

軍事委員會軍訓部審頒

# 電學大綱

(通信學生用)

軍訓部通信兵監編

中華民國三十二年

MG  
044.1  
10

國民政府軍事委員會軍訓部訓令

訓通按壁字第一號

茲編訂電學大綱，作為通信學生教育用書，仰即遵照

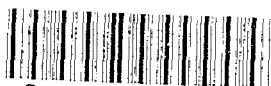
試用。

此令！

中華民國三十一年三月

日

部長白崇禧



3 1763 5495 3

## 序

電磁之學，為研究有無線電學學理之基礎。通信學生對於有線電無線電既為主要之學科，則電磁基本原理，自非先修不可。

電磁學課本，坊間所有，數見不鮮，惟其內容，深淺或有未合，凡所引例，大都偏重於電工，與通信學所舉者首尾難相啣接，為統一教育劃一教本起見，因自編「電學大綱」以為通信學生用書之一。

本書脫稿於二十九年之春間，曾先分發試用，彙集意見，重加修改，期臻完善，惟掛一漏萬，仍所難免。是在教育者之增刪修正矣。

通信兵監華振麟

# 電 學 大 綱

## 目 次

### 第 一 章 電 子 論

- 一、 概述
- 二、 流體說
- 三、 媒質說
- 四、 電子論
- 五、 原子組織與太陽系
- 六、 電子質子陽核
- 七、 電子數與原子序數
- 八、 游子與電荷體

#### 習 題

### 第 二 章 靜 電 現 象

- 九、 帶電現象
- 一〇、 摩擦帶電之原因
- 一一、 導體與非導體
- 一二、 驗電器
- 一三、 靜電感應
- 一四、 物體上電之分佈
- 一五、 表面密度
- 一六、 尖端作用
- 一七、 大氣電及避電器
- 一八、 起電盤

#### 習 題

### 第三章 電場電位

- 一九、 電場
- 二〇、 電力線
- 二一、 庫倫定律
- 二二、 電量之靜電單位
- 二三、 電位
- 二四、 電位差
- 二五、 電位差之單位
- 二六、 電位差與電動力

習 題

### 第四章 直流電路

- 二七、 電流
- 二八、 電流與電子流之方向
- 二九、 電流之單位
- 三〇、 電阻及其單位
- 三一、 歐姆定律
- 三二、 電路
- 三三、  $IR$  電位降
- 三四、 電力或電功率
- 三五、 電阻定律
- 三六、 克希荷夫定律
- 三七、 電阻串聯電路
- 三八、 電阻並聯電路
- 三九、 串並聯電路

習 題

## 第五章 磁

- 四〇、天然磁鐵人造磁鐵
- 四一、磁極
- 四二、磁之吸拒定律
- 四三、磁性物質
- 四四、磁場磁力線
- 四五、磁場強度
- 四六、磁力線密度
- 四七、地磁
- 四八、地磁三要素
- 四九、感應磁
- 五〇、磁之分子說
- 五一、磁性之維護
- 五二、磁屏

### 習 題

## 第六章 電磁

- 五三、電與磁
- 五四、電磁周圍之磁場
- 五五、螺形線圈內之磁場
- 五六、磁之電子說
- 五七、磁動勢
- 五八、電磁鉄
- 五九、永久磁鉄之磁化
- 六〇、導磁率

六一、磁阻及磁力線之計算

六二、磁滯損失

### 習 題

## 第七章 電容與容電器

六三、容電器之構成

六四、容電器之作用

六五、電容及其與電量電壓之關係

六六、電容之單位

六七、來頓瓶

六八、介質常數

六九、容電器種類

七〇、電容之計算

七一、電容串聯與並聯

### 習 題

## 第八章 電解及電池

七二、電解之本義

七三、直接電解

七四、間接電解

七五、電鍍

七六、法拉特定律

七七、電解表

七八、電解池之極化電壓

七九、伏脫電池

八〇、丹聶爾電池

- 八一、 電克爾電池
- 八二、 乾電池
- 八三、 空氣電池
- 八四、 蓄電池
- 八五、 電池之串聯與並聯
- 八六、 電池輸出最高功率之條件

習 題

### 第九章 電磁感應

- 八七、 法拉特之實驗
- 八八、 感應電壓之計算
- 八九、 電磁感應之原因
- 九〇、 林慈定律
- 九一、 佛來銘右手定律
- 九二、 交流發電機
- 九三、 直流發電機
- 九四、 佛來銘左手定律
- 九五、 渦流與渦流損失
- 九六、 直流電動機

習 題

### 第十章 自感應與互感應

- 九七、 自感應與自電感
- 九八、 自感電路急促斷路之危險
- 九九、 無感電阻線
- 一〇〇、 互感應與互電感
- 一〇一、 感應線圈
- 一〇二、 交流變壓器

習 題



## 第十一章 測電儀器

- 一〇三、 概述
- 一〇四、 活動線圈電流表
- 一〇五、 電流與電壓之測量
- 一〇六、 電位表
- 一〇七、 安培表伏特表測量電阻法
- 一〇八、 韋斯登橋與滑線電橋
- 一〇九、 電力表
- 一一〇、 瓦特表
- 一一一、 鉄心安培表及熱線安培表

### 習 題

## 第十二章 交流電路

- 一一二、 電流之區別
- 一一三、 交流之產生及其有效值
- 一一四、 電阻電路
- 一一五、 電感電路
- 一一六、 電感電路內電流之滯後
- 一一七、 感電抗
- 一一八、 電容電路
- 一一九、 電容電路內電流之導前
- 一二〇、 容電抗
- 一二一、 歐姆定律在交流電路上之應用
- 一二二、 交流電功率

### 習 題

# 第一章 電子論

一、概述 電之發現，遠在西歷一千六百年間，初由希臘人用貓皮摩擦琥珀，則琥珀能吸引塵埃紙屑等輕微物體。知有一種作用存在其間，此即今日之所謂電也。其後日就發明，遂致於用；電磁感應之理既與，取電之法不一而足，電之爲用大宏。

歐美各國，自十八世紀以來，電氣事業之發達，一日千里，降及近世，電報、電話、電燈、電動機、發電機、無線電以及其他用電之器械，相繼發明，幾成爲電器世界。吾人對於電之應用既持有擴展，則對於電之本質，首應確知。電爲何物，歷來雖有各種學說，但距今三十年前尚無確切之定論，足以圓滿解釋電之本質及其一切現象，而無缺憾者。至一八九五年始由英人湯姆森 (J.J.Thomson) 研究原子之本質，知原子之基本單位，較原子尤小，稱爲電子 (electron) 乃創爲電子學說 (Electron Theory)，用以解釋電之一切現象及其性質，頗爲合理，而切近於事實，並得許多實驗之證明，遂爲舉世所公認焉。茲先列舉歷來所有關於電之各種學說，然後述及電子論之內容。

二、流體說 一七四七年佛蘭克林 (Benjamin Franklin) 氏始創單流說 (One fluid theory) 謂一切電氣現象，均由一種流體 (One fluid) 或電火所生。在通常狀態，物體所含之此種流體，恰如其所需之分量，故不現帶電現象，但如與其他物體摩擦，則流體由此移彼，結果，一方所餘者較流體少而帶正電 (Positive charge)；他方則較通常多而

帶陽電 (Positive Charge) 。一七五九年辛麥 ( Robert symmer ) 氏又根據佛氏之單流說，而創為雙流說 ( two fluids theory )，以為正電及負電同為無重量之流體，性質相反，如等量混合，則成中和 ( Neutralization )，不現帶電性質，一切物體，在通常狀態時，所含此二種流體之量均等，勢力平衡，故成中和，但一經與他物體摩擦，則正電移至一物體，負電移至他物體，兩者相互分離，遂成一帶正電，一帶負電，且同種流體相斥，異種流體相吸。

以上為一八〇〇年前之舊說。二說均主張兩帶電體間可相隔若干距離，以起作用，是為間隔作用 ( Action at a distance )，至於兩帶電體間之媒質，認為並無關係。

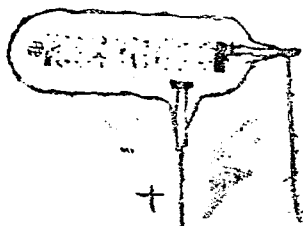
三、媒質說 流體說對於靜電現象，及導體內電流分佈各項問題，尚能圓滿解釋，但一至感應電流之現象，則多不能解答，且所謂間隔作用，亦不合理。因此，法拉特 ( Faraday ) 另創一媒質說 ( Ether theory )。此說盛行於一八七〇年至一九〇〇年間。彼認為電磁作用，均可歸之於其周圍媒質發生之變化，此種媒質，亦即解釋光現象時所假想之能媒，即一切電磁現象，均可由能媒之變形及運動以表現，後經馬克思威爾由數學上研究，成為光之電磁說 ( Electromagnetic theory of light )，最後復得赫芝之實驗證實，較流體說確有進步。

四、電子論 上述之流體說及媒質說，對於電荷 ( Electric charge ) 電流 ( Electric current ) 及一切簡單之現象，尚能適用，然對於電功能之放射，真空管之作用，以及其他較為複雜之現象，則不能正確說明。於是電子學說，乃應

運而起焉。吾人由化學上及物理學上，知凡佔有空間，具有重量，且經官感之媒介，而能引起吾人之感覺者，均稱為物質 (Matter)。如就其形態言之，約分三類：如銅、鐵、石子等曰固體 (Solid)；如水、油、水銀等曰液體 (Liquid)；如空氣，碳酸氣、氧、及氫等曰氣體 (Gas)，佈滿於宇宙，無在不有物質，吾人自身亦即由物質所構成。如就各種物質之組成而言，可分為二類：一為化合物 (Compound) 如水、食鹽、硫酸等，均含二種或二種以上之單質者是；一為元素 (Element)，如銅、鐵等、僅含一種單質者是。凡屬化合物，均由二種以上不同之元素化合而成，如水加以分解，則成氫與氧二元素；食鹽加以分解，則成鈉與氯二元素，此種元素，相互性質不同，與化合而成之化合物性質亦異，物質之種類雖繁，而組成此種物質之元素，並不為多，在今日已知之元素，不過九十二種而已。

此種構成化合物之最小粒子，仍不失原來性質者曰分子 (molecule)。而組成分子之最小粒子曰原子 (Atom)。三十年前科學家猶公認原子為組成物質之最小單位，是為原子學說。一八九五年湯姆森氏證明真空管內之陰極射線 (第一圖) 實發源於陰極所放射之微粒名曰電子 (Electron)。電子之形質特性不隨陰極之物質而異，其大小質量較最輕的氫原子猶小千萬倍，可見原子尚非最小，

第一圖 空管內發之陰極射線



而仍可分解。物質之終極單位，實由兩種帶電之微小粒子而成。其帶陽電者稱為質子 (Proton)，帶陰電者稱為電子，萬物之本源，即此極小之帶電質子與電子，是為電子論。

五、原子組織與太陽系 一切物質之原子，均可分析為一帶陽電之核與圍繞在其周圍之若干電子而成。原子之內部，宛如一極小之太陽系，一陽核亦稱原子核之 (Nucleus) 為其中心之太陽，而電子則為按一定軌道運行之行星。行星圍繞太陽運行，因有太陽吸力之故，電子在原子內圍繞核心運行，則藉有核心之陽電與電子陰電之電力。此種陰陽電因異性相吸，故亦具有一種吸力。除此吸力之外，電子與電子間相拒之力，亦頗大。

六、電子質子陽核 電子既為荷陰電之微粒，故亦稱陰電子。每個電子所荷之陰電量，為  $4.77 \times 10^{-10}$  靜電單位，或  $1.59 \times 10^{-20}$  電磁單位；半徑為  $1.9 \times 10^{-13}$  公分 (Cm)；質量則為  $9.0 \times 10^{-28}$  克 (Cm)。質子之質量，則較電子之質量大一八五〇倍；在任何原子內，其質量體積，與所荷之電量，亦均彼此相同，每個質子之陽電荷，亦正與電子之陰電荷相等。至於陽核，則隨各元素而不同。據盧頌福氏 (Rutherford) 之研究，知一切陽核均由帶陽電之質子與帶陰電之電子結合而成。最簡單之氫氣原子核，如第二圖 (A) 所示，則由一質子所成。故氫原子核常視為一切質子之單位。因質子質量大於電子一八五〇倍，故即以質子質量視作原子全部之質量，亦無不可。其他元素之陽核，其質量則為質子與電子質量之總和。其電荷則為由質子電荷之和，減去電子電荷之和。其量適與核外電子總電荷相等。例如原

子序數爲六之碳原子核，如第二圖（B）所示，則由十二質子與六電子而成，核外電子，其數爲六，陰與陽兩電量正相等也。

## 第二圖 原子

七、電子數與原子序數 因每個原子內電子數目與組織情形之不同，遂成立九十二種不同之元素。設以九十二種原子，除少數例外，依照原子量，自輕至重，順序排列，則各原子之核外電子數必等於原子序數之號數。因原子序數約爲原子量之半。故電子數可視爲與原子量成正比例，約爲原子量之半。例如氫原子之序數爲七，原子量爲一四，則電子數爲七，氧原子之序數爲八，原子量爲一六，則電子數爲八。下表所列自氫至鉛二十四種原子之電子數，原子序數，及原子量等，閱之可明相互間之關係。

八、游子與電荷體 原子如受外力作用在物質內常作離

速運動，故恆有若干原子因受撞擊或摩擦而增得電子或損失電子。增得電子者必荷陰電，損失電子者必荷陽電。凡因電子之得失而荷電之原子名曰游子（Ion）。荷陽電者曰陽游子，荷陰電者曰陰電子。酸類或鹽類爲水所溶解，其原子亦裂爲二種游子。例如硫酸溶於水內，其分子裂爲  $H_2$  及  $S_{O_4}$  二部。 $H_2$  荷陽電曰陽游子， $S_{O_4}$  荷陰電爲陰游子。此二種游子雖裂，但猶在水中相結合，故仍具硫酸之特性。

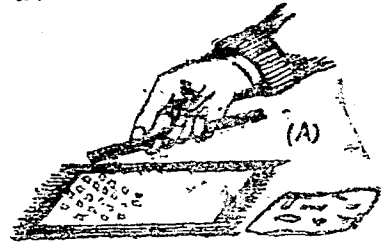
平常物體內縱有若干原子成爲游子。然物體全部並未得失電子。故二種游子勢力平衡，不能對外顯示電性。是爲中和體（Neutral body）。若與他物體因摩擦或其他作用後而得失電子，則陰陽電不復平衡，即能對外顯示電性，是爲電荷體（Charged body）。損失電子者爲陽電體，增得電子者爲陰電體。

## 習 題

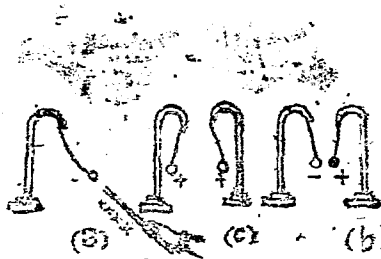
- 一、何謂流體說及媒質說？試述其缺點。
- 二、試述電子論之概要。
- 三、試略述原子體系與太陽系相似之點。
- 四、何謂電子質子？其重要性爲何？
- 五、質子與陽核如何區別？
- 六、電子數與原子序數有何關係？
- 七、何謂游子？
- 八、陽電體與陰電體定義如何？

## 第二章 靜電現象

九、帶電現象 凡不同類之兩種物體，如配置適當，加以摩擦，即能發生帶電現象。例如用絲絹擦玻璃棒，或絨布擦火漆棒，則玻璃棒或火漆棒即能帶電，而可吸引輕物如燈芯等。由各種試驗，知



帶電可分兩種：一由絲絹擦玻璃棒而產生之電，凡與玻璃棒上之電性質相同者，曰陽電 (Positive electricity)，一由絨布擦火漆棒而產生之電，凡與火漆棒上之電性質相同者，曰陰電 (Negative electricity)。同性之電相拒，異性之電相吸 (見第三圖)。



惟此種因摩擦而生

之電，常因所用物質有不同，而產生之電性質亦異。例如玻璃棒與絲絹摩擦，則玻璃棒帶正電 (即陽電)；絨布與火漆棒摩擦，則火漆棒帶負電 (即陰電)。此種經摩擦而帶電之性質，可由下表摩擦次序決定之。

十、摩擦帶電之原因 考摩擦帶電之原因，實不外由前所述原子內電子之關係，由前第八節，知一原子，在通常



一、	玻璃
二、	貓皮
三、	絨布
四、	絲絹
五、	木材
六、	火漆
七、	樹膠
八、	硫磺

狀態，其內所有質子之陽電，恰與其電子之陰電相等，故相互平衡，不現帶電現象。惟在一物體與另一物體摩擦時，由二物體之原子，互相接觸，因摩擦之力，足使此一原子中之電子，脫離而入另一原子之體系內。凡物質之原子內部，對於電子需要較甚，因此所生之吸力較大者，恆取得電子而帶負電。反之，對於電子吸力較小者，恆損失電子而帶正電。此種吸引力之大小，經比較

而知，無絕對標準可言。在摩擦次序表中，位置較前者吸力弱，位置較後者吸力強，相擦後，前者恆帶正電，後者則帶負電。

一一、導體與非導體 以荷電銅球觸金屬體，球即失電，若置之乾燥空氣中則否，可見物質傳電有難易之別，容易傳電之物質名曰導體 (Conductor)。不易傳電之物質名曰非導體 (Nonconductor) 亦曰絕緣體 (Insulator)。物質之所以有能導電，或不能導電之原因，仍不外由於物質內部電子吸力不同之關係。由前所述，知一切物質皆由原子組成，而原子又由陽核與游電子所組成。因物質種類之不同，陽核對於游電子之吸力，亦大小互異。其吸力大者，核外之游電子常被陽核所緊吸，不易脫離而活動，故導電能力極弱，此即所謂非導體者；其吸力小者，核外之游電子，完全在一種

自由狀態下，稍受外力，即易脫離，因電子變動甚易，故導電能力亦增，此即所謂導體者。惟此種導電之程度，亦祇可比較而得，實際上並無明晰之界限。介乎兩者間之物質，亦可稱為半導體。茲分別擇舉較重要之各物質列表如下：

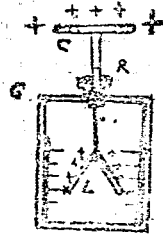
導 體	非 導 體	半 導 體
金屬，木炭，筆鉛，身體，酸類等之水溶液，不純之水，雲，及火焰等	玻璃，磁器，石蠟，絹絲，硫磺，油類，封蠟，琥珀，橡皮，純水，乾燥空氣，馬來膠，洋乾漆，硬膠等	木材，石材，紙，硫磺粉，棉，酒精，以脫，酒等

一二、驗電器 ( Electroscope ) 驗電器者，即利用電之吸拒作用以試驗電之有無及其性別之器具也。如第三圖以細絲懸通草球 ( 或小木球 )，為最簡單之驗電器。但通常用者，其構造如第四圖所示，玻璃瓶口G，塞有橡皮塞R。塞之中間，插一金屬棒M，棒面密塗硬膠或石蠟，上端鑲一圓銅板C，下端貼錫箔兩葉L。將帶電體舉近銅板，則錫箔上發生同性之電而張開，視張開角度之大小，得明帶電之強弱。此器平時須加蓋罩，使其乾燥不粘微塵，庶試驗時能顯輕微之電。

驗電器不獨可驗物之帶電與否，且能驗電之為正為負。法將絹巾擦過之玻璃棒接觸驗電器之銅板，令錫箔帶正電而分開。次舉欲驗之帶電體仍照前法接觸，如錫箔張開更甚，

則知所驗之電爲正，角度減小，則知所驗之電爲負。但如以帶電極強之物體，接觸銅板，則錫箔張開過猛，即有斷裂之虞，切應注意。又或物體帶電極強，電之性質雖與錫箔所帶者互異，而其爲正爲負，每不能依上法驗

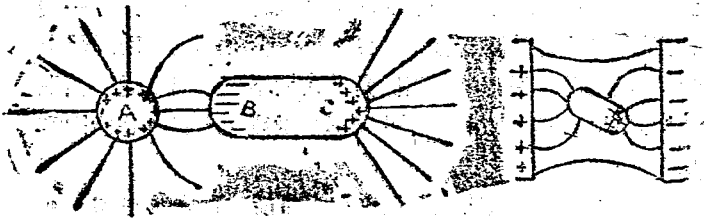
第四圖 驗電器



得，此因物體所帶之強電，除與錫箔所帶者相中和抵消後，其殘餘之電，仍足使錫箔極度張開也。驗電器之不用錫箔而用金箔者，稱爲金箔驗電器 (Gold Leaf Electroscope)。

一三、靜電感應 用已帶電之金屬球與另一未帶電之金屬棒接近而不相觸，則金屬棒亦能帶電。由實驗知此棒與球接近之一端所帶者爲與球異性之電，而另一端所帶者則爲與球同性之電 (見第五圖)。凡因帶電體之接近而帶之電曰感應電荷 (Induced Charge)。

第五圖 靜電感應



感應電荷，係兩性同時產生，量亦相等。如將帶電體移去，則兩電仍自中和，不復現帶電現象；又如帶體並不移

去，而用接地之導體與棒相觸，則此棒所荷與帶電體同性之電，立可逸失；惟與帶電體異性之電則仍存在。此種可自由逸失之電，稱為自由電 (Free Charge)，其不能逸失者，稱為束縛電 (Bound Charge)

一四、物體上電之分佈 非導體上如一部份有電，恆限於原處，不能傳佈；導體則否，一部份有電，依同性相拒之理，必自相互排斥，而分佈全體而止。且導體上所積之電，均分佈於其表面上，內部並無存此，在理可由實驗證明如下。

(甲)取一中空之導體，全部閉合，僅留一小孔，置於絕緣座上，使其帶電，再取一小銅板，上附玻璃柄名曰驗板 (Porve Plane)，以手執柄，使銅板與導體內外各部份逐次接觸，然後檢查之，知表面上各處均有同性之電，而其內部則否。

(乙)英人法拉第，嘗構一小屋，長寬高均為六英尺，屋外遍糊錫箔，使其助手在屋外用靜電發電機充電於錫箔，至能引起綿長火花之程度為止，法拉第則攜極靈敏之驗電器在屋內試驗，用盡方法，終不能發現電之痕迹。

根據上述結果，所以貴重儀器，恆用銅皮包裹，或藏於金屬箱籠中，建築物亦有用鋼皮包圍者，其理由即為避禦雷電之襲擊。

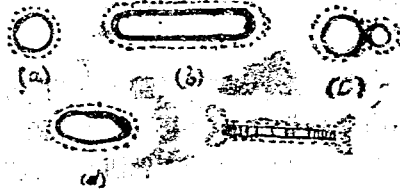
一五、表面密度 導體表面上存在之電量，各部份是否盡同，試擇表面上任意取一小面積，測得此小面積上之電量  $Q$  以小面積  $S$  除之，即得單位面積上所有之電量，曰表面密度 (Surface density)，通常以  $d$  代之，即

$$d = \frac{Q}{S}$$

四圍絕緣之球形帶電體，其近旁如無其他導體或帶電體存在，則其表面上之電，分佈極勻，各點上之  $d$  均相等。如在各點引法線，取其長與  $d$  成比例，則綜合各法線頂點之軌跡，成一同心球，即如第六圖之 a。絕緣圓筒，兩端作圓形者， $d$  在曲率大處

第六圖 電之分佈

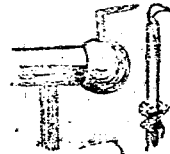
為最大，如 b 是。若兩球相切，則相切之點， $d$  為最小，距切點愈遠則愈大，如 c 是。又或兩球大小不同，則小球上  $d$  較大，橢圓體則尖端處  $d$  最大，如 d 是。至於平面圓板之平面部份， $d$  大致相同，但愈近邊緣，其值亦愈增。如 e 是。



一六、尖端作用 導體之尖端聚電最多，故其表現之電力亦最大。凡導體之尖銳部份，因所帶之電相互斥拒，常能漸次由該部份逸散於空中，此種作用，曰尖端作用 (Point action)。例如第七圖，在起電機

第七圖 電風

之一極上，裝一屈成直角之針，因電由針端傳至近旁之空氣，空氣與針尖，均帶同種之電，以受同性相拒之力，空氣不得不流開尖端，繼之而來之新空氣，不久亦受同樣



作用，持燭火近之，即可見火燄被吹如所示之方向，是爲電風（Electric Wind）。又如第八圖，於直立針上，支一能轉動之輕金屬架，架條之各尖端，作同一方向之彎曲，結果各尖端同受空氣之反動，齊

第八圖 反動風車



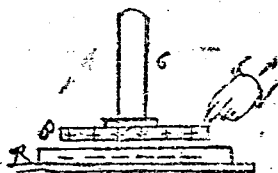
向箭頭所示之方向而轉，是曰漢密爾頓之電反動風車（Hamiltons' electric reaction mill）。導體上之電，受尖端作用放出空中後，失去其帶電之現象，曰放電（Discharge）。

一七、大氣電及避雷器 若以噴器管向上吹氣，使迅速穿過正在下降之水滴。則此一滴之水分裂爲無數水點，同時水點荷陽電，空氣荷陰電。故幸博森論大氣電發生於空中水點與空氣之劇烈摩擦。由摩擦而生電，復互相感應而積增擴大。陰陽電間吸力達相當程度時，衝破空氣而成火花，是爲電光。同時空氣份子被火花振動而成音響，加以遠近回聲，隆隆不絕即成雷聲。

大氣電與地面上感應所生之電相吸而發生火花時，人物如適當其衝，即遭擊滅，俗謂雷擊。欲保護建築物避免雷擊，以裝設一避雷器最爲簡易，以金屬尖針，裝於屋頂上，用導線下通入地即成。當荷電雲塊行近屋頂時，針尖即放電以消滅雲中電量，使火花不生而災禍自免。大廈之保護，宜於屋頂各角均設一針。以銅線繞屋周圍而連接之，然後擇對角二點下通入地。導線可用較粗之電線如塗銑鉄線等，或扁闊之銅條爲妥。地面不盡容易傳電，通地方法，宜以導線纏繞自來水管或銲接於銅板上，而埋入水溝。

一八、起電盤 靜電發電之裝置，以起電盤為最簡單。較之摩擦生電手續易而電量亦增，其構造如第九圖所示。

第 九 圖



起電盤由兩部份合併而成，一為硬橡皮圓板A，置於木台上，一為略小之金屬圓板B，板上裝有玻璃柄G。先用貓皮摩擦A，將B蓋上，以手指略觸B，再將B取開，此時B即帶電，然後將B所帶之電，移至其他導體後，再蓋在A上，仍照前法以手指觸B，隨即取開，又復得電。如是反覆行之，即可蓄積多量之電。茲說明其理如下：

貓皮與A摩擦，則A得陰電，但A之表面凹凸不平，故B蓋上時，實際上所能接觸者，不過數點而已，其餘部份，均由靜電感應，使B板下面生陽電，上面生陰電，以手觸B，則陰電即經人體入地，復將B分開，則所存陽電，即遍佈其上，至於A板之電，雖反覆行之，亦並不減少。

## 習 題

- 一、試說帶電現象
- 二、試引用電子論，說明摩擦帶電之原因及摩擦次序之根據。
- 三、導體與非導體由何劃分。試以電子論說明其所中不同原因。

- 四、試說明驗電器之構造及其作用。
- 五、試說明由靜電感應所生之現象。
- 六、試說明物體上電之分佈情形。並舉例證明之。
- 七、何謂尖端作用？
- 八、試述雷電之原因。
- 九、試述避雷器之構造及其作用。
- 十、起電盤能蓄電之理由安在？

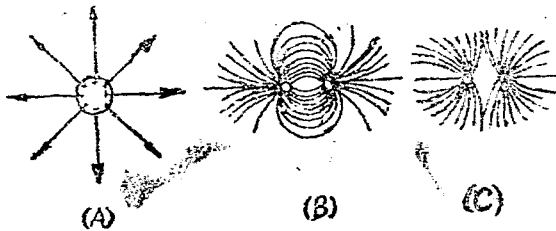


### 第三章 電場 電位

一九、電場 設有一極輕之小球，與一帶電體接觸，則此球即帶有與該帶電體同性之電。因同性相拒之故，於是球與帶電體顯示排斥，如第三圖 (C) 之現象。由實驗知球與帶電體相拒之力，雖相互隔離，亦仍存在。斯可證明帶電體周圍之空間，必具有特殊之性質，足以通過或保持相當之吸力或拒力，此其吸力或拒力所能及之空間稱為電場 (Electric field)，亦稱靜電電場 (Electrostatic field)。

二〇、電力線 設於電場內置一可以自由移動之單位陽電荷，則此陽電荷勢必循一定力向運行，其運行之軌跡，倘以曲線表之，即稱電力線 (Electric lines of force)。電力線之方向，恆由帶陽電之物體出發，至帶陰電之物體而止。惟因陰陽電均可獨立存在，故電力線或由帶陽電之物體向外發出，不復再返。或全數由外部進入帶陰電之物體內，不再發出，不過帶電體表面上如有一單位電量存在，即應有一組電力線，線之方向，則視情形而異。第十圖 (A) 所示，為帶陽電物體所發出之電力線方向，(B) 為異性兩帶電體間所分佈之電力線，(C) 為同性兩帶電體間所分佈之電力線。

第十圖 電力之分佈與方向



如圖所示，在異性兩帶電體中間之電力線，有張力作用，愈縮愈短，有使兩帶電體相互結合之勢。在同性兩帶電體中間之電力線，則有互相排擠之傾向。此所以同性電則相拒，異性電則相吸也。

二一、庫倫定律一七八四年法人庫倫由實驗斷定兩帶電體間之電力，必與其所帶電量之乘積成正比，而與相互間距離之平方成反比。是為庫倫定律。以公式表之，即

$$F = \frac{1}{K} \frac{QQ_1}{r^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中F為電力，q及q<sub>1</sub>為兩帶電體之電量，r為距離，K為常數，其數值視介質(即兩帶電體間所介之物質)種類而定。

