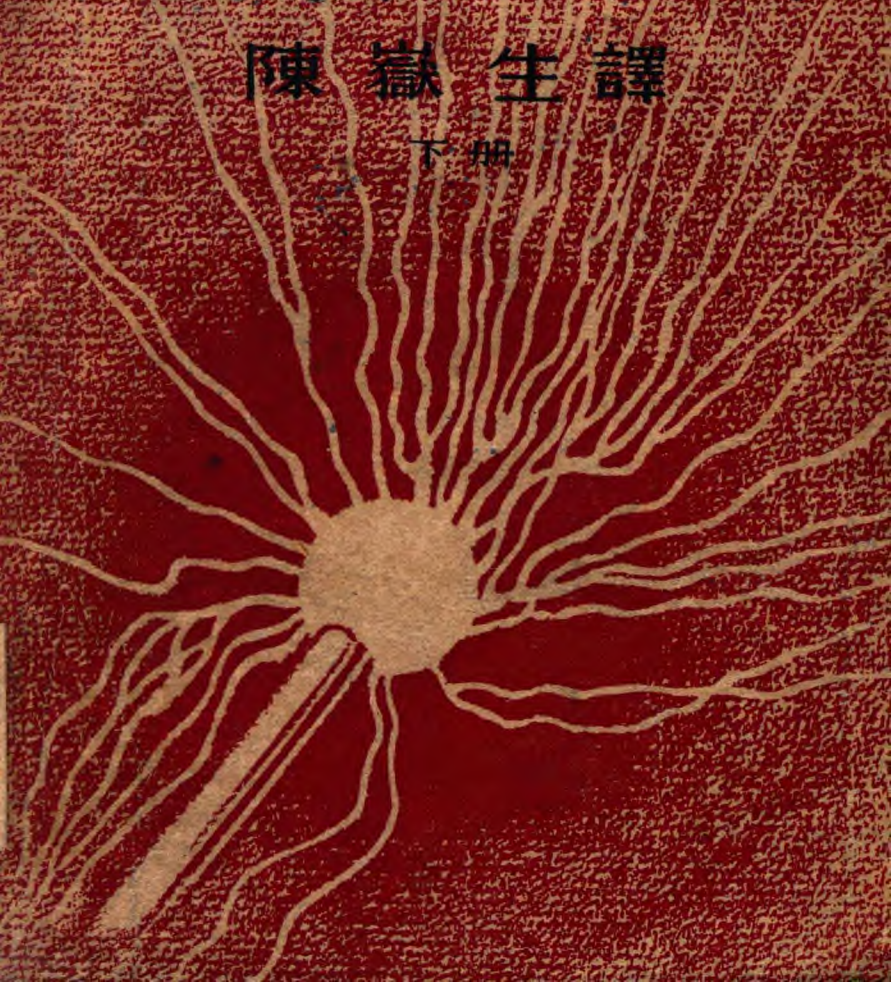


勃拉克·台維斯合著

基本實用物理學

陳嶽生譯

下冊



高級中學教科適用

基本實用物理學

勃拉克·台維斯合著

陳嶽生譯

下 冊

開 明 書 店 印 行

基本實用物理學 (下冊)

三十八年六月初版

每册定價一·三〇

原著者 勃拉克·台維斯

翻譯者 陳 嶽 生

發行者 上海福州路
關明書店
代表人 范洗人

印刷者 關明書店

有著作權 ■ 不准翻印

下 冊 目 次

第十五章	磁學	283
第十六章	靜電	298
第十七章	電流與電路	318
第十八章	電流的效應	352
第十九章	發電機與電動機	388
第二十章	交流	411
第二十一章	聲波	440
第二十二章	樂音	460
第二十三章	燈與反射器	488
第二十四章	透鏡與光學儀器	510
第二十五章	光譜與色	548
第二十六章	真空管與鐳	572
第二十七章	射電通訊	586

第十五章

磁 學

248. 【電器時代】 今日稱為電器時代，這是大家都聽到過的；日常生活，因為有了電器而大有改革，這也是大家在書報雜誌上看到過的；而新發見的電器，可以使我們的起居更舒服一些的，也許已經在我們的預期之中。但是大家看慣了的照耀室內和街道的電燈，祇有六十年的歷史；而汽車，真空除塵器，以及電冰箱中所裝又便宜又便利的電動機，也並沒有更長久的歷史；這兩點，就使人難以相信了。至於電在工商業上的其他應用，雖然不是一般人所熟悉的，卻也因為價廉與便利的緣故，已經多不勝計。例如叉與匙的鍍銀，浴室器具的鍍鉻，以及汽車車身的焊合，都靠着電的作用。各種電器之中，最可使人驚異的，恐怕要推有線電報電話，以及播音機和收音機。這些普通的裝置，倘能明白它們的原理，似乎可以增加一些人生的興致。不過這些電器，以及其他許多電器，它們的構造都很複雜，所以我們應該從下面所講比較簡易的實驗入手，俾可藉此熟悉各種電器所根據的基本原理。

249. ●【專門名詞與記號】 在以下的六章裏面，我們將要見到，電和磁的偉大的應用，怎樣從少數簡單的觀測，逐漸產生出來，這些觀測在從前初次實行的時候，似乎是都沒有什麼用處的。電學與磁學，差不多完全互相牽連，所以我們可以從磁學講起，也可以從電學講起。不過我們要請讀者留心，因為敘述電磁現象，

不得不用許多新的專門名詞，所以物理學的這一部分，外觀往往比實際的內容，似乎要艱深一些。

此外，還得知道一些記號的用法。這似乎又是一種多出來的工作，但是在習慣上，我們常用記號來代表各種不同的儀器，以及它們的聯繫，這樣，畢竟是可以節省一些時間的。

250. 【磁】 現在先講磁學，因為在本章以及此後各章裏面，我們將見羅盤，電話，電報，無線電收音機，發電機，電動機，以及測定電流的多數儀器，它們的作用怎樣都靠着磁的特性。磁的真相，至今還沒有大白，但是磁性的發生及其效應，我們已經知道了不少，而且正在繼續探索中。本節不講什麼別的話，祇要讀者想起一件事實，就是我們可以使鋼和鐵吸鐵，而且指一定的方向。所謂磁(magnetism)，就是這一種性質。磁性的應用，在商業上非常重要。

251. 【天然磁體】 數百年來，人人都知道有一種礦石叫做磁石(lodestone)的，有奇特的性質，能夠吸引‘鐵屑’，以及小塊同種岩石。小亞西亞的Magnesia附近地方，出產這種岩石很多，所以古希臘人叫它做‘magnetite’，譯成中文，便是‘磁’鐵礦。

取磁石($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)一塊，可見它能夠吸引鐵釘(圖 15-1)，但是不能夠吸引銅片或鋅片。又取鋼製縫針一枚，用磁石順一個方向把針摩擦幾下，即可使針磁化(magnetize)。

此種鐵礦，美國有很多地方出產；歐洲的挪威和瑞典，也出產磁鐵礦。若用這樣的所謂天然磁體(natural magnet)，摩擦一條鋼棒，則鋼棒亦呈磁性，而成爲所謂人造磁體(artificial magnet)。

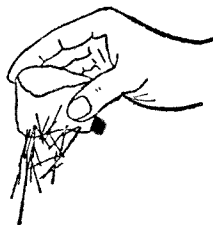


圖 15-1.

252. 【暫時磁體】 現在要講一講，一塊磁石吸引小鐵釘怎樣可以用電流來造成暫時磁體(temporary magnet)。

將紗包銅線(28號)約100呎,繞在一條軟鐵棒上,並將銅線的兩端,連接乾電池的兩極(圖15-2)。電流在鐵棒周圍的銅線上通過時,鐵棒便成功磁體,因為它在這時候能夠吸引鐵片。電流中斷,棒的磁性立刻失去。

從這個實驗,可知軟鐵棒祇在電流通過其周圍的時候,方纔獲得磁性;這就是商用製造磁鐵法,到第十八章中,還要予以詳細的論述。

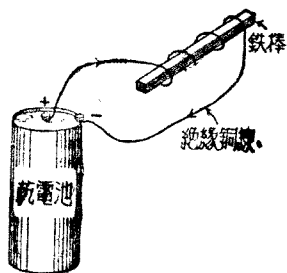


圖15-2. 電流在鐵棒周圍通過時,鐵棒變成磁體

253. 【磁極】 磁石發見多年以後,歐洲人方纔知道它的磁性集中於地位差不多一定的兩點或兩點以上。設有很長的磁石一塊,上面祇有這樣的點兩個,而且靠近兩端,那麼用線懸掛這磁石,即可見其一端指北,他端指南。磁石的這種特性,可以利用它來指示方向,不過我們現在所用的並非磁石,而是經過磁化的鋼針。這種利用磁針指向的裝置,叫做羅盤(compass)(圖15-3)。我們大概都知道,羅盤對於航海,航空,探險,以及測量,是一件怎樣寶貴的儀器。我國人發明羅盤,恐怕很早,隔了許多年以後,歐洲人方纔重行發明它。

設將條形磁體的兩端,輪流插入一堆鐵屑或一堆小鐵釘中,然後取出,即可見鐵屑或鐵釘被這條形磁體的兩端牢牢吸住,不得落下(圖15-4)。這磁體吸住鐵屑的

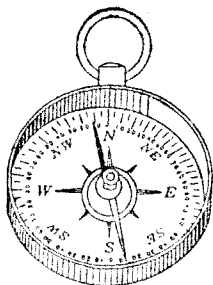


圖15-3. 袖珍羅盤

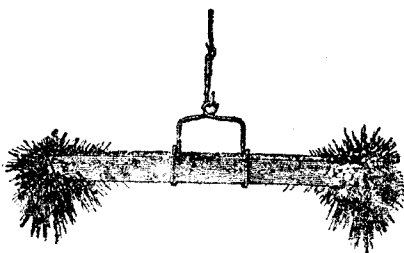


圖15-4. 鐵屑附着於磁體,在兩極集中

部分，就叫做磁體的兩極(pole)。

這兩極之中，一極常指北，所以叫做指北極 (north-seeking pole)，或簡稱 N 極；還有一極常指南，所以叫做指南極 (south-seeking pole)，或簡稱 S 極。

254. 【磁斥力】 人們已經知道了磁體能夠吸引別的物體之後，再經過幾百年，方纔知道磁體有時候亦能排斥別的物體。

設將一磁體的指南極(即 S 極)，移近擺在支樞上(或懸掛)的另一磁體的 S 極，則此兩極互相排斥。又若使這兩磁體的 N 極接近，也是這樣(圖 15-5)。但若將一個 N 極移近可動磁體的 S 極，或將一個 S 極移近可動磁體的 N 極，則此兩極即互相吸引。

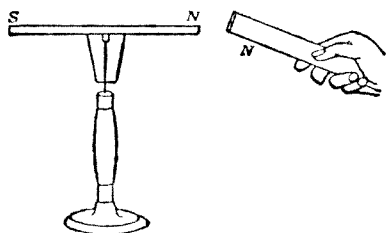


圖 15-5. 同性磁極互相排斥

所以我們知道——

同性磁極相斥。

異性磁極相引。

據實驗結果，磁極間的這種引力或斥力，依兩極距離的平方而反變。這就是說，兩磁極間引力或斥力的減少，比距離的增加快得多。例如本來離開 1 厘米的兩個異性磁極，若距離增加到 2 厘米，引力即減剩 $\frac{1}{4}$ ；若距離增加到 3 厘米，引力即減剩 $\frac{1}{9}$ 。

255. 【磁偏角與磁傾角】 羅盤發明後沒有多少時候，就有人察見磁針所指的方向，並不是地球的正南與正北。羅盤的磁北向(即磁針所指的北向)，與地理上真正北極相差的角，叫做磁偏角 (declination)。從前以為磁偏角到處相同，此說傳流很久。但是科侖布在 1492 年到美洲去的時候，中途發見亞速爾羣島附近有一處地方，磁偏角是零。可見精密測定各地的磁偏

角，對於航海及測量人員，顯然是一種很重要的事情。所以世界各國政府，都刊印詳細準確的地圖，圖上載明等偏線(isogonics)，即磁偏角相等各地點連成的線。圖 15-6 便是這種地圖的一

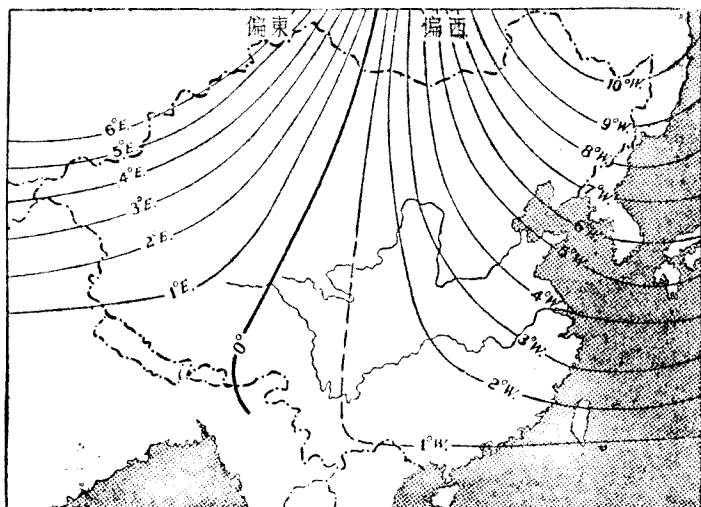


圖 15-6. 中國等偏線圖

例。任何一個特殊地點的磁偏角，並不是固定不變的，所以此等地圖，必須隨時予以改訂。

在科命布時代以後約一百年，關於磁針的指向又有一個重要的發見。設取鋼針一枚，使它完全平衡，能夠在磁子午面（即通過磁針的子午面）內上下自由旋轉，然後使它磁化，則在北半球上，它的指北極將向下傾斜，與水平面成一隻很大的角（圖 15-7），這角叫做磁傾角(dip)。愈向北行，磁

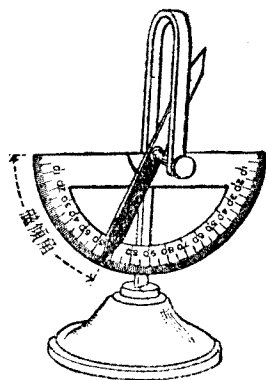


圖 15-7.

成平衡的磁針指示磁傾角

傾角愈大；愈向南行，磁傾角愈小。沿赤道附近的一圈上，磁傾角等於零。在南半球上，磁針的指北極向上斜指。夏克爾敦南極探險隊(Shackleton's South Polar Expedition)，曾在南極洲某地，發見磁針在該地成功鉛直，它的指北極直向上指。換句話說，磁傾角等於 90° 。

256. 【地球是一個磁體】 這些奇異的磁現象，第一個要想說明它們的理有的，乃是英國女皇伊梨莎白的御醫吉柏(William Gilbert)。他將一塊磁石琢磨成球狀，而將很微小的磁針移近此球，即見小磁針與球的作用，和平常羅盤在地球表面上的情形一般無二。所以吉柏即稱其球狀磁石為‘小地球’

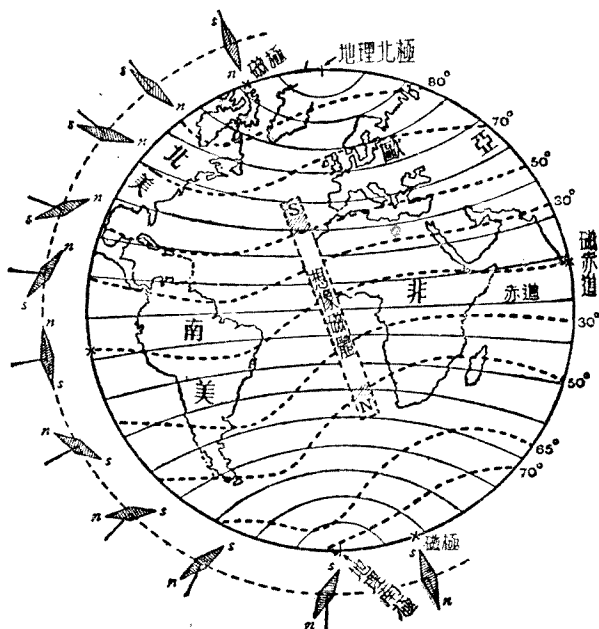


圖 15-8. 地球好比一個巨大的球形磁體。

並斷定此球確可代表地球本體(就磁性而論)。

地球對於磁性物體的作用,猶如一個巨大磁體(圖15-8),若與實驗室內所常見的磁體比較,則除長遠不及粗以外,其他完全相同。地球也有指北極與指南極各一個,但是依照引斥定律(第254節),它的指南極非在北半球上不可,而它的指北極則應該在南半球上。這兩個磁極,並不恰巧在地理上的南北極。其中的一極,即‘北磁極’,在北美洲赫貞灣(Hudson Bay)附近,但是常常向西緩緩遷移。還有一極,即‘南磁極’,在南極洲南維多利亞地(South Victoria Land)附近,差不多同北磁極相對。

地球的磁化,必定是不整齊的,因為等偏線和等傾線,都不是正圓(第255節)。從火山的噴火,可知地球的內部很熱,而現在所知道的一切磁性物體,在高溫下沒有不失去磁性的。由此可見呈現於地球外表的地磁,似乎須要另外尋它的原因。此外,我們又知道地球磁極的位置,是在逐年漸漸遷移的。這些現象為什麼發生;既有此等現象,地球為什麼仍得磁化;這些問題的答案,現在還沒有知道。

問 答 題

1. 磁體能不能 (a) 祇有一個極? (b) 有兩個指北極? (c) 有兩個以上的極?
2. 銀幣, 鎊幣, 銅幣, 或錫罐, 能不能被磁體吸引? (是/否)
3. 若將金屬棒 AB 移近磁

針, 如圖 15-9 所示, 則當 (1) A 端既不吸引亦不排斥 N 極時; (2) A 端吸引 N 極時; (3) B 端亦吸引 N 極時; (4) A 端排斥 N 極時; 可得什麼確定的結論?

4. 在實驗室的地板上, 用羅盤針畫一條地磁南北線, 然後決定 (a) 此線應該依順鐘向或反鐘向旋轉, 纔可以合於地理南北線? (b) 應該旋轉幾度?

5. 在某實驗室中, 用很好的羅盤, 非常小心地測定磁北向, 但結果則測錯的度數頗多。也許因為什麼緣故呢?

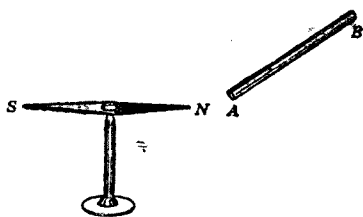


圖 15-9. 磁針與金屬棒相引或相斥

6. 地球上有沒有磁針指東的地點？
7. 磁針在多數地點不指正北，航海者怎樣能利用羅盤？
8. 北磁極離開地理北極有多遠？
9. 圖 15-6 中，等偏線有彎曲得很的，什麼緣故？
10. 製造一隻磁傾針(即下傾的磁針)，你將採取哪一種方法：(a) 先使鋼針磁化，然後使它平衡；(b) 先使鋼針平衡，然後使它磁化？

257. 【磁體周圍的磁場】 法拉第 (Michael Faraday) 以爲除磁體本身外，在磁體周圍的空間亦須予以研究，方纔可以對於磁體的作用，有真正的了解。研究磁學而有這樣的見解的，法拉第是第一人。

研究磁體及其周圍的空間，有一個方法是取硬紙一張(或賽璐珞一片)，蓋在條形磁體上，再將鐵屑勻撒在紙上(圖 15-10)。若輕敲硬紙，使鐵屑稍受震動，則鐵

屑便自行排成很整齊的線，從一極通連到他極。這是因爲每一粒鐵屑，都受原有磁體的影響而稍稍磁化，所以各按應指的方向而排列，倘然拿一枚微小的磁針放在同一地位，這小磁針必定也指這個方向。試用小羅盤代替鐵屑，描繪各線，即可證明這句話。不過各線的描繪，當然不及鐵屑排列出來那樣的迅速。

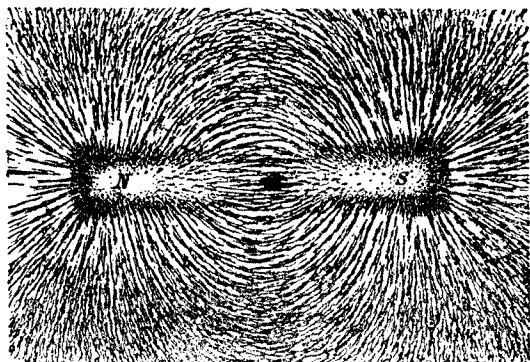


圖 15-10. 用鐵屑描出條形磁體周圍的磁力線

法拉第就用上述的方法，畫出磁體周圍的各線，這些線在物理學上叫做磁力線(magnetic lines of force)，而其所分布的空間則稱爲磁場(magnetic field)。磁力線的定義，可以照下面的說法：磁力線是一條想像中的線，線上任何一點的切線，其所指的方向，即是一個想像中的指北極被鄰近各磁極的引力和斥力驅動時所取的方向。因爲磁力線的想像是這樣的，所以我們往

往在線上標明小箭頭，表示從指北極出發而到達指南極的路程方向。磁力線這個概念，可使我們有一個很便當的方法，來記住一磁體對於它鄰近的其他磁體，有怎麼樣的影響。

258. 【磁力線宛如彈性纖維】 法拉第以為這些磁力線還有真實得多的意義。據他的想像，凡是磁體周圍的空間內，當真有這些力線常常存在，並非有了鐵屑時方始借鐵屑而呈現。

法拉第所想像的磁力線，其作用宛如張緊在空間的彈性纖維，它們時時要收縮，因此把兩頭的兩個磁極拉緊。它們又好像要乘收縮的時候向四側擴張，因此互相排擠而分開。磁力線為什麼有這些性質，那是不容易知道的，不過一旦假定它們有這些性質之後，就容易據以推考，在多數實際情形之下，將有什麼現象發生。

試取二磁體，使它們的異性二極相對，再用鐵屑探求它們的磁力線，則其結果必如圖 15-11 所示。若假定磁力線有收縮的傾向，就容易知道異性二極非互相吸引不可。但是同性二極間磁場中力線分布的情況，必如圖 15-12 所示。若假定力線互相從側面排擠而有分開的傾向，則同性二極顯然非互相排斥不可。

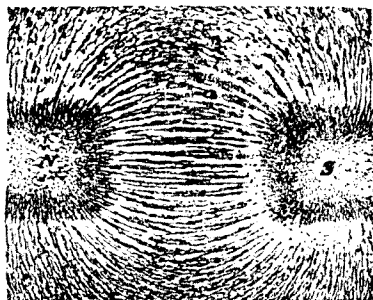


圖 15-11. 在異性兩極間的磁力線

這些假定，雖不能夠說明相斥相引的現象為什麼發生，但是可以使我們便於記住，什麼現象會發生，而且對於以後的研究，也頗有輔助的益處。還有一點要注意的是，磁力線並不相交，而且是貫

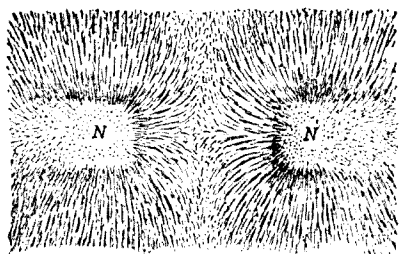


圖 15-12. 在同性兩極間的磁力線

通磁體本身的封閉曲線。

259. 【應磁】 取未經磁化的軟鐵棒，將其一端插入一堆鐵屑中，再拿出來，可見軟鐵棒並不吸引鐵屑。但若將永久磁體移近軟鐵棒，則軟鐵棒即變成暫時磁體，也夠吸引鐵屑（圖15-13）。將永久磁體拿開，軟鐵棒便失去它的磁性，而讓所已吸牢的鐵屑落下。

一塊鐵因為接近一個磁體而受磁化，叫做由感應而磁化 (magnetized by induction)，它所得的磁性就叫做應磁 (induced magnetism)，而原來的磁體就叫做感磁體 (inducing magnet)。

接近鐵塊的倘若是指北極，那麼用羅盤可以示知，應磁體 (induced magnet, 即獲得應磁的磁體)

的 N 極，在離開感磁體較遠的一端，而其 S 極則在較近的一端。

從實驗可以知道，極軟的軟鐵由感應而受磁化極快，感磁體移去時，失掉磁性也很快。硬鋼以及幾種鈷鋼齊和鎢鋼齊，很難受磁化但頗能保留磁性。所以電話及久磁電機 (magneto) 中所用的磁體，都拿特種硬鋼來製成。有一種新發明的鎳鋁鈷齊，叫做 Alnico 的，其磁性之強，超過以前所知的任何磁體。例如用此種合金製成的蹄形小磁體，本身雖然祇重 22 克，卻能夠吸住 1300 克重的物體，超過本身重量五十倍以上（圖 15-14）。

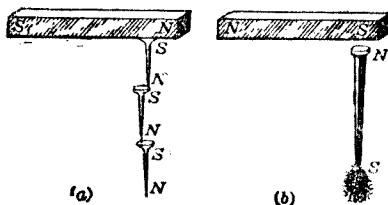


圖 15-13. (a) 各釘相接觸，由感應而受磁化。(b) 釘雖與磁體相離也可以受磁化

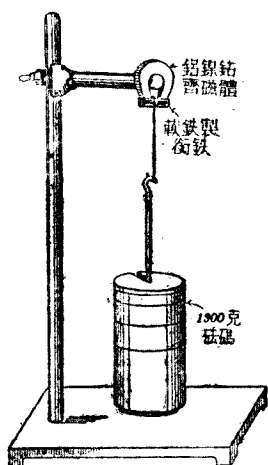


圖 15-14. 小磁體吸住五十倍於本身的重

260. 【導磁係數和磁阻】 假使將軟鐵一塊放在磁場中，即可見軟鐵鄰近所有的磁力線，都要擠到軟鐵裏頭去（圖 15-15）。

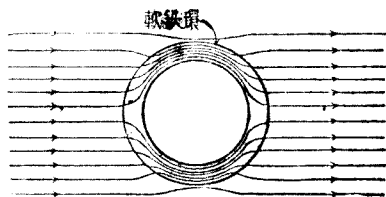


圖 15-15.

軟鐵環極可導磁

任何一種物質，其中磁力線的可得張布，是有難有易的。此種難易的程度，與在真空內的比較，愷爾文（Kelvin）稱之為導磁係數（permeability）。鐵的導磁係數，比空氣大至數百倍。

導磁係數愈大，受磁化愈容易。所以未經保護的錶，移近強力磁體時，錶的擺輪往往易受磁化，以致轉動遇到阻礙，指時就此不準。珍貴的錶，錶壳常用軟鐵製成，一旦到了磁場之中，磁力線集中在壳內，機件就不致受到影響了。磁力線的絕緣體，現尚未有，但常可用鐵來做隔磁的屏障。

與導磁係數恰相反的是磁阻（reluctance），它的定義可以說是：物質對磁力線所呈的阻礙叫做磁阻。鋼和鐵的磁阻是很低的。有幾種合金，例如硅鋼，因為磁阻很低，所以在電機中用得很多。據近年來的發見，有一種著名的鎳鐵合金，叫做巨姆齊（permalloy）的，它的導磁係數約三十倍於軟鐵。若將此種合金製成的棒，放在地磁場內，與地磁力線平行，即可使它磁化，成功很強的磁體。巨姆齊導磁係數之大，由此可見。在電話機中，磁力線的增減很微，須有很大的導磁係數，方纔顯得出，所以這種合金在電話機的製造上，尤為重要。

261. 【永久磁體的用途】 磁體除用於航海家測量家的羅盤中以外，又是種種電計，例如電流計，安培計，伏特計，以及瓦特小時計等的主要部分。電話聽筒中就裝有一個 U 字形的永

久磁體(圖 15-16)。電話鈴每次發聲的時候,有一個永久磁體

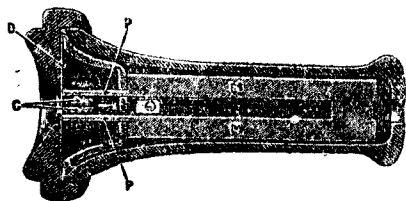


圖 15-16. 電話聽筒內裝有 U 字形的永久磁體 *M*

正在控制鈴珠的運動。多數鄉間支線上,向總局通話的電流,也是靠着幾個永久磁體而產生的。每一具現代速率計中,都有一個旋轉的永久磁體。每輛自動兩輪車和每架飛機上,都有永久磁體裝在久磁電機內。

這些商用的永久磁體,大概都變成馬蹄鐵的形狀。這是因為兩極相距既近,磁場強度即可大增的緣故。要得到強度不變的磁體,須用硬鋼或鈷鋼齊或鎢鋼齊,製成合宜的形狀,加以煅煉,增加它的硬度,再使它磁化。然後放在沸水或沸油裏面,加熱數小時,使它變得陳一些。

262. 【磁性的一種學說】 由下面所講的實驗,可得磁性的一種簡單學說:

取縫衣針一枚,或發條一段,先將它燒紅,然後投入水中,使它的硬度增加。於是使它磁化,並且把 *N* 極標明。設在它的中央不顯磁性的地點,將它折斷,而將斷處移近一枚磁針,則見折斷的兩端,一個是 *N* 極,一個是 *S* 極。又若折了再折,則每折斷一次,就有兩個新磁極產生,如圖 15-17 所示。

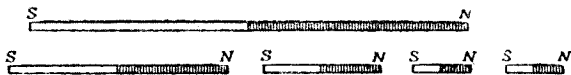


圖 15-17. 被折斷的磁體在斷處顯出磁極

一個磁體常可折斷而成許多小磁體。玻璃管內裝滿鐵屑,也可以使它磁化;但是一經搖動,磁性便失去。任何磁體,若經燒紅,震動,敲擊,或扭絞,便要失掉一部分或全部磁性。

這些事實,都可以使人想到一種磁性的學說 (theory of magnetism)。這學說由法國人安培 (Ampère) 首先提出,並且

由德國人韋柏(Weber)與英國人愛文(Ewing)予以用心的推敲。根據這個學說,凡是鐵棒,都經假定由微小的粒子(原子)構成,此等粒子,都是永久磁體——爲什麼這樣,沒有人知道。不過根據現代的原子學說,原子內部有微小的循環電流(電子的迴旋),使原子具有磁性的,便是這小小的電流。構成鐵棒的小小磁體,平時顛倒凌亂,全棒如此(圖 15-18 a),以致沒有累積的效應,可見於棒外。但在鐵棒受了磁化之後,這些小磁體就排列得整整齐齊,差不多成功平行的隊伍(圖 15-18 b),好像兵士操演一般,而且都面對着同一方向。靠近鐵棒中部之處,前後啣接各極,作用互相抵消。但在鐵棒的兩端,未經抵消作用的極,顯露在外的很多。在一端的都是指北極,在他端的都是指南極。這些自由磁極,它們的磁性積聚起來,就構成了磁體上的兩極。

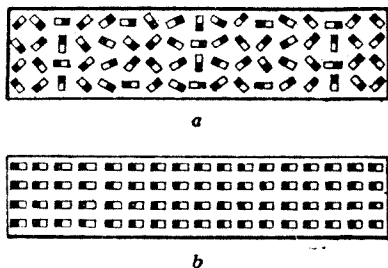


圖 15-18.

(a) 未受磁化的棒內原子排列情況
想像圖 (b) 已受磁化的棒內原子排列情況想像圖

根據這樣的學說,很容易知道一個磁體折斷而成兩個磁體時,若微小磁體的排列未受擾亂,則應有什麼結果。折斷處所呈現的新磁極,也是由各小磁極集合而成的,這些小磁極老早就在原來的地方,不過現在初次獨立在顯著可認的地位罷了。

更有一事,也是很明白的。若上述學說不錯,則一塊鐵的磁化,必定有一個確定的限度。因爲所有小磁體都照着一定的次序排齊後,無論磁化的力量如何強大,也不能有什麼作爲的了。這樣的磁體,可稱之爲飽和 (saturated) 磁體。

第十五章提要

磁體可以吸引鐵，鎳，及鈷。

磁體的兩極，是引力最強的地點。

引力和斥力：

同性磁極相斥。

異性磁極相引。

地球的作用猶如一個巨大磁體，它的 S 極在地理上北極的附近。

磁偏角是羅盤針 N 極所指方向與地理上正北向相差的角度。

磁傾角是地球磁力線方向與水平面所成的角度。

磁力線是一個獨立的 N 極(假想的)在磁場內所欲行過的路線。

磁力線有縱向收縮橫向膨脹的傾向；換句話說，沿力線的方向有拉力，沿垂直方向有推力。

磁場是有磁力線分布的空間。

導磁係數是任何物質與真空比較，其中磁力線可得張布的難易程度。

磁阻是物質對於磁力線所呈的阻礙。

問 答 題

1. 用一句話答覆下列各問語；磁力線入 N 極，還是出 N 極？入 S 極還是出 S 極？相引還是相斥？有時相交還是永不相交？

2. 一條軟鐵長棒，直立在北半球上。它的下端為什麼推斥羅盤針的 N 極？

3. 前題中直立的鐵棒，受到敲擊後，它的磁性增加還是減少？什麼緣故？

4. 鋼製縫針數枚，用線穿成一串，掛在一個強磁體的上方，它們的作用怎樣？什麼緣故？

5. 將鐵放在金屬製的壳內，即可保護它，使它不受磁場的影響。問黃銅，銅，巨姆齊，或軟鐵，哪一種最宜於製造鐵壳？

6. (a) 羅盤在汽車上是否可靠？(b) 根據前題的提示，怎樣可予以保護？

7. 你能不能設計一種裝置，可使羅盤面在舟行顛簸時仍保水平？

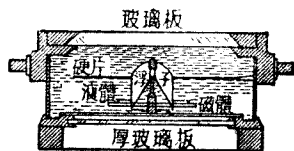


圖 15-19. 液體羅盤的剖面

8. 美國海軍所用的標準羅盤，其中有一種叫做‘液體式’，如圖 15-19 所示便是。試說出它的優點來。

9. (a) 戰鬥艦和大郵船上，為什麼用迴轉羅盤(gyrocompass)? (b) 它的作用根據什麼原理?

10. 多數鐵質船身，為什麼受到永久磁化? 它的磁化方向由什麼來決定? 航行海上時，為什麼漸漸失去一部分的磁性?

11. 鐵甲船上的羅盤，常受‘應磁的影響’。應當如何予以補救?

12. 旋鑿受磁化，頗有妨礙。怎樣可以使它的磁性消失?

13. 美國卡奈基研究所(Carnegie Institute)曾造過一隻特種的船(已毀)，全船差不多沒有鋼鐵。(a) 你以為當初造這隻船，目的在於測量全世界的什麼?(b) 這種沒有鐵的船對於這種特殊用途，有什麼好處?

14. 拿兩條用叻姆齊做成的棒，與一枚磁傾針平行。輕敲二棒，它們即互相排斥。什麼緣故?

15. 前題所說的二棒，若使它們垂直於磁傾針，則輕輕將它們敲擊後，將有什麼結果?

第十六章

靜電

263. 【由接觸或摩擦而帶電】 遠在公元前六百年的時候，希臘哲學家泰勒斯 (Thales) 已經察及，琥珀若經毛織物摩擦後，就要吸引稻草屑或其他輕的東西。後來又有人發見，不但琥珀有這個性質，就是別的物质，具有此種特性的也是很多很多。例如橡皮，玻璃，硫磺，都是。在寒冷乾燥的冬天，試將自來水筆桿或火漆棒，放在衣袖上摩擦幾下，就可以見到它能夠吸起一大串的紙屑。吉柏 (Gilbert) 稱此現象為電的現象 (electric phenomena)，electric 一字脫胎於 'electron'，而 electron 的原義就是琥珀。

不論什麼物體，若已獲得吸引紙屑的性質，在物理學上就說該物體已經帶電 (electrified)，或已經帶有電荷 (electric charge)。沒有電荷呈現的物體，在物理學上說它是中和的 (neutral) 物體。從多次精細的實驗，我們已經發見，任何兩種不同的物質，互相摩擦後，或密切接觸後，便都帶電。

264. 【電引力和磁引力】 上面所說的那種引力(叫做電引力)，有很多地方像磁引力。十六世紀以前，大家的確不能夠明察電和磁所引起的，乃是截然不同的兩種現象。就磁化的現象而論，祇在鐵鎳鈷三種金屬以及一二種特殊合金裏面，纔可以使它很容易的發生。但就帶電的現象而論，則將隨便什麼兩種物質摩擦，差不多都可以使它發生；摩擦非金屬，發生起來尤為容

易。磁性似乎是磁鐵礦的天性，因為它的吸引鐵屑，不必有賴於人工。但是帶電的現象，乃是物體經過某種人為的措施後所處的情況。受磁化的物體，至少常有二極，磁性大都集中於極上，而且兩個極的性質完全不同，因若一極吸引羅盤針的指北一端，則他極必定推斥此端。但是金屬物體由摩擦而帶電者，它所帶的電通常並不集中於一點或數點，因為它的各部分吸引輕物的本領，簡直沒有什麼高下。不過電也有兩種，正好比磁有兩極，下文我們就要講到。

265. 【導體與絕緣體】 物體有能將電從此處傳導到別處的，也有不能的。試取帶電體一個，例如用貓皮擦過的火漆棒，使它接觸一個金屬球，若此球用絲線懸掛，則球即可以帶電；若此球用銅線懸掛，則球即不能保持電荷。就第二種情形而論，到金屬球上去的電，並不少於第一種情形，但是全部都從銅線漏掉了。又若實驗者身體的任何部分，同一個帶電體接觸，那麼該帶電體上的電荷，也要失去。凡是將電荷導去很快的物質，例如金屬，叫做導體 (conductor)；凡是可以遏阻電荷漏失的物質，例如琥珀與乾燥的絲綢，叫做非導體 (nonconductor)，或絕緣體 (insulator)。電燈，電話，以及電報，其電線都架在玻璃支柱或瓷質支柱上，以防止漏電。這些支柱叫做‘絕緣器’。

導體與絕緣體之間，實在沒有明確的界線。多數物質，多少都能夠導電。即優良的導體，它們的導電性也是相差很大的。

下表所載，乃是少數普通物質，以導電本領的強弱為次序而排列者。

良 導 體	劣 導 體	絕 緣 體
金屬	乾燥木材	硬橡皮
碳絲	紙	乾燥空氣
石墨	酒精	石蠟
鹽類及酸類的水溶液	煤油	硫黃
	純水	膠木

有須予以注意者，容易由摩擦而帶電的物質，都是絕緣體。其所以如此的一個理由，是因為絕緣體的任何一點上，若由摩擦而帶電，則電即留駐該點，可以讓我們知道它的呈現。但在導體上，則電隨生隨即漏去。

凡是電的良導體，也必定是熱的良導體。這種事實將使我們推想到，傳電的過程與傳熱的過程很相像。

266. 【正電與負電】 取硬橡皮棒一條，用貓皮或法蘭絨擦過，放在圓形棒夾內，然後用絲線將它懸掛起來，或用針尖將它支持在絕緣架上，使棒成水平而可在水平面內自由轉動(圖 16-1)。再取另外一條硬橡皮棒，也是擦過的，使它接近第一棒的一端，即見該棒被斥而旋轉。又若這兩條棒是玻璃做的，擦棒的是絲織物，那麼它們也互相排斥。但若一條是用貓皮擦過的硬橡皮棒，一條是用絲織物擦過的玻璃棒，那麼它們接近時就互相吸引。

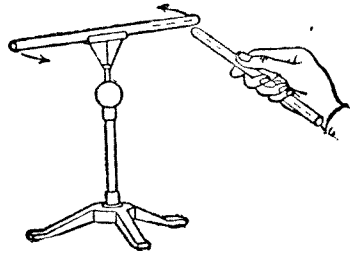


圖 16-1.

帶同性電荷的兩條棒互相排斥

從這幾個實驗，可知帶電的情況有兩種。科學家一致公認，用絲織物擦過的玻璃棒，其上所帶的電叫做正 (positive) 電或陽電；用法蘭絨或毛皮擦過的火漆棒或硬橡皮棒，其上所帶的電叫做負 (negative) 電或陰電。正電常用‘+’號來代表，負電常用‘-’號來代表。物體帶着同性之電，互相排斥；帶着異性之電，互相吸引。換言之，

同性電荷相斥，異性電荷相引。

據實驗又知道，一個帶電體，不論它所帶的是正電荷還是負電荷，常常吸引不帶電的物體。

267. 【怎樣驗電】 檢驗物體的帶電情況，我們常用驗電器 (electroscope)。將通草小球，或吹膨的玩具氣球，或乒乓球(外面敷一層鉛粉更好)，用絲線掛在玻璃架上，就成功一具簡單的驗電器。

設將不帶電的物體移近此球，則絲毫沒有什麼影響。但若將帶陽電的物體移近此球，則球先被吸引，然後也帶陽電而被斥。現在再將帶陰電的物體移近這個球，則球因已帶陽電而被吸引。但若這個帶陰電的物體與這個帶陽電的小球一接觸，則小球上的陽電與物體上的陰電一部分中和後，又帶着陰電而跳回去(圖 16-2)。若再將帶陰電的物體移近此球，則此球即因已帶陰電而被斥。但若將手或其他未帶電的任何物體移近此球，則球又被吸引。

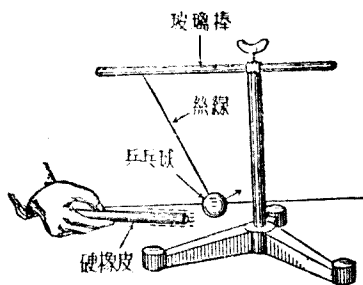


圖 16-2. 乒乓球驗電器，球先被吸引，後因接觸而帶電，又被斥。

若已知球上電荷的性(陽性或陰性)，則將球吸引的物體，它所帶的電必定和球上電荷同性。但若將球吸引，則物體或帶異性電荷，或未帶電。

268. 【金箔驗電器】有一種比較靈敏的驗電器，叫做金箔驗電器 (gold-leaf electroscope)。現在所通用的這種儀器，大都在堅硬的黃銅片旁邊，掛一條鋁箔以代金箔。黃銅片與鋁箔，通常都封在金屬箱內，以免被風吹動。箱的前後都有玻璃，以便觀察。又有直立的金屬(通常是黃銅)棒一條，從箱外穿過一個硫磺塞子(絕緣體)的中央而入箱，鋁箔和黃銅片就在這棒的下端(圖 16-3)。若用很強的電燈光，將鋁箔的影子投在屏上，則鋁箔的移動，觀察起來更為容易。

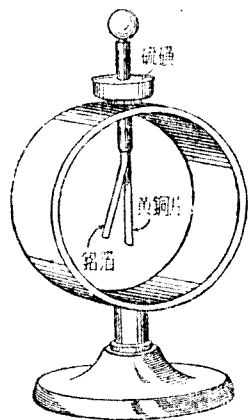


圖 16-3. 鋁箔驗電器

若將帶電的玻璃棒移近黃銅棒的頂端，則鋁箔即從黃銅片揚起。將玻璃棒拿開，鋁箔又垂下。但若使帶電很足的玻璃棒與黃銅棒的頂端接觸，則鋁箔揚起後不再下垂。這時候的驗電器，我們說它已由接觸而帶陽電。

若將帶陽電的物體移近帶陽電的驗電器，則鋁箔更向上揚起。但若移近驗電器的物體帶有陰電，則鋁箔揚起的角即減小。拿開器外的帶電體，無論它

所帶的是陽電或陰電，器內的鋁箔帶恢復它的原來地位。由此可見，驗電器上帶着電性已知的電，即可以用它來辨別帶電體所帶的是正電還是負電。

應用此種驗電器，可以增長關於帶電體的知識。例如絕緣導體經摩擦後，用驗電器檢驗一下，就知道它也帶了電。經過多次同樣的實驗後，我們得到了一個結論，即隨便什麼物體都能夠由摩擦而帶電。人立在絕緣的椅子上，用手擦玻璃棒，他的身體上就帶陰電；若手拿貓皮擦火漆棒，則他的身體上就帶陽電。一般地說來，不同的兩種物質互相摩擦後，一帶陽電而一帶陰電。

問 答 題

1. 乾燥的絲，潮濕的絲，棉花，玻璃，水銀，各應該列入第 265 節附表中的哪一欄？
2. 比較磁極與帶電體的性能。
3. 自由擺動的帶電體，指一定方向麼？
4. 帶陽電的鋼棒，用金屬線使它通地，它就失去電荷。若此棒經過磁化後，用同法使它通地，它的磁性會失去麼？將這兩種情形比較一下。
5. (a) 一物體吸引帶陽電的通草球，此物體是否帶正電，或帶一電，或未帶電？(b) 若此物體排斥帶陽電的通草球，那麼你可以知道的是什麼？
6. (a) 根據前題的答案，你說由吸引以驗電是可靠的還是不可靠的？(b) 由排斥以驗電，怎樣？
7. 薄紙屑接近帶電的玻璃棒，就飛起來附着在棒上，一會兒又跳落。說明其理。
8. 在寒冷乾燥的冬天，用梳子理髮，髮有根根豎立的趨勢。什麼緣故？
9. 法拉第曾經做過一隻大箱子，箱壁糊上鋁箔，然後把他的最靈敏的驗電器，放在箱子裏。法氏發見，雖然箱子外面鋁箔上帶電很多，以致發生頗長的電花，在箱內也不能察得有什麼帶電效應。說明其理。

269. 【物質的原子說】 由近年來的研究，得知電與物質的結構，有很密切的聯繫，不知此，即不知彼。所以我們現在把電的研究暫時擱一擱，先把物質的結構極簡單地講一講。

現在大家都相信，所有種種物質，都由一種或數種叫做**元素**(element)的簡單物質構成。例如水，它的成分就是氧和氫兩種元素。元素的最小粒子能夠參加化學變化的，叫做原子(atom)，這是公認的**原子的定義**。但本書前文早已講到(第 116 節)，氣

體由無數叫做分子(molecule)的粒子構成。最普通的氣體,例如氧、氮及氫,其中每一分子都由兩個同種原子構成,它們的結合乃是化學的結合。至於化合物,則其分子由兩個或幾個不同元素的原子構成。例如水,它的分子就含有兩個氫原子和一個氧原子。

270. 【原子的電子說】 從可靠的實驗上種種證據,我們現在都相信,每一個原子含有完全不同的兩部分:一部分是一個帶陽電的很小很小的核(nucleus),還有一部分是帶陰電的很小很小的粒子,叫做電子(electron)。電子按照某種排列方法,圍繞着核的四周。核雖然極小,差不多含有原子的全部質量。在正常狀態之下,原子呈中性(即不帶電);換言之,電子上陰電荷的總和與核上的陽電荷等值。無論哪一種元素,它的原子構造都相同,因為它們都由電子和核構成。這一種元素的原子,與另外一種元素的原子,它們的不同之處,祇在原子內的電子數與核上的陽電荷。例如碳原子有6個電子,圍繞着一個核,核上的陽

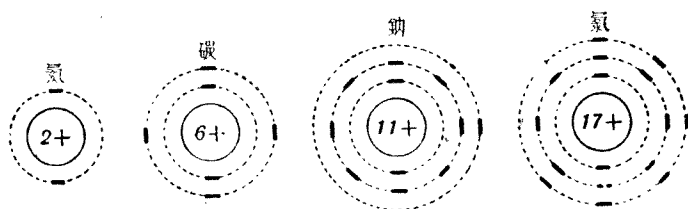


圖 16-4. 氫, 碳, 鈉 以及 氯 的 原 子

電荷與 6 個電子的陰電荷等值。鈉原子有 11 個電子,圍繞着一個核,核上的陽電荷與 11 個電子的陰電荷等值。碳之所以成爲碳,就因爲它的每一個原子有 6 個電子圍繞着核;鈉之所以成爲鈉,就因爲它的每一個原子有 11 個電子圍繞着核(圖 16-4)。此外如氯原子有 17 個電子圍繞着核,而氫原子祇有 1 個電子在

核外。氦原子是現在所知最輕的原子，而且非常微小，即使用最強大的顯微鏡，也休想看得見它，但是電子更比它渺小得多。電子的質量大約祇有氦原子的 $\frac{1}{1835}$ 。

美國人安德生 (C. D. Anderson) 近曾證明 (在 1932 年)，還有一種陽性的電子存在，這陽性的電子叫做正子 (positron)。目前對於這發見不久的新粒子，雖然知道的不多，但是下文仍要講到正子和所謂宇宙射線 (cosmic ray) 的關係。電子的名稱，並不因正子的發見而改稱負子，所以我們提到‘電子’，仍指帶負電的粒子而說。

一物體所含的電子個數，若比正常的個數多，該物體就帶陰電；若比正常的個數少，就帶陽電。在導體中，電子時時脫離若干原子，而再入其他原子。所以在導體裏面，不論在什麼時刻，常常有許多自由電子 (free electron)，以及個數相當的失去了電子而帶陽電的原子。任何物質，其中自由電子愈多，導電性愈強。所謂絕緣體，就是自由電子極少的物體。

271. 【感應起電】 在前文 (第 268 節) 中我們已經提到過，將帶電體移近未帶電的驗電器，可以使它感受影響。但若拿開帶電體，這種影響立即消失。將帶電體放在一物體的鄰近，而使該物體帶電，此種方法，叫做感應起電 (charging by induction)。原來帶電的物體上的電荷叫做感電荷 (inducing charge)；後來帶電的物體上的電荷叫做應電荷 (induced charge)。

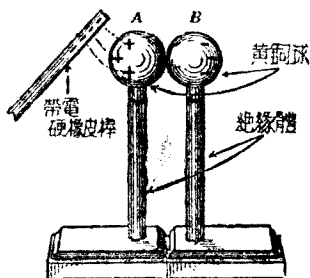


圖 16-5.

由感應使兩個金屬球帶電

現在用下面所說的實驗，來說明這個起電的方法。裝在絕緣座上的兩個金屬球 A 與 B，並肩放在一起，如圖 16-5 所示。取帶

陰電的硬橡皮棒，移近與 B 球接觸的 A 球。當棒尚在 A 球的近旁時，將兩球分開，然後把棒移去。我們若檢驗二球，即可見 A 球帶陽電而 B 球帶陰電。

又設有一個導體 C ，也裝在絕緣座上（圖 16-6）。將帶有陰電的棒 R 移近 C 的一端 b ，同時手指與其另一端 a 接觸。若先拿開手指，後拿開 R 棒，則將見這個導體已經帶有陽電。又若再做同樣的實驗，但是手指不與 a 點接觸，而與 a 以外其他任何一點如 b 接觸，亦見這導體仍帶陽電，結果和第一次完全相同。

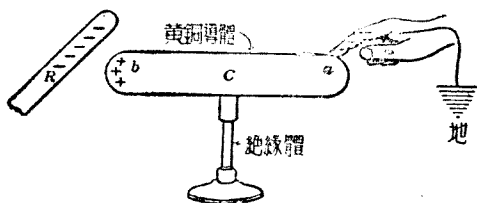


圖 16-6. 由感應使絕緣導體帶電

這種感應帶電的過程，可以想像如下：帶有陰電的棒接近絕緣導體時，導體內的電子被斥，所以導體較遠的一部分，即有過多的電子，而較近的一部分則因此帶有陽電。當導體正受電荷的影響時，若將它剖成兩半，便得兩個永久帶電體；若不將它剖開，而使手指與導體接觸，則被斥的電子即由人體逸入地中，但陽性原子仍留在導體上，所以手指與棒先後拿開，導體也永久帶有陽電。一般地說來，由感應使絕緣導體帶電時，應電荷常與感電荷異性。

272. 【由感應使驗電器帶電】 上文所述金箔驗電器的帶電過程，現在可以說明如下：帶陰電的物體接近驗電器的黃銅球時（圖 16-7），因為電子被斥而聚集在鋁箔，黃銅片，以及黃銅

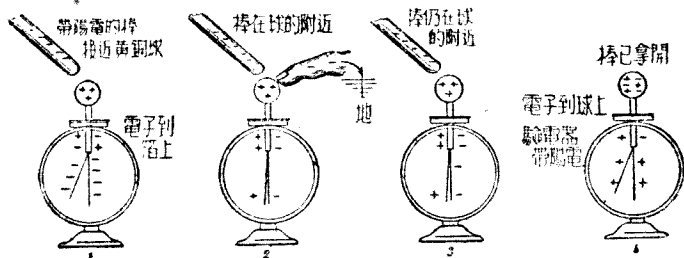


圖 16-7. 由感應使驗電器帶陽電

棒的下端，所以鋁箔和黃銅片都帶陰電，互相推斥，鋁箔因此揚起；同時黃銅球上帶有陽電(1)。若手指與黃銅球接觸，則被斥的電子即溜入地中(2)。再將手指拿開(3)，然後拿開帶電體(4)，驗電器就此帶有陽電。

將帶有陽電的物體，移近帶陽電的驗電器時，它便吸引箔與黃銅片上若干電子，使它們離開箔與黃銅片。於是鋁箔與黃銅片所帶的陽電更多，所以箔更向上揚起。若將帶陰電的物體移近驗電器，則黃銅球上的有些電子被斥，離球而到箔與黃銅片上，所以它們所帶的陽電減少，箔即向下略閉。

273. 【容電器】 在電機和電器裏面，往往須使一個導體可以多容納一些電。換句話說，導體對於電的容量即所謂電容(capacity)，我們非使它增加不可。增加導體的大小當然也可以達到這個目的。但若利用所謂容電器(condenser)的裝置，則比較方便得多。

試將驗電器的黃銅球，換成金屬板A，如圖16-8所示。使A板帶電，即見驗電器的鋁箔揚起。增加A板上的電荷，鋁箔即更向上揚。金屬板上的電荷愈多，鋁箔揚起的角愈大，但是這角的大小，並不單純地視板上電荷的多少而定。因為若取與A板相仿的第二塊金屬板B，用導線與地接通，再移近A板，則驗電器鋁箔揚起的角立即減小，但此時A板上的電荷並未減少。將B拿開，鋁箔即恢復原來的地位，但A上的電荷並未增加。由此可見決定鋁箔揚起的角度的，還有第二個因子，這第二個因子便是A板的電容。一定量的電荷加在A板上，A的電容愈大，鋁箔揚起的角愈小；電容愈小，角愈大。所以第二塊金屬板B接近A板時，實在已業人爲的方法增加了A板的電容。

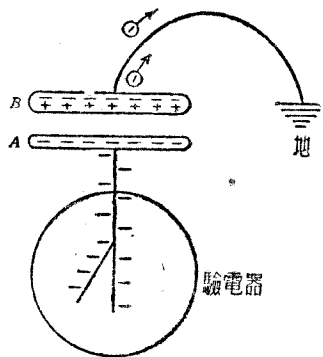


圖 16-8. 實驗示容電器之作用

再將B板移近A板，並使A板多多帶電，亦可使鋁箔恢復其原來的地位。這不但證明了A板的電容因B板的接近而大有增加，而且證明了A板的電容增加時，必須增加板上的電荷，方可保持鋁箔揚起的角度。可見這個角度所代表的，既不是單純的電量，又不是單純的電容。它所代

表的，在物理學上叫做‘電位’(potential)。電位的真正意義，這裏很不容易講解，祇能拿水來做比喻，大概說一說。假使把水看做電，那麼導體好比水管，導體的電容好比水管的截面積，導體的帶電量好比管中的水量，導體的電位好比管中水面的地位(水位)。一定量的水放在管中，截面愈小，水位愈高；截面愈大，水位愈低。在截面一定的水管中，水量愈少，水位愈低；水量愈多，水位愈高。要使管中的水位一定，截面小的，所需水量少；截面大的，所需的水量便多了。這三種情形，同上述的三次實驗的情形，頗有些相同。所以我們可以拿水位來比喻電位。

一塊金屬板同另一塊通地的相似金屬板十分接近時，它的電容為什麼大大增加，仍可以拿上面的驗電器做例子，說明如下。假定 A 板帶的是陰電，那麼板上便有過多的電子。當通地的 B 板移近 A 板時， B 板下面的電子即被斥而到 B 板的上面，然後由導線入地。於是 B 板便帶有陽電。 B 板上的陽電荷把驗電器下半截(即鋁箔和黃銅片)上的電子，吸引到 A 板上去，所以鋁箔落下。這樣一來， A 板上積集電子的電容，便因 B 板接近之故而增加了。

試將玻璃板嵌入兩金屬板之間，還可以顯示兩板間的絕緣體對於板的電容，大有關係。當玻璃板嵌入時，驗電器的鋁箔即落下；將玻璃板抽出，箔又揚起。由此可知，電容可因玻璃板的嵌入而增加。換句話說，兩金屬板間的絕緣體愈好，電容愈大。

相離很近而用絕緣體隔開的金屬板組，就叫做容電器。容電器積電的電容，正比例於板的面積，反比例於板到板之間的距離，又與絕緣體的性質有關係。這絕緣體在物理學上叫做介體(dielectric)。用玻璃板，雲母片，或石蠟紙做介體時，電容比用空氣時大得多。

274. 【商用容電器】 遠在 1745 年時，荷蘭的來頓大學(University of Leyden)有人曾將錫箔貼牢在廣口玻璃瓶的內外壁上，做成容電器(圖 16-9)。這種容電器叫做來頓瓶(Leyden jar)，現在做實驗的時候仍舊要用到它。使來頓瓶充電，可將它的黃銅球連在起電機的一端上，而使瓶外的錫箔與地通連。但

是電話，感應圈，以及無線電報等所用容電器，通常都比來頓瓶精緻得多。例如電話容電器，即由狹長錫箔兩條，中隔蠟紙，捲緊而成。這兩條錫箔就是兩塊金屬板，其間並無通電的聯絡。所以同時可使一箔帶陽電，一箔帶陰電。這陽電荷與陰電荷互相束縛，因此可在二箔上蓄積很多的電。這種容電器的電容，與板的面積成正比例。

無線電收音機中，常用一種所謂可變容電器 (variable condenser)，如圖 16-10 所示便是。這種容電器由二組半圓形金屬片，交錯重疊而成。各節彼此相離很近，但不接觸。一組金屬片裝牢在中央的軸上，可以跟着軸一起轉動；還有一組金屬片固定在絕緣架上。兩組分別通連容電器的兩端。當動片轉到全部嵌入定片隙縫之內時，容電器的電容到達最大值。將動片旋轉，減少它的嵌在定片空隙內的面積，就可使電容逐漸變小。使用無線電收音機時，所謂調諧 (tuning)，意思就是更改一個可變容電器的電容，使它有適宜的數值。

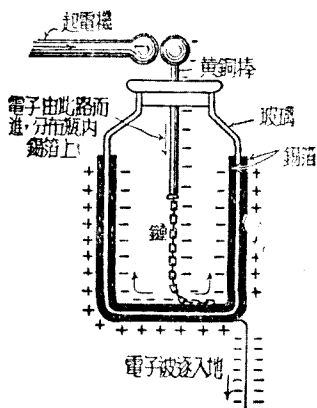


圖 16-9. 來頓瓶式的容電器

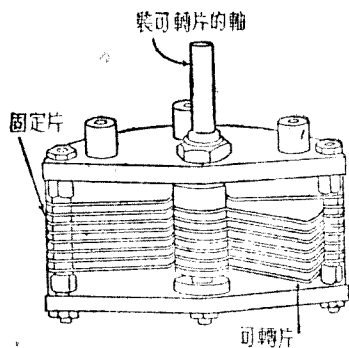


圖 16-10. 可變容電器

275. 【用水比喻容電器的作用】 上文曾用水位比喻容電器金屬板的電位，現在仍用水來說明容電器的作用。取儲水

管兩隻，如圖 16-11 所示的 *A* 與 *B*，底部用導管通連，導管內有活栓 *V*。若將 *V* 關閉，注水入 *A* 與 *B*，使水面高低不齊，則 *A* 與 *B* 即可代表容電器的兩塊金屬板。水面較高的 *A* 管代表帶陽電的板，水面較低的 *B* 管代表帶陰電的板。兩管中水面高低之差，代表兩板的電位差 (potential difference)。

分別連在 *A* 和 *B* 底部的兩段導管，相當於連在容電器兩板上的導線。活栓 *V* 關閉時，相當於這兩條導線的自由端尚未接觸。活栓 *V* 旋開時，水即從 *A* 管經由 *V* 而急衝入 *B*，兩管中的水面很快地就

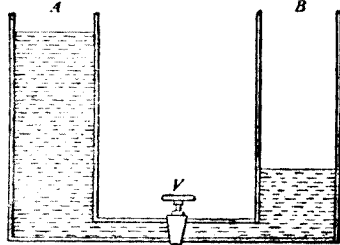


圖 16-11. 用水比喻容電器

變成一樣平。這相當於連接容電器兩板的兩條導線的自由端接觸時，電即從一板移到他板，兩板的電位瞬息間相等。這就是所謂容電器的放電 (discharge)。導管中活栓初開時，水流得非常急速，往往乘勢多流入 *B*，以致 *B* 管中的水面高於 *A* 管。然後又從 *B* 管回流入 *A*，再從 *A* 管流入 *B*，如是往復流動，終因導管內有摩擦作用的緣故，漸漸停息。容電器經導線通連其兩端而放電時，也有相仿的情形，即放電過度，以致容電器本來帶陽電的板帶了陰電，本來帶陰電的板帶了陽電。然後再放電，再帶電，電在兩板間迅速來往 (比水在導管中快得多)，終因導線上有與摩擦相仿的所謂電阻 (electrical resistance) 的作用，漸漸停止。容電器的這種放電情況，用專門名詞來說，叫做振盪放電 (oscillatory discharge)。

276. 【感應起電機】 最簡單的感應起電機叫做起電盤 (electrophorus)，由一個硬橡皮圓盤同一個略小些的金屬圓板構成，金屬板上裝有絕緣柄。

先用毛皮摩擦硬橡皮盤 B (圖16-12),使它帶陰電(1)。這陰電留在橡皮盤上,可以經過幾小時之久。其次將金屬圓板 A 放在盤上(2),並用手指與圓板接觸,使它'通地'(3)。拿開手指,然後舉起圓板,則板上已經帶有陽電(4)。若將這帶陽電的金屬圓板,移近來頓瓶的黃銅球,就有一個電火花在空隙中跳過。反復行此手續多次,即可用起電盤使來頓瓶充電到很多的地步*。

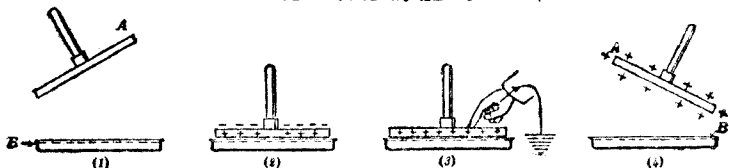


圖 16-12. 起電盤根據感應帶電的原理

當金屬圓板放在帶陰電的硬橡皮盤上時,它們並不處處完全密接,板與圓盤之間,有很多的空隙存在。所以圓板下面在這些空隙處的電子,即被推斥到圓板上面。手指與金屬圓板一接觸,這些被斥的電子便從人體逸入地中。所以金屬圓板就全部帶有陽電。硬橡皮盤一次帶電後,無論從起電盤得電多少回,橡皮盤上的電不會有顯著的減少。使一個物體帶電,是要費掉一些能量的。就本例而論,能量的來源是舉起金屬圓板的手,所以硬橡皮盤上的電不會少掉。

277. 【靜電起電機】比較複雜的靜電起電機,所利用的也是感應起電的原理,例如威姆胡斯特起電機(Wimshurst electric machine)(圖16-13)便是。在課室內作示教實驗時,通常都用這種起電機。

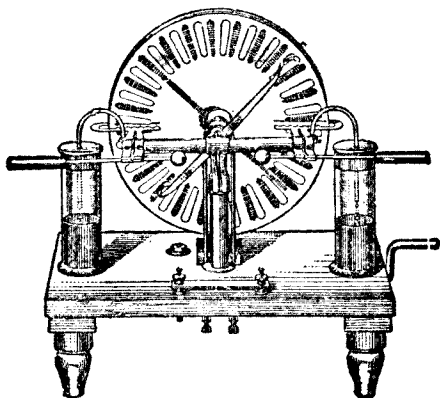


圖 16-13. 威姆胡斯特氏起電機也用感應帶電的原理

* 在家中自己做一隻很好的起電盤,並非難事。

范德格拉甫 (Vander Graff) 曾造成一座巨大的靜電起

電機，可以產生幾百萬伏特 (volt, 電位差的單位, 後文第290節中就要講到) 的電位差, 並可產生長達數米的電火花。此機的主要部分是兩個很大的空心金屬球, 支在絕緣柱上 (圖 16-14)。柱內各有首尾啣接的絕緣帶一條, 由電動機使它們出入金屬球不息, 循環將電荷送入二球之中。電荷入

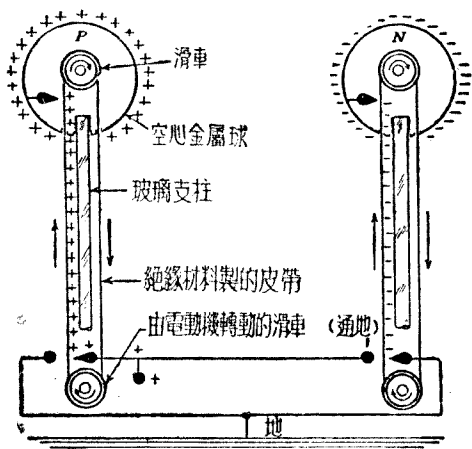


圖 16-14. 范德格拉甫氏靜電起電機

球, 即由感應作用使球帶電。空心球所帶的電完全在外表面上, 球的內壁絕無電荷。所以球內可以布置一實驗室, 供研究原子核之用 (下頁, 圖 16-15)。

278. 【電在導體上的分布】

16-16 所示, 並用靜電起電機使罐儘量帶電。

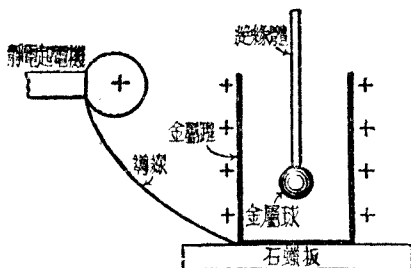
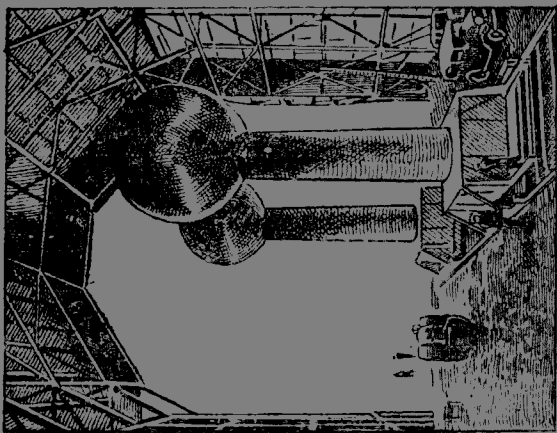


圖 16-16. 電荷分布在金屬罐的外面

取金屬罐一隻, 放在石蠟板上, 如圖於是裝在絕緣柄上的金屬小圓板或小球, 叫做「驗電板」(proof plane) 的, 檢驗金屬罐上的各處。若使驗電板先與罐的外面接觸, 然後使它接近帶電的驗電器黃銅球, 即可知金屬罐外的電荷很多。但若使驗電板先與罐的內面接觸, 則驗得罐內全不帶電。

普遍地說來, 電荷完全在導體的外表面。又



(a)



(b)

圖 16-15. (a) 美國麻州理工大學 M.I.T. 的范德格拉夫氏靜電起電機，可以產生非常大的靜電場。
(b) 企鵝球與地及房屋間放電，發生人電位。這起電機的重要部分，設在球面

據實驗，可知電荷的分布在導體的稜角或突起部份上，比在其他平坦的部份上密得多。若導體有尖銳的突出部份，則該部份電荷分布之密，密至足以使尖端上的電子逸入空氣或附近通地的別的導體，或從空氣或附近通地的別的導體吸取電子，其結果，導體上的電荷漸漸放掉。此種過程叫做尖端放電 (point discharge)。尖端放電急劇進行時，在尖端附近即有光輝出現。

279. 【大氣中的電】約在十八世紀中葉時，美國的佛蘭克林 (Benjamin Franklin) 根據他的著名的風箏實驗，證明雷雲 (thundercloud) 帶有平常的電荷，並證明電閃 (lightning) 是大規模的放電，即所謂電花放電 (spark discharge)。他的發見，到處為科學家所承認，乃是劃時代的空前創舉。這一件事情的經過，最可使人驚歎的，恐怕是佛蘭克林沒有當場被雷擊斃。不到一年後，有一個俄國人做相仿的實驗，就不幸送掉了自己的生命。

佛蘭克林後來又發明了避雷針 (lightning rod)，在雷雨時安然導電入地，以免其取道房屋而放電，致生雷擊的災禍。當帶電的雲飄行到地面突出物體，例如大樹，煙囪，或教堂尖塔等等的上空時 (圖 16-17)，即感起異性電荷，集於各該物的上端。這電荷若不導入地中，就愈積愈多，多到相當程度時，或當帶電的雲離地太近時，空氣的絕緣壁壘即被衝破，引起大規模的放電，產生強烈的閃光 (即電火花，有時長達五哩)，並發很大的爆炸

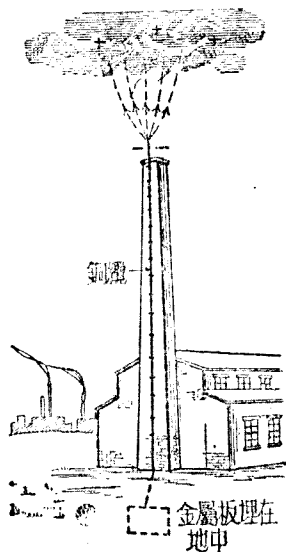


圖 16-17. 帶電的雲引起煙囪內的異性電荷，但因有銅桿通地，故可放入地中而無危險

聲，所謂雷擊(thunder-stroke)就是。這聲音之所以發生，大家以為是由於放電所經的狹長空氣帶，驟然受熱而急行膨脹之故。這一部分的空氣來回激盪，產生所謂壓縮波(compression wave)，所以我們就聽到了聲音(關於壓縮波和聲音，見下文第三章)。

據最近的實驗，水在上升的空氣流中降落時，若氣流很急，可將水吹散，則所成較大的水滴，通常帶有陽電；細霧狀的小水滴，通常帶有陰電。雷雲的生成，常在上升的巨大空氣流的頂端，所以我們很容易懂得，為什麼雷雨時降下來的大雨滴常帶陽電，而被空氣流衝上去的細霧，則成爲帶陰電的雲(圖 16-18)。

280. 【避雷針】 避雷針何以有避雷的效用，各方面的意見到現在仍舊沒有一致。不過針的質地倘若脆弱，裝置倘若不合理，通地情況倘若不良好，則有針比無針更壞，這倒是一定的。從另一方面說，若有堅實的導體，從屋頂上分佈得很適宜的幾點，或從尖塔的頂端，向下通入良好的地中，且中途不改向上行，又沒有過於彎曲的地方，那麼房屋決可受到保護，避免雷擊。電話，無線電收音機，電燈線以及長距離輸電線，通常都有各式各樣的避雷器(lightning arrester)保護着。

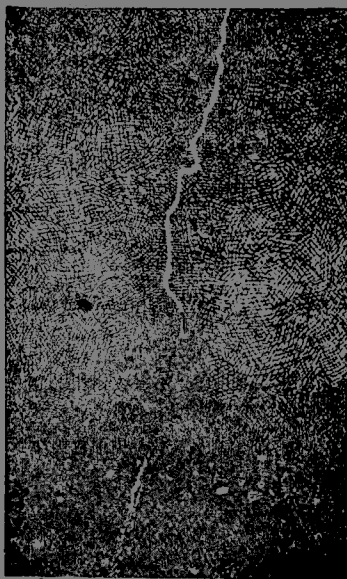


圖 16-18. 美國紐約都城大廈受雷擊的情況。這張相片是在 1936 年六月十一日下午九點零三分，用超敏膠片和 $f/16$ 光闌攝取的。

佛蘭克林 (Benjamin Franklin 1706-1790) 美國人。著名作家,政治家,又是科學家。對於電有科學上的研究,發明避雷針,提出正電與負電的概念及名稱,且在醫藥,光學,熱學,以及農業方面,發明不少實用的裝置和方法。



庫倫 (Charles A. Coulomb 1736-1806) 法國科學家。在摩擦力及電學方面有研究。因發見電力及磁力的引斥定律而得盛名。

第十六章提要

凡物體，都可以由接觸或由摩擦，使它帶陽電即正電（如玻璃等），或帶陰電即負電（如樹膠等）。

同性電荷相斥。

異性電荷相引。

中和的物體含有等量的陽電與陰電。

原子（一切物質的）由帶陰電的電子圍繞帶陽電的核而成。

導體是一種物質，其中的電子可以自由移動。

絕緣體是一種物質，其中的電子牢牢附着於原子，以致不得自由移動。

帶陽電的物體，電子缺少。

帶陰電的物體，電子過多。

由感應而帶電的物體，常帶異性電荷。

容電器由兩個導體被絕緣體隔開而成。

問 答 題

1. 用鋼骨水泥及鋼鐵建築而成的大廈，往往容易遭受雷擊，但不致有什麼損傷。說明其理。
2. 教堂的尖頂，在將受雷擊以前，其帶電狀況怎樣？
3. 鋼製汽油運送車往往帶電。(a)有什麼危險沒有？(b)怎樣預防？
4. 使硬橡皮棒帶陰電，其電荷是從什麼地方來的？
5. 使玻璃棒帶陽電，其電荷是從什麼地方來的？
6. 由感應使驗電器帶陽電，其手續如何？試依 1, 2, 3 的次序，逐步予以敘述。
7. 手指與驗電器的黃銅球接觸，則(a)當驗電器帶有陰電時，(b)當驗電器帶有陽電時，使鉛箔下垂的原因是什麼？
8. (a)容電器的電容，看哪幾個因子而定？(b)圖 16-10 所示的可變容電器，若將它的軸轉動，那麼這些因子中有哪一個或哪兩個起了更改？
9. 來頓瓶放在石蠟板上，就不能夠使它帶很多的電。什麼緣故？
10. 手持帶電的來頓瓶，既不覺得觸電，亦不會失去電荷。什麼緣故？
11. (a)若已使一個絕緣的金屬球帶了陰電，則如何可用此球，使其他無論多少絕緣金屬球，一個一個都帶陽電？(b)第一個金屬球上的電荷會失去麼？

12. (a) 若已使一個絕緣的金屬球帶了陰電，則如何可用此球，使其他無論多少個絕緣金屬球，一個一個也帶陰電？(b) 第一球的電荷要失去麼？

13. 怎樣保護 (a) 無線電收音機；(b) 電話；(c) 家中的電線；(d) 高壓輸電線；使它們不受雷擊？

第十七章

電流與電路

281. 【靜電與動電】 十九世紀以前的人，對於電的知識，實際上祇限於所謂靜電(electricity at rest)。最有用的發明，差不多祇有避雷針一種，它的價值，不免在當時被估得太高了一些。最有用的儀器，在十九世紀前設計的，也祇有容電器一種。但在過去六十年中，電已一躍而居技術上及工程上的重要地位。電燈，電動機，電車，電話，無線電報，無線電話，以及長距離輸電，都已成爲日常見慣的事情了。凡此種種，都要用到動電(electricity in motion)，這動電，便是所謂電流(electric current)。

282. 【電流與水流】 電雖然在多方面自行呈現出來，電的真正本性，卻至今還沒有定論。不過我們可以不管這一件事，而把電流效應所遵守的定律，以及電流的應用，弄熟了再說。現在我們祇要記住，電流沿導體流動，與水在導管內流動，頗有些相仿。

設有一水箱，裝在屋頂上，供噴水滅火之用。在起火的時，水即從箱中經導管而流下，到起火的室內，即從導管開口處噴出來。這水箱若裝在地下室中，就不能噴水，因爲水是‘向下’流的。水箱既在屋頂上，箱中水面與室內導管一端就有高低的差別，所以水能流動。換句話說，水位的不齊，產生了推動之勢(motive force)。這水位差，叫做水頭(water head)。就屋頂水箱一例而論，水頭等於箱中水面高出導管開口處的呎數。

同理，乾電池上的兩個接線柱即兩個端鈕(terminal)，若用金屬導線連結，則因兩端鈕上電的狀況不同，而有電流沿着導線流動。

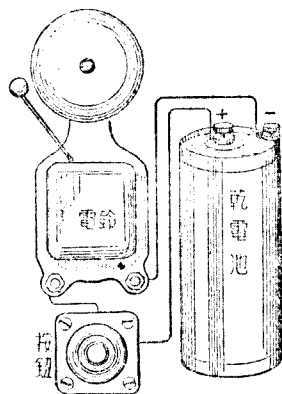


圖 17-1. 乾電池上兩個接線柱間的電位差，使電流在導線上流動

如圖 17-1 中的按鈕，若用手指將它按下，則從乾電池上註明 + 號的端鈕出發，經由電鈴而回到註有一號的端鈕，這條路線就可接通，此時電鈴大鳴，金屬導線發熱，使人想到必有什麼東西在金屬線上流動。這東西，我們就叫它做動電。照現在的說法，流動的乃是電子。所謂電流，即是電子流。電子所以沿導線流動，是因為乾電池上 + 與 - 兩端鈕上電的狀況有差別之故，這差別，叫做電位差 (difference of electrical potential)。

283. 【簡單電池】意大利科學家伏打 (Volta)，在一八〇〇年發見一個方法，可以由化學作用產生電位差，因而使電流繼續流動不息。現在讓我們照樣做一個簡單的實驗，如下所述：

取銅板鋅板各一條，設法將它們直立在玻璃杯中，並使它們不相接觸，然後注入稀硫酸(圖 17-2)。觀察杯中二板，將見銅板不受酸的作用。但鋅板上立刻充滿了許多氣泡(氫)，陸續上昇至杯頂，而鋅板本身則漸漸溶蝕在酸液中。換句話說，鋅原子(Zn)正在變為鋅離子(Zn²⁺)，溶解在水內(參閱第320節)。留在鋅板上的電子，使銅板帶陰電。(注意：銅板與鋅板未曾用銅線連結時，這個過程並行片刻即止)。

用靈敏的驗電器仔細驗一驗，即可知道銅板帶陽電，鋅板帶陰電。這就是說，鋅板上已積集了過多的電子。若將銅鋅

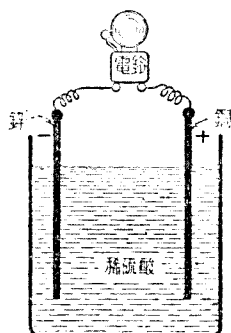


圖 17-2. 簡單的伏打電池

* 帶陽電或陰電的原子或原子集團，叫做離子(ion)。

二板，用電鈴，銅線及按鈕連結起來，則將按鈕撤下時，電鈴立刻大鳴*。由此可知此時正有電流從一板經銅線而流至他板。多年以來，一向假定導線上的電流從銅板（電位較高的一板）流到鋅板（電位較低的一板）。關於這一層，下節我們還要講一講。

差不多隨便什麼樣的兩個導體，都可以用來代替銅板和鋅板，但是它們的資料一定不可相同。他種液體也可以代替硫酸，但此液體（叫做電解液 electrolyte）必須對於兩種金屬之一起化學作用。與電解液不起或略起化學作用的一板，叫做陽極或正（+）極（positive electrode），他板叫做陰極或負（-）極（negative electrode）。

284. 【電流與電子流】我們已經知道，依照電子學說（第270節），金屬及其他固態導體的自由電子，比絕緣體多得多。電池或其他任何式樣的發電機，經連結而成首尾啣接中間不斷的導體環路時，並不製造電子，僅使電子在此環路上依一定方向移動罷了。這個沿導體被驅前行的電子流，就是電流。但是我們應當仔細注意到一件事，即是這電子流的流動方向，是從陰極經導體（電池或發電機以外的）而到陽極。這個方向恰同相沿甚久的假定相反，照從前的假定，電是從陽極經導線流到陰極的（第283節）。因為有許多書籍早已根據這個習慣來敘述電流方向，所以我們仍假定電流的方向是從陽極經導線而到陰極。不過我們在同時應當記住，對於直接牽涉到電子的現象有所論述時，電子流的方向實與此習慣上的電流方向相反。

285. 【電路】穩定的電流，非有完全封閉的導電路徑，即環狀路徑，決不能流動不息。電流所通過的這樣一條路徑，叫做電路（electric circuit），如圖 17-1 及 17-2 中所示的，都是電路。

* 注意：此時氫氣泡不現於鋅片而現於銅片，鋅片消耗的過程進行不息。

電路在電池以外的部分，包括電鈴，按鈕，以及導線，叫做外電路 (external circuit)；其在電池本身之内的部分，包括兩板及電解液，叫做內電路 (internal circuit)。讀者須注意，我們所假定的是，電流在外電路上從銅板（或碳棒）通過金屬線而到鋅板，再在內電路上從鋅板通過溶液而到銅板（或碳棒），完成環狀的通路。若將電池外的導線割斷，即將電路截斷 (break the circuit)，則電位差雖仍依然如舊，電流卻不能繼續再流，因為導電的環狀路徑斷掉了。若再將導線的兩端接連起來，即將電路接通 (close the circuit)，則電流又流動如前。若用粗而短的導線，其電阻很小很小的，將一電池或一組電池的端鈕連結，便成短路 (short circuit)。短路是要損害電池的，切勿嘗試！

286. 【水的比喻】 第 283 節所述電池的作用，好比抽水機使水在導管系統中，循環流動不息。一個電池，可以看成一具抽水機，或驅使電子移動的機械。

假定有兩隻水槽，如圖 17-3 所示的 A 與 B，放在不同的地位，A 槽高於 B 槽。導管一條及抽機一具，將 B 槽底部接通到 A 槽底部。若兩槽貯水都不滿，則抽機起動後，B 槽的水即被吸入 A 槽。於是 A 中的水面，就逐漸升高。設有溢水管從 A 槽通到 B 槽，那麼溢出來的水，仍得流回行將枯竭的 B 槽。所以抽機的效用，僅在於可使兩槽中的水，在導管系統及兩槽中循環流動不停而已。這和電池外電路接通時的情形，頗有些相仿。

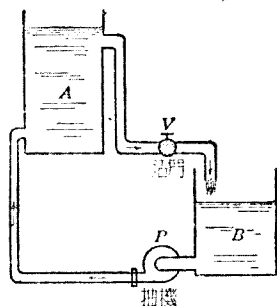


圖 17-3. 用水比喻電路，伏打電池好比抽水機

現在若用活門 V 將溢水管關斷，則抽水機很快的將 B 槽中的水抽乾。抽水機雖仍可繼續轉動不停，但不能再從 B 槽抽得點滴

之水。因此，導管內便無水可流。

這和電池兩端鈕沒有導線連結時的情形相仿。兩板間的电位差仍得保持，但是並無電流在流動着。

287. 【控制電流的兩個因子】 在任何電路之中，必須有某種發電器，例如電池或電池組，可驅使電子行動；又須有一條導電的路徑，例如金屬線，可讓電子流沿着它流動。電子流動的速率，即每秒中經過一定點的電子數，叫做**電流強度** (intensity of current)。通常我們不說‘電流強度’，往往單說‘電流’。使這電子流流動，必須有電位差。這電位差通常叫做**電壓**(voltage)，又叫做**電動勢** (electromotive force)。但電路上常有多少妨礙，使電子不能暢流無阻。此種阻礙，就是所謂電路的**電阻** (resistance)。電動勢和電阻，乃是控制電流的兩個因子。現在將電動勢，電流，以及電阻，詳細論述於下。

288. 【電流的單位：安培】 水流在導管中通過的速率，可以用每秒多少加侖或每秒多少立方呎來表示。同樣，我們可用每秒有多少電量通過一定點，來表示電流。電量的單位叫做**庫侖** (coulomb)，約有 6.28×10^{18} 個電子；這個名詞，是紀念法國科學家庫侖 (Coulomb) 而取的。測定庫侖的方法，將在第 326 節中予以說明。每秒輸送電量一庫侖的電流，叫做**一安培** (ampere) 的電流。(國際安培定義，亦將在第 326 節中敘述。) 這個名詞，是爲了紀念法國物理學家安培 (Ampère) 而取的。通常我們所關心的是電的流動速率，並不是電量，所以安培這個名詞用得很多，而庫侖這個名詞，不過偶爾用一用。

新製成的乾電池，用粗短導線連其兩端鈕成短路，約有電流 30 安培通過導線，但是這樣大的強度，祇能維持很短的時間。一盞 60 瓦特的電燈當電位差是 110 伏特時，所需電流約爲半安培。(參閱第 290 節與第 334 節。) 電話聽筒所需的電流不到

0.1 安培。

289. 【電阻的單位：歐姆】我們都知道，水流在導管中通過時，常因管的內壁有摩擦作用而受到阻礙。我們又都知道，導管的管壁愈粗糙，管身愈細長，對於管中流過的水，阻礙愈大。正與導管對水流所呈的阻礙相仿，電阻乃是導體對電流所呈的阻礙。我們已把物質分成兩類，一類是導體，一類是非導體或絕緣體（第 205 節）。但是最良好的導體也不能毫無缺點，而且一切導體對於電的流動，多少總有一些電阻。

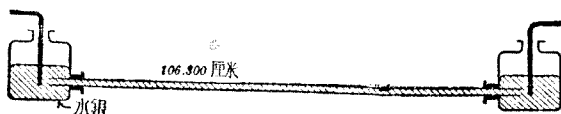


圖 17-4. 標準歐姆：水銀柱長 106.300 厘米，截面積是 1 平方毫米，溫度在 0°C 。

電阻的單位叫做歐姆 (ohm)*。這個名詞是爲了紀念德國科學家歐姆 (Georg Ohm) 而取的。歐姆首創關於電流的定律，這定律將在第 292 節中予以討論。

第 10 號 (美規) 銅線 1000 呎的電阻，差不多恰是一歐姆。平常所用的電鈴線 (第 18 號) 約 160 呎，或 18 號鐵線 26 呎，它的電阻也是一歐姆。直徑 $2\frac{1}{2}$ 吋的電鈴，其電阻通常約在 1.5 歐姆到 3 歐姆之間。電話聽筒的電阻是 60 歐姆，而 40 瓦特的鎢絲燈，在白熱時，電阻約爲 300 歐姆。

290. 【電位差：伏特】我們都知道，要使水在導管中流動，必須有水位差或抽機，產生推動的趨勢，纔成。同理，要使電在導線上流動，必須有電池或其他發電器，產生電位差即電動勢，纔成。電動勢的單位叫做伏特 (volt)。這個名詞是爲了紀

* 國際歐姆的定義，經公認爲恰長 106.3 厘米，恰重 14.4521 克的水銀柱，在 0°C 時所呈的電阻。這般長這般重的水銀柱，它的截面積差不多是一平方毫米 (圖 17-4)。

念法國科學家伏打(Volta)而取的，伏打就是發見用化學方法產生電流的第一人。伏特的定義，可以這樣說：使一安培的電流通過一歐姆的電阻，所需的電動勢叫做一伏特。

例如用鋅板銅板及稀硫酸構成的簡單電池，它的電動勢大約是一伏特。普通乾電池的電動勢約為 1.5 伏特，而鉛蓄電池的電動勢則為 2 伏特左右。屋內電燈所用的電流，通常約在電動勢 110 或 220 伏特之下流動。電車的開行，需有電動勢約 550 伏特。

電動勢的略號是 c. m. f. 或是 E. M. F.，它與電位差及電壓，有同樣的意義，都指要使電運動或使電運動的‘推動之勢’而說。在工程及實用上，電壓一名，用得較多。

291. 【伏特與安培的區別】 電流強度用安培數計量；推動電流的電動勢用伏特數計量。在一定的電路中，電動勢愈大，電流亦愈強。要使每秒有一定加侖數的水，流過一定的導管，非有一定的‘水頭’不可。同樣，要使一定量的電流通過一定的導線，也非有一定的電位差不可。不論是水是電，都必須先有推動之勢，然後可以有流。在另一方面講來，雖有推動之勢，仍可無流。電路中的開關沒有開的時候，雖有動勢（伏特）而無電流（安培），正好比導管中的活門未開之時，雖有水位差（水頭）而無水流。

因為電的研究時時牽涉到電流，所以我們對於下列三個名詞，非有明白的概念不可：

- (a) 電流(電的流動率)，
- (b) 電阻(可以控制電流的阻礙)，
- (c) 電壓(推動電流的原因)。

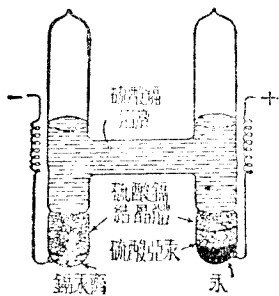


圖 17-5. 德爾斯吞標準電池

* 國際伏特之值，由德爾斯吞(Weston)標準電池規定，該電池在 20°C. 時的電動勢是 1.0183 伏特(圖 17-5)。



安培 (André Marie Ampère, 1775-1836) 法國哲學家, 數學家, 兼物理學家。發見電流與磁的關係。創立後來科學家研究電與磁的基礎



歐姆 (Georg Simon Ohm, 1787-1854) 德國數學家兼物理學家。研究伏打電池組及電阻定律。發見電學上著名的歐姆定律

下節中的單位表，可以幫助讀者確定安培、歐姆，以及伏特三名詞的意義。

292. 【歐姆定律】 我們剛纔已經得知，若無電動勢使電流流動，就不能夠在電路中有一道電流。此外，我們又發見，電流的大小要受電阻的節制。用抽機使水通過導管時，水流的大

單 位	水	電
量	加 侖	庫 侖
流 量 每 秒 之 量	每 秒 加 侖 數	安 培 每 秒 庫 侖 數
阻 礙	(無單位)	歐 姆
動 勢	水 頭 呎 數	伏 特

小正比例於抽機所施的壓力，反比例於導管的摩擦阻礙。同樣，使電流通過導線時，電流正比例於電池或其他發電器的電動勢即電壓，反比例於電路的電阻。電流，電動勢，以及電阻，三者之間的此項關係，叫做歐姆定律 (Ohm's law)，因為第一個正式宣布這條定律的科學家是歐姆(在 1827 年)。歐姆定律可以這樣寫：電路中的電流強度等於電阻除電動勢。

$$\text{電流(安培數)} = \frac{\text{電動勢(伏特數)}}{\text{電阻(歐姆數)}}$$

用記號來表示，就是

$$I = \frac{E}{R}.$$

例如有電動勢 110 伏特，使電流通過電阻 5 歐姆，求電流強度，可列式如下：

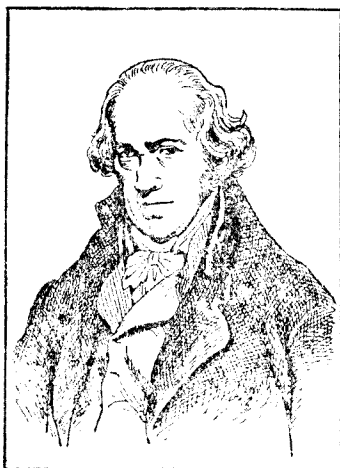
$$I = \frac{E}{R} = \frac{110}{5} = 22 \text{ 安培.}$$

在電阻已知的電路中，欲維持一定量的電流，所需的電動勢可從公式

$$E = IR$$

算得。

瓦特(James Watt, 1736-1819)蘇格蘭人。格拉斯哥(Glasgow)大學儀器製造專家。改良蒸汽機,傳至今日。電功率的單位,就用他的名字來稱呼,以表紀念。



伏打(Alessandro Volta, 1745-1827)意大利物理學家。研究金屬接觸生電現象,發明電池,開電流研究之端。發明容電驗電器(condensing electroscope, 將一板通地的容電器與驗電器銅球連接,如圖16-8所示,即成容電驗電器)及起電盤。

例如有弧光燈一盞，其電阻（在熱的時候）是 5.5 歐姆，欲送電流 10 安培通過此燈，求其所需電壓，可列式如下：

$$E = IR = 10 \times 5.5 = 55 \text{ 伏特.}$$

若已知電壓之值，而欲使電流有已知的強度，則可將此基本方程式改寫如下，以求電路的電阻：

$$R = \frac{E}{I}.$$

例如有電熱器一具，可以安然負載電流 10 安培。若在 115 伏特的電路上使用此器，則其（熱）電阻當有下值：

$$R = \frac{E}{I} = \frac{115}{10} = 11.5 \text{ 歐姆.}$$

歐姆定律是研究電流的基本定律，所以上述三種形式，都應該牢牢記住。

有一點可在此處順便提出，也許對於學者有些益處，即歐姆定律中所表示的關係，頗同人生涉世的原則相仿：成功 (I) 正比例於努力 (E)，反比例於阻止努力的障礙 (R)。

計 算 題

1. 電動勢 50 伏特，可送電流多少通過電阻 10 歐姆？
 2. 在前題中，若 (a) 電阻減少到 2 歐姆，(b) 電阻增加到 1000 歐姆，則電流之值是多少？
 3. 電熱器一具，它的電阻是 18 歐姆。此器若接在 112 伏特的電路上，將取用多少電流？
 4. 要送電流 4 安培通過 60 歐姆的電阻，則電路上必須有多少電壓？
 5. 電鈴一具，它的電阻是 3.2 歐姆，通過它的電流應當是 1.9 安培。問必須用多少電壓？
 6. 電燈一盞，裝在 112 伏特的電路上，放光時消費電流 0.7 安培。(a) 這電燈的電阻是多少？(b) 另外一盞電燈也裝在這電路上，祇用電流三分之一。它的電阻是多少？
- * * *
7. 有電磁體（第 313 節）一個，通過它的電流若在 12 安培以上，就要使它過度發熱。若此電磁體的電阻是 5 歐姆，則須加添多少電阻，纔可以在 115 伏特的電路上使用它？
 8. 一人修理電燈插座，不意觸電，有 0.005 安培的電流，通過他的身體，未曾受傷。後來此人在浴盆中開燈，竟觸電而死，其時通過他身體的電流是 0.15 安培。兩次觸電，電壓相同。求各次的電阻。

9. 欲使電路中的電流加倍，應該 (a) 單使電壓有什麼改變，(b) 單使電阻有什麼改變，(c) 使電壓與電阻同時有什麼改變？

10. 經使電爐 (electric hot plate) 一隻，它的電阻是 25 歐姆。若使 5 安培以上的電流通過它，它就要‘燒壞’。問加在此爐上的最大安全電壓是多少？

