

# 電學與磁學

裘維裕編譯

電工圖書出版社印行

電 工 技 術 叢 書

# 電 學 與 磁 學

裘維裕編譯

電 工 圖 書 出 版 社 發 行  
上 海

電工技術叢書

電學與磁學

Electricity and Magnetism

by

I. C. S. Staff

版權所有



不准翻印

一九四五年六月初版

一九五一年十月六版

定價人民幣一〇五〇〇元

編譯者 裘 維 裕

出版者 電工圖書出版社

總發行所 中國科技圖書聯合發行所

上海中央路二四號三〇四室

電話 一九五六六

電報掛號 二一九六八

分銷處 各地書店

# 電工技術叢書

## 第一集

總編輯 楊孝述

編輯委員會 毛啓爽 丁舜年 楊肇燦  
趙富鑫 莊標文

電學與磁學	裘維裕
交流電學	裘維裕
直流發電機與電動機	毛啓爽
交流發電機與電動機	丁舜年
變壓器 (在印刷中)	周琦
發電廠與配電站	毛啓爽
蓄電池	毛啓爽
保護替續器	丁舜年
磁鐵及電磁鐵的設計	丁舜年
司路機鍵	壽俊良
電壓調整器	壽俊良
電工儀器及量度	楊肇燦
瓦特小時計	莊標文 楊肇燦
電照學	趙富鑫
電熱	趙富鑫
線路輸電及計算	曹鳳山
實用電工敷線法	莊標文
工用電子管理論 (印刷中)	史鍾奇
電燈線路與電子管控制	李志熙

# 凡 例

- (一)本叢書編譯之目的，係為訓練電機工程事業各項中級工程師及高級技工之用；職業學校，函授學校等採作課本，最為適合；即為有志自修者，亦極合用；而大學生備作參考，以補大學教本略於實用之不足，裨益亦非淺鮮。
- (二)本叢書係用美國國際函授學校 (International Correspondence School) 所編之教本為依據，延聘專家，從事編譯；原書優點為 (1) 注重實用，(2) 說理淺顯；(3) 插圖豐富詳明，尤以插圖多經精心繪製，與正文相得益彰，最為特色。
- (三)本叢書一面採用國外已見成效之書籍為藍本，一面力求適合國情，盡量加入國內已有之材料及法規，庶免隔閡之弊。
- (四)本叢書對於原書之優點，力為發揮，惟原書若有舛誤或欠妥，亦不事盲從，而惟求其至是，不憚加以修正，以免遺誤。
- (五)本叢書側重中級電工教育，對於高深精確之理論，大都從略，間有必須牽涉之處，亦祇能取譬於日常切近之事物，出以通俗近似之陳述，精確之度難免犧牲，讀者諒之。
- (六)本叢書中所用各項單位，均取國際制，凡原書用英美制之處，則加註國際制之當量值。

- (七)本叢書在原則上遵用教育部頒之名詞。凡名詞若爲部頒所無者，或部頒名詞在實用上有窒礙者，則有編輯會議商定之。
- (八)本叢書各冊名詞力求統一，惟卷帙甚繁，編輯部同人校訂難免疏漏，所望讀者發現矛盾或不一致之處，惠予指正，以期再版時收統一之效。
- (九)本叢書中重要名詞後均附註英文名詞，並於每冊後附英漢對照名詞彙。
- (十)本叢書爲普及起見，用語體文撰述。
- (十一)本叢書第一集共二十三冊，電工各門大致俱備，其他門類，如電信等，擬陸續另出第二集補成之。
- (十二)本叢書編輯同人均以業餘之暇從事撰述，疏誤在所難免，所望海內方家，不吝見教，俾於再版時得以更正，不獨同人個人之幸，亦中國電工教育之幸也。

## 編譯者序

從事電工事業的人，常感到講述電學基本原理書籍的缺乏，所以要閱讀這一類書籍，困難很多。

本冊是電工叢書的一種，是美國國際函授學校教員編著的『電學與磁學』（“Electricity and Magnetism” by I. C. S. Staff; International Textbook Co. 印行），講述電學與磁學的基本現象和定律。說理扼要而簡明，切合於實用。有了這種基本的知識，方纔可以修習本叢書的其它小冊。

原書說理欠妥或者不十分明瞭的地方，都已由譯者改正並且加以補充。

原子的構造在電學和磁學上，很是重要，所以本冊裏也大略講些。尤其是磁性，自感，互感，電阻，和電導係數數節，補充得很多，大部分是完全寫過的，希望這幾種現象，可以稍為明晰一些。

原書附表很少，搜集的材料也不多，譯者根據最近的手冊和國際電工技術委員會公佈的數據，儘量採入，使這本小冊非但可以用作基本知識之研習，也可以當做一本有用的參考書。

我國已經採用米制，但是在習慣上，英美制還是使用。所以原書裏的量度，或者改成米制或者添註米制，原書裏的例題和習題都是用英美制的，本冊於可能範圍內，例題和習題裏已增加了米制的演算。

本冊付印倉卒，難免有錯誤之處，希望海內明達不吝指教，使再版的時候，可以更正。

本冊曾經楊季凡和楊允中兩位先生閱過，他們給譯者許多的建議；英漢對照名詞索引，是張鳳君女士代為編列的，特此誌謝。

中華民國三十四年六月

序於上海

裘維裕



# 目 錄

## 第一編 電學通論

### 第一章 電子論大意..... 1

1.1 概論 1.2 分子和原子 1.3 電子和質子 1.4 離子 1.5 電離

### 第二章 電勢電流和導體..... 7

2.1 電場 2.2 電勢 2.3 零電勢, 正電勢和負電勢 2.4 等勢面  
2.5 電動勢 2.6 電勢差和電動勢的比較 2.7 電流 2.8 電子流  
和電流的方向 2.9 導體 2.10 絕緣體或半導體 2.11 電阻

## 第二編 動電學

### 第三章 發生動電的方法..... 17

3.1 電學的分類 3.2 發生動電或者電流的各種方法 3.3 原電池  
3.4 局部作用 3.5 常流和暫流電池 3.6 丹聶爾電池 3.7 勒克  
薩社電池 3.8 乾電池 3.9 標準電池 3.10 蓄電池 3.11 溫差  
電偶

### 第四章 電學上用的單位..... 26

4.1 電的量度 4.2 電流的單位 4.3 電量的單位 4.4 電阻的單  
位 4.5 電勢差, 電壓和電動勢的單位 4.6 電導 4.7 電能, 電

功,和電功率的單位

## 第五章 熱學和電學的關係..... 36

- 5.1 熱的單位, 功的單位, 和功率的單位的關係 5.2 熱功當量  
5.3 熱功和電功 5.4 機工功量和熱工功量 5.5 機工功率和電工  
功率

## 第三編 電路

## 第六章 電路上用的名詞..... 48

- 6.1 簡單電路 6.2 通流和斷流電路 6.3 通地, 通地電路, 和地  
回電路 6.4 捷路

## 第七章 串聯並聯和混聯電路..... 52

- 7.1 串聯接法 7.2 串聯的電阻 7.3 並聯接法 7.4 並聯的電阻  
7.5 不同導體並聯的總電阻 7.6 混聯接法

## 第八章 歐姆定律..... 58

- 8.1 歐姆定律 8.2 水壓降落和電勢降落 8.3 電路裏的電勢降落  
8.4 歐姆定律的擴義 8.5 支路電路

## 第四編 靜電學

## 第九章 電荷..... 70

- 9.1 概論 9.2 靜電定律 9.3 摩擦電序 9.4 靜電感應 9.5 靜電  
感應的電子論 9.6 靜電感應引起的電閃現象 9.7 絕緣介質的

擊穿

## 第十章 容電器 ..... 77

- 10.1 概論 10.2 輸電線路的電容 10.3 容電器的原理 10.4 容電器的水力唧筒類喻 10.5 容電器的構造 10.6 容電器的電容  
 10.7 關於電容的幾個條件 10.8 介質和絕緣物的區別 10.9 介質常量 10.10 介質的吸收本領 10.11 固體物質的介質強度  
 10.12 變壓器用絕緣油的介質強度 10.13 空氣的介質強度  
 10.14 電容的單位 10.15 容電器的並聯接法 10.16 容電器的串聯接法

## 第五編 磁學

## 第十一章 磁體和磁性 ..... 96

- 11.1 天然磁鐵 11.2 永久磁鐵 11.3 吸引和推斥 11.4 磁極強度 11.5 磁矩和磁化強度 11.6 地球是一個很大的磁體 11.7 磁場和磁力線 11.8 磁通量 11.9 磁力線的方向和磁路 11.10 磁極 11.11 磁質 11.12 非磁質

## 第十二章 磁路 ..... 106

- 12.1 概論 12.2 磁感應 12.3 磁感應強度和磁通量密度 12.4 磁通勢 12.5 磁阻和磁導 12.6 導磁係數和磁阻係數 12.7 鐵磁質, 順磁質和反磁質 12.8 磁路定律

## 第六編 電磁

### 第十三章 電流的磁效應 ..... 117

- 13.1 概論 13.2 用羅盤針來定電流磁力綫的方向 13.3 試驗電  
 流方向的方法 13.4 兩個平行電流的互效應 13.5 螺線管  
 13.6 極性 13.7 電磁鐵的種類 13.8 電磁鐵的構造 13.9 永  
 久磁和電磁鐵所用的材料 13.10 電磁鐵和磁通勢 13.11 有鐵  
 心和沒有鐵心的電磁鐵 13.12 起磁力場 13.13 剩磁效應和頑  
 磁性 13.14 磁滯和磁滯迴線 13.15 去磁 13.16 磁性的分子磁  
 論 13.17 磁性的電子論

### 第十四章 電磁感應 ..... 133

- 14.1 概論 14.2 發電機和變壓器作用 14.3 用條形磁鐵發生的  
 應電流 14.4 由電流的變更而發生的應電流 14.5 一個簡單的  
 變壓器 14.6 楞次定律 14.7 用截割的說法來講應電流的發生  
 14.8 用磁通量的變更率來講應電流 14.9 應電流的阻尼作用  
 14.10 自感 14.11 自感係數 14.12 自感效應的一個表演 14.13  
 無感電阻 14.14 互感 14.15 互感係數

### 第十五章 線規和線表 ..... 149

- 15.1 截面面積 15.2 長度的單位 15.3 截面面積的單位 15.4  
 線規 15.5 電阻係數和導電係數 15.6 導體電阻的計算方法  
 15.7 電阻的溫度係數

### 表一 摩擦電序表 ..... 72

### 表二 各種物質的介質常數 ..... 87

表三	國際電工技術委員會1935年公佈球隙電花電壓	90
表四	磁感應數據平均值	110
表五	各種線規直徑密爾數比較表	154
表六	實體銅線表:米制規號,米制單位和圓密爾數	156
表七	實體銅線表:英國標準線規,英制單位。	157
表八	實體銅線表:美國線規或稱 <u>白朗夏泊</u> 線規,英制單位	158
表九	實體銅線表:美國線規或稱 <u>白朗·夏泊</u> 線規,米制單位	159
表十	各種金屬物在溫度 $20^{\circ}\text{C}$ .時候的電阻	164

# 電 學 與 磁 學

## 第一編 電學通論

### 第 一 章

#### 電子論大意

1.1 概論 關於電的性質的假說，最初有卞雅明佛蘭克林 (Benjamin Franklin)的單流體說(Single fluid theory)，和羅伯昔摩 (Robert Symmer)的兩流體說(two fluid theory)。自從閻遜作用說出世以後，又認電做傳佈電磁作用的以太(ether)裏的形變(strain)。後來法拉第 (Faraday)發明了電解定律，已有電是原子性(atomicity)的暗示。但是電是微粒的電子論(electron theory)直到十九世紀的末年，有了實驗的證明，經過羅倫徹 (H. A. Lorentz.)和湯卜遜 (J. J. Thompson)許多人的提倡，方才確定。利用電子論，非但可以解釋電學上各種現象，並且可以用來說明物體的磁性，實在是一個重要的學說。

要明瞭電子論，先要把物質(matter)和它的構造簡略的談一談。無論什麼東西佔有空間的都叫做物質。無論什麼物體都是一種物質做成的。物質有三種狀態，就是固體(solid)，液體

(liquid) 和氣體 (gas), 這叫做物質三態 (three states of matter)。鐵, 石, 木, 等是固體物質; 水, 油, 水銀, 等是液體物質; 空氣和它的主要成分氧和氮是氣體物質的例子。一個物體, 如果溫度和氣壓變更, 可以從一態變成另一態。例如水在一個大氣壓力之下, 平常溫度之中是液體, 假使溫度降到百分溫度計 (Centigrade thermometer) 零度 ( $0^{\circ}\text{C}.$ ) 以下, 凝結成冰, 變成固體。假使溫度增加到百分溫度計一百度 ( $100^{\circ}\text{C}.$ ) 以上, 蒸發成汽 (vapor), 變成氣體。水銀在一個大氣壓力之下, 平常溫度之中, 是液體, 但是溫度降到百分溫度計零度以下  $40^{\circ}\text{C}.$  凝結成固體, 溫度增加到  $360^{\circ}\text{C}.$  以上, 變成汞汽, 成爲氣體。

1.2 分子和原子 物體的物質, 都是分子 (molecules) 組成的。分子是原子 (atoms) 組成的。一個水的分子是兩個氫原子和一個氧原子組成的。

分子可以說是物質最小的部分, 但是它的性質和原來的物質完全是一樣的。原子是分子的一部分; 它是物質最小的質點 (particle), 用化學的方法方才可以得到。原子併合起來成爲分子, 分子集合起來成爲物體。現在知道的, 大約有九十種化學性質不同的原子。化學性質相同的原子組成的物質叫做元素 (element)。金, 鐵, 和氫等都是元素。化學性質不同的原子組成的物質叫做化合物 (compound)。木, 水, 和平常吃的鹽都是化合物。

1.3 電子和質子 西文 “electricity” (電) 這個字是從希臘字 “electron” 變化出來的。 “electron” 原來的意義是琥珀

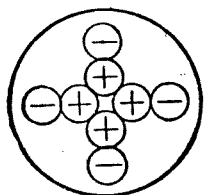
(amber)。古時的人已經發現琥珀和乾的絲織品或別種東西摩擦以後，能夠吸引輕小的物質，像紙屑，木屑等。物體有了這種特性就叫做帶電(electrified 或 charged)物體。

以前的人把原子當做物質最小的質點，沒有方法把它再分成較小的部分。現在知道物體裏面還有比原子更小的東西存在，這就是電子(electron)。

電子說假設原子的中心有一羣帶陽電的質點叫做質子(protons)和一羣帶陰電的質點叫做電子，質子和電子組成原子核(nucleus)。但是原子核裏質子的數目比電子的數目多，所以原子核的電荷(charge)是陽的。繞着原子核而轉動的，還有幾個帶陰電的電子，好像行星繞着太陽一般的轉動。中和(neutral)或是不帶電的原子，沒有電性的顯示，那末繞着原子核轉動的電子的總陰電荷和原子核本身的陽電荷恰正相等。氫的原子核是一個帶陽電荷的質子，在外邊繞着轉動的有一個帶陰電荷的電子。氦(Helium)的原子核共有四個質子和二個電子，外邊繞着轉動的有兩個電子。鋰(Lithium)的原子核有七個質子，四個電子，外邊繞着轉動的有三個電子。原子量(atomic weight)最大的鈾(Uranium)的原子核有二百三十八個質子和一百四十六個電子，外邊繞着轉動的有九十二個電子。近來又有中和子(neutron)和陽電子(positron)的發現，這也是物質構造中的一部分。物質究竟是怎樣構造成成功的，現在還沒有確定，上面講的，不過是一種假設罷了。



一個正常(normal)或是中和原子,它的陽電荷同陰電荷恰



正相等。圖 1.1 是表示原子裏的陽電荷和陰電荷的數目,並不表示原子的構造。陽電荷用正(+ )號來表示,陰電荷用負(- )號來表示。圖內的(+ )號同(- )號是相等的,換一種說法,陽電荷的數目與陰電荷的數目是相等的。

圖 1.1 原子裏的陽電荷和陰電荷的數目。

1.4 離子 一個原子有相當數目的電子,在電學上講起來是平衡的。它不顯示電的特性,不吸引別的電子和原子。在這種情形之下,原子的狀態可以說是穩定的。但是物質裏的分子,就是在平常溫度裏,不停的竄動,分子裏的原子也是同樣的竄動。這種竄動,使電子受到擾動(disturbance)。竄動的程度增加還可以使物質的溫度增高。

一個原子,有了擾動或者別個原子的撞擊,或者別的原因,失掉了一個電子,這個原子就不是一個正常原子,電學上講起來,它是不平衡了。這種電學上不平衡的原子叫做離子(ion)。一個原子少了一個電子,它的陽電荷就比陰電荷多,顯示陽電荷的性質。氫原子去了一個外繞的電子,就成功有陽性電荷的氫離子。氫原子去了一個或者兩個外繞的電子,就成功氦離子。這種離子,因為它有陽電荷的顯示,叫做陽離子(positive ion)。圖 1.2 同圖 1.1 是一樣的,只表示原子裏陽電荷和陰

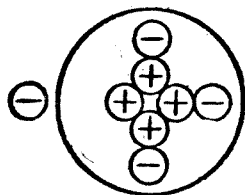


圖 1.2 原子去了一個電子,成功了一個陽離子。

電荷的數目，並不是原子構造的模式。去了一個電子，剩下的陽電荷比陰電荷多，成功了一個陽離子。

一個正常原子受到了擾動，也可以加添一個電子，它的陰電荷就比陽電荷多，顯示陰電荷的性質。這種不正常的原子叫做陰離子(negative ion)。圖 1.3 表示一個多了一個電子的陰離子。因為陰離子帶着的是陰電荷，所以推開附近的電子。但是一個陽離子走到它的附近，就被它吸引攔來，把它多着的一個電子放到陽離子上去，成功了正常原子。

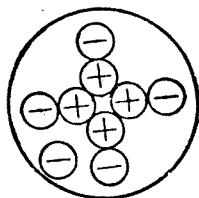


圖 1.3

原子多了一個電子，成功了一個陰離子。

照電子論的講法，陰電荷的流動就是原子間電子的流動，因為電子所帶的是陰電荷。陽電荷是在原子核裏邊的，除非原子可以流動，陽電荷方才可以流動。金屬物質像銅線，電子是假定可以在原子和分子之間自由流動，原子只可不離本位的竄動，不能夠像電子一樣的自由流動。假使說原子可以自由流動，那末，若是把一根銅線和一根鐵線接連起來，通過電流，電流當然通過兩線連接處，銅原子就可以跑到鐵線裏去，或者鐵原子跑到銅裏去。觀察的結果，從沒有見到這種情形，所以說原子在金屬物質裏是不能夠自由流動的。但是電流通過液體的時候，就有電解(electrolysis)的作用，銅原子成功了銅離子，隨着電流流動。在這種情形之下，原子和電子都流動，成功了陽電荷和陰電荷的流動。

**1.5 電離** 一個正常或者中和的原子變成功一個陽離子或者一個陰離子的過程(process)叫做電離(ionization)。平常用的電池,一種無線電用的真空管,和其它電工上用的東西,許多是電離的例子。

## 第二章

# 電勢電流和導體

2.1 電場 物體也可以顯示和它的分子或是原子一樣的電特性。物體裏的原子缺少了電子，就叫做帶陽電荷的物體。反過來說，原子有過多的電子，這個物體就有陰電荷。一個缺少電子的物體（帶陽電的物體）就吸取別個物體的電子來補足它缺少的電子數。

一根玻璃棒或者一塊琥珀，用綢布或者毛皮來摩擦，摩擦的部分，就能夠吸引輕小的物體，像綢片，羊毛，羽毛，等。玻璃棒被摩擦的部份就有陽電荷，綢布上面就有陰電荷。玻璃棒上的陽電荷同綢布上的陰電荷是相等的，這是因為玻璃棒上的電子跑到綢布上去，玻璃棒上失去的就等於綢布上得到的。這種帶電的 (charged or electrified) 物體可以推拒或者吸引別一個帶電的物體。若是兩個物體帶的電荷，極性 (polarity) 相同，就推拒開去，極性相異，就吸引攏來。

一個帶電的物體施與另一個帶電物體的力就叫做電力 (electric force)，不帶電的物體，沒有這種作用，所以自從電荷上來的。帶電物體四週的空間，它的電力可以達到的叫做電場 (electric field)。在一個帶電物體的電場裏某一點的地方，假想一

個單位陽電荷放在那裏，它受到的力（力是矢量 vector，有大小，有方向）叫做電場強度（electric field intensity）。一個電場裏，各點的電場強度（大小和方向）都是相等的，叫做均強電場（uniform electric field），各點的電場強度不相等的，叫做不均強電場（non-uniform electric field）。

**2.2 電勢** 解釋一個帶電物體或者一個電荷的運動，常常用電勢（electric potential）和電勢差（difference of electric potential）兩個名詞。假使兩個帶電的物體  $A$  和  $B$ ，把一根金屬線連接起來，若是有電的流動，那末物體  $A$  的電勢和物體  $B$  的電勢一定不同，我們說  $A$  和  $B$  兩個物體有電勢差。若是陽電從  $A$  流到  $B$  上去\*，我們說  $A$  的電勢比  $B$  高；反過來講，若是陽電從  $B$  流到  $A$ ，我們說  $B$  的電勢比  $A$  高。上節裏講的玻璃棒和綢布，摩擦以後，玻璃棒和綢布就有電勢差，電子就從玻璃棒跑到綢布上去，或者說陽電從綢布跑到玻璃棒上去。玻璃棒的電勢比綢布高。但是這種電的流動是暫時的。瞬時之間，棒和綢布的電勢已經平衡，沒有電勢差，電就不能流動。電池和發電機，可以繼續維持電勢差，電就可以繼續流動。一個帶電的物體，從電場裏某一點地方移動到另一點地方，這兩點地方一定有電勢差。一個

---

\* 以前的觀念，把電分成陰陽兩種，都可以自由流動。自從電子論成立以後，才知道只有帶陰電的電子可以自由流動，陽電是不能流動的。但是在習慣上和許多書籍上，仍沿用舊說，倘使更改，困難很多。本書不便獨異，所以有時仍採用舊說，以免混淆。（參閱第 2.8 節 第 12 頁。）

帶陽電的物體若是從  $A$  點移動到  $B$  點， $A$  點的電勢一定比  $B$  點高。

電勢可以用氣體的壓力 (pressure) 來做譬喻。假使兩個箱子裝着不同壓力的氣體，把一根管子通連起來，氣體就從壓力高的箱子流到壓力低的箱子裏去。氣體繼續的流直到兩個箱子裏的壓力平衡，方才停止。電勢也可以用水面位 (water level) 來做譬喻。高面位的水一定流到低面位去。要維持水的流動，須要維持水的面位差 (difference of level)。若是把氣體或者水當做電，氣體壓力和水面位相當帶電物體的電勢。氣體的壓力差和水的面位差相當電勢差。

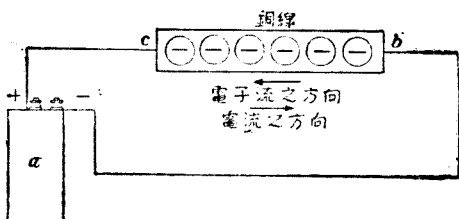
上面用的譬喻，我們叫它類喻 (analogy)，類喻是把平常習見的情形來解說一種難於了解的問題。給研習的人一個啓示。但是類喻用的例子和所喻的問題，並不是完全相同的。例如帶電的物體有電場，盛氣的箱子，四週並沒有什麼氣場。後面用類喻的地方很多，都是用來做一個啓示，切不可拘泥。

**2.3 零電勢正電勢和負電勢** 講到水面位的高低，我們揀一個水面位做參攷而或者零面位 (zero level)，平常用海的面位當做零面位。比海面位高的當做正面位，比海面低的當做負面位。在電學上，把地球的電勢當做零電勢 (zero potential)，電勢比地球電勢高的當做正電勢 (positive potential)，比地球電勢低的，當做負電勢 (negative potential)。陽電可以從一個正電勢的物體流到地球上去，陽電也可以從地球流到一個負電勢的

物體上去。

**2.4 等勢面** 在一個電場裏，有相同電勢的各點是在一個面上的。這種面叫做等勢面(equipotential surface)。一個電場，可以分成無數的等勢面。電在同一等勢面上是不能從一點移動到另一點地方的。

**2.5 電動勢** 一個電池(cell)，像圖 2.1 裏的 *a*，因為裏面有



化學作用，可以在兩個端鈕 (terminal) 之間繼續維持一個電勢差。我們就說電池裏發生一個電動勢

圖2.1 接在電池上銅線裏電流和電子流的方向。 (electromotive

force)。無論什麼設置(device)能夠維持一個端鈕的電勢比另一個端鈕高，這種設置一定能夠發生電動勢。兩個端鈕間的電勢差也叫做電壓(voltage)。假使把一根銅線接在電池兩個端鈕之間，像圖 2.1，因為端鈕的電勢有正負，所以線的 *b* 端是負電勢，*c* 端是正電勢，電子從 *b* 端流到 *c* 端。電池若是不壞，它可以繼續發生電動勢，繼續維持端鈕間的電勢差，電子也繼續的經過銅線電池的內部而流動。

**2.6 電勢差和電動勢的比較** 電勢差和電動勢好像是一樣的，實在完全是兩件事。把電池來講，電池裏邊有電動勢，端鈕之間有電勢差。電勢差和電動勢非但數值不等，方向也相反。用屏

水機來做一個類喻，機內部的作用可以把水的位面升高，維持一個水面位差，使水繼續的流動。但是機的作用，一部分用來造成水面位差，一部分是用來抵抗機內部因水流過遇到的摩擦。電池裏電流通過時也有電的摩擦。電動勢減去摩擦部分，才是電勢差。沒有電流的時或者說外邊沒有接銅線的時候，電勢差才等於電動勢，不過方向和反罷了。

電池兩個端鈕的電勢，從電池外部的電路看起來，正端的電勢比負端高，電勢的方向是從正端到負端的；但是從電池內部的電路看起來，電動勢的方向是從負端到正端，負端的電勢比正端高。所以電動勢的方向和電勢差的方向是相反的。

2.7 電流 電子在銅線裏的流動，照上面的講法，要有兩個條件：第一，電池兩端之間一定要有電勢差，並且電池裏一定要有電動勢來維持這個電勢差。第二，一定要有一根線把兩端接起來，線和電池本身完成一個通流的(closed)電路(electric circuit)，電子才可以循着電路而流動。

在線上無論什麼地方，取一個截面(cross section)，和電子流動的方向垂直，那末每秒鐘流過這個截面的電子數叫做電子流(electronic current)。電子流的大小是同電池裏的電動勢和構成全電路的物料有關係的。

一只電燈或者一只電動機(motor)，只要兩端有繼續的電勢差或者電壓，電子就可以流動。電子流的大小同電壓和構成電路用的物料是有關係的。



平常說的電流(electric current),它的方向和電子流的方向恰正相反(參閱 2.8節)。一個量度得出來的電流需要很多很多多電子的流動。這許多電子都在比較電子大得多的原子間的空隙裏穿過。

平常在電線裏,電子流動的速度(velocity)實在是很慢的,每分鐘不過幾個厘米(centimeter)。但是流動的數目很多很多。線裏的電子,好像一羣蚊蟲,每個蚊蟲,四面的竄動,整羣的蚊蟲,又向一個方向行動。電子流動速度相當整羣蚊蟲行動的速度。每個電子竄動的速度,個個不同,時時不同,可以從零到很大的數值。

或許有人要問爲什麼無線電,和電報,電話傳遞電訊瞬息萬里呢?要知道這不是電子流動的速度,而是電子流動時候發出來的電磁波(electromagnetic wave)的速度。電磁波在真空裏(空氣裏也差不多)的速度是每秒鐘三十萬千米。循着線走的電磁波,速度也差不多,所以線一端的動作,瞬息之間,可以傳遞到很遠很遠的地方。