二二、電量之靜電單位。電之單位大別為絕對單位(Absolute unit)及實用單位(Practical unit)二種。絕對單位則以公分(Centimeter)克(Gram)秒(Second)為基準。故又稱分克秒單位(C.G.S.unit)。絕對單位又分為克秒靜電單位(C.G.S.Electrostatic unit)及分克秒電磁單位(C.G.S.Electromagnetic unit)二種。其依靜電現象而定者稱靜電單位。依電磁現象而定者稱電磁單位。絕對單位非失之過大，即失之過小，故實際上恆取絕對單位之倍數或分數用之，而為實用單位。茲將各單位述之如次。

等量帶電之二質點，在空氣中相距一公分，其所生作用之力適為一達因(Dyne)時，則其電量為一分，克，秒，靜電單位，由庫倫定律得

$$F = \frac{QQ_1}{Kr^2}$$

今設  $F = 1$  達因

$K = 1$  (空氣之介質常數)

$r = 1$  公分

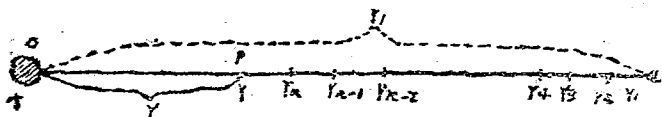
$\therefore Q = 91$  分克秒靜電單位電量

電量之分，克，秒，電磁單位爲分，克，秒，靜電單位之  $3 \times 10^{10}$  倍。其實用單位爲分，克，秒，電磁單位之十分之一，亦即分，克，秒，靜電單位之  $3 \times 10^9$  倍。一靜電單位之電量曰一庫倫，其兆分之一曰微庫倫，其兆兆分之一曰微微庫倫。一庫倫含有電子數  $3.28 \times 10^{18}$ 。

二三、電位 (Electric Potential) 高舉物體以反抗地球重力，須費功 (Work) 若干，此功即變爲位置能力。於電場內亦然。電量反抗電力而移動位置時，亦必費功若干。茲將單位正電體自無窮遠移至電場內之某點所費之功定爲該點之電位，則帶電體之在電場內某點之電位，即可依此定則求之。

如第十一圖帶電體  $Q$  賦有正電  $q$  時。將單位正電體自  $Q$

第十一圖 電位



移至  $P$  而計其所費之功，復於  $PQ$  間等分爲  $n$  個小部份，即  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ ，且設  $r$  爲  $Q$  之距離， $f_1, f_2, f_3, \dots$  爲各點上單位正電體與  $q$  之作用力，依庫倫定律得

$$f_1 = \frac{P}{r_1^2}, f_2 = \frac{P}{r_2^2}, f_3 = \frac{P}{r_3^2} \dots$$

$r_1$  間之距離極小時，則單位正電體自  $r_1$  移至  $r_2$  所受之力，可視為不變，與  $f_1$  同。

茲設單位正電體自  $r_1$  移至  $r_2$  ..... 自  $r_2$  移至  $r_3$  ..... 自  $r_n$  移至  $r$  所費之功各為  $W_1$   $W_2$  .....  $W_n$ 。

因 功 = 力 × 距離

力之方向，即電場強度  $f$  之方向，力線出自正電體而終於負帶電體。

$$\text{故 } W_1 = f_1 (r_1 - r_2) = \frac{P}{2_1^2} \times (r_1 - r_2)$$

$$\text{但 } r_1^2 = r_1 + \{r_2 + (r_1 - r_2)\}$$

( $r_1 - r_2$  之值較  $r_2$  甚小，可略之，改書為

$$r_1^2 = r_1 \times r_2$$

$$\therefore W_1 = \frac{P}{r_1 r_2} (r_1 - r_2) = q \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$\text{同法得 } W_2 = q \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$W_3 = q \left( \frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_3} \right)$$

$$W_{n-1} = q \left( \frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_{n-1}} \right)$$

$$W_n = q \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right)$$

$$\text{加之 } W_1 + W_2 + \dots + W_n = q \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$$

設  $W$  為單位正電體自  $C$  移  $P$  所費之全功，則

$$W = q \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$$

亦即  $PQ$  間之電位差 (Potential Difference)

茲設  $P$  點之電位  $= V_p$

$Q$  點之電位  $= V_Q$

則  $PQ$  間之電位差  $= V_p - V_Q$

$$\therefore W = V_p - V_Q = q \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \dots (2)$$

如相距為無窮遠時

$$\text{則 } r_1 = \infty$$

$$\text{故 } \frac{1}{r_1} = 0$$

$$V_Q = 0$$

$$W = \frac{q}{r} \text{ 爾格 (erg)}$$

$$\therefore V_p = \frac{q}{r} \text{ 靜電單位電位} \dots (3)$$

此即所求  $P$  點之電位也。上式之  $q$ ，依帶電之性質，可給與正號或負號。又  $V$  及  $q$  均屬分、克、秒靜電單位， $r$  則以公分表之。惟此式以空氣為介質，如在空氣以外之介質內，

自應更以介質常數 $K$ 除之。

$$\text{即 } V_p = \frac{q}{Kr} \dots\dots\dots(4)$$

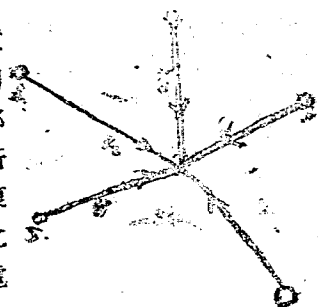
如以多數電荷散佈時，則電場內 $p$ 點之電位與各電荷在 $P$ 點所成電位之代數和相等。如第十二圖設 $q_1, q_2, q_3, \dots\dots$ 為各電荷， $r_1, r_2, r_3, \dots\dots$ 為 $P$ 點離各電荷之遠，則 $P$ 點之電位 $V_p$ 可以次式代表之

$$V_p = \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} \dots\dots\dots$$

$$\text{或 } V_p = \sum \frac{q}{r} \dots\dots\dots(5)$$

電場內任意一點之電位，與單位正電體自無窮遠移至該點所費之功相等，已見前述，若單位正電體自該點移至無窮遠時，則非特不費功，反能表現功於外部，成就與該點電位相等之功，斯與高舉物體取得位置能力後，復落地而，能成與位置能力相等之功，其事雖異，其理則同，故電位者即將來成功能電能之也。

第十二圖 散佈電荷與 $P$ 點所成之電位



二四、電位差 (Potential Difference) 電場內二點電位之差稱電位差。與將單位正電體自低電位之點移至高電位之點所費之功相同，而與移動路線之曲直，並無關係。公式中電量 $q$ 為正，則電位亦正，反之則為負。單位正電體向正

電之方向移動時必需功若干，故正電之電位恆較負電之電位為高。異性兩電之間，必有若干電位差，但正負電量，未必定有正負電位，例如接觸大地之導體，不問其帶電之為正為負，常為零位也。

電場內各點之強度  $f$  相等時，則名均勻電場 (Uniform field)。於均勻電場中將單位正電體逆電力線方向移動時，所受反抗之力，常等於  $f$ ，設如沿電場方向二點間之距離為  $r$ ，電位差為  $v$ ，則得次式

$$V = - \int \mathbf{F} \times \mathbf{r} \dots \dots \dots (6)$$

上式之  $f$  附一負號 (—) 之故，即因電位係單位正電體逆電力線方向經過距離所需之功，以  $f$  之方向為正，則  $f$  之方向為負矣，但僅表電位之大小時，亦可將負號略之。

二五、電位差之單位 由上所述，電位差之定義，既為一單位正電體由一點移至他點所需之功，則當所需之功為一爾格 (erg) 時，此兩點之電位差，亦即為分，克，秒，靜電制之單位電位差 (C.G.S. Electrostatic Unit Of Potential Difference)。如將電荷  $Q$  (靜電單位之電量) 由電位  $V_1$  移至  $V_2$ ，則所需之功  $W$  即為  $Q(V_2 - V_1)$  爾格，或

$$W = Q(V_2 - V_1) \dots \dots \dots (7)$$

在實用上，電位差 (Potential Difference Or P.D.) 之單位為伏脫 (Volt)，為靜電單位之  $\frac{1}{300}$ ，即一伏脫等於  $\frac{1}{300}$  分，克，秒，靜電單位之電位，故如有一庫倫之電量兩

點間移動，兩點間之電位差等於一伏脫時，則所需之功應為

$$\frac{1}{300} \times 3 \times 10^9 = 10^7 \text{ (Joule)}$$

即 功 = 庫倫 × 伏脫 = 焦爾………(8)

二六、電位差與電動力 電位差與電動力（即電壓亦稱電動勢）（Electro—motive Force Or E. M. F.）之意義不同，電位差者乃兩點間電位不同之位，而電動力或電壓者，乃發生此電位差之原動力。譬如兩金屬球，如第十三圖（A），一帶正電，一帶負電，其間雖有電位差存在，但無繼續發生電位差之原動力，故一經用導線將兩帶電體連接，發生瞬息之電流後，電位差即已不復存在。如第十三圖（B）因電池△能發生電動力，故用導線連接後，電流繼續流行，

第十三圖 瞬息與持續電流

瞬息電流

持續電流



直至電池之電量消失為止，此種情形，與欲保持水管內水流不斷，必須維持水管兩端之相當水位差正同。發生電動力之裝置，除電池外，尚有發電機等，候後再述。

### 習 題

- 一、何謂靜電場，電力線？試用圖說明（一）一帶正電，一帶負電，（二）同帶負電之電力線分佈。



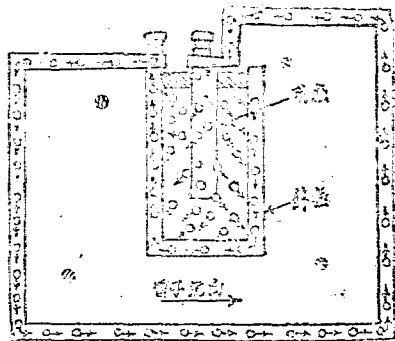
- 二、電之同性相拒，異性相吸何故？試以電力及電力線關係說明之。
- 三、試說明庫倫定律及其公式。
- 四、二荷電小銅球相三公分，一荷 $0.008$ 微庫倫陽電，一荷 $750$ 微庫倫陰電，求二球相吸之力（假定空氣 $k=1$ ）。
- 五、設已知相距六公分之兩帶電體間吸力為八達因，當其中一帶電體之電荷加倍時，各應帶電若 $F$ ？
- 六、二球共荷二十一靜電單位電量之同性電，當相距二公分時，拒力為二十六達因，求各球所荷電量。
- 七、設將十二靜電單位電荷由電勢為二十四移至電勢為六十之處時，問所需之功若干？
- 八、試說明電位差與電動力不同之點。
- 九、電位差之靜電單位及實用單位為何；試詳述之。

## 第四章 直流電路

二七、電流 在電位不同之兩點間，用導線連接，即有電子移動於其間，是為電流。電流之流動方向一定不變者，謂之直流。其流動方向按一定時刻，而為有規則之變動者，謂之交流。交流電路，當於後章述之。設將乾電池之正負極（或陽極與陰極）。用銅線連接，（如第十四圖）則因電池內部之化學作用。

第十四圖 電池連接後電子之流動

已使大部份電子趨於負極，故此時正極上聚積無數陽性游子，對於電子之吸力頗大，銅線概為良導體，（參閱第一一節）則其原子內之電子，因內部對其吸力甚小

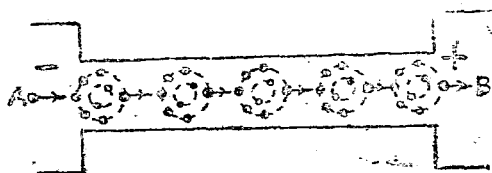


，極易脫離其原子本身而流向正極。此一原子既失去其應有之電子，則荷電即不能平衡，對於鄰近原子內之電子。遂亦發生同樣之吸引作用，使其脫離原子本身。一如此依次繼續進行，直至電池之負極，適引其間已存留不少之過剩電子。且由電子相互間之斥拒作用，於是此不少電子，流向此缺乏電子之銅線原子上以完成全路中之電子流動。電池之化學作用，既在不斷進行，則其兩極間之電動力，亦常能維持無

間，故由負極出發，經導體而至正極，再由正極經電池本身，而至負極，電子之流動，自亦廣續不停，以其流動之方向一定不變，故稱直流。

考電子流動之速度至為遲緩，每分鐘不過數吋，然吾人習見電燈即輸送電流，極遠逾數十里，有線電通信距離更遠，祇須按下電鍵，瞬息間電流立可發達，推源其故，因所傳遞者，為電子之移動，而非移動之電子。例如第十五圖。導體上A B

第十五圖 電流之解釋



二點間既有電位差，其間各原子即同時受到一種勢力，驅使若干

活動電子，脫離其原隸之原子，而向高電位移動，此種勢力，由前後原子互相廣續牽引，以求平衡，所以前後原子內同時移動之電子數必相等，且亦逐步前進。故凡導體上通過電流時，移動者為電子或電量，而非電流。電流則沿導體處處同時發生，且各處強度均屬相等。

二八、電流與電子流之方向 由上節以述，可知電池兩極連接導線後，其負極上之電子，即經由導線向電池之正極移動，此種由負極至正極之電子流向，亦即實際上之電流方向，惟現時通認之電流方向，却適與此實際上電子流向相反，謂電流方向是由正而負，蓋當最初作電池之實驗時，電子論

尚未偶立，因假定電流之方向，必與水流之方向相同，係由高處流向低處，電流一種情形由高電壓之正極移向低電位之負極，此種假定，相沿至今，固已普遍適用，吾人辨識原因，於實用上仍認由正而負可也。若謂電子移動之方向，則曰自負而正。

二九、電流單位 在靜電學上，如電容器之充電，或靜止時之電荷，其多寡以電量表示，單位為庫倫（Coulomb意義已詳第二二節中）。在動電學上，如流在導線或其他導體上流動，因電量未能將時間之因子計入，普通多不用電量，而以電流之強度表明，即每秒內所能通過之電量為計算之標準。蓋電流所生之效果，皆視電流之強度而定。譬如一〇〇庫倫之電量，於一小時內通過某導體，雖亦發生相當之熱量等效應，但如令此相等之電量，於一秒鐘內通過同一導體，則其所發生之熱效，必不相同，後者之溫度，必較前者為高。因此，電流須計其強度，將時間之因子計算在內，即每單位時間內所流過之電量，較之電量，在意義上自有不同。

電流強度之單位曰安培（Ampere），是用以紀念法國大科學家安培（Andre marie Ampere）者，設以 $Q$ 表電量（單位庫倫）， $t$ 表時間（單位為秒），則電流 $I$ （單位安培）與電量及時間之關係當如下：

$$I = \frac{Q}{t} \text{ 安培} \dots\dots\dots (9)$$

由前第二二節，知一庫倫所含之電子數為 $6.28 \times 10^{18}$ ，則一安培之電流，當為 $6.28 \times 10^{18}$ 電子秒，即每秒通過導線橫斷面之電子數 $6.28 \times 10^{18}$ 時為一安培。在商計較小時以千

分之一安培作單位者曰千分安培 (Milliamperere)，以兆分之一安培作單位者曰兆分安培，(Microampere)。

三十、電阻及其單位 水流經過導管時，受管內之阻力水流加緩此與電流通過導線之情形相類，電流通過導線時，導線亦有一種阻力，以阻遏其通過。此種阻力，謂之電阻 (Resistance)，通常以R表之，其單位為歐姆 (Ohm)，簡寫為Ω (希臘字Omaga)，亦用以紀念德國科學家歐姆 (George Simon Ohm) 者。

一歐姆之電阻，即一導線兩端受一伏脫電壓，通過電流通過為一安培時之阻力。為計算較大之電阻，通常亦有以百萬歐姆 (Megohm) 為單位，簡書為MΩ。又為表示較小之電阻，有以百萬分之一歐姆為單位者，曰兆分歐姆。

為便於計算起見，有以電阻之倒數 (The reciprocal of resistance) 曰電導 (Conductance) 者，其單位為歐姆原字之倒寫，曰姆 (Mho)，譬如真空管燈絲之電阻為二十歐姆，則其電導

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ 姆}$$

三一、歐姆定律 由前各節，知在一導體內之電子流，與加於導體兩端之電壓成正比；而與導體之電阻成反比，此可用  $I \propto \frac{E}{R}$  之關係表之。此關係首由歐姆氏發明，且由其將電阻單位適當配合，以成簡明之定律，曰歐姆定律 (Ohm's Law)。其言曰；「任何電路內之電流強度，必等於該電路兩端之電壓除以電阻，」以算式表之則為；

$$I = \frac{E}{R} \dots \dots \dots (10)$$

式中  $I$ ——電流 (安培)  
 $E$ ——電壓 (伏脫)  
 $R$ ——電阻 (歐姆)

此定律適用於直流電路，其算式之運用極關重要。

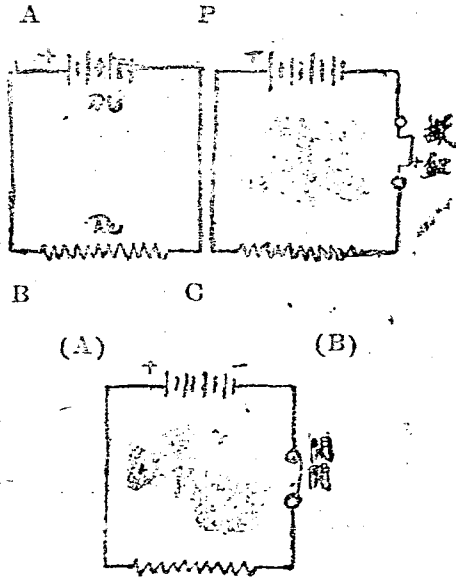
三二、電路 凡電流經行之路曰電路或稱回路 (Circuit)。電路內導體或導線無一處中斷，可使電流繼續通過者曰閉路 (Close circuit)，如第十

六圖 (A)。反之如電路中有一處或數處中斷，非開合不能使電流通過者曰開路 (Open circuit)

。此種電路開閉之器械，式樣甚多，有用揷鈕 (Push) 或電鑰 (Key) 者，亦有用開關 (Switch) 者。揷鈕或電鑰之

構造，係用有彈性之兩導片所成，中間分離而得有揷下或放鬆之動作，司其離合，如圖第十六 (B) 所示，揷鈕按下，則電路閉合，釋放時則電路開斷。電鈴電路上用者，即為此

第十六圖 開關與閉路



種。開關則不外利用一導體，可以左右搬動或上下開合，與接點接觸，如圖 (C) 即為最簡單之一種。在電路中裝一開關，則電流之流通與否；可得隨意加以控制。

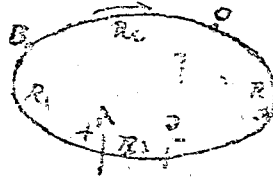
電池或發電機內部兩極間之電路，曰內路 (Internal circuit)；其電阻則曰內電阻 (Internal resistance)。其接於電池或發電機外部之電路，曰外路 (External circuit)；其電阻稱為外電阻。(External resistance)。

除上述之電路，尚有所謂短路 (Short circuit) 者。電路雖通但無電阻存在，此種短路除別有作用者外，在一般電路上皆應避免之。因由歐姆定律，知電壓為常數時，則電流與電阻成反比，電阻愈小，電流愈大，如果電路因某種關係，致成短路，則電阻減至極低，電流即增至極高，此種強電流如通過機件常被燒壞，甚或釀成火災。為預防起見，可於電流通入機件部份，裝接保險絲或稱熔線 (Fuse)。熔線由一種合金製成，熔解點極低，所能荷載電流之強弱，視其直徑之大小而定，倘通過電流，超過限度，不待灼紅，即自燬斷，因此閉路或為開路，機件得以保全。電燈線入屋，必裝熔線，即為此故。

三三、IR 電位降 由前所述，知電流之能流動，由於電動力，當電流流經電阻時，而電壓降落，於電阻之兩端上測之，故必有電位差。依照歐姆定律，此電位差等於電流與電阻之乘積，即  $V = I \times R$ 。若電壓加於含有數電阻串聯之電路時，因輸送電流經過各電阻，則每一電阻，必各有一部電壓之降落。此種因電流通過電阻而降之伏脫數，稱曰 IR 電位降 (IR Drop)。

例如第十七圖，電池正極A為電位最高點，自A至B電位降低  $I R_1$  伏脫，自B至C降低  $I R_2$  伏脫，自C至D，降低  $I R_3$  伏脫，自D至A，復降低  $I R_i$  伏脫，設  $R_e$  為外電阻  $R_i$  為內電阻， $E_0$  為原生電壓，則全電路降低之電位為

第十七圖 電位降



$$MIR = I (R_e + R_i) .$$

$$\text{因 } E_0 = I (R_e + R_i)$$

$$\text{故 } E_0 = MIR$$

即電池或發電機之原生電壓等於全電路電位降之和。

由是可見電池之原生電壓為作用於全電路之整個電壓，其在電路中則按電阻之大小而分配於各段。每段分配之電壓亦即該段之  $I R$  電位降，與公式  $E = I R$  相符。

故欲計算電路中一部份之電流，則  $E$  須為分配於該部份之電壓， $R$  為該部份之電阻，而後  $I = \frac{E}{R}$  方為通過該部份之電流。

電流經過電阻而發生之電位降，與水壓經過水管而發生水位降之情形相似。每一微點之水，其分子間之相互摩擦力，以及水與水管接觸面之相互摩擦力，均足使水位在水管內逐漸低落。除因特別情形，有利用此種電位降者外，通常在電路上，電壓降不宜太甚。因維持電路內之電流流動者，為



電壓，而非電流本身，電壓降落太甚，則電流隨而減小，又電壓降既與電阻有關，故電路中之電阻，以愈小愈佳，但亦視所需電路之情形而定。

三四、電力或電功率 電燈裝接有電壓，燈即發光發熱，光與熱為能力，此能顯由電能 (Electric energy) 轉變而成。又如以適當之電壓，加諸各種電動機 (俗名馬達 Motor)，電動機即自動旋轉，發為機械能，此能亦即由電能轉變而成。總之，當有電壓存在之處使電流通過任何物體或器械時，電能必轉變而為相當之別種能，或為光，或為熱，或為其他相當之功 (Work)。

在力學上，機械能與功之單位相同，而功率 (Power) 即為每單位時間內所作之功。同理，電能亦與其功之單位相同，而電力或電功率 (Electrical Power) 亦即單位時間內電之所作之功。由前述公式 (八) 及公式 (九)，知功為  $W = QE$  焦爾，因  $I = \frac{Q}{t}$ 。  $Q = It$

故電能  $W = QE = EIt$  焦爾 (Joule) ..... (11)

電力或電功率，為  $P = \frac{W}{t} = \frac{QE}{t} = \frac{EIt}{t} = EI$  瓦特，瓦特 (Watt)，係電力之單位，即等於電流為一安培而電壓為一伏脫時之電力。

在實用上，以瓦特之單位尚嫌太小，恆以千瓦特計之，或為一般之單位，曰基羅瓦特或千瓦特 (Kilowatt)，縮寫 KW。即  $1KW = 1000W$ 。

英制之功率單位為馬力 (Horse Power or H.P.)，一馬力為每分鐘三三〇〇〇呎磅或每秒五五〇呎磅。

∴ 1呎磅 = 1.356 焦爾，

∴ 1H.P. = 746 瓦特。

依照上節所述，任何電路內，在電流（安培）通過電阻 R（歐姆）時，其電壓降既為 IR，即  $E = IR$ ，則此時之電力消耗當為；

$$P = EI = IR \times I = I^2 R \text{ 瓦特}$$

如將  $I = \frac{E}{R}$  代入

$$\text{則消耗之電力當為 } P = EI = \frac{E^2}{R} \text{ 瓦特} \dots \dots \dots (12)$$

由上列公式，可知在一電路內，如其電阻為常數，則消耗而變為別種能之電力，與電壓或電流之平方成正比，如將電壓或電流加倍，則變為別種能之電力可加至四倍。

三五、電阻定律 在任何電路，均不能離開電壓，電流，及電阻之關係。故電壓電流電阻可目為一般電路之基本因子，三者之中，除電壓由發電機或池供給，電流視電壓高低與電阻之多寡而定，均與電之本身有關外，至於電阻則完全與物理因子有關，因其長度，橫斷面積，質料，以及溫度等之不同，電阻之數值亦異。茲分述其關係如下：

（一）電阻與長度 電阻與導體之長度成正比，導體愈長，則電阻愈大，此與水管愈長，對於水流之摩擦力愈大之情形正同，譬如一導線長十公尺，其電阻為十歐姆，則此導線長度，如為五〇公尺，電阻必為五〇歐姆。

（二）電阻與橫斷面積 此亦與水管之情形相似。凡導體之橫斷面積（Sectional Area）愈大，則電阻愈小，即電

阻與導體橫斷面積成反比，蓋導線之橫斷面積愈大，則在一定電壓之下，其每秒內所能通過之電子數當愈多，即對於電子流動之阻力愈小。

測量導線粗細之儀器稱曰量線規 (Wire Gauge)，因製造廠家不同，量線規亦於數種，為圖便到，對於各種直徑大小之導線，均編定號數，號數愈大，則直徑愈小，至於各號數間直徑大小之比，則視所採用之標準而異。如美國之 B & S 線規，或 A. W. G 線規，其相隣兩號數直徑之比為一、一二三，所有粗細各線直徑與電阻之大小，均見下表，極便查對。

一 等 導 線 之 直 徑 (吋)	直 徑		橫 截 面 積		每 英 寸 長 所 有 導 致			每 下 英 寸 之 電 阻 值 (歐姆)		銅 線 安 公 司 之 規 格 號 數
	英 吋	公 厘	圓 米 碼	平 方 公 厘	英 吋 碼 包	英 吋 碼 包 S. C. G. D. C. G.	漆 包	銅 線	電 阻 值 (approx.)	
B. & S. G.	mil.	mm.	Cir. mils.	Sq. mm.	D. C. G.		Enamel	Copper		
0000	480.0	11.68	211500	107.3				.0430		211.6
000	473.2	11.40	167300	85.03				.0529		167.8
00	464.3	11.263	130150	67.48				.0633		130.1
0	454.9	11.252	105500	53.30				.0750		105.5
1	445.3	11.348	83650	42.41				.0875		83.7
2	435.6	11.054	65870	33.63				.1022		65.4
3	425.4	10.827	52050	26.67				.1184		52.6
4	414.3	10.589	41740	21.35				.1363		41.7
5	401.9	10.221	33100	16.77				.1562	0.63	33.1
6	388.0	9.845	26250	13.3	5.44	5.20		.1784	11.21	26.3
7	374.0	9.565	20820	10.55	6.08	6.23		.2030	14.79	20.8
8	358.5	9.284	16510	8.38	6.80	6.94		.2300	17.9	16.5
9	341.4	8.908	13250	6.63	7.64	7.78		.2597	22.6	13.1
10	321.9	8.258	10360	5.26	8.51	8.55		.2918	28.0	10.4
11	300.74	7.605	8254	4.17	9.58	9.60		.3264	35.5	8.2
12	280.31	7.153	6529	3.31	10.82	10.80		.3639	44.8	6.5
13	261.83	6.728	5178	2.62	11.83	12.03		.4042	56.7	5.2
14	245.04	6.228	4107	2.08	13.10	13.45	14	.4475	71.7	4.1
15	229.07	5.850	3257	1.65	14.63	14.80	16	.4947	90.4	3.3
16	214.82	5.491	2583	1.31	16.40	17.25	18	.5464	113.0	2.6
17	201.21	5.150	2048	1.04	18.10	18.60	21	.6033	145.0	2.0
18	188.94	4.824	1624	.82	20.09	20.00	24	.6660	184.0	1.6

19	35.60	.0116	1288	.68	21.63	23.60	27	8.210	226.0	1.3
20	31.95	.0118	1022	.52	23.91	23.40	29	10.35	287.0	1.0
21	28.46	.7230	819.1	.41	26.20	23.70	32	13.05	362.0	.91
22	25.33	.6432	642.4	.33	28.59	32.00	36	16.46	480.0	.84
23	22.57	.5733	509.5	.26	31.12	34.60	40	20.76	575.0	.75
24	20.10	.5178	404.0	.20	33.60	37.10	45	26.17	720.0	.61
25	17.90	.4547	320.4	.16	36.20	41.50	50	33.00	912.0	.52
26	15.94	.4049	254.1	.13	39.00	46.50	57	41.62	1162	.45
27	14.20	.3605	201.5	.10	42.00	49.40	64	52.73	1452	.39
28	12.67	.3211	156.8	.08	45.50	54.00	71	66.17	1800	.34
29	11.25	.2859	126.7	.06	49.00	58.60	81	81.84	2300	.30
30	10.03	.2548	100.6	.05	51.18	54.49	88	105.20	2840	.27
31	8.928	.2268	79.70	.040	56.80	69.00	140	192.70	3680	.23
32	7.959	.2009	62.21	.031	62.20	75.00	120	107.30	4390	.20
33	7.099	.1798	50.19	.0254	54.32	81.00	138	211.00	5830	.18
34	6.305	.1601	39.75	.0201	68.60	67.60	140	255.00	7400	.16
35	5.618	.1428	31.52	.0159	75.60	94.20	160	353.00	9560	.14
36	5.000	.1270	25.00	.0127	78.50	101.00	180	425.00	11720	.13
37	4.453	.1131	19.89	.0100	34.00	109.00	185	539.49	14559	.12
38	3.953	.1007	15.72	.0079	69.10	115.50	205	672.50	18355	.11
39	3.531	.0897	12.04	.0063	25.00	122.30	215	848.19	24100	.10
40	3.134	.0806	9.38	.0050	102.50	130.00	230	1069.00	32660	.09
41	—	.0721	7.341	.0040	112.00	151.00	240	1273.00	—	.08
42	—	.0633	5.721	.0032	124.04	160.00	253	1697.00	—	.08
43	—	.0564	4.333	.0025	140.00	192.00	266	2103.00	—	.065
44	—	.0502	3.378	.0020	155.00	210.00	273	2653.00	—	.064