293. 【電流及電壓的測定】 測定電流之值，祇要把安培計 (ammeter, ampere meter 的簡寫) 插入電路之中，就成。所謂插入，好比將導線割去一段，換接安培計。

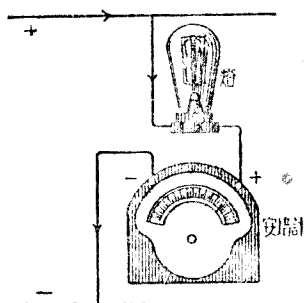


圖 17-6. 用安培計測定電燈中通過的電流

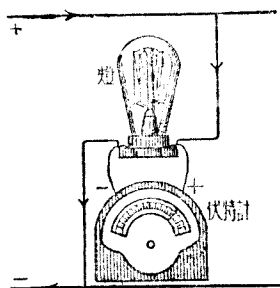


圖 17-7. 用伏特計測定電燈兩端的電位差

如圖 17-6 所示，就是將安培計插入電燈的電路，來測定通過電燈的電流。從這樣的連法，可知通過電燈的電流，也必定通過安培計。安培計自身的電阻是很小的。它的構造精巧得像錶一樣，使用時必須十分留意。還有應當注意的，連接安培計的時候，須讓電流從正 (+) 接線柱進去，而從負 (-) 接線柱出來。

使電流通過電器的電位差，即電壓，欲予以測定，可以不必截斷電路，即不必遮斷通過電器的電流。我們祇要把伏特計 (voltmeter) 的兩端鈕，連在電器的兩端鈕上，就成。從這樣的連法，可知通過電器的電流，並不通過伏特計。

圖 17-7 表示，怎樣連接伏特計，來測定那使電流通過電燈的電位差。由圖立刻可以知道，伏特計跨接在電燈上，伏特計的正 (+) 接線柱與電燈的正 (+) 接線柱相連。伏特計的電阻是很高很高的，所以祇有很小很小的電流，通過伏特計的本身。

安培計與伏特計的正確用法，是非知道不可的。安培計應該串接或插接 (inserted into) 於電路，而伏特計則應跨接 (connected across) 於電路。若誤將安培計跨接於電路，或不同別的電器串接而單獨接到電線上去，則因大量電流潮湧而入，

安培計就要立刻燒壞。讀者切勿輕於一試，須知這種儀器是很貴的！

294. 【電阻的測定：伏特計安培計法】 測定電阻而不求十分準確，那麼最簡便的方法就是利用伏特計與安培計這兩種普通儀器。假定待測的未知電阻是 R 。將這未知電阻同安培計連成一串，而將伏特計跨接於這未知電阻的兩端，如圖 17-8 所示。應用歐姆定律，電阻等於電流除電壓：

$$R = \frac{E}{I}$$

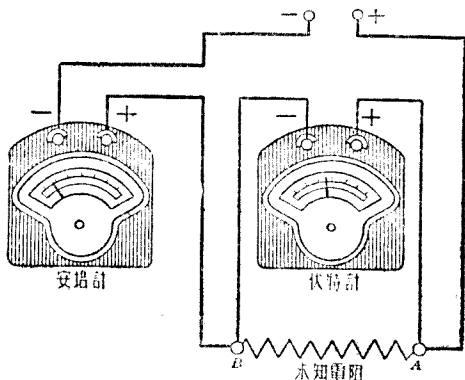


圖 17-8. 用伏特計安培計法測定電阻

注意：待測定的電阻很高，而電路中的電流很小時，通常將伏特計跨接於電阻及安培計二者之上*。

測定電阻，若欲求其精確，可用「惠斯登電橋」（Wheatstone bridge）。此法的原理如下：

如圖 17-9 所示， R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_4 是四個電阻， G 是一非常靈敏的電流計（第 317 節）。照這樣的接法，電流 I 從電池出來，到 a 點分兩條路進行，通過 R_1 的假定是 I_1 ，通過 R_2 的假定是 I_2 。倘若四個電阻配合得宜，則電流計 G 中即無電流通過。此

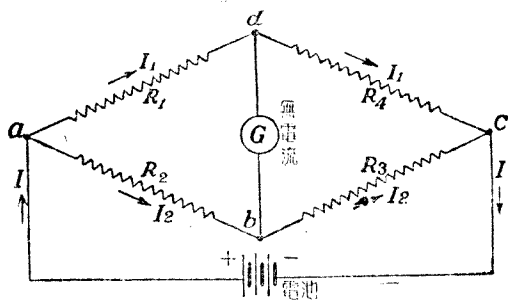


圖 17-9. 惠斯登電橋的原理

* 量低電阻用第一法，量高電阻用第二法，未知電阻都須比伏特計的電阻相差很遠，纔無大誤。若相差很少，或竟相等，那麼用兩法所得的結果，都極不準確。

時 d 與 b 的電位差等於零；換言之， a 與 d 間的電位差等於 a 與 b 間的電位差，於是通過 R_3 的電流是 I_2 ，通過 R_4 的電流是 I_1 。 d 與 c 間的電位差等於 b 與 c 間的電位差。故從歐姆定律，可得

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$I_1 R_4 = I_2 R_3$$

從這兩式可得

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$$

$$R_4 = R_1 \times \frac{R_3}{R_2}$$

若已知 R_1 及 $\frac{R_3}{R_2}$ 之值，即可將 R_4 的值計算出來。

295. 【導線電阻的計算】 導線的電阻，看它的質料，長度，截面，以及溫度而定。我們從實驗知道，任何導體的電阻正比例於它的長度，反比例於它的截面積。

因為導線通常都是圓柱形，所以用方吋來計算它們的面積，頗不方便。美國的電機工程師，因此常說直徑千分之一(0.001)吋的導線，它的直徑是**1密爾**(mil)，它的截面積是**1圓密爾**(circular mil)。圓面積是與直徑的平方成正比例的，所以導線的截面積若用圓密爾數來表示，即等於其直徑密爾數的平方。

例如有一導線，它的直徑是 15 密爾，它的截面積就是 $(15)^2$ 即 225 圓密爾。又如直徑 1 吋的導線，它的直徑是 1000 密爾，它的截面積就是一百萬圓密爾，一方吋等於 $\frac{4}{\pi}$ 百萬圓密爾(圖 17-10)。

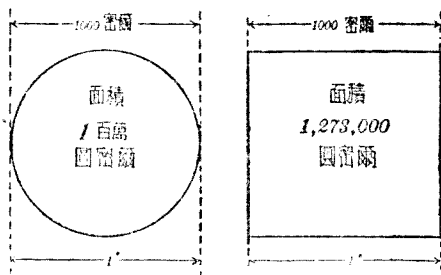


圖 17-10. 用圓密爾為單位，表示圓與正方形的面積

計算導線的電阻，通常用長一呎截面積一圓密爾的同質料導

線做比較的標準。這樣的一段導線，叫做**一密爾呎**(mil foot)。

導線一密爾呎的電阻，有時叫做製成該導線所用物質的**電阻係數**(resistivity 或 specific resistance)。下表所載，乃是少數普通導體一密爾呎，在溫度 20°C . 時的電阻係數(用歐姆做單位)：

鋁	17.0	鋼，製軌用的	85.5-130
銅	10.4	鎢	35.8
德銀(含銀 18%)	198	錳鎳銅齊	250-450
鐵，商用的	66.4-81.4	鎳鉻齊	670

任何導線的電阻，可以直接計算出來，祇要把該導線全長呎數，乘該線一密爾呎的電阻(歐姆數)，再除以截面積的圓密爾數，便成。

為便於記憶及應用起見，可用公式表示如下：

$$R = \frac{Kl}{d^2}$$

式中 R 是電阻歐姆數， K 是一密爾呎的電阻(即電阻係數)， l 是長度呎數，而 d^2 是截面積圓密爾數。

例如有銅線 500 呎，它的直徑是 40.3 密爾，若欲計算它的電阻，就有下面的算式：

$$R = \frac{Kl}{d^2} = \frac{10.4 \times 500}{(40.3)^2} = 3.2 \text{ 歐姆}$$

296. 【溫度對於電阻的影響】 試將第 30 號鐵線 10 呎，繞在石棉板上，而送電流通過它。取安培計一具，插接在這電路中(圖 17-11)。然後用本生燈加熱於鐵線，即見電流強度大減。

從實驗可以知道，銅線一密爾呎的電阻，在 20°C . (即 68°F .) 時是 10.4 歐姆，但在 0°C . 時祇有 9.6 歐姆。在 0°C . 時測準的電阻一歐姆的銅線，溫度每昇一度，它的電阻大約增加 0.00426 歐姆。精測導線冷時的電阻，又精測其熱時的

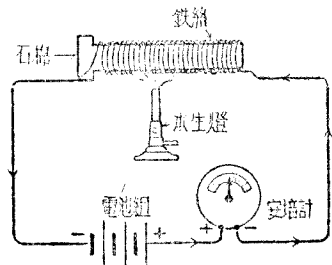
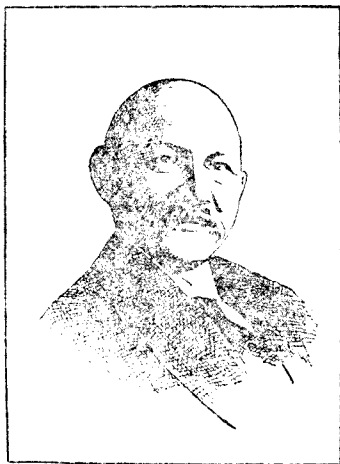
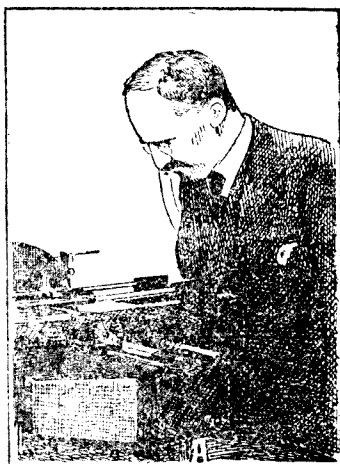


圖 17-11. 加熱於鐵線，電阻增加電流減少

羅倫德 (Mary A. Rowland, 1818-1907) 美國物理學家。約翰霍布奈斯大學教授，當時最前線的物理學家。曾在化學、磁學以及數學方面作種種實驗而得者。



翁溫斯 (H. Kamerlingh Onnes, 1853-1926) 荷蘭物理學家。在萊頓大學教授物理學四十年。研究極低溫度時的物性。使氦液化，並發見所謂超導性現象。在 1913 年獲諾貝爾獎金。

電阻，可得用電測溫之法。

就大多數純粹金屬而論，電阻的增加差不多同溫度的升高成正比例。鎢絲燈的電阻在冷時祇有 20 歐姆，但當燈絲白熾時，其電阻即增加到 400 歐姆。

297. 【溫度對於電阻的奇特效果】 有幾種金屬冷到絕對零度以上幾度時，其電阻差不多突然全失。因此，其導電之容易，數千倍於溫度較高的時候。此種現象即是所謂超導性 (superconductivity)，由翁涅斯 (H. Kamerlingh Onnes) 在來頓地方發見，但其原因至今未有解釋。大多數合金的電阻，不但比所從構成的純粹金屬高，而且遠不容易受溫度的影響。例如‘錳鎳銅齊’ (manganin) 的電阻係數，高達 250 到 450 歐姆不等，看所含純粹金屬的成分而定。但其電阻，差不多不跟着溫度的昇降而有所改變。

又有少數物質，例如碳、玻璃以及瓷，受熱時電阻減低。碳絲燈的電阻，熱時大約祇有冷時的一半。

計 算 題

1. 有導線一條，電阻是 36 歐姆。問 (a) 長三倍而粗細相同的同質導線在同溫度時，它的電阻是多少？(b) 長度相同而截面積三倍的，多少？
 2. 第 24 號銅線 1000 呎的電阻是 25.6 歐姆。求此種銅線 200 呎的電阻。
 3. 欲得電阻 35.0 歐姆，前題中的銅線須用幾呎？
 4. 某號銅線的直徑是 0.064 吋，求 (a) 它的直徑的密爾數，(b) 它的面積的圓密爾數，(c) 它的號數 (查閱上冊附錄中的銅線表)。
 5. 有直徑 50.8 密爾的銅線 2000 呎，用第 295 節的公式求它的電阻，再查銅線表中所載之值，藉以核對你的答數。
- * * *
6. 有截面積 810 圓密爾的銅線一哩，求它的電阻。
 7. 第 1 號錳鎳銅齊線 80 呎，它的電阻是多少？(查閱上冊附錄中的銅線表)
 8. 鉗接於一隻電熱器的伏特計，讀數是 110 伏特，而串接於此器的安培計，它的讀數是 5 安培。這電熱器的電阻是多少？
 9. 送 1 安培的電流，通過第 16 號銅線 2000 呎，需用多少電壓？
 10. 長 250 呎的銅線，它的電阻是 1.25 歐姆。(a) 這銅線是第幾號？(b) 這銅線一哩的電阻是多少？

電路

298. 【串聯電路】 將電器幾隻連接起來，如圖 17-12 所示。使電

流通過各器，次序如下：
先入安培計 A_1 ，原經電
燈 L ，稀硫酸溶液 S ，安
培計 A_2 ，小電動機 M ，
及其附裝的變阻器
(rheostat，可變的電
阻)，最後再經安培計
 A_3 ，回到開關 Z 。此時
可見燈光暗弱，電動機
祇能慢慢的轉動。不
過電燈既然發光，可知
這單線電路上正有電流通過。這電路的各部分上，通過的電流強度有沒有差別？將各安培計的讀數比較一下。

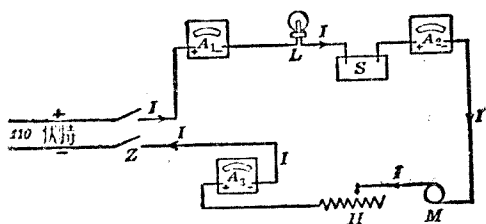
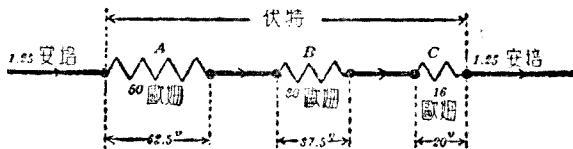


圖 17-12. 串聯電路各電器，首尾腳接

這電路的各部分上，通過的電流強度有沒有差別？將各安培計的讀數比較一下。

電器若干具魚貫相連，成爲一條單線，叫做串聯(in series)。電流在串聯電路(series circuit)上祇循一條路徑進行，故在這電路各部分上的電流都相同，決不因各部分電阻的不同而稍有強弱的差別。構成串聯電路的各部分，質料可以不同，長短粗細也可以不同。但是全電路的電阻卻等於各部分電阻的和。

舉個例來說，設有電器三具串聯：A，電阻 50 歐姆；B，電阻 30 歐姆；C，電阻 16 歐姆(圖 17-13)。則總電阻就等於三具電器電阻的和，即 $50+30+16=96$ 歐姆。

圖 17-13. 三電阻 A, B, C 串聯

若將此
三具電器接
在 120 伏特
的電源(例
如電燈線)
上，則按歐
姆定律，就
得

$$I = \frac{E}{R} = \frac{120}{96} = 1.25 \text{ 安培。}$$

299. 【歐姆定律應用於部分電路】 有一種很重要的事情，不可忘却，這就是：歐姆定律不但可以應用於全電路，而且可

以應用於電路的任何一部分。換句話說，在電路某一部分通過的電流，即等於跨過該部分的電壓^{*}為該部分的電阻所除。

例如要找前例中跨過電阻 50 歐姆的電壓，則因電流是 1.25 安培，所以得

$$E = IR = 1.25 \times 50 = 62.5 \text{ 伏特.}$$

又，跨過電阻 30 歐姆的電壓是

$$E = IR = 1.25 \times 30 = 37.5 \text{ 伏特.}$$

跨過電阻 16 歐姆的電壓是

$$E = IR = 1.25 \times 16 = 20 \text{ 伏特.}$$

總電壓就是這三個分電壓的和，即

$$62.5 + 37.5 + 20 = 120 \text{ 伏特.}$$

串聯電路所遵守的定律如下：

電流，在串聯電路上處處相同。

電阻，屬於串聯諸電器全體的，等於各器的電阻之和。

電壓，跨過串聯諸電器全體的，等於跨過各器的電壓之和。

又因電壓等於電阻乘電流 ($E = IR$)，而電流 (I) 在串聯電路的各部分上都相同，所以跨過串聯電路任何部分的電壓，正比例於該部分的電阻。

300. 【並聯電路】 現在我們再另照圖 17-14 所示，構成分枝的電路。

安培計 A_1 所測定的是全部電流；安培計 A_2 所測定的是通過電燈 L 的電流；安培計 A_3 所測定的是通過電動機 M 和可變電阻 H 的電流。三安培計的讀數，一望而知其各不相同，但安培計 A_1 的讀數，卻等於 A_2 與 A_3 的讀數和。

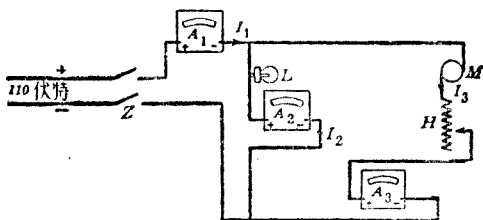


圖 17-14. 分枝的電路

電器兩具或兩具以上，相並而連結，以致電流在其中分道通過，叫做**並聯** (in parallel)。

* 跨過一段電路例如 ab 的電壓，即 a 點與 b 點的電位差。

如圖 17-15 所示，有兩導線並聯，其電阻是 4 歐姆與 6 歐姆。介於兩個公共端點(A 與 B)之間的電壓，是 12 伏特。應用歐姆定律，我們可以求得，通過 4 歐姆導線的電流是 $\frac{12}{4} = 3$ 安培，

通過 6 歐姆導線的電流是 $\frac{12}{6} = 2$ 安培。由此可見較

大的電流 3 安培，通過較小的電阻 4 歐姆。又，通過並聯兩導線的總電流，是 $2 + 3 = 5$ 安培。所以應用歐姆定律，即可求得並聯兩導線的「聯合電阻」(joint resistance)，即 A 點 B 點間電路的總電阻。A 與 B 間的電壓是 12 伏特，而電流是 5 安培，所以電阻必定是

$$R = \frac{E}{I} = \frac{12}{5} = 2.4 \text{ 歐姆。}$$

因此可知：並聯二導線的聯合電阻小於任一導線的電阻。其實這不過是一個特例。就通例來說，A 與 B 間電流通過的路徑愈多，則此二點間的電阻愈小。設有三條導線並聯，它們的聯合電阻就比兩條並聯時更小。

在並聯電路上，通過各導線的電流，與各導線的電阻成反比例。用式子表示，就是

$$R_1 : R_2 = I_2 : I_1.$$

水面高低不同的兩隻水槽，用幾根導管連接，情形正與分岐電路相仿。在一定時間之內，流過兩根導管的水，顯然比流經一根導管的多，流過三根導管的當然更多。故若在這兩個水槽間添裝導管，則節制全部水流的阻礙，就可以減少。

301. 【並聯電路的電阻】要找並聯電路的聯合電阻，可以先求每一支路上的電流。其次，將這些電流加起來，求得總電流。最後，拿這總電流除那跨過並聯電路的電壓。倘然電壓不

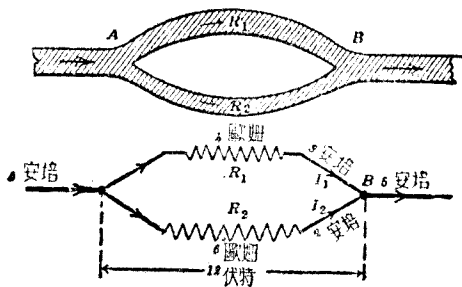


圖 17-15.

兩導線並聯(下)很像兩導管並聯(上)

知道，可以假定它是一伏特。

舉個例來說，假定有並聯的三個電阻 L 、 M 、及 N (圖 17-16)。 $L=8$ 歐姆，

$M=16$ 歐姆， $N=80$ 歐姆。跨過這一組電路的電壓，假定它是一伏特。

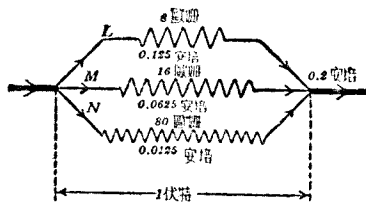


圖 17-16. 三電阻 L 、 M 、 N 並聯

從上面所開的各數，可以算出通過 L 的電流是 $\frac{1}{8}$ 即 0.125 安培，通過 M

的是 $\frac{1}{16}$ 即 0.0625 安培，通過 N 的是 $\frac{1}{80}$

即 0.0125 安培，所以總電流是 $0.125 + 0.0625 + 0.0125 = 0.2$ 安培，聯合電阻

就是 $\frac{1}{0.2} = 5$ 歐姆。

找並聯電路的電阻，還可以利用所謂電導 (conductance)。電導等於電阻的倒數，即 $1/\text{電阻}$ 。並聯電路的電導等於各支路電導的和。

例如前題，設命 R 等於聯合電阻，則可得

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{80},$$

$$\therefore R = 5 \text{ 歐姆.}$$

將上面所講的稍稍研究一下，就知道電阻相等的兩條導線並聯時，聯合電阻恰等於一條導線電阻的一半。電阻相等的三條導線並聯時，聯合電阻恰等於一條導線電阻的三分之一。三條以上照此類推。若改並聯為串聯，則兩條三條等等的聯合電阻，等於一條導線電阻的兩倍三倍等等。

並聯電路所遵守的定律如下：

電壓，跨過並聯各電阻的，都相同。

總電流，通過全部並聯電路的，等於通過各支路的電流和。

聯合電阻，屬於全部並聯電路的，等於總電流除電壓。或說，全部並聯電路的電導，等於各支路的電導和。

計 算 題

1. 設有三條導線串聯，它們的電阻是 3, 6, 及 8 歐姆，則聯合電阻是多少？

2. 若將第 1 題中的三條導線並聯，聯合電阻是多少？
3. 試用別種方法，連結第 1 題中的三條導線，並且求它們的聯合電阻。
4. (a) 200 歐姆的電燈四盞並聯，其聯合電阻是多少？(b) 若將這四盞燈接在 112 伏特的電線上，則通過四燈的電流是多少？
5. 完全相同的電燈六盞，並聯起來，聯合電阻是 30 歐姆，求每盞燈的電阻。
6. 210 歐姆的電燈一盞，同 180 歐姆的電燈一盞並聯，求聯合電阻。
7. 把 110 伏特的電壓，加在第 6 題中的並聯電路兩頭，則通過各燈的電流各有幾安培？

* * *

8. 一個並聯的電路有兩條支路，它的聯合電阻是 15 歐姆。若一條支路的電阻是 20 歐姆，則另一條支路的電阻必定是多少？

9. 有電燈三盞，並聯於 112 伏特的電線上。若每盞電燈需要電流 0.5 安培，則此三燈的聯合電阻是多少？

10. 有電器三具並聯，跨過兩端的電壓是 112 伏特，通過它們的總電流是 20.8 安培。若第一器的電阻是 10 歐姆，第二器的電阻是 20 歐姆，則第三器的電阻是多少？

11. 假定圖 17-13 中的三電阻 A , B , 及 C 是 20, 10, 及 5 歐姆，並假定電流是 4 安培。求 (a) 跨過各個電阻的電壓，(b) 總電壓。

12. 有 55 歐姆電燈一盞，30 歐姆電燈一盞，以及 15 歐姆線圈一個串聯。跨過 30 歐姆電燈的電壓是 120 伏特。

求——

- (a) 通過二燈及線圈的電流。
- (b) 跨過 55 歐姆電燈的電壓。
- (c) 總電壓。

13. 三電阻串聯，一個是 30 歐姆，一個是 40 歐姆，第三個不知道。用安培計測得通過它們的電流是 2.5 安培。電路兩端的電壓是 225 伏特。

求——

- (a) 未知的電阻。
- (b) 跨過 30 歐姆的電壓。
- (c) 跨過 40 歐姆的電壓。

電池的聯法

302. 【串聯的電池】 不但外電路上的各個電阻可以串聯，就是電池或發電器本身也可以串聯起來。如圖 17-17 所示，便是串聯的三個電池。第三號電池的碳棒（即正極）與第二號電池的鋅筒（即負極）連接；第二號電池的碳棒與第一號電池的鋅筒連接；外電路上的電流從第一號電池的碳棒流出。這電流

通過外電阻 R 後，回到第三號電池的鋅筒。由此可知電流是順次通過各電池的。

若用伏特計測一個電池，則見電動勢大約是 1.5 伏特；測串聯的兩個電池，電動勢是 3 伏特左右；測串聯的三個電池，電動勢大約是 4.5 伏特。所以我們知道，一組串聯的電池，它的電動勢是各電池的電動勢和。

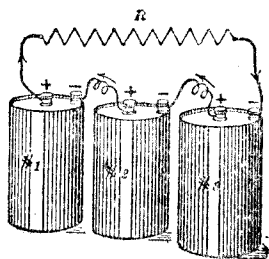


圖 17-17. 三電池串聯

圖 17-18 所示，乃是用水來比喻三個串聯的電池，圖中抽水機代表電池。

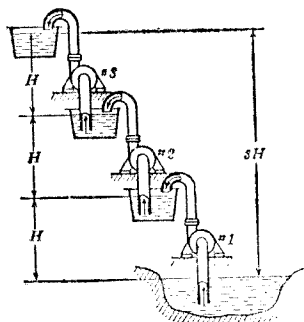


圖 17-18.

用水比喻串聯的三電池

串聯電池組的內電阻，當然是各電池內電阻的和，正與任何串聯電路的內電阻相同。

303. 【並聯的電池】 兩個或兩個以上的電池，無論照什麼方法連結起來，都叫做電池組 (battery)。將電池或發電器連結，有時以並聯為有利。如圖 17-19 所示，便是三個電池並聯而成的電池組。所謂並聯，是

將所有的正端鈕 (碳棒) 連在一起，並將所有的負端鈕 (鋅筒) 也連在一起。若用伏特計測此電池組的電動勢，則見並聯電池組的電動勢同於一個電池的電動勢。圖 17-20 所示，乃是用水來比喻三個並聯的電池。

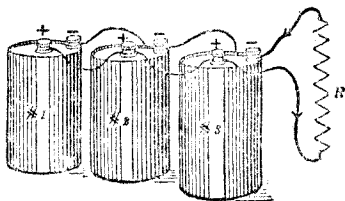


圖 17-19. 三電池並聯

並聯電池組的內電阻，正與其他任何並聯電路的電阻相同，等於電池個數除一個電池的電阻。

例如有電池三個並聯，每一個電池的電動勢是 1.5 伏特，內電阻是 0.12 歐姆。問通過外電阻 0.26 歐姆的電流是多少？

這電池組的內電阻是 $\frac{0.12}{3} = 0.04$ 歐姆。

總電阻是內電阻與外電阻的和，即 $0.26 + 0.04 = 0.3$ 歐姆。從歐姆定律*，通過外電阻的電流是 $\frac{1.5}{0.3} = 5$ 安培。

於是每一電池中的電流是 5 安培的三分之一，或 1.67 安培。

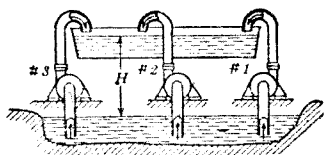


圖 17-20.

用水比喻並聯的三電池

304. 【電池的混合聯法】 設有乾電池六個，那麼除了全體串聯及全體並聯外，還有兩個聯法。第一法是每三個電池串聯成一排，共得兩排，再將這兩排並聯，如圖 17-21 A 所示。

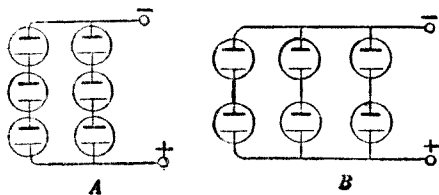


圖 17-21. 六電池連結成一組。

A, 3 個串聯成一排, 2 排並聯; E, 2 個串聯成一排, 3 排並聯

第二法是每兩個電池串聯成一排，共得三排，再將這三排並聯，如圖 17-21 B 所示。

從任何式樣的電池組發出來，而在已知外電阻上通過的電流，若欲知其大小，可以按照下列各步手續來推求：第一步，求總電壓，這就是，每一電池的

伏特數乘每排串聯的電池數。第二步，求內電阻，這就是，一個電池的內電阻，用每排串聯電池數乘，再用並聯的排數除。第三步，求總電阻，這就是外電阻與內電阻的和。最後一步，應用歐姆定律求電流，這就是，用總電阻除總電壓。

用式子表示如下：

$$I = \frac{nE}{\frac{nr}{m} + R} = \frac{mnE}{nr + mR},$$

* 歐姆定律應用於電池及外電阻所成的電路時，應當寫成

$$E = I(R+r)$$

式中 E 是電池的電動勢， I 是通過外電阻的（亦就是從電池出來的）電流， R 是外電阻， r 是電池的內電阻。

式中 m 是並聯的排數, n 是每排串聯電池數, E 是每一電池的電動勢, R 是外電阻。
在式子中, 若令 $m=1$, 則得

$$I = \frac{nE}{nr + R}$$

這就是單純串聯電池的電流公式。

又若令 $n=1$, 則得

$$I = \frac{E}{\frac{r}{m} + R}$$

這就是單純並聯電池的電流公式。

就單純串聯的電池組而論*, 設 I_0 是一個電池透過外電阻 R 的電流, 則

$$I_0 = \frac{E}{r + R}$$

於是可得

$$\frac{I}{I_0} = \frac{nE}{nr + R} \times \frac{r + R}{E} = \frac{nr + nR}{nr + R}$$

即

$$I = I_0 \cdot \frac{nr + nR}{nr + R}; \quad (\text{A})$$

當外電阻比內電阻大得很多時, 此式可以寫成

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot n \cdot \frac{R + r}{R + nr} \\ &= I_0 \cdot n \cdot \left[1 - \frac{(n-1)r}{R + nr} \right] \\ &= I_0 \cdot n \cdot \left[1 - \frac{\frac{n-1}{R} r}{\frac{r}{n} + n} \right]. \end{aligned}$$

把這個式子考察一下, 可見 $\frac{R}{r}$ 的比值愈大時, 即 R 愈大時 (r 是電池的內電阻, 不可變), 分數 $\frac{\frac{n-1}{R} r}{\frac{r}{n} + n}$ 愈小, 即 $1 - \frac{\frac{n-1}{R} r}{\frac{r}{n} + n}$ 愈近於 1, 也就是 I 愈近於 I_0 的 n 倍。

當外電阻 R 之值極大極大的時候, I 差不多是 I_0 的 n 倍。

若外電阻比內電阻小得多, 則可將 (A) 式寫成

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot \left[1 + \frac{(n-1)R}{nr + R} \right] \\ &= I_0 \cdot \left(1 + \frac{1 - \frac{1}{n}}{\frac{1}{n} + \frac{r}{R}} \right) \end{aligned}$$

* 電池組透過已知外電阻的電流大小問題, 若欲提及, 似應稍加解釋, 茲特增添一段。惟教者儘可斟酌情形, 索性刪去不講。

把這個式子考察一下，可見 $\frac{r}{R}$ 的比值愈大時，即 R 愈小時，分數 $\frac{1 - \frac{1}{n}}{\frac{1}{n} + \frac{r}{R}}$ 愈小，

即 $1 + \frac{1 - \frac{1}{n}}{\frac{1}{n} + \frac{r}{R}}$ 愈近於 1，也就是 I 愈近於 I_0 。當外電阻 R 之值極小極小的時候，

I 差不多等於 I_0 。

就單純的並聯電池組而論，用同樣的推理方法，可知：

當外電阻 R 之值極大極大時， I 差不多是 I_0 的 n 倍。當外電阻 R 之值極小極小時， I 差不多等於 I_0 。

單純的串聯電池組送過外電阻的電流，其情形恰同單純的並聯電池組相反。外電阻比內電阻大得多時，串聯可以多送電流通過外電阻。外電阻比內電阻小得多時，並聯可以多送電流通過外電阻。

計 算 題

1. 有蓄電池十二個，每一個的電動勢是 2 伏特，電阻是 0.006 歐姆。現在將它們聯成一個電池組，(a) 得到最大的電動勢時，(b) 得到最小的內電阻時，全電池組的電動勢與電阻各是多少？

* * *

2. 第 304 節開端所說的六個電池，依照四種聯法而成的四個不同的電池組，所能送過外電阻 10 歐姆的電流，各是多少？假定每個電池的電動勢是 1.5 伏特，內電阻是 0.12 歐姆。

3. 第 2 題中的外電阻若是 0.1 歐姆，則送過的電流各是多少？

4. 有鐵道臥車一輛，車中所用的蓄電池組，由 2 伏特蓄電池 16 個串聯而成，每一個蓄電池的內電阻是 0.008 歐姆。全車裝有並聯的 60 歐姆電燈 30 盞，向輸送電流的普線電阻一共是 0.5 歐姆。當電燈全部開亮時，有多少電流 (a) 從這電池組流出去？(b) 通過每一盞電燈？

305. 【乾電池的內部構造】 近幾年來，凡是需要斷續電流的電器，例如電鈴，電話，信號裝置，電筒，以及氣機中的發火電路等等，差不多已經專用一種電池，所謂‘乾電池’便是。這種電池（圖 17-22）的陰極是一個鋅製的圓筒，這圓筒同時又是安放電池其他各部分的容器。陽極是一條碳棒，直立在筒的中央，這碳棒可以做成圓柱形，也可以在它的四周刻上幾道槽。鋅筒的

內壁襯一層紙柏板或吸水紙，其中吸飽了鹼砂 (sal ammoniac, 即氯化銨, 有些像食鹽而並非食鹽) 與氯化鋅的水溶液。襯壁與碳棒之間的空隙, 填滿了一種糊, 這糊是將碳粒和二氧化錳放在氯化銨水溶液中浸潤而成的。這糊狀的混合物填到離鋅筒口不滿一吋而止, 上面通常再加蓋一層瀝青, 把口封住。鋅筒外壁往往敷一層漆, 再套上一隻恰可配合的厚紙筒。這種電池中的氯化銨溶液, 其作用相當於第 283 節中所述簡單電池中的稀硫酸。

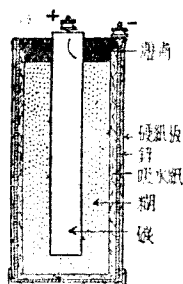


圖 17-22.
乾電池的剖面

306. 【乾電池中的極化】 昔時早已發見, 若用導線連結簡單電池的兩極, 成功一條通路, 則電流不但不能永久維持其一定的強度, 而且很快地愈來愈弱。這種效應, 叫做極化 (polarization), 它的原因, 早經發見, 乃是陽極板上積集氣體一層所致, 這氣體通常是氫。這一層氣體產生之後, 電池的內電阻就要增加, 而且還有反向的電動勢產生, 所以電流很快的趨於衰弱。乾電池內加入二氧化錳, 它的功用即在於減除電池的極化作用。不過乾電池組在不用電流時, 仍應立即截斷其通路。

307. 【電池的端電壓】 設將伏特計接在一隻乾電池的兩個端鈕上, 則見電池兩端的電壓大約是 1.5 伏特, 這與乾電池的電動勢很相近。設將高電阻 (1000 歐姆) 的線圈 (coil, 繞成螺旋彈簧狀的導線) 連在電池兩端上, 再用伏特計量它的兩端電位差或端電壓 (terminal voltage), 則伏特計上的讀數差不多與前相同。但若將粗而短的導線連結電池兩端 (連成短路), 使大量電流從電池流出, 則用伏特計跨接後量得的端電壓, 即大大的減低。

由此實驗, 顯然可知一個電池在送出電流時, 它的端電壓小於它的電動勢 (即電路不通時兩端的電位差)。這是不難了解的, 祇要我們記得, 使電流通過電池的內電阻, 是也需要電壓的; 正和電流通過外電阻需要電壓一樣。

例如有乾電池一個，它的電動勢是 1.50 伏特，內電阻是 0.07 歐姆，問這電池發出電流 5 安培時，它的端電壓是多少？

依照歐姆定律，設 E 是電動勢， I 是電流， R 是外電阻， r 是內電阻，則

$$E = IR + Ir,$$

即 電動勢 = 端電壓 + 送電流過內電阻的電壓

$$Ir = 5 \times 0.07$$

$$= 0.35 \text{ 伏特.}$$

故 端電壓 = 電動勢 - 送電流過內電阻的電壓

$$= 1.5 - 0.35$$

$$= 1.15 \text{ 伏特.}$$

若電流是 10 安培，則端電壓是 $1.5 - 10 \times 0.07 = 0.8$ 伏特。

一個電池的電動勢，其一部分必須常常用在送電流通過電池的內電阻，因此，使電池的內電阻儘量減低，乃是製造電池時一件要緊的事。供給強大電流的電池 尤其應該如此。就完全電路而論，歐姆定律中的所謂電動勢，實在指的是斷路電壓 (open-circuit voltage)，即電路不通時電池兩端的電位差。

308. 【線路上的壓降】 剛纔我們已經知道，電池或電池組的端電壓，常小於它的電動勢，因為送電流通過電池或電池組的內電阻，也需要電壓之故。同理，電流從發電機沿着線路送到很遠的地方備用時，線路上接得電流的一端，電壓常小於發電機的電壓。這線路上的壓降 (voltage drop)，等於電流乘線路的電阻 (IR)。室內線路上的壓降，通常不應當超過百分之二。

取 75 瓦特電燈四盞，並聯起來，如圖 17-23 所示。每兩燈之間接一條銀鍍齊

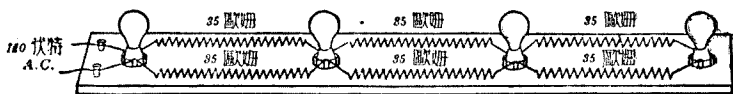


圖 17-23. 線路上的壓降看電阻和電流而定

線 (18 號，此線長約三米，繞成頗緊密的螺旋圈，可以節省些地位。將 110 伏特的電壓加在這並聯電路的頭上，然後比較各燈的明暗程度。末了一盞燈最暗，什麼緣故？ 現在若從最近電流通入處的一頭起，將電燈一盞一盞拿掉，則末了一燈的亮度有什麼改變？什麼緣故？改用小燈，怎樣？改用大燈，又怎樣？

已知電線的長短與粗細，及其上所輸送的電流，我們就可以計算電線上的壓降。

譬如說，有第 4 號銅線 1500 呎，輸送電流 40 安培，則線上的壓降可以計算如下：

查銅線表(見上冊附錄)，第 4 號銅線 1000 呎的電阻是 0.248 歐姆。所以 1500 呎的電阻是 1.5×0.248 即 0.372 歐姆。壓降 $E = IR = 40 \times 0.372 = 14.9$ 伏特。

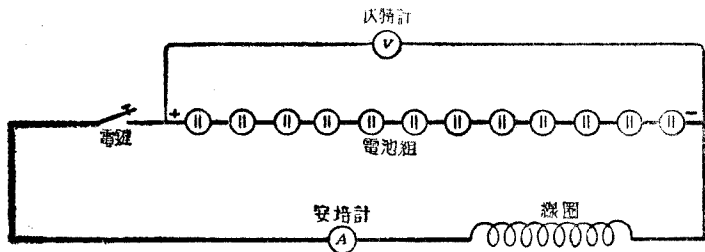


圖 17-24. (a) 電池組和 (b) 線圈的電阻各是多少？

又設將電流 15 安培送過銅線 5000 呎，壓降祇可有 12 伏特(圖 17-24)。問須用第幾號銅線？

由歐姆定律計算電阻：

$$R = \frac{E}{I} = \frac{12}{15} = 0.8 \text{ 歐姆.}$$

於是可知合此條件的銅線，每 1000 呎的電阻是 $\frac{0.8}{5} = 0.16$ 歐姆。查銅線表，有這樣大的電阻的銅線，介於第 2 號與第 3 號之間。所以我們應當用比較粗些的(為什麼?)即第 2 號。

問答題與計算題

1. 導線三條串聯，它們的電阻分別是 6, 18, 及 24 歐姆。(a) 送電流 2 安培通過電路，須要多少電壓？(b) 在各電阻上的壓降是多少？

2. 電線的電阻是 0.025 歐姆，所送電流是 1000 安培，問線上的壓降是多少？

3. 長 4 哩，直徑 0.325 吋的銅線，輸送電流 100 安培，問‘線降’(live drop)是多少？線降就是壓降。

4. 第 292 節後面的第 8 題中，曾說一個人因為有 0.15 安培的電流通過他的身體而死。但是一個新的乾電池，可以發出 25 安培的電流，若將手與它的兩個端鈕接觸，毫無傷害。這是什麼緣故？

5. 新的乾電池一個，用伏特計測得它的電動勢是 1.5 伏特。再用電阻很小可以不計的安培計，測得它的電流是 30 安培。(a) 求內電阻。(b) 隔了幾個星期

之後，又用同法測得 1.5 伏特與 5.0 安培。求內電阻。(c) 爲什麼電壓沒有改變？

6. (a) 一個電池的電動勢同它的端電壓，有什麼區別？(b) 哪一個大些，爲什麼大些？

* * *

7. 有乾電池一個，它的電動勢是 1.5 伏特，內電阻是 0.14 歐姆。若外電阻也是 0.14 歐姆，則 (a) 電池內的壓降，與外電路上的壓降，比較起來哪一個大？(b) 端電壓是多少？

8. 有 6 伏特蓄電池組一個，它的內電阻是 0.03 歐姆。這電池組送電流通過外電阻 0.02 歐姆時，(a) 電池組中的壓降是多少？(b) 外電路上的壓降是多少？(c) 端電壓是多少？

9. 第 8 題中的外電阻，若比內電阻大得很多，譬如說是 11.97 歐姆，則 (a) 電池組中的壓降是多少？(b) 外電路上的壓降是多少？(c) 端電壓是多少？

10. 圖 17-24 所示的電路，有電池組，電鍵，線圈，伏特計，以及安培計各一件。電鍵按下時，儀器上的讀數是 15 伏特與 1.5 安培。電路截斷時，伏特計上的讀數是 18 伏特。求線圈及電池組的電阻。

第十七章提要

電流在外電路上，是從+到-的(電子流的方向相反)。

電流在電池或發電機內，是從-到+的。

電流的單位是安培。相當於每秒幾加侖的水。

電阻的單位是歐姆。相當於導管內的摩擦。

電動勢的單位是伏特。相當於水頭。

歐姆定律：

$$\text{電流} = \frac{\text{電動勢}}{\text{電阻}}$$

可適用於整個電路或一部分電路。

應用於整個電路時，外電阻及電池的內電阻都得算進去。

安培計——低電阻——串聯於電路——全部電流通過。

伏特計——高電阻——並聯於電路——很微小的電流通過。

導線的電阻 = $\frac{\text{電阻係數(每密爾呎歐姆數)} \times \text{長度(呎數)}}{\text{直徑的平方(圓密爾數)}}$

電阻串聯時——

電流處處相同。

聯合電阻是各部分電阻的和。

電壓跨過全部組合的，是跨過各部分的電壓和。

電阻並聯時——

電壓跨過各電阻的都相等。

總電流通過全部組合的，是通過各部分的電流和。

聯合電阻等於總電流除電壓。或說，全部組合的電導等於各部分的電導和。

$$\text{電導} = \frac{1}{\text{電阻}}.$$

電池串聯時——

電動勢是各電池電動勢的和。

內電阻是各電池內電阻的和。

電流通過外電路的，與通過每一電池的都相同。

電池並聯時——

電動勢同於每一電池的電動勢。

電阻屬於 n 個並聯的同樣電池的，是任一個電池內阻的 $\frac{1}{n}$ 。

電流從每一電池發出來的，是通過外電路的電流的 $\frac{1}{n}$ 。

電池電能，來自溶液對鋅的化學作用。鋅好比電池的燃料。

電池的電動勢 = 電池的全部‘抽水作用’ = 斷路電壓。

端電壓比電動勢小，它們的差就是使電流通過內電阻所需的電壓。

線路上的壓降等於電流乘線路的電阻 (IR)。

問 答 題

1. 導線的電阻看四個因子而定，這四個因子是什麼？
2. 伏特計與安培計，外表是大致相同的。若將伏特計看錯了當做安培計用，而同一盞電燈串聯，如圖 17-6 所示，則有什麼結果？

- 將安培計跨接於高壓電路，那是很危險的。什麼緣故？
- 若將標明 110-120 伏特字樣的電熨斗，(a) 接在 2:0 伏特的線路上，(b) 接在 50 伏特的線路上，那麼會有什麼結果？
- 汽車上的開動電動機 (starting motor)，有時從 6 伏特蓄電池取用電流 165 安培之多。問蓄電池與開動機的聯合電阻是多少？
- 300 歐姆電話聽筒一隻，須用 1.5 伏特的電壓。問其中通過的電流是多少？
- 具有‘鎳鎳銅齊’所有各性質的合金，有什麼用處？
- 截面積相同的銅線及鉛線各一條，有相同的電阻。(a) 哪一條線長些？(b) 長幾倍？
- 試將乾電池中所用各質料的名稱說出來，並敘述每一種質料的功用。
- 乾電池外面的硬紙套，除可刊登廣告外，還有沒有別的用處？
- 真正乾燥的乾電池為什麼無用？
- 檢查乾電池，寧可用安培計而不用伏特計，這是什麼緣故？
- (a) 乾電池的電動勢看什麼而定？(b) 它的內電阻看什麼而定？
- 乾電池六個串聯，若外電阻很小很小，則所可送過外電阻的電流，比一個電池所送的多不了多少。什麼緣故？
- 乾電池六個並聯，若外電阻很大很大，則所可送過外電阻的電流，比一個電池所送的多不了多少。什麼緣故？
- 幾個電阻並聯，它們的聯合電阻比其中最小的電阻更小。什麼道理？
- 幾條導線並聯，它們的聯合電阻為什麼永不能等於各導線電阻的平均值？
- 住宅內的電燈是並聯的。若多開幾盞，則 (a) 總電流有什麼更改？(b) 總電阻有什麼更改？
- 將圖 17-25 重畫，表示怎樣連接安培計 A 與伏特計 V，以求電燈 L 的電阻。

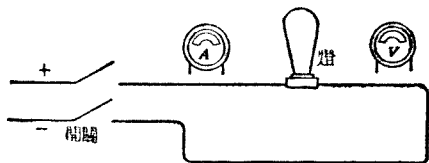


圖 17-25. A 與 V 應當接在什麼地方？

複習問答題與計算題

第十五章

- 若在小試管中裝半管鐵屑，則 (a) 怎樣可使它磁化，並使 N 極在管底一端？(b) 怎樣可用羅盤針來證明，這半管鐵屑已經這樣的磁化？(c) 怎樣可以除去它的磁性？(d) 怎樣證明它已經去磁？
- 條形磁體熱到高溫度時，便失去磁性。什麼緣故？
- 用條形磁體摩擦鋼片，可使鋼片磁化，但條形磁體並不失去磁性。什麼緣故？
- 測量師在世界多數地方，非校正他們的羅盤上的讀數不可，這是什麼道理？
- 何謂磁子午線？

6. 一手持軟鐵棒，使它指磁子午線的方向，一手拿木頭一塊，在軟鐵棒的一頭連敲幾次，就可以使這棒磁化。(a)說明理由。(b)怎樣可以使它去磁？

7. 水盆裏浮着一個軟木塞，軟木塞上平放着一個小磁體。若在北半球上做這個實驗，軟木塞和磁體要向水盆靠北的邊緣移動否？你有什麼見解，什麼理由？

8. ‘磁性飽和’(magnetic saturation)是什麼意思？

第十六章

1. 一隻驗電器帶有陰電，拿一條棒靠近這驗電器的頂，若鋁箔(a)更向外張開，(b)向內收攏，則對於此棒，所可指示的是什麼？

2. 根據原子說，物體(a)帶陰電時，(b)帶陽電時，是在什麼狀況之中？

3. 用絲線兩條懸掛的水平鐵棒，怎樣可以暫時(a)由感應使它磁化？(b)由感應使它帶電？畫兩個圖來表示。(c)在每一種情形之下，鐵棒內部會有什麼事情發生？

4. (a)用起電盤使來頓瓶帶電，方法怎樣？(b)怎樣可使它放電？

5. 高大的樹木遭受雷擊，有時樹皮完全剝光，但樹幹仍屹然直立。怎樣會弄成這個樣子的？

6. 增加容電器的電容，有三個方法。是什麼方法？

7. 容電器實際上有什麼作用？

8. 將指關節靠近大機器上疾轉的皮帶，有時可引起數吋長的火花。發生火花的原因是什麼？

第十七章

1. 長一哩重一磅的銅線，它的電阻是 850 歐姆。另外一條銅線也重一磅，但是長祇有半哩。問這第二條銅線的電阻是多少？

2. 電燈花線長 500 呎，用 27 號細銅線 10 支絞成，外面包有絕緣材料。求(a)每一支細銅線的電阻，(b)全部花線的電阻。

3. 110 伏特 6 安培的電熱器一隻，要換用新線圈。(a)這線圈必須有多少電阻？(b)若鎳鎢齊線的電阻係數，在紅熱時是 700，則用 18 號鎳鎢齊線，應長多少？

4. 某發電機輸送電流的線兩條，各長 2 哩，它們的電阻不可以超過 5 歐姆。(a)這線的截面積應該是多少圓密爾？(b)可用的線，最細是幾號？

5. 用伏特計與安培計，求一隻電鈴的電阻，下述四種連結伏特計的方法，哪一種是對的？

(1) 同電鈴串聯。

(2) 同電池串聯。

(3) 跨接在電鈴的兩端。

(4) 跨接在電池的兩端。

6. 求第 5 題中電鈴的電阻時，安培計的接法，在上述四種之中，哪一種是對的？

7. 弧光燈十盞，串聯在電阻 5 歐姆的線路上，每盞需用電流 14 安培，每盞(通電流時)的電阻是 6 歐姆。求此電路上所需使燈發光的電壓。

8. 電燈兩盞，它們的電阻分別是 220 與 330 歐姆。若將兩燈接在 110 伏特的線路上，則 (a) 串聯時，(b) 並聯時，每燈及總線上通過的電流各是多少？

9. 有 110 伏特三用電爐一隻，內裝等電阻線圈兩枚。兩線圈串聯時，通過的電流是 1.5 安培。(a) 求各線圈的電阻。(b) 並聯時，通過的電流是多少？(c) 第三種使用方法是怎樣的？此時通過的電流是多少？

10. 某電路有支路兩條，分別輸送電流 4 安培與 6 安培。若第一支路的電阻是 4 歐姆，則 (a) 第二支路的電阻是多少？(b) 兩支路的聯合電阻是多少？

11. 某電路有支路兩條，第一條的電阻是 3 歐姆，有電流 12 安培通過，第二條的電阻是 18 歐姆。求 (a) 跨過兩支路公共端點的電壓，(b) 第二支路上通過的電流，(c) 兩支路的聯合電阻。

12. 有 4 歐姆，8 歐姆，及 12 歐姆的線圈各一個，怎樣連結起來，可使它們的聯合電阻是 11 歐姆？畫一個圖表示聯法。

13. 長一哩的電線，有電流 5 安培通過時，壓降不可以超過 10 伏特。問應該用第幾號線？

14. 下面所舉的各物，哪幾種在乾電池中不可不用，缺少了就要不發生電流：鋅，氯化鐵溶液，吸水紙，鐵粒，二氧化錳，碳棒，瀝青？

15. 有 1.5 伏特與 0.2 歐姆的乾電池兩個，串聯後，送電流通過並聯的兩線圈，它們的電阻分別是 4 歐姆與 6 歐姆。求 (a) 二線圈的聯合電阻，(b) 電池組發出的電流，(c) 通過各線圈的電流。

第十八章

電流的效應

309. 【電流的效應】 我們已經講過，所謂電流，只是流動的電子罷了。電子雖從未有人見過，關於電流的知識，卻已積聚得不少，這些知識的獲得，都由於電流效應(effect)的研究。譬如說，我們都熟悉，尋常電燈泡中的燈絲，在發光時入白熾狀態，這便是電流的熱效應；又都見過，電鈴發聲時，敲鈴的錘在振動着，這便是電流的磁效應；又都知道，使電流通過加有酸的水，水即分解成爲氫和氧，這便是電流的化學效應；又都知道，開動汽車引擎所用的電動機，能有機械力發出來，這便是電流的機械效應。

用平常的6伏特蓄電池組一組，送電流通過小電燈泡 L ，電磁體 M 及簡單電解器 E (圖18-1)，就可顯示電流的這些效應。

從這些效應的一種或數種，便可檢查導體上有無電流通過。電流的方向，雖不能從熱效應來決定，但從化學效應或磁效應，即可予以決定，這在本章後半段中，就要講到。電流的強度，可用任何一種效應來測定，但以用磁效應爲最便。

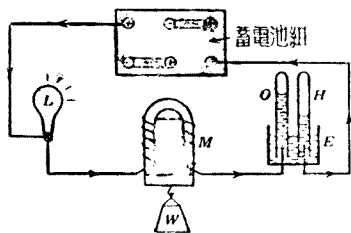


圖 18-1. 電流的各種效應：熱效應，磁效應，化學效應

電流的磁效應

310. 【奧斯特的發見】 一八一九年，丹麥物理學家奧斯特(Oersted)發見，將連結電池兩極的導線放在羅盤針的上方，當

電流從南到北的時候(圖 18-2),磁針的指北極向西偏轉。若將導線放在羅盤針的下方,則磁針的指北極向東偏轉。這發見,引起當時科學家最大的興趣,因這是磁電間有聯繫的第一個證據。

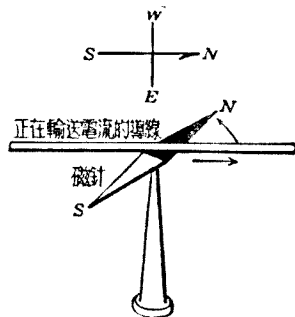


圖 18-2. 磁針上方銅線內的電流使磁針偏轉

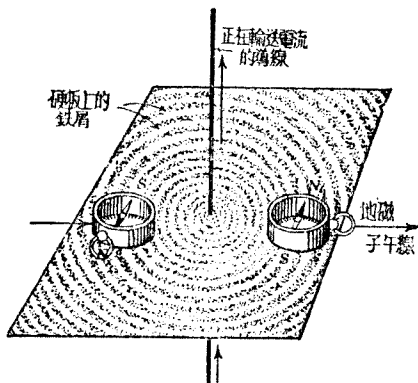


圖 18-3. 電流四周的磁力線

311. 【電流周圍的磁場】 羅盤針的 *N* 極(指北極)是指着磁力線的方向的(第 257 節),因此,從奧斯特氏的實驗,我們知道當電流通過導線時,顯然有一個磁場產生,同導線垂直。

欲使此事明瞭,我們可以做下面的實驗。取導線一條,將它穿過一塊厚紙板,並使它在鉛直方向之內。板上勻布鐵屑一層,然後用蓄電池組在短時間內送強電流通過這導線,電流方向從下到上。當電流正在導線上通過時,輕敲紙板,板上鐵屑便自行排成許多同心圓,圍繞着導線。這些同心圓所指示的,便是電流周圍的磁場中磁力線分布的情況。將小羅盤放在這板上種種地位,可見磁力線的方向,如圖 18-3 所示。

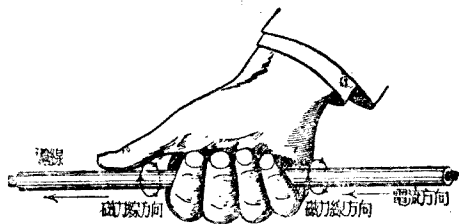


圖 18-4. 握指定則,適用於導線周圍的磁場

有所謂姆指定則(thumb rule)者,可以幫助我們記住,輸送電流的單根直導線,它的周圍的磁力線指什麼方向:右手握導線(圖 18-4),伸直姆指指

電流的方向，其他四指蜷曲於導線的周圍，指磁場的（即磁力線的）方向。

倘若已知導線附近的磁場方向，那麼應用這個定則，就可以求得電流的方向。

312. 【線圈周圍的磁場】 有電流通過的導線，倘若彎成一個環，那麼所有的磁力線都從環的一面進去，而從環的另一面出來。又若將幾個環啣接起來，成一個線圈，那麼所有的磁力線差不多全部貫通整個線圈，而從線圈外面回到原處，好像一條‘首尾連接的鏈’。

(1) 我們可以把一條銅線來回穿過一塊紙板或賽璐珞板，繞成一個寬鬆的線圈，然後將鐵屑勻布在光滑的表面上，來證明上面所說的話。當強電流通過這線圈的時候，我們輕敲紙板，就可以看見鐵屑自行排列整齊，指示板上磁力線的分布情況（圖 18-5）。再用小羅盤檢驗，就可以知道板上磁力線的一般的方向。此外還可以看到，在每一環與紙板相交兩點的周圍，都有環狀磁力線幾條，出入於相鄰兩匝之間。這些乃是漏出線圈外面來的磁力線。

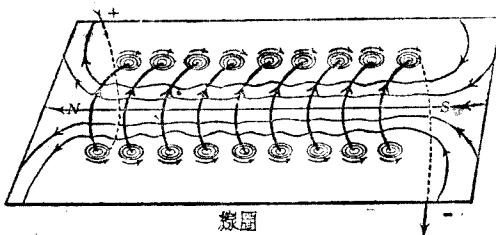


圖 18-5. 開線圈四周的磁場

(2) 我們再取絕緣銅線一條，繞成緊密的線圈，而送電流通過這線圈。此時使它接近一枚羅盤針，就看見它有條形磁鐵的作用。倘若改變電流的方向，這線圈的兩極（N 極與 S 極）也互相交換。

3 再將軟鐵心插入線圈之中，然後使電流通過線圈，我們就看見這軟鐵心具有很強大的磁力，能夠吸引鐵屑鐵片。但是電流一斷，軟鐵心差不多立刻失去它的磁性。這樣的配置叫做電磁體（electromagnet）。

(4) 若將強大電流通過巨型電磁體或電磁起重機（圖 18-6），我們就可以顯示電磁體能夠發出驚人的大力。

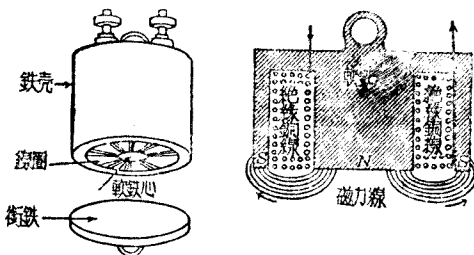


圖 18-6. 電磁起重機罐型

線圈中的軟鐵心，它的導磁係數比空氣高得多，所以同一電流通過同一線圈，有軟鐵心的時候所生的磁力線，比沒有軟鐵心的時候增加到幾千倍。

313. 【電磁體】 剛纔我們已經知道，軟鐵心周圍繞着一個線圈，就叫做電磁體。電磁體的用途非常廣大，但是廣大的原因，並不在於它有強大的引力，卻在於它的磁性可以隨意加以控制。這樣的一種磁體，祇在電流通過線圈的時候，方纔是一個磁體，電流一斷，軟鐵心差不多恢復它的天然狀態。不過磁性的損失並非絕對完全，還有少許剩磁(residual magnetism)，留存在裏邊，留存的期間，長短不定。

凡是用電的器械，差不多都有電磁體，成為它們的一部分。電鈴，電報，電話，發電機以及電動機，就是通常所見的例子。

欲決定電磁體的極性(polarity)，祇要應用前面所說適用於直導線的拇指定則(第311節)。

線圈的拇指定則：用右手握住線圈，蜷曲的四指指電流的方向，拇指伸直指線圈的N極(圖18-7)。

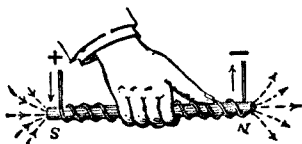


圖 18-7. 拇指定則，可示電流通過線圈時線圈的極性

電磁體的強度(strength)，依電流(安培數)與線圈匝數相乘之積而正變(即成正比例)。換句話說，就是看線圈的安培匝數(ampere turns)而定。

爲了使電磁體的兩極都可以利用到起見，軟鐵心與線圈常常彎成馬蹄形。

電磁體的應用

314. 【舉重磁體】 一八三一年，英國人法拉第(Faraday)與美國人亨利(Joseph Henry)，初次造成實用的電磁體。亨利是美國有名的科學家，又是著名的教授。他在製造實用電磁體

的時候，正擔任着美國紐約州阿爾巴尼 (Albany) 學院的講席。他所造的電磁體，能夠舉起本身五十倍的重量。電磁體有這樣強大舉重力量，在當時已算是了不得的了。

現在所造的電磁起重機(圖 18-8)，它的舉重力量比亨利所造的大得多。使軟鐵心的極面與鋼或鐵的型鑄物接觸，而將電流開通，極面每方吋就可以舉起 100 到 208 磅的重量。電流一斷，它就將所舉之物立刻放掉。

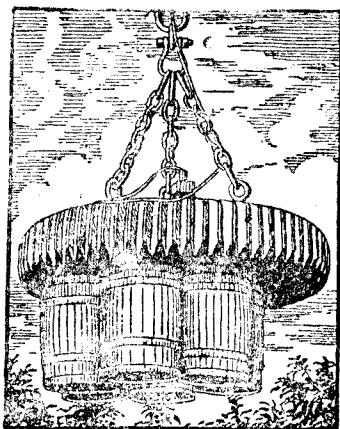


圖 18-8. 電磁起重機舉起許多桶鐵釘

315. 【電鈴】 電鈴的電路(圖 18-9)，除鈴的全部構造以外，通常包括電池組一組，由兩個或兩個以上的電池組成者(或降壓器一具，見第 374 節)，按鈕一個，以及導線幾條。將按鈕

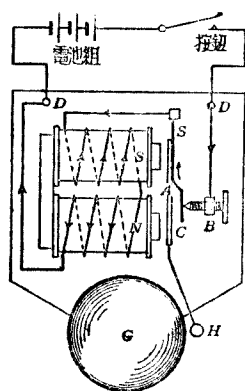


圖 18-9. 電鈴概示圖

鈕壓下去，接通電路，電流便流過電磁體 NS ，使它吸引銜鐵 A 。當銜鐵 A 向左侧擺過去時，彈簧 C 即被拉而與螺釘接觸點 B 分離，電路因此被截斷。於是電流停止，而電磁體即將銜鐵放鬆。彈簧 S 就把銜鐵拉回去， C 再與 B 接觸，電路又通。此後全部過程，再重復進行，循環不息。銜鐵上附有一鏈 H ，所以當銜鐵左右擺動時， H 鏈即很快的連連敲打 G 鈴，發出一串的聲音來。

316. 【電報】 在英文中電報(telegraph)一字的原意，乃是一種能在‘遠

地書寫’的儀器。一八四四年，莫爾斯(Samuel F. B. Morse) 最初發明這種儀器時，他的設計是教這儀器能在一張移動的紙條上，印出或點或劃的符號，以傳音訊。英文 telegraph 一名的由來，便在於此。時至今日，收報機已不用紙條，改用所謂發聲器(sounder)，該器可以連續發出滴答之聲，每兩聲相隔的時間，或短或長，代表點與劃。換言之，接收電報，已經用耳代目了。

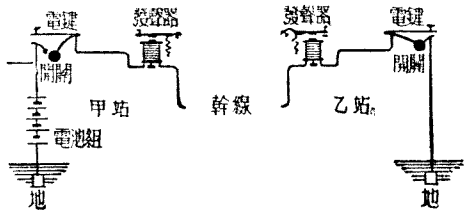


圖 18-10. 簡單電報電路

簡單的電報電路，有電池組一組，電鍵一個，以及發聲器一隻，如圖 18-10 所示，電報收發機中所用的電池，通常是蓄電池，但在實驗室內，用隨便什麼電池都可以。

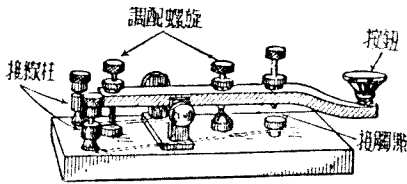


圖 18-11. 電鍵(發報用)

使電路急速斷續的裝置，頗有些像普通的按鈕(圖 18-11)。至於發聲器(圖 18-12)，則由電磁體一個，與固着在金屬棒上的一塊銜鐵構成。這金屬棒放在一個支樞(pivot)上，故可上下轉動。電流通過電磁體時，銜鐵被拉向下；電流斷時，彈簧推棒，使它再向上轉。棒的上下各有

電鍵(key)是一種可

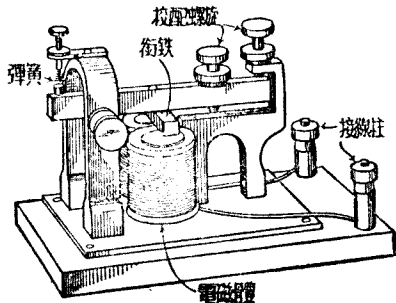


圖 18-12. 發聲器(收報用)

螺釘一枚，將棒夾住，限制它的運動，而滴答之聲，亦從棒與螺釘相撞而來。棒與上下螺釘相撞時，所發兩音是不同的，所以人耳能夠予以辨別，而知滴答兩聲相隔的時間，所代表的是一點還是一劃。這兩聲相隔時間的短長，與電鍵按下的時間，互相符合。

電報剛剛在商業方面應用的時候，就發見一件事情，即連結兩地收發機的線路，它的電阻很大，以致電流太弱，雖然將許多電池串聯起來，也不足以使發聲器發聲。所以改用本地電池組使發聲器發聲，並添裝所謂替續器 (relay, 亦稱繼電器，見圖 18-13)，專司本地電池組電路的斷續。這替續器中有一個電磁體，它的線圈匝數很多很多，所用的銅線非常之細。在這電磁體的前面，有一塊非常之輕的銜鐵，被一條極細軟的彈簧拉住，與電磁體相離。替續器與發聲器

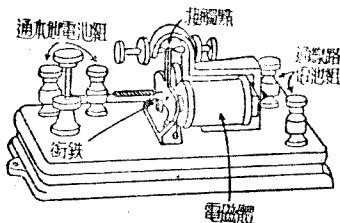


圖 18-13. 替續器(收報用)

連接的電路，如圖 18-14 所示。發報處的電鍵揷下去時，微弱電流即激發替續器中的電磁鐵，使它足以吸引銜鐵，同一枚螺釘接觸，於是本地電路通連，而有強電流在發聲器中通過。

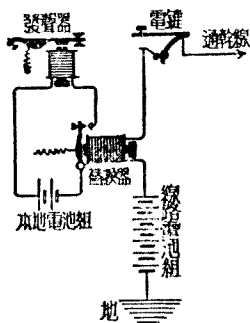


圖 18-14

電報替續器電路

現代商用电報線路，它的收發兩頭都有一隻同打字機相仿的機器。發報員在這一頭發報，好比用打字機打字，那一頭的收報機收到電訊後，便將它自動打在一張紙條上。我們平時所見黏在電報箋上的，就是這種紙條。不過這種機器的構造是太複雜了，在本書裏面不能敘述。

317. 【達松發爾電流計】 測定或檢驗微弱電流的儀器，叫做電流計 (galvanometer)、現代電流計，通常用可動線圈 (movable coil) 一枚及固定磁體 (fixed magnet) 一個製成。這種電流計叫做達松發爾電流計 (d'Arsonval galvanometer)。

如圖 18-15 所示，就是簡單的達松發爾電流計。它的永久磁體變成 U 字形，N 同 S 兩極之間有空隙隔開。它的線圈，是用非常細的絕緣銅線，繞在一極輕的長方形金屬框子上而成的。這金屬框子用金屬線或金屬帶吊住，可以在永久磁體的兩極 N 與 S 之間轉動。這可動金屬框的內部

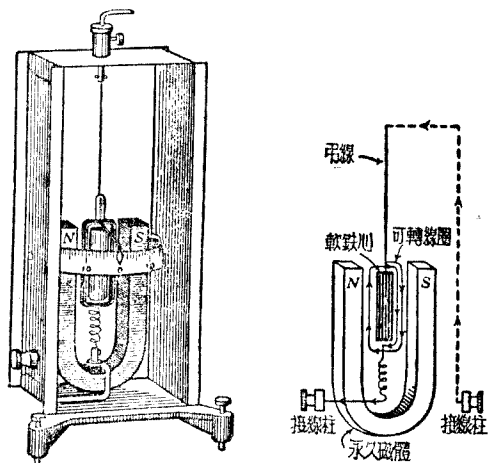


圖 18-15. 達松發爾電流計，示主要部分

空隙處，有一個固定的軟鐵圓柱，將磁力線集中，成扇狀，使線圈在轉動時受到均勻的磁力。當電流在線圈中通過時，線圈便成一微小的磁體，而有轉動的傾向，要使它兩極，儘量接近固定磁體的異名兩極。但金屬框的下端附有彈簧，所以扭轉到某程度時，即因彈簧的彈性而停住。扭轉的角度是看電流的大小而定的。從指針在刻度尺上所示的讀數，便可測定電流的大小。

318. 【安培計】 商用的安培計，就是一種加有分路的圈轉電流計 (shunted moving-coil galvanometer)。這種電流計，攜帶起來，非常方便。它的可動線圈，不用金屬線吊住，而是裝在蹄形強磁體兩極間的寶石軸承上的。電流的出入線圈，經

由極細的螺旋形彈簧。待測定的電流，祇有很小一部分，大約是千分之一，流過線圈，其餘大部分電流，從一條金屬片通過，這條金屬片就是所謂分路(shunt, 圖 18-16)。因為流過線圈的電流，是全部電流的幾分之幾，這幾分之幾是一定的，所以附在可動線圈上的指針，可以使它在刻度尺上，直接指示全部電流的安培數。

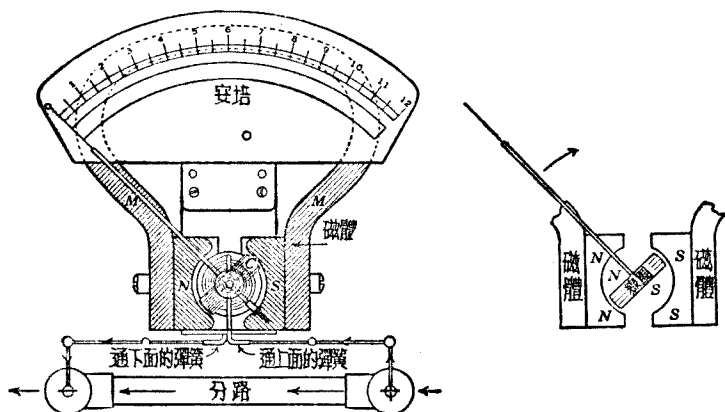


圖 18-16. 安培計，加有分路的電流計

我們不難知道，安培計的電阻差不多就是分路的電阻，它的數值是很小的。

319. 【伏特計】

商用的伏特計(圖 18-17)，不過是一個電阻很高很高的電流計罷了。將電壓加在伏特計上，通過伏特計的電流是與電壓成正比例的。所以刻度尺上的讀數，可以直接指示伏特數。

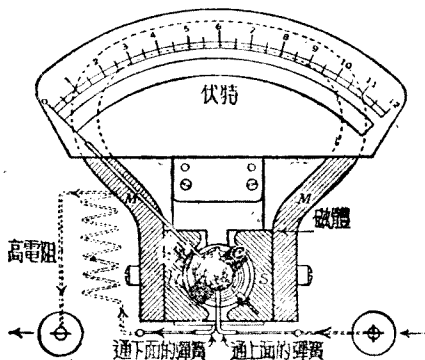


圖 18-17. 伏特計，有高電阻的電流計

這個原理，用水來比喻，如圖 18-18 所示，就可以明白。從圖一望而知，導管 AB 接通 L 與 L' 時，務必使 AB 中的水流很小很小，不至於改變兩器中的水位差到可察的程度，我們纔可以從水流的強度，測得待測的兩器中原來的水位差，而得相當可靠的數值。

伏特計通常也是圈轉電流計，它的可動線圈上串聯着一個高電阻線圈，因此，流過伏特計的乃是很小很小的電流，不過全部都通過可動線圈。其實此種伏特計，祇在所用電流很小，不至於影響待測電壓到可察程度時，纔可指示大致準確的數值。

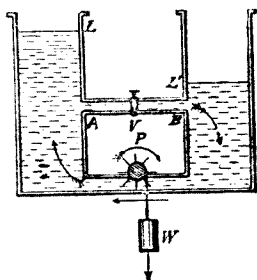


圖 18-18. 用水比喻伏特計

要用同一伏特計測定大小範圍不同的電壓，祇消在伏特計上串聯一個適當的高電阻線圈，便行。

問 答 題

1. 拿着羅盤，站在南北向電車的高架電線下面，若見磁針的 N 極偏東，則線上的電流有什麼方向？
2. 電磁體的吸引力太弱時，用什麼方法加強它？
3. 舉重電磁體的鐵心，常用軟鐵而不用鋼。軟鐵勝過鋼的優點是什麼？
4. 圖 18-19 乃是一隻電鈴一隻按鈕的接線概示圖。試仿照此圖，作下述各圖，但電池組祇用一組，並要盡量節省導線：
 - (1) 一隻按鈕通兩隻電鈴。
 - (2) 兩隻按鈕通一隻電鈴。
 - (3) 兩室中各有按鈕與電鈴一隻，欲此室中的按鈕，彼室中的電鈴就發聲。
5. 一個線圈有線 70 匝，通過它的電流是 3 安培；另外一個線圈有線 50 匝，通過它的電流是 4 安培。問哪一個線圈的磁力大些？

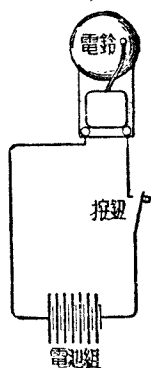


圖 18-19.
簡單的電鈴電路

電流的化學效應

320. 【溶液的電解】 電流通過銅線時，銅線就發熱，而

且它的周圍有一個磁場產生,除此以外,並無其他任何改變。電流通過食鹽的水溶液時,溶液也發熱,周圍也有一個磁場產生;但同時兼起分解作用。例如在一定的某種情形之下,電流通過鹽水時,便將鹽水分解為苛性鈉,氫,以及氯。不過液體也有不導電的;例如酒精與火油便是。電流通過能導電的液體,而使它多少分解一些,這種過程叫做電解 (electrolysis), 這液體就叫做電解液 (electrolyte)。

如圖 18-20 所示,乃是一種簡單的電解器。待試驗的液體放在玻璃瓶中,液體內插入兩條金屬絲或兩條碳棒,其中一棒與一盞電燈串聯。全部裝置可以接在平常的電燈線路上,或接在蓄電池組上。電燈倘若發光,受試驗的液體便是電解液。我們可以把稀硫酸,氫氧化鈉,食鹽,以及糖的水溶液,再把火油與蒸餾水,拿來做實驗。這些受試驗的液體,哪幾種是電解液?

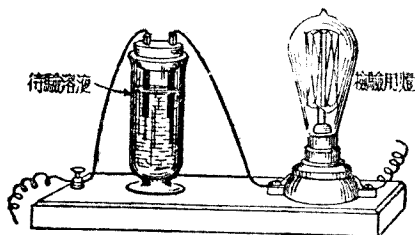


圖 18-20. 檢驗溶液的導電性

關於這些實驗,現代的學說有一個假定,這就是說,電解液之所以能夠導電,那是因為液體中含有所謂離子 (ion) 的緣故。離子是帶有陽電或陰電的原子或原子羣。例如在稀硫酸裏面,硫酸分子 H_2SO_4 分離成 2 個陽離子 (2H^+) 及 1 個陰離子 (SO_4^{--})。離子 SO_4^{--} 所帶的電荷,相當於離子 H^+ 所帶的兩倍。分子在溶液中分離為離子的過程,叫做電離 (ionization)。離子在溶液中有輸電的功用。

321. 【氯化氫的電解】 電解乃是電流的化學效應,我們可用氯化氫 HCl 的溶液做實驗來說明它(圖 18-21)。這溶液裏面含有氫離子 (H^+) 以及氯離子 (Cl^-)。我們把碳棒兩條,放在溶液裏,當做電極用。一極同電流源的正端鈕連接,叫做陽 (+) 極 (anode); 還有一極同電流源的負端鈕連接,叫做陰 (-) 極

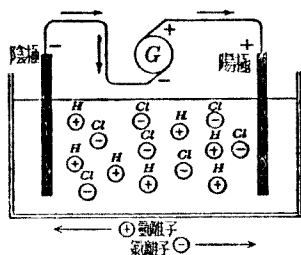


圖 18-21. 鹽酸電解概示圖

學變化發生，一種在陽極，一種在陰極。

322. 【水的電解】

水(加上少許硫酸),可以在圖 18-22 所示的儀器

裏面,很方便地用電流使它分解。用爲電極的兩塊鉚板,同一組電池組或一具發電機相連,電壓至少須有 10 伏特。A 管中的電極是陽極,同電流源的正(+)端鈕連接; B 管中的電極是陰極,同電流源的負(-)端鈕連接。電流通過溶液,從陽極到陰極(電池內的情形

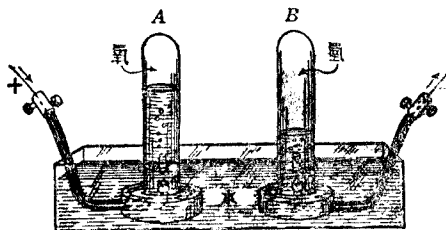


圖 18-22. 水的電解

與此相反)。電流一通,就可以看見小氣泡從兩個電極的附近昇上來。在 B 管中積聚的氣體,它的體積是 A 管中的兩倍。B 管儲氣已滿時,我們就把電流截斷,而將兩管中的氣體查驗一下。查驗 B 管中的氣體時,我們把點着的火柴很小心地放近管口。這氣體立即自行燃燒起來,火燄是紫藍色的,由此可知它是氫。又將燃紅的松木梗,伸入 A 管,立即發生火燄,由此可知它是氧。

從這個實驗我們知道,加有少許硫酸的水,被電流分解成爲氫與氧。水是不良的導電體,所以要加一些酸在裏邊。但在實驗完畢之後,若將剩餘的溶液分析一下,即將見加進去的酸絲毫沒有短少。現在讓我們來說一說,這過程是怎樣進行的。

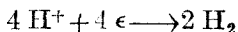
323. 【電解的理論】

水的電解,可以用下面的理論來解釋:

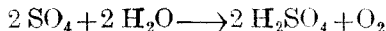
小量硫酸 (H_2SO_4) 加入水中後,每個硫酸分子就分離爲兩

(cathode)。當電壓加在這兩極上的時候,離子即被吸引到相反的電極上去。這就是說,氫離子(H^+)趨向陰極(-),而氯離子則趨向陽極(+)。在陰極,每個氫離子獲得一個電子而成爲氫原子。在陽極,每個氯離子送掉一個電子,成爲氯原子。這樣,就有兩種化學

個陽離子 (2H^+) 同一個陰離子 (SO_4^{--})。當電流通過溶液時，陽離子 (H^+) 便向陰極移動，而陰離子 (SO_4^{--}) 則向陽極移動。在陰極，陽離子 (H^+) 獲得電子後又變為平常的氫，成氣泡而昇出水面：



式中 ϵ 代表電子。在陽極，陰離子 (SO_4^{--}) 送掉兩個電子，同時與水 (H_2O) 起作用，再成硫酸 (H_2SO_4)，而讓氧 (O_2) 逸出液面：



這樣一來，加在水中藉以導電的硫酸並沒有少掉分毫，而兩個分子的水 ($2\text{H}_2\text{O}$) 卻被分解為兩個分子的氫 (2H_2) 和一個分子的氧 (O_2)。

324. 【電解在工業上的用途】 電解的過程在工業上用得很廣，它的用途計有(1)在金屬表面上電鍍一薄層好看或經用的別種金屬，(2)製造印刷用的電鑄版，(3)精煉各種金屬，以及(4)製造化學藥品。

(1) 電鍍的方法可用下面的實驗來說明：

我們將碳板兩塊(或碳棒兩條)，插入盛有硫酸銅 (CuSO_4) 溶液的瓶中，如圖 18-23 所示。再將這兩塊碳板，连接到一組 6 伏特蓄電池組，或其他電流源的兩端鈕上。在陰極 (-) 板上，可有一層什麼東西鍍了上去？在陽極 (+) 板上，可有什麼變化發生？倒轉電流的方向，可有什麼結果？

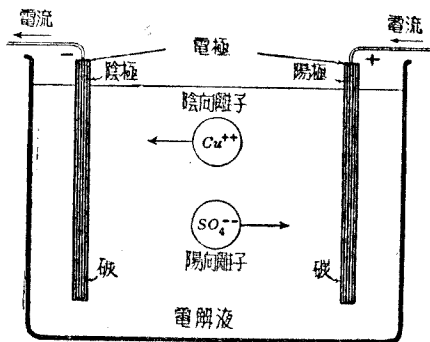


圖 18-23. 銅的電鍍

這過程同水的電解是很相像的。銅離子 (Cu^{++}) 到達陰極時，它們取得了電子，就再變為銅原子，因此就澱積在陰極碳板

上。陰離子(SO_4^{--})到達陽極時,它們失掉了電子,而同水中的兩個氫原子化合,生成硫酸(H_2SO_4),同時氧即在陽極碳板上放出來。

一般地說來,待鍍物體總是在陰極;陽極是待鍍到物體上的金屬;而溶液中非含有此種金屬的離子不可。如鍍金,所用的電解液是亞金氰化鉀〔gold potassium cyanide, $\text{K Au}(\text{CN})_2$ 〕的溶液,所用的陽極就是黃金。又如白鐵,現在也用電鍍術,將鋅鍍在鐵皮上而成。所用的電解液是硫酸鋅的溶液;陽極是鋅,陰極是鐵皮。

(2) 電鑄術 讀這本教科書的,也許有人以為這本書是用活字印出來的。其實並非如此。凡是大量出版的書籍,通常都用電鑄版(electrotype plates, 俗稱電鍍銅版)來印刷。製版的方法,先將排好的活字版,用臘做成陰文模型。再在這臘型外面塗一層石墨,使不導電的臘型成為導電體。然後把它浸在硫酸銅的溶液中,並將其連接於電流源的負端鈕,使它成為陰極。再將銅板一塊浸入液中,這就是陽極。電流通,銅就慢慢地澱積在臘型上。積到約有一張名片那麼厚的程度,就將這一層銅質薄皮,從臘型上取下來,在它的背面‘托’一塊活字金,使它有必要的強度,以供印刷之用。

(3) 精煉金屬 從鎔礦所出來的銅,它的純淨程度不高,不可以用它來製造電線及電纜這一類物品。所以必須利用電解將它精煉過,方纔可以用在電機及電器上。精煉的時候,用粗銅做陽極,用一薄片純銅做陰極;電解液是硫酸銅(圖 18-24)。因電流通過而澱積在陰極的銅,質地非常純淨。陽極的粗銅逐漸溶解掉,其中所含雜質落在電解池底,成為一堆泥狀物。在這泥狀物裏面,通常總含有金和銀,它們的價值,足以償付精煉的代價。用這個方法提得的純銅,在商業上叫做電解銅。

325. 【電化當量】 法拉第做過許多次實驗，證明一定大小的電流在一定長短的時間之內，使一定的金屬從它的溶液澱積出來，有一定的分量。這便是所謂法拉第電解定律(Faraday's law of electrolysis)。

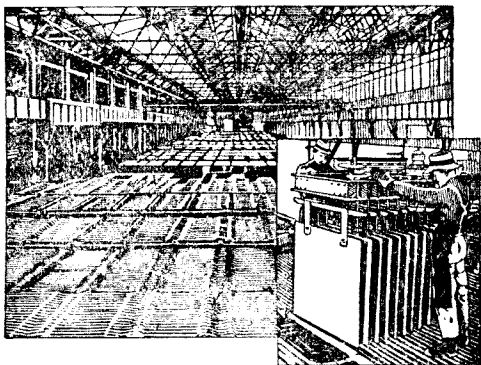


圖 18-24. 商用電解煉銅池，右下圖示提起的陰極板

這條定律非常精確，現在所知較準標準安培計所用最最準確的方法，就拿它來做根據。因電流通過溶液而澱積起來的某元素，它的分量看下列各因子而定：(1)電流的強度，(2)電流所經的時間，(3)該元素的本性。一安培的電流通過某種溶液時，某元素在每小時內從該溶液析出的澱積量，叫做該元素的電化當量(electrochemical equivalent)。

電化當量表

元 素	符 號	每安培小時澱積克數
鋁	Al	0.337
鉻	Cr	0.647
銅	Cu	1.186
金	Au	2.452
氫	H	0.0378
鎳	Ni	1.094
氧	O	0.298
銀	Ag	4.025

326. 【國際庫侖與國際安培】 電機工程師一致贊同，用

電流的化學效應，來下安培的定義。取鉛製坩鍋一隻，中盛硝酸銀 (AgNO_3) 溶液，再取銀 (Ag) 板一塊，插在這溶液內，這樣就成功一隻銀解電量計 (silver coulometer)。若將電池組的正 (+) 端鈕連接於銀板，負 (-) 端鈕連接於坩鍋，即可見銀板(陽極)因銀的溶解而逐漸失去重量，坩鍋(陰極)因有銀澱積而重量增加(圖 18-25)。由於國際的共同協定，可使銀 0.001118 克澱積的電量，叫做一庫侖；穩定不變的電流可使銀在每秒中澱積 0.001118 克的，叫做一安培。以上所述，即是國際庫侖與國際安培的定義。

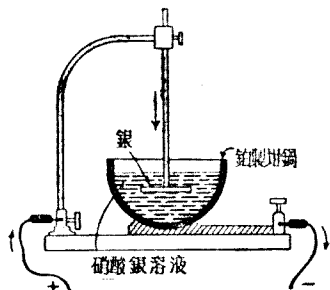


圖 18-25. 銀解電量計，可用以校準安培計的讀數

蓄電池組

327. 【何謂蓄電池組？】蓄電池組這個名詞，也許使有些人想到，蓄電池組乃是將電儲蓄起來的器具。豈知他們是完全想錯了。在一組蓄電池組裏面，正和在其他隨便什麼電池組裏面一樣，電能是從化學能轉換而來的。所謂使蓄電池組充電 (charging) 的過程，就是使電流通過某種溶液，造成某某化學物質，正和水被電解而生氫和氧的情形相仿。在放電 (discharging) 的過程中，充電時所造成的物質起化學作用，因而就產生了電流。

328. 【做一隻簡單的鉛蓄電池】在玻璃瓶中盛極稀的硫酸溶液，再插入兩塊平常的鉛板，使它們不相接觸，這樣就做成了一隻簡單的鉛蓄電池。要使這蓄電池很快的充電(或說要很快的‘造成’兩塊極板)，可將它串聯於一具 6 伏特左右的發電機

G (圖 18-26),再串聯一隻(指針可向左右移的)安培計。電流通了不多幾分鐘之後,將發電機的電路截斷,而將伏特計的兩條線接在兩塊鉛板上,就可以從伏特計的讀數,知道這鉛蓄電池的 e. m. f. 大約是 2 伏特。若將電鈴一隻,同這蓄電池及安培計串聯起來,電鈴便發聲。由此可知正有電流發生。再從安培計的指針,知道放電時的電流方向,與充電時的相反。充電以後,將兩塊鉛板拿出瓶來,可見陽極板 B 是褐色的,因為板上蓋有一層二氧化鉛 (PbO_2);陰極板 A 仍舊有平常純鉛 (Pb) 的灰白色。

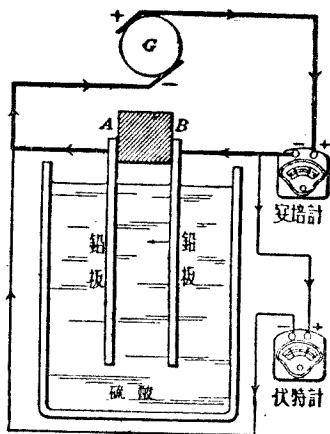
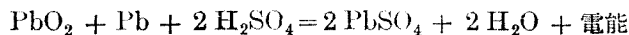


圖 18-26. 鉛蓄電池的造成

329. 【商用鉛蓄電池組】 在商用的鉛蓄電池組裏面(圖 18-27),陰極板是海綿狀的純鉛(Pb),陽極板是二氧化鉛(PbO_2),而電解液則為稀硫酸。在充電的過程中,陽極板逐漸罩上一層深褐色的二氧化鉛,陰極板逐漸變成灰白色的海綿狀。在放電的過程中,兩極的板都逐漸變到同一的狀況,即各板的表面上都罩着一層硫酸鉛($PbSO_4$)。鉛蓄電池放電與充電的化學變化,可以用一個化學方程式簡單地表示出來如下:

←— 充電



(+)板 (-)板

(+)與(-)板

放電 →

從這方程式我們立刻可以知道,在充電的過程中,硫酸的濃

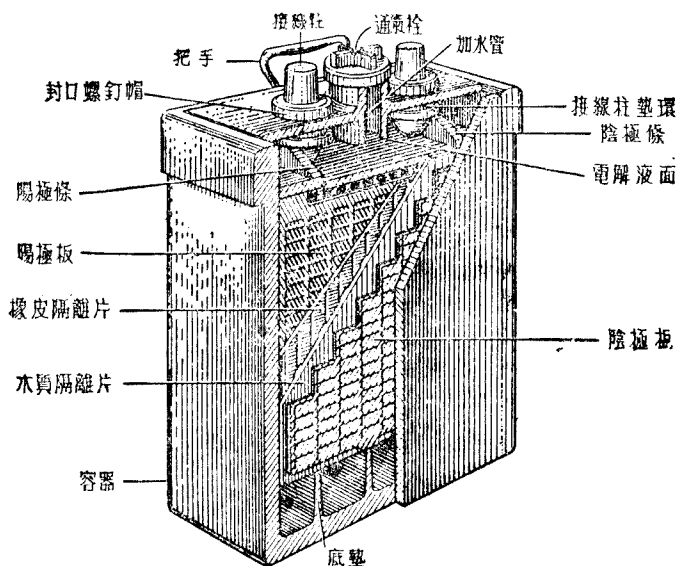


圖 18-27. 商用蓄電池組 (截去一角)

度增加；在放電的過程中，硫酸的濃度減低。所以一隻鉛蓄電池的狀況，可以從酸液的比重來推測它。商用鉛蓄電池中的板，它的製造方法有兩種。一種是先將鉛板的表面弄得很粗糙，然後使它們分別變成二氧化鉛同海綿狀鉛。還有一個方法是在板上開鑿許多小孔，孔中填滿現成的活性材料 (active material, 即二氧化鉛與海綿狀鉛的總稱)。

330. 【蓄電池組的用途】 汽車上用來開動，點燈，以及發火的蓄電池組，無疑是一般人所最熟悉的一種蓄電池組。這樣的一種蓄電池組，通常由三個鉛蓄電池 (每個 2 伏特) 串聯而成 (e.m.f. 是 6 伏特)。它的發電量大概是從 60 到 110 安培小時

(60安培小時的意思，就是10安培的穩定電流，大約可以供給6小時)。

在中央發電廠內，經常預備着很大很大的蓄電池組，以供臨時補充及臨時救急之用。潛水艇在水底潛航，全靠大型蓄電池組供給電能。列車上的電燈，也用蓄電池組來放光，這蓄電池組的充電，是由一具跟着車輪同轉的發電機來擔任的。

此外，蓄電池組還有其他許多重要的用途，例如收發無線電報與無線電話，在中央發電廠鞭長莫及的地方點電燈，在有線電話局與有線電報局中通話通報，以及在實驗室內用一定的電壓做試驗工作，以及發火災警報與信號等等，都是非用蓄電池組不可的。

331. 【檢查蓄電池組】 檢查一隻乾電池，祇要用袖珍安培計，那是一件很容易的事情。但是我們假使用同樣的方法來檢查一組蓄電池組，安培計便要立刻燒壞。這是因為蓄電池組的內電阻非常之小，有很大很大的電流在安培計的線圈中通過之故。一隻蓄電池的電動勢，大約是2伏特。然而我們應該記住，從蓄電池的斷路電壓，決不能知道它的充電及放電的情況。蓄電池的電壓，必須常常在按照正常速率充電或放電時，予以測定。充電很足的時候，電壓可以高達2.5伏特。按照正常速率放電，當端電壓降低到1.8伏特時，放電就應該停止。市上出售的蓄電池，它的發電量都用安培小時(ampere hours)來計算。這個數目，是拿穩定電流連放8小時做根據的。例如80安培小時的蓄電池組，可將10安培的穩定電流，維持8小時之久，所以10安培就是它的正常放電速率。

因為酸液的濃度在充電時增加而在放電時減低，所以決定蓄電池組的情況，通常都用比重計來測定其中電解液的比重(圖18-28)。比重的數值，是看蓄電池組的種類及其用途而定的。

就平常汽車上所用手提蓄電池組而論，電解液的比重在充電足量時，應當介於 1.27 與 1.29 之間，而在放電已盡時，應當介於 1.15 與 1.17 之間。蓄電池的製造廠，對於出品的使用及保護方法，都有詳細的說明。

計 算 題

1. 電流 5 安培通過硫酸銅溶液，經 3 小時之久，問有幾克銅濺積起來？
2. 汽車前後的護車擋 (bumper)，表面上電鍍一層鎳，所用電流是 5 安培，所經時間是 3 小時。問它的重量增加了多少？
3. 在 8 小時內濺積金 61 克，須用多少大的電流？
4. 用第 326 節中所講的方法，校準一隻安培計的讀數，在 2 小時內有銀 43.8 克濺積起來。若電流穩定不變，則安培計上的讀數應該是多少？
5. 用電流 1.5 安培將水電解，欲產生氧 5.6 克，須經過多少時間？
6. 將銅一噸精煉，若所用電流是 300 安培，則煉畢須經多少天？
7. 用電流 2.5 安培，經過 2 小時，可使鋅 0.15 克濺積。試據此以求鋅的電化當量。
8. 兩隻電鍍池串聯，一隻供鍍金之用，還有一隻供鍍銀之用。銀有 1 克濺積起來的時候，金的濺積量是多少？
9. 蓄電池組一組，它的發電量是 90 安培小時，它的正常放電率是多少？
10. 有鉛蓄電池一隻，它的電動勢是 2 伏特，它的內電阻是 0.004 歐姆。問在發出電流 25 安培的時候，它的端電壓是多少？
11. 汽車上用的 6 伏特蓄電池組一組，它的內電阻是 0.01 歐姆。現在用 20 安培的電流將它充電，須用多少大的電壓？

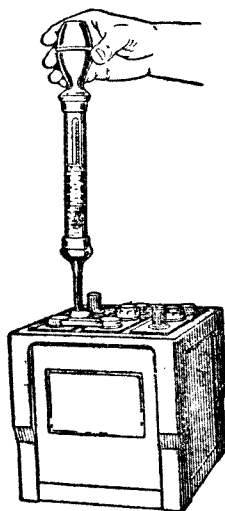


圖 18-28. 用比重計
檢驗六伏特蓄電池組

電流的熱效應

332. 【電流生熱】 我們都知道電燈泡在發光的時候是很燙的；我們都使用過或看見過電熨斗(圖 18-29)，電烤器，咖啡

電煮器，以及電熱輻射器。但是我們恐怕不會想到，電流無論多少微小，總有熱量產生。在電鈴，電報，或電話的導線上，當電流通過的時候

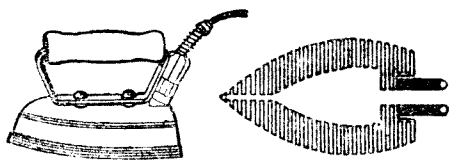


圖 18-29. 電熨斗及其發熱線圈

都有熱生出來，不過產生得很慢，隨生隨即散逸，所以我們察覺不出罷了。須知巨型發電機就因為電流有此發熱的效應，以致輸出受到限制；從發電機出來的電流倘若太大，機中的線圈就要發熱，把絕緣物質燒毀。

333. 【保險絲與斷路器】 為保護電機電器，不至於被過分大的電流燒壞起見，常常在電路中插入一種自動的安全裝置。在家用的電燈線路上或在小型電動機上，所插入的是保險絲 (fuse)；在發電廠裏面或在電車上，所插入的是斷路器 (circuit breaker)。所謂保險絲，乃是一種特殊合金做成的一段線，能夠在低溫度熔解。保險絲的粗細看所用電流的大小而定，若有過分大的電流偶然流過，它便立刻熔解，電路就立刻斷掉。保險絲通常裝在固定的瓷盒裏邊：有一種‘保險插頭’ (plug fuse)，如

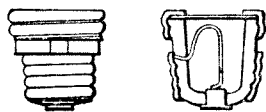


圖 18-30.