**2.8 電子流和電流的方向** 圖2.1 指示的電子流是從電池的負端經過銅線,電池的內部,流到電池的正端。發電機和別種電工設置(electric device),都是一樣,電子是從負電勢的一端流到正電勢的一端。這叫做電子流,它的方向,圖 2.1 裏已經標明。但是在電子論沒有發明以前,大家都把電流當做水流一樣。從高電勢的地方流到低電勢的地方,同時把電池的兩端,一個叫它正,

一個叫它負，又假定正端的電勢比負端高，所以電是從正端流到負端。圖 2.1 裏電流的方向是從  $c$  到  $b$ ，和電子流的方向，恰正相反。

本書裏無論講到電池或者發電機，電流都是從正或者高電勢的一端流到負或者低電勢的一端的。符號(+)和(-)是用來表示兩端的電勢的。所以電流也可以說從(+)流到(-)。

不變方向的電流叫做直流(direct current)。大小不變的直流叫做恆定直流(continuous direct current)。假使直流大小的變更有週期的，叫做脈動電流(pulsating current)。電池供給的電流可以說是恆定直流。其它發生直流的方法，在本叢書直流發電機裏還要詳細講述。

電流方向的變換，若是有週期的，叫做交變電流，簡稱交流(alternating current)。一根有交流的線，一定有一個時時交變方向的電動勢。但是在無論什麼瞬時(instant)，交流也同直流一樣，是從正或者高電勢的一端流到負或者低電勢的一端。交流的發生和變換(transformation)，在本叢書交流發電機和變壓器裏有詳細的講述。

**2.9 導體** 許多材料，像銅，鐵，鋁(aluminium)，銀，金等，電流通過是很容易的；還有許多材料，像瓷，橡膠(rubber) 絲一類的，電流是不容易通過的。照電子論的講法，金屬物體容易通過電流的理由是因為金屬物體裏的原子吸引電子的本領很弱，大多數的電子，在金屬物體裏，是很自由的。一有電力或者電勢

差加上去，電子就流動。電子愈容易流動，物體通過電流的本領也愈大。容易通過電流的物體叫做導體(conductor)。

在平常溫度之中，金屬物體，像銅，鐵等，體內的電子，沒有一定方向的竄動。一有機會，就被缺少電子的原子吸引去補足它缺少的電子。導體上有了電勢差，電子就立刻向同一方向從導體的負電勢端流到正電勢端。

依照導體通過電流的本領，物體可以排成下列的次序。銀，銅，金，鋁，鋅(Zinc)，黃銅，含磷青銅(Phosphor bronze)，鉑(Platinum)，錫，鎳(Nickel)，鉛，德銀(German Silver)，鋼，鐵，水銀，碳(Carbon)，和水。銀和金的價值太貴，不值得用來做導體的。銅的產量很多，價值也不貴，普通用的導體，都是用銅來做的。長距離的輸電線(transmission line)用鋁的很多。

**2.10 絕緣體或非導體** 阻止電流通過的物體叫做非導體(non-conductor)或者絕緣體(insulator)。導體和絕緣體的區別，並沒有一定的界限。許多物體，在某一種應用上是絕緣體，在別一種應用上，它是導體。還有許多物體，在某一種溫度之中，是很好的絕緣體，但是溫度增高，它就變成很好的導體。

照電子論的講法，一個完全絕緣體(perfect insulator)是一種物體，它的原子，在無論什麼情形之下，不會失掉它的電子的。這是一個理想的絕緣體。普通用的絕緣體，電力加上去，電子就有位移(displacement)，電力除去，電子立刻回到它原來的位。電子和原子之間，好像有彈性的東西把它們聯繫牢的。假

使所加的電力過大，電子的位移超過它可能回到它原來位置的時候，電子就脫離了原子的束縛，變成自由電子，絕緣體就破裂變成功導體。

玻璃，瓷，橡膠，雲母(mica)，石蠟(paraffin) 浸透的乾木塊，紙，硬化纖維(vulcanized fiber)，石棉(asbestos)，純土瀝青(pure asphalt)，空氣，和乾燥的油都是很好的絕緣物。還有一種絕緣化合物，叫做『焙克來』膠(bakelite)，電機製造上，用得很多。在電機工程(Electrical Engineering)上，絕緣體是重要的。不要電流通過的地方，都用絕緣體來隔離。像電報，電話，電燈和輸電功率(electric power)的線，都用瓷或者玻璃製的絕緣體來裝置，使電線和電桿隔離，線裏的電流不能夠流到桿上去。

2.11 電阻 電阻(electric resistance)是物質阻止和抵抗電流通過的一種特性，各種物質阻止和抵抗的本領不同，所以電阻也不同。非導體的電阻比導體大。物質都有電阻，沒有一種物質是完全沒有電阻的。電路裏電流的大小和電路兩端的電勢差成正比，但是和兩端間的電阻成反比。換一種說法，若是兩端的電勢差增加，電流也增加，若是兩端間的電阻增加，電流就減小。

在導體裏流動的電子，數目很多。原子間的空隙，雖比電子大得多，但是電子竄動的方向，沒有一定，流動的時候，同別的電子或者原子或者分子碰撞的機會很多。這種碰撞，使電子失去它一部份的能量(energy)。好像水在水管裏流動的時候，水和管

間的摩擦(friction),使水失去一部份能量一樣。失去的能量變成散逸的熱能(heat energy)。管子愈長摩擦愈大,但是管子垂直水流的截面面積增大,摩擦就小。導體的電阻,和水管裏的摩擦一樣,使電子失去能量,失去的能量也變成熱能,把導體的溫度增加。同一材料,同一大小(指截面面積)的導體或者輸電線,長的電阻比短的大;同一材料,同一長短的導體或者輸電線,截面大的電阻比小的。換一個說法,導體或者輸電線的電阻是和長度成正比,和垂直電流截面的大小成反比。就是長短截面大小都是一樣,電阻也可以不同,要看用的是什麼材料。各種材料所有的電阻,相差可以很大。材料,長短和大小都是一樣,還要知道導體的溫度是不是一樣,溫度不同,電阻也是不同的。(參閱第15.7節)。

## 第二編 動電學

### 第三章

## 發生動電的方法

3.1 電學的分類 不流動的電叫做靜電 (static electricity)。像把玻璃棒同綢布或者火漆(sealing wax)同絨布(flannel)摩擦發生的電，停止在摩擦的地方，不能流動的。研究靜電的學問叫做靜電學(Electrostatics)(參閱第三編)。

流動的電叫做動電(kinetic electricity)。像電池和發電機發生的電。電池和發電機裏有電動勢，可以維持一個電勢差，使電繼續的流動。研究動電的學問叫做動電學(Electrokinetics)。

3.2 發生動電或者電流的各種方法 要電流動，先要有電動勢，才可以維持一個電勢差。現在用的方法，不外乎下邊講的幾種：(一)利用化學作用，像電池；(二)利用發熱作用(heating effect)，像溫差電偶 (thermocouple)；和(三)利用磁感應(magnetic induction)，像直流和交流發電機。

3.3 原電池 原電池(primary cell)也叫做伏打電池(voltaic cell)或者賈法尼電池(Galvanic cell)，是利用化學作用來

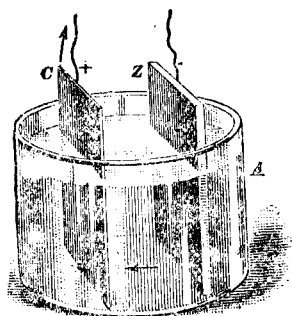


圖3.1 一個簡單的伏打電池

發生電動勢的。圖 3.1 是一個簡單的伏打電池 A 是一個玻璃瓶，裏面裝的液體叫做電解液 (electrolyte)。在電解液裏，放一塊銅片 C 和一塊鋅片 Z，C 和 Z 叫做電極 (electrode)。

伏打電池的電解液是稀硫酸 (diluted sulphuric acid)。把銅片和鋅

片浸入電解液裏，同時用一根金屬線把兩個極連接起來，就有電流。線裏的電流是從銅極到鋅極，但是電解液裏的電流是從鋅片流到銅片。所以銅是陽極 (positive pole) 但是負片，鋅是陰極 (negative pole) 但是正片。電流通過的時候，浸在液裏的銅片，面上就有一層氫氣泡，鋅片漸漸的耗蝕，液裏就有硫酸鋅 (zinc sulphate)。

簡單伏打電池的電流降落很快。因為銅片推積的氫泡發生一個反電動勢 (counter electromotive force) 減低原來的電動勢，並且增加電池內部的電阻或者內電阻 (internal resistance)，使電流降落。這種現象叫做電池的極化 (polarization)。要極化減小，電池的電流不變，普通用的有兩種方法。一種叫做化學方法 (chemical method)，一種叫做電化方法 (electrochemical method)。化學方法是把一種氧化劑 (oxydizing agent) 放在負片的四周，使極化發出來的氫和氧化劑化合成水，下邊講的勒克蘭社電池 (Leclanché cell)，就用這種方法。電化方法，

用兩種溶液(solution)，兩個片的四周各放一種溶液。極化發出來的氫立即和負片四周的溶液化合，極化的可能差不多沒有了。丹聶爾電池(Daniel cell)就用這種方法。因為化學方法用一種溶液，電化方法用兩種溶液，所以也叫做單液(single fluid)和兩液(two fluid)電池。

**3.4 局部作用** 製造上用的鋅大多含鐵粒和碳粒等雜質。這種鋅片浸入稀硫酸溶液裏，雜質和鋅片成許多小電池。一方面耗蝕鋅片，一方面把鋅片罩上一層不導電的氣泡。這種現象叫做局部作用(local action)。去除局部作用只要把鋅片先放在水銀裏。這種方法，叫做汞齊化(amalgamation)。

**3.5 常流和暫流電池** 不常用的或者用的時間很短的電池，極化發出來的氣可以漸漸的擴散(diffusion)，或者用氧化劑來去除它，電鈴，家用電話，都可以用這種電池。因為不是常用的所以叫做暫流電池(open circuit cell)。勒克蘭社電池就是這一種。常用的電池要繼續不斷的供給電流，那末要用常流電池(closed circuit cell)。這種電池最好沒有極化，丹聶爾電池和鉛電池(lead cell)是最適宜。

**3.6 丹聶爾電池** 圖 3.2 是一個丹聶爾電池，Z 是一根汞齊化的鋅棒，浸在硫酸鋅(zinc sulphate)溶液或者很淡的硫酸溶液裏。A 是一個多細孔的杯(porous cup)用來裝溶液的。J 是一個玻璃瓶，裏面盛着濃的硫酸銅(copper sulphate)溶液和一片銅皮 C。多孔杯的用處，一方面可以使杯裏的溶液不和外



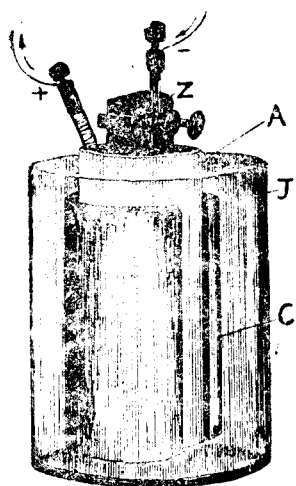


圖3.2 丹遜爾電池。

邊的溶液混合，一方面可以把極化發出來的氫和硫酸銅仍舊有化學作用。若是把銅和鋅兩個極用鎳連起來，鎳裏的電流就從銅極流到鋅極。在多孔杯裏，鋅和硫酸的化學作用成功硫酸鋅和氫。氫和玻璃瓶裏的硫酸銅成功硫酸和銅。銅是陽離子帶着陽電，所以跑到負的銅片濺積 (deposit) 在片上。

3.7 勒克蘭社電池 勒克蘭社電池是一個單液電池。用氯化銨 (sal-ammoniac) 做溶液。圖 3.3 是

一個勒克蘭社電池。鋅棒 Z 和碳塊 C 是兩個電極，碳塊是陽極，鋅棒是陰極。碳塊是放在一個多細孔杯 A 的裏邊，用碳屑和二氧化錳 (manganese dioxide) 把它塞牢。玻璃瓶裏裝的是氯化銨溶液。鋅和氯化銨的化學作用發生氫。氫再和二氧化錳化合成三氧化二錳和水，這樣把極化作用去除了。這種電池的初電動勢 (initial electromotive force) 有 1.5 伏 (volt)。使

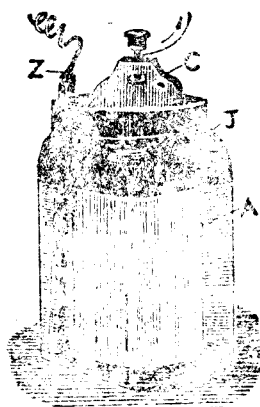


圖3.3 勒克蘭社電池。

### 第三章 發生動電的方法

用的時候，因為發生的氫，二氧化錳來不及完全氧化它，仍舊有極化，電動勢慢慢的降落。但是電路開啓後，停了一會，可以恢復它的原狀。

3.8 乾電池 乾電池(dry cell)實在就是勒克蘭社電池。圖

3.4 裏的 Z 是乾電池外邊的鋅皮圓筒也是乾電池的陰極。筒的裏邊和底部，襯一層富有吸收性的物料像吸水紙，稀布，或者澱粉(starch)，麥粉，焦石膏(plaster of Paris)調成的漿糊。筒的中央放一根碳棒 C，這是乾電池的陽極。陽極的端鈕就裝在碳棒的上面，陰極的端鈕，裝在鋅皮筒上。去極化劑(depolarizer)是用碾



圖 3.4 乾電池。

碎的焦煤(coke)，石墨(graphite)和二氧化錳的混合物做成功的。塞在碳棒和鋅皮筒之間。吸收性物料和去極化劑都用氯化銨和氯化鋅(zinc chloride)的溶液浸透。電池的上部是用一種不進濕份的混合物來封閉的，同時也用來保持漿糊裏的水份。

一個新的乾電池，它的電動勢大約是 1.5 到 1.6 伏。擱置不用，幾個月後，不過降落 0.1 伏。假使電動勢降落得很快，那末它的內部一定腐敗或者有別的問題。乾電池的內電阻，新的時候不過 0.1 歐姆(ohm)，一年以後，也許增加到 0.5 歐姆，但是使用時候的極化，可以增加它的內電阻，使電動勢降落得很多。

3.9 標準電池 電工量度(electrical measurement)和校

準(calibration)工作所用的電池，它的電動勢要穩定準確。普通用的有兩種；一種叫做葛拉克標準電池 (Clark standard cell)，一種叫做衛斯吞(Weston)標準電池。圖 3.5 是一個衛斯吞

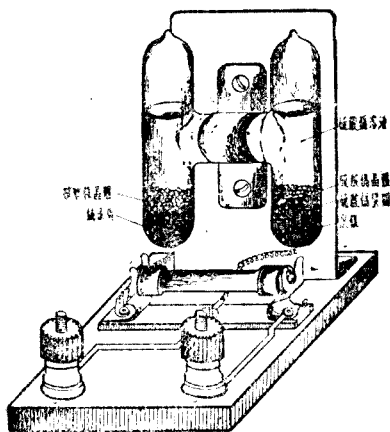


圖3.5 衛斯吞標準電池。

吞電池。陽極是水銀和硫酸鎘的漿糊，陰極是汞齊化的鎘 (cadmium)。電解液是硫酸鎘。這種電池，嚴格的照規定方法做起來，它的電動勢在百分溫度計 20 度時候是 1.01835 伏。假使溫度變更，電動勢的變更很小，差不多都是恆定的。

葛拉克電池和衛斯吞電池差不多一樣，不過把用鎘的地方改用鋅。陰極是汞齊化的鋅，電解液是硫酸鋅。它的電動勢在 15°C. 的時候是 1.4328 伏。假使溫度變更，它的電動勢可以用下面的公式來計算的。

$$\text{電動勢} = [1.4328 - 0.0012(t - 15)] \text{伏,}$$

$t$  是用這種電池時候百分溫度計指示的度數。

用標準電池有一點應當特別當心的，就是標準電池的電流要很小很小，幾個微安培 (microampere) 也可以使電池受傷。電流大些，電池的內部就起一種恆久的化學變化，影響它的電動

勢。所以標準電池的電動勢，切不可把伏特計(voltmeter)來量度的。

**3.10 蓄電池** 原電池是利用化學作用直接發生電動勢的。上幾節裏講的幾種電池都是原電池。還有一種電池，也用兩個電極，一種電解液，但是先要通過電流，把兩個極的化學性質改變過，才可以像原電池一樣發生電動勢。這種手續，就叫做充電(charge)。這種電池叫做蓄電池(storage cell)。換句話說，原電池是把化學能量直接變成電能(electric energy)，蓄電池是先把電能變成化學能量，再從化學能量變成電能。充電是把電能儲蓄起來。

普通用的蓄電池有兩種：一種是普隆特鉛電池(Plante lead cell)，一種是愛迪生鹼液電池(Edison alkaline cell)。普隆特電池的極板都是鉛做的，電解液是硫酸。充電以後，陽極變成二氧化鉛，也叫做紅鉛(lead peroxide)。陰極變成海綿狀的鉛。若是用一根有電阻的線把它兩個極接連起來，就有和充電時相反的化學作用，發生的電動勢和電流也同充電時的電流方向相反。這叫做放電(discharge)。極板上的化學作用沒有用完的時候，電流可以繼續供給。用完以後，再行充電，仍舊可以供給電流。這一點蓄電池和原電池不同。

鉛蓄電池的電動勢差不多是2伏，它的內電阻很小很小，計算的時候，可以略去。它的輸出量(output)是用安培小時(ampere hour)做單位的。放電的時間大都用八小時來計算。一個

電池有 120 安培小時的輸出量，就是說這個電池的放電電流可以有 15 安培，繼續放電八小時。安培小時乘上電池的電壓伏數（因為內電阻很小，電動勢和電壓是相等的），就是電池的電能，單位是瓦特小時 (watthour)。

愛迪生電池的兩極，一個是鎳 (nickel)，一個是鐵，電解液是鹼性的氫氧化鉀 (potassium hydroxide) 溶液。充電以後，陽極是二氧化鎳 (nickel dioxide)，陰極是純鐵。它的電動勢大約是 1.2 伏，內電阻也很小。它的輸出量是把五小時來計算的，一個 150 安培小時的電池，可以放電 30 安培繼續五小時。

關於蓄電池的構造和使用，本叢書另有專冊講述，這裏講的，不過一個大概罷了。

幾個電池連接起來叫做電池組 (battery)，幾個蓄電池連接起來，叫做蓄電池組 (storage battery)，幾個原電池連接起來，叫做原電池組 (primary battery)。

3.11 溫差電偶 把兩根不同的金屬線兩頭都連接起來，一個接頭 (junction) 的溫度增高或者減低，就可以發生電動勢。這就叫做溫差電動勢 (thermoelectric electromotive force)。假使把沒有加熱的接頭或者閑接頭 (free junction) 折開，接一隻電流計 (galvanometer)，就可以量度它的電流。無論那兩種金屬線，像銅和康銅\* (constantan)，或者銅和鐵連接起來，加熱以後，可以發生電動勢的裝置，叫做溫差電偶 (thermoelec-

---

\*康銅是一種合金，裏面含銅百分之六十，鎳百分之四十。

tric couple)。西文“thermo”這個字是從希臘來的。它的意義是「熱」。溫差電偶電動勢的方向，是看那一個接頭加熱使它的溫度增高而定的。假使電偶的兩個接頭叫它甲接頭和乙接頭，甲接頭的溫度比乙接頭高，電動勢是一個方向，若是把甲接頭的溫度減到比乙接頭低，電動勢的方向就相反。要增加溫差電偶的電動勢，只要把幾個溫差電偶串聯(series)接起來。

溫差電偶最大的應用是量度高溫度，像鎔爐(furnace)的溫度。這種儀器叫做溫差電偶高溫計(thermoelectric pyrometer)。高溫計裏的電偶是用鉑(platinum)和鉑銻(iridium)合金線做的，一個接頭裝在石英(quartz)管裏，放在鎔爐內，可以量度到百分溫度計一千二三百度。另一個接頭，就是閑接頭，放在空氣裏，同屋內的溫度是一樣的。因為屋內的溫度常常變動，所以高溫計裏有一種補償裝置(compensating device)來調整它。電偶裏的電流是用一個靈敏的安培計(ammeter)來量度的。安培計上的標度(scale)，先用知道的溫度來校準，所以安培計的讀數(reading)是溫度不是安培。

## 第四章

# 電學上用的單位

4.1 電的量度 電是沒有方法直接量度的，只可以量度它的效應(effect)和它的功量(work)。最便利的是量度它的化學效應，磁效應和熱效應。電量計(voltmeter)或者庫倫計(coulombmeter)是用來量度化學效應的一種儀器。一個電量計有兩個同樣的金屬極，一種電解液。電流通過的時候，一個極的質量漸漸消蝕，澱積到另一個極上去。澱積的數量同電流的大小，時間的長短成正比。電流和時間的乘積叫做電量(electric quantity)。

銅解電量計(copper voltameter)的兩個極是用銅片做的，電解液是硫酸銅。電流通過的時候，電解液就分解(decompose)成銅離子和硫酸基離子。帶陰電的硫酸基離子和陽極的銅化合物仍舊成硫酸銅，所以電解液的濃度(concentration)是不變的。帶陽電的銅離子跑向陰極就澱積在陰極的片上。這種化學的過程，叫做電解(electrolysis)。陰極上澱積的銅的數量同電量成正比。

比較正確的工作用銀解電量計(silver voltameter)。銅解電量計的陽極是用純銀片做的，陰極是一只鉛製的碗，電解液是

硝酸銀(silver nitrate)。電解的時候，硝酸銀分解成銀離子和硝酸基兩種離子。硝酸基離子和陽極的銀化合，仍舊成硝酸銀，銀離子跑向陰極，就澱積在銀碗底裏。澱積的銀的數量同電量成正比。

上面講的兩種電量計，因為電量就是電流和時間的乘積，所以也可以用來量度電流。普通量度，銅解電量計的準確度(accuracy)已經很夠，但是精密的量度，要用銀解電量計。

4.2 電流的單位 電流的單位在實用制(practical system)上是安培(ampere)。安培的大小是根據國際間的協定成立的。經過了幾次的修改，又重經國際電工技術委員會(International Electrotechnical Commission)的協定，是用銀解電量計來規定的。所以實用制的安培也叫做國際安培(international ampere)。假使一個恆定(constant)電流，通過硝酸銀的溶液，能夠每秒鐘澱積 0.00111800 克的銀，叫做一個國際安培。安培的千分之一叫做毫安培(milliampere)，安培的百萬分之一叫做微安培(microampere)。安培的省寫是安。

實際應用，電流並不是用電量計來量度的，電量計不過是國際間的一種協定罷了。平常用來量度電流的儀器叫做安培計(ammeter)。安培計的種類很多，交流司路屏(switchboard)上用的，大都是轉鐵安培計(moving iron ammeter)。試驗室裏用的，比較準確，直流用永久磁轉卷安培計(permanent magnet moving coil ammeter)，交流用力測安培計(electrodnyamo-



meter ammeter), 熱線安培計(hot wire ammeter)和溫差電偶安培計(thermocouple ammeter)直流交流都可以用。校準工作, 直流用電勢計(potentiometer), 交流用愷爾文電流電秤(Kelvin current balance)。關於安培計的構造和用法, 本叢書另有電工儀器一書講述。

接安培計應當把安培計同要量的電路或者導體串聯接起來, 使經過電路或者導體裏的電流也經過安培計。計上的讀數(reading), 安培或者毫安培, 是用一個可以轉動的針來指示的。

**4.3 電量的單位** 電量的單位在實用制上是庫倫(coulomb), 省寫作庫。庫倫的大小, 也同安培是國際協定的, 所以也叫做國際庫倫(international coulomb)。一個國際庫倫是一個國際安培的恆定電流一秒鐘傳遞的電量。

電量可以用上面講的電量計來量度。微量的電量, 要用衝擊電流計(ballistic galvanometer)來量度。

**4.4 電阻的單位** 國際歐姆(international ohm)或者歐姆(ohm)是國際間協定的電阻實用制單位。一個國際歐姆是一個長 106.300 厘米, 質量 14.4521 克, 均勻截面的水銀圓柱在熔冰溫度時對於一個恆定電流通過時的電阻。歐姆的省寫是歐。實用的標準電阻是用錄卷(coil)來做的, 叫做電阻錄卷(resistance coil)。把幾個歐姆值不同的電阻錄卷裝在一個箱裏, 箱的上面, 裝一個晷盤(dial)或者插頭(plug), 叫做電阻箱(resistance box)。

實際應用的時候，歐姆這個單位，有時覺得太大，有時覺得太小，用起來很不便當。所以大的電阻，用兆歐姆(megohm)做單位，一個兆歐姆等於一百萬歐姆；小的電阻用微歐姆(micro-ohm)做單位，一個微歐姆是一個歐姆的百萬分之一。

量度電阻，最普通的方法是用惠斯登電橋 (Wheatstone bridge)。很大和很小的電阻，惠斯登電橋是不適用的。電路的絕緣電阻(insulation resistance)要用歐姆計(ohmmeter)或者高阻計(megger)量度的。很小的電阻大都用愷爾文電橋(Kelvin bridge)來量度。

4.5 電勢差電壓和電動勢的單位 電勢差，電壓和電動勢的單位是一樣的，都叫做伏特(volt)。伏特也是國際協定的，所以也叫做國際伏特(international volt)。假使一個導體兩端間的電阻是一個國際歐姆，導體裏的電流是一個國際安培，那末這個導體兩端的端勢差是一個國際伏特。仟伏特(kilovolt)是一個大的電勢差單位等於一千伏特，小的單位毫伏特(millivolt)是一個伏特的千分之一，微伏特(microvolt)是一個伏特百萬分之一。伏特的省寫是伏。

量度電勢差或者電壓用伏特計(voltmeter)。伏特計的構造和式樣同安培計是差不多一樣的，不過用的電阻，大小不同，接法不同罷了。伏特計也有轉鐵，永久磁轉卷，力測等種類。校準工作，直流用電勢計。熱線和力測伏特計，用直流或者交流來校準。靜電伏特計(electrostatic voltmeter)，在實際應用上，不過用

來量度高電壓，一定要用交流來校準的。很高的電壓是用電花隙 (spark gap) 來量度的。本叢書關於伏特計的構造和電壓的量度方法 另有專冊講述。

用安培計量度電流，要把安培計和導體或電路串聯接起來。用伏特計量度一個導體或者一個電路兩端間的電壓，伏特計一定要跨接 (across) 兩端。

**4.6 電導** 一種物質導電的本領，叫做電導 (conductance)。電導是電阻的倒數 (reciprocal)，它的單位是姆歐 (mho)，姆歐是歐姆兩字的倒寫。假使一個導體的電阻是 10 歐姆，它的電導是  $1/10$  姆歐；假使電阻是  $1/2$  歐姆，電導是  $1 \div \frac{1}{2} = 1 \times \frac{2}{1} = 2$  姆歐；假使電阻是 12 歐姆，電導是  $1/12$  姆歐。反轉來講，電阻也是電導的倒數。所以，假使電導是  $1/12$  姆歐，電阻是  $1 \div \frac{1}{12} = 1 \times \frac{12}{1} = 12$  歐姆；假使電導是 12 姆歐，電阻應當是  $1/12$  歐姆。姆歐的省寫是姆。

電導不是可以直接量度的，要先量電阻，取它的倒數。很大和很小的電導，惠斯登電橋是不適用的。

**4.7 電能電功和電功率的單位** 能 (energy)，功 (work) 和功率 (power) 的單位，機工和電工是相同的。能是做功的本領，物理上的性質是一樣的所以它們的單位也是一樣的。功率是做功的快慢，和功是不同的，所以它們的單位也不同。用一個簡單的譬喻來講，有兩件相同的工程，需要的功的數量是相同的，甲要一個月完成，乙要三個月完成，但是功的數量，並不因為時