除舊法直接計算圓之面積外，一般對於導線圓面積多用圓密爾 (Circular mil) 計算，其記號為 C. M. 密爾為導線直徑之單位，等於  $\frac{1}{1000}$  英寸，即 1 Mil = 0.001 in. 一圓密爾 (C.m) 等於直徑為一密爾之圓面積，任何導線之截面積之圓密爾數等於直徑密爾數之平方，例如十八號導線之直徑為 0.40 英寸，即其直徑等於 40 密爾，其圓面積則為  $40 \times 40 = 1600 \text{ cm}$ 。

(三) 電阻與資料：由前述之電子論，知每一物質，其原子之內部電子組織，均各不同，對於導電之能力，隨之亦異。因此不同之物質，必顯有不同之電阻。一定長度與一定橫斷面積導線之電阻，稱為比電阻或稱電阻係數 (Specific Resistance)。通常一英尺長，一圓密爾橫斷面積大小之電

錫。為該導線之比電阻，以K (Circular-mil-Foot) 表之。

比電阻愈小，則其導電能力愈佳，銀之比電阻為最小，銅次之，惟以銀價較貴，故多用銅為導線，鉛之比電阻並不大，且質料極輕，亦適用為導線。至於各種物質之比電阻詳見下表。

物 質	比電阻K每英吋長 圓英尺之電阻	比電阻數	物 質	比電阻每英吋長 圓英尺之電阻	比電阻數
銅	10.35	0.00393	汞	576.0	0.00009
電阻線	294.00	0.00001	銀	34.0	0.004
錫	17.00	0.0039	銅鎳合金	294.0	0.00001
白銅	42.00	0.002	鐵	47.0	0.005
碳	22000.00	——	鎘	60.00	0.005
德銀(18%)	198	0.0004	銀	9.56	0.0058
金	14.9	0.00342	軟鋼	96.00	0.005
亞冷酸(銻)	1.00	0.0050	錳鋼	115.00	0.004
錳紫	435.00	0.005	鉛	69.00	0.0042
鎳	132.35	0.0039	銻	34.00	0.0045
錳鎳合金	264.00	0.0001	銻	35.00	0.0037

總括上述之(一)(二)及(三)項，如以K表比電阻(單位歐姆秘爾呎)，L表長度(單位呎)，C.M.表導線之圓面積，則得電阻定律(Law Of resistance)如下列之公式：

$$R = \frac{KL}{C.M.} \text{ 歐姆} \dots \dots \dots (10)$$

(四) 電阻與溫度 因導體之溫度，常隨其周圍之溫度

，或因通過電流所發生之熱量而變化。故欲正確計算電阻值，溫度一因子，自須計入。純粹之金屬與多數合金，其電阻常因溫度之增加而增加，碳及電解質之電阻，則隨溫度之增加而減小。此種電阻變化之大小，隨物質而不同。純金屬則每改變攝氏一度，其電阻約增減 0.4%。惟一般特製之合金，其電阻常不因溫度而改變，如銅鎳鎳合金，其內含銅 18% 鎳 12% 鎳 4%，普通作安培表之分路 (Shunts) 電阻用者，其電阻變化，每度不過十萬分之一。又如銅鎳合金 (銅 70% 鎳 40%) 之電阻，實際上幾不因溫度之改變而改變。

任何物質，設其電阻為一歐姆在溫度改變一度時，所改變之電阻，稱為電阻之溫度係數 (Temperature Coefficient of Resistance)，通常以  $\alpha$  表之。各種物質之電阻之溫度係數，附列於比電阻表內。

電阻既因溫度而改變，則溫度變化計入時，上述之公式 (B) 尚須增加一項因子，故其算式為

$$R = \frac{K \cdot L}{C.M.} (1 \pm \alpha t) \text{ 歐姆} \dots \dots \dots (14)$$

式中 R = 導體在工作溫度時之電阻 (歐姆)

K = 導體在 20°C 時標比電阻

L = 導體之長度 (英尺)

C.M. = 導體之圓面積 (圓密爾)

$\alpha$  = 溫度係數

t = 以 20°C 為標準所改變之溫度度數

三六、克希荷夫定律 關於各種簡單電路之電流電壓及電阻，自可根據歐姆定律以計算，惟遇較為複雜之電路，則往往非此簡單方法所可解決。因此克希荷夫氏 —— Kirchho

ff——乃根據歐姆定律，更添定律二則以作解決複雜電路之助，即克希荷夫定律 (Kirchhoff's Law)。

九 (一)：在電路中任何一點，假定流向此點之電路為正，而由此點流出之電流為負，則所有流向此點，與由此點流出諸電流之代數和 (Algebraical Sum) 等於零。以算式表之，為

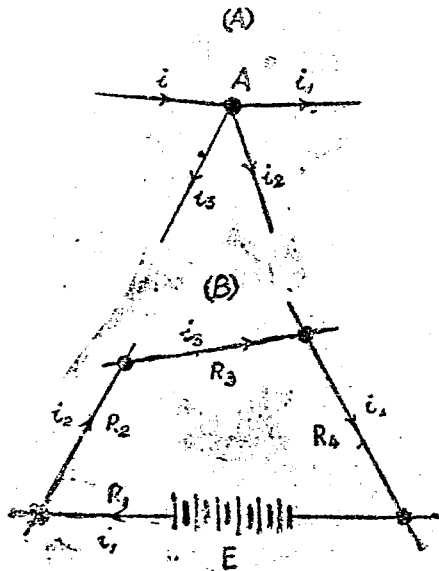
$$\Sigma I = 0 \dots\dots\dots (15)$$

如第十八圖 (A) 設流向 A 點之電流為正，則由 A 點流出之各電流  $i_1, i_2, i_3$  等為負，則

$$\Sigma I = i - i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

$$\text{或 } i = i_1 + i_2 + i_3$$

第十八圖 支希荷夫定律之圖解



定律(二)：在任何閉路內，各段IR電位降之代數和，必等於其電動力或電壓之代數和，以算式表之，爲：

$$\sum IR = \sum E \dots \dots \dots (16)$$

如第十八圖(B)

$$\sum IR = E$$

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = E$$

$$E = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4$$

引用克希荷夫定律以解決電路問題時，須先作圖代表電路全部。分別標明各電流電壓之方向。凡屬已知或能由推測以決定者，固宜標明其正確方向；凡不能由推測以決定者，亦可任意假設一方向暫記於圖。然後引用上述兩定律，列出n個方程式以解答n個未知數。解出結果後，若電流電壓爲負值，即表示其方向實與所假設者相反，值證誤，不須重解。

例題(一)二電池相並聯而接於1.7Ω之外電阻。其原生電壓爲

$$E_1 = 2V, E_2 = 1.4V$$

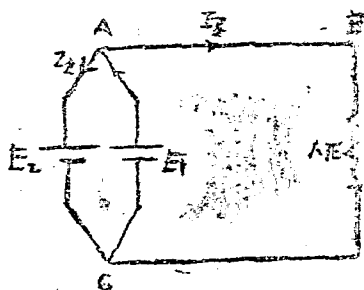
其內電阻爲  $R_1 =$

$$0.5\Omega, R_2 = 0.8\Omega$$

求各電池所載之電流及外電路電流。

解：因  $E_1$  大於  $E_2$  故假設電流方向如圖。因未知數有三，故須列三式。

擇A點





$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

擇 ABCDE<sub>1</sub> A 合路

$$0.5I_1 + 1.7I_3 = 2$$

擇 ABCDE<sub>2</sub> A 合路。

$$1.7I_3 - 0.8I_2 = 1.4$$

解上列三式得；

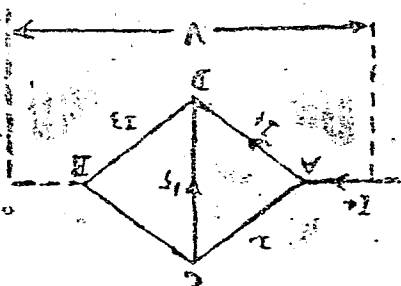
$$I_1 = 1 \text{ 安培}, I_2 = 0.12 \text{ 安培}, I_3 = 0.83 \text{ 安培},$$

例題(二) 惠斯登電橋為聯接五段電阻所成之電路。設某惠斯登電橋其 ABCD，其電阻為

$$AC = 2\omega, AD = 4\omega, BC = 5\omega, BD = 3\omega,$$

$$CD = 8\omega。求 AB 間結果電阻。$$

解： 假設自 A 流向 B 之總電流為 I 安培。而後求 AB 二點間之電位差 V。則  $R = \frac{V}{I}$  即為 AB 間結果電阻。欲求各



分段所載之電流。

因未知數有五，故須列五式。

擇 A 點，

$$I_1 + I_4 = I$$

擇 B 點，

$$I_2 + I_3 = I$$

擇 C 點，

$$I_1 - I_2 - I_5 = 0$$

擇 ACDA 合路，

$$2I_1 + 8I_5 - 4I_4 = 0$$

擇CECD合路，

$$5I_2 - 3I_3 - 3I_5 = 0$$

$$\therefore I_1 = \frac{11}{20} \text{ a}, \quad I_2 = \frac{37}{80} \text{ a},$$

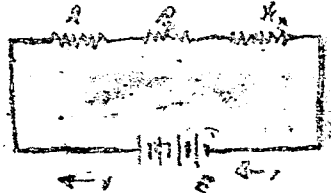
$$\therefore V = 2I_1 + 5I_2 = 1.1 + 2.31 = 3.41 \text{ V}$$

$$\therefore R = \frac{V}{I} = \frac{3.41}{1} = 3.41 \text{ W}$$

三七、電阻串聯電路 在各種實用電路上，用電阻連成外電路之連接方法可分三種：即串聯電路 (Series circuit)，並聯電路 (Parallel circuit)，及串並聯電路或稱混聯電路 (Series Parallel circuit)。凡電路之各部，直例連接，電流祇由一路通過，中間並不分流者，曰串聯電路，如第十九圖所示。

第十九圖 電阻串聯電路

如以  $I$  為通過各部之電流， $E$  為所加之電壓， $R_1$   $R_2$  .....  $R_3$  為各部導體之電阻， $R_0$  為總電阻，



則由克希荷夫氏第二定律

$$\sum E = \sum IR$$

$$E = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$$

$$= I (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

$$\text{即 } \frac{E}{I} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

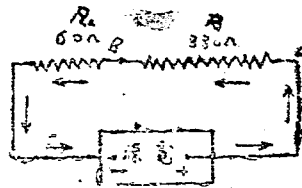
$$\text{因 } \frac{E}{I} = R_0$$

$$R_0 = R_1 + R_2 + \dots + R_n \dots (17)$$

即串聯電路之總電阻等於各段電阻之總和。

例題；某電源之電動力為一一〇伏脫（假定電源內部並無電阻），外連六〇及三八〇歐姆之電阻兩段（第二十圖），問此電路之總電阻，及通過其間之電流各若干？

第二十圖 總電阻及電流之計算



解（一）電路之總電阻為  $R = 380 + 60 = 440$  歐姆

（二）電流為

$$I = \frac{E}{R} = \frac{110}{440} = 0.25 \text{ 安培}$$

電流既已求得，又可計算各段電阻兩端之電壓， $R_1$  兩

端之電壓為；  $I R_1 = 0.25 \times 380 = 95 \text{ V}$

$R_2$  兩端之電壓為；  $I R_2 = 0.25 \times 60 = 15 \text{ V}$

相加得：  $E = 15 + 95 = 110 \text{ V}$

適與電源之電動力相等。此即證明上項計算為無誤。

由上所述，則串聯電路之要點，可總括如次：

（一）總電阻等於各段電阻相加之和

(二) 通過各段電阻之電流一律相同

(三) 總電壓與各段IR電位降之總和相等

三八、電阻並聯電路如一電 第二十一圖 電阻並聯電路  
路中間，電流可分數路通過者，  
曰電阻並聯電路，如第二十一圖  
所示。

因加於 $R_1$   $R_2$  及 $R_3$  之電  
壓均等於電池之電壓 $E$ ，故由歐  
姆定律通過 $R_1$   $R_2$  及 $R_3$  之電  
流，當為；



$$i_1 = \frac{E}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{E}{R_2}$$

$$i_3 = \frac{E}{R_3}$$

但  $I$  (總電流) =  $i_1 + i_2 + i_3$

$$= \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \frac{E}{R_3}$$

$$= E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

亦即  $\frac{I_0}{E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

設  $R_0$  為總電阻，則  $\frac{I_0}{E} = \frac{1}{R_0}$

$$\text{即 } \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots \dots \dots (18)$$

亦即並聯電路，其總電阻之倒數等於各部電阻倒數之總和

設  $R_1, R_2, R_3, \dots \dots \dots$  等均相等，

$$\text{則 } \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \dots \dots \frac{1}{R_n}$$

$$\text{即 } R_0 = \frac{R_1}{n} \dots \dots \dots (19)$$

例題：今有並聯之三電阻 ( $R_1 = 30$  歐姆， $R_2 = 15$  歐姆， $R_3 = 10$  歐姆) 接於五伏特電源之兩端，問總電阻及總電流各若干？

解：總電導為： $\frac{1}{R} = \frac{1}{30} + \frac{1}{15} + \frac{1}{10} = \frac{6}{30}$

故總電阻  $R = 5$  歐姆

總電流為  $I = \frac{E}{R} = \frac{5}{5} = 1$  安培

至於各段電流則為， $I_1 = \frac{5}{30} = 0.17$  培安

$$I_2 = \frac{5}{15} = 0.33 \text{ 安培}$$

$$I_3 = \frac{5}{10} = 0.5 \text{ 安培}$$

相加得一安培，故可證明上項之計算為無誤。

以上加以總括，即得並聯電路之要點如下；

- (一) 在並聯電路中各電阻兩端之電壓全等。
- (二) 總電流等於各分電流之總和。
- (三) 總電阻較任何部份之電阻為小。

### 三九、串並聯電路

除上述串聯及並聯電路外，尚有將此二電路合併而成爲串並聯電路者，其計算方法，可舉下設之例題以明之；

如下圖 B C 間之等值電阻爲

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} \text{ 即 } R_1 = 10 \text{ 歐姆}$$

故 AC 間之總電阻爲

$$R_{AC} = 10 + 2 = 12 \text{ 歐姆}$$

EF 間之等值電阻爲

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{10} \text{ 即 } R_2 = 5 \text{ 歐姆}$$

故 DF 間之總電阻爲  $R_{DF} = 1 + 5 = 6 \text{ 歐姆}$

因此全部電路之等值電阻爲：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{AC}} + \frac{1}{R_{DF}} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{3}{12}$$

即  $R = 4$  歐姆

## 習 題

- 一、試以電子在導體上移動情形，說明直流現象。
- 二、電子移動速度與電流速度相同否？試用圖說明之。
- 三、電流與電子流之方向是否一致？
- 四、今有十安培之電流通過某導線。問四小時後，此導線上通過之總電量若干？
- 五、某導線於五分鐘內通過六〇庫倫之電量，求此導線上之電流。
- 六、設有二二四式真空管，其燈絲電流為一、七五安培，而燈絲電壓為二，五伏脫求燈絲所需之電力。
- 七、試說明歐姆定律。
- 八、燈絲電阻四〇〇歐姆之電燈，接於電壓二二〇伏脫之電路內，點用四小時，通過之電量及所需之電力各若干？
- 九、某電路接於二〇〇伏脫電壓之間，半小時內，其通過電量六〇〇庫倫，求此電路之電阻。
- 十、一一〇伏脫之電燈，需電流  $\frac{1}{4}$  安培，問其電阻若干？
- 十一、試繪圖說明 (a) 電路 (b) 閉路 (c) 開路 (d) 內路 (e) 內電阻 (f) 外路 (g) 外電阻 (h) 短路。
- 十二、何謂 IR 電位降，其對於電路之利弊如何？

十三、試以電子關係說明歐姆定律。

十四、B. & S. 二四號銅線之直徑為  $0.5103 \text{ mm}$  0.0201

英寸，如以密爾計其直徑，圓密爾計其面積，則各應為若干？由表得知此導線之比電阻在  $20^\circ\text{C}$  時為 10.35，今如以此銅線 1000 英尺繞一線圈，在  $20^\circ\text{C}$  時之電阻應為若干？

十五、假定銅之電阻溫度係數為 0004。則上題線圈之電阻在溫度為  $80^\circ\text{C}$  時應為若干？

十六、試用公式及圖說明克希荷夫定律。

十七、設有九〇伏脫之電池，以四〇及一二〇歐姆之兩電阻，並聯於其兩端，求通過每電阻之電流及總電流。

十八、六伏脫蓄電池，當短路時可有電流三〇〇安培，問此電池之內電阻為若干？

十九、有一二歐姆之電阻，今以六安培之電流通過四分鐘，試求 (a) 所加之電壓，(b) 所作之功，(單位爾格及焦爾) 及 (c) 所供給之電力。

二十、五〇，三〇，及 10 歐姆之三電阻並聯後，又與第四電阻並聯，得總電阻為二歐姆。試求此第四電阻值。

二一、五〇。七六，及一一歐姆之三電阻並聯於一電路內，設有電池供給之電流共為二安培則流經各電池之電流應各為若干？

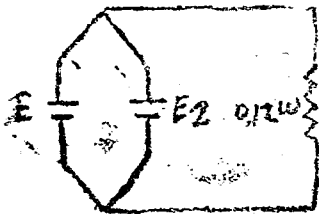
二二、二二〇伏脫發電機，其正規電流為 100 安培，則此發電機之電力為若干基羅瓦特？又為馬力若干？



二三、二五基羅瓦特之直流發電機，用於110伏脫之電路，其正規電流應為若干？

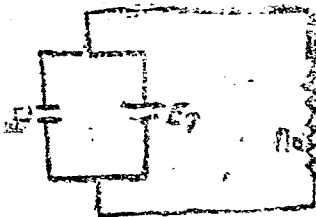
二四、一滷電表之電阻為一二六歐姆今擬將一四歐姆之並聯電阻接入，則其總電阻為若干？

二五、求路端電壓，設 (a) 二電池之正負極聯接如左圖，(b)  $E_2$  之正負極與圖示相反。



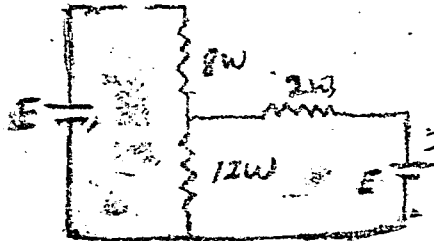
$E_1 = 2.2\text{v}$ ，內電阻為0.1歐姆  
 $E_2 = 1.8\text{v}$ ，內電阻為0.75歐姆

二六、求各電池組所載之電流。



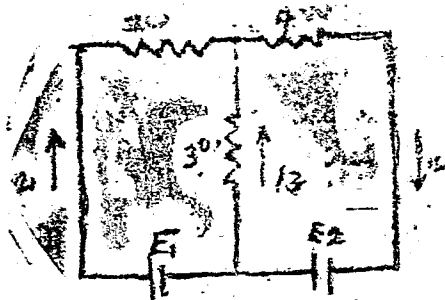
$E_1 = 4\text{v}$ ，內電阻為1.2歐姆  
 $E_2 = 3\text{v}$ ，內電阻為1歐姆  
 $E_3 = 1\text{v}$ ，內電阻為0.5歐姆  
 $R_e = 2\text{歐姆}$

二七、求各電池組所載之電流，設 (a) 電池正負極聯



接如左圖。(b)  $E_2$  之正負極與圖相反。  
 $E_1 = 10\text{v}$ ，內電阻為0.5歐姆  
 $E_2 = 6\text{v}$ ，內電阻為0.4歐姆

二八、求左圖電路中  $I_1$ 、 $I_2$  及  $I_3$  之值。



$E_1 = 8\text{v}$ , 內電阻  
為  $0.6$  歐姆  $E_2 =$   
 $6\text{v}$ , 內電阻為  $0.4$  歐  
姆

## 第五章 磁

四〇、天然磁鐵與人造磁鐵 由電磁學發展之歷史觀之，吾人對於電磁學識之發端，厥爲磁鐵 ( Magnet ) 之磁性 ( Magnetism )。蓋在遠古時代，首先獲知磁鐵礦 ( Magnetite,  $Fe_3O_4$  ) 有一種吸鐵之性質，並知磁鐵懸於空中時，其二端常指南北而靜止。吾國人自謂古時三大發明中之指南針 ( Compass ) 卽利用此種磁性，在歷史充推最早。

上述之磁鐵礦，最初係發現於小亞細亞之 Magnesia 地方，於紀元前五八五年傳至希臘 ( Greece )，希臘人遂以 Magnes 名之。英文名詞之磁鐵磁性等，卽由 Magnes 一字脫胎而來。

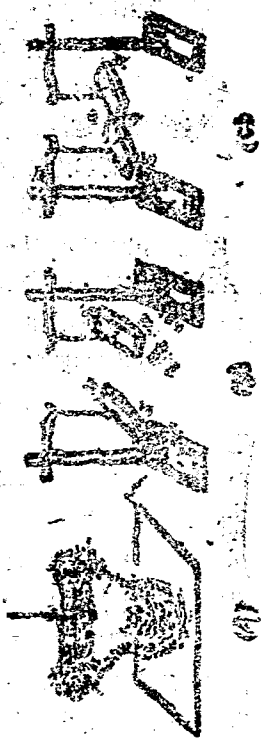
磁鐵亦稱磁石，可分爲二種；一爲出於天然者，如磁鐵礦。黃鐵礦 ( Magnetic Pyrite  $FeS_2$  ) 及鉛礬等礦石，曰天然磁鐵 ( Natural Magnet )。一爲由人力造成者，如以鋼製之小棒，用一具有磁性之磁鐵，順向摩擦數次之後，卽帶磁性，其吸引鐵屑之程度，較天然磁鐵或且過之。此種用人工造得磁性之磁鐵，曰人造磁鐵 ( Artificial Magnet )。人造磁鐵之大小形狀，可隨人意製造，磁性亦較強，故應用極廣。除上述以磁鐵磁化得磁者外，現今一般強磁鐵，且均利用電流通過線圈以使鐵心磁化，其原理另述於後。

四一、磁極 磁鐵之有吸鐵性質，依其吸力強弱而言，並非整體一致，在其兩端附近為最著。如第二十二圖（A），吸引鐵屑最多亦即作用最強之處，厥為磁鐵之兩端，如此磁性最強之磁鐵端，特稱為磁極（Magnetic Pole）。

假定用細線，將條形磁鐵懸起，如第二十二圖（A）使其可以自由轉動，則其兩極恆指一定方向，其所指方向雖隨地而稍有偏差，但大致則與南北方向相差不遠。因此指北之極，名曰指北極（North Seeking Pole），簡稱北極（North Pole），亦曰N極，指南之極名曰指南極（South Seeking Pole），簡稱南極（South Pole），或曰S極。兩極必同時存在，強度相等。

四二、磁之吸拒定律 上法將條形磁鐵懸起，可以決定其兩極。設此磁鐵之南極，與另一磁鐵之南極，或此磁鐵之

第二十二圖 磁鐵與磁極



北極，與另一磁鐵之北極，相互接近，如第二十二圖 (B) 所示，此時兩者間發生一種斥拒之力；倘兩磁鐵可以自由轉動，即能顯示相拒現象。反之，若此磁鐵之南極與另一極石之北極接近，則發生一種吸引之力，而顯示相吸現象，如第二十二圖 (C) 所示。此與電之吸拒定律相似，故磁之吸拒，可得第一及第二定律如下：

(一) 同名之極相拒：

(二) 異名之極相吸。

與靜電庫倫電力相似。磁之吸拒作用。由庫倫實驗而發明磁力之庫倫定律，稱為磁之第三定律，其言曰：

(三) 兩磁極間之吸力或拒力，與兩磁極強度乘積成正比；而與其間之距離平方成反比，以公式表之，則為

$$F = \frac{M_1}{u_1} \times \frac{M_2}{r_2} \dots \dots \dots (20)$$

式中  $F$  表力， $M_1$   $M_2$  表磁極強度， $u$  表媒質之導磁率 (Permeability)， $r$  表其間之距離。

假定有兩磁極，強度相等，在真空或空氣中相距一公分 (Cm.)，而其間作用之力為一達因 (Dyne)，此時之磁極，為單位強度之磁極 (Pole of unit Strength)。如為 N 極，則略稱單位正極 (Unit Positive pole)。單位磁極所含之磁量，亦即磁量之單位，定名為一分克秒單位 (C.G.S. Unit)，(真空或空氣中  $U=1$ )

四三、磁性物質 一切物質，如就其在一磁場內所發生之感應關係言之，可分為二類：一為順磁質 (Para-Magn

etic Substances )，如鐵，鋼，鎳，鈷，鎘，錳，鉛，錫，及空氣，等是，此類磁質，如置於甚強之磁場內，即能感受磁化 ( Magnetizing ) 而變為磁鐵；且其受磁後之極性與所磁化之磁場極性相同。順磁體中以鐵、鎳、鈷三者之效應最著，即於極弱之磁場內，亦能感受甚強之磁性。故又稱為強磁質 ( Ferro Magnetic Substances )。一為逆磁質 ( Diamagnetic Substance )，此類磁質，如置於一極強之磁場內，雖亦能感應而得極微弱之磁性，惟其受磁後之極性即與所放之磁場極性相反，如錳、錒、銅、銀、鋅、硫、銻、金、水及石英等皆是。

此外尚有若干物質，雖置於極強之磁場內：其順磁性，或逆磁性均不顯著，即難以受磁，此類物質稱為非磁質 ( Non-Magnetic Substances )。惟所謂磁質與非磁質。亦僅表明受磁難易之差別，實際上並無顯然之分界。又磁質中有得磁後即不易失磁者，曰永久磁鐵，受磁易而失磁亦易者，曰暫時磁鐵。

強磁性物質，當首推鋼與鐵。一般市售之永久磁鐵，為獲得較強之磁性起見，尚有於鋼內加入少許鎳、錳、鈷，或鎢，以成一種特製之合金者。至如空氣、白銅、鉛、鋅、及玻璃等，雖在極強之磁場內，亦難起磁化，故均目為非磁質。

四四、磁場，磁力線 由二十二圖 ( A ) 所示之實驗，知磁鐵接近鐵屑時，因磁力作用，可吸引甚多之鐵屑，附着於兩極之周圍，此種作用，不僅磁鐵與鐵屑相觸時，可以發生，即距離有相當之遠，亦屬存在。由此可證明磁極周圍之

空間，具有特殊之性質，對於各種磁性物質，均能發生作用。如此磁力所能及之空間即稱磁場 (Magnetic Field)。

試於磁鐵上面，覆以玻璃片或一層薄紙，然後在玻璃片或紙上撒以極細鐵屑，稍加敲動。則鐵屑因受磁鐵之吸引作用，將沿一定方向而排列，如第二十三圖 (A) 所示。又如在磁鐵之近旁，置一斷小指南針，使其移動，則此指南針在磁場內任意一點上所指之方向，亦有一定，依各點上所指方向之軌跡連成曲線，可如第二十三圖 (B) 所示。此種鐵屑排列之行，及指南針運行之軌跡，足可表明磁場內磁的方向，因恆以線表明，故通稱為磁力線 (Magnetic lines of force)。線之多寡，亦恆用以表示磁之強弱。磁力線與電力線相似，此雖假想，但亦可由實驗證明，惟目不能見而已。至於磁力線之方向，通認為由磁鐵之 N 極出發，而至 S 極經內部至 N 極，成一磁路，且通過 N 極與 S 極之磁力線數量相等。

四五、磁場強度 凡單位 N 極在磁場內某點所感受之結果磁

第二十三圖 磁力線



力，爲在該點之磁場強度。磁場強度之絕對單位名曰高斯。一高斯即爲單位N極磁一達因磁力之磁場強度。設強度 M 絕對單位之一磁極在某點感受F達因之磁力，則在該點之磁場強度爲

$$H = \frac{F}{M} \text{ 高斯} \dots\dots (21)$$

若已知某點之磁場強度爲H高斯則磁極 M 在該點所受之磁力爲

$$F = HM \text{ 達因}$$

四六、磁力線密度 磁場爲磁力線所及之範圍。磁場中任何截面積內所通過之磁力線總數名曰磁通 或曰磁通量 ( Magnetic Flux )。每單位面積內所通過之磁力線總數名曰磁通密度 ( Flux density )。磁場內磁力線之稀密即表示磁場之強弱，故磁通密度亦以磁場強度爲計。例如某一磁場強度爲H高斯，即垂直於該磁場之單位面積內通過H磁力線。若各垂直面積內，磁通密度相等，則通過面積A之磁通，即爲

$$\phi = HA \dots\dots\dots (22)$$

由第二十三圖 ( A ) 及 ( B )，知條形磁鐵之磁力線由N極發出者，必須經過空間，始能回至S極，空氣既非強磁質，故空間愈長磁力線之散失亦愈多，磁通或磁場強度即愈弱。假使此條形磁鐵彎曲而成馬蹄 ( Horse shoe ) 形，如第二十三圖 ( C )，則空間縮短，散失既少，所有之磁力線，集中於兩極間，磁通或磁場強度加強故磁性必強。磁石發電機 ( Magneto-generator ) 聽筒 ( EarPhones ) 磁力式揚聲器 ( Mognete type loud speakers ) 以及其他電氣機械中，



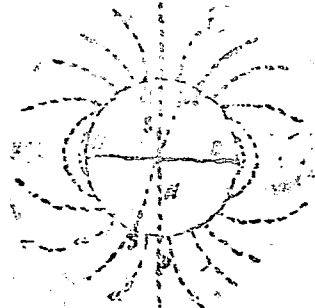
所以多用蹄形磁鐵者，蓋爲此故。蹄形磁鐵之製法，通常先將一條形之鋼，彎成蹄形，如須穿孔，亦于此時鑿成，再將此蹄形之鋼條，熱至赤紅，取出後浸於水或油內，是爲淬火 (Hardening)，最後乃置於極強之蹄形電磁鐵下 (Horseshoe electro-magnet)，加以磁化即成。

四七、地磁 如將磁針懸於空中，任其自由轉動，則其兩端分指南北。可知地球具有磁性，實爲一大磁鐵，磁針之所以被吸而轉動即由於此，此磁力發生自地球，名曰地磁。根據磁之吸拒定律，則知