瓷質插頭中的保險絲

圖 18-30 所示，是一隻瓷製的杯子，保險絲封在杯內，這杯可以旋入燈座中，好像一隻電燈泡。保險絲熔解，俗稱‘燒斷’。

所謂斷路器，乃是一隻大型的開關，當電流太大的時候，它能自動地把電路關斷。它的主要部分是一個線圈和一個可動鐵心。通過線圈的電流，大於全部電路所能安全地負擔的數量時，鐵心即被吸入，電路因此斷掉。

電功率的計算

334. 【電功率計算法】 要計算水功率，我們必須知道水的壓力或‘水頭’，以及每分鐘流過的水量，因為

水功率 = 每分鐘流過的水量 × 水頭。

$$H. P. = \frac{\text{每分鐘磅數} \times \text{呎數}}{33000}$$

仿此，要計算電功率，我們必須拿電壓乘每秒流過的電量（即電流）：

電功率 = 電流 × 電壓。

電功率的單位是瓦特(watt)。瓦特的定義可以這樣說：使一安培的電流在一伏特的電壓下流過，所需的功率是一瓦特：

瓦特數 = 安培數 × 伏特數。

因為瓦特是很小的功率單位，所以通常用仟瓦(kw.)來表示功率，一個仟瓦 = 1000 瓦特：

$$\text{仟瓦數} = \frac{\text{安培數} \times \text{伏特數}}{1000}$$

例如有電燈一盞，從 110 伏特的線路上取用電流 0.4 安培，則其所用的電功率即是 $0.4 \times 110 = 44$ 瓦特。

又若有電熱器一隻，它的電阻是 110 歐姆，則在 550 伏特的線路上，它所用的電流是 $\frac{550}{110} = 5$ 安培。所以使這電熱器發熱，所需要的電功率是 $5 \times 550 = 2750$ 瓦特，或 2.75 kw. (仟瓦)。

不論在什麼時候，使電流通過某一電路，必須作功反抗該電路中的電阻。若消耗於某一部分電路的功，全都用在使該部分電路發熱，那麼功率就等於該部分兩端的電壓乘以流過的電流。

這就是說，

$$P (\text{瓦特數}) = E (\text{伏特數}) \times I (\text{安培數}).$$

但是依照歐姆定律，

$$E = IR,$$

因此

$$P = IR \times I$$

或

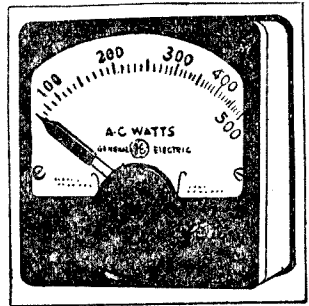
$$P = I^2 R.$$

因為功率的計算，在機械方面通常是用馬力 (h.p.) 做單位的，所以馬力與瓦特這兩種單位之間的關係，我們應當知道，以圖計算時的便利。從實驗，

$$1 \text{ 馬力} = 746 \text{ 瓦特}.$$

$$1 \text{ 仟瓦} = 1.34 \text{ 馬力 (h. p.)}.$$

335. 【電功率的測定】 要測定某一電路的電功率，我們可用瓦特計 (wattmeter)。瓦特計 (圖 18-31) 中有粗銅線繞成的固定線圈兩個，與負荷串聯。在這兩個線圈之間，裝有可動線圈 B 一個，跨接在線路上，好比一隻伏特計。固定線圈的磁場強度，與電流成正比，可動線圈的磁場強度，則與電壓成正比。因此，作用於可動線圈的轉矩，與電流電壓相乘之積成正比，即與瓦特數成正比。



336. 【電能】 功率既是每單位時間內所作的功，亦即是能的消耗率，所以功率乘時間 (即瓦特數乘時間單位數)，就等於消耗掉的全部電能或所作功的全部。

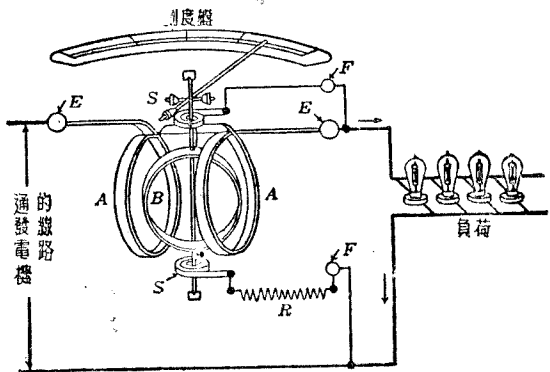


圖 18-31. 瓦特計及其概示圖

例如 15 馬力的蒸汽機作功 8 小時，它所作功的全部就是 $8 \times 15 = 120$ 馬力小時。又如發電機一具，按照 15 仟瓦的功率發電 8 小時，它所作的功或發出的電能，就是 120 仟瓦小時。

我們出的電費，就是按照仟瓦小時計算的，通俗所謂一度，就是一個仟瓦小時。假定每仟瓦小時的電費是銀幣一角，又假定某店舖有電燈 100 盞，每盞的電能消耗率是 50 瓦特，則點燈 3 小時，所應付出的電費便是

$$\frac{100 \times 3 \times 50 \times 0.10}{1000} = \$1.50 \text{ (銀幣)}.$$

在實驗室中，為便利起見，往往用較小的單位——**瓦特秒**，或稱**焦耳** (joule)。

能量(焦耳數) =

電流(安培數) \times e.m.f.(伏特數) \times 時間(秒數)

或 $W = IEt.$

焦耳與其他通用的能量，彼此的關係如下表所示：

$$1 \text{ 焦耳} = 0.102 \text{ 仟克米}.$$

$$= 0.738 \text{ 呎磅}.$$

$$= 0.238 \text{ 克卡}.$$

$$1 \text{ B.t.u.} = 1054 \text{ 焦耳}.$$

337. 【瓦特小時計】 凡是電燈或電熱的用戶，都很關心他的‘電表’上的讀數，因為他每月所接到的電費賬單，是拿這讀數做根據的。這‘電表’，在物理學上叫做**瓦特小時計** (watt-hour meter)。

如圖 18-32 所示，乃是一種叫做湯姆孫式的瓦特小時計 (Thomson's watt-hour meter)。這種瓦特小時計實在是一隻小電動機，它的可轉線圈(叫做電樞)的旋轉速率，與通過它的電能消耗率成比例，而記數盤上的指針，所記的實在就是這線圈轉過的總週數。固定線圈(叫做場線圈)與線路串聯。所以磁場強度與總線上通入此計的電流成正比例。電樞跨接在總線上，通過它的電流與總線電壓成正比例。所以使電樞旋轉的轉矩，

與電流電壓相乘之積，即與線上通過的瓦特數成正比例。

可轉線圈的軸上，裝有一片圓的鋁片，嵌在永久磁體的兩極之間。當圓片隨着線圈旋轉的時候，有稱為渦流的電流，發生於圓片之中（參閱下文節 379 節），這渦流，有阻礙圓片旋轉的傾向。這麼一來，當電流初斷時，圓片差不多立刻停止，不至於像一般機器上的飛輪一樣，憑着慣性繼續旋轉而不肯就停。所以這種裝置，增加了瓦特小時計記錄的可靠程度。

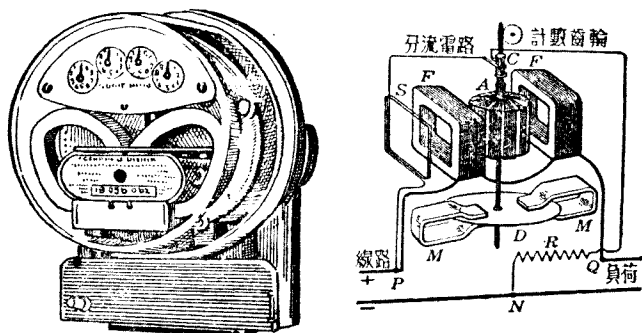


圖 18-32. 湯姆孫氏自動紀錄瓦特小時計及其概示圖

這一種式樣的瓦特小時計，在直流（方向不改變的電流）電路上以及在交流（方向交換改變的電流）電路上，都可以使用。

338. 【電流所生熱量的計算】 一隻電熨斗或電烙鐵在 t 秒內所消耗的電能，我們已經知道，是 EIt 焦耳。但是根據歐姆定律， $E = IR$ （假定在所討論的一部分電路裏面，沒有電池，發電機，或電動機），所以我們可以另寫一個式子如下：

變成熱的電能 = I^2Rt 焦耳數，

這個式子，在討論電流的熱效應時，用起來往往比較便利一些。又因從實驗已測定一焦耳約等於 0.24 卡，故得

$$H = 0.24 I^2Rt.$$

式中

 $H =$ 熱量卡數。 $I =$ 電流安培數。 $R =$ 電阻歐姆數。 $t =$ 時間秒數。

要決定電流所生的熱量，可在量熱器或卡計(calorimeter)裏面(圖 18-33)，放一個用康銅(constantan)線繞成的線圈，夾住在兩條硬銅棒之間，銅棒伸出蓋外，固定在接線柱上。將電流 I ，電壓 E ，以及時間 t 測定後，就可以決定電能的焦耳數。量熱器中的水重加上量熱器的水當量，再乘以溫度昇高的度數，即得被吸收的熱量 H (卡數)。從這兩個數目，就可以算出每一焦耳相當於多少卡。

舉個例來說，假定量熱器中的水重與量熱器水當量的和是 1079 克，溫度的升高是 10.6 攝氏度。所通過的電流是 1.2 安培，電位差是 76 伏特，而所經的時間是 523 秒。據此推算，得

$$\frac{H}{IEt} = \frac{1079 \times 10.6}{1.2 \times 76 \times 523} = 0.24$$

故知每焦耳相當於 0.24 卡。

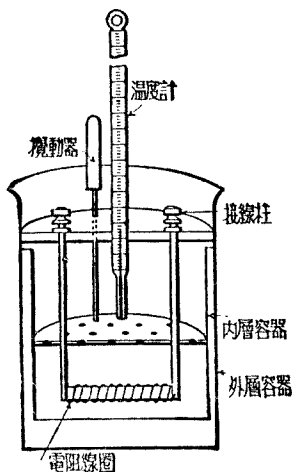


圖 18-33. 電卡計

計算題

1. 小型 112 伏特電熱器一具，需用電流 6.2 安培。問這電熱器的電能消耗率是多少？
2. 電烤器一隻，上面標明‘110 伏特，660 瓦特’。問它需用電流多少？
3. 電鉗烙鐵一具，它的電阻是 50 歐姆，接在 112 伏特的線路上，它的電能消耗率是多少瓦特？
4. 行駛電車用的發電機一座，向高架電線輸出的電流是 1500 安培，電壓是 550 伏特。問這發電機的功率是 (a) 多少仟瓦？(b) 多少馬力？
5. 有 660 瓦特電熨斗一隻，需用電流 5.8 安培。求 (a) 線路電壓，及 (b) 熨斗的電阻。

6. 某洗衣工場用電熨斗五隻，並聯於 110 伏特的線路上，每隻的電阻是 20 歐姆，問電能消耗率是多少？

7. 若第 6 題中的電熨斗，連續使用達四小時之久，則其所消耗的電能是多少仟瓦小時？

8. 電流熱水器一隻，在 112 伏特的電壓下，須用 8 安培的電流。(a) 它在半小時內消耗多少焦耳的能？(b) 它所發出的熱量是幾卡？

9. 一隻 25 瓦特的電燈泡，放光一小時，它所輻射出來散在室內的熱有多少卡？

10. 小型電烘爐一隻，它的電阻是 15 歐姆，它所需要的電壓是 115 伏特。此爐發熱兩小時，(a) 電量的消耗率是多少？(b) 電能的消耗率是多少？(c) 用去幾個仟瓦小時的能量？(d) 這能量合多少焦耳？(e) 所產生的熱量是多少卡？

11. 若電費每仟瓦小時銀幣 1 角 1 分，則第 10 題中所說的電烘爐發熱兩小時，代價多少？

12. (a) 若電費每仟瓦小時銀幣 1 角 5 分，則一盞 50 瓦特的電燈發光一小時，代價是多少？(b) 花銀幣 5 分，此燈可以點多少時候？

13. 若電費每仟瓦小時銀幣 1 角 2 分，則 3 馬力小電動機一隻，連開 5 小時，要出多少錢？

14. 電鐘一隻，每隔四分鐘用 0.8 安培的電流開一次發條，供給電流的是一組 6 伏特蓄電池組，開發條的時間是 0.5 秒。(a) 問這電鐘在一個月內用去電能多少仟瓦小時？(b) 使用此鐘，嫌太費麼？

15. 電烘爐一隻，需用電流 5 安培，電壓 110 伏特。現在用此爐熱水 1100 克，從 20°C . 熱到 60°C ., 須經多少時間？假定有 100% 效率？

16. 用 10 歐姆的線圈，要在 10 分鐘內將水 1000 克，從 15°C ., 熱到 75°C ., 問必須用電流多少？

17. 有電熱器一隻，需用電流 12 安培，電壓 115 伏特，效率是 70%。現在用此器熱水，從 10°C ., 熱到 100°C ., 問 10 分鐘內可以熱多少水？

電 燈

339. 【鎢絲燈】 現代白熾電燈裏面的燈絲 是用純鎢做成的。鎢的熔點非常之高，約在 3000°C . 以上。這纖細的金屬絲上有電流通過時，它即成爲白熾 (incandescent)。在一盞一百瓦特的電燈泡中，所用鎢絲的直徑大約祇有 3 密爾 (0.003 吋)。不過全絲很長，所以在通常的燈泡裏面，須將它曲曲折折的繞在星狀玻璃架上。電流出入燈絲，經由兩條粗而短的金屬線 (圖 18-34)，叫做引入線 (lead-in wire)。引入線用特殊的合金做

成，熔合在玻璃泡壁中，它的線脹係數同於玻璃，所以燈泡不會漏氣。引入線的一端同鎢絲鉗接，他端與銅線鉗接，再由銅線與燈泡尾部的黃銅螺旋套及金屬尾尖連結。像這種螺旋式的燈尾，在美國很是通行，可以說是標準的形式。愛迪生

(Thomas A. Edison) 在 1881 年發明的，差不多也是這種形式。



愛迪生 (Thomas A. Edison, 1847-1931) 美國發明家。發明留聲機，有聲電影，高電阻碳絲燈，以及許多實用的器具。在第一次世界大戰時，曾解決很多海軍上的問題，例如利用回聲偵察潛水艇就是

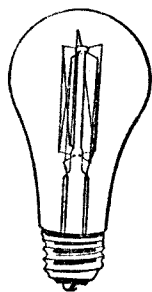


圖 18-34.
真空鎢絲燈

340. 【充氣鎢絲燈】

從前製造電燈泡的時候，常把泡內空氣儘量抽去，抽到差不多成爲完全真空的地步，因爲泡內若有空氣，可以助燃，則燈絲立刻便要燒斷。然而我們從實驗知道，在這種抽去空氣的燈泡中，燈絲常在緩緩蒸發，以致燈泡內面逐漸堆積一薄層黑黝黝的金屬，猶如鏡子一般。這麼一來，燈的發光效率當然要打一個折扣。因此，在現代的電燈泡中，都充有鈍氣，例如氮或氬。泡內有了鈍氣，燈絲的蒸發就大受阻礙，而且鎢絲的溫度比在真空泡中更可以提高。在這種充氣的燈泡中，那很長的鎢絲繞成極細的螺旋管（圖 18-35），這螺旋管裝在架上，縮攏成功一個圓弧，以免泡內氣體使它冷卻到可察的程度。

因為現代的鎢絲燈，它的燈絲發光非常之亮，容易使人看了眼睛發花，所以玻璃泡都用毛玻璃做成。這玻璃泡的內壁粗糙而外壁光滑，仍舊可以讓燈絲所發的光，差不多全部透出泡外。照耀街道的燈，在現代化的都市中，差不多都採用充氣燈，它們的發光強度（見下文第 435 節）有高達 3000 到 4000 燭光的。

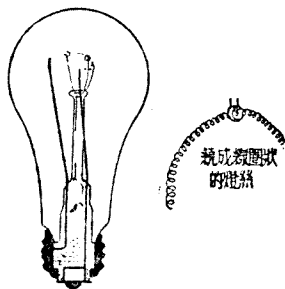


圖 18-35. 充氣鎢絲燈，燈絲繞成線圈

341. 【電弧】 一百多年以前，英國的賓維爾士 (Sir Humphry Davy) 用電池 200 隻組成電池組，在兩條木炭棒之間造成一個電弧。然而這不過是賓維在講演時所作的一個著名實驗罷了。直等到六十年之後，實用發電機已經造成時，弧光燈方纔有成爲商品的可能性。在那個時候，就已經發見以前所用的木炭，遠不如焦炭來得經久耐用。

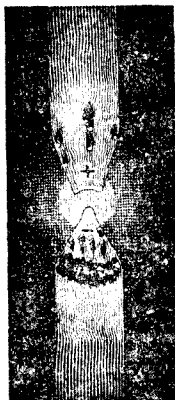


圖 18-36. 電弧燈的陽極碳棒與陰極碳棒

要知道電弧有什麼形狀，我們可將兩條碳棒連在 50 伏特以上的線路上，再向一個適當的可變電阻串聯起來。發出來的光是非常強烈的，眼睛必須用有色玻璃遮住，以免直接被強光照射。若有凸透鏡（見下文第 469 節），則可將電弧映射在屏上。若所用的電流是直流，則在通陽極的碳棒頭上生陷口，通陰極的碳棒頭上生錐狀尖端（圖 18-36）。將鐵絲放在電弧裏面，可以使它熔解，由此可見電弧所發熱量之大。

342. 【現代的弧燈與汽燈】 弧燈 (arc lamp) 中的碳棒即使用焦炭，也還是要逐漸燒掉。因此，有人就發明了自動弧燈，可使兩條碳棒慢慢相對移動，以保持兩端之

間的適當距離。最初的幾種弧燈，利用鐘錶的機構來推動碳棒，但是後來卻通用電磁體和觸接器來推動碳棒。

雖然在世界各地還用鎢絲燈代替弧燈來照耀街道，但是探照燈及影片放映燈中，仍舊有用電弧的。

在所謂汞弧燈 (mercury-arc lamp) 或汞汽燈 (mercury-vapor lamp) 裏面，所利用的乃是汞汽的發光特性。一條斜放的真空玻璃管，長 2

呎到 4 呎(圖 18-37)，它的下端置有少許水銀。使電流開始通過水銀蒸汽，須用一種特殊的裝置。不過一開始以後，電

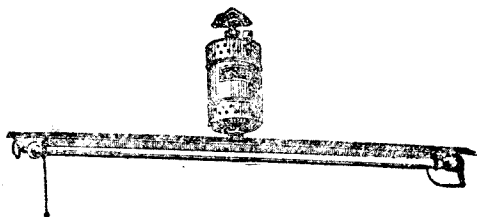


圖 18-37. 汞汽燈

流就很容易的繼續通過熱的汞汽，而使汞氣發光，這光含有綠光，

藍光，以及黃光的成分，但是紅光的成分差不多沒有。因此，物體放在汞氣燈光之下，會顯出奇特的顏色來。

有一種汞弧燈，它的管子不用玻璃而用石英做成，這種燈可供消毒殺菌之用，因為石英可以讓所謂紫外射線透過(參閱第 511 節)，而紫外射線是具有殺菌的功用的。

另外一種汞汽燈，叫做太陽燈 (sun lamp) 的(圖 18-38)，有兩個鎢製電極，靠得非常之近，而又有一條很細的鎢絲把它們連接起來。在燈泡底上，放着少許水銀。當電流一

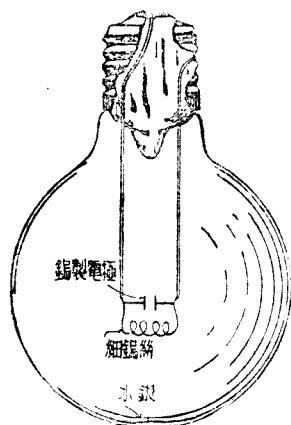


圖 18-38. 太陽燈(紫外射線燈)，水銀蒸發成汽，鎢製電極間即生電弧

通，鎢絲放光時，水銀便很快的蒸發。因為汞汽的導電比鎢絲容易，所以在兩枚鎢製電極之間，就產生一個汞汽弧，而鎢絲則停止放光。太陽燈也是紫外射線燈(ultraviolet lamp)的一種。

除水銀以外，其他金屬如鈉(sodium)，近來也被採用，以製效率較高的街燈。如圖 18-39 所示，便是鈉汽燈泡的構造。

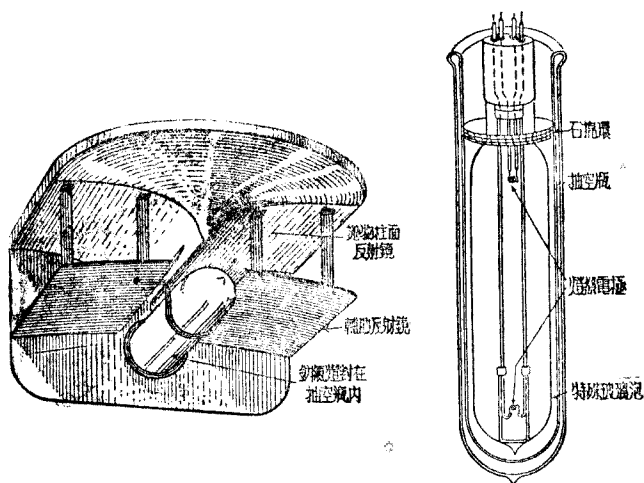


圖 18-39. 鈉汽街燈

泡中有兩個線圈狀鎢絲電極，開始造弧時，電流先通過這兩個鎢絲線圈，使它們熱到白熾程度。鎢絲所發之熱輻射到少許純鈉上，即有鈉汽布滿全泡，於是電弧造成，放出強光。泡內還有少許氬氣，可以幫助鈉汽弧的造成。因為有這氬氣的緣故，鈉汽燈先發鮮明的紅光，然後變成強烈的金黃色光。這種燈的效率，約三倍於同樣大小的普通鎢絲燈。用鈉汽燈照明公路與橋樑(圖 18-40)，似乎比用別的燈價廉而物美。

還有一種叫做氬燈(neon lamp, 俗稱霓虹燈)的燈，專供商

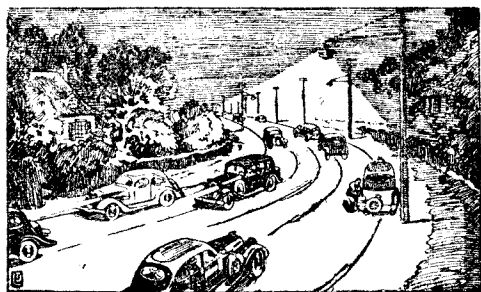


圖 18-40. 用鎢汽燈照明道路

業廣告之用。該燈的發光管內含有少許氙氣，它的壓力很小很小。所需的電壓很高，約在10000伏特左右，但是用電卻很省。這樣高的電壓，可從昇壓器(見第378

節)獲得。氙光管所發的光是鮮明的橙紅色。

343. 【電鉗與電熔爐】 從前鐵匠要把兩條鐵棒鉗接起來，必須先將待鉗的兩頭燒得通紅，然後再用鐵錘將它們敲打很多時候。現在有了電的幫忙，就不必這樣的費事了。先使待鉗的鐵棒兩端互相接觸，然後送強電流通過鐵棒。因為接觸處是電阻最高的地方，所以在這裏發生的熱量很大，溫度很快的就昇到了鉗接點。修補電車軌道以及一般的鋼鐵鉗接工程，現在都用這電鉗 (electric welding) 的方法。近來連橋樑與房屋的鋼架，也不用鉗釘而用電鉗來綴合了。

因為電弧的溫度非常高，所以在電熔爐 (electric furnace) 裏邊，常利用電弧來製造碳化鈣 (CaC_2 ，俗稱電石) 以及碳化矽 (SiC ，又稱金剛砂)。在鋼鐵工場裏面，電熔爐的用途很廣，而製造含鎢或含鉬的

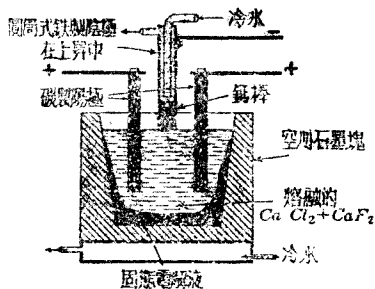


圖 18-41.

煉鈣用的電熔爐概示圖

特種鋼齊，尤須用電熔爐（圖 18-1 所示，就是提煉金屬鈣用的電熔爐）。

若將一道氫氣流，向兩個鎢製電極間的電弧中噴進去，則因溫度很高的緣故，氫分子大部分都裂開，成爲自由的氫原子。這些氫原子重行結合爲氫分子的時候，產生非常之熱的火焰，溫度高達 4000°C ，這種所謂**氫原子焰** (atomic hydrogen flame)，現已被應用於金屬的融合與銲接。

問答題與計算題

1. 一隻 600 瓦特的電熨斗，一隻 600 瓦特的電烤器，一盞 600 瓦特的電燈，在同樣長的時間之內，所發出來的熱量哪一個最多？

2. 若電費每仟瓦小時銀幣 8 分，則 50 仟瓦的電燈一盞放光 20 分鐘，代價是多少？

3. (a) 在 112 伏特的線路上，問最多可並聯幾盞 50 瓦特的電燈，而不致燒斷一 15 安培的保險絲？(b) 在某市鎮上，法定每家不可用電超過 1320 瓦特。問可以用 50 瓦特的電燈幾盞？

4. 有 110 伏特 220 歐姆的電燈五盞串聯。(a) 作一個電路概示圖，並求 (b) 發電機的端電壓，(c) 發電機送出來的電流，(d) 通過每盞電燈的電流，(e) 發電機的輸出功率。

5. 有 110 伏特 220 歐姆的電燈五盞並聯。(a) 作電路的概示圖，並求 (a) 發電機的端電壓，(b) 發電機送出來的電流，(c) 通過每盞電燈的電流，(d) 發電機的輸出功率。

6. 有 50 瓦特 110 伏特的電燈，及 25 瓦特 110 伏特的電燈各一盞，比較它們所用的電流，及燈絲的電阻，粗細以及長度。

7. 若每燭光相當於 1.05 瓦特，則 60 瓦特的電燈一盞可發幾燭光？

8. 探照燈一架，需用電流 100 安培，及電壓 60 伏特。將此燈接在 110 伏特的線路上，必須再串聯一個多少大的電阻？

* * *

9. 若第 8 題中所說探照燈的電弧，可發 128,000,000 燭光，則每瓦特可發幾燭光？

10. 電流 15 安培通過電阻 200 歐姆，歷時 20 分鐘，問作了多少功？

11. 使兩倍大的電流通過已知電阻，需要四倍大的功，爲什麼？

12. 發電機一座，效率 80%，欲用以使 115 伏特電燈 500 盞放光，每盞的電阻是 230 歐姆。問須用多少馬力運轉這發電機？

第十八章提要

磁力線在有電流通過的直導線四周成同心圓。

拇指定則適用於直導線的：用右手。拇指伸直指電流方向。四指蜷曲指磁力線方向。

磁力線在線圈周圍，大部分貫通線圈內部而由外部回到原處。

拇指定則適用於線圈的：用右手。拇指伸直指 N 極。四指蜷曲指電流方向。

電磁體的強度大部分看安培匝數而定。

安培計是低電阻的電流計，串聯於電流強度待測定的電路內。

伏特計是高電阻的電流計，跨接在電位差待測定的電路兩點上。

電解液是可以導電，且在電解過程中多少要分解一些液體。

電解液的分子在其溶液中分成帶陽電及帶陰電的原子或原子團，叫做離子。

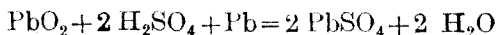
因有電流通過而生成的澱積物，它的重量 =

電化當量 \times 電流 \times 時間。

鉛蓄電池：陽極板，二氧化鉛；電解液，硫酸；陰極板，海綿狀純鉛。

充電及放電時的化學變化：

←— 充電



放電 —→

保險絲乃是短短的一段易熔合金線，串接在電路中，當超越定量的電流通過時，它便熔解而將電路截斷。

電功率 = 電流 \times 電壓。

瓦特數 = 安培數 \times 伏特數。

1 馬力 = 746 瓦特。

電能以仟瓦小時為單位 = 仟瓦特 × 小時數。

功率(用以勝過電阻者) = 電流的平方 × 電阻。

瓦特數 = (安培數)² × 歐姆數。

焦耳就是瓦特秒。

能量以焦耳為單位 = I^2Rt

熱量以卡為單位 = $0.24 I^2Rt$

白熾燈內含有很細的鎢製燈絲，這燈絲因為電流通過而呈白熾狀態。燈泡有抽空的，也有含鈍氣如氬或氮的。

問 答 題

1. 要把安培計改成伏特計，必須怎樣改造一下？
2. 將伏特計單獨連接於線路上，不比安培計那樣的容易燒壞。什麼緣故？
3. 微弱的電流可使替續器把電路接通，但不能使發聲器發聲。替續器與發聲器在構造上有什麼差別，纔會有這樣的可能性。
4. 兩隻電鈴並聯起來，比串聯起來發聲清晰一些。什麼道理？
5. 在美國，有幾處很大的發電廠可在離廠幾千里的地方將開關拉上，而使廠內發電。這樣的遠地操縱裝置，你能畫出它的草圖來麼？
6. 鉛蓄電池充電足量的時候，其中電解液的比重是多少？比重可以降低到什麼地步，不至於損壞蓄電池？
7. 蓄電池組放電後，電解液的比重為什麼降低？
8. 在已放電的蓄電池內，加些硫酸進去，把比重提高一些，這是不是一個好辦法？
9. 使蓄電池組充電時，哪一個端鈕應當接在正(+)的一條輸電線上？
10. 汽車上的6伏特蓄電池組一組(圖 18-42)，它所發出的電流，可供(a)開動器，(b)頭燈，(c)喇叭，(d)散熱器後的電扇，以及(e)無線電收音機的取用。你能設法探詢各需電流多少安培麼？

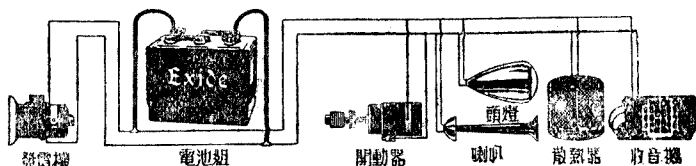


圖 18-42. 汽車上的蓄電池組，和發電機(左)充電，而將電流供給各種電器(右)

11. 爲什麼不能用一個乾電池來使一個蓄電池充電？
12. 蓄電池有幾個什麼優點勝過乾電池？
13. 用電鑄版印刷，比用平常的活字版有什麼好處？
14. 某線路，只可輸送電流 15 安培，若在這線路上串接一段 30 安培的保險絲，就很危險。什麼緣故？
15. 封在白熾燈玻璃泡中的引入線，曾經一度用鉛來製造。如今已發明了一種價廉的合金，專供製造引入線之用。問這種合金必須有什麼特性？
16. 鎢有什麼特性，使它成爲製造燈絲的好材料？
17. 電熨斗內若不裝定溫器（參閱第 178 節），則很危險。什麼緣故？
18. 在電燈泡內充氣，成本比不充氣高。爲什麼要充氣？
19. 白熾燈中的燈絲，爲什麼纏成螺旋狀？

第十九章

發電機與電動機

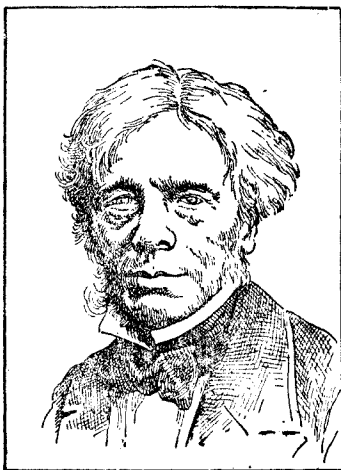
344. 【法拉第的發見】 如果我們非從電池組不能獲得一切應用的電流，那麼我們就休想用電燈來照耀街道，也休想乘坐電車。伏打電池組中的鋅，價錢是太貴了，決不能用為產生大量電流的‘燃料’。

大約一百年以前，英國的法拉第 (Faraday) 與美國的亨利 (Henry)，都發見機械能可以直接轉換為電能。他們當時所用的利用磁體產生電流的方法，就是現代商用發電機的基本原理。

345. 【發電機的重要】 法拉第與亨利的偉大發見出現了四十年之後，纔有商用發電機跟着出現。這發電機，可將蒸汽機、氣機，以及水輪機的巨額能量，轉換成巨額電能。這電能，可以輸送到幾百哩之外。電動機有了電能，可以運轉各式機器；電燈有了電能，可以發光照耀街道與住宅；電熱器有了電能，可以煖室；電熔爐有了電能，可以使鋼鐵熔解。總而言之，現代的工商業，因為發電機可以供給廉價的電能，已經起了很大的改革。

346. 【切割磁力線的導線】 要懂得發電機的基本原理，有一個很簡單的方法，即仿照法拉第的辦法，使一條導線在磁場內取切割磁力線的方向而移動，然後把所產生的所謂應電動勢 (induced e.m.f.) 研究一下。假定有直的導線 AB ，被推向下移動，在 U 字形強磁體的磁場中，將磁力線切割，如圖 19-1 所示。當 AB 正在切割磁力線之際， AB 內即產生應電動勢，這

法拉第(Michael Faraday, 1791-1867)英國物理學家兼化學家。對於實驗有純熟非常的技巧。在電磁學, 電磁感應, 以及電解方面, 均有重大的貢獻。又曾研究過氣體的液化。他是當時著名的實驗
講師



亨利 (Joseph Henry, 1797-1878) 美國物理學家。華盛頓史密生研究所 (Smithsonian Institution) 第一任幹事。在電學上有重要的研究, 而且是研究電磁體與電磁感應定律的第一個美國人。感應的單位就是爲了紀念他而稱爲亨利的

應電動勢使 B 的電位高於 A 的電位。將 A 端與 B 端連在電流計的兩端鈕上，就可以看得出來。若導線的運動停止，電流也立即停止。又若導線向上移動，則從電流計的指針地位，可知 AB 內的電流亦改取與前相反的方向。若導線

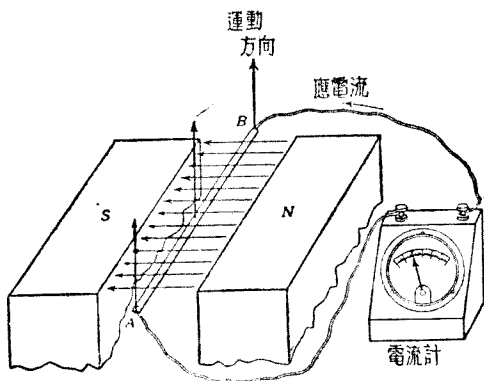


圖 19-1. 切割磁力線的導線 AB 中有應電動勢

雖動而不切割磁力線（即運動的方向與磁力線平行），則導線內也沒有所謂應電流（induced current）發生。總而言之，導線移動時必須切割磁力線，其中纔有應電動勢產生。

既然如此，則應電流的方向，就得看兩個因子而定：(a) 導線運動的方向，(b) 磁力線的方向。這三個方向之間的關係，若照弗來明 (Fleming) 氏定則，用右手三指伸成三個直角來代表，

如圖 19-2 所示，那麼就很容易將它記住。

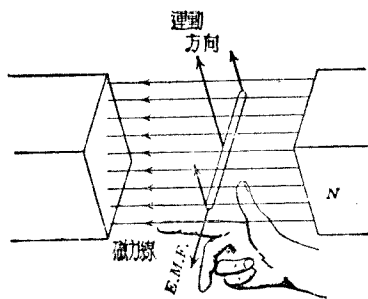


圖 19-2. 應電動勢所遵照的右手規則

弗來明右手定則 伸直右手的拇指，食指，以及中指，使每兩指間各成一個直角。若拇指 (thumb) 所指的是導線運動 (motion) 方向，而食指 (forefinger) 所指的是磁場 (field) 方向（即磁力線方

向),則中指 (middle finger) 所指的便是應電流 (induced-current) 的方向 (電流常用 i 代表)*

使線圈的一段切割磁力線,線圈中也有應電動勢產生。由精密的實驗我們得知,導線切割磁力線愈快,磁場愈強,導線(繞成線圈)的匝數愈多,則應電動勢就愈大。總而言之,應電動勢的大小,要看三個因子而定: (1) 速率; (2) 磁場; (3) 匝數。

應電動勢正比例於速率 \times 磁力線數 \times 線圈匝數。

347. 【發電機的基本原理】 發電機(generator)是把機械能直接轉換為電能的機器,它的主要部分有兩個: (1) 磁場(magnetic field),在小型發電機如久磁發電機(magneto)中,這磁場得自永久磁體,但在大型發電機中,則須從電磁體獲得; (2) 電樞(armature),是一個可轉的線圈,用銅絲繞在可轉的鐵環或鐵製鼓體上而成。電樞上面的銅線,相當於前文所述實驗中切割磁力線的導線。我們若要懂得,電樞旋轉時,線圈內有什麼現象發生,祇須先懂得,一個長方形的導線單環,繞水平軸旋轉時(圖 19-3),環內有何現象發生。假如此環從鉛直的地位開始,依順鐘向旋轉。環的一邊 AB 線,在第一個半週時,向下移動,故從弗來明定則,可知 AB 上的應電動勢,要使電流從 B 向 A 流動。同時, CD 線向上移動,故有電流從 C 流到 D 。這樣看來,在第一個半週之內,有應電流在環中流動,方向是 $CDBA$; 在第二個半週之內,應電流的方向顯

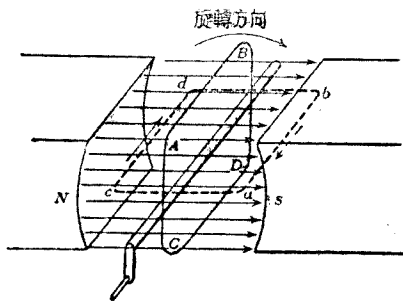


圖 19-3. 導線環在磁場中旋轉

* 注意 thumb 與 motion 兩字中各有 m, forefinger 與 field 中各有 f, middle finger 中則有常常代表電流的 i 。

倒,改爲 $ABDC$ 。所以導線環每轉一週,其中的電流兩次改變方向。這種交換改向的電流,就叫做交流(alternating current, 略號 A. C.)。

用適當的儀器,我們可以測得這交流的電壓(應電動勢)在第一個半週內,從零開始,昇到最高正值,再降到零,如圖 19-4 曲

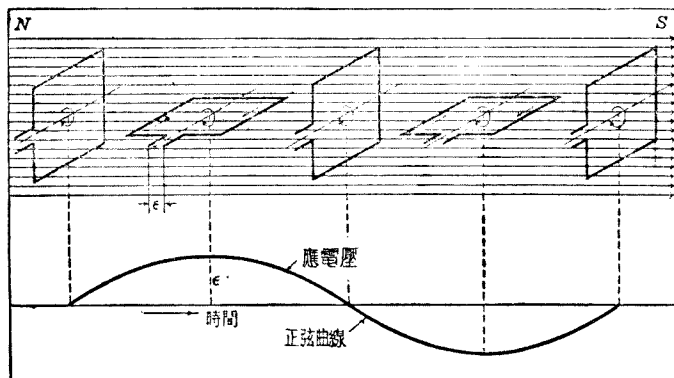


圖 19-4. 正弦曲線指示應電動勢與導線環地位的關係

線左半段所示(這曲線叫做正弦曲線,因為三角函數正弦的位跡 graph, 就是這個形狀) 在第二個半週內,電壓從零依反對方向逐漸變更,直到最低負值,再回復到零。當環在水平地位時, e. m. f. 到達最高正值或最低負值。(什麼緣故?) 環轉一週(360°),電流的變更也是一週(cycle)。

348. 【簡單的交流發電機】 現代發電廠中所用的發電機,差不多都是交流發電機(alternator)。我們剛纔已經見過,一個線圈在兩個磁極間的磁場中旋轉,線圈內就有電流發生,這電流每隔半轉,改變方向一次。這就是說,在一座雙極的(bipolar)交流發電機中,電樞每旋轉一週,電流就有兩次改向。爲了使電樞中的電流可被利用,及將電流加強起見,我們把剛纔

所用的簡單裝置改動一下。

我們把可轉線圈(即電樞)繞在鐵心 C 上(圖 19-5),藉以增加磁場的強度。把

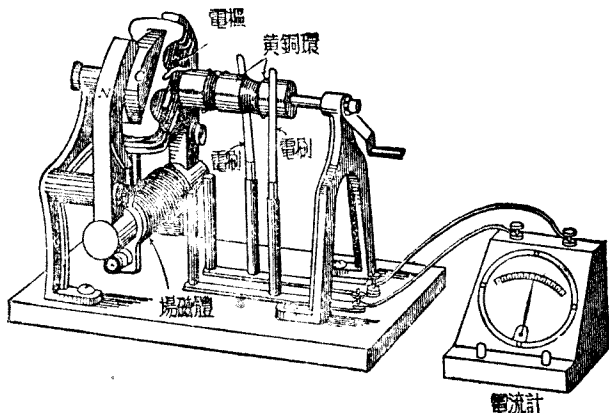


圖 19-5. 簡單交流發電機雛型

這電樞裝在一個架子上,使它可以一個 U 字形電磁體的 N 極與 S 極之間旋轉。其次我們把這可轉線圈的兩頭,接牢在兩個分開的絕緣黃銅環上,黃銅環裝牢在電樞軸的一端。再用電刷 (brush) 兩個和導線兩條,把這發電機同一具靈敏電流計 G 接成通路,於是使電樞慢慢旋轉,察看電流計上指針移動的情況。線圈轉到什麼地位, e. m. f. 最大? 轉到什麼地位, 電流改變方向? 什麼緣故?

349. 【商用交流發電機】 在任何發電機內,電流發生的主要原因,乃是電樞上的銅線和磁場裏的磁力線有相對運動(產生這磁場的磁體叫做場磁體, field magnet),因此,製造大型交流發電機時,通常都用可轉磁場 (revolving field) 和固定電樞 (stationary armature),這樣既不違背發電的原則,且可合於經濟的條件。如圖 19-6 所示,突出的四個磁極 N, S, N, S 旋轉時,它們的磁力線掃過電樞線。這些線都嵌在固定架子 A 的裏面一圈幾條槽內。場線圈 (field coil, 即繞在旋轉磁極上的線圈) 中有直流通過,這直流來自可發連續電流的另一發電機,叫做激發機 (exciter)。激發電流由兩枚電刷引入,電刷同兩個絕緣金

屬環相摩擦，這兩個環叫做滑環(slip-ring)。交流直接從固定架子上所繞的線通出去，經由電纜(cable)而到控制板(switch-board)。爲了實用上的種種理由，製造這種式樣的交流發電機，使具有可耐高電壓的絕緣程度，是比製造別種式樣要容易一些，便宜一些。

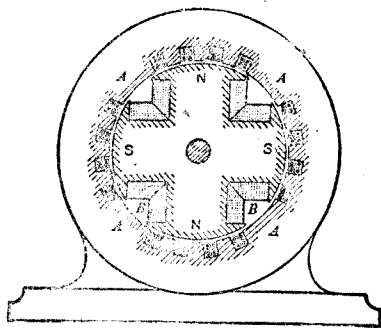


圖 19-6. 可轉場磁體 N, S, N, S
及固定電樞 A, A, A, A

如圖 19-7 所示，乃是

所謂單相發電機(single phase generator, 對應於一個磁極祇有

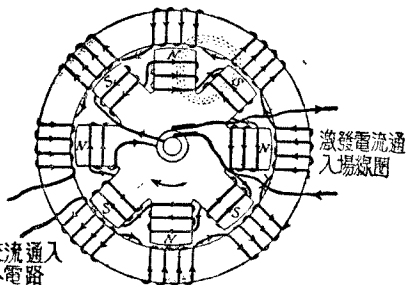


圖 19-7. 單相交流發電機中的可轉場
磁體(8個極)及固定電樞

一個線圈，所發的電流祇有一道，叫做單相)中電樞線圈排列概示圖，由圖可知磁極共有八個，線圈也有八個，串聯成功一組。就圖中所示的發電機而論，磁場每轉完一週，交流的方向改變八次，換言之，交流的變更經過四

週。每秒的變更週數，叫做頻率(frequency)。一般地說來，交流的頻率等於旋轉磁場每秒所轉的週數，乘磁極總數的一半。(什麼緣故?)

在單相發電機中，場磁體共有幾個磁極，電樞上就有幾個線圈，這兩個數目是相等的。但就實際應用而論，工程師覺得對應

於每一磁極若有三個線圈，而將全部線圈串聯成三組，則更可合於經濟的條件。這種式樣的發電機，叫做**三相交流發電機** (three-phase alternator)。現在通行的發電機，就是這一種。三相發電機的三組線圈，送出三道電流來，可以分別用在三個分開的電路上，然而通常祇用三條‘活線’ (live wire, 亦稱有電線，俗稱火線)，以代六條線，因此可以省掉很多的銅線。

350. 【交流的用途】 現在各廠所發的及各地所用的電流，差不多全是交流，因為將交流輸送到遠處，比輸送直流簡省得多。在下一章第 378 節中，我們就要討論到何以如此的理由。交流用於發光和發熱，與用直流是一樣的。電動機也分交流與直流兩種，不過電車上所用的電動機，以直流電動機較為適宜。在化學工程方面，例如電解與電鍍，也不能用交流。所以我們現在就把直流發電機，以及變交流為直流的各種裝置，約略講一講。

351. 【直流發電機】 在直流發電機中，正像在簡單的交流發電機中一樣，也有一個線圈在磁場裏旋轉，這線圈內所產生的電流仍舊是交流。為了使這交流變成直流（即在同一方向內流動的電流）起見，我們非用一種叫做換向器 (commutator) 的裝置不可。這換向器的作用，可用下面的實驗來說明：

我們所用的電磁鐵和可轉電樞，與第 348 節裏的實驗中所用的相同，但是電樞線圈的两端，並不連在兩個離開的絕緣銅環上，卻連在一個環的分離的兩個半環上，這兩個半環叫做**裂環換向器** (split-ring commutator, 圖 19-8)。電刷兩枚，緊靠着這裂環的相對兩半環，所以在電

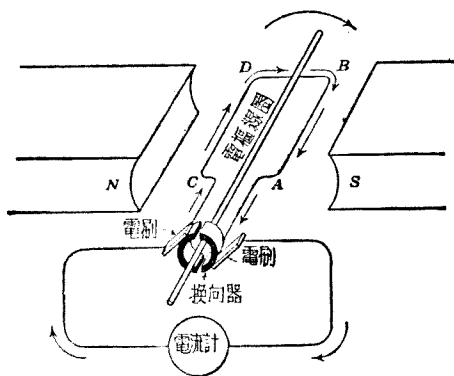


圖 19-8. 導線環與裂環換向器

樞旋轉時，每一電刷先與線圈的這一端相接，又與那一端相接，交換不停。電刷經過調配地位後，恰可在線圈內的電流改變方向的一剎那間，從換向器的這一個半環移到那一個半環上，亦即從連接線圈的這一端改變到連接線圈的那一端。電刷可用導線連接到電流計上，同上次實驗時一樣，然後用螺絲桿輪(worm gear)將電樞慢慢轉動(圖 19-9)。

通過電流計的電流，它的方向有改變麼？線圈在什麼地位時電流最大？電流是穩定的還是忽大忽小的(忽大忽小的直流叫做脈動電流，pulsating current)？

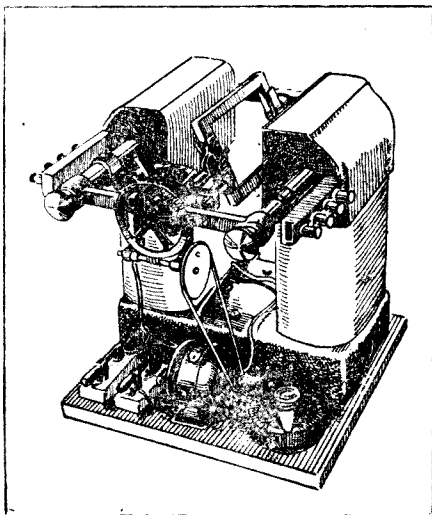


圖 19-9. 磁場中可轉導線環的罐型

在電樞線圈內產生的電流，雖然當電樞轉完一週時改向兩次，在外電路中的電流，它的方向卻

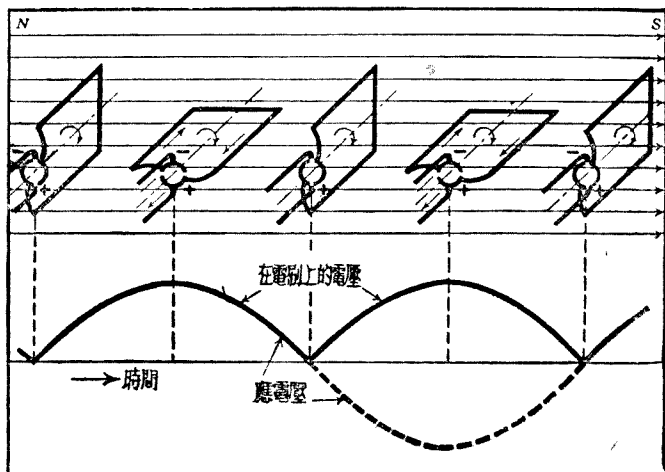


圖 19-10. 曲線表示裝有換向器的導線環上所生的脈電壓

是始終不變的。不過從圖 19-10 可知，這是脈動電流。所以現在的問題，是怎樣可得穩定的單向電流 (steady unidirectional current)。在商用發電機中，我們可以見到，解決這個問題的辦法，是將幾個分開獨立的電樞線圈，均勻地分布在一個軟鐵鼓體表面的周圍。這些線圈排列得恰到好處，不論何時，常有一個線圈依垂直方向切割磁力線。為了使各線圈不致滑動，我們在鼓體表面上開幾條平行於軸的槽，而將線圈嵌入

(圖 19-11)。鼓體上每有一個線圈，換向器的環上就有分開的一節。線圈的數目增加，換向環上分開的部分也必須增加。譬如，當線圈個數是 16 的時候，換向環就分成 16 節。換向環的各節大都

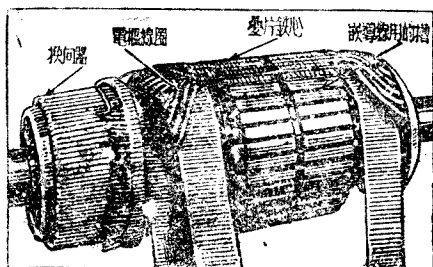


圖 19-11. 一部分繞好的鼓體電樞。各線圈嵌在槽內，線圈頭鉗牢在換向器的銅條上。

是銅條，固定在軸的周圍，銅條與軸及銅條與銅條之間，都有薄薄的幾層雲母隔開。各線圈的頭，都鉗牢在這些銅條上。

圓柱形的鼓體，是用很薄的軟鐵片緊緊夾在一處而做成的，(為什麼要這樣做的理由，見下文第 379 節)。這軟鐵固體不但可以支持線圈，而且可以加強磁場。鐵的導磁係數比空氣大數千倍，有了鐵在磁場中，磁力線自然大大的增加了。

352. 【多極發電機】 剛纔所說的發電機，叫做雙極發電機 (bipolar generator)，因為場磁體祇有兩個磁極。但在商用的發電機中，尤其是大型的發電機中，通常都有四個，六個，八個乃至八個以上的磁極。這種發電機叫做多極發電機 (multipolar machine)。將磁極的對數增加，則電樞旋轉的速率，雖比雙極

發電機小得多，亦可得到適用的電壓（110，220，或 550 伏特）。發電機的電壓，是看電樞線圈切割磁力線的速率而定的。在四極發電機（圖 19-12）中，電樞上的每一條線，當電樞轉畢一週時，切割完全的一組磁力線，共有四次；但在雙極發電機中，祇有兩次。所以就產生同樣大的電壓而論，四極機的旋轉速率，祇須等於雙極機的一半，就成。此外，多極機製造起來比較省錢，因為無需大量的軟鐵來增加那必要的磁力線。

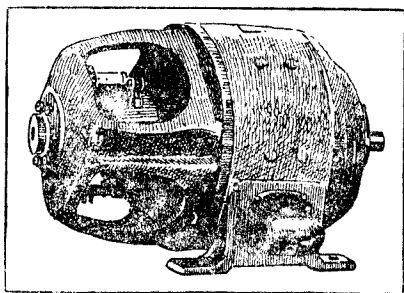


圖 19-12. 四極發電機，用球軸承，並有換向器與電刷（在圖中左側）

現代直流發電機與直流電動機的兩個主極之間，另有一個較小的磁極，叫做換向極（commutating pole），它的線圈與電樞線圈串聯（圖 19-13），所以它的強度是看電樞電流的大小而定的。這換向磁極的插入，目的並不在於增加電樞內所生的電功率，祇在於可使電刷與銅片之間，不致在負荷很大或電樞旋轉速率很高時發出電花而已。換向器的這種作用，此處不能講述，讀者如欲明瞭其理由，須求之於電工專書。

353. 【發電機中的能源】 有一件重要的事情切不可忘卻，即發電機決不能自行創造電流。它祇能夠把機械能轉換為電能。譬如說，我們若欲使鄉間屋內的電燈放光，單單購備一座發電機，那是不夠的。我們必須再置備一座蒸汽機，或一座氣機，或一座水輪機，用它來運轉這座發電機。因為發電機所產生的電流，它的方向是反對線圈轉動所需的方向，所以電流愈大，愈需要很多的機械能，使電樞轉動。大型發電機，例如發電廠中供

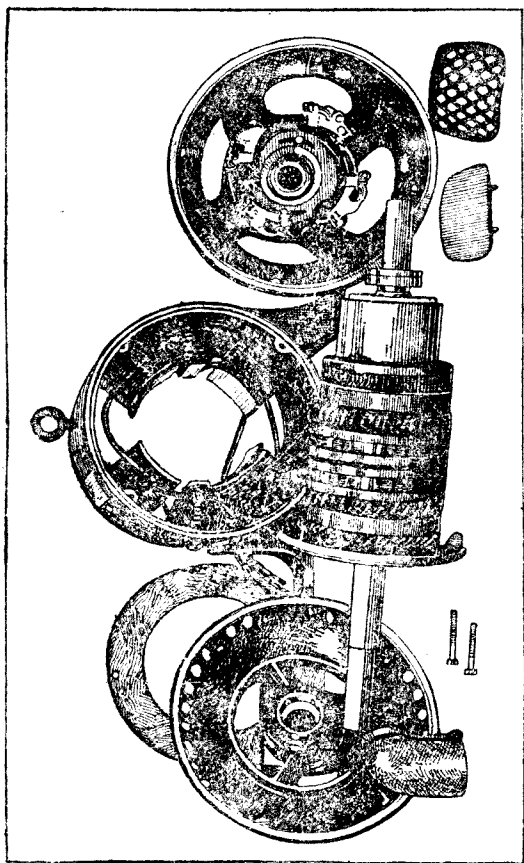


圖 19-13. 四極發電機 20 瓩. P., 每分鐘轉 1150 次, 230 伏特) 的各部分, 正待集合

給電車及都市電燈網所用電流的發電機，有時需要 20,000 馬力到 70,000 馬力的蒸汽機來運轉

354. 【將交流換成直流】 就某某數種用途而論（例如使蓄電池組充電），絕對地需要單向電流。在功率較大的情形之下，可用電動發電機（motor-generator）來把交流轉換成爲直流。所謂電動發電機，其實就是一隻交流電動機和一隻直流發電機連結而成，它的另外一個名稱叫做旋轉變流機（rotary converter），但在使 6 伏特蓄電池組充電時，用氧化亞銅整流器（cuprous oxide rectifier）較更方便。通過這種整流器的，雖是單向電流，卻並非絕對地穩定的電流。

氧化亞銅整流器的主要部分，是四隻氧化亞銅整流鈕（rectifying button），如圖 19-14 連結而成。每一鈕有一銅片（Cu），銅片上堆積一層氧化亞銅（ Cu_2O ）。此鈕可以讓電流很容易從氧化亞銅流到銅片，但對於反向的電流，則發生極大的電阻。在 A 端是正端的半週之內，電流的方向，如圖中環內箭頭所示；在其次半的週之內，即在 B 端是正端

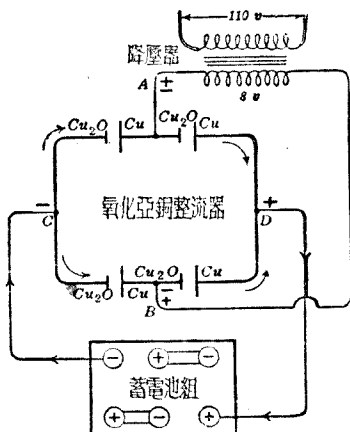


圖 19-14. 使蓄電池組充電所用氧化亞銅整流器

時，電流的方向如環外箭頭所示。在此情況之下，就有一道脈動單向電流，通過待充電的蓄電池組，這電流，是很適於充電之用的。

問答題與計算題

1. 圖 19-1 中的導線 AB，(a) 若從圖中所示的地位向下移動，(b) 若依水平

方向從 N 移動到 S , (c) 若從圖中所示地位向上移動, (d) 若其 A 端突向下傾, (e) 若其 B 端突向下傾, 則流過 AB 的電流依照什麼方向?

2. (a) 決定發電機所生電壓的因子, 是哪三個? (b) 各因子對於電壓各有什麼影響?

3. 試舉出不能用交流必須用直流的三種用途, 並予以說明。

4. 電燈開亮的盞數增加時, 發電機的端電壓有時要減低, 什麼緣故?

5. 發電機一座, 可供給電流 40 安培, 電壓 500 伏特, 由輸電幹線送到一家工廠中去。幹線的電阻是 1.5 歐姆。(a) 此發電機所產生的功率是多少(仟瓦)? (b) 在工廠得到的電壓是多少? (c) 工廠用電的功率是多少?

6. 有電燈 60 盞, 每盞需要電流 0.4 安培, 由一座可發電壓 110 伏特的發電機, 使它們放光, 此發電機的效率是 80%。問運轉這座發電機的汽油機, 它的馬力該是多少?

電 動 機

355. 【發電機當作電動機】 我們早已知道, 一座發電機為蒸汽機, 氣機, 或水輪機所運轉時, 它就能夠產生電流。現在我們就要知道, 這電流怎樣可以通到第二隻電機中去, 而使這第二隻電機能夠運轉電車, 運轉印刷機, 運轉縫紉機, 或運轉其他需要機械能的任何機器。這第二隻電機, 構造與第一隻電機(即發電機)完全相同, 它的名稱就是電動機(motor)。發電機與電動機, 乃是可以互相改換的機器。

在構造方面, 直流電動機 (d-c. motor) 和直流發電機很相同, 也有電磁體, 電樞, 以及換向器與電刷。不過若欲懂得直流電動機的作用, 則我們對於有電流通過的導線在磁場中的行動, 非先有清楚的了解不可。

356. 【有電流通過的導線在磁場中受到側向推力】 將柔軟的導線 AB , 懸懸地橫張在電磁體的兩極之間, 如圖 19-15 所示。從電池組出來的電流, 通過電磁體線圈後, 可使它的 N 極與 S 極的地位, 如圖所示。若從另外一個電池組, 送一道很強的電流暫時通過 AB , 方向如圖中箭頭所示, 則 AB 線介於兩磁極之間的部分, 立即被推向上。又若 AB 線上的電流改向, 則該線在兩磁極間的部分, 即被推向下。

在強電磁體兩極之間的磁場, 是差不多均勻地分布的, 所以這個區域內的磁力線, 可以用平行線來代表, 如圖 19-16 A 所示。

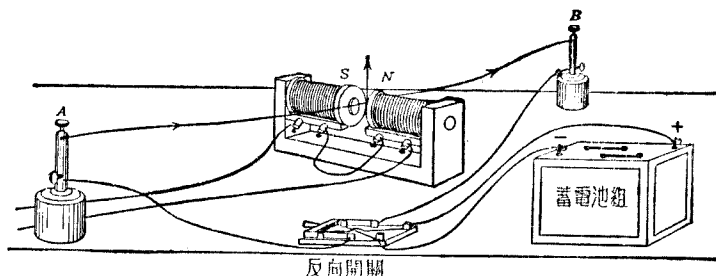


圖 19-15. 輸送電流的導線在磁場中受到側向推力

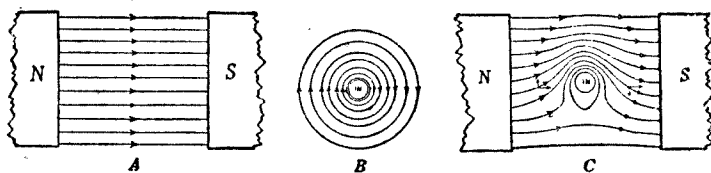


圖 19-16. 電動機中的磁場：A, 單有磁體時的勻布磁場；B, 單有電流時的圓形磁場；C, 磁體與電流的合成磁場

至於有電流通過的導線，在這勻布磁場(uniform field)中為什麼會受到推力，理由也不難明白，祇要我們並未忘卻，電流通過導線時，就在導線四周產生一個它自己的磁場，這磁場內的磁力線，是許多同心圓。如圖 19-16 B 所示，乃是垂直貫通本書紙面的導線，當其上有電流通過，方向由書外入書內時（即由讀者的地位向書而入），導線周圍磁力線在紙面上分布的情況。各磁力線的方向，按照拇指定則，應當是順鐘向。

現在若將這導線以及它周圍的同心圓磁力線，放在電磁體兩極 N 與 S 之間的勻布磁場內，則導線上方的磁力線，比下方的就要擁擠得多（圖 19-16 C），因為下方的兩個磁場的磁力線方向相反，互相抵消之故。在第 258 節中，我們已經說過，磁力線，可以想像它們的作用猶如張緊的橡皮帶。因此，在這樣的情形

之下，我們就不難想到，導線是要被推向下方的了。若電流的方向倒轉，那麼磁力線都擁擠在導線的下方，而導線就要被推向上方去了。

357. 【電動機的三指定則】 磁場內的導線上有電流通過時，如要知道這導線被推向哪一側，也可以用弗來明氏的發電機定則來決定(第346節)，不過這裏所用的乃是左手而非右手罷了(圖19-17)。

358. 【電動機的作用】 在電動機中，正和在發電機中一樣，電樞差不多專用鼓體(參閱第351節)。我們總還記得，繞在這種電樞上的線，都嵌在鼓體表面的槽內，如圖19-18所示。將各線圈串聯起來的導線，在鼓體兩端依巧妙的方法布置，恰可使圖中鄰近一磁極(譬如說右面的S極)的電流都向外

(向讀者)流出，而鄰近另一磁極(即左面的N極)的電流都向內(離開讀者)流入。這些導線的連結方法，在這裏不是非講不可的，而且實際上有許多不同的布置方法可用，所以就把它略去不講。

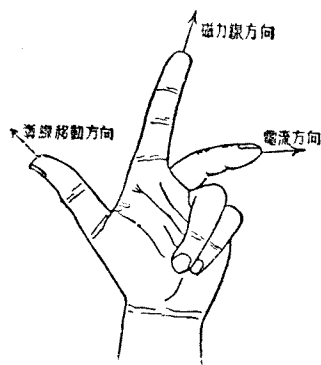


圖 19-17. 用左手三指定則明電動機定則

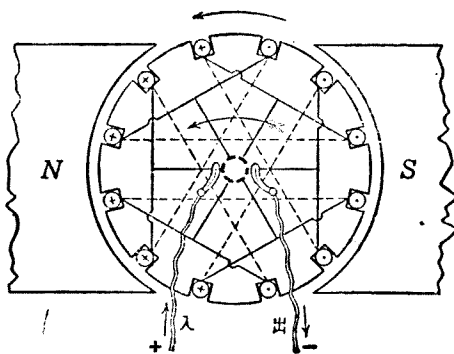


圖 19-18. 電動機鼓體繞線連結法

不論用什麼方法連結，從剛纔所說的三指定則我們可以明明白白地知道，在電樞右側的各線用記號 \odot 註明的，都被推向上方而在左側的各線用記號 \oplus 註明的，都被推向下方*。換句話說，因為左右被推的方向相反，所以就有一個轉矩（第 111 節）要使電樞依反鐘向旋轉。這轉矩的大小，是看電樞上繞線的條數和長短，電樞內通過的電流，以及磁場的強度而定的。

換向器和電刷的作用，與在發電機中相仿，是要乘電樞旋轉之際，改換幾個線圈內的電流方向，因此可以使電流在全部線圈內的流動方向，恰如圖 19-18 所示。

359. 【電動機的式樣】 直流電動機通常有兩種式樣。一種叫做**串繞電動機**(series motor)，可以發出很大的開動轉矩 (large starting torque)，電車和汽車上所用的，就是這種電動機。在串繞電動機中，電樞線圈同場線圈是串聯着的（圖 19-19），所以電流全部通過電樞線圈，也通過場線圈。還有一種電

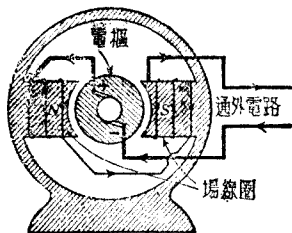


圖 19-19. 串繞電動機的連結法

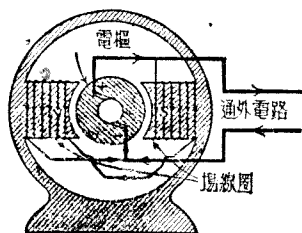


圖 19-20. 分繞電動機的連結法

動機叫做**分繞電動機**(shunt motor)，供運轉工場內各種機器之用，因為它的旋轉速率差不多一定不變。在分繞電動機中，場線圈是同電樞線圈並聯着的，而且用很多匝的細線繞成，所以祇有一小部分的電流，通過場線圈（圖 19-20）。電動機也有雙極與

* 記號 \odot 表示電流向外流出，記號 \oplus 表示電流向內流入。

多極的分別。我們需要電動機依很低的速率旋轉時，就使它有很多的極。

360. 【電動機中的反電動勢】 假定我們把安培計一隻，白熾燈一盞，以及小型電動機一座，串聯起來如圖 19-21 所示。若將電動機的電樞拿住，不讓它轉動，而從電燈線路或蓄電池組通入電流，則電燈放光很亮。但若放手讓電樞旋轉，電燈便變成昏暗少光。

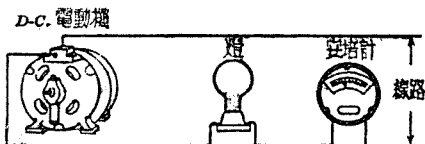


圖 19-21. 用燈與安培計證明電動機在起動時所納電流，比在按正常速率旋轉時為多

從這個實驗我們可以知道，電動機在轉動的時候，所用的電流比電樞不動時少。電動機轉動時，外來的電動勢與電路中的電阻，是不會有什麼改變的。所以電流的減少，必定是因為電動機內產生了反電動勢，將外來的電動勢抵消了一部分之故。

電動機的電樞上，是繞有串聯的許多線圈的。當電樞轉動時，這些線圈不停地切割着磁力線，其中就不得不產生一個電動勢。換句話說，凡是直流電動機，同時又是直流發電機。這一個電動勢的方向，常與送電流入電樞的電動勢相反。

正好像在發電機中一樣，電動機的電樞轉得愈快，這反電動勢愈大。因此，外來電動勢與這反電動勢的差就愈小。這兩個電動勢的差，便是迫使電流通過電樞線圈的電壓。所以電動機在慢慢地旋轉的時候，所用的電流比在迅速地旋轉時多；剛剛動的時候比轉到最高速的時候更要多得多。

舉個例來說，假定加在一座電動機上的外來電壓是 110 伏特，而反電動勢是 105 伏特，那麼迫使電流通過電樞繞組的淨電壓，就是 $110 - 105 = 5$ 伏特。若電樞的電阻是 0.5 歐姆，則電樞內通過的電流便是 $5.0 / 0.5 = 10$ 安培。但若當電樞不動時，全部電壓 110 伏特加在電樞上，通過電樞的電流就有 $110 / 0.5 = 220$ 安培之多。

361. 【使電動機開動】 電動機從靜止開始運動時，起初當然沒有反電動勢。故若將電動機直接往線路上一連，過分大的電流就要把電樞‘燒掉’。為免除此弊起見，起初的時候在電

路中串接一個開動電阻 (starting resistance)。電動機已動之後，愈轉愈快，就把這電阻逐步減少，減少到零為止。

電動機的使用

362. 【分繞電動機】 工廠和工場裏面，用帶和輪軸傳遞能量，實在是一件又危險，又吵鬧，又不經濟的事情。依照現代的方法，電流從中央發電廠出來，經由銅線遞送到工廠各部分去，就用這電流來直接運轉各部機器，或一羣機器，因為這些機器上都裝有電動機。採用了電傳能量的方法，不但可以免除帶和輪軸的麻煩與危險，而且可以將各部機器隨意放在什麼地點，還可以利用可變電阻，很容易的將機器的速率予以調節。在備有這種裝置的工場和工廠裏，所用的電動機通常都是分繞式，因為需要不變的旋轉速率之故。分繞電動機的速率，在負荷很輕（或沒有負荷）的時候，與在負荷滿足的時候，是差不多相同的。家庭之中若置備了小型電動機，則亦可以得到方便與舒適。用小型分繞電動機來運轉縫紉機（圖 19-22），以及電冰箱中的空氣壓縮器，便是顯著的例子。

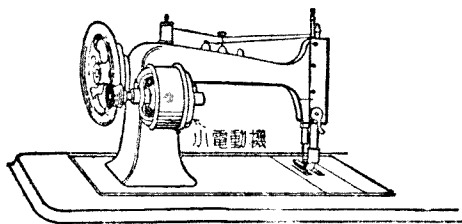


圖 19-22. 由分繞電動機轉動的縫紉機

363. 【串繞電動機】 在電車上或起重機上，所用的電動機都是串繞式，因為這種式樣的電動機，可以發出很大的開動轉矩來。串繞電動機所發的轉矩，與電流的平方成正比例。但在分繞電動機中，這轉矩祇與電流成正比例。串繞電動機的速率最低時其所發轉矩最大（因為沒有反電動勢，所以這種電動機適用於起重機或車輛。串繞電動機上的負荷跌落到零的時候，

電樞就要飛轉，愈轉愈快，快到碎裂而止。因此，串繞電動機常直接連在被運轉的機器的軸上（或用齒輪連接），使它的負荷永遠不會卸掉。

364. 【電動機的效率】 電動機的用途很廣，其理由之一便是它的效率很高，有時可以高到 80% 或 90%。電動機的效率，正同其他任何機器的效率一樣，也等於輸出對輸入之比。求輸入，那是很容易的，祇要量一量加在電動機上的電壓有幾伏特，以及通過電樞的電流有幾安培，就可以把輸入的瓦特數計算出來。

求輸出，工程師們常用所謂‘輪掣功率計’。有一種簡單的輪掣功率計，是一條帶子（或一條繩子），帶子的腹部套住電動機軸端的傳動輪下面，帶子的兩頭鉤住兩隻彈簧秤的鉤子，例如圖 19-23 所示。

若傳動輪旋轉，如圖中箭頭所示，則右邊的彈簧秤所受的拉力，就一定比左邊的大些，因輪子和帶子間有摩擦力作用着。這摩擦力的大小，等於兩隻彈簧秤上的讀數之差。每分鐘力的作用所通過的距離，等於傳動輪的圓周乘每分鐘旋轉次數。

在每分鐘內所作的功，等於摩擦力乘力的作用每分鐘所通過的距離。

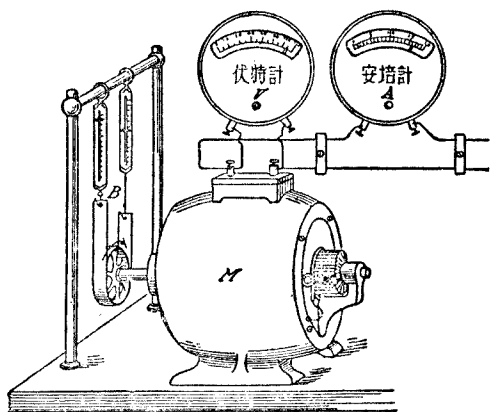


圖 19-23. 用輪掣功率計測定電動機的效率

若將所得的輸出與輸入、用公共的單位來表示，再除一除，就得所求的效率。計算時，不要忘了

$$\begin{aligned} 1 \text{ 瓦特} &= 44.3 \text{ 呎磅每分鐘} \\ &= 6.12 \text{ 仟克米每分鐘。} \end{aligned}$$

問答題與計算題

1. (a) 在圖 19-24 中，電樞的哪一頭是 N 極？(b) 這電樞將依順鐘向旋轉，還是依反鐘向旋轉？(c) 當電樞的 N 極到達場磁體的 S 極時，電樞為什麼不停住在那裏？

2. 若將圖 19-24 中電池組兩端鉗的接法倒過來，電樞的旋轉方向也會倒轉過來麼？什麼緣故？

3. 圖 19-24 所示的電動機，是分繞式還是串繞式？把這概示圖重畫一個，原來若是分繞式，把它改成串繞式；原來若是串繞式，把它改成分繞式。

4. 有電動機一隻，它的電阻是 0.75 歐姆。若加在這電動機上的外來電壓是 115 伏特，而反電動勢是 112 伏特，則通過它的電樞的電流是多少？

5. 電動機的負荷增加時，與電動機串聯的安培計指針，在刻度尺上向較大還是較小的讀數移動？什麼緣故？

6. 有一隻 110 伏特的電動機，在開動時候，電路中的安培計讀數是 25 安培。既動之後，指針差不多立刻退到 1.5 安培的讀數上，停留於該處。(a) 求這電動機的電阻。(b) 它在轉動時的反電動勢是多少？

7. (a) 電動機上裝置開動箱 (starting box, 內有可變電阻)，有什麼目的？(b) 小型電動機上無需開動箱，什麼緣故？

8. 有四馬力電動機一隻，連接在 115 伏特的線路上而負載已滿時，需用電流 32 安培。求此電動機的效率。

* * *

9. 有電動機一隻，受輪掣功率計的試驗時，取用電壓在 113 伏特的電流 67 安培，發出功率 8.5 馬力。求此電動機的效率。

10. 電動機一隻，它的效率是 90% ；連接在 110 伏特的線路上，所發的功率是 5 馬力。求這電動機的效率。

11. 一汽車在初開動的數分鐘內，它的開動器從 6 伏特蓄電池組取用電流 180 安培。若電動機的效率是 80% ，則其馬力是多少？

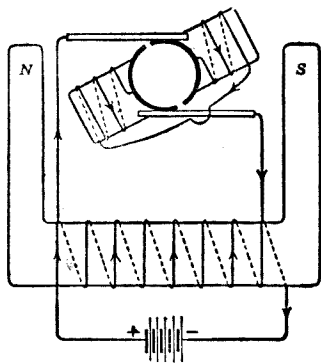


圖 19-24. 供實驗用的簡單電動機

12. 在圖 19-23 中，假定輪子的直徑是 5 吋，而當電動機每分鐘轉 1800 次時，兩隻彈簧秤上的讀數是 2 磅與 7 磅。同時，伏特計與安培計上的讀數是 110 伏特與 4.0 安培。求輸出與輸入的馬力數，及其效率。

第十九章提要

發電機原理：

導線切割磁力線，而有應電動勢發生時，若要決定應電流的方向，可用右手——

拇指所指的是運動方向。

食指所指的是磁力線方向。

中指所指的是電流方向。

電動勢的大小與速率 \times 磁力線數 \times 線圈匝數成正比例。

商用發電機：

裝有滑環的發出交流。

裝有換向器的發出直流。

發電機決不會造能；它祇不過把機械能轉換成電能罷了。

電動機把電能轉換成機械能。

有電流通過的導線與磁力線成直角時，常被推向一側，

要決定運動的方向，用左手。

凡電動機在轉動時同時又有發電機的作用。在發生這樣的作用時所生的電動勢，對於運轉電動機的電流予以反抗，所以叫做反電動勢。

淨電動勢，即迫使電流通過電樞的電動勢，等於外來的電動勢減去反電動勢。

歐姆定律應用於電動機的電樞時，祇可用淨電動勢。

問 答 題

1. 鳥在高壓電線上棲息，往往不受傷害。人若攀登鋼質電線柱而觸及電線，則常死亡。說明其理。

2. (a) 在隧道中或地下電車路上，往往有第三條軌道，這第三條軌道的敷設有

什麼目的？(b) 這條軌道被認為比行車軌道危險，什麼緣故？

3. 試舉出幾種方法，可在一條導線上產生電動勢。
4. 在發電機剛剛轉動時，剩磁(residual magnetism, 電磁體的電流雖已停止，磁性仍沒有全部消失，那留下來的叫做剩磁)可有什麼用處沒有？
5. 製造發電機時使其磁極多於兩個，可有什麼好處？
6. 在(a)並聯的燈數增加後，(b)串聯的燈數增加後，使發電機的電樞旋轉，需要更大的力還是較小的力？
7. (a)所謂‘60週的交流’是什麼意思？(b)電燈接在25週的電路上，燈光就要閃爍不定，什麼緣故？
8. 用60週的交流可以使電磁體吸鐵，你以為成不成？說出你的答案的理由來。
9. 換向器裝在(a)發電機上，(b)電動機上，有什麼目的？
10. (a)電動機中有反電動勢產生，它的原因是什麼？(b)發電機是否也有反電動勢？
11. 有一隻用帶傳動的發電機，正在使一個蓄電池組充電。帶忽然斷掉，但是發電機仍在轉動。試加以解釋。
12. 有電動機一座，它的效率是70%。還有30%變成了什麼？
13. 設計製造一隻發電機，使磁場旋轉而不使電樞旋轉，能不能？
14. 某實驗者用輪掣功率計(第364節)測定一隻串繞電動機的效率時，預作準備，萬一帶子斷掉，電路也立刻斷掉。這樣的布置，為什麼是必要的？

第二十章

交 流

感 應 圈

365. 【由磁體所感起的電流】 用細銅線繞成很多匝的線圈，把它的兩頭接在一隻靈敏的電流計上。然後將很強的條形磁體的一極，很快地插入線圈中(圖 20-1)。我們可以看到，電流計的指針有暫時的偏轉。若再將電磁體很快地抽出來，又可看見電流計的指針，順着反對方向偏轉。現在若將電磁體放在線圈中不動，則電流計的指針立即退回來指着零。若將此實驗重複做幾次，但是使磁體慢慢上昇，慢慢降下，則見電流計指針的偏轉減少。

若先使磁體的 N 極伸入線圈中，後使 S 極伸入，則前後兩次電流計指針的偏轉，方向相反。若要決定線圈中所感起的應電流，依着哪個方向流動，我們可以取銅線一條，鋅線一條，一端放在口中唾液內，做成一隻小小的伏打電池，而將銅線鋅線的另一端連在電流計上。我們都知道，銅線是正極。因此，電流計指針偏轉的方向，由小小電池所引起的以及由線圈中應電流所引起的，我們可以把它們比較一下，比較之後，就可以決定線圈中電流的方向。用這個方法，我們發見，當磁體的 N 極投入線圈時，應電流所取的方向，是使線圈上端(即面對着 N 的一端)成爲 N 極的方向。用同樣的方法，我們又發見，當磁體的 S 極投入線圈時，應電流所取的方向，是使線圈上端成爲 S 極的方向。在兩種情形之下，線圈上端都成爲抗拒磁體進入線圈的一極。

從這樣的實驗，我們可以知道，使磁體出入於線圈，就可以產生暫時的電流。這些實驗所包含的原理，是和發電機的原理相

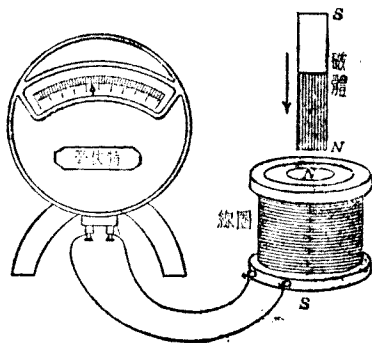


圖 20-1. 將磁體 NS 插入線圈中，產生瞬時電動勢

同的,所不同者,此處移動的不是導線而是磁體。有兩點是很明白的:(一)祇在磁體移動的時候纔有電流發生;(二)磁體移動的方向改變,電流的方向也改變。因為電流常受電動勢的驅使而流動,所以磁體的出入線圈,非產生應電動勢(induced electromotive force)不可。

應電流的方向,可以從下列的定律推知:應電流要取這樣的一個方向,即使應電流所引起的磁場,抗拒那引起應電流的運動。這條定律便是所謂林慈定律(Lenz's Law)。

366. 【由電流感起的電流】 因為電磁體可使它比普通永久磁體強得多,所以電磁體出入線圈時感起較大的電流,這是應當在我們的意料之中的。

如圖 20-2 所示,產生應電流的線圈 S ,叫它做副線圈 (secondary coil),它的兩端連在電流計上。代替磁體的電磁體線圈 P ,叫它做原線圈(primary coil),它的兩端連在一組蓄電池組上。我們使通有電流的原線圈 P 出入副線圈 S 時, S 裏面就有應電流產生,正好比使一個磁體出入線圈一樣。然而用電磁體時,應電流比較大得多。我們還可以發見,線圈 P 中的電流增加時,磁場的強度增加,因而應電流的強度也增加。

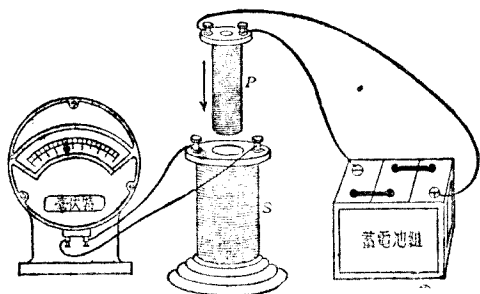


圖 20-2. 正在移動的電磁體 P 使線圈 S 中有電流發生

若在原線圈中插一條軟鐵棒,則電磁體的磁場強度大大增加,而線圈周圍的磁力線也大大增加,於是副線圈中的應電流便跟着增加。

若將原線圈以及它的軟鐵心,放在副線圈中不動,而將原線圈電路中的開關忽開忽關,也可以感起副線圈中的應電流。開關初開時與初關時,電流計指針的偏轉方向相反。將線圈,軟鐵心,以及開關如此布置,可用以產生很高的應電壓;這樣的布置叫做‘感應圈’(induction coil)。

概言之,通過線圈的磁力線數有變更時,線圈中即有應電流

產生。

367. 【商用感應圈】 在商用感應圈(圖 20-3)中,原線

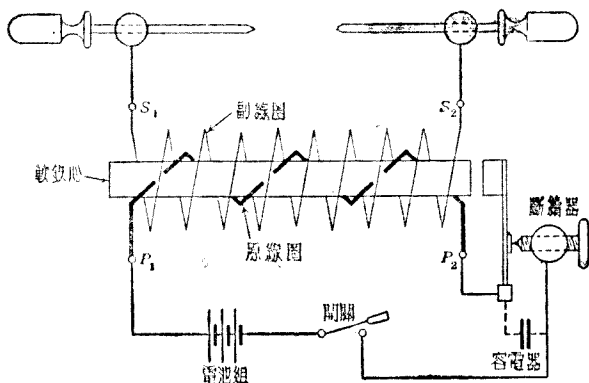


圖 20-3. 感應圈的概示圖

圈和副線圈同繞在一個鐵心上,而鐵心則用軟鐵絲束在一起做成。爲什麼這樣做,將在下文予以討論。原線圈用粗銅線繞成,匝數很少;副線圈用很細的絕緣銅線繞成,匝數很多。兩線圈之間的絕緣,很小心地使它非常完善。爲使原線圈中的電流斷續得很快起見,通常在線圈的一端裝一個斷續器(interrupter),專司此事。這一個電路自動斷續的裝置,與第315節中所說附在電鈴鎚柄上可以來往擺動的銜鐵,作用是完全相同的。當原線圈的電路忽然截斷時,電流仍有繼續流動的趨勢,宛如也具有慣性一般。斷續器的接觸處微開時,這電流就要跳過那空隙,以致生出電花來。這樣是要減低‘截斷電路’的速率,因而削弱了應電動勢的。爲去除此弊起見,我們常將容電器一隻,跨接在斷續器上。這容電器,通常用錫箔和石蠟絕緣紙做成。有了這容電器之後,原線圈電路初斷時,那勢欲延續的電流,就可以湧到這‘儲藏庫’中去。這麼一來,電花就可以減小了。但是電花並不因

容電器之存在而完全絕跡。因此之故，接觸點的尖端上必須鑲銀或鎢，而且必須不時將它擦乾淨。副線圈中所感起的應電動勢，在原線圈電路斷的時候，比在續的時候大得多。什麼緣故？

副線圈的兩端連接在兩個金屬球上。有兩支裝絕緣柄的金屬針，貫通兩球；兩針尖的距離可予以調配。當感應圈起作用的時候，若針尖充分接近，就有電花很快的一個跟着一個，跳過其間的空隙。感應圈的等級，通常就用這電花的長短來區別。這種式樣的感應圈，又叫做倫考夫感應圈(Ruhmkorff coil)。

368. 【感應圈的用途】 感應圈最重要的用途，就是在氣機中發火。使火花在電花插頭(spark plug, 俗稱火星塞，如圖 20-4 所示)的兩端間跳過，是需要幾千伏特那麼樣的電壓的，這就非用感應圈不可了。

許多汽車引擎及船舶引擎上所用的直流，都由裝有電壓調節器的發電機同蓄電池組供給。這低壓電流，必須用感應圈將它變成高壓電流。在這樣的系統裏面，有感應圈一個，斷續器一個，容電器一個，並有配電器(distributor)一具，該器可將高壓電流，順次送到各電花插頭上去。這發火系統的原理，看圖 20-5 就可以明白。

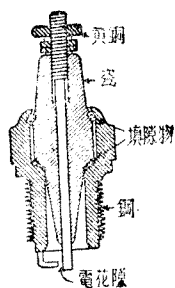


圖 20-4. 氣機中電花插頭的剖面

感應圈有時同蓄電池組裝在手提箱中，可供激發 X 射線(見第 519 節)之用；又在電話線路中，也要用到感應圈(見第 372 節)。

369. 【自感應】 若將繞在軟鐵心外面有很多匝數的線圈兩端，連接於電池組，則當電路初通時，我們將見電流在線圈中不能立刻到達其足值，一如‘歐姆定律所決定者然’。電流在線圈中有此逐漸增加的現象(時間當然很短)，它的理由如下：電流

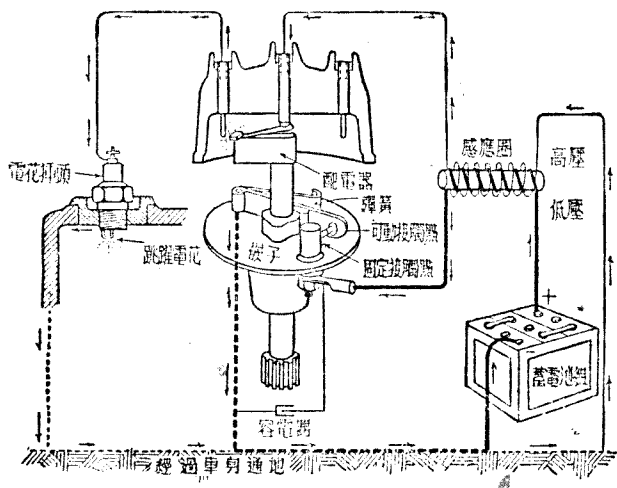


圖 29-5. 汽車中的發火系統, 有蓄電池組, 斷續器, 容電器, 感應圈, 配電器, 以及電花插頭等

初通, 線圈周圍就有磁場產生, 這磁場初生時無異於改變了線圈內的磁力線數, 於是由林慈定律, 線圈內即有應電動勢產生, 此應電動勢反對電流的通過線圈, 無異於暫時增加了線圈的電阻, 所以通過的電流暫時比歐姆定律所許可的少得多。但是應電動勢祇在磁力線數改變的一剎那間纔有, 假定電流不再增加, 磁力線數即無改變, 應電動勢即行消滅, 而線圈的電阻就要恢復它的本值。於是由歐姆定律, 應有更多的電流通入, 換言之, 電流便要增大起來。就在這增大的一剎那間, 由林慈定律, 產生了反對增加的應電動勢, 所以電流雖可增加, 卻不能一下子就增加到歐姆定律所許可之值。總而言之, 在線圈中的電流漸增的情形, 差不多是這樣的: 電流增加時, 產生應電動勢, 阻礙電流的增加; 電流不增加, 應電動勢消滅, 阻礙去掉, 電流又可增加 (如果還在歐姆定律所許可的足值以下); 如是循環繼續 (當然是又快又不間斷

的)，直到電流達於歐姆定律所許可的足值而止。

在電路初斷時，原來的電流並不立刻降低到零，卻要跳過開關的空隙，繼續流通。這是因為線圈周圍的磁場消失時，線圈內的磁力線數有了改變，感起了反對電流降低（即保持電流）的應電動勢之故。

要觀察這個現象，可作下述的實驗。取 6 伏特小電燈一盞，跨接在一個電磁體的兩端。再將 4 伏特的蓄電池組一組，開關一個，與電燈串聯起來，如圖 20-6 所示。當電路初通時，電燈很亮，但隨即暗下來。這就是因為流過電磁體線圈的電流，起初很少，後來逐漸增加，成為穩定電流，占全體電流的大部分，以致通過電燈的電流，大大地減少之故。當開關初斷時，電燈非但不熄，反而亮了起來。這就是因為線圈中的磁力線數減少，感起一個應電動勢，要將電流繼續保持之故。

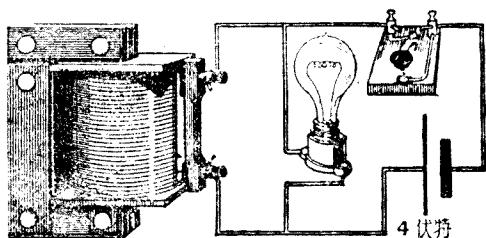


圖 20-6. 證明電磁體有電感效應的實驗

電路所具‘反對電流變化’的性質，叫做該電路的自感應 (self-induction) 或電感 (inductance)，有時候也叫做電磁慣性 (electromagnetic inertia)，因為它很像各種機器中所呈現的慣性。自感應在交流電路中乃是很重要的性質，在高頻率電流的電路中，尤屬重要。

電 話

370. 【電話聽筒】在 1876 年，裴耳 (Alexander Graham Bell) 作公開實驗，證明人聲可以用電來傳遞，驚動了整個世界。直至今日，我們仍舊使用着他所發明的電話 (telephone) 器具中的主要部分，就是所謂裴耳聽筒 (Bell receiver)。這種聽筒的硬橡皮套子裏邊，有一個 U 字形的永久磁體 M ，它的每一磁極

P 的周圍，有一個線圈 C ，用很細很細的絕緣銅線繞成，匝數非常之多（圖 20-7）。薄鐵圓片 D ，雖被永久磁體吸住，但是它的四

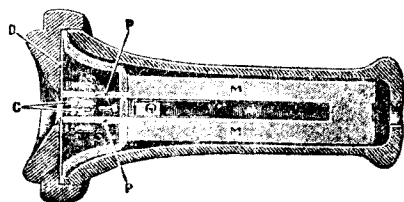


圖 20-7. 電話聽筒的各部分

周擱在一個圓的框子上，所以它的中央部分並不同磁體的兩端真正接觸。在這圓片的外面，有一個中央開孔的硬橡皮蓋子，叫做接耳部 (earpiece)。這接耳部的作用猶如一隻小型的聚