間的長短而增減，所以甲和乙所做的功是一樣的。功率是做功的快慢，換句話說，是一個單位時間裏做的功。假使把月做時間的單位，那末甲每一個單位時間裏做的功，比乙每一單位時間裏做的功大三倍，或者說乙的功率比甲的功率大三倍。在電工方面，發電機，電動機，和別種電工用具的額定量(rated output)是用功率來計算的。功率大的電機，一個單位時間可以做的功多，可以供給的電能也多。電費是用總共供給的能來計算的，和功率的大小是沒有關係的。

$$\text{功率} = \frac{\text{功}}{\text{時間}} = \frac{\text{能}}{\text{時間}}$$

$$\text{功} = \text{能} = \text{功率} \times \text{時間}。$$

電功或者電能的單位是焦耳(joule)。焦耳是一個庫倫通過有一個伏特電勢差所做的功。焦耳的省寫是焦。一個電池或者發電機供給的電能是它的電動勢和電量的乘積。一個導體或者電路消耗的電能是等於電勢差和通過電量的乘積。但是電量等於電流和時間的乘積，所以，

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

電功率的單位是瓦特(watt)。一個瓦特等於每秒鐘供給或者消耗一焦耳電能的功率。瓦特的省寫是瓦。大的單位叫做仟瓦(kilowatt)。一個仟瓦等於一千瓦。

$$\begin{aligned} \text{瓦特} &= \frac{\text{焦耳}}{\text{秒}} = \frac{\text{伏特} \times \text{安培} \times \text{秒}}{\text{秒}} \\ &= \text{伏特} \times \text{安培}。 \end{aligned}$$

焦耳 = 伏特  $\times$  安培  $\times$  秒 = 瓦特  $\times$  秒。

令  $P =$  功率瓦特數，

$V =$  電勢差伏特數，

$I =$  電流安培數，

則  $P = VI$  伏安或瓦，

這是一個重要的公式，應用的地方很多，應當牢記。

量度電功率用瓦特計(wattmeter)。瓦特計的構造和力測伏特計或者力測安培計，大致相同的。瓦特計有兩個錄卷，一個叫做電勢錄卷(potential coil)，一個叫做電流錄卷(current coil)。每個錄卷有兩個端，電勢錄卷的兩個端是和要量的負載(load)跨接，電流錄卷的兩個端是和要量的負載串接。瓦特計的電勢錄卷和電流錄卷是把110伏和5安做標準的。較高的電壓，直流用串接的電阻，交流用電勢變量器(potential transformer)，較大的電流，直流用並接的分流器(shunt)，交流用電流變量器(current transformer)。

【例題1】 一個電燈電路，它的電壓是110伏，電流是5安，問功率是多少瓦？

【解】 電流  $I$  是5安，電壓  $V$  是110伏，所以電功率  $P = 110 \times 5 = 550$  瓦。

【例題2】 假使供給一個電動機的功率是660瓦，電壓是110伏，問電流是多少安？

【解】 功率  $P = 660$  瓦， $V = 110$  伏，所以  $660 = 110 \times I$ 。

$$I = \frac{660}{110} = 6 \text{ 安。}$$

【例題 3】 假使供給一個電燈電路的功率是 460 瓦，電流是 4 安，問電壓是多少伏？

【解】 功率  $P = 460$  瓦， $I = 4$  安，所以  $460 = V \times 4$ ，

$$V = \frac{460}{4} = 115 \text{ 伏。}$$

電功或者電能的單位焦耳既然是伏特  $\times$  安培  $\times$  秒，伏特  $\times$  安培又是瓦特，所以焦耳也等於瓦特  $\times$  秒，又叫做瓦特秒 (watt-second)，簡寫作瓦秒。瓦特小時 (watt-hour) 是一個較大的電功或者電能的單位，等於 3600 瓦秒，因為一小時等於 3600 秒。瓦特小時的省寫是瓦時。實際應用上，瓦特這個單位還嫌小，再大的單位是仟瓦特小時 (kilowatt-hour)，省寫作仟瓦小時。一個仟瓦小時等於 1000 瓦時。

令  $W =$  電功瓦時數

$P =$  電功率瓦數

$W' =$  電功仟瓦小時數

$P' =$  電功率仟瓦數

$t' =$  時間小時數

那末  $W = Pt$  瓦特……………(1)

$W' = P't$  仟瓦小時……………(2)

量度電功或者電能用瓦特小時計 (watthour meter)，省稱瓦時計。一個瓦時計的主要部份是：(1) 一個小型電動機。電動機

有換向式(commutator type),水銀和盤式(mercury and disc type),或者感應式(induction type)。(2)一個掣動裝置(braking system),用一種非磁性金屬物(non-magnetic metal)像鋁做一個圓盤(disc)。圓盤裝在電動機的轉軸上。盤的外緣嵌在一個或者兩個永久磁鐵的兩極間。(3)一組齒輪的裝置,指示圓盤的轉數。轉數和電能的多少成正比。校準好的瓦時計,計上顯示的數字,就是用到電能的仟瓦小時數,或者佰瓦小時數(hectowatt hour)。瓦時計也有兩個錄卷;一個是電勢錄卷,應當和要量的負載跨接,一個是電流錄卷,應當和要量的負載串接。關於瓦時計的構造和使用方法,本叢書另有專冊講述。

【例題 1】 一個電動機的功率是 1000 瓦,(a)問 5 小時所需的瓦時是多少?同時間裏,所需的仟瓦小時是多少?

【解】 (a) 功率  $P = 1000$  瓦,  $t = 5$  小時,  $W = 1000 \times 5 = 5000$  瓦時。

(b) 因  $1000$  瓦 = 1 仟瓦,  $t = 5$  小時,  $W = 1 \times 5 = 5$  仟瓦小時。

瓦時和焦耳都是電功或者電能的單位,它們的關係,可以用下邊的公式計算,因為一小時 = 3600 秒,瓦時  $\times 3600 =$  瓦秒 = 焦耳。所以,

$$\text{瓦時數} = \frac{\text{焦耳數}}{3600} \dots\dots\dots(1)$$

$$1 \text{ 瓦時} = 3600 \text{ 焦耳。} \dots\dots\dots(2)$$

上面兩個公式,都是表示瓦時和焦耳的關係,但是意義不同,用法也兩樣。公式(1)是用來把焦耳數化成功瓦時數的,也可以把瓦時數化成功焦耳數。公式(2)是表示瓦時這個單位和焦耳單位

大小的關係。我現在用元角來做個譬喻，元的的單位比角的單位大10倍，所以，

$$1 \text{ 元} = 10 \text{ 角。}$$

公式(2)，1 瓦特 = 3600 焦耳，就是這個意義。但是要把角數化成功元數，我們把角數用 10 來除，所以，

$$\text{元數} = \frac{\text{角數}}{10}。$$

同樣的理由，把元數化成功角數，我們把元數用 10 來乘，所以，

$$\text{角數} = \text{元數} \times 10。$$

公式(1)，瓦時數 = 焦耳數 ÷ 3600，或者焦耳數 = 瓦時數 × 3600，就是這個意義。



## 第五章

# 熱學和電學的關係

5.1 熱的單位, 功的單位, 和功率的單位的關係 無論做什麼工作, 一定有熱量發生。轉動一個電機, 固然需要功量, 就是一個電機不做什麼有用的工作閑轉, 也要需要功量。一個電機閑轉時耗去的功量完全變成熱量, 大部份的熱量把軸承(bearing)的溫度升高。一般工匠都知道機器的軸承一定要加滑潤油(lubricating oil)減小它的摩擦, 才可以減低它的溫度。摩擦過大, 可以使軸承有過度的熱量而燒壞。這是因為摩擦大, 消耗的功量也大, 變成的熱量也多的緣故。

熱量的單位是卡路里(calorie), 省寫作卡; 也叫做克蘭姆卡路里(gram-calorie), 省寫作克卡。仟克卡(kilogram-calorie)或者大卡(major calorie)是一個大的熱量單位。一個仟克卡或者大卡=1000 克卡。一個克卡是把一克水的溫度升高 $1^{\circ}\text{C}$  所需的熱量。仟克卡是一仟克水的溫度升高 $1^{\circ}\text{C}$  所需的熱量。

英美制的熱量單位是英熱單位 (British thermal unit 省寫作 B. T. U.)。英熱單位是把一磅水的溫度升高 $1^{\circ}\text{F}$  所需的熱量。

要把  $M$  質量的水升高  $t$  溫度所需的熱量是等於  $M$  和  $t$  的乘積。

$$\text{令 } H = \text{熱量}$$

$$M = \text{水的質量}$$

$$t = \text{溫度的變更}$$

$$\text{那末 } H = Mt$$

【例題 1】把 100 克水的溫度，從  $0^{\circ}\text{C}$ . 升高到  $100^{\circ}\text{C}$ . 問 (a) 所需的卡是多少？(b) 所需的仟克卡是多少？

【解】溫度的變更  $t = 100 - 0 = 100^{\circ}\text{C}$ . 水的量質  $M = 100$  克，所以

$$H = 100 \times 100 = 10,000 \text{ 卡。}$$

因 1 仟克卡 = 1000 卡，1 卡 =  $\frac{1}{1000}$  仟克卡，所以  $\frac{10,000}{1000} = 10$  仟克卡。

【例題 2】把  $8\frac{1}{2}$  磅 (1 加侖) 的水從  $32^{\circ}\text{F}$ . 升高到  $212^{\circ}\text{F}$ ., 問所需的熱量是多少？

【解】溫度的變更  $t = 212 - 32 = 180^{\circ}\text{F}$ ., 水的質量  $M = 8\frac{1}{2}$  磅。所以

$$H = 8\frac{1}{2} \times 180 = 1500 \text{ 英熱單位。}$$

5.2 熱功當量 把一個圓柱形的筒，裏邊盛水。筒裏裝一個可以轉動的鉛直 (vertical) 軸。軸的四週裝上幾個翼槳 (paddle)，沒浸在水裏。軸的上部繞着兩根繩，繩的一端懸一個重物。重物下降，軸就帶着翼槳轉動。翼槳轉動時和水的摩擦，把水的溫度增高。筒裏插一枝溫度計，可以量度水增高的溫度。從重物下降的距離和重物的質量，可以計算抵抗摩擦需要的機工能量 (mechanical energy)。從筒裏水的質量和它升高的溫度，可以

計算從摩擦生出來的熱量。英國人焦耳 (Joule) 用這種裝置測定機工能量和熱量的關係。它得到的結果是每 778 呎磅 (foot-pound) 的功量可以發生一個英熱單位的熱量。後人追崇焦耳對於科學和工程上重要的供獻，把 778 呎磅這個常量 (constant) 叫做焦耳的熱功當量 (mechanical equivalent of heat)。熱功當量是發生一個單位熱量所需的機工功量或者能量的單位數目。機工功量 (或者能量) 和熱量的關係，可以用下邊幾個公式來表示：

$$778 \text{ 呎磅} = 1 \text{ 英熱單位},$$

$$1 \text{ 呎磅} = \frac{1}{778} \text{ 英熱單位}。$$

把呎磅數化成英熱單位數，或者英熱單位數化成呎磅數，用下邊兩個公式：

$$\frac{\text{呎磅數}}{778} = \text{英熱單位數},$$

$$\text{英熱單位數} \times 778 = \text{呎磅數}。$$

米制 (metric system) 裏的實用功量單位是米仟克 (meter-kilogram)。

$$426.9 \text{ 米仟克} = 1 \text{ 仟克卡},$$

$$1 \text{ 米仟克} = \frac{1}{426.9} \text{ 仟克卡}。$$

把米仟克數化成仟克卡數，或者仟克卡數化成米仟克數，可以下邊兩個公式：

$$\frac{\text{米仟克數}}{426.9} = \text{仟克卡數},$$

$$\text{仟克卡數} \times 426.9 = \text{米仟克數}。$$

仟克卡和英熱單位的關係是，

$$0.2520 \text{ 仟克卡} = 1 \text{ 英熱單位},$$

$$3.969 \text{ 英熱單位} = 1 \text{ 仟克卡}。$$

【例題 1】把 30 仟克水的溫度升高  $20^{\circ}\text{C}$ 。需要的功量是多少米仟克？

【解】  $H = Mt = 30 \times 20 = 600$  仟克卡；米仟克數 = 仟克卡數  $\times 426.9$

$$= 600 \times 426.9 = 256,140。$$

【例題 2】假使把 4269 米仟克的功量都變成熱量來升高 20 仟克水的

溫度，問增加的溫度是多少？

【解】 仟克卡數 =  $\frac{\text{米仟克數}}{426.9} = \frac{4269}{426.9} = 10$ ；20 仟克水升高溫度  $1^{\circ}\text{C}$

需要 20 仟克卡，所以 10 仟克卡可以升高 20 仟克水的溫度  $\frac{10}{20} = \frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ 。

【例題 3】把 50 磅水的溫度升高  $18^{\circ}\text{F}$ 。需要的功量多少呎磅？

【解】  $H = Mt = 50 \times 18 = 900$  英熱單位；呎磅數 = 英熱單位數  $\times 778$

$$= 700,200。$$

【例題 4】假使把 38,900 呎磅的功量，都變成熱量來升高 10 磅水的

溫度，問增加的溫度是多少？

【解】 英熱單位數 =  $\frac{\text{呎磅數}}{778} = \frac{38,900}{778} = 50$ ；10 磅水升高溫度  $1^{\circ}\text{F}$ 。需

要 10 英單位，所以 50 英熱單位可以升高 10 磅水的溫度  $\frac{50}{10} = 5^{\circ}\text{F}$ 。

5.3 熱功和電功 焦耳和其它的人用各種方法測定要發生

一個英熱單位的熱量需要 1054.8 焦耳的電功量。量度的方法是用一個電阻沒浸在水裏。通過電流發出來的熱量，把水的溫度升高。電功焦耳數是等於安培×伏特×秒。熱量英熱單位數是等於磅×變更的溫度數 $^{\circ}F$ 。熱量和電功量的關係，可以下邊幾個公式來表示：

$$\text{焦耳數} = \text{英熱單位數} \times 1054.8$$

$$\text{英熱單位數} = \frac{\text{焦耳數}}{1054.8}$$

米制裏用的熱量單位是仟克卡，要發生一個仟克卡的熱量需要 4186 焦耳的功量。所以

$$\text{焦耳數} = \text{仟克卡數} \times 4186$$

$$\text{仟克卡數} = \frac{\text{焦耳數}}{4186}$$

【例題 1】用一個 200 伏 2.5 安的電爐來煮 5 仟克的水，假使水的初溫度是  $14^{\circ}C$ ，所有的電功都變成熱量給水吸收去。問把水煮沸需要多少小時？

【解】把 5 仟克的水從  $14^{\circ}C$  煮到  $100^{\circ}C$ （水的沸點），需要的熱量是，

$$\text{仟克卡} = \text{仟克} \times \text{溫度的變更}(^{\circ}C)$$

$$= 5 \times (100 - 14) = 5 \times 86 = 430$$

$$\text{焦耳數} = \text{仟克卡數} \times 4186 = 430 \times 4186$$

$$= 1,800,000$$

$$\text{焦耳} = \text{伏特} \times \text{安培} \times \text{秒} = 500 \times \text{秒}$$

$$\text{秒} = \frac{\text{焦耳}}{500} = \frac{1,800,000}{500} = 3,600$$

1 小時 = 60 × 60 = 3,600 秒, 所以,

$$\text{小時數} = \frac{3,600}{3,600} = 1 \text{ 小時。}$$

**【例題 2】** (a) 一個電熱器 (electric heater) 的電流是 12 安, 電壓是 110 伏, 沒浸在 22.5 磅水裏 30 分鐘 (1,800 秒), 問輸給水的熱量是多少?  
(b) 假使水的初溫度是  $35^{\circ}F$ , 它的終溫度 (final temperature) 是若干?

**【解】** (a) 先求功量的焦耳數,

$$\begin{aligned} \text{焦耳} &= \text{伏特} \times \text{安培} \times \text{秒} \\ &= 110 \times 12 \times 1800 = 2,376,000 \end{aligned}$$

$$\text{英熱單位數} = \frac{\text{焦耳數}}{1054.8} = \frac{2,376,000}{1054.8} = 2,252,$$

(b) 升高 22.5 磅水的溫度  $1^{\circ}F$  需要 22.5 英熱單位, 2252 英熱單位可以升高 22.5 磅水的溫度  $\frac{2252}{22.5} = 100^{\circ}F$ . 因為初溫度是  $35^{\circ}F$ , 所以終溫度應該是  $100 + 35 = 135^{\circ}F$ .

**5.4 機工功量和電工功量** 778 呎磅 = 1 個英熱單位, 但是 1054.8 焦耳也等於 1 個英單位, 所以,

$$778 \text{ 呎磅} = 1054.8 \text{ 焦耳,}$$

$$1 \text{ 呎磅} = \frac{1054.8}{778} = 1.356 \text{ 焦耳}$$

$$1 \text{ 焦耳} = \frac{1}{1.356} = 0.7376 \text{ 呎磅。}$$

把呎磅數化成焦耳, 或者焦耳數成呎磅數, 可以用下邊兩個公

式：

$$\text{焦耳數} = 1.356 \times \text{呎磅數},$$

$$\text{呎磅數} = 0.7376 \times \text{焦耳數}.$$

在米制裏，426.9 米仟克等於 1 仟克卡，但是 4186 焦耳也等於 1 仟克卡，所以，

$$426.9 \text{ 米仟克} = 4186 \text{ 焦耳}$$

$$1 \text{ 米仟克} = \frac{4186}{426.9} = 9.807 \text{ 焦耳},$$

$$1 \text{ 焦耳} = \frac{1}{9.807} = 0.102 \text{ 米仟克},$$

把焦耳數化成米仟克數，或者米仟克數化成焦耳數，可以用下邊兩個公式：

$$\text{焦耳數} = 9.807 \times \text{米仟克數},$$

$$\text{米仟克數} = 0.102 \times \text{焦耳數}.$$

【例題 1】 一個 220 伏的電路供給 5 安的電流 30 分鐘(1800 秒)相當多少米仟克？

【解】 先求焦耳數，

$$\begin{aligned} \text{焦耳} &= \text{伏特} \times \text{安培} \times \text{秒} \\ &= 220 \times 5 \times 1,800 = 1,980,000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{米仟克數} &= 0.102 \times \text{焦耳數} \\ &= 0.102 \times 1,980,000 \\ &= 201,960 \end{aligned}$$

【例題 2】 500 呎磅相當多少焦耳？

$$\begin{aligned} \text{【解】} \quad \text{焦耳} &= 1.356 \times \text{呎磅} \\ &= 1.356 \times 500 = 678 \end{aligned}$$

【例題 3】一個 110 伏的電路供給 10 安的電流 30 分鐘(1800 秒),相當多少呎磅?

【解】先求焦耳數

$$\begin{aligned} \text{焦耳} &= \text{伏特} \times \text{安培} \times \text{秒}, \\ &= 110 \times 10 \times 1,800 = 1,980,000 \\ \text{呎磅數} &= 0.7376 \times \text{焦耳數} \\ &= 0.7376 \times 1,980,000 = 1,460,448 \end{aligned}$$

5.5 機工功率和電工功率 1 呎磅等於 1.356 焦耳, 每秒鐘呎磅等於每秒鐘 1.356 焦耳或者 1.356 瓦特。1 馬力 (horse power) 的功率是每秒鐘 550 呎磅的功量, 也等於  $550 \times 1.356 =$  每秒鐘 745.7 焦耳。英美都把 1 馬力作為每秒鐘 746 焦耳或者 746 瓦特。所以,

$$\text{英美制馬力數} = \frac{\text{瓦特數}}{746} = \frac{\text{伏特數} \times \text{安培數}}{746}$$

英美制馬力也可以把每分鐘 33,000 呎磅的功量來表示它。1 分鐘等於 60 秒, 所以,

$$\begin{aligned} \text{英美制馬力} &= \frac{550 \times 60 \text{ 呎磅}}{1 \times 60 \text{ 秒鐘}} = \frac{33,000 \text{ 呎磅}}{1 \text{ 分鐘}} \\ &= \text{每分鐘 } 33,000 \text{ 呎磅。} \end{aligned}$$

米制馬力有幾種。一種是法國的蒸汽馬力 (cheval vapeur) 等於每秒鐘 75 米仟克; 一種是朋西來 (poncelet) 等於每秒鐘



100 米仟克。德國和歐洲大陸用的米制馬力 (metric horse power) 是等於 745.5 瓦特, 也有當作 736 瓦特的, 這是因為用的重力加速度 (acceleration of gravity) 的數值不同的緣故。本書裏用的米制馬力都是作為 735.5 瓦特的。法國的蒸汽馬力合到瓦特數也是 735.5。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 米仟克} &= \text{每秒鐘 } 9.807 \text{ 焦耳} \\ &= 9.807 \text{ 瓦特。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 法國蒸汽馬力} &= \text{每秒鐘 } 75 \text{ 米仟克} \\ &= \text{每秒鐘 } 75 \times 9.807 \text{ 焦耳} \\ &= 735.5 \text{ 瓦特。} \end{aligned}$$

所以,

$$\text{法國蒸汽馬力數} = \frac{\text{瓦特數}}{735.5} = \frac{\text{伏特數} \times \text{安培數}}{735.5}$$

同時,

$$\begin{aligned} 1 \text{ 朋西來} &= \text{每秒鐘 } 100 \text{ 米仟克} \\ &= \text{每秒鐘 } 100 \times 9.807 \text{ 焦耳} \\ &= 980.7 \text{ 瓦特。} \end{aligned}$$

所以,

$$\text{朋西來數} = \frac{\text{瓦特數}}{980.7}$$

【例題 1】 220 伏的電路供給 400 安的電流, 相當多少 (a) 米制馬力?

(b) 英美制馬力?

$$\text{【解】 米制馬力數} = \frac{\text{伏特數} \times \text{安培數}}{735.5} = \frac{220 \times 400}{735.5} = 119.66$$

$$\text{英美制馬力數} = \frac{\text{伏特數} \times \text{安培數}}{746} = \frac{220 \times 400}{746} = 117.96$$

【例題 2】一個電動機接在一個 220 伏的電路上，正常使用時，需要 94.7 安的電流。電動機的效率(efficiency)是百分之 89.5，換句話說，這個電動機可以把電工功率的百分之 89.5 變換成機械工功率。問電動機輸出量(output)是(a)多少米制馬力？(b)多少英美制馬力？

【解】輸入(input)功率的瓦特數等於  $220 \times 94.7 = 20,834$  瓦。但是電動機的效率是百分之  $89.5 = \frac{89.5}{100} = 0.895$ 。把輸入功率打成一個八·九五折就是輸出功率。輸出功率 = 輸入功率  $\times 0.895 = 20,834 \times 0.895$  瓦 = 18,646 瓦。

$$(a) \text{輸出量米制馬力數} = \frac{18,646}{735.5} = 25.35,$$

$$(b) \text{輸出量英美制馬力數} = \frac{18,646}{746} \approx 24.99.$$

【例題 3】假使一個電動機工作的率是 17 英美制馬力，也可以說是這個電動機的輸出量是 17 英美制馬力。它於效率是百分之 87.5。問若把這個電動機接到一個 220 伏電壓的電路上需要多少安的電流？

【解】因為只有百分之 87.5 或者 0.875 的輸入電功率可以變換成 17 英美制馬力的輸出機械工功率，所以輸出馬力數是  $17 \div 0.875$ 。又因，

$$\text{英美制馬力數} = \frac{\text{伏特數} \times \text{安培數}}{746}$$

所以，

$$\frac{17}{0.875} = \frac{220 \times \text{安培數}}{746}$$

$$\text{安培數} = \frac{17 \times 746}{0.875 \times 220} = 65.9$$

【例題 4】假使例題 3 裏的電動機的輸出量是 17 米制馬力；效率，電

壓都同前題一樣，問需要的電流是多少安？

【解】 輸入量米制馬力數應當是  $17 \div 0.875$ ，

$$\text{米制馬力數} = \frac{\text{伏特數} \times \text{安培數}}{735.5}$$

所以， 
$$\frac{17}{0.875} = \frac{220 \times \text{安培數}}{735.5}$$

$$\text{安培數} = \frac{17 \times 735.5}{0.875 \times 220} = 61.9$$

### 習 題

7. 一個辦公室用 7 座架燈(fixture)，每座架燈有 5 只 40 瓦的電燈。  
(a) 若是全部電燈都燃點，需要的功率是多少瓦？(b) 若是電路的電壓是 110 伏，共需電流多少安？

答 (a) 1,400 瓦 (b) 12.72 安

2. 若是每仟瓦小時的電費是 2 角，習題 1 裏的電燈燃點 1,000 小時要多少錢？

答 280 元。

3. 假使把習題 1 裏的電燈從 40 瓦改成 60 瓦，每仟瓦小時的電費和燃點的時間仍舊一樣，問增加的電費是多少？

答 140 元。

4. (a) 假使把 10,000 磅的物體升高 200 呎所需的功量都變成熱量來增加  $16\frac{2}{3}$  磅(即 1 加倫)水的溫度，問水的溫度可以增加多少  $^{\circ}F$ ？

(b) 假使把 10,000 仟克的物體升高 200 米所需的功量都變成熱量來增加 160 仟克水的溫度，問水的溫度可以增加多少  $^{\circ}C$ ？

答(a)  $154.2^{\circ}F$ . (b)  $29.3^{\circ}C$ .

5. 一個 110 伏 5 安的電熱器沒浸在  $8\frac{1}{2}$  磅(即 1 加倫)的水裏，若是要把水的溫度從  $32^{\circ}F$ . 增加到  $180^{\circ}F$ .，需要的時間是多少？

(b) 用同一電熱器沒浸在 4 仟克的水裏，若是要把水的溫度從  $0^{\circ}C$ . 增

加到  $82^{\circ}\text{C}$ ., 需要的時間是多少?

答 (a) 2,366 秒鐘或 39.5 分鐘

(b) 2,495 秒鐘或 41.6 分鐘

6. (a) 一個引擎的正常輸出量是 120 英美制馬力, 用來策動一個發電機。這個發電機只能夠把輸入的機工功率的百分之九十轉換成功電工功率。發電機的電壓是 220 伏, 問它供給的電流是多少安?

(b) 假使引擎的正常輸出量是 120 米制馬力, 其它的條件和前題一樣, 問發電機供給的電流是多少安?

答 (a) 366 安 (b) 361 安

7. 一個水車發電機, 電壓是 550 伏, 供給的電流是 1,000 安, 是用來行駛街車的。假使發電機只能把輸入的機工功率百分之九十二轉換成功電工功率, 問水車應當供給多少, (a) 英美制馬力? (b) 米制馬力?

答 (a) 801 英美制馬力 (b) 813 米制馬力

8. (a) 一個電機是用來策動木工廠裏的機器的, 平均供給的功率是 6 英美制馬力, 使用的時間是每年 2,500 小時。假使電動機的效率是百分之八十, 每仟瓦小時的電費是 8 分, 問每年的電費是多少?

(b) 假使前題裏的電動機供給的功率是 6 米制馬力, 其它條件都同前題一樣, 問每年的電費是多少?

答 (a) 1,119 元 (b) 1,103 元

9. 一個臥室裏有一座 4 只 40 瓦電燈的架燈, 另外還有 2 只 60 瓦的檯燈, 假使每仟瓦小時的電費是 2 角, 平均每天一只檯燈和全部架燈燃點 4 小時, 問 30 天的電費是多少?

答 5.28 元

10. 一個小型電動機使用的時候需要的功率是 220 瓦, 和 3 只 25 瓦, 4 只 40 瓦的電燈接在同一電路上。總共用的時間是 100 小時, 每仟瓦小時的電費是 2 角 4 分, 問供給這些電能的電費是多少?