地理上地磁之南極，必同向於磁針之北極，而地磁上之北極，亦必同向於磁針之南極。地球兩極與地磁兩極之位置，逐年微有偏轉，並不固定。第二十四圖示地磁兩極位置及其磁力線分佈之大概。

四八、地磁三要素 磁針之有特殊裝置而能迴繞直立軸旋轉者，名曰羅盤針，能迴繞水平軸旋轉者名曰磁傾針。地磁兩極位置並不與地理上兩極相符。羅盤針在地面上各處所指方向實非正對南北，羅盤針偏出於地理

第二十四 地磁

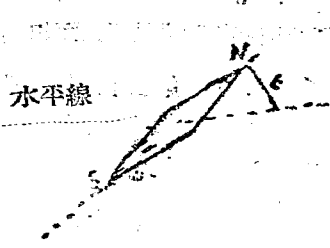


第二十五圖 磁偏角



上子午線之角度名曰磁偏角 (第二十五圖)。地面上磁力線除在地磁赤道附近外，均不與水平線平行，以磁傾針測之，恆不能靜止於水平線位置，磁傾針指向線與水平線傾斜之角度名曰磁傾角 (第二十六圖)。在南半球

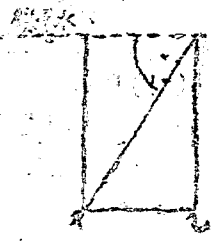
第二十六圖 磁傾角



， $n$  極向上傾。磁傾角為正。至北半球， $n$  極向下傾，磁傾角為負。地磁之磁傾角，加以羅盤針兩端之有效強度，即為地磁強度之水平分力。磁偏角、磁傾角，與水平分力為地磁之三要素，蓋由斯三者，則地磁之強度與方向可以推知矣。

第二十七圖所示為地磁強度  $R$ ，水平分力  $H$ ，垂直分力  $V$ ，與磁傾  $\alpha$  角四項之互相關係，以算示表之即為

第二十七圖 地磁強度之計算



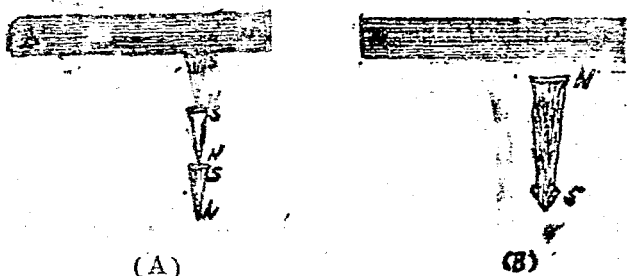
$$H = R \sin \alpha$$

$$V = R \cos \alpha$$

在地磁赤道附近，磁傾角為零。愈近兩極，磁傾角為大。在兩極附近，磁傾角幾為直角，愈近兩極，地磁強度愈強而其水平分力則愈弱，在兩極附近，地磁最強，水平分力幾為零，羅盤針其效力，在地磁赤道附近，地磁最弱，而水平分力為最大。

四九、感應磁 將磁鐵與一鐵釘接觸，如第二十八圖，則此鐵釘即被磁鐵所吸而相連，同時釘之本身亦變成磁鐵，

第二十八圖 磁之感應現象



而再可連吸另一鐵釘，蓋被吸之釘亦成磁鐵矣，其能吸釘之數每不等，須視磁鐵強度而定。此種因與磁鐵接觸，或因置於磁場內而生之磁，曰感應磁 (Induced magnetism)。感應磁與感應電荷相似，其磁性亦係與磁化磁鐵接近一端之磁性相異，而與距離較遠一端之磁性相同，如第二十八圖 (A) 及 (B) 所示。

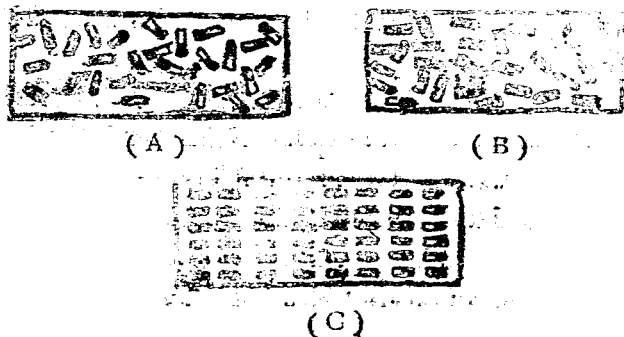
上述。鐵釘與磁鐵接觸時，能發生感應磁，但如接觸後離開磁場，此感應磁是否仍存在？因鐵釘為磁質，受磁易而失磁亦易，離開磁場後，其磁性亦幾全失，磁性祇能暫時存在，如凡之磁性，稱為暫時磁性 (Temporary magnetism)。屬於暫時磁性之物質如生鐵 (Wrought iron) 軟鐵 (Hardened steel) 及鎳等皆是，至於硬鋼及數種合金鋼等，則雖磁化力已失，仍可保持其受磁後之磁性，因此應用上可以經久，稱為永久磁性 (Permanent magnetism)。

凡磁性物質之得磁易者，失磁亦易，反之，得磁難者，失磁亦難。此種阻礙磁化與保留磁化之性質，是為頑磁性 (Retentivity)。鋼之所以常用為永久磁鐵者，即因頑磁性極強之故，軟鐵之頑磁性極弱，惟去磁之後仍有少許磁性，剩留其間，此即所謂剩磁 (Residual magnetism)，剩磁之強弱，則視質料而異。

五〇、磁之分子說 關於成磁之理論頗多，其中較能完滿解釋磁之現象者，為磁之分子說 (Molecular theory of magnetism)。此說係假定一切磁質物質，其組成之分子 (molecule) 本身，即為一極小之磁體，同具有南北兩極，惟當未經磁化之前，其內部磁分子之排列，錯亂不齊，致同名或異名各極間之作用，互相抵消，不呈磁性，如第二十九圖 (A) 所示。但如加以磁化力量，則各個磁分子均漸轉向一定之方向，如圖 (B) 所示。最後則作有規則之排列如圖 (C) 所示。此時除中央各分子異名之極，互相抵消外，其餘皆顯磁性而以兩端為尤強。

磁之分子說可用各種方法證明，例如 (一) 在試管內

第二十九圖 磁化前後磁分子之排列狀況



，實以鐵屑，用永久磁鐵，由管之此端至他端，沿單一方向，摩擦若干次後，則管內之鐵屑，因之磁化，遂排列成行，每一鐵屑，不啻一小磁鐵，其軸均與管並行，全管遂成一磁鐵。但若將磁化力量移去，並將管略為搖動，則管內鐵屑，又復錯亂如初，磁性亦失，（二）以磁化後之小磁鐵（或磁針）入火，燒至紅熱，即全失其磁性，倘不用火燒，用錘重擊，磁性亦減弱，蓋經火熱或振動後，磁分子又起變亂矣，（三）將磁針折斷，則各段皆成一完全磁鐵，斷處成爲兩新成之極。原有S極之一段，其新成之極爲N極之一段，其新成之極則爲S極，如是折而又折，以至無窮，結果仍同。由此可知磁鐵分子，均有兩極。且各以異極相互啣接。就事實言，鋼之磁化，不若鐵之易，此因每種磁性物質，其磁分子間，摩擦力大小各不相同，鋼分子間摩擦力較鐵爲大，故既不易磁化，而磁化之後亦不易喪失。又鋼鐵等物質之磁化程度，各有一定之界限，由上述之理，亦足說明。蓋任何磁性物質，在全體分子已完全排成一定方向之後，（即如第二十九圖）（C），則雖加以任何強大之磁化力，亦不能使其更進一步而另行排列。磁化達此界限後，通常謂之「飽和」。

由上可明磁之分子說，對於磁之各種現象，確能充分予以解答。惟現今之物質觀，概視爲不斷運動之電子所構成，則此種磁的現象，亦須於電子論中求其根源。且所謂磁者，與電子關係極深，自法拉特之感應電流發現之後，不但知電可生磁，磁亦能生電，此種電磁相互間之關係，自非此種分子說所可一貫的予以解釋，因此，磁之電子說（Electron

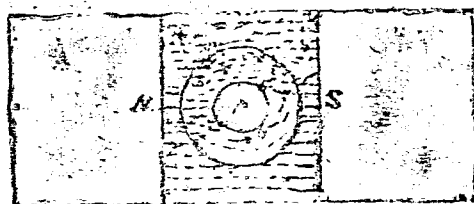
theory of magnetism) 遂以產生，其說見下章。

五一、磁性之維護，在一般電氣機械中，應用永久磁鐵者，其磁極之磁通密度，須能維持永久而不變。當磁鐵新經受磁之後，其強度較強，但經久用亦隨年月而逐漸衰弱。此種衰弱之原因頗多，以磁鐵經過火熱，或被重震關係為尤甚，故吾人對於磁鐵欲其經久不減磁性，須妥加維護。為預防磁鐵之磁性改變過甚起見，一般永久磁鐵，恆於製造完成後，先加火熱，其溫度以不令硬鋼變成軟鋼為限，（通常熱至一〇〇度經過十二小時後，使其磁通密度，降落至一定限度，如此庶可經時較久，不稍變化。

五二、磁屏 世無絕對絕緣之物質，同理，亦無絕對非磁性之物質，磁力線對於空氣，木材，白銅，以及其他一般所謂非磁質，雖不能如通過鐵鋼等磁質之易，但非絕對不能通過故欲將磁場隔開使隔界兩方磁力切斷彼此不受影響，實非用非磁質所易奏功。現代通用隔離磁力線之屏蔽，稱為磁障或磁屏，(magnetic screen)者，其法係於被隔離各物中間，置以

磁性物質，如第三十圖所示，NS為磁鐵之兩極，E為軟鐵製成之鐵圈，

第三十圖 磁障



因軟鐵之透磁率極大，所有由N極發出之磁力線，均密集於鐵圈，然後而至S極，圈之中央既為非磁質幾無磁力線通過，如此鐵圈之中央，故可完全免除磁場之影響，而為良好之磁屏。一般精細之儀器，為防附近磁力線之侵入，常用磁障，以隔離之。惟屏蔽體 (Screen)，必須較厚；否則對於較強磁之場，效果仍淺。

若附近有交變磁場之處，亦可用接地之磁屏以為屏蔽，如此可使磁場為屏蔽體所吸收，成為感應電流，而入地消失不復侵入內部。一般對電週率放大器之線圈，多用此種屏蔽，以避免磁場之干擾。

## 習 題

- 一、何謂天然磁鐵，人造磁鐵？
- 二、試述磁鐵之性質。
- 三、試述磁之吸引定律。
- 四、設有一磁極，其磁強為六〇單位，與另一二〇單位強度之同極，相距二〇公分間互相作用之力為若干？
- 五、設條形磁鐵AB兩端，相距八公分，磁極強度為二五絕對單位。即為一小磁針，磁極強度為二絕對單位。其磁極與條形磁鐵B極相距二公分，求磁針極所受之磁力及其方向。
- 六、何謂磁質，順磁質，逆質，強磁質，非磁質？試舉例以明之。
- 七、何謂磁場，磁力線？試繪圖表明，(a) 兩同極間，(b) 兩異極間之磁力線分佈情形。

- 八、設所在地之地磁強度爲二五高斯，今有一磁針，其磁極強度爲一六絕對單位，問針端各受磁力若干？
- 九、設所在地之地磁強度爲〇、一八高斯，其方向爲自南向北與地面平行今有長二〇英尺，高一五英尺之牆壁，求牆之面積上所通過之磁場。設牆面方向爲 (a) 向南，(b) 向東南，(c) 向東，各求通過之磁通。
- 十、何以蹄形磁鐵常較棒形磁鐵之磁性爲強？
- 十一、何謂地磁？
- 十二、試述地磁之三要素。
- 十三、何謂感應磁、暫時磁鐵，永久磁鐵，示用圖說明感應磁之磁極，與永久磁鐵極之關係。
- 十四、試用圖說明磁分子說，並以試驗證明之。
- 十五、何謂磁屏？磁力線可用非磁質隔絕否？試以圖說明之。

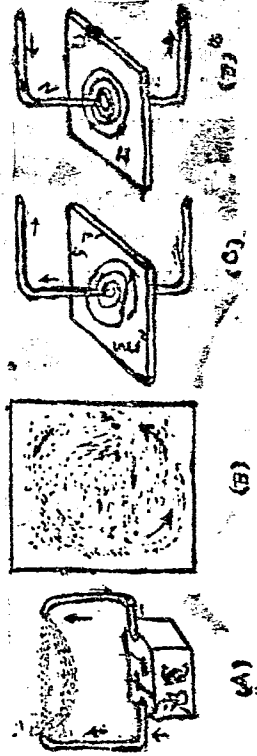


## 第六章 電 磁

五三、電磁之發見：一八一九年丹麥人奧斯德 (Oersted) 由實驗發現當電流流行時，與此電流相伴，於其周圍發生磁場，其性質與由永久磁鐵所發生者，完全相同，自此之後，電與磁之關係始明，而電磁之應用亦日廣。

五四、電磁周圍之磁場；電流通過導體，而發生之磁場，可由下述極簡單之磁場實驗證明：設將長約一公尺之導線 (B S10或12號)，連接於六伏脫蓋電池之兩端，電流既通，使導線與紙板上之鐵屑接觸，如第三十一圖 (A) 所示，則鐵屑均自動開着此導線之周圍；後如將導線自電池拆下，則隔着之鐵屑，均自動由導線上墮落。由此可知電流通過導線時，導線周圍即發生與永久磁鐵周圍相同之磁場，可以吸引鐵屑。此磁場強度，係與電流強度有關，如將圖 (A) 所示之導線，先接二伏脫

第三十一圖 電流通過導線時磁場



電池，次接六號電池，照樣試驗，則附着於導線上之鐵屑，後者必較前者為多，又電流之強度若相同，則導線距鐵屑相近時，吸力亦強，較遠則漸弱，經實驗而得，知與相互間距離之平方成反比例，

圖 (B) 示撒佈鐵屑之紙板或玻璃片，中間鑽一小孔，而將導線穿過，電流通過時，板上鐵屑均自動列成爲同心圓。假定導線附近，置一極小之指南針，則此指南針無論在何點，均取與導線相互垂直之方向，換言之，即在任何點，均取與同心圓相切 (Tangent) 之方向，如圖 (C) 所示。現如將導線接連電池之兩端，加以換接，使電流通過導線之方向與前相反，此時指南針仍取與導線相互垂直之方向，惟其兩極所指，而與前相反，如圖 (D) 所示。由此可知，電流周圍之磁場其磁力線方向，隨電流之方向而不同。下述之安培右手定則 (Right-hand Rule) 即表示其相互間之關係，其言曰：『如以右手握導線，大指所指爲電流之方向，則導線，周圍磁力線方向，適與其餘各指所指之方向相同。』(見第三十二圖)

上述各項，概括如下：

(一) 在電流周圍，必相伴而產生磁場，其磁力線均以導線爲圓心，而成無數同心圓。

(二) 磁場強度視通過電流之強弱而定，電流愈大，則磁場愈強。

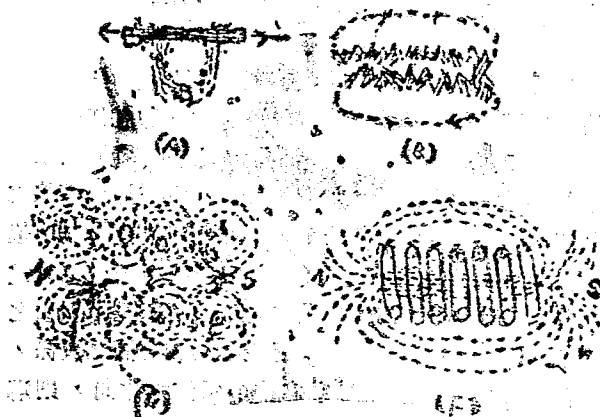
(三) 沿導線之任一點，其周圍所生之磁力線多寡相同，即電流之強度相同，產生之磁場強度亦相等。

(四) 在電流周圍之磁場，因爲圓狀，故不分南北極；

但其磁力線與電流相互間之關係，則有一定，兩者之方向，可應用安培右手定則決定之。

五五、螺形線圈內之磁場 設將導線繞成螺形單轉線圈，通以電流，如第三十三圖 (A) 所示，則圍繞導線之磁力

第三十三圖 螺形線圈之磁力線方向



線，將以同一方向，通過線圈中心，因線圈中心之面積較外為小，所有磁力線可視為均集中於此，故所成之磁場，自較線圈之外部為強。茲如線圈不祇一匝，而為匝數甚多螺形線圈 (Solenoid) 如圖 (B) 所示，則因各匝導線上電流之方向相同，任一點所產生之磁力線，亦必以同一之方向通過此線圈之中心，至於線圈各匝相鄰之空間，則因磁力線方向相反，而強度相等之關係，作用抵消。因此一螺形線圈，當有電流通過時，其內所成之磁場實與有一條形磁鐵相同，觀第三十三圖 (C) (D) 可更明瞭。圖 (C) 及 (D) 所示，均

爲螺形線圈之剖面，標有 $\oplus$ 者，表示電流由此流入；標有 $\ominus$ 者，表示電流由此流出，圖(C)示圍繞各匝間之磁力線分佈情形；圖(D)示整個線圈之磁力線分佈情形。磁力線發出之一端爲N極，流入之一端爲S極。

螺形線圈磁極與電流方向之關係，亦可應用右手定則確定如下：

『右手作握導線狀，如各指所指之方向，爲導線上通過電流之方向，則展開之姆指，所指着必爲磁力線之方向，亦即磁力線之N極。

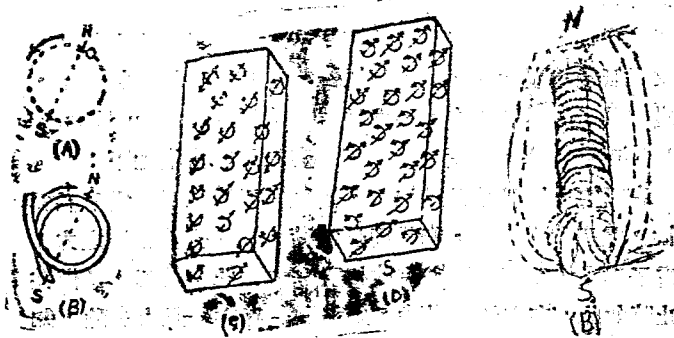
五六、磁之電子說 上述電流流經導線時，導線周圍，即產生磁場，此磁場既因電流而產生，自爲導線上電子運動所致而無疑。蓋時至近代，一切物質之組成，既原於電子，則磁之分子說自不成立，磁之電子說(The electron theory or magnetism)，于焉代之而興。茲舉述其大概如下：

在靜電，同性帶電體相拒，異性帶電體相吸，電子爲負性，電子與電子間，既帶同種電荷，當必發生相拒之力；而電子與陽離子間，則必發生相吸之力。此種情形，不僅在靜止時如此，在電子運動時，知亦同樣存在。且由實驗知，電子運動而發生於其周圍之力，實與永久磁鐵所發生者同，故電子運動之結果，必發生磁力(Magnetic force)此即電生磁之簡單理論與原由。

實則不僅電流周圍所生之磁場爲電子運動之結果，即永久磁鐵，以及其他一切磁之現象，亦無不由於電子之關係。根據電子論，一切物質均由原子構成，而原子由陽核及圍繞於其周圍運行之電子所構成，爲便於說明起見，假定原子內

圍繞其陽核之某一軌道上，有電子不斷運行，如第三十四圖(A)所示，此與圖(B)之單匝線圈中通過電流時之情形，完全相似。單匝線圈中當有電子在其流上動時，既能產生磁場，則電子在原子內圍繞陽核運行，自必同樣產生磁場。因此向所認為磁性物質係由磁分子構成者，今當不能不加以修正，而應仍歸源於構成此物質終極單位之電子。原子因其內之

第三十四圖



電子運動，既能產生磁力，本身即成一磁鐵，惟在通常狀態下，一切物質，內部原子與電子運行之軌道，多不規則，磁力之方向，相互錯縱，致作用抵消，而磁性不顯，但如加以磁化力，則每一原子，受此磁化力之影響，將轉動其方向，僅內部電子之軌道相互並行，同時與磁化力之方向相互垂直，結果各個電子，遂得循同一方向運行，一如通電流於螺旋形

線圈時之情形，每一電子運行而發生之磁力線，因方向相同，故力亦相加，遂成爲磁鐵，此即磁質物質積成之原因。

在通常之磁性物質，加有磁化力時，其原子內電子，多少略有轉動，而運行在同一方向，而顯出磁性。強磁質中電子受有磁化力後轉動多而且整，故磁性較強。逆磁性物質，在適當狀態，其原子及電子軌道之組織情形，如圖 (C) 所示，感受磁化力時，電子轉動之結果，使與磁化力電子運行方向相反之運動加速，而使方向相同之運動降低，結果磁性適成相反。至於非磁質因其內電子爲湯核所吸而不受外部磁力所感應，運行方向不易改變而調整，故所顯磁性甚少也。

五七、磁動勢 磁路與電路相似，電路中產生電流之原動力爲電動力，磁路中之能力產生磁通，亦必有原動力，此爲磁動勢或曰磁動力 (Magneto motive force M. M. F.) 此種磁即係單位磁通，由此點多至他一點所需之力，或所成之功。此在物理學上定義如此，在實際應用上，恆以安培匝數表明之。

吾人知線圈中所能產生之磁通，與所通過之電流強度，及其匝數多少成正比，故匝數愈多，或電流愈強，磁通愈大，則產生此磁通之磁動勢可知亦必愈大。茲設以  $N$  表線圈匝數， $I$  表電流安培，則磁動勢與  $N$  及  $I$  可得如下之關係，即：

$$M. M. F. \propto NI \text{ 安培匝數}$$

$$\text{或 } M. M. F. = 0.4\pi NI \text{ 吉爾拍 (Gilber.s)}$$

..... (24)

吉爾柏 (Gilberts) 為磁動勢之分克秒單位。

五八、電磁 將軟鐵 (其他磁性物質亦可) 作為鐵心 (Core)，插入通有電流之線圈內，如第三十五圖 (A)，則鐵心同時受磁而成為磁鐵，因由電磁之作用而然，故稱為電磁鐵，(Electro magnets)。此鐵心受線圈磁場之感應於其本身產生磁場，與軟鐵磁場，因彼此磁力線方向一致，故插入鐵心後，線圈周圍之磁場強度，必為線圈磁場，與軟鐵磁場，兩者之和，若電流停止，因磁化力既滅，鐵心之磁性亦失。惟其中少數原子，因相互間吸力作用，仍能維持其新位置，故尚有若干磁性存留其間，此即前所稱之剩磁是。軟鐵之剩磁極少，硬鋼 (Hard steel)、錳鋼 (Manganese steel)、鈷鋼 (Cobalt steel)，等剩磁極多，甚至施以相反之磁化力，均不能使其完全恢復原狀。

第三十五圖 電磁鐵



因用途上之不同，除條形電磁鐵 (Bar electro-magnet) 如圖 (A) 者外，尚有蹄形電磁鐵 (Horseshoe electro-magnet) 及殼形電磁鐵 (Shell shaped electro-magnet)

等，第三十五圖(B)即爲蹄形電磁鐵之一種，兩端間空隙(Air gap)甚小，大部份磁力線均經由鐵之內部，故磁性極強。電鈴音響器電話送話器無線電報用聽筒及其他較靈敏之電磁器械，多採用此式。其左右兩線圈係以相反方向，分別繞於鉄心上，在通過電流時，可得不同之磁極，如圖所示，其另一端，連以軛鐵(yoke)其用意在於使增強磁路中之導率。

圖(C)爲一般形電磁鐵，依將線圈纏繞於砂鋼圓柱上，外部爲鋼殼，當電流通過線圈時，一端發出之磁力線，可分經兩邊鋼殼及極短之空隙，回至中心之圓柱，因其環成之磁路導磁率極高，故磁場亦極強。

五九、永久磁鉄之磁化 現今一般通用之永久磁鉄，即用电磁鐵之方式施行磁化法，將未經磁化之條形鋼，或馬蹄形鋼，置於線圈中，而通以電流，同時，加以打擊，以期鋼內游電子軌道，均能轉動，成同一之方向，數秒鐘後，電流停止，即成爲永久磁鉄。爲防避免磁性消失起見，在未用時，蹄形永久磁鉄之兩極，常以一塊軟鉄，稱爲保磁子(Keeper)。

六〇、導磁率 空心螺形線圈，通以一定強度之電流，因磁動勢(因 $H, F. \propto NI$ )既一定，故所生之磁通，亦必一定，設以軟鉄鉄心插入此螺形線圈內，則磁動勢雖未增加，(即 $NI$ 仍爲一定)，而磁通則增加三〇〇倍。由此而知，電磁鉄之強度，除與磁動勢大小有關外，與其中心所介之物質，亦有極大之關係，以同一之磁動勢，以某種物質爲心，所得之磁場強度，與以空氣或真空爲心所得之磁場強度，相互



間之比值，稱爲該物質之導磁率，或曰透磁率，通常以  $\mu$  表之。導磁率之倒數，即  $\frac{1}{\mu}$  是爲電阻係數或稱比磁阻 (Specific reluctance)。一切非磁性物質之導磁率均爲一，磁性物質之導磁率，通常均大於一。

六一、電阻及磁力線之計算 第四節述磁方線方向，在磁鐵外端，係由 N 極而至 S 極；在磁鐵內部，係由 S 極而 N 極，自成環路，稱曰磁路 (magnetic circuit)，其情形與電路相同，電路中使電流流動者爲電動力 (E. M. F.)，磁路中產生磁通 (即磁方線) 通過磁路者，爲磁動勢 (M. M. F.)。電路中之電流在導體上流動，導體有電阻，電阻大則電流小，磁路中之磁通，則藉磁性物質以傳導，磁性物質亦有磁阻，磁阻之大小，於電阻相似，亦與物質之長度及物質之比磁阻 (即  $\frac{l}{\mu}$ ) 成正比，而與物質之橫截面積成反比。因磁路與電路相似，故亦適用歐姆氏定律，茲列式如下。

$$\phi = \frac{M. M. F.}{R} \dots \dots \dots (25)$$

式中  $\phi$  = 磁通 (單位馬克士威 Maxwells) M. M. F.  
 = 磁動勢 (單位吉爾柏 Gilbert)  
 R = 磁阻 (單位奧斯德 oersted)

由公式 (二四)  $M. M. F. = 0.4\pi N I$  吉爾柏 (螺形線圈)  
 線圈之匝數  
 直導電流之強度 (單位安培)

$$L = \frac{L}{uA} \dots \dots \dots (26)$$

$L$  = 磁路長度 (單位公分 cm)  $A$  = 磁路之橫  
截面積 (平方公分)

$u$  = 導線率

將 (二四) (二五) 及 (二六) 三式合併，則螺形線圈 (Solenoid) 之磁力線 (即磁通  $\phi$ )，可由下列公式計算之，  
即

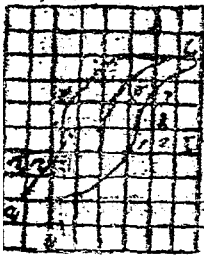
$$\phi = \frac{0.4\pi Ni}{L} = \frac{1.257 NiA}{L} \dots \dots \dots (27)$$

磁通密度為單位面積內所通過之磁力線，即

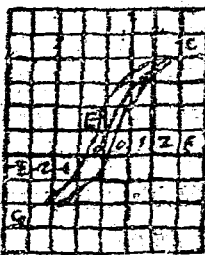
$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{1.257 Ni}{L} \dots \dots \dots (28)$$

(單位高斯 Gauss)

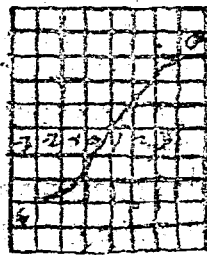
第三十六圖 磁滯表現之曲線



M.M.E. VW  
(A)



M.M.E. WV  
(B)



M.M.E. WV  
(C)

六二，磁滯損失。假定有一變化之電流，通過硬鋼心螺形線圈，則因磁動勢（即 $NI$ ）之變化，使所生之磁通亦發生變化，惟由實驗，磁通中之變化，常較磁動勢（ $NI$ ）稍為遲滯，兩者相變之關係，以曲線表明之，可如第三十六圖所示。其中之(A)為硬鋼心之磁滯曲線，由圖可見當磁動勢（即 $IN$ ）由零逐漸增加時，磁通沿 $O-B$ 線增加，直至 $C$ 點因已達飽和，故成水平。此時將磁動勢逐漸減小，磁通亦隨而衰退，惟至磁動勢已減至零時，磁通並不至零，而為 $O-D$ 。是即剩磁，假定此時加以反向之動勢為 $O-E$ 時，始能使磁通減至於零，電磁鐵之磁性完全失去。倘此時之反向磁動勢繼續增加，電磁鐵繼續磁化，惟磁化後之南北極，恰與以前相反漸至於飽和。其後如又將磁動勢反向減小，磁通仍沿 $G-H$ 線變化，至磁動勢為零時，磁通仍不能為零，倘再加以反向之磁動勢，則磁通始沿 $H-I-J-C$ 線漸達於 $C$ 點，其變化結果適成一完全曲線。

考磁通變化、常較磁勢變化遲滯之原因，殆由於磁性物質磁化時，為克服每個原子間之摩擦力，須損耗其若干能力。同理，在已經磁化成為磁鐵之後。欲恢復原來狀態，使磁性完全消失，則須添增若干能力。以克服每個原子間之摩擦力，此外，並因每一原子既一塊小磁鐵，在同一方向排列，則相互間即具吸力作用，較前更不易轉動，致所需之能力更多。此種所需或所耗之能力，由於原子間之摩擦力與吸力而起，恆轉變而為損耗之熱能。