聲筒(喇叭)，同時又可以使圓片的地位固定。

要知道這聽筒的作用，可將它與電燈串聯起來，再接在交流線路上，或小型交流發電機上。接上去後，若把接耳部放在耳朵上，立即聽到聽筒中發出很響的嗡嗡聲。若將聽筒豎直，接耳部朝上，再取鉛筆一支輕輕點在薄圓片上，則可見鉛筆上下跳動不停。原來通過磁極頭上兩線圈的交流，使磁體的磁性忽強忽弱，於是圓鐵片的受吸也跟着忽猛忽衰，因此鐵片就振動不止。這振動由空氣傳入耳內，就成功聲音。

371. 【電話的話筒】 現代電話的話筒 (telephone transmitter, 亦稱發話器)，不過是一隻經過小心設計的小匣子(圖 20-8)，匣中裝滿了堅硬的碳粒(圖中 C 便是)。匣子的前蓋與後蓋 (B) 都是磨光的碳板，

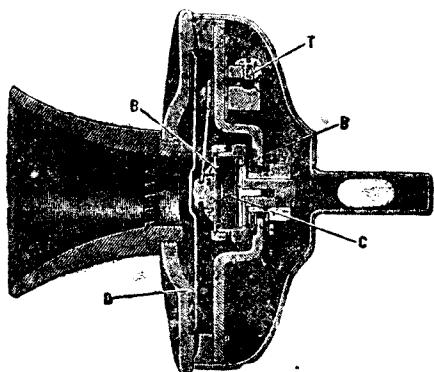


圖 20-8. 話筒的剖面

匣子的側面是絕緣體。前面一塊碳板同一塊薄鐵圓片 D 的中心相連，當 D 片振動時，這碳板也跟着忽向內忽向外地微微移動着。後面一塊碳板，牢牢地裝在話筒套堅實的底部上。從電池組出來的電流，經由端鈕 T 通入前面的碳板，然後經由碳粒，後面的碳板，金屬架以及導線，流出話筒，而由電話線再流入聽筒。當薄圓片稍稍向後移動時，同它連着的碳板便壓緊匣內的碳粒，碳粒的電阻因此減低，而流過聽筒中的電流也因此加強，於是聽筒中的薄圓片也向後稍稍移動一下。當話筒中的薄圓片稍稍向外移動時，匣內碳粒就互相靠得鬆一些，所以電阻增加，於是流過聽筒的電流減少，因而聽筒中的薄圓片也稍稍向外移動一下。在如此互相聯繫的情形之下，話筒中薄圓片的運動，由聽筒中的薄圓片重複照樣表演。因此，向話筒口講話時，空氣的振動傳給話筒的薄圓片，薄圓片便依着一定的方式而振動，這振動由電流傳到聽筒中，聽筒的薄圓片也依着同樣的方式而振動，聽筒接耳部近旁的空氣，就跟着作同樣的振動，這振動傳入聽的人的耳中，他便聽到了發話人的聲音(圖 20-9)。

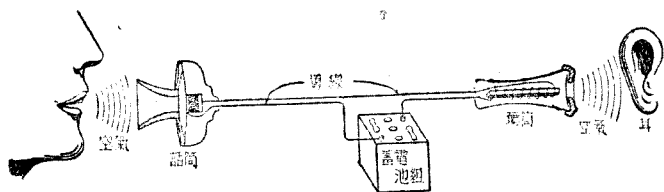


圖 20-9. 簡單的單路電話的電路

372. 【中央電池組與本地電池組電話系統】 剛纔所說的那種電話系統，叫做中央電池組系統(central-battery system)，通行於各大城市。所謂電池組，乃是一個很大的蓄電池組，或一座發電機，裝設在中央電話總機構之內。各線通話時(不論在什麼時刻)，共同使用着這一個電池組。

在許多鄉村電話分局中以及在偏僻的地方，卻採用着另外一個系統，叫做本地電池組系統(local-battery system)。因為這個系統的開辦與養護，都比較簡省得多。即使在城市之中，有時因用戶離總局太遠，也採用相仿的系統。

在本地電池組系統裏面，每一個用戶的電話機中，都有幾個乾電池，同話筒串聯起來，如上節所述。但所生的變動電流，不直接經由幹線送達對方，卻經由一隻小型感應圈的原線圈而回到電池組中去。同時，這小型感應圈的副線圈中，則有完全與原線圈中電流作同樣變動的應電流產生，經由幹線而通入對方的聽筒中(圖 20-10)。這電流的電壓比原來的高得多，因此可以

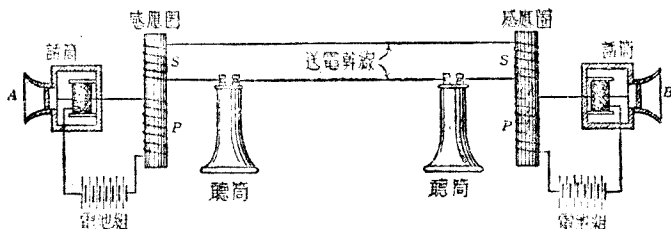


圖 20-10. 簡單的雙路電話的電路，有兩個感應圈

使‘線路損失’大大地減少。所以傳入聽筒中的電能，比直接遞送原來的電流時多一些。就這一層而論，本地電池組系統實在比中央電池組系統好。大城市內所以不採用本地電池組系統，主要的原因是不容易使許許多多的本地電池組，常處於良好可用的狀況之下。

現代的電話設備，複雜到萬分，也奇妙到萬分。例如利用真空管作放大器的長途電話，不用接線人員的自動電話，以及超越重洋的無線電話，都是太專門化了，這裏竟無法講述*。

* 不過你若能參觀一下本地的電話局，你一定可以獲得許多可貴的實際知識。

問 答 題

1. 在導體內產生感應電動勢，非有什麼條件不可？
2. 當你向下望着圖 20-1 的線圈時，若線圈上端是 N 極，則線圈中電流的方向是順鐘向還是反鐘向。
3. 當磁體從圖 20-1 的線圈中被拉向上而動時，線圈的頂端是什麼極？用楞次定律說明。
4. 將軟鐵心放在圖 20-2 的原線圈中，可使副線圈中的電流大大地增加，什麼緣故？
5. 感應圈的副線圈中的電流，與原線圈中的電流，有什麼不同的地方？
6. 感應圈的副線圈中的電流是從什麼地方來的？
7. 單用聽筒兩隻，以及必要的線，可以造成一個短距離的電話系統（無需電池組）。作一概示圖，加以說明。電流從什麼地方來的？
8. 取電鈴一具，拿到黑暗的地方，你就可以看見當電路斷的時候，斷續器的接觸點上有電花發生，但在電路通的時候，卻沒有電花。試將此現象予以解釋。

變 壓 器

373. 【變壓器的構造】 我們早已知道（第 366 節），感應圈有一個直的軟鐵心，鐵心周圍有兩個線圈：一個是原線圈，匝數很少；一個是副線圈，匝數很多。當忽斷忽續的電流通過原線圈的時候，就有一連串的單向高壓電花，在副線圈的兩端之間跳躍

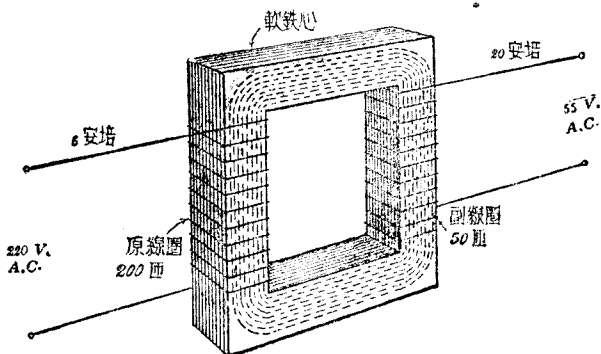


圖 20-11. 理想中的降壓器

不停。這是因為原線圈中的電流突然降低到零的緣故。所謂變壓器 (transformer), 實在就是變相的感應圈。它與感應圈不同之處有兩點: 第一點, 變壓器的鐵心通常是閉合的長方環 (圖 20-11); 第二點, 通入變壓器原線圈中的電流是交流。交流使鐵心中產生交變的磁力線, 這交變的磁力線就在副線圈中感起交變的電壓。由此可知, 所謂變壓器, 也是兩個不相連的線圈繞在同一鐵心上而成的。

374. 【變壓器的作用】 我們必須牢牢記住, 變壓器根本是一個電壓改變器 (voltage changer), 並不能將交流改為直流。要表示變壓器有什麼作用, 最好的方法恐怕是拿一隻電鈴變壓器來說一說。這小小的裝置, 可使我們從平常的交流線路, 取得電能, 以供電鈴發聲之用。它可以把電燈所用的 110 伏特電壓, 變成電鈴或玩具電車所需要的 5 伏特或 10 伏特電壓。

有一種電鈴變壓器的外部構造和內部構造, 略如圖 20-12 所示。它的 A 與 B 兩端, 叫做原端 (primary terminal), 經由保險絲接在 110 伏特的交流線路上。它的 x 與 y 兩端, 叫做副端 (secondary terminal); 當原端間的電壓是 110 伏特時, 在這兩端間的電壓是 10 伏特。我們把它拆開來一看, 看見它的內部構造非常簡單, 祇有一個鐵心和兩個線圈, 必將大為驚奇。鐵心 C 由韌鋼薄片疊置而成, 這些鋼片都用模型打成一定的式樣, 使磁力線成為閉合的曲線。原線圈 P 用塗有珐瑯質的銅線繞成, 約有 880 匝, 而副線圈 S 則僅約有 80 匝。

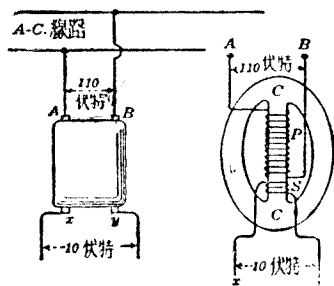


圖 20-12. 電鈴變壓器及其內部的構造

375. 【變壓器的原理】 在任何式樣的變壓器中，有兩個線圈繞在一個公共的鐵心上。當交流通過其中一個線圈（即原線圈）時，鐵心即受磁化，磁力線先依照一個方向潮水似地增減，再在反對方向內增減。因為這些磁力線也通過另一個線圈（即副線圈），所以就在這第二個線圈內感起了交流。又因為通過兩個線圈的磁力線數是相同的，所以每一匝的應電壓也是相同的。於是原線圈兩端間的總電壓，與副線圈兩端間的總電壓之比，等於原線圈匝數與副線圈匝數之比。這個關係，可用式子表示如下：

$$\frac{\text{原線圈上電壓}}{\text{副線圈上電壓}} = \frac{\text{原線圈匝數}}{\text{副線圈匝數}}$$

由此可見，交流的電能，經由鐵心中磁力線的變更，從變壓器的原線圈傳給副線圈。

376. 【平常的配電變壓器】 街道上輸電幹線的電壓，通常約在2400伏特左右。所以我們必須用配電變壓器（distributing transformer），將這電壓降低到120伏特，以供住宅內安全地取用。這樣的變壓器，叫做降壓器（step-down transformer）。它的高壓線圈，有許多匝，用細銅線繞成，連接在2400伏特的輸電幹線上。它的低壓線圈，用粗銅線繞成，匝數很少，連接在通入住宅的電燈線路上（圖20-13）。就現在所舉的這個例子而論，高壓線圈（即原線圈）的匝數，必須

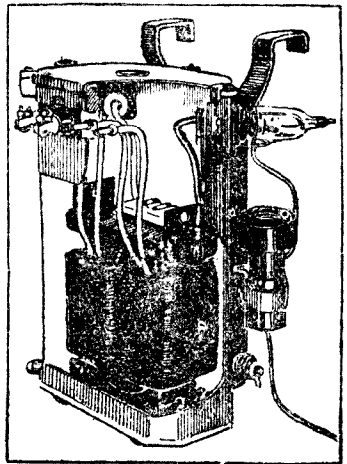


圖 20-13. 將電壓從 2400 伏特降低到 120 伏特的配電變壓器

等於低壓線圈(即高線圈)匝數的 20 倍 ($2400 \div 120 = 20$)。但是副線圈的銅線必須比原線圈粗,因為在副線圈中通過的電流,是原線圈中的 20 倍。換言之,變壓器所輸出的能量,差不多等於它所輸入的能量;損失雖然也有,為量卻很微小,不過百分之二到五。這損失掉的能量,變成了熱量使變壓器的溫度升高,所以要設法將它散掉,以免變壓器的損壞。由此可見,變壓器的效率是很高的,通常約從百分之 95 到 98。

377. 【變壓器的用途】 在電燈廠中,通常所用的交流發電機,其所發電流的電壓是 2400 伏特。這電流就在這樣高的電壓下被輸送到各區,再用降壓器將它的電壓降低到 115 伏特,以供使屋內電燈放光之用。降壓器的另外一個重要用途,是供給低壓強電流,用在電熔爐及電銲方面(圖 20-14)。



圖 20-14. 正在建築中的大廈,它的鋼梁接合處用電弧來銲牢

下面的實驗,可以證明變壓器的這個用途。取很粗很粗的銅線 S , 在小型降壓器的鐵心 X 周圍,繞上一匝或兩匝,如圖 20-15 所示。將這降壓器的原線圈 P 的兩端,連在 110 伏特的交流

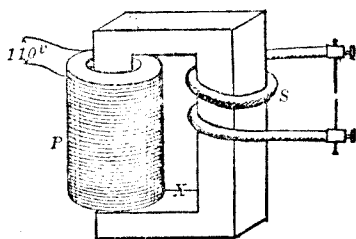


圖 20-15. 用於銲接實驗的降壓器

線路上(倘若有交流線路可用)。將粗線的兩端連在兩枚小釘上。假使把小釘的兩端靠攏,而 P 中有電流通過,則 S 中即有強大電流通過,兩釘變成紅熱,可以銲接起來。

電車軌道的鄰接兩段,往往用這個方法銲接在一處。所需

要的暫時的強大電流，可從降壓器取得。這降壓器的副線圈，用很粗很粗的銅線繞成，祇有一匝或兩匝。副線圈的兩端，夾住在待銲接的兩段軌道上，正和上述實驗中所說連在兩枚小釘上的情形相同。

378. 【長途遞送電能】 利用高壓交流——電壓有高達 200,000 伏特以上的——現在已可將電能遞送到很遠的地方去。例如美國加州西拉奈伐達山 (Sierra Nevada Mountain) 水力發電廠中發出來的電能，就是用高壓交流遞送到相距 250 哩的洛杉磯 (Los Angeles) 去的。用高壓來遞送電能，深合經濟原理。要了解這一點，我們應當記住，在單位時間內所遞送的電能，看電壓與電流的乘積而定。就遞送同值的電能而論，若將電壓提高，電流即可降低，這是很明白的事。但是所遞送的電流較小，損失也較少；因為損失來自電流的熱效應，而熱量的產生則與電流的平方成正比例。

在美國，見有三條或六條銅(或鋁)纜，每條的直徑約為四分之三吋，高高架在鋼柱上，離地約 75 呎，正在按着 40000 仟瓦的功率遞送電能，那是不足為奇的。美國的水力發電廠，正在全國各地區建立起來。例如在耐曼拉瀑布的幾處水力發電廠，它們整日整夜發電，把電壓提高到 60,000 伏特，而將得自瀑布的能量，遞送到羅徹斯特 (Rochester)，敘拉古 (Syracuse)，以及其他各城市的總站去。總站之外有分站，在分站的電壓降到約 2000 伏特。然後再由各分站將電流分配給各工廠，各住戶，以及電車公司，供運轉機器，開行電車，以及發光發熱之用。在電流尚未入屋以前，電壓再度降落，約降到 220 或 110 伏特。

在發電總站都裝有昇壓器 (step-up transformer)，這些昇壓器接受的電流，其電壓約從 2,400 伏特到 11,000 伏特。昇壓器將電壓提高到 50,000 伏特至 22,0000 伏特後，再將電流送到遞

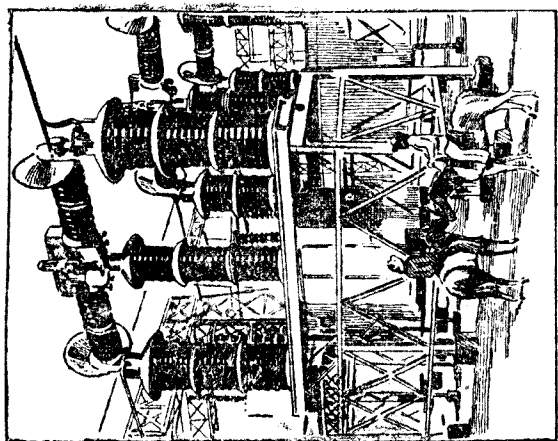
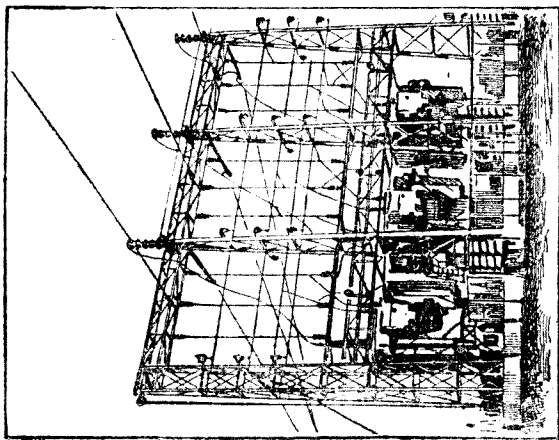


圖 20-16. 現代戶外輸電裝置。輸電線架在很高的鋼柱上。左：變壓器與送電器。
右：高壓開關。此線路輸送的電流約有 1200 安培，電壓是 287,500 伏特。

能幹線上(圖 20-16)。在這個過程裏,變壓器的輸入是不會多於輸出的,因為輸入的功率,與輸出的功率,都等於電壓與電流相乘之積。副線圈兩端的電壓,固然可以提高到原線圈電壓的若干倍,譬如說 10 倍,但在同時,副線圈中的電流,卻降低到不及原線圈電流的十分之一。換言之,電壓用 10 乘,電流須用大於 10 的數除,故就變壓器輸出的功率而論,總是祇有損失而無盈餘的。在很大的大型變壓器中,須用油為絕緣體,這油,又得用水冷法使它冷卻。在現代高壓遞能裝置中,多採用戶外變壓器與戶外開關(圖 20-16),因為這種式樣比室內變壓器與室內開關好得多。

379. 【疊片鐵心. 渦流】 變壓器的鐵心,是用軟鐵片或柔鋼片軋成所需的形狀,然後將它們疊合而成的。感應圈的鐵心,是將軟鐵絲束在一起而成的。若將發電機或電動機的電樞,細細察看察看,則將見那鐵質鼓體,也由柔鋼片重疊而成。這些鋼片都軋成圓形,邊緣上有若干缺口,如圖 20-17 所示。鋼片軋好之後,再將它們裝牢在鼓體上。這樣做成的鐵心,叫做疊片鐵心(laminated core)。變壓器,感應圈,電樞等的鐵心,不但由鐵片或鐵絲集合而成,而且由一層蠟膠使片與片之間或鐵絲與鐵絲之間,彼此絕緣。其目的,在於消除所謂渦流(eddy currents),或佛科電流(Foucault currents)。

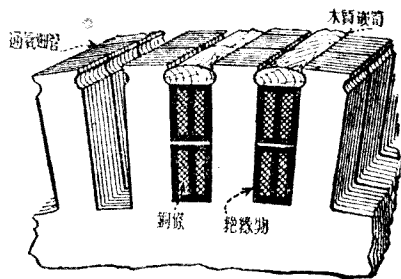


圖 20-17. 發電機電樞的疊片鐵心

在研究發電機的時候,我們已經知道,若有導體在磁場中運動,把磁力線切割,那麼就有應電動勢要送一道電流通過這導體。

發電機中輸送這電流的是銅線，但銅線是繞在鐵心上的。這鐵心本身也是導體，所以當它在磁場中旋轉的時候，也有一個應電動勢在鐵心內產生。這個應電動勢，便要送幾道電流通過鐵心的幾部分。這些電流，就叫做渦流。渦流的發生，立刻使鐵心發熱，並阻礙了電樞的旋轉，虛耗了電能。為儘量減少渦流起見，我們就採用了疊片式的鐵心，它的絕緣點很多很多，把渦流的通道橫截成許多小段，這樣就不會有很大的渦流發生了。

380. 【利用渦流以得阻尼的能效】。欲表示渦流對於在磁場中運動的導體有阻尼(damping)的趨勢，可作下述的實驗。取厚銅塊做成的擺一個，將它掛在強電磁體的兩極之間，如圖 20-18 所示。若電磁體未經激發，則擺錘在兩磁極間來往自如，同平常的擺無二。但若將電流通入電磁體，則銅擺立即受到阻礙，不能擺過磁場。又若將此整塊的銅擺，換一個擺錘上橫刻着一排鋸痕的相似銅擺，則見渦流的阻尼能效，即減去不少。銅擺中的渦流阻礙擺的運動，其情況正與將擺放在濃厚的糖漿裏面一般。

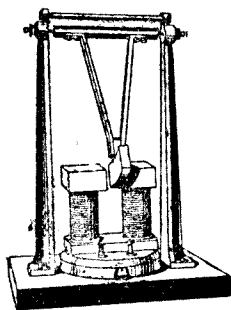


圖 20-18. 銅擺因渦流的發生而受阻尼

渦流的阻尼能效，在達松發爾電流計(第 317 節)中，可以阻止那可轉線圈的擺動。這線圈的銅線，通常繞在一個很輕的銅架或鋁架上，線圈轉動時，多虧這金屬架內的渦流阻止了它的擺動，使我們很快地看清了指針所指的讀數。故這種電流計又叫做‘不擺電流計’(dead-beat galvanometer)。應用這同一原理，我們可使瓦特小時計中的圓片，不至於轉得太快，這在第 337 節裏面，是已經提過的了。

在各式速率計(speedometer, 圖 20-19)中，我們可以看見有

一個磁體依照車行的速率旋轉着。這磁體放在一個鋁匣內，這鋁匣可在支樞上很靈活地轉動，但又被細彈簧牽住。當匣內的磁體旋轉時，匣上即有渦流產生，故匣即被拉而轉過一角（若無彈簧牽住，匣將隨磁體同轉），此角的大小，看磁體旋轉的速率而定。匣與指針相連，指針在刻度盤上移動，即可指示車行速率是每小時多少哩。

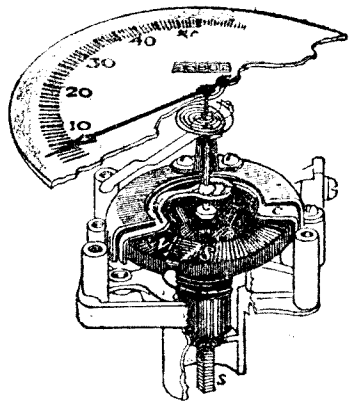


圖 20-19. 汽車速率計，蓋子揭開，可見其中的旋轉磁體，這磁體裝在鋁質鼓形匣 c 內，旋轉時鋁質鼓形匣上有渦流發生，所以鋁匣轉過一角，由指針指示出來，角的大小跟着速率一同增加。

問答題與計算題

1. 用手指接觸大型感應圈的副線圈兩端，是非常危險的。什麼緣故？
2. 電流穩定時，電路的自感應便不顯出來，這是什麼道理？
3. 在感應圈上需要斷續器，在變壓器上不需要，什麼緣故？
4. 電流實在是一串移動着的電子。發電機是不會產生電子的。那麼發電機做的是什麼工作？
5. 長途輸送電流的電纜，有時用鉛製成而不用銅，什麼緣故？
6. 接在電鈴上的雖然不過是兩隻乾電池，但有時以手觸電鈴，竟會發麻，什麼緣故？
7. 有的感應圈，用 6 伏特蓄電池即可發生十萬伏特的電花。說明電壓何以增加得如此之高。
8. 長途遞送高壓電流的電線，往往架在鋼柱上，離地 75 呎或 75 呎以上。此外，公司還要收購一條 100 呎寬的地帶，專供敷設電線之用。為什麼要有這些預防的措置？
9. 在高壓輸電線上，實際所用的電壓有沒有限制？若有，什麼緣故？
10. 直流電路上為什麼不能用變壓器？
11. 用變壓器使電壓從 1100 伏特降低到 220 伏特，原線圈與副線圈的匝數比，應該是幾何？
12. 圖 20-20 所示的，是一隻電鈴變壓器的蓋子。(a) 作匣內接線情狀的概示圖；(b) 在每一線圈上註明合理的匝數。

13. 變壓器一隻，它的原線圈有 60 匝，副線圈有 1200 匝。若原電壓是 500 伏特，則副線圈兩端的電壓是多少？

14. 第 13 題中的變壓器，若有電流 2 安培通過它的副線圈，則在原線圈中有多少電流通過？

15. 計算第 14 題中的輸入功率與輸出功率，假定沒有損失。

16. 某水力發電廠，發出電壓 2300 伏特，電流 1000 安培。(a) 若將電能按此功率傳遞到遠處，而電線的電阻是 2 歐姆，則線路損失有幾仟瓦？(b) 若先將電壓提高到 23,000 伏特，則線路損失有多少？

(c) 在兩種情形之下，線路的其他端有多少仟瓦可得？

注意：在下列各語中，選出不錯的部分。

17. 向電話機(圖 20-19)發話時，原線圈電流是 (a) 穩定的直流，(b) 脈動直流，(c) 交流。

18. 向電話機發話時，副線圈電流是 (a) 穩定的直流，(b) 脈動直流，(c) 交流。

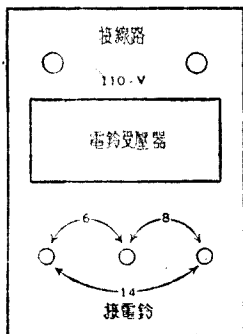


圖 20-20. 電鈴變壓器

交流電路的性質

381. 【阻抗】 設電鈴變壓器原線圈的電阻，經測定是 13 歐姆，那麼把這變壓器接在 110 伏特交流線路上，我們也許以為會有 $\frac{110}{13} = 8.5$ 安培的電流，通過它的原線圈。但如果在原線圈上串聯一隻交流安培計，即見實際上流過原線圈的電流，祇有 0.05 安培。由此可知，除電阻以外，明明還有別的什麼障礙，使交流不得在原線圈中暢通。線圈對於交流的這種障礙，叫做**阻抗** (impedance)。就本例而說，阻抗是 $\frac{110}{0.05} = 2200$ 歐姆。這

線圈若接在 110 伏特直流線路上，是有很快地燒斷之虞的；但是接在 110 伏特交流線路上，差不多沒有電流通過。

取白熾燈一盞，同一個線圈串聯起來，如圖 20-21 所示。線圈中有一個鐵心，可以隨時取出。

先將鐵心取出，而使直流通過線圈與燈。我們可以看出電燈發光很亮。若將

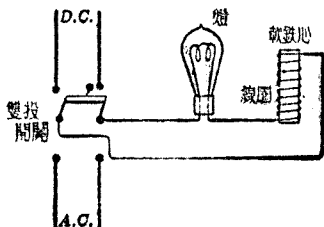


圖 20-21. 電燈與電感線圈在直流電路及在交流電路上串聯

鐵心插入線圈中，燈光的亮度並不稍減。現在再將鐵心取出，把燈和線圈連接在交流電源上，電壓與直流相同，即見燈光變得很暗。若再將鐵心插入線圈，則使燈光暗淡的效果，更為顯著。

把交流扼住的這種作用，即是線圈的自感應所招致的（第369節）。當交流在線圈內變動時，有一個反電動勢為自感應所引起。這反電動勢是與外來的電動勢相反的；因此，驅使電流通過線圈的淨電壓（等於外來電壓減反電壓），就比原來的小得多。其結果，無異於大大地增加了電阻。換句話說，交流在含有線圈的電路中通過時，歐姆定律變成了下面的式子：

$$\text{電流} = \frac{\text{電壓}}{\text{阻抗}}$$

或

$$\text{阻抗} = \frac{\text{電壓}}{\text{電流}}$$

382. 【交流電路中的功率】 我們早已知道（第334節），在直流電路中，功率的瓦特數等於伏特數乘安培數。在沒有自感應的交流電路——例如平常白熾燈的電路——之中，也可以適用這同一的定律。但在有自感應作用的電路——例如變壓器的原線圈——之中，我們若用瓦特計測定其功率，即見所測得的功率，小於伏特數與安培數相乘之積。交流電路中實功率與視功率（apparent power，即伏特數與安培數相乘之積）之比，叫做功率因子（power factor）。

交流功率（瓦特數）= 伏特數 × 安培數 × 功率因子。

例如就上節所述的變壓器而論，瓦特計的讀數似應為 $110 \times 0.05 = 5.5$ 瓦特。但在實際上它的讀數祇有 4 瓦特。所以這變壓器原線圈的功率因子是

$$\frac{\text{實功率}}{\text{視功率}} = \frac{4 \text{ 瓦特}}{5.5 \text{ 伏特} \cdot \text{安培}} = 73\%$$

若電路中祇有電阻，那麼它的功率因子便是 100%。但在有自感應的電路中，功率因子是常小於 100% 的。電路中自感應的作用愈大，功率因子愈小。就實際情形而論，有電燈又有電動機的商用電路，它的功率因子大約是百分之八十五。

383. 【容電器在交流電路中】 若將白熾燈一盞與容電器一隻

串聯在直流電路上(圖 20-22),燈是不會放光的,因為電路在容電器的兩板間沒有通。但若將這同一電路接在交流電路上,雖然在容電器的兩板之間電路仍沒有通,電燈也會放光。

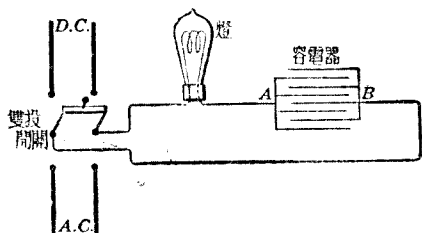


圖 20-22. 電燈與容電器在直流電路及在交流電路上串聯

在有容電器的交流電路中,電流雖然沒有通過容電器,卻在容電器的兩板上流進流出。使燈

放光的,就是這浪潮般來去的電。若減少容電器的大小,燈光即不復可察,因為容電器的電容太小了,就不足以使燈放光。

容電器在交流電路中的作用,可以用圖 20-23 所示連在水

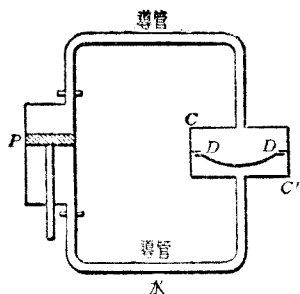


圖 20-23. 用水比喻容電器在交流電路上的作用

管上的水箱來比喻。這水箱分成兩部分, C 與 C' , 用一塊彈性膜 D 隔開; 兩部分都經由導管與一隻抽機 P 相通。這抽機的活塞上下移動時, 水在導管中也能夠來往激盪, 因為薄膜是有彈性的。水依着順鐘向盪動時, 薄膜向下凹; 水依着反鐘向盪動時, 薄膜向上凹。所以水在管中浪潮似的不停地來往, 薄膜即不停地受到脅迫。

這抽機, 相當於交流發電機; 水箱的兩部分, 相當於容電器的兩組金屬片; 薄膜相當於介體, 即容電器兩組金屬片之間的絕緣體。

當交流在電路中依一個方向流動時, 容電器的一組金屬片即帶正電, 他組金屬片則帶負電。電流方向倒轉時, 容電器兩組金屬片上的電荷, 也正負交換。在平常的電燈電路中, 這交換的

過程每秒鐘有 120 次，所以電在容電器中流進流出是很快的。容電器在有線電話與無線電話方面，都是很重要的部分。

問答題與計算題

1. 阻抗與歐姆電阻 (ohmic resistance) 有什麼區別？
2. 適用於直流電路及沒有自感應的交流電路的公式，是

$$\text{電流} = \frac{\text{電壓}}{\text{電阻}}$$

試立一個相仿的公式，俾可適用於有自感應的交流電路。

3. 電阻是 55 歐姆的直導線，連在 (a) 110 伏特直流線路上時，(b) 110 伏特交流線路上時，有多少電流通過？

4. 若將第 3 題中的導線繞在一個軟鐵心上，則 (a) 從 110 伏特直流線路可取得多少電流？(b) 連在 110 伏特交流線路上時，電流祇有 0.4 安培。為什麼這樣少？阻抗有多大？

5. 變壓器一隻，從 110 伏特交流線路上取得 7.5 瓦特，功率因子是百分之 60。問它取得電流多少？

6. 線圈一個，連在 230 伏特交流線路上，阻抗是 45 歐姆，功率因子是百分之 75，問它消耗電能的功率是多少？

交流電動機

384. 【交流電動機】 交流發電機也可以用為電動機，祇要先使它轉動，速率與供給電流的交流發電機完全相同，電樞與磁場相對地位的改變，也與電流通入其中而交變的情形完全相同。這樣的一種機器，叫做**同步電動機**(synchronous motor)。因為它不能自行開動，所以通常用起來是很不方便的。但在分廠中及小站上，可以用它來運轉直流發電機。這種電動機的轉動速率，始終與交流發電機完全相同。小型同步電動機，目下在電鐘裏面用得最廣，因為交流線路的頻率，是維持得非常穩定的。

將平常的串繞電動機在其設計方面稍稍改一下，就可以使它成為交直流兩用的電動機。這種電動機叫做**換向電動機**(commutator motor) 或**單相串繞電動機**(single phase series motor)，用交流行駛的電車及電機車上所裝設的便是。電扇及

真空除塵器，也有採用小型換向電動機的，它們的名牌上，都註明着‘交流或直流’(A-C. or D-C.)字樣。

在工商業上用得最多的電動機，叫做感應電動機(induction motor)。這種電動機有兩個特點：(一)不轉的部分即所謂定子(stator)，引起一個旋轉磁場(rotating magnetic field)；(二)旋轉的部分即所謂轉子(rotor)，則造成特種的形式叫做鼠籠式(squirrel cage)。圖 20-24 所示，便是這兩部分。它們的作用，下文就要予以論述。

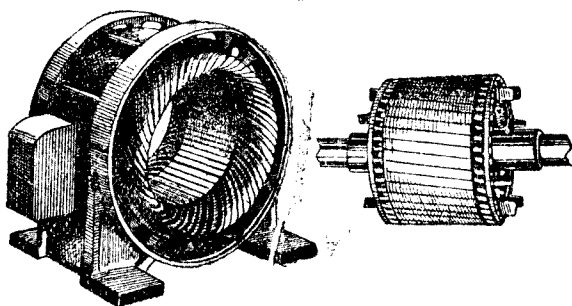


圖 20-24. 感應電動機的定子(左)和轉子(右)

385. 【旋轉磁場】 設有兩道交流，它們的頻率相同，而它們的交變消長，隔開四分之一週的時間，那麼就可以產生一個旋轉磁場。這樣的兩道交流，我們常說它們有 90 度的相位差(phase dif-

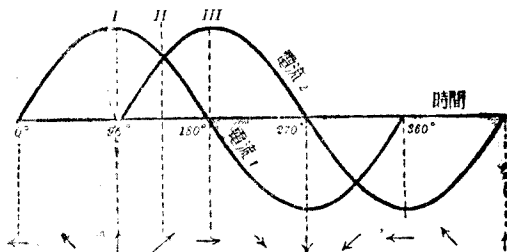


圖 20-25. 曲線表示兩電流，其相位差是 90°，在線路 1 和線路 2 中流通

ference)。圖 20-25 中的兩條曲線，即可表示有 90 度相位差的兩交流變動情況。這兩道交流，我們使它通入兩組線圈，這兩組線圈繞在一個圓鐵環中向內突出的四個極上，如圖 20-26 所示。

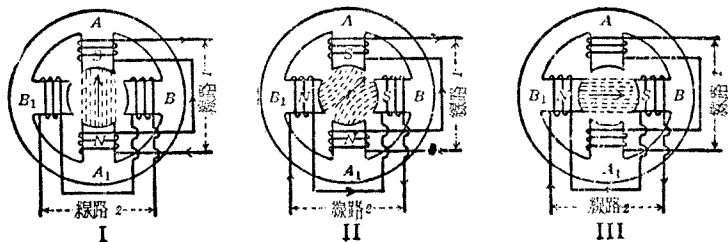


圖 20-26. 相位差是 90° 的兩電流產生旋轉磁場

當電流 1 到達最高值時，從圖 (20-25) 中曲線可見電流 2 是零。A 與 A₁ 兩個極 (圖 20-26) 都受磁化，但 B 與 B₁ 則未受磁化。磁力線從 N 到 S，如圖中箭頭所示。隔八分之一週的時間 (45 度) 之後，電流 1 降低，電流 2 升高，兩者到達同值。這時候，四個極受到同樣程度的磁化，磁力線的分布情況如 II 所示。再隔八分之一週 (45 度) 的時間之後，電流 1 已降低到零，電流 2 到達最高值。此時 A 與 A₁ 兩極不受磁化，而 B 與 B₁ 兩極則受磁化到最高程度，磁力線示 N 到 S，如 III 中箭頭所示。若在交流的完全一週中，這個過程繼續時時進行，則我們就可以見到，箭頭的方向轉過了 360 度。這樣一來，就產生了旋轉磁場，這磁場，可以使其中的磁體跟着它旋轉。於是我們就有了一隻小小的二相 (two-phase) 交流電動機。

386. 【感應電動機的轉子】 跟着旋轉磁場旋轉的磁體，當然可以用電磁體來代替，這電磁體，可從外面的電源導入直流去激發它。然而商用交流電動機的轉子，卻是簡單得多的。這種轉子有一個鐵心，很像鼓體電樞的鐵心，面上也開着槽，布滿了

整個鐵心的周圍，但槽內嵌的不是線圈，而是一條條很大的銅條（不絕緣的），銅條兩頭，牢牢鑲住在兩個銅環上。這就是所謂鼠籠式轉子（圖 20-24）。

鼠籠式轉子放在旋轉磁場中的時候，在轉子兩側的銅條以及鉗住在銅條兩端的銅環，無異於一個閉合的導線環。旋轉磁場的磁力線橫掃過這環時，環雖與外面任何電路不相聯繫，環內也有很大的電流被感起。（銅條雖不絕緣，鐵心內並無電流通過，因為疊片式鐵心的電阻在沿軸的方向內很大，而銅條內的應電動勢很低。）這很大的應電流，使鐵心成為磁體，於是旋轉磁場對這磁體發生作用，拉着它同轉。

轉子的速率，是永遠跟不上旋轉磁場的。如果轉子轉得真同旋轉磁場一樣快，銅條就要不切割磁力線，其中就不會產生應電流，因而就不能得到電功率，可使轉子帶着負荷一同轉。

鼠籠式轉子既簡單而又很堅固。它所需要的只是保冷罷了。使它冷卻的方法，通常用扇子把冷空氣不斷地吹過鐵心。全部機器裝配就緒之後，堅固緊密，而且使用簡易，差不多‘人人懂得’。因此，感應電動機在工場及工廠中的用途很廣，甚至在電機車上，也有它的用處。另外有一種感應電動機，它的轉子是線繞式，同直流電動機的電樞有些相像。這種電動機加上適當的外電阻，可以獲得很好的開動



湯姆生 (Elihu Thomson, 1853-1937)。生在英格蘭，但在美國受教育，住在美國。在電器製造業方面也是一個先進者。研究過交流，高頻率；發明瓦特小時計與電鍍術

特徵 (starting characteristics), 例如低電流與高轉矩。

問 答 題

1. 工程師在發電廠內, 怎樣可以控制交流的頻率?
2. 四極發電機發出 60 週的交流, 每分鐘必須旋轉多少次?
3. 有許多式樣的電鐘, 必須用手撥針, 使它們開始走動, 這是什麼緣故?
4. 激發 (a) 直流發電機, (b) 交流發電機的磁場, 那電流是從什麼地方來的?
5. 說明感應電動機的轉子為什麼會旋轉。

第 二 十 章 提 要

應電流祇在通過電路的磁力線有變更時纔存在。

應電流所取的方向, 目的在於反對那引起應電流的運動。這就是林慈定律。

自感應, 或電感, 是電路的一個性質, 要使它的磁場反對電流有任何變更。

電話的聽筒內有永久磁體, 它的兩極的磁性忽強忽弱, 但並不交換。

電話的話筒內有碳粒, 它的電阻因所受壓力的改變而改變, 使壓力改變的是一塊振動的薄鐵片。

變壓器中

$$\frac{\text{原線圈上的電壓}}{\text{副線圈上的電壓}} = \frac{\text{原線圈匝數}}{\text{副線圈匝數}}$$

長途輸送電能, 用高電壓與低電流可以減少線路損失。

鐵心, 不論是變壓器中的還是電樞中的, 都用疊片式, 藉以減低由渦流所引起的損失。

$$\text{阻抗} = \frac{\text{交流伏特數}}{\text{交流安培數}}$$

交流功率 = 伏特數 × 安培數 × 功率因子。

功率因子通常比一小。

電流並不流過容電器，但是的確流進又流出容電器。因此，在交流電路中，容電器是用得很多的。

同步電動機的構造同於交流發電機。

交流串繞電動機在構造上很像直流串繞電動機，往往可以交直流兩用。

感應電動機有一個定子，定子中的電流感起一個旋轉磁場；有一個轉子，其中有電流為旋轉磁場所感起。

問 答 題

1. (a) 沒有自感應的電路與有自感應的電路，各舉一例。(b) 說明為什麼一個電路有自感應，還有一個電路沒有自感應。
2. 為什麼電磁體有電感，而與電磁體上的線同長同粗的單根直導線沒有？
3. 測定交流電路中的電流，是不能用通常的直流安培計的。什麼緣故？
4. 大型交流發電機，使其磁場轉動，電樞固定，有什麼好處？
5. 感應電動機勝過那需要電刷的電動機，有哪些優點？
6. 可以把交流變成直流的方法，說出兩個來。
7. 在某大城市中有一宅房子，使房子內電燈放光的電流，來自一個水力發電廠，該廠是建立在羣山之中的。(a) 說明電燈所利用的能，從太陽得來。(b) 追溯能從太陽跑到電燈中去的各次轉換步驟。
8. 電燈一盞同大型容電器一隻串聯後，先接在 110 伏特的直流線路上，再換接在 110 伏特的交流線路上。燈在哪一條線路上放光？什麼緣故？

複習問答題與計算題

第十八章

1. 說出不能用电磁體而祇可用永久磁體的兩樁用處來。
2. 怎樣可使磁體浮懸在空氣裏面？
3. 小型電池池若須用乾電池四個，這四個電池應該串聯還是並聯起來？為什麼？
4. (a) 在電報電路裏面，為什麼不可以用乾電池？(b) 在這種電路裏面，電池的消耗率以什麼為主要因子？
5. 許多安培計有兩條刻度尺，一條的讀數也許是 0 到 10 安培，還有一條也許是 0 到 100 安培。同一儀器怎樣可以用在兩個不同的範圍之內，說明其理。
6. 有一件用鐵鑄成的東西，要先鍍一層銅，再鍍一層鎳。若每次所用的電流是 10 安培，而澱積在物件上的金屬，每種都是 8 噸，則兩次浸在池內，各需多少時間？(1 噸 = 28.35 克。)

7. 用 12 隻蓄電池聯成的蓄電池組，其電動勢是 24 伏特，而內電阻是 0.06 歐姆。現在要將 20 安培的電流通入，使它充電，問必須有多少伏的電壓加上去？
8. 有鉛蓄電池一隻，它的斷路電壓是 2.3 伏特，送出電流 10 安培時的端電壓是 2 伏特。問這電池的內電阻是多少？
9. 無軌電車一輛在斜坡上向上行駛，它所用的電流是 90 安培，電壓是 550 伏特，問它所輸入的馬力是多少？
10. 電弧燈一盞，接在 45 伏特的電路上，有電流 9 安培通過此燈。問在 3 小時內燈中所發的熱量是多少？
11. 在 110 伏特線路上及在 115 伏特線路上使用 30 歐姆的電熱器，比較電能的消耗率。
12. 一隻電冰箱接在 110 伏特線路上，它的電動機需用電流 1.5 安培。若每半小時內開 3 分鐘，而電費是每仟瓦小時銀幣 1 角 8 分，則一天的費用是多少？
13. 從一仟瓦小時可得多少卡的熱(假定能量毫無損失)？
14. 白熾燈六十盞，每盞放光時的電阻是 220 歐姆，並聯在 110 伏特的線路上。若電能在傳遞時的損失率是 750 瓦特，則供給電流的發電機，它的發電量是多少仟瓦？
15. (a) 若電費每仟瓦小時銀幣 1 角 8 分，則花銀幣 3 分，一具 660 瓦特的電熨斗可以使用多少時間？(b) 若有真空除塵器一隻，需從 110 伏特線路上取電流半安培，則照上述電費，花銀幣 3 分，可以使用幾小時？
16. 若電費每仟瓦小時銀幣 3 角，則將 55 歐姆電熱器接在 55 伏特電路上，比接在 110 伏特電路上，每小時的代價孰大？
17. 軍用探照燈一盞，按 25 仟瓦的功率消耗電能時，可發 300,000,000 支燭光。(a) 此燈接在 110 伏特線路上，取用多少電流？(b) 每燭光消耗幾伏特？
18. 有 220 伏特 550 瓦特和 110 伏特 550 瓦特的電熱器兩隻，比較它們所發的熱量。
19. 一隻 50 瓦特的電燈泡，放在 10°C . 的水 400 克中，經過 8 分鐘將水熱至 18°C . 把這燈泡當作電熱器看，它的效率是多少？
20. 在住宅裏面最容易惹起火災的單獨原因，據說是電熨斗。有同樣瓦特數的電熨斗，電烘爐，以及電熱器，為什麼電熨斗格外危險到如此地步？

第十九章

1. 所謂‘電動機的發電機效應’，是什麼意思？
2. 激發 (a) 直流發電機的磁場，(b) 交流發電機的磁場，所用的電流是怎樣得到的？
3. 單線圈雙極發電機，必須每分鐘旋轉多少次，纔能夠發出每秒 60 週的電流來？
4. 八極發電機必須每分鐘旋轉多少次，纔可以發出 60 週的交流來？
5. 電動機一座，它的內電阻是 0.4 歐姆，接在 150 伏特的線路上，依正常速率旋轉時，通過它的電流是 15 安培。問這電動機中所產生的反電動勢是多少？
6. 瀑布高 25 呎，每分鐘的流量是 550 立方呎。用這瀑布來發電，若水輪

機與發電機的聯合效率是75%，則從此瀑布可得有效功率多少仟瓦？

第二十章

1. (a) 電磁感應與靜電感應，哪些地方是相像的？(b) 那些地方是不相像的？
2. 電動機，發電機以及變壓器的鐵心，都用軟鐵片疊成。爲什麼要這樣做？
3. 電可以生磁而磁又可以生電。關於電的其他可逆作用，試舉出兩種來。
4. 感應圈一個，它的原線圈有100匝，副線圈有20,000匝。若原線圈電壓是6伏特，則副線圈電壓是多少？若偶而觸及這感應圈的副端，也許不會受到大傷害。什麼緣故？
5. 有110伏特0.5安培的電燈四十盞，從變壓器的副線圈取用電流。若原線圈中的電流是2安培，則其兩端間的電壓是多少？
6. (a) 變壓器一隻，它的降壓比是5。若原線圈中電流是15安培，電壓是550伏特，則從它的副線圈取用電流，可使50瓦特的電燈幾盞放光？(b) 若電燈多開十盞，則在兩電路中有什麼變故發生？

第二十一章

聲 波

387. 【爲什麼研究聲學?】 在比較高深一些的物理學教科書裏面,討論聲學時往往把它看成了力學的一部分,因爲一切聲音的產生,無不由於物體的振動。這一種形式的運動,雖然好算得最常遇見的運動,可是在本書之中,一直還沒有討論過。凡是機械的結構,其中都有振動發生,例如坐在正在行駛的汽車裏,或站在一架正在轉動着的引擎旁邊,都可以覺得車子或地板,振動不停;即使是地球,有時也要振動(地震)。前面已經提起過,熱和光的遞送過程,都是波動的進行,好像水波在水面上進行一般。聲音的遞送,也是波動的進行,不過傳遞聲波的不是假想中的以太,而是實在的物質,例如空氣。除了熱波,光波,聲波以外,還有電波,無線電收音機中的音樂,就是這電波從遠處送過來的。這些波,都有相同的通性,其最大的不同之點,在於所謂**頻率**(每秒的振動次數)。凡此種種,下文還要分別予以論述,這裏不過提一提罷了。

近幾年來,居住在都市裏的人,都覺得到處‘聲音嘈雜,不堪入耳’。爲應付這新興的局面,而謀有所補救起見,就產生一批專門的人才,叫做**聲學工程師**(acoustic engineer)。這班專家的任務,是校正各處公衆會場的傳聲特性,設計無聲電冰箱與無聲打字機,減除汽車引擎的軋軋之聲,以及製造更完善的揚聲器(喇叭),供收音機及有聲電影之用。在本章及下一章內,我們將

要討論聲學的少數基本原理，及其比較普通的應用。

388. 【聲音從何而來？】 鈴或鐘發聲的時候，我們看見鈴錘或鐘舌把鈴或鐘敲打，而我們就差不多在同時聽到了鈴聲或鐘聲。但是敲打的效果，還有一個，這效果，我們必須在鐘被敲打之後，取一支鉛筆抵住鐘緣，方纔知道。原來那鐘體正在很快很快地來往振動着。又如琴弦給弓摩擦時，我們一面可以聽見琴聲，一面又可以看見琴弦比未被摩擦時看起來闊一些。由此可知琴弦正在來往振動着。取音叉 (tuning fork) 一枚，把它敲一下，拿近耳邊，我們就可以聽見一個聲音；若用舌尖輕觸這發聲的音叉，即可覺得它也在劇烈地振動着。

要使音叉的振動也可以看得見，我們可取輕而小的玻璃珠一粒，或通草製小球一個，用線懸掛，拿在手中，而使球與音叉接觸(圖 21-1)。此時即見小球跳動，頗為劇烈。用小型電弧燈將球的影子投射在屏上，這振動還可以看得更清楚一些。

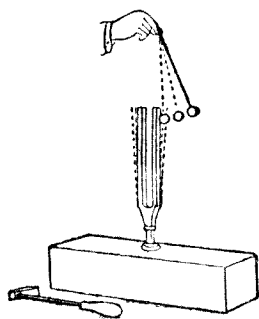


圖 21-1. 音叉的振動可以看得見

另外一個方法，是在音叉一股的頭上裝一個筆尖似的小針。若在音叉發聲時，拿一塊薰過煙的玻璃輕觸針尖而在針尖的下方拉過，則玻璃上即有痕跡留下。取一張白紙托在玻璃背面，或用燈光照射，玻璃上給針尖劃出來的曲線，就可以看得很清楚(圖 21-2)。

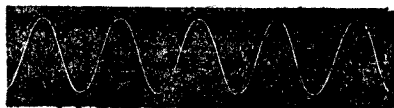


圖 21-2. 振動中的音叉在移動着的薰玻璃板上所劃的波狀曲線

聽見了聲音而追尋聲音的來源，總可以看見有什麼物體正在作振動(vibratory motion)。也許有什麼東西落在地上，或有什麼東西被敲打，或有人吹哨子，或有人在叫喊。在每一種情形之下，總有一個物體正在振動着，這振動，就是引起聽覺的原因。

389. 【傳聲的是什麼？】 平常把聲音傳到我們耳朵中來的，就是在我們四周圍的空氣。下述的實驗，可使你相信平常傳聲的，的確是空氣：

取良好的真空抽機一具，在它的玻璃罩內，用橡皮帶掛一隻電鈴（圖 21-3）。最好在玻璃罩的托盤上，墊一層厚約 1 毫米的橡皮，因為橡皮是會把聲波吸收掉的。有了這層橡皮，就無需再用蠟封口，以求密閉。若在電鈴線路中裝一隻開關，以便隨時可使電鈴發聲，然後再將玻璃罩內的空氣抽出來，則鈴聲即愈來愈輕。但是當我們把空氣再放進去的時候，鈴聲便又同起初一樣的響亮。倘若真能把玻璃罩內的空氣完全抽掉，又若沒有一些聲音從支持電鈴的地方傳出來，那麼鈴聲必將一些也聽不到。

我們知道熱與光都可通過真空，電燈泡就是一個很好的證據。但是聲音決不能通過真空，上面所說的實驗就是很好的證據。

我們還可以證明，空氣以外的其他氣體，也能夠遞送聲音，而液體與固體的傳聲，比氣體更好。例如你若將耳朵放在水裏面，而在離開你不很遠的地方，有人把兩塊石頭一同擲在水中，那麼你就可以把兩石擊水之聲，分辨得清清楚楚。將耳朵緊緊貼在鋼軌上，可以聽見很遠地方列車行動的聲音，這也是一種大家熟悉的事情。又若把耳朵靠緊地面，則幾百哩外所發生的大聲，例如開砲或火山爆發，都可以聽見。

要證明液體可以傳聲，可作下述的實驗：取大軟木塞一個，中央開一個孔，把音叉的柄插入孔中。將音叉拿在水中，不讓與別的東西接觸（空氣除外），而用鑼敲叉，則叉聲差不多聽不到。但若取中空的木匣一隻（圖 21-4），匣上放水一杯，而將音叉用手拿住，軟木塞浸在水中，則音叉之聲即可以聽得很清楚。聲音之來，似乎來自木匣。從這個實驗我們知道，音叉的振動由軟木塞傳給水，由水傳給玻璃，由玻璃傳給木箱，由木箱傳給室內的空氣，再由空氣傳入耳中。

要證明固體傳聲，可作下述的簡單實驗：取米尺一支，一端抵住在門上，而將正在

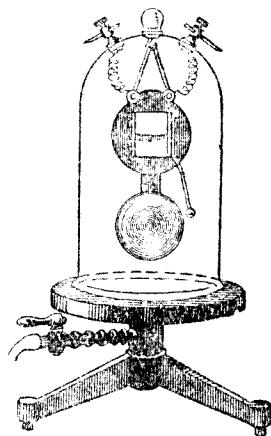


圖 21-3. 電鈴在抽空的玻璃罩內發聲，聲弱不能聞

振動的音叉，放在米尺的另一端上。音叉之聲，似乎從門發出來。米尺的作用，在這裏就是把音叉的振動傳給門，再由門傳給空氣。

因此我們可以斷定，固體、液體以及氣體都可以傳聲波。

390. 【聲音傳得多少快？】 在平常的屋子裏面，聲從聲源傳到我們的耳朵中，我們並不覺得需要什麼可以看得出來的時間。但在很大的廳堂中，或在戶外空曠之地，則在聽到了一個聲音之後，隔開一些時間，又聽到

這個聲音的回聲(echo)。由此可知，聲從聲源到反射表面，再被反射回來，是需要時間的。雷雨的時候，我們都先看見電閃，然後再聽見隆隆的雷聲。天空放電的地點愈遠，看見電閃與聽見雷聲相隔的時間愈長。遠處的汽笛，每一個人必定先看見它放汽，後聽見它發聲。所以聲音的進行比光慢得多，這是無疑的。

測定聲在空氣中進行的速率，一個方法是在遠處的山上開放大炮。知道了觀測地點與開炮地點的距離，以及看見火光與聽見炮聲相隔的時間，就可以計算聲音在空氣中的速率。在1738年，有幾個法國的科學家，曾在相距17哩的兩座小山上安放兩尊大炮，用這個方法作測定聲音速率的實驗。爲了免除因風而生的誤差起見，他們先在這一座小山上觀測，後在那一座小山上觀測。他們所用的儀器，雖然都很簡陋，可是他們所得的結果，卻與真值很接近，使我們不得不歎服他們的精細與審慎。自從這一次實驗做過之後，聲音在空氣中的速率曾測定好幾次。從這幾次實驗我們知道，在 0°C . 及76厘米的壓力之下，聲音在乾燥靜止的空氣中進行，速率是 1087.13 ± 0.26 呎（或 331.36 ± 0.08 米）每秒。聲音在水中的速率是空氣中的4.5倍左右。

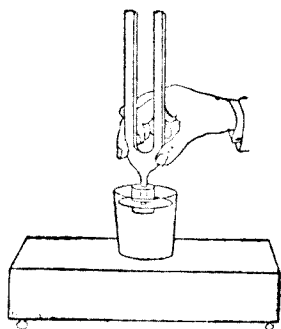


圖 21-4. 音叉的聲音由水傳給木匣

在鋼鐵裏面的速率約是空氣裏面的 15 倍以上。又從實驗得知，聲音在空氣中的速率，與溫度有關係，氣溫每昇高一攝氏度，速率約增加每秒 2 呎(或 0.6 米)。在實用方面，祇要記得聲音在空氣中進行，在 0°C . (32°F .) 時，約每秒 1090 呎；在 20°C . (68°F .) 時，約每秒 1130 呎。

計 算 題

1. 一隻汽艇上的汽笛，看見它放汽 12 秒之後，纔聽見聲音。這汽艇到觀測地點的距離是 (a) 多少呎？(b) 多少米？
 2. 在離開靶子 3000 呎的地方開鎗，鎗彈的速度是每秒 2000 呎。鎗聲與鎗彈，(a) 哪一個先到靶子？(b) 先到多少秒？氣溫是 20°C 。
 3. 鎗上的報時大鐘敲一下。若氣溫是 30°C ，則鐘敲四分之一分以後，鐘聲傳到離鐘多少哩的地方？
 4. 若有一人在離鐘兩哩的地方，憑此鐘聲校準他的錶，他應當撥前還是撥後多少？
 5. 聲音在 (a) 空氣中，(b) 在水中，(c) 在鐵軌中，進行一哩需要多少時間？
- * * *
6. 站在一所很大的穀倉前，高聲叫喊，1.2 秒後聽見回聲。穀倉有多遠？氣溫是 30°C 。
 7. 一個有科學頭腦的男孩子，要想不用溫度計而知道空氣的溫度。他站在一座懸崖前面，開放來福鎗，而用停錶測定回聲到達他耳中的時刻。若他離開懸崖半哩，而停錶的讀數是 4.7 秒，則 (a) 空氣的溫度是多少？(b) 在這個實驗裏面，最大的誤差來源是什麼？
 8. 一個木工把木板釘在屋頂上，每兩秒鐘內打四下。遠處有一個人，剛剛在鎗向上舉，到達最高點時，聽見鐘敲釘的聲音。問此人與木工之間的距離約略是多少？
 9. 一人放石塊落入深 144 呎的井中。問他在石落幾秒後，聽見石塊擊水的聲音？
 10. 鋼軌被敲打，耳朵貼在軌上，0.2 秒後聽見敲打的聲音，再隔 2.8 秒後，又在空氣中聽見敲打的聲音。假定氣溫是 20°C ，(a) 鋼軌被打處有多少呎遠？(b) 聲音在鋼軌中的速度是多少？

391. 【聽覺】 我們一直在討論着所謂‘聲音’通過氣體，液體以及固體的傳遞，但是我們知道，所傳遞的不過是一種振動。平常想像聲音，是忘不了有一隻聽見聲音的耳朵的；假使想不到這隻聽得見聲音的耳朵，那麼對於聲音，簡直無從想像。例如人

跡乃至獸跡永遠不到的窮鄉僻壤，山上有瀑布沖下來是否也會有聲音，這一種怪問題據說也會有人提出來。所謂‘聲音’，顯然包含兩件事情：一件是發生**振動**；還有一件是這些振動傳給耳中的鼓膜(tympanum, 圖 21-5), 引起了聽覺。在耳朵裏以及在

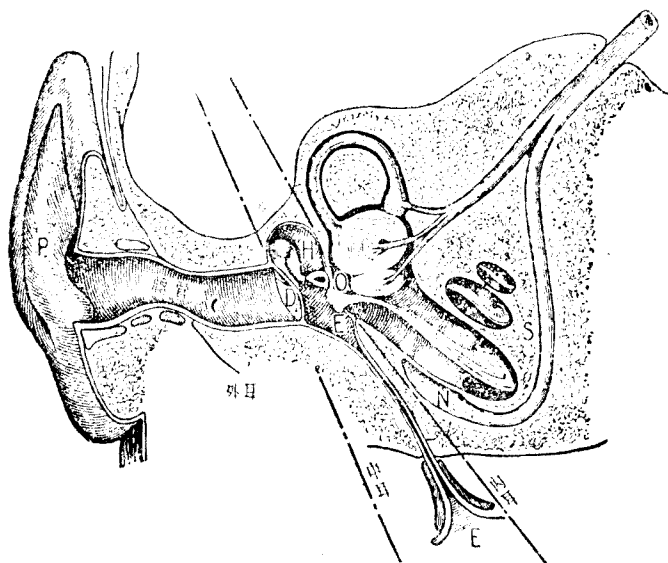


圖 21-5. 人耳的剖面。空氣中的聲波進入聽管，使鼓膜 *D* 隨波振動；中耳 *H* 裏面的三根小骨把鼓膜的振動傳給卵形窗 *O*，再傳給內耳中的液體。布滿在螺旋管中的神經把這振動拿去，腦中就有了聲音的感覺。

腦子裏有些什麼事情發生，這方面的研究應該屬於生理學和心理學的。在物理學上，我們祇討論空氣或其他傳聲介質中的振動，我們講到‘聲音’的時候，所指的就是這種振動。照這個意思來說，窮鄉僻壤的瀑布，不論有沒有耳朵在那兒聽，它的聲音總是有的。

聲 波

392. 【聲音是波動】 聲音傳到耳中時，顯然沒有實在的（就是有重量可稱的）東西從聲源跑過來跑進耳朵裏邊去，要不然，真空抽機玻璃罩內的電鈴聲，是怎樣透過玻璃的呢？從這一件以及其他相仿的事實看來，我們可以毫無錯誤地斷定，所傳遞的不過是振動。振動的傳遞過程，叫做波動（wave motion），下文就要予以論述。

393. 【水波】 因為聲波通常是不可見的，所以我們從水波（water wave）的研究開始。一塊石頭投入水平如鏡的池中，就引起了池水的擾動，這擾動從石塊擊水處向四方傳布出去，池面上因此顯出了許多同心圓，圓心就在石塊擊水處。水受石擊，即被擠向下方和四側，成一個環狀脊。這環狀脊漸漸向外擴大，環內又生出第二個環狀脊來。照這樣進行下去，外環愈擴愈

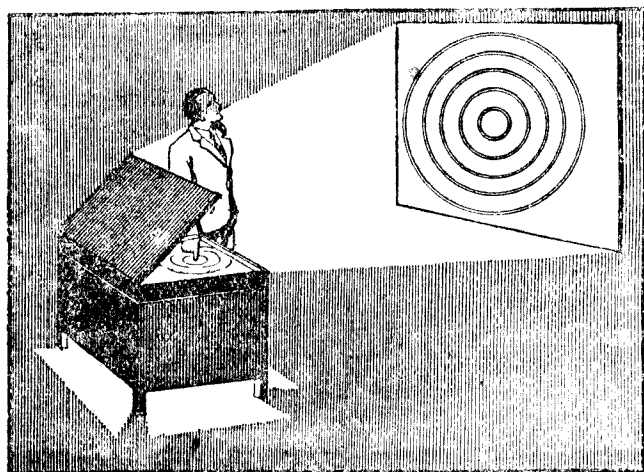


圖 21-6. 水盆底下方的電弧燈光，將水波映在屏上

大，內環愈生愈多。其結果，池面上立刻布滿了一系列圓形的波峯，(crest)，每相鄰兩個波峯之間隔着一個波谷 (trough)，全部從擾動中心向外移動。

在一隻四邊是木頭而底是玻璃板的不漏水淺盤中盛水，即可將水波映在天花板上，或用斜放的鏡子映在牆壁上，如同 21-6 所示。這水盤擺在一個架子上，燈光可從盤下透過盤中的水面向上照射。盤中盛水深約四分之一吋。透出水面的光照在天花板上或牆壁上。水中有波發生時，就可以看見波峯的影子。

394. 【駐波】 盛在四邊是玻璃的狹長水槽裏的水，用木塊使它上下盪動，就見有一列所謂駐波 (stationary wave) 產生。它的表面，可用圖 21-7 中的曲線來代表。圖中 A, B, C, D 等點是不動的，叫做波節 (node)。每相鄰兩節之間的部分叫做波腹 (loop)。節與節間的水，上下振動；向上時，成功

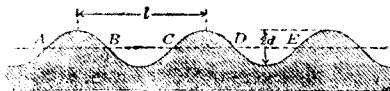


圖 21-7. 水波的剖面

波峯；向下時，成爲波谷。一峯與相鄰的一谷，合起來是一個波，例如從 A 到 C ，或從 B 到 D 。波長 (wave length) l 就是一波上的任何一點到相鄰一波上對應點的水平距離。兩波上的對應點叫做同相 (phase) 點。波的振幅 d (amplitude) 就是波峯與波谷間垂直距離的一半。

395. 【波的速度，波長，以及頻率之間的關係】 投石於平靜的池中而引起水波，就這個例子來說，我們都知道，當波環愈擴愈大時，任何一個特別指定的波峯，似乎從中心沿着輻線向外移動，直至抵達池岸或消失不見而止。波峯在一秒內進行的距離，叫做波的速度 (velocity)。在一秒內經過某一定點的波峯數，叫做波的頻率 (frequency)。我們祇要稍稍思索片刻，就可以知道水波的波長，速度，以及頻率之間，不得有下面的關係：

$$\text{速度} = \text{頻率} \times \text{波長}$$

或

$$v = fl.$$

有應牢記勿忘者，在水面上進行的祇是波的形狀，並不是水。取軟木塞一個或玩具小船一隻，使它浮在池面上，當池水的波峯經過時，我們祇見軟木塞或小船隨水上下盪動，並不隨波前進，這便是明證。

396. 【橫波與縱波】 表現波動，還有一個很容易的方法。取長約 20 呎的橡皮管一條，一頭縛住在牆上的鉤子上，一頭拿在手裏。將手很快的一抖，就可以送一個波出去，這個波沿着橡皮管



圖 21-8. 橡皮管中的橫波

前進(圖 21-8)。向上昇的部分到鉤子，反射回來是向下降的部分。向下降的部分到鉤子，反射回來是向上昇的部分。

就水中的波以及橡皮管(或繩索)上的波而論，水或橡皮管的各部分向上向下振動，而波的前進則依照水平方向。這樣的波叫做橫波(transverse wave)。

還有第二種波動，發生於有彈性可壓縮的物體，例如氣體及彈簧之中。要研究這一種波，可用螺旋形彈簧代表那傳遞波動的媒介，而作下述的實驗。

圖 21-9 所示，是一個匝數很多的彈簧，它的上端掛在天花板上的鉤子上。若將靠近下端的數匝很快地一壓，這幾匝便微微移動，把上面的鄰近幾匝壓一下；這幾匝又把更上面的鄰近幾匝壓一下。這樣一來，便有一個波(或說脈搏)沿着彈簧向上進行。

其次，若將彈簧靠近下端的數匝很快的一拉，使這幾匝暫時離得開一些，則上方鄰近的各匝，也逐一順次被拉開，而這擾動終於到達了彈簧的頂端。由此可以知道，將彈簧的一端一推或一拉，這一推或一拉便照樣傳到了彈簧的另一端。

像這一種波，它的來回振動的方向，與波在媒介中進行的方向相同，就叫做縱波(longitudinal wave)或壓縮波(compression wave)。

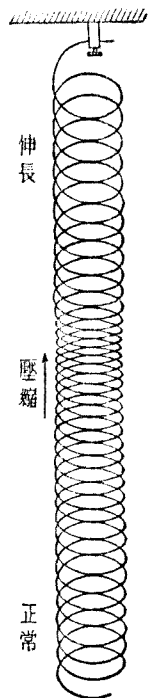


圖 21-9. 螺旋彈簧中的縱波

397. 【各種不同波動的比較】 在圖 21-10 中,上面的一

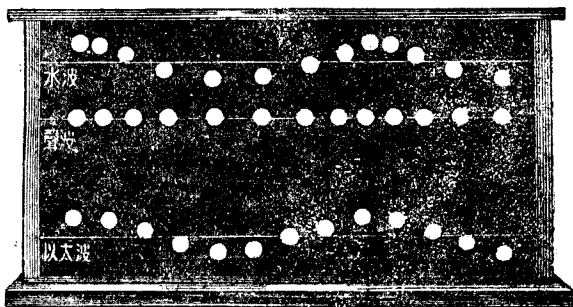


圖 21-10. 說明水波,聲波,以及以太波的模型

排圓片代表水波，當每一個波峯向右進行之際，每一個圓片在一個圓形的軌道上旋轉。波幅即由這圓形軌道的半徑決定。中間的一排圓片代表聲波。這一排裏面的圓片依水平方向來往運動；換句話說，運動的方向同於波動進行的方向。這些圓片在某一點靠得很近，成功所謂‘密部’(condensation)；過去一段距離分得很開，成功所謂‘疏部’(rarefaction)；再過去相等的距離又靠得很近，成功密部。在最近兩密部(或兩疏部)之間，或最近兩個同相點之間的距離，就是波長。圖中下面的一排圓片註着以太波(ether wave)字樣，不問有沒有以太存在(在我們想像中的以太，至今未能證明它的存在)，它所代表的乃是光波。初見之時，這種波似乎很像水波，但經仔細考察後，可知圓片是上下移動的，換言之，運動的方向垂直於波行的方向。

398. 【固體內的縱波】 不但是彈簧可以傳遞縱波，氣體甚至固體如鋼，也能夠傳遞縱波。

若把一條鋼棒的中部夾住，而用塗有松香的布沿着棒的方向摩擦，就有鏗鏘清脆的聲音發出來。這條棒，已被引起了縱向的振動。取小象牙球一枚，用繩懸掛，而使球與棒的一端接觸，即可證明此事。當鋼棒作縱向振動時，球即很猛烈地向外跳盪(圖 21-11)。

圖 21-12 是一具特殊的儀器，專供說明固體傳遞縱向振動之用。被推（或被拉）的質點，雖然祇移動很微小的距離，推（或拉）的作用仍可以傳遞很長的距離。

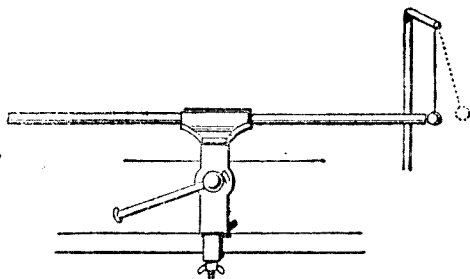


圖 21-11. 棒內的縱波使球跳動

這儀器有許多堅如玻璃的鋼球，掛成一排，球與球剛剛接觸而不相壓。

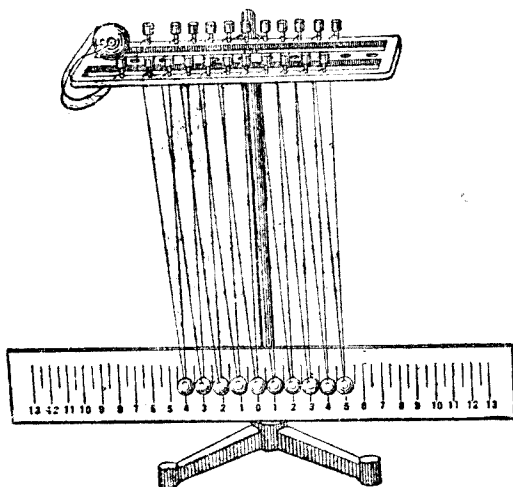


圖 21-12. 說明縱波怎樣從一質點傳到另一質點的儀器

若將第一個球拉向一側，放手，讓它飛回去，打在那掛着的一排球上，則見受打的一球似乎並未移動，而其次的各球也是如此。祇有在另外一端的末一個球，好像直接受打，向外飛出去，飛得同第一個球被拉一樣遠。因為鋼的彈性是很大的，所以最先一球所受到的打擊，即由各球互相受授，一直傳到末了一球而止。幾個小孩子排成一行，第一個人被推，末一個人有倒地之可能，情形正與此相同。

399. 【聲波】 傳遞聲音的空氣，它的各部分來往振動，其方向同於傳聲的方向，好比彈簧一般。換句話說，聲波是縱波，

或壓縮波由密部與疏部相間而成。 因為石塊投入水中，激起了水波，成功同心圓向外擴張，所以我們想到，鐘在發聲時，一定激起同心球面波 (spherical wave)，向四面八方傳播。這些球面波，即由空氣的密部與疏部，一層層相間而成。

圖 1-13 是聲波在一條管子中進行的想像圖。AB 是代表

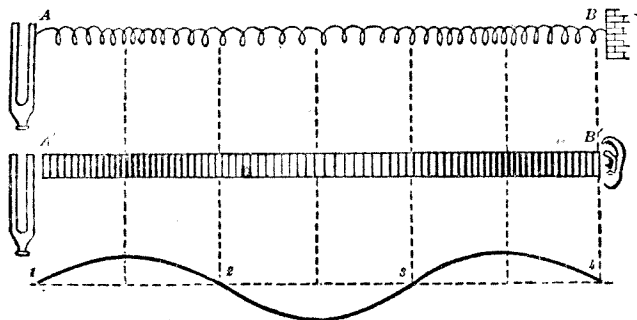


圖 21-13. 聲波也可以用曲線來代表

傳聲介質的彈簧模型，音叉的來往振動，使彈簧的各部分鬆緊相間。A'B' 是空氣柱。音叉在 A' 端，它的振動由這空氣柱傳到 B'，在 B' 的鼓膜就接受了這振動。

空氣柱的密部與疏部，在 A'B' 中由所加短劃的粗細及多少分別表示。空氣的擾動是從音叉傳到了耳中，但空氣的本身，不問在哪一點，不過微微地振動罷了。圖中下方的曲線，乃是聲波的代表（並非聲波的形狀）。波峯 1-2, 3-4, 等等代表密部，而波谷 2-3 等等則代表疏部。波幅相當於每一空氣質點從原地位向左右移動的距離。一個聲波包括一個完全的波峯與相鄰的一個完全的波谷，也就是相鄰的一個密部與一個疏部。任何相鄰兩波對應點之間的距離，叫做波長。

聲波的波長，速度，以及頻率之間的關係，是與水波相同的 ($v=fl$)，所以我們可以很容易地把聲波的波長計算出來。

舉個例來說，假定有一隻音叉，每秒振動數是 256，而在溫度 20°C . 時，空氣傳聲的速度是每秒 1130 呎。從公式，可以知道波長等於 1130 呎除以 256，即 4.4 呎左右。

欲虛擬聲波在寬敞的空間中向各方傳播出去的情況，我們可以幻想有無數細小的螺旋形彈簧，以聲源為公共中心，向各方輻射出去，這些彈簧在同時都受到了很劇烈的一樣的推拉。

計 算 題

(假定氣溫是 0°C .，除非另行提及。)

1. 鋼琴上的中音 A 弦振動時，頻率是 435。問它所發出的聲波，波長是多少？
 2. 某風琴所用的最低音，頻率是每秒振動 16 次。問它的波長是幾呎？
 3. (a) 提琴上的一根弦，發出聲波長 24 吋，頻率是多少？(b) 若奏琴處離開樂廳的後壁 220 呎，則一個聲波到達後壁，須經多少時間？
 4. 某鋼琴所發出的聲波，其波長範圍約從 27 呎到 3.2 吋。問其頻率的範圍是從多少到多少？
 5. 某音叉每秒發送聲波 512 個。(a) 每一個波的波長是多少？(b) 一個波經過一個定點需要多少時間？
- * * *
6. 一隻提琴上的 D 弦，它的振動頻率是 290。(a) 當氣溫在 15°C . 的時候，(b) 當氣溫是 30°C . 的時候，它所發出的聲波是多少長？
 7. 某風琴管在 20°C . 時的音調 (pitch，即頻率) 是每秒振動 521 次，問在 10°C . 時它的音調 (頻率) 是什麼？
 8. 某音叉每秒振動 1024 次，而其所發聲波的波長是 32 厘米。(a) 求聲音在空氣中的速度。(b) 求氣溫在攝氏溫標上的讀數。

400. 【聲音的強度或響度】 我們必須常常記住，鐘鳴之時，鐘聲是四面八方都聽得見的。這就是說，聲波向四面八方擴張出去，如圖 21-14 所示。每一個球面波在擴張的時候，離開聲源愈遠，它的能量分布的面積愈大。因此，聲音的強度 (intensity) 或響度 (loudness) 就減

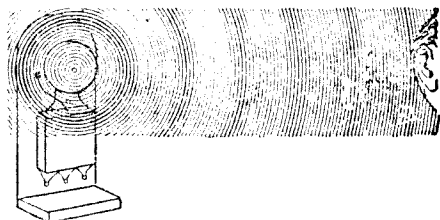


圖 21-14. 聲波從電鈴向各方擴展出去

低了。球的表面積是和半徑的平方成正比例的，所以每單位面積上所分布的能量與距離的平方成反比例。例如從 10 呎遠處傳來的鐘聲，比從 5 呎遠處傳來的，祇有四分之一的響度；若從 15 呎遠處傳來，便祇有九分之一的響度了。這就是因為在離開聲源 15 呎的地方，比在離開聲源 5 呎的地方，能量分布的面積（也就是能量授與的空氣質點數），增加到九倍的緣故。一般地說來，聲音的響度（或強度）與距離的平方成反比例。這條定律，在‘自由空間’內是絕對真確的。不過‘自由空間’差不多永遠不能夠有。

乘坐飛機或攀登山嶺，愈昇愈高時，因為空氣愈來愈稀薄，所以覺得它傳聲不如在地面上那樣的清晰。概言之，聲音的強度還要看傳聲介質的密度而定。

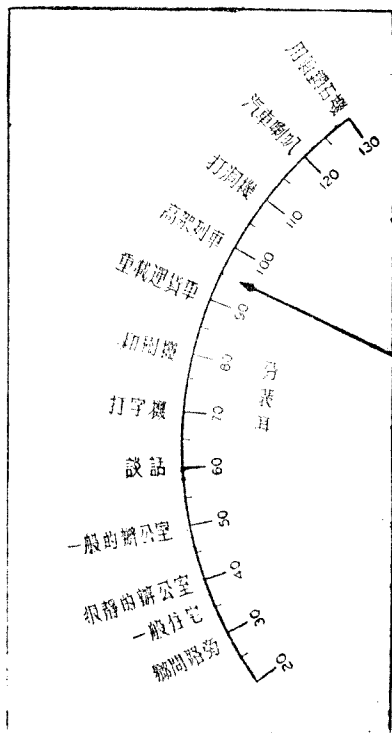
401. 【聲音響度的單位】 在近幾年中，對於聲音響度的測定，已經有了比較精密的實驗。所謂聲音的響度（或強度），就是垂直於聲波進行方向的每平方厘米的面積上，在每一秒內通過的能量（功率）。我們的耳朵，固然能夠由於鼓膜所受功率之不同，而分辨聲音的強弱，但是也只能區別一個大概，正和皮膚對於溫度的感覺一般，若欲精密區別兩個聲音的相對響度（relative loudness），我們必須用特殊的儀器，所謂響度計（sound-level meter）便是（圖 21-15）。至於比較響度所用的單位，最通用的是斐耳（bel）。又因



圖 21-15. 用響度計測定汽車的噪聲

這個單位太大，不合大多數的用途，所以更通用的乃是一斐耳的十分之一，叫做分斐耳(decibel, 簡寫 db.)。不過這個單位的來歷，是太曲折了，這裏不能說明。所以我們祇舉幾個實用的例子，使讀者略知這個新單位的應用概況。若將可以聽得見的最輕的耳語，取為比較的標準，則大聲談話的響度約是 60 分斐耳，而在家庭中，所聽到的無線電收音機中很響的音樂，它的響度約是 80 分斐耳。汽鍋工廠中的喧鬧聲約有 97 分斐耳，熱鬧餐廳中的噪聲約有 70 分斐耳，一般辦公室中的嘈雜聲約有 50 分斐耳，靜寂的辦公室中聽到的聲音約有 40 分斐耳，郊區住宅內聽到的聲音約有 30 分斐耳，而在幽靜的花園內聽到的聲音約有 20 分斐耳。在一座大廈裏邊，任何噪聲強度在 50 分斐耳以上的，都應予以摒除。圖 21-16 所示，乃是幾種普通噪聲的相對響度。

402. 【求聲音的方向】 兩耳都聽得見聲音的人，即使是瞎子，通常也可以辨別聲音所從來的方向，大致無誤。惟一的例外，是在聲音從身體正中方向內(正前方，正後方，或當頂)傳來的時候，這時候，前方來的聲



(Courtesy of General Radio Co)

圖 21-16. 各種噪聲響度的略值

音，往往錯把它當做從後方傳來。在這幾種情形之下，聲音從聲源出發，是同時到達聽見聲音之人的左耳與右耳中的。除此以外，聲音到達左耳與右耳，時間上總有一些差別，因為聲波所經過的路程有長短之不同。所以我們似乎很有理由可以斷定，兩隻耳朵都能夠聽見聲音的人，其所以能夠辨別聲音所從來的方向，是因為聲波到達左右兩耳，時間有差別的緣故。

據實驗，在一人的兩耳中插兩條等長的管子，而用針尖刮管子的那一頭，若兩次刮的時間相差百分之幾秒，而此人的兩眼用布蒙住，則此人似乎祇聽見一個聲音，並且以為這聲音從頭的一側傳來，這一側就是先刮管子的一側。測探潛艇方位的裝置，就是根據這個原理做成的。

403. 【聲音的反射】 任何彈性體，例如橡皮球，擲在磚牆上，必然要跳回來。水波行到了石隄邊，便要反激回去。同樣，聲波在進行時遇到別的物體，例如高樓大廈，懸崖峭壁，以及密林叢樹，也要被反射而折回。這反射回來的聲音，就是所謂回聲(echo)。若欲使回聲與原來的聲音分別清楚，則反射表面必須在 20 或 25 碼遠的地方。反射表面愈遠，反射波到達耳中所經的時間愈長，因而回聲愈覺其清晰。若有幾個平行反射面，例如在狹窄的山谷中，有一重重的山峯，或有遠近不同的反射面，則回聲就有重複之可能，換言之，同一個聲音，可以聽見不止一次。例如雷聲之所以隆隆不絕，就是因為高山，大林，以及雲層等等陸續將聲波反射的緣故。

下述的實驗可使我們相信，聲波也同熱波光波一樣，可被彎曲的表面反射。若將凹鏡兩面，相對放置，如圖 21-17 所示，則在一鏡焦點(參閱第 199, 第 450 節)的汽笛聲，即經兩次反射而可用所謂‘靈燄’(sensitive flame)在另一鏡的焦點檢得。靈燄乃是一條細長的照光氣火燄，使照光氣從抽細的尖頭小口玻璃管噴出來，用火點着，便得。聲波，尤其是高頻率的聲波，集中了向靈燄進襲，靈燄便要伸縮揮舞起來。

大廳堂中若有穹窿式的半球狀的天花板，則在廳堂一隅切

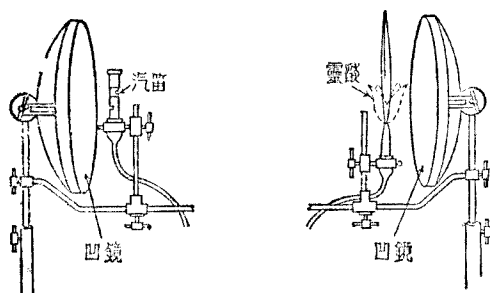


圖 21-17. 從汽笛出來的聲波被兩面凹鏡兩次反射，並由靈敏檢得

切私語，可在廳中遠處聽得很清楚，因為聲波經由天花板反射下來，集中到聽的人耳中之故。

404. 【聲音反射的實用】 在液體中也可以發生壓縮波，正和在氣體中一樣。壓縮波在水中進行的速度，比在空氣中大至四倍，不過水的質點的運動，當然是很微細的。我們聽見聲音，就靠着內耳液體中的波，這真是奇妙之至。

近年來，海上船隻互相通訊或與岸上通訊，往往利用水中聲波以收發水中信號。現代的船舶，它的底上都有特殊的設備，可以發出水中聲波，並接收從海底反射回來的波，再把收發相隔的時間記錄下來。若已知當時波的速度，則海底的深度就可以計算出來。這深度，往往用嚟(fathom)數來表示，一嚟等於六呎。因此，這種儀器叫做嚟計(fathometer)。美國海岸地形測量局(United States Coast and Geodetic Survey)，即用嚟計測繪了海底的地圖。航海者若備有嚟計和海底地圖，那麼他雖在晚間或大霧中，也能夠知道他的船在什麼地點。

405. 【聲波的相片】 美國印第安那(Indiana)大學福萊(A. L. Foley)教授，曾發明一個很巧妙的方法，攝取聲波的相片。

他所用的聲源，乃是一個發大聲的電花。這電花一發出之後，四週圍的空氣中立刻就有一個球面波向外擴張，這球面波的前面是一層被壓縮的空氣，後面是一層祇有稀薄空氣的空間。附近另外有一個電花，剛剛在聲波送出以後的一瞬間放出來。福萊就利用這很亮的閃光，攝取了那球面波的相片，這相片上的聲波，看起來好比一個不動的影子，因為閃光照耀的時間是太短了，這球面波差不多沒有前進。如圖 21-18 A 所示，乃是圓盤後面的

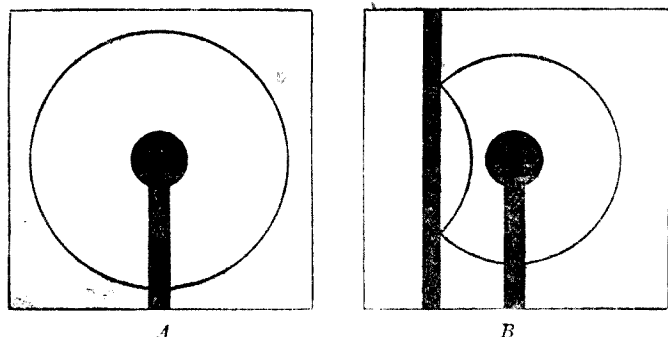


圖 21-18. 聲波的相片。A, 由電弧產生的聲波向外擴張；
B, 聲波被玻璃板反射

電花所引起的聲波，正在向外擴張；圖 21-18 B 所示，乃是聲波從玻璃表面反射回去的情形。這個方法，已被用來測定聲波的速率。在建築聲學 (architectural acoustics) 方面，此法亦有應用。採用此法的有薩冰 (W. C. Sabine) 以及其他聲學專家。

406. 【室內的聲音】 有些大廳，很不適合演講之用，因為坐在裏面聽講，差不多一些也聽不清楚。所以現有的各處大講堂，應當予以聲學上的改良，而新設計的大講堂，則應使其沒有這種弊病。這實在也是一件很重要的事情。

有時候在室內某一地點聽起來很容易，但在另一地點聽起

來就覺得很困難。這種弊病的發生，通常由於牆壁及天花板的某一部分，將演講人的聲音反射下來所致。這些反射作用所產生的回聲，也許緊緊跟着原來的聲音，差不多在同時到達聽衆的耳內，於是聽起來就覺得嘈雜不清了。補救的辦法，是用吸收聲波的材料，例如厚的幔子或毯子，把這些討厭的回聲所從出的表面，一齊遮住。

但是還有一個主要的弊病，卻由所謂餘響（reverberation）而來。室內有一個穩定的樂音或人聲發出的時候，那傾瀉如注的聲波即從牆壁，地板，以及天花板來回反射，漫無定向，終於全室到處勻布着聲音。這聲音，逐漸減弱，到消滅而止，因為每一個聲波每經一次反射，它的能量就要多少被吸收掉一部分（開着的窗戶，讓聲波全部出外，毫無反射，故可看成聲音的完全吸收體）。正在這將滅未滅之際，又有新的聲波從聲源注瀉於室內，因而聲音的響度很快地增加，增加到被吸收的能量，恰好同聲源送出來的能量相等的地步。現在假使聲源突然停止發聲，則已在室內的聲音便開始消滅下去；但是仍可以聽得見，有時候孑孑不絕，達三秒或四秒之久。這現象，便是餘響。餘響的多少，即用聲源停止發聲以後仍可以聽見聲音所經時間的久暫來計量。若餘響太少，室內即顯得枯寂無味。若餘響太多，則說話的人正在講第五個字的時候，也許第三第四個字的聲音，還縈繞在我們的耳邊。這樣一來，聽的人就要覺得嘈雜難辨了。餘響太多的廳堂，在牆壁或天花板上遮一層吸收聲音的材料，就可以除去它的這種弊病；但是餘響太少的廳堂，就非予以改造不可。

第二十一章提要

聲音都由物體的振動而生。

聲音（在物理學上說）乃是一種振動，可以傳過固體，液體，以及空

氣與其他氣體，但不能傳過真空。

聲波由一串密部與疏部相間而成。

聲波的速度在空氣中當氣溫是 0°C . 時約為每秒 1090 呎，氣溫每昇高一攝氏度，增加約每秒 2 呎。

波長 = 波峯到相鄰波峯之間的距離（或從密部中心到最近另一密部中心的距離）。

頻率 = 在一秒內經過一定點的波數。

速度 = 頻率 \times 波長。

聲音的強度（或響度）在空曠處與聲源距離的平方成反比例。

問 答 題

1. (a) 雷閃從何而來？(b) 雷閃後隆隆的雷聲從何而來？
2. 雷閃發生地點的遠近，你怎樣予以估計？
3. 美國鹽湖城(Salt Lake City)的摩爾蒙教堂(Mormon Tabernacle)，形狀好像縱向剖開的半隻長西瓜。若在教堂裏一定的一個地點拿一隻盤，而有一隻釘落在盤上，則立在許多呎遠的另外一個一定地點的人，可以很清楚地聽見釘與盤相接觸的聲音。說明其理。
 4. (a) 鋸子鋸板時，(b) 將吹脹的紙袋拍碎時，(c) 弓在提琴的弦上拉過時，怎樣發出聲音來？
 5. 有一尊炮，一隻停錶，一隻溫度計，(a) 怎樣可以用它們來測定一個大湖的寬度？(b) 怎樣計算？
 6. 圖 21-19 所示的汽車喇叭中，(a) 發聲的是什麼？(b) 使振動部分起振動的是什麼？
 7. 你與一隻樂器的距離加倍時，你所聽到的聲音比原來有兩倍強麼？有一半強麼？有四倍強麼？有四分之一強麼？
 8. 兩個人分別站在離開一隻汽笛 1200 呎與 2000 呎的地方。比較他們所聽見的聲音響度。
 9. (a) 喉聲出唱者之口，入聽者之耳，究竟是怎樣給空氣傳過去的？(b) 熱的傳導，對流，及輻射，哪一種過程可與傳聲的過程相當？
 10. 飛機的軋軋聲，似乎從飛機後幾百呎的地方發出，你注意到麼？解釋之。

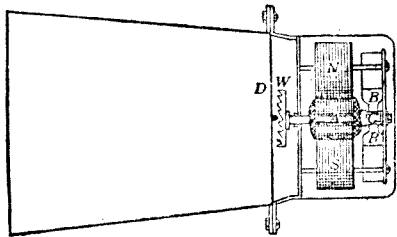


圖 21-19. 用電動機發聲的汽車喇叭

第二十二章

樂 音

407. 【樂音與噪聲】 有些聲音聽起來大家覺得不愉快，這些聲音就是噪聲(noise)。例如用力關門的聲音，車輛在石子路上顛簸的聲音，都是。但是有些聲音聽起來非常悅耳，例如鋼琴聲或簫聲鼓聲都是，這些聲音就是樂音(musical sound)。欲表示這兩種聲音的區別，最好的方法，莫如比較圖 22-1 中的兩條曲線，這兩條曲線，是用聲波顯示器(phonodeik, 見下文第 418 節)記錄下來的。曲線 A 代表噪聲的振動情況，曲線 B 代表樂音的振動情況。從圖我們立即知道，噪聲的振動很不規則，而樂音的振動很有規律。噪聲雖然很刺耳，樂音雖然很悅耳，有時也很難予以區別。不過在樂音之中，我們常可以找出另外的整齊性，即是所謂韻律(rhythm)與諧和(harmony)。

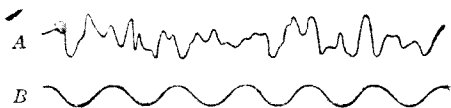


圖 22-1. 代表 (A) 噪音及 (B) 樂音的曲線

408. 【樂音的三特徵】 經過仔細的研究後，我們知道各種樂音之所以不同，就因為下列三特徵各不相同之故：

1. 音調，或頻率(每秒振動數)。
2. 音強，或響度(由聲波的能量決定)。
3. 音品，或音的成分(一音中往往含有幾個音，其頻率是其中一音的整倍數)。

不過耳朵所能辨別的，並非這些物理的性質，而是全部因素所引起的總效果。現在我們就把樂音的這三個特徵，分別討論一下。

409. 【音調】 當我們說一個樂音是高音或低音的時候，我們所指的就是它的音調。若從鋼琴的鍵盤一端起，順次按捺各鍵，即可以聽見各音順次升高或降低，因為它們的頻率是在順次增加或減少。又若拿一張硬紙片，輕輕與一個轉得很快的齒輪上的齒接觸，也可以辨出所發的聲音，因齒輪旋轉的或快或慢（即紙片振動頻率的或大或小），而有或高或低之不同。換句話說，音調是看振動的頻率而定的。

用「驗音盤」(siren disk)來做實驗，可使我們對於音調與頻率間的關係，看得非常明白。所謂驗音盤(圖 22-2)，乃是一個金屬圓盤，盤上開有許多小孔，排成一個一個的同心圓，各圓上孔與孔間的距離，有相等的，也有不相等的。這個盤，裝在一個架子上，可以很快地旋轉。若有一道氣流，急衝在外緣等距離的一排孔上，則因氣從孔中噴過，隔開一定的時間，所以就有一個樂音產生。增加圓盤旋轉的速率，樂音即升高。此時我們說，驗音盤的音調是提高了。

若將吹氣管口對準另一排等距離的小孔，孔數祇有前一排的一半，則音調便要降低。又若將管口對準一排距離不相等的小孔，就有噪聲發生。

測定樂音的頻率，有一個方法便是應用這驗音盤。舉個例來說，假定這圓盤的外緣全周共有 48 個孔，盤與電動機相連，每分鐘轉 1800 次。在每一秒內，圓盤轉 30 次，所以氣從小孔噴過，每秒有 $30 \times 48 = 1440$ 次。這就是說，此時所發樂音的頻率是 1440。不過頻率如此之高的音，是非常尖銳的；通常可發標準 A 音的音叉，它的頻率祇有 440。

