

遵照三十年修正課程標準編著

新中國教科書
高級中學

物理學

下冊

(第三學年第二學期用)

編著者 張開圻
校訂者 戴運軌

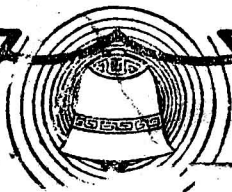
教育部審定

正中書局印行

420.74
0022



金
0.



九 卷 印 出

中華民國三十四年五月初版
中華民國三十八年一月滬十版

新中國高中物理學
教科書

※ 下 册 定價金圓捌角貳分
(外埠酌加運費匯費)

編	著	著	張	開	圻
校	訂	者	戴	運	軌
發	行	人	蔣	志	澄
印	刷	所	正	中	書
發	行	所	正	中	書

(1698)

下 册 目 次

第五編 光學

第一章 光的傳播

1. 光源 1
2. 光的直線傳播 2
3. 影 3
4. 日蝕和月蝕 4
5. 針孔像 5
6. 視差 6
7. 光度 7
8. 照度 8
9. 光度計 10
10. 光的速度 13
11. 光的波動說 15
12. 光波和光線 16

第二章 光的反射

1. 光的反射 19
2. 平面鏡 20
3. 多次反射 22
4. 球面鏡 23
5. 球面鏡的成像 25
6. 球面鏡的公式 27

7. 球面鏡成像的作圖法 29
8. 凹鏡的球面像差 31

第三章 光的折射

1. 光的折射 35
2. 折射率 37
3. 折射線的作圖法 40
4. 全反射 40
5. 光的大氣折射 42
6. 平行玻璃片 43
7. 稜鏡 44
8. 透鏡 46
9. 透鏡的成像 49
10. 透鏡的公式 50
11. 透鏡成像的作圖法 53
12. 兩透鏡接觸時的焦距 54

第四章 光學儀器

1. 光學儀器 58
2. 照相機 58
3. 眼的構造 59
4. 眼的調節 60
5. 眼鏡 61

6. 映畫器和電影	62
7. 視角和實體鏡	64
8. 放大鏡	65
9. 複顯微鏡	66
10. 天文望遠鏡	69
11. 地上望遠鏡	71
12. 潛望鏡	72

第五章 光的色散

1. 光的色散	75
2. 夫牢因和斐譜線	77
3. 分光鏡	78
4. 光譜的種類	79
5. 光譜的限度	81
6. 虹霓	83
7. 物體的顏色	85
8. 螢光和磷光	86
9. 色的混合	87
10. 色差	88

第六章 干涉和繞射

1. 光的干涉	90
2. 夫累涅爾的實驗	91
3. 薄膜的顏色	92
4. 光的繞射	93
5. 光經單縫的繞射	94
6. 繞射光柵	97
7. 光的偏極化	99
8. 雙折射	101

第六編 磁學

1. 磁鐵和磁極	102
2. 磁力和極強	104
3. 庫倫的磁力定律	105
4. 單位磁極	106
5. 磁感應	106
6. 磁場	108
7. 磁力線	110
8. 磁力線和磁場	111
9. 介遞作用	112
10. 磁的分子說	113
11. 地磁要項	114
12. 羅盤	117

第七編 電學

第一章 靜電

1. 正電和負電	420
2. 導體和絕緣體	421
3. 驗電器	422
4. 庫倫的靜電力定律	423
5. 靜電感應	424
6. 電子說	425
7. 電場和電力線	426
8. 靜電的分布	428
9. 電容	429
10. 尖端作用	430
11. 起電盤和起電機	431
12. 電閃和避雷針	434

第二章 電位和電容

1. 導體的電位..... 136
2. 電位差的量度..... 137
3. 導體上電位的升降..... 138
4. 電容和介質常數..... 140
5. 容電器..... 142
6. 容電器的組合..... 144

第三章 電流和電池

1. 電流..... 146
2. 伏打電池..... 147
3. 電池的局部作用和極化..... 149
4. 丹聶爾電池..... 150
5. 勒克蘭社電池和乾電池..... 151
6. 標準電池..... 153

第四章 電阻和歐姆定律

1. 電阻..... 155
2. 電阻定律..... 156
3. 電阻和溫度..... 157
4. 歐姆定律..... 159
5. 電阻的組合..... 161
6. 分路..... 194
7. 電池的電動勢和內電阻..... 165
8. 電池的組合..... 167
9. 電阻箱和變阻器..... 170
10. 電阻的量度..... 172
11. 惠斯登電橋..... 174
12. 電位計..... 175

第五章 電流的熱效應

1. 電能和電功率..... 180
2. 焦耳定律..... 182
3. 白熾燈..... 183
4. 弧光燈..... 185
5. 電熱器和保險絲..... 187
6. 電鉀和電爐.....

第六章 電流的化學效應

1. 電解..... 190
2. 法拉第電解定律..... 191
3. 電量計..... 193
4. 游子電荷..... 195
5. 電解定律的理論證明..... 193
6. 電鍍和電鑄術..... 197
7. 蓄電池..... 198
8. 反電動勢..... 201

第七章 電流的磁效應

1. 電流周圍的磁場..... 203
2. 線圈和螺線管的磁場..... 205
3. 導磁係數..... 207
4. 磁質..... 209
5. 電磁鐵..... 209
6. 電鈴..... 210
7. 電報..... 211
8. 導線在磁場內的運動..... 213
9. 電流計..... 215
10. 安培計和伏特計..... 217

第八章 電磁感應

1. 應電流	221
2. 楞次定律和右手定則	224
3. 應電動勢	225
4. 自感應和感應係數	227
5. 感應圈	229
6. 交流電機	230
7. 直流發電機	234
8. 電樞的形式	235
9. 磁場的激發	237
10. 渦電流	239
11. 電動機	239
12. 電扇電車和瓦特小時計 ..	241
13. 變壓器	242
14. 電話	244

第九章 真空放電

1. 低氣壓時的放電	247
2. 陰極射線	250
3. X射線	252
4. 熱體發射的電子	255

5. 吞加整流器和柯立芝 X射 線管	256
6. 光電效應	258
7. 有聲電影	259
8. 電傳相片術	260

第十章 電磁波

1. 電振動	263
2. 電磁波	265
3. 電共振	265
4. 晶體檢波器	269
5. 真空管檢波器	271
6. 真空管振動器	273
7. 無線電報	275
8. 無線電話	277

第十一章 放射現象

1. 放射質	279
2. 柏克勒爾射線的性質	281
3. 放射質的蛻變	283
4. 物質的構造大意	285

第五編

光學

第一章 光的傳播

§1. 光源

物體中如太陽、電燈等，能自行發光的，稱為發光體(luminous body)，或稱光源(luminous source)。光源如很小而可認為一點時，即稱為光點(luminous point)。凡不能發光的物體，如月球和行星等，須受外來的光照射方始為吾人所見及的，稱為被照體(illuminated body)。

如空氣、玻璃、和水等，凡光能透過的物體，稱為透明體(transparent body)。如木、石、金屬等，凡光不能透過的物體，稱為不透明體(opaque body)。又如白紙、毛玻璃、牛乳等，凡稍能透光，而不能使人窺見其後面狀況的物體，稱為半透明體(translucent body)。同一物質組成的物體，其透光的程度，須隨其厚度、表面的性質、和光的顏色等而定；例如水本為透明體，但其深度過大，即呈暗黑，而不能透視；如金、銀等本為不透

明體，但鈍成薄片，即可透過少許的光；又如玻璃本為透明體，但將其表面磨粗，即變成半透明體。

§ 2. 光的直線傳播

光能透過的物質，稱為光的介質。如空氣和水等，凡組織均勻的透明物質，稱為均勻介質(homogeneous medium)。如在光點和眼連接的直線間，放一不透明體，則光即被遮隔，而不得見；又如太陽光由窗隙射入室內時，其進行的路程上如有塵埃，即顯見其成直線進行。凡光在均勻介質中，常沿着直線進行的現象，稱為光的直線傳播(rectilinear propagation of light)，凡由光源發出的光，在任何一定方向進行的路程，可用一直線來表示的，稱為光線(ray of light)。凡由一光點向各方發出的許多光線，漸遠而漸互相擴散的，稱為發散光線(divergent rays)。凡由遠處光源傳來的許多光線，可認為互相平行的，稱為平行光線(parallel rays)。如許多光線進行時，能漸會集而相交於一點的，稱為會聚光線(convergent rays)。

§ 3. 影

發光體的附近如放一不透明體，則因光沿直線傳播的結果，故在不透明體的後方，光線不能達到，即構成一暗黑的部分，而稱為影(shadow)。影的形式常隨不透明體的邊緣的形式，及光源和物體相比的大小而定。例如圖 210，設光源 L 僅為一點，則由此點和不透明體 AB 的邊緣所連成的光線，即為 AB 後方

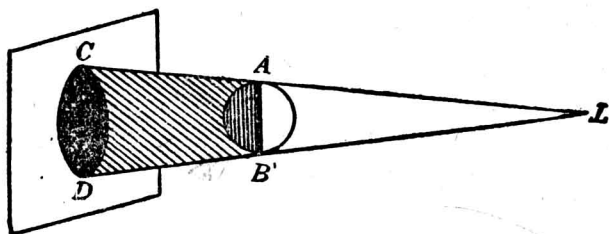


圖 210 影

所呈明暗區域的分界線，構成的影，完全黑暗，輪廓頗為顯明。如放一紙屏於影中，即得和物體的邊緣相同的形式，而較物體為大。若光源非為一點，而比物體為小時，則由各點和物體的邊緣作成的光線，在物體後方構成的影，可分為兩部。例如圖 211，

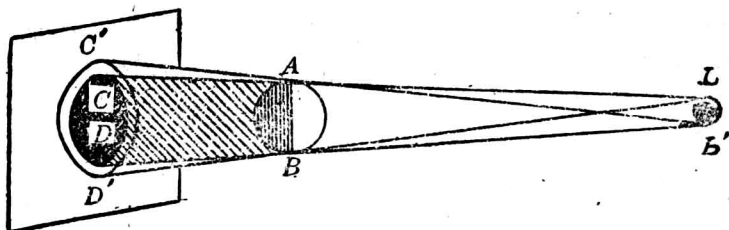


圖 211 本影和半影(1)

LL' 為發光體， AB 為不透明體，如將紙屏放在影中，即見 CD 部分的影，完全黑暗的，稱為本影 (umbra)。本影的周圍， $C'D'$ 的部分，能受到光源一部分的光，而成較淡的影，就稱為半影 (penumbra)。若發光體比物體為大時，則所成本影的截面，並不

隨距離而較物體為大。設發光體和不透明體均為球形，則如圖

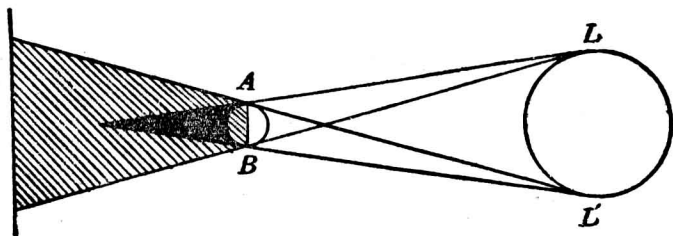


圖 212 本影和半影(2)

212, 所成的本影為一錐體, 其外方亦包有半影. 如將紙屏放在錐體處, 則亦得本影和半影, 但在錐體外, 僅得見半影.

§ 4. 日蝕和月蝕

日蝕 (solar eclipse) 為月球運行恰在太陽和地球一直線的中間時所發生; 就是地球的表面, 恰在月球後方的影中所顯的現象 (圖 213). 凡地球的表面在月球後本影的部分時, 完

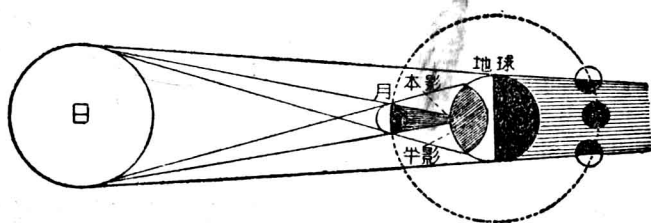


圖 213 日蝕和月蝕的原理

全暗黑, 不能窺見太陽的光, 就成太陽的全蝕 (total eclipse); 如在月球後半影的部分處, 僅受到太陽光的一部分, 就成太陽

的偏蝕(partial eclipse)。因月球比太陽為小，故月球後方所成的本影，成一錐體。若此錐體的頂點不能達於地面時，則地面上對此頂點的地方，可以窺見太陽的周圍，而不能見其中央部分，就成太陽的環蝕(annular eclipse)，月蝕(lunar eclipse)為地球運行，恰在太陽和月球的中間時所發生；就是月球恰在地球的影中所成的現象，其理由和日蝕相同。惟因地球本影較月球本體為大，故月蝕僅有全蝕和偏蝕兩種。

§5. 針孔像

[表演] 將硬紙板上用針穿一小孔，在暗室內放於燭燄和紙屏的中間(圖214)，紙屏上就顯出一燭燄的倒立圖形。或用長方形紙盒一個，在盒的較狹側面上的中央，穿一小孔，再除去和其相對的紙面，而換裝一毛玻璃片。若將穿有小孔的一面向屋外，玻璃上就可現出外方景物的倒立圖形。

凡由實物(object)傳來的光，能設法使其造成和實物相似形狀的圖形，稱為物體的像(image)。若物體發出的光線，經過一小孔，得在屏上集成的像，稱為針孔像(pin-hole image)。如用一暗箱以成一針孔像的裝置，稱為針孔照相機(pin-hole camera)。針孔像的

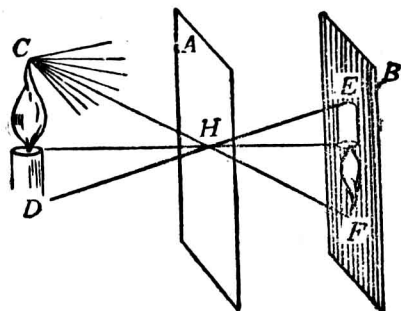


圖 214 針孔像

發生，亦為光的直線傳播的結果，如圖 214，燭上 CD 間各光點發出的光線，都依直線進行， C 點發出的光線中，只有通過針孔 H 的，得射於屏上的 F 點。 D 點所發的光線中，亦只有通過針孔的，得射於屏上的 E 點。故 CD 間各點的光線，都順次射於屏上，而成燭燄的倒形。這種和實物的位置相反，而成倒立的圖形，稱為倒像 (inverted image)。由像的倒立，可知光必沿着直線傳播。凡由光線實際集合而成的像，可用紙屏承受的，稱為物體的實像 (real image)。凡小孔愈小，則所成的像愈清晰〔註〕。若於一針孔的近旁再穿一針孔，則於屏上必現重疊的二像，所成的像就變模糊。故物體所發的光線，經過一大孔時，可認為一大孔係許多小孔所組合而成，所成的各像，就因彼此重疊的結果，不能顯示物體的像，而只能現出孔的形狀。

〔註〕如小孔過小，則因光的繞射 (p. 93, § 4) 不能成像。

§ 6. 視差

吾人在行動的火車中，窺察窗外的景物時，必覺近車的物體，似和車的進行方向相反而移動，但遠方的物體，似和車取同一方向而移動，這種現象，亦為光的直線傳播的結果。例如圖 215，設 A 和 B 為兩個遠近物體的位置，當吾人在 P_1 的位置窺察時，則 AP_1 和 BP_1 的兩光線，對 P_1 所成的角 α ，即表示吾人視界的範圍，稱為視角 (visual angle)，而較遠的物體 B ，必在較近物體 A 的左方。又當吾人在 P_2 的位置窺察時，則 AP_2 和 BP_2 兩光

線對 P_2 所成的視角變成 β ，而 B 的位置就在 A 的右方。故吾人由 P_1 向 P_2 移動時， B 的位置對 A 就像自左而右，以得位置的差異。這種因觀察者的移動，而兩個相距的物體所得相對變位的現象，稱為視差 (parallax)。由視差即可辨別兩物體的遠近；如兩物體在同一位置的上下，或即和觀察者在同一距離時，則觀察者雖對物體作左右的移動，

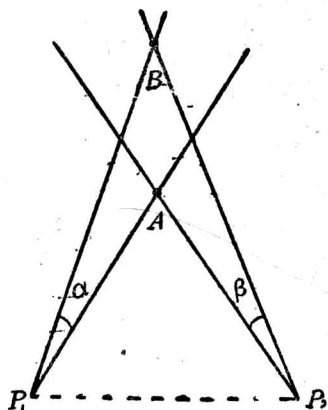


圖 215 視差

亦不生視差。吾人於實驗室中，常利用視差的有無，以確定兩物體是否恰在同一位置的附近。

§7. 光度

光源的發光強度 (luminous intensity)，簡稱光度，亦稱照光本領 (illuminating power)。光度的單位為燭光 (candle power)。1 燭光的標準，係採用英國的標準燭所發的光度，即用鯨油製成的蠟燭，直徑為 $7/8$ 吋，每小時燃去 120 格令 (grain) (即 7.776 克) 時所發的光。現在的國際燭光 (international candle)，係用戊烷 (pentane, C_5H_{12}) 燈所發光度的 $\frac{1}{10}$ 為標準。但因此等標準燭光的使用和調準，頗不便利，故普通實驗室中，常多採用已經校準的電燈，所發的燭光數為標準光源，以確定各種光源的

光度。

一光源於每單位時間內向各方傳播的總能量，實用上採用的單位，稱為流明 (lumen)。1 流明即 1 標準燭光的光源，在 1 立體弧度 (solid radian) 角內，所發出的光量。因空間中對於一點所張的立體角 (solid angle)，等於 4π 立體弧度，故如命 I 為光源的燭光數， E 為光量，則因 1 燭光在空間向各方發出 4π 流明的光量，即得光度和光量的關係為

$$E = 4\pi I.$$

$$[\text{光量(流明)}] = [4\pi] \times [\text{光度(燭光)}].$$

§ 8. 照度

被照體受到光的照射時，其表面上每一單位面積在單位時間內所受的光量，稱為照度 (intensity of illumination)。設一光源於每秒發出的光量為 E 流明，若以此光源為一球面的中心，球的半徑為 r 米，則因球面的表面為 $4\pi r^2$ 平方米，故此球面上的照度如命 l 表示，即得下式為：

$$l = \frac{E}{4\pi r^2} \quad (1)$$

即

$$[\text{照度}] = \frac{[\text{光量(流明)}]}{[\text{總面積(平方米)}]}.$$

照度的單位，即為每平方米 1 流明，亦稱為 1 勒克司 (lux)。設 I 為光度的燭光數，則因 $E = 4\pi I$ ，故 (1) 式可寫成如下式：

$$I = \frac{I}{r^2} \quad (2)$$

$$[\text{照度(勒克司)}] = \frac{[\text{光度(燭光)}]}{[\text{距離(米)}]^2}$$

由上式,可知 1 勒克司即等於離 1 燭光的光源 1 米處面上的照度,故照度的單位,通常可稱為 1 米燭光 (meter candle)。如和 1 燭光的光源相距為 1 呎處的照度,即稱為 1 呎燭光 (foot candle)。

由 (2) 式,可知被照體的面上,和光線互成垂直時的照度,對於一定光源的距離的平方成反比,稱為照度的平方反比律 (law of inverse square)。

又如圖 216,設和光線垂直的 AB 面上的照度為 l ,其總面積為 s ,所受的光量有一定。若將此光量照射於面積為 s' 的傾斜面 AC 上,則因面積較大,照度即減小而為 l' 。如 AC 和 AB 面的傾角為 θ ,則

$$s = s' \cos \theta.$$

但因兩面所受的光量相等,故得

$$ls = l's',$$

或

$$ls' \cos \theta = l's',$$

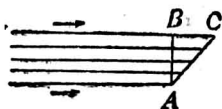


圖 216 傾斜面上的照度

$$\therefore l' = l \cos \theta.$$

故被照體的表面，和光線互相垂直時的照度為最大，如傾斜則隨傾角而減小。

〔例題〕 設離燈 5 米處的照度為 1.5 米燭光，求此燈的光度。

〔解法〕 因 $l = \frac{I}{r^2}$ 故得 $1.5 = \frac{I}{0.25}$,

$$\therefore I = 37.5 \text{ 燭光.}$$

§ 9. 光度計*

量度光源的光度所用的儀器，稱為光度計 (photometer)。量度光度的學問，稱為光度學 (photometry)。光度計的種類雖多，但下列數種，為普通所用的簡單裝置。

(1) 倫福德光度計

這種光度計為倫福特 (Rumford) 所首創，亦稱為比影光度計 (shadow photometer)，其裝置如圖 217， L 為一不透明而直立的棒， P 為白屏， S_1 為一標準光源， S_2 為欲量度的未知光源。兩光源各放在直棒前的側方，如將其位置配置適當，則白屏上即得並立而同等暗黑的棒影。因由 S_1 所發的光，可以

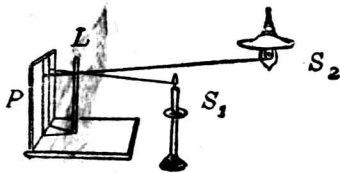


圖 217 倫福特光度計

照及 S_2 所成的影，而 S_2 所發的光，可以照及 S_1 所成的影，故兩影恰為同一照度時，其暗黑的程度即可相同。設 I_1 為標準光源的燭光數， I_2 為未知光源的燭

光數， a_1 和 a_2 為兩光源各和白屏間的距離，則由照度的平方反比律，即得下列的關係為：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

上式即表示任何兩光源，對於同一屏上有相同的照度時，其光度就和屏及光源間距離的平方成正比。這個關係，為光度學中比較兩光度時的基本原理。根據標準光源的光度，再測定 d_1 和 d_2 ，即可推求未知光源的光度。

(2) 本生光度計

本生光度計(Bunsen photometer)，亦稱油斑光度計(grease spot photometer)。其簡單的裝置係用一白紙屏，在紙的中央滴一油點，或熔解的蠟點，使紙成半透明體。如持此紙屏近窗前，則背窗一面的油斑，較其周圍為明亮，對窗一面的油斑，較其周圍為暗黑，可知照度較大一面的油斑，比較暗黑。設紙兩面的照度相等時，則不論觀察其任何一面，油斑明暗的程度必相等。設如圖 218，將此紙屏 P

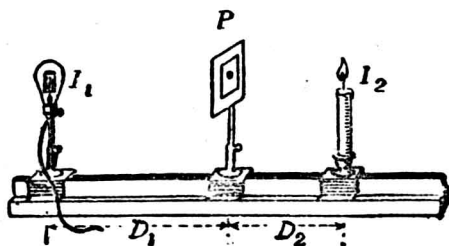


圖 218 本生光度計

在暗室內放於兩光源的中間，則由上述的基本原理，將紙屏移動，俟油斑兩面的亮度相等時，即可推出未知光源的光度。

應用本生光度計，比較油斑兩面的亮度，欲得便利的觀察時，可將滴有油斑的紙屏，裝在一方盒內，如圖 219 的外形和其截面。在紙屏的一端，兩旁各立一小平

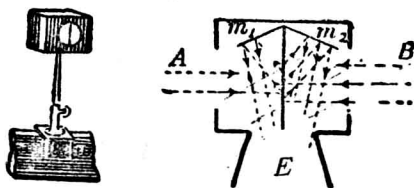


圖 219 紙屏的裝置

面鏡 m_1 和 m_2 ，如在前方 E 處觀察，即可在兩鏡中同時看到油斑的兩面，以得精密的比較。

() 喬里光度計

喬里光度計(Joly photometer)，亦稱漫射光度計(diffusion photometer)，其裝置和本生光度計相似，惟將油斑紙屏換去，另用石蠟(paraffin)一塊，切成厚約 0.25 吋而相似的長方形塊兩片，如圖 220 中的 P 。然後在兩片的平滑面間夾一錫箔

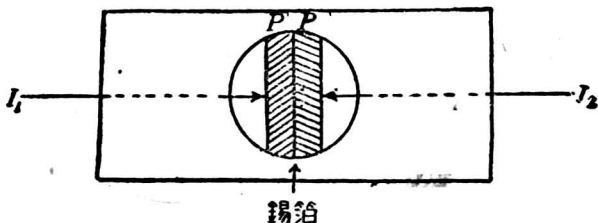


圖 220 喬里光度計

箔，裝在一盒中而成。盒的左右兩方各有一孔，可以收集每一方光源射來的光，盒的前面亦有一孔，可由此處窺見兩蠟片的側端。如將此盒在兩光源間移動，至兩蠟片端的亮度相等時，即可應用上述的基本原理，以比較兩光源的光度。

〔例題〕一標準蠟燭和一 4 燭光的光源，相距 6 公尺，如在連接兩光源的直線上放一紙屏，使屏上對於任何一光源，可得相等的照度，則此屏應放在何處？

〔解法〕 設 x 為紙屏和標準蠟燭間的距離，則 $(6-x)$ 為屏和 4 燭光間的距離。依照度的定律，當紙屏對於任何一光源得相同的照度時，則可列成下式為：

$$\frac{1}{x^2} = \frac{4}{(6-x)^2}, \quad \text{或} \quad (6-x)^2 = 4x^2.$$

$$\therefore 6-x = \pm 2x, \quad \therefore x = +2 \quad \text{或} \quad -6.$$

由 x 的兩數值，可知符合題中的情形，得有兩種位置。第一位置為紙屏放在兩光源間，離標準蠟燭 2 公尺；或取第二位置，將紙屏放在蠟燭的外方 6 公尺處。

§ 10. 光的速度

在公元 1675 年前的學者，對於光的傳播，認為由光源可直達於觀察者，而其速度則為無限大。但在這年，丹麥的青年天文學家勒麥(Römer)首由天體的觀察，以得光速的量度。如圖 221，

S 為太陽， E 為地球， J 為木星(Jupiter)， M 為木星的一個衛星。這個衛星繞木星運行，每次繞入木星的本影內，就成衛星蝕，和月蝕的理由相同。木星繞太陽運行一週所需的時間為

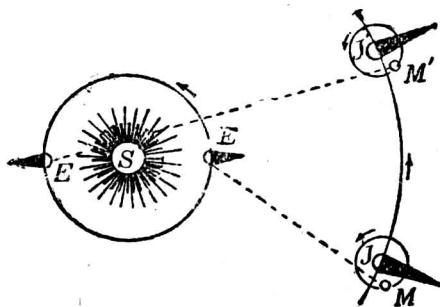


圖 221 勒麥光速的量度

11.86 年，故在地球上觀察這個衛星蝕的次數很多。當地球在 E 處時，見到衛星蝕後，地球和木星的距離漸遠，若光的傳播不費時間，則所見繼續兩次蝕所歷的時間，必常不變，這是因為衛星

週期不變的緣故。然勒麥觀察第二次蝕後，至第三次蝕所歷的時間，比較第一和第二兩次蝕所歷的時間爲長，此後每連續兩次蝕相隔的時間漸漸增長，迄地球到達 E' 的位置時，所觀察的衛星蝕時刻，較預定的時刻落後 16 分 36 秒，或等於 996 秒。但此後每連續兩次蝕相隔的時間則漸漸縮短，迄地球回至原位置 E 時，所觀察得的衛星蝕時刻，又和預期的相符合。所以勒麥主張這 996 秒時間必爲光經過地球繞太陽運行之軌道的直徑所需的時間。因地球運行軌道的直徑約爲 300,000,000 千米，那麼這所需的時間如作 1,000 秒計算，則光的速度約爲每秒 300,000 千米。

自天文上測得光的速度後，學者羣起研究，欲得地面上測定光速的方法。經法國菲左(Fizeau)和佛科(Foucault)等，用精密的儀器實驗後，光速的測定遂更有進步。至近代經美國邁克爾孫(Michelson)的改良，遂確定光在空氣中的速度，而得真確的數值。然由各種方法的測定，對於光在空氣或真空中傳播的速度，可認爲每秒 3 萬萬米(3×10^8 米/秒 或 3×10^{10} 厘米/秒)，或爲每秒 183,000 哩。這個速度每秒可繞行地球的周圍七周半，所以其數值很大。但就天體間星球的距離來比較，這個數值亦不能算大；例如光自太陽傳至地球，須歷 8 分 18 秒，由北極星傳至地球，須歷 44 年，可知宇宙的廣大。

光在真空中的速度爲最大，其在空氣中的速度，和真空中的數值相差極微。由直接的測定，知光在水中的速度，約爲空氣中的 $3/4$ ，在玻璃中的速度，約爲空氣中的 $2/3$ 。凡光在各種透明介質中的速度，都比在空氣中的爲小。又各種顏色的光，在空

氣中的速度均相等，但在玻璃等物質中透過時，就各不相等。

§ 11. 光的波動說

能量的傳播，既可由不連續的質點的移動，或由介質中連續的波動而進行，故關於光的本性(nature of light)，在希臘時代的學者，早已具有這兩種不同傳播的見解，但尚無確定的概念。至十七世紀時，牛頓深信光為一種極微的質點，自光源以極大的速度，向各方發射，以解釋光的直線傳播等現象，而成光的微粒說(corpuscular theory of light)。同時荷蘭物理學家惠更斯(Huygens)則反對這個學說，認光的傳播為一種波動的現象，而成光的波動說(wave theory of light)。

當光的波動說初創時，對於光的現象，尚不能作普遍的解釋。其難點有二：一為波動須賴物質傳播，但光可透過真空，卻和聲波等不同；一為聲波等遇阻礙的物體，可繞道而過，若光為波動，則對於光的直線傳播，頗難說明。故在公元 1800 年前的學者，都公認微粒說，而不承認波動說。

至公元 1801 年，英國楊(Young)氏首由實驗發見光的干涉現象(p.90, §1)，後數年法國夫累涅爾(Fresnel)亦由種種實驗的方法，確定光的干涉現象，且發見光的繞射現象(p.93, §4)。這種干涉現象為波動的特性，而非微粒說所能解釋，至繞射現象，即證明光在相當情況下，亦能遇阻礙的物體而變更其進行的方向，得為吾人所窺測。根據實驗的結果，對於光的波動說，

遂得有力的證明，以代替微粒說的地位，而為學者所公認。

對於光波在真空中的傳播，惠更斯曾假定真空中有一種介質，稱為以太(ether)。這種介質係假定為一種透明而質量甚小的物質，非吾人感覺所能察知；不但瀰漫於空間，且徧布於物質的分子間，故光波即可賴以太而在真空中傳播。當波動說初創時，認光波為以太中的一種機械振動 (mechanical vibration)，但至公元 1864 年，英國大物理學家馬克士威(Maxwell)由數理的推論，預言熱、光、和電磁等的現象，均為同一的起源，因確定光波為以太的一種電磁振動，且和現代無線電傳播的電磁波 (electromagnetic waves)(p.265, § 2)屬於同式的橫波，但其波長則更短，因倡光的電磁說(electromagnetic theory of light)，復經德國赫芝(Hertz)由實驗察知電磁波的存在，且經近代發見的各种波長的電磁波，於是光波遂認為電磁波中的一部分，而光的波動說，更得到強有力的基礎。

近代對於光的本性，仍為一研究的問題，由各種實驗的結果；表示光的傳播，有時可為波動，有時和微粒的性質類似，而認為微粒和波動的性質，各有其相當的實驗基礎，可以同時並重。但初學者對於光的基本現象，引用波動說來說明，已足應用。

§ 12. 光波和光線

水面上一點上下振動時，即發生同心的連續圓形列波，而向各方傳播。凡在均勻介質的空間中，由一點為擾動中心，而發

出的波，其波前即成球面。其在任何時刻的波前，可由其鄰近較早的原波前，而求得其形式。如圖 222, O 爲光點, AB 爲原波前, 和光點的距離爲 r 。設波

的傳播速度爲 v , 則在波前上 a, b, c, d, e 等各點, 可認爲新的擾動中心, 同時發出半徑相同的球面波, 即稱爲副波 (secondary waves)。此

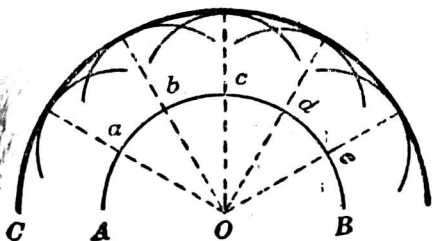


圖 222 惠更斯原理

等副波的球半徑, 在短時間 t 內均爲 vt , 而包圍各副波的球面 CD , 爲和各副波面成正切的包跡 (envelope), 即自原波前經 t 時間後所求得的新波前, 和光點的距離爲 $vt + r$, 這樣逐次由原波前推出新波前, 以說明波的傳播, 稱爲惠更斯原理 (Huygens Principle)。故凡一光點發出的光波, 可依光點爲球面的中心, 作同心的各球面, 以表示各時刻的波前, 而成連續的球面波 (spherical waves)。若光源甚遠, 其傳來的波前, 得認爲平面時, 則依同樣原理, 逐次求出的新波前, 亦必爲平面, 而成連續的平面波 (plane waves)。光線即爲和波前垂直的直線, 以表示光波的進行方向, 故由光點發出球面波時的許多光線, 即成發散光線, 而平面波傳播時的許多光線, 即成平行光線。

研究光學時, 對於光的現象, 如就光線的作圖, 即可依據

幾何學的原理來說明，而不涉及光的本性的，稱為幾何光學 (geometrical optics)。若依光的波動說，以說明光的現象的，稱為物理光學 (physical optics)。物理光學不但可以解釋由幾何光學所得的各原理，且可推得幾何光學所不能解釋的部分，如光的干涉和繞射等。

習 題

1. 太陽光穿過樹葉間，射在地面上，何以常成許多圓形的光？
2. 在太陽照射的時候，地面上可看見電線桿的影，而不能見電線的影。這是何故？
3. 地球上的各處，是否可同時窺見太陽的全蝕？何故？
4. 在針孔照相機的前方 15 厘米處，放一 2 厘米高的燭燄。求針孔後 55 厘米處的屏上，所成像的大小。
5. 太陽光線和地面成 45 度角時，50 呎高的樹後，所生的影，長度為若干？
6. 6 米高的電桿，在太陽光下所成的影，長度為 10 米。同時人體所成的影，長度為 4 米。求此人的身長。
7. 設最適宜於讀書的照度為 3 燭光，則在 32 燭光的電燈下讀書時，書面和燈間的垂直距離應為若干？
8. 一 16 燭光的光源，離屏 150 厘米。(1) 求屏上的照度。(2) 若以 50 燭光的光源射光於屏上，欲得此照度時，則其距離應為若干？
9. 2 米遠的面上的照度，須用幾燭光的光源照射，方可與 30 厘米遠的 1 燭光所生的照度相等？
10. 500 燭光的燈照射於距離為 50 米的平面上，其照度為若干？若用 100 燭光的燈射於同平面上，欲得相等的照度，則距離應為若干？

11. 在 16 燭光的電燈下讀書，最適宜的照度須將書和光源相距 60 厘米。若在 52 燭光的燈下，則書本和燈應隔若干距離，方為合宜？
12. 設在本生光度計上的兩光源，一為 5 燭光，一為 30 燭光，相距 2 米，則紙屏須放在何處，方能使兩面的照度相等？
13. 兩燈的光度各為 90 燭光和 10 燭光，相距 1 米。在兩燈間相連的直線上放一紙屏，欲使所受每燈的照度均相同時，則紙屏應放在何處？
14. 曬相片時，如離一電燈 1 米遠時，須曝 15 秒，最為合宜。若相距 2 米時，則應需的時間為若干？
15. 印相片時，如將相片放在 15 燭光下 1 米處，露光時間為 5 秒。若在 32 燭光下 2 米處，則露光時間應為若干？

第二章 光的反射

§ 1. 光的反射

光在一介質中傳播至另一介質的境界面時，其一部分即自境界面起回射於原介質，而成光的反射(reflection of light)現象。光滑的金屬面和鍍銀的玻璃面上，所受的光，幾成全部的反射。如圖 223， BA 為一平面的反射面，和書面成垂直的截面。 LI 為入射的光線，簡稱入射線(incident ray)；入射線和反射面相遇的 I 點，稱為入射點(point of incidence)，從 I 點作一直線 IN ，和反射面垂直，是為反射面的法線(normal)。光線達 I 點，即

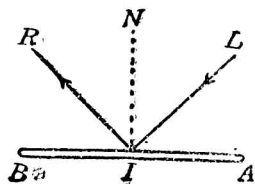


圖 223 光的反射定律

反射而成 IR 的反射光線，簡稱反射線 (reflected ray)。入射線和法線所成的角 LIN ，稱為入射角 (angle of incidence)；反射線和法線所成的角 RIN ，稱為反射角 (angle of reflection)。由實驗的結果，得光的反射定律 (law of reflection of light) 如下：

(1) 入射線和反射線在法線的兩側，且和法線在同一平面內。

(2) 入射角常和反射角相等。

由光的反射定律，可知互相平行的一束光線，射在極平滑的面上，則反射後的一束光線，亦必互相平行，如圖 224(A)，這

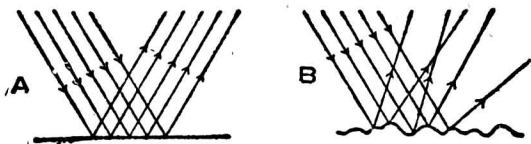


圖 224 單向反射和漫射

種正常的反射，稱為單向反射 (regular reflection)。若入射線遇粗糙的面，則因面上凹凸不平，故入射線雖互相平行，但反射線的方向就各不相同，如圖 224 (B) 的情形。這種反射，稱為漫射 (diffuse reflection)，或稱散射 (scattering)。吾人對於地上的物體，可由各方向辨別其存在，就因其表面發生漫射的緣故。

§ 2. 平面鏡

凡反射面為極光滑的平面，即稱為平面鏡 (plane mirror)。

若在鏡前有一光點，如圖 225 的 A 點，則由此點發出的光線中，取二入射線 AC 和 AD ； AC 和鏡面垂直，其反射線必在同一直線上， AD 的反射線為 DE 。再將這二反射線向鏡後延長，即相交於 A' 點。

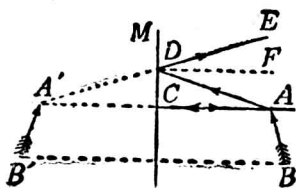


圖 225 平面鏡的成滯

由光的反射定律，得

$$\angle ADF = \angle EDF.$$

故由幾何定理，可知

$$\angle ADC = \angle EDM.$$

但

$$\angle EDM = \angle A'DC,$$

故

$$\angle ADC = \angle A'DC.$$

故直角三角形 $\triangle ADC$ 和 $\triangle A'DC$ 為相等三角形。

$$\therefore AC = A'C.$$

可知 A' 點為 A 點的對稱點。 A 點發出的光，遇鏡反射後，宛似都從 A' 點發出的一樣，所以 A' 點稱為 A 點的像。凡將各反射線延長，在鏡後集合而成的像，稱為虛像 (virtual image)。若平面鏡前放一 AB 的物體，則鏡後的像，由每點的像集合起來，就成 $A'B'$ 的虛像。凡平面鏡所成物體的虛像，其位置和原物體相對稱，大小和物體相等。像與鏡面的距離，常和物體與鏡

面的距離相等。

平面鏡的成像，可以波動說來說明。如圖 226， mn 為平面鏡， P 為光源。設 ao_1 表示光波達鏡面時的波前，如無反射面，則在相當時間內，波前必達 co_1d 的位置。但因反射波的速度等於入射波進行的速度，故當波前上 a 點和 b 點達鏡面時， o 點已反射至 o_2 ，反射波前即成 co_2d ，而 oo_2 必等於 oo_1 ，反射波的曲率半徑亦必和入射波的曲率半徑相同，那麼 co_2d 的曲率中心 P' ，即為 P 的虛像，物和像必互相對稱。

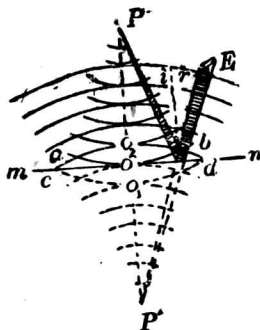


圖 226 光波由平面鏡的反射

§ 3. 多次反射

設將兩平面鏡互相垂直，如圖 227 中的 OA 和 OB ，則實物 P 對於 OA 的對稱點 P_1 處，生一虛像；其對於 OB 的對稱點 P_2 處，亦生一虛像。再由二次反射的結果，在 P_3 處生第三個虛像，其位置如由 OA 鏡望去，則為 P_2 對於 OA 的對稱點，如由 OB 鏡望去，則

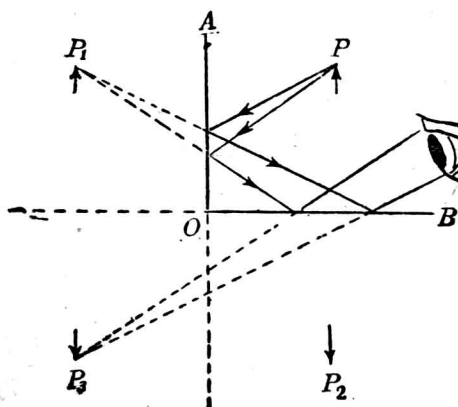


圖 227 多次反射(1)

爲 P_1 對於 OB 的對稱點。圖中的情形，即由 OB 鏡望去，而得 P_1 的像。這樣的數次反射，稱爲多次反射 (multiple reflection)。

若兩鏡互成傾斜的角爲 60 度，如圖 228，則所得的像，其總數亦有一定。如求各像的位置時，可先將表示鏡面的直線延長，如圖中的 OC 和 OD 。而各像的位置，必均在以 O 爲中心，依 OP 爲半徑所作成的圓周上。 P_1 和 P_2 爲 P 在各鏡面一次反射所成的像； P_3 和 P_4 爲二次反射所成的像； P_5 爲三次反射所成的像。其光線的路程，如圖中所示，而 P_5 的位置，爲由 OB 鏡望去的情形。又設依 60 度角，再作 OE 和 OF 兩直線，可知每一角內，恰含有一像。

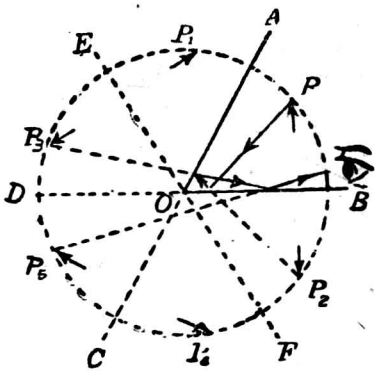


圖 228 多次反射(2)

由上列兩例，可知兩平面鏡互相傾斜，相交的角爲 θ 時，可自兩鏡與所作圓周之交點起，分成 $360/\theta$ 角，則除實物所占去的一角外，其他每一角中即生一像。故所成像的總數，必爲 $\left(\frac{360}{\theta} - 1\right)$ 個。如兩鏡所夾的角 θ 不能整除 360 時，則其整商即爲成像的總數。凡最後所求得像的位置，如圖中 P_5 ，適落在兩鏡的背後，乃不復生像。如兩平面鏡互相平行，則 θ 角爲零，故由多次反射所成的像，必爲無限的數值。但因反射多次後，各像的亮度大減，那麼實際所能窺見的，僅爲最初數次反射所成的像。這種情形，可於理髮店內對立的鏡中察及。

§ 4. 球面鏡*

*實驗 21。

反射的鏡面如為球面的一部分，稱為球面鏡 (spherical mirror)。球面鏡的種類有二：凡利用向球心彎曲的一面為反射面的，稱為凹鏡 (concave mirror)；若用球面的外面凸出的部分為反射面的，稱為凸鏡 (convex mirror)。鏡的中點，稱為鏡頂 (vertex of mirror)，如圖 229 中的 O 點。於鏡頂和球心間聯結一通過的直線，稱為鏡的主軸 (principal axis of mirror)。凡通過球心的其他直線，即稱為鏡的副軸 (secondary axis of mirror)。球心 C 亦稱鏡的曲率中心 (center of curvature)，其和球面距離，即為鏡的曲率半徑 (radius of curvature)。由鏡的邊緣 A 和 B ，對於球心所張的角 ACB ，稱為鏡的孔徑 (aperture of mirror)。

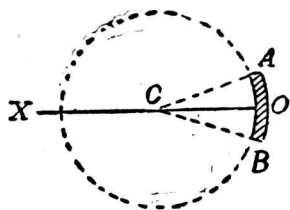


圖 229 球面的一部分



圖 230 凹鏡的焦點

若將太陽光依鏡的主軸方向，射於凹鏡面，則因光源的距離甚遠，射來的光線可視作平行，這等平行光線達凹鏡面反射後，都會集於主軸上的一點，如圖 230 的 F 點。如將容易着火的物質放在這點上，就起燃燒，故稱這點為鏡的主焦點 (principal

focus of mirror), 簡稱焦點。凹鏡的焦點, 為反射光線實際會集而成, 故稱為實焦點(real focus)。如將太陽光線射於凸鏡面上, 則反射線因擴散, 不能在鏡前會集, 但將反射線延長至鏡面後, 在主軸上亦能會集於一點, 如圖 231 的 F 點。這點稱為虛焦點(virtual focus)。焦點和鏡頂間的距離, 稱為焦距(focal length)。球面鏡的焦距, 恰為球面曲率半徑長度的一半(p. 27, § 6)。

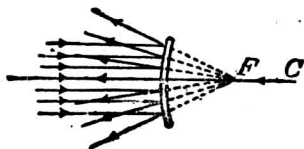


圖 231 凸鏡的虛焦點

§ 5. 球面鏡的成像

〔表演〕 先將一凹鏡向太陽光, 用紙屏探測其主焦點的位置, 約計其焦距的長度。然後在暗室內, 將一燭燄放在凹鏡的前面(圖 232), 因燭燄的位置, 而所成的像就有虛實、大小、正倒的不同, 若放在凸鏡前, 則祇能得虛像。這個實驗, 可依下表逐一表演。

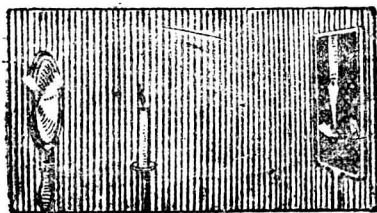


圖 232 凹鏡的成像

表 24 球面鏡的成像

實物的位置		像的性質		位置	虛實	正倒	和實物相比的大小
		位置	性質				
凹鏡	1. 無窮遠處	焦點上	實像	——	——	——	一點
	2. 球心外	球心和焦點間	實像	——	倒立	——	較小
	3. 球心上	球心上	實像	——	倒立	——	相等
	4. 球心和焦點間	球心外	實像	——	倒立	——	較大
	5. 焦點上	無窮遠處	——	——	——	——	——
鏡	6. 焦點內	鏡後	虛像	——	正立	——	較大
凸鏡	1. 無窮遠處	虛焦點上	虛像	——	——	——	一點
	2. 鏡前	鏡後	虛像	——	正立	——	較小

由實驗，知凹鏡成像時，凡物體放在主焦點外，常得實像，在主焦點內，則成虛像。實像常為倒立，可由紙屏承受，而虛像常為正立，在鏡的後方，且較實物為大。凸鏡所成的像，不論實物的位置如何，常為虛像。這種虛像，常較實物為小，和凹鏡所成的虛像不同。

由實驗，且可知凹鏡前實物和像的位置，可互相交換，例如實物在球心外的某點，其像在球心和焦點間的地位，若在這成像的地位放實物，則所成的像必在物體原放的地位。凡兩點的位置，其一點如為光點，而他點恰為像點，可互相交換的，稱為共軛點(conjugate foci)。

§ 6. 球面鏡的公式

如圖 233, SP 表示一球面鏡, 其曲率中心為 C 點。 CP 為曲率半徑, 命 R 表示。 設 L 為鏡的主軸上的一光點, 發出一光線

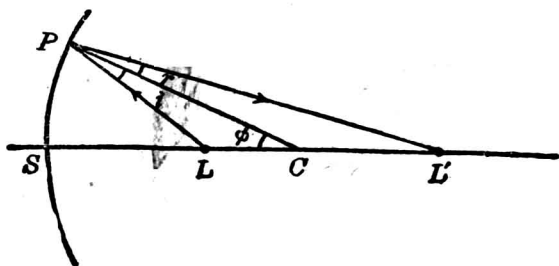


圖 233 球面鏡的反射

LP , 在鏡的 P 點, 依入射角 i 等於反射角 r 的定律, 反射後, 在主軸上成像點 L' 。 又設命 D_1 代表光點和鏡頂的距離(即 LS), 而 D_2 代表像點和鏡頂的距離(即 $L'S$), ϕ 為 PC 和主軸所成的角, 則由三角學的正弦定律, 在 $\triangle LPC$ 和 $\triangle L'PC$ 中, 得下列的關係:

$$\frac{LP}{LC} = \frac{\sin \phi}{\sin i}$$

和

$$\frac{L'P}{L'C} = \frac{\sin \phi}{\sin r}$$

但依光的反射定律,

$$\angle i = \angle r.$$

故

$$\sin i = \sin r.$$

$$\therefore \frac{LP}{LC} = \frac{L'P}{L'C}.$$

設鏡的孔徑甚小，則 ϕ 角當亦甚小，故可認為

$$LP = LS = D_o,$$

$$L'P = L'S = D_i.$$

又

$$LC = R - D_o, \quad L'C = D_i - R.$$

代入上式，即得

$$\frac{D_o}{D_i} = \frac{R - D_o}{D_i - R} \quad (1)$$

$$\therefore D_i R + D_o R = 2D_o D_i.$$

如用 $D_i D_o R$ 除上式，即得

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{2}{R} \quad (2)$$

若將光點放在無窮遠處，則 $D_o = \infty$ 。由(2)式，即得

$$\frac{1}{D_i} = \frac{2}{R}.$$

但此時 D_i 即等於鏡的焦距 f ，故

$$f = \frac{R}{2}.$$

即球面鏡的焦距，等於其曲率半徑的半長，故(2)式亦可改為

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

上述(2)、(3)兩式，即表示共軛點的關係(conjugate focal relations)，為球面鏡的普通公式，對於凹鏡、凸鏡，均可適用。但應用時，對於鏡前的距離均取作正值，而在鏡後的距離則取作負值，故凹鏡的焦距為正值，凸鏡的焦距為負值。像的距離 D_i 如為正值，即表示實像，如為負值，即表示虛像。

§ 7. 球面鏡成像的作圖法

球面鏡所成的像，亦可由作圖以定其性質。設球面鏡的焦點已知，可就實物上的一光點，(1)先作一和主軸平行的光線，遇鏡反射後，必通過其焦點；(2)更作一通過球心的光線，遇鏡反射後，必沿原路程而射回，這兩光線如能在鏡前相交，則交點就是光點的實像。若兩光線在鏡前不能相交，則將兩反射線向鏡後延長，而得的交點，就是光點的虛像。依此類推，則物體上各光點都可求其像點，而集成物體的像。附列數圖，即表示球面鏡成像的作圖法。 $A'B'$ 即實物 AB 的像。如就圖 2-4 而論，可

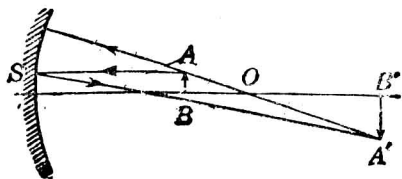


圖 234 凹鏡所成的實像

知實物在 AB 處，其所成的實像即在 $A'B'$ 處；若實物放在 $A'B'$ 處，而另作一圖，則其所成的實像，必生於 AB 處，故實物和像的位置，可以互相交換，亦可顯示其轉點的關係。

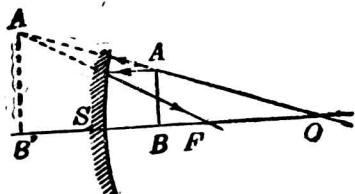


圖 235 凹鏡所成的虛像

又如命 L_o 表示實物的長度， L_i 表示像的長度，則由圖 234，依相似三角形 AOB 和 $A'OB'$ ，得

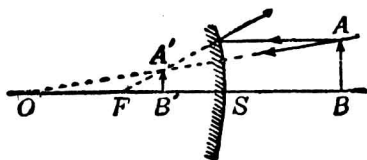


圖 236 凸鏡所成的虛像

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{OB}{OB'}$$

$$\therefore \frac{L_o}{L_i} = \frac{R - D_o}{D_i - R}$$

由上節(1)式，即可推知

$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{D_o}{D_i}$$

如就其他各圖類推，亦可得相同的關係，即實物和像大小的比，等於兩者和鏡的距離的比。

[例題 1] 物體的長度為 1 吋，放在焦距為 3 吋的凹鏡前，若此物體和鏡相

距 3 呎 6 吋，試求像的位置、大小、和形狀。

〔解法〕 由公式
$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f}$$

得
$$\frac{1}{3} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{3}$$

故
$$D_i = 21 \text{ 呎.}$$

再由
$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{D_o}{D_i}$$

求得
$$L_i = 6 \text{ 吋.}$$

故所成的像為實像，和鏡相距 21 呎，較實物大 6 倍。

〔例題 2〕 一凸鏡的曲率半徑為 10 厘米，設有長為 5 厘米的物體，放在鏡前 12 厘米處，求像的位置、大小、和形狀。

〔解法〕 由公式
$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{2}{R}$$

因凸鏡的曲率半徑為負值，故得

$$\frac{1}{12} + \frac{1}{D_i} = -\frac{2}{10}$$

$$\therefore D_i = -3\frac{9}{17} \text{ 厘米.}$$

再由
$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{D_o}{D_i},$$

即求得

$$L_i = -1\frac{8}{17} \text{ 厘米.}$$

故所成的像為虛像，在鏡後 $3\frac{9}{17}$ 厘米處，較實物為小。

§ 8. 凹鏡的球面像差

球面鏡的公式證明時，係假定鏡的孔徑甚小，僅取鏡的中央極小部分為反射面，而得的結果。若凹鏡的孔徑大時，則和其主軸平行的光線，射至鏡面而反射，按反射定律，各光線於實際上並不能會聚於一點，所成的像就不能清楚。如圖 237 中，凡近主軸的中央射線(central rays)，遇鏡反射後，可相交於 F 點，其和主軸

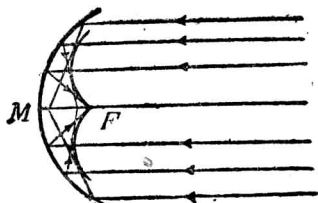


圖 37 球面像差

遠離的邊部光線 (marginal rays) 反射後，則逐次會聚於 F 點以內。這種現象，稱為球面像差(spherical aberration)。凡和各反射線相切，而呈一明亮的曲線，稱為焦散曲線(caustic curve)。例如盛水的茶杯，將杯的內面向強光時，和一明亮的金屬圓柱面，將其向心彎曲的一面向光源時，均可見到這種曲線。

凹鏡的球面像差如欲免除，可在鏡前放一不透明的薄片，在片的中央開一孔，以限制射入的光線，僅為中央射線，則所成的像即可清楚。通常最良的方法，可將鏡面改用拋物線面的一部分，成一拋物柱面鏡 (parabolic mirror)，則和主軸平行的光線，射至鏡面，經反射後，都可會聚於鏡的焦點上。故用以觀察遠距離的物體，因會聚於焦點的光線既多，所成的像就不但清楚，且較明亮。天文上所用的反射望遠鏡(reflecting telescope)，即利用這種鏡面為反射面。又如軍艦上所用的探照燈 (search

light), 汽車前部所用的照射燈(head light), 都將光源放在拋物柱面鏡的焦點上, 使光在鏡面反射後, 均成平行光線, 如圖 238 的情形, 以成強光, 而照達遠方, 亦為利用這種原理所製成的反射鏡(reflector).

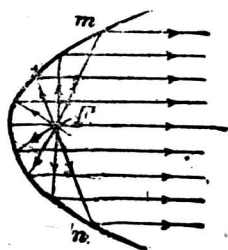


圖 238 反射鏡

習題

1. 月光照射於靜止的水面時, 水中可見月球整形的像. 如水面起波動時, 其像常延長. 這是何故?
2. 晝間在室內的人, 由竹簾或紗窗, 可窺見室外的景物. 但室外稍遠的人, 卻不能窺見室內的情形. 這是何故?
3. 室外稍遠的人向屋內的玻璃窗望去, 在白晝與在夜晚室內有燈火時的情形有何不同? 其理由如何?
4. 向平面鏡望去時, 有時不易窺見鏡的本身. 何故?
5. 由平面鏡成像的作圖法, 證明一直立的平面鏡, 只要等於人身長度的一半, 人眼在鏡前即可窺見其全身的像.
6. 前問中人身和鏡的距離不同時, 是否有關係?
7. 如在一直立的平面鏡前 l 厘米處, 放一物體. 若將此鏡離開物體, 而移過 d 厘米, 則像移過的距離, 必為 $2d$. 試作圖以證明.
8. 光線斜射於平面鏡上, 傾角為 35° 時, 其入射角和反射角各為若干度?
9. 設將前問中的平面鏡轉過 1° , 使傾斜的角成 6° , 則其反射線轉過若干

角度?