答 10.93 元

# 第三編 電路

## 第六章

### 電路上用的名詞

**6.1 簡單電路** 電路是一個傳遞電功率的路徑(path),用一根或者幾根導線連接成功的。電流可以從發電的地方或者電源(Source)循着傳遞的路徑流到供給地方,再循着原來的路徑回到電源。

電路可以在紙上用圖來表示。這種圖叫做電路圖(circuit diagram)。電路圖裏有導線的佈置,電流的路徑,電源,負載,和其它量度用的儀器。可以說是全電路簡明的鳥瞰圖。

供給電流的電源,像電池組或者發電機,是把一種習用的圖形符號(graphical symbol)來表示的。圖 6.1 是一個簡單的電路圖,

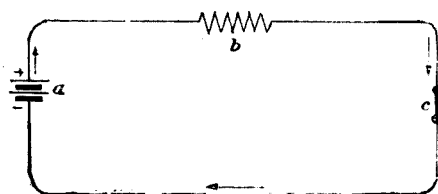


圖 6.1 一個簡單電路。

圖,  $a$  處是一個電源。長短線是電池組的符號。一根長線和一根短線代表一個電池。電路裏電流的方向是用箭頭來表

示的。每個電池的兩根線，細而長的一根代表電池的陽極，闊而短的一根代表電池的陰極。電路本身是用細線來描成的。 $b$  處的鋸齒口紋線是一個電阻裝置的符號，電阻和電阻器 (resistor) 都用這個符號。 $c$  處是司路器亦稱開關 (switch) 的符號。這個開關可以把電路的上下兩部分通連或者開斷。電阻器可以用線卷，鐵柵 (iron grid) 或者別的東西來做的。各種圖形符號是習慣上常用而大家承認的。但是各國習用的圖形符號，並不完全相同，所以近幾年來，國際電工技術委員會想把圖形符號統一。一部分的草案，已經有好幾次的討論，但是還沒有正式的公佈。

在電源以外的電路叫做外電路 (external circuit)，在電源本身裏的一部分電路叫做內電路 (internal circuit)。圖 6.1 的電源是一個電池組，所以電池組以外的電路叫做外電路，電池組本身裏的一部分電路叫做內電路。

**6.2 通流和斷流電路** 一個電路各部分都是通連沒有開斷的地方，那末電流可以從電源的一端循着路徑回到電源的另一端，成一個繼續沒有間斷的電路。這種電路叫做通流電路 (closed circuit)。圖 6.1 裏的開關  $c$  是通連的，電流的路徑沒有間斷的地方，所以是一個通流電路。

假使一個電路有一部分或者幾部分開斷，在開斷的地方電流就不

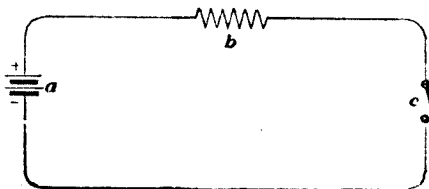


圖 6.2 一個通流電路。

能夠通過。這種電路叫做斷流電路(open circuit)。圖 6.2 裏的開關  $c$  是開斷的,使電路的上下兩部分斷絕,電流不能夠通過,所以是一個斷流電路。

**6.3 通地,通地電路和地回電路** 一個電路,無論那一部分,和地通連,電流可以直接從通連的部分或者藉着別一個導體,通到地上,叫做通地電路(grounded circuit)。一根電燈的導線和水管摩擦,把外面包的絕緣物擦破,裏面的銅線和水管接觸,電路就在銅線和水管接觸的地方和地通連,這種接觸的地方就叫做通地(ground)。假使一個電路有兩處通地,那末一部分的電流就從一個通地處流到地裏,再從另一個通地處回到電路。在這兩個通地之間,線裏的電流只有一部分,不是完全的,因為沒有這種通地的情形,電流只能夠在導線裏通過,不會分一部分到地裏去的。

有時,用地來做整個電路的一部分,這樣,可以省去一部分

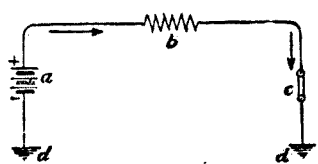


圖 6.3 地是整個電路的一部份。

的線。圖 6.3 裏,  $d, d$  是兩處通地。兩處通地間的地成爲整個電路的一部分。電流從電池組  $a$  的陽極起,經過電阻  $b$ , 開關  $c$ , 由通地  $d$  流到地,經過  $d, d$  間的地,再從

另一通地  $d$  回到電池組  $a$  的陰極。因為利用地做電流回到電源的電路,所以這種電路也叫做地回電路(ground return circuit)。許多電工鐵道的電路,都用和地接觸的路軌做電流的回

路，也是地回電路。

6.4 捷路 捷路(short circuit)對於無論什麼電工裝置，都是有損害的，但是因為種種原因，沒有方法完全避免。下面講的是幾個發生捷路的原因：電線或者電機裏用的絕緣物有損壞之處，導線的接法有錯誤，一根導線或者一個導體，偶然跌落跨接在一個電路的兩根線上，和其它的原因，都可以發生捷路。捷路電流的大小，完全看電路中捷路部份電阻的大小，和電路上的保護設備(protective equipment)是不是在有過量電流的時候，能夠立刻把電路開斷。若是電阻大，保護設備很好，由捷路發生的電流，可以不致於使導線和儀器等燒壞。電燈電路裏的導線，有時外面的絕緣物損壞，裏面的銅線互相接觸，結果就是捷路，在決流的時候，可以有很大的電流，但是有了相當的保護設備，就可以把電路立刻開斷，電流就停止，不致於肇禍。若是電路或者儀器，沒有保護設備，不能夠把電路開斷，那末由捷路發生的電流也許很大，可以釀成燃燒的危險。



## 第七章

# 串聯並聯和混聯電路

**7.1 串聯接法** 導線、電阻、電池、發電機和其它許多電工裝置，都可以用幾種方法來聯接。假使一個電路裏的各種裝置接連起來以後，電流可以流的路徑，只有一條，像圖 6.1 表示的接法，電路裏的各種裝置，接成一串。這種接法就叫做串聯接法(series connection)。在一個串聯的電路裏，若是有一處開斷，整個電路裏的電流也都停止。有電流的時候，串聯電路裏無論那一處的電流都是一樣的。

串聯的電池或者發電機，它們端鈕的連接，應當使它們的電動勢相加起來。圖7.1 是表示

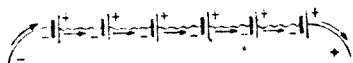


圖7.1 六個串聯的電池。

六個串聯的電池。每個電池的陽極是和鄰近一個電池的

陰極接連。電路裏的總電動勢是等於六個電池電動勢的和。圖 7.1 是一個斷流電路，箭頭表示電動勢的方向，假使電路通連，這也是電流流動的方向。

假使圖 7.1 裏有一個電池的端鈕調轉來接，把它的陽極接到鄰近一個電池的陽極，陰極接到另一個鄰近電池的陰極，那末這個電池和別個電池並不是真的串聯。它的電動勢和別個電池

的電動勢，方向相反。電路裏的總電動勢是其它五個電池電動勢的和減去這個電池的電動勢。

**7.2 串聯的電阻** 幾個電阻串聯起來，它的總電阻是等於各電阻相加起來的和。例如

圖 7.2, 電阻  $a=8$  歐,  $b=12$  歐,  $c=22$  歐,  $d=34$  歐。四個電阻串聯起來，電阻是  $8+12+22+34=76$  歐。這是在電池組  $B$  以外

的外電阻。假使電池組本

身的內電阻是 5 歐，那末整個電路裏的總電阻是  $76+5=81$  歐。

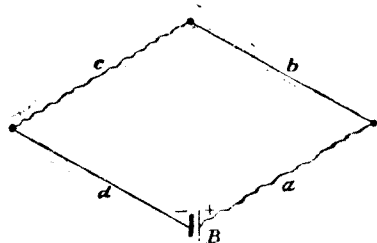


圖 7.2 四個串聯電阻的電路。

**7.3 並聯接法** 一個有兩個或者兩個以上支路(branch) 的電路，每個支路不過傳遞一部分的電流，叫做分流電路 (Shunt circuit)。這種支路連接的方法叫做並聯接法(parallel connection)。

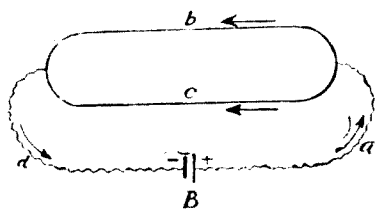


圖 7.3 一個分流電路。

圖 7.3 是一個分流電路。電池組  $B$  是用來供給電路裏的電動勢的。 $a, b, c$  和  $d$  是有電阻的導線。導線  $b$  和  $c$  是兩個並聯的支路。假使電池組  $B$  的內電阻很小，可

以略去不計， $a$  和  $d$  的電阻也是很小的，那末  $b$  和  $c$  兩個支路，無論拆斷那一個，另一個支路裏的電流，並不因為拆斷一個支路

發生變更。若是電池組  $B$  的內電阻不是很小， $a$  和  $d$  的電阻也是相當的大，那末拆斷了一個支路就影響到沒有拆斷的支路裏的電流。圖 7.3 裏的箭頭指示電流的方向。

並聯的電池或者電池組，它們的陽極是都接在一起或者同一導線上，它們的陰極也是接在一起或者另一導線上。圖 7.4 表

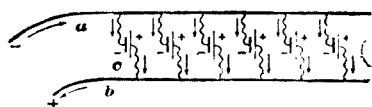


圖7.4 六個並聯的電池。

示六個並聯的電池。假使六個電池都是相同，內電阻小到可以略去，那末導線  $a$  和  $b$  間的電壓就等於無論那一

個電池，像  $c$  的電動勢。假使內電阻不可以略去，那末  $a$  和  $b$  兩線間的電壓是等於無論那一個電池的電壓。圖 7.4 裏的箭頭是表示外電路通連的時候，電流流動的方向。外電路裏的電流是等於六個並聯電池的電流的和。例如，把圖 7.4 裏的斷流電路用一根有電阻的導線通連起來，若是每個電池供給的電流是 2 安，那末外電路裏的電流是  $6 \times 2 = 12$  安。

**7.4 並聯的電阻** 在 2.11 節裏曾經講到一個導體的電阻和它的長度成正比，和它的截面面積成反比。換一種說法，同一物料和同一截面的導體，長度越長，電阻越大；同時，同一物料和同一長度的導體，截面越大，電阻越小。假使兩個或者兩個以上物料相同的導體並聯接起來，像圖 7.5

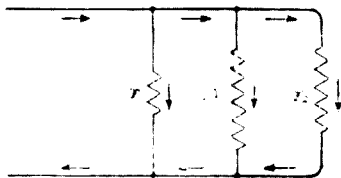


圖 7.5 三個並聯電阻的電路，

裏的  $r$ ,  $r_1$  和  $r_2$  結果是截面面積增加, 電阻減小。所以兩個或者兩個以上並聯導體的總電阻比無論那一個導體的電阻小。

兩個物料相同, 長度相同, 截面相同的並聯導體的總電阻相當於一個導體截面面積加一倍的電阻, 所以總電阻是一個導體的電阻的二分之一。若是三個同樣導體並聯接起來, 相當一個截面面積三倍大的導體的電阻, 所以總電阻是一個導體的電阻的三分之一。用同樣的方法, 可以推算無論多少並聯導體的總電阻。若是  $n$  個同樣導體並聯, 它們的總電阻是等於一個導體的電阻把  $n$  來除。或者

$$R = \frac{r}{n}$$

$R =$  並聯  $n$  導體的總電阻,  $r =$  每個導體的電阻,  $n$  是導體的數目。

**【例題】** 假使一組並聯的白熾電燈 (incandescent lamp) 是 11 只, 每只電燈的電阻是 220 歐, 問這一組並聯電燈的總電阻是多少?

**【解】** 因  $R = \frac{r}{n}$ , 所以  $R = \frac{220}{11} = 20$  歐。

**7.5 不同導體並聯的總電阻** 在 4.6 節裏, 曾經講過電導是電阻的倒數, 同時, 電阻也是電導的倒數。假使幾個導體並聯接起來, 總電導就等於每個導體的電導加起來。總電導的倒數就是並聯導體的總電阻。例如, 假使三個並聯電阻, 像圖 7.5,  $r = 3$  歐,  $r_1 = 4$  歐,  $r_2 = 6$  歐, 它們的總電導是  $\frac{1}{3}$  姆 +  $\frac{1}{4}$  姆 +  $\frac{1}{6}$  姆 =  $\frac{9}{12} = \frac{3}{4}$  姆。總電阻是  $\frac{3}{4}$  的倒數, 或者  $1 \div \frac{3}{4} = 1 \times \frac{4}{3} = 1\frac{1}{3}$  歐。假使

$R =$  幾個並聯導體的總電阻,

$r, r_1, r_2,$  等 = 各個導體的電阻,

$G =$  並聯導體的電導

那末,

$$G = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \dots\dots, \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \dots\dots} \quad \text{-----} \quad (2)$$

【例題 1】 四個並聯的導體，它們的電阻是  $\frac{1}{3}$  歐，2 歐，3 歐，和 6 歐  
求 (a) 它們的總電導，(b) 它們的總電阻。

【解】 (a) 因為它們的電阻是  $\frac{1}{3}$ ，2，3，和 6 歐，所以它們的電導是  
 $1/\frac{1}{3} = 3$ ； $\frac{1}{2}$ ； $\frac{1}{3}$ ；和  $1/6$  姆。應用公式(1)

$$G = 3 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + 1/6 = 4 \text{ 姆。}$$

應用公式(2)，

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{4} \text{ 歐。}$$

【例題 2】 四個並聯的導體，它們的電阻是 5，8，16，和 80 歐，求它們的總電阻。

【解】 應用公式(2)

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{80}} = \frac{1}{\frac{8}{40} + \frac{5}{40} + \frac{2.5}{40} + \frac{0.5}{40}} = \frac{1}{\frac{16}{40}} = 1 \times \frac{40}{16} \\ &= \frac{5}{2} = 2\frac{1}{2} \text{ 歐。} \end{aligned}$$

7.6 混聯接法 混聯 (parallel-series 或者 series-parallel) 的電路裏，有串聯和並聯的導體或者裝置混合在一起，所

以叫做混聯接法 (parallel-series connection)。圖 7.6 裏的電池是混聯接起來的。

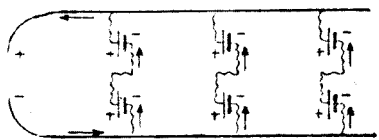


圖7.6 六個混聯的電池。

每一組有兩個串聯的電池，

所以每一組的電動勢是兩個電池電動勢的和，兩根導線間的電壓是每一組電池電壓的和。假使外電路通連，外電路裏的電流是

三組電池電流的和。

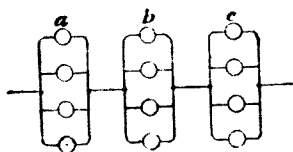


圖7.7 十二個混聯的電器

圖 7.7 是一種混聯接法。a, b 和 c 三組是串聯的，每一組有四個並聯的裝置。

混聯導體的總電阻可以用串聯

和並聯的方法來計算：串聯的部份，把它們的電阻加起來，並聯的部份，把它們的電導加起來。

例如，假使圖 7.7 裏每個裝置的電阻是 3 歐，那末電導是  $\frac{1}{3}$  姆，四個裝置的總電導是  $4 \times \frac{1}{3} = \frac{4}{3}$  姆。每組的電阻是  $1 \div \frac{4}{3} = 1 \times \frac{3}{4} = \frac{3}{4}$  歐。三組串聯的電阻是  $3 \times \frac{3}{4} = \frac{9}{4} = 2\frac{1}{4}$  歐。假使每一組的四個裝置的電阻都相同，但是各組的總電阻都不同，那末可以先求每一組的總電阻，再把三組的電阻加起來。

## 第八章

# 歐姆定律

8.1 歐姆定律 在直流電路裏，一個導體兩端的電勢差越大，電流越大；但是同一電勢差，兩端間的電阻越大，電流越小。假使把一伏的電勢差加到一個有一歐電阻的導體上，可以有一安的電流，那末二伏的電勢差加到同一導體上，就可以有二安的電流。歐姆經過了許多試驗，找到了一個導體的電勢差，電流和電阻的關係。它的結論是：一個某一種物料的導體，在某一溫度時，導體裏的電流和導體兩端間的電勢差，成比例。這就是電學上很重要的歐姆定律(Ohm's law)。若是用算式來表示這個定律，可以用下邊的公式：

$$I = GV \dots\dots\dots (1)$$

$I$  是導體裏的電流， $V$  是導體兩端間的電勢差， $G$  是比例因數，也就是導體兩端間的電導。公式(1)也可以寫成

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{G} \times I &= V \\ RI &= V \\ I &= \frac{V}{R} \\ R &= \frac{V}{I} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$R$  就是導體兩端間的電阻。公式(1)和(2)都是歐姆定律。若是  $V$  的單位是伏,  $I$  的單位是安, 那末  $R$  的單位是歐。所以,

$$\text{伏數} = \text{安數} \times \text{歐數},$$

$$\text{安數} = \frac{\text{伏數}}{\text{歐數}},$$

$$\text{歐數} = \frac{\text{伏數}}{\text{安數}}。$$

【例題 1】一個電燈的電阻是 220 歐, 若是這個電燈接到一個 110 伏電壓的電路上, 問電燈裏的電流是多少安?

【解】電壓  $V = 110$  伏, 電阻  $R = 220$  歐, 應用歐姆定律公式(2),

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110}{220} = \frac{1}{2} \text{ 安}。$$

【例題 2】一個 550 瓦的電熨斗, 它的電壓是 110 伏, 問它的電阻是多少歐?

【解】先求電流, 在 4.7 節裏曾經講過,

$$\text{瓦特數} = \text{伏特數} \times \text{安培數}$$

$$550 = 110 \times \text{安培數}$$

$$\text{安培數} = \frac{550}{110} = 5。$$

應用歐姆定律,

$$I = \frac{V}{R},$$

$$5 = \frac{110}{R}$$

$$R = \frac{110}{5} = 22 \text{ 歐}。$$



【例題 3】 一個電工裝置的電阻是 16 歐，假使裝置裏要有 5 安的電流，問所需的電壓是多少伏？

【解】 應用歐姆定律，

$$V = IR$$

$$V = 5 \times 16 = 80 \text{ 伏。}$$

8.2 水壓降落和電壓降落 電勢降落(drop of potential或者 fall of potential) 可以用水在水管裏流動做一個類喻。在一個時間內，水管裏流過水的多少全靠水管兩端水受到的壓力 (pressure) 或者水動勢 (water head) 和水管裏的摩擦。假使水管兩端的壓力差或者動勢差是一定的，那末在同一時間內，大的管子流過的水比小的管子多，因為大管子裏的摩擦比小管子裏的摩擦小；一個內部潔淨而光滑的管子流過的水比一個內部粗糙而銹蝕的管子多，因為內部潔淨而光滑，管子的摩擦就小。假使一個水管對於流水的摩擦很小，那末管子兩端只要有很小的壓力差或者動勢差就可以有很多的水量通過。但是無論怎樣光滑的管子，終有摩擦，一定要有一部份的壓力來剋制這種摩擦，水方才能夠流動。

圖 8.1 裏的  $a$  是一個水櫃，櫃裏的水面是維持一個一定的高度  $b$ ，所以櫃裏的水動勢  $b$  是不變動的。假定水動勢  $b$  在櫃底的壓力是每平方厘米 1 仟克，那末一個和水櫃通連平放的水管  $c$ ，它  $d$  端的壓力也是每平方厘米 1 仟克。在水管  $d$  和  $e$  兩個地方接兩個壓力計 (pressure gauge)  $f$  和  $g$  來量度這兩處的水

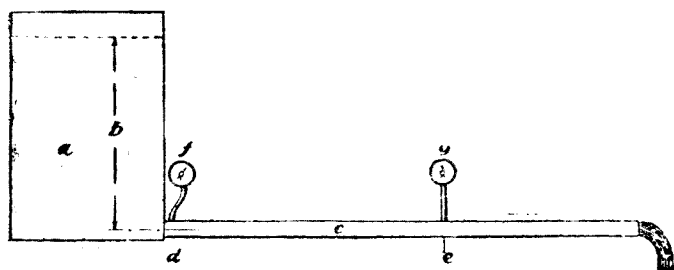


圖 8.1 用水壓降落來說明電勢降落。

壓力。假使把水管出水的一端用塞頭塞住，水就不能夠流動，用不到剋制水管裏的摩擦，所以水管裏無論那一處的壓力，同壓力計  $f$  所指示的壓力都是一樣；但是塞頭一拔去，水就流動， $e$  處壓力計  $g$  所指示的壓力就比  $d$  處壓力計  $f$  所指示的壓力小，因為水流動的時候，一部份的壓力是用來剋制水管裏  $d$  和  $e$  間的摩擦。水壓降落 (drop of pressure) 就是  $f$  和  $g$  兩個壓力計所指示的壓力的差數，也就是剋制水管裏  $d$  和  $e$  間摩擦耗去的水壓力或者水動勢。假使一個水管是用幾節同一長度大小不同的管子連接成功的，那末小管子兩端的水壓降落比大管子兩端的水壓降落來得多，這是因為小管子裏的摩擦大；所以同一水流通過，消耗的水壓也多。水壓降落的分佈和管子裏的摩擦是有關係的，摩擦最大的地方，水壓的降落也最大。

我們可以把導體當做水管，電流當做水流，水管兩端的壓差當做導體兩端的電勢差，導體裏的電阻當做水管裏的摩擦，由摩擦而起的水壓降落當做由電阻而起的電勢降落。因為導體都有

電阻，所以要通過電流，一定要用一部分的電勢來尅制電阻。一個電阻很小的導體，兩端只要有很小的電勢差，就可以有很大的電流。電池或者發電機裏的電動勢和水櫃裏的水動勢有一樣的作用，是用來維持導體兩端間的電勢差使電流可以繼續。假使把導體的一處拆斷，就和把水管塞住一樣，電流就停止。拆開的導體，若仍舊和電池或者發電機連接，那末一個導體的電勢和電池或者發電機陽極的電勢一樣，另一個導體的電勢，和電池或者發電機陰極的電勢一樣。因為沒有電流，拆斷的導體裏就沒有電勢降落，所以兩個導體的電勢雖然不同，但是每一個導體各部份的電勢都是一樣的。同一長度的導體，截面越大，電阻越小；截面越小，電阻越大。若是把同一電流通過兩個電阻不同的串聯導體，電阻大的導體比電阻小的導體，電勢降落來得多。

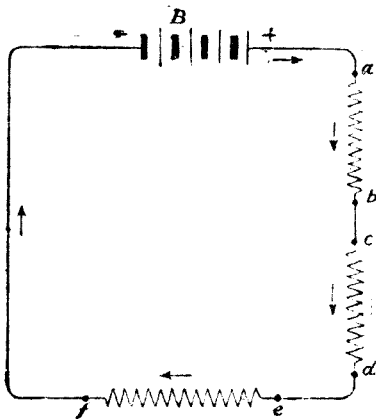


圖 8.2 一個電池和幾個電阻串聯的電路。

### 3.3. 電路裏的電勢降落

一個電池組或者別種電源使電流通過一個電路，電路裏的電壓是依着電阻的大小分佈的。假使一個電池組使電流通過像圖 8.2 表示的電路； $B$  是一個電池組， $ab$  是一個電阻， $cd$  是一個較大的電阻， $ef$  是一個更大的電阻。這幾個電阻和電池組是串聯

的。這就是一個簡單的串聯電路。電路裏的電流，無論那一處都是一樣。要求電流的量值，只要把電池組的電壓用這幾個電阻的和數來除。令  $V$  = 電池組的電壓， $r_{ab}$ ， $r_{cd}$ ，和  $r_{ef}$  = 外電路裏  $ab$ ， $cd$  和  $ef$  的電阻，那末電流

$$I = \frac{V}{r_{ab} + r_{cd} + r_{ef}},$$

假使電池組的電動勢是  $E$ ，電池組的內電阻是  $r$ ，那末電流

$$I = \frac{E}{r_{ab} + r_{cd} + r_{ef} + r}。$$

每一個電阻消耗一部份的電壓，使同一電流通過一個電路，大的電阻比小的電阻兩端的電勢降落來得大。因為這個緣故， $ef$  一段的電壓比  $cd$  大， $cd$  一段比  $ab$  大。假使一個電路，無論一處折斷，斷處兩端間空氣的電阻是很大很大，所以電流就不能夠通過，沒有電流，電路裏就沒有電勢的損失 (loss of potential)。在這種情形之下，斷處兩端的電勢差就等於電池組的電動勢。

平常對於一個電路，所注意的是電源以外的一部分，或者外電路；實則電源內部的電路，也應當注意的。外電路裏無論那一部分電阻兩端間的電勢降落和電流的關係，可以應用歐姆定律來計算的。同樣的理由，全電路的電阻，內電阻，電動勢和電流的關係，也可以應用歐姆定律。一個電路裏的電動勢是完全用來使電流通過電路的各部分，剋制各部分的電阻。假使電路一部分

兩端間的電阻是  $R$ ，電路裏的電流是  $I$ ，照歐姆定律，兩端間的電勢差或者電壓  $V$  是：

$$V = IR。$$

假使在電路的甲處，接一個電器，電源是在電路的乙端，那末電器上的電壓是等於電源的電壓減去電路甲乙兩處間的電壓降落  $IR$ 。 $I$  是電路裏的電流， $R$  是甲乙兩處間的電阻。 $IR$  也叫做  $IR$  降落 ( $IR$  drop)。

我們可以用圖 8.2 的電路來說明：假定電阻  $R_{ab}$ 、 $R_{cd}$ ，和  $R_{ef}$  是  $\frac{1}{2}$ ，2，和 3 歐；電池組的內電阻  $\frac{1}{2}$  歐；電池組的電動勢是 18 伏。

那末全電路的電阻是  $\frac{1}{2} + 2 + 3 + \frac{1}{2} = 6$  歐。電流  $I = \frac{E}{R} = \frac{18}{6}$

$= 3$  安。所以  $ab$  的電壓降落是  $V = IR = 3 \times \frac{1}{2} = 1.5$  伏， $cd$  的電壓降落是  $3 \times 2 = 6$  伏； $ef$  的電壓降落是  $3 \times 3 = 9$  伏；電池組內部的電壓降落是  $3 \times \frac{1}{2} = 1.5$  伏。這幾個電壓降落的和是  $1.5 + 6 + 9 + 1.5 = 18$  伏，就等於電池組的電動勢。電池組兩極間的電勢差或者電壓是等於外電路裏各部分電壓降落的和，所以

$$\begin{aligned} V &= IR_{cb} + IR_{cd} + IR_{ef} \\ &= 3 \times \frac{1}{2} + 3 \times 2 + 3 \times 3 \\ &= 1.5 + 6 + 9 = 16.5 \text{ 伏。} \end{aligned}$$

**8.4 歐姆定律的擴義** 在一個電路裏，可以任意揀兩處，兩處之間，可以有許多路徑，但是兩處間無論那個路徑的電勢差或者電壓降落都是一樣的。把電池組  $B$  的兩極當作電路裏的兩處，

那末，外電路和經過電池組的內電路是這兩處間的兩個路徑。外電路和內電路的電勢差在兩極間應當是一樣的。外電路在兩極的電勢差就是外電路裏的總電壓降落，也就是電池組的電壓，所以，

$$V = IR_{ab} + IR_{cd} + IR_{ef}$$

同時，電池組的電動勢  $E$  是等於全電路的電壓降落，所以，

$$E = IR_{ab} + IR_{cd} + IR_{ef} + IR,$$

$R$  是電池組的內電阻， $IR$  是內電阻的電壓降落。移項得到，

$$E - IR = IR_{ab} + IR_{cd} + IR_{ef} = V$$

或者

$$V = E - IR。$$

所以電池組的電壓，從內電路看起來，是等於電池組的電動勢減去內電阻的電壓降落。這一個公式可以說是歐姆定律的擴義 (extension of Ohm's law)。

上邊講的一個例，電池組電動勢的方向和電流的方向是相同的，假使電池組電動勢的方向和電流的方向相反，像電池充電的時候，那末電池組的電壓

$$V = E + IR。$$

歐姆定律  $V = IR$  是應用在導體或者電路沒有電動勢的部分。有電動勢的部分，像電池組或者發電機，電動機，應當用擴義的歐姆定律  $V = E - IR$  或者  $V = E + IR$ 。 $IR$  前面的符號，(-)表示電動勢和電流是同一方向，(+)電動勢和電流是相反方向。