磁通變化磁滯之現象，稱為磁滯 (Hysteresis)，因磁滯而損耗之能力，為遲滯損失 (Hysteresis Loss)。此現象由

實驗測得而以曲線表明之，爲磁滯曲線 (Hysteresis Loop) 如第三十六圖所示。大抵磁通變化愈快，則所需以克服此種原子間摩擦力與吸力之能力愈多，故磁鐵損失亦愈大，因此，流電所用之各種機械，其磁通變化每秒鐘在一百次（如交流電爲五〇週秒，則反復由最高點以至零位之變化，每秒一〇〇次）以上者，常視磁滯損失爲極有損害之因子。關於此等器械之設計，自應選擇磁滯損失極小之物質，以充電磁線圈之鐵心。圖(B)爲矽鋼 (Annealed silicon steel) 之磁滯曲線。其磁滯損失已較硬鋼，圖(A)爲小，圖(C)則爲理想之磁滯曲線其損失爲零，是爲最佳。至於實際上則軟鐵及矽鋼之磁滯損失，確較一般磁性物質爲小，故變壓器及電機上多用之。

## 習 題

- 一、如何以實驗證明電流周圍磁場之存在？
- 二、如何應用安培右手定則以決定導線電流與磁力之方向。
- 三、試求圓電流中心垂直線上各點之磁場強度。
- 四、螺形線圈電流與磁力線方向相互之關係如何？試用圖說明之。
- 五、試略述磁之電子說。
- 六、試繪圖說明電生磁之理及順磁質強磁質非磁質構成之原因。
- 七、今有二五〇轉之螺形線圈，若通過之電流爲五安培，問磁動勢爲若干？
- 八、何謂電磁鐵，一般通用之電磁鐵有幾種？試繪圖說明。

之。

九、何謂（一）磁路，（二）磁阻，（三）導磁率，（四）比磁阻（五）旗磁性（六）剩磁？

十、試說明磁滯現象。

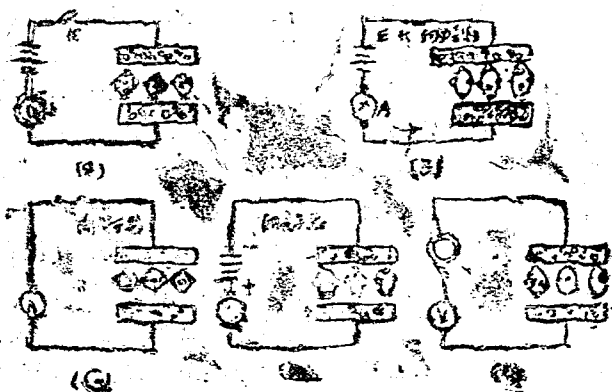
十一、試用公式說明磁之歐姆定律。

## 第七章 電容與容電器

六三、容電器之構成 凡可以存儲電荷，以使其上有一電位差存在之器，稱為容電器 (Condenser)。通常於兩導體中間隔以絕緣體 (即介質) 構成之。單獨之導體，與大地並列，如無線電之天線與地線，亦得視為容電器，蓋大地亦為一導體也。

六四、容電器之作用如第三十七圖所示，兩金屬片中

第三十七圖 電容器作用時之電子



間隔以介質 (Dielectric 亦稱絕緣體) 而成之容電器中，各小圈點係代表電子，原子內之黑點則代表陽核，圖 (A) 為開關未閉合時之情形，介質內電子係在通常中和狀態。圖 (B)，係開關閉合後之情形。當電池之電壓加於容電器

時，上面之金屬片，因與正極相接，故其原子內之電子，多流往電池；下面之金屬片，因與負極相接，故電子由電池增多流集其上，形成一暫時之電子流，此由安培表指針之轉動，可以見之。同時介質本身因上面金屬片電子減少為正電位，下面金屬片電子增多為負電位，其原子內之電子，雖不能自由逸出而飛往金屬片，但因受電力影響，電子為正電所吸近，而陽核則為負電所吸近，電子與陽核背向位移，而兩者之間吸力仍存，故呈出一種緊張狀態，此為充電(Charge)至兩金屬片上之電位差，與電池電壓相等時，充電現象始停止。現在將電路上電壓除去，而將容電器之兩端，指導線，如圖(C)所示，因上下兩金屬片上電位不相等，則其前所流集於下面金屬片之電子，將由導線——流回上面金屬片，以冀恢復原來中和狀態，因此遂發生電子流，此亦可於安培表指針之轉動見之，惟其方向適與前相反，此為放電(Discharge)至兩金屬片上電子相若而電位差為零時，放電現象始停止。又如將導線拆除後以方向相反之電壓，加於其上。則其充電放電一如上述之情形，不過充電及放電時電子流動方向各與以前相反，如圖(D)所示，又或加於電容器者，不為直流，而為交流電壓，如圖(E)一猶上述之情形，電子反復流動，忽而上往，忽又由下往上而成繼續不斷之交流。惟應注意者，此種電子流，僅及於容電器外部，並不通過容電器本身，因其介質內電子，雖能往復位移，但仍不能流至上下兩金屬片也。由上觀之，直流電加上容電器時，只在加上之頃，有瞬時電流發生，過後即絕，是可謂容電器不能通過直流電；加上交流電時，因電壓反復交變，線路上電

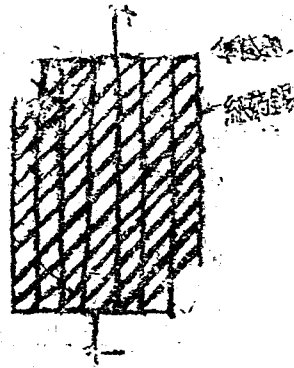
流仍能反復流動，是可謂容電器能通過交流電。

上列之 (E) 如用一種充電方向變動極速之交流電壓，則因介質內部電子變動過捷，呈一種永遠緊張狀態，且由原子之摩擦而生熱。其熱量，即與電壓高低及變動遲速有關，電壓愈高，變動愈速（即週率愈大）所發生之熱最自亦愈多，這熱量增至相當程度，則容量器內之滲雜物質，將被熔化，介質之絕緣能力亦被減弱，則容電器即難免損壞。

由上述述容電器接入電路中，因介質內電子位移，發生電場，確有蓄電之作用，但此與蓄電池之蓄電情形不同，因蓄電池充電時，所蓄者為化學能，放電時，則轉變而為電能，容電器之充電，係使此銅導片上（若欲容電器體積小而儲量多，可用錫紙多頁，各隔以雲母薄片或石臘層，分兩組連接，如第三十八及第四十圖）之電子，強迫流集於另一銅導片上，遇有機會，此種被逐之電子，將立即流回，以恢復其中和狀態，所蓄與所放均係電能。

六五、電容及其與電量電壓之關係 容電器上加有電壓時，其內電子位移而荷電，此電荷與所加之電壓有關，在單位電壓下所荷之電量，謂為容電器之電容 (Capacity)。此電容可比氣體於容器內之容量：設有任何之器，其內部容積為十立方尺，則在氣壓與空氣壓

第三十八圖  
錫紙容電器之構成





力相等時，其所儲之氣體，即爲十立方尺，此即容量也，若氣壓增加，則器內所儲之氣體，自亦增加，然其容積，仍爲十立方尺，因所增加者爲容量，並非器之容積也，故在單位氣壓下之容量必有一定，氣壓增高，容量亦增大，換言之，欲增加所儲之氣體。不必定須擴大其容積。器之容電亦相似。容電器之電容，可視爲不變之數（假定形狀，大小，位置及通感體不發生變更），是猶容器之容積。但電壓增高，蓄電亦大；換言之，若欲增加其所容之電量，祇須增加其電壓。茲舉電容之公式以明之：

$$C = \frac{Q}{V} \text{ 或 } Q = CV \dots\dots\dots \text{公式} \dots\dots\dots (29)$$

式內 $Q$ 爲所儲之電量， $V$ 爲加於容電器之電壓， $C$ 即容電器之電容。設電壓爲一，則電量與電容相等，若電壓加一倍，則所儲之電量亦加一倍，與氣壓加倍氣體量亦加倍之情形相同，此可知容電器之電容，爲即電壓變更下所能貯電量之一係數。

六六、電容之單位，依上公式，設 $C$ 爲一電容單位， $Q$ 爲一靜電單位則 $V$ 爲一電壓單位，故任何容電器，若發生一分克秒靜電單位之電量，而其電壓爲一單位者，此容電器之電容，即爲一分克秒靜電電容單位。其實用單位爲法拉，即加於容電器之電壓爲一伏脫，而所儲電量爲一庫倫時，此容電器之電容爲一法拉。

法拉單位應用時有時過大，普通取其百萬分之一曰兆分法拉「記號 $\mu F$ 」，或百萬百萬分之一曰兆兆分法拉（記號 $UUF$ ）。法拉與靜電電容單位之關係如次：

1 法拉 =  $9 \times (10)^{11}$  分克秒靜電電容單位

∴ 法拉 =  $\frac{\text{庫倫}}{\text{伏脫}}$ ，庫倫 =  $3 \times 10^9$  分克秒靜電單位

伏脫 =  $\frac{1}{300}$  分克秒靜電單位

∴ 法拉 =  $\frac{3 \times 10^9}{\frac{1}{300}} = 9 \times 10^{11}$  分克秒靜電單位

六七、來頓瓶 ( Leyden jar ) 容電 第三十九圖 來頓瓶

器之發明，肇端於來頓瓶，一七四六年創造於荷蘭之來頓 ( Leyden ) 故錫是名。其製為一玻璃瓶，如第三十九圖所示，內外二面各糊錫箔，高及瓶之三分之二，一銅桿通過瓶塞，上載銅球，下垂銅鏈，以連接瓶內錫箔，充電時須以瓶外錫箔通地或握於手，瓶內錫箔方能多蓄電量，否則蓄電極微，效用殊弱。來頓之應用，僅限於實驗室，因其體積大而電容少，不適於實用。



六八、介質常數 容電器內兩金屬板間所隔之空氣，若易以其他非導體，如玻璃雲母等，則電容可加大。如此加大之一數名曰介質常數 ( Specific Inductive Capacity )，例如空氣容電器之電容為  $C$ ，若易以他種非導體為介質時，其電容增為  $C \times \epsilon$ ，則此非導體之介質常數為

$$\epsilon = \frac{C \times}{C_0} \dots \dots \dots (80)$$

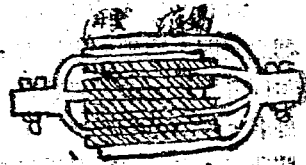
真空、空氣及各種氣體之介質常數皆為一，其他非導均大於一。茲舉數種重要物質之介質常數例為下表：

物 質	硬臘	松脂	橡皮	石油	玻璃	雲母
K	2.0	2.2	2.5	3.1	6—8	8

#### 六九、容電器種類 容

電器種類繁多，式樣不一，隨其用處而不同。通常分為定最與變最兩種；容電器之電容，不能改變或增多者，為定最容電器，通常多以雲母片與錫箔層層相間，分為

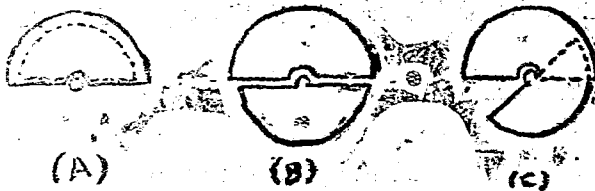
第四十圖



兩組，每組之一端，則相互連接，如第四十圖所示，其介質恆露出導片之外，所以保持絕緣之良好。

容電器之電容可任意增減者，為可變容電器，恆以空氣為介質，其導片亦分兩組，一組固定不動者，曰定片組，一組裝連轉軸，可以轉動者，曰動片組，各組相互平行，組與組間各片相間而列，同組各片，則相互連接，但不與他組之導片接觸。當動片組與定片組完全相並時，電容為最大，如第四十一圖（A）所示，將動片組旋出與定片組全不相並時，電容則最小如圖（B）所示。在旋轉時，電容之大小全視其相並位置而定，如第四十一圖，（C），示旋轉後之位置

第四十一圖 變量容電內導片之位置



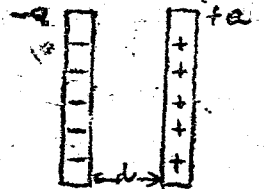
其電容當較 (A) 為小較 (B) 為大。可變容電器之導片，多以鋁或黃銅薄片製成，黃銅焊接較易，即稍薄亦不致屈曲，鋁質較輕，且不生銹，故以上兩種金屬，應用最宜。

七〇、電容之計算 容電器之電容與下列三項有直接關係。

- (一) 與導片之面積成正比，面積愈大電容亦愈增。
- (二) 與導片間相隔距離成反比，距離愈近電容亦愈增。
- (三) 與容電器中介質之常數有關，凡介質常數愈大，電容亦愈增通常空氣之常數為一，玻璃為六與八之間，雲母最大，見前表。

既知上述三項影響電容之因子，則容電器之電容自不難加以計算，茲將普通簡易各式，擇舉如下：

如第四十二圖所示，為平導片容電器，設電場內任何一點P，置單位正電體，此。第四十二圖 平行薄片間之電容正電體與 (+Q) 相拒與 (-Q) 相吸，結果向B片之方向移動，P點之合成電場強度即荷電後A B 二片電場強度之總和。



因帶電板之電場內任何一點之強度為帶電板上表面密度  $P$  之  $2\pi$  倍，故上述  $P$  點之合成強度當為  $E=2\pi\sigma+2\pi\sigma=4\pi P$

將單位正電體自  $A$  移至  $B$ ，所做之功為  
 $W=Ed=4\pi Pd$

但  $W$  即兩板間之電位差，故上述又化為

$$V=4\pi Pd$$

$$\therefore Q=PA \quad P=\frac{Q}{A}$$

$$\therefore V=4\pi \frac{Q}{A} d$$

$$\text{又因 } C=\frac{Q}{V}$$

$$\therefore C=Q / \frac{4\pi Qd}{A} = \frac{A}{4\pi d}$$

$$\text{或 } C=\frac{KA}{4\pi d} \quad \text{C.G.S. 靜電單位} \quad \frac{KA}{4\pi d} \times \frac{1}{9 \times 10^9} \text{ 法}$$

法拉(Fd)

$$=\frac{KA}{4\pi d} \times \frac{1}{9 \times 10^9} \times 10^6 = \frac{KA}{4\pi d} \times \frac{1}{9 \times 10^3} \text{ 兆}$$

分法拉(UF)

此公式內  $K$  為介質常數， $A$  為導片面積，其單位為平方公分， $d$  為介質厚度，即二導片間距離，其單位為公分。

若有  $n$  導片構成一容電器，則其電容之公式為  $C=$

$$\frac{KA}{4\pi d} (n-1) \text{ 分. 克. 秒靜電電容單位} \dots (31)$$

圓球形之電容，即等於其半徑 $r$

$$V = \frac{Q}{r}, \therefore C = \frac{Q}{V} = r$$

故 $C = r$ 分，克，秒，靜電電容單位…… (29)

七一、容電器之串聯與並聯，若有容電器 $A, B, C$ ，其電容分別為 $C_1, C_2, C_3$ ，因接法不同，而所得之總電容亦異。如第四十三圖所示各容電器並聯時，三者所有之電容為 $Q_1, Q_2, Q_3$ ，因

$$Q_1 = VC_1, Q_2 = VC_2, Q_3 = VC_3 = VC_3$$

三電容相加則得 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = V(C_1 + C_2 + C_3)$ ，故三者之總電容為：

$$C = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3 \dots \dots \dots (33)$$

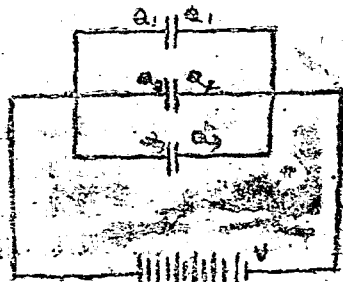
如第四十四圖所示三容電器串聯時，因三者之電量必等，而電壓 $V$ 則分為三部份，其公式為

$$V_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

第四十三圖 容電器之並聯



三部份電壓相加，

則得

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

故其總電容為  $C =$

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} + \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1}$$

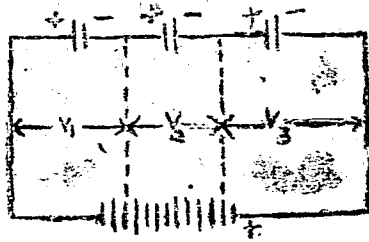
..... (34)

串聯與並聯兩相比較，可得顯然不同之結果，即並聯時電容加大，串聯時減小。

### 習 題

- 一、試述容電器之作用。
- 二、容電器之電路何以能繼續通過交流而不能通過直流？
- 三、容電器之作用與蓄電池不同何在？
- 四、何謂介質常數？試舉例說明之。
- 五、試述來頓瓶之構造及其作用。
- 六、某一空氣容電器，其二圓板之直徑為三公分，欲便與直徑一〇〇公分之球，彼此電容相等，問二板間須隔離若

第四十四圖 容電器之串聯



干公分？

- 七、今有空氣可變容電器共計半圓片十五枚，分成兩組，片之半徑均為四公分，各片相距均為 $0.15$ 公分，轉軸所佔之面積不計，問其最大之電容為若干兆分法拉？設此器分成一八 $0$ 度，每度約合電容若干？
- 八、今有電量 $Q$ ，一庫倫離A點四英寸，B點為九英寸，問A及B二點間之電位差為若干伏脫？
- 九、今有容電器三具，其電容各為三、四五，兆分法拉，問串聯及並聯後之總電容各若干？
- 一〇、今有二容電器串聯後之總電容為 $0.001$ 兆分法拉，已知其一之電容為 $0.0034$ 兆分法拉，問另一容電器之電容為若干？
- 一一、一法拉之電容相當於分克秒單位幾何？
- 一二、兩絕緣球，一球之半徑為另一球之九倍，假定大者荷電 $+20$ 靜電電量單位，兩球相觸後，求電荷分佈之比例？



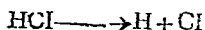
## 第八章 電解及電池

七二、電解之本義：電流通過酸類鹽類之水溶液，則化合物分子分解成爲正負游子而對流離，此現象名曰電解。電解之液體盛於容器中，於其內放置兩導體以通電流，如此組成用以發生電解之器名曰電解池。池內起電解作用之液體名曰電解質，電流出入所經之兩導體名曰電解池之兩極，在電流流入一端爲正極，電流流出一端爲負極。電解方式視電解質與兩極之物質而異，大別爲（一）直接電解（二）間接電解，（三）電鍍三種。

七三、直接電解，電解液內正負游子若皆爲自能獨立之元素，經過電

第四十五圖 直接電解

解後，均離液體而獨立，不復與其他分子起化合作用者爲直接電解，例如第四十五圖之電解池，內盛鹽酸水溶液（ $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ ），兩極爲鉑片或碳精片，加以電壓，則負游子（ $\text{Cl}$ ）流向正極，正游子（ $\text{H}$ ）流向負極，迨抵兩極後，游子即不能隨所荷電量向前移動，遂失去電量而成中和原子。此中和原子不能與他游子化合，即離液體而獨立，回復其氣體性，於是成爲氣泡，由兩極上升，收集於玻璃管之上端，故電解鹽酸水溶液之結果，正極玻璃內生氯，負極玻璃管內生氫。二氣容量相等，其分解方程式爲

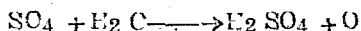
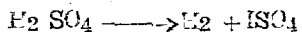
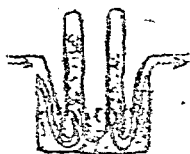


水在電解質內僅使鹽酸分子成爲游子，此外並無其他作

用。

七四、間接電解 正負游子若非自能獨立之元素，或與水之分子化合力甚強，則對流達兩極後，與水之分子起化合作用，其結果為水之分子分解，而於正極放出氧氣，於負極放出氫氣。電液之分解作用直接加於水之分子，是為間接電解，例如以硫酸水溶液 ( $H_2SO_4 + H_2O$ ) 為電解質，則負游子 ( $SO_4$ ) 流達正極復與水之分子化合，變成為硫酸分子，溶於液內，同時則在正極上放出氧氣如第四十六圖。其分解方程式為

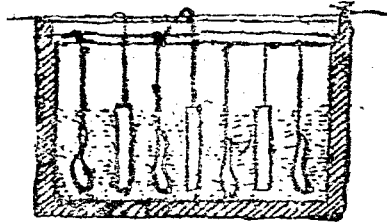
第四十六圖 間接電解



故電解硫酸水溶液之結果 正極玻璃管內生氧，負極玻璃管內生氫。電解液內所分解者實為水之分子，硫酸分子則並未因分解而減少，負極玻璃管內氫氣容量，常為正極玻璃管內氧氣之二倍，化學家恆借此證明水之化合成分為  $H_2O$

七五、電鍍 若以銅板為兩極，硫酸銅 ( $CuSO_4$ ) 水溶液為電解質，則通電流後，正極之銅逐漸消蝕，負極之銅逐漸積增，而液體濃度則不變。其結果猶移正極之銅而鍍於負極，是即所謂電鍍，其用途甚廣，如鍍金銀於裝飾品，鍍鎳以防銹，皆屬社會上必需之工業。凡電鍍須置被鍍物品為負極，所鍍質料為正極，鍍料之鹽類水溶液為電解質。例如

第四十七圖 電 鍍



欲鍍銀於銅匙，可用硝酸銀（ $AgNO_3$ ）水溶液為電解質，懸若干銀條為正極，懸銅匙為負極，而浸於液內第四十七圖，然後通以電流，至銅匙鍍銀達相當厚度為止。電鍍物質皆極純

淨而光澤美觀，故電鍍術又可用以提煉金屬及鑄造印板及招牌等。

七六、法拉特定律 一八三三年法拉特詳細考察電解效果，遂發明下列二項定律，今稱為法拉特定律。

（一）電流所分解而放出某物質之質量，依電流強度與電流存在時間為正比，而與電解質之種類成分無涉。換言之。即僅與通過電解池之電量為正比。以算式表之為

$$M = ZQ = ZIt \text{ 克} \dots\dots\dots (85)$$

式內  $Z$  為比例常數 其值視所分解之物質而異，因  $Q = It$ ，則  $Z = M/Q$  可見  $Z$  實為每一庫倫電量所分解而放出之質量，名之曰電解率。

（二）電解率視物質而異，各物質之電解率，與其化合量為正比。其元素之原子價除其原子量所得之商與氫原子量之比，是為該原質之化合量。例如鈉之原子價為一，其原子量為二三·〇五，氫之原子量為一·〇〇八，故鈉之化合量為二二·八七，又銅之原子價作為一或二其原子量為六三·六，故銅之化合量有二，即六三·〇九與三一·五四，餘類

推。

依據第二定律若已知一種元素之電解率，即可推算其他各元素之電解率。科學家已精確證明銀之電解率為，〇〇一一一八克，故恆採用為推算他元素電解率之比較標準，設如某元素(X)之化合量為 $C_x$ ，銀之化合量為 $C_A$ ，則該元素之電解率為

$$Z_x = 0.001118 \frac{C_x}{C_A} \dots\dots\dots (36)$$

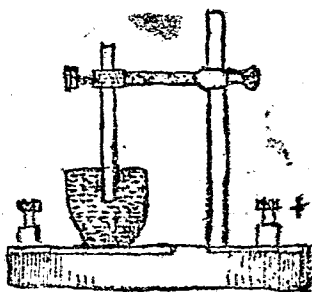
上述二定律合而言之，則電流 $I$ 於 $t$ 秒內所放出某某元素之質量為

$$M_x = 0.001118 \frac{C_x}{C_A} It \text{ 克} \dots\dots\dots (37)$$

七七、電解表 由電流分解物質之效果可測定該電流之強度。例如電流於 $t$ 秒內分解某物質之質量為 $M$ ，則其強度必為  $I = \frac{M}{Zt}$ ，凡用以測量電流之電解池名曰電解表，因

電解質量僅依電量為正比，不隨其他情形而異，故用電解表測量電流，較用其他測電表為可恃，其中最精確者為銀電解表，構造如第四十八圖，用鉛杯為負極，銀棒為正極，硝酸銀水溶液為電解質。電流於 $t$ 秒內所分解之銀量等於測量前後鉛杯重

第四十八圖 銀電解表



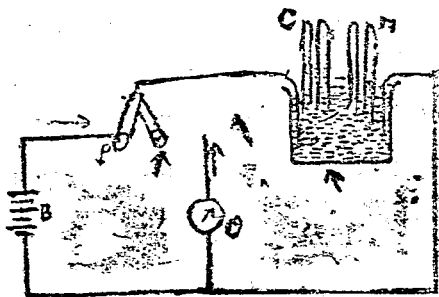
量差之，由是即可計算電流之強度。

銀之電解率已經精確測定，而銀電解表又為最精確之測量儀器。故電流鍍銀之效果，可用以規定單位電量與單位電流之永久標準。即每一標準庫倫為能鍍 $0,001118$ 克銀之電量，每一標準安培為於一秒鐘內能鍍 $0,001118$ 克銀之電流。

七八、電解池之極化電壓 電解池兩極極為同物質之導體，其間本不產生電壓，惟電解時若放出而貯積於兩極之物質不同，此時兩極間必有電壓產生，是為電解池之極化電壓。極化電壓之方向恆與充入電流方向相反，其效果為反抗電流輸入，故亦名曰反電壓。電鍍為移正極物質而鍍於負極，電解時兩極物質相同，故電鍍池內極化電壓為零。

氣體與電解液接觸亦能發生電壓，其現象可以實驗證明如下；連接電路如第四十九圖所示，B為電池，M為電解池，其電解質為硫酸水溶液，兩極為碳精棒，上

第四十九圖 電解池

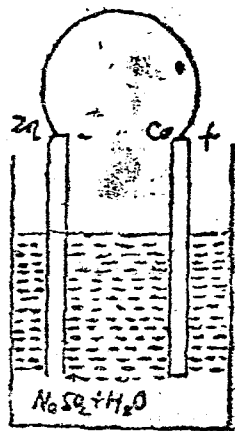


覆玻璃管，G為高電表，用以顯示電流之有無及方向，S為兩路開關，扳接於P點時，則M通B而與G隔絕，扳接Q點時則M通G而與B隔絕。茲先將S接Q則G表示無電流，可見電解池兩極間實無電壓存在，再將S接P，則M通電流而

起電解作用，正極玻璃管內生氫，負極玻璃管內生氧，待二氣積至相當容量後，將S板接Q，此時電表上顯示有電流通過，其方向則自正極至負極，同時二氣容量漸減，迨至無餘，電流亦隨而消失。可見電解池兩極間確因氫氧二氣附着於極片而產生電壓。氫氧二氣與硫酸水溶液所生之極化電壓約為一、七伏脫，故加於此種電解池之電壓，必須大於一、七伏脫，方能發生電流，而起電解作用。

七九、伏脫電池 (Simple voltaic cell)：如第五十圖，若以鋅條及銅片，浸於稀硫酸溶液內，即成一最簡單之伏脫電池。銅片為正極，鋅條為負極。放電時電流方向在電池外者自銅至鋅，在電池內者自鋅至銅。經久放電後，鋅條漸蝕，氫泡積附於銅片周圍，不即分散，結果則電流逐漸低減。考其原因，一由氫之不善導電，電阻遂增，二由氫與銅間自成一電池，所生電壓，與鋅銅間之電壓相反，此種因氫泡發生而致電壓減低，謂之極化作用 (Polarization)，宜用適當方法防免之。

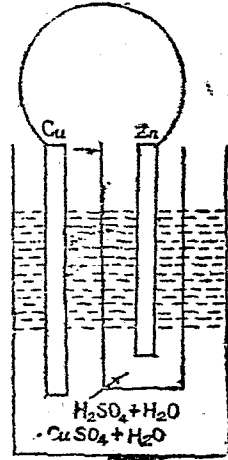
第五十圖 伏脫電池



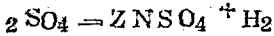
八〇、丹哥爾電池 (Daniells Cell)；此式電池如第五十一圖所示，鋅條浸於稀硫酸溶液內，而銅片則浸於硫酸銅

第五十一圖 丹品爾電池

液內。兩液間用一多細孔之瓷筒 (Porouscup) 相隔，銅片仍為正極，鋅條仍為負極，經過化學作用後，筒內鋅與硫酸化合，成為硫酸鋅，而散放氫泡，氫至筒外與硫酸銅化合，成為硫酸及銅，此銅即積於銅片上，茲列程式如下；



筒內..... $ZN + H$

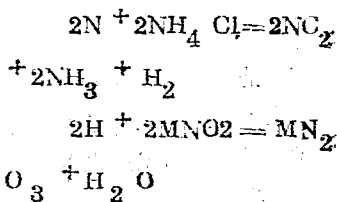
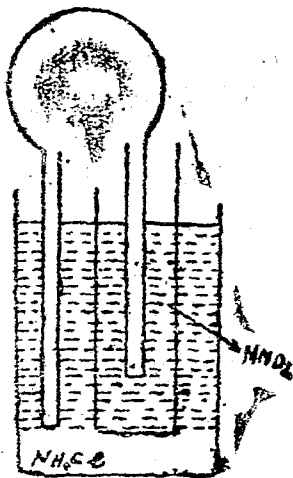


筒外..... $CuSO_4 + H_2 = H_2 SO_4 + Cu$

筒之作用，雖將二液分開，然仍能使氫得與筒外溶液起化學作用，故氫氣不致附着於銅片上，而極化作用可免。此種電池之電壓，約為一、一七八伏脫。

八一、雷克蘭電池 (Leclanche Cell) 此種電池所用之電解質為氯化銨 ( $NH_4 cl$ )，正極為炭精片，負極為鋅條，如第五十二圖所示。於多孔瓷筒中，置二氧化錳 ( $MnO_2$ )，正極即植立其間。當電流經過電解質，鋅與氯化銨化合而成氯化鋅；氫及鹵精氯化鋅溶解于液中，鹵精則之散，氫進向炭精片遇二氧化錳成氧化錳及水，如是可不生極化作用。其化學方程式如下：