10. 如入射線方向不變，而將平面鏡轉過 θ 角，證明反射線轉過的角為 2θ 。
11. 將一物體放在凹鏡前 2 米處，所成的像在鏡前 0.9 米。求此凹鏡的焦距，和其曲率半徑。
12. 在一球面鏡前 1 米處，一光點所發的光線，經此鏡反射後，會集於鏡前 0.3 米處。問此鏡屬於何種？其焦距為若干？
13. 一凹鏡的焦距為 6 厘米，鏡前 5 厘米處如放一物體，則像成在何處？和實物相比的大小如何？
14. 一物體的長度為 6 厘米，如放在曲率半徑為 1.2 米的凸鏡前 12 厘米處，則像的位置和大小各如何？
15. 設一凹鏡的焦距為 f ，一物體放在鏡前 $2f/3$ 處。證明所成的像，為一正立的虛像，其大小為實物的 3 倍。
16. 一凸鏡的曲率半徑為 12 厘米，如於鏡前 6 厘米處放一小球，試用作圖法，求其像的位置。
17. 將一小球置於凹鏡前 44 厘米處，凹鏡的曲率半徑為 50 厘米，試用作圖法，求其像的位置。
18. 一凹鏡的焦距為 f ，若一物體放在鏡前 $3f/2$ 處，則像的性質和大小如何？如欲使像得同大小的放大時，則除物體放在此位置外，是否能有另一位置？
19. 一凹鏡的曲率半徑為 1.5 米，如欲得一放大的像，恰為實物的 3 倍，則物體應放在何處？所成的像虛實如何？
20. 如欲將一燭談，成像於離談 1 米處的牆上，使像的大小為談的 3 倍，則應用的球面鏡屬於何種？此鏡應放在何處？

第三章 光的折射

§ 1. 光的折射

光達兩介質的境界面時，一部分起反射而回入原介質，其另一部分即透入第二介質中，因速度的變更，成光的折射 (refraction of light)。

〔表演 1〕 將狹小的一柱光，由空氣斜射入水中，如在空氣中吹以煙霧，即可窺見入射線的方向，如圖 239 的 LI 。若在水中用粉筆屑攪拌，即可察見光線折射，而取 IR 的方向。

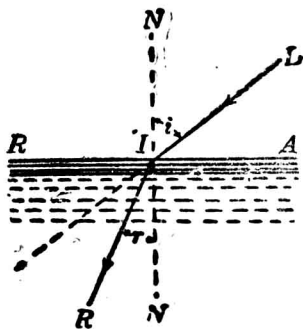


圖 239 光的折射

〔表演 2〕 在不透明的器底放一銅元，人身後退，至器壁恰將銅元遮住，而不見為止。若此時在器內注水，則銅元似浮起而得見，如圖 240 所示。

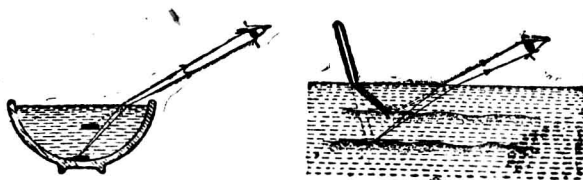


圖 240 水中光的折射

〔表演 3〕 若將直棒斜插入水中，則棒在水面處宛如折為兩段，其在水中的

部分，亦似浮起。

當光在兩介質的境界面上折射時，如就光線的入射點，作一法線，則光的入射線在第一介質中，和此法線所成的角，即為入射角（圖 239 中 i ）。其透入第二介質中的光線，稱為折射線（refracted ray），此折射線和法線所成的角，稱為折射角（angle of refraction）（圖 239 中 r ）。凡光線由第一介質斜射而透入第二介質中時，如其速度減小（例如光由空氣透入水中），則折射線常向法線偏折，故折射角比入射角為小。若速度增加（例如光由水透入空氣中），則折射線常離法線偏折，故折射角就比入射角為大。由實驗得光的折射定律（law of refraction of light）如下：

(1) 入射線和折射線，各在法線的兩側，且和法線在同一平面內。

(2) 於已知的兩介質中，光的入射角的正弦，對於折射角的正弦的比率，為一常數。故對於一定的入射角，必有一相當的折射角。這個關係，係丹麥斯涅爾（Snell）於公元 1621 年，首由觀察而推得，故亦稱為斯涅爾的折射定律（Snell's law of refraction）。

如命 i 表第一介質中光的入射角， r 為第二介質中光的折

射角，則得

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n = \text{常數}.$$

在第二介質中的波前，而 BB' 與 CC' 表示光波在空氣和介質中進行的各方向，故各和界面上法線所成的角 i 和 r ，即為光線的入射角和折射角。

命 n_{12} 及 n_{21} 為兩介質的相對折射率，由三角學，得

$$BB' = V_1 t = CB' \sin i,$$

及 $CC' = V_2 t = CB' \sin r.$

故
$$\frac{V_1 t}{V_2 t} = \frac{CB' \sin i}{CB' \sin r},$$

或
$$n_{12} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_2}{V_1},$$

但因 $n_{21} = \frac{V_1}{V_2},$ $\therefore n_{12} = \frac{1}{n_{21}}$

上式中 V_1/V_2 為一常數，和光的進行方向並無關係。故即得斯涅爾定律的證明；且可知第二介質對於第一介質的折射率，亦為光在第一介質中的速度，和在第二介質中的速度的比率。又任何兩介質彼此間的二相對折射率互為倒數。

凡光的速度較大的一介質，亦稱為光疎介質 (optically rarer medium)，而光的速度較小的一介質，亦稱為光密介質 (optically denser medium)。故介質的光密或光疎，係指其折射率的大小，卻和介質的密度無關係。例如酒精的折射率約為 1.37，水的折射率為 1.33。故酒精即較水為光密，恰和密度的情形相反。

〔例題 1〕 水的折射率約為 $\frac{4}{3}$ ，或即為 1.33。若光由水中射入空氣時，則所得的折射率應為若干？

〔解法〕 設 n_{aw} 表示光由空氣射入水中時的折射率， V_1 為光在空氣中的速度， V_2 為光在水中的速度，則

$$n_{aw} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{4}{3} = 1.33.$$

若命 n_{wa} 為光由水中射入空氣時的折射率，則

$$n_{wa} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{3}{4} = 0.75.$$

〔例題 2〕 水的折射率如為 $\frac{4}{3}$ ，玻璃的折射率為 $\frac{3}{2}$ ，求光由水中射入玻璃時的折射率，和光由玻璃射入水中時的折射率。

〔解法〕 如命 n_{aw} 為水的折射率， n_{ag} 為玻璃的折射率， V_a 為光在空氣中的速度， V_w 和 V_g 各為光在水中和玻璃中的速度， n_{wg} 為光由水中射入玻璃時的折射率， n_{gw} 為光由玻璃射入水中的折射率，則因

$$n_{aw} = \frac{V_a}{V_w} = \frac{4}{3},$$

$$n_{ag} = \frac{V_a}{V_g} = \frac{3}{2},$$

故得

$$\begin{aligned} n_{wg} &= \frac{V_w}{V_g} = \frac{n_{ag}}{n_{aw}} \\ &= \frac{3}{2} \times \frac{3}{4} = \frac{9}{8} = 1.125. \end{aligned}$$

又

$$\begin{aligned} n_{gw} &= \frac{V_g}{V_w} = \frac{n_{aw}}{n_{ag}} \\ &= \frac{4}{3} \times \frac{2}{3} = \frac{8}{9} = 0.887. \end{aligned}$$

〔註〕 n_{wg} 即玻璃對於水的折射率，而 n_{gw} 即水對於玻璃的折射率。

§ 3. 折射線的作圖法

光在兩介質的境界面折射，如折射率和入射角已知，則根據折射定律，即可求得其相當的折射角，而折射線的方向，即可確定。但如用幾何作圖法，亦可繪出折

射線的路程。例如圖 242， SS' 為水和空氣的境界面， i 為入射角。可先由 O 點，作一任何大小的圓；再由入射線和此圓的交點 A ，作 AB 線，和境界面上入射點處的法線相垂直。因水的折射率為 $4/3$ ，故將 AB 分成 4 等分，於是依此 1 等分的長度，在 OS' 上量出 OE 的長度為 3 等分；然後作 EC 線，和法線平行，而和圓交於 C 點，連接 OC 線。

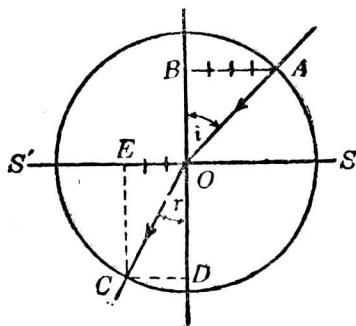


圖 242 折射線的作圖法

因 $OA=OC$, $CD=OE$,

$$\sin i = \frac{AB}{OA}, \quad \sin COD = \frac{CD}{OC},$$

故
$$\frac{AB}{OA} : \frac{CD}{OC} = \frac{4}{3} = \frac{\sin i}{\sin COD},$$

或
$$\frac{AB}{CD} = \frac{\sin i}{\sin COD} = \frac{4}{3}.$$

故 $\angle COD$ 即為折射角，而最後連接的 OC 線，即為折射線。

§ 4. 全反射

因光線由水或玻璃中透入空氣時，折射線常離法線偏折。

例如圖 243 的 POA , 和 $PO'B$ 的行程, 故入射角漸大至一定的角時, 則折射線恰沿着境界面進行, 如光線 $PO''S$. 可知入射線 PO'' 為最後射出空氣的光線. 若入射角再增大, 則光線完全由境界面反射, 而不能透入空氣中, 如 $PO'''C$. 凡光由光密介

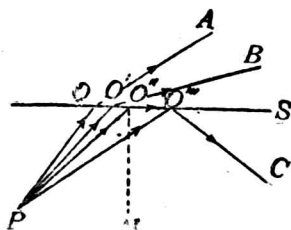


圖 243 全反射

質中進行, 遇一光疎介質時, 如其入射角過一定的限度後, 則在兩介質的境界面上, 不起折射, 而成完全反射的現象, 稱為光的全反射 (total reflection of light). 全反射開始前的一入射角限值, 即相當於折射角成 90° 的, 稱為臨界角 (critical angle), 如圖中 $\angle PO''N$. 這種全反射, 亦依光的反射定律, 其境界面和一平面鏡的作用相同. 水對於空氣的臨界角約為 48.5° , 玻璃對於空氣的臨界角約為 41.5° , 金剛石對於空氣的臨界角約為 24.5° , 故金剛石的全反射現象最易察見, 面上閃爍光輝.

因臨界角的相當折射角為 90° , 故設 n 為一介質對於空氣的折射率, i 為其對於空氣的臨界角, 則由折射定律, 得

$$\frac{1}{n} = \frac{\sin i}{\sin 90^\circ},$$

即

$$\sin i = \frac{1}{n}.$$

故由介質的折射率，即可求出其臨界角。如用幾何作圖法，亦可直接繪出。例如圖 244 AB 為水和空氣的界面，因水的折射率為 $4/3$ ，故以入射點 O 為圓的中心，取長度為 $4:3$ 的兩半徑，作成兩個同心圓，再由界面和內圓的交點 C ，作一法線，和外圓相交於 E 點，然後連接 EO 線而延長至 D ，即得 $\angle DOF$ 。

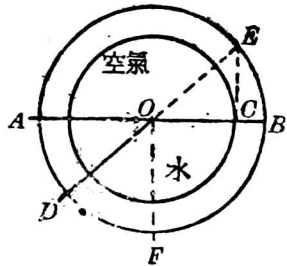


圖 44 臨界角的作圖法

因 $\angle DOF = \angle OEC$,

$$\sin OEC = \frac{OC}{OE} = \frac{3}{4},$$

即 $\angle OEC$ 角的正弦，為折射率的倒數，和上述的結果相同，故 $\angle DOF$ 即為所求的臨界角。

§ 5. 光的大氣折射

光在兩介質的界面起折射外，如同同一介質的各層中，有折射率的差異，則光

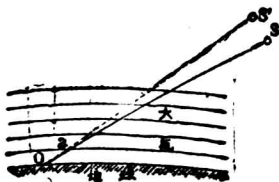


圖 245 光的大氣折射

透過各層中，亦生折射。例如大氣的下層折射率較大，漸上而減小，故如圖 245，太陽 S 在地平線升降時，即因在各層折射的結果，吾人即見其像在 S' 的位置，而較實物為高。這種現象，稱為光的大氣折射 (atmospheric refraction of light)，天體間星光的閃動及經炭火上而窺

見物體的動搖等，都因空氣中的各部分折射率變更甚大，故所見像的位置變更事

已，吾人即覺其閃動不定。

在海濱的區域，有時得見遠處的景物，現於空中，而成海市蜃樓(mirage)。這種現象，即因由遠處物體所傳來的光線，因空氣的下層光密，而上層光疏，故即因全反射而呈彎曲的路程，使吾人得見其像，如圖 246(1) 的情形。沙漠中地面的空氣較上層為熱，折射率較小，較高的樹木等所傳來的光線，即向下方漸屈曲，而再向上方折射，亦呈全反射，故吾人窺察前方的地面，即見其所成的虛像，如圖 246(2) 的情形。海市蜃樓所成的像，或為正立，或為倒立，即隨空氣各部相對折射率的大小而異。

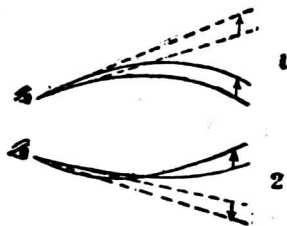


圖 246 海市蜃樓

§ 6. 平行玻片

平行玻片 (parallel glass plate) 即兩對面互成平行的玻璃片，如圖 247，設光線 OP 依入射角 i ，斜射於平行玻片的面上，則光自空氣透入玻璃中，偏向於法線而成折射角 r ；再自玻璃中透入空氣中的光線，稱為出射線 (emergent ray)，此線即離法線而偏向，其和法線所成的出射角，命 x 表示。更命 n_{ag} 為玻璃對於空氣的折射率， n_{ga} 為空氣對於玻璃的折射率，則由折射定律得

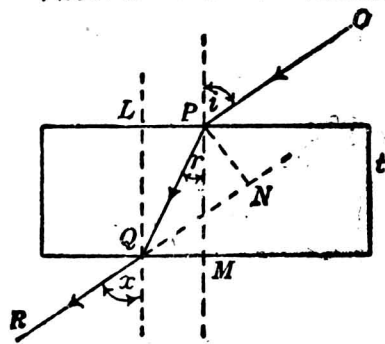


圖 47 平行玻片

$$n_{ag} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

又
$$n_{ga} = \frac{1}{n_{ag}} = \frac{\sin r}{\sin x},$$

故
$$\frac{\sin i}{\sin r} \cdot \frac{\sin r}{\sin x} = n_{ag} \cdot \frac{1}{n_{ag}} = 1.$$

$$\therefore \angle i = \angle x.$$

故光線透過一平行片的介質時，其出射線和入射線，常互相平行，而其所生的旁位移，得推求如下：

如圖 247, PN 即為所生的旁位移，設平行片的厚度為 t ，則由三角形 PNQ ，得

$$PN = PQ \sin PQN = PQ \sin(i - r).$$

再由三角形 PMQ ，得

$$PQ = \frac{PM}{\cos r} = \frac{t}{\cos r},$$

故
$$PN = \frac{t \sin(i - r)}{\cos r}.$$

§ 7. 稜鏡

凡兩平面斜交成一角度的透明體，稱為稜鏡(prism)。兩面所成的夾角，稱為稜鏡角(angle of prism)，或稱稜角(refracting angle)。普通所見的稜鏡為玻璃或水晶等透明體所成的三角柱體(圖 248 (1))。其和各稜(edge)成直角的橫截面，稱為稜鏡的主截面(principal section)，如圖 248 (2)的三角形 ABC 。光線在稜鏡中透過時，入射線 IP 由稜鏡的一側面射入，因折射而成 PQ 的路程，至 Q 再折射而成出射線 QR 。其入射線和出射線常在同一主截面內，入射線 IP 和折射線 PQ 所成的 $\angle d_1$ ，即表示

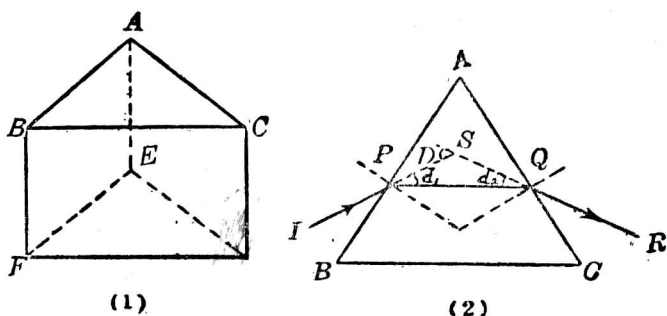


圖 248 稜鏡

光線偏向的程度，稱為偏向角 (angle of deviation)。又 PQ 和出射線所成的偏向角，即為 $\angle d_2$ 。凡入射線和出射線所成的偏向角 D ，稱為總偏向 (total deviation)。由三角形 PQS ，可知

$$D = d_1 + d_2.$$

因光線在稜鏡中經兩次的折射，均離稜角而偏折，故如使稜角向上而隔稜鏡望物體時，所見像的位置，常比實物為高 (圖 249)。

稜角為直角的透明體，即稱為直角稜鏡 (right-angled prism)。如光線垂直投射於稜鏡的一面，如圖 250(1) 的 AC ，則透入稜鏡後，因投射於 BC

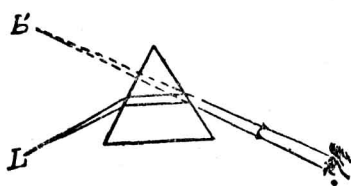


圖 249 稜鏡的成像

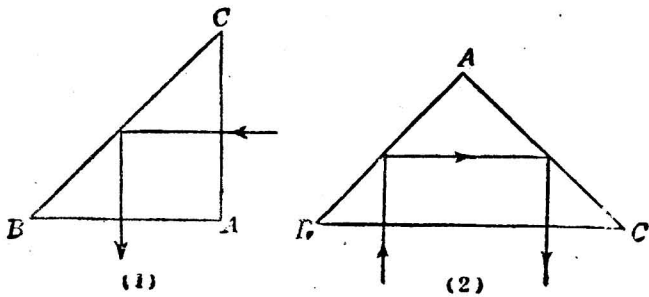


圖 250 直角稜鏡

面的角為 45° ，較玻璃的臨界角 41.5° 為大，故光由全反射，得變更一直角的方向。又如圖 250(2)，光線如由 BC 面垂直透入，則由兩次的全反射，可將光線變更 180° 的方向，即出射線和入射線方向相反而路線不重合。

§ 8. 透鏡

凡兩側面為兩球面的一部分，或一球面和一平面所組成的透明體，稱為透鏡(lens)透鏡可分為兩大類：凡中央部分較周圍為厚的，稱為凸透鏡(convex lens)，有雙凸透鏡(double convex lens)、平凸透鏡(plano-convex lens)、凹凸透鏡(concavo-convex lens)等種類(圖 251 的 1, 2, 3)；凡周圍較中央部分為厚的，稱為凹透鏡(concave lens)，這類透鏡亦有雙凹透鏡(double concave lens)、平凹透鏡(plano-concave lens)、凸凹透鏡(convexo-concave lens)等數種(圖 251 的 4, 5, 6)。凡連接透鏡兩側面中

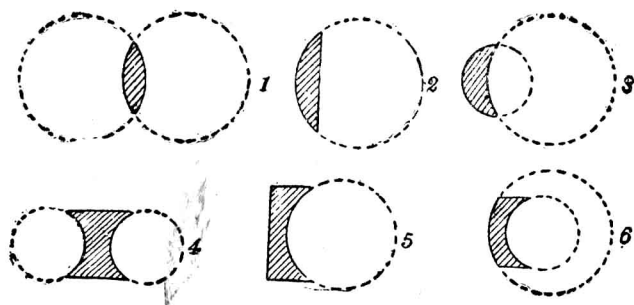


圖 251 透鏡的種類

心的一直線，稱爲透鏡的主軸 (principal axis of lens)。凡透過一透鏡的光線中，如其入射線和出射線互相平行，不生偏向，能和平行玻片的情形相同的，則此透過透鏡的光線和主軸相交的一定點，稱爲透鏡的光心 (optical center of lens)，如圖 252 的 N 點。凡透鏡的兩側面互相對稱，如雙凸透鏡和雙凹透鏡，則透鏡的幾何中心，即爲光心的位置。透鏡的兩側面相距甚近的，稱爲薄透鏡 (thin lens)，光線透過薄透鏡時 其入射線和出射線間的旁位移甚小，可以略而不計，故凡透過光心的一光線，可假定在透鏡中不起折射，作圖時得用一直線來表示。主軸以外，凡經過光心的任何一直

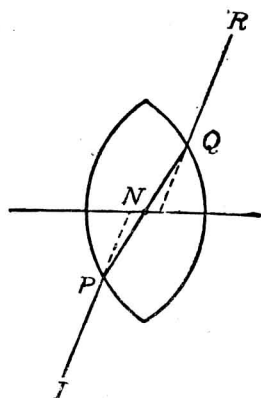


圖 252 光心的說明

線，稱為透鏡的副軸(secondary axis of lens)。

凡和凸透鏡主軸平行的一束光線，經過透鏡後，即起折射而集於主軸上的一點，如圖 253 的 F 點，稱為透鏡的主焦點(principal focus of lens)，或簡稱焦點。將太陽光經過透鏡，集合起來，射於紙上，如紙的地位恰在焦點處，就起燃燒(圖 254)。焦點和光心間的距離，即為透鏡的焦距。各種凸透鏡都有會集光線的作用，亦可稱為會聚透鏡(convergent lens)。

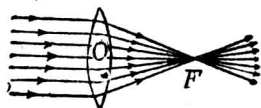


圖 2 3 凸透鏡的焦點

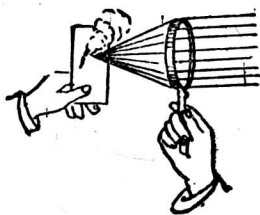


圖 254 太陽光集合而起燃燒

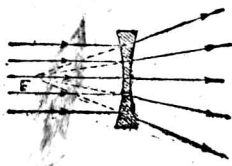


圖 255. 凹透鏡的焦點

凡平行於主軸的光線，遇一凹透鏡，則光線折射後，成為發散光線。如將經過透鏡後的出射線，向後延長，則可相交於一點，而各出射線，就宛似由這點發出，如圖 255 的情形。這點稱為凹透鏡的虛焦點，其和光心間的距離，亦即為焦距。各種凹透鏡都

有發散光線的作用，故亦可稱為發散透鏡 (divergent lens)。

凸透鏡的焦點，為光線實際集合而成，故為實焦點。若在此焦點上放一光源，則發出的光線，通過透鏡後，就變成平行光線，和凹鏡的情形一樣，可直照遠方，而光的強度不變。海邊燈塔的構造，就是應用這個原理。

§9. 透鏡的成像*

凸透鏡所成的像，和凹鏡的情形相似，因實物和透鏡距離的遠近，可成實像和虛像。凹透鏡和凸鏡的情形相似，常成虛像。

表 25 透鏡的成像

實物的位置		像的性質		位 置	虛像或實像	正立或倒立	和 實 物 相 比 的 大 小
凸透鏡	1. 無窮遠處	焦點上	無窮遠處	實像	—	一點	
	2. 二倍焦距外	他方的焦點和二倍焦距內	他方的二倍焦距內	實像	倒立	較小	
	3. 二倍焦距上	他方的二倍焦距上	他方的二倍焦距上	實像	倒立	相等	
	4. 焦點和二倍焦距內	他方的二倍焦距外	他方的二倍焦距外	實像	倒立	較大	
	5. 焦點上	無窮遠處	無窮遠處	—	—	—	
	6. 焦點內	和實物同在一方	和實物同在一方	虛像	正立	較大	
凹透鏡	1. 無窮遠處	虛焦點上	無窮遠處	虛像	—	—	
	2. 透鏡前	和實物同在一方	和實物同在一方	虛像	正立	較小	

*實驗 24。

〔表演〕 關於凸透鏡成像的表演，可取一雙凸透鏡，先放在太陽光中，用紙探察其焦距的約數；然後用燭燄為實物，更用白紙屏承受其實像，依上表配置實物的位置，而確定像的性質。

由實驗可知透鏡的主軸上，實物和其像的位置，亦可有互相交換地位的關係。如一點為光點，則他方的一點恰為像點。這兩點即稱為透鏡的共軛點。雙凸透鏡兩方的共軛點，如彼此和光心的距離恰相等時，稱為副焦點(secondary foci)。每一副焦點和光心的距離，由上列的實驗，知為焦距的二倍。又由實驗，知凸透鏡所成的虛像，較實物為大，但凹透鏡所成的虛像，則較實物為小。

§ 10. 透鏡的公式

設 n 為一雙薄凸透鏡的折射率， s 為其主軸上的一光點(圖 256)，由此點發出的球面波，當其波前達透鏡時，因中點部分先

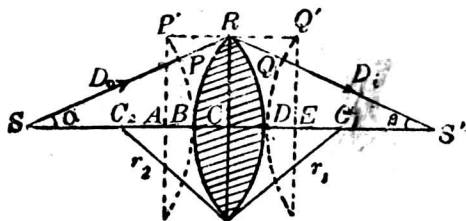


圖 256 光波在透鏡中的折射

透入，而在透鏡內所經的距離較長，速度減小，故其出射波的曲面，所得的曲率，恰和入射波相反，而其波前的曲率中心 S' ，即

爲像點的位置。如命 r_1 表示光波和透鏡相遇的第一側面的曲率半徑， r_2 爲他方的第二側面的曲率半徑。設 D_0 和 D_i 爲物體及像各和透鏡的距離，即爲入射波前 $P'B$ 和出射波前 $Q'D$ 各有的曲率半徑，如透鏡甚薄，即可視爲物體和像各和其光心 C 的距離。如入射線 SP 及出射線 QS' ，各和透鏡主軸所成的傾角 α 和 β 甚小時，則自 P 點經 B 而達 Q 的光線路程，可認爲和 $P'Q'$ 相等。又設 V_1 和 V_2 爲光波在空氣和透鏡中各有的速度，則因波前的中點 B 經透鏡，在 D 透出時，所經的時間 t ，必和 P' 在空氣中達 Q' 的時間相等。故得

$$P'Q' = V_1 t \quad \text{及} \quad BD = V_2 t.$$

但因
$$\frac{V_1}{V_2} = n,$$

故
$$P'Q' = nBD.$$

或
$$AB + BC + CD + DE = n(BC + CD),$$

$$\therefore AB + DE = (n-1)(BC + CD).$$

如命
$$P'A = RC = Q'E = y,$$

則由弧矢(sagitta of arc)和曲率半徑的關係〔註〕，得將上式寫成

$$\frac{y^2}{2D_0} + \frac{y^2}{2D_i} = (n-1) \left(\frac{y^2}{2r_1} + \frac{y^2}{2r_2} \right).$$

$$\therefore \frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (1)$$

若 $D_o = \infty$, 則 $D_i = f =$ 透鏡的焦距, 故(1)式即可寫為

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

上式即為透鏡的普通公式。如由凹透鏡推求, 亦可用同樣的方法, 以得此共軛關係。惟應用時, 對於 D_o 的符號, 如為實物, 常取作正號, 若為虛物, 則用負號。 D_i 的符號為正號時, 即為實像, 為負號時, 即為虛像。又 f 的符號, 對於凸透鏡常取正號, 而用於凹透鏡時, 則取負號。

[例題] 設一凸透鏡的焦距為 4 厘米。和一焦距為 5 厘米的凹透鏡, 相距 5 厘米, 若於凸透鏡前放一物體, 相距 6 厘米, 求像的位置, 和其性質。

[解法] 先求物體由凸透鏡所成的像, 則因 $D_o = +6$ 厘米, $f = +4$ 厘米, 故由公式得

$$\frac{1}{6} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{4},$$

$$\therefore D_i = 12 \text{ 厘米.}$$

再以此像為凹透鏡的物體, 即稱為虛物體 (virtual object), 而應用公式時, 即取 $D_o = -(12-5) = -7$ 厘米, $f' = -5$ 厘米, 故得

$$-\frac{1}{7} + \frac{1}{D_i} = -\frac{1}{5},$$

$$\therefore D_i = -17.5 \text{ 厘米.}$$

故最後求得的像為虛像, 和凹透鏡相距 17.5 厘米。

〔註〕 弧矢和曲率半徑的關係 設如圖 257, C 爲 AB 弧的曲率中心, 弧的曲率半徑爲 r , x 爲 AB 弧和其弦 (chord) 所包的最大距離, 即稱爲弧矢. 設 AB 弦 $= 2y$, 則因

$$r^2 - y^2 + (r - x)^2,$$

$$\therefore 2rx - x^2 = y^2,$$

$$x = \frac{y^2}{2r - x} = \frac{y^2}{r(1 + \cos \alpha)}.$$

設 α 角甚小, 則可得

$$x = \frac{y^2}{2r}.$$

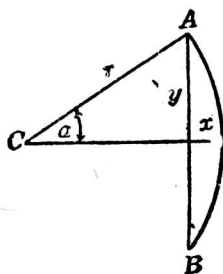


圖 257

弧矢和曲率半徑的關係

§ 11. 透鏡成像的作圖法

薄透鏡成像的作圖法, 可由實物上的一光點起, 根據前數節的原理, 作兩條光線: (1) 一光線通過透鏡的光心, 方向不變, 而沿一直線進行; (2) 另一光線和透鏡的主軸平行, 經折射後, 通過透鏡的焦點. 此兩光線的交點, 就是光點的像. 由實物上各光點經透鏡的折射, 所成各像點的集合, 就成物體的像, 如圖 258, $Q'P'$ 即爲 PQ 的實像. 若所取的兩光線不能在透鏡的另一方

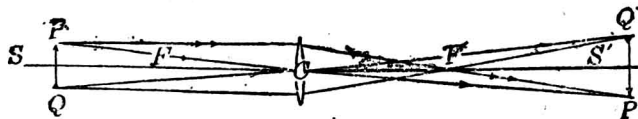


圖 8 凸透鏡的實像

相交，則將兩線延長到實物的一方，就相交而成虛像。如圖 259 和圖 260 的情形。

實物和像的大小的相比，可由各圖中，根據相似三角形的定理，亦得和球面鏡相同的比式，即

$$\frac{L_o}{L_i} = \frac{D_o}{D_i}$$

即實物和像的長度相比，即等於兩者 and 透鏡的距離的比。

§ 12. 薄透鏡接觸時的焦距

設如圖 261 兩薄透鏡的焦距各為 f_1 和 f_2 ，如取同一主軸而接觸時，則此組合透鏡的焦距 f ，可用透鏡的公式推出。

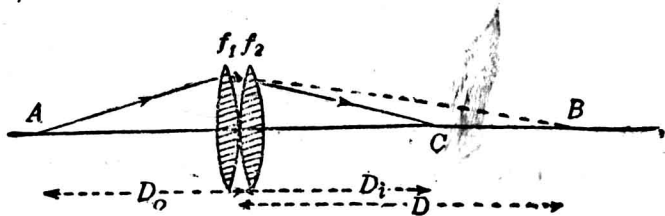


圖 261 組合薄透鏡的焦距

設 A 為光點，如對於第一透鏡單獨所得的像點為 B ，則得

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f_1} \quad (1)$$

像點 B 對於第二透鏡為一虛物體，故得

$$-\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f_2}. \quad (2)$$

將(1)(2)兩式相加，即得

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}.$$

如認兩透鏡相當於焦距為 f 的一個單透鏡，則因

$$\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} = \frac{1}{f},$$

故

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}.$$

上式中如兩透鏡的一個為凹透鏡，則其符號當取負號。故組合薄透鏡接觸時，其焦距的倒數，等於各透鏡焦距的倒數的和。

習 題

1. 一光線自光疎介質而透入光密介質中時，入射角如為 60° ，則其相當的折射角為 30° 。證明折射率為 1.73。

2. 試用作圖法，求出上問的折射率。

3. 設玻璃的折射率為 1.5，則光在玻璃中進行的速度為若干？

4. 設光線透入玻璃 ($n=1.5$) 時的入射角為 45° ，則其折射角應為若干度？

試再用作圖法，求其折射角。

5. 有一透明的球體，其折射率為 $\sqrt{3}$ 。若一光線射於此球面上，入射角為 6° 。證明此光線在球的內部，作一次內反射後，再由球面出射的光線，必和原入射線平行，而方向相反。

6. 水的折射率為 1.33, 酒精的折射率為 1.35. 問酒精對於水的折射率為若干? 水對於酒精的折射率為若干?

7. 設水的折射率為 1.33, 二硫化碳的折射率為 1.62. 求二硫化碳對於水的折射率.

8. 依上問的數據, 求光在水中和二硫化碳中各有的速度.

9. 設硫酸的折射率為 1.437, 求硫酸對於空氣的臨界角.

10. 在盛水的燒杯中, 斜放一空試管時, 向上的管壁, 就呈明亮. 何故?

11. 荷葉上的水滴, 何以光耀明亮?

12. 取一盛水的玻璃杯, 在杯外近底處放一燭燄. 若在杯的另一方近底處, 向水面觀察, 可見倒置的燭像. 試說明其理.

13. 設在一容器內注入 8 厘米深的透明液體, 其折射率為 $5/4$. 如器底處有一光點, 向上方的各方向發射光線時, 則在此液體的表面上, 必有一定的圓, 其圓心恰在光點的上方, 其圓周為透出光線的界限, 而在圓的外方的液面上, 光就不能透出. 試述其理, 並求此圓的半徑.

14. 一玻璃雙凸透鏡的焦距為 30.6 厘米, 其兩面的曲率半徑各為 30.4 厘米和 34.5 厘米. 試求玻璃的折射率.

15. 水和玻璃的折射率如各為 $4/3$ 和 $3/2$, 證明一玻璃透鏡放在水中時的焦距, 約為其在空氣中時的 4 倍.

16. 證明一平凹玻璃透鏡的焦距, 為其凹面的曲率半徑的 2 倍.

17. 一物體放在一透鏡前 3 呎處時, 其像成在透鏡後 1 呎處. 求此透鏡的焦距.

18. 一物體離透鏡 30 厘米, 其像和物體同在透鏡的一方, 離透鏡 3 厘米, 這透鏡是凸的, 還是凹的? 其焦距為若干?

19. 一凸透鏡的焦距為 10 厘米. 若欲得一物體的實像, 大小為物體的 3 倍,

則此物體應放在何處？

20. 一凸透鏡的焦距為 1 呎 6 吋，如欲得一物體的實像，大小為物體的 3 倍，則物體和透鏡應相距若干？若欲得一較物體大三倍的虛像，則物體的位置應如何？

21. 試用作圖法，表示一焦距為 5 厘米的凸透鏡，成一為實物 2 倍大小的像。

22. 一燭燄和一屏相隔的距離為 l ，如用一凸透鏡，在燭燄的近旁調準其位置時，屏上即得一放大的實像；如將透鏡由此位置向屏移過一相當距離 d ，則屏上又可得一較小的實像。證明此凸透鏡的焦距為 $(l^2 - d^2)/4l$ 。（註：此題為凸透鏡的焦距的一種真確量度法，惟 l 應大於 4 倍焦距的長度，證明時可先列出 $D_o + D_i = l$ ，和 $D_i - D_o = d$ 兩式的關係，即可求得 f 的結果。）

23. 一燭燄和一牆的距離為 3 呎，問焦距為 8 吋的一凸透鏡，應放在何處，牆上可得燭燄的實像？（答）離燭燄 1 呎或 2 呎處。

24. 在凸透鏡的前方 1 米處，放一光源，則在其後方 1.5 米處，生一實像。若在透鏡的後方 5 厘米處，放一平面鏡，和其主軸垂直，則所成的像在何處？（答）在透鏡前方 42 厘米處生一實像。（註：參考圖 262，先由透鏡成像，如圖右方的虛

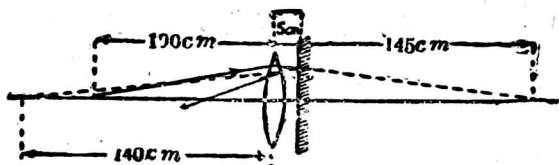


圖 262

線，次由平面鏡的反射，像的位置應如圖中左方的虛線所表示，但因反射後的光線再經透鏡，故最後更應用透鏡的公式，即得所成的像。）

25. 一凸透鏡的焦距為 6 厘米，一凹透鏡的焦距為 8 厘米。如將此兩透鏡互在其同一的主軸接觸，成一組合透鏡，則其合成的焦距為若干？

第四章 光學儀器

§ 1. 光學儀器

凡輔助吾人的視覺，以觀察光的現象時，所用的器械，稱爲**光學儀器**。各種光學儀器的主要部分，大都係利用透鏡、稜鏡，以及球面鏡和平面鏡等，組合而成，故由反射定律和折射定律即可說明其各部分的作用。本章係就普通所用的簡單光學儀器 (simple optical instruments)，說明其構造和功用。

§ 2. 照相機

針孔照相機 (p. 5, § 5) 須用小孔，方能得外方景物的像。若將孔的口徑放大，而安裝一凸透鏡，則因此透鏡能會聚光線，且所受的光量較小孔爲多，故所成的像，不但輪廓清楚，且其亮度亦可增加。照相機 (photographic camera) 的裝置，就是應用這個原理而成。其主要部分爲一暗箱，和箱前的凸透鏡 (圖 263 和圖 264)；箱的側面用柔皮製成，可以摺疊伸縮，以調準透鏡和箱後毛玻璃片間的距離，使透鏡前方欲照的實物，和玻璃片上所成的倒像，恰在透鏡的共軛點的位置。當用照相機攝影時，先將這個位置配好，以得大小合宜，而甚清楚的倒像。其強度由透鏡前光闌 (diaphragm) 的配置，以定透入的光量。然後用塗有感光性銀鹽的乾片，代替玻璃片的位置，經相當的露光時間，因映於片上的像，各部分有明暗的區別，故即起不等的化學變化，而

成潛像。

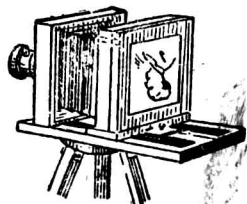


圖 233 照相機

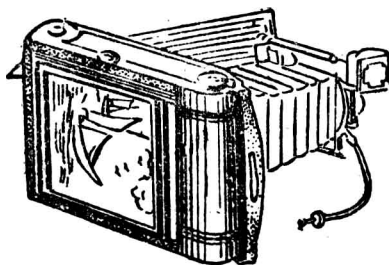


圖 234 手提照相機

乾片感光後，在暗室內將片浸入顯像劑(developer)的溶液中，其感光部分即變成暗黑的銀層，用水沖洗後，再浸入定像液(fixing solution)中，則未曾感光的銀鹽，均被溶解，再用水沖洗，即得和原物體明暗相反的底片(negative plate)。如置感光紙於底片的下面，在太陽光下露光後，亦先後用顯像液和定像液浸過，就成濃淡和底片相反，而和原物體相同的正片(positive plate)，即為通常的相片。

§ 3. 眼的構造

由光學的觀點而論，人眼亦為一光學儀器。眼的構造雖很複雜，但和照相機頗相似。眼球的水平截面，如圖 265，球的外面有一層堅牢的膜，其在前方凸出而透明的部分 *C*，稱為角膜(cornea)，在後方的部分，並不透明的，稱為鞏膜(sclerotic) 角膜後的部分 *A*，稱為前房(anterior chamber)，房中充有一種透明的液體，稱為前房液(aqueous humor)。 *I* 為能伸縮而有色的彩簾(iris)，彩簾的中央有一圓孔 *P*，即為瞳孔(pupil)，在彩簾和瞳孔後的透明晶質 *L*，稱為睛珠(crystalline lens)，

睛珠係多層密度不同，而具有彈性的透明質所組成，最外一層較為柔軟，而最內一層較為堅固，其前方一面的曲率，較其後方一面的為小，而呈凸透鏡的作用。又和鞏膜內層上的黑衣 (choroid) 相連而附着於睛珠兩面的筋肉 M ，稱為有毛肌肉 (ciliary muscle)。睛珠後方 V 的部分，稱為後房 (posterior chamber)，房中充滿透明的膠質，稱為玻璃狀液 (vitreous humor)。黑衣散布於眼球內部，其內面有視神經散布的部分 R ，稱為網膜 (retina)。網膜上正對視神經通入眼球的一點 B ，缺乏視覺的，稱為盲點 (blind spot)；其正對睛珠後方的 Y 點，四周略呈黃色，對於視覺最為敏銳的，稱為黃斑 (yellow spot)。

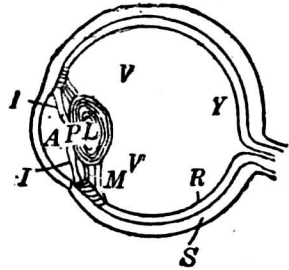


圖 265 眼的截面

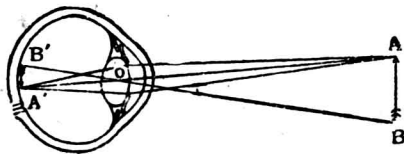


圖 263 眼中所映的像

如圖 263，由實物 AB 發出的光線，進入瞳孔，經形體的節制，使瞳孔有大小，以調準透入的光量；而呈照相機的光闌作用後，即由睛珠的折射，集光於網膜上，成為倒立的實像 $A'B'$ 。視神經受其

刺激，因視覺的作用，而知有正立物體的存在。

§ 4. 眼的調節

人眼中睛珠的曲率，得受有毛肌肉的節制，可以任意變更。當注視近物時，有毛肌肉即收縮，睛珠兩面的曲率，遂因彈性而增加，焦距減短，若注視遠物時，有毛肌肉即鬆張，使睛珠稍凹

扁平，以減小其曲率，焦距加長。故睛珠和網膜間的距離，雖常不變，但由睛珠曲率的變更，對於遠近物體的像，都可映於網膜上，而得顯明的視覺。這種調準睛珠曲率的本領，稱為眼的調節 (accommodation of the eye)。

由眼的調節，使眼得見顯明的最遠的一點，稱為遠點 (far point)；最近的一點，稱為近點 (near point)。健全的眼的遠點，可達無窮遠處，近點約距眼 20 厘米，均可因眼的調節，以得明視。物體離眼最易明視，而不感覺疲勞的距離，稱為明視距離 (distance of distinct vision)。明視距離雖隨各人的眼球而有不同，但通常選用 25 厘米，或 10 吋，作為標準距離。

§ 5. 眼鏡

平行的光線經過健全的眼，其像常集於網膜上 (圖 267)。但近視眼 (myopia eye or near-sighted eye) 的睛珠，曲率過大，或眼球特別深些，其明視距離比健全的眼為短。平行光線透過睛珠所成的像，常成於網膜的前方 (圖 267 (2) 的虛線)，所以網

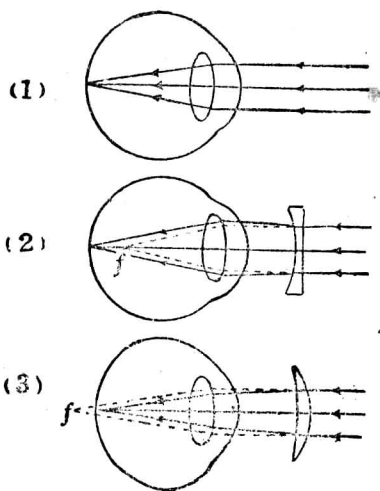


圖 267 視覺的缺點

膜上所感覺的，模糊不清。如欲使像移至網膜上，則須戴凹透鏡所製的眼鏡 (spectacles)，使光線發散後，然後由睛珠會聚，方可明視遠處的物體。遠視眼 (hypermetropia or far-sighted eye) 的睛珠，過於扁平，或眼球特別淺些，其明視距離比健全的眼為長，近處物體的像，常成於網膜的後方，故須戴凸透鏡所製的眼鏡，使光線先經眼鏡的會聚，以助睛珠的作用，而像就移前，成於網膜上。年老人的睛珠，已失其調節作用的，稱為老眼 (presbyopia)。老眼注視近物時，因不能使睛珠的曲率增加，故和遠視眼的情形相似，亦應戴凸透鏡所製的眼鏡，以補其視覺的缺點。

眼鏡的度數，有用透鏡焦距的吋數來表示的，但現時通用的透鏡度 (power of a lens)，係採用焦距米數的倒數。凡透鏡的焦距為 1 米時，則稱其焦度 (dioptric strength or dioptric power) 為 1 度 (diopetre)。例如 0.1 米焦距的透鏡，其焦度即為 10 度。

§ 6. 映畫器和電影

映畫器 (projecting lantern) 亦稱幻燈，其構造的主要部分有三：(1) 一為光度極大的光源，例如燈絲集中的白熾燈 (即電燈)，或弧光燈，如圖 268 中 A 的部分，光源的後方常附一反射鏡，使光向前方進行；(2) 一為焦距較短的一組平凸透鏡 L ，將光源發出的光線，會集於插入 P 框內而倒置的透明畫片，這組的

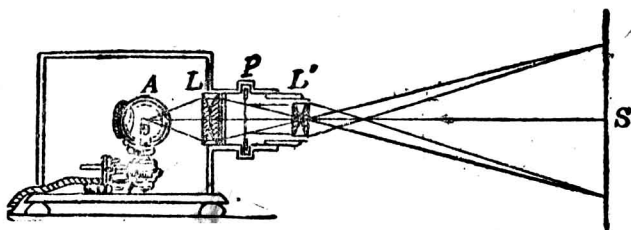


圖 268 映畫器(1)

透鏡，即稱為聚光透鏡 (condensing lens)；(3) 一為透明畫片前方的映畫透鏡 (projecting lens) L' ，即將畫片的像映射於白屏 S ，而得放大的實像。 P 與 L' 的距離可隨屏的遠近，由螺旋移動的裝置，隨時配置，使畫片和像，恰在透鏡 L' 的共軛位置，使所映的像，輪廓清楚。

若欲將不透明的畫片，如書報上所載的，亦能用映畫器，映於白屏上，以供公眾觀覽時，則映畫器的裝置應稍改動，如圖 269 的情形。先使聚光透鏡 L 所收集的光，照射於平置的畫片 PQ ，使其反射光經上方映畫透鏡 L' ，再由平面鏡 M 改變光的方向，即可將放大的像，映於白屏上。

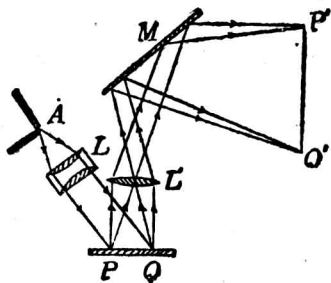


圖 269 映畫器(2)

吾人的視覺，得將網膜上所映的物像，約可保留達 $\frac{1}{16}$ 秒以

上,方纔消滅.這種現象稱為視覺暫留(persistence of vision).活動電影(moving picture)的原理,即對於運動的人物,每隔約 $\frac{1}{16}$ 秒攝一相片,即得各相片所連成的影片.開演時將影片裝入一特製的映畫器中(圖 270),使屏上所現的像,每隔 $\frac{1}{16}$ 秒更換

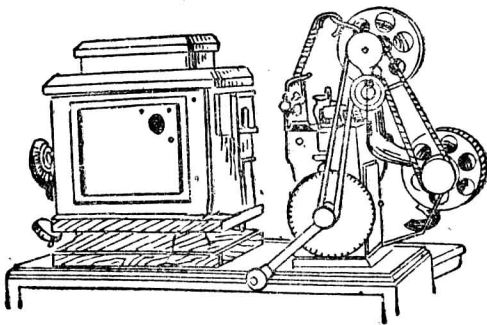


圖 270 電影放映機

一次,吾人因網膜上連續所見的像,有視覺暫留的性質,故即不覺像的間斷,宛似實物的活動.

§ 7. 視角和實體鏡

觀察物體時,由物體的限端,引至一眼的二直線,所成的夾角,即為視角(圖 271).視角的大小,雖與物體的大小有關係,但亦因物體的遠近而異,故同一物體如離眼有遠近,則視角亦有大小,若視角較大,則網膜上所成的像亦大.太陽和月球,其大小雖不等,但因和眼的距離有遠近,故吾人望去,因所成的視角相差不遠,就覺其大小宛似相等.

當吾人用雙眼視一物體時 因兩眼各對此物體的視角,略有差異,故可辨別

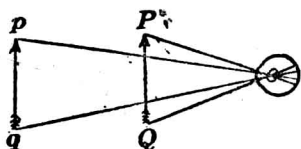


圖 271 視角

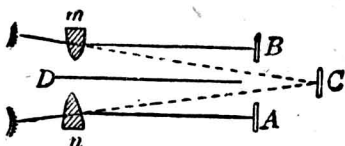


圖 272 實體鏡的原理

物體的各部分離眼的遠近，以生立體的感覺。實體鏡(stereoscope)就是利用雙眼視角的不同，使像片顯示立體感覺的器械。先用具有兩個透鏡，而互隔約為人的兩眼的距離，所製成的實體照相機(stereoscopic camera)，將一物體依每一透鏡的地位，攝取照片各一張，然後如圖 272，在 A 和 B 的鏡框內，將每一照片插入，放在兩個半透鏡 m 和 n 的前方。如用雙眼於透鏡中望去，則因光線經透鏡折射，使兩像重疊於 C 處，而左右的情形仍略有差異，故每一照片雖為平面，卻因兩照片的像重合，即可得和實物相同的立體感覺。

§ 8. 放大鏡

放大鏡(magnifying glass)即為一焦距頗短的凸透鏡。如將微小的物體放在其焦點內，即可得一放大的虛像，例如圖 273 中 A'B' 即為實物 AB 放大的虛像。所以放大鏡亦稱為單顯微鏡 (simple microscope)。

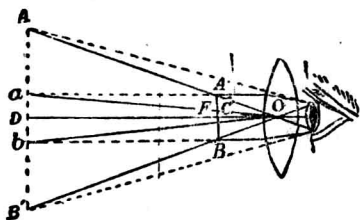


圖 273 透鏡的放大率

通常將明視距離 25 厘米處虛像的大小，和實物的大小相比 稱為單顯微鏡的放大率(magnifying power)。設如

圖 273, OD 和 OC 爲像和物體各和透鏡的距離, 則透鏡的放大率 M 爲

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{OD}{OC}.$$

實際應用時, $OD = 25$ 厘米, OC 和透鏡的焦距 f 幾相等, 故放大率可約用下式〔註〕:

$$M = \frac{25}{f}.$$

由上式可知放大鏡的焦距愈小, 則其放大率即愈大。

〔註〕 因 $M = \frac{OD}{OC}$, $OD = 25$ 厘米, 如命 $OC = d$, 則由透鏡的公式, 得

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{25} = \frac{1}{f}.$$

$$\therefore M = \frac{25}{d} = 25 \left(\frac{1}{25} + \frac{1}{f} \right),$$

$$\therefore M = \left(1 + \frac{25}{f} \right),$$

上式爲像在 25 厘米處應得的公式。設焦距 f 甚小, 則 $25/f$ 的數值, 較大甚, 故普通可取其約數, 以明視距離和透鏡的焦距的比率, 即爲放大鏡的放大率。

§ 9. 複顯微鏡*

複顯微鏡 (compound microscope), 簡稱爲顯微鏡, 係用一直立的金屬圓筒〔圖 274 (1)〕, 在其上下兩端, 各套有一組的凸透

*實驗 26.

鏡。圓筒下端的一組透鏡，和實物接近的，稱為物鏡 (objective)；其上端的一組透鏡，和眼接近的，稱為目鏡 (eyepiece)。物鏡的焦距甚短，而目鏡的焦距則較長。物鏡下有孔的平臺，即放置兩玻璃片所夾的微小物體，平臺下有一凹鏡，可使外方的光反射，經臺孔而達於圓筒，以得顯明的觀察。

設物體 AB 放於物鏡 O 的焦距外少許，如圖 274(2)，使其所成的實像 ab ，恰在目鏡 E 的焦距內。如由目鏡中望去，則 ab 的像更放大，而在眼的明視距離處，成虛像 $a'b'$ ，故 $a'b'$ 和 AB

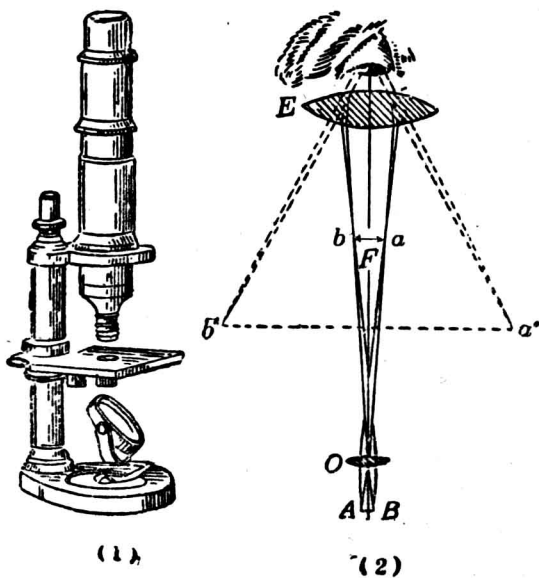


圖 274 複顯微鏡

相比,其放大率當比單顯微鏡為更大。

設實物 AB 和物鏡的距離為 D_o , ab 和物鏡的距離為 D_i , 則物體經物鏡的放大率 M_o 為

$$M_o = \frac{ab}{AB} = \frac{D_i}{D_o}.$$

又設 M_E 為焦距 f 的目鏡的放大率, 則得

$$M_E = \frac{a'b'}{ab} = \frac{25}{f}.$$

故複顯微鏡的放大率 M , 必等於 M_o 和 M_E 的乘積, 而得

$$M = \frac{a'b'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} \times \frac{25}{f}.$$

通常因 D_i 約等於金屬圓筒的長度 L , D_o 幾和物鏡的焦距 F 相等, 故複顯微鏡的放大率 M , 得列成如下式〔註〕:

$$M = \frac{25L}{Ff}.$$

由上式可知欲得顯微鏡的高倍放大率, 須使物鏡和目鏡的焦距減短, 或將金屬圓筒的長度增加。顯微鏡的放大率有達 2,500 倍至 3,000 倍的, 若再高則像的放大面積過大, 就有模糊不清的弊病。

〔註〕顯微鏡的放大率當成像於明視距離 25 厘米處時, 所得的公式, 應為:

$$M = \frac{D_i}{D_o} \left(1 + \frac{25}{f} \right).$$

但通常求其放大數時，可認作前式而計算。

§ 10 天文望遠鏡*

望遠鏡(telescope)係觀察天體或地上遠距離物體的器械，其構造係用互相套裝而能伸縮長度的一組圓筒而成。全筒的兩端，亦各裝物鏡和目鏡。對於天體觀察時的望遠鏡，稱為天文望遠鏡(astronomical telescope)，可分為折射望遠鏡(refracting telescope)，和反射望遠鏡(reflecting telescope)兩大類。

折射望遠鏡所用的目鏡和物鏡，均為透鏡。例如圖 275， O 為物鏡，能將天體間物體 AB ，因折射而得的實像 ab ，成於物鏡

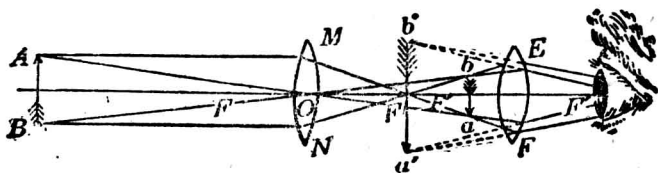


圖 275 天文望遠鏡

焦點的附近，且恰在目鏡的焦距內，故 ab 像更由目鏡的放大，就成虛像 $a'b'$ ，所見的像為實物的倒像，這種天文望遠鏡的放大率，約為物鏡的焦距和目鏡的焦距所得的比率，故物鏡的焦距愈長，放大率亦愈大。

例如圖 276， O 為天文望遠鏡的物鏡，遠處物體 QP 所成的像 $Q'P'$ ，生於透鏡焦點的附近，這像可用眼在相距 \dots 厘米處直接觀察，其視角 $Q'EP'$ ，和物鏡處

*實驗 2。

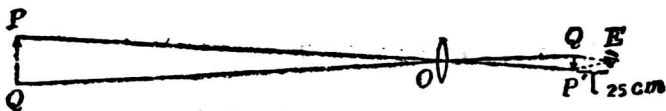


圖 276 天文望遠鏡的放大率

所成的視角 POQ ，或即和 $Q'OP'$ 角相比，就是物鏡的放大率。因 $P'Q'$ 和透鏡的距離約為物鏡的焦距 F ，而 $P'Q'$ 和眼的距離為 25 厘米，又因視角的大小和距離成反比，故物鏡的放大率 M_O ，即為：

$$M_O = \frac{\angle Q'EP'}{\angle Q'OP'} = \frac{F}{25}$$

但目鏡的放大率

$$M_E = \frac{25}{f}$$

故天文望遠鏡的放大率 M ，即為：

$$M = M_O M_E = \frac{F}{f}$$

望遠鏡的物鏡如不用透鏡，而用一反射鏡，即為觀察天體時所用的反射望遠鏡。例如圖 277，光線由廣大的反射鏡反射後，再經平面鏡或球面鏡等的反射，即可在反射鏡的近旁，或鑲在反射鏡中的目鏡觀察。

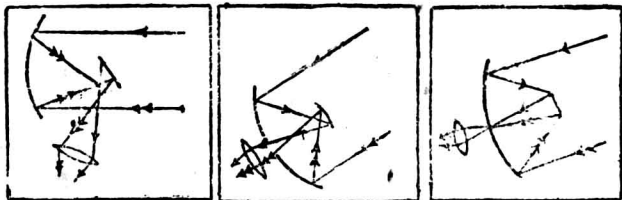


圖 277 反射望遠鏡

§ 11. 地上望遠鏡

用以觀察地面上物體的望遠鏡稱為地上望遠鏡 (terrestrial telescope). 因天文望遠鏡所成的像為倒像, 地面上使用不便, 故製地上望遠鏡時, 應如圖 278, 在物鏡 O_1 和目鏡 O_3 間插

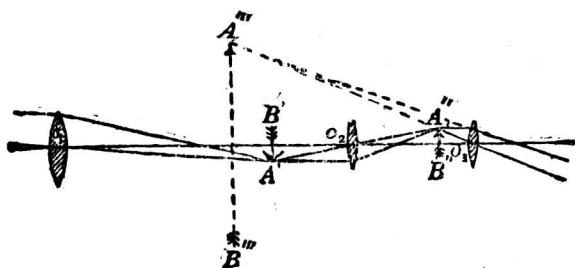


圖 278 地上望遠鏡

入一凸透鏡 O_2 , 使由物鏡所得的倒像 $A'B'$, 可以轉成一正立的實像 $A''B''$; 然後再用目鏡放大, 則所見像的形狀, 就得和實物同樣的正立。

有一種天文望遠鏡稱為伽利略望遠鏡 (Galileo telescope) 的, 係荷蘭製眼鏡家所發明, 經伽利略改造而成。所用的物鏡為凸透鏡, 但目鏡則用凹透鏡 (圖 279), 所成的像, 和實物亦得同樣的正立; 且因兩透鏡的距離較短, 攜帶便利, 故普通觀劇鏡 (opera glass), 就是利用兩個伽利略望遠鏡, 左右並置而成。

普通觀劇鏡的缺點: 在其視場 (field of view) 過小, 而普通

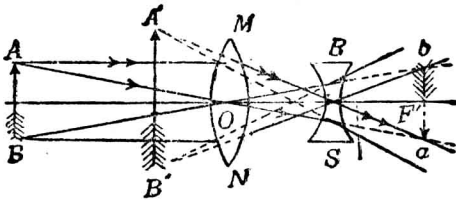


圖 279 伽利略望遠鏡

地上望遠鏡的視場雖大，但所用的圓筒又嫌太長，故一種優良的觀劇鏡，係在普通地上望遠鏡的目鏡和物鏡間，插入兩個直角稜鏡，如圖 280，則光線由物鏡透入後，經稜鏡內四次全反射，

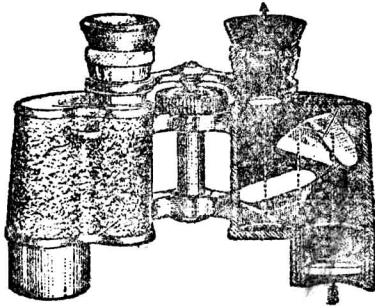


圖 280 稜鏡式雙筒望遠鏡

亦可將倒像轉正，應用時亦採用雙筒，故稱為稜鏡式雙筒望遠鏡 (prism binocular)。這種雙筒望遠鏡的管長可縮短，攜帶便利，且其視場亦較大，而實體的感覺更為增加。

§ 12. 潛望鏡

潛水艇在水面下行駛時，欲觀察水面上的情形，常用潛望鏡(periscope)。其構造的原理，如圖 281，實為一種兩重接合的望遠鏡，如 OE 和 $O'E'$ 。水面上的光線由 P 透過鏡上的孔道，及於稜鏡 P_1 ，作全反射而下射至 E ， E 為凸透鏡，焦距較短，光線經透鏡而成 $a'b'$ 的實像。這個實像，恰在透鏡 O 的焦點附近，故光線經過 O 後，變成平行。再由 O' 的裝置，使光線射至稜鏡 P_2 ，再作一次全反射，而成 $a''b''$ 的實像。如於目鏡 E' 觀察，可見得一虛像 Q 。故在潛水艇內，可觀察水面上的情形，且因全筒可繞軸轉動，以觀察任何方向，故運用頗為便利。

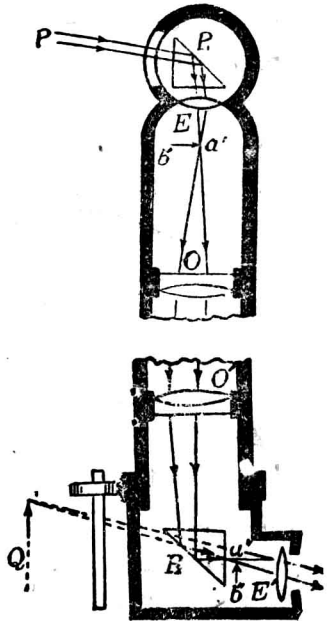


圖 281 潛望鏡

習題

1. 當照相機前面 10 呎處有一汽車時，則玻璃片和透鏡相距 8 吋，恰得其倒像。

若汽車在機前 10 呎處，則透鏡和玻璃片的距離須增長，抑或縮短？

2. 人眼的瞳孔在暗室內張大，在太陽光下則縮小，何故？

3. 吾人如入已開演的影戲場內，則驟覺暗黑，而不能辨別坐椅等的地位，但稍待片刻，即可看清，這是何故？

4. 攝影時如遇陰天，須將照相機的光圈張開，何故？

5. 試述近視眼和遠視眼的區別，和其補救法。

6. 近視眼所戴的眼鏡如放在健全的眼前，則所成的像究在網膜的前方，或

在其後方? 試用圖來說明

7. 一人的明視距離為 20 厘米, 如用一焦距為 5 厘米的眼鏡讀書時, 則書本和眼應相隔若干距離? (註: 題意即戴此眼鏡後可將書本的像成在 20 厘米處。)

8. 一遠視眼所戴的眼鏡, 焦距為 10 厘米, 如將印刷物放在離眼鏡前 30 厘米處, 則恰能明視, 問其明視距離為若干?

9. 一近視眼將一印刷物放在眼前 15 厘米, 恰能明視, 若欲看清離眼 60 厘米處的書本, 則應戴的眼鏡焦距為若干?

10. 設一遠視眼的最近明視距離為 2 呎 11 吋, 若將書本放在 10 吋處時, 則應戴的眼鏡焦距為若干?

11. 一長 6 呎的成人, 立在地, 人和一觀察者相隔 300 呎, 設在其中間有一長為 4 呎的小孩, 觀察者望其高度, 宛和前立的成人相等, 問小孩和觀察者的距離為若干?

12. 在映畫器前 30 呎的白屏上, 要映出較畫片為 30 倍大的放大像, 則所用透鏡的焦距應為若干?

13. 說明活動電影的原理。

14. 試用圖示, 說明放大鏡能將物體放大的理由。

15. 試用圖示, 說明顯微鏡的簡單構造, 和其原理。

16. 顯微鏡的物鏡和目鏡, 其焦距各為 1.5 厘米和 7 厘米, 如在物鏡下 1.5 厘米處, 放一物體, 由目鏡望去, 使所成的像在通常的明視距離處時, 則此顯微鏡的放大率為若干?

17. 試比較望遠鏡和顯微鏡的相同和相異的各點。

18. 用望遠鏡窺視遠方物體時, 其筒長應縮短, 但窺視較近的物體時, 應再伸長, 何故?