【例題 1】一組 110 伏 25 安的電燈是裝在離電源 30 米的地方，電源

到電燈間線路(line)的電阻是 $\frac{1}{6}$ 歐，(a)問電源的電壓應當是多少，電燈的電壓方有110伏？(b)導線每米的電壓降落是多少？

【解】 (a)總電壓降落 $=25 \times \frac{1}{6} = 5$ 伏；電源的電壓應當是 $110 + 5 = 115$ 伏。

(b)每米電壓降落是 $5 \div 60 = 0.0833$ 伏。導線有兩根，往返各長30米，共計60米。

【例題2】 一個電動機裝在離電源150米的地方，需用的電流是5安，線路裏的電壓降落是12伏，問(a)線路裏的電阻是多少？(b)每一根導線的電阻是多少？

【解】 (a)線路電阻  $R = \frac{V}{I} = \frac{12}{5} = 2.4$  歐。

(b)一條路線有往返兩根導線，每一根導線的電阻是全線路電阻的一半，所以， $2.4 \div 2 = 1.2$  歐。

8.5 支路電路 假使一個電路是幾個並聯的支路接成的，叫做支路電路(branch circuit)。每一個支路裏的電流可以用歐



圖8.3 三個支路的電路。

姆定律來計算的。電路裏的總電流是等於各支路電流的和。圖8.3是一個有三個支路的電路。每一個支路的電壓是80伏。三個支路的電阻是

5, 10, 和 20 歐，都是並聯接起來的。5 歐支路裏的電流是  $I = \frac{V}{R} = \frac{80}{5} = 16$  安；10 歐支路裏的電流是  $\frac{80}{10} = 8$  安；20 歐支

路裏的電流是  $\frac{80}{20} = 4$  安。電路裏的總電流是  $16 + 8 + 4 = 28$  安。

求總電流也可以先求三個支路的總電阻。三個支路的電導是  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{10}$  和  $\frac{1}{20}$ 。它們的總電導是  $\frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20}$ ，所以總電阻

$$R = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20}} = \frac{1}{\frac{7}{20}} = 1 \times \frac{20}{7} = 2\frac{6}{7} \text{ 歐。}$$

通過這個總電阻的電流是  $\frac{80}{20} = 80 \times \frac{7}{20} = 28$  安。和上邊先求

各支路電流再加起來得到的答數是一樣的。像這一類的習題，兩個方法都可以用的。

我們再把圖 7.3 的電路做一個例子。這一個電路有兩個並聯的支路。假使  $a$ ,  $b$ , 和電池組的內電阻都是很小，可以略去不計； $b$  的電阻是 3 歐， $c$  的電阻是 6 歐，電池組的電動勢是 8 伏。兩個支路的總電阻是，

$$R = \frac{1}{\frac{1}{3} + \frac{1}{6}} = \frac{1}{\frac{9}{18}} = 1 \times \frac{18}{9} = 2 \text{ 歐。}$$

因為  $a$ ,  $d$  和電池組都沒有電阻，所以全電路的總電阻也等於 2 歐，電路裏的電流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{V}{R} = \frac{8}{2} = 4 \text{ 安。}$$

電池組的電壓，在這種情形之下，就等於電池組的電動勢，或者，

$$V = E = IR = 8 \text{ 伏。}$$

$b$  支路裏的電流是  $\frac{V}{3} = \frac{8}{3} = 2\frac{2}{3}$  安； $c$  支路裏的電流是  $\frac{V}{6} =$



$\frac{8}{3} = 1\frac{2}{3}$  安。假使把支路  $b$  拆斷，那末全電路的電阻是 6 歐，因為電池組沒有內電阻，它的電壓仍舊等於它的電動勢 = 8 伏。 $c$  支路裏的電流仍舊是  $\frac{8}{3} = 1\frac{2}{3}$  安，同  $b$  支路沒有拆斷的時候是完全沒有變動，所以說  $b$  支路的拆斷並不影響  $c$  支路的電流。(參閱第 7.3 節。)

假使電池組的內電阻是 3 歐， $a$  是 5 歐， $d$  是 6 歐，那末全電路裏的電阻是  $a$  的電阻 +  $d$  的電阻 +  $b$  和  $c$  並聯的電阻 + 電池組的內電阻 =  $5 + 6 + 2 + 3 = 16$  歐。電路裏的總電流是，

$$I = \frac{E}{R} = \frac{8}{16} = \frac{1}{2} \text{ 安。}$$

應用歐姆定律的擴義，電池組的電壓是

$$V = E - IR = 8 - \frac{1}{2} \times 3 = 8 - \frac{3}{2} = 1\frac{3}{2} \text{ 伏。}$$

$b$  和  $c$  並聯支路兩端的電壓是等於兩支路的總電阻  $\times$  總電流 =  $2 \times \frac{1}{2} = 1$  伏。所以， $b$  支路裏的電流是  $\frac{1}{2}$  安， $c$  支路裏的電流是  $\frac{1}{2}$  安。假使把支路  $b$  拆斷，那末全電路的電阻是  $5 + 6 + 6 + 3 = 20$  歐。電路裏的電流，也就是  $c$  支路裏的電流，是  $\frac{8}{20} = \frac{2}{5}$  安。 $b$  支路的拆斷就把  $c$  支路裏的電流從  $\frac{1}{2}$  安變更到  $\frac{2}{5}$  安。在這個情形之下， $b$  支路的拆斷和  $c$  支路的電流是有影響的。

假使  $a$  和  $d$  的電阻是小到可以略去不計，但是電池組的內電阻有 3 歐，那末全電路的電阻是  $b$  和  $c$  並聯的總電阻加電池組的內電阻 =  $2 + 3 = 5$  歐。電路裏的總電流是  $\frac{E}{R} = \frac{8}{5} = 1\frac{3}{5}$  安。電池組的電壓是  $8 - \frac{8}{5} \times 3 = 8 - \frac{24}{5} = 3\frac{1}{5}$  伏。 $b$  和  $c$  支路兩端

的電壓，因為  $a$  和  $d$  的電阻可以不計，是等於電池組的電壓或者應用歐姆定律，電壓 = 總電流  $\times$   $b$  和  $c$  的並聯電阻 =  $\frac{8}{5} \times 2 = \frac{16}{5} = 3\frac{1}{5}$  伏。 $b$  支路裏的電流是  $\frac{16}{5} \div 3 = \frac{16}{5} \times \frac{1}{3} = \frac{16}{15} = 1\frac{1}{15}$  安。 $c$  支路裏的電流是  $\frac{16}{5} \div 6 = \frac{16}{5} \times \frac{1}{6} = \frac{16}{30} = \frac{8}{15}$  安。假使  $b$  支路拆斷，那末這個電路同上面講的兩個情形一樣成一個簡單電路，電路裏無論那一處的電流都是一樣。全電路的電阻是  $6 + 3 = 9$  歐，電流是  $\frac{8}{9}$  安，這也是  $c$  支路裏的電流。 $b$  支路的拆斷，把  $c$  支路的電流從  $\frac{8}{15}$  安變更到  $\frac{8}{9}$  安。

## 習 題

1. 兩個電阻，一個是 30 歐，一個是 20 歐，並連接起來。求 (a) 它們的總電阻；(b) 它們的總電導。 答 (a) 12 歐。 (b)  $\frac{1}{12}$  姆。

2. 十隻 220 歐的電燈，並連接在一個 110 伏的電路上。(a) 問這十隻並聯電燈的總電阻是多少？(b) 假使十隻電燈都燃點，電流是多少？

答 (a) 22 歐。 (b) 5 安。

3. 要使一個 20 歐電阻的電路裏有 6 安的電流，應當用多少伏的電壓？ 答 120 伏。

4. 假使要把一個有 70 歐的電器裏的電流，在 220 伏電路上，限到 2 安，問應當增加的串聯電阻是多少？ 答 40 歐。

5. 四個支路，它們的電阻是 2, 4, 5 和 10 歐，並連接在一個 220 伏的電路上，求 (a) 每個支路裏的電流；(b) 電路裏的總電流。

答 (a) 110, 55, 44, 和 22 安。 (b) 231 安。

# 第四編 靜電學

## 第九章

### 電 荷

**9.1 概論** 一根玻璃桿和一块綢布摩擦，兩個物體就有電荷。這種帶電荷的物體叫做帶電體(electrified body)，發生電荷的手續叫做起電(electrification)。電荷都發生在受到摩擦的部分，若是用導體或者手指和這部分接觸，電荷就藉着導體或者手指流到地上去，物體上就沒有電荷。絨布摩擦火漆，或者皮帶輪和皮帶摩擦，也可以起電。

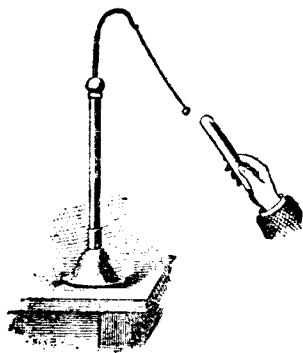


圖9.1 一個驗電用的小木髓球。

一個帶電的玻璃桿攜近一個和地絕緣的輕小物體，像圖 9.1 裏的小木髓球，小球就被吸引。假使把小球和玻璃桿接觸，小球就立刻離開去。再把玻璃桿移近些，小球仍舊離開。把另外一個小木髓球用同樣方法起電，放得很近，兩個球就互相推斥。

火漆用絨布摩擦，也成功帶電的物體，同玻璃桿一樣，也可以吸引像圖 9.1 裏的小木髓球。帶電的火漆在木髓小球上的作用和帶電的玻璃桿在木髓小球上的作用是完全一樣的。但是用玻璃桿起電而被推斥的木髓球，放在帶電火漆的附近，就被吸引。所以火漆上的電荷同玻璃桿上的電荷是不同的。

照上面講的試驗，電荷或者靜電有兩種：一種叫做陽電荷 (positive charge)，一種叫做陰電荷 (negative charge)。兩種電荷是同時發生的，不過是在兩個物體上。一個物體上有陽電荷，另一個物體上一定有陰電荷；一個物體上有陰電荷，另一個物體上一定有陽荷。只有陽電荷而沒有陰電荷，或者只有陰電荷而沒有陽電荷，是不可能的。玻璃桿同綢布摩擦，玻璃桿上的電荷是陽的；同時，綢布上就有同量的陰電荷。火漆和絨布摩擦，火漆上的電荷是陰的，絨布上就有同量的陽電荷。照電子論的講法，可以說電子是從一個物體上擦掉，加到另一個物體上去了，所以一個物體上的陰電荷就有增加，另一個物體上的陽電荷也有同量的增加。

有時固體和液體的摩擦，可以起電。例如汽油 (gasoline) 在管子裏流過，可以使管子起電。

一個金屬物體起電以後，假使有導體的路徑可以通地，電荷就從物體流到地上去了。一個非導體或者絕緣體像硬橡膠一類的東西，只有被摩擦的一部分可以起電，電荷不能夠從物體一處流到別處。金屬物體起電以後，電荷散佈在整個物體的表面。要使金屬物體保持它的電荷，一定要用非導體的東西，使它和地絕

緣。若是要使金屬物體上的電荷跑到地上去，只要在金屬物體上裝一個通地的導體和地連接，像載氣油的車是用一根拖練通地的。氣油流過出油管而起的電荷就藉着拖練流到地上去了。同樣的理由，氣油唧筒都是通地的，輸油的橡膠管裏面，也襯金屬物，這都是使電荷有路徑可以通地。

**9.2 靜電定律** 靜電荷的作用，從許多試驗的結果，可以歸納成功下面幾條定律：

(I) 兩個物質不同，沒有帶電的物體互相緊觸，像摩擦，一個物體就有陽電荷，另一個物體就有陰電荷。

(II) 一個沒有帶電的物體甲，和一個帶電的物體乙相緊觸，甲就帶電，甲所帶的電荷同乙的電荷是一樣的。

(III) 帶同樣電荷的物體，互相推斥；帶不同樣電荷的物體，互相吸引。

### 表一 摩擦電序表

1. 毛皮	6. 木棉	11. 金屬物
2. 絨布	7. 絲	12. 火漆
3. 象牙	8. 皮革	13. 松香
4. 晶體	9. 人的身體	14. 馬來樹膠 (gutta-percha)
5. 玻璃	10. 木	15. 火綿 (gun cotton)

**9.3 摩擦電序** 下面一個各種物質的排列次序，叫做摩擦電序 (electric series) 表。這個表裏物質的次序是這樣排列的；假

使把一種物質和列在它下面的物質互相摩擦，起的電荷是陽的，和列在它上面的物質互相摩擦，起的電荷是陰的。例如，玻璃和毛皮摩擦，玻璃上的電荷是陰的；但是和綢布摩擦，玻璃上的電荷是陽的。有時，兩種物質摩擦而起的電很小很小，不容易觀察。

9.4 靜電感應 把一個帶電的物體甲放在一個和地絕緣的物體乙的附近，物體乙上就感生應電荷。這種現象可以用圖 9.2 的裝置來試驗。兩個導體  $ab$  和  $c$  是裝在絕緣物做的座子上的。導體  $ab$  的下面，懸掛幾對木髓做的小球。先把導體  $c$  起電，再把它移到導體  $ab$  的附近，一對對的小球就分離開來，像圖 9.2 所示。這可以表示導體  $ab$  上有感生的應電荷，並且一對對的小球上也有相同的電荷，所以互相推斥。假使把導體  $c$  移開，小球就回復到原來的位置，表示小球上的電荷是沒有了，同時，導體  $ab$  上也一定沒有電荷。

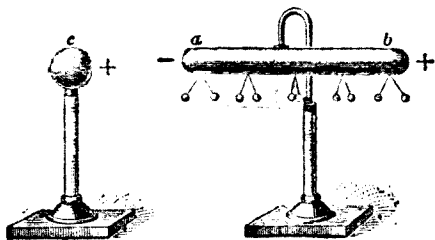


圖9.2 導體上應電荷佈置的實驗。

當兩個導體相近的時候，導體  $c$  上的電荷吸引導體  $ab$  裏相反的電荷到近導體  $c$  的一端  $a$ ；同時，排斥和導體  $c$  上相同的電荷到離導體  $c$  遠的一端  $b$ 。導體  $ab$  上感生的應電荷大都齊集在兩端的地方，所以懸在近端的小球比懸在中部的小球分離得開。當導體  $c$  移開的時候，導體  $ab$  兩端的電荷，因為沒有了吸引和

排斥，就互相中和，所以一對對的小球就回復到原來的位置。只要把一個帶電的導體移近和移離導體  $ab$ ，就可以使一對對的小球忽而分開忽而合攏。

把一個帶電的導體攜近另一個導體而感生應電荷的現象叫做靜電感應(electrostatic induction)。

**9.5 靜電感應的電子論** 照電子論的假定，一個沒有帶電的物體，有一個相當數目的電子，換句話說，在沒有帶電的物體裏，所有的陰電荷和所有的陽電荷是相等的。一個帶陽電荷的物體是電子缺少的，一個帶陰電荷的物體是電子過剩的。當導體  $c$  移近導體  $ab$  的時候，像圖 9.2 所示， $c$  上的陽電荷吸引  $ab$  裏的電子，因為導體裏的電子可以自由流動，所以就跑到  $ab$  近  $c$  的一端，就是  $ab$  的  $a$  端。這樣， $ab$  的  $b$  端的電子缺少，所以  $a$  端有陰電荷  $b$  端有陽電荷。

**9.6 靜電感應引起的電閃現象** 假使兩個導體，一個帶的是陽電荷，另一個帶的是同量的陰電荷，把兩個導體移到很近的時候，兩個導體上不同性電荷的吸引力很大，電荷能夠從一個導體，經過空間，跳到另一個導體上去，兩個導體間的空間，就發生電花(spark)。同平常所見的電閃(lightning)的現象是完全一樣的，不過規模小些罷了。在電閃的時候，不同性的電荷是在兩塊雲上邊的，或者在雲和地的上邊，吸引力是很大很大，電荷經過空間的時候，可以發生一個很亮很大的電花，或者閃光(flash)。這樣一來，兩種電荷的一部分或者全部變成中和。

一塊帶陽電荷的雲，降落到很低的時候，可以在電燈和電話線上或者樹木房屋上感生陰電荷。在這個時候，假使有一塊帶陰電荷的雲行到帶陽電荷雲的附近，因為異性電荷吸引很強，就發生放電(discharge)。放電以後，兩塊雲都成中和，就沒有感應的作用。電燈，電話線，和樹木，房屋上的感應電荷(induced charge)，因為沒有了吸引力，就立刻揀電阻最小的路徑回到地上。電線，樹木等的電荷，都是很緩緩的感生的，因為帶電的雲是慢慢的降落的；但是放電的時間是很短很短，所以感生電荷的退回地上也是很快很快的。若是有人在空曠的地方，附近沒有樹木和房屋，帶電的雲降落的時候，可以感生大量的應電荷。但是當低雲和別塊附近的雲發生放電，電荷驟然消失，人體上的感生電荷驟然從身體上回到地上，人就受到一個很劇烈的震動。這種現象叫做電震(electric shock)。電震的時候，好像遭着打擊一樣，所以有人相信是被閃電所擊。電震有時也叫做回震(return shock)，因為這是應電荷回到地上去發生的。

**9.7 絕緣介質的擊穿** 兩個導體，中間隔着絕緣介質空氣，把導體上的電荷密度逐漸增加，加到密度相當大的時候，電荷能夠從一個導體，穿過空氣，跑到另一個導體上去。用別種物質做絕緣介質，也可以有同樣的情形，不過所需的電荷密度不同罷了。絕緣介質在這種情形之下，叫做疲竭(break down)或者擊穿(punctured)。兩個導體上電荷的吸引作用，在絕緣介質沒有擊穿以前，並不因為絕緣介質的存在，有什麼影響。例如把一張



紙放在圖 9.2 裏導體  $ab$  和  $c$  的中間，導體  $c$  仍舊可以使導體  $ab$  有應電荷。但是要使導體間發生電花，先要把  $ab$  和  $c$  上的電荷密度增加，等到紙被擊穿的時候才能有電花通過。

# 第十章

## 容 電 器

**10.1 概論** 一個容電器(electric condenser)是利用靜電感應的效應來儲蓄電荷的一種裝置。最簡單的容電器是用兩片導體，中間隔着一層絕緣物質做成的。假使把一片玻璃，兩面都貼一層錫箔(tin foil)。就是一個簡單的容電器。兩片導體叫做容電器片(plate)；中間的絕緣物質叫做容電器的介質(dielectric)。品質比較優良的儀器和精密量度上用的容電器，都用很薄的錫箔做片，用雲母或者玻璃做介質。品質比較差些的容電器，也用很薄的錫箔做片，用浸油的紙做介質。有些容電器，用金屬板做片，用空氣做介質。商用容電器有各種式樣，一種式樣有一種用處，完全看用在什麼地方和那種電路上。容電器的名稱是把它用的介質來定的；用雲母的叫做雲母容電器(mica condenser)，用空氣的，叫做空氣容電器(air condenser)，用紙的叫做紙容電器(paper condenser)。

一根和地絕緣的金屬線，同地或者和地連接的導體，也可以當作容電器的兩個片，線和地間的空氣可以當作容電器的介質。地下或者海底的電纜，也是一個容電器。電纜裏面的導體，和外面鋼的裝鎧(steel armour)或者鉛皮是容電器的兩片，中間的

絕緣物像加硫橡膠，紙，或者苧麻，是容電器的介質。

有幾種電路裏，容電器的效應，很不相宜；但是在另幾種電路裏，是需要容電器效應的。例如，一個長距離的電話線或者電纜，容電器效應很大，若是不把它中和，可以使傳遞的聲音發生畸變(distortion)。減小這種畸變，把加感線卷(loading coil)或者抗流線卷(choke coil)，分佈在電路的各處。抗流線卷的原理和構造，另有專冊講述。

**10.2 輸電線路的電容** 長距離的輸電線路 (transmission line) 也有很大的容電器效應或者電容(capacity)，在裝置和使用輸電線的時候，一定要很當心。電路和發電機連接的時候，因為輸電線的電容，可以儲蓄大量的電荷；但是在電路和發電機拆斷的時候，輸電線的放電，可以釀成意外的危險。服務員工，以為電路已經拆斷，一定沒有什麼危險，工作的時候，用手或者導體做工具，和線接觸，線上儲蓄的靜電荷，就藉着人的身體放電到地上，使工作的人受到一個很厲害的電震，也許致死。這種危險，

只有在高電壓輸電線裏，才能碰到，所以在拆斷這種線路以後，一定先要把輸電線通地，才可以工作。

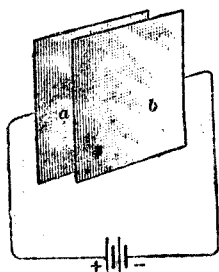


圖10.1 一個簡單容電器 一個電池組的兩個極上的。在電壓剛纔加到

**10.3 容電器的原理** 圖 10.1 裏的容電器，*a* 和 *b* 是容電器的兩塊金屬片，兩片間的空氣，是容電器的介質，容電器的片是接在

片上的時候，就有一個電流衝到容電器的片上。起初的時候，電流很大，漸漸的減到沒有，電流從開始流動到停止，時間很短，不過一秒鐘的很小很小的一部分。容電器的片上，就積有電荷。這叫做已起電的容電器。 $a$ 片上的陽電荷和 $b$ 片上的陰電荷是一樣多少的。片上電荷量的多少看所加的電壓大小而定。電壓越大，片上的電荷量越多。

$a$ 和 $b$ 片上兩種不同的電荷，有互相中和的趨勢，片間的空氣裏，就發生一種應力(stress)，這就是空氣的介質應力(dielectric stress)。起初連接的時候，電流是繼續從電池組流到片上，直等到介質應力和電壓互相平衡，方才停止。但是在介質的本身，並沒有看得見的畸變，也許介質裏有一種不可見的物理變更。

10.4 容電器的水力的筒類喻 用水力唧筒的動作來說容電器裏介質應力，比較容易明瞭。圖 10.2(a) 的水力唧筒  $a$  和

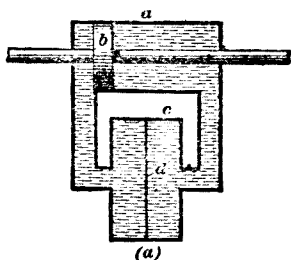


圖 10.2a

用水力唧筒來說明一個容電器沒有受到電壓時候的情形。

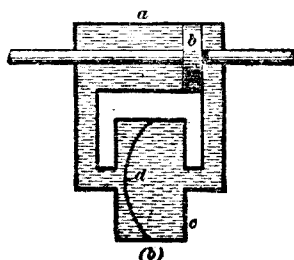


圖 10.2b

用水力唧筒來說明一個容電器受到電壓時候的情形。

它的活塞  $b$ ，是另外用機器來策動的，我們可以當它是水壓源 (source of hydraulic pressure)，相當圖 10.1 裏電池組的電壓。圖 10.2(a) 裏的圓柱筒  $c$ ，和它的彈性隔膜  $d$ ，相當一個容電器。彈性隔膜相當容電器的介質。唧筒和圓柱筒裏的水可以當做電。

活塞  $b$ ，圖 10.2(a)，沒有受着壓力的時候，彈性隔膜  $d$  是一個平片，在圓柱筒的中央，把圓柱筒裏的水分成兩個相等的部分，活塞受着壓力而移向右邊的時候，圖 10.2(b)，唧筒裏的水被迫流到圓柱筒裏，彈性隔膜就有畸變。雖然水並沒有流過隔膜，但是唧筒和圓柱筒連接的管子裏，水是流動的。活塞受着壓力，繼續向右移動，彈性膜的畸變也繼續增加，管子裏的水，也繼續流動，直等到活塞的壓力和彈性膜所生的壓力，互相平衡，水流方才停止。在這個時候，彈性膜保持它的畸變，不能夠再有增加，也不減小。同樣的講法，電壓加到容電器片上，介質就有畸變，電流雖然不能夠通過介質，但是接線裏有電的流動。等到由介質畸變而發生的應力，和片上因電荷而起的電壓平衡，電流就停止。上面已經講過這個時間是很短很短的。平衡的時候，介質保持它的畸變。若是片上的電荷有增減，電壓就有變更，畸變和電壓失去了平衡，畸變也跟着變動，等到和變更的電壓，再有一個新的平衡，方才停止。已經起電的容電器，介質裏都有這種不可見的畸變的。

一個已經起電的容電器，就是把電源拆斷，它的片上仍舊可

以保持已積的電荷，介質也保持它的畸變。若是用一根線把兩個片連接起來，兩片上不同性的電荷，立刻中和，線裏就有一個衝動的電流，起初很大，經過了一個很短很短的時間，電流就停止。這種情形，叫做放電(discharge)。放電以後，片上的電荷完全中和，電壓減到零，同時，介質的畸變也完全消滅。

10.5 容電器的構造 上節裏講的是一個最簡單的容電器，導體片只有兩塊；實際上用的容電器，導體片的塊數很多，分成兩組。每一組的片是連接起來的，一組的片和另一組的片是互相間夾的。兩片之間是一片絕緣物的介質。每組有一個端鈕。圖10.3是固定容電器(fixed condenser)構造的一種，圖(a)表示

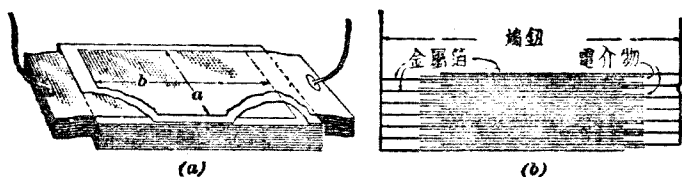


圖10.3 固定容電器的構造：(a)表示有一塊導體片和一塊絕緣片，已經切去一部分。(b)表示容電器的截面。

一塊導體片和一塊絕緣片，有一部分已經切去，圖(b)是這種容電器的截面。容電器導體片的有效部分和絕緣片緊相接觸的部分，圖(a)裏的尺度  $a$  和  $b$  是導體片的有效部分的闊狹。 $ab$  的乘積和絕緣介質片的片數就是介質的總有效面積。導體片和介質片配合以後，外邊用兩塊絕緣物板封閉，再壓緊夾住。

圖10.4是一個可變容電器(variable condenser)，它的電

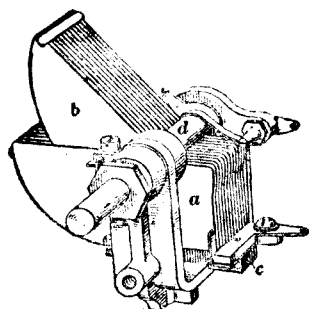


圖10.4 一個可變容電器。

容可以在一個量程(range)內變動。這種容電器有兩組導體片  $a$  和  $b$ ，片間的空氣就是介質。固定的片組  $a$  是連接起來的，整個片組是很牢固的裝在一個絕緣板  $c$  的上邊。片組  $b$  是裝在一個轉動軸  $d$  上。軸轉動的時候，把片組  $b$  在片組  $a$  的間隙裏移進和移出，但是不和片組  $a$

碰觸。當片組  $b$  完全移進片組  $a$  裏的時候，容電器的電容是最大；片組  $b$  漸漸的移出來，電容就漸漸的減小，片組  $b$  完全移出片組  $a$  的時候，電容是最小。