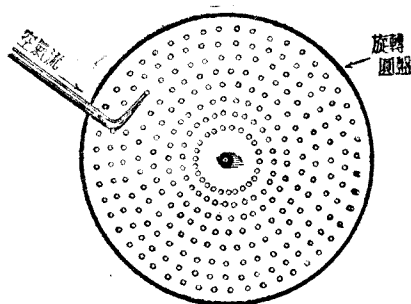


圖 22-2. 由電動機轉動的驗音盤。

空氣流向着一圈小孔急噴

在每一秒內，圓盤轉 30 次，所以氣從小孔噴過，每秒有 $30 \times 48 = 1440$ 次。這就是說，此時所發樂音的頻率是 1440。不過頻率如此之高的音，是非常尖銳的；通常可發標準 A 音的音叉，它的頻率祇有 440。

410. 【可聞限度】 人類的耳朵可以聽得見的最低樂音，它的頻率大約是每秒振動 30 次。聲音的頻率超過了一定的數目，人類的耳朵也聽不見。不過這一個高音的可聞限度 (limit

of audibility) 是因人而不同的，大概在每秒 18,000 到 22,000 次之間。聽覺更要隨着年齡而變遷，年齡愈大，愈不能聽到高音，這就是明證。頻率在可聞限度以上的振動，因為人耳聽不見，所以叫它們做超聲振動 (supersonic vibration)。這種振動，現在已可應用於水下秘密通訊方面。

411. 【音強，或響度】 我們早已講過(第 400 節)，任何聲音的強度，因耳朵離開聲源愈遠而愈弱。但若耳朵到聲源的距離不變，那麼就這隻特別的耳朵而論，樂音的強度是要看聲波的振幅而定的。例如鋼琴上的弦，或一隻音叉，受猛烈的敲擊時所發的聲音，比受輕微的敲擊時要響得多。劇烈的振動產生振幅(第 394 節)很大的聲波，因而就產生響亮的聲音。耳朵對於聲音響度的感覺，本來要看聲波中所含的能量而定，振幅大的聲波，它的能量當然多於振幅小的聲波，所以波的振幅愈大，耳朵就覺得聲音愈響。

在離開聲源有一定距離的地方，要增加所聽到的一個聲音的響度，有三個方法：第一，增加聲源的振動能；第二，使聲波不向各方散播出去；第三，將聲波聚斂起來，使它們集中於聽者之耳。傳話管(speaking tube)與喇叭筒(megaphone)所應用的，乃是第二個方法；而用凹鏡及彎曲的手掌聚斂聲波，則為第三法。

412. 【音品，或音的成分】 樂音的第三個特性是音品。不同的樂器發出音調強度都相同的樂音來，不同的歌唱者唱出同強度同音調的歌聲來，我們的耳朵仍可以辨別它們的不同，這就是因為它們的音品不同之故。即使是同一種類的樂器，也可以發出音品不同的音來。例如兩隻提琴的價值，有時相差很多，這也是因為它們所發聲音的音品，有很大的差別之故。音品較佳的較為悅耳，價值就大一些。又如我們在電話中辨得出對方講話的是哪一個朋友，這也是從音品方面來推斷的。

樂音的微妙的區別，即所謂音品，第一個發見其來由的科學家，就是赫姆霍茲 (Helmholtz)。他在研究的時候，曾利用所謂諧應器 (resonator, 見第 414 節)，使它與待研究的各音起諧應 (resonance) 或共振 (sympathetic vibration)。現在我們先來講一講，什麼叫做共振。

413. 【共振】 玩過鞦韆的人想必都有一個經驗，即連續在適當的時刻把鞦韆輕輕推幾下，每一次幫助鞦韆的擺動而不予以阻礙，就可以很容易的使鞦韆大擺起來。但若把鞦韆隨意亂推，雖用大力，也不會有什麼效果。同樣，聲波或其他輕微的衝擊按時按刻加在一個物體上，若頻率恰等於該物體的天然振動頻率（各物體都有一定的天然振動頻率），那麼該物體就會很劇烈的振動起來。這種振動，叫做共振。

顯示共振現象的一個方法，是將兩隻同音調的音叉，放在離開幾呎的兩處地方，如圖 22-3 所示。若用木槌猛敲音叉 A，而用手使它很快地停止振動，則音叉 B 雖未經敲打，也會發聲，即使在一間很大的屋子內，也可以聽得見。音叉 B 的振動，是可以看得出來的，祇要用第 388 節所講過的方法，就行。它所以能夠振動，是因為受了音叉 A 所發聲波的影響之故；換言之，這就是共振。若在任一音叉的一肢上加一個滑子 (slider)，改變它的天然頻率，那麼兩個音叉的音調不同，就不會再有共振的現象發生。

從這個實驗我們知道，兩隻音叉必須有完全相同的頻率，方纔能夠共振。家具以及玻璃器皿，各有各的天然頻率。倘若有一個音，它的頻率恰巧等於這些天然頻率中的某一頻率，那麼有這一個天然頻率的東西，就會起共振作用。一個聲波打在這件

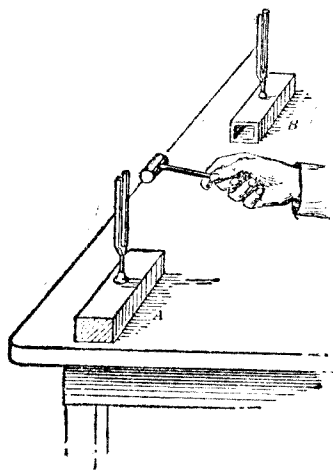


圖 22-3. 同音調的兩個音叉起共振

佛科 (Léon Foucault, 1819-1868) 法國物理學家。創作著名的佛科實驗, 用擺證明地球的自轉。造迴轉儀 (gyroscope)。研究光學上的各種問題, 例如光速問題。發見所謂‘渦流’



赫姆霍茲 (Hermann Von Helmholtz, 1821-1894) 德國生理學家兼物理學家。他的貢獻範圍甚廣。著名者有生理光學 (physiological optics) 方面的研究, 有聲學方面的研究, 有電學方面的研究, 以及申述能量不滅律

東西上，力量固然很微弱，但若累積多次的打擊，次次在適當的時刻，那麼即使是很大的物體，也會起共振的。據說從前有一隊兵經過某處一條橋，兵士的步伐太齊整了，而且它們的頻率又恰巧等於那條橋的天然頻率，以致橋身起了共振，竟然自行坍掉。在地震的時候，高大的房屋不倒，矮小的房屋坍掉，也是由於共振的作用。

414. 【諧應器】一般地說來，振動體所送出來的聲波，可使附近另一物體也起振動，祇要兩物體的天然振動頻率完全相同。這兩個物體，我們說它們成諧應(in resonance)。前一節中所講過的實驗，做的時候我們應當注意到一件事，即每一隻音叉都立在一隻木製空匣上，匣子的一頭是開口的。須知道這匣內的空氣柱，它的天然頻率就與音叉的頻率完全相同。像這樣的一隻空匣(其實是匣內的空氣柱)，就叫做諧應器(resonator)。收受第一音叉所發聲波的能量而起共振的，與其說是第二音叉的本身，毋寧說是第二音叉的諧應器。

欲顯示空氣柱的諧應作用，可作圖 22-1 所示的實驗。大玻璃圓筒 B 中盛水(不要盛滿)，取兩端開口的玻璃管 A，下端插入水內。將發聲的音叉放在 A 管上端附近，同時使 A 管在水內或昇或降，以增減管內空氣柱的長度。當 A 管昇到或降到某一適當的地位時，其中空氣柱即起共振，此時所聞音叉的聲音最響，因為已被空氣柱的聲音加強了。

空氣柱對於聲音有此加強作用 (reinforcement 或 intensification)，是因為原波與反射波相合之故。要符合這一個條件，空氣柱的長度與原來的波長之間，須有一定的關係。例如作上面所說的實驗

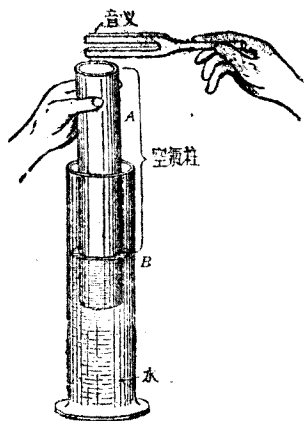


圖 22-1. 音叉的聲音被
空氣柱加強

時，若空氣柱的長度恰等於音叉所發聲波的波長四分之一，則加強作用即行發生。爲什麼這樣，從圖 22-5 就可以明白。在這圖中， ac 是音叉的一股，振動於 A 管中空氣柱的上端，而與空氣柱成諧應。當這一股從它的中間地位向下而動時，就有一個密部從管口向下進行；當這一股向上剛剛經過它的中間地位時，空氣柱的密部已從管口行至管底再由管底反射回來而仍到管口。這個密部此時進行的方向也向上，所以有加強音叉振動的作用。因爲聲波在 A 管中一往一返所經的時間，恰爲音叉振動半週所需的時間，所以聲波行畢空氣柱全長一次所需的時間，乃是音叉振動週期的四分之一。於是可知 A 管中空氣柱的長度等於四分之一波長。再做幾次實驗，我們更可知道，諧應空氣柱（在一端開口的管中）的長度，可以等於四分之一波長的 3, 5, 7 倍，或任何奇數倍數。

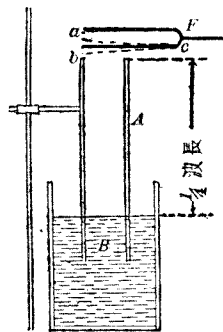


圖 22-5. 可以說明諧應空氣柱的概示圖

就一般情形而論，可以說諧應是由共振所引起的聲音加強作用。到下文第 529 節，我們將要找到無線電波起諧應的例子；又在下文第 503 節中，我們將要知道，光波也有加強的作用。

415. 【弦上的駐波及其節】 設將一條弦的一端，縛在一個大彈簧片的一端，這彈簧片用電磁體使它振動。弦的另一端掛一砝碼，把弦拉緊。這樣，弦上就會發生一個駐波，如圖 22-6 所示。彈簧的振動引起了弦的振動，這些振動在弦上傳過去，傳到跨在滑車上的另外一端 P ，就被反射回來。將砝碼 W 調準到適當的程度，可以使弦作整段的振動，即兩端各有一節，中間是一個波腹。若減少 W 的重量到適當的數值，弦即分兩段

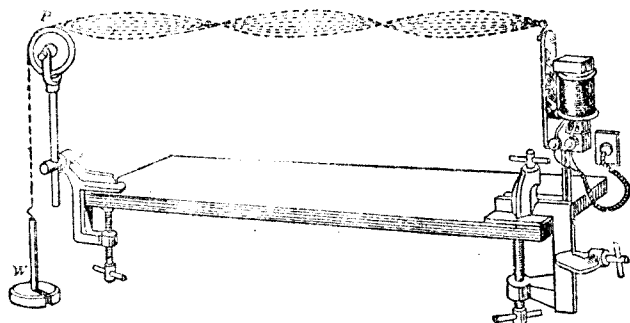


圖 22-6. 電振器(圖右方)使弦上發生駐波

振動，共有波腹兩個，波節三個，一個在弦的中點，兩個分居弦的兩端。由此可知，減少弦上的拉力（或張力）到適當的數值，可使弦分幾段振動。

用精細的解析方法，我們可以證明，兩列波長相同振幅相同的波，在反對方向內進行而相遇，就造成駐波。就本例而論，在弦上依反對方向進行的兩個波，便是彈簧所引起的波與從 P 端反射回來的波。凡是駐波，它的相鄰兩節間的距離，等於相對進行兩波的波長之半，這是應當牢記勿忘的。

這一種形式的波非常重要，因為就多數物體而論，例如音叉的兩股，或鋼琴上的弦，它們的振動都造成駐波。即使是管樂器，例如風琴管，其中的空氣柱振動時，也成功駐波。

416. 【強迫振動】 音叉被敲後，我們必須將它拿近耳邊，纔能夠聽得出它所發的聲音。但若將音叉柄緊緊抵住桌面，則聲音便大大地響起來。另取一隻音調不同的音叉，做相同的實驗，聲音照樣也加強。由此可知，桌子能夠加強任何一隻音叉的聲音，但是一定長短的空氣柱祇能加強有一定頻率的音。

音叉的振動由音叉柄傳到桌面，而迫使桌面也照同樣的頻率振動。桌面的面積很大，故可使大量空氣振動，於是到達耳中的聲波，強度就也很大了。鋼琴以及其他樂器上的傳響板

(sounding board), 它的作用正和這個實驗裏的桌面相同。這種振動叫做**強迫振動**(forced vibration), 因為不論什麼音調的音叉及弦, 都可以將它引起。

417. 【基音與泛音】 一條鋼琴弦作整段的振動時, 所發出來的音就是所謂該弦的**基音**(fundamental note)。這基音, 乃是該弦所能發的最低的音。基音的音調, 視弦的長度, 張力, 粗細, 以及質料而定。一條弦作全段的振動, 也許同時又有分段的振動; 例如分兩段振動。這種振動所發出來的音, 叫做該弦的**第一泛音**(first overtone), 它的頻率是基音頻率的兩倍。一條弦作全段的振動, 也許同時有分三段的振動。此時該弦所發的除基音外, 還有它的**第二泛音**(second overtone, 圖 22-7)。自此以上更高的泛音, 也有與基音同時發生的可能。

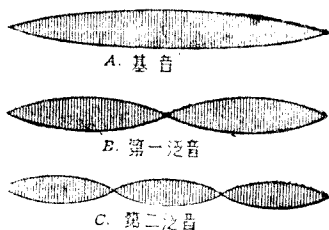


圖 22-7. 怎樣使弦發出基音及第一第二泛音

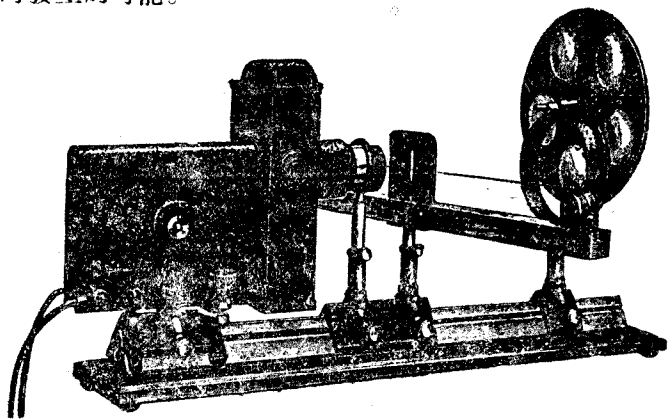


圖 22-8. 用旋轉透鏡盤來投射弦上橫振動的儀器

在幻燈的聚光透鏡 (condensing lens) 之前，緊緊地繃一條弦，如圖 22-8 所示，便可以看見泛音與基音同時發生的情形。弦的中點附近，有一塊金屬板，板上開着一條豎直的隙縫。投影用的凸透鏡共五個，勻布在一個可轉圓盤的周圍。若用弓摩擦弦的中點，而使圓盤旋轉，即可看見受光屏上顯出一條整齊的波紋線 (圖 22-9)，這就是基音的振動情況。若用弓摩擦弦的一端附近之處，就看見基音的波線上重疊着許多小波 (泛音)。

赫姆霍茲曾證明，決定音品的，不過是與基音混在一起的各泛音，它們的個數以及各個泛音的強度而已。

418. 【攝取聲波的相片】 第 407 節中提及的聲波顯示器 (phonodeik) 乃是米勒 (Dayton C. Miller) 教授所發明的一種特殊照相機，可以攝取聲波的相片，而且經過改裝的手續後，又可以把聲波的形式映在屏上。這種儀器的構造，是非常精巧細緻的。

最近又有人發明了另外一種形式的聲波顯示器 (圖 22-10)，比米勒原來的設計簡單

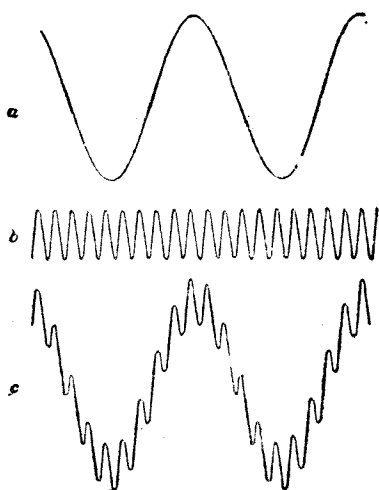


圖 22-9. 表示 (a) 基音, (b) 音調較高的泛音, 以及 (c) 泛音與基音混和的曲線

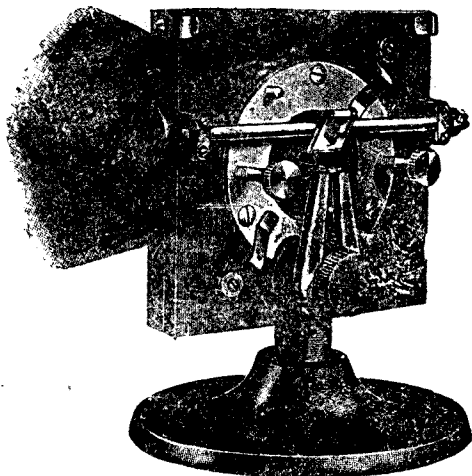


圖 22-10. 可用以投射聲波的簡式聲波顯示器

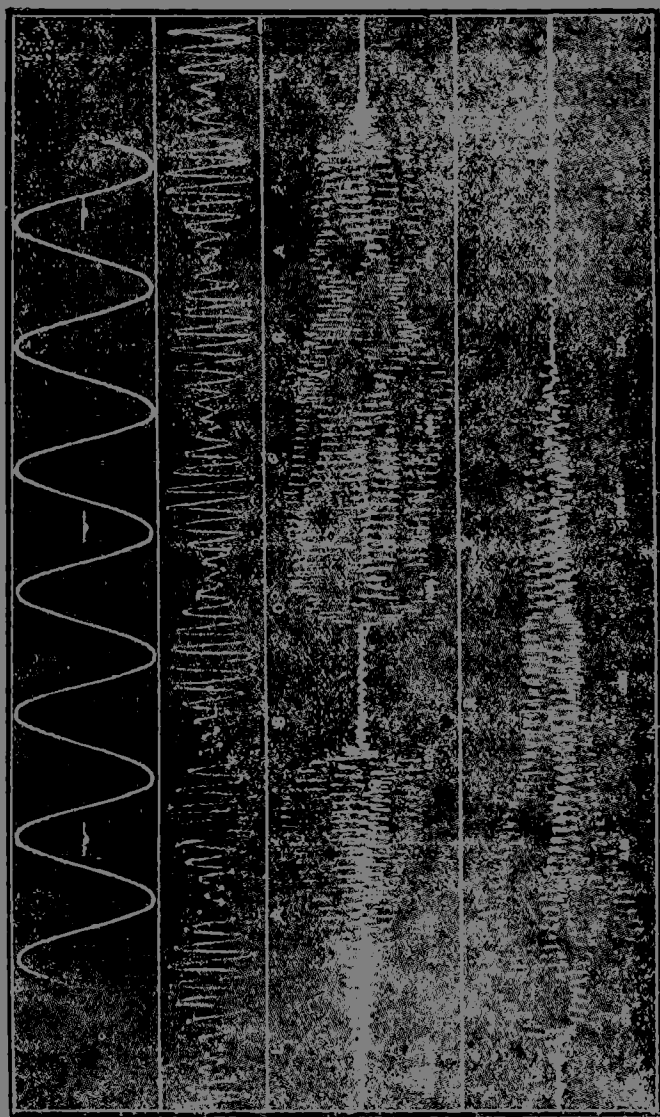


图 21. 由共振器所得的图线 I 及 II 是空腔的三次谐波的声音。III 和 IV 是同一空腔
 所得的图线。III 及 IV 是波在 Laborgas 管中传播时所受到的波。

一些。有一隻很小的鐵叉，裝牢在一片薄的金屬圓片中心，鐵叉的兩股橫擱在一個永久磁體的兩極尖端上。有一條很細的鐵絲，夾住在叉和磁極之間，鐵絲上附有小鏡子一面。當薄片振動的時候，鐵叉的兩股就帶著鐵絲使它在磁極上微微的來回滾動。這振動傳給了鏡子，由鏡面反射出來的一道光，也忽上忽下的作相當的振動。這道光射在另外一面繞着鉛直軸旋轉的鏡子上，我們就可以看見受光屏上顯出一條曲線，表示某一聲波的特徵。圖 22-11 所示，即是米勒氏聲波顯示器得到的曲線。

計 算 題

1. 某音叉在至少長 22 厘米的空氣柱上方振動時，聲音加強。此音叉所發之音的波長是多少？
2. 某音叉的聲音，爲至少 8.5 吋長的空氣柱所加強，(a) 它的波長是什麼？(b) 它的頻率是什麼？
3. 當氣溫在 20°C 時，可與頻率 435 的音起共振最短的空氣柱，應當是多少長？
4. 空氣柱至少長 13.0 吋，可與頻率 256 的音叉成諧應。求 (a) 聲音在空氣中的速度，(b) 空氣的溫度。
5. 用可以調節長短的空氣柱，加強每秒振動 290 次的 D' 音，求最短的兩個長度。
6. 長 10 厘米與 30 厘米的空氣柱，都可使某音叉的聲音加強。假定在當時的室內氣溫之下，聲音在空氣中的速度是每秒 345 米，求音叉的頻率。
7. 一汽笛的諧應空氣柱最短是 1.5 吋長，求此汽笛所發聲音的頻率。
8. 在(圖 22-2) 驗音盤上，假定第三排有小孔 50 個，每兩孔的距離相等，第四排也有小孔 50 個，距離不相等。當電動機帶着圓盤旋轉，每分鐘轉 1800 次時，(a) 空氣流噴過第三排，音調是什麼？(b) 空氣流噴過第四排，音調是什麼？

419. 【聲音的干涉】 在講述諧應器時，我們已經知道，兩個聲波可以聯合起來，互相加強。須知兩波也可以聯合起來，互相毀滅。這就是說，在一定的條件之下，兩個聲音的聯合可以產生靜寂。 這種現象，叫做干涉(interference)。下述的實驗，可以使我們相信干涉的現象確能發生。

取裝在木匣上的同音調音叉兩個，並列在一處，兩用木槌先後敲這兩音叉，我們可以聽到很平穩很圓滑的聲音。但若將滑子套在一音叉的兩股上(圖 22-12)，以改變其頻率，然後再敲兩叉，我們就聽見一陣陣忽抑忽揚似在發抖的聲音。這種現象叫做拍(beat)。拍的生成，實由於干涉和加強的相間作用。

將鋼琴或風琴上鄰接兩鍵同時捺下，就可以聽見拍的作用，若所捺的兩鍵是在低音部分，則拍的作用格外顯著。

凡是頻率稍有差別的兩音，它們的波聯合起來，即發生拍的效應。

利用拍，可將兩條弦或兩個音叉調準到同一音調。不聽見拍的時候，它們的音調就互相一致了。

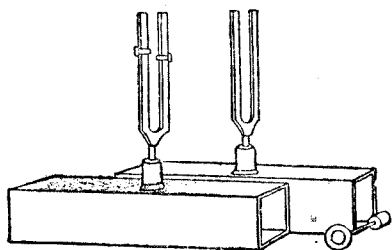


圖 22-12. 頻率微有差別的兩音
又造成拍

420. 【拍是怎樣生成的？】 欲知兩聲波怎樣聯合起來而產生寂靜，可把圖 22-13 的

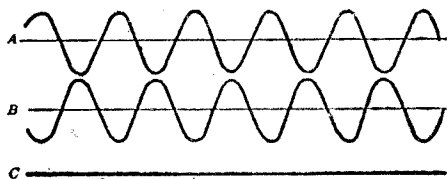


圖 22-13. 同頻率而反相的兩波 A 與
B 互相干涉而生 C

兩條曲線來研究一下。圖中的曲線 A 代表一個聲波，曲線 B 代表另一個聲波，頻率與 A 完全相同，但是它的相 (phase)則與 A 完全相反——這就是說，B 波

的進行比 A 波落後半個波長。倘若產生這樣兩個波的衝擊加在空氣上，空氣是不會起什麼擾動的(曲線 C)。這個效應，即是聲波的干涉。

若有頻率相同的兩個聲波同相 (in phase)或同步 (in step)，即兩波進行的情況完全相同，波峯與波峯常同時到達同地)，如圖 22-14 中的 A 和 B 兩曲線所示，則此兩聲波即互相加強，因而產生振幅加

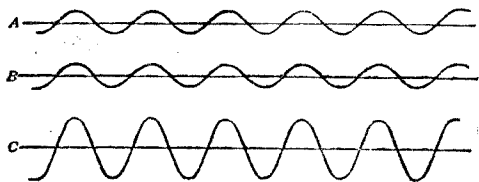


圖 22-14. 同頻率而同相的兩波 A 與 B 互
相加強而生 C

倍的聲音，如圖中曲線 *C* 所示。這就是聲波的**加強效應**。

又若有頻率相差很微的兩個聲波(圖22-15中的曲線 *A* 和 *B*) 互相重疊，則在某一時刻發生**加強作用** *R, R, R*，而在另一時刻又發生**干涉作用** *I, I, I*，如曲線 *C* 所示。

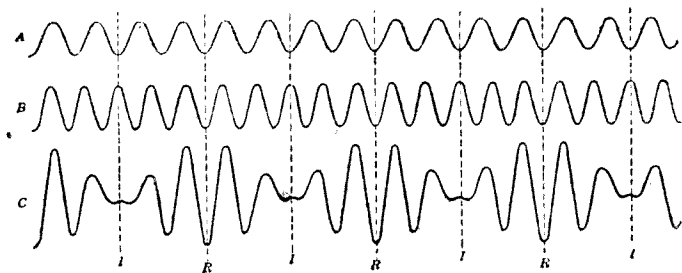


圖 22-15. 曲線 *A* 與 *B* 的頻率稍有不同；合成的曲線 *C* 有 *R, R, R* 等加強部分，有 *I, I, I* 等干涉部分；這就成功了拍。

若這兩波的頻率差是一，例如每秒 255 次與每秒 256 次，則每秒即發生一次加強與一次干涉(一拍)，這是很明白的。概言之，每秒的拍數等於兩波的頻率差。(參閱圖 22-11 的 II.)

421. 【拍與不諧和】 由實驗我們知道，不諧和就是拍所造成的。倘若兩個音所產生的拍是每秒六次或六次以上，則兩音並發時即使人不快。兩音的頻率差若在三十左右，則兩音同發時就要產生最不諧和的效應。但若頻率差增加到七十，例如中音 *C* 和 *E*，則兩音並發時即可發生諧和的效應。兩個樂音有很強的泛音而欲使其諧和，必要的條件是彼此的任何兩個泛音不會產生令人不快的拍數。由小鈴或小鑼所構成的樂器，敲起來總是一個一個的敲，並不同時敲二個或幾個，就是爲了這個緣故。

422. 【音階】 到現在爲止，我們所研究的，祇是空氣中一

列波的性質，以及一個樂音的傳播。現在我們要把樂音之間的幾個基本關係，拿來討論一下。換句話說，我們要找尋音樂的科學基礎。

若欲比較兩個樂音，我們先得比較它們的音調，即頻率。同頻率的音，我們說它們是同音(in unison)。兩個音的頻率比是1:2，這兩個音的間隔就叫做一均或一個八音度(octave)。例如頻率是512的音比頻率是256的音高一均，而頻率是128的音比頻率是256的音低一均。

據前人研究所得，人耳所能辨認為諧和的音，祇是頻率比可用簡單整數來表示的，例如成1:2，或2:3，或3:4等等的兩個音。更可引以為奇怪的是，好幾百年以來，人類的耳朵一直覺得頻率比是4:5:6的三個音，非常諧和。這樣的三個音聯合起來，叫做大三和音(major triad)。

一串音按着頻率的次序排列起來，若其第一音，第三音及第五音成功大三和音；又其第四音，第六音及第八音（比第一音高一均的音）也成功大三和音；而第五音，第七音及第九音（比第二音高一均的音）也成功大三和音；則此一串音即構成一個大音階(major scale)。下表所示，便是大音階中各音頻率間的關係，代表各音的字母，都是樂譜中用慣的。

一均中各音關係表

C (do)	D (re)	E (mi)	F (fa)	G (sol)	A (la)	B (si)	c (do)	d re
4		5		6			8	
			4		5		6	
	(3)			4		5		6
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2	$\frac{9}{4}$

鋼琴的鍵盤上各均各音的排列，如圖 22-16 所示。白鍵所

可聞音譜

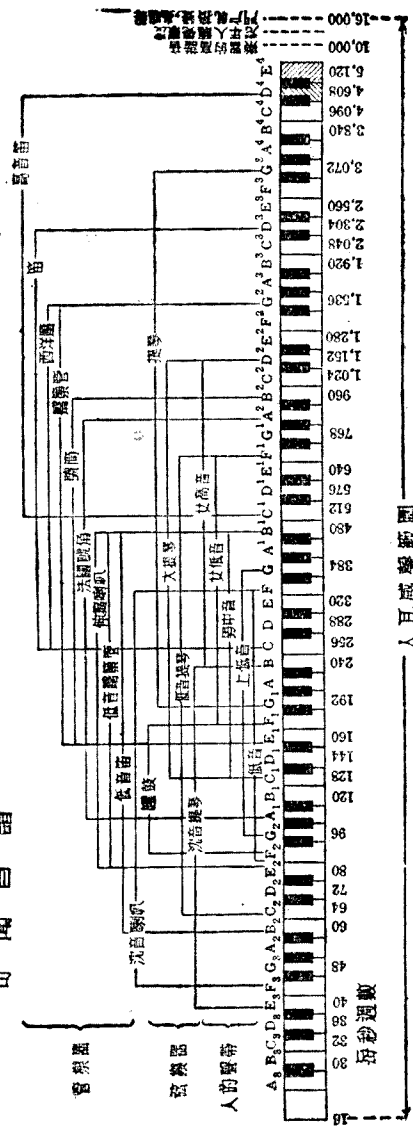


圖 22-16. 鋼琴上的鍵盤以及人類可聞的聲帶(所舉都不過是大概的範圍)

管的各音，乃是通常以 C 音爲主的大音階中各音。黑鍵所管的各音，是和鄰兩白鍵中間的音，用白鍵同黑鍵混和，可造成以 D, E 等音爲主的其他各大音階。

任何頻率，可以選做一均中第一音的頻率，再照前述的關係造成全音階。在實際上，通用的第一音頻率，確有幾種。音樂家把‘標準 A 音’的頻率定爲 440，據此推算，中 C 音的頻率是 264。在物理實驗室中，發中 C 音的音叉，其頻率通常是 256，以便於計算。

樂 器

423. 【鋼琴】 鋼琴現已成爲大家都熟悉的樂器，它的鍵盤（圖 22-16）上，通常有 88 個鍵。把琴蓋掀開，我們可以看出琴內張着 88 條弦，長短粗細，各不相同。每一個鍵管着一個毛氈槌，將鍵捺下，由槓桿的聯繫，槌即敲弦，因而發出一個音調一定的樂音來。我們還可以注意到，發低調各音的弦都又長又粗，而發高調各音的弦則又短又細。也許有人看見過修理鋼琴的人，用扳鉗旋轉弦線一端的柱子，把弦拉緊放鬆，藉以校準各弦的音調。

若將鋼絲一條繃緊在桌子上，而使它振動，則其所發之音，遠不及琴弦所發的那樣響。這是因爲貼近鋼琴各弦的下方，裝着一塊傳響板之故。弦的振動經由弦馬（bridge）傳給這塊薄而且大的板，使它作強迫振動。於是此板即使大量空氣跟着作同樣的振動（一條弦是決不能單獨使這麼多的空氣振動的），因而發出聽起來響得多的音。

424. 【弦的振動定律】 弦拉得愈緊，它的音調愈高，這是可以由弦音計（sonometer）來證明的。所謂弦音計（圖 22-17），不過是一隻長木箱，箱上有兩條鋼弦，一端固定，一端繞過滑車，而由掛在弦上的砝碼，將它拉緊。若一弦所受的拉力，恰等於另一弦所受拉力的四倍，則第一弦所發的音，就要比第二弦高出一均。

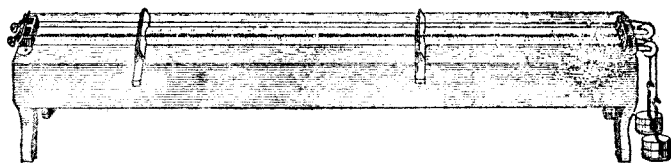


圖 22-17. 可以說明弦的振動定律的弦音計

若在弦下放置可動的弦馬，則音調即隨弦馬的地位而變更。弦的自由振動部分愈短，音調愈高。我們還可以證明，同長度且受同樣拉力的兩弦，較粗的音調較低。

精細的這一類實驗，已證明了下列各條定律：

(1) 振動頻率與振動弦的長度成反比例。據此，在一定拉力之下的弦，若將弦馬移置在它的中點，則其所發之音就要提高一均。

(2) 振動頻率與拉力的平方根成正比例。據此，若一弦受 4 磅的拉力而每秒振動數是 100，則須將拉力增加到 16 磅，纔可以使它的音調升高一均，即使其振動頻率從每秒 100 次增加到每秒 200 次。

(3) 振動頻率與弦的單位長的重量平方根成反比例。鋼琴上發低音的弦，是在鋼絲上再繞以鋼絲而做成的，因為這樣就可以得到必要的重量。

425. 【其他弦樂器】西洋的提琴(violin)，曼陀玲(mandolin)，以及吉泰(guitar)，我國的琵琶，七弦琴，胡琴等等，都屬於所謂弦樂器(stringed instrument)。這些樂器上裝有兩條以上的弦，各弦調準到一定的音調，弦下有馬，馬支在空心的木身上，這空心的木身不但有加強音的響度的作用，而且有決定音品的作用。同樣一隻提琴，同樣一隻七弦琴，其所發聲音有清濁之不同，就是因為琴身的大小形狀質地都不同之故。不論是我國的七弦琴，或西洋的提琴，凡是名手所造的名琴，其價值之高，也

是爲了音品優美的緣故。

這些弦樂器與鋼琴不同之點，在於弦數比鋼琴少得多，且在於發音不用槌敲，而用弓拉，或用手彈。每一條弦可以使它發出許多不同的音來，祇消將手指把弦捺住在種種不同的地位，以改變弦的振動部分的長度。拉或彈的地點及方法，可以決定泛音的多少和強弱，因而可以決定音品。演奏提琴的人，就憑着這手法的變化，不但可使提琴的音階寬闊，而且可使它的音品也有廣大的範圍。

426. 【管樂器】 最簡單的管樂器(wind instrument)是風琴管(organ pipe)。管的上端有時開口，有時不開口(圖 22-18)；開口的叫做開管(open pipe)，不開口的叫做閉管(closed pipe)。

我們向開管吹氣時，氣流衝激絕薄的邊緣，使它起劇烈的振動。管的作用猶如一隻諧應器。這樣的管所可發的最低音，它的波長是管長的兩倍。這個音叫做開管的基音。若用手掩住開管的上端，使它成爲閉管，則其所可發的最低音降低一均，換言之，最低音的波長是管長的四倍。這個音叫做閉管的基音。

概言之，開管的長度是基音波長的一半，閉管的長度是基音波長的四分之一。

第 414 節所述實驗中所用的諧應管乃是倒立的閉管，放音叉的一頭，相當於風琴管用嘴吹的一端。

西洋的笛(flute)，響栗管(clarinet)，薩氏簧管(saxophone)，小銅角(cornet)以及伸縮喇叭(trombone)，我國的簫，笛等等，都屬於管樂器。這些樂器中空氣柱的長短，有的因管側小孔的開閉而

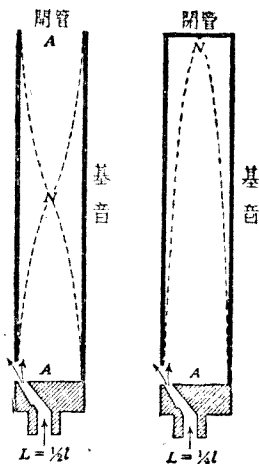


圖 22-18. 開口的與閉口的風琴管

改變*，例如西洋的笛，簫，薩氏簧管，以及我國的簫和笛，都是；有的因管側活塞的進出而改變，例如西洋的小銅角便是（圖 22-19 中的 a, b, c, 即是改變空氣柱長短的活塞）；有的因管身的

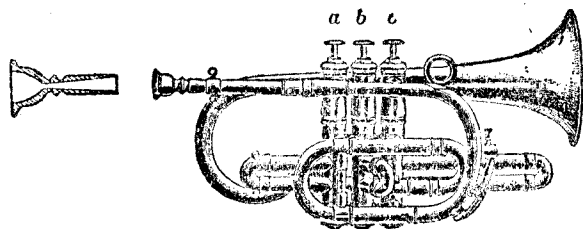


圖 22-19. 小銅角和它的吹口

伸縮而改變，例如伸縮喇叭即是，它的管身有一部分是可以移進移出的。用力吹奏時，還可以因為泛音的產生而使音調改變（提高一均乃至二均）。

管樂器的發聲，有三種情形：一種靠吹奏人嘴唇的顫動，例如小銅角之類；一種靠簧或膜的振動，例如薩氏簧管或我國的笛；還有一種靠管身薄邊的振動，例如我國的簫。

427. 【電風琴】 所謂電風琴，並沒有長短不同的風琴管，但是它的聲音卻與風琴差不多完全相同。先將風琴的各基音與各泛音仔細分析，析成許多種不同的頻率，然後再利用電流，將這些頻率按不同的方法混合起來，重行造成各風琴管所發的聲波。這便是電風琴的原理。在電風琴中，有所謂‘音輪’（tone wheel）的，相當於單發基音的風琴管。這音輪乃是一個金屬製的小圓盤，它的四周有排列均勻的突起部分。小圓盤在繞有線圈的永久磁體前旋轉（圖 22-20），即可發生一定頻率的交流。音輪共有 91 個，分別由齒輪推動，旋轉不息。每一個音輪所引

* 開某孔，即無異於在該孔截取空氣柱。

起的交流頻率，是看該音輪的旋轉速率以及輪周突起部分的數目而定的。將琴鍵按下，就有某一個電路接通。於是就有一道交流，送入一隻普通的揚聲器 (loudspeaker, 見下文第 431 節) 內。所以演奏電風琴的技巧，即在於怎樣配合適當的電流，俾可發出宏壯動聽的樂聲來。除了平常的基音之外，演奏人還可以任意增加泛音的數目與強度，以產生優美的音品，他祇要把‘音節栓’(stops)抽出適當的長度，就行。電風琴所用的電流，可以取自平常的家用電燈線路；它所占的地位同一架鋼琴差不多(圖 22-21)；它的費用，比一架普通的風琴更省。

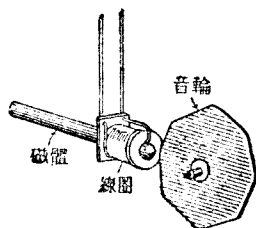


圖 22-20. 音輪是一個金屬圓盤，在繞有線圈的永久磁體前旋轉

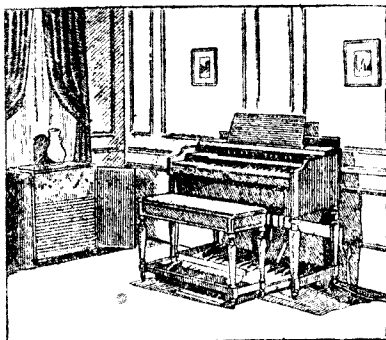


圖 22-21. 沒有管的電風琴，在左側是揚聲器

問答題與計算題

1. 有提琴一隻，它的 A 弦的振動部分長 32 厘米。該弦不用手撥，拉出聲音來的時候，每秒振動 435 次。(a) 若用手指將 A 弦捺住，使其受拉部分減短到 16 厘米，則其振動數是每秒多少？(b) 減短到 15 厘米時，多少？(c) 欲使振動數是每秒 488，此弦的受拉部分應該長多少？
2. 提琴上的四條弦，是一樣長的，然而全弦作振動時，各弦所發的音各不相同。說明其理。
3. 有一條弦，它的基音頻率是 200。求其最初三個泛音的頻率。
4. 樂隊中最好的與最不好的提琴演奏人，他們所奏同樣的音，聽起來覺得不同。為什麼不同？

5. 一音叉的波長是 3.5 呎，可與此音叉共振的最短閉管，有多少長？
6. 閉口風琴管的基音波長是 3.5 呎，該管長多少？
7. 閉口風琴管的基音波長是 3.5 呎，該管長多少？
8. 閉口風琴管長 10 吋，所發基音的頻率是每秒振動 326 次。若欲在同時 (a) 用閉管，(b) 用開管以得高出一均的基音，則所用之管應長多少？
9. 當氣溫是 25°C 的時候，長 10 呎的閉口風琴管，它的基音的音調是多少？
10. 閉口風琴管兩支，分別長 20 吋與 21 吋。若在氣溫是 20°C 的時候，使這兩風琴管，同時發出基音，則每秒有拍幾次？

428. 【有振動膜的樂器】 這種樂器最普通的一個例子，便是鼓 (drum)。還有人類的聲音，也是由膜的振動而來。人的咽喉兩側，有一對薄膜，叫做聲帶 (vocal cords, 圖 22-22)。聲帶振動加以唇和舌的振動，構成了人的語言與歌聲。改變聲帶所受肌肉的拉力，可以改變音調；改變口腔的形狀，可以改變泛音，因而可以改變音品。

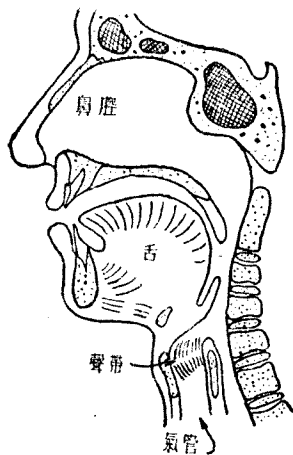


圖 22-22. 鼻口咽喉的剖面。在氣管中可見聲帶

聲音的再生

429. 【唱機】 通常機械式的唱機 (phonograph) 中，有一隻尖銳的針 (圖 22-23) 在唱片的溝紋內左右振動，這振動由細巧的槓桿傳給一片豎直的薄片，薄片因此跟着振動而發聲，這聲音，再用第 411 節所講的方法增加它的響度。

近幾年來，製造唱片以及使聲音再生 (reproduction) 的方法，都有很大的進步，所以普通機械式唱機的地位，漸漸有讓給電唱機的趨勢。下面就是利用電流錄音及放音的概要。

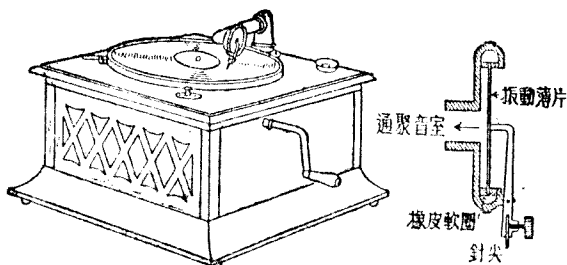


圖 22-23. 唱機及唱片, 附‘唱頭’的概示圖

待錄的聲音, 傳到像廣播室內所用的那樣的話筒 (micro-
phone) 內, 引起脈動電流, 這電流再經由真空管 (vacuum tube, 見
第 545 節) 放大器予以放大。放大的電流產生磁效應, 使一枚錄
音針振動, 這錄音針就在軟蠟板上劃出屈曲的溝紋。於是再用
電鍍的方法, 從這蠟板鑄得一塊銅模。最後用幾噸重的壓力, 把
這銅模壓在唱片上 (此時唱片剛澆好, 還是很熱的), 壓出音跡來。
在放音的時候, 唱片按一定的適當速
率旋轉 (用小型電動機), 使那輕觸溝
紋 (即音跡) 的針振動, 因而就在所謂
拾音器 (pick-up, 俗稱電唱頭, 圖 22-
24) 內產生了交流。這交流經由真
空管放大器予以放大後, 再通入揚聲
器。其結果, 可以再生的聲音, 它的音
調與音品的範圍, 便大大地增加了。

430. 【話筒的型式】 平常的
電話機上, 現在仍舊採用碳粒式的話
筒 (第 371 節)。但就廣播及有聲電
影而論, 則近來已有兩種新發明的話
筒在使用中: (一) 容電器式話筒

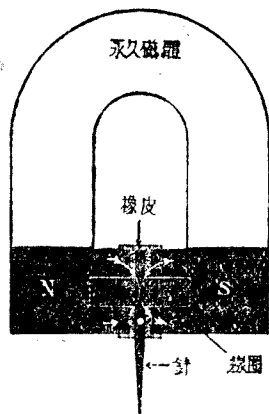


圖 22-24. 磁電拾音器 (電唱頭) 的概示圖。唱針的振動使線圈內發生交變電動勢

(condenser microphone)(二)圈動式話筒(moving-coil microphone)。用這兩種話筒來使聲音再生,比用簡單的碳粒式像真得多。

在容電器式的話筒內,有兩塊平行的絕緣板,中間隔着一層空氣,大約祇有一千分之一吋那樣的薄。前面一塊板(即靠近話筒口的一塊),是用金屬做的,又柔韌又輕,而且很薄。聲波傳到這塊金屬薄板上,使它前後移動,因而可使兩板間的微小距離有微小的變更。我們在第 273 節中已經講過,容電器的電容是看兩板間的距離而定的。又,交流電路中若有容電器,則改變電容即可改變電流。因此,話筒口的金屬板振動時,話筒內的交流即起微小的變更,與聲波互相呼應。這微小的電流變更,可以經由真空管放大器(第 545 節)予以放大,不致改變波動的原來形式。所謂容電器式話筒的原理,不過如此而已。

用圈動式話筒(圖 22-25),還可以得到更好的結果。在這

一種話筒內,金屬薄片受到聲波後,即帶着一個線圈一起振動,這線圈是放在磁場中的,因此就產生了交流,這交流也用真空管放大器予以

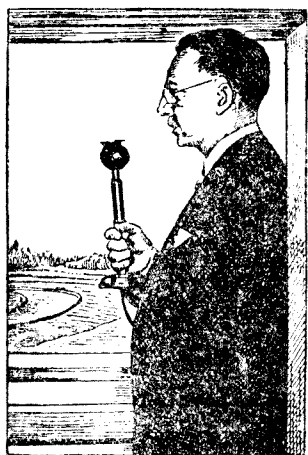


圖 22-25. 播音臺報告員向
——圈動式話筒發言

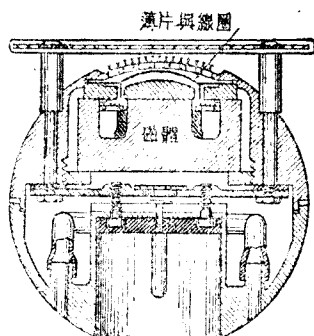


圖 22-26. 圈動式話筒的剖面

放大。圖 22-26 所示，乃是圈動式話筒的剖面概況。金屬片是用又薄又輕的耐鋁 (duralumin) 做成的。它的中部成圓穹形，有一個很輕的線圈附着在它的下面的邊緣上。聲波使金屬片上下振動時，這線圈就跟着在圓形的溝中也作上下的振動，而將永久磁體的磁力線伸布在溝中的部分切割着。這麼一來，就在線圈內發生變動的交流，這交流的變動情況，與高頻率聲波及低頻率聲波對應，可以到異常真確的程度。這種話筒是沒有方向性的，這就是說，對着話筒的任一側，都可以發出清楚響亮的聲音來。這也是一個很大的優點。

431. 【揚聲器】 現代的揚聲器，通常都是電動式 (dynamic type)。它有一隻很短很小的線圈，裝牢在一個圓錐形的紙盆底上。這線圈放在一個小而強的電磁體所生集中的磁場內(圖 22-27)。來自電話，電唱機，或無線電收音機的放大電流，是要在這線圈中通過的。

線圈的每一條線都垂直於電磁體 (或永久磁體) 所生的磁力線，所以線圈受到推力，正如在電動機中一般(第 356 節)。這推力是跟着線圈內電流的大小而變更的。因此，這線圈以及圓錐形紙盆就向內向外振動，完全對應於被放大電流的變更。

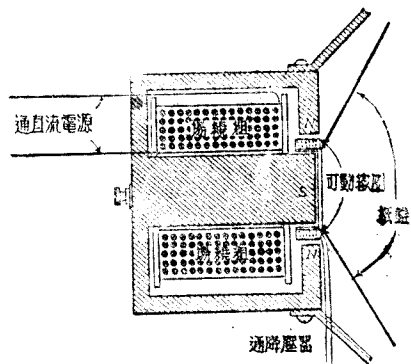


圖 22-27. 電動喇叭的剖面

這樣，就把送入遠處話筒內的空氣波，差不多一模一樣地再造出來。電動式揚聲器，幾乎沒有本身所特有的天然振動，這也是它的一個很大的優點。

第二十二章提要

樂音的三特徵是音強，音調，以及音品。

音強(或響度)是看振幅而定的。

音調是看頻率而定的。

音品是看波的形式，或泛音的多少和強弱而定的。

基音是振動體整個振動時所發最低的音。振動體作分段振動時，發出泛音。比較簡單的泛音叫做諧音。

弦的音調——(一)長度減短時提高。

(二)拉力增加時提高。

(三)弦愈輕愈細，愈高。

共振或諧應是物體受聲波衝擊時，因聲波的頻率同於物體本身的天然頻率，而也起振動的現象。

聲音可用諧應器加強，那是因為原波與反射波聯合起來的緣故。

開管的長度 = $\frac{1}{2}$ 基音的波長。

閉管的長度 = $\frac{1}{4}$ 基音的波長。

每秒的拍數等於兩波的頻率差。

音程是兩音間的頻率比，這個比等於2時，叫做一均。

成諧和的兩音，其音程是簡單整數比。

大三和音是頻率比等於4:5:6的三個音。

大音階由三組大三和音錯綜地構成。

聲音再生器的原理：從聲波得對應的脈動電流，這電流經過放大後，通入揚聲器，再得原來的聲波。

問 答 題

1. 鋼琴上發低音的各弦，都繞有鋼絲，什麼緣故？
2. 鋼琴上的弦，多數是三弦成一組，每組一音。同一組中的弦，其所發之音，必須是同音。調準的時候，我們可以利用拍。怎樣利用？

3. 提琴的琴身總是空的，而且用很薄的木頭做成。什麼緣故？
4. 將鋼琴下面的揚音踏板 (loud pedal) 踏下去，琴內的抑音器 (damper) 便離開了弦。在這時候，若有另一人用另一樂器奏出一個音來，經過一秒左右的時間，然後側耳細聽，那麼必可聽見鋼琴內也有聲音發出來。說明其理。
6. 風琴管的音調，在冬天與在夏天，可有什麼差別給我們注意到？風琴管本身長度的微小變更，略去不計。
7. 一輛疾駛的汽車經過時，它的喇叭聲的音調突然降低。這現象，你能予以解釋麼？
8. 唱機的唱片，教它轉得快一些，音調就會昇高。在鋼琴上奏曲奏得快一些，音調也會提高麼？說出答案的理由來。
9. 怎樣可使提琴，笛子，伸縮喇叭，以及號角的聲音，從低音調轉到高音調？
10. 鋼琴上的弦，(a) 若其所受拉力加倍，(b) 若其長度加倍，(c) 若其重量加倍，則其音調有什麼改變？
11. 優良的無線電收音機，我們常說它發音‘非常逼真’ (high fidelity) 及‘音質優美’ (good tone quality)。這有什麼意思？

複習問答題與計算題

第二十一章

1. 一隻船的底板上受到猛烈的一擊。聲音按每秒 1400 米的速率傳到海底，經過 5 秒鐘之後，由船底所裝水下電話機收到從海底來的回聲。問在該處的海底深多少？

2. 燈號船 (lightship) 一艘，備有霧角 (foghorn) 並裝有水下警鈴。某船在航行時，船長忽從水下電話機 (圖 22-28) 中接到這燈號船所發的水下信號，4 秒鐘之後，又聽見霧角的聲音。若霧角聲與警鈴聲同時從燈號船發出，而聲音的速率在空氣中是每秒 1100 呎，在水中是每秒 4800 呎，則兩船間的距離是多少？

3. 在廳堂中或在教堂裏，若餘響太多，可有什麼補救的辦法沒有？說幾個出來。

4. 聲音的速度在水中為什麼比在空氣中大？

5. 一山谷寬 5500 呎，兩側峭壁聳峙，與地面垂直。設有一人在此谷中開放大炮，聽到兩次回聲，各從一壁反射而來，前後相隔 6 秒。問此人開炮處離較近的一壁有多少遠？

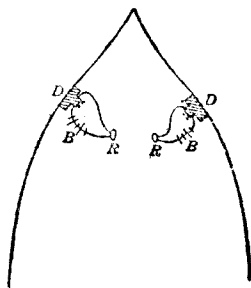


圖 22-28. 裝在船底兩側的水下電話機

第二十二章

1. 在實驗室中求得，與頻率 256 的音叉起共振的最短空氣柱（閉管中的），長 12.9 吋。（a）從這個數目計算聲音在空氣中的速度。（b）若當時的氣溫是 20°C ，再計算聲音在當時的真速度。（c）從這兩個速度，求實驗結果的誤差百分數。

2. 說出（a）一個方法，可使提琴上某一條弦所發聲音的強度改變；（b）兩個方法，可使這聲音的音調改變；（c）一個方法，可使它的音品改變。

3. 有音叉一個，已確知其頻率是 326；另有音叉一個，叉上刻着 326 的字樣。當兩叉並擊時，每秒發生 3 拍。問第二音叉的兩個可能的頻率是什麼？

4. 每秒振動 256 次的音叉一個，可用 4 呎長閉管中的氫柱使它加強。求聲音在氫中的速度。

5. 設鋼琴上中 C 音的頻率是 256，求鍵盤上其他七個 C 音的頻率。參閱圖 22-16。

6. 人耳所能聽得見的最低音與最高音，其頻率分別在 30 與 20,000 左右。計算它們的波長。

7. 風琴裏面所用最長的管，是 34 呎長的開管。它的音調是什麼？

8. 風琴為什麼要有許許多多的管？

第二十三章

燈與反射器

432. 【光的好效果與壞效果】 我們不得不在人造的光明之下，做很多的工作，所以關於照明 (illumination) 的幾件重要事實，我們也非知道不可。第一件主要的事情，就是要有充足的光，使我們可以把各種東西看得清清楚楚，這是無庸多說的。但是我們從經驗知道，有時候雖然有充足的光，卻仍舊不能夠把各物體的地位與形狀，辨別得一清二楚。這是因為燈的地位分布得不適宜，以致陰影縱橫交斜，未免與白晝差別太甚之故。其次還有一個極困難的問題，那便是不容易找到適當的燈光，使有色物件在燈光下看起來，與在日光下無別。最後一個問題，就是在現代的強烈燈光之下，我們不得不設法保護我們的眼睛。這些電燈大都光芒亂射，很容易使我們眼花目眩。照明的問題除了以上所述者外，還有費用方面的問題，也是必須加以研究與考慮的。

太陽光除有照耀四方的功用外，還有治病的功用，這已經有了幾百年的歷史。近年來的各種實驗似乎更昭示我們，那些波長太短人目不可察見的光波，所謂紫外光波 (ultraviolet wave)，對於植物與動物，都有刺激的作用。這種波，現在已經可以用人工的方法產生，例如用石英汞汽燈 (第 342 節)。用於銲接鋼鐵的電弧，也會放出這種很短很短的光波來，所以使用這電弧的工人們，必須戴上特製的眼鏡，以免兩目遭受劇烈的灼傷。

照 明

433. 【光依直線進行】 個個人都知道，眼睛決不能看見轉灣過去的地方，因為在平常的環境之下，光是依直線進行的。

若在暗室裏邊安放一盞電燈同一個屏，而且在燈與屏之間安放第二個不透光的屏，屏上刺一個針孔，則可看見第一個屏上顯出燈絲的倒像（圖23-1）。由此即可知道，光是依直線穿過針孔的。所謂‘針孔照相機’(pinhole camera)就根據這個原理製成。

測量員之所以能夠精密測定角度，也是因為光從遠處物體來到他的儀器之中，依直線進行之故。

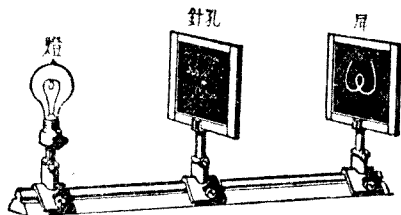


圖 23-1. 光通過針孔順着直線進行

光依直線進行，還有一個人人熟悉的結果，這就是，不透明的物體遮住了光的通路而有影生成。通常講影，祇指受光面上顯出來的陰暗部分而說；但在物理學上講影，就得把有光通過與無光通過的空間區別一下。影的邊緣，大都模糊不清，換言之，明亮與黑暗之間，並沒有明確地劃分的界限，除非光源小到差不多成爲一點。發光體愈小，影愈清晰，例如電弧燈所投的影，比火油燈燄或煤氣燈燄所投的，看起來清楚一些。若把地球所投的影研究一下（圖 23-2），即見 A 區內完全沒有太陽光通過，這個區域叫做**本影**(umbra)。

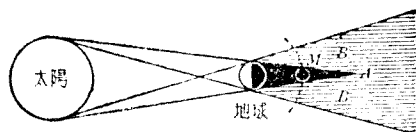


圖 23-2. 地球投影在月球上造成全蝕

但在 B B 區內，卻有一部分的太陽光通過，這個區域，叫做**半影**(penumbra)。當月球 M 恰巧進入本影中的時候，地球上就看見月全蝕 (total eclipse)。若月球有一部分在半影中，則地球上

所見的就是月偏蝕(partial eclipse)。

434. 【照度：平方反比律】不消說，一本書放在燈的近旁，比了放在與燈隔開一段距離的地方，燈光照在書上亮得多。換句話說，照度(illumination)——即落在單位面積上的光量——隨着距離的增加而減少。

在金屬薄皮空心球中，放一隻鎢極弧光燈泡(圖 23-3)，球的前面開一個針孔，

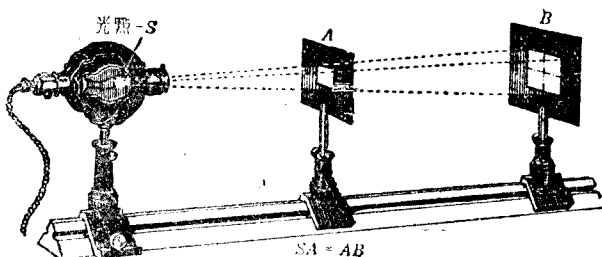


圖 23-3. 照度與距離的平方成反比例

造成差不多可以當作光點看的光源 S 。於是在離開 S (即針孔) 一呎的地方，放一塊厚紙板 A ， A 上有一個正方形孔，面積等於一平方吋。再在離開針孔 S 二呎的地方，放一個受光屏 B 。從圖顯然可知，通過 A 上一平方吋孔的光，照到 B 上的時候分布在 4 平方吋的面積上。若將 B 屏移到離開 S 光點 3 呎的地方，則通 A 上一平方吋孔的光，照到 B 上的時候就要分布在 9 平方吋的面積上。 B 的受光面積，是與 B 到 S 間的距離平方成正比例的，但是落在受光面上的光，卻始終不多不少。所以 B 屏上每單位面積所受的光量，隨着距離的平方而減少。

照度或照明的強度 (intensity of illumination) 與距離的平方成反比例(與第 400 節比較)。

這條定律假定光源充分微小，可以看成光點，並假定受光表面與光的照射方向成直角。

435. 【燈的發光強度】計算已知面積上的受光量時，不但必須測定到光源的距離，而且必須測定光源的發光強度或光度(luminous intensity)。例如房間內用現代的電燈來照明，

比了用火油燈就亮得多。因為市上出售的燈，形式很多很多，所以我們極應當有一種方法，可以用來測定這些燈的發光強度。要做這樣的工作，我們必須有一盞標準燈(standard lamp)，以及比較燈的光度的儀器。這儀器就是所謂**光度計**(photometer)。

436. 【標準燈】 經人提出來試用的標準燈，雖然為數不少，但是沒有一種可使我們完全滿意。最古舊的標準燈是英國的標準燭，用鯨腦油依照特定的方法製成。這種標準燭，在計算時雖仍用它來做單位，但在實用上已經不用它來做標準。從這種標準燭在水平方向內所發出來的光，它的光度就叫做一**燭光**(candle power)。

美國現在所用一燭光的標準，由華盛頓國立標準局所保持的一組標準白熾燈來決定。這樣決定的光度單位叫做一**國際燭光**(international candle)，已經由英國與法國予以承認。在德國，法定光度單位是**赫**(Hefner)，一赫等於一國際燭光的 $\frac{9}{10}$ 。

437. 【本生光度計】 如圖 23-4 所示的，乃是所謂‘油斑’

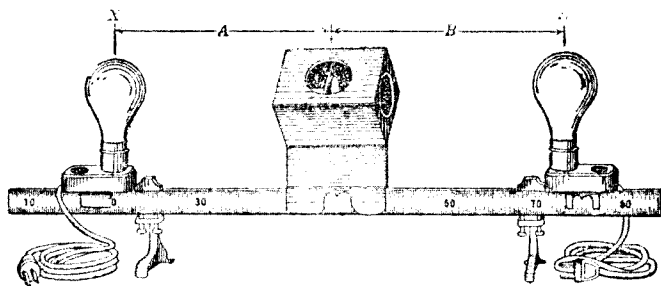


圖 23-4. 本生光度計，可以用來比較電燈 X 和標準燈 S

光度計，為德國化學家本生(Robert Bunsen)所發明，因此又叫做**本生光度計**(Bunsen photometer)。用這儀器，我們可以把光度待決定的燈在水平方向內所發的光，同一盞標準燈在水平

方向內所發的光比較。它的主要部分是一個白紙屏，屏的中央有一個透明的油斑，可以讓光自由透過。這屏放在待比較的兩盞燈中間，兩盞燈分別照着它的兩面。若紙屏的左側受光比右側多，則從左側看屏，可見全屏很亮而中央現一黑斑。若紙屏的兩面受光量相等，則中央的黑斑不見；即使有時看見，也是兩面看起來一樣亮。有油斑的屏，通常藏在一隻匣子裏（圖 23-5），匣子的兩頭開着孔，燈光可以直射入匣，照在屏上。匣子前面也有圓孔，眼睛即從此孔張望其內部。屏的兩側各有一鏡，斜放着，如圖所示。有了這兩面鏡子，我們就可以同時看見屏的兩面，以便比較。

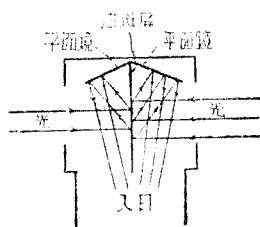


圖 23-5. 本生光度計上的
的箱子，箱內放着油斑屏

在實驗室中，往往採用另一種光度計，叫做喬里氏 (Joly) 光度計。此種光度計中並無‘油斑’屏以及鏡子，卻有兩塊石蠟板，中間用錫箔隔開。這兩塊板看起來一樣亮的時候，即知它們所受的光相等。

438. 【本生光度計的使用法】 使用本生光度計，必須在暗室之內。待檢驗的燈 X ，放在光度計的刻度棒一端，標準燈放在他一端，如圖 23-4 所示。然後移動油斑屏，直到一個適當的地位，使它的兩面恰巧受光相等。於是把 A 和 B 兩段距離予以測定（從棒上的刻度可以求得）。

若 A 與 B 兩段距離相等，則兩燈的燭光數顯然相等。若這兩段距離不相等，則離屏較遠的燈，其燭光較大。又因照明強度與光源距離的平方成反比例，而在屏的兩面照度相等，所以可得下面的方程式：

$$\frac{X \text{ 的燭光}}{A^2} = \frac{S \text{ 的燭光}}{B^2}$$

舉個例來說，設有燈一盞，它的燭光是 X ，離開屏 100 厘米；標準燈的燭光是 16，離開屏 80 厘米，此時屏的兩面上照度相等，

$$\text{則} \quad \frac{X}{(100)^2} = \frac{16}{(80)^2}$$

$$\text{而} \quad X = 25 \text{ 燭光.}$$

439. 【照度的測定】 我們剛纔已經知道，光源強度的單位是國際燭。這樣的一支標準燭，它的光照在離燭一呎遠而與光的進行方向成直角的表面上，此時的照度叫做一呎燭 (foot-candle)。這便是照度的單位。從這定義，顯然可得下式：

$$\text{照度(呎燭)} = \frac{\text{燭光}}{\text{距離的平方(呎)}^2}$$

舉個例來說，一盞 16 燭光的燈，直照在一呎遠的表面上，照度就是 16 呎燭。又若有 32 燭光的燈一盞，照在 4 呎遠的物體上，照度就是 $\frac{32^2}{(4)^2} = 2$ 呎燭。

在這兩個例子裏，我們假定都祇有一個光源，而受光表面都垂直於光的進行方向(直照或正照)。在實際上，這種情形是差不多永遠不會有的，所以計算任何表面上的照度，乃是一個極難的問題。

圖 23-6 所示是現代‘呎燭計’ (foot-candle meter)，可以用來直接測定任何地方的照度。這儀器的主要部分是一隻電流計和一隻‘光電池’ (photronic cell，在美國商場上叫做衛斯不光電池，(Weston photronic cell) 它的構造略如圖 23-7 所

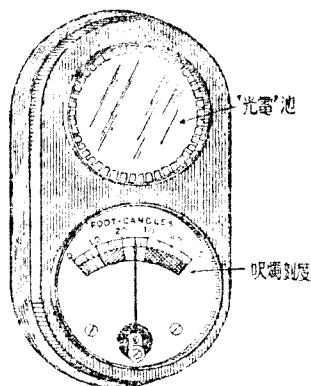


圖 23-6. 有‘光電池’的呎燭計

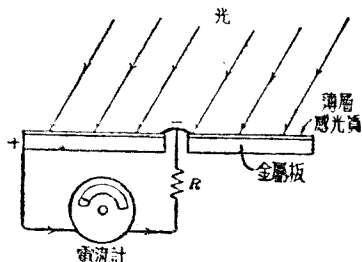


圖 23-7. ‘光電池’的概示圖；這儀器露在光中，即成為小小的電池

示)。這電池有一塊圓形金屬板(鎳和鐵的合金),板的中央有一小孔,板上蓋着一薄層感光性材料(硒)。有一個小金屬環與這一層弱接連着,它就是電池的負極;金屬圓板是正極。光照在硒上,能把電子趕出去,趕到金屬板上,成功一層電子障壁(barrier layer of electrons)。電子要通過這障壁,遠不及透過硒層那樣的容易。所以電流的流動,如圖中所示。這光電池把光能轉換為電能,而其電流則與硒層受光的多少成正比例。所以電流計上的刻度尺,其讀數可以按準到直接指示燭數。

440. 【燈的效率. 流明】 一盞燈在放光的時候,是把光能向各方輻射出去。若有一盞一燭光的燈,照着一呎遠的表面一平方呎(圖 23-8),則此表面上所受的光能,叫做一流明(lumen);

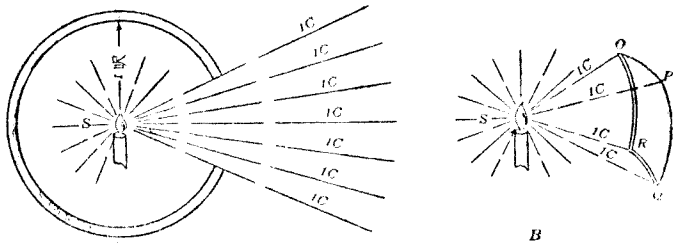


圖 23-8. 流明的定義: S 是 1 燭光的光源; $OPQR$ 是 1 平方呎的球表面

這就是計算光能的單位。假定一盞一燭光的燈,向各方均勻地輻射光能,則該燈所輻射的光能總量是 4π 流明,因為半徑一呎的球,它的面積是 4π 方呎。所以

1 燭光發射 4π 流明。

電燈的效率,現在即按每瓦特多少流明來計算。例如舊式碳絲燈的效率是每瓦特 3.3 流明,而燈泡用清玻璃做的鎢絲抽空式電燈,它的效率是每瓦特 10.2 流明。不過若欲表示電能有多少部分轉換為有用的白光,我們仍須用百分數。例如每瓦特 10 流明的鎢絲燈,它的效率大約祇有百分之 1.6。

例題:有 40 瓦特電燈一盞,經測定燭光數是 32。問它的效率是每瓦特幾流明?



圖 23-9. 各種工作與遊戲所需要的照度(呎燭數)

$$\text{效率} = \frac{\text{輸出(流明數)}}{\text{輸入(瓦特數)}} = \frac{32 \times 4\pi}{40} = 10.1 \text{流明/瓦特}$$

441. 【需要多少高的照度?】 明暗適宜的照度, 隨着環境的不同而大有高下之別 (圖 23-9)。例如在繪圖室中, 在舞臺上, 以及在店鋪內, 大約需要 20 呎燭, 但在教堂裏, 住宅裏, 以及公共的甬道中, 也許祇需要 3 呎燭。太亮與太暗, 是同樣地不合需要的。暴露在外面的強烈光源, 超過每平方呎 5 燭光, 就要使眼睛受到刺激; 這就是所謂‘眼睛酸’的普通原因。為免除此弊起見, 電燈泡應當用濁玻璃製造, 各燈應當散布四處, 最好用遮光板將直接的光遮住, 或竟將燈泡隱藏在看不見的地方, 而使燈光從天花板或牆壁反射下來。這種間接照明的方法, 雖然費用比較多一些, 但是可使我們得到明暗適宜, 均勻散布, 柔和不刺目的光, 極合公共大廈內廣大房間之用。

問答題與計算題

1. (a) 如圖 23-2 所示的本影, 它的各部分都一樣暗麼? (b) 半影的各部分都一樣暗麼?
2. 日全蝕的時候, 圖 23-2 中三個天體怎樣排列? 畫一個本影半影的概示圖。
3. 舉一個數字的例子, 說明平方反比律 (a) 應用於聲音, (b) 應用於光。
4. 離開一張畫 8 呎處有電燈一盞, 若其照在畫上的照度, 與離畫 4 呎處 25 燭光的電燈相同, 則其燭光數是多少?
5. 本生光度計中所用的標準燈有 4.0 燭光。該燈離屏 25 厘米時, 與離屏 75 厘米的燈, 在屏的兩面有相等的照度。求第二燈的燭光數。
* * *
6. 用雪茄煙匣子做成的針孔照相機, 其中的敏化片離開針孔 8 吋。一個男孩子長 5 呎, 站在照相機前 9 呎, 問他的像在敏化片上長多少?
7. 街燈的光透過一呎見方的玻璃窗, 照在對面 10 呎遠處的牆壁上, 現出光斑一塊。若此街燈離開窗 20 呎, 則光斑的大小是多少?
8. 第 7 題中的光斑若有 15 吋見方那麼大, 則街燈離開窗幾呎?
9. 在離開 50 燭光的電燈 4 呎處看書, 覺得很適宜。若因某項事故不得不離燈更遠 3 呎, 則應將燈換成多少燭光, 方纔能夠得到同樣的照度?
10. 離開 50 燭光的燈 5 呎處有書一本, 書上的照度是多少呎燭?
11. 宜於看書的照度若是 3 呎燭左右, 則 60 燭光的燈應該放在離書本多少遠的地方?

12. 將相片放在離開 50 燭光電燈 2 呎之處，需要經過 10 秒鐘的時間，纔可以曬印完畢。若將相片放在離開 100 燭光 3 呎處曬印，需要多少時間？

13. 有 115 伏特 160 燭光的電燈一盞，需用電流 0.90 安培，問它的效率是每瓦特幾流明？

平面鏡

442. 【漫射與單向反射】 在我們四周圍的物體，我們能夠看見，那是因為這些物體把光反射到我們眼睛裏去的緣故。多數物體的表面是粗糙的，所以照射在上面的光給反射回去，往

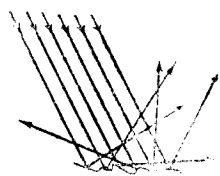


圖 23-10. 光的漫射
(隨處得見物體的原因)

往很散漫，如圖 23-10 所示。光的這種反射，叫做漫射 (diffused reflection)。例如沒有上過光的紙，或沒有塗過漆的木材，光照射上去，就給漫射開來。然若有磨得非常光滑而且很平整的金屬表面，則光從這個表面反射後，常順着一定的方向

入目，以致看起來那反射的光好像從遠處的物體發出，而並不來自這個反射面。這種反射叫做單向反射

(regular reflection)。如圖 23-11 所示，便是單向反射，圖中 mm 是一個平面鏡 (mirror) 的反射表面。直線 OP 指示落在鏡上的光的方向，直線 PE 指示反射光的方向。

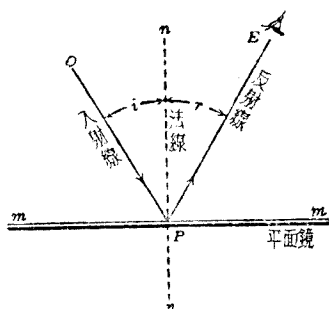


圖 23-11. 單向反射 鏡中有像的原因。

443. 【反射定律】 從一個小孔中通過的一道光，叫做光柱 (beam)。極細極細的光柱叫做光線或射線 (ray)*。光柱可以看做是無數光線所構成的。

* 射線的比較準確的定義見第 461 節。

從極遠的光源 例如太陽，發來的光柱，其所由構成的光線差不多互相平行。因此，這樣的光柱叫做平行光柱。

在圖 23-11 中，設 OP 是平行光柱，斜投在平面鏡 mm 上，而 PE 則為反射光柱。若過 P 點作 mm 的垂直線，或稱法線 (normal)，則入射光柱與法線所成的角 i 叫做入射角 (angle of incidence)，而反射光柱與法線所成的角 r 叫做反射角 (angle of reflection)。

由仔細的實驗可以證明——

- I. 入射線，法線，及反射線在同一平面上。
- II. 入射角等於反射角。

444. 【平面鏡所造成的像】 我們都知道，一個人站在平面鏡前，就會看見他自己以及身旁各物，好像在鏡子的背後。如圖 23-12 所示，從物體 AB 的 A 點發出的光線，經平面鏡反射後

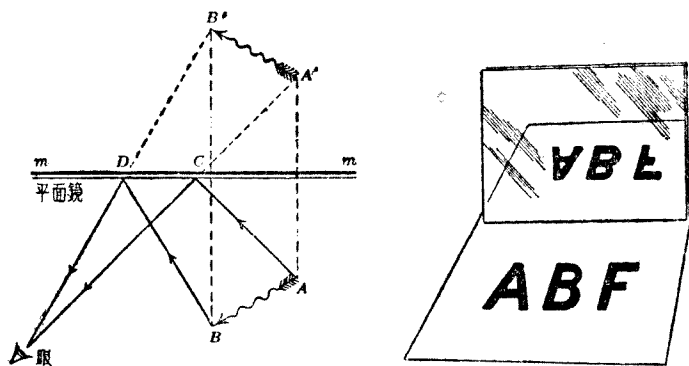


圖 23-12. 在平面鏡中的像

進入眼睛 E ，好像從鏡子背後的 A' 點發來。同樣，從物體 AB 的其他一切諸點發出的光線，經反射後都好像從鏡子背後 $A'B'$ 的一切諸點發來， $A'B'$ 的形狀大小與 AB 完全相同。這 $A'B'$

乃是鏡後好像發出光線來的一羣點子，它們即構成了物體 AB 的像 (image)。通俗的文字裏面，有所謂‘顧影自憐’的句子，是說一個人照着鏡子覺得自己很漂亮，不過他所看見的不是他的影而是他的像，所以在物理學上講來這句話是錯的，應該寫成‘顧像自憐’纔對。鏡前物體的任何一點例如 A ，同它的像的對應點例如 A' ，若用直線聯起來，則此線必與鏡面 mm 垂直，且被 mm 平分（這因入射角等於反射角的緣故，可用初等平面幾何學證明）。

概言之，平面鏡中的像，大小同於鏡前的物體，其在鏡後到鏡面的距離，等於物體在鏡前到鏡面的距離。

平面鏡中的像，的確與實在的物體非常相像，一眼望去，簡直可以亂真。因此，魔術家往往利用磨琢得非常光滑，不容易被人察見的平面鏡，使觀眾獲得一個奇怪的幻覺。不過鏡中的像總是左右換位的，所以他們決不讓觀眾看見鏡中有一頁書或一隻鐘的像。

445. 【平面鏡的用途】 家庭中所用優良的平面鏡，都用玻璃板做成，板後塗上一薄層的銀。投射在鏡上的光，有很小一部分從玻璃的表面反射，其餘很大一部分從背面的銀質反射而反射出來。大房間內的壁上，若嵌着巨大的平面鏡，往往顯得房間格外寬敞。

在科學儀器裏面，往往有一面很小的鏡子，裝牢在一個可以轉動的部分上；例如電流針的可轉線圈上就有這樣的一面鏡子。這鏡子轉動時，從鏡面反射的光柱所轉過的角，二倍於鏡子本身所轉過的角。試用初等平面幾何學予以證明。

汽車電車的駕駛員旁邊，通常概須依照定章，裝設鏡子一面，以便窺見車後的情景。

問答題與計算題

1. 用有光紙印刷的雜誌，閱讀起來頗感不易，什麼緣故？

2. 磨得非常光亮同門戶一樣大小的鏡子，常被誤認為通到另一室的門口，什麼緣故？
 3. 遠望鏡子裏一隻鐘，似乎指示八點廿四分。問實在的時刻是什麼？先決定了答案，再行試驗。
 4. 取小鏡子一面，豎直放在本題的第一行上，再看鏡中的 CHOICE QUALITY 兩字。為什麼其中一字顛倒而還有一字不？
 5. 一婦人站在一面鏡子前，看見鏡中現出她的全身。這面鏡子最短須有多長？作一概示圖證明你的答案。
- * * *
6. 在晚間，汽車駕駛員座旁的小鏡中，往往現出車後汽車頭燈的像好幾個，一連串重疊起來，由濃而淡。試將理由說清楚。（作概示圖）
 7. 衣服鋪子裏的穿衣鏡，可使試穿的人自己看見背面。這穿衣鏡是怎樣布置的？
 8. 汽車的擋風玻璃板及背後的玻璃窗差不多豎直時，坐在車中可以看見自己的像，背對着自己，而在前面幾呎遠的地方。作一概示圖，說明這個現象的理由。
 9. 平面鏡兩面，豎着放，成功直角，中間放一件物體。有幾個像可以看見？作一概示圖，求出各像的地位。
 10. 光線投在平面鏡上，經反射後，入射線與反射線成 20° 的角。若將此平面鏡轉過 1° 的角，則反射線轉過的角是多少？

曲 面 鏡

446. 【曲面鏡】 曲面鏡通常總是球面形；換言之，乃是球表面的一部分。若是外表面的一部分，叫做**凸鏡** (convex mirror)；若是內表面的一部分，叫做**凹鏡** (concave mirror)。曲面鏡所從截取的球面的中心，叫做**曲率中心** (center of curvature)，如圖 23-13 中的 C 便是。連接曲面鏡中心 M 與曲率中心 C 的線 CM ，叫做**主軸** (principal axis)。穿過曲率中心的其他任何直線，例如 CS ，叫做**副軸** (secondary axis)。凡是軸，不論為主為副，必在軸與鏡面交點處垂直於鏡面。

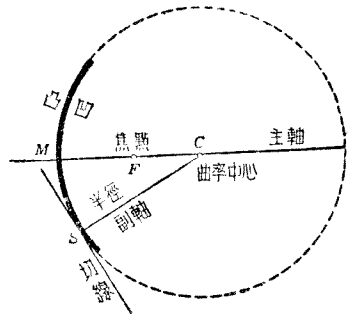


圖 23-13. 曲面鏡的曲率中心

447. 【主焦點】 平行於主軸的光柱投射在凹鏡上而被反射後，反射光線都通過一個定點或其附近的小區域（圖 23-14）。

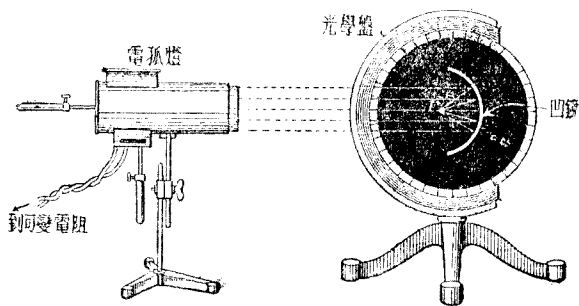


圖 23-14. 凹鏡使平行射線聚斂於一點

這一點叫做凹鏡的主焦點(principal focus)。主焦點的定義可以這樣說：焦點乃是平行於主軸而靠近主軸的光線經反射後相遇之點。主焦點到鏡面中心的距離叫做焦距 (focal length)。焦距等於曲率半徑的一半。

平行於凹鏡主軸的光線，經反射後並非全部恰恰通過同一點。反射光線不能準確地向一點聚斂，這個缺點叫做球面像差 (spherical aberration)。若僅用球面的很小一部分做鏡面，則此項缺點並不顯著。如圖 23-15 所示，乃是大凹鏡所造成的像差。從圖可見，祇有中央一小部分的光線經反射後通過焦點 F ，而靠近鏡緣的光線經反射後決不會通過 F 而在 F 的內側。

有時候，必須將電弧燈的發散光線收集起來，使它們全依着一個方向反射出去，例如在探照燈中便是如此。將電弧燈放在球面凹鏡的主焦點上，這件事

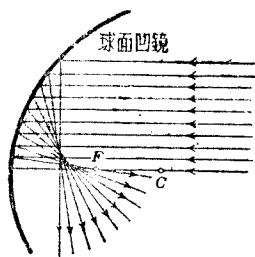


圖 23-15. 球面像差

情大致好算辦到；因為光線所經的通路和前面所說過的相同，只是方向相反罷了。然為避免球面像差起見，通常總用拋物面鏡 (parabolic mirror, 圖 23-16), 因為平行於拋物面鏡主軸的光線, 經反射後都準確地通過焦點 F , 而從焦點 F 發出的光線, 經反射後都平行於主軸, 這是可用解析幾何學上的定理來證明的 (讀者倘若尚未讀過解析幾何學, 則可暫時予以承認)。

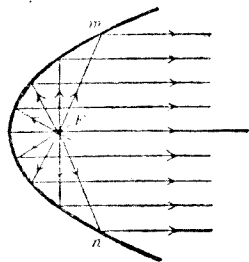


圖 23-16. 拋物面鏡

448. 【凹鏡的用途】 醫生所用的診察鏡 (ophthalmoscope) 乃是一面中央有孔的凹鏡。他在診察病人時, 常把這診察鏡戴在額上, 燈光從鏡面反射後, 大量集中而入受診者

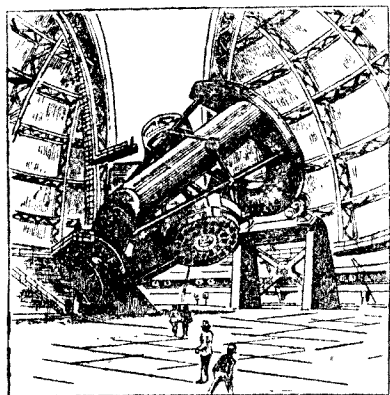


圖 23-17. 二百吋反射望遠鏡 (美國加州理工大學)。管長 60 呎, 直徑在 20 呎以上。管身非常堅固, 其上端可以支持一個觀測人, 不會使管撓曲。可動部分的總重量是 425 噸左右。圖 11-7 所示, 即是它的正在琢磨中的反射鏡

的眼睛, 或鼻孔 或咽喉, 他便可以從小孔窺見被照明的腔道, 因而診察腔道內是否有什麼病徵。

有一種望遠鏡, 叫做反射望遠鏡 (reflecting telescope, 圖 23-17) 的, 它的長管子的一端裝有凹鏡, 可以造成遠處物體的像 (參閱第 450, 452 節)。管子的另一端裝有目鏡 (eye-piece), 即擴大鏡 (magnifying glass, 參閱第 485, 488 節), 從這目鏡可以很方便地察看凹鏡所造成的像。

在複顯微鏡 (compound

microscope) 裏面, 燈光或從窗戶進來的光, 先由凹鏡反射集中 (參閱第 487 節), 然後再照在待察看的物體上。

此外在探照燈 (圖 23-18) 以及頭燈 (headlight) 的裝置方面, 凹鏡的用途非常之廣 (拋物面鏡的用途尤廣)。

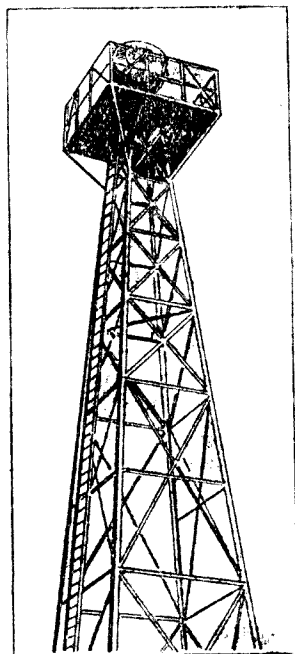


圖 23-18. 用反射凹鏡的
空中旋轉探照燈

449. 【凸鏡】 平行於凸鏡主軸的一束光線投到凸鏡面上時 (圖 23-19), 即被反射而四向發散, 好

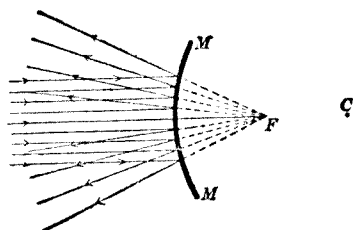


圖 23-19. 凸鏡及其虛焦點

像從凸鏡背後的一點 F 發出來一般。 F 的地位是在曲率中心 C 到凸鏡 MM 的一半路之處。 這一點叫做虛焦點 (virtual focus), 因為光線並不真正通過此點, 只是看起來好像從此點發出罷了。 就凹鏡而論,

經反射後的光線是的確通過焦點 F 的。 焦距很短的大凹鏡, 可將太陽的輻射能大量集中於焦點, 若在焦點放置紙張木片, 則紙張木片即行着火自燃。 這便是光線的確通過焦點的實證, 也是焦點得名的由來。 凹鏡的焦點又叫做實焦點 (real focus), 以別於凸鏡的虛焦點。

任何物體放在凸鏡前面, 不論遠近, 它在鏡中的像總是正立

的,比物體小,而且似乎在凸鏡的背後。凡是看起來好像在鏡面背後的像,叫做虛像(virtual image)。平面鏡與凸鏡所造成的像,都是虛像。在汽車擋風玻璃板外靠近司機座位旁邊,往往裝一面小小的凸鏡,讓司機人不用回頭,可以看見車後有什麼別的车辆跟上來。

450. 【實像與共軛焦點】 在暗室裏面,若將一盞小電燈放在一面凹鏡之前(焦點以外),則在離凹鏡更遠的壁上或屏上,有電燈的像映出來,如圖 23-20 所示。這像是不是上下顛倒的呢?
這像是不是左右易位的呢?