19. 有一望遠鏡, 其物鏡的焦距為 200 厘米, 目鏡的焦距為 8 厘米, 試求其

放大率。

20. 有一顯微鏡，其物鏡的焦距為 0.5 厘米，目鏡的焦距為 4 厘米，筒長 20 厘米，問其放大率為若干？

第五章 光的色散

§1. 光的色散

如使太陽光通過一狹小的縫 (slit)，而透入一稜鏡，如圖 22，則光不但折射，而其出射線且向前分散，在一白屏上散布，成一美麗的有色光帶，帶中各色的鄰近處，雖無明顯的界限，但其主要各色的次序，必

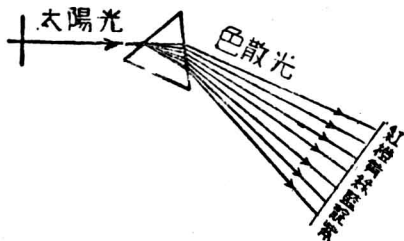


圖 282 光的色散

為紅(red)、橙(orange)、黃(yellow)、綠(green)、藍(blue)、靛(indigo)、紫(violet)等七色，這種現象，稱為光的色散 (dispersion of light)。由色散而在白屏上列成一有次序的各色光帶，稱為光譜(spectrum)。

牛頓首作光的色散實驗，證明太陽光可分散為各種色光。但如圖 283，當太陽光經第一稜鏡 P_1 在屏 S_1 上成一光譜後，牛頓再在屏中取一狹縫，使一種色光通過，以透入第二稜鏡 P_2 ，即可見其出射線並不再行分散，而集於屏 S_2 上。凡光譜中不再為

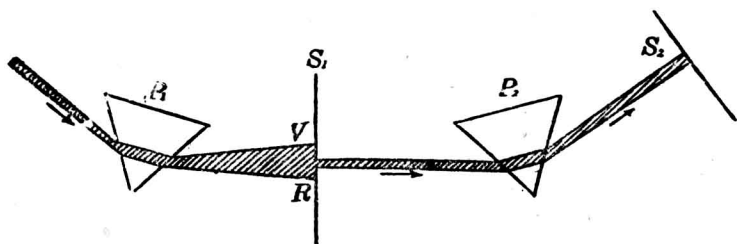


圖 283 牛頓的色散實驗

稜鏡所分散的任何一種色光，稱為單色光 (monochromatic light)。凡經稜鏡而能色散為幾種色光的光，即稱為複光 (compound light)。

若白光經稜鏡色散後，再用一相似的稜鏡倒置如圖 284 的位置；或用一凸透鏡，將各色光會聚成爲一點。都可使色散的光，仍合成白光，是爲光的復合 (recombination of light)，故太陽光實爲各種色光的混合光。

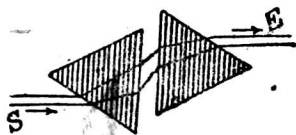


圖 284 光的復合

白光經稜鏡而色散的原因，係各種色光在玻璃內速度的不等，或玻璃對於各種色光的折射率不同的緣故。七色中紫光的速度最小，玻璃對於紫色的折射率最大，故紫光的偏向亦最大；紅光的速度最大，玻璃對於紅光的折射率最小，故紅光的偏向亦最小。各色光的偏向，介於紅光和紫光之間，故就成光的色散，

在白屏上得一有色光帶。

§ 2. 夫牢因和斐譜線

太陽光經稜鏡分散而成的光譜，稱為太陽光譜(solar spectrum)。太陽光譜自牛頓於公元 1672 年發見後，至公元 1802 年英人胡拉斯頓(Wollaston)重作較精密的實驗時，發見太陽光譜中有若干條暗線，認為係光譜中各色的自然界線。至公元 1814 年德國光學家夫牢因和斐(Fraunhofer)亦發見這種暗線，並用圖畫出其相對的位置，而用英文字母，表示各特別顯著的暗線，稱為 *A, B, C, D, …* 等線，例如光譜的第 1 列，*A* 線 *B* 線和 *C* 線在紅色部分內，*D* 線在黃色部分內，*E* 線在綠色部分內，*F* 線在藍色部分內，*G* 線在靛色部分內，*H* 線在紫色部分內，均有確定的位置。夫牢因和斐更能在 *B* 線和 *H* 線間，數出 754 條暗線，並將其中的 350 條暗線的位置，在其光譜圖中畫出。由其所得的結果，顯然表示胡拉斯頓的解釋並不準確。這種暗線經詳細檢查後，其數目約可在 4,000 條以上，總稱為夫牢因和斐譜線(Fraunhofer's line)。

研究光學時，於理論和實驗上對於太陽光譜中的夫牢因和斐譜線均很為重要，因這種暗線在光譜中各有一定的位置，且每一暗線可表示一定波長的單色光，故較用紅、橙、黃、綠等字，表示色光，更為確定。例如火燄中放以食鹽，即為常用的鈉燄(sodium flame)所發的黃光，為鈉元素在各種鈉的化合物中持

有的光，恰和 D 線的波長相當，故量度介質的折射率時，通常即用鈉燄為光源，所得的折射率即對於 D 線而言，所指的光即有確定的波長，而比泛指的黃光，更為準確，幾種介質對於 D 線的折射率如下表：

表 26 折射率

介 質	n	介 質	n
醇(酒精)	1.36	二硫化碳	1.62
冕牌玻璃	1.51	冰	1.31
金 剛 石	2.42	松 節 油	1.47
火石玻璃	1.65	水	1.333

§ 3. 分光鏡

凡觀察各種光源所成的光譜，所用的儀器，稱為分光鏡 (spectroscope)，其主要構造有四部分，如圖 285，(1) A 為準直管 (collimator)，或稱平行光管，管的外端有細長縫 S ，他端有凸透鏡 B ；(2) P 為稜鏡，放在一直柱所支的圓平臺上；(3) T 為望遠鏡，用以觀察光譜；(4) S_0 為標度管 (scale tube)，管的外端置一標尺，他端有凸透鏡。觀察光譜時，先將準直管端的縫，配準在透鏡 B 的焦點位置，使光由縫射入，經過透鏡後，即成平行光線，投射至稜鏡的一側面，折射而色散，每種色光的出射線，均透入望遠鏡中，從望遠鏡中觀察，就窺見光譜的各部分，標度管

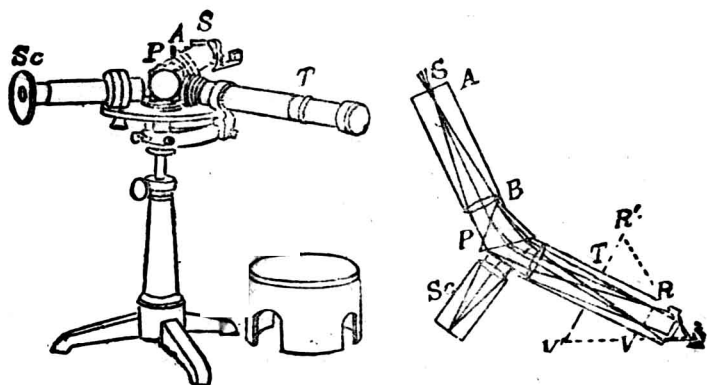


圖 285 分光鏡

的外端用白光照射時，可使照明標尺的光線，由稜鏡向望遠鏡的一側面上反射，以入望遠鏡中，使所見光譜的像外，同時可見標尺的像，以比較光譜各部分的位置。

若將分光鏡的標度管除去，在其圓平臺的圓周上，刻有角的標度；更將望遠鏡和一角度旁的游標相連，可繞鉛直軸線，在平臺的周圍轉動，即得量度望遠鏡轉過的角。這種裝置，即稱為分光計(spectrometer)。若將一照相器代替望遠鏡，得將光譜攝成相片的，稱為攝譜儀(spectrograph)。

§ 4. 光譜的種類

〔表演 1〕 將燭焰放在分光鏡的準直管前，觀察光譜，由紅色以至紫色的各部分，可知光譜中各色連續，而無間斷的地方。

〔表演 2〕 將酒精燈放在準直管前，用鉑線蘸鈉的化合物，如食鹽等溶液，而

放入火試中，則見黃色的細縫像，而得一明線。再將鋰、鋇、鈣等鹽類的溶液，逐次放入火焰中，作同樣的實驗，則見每種元素的化合物，都有一定的明線。

〔表演 3〕 在準直管前置一電燈，或一弧光燈，可見各色連續的光譜。若在光源和縫間放一明亮的鈉燄，則光譜中黃色部分現一暗線。更將電燈除去，則暗線處現鈉的明線。

由實驗可知光譜的種類有三，分述如下：

(1) 連續光譜 凡一切熾熱的固體和液體，例如燭光、電燈光、和弧光等，所成的光譜，自紅端以達紫端，均連續而無間斷的，稱為連續光譜(continuous spectrum)。

(2) 明線光譜 凡每種元素熾熱時的汽或氣體，所成的光譜，係不連續而有一定位置的光譜線(spectral line)的，稱為明線光譜(bright line spectrum)。各種元素所具有的光譜線，均無共同的線，故由所見明線的數目和位置，即可判別物質中所含的元素。這種鑑別元素的方法，稱為光譜分析(spectrum analysis)。本生燈燄中含有 $1/14,000,000$ 毫克的鈉，即可發生 D 線。可知光譜分析很為準確。元素中如銫(caesium)、銣(rubidium)、鉍(thallium)、銻(indium)，和鎘(gallium)等的發見，都是利用光譜分析的方法。

連續光譜和明線光譜，均為物質熾熱時所發生，亦可總稱為發射光譜(emission spectrum)。

(3) 暗線光譜 凡光經液體氣體或固體等的透明體後，在光譜上發生暗線的，稱為暗線光譜(dark line spectrum)，這等

暗線的位置，和經過的透明物質於熾熱時，所生明線的位置相同。克希荷夫(Kirchhoff)等認為低溫度的物質，可由選擇吸收(selective absorption)，將透過的光中，除去和其自身熾熱時能發的光波，故剩餘的光中，即缺少吸收的部分，而得相當的暗線或暗帶(dark band)。這種關係，稱為光譜線的自蝕(reversal of spectral line)。故暗線光譜亦稱為吸收光譜(absorption spectrum)。

太陽光譜中夫牢因和斐譜線的發生，即因太陽的外部包有溫度較低的氣層，故太陽光通過時，一部分即為氣層所吸收，和各種暗線光譜的原理相同。若將各種元素所呈特殊明線的位置，和太陽光譜中暗線的位置互相比較，即可推知地球上存在的元素，太陽上亦有多數的存在。當氦(helium)元素尚未能在地球上發見時，在太陽光譜中早已發見和這元素相當的特殊暗線。故光譜分析在天文學上研究各星球時，亦甚重要。

§5. 光譜的限度

各種單色光各有一定的波長，不過數值很小。依光的干涉和光的繞射等實驗，可量度光譜中任何一色光的波長。波長的單位可用厘米或毫米，但亦有用較小的單位來表示的；例如取一萬萬分之一厘米(10^{-8} 厘米)為單位，稱為一埃斯特稜(Ångström)，簡稱為埃，可用Å字代表。又有用千分之一毫米為單位的，稱為一微米(micron)，用 μ 的記號表示；更有用千分

之一 μ 爲單位的, 即用 $\mu\mu$ 的記號表示。

吾人視覺所能察見的光譜, 稱爲可見光譜 (visible spectrum), 其限度約自 3900 埃的紫色到 7800 埃的紅色爲止。光譜中相當於主要夫牢因和斐譜線的光波的波長如下表:

表 27 夫牢因和斐譜線的波長

線 名	產生的元素	波長(埃)
A	氧(O_2)	7594
B	氧(O_2)	6897
C	氫(H_2)	6563
D ₁	鈉(Na)	5895
D ₂	鈉(Na)	5890
E	鐵(Fe)	5270
F	氫(H_2)	4831
G	鐵(Fe)	4388
H	鈣(Ca)	3959

光譜中黃色部分的光, 對於眼的感覺最強, 由黃色向光譜的兩端而依次漸弱。如就感覺的強弱作一曲線, 得如圖 286 中曲線 II 的情形。若用精密的溫度計, 放至光譜的各部分, 即可察知各種色光, 可生熱作用, 但自紫色向紅色, 熱作用則漸次增加, 在紅色外熱作用

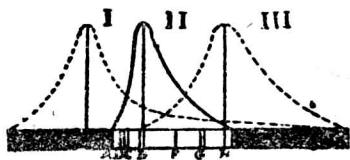


圖 283 光譜中各部的作用

最強處，爲不可見的部分，如圖中曲線 I 的表示。這紅光外波長較長的部分，稱爲紅外線 (infra-red rays)。又如用照相所用的感光紙，放在光譜的各部中，可察知感光的程度，以紫端爲最強，在紫光外亦有不可見的部分，其波長較短，可呈光的化學作用，如圖中曲線 III 的表示。這紫光外不可見的部分，稱爲紫外線 (ultra-violet rays)。紫外線殺菌的效力很大，故可利用太陽光以消毒。紅外線和紫外線爲不可見光譜 (invisible spectrum) 的部分。由精密的實驗，知紫外線最短的波長，可達 0.00000136 厘米，其值僅爲可見的最短紫光波長的 1/30。紅外線最長的波長爲 0.042 厘米，較最長的紅光約長 525 倍。

§ 6. 虹霓

虹霓 (rainbow) 爲太陽光射至大氣中浮着的水滴，而成自然界中習見的光譜。其成因可由下列的表演來說明：

〔表演〕 取一圓底燒瓶 F (圖 287)，其圓球的直徑約爲 1 厘米，滿盛以水，支於架上。瓶旁向太陽的一面，放一白紙屏 AB，使太陽光由屏的中央小孔 O 透入，射於瓶上。如瓶的地位配置合宜，則 O 孔的周圍可現出各色光的圓周。紅色光在最外層，紫色光在最

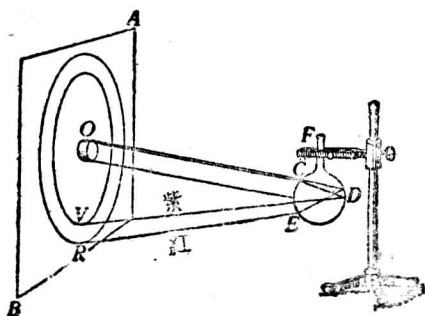


圖 287 人造虹

內層，和自然界中虹的現象一樣。

由上面的表演中，太陽光線射於玻璃球上 C 處，一部分進入瓶內的光，在水中折射而起色散，射至 D 處，恰起全反射，至 E 再折射而色散，以透入空氣中。在兩次的折射時，紫色光的偏向最大，紅色光最小，故射至紙屏上時，紫色在內而紅色在外。入射線和紫色出射線所成的角約為 40° ，其和紅色出射線所成的角約為 42° 。

天空所顯的虹(primary rainbow)就是太陽光射在浮着的水滴上，經兩次折射和一次全反射而成，和上述的表演相同。夏雨初霽時，空中浮着的水滴極多，吾人背太陽而立，如圖 288 中 E 的位置，則自雨滴出射的光線，和自人眼所取平行於太陽

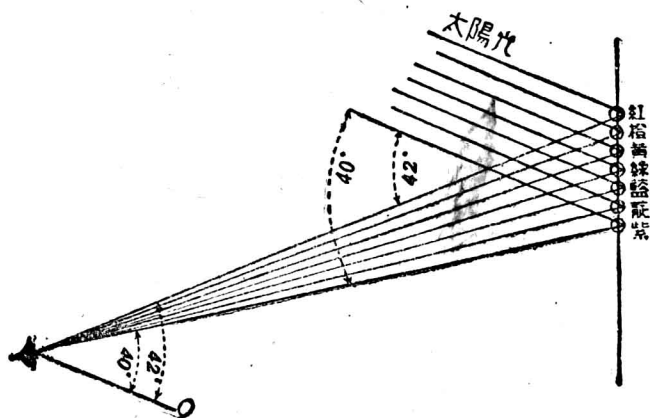


圖 288 虹

光線的方向(EO 方向)成 40° 角的,必為紫色光,若成 41° 角的,必為紅色光,所以紫色在內,紅色在外,介在這兩個方向中間的水滴,出射的光線就順次現出自然的光譜。凡以和太陽光線平行的方向,自眼起作一 EO 線,為一錐體的軸線, E 為頂點,則此錐體底面周圍的水滴中,光的出射線,對於 EO 成同一角的,都呈同樣的色光,故虹常成環狀。

太陽光線射於水滴內,若經兩次折射和兩次全反射,則水滴出射的紅光線,和入射線約成 51° ,紫光線和入射線約成 54° ;那麼人眼依和太陽光線平行的直線方向成 51° 的仰角,就看到紅光,在 54° 的仰角,就看到紫光,所以紅色在內,紫色在外,其餘的各種色光,亦介於紅紫兩色的中間,其次序恰和常見的虹相反,即稱為霓(secondary rainbow)。霓常現於虹的外方,因在水滴內所經的光程較長,光色就較虹為淡。虹霓的情形,如圖 289 所示。

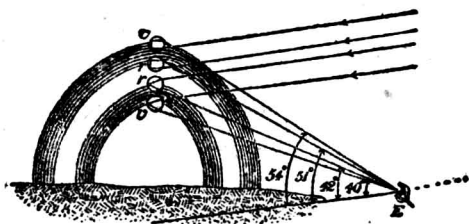


圖 289 虹霓

§ 7. 物體的顏色

白光照射於物體上，一部分散射，一部分即透入物體的內部，達少許距離，物體就吸收其一部分的光，將殘餘的部分再行反射，而成物體特有的顏色。例如紅布放在太陽光內，僅將光中的紅色光反射，而將其餘的各種光線吸收，故呈紅色。其他各色的物體，都有同樣的現象，所以可呈各種的顏色。白布能反射各種光線，故呈白色；黑布則將光線完全吸收，故無顏色。凡物體受白光的照射後，祇有一種光的反射，稱為選擇反射 (selective reflection)，故不透明體在太陽光下所呈的顏色，就是選擇反射的結果。若將紅布放於黃光下照射，則因光源中缺乏紅光，故布就成暗黑，可知物體的顏色，都由入射光反射而得，並非物質本身所有。

太陽光透過紅色玻璃片時，玻璃僅能將紅光透過，而吸收其餘的光。若用紅藍玻璃片重疊，以觀察太陽光，可使透過的光強度減小，如多置數片，可完全將光吸收，而呈暗黑。故透明體通過的色光，為選擇吸收後剩餘的結果。

§ 8. 螢光和磷光

普通物體所反射的色光，其波長均為入射波所具有的，但亦有各種物質，可將所吸收的光波，改成較長的波長而再發出的。例如將曾於硫酸金雞納 (sulphate of quinine) 溶液中浸過的一紙片，放在太陽光譜的紫外線部分內，則發生明亮的乳色藍光。這種的光，稱為螢光 (fluorescence)。檢查紫外線、陰極射線、和 X 射線時，常用能放螢光的物質，使不可見的射線，變成可見的光。其他如釷玻璃 (uranium glass) 可發黃綠色的螢光，石油、石油脂 (vaseline)，和潤滑油等，都可發生藍色的

螢光。能發螢光的物質，如將光源除去，則螢光亦即消滅。

又如鈣(calcium)、銣(strontium)、鋅(zinc)、和鋇(barium)等的硫化物，露於光中時，亦能顯示和螢光類似的光。但將外方的光源除去後，仍能延長其發光的時間。這樣的光，即稱為磷光(phosphorescence)。

§9. 色的混合

太陽光的七色合併，得成白光。如用圓板一塊，上貼光譜中各色的紙片，大小配置適當，即成牛頓色板(Newton's disk)(圖290)。使其迅速轉動，在強烈的照度下，亦可得見光的復合，而板呈白色。若再用黃紙片和藍紙片，各貼在色板的半面，則板轉動時，亦可見黃光和藍光合併，而成白光。凡兩種色光，如可併成白光，則比兩種色光，稱為互補色(complementary colors)。如將下表中各互補色混合，都可成白光。若將白光中取去一種色光，則剩



圖290 牛頓色板

表28 互補色

紅	橙	黃	綠	紫
	：	：	：	：
藍	綠	藍	紫	綠
綠	藍	紅	黃	紅

餘的即為此色光的互補色。例如注視一張紅紙以後，若

注視白紙上，則白紙反射到眼睛的白光中，紅色部分因網膜的疲勞，不能和視神經相應，故能起視神經作用的，即為藍色的互補色，白紙上即顯出藍

綠色(bluish green color)

顏料(pigment)色的混合,卻和色光的混合不同.黃藍兩色光合併,即成白光;但將黃、藍兩顏料混合,則成綠色.這是因為黃色顏料,在白光中能反射黃光和綠光,而將其餘的光吸收;藍色顏料在白光中能反射藍光和綠光,而將其餘的光吸收,故黃、藍兩顏料混合時,只有綠光可以反射,白光中其餘的色光,盡被吸收,可知顏料混合後所呈的顏色,係太陽光被顏料吸收後所反射的色光,和物體所呈顏色的原理相同,但和色光的混合,截然不同.三色板印刷(three-color printing)法,就是將紅、黃、藍三種顏料,分別塗在印板上,分三次在紙上的同地位,重疊印刷,可得各種不同的顏色.

§10. 色差

關於光在透鏡和稜鏡中通過時,前兩章中的說明,均假定為一種單色光的作用,但當白光通過一透鏡時,則因玻璃對於各色光的折射率不同,故紫色光所成的焦距最短,紅色光所成的焦距最長,而各色光所成透鏡的焦點,不能恰為一點.所成物體的像,就生顏色的模糊.這種因光的色散而呈的差異,稱為色差

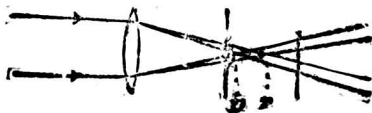


圖 201 透鏡的色差



圖 202 消色差透鏡

(chromatic aberration). 優良光學儀器中所用的透鏡, 應避免這種色差. 普通消除色差的透鏡, 常用一冕牌玻璃(crown glass)的凸透鏡, 和一火石玻璃(flint glass)的凹透鏡, 經設計使其組合而成. 如圖 292, 使前者所生的色差, 恰經後者而消除, 即稱為消色差透鏡(achromatic lens). 如用兩折射率相同的玻璃稜鏡互相倒置 (p. 75, § 1), 即成消色差稜鏡 (achromatic prism), 且無偏向的發生. 若用一冕牌玻璃的稜鏡 C , 和一火石玻璃的稜鏡 F , 如圖 393, 亦可由設計, 以製成一消色差稜鏡, 但其出射線卻生偏向.



圖 293 消色差稜鏡

習題

1. 紅光和藍光, 在物理的意義上有何不同?
2. 試用圖示, 將稜鏡所成的太陽光譜中, 表出各種色光的相對位置.
3. 藍光和紅光在玻璃中進行的速度, 孰大孰小? 何故?
4. 何謂單色光?
5. 何以確信太陽中有鈉元素存在?
6. 由月光所得的光譜, 應屬於何種?
7. 說明夫牢因和斐譜線的成因.
8. 由光譜分析, 何以可鑒別各種元素? 如和化學分析相比較, 則其優點安在?
9. 試舉例以說明各種可見光譜,

10. 早晨所現的虹，應在天空的何方？
11. 虹和霓有何區別？
12. 不透明體和透明體在太陽光中所呈的顏色，如何決定？
13. 何謂白和黑？煤何以爲黑的物質？
14. 冰呈透明，而雪則爲白色不透明體。試說明其理由。
15. 隔綠色玻璃看黃色和紅色的物體，當各呈何色？
16. 白紙和黃紙在帶有黃色的光源下，可否鑒別？何故？
17. 如用眼直接觀察太陽的偏蝕時，則因光度太強，頗不便利。問有何簡單方法，可以避免光的刺激？
18. 色光的混合，和顏料的混合，所得的結果，有何不同？
19. 各種顏料混合時，何以可變成暗黑？
20. 黑紙上用紅墨水寫字，不易顯出，但用朱砂，則可以顯出。何故？

第六章 干涉和繞射

§ 1. 光的干涉

〔表演〕 將寬約 1.5 厘米，長約 10 厘米，極平的兩玻璃片相重疊，再用薄紙隔其下端，而將其上端夾緊，使片間生劈狀的空氣層，如圖 294，然後在玻璃片前放一鈉燄，觀察玻璃片面上的反射光，可見有交互駢列的黃帶和暗帶，發生在面上。

由上列的表演，可知兩列光波亦可互相消滅，而成暗帶，即爲光的干

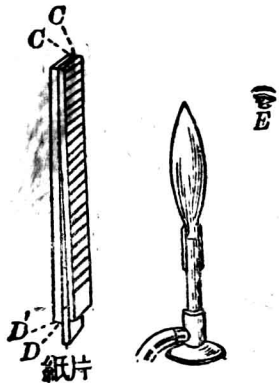


圖 294 光的干涉

涉 (interference of light), 得用圖 295 來說明。設 AB 和 AC 為弓狀空氣層和玻璃片接觸的兩面, 鈉燄所發的黃光, 在此兩面上即發生反射。如用實曲線 ab , 表示 AC 面上 a 點處發生的反射波, 虛曲線 $a'b$ 表示 AB 面上 a' 點處發生的反射波。又如 aa' 的距離, 恰使此兩反射波的位置, 能相差黃光的半波長的距離, 則兩光波即互相消滅, 而成干涉, 和聲波的干涉相同, 故由片上望去, 就見一暗帶。因空氣層的距離, 向下漸次增加, 故

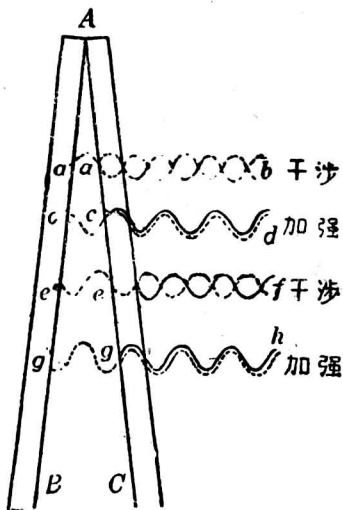


圖 295 光波干涉的說明

必能得一 cc' 的距離, 恰使 c 點和 c' 點所發生的兩反射波, 互相重合, 相差一波長的位置, 光即加強, 而成黃帶, 依此類推, 可知空氣層的距離如達 ee' 時, 必可使 e 點和 e' 點所發生的兩反射波, 恰能消滅而起干涉; 再達 gg' 的距離時, 又可使 g 點和 g' 點所發生的兩反射波加強, 故片上就起交互相間的暗帶和黃帶。凡兩光波相合時, 所起交互排列的明帶和暗帶, 稱為干涉條紋 (interference fringes)。

§ 2. 夫累涅爾的實驗

關於光的干涉，實驗時所遇的困難，約有兩點：一為光波的波長很短，欲使兩光波恰能相差半波長的位置，則相隔的距離亦必很短。故調準兩光波的位置，得見干涉條紋，實驗時應耐心配置，方可成功；一為兩光源的頻率決難一致，故兩光源所發光波的干涉幾不可能，不似兩音叉所發音波之易干涉，即可得兩光源所發光波的干涉，夫累涅爾於公元 1816 年和 1825 年，曾設計兩個實驗，能將上列的困難解除，而得顯明的干涉條紋。這等實驗，為近代高級光學實驗中量度光波的波長時，所採用的一種方法，茲介紹其構成干涉的原理如下：

(1) 雙鏡的實驗 如圖 296, M_1 和 M_2 為幾成 180° ，而稍傾斜的兩平面鏡

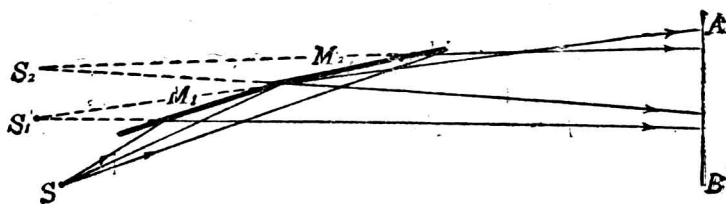


圖 296 雙鏡的實驗

的水平截面，即稱為夫累涅爾雙鏡(Fresnel bimirror)。S 為狹小的單色光源，發出的光，一部分由 M_1 反射，所得的反射光，即宛似由像 S_1 發出；一部分由 M_2 反射，反射後的光，即宛似由像 S_2 發出。若將此兩柱光，於 AB 處重疊，經精密的調準，配置兩鏡的傾角，即可用目鏡，在 AB 處窺見其干涉條紋。

(2) 雙稜鏡的實驗 一扁長方形的玻璃塊，一面為平面，一面成稜鏡形，而幾成一平面的，稱為夫累涅爾雙稜鏡(Fresnel biprism)。如圖 297，由光源 S 所發的光，一半經稜鏡的折射，偏向於一方，而另一半經稜鏡而偏向於他方，故兩柱光宛似各由 S_1 和 S_2 發出，即可使其重疊而得干涉。

由夫累涅爾實驗，可知欲得光的干涉現象，須將一光源所發的光，設法分成兩柱光，然後使其重疊，則因兩光為同一光源所發出，頻率可絕對一致，故再加以調

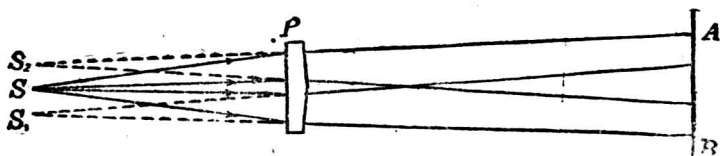


圖 297 雙稜鏡的實驗

準，即可使兩光波的光程(optical path)，恰能相差半波長的位置，以得干涉。

§ 3. 薄膜的顏色

肥皂泡的薄膜，水面上的油層，螺鈿的表面等，如放在太陽光下，常顯示美麗的顏色。這種薄膜所呈的顏色，實為光的干涉所生的現象。當太陽光照射於薄膜上，一部分為上層的表面反射，一部分透入膜中，由下層的表面反射，如薄膜的厚度恰使兩反射波的紅色光波起干涉，則紅光消滅，其互補色為藍綠色光，即發現於該部分。若其厚度恰使藍綠色光波起干涉，則其互補色即紅色光，必發現於這部分。若膜為等厚，觀察者對膜的視角不變，則其所呈的顏色必均勻，若視角稍變，則對反射光線因通過膜的厚度不等，故所見的顏色亦就不同。

§ 4. 光的繞射

任何波動如遇障礙的物體，就沿着物體的邊角彎曲，以改變波的進行方向。這種現象，稱為波的繞射(diffraction of wave)。聲波、水波等的繞射，很為顯著。但光波的繞射(diffraction of light waves)，當波動說提出後，歷很久的時間未能發見其現象，這是當時學者不能信仰光是波動的一種所持的最大理由。但後世由波動的精密考察，知波長愈長的波，遇障礙的物體，其繞射的程度，比波長較短的為大，故聲波和水波的繞射，極易覺察。而

光波的繞射，非作精密的考察，就不易見到。

凡波動遇障礙物體後，繞射的程度，亦依波長和障礙物體相比的大小而定。若障礙物比波長甚大時，繞射程度不顯，則成影的現象，如其比波長為小，則波動繞射現象甚顯。而達幾何的影內。聲波的波長比普通的障礙物為大，故聲波極易繞射，若聲波遇極大的障礙物，亦能生影的現象。光波的波長很短，普通的障礙物比較為大，故繞射極難察見。設光波通過甚小的小孔窄縫，如下節所述的，則光亦可轉彎，而達幾何的影內，以成光的繞射。

§ 5. 光經單縫的繞射

光經單縫 (single slit) 的繞射，為夫累涅爾根據惠更斯和楊氏等光的研究，所得的最簡單的基本例證。

〔表演〕 取露過光的照相乾片，或不透明的紙片，在其面上，用刀留意畫成寬約 $1/20$ 至 $1/10$ 毫米的狹縫一條，持片放近眼前，以窺察發光電燈中的一長燈絲，使縫和燈絲互相平行，即可見到繞射條紋 (diffraction fringes)。如圖 298 所示，除中央較寬的一條白光外，兩旁即顯交互排列着的暗條和明條，明條顯有色彩，紅色在外，紫色在內。若使光先經過一紅玻璃片而通入狹縫，則得交互排列的紅條和暗條。如用兩手指夾成一縫，以代替上述的乾片或紙片上的縫，亦可窺見同樣的現象。若將兩指壓緊，使縫更狹，則條紋變寬，如縫漸寬，則條紋漸近

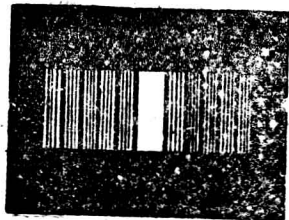


圖 298 繞射條紋

中央明條，即不易察見。

由單縫所得的繞射條紋，夫累泊爾的說明，頗為巧妙。如圖 299，設 AB 為一鉛直單縫的水平截面， W 表示平行波前進的波

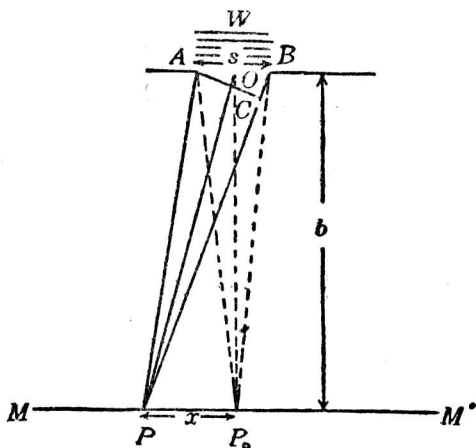


圖 299 繞射的說明

前， MM' 為光透過單縫後所達到的屏。又設 s 為縫的寬度，屏和縫的距離為 b ，屏上的 P_0 點，和縫的距離為最短。如縫的寬度和距離 b 相比為甚小時，則由波前 AB 上各光點發至 P_0 的光，並無光程差 (path difference)，故 P_0 常為較寬明條的位置。

設 x 為 P_0 旁的一點 P 和 P_0 相隔的距離， AC 為由 A 至 BP 之垂直線，則光程 AP 和 BP 的相差，即為 BC 。 $\angle BAC$ 即稱為繞射角 (angle of diffraction)。如光程差 BC 恰為一波長

的長度 λ 時，夫累涅爾即設想由 AB 波前的中點 O 起，和 P 間作一 OP 線，使 AB 分爲 AO 和 BO 的兩區域，而稱爲夫累涅爾帶 (Fresnel zone)，則光程 $OP - AP = \frac{1}{2}\lambda$ ，故 AO 和 BO 兩帶中各相當點的光，即恰相干涉，使 P 處成第一暗條。

又設將 P 點和 P_0 的距離 x 增長，至屏上的一相當位置，使光程差 BC 恰爲 $3\lambda/2$ ，則波前 AB 可認爲分成 3 帶，則其中左方的兩帶，光程差恰爲 $\frac{1}{2}\lambda$ ，故此相鄰兩帶的光，即互相消滅，此處的 P 點，僅受到右方第三帶所發來的光，故所成的第一明條，即較中央明條爲狹，而亮度亦減小。

如再向左方取一 P 點，使 BC 恰爲 $4\lambda/2$ ，則將 AB 分成 4 帶，其鄰近兩帶的光，各相干涉，就在第一明條旁，現出第二暗條。依此類推，即可逐次說明交互排列的暗條明條發生的理由。

又因 $\triangle ABC$ 和 $\triangle OPP_0$ 爲相似三角形，故得

$$\frac{x}{b} = \frac{BC}{AC} = \frac{BC}{s}.$$

設用 n 表示一整數，或即爲帶的數目，則

$$BC = n \frac{\lambda}{2},$$

故

$$x = \frac{bn}{s} \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

由上式可得光的繞射的具體概念如下：

(1) n 為偶數時，則離中央明條 x 距離處（即由中央明條的中點和其他條紋的中點間的距離），即發生暗條； n 如為奇數，則發生明條。但因一部分的光消滅，故離中央明線愈遠，條紋的亮度愈減小。

(2) 式中 x 和 s 成反比，故縫的寬度如愈小，則各條紋和中央相隔的距離愈增，光的繞射很易見到。若 s 漸大，則 x 漸小，光的繞射即很難見到。故光在普通的縫內透過時，即可簡略而稱為直線傳播。

(3) 由式中將 x , s 和 b 等量度後，即可推出光波的波長。

(4) 又因 x 和 λ 成正比，故波長愈長的波，即易見波的繞射，且可知光波的繞射程度，以紅色為最大，而紫色為最小。

§ 6. 繞射光柵

如將無數細線互相平行，以等距離排成一列，則得許多平行狹縫，稱為繞射光柵 (diffraction grating)。精密的繞射光柵，係在玻璃片上，用金剛石畫成許多等距離，而不透明的直痕所成。其鄰近的每兩痕間，即成一透明的縫。在 1 吋的寬度中，所畫的直痕數，常自 10,000 至 20,000 條，故製造時頗為困難。通常所用的透射光柵 (transmission grating)，即用熔膠 (melted gelatin) 等物質，放在優良的一光柵上，凝結製成，貼於玻璃片上，亦呈同樣的功用，即為一重摹光柵 (replica of grating)。

如圖 300，若白光由縫 S 通入，經透鏡 L_1 變成平行光線，射

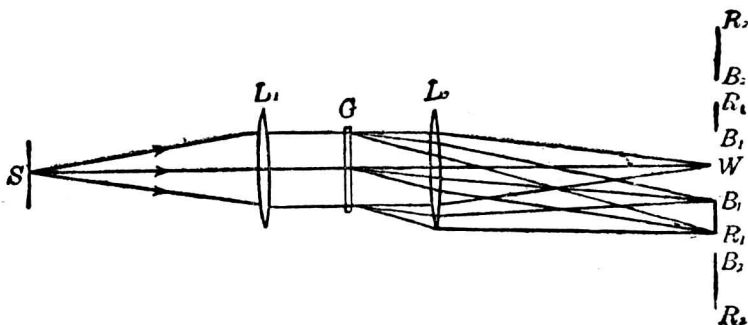


圖 300 繞射光譜

至透射光柵 G 上，由透鏡 L_2 的會聚，則在屏上得一中央明條 W 外，且因色光的繞射，即在 W 的兩方，各成一組光譜 B_1R_1 ，稱為**第一級光譜**(first-order spectrum)；在 B_1R_1 外，又有第二組光譜 B_2R_2 ，稱為**第二級光譜**(second-order spectrum)。第二級光譜外，亦可有第三級等光譜，惟亮度漸減。這種光譜，稱為**光柵光譜**(grating spectrum)，或稱**繞射光譜**(diffraction spectrum)。其長度較稜鏡光譜(prismatic spectrum)為長，檢視光譜的各部分，較為便利，故光譜分析上，常用光柵以代替稜鏡的部分。

又設如圖 301， MN 的斷續線表示一光柵的放大部分。當平行光線射入時。因在各縫中透過的光，除可由透鏡會聚成一中央白像外，其依 AS 方向繞射的一種色光，如光程差 AB 等於波長 λ 的 n 倍，則鄰近兩縫間透過的光，依此方向可以加強，故用透鏡會聚，即成一光譜中一種色光。

因

$$AB = n\lambda,$$

n 如爲 1 時，即得第一級光譜中的色光， n 如爲 2 時，即得第二級光譜中的色光，依此可類推。又設 d 爲兩縫中點間的距離，命 θ 表示 $\angle ACB$ ，即爲繞射角，則得

$$\sin \theta = \frac{AB}{AC} = \frac{AB}{d},$$

故 $AB = d \sin \theta$ 。

或 $n\lambda = d \sin \theta$ 。

此式爲光柵的普通公式。如

第一級光譜中的一色光，則得 $\lambda = d \sin \theta_1$ ，第二級時爲 $2\lambda = d \sin \theta_2$ ，第三級時爲 $3\lambda =$

$d \sin \theta$ ，而 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 即爲一色光對於各光譜級所成的相當繞射角。若 n 已知， d 和 θ 亦已測定，則用光柵，即可量度任何單色光的波長。

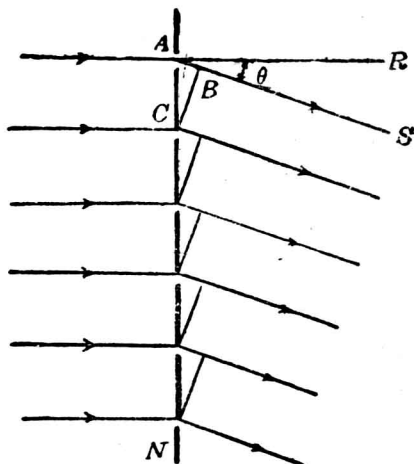


圖 301 光柵的原理

§ 7. 光的偏極化

使一繩上所發生的橫波由 P 和 Q 兩柵中通過。若兩柵面的柵條恰和這橫波振動的平面平行，則繩上的橫波可在柵中前進無阻，如圖 302(1)。設 P 柵的柵條和波的振動平面仍平行，而將 Q 柵旋轉 90° 的位置，則波雖可通過 P 柵，但達 Q 柵後，就不能通過，如圖 302(2)。如將細彈簧圈發生縱波，以通過兩柵，則不論柵的位置如何，波動都可在柵條中進行。可見由柵條的方向，就可辨別橫波和縱波。凡波的振動均在某同一方向上，和

其前進的方向相垂直的現象，稱為波動的偏極化(polarization)。

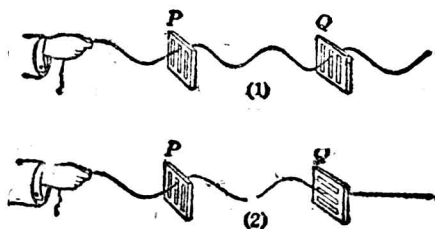


圖 302 橫波的偏極化



圖 303 熱電石鈹

[表演] 取熱電石(tourmaline)晶片一塊(圖 303 a), 放在光源和眼的中間, 可見有光, 惟強度稍弱, 再取第二晶片 b 放於第一晶片的同直線上, 若兩晶片的晶體光軸彼此平行, 光仍可通過(圖 304), 若將其中的一晶片在鏡內轉動 90° 的位置, 光就被隔斷(圖 305)。

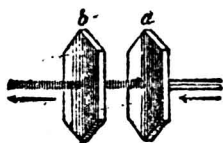


圖 304 光波經過熱電石晶體

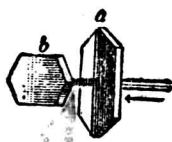


圖 305 光波為橫交熱電石晶體所遮斷

由上面的實驗, 可知熱電石晶體的光軸和柵面的柵條一樣, 即可使光波限定和軸平行的方向通過, 而不能通過和軸垂直的方向。這種現象稱為光的偏極化 (polarization of light), 凡由光波透過一品體後, 其振動方向僅限於一定平面內, 則透過的光波, 稱為平面偏極光(plane polarized light)。由光波的

偏極化, 可知光波為橫波, 而非縱波。

§ 8. 雙折射

以前討論光線自空中射入另一介質中時, 係假定介質為各向同性(isotropic)的透光體, 而折射光線係依定律在介質中作單方向的進行。若所用介質, 如方解石(calcite)等, 之為各向異性(anisotropic)的, 則折射光線常分為兩道, 分別向兩個不同的方向進行。在這兩道折射光線中, 一道係遵循尋常的折射定律, 叫做尋常光線(ordinary ray), 另一道所遵循的折射定律, 和尋常光線不同, 故叫做非常光線(extraordinary ray)。設當入射角為零時, 尋常光線的折射角雖等於零, 而非常光線的折射角則不等於零, 故隔方解石以窺察文字或圖畫等時, 因尋常光線和非常光線可以分別成像, 故常可看出有像二重, 如圖 306 所示。

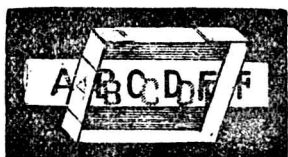


圖 306 通過方解石的雙折射現象

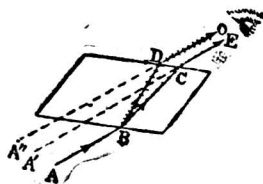


圖 307 雙折射和偏極化

這種現象, 就叫做雙折射(double refraction)。如用熱電石晶片以檢驗由方解石所生的兩種折射光線時, 並可發現這兩種偏極化光線的振動方向, 係相垂直的, 如圖 307 所示。

習 題

1. 光的干涉條件如何?
2. 何以不能用兩個光源所發的光,以得光的干涉現象?
3. 如何可以利用一個光源所發的光以得光的干涉現象?
4. 試述薄膜所呈顏色的理由。
5. 光的繞射何以不易發見?
6. 光波既有繞射現象,何以通常可將光為直線傳播?
7. 繞射光譜比稜鏡光譜,有何優點?
8. 光的干涉和繞射所生的現象,有何區別?

第六編

磁學

§ 1. 磁鐵和磁極

凡能吸引鐵屑的物體，稱為磁鐵(magnet)。其在自然界中發見的一種黑色礦石，稱為磁鐵礦(magnetite, Fe_3O_4)的，即富有吸引鐵屑的特性，故稱為天然磁鐵(natural magnet)。若用磁鐵的一端，在一鋼條上，沿同一方向摩擦數次，或依其他的人工方法(p. 209, § 5)，用鋼條製成的磁鐵，則稱為人造磁鐵(artificial magnet)。人造磁鐵中，因其形狀的不同，而有磁針(magnetic needle)、條形磁鐵(bar magnet)、和蹄形磁鐵(horseshoe magnet)等名稱(圖 303)。

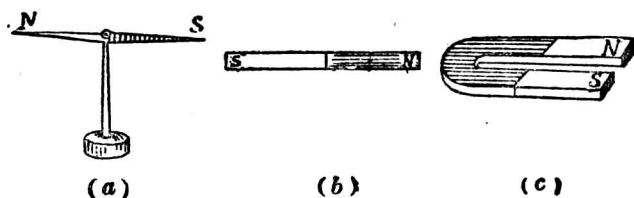


圖 303 (a) 磁針 (b) 條形磁鐵 (c) 蹄形磁鐵

如將磁鐵放在鐵屑中，則鐵屑能被磁鐵的兩端所吸引，如圖 309 所示的情形。凡一磁鐵的兩端，能吸引鐵屑最多的部分，稱為磁極

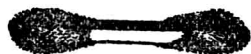


圖 309 磁極

(magnetic pole)。由實驗知每一磁鐵至少有兩個磁極，而不能單有一孤立的磁極，如就一條形磁鐵或一磁針的兩極間，連接一直線，則此直線稱為磁軸線 (magnetic axis)。

若更將一磁針或一條形磁鐵懸着，或支持在一尖針上，使其在水平面內能自由轉動，則磁鐵於靜止時，其每一磁極，必各指一定的方向。此方向在地球上各處所指的雖稍有差別，但大致為南北。其向北的一極，稱為指北極 (north seeking pole)，簡稱北極 (north pole)，在磁鐵上常用 N 表示，故亦可稱為 N 極；其向南的一極，稱為指南極 (south seeking pole)，簡稱南極 (south pole)，在磁鐵上常用 S 表示，故亦可稱為 S 極。我國最早發明的指南針，即利用磁極能指方向的性質。

§ 2. 磁力和極強

將一磁鐵的一磁極，放至能自由轉動的磁鐵的附近時(圖 310)，如兩 N 極或兩 S 極接近，則必互相推斥， N 極和 S 極相近，必互相吸引。可知同名的兩磁極，彼此相推；異名的兩磁極，彼此相引。這種兩極間的相推或相

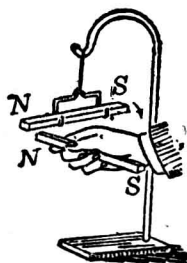


圖 310 磁力

引的力，稱爲磁力(magnetic force)

磁極強度(pole strength)，簡稱極強，爲一磁極所含有的磁量(quantity of magnetism)。兩磁極的極強，可由磁力以比較其多寡。凡在同一磁鐵上的 N 極和 S 極，如各和一定的一磁極作用時，其相推和相引的兩力均相等，故兩極的極強常相等。但因各極作用力的性質不同，故通常可命磁鐵上的 N 極爲正極(positive pole)，其極強爲正量，而 S 極即稱爲負極(negative pole)，其極強爲負量。

§ 3. 庫倫的磁力定律

法國物理學家庫倫(Coulomb)於公元 1800 年，首先由實驗推得：兩極間互相作用的磁力，和兩極強的乘積成正比，而和兩極間距離的平方成反比。這個關係，稱爲庫倫的磁力定律(Coulomb's law of magnetic force)。

更由實驗，知兩極間作用的磁力，對於介質的性質亦有關係。設兩極強各爲 m 和 m' 單位，兩極的距離爲 r ，磁力爲 F ，介質的導磁係數(p. 533, § 3)爲 μ ，則由庫倫定律和介質的性質，可列一總式爲：

$$F = \pm K \frac{mm'}{\mu r^2}$$

式中 K 爲一常數， F 的數值如用 '+' 號時，即表示同名兩極間相推的磁力，如爲 '-' 號時，即表示異名兩極間相引的磁力。

依下節單位極的定義，每一磁極可認為許多單位極組合而成。但因磁鐵上的磁極並非集於一點，而在細小的磁針上，磁極的地位約在針端的一點，故由實驗以證明庫侖定律時，應用細長的磁針，以便易於確定兩極間的距離，且可免去遠端一磁極的影響。可知庫侖定律中的磁力，係指兩點極(point pole)間的作用，由實驗的證明，頗為困難。但因實際應用時，差誤甚小，故可認為一普遍的定律。

§ 4. 單位磁極

如用極強相同的兩個磁極，在真空中相隔 1 厘米的距離，互相作用的推力恰為 1 達因時，則每一磁極，稱為單位磁極(unit magnetic pole)，即為極強的 C. G. S. 單位。通常對於單位 N 極，稱為單位正極(unit positive pole)。

如於庫侖定律的公式中，依這種單位表示，則因 $m = m' = 1$ C. G. S. 單位， $r = 1$ 厘米， $F = 1$ 達因，真空中 $\mu = 1$ ，可知式中 $K = 1$ 。故兩磁極在真空中作用的磁力，可列成下式：

$$F = \pm \frac{mm'}{r^2}.$$

又因空氣的導磁係數為 1.0000004，和 1 相近，故上式亦可表示兩磁極在空氣中作用的磁力。

§ 5. 磁感應

[表演] 用條形磁鐵的一端吸一小鐵釘，則此鐵釘可吸第二釘，以至第三，第

四釘等，連續吸引(圖 11)，若將磁鐵離開第一小釘，則各小釘立即脫落。又設將一小釘放在磁極的附近，則小釘雖未和磁極接觸，但其他端亦能吸引鐵屑(圖 312)。如用玻璃片銅片等物質，放在磁極和小釘的中間，則小釘仍吸引鐵屑，若將磁鐵移去，則鐵屑亦由小釘落下。

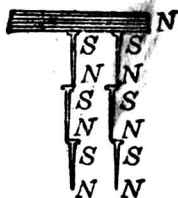


圖 11 磁感應(1)

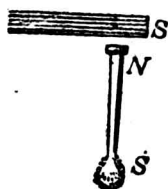


圖 312 磁感應(2)

凡軟鐵棒鄰近有磁鐵存在，不論棒和磁極是否接觸，都可暫時成爲磁鐵。這種現象，稱爲磁感應 (magnetic induction)。如用磁針的已知磁極，放於軟鐵棒每端的附近，可知棒和磁極 N 相近的一端，因感應而成異名的 S 極，和磁極 N 較遠的一端，則成同名的 N 極。這是磁感應普通的現象，磁極和鐵棒的中間有非磁性物質存在時，仍可發生磁感應。

軟鐵受磁感應的作用，可立即成爲磁鐵，但將外方的磁鐵移去，則軟鐵的磁性即消失，故在鄰近磁極附近的軟鐵，所成的磁鐵，稱爲暫時磁鐵 (temporary magnet)。鋼比軟鐵的感應爲難，但受感應以後，雖取去磁鐵，仍能保持磁性的大部分，所成的磁鐵，稱爲永久磁鐵 (permanent magnet)。這種保持磁性的性質，

稱為頑磁性(retentivity)。

§ 6. 磁場*

一磁鐵的周圍，凡受磁力作用的空間，稱為磁場 (magnetic field)。如假定有一單位正極存在於磁場內的一點，則其所受磁力的大小，即稱為這點的磁場強度 (magnetic field intensity)，而力的作用方向，即表示此點的磁場強度的方向。凡一單位正極在磁場內的某點，如恰受 1 達因的磁力，則這點的磁場強度，即為 1 C. G. S. 單位，亦稱為 1 高斯 (gauss)。故若某點的磁場強度為 H 單位，則一為 m C. G. S. 單位極強的磁極放於該點時，所受的磁力為 F 達因，可用式表示其關係如下：

$$F = mH.$$

$$[\text{磁力}] = [\text{極強}] \times [\text{磁場強度}].$$

上式中 H 為一向量，故在磁場內兩點的強度如相等時，則不但其數值相等，且其方向亦須相同。凡磁場的某部分各點的強度，數值相等，而方向均互相平行的，稱為均強磁場 (uniform magnetic field)。

[例題] 一磁鐵的長度為 10 厘米，其極強為 450 單位。設有一點，和磁鐵的 N 極相距 20 厘米，和 S 極相距 15 厘米。(1) 求該點的磁場強度。(2) 若在該點上放一極強為 100 單位的磁極，則所受的力為若干？

*實驗 27, 實驗 28.

【解法】(1)如圖 313, 先求 P 點上放一單位正極時, 對於磁鐵的 N 極和 S 極, 各受的作用力為 H_1 和 H_2 。然後由力的合成, 求得其合力 H , 即為 P 點的磁場強度。

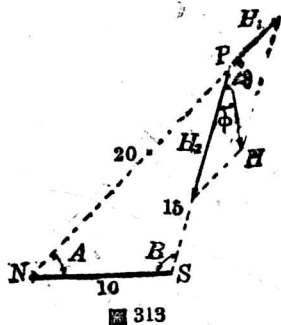
由庫侖定律, 得

$$H_1 = \frac{450 \times 1}{20^2} = 1.125,$$

$$H_2 = -\frac{450 \times 1}{15^2} = -2.$$

設 θ 為 H_1 和 H_2 間的夾角, 則因

$$\theta = A + B,$$



故由餘弦定律, 得

$$15^2 = 20^2 + 10^2 - 2 \times 20 \times 10 \cos A,$$

$$\therefore A = 46^\circ 34'.$$

又

$$20^2 = 15^2 + 10^2 - 2 \times 15 \times 10 \cos B.$$

$$\therefore B = 104^\circ 29'.$$

$$\therefore \theta = 151^\circ 3'.$$

故由

$$H^2 = H_1^2 + H_2^2 + 2H_1H_2 \cos \theta,$$

即可求得

$$H = 1.15 \text{ 達因/單位極}.$$

設 ϕ 為 H 和 H_2 所成的角, 則得

$$\tan \phi = \frac{H_1 \sin \theta}{H_2 + H_1 \cos \theta},$$

$$\therefore \phi = 28^\circ 11'.$$

故 H 的方向和 H_2 成 $28^\circ 11'$ 的角。

(2)因

$$F = mH.$$

故

$$F = 100 \times 1.15 = 115 \text{ 達因.}$$

§ 7. 磁力線

〔表演〕用玻璃板一塊，放於一條形磁鐵上，板上如撒以鐵屑，而輕擊板面，使鐵屑可以自由移動，則鐵屑的排列，如圖 314 所示。又若將兩同名的磁極，或兩異名的磁極作同樣的實驗時，即得圖 315 和 316 的情形。注意異名兩極間的鐵屑，互相銜接，但同名兩極間的鐵屑，卻在極間的中部互相分離。

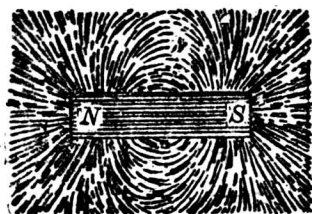


圖 314 磁場的表示

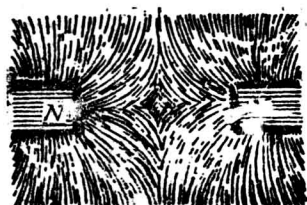


圖 315 同極間的磁場

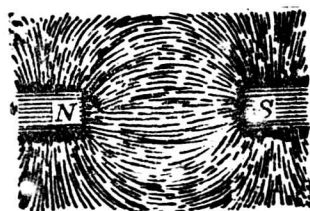


圖 316 異極間的磁場

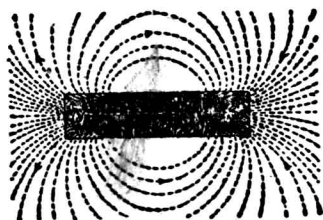


圖 317 磁力線

由實驗知鐵屑撒布於磁極的附近時，因受磁感應，變成許多暫時磁鐵，並受磁力的作用，排成許多曲線。若再用一小羅盤針 (compass needle)，在磁場內由 N 極移至 S 極，則針所指的

方向，常沿這種曲線的正切方向。凡一單位正極，如放在磁場內，則可推想此正極必由 N 極移至 S 極，其所經的曲線路程，稱為磁力線 (magnetic lines of force)。如圖 317，即為一條形磁鐵附近磁場內磁力線分布的理想圖。

法拉第 (Faraday) 首創磁力線的概念，以解釋磁的作用，實用方面，頗為便利。關於磁力線的特性，可分述如下：

(1) 每一磁力線，由磁鐵的 N 極發出，經空間至 S 極，再從 S 極，經磁鐵的內部，回至 N 極，而成一閉曲線 (closed curve)。

(2) 凡磁力線所遇的磁鐵或軟鐵，即成磁極。

(3) 各磁力線永不相交，故一點的磁場強度，僅取一曲線的正切方向，而小磁針放在該點時，不能取兩個方向。

(4) 磁力線和橡皮線的性質相似，在兩極間緊張着，有縮短其長度的趨勢，故兩異名磁極即發生互相吸引的作用。

(5) 各磁力線有向旁邊推壓其他磁力線的性質，故常成曲線，而兩同名磁極間，則發生互相推斥的作用。

(6) 磁力線在軟鐵間易於導過，故在磁場中如放一塊軟鐵，則附近的磁力線，即由空氣中的原路程，取道軟鐵而生偏向。

§ 8. 磁力線和磁場

由磁力線的概念，可知凡有磁力線的空間，即為磁場。凡和磁力線垂直的一平面上，每單位面積內通過磁力線的數目，即為磁場強度。通常對於一單位正極受 1 達因磁力處的磁場，或

1 C. G. S. 單位磁場強度，即用每平方厘米通過一條磁力線，以表示其強度，例如圖 318 中 $ABCD$ 面所通過的磁力線，若一單位正極在磁場中受 1000 達因之力時，則每平方厘米中，即通過 1000 條磁力線。故磁力線愈密，即為磁場強度愈大的區域。若各磁力線互相平行，密度均勻，即成均強磁場。設 H 表示均強磁場的強度， A 為總面積， Φ 為 A 面積內所含磁力線的總數，則得

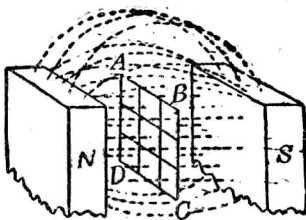


圖 318 磁場強度的表示

$$\Phi = HA,$$

對於一極強為 m 單位的磁極，欲求其所生磁力線的總數，可在此磁極的周圍，作一半徑為 r 的球面，則因每單位面積上通過的磁力線 $H = \frac{m \times 1}{r^2}$ ，又因球面積 $A = 4\pi r^2$ ，故由 m 單位的磁極，散布於全球面上磁力線的總數，即為 $4\pi m$ 。

§ 9. 介遞作用

庫倫定律和萬有引力的作用頗相似，故當時學者以為磁是一種很輕的物質，兩磁量在介質中相隔時，即有天然的相推或相引的磁力。這種解釋，稱為超距作用 (action at a distance)。法拉第卻認為磁的作用，應着重於介質方面，而不必注意於相關的磁極，故即假定空間約以太，在兩極間發生應變，以傳遞其作用，即稱為介遞作用 (action through the medium)。由介質中應變的大小和方向，用磁力線來表示，即可說明兩極間磁力的作用；且對於電磁的現象和應用方面，頗為重要。其後馬克士威確定電、磁、光等均為同一起源，即根據法拉第的介遞作用，而得進一步的研究，故討論電磁問題，除應用庫倫定律外，對磁力線概念，應先求明瞭。

§10. 磁的分子說

〔表演 1〕 用一試管，內充鐵屑，更用磁鐵的一極，自管的一端沿同一方向摩擦若干次，如將管端移近一磁針，則知管中鐵屑的兩端，即各顯 N 極和 S 極，而成一磁鐵。若將管中的鐵屑振動後，再用磁針試其兩端，可知磁性已消失。

〔表演 2〕 將縫針一根，用磁鐵摩擦，即成磁鐵。如將此針放入火中燒熱，或將針置東西之方向用錘衝擊，則針能吸引鐵屑的強度就減小。

〔表演 3〕 將已成磁鐵的縫針，如在其中間折斷，則各段都成爲一磁鐵，斷處呈現兩新極（圖 319）。如繼續將每段分割，其結果仍相同。

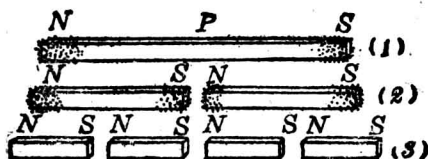


圖 319 磁鐵折斷後的情形

由實驗可知物質所現的磁性，和其分子的排列有關係，如受激烈的振動，則分子排列成錯亂的狀態，而磁性即消失。更由磁鐵分割時，能成若干段的磁鐵，可知磁鐵中的分子，必本爲一小磁鐵，由其排列的狀態不同，即顯示是否有磁性。這個磁的理論，係韋伯(Weber)於公元 1852 年所首創，而經攸英(Ewing)的擴充，稱爲磁的分子說((molecular theory of magnetism)。

鋼條由磁鐵的摩擦 或由磁感應變成磁鐵的方法，稱爲磁化(magnetization)。磁鐵受振動而發生磁性消失的現象，稱爲去磁(demagnetization)。依磁的分子說，在磁化前的鋼條，其內部各分子雖各爲一小磁鐵，但因排列錯亂，如圖 320，故其異名的極，作用恰相抵消，而兩端就不能顯示磁性。若移近磁鐵，則

其分子受磁力的作用，旋轉其排列狀態，如圖 321，中央部分異名的極，雖仍互相抵消其作用，但兩端就排列整齊，顯示磁極。若去磁時，則因分子受振動，回復其錯亂排列的狀態，故磁性即消失。鋼的分



圖 320 磁化前分子排列的狀態

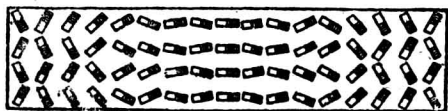


圖 321 磁化後分子排列的狀態

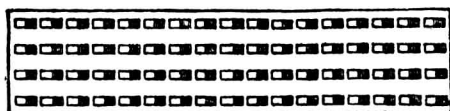


圖 322 飽和磁鐵分子排列的狀態

子受磁化後，其排列不易錯亂，故其保留磁性的性質，較鐵為強。又鋼條受磁化時，極強漸漸增加，但到一定的磁化程度後，雖用強大的磁化力(p. 207, § 3)，極強亦不能再增加。凡物質磁化後至極強最大時的磁鐵，稱為飽和磁鐵(saturated magnet)。由分子說，因分子排列可漸達整列的限度，使各分子磁鐵的磁軸線，變成平行，如圖 322，故飽和磁鐵雖再受強大的磁化力，但因磁化的限度已達，不能再增加其極強。

§ 11. 地磁要項*

英人吉柏(Gilbert)由磁針常指南北的事實，推知地球亦為一大磁鐵。其 S 極在地理的北極附近，其 N 極在地理的南極附

*實驗 34, III

近(圖 323), 由實測的結果, 知地球的兩極和其磁極, 確非在同一的位置, 故地磁赤道 (magnetic equator) 和地理的赤道並不一致。當哥倫布 (Columbus) 首次航行往美洲時, 即發見磁針所指的方向, 因地而異。凡磁針在水平面內所指的方向, 即為磁子午線方向, 其和地理的子午向所成的偏差角, 稱為磁偏角 (magnetic declination)。若將磁針的重心懸持或支持, 使針

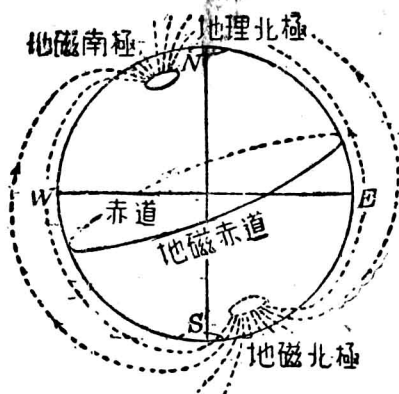


圖 323 地球的磁極

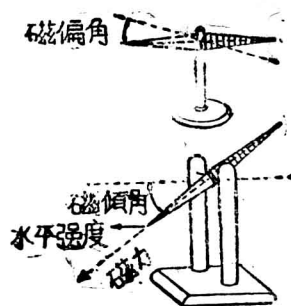


圖 324 磁偏角和磁傾角

在鉛直面內可以轉動, 則在地磁赤道上 針必成水平, 但將磁針移至北半球或南半球, 則磁針就向地面傾斜。凡磁針在磁子午線方向的鉛直面內所指的方向, 和水平面所成的角, 稱為磁傾角 (magnetic inclination or dip)。磁針所指的方向, 係指示地磁場內磁力的方向。凡地磁場內每一點磁場強度的水平分力, 稱為水平強度 (horizontal intensity)。磁偏角、磁傾角、和水

平強度，爲表示地磁場某處的狀況，稱爲地磁的三要項 (three elements of terrestrial magnetism)。我國幾個大城市的地磁狀況，如下表所示：

表 29 我國重要城市地磁要項

地名	磁偏角 (偏西)	磁傾角	水平強度
瀋陽	6° 04'	58° 39'	0.278
北平	4° 53'	57° 18'	0.288
太原	3° 18'	55° 11'	0.301
蘭州	0° 18'	53° 05'	0.312
西安	1° 42'	50° 29'	0.323
南京	2° 26'	46° 43'	0.331
上海	2° 37'	45° 38'	0.331
成都	0° 08'	45° 16'	0.344
昆明	0° 04'	35° 19'	0.372
廣州	0° 29'	32° 01'	0.372

如圖 325，設地磁場內某點的總強度 (total intensity) 爲 T ，其和水平面所成的磁傾角爲 θ 。又命 H 爲地磁的水平強度， V 爲其鉛直強度 (vertical intensity)，則得下列各式：

$$T = \sqrt{H^2 + V^2},$$

$$T = \frac{H}{\cos \theta},$$

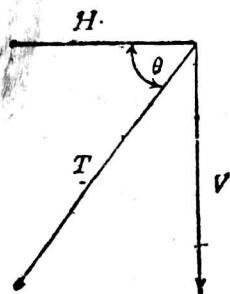


圖 325 地磁強度

$$\tan \theta = \frac{V}{H}.$$

§ 12. 羅盤

通常所用羅盤(compass)的構造,較為簡單,僅為一單獨的磁針而成。至航海所用的羅盤,則較為精確。其構造的要部為一輕質圓盤,盤的內面一層的中央部分,附有數個平行的小磁針,以代替一個磁針的作用。盤的外面的周圍,畫分 32 等分,以表示方向。盤的中心支於一尖針上,盤外有保持水平的裝置,使盤面可自由繞水平軸而轉動,故船身雖受風浪,動搖不定,但盤面常保持水平的位置。盤的內側邊上,附有和船首方向一致的指標,依這個指標,和盤面刻度相合處,就可讀出船首所趨的方向。這種裝置,係英人愷(Kelvin)氏在公元 1876 年所首創,但是自公元 1910 年以來,對於戰艦和潛水艇上所用的羅盤,係利用轉動體的慣性,保持其轉動軸線方向的原理而製成,即不受地磁的影響,而稱為迴轉羅盤(gyrocompass)。

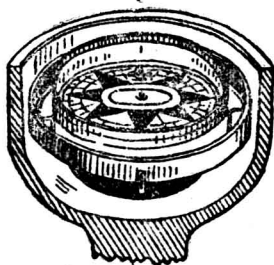


圖 326 羅盤

習題

1. 磁鐵何以能吸引軟鐵?
2. 有磁鐵和鐵條各一,如何可以辨別?