片組  $a$ ，因為它是固定的，叫做靜片組(stationary plates 或者 stator)。片組  $b$ ，因為它是可以轉動的，叫做動片組(movable plates 或者 rotor)。

容電器在電機工程和無線電工程的線路圖裏，用圖 10.5 裏的圖形符號 (graphical symbol) 來

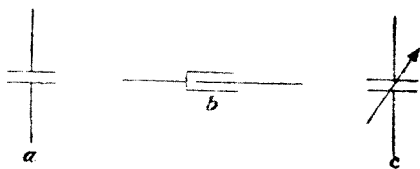


圖10.5 容電器的圖形符號。

代表的。符號  $a$  和  $b$  是用來代表容電器有固定電容的，符號  $c$  代表容電器有可變電容的。

**10.6 容電器的電容** 容電器的靜電容(electrostatic capacity)或者電容(capacitance 或者 capacity)是等於把容電器

的電勢增高一個單位所需的電量。把一個裝氣體的袋來做一個類喻，可以明瞭電容的意義。同一個袋，多用些壓力把氣體裝進去，袋裏的氣體就可以多些，少用些壓力，就少些。所以袋的容積 (volume) 雖然沒有變更，但是所盛的氣體，因為裝氣時所用壓力的大小，可以有多少。袋裏已經裝有氣體，若再加些氣體進去，袋裏的氣體壓力就有增加。一個小袋，把它袋裏的壓力增高一個單位所需的氣體，比把一個大袋的氣體壓力增高一個單位所需的氣體來得少。我們就說小袋的容積小，大袋的容積大。袋的容積相當容電器的電容，袋裏的氣體相當容電器片上的電荷，裝氣體時用的壓力相當電池組加到容電器上的電壓，袋裏氣體的壓力相當容電器片上電荷的電勢。

容電器導體片上的電荷量也不固定的，要看導體片面積的大小，電池組加到片上的電壓的高低，電壓越高，電荷緊聚，電量越大。容電器也和裝氣袋一樣，一個小的容電器，它的電壓比較容易增高。把一個小導體圓球的電勢增高一個單位，所需的電荷量比較增高一個大導體圓球的電勢一個單位所需的電荷量來得少。要計算容電器的電荷量，一定要先知道容電器的電容和電勢。把  $C$  代表容電器的電容， $V$  代表電勢， $Q$  代表片上的電量，因為電容是把電勢增高一個單位所需的電量，也就是  $Q$  和  $V$  的商數，所以，

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



或者，

$$Q = VC$$

$$V = \frac{Q}{C}。$$

若是式內  $Q$  的單位是庫倫， $V$  的單位是伏特，那末  $C$  的單位是法拉(farad)。

10.7 關於電容的幾個條件 因為一個定值的電壓可以使一個容電器片有一個相當的電荷密度，把片的面積增加，就可以增加片面上的電量，所以要增加容電器的電容，只要增加片的面積。

同時，容電器的片放得越近，或者介質越薄，一個定值的電壓可以使電荷的密度增加。一個平行平面片的容電器(parallel plate condenser)的電容和片間的距離成反比。假使一個平行平面片容電器用 1.6 厘米厚的玻璃做介質，它的電容是 10 個單位，若是玻璃片的厚度減到 0.8 厘米，電容可以增加到 20 個單位。

除了上面講的兩點以外，容電器介質的物料也有很大的關係，一個容電器兩片間的介質的物料不同，就有不同的電容。例如，用同樣厚度的玻璃片或者紙片來代替兩片間的空氣，可以增加靜電感應，靜電感應增加，電容也就增加。

照上面講的幾點，我們得到一個結論，就是，容電器的電容同所用導體片的大小和式樣，介質的厚度，和介質所用的物料，都有關係的。

**10.8 介質和絕緣物的區別** 無論那一種物質，可以容許靜電感應通過的都叫做介質；凡是介質都是非導體或者絕緣物。但是介質和絕緣物是有區別的。凡是一種物質，對於電流有很大的電阻，是一種好的絕緣物；但是一種好的介質，一定要是一種對於通過靜電感應抵抗很小的物質。一個很好的絕緣物也許是一個不好的介質，但是介質都是絕緣物。把乾燥的空氣來做一個例子，乾燥的空氣是一種很好的絕緣物，但是一種很壞的介質。

**10.9 介質常量** 各種物質通過靜電感應的容許度和真空通過靜電感應的容許度的比叫做介質常量 (dielectric constant 或者 Specific inductive capacity)。介質常量和導體的電導 (conductivity) 的意義相同。各種不同的物質有不同的介質常量，但是各種非導體的介質常量都比真空大。空氣的介質常量和真空相差很少，平常把空氣的介質常量當做 1。

量度一種物質的介質常量，可以先量度一個用空氣做介質的容電器的電容和這個容電器兩塊導體片間空氣的厚度。再把要量度的介質來代替空氣，把介質的厚度增減等到容電器的電容和用空氣做介質的時候一樣。那末介質的厚度和空氣的厚度的比，就是介質常量。假使用松香做介質，要 2.55 單位的厚度方才同一個單位厚度的空氣介質有一樣的電容，那末松香是一個較好的介質。但是空氣的介質常量是 1，所以松香的介質常量是  $2.55 \div 1 = 2.55$ 。

**10.10 介質的吸收本領** 容電器的電容和量度的方法是有

關係的。量度的方法不同，電容也有差異。因為介質吸收電能的本領，要看起來起電和放電的快慢。快慢不同，得到的結果也不同。這就叫做介質的吸收本領 (absorptive power of dielectrics)。假使有一個容電器，先用每秒鐘裏起電和放電很多次數的方法來量度，再用每秒鐘起電放電次數比較少的方法來量度，那末，第一個方法得到的電容比較第二個方法得到的來得小。因為這個理由，所以用不同方法得到的介質常量的數值，和各人得到的數值，相差很多。表二是各種物質的介質常量。把空氣在一個大氣壓力時候的介質常量當做 1。

**10.11 固體物質的介質強度** 絕緣物質的介質強度 (dielectric strength) 是一種物質在沒有擊穿 (puncture) 或者疲竭 (disrupted 或者 breaking down) 以前可以擔當的最高電勢差或者電壓。在擊穿或者疲竭的時候，電花就可以穿過絕緣物質，成功一條導體的路徑。有幾種絕緣物質，在低電壓加上去的時候，抵抗電流通過的電阻很大，但是高電壓加上去，也許很容易疲竭。還有幾種絕緣物質，低電壓加上去的時候，電阻並不大，但是抵擋因高電壓而起的疲竭的本領比較大。物質一經擊穿，在擊穿的地方，變成碳化 (carbonized) 或者燒焦 (burned)，因為碳是一個很好的導體，所以物質的絕緣性就毀壞。

測定物質介質強度的方法是把要試驗的物質放在兩個金屬極之間，慢慢的把兩極間的電壓增加，等到物質疲竭，電花穿過。物質在這種情形之下，已經擊穿。在將穿未穿時候的電壓伏特

表二 各種物質的介質常量

物 質	介質常量K
空氣,在一個大氣壓力時 .....	1
空氣,在0.001毫米水銀柱壓力真空時 .....	0.94
空氣,在5毫米水銀柱壓力真空時 .....	0.999
乙醇或者酒精(ethyl alcohol) .....	25.8
甲醇(methyl alcohol, wood) .....	31.2
蜂蠟 .....	1.86
蓖麻油 .....	4.67
硬橡膠(ebonite) .....	2.5—3.5
硬化纖維(vulcanized fibre) .....	5—8
火石玻璃(flint glass),密度 4.5 .....	9.9
火石玻璃,密度 2.87 .....	6.6
冕牌硬玻璃(hardcrown glass) .....	2.48
鉛玻璃(lead glass)密度 3—3.5 .....	5.4—8
甘油(glycerine) .....	56.2
馬來樹膠(gutta percha) .....	3.3 —4.9
純橡膠(pure Indian rubber) .....	2.22—2.5
雲母 .....	4.6—8
橄欖油(olive oil) .....	3—3.16
馬尼刺紙(Manila paper) .....	1.5
石蠟(paraffin wax) .....	2—2.5
石油 .....	2.13
瓷 .....	4.38
石英 .....	1.77—2.55
松香 .....	2.55—3.7
蟲膠(shellac) .....	2.24—3.84
變壓器用油 .....	2.5
松樹汁(turpentine) .....	2.15—2.43
石油脂或者凡士林(vaseline) .....	2.2
蒸餾水 .....	81
楓木(maple wood) .....	3—4.5
橡木(oak wood) .....	3—6

數，就是物質的介質最高強度。把最高電壓伏特數用物質的厚度來除，就可以得到每單位厚度伏特數的介質強度。厚度單位在米制中用厘米，在英制中用密爾(mil)。一個密爾是一英寸的千分之一，或者一英寸等於1,000 密爾。

市上用的絕緣混合物，種類很多，成分也不一致，測定介質強度所用的方法不同，得到的結果，可以相差很大，所以只揀幾種普通常用的物料的介質強度寫在下面。介質強度的單位是每密爾伏特數。石棉 100；平常用的玻璃 200；各種紙 125 到 250；大理石 160；板石(slate) 35；石蠟 300；瓷 200。

**10.12 變壓器用絕緣油的介質強度** 變壓器裏用的絕緣油(insulating oil)和其它絕緣物質一樣，應當有支持高電壓的本領。油裏面只要有百分之 0.003 到 0.005 的水混入，影響油的介質強度很大。用標準的檢驗方法，很乾燥和很潔淨的絕緣油的介質強度應當是 80 到 90 仟伏的電壓。普通變壓器絕緣油的介質強度，英國的規定是不得小於 30 仟伏。30 仟伏以下的絕緣油，油裏的雜物和濕分過多，是不可以用的。

檢驗用的盛油器內部的尺度不得小於 55 毫米×90 毫米×100 毫米高。電極是銅製的圓球，直徑 13 毫米。兩極的軸線要在同一水平線上。兩極間的空隙是 4 毫米。兩極都要沒浸在油裏，離油面不得少於 50 毫米。油的溫度應當在 15.0°C. 和 20°C. 之間。

檢驗用的電壓是交流，它的頻率應當在 25 和 100 之間。電

壓的波形應當很近正弦波形。電壓波形巔值和平均方根值的比，不得超過 1.45。

**10.13 空氣的介質強度** 空氣的介質強度，直流比交流高。壓縮的空氣比稀疏空氣或者空氣在平常大氣壓力時來得高。一個空氣隙(air gap)，無論怎樣短，至少需要 300 到 400 伏方才可以有電花穿過。

使電花穿過空氣隙所需的電壓最高值或者巔值(crest value)同(1)電極的放法，式樣，大小；(2)空隙四週的導體或者絕緣體；(3)加施電壓的時間；(4)溫度，氣壓，和空氣的濕度都有關係的。其次，(1)電極的成分和它表面的情形；(2)電極電路的接法和常量；(3)電壓的波形和頻率；(4)空隙間空氣的電離情形；和(5)球面的光滑和準確度；也有相當的關係。

電花穿過空氣隙，若是情形都相同，所需的電壓和空氣隙的長度有一定的關係。所以空氣隙也可以用來量度高電壓。量度高電壓用的電極有兩種：一種是針狀的，一種是球狀的。用針狀電極的空氣隙就叫做針隙(needle gap)，用球狀電極的空氣隙就叫做球隙(sphere gap)。國際電工技術委員會的決定是採用球隙，因為球隙比針隙靠得住，並且國際電工技術委員會發表的球隙數據(data)也比較準確。

表三是 1935 年國際電工技術委員會公佈的球隙電花電壓。表裏的數值是根據空氣在大氣壓力 760 毫米水銀柱高，和溫度  $25^{\circ}\text{C}$ . 時的數據。正弦波形(sine wave)電壓的均方根 (root

## 表 三

國際電工技術委員會 1935 年公佈球隙電花電壓

溫度 25°C. 大氣壓力 760 毫米時的巔值

巔值 仟伏數	球隙距離毫米數，一球通地						
	球直徑毫米數						
	20	62.5	125	250	500	750	1,000
14	3.8	4.0					
16	4.4	...					
18	5.1	...					
20	5.8	6.0					
22	6.5	...					
24	7.2	...					
26	7.9	...					
28	8.75	...					
30	9.5	9.4					
32	10.6	...					
34	11.8	...					
36	13.0	...					
38	14.14	...					
40	15.9	13.1					
50		16.9	16.8				
60		21.0	20.7	20.5			
70		25.7	24.4	...			
80		31.1	28.8	28.0			
90		37.9	33.0	...			
100		46.5	37.4	35.5			
120			47.0	43.5			
140			58.0	51.5	51.5		
160			71.3	60.0	59.5		
180			89.0	69.0	67.5		
200				78.5	76.0	75.0	75.0
250				...	...	...	95.5
300				142	118	116	115
350					...	...	135
400					168	159	155
450					...	...	177
500					236	209	199
550					...	...	222
600					330	267	247
650						...	273
700						334	300
750						...	323
800						422	360
850						...	393
900						537	430
950							469
1000							514
1050							561
1100							611
1150							683
1200							751

mean square 或簡作 r.m.s.) 值是巔值乘 0.707。例如，巔值 500 仟伏的電壓相當均方根值 353.5 仟伏。球隙距離是 236 毫米，球的直徑是 500 毫米。

圖 10.6 是乾燥空氣在平常大氣壓力下的介質強度。所用的電壓是交流。曲線 A 是用針隙的，曲線 B 是用直徑  $\frac{7}{8}$  英寸磨得很光滑的球隙的。擊穿電壓是仟伏數。虛線是用來表示讀法的。例如一個 6 英寸針隙，需要 70 仟伏；但是 6 英寸的球隙需要 130 仟伏。其它針隙或者球隙需要的電壓，可以用同樣的方法來求得。

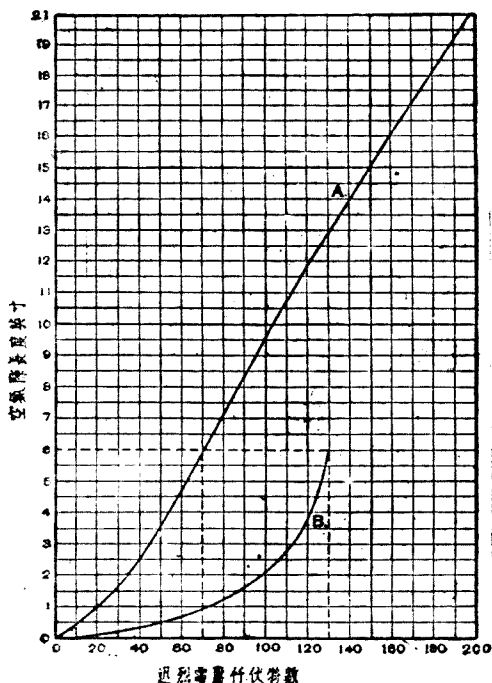


圖 10.6 乾燥空氣在平常大氣壓力下的介質強度。

10.14 電容的單位 電容的單位是法拉，省寫是法。一個容電器的電容，它導體片上的電量，和它的電壓的關係，在第 10.6 節裏，已經講過，可以用公式  $Q = VC$  來表示。C 是電容法數，Q

是電量。



是電量庫數， $V$  是容電器的電壓伏數。

假使一個容電器，有一個 1 安的電流通過 1 秒鐘，它積儲在導體片上的電量就等於 1 庫。在這個時間內，若是它兩端的電壓增加 1 伏，那末它的電容是 1 法。一個容電器有一法的電容，它的尺度要大到不得了。在實際應用上，用不到這樣大的單位。平常用的單位是微法(microfarad)。一個微法是等於一法的百萬分之一，或者

$$\begin{aligned}\text{微法} &= \frac{1}{1,000,000} \text{法}, \\ &= \frac{1}{10^6} = 10^{-6} \text{法}.\end{aligned}$$

在電機工程上，容電器的單位，大都是微法；在無線電工程上，微法這個單位還嫌大，用一個再小的單位，叫做微微法(micromicrofarad)。微微法是等於 1 微法的一百萬分之一，或者 1,000,000 微微法等於 1 微法。在無線電工程上還有幾種常用的電容單位，像毫微法(milli-microfarad)和厘米。毫微法是微法的千分之一，厘米和微微法的單位差不多一樣大小，1 厘米 = 1.112 微微法。

【例題 1】 假使 10 伏的電壓可以使一個容電器有一毫安的起電時的電流通過 0.01 秒鐘，問容電器的電容是多少？

【解】 電量庫數 = 安數 × 秒數；1 毫安 = 0.001 安，所以起電時的電量是  $0.001 \times 0.01 = 0.00001$  庫。又因  $C = Q/V = \frac{0.00001}{10} = 0.000001$  法 = 1 微法，所以容量器的電容是 1 微法。

【例題 2】一個 2.5 微法的容電器，接在一 50 伏的電路上，起電時需要的電量是多少庫？

【解】 2.5 微法 = 0.0000025 法，因  $Q = VC = 50 \times 0.0000025 = 0.000125$  庫。

10.15 容電器的並聯接法 容電器可以像圖 10.7 並聯接起來，或者像圖 10.8 串聯接起來。並聯的時候，總電容是等於各容電器電容的和。例如，圖 10.7 裏的  $C_1$  和  $C_2$  是兩個容電器的電容。 $T$ ， $T$  是它們的接線端。總電容  $C = C_1 + C_2$ 。假使有幾個電容相同的容電器並聯接起來，總電容是等於一個容電器的電容乘容電器的數

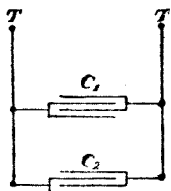


圖 10.7 兩個並聯接起來的容電器

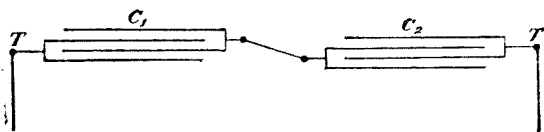


圖 10.8 兩個串聯接起來的容電器。

目。令  $C_1$  是一個容電器的電容， $n$  = 容電器的數目，那末，總電容

$$C = nC_1。$$

並聯容電器總電容的計算方法和並聯導體總電導的計算方法是一樣的，都是把各個的數值相加起來。

10.16 容電器的串聯接法 電容的倒數叫做倒電容 (elastance)。倒電容的單位叫做台拉法 (daraf)，簡寫作台。串聯容電器的總電容，像圖 10.8 的接法，可以先求每個容電器的倒電容，

再把倒電容加起來，得到總倒電容。總倒電容的倒數就是串聯容電器的總電容。假使兩個串聯容電器的電容是  $C_1$  和  $C_2$ 。T, T 是兩個接線端，TT 間的總電容是：

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}。$$

幾個電容相等的容電器串聯接起來，它們的總電容等於一個容電器的電容把串聯容電器的數目來除。令  $C_1$  = 一個容電器的電容， $n$  = 串聯容電器的數目，總電容

$$C = \frac{C_1}{n}。$$

幾個電容相等的容電器串聯，每一容電器的電勢差是等於 TT 間的總電勢差把容電器的數目來除。假使各容電器的電容不相等，但是串聯容電器的電量都應當相等的，因為串聯電路裏起電時的電流和起電的時間都是相同的。所以每個容電器的電壓是等於電量庫數把它的電容法數來除。在一組串聯容電器裏，電容最小的容電器電勢差最大，因為  $V = Q \div C$ ， $Q$  是相等的。若是容電器都是用同樣的介質，有一樣的介質常量，TT 間電壓逐漸增加的時候，電容最小的容電器最先擊穿。

【例題】三個容電器，它們的電容是 2,  $3 \times 4$  和 4 微法，求它們的總電容 (a) 並聯 (b) 串聯。

【解】(a)  $C = 2 + 3 + 4 = 9$  微法。

$$(b) C = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{\frac{13}{12}} = 1 \times \frac{12}{13} = \frac{12}{13} = 0.92 \text{ 微法。}$$

## 習 題

1. 四個容電器，它們的電容是 0.5, 1, 4 和 6 微法，求它們的總電容  
(a) 串聯, (b) 並聯。 答(a) 0.293 微法 (b) 11.5 微法。
2. 假使五個 2 微法的容電器, (a) 並聯接起來, 它們的總電容是多少?  
(b) 串聯接起來, 總電容是多少? 答(a) 10 微法 (b) 0.4 微法。

# 第五編 磁 學

## 第十一章

### 磁 體 和 磁 性

11.1 天然磁鐵 我國古時的人已經知道利用天然磁鐵 (natural magnet) 來指示方向。它們所用的天然磁是一種礦石,叫做磁鐵礦 (magnetite)。這種鐵礦可以吸引小塊的鐵,鋼和別種金屬物。把這種鐵礦做成一個小條,用線懸掛,使小條有一個水平的位置,可以繞着懸線在一個水平面上自由轉動,小條的方向終是指南北的。因為這個緣故,磁鐵礦也叫做導向石 (lodestone)。利用磁鐵礦特有的指向性質,做成我們平常用的羅盤 (compass)。

11.2 永久磁鐵 一根鋼針或者鋼條和天然磁接觸,就有和天然磁一樣的磁性 (magnetic property)。用這種方法做成的磁體 (magnet),可以在很長久的時期內保持它的磁性。我們叫這種磁體永久磁鐵 (permanent magnet)。商用的永久磁鐵都是鐵的合金做成的;像鐵和鎢 (tungsten) 或者鐵和鉻 (chromium) 的合金等。圖 11.1 所示的蹄形磁鐵 (horse-shoe magnet) 是一

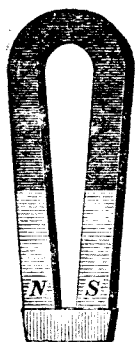


圖 11.1

蹄形磁鐵和銜鐵

種很普通的永久磁鐵。跨接在蹄形磁鐵兩端的一塊軟鐵 (soft iron) 叫做銜鐵 (armature 或 keeper)。銜鐵是用來幫助蹄形磁鐵保持它的磁性長久一些。永久磁鐵也有做成條形的，叫做條形磁鐵 (bar magnet)，像圖 11.2。



圖 11.2 條形磁鐵。

### 11.3 吸引和排斥 把一根條形磁鐵放在鐵屑

裏，鐵屑就黏聚在條的兩端，像圖 11.3。條的中部，鐵屑很少很少，足見磁性很弱。條形磁鐵的中部叫做中和區 (neutral region)，它的兩端叫做磁極 (magnet pole)。

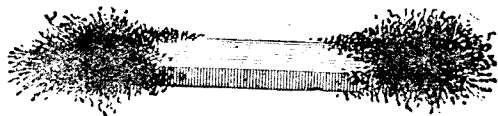


圖 11.3 鐵屑黏聚在條形磁鐵的情形。

經過條形磁鐵的兩

端的極，作一條直線，叫做磁軸線 (magnetic axis)。磁極間的距離叫做磁長度 (magnetic length)。磁極的位置並不是在條形磁鐵兩端的截面上，但是離截面很近，所以磁長度比條的長度短一些。平常計算的時候，也可以當它們是相等的。

無論那一種磁體，終有兩個磁極，沒有方法可以做成一個單磁極的磁體。假使把一根條形磁鐵，拆成許多許多小段，每一個小段，仍舊是一個磁體，仍舊兩端有兩個極。

一根磁化 (magnetized) 的針，像圖 11.4，平放在一個尖端

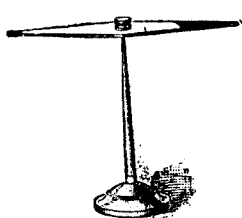


圖11.4 一個平放在尖端上磁化的針。

上邊，或者用線懸掛起來，使它可以是一個水平面上自由轉動，就成一個羅盤。假使附近沒有鐵，鋼或者別的磁體，這個針轉動停止的時候，一端指着地球的北極，另一端指着地球的南極。指北極的一端叫做指北極(north seeking pole)或簡稱北極(north pole)；指南極的一端

叫做指南極(south seeking pole)或簡稱南極(south pole)。磁體上標誌的  $N$  和  $S$  是表示磁體的北極和南極的。

若把一個磁體的北極靠近另一個磁體的南極，兩個極就有吸引的作用；假使兩個北極或者南極相近，就有推斥的作用。從上面的試驗，我們得到磁性作用的定律 (law of magnetic action)：同性磁極互相推斥，異性磁極互相吸引。

**11.4 磁極強度** 一個磁體吸引或者推斥力的大小，要看磁體兩端自由極(free pole)的多少。自由極的數目多，力就大。自由極的多少叫做磁極強度或者極強 (pole strength)。一個磁體，無論它的式樣怎樣，北極一端的極強和南極一端的極強一定是相等的。

**11.5 磁矩和磁化強度** 一個磁體的極強和它的磁長的乘積叫做磁矩(magnetic moment)。一根條形磁鐵，它的磁長和它的實在長度，相差很小，可以當做一樣。把  $m$  來代表極強， $l$  代表磁長，那末磁矩  $= ml$ 。假使條形磁鐵的截面面積是  $A$ ，它的體

積可以當做等於  $lA$ 。每單位體積的磁矩叫做磁化強度 (intensity of magnetization)。所以磁化強度  $= \frac{ml}{Al} = \frac{m}{A}$ ，就是每單位截面面積的極強。

**11.6 地球是一個很大的磁體** 地球可以當做一個很大的磁體，它的兩個磁極和地理上的南北極很相近，可以當做在同一地點。地球既然是一個磁體，磁性作用的定律當然也適用。所以一個用線懸掛可以自由轉動的磁體，終是指着南北的方向。地球的南磁極是在地球北極附近的地方；地球的北磁極，是在地球南極附近的地方。磁針或者別種磁體的指北極，雖然叫做北極，但是和地理上的北極，恰正相反。

**11.7 磁場和磁力線** 磁體的吸引和推斥力是有一定的方向的。假想一個北極放在磁體的附近，這個北極就循着磁體的吸引或者推斥合力的方向運動。運動的路線叫做磁力線 (magnetic line of force)。照這樣看法，一個磁體四週的空間，可以假想無窮數的磁力線。若是把一個可以磁化的物體放在裏邊，就有吸引或者推斥的作用。這種空間叫做磁場 (magnetic field)。

磁場裏磁力線的方向，可以用下面一個試驗來表演。把一張硬紙板平放在一根條形磁鐵上，用鐵的銼屑勻灑，若是條形磁是橫放的，紙面上的銼屑就依着磁力線的方向排列成許多曲線，從條形磁北極的一端到南極的一端，像圖 11.5 所示。假使條形磁是豎立的，紙面上的銼屑就排列成許多沿徑 (radial) 的直



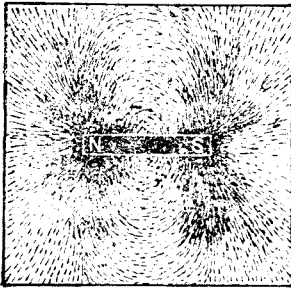


圖11.5 銼屑依着條形磁鐵磁力線的方向排列成功的曲線。

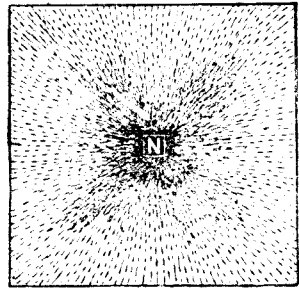


圖11.6. 銼屑在豎立條形磁一端排列成功的沿徑直線。

線，像圖 11.6 所示。做這個試驗的時候，要用手指把紙板輕彈，使銼屑容易排列。

我們要知道圖 11.5 和 11.6 裏銼屑的排列，不過表示磁力線的方向，並不是只有這幾條曲線上才有磁力，別處像兩根曲線之間，就沒有磁力。實則磁場裏沒有一處沒有磁力，沒有一處不可以假想一條磁力線。磁力線不過是用來了解磁場裏情形的一種幫助，給我們一個可以想像的觀念，並不是磁場裏真有什麼線。物理學上用這種方法的地方很多，切不可拘泥。