若交換燈與屏的地位而用小紙片代屏,則可使燈的像出現在這小紙片上。在屏上所造成的像,與在小紙片上所造成的像,將它們的大小比較一下。

這兩次實驗中凹鏡所造成的像,都是實像(real image),實像的各點,都有光線通過。

不是實像,我們決不能夠使它在屏上顯出來。

從一點發出來的光,經凹鏡反射後集中於另一點,這兩點叫做共軛焦點(conjugate foci),因為從第二點發出來的光經反射後必定集中於第一點。例如圖 23-20 中的燈和屏,它們所處的地位就是共軛焦點。

451. 【球面鏡公式】 從實驗我們知道

$$\frac{1}{\text{物體到鏡面中心的距離(物距)}} + \frac{1}{\text{像到鏡面中心的距離(像距)}} = \frac{1}{\text{焦距}}$$

或

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f}$$

這個方程式所表示的,乃是物體到鏡面中心的距離 D_o (簡

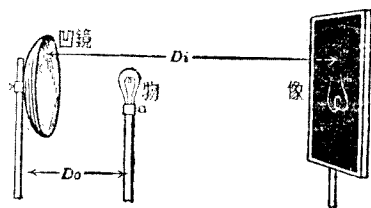


圖 23-20. 物體與像在凹鏡的共軛焦點上。

稱物距),像到鏡面中心的距離 D_i (簡稱像距),以及球面鏡的焦距 f ,三者之間的關係。這個關係,可使我們在已知三個量之中的兩個量以後,算出第三個量來。

上面的公式既適用於凹鏡,又適用於凸鏡,在比較高深一些的物理學書中,我們可以看到詳細的證明。物距 D_o 常有正的數值。像距 D_i 的數值可正可負;實像的 D_i 是正的,虛像的 D_i 是負的。至於 f 的數值,則就凹鏡而說是正的,就凸鏡而說就是負的。

在下一章中講到透鏡時,我們將見透鏡公式和這個公式的外貌相同。

問答題與計算題

1. 作兩個概示圖,表示平行光線在(a)凹鏡上及(b)在凸鏡上反射後的情況。
2. 若凹鏡的曲率半徑是 12 吋,則電燈必須放在什麼地位,燈光經反射後差不多平行於主軸?
3. 一物體放在凹鏡前 12 厘米處,所造成的像在鏡前 60 厘米處。求此凹鏡的焦距。
4. 凹鏡一面,它的焦距是 8 吋,鏡前 10 吋處放一物體,問像在哪處?
* * *
5. 凹鏡一面,它的焦距是 20 厘米。在鏡前何處放一電燈,可得放大兩倍的(a)實像,(b)虛像?(像的大小與物的大小之比,等於像距與物距之比。)
6. 在凹鏡前何處放置物體,則所造成的像是(a)實像,(b)放大的,(c)正立的,(d)縮小的,(e)倒立的,(f)虛像?
7. 第 6 題中的凹鏡換了凸鏡,則六個問題的答案如何?
8. 抄寫下表,並就凹鏡而在空白處填上應填的字句:

物體的地位	像的地位	實像或虛像	放大或縮小	倒立或正立
在 C^* 之外				
在 C				
在 C 與 F^* 之間				
在 F				
在 F 之內				

* F = 主焦點, C = 曲率中心。

幾何作圖法

452. 【凹鏡所造成的實像】 光線從物體出發到曲面鏡再反射的通路，倘若很小心地畫出它們的概示圖來，那麼我們對於像的地位和大小，還可以多懂得一些。

假定 mn (圖 23-21) 是一面凹鏡，它的曲率中心是 C 。命 AB 代表一個物體，放在曲率中心之外。要決定像的地位，可作從 A 發出的兩條光線。若 AP 是其中的一條，通過 C 點，則 AP 即垂直投射於鏡面，而仍依原路 (即在 PC 方向內) 反射回去。若 AD 是另一條光線，從 A 出發而平行於主軸，則在鏡面反射後即通過焦點 F 。 PC 與 DF 這兩條反射線的交點 A' ，就是 A 的像。用同樣的方法，可知 B 的像是在 B' 處，所以箭形線 AB 的像是箭形線 $A'B'$ 。

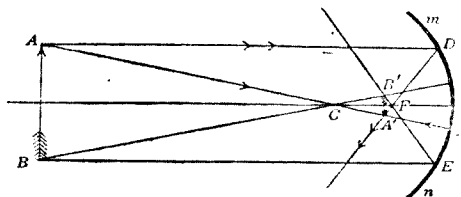


圖 23-21. 用幾何作圖法求凹鏡 mn 所造成的物體 AB 之實像 $A'B'$

從這作圖法我們可以知道，當物體在凹鏡前面曲率中心之外時，它的像是倒立的，在鏡的前邊，而且在 C 與 F 之間。因為從 A 出發的光線經反射後確通過 A' ，所以所造成的像是實像。

A' 既然是物點 (object point) A 的像點 (image point)，則物點在 A' 時，像點必在 A ；因為光線是可以在同一通路上依反對方向而進行的。換句話說， A 與 A' 是共軛焦點。

453. 【凹鏡中的虛像】 在上節中我們剛纔講過；物體放在曲率中心之外時，它的像在主焦點 F 與曲率中心 C 之間。又當物體在 F 與 C 之間的時候，像在 C 之外。就兩種情形而論，所造成的像都是實像。概括說來，當物體在主焦點 F 之外時，凹鏡所造成的像常常是實像。

但若將物體放在主焦點之內，即在 F 與鏡之間，則凹鏡所造

成的像就在鏡的背後，正立，放大，而且是虛像。

要用幾何作圖法來說明，我們可以仿照前例，從物體的 A 點出發的光線，畫出兩條來；一條平行於主軸，經反射後通過 F ，還有一條垂直於鏡面，經反射後通過 C 點而依原路回去(圖 23-22)。這兩條光線經反射後是向外發散的，所以必須將它們向鏡子背後延長，纔能夠求得交點 A' 。像點 A' 乃是 A 的虛像，因為從 A 出發的光線，經反射後並未真正通過 A' 點。

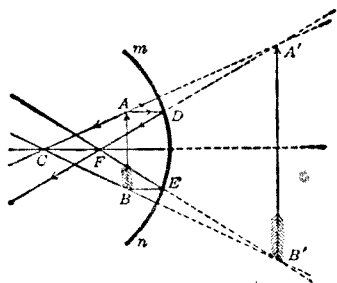


圖 23-22. 用幾何作圖法求凹鏡 mn 所造成的物體 AB 之虛像 $A'B'$

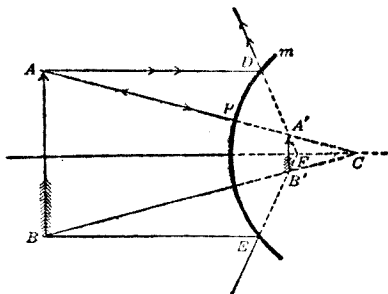


圖 23-23. 用幾何作圖法求凸鏡 mn 所造成的物體 AB 之虛像 $A'B'$

454. 【凸鏡所造成的虛像】 假定圖 23-23 中的 mn 是凸鏡，而 AB 是物體。作垂直於鏡面的光線 AP ，這光線經反射後依原路折回，看起來好像從 C 點發出(PC 虛線與 AP 成一直線，因 AP 垂直於球面)。再作光線 AD ，平行於主軸。 AD 經反射後，好像從虛焦點 F 發出。這兩條反射光線的延長線交於鏡後的 A' 點， A' 即是 A 的像。用同樣的方法，可定 B' 的地位。

從這個作圖方法我們知道，凸鏡所造成的像似乎常在鏡的背後，而比物體小。這像常是虛像；正立，而且離鏡比物體近。例如在湯匙的背面或磨光的金屬球表面照見的自己的像，就是縮小的虛像。

第二十三章提要

照度與距離的平方成反比例。

燭光數(燈的)可使受照的屏上得相等照度的，與燈至屏的距離平方成正比例。(這就是說，燈愈遠，燭光數必須愈大。)

單位照度，即呎燭，乃是從一呎遠處一燭光的燈所可得的照度。

$$\text{照度(呎燭數)} = \frac{\text{燭光數}}{\text{距離的平方(呎數)}^2} \cdot$$

單向反射定律：

I. 入射線，法線，以及反射線在同一平面上。

II. 反射角 = 入射角。

平面鏡：像常在鏡的背後，正立，虛像，與物體同大，與物體離鏡等遠。

主焦點(凹鏡的)——

平行於主軸的光線經反射後實在通過的一點(反射線一齊向該點收斂)。

虛焦點(凸鏡的)——

平行於主軸的光線經反射後，其反射線引向凸鏡背後的延長線所通過的一點(反射線似乎都從該點向外發散)。

凹鏡：

若物體在焦點之外，像也在焦點之外，而曲率中心則在物體與像之間。像倒立，是實像。

若物體在焦點之內，像在鏡的背後，正立，是虛像。

凸鏡：

像常在鏡的背後，正立，是虛像。

球面鏡公式(凹鏡與凸鏡都適用)：

$$\frac{1}{\text{物距}} + \frac{1}{\text{像距}} = \frac{1}{\text{焦距}}$$

物距常有正值。

像距——實像，正值；虛像，負值。

焦距——凹鏡，正值；凸鏡，負值。

問 答 題

1. 壁上掛的日曆上所印黑色大字‘1’，我們怎樣看見的，試予以說明。

2. (a) 完全透明的物體，能不能看得見？(b) 完全反射面能不能看得見？說出每個答案的理由來。
3. 隔牆欲見牆外的景物，有什麼方法「不許在牆上開洞」？試作概示圖說明你的方法。
4. 電燈光從一塊紅色玻璃反射時，我們可以看見兩個像，一個是白色的，一個是紅色的。你能解釋這個現象麼？（隔着紅玻璃看白紙，你看見的是什麼？）
5. 把鉛筆尖放在平面鏡上，就可以估計玻璃板的厚薄。這是怎麼一回事？
6. 兩條走廊交成直角。怎樣安放一面鏡子，就可以使站在一條走廊那一頭的人，一直望到另外一條走廊裏？
7. 能不能用 (a) 平面鏡，(b) 凹鏡，(c) 凸鏡將電燈的像映在屏上？
8. 若將燭火放在凹鏡前離鏡兩倍焦距之處，則像生在什麼地方？
9. 汽車頭燈中的燈泡所處的地位，恰可使反射光線成爲平行光柱而離燈向外照射。設欲使反射光線聚焦於車前數百呎處，則燈泡應該向前移動還是向後？
10. 一段拋物線與一段圓弧，有什麼不同的地方？
11. 拋物面鏡與球面凹鏡的作用，有什麼不同的地方？
12. 修面刮鬚用的凹鏡，怎樣可以求得它的焦距？
13. 金屬圓球中所見一座花園的像，作何形狀，試予以描寫。
14. 一人將一指向上伸直在曲面鏡前，他發見鏡所造成的像是倒立的。(a) 這像是實像還是虛像？(b) 這鏡是凸鏡還是凹鏡？

第二十四章

透鏡與光學儀器

455. 【光學儀器】 人的眼睛，可以說是現在所知道的最不平凡的光學儀器(optical instrument)。不過人的眼睛往往生來就有缺陷，非永遠加以‘糾正’或幫助不可。有缺陷的眼睛，是不能夠因為戴了眼鏡而變成健全的眼睛的，所以戴眼鏡的拿掉了眼鏡，就依舊看起來不方便。即使是健全的眼睛，也有它的限度，譬如說，太遠了看不見，太小了也要看不見。望遠鏡和顯微鏡，就是爲了幫助人目觀察很遠很小的物體而設計出來的。此外尚有許多儀器，例如照相機，大型幻燈(stereopticon)，以及活動電影放映機等，可以使我們看到不在同地不在同時所發生的事情。凡此種種裝置，可以使我們看得更清楚，看得更遠，看到過去的事情的，都叫做光學儀器。

全部光學儀器裏面，都裝着所謂透鏡(lens)，有些光學儀器裏面，還加裝着所謂稜鏡(prism)。要懂得光學儀器的作用原理，我們必須先把透鏡和稜鏡的透光情形，拿來研究一下。換句話說，我們必須把所謂光的折射(refraction of light)這個現象，先研究一下。

456. 【水中的折射】 一條棒斜插在水中的時候，看起來似乎齊水面折成兩段，在水中的一段折向上方。盆中有水時，盆似乎顯得淺一點。魚在水中游來游去，看起來離開水面比實際上要近一點，若有人要用鋼叉刺魚，他必須對準了所見魚像的下

方刺去，否則就要‘叉長莫及’。

做一個實驗，可以使讀者對於這個現象，更有深切的認識。取長方形玻璃水缸一隻，盛滿水。水用熒光黃微微地着一點色，然後用開有兩條縫的硬紙板，將水缸完全蓋住，如圖 24-1 所示。光柱一條，依適當的方向射入左邊的縫，斜落在水面上。這光柱入水後即起偏折，到水底平面鏡上，反射出水時又起偏折，最後從右邊的縫射出缸外。從缸側望缸內，可見光的曲折的通路，閃閃生輝。

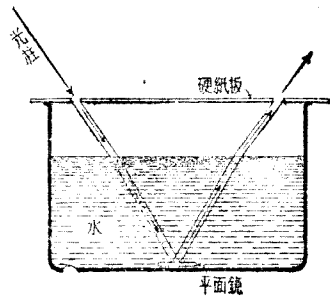


圖 24-1. 光柱斜射入水或出水時路徑折轉

以上所說的種種現象，都因光從空氣入水或從水入空氣時，要發生折射 (refraction) 而起。我們雖然說過，光是順着直線進行的，不過這也有一個條件，那就是祇在一種物質內繼續前進。一般地說來，光從一物質斜射而入他一物質時 (兩種物質就光而言疏密不同)，必在分界面發生折射 (或說必起偏折)。

457. 【折射定律】 現在讓我們來看一看，光從空氣入水時發生多少大小的偏折。

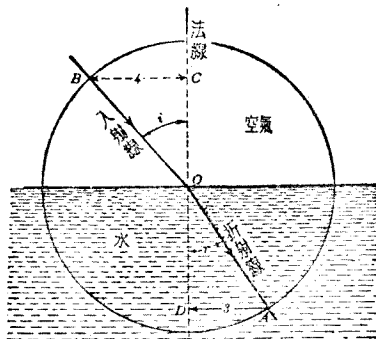


圖 24-2. 光從空氣入水時的折射概示圖

如圖 24-2 所示 (不難從實驗作得此圖)，光柱從空氣依着 BO 的方向入水，但在水中卻依着 OA 的方向進行。換句話說，光柱從空氣斜射而入水中，常向‘法線’偏折。就本圖而論， BO 所代表的是‘入射線’ (incident ray)，而 OA 所代表的是‘折射線’ (refracted ray)。入射線與法線之間的角 COB 叫做‘入射角’ (angle of incidence)；折射線與法線之間的角 AOD 叫做‘折射角’ (angle of refraction)。從實驗所測，若 COB 角是 53° ，則 AOD 角等於 37° 。

從這個實驗我們知道，光

柱從空氣入水時，常向法線（即水面的垂線）偏折。

458. 【折射率】 在前圖中，截取 $AO = BO = 5$ 吋，並從 A 和 D 向法線引垂線 AD 和 BC ，即可求得入射角和折射角間的關係。經過多次驗實後，我們必將發見，不論入射角有多大（此角常小於直角）， BC 的長度總是 AD 長度的一定倍數，或說 BC 對 AD 有一定的比。就本圖而論，可以量得 BC 的長是 4 吋，而 AD 的長是 3 吋。於是 BC/AD 就等於 $\frac{4}{3} = 1.33$ 。這一個比是一個一定的數目，叫做水對空氣的**折射率**（index of refraction）。我們從實驗知道，就兩種物質而論，不問入射角有多少大小，祇要兩種物質不改換，這個比是永遠不會改變的。

這個比也可以用入射角與折射角的‘正弦’來表示。正弦是數學上的名詞，它所指的就是直角三角形的對邊與斜邊的比。例如前圖中入射角 i 的正弦是 BC/BO ，而折射角 r 的正弦是 AD/AO 。因為從作圖 $AO = BO$ ，所以

$$\frac{\angle i \text{ 的正弦}}{\angle r \text{ 的正弦}} = \frac{BC/BO}{AD/AO} = \frac{BC}{AD} = \text{折射率。}$$

459. 【玻璃中的折射】 光柱從空氣斜射而入玻璃時，在玻璃中也起折射，這可以用下面的實驗來證明。

將半圓形玻璃塊放在光學盤的中心，如圖 24-3 所示。我們察得一部分的射線從玻璃塊的平表面反射回去，這平表面好像是平面鏡，餘下一部分的射線透過玻璃塊而起偏折。我們又察得入射角 $\angle AON$ 等於反射角 $\angle BON$ ，但是比折射角 $\angle COM$ 大。在光學盤上所見入射線端與折射線端到法線的距離，量一量就可以知道，從這兩個距離，立即可以算出玻璃對空氣的折射率。

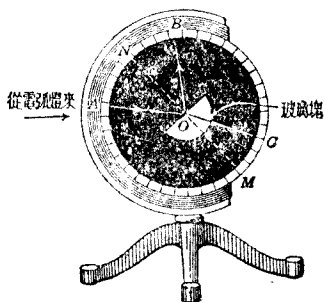


圖 24-3. 光柱 AO 落在玻璃塊上，一部分反射(OB)，一部分折射(OC)

平常的冕牌玻璃 (crown

glass)使光線起偏折的程度,小於鉛玻璃,即所謂火石玻璃 (flint glass)。換言之,冕牌玻璃的折射率小於火石玻璃。在光學上說來,火石玻璃密於冕牌玻璃;前者對空氣的折射率大約是 1.7,而後者對空氣的折射率大約是 1.5。

一般地講來,光從一種介質*斜射而入另一種介質時,例如從空氣入玻璃,或從金剛石入空氣,或從冕牌玻璃入火石玻璃,都起折射,即使是從真空入空氣,或從這一空氣層到密度不同的另一空氣層,也起折射。爐子上方的熱空氣流往上升,它的密度與四周較冷的空氣是不同的,光線通過這熱空氣柱時,必起折射,所以我們看見這熱空氣柱後面的物體,似乎在那兒跳躍顫動個不停。概言之,光從一物質斜射入光學上較密的物質時,常向法線偏折。

460. 【光通過空間的速率】 光為什麼折射,它的理由直等到光在各種不同介質內的速率被測定後,方纔明白。從前的人,的確以為光的進行是即發即到的。換句話說,大家以為光從起點到達終點,並不需要時間。直到 1675 年,這個觀念纔被屏棄。在那一年,有一個丹麥青年叫做羅麥 (Roemer) 的,在巴黎天文臺觀察木星的月蝕。他把木星的幾個月球之一 M (圖 24-4), 剛要進入木星 J 的本影中的時刻,測得非常準確,因而得知接連兩次初蝕開始時,相隔大約有一天又十八小時。連續各

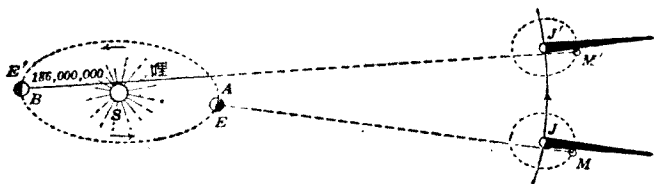


圖 24-4. 羅麥 (Roemer) 測定光速率的方法

* 可以讓光通過的都叫做介質、medium, 例如玻璃, 水, 空氣等。

次初蝕的開始，可以看成從木星向地球隔開相等的時間而發出的信號。然而羅麥卻發見，每兩個信號到達地球時隔開的時間，並不是一個常數。當地球 *B* 離開木星時，所觀測的接連兩次信號到達地球的時間，比真正時間長一些；當地球向着木星而進時，所觀測的時間比真正時間短一些。由此可以推知，光的進行是有一定的速率的，因為在前一種情形之下，光所經過的距離較長，而在後一種情形之下，光所經過的距離較短。據羅麥所實測的結果，地球從 *A* 向 *B* 而行時，木星月蝕接連兩次相隔的時間愈來愈長；當地球到達 *B* 的時候，長出來的時間有 16 分 36 秒（約 1000 秒）之久。這就是說，光穿越地球軌道約 186,000,000 哩，約需要 1000 秒。所以光在空間（虛無的空間）內的速率，是每秒 186,000 哩（每秒 300,000 仟米）。近年來在地球表面上直接測定光的速率，已有好幾個方法，所得的結果都很準確，而且與將近三百年前羅麥所測的，相去無幾。

美國加州威爾遜峯天文臺 (Mount Wilson Observatory) 的邁克爾遜 (Michelson) 教授，曾重行測定光的速率，測得非常準確。圖 24-5 所示，即是邁克爾遜實驗原理的概示圖。他在

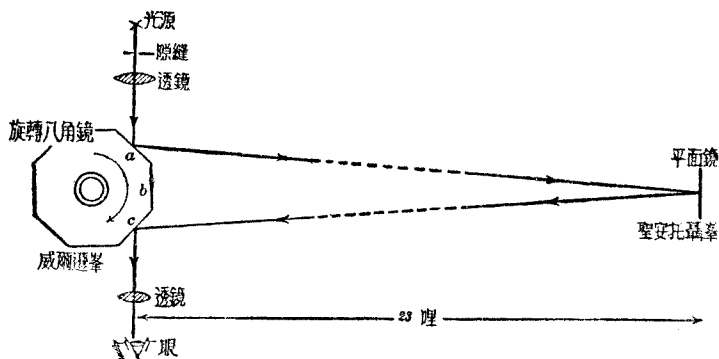


圖 24-5. 邁克爾遜 (Michelson) 測定光速率的方法

威爾遜峯上放一面可以旋轉的八角鏡，而在離威爾遜峯 23 哩的聖安托品峯 (Mount San Antonio) 上，放一面平面鏡。八角鏡在適當的地位時，通過隙縫透過透鏡的光，恰可從 a 反射到平面鏡，由平面鏡反射到 c ，再由 c 反射並透過透鏡而入目。若令八角鏡依適當的速率旋轉，使它在光從 a 出發而回到 c 時恰轉過八分之一週，即 b 取 c 的地位而代之，則光仍可入目。若八角鏡轉得略快或略慢一些，光就不得入目。邁克爾遜測定這適當的速率，因而求得光在虛無空間中的速率是每秒 299,796 千米。

這個速率實在是太大了，無怪以前的實驗家不能予以精密的測定。在地球上縱目所至的最遠處，光祇消 0.001 秒就可以到達。可見不用巧妙的儀器，決不能精密測定光的速率。光在空氣中進行，比在虛無空間中稍微慢一些。邁克爾遜對於光速的測定，努力不懈，他在臨終以前，還在着手計劃一次大規模的實驗，要用一根長一哩的抽空管子，測定光在其中進行的速率。在光學上說來是‘較密’的物質，例如水與玻璃，光在其中進行比在空氣中更要慢得多。



邁克爾遜 (Albert Abraham Michelson, 1852-1931) 美國物理學家。詩家谷 (Chicago) 大學物理學教授。在 1907 年得到諾貝爾 (Nobel) 物理學獎金。他是一個具有非常才智的光學實驗家，因精密測定光速率而得盛名。

461. 【光波】我們可以設想，在空間播送光的是一串波，正好比我們可以設想，在空氣中播送聲音的是一串波

一樣。光從點源發出時，每一個波的球面波峯或稱波前 (wave front)，向各方按相等的速率擴展出去。進行的方向既從中心向外輻射，則當然與波前垂直。這樣的一串向外擴展的波，如圖 24-6 (a) 所示便是。圖中各弧代表波前，而從 O 向 AB 指着的各箭頭，表示各波前一小段的進行方向。前一章中所說的射線 (或光線)，即是這些箭形線所指示的進行方向線。一束射線構成一個光柱。在所謂‘平行光柱’ [圖 24-6 (b)] 中，波前都是平面，而各射線都互相平行。

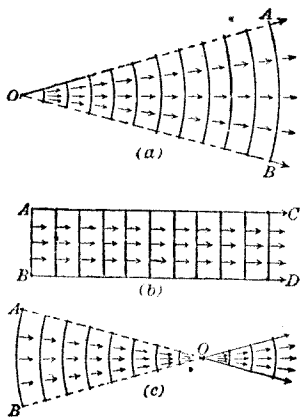


圖 24-6. 波前

用透鏡或球面鏡，可使光柱會聚於叫做焦點的一點。此時波前是球面，愈近焦點 O ，愈縮小 [圖 24-6 (c)]。

462. 【光為什麼折射】 光柱從空氣通入水中時，它的速率必然減低，這便是發生折射的原因。

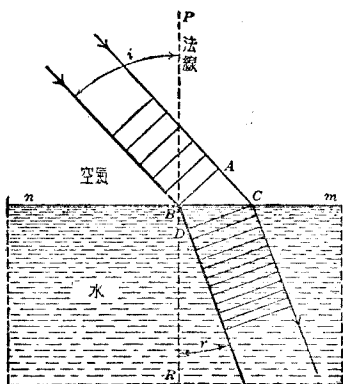


圖 24-7. 說明折射原因的概示圖

要說明這個原因，用圖 24-7 便成。圖中的許多平行線，代表許多波前，這些波前都依着箭頭所指的方向進行。最前一個波前的邊緣 B 到達水面而進入水中時，開始降低前進的速率，但邊緣 A 仍在空氣中，按着與前此相同的速率而進行。因此，波前的方向改變成 CD 的地位，而光柱

即向法線 PR 偏折。

這和一隊兵從平坦堅硬的原野，斜着走到高低不平經過犁耕的田地上去時的情形相仿。設前圖中的 AB (波前) 代表第一排兵，在 B 處的兵已經跨入崎嶇的田地後，在 A 處的兵還在平坦的原野上。在崎嶇的田地中走路，高一腳低一腳不免走得慢一些，在平坦的原野上走路，跨開大步當然快得多。因此，在 A 處的兵走過了 AC 這一段距離，在 B 處的兵不過前進到 D ， BD 比 AC 短得多。倘然在 B 處的兵不能夠向前急奔，而在 A 處的兵並不走得慢一些，那麼全隊走入田地後，必然從原來的進行方向，改變到更近於法線 PR 的方向。

一柱光順着垂直於水面的方向射入水中時，並不起折射。光進入水中，不問斜射或正射，速率的變更是一樣的，但是折射卻祇在斜射時方纔發生。

463. 【折射率與光的速率】 從圖 24-7 可以知道，光柱從空氣入水後偏折的程度，看 AC 與 BD 兩段距離的關係而定；換句話說，看光在空氣中的速率與在水中的速率有何關係而定。光在水中的速率，雖然不容易予以測定，但是法國科學家佛科 (Foucault)，在 1850 年早已將它測過。據各家實驗結果，光在水中的速率大約是空氣中的四分之三。這就是說，光在空氣中的速率大約是水中速率的 1.33 倍。這個數目，就是前文已提過的水對空氣的折射率(第 458 節)。一般地講來，

$$\text{一物質對空氣的折射率} = \frac{\text{光在空氣中的速率}}{\text{光在該物質中的速率}}$$

464. 【全反射】 一柱光斜着從水或玻璃透入空氣中時，折射線常離開法線而偏折。例如在圖 24-8 中，水面下一盞可動的燈在 a 處所發的光，沿着 aO 的方向進行，一出水面即沿着 Oa' 的方向折射；燈移到 b 處，入射線 bO 出水面後即折射而取 Ob' 的

方向。在水中的入射角愈增愈大，出水面的折射线離法線愈遠而愈靠近水面，最後將燈移到 c 處時，射线 cO 出水後沿着 Oc' 折射。剛剛掠過水面。射线 cO 與法線 NM 之間所成的角，叫做臨界角 (critical angle)。就水對空氣的例子而論，此角約等於 49° 。若在水中的入射角超過臨界角，例如射线 dO ，則射线永遠不能出水面。

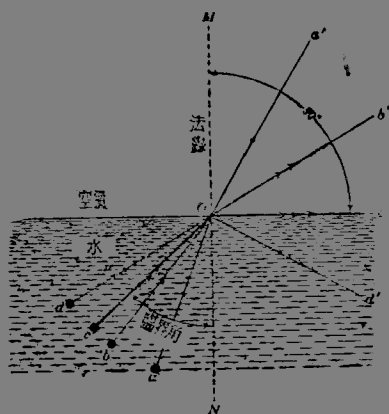


圖 24-8. 光在水中的臨界角與全反射

在這種情形之下，射线全部在 O 處反射入水，而取 Od' 的方向，好像落在一個光滑的金屬表面上一樣。這現象叫做全反射 (total reflection)。

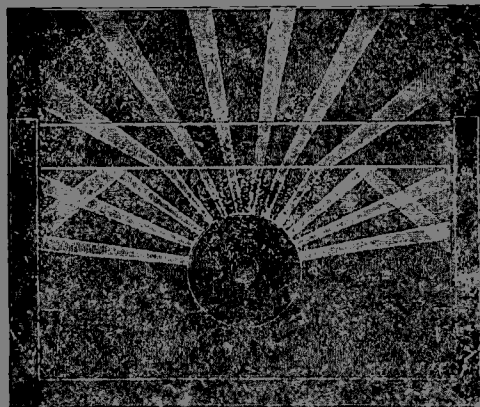


圖 24-9. 光在水中的折射與全反射

光從光學上較密的介質射入光學上較疏的介質時，若入射角超過臨界角，則不能射入而發生全反射。

欲觀察全反射現象，可用圖 24-9 所示的儀器。來自後方穿過各條縫的光，經由浸在水槽底的曲面鏡反射後，即依種種不同的入射角射向

水面。各條折射線，反射線，以及全反射線，因有映光屏的襯托，顯得非常明晰。

465. 【反射稜鏡】 在光學儀器中，往往非有一面完善的反射鏡不可。爲了達到這個目的起見，常採用各面磨光的**直角玻璃稜鏡**(right-angle glass prism)。在圖 24-10 中，設有光線 AB 垂直投射於這樣的一個稜鏡（用冕牌玻璃製成）的 XY 面上。這光線透入稜鏡後，不起折射，沿直線在玻璃中進行，落於 YZ 面的 B 處，同法線 mn 成 45° 的角。但因冕牌玻璃對空氣的臨界角大約是 42 度，所以 AB 射線不能透出玻璃，卻依 BC 的方向完全反射，然後垂直射在 XZ 面上，透出玻璃而絲毫不起折射。結果是 AB 射線偏折 90° 的角，好像有平面鏡放在 YZ 的地位上一般。

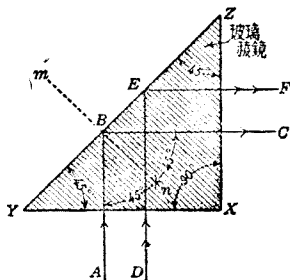


圖 24-10. 光在稜鏡中的全反射

466. 【由平行面玻璃板引起的折射】 光線(圖 24-11)透過兩面平行的玻璃板，例如優良的板玻璃時，在初入玻璃處

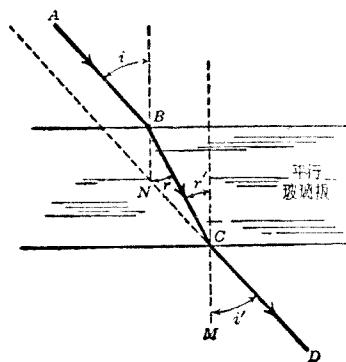


圖 24-11. 射線通過平行玻璃板的路徑

過兩面平行的玻璃板，例如優良的板玻璃時，在初入玻璃處(圖中的 B) 向法線 (BN) 偏折，而在初出玻璃處(圖中的 C) 離開法線 (CM) 偏折。結果是透出玻璃的射線 (CD) 不與原來的射線 (AB) 成一直線，祇與它互相平行(這是可用折射定律來證明的)。因此，當我們隔着玻璃板看一件物體時，物體的形狀雖不改變，物體

的地位卻微有移動。倘然玻璃板很薄，則地位的改變非常微小，不足以引起我們的注意。

467. 【稜鏡所引起的折射】 如圖 24-12 所示乃是稜鏡的橫剖面。這剖面若是一個正三角形，這稜鏡就叫做等角稜鏡

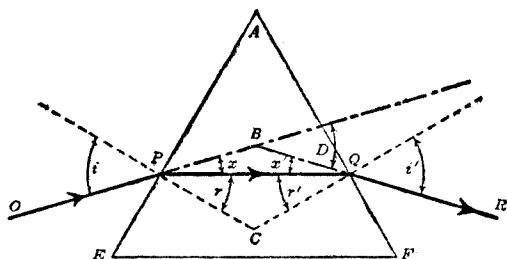


圖 24-12. 光在三角稜鏡中折射時的最小偏向

(equiangular prism); 剖面若是一個直角三角形，稜鏡就叫做直角稜鏡。射線 OP 進入稜鏡 AEF 的一面 AE 時，起偏折而取 PQ 的方向；透出另一面 AF 時，再起偏折而取 QR 的方向。兩次的折射，使原來的射線從 OB 的方向轉入 BR 的方向。全部方向的改變即等於 D 角，此角叫做偏向角 (angle of deviation)。任何透明體若有兩個很平的折射面交成一角，則此透明體便成為稜鏡。此角叫做稜鏡的折射稜角 (refracting angle) 或單稱稜角。就圖 24-12 而論， A 就是稜角。

光線通過稜鏡的路徑，可由作圖求得，如圖 24-12 所示一般。先在 P 處作 PQ ，再在 Q 處作 QR 。通過稜鏡的光柱，常向較厚的一邊偏折，這是應當記住的。

問答題與計算題

1. (a) 作一概示圖，指明人望水中見魚似乎在什麼地位。(b) 再作一概示圖，指明魚望水外見人似乎在什麼地位。
2. 在廚房中的碗架上放一隻盆子，盆子底下放一枚銅幣，然後離開盆子往後

退，退到剛剛看不見盆底的銅幣為止。這時候站着不要動，教別人將水倒在盆中，但是不可移動銅幣。盆中有了水，本來看不見的銅幣就可以看見。什麼緣故？銅幣到水面的距離看起來似乎比真正的距離近一些。試作概示圖予以說明。

3. 光線射入一塊玻璃板，入射角是 63° ，折射角是 36° 。由作圖求這玻璃對空氣的折射率。用平面三角學校驗你的答案，要是你能夠的話。

4. 第三題中所說的玻璃板，假使微微轉動一下，那麼入射角與折射角就變成 39° 與 24° 。試從這兩個數目求折射率。（用 24 除 39，你會不會得到所求的答案？）

5. 上兩題的答數，倘然非常相近，那麼也許是很準確的近似值。現在請你再算一道題，即已知入射角是 30° ，求折射角。

6. (a) 臨界角有什麼意義？(b) 有一種玻璃，它的對空氣的折射率是 1.50。用作圖法或用三角學求這玻璃對空氣的臨界角。

7. 金剛石對空氣的臨界角是 25° 。(a) 它對空氣的折射率比玻璃對空氣的折射率小還是大？(b) 求它的折射率。

8. 若水對空氣的折射率是 1.33，則光在水中的速率是多少？

9. 水對空氣的折射率大約是 $\frac{4}{3}$ ，而玻璃對空氣的折射率大約是 $\frac{3}{2}$ 。(a) 光在這兩種介質中的速率，哪一個比較大些？(b) 大多少倍？

10. 一稜鏡的三隻角是 20° ， 70° ，和 90° 。有光線從 90° 與 70° 兩角間的一面垂直射入稜鏡。製稜鏡的玻璃，它的臨界角是 42° 。證明該光線將在稜鏡內經過兩次反射後，方纔透出稜鏡。

透 鏡

468. 【會聚透鏡與發散透鏡】 所謂透鏡 (lens)，乃是一塊玻璃，或是別種透明體；它有兩個齊整的表面，這兩個表面通常是球面。通過這兩個球面的中心（圖 24-13 中的 C_1 和 C_2 ）作一直線，此直線稱為透鏡的主軸 (principal axis)。

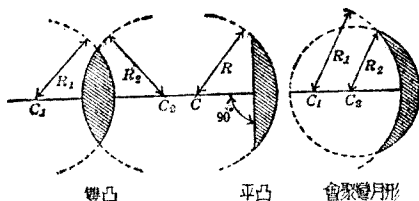


圖 24-13. 聚斂薄邊透鏡各式

透鏡分成兩類——

會聚透鏡 (converging

lens, 圖 24-13) 和發散透鏡 (diverging lens, 圖 24-14)。會聚透鏡的邊緣比中央薄。這一類透鏡的常型是雙凸透鏡 (double-

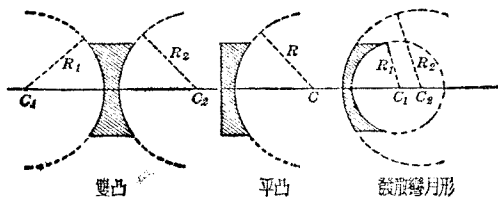


圖 24-14. 發散(厚邊)透鏡各式

convex lens)。發散透鏡的邊緣比中央厚。雙凹透鏡(double-concave lens)是這一類的常型。光線通過透鏡時，除沿着主軸進行外，常向較厚的部分偏折。這是應當記住的。

469. 【凸透鏡的作用】 若取凸透鏡放在適當的地位，使日光或從別的光源發出來的平行光線依着主軸的方向射入透鏡，則將見各光線都起折射，透出透鏡後差不多會聚於一點。拿一張紙放在這一點，可以看見紙上有一個極亮的光斑，這便是太陽的實像。經過很短的時間以後，紙即變成焦黃，甚至於燒起來。凸透鏡的中央部分愈厚，這一點離開透鏡愈近。

凸透鏡對於平行光線的作用，可以用光具座(optical bench, 圖 24-15)來表現。

平行於凸透鏡主軸的射線通過透鏡後會聚的一點，叫做凸透鏡的主焦點(principal focus)。簡單的透鏡(即雙凸透鏡)兩面各有一個主焦點，而且兩焦點離開透鏡等遠。從透鏡到任一主焦點的距離，叫做透鏡的焦距(focal length)。

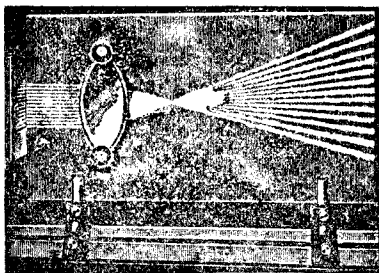


圖 24-15. 會聚透鏡在光具座上顯出聚光作用

因為入射線和對應於它的折射線，地位可以對換，故光點放在主焦點上，它的光線通過透鏡後即成為平行線。

470. 【凸透鏡所引起的波前的改變】 我們已經講過(第

460節), 光在玻璃中進行比在空氣中慢一些。從太陽或其他很遠的物體發來的光波, 到達透鏡時差不多是平面波。在圖 24-16 中垂直於射線進行方向的各線, 其所代表的就是一串前進的

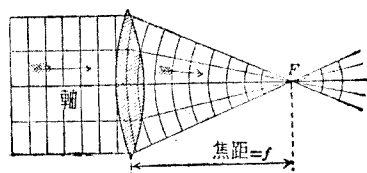


圖 24-16. 會聚透鏡對於平面波前的作用

波所處的地位及所取的形式, 由圖可知, 這些波通過透鏡時, 中央部分比四周部分格外慢, 所以透出透鏡後, 平的波前變成了凹的波前。光波的進行方向是垂直於波前的, 因此, 射線就會聚於一點(焦點); 不過

在既過焦點之後, 各波的波前又從凹面變為凸面。

471. 【透鏡所造成的像】 若將一個發光體, 例如一盞電燈, 放在一片透鏡的近旁, 而在它的主焦點之外, 則從物體出來的光線, 通過透鏡後即會聚在透鏡的他側。在此處若放置一屏, 則屏上即顯出一個很清楚的實像, 如圖 24-17 所示。這個像是倒立的, 而且比原來的實物大。若交換燈(物體)與屏(像)的地位, 或將透鏡移近屏而使物距與像距對換(與交換地位完全相同), 則將見屏上仍有很清楚的像顯出來, 但比實物小。放寬燈與屏的距離, 透鏡在燈屏之間, 仍可以有兩個地位, 使屏上有很清楚的像顯出來。

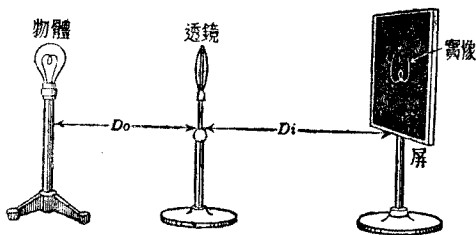


圖 24-17. 凸透鏡在屏上造成實像

若有兩點在凸透鏡的兩側, 物體放在其中的一點, 像即生於他點, 那麼這兩點就叫做共軛焦點(conjugate foci)。

472. 【凸透鏡造像公式】 物體及其由透鏡造成的像, 它們的相對地位看透鏡的焦距而定。若 D_o 是物體到透鏡的距離, D_i 是像到透鏡的距離, 而 f 是凸透鏡的焦距, 則(在透鏡很薄的時候)其間的關係可用下列方程式表示(與球面鏡公式外表

相仿；參閱第 451 節）：

$$\frac{1}{\text{物距}} + \frac{1}{\text{像距}} = \frac{1}{\text{焦距}}$$

或

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f}$$

473. 【透鏡公式的討論】 若物體離開透鏡非常之遠，以致從物體上任何一點出發的射線，到達透鏡的各部分時差不多互相平行，那麼所造成的像就在主焦點 F 處（圖 24-16）。因為

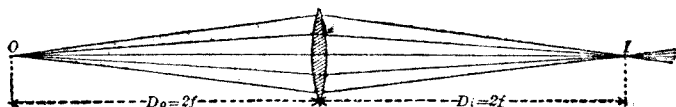


圖 24-18. 像與物體到透鏡的距離相等（都是 $2f$ ）。
物體的大小同於像的大小

D_o 非常之大時， $\frac{1}{D_o}$ 差不多等於零。從上式，可以推得 $D_i = f$ 。

若將物體移近透鏡，則像即離開透鏡。當 $D_o = 2f$ 時， $D_i = 2f = D_o$ （圖 24-18）。

若將物體更向透鏡移近，則像離開透鏡愈遠，直到物體移在主焦點 F 處時，像到透鏡的距離變成無窮大，換言之，此時通過透鏡的射線都變成互相平行（圖 24-19）。

將物體更向凸透鏡移近，移在主焦點之內，則通過透鏡後的各射線向外發散，看起來好像從透鏡後面的一點 I （圖 24-20）發

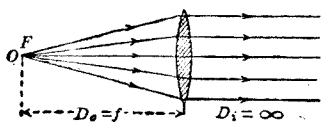


圖 24-19. 物體在 F ，通過透鏡後的射線平行

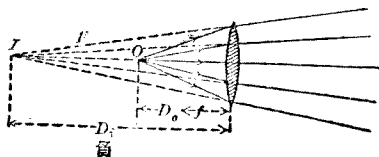


圖 24-20. 物體在 F 之內，所造成的像是虛像

出來(與物體在透鏡的同側)。在這種情形之下,透鏡公式裏的 D_i 是負的。 D_i 的值是負數,意思就是說像在透鏡後面,亦即與物體在透鏡的同側。

474. 【透鏡造像的作圖法】 透鏡所造成的像,若用幾何方法作出圖來即可知道像的大小以及它的地位。作圖的方法,與球面鏡造像的作圖法相同(第 452 節)。從物體上任何點出發的射線,我們祇要追尋其中兩條的來蹤去跡,追到它們的交點,就得到了該點的對應像點。例如在圖 24-21 中,從 A 出發而平

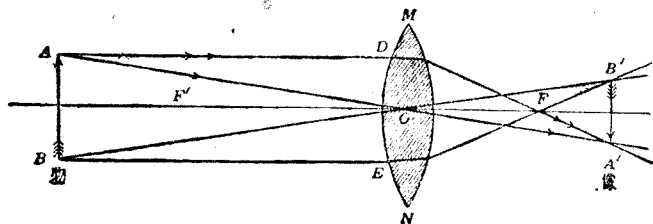


圖 24-21. 物體及其實像的大小

行於主軸的射線,經由透鏡折射後必定通過主焦點 F 。第二條從 A 出發經過透鏡中心的射線,是不起偏折的。這兩條射線的交點 A' ,即是 A 的像點。於是從相似三角形的定理,立即知道

$$\frac{\text{像的長度}}{\text{物的長度}} = \frac{\text{像到透鏡的距離}}{\text{物到透鏡的距離}}$$

像的長度與物的長度之比,叫做線倍率(linear magnification)。

圖 24-21 中物體 AB 的地位,在凸透鏡的主焦點之外,而像 $A'B'$ 在此條件下,乃是倒立的,實的,且比物體小(就本圖而說)。

圖 24-22 中的物體 AB ,在主焦點 F 與透鏡之間。此時像 $A'B'$ 乃是正立的,虛的,比物體大,而且祇能隔着透鏡看見它。

虛像決不能夠同實像一樣，也在屏上映出來。

475. 【凹透鏡所造成的像】 一束射線通過凹透鏡後，常向外發散，好像從透鏡後一點（與光源在透鏡同側）發出，這一點叫做虛焦點（virtual focus）。

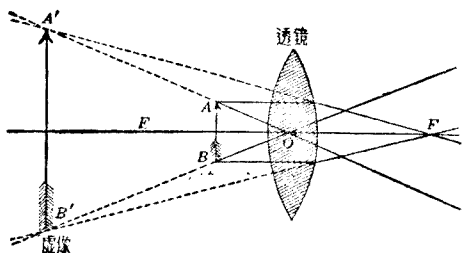


圖 24-22. 物體 AB 及其虛像 $A'B'$ 的大小

凹透鏡的發散作用，也可以用光具座表現出來，如圖 24-23 所示。

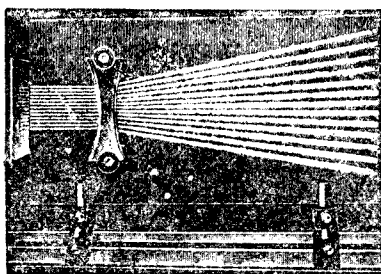


圖 24-23. 用光具座顯示發散透鏡的作用

要說明這個現象，祇要設想有一串平面波通過凹透鏡。因為凹透鏡的中央薄而邊緣厚，所以各波的中央部分比邊緣部分，受玻璃滯延少一些。其結果，各波出透鏡後，它們的波前變成凸面，於是各射線就好像從虛焦點出發一般了。

圖 24-24 所示，乃是凹透鏡造像的幾何作圖法。由圖可知，

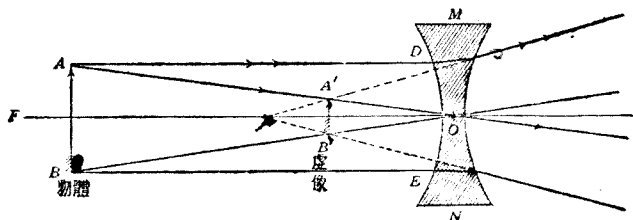


圖 24-24. 用幾何作圖法求凹透鏡所造成的虛像 $A'B'$

所造成的像與物體同在透鏡的一側，而且是虛的，正立的，並小於物體。透鏡公式應用於凹透鏡時，焦距須看成負的。所以凹透鏡往往叫做負(-)透鏡(minus lens)，而凸透鏡往往叫做正(+)透鏡(plus lens)。

476. 【透鏡造像的缺點】 應用圖 24-21 所示的幾何作圖法時，我們假定從物體上一點出發的一切射線，通過透鏡後準確地會聚於一點。但在實際上，落在透鏡邊緣的射線，比落在透鏡中央部分的射線，通過透鏡後偏折得多一些。因此，這一部分的射線便會聚於離透鏡較近的一點。這個缺點叫做球面像差(spherical aberration)。

用平常幻燈上的聚光鏡(凸透鏡)，在遠處屏上造成一盞電燈的像，即可顯示球面像差。我們將見屏上的像模糊不清。但若將透鏡遮住，單空出中央一小部分，則像便很清晰。再將透鏡遮住，單空出周圍一圈狹窄而與中心等距的隙縫，試試看有什麼效果。透鏡必須怎樣移動，方纔可在屏上映出清晰的像？

球面像差的效應，在於使所造成的像既不清晰，又發生畸形。若用遮光薄片或所謂光闌(stop)，將外緣的光線遮斷，則像的清晰與準確的程度，便可以改進。不過在同時它的亮度卻減少了。

以上所述關於透鏡的全部幾何學的理論，祇適用於很薄很薄的透鏡，而且限於一個假定的情形，即通過透鏡的光線，它們的方向與主軸斜交，不成很大的角。就實際的情形而論，差不多常用複透鏡(幾枚透鏡組合而成的)以代單透鏡。這種複透鏡的設計，目的在使一透鏡的缺陷，可因別一透鏡的缺陷而得到補救或抵消。

問答題與計算題

1. 在 1933 年舉行的美國詩家谷(Chicago)世界博覽會，會場裏的電燈總開關由大角星(Arcturus)管理，星光落在場內的一枚光電管(photoelectric cell, 第 481 節)上，全場即大放光明。這星光離開大角星，還是在上一次詩家谷世界博覽會開會的那一年，即 1893 年。問大角星離開地球(a)幾光年(光年是天文學上記天空距離的單位，等於光在一年中所經過的路程)?(b)幾哩？

2. 太陽離開地球約有 93,000,000 哩。太陽光從太陽到地球需時幾分？
 3. 一支點亮的蠟燭，離開一枚凸透鏡 30 厘米，它的像現在屏上，屏離開透鏡 3 米。(a) 這透鏡的焦距是多少？(b) 若太陽光通過這透鏡，則應在何處放一紙片，使紙片上現出最亮最清晰的日像？
 4. 電燈一盞，離開凸透鏡 50 厘米，透鏡的焦距是 15 厘米。(a) 像在什麼地方生成？(b) 敘述像的各項特點。
 5. 第 4 題中的電燈放在 (a) 離透鏡 20 厘米處時，(b) 離透鏡 10 厘米處時，求像的地位，並敘述像的各項特點。
 6. 有焦距 6 吋的凸透鏡一枚，若欲用這透鏡造成 (a) 放大的實像，像離透鏡 30 吋，(b) 放大的虛像，像離透鏡也是 30 吋，則物體須放在什麼地方？
 7. 高 2 吋的幻燈畫片一枚，離開焦距 8 吋的透鏡 9 吋。(a) 映畫屏應該放在什麼地方？(b) 映在屏上的畫有多少高？(c) 為什麼屏上上映出的畫不顛倒？
 8. 手持焦距 30 厘米的讀書鏡，離開書頁 12 厘米，所見的字放大多少倍？
- * * *
9. 有焦距 24 厘米的透鏡一枚，欲用此透鏡得正立的像，像長三倍於物體，物體應該放在離透鏡多少遠的地方？
 10. 證明雙凸透鏡所造成的像與物體之間的距離，不能小於 $4f$ 。
 11. (a) 在圖 24-21 中，(b) 在圖 24-22 中， A 與 A' 兩點是不是共軛焦點？各舉理由。
 12. 電燈一盞，離開一屏 4 呎。若有透鏡一枚，放在離屏一呎處，可在屏上造成燈像，(a) 則透鏡改放在什麼地位，也可以在屏上造成燈的像？(b) 比較兩個像的長短。
 13. 燈一盞，離開牆壁 90 厘米。凸透鏡一枚，放在燈與牆壁之間，可使壁上映出燈的像來，長是燈的 3 倍。問此透鏡的焦距是多少？

光學儀器

477. 【照相機】 照相機(camera)不過是一隻毫不漏光的箱子，它的一頭裝着透鏡(圖 24-25)，可以使箱外物體的像，映在箱子另一頭的**敏化片**(sensitized)或**軟片**(film, 亦稱膠片)上。這敏化片是一片玻璃(硬片)或一片賽璐珞(軟片)，它的一面勻敷着一層銀化合物。光通過透鏡的時間是有限制的，從一千分之一秒到幾分鐘不等。要看透鏡的品質，待攝取相片的物體的亮度，以及敏化片的‘感受速率’(speed)而定。在敏化片上留下的形相，必須等到用一種叫做**顯像劑**(developer)的化學藥品浸過後，方纔看得出來。這樣得到的一幅畫片叫做**底片**或**負片**(negative)。將底片蓋在敏化紙上，經強光照射適當的時間後，

再將敏化紙浸在顯像劑內，即得通常所見的相片 (photograph) 或正片 (positive)。

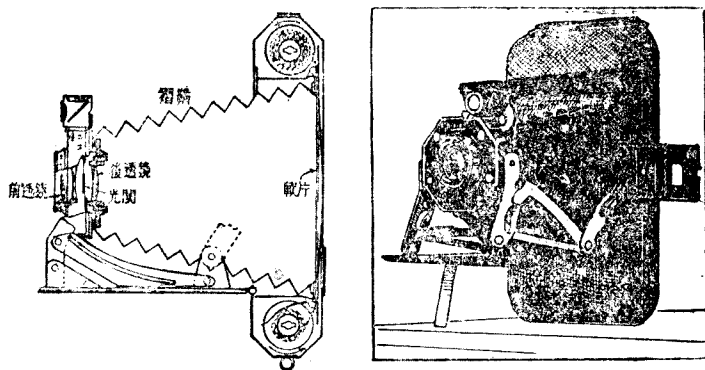


圖 24-25. 摺疊袖珍照相機，及其主要部分的概示圖

為減少單透鏡的球面像差起見，透鏡前面放着一個可以放大收小的光闌。光闌收小時，可以攝取很清晰的相片，但因入箱的光量減少，所以露光的時間非加長不可。若用兩枚或兩枚以上的透鏡組合起來，而在光闌與最前一枚透鏡之間加裝一個光閘 (shutter, 俗稱快門)，則動得很快的物體，亦可在一瞬間攝取其清晰的相片，所謂‘拍快照’或‘拍快鏡’ (snapshot) 者便是。留有物體形相的敏化片，必須處於適當的地位，即與物體須同在共軛焦點上，所以比較好的照相機，通常都有可以伸縮的‘褶靴’ (bellows)，以便使遠近物體的像，都能夠準確地造成在敏化片上。

478. 【幻燈】 幻燈 (projecting lantern, 或 stereopticon) 的用處，在於使照亮的物體或畫片的像，出現在屏上。它的主要部分是一個強烈的光源，例如一盞電燈 B (圖 24-26, A)；兩枚聚光鏡 C ，可使光聚斂後再通過透明的畫片 D ；以及一組稱為物鏡 (objective) 的透鏡 E ，可將畫片的實像造成在屏上。我們一望

即知，幻燈與照相機很相像，祇是物體與像的地位對換罷了。因為屏的地位，通常總是很遠，所以畫片 D 雖在物鏡 E 的主焦點外而離主焦點很近。所用光源必須又強又小；這是一件很重要的事。通常採用電弧或特製電燈，此種電燈的燈絲繞成線圈，蜷緊在一處，占很小的地位。在不透明物體用幻燈（圖 24-26, B ）裏面，燈後往往加裝金屬凹鏡 A 。

479. 【活動電影】 圖 24-27 所示，乃是一架活動電影照相機及其內部構造的概況。這照相機可在一條狹長柔韌的軟片上，攝取一串負片。攝取負片時，光閘 (shutter, 快門) 每秒大約開閉十六次。光閘閉時，軟片往下略移；光閘開時，軟片停駐不動。所攝取的各幅負片（圖 24-28），高約四分之三吋，寬約一吋。

軟片繞成卷，每卷約長 1000 呎。因為移過透鏡的軟片每秒約一呎（有負片 16 幅），所以每卷軟片有負片約 16,000 幅。若有任何人或物在照相器的視場內運動，則所攝得的一串負片，每一幅和前一幅微有不同。從這種負片，可以印出隨便多少卷的正

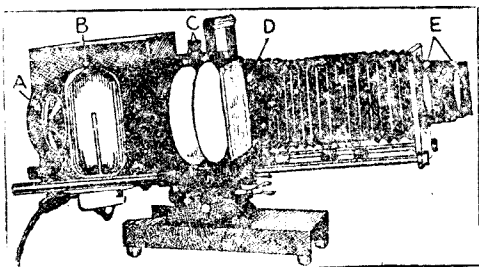


圖 24-26, A . 投射透明畫片用的幻燈
 A = 凹鏡, B = 光源, C = 聚光鏡, D = 畫片, E = 物鏡

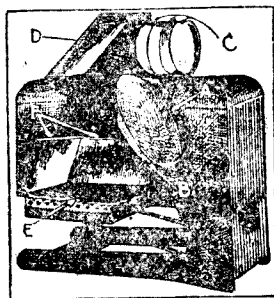


圖 24-26, B . 投射不透明物體用的幻燈
 A = 反射鏡, B = 光源, C = 物體, D = 平面鏡, E = 物鏡, F = 收集散射光線用平面鏡

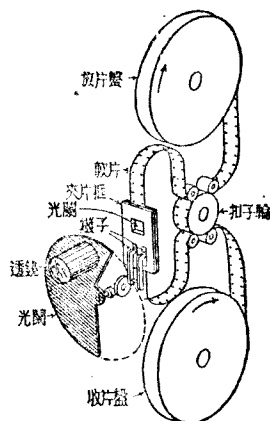
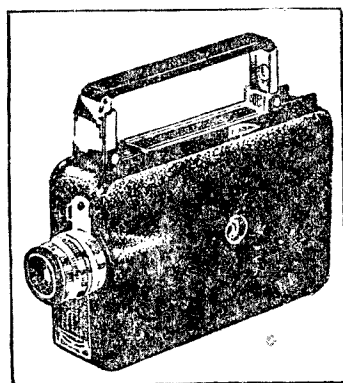


圖 24-27. 活動電影照相機 (業餘家所用) 及其主要部分的概示圖

片來，以供各地放映之用。圖 24-29 所示，即是特製的放映電影的幻燈，一串正片的各幅，在銀幕上順次陸續現出來，速率同於各幅負片的攝取，即每秒約十六幅。在十六分之一秒的時間內，前一幅所引起的視覺還留着沒有完，接着又有第二幅呈現在眼前，所以我們不覺得每兩幅之間有何間斷。這樣看來，我們看活動電影，所見的並非活動的畫，依舊是靜止的畫，不過這些靜止的畫一幅連一幅地出現得很快很快罷了。有一種動作很慢的電影，攝取時速率非常之高，但在放映時則按照平常的速率。這樣一來，跑快步的人，也好像在那兒踱方步了。

480. 【有聲電影】放映有聲電影的一個方法，是將標準電影放映機同留聲機聯合起來。兩架機器用同一電動機運轉，使留聲機轉盤上的唱片，與電影膠片完全同步。唱針的振動傳給磁場內一個小小的線圈，因而有變動的電流產生，這電流的變動完全與唱片上所留的音跡相對應。將這電流放大後，通入揚聲器，即可發出很大的聲音來。

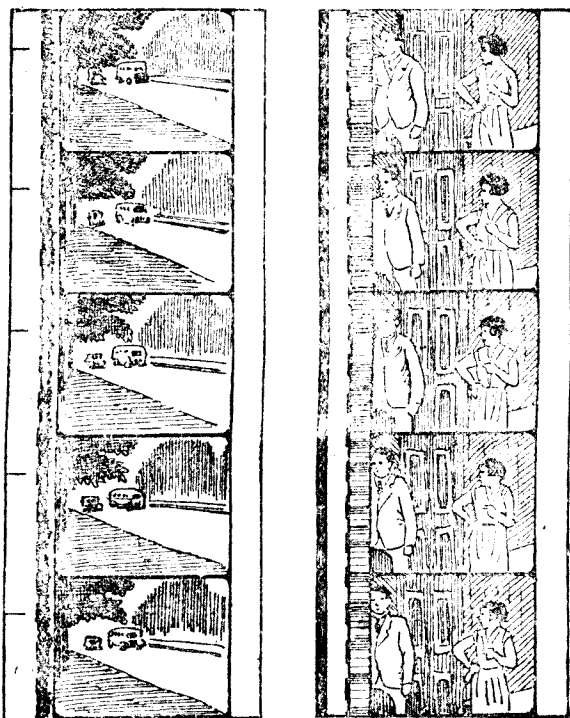


圖 24-28. 活動影片的兩段：左邊一段上的音跡闊狹不同；右邊一段上的音跡濃淡不同

但是這個方法有一個很大的缺點，即由唱片所發的聲音，很容易與人物的動作，不能互相密切呼應，以致嘴唇在動，沒有聲音，嘴唇不動，倒聽見有人說話。或開門時有砰的一聲，關門倒沒有聲音。這種情形，不但可笑，而且要引起觀眾不快的感覺。因此，這個方法，現在差不多已經摒棄不用了。

另外有一種方法是將音跡記錄在影片的邊緣上。圖 24-28

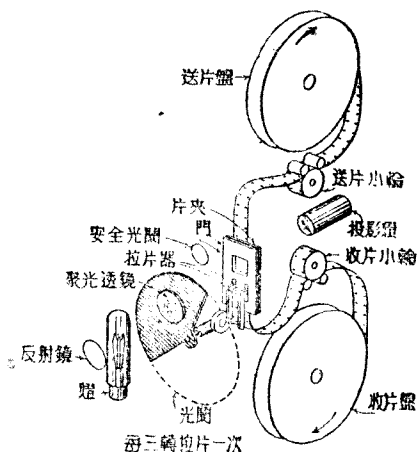
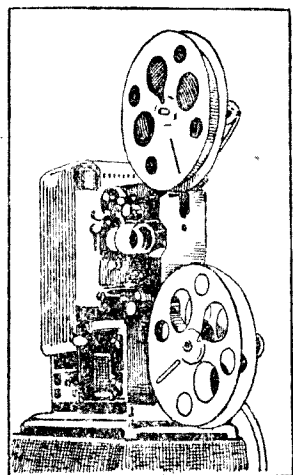


圖 24-29. 家庭用活動電影放映機，及其主要部分的概示圖

所示的影片，就有一道音跡，印在畫幅與扣片孔之間。欲從這音跡得到聲音，通常在放映機上加裝光電管（見下節）一枚。強烈而集中的燈光透過濃淡不同的音跡之後，再照射在光電管上，即可引起脈動電流，它的強弱的變化對應於音跡濃淡的變化，亦即對應於所錄的聲音。這電流經放大後，便通入揚聲器而使揚聲器發聲。如圖 24-31 所示，乃是有聲電影放映器以及電影院的構造與布置概示圖。

481. 【光電管】 所謂光電管 (photoelectric cell)，乃是一種特製的真空管 (圖 21-30)，管的中央有一個金屬線製成的環，當作陽極用。在管壁裏面塗着一層金屬，通常總是鉀，或鈉，或銫 (caesium)，

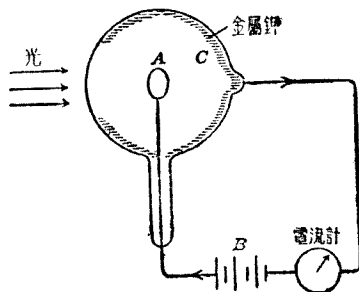


圖 24-30. 光電管

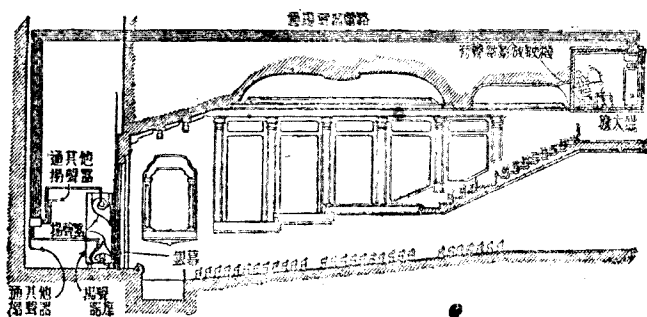
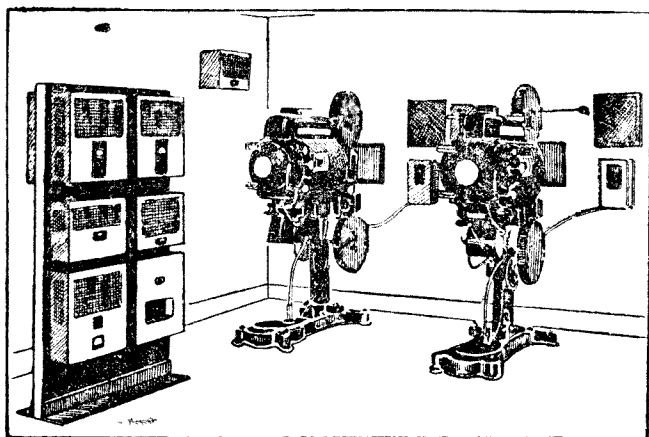


圖 24-31. 電影院的橫剖面，顯示有聲電影放映器與銀幕後揚聲器的布置

當作陰極用。光落在這一層金屬上的時候，就有電子從這層金屬發出來，射到陽極上去。光不斷地照在陰極上，電子也不斷地從陰極流向陽極。此時若有電池組與這光電管接連，電池的正端接在光電管的陽極 A 上，負端接在陰極 C 上，則從電流計指針的偏斜，可知有電流正依着圖中箭頭所指的方向在流動。光被遮斷時，電流立刻停止，因為光電管內的電子不再從 C 射到 A ， A 與 C 之間失去了聯絡，就無異於把電路截斷。通過光電管的電流，它的強弱正比例於光的強弱。這電流當然是很微弱的，不過可以將它放大，在第 545 節中就要講到放大這件事情。光電管乃是一件非常靈敏的調節儀器，它不但在有聲電影方面擔任了很重要的任務，而且在各方面都有很廣的用途，例如報火警，防賊盜，管理門戶，控制電路等等都是。因此，它就獲得了‘電眼’(electric eye)的雅號。

482. 【眼睛】 人類的眼睛(圖 24-32)實在好說是一具天然的照相機；睛珠在前面，猶如一枚透鏡；網膜在後面，無異一張敏化片。

它有任何人造照相機所萬不能及的種種優點。最重要的是，它能夠在同一張敏化片上接連攝取種種不同的相片，當時立刻由神經纖維中，某種尚未被我們探知的化學過程或電的過程，把它們‘顯出像來’，而且立刻經由‘專設的電線’(視神經)將所得結果，向‘總部’(腦)報告。

如圖 24-32 所示，是眼睛結構的概示圖。眼睛的前面有一層角質透明的薄膜，叫做角膜(cornea)，角膜裏面包着一種稀薄

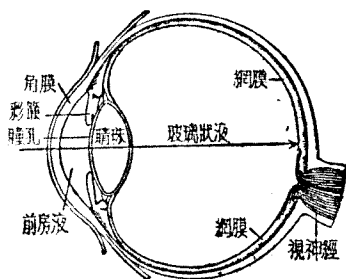


圖 24-32. 人目的剖面，顯示睛珠與網膜

如水的透明液體，叫做前房液(aqueous humor)。前房液裏面有一個可以收縮放大的光闌，叫做彩簾(iris)，彩簾後面便是睛珠(crystalline lens)。眼睛的後面內壁，有一層布滿神經的組織，叫做網膜(retina)，它的作用猶如照相機後面的敏化片。睛珠與網膜之間有一種透明的液體，叫做玻璃狀液(vitreous humor)。睛珠的折射率，比前房液及玻璃狀液都大。

483. 【眼睛的調節】 物體向照相機移近時，若欲使所攝的相片仍保清晰，則非增加透鏡與敏化片間的距離不可，或改用比較凸一些的透鏡，即焦距短一些的透鏡，亦可。通常的照相機所採用的是第一法，而眼睛所選擇的卻是第二法。眼睛為適應於遠近不同的距離起見，並不將網膜前後移動，卻將睛珠的焦距予以改變。眼睛的肌肉鬆弛時，睛珠通常取適當的形狀，恰可將很遠處的物體的像，清晰地造在網膜上。若欲察看近處的物體，則神經中樞發下命令，教睛珠周圍的環狀肌肉，把睛珠擠得更凸一些，俾可在網膜上造成一個很清晰的像。睛珠可由肌肉的鬆緊而適應於距離不同的物體，這種作用叫做眼的調節(accommodation of the eye)。就正常健全的眼睛而論，通常往往說，物體放在離目約 10 吋(或 25 厘米)的地方，看得最清楚。這句話的意思是，察看物體覺得很清晰而又不覺得疲勞(即所謂‘眼睛酸’)，最近的距離是 10 吋。物體離目愈近，網膜上的像愈大，看得當然愈清楚。所以我們要細看物體，往往不知不覺把物體盡量放近我們的眼睛。10 吋就是達到這個目的時，物體與眼睛間的最短距離。這距離，叫做健全眼睛的明視距離(distance of most distinct vision)。

484. 【眼睛的天然缺陷】 近視(short-sighted)和遠視(far-sighted)，都是眼睛的天然缺陷。在近視的眼睛裏面，遠處物體的像，造成於網膜的前方(圖 24-33 中的 A)。這是因為睛

珠太凸(它使光線偏折太多),或因眼球太長(網膜離睛珠太遠)的緣故。患近視的人,須把物體放在靠近眼睛的地方,纔可看得清清楚楚。這種缺陷,可以戴上用凹透鏡做成的眼鏡來補救。

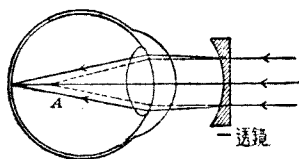


圖 24-33. 近視眼,睛珠太凸,
像結在網膜前(圖中虛線)

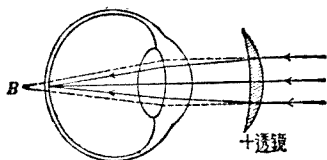


圖 24-34. 遠視眼,睛珠太扁,
像結在網膜後(圖中虛線)

就遠視的眼睛而論,在不遠不近處的物體,它的像造成於網膜的後方(圖 24-34 中的 *B*)。這是因為睛珠太扁(它使光線偏折太少),或因眼球太短(網膜離睛珠太近)的緣故。患遠視的人,若欲看得清楚,必須把物體放在離眼很遠的地方。這種缺陷,可以戴上用凸透鏡製成的眼鏡來補救。

老年人因為肌肉退化,失去調節的本領,所以需要戴上用**雙焦透鏡**(bifocal lens)做成的眼鏡。這眼鏡分上下兩半,上半看遠處,下半看近處(例如看書)。

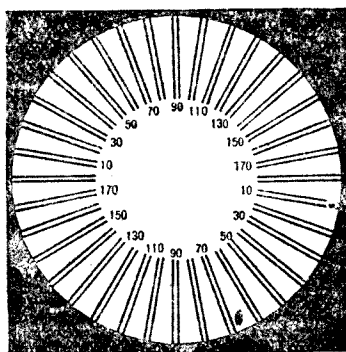


圖 24-35. 試驗像散性所用
的輻線圖

眼睛的天然缺陷還有一種,叫做**像散**(astigmatism, 俗稱散光)。像散的原因,是睛珠或角膜不成真正的球面。其結果,一個光斑例如星,常被看成一條短而亮的‘線’。圖 24-35 中的那許多直線,在患像散的人看來,並不是條條一樣的清晰。在某一

個方向內的線，看起來黑白分明，又光又直，但在與此方向垂直的線，看起來似乎粗一些，而且很模糊。這種缺陷，可以用圓柱面透鏡(cylindrical lens)來補救。

485. 【物體的距離與大小】 物體在眼中看出來的大小，看網膜上所造成的像的大小而定，因此須看視角(visual angle)的大小而定(圖 24-36 中的 AOB)。

物體向眼睛移近時，這個角顯然增加起來，因而物體的視大小(apparent size)也跟着增加。物體離開眼睛愈遠時，這個角愈小，因此物體的視大小也跟着減縮。例如我們沿着鐵路軌道遠望時，即見兩軌愈遠似乎靠得愈近。一個人站在離開我們 100

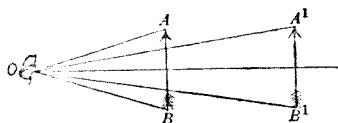


圖 24-36. 視角(人目藉以分別物體的大小)

碼遠的地方，他的像在網膜上的高度，祇有站在 10 碼遠處時的十分之一。但是實際上我們並不以為站在 10 碼遠處的是一個巨人，而站在 100 碼遠處的是一個侏儒，這是因為在日常經驗上，我們估計物體大小時，物體離開我們的遠近也顧到之故。

在山巔空氣清新的地方，看遠處的物體，往往把它們離開我們的距離，估計得比真正距離短一些。這是因為空氣一清潔，遠處物體看起來就比較分明一些的緣故。因此，我們又往往把這些物體的大小，估計得比真正大小不到一些。在另外一方面說，出現在地平線上的月，比高掛在天空中的月，看起來大得多。從前以為，這是比較月與地平線上物體而生的錯覺，但近來又有人以為，這是因為向前平視與向上仰視，引起不同的視覺之故。倘若平躺在地上，就覺得高空的月比地平線上的月大了。總而言之，估計物體的大小與遠近，一半須由經驗來決定，一半須由引起視覺的環境來決定。後者往往引起錯誤的估計。

顯微鏡與望遠鏡

486. 【放大鏡——簡單顯微鏡】我們已經說過，健全眼睛的明視距離（第 483 節），就一般人說來，大約是 10 吋（或 25 厘米）。若物體在明視距離之外，則網膜上的像縮小，細微的地方就看不出來。若物體在明視距離之內，則網膜上的像便模糊不清。

用雙凸透鏡察看物體，往往覺得它要大一些，所以雙凸透鏡往往叫做**放大鏡**（magnifying glass），或**閱讀鏡**（reading glass），因為它可以幫助我們閱讀字跡細小的書報，使我們不感到困難。將待察看的物體，放在離透鏡比焦距稍微近一些，如圖 24-37 所示，就可以看見一個正立而放大的像（虛像）。

將物距加以調準，直到得一最清楚的像而止，此時像距大約是 10 吋。這樣的一具簡單顯微鏡（simple microscope），它的放大率（magnifying power）等於像

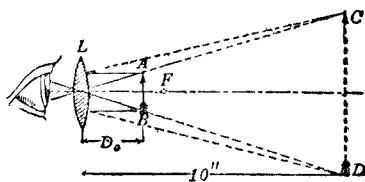


圖 24-37. 放大鏡 物體在焦點之內

長對物長的比。這個比，又等於像距對物距的比。因為眼睛與放大鏡靠得很近，所以像距差不多等於像到眼睛的距離。像距 10 吋，即是明視距離。於是放大鏡的放大率又等於 $10/D_o$ ， D_o 是物到透鏡的距離吋數（或等於 $25/D_o$ ， D_o 是物到透鏡的厘米數）。

例如有一放大鏡，拿在手中離開物體 1 吋時，所見的放大像最清晰，則此放大鏡的倍率就是 10 倍（長）。

487. 【複顯微鏡】平常人目所不能察見的極小物體，可在**複顯微鏡**（compound microscope）中見到。複顯微鏡的主要部分，乃是兩個（或兩組）透鏡，裝在一根管子的兩端（圖 24-38）。

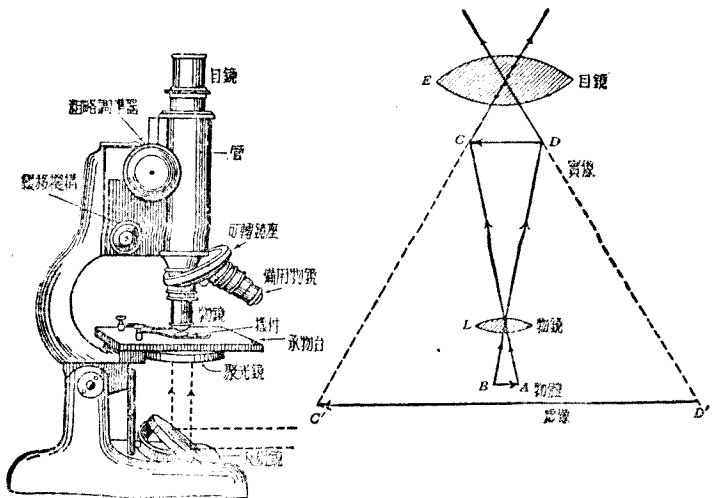


圖 24-38. 複顯微鏡及其透鏡系統的概示圖

較小的透鏡 L 叫做物鏡 (objective), 物體 AB 恰恰放在它的焦距之外, 因而有一個放大的實像 CD 造成。這實像, 再用所謂目鏡 (eyepiece) 來察看, 即見放得更大的虛像 $C'D'$, 離目大約是 10 吋。

實像 CD 比物體 AB (長) 放大的倍數, 等於像到透鏡 L 的距離為 L 的焦距所除的商。 CD 到物鏡 L 的距離通常大約是 150 毫米。 因此之故, 若物鏡的焦距是 5 毫米, 則像 CD 的長便是物體 AB 的 30 倍。 若目鏡再把像放大 10 倍, 則全部組合的放大率即等於 10×30 或 300 倍 (長)。 這就是說, 物體的任何兩點間的長度, 都放大 300 倍, 而物體的面積則放大 300×300 或 90,000 倍。 優良的複顯微鏡, 它的放大率有高至 2500 倍 (長) 的。

關於動植物的內部組織, 生活過程, 關於微生物, 以及關於疾病的原因, 有許許多多珍貴的發見, 都是靠着顯微鏡得來的, 所以顯微鏡乃是現代人的恩物之一。

488. 【望遠鏡】 望遠鏡 (telescope) 可使我們看見很遠很遠的物體, 這物體, 若不用望遠鏡, 是看不清楚的。 圖 24-39 所示

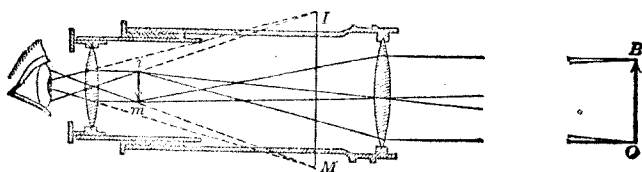


圖 24-39. 天文望遠鏡的透鏡系統

的是**天文望遠鏡**(astronomical telescope),它的主要部分是兩個透鏡(或兩組透鏡),一個是很大的物鏡,一個是目鏡。由物鏡造成的倒立實像 im 比物體 OB 小得多。但是它離開眼睛很近,近到可以用目鏡將它詳細察看,這目鏡,它的作用無異於放大鏡。因為目鏡並不把 im 的像 IM 再倒過來,所以在望遠鏡中窺見的是倒立的像,正和在顯微鏡中所窺見的一樣。這種望遠鏡之所以能夠望遠,實因光通過透鏡時起折射之故,所以我們有時稱之為**折射望遠鏡**(refracting telescope)。同樣,前文所說的顯微鏡,可以叫做**折射顯微鏡**(refracting microscope)。利用光的反射,也可以製成望遠鏡,叫做**反射望遠鏡**(reflecting telescope)。圖 24-40 右邊的一架,即是美國加州巴薩登那(Pasadena)地方威爾遜峯天文臺(Mt. Wilson Observatory)的**反射望遠鏡**,它的物鏡是直徑 100 吋的凹鏡。

巨型**折射望遠鏡**——例如美國加州海密爾登峯(Mt. Hamilton)上立克天文臺(Lick Observatory)的一架,或美國威士康辛州日内瓦湖(Lake Geneva)旁葉爾克斯天文臺(Yerkes Observatory)的一架(圖 24-40 左)——它的物鏡總是很大很大的消色差透鏡(見第 494 節),而且裝在又長又重的管子上。物鏡因為直徑很大的緣故,能夠收集大量的光,聚成一小束射線,全部送入眼睛的瞳孔。我們可以證明,天文望遠鏡的放大率,等於物鏡的焦距為目鏡的焦距所除的商。所以欲使天文望遠鏡有很高的放大率,物鏡非有很長的焦距不可。

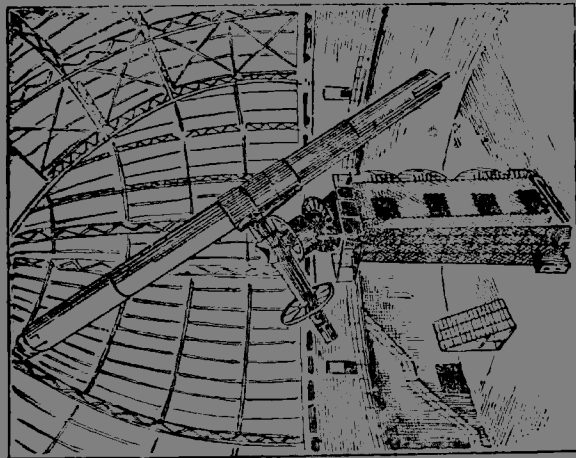
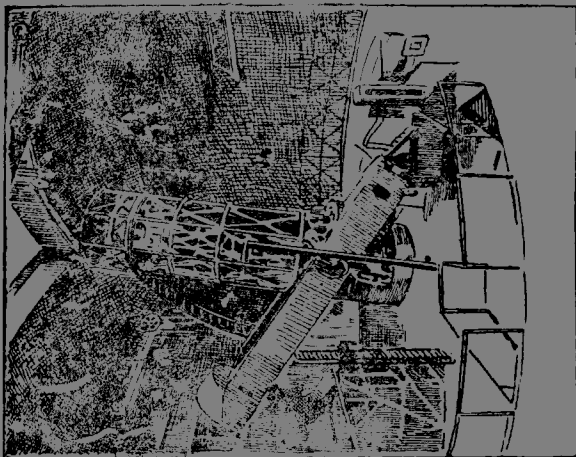


圖24-10 美國威斯康辛州 Wisconsin 日内瓦湖 Lake Geneva 萊佛克斯天文臺 Lick Observatory 的望遠鏡，是世界最大折射望遠鏡。它的物鏡直徑4吋，裝有長6.1呎的管子。



美國加州巴爾登那 Pasadena 威爾遜天文臺 (Mt. Wilson Observatory) 的反射望遠鏡。它的物鏡直徑是100吋。架子的兩端用鼓撐支持，鼓撐浮在水面裏面。

489. 【正像望遠鏡,偵察鏡】如圖 24-41 所示的望遠鏡,叫做正像望遠鏡 (erecting telescope) 或偵察鏡 (spyglass)。

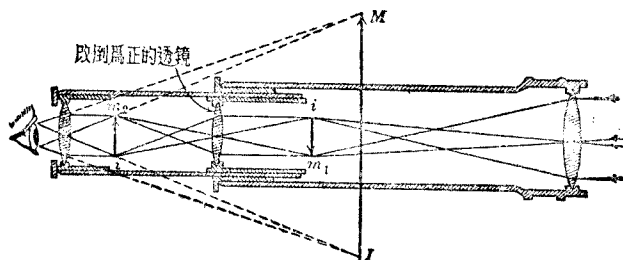


圖 24-41. 正像望遠鏡(或稱偵察鏡)的概示圖

它比天文望遠鏡祇多了一個(或一組)透鏡,插在物鏡與目鏡之間。這一個會聚透鏡,把物鏡所造成的實像 im_1 顛倒過來造成另一實像 im_2 ,然後再由目鏡把這正立的實像 im_2 ,造成放大而正立的虛像 LM 。在普通的偵察鏡裏面,目鏡由兩個透鏡組合而成,它的作用與單獨的一個放大鏡相同。正像望遠鏡雖能讓我們望見正立的物體,但是因為多了一個改倒為正的透鏡,望遠鏡管卻增長了不少。

在作長程射擊時,常用正像望遠鏡向遠處的目標瞄準。測量師所用的‘經緯儀’(transit)與‘平準儀’(level),它的主要部分也是一具正立望遠鏡,其中有十字形細絲,繃緊在橫截望遠鏡管的平面上,這平面,與物鏡所造遠處物體之像,恰在同一地位。

490. 【觀劇鏡】圖 24-42 所示,乃是所謂觀劇鏡 (opera

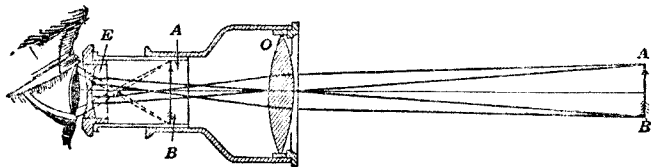


圖 24-42. 觀劇鏡的縱剖面

glass)。觀劇鏡也是望遠鏡的一種，它的目鏡是發散透鏡（即凹透鏡）。這目鏡的焦距差不多同於眼睛的焦距，因此它的功用無異於抵消睛珠的折射作用。所以我們可以說，由物鏡造成的像，直接造在網膜上。觀劇鏡的視場是不大的，因此，通常祇使它的放大率有三倍或四倍。不過它也有優點，結構緊湊，而且造成正立的像。它的兩個透鏡之間的距離，等於兩透鏡的焦距差。伽利略曾按照這個計劃製一望遠鏡，它的放大率是 30 倍（長）。他靠着這個望遠鏡，得到了異常重要的發見。

491. 【稜鏡雙筒望遠鏡】 有一種儀器，叫做稜鏡雙筒望遠鏡（prism binocular）的，它的用途正在逐漸增加起來。它既有偵察鏡的那樣大的視場，又有觀劇鏡的那樣緊湊，入鏡的光，在兩枚反射稜鏡之間來往，如圖 24-43 所示；這樣一來，結構自然可以緊湊了。稜鏡的裝置，可使物鏡的焦距，三倍於管子一樣長的普通瞭望鏡。因此，它的放大率也就有對應的增加。

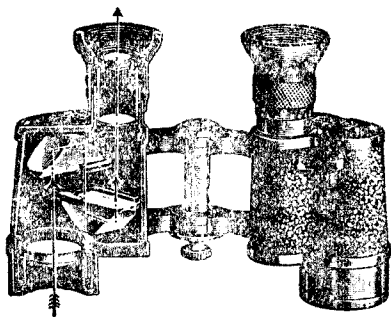


圖 24-43. 利用稜鏡的雙筒望遠鏡

此外，因為光在兩枚稜鏡中反射，故可不必像普通天文望遠鏡那樣加用改倒為正的透鏡，而亦得正立的像。在第一枚稜鏡中反射兩次，上下顛倒回來；在第二枚稜鏡中反射兩次，左右歸還原位。這麼一來，像就完全恢復了它的本來的位置。

問答題與計算題

1. 在 100 碼透處的一輛汽車，在照相機中聚焦準確時，照相片離開透鏡 8 吋。這汽車離開照相機 10 呎時，照相片與透鏡之間的距離必須有怎樣的改變？這距離

必須增加還是減少？

2. 眼睛望着 100 碼遠的汽車而看得很清楚時，若汽車愈來愈近，則眼睛應當怎樣調節？

3. 小型箱式照相機，它的透鏡是固定的（透鏡與照相片間的距離不能改變）。用這種照相機，為什麼不加調準，而可攝取遠近各物的相片？

4. 倘若物體近在 6 呎以內，上題中所說的箱式照相機，即不能使用。為什麼？但若將另一透鏡加在照相機的透鏡前面，那麼近到 $3\frac{1}{2}$ 呎處的物體，也可以攝取它的相片。說明理由。

5. 眼鏡有時用兩套透鏡做成（雙焦距眼鏡）。這種眼鏡有什麼好處，什麼不便之處？

6. 戴雙焦距眼鏡的人，彈奏鋼琴時，若琴架上的樂譜離開他 30 吋，那麼他就覺得很困難。什麼緣故？

7. 路面上漆着的字，若比平常的字體特別高，則坐在汽車中看起來比較容易。什麼緣故？

8. (a) 影片放映機上的光闌，將光柱遮斷的一剎那間，銀幕上是否真正黑暗無光？(b) 所謂‘視覺暫留’ persistence of vision，是什麼意思？

9. 爲了要數一數一種布每吋有幾條線起見，把焦距是 2 吋的雙凸透鏡，放在這種布的上方，離布 $1\frac{2}{3}$ 吋。(a) 造成的是哪一種像？(b) 像在什麼地位？(c) 像比實物放大了幾倍？

10. 有 2×3 吋的相片一張，要將它放到 8×12 吋那樣大。若用焦距 10 吋的透鏡，則敏化紙必須放在什麼地方？

11. 某攝影師從下面所說的幾個數目，推算出一株樹的高度。他知道他所用的透鏡，焦距是 12.0 吋，而敏化片則在焦點外 0.2 吋處。他量得相片上樹的高度是 6.0 吋。問樹有多少高？

12. 在一架複顯微鏡中，物鏡 L （圖 24-38）的焦距是一吋，而物體 AB 離開物鏡 1.1 吋。(a) 像 CD 離開物鏡是多少遠？(b) 像放大多少倍？(c) 若目鏡把這像再放大 20 倍，則此顯微鏡的放大率是多少？

13. 有電影膠片寬 1 吋，而銀幕上的畫寬 10 呎。問照在膠片上與照在銀幕上的光，它們的強度比是什麼？

第二十四章提要

折射發生於光從一種透明物質斜着透入另一種透明物質之時。

光斜着透入光學上較密的物質時，向法線偏折。

$$\begin{aligned} \text{折射率} &= \frac{\text{入射角的正弦}}{\text{折射角的正弦}} \quad (\text{某物質對空氣的}) \\ &= \frac{\text{光在空氣中的速率}}{\text{光在該物質中的速率}} \end{aligned}$$

光的速率(在虛無空間內) = 186,000 哩每秒
 = 3×10^{10} 厘米每秒

臨界角是光從光學上較密的介質透出時,不可超過的入射角。
 稜鏡使光向着較厚的部分偏折。

凸(薄邊)透鏡使光向內會聚。

凹(厚邊)透鏡使光向外發散。

主焦點是平行於軸的射線會聚之點。

透鏡公式(適用於會聚透鏡及發散透鏡):

$$\frac{1}{\text{物距}} + \frac{1}{\text{像距}} = \frac{1}{\text{焦距}}$$

就凸透鏡而論,焦距是正的。

就凹透鏡而論,焦距是負的。

造成實像時,像與物體在透鏡異側,像距是正的。

造成虛像時,像與物體在透鏡同側,像距是負的。

像的大小由下式決定(會聚透鏡與發散透鏡都適用):

$$\frac{\text{像長}}{\text{物長}} = \frac{\text{像距}}{\text{物距}}$$

光電管中,有光照在負極(鉀)上,即有電子從負極發出。通過光電管的電流正比例於光的強度。

問 答 題

1. 在幻燈裏面,(a)聚光鏡有什麼用處?(b)物鏡有什麼用處?
2. 從幻燈投射在屏上的畫若擴大,則燈應向屏移近還是移得遠些?
3. 太陽尚未昇出地平線及尚未降至地平線以下前數分鐘,就可以看得見。說明理由。
4. (a)在水底游泳時,為什麼看不清各種東西?(b)潛水人能不能隔着他的頭盔上的窗,很清楚地望見窗外的一切。
5. 玻璃瓶中的橄欖,拿出來似乎小得多。什麼緣故?
6. 用雙凸透鏡造成(1)實像,(2)放大的像,(3)正立的像,(4)虛像,(5)倒立的像,(6)縮小的像,(7)地位介於 f 與 $2f$ 之間的像,(8)在 f 之內的像,物體應當放在什麼地方?
7. 不論是鏡或透鏡,所造成的實像常倒,這句話對不對?