3. 何謂單位磁極?

4. 一磁極的極強為 90 C. G. S. 單位, 如和另一磁極相隔 2 厘米時, 其引力為 1 克. 求第二磁極的極強.

5. 如兩個磁極的極強各為 32 和 33 C. G. S. 單位. 則相隔 12 厘米時, 其互相作用的磁力為若干?

6. 何謂磁場強度和磁力線?

7. 一磁極的極強為 27 C. G. S. 單位, (1) 求和此極相距 3 厘米處的磁場強度; (2) 若在此處放一 32 C. G. S. 單位的磁極, 則所受的磁力為若干?

8. 試就 $F = \frac{mm'}{r^2}$ 和 $F = mH$ 的兩公式, 比較其意義.

9. 一磁極的極強為 3 單位. 如放在磁場的一點上, 所受的力為 8.1 達因. 求該點的磁場強度.

10. 條形磁鐵周圍的磁場強度, 最大的部分在何處?

11. 試就蹄形磁鐵的磁場, 作一磁力線圖.

12. 試就條形磁鐵的異名的兩極間, 和同名的兩極間, 作圖以表示磁力線的狀態.

13. 將小縫針燒紅, 放在蹄形磁鐵的兩極間, 使針沿着連接兩極的直線上待冷, 是否可以磁化? 何故?

14. 將鋼條依地磁場的南北方向加以鎚擊, 可變成磁鐵, 若將其置東西方向而鎚擊, 則可去磁. 何故?

15. 表示磁傾角的磁針, 如放於地磁的磁極處, 則顯何作用?

16. 試舉二事件, 證明地球為一大磁鐵.

17. 設有粗細均勻的鋼條, 磁化後如能懸住成水平, 則其支持點是否在其重心上? 何故?

18. 試將一磁針放在軟木塞上, 而浮於水面, 使其得自由運動, 則此磁針是否

能向北而動? 何故?

19. 南京的磁傾角為 $46^{\circ} 43'$, 水平強度為 0.331 , 求其總強度及鉛直強度.

20. 某處的磁傾角為 60° , 如在傾斜磁針的上端, 加 1 克的重量, 則其傾角, 可由 60° 變成 3° . 若欲使此磁針能成水平的位置時, 則針端應加的重量為若干克?
(註: 先定此磁針的極強為 m , 長度為 l , 地磁水平強度為 H , 鉛直強度為 V 然後列出 V 和 H 的關係式, 並由題意, 列出兩次力矩的平衡式, 即可由三式求出答案.)

第七編

電學

第一章 靜電

§1. 正電和負電

將一硬橡皮棒(ebonite rod)和貓皮摩擦數次後，能吸引通草球(pith ball)，或紙屑等輕物體。如用玻璃棒和絹布摩擦，亦得同樣的現象。凡能吸引輕物的物體，稱為帶電體(electrified body)，或稱該物體帶有電荷(electric charge)。凡使物體帶有電荷的方法，稱為起電(electrification or charged with electricity)，或稱帶電。兩物體由摩擦而得帶電，稱為摩擦起電(electrification by friction)。

〔表演〕 取乾通草球一個，用絲線懸住。將絹布擦過的玻璃棒和球相近(圖 327)，棒即將球吸引。如棒和球接觸後，球即帶電，而和棒相推斥。若用貓皮擦過的硬橡皮棒近此帶電的球，則互相吸引。

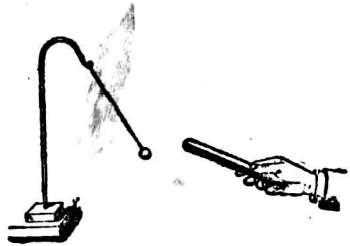


圖 327 通草球驗電器

由實驗知電有兩種。凡任何物體所帶的電荷，如和絹布擦過的玻璃棒上所帶的電一樣的稱爲正電(positive electricity)；如和貓皮擦過的硬橡皮棒上所帶的電一樣的稱爲負電(negative electricity)。且知同種的電，彼此相推，異種的電，彼此相引。這種相推或相引的力，稱爲靜電力(electrostatic force)。

§ 2. 導體和絕緣體

若將絹布摩擦過的金屬棒，用手握着，以移近一通草球，則不能發生吸引的現象；但將金屬棒的一端附裝一玻璃柄後，用手握柄，再和絹布摩擦，金屬棒亦可帶電。可知金屬棒和絹布摩擦，如用手直接握着，電即由棒傳至各部分，而由人手移去。凡物體上一部分如受有電荷，易於傳至其他各部分的，則此物體稱爲導體(conductor)。又如玻璃棒硬橡皮棒等，凡一部分帶電時，而甚難傳至其他各部分的物體，稱爲非導體(non-conductor)。人體和地，均爲導體，故帶電體和人手及地接觸，電荷即可傳去。如在導體和地球間放一非導體，則導體帶電後，就被隔開，而不能傳至地球。凡兩導體間隔一非導體，以避免傳電的方法，稱爲絕緣(insulation)，故非導體亦可稱爲絕緣體(insulator)。

導體和非導體的名詞，僅表示物體傳電的程度，係相對而非爲絕對的，故並無顯明的界限。普通對於金屬、炭，以及酸類、鹼類、和鹽類的溶液等，易於傳電的稱爲良導體(good conductor)；如乾空氣、硫黃、玻璃、硬橡皮、瓷器、火漆、膠木等，甚難

傳電的，即為優良的絕緣體；又如乾木、棉、紙、溼空氣等，絕緣的程度較差，稍能傳電的，即稱為不良導體 (poor conductor)。

§ 3. 驗電器

欲檢驗物體是否帶電，和電的種類，所用的儀器，稱為驗電器 (electroscope)。其簡單的裝置，為在一玻璃瓶的瓶塞中 (圖 328) 插入一金屬棒，瓶塞和金屬棒接觸的周圍，最好用絕緣體環繞，棒的下端貼兩張金箔，其上端附置一金屬板，或一金屬球。這種的裝置，稱為金箔驗電器 (goldleaf electroscope)。



圖 3-8 金箔驗電器

如將帶電體和金屬棒的上端接觸，則電荷由棒傳至金箔，箔上因帶同種的電，彼此相推，故兩箔即展開。由其展開所成角度的大小，即可比較帶電體的電量。如和棒端接觸的物體，並不帶電，則金箔決不展開。設先用一已知的正電體，和棒端接觸，使金箔帶有正電，而展開後，更將一負電體和棒端接觸，則金箔必閉垂，且失去所帶的電的一部分，或完全失去。這種正電和負電相消的現象，稱為中和 (neutralization)。如金箔已帶正電後，更將一未知的帶電體和棒的上端接觸，若金箔展開的角度增加，則帶電體亦必帶正電；若箔閉垂；則可斷定為負電。故由驗電器，亦可確定帶電體上電的種類。

兩物體由摩擦起電後，如用驗電器留意試驗，可知一物體帶有正電，而另一物體必帶負電。故正電和負電常同時產生。更將兩物體由摩擦起電後，同時和驗電器接觸，金箔必仍閉垂。故同時產生的兩種電荷，電量亦必相等。

§ 4. 庫倫的靜電力定律

庫倫於公元 1785 年，由實驗求得。兩帶電體間互相作用的靜電力，和兩者所帶電量的乘積成正比，和其間距離的平方成反比。這個關係，稱為庫倫的靜電力定律 (Coulomb's law of electric force)。更由卡文提什和法拉第的發見，知靜電力和兩帶電體相隔的介質，亦有關係。設兩帶電體的電量為 q 和 q' ，相隔的距離為 r ，作用的力為 F ，則庫倫定律可列式為：

$$F = \pm C \frac{qq'}{Kr^2}.$$

式中 C 為一常數。 K 為介質常數 (p. 140, § 4)，依介質的性質而定。‘+’號表示同種電間的推力；若用‘-’號，即表示異種電間的引力。

凡兩個點電荷 (point charge) 在真空或空氣中 (空氣的介質常數為 1.0005 和真空的 1 相近)，相距 1 厘米，如推斥的力恰為 1 達因時，則每一電荷的電量 稱為 1 電量的 C. G. S. 靜電單位 (C. G. S. electrostatic unit of quantity of electricity)。應用此單位時， C 的數值即等於 1，故在空氣中的靜電力，可列

成下式:

$$F = \pm \frac{qq'}{r^2}.$$

又取 3×10^9 靜電單位的電量, 稱為 1 庫侖(coulomb), 為電量的實用單位(practical unit of quantity of electricity).

§ 5. 靜電感應

〔表演 1〕 用乾燥的金屬圓筒 A 和 B , 如圖 329, 互相接觸, 放於白蠟塊或優良的絕緣體上. 每一圓筒的頂面附一小通草球, A 筒下面繫一絲線. 如將和貓皮擦過的硬橡皮棒 R , 放近 B 筒, 則由通草球的展開, 知兩筒均帶電. 如將 R 棒移去, 則球下垂, 而兩筒均無電. 若於 R 棒未移去前, 曳 A 筒下面的線, 使和 B 脫離, 再將棒移去, 則兩筒均帶電. 更由驗電器的檢查, 可知 B 帶正電, 而 A 帶負電.

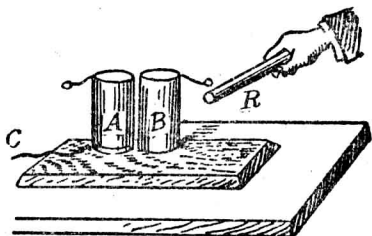


圖 329 靜電感應

由實驗知帶電體放在絕緣導體的附近時, 導體和帶電體鄰近的一端, 所起的電, 和帶電體的電相異; 其和帶電體遠隔的一端, 所起的電, 屬於同種. 這種現象, 稱為靜電感應(electrostatic induction). 當帶電體在導體旁移去時, 導體因感應而生的兩種電量, 恰相中和. 故絕緣的導體上, 由靜電感應同時發生的兩種電量常相等. 更知一絕緣的導體放在帶電體的附近, 如能將導體分成兩部分, 則每一部分都可帶電. 即使將原帶電體移去,

此兩部分所帶的電仍不消失，這種起電的方法，稱為感應起電 (electrification by induction)。

〔表演 2〕 如將帶負電的硬橡皮棒，放近一驗電器，則棒雖未和驗電器的金屬棒端相接觸，但金箔亦能展開 (圖 330)。若在棒未移去前，用手指觸驗電器的金屬棒端，箔即閉垂。然後將手指離開，再將硬橡皮棒移去，金箔又展開。若用絹擦過的玻璃棒，和驗電器接觸，則金箔展開的角度增加，可知金箔由感應而起的電為正電，和硬橡皮棒所帶的不同。

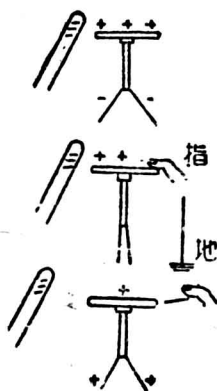


圖 330

驗電器由感應而帶電

由實驗知帶電體鄰近一絕緣的導體時，導體近帶電體的一端，所起的電荷，受帶電體的吸引，稱為束縛電荷 (bound charge)；而遠端的電荷，如和地接觸，則立即傳去而消失的，稱為自由電荷 (free charge)。如是導體所帶的電，常和帶電體所帶的電相異。這種方法，為感應起電時通用的方法。

§6. 電子說

電的本性究竟如何，歷來有各種學說，但以近代的電子說 (electron theory) 因有實驗根據，故為科學家所公認。依電子說，知每一原子係由帶正電的原子核 (nucleus)，和環繞核外運動而帶有負電的電子 (electron) 組合而成。電子的質量極小，僅為最輕的氫原子的 1840 分之一，其所帶的電量為 4.77×10^{-10} 靜電

單位的電量。原子中正負兩種電量常相等，故通常均呈中和，而不顯出帶電的現象。但因每一原子核外的電子，可由一原子設法移入他原子的範圍內，故如將硬橡皮棒和貓皮摩擦，則貓皮內一部分的電子，就移至硬橡皮棒，其結果即使貓皮中的原子缺少電子，而現正電；硬橡皮棒的原子，因電子增加，即呈負電。且可知貓皮所現的正電量，必和硬橡皮棒的負電量相等。故凡帶正電的物體，即為缺少若干電子的狀態；而帶負電的物體，即為電子過多的狀態。如電子數適中，而物體所帶正負兩種電量相等的，即為中和體。如將一絕緣導體放在正電體的附近時，則在導體上遠端原子的電子，被正電體吸引，移至近端，故近端的原子集有多量的電子，就顯示負電，遠端的原子因缺少電子，就現正電。若將帶電體移去，則電子仍移至原位置，故導體仍呈中和的現象。如在正電體未移去前，用手指接觸導體的任何部分，則地中的電子可移至導體上，以補導體遠端處原電子的地位。將手離開，再移去正電體，則束縛的電子，分布於全導體，使有過量的電子，即成負電體。如將一絕緣的導體，放在負電體的附近，而由感應以成正電體的理由，亦可由電子說而得其解釋。

§ 7. 電場和電力線

帶電體的附近，凡電力所能作用的空間，稱為電場(electric field)。如假定有一靜電單位的正電荷，存在於電場內的一點，則其所受電力的大小，即表示該點的電場強度 (electric field

intensity). 故電場內某點的強度如為 E , 則 q 靜電單位的電量, 在該點所受的力為 F 達因, 可用下式表示:

$$F = qE.$$

〔表演〕 在玻璃板上貼兩片錫箔, 相隔數厘米, 將板支持在絕緣體的架上, 使成水平. 再用石膏粉 (gypsum powder) 撒布於玻璃板上, 並用銅線, 將每一錫箔片和靜電起電機的一電極相連接. 當起電機轉動時, 兩箔片即各帶正電和負電. 如用玻璃棒輕擊板邊, 使石膏粉稍受振動, 即見粉末衝接, 和磁場內鐵屑相似.

電場和磁場相似, 亦可用許多曲線, 表示兩帶電體間的介質中各點的狀態. 每一曲線上各點的正切方向, 即為單位正電荷所受電力的方向. 這種曲線, 稱為電力線 (electric line of force). 電力線的性质和磁力線相似, 通常假定其由正電體發出, 而終止於負電體. 線上亦發生張力, 有縮短其長度的傾向, 故異種兩電荷間即生吸引的電力. 又和線成直角的方向, 有旁壓力的作用, 故同種兩電荷間即生推斥的電力. 兩電荷間

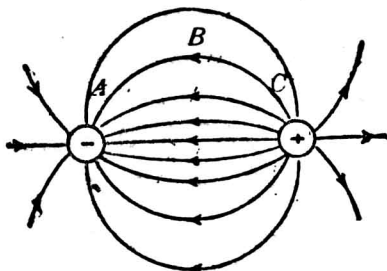


圖 331 異種電荷間的電力線

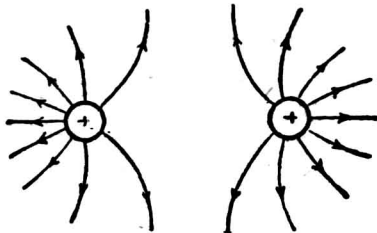


圖 332 同種電荷間的電力線

電力線的分布情形，如圖 331 和 332 所示。

每一單位正電荷，普通可假定為一電力線的起點，而一單位負電荷，即為電力線的終點。故有 q 單位電量的正電體存在於空間時，即有 q 條線發出，附着於鄰近的各物體上，使各成負電體，而總電量亦必為 q 單位。每一電力線在空間雖可為曲線，但其起點和終點處，均和物體的面，互成直角，如圖 333。在正電體 A 旁有一絕緣的導體 B 時， A 上發出電力線的一部分，必由 B 通過，但因導體中不能有電場發生，故通過導體的電力線，即由導體的面上附着而發散，遠端遂帶正電荷，而導體和正電體附近的一端，則帶負電荷。又因電力線在導體上進入和離開的數目

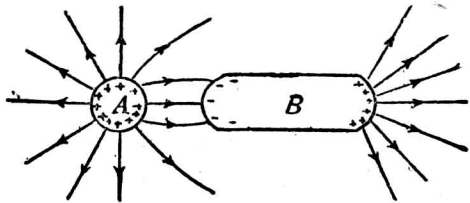


圖 333 靜電感應時的電力線

必相等，故由靜電感應所成的正負兩種電量，亦必相等。這個電量的多寡，依通過電力線的數目而定。如將導體和帶電體相隔愈近，則由感應所得的電量，亦必愈多。

§ 8. 靜電的分布

[表演 1] 如圖 334，將金屬杯 A 放在乾玻璃杯 B ，或任何一絕緣體的上面，使其帶甚多的電。如用驗電板 (proof plane, 係金屬板附於絕緣的玻璃棒上而成) C 和 A 杯的內面接觸後，移至驗電器上，即可知杯的內面並不帶電。若將驗電板和杯的外面接觸，然後移近驗電器，則可知杯外有電的存在。

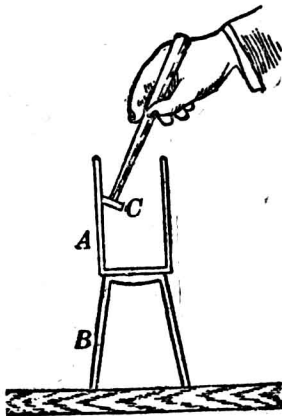


圖 334 電荷的分布(1)

〔表演 2〕將蛋形的絕緣導體(圖 335)帶電,用驗電板和其曲率較小處接觸,移電荷至驗電器,觀察金箔的展開角,然後將金箔上的電消去,再用同樣的方法,檢查導體上曲率最大處的電,可知金箔的展開角必較前為大。



圖 335 電荷的分布(2)

由實驗知導體上的一部分帶有電荷,即向各部分分布,而電荷的分布(distribution of charges),完全集於導體的外表面上。由同種電的互相推斥,和電力線的張力,都可推知其為必然結果。導體表面上每單位面積內所集的電量,稱為電荷的表面密度(surface density of charge)。凡球形導體的面上,各部分的曲率半徑都相同,帶電時,電荷的分布頗為均勻,故各部分的表面密度均相同;但帶電體的表面上各部分的曲率如不同時,則曲率最大處的表面密度為最大。

§ 9. 電屏

一閉合的空心導體(closed hollow conductor)上帶有靜電荷時,因電荷均分布於其表面,已達平衡狀態,各電力線均附着

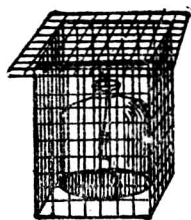


圖 336 電屏(1)

於其表面,故導體的內部,不能有電力線存在,以成電場。法拉第首由實驗,將一驗電器的周圍,罩一網目甚小的金屬線籠(圖 336),察知籠的網目上雖帶有極強的電,但其內部的驗電器,毫不發生靜電的效應。這種閉合導體能使其內部不受外方電擾(electric disturbance)

的影響，而呈隔離的作用時，即稱為電屏(electric screen)。故欲作精密的實驗時，所用的電學儀器，欲使不受附近電場的影響，常用一金屬箱為電屏。

又如圖 357，設在一空心導體內如放一孤立的正電體，則導體的內面，由靜電感應發生負電，其外面即生正電，但因內外面的電力線並不連續，故導體內部的電場，和其外部的電場不生關係。可知電屏的作用，有兩要點，即：

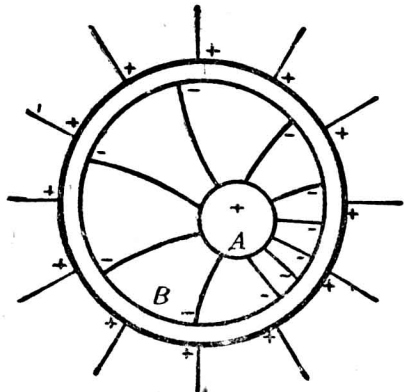


圖 357 電屏(2)

(1) 空心導體的內外部，各有的電荷和電場，均完全獨立，而不互生影響。

(2) 空心導體的內部，除有絕緣的電荷存在時，不能有電場的發生。

§10. 尖端作用

[表演 1] 將彎曲的尖針附着於起電機的一電極上(圖 338)，使尖端向燭燄。當起電機發動時，火燄即被吹而偏斜，稱為電風(electric wind)。

[表演 2] 將一電輪(electric whirl)(圖 339)支持於尖針上，並將針和起電

機的一電極相接。當起電機發動時，電輪即依圖上箭頭所示的方向，迅速轉動。

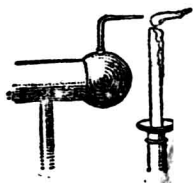


圖 338 電風

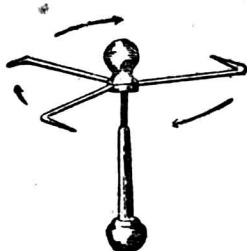


圖 339 電輪

尖端為曲率最大的部分，如一尖針和帶電體相連接，則尖端上所集的電量甚多，或其表面電荷密度為甚大，可使附近的空氣分子，由中和狀態，受其感應，分離而成兩組正電和負電的分子。這種作用，稱為空氣的游離(ionization)，而每組帶電的分子，稱為游子(ion)。如尖端有正電，則空氣中的一組負游子(negative ion)為尖端所吸引，就互相中和。這種正負電相消的作用，稱為尖端放電(point discharge)。其他一組的正游子(positive ion)，就為尖端所排斥，故電風的發生，即被斥的游子前進時，推動空氣所成。又因尖端排斥帶同種電的游子，同時游子即生反作用，以推尖端，故具有尖端的物體，如電輪等能自由轉動時，其轉動的方向，必和尖端所指的方向相反。尖端放電的現象，稱為尖端作用(action of points)。

§ 11. 起電盤和起電機

利用靜電感應，以發生電量的裝置，稱為起電盤 (electrophorus)。如圖 340, B 為墊有硬橡皮板的金屬圓盤，先用貓皮摩擦板面，即得負電。然後將具

有絕緣柄的金屬板 A ，放於板上。因 A 和 B 的兩面並非絕對的各成一平面，只有若干點相接觸，中間有空氣層存在，故由感應起電的方法，以手指觸 A

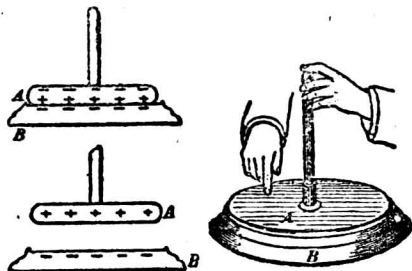


圖 340 起電盤

板，負電即由人身傳至地球，將手指離開，提起 A 板，板上即帶正電，可由驗電器來檢查。依法重複試驗，即可從定量的負電體，由感應而得多量的正電。

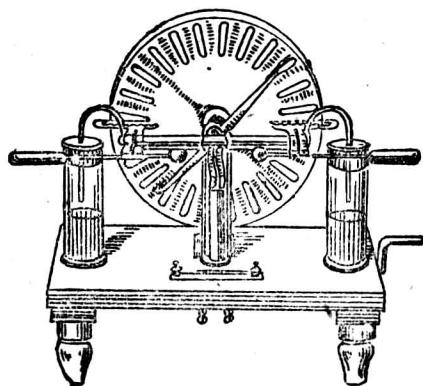


圖 341 起電機

起電機 (electric machine) 即一連續作用的起電盤。普通應用的一種，為威姆胡斯特起電機 (Wimshurst machine)。其主要部分為等大的兩塊硬橡皮圓板（或玻璃板），裝於同一軸上，可作反對方向的轉動(圖341)。

兩板外面的圓周，各貼有錫箔，或鋁箔若干張，板的前面各置弓形金屬棒一支，兩棒的位置，幾互成直角，且各和水平面約成 45° 的傾角，每棒的兩端附有金屬刷毛，各和板面相隔 180° 的錫箔相接觸。板的左右各有一對金屬的電梳 (electric comb)，和兩板的錫箔鄰近，並由金屬棒連至兩金屬球。這兩球稱為起電機的電極 (electrode)。兩板轉動時，電極上就附有多量的電，一為正電，一為負電。兩種的電當兩電極在相當的距離時，可透過空氣，發生激烈的中和現象，而成火花放電 (spark discharge)。

起電機的原理，可依圖 342 來說明。圖中小圓代表前方的圓板，大圓代表後方的圓板。因空氣中常帶有少量的電，故起電機的錫箔亦常附有微量的電荷。設於刷毛 C 的對方 A 箔上，帶有正電，則由靜電感應，刷毛 C 帶負電，同時刷毛 C' 帶正電。故前板依箭頭方向轉動，凡經過和 A 相對時的錫箔，即和刷毛 C 接觸的，均帶負電，而經過和 A' 相對時的錫箔，均帶正電。此等帶正電的錫箔，隨板的轉動，

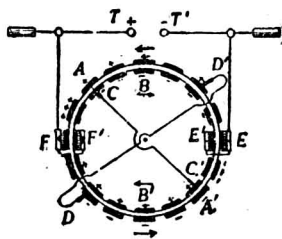


圖 342 起電機的原理

而和電梳 F, F' 接近時，則梳由感應起負電於其尖端；而使 T 極帶正電。同時板面上帶負電的錫箔，經過電梳 E, E' 時，亦由同樣的理由，使 T' 極帶負電。後板上刷毛的一端 D' 與所觸的錫箔正對於前板帶有負電的錫箔時，亦由感應而帶正電，其他端 D 同時即帶負電。故後板的轉動方向，如和前板相反，則凡帶正電的錫箔，經過電梳 F, F' 時，亦使 T 極帶正電，而帶負電的錫箔經過電梳 E, E' 時，亦使 T' 極帶負電。故起電機的兩板，依反對的方向相對轉動時，可使一電極帶有正電，一電極帶有負電。兩極在相當距離內，因會集的電量甚多，即可發生火花放電。

§ 12. 電閃和避雷針

美國佛蘭克林(Franklin)曾用絹製的風箏，升放雲端，知空間的浮雲，帶有多量的電。若正負兩電的雲接近，至相當距離，亦和起電機中兩電極的作用相同，起激烈的中和作用，而成火花放電。這種火花放電即稱為電閃(lightning)。放電時火花經過的歷程，空氣驟熱，而迅速膨脹，即成雷鳴。故雷(thunder)的發生，即空間雲裏發生火花放電的結果。

雲中帶電時，地面亦起感應。若所集的電量，在相當距離內，足使雲中的電和地面的電放電時，則火花所經處，地面上的樹屋毀壞，人畜死傷，是為觸電。

屋宇避電的方法，最好利用電屏，在其周圍裝置鐵絲網籠，惟不甚便利。佛蘭克林應用尖端作用，發明避雷針(lightning rod)，即用一上端有尖端的金屬棒，直立於建築物上，棒的下端連有銅板，深埋於溼土內而成，當帶正電的雲和地面接近時，地面因感應所得的負電在尖端蝟集，使空氣起游離，分成兩組的游子。正游子為尖端所吸引，和其負電中和，而負游子被尖端推斥，和雲中的正電中和。連續作用，可使雲和地面所帶的電量在定距離時，不足以發生火花放電，而免落雷(thunderbolt)的危險。故避雷針係利用尖端放電代替火花放電的裝置，以生無聲放電(silent discharge)，而避免觸電的危險。

習題

1. 試述起電的兩種方法。
2. 起電的表演時，何以在冬季比在夏季為容易？如在潮溼的天氣施行實驗時，可將所用的儀器放在太陽中曝曬，或用火烘乾。何故？
3. 用驗電器玻璃棒和絹布，如何可檢查帶電體所帶電的種類？
4. 用絹布擦未絕緣的黃銅棒而棒並不帶電。何故？
5. 試比較電和磁的現象，詳述異同的各點。
6. 設有絕緣金屬杯數個，列成一排，而不相接觸。若在其盡端的杯旁放一帶正電的棒，試用圖示，表出各杯的帶電狀態。
7. 設在上題中近正電棒的杯上，用手指接觸，然後移去手指和棒。試再用圖示，表出各杯的帶電狀態。
8. 有大小相同的兩球體，一帶 10 單位的正電，一帶 12 單位的負電。如兩球接觸後而再分開，則每球上各帶有若干電量？
9. 有大小相等的兩個球體，一帶 10 單位的正電量，一帶 2 單位的負電量。問兩球相距 2 厘米時，其間作用力如何？又若將兩球接觸後，再放回原處，其作用力又如何？
10. 兩小球相隔的距離為 10 厘米，一小球帶有 45 單位的電量。如和另一小球間的作用力等於 5 毫克的重量時，則另一小球所帶的電量應為若干？
11. 一尚未帶電的小球，和一大小相等而已帶電的小球相觸後，放至相距 6 厘米的位置，測其相推的力為 4 達因。求帶電小球原有的電量。如欲使此兩球間的作用力減至 1 達因，則兩者的距離應為若干？
12. 兩小球各帶有 50 單位的正電量，放在每邊長度為 1 米的等邊三角形的兩角處。問第三角的一點，對於這帶電體所成的電場強度為若干？

13. 一球的半徑為 2.5 厘米, 如欲使其帶電, 得電的表面密度為 σ/π , 則所需的電量為若干?
14. 試述電屏的作用。
15. 一小導體 A 放在懸住的通草球前 30 厘米處, 兩者各帶有正電。當另一帶有負電的小球 B , 放在 A 和通草球間連接的直線上, 而和通草球相距 20 厘米時, 則通草球恰能不受推引的作用。比較 A 和 B 所帶的電量。又設將 B 球移近 A 球時, 及和 A 相觸時, 則通草球各有如何的影響?

第二章 電位和電容

§ 1. 導體的電位

在容器中, 如盛以水, 則所加的水量愈多, 其水位亦愈高。如圖 243, 容器 A 和 B 中盛水後, 如用一導管相連通, 則水必由水位較高的器中, 向水位低的器中流動, 直至兩器中的水位, 在同一平面而停止。當兩個導體 A 和 B 帶電後, 用導線 r 使其連接時, 電荷亦可發生暫時的流動, 和水的流動相似。故每一帶電體即稱具有電位 (electric potential), 凡兩帶電的導體

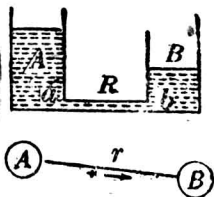


圖 243

相接時, 能發生電荷的移動, 即認為兩者的電位不等, 其相差的程度, 即稱為電位差 (potential difference), 或稱電壓 (voltage)。若正電荷自 A 向 B 移動, 即稱 A 為高電位, 而 B 為低電位。故正電荷常由高電位向低電位移動, 直至兩帶電體的電位相同時,

即不起移動。凡一孤立的帶電體，其面上電荷的分布，已達靜止的平衡狀態時，面上各點的電位，亦必相同。

因地球為一大導體，其面上各點已達電的平衡，而電位相同，故即採用地球為一標準的零電位（zero potential）。若將導體和地球連接時，有正電荷自導體向地球移動，或依電子說，有電子自地球流向導體，則稱該導體對於地球，具有正電位（positive potential）。若導體和地球連接時，有負電荷流向地球，或電子自導體向地球移動，則稱該導體對於地球，具有負電位（negative potential）。故導體帶有正電時，即為正電位，帶負電時，即為負電位；但一導體如和地相連接，而無電荷移動時，則導體上不論是否有電，其電位即和地相同，而為零電位。

帶電體的電位，和所帶的電量成正比，故兩個導體各帶正負的電量，如有增加，則其電位差亦增大。這個電位差，在兩者間定距離內，達到一定的限度，即不相連接，亦可發生火花放電。此時導體上的電位，稱為花放電位（spark potential），其大小隨導體的形狀，和介質等的性質而定。

§ 2. 電位差的量度

在地上將一物體由一水平面移上，至另一水平面時，則兩平面間位能的差，必等於對物體所作的功，即為物體的重量和兩位處高度的差的乘積。電位差的大小，亦可由所作的功以確定。凡將一靜電單位的電量，由低電位的一點，向高電位的一點移

動時 所需的功，即為兩點間電位差的量度。如所需的功為 1 爾格，則兩點間的電位差，稱為電位差的 C. G. S. 靜電單位 (C. G. S. electrostatic unit of potential difference)。設 $(V - V')$ 為兩點間的電位差， q 為移動的電量，則所需的總功 W ，必為

$$W = q(V - V').$$

又因電量的實用單位為庫侖，功的實用單位為焦耳，故如將 1 庫侖的電量，在導體的兩點間移動，所需的功恰為 1 焦耳，則電位差的實用單位，稱為 1 伏特 (volt)。因 1 庫侖 = 3×10^9 靜電單位的電量，1 焦耳 = 10^7 爾格，故

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1}{300} \text{ 靜電單位的電位差。}$$

上式中實用單位的關係，可表示如下：

$$\text{焦耳} = \text{庫侖} \times \text{伏特。}$$

[例題] 一導體的電位為 10 伏特 (即和地的電位差)。如將 60 靜電單位的電量，自地移至導體上，則所需的功為若干？

解法 $10 \text{ 伏特} = 10 \times \frac{1}{300} \text{ 靜電單位，}$

故 $W = 60 \times 10 \times \frac{1}{300} = 2 \text{ 爾格。}$

§ 3. 導體上電位的升降

導體的電位，除和其電量成正比外，更依下列的效應，而有升降。

(1) 鄰近另一帶電體時的效應 設如圖 344 B 爲一不帶電的導體，其電位爲零。若將 B 移近一正電體 A ，則 B 的兩端

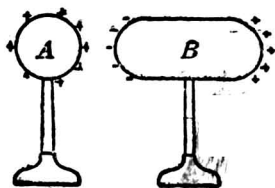


圖 344 導體上電位的升高



圖 345 導體上電位的降低

即呈靜電感應，而有電荷的分布。此時 B 的電位，是否有何改變？學者如欲解決此問題，可依電位的意義，設想 B 和地面的連接，就其電荷移動的傾向〔註〕，必可立即解答 B 的鄰近，因有正電體的存在，其電位已升高，而爲正電位。且因導體上無電荷的移動，故此時各點均爲同一的電位。如導體和帶電體相距更近，其電位的升高亦必增加。又如圖 345，當 B 移近一負電體時，則由同理，可知其電位即降低，而爲負電位。由此可推知 (a) 一帶電的導體，如移近另一正電體時，則其電位必升高，而 (b) 移近一負電體時，其電位必降低。

(2) 鄰近一接地導體時的效應 設如圖 346，一負電體 A 帶有一定的電量，其電位亦有一定，可由所接驗電器金箔的展開度表示。若用一接地導體 (grounded conductor) B 移近 A 時，則驗電器的金箔即閉垂，而顯示 A 的電位，因鄰近一接地導體而升高。如帶電體 A 爲正電，則接近 B 時，其電位必降低。這種

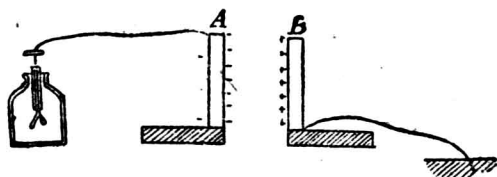


圖 346 接地導體對於帶電體的效應

效應，因接地導體發生感應電荷，故很易用(1)的結果而說明。可知帶電導體所帶的電，不論為正電或為負電，如其鄰近有一接地導體時，則其和地面的電位差，即生減小的效應。

〔註〕 上列兩種效應的說明，亦可根據電位差的量度，由地球和導體間所需的功而推出，但為初學者便於明瞭起見，可用上說以說明。

§ 4. 電容和介質常數

凡將導體增加 1 單位電位，所需的電量，稱為導體的電容 (electric capacity)。設用 Q 單位的電量，使導體增加 V 單位的電位， C 為導體的電容，則其關係為：

$$C = \frac{Q}{V}.$$

$$[\text{電容}] = \frac{[\text{電量}]}{[\text{電位}]}$$

電容的 C. G. S. 靜電單位 (C. G. S. electrostatic unit of capacity) 即用 1 靜電單位的電量，使導體恰能增加 1 靜電單位的電位。電容的實用單位為法拉 (farad)，即 1 庫倫的電量，恰使

導體的電位，增加 1 伏特。如取 $\frac{1}{10^6}$ 法拉為電容的單位，稱為 1 微法拉 (microfarad, 縮寫為 mf.)。若再取 $\frac{1}{10^6}$ 微法拉為單位，則稱為 1 微微法拉 (micromicrofarad, 縮寫為 mmf.)。

因 $1 \text{ 庫侖} = 3 \times 10^9 \text{ 靜電單位的電量,}$

$$1 \text{ 伏特} = \frac{1}{300} \text{ 靜電單位的電位,}$$

故 $1 \text{ 法拉} = 9 \times 10^{11} \text{ 靜電單位的電容.}$

導體的電容，和其大小與形狀有關係外，由實驗和理論，知其鄰近有接地導體時，其和地面間的電位差即減小，故須增加電量，方可恢復其原有的電位。由電容的定義，可知導體的電容，因有鄰近的接地導體，故即隨電位差的減小而增加。若兩導體間的介質用各種絕緣體代替空氣時，則由實驗知其電容亦增加。設 C_m 為某介質間隔時的電容， C_a 為空氣間隔時的電容，則兩電容的比值，稱為介質常數 (dielectric constant or specific inductive capacity)。如用 K 表示介質常數，則得

$$K = \frac{C_m}{C_a}.$$

$$[\text{介質常數}] = \frac{[\text{介質間隔的電容}]}{[\text{空氣間隔的電容}]}.$$

各種重要介質常數如下表：

表 30 介質常數

白 蠟	2.0 至 2.3	雲 母	6.0 至 8.0
石 油	2.07	玻 璃	6.6 至 9.9
硬 橡 皮	2.0 至 3.1	蒸 餾 水	75. +
硫 黃	3.8 至 4.0	酒 精	25. +

§ 5. 容 電 器

凡利用一絕緣體，介於兩導體間，以儲蓄電量的裝置，稱為容電器(condenser)。容電器的最簡單的，為一大口的玻璃瓶，在其內外面的下部，各貼錫箔一層，如圖 347。內層由金屬鍊通至瓶口外面的小球，外層即和地連接。這個裝置，為公元 1788 年，

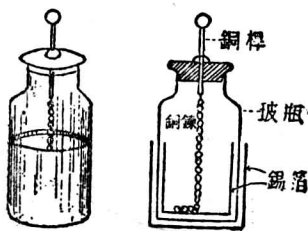


圖 347 來頓瓶

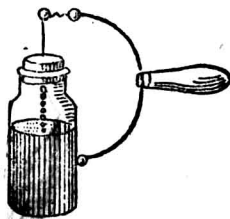


圖 348 容電器的放電

首用於荷蘭的來頓城，故稱為來頓瓶(Leyden jar)。如用起電機的一電極，接於來頓瓶的小球上，即可蓄電於瓶中，稱為容電器的灌電(charge)。若用放電叉(discharge tong)，使外層錫箔和球相近，如圖 348 的情形，留一空氣隙(air gap)，則外層由感應所得的電，即和內層的電起中和，而生火花放電。若於第一次

放電後，再用放電叉檢查，可有第二次以至第三次等微弱放電，稱為剩餘放電 (residual discharge)。這種現象，即因介質內部吸收的電荷，漸漸放出而發生，其吸收電量的多少，隨介質的性質而異，如空氣、石英和氣體等的均勻介質，常無剩餘放電的發生。

普通應用的容電器，常用兩組的板交互疊置而成(圖 349)，

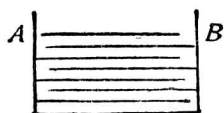


圖 349 板容電器

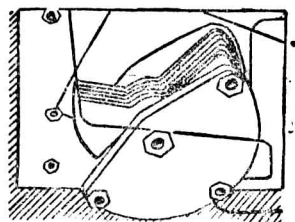


圖 350 可變容電器

稱為板容電器 (plate condenser)。如板間隔以空氣則稱空氣容電器 (air condenser)。若用雲母 (mica) 或紙片等為介質，則各稱為雲母容電器 (mica condenser) 和紙片容電器 (paper condenser) 等。板容電器中一組的板即為灌電的板，而另一組的板，即為接地導體，其間含有介質常數較大的絕緣體，故用這裝置，可得甚大的電容。凡兩組的板互相對立，位置固定 有一定的電容的，稱為固定容電器 (fixed condenser)。如一組的板固定，而另一組的板可以轉動 (圖 350)，使板的有效面積增加或減少，而能變更其電容的大小的，稱為可變容電器 (variable condenser)。

容電器的應用頗廣，如電話、電報、起電機、和無線電等，常用為主要的部分。

§ 6. 容電器的組合

如將數個容電器連接，使其同時帶電，即為容電器的組合 (combination of condensers). 組合的方法，有下列兩種：

(1) 並聯 如圖 351, C_1, C_2 和 C_3 為三個容電器各有的電容。如使每一容電器的接地導體和帶電導體，各相連接，則當 A 和 B 的兩線端，和電源連接時，每一容電器上的電位差均相等，命 V 表示。這種連接法，稱為容電器的並聯 (connected in parallel). 又設命 Q_1, Q_2 和 Q_3 表示容電器上各有的電量，則得：

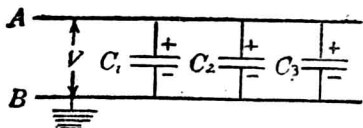


圖 351 容電器的並聯

$$C_1 = \frac{Q_1}{V}, \quad C_2 = \frac{Q_2}{V}, \quad C_3 = \frac{Q_3}{V}.$$

若命 Q 表示總電量， C 表合成的總電容，則因

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

和

$$Q = CV,$$

$$\therefore CV = C_1V + C_2V + C_3V,$$

或

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

即數個容電器並聯時，其總電容即等於各電容的總和。故

並聯的結果，可使所得的電容，較單用一個容電器時為大。

(2) 串聯 又如圖 352，將數個容電器順次連接，如 A 端通以正電量 Q ，則由靜電感應，每一容電器的導體上所帶的電量均為 Q ，即成容電器的串聯 (connected in series)。設 V 為總電位差， C 為組合而成的總電容， V_1 、 V_2 和 V_3 為三個容電器的電位差， C_1 、 C_2 和 C_3 為其相當的電容，則因

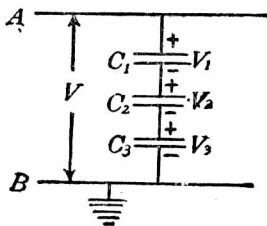


圖 352 容電器的串聯

$$V = V_1 + V_2 + V_3,$$

和 $Q = CV; \quad C_1 = \frac{Q}{V_1}, \quad C_2 = \frac{Q}{V_2}, \quad C_3 = \frac{Q}{V_3}$

故得 $\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3},$

或 $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$

即數個容電器串聯時，其總電容的倒數，等於各電容倒數的總和。故串聯的結果，可較單用任何一個容電器的電容為小。

習 題

1. 何謂電位差？何謂電容？
2. 一導體的電位為 20 伏特，如將 4 靜電單位的電量自地面移至導體上，所

需的功爲若干?

3. 來頓瓶放於玻璃板上,其電容是否減少?何故?
4. 起電機如不用來頓瓶時,則得連續而頻率較大的火花放電,但在兩電極上各和一來頓瓶連接時,則得頻率較小而甚亮的火花放電.說明其理由.
5. 設用 1 微法拉的容電器,欲使其電位升高 1 伏特,須用若干庫倫的電量?
6. 一絕緣導體帶電後所成的電位,已有一定,若不和其接觸,或改變其電量,則有如何的方法,可使其電位發生變化?
7. 兩個導體的電容各爲 10 和 15 靜電單位,如用一導線將其連接後,用 1,000 靜電單位的電量,分配於此兩導體上.求每一導體各得的電量,並各求其電位.
8. 一導體的電容爲 75 靜電單位,使其帶電,而電位升至 20 靜電單位.然後和一電容爲 25 靜電單位的導體相接觸,致一部分的電量分去.問接觸後每一導體的電量和電位,各爲若干?
9. 一球體的電容爲 25 靜電單位,其電位爲 100 靜電單位.若將此球體和一來頓瓶相連接,則其電位即降至 20 靜電單位.問來頓瓶的電容爲若干?
10. 何謂介質常數?設一未帶電的容電器含有一種固體介質,如和電位爲 V 單位的相似容電器而以空氣爲介質的相連接,則其共同的電位即爲 ϕ 單位.求此固體的介質常數.

第三章 電流和電池

§ 1. 電流

電位不同的兩個帶電體,如用導線連接,則電必在短時間內,經導線而流動,至兩導體的電位相同時方停止.凡在導線上

繼續移動的電荷，稱為電流 (electric current)。電流的方向，習慣上常規定其自高電位向低電位處流動，故正負兩帶電體間如用導線連接，則電流的方向即由正電體至負電體。

連通器的各器中，水面有高低時，水即暫時在連通管內流動。若欲保持管中有繼續的水流，且每處於單位時間內流通的水量須不變，則管的兩端所受的壓力，必保持一定的差數，或即於各器中的水面，應保持其高度的差數。電流的情形正和水流相似，凡兩帶電體用導線連接，電荷僅能於短時間內流動，而即停止的，稱為暫時電流 (transient current)。若設法將電荷連續供給於兩導體，使其電位差能保持不變，則電流即可在導線上連續流動，而成連續電流。

凡導體的某點上，每秒通過的電量，稱為電流強度 (current strength)。設命 Q 表示 t 秒內通過導體上某點的總電量， I 為電流強度，則得其關係如下式：

$$I = \frac{Q}{t}.$$

$$[\text{電流強度}] = \frac{[\text{總電量}]}{[\text{時間}]}.$$

電流強度的實用單位為安培 (ampere)。1 安培即為導體上每秒流過 1 庫侖電量時的電流強度。

§2. 伏打電池

意大利物理學家伏打(Volta)於公元1800年,首由化學作用,而得保持一定電位差的裝置。這種裝置,稱為伏打的簡單電池。其構造係用一銅板(C)和一鋅板(Z)對立在盛有稀硫酸的杯內而成(圖353)。當銅板和鋅板對立在硫酸內時,銅板就帶有正電,鋅板帶有負電。如將銅板和鋅板用導線連接,則電自銅板流向鋅板,而成連續電流。凡一切簡單電池,都由兩種不同的金屬板,和一種或兩種導電的溶液而成,普通可總稱為伏打電池(voltaic cells)。每一金屬板,稱為電池的電極(electrode of a cell);其帶正電的一極,稱為電池的正極或稱陽極, (anode or positive electrode)。其帶負電的一極,稱為電池的負極或稱陰極。(cathode or negative electrode)。導電的液體,稱為電解液(electrolyte)。伏打電池的兩極,和一種電解液組合而成的,稱為單液電池(single fluid cell)。如用兩極和兩種電解液組合而成的,稱為兩液電池(two fluid cell)。



圖 353
簡單電池

凡電流經過的導體,如連接電池兩極間的導線,和電解液的每部分,稱為電路(electric circuit)。電池的電流,由正極起,經金屬導線,而至於負極的部分,稱為外電路(external circuit);再由負極經電解液,而流至正極的部分,稱為內電路(internal circuit)。如電池所發的電流,經金屬導線和電解液,而成循環流動時的電路,稱為通路(closed circuit)。如將導線除去,電流不

通時，即稱爲斷路(open circuit)。電池的兩極，在斷路時的電位差，稱爲電池的電動勢(electromotive force,可縮寫爲E.M.F.)。伏打的簡單電池的電動勢爲1伏特，即銅極和鋅極在斷路時的電位差。

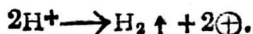
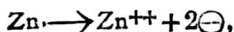
§3. 電池的局部作用和極化

如將商用的鋅板浸於稀硫酸內，則因板中含有鐵或碳等雜質，板面上即組成多數的小電池，而發生氣泡。這種鋅和雜質間成一電路，使發生局部電流的作用，稱爲電池的局部作用(local action)。電池的極如有局部作用，則當不用電時，其極亦漸漸消蝕。預防之法，普通將鋅極浸入硫酸後，再用水銀塗於板面，即稱爲汞齊化(amalgamation)。板面即爲鋅和水銀混合的鋅汞齊(zinc amalgam)所包圍，硫酸不能和雜質直接接觸，故當電池爲斷路時，鋅板的局部作用即可避免。如成通路時，則雜質隨鋅的消蝕而落下，亦不致發生局部作用。



圖 254
局部作用

伏打電池，當成通路時，因硫酸在水內可分成 H^+ 和 $SO_4^{=}$ 兩種游子，鋅極消蝕於硫酸中的部分，即成正游子，而其本身即帶負電，同時 H^+ 向銅片移動，將正電傳至銅板，失去電荷後，就成 H_2 氣體而放出。故鋅極和銅極旁的作用，可用下式來表示：



銅極旁所發的氫泡，常附着於板面，而不易分散。因氫為非導體，集於銅極上，致減小銅極的有效面積，且足改變極的性質，故可使電池的電動勢衰弱，以減小電流強度。凡電池成通路時，其正電極上有氣泡附着，而減小電流強度的現象，稱為電池的極化(polarization)。

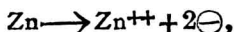
§4. 丹聶爾電池

伏打所發明的簡單電池，僅為歷史上重要的發見，而不能實用。普通實驗室內常用的電池，有丹聶爾電池(Daniell cell)和勒克蘭社電池(Leclanche cell)等。

丹聶爾電池(圖 355)始創於公元 1830 年，其正極為銅，負極為鋅。電解液有兩種，一為硫酸銅 (CuSO_4) 液，一為硫酸鋅 (ZnSO_4) 液。硫酸鋅液中浸以鋅極，硫酸銅液中浸以銅極。硫酸鋅液盛於多孔杯 (porous cup) 中，和硫酸銅液相隔離，但杯的小孔中，游子可以通過。兩極間的電動勢為 1.08 伏特。其成通路時兩極旁的作用，可用下式表示：



圖 355
丹聶爾電池



故鋅極為負，漸漸消蝕，銅極為正，質量漸增加。硫酸銅液的濃度漸減，故應於液中放置多量的硫酸銅晶體，方可保持液

的濃度。

丹聶爾電池極化作用甚微，故能保持一定的電動勢，但其電流強度於應用時的最大值，僅能達 1 安培。至公元 1854 年所創的重力電池 (gravity cell) 係就丹聶爾電池所改良的一種形式，即如圖 356，利用硫酸銅液和硫酸鋅液的比重不同，使兩液直接接觸，銅極放在器底，而鋅極放在上方，其作用較用多孔杯為大。



圖 356
重力電池

丹聶爾電池，亦稱常流電池 (closed circuit cell)，不用時須常成通路。否則硫酸銅液就透過多孔杯，而擴散於杯中，使鋅極上成氧化銅的沈澱。如成通路時，則因銅游子常向銅極進行，故無這種破壞電池的作用，可知丹聶爾電池應用時頗不經濟。

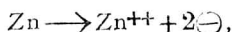
§ 5. 勒克蘭社電池和乾電池

勒克蘭社於公元 1868 年首創的電池，稱為勒克蘭社電池。

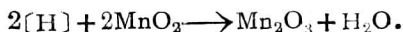
其構造為在一素燒瓷筒內，插一碳板 (圖 357)，周圍填充二氧化錳 (MnO_2) 和炭末等混合物。筒端密封，僅露出碳板。然後將筒放入盛有氯化銨 (NH_4Cl) 液的玻璃器內，液中更浸一鋅棒而成。碳板為正極，鋅棒為負極，其電動勢約為 1.5 伏特。鋅極方面的作用為：



圖 357 勒克蘭社電池



碳極方面的作用爲：



碳極上放出的 NH_3 溶於溶液中，和鋅游子結合，成 $\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$ 。氫爲二氧化錳所吸收，故碳極上雖有氫泡發生，但因二氧化錳的作用，即可不生極化。凡電池中所用的化學藥品，可免除極化的，稱爲去極劑(depolarizer)

勒克蘭社電池應用時，可供給 1 安培至 3 安培的電流，但因去極劑的作用甚緩，故不能繼續供給一定的電流，僅可斷續供給而常用於電鈴的裝置。

乾電池(dry cell)爲勒克蘭社電池的變形(圖 358)，即將氯化銨溶液和石膏、二氧化錳等物混合，成爲糊狀的物質，裝於鋅板製成的圓筒內，碳板即插入其中而成。故乾電池內仍有水分，於鋅筒的上面，常用瀝青密封，以免水分的蒸發。這種電池的作用和勒克蘭社電池相似，惟其外表乾燥，乃有乾電池之名，所以別於前述各種之溼電池。由於攜帶便利，故電鈴和

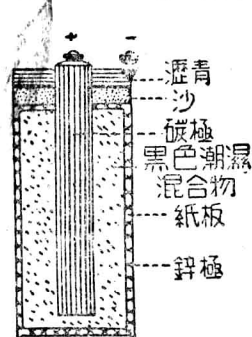


圖 358 乾電池

手電燈內都常應用。

§ . 標準電池

對於各種電池的電動勢，或電路上任何兩點間的電位差，欲得真確的量度，常由已知的標準電動勢，比較而得(p. 175, § 12). 凡取為標準電動勢的電池，稱為標準電池(standard cell). 標準電池有兩種，分述如下：

(1) 葛拉克電池，葛拉克標準電池(Clark standard cell) 的構造，如圖 359，係在 H 形玻璃管的一管中，注以水銀，即為電池的正極，水銀上有糊狀 Hg_2SO_4 ，另一管底裝有鋅汞齊，即為此電池的負極。兩管中更注入硫酸鋅的飽和溶液，為其電解液，液中放有過量的硫酸鋅晶體。兩極用封入管中的鉛線，使和管外相通。此電池的電動勢，在 15°C . 時為 1.433 伏特，若在任何溫度 $t^\circ\text{C}$. 時的電動勢，可由下式求出：

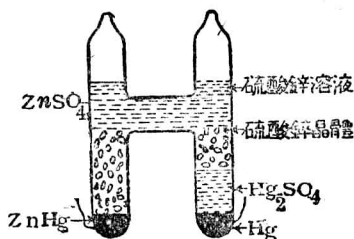


圖 359 葛拉克電池

$$E = 1.433 - 0.00119(t - 15).$$

(2) 衛斯吞電池 衛斯吞標準電池(Weston standard cell) 的構造和葛拉克電池相似，其正極亦為水銀，上和糊狀 Hg_2SO_4 相接，惟其負極則用鎘汞齊(cadmium amalgam)，以代替鋅汞齊，

並用硫酸鎘(cadmium sulphate)溶液代替硫酸鋅溶液,故此電池亦稱鎘電池(cadmium cell). 其電動勢在 20°C . 時為 1.0183 伏特,此數值幾可不隨溫度的改變而生影響,故為最優良的標準電池. 若更欲確定任何溫度 $t^{\circ}\text{C}$. 時的電動勢,可由下式求出:

$$E = 1.0183 - 0.0004(t - 20).$$

1 法定伏特 (legal volt) 的電動勢〔註〕,係根據衛斯吞電池而確定,其定義即:

$$1 \text{ 法定伏特} = \frac{1}{1.0183} \text{ 衛斯吞電池的電動勢.}$$

〔註〕 法定伏特亦稱國際伏特 (international volt),係各國公認而採用的標準單位.