在電場裏任何一點的地方，假想一個單位磁北極放在那裏，這個單位磁北極所受到的力就是這一點的磁場強度(magnetic field intensity)。磁場強度的單位是每單位磁極達因(dyne)數。達因是厘米克秒制(centimeter gram second system 簡稱 c.g.s. system) 力的單位。1 達因約等  $\frac{1}{981}$  克，或者 1 克的力 = 981 達因的力。磁場強度的方向就是單位磁北極受到力的方向。

點離磁體越近，磁場強度越大；越遠越小。照理論講，除非點在無窮遠，終有磁場強度。在實際上，在一個條形磁鐵一兩米以外，磁場強度已經很小很小，可以略而不計了。

表示磁場裏某一點的磁場強度，可以在這一點的地方，假想一個平方厘米平面，穿過這個平面的磁力線數代表這一點磁場強度的大小。平面要和磁力線成正交。每單位磁極 1 達因的磁場強度，可以用每平方厘米穿過 1 條磁力線來表示；每單位磁極 5 達因的磁場強度可以用每平方厘米穿過 5 條磁力線來表示。

一個磁場裏，任何一點地方的磁場強度都是相等的，換句話說，就是磁場強度的大小和方向都是一樣的，叫做均強磁場 (uniform magnetic field)。若是磁場裏各點的磁場強度，大小不同，或者方向不同，或者大小和方向都不同，叫做不均強磁場 (non-uniform magnetic field)。一間房子，所佔的空間，和地球比較是很小很小，大地的磁場在一間房裏，可以當做均強磁場。但是在房子裏放一根條形磁鐵，條形磁鐵的磁場是一個不均強磁場，房子裏的磁場也成不均強磁場。同時，假使房子的牆壁有鋼條，鋼窗，或者別種大塊的鋼鐵物件，大地磁場受到它們的應響，成一個不均強磁場。

**11.8 磁通量** 磁場裏的磁力線，照上一節的講法是沒有定數的。但是平常都用磁力線數來表示磁體的極強的，究竟怎樣才算一根磁力線。規定磁力線數的方法，先把磁場裏的磁力線分成功許多束。每一束的磁力線好像一根截面不同的管子。一個磁體

的磁場裏束的多少，和它的極強成正比，或者等於它的極強。每一束用它的中線來表示，當它一根磁力線。這種磁力線叫做磁體的通量(flux) 或者磁通量(magnetic flux)。磁通量或者磁力線的單位可以用馬克士威(maxwell)。

### 11.9 磁力線的方向和磁路

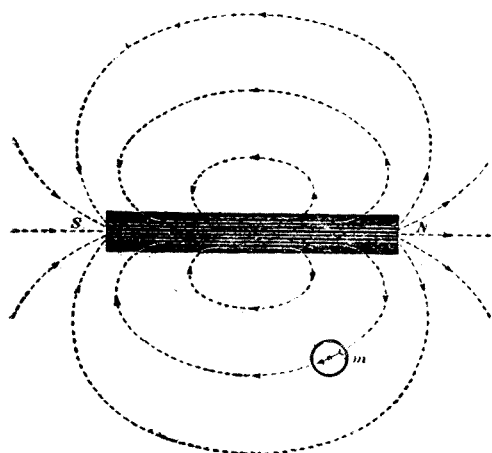


圖117 每一根磁力線是一個完整的環。

磁體的每一條磁力線是假定從北極起始，經過四周的空間，到磁體的南極；通過磁體的內部，回到北極，像圖 11.7 所示。每一條磁力線都是完整的一個環。磁場裏任何一點地方磁力線的方向就是這一點磁場強度的方向。磁力線通過的

路徑叫做磁路(magnetic circuit)。每一條磁力線各自成一個完全的磁路。圖 11.5 裏鏗屑所示的磁力線，許多磁力線從北極或者南極出發，到了極場裏就湮滅不見了，實則這種磁力線並沒有湮沒，仍舊是回到相反極的一端。沿磁軸線的一條磁力線，看上去好像它的磁路是不完全的，但是在理論上講起來，它的磁路是在無窮遠的地方兜轉來的。

一個磁場裏磁力線的方向，可以用一個懸掛的小磁針或者小羅盤來循描(trace)的。圖 11.7 裏的  $m$  是一個小羅盤。羅盤裏磁針北極所指示的方向就是磁力線的方向。換句話說，羅盤裏的磁針若是很短很小，它的磁軸線一定轉到和這一點地方磁力線的切線(tangent)平行。磁力線平常都用虛線或者細線描繪，它的方向用箭頭來表示，像圖 11.7。

在無論什麼磁場裏任何一點的地方，決沒有兩條相交的磁力線。倘然把兩個條形磁的同極性的一端，放得很近，兩極附近的磁力線互相擠軋，和兩個條形磁沒有放在一起時候各自的磁場完全兩樣，但是沒有相交的磁力線。每條磁力線仍舊表示兩個條形磁合力的方向。圖 11.3 和 11.9 圖所示的是兩個條形磁同性

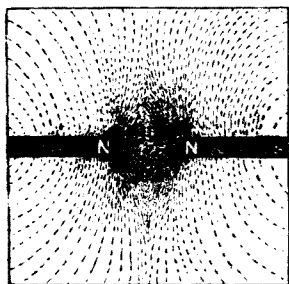


圖 11.8 兩根條形磁鐵，磁軸在一條直線上，同性極放在一起，銼屑排列成功的曲線。

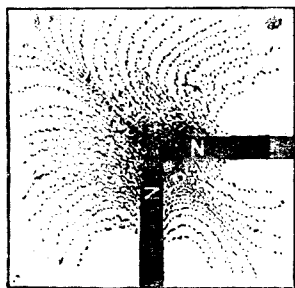


圖 11.9 兩根條形磁鐵，磁軸正交，同性極放在一起，銼屑排列成功的曲線。

極放在一起在紙面上灑成的銼屑圖。從圖裏銼屑排列成功的曲線，可以看得出這個磁場裏磁力線分佈的情形和每個條形磁沒

有放在一起時候原來的磁力線分佈的情形完全兩樣。兩極附近有一個區域，磁力線擠得很緊，這個區域的位置，和兩極極強的大小是有關係的。

每一個磁體的磁場，磁力線分佈的情形是有一定的，假使在這個磁場裏，另外放一個磁體，那末磁力線分佈的情形完全變動，成了一個畸變的(distorted)磁場。

11.10 蔗極 假使兩根條形磁，把它們同性極的兩端，互相接觸，成一根兩倍長的條形磁。這根條形磁有三個極，兩端的兩個極是同性的，中間一個極是異性的。這個中間的極實在是兩個極併成功的，叫做蔗極(consequent pole)。要把一根鋼條磁化，使它兩端有同性的兩個極，中間有幾個蔗極，是很不容易的，但是磁化得合法，也是可能的。圖 11.10 就是一根磁化成功有三

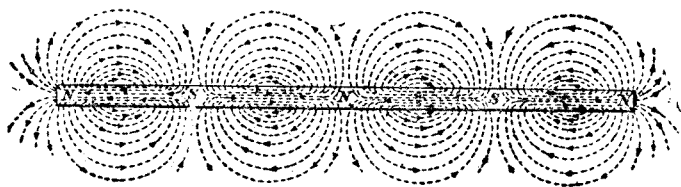


圖 11.10 有三個蔗極的條形磁。

個蔗極的條形磁。

11.11 磁質 無論什麼物質，放在一個磁體或者一根有電流的導體的附近，能夠發生磁性的叫做磁質(magnetic substance)。屬於磁質類的物質，對於通過磁力線的阻力都是很小。磁質不一定是磁體，這就是說，它們不一定有固定的磁極，但是它們

有被磁體吸引和推斥的可能。一塊軟鐵可以吸引一個磁體的無論那一個極，或者它本身可以被一個磁體無論那一個極吸引但是不在磁體附近的時候，它就沒有磁極，也不能夠吸引別的沒有磁化的軟鐵。

鐵的磁性，在我們知道的元素中是最好。但是有幾種非磁質(non-magnetic substance)的合金，也有很好的磁性。有幾種鐵的合金，比純鐵的磁性還要好。除掉了鐵和鐵的合金以外，像鎳，鈷(cobalt)，錳(manganese)，和鉻等，都有磁性，但是比鐵和鐵的合金小得多。

11.12 非磁質 無論什麼物質，沒有一種是完全不能夠通過磁力線的。非磁質對於磁力線通過的阻力，和空氣差不多，但是比鐵或者鋼要大到幾千倍。因為這個緣故，所以把非磁質的紙張或者木片放在一個磁鐵和它的銜鐵中間，並不影響它的磁性作用。磁力線通過這種物質和通過空氣一樣，仍舊可以在銜鐵裏感生磁性，把它吸引。

銅是非磁質，在電工製造上，用得很多；儀器和導線，都是用着銅的。鋁也是非磁質，電工上的用處也很多。

鐵製的物件，位置不變，久擱在一處，也可以被大地的磁場磁化。例如縛籬的鐵樁，年代長久，就可以被大地的磁場磁化，有很弱的磁性。把一個羅盤，攜到附近，就有吸引和推斥的作用。這種磁化的方法，叫做感應起磁(magnetization by induction)。磁化鐵和鋼，都是用這種方法的。

## 第十二章

# 磁 路

**12.1 概論** 關於磁路(magnetic circuit)裏產生磁性或者磁力線的定律,有幾點和電路裏發生電流的定律是一樣的。磁力線的路徑可以完全在鐵的裏邊或者別種磁質的裏邊,整個的磁路是鐵或者別的磁質做成功的一個通路;也可以一部分通過鐵,一部分通過空氣,成一個混合磁路(compound circuit)。

**12.2 磁感應** 一個磁質像軟鐵做的東西,放在磁場裏,就有磁力線通過,使磁質起磁。因為磁質比四週的空氣容易通過磁力線,所以磁力線都擠在磁質裏。用這種方法來把鐵起磁是暫時的。把鐵移離磁場,磁性就消滅。當鐵在磁場裏的時候,和別的磁體完全一樣,也有極性,磁力線進去的一端是南極,出去的一端是北極。用這種方法使磁質起磁叫做磁感應(magnetic induction)。

用磁感應起磁的磁體,除掉了磁場裏原來的磁力線以外,因為起磁以後,磁體就有磁極,由磁極的極強生出來的磁線叫做磁化線(line of magnetization)。把原來磁場裏的磁力線和磁化線加起來叫做磁感應線(line of magnetic induction)。

**12.3 磁應感強度和磁通量密度** 在由感應起磁的磁體裏,

假想一個平面，它的面積是一平方厘米，和磁感應線成垂直，那末每一平方厘米通過的磁感應叫做磁感應強度(magnetic induction)。因為磁感應線也叫做磁通量，所以磁感應強度也叫做磁通量密度(magnetic flux density)。

**12.4 磁通勢** 一個電路裏，要使電流流動，一定要有電動勢；一個磁路裏，要有磁力線的通過，一定要有磁通勢(magnetomotive force)。磁通勢是發生磁通量或者磁力線的主動者，也可以說是磁力線通過磁路時，克服磁路裏磁阻(reluctance)的本領。

永久磁或者一個有電流的線圈(coil)都可以發生磁通勢。磁質在磁場裏由感應而起的磁性，也可以說是因為有了磁通勢而發生的。在厘米克秒絕對電磁制(absolute c.g.s. electromagnetic system)中，磁通勢的單位是吉柏(gilbert)，實用制中用安培匝(ampere turn)，省作安匝。一個安匝等於1.257吉柏，所以，

$$\frac{\text{吉柏數}}{1.257} = \text{安匝數。}$$

**12.5 磁阻和磁導** 磁路裏的磁阻是一個磁路反抗磁力線通過的本領，相當電路裏的電阻。磁力線揀磁阻最小的路徑通過，和電流揀電阻最小的路徑流動是相同的。

一個磁路，磁阻的大小和磁路的長度成正比，和磁路正交磁力線的截面面積成反比；換句話說，磁路越長或者截面面積越



小，磁阻越大。磁阻的大小和磁路用的物質也有關係的。磁質的磁阻比非磁質的磁阻小。各種磁質的磁阻，大小也不同。

在厘米克秒電磁制中，磁阻的單位是奧斯特(oersted)。一奧斯特等於一立方厘米非磁質，像空氣，磁力線通過時所有的磁阻。這個立方每邊都是一厘米，它的相對的兩個平面，面積是一平方厘米，要同磁力線成正交。在這一個立方裏的磁力線的分佈一定要均勻。

磁阻的倒數叫做磁導(permeance)，相當電路裏的電導，也就是使磁力線通過的本領。磁導的單位還沒有名稱。假使一個電路，它的磁阻是3奧斯特，那末它的磁導就是 $\frac{1}{3}$ ，假使磁導是4，那末磁阻就是 $\frac{1}{4}$ 奧斯特。

無論那一種磁質，通量密度高的時候，磁阻大；通量密度低的時候，磁阻小。但是非磁質的磁阻，不論什麼通量密度，是沒有變更的。在磁質裏，通量密度加到相當數目的時候，若是再把通量密度稍些加一點，磁阻的增加很大。這個現象，叫做磁性飽和(magnetic saturation)。在磁化曲線(curve of magnetization)上叫做飽和點(saturation point)。純鐵，鑄鋼，矽鋼(silicon steel)飽和點的通量密度，每平方厘米，可以有21,000條磁力線；高導磁齊(permalloy)的飽和點通量密度每平方厘米不過11,600條磁力線。

12.6 導磁係數和磁阻係數 把一根軟鐵條，放在一個均強磁場裏，它的軸線同磁力線平行，鐵條就起磁成一個磁體。假

想在這根條形磁鐵的中間，割去一片，和磁力線成正交，就有一片的孔隙。孔隙裏每平方厘米通過的線數，12.3 節裏已經講過，叫做磁應感強度或者磁通量密度。把  $B$  來代表通量密度， $H$  來代表磁場強度， $\frac{B}{H}$  叫做導磁係數(permeability)。平常用希臘字母  $\mu$  來代表的，所以，

$$\mu = \frac{B}{H}$$

或者  $B = \mu H$ 。

真空的導磁係是當作 1 的，空氣的導磁係數和真空差得很少，平常也把它當作 1 的。

磁化強度和磁場強度的比叫做磁化係數 (magnetic susceptibility)。導磁係數的倒數叫做磁阻係數(reluctivity)。磁阻係數也可以說是一立方厘米的磁質，磁力線通過時的磁阻，但是磁質的每邊應當都是一厘米，相對兩平面要同磁力線成正交，立方裏磁力線的分佈要均勻。

表四是正常感應(normal induction)數據(平均值)。第(1)項是磁應感強度或者磁通量密度每平方厘米磁力線數或者高斯數。第(2),(3),(6),(8),(10),(12),(14),(16)和(18)項是各種磁質的磁化力每平方厘米磁力線數。第(3),(5),(7),(9),(11),(13),(15),(17)和(19)項是各種磁質的導磁係數。第(20)項是磁應感強度或者磁通量密度每平方英寸磁力線數。

第(2)項西方電器公司(Western Electric Co.)的高導磁

表 四  
磁感應數據 (平均值)

通量密度 ( $B$ ) 每平方厘米 磁力線數	高導磁齊 磁化力 ( $H$ ) 每平方厘米 磁力線數	高導磁齊 導磁係數 ( $\mu$ )	精煉磁齊 磁化力 ( $H$ ) 每平方厘米 磁力線數	精煉磁齊 導磁係數 ( $\mu$ )
10	0.0010	10,000	0.0015	6,670
16	0.0017	9,410	0.0021	7,620
25	0.0026	9,620	0.0034	7,350
40	0.0039	10,250	0.0058	6,900
64	0.0057	11,220	0.0089	7,190
100	0.008	12,500	0.0107	9,330
160	0.011	14,530	0.0130	12,200
250	0.016	15,620	0.017	14,700
400	0.021	19,030	0.023	17,400
640	0.026	24,600	0.029	22,050
1,000	0.030	33,200	0.036	27,750
1,250	0.033	37,900	0.041	30,500
1,600	0.036	44,500	0.047	34,050
2,000	0.038	52,600	0.053	37,750
3,000	0.044	68,200	0.069	43,500
4,000	0.049	81,700	0.100	40,000
5,000	0.060	83,300	0.137	36,500
6,000	0.080	75,000	0.185	32,400
7,000	0.12	58,200	0.25	28,000
8,000	0.20	40,000	0.35	22,850
9,000	0.50	18,000	0.50	18,000
10,000	2.0	5,000	0.76	13,160
11,000	20.0	550	1.40	7,860
12,000	500	24	2.50	4,800
13,000			4.8	2,710
14,000			10.0	1,400
15,000			40	375
16,000			400	40
17,000				
18,000				
19,000				
20,000				
21,000				
22,000				

表 四  
磁感應數據 (平均值)續前頁

高級矽鋼 4% 磁化力 (H) 每平方厘米 磁力線數	高級矽鋼 導磁係數 ( $\mu$ )	中級矽鋼 2.5% 磁化力 (H) 每平方厘米 磁力線數	中級矽鋼 導磁係數 ( $\mu$ )	低級矽鋼 1% 磁化力 (H) 每平方厘米 磁力線數
0.010	1,000	0,017	583	0.021
0.016	1,000	0.025	640	0.030
0.025	1,000	0.038	657	0.044
0.04	1,000	0.05	800	0.063
0.06	1,066	0.08	800	0.095
0.09	1,110	0.12	833	0.14
0.12	1,333	0.17	941	0.20
0.16	1,562	0.22	1,136	0.27
0.19	2,100	0.30	1,333	0.35
0.23	2,780	0.38	1,683	0.45
0.28	3,570	0.45	2,220	0.53
0.31	4,030	0.49	2,550	0.58
0.35	4,570	0.54	2,960	0.64
0.38	5,260	0.58	3,450	0.69
0.46	6,520	0.66	4,545	0.82
0.56	7,150	0.74	5,410	0.93
0.64	7,870	0.85	5,890	1.06
0.75	8,000	1.00	6,000	1.25
0.90	7,730	1.19	5,880	1.50
1.05	7,620	1.45	5,510	1.8
1.22	7,370	1.8	4,440	2.2
1.40	7,150	2.3	4,350	2.7
1.80	6,110	3.2	3,440	3.6
2.6	4,620	4.5	2,670	5.0
4.1	3,170	6.8	1,910	7.6
9.0	1,560	11.0	1,270	13.0
23	650	24.0	625	26.0
52	307	47.0	341	41.0
110	154	93	183	80.0
200	90	170	106	140.0
380	50	300	63	220
900	22	590	35	360
1,800	12	1,250	15	700
2,800	8	2,100	10	1,400

表 四  
磁感應數據 (平均值)續前頁

低級矽鋼 導磁係數 ( $\mu$ )	商用軋煉 純鐵力 磁化力 ( $H$ ) 每平方厘米 磁力線數	商用軋煉 純鐵 導磁係數 ( $\mu$ )	普通低碳 軋煉鋼 磁化力 ( $H$ ) 每平方厘米 磁力線數	普通低碳 軋煉鋼 導磁係數 ( $\mu$ )
476	0.033	303	0.038	263
533	0.05	320	0.041	390
568	0.07	357	0.093	269
635	0.11	367	0.14	285
674	0.16	400	0.21	310
715	0.21	4.6	0.29	345
800	0.29	551	0.41	390
925	0.40	625	0.52	481
1,142	0.55	727	0.67	598
1,422	0.68	941	0.82	780
1,886	0.75	1,332	1.02	981
2,155	0.78	1,602	1.13	1,105
2,515	0.82	1,50	1.24	1,290
2,900	0.87	2,300	1.4	1,428
3,655	0.94	3,190	1.6	1,875
4,300	1.00	4,000	1.8	2,220
4,720	1.15	4,350	2.1	2,380
4,800	1.4	4,280	2.4	2,500
4,660	1.6	4,370	2.8	2,500
4,440	1.8	4,440	3.2	2,500
4,090	2.0	4,500	3.8	2,370
3,700	2.3	4,350	4.5	2,220
3,050	2.8	3,930	5.3	2,080
2,500	3.3	3,640	6.6	1,820
1,710	4.1	3,170	8.6	1,510
1,070	5.5	2,550	12.8	1,090
577	10	1,500	17	556
390	20	800	28	571
213	40	425	52	327
129	80	225	95	189
86	145	131	165	115
56	230	87	280	71
30	360	58	500	42
15	940	23	1,100	20

表 四  
磁感應數據 (平均值)續前頁

軋煉鑄鋼 磁化力 ( $H$ ) 每平方厘米 磁力線數	軋煉鑄鋼 導磁係數 ( $\mu$ )	軋煉鑄鐵 磁化力 ( $H$ ) 每平方厘米 磁力線數	軋煉鑄鐵 導磁係數 ( $\mu$ )	通量密度 每平方英寸 磁力線數
0.050	200	0.08	125	64
0.075	213	0.13	123	103
0.11	227	0.19	131	161
0.15	266	0.29	138	258
0.22	291	0.44	145	423
0.30	333	0.65	154	645
0.42	381	0.91	176	1,030
0.57	439	1.2	207	1,610
0.79	506	1.6	250	2,580
1.03	621	2.0	320	4,230
1.23	813	2.5	400	6,450
1.38	905	2.8	446	8,100
1.57	1,018	3.3	485	10,300
1.8	1,110	4.0	500	12,900
2.3	1,304	7.0	429	19,400
2.8	1,430	14	286	25,800
3.3	1,520	25	200	32,300
3.9	1,540	45	133	38,700
4.5	1,560	70	100	45,200
5.2	1,540	81	99	51,600
6.2	1,450	160	56	58,100
7.5	1,330	220	45	64,500
9.5	1,160	310	35	71,000
12.5	960	410	29	77,400
16	813	620	21	83,900
22	636	1,000	14	90,300
32	469			96,800
50	320			103,200
82	207			109,700
130	138			116,100
200	95			122,600
340	53			129,000
800	26			135,500
1,800	12			141,900

齊(permalloy)是鎳和鐵的合金。磁化力小的時候，導磁係數很高，卷心(core)損失很小。它的初導磁係數(initial permeability)可以到9000，最高導磁係數可以到100,000。但是它的導磁係數很容易變更，受了震動或者磁的擾動，可以變更得很多。高導磁齊大都用來做電話線路上的加感錄卷和變壓器。這種裝置，在音頻(audio frequency)電流通過的時候，需要有高的電感和低的卷心損失，高導磁齊對於這兩個條件都可以滿足。高導磁齊最大的缺點是它的飽和點很低和它的磁性不很穩定。它的飽和點通量密度不過11,000。

第(4)項衛斯亨豪斯電器公司 (Westinghouse Electric Co.)的精煉磁齊(hipernik)是一種精煉過的鐵和鎳的合金。提煉的時候，把所含的雜質，差不多完全去除，尤其是氧。它的初導磁係數可以到6,000。也比普通用的磁質高得多。它的最高導磁係數可以到90,000，它的飽和點通量密度比高導磁齊稍為好些，可以到15,600。

第(6)，(8)和(10)三項是各級的矽鋼(silicon steel)。矽的成分可以從很少到百分之1或者5。矽的功用可以使這種合金的電阻增高，磁滯(hystresis)和渦流(eddy current)損失減小，並且還可以增加它的陳煉(aging)特性。矽鋼的用途很廣，電機和變壓器都用矽鋼片來做心子；別種電器，用矽鋼片的也很多。它的初導磁係數從325到750，完全看所含矽的多少；最高導磁係數從5,000到8,000；飽和點磁通量密度從19,500

21,200。初導磁係數和最高導磁係數，含矽越高，量值越大；飽和點磁通量密度。含矽越高，量值越小。

純鐵和鑄鋼(cast steel)，導磁係數比較的低。純鐵的初導磁係數是 275，最高導磁係數是 4500；鑄鋼的初導磁係數是175，最高導磁係數是 1500；但是它們的飽和點磁通量密度可以到 21,000。鑄鐵的初導磁係數不過 125，最高導磁係數也不過 500，飽和點磁通量密度也低，不過 14,000。純鐵大都用來做電機的極面，和替續器(relay)；鑄鋼是用來做電機的外框和磁極；鑄鐵只有用來做外框。

12.7 鐵磁質順磁質和反磁質 第十一章裏曾經講過物質可以分成功磁質和非磁質。這種分類，並不妥當。世界上的物質，實在沒有一種可以說是非磁質的；空氣，銅等都列在非磁質類裏的，但是都可以通過磁力線。照非磁質嚴密的定義，磁力線在這種物質裏，不應該通過。這和電路裏的導體和非導體的分類，一樣的不妥當。比較妥善的分類，應當依照物質的磁性而分成三類。第一類叫做鐵磁質(ferro-magnetic substance)；像鐵，鎳，和鈷，都可以給磁體吸引。它們的導磁係數大於 1 而且量值都是很大。第二類叫做順磁質(paramagnetic substance)。順磁質和鐵磁質有一樣的磁性，不過給磁體吸引的力很微弱。它們的導磁係數比 1 略大一些。現在知道的，有二十種元素是屬於這一類的；像鋁，鉻，錳，鈉(sodium)和鉑質。第三類叫做反磁質(dia-magnetic substance)。把一個反磁質的物體放在磁體的附近。



磁體對它的作用是推斥而不是吸引。它的導磁係數是小於 1。鉍 (bismuth) 是一種很強的反磁質，它的導磁係數是 0.9998。銻 (antimony)，磷 (phosphorus)，石英，玻璃，銅，銀，水和許多氣體都屬於這一類。

12.8 磁路定律 磁路和電路一樣，磁通勢，磁通量和磁阻的關係，可以用一個定律來表示它，這個定律叫做磁路定律。

$$\text{磁通量} = \frac{\text{磁通勢}}{\text{磁阻}},$$

把  $\Phi$  代表磁通量， $F$  代表磁通勢， $R$  代表磁阻，磁路定律可以寫成

$$\Phi = \frac{F}{R},$$

或者

$$F = \Phi R,$$

$$R = \frac{F}{\Phi}$$

公式裏的磁通量相當電路裏的電流；磁通勢相當電動勢；磁阻相當電阻。這個定律和電路上用的歐姆定律有一樣的形式。

磁路也有串聯，並聯和混聯等接法，計算總磁阻，同計算總電阻的方法完全一樣，可以應用電路上的各種定律。

# 第六編 電磁

## 第十三章

### 電流的磁效應

**13.1 概論** 電流通過一個導體的時候，它的四週就發生磁場。由電流發生的磁效應(magnetic effect)叫做電磁(electromagnetism)。電流發生的磁場裏的磁場強度，近導體的地方最大，距離越遠，磁場強度越小。假使把一根有電流的導線，穿過一塊平放的紙板，紙板的面和導線成正交。用鐵的銼屑勻灑在導線的四週，銼屑就繞着導線排列成

許多同心的圓圈，像圖 13.1 所示。這種磁效應；並不是只限在一個平面上，無論那一處，放一個和導線成正交的紙面，都有這種情形；所以一根有電流導線的磁場，可以假想是許多許多的同軸線圓圈，像圖 13.2。

假使電流是從左到右，像箭頭所指示的，人在導線的左端看，那末繞着導線的磁力線圈的方向是順

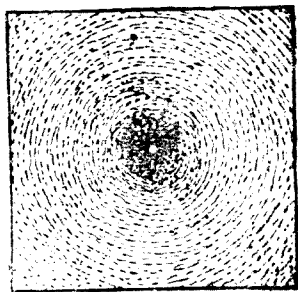


圖 13.1 銼屑繞着有電流的導線排列成許多同心圓圈。



圖 13.2 一根有電流導線的磁場

時針的 (clock wise)。假使導線的電流的方向反過來，從右到左，磁力線圈的方向也就反過來，變成反時針的 (counter clock-wise)。順時針三個字的意義是指鐘或者錶上時針轉動的方向而言，像圖 13.3 所示。