8. 攝取相片,用有透鏡的照相機比用針孔照相機‘快’,什麼緣故?
9. 同樣是有透鏡的照相機,這隻比那隻‘快’,什麼緣故?
10. 在照相機的光闌上印有 $f/8$ 字樣,什麼意思?
11. ‘慢動’電影是怎樣攝製的?
12. 在複顯微鏡中,(a) 第一個像是實的還是虛的? 是放大的還是縮小的?(b) 第二個像是實的還是虛的? 是放大的還是縮小的?
13. (a) 反射望遠鏡與折射望遠鏡有什麼區別?(b) 它們各有什麼長處與短處?
14. 折射望遠鏡與觀劇鏡有什麼主要的差別?
15. 望遠鏡的目鏡所造成的虛像,通常大於望遠鏡的管。怎樣能夠看得見像的全體?
16. 從很亮的日光下初入室中,常覺非常黑暗,什麼緣故?
17. (a) 讀書,寫字或縫紉時,光最好從肩的上方來,何故?(b) 就多數人而言,最好從左肩的上方來,何故?
18. 列表比較眼睛與照相機的異同。

第二十五章

光 譜 與 色

492. 【稜鏡引起光的色散】 在第 467 節中我們已經知道，光柱通過稜鏡時折射兩次，初入玻璃時折射一次，初出玻璃時再折射一次。所以光柱的偏折總算起來是不小的。我們在前面講過，光斜着從空氣入玻璃或從玻璃入空氣時發生折射，是因為光在空氣中的速率與在玻璃中的不同之故。現在我們還要用實驗來證明，速率的不同，不但使通過稜鏡的光起不小的偏折，而且使白光分布成一條彩色的帶，叫做光譜(spectrum)。這個實驗非常重要，是應該在教室中做給大家看的。

若讓太陽光（或電弧燈光）穿過一條狹縫，射入一間暗房，而取稜鏡一枚放在它的路徑中（圖 25-1），則光柱即在稜鏡內折射兩次。取白屏一個，放在透出稜鏡的光的路徑中，屏上即有一條彩色的帶出現。在這條彩色帶中，大概可以分出七種顏色，紅，橙，黃，綠，藍，靛，以及紫，每相鄰兩色逐漸混清，並無分明的界限。

若用凸透鏡一枚，將隙縫的像造在屏上，然後將稜鏡靠近透鏡放在屏的這一面，那麼屏上現出來的光譜就比較清晰一些。屏須移動一下，使光仍舊落在屏上，屏的地位雖略有改變，光從透鏡到屏的路程卻是與前相同的。此時映在屏上的‘光譜’，乃是隙縫的許多種顏色的像，接連排列而成，每相鄰兩色仍舊互相混清*。

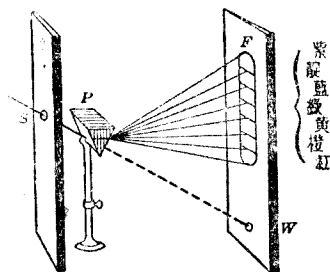


圖 25-1. 日光被稜鏡分成各種色光

* 下面所述，乃是利用幻燈將光譜映在屏上的一個簡便的方法。隨便什麼幻燈都可以用。在畫片框內嵌一片金屬，它的大小與畫片相同。這金屬片上開有一條直立的隙縫，長約一吋，寬約 1/8 吋。將這隙縫的像，造在待映光譜的屏上。然後取玻璃稜鏡一枚，放在幻燈物鏡前的光柱中。旋轉幻燈（連稜鏡一起轉），直到光譜映在屏上而止。

英國的牛頓爵士(Sir Isaac Newton),便從這簡單而著名的實驗,發見了平常的白光實由許多種色光混合而成。這些色光,從紅光逐漸改變到紫光,構成了人目的可見光譜(visible spectrum)。白光通過稜鏡後分成白光所由混成的色光,叫做色散(dispersion)。在人目看來是紅的光,偏折最少;偏折最多的,在人目看來就是紫光。光之所以有種種不同的顏色,是因為有不同的波長(wave length)之故,這在後面還要講到。

稜鏡本身是不能產生各種不同的色光的,它祇能夠把光柱內原來所有的各種色光分散開來。爲了證明這一點起見,牛頓曾取第二塊稜鏡,放在光譜裏面,單讓紫光落在這第二塊稜鏡上。他發見紫光透過稜鏡時仍起折射,但顏色方面不再有什麼變化。他還發見,用會聚透鏡將全部分散的色光集合起來,結果再得到白光。

493. 【爲什麼白光被稜鏡分成各種色光?】 色散的實驗,乃是光學上基本重要實驗之一,我們不但應該知其‘然’,而且應該知其‘所以然’。首先我們得假定,所有這些不同的(色)光,從太陽經過虛無的空間來到地球,是按着同一的速率進行的。但是它們在玻璃中,在水中,或在其他透明的物質中,卻各按不同的速率進行。例如藍光就比紅光進行得慢些。光從一介質斜着而入第二介質時,偏折的多少,既然看光在兩介質中速率的變更而定,那麼不同的色光在任何透明物質內的偏折,當然也各不相同。這就是稜鏡引起色散的原因。

現在讓我們看一看,能不能想像那較短的光波例如藍光(從紅光到紫光,波長逐漸減短),怎樣會在玻璃中比那較長的光波如紅光,格外進行得慢些。在這地方,我們可以把隊伍在耕過的田地上進行那個老比喻(第462節),拿來再用一下。假定這一隊兵,其中有的是短腿的兒童,有的是長腿的大人。短腿的兒童在耕過的田地上行走,當然比長腿的大人格外慢一些。這裏所說的短腿兒童,顯然代表短波(藍光),而長腿的大人則代表長波(紅光)。這個比喻,固然粗淺得很,但是很可以幫助我們了解色散的道理。

494. 【消色差透鏡】 太陽光透過平常用獨塊玻璃製成的雙凸透鏡時，即起折射而會聚於所謂焦點。但是它也起色散，正好比在稜鏡中一般，因此，紅光的焦點（圖 25-2） R ，離開透鏡比紫光的焦點 V 遠些。這種單透鏡，是不能夠把白光照着的物體的像，造得非常清晰的，因為像的明暗部分之間的界線，都着上了顏色。

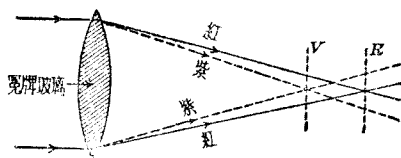


圖 25-2. 凸透鏡所引起的色差

這個缺點，叫做**色差** (chromatic aberration)。若將冕牌玻璃透鏡同火石玻璃透鏡密切拼合起來，成功一枚複透鏡，如圖 25-3 所示，則對於色差可以多少有一點補救。這樣的透鏡，叫做**消色差透鏡** (achromatic lens)。經過周密的設計，消色差透鏡是可以消除色差的大部分，而仍保持必要的偏折的。

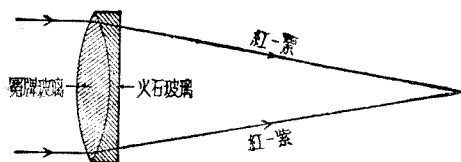


圖 25-3. 消色差透鏡

495. 【分光鏡】 在稜鏡所造成的光譜中，不同的色光多少總有互相重疊的地方。但在叫做**分光鏡** (spectroscope) 的一種儀器裏面，這個缺點就有了補救。分光鏡（圖 25-4）有三個主要的部分：**準直器** (collimator)，這是一根管子，它的一頭有一條很細的隙縫，另外一頭有一枚凸透鏡；**稜鏡** 通常總是等角的，而且用火石玻璃製成；以及**望遠鏡**，這望遠鏡有一個物鏡和一個目鏡。準直器上的隙縫恰在透鏡的主焦點處，所以從隙縫四向出發的光，經由透鏡改變成平行光柱之後，纔落在稜鏡上。這平行光柱在稜鏡中即起折射與色散，各種色光透出稜鏡各依各的

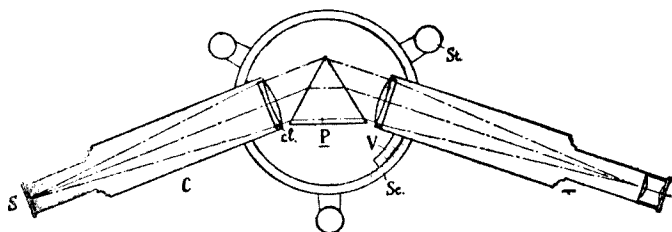
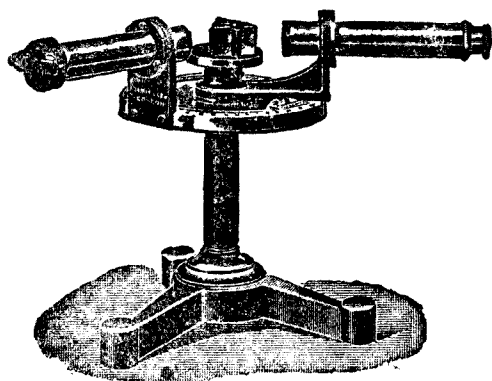


圖 25-4. 簡單分光鏡及其透鏡稜鏡系統的概示圖

方向而成爲不同向的許多平行光柱。這些平行光柱射入望遠鏡，即有界限分明的光譜像，在望遠鏡中造成，這像，可以用眼睛窺視，也可以用照相機攝取它的相片。使用分光鏡時，把準直器夾緊，望遠鏡就可以繞着穿過稜鏡的鉛直軸旋轉。底盤上附有刻度圓，各種不同色光的偏向，都可以藉此測定。因爲光的顏色起原於波長的不同，故可校準這儀器的刻度圓，直接讀出波長來。

496. 【直視分光鏡】 若將兩枚稜鏡並放在一處，一枚用冕牌玻璃製成，一枚用火石玻璃製成，它們的折射稜角在相對的地位，則用適當的折射稜角，可使兩枚稜鏡所引起的偏向，互相抵

消。但是因爲火石玻璃的色散程度差不多兩倍於冕牌玻璃，所以透出稜鏡的光仍舊是各色分散的。不過這樣的光柱，它的中央部分（黃色）透出稜鏡的方向，差不多相同於射入稜鏡的方向（圖 25-5）。

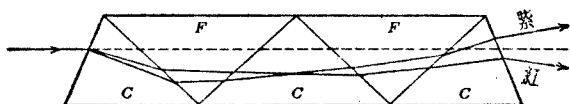


圖 25-5. 引起色散的直視稜鏡

利用這個原理，可以做成所謂直視分光鏡 (direct-vision spectroscopy)。在小型直視分光鏡(圖 25-6)中，通常有三塊稜鏡，顛倒並放，中間一塊用火石玻璃製成，兩旁兩塊用冕牌玻璃製成。管子的一端有隙縫 S ，光穿入 S 後，即由一枚

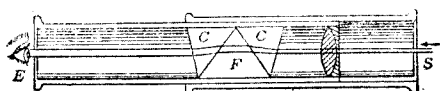


圖 25-6. 直視分光鏡

凸透鏡改變成平行光柱。這平行光柱透過稜鏡的組合後，即成爲色散的光柱，而從管子的他端進入人目 E 。將套管移動，可以調準隙縫與透鏡的距離，以便適應於不同的眼睛。大型直視分光鏡有稜鏡五枚，三枚用冕牌玻璃，兩枚用火石玻璃製成。

497. 【分光鏡的用處】 分光鏡自從本生與克啟荷夫 (Kirchhoff) 在 1859 年予以改善以來，已成爲發展科學最珍貴的利器之一。化學家利用分光鏡研究光譜，以探查稀有元素的蹤跡，比用最精巧的天平都好。天文學家利用分光鏡不但能夠研究太陽的組成，而且能夠研究太陽與衆星的狀態與運動。物理學家利用各種形式的分光鏡，能夠研究原子與分子的結構問題。爲使讀者了解這儀器怎能有此種種不同的用途起見，我們現在把光譜的種類講一講。

498. 【各種光譜】 在分光鏡中所見的光譜屬於哪一種，這是要看光源而定的。假使光源是電弧燈，是有白熾鎢絲的電燈，或平常的煤氣火燄，其中有許多白熾的碳粒（即煙灰），那麼各種色光都有發射。這就是說，我們所見的光譜，含有一切波長，從最短的紫光起到最長的紅光止。這樣的光譜，通體沒有空隙，而且各色齊全，叫做連續光譜（continuous spectrum，圖 25-7）。

若在本生燈的藍色火燄中，加入少許食鹽（氯化鈉），則火燄因有鈉化合物的在場而立刻呈現黃橙色。若用分光鏡來察看這樣的火燄，則將見兩條很狹的黃線，靠得非常近，看起來好像一條。又若用分光鏡來察看汞汽燈所發的光，則可察見有好幾條這樣的線——兩條黃線，一條很亮的綠線，還有五條較暗的線，在綠色區與藍色區內。由此可知，發光的蒸汽及氣體，例如汞汽，它們的光譜並不是各色齊全的連續光譜，只是紫色區，綠色區，以及黃色區內的幾條明亮的線罷了。這種光譜叫做明線光譜（bright-line spectrum）。不過任何一種物質，常在連續光譜的一定地位上（一定的顏色），顯出它的特性明線（一條或幾條）。經過精密的測定，我們知道每條特性明線指示着一個確定的波長。兩種不同的物質，它們的特性明線也不相同。對於明線光譜合理的解釋，可以得之於所謂量子論（quantum theory）。量子論乃是近代物理學上的一大建樹，其內容很深奧，這裏不能敘述。

在造成連續光譜的光柱中，插入一片鈷藍（cobalt-blue）玻璃，則光譜的橙色，黃色以及綠色部分，都被抹掉。又若在光柱中插入一片綠玻璃，則光譜上祇剩有綠色部分，其餘全都不見。白光通過有色透明固體或有色液體後，必造成如上所說的光譜。這種光譜叫做吸收光譜（absorption spectrum）。通過氣體或蒸汽的白光，也要造成吸收光譜。不過當吸收物質是固體或液

體的時候，我們在分光鏡中所見連續光譜上的黑暗部分，乃是不狹的吸收‘帶’(band)；而當吸收物質是氣體或蒸汽時，所見的黑暗部分乃是很狹很細的帶，或竟是線。舉個例來說，將電弧燈的白光送入分光鏡，我們可以得到一條連續光譜。若在光柱中插入一盞本生燈，而用燈燄加熱於少許金屬鈉，如圖 25-8 所示，那麼

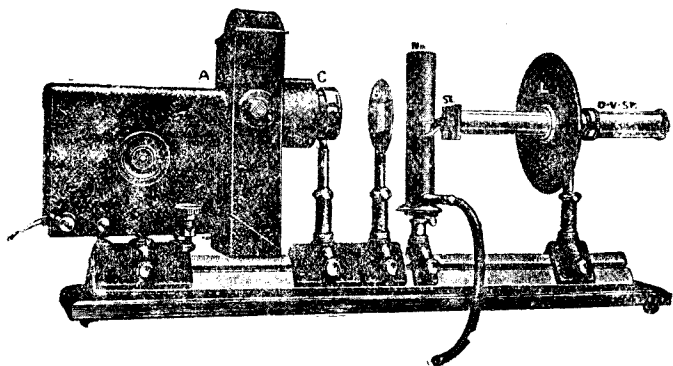


圖 25-8. 示教實驗儀器，可用以顯示白光通過鈉蒸汽時所生鈉的吸收譜線

我們就要看見連續光譜上現出黑暗的吸收線若干條，它們的地位，剛剛是鈉的特性明線光譜所處的地位。做這個實驗的第一個人，是德國物理學家克啟荷夫 (Kirchhoff)，那時候他在海德堡 (Heidelberg) 大學當教授。對於太陽光譜的解釋，這是一個很重要很有意義的實驗。

499. 【夫牢因和斐線】 在 1814 年，德國光學家夫牢因和斐 (Fraunhofer) 發見，太陽光譜中有許多條很細的黑線。這些黑線，我們現在稱之為夫牢因和斐線 (Fraunhofer lines)。剛發見這些黑線時，一般物理學家當時都不能提出合理的解釋。直到克啟荷夫做了上述的實驗之後，方纔經他斷定，這些黑線的呈現，實由太陽的蒙氣中，含有各種吸收物質所致，這些物質本身

的特性明線，就在夫牢因和斐線所處的地位。太陽的心，溫度非常之高，它所發出的光乃是白光（造成連續光譜）。但是太陽的外面包着一層較冷的氣體，白光通過這氣體層時，其中的吸收物質，就把本身所要發出的光波，從白光中吸收掉。根據這個理由，克啟荷夫斷定，鐵，鎂，銅，鋅，以及鎳這一類的金屬，都呈汽態而存在於太陽蒙氣之中。經過一番研究以後，他發見地球上差不多一切元素的明線光譜，其地位都同某某夫牢因和斐線相符合。所以他再斷定，地球上找得到的一切元素，太陽的蒙氣裏面差不多都有。但是從另外一方面說，太陽光譜中的夫牢因和斐線，為數很多，其中頗有幾條，並不對應於克啟荷夫時代所已知道的地球上任一元素的明線光譜。因此大家懷疑，地球上必定還有元素未被人類找到。後來果然從夫牢因和斐線的啟示，發見了新元素氦。現在太陽光譜中還有幾條夫牢因和斐線，未能確定它們所屬的元素。這些線諒必差不多全屬於已知的元素，這些元素的存在於太陽蒙氣之中，已由別的夫牢因和斐線予以證實。至於在地球上為什麼不能夠得到這些奇異的線，那是因為實驗室中的情況同太陽比起來，究竟還差得很遠之故。

克啟荷夫對於夫牢因和斐線的解釋，乃是劃時代的貢獻。赫姆霍茲曾說過，‘他的發見在人類裏面所引起的讚美，所激發的幻想，差不多沒有其他的前例可比，因為在過去看來似乎是永遠隱蔽着的世界，從此可讓我們窺視其內部了。’

色

500. 【各色光波的波長】 光之所以有種種顏色，是因為光波有種種不同的長度之故。利用所謂光柵（grating，一種測波長的裝置），現在已能直接測定各種色光的波長，從而可以證明紅光的波最長，紫光的波最短。就因為這樣，太陽光透過稜鏡

而起色散時，紅光(長波)偏折最少，紫光(短波)偏折最多。下表所載，乃是各色波長的約數。

各色光波的長度表

色	波長範圍 厘米	色	波長範圍(厘米)
紅.....	0.000063—78	綠.....	0.000049—56
橙.....	0.000060—63	藍.....	0.000044—49
黃.....	0.000056—60	紫.....	0.000038—44

501. 【物體的顏色】 任何物體所呈的顏色，要看兩個因子而定：(1) 照在物體上的光，(2) 從物體反射或傳到眼睛裏的光。

一絨紅色棉紗，放在光譜的紅色區域中，看起來當然是紅的。但若將它放在光譜的藍色區域中，那麼看起來就差不多是黑的(圖 25-9)。同樣，一絨純藍色的棉紗放在光譜中，除它本身之色所在的藍色區域外，差不多總現出黑色來。

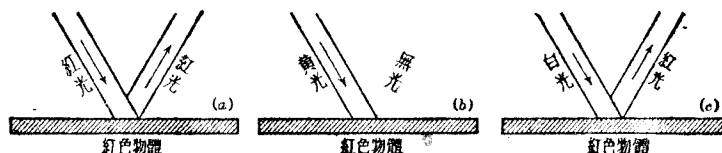


圖 25-9. 有色物體對於光的選擇反射

還有一個實驗，也可以顯出光與物體顏色之間的關係，這實驗便是取色澤鮮明的絨線或紙花，用鈉燄的黃光來照射。這光祇包含着一組特別的波長，所以凡是反射這些波長的色光的，看起來都呈黃色，不反射的，看起來都是黑色。

由此顯然可知，一張白紙在日光下看來所以現出白色，是因為它將各種波長的色光全部反射之故；而一塊紅布在日光下看來所以呈紅色，是因為它祇把引起紅色視覺的長波反射之故。倘若落在白紙上的祇有紅光的波，那麼白紙看起來好像紅紙；又若紅布祇受沒有紅色波的光照射，那麼紅布就要看起來好像是黑布。換句話說，不透明物體的顏色，看它所反射的光的波長而定。汞弧燈是效率很高的電燈，然而在必須區別顏色的地方

不能夠用它，因為它不發紅光的波。

若在通過稜鏡後的光柱中，放一片紅玻璃，則我們所見的光譜便祇有紅色部(圖

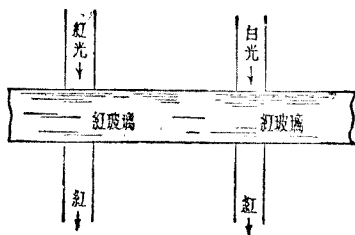


圖 25-10. 光的選擇透射

攝影家所用紅燈上的玻璃，它只使紅光可以自由透過。凡是對於照片上所塗化合物可起作用的光，如黃光，綠光，藍光，以及紫光，差不多全被吸收掉。

502. 【色光的混合】 除白光外，尚有其他色光，不祇單含一種波長，例如紫紅色 (purple) 即由紅光與藍光混合而成。

在牛頓氏色盤 (Newton's color disk, 圖 15-11) 上，放置紅色與綠色扇形，然後將盤急速旋轉，使這兩種色光 (反射光) 差不多在同時入口，則可見那疾轉的圓盤呈黃色，同光譜中的黃色非常相像。將紅色光與藍色光混合起來，可得紫紅色光，這種色光在光譜中是沒有的。若在色盤上放置黑色扇形與紅色或橙色或黃色扇形，則色盤急轉時呈現各級深淺不同的褐色。又若在色盤上放置紅色，綠色，以及藍色三個扇形，而使盤在很亮的白光下疾轉，則盤上現出灰白色。

混合色光的另一方法，是用圖 25-12 所示的特殊儀器^{*}，使白光三柱分別透過三塊有色玻璃——紅，藍及綠。其結果是幕上現出一部分重疊的三個圓。在三個圓疊在一起的地方，現出白色；紅圓與綠圓重疊的地方，現出黃色；而藍圓與紅圓重疊的地方，則現出紫紅色 (purple)。

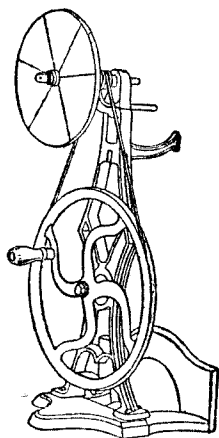


圖 25-11. 裝在手搖旋轉機上的牛頓氏色盤

* 設計人是美國的那得洛夫博士 (Dr. Von Nardroff)。

光譜上的各色，叫做純色 (pure color)，其他的顏色叫做複色 (compound color)。若黃光與濃淡合度的藍光混合起來，則結果產生白光。可以混合成白光的兩種顏色(光)叫做互補色 (complementary colors)。例如黃與藍便是。

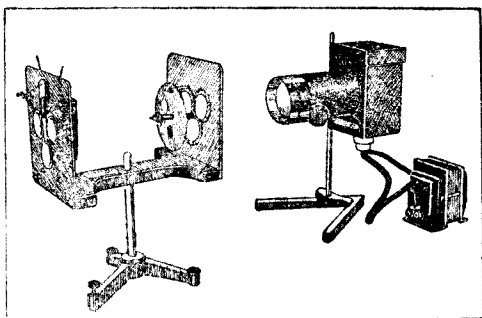


圖 25-12. 那得洛夫氏色光混合器。右側之燈所需要的電流由降壓器供給

503. 【顏料的混合】 將顏料 (pigment)——即有色小粒子——混合起來，所得結果與混合色光完全不同。

取黃鉛筆心與藍鉛筆心各一段，磨碎成粉。若將這粉對半攪和，則混合物的顏色就是鮮明的綠色。

從這實驗我們可以斷定，黃光與藍光混合起來，雖然產生白光，但是黃色顏料與藍色顏料混合起來，卻產生綠色。這是因為白光中的一切色光，除黃與綠之外，都要被黃色顏料吸收掉，而除藍與綠之外，都要被藍色顏料吸收掉的緣故。唯一不被這兩種顏料吸收掉的是綠光，所以混合物呈綠色。換句話說，各種顏料混合時，混合物的顏色乃是不被各成分吸收掉的顏色。

504. 【色覺】 我們能夠看見各種顏色這一個生理過程，是不甚簡單的，而且至今還在科學家紛紛討論之中。據各次實驗的結果看來，眼睛對於黃綠色的感覺，似乎最為敏銳。用新式的鈉汽燈照明公路，效率很高，理由就在於此。按照楊氏 (Young) 的學說，眼睛內生有三組未經發見的器官，分別專司三原色 (primary color) 的視覺。三原色就是：紅色，綠色，以及

藍色(此三種色光依適當的比混合後可成白光,亦可成其他的色光)。每一器官對一切顏色多少可以起一些感應;但是對本器官專司的色覺(即三原色之一),感應特別強大。用這學說,可以解釋色盲症患者所鬧的許多笑話。色盲的原因,似乎是這三組器官之中,有一組或一組以上缺掉,或效用不完善。舉個例來說,假定專司綠色的一組運用不靈,那麼白光就要看做紅光,因為紅與綠是互補色,而綠色光斑就要看成黑點。由此更可知道,為什麼在用紅綠燈管制交通的地方,患色盲症的人駕駛汽車,乃是一件很危險的事情。

505. 【彩色電影】 攝製彩色電影雖然有好幾個方法,但是這裏我們祇講業餘攝影人最常用的一種。這方法叫做柯達顯色過程(kodachrome process)。攝取彩色影片,必須用露光時間可以很短的照相透鏡(例如 $f/1.9$)*,即可容很多光量進入照相機的透鏡(俗稱快鏡頭)。裝入照相機中的膠片,雖然是特製的,但其使用方法,卻與攝取黑白相片用的無二,唯一的限制是必須在直接而明亮的日光下攝取。不過攝就以後,須送到製片廠中用特殊方法顯像,然後送回來供放映之用(目下在我國尚無這種工廠)。

柯達顯色過程的祕密,就在膠片的製作上面。這膠片,有三層很薄很薄的敏化乳膠,重疊敷在賽璐珞透明片上,每兩層乳膠之間,有一層很薄的着色白明膠隔開(圖 25-13)。底層是紅敏性乳膠(red-sensitive emulsion),這層上面是着色的白明膠,再上是綠敏性(green-sensitive)乳膠,更上是第二層白明膠,最上

* $f/1.9$ 的意思,是光圈的最大孔徑等於焦距的 1.9 分之一。照相機中底片上的照度,與 $\left(\frac{d}{f}\right)^2$ 成比例, d 是光圈的孔徑, f 是焦距。若命 $d = \frac{f}{m}$,則照度即與 $\left(\frac{1}{m}\right)^2$ 成比例,或與 m^2 成反比例。所以 m 愈小,露光時間即可愈短。例如用 $f/8$ 透鏡,比用 $f/16$ 透鏡,露光時間可以短至四分之一。

一層是藍敏性(blue-sensitive)乳膠。這三層乳膠和兩層白明膠，一共祇有0.02毫米厚。

藍光在最上一層留下印象而被吸收掉。綠光透過頂上一層，對中間一層發生作用。紅光透過這兩層，對底層發生作用。三層乳膠上，分別攝得三種色光所感起的三張負片。軟片背面另有黑色的一層，可藉以防止反射，因而可以免除模糊不清之弊。

這種膠片的顯像手續，即使在設備完善的專用實驗室中，也是一件非常困難的工作。三張負片顯像後，印成正片，再分別染上顏色；底層是藍綠色，中間一層是苯胺紅色(magenta)，頂上一層是黃色。在銀幕上應當現出紅色的斑點，在底層上沒有顏色，因為原來負片上經紅光作用，而於顯像後留下來的黑點，在翻印正片時已被除去，而藍綠色染料不遇殘留的乳膠是附着不牢的。所以從放映機出來的白光，射到這個斑點上就透過底層而無任何色光的損失，此後再順次透過苯胺紅色及黃色的兩層，其中綠光與藍光被這兩層吸收掉，於是出現在銀幕上的就祇剩紅光了。這種顯色過程，雖然在技術上非常困難，它的結果卻很完美。

506. 【薄膜的顏色】 光從透明的薄膜，例如肥皂泡膜反射出來，往往產生鮮明的色彩，這個現象乃是光的波動說(wave theory of light)強有力證明之一。色彩的產生，是由所謂光波的干涉(interference)所致，現在我們就要用下面的實驗來予以說明。

將乾淨的鐵絲環浸在肥皂液內，取出後使環直立，環上即有在鉛直面內的肥皂膜一層。環與環上的薄膜，最好密封在裝有玻璃窗的箱子裏，以防止肥皂膜的蒸發。構成膜的液體，因重力的作用而向下流瀉，以致膜成楔形，上薄下厚。使太陽光一柱，或從幻灯機(圖25-14)出來的光柱，經由這肥皂膜 F 反射後落在白色的屏上。再將凸透鏡 L 放在如圖25-14所示的地位，俾可在屏上造成界限分明的像。此時我們可以看到，屏上有一串水平的彩色條紋。

把圖25-14中的概示圖察看一下，即知一部分白光在肥皂膜的表面 B 起反射，還有一部分則透入膜中而在底面 D 起反射，再透出膜外。假定在膜的某處，厚度恰是 0.0002 厘米，則在此處從底面反射出來的波前，比從表面反射的要落後 0.0004 厘米，即肥皂膜在此處厚度的兩倍。若光波的長度也是 0.0004 厘米，則兩個反射

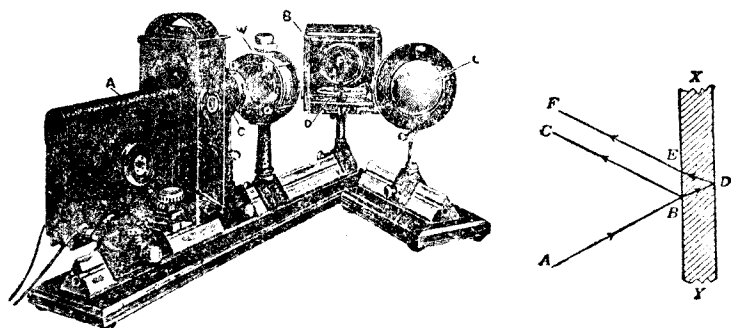


圖 25-14. 顯示肥皂膜中光的干涉現象所用的儀器及干涉概示圖。薄膜 F 密藏在 B 箱內以免蒸發。

波前同相 in phase，彼此互相‘加強’，與聲波的加強相仿（參閱第 420 節）。但若光波的長度是這段距離的兩倍（薄膜厚度的四倍，即 0.00008 厘米），則兩個反射波前異相（out of phase），彼此隔開半個波長，就要互相消滅了。這就是所謂光的‘干涉’（參閱第 419, 420 節）。

白光既由各種不同的色光混合而成，當然有各種不同的波長。又因為肥皂膜的厚薄處處不同，而發生干涉的是哪一種波長的光，要看肥皂膜的厚度而定，所以紅光的干涉發生於這一點，就不發生於另一點，而黃光的干涉發生於那一點，就不發生於這一點。凡是紅光發生干涉的地方，留下來的的是紅色的補色，一種帶藍的綠色。凡是黃光發生干涉的地方，留下來的的是黃色的補色，即藍色。因此，屏上就現出一串彩色條紋來，其中各色都是光譜上各色的補色。

有許多美麗的色彩，都因光波在很薄的薄膜中發生干涉而起。例如水面上的石油膜，金屬表面氧化物薄膜，以及孔雀的羽毛，它們的色彩，都從光波的干涉而來。

偏極化光

507. 【光波與聲波的比較】 我們已經知道，光波可在虛

無空間中進行，而聲波祇能在固體、或液體、或氣體內傳播。光波在空間中進行，速率非常巨大，每秒約 186,000 哩，而聲波在空氣中常溫下的速率，祇有每秒 1100 呎左右。舉個例來說，假定在月球上發生大爆炸，則在地球上離開爆炸 1.3 秒後，就可以看得見爆炸的火光。但若地球與月球之間有空氣存在，則從爆炸開始起，須經兩星期之久，地球上方纔聽得見爆炸聲。光波與聲波，其不同之點已很顯著，然而還有一個根本上的差別，一向遭人忽視，直到 1810 年，法國工程師兼物理學家馬呂士 (Malus)，偶然察看巴黎盧森堡宮 (Luxemburg Palace) 窗上反射的日光，因而發見了這個一向隱藏着的要點。據他研究的結果，反射光柱不依進行的方向成功對稱。這一種現象，我們若假定光波與聲波一樣，也是縱波，那麼就不能夠予以解釋，但若假定光波是橫波，即振動方向與進行方向成直角的波，那麼就可加以說明了。將長繩（或軟橡皮管）的一端縛牢在壁上，而用手拿住他端抖動，就可以得到橫波的例子，因為繩子上下振動而波則依着繩子向前進行（圖 25-15）。

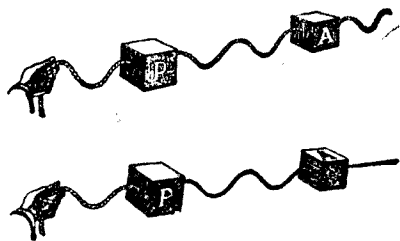


圖 25-15. 光的偏極化（機械式的比喻）

508. 【何謂偏極化光？】 光是一種振動，

這個假定，至今一直被大家認為是不錯的。究竟是什麼東西在振動，卻還沒有知道。不過從 1810 年以來，我們已在實驗方面獲得了證據，可以證實光波的振動方向，並不像聲波那樣順着射線，卻與射線成直角，而且在一切可能的方向之內；這就是說，上下，左右，介乎上下左右之間，都有。我們不但知道光是橫振動，而且有種種不同的方法，可以將平常的光改變成不平常的光，使

它的振動方向祇剩一個。經過這種改變後的光，就叫做偏極化光(polarized light)或面偏光(plane-polarized light)*，而光的這種改變則稱為光的偏極化(polarization of light)。

509. 【起偏極化的方法】 在每一可能的方向內作橫振動的平常光柱，將它改變成面偏光柱，方法雖然不止一個，但是在這裏卻祇舉一個例子。

使光柱通過一種叫做熱電石(tourmaline,它的組成是 $(\text{H}, \text{K}, \text{Na})_6\text{SiO}_5 \cdot (\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Mn})_3\text{SiO}_5$)的結晶體，則透過光即成為‘面偏光’。若在這‘面偏光柱’中插入第二塊熱電石，則當第二晶體之軸平行於第一晶體之軸時，光仍能透過第二晶體，但因受第二晶體的吸收作用，所以透出來的光比較暗淡，而且帶有顏色。但若將此第二塊熱電石轉過九十度，使兩晶體的軸互相垂直，則光即不能通過第二晶體而至屏上(圖 25-16)，此時我們說兩塊晶體互相交叉(crossed)。為什麼第二晶體的軸與第一晶體的軸互相垂直時，面偏光不能透過第二晶體，我們可以用圖 25-15

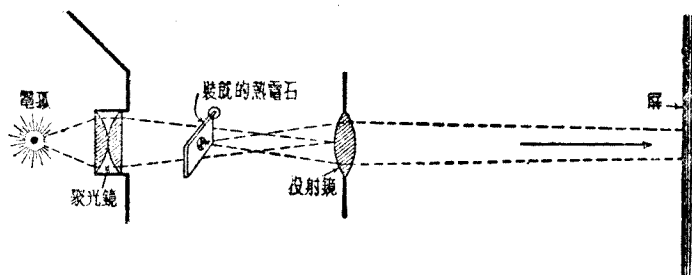


圖 25-16. 通過熱電石晶體的光柱投射儀器概示圖

所示力學上的比喻來解釋一下。當 P 的隙縫與 A 的隙縫平行時，繩子的振動通過 P 後也可以不受阻礙而通過 A 。但在 A 的隙縫垂直於 P 的隙縫時，繩子的上下振動傳到 A 時，即受到阻礙而不能通過去了。

過去我們祇知道有幾種天然的結晶體，例如冰洲石(Iceland spar, CaCO_3)，熱電石等，可以使光起偏極化。近來則已經有人發明了特殊的方法，可用人工製造大片的透明起偏材料(polarizing material)這種材料的商用英文名稱，叫做‘polaroid’，可以

* polarization 一字就其在光學上的意義而論，最近有人譯成‘專業化’，polarized light 譯成‘專業光’，而 plane-polarized light 則譯成‘面專業光’。

譯做‘起偏珞’。起偏珞的主要成分是醋酸纖維素〔cellulose acetate, 同賽璐珞(cellophane, 俗稱玻璃紙)很相像〕,其中鑲嵌着許許多多極細極細的針狀結晶體,彼此都互相平行。兩塊普通玻璃中間夾一片起偏珞,便成起偏玻璃(圖 25-17)。起偏珞約可讓 40% 的偏極化光透過,而將其餘部分吸收掉。

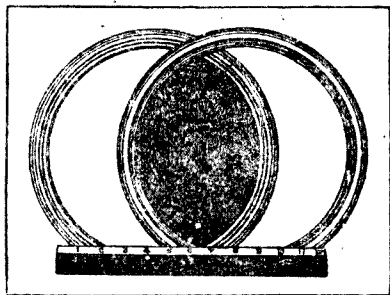


圖 25-17. ‘起偏玻璃’圖片,其中含有可以使光發生偏極化的微小晶體。兩圖片重疊處沒有光透過,因為兩片的晶體交叉之故。

510. 【偏極化光的用途】 利用偏極化光的顯微鏡,常被礦物學採用,藉以探礦。

近來還有工程師們用賽璐珞做成小模型,代表橋梁,齒輪,以及飛機的各部分,而使這些小模型受到脅迫,與真正的結構實際上所受到的相同。然後用偏極化光察看,就可以看出脅變的情狀。化學家久已採用一種儀器,叫做糖量計(saccharimeter 或 saccharometer),來檢視糖溶液的濃度。偏極化光通過糖的溶液時,它的振動方向即起變更,糖量計所利用的,即是這個現象。

偏極化光還有一件很有趣味的用處。在汽車的頭燈上裝置一種特殊的起偏玻璃,就可以減少晚間由頭燈送入目中的眩耀。因為駕駛員也可以戴上一副用同樣玻璃做成的眼鏡,否則便將擋風玻璃的一部分也用起偏材料來做。這兩層玻璃,頭燈上的與擋風玻璃(或眼鏡),它們的作用猶如節 509 節中所說的兩塊熱電石晶體,但駕駛員仍可靠着自己車上頭燈所發出來的光,看見自己的車子是在什麼地方駛行。如這種制度普遍採用,那

麼凡是對方來的汽車，它們的頭燈光就不至於使人眼花撩亂了。

輻射全譜

511. 【不可見的光譜】 太陽光譜投在屏上時，是可以證明它實際上伸展到可見部分以外的。利用靈敏的吸熱儀器（輻射計），我們已可推知，太陽不但將感動視神經的光波輻射出來，而且將較長的波向外發送，這長波雖然看不見，卻有很強的熱效應。在物理學上，這種輻射叫做**紅外射線**（infrared ray）。紅外射線（或稱紅外光）在現代科學工作方面，已占很重要的地位，因為有一種特製的照相膠片，對於這些長波有敏感的，已經發明了。利用這種膠片，可以在完全黑暗之中攝取物體的相片，祇要有充分的紅外射線，從該物體放出來（凡是不很冷的物體，雖不發出可見的光波，卻可發出充分的紅外射線，足以引起這種膠片的敏感）。更重要的是，利用紅外射線，可以隔着雲霧攝取遠處物體的相片，因為紅外射線是能夠穿透雲霧的。在晴天，有時候煙霧迷漫，以致損壞了遠處的景色，若用紅外線膠片，則仍可以攝取清晰的相片。

由於攝取太陽光譜的相片，我們還知道，太陽所輻射的波，其中還有**太短**而不能為人目所見的，能夠使平常的照相片起敏感。這種輻射在物理學上叫做**紫外射線**（ultraviolet ray）。又因為這些短波射線能夠引起化學變化，所以有時候，我們稱之為**光化射線**（actinic ray）。在植物組織的變化過程中，光化射線似有重大的作用。醫生往往用人工紫外射線（或稱紫外光），治療某某數種疾病。但是這些短波對於人類有益的，其波長的範圍似乎很小。

512. 【光的本性】 我們已經提起過，光是一種輻射能，以波動的方式在空間內傳播。換言之，光與熱，都是輻射能。然

而這並不是一成不變的學說。在十七世紀中，荷蘭物理學家惠更斯 (Huygens)，的確把光的波動說創立得很完美。但是他的敵手牛頓爵士，卻在英國堅持較舊的微粒說 (corpuscular theory)，依照此說，光是極微細的粒子流，從一切發光體按極高的速率四向射出。牛頓在當時的科學界中名高望重，所以他的‘薄命’的微粒說，仍得統制着科學思想，逾百年以上。直到十九世紀初年，英國的楊氏 (Thomas Young) 與法國的弗雷納 (Fresnel) 做過他們的著名實驗以後，波動說方纔爲大家所接受。

四十年前，科學家對於光的波動說都很滿意，因爲凡所觀測到的關於光的現象，似乎都可以從此說獲得合理的解釋。例如繞射 (diffraction)* 以及干涉，不假定光是一種波動，似乎就沒有了解這兩種現象的可能。不過前輩科學家爲了假定光是波動起見，的確不得不再假定空間之中，有一種傳送光波的介質，以便想像。這介質，叫做以太 (ether)。他們還得假定，以太不但瀰漫於星際空間，而且滲入一切物質的分子間的空間。然而以太究竟是什麼，這個問題卻依舊沒有解決。甚至於有無以太，都成疑問，因爲過去所作企圖證明以太存在的實驗，並沒有把正面的答案給我們看。

在最近三四十年裏邊，科學家在理論物理學的領域中有了很不平凡的收穫。收穫之一便是所謂相對論 (theory of relativity)，使許多科學家對於以太的存在發生疑問的，就是這相對論。另外一個收穫便是所謂量子論 (quantum theory)。這個學說，是把‘輻射能並非綿續量’這個觀念做根據的。此說一出，前人所遺簡單的波動說，似有大加修改的必要。例如關於光電管的實驗結果，有些若用修改過的微粒說來解釋，比用波動說簡單。不過初習物理學的人，目下自以承認波動說爲宜，因爲用這

* 光線在物體的角上微微彎曲，這現象叫做繞射，近來有人譯作衍射。

假說究竟可以很容易地解釋許多現象。所須記住的是，光的本性是什麼，這個問題至今尚未有徹底的解答。

第二十五章提要

白光由許許多多波長不同的光混合而成。

色的不同，對應於波長的不同，紅光的波就比紫光的長些。

可見光譜中各色光波的長度，約從 0.000068 厘米（紅）起，到 0.000040 厘米（紫）為止。

短波通過透鏡或稜鏡時，比長波偏折較多。

連續光譜由白熾的固體造成。

明線光譜由白熾的氣體造成。

吸收光譜或稱暗線光譜 (dark-line spectrum)，由白熾固體所發之光通過較冷氣體吸收層後造成。

物體的顏色要看到達眼中的波長而定。

薄膜的顏色，起原於某某波長因干涉而消失。

光的偏極化，證明光是一種橫振動。

問 答 題

1. 折射與色散有什麼不同之處？
2. (a) 仔細作白光通過稜鏡而起色散的概示圖。(b) 在這概示圖中添一稜鏡，將各色光再混合為白光。
3. 一柱白光透過冕牌玻璃稜鏡時，(a) 哪一種色光的偏向最大？(b) 哪一種的偏向最小。
4. 根據上題的答案，對於‘冕牌玻璃的折射率是 1.50’這句話，將加以怎樣的修正？
5. 白光垂直射入玻璃板時，哪一種色光最先透過？
6. 圖 25-18 是輻射全譜，也可以說是‘電磁波的全譜’。這裏面除可見光譜外，還有些什麼？
7. 我們可以說，‘可見光譜祇有一均左右’。這句話是什麼意思？
8. 在本生燈的藍色火簇中放一條清潔的鉛絲，而用分光鏡窺視。問所見的是何種光譜？

電 磁 波 全 譜

(照 對 數 線 尺 分 度)

頻 率	波 長 (厘米)	名 稱	來 源	檢 波 法
10^{22}	10^{-11}	宇宙射線	(尚未確知)	液體的電離
10^{21}	10^{-10}			
10^{20}	10^{-9}	γ 射線	原子核的衰變	比 X 射線具有穿性更強
10^{19}	10^{-8}			
10^{18}	10^{-7}	X 射線	快態電子突然停止	發光 化學作用 顯微的看鏡
10^{17}	10^{-6}			
10^{16}	10^{-5}	紫外射線 (紫外作用)	高熱物體及電離過程的輻射	發光 化學作用 氣體的看鏡
10^{15}	10^{-4}			
10^{14}	10^{-3}	可見光	熱體的輻射	光的感覺
10^{13}	10^{-2}			
10^{12}	10^{-1}	紅外射線 (紫外作用)	熱體的輻射	發熱偶 用特製膠片照相
10^{11}	1 厘米			
10^{10}	10^2	超短波	火花線放電 三種真空管發盪	粉末檢波器 晶體或真空管檢波器
10^9	10^3			
10^8	10^4	射電波		
10^7	10^5			
10^6	10^6			
10^5	10^7			
10^4	10^8			
10^3	10^9			
10^2	10^{10}	極長電波	線圈在磁場中旋轉	交流電的 檢波 檢儀
10				致電

圖 25-18. 輻射全譜

9. (a) 下列各燈的光源是什麼？(b) 各造成何種光譜？電弧燈；白熾燈；氙燈；鈉汽燈。
10. 連續光譜，明線光譜，以及暗線光譜，彼此有何區別？
11. 汞汽燈在有些地方是理想的燈，但在別的地方則因缺乏紅光而不適用。爲什麼不在燈的外面加上一個紅色罩子呢？
12. 白熾燈發出綠光麼？
13. 在沖洗照相片的暗室中，爲什麼用紅燈？
14. 在紅光之中，(a) 一朵紅花，(b) 一張綠葉，(c) 一張白紙，各現何色？
15. (a) 何謂‘日光燈’？(b) 日光燈有什麼用處？
16. 試作下述的簡單實驗：用藍色粉筆在黑板上劃一條線，再用黃色粉筆打一個叉，然後用手指擦去藍黃重疊的地方。此時可見手指上有鮮明的綠色。說明理由。粉筆裏有綠色的成分麼？
17. 英國的藍姆則爵士 (Sir William Ramsey) 發見太陽中有氫存在，幾年之後，纔知道地球上也有氫存在。它怎樣發見的？
18. (a) 何謂球面像差與色差？(b) 各用何法補救？
19. 將下列各種電磁波，依波長的次序排列，從最長的起：紅光波，射電波，紅外射線，橙色光波，X 射線，紫外射線？

複習問答題與計算題

第二十三章

1. 鈉汽街燈的發光率，約爲每燭光 0.25 瓦特，同樣大小的白熾電燈，約爲每燭光 0.60 瓦特。比較這兩種燈的效率。
2. 三尺遠的燈一盞與六尺遠同樣的燈兩盞，在書本上的照度哪個大些？
3. 硬紙片一張，尺寸是 $2\frac{1}{2} \times 3\frac{1}{2}$ 吋，離開桌面一呎，在水平的地位。燈一盞，在紙片中心上方 3 呎處。問紙片在桌上的影子，面積有多少？(假定燈光聚集於一點。)
4. 地上有水一小窪，一人站在離水 8 呎之處，望見水中的街燈像，街燈離開此人 28 呎。若此人的眼睛離開水面 5 呎，則街燈的高度是多少？
5. 在離開 60 燭光的電燈 2 呎之處曬印相片，適當的露光時間是 32 秒。若用同一負片，在離開 15 燭光的電燈 6 吋處曬印，應當露光多少時間？
6. 有 115 伏特 0.55 安培的電燈一盞，可發 90 燭光。(a) 問這電燈的發光率是每瓦特幾燭光？(b) 每燭光幾瓦特？(c) 將此燈掛在桌子上方多少遠處，桌面上可得照度 3 呎燭？
7. 適當的照度，從 2 呎燭到 10 呎燭不等。(a) 在哪些時候較小的照度已經夠用？(b) 在哪些時候需要較大的照度？
8. 白熾燈可以放在凹鏡前適當的一點，使一半大小的像映在屏上。若凹鏡的焦距是 15 厘米，則 (a) 燈離鏡多少遠？(b) 屏離鏡多少遠？

第二十四章

1. 離開一枚凸透鏡 10 吋的地方有一個物體，它的像在透鏡的對面，離透鏡 30 吋。(a) 這像是實的還是虛的？(b) 像放大多少倍(長)？
2. 畫一個很大的圖，表示光線在下述情形之下的近似路徑：(a) 斜着透過很厚的平行玻璃板；(b) 透過玻璃稜鏡，其折射稜角是 60° ；(c) 垂直射入 $90^\circ-45^\circ$ 稜鏡夾直角的一面。
3. 雙凸透鏡一枚，它的焦距是 9 厘米。物體必須放在離鏡多少遠的地方，纔可以得一個實像，(a) 它的高與物體相等，(b) 三倍於物體？
4. 白熾燈一盞，掛在桌子上方 5 呎之處。透鏡一枚放在燈與桌之間，在桌面上造成一像，大小四倍於燈。(a) 所用的是什麼透鏡？(b) 透鏡離燈多少遠？(c) 透鏡的焦距是多少？
5. 用幻燈放映舊片，燈非安置在離屏 50 呎的地方不可，舊片非從 3.6 吋放大到 6 呎不可。爲適合這些條件起見，透鏡非有多少焦距不可？
6. 某攝影師用 12 吋透鏡(即焦距 = 12 吋)，要攝取一人的全身相片，此人身高 6 呎，離透鏡 10 呎。照相片必須(a) 離開透鏡多少遠？(b) 有多少高？
7. 我們憑什麼斷定，造在眼睛裏網膜上的像是倒的？倘若真是倒的，爲什麼本來是正的物體看起來還是正的？
8. 患近視的人，(a) 他的睛珠太厚還是太薄？(b) 睛珠的焦距太長還是太短？(c) 能不能用凸透鏡補救，還是要用凹透鏡？
9. 用照相機攝取遠處一山的相片，當膠片離透鏡 8 吋時，所攝取的相片最爲清晰。若有一人離此照相機 8 呎，則膠片與透鏡間的距離應有怎樣的改變，纔可以攝取此人的相片，也很清晰？
10. 給你短焦距透鏡和長焦距透鏡各一枚。你怎樣可以用它們做成(a) 一架望遠鏡，(b) 一架複顯微鏡？
11. 有電影放映機一架，安放在懸樓裏，地位高出於銀幕中心的水平面。(a) 比較銀幕上畫面上下兩邊的寬度。說明理由。(b) 在這樣的情形之下，很難使像的焦點恰在適當的地位。爲什麼？
12. 活動電影裏正在移動的車輛，它們的輪子有時候似乎倒轉，有時候似乎不轉。怎樣會有這現象，說明其理。
13. 下表專用於雙凸透鏡，照抄一份，填補完全：

物體的地位	像的地位	實像還是虛像	像放大還是縮小	像正立還是倒立
在 ∞^*				
介於 ∞ 與 $2f$ 之間				
在 $2f$				
介於 $2f$ 與 f 之間				

在 f			
介於 f 與 l 之間			

* ∞ = 無限遠處, f = 焦距, l = 透鏡

第二十五章

- (a) 分光鏡上的隙縫有什麼用處? (b) 為什麼非很細不可?
- 比紫光波更短的波, 有什麼用處? 說幾種出來。
- 光的速率是每秒 300,000,000 米, 而引起紅色視覺的波長是 0.00068 毫米。紅色光波的頻率是多少, 即每秒有幾個波進入眼睛?
- 可見光譜中各色光的波長範圍是什麼? 在一毫米中可以排列幾個藍色光的波?
- 從汞弧燈發出來的光照射在人的手上時, 手即呈現異樣的顏色。說明理由。
- 用紅光照明時, 寫在白紙上的紅字看不出來, 寫在黑紙上的仍可看得出來。說明理由。
- 廣告牌一塊, 用深淺程度可成爲互補色的紅光與藍光照明。這兩種光自動地閃耀, 各別或同時照在牌上。 (a) 牌上紅字; (b) 牌上藍字; (c) 牌上白地被紅光單照時; 被藍光單照時; 被紅光與藍光同照時, 各引起什麼色覺?
- 凡是照相機, 除最貴的以外, 它們的‘鏡頭’都用幾枚分開的透鏡做成。什麼緣故?
- 列表比較光與聲, 特別注意介質與傳播情況, 波長, 以及速度。
- 用放大鏡察看圖 25-19 的彩印畫。所用印油的三種顏色與三原色有什麼關係?

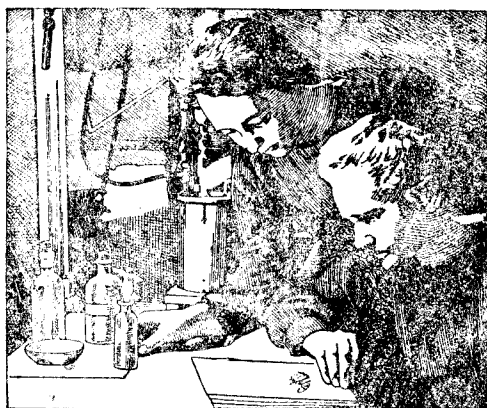
第二十六章

真空管與鐳

513. 【物理學史的新紀元】在1895年的時候，凡是設備完善的物理實驗室中，都新添了各式各樣玩具似的玻璃管，其中的空氣多少已被抽去一些。這些玻璃管叫做蓋斯勒管(Geissler tube)和克魯克斯管(Crookes tube)，因為發明人是德國的蓋斯勒(Heinrich Geissler)和英國的克魯克斯爵士(Sir William Crookes)。然而這些玻璃管並非祇是玩具而已。就在那一年，有一個德國的教授在巫次堡大學(University of Würzburg)用這些半抽空玻璃管，做了許多次實驗。別的教授們也做過相仿的實驗，但是都沒有獲得什麼新奇的結果。祇有這位德國教授，卻觀察到新奇的現象，因而在這方面繼續實驗下去。最後的結果是發見了一種新的射線，他稱之為X射線(X ray)，因為他不知道這些射線究竟是什麼東西。不過這位德國教授的大名，倫琴(Wilhelm Konard Roentgen)，就此傳遍了全世界，而大家為紀念X射線的發見人起見，都把這些射線叫做倫琴射線(Roentgen rays)。

倫琴射線的發見，使巴黎的貝格雷(Henri Becquerel)跟着發見某種礦物也放出奇特的射線，這些射線同倫琴射線有些相像。居禮夫婦(M. and Mme. Curie)繼續研究這些射線，因而發見了鐳以及錒的各種輻射。後來又有湯姆生爵士(Sir J. J. Thomson)用他的弟子若干人，在英國劍橋卡文迪許實驗室

(Cavendish-Laboratory) 中，從實驗上的研究，鑑定了電子(electron)乃是‘電的原子’(atom of electricity)。凡此種種發見，引起了更多的實驗，對原子的結構予以熱烈的研究，最後又將研究的攻勢，集中於原子的核。



居禮夫人(Mme. Marie Skłodowska Curie, 1867-1934)和她的女兒朱力奧夫人(Mme. Joliot) 居里夫人是波蘭人，嫁給她的同學居禮(Piérre Curie)後，共同研究放射性物質，非常努力。1898年，她發見了鐳，震動全世界。釷也是她發見的；她把這個元素叫做 polonium，來紀念她自己的祖國波蘭。朱力奧夫人和她的丈夫，在人造放射性方面，有很大的貢獻。

約在十九世紀末年的時候，應用物理學(applied physics) 方面的研究範圍，也廣大地展開。例如電訊交通，就從赫芝(Hertz)，自朗里(Branly)，以及馬可尼(Marconi)等的實驗結果，獲得了重大的推進。所謂射電工業或無線電工業(radio industry 或 wireless industry)，便從此產生。在本書的最後的兩章裏面，我們打算把現代物理學上這些奇妙的進步之處，約略敘述一下，尤注意於原子的結構，以及射電通訊(即無線電報)。

稀薄氣體中的放電

514. 【產生電火花的電壓】 使電火花在兩個電極間跳躍而過，所需的電壓要看幾個因子而定——電極的大小，兩電極

間的距離，以及周圍的氣壓，都是。使電火花在兩個尖銳的電極間跳過，比在兩個球狀電極間通過，所需電壓要小一些。例如相距一厘米的兩個尖銳電極，其起花電壓(sparking voltage)大約是 800 伏特，而相距一厘米的兩個直徑一厘米的圓球電極，其起花電壓就要高達 30,000 伏特左右。電機工程師已有一致的協議，規定幾個電花隙距，用以估計很高的電壓。

515. 【在部分真空中的放電】 下述的實驗，可以使我們看到大氣壓力對於起花電壓的影響。取 3 呎或 2 呎長兩頭封口而裝有電極的玻璃管一根，同一隻感應圈連接起來，如圖 26-1 所示。這玻璃管的一端有一根支管，與一具優良的真空抽機通連。當感應圈初起作用時，放電過程在線圈的兩端 x 與 y 之間進行，這兩端的距離祇有幾毫米。但在管中空氣抽出一部分，抽到管內氣壓降低到祇有水銀柱 10 毫米左右後，放電即不通過短隙 xy ，而取道長得多的管子。由此可知，氣壓減低時，起花電壓也降低。

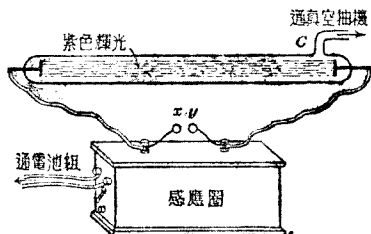


圖 26-1. 部分抽空管中的放電現象

使兩電極間的氣壓減低，即可使電花通過兩極間的空隙容易一些。但當氣壓減低到某一程度之時，電花的跳躍又開始困難起來。若真空管的抽空程度到達現在所能到達的最高點，則電花簡直無跳過的可能。

抽空程度愈進愈高之際，真空管中外觀的變化，是十分有趣的。起初，放電的過程沿着幾條閃爍生輝的線進行。氣壓逐漸降低，這些放電的線逐漸膨大，終於充滿全管，發出穩定的輝光。抽空程度再行提高，就有一片柔和的絲絨似的光輝，遮蔽着陰極的表面。同時，管子的大部分布滿了一排層次井然的輝光區，直伸展到陽極的近旁。這些輝光區叫做陽極區(positive columns)的。

在都市的街道上入晚常見的所謂霓虹廣告燈(neon display

sign), 也不過是彎成文字或圖畫的長玻璃管, 兩頭封口, 裝有兩個電極, 其中空氣抽掉, 換上氣壓很低的氖氣罷了。這些管子的橙紅色光輝, 便從放電而來。它們所消耗的電很少, 不過電壓很高, 這高電壓可以得之於小型的昇壓器(step-up transformer)。在氖管中摻入各種氣體或蒸汽, 可得各種不同的顏色

516. 【氣體的電離】 為解釋抽空玻璃管中的放電現象起見, 我們可以想像那些遺留在管中的氣體分子, 不是失去電子, 便是獲得電子; 這就是說, 管內的殘餘氣體已起電離(ionization)。因為我們已把足數的氣體分子從管中抽去, 造成了部分真空, 所以這些離子(ions) 的自由行動, 都擴大了範圍。於是它們的速率增加, 撞在別的分子上把被撞分子的電子撞掉, 因而產生了更多的離子。負擔放電責任的, 就是這些離子。

517. 【陰極射線】 玻璃管的抽空程度, 提高到壓力祇等於水銀柱 0.01 毫米左右時, 陽極輝光變得非常暗淡, 而陰極周圍的暗區則被一種不可見的射線突破。不論管內的陽極在什麼地位, 這些不可見的射線常與陰極的表面差不多成直角。這種從陰極出來的輻射, 叫做陰極射線(cathode rays), 可在幾方面現出它的性能: 第一, 射在玻璃上產生黃綠色的熒光(fluorescence); 第二, 可以焦聚而生強熱; 第三, 依直線進行, 若有金屬物體遮斷它的路徑, 即有界限分明的影子在玻璃一端現出。

用圖 26-2 所示的真空管, 可以證明陰極射線有熱效應。感應圈所引起的放電從管頂到管底通過此管時, 陰極射線即焦聚在一薄塊的鎢上, 這塊鎢就變成紅熱。

用另外一種形式的真空管, 圖 26-3, 可以證明陰極射線的直進。放電進行時, 管壁上即現出一個鋸製十字的影子。

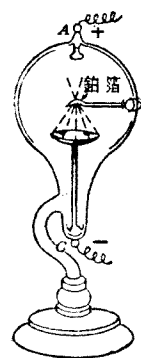


圖 26-2. 陰極射線的熱效應

518. 【陰極射線是什麼?】 用圖 26-4

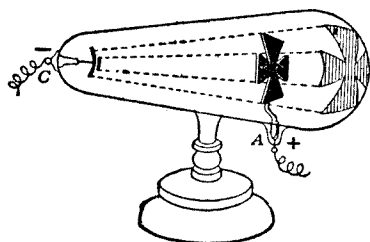


圖 26-3. 陰極射線在玻璃壁上所投的影

所示的真空管，可使扁平的一束陰極射線，通過鉛屏 mr 的隙縫，投射在熒光屏 f 上，這屏的地位與陰極射線的進行方向微有偏斜，故屏上現出一條發熒光的直線。若取 U 字形強磁體放近管的一側，使磁場方向與陰極射線方向交成直角，則從熒光屏上的曲線，而知陰極射線的進行已起偏轉，宛如輸送電流的導線在磁場中起運動一般。從偏轉的方向看來，陰極射線非為電子流不可（參閱第 270 節）。又若將兩塊帶電的板（一正一負）放在管子的兩側，產生一個貫穿管子的靜電場，則也可引起陰極射線的偏轉。這偏轉的方向，又指示陰極射線非為電子流不可。

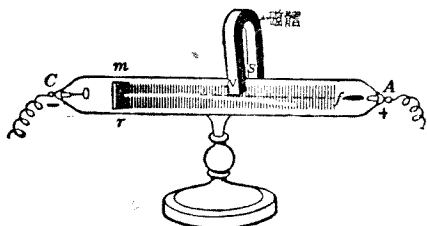


圖 26-4. 用 U 形磁鐵使陰極射線彎曲

從這個實驗以及其他的實驗，我們相信陰極射線乃是電子流，從陰極表面發射出來，速度非常之高。

英國的物理學家湯姆生爵士，曾從陰極射線的各種實驗，估計每一個電子的質量約等於氫原子的 $\frac{1}{1835}$ ，且估計其速度約等於光速的十分之一到三分之一。每個電子所帶的負電，經假定為等於電解液中氫離子所帶的負電 (1.591×10^{-19} 庫侖)。

519. 【X 射線】陰極射線擊中鉛製的靶子(圖 26-5)時，

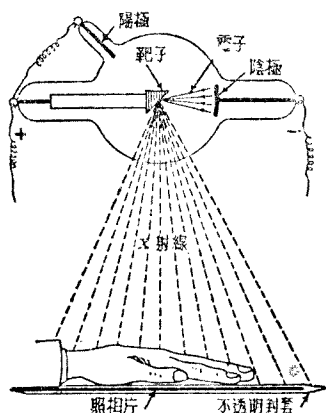


圖 26-5. 用 X 射線管攝
取手的透射照片

即有 X 射線從這靶子發出來。X 射線對於照相片的效應，頗與太陽光相同。但是 X 射線還能夠貫穿許多不透明物質，例如木頭，厚紙板，以及人體，這就不是平常的可見光所能及的了。這些射線在磁場中不受影響，所以它們與陰極射線並不相同。

將照相片包在不透明的封套裏，而將手覆在封套上，然後給 X 射線照射(圖 26-5)，即可得圖 26-6 所示的透射相片 (radiograph)。這種相片之所以能夠攝取，是因為

X 射線對各種不同物質的貫穿性不同之故。

陰極射線落在任何固體上，總有 X 射線產生，而從該固體發送出去。現在我們已經知道，X 射線也是‘波’與光波有共通的性質，不過波長卻短得多(參閱圖 25-18)。發射 X 射線的真空管內，氣壓愈低，兩電極間的電壓愈高，則其所發 X 射線的貫穿性也愈強。圖 26-7 所示的柯立治 (Coolidge) X 射線管，其中的空氣已被盡量抽去。為獲得充分必要的

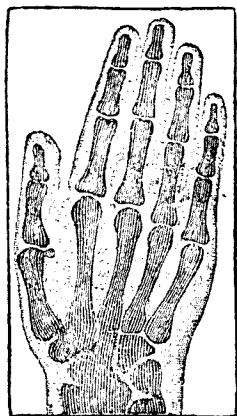


圖 26-6. 手的透射相片

電子起見，特用鎢質螺線製成陰極，另外用 12 伏特的電池組 B，送電流通過鎢絲，使它發熱。這樣的陰極叫做熱燈絲陰極 (hot-filament cathode)。鎢絲的周圍套着一個鉍製的管子，它

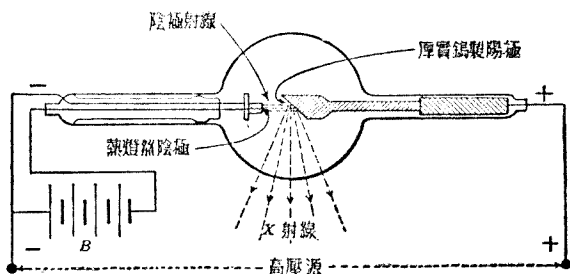


圖 26-7. 柯立治 X 射線管的概示圖

的用處是使電子流焦聚於鎢製的陽極上。調節陰極的溫度，可以控制 X 射線的強度。又因 X 射線的貫穿性，正比例於電子的速率，所以變動兩極間的電壓，就可以控制 X 射線的貫穿性。

放射 性

520. 【放射性】 法國人貝格雷在 1896 年發見，瀝青鈾礦以及其他含有鈾素的礦物，常在放出類似於 X 射線的射線。若用黑紙裹着照相片，靠近這種礦石，而將銅幣或其他不透明物體，擋在包裹上，即可攝得銅幣等物的黑影相片 (shadow picture)。含鈾礦物所具的這種性質，叫做放射性 (radioactivity)。這些神祕的射線，也可以用檢驗 X 射線的方法，予以檢驗，即利用其對於照相片的效應，射擊固體產生熒光的效應，以及使氣體電離的效應。最後一種效應，很容易予以測定，祇要觀察帶電的金箔驗電器中箔的下降率 (圖 26-8)，就成。

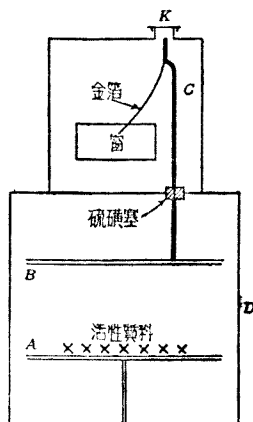


圖 26-8. 試驗放射性用的金箔驗電器

521. 【鐳的發見】 貝格雷發見

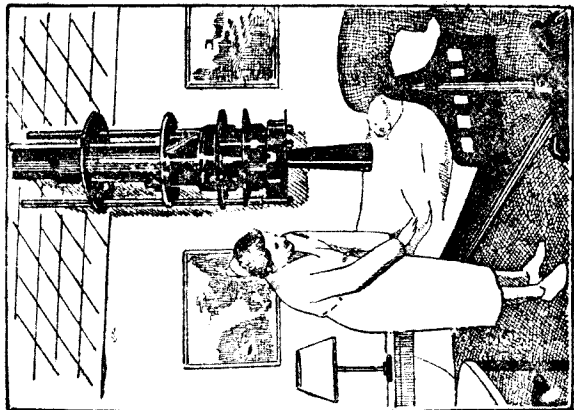
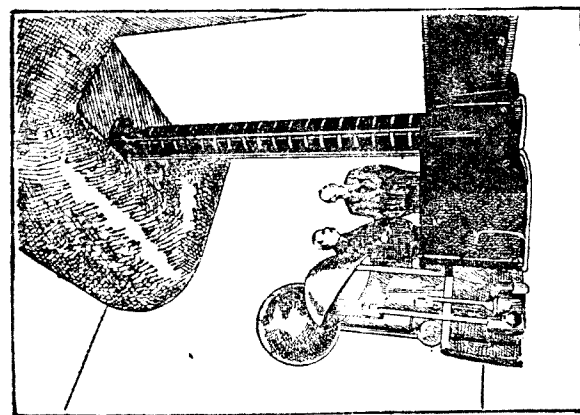


圖 26-9. 美國波士登(Boston)亨丁登醫院(Huntington Hospital)的巨型X射線發射器,供治療病患之用。該器有靜電起電機一架(參閱第 277 節,由麻州理工大學教授范德格拉甫予以設計。X射線管長 16 呎,固定不可移動,所以在患者受照射時,必須先將病牀昇高

這些神祕的射線以後，居禮夫婦立刻跟着發見，比鈾略輕的重元素釷，也有同樣的性質。然而他們又發見，產於奧國某地的瀝青鈾礦，它的放射性比同重量的純鈾與純釷都強，因此頗感驚異。這種特別的瀝青鈾礦，明明含有另外一種物質，它的放射性比鈾與釷都強得多。經過好幾個月的艱苦工作以後，居禮夫人終究從許多噸的瀝青鈾礦裏面，提出了極少量而且頗為純淨的這種新物質。這種新物質經她鑑定後，的確是前此所未知的化學元素。她給這新元素題了一個名字，就是鐳 (radium)。鐳的放射性，四百萬倍於同重量的純鈾。

平常市上出售的鐳以及用的鐳，都不是淨純的金屬鐳，而是與溴化合的鹽，外表很像普通的食鹽。這種鐳鹽約 1.7 克，含有純鐳一克。

522. 【從鐳發出來的三種射線】 居禮夫人發見鐳的後一年，英國羅德福勳爵 (Lord Ernest Rutherford) 鑑定鐳的輻射之中，有兩種不同的粒子。這兩種粒子所集成的射線，羅德福稱之為亞爾法射線及比忒射線。那個時候，羅德福在加拿大蒙特雷 (Montreal) 的麥吉爾大學 (McGill University) 當教授。不多幾時以後，從鐳發出的第三種射線，即茄瑪射線，亦經發見。

若取鉛一塊，挖一小穴，穴中嵌入鐳鹽少許，則用靜電場便可以將鐳所發出的三種射線分開 (圖 26-10)。亞爾法 (α 射線 (alpha ray) 的貫穿性很弱。由實驗知道，這射線乃是帶正電的氦原子所集成。比忒 (β) 射線 (beta ray)

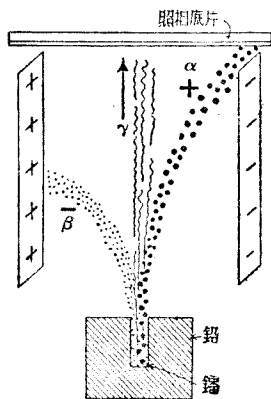


圖 26-10. 用靜電場分開三種輻射

莫士萊 (Henry Gwyn-Jeffreys Moseley, 1887-1915) 英國物理學家。曾證明元素的原子序數與其 X 射線譜之間, 有簡單的關係存在, 並求得各種金屬的 X 射線譜



羅德福勳爵 (Lord Rutherford, 1871-1937) 英國物理學家。在英國卡文迪許實驗室 (Cavendish Laboratory) 主任多年。得 1908 年諾貝爾化學獎金。發見亞爾法 (alpha) 射線及比忒 (beta) 射線。首創原子有核的學說, 首先用亞爾法粒子 (alpha particle) 轟擊氮核而得同位氧素 (原子量是 17)

的貫穿性比較強得多。這射線實在不過是一注電子，正同真空管中的陰極射線一般無二。茄瑪(γ)射線(gamma ray)不受靜電場的影響。這射線乃是非常短的 X 射線。鐳對於照相片的作用，就是從茄瑪射線來的。

三種射線都可使空氣電離，故放射性的強弱可由電離程度來決定，而電離程度的高低，又可由驗電器的放電率來決定。據實測結果，亞爾法射線所引起的空氣電離程度比比忒射線大，而比忒射線所引起的比茄瑪射線大。但就貫穿性而論，則亞爾法射線遠不及比忒射線與茄瑪射線。亞爾法射線透不過幾張紙，比忒射線卻可透過一毫米或二毫米以下的鉛板。至於茄瑪射線，則幾吋厚的鉛板也不能將它全部擋住。

523. 【威爾遜霧室】 英國劍橋大學教授威爾遜(C. T. R. Wilson)在 1912 年發明了一件巧妙的儀器，用這儀器可以看見亞爾法粒子的徑跡，並攝取其相片。大家都知道，空氣中的水分已達飽和程度時，若使空氣突然膨脹，以致冷卻，那麼就有霧生成。霧中的大小水滴，通常凝結在塵粒上。若空氣中潔淨無塵，則小水滴便凝結在帶電的空氣分子(離子)上。威爾遜的這件儀器，就是根據這個原理發明的。在不漏氣的密閉容器中，有潔淨無塵而含水已達飽和程度的空氣。用巧妙的機構使空氣突然膨脹，同時使少許放射性資料(radioactive material)所發的亞爾法射線，射入潮溼空氣之中。每一條射線產生一串離子，

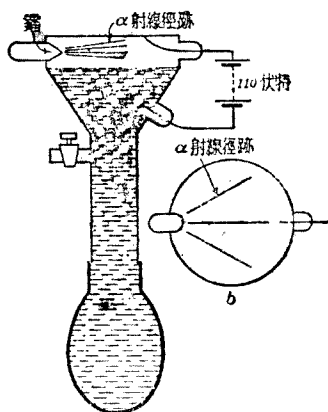


圖 26-11. 最普式(Knipp form)威爾遜霧室

在這些離子上都有小水點凝結。於是我們就可以看見亞爾法粒子的徑跡。這儀器，我們稱之為威爾遜霧室 (Wilson cloud chamber)。

如圖 26-11 所示，乃是一種很簡單的霧室，叫做森普式 (Knipp's form) 霧室。把下端的橡皮囊一擠，上端圓柱形室內的空氣即受壓縮，把橡皮囊放鬆，空氣便急速膨脹。在細金屬絲上面的放射性質料，把亞爾法射線送入這膨脹着的溼空氣中。水用墨汁染黑，襯着這黑地，白色的一條條徑跡，看得很清楚。

如圖 26-12 所示，便是用威爾遜霧室 攝取的亞爾法粒子徑跡的相片。由圖可見，這些徑跡似乎都很直。靠近徑跡的起點，偶而有曲折的地方。這也許是因為亞爾法粒子直接撞着了原子核的緣故。

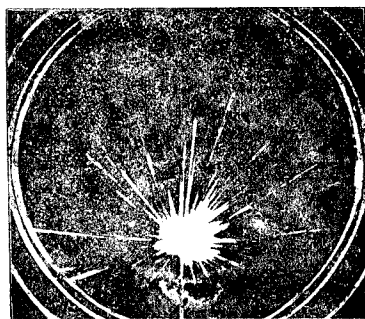


圖 26-12. 威爾遜霧室中所見的亞爾法粒子的徑跡

524. 【鐳的用途】

鐳所放出來的輻射，其作用是非常之強的。用這些射線也可以攝取透射相片，與用X射線完全相同。鐳的射線對於有生命的東西，作用很強烈。因此人們都有一個希望，希望鐳可以治療種種疾病。有幾種癌症，用鐳來治療，的確頗見功效。鐳除放出三種射線外，還在繼續不斷的放出所謂鐳射氣 (radium emanation)。通常用來治病的乃是這鐳射氣，並非鐳的本身。每天用抽機從密藏鐳鹽的容器中抽得鐳射氣，而將它收集封存於細小的玻璃管內，然後把這些玻璃管插入癌塊附近的肉中。它們所以能夠治療癌症，是因為所發出的射線，毀壞有病的組織，比毀壞健全的組織快得多之故。

將不純淨的鐳或其他放射元素 (radioactive element)，同硫

化鋅混合起來，就可以製成所謂熒光漆(luminescent paint)，因為鐳的射線遇見硫化鋅，即產生熒光。熒光漆塗在鐘面或錶面上，夜間可以閃發輝光。電燈開關或門柄上敷塗熒光漆，可免暗中摸索之苦。

525. 【鐳所放出的熱能】 鐳及鐳鹽還有一個奇特的性質，即是繼續不斷的放出熱來，它們的溫度，往往比四周的物體高出三度到五度。從精細的實驗我們知道，一克鐳每小時約放出100卡的熱量。鐳將熱能放出，雖然進行得很慢，卻須經過很久很久的時期，方纔停止。據估計，一克鐳在長時期中所放出的熱能總量，約有燃煤一克所生熱能的300,000倍之多。

526. 【人造放射性】 居禮夫婦因為發見了鐳，就在1903年獲得了諾貝爾獎金 (Nobel prize)。到1934年，居禮的女婿朱力奧 (Frederick Joliot) 和女兒伊倫娜 (Irene Curie-Joliot) 發見人造放射性 (artificial radioactivity)，明年他們也得到了諾貝爾獎金。所謂人造放射性，簡單地說來，就是用亞爾法射線轟擊某某幾種物質，使它們變成放射質 (radioactive substance)。亞爾法粒子 (即氦核) 鑽進了被轟擊的原子核，該原子核的內部即起一種變化，因而產生了一個新放射質的原子。例如用亞爾法粒子轟擊鋁核，就產生放射磷 (radioactive phosphorus，或稱射磷)。

第二十六章提要

陰極射線是帶負電的粒子流，這些粒子叫做電子，從陰極表面射出。

X射線產生於陰極射線擊中固體 (靶子) 之時。這種射線與波長極短的紫外射線相類，能貫穿不透明的物質而使照相片起化學作用。它們貫穿不同物質的厚度，大約與物質的密

度成反比例。

放射質自行放出三種射線：

- (1) 亞爾法射線，帶正電的氦原子流；
- (2) 比忒射線，帶負電的電子流；
- (3) 茄瑪射線，非常短的 X 射線。

鐳放出熱量很慢，但是繼續不停，為時甚久。

問 答 題

1. 感應圈的兩尖端間電花長 6 吋，電壓大約是多少？
2. 陰極射線在磁場中起偏轉，憑這現象，為什麼可以知道這射線是電子流？
3. 將磁體放在如圖 26-4 所示的地位，但 *N* 極與 *S* 極對換，則陰極射線將怎樣偏轉？（參閱圖 19-5）
4. 怎樣可使陰極射線聚焦？
5. 陰極射線與 X 射線有什麼差別？
6. 陰極射線管與 X 射線管有什麼不同？
7. 說明牙科醫生怎樣利用 X 射線。（訪問牙科醫生）
8. 管理 X 射線管的人，應該怎樣預防，以免受到射線的損害？
9. 除鐳以外，尚有哪些放射質是你所知道的？
10. 所謂‘有放射性’是什麼意思？
11. 怎樣檢驗一種物質有沒有放射性？
12. 用什麼方法可測放射性的強弱？

第二十七章

射電通訊

電諧應

527. 【來頓瓶的振盪放電】 美國物理學家亨利 (Joseph Henry) 在 1842 年注意到，當來頓瓶經由圍繞着一枚鋼針的線圈而放電時，鋼針即受磁化。但是除此以外，他還發見一個驚人的現象，即來頓瓶的充電雖然正負不變，鋼針的一端卻時而指北時而指南。他爲

了解釋這現象，就假定放電時線圈中的電流，不是直流而是來往改向很快的交流，並且假定這電流的

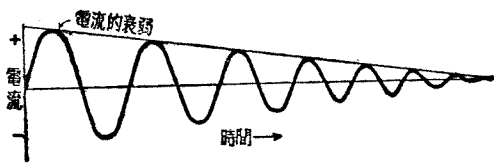


圖 27-1. 來頓瓶放電時產生振盪電流，這電流逐漸衰弱，趨向於零

振盪，逐漸衰弱，其情形如圖 27-1 的曲線所示。據此假定，則在初放電時，電流忽來忽往，強度相差無幾，而時間相隔甚短，所以鋼針的一端忽成 N 極忽成 S 極，以致來不及偏轉。如是一次一次的交變，直到最後一次的電流尚能使鋼針磁化到可以察覺的程度時（下一次的改向電流即不能使鋼針磁化到可以察覺的程度），鋼針即依該一次振盪的方向起磁化而偏轉。

不多幾年以後，英國大物理學家兼電機工程師愷爾文 勳爵 (Lord Kelvin)，用數學的理論證明，來頓瓶的放電非振盪不可。

最後到 1859 年，費得森 (Feddersen) 用快速旋轉鏡攝取電花的相片，得告成功。從這個實驗，可以算出一次振盪的時間。這時間非常之短，從一千分之一秒到一千萬分之一秒不等。

528. 【機械的諧應】 在研究聲波的時候我們早已知道，兩個物體的振動頻率相同，則此二物體即有起共振的傾向。兩個振動體的這種性質，我們稱之為諧應 (resonance)。

取橡皮管一條，張緊在兩個支柱之間，並用粗細長短質地均相同的兩條線，在這橡皮管上掛兩個等重的物體 x 與 y ，成兩個相同的擺，如圖 27-2 所示。若命一個擺 y 振動，則還有一個擺 x 不久便開始振動，能量逐漸由第一個擺遷移到第二個擺上，第一個擺終於停止不動。不過這個現象，祇在兩擺的週期 (或頻率) 完全相等時，纔能夠發生。換句話說，機械能的遷移，諧應乃是必要的條件。

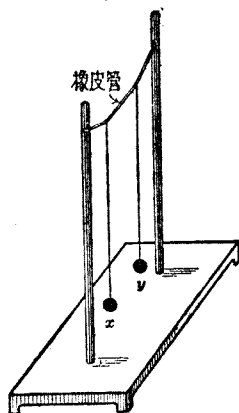


圖 27-2. 兩個擺的機械的諧應

529. 【電諧應】 容電器 (來頓瓶本是容電器) 放電時所生的振盪電流，它的頻率要看容電器的電容，以及電流湧來湧去所經電路的電阻與電感而定。因此，若有兩個來頓瓶電路，它們的電容，電感，以及電阻卻相同，那麼它們的頻率也相同，而且這個電路可以影響到那一個電路。

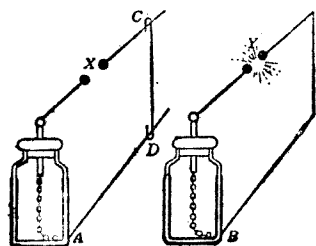


圖 27-3. 電諧應

如圖 27-3 所示，設有兩隻來頓瓶 A 和 B ，大小相同，瓶壁的質地與厚薄也都相同。 B 瓶上連着一個長方形的電路，由粗銅線構成，一端與瓶外的塗層相連，另一端與瓶的銅球相連。電路上有一個小小的電花隙 Y 。在 A 瓶上也連着一個相仿的電路，但長方形的一邊 CD 是活動的，可以拉進拉出，改變長方形的大小。這第二個電路上也有一個電花隙 X ，但是很短很短。

使這兩個長方形電路相離一呎，並使它們互相平行，然後用感應圈發電花，跳過 Y 隙。若將 CD 移動到一個適當的地位，則在電花跳

過 B 瓶電路上的 Y 隙時, X 隙中也有小電花發生。但若將 CD 從這地位稍稍向內或向外移動, X 隙的電花立即停止。

現代的射電通訊(radio communication),莫不有賴於這個現象。這就是所謂電諧應(electric resonance)。當兩個電路互成諧應(in resonance)的時候,能即可從第一電路遷移到第二電路。即使兩個電路之間並無聯絡,第二電路中也因為起了諧應而有電流發生。欲覓取這個現象的解釋,我們應當先注意,來頓瓶每放電一次,連接瓶內瓶外兩層的電路中,即發生不同於平常交流的振盪電流。這電流的頻率,高達每秒數千乃至數百萬週,遠非普通交流的每秒 60 週可比。此外,每振盪一回,電流即減弱一些,這也是與平常的交流不同之處。這樣的交流,叫做減幅振盪電流(damped oscillatory current),如圖 27-1 的曲線所代表的便是。

530. 【電波】 每有頻率很高很高的交流發生時,不問它是來頓瓶放電而生的減幅振盪電流,或特種儀器所生的穩定振盪電流,其效應,乃是在周圍空間內激起了電波(electric wave)。這電波,可將能從此一電路傳給另一起諧應的電路,好比前述實驗(圖 27-2)中的橡皮管一般。第一個把電波檢驗出來的是德國物理學家赫芝(Heinrich Hertz),時在 1888 年。因此,這種波又叫做赫芝波(Hertzian wave),不過通常我們稱之為射電波(radio wave)或無線電波。

經研究後,我們知道,若將來頓瓶換成一條天線(antenna,用絕緣體高

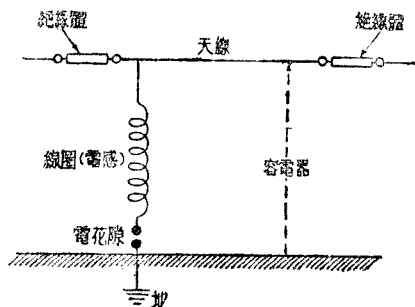


圖 27-1. 天線及地的作用猶如一個容電器

高張緊在兩根直立支柱之間的水平銅線)和地面,如圖 27-4 所示,則一樣強的電流可以激起強得多的電波。天線與地面無異於一個巨大容電器的兩塊板,而空氣則是兩板之間的介體。連接天線與地面的,通常並不是單單一匝銅線,而是一個線圈。

射電通報術

531. 【射電廣播與射電通報】 從 1920 年以來,廣播事業急劇發展,所以無線電收音機已經成了普通的家用器具之一。我們一聽見提到收音機的時候,就會自然而然地立刻想到,有演講或音樂從揚聲器(俗稱喇叭)中出來。可是我們別忘了,在許多年以前,還沒有所謂廣播,那個時候還祇能夠靠射電通報術(radiotelegraphy)或無線電通信術,把消息傳給海上的船隻,或傳過海洋而達彼岸。直到現在,射電通報術依舊用途很廣。我們有時仍會聽到,收音機中有一陣陣長長短短的啾啾聲,在那兒按照規定的電碼,拼成字句,給懂這電碼的人收聽。我們若欲了解音樂與演講的發送與接收,那麼,我們非對於射電通報術先有了解不可。

最初的射電發報機,都用一個感應線圈,以及一個電花隙,來使振盪電流發生。這振盪電流當然是減幅的(第 527 節)。後來有人發見,連續振盪電流(continuous oscillatory current,即不減幅振盪電流)更適宜於產生無線電波。但若用發電廠中所用那樣的發電機,來產生頻率充分高的交流,是非常困難的,所以這種通訊方法,起初祇限於大規模的高商業機關。

現在已可用特殊設計的真​​空管,來產生連續高頻率交流,需要什麼頻率,就有什麼頻率。這些真空管的作用,非常令人滿意,而且效率很高,所以很快地代替了其他一切射電發送裝置。

532. 【無線電波與光波】 無線電波進行的速率·與光波

赫芝 (Heinrich Rudolf Hertz 1857-1894) 德國物理學家。因研究電磁波而享大名。他的研究，在實驗方面證實了馬克士威 (Maxwell) 所創應當有電磁波存在的學說，因而奠定了現代無線電學的基礎



馬可尼 (Guglielmo Marconi 1874-1937) 意大利工程師。發明商用無線電報。在 1899 年，英國與法國之間開始用無線電報通訊。在 1901 年，英國與美國之間開始用無線電報通訊，通訊距離長達 2000 哩以上

相同，即每秒 300,000,000 米。無線電波與光波，有同樣的性質，但前者的頻率則比後者低得多。下列的公式，可以適用於無線電波，光波，以及聲波：

$$\text{速度} = \text{頻率} \times \text{波長}.$$

因此，300,000,000 (米/秒)

$$= \text{頻率(週/秒)} \times \text{波長(米)},$$

$$\text{或頻率(仟週/秒)} = \frac{300,000 \text{ (仟米/秒)}}{\text{波長(米)}}.$$

舉個例來說，若某廣播電臺所用的波長是 300 米，則其頻率即是每秒 $\frac{300,000}{300} = 1000$ 仟週（即一百萬週）。若以此與 0.00006 厘米（即 0.0000006 米）的光波比較，則後者的頻率是 $\frac{300000}{0.0000006} = 5 \times 10^{11}$ （即 5 後面有 11 個零）仟週。所以光波的頻率是無線電波的 5×10^8 倍。

533. 【可調接收電路】 用兩隻來頓瓶做實驗的時候，第二隻瓶以及它的電路與短電花隙，其作用猶如檢驗有沒有無線電波的一種裝置。這當然是一種很簡陋的裝置，決不能用在商業方面，因為它的有效接收距離不過是幾呎罷了。現代無線電接收機，有四個主要部分，這四部分是，可調電路(tuned circuit)，天線(antenna)或環形天線(loop)，檢波器(detector)，以及電話聽筒(telephone receiver)。現在順次講述於下。

所謂可調電路，不過是電感(線圈)與電容(容電器)串聯而成的電路。這樣的一個電路，它的電諧應看電感與電容相乘之積而定，因此，由於變更電感，或變更電容，就可以將電路調諧(tune)，所謂調諧，即使其對於外來的某一電波，起最高程度的諧應。

在來頓瓶實驗裏面，電感得之於一圈銅線，而電容則得之於瓶。將第二瓶電路的可動部分 CD 移動(圖 27-3)，目的即在於調諧。 CD 移動時，連在第二瓶上的銅線環大小改變。因此，電路中的電感改變，改變到適宜的程度時，電諧應就發生了。祇在這電路諧應於第一瓶的電路時，電花方纔發生。

在現代接收機中，慣用固定的電感，這電感，得之於一個線圈（並非一匝銅線）；至於調諧，則變更電容即可。因此，必須用一種可變容電器（圖 16-10），以代來頓瓶。

534. 【天線與地】 天線與地線(ground connection),也是所需要的主要部分,不過並不是非有不可的。在接收機與發送機中,天線與地的作用,都像一具大型容電器的兩塊板。天線與地,中間由一個線圈通連。這線圈,又是一具空心變壓器(air-core transformer)的原線圈,這變壓器的副線圈,就是可調電路中的線圈(圖 27-5)。這裏的變壓器,必須用空氣心,而不可用電燈變壓器中的鐵心;因為要使鐵的磁性改變方向,快到充分的程度,足與無線電電路中所用頻率極高的交流同步,那是不可能的。改變天線電路中線圈的匝數(即改變其電感),就可以將天線電路調諧。不過這個手續往往可以省掉。

535. 【接收機中的電流】 在任何無線電接收機中,外來無線電波的效應,是在可調電路中感起振盪電流。所以我們祇要

有方法檢得這電流,就可以收到外來的信號。發生可聞的聲音,所需能量是很微小的,因此,在可調電路中所感起的電流,其能量實足以使電話聽筒中的薄片振動。然而電話聽筒決不能直接與可調電路串聯。因為電流的振盪非常之快,以致薄片來不及跟着它振動。即使薄片能夠跟着它振動,也因頻率太高而其聲

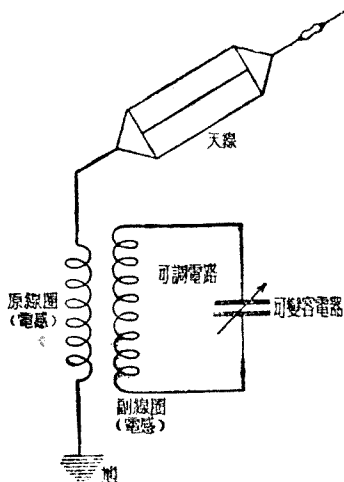


圖 27-5. 有可調副線圈的天線電路

超出人耳可聞限度之外。

用感應圈發送無線電波時，斷續器每斷續一次，容電器即放電一次，即有一列高頻減幅振盪發生。一次一次單獨振盪的發生，雖然頻率非常之高，但是一列一列振盪的頻率，卻比較低得多，從每秒幾百到一千不等。這頻率完全相當於人耳可聞限度以內的聲音，而且低得足以使電話聽筒內的薄片，按着這頻率振動。因此，祇要在可調電路中加一種裝置，可使薄片依着一列一列電波的頻率振動，而毋庸跟着一次一次單獨的振盪而振動，則接收信號的問題便可以解決了。

536. 【晶體檢波器】 所謂晶體檢波器(crystal detector)，不過是一小塊結晶體，例如矽或方鉛礦，它的一面嵌在軟金屬內，還有一面露出在空氣中，與一枚金屬針的尖端接觸。這樣的裝置（由於晶體的特性），可讓交流祇在一個方向內很容易地通過（方向改換，通過非常困難），所以適合於微弱電流的整流之用。它在電路中連結的方法，如圖 27-6 所示。在可調電路中發生的每一列振盪電流，都經過這晶體整流。受過整流作用的電流，使固定容電器帶電，這固定容電器再經由電話聽筒放電，每有一列振盪發生，即放電一次（圖 27-7）。因此，聽筒裏的鐵片即起對應的振動，其頻率在人耳的可聞

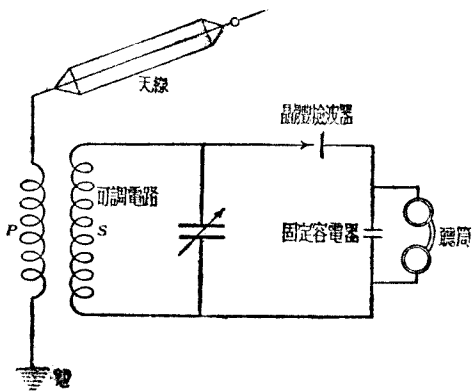


圖 27-6. 用品體檢波器的無線電收音機電路

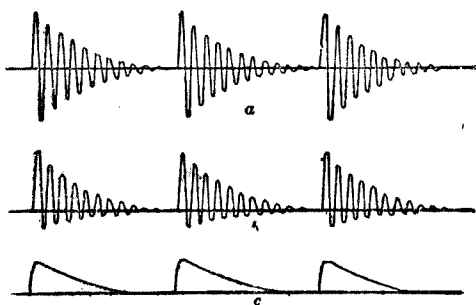


圖 27-7. 檢波器對於減幅電流的整流作用：
 a, 減幅振盪電流；b, 大部分經由檢波器整流
 後的減幅振盪電流；c, 使聽筒薄片起振動的
 平均電流

限度以內。要拍發電報時，在發報局將電鍵按捺，捺下的時間長短不同，相當於國際電碼中的點與劃。收報員在收報局中，即聽到長長短短的啾啾聲，把它們拼成所代表的文字。

真 空 管

537. 【真空管的各部分】 真空管 (vacuum tube) 或熱離子管 (thermionic tube) 的發明與改良，已使無線電的收發起了很大的改革。收音機中的真空管，諒必大家都很熟悉。這是一隻小小的玻璃泡或金屬泡，它的底上有四隻或不止四隻插針或稱腳 (prong)。在泡內，有鎢鈦合金製成的燈絲或絲極 (filament) (圖 2-8)。燈絲的兩端，與管底的兩隻粗腳通連。在燈絲的周圍，有一層金屬絲網，叫做柵極 (grid)。柵與燈絲是絕緣的，但與管底較細的一腳通連。在燈絲與柵的周圍，有一塊金屬板 (很薄的)，與燈絲及柵都絕緣，而與管底另一細腳通連。這叫做板極 (plate)。泡內空氣抽出，抽到所能抽到的最完全真空。

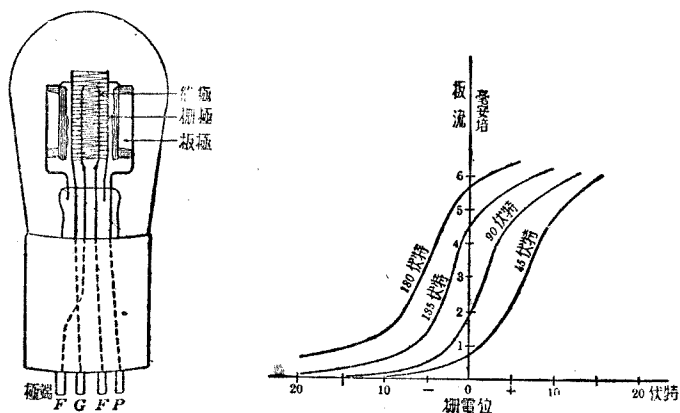


圖 27-8. 三極真空管，內有絲極 FF ，柵極 G ，以及板極 P ；右圖是它的特性曲線

交流收音機(a-c sets)中所用的真空管不用燈絲而用發熱環(heater loop) H (圖 27-9)以及被 H 加熱的陰極 (cathode) C 。這熱陰極的添加，使管底多了一隻細腳，第五腳。現在還有一種真空管，多一個柵極，叫做屏柵極(screen-grid)；而這些真空管也就叫做屏柵極管。

538. 【真空管的作用】 真空管在使用之時，它的燈絲兩端通連於電流發生器，所謂‘ A ’電源或‘ A ’電池組就是 (圖 27-10)。這電流，使燈絲發熱到呈現鮮明紅色的程度。燈絲所由構成的分子，因受熱而入劇烈振動的狀態，它們的電子不免被‘搖得鬆脫’。有些電子完全離開了燈絲的束縛，成為圍繞着燈絲的一羣。

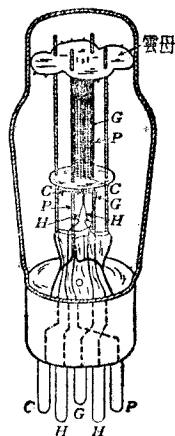


圖 27-9. 發熱環陰極式三極管

連接板極的插針，通連於電動勢約二十伏

特的另一電池組(或別的電源)的正極;這電池組的負極與燈絲的一端通連。這電池組叫做‘B’電池組,它的效果是使屏極帶正電。從燈絲出來的電子,因為帶着陰電,所以被帶陽電的板極吸引,穿過柵極的網眼而到達板極之上。這些電子不絕從燈絲射到板極,無異將一條電阻很高的金屬線,在泡內接通燈絲與板極,因而就有電流在‘板電路’(plate circuit)中發生。

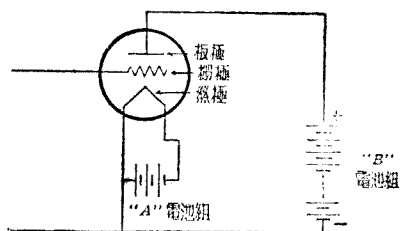


圖 27-10. 真空管上接有‘A’電池組及‘B’電池組

539. 【柵極的作用】 柵極的用處,在於控制電子流,與水管內的活栓控制水流,情形有些相仿。柵極若帶電而其電位低於燈絲的電位,則就要斥拒燈絲所發射的電子,強迫它們留在燈絲的附近,不得穿過柵極的網眼而到板極上去。此時板電路中的電流即行停流。柵極若帶正電,則可幫助板極吸引電子,使電子容易穿過網眼而到板極,此時板流(plate current)即行增加(圖 27-8)。

540. 【真空管檢波器】 因為柵極有上述的作用,所以真空管可以用作檢波器。圖 27-11 所示,即是用真空管代替晶體檢波器的收音機。從圖可見,天線,地,以及可調電路的連接方法,與晶體收音機相同。

當無線電波碰到收音機上的天線時,可調電路中就有高頻交流發生。這電流使真空管的柵極,忽帶正電,忽帶負電,交變不止。每在柵極帶有正電的半週中,柵極幫着板極吸引那些從燈絲發出來的電子。因此,從燈絲到板極的電子流(板流)就增加。每在柵極帶有負電的另一半週中,柵極對燈絲所發的電子

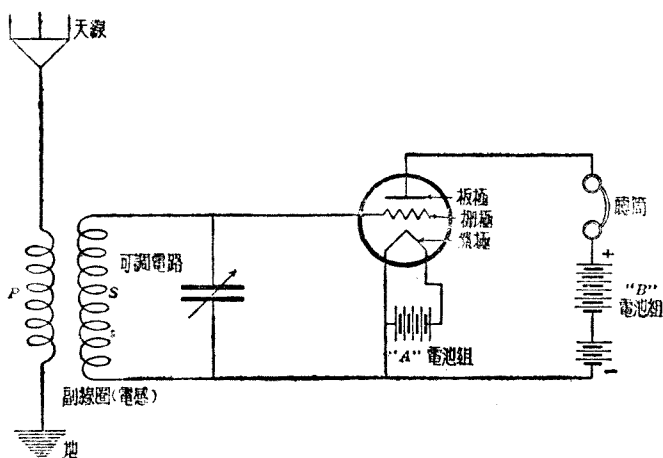


圖 27-11. 用真空管檢波器的簡單收音機

子以斥拒,所以這些電子就到不了板極。其結果,板流時增時減,而流過電話聽筒的直流也時時變更其強度。每有一列脈動電流通過聽筒,聽筒的薄片即振動一次,正與晶體檢波的情形一樣。

541. 【晶體檢波器與真空管檢波器的比較】 從上節所講的看來,真空管確可用為檢波器。它比晶體靈敏得多,可靠得多,而且不像晶體檢波器那樣的需要時加調準。使用真空管時,固然因為需要電池組或其他電源裝置,而似乎不及晶體便利,但是現在的無線電收發機中,差不多專用它來檢波,晶體檢波器簡直無人過問了。

真空管檢波器的靈敏度(sensitivity)大於晶體檢波器,理由就是因為真空管有‘活門’般的作用。真正使電話聽筒發聲的能,是從‘B’電池組來的;由天線收得而移交與可調電路(柵極電路)的能,不過用來控制板路中能量的流動罷了。由天線收得的能量雖然非常微小,但可控制板電路中大得多的能量,正好比

在水力發電廠中，管理水閘的人一舉手之勞，將閘門或開或閉，就可以控制幾千馬力一般。

542. 【再生接收機】 利用所謂再生(regeneration)的方法，可使真空管接收機的靈敏度再增加一些。因為在板電路中的有效能量，比柵電路中的大得多，故可把它的一部分，回授與柵電路。要達到這個目的，祇消取線圈一個，與真空管的板極串聯，而將此線圈放在適當的地位，俾可在可調電路中感起電流，就行(圖 27-12)。這一個插入板電路的線圈，通常叫做反饋線圈(tickler)。這樣的一具接收機，它的作用如下述。當外來的信

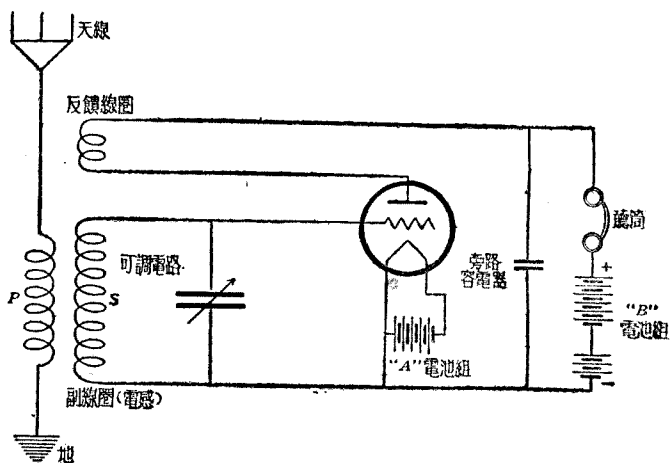


圖 27-12. 有再生(反饋線圈)的收音機

號引起了可調電路中的振盪電流時，這電流經由真空管柵極的作用，使板電流也起同樣的變更。板電路中振盪能的一部分，經由反饋線圈回授與柵電路，柵電路中的能量因此即見增加，而可將板電路中電流變更的程度提高。這麼一來，在板電路中流動的能量也跟着增加，於是更多的能量經由反饋線圈回授與柵

電路。所以這個過程是有互助累積之功效的。將反饋線圈與可調電路線圈的相對地位予以調準，可使電話聽筒中所聞信號的強度，有很大的增加。

543. 【接收機中的振盪】 在簡單的（非再生的）真空管接收機中，由外來信號引起的可調電路中的電流，其強度當然受到可調電路的電阻的限制。在再生接收機中，同一信號產生了強得多的電流。由此可知，加再生於接收機，相當於減低可調電路的電阻。使反饋線圈與空心變壓器的副線圈愈接愈近時，或使兩個線圈的軸（縱貫全線圈的軸）相交的角，愈來愈小時（將反饋線圈旋轉），再生的作用就愈大，而可調電路的有效電阻也愈見減低。若再生的作用增加到充分大的程度，則可調電路中的有效電阻，可以減低到零。在這樣的情形之下，可調電路中的電流一經流通以後，就要繼續流動不停，因為沒有了使它停止的原因。這種情形，叫做真空管起振盪。再生接收機的靈敏度，增加到超過了適宜的限度，常有銳叫聲或怒吼聲發出，這種聲音即從真空管起振盪而來。