習 題

1. 火花放電和電池供給的電流,有否區別?
2. 何謂電流強度? 導線上的電流強度為 3 安培,在 2 分鐘內通過的電量為若干?
3. 電池的局部作用,何以應設法免除? 其極化的意義如何?
4. 試述丹聶爾電池和勒克蘭社電池的優點和缺點.
5. 乾電池是否絕對乾燥? 若真乾燥,則電池的作用如何?
6. 何謂法定伏特?

第四章 電阻和歐姆定律

§ 1. 電阻

〔表演〕 試用 6 米長的 30 號銅線為導線，和一電池及一電流計 (p. 215, § 9) 相連接，讀出電流計的偏度。再用等長的 30 號鐵線，代替銅線的地位，電流計上的偏度即減少。

水在導管內流動，管內每秒流過的水量當有一定。若在管內充填沙礫，則水的流動較難，流過的水量即較前為少。導線上的電流強度，和導管內水流的情形相像。須依導線的性質而定。由實驗知用同一電動勢的電池，分別連接於形狀雖同而性質不同的各導線上，導線對於電的阻礙，卻各有大小；例如鐵線上的電流強度較用銅線為小，即鐵線對於電的阻礙比銅線為大。凡在電路上的各部分，對於電流的阻礙，稱為各該部分的電阻 (resistance)。

銀為最良的導電物質，故其電阻為最小，其他重要物質的電阻和銀的相比倍數，得列成如下表：

表 31 電阻的比較

銀	1.00	軟鐵	6.00	德銀	18.10
銅	1.11	鉛	7.20	汞	63.10
鋁	1.87	硬鋼	13.50	鎳鉻	63.60

電阻的實用單位為歐姆 (ohm)，1 歐姆即導 兩端受 1 伏

特的電壓，有電流強度恰為 1 安培時的電阻。1 法定歐姆 (legal ohm)，亦稱國際歐姆，即長度為 106.3 厘米，橫截面積為 1 平方毫米的水銀柱，在 0°C . 時對於電流所呈的電阻。如取 10^{-3} 歐姆為單位，稱為 1 微歐姆 (microhm)。如取 10^6 歐姆為單位，稱為 1 百萬歐姆 (megohm)。

§2. 電阻定律

任何一均勻導線，在某一溫度時的電阻，由實驗知依 (1) 導線的長度，(2) 橫截面積，(3) 組成物質的性質而定。凡同一物質製成的均勻導線，所呈的電阻和其長度成正比，和其橫截面積成反比。這個關係，稱為電阻定律 (law of resistance)。設命 l 表示一均勻導線的長度， A 為其橫截面積， R 為其電阻，則電阻定律可表示如下式：

$$R = \rho \frac{l}{A}.$$

式中 ρ 為一常數，其值隨製成導線的物質而定，稱為電阻係數 (specific resistance or resistivity)。如 $l=1$ 厘米， $A=1$ 平方厘米，則 $R=\rho$ 歐姆。故電阻係數可認為 1 立方厘米的立方體，在其相對兩面間所呈電阻的歐姆數。

物質所呈電阻的倒數 $\left(\frac{1}{R}\right)$ ，稱為電導 (conductance)。電阻係數的倒數 $\left(\frac{1}{\rho}\right)$ ，稱為電導係數 (specific conductance or con-

ductivity)。故電導係數可認為長度為 1 厘米，橫截面積為 1 平方厘米的導體，所有的電導，電導的單位為姆歐 (mho)，即將歐姆倒寫而成。

〔例題〕一銅線的長度為 150 厘米，其橫截面的直徑為 0.04 厘米，設銅的電阻係數為 1.643 微歐姆，求此銅線的電阻。

〔解法〕由電阻定律，
$$R = \rho \frac{l}{A},$$

故得
$$R = 1.643 \times 10^{-6} \times \frac{150}{\pi(0.02)^2},$$

$\therefore R = 0.196$ 歐姆。

§ 3. 電阻和溫度

〔表演〕將長約 3 米的 30 號鐵線，繞於石棉板上，和一電池及一低電阻的電流計相連接，讀出電流計的偏度。於是將此鐵線放入火燄中加熱，由偏度的連續減低，可知鐵線的溫度漸增時，其電流強度減低，而電阻連續增加。

由實驗知多數物質的電阻，常隨溫度的升高而增加。凡溫度每變更 1°C ，所生電阻的變化，對於 0°C 時電阻的比值，稱為電阻的溫度係數 (temperature coefficient of resistance)。如命 R 為導線在 $t^\circ\text{C}$ 時的電阻， R_0 為在 0°C 時的電阻， a 為其溫度係數，則電阻和溫度的關係，可用下式表示：

因
$$a = \frac{R - R_0}{R_0 t},$$

故得
$$R = R_0(1 + at).$$

各種導電的物質，如純金屬和多數合金的電阻，均隨溫度的上升而增加，其溫度係數均為正值；但如碳、導電液以及各種絕緣體，如玻璃、大理石等，其電阻均隨溫度的上升而減小，其溫度係數均為負值。幾種合金如錳銅(manganin, 84 Cu, 12 Mn, 4 Ni)、康銅(constantan, 60 Cu, 40 Ni)等的電阻係數較大，而其溫度係數較小，故常用之製成標準電阻。又如德銀(German silver, 60 Cu, 25 Zn, 14 Ni)和鎳鉻(nichrome)等的電阻係數亦大，通常多用於電阻器中。各種主要物質的電阻係數和其溫度係數，在 20°C. 時的數值如下表：

表 32 電阻係數和溫度係數

物質	電阻係數 (微歐姆厘米)	溫度係數 (1°C)	物質	電阻係數 (微歐姆厘米)	溫度係數
金	2.44	0.0034	鉛	22.00	0.0043
銀	1.63	0.0038	汞	95.78	0.0089
銅	1.77	0.0038	錳銅	44.00	0.00006
鐵	10.00	0.0050	康銅	49.00	0.00002
錫	11.50	0.0042	德銀	33.00	0.0004
鋁	2.83	0.0034	鎳鉻	100.00	0.0004
鉑	10.00	0.003	鎳鉻 II	111.33	0.00035

[例題] 銅線的截面積為 0.000591 平方厘米，長度為 100 米，求其在 100°C. 時的電阻(設銅的電阻係數為 1.77×10^{-6} 歐姆厘米，溫度係數為 0.0038)。

[解法] 在 0°C. 時的電阻 $= R = \rho_0 \frac{l}{A}$,

$$\therefore R_0 = 1.77 \times 10^{-6} \times \frac{10^4}{0.000591} = 29.95 \text{ 歐姆,}$$

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

$$\begin{aligned} \therefore R &= 29.95 + 29.95 \times 0.0028 \times 100 \\ &= 29.95 + 11.38 = 41.33 \text{ 歐姆.} \end{aligned}$$

§ 4. 歐姆定律*

德國物理學家歐姆 (Ohm) 於公元 1826 年, 由實驗發見電壓、電流強度、和電阻的關係, 而發表一定律, 稱為歐姆定律 (Ohm's law). 即在一定電路中的電流強度, 和所用的電動勢成正比, 和通路的總電阻成反比. 如用 I 表示電流強度, E 為電動勢, R 為總電阻, 則歐姆定律可列成下式:

$$I = \frac{E}{R}, \quad (1)$$

$$[\text{電流強度(安培)}] = \frac{[\text{電動勢(伏特)}]}{[\text{總電阻(歐姆)}]}.$$

歐姆定律亦可應用於通路中的任何一部分. 設 V 為通路上兩點間的電位差, r 為其電阻, I 為電流強度, 則得

$$I = \frac{V}{r}, \quad (2)$$

$$[\text{電流強度(安培)}] = \frac{[\text{電位差(伏特)}]}{[\text{電阻(歐姆)}]}.$$

* 驗實 29, I.

歐姆定律為電學中重要定律的一個，茲再申述其應用的要點如下：

(1) 歐姆定律僅適用於金屬和電解液中的連續電流。其電流強度和流動方向均有一定，而無變化。

(2) 通路上的總電阻如已有一定，則用一定的電動勢時，其電路上各點的電流強度均相同。

(3) 歐姆定律不但適用於一通路的全部分(如 1 式)，且對於此通路中的任何一部分，亦可適用(如 2 式)。

(4) 通路上有連續電流，其各點的電位漸次順電流的方向而降落。凡電路上任何兩點間的電位差，亦稱為電位降落 (drop of potential, fall of potential or voltage drop)。如兩點間的電阻和電流強度均為已知數，則由(2)式，可知這部分的電位降落，即等於電流強度和其電阻的乘積。

(5) 由歐姆定律，可推知一串聯通路中所用的電動勢，即等於其連續各部分上，沿電流方向所得電位降落的總和。

[例題] 如圖 360，設 AD 間的總電阻為 60 歐姆，若用 60 伏特的電壓，施於 A 和 D 上。而 AD 間可分成 10, 20, 和 30 歐姆的三部分電阻。試求(1)每一電阻

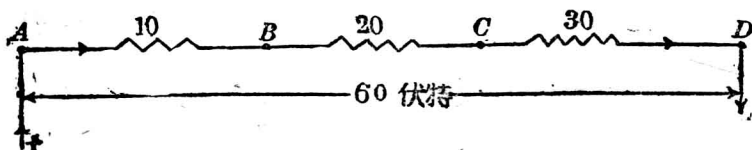


圖 360

中通過的電流強度，(2)每一電阻上兩端間的電位降落。(3)比較各部分電位降落的總和，和所用的電壓。

〔解法〕(1) 電路 AD 間的電阻已有一定，故用 60 伏特施於兩端時，其任何部分的電流強度均相同，可由歐姆定律求得，即

$$I = \frac{60}{60} = 1 \text{ 安培.}$$

(2) 設命 V_1, V_2 和 V_3 表示 10, 20 和 30 歐姆各部分上的電位降落，則由歐姆定律，得

$$V_1 = I \times 10 = 1 \times 10 = 10 \text{ 伏特,}$$

$$V_2 = I \times 20 = 1 \times 20 = 20 \text{ 伏特,}$$

$$V_3 = I \times 30 = 1 \times 30 = 30 \text{ 伏特.}$$

(3) $V_1 + V_2 + V_3 = 10 + 20 + 30 = 60$ 伏特。

故 AD 間的電壓 $= V_1 + V_2 + V_3 =$ 各部分電位降落的總和。

§ 5. 電阻的組合

設有若干個電阻互相聯結，以供電路上的應用時，稱為電阻的組合(combination of resistances)，組合的方法有二：

(1) 串聯 如就若干個電阻的各端，順次連接，如圖 361 的組合法，稱為電阻的串聯(resistances connected in series)。凡串聯的各電阻，如插接於一電路中時，則各電阻中通過的電流強度相同。凡一單獨的電阻，可以代表若干個電阻聯結時的有效數值。稱

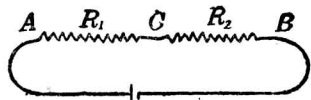


圖 361 串聯的電阻

爲組合電阻(combined resistance or resulting resistance). 串聯時組合電阻的兩端, 所受的電壓, 必等於各電阻兩端電壓的總和. 設如圖中, R_1 和 R_2 爲兩個串聯的電阻, 並命 V 表 AB 間的電壓, V_1 和 V_2 各表 AC 和 CB 間的電壓, I 爲電流強度, R 表 AB 間的組合電阻. 則得

$$V = V_1 + V_2,$$

但因 $V_1 = IR_1, \quad V_2 = IR_2, \quad V = IR,$

故 $IR = IR_1 + IR_2.$

或 $R = R_1 + R_2.$

故各電阻的組合如爲串聯時, 則其組合電阻的數值, 必等於各部分電阻的總和.

(2) 並聯 設有若干個電阻平行排列, 將其每一端均連接於一處, 成一公共接點(common junction), 而各電阻的他端亦連接而成一公共接點, 如圖 362 的接法, 稱爲電阻的並聯(resistances connected in parallel). 設 V 表兩公共接點 A 和 B 間的電阻, 則每一電阻 R_1 或 R_2 的兩端, 所受的電壓必相同. 但電流 I 自接點 A 通入時, 卻分爲兩路, 其經 R_1 上的電流爲 I_1 , 而經 R_2 上的電流爲 I_2 . 此兩部分電流至接端 B 即匯集, 而再等於 I , 故得

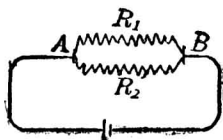


圖 362 並聯的電阻

$$I = I_1 + I_2.$$

設 R 為 AB 間的組合電阻，則由歐姆定律，得

$$I = \frac{V}{R}, \quad I_1 = \frac{V}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V}{R_2}.$$

故

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2},$$

或

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

即若干個電阻的組合如為並聯時，則其組合電阻的倒數，等於各電阻的倒數的總和。若用 n 個相等的電阻並聯時，則其組合電阻必為每一電阻的 $\frac{1}{n}$ 。故若干個電阻並聯時，可得較小的組合電阻。

[例題 1] 設有 10, 15 和 20 歐姆的三個電阻，互相並聯，求其組合電阻。

[解法] 因
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{10} + \frac{1}{15} + \frac{1}{20} = \frac{6+4+3}{60},$$

$$\therefore R = \frac{60}{13} = 4.6 \text{ 歐姆}.$$

[例題 2] 設有三個電阻，各為 15 歐姆，求其串聯和並聯時，各得的組合電阻。

[解法] 串聯時的組合電阻為

$$15 \times 3 = 45 \text{ 歐姆}.$$

並聯時的組合電阻為

$$\frac{15}{3} = 5 \text{ 歐姆}.$$

§ 6. 分路

如兩電阻並聯時，則每一電阻對於其他的一電阻，稱為分路 (shunt)。如圖 363，電阻 S 即為電阻 R 的分路。設 I_1 為未接分路時電阻 R 上的電流，若將 S 和 R 並聯後，則電流分兩路通過，此時通過 R 的電流 I_1 僅為總電流的一部分，另一部分的電流 I_2 則由 S 通過，如果 a, b 兩公共點間的電壓不變，由兩電阻並聯，其組合電阻必為 $\frac{RS}{R+S}$ ，可推知未接分路時與已接分路時電流強度的關係，和通過各分路上的電流強度。假定已接分路時的總電流為 I ，則根據歐姆定律：

$$E = I \frac{RS}{R+S}$$

$$E = I_1 R \quad E = I_2 S$$

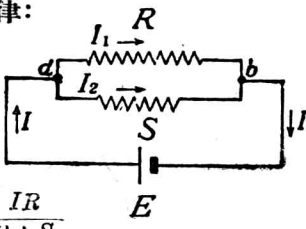
$$\therefore I_1 = \frac{IS}{R+S} \quad I_2 = \frac{IR}{R+S}$$


圖 363 分路

$$I_1 + I_2 = I \left(\frac{S}{R+S} + \frac{R}{R+S} \right) = I$$

從上列各式可知：(1) 通過各分路的電流與該分路的電阻的倒數成正比。(2) 在同一電壓下，已接分路之總電流必較未接分路時為強，而各分路上的電流並不因其他分路的存在而生影響。

電學上時常應用到分路，尤其是遇到所須量度的電流超過

電流計的最高量度時，多應用分路以補救之。例如有一電流計其內電阻為 r ，最大量度為 1 安培，今欲將其最大量度提高至 10 安培，只要並聯一電阻為 $\frac{r}{9}$ 的分路而通過此超出之 9 安培電流即可達到目的。

§ 7. 電池的電動勢和內電阻

[表演] 取一高電阻的電流計，或一伏特計，連接於簡單電池的兩極，讀出偏度或伏特數。如將兩極間的距離改變，則偏度或伏特數並不改變。更將極板浸在液中的面積增減，可知偏度或伏特數仍始終不變。若將兩極所用的物質，或電解質變換，則偏度或伏特數就各不同。

由實驗知每一電池的電動勢，僅依電極和電解液的性質而定，和極板間的距離及浸在溶液中的面積並無關係。

[表演] 將一簡單電池的兩極，和一低電阻的電流計，或一安培計相連接，讀出其偏度或安培數。若增加兩極間的距離，則偏度或安培數即減少，表示電流強度已改變。更將兩極浸在液中的面積減少，其偏度或安培數亦必減少。

電池和一電阻連成通路時，其外電路的電阻，稱為外電阻 (external resistance)。由實驗知電池的電動勢有一定；當其外電阻不改變時，若將其兩極在液中的距離，和浸在液中的面積改變，電流強度均即改變。由歐姆定律，可知電解液對於電流的通過，亦呈相當的電阻。凡電池的電解液所呈的電阻，稱為內電阻 (internal resistance)。內電阻的大小，和兩極間的距離成正比，和浸在液中的面積成反比。設 R 表示電池成通路時的外電阻， r 表示電池的內電阻，則歐姆定律應用於總電路時，因總電阻等

於 $R+r$, 故可列成下式:

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

由上式可知電池電動勢 $E = IR + Ir$, 其中 Ir 的部分, 即為電池中因內電阻而生的電位降落, 而 IR 即為電池和外電阻 R 連接時, 其兩極所示的電壓, 這個電壓, 稱為電池的端電壓 (terminal voltage). 故電池的端電壓, 即等於電動勢和內電阻電位降落的差數, 即 $E - Ir$, 其數值常較電動勢為小 且隨外電阻的大小而定. 電池成斷路時, 並無電流發生, 故其兩極間的電壓即為電動勢.

〔例題 1〕 設電池的電動勢為 1.5 伏特, 其內電阻為 5 歐姆. 如和外電阻 10 歐姆連接, 成通路時, 則其電流強度和電池的端電壓各為若干?

〔解法〕 由歐姆定律, 得

$$I = \frac{1.5}{10+5} = 0.1 \text{ 安培.}$$

內電阻的電位降落 $= 0.1 \times 5 = 0.5$ 伏特,

故 電池的端電壓 $= 1.5 - 0.5 = 1$ 伏特,

或 電池的端電壓 $= 0.1 \times 10 = 1$ 伏特.

〔例題 2〕 設有一電池組和外電阻相連接, 如圖 364 的情形. 電池的內電阻為 2 歐姆, 外電阻 R_1 , R_2 和 R_3 各為 4, 12 和 7 歐姆, 電池供給的電流強度為 3 安培. 求 (1) 外電阻的組合電阻, (2) R_1 和 R_2 兩接點間的電壓, (3) R_3 的電位降落, (4) 內電阻的電位降

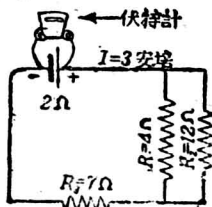


圖 364

落；(5)電池的電動勢。(6)如用一伏特計接於此電路中電池的兩極時，應表示若干伏特？(7) R_1 和 R_2 經過的電流強度，各為若干？

〔解法〕(1) 先求 R_1 和 R_2 並聯的組合電阻，再和 R_3 串聯，求其總和。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4} + \frac{1}{12} = \frac{1}{3}, \quad R = 3 \text{ 歐姆.}$$

故外電阻的組合電阻為

$$3 + 7 = 10 \text{ 歐姆.}$$

$$(2) \quad V_1 = IR = 3 \times 3 = 9 \text{ 伏特.}$$

$$(3) \quad V_2 = IR_3 = 3 \times 7 = 21 \text{ 伏特.}$$

$$(4) \quad V_3 = Ir = 3 \times 2 = 6 \text{ 伏特.}$$

$$(5) \quad E = V_1 + V_2 + V_3 = 9 + 21 + 6 = 36 \text{ 伏特.}$$

(6) 伏特計上所示的數值，即為電池的端電壓，等於 $E - V = 6 = 30$ 伏特，或等於 $3 \times 10 = 30$ 伏特。

$$(7) \text{ 因} \quad \text{兩接點間的電壓} = 9 \text{ 伏特,}$$

$$\text{故} \quad R_1 \text{ 上的電流} = \frac{9}{4} = 2.25 \text{ 安培.}$$

$$R_2 \text{ 上的電流} = 3 - 2.25 = 0.75 \text{ 安培.}$$

$$\text{或} \quad \frac{9}{12} = 0.75 \text{ 安培.}$$

§ 8. 電池的組合

如用若干個電池連接，即得電池的組合 (combination of cells)。組合的一組電池，總稱為電池組 (battery)。其組合方法，有串聯和並聯等。

(1) 串聯 若將數個電池的正極和負極，順次連接，如圖

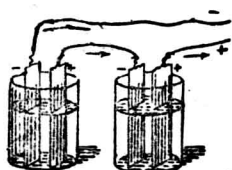


圖 365 串聯的電池

365 的組合法 稱為電池的串聯 (cells connected in series). 其最外兩極間的電動勢，等於各電池電動勢的總和。設每個電池的電動勢為 E ，則 n 個相同的電池串聯時，其總電動勢必為 nE 。又設

R 為外電阻， r 為每個電池的內電阻， I 為電流強度，則依歐姆定律得

$$I = \frac{nE}{R + nr} \quad (1)$$

(2) 並聯 若將數個電池的同極相連接，如圖 366 的組

法，稱為電池的並聯

(cells connected in

parallel)。設每個電池的

電動勢為 E ，內電阻為

r ，則 n 個相同的電池

並聯時，兩接點間的電

動勢仍為 E 。如和外電

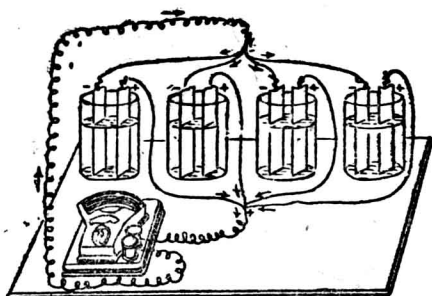


圖 366 並聯的電池

阻 R 連接，成一通路時，則兩接點間的內電阻，必為 $\frac{1}{n}r$ ，故由歐姆定律，得

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} \quad (2)$$

凡外電阻較電池的內電阻為大時，如欲得強電流，常用串聯的組合法。若此時用並聯，則由(2)式，得

$$I = \frac{nE}{nR + r}$$

式中 nR 較 r 大甚， r 幾可略去不計，故雖用 n 個電池連接，但其作用仍和一箇電池相當，就不能供給較強的電流。凡內電阻較外電阻為大時，欲得強電流，常用並聯的組合法。因此時如用串聯，則由(1)式， R 可略去不計，故僅得一個電池的作用，而不能達到目的。

〔例題1〕 6個電池串聯，成一電池組，和一外電阻為3.6歐姆相連接。設每一電池的電動勢為1.8伏特，其內電阻為0.3歐姆，求任何一電池上的端電壓。

〔解法〕 先求電流強度，得

$$I = \frac{6E}{R + 6r} = \frac{6 \times 1.8}{3.6 + 6 \times 0.3}$$

$$= \frac{10.8}{0.4} = 2 \text{ 安培。}$$

然後可由兩種解法，以求出所需的結果。

(a) 求出外電阻兩端的電壓，以推求每一電池的端電壓。

$$V = IR = 2 \times 3.6 = 7.2 \text{ 伏特。}$$

故每一電池的端電壓為

$$\frac{7.2}{6} = 1.2 \text{ 伏特.}$$

(b) 求出每一電池因內電阻而生的電位降落，以推求其端電壓。

$$Ir = 2 \times 0.3 = 0.6 \text{ 伏特.}$$

故每一電池的端電壓為

$$E - Ir = 1.8 - 0.6 = 1.2 \text{ 伏特.}$$

[例題 2] 用上例的數據，求此 6 個電池並聯時，每一電池的端電壓。

[解法] 先由歐姆定律，求電流強度。

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{6}} = \frac{1.8}{3.5 + \frac{0.3}{6}}$$

$$= \frac{1.8}{3.65} = 0.49 \text{ 安培.}$$

(a) 電池組的端電壓 $= 0.49 \times 3.6 = 1.76 \text{ 伏特.}$

因電池為並聯，故每一電池的端電壓均為 1.76 伏特。

(b) 0.49 安培為 6 個電池供給的電流，故每一電池供給的電流，必為

$$\frac{0.49}{6} = 0.081 \text{ 安培.}$$

每一電池內電阻所生的電位降落為

$$0.081 \times 0.3 = 0.024 \text{ 伏特.}$$

故每一電池的端電壓為

$$1.8 - 0.024 = 1.76 \text{ 伏特.}$$

§ 9. 電阻箱和變阻器

如用錫箔、康銅或德銀等的導線，繞於硬橡皮管上，以成各種變阻電阻線器。

(resistance coil), 並將各線圈的電阻由精密測定的調準, 使爲 1 歐姆的整倍數, 或其十進分數, 然後如圖 367, 將線圈的兩端, 各和黃銅塊 A, B, C 等銲接。此等銅塊均各相間隔, 而固定於一硬橡皮板上。再用此板爲一木箱的箱蓋, 使板下的各線圈均藏在箱中。這種裝置, 稱爲電阻箱(resistance box), 如圖 368 的形式, 爲實驗室中常用的已知電阻箱, 箱上各銅塊間如插入黃銅插頭(plug)時, 即可使銅塊連通; 每一最外的銅塊, 各和一接線柱(binding post)連接, 以便插接於電路中。當應用電阻時, 如將黃銅插頭拔去, 則電流須經過電阻線圈, 由板上所刻電阻的數值, 且因各線圈均爲串聯, 故由拔去各插頭處的數值, 求其總和, 即爲應用的總電阻, 計算便利。

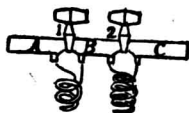


圖 367

電阻線圈的排列

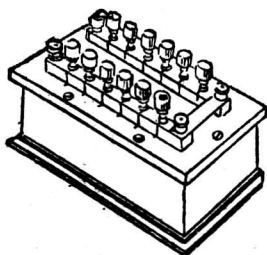


圖 368 電阻箱

對於普通電路中, 欲使其電阻增加或減少, 而不必作精密的量度時, 所用的可變電阻, 稱爲變阻器(rheostat)。變阻器的形式甚多, 茲舉下列的兩例, 以明其應用。

(1) 滑觸變阻器 如圖 369, 若用德銀或康銅的瓷漆線(enamelled wire), 繞在絕緣的瓷圓筒上, 則因線圈均敷有瓷漆, 故不相連通, 線的兩端各銲接於兩方的接線柱, 如將兩接線柱插接於電路中, 即可應用全部分的電阻。但在線圈筒的上方有平行的金屬棒一根, 棒的右端亦有一接線柱。棒上套有滑動接頭(sliding

contact), 可緊壓於線圈上, 並因接觸部分的殼漆已刮去, 故如將左下方的接線柱和棒端的接線柱, 插接於電路中時, 則可應用全線圈的左方一部分的電阻. 由接頭的移動, 即可任意變更電阻的大小. 這種電阻, 稱為滑觸變阻器 (slide rheostat).

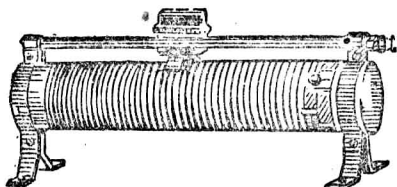


圖 369 滑觸變阻器

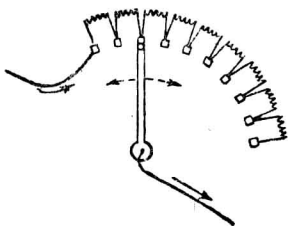


圖 370 曲柄變阻器

(2) 曲柄變阻器 如圖 370, 將各黃銅塊排成一圓弧形, 銅塊間各接一電阻線圈. 更用曲柄的一端固定於圓心, 而他端可在銅塊上滑動, 亦可變更所用電阻的大小. 這種電阻, 稱為曲柄電阻器 (crank rheostat).

§10. 電阻的量度

通常對於量度外電阻的簡單方法, 有代替法 (method of substitution)、比較法 (comparison method)、和安培計-伏特計法 (ammeter-voltmeter method) 等.

(1) 代替法 如將一待測電阻和一電流計串聯, 而連接於一丹聶爾電池, 記出電流計的偏度. 然後將待測電阻自電路中移去; 而用一電阻箱插接, 以代替其位置, 拔去電阻箱上的插頭, 調準電阻, 直至電流計顯示和前同一的偏度為止. 因兩次所用的電動勢和所得的電流強度均相同, 故由歐姆定律, 可知電阻

箱上所示電阻的總和，即為待測電阻的數值。

(2) 比較法 如將一標準電阻 R ，和一待測電阻 R' 串聯於一定電動勢的電池組，於是用一伏特計，先量得 R 的電位降落為 V 伏特，再量得 R' 的電位降落為 V' 伏特。設 I 為電流強度，則由歐姆定律，可由標準電阻的比較，以推求待測電阻的數值。

$$\text{因} \quad V = IR, \quad V' = IR',$$

$$\text{故} \quad R' = \left(\frac{V'}{V}\right)R.$$

(3) 安培計 - 伏特計法

此法係直接應用歐姆定律而求出待測電阻的數值。如圖 371，將一安培計和待測電阻 C 串聯，以通於電池組。再用一伏特計和電阻的兩端並聯，由兩計上讀得的安培數和伏特數，即得 $R = V/I$ 。

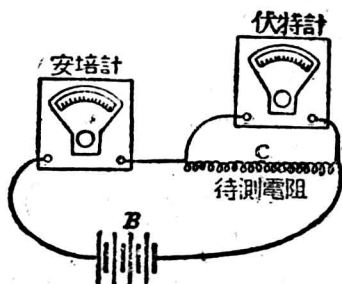


圖 371 電阻的量度

電池的內電阻，可由下列例題，說明其簡單量度法。

【例題】一電池和一變阻器及安培計相串聯，並用一伏特計和此電池並聯。如先讀得電池的端電壓為 1.5 伏特，電流強度為 0.01 安培，然後減少外電阻，再記得端電壓為 1.0 伏特，電流強度為 0.15 安培。求此電池的內電阻。

【解法】由歐姆定律，得下列兩式：

$$E - 1.5 = 0.01r,$$

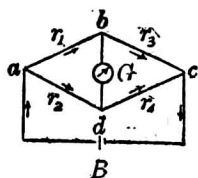
$$E - 1.0 = 0.15r,$$

由兩聯立方程式，即可求得 $r = 3.5$ 歐姆。

§ 11. 惠斯登電橋*

電阻的量度，除上述的簡單方法外，如欲得一精密而簡便的量度法，可用惠斯登電橋 (Wheatstone bridge)。如圖 372，

r_1, r_2 和 r_3 為三個可變標準電阻，和一待測電阻 r_4 連接，成一網絡(network)。a 和 c 兩接點，和一乾電池相連接，b 和 d 間，接一電流計 G，即稱為電橋。



先將 r_1 和 r_3 的電阻配定一比率，故此兩電阻常稱為比率臂 (ratio arm)。然後將 r_2 配合，使 b 點和 d 點的電位恰相等，那麼 b, d 間就無電流，故電流計就不生偏度。設用 V_1 表示 a, b 或 a, d 間的電位降落， V_2 表示 b, c 或 d, c 間的電位降落， I_1 為 abc 分路間通過的電流強度， I_2 為 adc 分路間通過的電流。則由歐姆定律，得：

$$V_1 = I_1 r_1 = I_2 r_2 \quad (1)$$

$$V_2 = I_1 r_3 = I_2 r_4 \quad (2)$$

如用(2)式除(1)式，則得

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4}.$$

*實驗 31.

由上式，可知電流計中不生偏度，或橋上無電流通過時，則 $\frac{r_1}{r_3}$ 的比值恰和 $\frac{r_2}{r_4}$ 的比值相等。因 r_1, r_2 和 r_3 均為已知電阻，故未知電阻 r_4 就可測定。

惠斯登電橋中的三個已知電阻，如裝於一匣內，而便於攜帶的一種形式，稱為郵局電阻 (post office beidge)。凡用 1 米的均勻德銀導線 AB ，上有一滑動接頭 (圖 373)，可將導線分成 m

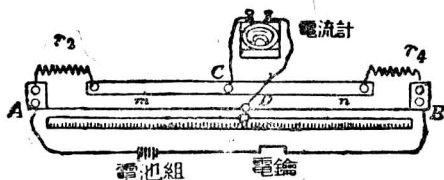


圖 373 滑線電橋

和 n 兩部分的長度，以代替 r_1 和 r_3 的比率臂，並用一電阻箱 r_2 ，和未知電阻 r_4 各接於橋的左右兩空隙處，即稱為滑線電橋 (slide wire bridge)。這種形式的電橋，實驗室中均多採用，而未知電阻 r_4 ，可由下式求出：

$$r_4 = \frac{n \text{ 部分的長度}}{m \text{ 部分的長度}} \times r_2.$$

§ 12. 電位計*

電動勢或電位差的量度，普通可用伏特計。但欲作精密的

*實驗 30。

量度時，應用電位計(potentiometer)。最簡單的電位計，係用一均勻的高電阻導線，如圖 374 中的 ab ，連接於有電池組 B 和變

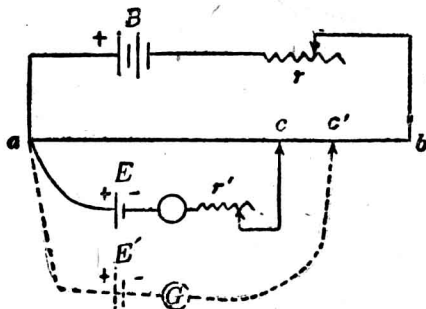


圖 374 電位計

阻器 r 的幹路(main circuit)中。先由 a 端連接一分路 aEc ，中含一標準電池 E ，其電極和電池組 B 的同種電極相連。再有電流計 G ，及變阻器 r' 。 c 為線上的滑動接頭。若線上 ac 間的電位降落恰和標準電動勢 E 相等時，則分路上即無電流，電流計中即不生偏度。變阻器 r' 係保護電流計和標準電池，使於未平衡時，無大量的電流通過分路，至恰能平衡時，可將 r' 除去，而得偏度有無的精密確定。設 R 為 ac 間線上的電阻， I 為幹路上電流強度，則當分路中電流計不生偏度時，得：

$$E = IR \quad (1)$$

再用未知電動勢 E' 的電池，或另一電路上兩點間的未知電位差，代入標準電池的地位，用同法將滑動接頭移至線上 c'

點時，電流計中亦不生偏度。如 R' 為 ac' 間的電阻，則得：

$$E' = IR' \quad (2)$$

由(1),(2)兩式，可知

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

又因均勻導線的電阻和其長度成正比，故若量出 ac 和 ac' 的相當長度各為 l 和 l' ，則上式可列成：

$$E' = \frac{l'}{l} E.$$

式中標準電動勢 E 有一定的數值 (p. 153, § 6)，故由此比例式，即可求出未知電動勢。

習 題

1. 何謂法定歐姆？
2. 若銅的電阻係數為 0.000018 歐姆厘米，求長度為 150 米，直徑為 1.6 毫米的銅線，所呈的電阻。
3. 兩導線的性質和長度均相同，各有 4 和 9 歐姆的電阻，設一個導線的直徑為 1 毫米，則第二個導線的直徑為若干？
4. 一銀片的長度為 10 厘米，寬度為 0.5 厘米，厚度為 0.1 毫米，求全長度間的電阻。
5. 鋁的密度為 2.7 ，問長為 1 米，重為 1 克的鋁線，所呈的電阻為若干？
6. 有兩個導線，一為鋁線，一為銅線。如兩導線的長度相同而呈相同的電

阻時，則其重量的比率如何？已知鋁和銅的密度的比率為 $1:2.5$ ，而其電阻係數的比率為 $1:0.55$ 。

7. 在 0.25 歐姆的電阻上，如接以 12 伏特的電壓，則電流強度為若干？

8. 將 5 歐姆和 8 歐姆的兩個線圈並聯，其總電阻為若干？

9. 設有 4 歐姆和 12 歐姆的兩電阻並聯後，再接至含有 13 歐姆的電路上。求電路的總電阻。

10. 有一電阻 300 歐姆，如加一分路而連接於電路上，可使通過電阻上的電流強度為總電流的 $\frac{1}{10}$ 。求此分路的電阻。

11. 有一電路，係由兩個導線並聯而成，其電阻一為 5 歐姆，一為 20 歐姆。已知通過這組電阻上的總電流為 5 安培，求這個電路的電壓，和各導線中通過的電流。

12. 將一均勻導線彎成一連接的正方形，如每邊的電阻為 r 歐姆，試求兩相對角間連接於電路上所呈的電阻。

13. 試將上問中的正方形，取其任何一邊的兩端，插入電路中，則其電阻為若干？

14. 電池的電動勢依何而定？

15. 電池的電動勢和端電壓，有何區別？

16. 一電池的電動勢為 1.43 伏特，其內電阻為 2 歐姆。如和 25 歐姆的電阻連接，則電路上的電流強度為若干？

17. 當外電阻為 9 歐姆時，則所用的電池組，可供給 0.43 安培。若此電路上的外電阻增加至 32 歐姆時，則電流變為 0.2 安培。求此電池組的內電阻。

18. 一丹聶爾電池的電動勢為 1.08 伏特，其內電阻為 3 歐姆。如用這種電池 8 個，和 30 歐姆的電阻串聯，則其電流強度為若干？

19. 乾電池的電動勢為 1.5 伏特，其內電阻為 2 歐姆。如在所接外電阻 40 歐

姆上，欲得 1 安培的電流，須用乾電池若干個？

20. 有一電池組，係 40 個丹聶爾電池串聯而成。如和 280 歐姆的電阻連接，則得 0.054 安培的電流。若外電阻增加至 1:8 歐姆時，則電流變為原數的一半。求每一電池的電動勢，和其內電阻。又當外電阻為 280 歐姆時，此電池組兩端的電壓為若干？

21. 有電池 3 個，每一電池的電動勢為 2 伏特，內電阻為 0.5 歐姆。如將其並聯後，和一 8 歐姆的外電阻連接，則每一電池中和外電阻中經過的電流為若干？此時每一電池的端電壓為若干？

22. 有 6 個電池，每一電池的電動勢為 2 伏特，內電阻為 0.5 歐姆。若將每 3 個電池串聯成一組後，再將二組的兩端並聯起來，然後和 20 歐姆的外電阻相連接，求每列電池組中和外電阻中經過的電流強度。

23. 將電動勢為 1.8 伏特的電池，和一較小的未知電動勢的一電池依反對方向串聯（即同極相連接）。再和一 400 歐姆的電阻連接，而得相當的電流。若再將兩電池順次串聯，欲得和前相等的電流時，則所需的電阻應增至 4000 歐姆。設兩個電池的內電阻甚小，而可以不計時，試求此電池的未知電動勢，並求出電流的數值。

24. 設有 60 個電阻串聯於一電路上，如每一電阻為 3 歐姆，所需的電流為 6 安培，則對於此組電阻的兩端，應施以若干電壓？

25. 有一發電機，供給並聯電燈 5000 盞所需的電流。設每一電燈的電阻為 20 歐姆，線路的電阻為 1 歐姆，發電機的內電阻為 0.5 歐姆，則當發電機的電動勢為 20 伏特時，供給的總電流為若干？

第五章 電流的熱效應

§ 1. 電能和電功率

由 p. 137, § 2, 知在兩導體的電位差為 $V - V'$ 時, 如將電量 q 移動, 則其所成的功 W , 可用下式表示:

$$W = q(V - V').$$

若在導線上兩點間的電壓為 V , 如有連續的穩定電流 I 通過時, 則由同理, 及 $q = It$ (p. 146, § 1), 可知電流在此兩點間所成的功, 亦可用下式表示:

$$W = IVt \quad (1)$$

上式為電流在電路中一部分所成的功. 如就電路的全部分而論, 則通路上所用的電動勢 E , 即等於一單位電量, 繞全電路而流動一周時所成的功. 故 q 單位電量所成的功, 必為:

$$W = qE,$$

或
$$W = IEt \quad (2)$$

凡電流在通路中的一部分, 或全部分所成的功, 即等於電路中消耗的一部分, 或全部分的能量. 這種能量, 稱為電能 (electric energy). 由(1)、(2)兩式, 即可計算電能, 式中如各量均取實用單位, 則得其關係為:

$$\text{焦耳} = \text{安培} \times \text{伏特} \times \text{秒}.$$

電功率(electric power)和普通功率的定義相同，即為電流在電路中的作功速率。如此率均勻而有一定，則可用每單位時間內所能供給或消耗的電能來表示，而得下式：

$$[\text{電功率}] = \frac{[\text{電能}]}{[\text{時間}]}$$

如用 P 表示電路上任何一部分的電功率， V 為此部分的電壓， I 為電流強度，則得：

$$P = IV \quad (3)$$

如就全部分而論，則得

$$P = IE \quad (4)$$

式中的各量如均取實用單位，則得其關係為：

$$\frac{\text{焦耳}}{\text{秒}} = \text{安培} \times \text{伏特},$$

或 $\text{瓦特} = \text{安培} \times \text{伏特}.$

商業上通用的電能單位為仟瓦小時 (kilowatt hour)，俗稱電度，即因功為功率和時間的乘積而定。1 瓦特為每秒 1 焦耳的功，或 1 瓦特秒 (watt second) 即為 1 焦耳，故 1 仟瓦小時 = 1,000 瓦特 \times 3,600 秒 = 3,600,000 焦耳。凡電燈和電熱器上常表明應用的瓦特數，如用電的時間有一定，則消耗的電能即可算出，更依每仟瓦小時的價格，即可算出應付的電費。

§ 2. 焦耳定律

電流通過電路的各部分時，常發生熱量，此熱量即由電能變換而成，稱為電流的熱效應(heating effect of current)，焦耳由實驗的結果，發見導線上電流所發的熱量，和其電阻，電流強度的平方，以及電流通過的時間成正比。這個關係，稱為焦耳定律(Joule's law)。

設 I 為電流強度的安培數， R 為電阻的歐姆數， t 為時間的秒數， H 為熱量的卡數，則焦耳定律可用下式表示：

$$H = 0.24 I^2 R t.$$

上式亦可由理論推得。設 V 為電阻 R 的兩端所受的電壓，則因電能變成熱能，故由

$$W = IVt,$$

和

$$W = JH,$$

得

$$H = \frac{W}{J} = \frac{IVt}{J}.$$

更由歐姆定律； $V = IR$ ，而 $J = 4.2$ 焦耳/卡，

故

$$H = \frac{I^2 R t}{4.2},$$

或

$$H = 0.24 I^2 R t.$$

電功率除由 $P = IE$ 瓦特計算外，可知由熱量亦可算出，即

$$P = I^2 R \text{ 瓦特,}$$

或

$$P = \frac{I^2 R}{4.2} \text{ 卡/秒,}$$

即

$$P = 0.24 I^2 R \text{ 卡/秒.}$$

例題 1] 一導線上兩端的電壓為 20 伏特，電流為 3.5 安培。求 (1) 5 分鐘內電流作功的焦耳數。(2) 導線上消耗的功率為若干瓦特？並用每秒卡數表出。(3) 導線上發生的熱量，在 5 分鐘內，共為若干卡？

[解法] (1) $W = IVt = 3.5 \times 20 \times 5 \times 60 = 21,000$ 焦耳。

$$(2) P = IV = 3.5 \times 20 = 70 \text{ 瓦特.}$$

$$P = 3.5 \times 20 \times 0.24 = 16.8 \text{ 卡/秒.}$$

$$(3) H = 3.5 \times 20 \times 0.24 \times 5 \times 60 = 5,040 \text{ 卡.}$$

[例題 2] 一電燈的電壓為 220 伏特，欲通過 3 安培的電流，應需若干馬力？

[解法]

$$P = 220 \times 3 \text{ 瓦特}$$

$$= \frac{220 \times 3}{746} \text{ 馬力}$$

$$= 0.885 \text{ 馬力.}$$

§ 3. 白熾燈*

白熾燈 (incandescent lamp) 即普通所稱的電燈，係利用電流的熱效應，而得強光的裝置。美國愛迪生 (Edison) 經四十餘年的實驗，至公元 1880 年，最初發明一實用的碳絲燈 (carbon filament lamp)，係在真空的燈泡 (bulb) 內，封入一碳絲，在其兩端

*實驗 33。

用鉑線導出泡外，如圖 375 的形狀。泡內因為高度真空，故碳絲通電時，即熾熱發光而不起氧化。碳絲的電阻隨溫度的增高而減小，其在熾熱時的溫度，約為 1800°C 。每 1 燭光所耗的功率，約為 3.75 瓦特。燈的壽命 (life of the lamp) 約為 1,000 小時。

熾熱物體的溫度如愈高，則其輻射的總能量中，光能所占的百分數愈大。碳絲的溫度不能超過 2000°C ，所發的光常帶黃色，過熱時易於揮發，使燈泡的內層變黑，故其後對於燈絲，加以改

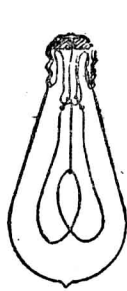


圖 375 碳絲燈



圖 376 鎢絲燈

良，採用不易熔解的金屬絲 (metallic filament)，以代替碳絲。最初應用的為鐵絲燈 (osmium filament lamp) 和鈿絲燈 (tantalum filament lamp)。至公元 1906 年後，即得現今通用的鎢絲燈 (tungsten filament lamp)。如圖 376， w, w 為由鎢絲導出泡外的導線，一端銲接插頭的底部 A ，一端通至其側部 B ，即成螺旋式插頭，和燈座 (lamp socket) 的陰螺旋相接合。但市上通用的一種插頭，則兩導線均通至其上部互相絕緣的錫條上，而直接插入燈座內。導線由泡內通出時，經過一玻璃柄，其線脹係數應和玻璃的相同，以免因熱生隙，而漏入空氣。泡內不但需達高度真空，且須將泡至少加熱至 300°C ，並放置少量的紅磷。以

除去泡內微量的水汽，而免鎢絲氧化。鎢絲燈每 1 燭光所耗的功率，約為 1.25 瓦特，其壽命約為 100 至 2000 小時。

若在鎢絲燈內，再封入鈍氣(inert gas)，如氮或氬 (argon) 等，即成盛氣燈(gas-filled lamp)，則鎢的揮發可以減少。且將極長的燈絲曲成細小的螺旋狀，以減小熱的輻射，如圖 377 的形狀，故燈絲的溫度更可升高至 $3700^{\circ}\text{C}.$ ，而光度增加。每燭光所耗的功率，約可減至 0.6 瓦特。

白熾燈中燈絲兩端的電壓均有一定，普通為 220 伏特和 110 伏特的兩種，手電筒內的燈泡可小至

1.5 伏特。因燈絲各有一定的電阻，故電壓大的燈泡如接至較低的電壓上，則功率不足，光度不能達其正常情形，而電壓小的燈泡更不可接至較高的電壓上，否則燈絲受有過量的電流強度，所發的熱量，即使其達熔解的溫度，而致斷去。

§ 4. 弧光燈

如將兩碳棒的一端互相接觸，而接至 10 伏特以上的電壓間，則其接觸處因電阻甚大，而發生紅熱(red-hot)。然後將其稍稍分離，其空隙間即發生弧狀火燄，稱為電弧(electric arc)。電弧的現象首由英國德維(Davy)，於公元 1800 年開始研究。因棒



圖 377 盛氣燈

端發生電弧時，即熾熱而光度甚強，故可用作光源，而稱爲弧光燈(arc lamp)。設電流由一棒連續流至他棒，則電流通入的一棒，稱爲正極(positive electrode)，而電流流出的一棒，稱爲負極(negative electrode)。負極漸凸起，而正極常凹下，即稱爲陷口(crater)，如圖 378 的形狀，大部分的光，均由此陷口發出，陷口的溫度可達 3800°C ，爲人造的最高溫度。

電弧的發生由於空隙間碳汽的游離，故電流即由游子負帶而流通，其由負極向正極流動的游子，比反對方向流動的爲速，故正極的高溫度或由於游子衝擊較多而成。碳棒端因在電弧中氧化，故漸漸消蝕，正極的消耗量較多，約爲負極的兩倍。因此消耗的結果，空隙的距離增大，而電弧即將消滅，如欲



圖 378 電弧

保持電弧的繼續發生，須用附裝的自動節制器，使空隙常有一定的距離。此種電弧每耗 1 瓦特的功率，約可發生 1 燭光至 2 燭光間的光度。若將電弧放在一玻璃泡內，即稱爲閉弧燈(inclosed arc lamp)，其碳棒的消耗量，即因空氣的限制而減少，但光度亦較露在空氣中的開弧燈(open arc lamp)爲小。

近代常用的一種發弧(flaming arc)，所發的光度可較普通的電弧爲大，係在碳棒中另裝一心(core)，中實碳、石灰(lime)、氧化鎂和其他氧化物，故在高溫度時即可發出極強的光。此種

弧光，每 1 燭光約耗 0.3 瓦特，光的來源均由弧上發出。尚有一種金屬弧光燈 (metallic arc lamp)，其負極為在鐵管中壓入磁鐵礦和氧化鈦 (titanium oxide) 的混合粉末，而正極為銅條，光亦由電弧發出，效率甚大。

§ 5. 電熱器和保險絲

凡利用電流的熱效應，使電流通過高電阻的導線，以供給家庭中需要的發熱器，稱為電熱器 (electric heater)。一切電熱器，如電爐、電暖爐、電烘爐、煮水壺、烹飪器等的發熱部分，都是利用熔點極高，而電阻極大的導線，繞於耐火黏土 (fire clay) 等的絕緣體上而成。如通以電流，導線即熾熱而發多量的熱量。電熨斗 (electric flat iron) 即為電熱器的一種，其發熱部分，通常係用鎳鉻線，繞於雲母片上而成，如圖 379 的形狀。

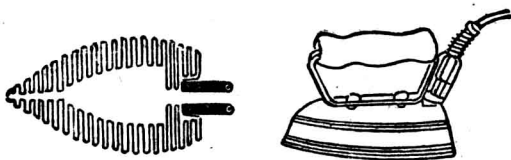


圖 379 電熨斗和其發熱部分

凡安裝電熱器、電燈和電動機等，因各器中的導線均有一定的載流量 (current carrying capacity)，不能超過其額定電流強度，故當外方電路導入室內時，應於通路中串連一保險絲 (fuse wire)。保險絲為熔點頗低的鉛錫合金所製成的一種導線，

祇可通過相當的電流強度，方不熔解。市上出售的保險絲，均註明其載流量的安培數，可按電器的載流量而採用。電路中如已插有保險絲，則遇過量電流通過時，所生的熱，恰使保險絲熔解，以成斷路，即可防止電器的損壞。故保險絲的原理亦為熱效應的應用。

§ 6. 電鐸和電爐

鐵匠將兩鐵條端放在火中加熱，至紅熱時即可用鎚擊，使兩端鐸接。但若將鐵條端接近時，通以強電流，則因接觸處的電阻甚大，可發大量的熱，故鐸接所需的溫度立可得到，再施以壓力，即易於接合。這種鐸接的方法，稱為電鐸(electric welding)。通常對於電車軌道的接合，橋梁和其他鋼鐵工程中，均常用此種電鐸的方法。

凡利用電弧所生的熱，以得高溫度的裝置，稱為電爐(electric furnace)。其構造係在耐火性的黏土或生石灰等的槽中，插入兩碳棒而成，如圖 380 的形狀。若將碳棒接入強電流的電路中，則棒端間發生電弧，所生多量的熱，即使槽中達高溫度，可將熔點極高的物質熔解。這種電爐，係西門子(W. Siemens)於公元 1879 年所發明，可用以製造鈣和碳化而成的碳化鈣(calcium carbide)，及碳和矽化合而成的金剛砂(carborundum)，並為鋼鐵廠所廣用，以製造含有鎢或鉬



圖 38) 電爐

(molybdenum)等的特種合金鋼。

習 題

1. 經過 12 歐姆的電阻上，有 6 安培的電流，歷時 4 分鐘，求所耗的電能。
2. 導線的電阻為 3 歐姆，如有 5 安培的電流通過時，則每小時應發生的熱量為若干？
3. 電燈泡上各註有 110 V. 25 W. (即 110 伏特 25 瓦特) 及 110 V. 100 W.，試各求其電阻，和所需的電流。
4. 某工廠需用 20 燭光的電燈 200 盞，每燭光須耗 1.25 瓦特的功率。問應買幾仟瓦的發電機？又設所用的電燈為 110 伏特的電壓，求通過每燈的電流。
5. 設每一電燈的電阻為 20 歐姆，所需的電流為 0.8 安培，則 4 仟瓦的發電機可負載燈若干。
6. 將一 20 歐姆的鉑線圈，浸於 600 克的水中，通過 5 安培的電流。如電熱器吸收的熱量不計時，則水的溫度由 15°C . 升至 100°C .，應歷的時間為若干？
7. 一弧光燈所需的電壓為 50 伏特，電流為 9.75 安培。求所耗的功率。
8. 一 16 燭光的電燈所需的電壓為 50 伏特，電流為 1.05 安培。求每燭光所耗的瓦特數。若用 100 盞燈時，須用的功率為若干馬力？
9. 一住宅內所用 20 燭光的電燈，共計 23 盞。每一電燈所需的電壓，設為 10 伏特，電流強度為 10 安培，應用的連接導線共為 400 米，其電阻為每千米 2.9 歐姆。若各燈皆集中於導線的一端，試計算導線上所耗的能量占全部所耗能量的百分率。
10. 今有 40 瓦特的電燈 3 盞，每日用 3 小時。設每一電度應納國幣 0.22 元，則每月應出多少電費？
11. 電路上的電流如增加一倍，則因熱效應所耗的功率，有何影響？
12. 如由電機發出的電壓為 110 伏特，其連至 500 米距離處時，因電位降落，

故電壓降低。設連接導線的電阻為每千米 2.5 歐姆，導線上的電流為 10 安培，求 500 米距離處的電壓。

13. 由戶外通入電壓為 220 伏特的電源，其電流須先經過能容 3 安培的保險絲，今於其原有 50 瓦特的電燈 10 盞外，再要添裝 400 瓦特的電扇一座，各燈和電扇都和導線並聯，問全部應用時保險絲是否不至熔斷？

14. 在 220 伏特的電壓上，用 5 安培的保險絲連接後，可裝 40 瓦特的電燈若干盞？

15. 在 110 伏特的電壓上，所用的 40 瓦特的電燈泡，可否用於 220 伏特的電壓上。又設將 220V, 75W. 的燈泡，用於 110 伏特的電壓上，其結果又如何？

第六章 電流的化學效應

§ 1. 電解

由化學作用，可得電池的裝置，以產生電流，但用電流通過導電的電解液內，亦可發生化學作用，稱為電流的化學效應 (chemical effect of current)。如用鉑板兩塊，插入滴有稀硫酸的水中，而接於一直流電源，則電流通入和流出液體處的鉑片，即為電極。其電流通入的一電極稱為陽極 (anode)，而流出一電極稱為陰極 (cathode)。若在每一電極的上面，置有滿盛以水而倒置的玻璃試管，如圖 81 的形狀，則當兩極和電池連接時，即見陽極和陰極上各有氣泡發生，收集於管頂。

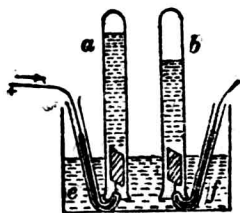


圖 8 水的電解

陽極上發出的氣體爲氧，而陰極上發出的爲氫，即因硫酸在水中時，其分子呈游離而分解爲 H^+ 和 SO_4^- ，故當通電時， H^+ 向陰極移動，失其電荷，即成氫而放出， SO_4^- 向陽極移動，失其電荷，不能獨立存在於水中，更和水起作用而成 H_2SO_4 和氧，即將氧放出。凡溶液因電流的通過，而起分解的現象，稱爲電解 (electrolysis)。溶液中游離的游子，其帶負電而向陽極移動的，稱爲陽向游子 (anion)，其帶正電而向陰極移動的，稱爲陰向游子 (cation)。酸類、鹼類、和鹽類等的溶液，當電解時，常有金屬或氣體，在兩電極上析出。

§2. 法拉第電解定律

法拉第於公元 1834 年，由實驗的結果，發見電解定律 (law of electrolysis) 如下：

第一定律 由電解液中析出物質的質量和通過的電量成正比。因電量等於電流強度和時間的乘積，故析出物質的質量，亦和電流強度及時間成正比。

第二定律 用相等的電量析出各種物質的質量，和各物質的化學當量 (chemical equivalent，即以物質的原子價除其原子量所得的商數) 成正比。

設 M 爲析出物質的質量， Q 爲所用的電量， I 爲電流強度， t 爲通電的時間，則電解的第一定律，可用式表示如下：

$$M = zQ,$$

或
$$M = zIt. \quad (1)$$

式中 z 爲一常數, 即用 1 庫倫的電量, 於電解時所析出物質的質量, 或即用 1 安培的電流在 1 秒間所析出的質量. 此數量稱爲電化當量 (electrochemical equivalent). 1 法定安培 (legal ampere) 或稱國際安培 (international ampere), 即每秒能在銀鹽溶液中, 析出 0.0011180 克純銀時的電流強度. 重要物質的電化當量如下表所示. 由表中可知元素的原子價, 如不止一個, 則其電化當量的數值, 亦不止一個.

表 33 電化當量

元素	原子量	原子價	化學當量	電化當量
氫	1.01	1	1.01	0.0000105
氧	16.00	2	8.00	0.0000829
氮	14.04	3	4.68	0.00004843
氟	35.45	1	35.45	0.0003675
亞銅	63.6	1	63.6	0.0006558
銅	63.6	2	31.8	0.003294
亞鐵	56.0	2	28.0	0.0002893
鐵	56.0	3	18.7	0.0001929
鋅	65.4	2	32.7	0.0003387
銀	107.9	1	107.9	0.0011180

設 W_1 和 W_2 爲兩元素各自的原子量, n_1 和 n_2 爲其原子價, 則電解的第二定律可用式表示如下:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\frac{W_1}{n_1}}{\frac{W_2}{n_2}} \quad (2)$$

或

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{W_1 n_2}{W_2 n_1}$$

〔例題 1〕 如用 2 安培的電流，通入銀鹽溶液中，則在半小時內，陰極上可鍍出的銀為若干？

〔解法〕 由電解第一定律，得

$$\begin{aligned} M &= zIt = 0.001118 \times 2 \times 1800 \\ &= 4.02 \text{ 克。} \end{aligned}$$

〔例題 2〕 將水電解，於 10 分鐘內可放出 0.008 克的氫。若用此電量，將硫酸銅溶液電解時，可析出若干克的銅？並求所用的電流強度。

〔解法〕 由電解第二定律，得

$$\frac{0.008}{M} = \frac{1.01}{31.8}$$

$$\therefore M = 0.25 \text{ 克。}$$

又由第一定律，得

$$\begin{aligned} I &= \frac{0.008}{0.0000105 \times 10 \times 60} \\ &= 1.27 \text{ 安培。} \end{aligned}$$

§ 3. 電量計*

因各種元素的電化當量均已測定，故由電解液中通過電流

*實驗 32.

時，測得析出物質的質量，即可確定在一定時間內所用的電量。凡由電解以量度電流強度的儀器，稱為電量計 (voltmeter or coulometer)。重要的電量計有銅解電量計(copper voltameter)和銀解電量計(silver voltameter)兩種。

(1) 銅解電量計 普通應用的電量計中，較為準確的，為銅解電量計。其構造係在一電解池(electrolytic cell)中，盛有硫酸銅溶液，用銅為兩電極而成。如於一定時間導入電流，則由陰極上增加的銅量，即可算出電流強度，如下式：

$$I = \frac{M}{0.000329 \times t}$$

(2) 銀解電量計 最準確的電量計中所用的電量計，為銀解電量計。其構造如圖 38.4 的標準形式，係在鉑皿中盛硝酸銀溶液，鉑皿即用作陰極，再用精煉的電解

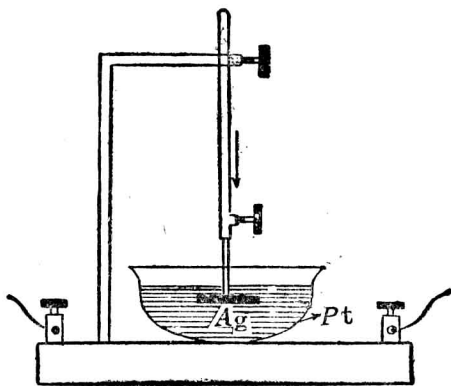


圖 38.4 銀解電量計

銀(electrolytic silver, 即由電解而得的純銀)一片，懸於溶液中，作為陽極。當電流通過時，銀即鍍於鉑皿上，由精密而靈敏的天平，測得增加的銀量，即可由下式算

出準確的電流強度：

$$I = \frac{M}{0.001118 \times t}$$

電流計的刻度擬直接記出電流的安培數，或校準安培計上的標度時，均用銀解電量計，和其串聯於一電路中，而得極準確的量度

§ 4. 游子電荷

電解液中的電流，係由兩種游子的遷移(migration of ions)而傳導。此種游子，均為帶有正電或負電的原子，或為帶電的原子羣，故電解液中的導電，和金屬導線上由電子而導電的性質，完全不同。如以克為單位，表示任何一元素的化學當量，則稱為克當量(gram equivalent)。即以該元素的原子價除其克原子所得之商。例如水解電量計，銅解電量計和銀解電量計串聯於一電路中，通過的電流強度均相同，則當 1 克的氫析出時，氧必析出 8(16/2)克，銅為 31.8 (63.6/2)克，而銀為 107.9 (107.9/1)克，故由法拉第電解定律，凡能析出一元素的克當量時，其所用的一定電量，必可析出其他各元素的克當量。此一定電量的數值，可取為 96, 50 · 庫侖 (107.9/0.001118)，定為電量的一單位，稱為 1 法拉第(faraday)。可知 1 法拉第的電量，能析出任何一元素的 1 克當量。

由氣體動力論，可推知每克當量的單價(univalent)元素中，含有原子的數目 N ，均為 6.06×10^{23} ，雙價(divalent)元素中含

有的,均爲 $\frac{N}{2}$, 餘可類推. 那麼單價原子成游子時所帶的電量 e , 必爲 $96500/N$. 即

$$e = 1.59 \times 10^{-19} \text{ 庫倫.}$$

或 $e = 4.774 \times 10^{-10}$ 靜電單位的電量.