第五十二圖 雷克蘭電池

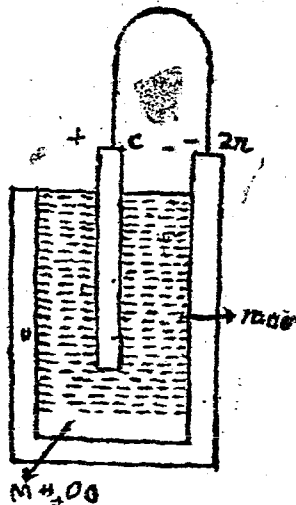


此種電池電壓，約有一、四至一、六伏脫。若繼續應用不斷，二氧化錳變成三氧化二錳，電壓漸低，若斷續應用，得空中之錳，漸又恢復，故宜於電鈴電話及電報上之裝用。

第五十三圖 乾電池

八二、乾電池 (Drycell)

：乾電池，即由雷克蘭電池所改造，如第五十三圖，以鋅板作成圓筒形，中間豎立炭精棒，棒之周圍置二氧化錳層，以氯化氫為解質，各化學品與木屑混和，而飽實於鋅筒炭棒之中，筒之上端加火漆封口即成，凡電池之電解質，必為液體，乾電池之電解質亦不能例外，所異者，電解質拌和於木屑中，成黏糊狀，蓋非乾也，乾





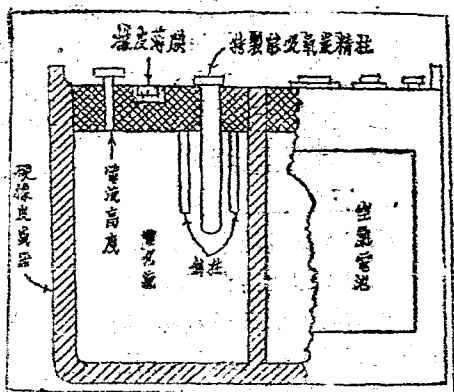
銅電池將失其效用矣。火漆封口，亦所以防其水份化氣而外逸也。乾電池之電壓，約為一、五伏脫。應用時，宜置於乾燥潔淨及尋常溫度之處。

八三、空氣電池 (Air Cell) ; 近年在無線電收發機上。尚有一新發明之

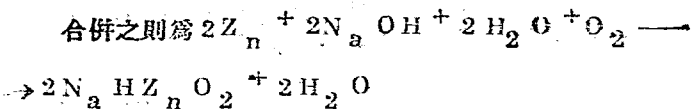
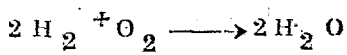
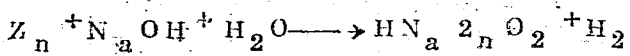
電池曰空氣電池，其優點在去極化作用，因其電解質溶液中置特製之多孔炭精，能吸取空氣中之氧以防極化也。

• 構造如第五十四圖，電池之陰陽兩極，仍為炭精與鋅條，電解質為氫氧化鈉 (Sodium Hydroxide)，即苛性

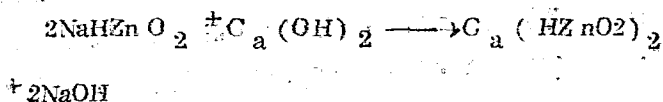
第五十四圖 空氣電池



蘇打，另加氫氧化鈣，使電解質在使用等，得逐漸恢復其原狀，其化學反應如下：



氫氧化鈣與鋅酸氫鈉之作用如下



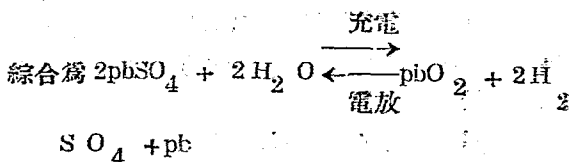
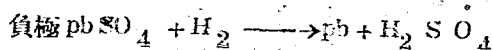
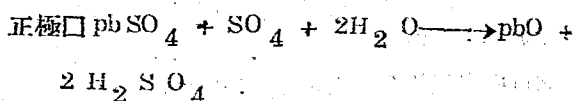
當電流通過電池時，將電解質溶液中之水，分作氫氧兩種游子，氫游子流向特製之炭棒上，與炭棒吸得之氧相遇即放電而與氧化合為水，因此氫氧遂不致累積炭棒上，電池之內電阻，亦不致增加，故其電壓常能穩定。

空氣電池之電壓，約為一伏脫，市上所售者，往往以兩池合組而成，作燃點新式二伏脫真空管燈絲之用，其容量約六〇〇安培小時 (Ampere hour)，即電流與使用時間之乘積，等於六〇〇也。

八四、蓄電池 蓄電池為由電解作用使其兩極由同物質而轉變為異物質者，上述第四十九圖之實驗，即其一例，當電池B連接M時，電流反抗之極化電壓而作功，電能轉變為化學能而儲蓄於M之內，是為蓄電池充電。M充電後而接通外路G時，化學能即回復為電能而放出，兩極間發生電壓而於外路上通過電流，是為蓄電池放電。迨所蓄之電能完全放出後，兩極由電解所生之異物質完全消失而回復為同物質，電壓不復存在，電流亦停，是為放電完畢。如是一充一放。反復行之，池內之質料及其構造，仍然保持原狀，雖至無窮次亦然，故其效用，實能異電能之儲藏器，得以陸續儲藏發電機所輸出之電能，以留待隨時需用。

現在最通用者為鉛板蓄電池，兩極以鉛板作骨，表面渡

嵌一厚層質鬆外孔如海綿體之硫酸鉛 (  $PbSO_4$  )。硫酸鉛為兩極主要質料，鉛板則僅用以支托鬆軟之硫酸鉛者，無其他作用。鉛板裝於玻璃或橡皮製之容器內，浸以硫酸水溶液 ( 即電解質 )，充電時由電解作用，使正極主要質料轉變為二氧化鉛 (  $PbO_2$  )，負極主要質料轉變為鉛 (  $Pb$  )。其式如下：



迨主要質料盡變成  $PbO_2$  與  $Pb$  後，倘再繼續充電，則電解作用僅使水之分子分解，兩極表面發現氣泡，正極為氧，負極為氫，是為充電滿足。此時蓄電池原生電壓，為二、二伏脫，電解比重為一、二六〇。又放電將畢，則電解質稀淡，而電壓降低極速。電壓降至一、八伏脫或電解質比重減至一、一七，則蓄電池容已放電將盡，必須重行充電，方能再用。

蓄電池形式較之容電器似乎相類，每極皆為若干平行鉛

板，正負相間排列，如是則兩極相對之面積廣而距離亦近；主要質料鬆而多孔，結果亦為擴大兩極之有效面積，故蓄電池之內電阻微而電壓高。若將各種乾溼電池，用電阻極小之導線加以短路，因供電頗微，尚不致發生大害，至於蓄電池，則絕對不能令其短路。

蓄電池自充電滿足至放電完畢所輸出之安培小時數，稱為蓄電池之容量，設一蓄電池充電滿足後，輸出一〇安培電流經八小時而放電完畢，是其容量為八〇安培小時，設有一蓄電池，其容量為一〇〇安培小時，若每小時輸出二培電流即可維持五〇小時之久，若每小時輸出一〇安培電流，則能供電一〇小時。現在通用之鉛板蓄電池，其容量約為八〇、一〇〇、一二〇安培小時三種。蓄電池容量視鉛板面積大小而異，鉛板片數多而面積廣，容量亦較大。蓄電池放電量與其充電量之比，稱為蓄電池之效率，若構造良好，充電放電皆和緩而不過量，充電後又不長時間擱置，則其效率約可安百分之八〇。

#### 八五、電池之串聯與並聯

電池之連接法，分串聯與並聯。以第一電池之負極接第二電池之正極，第二電池之負極接第三電池之正極與最後電池之負極，以接通外電路，是為串聯（第五十五圖）。各電池之正極連接一起，其負極亦聯接一起，是為並聯（第五十六

第五十五圖 電池之串聯



圖)。若干電池串聯或並聯後，其全部即稱電池組。電壓相等之電池方能並聯成組，否則內電路中發生電流致成短路。

設有  $n$  只電池之原生電壓各為  $E_0$ ，內電阻均為  $R_i$ ，則串聯後電池組之總電壓為  $n E_0$ ，總內電阻為  $n R_i$ ，

如外電路上加有電阻  $R_e$ ，則輸出外電路之電流為

$$I = \frac{n E_0}{R_e + n R_i}$$

結果可由總電壓之增加以使電流增加。唯內電阻亦隨電壓間增，若外電阻較小，則內電阻影響頗大，電流

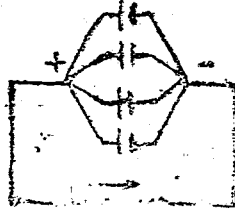
$\frac{n E_0}{R_e + n R_i}$  幾等於  $\frac{E_0}{R_i}$  較單用一個電池所增極微，反之，

若外電阻較大，則內電阻影響極微，電流  $\frac{n E_0}{R_e + n R_i}$  幾等

於  $\frac{n E_0}{R_e}$ ，較單用一個電池約增  $n$  倍。可見串聯電池對與外電

阻較大之電路或內電阻極微之電池極為有利，對於外阻較小之電路或內電阻較大之電池則並無大利。惟蓄電池之內電阻恆極小，故常串聯成組以得較高電壓。

第五十六圖 電池之並聯



並聯電池組之總電壓仍為  $E_0$ ，總內電阻為  $\frac{R_i}{n}$ ，輸出外

路之電流為

$$I = \frac{E_0}{R_e + \frac{R_i}{n}}$$

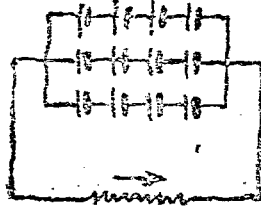
結果可由內電阻減小以使電流增加。若外電阻較大則內電阻影響微，電流所增無幾。反之，若外電較小則內電池影響顯著，電流

幾等於  $\frac{n E_0}{R_i}$  較單用一個電池

約增  $n$  倍。故並聯電池組之應用，限於外電阻極小之電路。

惟若外電阻既有一定，並聯後每個電池所輸電流可減小，即其放電率減低，電池之壽命得以加長。

第五十七圖 電池之串並聯



八六、電池輸出最高功率之條件 電池組又可由若干電池串聯並聯而成(第五十七圖)

• 串聯可以增加電壓，並聯可以減小內電阻，皆足以增加外電路所得之電流。設每  $x$  個電池串聯為一組，各組復相並聯  $y$  排，則此電池組之電池數為  $n = xy$ ，電壓為  $x E_0$ ，內電阻

為  $\frac{x}{y} R_i$ ，故外電路所得電流為

$$I = \frac{\frac{x E_0}{R_e + x R_i}}{y} = \frac{\frac{n E_0}{y R_e + x R_i}}{y}$$

因  $E_0$ ,  $R_i$  及  $n$  皆為常數，故電流強弱僅視  $x$ ,  $y$  二數若何編配而異。欲得最大電流則分母  $(y R_e + x R_i)$  須為最小。

$$\therefore y R_e + R_i = (\sqrt{y R_e} - \sqrt{x R_i})^2 + 2\sqrt{N R_e R_i}$$

$$\therefore \sqrt{y R_e} - \sqrt{x R_i} = 0 \text{ 或 } \frac{x}{y} R_i = R_e$$

結果即內電阻等於外電阻時電流為最大。故若外電阻為定值，則電池之連接，必須配至其結果內電阻幾與外電阻相等時，方能輸出最大電流或最高功率於外電路。反之，若電池或電池組固定，即內電阻為定值，則外電阻必須配至幾等於內電阻時，方能得最高功率之輸出。

### 習 題

- 一、電解方式可大別為幾種？試各舉例說明之。
- 二、今欲鍍鎳於表面廣一〇〇〇平方公分之器皿，欲達  $\frac{1}{10}$  公厘厚度。鎳之比重為八·八 (a) 問需若干電量通過電解池？(b) 放電流強度一〇安培，求電鍍之時間。
- 三、一克水電解為氫氧。設氫氧密度分別為〇、〇〇〇〇八九八與〇、〇〇一四三。求 (a) 二氣重量 (b) 二氣容量，(c) 與電流為  $\frac{1}{2} a$  則分解一克水需時若干？

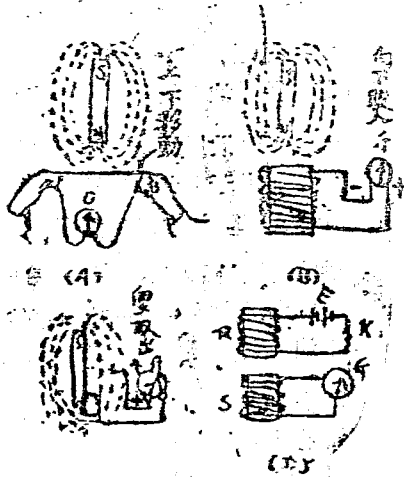
- 四、三隻銅電解表，其電解質皆為硫酸銅水溶液，並聯後接入某一電路內，經半小時，負極所增重量為，七六三、七四二、七八五克。求此電路內電流之強度。
- 五、某電解池需 $3v$ 電壓加於兩端始得 $1a$ 電流而電解。設每克氫氣分解時須吸收一四二〇〇〇焦爾能力，求此電解池之反電壓與內電阻。
- 六、某種蓄電池之安全電流限度為 $10_a$ ， $E_o = 2V$ ， $R_i = 0.1w$ ，今欲用此種電池以得總電壓 $50A$ ，電流 $30A$ ，問需電池若干？如何連接？
- 七、今有某種電池內四〇個 $E_o = 1.08V$ ， $R_i = 4w$ ，用以供給電流於外電路。(a)問如何連接以得最大電流？(b)求最大電流及電功率之值。
- 八、電池二六個 $E_o = 1V$ ， $R_i = 1w$ 用以供給電流於 $2w$ 外電路。(a)問如何連接以得最大電流。(b)求最大電流及電功率之值。
- 九、用電池燃燈一盞。 $E_o = 1V$ ， $R_i = 2w$ 燈之電阻為 $50w$ ，需 $1a$ 電流。問至少須用電池若干？如何連接？
- 一〇、試述鉛板蓄電池之構造。



## 第九章 電磁感應

八七、法拉特之實驗 取數尺長之導線，將其兩端接於一極靈敏之測電表 (Galvanometer)，而在條形磁鐵附近，用上下移動，如第五十八圖 電磁感應之試驗

十八圖 (A)，測電表指針即發生偏轉，倘導線移動之方向變為由下向上，則指針之偏轉亦反向，又若導線固定不動，或移動之方向與磁力線平行，則指針即不現偏轉。此際既無電源接入測電表回路，表之指針却發生偏轉，此必由於導線在磁場內割動磁力線而生之電流。經實驗所知，割動磁場產生電壓，因以發生電流，其大小與導線運動之方向有關，以導線垂直於磁力線割動時為最大，若與磁力線平行，即無電流發生。



茲如將一長約五〇尺之十八號棉包導線，繞於圓形紙筒上，以其兩端接於測電表G，如第五十八圖 (B) 當一條形磁鐵驟然插入時，測電表之指針，即發生偏轉，且較上述用單根導線時為更大。當磁鐵靜止時，指針遂又復零位。設

此時將此磁鐵由線圈內驟然取出，如圖 (C)；則指針亦生偏轉，惟方向適與插入時相反。插入或取出之動作愈快，則指針偏轉愈大，表明所發生之電壓與電流之強度愈增。但如過快，則因指針之慣性關係，指針僅能在零位之左近。發生極小之擺動，此外如將磁鐵磁性加強，或將線圈之匝數加多，發生之電壓亦增高。

除上述直接用線圈在磁場內割動磁力線可以發生電壓外，設將通有電流之線圈，以代替條形磁鐵，如第五十八圖 (D)，亦可獲同樣之結果。圖中 K 為開關，B 為電池組，先將開關 K 閉合，使線圈 D 有電流通過，此時接於線圈之游電表 G，指針即發生偏轉，惟不久即回復零位。繼將 K 放開，電流遂斷，此時 G 之指針又生偏轉，亦瞬息即止，但指針動向恰與前相反。又或任 K 在按下位置，而移動兩線間相互距離，G 之指針，亦同樣發生偏轉，而接近時與離開時之方向，又各相反。

上述情形，首由法拉特所驗明，其線於磁場內割動而生電，知由感應而來，此種現象，稱為電磁感應 (Electromagnetic induction)。由感應而生之電壓，曰感應電壓 (Induced e.m.f.)。由感應電壓而生之電流，曰感應電流 (Induced current)。

八八、感應電壓之計算 感應電壓與下列三式有直接關係：

(甲) 割動磁通或磁力線愈多，則所生之感應電壓愈高。

(乙) 線圈匝數愈多，則所生之感應電壓亦愈高。

(丙) 割動磁力線時，其方向變換愈快，或變換之時間愈短，則所生之感應電壓亦愈高。

以上三項如加以總括，即可得下列之簡單公式：

$$e = \frac{\Phi N}{T} \times 10^{-8} \quad (\text{伏脫}) \dots\dots\dots (38)$$

式中  $\Phi$  = 在 1 秒時間內所割動或變化之磁通

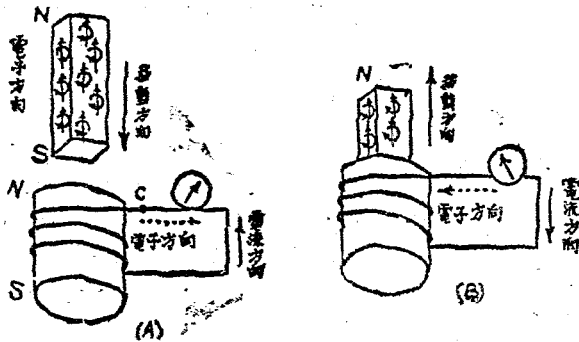
設有一線圈，共一〇匝，使其割動磁力線為五〇〇、〇〇〇之磁場，每秒鐘計五〇次，則依公式(三八)計算，所產生之電壓為，二五伏脫，即

$$N=10 \quad T=\frac{1}{50} \quad \Phi=50,000$$

$$\begin{aligned} \text{故 } E &= \frac{\Phi N}{T} \times 10^{-8} = \frac{50000 \times 10}{\frac{1}{50}} \times 10^{-8} \text{ V} \\ &= 50000 \times 10 \times 50 \times 10^{-8} = 0.25 \\ &= 25 \text{ 伏脫} \end{aligned}$$

八九、電磁感應之原因 由前第五七節述及磁之電子說，知所謂磁者，實際上不過由於構成物質終極單位之電子運動現象，每一原子既由陽核舉圍繞陽核運行之游電子所組成，當游電子運行之軌道，均成為同一方向時，即成一極強之磁鐵，即三十四圖(D)所示者是。茲如將條形磁鐵投入通有電流之線圈中，如第五十九圖(A)，方投入時，因磁鐵內電子之運行方向均已如圖所示，在線圈內必發生一力量相等而動向相反之作用，換言之即線圈內之電子，感受磁鐵內同

第五十九圖 電磁感應與電子關係



一方向運行之電子作用時，因相互斥拒，自必同時流動，惟其方向則與磁鐵內電子之動向相反。線圈之兩端，如為開路，則此等因磁鐵影響而發生之電子變動，祇能使若干電子聚積於導線之C端，如為閉路，則此等變動之電子，即能發生電子流，其方向如圖(A)所示。設此磁鐵置於線圈內靜止不動，則磁鐵內之電子運動，與線圈導體內之電子，保持一種平衡狀態，因此並無電流發生，但若磁場強度發生變化，此種平衡狀態，即又不能維持，電流遂亦產生。此即電磁感應之根本原因。

尙有應注意者，磁場之變化始能產生電流此由磁能變為電能也，其猶機械能之消耗，始能獲得電能，能力不能創造，而祇可傳變，電磁變化，自非例外。通常用之發電機，其使線圈轉動，機械能力，多由蒸汽機(Steam Engine)，

或輪機 (Turbine)，汽油發動機 (oil engine) 等供給之電磁之能若已固定，則由機械能而始變為電能也。

**九〇、林慈定律** 磁鐵投入線圈中，則所生之感應電流，流行於線圈，因此電流之流行，遂亦發生磁場，故線圈本身亦即變為一磁鐵。惟由線圈所發生之磁力線方向，恰與投入之磁鐵磁力線相反，磁鐵先入線圈之一端，圖如為N極，而線圈先接磁鐵之一端亦為N極，而線圈之另一端，則為S極，如第五十九圖 (A) 所示，兩者磁極方向適相反也。由同極相拒之理，線圈所生之暫時磁場，對於磁鐵發生斥拒力，欲反抗其投入。反之，若將磁鐵自線圈中取出，則因所生之感應電流與前相反，此時線圈上端為S極，下端為N極，如圖 (B) 所示，由異極相吸之理，線圈所生之暫時磁場，對於磁鐵發生吸引之力，而反對其取出。

上述加以概括，可得一重要之結論，稱為林慈定律 (Lenz's Law)，其言曰：

「凡因磁力線增多或減少，線圈內發生感應電流時，由此感應電流所生之磁力線，必與原使線圈發生電流之磁力線之變化相反。如原有之磁力線增加，感應電流所產生之磁力線，必與原有者方向相反，以反對其增加，若原有之磁力線減少，則感應電流所生之磁力線方向，必與原有者相同，而反對其減少。質言之，即線圈內所產生之感應電流，其磁力線方向常取反對或阻遏原有磁場變化或運動之傾向。」

**九一、佛來銘右手定則** 林慈定律，不祇可以決定線圈內所生之感應電流方向，並可決定感應電流之磁力線方向。惟簡單而便於記憶，則有佛來銘 (Fleming) 發明之右手定

則 (Fleming's right hand rule)。其說如下

「若伸右手，使姆指食指及中指相互垂直，如食指指磁方線方向，姆指指導體運動方向，則中指所指者，即為感應電流之方向（見第六十圖）。」

第六十圖  
右手定則



九二、交流發電機 利用電磁感應原理

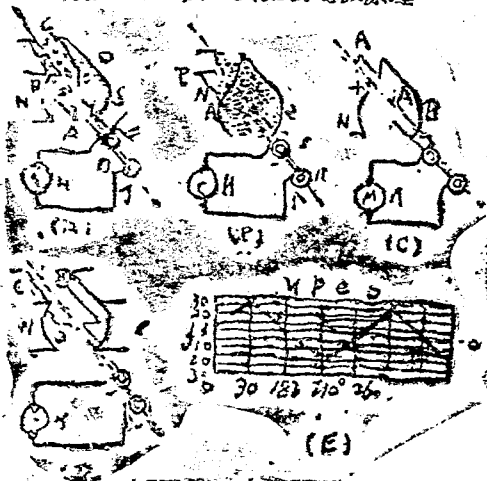
將機械能變為電能之裝置，曰發電機 (Generator)。發電機如就其所產生之電流之性質言之，通常分為二種：一為交流發電機 (Alternating current Generator)。其電流及電壓之強度與方向，循環變化，而有一定之週率 (Frequency) 者。一為直流發電機 (Direct current Generator)。其電流方向，常為一定，構造上除整流器外，其餘大致與交流機相同。發電機因電力大小，電壓高底，以及單相，(Single phase)

第六十一圖 交流發電機原理

多相 (Polyphase) 等種種之不同，式樣極多，結構亦異。礙為易於明瞭起見，特先述一簡單交流發電機，藉明大概。至於直流發電機，則當於下節述之。

第六十一圖

示一簡單交流



發電機之發電部份，與電燈K連接，NS為兩極，其間磁力線均勻分佈，ABCD為依其軸心而旋轉於磁場內之線圈，其兩端分接銅製之集流環（Collectoring）E及G。此兩集流環彼此絕緣，並與中軸（Shaft）絕緣，（惟與銅或碳製之電刷（Brush）H及J相接觸。使線圈內所生之電流，導至外路，電燈K即能發光。

設此發電之機圈，先轉動在垂直位置，如圖（A）所示，則因線圈之AB及CD邊線，在旋轉之頃，並無割動磁力線，故感應電壓為零。及再旋轉後，照時鐘指針之動向，先轉一較小之圓角度，因則旋轉割動磁力線，僅有一小部份，線圈上有發生較小之感應電壓。

茲如線圈繼續轉動，因被割動，之磁力線，其數愈增，亦即磁力線之變化愈大，結果所生之感應電壓及電流亦愈強。至於電流之方向，可應用佛來銘右手定則，不難決定，即如圖（B）所示。惟由上述之林慈定律，知感應電流所生之磁力線，係與原有之磁力線方向相反，線圈不啻一暫時磁鐵，上端為S極，下端為N極，與原來之S極與N極相互間各有斥拒之力交足以阻遏其動作，故欲線圈繼續轉動，自須加以相當之機械動力。

及至線圈轉動將至水平位置時，因AB及CD之轉動方向與原有磁力線垂直，所被割動更多，感應電壓亦更大。直至水平位置，電壓增至最高點。由是再繼續旋轉，則磁力之變化率又逐漸減小，感應電壓亦漸低，在圖（C）位置時，即與在圖（A）位置時情形相同，感應電壓復降為零。

經過半周後仍將線圈繼續前轉，則因線圈內AB與CD線

條，割動磁力線之方向，與前相反，故所生之感應電壓及電流等，方向亦變，其強度則仍逐漸增加。於圖 (D) 所示位置時，感應電壓又增至最高點，如再繼續前轉，電壓又漸次減低，回至圖 (A) 位置，則完成一週，電壓仍變為零。

由上所示，每次線圈在NS兩極間轉動一週，其位置由 (A) 經 (B) (C) 及 (D) 而回至 (A)。在 (A) 與 (C) 之位置時，線條轉動方向與磁力線平行，無感應電壓，故亦無感應電流發生，在 (B) 及 (D)，之位置時，磁力線變化率極大，故感應電壓及電流亦最強，惟方向則適成相反，茲以線圈轉動之一週，分為三六〇度，表明於坐標準之橫軸 (Absclssa)，以在各度位置時之感應電壓數值，表明於坐標上之縱軸 (ordinates)，則可繪成如圖 (E) 之曲線。圖中〇—〇為零線，在零線之上者表示正向電壓，在零線之下者表示反向電壓。一般理想中之發電機，在曲線上每一位置之感應電壓，為一正弦函數，故亦稱為正弦曲線 (Sine curve)。惟實際上因發電機之磁通，不能於上述之均勻分佈，所謂正弦曲線，自亦不甚確切，不過為計算上便利起見，恆假定如是。

由圖 (E) 之曲線，可明線圈上所發生之感應電壓，由 O 點開始，增加至 L，以達最大值 M，由 M 起減少至 N，而降至零位 P。於是改變方向，始則由零增至反向最大值 R，又由 R 減至零位 T，如此由 O 至 M 降而至 P，又由 P 至 R 降而至 T，一起一伏之變化，稱為一週。每週所需之時間，稱為週期 (Period)。每秒鐘內所得之週數，稱為週率 (Frequency)



。週率之多寡，與轉動之速度有關，但同時亦視發電機所有磁極之對數而定，設上述發電機之磁極，由一對而增至二對，其與S極，相鄰排列，則當線圈轉動至一八〇度時。電壓已循環變化一次，至三六〇度時，則變化兩次其週率較用一對磁極時增加一倍矣。發電機之磁極多，則變化之週數亦增加，故可不必轉動過速，而週率自增。故一般市用五〇至六〇週/秒之發電機，其磁極恆用一對三對甚至四對以上。茲以T表週期，f表週率，以N表磁極數，R.P.M.表每分鐘轉速，則週率與週期之關係為：

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (39)$$

週率與磁極轉速之關係為

$$f = \frac{N}{2} \times \frac{\text{RPM}}{60} \dots\dots\dots (40)$$

發電機內所裝之鐵心線圈，用以發生感應電流者，稱為發電子或曰電樞，上述之交流發電機，係磁場固定，而發電子轉動者，但亦有發電子固定，而磁場轉動者，此種發電機之發電子，亦係由多數綫圈串聯而成，俾每圈上所生之電壓相加，可得一較大之總電壓，其旋轉之磁場，則由一重鐵心，繞以綫圈而成。此綫圈通以直流，即得一極強之單向磁場。通常另裝小直流發電機，以作磁場線圈之電源者，稱為勵磁機 (Exciter)。此外亦有在發電機上，分別另繞若干直流綫圈者，此則隨所用發電機之種類而定，頗非一律。

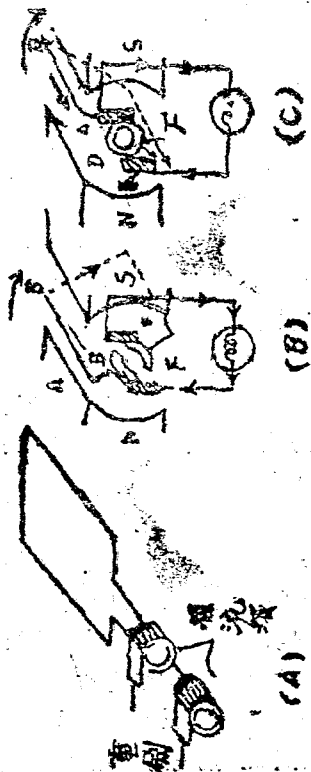
發電機之發電子除用一組線圈外，尚有將不同位置之多數線圈，分別連成二組或三組，使發電子上所生之電壓，有二路或三路可接，以成所謂二相或三相 (Phase) 交流發電機。

者。此種異相電壓，可分用，亦可並用。一般電力廠所發之交流電，大致以三相居多。

九三、直流發電機 設第六十二圖 (A) 之集流環不用，而裝一整流器於其上，如圖 (B)，即成一直流發電機，所謂整流器 (Commutator) 者，不啻交流變直流所用之自動開關，最簡單之一種，為銅製之兩環，如圖 (B) 之 D 及 F，稱為整流分截片 (Commutator Segment)，截片與發電子裝於同軸，隨發電子而旋轉，與整流器接觸者，則為位置一定之炭刷，即圖 (B) 中之 E 及 G。

在直流發電機，正轉至圖 (B) 之位置時，截片 D 與炭刷 E 接觸，截片 F 則與炭刷 G 接觸，由圖示之轉動方向，發電子所產生之電流，由炭刷 G 流入電燈，再由 E 而回。當總圈繼續旋轉，其所發生之電壓變換方向時，截片 D 改與炭刷 G 接觸，截片 F 亦改與炭刷 E 接觸，如圖 (C) 所示，此時