544. 【真空管振盪器】 在接收機中，振盪會引起叫聲，這振盪當然是不合需要的。然而這振盪的作用，卻使真空管有了一樁非常重要的用處。真空管起振盪時，振盪的頻率，當然同於柵電路經調諧到的頻率。這個頻率可以調準到任何需要的數目，祇消變更可調電路的電感或電容，使它有適宜的數值，便成。所以真空管振盪器（vacuum-tube oscillator）能夠產生可調準的高頻交流。這個條件，恰巧合於產生無線電波的需要。在接收電路中的有效功率，當然是很小的。但是用這樣小的功率，已足以產生傳播到幾哩遠的電波，使幾哩遠的接收機中聽到可辨的聲音。若需要較大的功率，則可用較大的真空管，或將幾個真空管合起來用。現在各廠所造的大型真空管，每一枚有能輸出

150 仟瓦之多的。這些真空管，與普通家用收音機中的真空管很相像，所不同者，它們的板極都有水冷裝置，而所用板極電壓，有高達 2000 伏特的。大多數射電通報台，以及所有廣播電台，現在都採用真空管振盪器。

545. 【放大】 有時候我們要增加交流的能量，而又不要改變它的頻率。這就是所謂放大(amplification)。放大的方法，不但用於無線電接收機，而且用於廣播，用於長距離通話，用於公開演講時所裝設的揚聲器(喇叭)，用於製造‘電流錄音’的唱片，以及其他很多地方。將真空管照適當的方法連接，就可以達到放大的目的，而這樣的裝置，就叫做放大器(amplifiers)。我們若一察圖 27-8 所示的真空管特性曲線，即可看見 150-V. 那條曲線，有很長的一部分差不多是直的。若將柵電位從 -10 伏特改變到 0 伏特，則板電流即從 1.5 毫安培改變到 5.7 毫安培。柵電位在這一範圍裏面的任何昇降，可使板電流也起一模一樣的昇降。至於板電路中的輸出功率，則與前述的情形相同，也是比柵電路中的功率大得多。因此，我們可用一串真空管，把很微弱的電流，放大到合於需要的任何程度。如圖 27-13 所示，便是單管放大器的標準連接法，此種放大器，適用於前所列舉的各例。從圖可見，除‘A’與‘B’兩個電池組之外，還須添用一

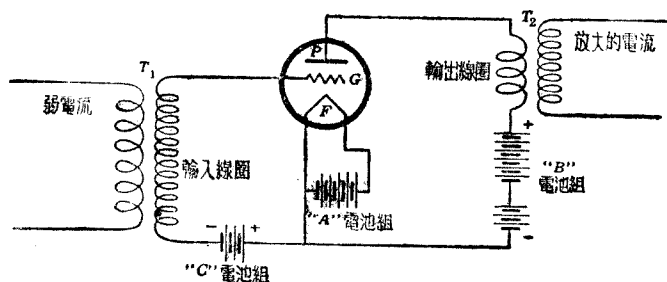


圖 27-13. 真空管用為放大器，有變壓器 T_1 與 T_2 。

個‘C’電池組。這‘C’電池組的用處，在於使柵極的正當電位，固定於特性曲線的直線部分上某一定點。當交流經由輸入線圈而到柵電路中之時，柵電壓即在這個定點的上下或昇或降。這昇降的情形，在板電流中完全照樣模仿出來。於是輸出線圈即將放大的能量送出去，供適合各種需要之用。

射電通話術

前此所述，僅限於射電通報的接收與發送。然自廣播事業開創以來，言語與音樂的收發，已成為非常重要的人生一頁，以致我們不得不在本書之內，把射電通話術(radiotelephony)所用的方法，約略敘述一番。不過詳細的論述，當然不在本書範圍之內。

546. 【廣播器械】 廣播所必需的器械，可以分成兩大類：**振盪器**(oscillator)以及**調盪器**(modulator)。振盪器的用處，在於產生高頻連續振盪電流，而調盪器的作用，則在控制這電流，使受待廣播的聲音的影響。

真空管振盪器的原理，我們早已在第544節中敘述過了。所用的真空管，大概不止一個。這些真空管在可調電路中引起很強大的高頻交流或射頻交流(radio-frequency a-c.)。每一個廣播電台，各自設計，選定一個廣播用的頻率。廣播的頻率，須按政府的規定，以儘量避免干擾鄰近電台為原則。現在世界各國通用的廣播標準頻率，從每秒550仟週到每秒1500仟週不等。

在尚未敘述調盪器的作用之前，最好把平常的電話原理，先複習一下。聲波打擊在話筒的薄片上，使它起振動。薄片振動時，一隻小匣子的碳粒，其所受的壓力即起對應的變更。因此，這些碳粒對於電流所呈的電阻，也起對應的變更。於是通過這

些碳粒的電流強度，就忽增忽減，其增減情形與空氣中的壓縮波互相對應。舉個例來說，若有音叉一枚發出中音 C，則將音叉放在話筒前面時，即有頻率每秒 256 週的脈動電流發生。這脈動電流，可用以使聽筒中的薄片振動，這振動的薄片就送出一列聲波，與打擊話筒薄片的聲波相同。就較為複雜的聲音，例如演講或歌唱而論，脈動電流的變更情形要複雜得多。但是這複雜的脈動電流，仍舊可以使聽筒中的薄片，照樣起複雜的振動，因而發出原來傳入話筒的聲波來。

547. 【廣播】 廣播電台播音室內的聲音，先給一隻微音器或話筒(microphone)收去。話筒的式樣很多，其中有一種與電話的話筒原理完全相同，不過外觀大異而已。聲音作用於話筒，產生脈動電流，這電流我們稱之為聲流(voice current)。這聲流，先經一組真空管放大器放大，然後再由調盪器，用它來控制那振盪器所生的高頻交流，這交流叫做載流(carrier current)。

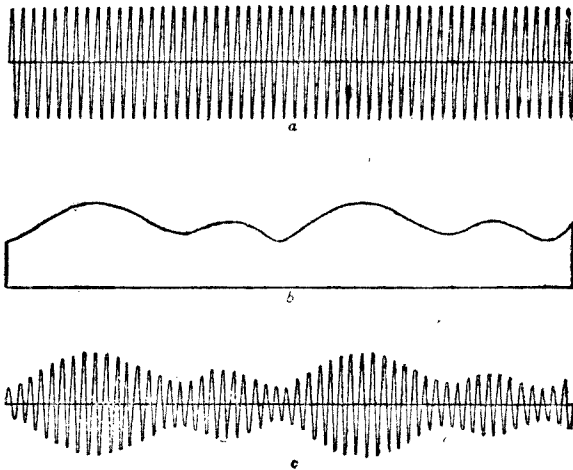


圖 27-11. 高頻載流的調幅：a，未經調幅的載流；b，聲流；
c，載流受聲流的調幅作用

調盪器有好幾隻強大真空管，它的電路是非常複雜的。聲流的變更頻率，比載流的頻率小得多，所以在聲流變更一次的時間內，載流已變更了許多週（圖 27-14）。當聲流增加時，調盪器使載流的強度（振幅）加大；當聲流減少時，調盪器使載流的強度（振幅）減小。這種調盪方法，叫做變幅調盪或調幅（amplitude modulation）。在調幅的過程中，振盪器電流（載流）的頻率不變，變更的祇是它的強度（振幅）。讀者若察看圖 27-14，則聲流對於‘載流’（即振盪器所生的電流）的調盪作用，便可明瞭其概況。經過調盪（調幅）的高頻交流，通入天線系統，即在天線系統內產生經過調盪的載波（carrier wave），從廣播電台向各方傳播出去。

548. 【廣播電波的接收】 任何接收機，可用以收聽電報的，也可以用它來收聽電話。調盪過的載波來自遠方，與接收機上的天線相遇後，即在接收機的可調電路中，引起調盪過的高頻交流，與遠處發送機中的調盪過的高頻交流完全相同，祇要接收機的可調電路，業經調諧到與載波有同樣的振盪頻率。因為各廣播電台所選定的載波頻率，各不相同，所以我們可以隨意選取我們所要收聽的某一電台。欲達到這一個目的，祇須調準可變容電器，將接收機調諧到所欲收聽該電台的頻率。

可調電路中的振盪電流，由檢波器予以整流，於是在檢波器中即有聲流發生，這聲流，與播音室中話筒內的聲流相同。聲流通過電話聽筒，聽筒即將原來的聲音再發出來。

549. 【收音機】 目今所用收聽廣播節目的收音機，大多數非常複雜，遠非我們剛纔所說的單管收音機可比。此等收音機中，除真空管檢波器外，還有好幾枚別的真空管，用作放大器，以加強所收聽的樂聲或歌聲。這些真空管中，有幾枚用來放大尚未進入檢波器的信號，此時我們稱之為射頻放大器（radio-

frequency amplifier)。有幾枚用來放大檢波器中的聲流，此時我們稱之為音頻放大器(audio-frequency amplifier)。

550. 【電動揚聲器】 最初的揚聲器 (loud-speaker)，不過是大型的電話聽筒上，裝置一隻喇叭罷了，這喇叭與舊式留聲機上所用的很相像。喇叭雖可聚聲，然而對於某某頻率的聲波有加強作用，對於其他頻率的聲波則有抑制的作用。其結果，從喇叭出來的聲音，與播音室中原來的聲音，大不相同。現在有好幾種式樣的揚聲器發明成功，這些揚聲器所發出來的聲音，與原來的聲音比較，已經接近得多了。

所謂**電動揚聲器** (dynamic loud-speaker)，係用極強的電磁體，直接對一個可動線圈發生作用如圖 27-15 所示。當電流在這可動線圈中通過時，線圈即被電磁體吸引。這電磁體有特殊的形式，可使它的強磁場，分布在它的中心磁極四周。可動線圈祇有很少的幾匝，直接裝牢在紙錐 (paper cone, 俗稱紙盆) 的頂點，圍住了中心磁極而不與它接觸。來自放大真空管的電流，通入一隻降壓器，然後再由這降壓器通入紙錐頂上的線圈。這一個很輕的線圈與很小的紙錐頂，它們的總重量非常微小，所以很容易按着比較高的頻率而振動。

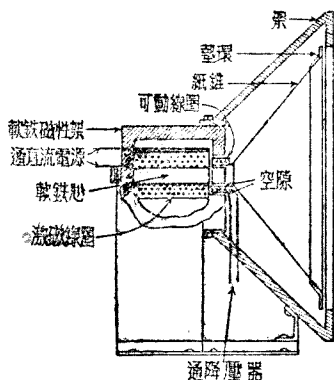


圖 27-15. 電動揚聲器的剖面

551. 【交流收音機】 接在電燈線路上的交流收音機 (a-c. receiving set)，與用電池組的收音機，主要構造很相像，不過不用電池組，添裝了一具整流器，一具濾波器，以及一隻可使 60 週交流適用於收音機的變壓器而已。整流器與濾波器，將交

流換成差不多很平穩的直流，以供通入板電路與柵電路之用。變壓器的副線圈不止一個，其中有將交流電壓，從 110 伏特昇到 350 伏特的，也有將交流電壓降到幾個伏特，以供使燈絲發熱之用的。燈絲既熱，在燈絲周圍的空心圓柱，即陰極，也跟着發熱（圖 27-9）。板電路中所需要的直流，由一枚雙板極整流管供給。濾波器是一組線圈與容電器。一起一伏的電流進入該器後，出來便成爲差不多平穩的直流。交流收音機比用電池組的收音機，要簡潔一些，而且對於不懂無線電技術的收聽者，更適合一些，因爲比較不容易壞。

552. 【電磁波】 前面已經講過（第 257 節），法拉第相信‘磁力線’當真存在於空間。他還以爲這些力線可將磁與電在空間中傳播。幾年之後，馬克士威（Maxwell）推廣法拉第的這個學說，而將它放在數學的基礎之上。這個學說，最後在 1888 年爲德國人赫芝（Heinrich Hertz）所證實。他的各次實驗，證明了有電磁波存在，這電磁波雖然有時長達許多米，它的速率卻與光波相同。電磁波也能起反射與折射，正像光波一樣。所以我們敢說光波也是電磁波。這一個概念，以及能量不滅律，乃是十九世紀物理學上最不凡的兩大成就。

553. 【電離層】 我們已經見到，無線電波很像平常的光波，不過它的波長比光波的波長大得多罷了。無線電波沿着地面前進之際，愈遠愈弱，因此，傳到幾百哩遠的地方時，就要微弱到不能被檢波器檢得。然而我們現在的確可以利用電波，隔着數千哩的長距離通訊，甚至可將射電信號，送到地球的那一邊去。爲說明這個現象，以及在發送方面所遇的其他現象起見，耿涅黎（Kennelly）與海維賽（Heaviside）二人，曾各不相謀地提出了一種學說，即地球四周圍裹着一層或幾層的導電空氣球面層，它們的高度從 30 哩到 200 哩不等。這種空氣層，我們稱之爲電離

層 (ionosphere)。這幾層空氣的所以有此情況，似乎是因為其中有很多離子存在之故，這些離子，可將電波折射或反射，大概如圖 27-16 所示。因此，無線電波就在電離層與地面之間，蜿蜒曲

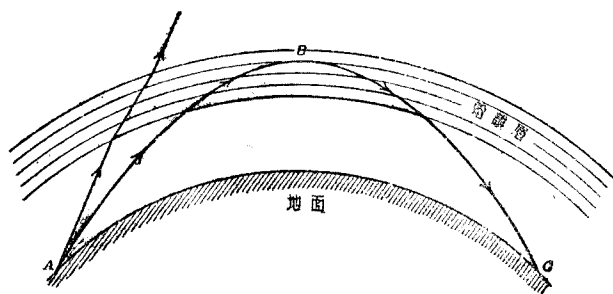


圖 27-16. 電離層反射無線電波

折而進，其路線大抵跟着地面一同彎曲，而並不向地球外的空間四散播射。電離層的成因，現在還沒有確切地知道，不過至少有一部分的原因，似乎是出於太陽所發紫外射線的照射。

554. 【宇宙射線】 帶電的驗電器，常逐漸失去它所帶的電，這個現象，是知之已久的了。起初，大家以為電的走漏，由於絕緣的不能到達完善地步，或由於空氣略具導電之性。後來發見了地球內有放射質存在，大家又以為放射質所發出來的射線，使空氣起了電離，因此使驗電器所帶的電逐漸放去。用厚鉛板包圍驗電器，它的放電率即見減低，這個實驗，對於上述的假說，頗有支持的力量。

但是後來又發見，驗電器上電荷的喪失率，隨着驗電器離地的高度而一同增加。可見明明還有一種貫穿性很強很強的輻射，來自地球及其大氣層以外的某某發源之處。因此，把這種輻射叫做**宇宙射線** (cosmic rays)，似乎很適當。

爲了決定宇宙射線的強度怎樣因緯度與高度的不同而不同

起見，有不少研究宇宙射線的專家，在不同的時候不同的地點，做了許多許多次實驗，以測定各時的宇宙射線的強度。這些實驗的舉行，還受到了兩個問題的激勵。這兩個問題是：什麼是宇宙射線？以及宇宙射線是怎樣產生的？這兩個問題的答案，尤其是第二個問題的答案，至今還沒有確定。有些物理學家，以為宇宙射線很像可見光，不過波長比光短得很多罷了。換句話說，這些射線的波長比茄瑪射線還要短。還有很多物理學家，都以為宇宙射線必定是某種帶電的粒子，也許是一種超比忒射線 (super-beta rays)。宇宙射線的本性問題，乃是一個很難解決的問題，因為宇宙射線通過地球大氣時，常有別的射線產生，這些射線伴同原來的射線前進，而使空氣發生電離。宇宙射線似乎不是從太陽發出來的，因為白晝與晚間，宇宙射線的強度相差甚微。不過我們的確知道，有一種射線從遙遠的空間來到地球，它的貫穿性千倍於放射質所發的射線，它能夠穿透幾百呎的水。這些宇宙射線，到底是從哪裏來的呢？

555. 【原子擊破機】 近年來物理學家研究宇宙射線，頗有堅忍不拔的精神。為什麼？一個理由是他們希望從宇宙射線的研究，對於原子的結構有更進一步的發見。這個希望，又使他們發明了幾種器械，可用以在實驗室內轟擊原子，而將原子擊破。這些所謂原子擊破機 (atom-smashing machine)，不但大受物理學家的青眼，而且還受到一般人的注意。其中最出名的一種，怕恐要算是迴旋益能器 (cyclotron) 了。下節我們就要把這迴旋益能器，很簡單地講一講。

迴旋益能器是美國柏克萊 (Berkeley) 加州大學 (University of California) 的教授勞倫士 (E. O. Lawrence) 所發明的。(圖 27-17) 在初發明時，此器不過是一隻小小的圓柱形扁盒，直徑六英吋，夾在一個電磁體的兩極之間。後來屢經改良，到本書

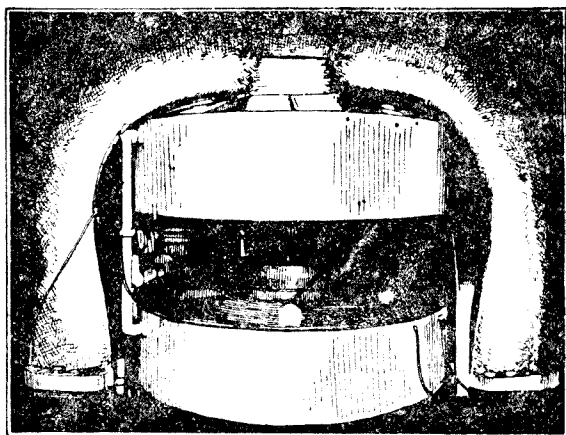


圖 27-17. 美國柏克萊地方加州大學 University of California 的「迴旋益能器」中所用的巨型電磁體，該器可將原子敲碎，它的設計人是勞倫士教授 (Prof. E. O. Lawrence) 及其合作者。磁體的直徑是 37 吋；磁場是鉛直的

完稿的時候(指英文原本)，他已造成了一座很大的迴旋益能器，它的電磁體重 85 噸，極面直徑 37 吋，兩極相距 8 吋。新的計劃，早在預備中，他還要另造一座巨型迴旋益能器，它的電磁體重 220 噸。此外在美國有十一座迴旋益能器，在加拿大有一座，在歐洲及東方共有十一座，都已造成或正在建造中。

我們尚未了解這原子擊破機的作用以前，必須先回想一下，原子乃是非常微小的粒子，最大的原子，直徑不過 0.000,000,01 吋，而普通的原子，其直徑都比這小得很多。我們已經知道構成原子的是電子與質子^{*}(分別帶正電及負電)，以及不帶電的粒子，叫做中子(neutron)。我們又知道，原子的質量，差不多全部集中在帶陽電的核上。因此，要將原子敲開，就非得把核敲開不

* 質子、proton)帶正電，即是氫原子的核。

可。要完成這件工作，必須利用一個彈丸，它的大小約同於原子核本身的大小，而且有驚人的巨大速率（動能）。我們還須有一個靶子，例如鎢絲，上面有待敲開的原子。最後，還得有一個一定的方法，把敲過以後留下來的東西鑑定一下。

所用的彈丸，最普通的是氫原子核（質子），氦核（亞爾法粒子），或重氫原子（heavy hydrogen atom）的核，叫做氘子（deuteron）。在勞侖士的迴旋加速器中，這些彈丸可以繞着圓形軌道飛馳，每繞畢半圈，受到一次加速，所以愈走愈快，而軌道也愈變愈大，它的路徑就成功螺旋形。氘子走畢這螺旋形軌道，打在鍍製的靶子上，能量高達 $7,800,000$ 伏特。勞侖士的這個驚人的成績，表現於兩隻 D 形盒拼成的扁圓盒中（圖 27-18）。盒內的空氣抽盡，使飛馳的粒子可以自由前進而不致與空氣分子碰撞。氘子的發源地在扁圓盒的中心。利用射頻振盪器，可使高達 $50,000$ 伏特的電壓，在扁圓盒的兩極間（兩個 D 形之極）非常迅速地交

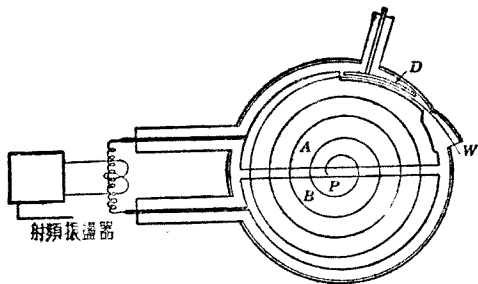


圖 27-18. 迴旋加速器中磁轆兩極間真空匣的剖面

變。在如此高的電壓之下，且因有縱貫的磁場，所以彈丸在每一 D 形盒內繞着圓形軌道而疾馳。它們在這一個 D 形盒內行畢半週，剛要出去而進入對方的 D 形匣時，電位恰起交變，粒子受到一次加速，再入對方的 D 形匣。粒子每行畢半週，電壓交變

* 粒子在迴旋加速器中的動能，用電子伏特做單位，一電子伏特（electron-volt）約等於 1.592×10^{-12} 爾格。

一次（兩個 D 形極的正負交變一次），恰好乘粒子已出此 D 形盒而未入彼 D 形盒之際，即在兩個 D 形盒空隙內的一瞬間，使它們得到加速度。所以粒子愈奔愈快，愈奔愈向盒外。大約繞畢 50 圈，即加速 100 次後，它們就旋到了盒子的邊緣。將近邊緣時，改取直線路徑，從一個窗內射出來，打在預備好的靶子上（圖 27-18）。

要研究如此打破原子後的產物，可用威爾遜‘霧室’（第 523 節）。從霧跡的粗細，以及在磁場內的彎曲程度，即可推算原子碎片的速率及其所帶電荷。

556. 【得到了什麼結果？】 轟擊原子的結果，總括一句話來說，舊的原子已被打開，新的原子已經產生。這種所謂人造的原子蛻變（artificial disintegration of atom），其歷史開始於 1919 年。英國的羅德福勳爵（Lord Rutherford），在那一年第一個用出自天然放射質的亞爾法粒子，轟擊氣態氮，發見有質子產生。在那個時候，因為天然放射質很稀罕，做這種實驗是不大容易的。可是有了迴旋益能器之後，亞爾法粒子的來源就不值一慮了。據估計，在五百萬伏特高壓之下作用的迴旋益能器，可以產生許多高能量亞爾法粒子（氦核），其數之多，可與兩磅錒所發射的相等。全世界的現有錒量，恐怕一共還不到兩磅。有時候這些彈丸把原子核打碎，而與核的碎片結合，成為新原子。有時候打入核內，成功一個過重的核，這個核很不安定，所以就開始放射粒子及茄瑪射線。這便是所謂人造放射性（artificial radioactivity）。所有的元素，差不多全被轟擊過，而人造放射性元素，已產生的差不多在一百種以上。甚而至於少數金原子，也已經造成功了！人造黃金，目前當然還離開商業化遠得很，因為要從銷變出來。不過古代鍊金術士的夢想，卻終究實現了一部分。

轟擊原子，還有一個驚人的結果，即是原子彈 atomic bomb) 的誕生。* 這個驚天動地的發明，現在正予人類以威脅，使人類面臨着毀滅與進步的歧路。

問 答 題

1. 無線電波一直存在於我們的周圍，而且任何電路截斷時（例如關掉電燈），就有無線電波產生。若果真如此，為什麼我們知道它的存在，還不過是幾十年前的事？

2. (a) 從前的射電發報機，其所用的高頻交流，是怎樣產生的？(b) 現代的射電發報機，其所用高頻交流又是怎樣產生的？

3. 無線電接收機(收音機)中，有時要用變壓器。什麼緣故？

4. 連接在天線電路中的變壓器，切不可有鐵心。什麼緣故？

5. 無線電收發台的天線，往往架在很高的柱子上(圖 27-19)。什麼緣故？

6. 在無線電接收機或發送機電路中的可變容電器，有什麼用處？

7. 將真空管的板極接在電池組的負極上，真空管能起作用麼？說明理由。

8. 真空管的真空程度是很高的。電流怎樣能夠通過？

9. 檢波器的實際工作是什麼？為什麼稱之為檢波器，你懂得麼？

10. 在簡單的檢波管電路中，下列各項各有什麼用處：燈絲，柵極，板極，‘A’ 電池組，‘B’ 電池組，電話聽筒？

11. 揚聲器為什麼不能夠放在簡單的檢波器電路中，以代電話聽筒？

12. 真空管怎樣可以作放大器？

13. 最簡單的現代收音機，它的主要部分是什麼？

14. (a) 沒有電流在柵電路中通過的時候，(b) 有交流在柵電路中通過的時候，流過板電路中的是何種電流？

15. 所謂‘調盪過的’載流，是什麼意思？

16. 在發送機中，由聲波而產生無線電波，向外播射，在接收機中，由無線電波產生聲波，入人之耳，這兩

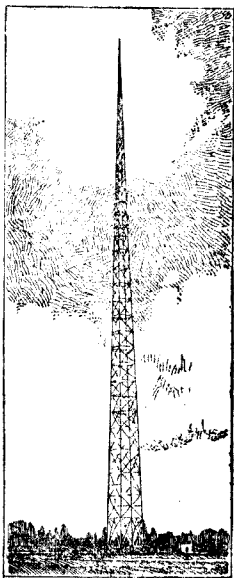


圖 27-19. 美國華盛頓州斯波塔地方 (Spokane) 的天線柱，高 828 尺

* 關於原子彈，本書原文未載，讀者請看譯者所編本局出版的‘原子能與原子彈’一書。

種過程的主要步驟是什麼？

17. (a) 離你最近的廣播電台，它的廣播載波的頻率是多少？(b) 載波的波長是多少？(c) 這波在空中進行有多少快？把這電台的呼號同你的答案寫在一起。

18. (a) 長 200 米的無線電波，同人耳可聞的最高音（每秒振動 20,000 次），比較其頻率。(b) 無線電波為什麼不能夠直接為人耳所聽到？

19. 據說在甲地用無線電收音機，收聽乙地大樂廳內的音樂，可以比樂廳內離演奏台很遠的聽眾先聽到。這句話說得對不對？

第二十七章提要

容電器放電經由小電阻，產生電的振盪。

發生諧應的兩個電路，說它們有相同的頻率。

射電波（無線電波）的波長 = $\frac{\text{速度}(300,000,000 \text{ 米/秒})}{\text{頻率 週/秒}}$

晶體檢波器與真空管檢波器，都有整流的作用。

真空管又可用為振盪器或放大器。

電波從天線送出去，在空間內傳播，而為另一天線所接收。

三極真空管內有三個主要部分：燈絲或絲極，在紅熱時發射電子流；板極，帶正電，電子都流到它的上面去；柵極，介於板極和絲極之間，有控制電子流的功用。

再生電路係在板極電路中插接一個反饋線圈，它的地位靠近柵電路中的線圈。它對這線圈（空心變壓器的副線圈）有感應作用，因而可以使板電流大大地增加。

放大可以得之於下述的連接法：將昇壓器的原線圈插入板電路中，代替電話聽筒，而將副線圈通連於第二真空管，即所謂放大器的柵極上。這種過程叫做音頻放大，可以重複。

適當的變壓器與真空管，可用以放大尚未入檢波管的電流；這個方法叫做射頻放大。

音頻（可聞頻率）在每秒 15 週與每秒 15,000 週之間；射頻約從每秒 15,000 週到每秒幾百萬週。

在射電通話術中，通常利用振幅調盪或調幅，使不減幅高頻連續

振盪電流的強度，起對應於聲波的變動。

複習問題與計算題

第二十六章

1. (a) 鐳所發出的三種輻射是什麼？(b) 哪一種使鐳有治療的價值？
2. 牙科醫生怎樣攝取牙齒的 X 射線相片？
3. (a) 螢光鏡 (fluoroscope) 有什麼用處？(b) 它是用什麼資料做成的？
4. 我們相信 X 射線是非常短的波，與紫外射線相仿而比紫外射線更短，有什麼實驗上的證據？

第二十七章

1. 無線電波在 (a) 速度方面，(b) 波長方面，(c) 頻率方面，與光波有什麼不同之處？
2. 無線電波與聲波，在 (a) 速度方面，(b) 波長方面，(c) 頻率方面，有什麼不同之處？
3. 在有些無線電收音機中，兩枚完全相同的真空管，一枚用作檢波器，還有一枚用為放大器。它們的作用有什麼不同？
4. 使真空管的柵極 (a) 為正極時，(b) 為負極時，從燈絲到板極去的電子流，受到什麼影響？
5. 音頻變壓器 (audio-frequency transformer) 有鐵心，但射頻變壓器 (radio-frequency transformer) 則有空氣心。為什麼有這樣的差別？

索 引

A

- 'A' battery, 'A' 電池組, 595.
- Aberration, 像差.
chromatic, 色差, 550. [差, 527.
spherical, of lens, 透鏡的球面像
of mirror, 鏡的像差, 501.
- Absolute, 絕對.
pressure, 絕對壓力, 123.
temperature, 絕對溫度, 212.
zero, 絕對零度, 213, 216.
- Absorption, 吸收.
bands, 帶, 554.
of gases, 氣體, 138.
spectra, 光譜, 553.
- A-C., 參看 Alternating current.
- Acceleration, 加速度, 162, 165.
force causing, 產生加速度的力,
182. [體, 171.
of freely falling bodies, 自由落
negative, 負加速度, 166, 168.
- Accommodation, 調節, 536.
- Achromatic lens, 消色差透鏡, 550.
- Adhesion, 附着力, 137.
- Air, 空氣.
brakes, 空氣輪胎, 119.
buoyancy of, 浮力, 116.
compressibility of, 可壓縮性, 120.
compressor, 空氣壓縮器, 118.
-conditioning, 空氣保適, 255.
density of, 密度, 94.
elasticity of, 彈性, 120.
moisture in, 空氣中的水分, 252.
saturated, 飽和空氣, 253.
under pressure, 受壓力的空氣, 94,
101, 118, 119.
- Airplanes, 飛機, 156.
engine, 引擎, 276.
forces acting on, 所受的各力, 159.
- Alpha, 亞爾法.
particles, 粒子, 584, 610.
rays, 射線, 580.
tracks, 徑跡, 482. [411, 429.
- Alternating current, 交流, 395,
converted to direct, 換成直流,
frequency of, 頻率, 394. [400.
motors, 電動機, 432.
phase of, 相, 394.
power in, 功率, 430.
receiving sets, 收音機, 604.
uses of, 用途, 395.
- Alternator, 交流發電機, 392.
commercial, 商用, 393.
rotating field of, 可轉磁場, 393.
three-phase, 三相, 395.
- Altimeter, 高度計, 106.
- Altitude, 高度. [106.
by barometer, 用氣壓計測高度,
- Ammeter, 安培計, 324, 359.
- Ampere, 安培, 322.
international, 國際安培, 366.
turns, 安培匝數, 355.
vs. volt, 安培與伏特, 324. [322.
- Ampere, André Marie, 安培, 294,
- Amplification, 放大, 600.
audio, 音頻放大器, 604.
radio, 射頻放大器, 603.
- Amplifier, 放大器, 600, 604.
- Amplitude, 振幅, 417.
- Aneroid barometer, 無液氣壓計,
- Angle, 角. [103.
critical, 臨界角, 518.

of deviation, 偏向角, 520.
 of incidence, 入射角, 498, 512.
 of reflection, 反射角, 498.
 refracting, 折射稜角, 520.
 visual, 視角, 538.
 of refraction, 折射角, 511.

Anode, 陽極, 367.

Antenna, 天線, 588, 591, 611.

Arc, 弧.
 electric, 電弧, 380.
 lamps, 弧燈, 380. [理, 83, 116.

Archimedes' principle, 阿基米得原

Armature, 電樞, 391, 393.
 drum, 鼓輪, 391, 397.
 of generator, 發電機的, 393.
 of motor, 電動機的, 403.
 stationary, 固定電樞, 393.

Astigmatism, 像散, 573.

Atmosphere, 大氣, 94.
 layers in, 大氣層, 107.
 lifting effect of, 浮力, 116.
 moisture in, 大氣中的水分, 252.
 one, — '大氣壓', 102.
 pressure of, 壓力, 98, 103.
 refraction in, 在空氣中的折射, 513.

Atmospheric electricity, 大氣中的

Atom, 原子, 302, 608. [電, 313.
 a magnet, 一磁體, 295.
 nucleus of, 原子核, 303, 573.
 -smashing machines, 原子擊破機,

Atomic theory, 原子說, 302. [607.

Attraction, 引力.
 electric, 電引力, 298.
 gravitational, 萬有引力, 185.
 magnetic, 磁引力, 298.

Audibility, 可聞.
 limits of, 限度, 461.

Audio frequency, 音頻, 604.

Aurora borealis, 北極光, 118.

Automatic, 自動.
 arc lamp, 自動弧燈, 380.
 stoker, 自動添煤器, 264.

Axis, 軸.
 principal, 主軸, 500.
 secondary, 副軸, 500.

Axle, 軸.
 wheel and, 輪軸, 32.

B

Back e. m. f. of motor, 電動機中的
 反電動勢, 405.
 due to inductance, 爲自感應所引

Balance, 秤. [起, 430.
 platform, 台秤, 9.
 spring, 彈簧秤, 9.
 -wheel in watch, 錶的擺輪, 209.

Ball bearings, 滾子軸承, 58.

Balloons, 氣球, 117.

Barograph, 氣壓記錄器, 104.

Barometer, 氣壓計.
 aneroid, 無液氣壓計, 103.
 mercury, 水銀氣壓計, 103.
 a pressure gauge, 壓力計,

Battery, 電池, 340.
 'A', 'A' 電池組, 595.
 'B', 'B' 電池組, 596, 597
 'C', 'C' 電池組, 601.
 central, 中央, 418.
 local, 本地, 418.
 telegraph, 電報, 356.
 telephone, 電話, 418.
 storage, 蓄電池, 368.
 testing a, 檢查一電池, 370.
 參看 Cell,

Beam of light, 光柱, 497.
 parallel, 平行光柱, 516.

Beats, 拍, 471, 472, 473.

Becquerel, Henri, 貝格雷, 572, 578.

Bel, 斐耳, 452.

Bell, 鈴.
 electric, 電鈴, 356. [壓器, 421.
 transformer for ringing, 電鈴變

Bell, Alexander Graham, 斐耳,

Belt, 皮帶, 50. [416.

Bending, 撓曲, 128, 130.
 Bernoulli's principle, 柏努利原理,
 Beta rays, 比忒射線, 580. [78.
 Binocular prism, 雙鏡雙筒望遠鏡.
 Blower, 吹風機, 114. [544.
 Boiler, 汽鍋, 263.
 kitchen, 廚房裏的水箱, 224.
 efficiency of, 效率, 264.
 fire-tube, 火管式汽鍋, 264.
 steam, 汽鍋, 263.
 water-tube, 水管式汽鍋, 264.
 Boiling, 沸騰.
 freezing by, 因沸騰而凝固, 250.
 point, 沸點, 203, 243.
 table, 沸點表, 245.
 process of, 過程, 245. [影響, 243.
 effect of pressure on, 壓力變更的
 table, 沸點表, 3 (附錄).
 Boulder Dam, 波爾德大壩, 76.
 Bourdon gauge, 波當壓力計, 123.
 Boyle's law, 波義耳定律, 120.
 Brake, 輪掣.
 air, 空氣輪掣, 94, 119.
 hydraulic, 水壓輪掣, 82.
 for testing a motor, 用以測定電
 動機的功率, 407.
 Breaking strength, 斷裂強度, 132.
 British thermal unit, 英國熱單位,
 233. [量, 262.
 mechanical equivalent of, 功當
 Broadcasting, 廣播.
 radio, 射電廣播, 601, 602, 603.
 Brownian movement, 布朗運動,
 Bugle, 小銅角, 479. [135.
 Bunsen photometer, 本生光度計,
 Buoyancy, 浮力, [491, 492.
 of air, 空氣的, 116.
 of liquids, 液體的, 83.

C

'C' battery, 'C' 電池組, 601.
 Ca'sson, 潛水函, 119.

Calorie, 卡.
 gram, 克卡, 233.
 kilogram, 仟克卡, 231. [量, 262.
 mechanical equivalent of, 功當
 electrical equivalent of, 電當量,
 Cam, 歪輪, 44. [376.
 Camera, 照相機.
 motion-picture, 活動電影, 531.
 photographic, 照相機, 528.
 Candle, 燭.
 foot, 呎燭, 493.
 international, 國際燭光, 491.
 power, 燭光, 491.
 Capacity, 容量.
 of boiler, 汽鍋的, 263.
 of condenser, 容電器的, 431.
 of storage cell, 蓄電池的, 370.
 volumetric, 體積的, 6.
 Capillarity, 毛細作用, 137.
 in soils, 土壤中的毛細作用同, 138.
 Capstan, 絞盤, 33.
 Carburetor, 和合器, 271.
 Cathode, 陰極, 367.
 rays, 陰極射線, 575, 576.
 Cell, 電池.
 dry, 乾電池, 343, 344.
 electric, 電池, 319, 321. [321.
 hydraulic analogy of, 水的比喻,
 lead storage, 鉛蓄電池, 367.
 photoelectric, 光電管, 533.
 polarization in dry, 乾電池中的
 極化, 344.
 simple, 簡單電池, 319,
 terminal voltage of, 端電壓, 344.
 weston normal, 衛斯吞標準電池,
 參看 Battery. [324.
 Cells, 電池.
 best arrangement of, 混合聯法,
 in parallel, 並聯, 340. [341.
 in series, 串聯, 339.
 Center, 中心.
 of curvature, 曲率中心, 590.

- of gravity, 重心, 28.
- Centigrade scale, 百分溫標, 202.
- Central batteries, 中央電池組, 418.
- Centrifugal, 離心.
pump, 離心抽機, 114.
tendency, 離心趨勢, 180.
- Centrifuge, 離心機, 180.
- Centripetal force, 向心力, 178, 180.
- Charles' law, 查理定律, 212, 218.
- Chromatic aberration, 色差, 550.
- Circuit, 電路.
a-c., 交流電路, 430.
braker, 斷路器, 372.
closed, 閉合, 421.
divided, 分岐的, 336.
electric, 電路, 320, 335.
in multiple, 並聯, 336.
partial, 部分, 335.
parallel, 並聯, 336, 338.
plate, 板電路, 596.
resistance, 電阻, 322.
series, 串聯, 335.
telegraph, 電報, 357.
telephone, 電話, 418, 419.
tuned, 可調電路, 591.
- Clarinet, 薩栗管, 478. [205.]
- Clinical thermometer, 臨床溫度計,
- Clouds, 雲, 255.
- Coefficient, 係數.
of expansion, 膨脹係數, 209, 210.
of friction, 摩擦係數, 155. [215.]
pressure, of gas, 氣體壓力係數,
- Cohesion, 內聚力, 137.
- Coils, 線圈, 422.
- Color, 色, 555.
blindness, 色盲, 559.
disk, 色盤, 557.
motion-pictures, 彩色電影, 559.
printing, 彩印畫, 對 571.
vision, 色覺, 558.
- Colors, 顏色.
complementary, 互補色, 558.
- compound, 複色, 558.
mixing, 混合, 558.
of objects, 物體的, 556.
of thin films, 薄膜的, 560.
pure, 純色, 558.
wave lengths, 波長, 555, 556.
- Commutating poles, 換向極, 398.
- Commutator, 換向器, 395.
-motor, 換向電動機, 432.
- Compass, 羅盤, 285.
liquid, 液體, 206. [558.]
- Complementary colors, 互補色,
- Component, 分力.
of a force, 力的分解, 152.
- Composition of forces, 力的合成,
- Compound, 複. [146, 149.]
bar, 重疊金屬條, 206.
color, 複色, 558.
steam engine, 複式蒸汽機, 266.
- Compressed air, 壓縮空氣, 119.
- Compressibility, 可壓縮性.
of fluids, 流體的, 119.
- Compression, 壓縮, 128, 130.
- Compressors, 壓縮器.
air, 空氣壓縮器, 118.
- Concave, 凹.
lens, 透鏡, 526.
reflector, 反射凹鏡, 503.
- Condensations, 密部, 451.
- Condenser, 冷凝器, 245, 容電器, 306.
in an a-c. circuit, 在交流電路中,
commercial, 商用, 307. [430.]
capacity of, 容量, 431.
definition, 定義, 307.
grid, 柵極, 594. [308.]
hydraulic analogy of, 用水比喻,
microphone, 話筒, 482. [309.]
oscillatory discharge, 振盪放電,
steam, 蒸汽冷凝器, 265.
variable, 可變容電器, 308.
- Conductance, 電導, 338.
- Conduction, 傳導.

of electricity, 電的, 318.
of heat, 熱的, 226.
by solutions, 溶液的導電, 362.
Conductivity of solutions, 溶液的導電性, 320, 362.
Conductor, 良導體. [401.
electric, 電的, 29, 300, 311, 318,
of heat, 熱的, 227.
Conjugate foci, 共軛焦點, 504, 523.
Conservation of energy, 能量不減,
Consistent units, 單位的一致, [189.
Convection, 對流作用, 223. [183.
currents, 對流, 222.
Converging lens, 透鏡, 528.
Coolidge X-ray tube, 柯立治 X 射
Cooker, 鍋. [線管, 577.
pressure, 高壓鍋, 244.
Cooling, 冷卻. [卻, 249.
due to evaporation, 因蒸發而冷
a gas engine, 使氣機冷卻, 271.
Cornet, 小銅角, 478, 479.
Corpuscular theory, 微粒說, 566.
Cosmic rays, 宇宙射線, 606.
Coulomb, 庫倫, 322, 366.
Charles A., 庫倫, 315.
Coulometer, 電量計, 367.
Crank and axle, 輪軸, 32, 33.
Critical angle, 臨界角, 518.
Crookes tubes, 克魯克斯管, 572.
Crown glass, 冕牌玻璃, 512, 513,
519. [597.
Crystal detector, 晶體檢波器, 593,
Curie, Mme. M. S., 居禮夫人, 572,
Current, 電流. [573, 580, 584.
alternating, 參看 Alternating
current. [361.
chemical effects of, 化學效應,
convection, 對流, 222.
damped oscillatory, 減幅振盪電
defined, 定義, 324. [流, 588.
direct, 直流, 395.
eddy, 渦流, 426.

electric, 電流, 352.
Foucault, 佛科電流, 426.
heating effect of, 熱效應, 376.
high frequency, 高頻率, 394.
induced, 感起的電流, 411.
intensity of, 電流強度, 322.
magnetic effect of, 磁效應, 352.
measurement of, 測定, 329.
plate, 板流, 596.
rectified, 整流, 400. [391.
in revolving loop, 在旋轉環中,
starting. 起動時, 405.
steady, 穩定的, 397.
unit of, 單位, 322.
voice, 聲流, 602.
of water, 水流, 318.
Curvature, 曲率.
center of, 曲率中心, 500.
Cycles, 週, 392.
Cyclotron, 迴旋加速器, 607. [266.
Cylinder condensation, 冷凝機筒,

D

Damping, 阻尼.
by eddy currents, 用渦流, 427.
d'Arsonval galvanometer, 達松發
爾電流計, 359. [380.
Davy, sir Humphry, 戴維爵士, 231,
Decibel, 分貝, 454.
Declination, 磁偏角, 286.
D-C., 參看 Direct current.
Density, 密度, 11, 13.
table, 密度表, 12.
of air, 空氣的, 94.
of gases, 氣體的, 95.
and heaviness, 密度與輕重, 11.
and pressure, 密度與壓力, 122.
of water, 水的, 87.
vs. specific gravity, 比重與密度,
Detectors, 檢波器, 593, 596. [87.
Deuteron, 氘子, 609.
Developer, 顯像劑, 528.

Deviation, 偏向.
 angle of, 偏向角, 520.
 Dew, 露, 255.
 - point, 露點, 253.
 Diaphragm, 電話筒中的薄圓片, 遮光薄片, 光闌, 418, 527, 529.
 Dielectric, 介體, 307.
 Diesel engine, 狄賽爾機, 271.
 Difference of potential, 電位差, 309.
 Diffraction, 繞射, 566. [319, 323.
 Diffusion, 擴散.
 of gases, 氣體的, 134.
 of liquids, 液體的, 133.
 pump, 擴散抽機, 97.
 Dip, 磁傾角, 286. [電機, 395.
 Direct-current generators, 直流發電機, 放電.
 of battery, 電池, 367.
 of condenser, 容電器, 586.
 through gases, 稀薄氣體中, 573.
 of lightning, 雷閃, 313.
 in partial vacuum, 在部分真空中,
 Discord, 不諧和, 473. [574.
 Dispersion, 色散, 549.
 Dissociation, 電離, 362.
 Distillation, 蒸餾, 245.
 fractional, 分餾, 246. [器, 422.
 Distributing transformer, 配電變壓器
 Distribution of electricity, 電在導體上的分布, 311.
 Diverging lenses, 發散透鏡, 521.
 Drag, (空氣的)阻力, 77.
 Drum, 鼓, 481.
 Drum armature, 鼓體電樞, 397.
 Dry cell, 乾電池, 343.
 polarization in, 極化, 344.
 Dry farming, 乾耕, 138.
 Dry ice, 乾冰, 250.

E

Ear, 耳.
 human, 人耳, 445.

Earth, 地球.
 as magnet, 好比磁體, 288.
 Eccentric, 偏心輪, 265.
 Echo, 回聲, 443, 455.
 Eclipse, 蝕, 489.
 Eddy currents, 渦流, 426.
 Edison, Thomas Alva, 愛迪生, 379.
 Efficiency, 效率.
 defined, 效率的定義, 57.
 of boiler, 汽鍋的, 264.
 of electric motor, 電動機的, 407.
 of steam plant, 蒸汽發動機的, 268.
 of transformer, 變壓器的, 423.
 of water wheels, 水車的, 73.
 Elastic limit, 彈性限度, 132.
 Elasticity, 彈性, 131.
 Electric, 電.
 arc, 電弧, 380.
 attraction, 電引力, 298.
 bell, 電鈴, 356.
 cell, 電池, 319, 321.
 charge, 電荷, 298.
 circuit, 電路, 318, 320, 335.
 conductor, 導體, 299, 311, 318,
 current, 電流, 318. [401.
 discharge, 放電, 574.
 energy, 電能, 374.
 furnace, 電熔爐, 383.
 generator, 發電機, 388.
 heating, 電流的热效應, 371.
 insulators, 絕緣體, 299.
 lighting, 電燈, 373.
 motor, 電動機, 401.
 potential, 電位, 309, 319, 323.
 power, 電功率, 373.
 resonance, 電諧應, 586.
 units, 單位, 326.
 waves, 電磁波, 695.
 welding, 電焊, 383.
 Electricity, 電, 298.
 atmospheric, 大氣中的電, 313.
 how detect, 怎樣驗電, 300.

- distribution of, 在導體上的分布, 311. [320.]
- electron theory of, 電子說, 303,
- frictional, 摩擦電, 298.
- a source of heat, 電流生熱, 371.
- in motion, 動電, 318. [電, 300.]
- positive and negative, 正電和負
- produced by induction, 感應起電,
- at rest. 靜電, 298. [309.]
- unit of quantity of, 電量的單位,
- Electro, 電的. [322.]
- chemical equivalents, 電化當量,
- magnets. 電磁體, 355, 391. 366.
- magnetic theory of light, 光之
- 電磁說, 682.
- motive force, 電動勢, 323.
- plating, 電鍍, 364.
- statics, 靜電學, 310.
- typing, 電鑄術, 365.
- Electrode, 電極, 320, 362.
- Electrolysis. 電解, 362. [途, 364.]
- industrial uses of, 在工業上的用
- theory of, 電解的理論, 363.
- Electrolyte, 電解液, 320, 362.
- Electrolytic copper, 電解銅, 365.
- Electromotive force (or voltage),
- 電動勢 (或電壓), 322.
- back, 反電動勢, 405.
- of combinations of cells, 聯合電
- 池的, 339, 340.
- of generators, 發電機的, 390.
- induced, 應電動勢, 390, 392, 412.
- of lead cell, 鉛電池, 367.
- measured, 測定的, 329.
- pulsating, 脈電壓, 396.
- sparking, 起花電壓, 574.
- terminal, 端電壓, 344.
- of transformers, 變壓器的, 422.
- of transmission lines, 輸電線的,
- unit of. 單位, 323. [424.]
- Electrons, 電子, 303, 573, 576, 582,
- theory of, 電子說, 303. [608.]
- Electrophorus, 起電盤, 309.
- Electroscope, 驗電器, 300, 305.
- E. m. f., 參看 Electromotive force.
- Energy, 能, 189.
- conservation of, 能量不滅, 189,
- definition of, 定義, 190. [196.]
- dissipation of, 散逸, 196.
- electrical, 電能, 374.
- in generator, 在發電機中的, 398.
- kinetic, 動能, 189, 191, 192, 193.
- potential, 位能, 189, 190.
- radiant, 輻射能, 217, 565.
- of radium, 鐳所放出的能, 584.
- transformation of, 變遷, 195, 轉
- 換, 398.
- unit vs. joule, 其他通用的能量單
- 位與焦耳, 375.
- Engine, 引擎.
- airplane, 飛機, 276.
- automobile, 汽車, 271.
- compound, 複式引擎, 266.
- condensing, 凝汽式引擎, 265.
- Diesel, 狄賽爾機, 271, 277.
- efficiency of, 效率, 268.
- * 4-stroke, 四程機, 274.
- gas, 氣機, 270, 271, 272.
- internal combustion, 內燃機,
- oil, 油機, 276. [280.]
- slide-valve, 移動滑門式引擎, 264.
- steam. 蒸汽機, 263.
- 2-stroke, 兩程機, 272.
- Equilibrant, 平衡力, 148.
- Equilibrium, 平衡.
- conditions of, 平衡的條件, 145.
- Ether, 以太, 229, 566.
- Evaporation, 蒸發, 249.
- Exciter, 激發機, 393.
- Expansion, 膨脹, 201.
- coefficient of, 膨脹係數, 207, 210.
- in freezing, 凝固時, 237.
- of gases, 氣體的, 211, 212.
- of liquids, 液體的, 210.

measurement of, 測定, 207.
of solids, 固體的, 205.
of water, 水的, 210.

Eye, 眼.

electric, 電眼, 535.

human, 人目, 535, 536, 537.

Eyepiece, 目鏡, 544.

F

Fahrenheit scale, 華氏溫標, 203.

Falling bodies, 自由落體, 170.

Faraday, Michael, 法拉第, 290, 355,
discovery, 發見, 388. [389.

Fathometer, 噸計, 456.

Faucet, 放水嘴, 71.

Filament, 燈絲, 380, 594.

Films, 膜.

thin, 薄膜, 560. [膜, 384.

Flaming atomic hydrogen, 氫原子

Flabiron, 熨斗.

electric, 電熨斗, 371, 372.

Fleming's rule, 弗來明定則, 390.

Floating bodies, 浮體, 84. [403.

Fluid, 流體.

expansion of, 膨脹, 210.

friction, 摩擦力, 77.

Fluorescence, 螢光, 575, 578.

Flute, 笛, 478.

Flux, 磁力線, 293.

magnetic, 磁力線, 290.

Focal length, 焦距.

of lens, 透鏡的, 522.

of mirror, 鏡的, 500.

Foci, 焦點.

conjugate, 共軛焦點, 504, 523.

Focus, 焦點. [522.

principal, of lens, 透鏡的焦點,

of beam, 光柱的, 516.

of mirror, 鏡的, 501.

real, 實焦點, 503.

virtual, 虛焦點, 503, 526.

Fog, 霧, 255.

Foot, 呎, 6.

-candle, 呎燭, 493.

-candle meter, 呎燭計, 493

-pound, 呎磅, 40.

Force, 力.

buoyant, 浮力, 83.

centripetal, 向心力, 179.

component of a, 分力, 152.

-diagram, 力的概示圖, 149.

electromotive, 電動勢, 322, 323.

of expansion, 膨脹力, 210.

of friction, 摩擦力, 56.

at fulcrum, 在支點上的力, 25.

lines of, 磁力線, 290, 353, 388.

moment of, 力矩, 24.

and momentum, 力和動量, 194.

and motion, 力與運動, 145.

vs. pressure, 力與壓力, 64.

pump, 壓上抽機, 113.

unbalanced, 不平衡的力, 181.

useful component of, 有用分力,

Force pump, 壓上抽機, 113. [152.

Forces, 力.

composition of, 合成, 146, 149.

equilibrant of, 平衡, 148.

in equilibrium, 成平衡的, 146.

molecular, 分子力, 137.

parallel, 平行力, 26.

parallelogram of, 平行四邊形, 147.

represented by arrows, 用箭形線
代表力, 146.

resolution of, 分解, 150.

resultant of, 合力, 147, 148.

unbalanced, 不平衡的力, 145.

Foucault currents, 佛科電流, 426.

Foucault, Leon, 佛科, 426, 464.

Fractional distillation, 分餾, 246.

Franklin, Benjamin, 佛蘭克林,
313, 315. [554.

Frannhofer lines, 夫牢因和斐線.

Freezing, 凝固.

by boiling, 因沸騰而凝固, 250.

evolves heat, 在凝固時放熱, 240.
 expansion in, 在凝固時膨脹, 233.
 -point, 冰點, 203, 237.
 Frequency, 頻率, 447.
 its relation with wave length,
 與波長之關係, 447. [的, 394.
 of alternating current, 交流電
 of sound, 聲的, 440, 461, 474.
 Friction, 摩擦, 52, 53.
 coefficient of, 摩擦係數, 55.
 electrification by, 摩擦起電, 293.
 fluid, 流體摩擦力, 77.
 produces heat, 摩擦生熱, 202.
 on incline, 斜面上的摩擦力, 155.
 Frost, 霜, 255.
 Fundamental, 基音, 468, 478.
 Furnace, 爐, 383.
 Fuse, 保險絲, 372.

G

Galileo, Galilei, 伽利略, 100, 170.
 Galvanometer, 電流計, 359, 427.
 Gamma rays, 伽瑪射線, 580, 582.
 Gas, 氣體.
 equation, 氣體方程式, 215. [379.
 -filled tungsten lamp, 充氣鎢絲燈,
 pressure, 壓力, 122, 135, 215.
 volume and temperature, 體積
 和溫度, 213.
 Gas engines, 氣機, 270.
 four-stroke, 四程機, 274.
 two-stroke, 兩程機, 273.
 Gases, 氣體.
 absorption of, 吸收, 139.
 diffusion of, 擴散, 134.
 electrical discharge through,
 氣體中的放電, 573.
 expansion of, 膨脹, 211. [135.
 kinetic theory of, 分子運動說,
 properties of, 性質, 63.
 sound transmitted by, 傳聲, 412.
 spectra of, 氣體的光譜, 553.

thermal properties of, 熱的性質,
 Gauge, 壓力計. [211.
 Bourdon, 波當壓力計, 123.
 mercury, 水銀壓力計, 123.
 pressure, 壓力計, 122.
 water, 水面計, 70.
 Geissler tube, 蓋斯勒管, 572.
 Generator, 發電機.
 a-c., 交流, 392.
 bipolar, 雙極, 397.
 d-c., 直流, 395.
 electric, 發電機, 391.
 electrostatic, 靜電起電機, 310.
 as motor, 電動發電機, 400.
 multipolar, 多極發電機, 397.
 principles, 原理, 391.

Gram, 克.

-calorie, 克卡, 233.
 mass, 質量, 186.
 weight, 重量, 8.

Gravitation, 引力.

universal, 萬有引力, 185.

Gravity, 重力.

acceleration of, 加速度, 171.
 center of, 重心, 29.
 specific, 比重, 87.

Grid, 柵極, 594, 595, 596. [線, 592.

Ground connection, 接地, 589, 地

Guericke, Otto von, 苟立克, 95,

Guilar, 吉泰, 477. [99, 102.

H

Harmonics, 基音, 466.

Headlights, 頭燈, 503, 564.

Heat, 熱, 201.

of combustion, 燃燒熱, 233.

conduction, 傳導, 226.

of fusion, 熔解熱, 239.

insulators, 絕緣體, 221, 227.

measurement of, 計量, 233.

mechanical equivalent of, 熱功
 當量, 292.

- molecular theory of, 分子說, 217.
 radiant, 輻射熱, 217, 229.
 evolved by radium, 鐳所放出的熱能, 584.
 saving of, 節約, 221.
 sources of, 來源, 202.
 specific, 比熱, 234.
 theory of, 學說, 217.
 transmission of, 遞送, 221.
 of vaporization, 汽化熱, 247, 254.
 waves, 熱波, 217, 229.
 and work, 熱與功, 260.
- Heating, 煖室.
 electric, 電流生熱, 371.
 hot-air, 熱空氣煖室, 225.
 hot-water, 熱水煖室, 224.
 indirect system, 簡接煖室法, 226,
 steam, 蒸汽煖室, 248. [248.
 Hefner, 赫, 491.
 Helium, 氦, 555, 580, 584.
 in airships, 用於飛艇, 117.
 Helmholtz, Hermann von, 赫姆霍茲, 196, 463, 464, 555. [586.
 Henry, Joseph, 亨利, 355, 388, 389,
 Hertz, Heinrich Rudolf, 赫芝, 573,
 588, 590, 605.
 High-vacuum pump, 高度真空抽機,
 Hooke's law, 虎克定律, 130. [98.
 Horse power, 馬力, 48.
 h.-p. hour, 馬力時, 48, 375.
 Humidity, 溼度, 252.
 Huygens, 惠更斯, 178, 566.
 Hydrant, 起水筒, 71.
 Hydraulic, 水力的.
 lift, 水壓起重臺, 82.
 press, 水壓機, 80.
 Hydraulic analogue, 水的比喻.
 of cell, 電池的, 321. [340.
 of cells in parallel, 並聯的電池的,
 of cells in series, 串聯的電池的,
 of condenser, 容電器的, 308. [339.
 of electric circuit, 電路的, 321.
 of difference of potential, 電位差的, 309.
 of voltmeter, 伏特計的, 361.
 Hydrometer, 比重計, 89, 371.
 Hygrometer, 溼度計, 254.
- I
- Ice, 冰, 233.
 -making, 製冰, 250.
 Ignition system, 發火系統, 415.
 Illumination, 照明, 489, 493, 496.
 Image, 像.
 formed by pinhole, 針孔成像, 489.
 formed by plane mirror, 平面鏡所造成的像, 498.
 formed by curved mirror, 曲面鏡所造成的像, 500.
 formed by lens, 透鏡造成的像,
 defects of, 缺點, 527. [525.
 real, 實像, 506.
 size of, 像的大小, 525.
 virtual, 虛像, 504, 506.
 Impedance, 阻抗, 429.
 Impulse, 衝量, 194.
 Incandescent lamp, 白熾電燈, 379.
 vacuum in, 真空, 379.
 Incidence, 入射.
 angle of, 入射角, 497, 498, 511.
 Inclined plane, 斜面, 42, 155, 170.
 Index of refraction, 折射率, 512,
 517.
 Induced currents, 感應電流, 411.
 amount of, 大小, 391.
 direction of, 方向, 390, 411.
 e. m. f., 電動勢, 390, 411.
 electrification of, 起電, 304.
 Induced magnetism, 應磁, 292.
 Inductance, 自感應, 414.
 Induction, 感應.
 charging by, 感應起電, 304.
 coil, 感應圈, 411, 413, 414, 593.
 machines, 感應起電機, 309.

motor, 感應電動機, 493.
 electric, 電感應, 304.
 magnetic, 磁感應, 292.
 Inertia, 慣性.
 law of, 慣性定律, 177.
 in curved motion, 曲線運動, 179.
 electromagnetic, 磁慣性, 416.
 Infrared rays, 紅外射線, 565.
 Insulators, 絕緣體.
 electric, 電的, 299.
 heat, 熱的, 227.
 Interaction, 相互作用.
 law of, 定律, 184.
 Interference, 干涉, 566.
 of light, 光的, 560.
 of sound, 聲音的, 471.
 Inverse squares, 反平方.
 law of, for gravitation, 重力的
 反平方定律, 186. [律, 490.
 for illumination, 照度的平方反比
 for magnetic attraction and
 repulsion, 磁引力和磁斥力, 286.
 for sound intensity, 聲音強度的
 反平方比律, 452.
 Ionization, 電離, 362, 575, 582.
 Ionosphere, 電離層, 615.
 Isobars, 等壓線, 105.
 Isogonic lines, 等偏線, 287.

J

Jackscrew, 起重螺旋, 40.
 Joliot, Frederick and Irene Curie,
 朱力奧夫人, 573, 584.
 Joule, 焦耳, 375. [261.
 Joule, James Prescott, 焦耳, 260.

K

Kelvin (Sir William Thomson),
 開爾文, 261, 293, 586.
 temperature scale, 開氏溫標, 213.
 Key, 電鍵.
 telegraphic, 電報機的, 357.

Kilogram, 仟克, 8.
 -calorie, 仟克卡, 234.
 mass, 質量, 186.
 Kilowatt, 仟瓦, 49, 373.
 -hour, 仟瓦小時, 375.
 Kinetic, 動力.
 energy, 動能, 189. [135.
 theory of gases, 氣體分子運動說,
 Kirchhoff, 克啓荷夫, 552, 554.
 Kodachrome film, 柯達膠片, 對 559.

L

Lamps, 燈, 488.
 arc, 弧燈, 380.
 electric, 電燈, 378.
 efficiency, 效率, 494.
 incandescent, 白熾燈, 378.
 luminous intensity of, 光度, 490.
 mercury arc, 汞弧燈, 381.
 neon, 氖燈, 382.
 sodium, 鈉汽燈, 382.
 sun, 太陽燈, 381.
 standard, 標準燈, 491.
 tungsten, 鎢絲燈, 379.
 ultraviolet, 外射線燈, 382.
 Lantern, projecting, 幻燈, 529, 530.
 Latent heat, 潛熱.
 of fusion, 熔解熱, 239.
 of vaporization, 汽化熱, 247.
 Lead storage cell, 鉛蓄電池, 367.
 Left-hand rule (motors), 左手定則
 (電動機的), 403.
 Length, 長度.
 units of (table), 單位表, 6.
 Lens, 透鏡, 510, 521.
 achromatic, 消色差透鏡, 550.
 converging, 會聚透鏡, 521, 529.
 crystalline, 暗珠, 536.
 cylindrical, 圓柱面透鏡, 538.
 defects in, 缺點, 527.
 diverging, 發散透鏡, 521, 526, 544.
 equation, 公式, 524.

local length of, 焦距, 522.
 principal focus of, 主焦點, 522.
 formula, 公式, 523.
 images constructed by, 透鏡所
 造成的像, 523.
 magnification by, 透鏡的倍率,
 Lenz's law, 林慈定律, 412. [525.
 Levers, 槓桿, 18, 23, 28, 57.
 Leyden jar, 來頓瓶, 307.
 discharge of, 放電, 586.
 Lift pump, 提上抽機, 112.
 Lifting magnet, 舉重磁體, 355.
 Light, 光, 488.
 advances in straight lines, 依直
 線進行, 489.
 analysis of, by prism, 光波稜鏡分
 beam of, 光柱, 497. [析, 548.
 electric, 電光, 378.
 interference of, 干涉, 560.
 mixing, 混合, 557.
 nature of, 本性, 565, 567.
 polarized, 偏極化光, 561.
 rays of, 光線, 497.
 reflection of, 反射, 556.
 refraction of, 折射, 511, 516.
 theory of, 學說, 566.
 velocity of, 速率, 513, 517.
 transmission, 透射, 557.
 wave length of (table), 波長
 (表), 559.
 waves, 光波, 515, 560, 589.
 Lightning, 電閃, 313.
 rod, 避雷針, 313, 314.
 Lines of force, 磁力線, 290.
 push exerted by, 推力, 401.
 wire cutting, 切割磁力線的導線,
 Liquids, 液體. [448.
 buoyant effect of, 浮力, 85.
 conduction of electricity by,
 導電, 362.
 diffusion, 擴散, 133.
 expansion of, 膨脹, 210.

incompressibility of, 不能壓縮,
 mechanics of, 力學, 63. [120.
 molecular attractions in, 分子
 吸引力, 133.
 pressure in, 壓力, 64.
 properties, 性質, 63.
 pumps for, 液體抽機, 112.
 separation of, 分離, 246.
 sound transmitted by, 傳聲, 442.
 Liter, 升, 6.
 Lodestone, 磁石, 284.
 Longitudinal waves, 縱波, 448.
 Loudness, or intensity, of sound,
 響度或音強, 462.
 Loud-speakers, 揚聲器, 484.
 Lubrication, 潤滑, 55.
 Lumen, 流明, 494.
 Luminescent paint, 發光漆, 584.

M

Machines, 機械, 50.
 atom-smashing, 原子擊破機, 507.
 compound, 複合機械, 46.
 efficiency of, 效率, 57.
 elements, 基本機件, 17.
 hydraulic, 水力的, 64.
 pneumatic, 用氣的, 94.
 refrigerating, 發冷機, 251.
 Magdeburg hemispheres, 馬德堡半
 Magnet, 磁體 [球, 99.
 atomic, 原子, 295.
 current induced by, 由磁體所感
 起的電流, 411.
 earth a, 地球, 288.
 electro, 電磁體, 355, 391. [402.
 field around, 磁體周圍的磁場, 290,
 by induction, 由感應而生的, 292.
 lifting, 舉重磁體, 355.
 natural, 天然磁體, 284.
 permanent, 永久磁體, 493.
 saturated, 飽和磁體, 295.
 temporary, 暫時磁體, 284.

- Magnetic, 磁的.
- effects of electric current, 電流的磁效應, 353.
 - flux, 磁力線, 290.
 - force, 磁力, 290.
 - repulsion, 磁斥力, 332.
- Magnetic field, 磁場, 290.
- around coil, 線圈周圍的磁場, 354.
 - around current, 電流周圍的磁場, 353.
 - of a generator, 發電機的, 396.
 - rotating, 旋轉磁場, 433.
 - side push, 側向推力, 401.
- Magnetic poles, 磁極, 285, 288.
- Magnetism, 磁, 283, 284. ^②
- induced, 應磁, 292. [294.
 - molecular theory of, 磁性學說,
- Magnetite, 磁鐵礦, 284.
- Magneto, 久磁發電機, 294, 391.
- Magnification, 倍率.
- linear, 線倍率, 525.
- Magnifying glass, 放大鏡, 539.
- Magnifying power, 放大率.
- of lens, 透鏡的, 525.
 - of microscope, 顯微鏡的, 539.
 - of opera glass, 觀劇鏡的, 544.
 - of telescope, 望遠鏡的, 540.
- Major, 較大的.
- scale, 大音譜, 474.
 - triad, 大三和音, 474.
- Mandolin, 曼陀鈴, 477.
- Marconi, Guglielmo, 馬可尼, 573.
- Mass, 質量, 186. [590.
- Maximum and minimum thermometer, 最高最低溫度計, 220.
- Mazda lamps, 鎢絲燈, 378.
- Measurement, 量度, 4.
- of current, 電流的測定, 329.
 - of resistance, 電阻的測定, 330.
 - of voltage, 電壓的測定, 329.
- Mechanical advantage, 機械利益,
- 2, 33, 43, 45, 81.
- Mechanical equivalent, 功當量.
- of electricity, 電功當量, 408.
 - of heat, 熱功當量, 262.
- Megaphone, 喇叭筒, 462.
- Melting point, 熔點, 237.
- table, 表, 237. [238.
 - effect of pressure on, 壓力影響,
- Mercury-arc lamp, 汞弧燈, 381.
- Meter, 米.
- foot-candle, 呎燭計, 493.
 - standard, 標準, 5.
 - watt-hour, 瓦特小時計, 375.
- Metric system, 米制, 4, 1 (附錄).
- Michelson, Albert Abraham, 邁克爾遜, 514, 515.
- Micrometer screw, 測微螺旋, 45.
- Microphone, 話筒, 482, 602.
- Microscope, 顯微鏡, 539, 540.
- Mil, 密爾, 331.
- Miller, D. C., 米勒, 469.
- Mirror, 鏡, 497.
- concave, 凹鏡, 500, 502.
 - convex, 凸鏡, 500, 503.
 - curved, 曲面鏡, 500.
 - focus, 焦點, 501.
 - formula, 球面鏡公式, 504.
 - parabolic, 拋物面鏡, 502.
 - plane, 平面鏡, 499.
 - prism as a, 稜鏡, 519.
- Mixing colors, 色的混合, 557.
- pigments, 顏料, 558.
- Mixtures, 混合.
- method of, 混合法, 235.
- Modulator, 調盪器, 601.
- Molecular theory, 分子說.
- of cohesion and adhesion, 內聚力與附着力的, 137.
 - of gases, 氣體的, 135.
 - of heat, 熱的, 217.
 - of magnetism, 磁的, 294.
- Molecules, 分子, 63, 137, 303.
- Moments, 力矩.

principle of, 力矩原理, 24.
 Momentum, 動量, 194.
 Monoplane, 單葉機, 158.
 Morse, S. F. B., 莫爾斯, 357.
 Moseley, H. G. J., 莫士萊, 581.
 Motion, 運動.
 accelerated, 加速運動, 162, 170.
 laws of, 定律, 166, 177.
 Motion pictures, 活動電影, 530,
 colored, 彩色電影, 559. [534.]
 with sound, 有聲, 532.
 Motor, 電動機, 388.
 a-c, 交流電動機, 432.
 commutator, 換向電動機, 432.
 d-c, 直流電動機, 401.
 back e. m. f. of, 反電動勢, 405.
 efficiency of, 效率, 407.
 electric, 電動機, 401.
 -generator, 電動發電機, 400.
 induction, 感應電動機, 433, 434.
 multipolar, 多極, 405.
 rule, 定則, 403.
 series, 串繞, 404, 432.
 shunt, 分繞, 401.
 starting a, 使開動, 405.
 synchronous, 同步, 432.
 Muffler, 減聲器, 274.
 Musical, 音樂.
 instruments, 樂器, 476.
 scale, 音階, 473.
 tones, 樂音, 460, 473.

N

National Bureau of Standards,
 國立標準局, 491. [168.]
 Negative acceleration, 負加速度,
 Neon tubes, 霓虹燈玻璃管, 574.
 Neutrons, 中子, 608.
 Newcomen, Thomas, 牛考門, 259.
 Newton, Sir Isaac, 牛頓, 177, 566.
 Nodes, 波節, 447, 466.
 Noise, 噪聲, 454, 460.

Nonconductors, 非導體, 299.
 Normal, 法線, 498, 511.
 Note, 音符.
 fundamental, 基音, 468.
 Nucleus of atom, 原子核, 608.

O

Objective, 物鏡, 529.
 Octave, 八音度, 474.
 Oersted's discovery, 奧斯特的發見,
 Ohm, 歐姆, 323. [352.]
 Ohm, Georg Simon, 歐姆, 323, 325.
 Ohm's law, 歐姆定律, 326, 335, 430.
 Oil engines, 油機, 270.
 Onnes, H. Kamerlingh, 翁涅斯,
 Opera glass, 觀劇鏡, 543. [333, 334.]
 Ophthalmoscope, 診察鏡, 502.
 Optical instruments, 光學儀器,
 Organ, 風琴. [510, 528.]
 pipe, 風琴管, 478.
 electrical, 電風琴, 479.
 Oscillations, 振盪, 599, 601.
 Oscillator, 振盪器, 599, 601.
 Oscillatory, 振盪.
 current, 振盪電流, 588.
 discharge, 振盪放電, 586.
 Overtones, 泛音, 468, 478.
 Oxygen, 氧.
 compressed, 壓縮氧, 122.

P

Parabolic mirror, 拋物面鏡, 502.
 Parallel, 平行, 並聯.
 cells in, 並聯的電池, 340.
 circuits, 並聯電路, 336.
 forces, 平行力, 26.
 Parallelogram of forces, 力之平行
 四邊形, 147.
 Pascal, Blaise, 巴斯噶, 121.
 Pascal's law, 巴斯噶原理, 80.
 vases, 容器, 66.
 Pelton wheel, 拍爾吞水車, 72.

- Pendulum, 擺, 172.
 resonance of, 擺的諧應, 587.
- Penumbra, 半影, 489.
- Permalloy, 巨姆齊, 293.
- Permanent magnets, 永久磁體.
 uses of, 用途, 293.
- Permeability, 導磁係數, 293.
- Phase, 相.
 of a-c., 交流的, 447.
 of waves, 波的, 472.
- Phonodeik, 聲波顯示器, 460, 469.
- Phonograph, 唱機, 481.
- Photo electric cell, 光電管, 523.
- Photometer, 光度計, 491. [566.
- Piano, 鋼琴, 476.
 keyboard of, 鍵盤, 475.
- Pick-up, 拾音器, 482.
- Pigments, 顏料, 558.
- Pilot balloons, 探空氣球, 109.
- Pitch, 螺距, 45.
 of screw, 螺旋的, 45.
 of sound, 音調, 461.
- Plane, 平面.
 inclined, 斜面, 42.
 mirror, 平面鏡, 499.
- Plane polarized light, 面偏光, 563.
- Plate, 板.
 circuit, 板電路, 596, 598.
 electrotype, 電鑄版, 365.
- Platform balance, 台秤, 9.
- Pneumatic machine, 用氣的機械,
- Polarization, 偏極化, 563. [44.
- Polarized light, 偏極化光, 561.
- Poles, 極.
 of electromagnet, 電磁體的, 355.
 of the earth, 地球的, 288.
 of permanent magnet, 永久磁體的, 285.
- Positive electricity, 正電, 300.
- Positron, 正子, 304.
- Potential, 位. [828.
 difference of, 電位差, 309, 319,
 electrical, 電位, 311.
- Potential energy, 位能, 189.
- Pound, 磅.
 avoirdupois, 常衡, 9.
- Power, 功率, 48.
 a-c., 交流電路中的功率, 430.
 brake test, 用輪掣測定功率, 50.
 d-c., 直流電路中的功率, 373.
 electric, measurement of, 電功率計算法, 373.
 -factor, 功率因子, 430.
 horse-, 馬力, 48. [廢, 424.
 plants, hydroelectric, 水力發電
 transmission of, 功的傳遞, 50,
 vs. work, 功與功率, 58. [406.
- Pressure, 壓力, 64.
 absolute, 絕對壓力, 123.
 air under, 受壓力的空氣, 118.
 and speed, 壓力和速率, 78.
 of atmosphere, 大氣的壓力, 98.
 -coefficient of gases, 氣體的定積
 增壓係數, 215.
 -cooker, 高壓鍋, 244.
 effect of, on boiling, 壓力對沸的
 影響, 243. [238.
 on freezing, 壓力對凝固的影響,
 by the gauge, 在壓力計上, 123.
 gauges, 壓力計, 123.
 in liquids, 液體內, 65.
 standard, 標準壓力, 244.
 transmitted by gases, 氣體傳遞壓
 力, 118.
 transmitted by liquids, 液體傳遞
 vapor, 汽壓, 243. [壓力, 64, 80.
- Primary, 原線圈.
 coil, 原線圈, 422. [422.
 of transformer, 變壓器的原線圈,
- Prime mover, 原動機, 50.
- Printing in colors, 彩色印刷, 571.
- Prism, 稜鏡, 520. [面, 519.
 as reflecting surface, 用作反射
 -binocular, 稜鏡雙筒望遠鏡, 544.

- causes dispersion, 引起色散, 548.
 refraction by a, 引起折射, 548.
 reflecting, 反射稜鏡, 519.
 spectrum by, 造成光譜, 548.
- Projectiles. 拋射體, 174.
- Projecting lantern, 幻燈, 530.
- Protons, 質子, 609.
- Pulley, 滑車, 34.
 differential, 差動滑車, 47.
- Pumps, 抽機.
 centrifugal, 離心抽機, 114.
 diffusion, 擴散抽機, 97.
 force, 壓上抽機, 113.
 high-vacuum, 高度真空抽機, 98.
 for liquids, 液體抽機, 112.
 vacuum, 真空抽機, 95.
- Pyrex glass, 派勒克斯玻璃, 208.

Q

- Quality, 音品.
 of musical tone, 樂音的, 462.
- Quantum theory, 量子論, 553, 566.

R

- Radiant heat, 輻射熱, 217, 229.
- Radiation, 輻射,
 of heat, 熱的輻射, 229.
 from radium, 鐳的輻射, 580.
- Radiators, 射熱器,
 steam, 蒸汽射熱器, 248.
- Radio, 射電.
 amplifiers, 放大器, 600.
 batteries, 'A' and 'B', 電池組,
 'A' 與 'B', 595, 596.
 broadcasting, 廣播, 601.
 detectors, 檢波器, 596.
 frequency, 頻率, 589.
 telegraphy, 通報術, 589.
 telephony, 通話術, 601.
 waves, 電波, 588.
 wave length, 波長, 591.
- Radioactivity, 放射性, 578.

- artificial, 人造放射性, 584.
- Radiograph, 透射相片, 577.
- Radiometer, 輻射計, 230.
- Radium, 鐳, 572.
 emanation, 鐳射氣, 583.
 energy of, 鐳的能, 584.
 radiation, 放射, 580.
 uses of, 用途, 583.
- Rain, 雨, 255.
- Rarefactions, 疏部, 451.
- Rays, 射線.
 alpha, 亞爾法射線, 580.
 beta, 比忒射線, 580.
 cathode, 陰極射線, 575.
 cosmic, 宇宙射線, 606.
 gamma, 茄瑪, 582.
 infrared, 紅外射線, 565.
 light, 光, 498.
 Roentgen, or X, 倫琴射線, 或 X
 射線, 572.
 ultraviolet, 紫外射線, 565.
- Receiver, 聽筒.
 telephone, 電話聽筒, 416.
- Receiving sets, 接收機.
 regenerative, 再生接收機, 598.
 a-c., 交流接收機, 604.
 vacuum-tube, 真空管, 597.
- Reciprocating steam engine, 往復
 蒸汽機, 264.
- Rectifiers, 整流器. [400.
 copper oxide, 氧化亞銅整流器,
- Refining, 精練.
 of metals, 金屬, 365. [542.
- Reflecting telescope, 反射望遠鏡,
- Reflection, 反射.
 angle of, 反射角, 497.
 law of, 反射定律, 497.
 of light, 光的, 497.
 by prism, 稜鏡的, 519.
 of sound, 聲音的, 455.
 total, 全反射, 517.
- Reflectors, 反射鏡, 503.

Refracting angle, 折射角, 511.
 Refraction, 折射, 511.
 angle of, 折射角, 511.
 in glass, 在玻璃中的, 512.
 index of, 折射率, 512.
 law of, 定律, 511.
 by lens, 透鏡的, 522.
 of light, 光的, 510.
 by plate, 平行面所引起的, 519.
 by prism, 稜鏡的, 519.
 reason for, 緣由, 516.
 in water, 水中的, 510.
 Refrigerator, 冷藏箱, 241.
 gas fired, 氣體發冷機, 252.
 ice-, 冰箱, 241.
 mechanical, 發冷機, 251.
 Regeneration, 再生, 598.
 Relativity, 相對論, 566.
 Relay, 替續器.
 telegraphic, 電報機的, 358.
 Repulsion, 斥力.
 electric, 電的, 300.
 magnetic, 磁的, 286.
 Resistance, 電阻, 335.
 air, 空氣阻力, 78.
 of ammeter, 安培計的, 329.
 combinations of cells, 聯合電池組的, 340.
 computation of, 計算, 331.
 of copper wire, 銅導線的, 331.
 table, 電阻表, 2 (附錄).
 of divided circuit, 分岐電路的, 337. [外電阻, 341.
 internal and external, 內電阻與
 measurement of, 測定, 330.
 specific, 電阻係數, 332.
 starting, 開動電阻, 406. [332.
 temperature affects, 溫度的影響,
 unit of, 單位, 323.
 of voltmeter, 伏特計的, 360.
 of wire, 導線的, 331.
 Resistances, 電阻.

 in parallel, 並聯電路的, 337.
 in series, 串聯電路的, 335.
 Resolution of forces, 力的分解, 150.
 Resonance, 諧應, 463.
 acoustical, 聲的, 463.
 electrical, 電諧應, 586.
 of pendulums, 擺的, 587.
 Resonators, 諧應器, 465.
 Resultant, 合力, 147.
 Retardation, 減速度, 166.
 Retina, 網膜, 536.
 Reverberation, 餘響, 458.
 Revolving field, 可轉磁場, 393.
 Rheostat, 電阻器, 406.
 Right-hand rule (generators), 右
 手定期 (發電機), 390. [572.
 Roentgen, Wilhelm Konrad, 倫琴,
 Roentgen rays (X rays), 倫琴射線
 (X 射線), 576.
 Roller bearings, 滾子軸承, 58.
 Rotary converter, 旋轉變流機, 400.
 Rotating pumps, 迴轉抽機, 97.
 Rotor, 轉子.
 of induction motor, 感應電動機
 的, 434. [333.
 Rowland, Henry A. 羅蘭德, 262,
 Ruhmkorff coil, 倫考夫感應圈, 414.
 Rutherford, Lord, 羅德福勳爵, 580.

S

 Sailboat, 帆船, 156. [(表), 253.
 Saturated air (table), 飽和空氣
 Saxophone, 薩氏簧管, 478.
 Scale, musical, 音階, 473.
 Scales, platform, 台秤 9.
 Screen grid tubes, 屏柵極管, 59.
 Screw, 螺旋, 44.
 Seaplane, 水上飛機, 156.
 Searchlight, 探照燈, 503.
 Secondary coil, 副線圈, 422.

- of transformer, 變壓器的, 422.
- Self-inductance, 自感應, 414, 430.
- Sensitive flame, 靈敏, 455.
- Series, 串聯.
- cells in, 電池, 339.
- circuit, 電路, 335.
- motors, 串繞電動機, 404.
- Shadow, 影.
- cathode-ray, 陰極射線, 578.
- earth's, 地球的, 489.
- Shear, 軋歪, 129.
- Sheave, 滑輪, 34.
- Short-sighted eye, 近視眼, 536.
- Shunt, 分路.
- of ammeter, 安培計的, 360.
- motor, 分繞電動機, 406.
- Sine of angle, 角的正弦, 512.
- Single-phase current, 單相電流,
- Siphon, 虹吸管, 114. [394.]
- Siren, 驗音, 461.
- Size, 大小.
- apparent, 物體的視大小, 538.
- of image, 像的大小, 525.
- Snow, 雪, 255.
- Solar spectrum, 太陽光譜, 548.
- Solids, 固體.
- density of, 密度, 13.
- electrical, conductivity of, 導電性, 249. [444.]
- sound transmitted by, 固體傳聲,
- specific gravity of, 比重, 87.
- spectra of, 光譜, 553. [227.]
- thermal conductivity of, 導熱性,
- thermal expansion of, 受熱膨脹,
- Solutions, 溶液. [205.]
- conduction by, 溶液的電解 361.
- Sonometer, 弦音計, 476.
- Sound, 聲音, 440.
- cause of, 來源, 441. [向, 454.]
- finding direction of, 求聲音的方
- intensity of, 強度, 452.
- interference of, 干涉, 471.
- level meter, 響度計, 453.
- musical, 樂音, 460.
- nature of, 性質, 462,
- reflection of, 反射, 455.
- in rooms, 室內的, 457.
- sensation of, 聽覺, 444.
- track on film, 膠片上的音跡, 532.
- transmission of, 傳遞, 442, 443.
- velocity of, 速率, 443.
- waves, 聲波, 440.
- wave, energy in, 聲波的能量, 462.
- wave, motion of, 聲音是波動, 446.
- waves, photography, 聲波相片,
- Sounder, 發聲器. [469.]
- telegraphic, 電報機的, 357.
- Spark, 電花.
- coil, 線圈, 412, 413.
- oscillations of, 振盪, 587.
- plug, 電花插頭, 414.
- Sparking voltage, 起花電壓, 574.
- Specific, 特種的.
- gravity, 比重, 87.
- heat, 比熱, 235. †
- resistance, 電阻係數, 332.
- Spectra, 光譜, 553.
- absorption, 吸收光譜, 553.
- brightline, 明線光譜, 553.
- continuous, 連續光譜, 553.
- solar, 太陽光譜, 554.
- Spectroscope, 分光鏡, 550.
- direct-vision, 直視分光鏡, 551.
- uses, 用處, 554.
- Spectrum, 光譜, 548.
- audible, 可聞音譜, 475.
- brightline, 明線光譜, 553.
- chart, 光譜圖, 對 553.
- complete, 輻射全譜, 565.
- invisible, 不可見的, 565.

- by prism, 稜鏡造成光譜, 548.
solar, 太陽光譜, 554.
- Speed, 速率.
average, 平均速率, 162.
variable, 變速率, 164.
- Speedometer, 速率計, 427.
- Split ring, 裂環, 395.
- Spring balance, 彈簧秤, 9.
- Spyglass, 偵察鏡, 543. [435.]
- Squirrel-cage rotor, 鼠籠式轉子,
- Stability, 穩定, 30.
- Standard, 標準.
kilogram, 仟克, 9.
lamp, 標準燈, 491
meter, 米, 4.
pressure, 壓力, 244.
weight, 重量, 187.
- Starting, 開動.
a motor, 電動機, 405.
-resistance, 開動電阻, 406.
-torque, 開動轉矩, 406.
- Steam, 蒸汽, 242.
boiler, 汽鍋, 263.
engine, 蒸汽機, 263.
heating, 蒸汽暖室, 248.
latent heat of, 潛熱, 247.
plant, 蒸汽發動機, 263, 268.
turbines, 蒸汽輪機, 267.
- Stereopticon, 幻燈, 529.
- Stop watch, 停錶, 10.
- Storage batteries, 蓄電池組, 367.
lead, 鉛蓄電池, 367.
testing, 檢查, 370.
uses, 用途, 369.
- Strain, 脅變, 129.
- Stratosphere, 同溫層, 109.
- Streamlined bodies, 流線型車身, 77.
- Street-car motor, 電車的電動機, 407.
- Strength, 強度.
breaking, 斷裂強度, 132.
- Stress, 脅迫, 128.
- Strings, 弦.
vibrating, 振動, 476. [455.]
- Submarine telegraph, 潛艇電報,
- Suction pump, 提上抽水機, 100.
- Sun lamp, 太陽燈, 381.
- Superconductivity, 超導性, 334.
- Supersonic vibrations, 超聲振動,
- Surface tension, 表面張力, 136. [462.]
- Sympathetic vibrations, 諧應, 463.
- Synchronous motor, 同步電動機, 432.
- T**
- Telegraph, 電報, 356.
key, 電鍵, 357.
radio-, 射電通報術, 589.
relay, 替續器, 358.
- Telephone, 電話.
radio-, 射電通話術, 601.
receiver, 聽筒, 293.
transmitter, 話筒, 417.
- Telescope, 望遠鏡.
astronomical, 天文的, 541.
erecting, 正像望遠鏡, 543.
reflecting, 折射, 541.
Yerkes, 葉爾克斯, 541.
- Temperature, 溫度.
absolute, 絕對溫度, 212.
effect on resistance, 對於電阻的
high, 高溫度, 216. [影響, 332.]
low, 低溫度, 216.
scales, 標, 203.
- Tension, 張緊, 128.
surface-, 表面張力, 136.
- Terminal voltage, 端電壓, 344.
- Thermometer, 溫度計, 203.
centigrade, 百分溫標, 203.
clinical, 臨牀溫度計, 205.
Fahrenheit, 華氏溫標, 204.
maximum and minimum, 最高

- 最低溫度計, 220.
 metallic, 金屬溫度計, 207.
 recording, 記溫器, 207.
 special types of, 特殊溫度計, 204.
 wet- and dry-bulb, 乾溼泡溫度計,
 Thermos bottle, 保溫瓶, 228. [254.
 Thermostat, 定溫器, 207.
 Thomson, Elihu, 湯姆生, 435.
 Thomson, Sir J. J., 湯姆生爵士, 572.
 Thomson, William (Lorn Kelvin),
 湯姆生 (愷爾文勳爵), 261.
 Thumb rule, 拇指定則.
 for coil, 線圈的, 355.
 for wire, 導線的, 353.
 Thunder, 雷, 313.
 Tickler, 反饋線圈, 598.
 Time, 時間.
 units of, 單位, 10.
 Tone wheel, 音輪, 479.
 Torque, 轉矩, 130.
 on armature, 在電樞, 404.
 starting-, 開動轉矩, 406.
 Torricelli's experiment, 托里拆利
 的實驗, 101.
 Tourmaline crystal, 熱電石晶體,
 Traction, 摩擦力, 53. [563.
 Tractor, 曳引機, 184.
 Transformer, 變壓器, 421.
 bell-ringing, 電鈴變壓器, 421.
 distributing, 配電變壓器, 422.
 out-of-doors, 戶外裝置, 425.
 uses of, 作用, 421.
 Transmission, 傳遞.
 of electric power, 電能的, 424.
 of electric waves, 電波的, 588.
 gears, 齒輪, 279.
 of heat, 熱的, 222.
 of light, 光的, 515.
 of mechanical power, 功的, 50.
 of sound, 聲的, 442.
 Transmission apparatus, 發送器械.
 radio, 射電, 601.
 Transmitter, 話筒.
 radio, 無線電話筒, 482.
 telephone, 電話的話筒, 417.
 Transverse waves, 橫波, 448.
 Triad, 三.
 major, 大三和音, 474.
 Triode, 三極管, 595.
 Troposphere, 變溫層, 109.
 Tuned circuit, 可調電路, 591.
 Tungsten lamp, 鎢絲燈, 379.
 Tuning fork, 音叉, 441.
 Turbine, 輪機.
 steam, 蒸汽輪機, 267,
 water, 水輪機, 73.
 Twisting, 扭轉, 128.
 Two-phase current, 二相電流, 434.
 Tyndall, John, 丁約翰, 203.
- ## U
- Ultraviolet rays, 紫外射線, 565.
 Umbra, 本影, 489. [185.
 Universal gravitation, 萬有引力,
 Uranium, 鈾, 578.
- ## V
- Vacuum, 真空, 96.
 cleaning, 真空除塵法, 98.
 electric discharge in, 在部分真
 空中的放電, 574.
 'nature abhors', 自然忌真空, 100.
 pans, 真空鍋, 444.
 partial, 部分, 96.
 perfect, 完全, 96.
 pumps, 真空抽機, 97.
 sound not transmitted by, 聲音
 不能通過真空, 442.
 tube, 真空管, 381.
 -tube detector, 真空管檢波器, 569.

-tube receiving set, 真空管接收機, 598.
 weight in, 在真空中的重量, 116.
 Vapor pressure, 汽壓, 243.
 Velocity, 速度.
 in relation with wave length, 速度與波長之關係, 447.
 or speed, 或速率, 162.
 table, 表, 163.
 of light, 光的, 513.
 of molecules, 分子的速度, 135.
 of sound, 聲的, 443.
 Ventilation, 換氣, 225.
 Vibration, 振動.
 audible limits of, 可聞限度, 461.
 forced, 強壓振動, 467.
 frequency of, 頻率, 461.
 longitudinal, 縱的, 449. [481.
 of membranes, 有振動膜的樂器,
 sound caused by, 聲音由振動而來,
 of strings, 弦的, 476. [441.
 sympathetic, 諧應, 463.
 of tuning fork, 音叉的, 441.
 Violin, 提琴, 477.
 Virtual, 虛.
 focus, 虛焦點, 503.
 image, 虛像, 504.
 Visual angle, 視角, 538.
 Vocal cords, 聲帶, 481.
 Voice, 聲音, 481.
 Volt, 伏特, 323.
 Volta, Alessandro, 伏打, 319.
 Voltage, 電壓, 324.
 drop in a line, 線路上的壓降, 345.
 measurement of, 測定, 329.
 sparking, 產生電火花的電壓, 373.
 terminal, 端電壓, 344.
 Voltmeter, 伏特計, 329, 360.
 Volume, 體積.
 units of, 單位, 6.

W

Watch, 錶.
 balance wheel of, 擺輪, 209.
 stop, 停錶, 10.
 Water, 水.
 a poor conductor, 不良導體, 227.
 density of, 密度, 12.
 distilled, 蒸餾水, 246:
 -equivalent, 水當量, 236.
 expansion of, 膨脹, 210.
 -gauge, 水面計, 70.
 heat of freezing of, 凝固時的熱,
 240. [247.
 heat of vaporization of, 汽化熱,
 heating system, 熱水暖室, 224.
 pressure, 壓力, 71.
 refraction of light by, 水中光的
 折射, 519. [517.
 total reflection in, 水中的全反射,
 -tube boiler, 水管式汽鍋, 264
 turbines, 水輪機, 72.
 waves, 水波, 446.
 wheels, 水車, 72.
 works, 給水裝置, 70.
 Watt, 瓦特, 373.
 -hour meter, 瓦特小時計, 375.
 meter, 瓦特計, 374.
 -second, 瓦特秒, 375.
 Watt, James, 瓦特, 327.
 Wave, 波.
 -front, 波前, 516.
 -length, 波長, 447.
 of colors, 各色的波, 555.
 of light, 光波, 555.
 model, 模型, 449.
 table, 表, 556.
 -formula, 波的公式, 447.
 Waves, 波.
 light, 光波, 515.

- radio, 射電波, 588.
 in solids, 在固體內, 449.
 sound, 聲波, 451, 456.
 transverse and longitudinal, 橫波與縱波, 448.
 standing, 駐波, 467.
 water, 水波, 449.
- Weathermap, 天氣圖, 105.
- Wedge, 劈, 44.
 rotating, 楔子, 44.
- Weight, 重量.
 of air, 空氣的, 95.
 local, '本地' 重量, 187.
 vs. mass, 重量與質量, 186.
 standard, 標準重量, 187.
 units of, 單位, 8.
 table, 表, I (附錄).
 in vacuum, 在真空, 116.
- Welding, 鐔.
 electric, 電鐔, 383.
- Wet- and dry-bulb thermometers, 乾溼泡溫度計, 254.
- Wheel and axle, 輪軸, 32.
- Wheels, 輪.
 water, 水車, 72. 房室, 582.
- Wilson cloud chamber, 威爾遜霧
- Wimshurst machine, 威姆胡斯特
- Windlass, 轆轤, 33. [起電機, 310.
- Wind tunnel, 風洞, 78.
- Wire table, 銅線表, 2 (附錄).
- Work, 功.
 definition of, 定義, 40.
 electric, 電, 375.
 vs. power, 功與功率, 48.
 principle of, 原理, 40.
 units of, 單位.
- X
- X rays, X 射線, 572.
- X-ray tube, X 射線管, 577.
- Y
- Yard, 碼.
 U. S. legal, 美國的法定碼, 5.
- Yerkes telescope, 葉爾克斯天文台的望遠鏡, 542.
- Young, Thomas, 楊氏, 566.
- Z
- Zero, 零.
 absolute, 絕對零度, 213.