凡單價的游子電荷(ionic charge)如爲 e , 則由上述的結果, 可知雙價的游子電荷, 必爲 $2e$, 而三價的游子所帶的電量, 必爲 $3e$, 或即 e 的電量爲電的天然單位(natural unit of electricity). 各種游子的電量均爲此單位的整倍數, 爲電學中最重要的一個結果. 因此單位電量和用其他方法(p. 250, § 2)求出的電子所帶的電荷均能完全相等, 爲現代所得的最小電量, 故陰向游子即爲缺少一個或數個電子的原子或原子羣, 而呈正電; 而陽向游子即爲多帶一個或數個電子的原子或原子羣, 而呈負電. 游子上缺少或增加的電子數, 恰和其原子價相等.

§ 5. 電解定律的理論證明

單價的游子電荷 e 既爲電量的天然單位, 而雙價和三價等的游子電荷又恰爲 e 的整倍數, 故如命 v 表游子的原子價, N 爲電解池中電極上所得的原子數, Q 爲電解液中通過的電量, 則可表示其關係爲:

$$Q = Nev. \quad (1)$$

設命 m 表示原子的絕對質量, M 爲電極上析出的質量, 則得:

$$M = Nm. \quad (2)$$

由(1)式,知
$$N = \frac{Q}{ev}.$$

代入(2)式,即得

$$M = \frac{m}{ev} Q.$$

上式如對於一種電解液而論,則 $\frac{m}{ev}$ 為一常數,可知電極上析出的質量 M ,和通過的電量 Q 成正比,是即電解第一定律。若用同一電量 Q ,通過各種電解液時,則析出的電量必和 $\frac{m}{v}$ 成正比,因而和其化學當量 ($\frac{m}{v} \times 6.06 \times 10^{23}$) 成正比,是即電解第二定律。

更由
$$M = zIt,$$

可知
$$z = \frac{m}{ev},$$

式中電化當量 z , 和單價的游子電荷 e , 現今均已得準確的量度,故各種原子的絕對質量 m 即可由此求出。例如一氫原子的絕對質量,可算得為 1.66×10^{-24} 克。

§ 6. 電鍍和電鑄術

電鍍 (electroplating) 即利用電解,使金銀等物質鍍於其他金屬表面上的方法。係將被鍍的金屬面為陰極,而用欲鍍的金屬為陽極,如圖 353。所用的電解液中,應含有鍍出金屬的正游子,例如鍍銅時,銅為陽極,電解液為硫酸銅溶液,含有 Cu^{++} 和 SO_4^{--} ,

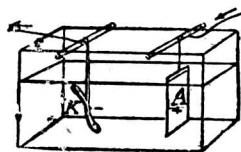


圖 353 簡單的電鍍槽

被鍍的物體即為陰極。當通電時，銅的正游子就向陰極移動，遇極失其電荷，而鍍於物體上。普通電鍍所用的電解液，其配合的成分如下表：

表 34 電解液配合的成分

鍍金液	水 1000 克	氯化金 10 克	氰化鉀 50 克
鍍銀液	水 1000 克	氰化銀 25 克	氰化鉀 50 克
鍍鎳液	水 1000 克	硫酸鎳銨 100 克	

實際上應用的電鍍槽，係將欲鍍的物件懸於中央的極棒上，如圖 384，在物體的兩側，以懸掛的金屬陽極環繞，則鍍成的物體，更為均勻而美觀。

普通的電鑄術 (electrotyping)，係將鉛字排版後，用蠟或膠製成模型，以石墨塗於其上，使其成為導體，然後懸於鍍銅槽內的硫酸銅溶液中，作為陰極，而用銅為陽極。通電後，俟模型上所積的銅層達相當的厚度，即取出而去其蠟或膠，再以活字金屬作其底，使銅層堅硬，就可應用，近代印刷術上，常採用這種方法。

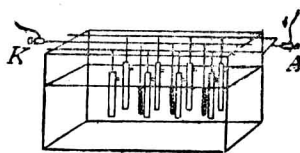


圖 81 電鍍槽

§ 7. 蓄電池

〔表演〕 將兩板兩塊對立於稀硫酸內，如圖 385。用導線將兩極和電池 C 連接，插入電鍵 K_1 和 K_2 並接一電鈴 B 。若將 K_1 揷下，則電池和兩極相通，電流通入，使陽極漸呈棕褐色，然後換揷 K_2 ，則因通電後，兩鉛板的性質已不同，可成

電池的作用，而供給電流，使電鈴發聲。

由實驗知兩鉛板放在稀硫酸內，最初的性質相同，故無電動勢，而不呈電池的作用。如將電流通過，則陽極的鉛板，因稀硫酸溶液電解，

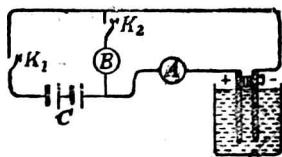


圖 385 蓄電池的原理

而受到氧的化學作用，變成二氧化鉛 (PbO_2)，但陰極上所析出的為氫，不生化學作用，仍為鉛板，故通電後兩鉛板的性質不同，就變成電池。二氧化鉛板為陽極，鉛板為陰極，其電動勢約為 2 伏特。蓄電池 (storage battery) 的構造，就是根據這種方法，每極均為一組的板所製成，交互排列，如圖 386 的形狀。因各板間的距離甚近，且板的面上製成凹凸的溝紋，面積增加，故其內電阻甚小，可供較大的電流。

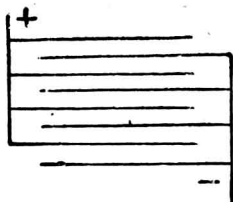
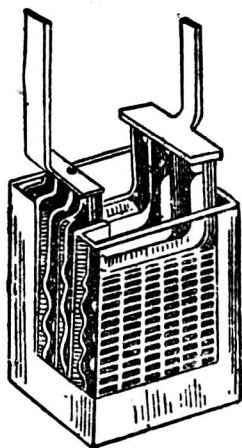


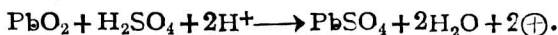
圖 386 蓄電池

蓄電池供給電流時，稱為蓄電池的放電。放電時係由化學能量變成電的能量，兩極的性質漸變。須再將直流電通入，則兩極仍回復原狀。通入電流時，稱為蓄電池的灌電，係由電的能量變成化

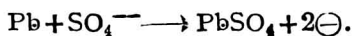
學能量，而貯於電池中。故簡單電池祇能由原有的化學能量變成電能的，稱為原電池(primary cell)，而蓄電池又稱為副電池(secondary cell)。

鉛蓄電池放電時的作用，約可用下式表示：

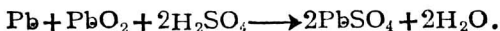
陽極方面：



陰極方面：



故其變化可總列一式為：

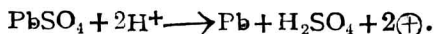


鉛蓄電池灌電時的作用，約可用下式表示：

陽極方面：



陰極方面：

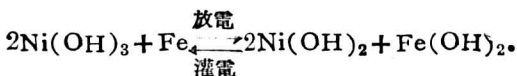


故其變化可總列一式為：



鉛蓄電池的重量甚大，如無嚴密的管理，則易於損壞。美人愛迪生所發明的鎳鐵蓄電池則較為輕便，而管理較易。這種電

池的陽極為氫氧化鎳 $[\text{Ni}(\text{OH})_3]$ ，其陰極為純鐵 (Fe) ，電解液為氫氧化鉀 (KOH) 。放電時陽極上漸變成氫氧化亞鎳 $[\text{Ni}(\text{OH})_2]$ 。而陰極則漸變為氫氧化亞鐵 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ ，灌電時仍回復原狀，其化學變化得由下列的總式表示：



蓄電池所能供給的電能，稱為蓄電池的容量（capacity of storage battery），其單位為安培小時（ampere hour）。1 安培小時即在 1 小時內可連續供給 1 安培的電流，故蓄電池的容量如為 90 安培小時，若所用的電流為 4 安培，即可連續應用 5 小時，容量愈大，則售價愈貴。其放電或灌電時的電流強度有一定的額定值，每一電池均有標記，不能超過其數值，又放電已久的電池，應即灌電，否則電池的壽命即被縮短。

§ 8. 反電動勢

如圖 387，設於電解池 C 中，盛以稀硫酸，用鉑為電極，和一分路電流計 G ，串聯於電池組 B ，而用一雙極電鍵 k ，使前後兩方的電路，可以交互通斷。設 k 和 A 點接觸，則電流導入電解液，注意電流計的偏度漸次減少。此種現象，即

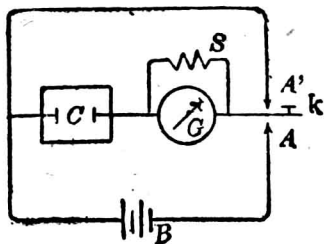


圖 387 反電動勢

因電解作用發生的氫和氧，包圍兩電極，和電池的作用相似，而發生極化。此時兩極的性質已變，即產生一電動勢，其方向和外加電動勢(impressed E. M. F.)的方向相反，故稱為反電動勢(counter E. M. F. or back E. M. F.)。上述電解池的反電動勢，可將 k 和 A' 點接觸，使圖中後方的電路連通。由電流計中偏度的反向，即可顯示其存在。又如蓄電池的灌電時，亦有反電動勢，以阻止電的流入，故灌電的時間稍久，須將串聯於電路中的變阻器，逐漸減少所用的電阻，以保持灌電時的一定電流強度。

在任何電路中，如有反電動勢存在時，則歐姆定律的應用，可列成下式：

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

式中 E 為外加電動勢， e 為反電動勢， R 即總電阻。若將此式的兩方各乘以 I ，則得

$$IE = I^2R + Ie$$

式中 IE 為外加功率， I^2R 為消耗於發生熱量的功率，而 Ie 即對於反電動勢所成的機械或化學能量時所需的功率，故上式亦即表示能量不滅的原理。可知在任何電路中，如所用的電能，除供給發生熱量外，更須消耗其一部分的能量時，則電路中必有反抗電流流入的反電動勢。

習 題

1. 如將硝酸銀溶液電解，通以5安培的電流，則在8小時內，可析出銀若干克？
2. 用1安培的電流來鍍銀，如用硝酸銀溶液，鍍出1克的銀時，則所需的時間為若干？
3. 何謂法定安培？
4. 何謂游子？試就游子電荷，說明電的原子性。
5. 1安培的電流在1小時內，可將若干克的水電解？（已知銀的原子量為108，氧的原子量為16，氫的原子量為1。）
6. 溶液中導電的性質，和金屬導體的情形，有何不同？
7. 蓄電池中的硫酸，如用比重計插入，檢查其比重的數值，何以可確定是否須灌電？
8. 蓄電池比原電池的優點安在？

第七章 電流的磁效應

§ 1. 電流周圍的磁場*

丹麥物理學家奧斯特(Oersted)於公元1820年，發見導線有電流通過時，其周圍就發生磁場，首得電和磁的關係，這種電的作用，稱為電流的磁效應(magnetic effect of current)。

〔表演〕 在磁針的上面，放一和磁針平行的導線(圖288)。如導線上有電流通過時，則磁針發生偏轉。電流的方向改變時，磁針偏轉的方向亦改變。

*實驗 29 II.

由實驗知導線上電流通過時，其方向可由磁針的偏轉方向而確定。如用右手掌向磁針，使導線介於其間，手指的方向表示電流的方向，則拇指所指的方向，即為磁針 N 極偏轉的方向。依此規則，由磁針 N 極的偏向，就可檢查導線上的電流，且可確定其方向。

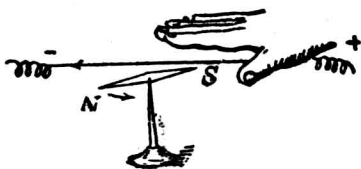


圖 383 電流的磁效應

[表演] 將導線穿過一水平紙板，如圖 389 (1)。當通電時，用磁屑撒布其周圍，即可見到磁場的狀態，而推得磁力線均以導線為中心，成許多圓周。且可用一

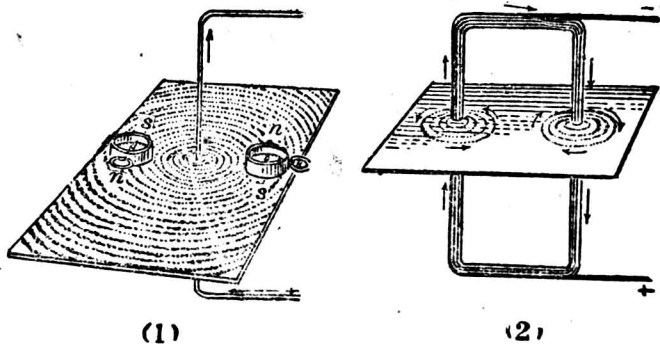


圖 389 導線周圍的磁場

小羅盤考察電流周圍的磁場，即可確定磁力線的方向。如電流的方向改變，磁場的方向亦即改變。若單根導線上通過的電流不甚強時，可依圖 389 (2) 的方法，即以多匝導線代單根導線而做實驗，即可明示磁場的狀態。

由法國物理學家安培(Ampere)的研究，知電流周圍的磁場，

常和電流的方向互成直角。如用右手握導線，拇指表示電流的方向時(圖 390)，則各手指所示的方向，即為導線周圍的磁力線方向。這個定則，稱為安培定則(Ampere's rule)。

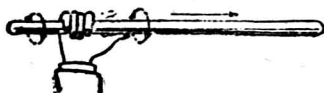


圖 390 安培定則

由實驗可證明一長度甚大的直線導線上，有電流通過時，其周圍的某點所生的磁場強度，和導線上的電流強度成正比，和導線的垂直距離成反比。

§ 2. 線圈和螺線管的磁場

將一導線環繞而成的迴線(loop)，稱為線圈(coil)。如線圈上有電流通過時，則其一面顯示 N 極，而其他的一面顯示 S 極，恰和一極短的磁片相當。其磁力線即由 N 極的一面發出；而回入 S 極的一面，以成閉曲線，如圖 391 中

一單匝線圈所示的情形。電流在導線上流動的方向亦可從導線的橫截面中表示出來。圖中之 \odot 表示電流自橫截面流出；

\oplus 表示電流流入橫截面。所以‘ \cdot ’號與箭頭相當；‘ $+$ ’號和箭羽相當，看圖 391 的

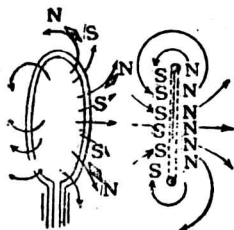


圖 3 1 單匝線圈的磁場

右圖便知。又如圖 392，一單匝線圈上有電流通過時，則由安培

定則,可知其兩面所呈的磁極,和其電流方向的關係,且可用 \odot 和 \otimes 的記號來表示,即一觀察者和線圈面相對時,如知線圈上的電流依反時針的方向(由 n 字順筆的箭頭所表示),則所對的一面必呈 N 極,若為順時針的方向(由 s 字順筆的箭頭所表示),則所對的一面

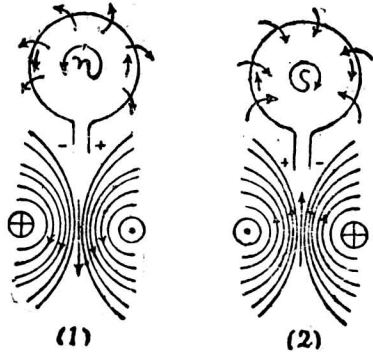


圖 392 線圈中的磁力線

必呈 S 極。若將此圓線圈直立,使圈的左右兩方的線,各穿過同一的水平紙板,則由鐵屑的撒布,或小羅盤針的檢查,可知附近於每線周圍的磁場,在圈面兩側的方向雖為反向,但經過圈內時,卻均成同方向,而在圓心部分的磁力線,和圈面垂直。凡一圓線圈的圓心上,由電流發生的磁場強度,其大小和線圈上的電流強度及線圈的匝數(number of turns)成正比,和圓的半徑成反比,其方向常和圈面垂直。

將一導線在圓筒上繞成連續的螺旋線(helix),稱為螺線管(solenoid),其構造可認為許多圓線圈串聯而成。在管的中央部分,各線圈的磁性互相抵消,而兩端即各顯一磁極,恰和一條形磁鐵相當。如將各端放近一磁針,即可檢出其極性。由安培定則,可確定管端的磁極,和各線圈上電流方向的關係,為便利計,

可略將此定則變通，即如圖 393，若用右手握管，手指依各線圈上電流的方向，則拇指所指的一端，即為螺線管的 N 極。並可依線圈的方法，用 \odot 或 \otimes 的記號，表示每端的極性和電流方向的關係。

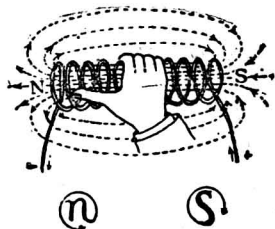


圖 393 螺線管的磁極定則

長螺線管內，中段通過的磁力線，均成平行，其沿管的中段軸線上，各點的磁場強度均為一致，而依磁力線的直線方向，其大小和線圈上的電流強度，及管的每單位長度中所含的線圈匝數成正比。凡安培數和線圈匝數的乘積，稱為安培匝數 (ampere-turns)。故螺線圈中的磁場強度，和其安培匝數成正比。

§ 3. 導磁係數

由前節知螺線管的各線圈上，有一定的電流通過時，其管中的磁場強度亦有一定。如於管中再插入一軟鐵棒，即稱為鐵心 (iron core)，則其兩端的極強增加甚大。此時的鐵心因受管中磁場的感應，磁化為暫時磁鐵，而管中未放鐵心前的磁場強度，即稱為磁化力 (magnetizing force)。磁化力的大小，依管的橫截面上每一平方厘米中通過磁力線的數目而定。若用鐵心插入後，則鐵心因磁化而生的磁力線，稱為磁化線 (line of magnetization)。凡鐵心在螺線管中磁化時，每一平方厘米上除磁化線通過外，管中原有磁力線亦在鐵心中經過，其方向和磁化線相

同。此磁力線和磁化線的總和，稱為磁感應線(line of magnetic induction)，其表示的強度，稱為磁感應強度(magnetic induction)。設命 H 表磁化力， B 表磁感應強度，則物質中磁感應強度和外加磁化力的比率，稱為該物質的導磁係數(permeability)。如用 μ 表示一物質的導磁係數，則得：

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

$$[\text{導磁係數}] = \frac{[\text{磁感應強度}]}{[\text{磁化力}]}.$$

由實驗知物質的導磁係數，不但隨物質的性質而有不同，即在同一物質中，其數值亦隨磁化力，和其磁化的程度而異。凡未經磁化的軟鐵，其導磁係數常隨磁化力的增加而急激變大，至磁鐵近飽和時，則磁化力雖再增加，但其數值卻變小。對於一定的磁感應強度，某種鐵的導磁係數如為已知，則發生此磁感應強度，應用磁化力的大小，即可由上列的關係求出。凡螺線管中鐵心的橫截面上通過的總磁感應線，稱為磁通量(magnetic flux)。如磁感應強度 B 為已知數，則面積 A 中的磁通量 Φ ，即為：

$$\Phi = BA,$$

或

$$\Phi = \mu H A.$$

真空中的導磁係數為1，空氣和各種非磁質的導磁係數，亦可認為和真空相同。鐵的導磁係數可高至1000以上。凡導磁係

數較大的物質，如放在磁場中，可改變其磁力線分布的狀態，使磁力線在物質中經過，故磁場中如放一鐵環，則因磁力線易在環上通過，即使環內的部分可無磁場，以成磁屏(magnetic screen)的作用，和電屏的情形相似。

§ 4. 磁質

如軟鐵和鋼等，凡可由磁感應而為磁鐵吸引的物質，稱為磁質(magnetic substance)，鎳和鈷等在磁場中亦能磁化，惟較鐵為弱。凡有較大磁性的物質，如鐵、鎳、鈷等，稱為鐵磁質(ferromagnetic substance)。凡在甚強的磁場中，稍顯磁性的物質，如鎂、鉍、氧等，稱為順磁質(paramagnetic substance)。而甚多的物質在甚強的磁場中，顯示推拒的作用，而非受吸引的，如錒、磷、錒、金、銀、銅、鉛等，稱為反磁質(diamagnetic substance)。

順磁質的導磁係數常較 1 為大，反磁質的導磁係數則較 1 為小，而鐵磁質的導磁係數，數值常甚大。

§ 5. 電磁鐵

凡具有鐵心的螺線管，由電流的通過而成的磁鐵，稱為電磁鐵(electromagnet)。如圖 394 的形式，為通用的蹄形電磁鐵，線圈上有電流時，即可吸住軟鐵塊 A，電流斷去時，磁性即消失，軟鐵落下。由鐵

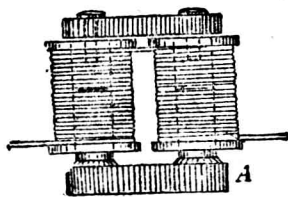


圖 394 電磁鐵

的磁化現象,可知電磁鐵的強度,和鐵心的橫截面積成正比,並隨螺線管的安培匝數,及鐵的導磁係數而定。

電磁鐵的用途甚廣,常用以代替永久磁鐵的作用,其特點得有下列數項:

(1) 電磁鐵可發生甚強的磁極,以吸引鐵質的重物,成爲起重磁鐵(lifting magnet),而得運輸上的便利。

(2) 電磁鐵可發生甚強的磁場,以得數值甚大的磁通量,而常用於電機中。

(3) 電磁鐵的極強,或所生的磁場,可隨電流強度的變化,而隨意改變其大小。

(4) 電磁鐵的極性,和其磁場的方向,可隨電流方向的改變而變換。

(5) 因電流的通斷,故可使電磁鐵所生的磁場,隨時發生或消滅,應用便利。

§ 6. 電鈴

電鈴 (electric bell) 是應用電磁鐵的作用,以發鈴聲的裝置. 如圖 355, P 爲按鈕 (press button),

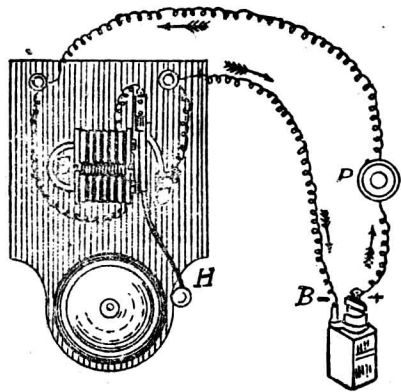


圖 355 電鈴

即一特製的揷鑰， B 為電池， E 為蹄形電磁鐵。當 P 揷下時，電流就由電池的正極，依圖中箭頭的方向，通過電磁鐵，再經彈簧片和螺釘 C ，而回電池。電流既通，電磁鐵就吸引其前面的銜鐵 (armature)，使錘 H 擊鈴而作聲。同時銜鐵移動時，其相連的彈簧片，和螺釘的接觸點分開，電流即斷去，故電磁鐵失其磁性，銜鐵因彈簧片的彈力作用，恢復其原位置，再和螺釘接觸，電流又通，電磁鐵再吸銜鐵，錘又擊鈴。如是使 C 的接觸點連續作往復的振動，鈴聲就繼續不已。

無線電中和其他各處所用的蜂音器 (buzzer)，其構造的原理，和電鈴相同，惟無鈴的裝置，而得銜鐵部分發出迅速振動的聲音。

§ 7. 電報

電報 (telegraph) 亦應用電磁鐵的作用，而得兩地互通信息的裝置。其主要部分為發送機 (transmitter) 和接收機 (receiver)。如圖 396，發送機為一特製的電鑰 K ，通信時將電鑰按下，使電池所發的電流，經架空導線 L ，通至接收機的電磁鐵 M ，而通於地，由地回至發送機的電池，以成通路。當電流通過時，電磁鐵

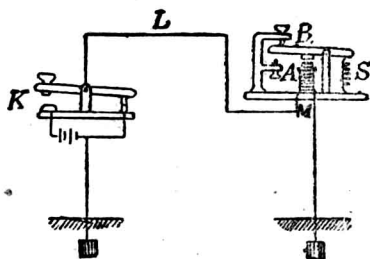


圖 396 電報的原理

將銜鐵吸下，擊 A 釘而發聲。當發送機的電鑰和手指脫離時，因彈簧圈的作用，恢復其原位置，使電路不通，同時接收機的電磁鐵失去磁性，銜鐵亦因彈簧圈 S 的作用，恢復其原位置，擊 B 釘而發聲。由銜鐵上下擊釘，所發兩聲相隔的時間，就可決定代表文字的點畫記號。這種接收機所用的裝置，稱為發聲器 (sounder)，其外觀如圖 397 的形狀。若接收機所吸引的銜鐵，連一墨水筆，則當電流斷續時，可使筆在筆下移動的紙條上，記出點畫的記號，這是舊時所用的裝置。

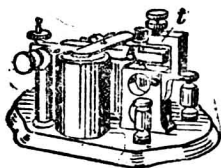


圖 397 發聲器

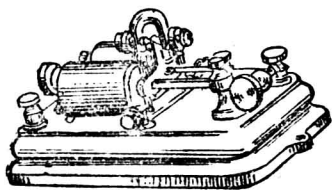


圖 398 替續器

如果兩地相隔的距離太遠，因導線的電阻很大，故發送局 (transmitting station) 和接收局 (receiving station) 間的電路上，電流太弱，不足使發聲器的電磁鐵吸引其銜鐵。如欲得有效的作用，則應於外方通來的導線和發聲器間，加一替續器 (relay)。替續器的外觀如圖 398 的形狀，其主要部分亦為電磁鐵的應用，組成的螺線圈，為數千匝的細線所繞成，故通過的電流雖小，但仍有吸引其銜鐵的作用，而發聲很低。應用時如圖 399 的接法，

將架空導線 L 及接地線 E ，和替續器的電磁鐵相聯接。發聲器的電磁鐵為數百匝的粗線所繞成，和一局部電路 (local circuit) 串聯。當替續器的銜鐵稍受微弱吸引時，可將 ab 間連接，使局部電路得成通路，故發聲器上線圈中通過的電流，由局部電池的供給，可調準其電流強度，作用可達正常狀態，而發清晰的聲音。可知替續器的加入，得將傳來電流的微弱作用，使局部電路通斷，仍可由發聲器以通信息。

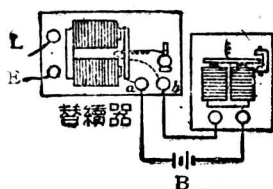


圖 309 替續器的作用

§ 8. 導線在磁場內的運動

[表演] 將一導線懸住，其下端浸入一水銀槽中，如圖 400 的裝置。設電流在導線上自上流下，而用蹄形磁鐵的兩極放在導線的兩側，則導線必依和磁力線垂直的方向，向內移動。電流的方向如改變時，則導線移動的方向亦改變。

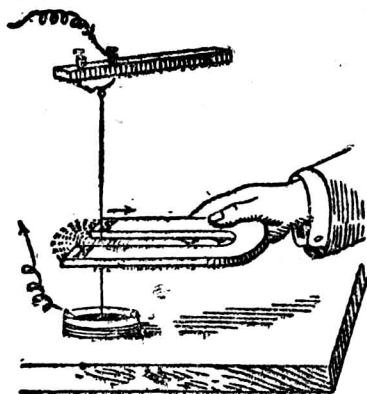


圖 400 導線在磁場內的運動

關係。佛來銘 (Fleming) 曾確定一簡易定則，以得其相互間的關

係，即以左手的拇指、食指和中指伸直，彼此互成直角（圖 401），如食指示磁力線的方向，中指表示電流的方向，則拇指所指的方向，必為導線移動的方向。這個定則，稱為左手定則（left hand rule）。



圖 401 左手定則

通電的導線能在磁場內的移動，即因電流在導線周圍所生的磁場，和磁鐵的磁場合成而得的結果。如圖 4.2, *A* 為磁鐵的

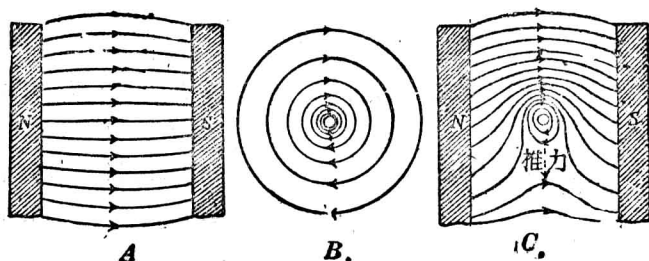


圖 402 導線在磁場內移動的原理

磁力線散布的狀態，其 *N* 極和 *S* 極的橫截面，依本書頁面的平面，*B* 為導線的橫截面，當電流的流向為向着且垂直於頁面時，其周圍所生磁力線的狀態。若將此導線放兩磁極間，則由 *A*, *B* 兩磁場的合成，在導線旁一部分處，彼此的磁場方向恰相同，合成的磁力線數目增加；但在和此相對的另一部分處，兩磁場的方向恰相反，合成的磁力線數目較少。因磁力線的性質和橡皮

線相像，故導線的兩旁所受的力不等，就被推而向較弱的部分移動。如圖中 C 的表示，可知磁場內通有電流的垂直導線，必離開原磁場和導線內電流所生磁場同方向的部分而移動。

又如圖 403，設一線圈懸在磁場內，可以自由轉動， N 和 S 為直立蹄形磁鐵兩極的橫截面， A 和 B 為一單線圈兩垂直邊的橫截面。當圈面和磁力線平行時，如電流自 A 邊流入橫截面，而從 B 邊流出，以和外

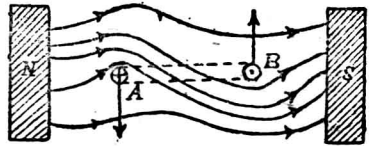


圖 403 線圈在磁場內的轉動

方的電池成一通路，則因圈的每邊周圍所生的磁場，和原磁場合成的結果， A 邊必向前移動，而 B 邊向後移動，就發生轉動，圈面有向磁場成垂直方向的趨勢，使圈面中包含的磁力線達最多的數目(圖 4.4)。如線圈上電流的方向改變時，則其轉動的方向亦變換。

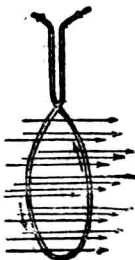


圖 404
磁場內通電的線
圈所趨的位置

§ 9. 電流計

凡利用磁效應而成量度電流強度的裝置，稱為電流計 (galvanometer)。其主要部分為線圈和磁鐵，可分為磁轉式 (movable magnet type) 和圈轉式 (movable coil type) 兩種。若將線圈固定 將其平面鉛直的放在地磁的水平強度所指的方向，在圈的中心支持一磁針，如圖 405 的形式，

並在磁針的垂直方向，連一質量小的長指針，可由所附的標度以表示磁針的偏轉，則因電流通過線圈時，其所生的磁場強度，和地磁的水平強度合成的結果，即使磁針偏轉至相當角度而平

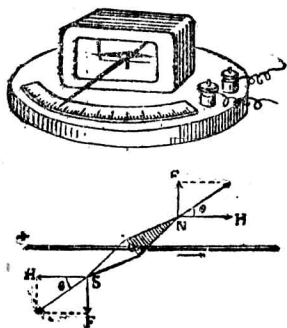


圖 405 磁轉電流計

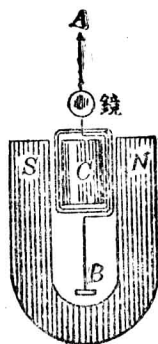


圖 406 圈轉電流計

衡。由指針所示偏轉的大小，可比較線圈上電流強度的大小。這個裝置，即成簡單的磁轉電流計。若將線圈懸於蹄形磁鐵的兩極間，例如通用的達松發爾電流計 (D'Arsonval galvanometer) (圖 406)，使其圈面和磁力線平行，並在圈上裝一指針或一小平面鏡，圈的內部固裝一軟鐵圓柱體 C ，因軟鐵的導磁係數較空氣為大，故放此圓柱體後，可使經過圈面的磁力線數目增加，而圈的轉動更為靈敏。當線圈的兩端 (A 和 B) 和外方相接，使電流通過時，圈就轉動，由指針或鏡面轉過的角度，可比較電流強度的大小，就成圈轉電流計。這種電流計的全部裝置，常裝在

前附玻璃的鐵盒中，以得磁屏的作用，而免地磁或其他磁場的影響。

電流計中通入的電流強度常甚小，而有一定的最大值，應用時須特別注意。若連接一電阻較小的分路後，而接入電路中，則可用以比較強度較大的電流，而稱為分路電流計 (shunted galvanometer)，

〔例題〕 設一電流計的電阻為 8.45 歐姆，如加一電阻為 0.05 歐姆的分路後，則接入電路時，流入電流計的電流，為總電流的百分之幾？

〔解法〕 設 i 為通入電流計的電流， I 為總電流， g 和 s 為電流計和分路各自的電阻，則得

$$ig = I \frac{gs}{g+s},$$

故

$$i = \left(\frac{s}{g+s} \right) I,$$

或

$$i = \left(\frac{0.05}{8.45+0.05} \right) I = \frac{1}{170} I$$

又設 x 為通過電流計中電流的百分數，則由比例，得

$$x = \frac{1}{170} \times 100\% = 0.58\%.$$

§ 10. 安培計和伏特計

若將電流計的標度，由銀解電量計 (p. 193, § 3) 的校準，直接刻成相當的安培數，就稱為安培計 (ammeter)。其刻成毫安培 (milliampere, 0.001 安培) 的，稱為毫安培計 (milliammeter)。

安培計常為一種分路電流計，如同一標度的安培計，含有兩種電阻不同的分路，則於分用時，可表示兩種不同的範圍(range)。例如一種範圍為0—1安培，即其標度的標大範圍可量度至1安培的最大值，而另一種範圍為0—10安培，即可量至10安培的最大值。如圖407，為一普通所用的衛斯吞直流安培計 (Weston direct current ammeter)，線圈 c 支於寶石軸承(jewel bearing)，用螺簧 p 的彈力，使其所附的指針指零點的位置。當電流通過時，因線圈的轉動，指針所示的位置，即可記出電流的安培數。安培計

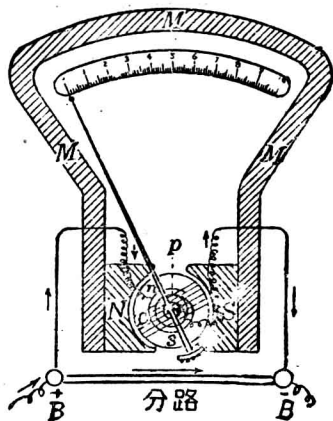


圖 407 安培計

常為電阻甚小的電流計，故接入電路中應用時，其電阻可以略去不計，對於電路中原有的總電阻，並無多大影響，而不致改變其電流強度的數值。且因量度電流強度，故插入電路中時，常用串聯的連接法。

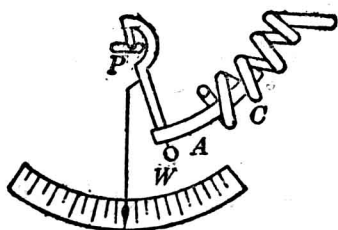


圖 418 軟鐵安培計

又如圖418，為利用軟鐵電流計所成的安培計， C 為粗導線捲成的螺線管， A 為繞 P 軸而可轉動的軟鐵片。當線圈上電

流通時，鐵片就被吸入，其旁附有的小指針，即在標度上指示安培數。W 爲附着於鐵片的錘，因重力的作用，在電流不通時，可使指針回復其零位置。

電流計的線圈中通過的電流強度，亦和線圈的兩端間所受的電壓成正比，故略加改造，並將標度直接刻成相當的伏特數，就成伏特計(voltmeter)。其刻成毫伏特(millivolt, 0.001 伏特)的，稱爲毫伏特計(millivoltmeter)。衛斯吞直流伏特計(Weston direct current voltmeter)的構造，和安培計相似，惟不用分路，而和線圈串聯一高電阻，如圖 409 中的 R。伏特計爲高電阻的電流計，量度電路上兩點間的電位差時，常和電路並聯，故應用於電路中時，其流入伏特計的電流強度甚小，對於接入兩點間的原有電流強度，可無多大影響，而不致發生兩點間電位差的顯著改變。

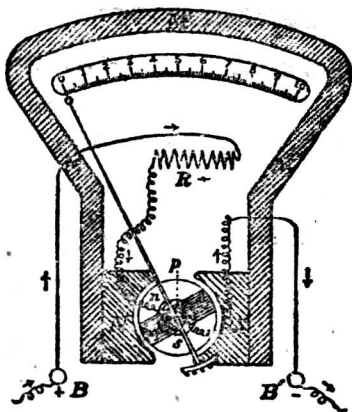


圖 409 伏特計

[例題 1] 設一電流計的電阻爲 1 歐姆，其標度共爲 25 分度 (division)，可指示 25 毫安培的最大電流強度。如欲應用於 25 安培的電路中，使其每 1 分度代表 1 安培時，則應用電阻爲若干大的分路，方可使此毫安培計變成一安培計？

[解法] 因

$$ig = \left(\frac{g}{g+s} \right) I,$$

$$i = 0.025 \text{ 安培}, \quad I = 25 \text{ 安培},$$

$$\therefore i = \frac{1}{1000} I,$$

故

$$\frac{s}{g+s} = \frac{1}{1000},$$

$$\therefore s = \frac{g}{999} = \frac{1}{999} = 0.001 \text{ 歐姆}.$$

[例題 2] 上問的電流計，如欲用作 25 伏特範圍的伏特計，則除電流計的電阻外，應加的串聯電阻為若干？

[解法] 因 $ig = 0.025 \times 1 = 25$ 毫伏特。

故此電流計直接用於量度電壓時，僅可量至 25 毫伏特的最大電壓。

設 R 為應加的串聯電阻，使其電位降落和電流計的電位降落相加而得的總和恰為 25 伏特，則電流計中通過的電流強度，雖仍可保持 0.025 安培的最大值，但因串聯電阻的存在，即可表示 25 伏特的範圍。即

$$0.025R + 0.025 \times 1 = 25,$$

$$\therefore R = \frac{25 - 0.025}{0.025} = 999 \text{ 歐姆}.$$

習 題

1. 一線圈平放在桌面上，如其中電流的方向為順時針的流動時，則圈的向上一面應顯何種磁極？

2. 有等長的螺線管兩個，一個的匝數為 50，通過的電流為 4 安培，另一個的匝數為 100，通過的電流為 1 安培。求兩管中磁場強度的比率。

3. 設一螺線管中的磁場強度為 3 C. G. S. 單位。其截面積為 4 平方厘米，

則管中的磁力線共爲若干？又設用截面相同而導磁係數爲 400 的軟鐵條，插入管中後，則所得的磁通量爲若干？

4. 電磁鐵比人造磁鐵有何優點？

5. 試繪一電鈴的簡圖，以說明其作用。

6. 電報中的替續器有何功用？替續器和發聲器有何區別？

7. 在兩條平行導線上，通以電流時，如電流的方向彼此相同，則導線間有何作用？如電流的方向彼此相反時，其作用又如何？

8. 電流計的電阻設爲 108 歐姆，如加一 12 歐姆的分路，試比較電流計中通過的電流和線路上的總電流。

9. 安培計和伏特計的構造和功用，有何不同？

10. 由伏特計量出的電壓，是否爲原電路上兩點間的絕對數值？量度電壓時應用的最精密方法又如何？

第八章 電磁感應

§ 1. 應電流*

[表演 1] 取一匝數甚多的線圈，和一電流計連接（圖 410）。如用條形磁鐵的一極，急速插入其中，則電流計的指針偏向一方，表示圈中有電流。當磁鐵留在線圈中不動時，指針立即回復其原位置，表示圈中無電流。再將磁鐵的一極由圈中急速提出時，指針偏向標度的他方，表示圈中所生的電流，和插入時所生的方向恰相反。如將磁極插入或提出的速度增加，則所生的電流強度必較前爲大。

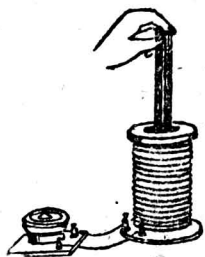


圖 410 應電流的實驗

*實驗 34, (I) 及 (II).

由實驗知磁極和線圈作相對運動時，線圈如成通路，即可發生瞬時電流的流動。這種電流，稱為應電流(induced current)，其強度和兩者相對運動的速度成正比，故當靜止時，線圈中即無應電流發生，凡發生應電流的現象，稱為電磁感應(electromagnetic induction)。這種現象，係由法拉第的實驗而發見，自彼於公元 1831 年發表後，因其可生多量的電能，故較電池更為重要，而為近代電工業的基礎。對於法拉第的實驗，除上述的表演外，更可由下列的表演，以明發生應電流的一般情形。

[表演 2] 如圖 411，試取 P 圈放於 S 圈內，將 P 圈和電池及電鑰串聯， S 圈和電流計連接。如將電鑰閉合，使 P 圈成通路時，由電流計指針的偏向，知 S 圈內發生應電流。但 P 圈內電流穩定時，指針即回復原位。設將電鑰開放，則當 P 圈內電流斷絕的瞬間， S 圈內亦發生應電流，其方向和前相反。若在 P 圈內放一軟鐵棒，再作同樣的實驗，則電流計中指針的偏轉必更大，以表示應電流強度因軟鐵棒的插入而增加。

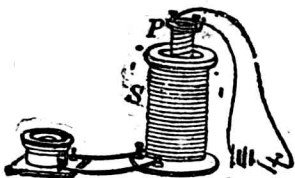


圖 411 互感應

[表演 3] 如將 P 圈和電池接成通路，待電流計的指針靜止後，再將 P 圈突然上提， S 圈內亦有應電流發生。然後將 P 圈急速插入 S 圈內，即得和上提時方向相反的應電流。試將此表演和表演 1 互相比較。若於此表演中更將 P 圈和一可變電阻串聯而成通路後，突然改變其電阻的大小，以得電流的增加或減小時，則 S 線圈中亦可發生瞬時的應電流。

由實驗知兩線圈互相獨立而鄰近時，如將一線圈通以電流，

而使電流斷續，則另一線圈中即發生應電流。其和電池接成通路的一線圈 P ，稱為原線圈(primary coil)；其生應電流的一線圈 S ，稱為副線圈(secondary coil)。這種兩線圈相互間的電磁感應，稱為互感應(mutual induction)。故此時原線圈中的電流通稱感電流(inducing current)。凡原線圈的感電流(1)斷絕或連續的瞬時內，(2)或當電流穩定後，而將線圈作相對的移動時；(3)或將其電流強度增加和減小時，則鄰近的副線圈中都可發生應電流。綜合上列的種種表演，可知不論磁鐵在一線圈內移動，或由原線圈的移動，及其電流的變化，所得的結果，實均為磁力線在空間內的移動，或發生變化。故對於一線圈中發生應電流的條件，可得下列的推想，即：

穿過一線圈的磁力線如有增加或減少的情形時，則此線圈中即可發生應電流；其於磁力線的增加及減少時，所生瞬時應電流的方向彼此相反。

〔表演 4〕 將一線圈和電流計連接，而使圈面套於蹄形磁鐵的一磁極上，如圖 412 的情形。若將線圈沿磁力線的平面內運動，則無應電流發生；但若將線圈運動的方向和磁力線互相垂直，則發生應電流。

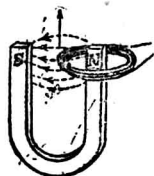


圖 412

應電流發生的條件

更由實驗，可知應電流須當導線橫截磁力線(cutting lines of force)時，方能發生。這是應電流發生條件的另一種推想方法。

§ 2. 楞次定律和右手定則*

楞次 (Lenz) 於公元 1834 年, 發表應電流的方向和導線在磁場內移動的關係; 即磁場和導線作相對運動時, 導線上所生的應電流, 常另生一磁場以反抗其運動, 由此磁力線的方向就可確定應電流的方向 (安培定則). 例如圖 413, 如將磁鐵的 N 極插入線圈時, 則線圈向此磁極的一端必生 N 極, 以抵抗其運動, 再依安培定則, 就可確定線圈上所生應電流的方向. 又將磁鐵的 N 極在圈內移出時, 線圈和磁極相近的一端, 必生 S 極, 以抵抗其運動. 亦可由所生的 S 極, 而確定應電流的方向. 如以磁鐵的 S 極插入線圈, 或由線圈中移出時, 亦可依楞次定律以確定應電流的方向. 又如兩線圈生互感應時, 因原線圈中通電, 磁力線發出, 即貫穿副線圈而移動, 故副線圈所生的應電流, 必生一磁場以阻止此運動. 可知原線圈中通入電流時, 副線圈中所生應電流必和原線圈中的感電流取反對的方向; 如原線圈中斷電時, 則散布於副線圈中的磁場必消滅, 副線圈中的應電流須產生一磁場以阻止其消滅, 可知副線圈中應電流的方向, 必和原線圈上的感電流的方向相同.

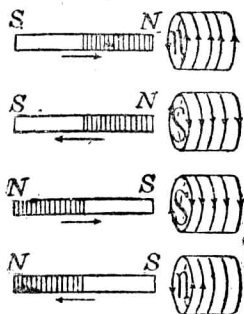


圖 413 應電流的方向

*實驗 34, II.

楞次定律實和能量不滅律相符合，即電的能量應由機械的功，或其他能量的消耗而得。故將磁極插入線圈內，必作機械的功，方可變成電能，應電流所生的磁場，恰反抗磁場和導線的相對運動，實為應有的現象。

如就導線在磁場內橫截磁力線的概念而論，則導線中所生應電流的方向，可由佛來銘所發明的右手定則(right hand rule)來確定，頗為便利。這個定則，和通電的導線在磁場內運動時的情形相似，即如圖 414，將

右手的拇指、食指、中指伸直，互成直角，如食指表示磁力線的方向，拇指表示導線在磁場內運動

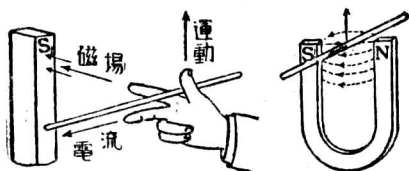


圖 414 右手定則

的方向，則中指所指的方向，即為應電流的方向。

§ 3. 應電動勢

凡電流都由電動勢而發生，由電磁感應所生的電動勢，稱為應電動勢(induced E. M. F.). 由實驗，知任何一線圈中，因磁場的變化而生的應電動勢，和線圈中磁通量的變率，及線圈的匝數成正比。設命 Φ_1 表示線圈中原有的磁通量， Φ_2 為歷 t 秒末時的磁通量， N 為線圈的匝數， E 為應電動勢，則得：

$$E = KN \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

又因線圈中每秒有 100,000,000 條磁力線變化時，則單線圈中恰生 1 伏特的應電動勢，而常數 K 即等於 1，故應電動勢的公式可表示為：

$$E(\text{伏特}) = N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t \times 10^8}$$

上式中磁通量的變率，如在任何時刻均為一定的數值，則得定電動勢(constant E. M. F.)；若磁通量的變化各秒不等，則在 t 秒內算得的電動勢，即為平均電動勢的數值。

通常計算應電動勢，亦可就導線於每秒內橫截磁力線的數目而定。設 H 為均勻磁場強度，即均勻磁場內每平方厘米中磁力線的數目， l 為導線能橫截磁力線部分所有長度的厘米數， v 為導線運動時速度的每秒厘米數，則當導線的運動恰和磁力線成垂直的方向時，其每秒橫截磁力線的總數，必為 lvH ，故應電動勢 E ，即為：

$$E(\text{伏特}) = \frac{lvH}{10^8}$$

〔例題〕 設一線圈的匝數為 1000，其圈面的面積為 500 平方厘米，如將此圈面和地磁場互相垂直，然後在 0.1 秒內將圈面轉過 90° 。若地磁強度為 0.3 高斯，則線圈中所生的應電動勢為若干伏特？

〔解法〕 因線圈中原有的磁力線為：

$$500 \times 0.3 = 150.$$

故經過 90° 時，其中磁力線的變率為：

$$1000 \times \frac{150}{0.1},$$

故

$$E = \frac{1500 \times 1000}{1.8} = 0.015 \text{ 伏特.}$$

§ 4. 自感應和感應係數

當一線圈中的電流增加或減少的瞬時內，不但其鄰近的電路中發生互感應而得應電流，且對其本身的電路，亦有應電流發生。這是因為一線圈中電流變化時，其磁力線亦必在圈面中發生變化，故線圈的本身亦有應電動勢發生。這種電磁感應的現象稱為自感應 (self-induction)。由楞次定律，凡一電路上有電流通入時，則因自感應而生應電流的方向，必和感電流的方向相反，以阻止感電流產生磁力線的趨向；如於電流斷絕時，則所生應電流的方向，必和感電流的方向相同，以阻止磁場的消滅，故導線上電流雖已斷絕，但因自感應必得暫時電流 (extra current) 的流動。可知自感應現象有抵抗電流的通入或斷絕的性質，和物質的慣性相像，故可稱為電慣性 (electric inertia)。

[表演] 如圖 415，將數個乾電池串聯而用導線使其一極和一銼刀柄相連接，再將由另一極通出的導線端，使其在刀面凹凸部分上滑動。則當斷電時，可見有火花發生於線端和刀面間。若再於此電路中插入一電磁鐵，而重作同樣的實驗時，則所現的火花更為顯明。

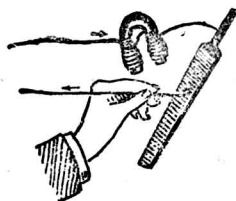


圖 415 自感應

如在匝數甚多的線圈中通以電流

後，突然將電流斷絕，則因斷路時電流的變率，常較通入時為大，而圈中磁力線的消滅變率，亦較通電時為大，故電路斷去時，因自感應所生的電動勢，常因甚大，而在斷處發生火花。這種現象，在電廠內用刀形電鍵 (knife switch) 斷絕電路時所常見，即為自感應顯著的例證。若於線圈中再插一軟鐵心，則因磁通量增加，故電流斷絕的瞬時內，磁力線消滅的變率更大，而由自感應發生的火花，能量亦更大。

任何電路中因自感應所生的電動勢，不但依電流的變率而定，且和電路的形狀及性質等均有關係。如某電路的附近並無磁質的存在，則其應電動勢和電流的變率成正比，即

$$e = L \left(\frac{I_2 - I_1}{t} \right).$$

上式中 I_1 表示電路上的原電流， I_2 為 t 秒末的電流， e 為應電動勢。 L 為一常數，稱為自感係數 (coefficient of self-induction or self-inductance)，其定義即為每單位電流變率所生的電動勢。如電流變率為每秒 1 安培，恰能發生 1 伏特的應電動勢，則得自感係數的實用單位，稱為 1 亨利 (henry)。若再取千分之一的亨利為單位，即稱為 1 毫亨利 (millihenry)。若線圈中有鐵心存在，則自感係數須依鐵的導磁係數方可確定。

當原線圈上的電流變率為 $\frac{I_2 - I_1}{t}$ 時，而鄰近副線圈上所生的應電動勢為 e ，設兩線圈中無磁質存在，則其關係亦和自感

應相似，可列式為：

$$e = M \left(\frac{I_2 - I_1}{t} \right).$$

式中 M 稱為互感係數 (coefficient of mutual induction or mutual inductance)，即原線圈上有每單位電流變率時，在副線圈上發生的應電動勢，其單位亦為亨利。

§ 5. 感應圈

感應圈 (induction coil) 係利用兩線圈的互感應，而發生高電動勢的裝置。其構造如圖 416，在一束互相絕緣的軟鐵線所製

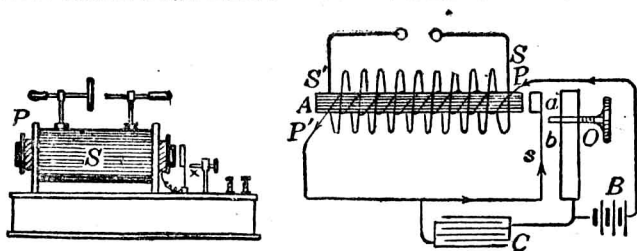


圖 416 感應圈的外觀和其內部

成的鐵心 A 上，繞有數百匝線包的粗銅線圈 PP' ，即為原線圈。在原線圈外更繞有數萬以至數十萬匝線包的細銅線圈 SS' ，即為副線圈。原線圈的一端和電池組 B 連接，他端和一附有軟鐵錘 a 的彈條 s 連接，經螺釘 O 的一端 b 處，而回至電池，以成通路。當電流通入原線圈時，鐵心因成電磁鐵，吸引 a 錘，就和 b 處脫離，電流中斷，鐵心失去磁性， a 錘回至原處，和 b 相接，電流

又通。如是 a 錘繼續作往復的振動，以成原線圈電路中的自動電鈴，故常稱為斷續器(interrupter)。這種電流的斷續，和電鈴中的裝置頗相似。當原線圈內感電流斷絕時，副線圈內的磁力線變率更大，其兩端即因極大的應電動勢，而發生火花放電。同時原線圈中感電流斷絕時，因有自感應所生的暫時電流，故螺釘的尖端 b 和 a 錘脫離處，常發生甚強的火花。此火花不但使螺釘的尖端發熱，易起熔解，且因暫時電流的方向，和感電流的方向相同，使貫穿副線圈面中的磁力線不易消滅，以影響圈中應電動勢的數值，故普通常於螺釘尖端和鐵錘間，並聯一容電器 C ，使原線圈所生的暫時電流，可立即儲積於容電器中，以免螺釘的尖端和鐵錘間發生強烈的火花，且可增加副線圈中磁力線消滅的變率，而得甚高的應電動勢。

感應圈的用途很廣。在內燃機中可利用其火花放電，使混合氣體燃燒而爆發。小感應圈常為醫生臨診時應用；較大的感應圈常應用於無線電報和 X 射線的發生等。

§6. 交電流

凡電路中的電流，其流動方向連續不變的，稱為直流(direct current)；若於一定的週期內，流動的方向常生往復變更的電流，則稱為交流(alternating current)。

〔表演〕 試將一線圈的兩端和一電流計連接，將圈面放在蹄形磁鐵的兩極間，和磁力線垂直，如圖 417 的情形。然後將圈面轉過 $18.^\circ$ 的位置，電流計的指針即

向一方偏轉。若再沿原方向轉過 180° 時，則電流計的指針向另一方偏轉，當線圈的平面和磁力線垂直時，恰為應電流改變方向的位置。

發電機 (dynamo or electric generator) 就是利用線圈在磁場內轉動，使機械能變成電能的裝置。通常所用的線圈，係繞在軟鐵心上，以增加磁通量，而在磁場內轉動，稱為電樞 (armature)。發生磁場的磁鐵，稱為場磁鐵 (field magnet)。

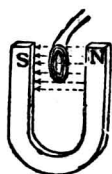


圖 417 交流電機的原理

交流發電機 (alternating current dynamo) 的構造，除電樞和場磁鐵的主要部分外，在和電樞相連的轉動軸上，裝有金屬環兩個，互相絕緣，如圖 418 的 R 和 R' ，稱為集流環 (collector

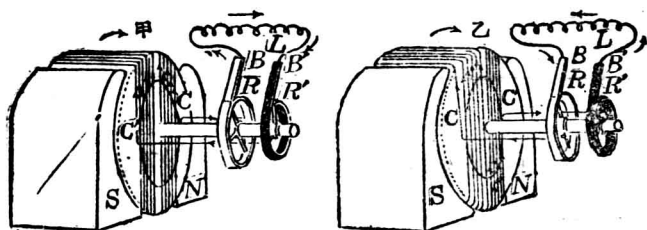


圖 418 簡單交流發電機

ring)，每環各和線圈的一端相連接。在集流環的附近更有位置固定的金屬刷 (brush) B 和 B' ，常和環周相接觸，且和外方的電路相連接。當電樞轉半轉時，電流由一刷流出而回至他刷，以成通路；再轉半轉時，電流的方向恰相反，故外電路上的電流就成

交流。城市中電燈所用的電流，多為交流，每秒電流的方向通常變換 100 次或 120 次，或一正一反的方向有 50 次或 60 次的循環，故稱此交流的頻率為 50 或 60 週(cycle)。

對於電樞中線圈上的電流方向和其轉動位置的關係，更可就圖 419 來說明。設 $cmnp$ 為一矩形單線圈，在蹄形磁鐵的兩極間作等速轉動。軸上的集流環僅繪

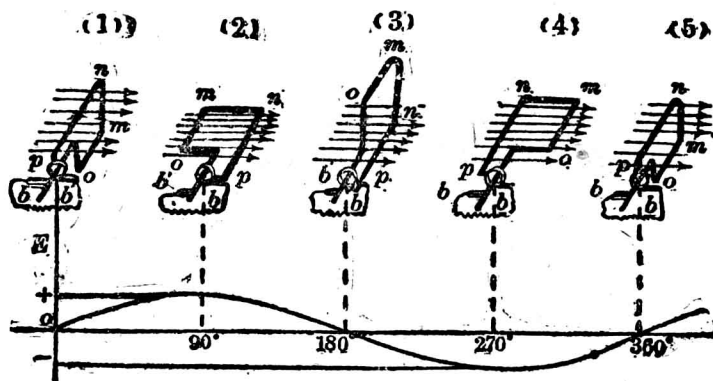


圖 419 交流電動勢的表示

一個，以便觀察。 b 和 b' 即為通至外電路的兩刷。當線圈面恰經過垂直面內，而和磁力線成垂直的位置時，導線各部分的運動方向，均和磁力線成平行〔(1) 的位置〕，故圖上並無應電動勢。若由此位置繞水平軸而依順時針的方向（由前方望去）轉過 9° ，則因 m 線向上， np 線向下，均橫截磁力線，所截線數漸增，至圈面和磁力線成平行時，變率最大〔(2) 的位置〕。但 mn 和 po 的兩部分導線，始終未能橫截磁力線，故對於橫截磁力線的導線部分，稱為作用導線 (acting element)。如依佛來銘的右手定則，可知線圈上電流的方向為 o 至 m 和 n 至 p ，即由 b 通過外電路而回至 b' ，以成通路。因右手定則常可用以確定電樞中電流的方向，故可稱為

發電機定則(dynamo rule), 如定線圈面和磁力線成垂直時的位置為 0° , 則由 0° 轉至 90° 的位置, 其電動勢係隨角的位置而增加, 可由圖 419 中下方的曲線來表示。以後線圈轉過的角如再增加至 180° 的位置時[(3)的位置], 其間電動勢即由最大值而漸減至零。由此位置再繼續轉動, 即因作用導線的位置恰和 0° 時的位置相反, 故所生的電動勢成爲負值, 電流即由 b' 經外電路而回至 b , 至 270° 時[(4)的位置], 亦達其最大數值。再由 270° 轉至 360° 的位置, 電動勢亦漸減小, 而達於零, 線圈即完成一轉的轉動。由圖中曲線, 即可表示線圈在兩磁極間, 由零位置起, 每轉過半轉所生電動勢的方向, 必變換一次, 而成交流。

以上所述, 僅爲交流發電機的簡單構造和原理, 其中所用的場磁鐵只有兩極, 即稱爲雙極交流發電機(bipolar alternator), 至工業上實用的發電機, 常用 4 極, 6 極, 或 8 極等的場磁鐵, 稱爲多極交流發電機(multipolar alternator), 應用多極發電機, 欲得一定的電動勢時, 對於電樞轉動的速度, 可較雙極發電機爲小; 例如 4 極發電機即有兩對磁極, 相互排列, 如圖 (2) 的情形, 故電樞上的每一導線旋轉一轉, 即可橫截磁力線 4 次, 而爲雙極發電機的 2 倍, 但其轉動的速度可減小一半, 即可產生同一電動勢。且因多極發電機的磁通量較雙極發電機爲多, 故可減少軟鐵的部分, 以減去發電機的重量, 並可節省製造的成本。