第六十二圖 交流變流之裝置



發電子之電壓，雖為交流，而流經外路電燈者，方向不變，成爲直流。此即直流發電機之主要原理。

一般實際應用之直流發電機，爲獲得極平穩之電口起見，恆於發電子上裝有多數線圈。每線圈匝數甚少，其兩端均分別與整流子之截片相接。故整流子截片常隨線圈之數而增加，片與片間，片與軸及夾環間，均用雲母絕緣。又因磁場之磁極過常不祇一對，所用之炭刷，或有與磁場之極數相等。截片之面，宜用砂紙摩擦，以期接觸良好。炭刷位置，亦宜適當調整，以減少火花之發生。

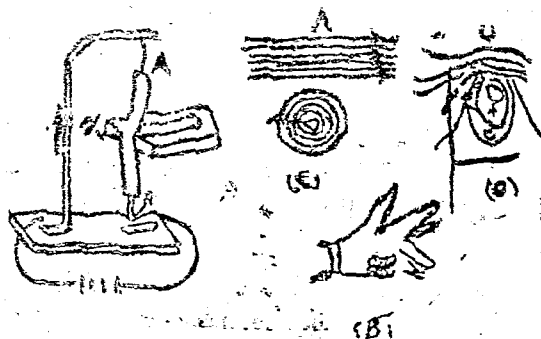
發電機發生或應電壓之高低，通常視繞於發電子上線圈匝數多少，磁場強度。及發電子旋轉速度而定，然改變通入磁場線圈之電流，即可改變磁場強度以使發生之電壓增減，此種調節電壓高低之方法，通常係於磁場線圈內，串聯可變電阻行之。

九四、佛來銘左手定則 第五十四節所述由電生磁，知當電流通過導線時，在此導線之周圍。即發生暫時磁場。磁力線方向與電流方向相互間之關係。可用安培右手定則加以決定。今如第三十六圖(A)所示於蹄形，磁鐵之兩極間，置一薄而易曲之銅片A B，而使電流通過，則根據前述之理，銅片周圍，發生磁場，惟其磁力線方向在銅片之一側，係與磁場之力線相加，另一側係與磁場之力線相減。設電流如圖示之方向，內側磁力線相加，外側磁力線相減，相加之側，磁力增強；相減之側，磁力減弱。結果銅片不能保持平衡，遂向外稍屈，如圖示現象。反之，如電流之方向改變，由銅片之B端流向A端，則根據同理之銅片將向內稍屈。由此

可知在磁場內置有通電之導線時，因導線周圍發生磁場，可使原有磁場失去平衡，而發生運動，其運動方向，與電流及原有磁場之方向，相互間關係恆為一定，可應用佛來銘之左手定則 (Fleming's left hand rule)，其言曰；

「如伸左手，使姆指，食指，及中指互成直角，設以食指指磁力線方向，中指指電流方向，則姆指所指者必為運動之方向。」(見第六十三圖B)

第六十三圖 左手定則之圖示

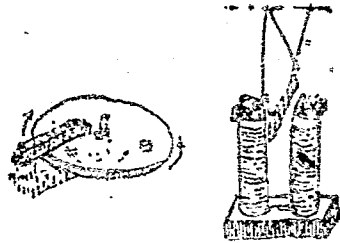


此種因磁力線互有增減而發生之運動，閱第六十三圖 (C) 及 (D)，當可更為明瞭。圖 (C) 之 A。為原有磁鐵之磁力線分佈情形。B 為電流由外向內通過導線時發生之磁力線分佈情形。設 A 與 B 之磁力線相合。則結果將如圖 D 所示，在 C 側之磁力線，既較 D 側為強，自必失去平衡，發生運動。電動機之構成，即由此理。

九五、渦流與渦流損失 上述由磁生電時，知線圈在一強度變換之磁場內，可因感應而生電流，實則此種感應電流

之能產生，不僅在線圈上為然，即在其他任何形狀之導體內，亦莫不如是。茲如將銅盤在蹄形磁鐵兩極間旋轉，如第六十四圖(A)所示，則銅盤之一部分割動磁力線亦生感應電壓。惟因此銅盤面積較大，所生電流故如虛線所示之方向，自成合路。根據林慈定律，感應電流所生磁場，係取反對銅盤變動之方向，可由圖(B)之實驗，加以證明之，圖示蹄形電磁鐵之

第六十四圖 渦流及其試驗



(A)

(B)

兩極間，懸一能自由擺動之銅片，但每次擺動後欲其自然靜止，須費時較久。茲以電流通過線圈，使成為電磁鐵，而將銅片擺動，則頃刻間即靜止，此因銅片割動線圈所生之磁場而發生感應電流，由此電流而成之暫時磁場，係反對其變動之方向，故銅片之擺動，亦遂停。通用之達孫佛測電表(D'Arsonval Galvanometer)，內部線圈繞於銅架上，目的即欲其擺動後迅速停止。

感應電流，通行於銅盤內部，成為渦狀。如圖(A)，稱曰渦流(Eddy current)。因由佛科氏(Foucault)研究而得，故亦稱佛科電流(foucault current)。渦流能使銅盤發熱，係由銅盤之動能，一變而為熱能，實際上是一種虛耗，故曰渦流損失(Eddy current loss)。在鐵心變壓器或感應器上，此種渦流損失，常視為極有損害之因子，為免除計，故一般感應器或變壓器，均不用整塊之軟鐵心，而用多

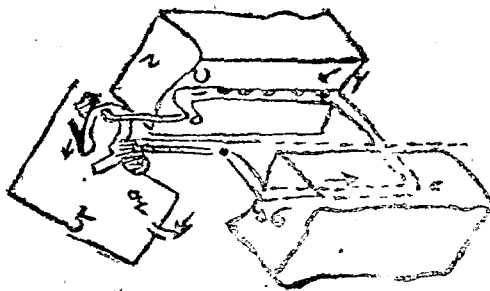
數較細之軟鐵絲，或極薄之軟鐵片。層疊而成，各鐵絲或鐵片均塗有絕緣液，使彼此絕緣，如此則割動磁通線之導體面積，既分成多數細薄之條片。渦流減小，而損失自亦減少。

九六、直流電動機 電動機俗稱馬達 (Motor)，應利用電能以產生機械能之一種機器而發明係由機械能遂以產生電能，如爲此電供諸電動機，即可還原而復爲機械能。彼此互變，可隨用途上之需要與取給上之便利，而設之。電動機通常分爲兩種：一爲直流電動機。其電源爲直流者，一爲交流電動機，其電源爲交流者。茲先略述直流電動機之結構原理，如左：

第六十五

第六十五圖 直流電動機原理

圖爲一最簡單之直流電動機。abcd爲置於N、S兩極間之單匝線圈，其兩端分別與整流分截片 $S_1$ 及 $S_2$ 相



連， $b_1$  及  $b_2$  則爲炭刷，由此可通外部之電源。當開關S閉合後，電流即由電源之正極發出，經炭刷  $b_2$  及線圈，再由炭刷  $b_1$  回至電源之負極上，第九十四節所述之理，線圈即自能轉動所設線圈之原來位置如圖所示，則此際所割磁場

之方線數極少，而以電流通入線圈，其方向如由  $b$  至  $a$  復由  $d$  至  $c$ ，則因磁場變化，應用佛來銘之左手定則。線圈必發生與時鐘指針導動向相同之轉動，即  $ab$  向下，而  $dc$  向上。及轉至上  $0$  度時。因割動之磁力轉最多，反對其動作，綫圈本應在此垂直之位置，即所謂死心者 (Deadcenter)，停止再進，但因綫圈既已轉動。尚保有相當之動量 (Momentum) 足以越過死心，即逾九十度少許，而使  $S_1$  與  $b_2$  接觸， $S_1$  與  $b_2$  接觸。迨經接觸綫圈上電流之方向變換，綫圈上所生之磁場亦變換。與上同理，線圈自必再轉其方向，依照左手定則， $Ab$  向上，而  $dc$  向下，至轉抵一八  $0$  度時，又因動量關係，綫圈仍超過一八  $0$  度之死心，使炭刷與整流環互換位置接觸，電流又變，綫圈仍繼續轉動，故通入之電流，源源不已，線圈之轉動亦不停。利用此種動力，可作各項機械工作。

## 習 題

- 一、何謂 (一) 電磁感應，(二) 感應電壓，及 (三) 感應電流？
- 二、試以磁之電子說說明電磁感應之理。
- 三、以甚強之條形磁鐵，在 B.S. 井 18 銅線纏繞一  $00$  匝，所成之空心螺形線圈內上下移動。設移動速度每分鐘一五  $0$  次時，綫圈可得感應電壓  $0.2$  伏脫，今如欲將此感應電壓增至  $0.6$  伏脫，問方法有幾種？
- 四、置於磁場內二  $00$  匝之綫圈，在某一瞬間割動磁通  $3 \times$

$10^6$  馬克士威，設於○、○二秒鐘內，增至  $4 \times 10^6$  馬克士威，問所發生感應電壓之平均值爲若干；

五、試說明林慈定律。

六、試用圖說明佛蘭銘左手定則。

七、略述交流發電機之原理及其構造。

八、五〇週/秒交流發電機，設其磁極爲六，求其轉速 (R. P. M.)。

九、試繪圖說明直流發電機之原理及其構造。

一〇、某五〇週/秒發電機圓速度爲500R. P. M. 則其磁極有幾？

一一、何謂(一)渦流？(二)渦流損失？(三)試用圖說明電壓感應關係，及其發生之原因。

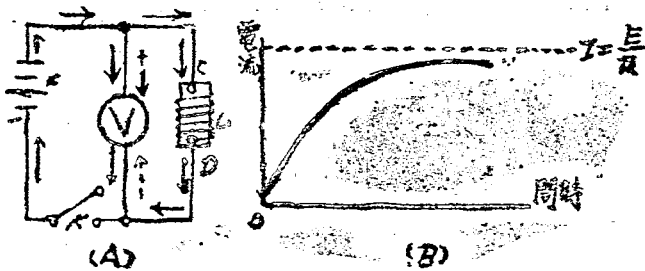
一二、試用圖簡述直流電動機構造與運用之大概。



## 第十章 自感應與互感應

九七、自感應與自電感 前述當電流通過導線時，導線周圍，必產生磁場，磁場若起變化，亦即生電此為單一線圈中由感應而生磁或生電者，曰自感應，由感應而生之磁場，其方向與強度，視通過電流之方向與強度而定，設此通過電流之方向與強度有變化，則發生之磁場，亦同時變化，依林慈定律，此變化之磁場，在導線上能發生一反電壓，稱自感應電壓，以反對或阻止電流之變動。此種性能存在於線圈中者，曰電感，由於自感應而生之電感，曰自電感。今如以線圈 $L$ ，連接電池 $E$ 及電鑰 $K$ 如第六十六圖(A)。在未接

第六十六圖 自感應試驗及其曲線

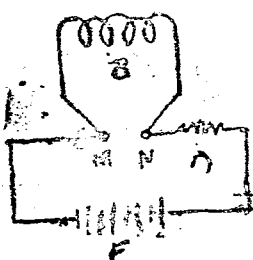


下 $K$ 之時，電流之值為零，當 $K$ 方按下，瞬息間電流由零而增，發生變化，故此時線圈中即有感應電壓產生，其作用係欲阻抗電流之通入線圈。以橫軸表時間，縱軸表電流，而繪一曲線，如圖(B)所示，即知電流須經過相當時間後，方可到達歐姆公式

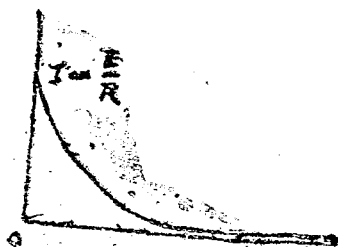
$$I = \frac{E}{R} \text{ 之值。}$$

今若將電鑰K開放，方在開放之頃，瞬息間電流降低至零，又生變化，線圈亦即有感應電壓產生，其作用，欲延長線圈中之原來電流，故與按下K時，所產生之電壓方向相反。欲證明反電壓之存在，可照第六十六圖(A)所示之辦法。將線圈L兩端，連接以靈敏之電壓計(或稱伏表)V，

第六十七圖 消滅自感應之方法及其曲線



(A)



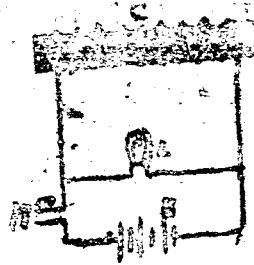
(B)

如此則於開放電鑰K之時，可見電壓計之指針，驟然作瞬時之轉動。此即表現有反電壓之存在。在實驗上對於切斷電流之動作，不宜過速，否則因電流變遷甚烈，感應電壓之值，可超過電源之電壓甚多，足以毀壞線圈之絕緣或於電鑰之接觸點間，發生強烈之火花。欲滅除火花而避免危險，應如第七十二圖(A)所示，於回路中加一電阻A，使電流逐漸變熱而使消耗淨盡。第六十七圖B所示之曲線，即表示用此方法時，電流可隨時消滅之情形。

自感應之能使電流展緩增加或延遲消滅，可由實驗(第

第六十八圖)證明之如下：第六十八圖中C爲鐵心線圈，線粗而電阻極微。L爲小電燈，B爲電池，其電壓等於L之所需額定電壓。按電路常理不論電鍵按下或釋放L皆無由得電流以發光，因L之電阻大倍於C也，但實驗上不然，K按下時，L發光片瞬而熄，可見電流始經線圈因線圈發生感應電壓而遲滯，乃通過電燈而發光，線圈內電流須經過此燈光存在之時間始能增至應有之強度。再將K釋放，L亦發光瞬而後熄。可見線圈內電流又須經過此燈光存在之時間始能完全消滅。額外電流取道於L以延殘喘，故電鍵接點不生火花。

第六十八圖 自感應發生時之試驗



九八、自感電路急促斷路之危險 電流開始流動時磁場即逐漸儲能，故線圈內磁力線隨電流以同增。迨電流穩定，自感電壓消滅，電流不復反抗自感電壓而作功，故磁力線隨電流亦達穩定之值。若電流阻斷，線圈內磁力線隨電流而衰落。磁場內所儲之能，遂轉變爲電能，發生額外電流，結果變熱而散失。磁場愈強則所儲之能愈多，斷路後額外電流之延續亦愈強。故自感較大之電路，一遇切斷電鍵接點恆見發生巨大火花，原因即由於此。

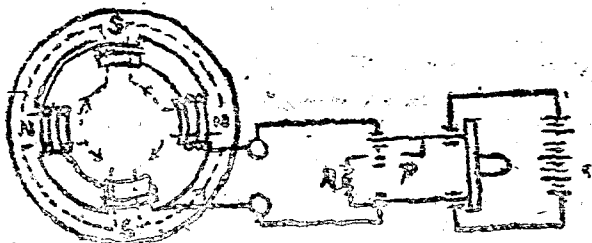
電路或通或斷雖皆使線圈內發生自感應，然通路時電流自由展發升起，自感電壓決不能高過外加電壓，故絕無不良影響。斷路時電流衰落，所經之時間其受制於電鍵開斷之遲

速，不容自由展緩。若電路內自電感頗大而斷路極速，則自感電壓亦必高逾尋常，故凡開斷自電感較大之電路，必須謹慎從事，緩緩扳開電鍵，以使電流之消滅，得以遲延。

電機之勵磁線圈尤須防護安全，善妥辦法，可於電路內設備一特殊開關，其構造如第六十九圖所示。K 為雙極扳鍵，雙極之一，連有金屬片 P。K 扳起時，P 即插入槽內，使勵磁線圈接通電阻線 R。額外電流遂得取道於 R 而緩緩衰落。如此則雖扳鍵之開斷極速，亦不致發生自感電壓過高之危險。

九九、無感電阻線 電流周圍之磁力線，可視為自導線中心向外擴張者。在導線無流通過時，設想磁力線縮成如一

第六十九圖 扳鍵上之特殊裝置

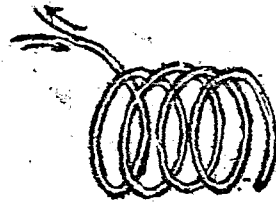


圓點，潛伏於導線中心，在通過電流時，則圓點向外擴張，成圍繞電流之圓磁力線。電流停止，則周圍圓磁力線向內緊縮，復成一圓點而伏於導線中心。故磁力線向外擴張或向內緊縮之際，此磁力線必被導線本身所截割，使導線上產生自感電壓。實際上雖單根長導線，亦皆有若干自電感。無線電通信所用之天線，即利用單根之導線其上亦有自電感存

在。

若將一根導線等分為二段，作電流之來回通路且使其相互絕緣，密切並列。則不論導線上所通電流之強弱，其周圍之結果磁場，常自相抵消為零，不隨電流而增減，如是繞成之線圈祇有電阻而無電感，名曰無感電阻線。用無感電阻線繞成之線圈（如第七〇圖）亦祇有電阻而無自感，名曰無感線圈。凡標準電阻器及測驗儀器內所用之電阻線，皆採用此法可免自感應之干擾

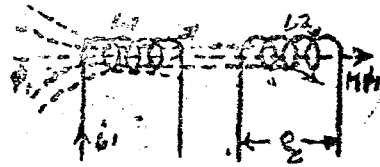
第七十圖 無感電阻線圈



一〇〇、互感應與互電感 一圈線內電流之變更，使鄰近其他線圈產生感應電

流之現象名曰互感應由互感應而生之電感曰互電感第七十一圖所示。線圈  $L_1$  載電流  $i_1$  其

第七十一圖 互感應之一例



一部份磁力線  $K_1 \phi_1$

分佈於線圈  $L_2$  周圍。故  $i_1$  變更時， $L_2$  必因  $K \phi_1$  變更而生互感電壓，其值為

$$e_2 = N_2 \frac{K \phi_1}{t}$$

因  $N_2$  及  $K$  為常數，而  $\phi_1$  與  $i_1$  成正比。故互感電壓  $e_2$

亦與其原動作用  $\frac{i_1}{t}$  成正比，即

$$e_2 = M \frac{di_1}{dt} \dots \dots \dots (41)$$

式內  $M$  為互感電壓  $e_2$  與其原動作用  $\frac{di_1}{dt}$  之比例常數，

即為二線圈間之互電感。互電感為二線圈間所公有，若二線圈間有互電感  $M$ ，則  $L_1$  內電流變更固使  $L_2$  產生互感電壓  $e_2 = M \frac{di_1}{dt}$ ，而  $L_2$  內電流變更，亦使  $L_1$  產生互感電壓

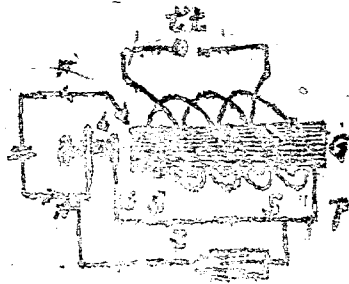
$$e_1 = M \frac{di_2}{dt} \dots \dots \dots (42)$$

大抵二線圈相距極遠或相垂直，則互感應極微或幾等於零，是名曰無互感線圈。二線圈接近，至一線圈之磁力線能分佈於他線圈之周圍時，始發生互感應。而有互感，二線圈密接而平行者互感較大。若二線圈之大小，各不相等，可置小線圈於大線圈內，使其位置相互平行，則二線圈關係愈密切，而互感亦愈大。又若二線圈繞於同一之鐵心上，則一線圈之磁力線，能全部通過他線圈，故其互感為最高。

一〇一、感應線圈 感應線圈為利用互感應由低電壓轉變為高電壓之一種裝置，如第七十二圖， $G$  為條形鐵心，若用整塊軟鐵製成，則磁力線變更時，垂直於磁場之各圓截面內，必發生渦流，故用多數鐵線束成圓棒，以阻渦流之通路。 $P$  為繞於鐵心外之線圈電流由此而輸入通稱原線圈，線粗而轉數少，約在百轉左右，故電阻極微，能由低電壓得較強電流以發生甚多磁力線。 $S$  為繞於外層之線圈電流由此輸出，通稱副線圈，線經細而轉數極多，由數萬至百萬匝不等，

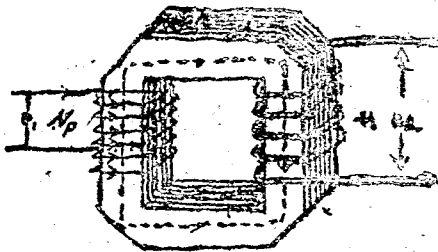
故鐵心內磁力線數變更時能使其兩端間產生高壓。二線圈間隔以厚層之硬橡皮圓筒，相互絕緣，可防高壓之突破。b 為接觸點。當流通後，b 因軟鐵片之振動，使電路忽斷忽續，續時鐵心內磁力線自零增至  $\phi$ ，斷時自  $\phi$  降為零，皆能於 b 間產生高壓。

第七十二圖 感應線圈



P 為鐵心線圈，其自感必展緩電流之增起與消滅，互感電壓尤不能極高。故於接觸點間并聯一定量容電器 C。如是則 b 開斷時，P 之額外電流充電於 C，不復於接觸點發生火花。同時 C 發生反向電壓以抗自感電壓，而額外電流瞬即停止。C 隨即放電於 P，成反向電流以促鐵心失磁。此二種作用，結果能促短磁力線消滅時間至  $\circ \cdot \circ \circ \circ \circ$  一秒以下，惟磁力線增起時間，則無法可以促短，故 b 之斷續，雖均能使副線圈產生高壓，然漸時所生者較高萬倍，是即利用以發

第七十三圖 變壓器



生 b 間火花之電壓。通常能發生二呎長火花之感應線圈，已數見不鮮，其相當互感電壓約為  $\text{五} \circ \circ \circ \circ \circ$  伏脫。

一〇二、交流

變壓器 交流變壓器係利用互感應以變更交流電壓之器。其

構造為匝數不相等之兩線圈同繞於環形鐵心上而成，如第七十三圖所示。設加交流電壓 $e_1$ 於線圈之一，則此線圈得交流 $i_1$ 而鐵心內發生依正弦規則變更之磁力線 $\phi$ 。 $\phi$ 之變更，使原線圈產生自感電壓 $e_1$ ，同時使副線圈產生互感電壓 $e_2$ ，線圈之電阻極微，故加於原線圈之交流電壓 $e_1$ 必等於其自感電壓 $e_1$ ，即

$$e_1 = e_1' = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

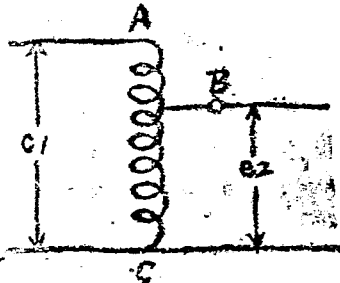
$$\therefore \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (48)$$

故交流電壓可由變壓器升高或降低，電壓升降之倍數，等於一線圈匝數相比之倍數。變壓器用於升高電壓者，名曰昇壓器，用於降低電壓者，名曰降壓器。變壓器構造簡單，裝置輕便，價廉省費。無轉動部份，不需人工管理，而交流電壓得以隨意變更，毫無限制。交流所以能普遍使用勝於直流者，變壓器之功也，變壓器鐵心亦須切成無數與磁力線平行之薄片，以阻渦流之通路。

變壓器之構造最簡者名曰自耦變壓器（如第七十四圖）

。僅為一鐵心線圈或空芯線圈 AC 製成，沿線圈長度有若干接觸點。可由活動板接器 B 以接至外電路。今如以交流電壓加於 AC，則 BC 間得較低電壓，此時 AC 間為正線圈而 BC 間為副線圈。若以交流電壓加於 BC，則 AC

第七十四圖 可變變壓器





間得較高電壓，此時 BC 間為正線圈而 AC 間為副線圈。電壓升降之倍數等於 AC 間匝數與 BC 間匝數相比之倍數。此倍數恆為構造所限，不能過大。故自耦變壓器祇能供給倍阻綫之用。

### 習 題

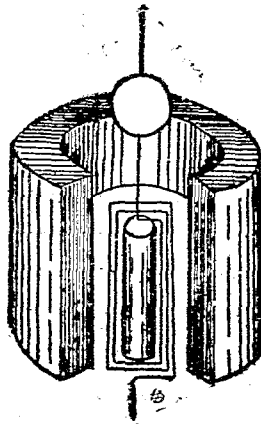
- 一、試用圖說明自感應之現象。
- 二、何謂互感應？
- 三、何謂互電感？
- 四、無感電阻綫如何構成？試舉例說明其用途。
- 五、試略述感應線圈之構成。
- 六、試說明變壓器之原理及其功效。
- 七、今有二變壓器，其變壓倍數為五及二〇，(a) 今欲升高一交流電壓至其值之一〇〇倍，試作圖示線路之連接  
(b) 如欲降低一電壓至其值之  $\frac{1}{4}$ ，則電路應如何連接？
- 八、一交變壓器，其二線圈匝數之比為一比四。(a) 今欲升高二〇〇伏脫電壓至一〇〇〇伏脫，試作圖示線路之連接。(b) 如欲降低此電壓至一六〇伏脫，則其電路應如何連接。

## 第十一章 測電儀器

一〇三、概述 電學中所用之實驗儀器頗多，不勝枚舉，茲就電表一類分別言之，凡應用電流之效應以測定電流之強度者通稱之曰測電表 (Galvanometer)，測電表之刻度直接指示安培數者曰安培表 (Amperemeter or ammeter)；其內加裝倍增器可直接指示兩點間之電壓伏脫數者曰伏脫表 (Voltmeter)，測定一電路內任何兩點間所消費之電力瓦特數者曰瓦特表 (Wattmeter)。各種常用之測電表，分述如次：

一〇四、活動線圈電表 活動線圈電流表為測電表中最常用之一種，係利用電流與磁場相互間之吸拒作用以推動線圈測定電流強度者，其構造如第七十五圖所示，M為一固定強磁鐵，C為一活動線圈。C用細線繞成長方形，懸掛於堅韌之細絲。而下接於螺形細彈簧上。M為環形或U形強磁鐵。A為富有導磁率之軟鐵筒，固於定線圈內，但不妨礙其旋轉。線圈C所處之位置，係在極強之均勻磁場中，其磁場之強度與方向不受外界影響而變遷。在線圈內無電流通過時，上下方彈力適使線圈靜止於與原有磁力線平行之位置。一至

第七十五圖  
活動線圈電流表之構造



經過電流，則線圈所生之磁力線與原有磁場發生吸拒作用，反抗彈簧彈力而旋轉，電流愈強，作用之力愈大，線圈所轉之角度亦愈增。因活動部份極輕，故雖電流極微亦能使線圈發生相當之轉動，不致失靈。且恆用小鏡透光，以示線圈所轉之程度，易於觀察，且亦異常靈敏。

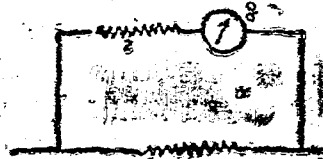
一〇五、電流與電壓之測量 測電流時電流表 串聯於電路內，其電阻勢必影響所測電流之強度，故電流表之電阻，須為極小，庶錯誤不著，又測電時通過表內之電流與加於其外端之電壓成正比，故電流表若接於電壓存在之二點間，則由活動部份所轉之程度，即可測知該二點間電壓，惟此時倘有顯著電流通過表內，則所測電壓，勢必隨內路電位降之增加而減低。欲永正確，須使通過表內之電流，減至極微，即電流表電阻須為極大，方不致發生影響，然通常電流表之電阻既小，故若用以測量較大電流，另須添接一小電阻，與表並聯合為一體，（第七十六圖），此並聯電阻線，名曰電流表之分流電阻。若用以測量較高電壓，另須添接一大電阻與表串聯合為一體，（第七十七圖）此串聯電阻線，名曰電壓表串聯電阻或曰倍增器。

用電流表測量電流或電壓，須與標準電流或標準電壓比較後，再由計算以求得其結果。依電流表原理加以改造，使能直接測知電流之安培數者，名曰安培表，使能直

第七十六圖  
電流計之並聯電阻

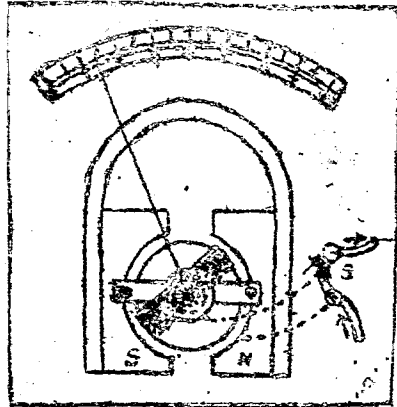


第七十七圖  
電流計之串聯電阻



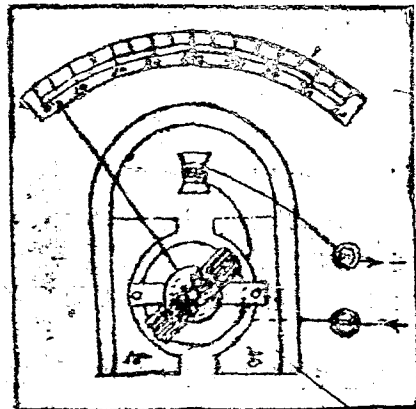
接測知電壓之伏脫數者名曰伏脫表。現在通用之安培表（第七十八圖）與伏脫表（第七十九圖）即係活動圈電流表所改製。全部機件均縮小集中，以便攜帶。

第七十八圖



活動線圈之旋轉軸上方繫一指針，能隨線圈轉動而直接指示安培數或伏脫數。安培表內有一分流小電阻  $S$ ，其結果電阻幾近於零。伏脫表內則有一串聯大電阻  $R$ ，其結果電阻約自數百至數千歐姆不等。

第七十九圖



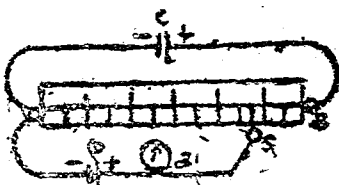
應用時若誤將伏脫表照安培表接法，串聯於電路內，僅使電流減小，所測不準，但表無損害。若誤將安培表照伏脫表接法，並聯於電壓存在之二點間，則因電阻極小，構成短路電流。