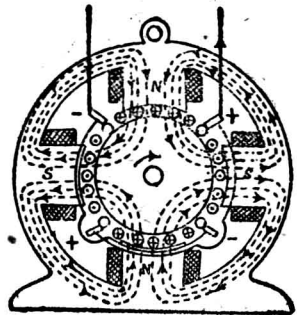


圖 420 4 極發電機的截面

凡電樞上僅有一組線圈, 而產生一種電動勢的交流發電機, 稱爲單相發電機(single phase alternator), 其頻率即等於每秒的轉數和磁極對數的乘積。若用兩組的線圈在電樞上繞着, 使兩線圈互成 90° 電度的位置, 則成在一發電機上可得兩種電動

勢的交流發電機。稱為二相發電機 (two phase alternator)。若用三組的線圈在電樞上互成 120° 電度的位置，則成可得三種電動勢的交流發電機 稱為三相發電機 (three phase alternator)。這種多相發電機所生的數種電動勢，可以分別應用，或可合併應用。例如圖 421，即表示三相發電機的三種電壓。圖 422 即為三相發電機合用時，可將通至外電路的導線，由六根合併為三根

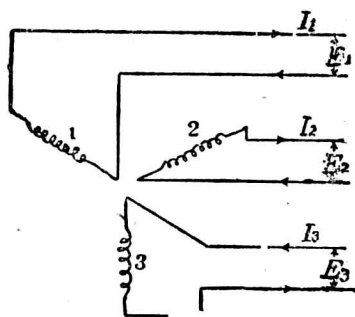


圖 421 三相發電機的三種電壓

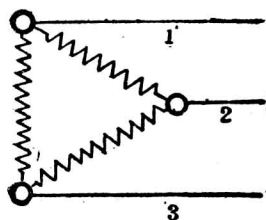


圖 422 三相發電機接法的一種

的方法 故於每兩線間，均可得用其相當的電壓，實用時對於線路上的導線，可以節省而較為簡便。

§ 7. 直流發電機

若將交流發電機的集流環用一整流器 (commutator) 代其位置，就可使電樞中的交流通至外方的電路時，變成同一方向的直流。這種電機，稱為直流發電機 (direct current dynamo)。最簡單的整流器，係由一金屬環 分成兩段 (segment) 而成。兩

段間彼此絕緣，各和電樞上線圈的一端相連接。如圖 423， R 和 R' 即為簡單整流器的兩段。每段的圓弧上，各與炭刷 B 和 B' 接觸，以和外電路相通。當電樞轉動半轉時，炭刷 B 和 R 接觸，再轉半轉，卻和 R' 接觸。其他一炭刷亦於電樞轉動時，每隔半轉即變換其所接觸的段，故線圈上電流的方向變更時，因炭刷和整流器接觸的段亦同時變更，那麼由炭刷通至外電路上的電流，就變成直流。

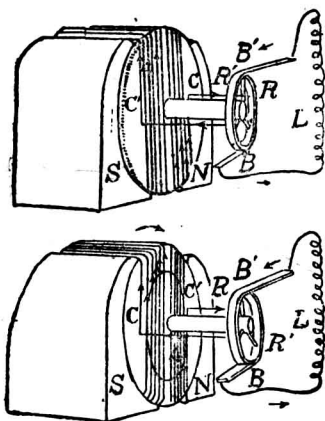


圖 4-3 簡單直流發電機

對於電樞中所生的交流，由整流器變成外電路上的直流時，電動勢必隨線圈轉動的位置而變更，圖 24 即示其變更的情形。

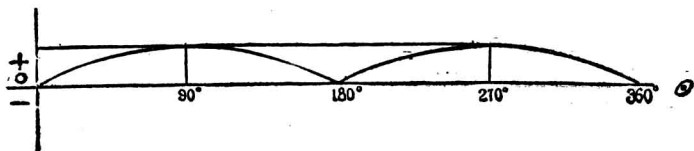


圖 424 直流電動勢的表示

§ 8. 電樞的形式

發電機中普通所用的電樞，係先用絕緣的薄鐵板若干片，釘合而成一圓柱，再依和柱軸平行的方向，繞有線圈而構成。這種形式，稱為鼓形電樞 (drum armature)。例如圖 425 為直流發電機中鼓形電樞的鐵心，和繞有一個線圈的形狀。這

種由絕緣的薄鐵片集合而成的鐵心，稱爲分片鐵心(laminated core)，又如圖 426，即表示直流發電機中鼓形電樞的前端形狀，電樞的周圍繞有互成一定角度的八個線圈，用 $11_1 22_1$

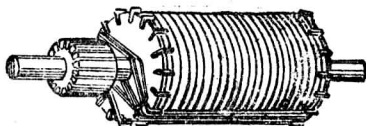


圖 4 5 分片鐵心

33_1 等數字，表示各線匝互相串聯的順序，虛線即爲電樞後端連接的導線，并在每兩線圈的連接處，由導線和整流器的一段相銜接，故整流器上實用時分成的絕緣段數，常和鐵心上所繞線圈的數目相等。這樣繞法的電樞，如依圖中所示在兩極間依反時針的方向轉動時，則其左方半周上的各導線，所生應電流的方向均相同，而右方半周上的各導線，亦生同向的電流。故電樞中所生的應電流，常由 b' 刷導出，經外電路而回入 b 刷，以成直流。

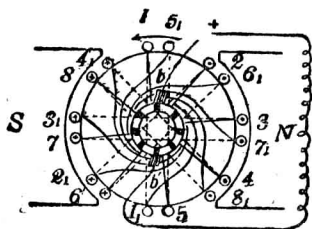


圖 426 鼓形電樞

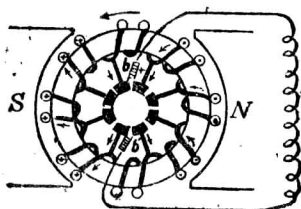


圖 427 環形電樞

發電機中除用鼓形電樞外，尚有一種環形電樞(ring armature)，例如圖 427，即爲直流發電機中環形電樞的繞法，其鐵心成環狀，爲一束絕緣鐵線集合而成。環上繞有排列均勻的八個線圈，互相串聯，每兩個線圈的連接處，亦用一導線和整流器的一段相銜接。這種電樞轉動時，於外電路上，亦可得一定方向的直流。

環形電樞在兩磁極間轉動時，因環的內側無磁力線的存在，故各線圈上能橫截磁力線而發生效應的，只限於環的外側的部分，其前後兩端和環的內側的部分，

只供導線之用，頗不經濟，至鼓形電樞的各線圈上，除兩端的部分外，其兩半周的導線，均能橫截磁力線，效用較大。但因環形電樞中各線圈的絕緣比較優良，故於高壓直流發電機中，常用這種電樞。

§ 9. 磁場的激發

電樞的磁場多利用電磁鐵而發生，稱為磁場的激發 (excitation of the field magnet)。激發的方法大別為分激和自激的兩種：

(1) 分激發電機 如在發電機的外方另用一直流發電機，供給產生磁場的電流，所用的方法，稱為分激法 (separate excitation)。這種方法，常用於交流發電機，而稱為分激發電機 (separately excited dynamo)。其供給電流的直流發電機，即稱為激發機 (exciter)。

(2) 自激發電機 凡利用場磁鐵的剩磁 (residual magnetism)，使電樞迴轉動所發生的微弱應電流，通過其本身的場磁鐵，使線圈漸次激發，至一定磁場強度。這種激發磁場的電機，稱為自激發電機 (self-excited dynamo)，常用於直流發電機中。又因繞法的不同，可分為三種自激法 (self-excitation)。

(a) 串繞發電機 如將電機中場磁鐵上的線圈，和電樞的線圈及外電路串聯，而行激發的，稱為串繞發電機 (series wound dynamo)。因線圈中通過的電流強度，和外電路上所通過的常相同，故外電路的電阻須有一定，方可保持發電機的定電動勢。這種繞法，應用粗線，使發電機可供給強度較大的電流，如圖 428，即為串繞發電機應用於弧光燈電路時的連接法。

(b) 分繞發電機 如圖 429，若將場磁鐵的線圈和外電路並聯於兩刷上，則得線圈的分路繞法。這種發電機，稱為分繞發電機 (shunt wound dynamo)。分繞線圈所用的導線較串繞發電機中所用的為細，但其繞成的匝數則較多，故亦可激發所需的磁場強度。如外電路上的電阻不變，則分繞線圈中電流強度，即有一定，以發生變的磁場強度，而可保持發電機的定電動勢。

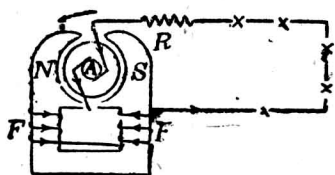


圖 428 串繞發電機

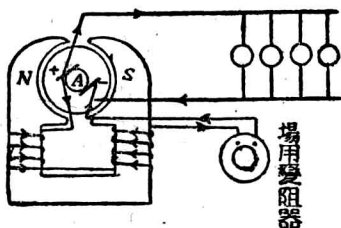


圖 429 分繞發電機

(c) 複繞發電機 城市中電燈或電車等的電路上所呈的總電阻，常發生變化，若用上述兩種發電機，則場磁鐵的強度即隨電流的變化而有大小，不能得定電動勢，以供給電路上的應用。故對於這等電路上所用的發電機，其場磁鐵的自激法，常將上述的串繞和分繞同時並用，而成定電動勢的複繞發電機 (compound wound dynamo)。如圖 430，場磁鐵上所繞的線圈，一部分為粗線繞成的串聯線

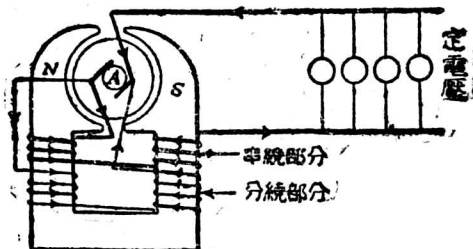


圖 430 複繞發電機

圈，和外電路互相串聯，而另一部分即為細線繞成的分繞線圈，在兩刷上和外部電路並聯，以成分路。故因激發而生的磁場強度，即和兩部分線圈中通過電流的總和成正比。但因發電機導出的總電流有一定的數值，如外電路上的電阻有變更時，則串繞部分和分繞部分中的電流，固各有變化，然其總和仍為一定。可知利用複繞的方法，即可產生定電動勢，而和外方電阻的變化無關係。

§ 10. 渦電流

感應圈中所用的鐵心，常為一束絕緣軟鐵線集合而成，而不用實體的鐵心，其理即因用實鐵心時，外方原線圈上電流的斷續，不但副線圈上發生應電流，而鐵心中亦必發生和副線圈上同方向的電流，如圖 431 的形狀，這種鐵心中的電流，稱為

渦電流(eddy current)，或稱佛科電流(Foucault current)。其流動的結果，可使鐵心發熱，而不易傳播於外方，致鐵心外所包線圈的絕緣程度，發生妨害。故若將實鐵心改成一束的絕緣鐵線，即可切斷渦

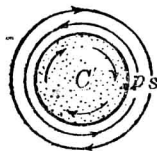


圖 431

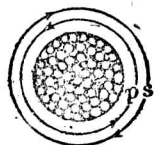


圖 432

實鐵心中的渦電流 絕緣鐵線製成的鐵心

電流的電路，如圖 432 的形狀。鼓形電樞中採用矽片鐵心(圖 425)的原因，即為避免渦電流的緣故，至環形電樞中的鐵心，須用軟鐵線製成，其理由亦相同。

§ 11. 電動機*

利用電能以成機械功的裝置，稱為電動機(electric motor)。直流電動機(direct current motor)的構造較為簡單，和直流發電機幾相同。如由外方使電流通過電樞，則由通電的線圈在磁場內轉動的實驗，和佛來銘的左手定則，可知電樞就在磁場內轉動。因左手定則可決定電樞轉動的方向，故亦可稱為電動機定則(motor rule)。

如圖 433，當直流電由金屬刷 B 通至整流器的一段，經線圈而在整流器的另一段，由金屬刷 B' 流出時，圈的左方為 n 極，

*實驗 3b.

右方爲 s 極，電樞就依圖中箭頭所示的方向，轉動半轉，自甲的位置轉至相反的乙的位置。這時整流器的兩段，恰能更換其所接觸的金屬刷，故可使線圈上的電流，變更其方向。可知線圈的位置雖已變更 180° ，但因其內電流的方向同時改變，故鄰近場磁鐵 N 極的一方，仍生 n 極，他方仍爲 s 極，電樞即依前半轉的原方向而轉動。如

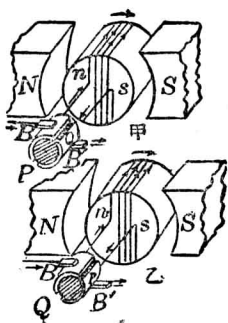


圖 133 直流電動機

是由整流器將外方的直流變成線圈上的交流，即可使電樞繼續轉動。實際所用的直流電動機，其電樞上的線圈雖爲數組串聯而成。整流器有相當的段數，但其能依一定方向轉動的原理仍相同。

電動機轉動時，其電樞上的各線圈，因橫截磁力線，故即生一相當的電動勢，和外加電動勢的方向相反。這種電動勢，即爲電動機的反電動勢(counter E. M. F. of a motor)。由 p. 201, § 8. 可知通過電動機中的電流，依照下式而確定，即

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

式中 R 表示電樞線路中所有的總電阻。但因電動機初動時，反電動勢 e 的數值不大，故通入的電流極大，很易毀壞電樞。若用一可變電阻和電動機串聯，則於電動機初動時，可配準所

需的電流，至電動機轉動的速度漸增後，因其反電動勢的增加，即可漸減串聯電阻，使達到額定的電流，大電動機中串聯的開動器(starter)，即本此原理而設置。

§ 12 電扇、電車、和瓦特小時計

電扇(electric fan)即利用電動機以旋轉推進器，而推動空氣的裝置(圖 434)，電車(tram car)所用的電動機，裝於車體的下面，並於其電樞的軸上，附有齒輪，以和車軸的齒輪相連接，故能驅動車輪，如圖 435，由發電機供給的電流，經架空線 L ，由



圖 434 電扇

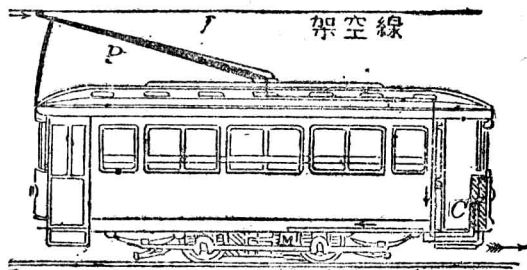


圖 435 電車

P 桿導入電動機，而由地上的鐵軌流回。架空線和鐵軌間的電位差，通常為 500 伏特，各車的接法，均為並聯。每車的前方裝有可變電阻箱，和電路串聯，駕車者得隨時應用，以節制通入電動機的電流強度，而改變電車進行的速度。無軌電車的架空線有二，車頂即有二桿，為電流導入和導出的部分。

瓦特小時計 (watt-hour meter) 俗稱電表，為自動記錄電

能消耗量的機械，其主要部分亦為電動機的應用。如圖 436， A 為電樞， F 為場磁鐵，場磁鐵亦為電磁鐵，而將其線圈和需要電能的電路串聯，故通過的電流即為所用的電流強度。電樞和幹路並聯，其中通過的電流強度，和幹路兩導線間的電壓成正比。故電樞在磁場內轉動時所需的功，和

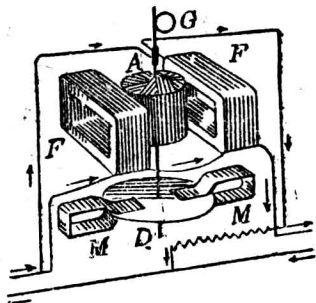


圖 436 瓦特小時計的內部

安培數及伏特數的乘積成正比，或和瓦特數成正比。更於電樞軸的下端附有鋁製的圓盤 D ，在強磁鐵 M 間轉動時，因發生電磁感應，可調節電樞的轉動，故由相當的校準，可使電樞轉動的速度和瓦特數成正比，而其轉動總次數則和瓦特小時數成正比，再由電樞軸上所附齒輪的轉動，即可記出所消耗的電能量。

§ 13. 變壓器

變壓器(transformer)為應用電磁感應以得交流電壓升降的裝置。其構造的要部即為原線圈和副線圈分繞在一矽鋼環上而成，如圖 437，原線圈 P 和交流發電機 G 連接，副線圈 S 即因電磁感應而發生應電動勢，以供給電燈或其他電路上的應用。

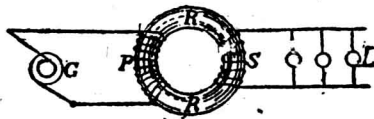


圖 437 變壓器的原理

在理想的變壓器，任一瞬間通過副線圈的磁通量，皆應與通過原線圈者完全相同，因而兩線圈內的磁通量變率亦當相同。故原線圈的電壓和副線圈的電壓的比，必等於原線圈的匝數和副線圈的匝數的比，可列式如下：

$$\frac{\text{〔原線圈的電壓〕}}{\text{〔副線圈的電壓〕}} = \frac{\text{〔原線圈的匝數〕}}{\text{〔副線圈的匝數〕}}$$

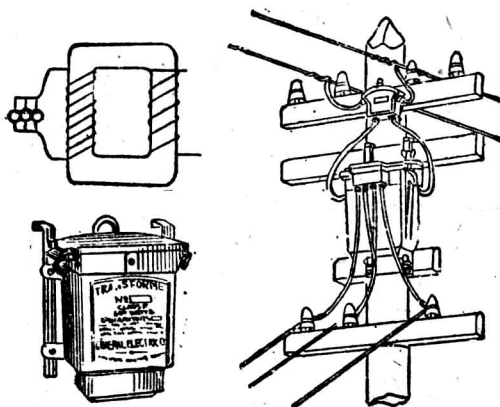


圖 458 變壓器的內部外觀和裝置

如原線圈的匝數較少，副線圈的匝數較多，則若將低電壓的交流，連接原線圈，則在副線圈上可得高電壓的交流。凡將低電壓變成高電壓的變壓器，稱為升壓器(step-up transformer)；若原線圈的匝數較副線圈為多，則可得由高電壓變成低電壓的變壓器，稱為降壓器(step-down transformer)。

交流電壓雖可用變壓器以升降，但為升壓器時，副線圈上

的電流強度則較原線圈上的為小，而降壓器的作用卻使副線圈上的電流強度增加。理想上的變壓器，其原線圈和副線圈上的功率，應常相等，但實際上因熱量的發生，而消耗一部分的電能，故副線圈上的功率，約為原線圈上的 97%。

發電廠的交流，常用升壓器變成數千或數萬伏特的高電壓電流，以輸送至遠處。其目的在求輸送導線上通過的電流強度可以減小，以減少導線上消耗的熱能，且可用較細的導線以合設備上的經濟原則。至高電壓的交流通至城市後，常用降壓器，逐步將電壓降低，以導入用戶。這種電功率的傳遞 (electrical transmission of power)，為交流電能輸送於長距離時的優點，而非直流電能所能望及的，故電廠中常用的發電機，多用交流。其對於長距離電路中的裝置，約如圖 439 的情形。

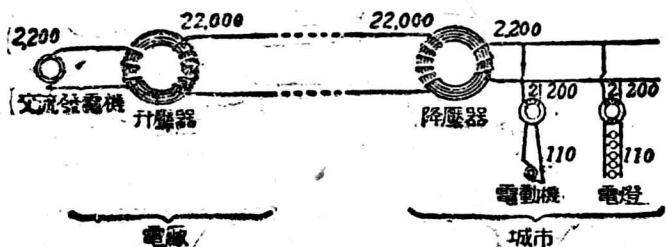


圖 439 長距離輸電之交流電壓的升降

§ 14. 電話

電話 (telephone) 即利用電流強度的變化和電磁感應，以傳

達言語於遠方的裝置。其重要部分為發話器 (telephone transmitter) 和收話器 (telephone receiver)。如圖 440, 為發話器的截面, A 為薄鐵片, B 函內為無數的細碳粒, F 為碳條。如將電流由 F 通入, 經碳粒而由鐵片經 G 流出, 則於鐵片前發一聲音, 薄鐵片即因受聲波而起振動, 片後的碳粒即受壓迫或放鬆, 其受壓迫時的電阻較放鬆時為小, 故片起振動, 可使經碳粒的電流, 隨所發的聲音而起強度上的變化。又如圖 441, 為收話器的截面, A 為蹄形磁鐵, 兩磁極前有軟

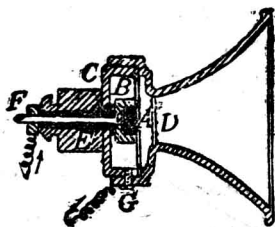


圖 440 發話器

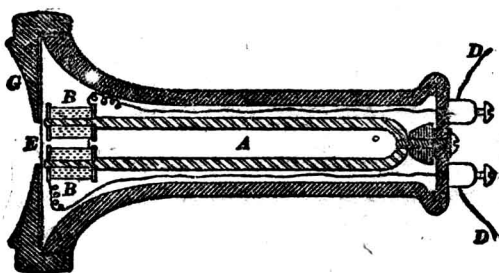


圖 441 收話器

鐵片 E , 每極上各繞有匝數極多的線圈 B 、 B' , 兩線圈的捲繞方向相反, 而互相串聯, 和外方電路 D 、 D' 相聯結。

簡單電話的裝置, 可用圖 442, 以說明其原理。 T 和 T' 為兩方的發話器, R 和 R' 為收話器, C 和 C' 為變壓器, B 和 B' 為電

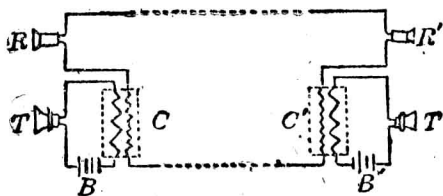


圖 442 簡單電話的原理

池組。設於 T 前送話時，薄鐵片受聲波而生振動，則變壓器 C 的原線圈上即生電流強度的變化，使副線圈上所生的應電流，即通過他方的收話器 R' ，使電磁鐵的極強亦生變化，而收話器中軟鐵片即起振動，以發出聲波，其頻率恰和發話器所受的聲波相同。故一方的語言，就可傳至對方。

習 題

1. 試由兩種推想的方法，述應電流發生的條件。
2. 一線圈中欲生 10 伏特的電動勢時，每秒須橫截磁力線的數目為若干？
3. 一均勻磁場的強度為 30,000 C. G. S. 單位。如有長度為 25 厘米的銅條，以 100 厘米每秒的速度直垂橫截此磁場時，則其兩端所生的電位差為若干？
4. 一線圈的匝數為 50，如經 $1/5$ 秒，在磁場內轉動半轉，可生 10 伏特的電動勢，求線圈中，含有最多磁力線時的數目。
5. 說明副線圈對於原線圈發生互感應時，所生應電流的方向。
6. 試繪一感應圈的簡圖，說明其作用。
7. 設將一線圈，在地磁場內繞鉛直軸而轉動時，則可產生交流電。問當線圈轉動至如何位置時，其電流的方向恰生變化？

8. 一感應圈中磁通量的變化為 100,000 條線，設原線圈中的電流斷絕時，磁力線在 $1/100$ 秒內消滅，兩極間可發生 75,000 伏特的電壓，則副線圈須有的匝數為若干？

9. 一發電機的電樞含有 50 個線圈，每一線圈係 5 迴線(loop)所組成。如電樞於每分鐘轉動 600 次，每一作用導線於每轉動半轉時，可橫截 2,000,000 條磁力線。求其發生的電動勢。

10. 一電動機受有外加電動勢 500 伏特，其反電動勢為 450 伏特。設電樞的電阻為 10 歐姆，則其中通過的電流為若干？

11. 一電動機和 500 伏特的電壓相連接，流過的電流為 8 安培。如此電動機發生 5 馬力的功率，求其效率。

12. 一變壓器中原線圈的匝數為 1000，通過的電流為 10 安培。若副線圈的匝數為 60，則其中的電流為若干？

13. 一變壓器的原線圈上，有 10 安培的電流，其電壓為 2000 伏特。設其副線圈上傳遞 194 安培的電流，電壓為 10 伏特，則每小時傳遞的能量為若干？消耗的能量為若干？

14. 變壓器能否將直流的電壓升降？何故？

15. 電燈廠常採用交流電，以供給用戶，而不用直流電。何故？

第九章 真空放電

§ 1. 低氣壓時的放電

各種氣體在通常溫度和氣壓下，常為電的優良絕緣體。但在氣體中的兩金屬電極，如施以相當的高電壓，即可使電極間發生火花放電，是為電經氣體的傳導(conduction of electricity

through gases). 若如圖 443, 將金屬片 A 和 B 各封入一長玻璃管的盡端, 而和感應圈的電極相連接, 則當管中有通常狀態的空氣時, AB 間不能發生放電現象。如用空氣唧筒將管中的空氣抽去, 使氣壓降至水銀柱數厘米時, 則感應圈所生的火花放電, 即不起於電花隙 S , 而在距離較長的 AB 間通過。可知氣體在低氣壓時亦能導電, 其傳導性常隨氣壓的降低而增加。

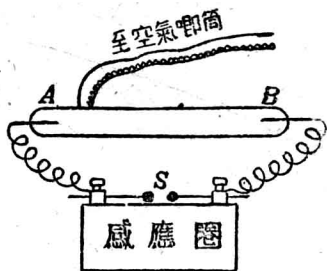


圖 443 半真空內的放電

真空管中放電的形狀, 常隨其真空程度而異。例如圖 444, 即表示其放電的程序。當管中最初放電時, AB 間呈一條光輝

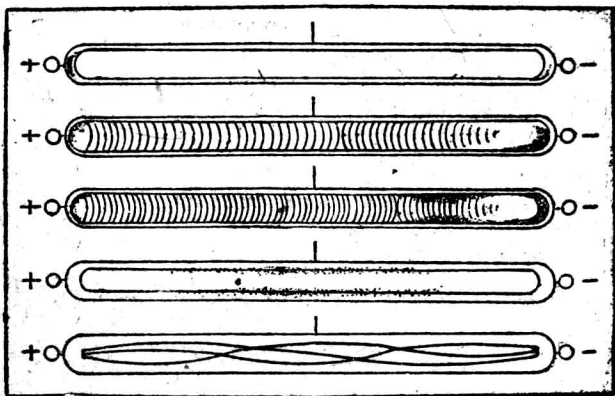


圖 444 真空管中放電的程序

的長帶。如氣壓降低約至水銀柱 4 厘米時，則帶漸擴大，而直至充滿全管為止。管中剩餘氣體於放電時所顯光輝的顏色，常隨其氣壓而變化，並隨氣體的種類而異。如用分光鏡檢查其光譜，即可由觀察而得管中氣體特有的明線，故光學中常用含有汞汽或氬等氣體的真空管，於其放電時的明線，供作測定波長的標準。這種剩餘氣體已達最易傳電時的放電管，或氣體於放電時能顯示其最大亮度時的真空管，稱為蓋斯勒管(Geissler tube)。近代都市中常利用這種放電管，變成各種文字或圖形，在晚間作為商品廣告；例如管中有氖(neon)的氣體，放電時呈紅色，如有汞和氬的氣體，即顯深綠色，燦爛悅目，頗為美觀。

設再將其真空管中的氣壓降至 $\frac{1}{2}$ 毫米上下時，則光帶縮短管中陰極和陽極間生一暗區，稱為法拉第暗區 (Faraday dark space)(圖 445)。在這暗區和陰極間有光亮的部分，稱為陰極電輝 (negative glow)。再近陰極，又呈一暗區，稱為克魯克斯暗區 (Crookes dark space)。

在陰極上有一層光輝，稱為陰極面電輝(cathode surface glow)。鄰近陽極的部分，所生無數鱗狀的光輝，凹面常對陽極的，稱為輝紋(striate)。這種明暗交互而生輝紋的部分，稱為陽極區(positive column)。



圖 445 真空放電的現象

真空管中的真空程度愈高時，其中克魯克斯暗區漸擴大，而

陽極區則漸縮短，至克魯克斯暗區遠離陰極 1 厘米以上，其附近的玻璃管壁，即開始發生螢光；冕牌玻璃顯示綠黃色，而火石玻璃則呈藍色。若用高度真空的空氣唧筒繼續抽氣，使達水銀柱 0.001 毫米的氣壓時，則玻璃管壁的全部分都發生螢光，而放電輝紋已完全消滅。這種真空程度的放電管，稱為克魯克斯管 (Crookes tube)。

§ 2. 陰極射線

英人克魯克斯研究真空管壁的螢光，於公元 1885 年得一重要的發見，即在陰極表面上有一種不可見輻射發出，著稱為陰極射線(cathode ray)。這種射線的主要性質，可分述如下：

(1) 陰極射線激發螢光 克魯克斯管中管壁所生的螢光，以正對陰極的部分為最強。若在管中立一十字形的金屬板，則對壁即成和板形相同的影(圖 446)，可知螢光係陰極射線衝撞於管壁而發生；且由成影的現象，可知陰極射線常依直線而進行。

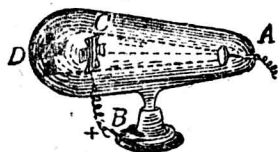


圖 446 陰極射線的成影

(2) 熱效應和機械效應 陰極射線常和陰極面垂直，故陰極如用凹面，則發出的射線可集合於一焦點。若在焦點處放一鉑板，則板受射線的衝擊，發生熱效應，以致白熾(圖 447)。又在陰極射線路程上，放一轉輪，即生機械效應，使輪轉動(圖 448)，



圖 447 熱效應

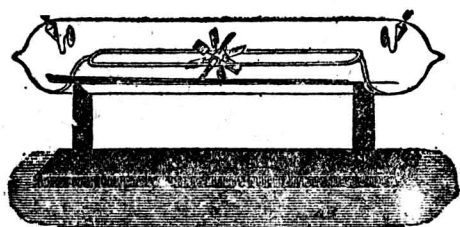


圖 448 機械效應

(3) 陰極射線在磁場內發生偏轉 設如圖 449, 用一薄鋁片或雲母片放在陰極附近, 畫一狹縫 s , 則射線透過縫後, 成一狹柱。如在射線後放一塗有發生螢光物質的板, 即可顯示其進

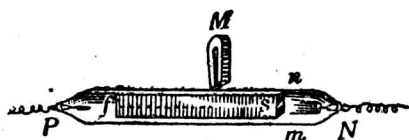


圖 449 陰極射線在磁場內的偏轉

行的路程。若於射線旁放一蹄形磁鐵, 使磁力線和射線垂直, 則射線進行的路程即生偏轉。由其偏轉的方向, 知和通電導線在磁場內的運動相似。如用佛來銘左手定則, 可證明陰極射線為許多帶有負



圖 450 陰極射線在電場內的偏轉

電的粒子所組成。

(4) 陰極射線在電場內發生偏轉 如圖 450. 將陰極射線

經過狹縫後，使一狹柱射線通過兩金屬片 P, P' 間，而在正對陰極的螢光板上，得一 S 的光點。若將 P' 帶正電， P 帶負電，則射線必生偏轉，而成 S' 的光點。其偏轉的方向常向正電片，可知射線為許多負電的粒子，更為顯明。

英國物理學家湯姆生(J. J. Thomson)於公元 1895 年，即由上述實驗，證明陰極射線為高速度的電子流。並由量度，得推算(1)陰極射線的速度；(2)和其荷質比(specific charge, 即電子所帶的電荷和其質量的比率) $\frac{e}{m}$ 的數值。由實測的結果，知其速度依真空管的兩極上所施的電壓而定，其數值為自光速的 $1/10$ 而達 $1/2$ (光速為 3×10^{10} 厘米/秒)，至荷質比卻不受剩餘氣體的性質和所用陰極的性質而有影響，故用鋁、鐵、銅等各種不同的金屬為陰極，所得的結果均相同，即

$$\frac{e}{m} = 1.762 \times 10^8 \text{ 每克庫侖。}$$

在電解中，氫游子的荷質比為最大，即

$$\frac{e}{m_H} = 95730 \text{ 每克庫侖。}$$

又由實驗知，氫游子所帶的電荷，恰和電子所帶的相同，故由上列的荷質比，可得

$$\frac{\text{氫原子的質量}}{\text{電子的質量}} = \frac{1.762 \times 10^8}{95730} = 1840.$$

可知電子的質量約為最輕的氫原子的 $\frac{1}{1800}$ ，而電子的質量為 9×10^{-28} 克。

每一電子所帶的電荷為 4.77×10^{-10} 靜電單位的電量，故由陰極射線所推得的電的原子性，恰和電解所得的結果相同。

§ 3. X 射線

德國物理學家倫琴(Röntgen)於公元1895年,實驗陰極射線時,發見射線和玻璃管壁,或管中任何障礙物衝突,可由管壁或障礙物上,發出一種新的不可見輻射,著稱爲X射線(X-ray)或稱倫琴射線(Röntgen ray)。通常所用的X射線管(X-ray tube),如圖451的形式。 C 爲鉛製的陰極,呈凹球面形,發出的陰極射線,可會聚於一點。 P 爲厚鉑片或錫片製成的陽極,其表面恰在陰極射線的焦點處,並和陰極面的軸線成 45° 的傾角,即爲陰極

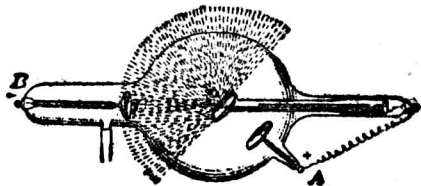


圖 51 X射線管

射線衝撞的靶(target)。靶面即發出X射線,向對方半球的各方輻射。由玻璃壁的黄綠色螢光,可顯見其輻射的範圍。這種裝置,因管中尚有剩餘氣體,故亦可稱爲氣體X射線管(gas X-ray tube)。X射線的特性,可分述如下:

(1) 貫穿本領 X射線的最顯著的特性爲貫穿本領(penetrating power),即有透過平常光線所不能通過的物質,如木、布、肌肉等,的本領。但遇金屬板和骨節等,即不易透過。如將手掌放在塗有鉑氰化鋇(barium platincyanide)的螢光板上,並將手掌放在X射線和板間,即因射線透過的程度不同,故可窺察骨節的結構(圖452)。凡貫穿本領愈強的射線,稱爲硬性X射線(hard X-ray),其較弱的射線,稱爲軟性X射線(soft X-ray)。X射線雖能穿過若干張重疊的鉛片,但遇薄箔片時,卻易被吸收,而不能透過。其能貫穿物質的範圍,和物質的密度大致成反比。

(2) 游離效應 設一帶電的驗電器放在乾空氣內時,其所帶的電量可歷長久的時間而不失去。但是如放在 X 射線的附近,則電荷立即消失。這是因為 X 射線可發生游離效應(ionizing effect),使氣體變成正負兩種游子,而成為導電體的緣故。



圖 452 X 射線經過手部的情形

(3) 激發螢光效應 X 射線的重要特性,為對於各種晶體,能激發螢光效應。例如鎢酸鈣(calcium tungstate)可激發白光,而鉑氰化鋇則激發黃綠色光。這種螢光效應,可利用以鑑別各種貴晶體,如金剛石和珍珠等。

(4) 生理效應 X 射線對於癬、疥等疾病,可以療治。這種有機體受 X 射線而生變化的作用,稱為生理效應(physiological effect),但健全的細胞如受 X 射線的時間過久,則反被灼傷,而不易療治,或竟無從療治,故作硬性 X 射線的實驗時,應將 X 射線管放在鉛室中,除在鉛板上穿一小孔,使射線得透過以供實驗外,而其他部分即可和人體隔離。

(5) 感光效應 倫琴於研究克魯克斯管的放電時,因發見管旁黑紙密封的照相底片,發生感光作用,故由探求的結果,即導出 X 射線的發見。這種感光效應(photographic effect),現為醫生診斷上所通用。例如患有結核病的肺上常留有許多密疤(dense scars),即可在 X 射線下所攝成的照片檢出。

X 射線不受磁場或電場所偏轉,其本性和陰極射線完全不同。依近代研究的結果,知 X 射線為波長很短的電磁波,其速度和光波相等。勞厄(Laue)於公元 1912 年,用 X 射線照射晶體,發見其特性的繞射現象,如根據這種實驗,則量得 X 射線的波長為自 0.1 埃(即 0.00000001 厘米)至 10 埃(即 0.000001

厘米)的範圍,凡波長較短的,即成硬性 X 射線。

§ 4. 熱體發射的電子

愛迪生於公元 1883 年,曾在白熾燈中封入一金屬片,如圖 453 中的 P ,即現今所稱的板極 (plate)。若將此極和外電路上 B 電池組的正極相連接,如圖中的接法,則當燈絲 F 用 A 電池組通以電流而熾熱時, F 與 P 間雖為真空但有電流通過,可於 BP 的線路上插入一電流計以檢出。此時 BPF 的電路,可稱為板極電路 (plate circuit),以和燈絲電路 (filament circuit) 相區別。如將 P 極和 B 電池組的負極連接,則板極和燈絲間即無電流通過。這種現象,稱為

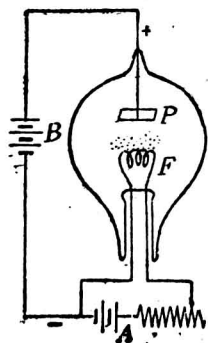


圖 53 熱游子管

愛迪生效應 (Edison effect)。又在這種效應被發見前,學者已知金屬的溫度升高時不能保留其所帶的電荷,但由這種現象,尚不能得一深切的理解。自公元 1900 年後,經李卻特生 (O. W. Richardson) 等的研究,方知熱體的表面上,有發射帶電粒子的特性,並稱這種粒子,為熱游子 (thermion)。

在通常氣壓的空氣內,熱體的表面所發生的熱游子,有帶正電和負電的兩種,情形較為複雜。若在高度真空的熱游子管 (thermionic tube) 內發射時,則熱燈絲發射的粒子,僅為負游子,故 P 極如和電池組的負極連接,則負游子即被推斥,電流不能

在 P, F 間流通, 而 P 極和電池組的正極相連時, 即因吸引負游子的作用, 故可成一板極電路。此種熱游子管之單向導電性能甚為重要, 應用頗廣。更由負游子在磁場和電場內偏轉的實驗, 可推出其荷質比, 而所得的數值, 恰和陰極射線所求得的結果相同。故真空管中熱體所發射的熱游子, 即證明為無數的電子。

熱游子管中板極電路上電流的大小, 須依板極和燈絲間的電壓而定。如電壓漸增加, 則電流亦漸增加; 但燈絲的溫度保持不變時, 其電流的增加亦有一定限度, 而成飽和狀態。若此時欲使電流再增加, 更須增高燈絲的溫度。又在同一溫度和電壓時, 各種熱體發射的電子數量均各不等。例如真空管中所用的鎢絲, 如敷以氧化鈾(thorium oxide)或氧化鈣等物質; 則因此種氧化面燈絲(oxide coated filament)在較低的溫度時, 可發射多量的電子, 故電流較用鎢絲者為大。

§ 5. 吞加整流器和柯立芝 X 射線管

近代對於蓄電池的灌電或其他需用直流電時, 可利用熱游子管中單向導電性的原理, 使輸入的交流變成直流, 而成吞加整流器(tungar rectifier)。其燈泡的形式如圖 454, 泡中稍充以氬, 達 3 厘米至 8 厘米的氣壓, 陽極為石墨或鎢所製成的一小錐體, 陰極為鎢絲圈, 應用時可如圖 455 的接法, 和其附設的變壓器 T , 連接至交流電源 CD 間。變壓器的原線圈 P 上, 有電流通過時, 其副線圈 S 即生應電流, 使泡中燈絲 F 熾熱。因輸入電流為交流, 故板極 A 和燈絲 F , 交互為正和負。

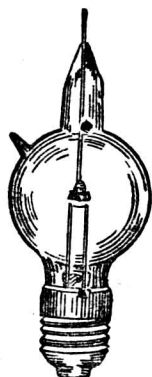


圖 454 吞加泡

如板極為正，則電路 $CRAFD$ 間可成通路，以使電路中所含的蓄電池組，可受其灌電。如板極為負，則電路不通。可知整流器有似唧筒中活門的作用，而蓄電池組或其他擔負 (load) 上所經過的電流，常成單向脈動電流 (unidirectional pulsating current)。

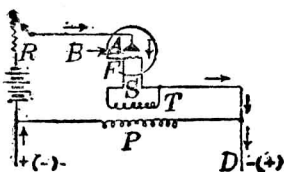


圖 455 真空整流器的原理

柯立芝 (W. D. Coolidge) 於公元 1913 年，更利用熱游子管，發明一新式的 X 射線管，而稱為柯立芝 X 射線管 (Coolidge X-ray tube)，其構造如圖 456(1)

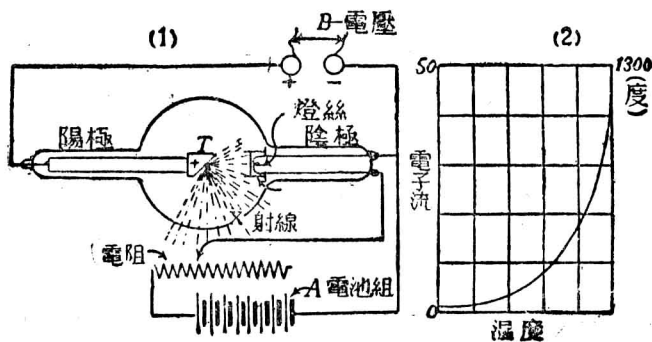


圖 456 柯立芝管

所示，陰極即為鎢絲。因板極電路中施有甚高的電壓，故鎢絲發熱時發出的電子，速度很大，可由絲外所包圍的鉗管，會聚成一堆射線，以衝擊陽極的鎢靶，激發 X 射線。這種 X 射線管比氣體 X 射線管的作用更為便利，而管中的真空程度亦可更高。如將燈絲和靶間的電壓變更，可隨意調準 X 射線的軟性或硬性，其能激發硬性射線的範圍更大，可超過氣體管的作用。圖 456 中(2)的曲線，係表示陰極發出電子的數量，隨其溫度而增加的情形。

§ 6. 光電效應

絕緣的金屬板如受弧光或火花放電的光時，則可發出帶負電的粒子，而其本身即呈正電。又如在光源和金屬板間隔一玻璃板，則不發生這種作用。可知普通金屬板須受紫外線的照射，方能激發帶負電的粒子，但如鉀、鈉、鋰等鹼金屬類，則對於可見光譜中各部分的光，亦能發生這種作用，而頗為顯著。凡由光的作用，得使金屬板或其他物質等發射帶負電粒子的現象，稱為光電效應(photo-electric effect)。依近代的實驗，知金屬板發出的這種帶負電粒子，和陰極射線的性質相同，惟速度則較小。由其荷質比的確定，即確定亦為電子。這種速度較小的電子，常因其發射的方法而稱為光電子(photo-electron)。更由實驗，知電子發出的數量，和光的照射的強度成正比。

凡利用光的強弱，以改變一電路中電流強度的裝置，稱為光電管(photo-electric cell)。如圖 457，管中抽成真空，其內壁除留有 P 窗的一小部分外，餘均鍍有純銀層。銀層上鍍有薄層的鉀元素，或鈉、鋰等元素。再用金屬線從銀面通至管外，而作為陰極。管中的中央部分有一金屬圈 A ，通至管外，作為陽極。 P 窗的管壁特用水晶製成，以免射入的紫外線，為玻璃所吸收。若將光電管的陰極 C 和電池組的負極連

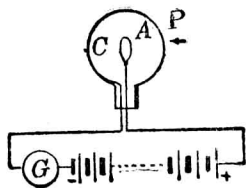


圖 457 光電管的作用

接，而陽極 A 和電池組的正極連接，並插入電流計 G 後，使光由 P 窗射入，則因陰極有光電子發出，故電路即變成通路，而得微弱的電流，可由電流計檢出。如外方光源的光度可發生強弱的變化，則此電路上電流的強度亦起變化。現代的有聲電影、電視和電傳相片術等，均利用光電管為其主要部分。

§ 7. 有聲電影

影片開演時，如更備有再發攝取時的對白、和樂、歌曲等聲音的裝置，即成有聲電影 (talkie or sound movie)。凡將唱片和影片同時運用，而成的有聲影片，稱為 他風 (vitaphone)。其缺點即為影片上的動作，和唱片所發的聲音，有時很難趨於一致，故現今通用的有聲影片，乃採用光電效應的原理製成。其攝製的方法，除攝取實物的動作外，更於影片的側邊，同時攝有一列明暗的條痕，稱為聲跡 (sound track)，其明暗與實物所發之聲音變化相當。這種將聲波變成影片上聲跡的方法，係賴微音器 (p. 277, § 8) 所收的聲音，先變成強弱不等的電流，再經三極真空管 (p. 271, § 5) 功率放大器 (power amplifier)，使電流增強，然後連至 AEO 燈 (alkaline earth oxide lamp)。此燈為一圓柱形的真空玻璃管，管中有二極，陰極為燈絲，敷有鋇元素和鐳元素，陽極為一金屬板，其構造實即為熱游子管，管中充有大部分的氬和少量的氮及氖。如以直流電經相當的電阻，和此管連接時，則發生白光。故由微音器所生的電流通入此管時，即可使燈光

隨電流的變化而發生明暗，由此經一狹縫以達影片，其所攝得的聲跡，恰和聲波相當。

有聲影片開演時，因由光源通過片上聲跡部分的光，時強時弱。如使其照射於一電路中的光電管上，即可使電路中發生微弱而有變化的電流。再經放大器的放大，連至銀幕後的揚聲器(loudspeaker)，即可發生強大的聲音，和攝取時的聲音相同。故吾人除見影片所成的電影外，同時更可聞其和動作一致的聲音，這種影片，有慕維通(movietone)，以及其他的名稱。

§ 8. 電傳相片術

凡將相片、圖畫或文字等的原形，由一地用電傳至遠地的方法，稱為電傳相片術(telephotography)。其構造可分為發送和接收兩部。發送部的原理如圖 458，係將文字或圖畫等捲於一

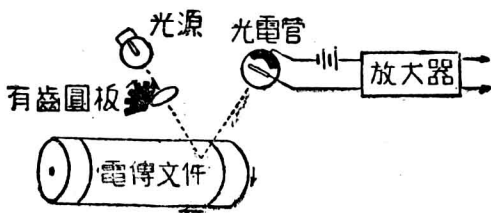


圖 458 電傳相片術的發送部

圓筒上。此圓筒用電動機，使其以一定的速度，繞圓筒軸轉動，並隨沿軸的一方向發生移動，如圖中箭頭所示。更由光源發出的光，經過每秒轉動約為 1500 次的有齒圓板的空隙，再受透鏡

會聚，射於畫片上的一點。於是將由此反射的光線，導入光電管。因該點或為暗黑，或為明亮，其反射光的強度，隨所遇的點而有強弱，故含光電管的電路中，所生的電流，亦隨點的明暗，而有強弱的變化。此電流即可再用三極管放大器加以放大，將增強的電流送至遠方。其接收部分的原理如圖 459 所示。遠方傳來的電流，先經放大器增強後，

通至一種極靈敏的電流計稱為示波器(oscillograph)中流過。此示波器有附裝的小反射鏡，常受一固定的光源照射。如送來的電流有強弱，則示波器的

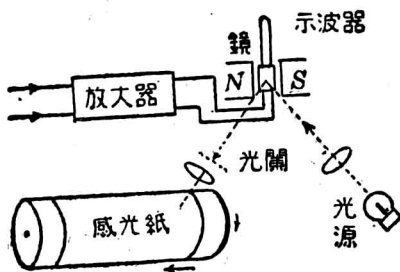


圖 459 電傳相片術的接收部

反射鏡所成的偏轉，即有大小的變化。由鏡反射後的光，再經過附有若干條細縫的光關。其能透過的光的強度，依示波器的反射鏡所生偏轉的大小而定。於是將此透過的光經透鏡的會聚，射於捲有感光紙的圓筒上，即由光的強弱，而生相當感光程度的一點。因此圓筒和發送部的裝置相同，亦用同一速度的電動機，使其轉動，且沿軸的一方向移動，故發送部和接收部同時繼續作用後，如將感光紙取下，而使其顯像，即可得和發送文字或圖畫相同的相片。這種電傳相片術除用有線電的發送和接收外，更可利用無線電報的原理，改由電波傳送和接收，但其主要原

理仍相同。

凡在 $\frac{1}{16}$ 秒內能將物體活動形像的全部，用電傳至遠方的裝置，則稱為電視 (television)，其構造雖較為複雜，但所用的主要原理，亦為光電管的利用，和電傳相片術大致相同，而兼有活動電影的原理。

電視的構造亦如電傳相片術，分為發送及接收二部。發送部主要的器械是光電管；接收部主要的器械是氖燈 (neon lamp)。發送部傳送物體的形像，並非將整個實物的形像，作一次傳送出去，而是一點接着一點，很迅速的移動，使在接收的觀者的視覺連續不斷，故可看見實物的全部形像。一個人若欲將其形像傳送於對方時，要坐在指定的座位上。座位前面的兩側，裝有光電管；正前方有極強烈的光源；光源和座位之間，又有一面大圓板，沿着板的邊緣，開有許多小孔，排列成螺旋線形。強烈的一柱光 (beam of light) 從許多小孔之一透過，再加會聚，使其焦點落在受傳送者的身體的一小點上。大圓板轉動的時候，照明的小點便在受傳送者的身體上移動不已。移動的速度須在 $\frac{1}{16}$ 秒內，行遍受傳送者的身體的全部方可，因為身體上各點形色的差異，其受光源照射後反射的光線當亦強弱不均。此種強弱不均的反射光線，照射在光電管上時，乃生成強弱不等的電流。然後用真空管放大器把它增強，以之傳送至接收部。

在接收部中，亦有一面大圓板，與發送部的圓板相同，其旋轉的速度亦相等。不過此圓板係裝在氖燈和一面小屏的中間。氖燈的光是由於其中放電而起，故恆隨其中通過的電流而變化。從發送部送來的強弱不等的電流，即藉氖燈的作用，而回復為強弱不等的光。當發送及接收兩部的圓板同時以等速度旋轉時，氖燈的光便從圓板的許多小洞中逐次通過，照射在小屏上面。其各照明的小點在小屏上出現的位置和強弱，恰和發送部所反射的一樣，故在小屏上所見的形像和受傳送者的本體並無二致。

第十章 電磁波

§ 1. 電振動

當萊頓瓶的內外層發生火花放電時，吾人憑視覺所見的火花，雖僅爲一次的跳躍，但於公元 1838 年，經費特生(Feddesen)用轉動極快的反射鏡，觀察放電時的火花，方知此瞬時放電，實爲多次往復運動的火花所組成。更由實驗，知在任何一電路中，如含有已灌電的容電器，和有自感係數的線圈，而其電阻爲甚小時，則容電器的放電，在短時期內，可使電路中發生週數極多的交流電。這種具有週期性的高頻率交流放電現象，稱爲電振動 (electric oscillation)。

試就力學中單擺發生的機械振動而論，可知其振動時必須有三種條件：即 (1) 單擺得位移時，有趨向其平衡位置的回復力 (2) 既達其平衡位置，因慣性而仍繼續運動；(3) 運動時所受的阻力應小，如在黏滯流體內，則難生連續的振動。若由這樣概念以探究電振動發生的條件，則其情形亦正和機械振動所得的相似。例如圖 460，將容電器 C ，線圈 L 及電鍵 K 串聯，並加電壓於容電器使其灌電，若將電鍵閉合時，則容電器開始放電，經線圈內流過，使其電壓漸次減小，而達於零。但在此時，線圈因自感應而發生的應電動勢，有阻止電流斷絕的趨向，而生暫時電流，仍依原電流的方向流動，其結果即使電壓已達於零的容電

器，受其灌電，變成和原方向相反的電壓。那麼容電器又開始放電，但經過線圈的電流，則和以前的方向相反。如是繼續作用，

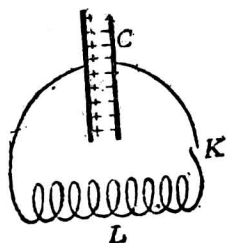


圖 460 電振動

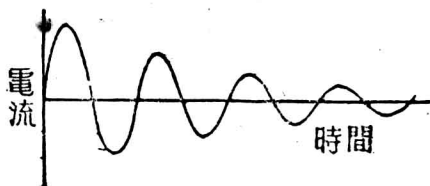


圖 461 阻尼振動

即成電振動現象。可知容電器的作用，係相當於機械振動的回復力；線圈的自感係數，為振動時的慣性；而電阻因消耗一部分的電能變成熟能，故和機械振動所遇的阻力頗為相當。又單擺在空氣中振動時，因受阻力而振幅漸小，終達靜止。今振動電路 (oscillatory circuit) 中的電能，既亦減少，故其電流當亦逐漸變小，以達於零。如用圖 461 的橫軸，示振動所歷的時間，縱軸示振動電流 (oscillatory current) 的正負兩方向的強度，則所成曲線的振幅，必漸減而達於零。這種振幅漸小的振動，稱為阻尼振動 (damped oscillation)。

對於電振動的週期 T ，和電容 C 及自感係數 L ，在電阻甚小時的關係，可由愷氏的證明，得列式如下，即：

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

或振動的頻率 f ，為：

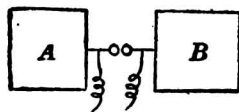
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

由上式，可知振動電路中的振動週期或頻率，係根據電容和自感係數的大小而確定。

§ 2. 電磁波

英國物理學家馬克士威(Maxwell)於公元 1864 年，由數理的推論，預言以太中受電振動的影響，應發生波動。至公元 1888 年，德人赫芝(Hertz)始由實驗以證明其說，並量度其傳播速度，實和光的速度相等，即為 3×10^{10} 每

秒厘米。赫芝所用的電振動器 (electric oscillator)，如圖 462，將兩鋅片 A 和 B，各和感應圈的一電極相連接，兩片各裝有金屬小球，互相鄰近，而成一電花隙。



接感應圈

圖 462 赫芝電振動器

當火花放電時，兩片所帶的電荷即交互為正電和負電，而成阻尼振動。赫芝和其他學者認為此電振動器的兩金屬小球間，因電的移動，故一球的每一單位正電荷，和另一球的每一單位負電荷相連的電力線，即由開始移動後，而成曲線如圖 463 (1) 的形狀。至兩球上的帶電互相交換其正負號時，此電力線即交叉成一線圈，如圖中(2)的形式；但因互相平行而同方向的電力線，常有旁壓力的作用，故所成的電力線圈，即被開始新生的電力線所推斥，而向前運動，如圖中(3)的情形。其後連續發出的

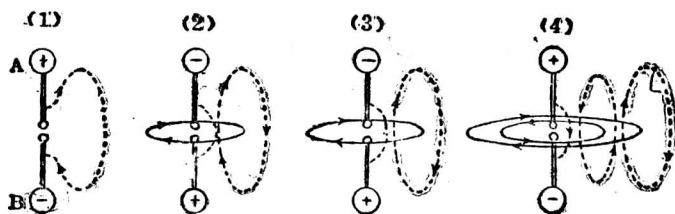


圖 453 電波和磁波的傳播

電力線圈均能向前推動，如圖中(4)的表示，餘可依此類推。這種每一電力線圈常隨振動電路中一單振動而發生的波動，稱為電波(electric wave)。至和地相接的電振動器所成的電波，則為依地面上方的半個電力線圈而傳播，愈遠而擴張愈高，如圖464

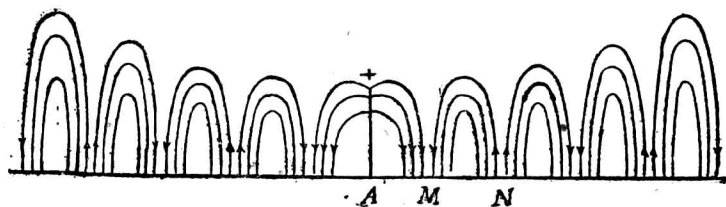


圖 464 電波的縱直截面

所示。又因振動電流係由若干個電荷同時移動而發生，故當一單振動時，所成的電力線圈，實際為電力線層組合而成。且在含導線 A 的各平面內均有之；為簡明計，故圖中僅示其一平面內的力線。凡電力線方向相同的兩鄰近線圈間的距離(例如圖中 MN 間的距離)，對於頻率一定的振動所發出的列波上，常有一定的長度，是為電波的波長。

當電振動發生時，空間除有電波外，其和電力線互相垂直的平面上，亦可設想有若干同心圓周的磁力線，同時亦向周圍各方向傳播，如圖 463 和圖 465 的形狀。其每組的磁力線圈和鄰近的一組方向亦恰相反。這種的波動，稱為磁波 (magnetic wave)。其鄰近而同方向的兩相當磁力線圈間的距離

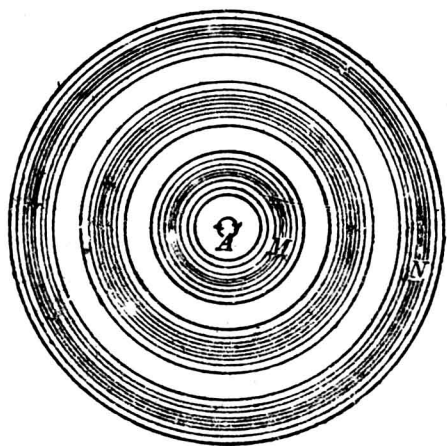


圖 465 磁波

(MN)，即為其波長。如就電波和磁波合併而言，則總稱為電磁波 (electromagnetic wave)。電磁波的傳播，和光波相同，亦依直線進行。遮導體如金屬板等，即起反射，但遮牆壁、木板、土、石等的物體卻仍可賴以太而透過。如遇電的絕緣體，即生折射。又電磁波傳播的速度，和光速相等，即為 3×10^{10} 每秒厘米。電磁波通過各種物質時，均有一部分為物質所吸收。故電磁波與光波比較，除波長不等外，其餘本性無不相同。

電振動如為阻尼振動時，則空間發生的電波，即為斷續的一列阻尼波 (damped waves)，亦稱為減幅波。若電振動的振幅

連續不變的，稱為無阻尼波(undamped waves)，亦稱為等幅波(p. 273, § 6)。

§ 3. 電共振

在聲學中當兩個音叉的頻率相同時，則一個音叉振動後，可與另一個音叉起共振而發聲。又如將等擺長的兩個單擺，懸於同一張着的線上，則一擺發生振動後，他擺亦起共振。關於共振的現象，不但音叉和單擺如此，即兩個振動電路間，亦可發生，而稱為電共振(electric resonance)。如圖 466，即為顯示電共

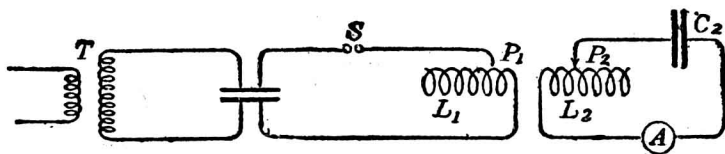


圖 466 電共振

振的裝置。 T 為變壓器，其副線圈的電路中含有容電器 C_1 ，電花隙 S 和線圈 L_1 。更於其鄰近放一電路，含有容電器 C_2 和線圈 L_2 及一靈敏的電流計 A 。如線圈 L_1 上有振動電流時，則線圈 L_2 的電路中，由接觸臂 P_2 的調準，及電流計的偏轉，可知因共振而得同頻率的電振動。凡起電共振的電路，稱為調諧電路(tuned circuit)，若此電路中的電阻很小，而 L_2 和 L_1 的距離並不十分接近，則對 P_2 的位置取定，使應電流恰為最大值後，設將 P_2 稍予移動，可使電流忽減小而起很大的變化時，則所得最大電流時的調諧，稱為銳調(sharp tuning)。

凡用通路的振動電路以發射電能，其電波傳播的距離不能甚遠。如用導線張布於空間，而下方和地相連接，則成開路式的振動電路。其上方張布的導線部分，稱為天線 (antenna)，而接地的部分，稱為接地線 (ground wire)。此天線和地面間，即成容電器的作用，和插入的線圈，合成一振動電路，而可將電能傳至遠方。關於共振電路的裝置，如圖 467，亦先用天線接收電波。如遇傳來電力線的方向向下時，則由其共振所生的應電流，亦由上方向下方而流動。至收到電力線的方向向上時，天線和地線間所生的應電流，即由下方向上方而流動，故由連續傳來的電波，即可使天線和地間所成的開路式電路中，發生電振動。再在此振動電路的線圈 L_1 旁放一含有線圈 L_2 和可變容電器 C 的電路，則成調諧電路，如將此電路中的電容和自感係數調準，即可得銳調的結果。

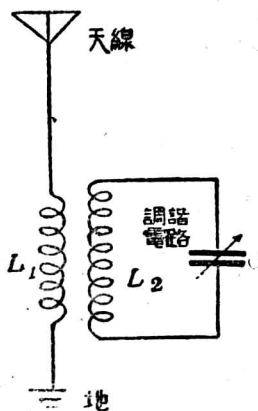


圖 467 調諧電路

§ 4. 晶體檢波器

空間傳來電波的頻率，常為每秒百萬次以上，如用調諧電路中收話器來接收，則因膜片的慣性，不能隨其頻率而振動，故不足賴以發聲，而檢出空中存在的電波。這種電振動的高頻率，

稱為射電頻率，簡稱射頻 (radio-frequency)。若在調諧電路中，設法將高頻率振動變成低頻率，而達每秒為數百次以至一千次左右的振動，則用收話器接收時，其膜片即可由振動而發聲。這種由聽覺所能覺察的低頻率，稱為成音頻率，簡稱音頻 (audio-frequency)。

凡於接收電路中插入一器，能將射頻電流的某半部截去，使成單向振動電流的，稱為檢波器 (detector)。近代最簡單的檢波器，即如圖 468 所示，稱為晶體檢波器 (crystal detector)，其構造係用方鉛礦 (galena)、矽礦 (silicon)

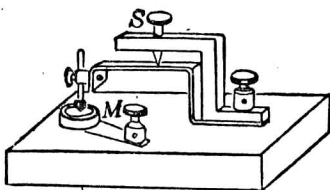


圖 468 晶體檢波器

或銅礦等的晶體，盛在金屬杯內，在晶體面上壓一金屬尖針，如

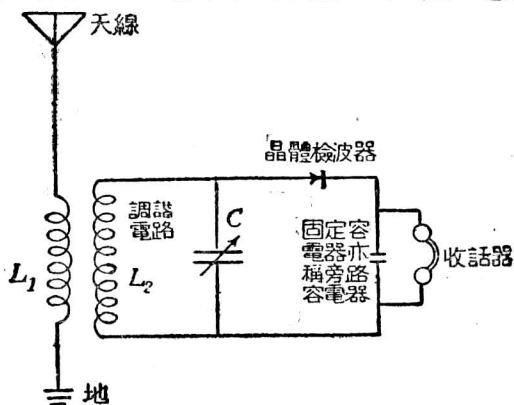


圖 469 晶體檢波電路

圖中 M 部分而成。若將此器串聯於調諧電路中，如圖 469 所示，則因所用晶體的電阻，僅容一方向的電流通過，幾能阻止另一方向電流，亦即有整流的特性，故在用檢波器前的調諧電路中本為高頻率交流，如圖 470 A 的形式。但有檢波器存在時，可由整

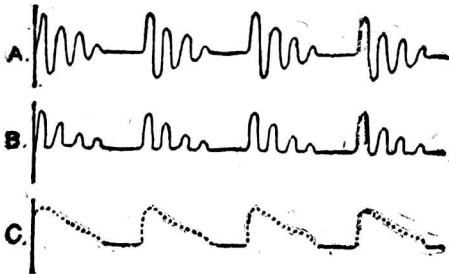


圖 470 晶體的整流作用

流作用，變成單向脈動電流，而成圖中 B 的形式。這個每一列波的脈動電流，其中高頻率成分可以經過旁路容電器，而低頻率成分在收話器中經過時，即使膜片得一振動，其通過的電流如圖中 C 的形式。故用晶體檢波器，可檢出空間的電波。

§ 5. 真空管檢波器*

真空管中熱燈絲能發射電子的現象，自愛迪生效應發見後，佛來銘即於公元 1896 年，利用其單向導電性的原理，而成真空管檢波器 (vacuum tube detector)。其主要部分為熱游子管。佛來銘所製成的真空管，僅有板極和燈絲二電極，稱為雙極真空

*實驗 36, 實驗 37.