增大結果恆使安培表焚燬，不可不慎。

一〇六電位表 安培表不能絕無電阻，伏脫表不能絕無電流通過。故用安培表或伏脫表以測驗，電流或電壓，所得之值並非絕對準確。理論上準確之測驗法，應用電位表（第八十圖），A B 為一公尺長粗細均勻之電阻線，接通電池 C。

沿線發生均勻電位降。S 為滑接器，可沿線滑動以與電阻線接觸。茲先以標準電池 D 與電流表 G 串聯後接於 A S 二點間，若 A 點電位較高於 S，D 之正極須連接 A 點，否則須以 D 之負極連接 A 點。以 S 左右滑動至 G 表

第八十圖 用電位計測驗電壓



示無電流時，記錄 A S 間電阻線之長度 I 然後拆去 D 而改接所測電壓 E x 再以 S 滑動至 G 復表示無電流記為止，記錄此時 AS 間長度 I 設標準電池之原生電壓為 E 伏脫，則所測電壓之值為

$$E_x = \frac{I}{100} E \text{ 伏特}$$

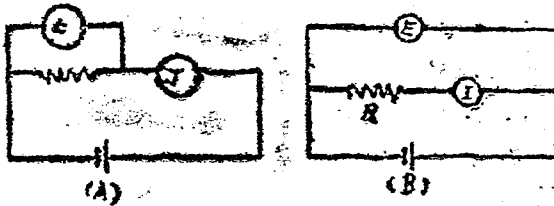
衛斯吞電池之原生電壓為一，〇八三伏脫。其值準確固定，科學家用為比較電壓之標準，故稱為標準電池。若用電位表測量電流，須於所測電路內擇一電阻已知之線段。照上述辦法求該段兩端之電位差。然後由歐姆定律計得電流之值。

一〇七安培表伏脫表測量電阻法 欲測驗一導體之電阻

，可使電流通過此導體，而以安培表測其電流  $I$ ，以伏脫表測其兩端之電位差  $E$ （第八十一圖）則由歐姆定律，計得導體電阻為

$$R = \frac{E}{I} \text{ 歐姆}$$

第八十一圖 用安培計伏脫計測量電阻法



上述測法，簡易而合於實用，惟不能得絕對準確之結果。蓋若連接電路如圖（A），則  $I$  大於通過  $R$  之電流，故  $\frac{E}{I}$  實小於  $R$ 。若連接電路如圖（B），則  $E$  大於  $R$  兩端之電位差，故  $\frac{E}{I}$  實大於  $R$ 。若  $R$  為極小，則通過伏脫表之電流比較極微，可置不計。若  $R$  為極大，則安培表兩端之電位差比較極微，可置不計。故測最小電阻宜連接電路如圖（A），測最大電阻宜連接電路如圖（B）。

一〇八、韋斯登電橋與滑線電橋 理論上準確之電阻測驗推韋斯登電橋測法（第八十二圖）。 $R_1, R_2, R_3$  為標準變阻器， $R_x$  為所測電阻。 $G$  為電流表。照此連接成一網狀電路如  $ABCD$ ，名曰韋斯登電橋。 $A, B$  二點接於電池後，變更  $R_1, R_2, R_3$  之值至  $G$  表示無電流通過為止。此時， $C, D$  二點電位相等， $R_1$  與  $R_2$  上電位降相等， $R_x$  與  $R_3$  上電

位降亦相等，由是  $I_1 R_1 = I_2 R_2$   $I_1 R_x = I_2 R_3$

$$\text{即 } \frac{I_1 R_1}{I_1 R_x} = \frac{I_2 R_2}{I_2 R_3}$$

$$\therefore R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$$

將韋斯登電橋之  $R_2$  R

3 二變阻器易為一公尺長粗

細均勻之電阻線 (第八十三

圖) 則成滑線電橋，電流表

G 接於 C 及滑線 S 點。A、B 二

點接於電池後，以 S 左右滑

動，至 G 表示無電流通過為

止。記錄 AD 間電阻線長度

為 l 公分，則由韋斯登電橋

原理：所測電阻之值為

$$R_x = \frac{100 - l}{l} R_1$$

一〇九、電力表以上所

述電流，皆指直流。若交流

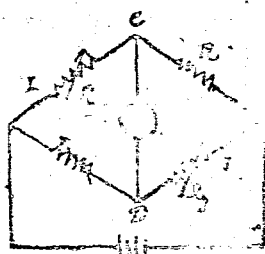
電通過電流表，則電流換向

時，活動部份必感受反向轉

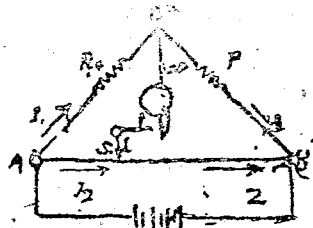
力，交流換向極速，活動部份不能隨作同步之轉動，故結果

必穩定不動，換言之，即轉力隨電流繼續換向，其和為零。

第八十二圖 韋斯登電橋

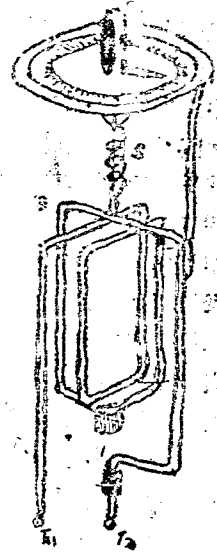


第八十三圖 滑線電橋



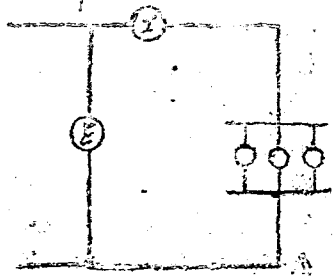
故活動部份不發生旋轉。上述各種電  
 流表，皆只能測量直流，不能用以測  
 量交流。與電流表原理相同而能兼測  
 交流者為電力表，其構造為一固定線  
 圈A與一活動線圈B(第八十四圖)，B  
 之下端浸於水銀杯內而與A串聯，其  
 上方用一絲線懸起而受制於螺形彈簧  
 S之彈力。S上端連有轉柄C。C帶一  
 水平指針，可沿刻度圓周移動，以示  
 所轉之角度。B之一邊附一直立指針  
 P，當指圓同上零度時，P之平面，  
 即垂直於A。通電流後，B感受轉力  
 而帶轉動。同時將C旋轉至P仍指  
 零度為止，電流強度即可由C所轉之  
 角度，比較而得。若通以交流，則A、  
 B二線圈內電流，同時換向亦生轉動  
 。故電力電表能兼測交流。

第八十四圖 電力電表之構造



一〇、瓦特表 直流  
 電路內電功率可由伏脫表與  
 安培表上記錄以計算之(第  
 八十五圖)。交流電路內電  
 功率不必等於二表上記錄之  
 相乘積，須另用瓦特表直接  
 測定之。瓦特表之構造與電  
 力表同理，為一固定線圈B

第八十五圖

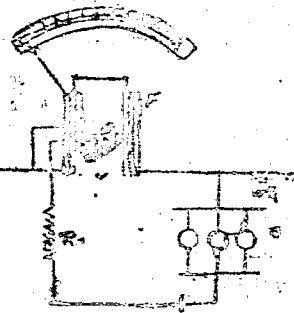




與一活動線圈M(第八六圖)

• F線徑粗而匝數少，故電阻極小，應用時須串聯於電路內，其作用與第八十五圖中之安培表相同，M線徑細而匝數較多，且串聯一電阻線R，故結果電阻極大，應用時須並聯於電路兩端，其作用與第八十五圖中之伏特表相同。M所受之轉力，與二繞圈內電流值成正比，而M內電流與電壓成正比，結果即與電流電壓之乘積 $EI$ 成正比，故視指針所轉之角度，可測電功率之瓦特數。

第八十六圖

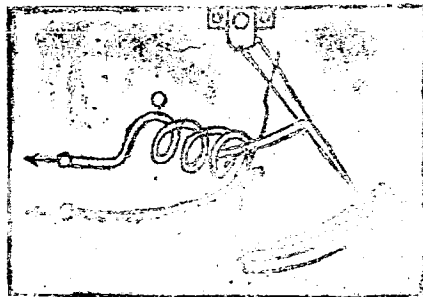


一一一、鉄心

安培表及熱安培表

鉄心安培表亦用以測量交流，其構造如第八十七圖，螺形線圈G吸引軟棒，使其連帶指針同時轉動，以指示電流之強度。電

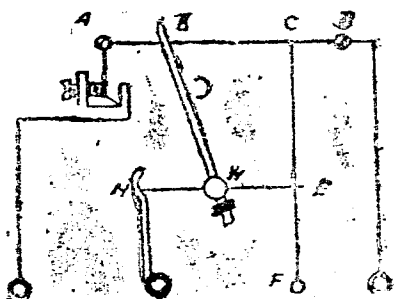
第八十七圖 鉄心安培表



磁吸鐵不因電流方向而異，故鉄心安培表能量測交流。熱線安培表之構造如第八十八圖，AB爲繞匝係數較高之鈞銀合金細線，CF爲另一金屬線，E H爲絲線，自銅片H繞過滑車

W而繫於GF線之E點上，常受H彈力而拉緊。電流通過 $\Delta I$ 時，A因熱而漲，使GF放寬，H遂拉絲線向左移動，使滑車帶指針轉動以指示電流之強度。電熱亦不因電流方向而異，故熱線安培表能兼測交流。

第八十八圖 熱線安培表



### 習題

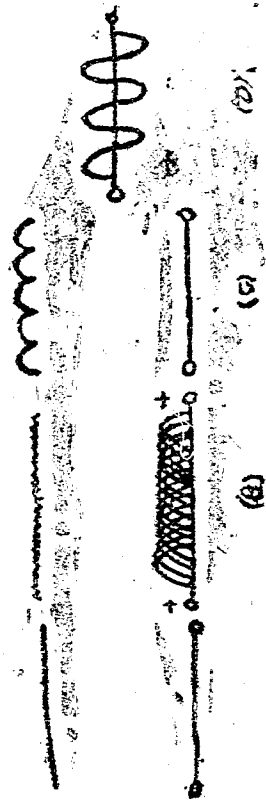
- 一、試述活動線電流表之原理及其構造。
- 二、試說明電流表分流電阻及電壓表串聯電阻之用途。
- 三、電位表如何測定電壓？試詳述之。
- 四、試繪圖說明韋斯登橋之原理及其用途。
- 五、今用韋斯登橋量一電阻  $R_x$  得  $R_1$  為  $R_2$  之七倍， $R_3 = 594$  歐姆，求  $R_x$ 。
- 六、試述鐵心安培表及熱線安培表之構造。
- 七、電流表可否用以測量電壓？伏脫表可否用以測量電流？其故安在？
- 八、交流安培表能兼測直流，而直流安培表不能兼測交流，其故安在？

## 第十三章 交流電路

二、電流之區別 現代習見之電流，大致可分三種

(一) 爲穩定直流 (Steady D.C.) 如通常由電池產生，或由直流發電機產生而經過濾波者，其強度及方向，恆爲一定不變，如第八十九圖 (A) 所示者是。(二) 爲脈動直流 (Pulsating D.C.)，其方向雖爲一定，但強度則隨時變化，如第八十九圖 (B) 及 (C) 所示者是。(三) 爲交流 (A.C.)，其強度及方向，均隨時變換，如第八十九圖 (D) 所示者是。關於直流，在電路內情形，已於第四章，及其他各章中，分別舉述。茲所欲言，厥爲交流，及動脈直流。脈動直流

第八十九圖 穩定直流與脈動直流及交流



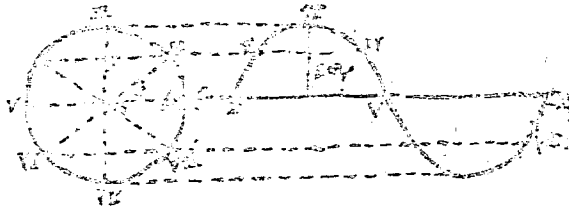
，其方向不變，與穩定直流相同，但電之流動，成微波形。

則又與交流相似，故實際上係直流而兼交流，其在電路內當亦兼有二者之特性，苟直流與交流電路之特性盡明，則暇動直流，在電路內之情形，自不難得其大概，無庸贅述。本章所述，以交流為主。

一一三、交流之產生及其有效值 交流之產生方法：（一）用交流發電機，其原理已見第九十二節所述。（二）由振盪而產生，應用線圈與容電器構成振盪電路，加上電源後，使於如此電路中發生往復循環之振盪電流，此即交流之一種，其週率可極高，故亦別稱曰高週率交流，無線電機上用之。

交流之方向與強度，依時而變，其一週之變化情形，展開如第九十圖所示之曲線此種變化，猶 OA 之向量等速運動

第九十圖 交流之說明



所成之正弦曲線 (Sine curve) 爲便於說明起見，交流之變動，恆以正弦向量代表之。在曲線上任何之值，爲交流在此點時之瞬時值，此值故即等於最大值之正弦函數。如以  $E_m$  表交流電壓之最大值，即圖上所示之  $E_m$  是， $e$  表瞬時值， $f$  爲週率， $t$  爲時間，則  $e = E_m \sin ( 2\pi f ) t$ ，交流之瞬時值亦

相同，即

$$i = I_m \sin(2\pi f)t \dots\dots\dots (45)$$

在實用上交流之瞬時值，極難量度，故另用一有效值，以作標準，此值即相等於直流所能發生熱效應之一值，其以此值通過電阻所發生熱量與以直流通過同電阻所能發生同量之熱之一值相等，由計算而得，此有效值亦即等於最大值之平方根值 (Root mean Square value) 以公式表明：

$$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{1.414} = 0.707 I_m$$

$$\text{又 } E_{eff} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{1.414} = 0.707 E_m \dots\dots\dots (46)$$

通常用交流安培表或交流伏脫表量出之交流安培數或伏脫數，是有效值，非最大值，亦非瞬時值也。

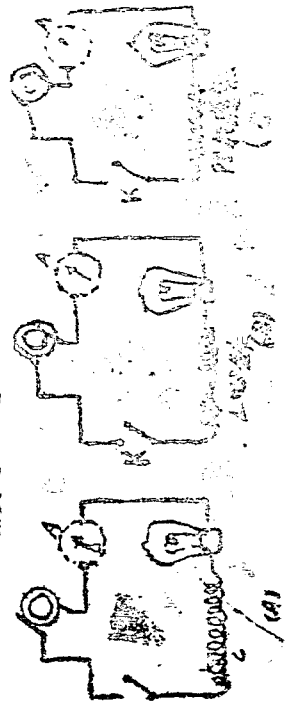
一一四、電阻電路 設將交流電壓  $E$ ，加於僅含電阻  $R$  之電路兩端，則與直流電路中情形相若而發生交流流通其間。如此電路所含者，無絲毫電容或電感之存在，則對於電流之阻力，祇有純電阻一種，其效應與直流通此電阻時相同，而電流，電壓，及電阻之關係，亦可同樣應用歐姆定律加以決定，即

$$I = \frac{E}{R} \dots\dots\dots (63)$$

一一五、電感電流 由上第十章第九十七節所述，如通過線圈之電流發生變化，其周圍磁場亦起變化，即在線圈上，產生反抗此種變化之自感應電壓。設通過線圈為交流，則磁場之強度與方向，既隨時變換。所發生之感應電壓，亦必

取反對交流電壓之方向。而隨時變換。大抵通過交流之週率愈高，則磁場之變化愈快，所發生之自感應電壓必愈大，線圈之匝數愈多，圈心之導磁率愈大，所產生之感應電壓亦愈強。依楞次定律，此自感應電壓，既時時取反對交流電壓之方向，結果必使線圈兩端之有效電壓數值減低，對於流過線圈之電流，同樣加以阻抗，此與直流電路之電阻，作用相似，所不同者，直流電阻，係將有用電能，變為有損毫之熱能，而交流自感則係一時吸收電能，另一時又可將所吸電能放迴，成為一種節制電流之阻力，以別於電阻，故稱電流（Reactance）。由感應而生之電抗，故又稱感應電抗（Inductive reactance）。此種感應電抗在交流電路內之影響，視第九十一圖所示之實驗，可更明瞭。圖（A）係將一〇〇英尺一八號銅線繞成螺形線圈，與電燈串聯，而接通交流電源之電路。A為安培表（0-5A）當開關K閉合後，因線圈之純電阻及自感應所發生之自感電壓關係，此電燈已不如未接入線圈時之光明。設於此時，將一軟鐵圓心，徐徐

驗實之阻感節制 圖一十九第

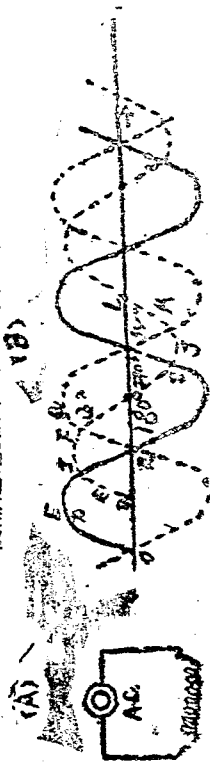


插入線圈，則因所發生之變換磁場增強，反電壓加大，故電燈亦逐漸變暗，而安培表所示之電流值，亦同時逐漸減小，直至鐵心全入線圈內部後始止。此一〇〇英尺一八號導線所有之電阻，不過〇、六五歐姆，假如另用一相等電阻之無感線圈接入，以代替原有線圈，如圖(C)。則此電燈必大放

光明。由此可知電流通過線圈時，除純電阻具有阻力外，線圈中之感電抗對於通入之電流，亦影響極大。惟電抗僅對變化之電流，如交流或脈動直流有阻遏；對直流，因其所產生之磁場無變化，無反電壓發生，故不致發生影響。

——六、電感電路內電流之滯後  
在交流電路內。由電感所發生之反電感，不僅將電流之有效值減低，且將電流變化，使之較所加之電壓變化滯後。由前第九十七節所述，自感電感所產生之結果，當知電壓加於電感電路時，其電流必須較長之時間，始能增至應有之值，電壓離開電感電路時，亦必須較長之時間，始能減至為零。此即電感電路中電流變化，常較所加電壓之變化，滯後若干時間，此種滯後情形，茲有下列第九十二圖，表示之。

第九十二圖 交流電之滯後



第九十二圖 係將一感應器，連接於交流電源之電路。爲便於說明起見，假定此感應器無絲毫電阻存在。則電路內，對於電流阻遏影響，僅自感電壓一項。圖(B)，爲所加電壓之正弦曲線，由此電壓所產生之電流，將在導線周圍產生一同樣變化之磁場。依楞次定律，此變化磁場發生一自感電壓，其變化雖與所加之電壓 $E$ 相似，而方向則隨時與 $E$ 相反，即如 $e$ 所示之正弦曲線。我人既知電流變化，較 $E$ 之變化爲滯後，則當 $E$ 已由 $O$ 開始時，電流必尚未開始流動。又由前第(41)公式，知線圈內之感應電壓，係與電流變動率之大小成正比，電流變動率愈大，感應電壓愈大，反之則愈小，故電流強度(亦即磁場強度)達最大值時。(即圖(B) I曲線中及I點)曲線幾成水平，變化率極小，而所生之感應電壓亦爲最小，簡單而言即電流最大時(無論負或正)，感應電壓爲零。反之，零流爲零時，變化率最大，感應電壓亦最高。因此，當感應電壓 $e$ 在 $R$ 點開始向正值增加時，電流必爲最大值 $I'$ ，此後則沿 $FG$ 線而逐漸減小，當 $e$ 在 $M$ 點開始，由最大值逐漸減小時，電流值必爲最小值 $H$ 由零開始向反對方向增加。因此將各點連成電流之波形曲線 $I$ ，如圖所示。

由圖示，爲所加電壓 $E$ 由 $O$ 點增至最大 $P$ 點時，電流尚未流動，而當電壓 $E$ 已經過四分之一週，電流始由 $O$ 而增加實際上爲滯後 $90^\circ$ 。此種滯後特性，在電感電路中極佔重要，設電路內除此電感外，尚有電阻或電容存在時，電流滯後之情形須視電阻，電感及電容各值之大小以定。

一一七、感電抗 感電抗之作用與電阻相似，除前述外



，尚有數點不同：第一、導線電阻之大小，完全視其物理因子，如長度橫斷面積，溫度高低及物質種類而定；無論為單根，或空心與實心線圈，其電阻大小，均有定值，而導線之感電抗，則一方面與其形狀有關，即線圈具有之電抗，可較等長之直線電抗大若干倍，另一方面與線圈之心有關，即鐵心線圈之電抗，較空心者為大。概括言之，電阻與其所用物質之物理因子有關，而感電抗，則與其電感之大小成正比。第二、在高週率時，電阻雖有變化，但所加電壓如為低週率，電阻可變化甚微，而感電抗之大小，則直接與所加電壓之週率大小成正比。茲以 $X_L$ 表感電抗，單位同為歐姆， $f$ 表週率，（週/秒）， $L$ 表電感（亨利），則感電抗與週率及電感之關係，當如下式：

$$X_L = 2\pi fL \text{ 歐姆} \dots\dots\dots (47)$$

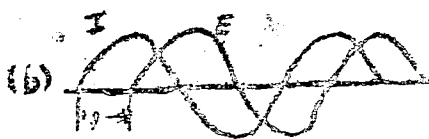
一一八、電容電路 容電器連接於交流電路中，其電流通過情形，乃與直流不同，前已言之，容電器接於直流電壓時，只在電壓加上或除去之頃，暫有瞬時電流通過，若接於交流電壓，因一反一正之關係，容電器內電子往復位移，電流可繼續流動。惟通過電流之大小，與不加接容電器之電路內電流通過情形時頗亦不同，交流之通過容電器，與通過電阻或電感然，亦能降蓋電壓，則容電器之電容，於交流電路中，一樣能成爲一種電抗，以反抗交流之通過。此種電抗，因由電容而生成者，即曰容電抗（Capacitive reactance）。電路中容電抗愈大，則電流愈小，反是則愈大。

一一九、電容電路內電流之導前而交流電路中如僅接有電阻，電流與電壓同相，如僅接有電感，上已述明，電流滯

後九十度，今如僅接有電容，電流與電壓之關係又如何？據容電器充電及放電情形，在充電開始之時，容電器上尚未發生反電壓，所能通過之電流當為最大，待所施電壓與容電器上電壓相差漸低，電流即漸小，至兩電壓相等時，電流即不再流動而等於零。加上之電壓若由此而漸低下，但容電器上電壓却可漸高，電流亦漸增大，至加上之電壓等於零時，電流為最大。電壓反

第九十三圖 電容電路

一方向，容電器在放電之後，而再反方向充電，電壓與電流關係，亦與前同，其情形如第九十三圖所表明。由知電容電路中之電流，於時間上超前於



所施電壓，是為電容電路中電流之超前現象。並當所加電壓最高時，電流最小，至電壓等於零時，電流反為最大。是知電流之超前為九十度。

電流與電壓同時變化，兩者為同相，倘其增減變動不同步，而有滯後或超前之現象。是曰不同相，所謂相，即兩者變動相差之時間，依角速度言之，是為兩向量相差之角度，此角度即曰相角，如第九十三圖(b)所示之 $\theta$ 是，在前所述電感或電容之交流電路中電流與電壓相差九十度，此即其相角九十度也。

一二〇、容電抗 容電抗在交流電路中之數值，視容電器電容大小與交流週率高低而定。若電容愈大或週率愈高，則因所能通過之電流愈大，容電抗愈小。反是，若電容愈小

或週效愈低，因通過電流愈小，則容電抗愈大。故容電抗大小，與交流週率及電容反比，以式表明如下：

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \dots\dots\dots (48)$$

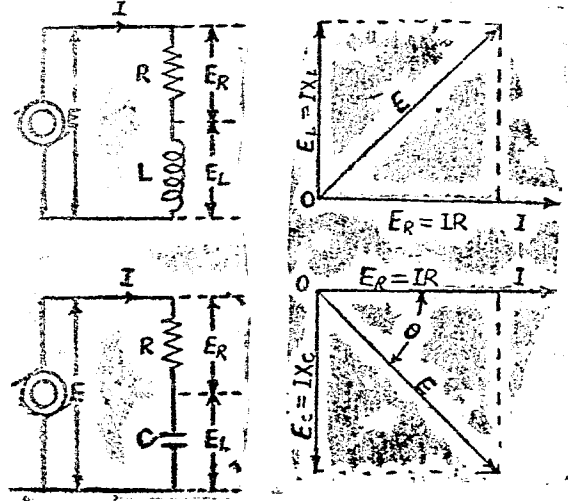
$X_c$  為容電抗，單位歐姆， $C$  為電容，單位法拉， $f$  週率，單位週/秒

一一一、歐姆定律在交流電路上之應用於直流電路中僅有電阻，計算故甚簡單，在交流電路中所應有容電抗存在，不啻多一電阻，應用歐姆定律計算電容須將容電阻電抗一併計入，即

$$I = \frac{E}{Z} \dots\dots\dots (49)$$

上式  $Z$  為電阻電抗之總和，稱為阻抗 (Impedance)。阻抗內所含之電抗，分感電抗與容電抗，均與相 (Phase) 有關，計算時，未可直接相加，須用向量法 (Vector method) 以求得，舉例如下：

第九十四圖 電抗與電阻串聯電路



第九十四圖 (a) 示電阻與感電抗串聯電路，因通過電阻之電流無超前落後之關係，但若通過獨有之電感，則須滯後九十度，今電阻與電感串聯並在，則電流必不與電壓同相，亦必不滯後九十度，職是之故，電阻與感電抗兩者未能以代數法直接相加，須從兩者之電壓降用向量加法，然後可求得阻抗。參照圖中，若此電路中僅有電阻，其電壓降與電流同相，如  $OA$  所示，又若僅有感電抗，其電流應滯後九十度，即電壓降應超前九十度，如  $OB$  線之所示，各線之長短表其量，相差角度依相而定其向。現因兩者，同時並存，而串聯電路中之電流只有一量，故電壓降有變更，依向量加法，應等於  $OC$  之一線。由此知電流並不與電壓同相，又不滯後九十度，僅滯後  $\theta$  角，此即其相角。現可依  $OAC$  三角形內，因  $OC^2 = OA^2 + OB^2$  此

$$E^2 = I_1^2 + I_2^2 = (IR)^2 + (I \times L)^2$$

$$\text{即 } E = \sqrt{I^2 (R^2 + \times L^2)} = I \sqrt{R^2 + \times L^2}$$

$$= IZ \dots \dots \dots (50)$$

此  $\sqrt{R^2 + \times L^2}$  即為全路中之阻抗

第九十四圖 (b) 示電阻與容電抗串聯時之情形，電流與電壓降  $E_R$  同相，而與  $E_C$  導前九十度，同理以向量法相加，得總電壓  $E$  如  $OC$  所示，既不同相，又不導前九十度，僅導前一相角， $\ominus$  由此即可求得全電路中之阻抗。因

$$E^2 = I^2 + E_C^2 = (IR)^2 + (I \times C)^2$$

$$\therefore E = I \sqrt{R^2 + X_C^2} = I \sqrt{R^2 + \frac{1}{2\pi f c}^2} \dots (51)$$

是即其電抗等於  $\sqrt{R^2 + X_C^2}$ 。

串聯電路中若有電阻感電抗及容電抗三者並存，或此三者相連而成並聯電路，或串聯而又並聯，欲求其電壓電流或阻抗，均如上所述，依向量相加，然後即得結果，學者試自求之。

一二二、交流電功率 電路中之電功率，等於  $UI$  或  $I^2R$ ，此在直流電路中完全有用於發熱發光或傳遞為其他機械動作，此為真功率 (true power)。在交流電路，因另有電感電容存在，電壓與電流未必同相，由  $UI$  計得之功率，並非全是相當於直流電路中之有效值，以  $UI$  計得之功率，是消耗於全路阻抗之功率，稱為外表功率或曰視功率 (Apparant power)。因蓄於線圈或容電器中之磁能或電能，仍能放迴，非為一種消耗，交流電路中之功率，只消耗於電阻之可作功部份，始為有用之真功率。茲以  $P_a$  表外表功率， $P_t$  表真功率，則

$$P_t = P_a \times \frac{R}{Z} = UI \times \frac{R}{Z} \dots \dots \dots (52)$$

是即有用之功率，僅外表功率之  $R/Z$ ，電路中電阻若既一定，則因電抗愈大而愈小，反是則愈大。上式之  $R/Z$  稱為功率因數 (Power factor)，所以用以示明外表功率中有若干真功率也。參看第九十圖，知電抗電路中之電壓與電流，須導前或後一相角  $\theta$ ，茲以  $\theta$  為夾角所成之直角三角形，斜邊表阻抗，底邊表電阻，則功率因數又即

$$\frac{R}{Z} \cos \theta \dots \dots \dots (53)$$

因知功率因數又等於  $\cos\theta$ ，即等於相角之餘弦。故交流真功率，又可用下式表明

$$P_t = EI\cos\theta \dots\dots\dots (54)$$

真功率單位，仍為瓦特。因相角 $\theta$ 常無一定，所以  $\cos\theta$  可於零與一之間而變動，祇在  $\cos\theta = 1$  時，真功率始等於外表功率，否則決不相等，總是較小。外表功率之單位，不用瓦特，而用伏脫安培，一千伏脫安培稱曰千伏脫安培 (KVA)，大電廠輸出之功率，恆以此單位表明之。

### 習 題

- 一、交流與直流區別何在？
- 二、電阻電路內交流與電壓之關係如何？
- 三、何謂電抗、感電抗、容電抗、阻抗？試分別說明之。
- 四、何謂相角，相角因數？
- 五、交流電路內電流有導前滯後現象，其故安在？
- 六、歐姆定律對於交流電路如何引用？
- 七、交流功率與直流有何不同？試詳言之。
- 八、試以向量法求電阻電感電容串聯電路中之阻抗與電壓。
- 九、試以向量法求電阻電感電容並聯電路中之阻抗與電流。
- 十、電阻五歐姆電感四亨利電容三法拉串聯後相接於百伏脫之交流電壓，求電路中之電流與阻抗及其真功率。