管 (two-electrode vacuum tube), 其檢波情形和晶體相同。現代所用的真空管檢波器, 以三極管 (triode) 為最簡便。這種真空管, 係美人第福來斯脫 (De Forest) 於公元 1907 年所創製。其構造如圖 471, 在真空泡內所置的板極 P 為圓筒形的金屬板, 燈絲 F 和 P 間放有金屬線網 G , 稱為柵極 (grid)。板極、柵極、和燈絲, 互相絕緣, 就稱為三極。板極常和 B 電池組的正極相連接, 故常帶正電。柵極因和燈絲相近, 故如使其稍

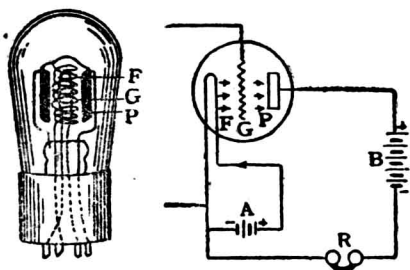


圖 471 三極管

帶負電, 必將熾熱燈絲所發的電子推斥, 而減小板極電路中的電流; 如稍帶正電, 則可助板極的作用, 以增加電流強度。由實驗, 知柵極的電位稍有變化, 則板極電路中的電流可發生很大的變化。如利用這種性質, 而作為檢波器時, 可如圖 472 的接法。其天線、地線和檢波電路的各部分, 大致和晶體的情形相同。惟普通的方法, 常將柵極經過一小固定容電器, 其電容為 0.0001 至 0.0025 微法拉, 通稱為柵極容電器 (grid condenser)。容電器旁常並聯一電阻, 為二三百萬歐姆的分路, 稱為柵漏阻 (grid leak), 以備柵極因吸收而積存的電子, 得於兩列波相隔的時間內, 由此漏去。當此檢波電路收到電波時, 柵極電位即成正負的

交互作用，故板極電路中亦成單向脈動電流，使收話器振動而發聲。

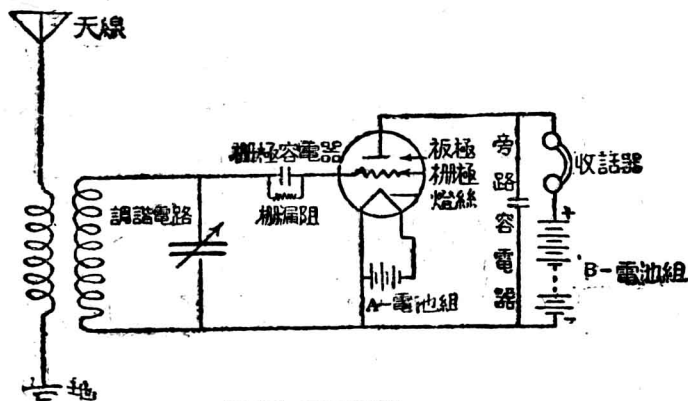


圖 472 三極管的檢波電路

三極管中柵極的電位，如稍有變化，既能使板極電流發生很大的變化，故和發送電波處的距離雖遠，而所受的微弱能量，亦可由局部電池組供給的能量，將來波的作用放大。這種放大作用 (amplification)，不但可增加接收器收到電波的範圍，又可增強響度，而較用晶體者為優。凡三極管作增強電流的作用時，即稱為真空管放大器 (tube amplifier)。常用於有聲電影和電傳相片術等的電路中。

§ 6. 真空管振動器

三極管的作用，不但可供作放大器，且可發生高頻率的無阻尼振動。發生的方法雖有多種，但可由圖 473 的接法，得說明

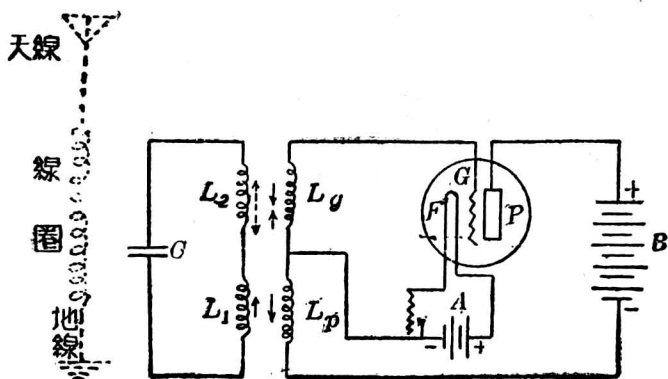


圖 473 真空管振動器

其原理。圖中線圈 L_g 和 L_2 及 L_p 和 L_1 各為一對互相鄰近的線圈， C 為容電器， L_p 和真空管中的板極電路串聯。如先設想板極電路中的電流稍有增加，則和 L_p 鄰近的線圈 L_1 中，即發生應電流，使容電器 C 灌電。同時因此電流經過線圈 L_2 時，鄰近的線圈 L_g 亦受其電感應，而改變柵極 G 的電位。如將 L_g 和 L_2 的相對位置作適當的調準，使此時的柵極恰能成正電位，則板極電路中的電流，更可增強，亦即增加 L_1 中的電流強度，得使容電器中的電量達其最大值。當容電器放電時， L_g 所生的電感應，即使柵極的電位為負，板極電路中的電流因即減小， L_p 中經過的電流既減小，則 L_1 所生應電流的方向，此時恰和放電電流的方向相同，而助其作用。故含有容電器的電路中連續有電振動時，則

由 L_p 所生的應電壓，使柵極得或正或負的電位，交互作用，而 L_p 上電流的變化，卻使 L_1 所生的應電流，常順 $B_1 L_2 C$ 電路中振動電流的方向，使振動電流逐漸增強，直至振動電路中能量的消耗率，和板極電流所供給的能量增加率相等時。即使 $L_1 L_2 C$ 的電路，連續發生無阻尼振動。若用天線、地線和串聯的線圈（相當 L_1 和 L_2 的兩部分），代替 $L_1 L_2 C$ 的地位時，（如圖中虛線部分）亦得同樣的振動，可發生無阻尼電波，傳播至遠方。這種三極管的裝置，稱為真空管振動器（tube oscillator）。

§ 7. 無線電報

無線電報（wireless telegraph）係利用電磁波的傳播，以通信的裝置，可分為發送機（transmitter）和接收機（receiver）兩部分。馬可尼（Marconi）於公元 1896 年，首依赫芝的實驗，創製商用無線電報。其發送機如圖 474(1) 所示，係屬於火花式的一

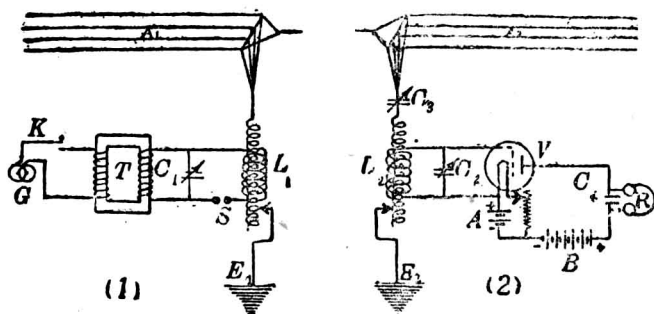


圖 474 無線電報的原理

種。若如圖中的電路，將電鍵 K 閉合，電流即由交流發電機 G ，經變壓器 T ，使容電器 C_1 灌電，此容電器至最大電壓時，足使電花隙 S 發生火花放電；於是 C_1SL_1 就成一振動電路。再由射頻變壓器 L_1 發生更高電壓，由天線 A_1 將阻尼電波向各方傳播。關於接收機的電路，可如圖中(2)的接法。當天線 A_2 接收電波時，由射頻變壓器 L_2 和容電器的調準，即成和來波頻率相同的共振。再將檢波電路中的 L_2 及可變容電器 C_2 的調準，即可使收話器 R 發聲。由發送機中電鍵閉合時間的長短，接收機的收話器，就發相當長短的信號，以代表電報中點畫的號碼。這個接收電路中，和收話器並聯的一個小固定容電器 C_4 ，稱為旁路容電器 (by-pass condenser)。其作用可使高頻電流通過，而阻止低頻電流。故收話器所發的聲音，可較清晰。接收電路中，常多採用這個容電器。

幾個發報電臺如均應用火花式發報機，則接收電臺對於每一電臺所得的信號，常易為其他電臺傳來的所擾亂，而不能得銳調的優點。故近代的發報機，已改用真空管振動器，以傳播電波。但因傳來的電波如未受調幅的作用時 (p. 277, § 8)，則常為無阻尼電波，而普通接收機中的收話器，除在來波始末的瞬間，能受其作用以發聲外，對於連續的來波，卻不能連續發聲，其整流和收話器中的電流情形，如圖 475 所示。可知接收無阻尼電波，應有特殊的方法。他拍接收法 (heterodyne reception) 為其

通用方法的一種。這種方法，和聲學中拍的現象相同，即將真空管接收機的電路，亦成一振動電路，所生的局部頻率，和傳來電波的頻率稍有差別，則可由兩個頻率的差數，或拍的頻率，而成收話器中的音類。例如圖 476 中，(1) 示來波的振動；(2) 為接收機中的局部振動；

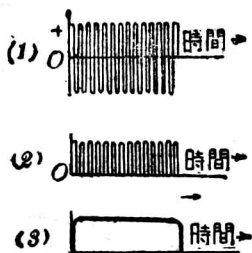


圖 475 無阻尼電波

(3) 係兩振動合成的拍；(4) 即表示整流後的電流，故收話器即

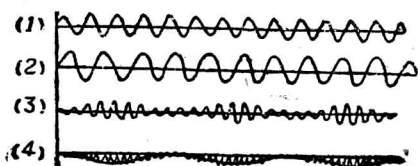


圖 476 他拍接收法的原理

可連續作用。又如接收機的局部頻率設為每秒 600,000 次，設有兩個電臺其頻率各為 601,000 和 602,000，則此接收機

對於一個電臺所成的拍的頻率，為每秒 1,000 次，而對於另一電臺所生的，則為每秒 2,000 次。故收話器中對於此兩個電臺所成的聲音，恰成一個八音度的差別，即容易辨清，而決無互相擾亂的弊病。更可知發送機採用真空管振動器後，不但因所生的無阻尼電波，可以傳播至較遠的距離，而接收機中亦易得銳調的結果。

§ 8. 無線電話

無線電話 (wireless telephone) 的原理，和無線電報相似。

其發送電臺(sending station)的裝置,如圖 477 所示, M 為微

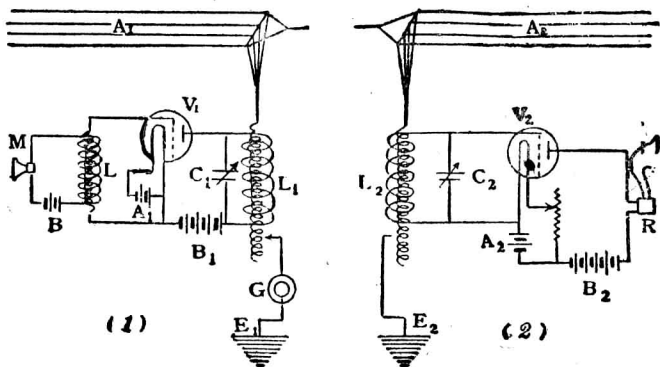


圖 477 無線電話的原理

音器(microphone),其構造的原理,和電話的發話器相似,得發生與聲波變化相應的聲流(voice current),再由變壓器 L 的作用,使副線圈中所生的應電流,即在真空管振動器的電路上流動。那麼真空管本身所生的射頻無阻尼振動的電流,本如圖 478 中 A 的表示,但因聲流的影響,即得振幅的變化,如圖中 B 的曲線。這種使振動電路中的電流,得依言語或音樂等波形而起變化的方法,稱為調幅(modulation),在此種調幅法內的微音器亦可稱為調幅器(modulator)。其由天線發射的電波,即稱為調幅波(modulated wave),當接收器的天線收到調幅波後,即由真空管檢波器,將其整流,如圖 478 中 C 所示,再由放大器的放大,可通過揚聲器,得成音頻的機械振動,如圖中 D 所表示的電流,

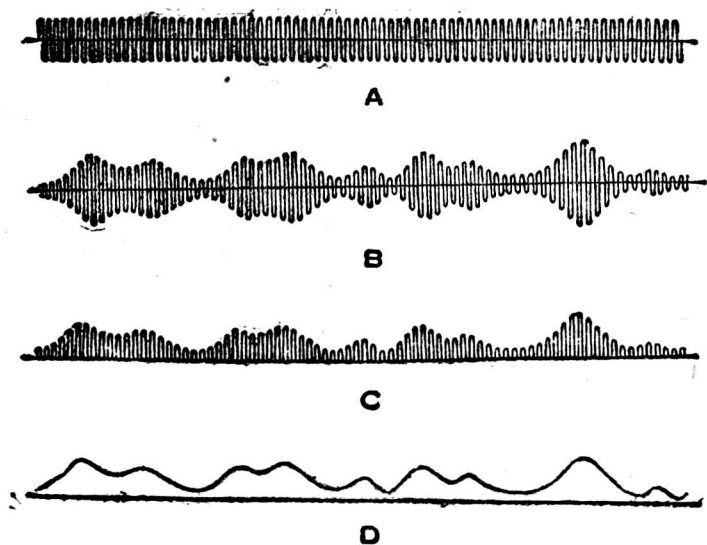


圖 478 調幅和檢波

即可發出和發話部分相同的聲音。揚聲器的構造原理，和電話中收話器的原理相以。

第十一章 放射現象

§1. 放射質

X 射線發見後，曾引起許多學者的注意，彼等均希望自然界中能生螢光的物質，得發射同樣的不可見射線。經探求的結果，竟於 X 射線發見後的次年，即公元 1896 年，首由法國物理學

家柏克勒爾(Becquerel)發見自然界中的鈾(uranium)元素,或其化合物,可有這種射線發出,而射線能貫穿黑紙所包的照相乾片,發生感光效應;並知鈾化合物中不生螢光的一種,亦能發生同樣現象。這種射線既和螢光無關係,故即決定其為一種新射線。更由連續的研究,知這種射線和 X 射線頗相似。在空氣或其他氣體中通過時,可使氣體導電。這種自然界中的物質能發生不可見輻射的現象,稱為放射現象(radioactivity),或稱放射性。

放射現象經柏克勒爾發見後,法人居里夫婦(M. and Mme Curie)及希密德(G. C. Schmidt)各由獨立的研究,又發見鈾(thorium)元素和其化合物,亦能發生同樣的輻射。其後居里夫婦又在含有鈾的礦物中,稱為鈾錒瀝青(pitchblende)的,發見其輻射的強度,較鈾的輻射更大。故猜想這種礦物中必含有別種的元素。因將這種鈾礦施以繁複的化學分析,終致發見兩種新元素,而稱為釷(polonium)和鐳(radium)[註]。鐳元素的放射本領,比鈾元素約大百萬倍,但在數噸的鈾錒瀝青中,卻祇能提煉而得數厘克的鐳,故其名貴為全世界所震駭。然若取千分之一毫克的純鐳和硫化鋅(ZnS)晶體混合後,塗於錶面上,則足可發光。第婁尼(Debiere)更於公元1900年,發見一種新元素,亦能發生放射現象,而稱為錒(actinium)。

凡自然界中能生放射現象的物質,統稱為放射質(radio-

active substance), 而具有放射現象的元素, 即稱爲放射元素 (radioactive element), 凡放射質所發的射線, 統稱爲柏克勒爾射線 (Becquerel rays)。

[註] 鈾元素的英文原名, 係居里夫人紀念其祖國波蘭 (Poland) 的光榮而命名; 鐳元素因具有豐富的射線, 故其英文原名係由 radio 一字的放射意義而變出的。

§ 2. 柏克勒爾射線的性質

刺忒福德 (Rutherford) 於公元 1899 年, 證明柏克勒爾射線 爲一種複雜的組合, 實具有三種射線, 可由磁場或電場, 將其分析, 而稱爲 α 射線 (alpha ray)、 β 射線 (beta ray)、和 γ 射線 (gamma ray) (圖 479)。

由 α 射線在磁場或電場內發生偏轉, 證明其爲無數帶有正電的微粒, 稱爲 α 粒子 (α particle)。這種微粒的質量, 爲氫原子的四倍, 故亦證明爲帶正電的氦元素。其由放射質內射出的速度, 約爲光速的十分之一, 經過薄鋁片時, 易爲吸收, 在空氣中可通過 8 厘米至 18 厘米的距離, 在任何氣體中通過的路程上, 因具有高速度, 得將氣體的中和原子碰撞, 而使其電子失去, 故即發生游離效應。

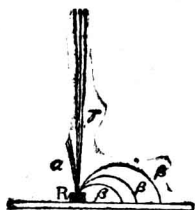


圖 479 三種射線

當 α 粒子衝擊敷有硫化鋅的熾光板上, 可發生小點的閃光, 如圖 480, 在圓筒

內的底面放有磷光板，上方附有放射質，在筒口裝有放大透鏡，即可由板上所見閃光的次數，以數出放射質發出 α 粒子的數目。這種裝置，稱為閃爍鏡(spinthariscopes)。

β 射線在磁場或電場內的偏轉，和 α 射線的方向相反，彎曲的程度較大，證明為無數帶有負電的電子所組成，其性質和陰極射線相似。所成的速度，雖隨各種放射質而異，但均較陰極射線為大，約為光速的三分之二。這種射線透過物質的貫穿本領，遠勝於 α 射線，其經過鋁片的距離，約為 α 射線的100倍。其所具的螢光激發作用和感光效應，亦頗為顯著。

γ 射線在磁場或電場內不生偏轉的影響，其性質和 X 射線頗相似。由研究的結果，知這種射線的本性，為波長更短的電磁波(表35)。 γ 射線的感光效應和螢光激發作用很大。



圖·8J 閃爍鏡

表35 各種波長的電磁波

名稱	波長	範圍
赫芝波	0.03 厘米	$\rightarrow \infty$
紅外線	8000 Å	$\rightarrow 0.3$ 厘米
可見光線	4000 Å	$\rightarrow 8000 \text{ Å}$
紫外線	136 Å	$\rightarrow 4000 \text{ Å}$
X射線	0.1 Å	$\rightarrow 150 \text{ Å}$
γ 射線	0.01 Å	$\rightarrow 1.4 \text{ Å}$

§ 3. 放射質的蛻變

放射質發出的射線不隨其本身所受的化學變化，或將其溫度降低等而停止，但經相當的放射時間，則可自然分裂，變成一組有次序的各種新物質，直至一穩定的物質為止。這種放射質所生的自然分裂現象稱為蛻變(disintegration)。

刺忒福德曾由鐳的蛻變，發見鐳元素先變成一種氣體物質，稱為鐳射氣(radium emanation)，或即氡(radon)元素。並知鐳

表 36 鈾系的蛻變

元素	符號	半化期	射線	原子量(理論值)
鈾	U	9×10^9 年	α	238
鈾 X ₁	U X ₁	23.8 日	β 和 γ	234
鈾 X ₂	U X ₂	1.15 分	β 和 γ	234
鈾 II	U II	2×10^6 年	α	234
鐳	Io	9×10^4 年	α	230
鐳	Ra	1580 年	α	226
鐳射氣	Rn	3.85 日	α	222
鐳 A	Ra A	3.0 分	α	218
鐳 B	Ra B	23.7 分	β 和 γ	214
鐳 C	Ra C	19.5 分	β 和 γ	214
鐳 C ₁	Ra C ₁	10^{-6} 秒	α	214
鐳 D	Ra D	16.5 年	β 和 γ	210
鐳 E	Ra E	4.85 日	β 和 γ	210
釷	Po	133 日	α	210
鉛	Pb	—	—	206

的原子量本為 226，而鐳射氣的原子量卻為 222，其差異為 4，恰和失去的 α 粒子，或即氦元素的原子量相等。這個鐳射氣的壽命不長，不到四天，就要變成一種新物質，占其全量的一半。但鐳卻可歷 1500 年後方有一半的分量變成鐳射氣，故鐳可保藏甚久，而不易發覺其蛻變。凡對於一切放射質發生一半分量的變化，所需的時間，稱為半化期(half period)。這個時間的長短，隨各種放射質而異，即可表示蛻變的快慢。鐳既變為氦後，氦又蛻變為鐳 A (radium A)，如是依表 36 所示，繼續遞變，以達穩定的鉛為止。由表中可知釷元素實由鐳元素的次第蛻變而成。

其後又證明鐳的本身亦為鈾元素所遞變而成。若自鈾元素起至蛻變而成的鉛為止，列成一系統，則成為鈾系 (uranium series)。除鈾系以外，由同樣方法追溯放射質的來源，即得由錒元素蛻變而成的一系統，稱為錒系 (actinium series)。其由釷元素所成的一系統，則稱為釷系 (thorium series)。但據最近的研究，知錒系實為鈾系的一分系，故對於各種放射質，可認為僅有鈾系和釷系兩種獨立的系統。

由放射質的蛻變，知鈾系和釷系所成的最後物質，均和鉛的性質相同。但通常鉛的原子量為 207.2，而由鈾系所成的鉛原子量為 206，又由釷系所成的鉛原子量卻為 208。這個差異，即導出通常的鉛必為原子量不同的鉛混合而成，而對於原子構造的研究上，頗為重要。

§ 4. 物質的構造大意

物質爲分子所組成，已由分子說述其概要，更由原子說即認爲分子又爲不可再分的原子所組成；且由俄人門得雷耶夫 (Mendeléeff) 的週期表，而知依照元素的原子量排列起來，即因化學性質的彼此相承，能顯出整齊的週期性，以啓示自然界中物質的構造，實有一定的規律。至近代電學的進步，得確定電子爲物質的一個基本質點，於是原子遂不能再認爲不可再分的單體。再由放射質的蛻變，得知原子的分裂而啓示其內部的結構。對於原子構造 (atomic structure) 的理論，首由英人普洛脫 (Prout) 的假說，而引起近代原子模型 (atomic model) 的設計。其間歷經湯姆孫 (J. J. Thomson)，刺忒福德和波耳 (Bohr) 等的基本推論，直至最近的見解，得認爲每個原子，可分成內外兩部分。內部爲帶有正電的微粒質點所組成，而稱爲原子核 (atomic nucleus)。外部爲若干個電子分布於核外，在一層一層的軌道上，繞核而運行，正和太陽系中的各行星環繞太陽而運行的情形頗相似。凡最外一層軌道上所有分布電子數相同的各元素，所呈的化學性質與原子價亦相同，故對於元素的週期性頗有關係。由實驗的推測，得確定原子核的半徑約在 10^{-12} 厘米以下，而原子的半徑約爲 10^{-8} 厘米，故原子的本身雖小，但其核和電子仍有相當的距離，和太陽系中尚有很大的空間，頗相類似。

通常的原子常爲中和體，故其核外電子所帶負電的總量，須

和原子核所帶的正電量相等。由各種實驗，知氫原子的構造最為簡單，係一個帶有正電的核，和一個繞核運行的電子所組成；其他各種原子核所帶正電的總量，均為氫原子核的整倍數。可知氫原子核實為各種原子核的單位質點，而稱為質子 (proton)。元素中除氫外，由查特威克 (J. Chadwick) 的發見，已公認各種原子核中尚有若干個不現電性，而呈中和的基本質點，稱為中子 (neutron)。故氫原子核以外的各種原子核，均為若干個質子和若干個中子組合而成。例如氦原子核係 2 個質子，和 2 個中子所組成，核外有 2 個運行的電子；鋰原子核係 3 個質子和 4 個中子所組成，核外有 3 個運行的電子；至最重的鈾原子核，即為 92 個質子和 146 個中子所組成，核外有 92 個運行的電子。電子的質量很小，而質子和中子的質量都各認為 1，故原子的質量，大致均依原子核中質子和中子的數目而定。凡各原子中的質子數目，或其電子的數目，稱為原子序數 (atomic number)。如依這樣的序數，定最輕的氫元素為 1，而順次至最重的鈾元素為 92，排列起來，就比用原子量列成的週期表，更有意義。

各種元素的原子量如依這種理論，則其數值應為一整數。但由實測的原子量，顯然可知其並非如此，這個問題，歷經沙第 (Soddy)、湯姆孫和阿斯吞 (Aston) 等的研究，知每種元素可為若干種化學性質相同，而原子量不同的元素混合而成，故混合物的原子量，即不能恰為整數。凡一種元素如對於別一種元素

的原子序數相同，且有同樣的化學性質，而原子量卻不相同，則稱此種元素為別一種的同位元素(isotope)。例如鋰的原子量有為7的，有為6的，而兩者混合的結果，即實測所得6.94的數值；其原子量為7的鋰原子中，原子核為3個質子和4個中子所組成，核外即有3個運行的電子，而原子量為6的鋰原子中，原子核為3個質子和3個中子所組成，核外即有3個運行的電子。可知兩種鋰元素的原子序數雖均為3，但因核內中子的數目不等，即呈不等的原子量。其他如鈹(beryllium)、硼(boron)、碳、氮、氧等，都各有其同位元素。

中西名詞對照表

一 畫

- 一柱光 beam of light, 262
 α 射線 alpha ray, 281
 α 粒子 α particle, 281
 β 射線 beta ray, 281
 γ 射線 gamma ray, 281

二 畫

- 刀形電鍵 knife switch, 238
人造磁鐵 artificial magnet, 103
入射線 incident ray, 19
入射點 point of incidence, 19
入射角 angle of incidence, 20
二相發電機 two phase alternator, 234
X 射線 X-ray, 253
X 射線管 X-ray tube, 253

三 畫

- 三色板印刷 three-color printing, 88
三相發電機 three phase alternator, 234
三極管 triode, 272
干涉條紋 interference fringes, 91
AEC 燈 alkaline earth oxide lamp, 259

四 畫

- 天文望遠鏡 astronomical telescope, 69
天然磁鐵 natural magnet, 103
天線 antenna, 269
化學當量 chemical equivalent, 191
分光鏡 spectroscope, 78
分光計 spectrometer, 79
分路 shunt, 164
分路電流計 shunted galvanometer, 217
分度 division, 219
分片鐵心 laminated core, 236
分激法 separate excitation, 237
分激發電機 separately excited dynamo, 237
分繞發電機 shunt wound dynamo, 237
牛頓色板 Newton's disk, 87
水平強度 horizontal intensity, 115
比影光度計 shadow photometer, 10
比較法 comparison method, 172
比率臂 ratio arm, 174
升壓器 step-up transformer, 243
中央射線 central rays, 32
中和 neutralization, 122

中子 neutron, 283
 太陽光譜 solar spectrum, 77
 方鉛礦 galena, 270
 反射線 reflected ray, 20
 反射角 angle of reflection, 20
 反射望遠鏡 reflecting telescope, 59
 反電動勢 counter E. M. F. or back
 E. M. F., 202
 反磁質 diamagnetic substance, 209
 內電路 internal circuit, 148
 內電阻 internal resistance, 165
 不透明體 opaque body, 1
 不可見光譜 invisible spectrum, 83
 不良導體 poor conductor, 122
 介遞作用 action through the medium,
 112
 介質常數 dielectric constant or speci-
 fic inductive capacity, 141
 日蝕 solar eclipse, 4
 月蝕 lunar eclipse, 5
 木星 Jupiter, 13
 夫牢因和斐 Fraunhofer, 77
 夫牢因和斐譜線 Fraunhofer's line, 77
 夫累涅爾 Fresnel, 92
 夫累涅爾雙鏡 Fresnel bimirror, 92
 夫累涅爾雙稜鏡 Fresnel biprism, 92
 夫累涅爾帶 Fresnel zone, 95
 以太 ether, 15
 互補色 complementary colors, 87

互感應 mutual induction, 223
 互感係數 coefficient of mutual induc-
 tion or mutual inductance, 229
 火石玻璃 flint glass, 89
 火花放電 spark discharge, 133
 丹聶爾電池 Daniell cell, 150
 公共接點 common junction, 162
 心 core, 183

五 畫

生理效應 physiological effect, 254
 平面鏡 plane mirror, 20
 平行光線 parallel rays, 2
 平行玻片 parallel glass plate, 43
 平凸透鏡 plano-convex lens, 46
 平凹透鏡 plano-concave lens, 46
 立體弧度 solid radian, 8
 立體角 solid angle, 8
 代替法 method of substitution, 172
 半透明體 translucent body, 1
 半影 penumbra, 3
 半化期 half period, 284
 正片 positive plate, 59
 正電 positive electricity, 121
 正游子 positive ion, 131
 正電位 positive potential, 137
 正極 positive pole, 105
 正極或陽極 anode or positive elec-
 trode, 148

凹鏡 concave mirror, 24
 凹透鏡 concave lens, 46
 凹凸透鏡 concavo-convex lens, 46
 凸鏡 convex mirror, 24
 凸透鏡 convex lens, 46
 凸凹透鏡 convexo-concave lens, 46
 功率放大器 power amplifier, 259
 仟瓦小時 kilowatt hour, 181
 瓦特秒 watt second, 181
 瓦特小時計 watt-hour meter, 241
 外電路 external circuit, 148
 外電阻 external resistance, 165
 外加電動勢 impressed E. M. F., 202
 主截面 principal section, 44
 石油脂 vaseline, 83
 石膏粉 gypsum powder, 172
 石灰 lime, 183
 本影 umbra, 3
 本生光度計 Bunsen photometer, 11
 戊烷 pentane, C_5H_{12} , 7
 白熾燈 incandescent lamp, 183
 包跡 envelope, 17
 出射線 emergent ray, 43
 目鏡 eyepiece, 67
 可見光譜 visible spectrum, 82
 可變電容器 variable condenser, 143
 北極 north pole, 104
 永久磁鐵 permanent magnet, 107
 去磁 demagnetization, 113

去極劑 depolarizer, 152
 匝數 number of turns, 203
 左手定則 left hand rule, 214
 右手定則 right hand rule, 225
 示波器 oscillograph, 261
 他拍接收法 heterodyne reception, 276

六 畫

自由電荷 free charge, 125
 自感係數 coefficient of self-induction
 or self-inductance, 228
 自感應 self-induction, 227
 自激發電機 self-excited dynamo, 237
 自激法 self-excitation, 237
 光的微粒說 corpuscular theory of
 light, 15
 光的干涉 interference of light, 90
 光的波動說 wave theory of light, 15
 光源 luminous source, 1
 光點 luminous point, 1
 光的直線傳播 rectilinear propagation
 of light, 2
 光線 ray of light, 2
 光度計 photometer, 10
 光度學 photometry, 10
 光的本性 nature of light, 15
 光的電磁說 electromagnetic theory of
 light, 15
 光的反射 reflection of light, 19

- 光的反射定律 law of reflection of light, 20
- 光的折射 refraction of light, 35
- 光的折射定律 law of refraction of light, 33
- 光疎介質 optically rarer medium, 28
- 光密介質 optically denser medium, 28
- 光的全反射 total reflection of light, 41
- 光的大氣折射 atmospheric refraction of light, 42
- 光閘 diaphragm, 8
- 光的色散 dispersion of light, 75
- 光譜 spectrum, 75
- 光的復合 recombination of light, 73
- 光譜線 spectral line, 80
- 光譜分析 spectrum analysis, 80
- 光譜線的自蝕 reversal of spectral line, 81
- 光程 optical path, 93
- 光波的繞射 diffraction of light waves, 93
- 光程差 path difference, 95
- 光柵光譜 grating spectrum, 98
- 光電效應 photo-electric effect, 258
- 光電子 photo-electron, 258
- 光電管 photo-electric cell, 258
- 地上望遠鏡 terrestrial telescope, 71
- 地磁赤道 magnetic equator, 115
- 地磁的三要項 three elements of terrestrial magnetism, 116
- 米燭光 meter candle, 9
- 同位元素 isotope, 287
- 多次反射 multiple reflection, 23
- 多孔杯 porous cup, 150
- 多極交流發電機 multipolar alternator, 233
- 曲率中心 center of curvature, 24
- 曲率半徑 radius of curvature, 24
- 曲柄電阻器 crank rheostat, 172
- 全蝕 total eclipse, 4
- 有毛肌肉 ciliary muscle, 60
- 有聲電影 talkie or sound movie, 259
- 老視眼 presbyopia, 32
- 吸收光譜 absorption spectrum, 81
- 安培 ampere, 147
- 安培計-伏特計法 ammeter - voltmeter method, 172
- 安培小時 ampere hour, 201
- 安培定則 Ampere's rule, 205
- 安培匝數 ampere-turns, 207
- 安培計 ammeter, 217
- 共軛點 conjugate foci, 25
- 共軛點的關係 conjugate focal relations, 29
- 吉柏 Gilbert, 114
- 色差 chromatic aberration, 88
- 尖端放電 point discharge, 131

尖端作用 action of points, 131
 伏特 volt, 158
 伏打 Volta, 148
 伏打電池 Voltaic cells, 148
 伏特計 voltmeter, 219
 百萬歐姆 megohm, 156
 西門子 W. Siemens, 188
 交流 alternating current, 250
 交流發電機 alternating current dynamo, 231
 收話器 telephone receiver, 245
 氖 neon, 249
 氖燈 neon lamp, 262
 李却特生 O. W. Richardson, 255

七 畫

伽利略望遠鏡 Galileo telescope, 71
 克希荷夫 Kirchhoff, 81
 克當量 gram equivalent, 195
 克魯克斯暗區 Crookes dark space, 249
 克魯克斯管 Crookes tube, 249
 呎燭光 foot candle, 9
 作用導線 acting element, 232
 阿斯吞 Aston, 283
 拋物柱面鏡 parabolic mirror, 32
 角膜 cornea, 59
 阻尼振動 damped oscillation, 264
 阻尼波 damped waves, 267
 均強磁場 uniform magnetic field, 168

折射線 refracted ray, 35
 折射角 angle of refraction, 36
 折射望遠鏡 refracting telescope, 59
 近點 near point, 61
 近視眼 myopia eye or near-sighted eye, 61
 攸英 Ewing, 113
 良導體 good conductor, 121
 束縛電荷 bound charge, 125
 佛科 Foucault, 14
 佛蘭克林 Franklin, 134
 佛來銘 Fleming, 213
 佛科電流 Foucault current, 239
 串繞發電機 series wound dynamo, 237

局部作用 local action, 119
 局部電路 local circuit, 213
 汞齊化 amalgamation, 149
 希密德 G. O. Schmidt, 280
 門得雷耶夫 Mendelceef, 285
 沙第 Soddy, 288
 吞加整流器 tungar rectifier, 256

八 畫

空氣隙 air gap, 142
 空氣容電器 air condenser, 143
 物理光學 physical optics, 18
 物鏡 objective, 67
 直角稜鏡 right-angled prism, 45

直流 direct current, 230
 直流發電機 direct current dynamo, 234
 直流電動機 direct current motor, 439
 定像液 fixing solution, 59
 定電動勢 constant E. M. F., 226
 固定容電器 fixed condenser, 143
 波的繞射 diffraction of wave, 93
 波耳 Bohr, 285
 金箔驗電器 goldleaf electroscope, 122
 金屬絲 metallic filament, 184
 金屬弧光燈 metallic arc lamp, 187
 金剛砂 carborundum, 188
 油斑光度計 grease spot photometer, 11
 弦 chord, 53
 法線 normal, 19
 法拉第 Faraday, 111
 法拉 farad, 140
 法定伏特 legal volt, 154
 法定歐姆 legal ohm, 156
 法定安培 legal ampere, 192
 法拉第暗區 Faraday dark space, 249
 火花放電位 spark potential, 137
 底片 negative plate, 59
 盲點 blind spot, 60
 明視距離 distance of distinct vision, 61
 明線光譜 bright line spectrum, 80

放大鏡 magnifying glass, 65
 放大率 magnifying power, 65
 放電叉 discharge tong, 142
 放大作用 amplification, 273
 放射現象 radioactivity, 280
 放射質 radioactive substance, 280
 放射元素 radioactive element, 281
 萊頓瓶 Leyden jar, 142
 板容電器 plate condenser, 145
 板極 plate, 255
 板極電路 plate circuit, 255
 兩液電池 two fluid cell, 148
 姆歐 mho, 157
 弧光燈 arc lamp, 183
 刷 brush, 231
 矽礦 silicon, 270
 居里夫婦 M. and Mme. Curie, 280

九 畫

指北極 north-seeking pole, 104
 指南極 south-seeking pole, 104
 重摹光柵 replica of grating, 97
 重力電池 gravity cell, 151
 相對折射率 relative index of refraction, 37
 負電 negative electricity, 121
 負游子 negative ion, 131
 負電位 negative potential, 137
 負極 negative pole, 105

負極或陰極 cathode or negative electrode, 148
 馬克士威 Maxwell, 16
 馬可尼 Marconi, 275
 度 dioptré, 62
 柏克勒爾 Becquerel, 280
 柏克勒爾射線 Becquerel rays, 281
 虹霓 rainbow, 83
 虹 primary rainbow, 84
 降壓器 step-down transformer, 243
 查特威克 J. Chadwick, 286
 活動電影 moving picture, 64
 音頻 audio-frequency, 270
 前房 anterior chamber, 59
 前房液 aqueous humor, 59
 後房 posterior chamber, 60
 玻璃狀液 vitreous humor, 60
 映畫器 projecting lantern, 62
 映畫透鏡 projecting lens, 63
 紅 red, 7
 紅外線 infra-red rays, 83
 紅熱 red-hot, 185
 胡拉斯頓 Wollaston, 77
 南極 south pole, 104
 威姆胡斯特起電機 Wimshurst machine, 132
 保險絲 fuse wire, 187
 耐火黏土 fire clay, 187
 迴線 loop, 205

迴轉羅盤 gyrocompass, 117
 按鈕 press button, 210
 段 segment, 234
 柵極 grid, 272
 柵極容電器 grid condenser, 272
 柵漏阻 grid leak, 272
 刺忒福德 Rutherford, 281
 閃爍鏡 spinthariscopes, 282
 氡 radon, 283
 柯立芝 W. O. Coolidge, 257
 柯立芝 X射線管 Coolidge X-ray tube, 257

十 畫

氣體 X射線管 gas X-ray tube, 253
 原子核 atomic nucleus, 285
 原電池 primary cells, 200
 原線圈 primary coil, 223
 原子構造 atomic structure, 285
 原子模型 atomic model, 285
 原子序數 atomic number, 286
 容電器 condenser, 142
 容電器的組合 combination of condensers, 144
 哥倫布 Columbus, 115
 閉曲線 closed curves, 111
 閉合的空心導體 closed hollow conductor, 129
 閉弧燈 inclosed arc lamp, 183

連續光譜 continuous spectrum, 80
 射頻 radio frequency, 270
 振動電路 oscillatory circuit, 264
 振動電流 oscillatory current, 264
 海市蜃樓 mirage, 43
 消色差稜鏡 achromatic prism, 89
 通草球 pith ball, 120
 通路 closed circuit, 148
 流明 lumen, 8
 旁路容電器 by-pass condenser, 276
 氮 ammonia, 171
 真空管檢波器 vacuum tube detector, 271
 真空管放大器 tube amplifier, 273
 真空管振動器 tube oscillator, 27
 被照體 illuminated body, 1
 透明體 transparent body, 1
 透鏡 lens, 43
 透鏡的主軸 principal axis of lens, 47
 透鏡的光心 optical center of lens, 47
 透鏡的副軸 secondary axis of lens, 48
 透鏡的主焦點 principal focus of lens, 48
 透鏡度 power of a lens, 62
 透射光柵 transmission grating, 97
 針孔像 pin-hole image, 5
 針孔照相機 pin-hole camera, 5
 倒像 inverted image, 3
 倫福特 Rumford, 10

倫琴 Röntgen, 253
 倫琴射線 Röntgen ray, 253
 氦 helium, 81
 埃斯特稜 ångström, 81
 庫侖 Coulomb, 105, 124
 庫侖的磁力定律 Coulomb's law of magnetic force, 105
 庫侖的靜電力定律 Coulomb's law of electric force, 123
 韋伯 Weber, 113
 帶電體 electrified body, 120
 起電 electrification or charged with electricity, 120
 起電盤 electrophorus, 132
 起電機 electric machine, 132
 起重磁鐵 lifting magnet, 210
 紙片容電器 paper condenser, 143
 瓷漆線 enamelled wire, 171
 氧化鈦 titanium oxide, 187
 氧化鈾 thorium oxide, 256
 氧化面燈絲 oxide coated filament, 256
 陰極 cathode, 190
 陰向游子 cation, 191
 陰極面電輝 cathode surface glow, 249
 陰極射線 cathode ray, 250
 陰極電輝 negative glow, 249
 釷 polonium, 280

- 國際燭光 international candle, 7
 國際伏特 international volt, 154
 國際安培 international ampere, 192
 游離 ionization, 131
 游子 ion, 131
 游子的遷移 migration of ions, 195
 游子電荷 ionic charge, 195
 游離效應 ionizing effect, 254
 球面鏡 sphetical mirror, 24
 球面像差 spherical aberation, 32
 密疤 dense scars, 254
 開弧燈 open arc lamp, 185
 開動器 starter, 241
 週 cycle, 232
 第一級光譜 first-order spectrum, 98
 第二級光譜 second-order spectrum, 98
 第福來斯脫 De Forest, 272
 第婆尼 Debierne, 280
 組合電阻 combined resistance or resulting resistance, 162
 視角 visual angle, 6
 視差 parallax, 7
 視覺暫留 persistence of vision, 64
 視場 field of view, 71
 乾電池 dry cell, 152
 偏蝕 partial eclipse, 5
 偏向角 angle of deviation, 45
 勒克司 lux, 8
 勒麥 Römer, 13
 勒克蘭社電池 Leclanche cell, 150
 副波 secondary waves, 17
 副焦點 secondary foci, 50
 副電池 secondary cell, 200
 副線圈 secondary coil, 223
 虛像 virtual image, 21
 虛焦點 virtual focus, 25
 探照燈 search light, 32
 彩簾 iris, 59
 黃斑 yellow spot, 60
 黃 yellow, 75
 眼的調節 accomodation of the eye, 61
 眼鏡 spectacles, 62
 望遠鏡 telescope, 69
 條形磁鐵 bar magnet, 103
 高斯 gauss, 108
 接地導體 grounded conductor, 139
 接線柱 binding post, 171
 接收機 receiver, 211
 接收局 receiving station, 212
 接地線 ground wire, 269
 常流電池 closed circuit cell, 151
 康銅 constantan, 60 Cu, 40 Ni, 118
 郵局電橋 post office bridge, 175
 盛氣燈 gas-filled lamp, 185
 陽極 anode, 190
 陽向游子 anion, 191
 陽極區 positive column, 249

圈轉式 movable coil type, 215
 毫安培 milliampere (0.001 安培), 217
 毫安培計 milliammeter, 217
 毫伏特 millivolt (0.001 伏特), 219
 毫伏特計 millivoltmeter, 219
 毫亨利 millihenry, 228
 荷質比 specific charge, 252
 軟性 X 射線 soft X-ray, 253
 釷 thorium, 280
 釷系 thorium series, 284

十二畫

惠更斯原理 Huygens principle, 17
 惠斯登電橋 Wheatstone bridge, 174
 單向反射 regular reflection, 20
 單顯微鏡 simple microscope, 65
 單色光 monochromatic light, 76
 單縫 single slit, 94
 單位磁極 unit magnetic pole, 103
 單位正極 unit positive pole, 103
 單液電池 single fluid cell, 148
 單價 univalent, 195
 單相發電機 single phase alternator, 293
 單向脈動電流 unidirectional pulsating current, 297
 焦距 focal length, 25
 焦散曲線 caustic curve, 32
 焦度 dioptric strength or dioptic

power, 62
 焦耳定律 Joule's law, 182
 無聲放電 silent discharge, 134
 無阻尼波 undamped waves, 268
 無線電報 wireless telegraph, 275
 無線電話 wireless telephone, 277
 幾何光學 geometrical optics, 18
 達松發爾電流計 D'Arsonval galvanometer, 216
 幅調波 modulated wave, 278
 順磁質 paramagnetic substance, 209
 晶體檢波器 crystal detector, 270
 硬橡皮棒 ebonite rod, 120
 硬性 X 射線 hard X-ray, 253
 黑衣 choroid, 60
 絕對折射率 absolute index of refraction, 37
 絕緣 insulation, 121
 絕緣體 insulator, 121
 普洛脫 Prout, 285
 發光體 luminous body, 1
 發散光線 divergent rays, 2
 發光強度 luminous intensity, 7
 發散透鏡 divergent lens, 49
 發射光譜 emission spectrum, 80
 發送機 transmitter, 211
 發聲器 sounder, 212
 發電機 dynamo or electric generator, 231

發電機定則 dynamo rule, 233
 發送電臺 sending station, 278
 發送局 transmitting station, 212
 發話器 telephone transmitter, 245
 雲母 mica, 143
 雲母容電器 mica condenser, 143
 散射 scattering, 20
 湯姆孫 J. J. Thomson, 252
 會聚光線 convergent rays, 2
 會聚透鏡 convergent lens, 48
 喬里光度計 Joly photometer, 12
 菲左 Fizean, 14
 斯涅爾 Snell, 36
 斯涅爾的折射定律 Snell's law of re-
 fraction, 36
 紫 violet, 75
 紫外線 ultra-violet rays, 83
 鈉焰 sodium flame, 77
 準直管 collimator, 78
 硫酸金雞納 sulphate of quinine, 86
 硫酸鎘 cadmium sulphate, 154
 鈣 calcium, 87
 冕牌玻璃 crown glass, 89
 超距作用 action at a distance, 112
 剩餘放電 residual discharge, 143
 剩磁 residual magnetism, 237
 插頭 plug, 171
 鈍氣 inert gas, 185
 氬 argon, 185

陷口 crater, 185
 替續器 relay, 212
 場磁鐵 field magnet, 231
 集流環 collector ring, 231
 渦電流 eddy current, 239
 貫穿本領 penetrating power, 253
 勞厄 Laue, 254
 揚聲器 loudspeaker, 260
 費特生 Feddesen, 263

十三畫

電磁波 electromagnetic waves, 16
 電荷 electric charge, 120
 電量的 C. G. S. 靜電單位 C. G. S.
 electrostatic unit of quantity of
 electricity, 123
 電量的實用單位 practical unit of quan-
 tity of electricity, 124
 電子說 electron theory, 125
 電子 electron, 125
 電場 electric field, 126
 電場強度 electric field intensity, 126
 電力線 electric line of force, 127
 電荷的分布 distribution of charges, 129
 電荷的表面密度 surface density of
 charge, 129
 電擾 electric disturbance, 129
 電屏 electric screen, 130
 電風 electric wind, 130

- 電輪 electric whirl, 120
- 電梳 electric comb, 123
- 電極 electrode, 133
- 電閃 lightning, 134
- 電位 electric potential, 136
- 電位差 electric potential difference, 136
- 電位差的 C. G. S. 靜電單位 C. G. S. electrostatic unit of potential difference, 138
- 電壓 voltage, 133
- 電容 electric capacity, 140
- 電容的 C. G. S. 靜電單位 C. G. S. electrostatic unit of capacity, 140
- 電流 electric current, 147
- 電流強度 current strength, 147
- 電池的電極 electrode of a cell, 148
- 電解液 electrolyte, 148
- 電路 electric circuit, 148
- 電動勢 electromotive force, 149
- 電阻 resistance, 155
- 電阻定律 law of resistance, 156
- 電阻係數 specific resistance or resistivity, 156
- 電導 conductance, 156
- 電導係數 specific conductance or conductivity, 156
- 電阻的溫度係數 temperature coefficient of resistance, 157
- 電位降落 drop of potential, fall of potential or voltage drop, 160
- 電阻的組合 combination of resistances, 161
- 電阻的串聯 resistances connected in series, 161
- 電阻的並聯 resistances connected in parallel, 162
- 電池的組合 combination of cells, 167
- 電池組 battery, 167
- 電池的串聯 cells connected in series, 168
- 電池的並聯 cells connected in parallel, 168
- 電阻線圈 resistance coil, 170
- 電阻箱 resistance box, 171
- 電位計 potentiometer, 176
- 電能 electric energy, 180
- 電功率 electric power, 181
- 電流的熱效應 heating effect of current, 183
- 電弧 electric arc, 185
- 電熱器 electric heater, 187
- 電熨斗 electric flatiron, 187
- 電鐸 electric welding, 188
- 電爐 electric furnace, 188
- 電流的化學效應 chemical effect of current, 190
- 電解 electrolysis, 191

電解定律 law of electrolysis, 191
 電化當量 electrochemical equivalent, 192
 電量計 voltameter or coulometer, 194
 電解池 electrolytic cell, 194
 電解銀 electrolytic silver, 194
 電的天然單位 natural unit of electricity, 193
 電鍍 electroplating, 197
 電鑄術 electrotyping, 198
 電流的磁效應 magnetic effect of current, 203
 電磁鐵 electromagnet, 209
 電鈴 electric bell, 210
 電報 telegraph, 211
 電流計 galvanometer, 215
 電磁感應 electromagnetic induction, 222
 電慣性 electric inertia, 227
 電樞 armature, 231
 電動機 electric motor, 239
 電動機定期 motor rule, 239
 電動機的反電動勢 counter E. M. F. of a motor, 240
 電扇 electric fan, 241
 電車 tram car, 241
 電功的傳遞 electrical transmission of power, 244
 電話 telephone, 244

電經氣體的傳導 conduction of electricity through gases, 247
 電傳相片術 telephotography, 260
 電視 television, 262
 電振動 electric oscillation, 263
 電振動器 electric oscillator, 265
 電波 electric wave, 265
 電共振 electric resonance, 268
 載流量 current carrying capacity, 187
 楞次定律 Lenz's law, 224
 楞次 Lenz, 224
 鉑氰化鉍 barium platinumcyanide, 253
 鉛直強度 vertical intensity, 116
 零電位 zero potential, 157
 滑動接頭 sliding contact, 172
 滑觸線變阻器 slide wire rheostat, 172
 滑線電橋 slide wire bridge, 175
 飽和磁鐵 saturated magnet, 114
 愛迪生效應 Edison effect, 255
 照光本領 illuminating power, 7
 照度 intensity of illumination, 8
 照射燈 head light, 33
 照相機 photographic camera, 58
 稜鏡 prism, 44
 稜鏡角 angle of prism, 44
 稜角 refracting angle, 44
 稜鏡式雙筒望遠鏡 prism binocular, 72
 稜鏡光譜 prismatic spectrum, 98
 睛珠 crystalline lens, 59

- 遠點 far point, 61
- 遠視眼 hypermetropia eye or far-sighted eye, 62
- 銻 thallium, 80
- 暗線光譜 dark line spectrum, 80
- 暗帶 dark band, 81
- 鈾玻璃 uranium glass, 83
- 鈾 uranium, 280
- 鈾系 uranium series, 284
- 鈾鑛瀝青 pitchblende, 280
- 頑磁性 retentivity, 108
- 感應起電 electrification by induction, 125
- 感電流 inducing current, 223
- 感應圈 induction coil, 229
- 感光效應 photographic effect, 254
- 雷 thunder, 134
- 落雷 thunderbolt, 134
- 微法拉 microfarad, 141
- 微微法拉 micromicrofarad, 141
- 微歐姆 microhm, 156
- 微音器 microphone, 278
- 葛拉克標準電池 Clark standard cell, 153
- 幹路 main circuit, 173
- 鉭絲燈 tantalum filament lamp, 181
- 鉬 molybdenum, 189
- 蜂音器 buzzer, 211
- 鼓形電樞 drum armature, 235
- 靶 target, 253
- 蛻變 disintegration, 283
- 鈹 beryllium, 187
- 硼 boron, 287

十四畫

- 複顯微鏡 compound microscope, 63
- 複光 compound light, 73
- 複繞發電機 compound wound dynamo, 258
- 熔膠 melted gelatin, 97
- 像 image, 5
- 漫射光度計 diffusion photometer, 12
- 漫射 diffuse reflection, 20
- 網膜 retina, 60
- 網絡 network, 174
- 聚光透鏡 condensing lens, 63
- 鉀 caesium, 80
- 銣 rubidium, 80
- 銲 indium, 80
- 蓋斯勒管 Geissler tube, 249
- 端電壓 terminal voltage, 163
- 碳絲燈 carbon filament lamp, 183
- 碳化鈣 calcium carbide, 188
- 焰弧 flaming arc, 183
- 銅解電量計 copper voltameter, 194
- 銀解電量計 silver voltameter, 194
- 蓄電池 storage battery, 199
- 蓄電池的容量 capacity of storage bat-

tery, 201
奧斯特 Oersted, 203
 銜鐵 armature, 211
 維他風 vitaphone, 259

十五畫
 熱游子 thermion, 255
 熱游子管 thermionic tube, 255
 實物 object, 5
 實像 real image, 6
 實焦點 real focus, 25
 實體鏡 stereoscope, 65
 實體照相機 stereoscopic camera, 65
 質子 proton, 283
 導磁係數 permeability, 208
 標度管 scale tube, 78
 標準電池 standard cell, 153
 橫截磁力線 cutting lines of force, 223
 摩擦起電 electrification by friction,
 120
 線圈 coil, 205
 潛望鏡 periscope, 73
德維 Davy, 185
德銀 German silver, 60 Cu, 25 Zn,
 14 Ni, 158
 影 shadow, 2
 鞏膜 sclerotic, 59
 綠 green, 75
 選擇吸收 selective absorption, 81,

選擇反射 selective reflection, 86
 鋅 zinc, 87
 鋅汞齊 zinc amalgam, 149
 銩 barium, 87
 磁鐵 magnet, 103
 磁鐵礦 magnetite, Fe_3O_4 , 103
 磁針 magnetic needle, 103
 磁極 magnetic pole, 104
 磁軸線 magnetic axis, 104
 磁力 magnetic force, 175
 磁極強度 pole strength, 105
 磁量 quantity of magnetism, 105
 磁感應 magnetic induction, 107
 磁場 magnetic field, 108
 磁場強度 magnetic field intensity, 108
 磁場的激發 excitation of the field
 magnet, 237
 磁力線 magnetic lines of force, 111
 磁的分子說 molecular theory of mag-
 netism, 113
 磁化 magnetization, 113
 磁偏角 magnetic declination, 117
 磁傾角 magnetic inclination or dip,
 115
 磁化力 magnetizing force, 207
 磁化線 line of magnetization, 207
 磁感應線 line of magnetic induction,
 208
 磁感應強度 magnetic induction, 208

磁通量 magnetic flux, 208
 磁屏 magnetic screen, 209
 磁質 magnetic substance, 209
 磁轉式 movable magnet type, 215
 磁波 magnetic wave, 267
 暫時磁鐵 temporary magnet, 107
 暫時電流 transient current, extra current, 147, 224
 歐姆 ohm, 155
 歐姆定律 Ohm's law, 159
 錳銅 manganin, 84 Cu, 12 Mn, 4 Ni, 198
 銱絲燈 osmium filament lamp, 184
 範圍 range, 218
 輝紋 striation, 249
 慕維通 movietone, 260
 調諧電路 tuned circuit, 268
 調幅 modulation, 278
 調幅器 modulator, 278
 銳調 sharp tuning, 268
 銻 actinium, 280
 銻系 actinium series, 284

十六畫

靜電力 electrostatic force, 121
 靜電感應 electrostatic induction, 124
 機械振動 mechanical vibration, 16
 邁克爾孫 Michelson, 14
 縫 slit, 75

靛 indigo, 75
 霓 secondary rainbow, 85
 螢光 fluorescence, 83
 蹄形磁鐵 horseshoe magnet, 103
 避雷針 lightning rod, 134
 衛斯吞標準電池 Weston standard cell, 153
 衛斯吞直流安培計 Weston direct current ammeter, 218
 衛斯吞直流伏特計 Weston direct current voltmeter, 219
 燈泡 bulb, 183
 燈的壽命 life of the lamp, 184
 燈座 lamp socket, 184
 燈絲電路 filament circuit, 255
 整流器 commutator, 234
 激發機 exciter, 237
 增頁 load, 257

十七畫

聲跡 sound track, 259
 聲流 voice current, 278
 螺旋線 helix, 203
 螺線管 solenoid, 266
 應電流 induced current, 222
 應電動勢 induced E. M. F., 225
 總強度 total intensity, 116
 簡單光學儀器 simple optical instruments, 58

環蝕 annular eclipse, 5
 環形電樞 ring armature, 236
 燭光 candle power, 7
 薄透鏡 thin lens, 47
 瞳孔 pupil, 79
 橙 orange, 75
 銣 strontium, 87
 點極 point pole, 103
 點電荷 point charge, 123
 鎢絲燈 tungsten filament lamp, 184
 鎢酸鈣 calcium tungstate, 254
 檢波器 detector, 270

十八畫

斷路 open circuit, 149
 斷續器 interrupter, 230
 雙凸透鏡 double convex lens, 46
 雙凹透鏡 double concave lens, 46
 雙價 divalent, 195
 雙極交流發電機 bipolar alternator, 239
 雙極真空管 two-electrode vacuum tube, 271
 臨界角 critical angle, 41
 透部光線 marginal rays, 32
 鎔 gallium, 80
 磷光 phosphorescence, 87
 顏料 pigment, 88
 繞射條紋 diffraction fringes, 94
 繞射角 angle of diffraction, 95

繞射光柵 diffraction grating, 97
 繞射光譜 diffraction spectrum, 96
 鎘汞齊 cadmium amalgam, 153
 鎘電池 cadmium cell, 154
 鎳絲 nichrome, 178

十九畫

鏡頂 vertex of mirror, 24
 鏡的主軸 principal axis of mirror, 24
 鏡的副軸 secondary axis of mirror, 24
 鏡的孔徑 aperture of mirror, 24
 鏡的主焦點 principal focus of mirror, 24
 藍 blue, 75
 藍綠色 bluish green color, 87
 羅盤針 compass needle, 110
 羅盤 compass, 117

二十一畫

攝譜儀 spectrograph, 79
 鐵心 iron core, 207
 鐵磁質 ferromagnetic substance, 209
 鐳 radium, 280
 鐳射氣 radium emanation, 283
 鐳 A, radium A, 284
 灌電 charge, 142

二十二畫

驗電器 electroSCOPE, 122

驗電板 proof plane, 128

二十三畫

變阻器 rheostat, 171

變壓器 transformer, 242

顯像劑 developer, 59

二十五畫

觀劇鏡 opera glass, 71