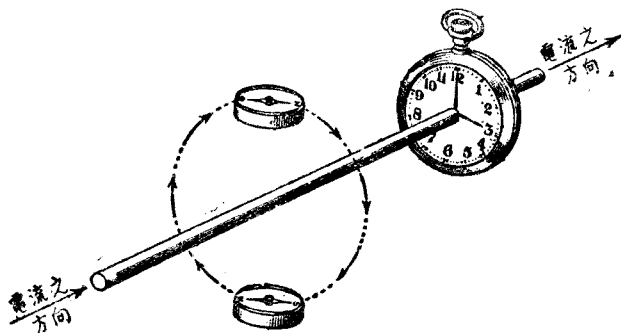


圖 13.3 電流和電流所生磁場內磁力線的方向。

**13.2 用羅盤針來定電流和磁力線的方向** 一個羅盤放在磁場裏，它的北極所指的方向就是磁力線的方向，這就是說，羅盤磁針的軸線終是和在這一點地方的磁力線的切線平行。圖 13.3 裏，有兩個羅盤，一個在導線上面，一個在導線下面，可以看得出電流發生的磁力線是繞着導線的圓圈。若是一個人順着電流的方向看，磁力線的方向是順時針的。把導線裏電流的方向反過來，兩個羅盤磁針的偏轉 (deflection) 也跟着反過來，表示磁

力線的方向，對於電流仍舊是順時針的。

**13.3 試驗電流方向的方法** 假使導體裏的電流是直流，羅盤也可以用來定電流的方向，因為直流和交流不同，它的方向是不變更的。試驗的時候，導線的一部分，最好是放在南北的方向，和平常羅盤磁針指示的方向平行。再把羅盤放在導線的附近，磁針北極偏轉的方向就可以定繞着導線磁力線圓圈的方向。假使一個人站在導線的一端看，所見的磁力線方向，若是順時針的，那末電流的方向是流向外邊去的；若是反時針的，那末電流的方向是流向看的人的。

把導線彎成一個環，把一個羅盤放在環的中心，像圖 13.4，磁針的偏轉可以增加，因為上下兩部分導線的磁力線合併起來，使磁針有同一方向的偏轉。把導線環的匝數(turns)增加，做成一個線卷，在卷的中心，放一個磁針，磁針的偏轉，跟着匝數增加。若是匝數很多，即使線卷裏的電流很小，磁針也可以有相當的偏轉。

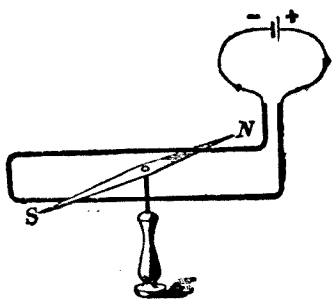


圖 13.4

導線環所生磁場內磁力線的方向。

**13.4 兩個平行電流的互效應** 假使兩根或者兩根以上的平行導線，線裏的電流，非但是平行還是同一方向，那末，電流發生的磁力線可以使導線合併攏來。一根導線的磁力線同另一根導線的磁力線合併起來，成功圍繞着兩根導線的磁力線，像圖 13.5

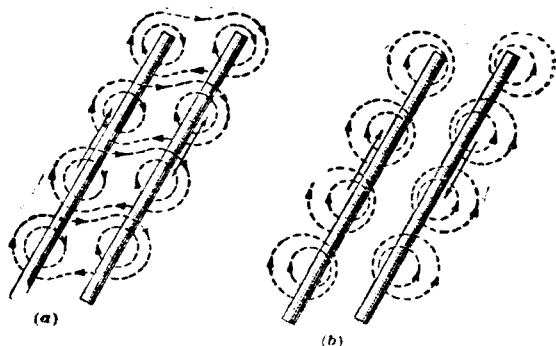


圖13.5 (a)兩個同向平行電流所成的磁力線。(b)兩個異向平行電流所成的磁力線。  
(a)所示。假使有許多根導線，每根導線的磁力線和其它導線的磁力線合併起來，成環繞着這幾根導線的磁力線。磁力線是揀最短的路徑通過的，好像有彈性的橡膠帶，所以能夠把導線拉合一起。

兩根平行的導線，若是電流的方向是相反的，那末，電流發生的磁力線的作用，使兩根導線分離開來，好像受着一種推斥的力一樣。每根導線的磁力線，方向是相反的，所以不合併起來，都擠在兩線的中間，像圖 13.5 (b)所示。我們也可以說，因為兩根導線之間磁力線擁擠，所以把它們推開來。有些電機，通過的電流很大，從磁力線的擁擠而發生的力量也很大，所以在這種電機裏的導體，一定要很牢固的紮縛起來，使它不能移動。例如大的發電極和變壓器，決流的時候，可以把導體掀離原來的位罝，或者把絕緣物毀裂，使電機受到很大的損傷。

**13.5 螺線管** 把一根有電流的導線彎成一個圓環，磁力線都順着同一方向穿過線環。把導線彎成長的螺紋環，像圖 13.6，在環裏的磁力線，都是同一方向，從螺紋環的一端進去，從另一端出來。一個有電流的螺紋環或者線卷，好像條形磁一樣，也有兩個極，也有吸引和排斥的本領。這裏螺紋環或者線卷是電磁鐵 (electromagnet) 最簡單的一種，平常叫做螺線管或者螺管線卷 (solenoid)。

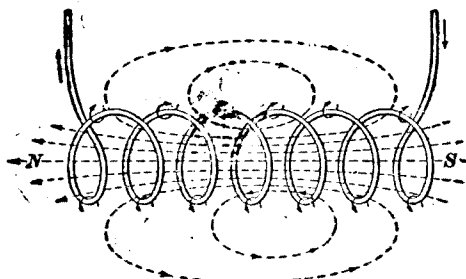


圖 13.6 螺線管的磁力線。

有電流的線卷，裏邊有固定的鐵心 (core)，或者活動的鐵心，或者裏邊沒有鐵心的，本書裏都叫它電磁鐵。

**13.6 極性** 無論那一種電磁鐵，有鐵心或者沒有鐵心，都有北極和南極，磁軸線，和其它永久磁鐵所有的磁性，像條形磁或者羅盤針的吸引和排斥的本領。把無論那一種電磁鐵水平的懸掛起來，使它可以自由轉動。轉停的時候，它的軸線一定是在南北的方向。從它轉停的方向，我們可以決定它兩端的極性。一個電磁鐵的極性，要看線卷的繞法和線卷裏電流的方向。假使電流的方向是知道的，可以用下面講的方法來決定一個電磁鐵的極性：

假使一個觀察的人站在螺管的一端觀察，若是電流的方向

是順時針的，那末，近觀察人的一端是南極；若是電流的方向是反時針的，那末，近觀察人的一端是北極。

一根導線繞成像圖 13.7 的螺管，電流依着箭頭的方向，在觀

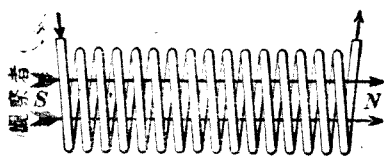


圖 13.7 螺線管裏的電流和磁力線的方向。

察人的一端流進螺管，這一端就是南極。觀察人看的方向就是磁力線的方向。若是把螺管裏電流的方向反過來，電磁鐵的極性也就相反。

平常檢定電磁鐵的磁極是用羅盤針的，這個方法，比較便利，只要記着同性磁極互相排斥，異性磁極，互相吸引。

假使一個螺管有幾層的線，若是線裏電流的方向都是順時針的，電磁鐵的極性是一樣的；無論線是一層或是許多層；或者繞了一層以後，再在這一層上回轉來再繞一層；或者幾層都是順着同一方向繞的。

圖 13.8 是一個用磁質做心的電磁鐵。電磁鐵上的線卷，平常叫做磁化線卷 (magnetizing coil)。磁化線卷都用絕緣物包的線做的，因為這樣，電流方才順着線路流，不至於流到鐵心上。或者靠近的

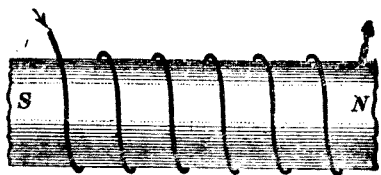


圖 13.8 電磁鐵。

線裏去。導線外邊包着絕緣物的叫做絕緣線 (insulating wire)。現在用來包線的絕緣物，大都是絲，棉，橡膠或者瓷漆 (enamel)。

**13.7 電磁鐵的種類** 電磁鐵因為用途的不同，可以分成許多種類。發電機，電動機，和變壓器裏用的電磁體，另有專冊講述，這裏從略。實則電磁鐵可以分成功兩大類：第一類是專門用來持握有磁性的物料，我們叫它吸持式電磁鐵(portative electromagnet)。這一種的電磁鐵所用的電流都是直流。第二類叫做曳引電磁鐵(tractive electromagnet)，是用來曳引銜鐵。利用銜鐵的動作，可以牽動別的東西，使它工作。凡是有磁性的物料，都可以用吸持式電磁鐵來吸住它。許多金工上用的磨牀(grinding machine)和銑牀(milling machine)的磁力吸板(magnetic chuck)，和移動鋼鐵塊的起重電磁鐵，都是吸持式的例子。

簡單的曳引電磁鐵是用在電鈴和蜂音器(buzzer)上的。沒有通電流的時候，銜鐵是用彈簧來使它離開電磁鐵的極片或者鐵心。

無論那一種電磁鐵，都可以用做吸住式或者曳引式的，但是要得到良好的結果，一種電磁鐵有一定的用途，所以在計劃的時候，應當選用最合宜的一種。

**13.8 電磁鐵的構造** 圖13.9裏的電磁鐵是吸持式最簡單的一種。它的構造，裏邊有一根鐵製或者鋼製的直條 $a$ 。 $a$ 也叫做活杵(plunger)。活杵外邊是一層用加硫硬橡膠或者別種絕緣物做成的胎型(bobbin)。胎型上的起磁線卷 $b$ 是許多層的絕緣銅線。圖13.9的下半部表示這種電磁鐵的截面。



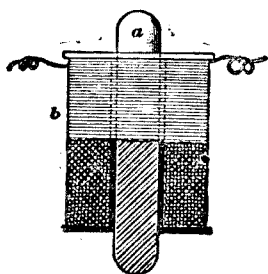


圖13.9 吸持式的電磁鐵。

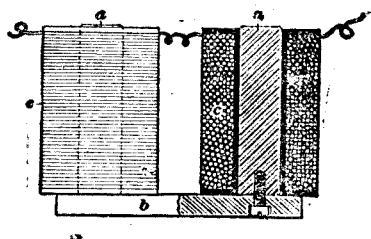


圖13.10 U形電磁鐵。

有一種電磁鐵像圖 13.10 所示，用得也很多，平常叫做 U 形電磁鐵。這種電磁鐵可以歸入吸持式的類裏。它的心子是三部分做成功的；兩個鐵心  $a, a$ ；和軛鐵(yoke)  $b$ 。軛鐵是一根直條，用螺釘釘在鐵心上。每一個鐵心有一個線卷  $c$ 。在圖 13.10 裏，一個線卷  $c$  和它裏面的鐵心  $a$  是用截面來表示的。兩個線卷裏電流的方向，應當相反，方才可以使一個鐵心的上端是北極，另一個鐵心的上端是南極。

無論那一種電磁鐵，它的磁路可以完全在鐵或者鋼的裏面，這種叫做鐵包電磁鐵 (iron-clad electromagnet)。這樣，磁化的效應比只有線卷，磁路裏沒有鐵的電磁鐵大得多。圖 13.11 是一個鐵包電磁鐵。線卷的外面完全用鐵圍着。電流通過的時候，活杆  $a$  就被吸進線卷裏，使磁路的鐵的部分增加。

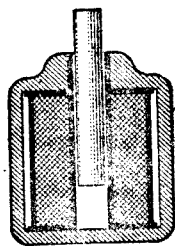


圖13.11 鐵包電磁鐵。

13.9 永久磁和電磁鐵所用的材料 永久磁和電磁鐵都有磁

極，磁場，和吸引同推斥的本領。永久磁要能夠在很長久的時期中，保持它的磁性。所用的材料，大約是下邊幾種合金：鈷鉻鋼，鎢鋼，和鉻鋼。近來新發明的高磁導的合金，種類很多，都可以用來做永久磁的。此外高成分碳鋼和表健的鑄鐵(surface hardened cast iron)，也是常常用來做永久磁的材料。

錫鋼和熟鐵是做電磁鐵最普通的材料。矽鋼是用來做交流電磁鐵或者作用敏捷電磁鐵的心子。鑄鐵和熟鐵，當磁通勢加上來的時候，可以有高度的磁化，但是電流一停，磁通勢減小，磁化差不多完全消失。

**13.10 電磁鐵和磁通勢** 第 12.4 節裏已經講過磁通勢是發生磁通量的主動者。一個電磁鐵的磁化本領(magnetizing power) 或者磁通勢是用磁化線圈的匝數和線裏電流的乘積來決定的。線圈的匝數和電流的安培數的乘積，在 12.4 節裏已經講過叫做安培匝或者安匝。例如一個線圈的磁化本領或者磁通勢是 600 安匝；若是線裏的電流是 6 安，那末線圈的匝數是  $600 \div 6 = 100$ ，用別的安培數和匝數，配合起來，也可以得到同樣的磁化效應，像 5 安和 120 匝，12 安和 50 匝，的乘積都是 600 安匝。至於一個線圈的安培匝數應當怎樣配合，完全要看可以資用的電流是多少，線圈上可以繞線的空隙是多少，方才可以決定。

**13.11 有鐵心和沒有鐵心的電磁鐵** 電磁鐵裏的鐵心可以使磁力線容易通過，換句話說，就是鐵心的磁阻比空氣小得多。所以一個同樣安匝的線圈，在有鐵心的電磁鐵裏，可以通過的磁

力線的密度比沒有鐵心的多得多。電磁鐵的吸引力是靠磁力線的密度的。所以，假使安匝數是一定，有鐵心的電磁鐵所有的吸引力比沒有鐵心的電磁鐵大得多。

**13.12 起磁力場** 電磁鐵磁路裏的起磁力場(magnetizing field)或者磁化力(magnetizing force)就是每單位磁路長度的磁通勢。它的單位是每單位長度安匝數。

【例題】 一個線卷，匝數是100，電阻是5.5歐，接在一個110伏的電路上，這個線卷是用來激發一個16厘米長的磁路的磁力綫的。問電路裏的起磁力場或者磁化力每厘米的安匝數是多少？

【解】 電流  $= \frac{110}{5.5} = 20$  安；所以磁通勢的安匝數是  $10 \times 100 = 2,000$ ；磁化力是每厘米  $2,000 \div 16 =$  每厘米 125 安匝。

**13.13 剩磁效應和頑磁性** 把一個螺管，一個可變電阻器，和一個電池組串聯接起來。在螺管的裏面放一根沒有磁化的鋼桿。螺管裏一有電流 就有起磁力場，鋼桿就磁化。這個可以用一個磁針的偏轉來試驗的。若是把電流停止，鋼桿並不能夠回復到它沒有磁化的時候一樣，它保留着一部分的磁化，或者說它是部分磁化的。這種現象叫做剩磁效應(residual magnetic effect)，鐵在磁化的時候，也有同樣的現象。這就是說，假使一根鋼桿或者鐵在原來的起磁力場裏，可以有一個相當的磁化；起磁力場增加，磁化也跟着增加；但是當起磁力場減到零的時候，磁化並不跟着退到沒有，仍舊保留一部分。剩磁效應的大小，和鋼或者鐵的性質是有關係的。大約鐵越硬，剩磁的效應越大；軟鐵比較小，

鋼比較大。鋼或者鐵保留一部分磁化的本領叫做頑磁性 (retentivity)。

**13.14 磁滯和磁滯迴線** 用交流的電磁鐵，每秒鐘裏，鐵心要經過許多磁化循環 (cycle of magnetization)。但是鐵有頑磁性，所以每一步的磁化終比所加的起磁力場落後。這種現象叫做磁滯 (hysteresis)。

平常要知道磁質的磁性 先要測定它的磁滯迴線 (magnetic hysteresis loop)。圖 13.12 是一個磁滯迴線，橫坐標  $OH$  代表起磁力場  $H$ ； $OB$  是縱坐標，代表磁感應強度  $B$ 。把起磁力場  $H$  從零起一步一步的逐漸增加，每一步就有一個相當的磁感應強度  $B$ 。把  $H$  和  $B$  描成一根曲線，若是鐵或者鋼原來是沒有磁化的，就得到像圖 13.12 裏的  $abc$  曲線，我們叫它原曲線 (virgin curve)。到了  $c$  點，把  $H$  一步一步的減小到零，得到的曲線是

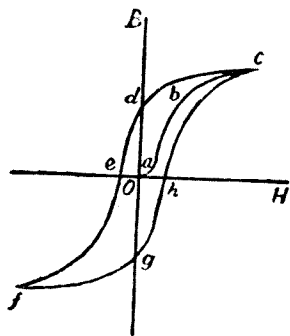


圖 13.12 磁滯迴線。

$cd$ ，並不是  $cba$ ，這是因為磁滯的關係。當  $H$  等於零時候的磁感應強度  $ad$  代表剩餘的磁感應強度或者頑磁性。再把  $H$  的方向反過來，慢慢地一步一步的在相反的方向增加。在  $e$  的地方， $B$  方才減到零， $H$  的價值是  $oe$ 。這就是把頑磁性減到零所需的相反  $H$  的量值。叫做矯頑磁力或者矯頑力 (coercive force)。把  $H$

在反的方向一步一步增加到負的最高值使它和正向的最高值相等，得到曲線  $ef$ 。這樣完成半個迴線。其餘半個迴線  $fghc$ ，只要把  $H$  的量值先一步一步在反的方向減小到零，得到曲線  $fg$ ，再把  $H$  反到正的方向，換句話說，仍舊回復到原來的方向繼續增加到正向的最高值  $c$ ，我們就得到一個完全的磁滯迴線  $cdefghe$ 。

鐵或者鋼經過一個完全或者一部分的磁滯循環，因為起磁力場的大小方向都有變更，鐵或者鋼裏的原子也跟着變更它們的位置。這樣就發生摩擦，產生熱量，磁滯迴線的面積是和產生熱量的多少成正比的。鐵越硬，迴線的面積越大，產生的熱量也越多。用交流的電磁鐵，每秒鐘裏電流方向的交變是和頻率有關係的，每秒鐘經過的磁滯循環，當然和頻率也有關係。所以電磁鐵因為磁滯而損失的功率同頻率成正比。計劃電磁鐵，磁滯的損失應當注意的。

鐵心的矯頑力和所用的物料是有關係的。電磁鐵應當用高導磁係數和低矯頑力的物料做鐵心。

12.15 去磁 要把磁鐵去磁(demagnetize)，只要把它放在一個螺管裏，用一個方向反復很快的起磁力場加到螺管上，同時使磁場的強度漸漸的減小到零，磁鐵裏就可以沒有剩餘的磁性。這是因為方向反復很快的起磁力場，可以使磁鐵發生磁滯現象， $H$  和  $B$  的關係成許多磁滯迴線。同時，磁場的強度逐漸減小，迴線的高度也逐漸減小到零為止，所以沒有剩磁的存在。若是把起磁力場驟然減到零，因為鐵有頑磁性，鐵在起磁力場等於零的

時候，磁應感強度並不是零，仍舊有剩磁的存在。在電廠裏工作的人員，有時所帶的表變成磁化，鑄製的表件，變成永久磁，記時就不準確。這種磁性可以用去磁的方法去磁。把表繫在一根線的一端，把線扭得很緊，放鬆的時候，表就很快的旋轉。攜表到一個強度磁場的附近，像有很大直流的電排。當旋轉的時候，慢慢地退離電排。這樣，可以使表裏的磁性有很快的方向反復。同時，使磁場的強度逐漸減小到沒有為止。這樣使表件經過許多逐漸遞減的滯磁迴線，把磁性去除。假使有高的交電流的電纜或者電排，只要把表攜到纜的附近，再慢慢地離開，不必使表旋轉，就可以使表件去磁。

13.16 磁性的分子磁論 物質的磁性，最早有攸英的磁論 (Ewing's theory of magnetism)。攸英的理論假定物質是許多很小很小的分子磁 (molecular magnet) 組成的。分子磁是最小的磁體，沒有方法再把它分析成功再小的磁體。每個分子磁有極強相等的南北兩個極，也有推斥和吸引的本領。換一句話說，分子磁是最小的條形磁。物質沒有磁化的時候，這些分子磁，磁軸線的方向是混亂的。一有起磁力場，一部分的分子磁的磁軸線就轉到和磁力場同一的方向。透在物質表面的自由極，就有磁性。起磁力場強度增加，轉到和磁力場同一方向的分子磁也增加，透在物質表面的自由極的數目也增加，所以極強就大。到了起磁力場強度增加到相當大的時候，大部分的分子磁已經轉到磁力場的另一方向，透在物質表面的自由極也增加到最大的數

目。即使再增加磁場的強度，自由極並不能夠再行增加，所以極強到了這個時候，不能夠再增加了。分子磁在物質裏是順着磁場排列成功一行一行的。因為同性磁極推斥的關係，分子磁行列之間互相推斥，行列變成彎曲，像圖 11.7 所示磁體裏的磁力線一樣。在這個圖上，可以看得出自由極並不聚集在物體的兩端，旁邊也有。因為這個緣故，一根條形磁的極的位置，並不在兩端的平面上，而在稍進一些的地方。同時，分子磁是不可以分成功兩半的，所以沒有單有北極或者南極的磁體。因為分子磁不可以再分，所以把一個磁體折斷，兩端仍舊有南北極。又因為分子磁的排列是一行一行的，每行的一端是北極，另一端是南極，所以物體兩端自由極的數目或者極強應當相等。每一行裏雖然有許多許多的分子磁，但是只有兩端的自由極對外方才有吸引和推斥的本領；其餘分子磁的南極和聯接的分子磁的北極緊接，磁性中和，對外就沒有磁性的作用。

13.17 磁性的電子論 對於物質的磁性，安培的理論說原子本身是磁性的，因為原子裏有電流的存在。電流有磁場，所以原子有磁性。安培很早就提倡這個理論，當時大家都覺得太新穎，並且安培也沒有方法證明原子裏有電流的存在。直到後來，有幾種光學上的效應，非得用安培的原子電流論來解說不可。並且用安培原子電流論推算得到的結果和試驗上量度得到的量值，很相符合。我們知道電流就是電子的流動。照原子的構造論，一個原子有原子核和在外邊繞着轉動的電子。每個電子在它的軌

跡上轉動，每秒鐘可以有許多轉數，相當一個電流，這就是安培理論裏的原子電流。

在第 1.3 節裏曾經講過，繞着原子核的電子的數目，各個元素是不同的。電子的分佈，並不是雜亂無章，是分成有層次的組織的。這種層叫做電子層(shell)。氫原子有一個層，層上有兩個電子，叫做 *K* 層。比較重的原子鋰(lithium)，除 *K* 層兩個電子以外，還有第三個電子，它離原子核比較 *K* 層的電子遠，成第二層，叫做 *L* 層。比鋰重的原子，*L* 層上的電子逐漸一個一個增加到氖。除掉了 *K* 層，*L* 層上有八個電子方才算完成。下面的原子像鈉，有完成的 *K* 層和 *L* 層，此外還有一個較遠的電子，開始造成另外一層，叫做 *M* 層。完成 *M* 層要有十八個電子。但是有幾個原子，一層還沒有完成，就開始造成另外一層。這種情形，和原子的磁性很有關係的。我們把鐵的原子來做個例子。

繞着鐵原子核轉動的電子有二十六個。它的 *K* 層上，有兩個電子；*L* 層上，有八個電子；這都是已經完成的層。到了 *M* 層，只有十四個電子，這是還沒有完成的 *M* 層。三層共有  $2+8+14=24$  個電子。還有兩個電子，不去完成 *M* 層，開始另造外面的一層，叫做 *N* 層。有高度磁效應的元素像鐵，鎂和鎳，它們繞着原子核的電子，都是在沒有完成一層的時候，已經開始另造外面的一層。所以原子裏的電子，有兩種情形，可以使原子有磁性：(1) 無論那一個完成的層，磁性是中和的，但是一個未完成的層是有磁性的。把鐵的原子來講，它有未完成的 *M* 和 *N* 層。(2) 電子除



掉了繞着原子核轉動，它自己也繞着自己的軸旋轉。好像地球，一面繞着太陽轉動，一面繞着自己的軸旋轉一樣。這種旋轉，叫做電子旋轉(electron spin)。在無論那個原子裏，電子旋轉的軸線都是平行的，但是可以分成功相反的兩個方向，我們叫它正的和負的旋轉。一個旋轉的電子，因為它的旋轉，也有磁的效應。鐵原子 *K* 層的電子的旋轉是一正一負；*L* 層是四正四負；*N* 層是一正一負；所以電子旋轉的磁效應互相抵消，但是 *M* 層是九正五負，有四個旋轉的電子，沒有抵消掉。因為這個理由，所以鐵原子有磁的效應。原子核本身也有旋轉的，但是它的磁效應很小，沒有什麼重要的關係。

原子的磁矩，在沒有受到外面影響的時候，就是這兩部分總合的結果。一有了磁場，旋轉的電子就受到一個偶力(couple)，使它像陀螺(top)或者迴轉器(gyroscope)一樣發生轉動，把許多原子裏電子軌跡的平面，漸漸的轉到同一方向，就有很大的磁效應。

上邊講的磁性電子論，比較複雜，但是可以用來解說順磁性和反磁性的現象，還有許多磁性對於光學上的效應。因為所用的理論，比較艱深，超出本書的範圍，只可以從略。

## 第十四章

# 電磁感應

**14.1 概論** 一個無論什麼式樣的線卷，假使穿過線卷的磁力線的數目有變更，線卷裏就有電動勢發生。這種電動勢叫做應電動勢(induced electromotive force)。由應電動勢發生的電流叫做應電流(induced electric current)。要使一個線卷裏，磁力線的數目變更，增或者減，只要線卷的導線和磁力線有相對的截割(cutting)運動。假使磁力線是固定的，只要線卷的大小，式樣或者位置變更，就可以使穿過線卷的磁力線數目變更。或者，線卷是固定的，磁力線的方向有變更或者數目有增減，也可以變更線圈裏的磁力線。上面講的第一個方法，可以說是線卷截割磁力線；第二個方法，磁力線截割線卷。無論用第一種或者第二種的方法來變更磁力線，都可以使線卷裏有應電動勢和電流。這種現象叫做電磁感應(electro magnetic induction)。

我們現在用的電燈和電機的電路，是利用發電機的電磁感應來發生電動勢的。電燈，電機，和電計上用的變壓器，也是利用電磁感應來變更電壓的大小的。所以電磁感應可以分成功兩種：一種可以叫做發電機作用(generator action)；一種叫做變壓器作用(transformer action)；兩種作用，發生的方法雖然不

同,但是原理是完全一樣的。

**14.2 發電機和變壓器作用** 發電機裏有兩組導體或者兩個繞組。這兩個繞組,一個是固定的,另一個是可以轉動的。一個繞組裏有起磁電流(magnetizing current),產生一個磁場;另一個繞組,因為轉動的關係,就有磁力線的變更,感生應電動勢。這個現象就叫做發電機作用。

在變壓器作用中,兩個線卷或者繞組都是固定的,若是一個繞組裏的電流有變更,可以使兩個繞組裏的磁力線數目都有變更,另一個繞組裏就有應電動勢。或者把磁力線通過的磁路磁阻變更,也可以變更磁力線的數目而發生電動勢。這種裝置可以使電壓變高或者變低,叫做變壓器(transformer)。

磁力線有了變更,變更的磁力線是有方向的。例如一根直的導體,若是電流增加,增加的磁力線是繼續向外展開的圓圈,若是電流減小,減少的磁力線是向導體收縮的圓圈。假使一個豎立的線卷,卷的平面是在南北的方向,卷裏電流發生的磁場的磁力線是自左至右,若是電流增加,增加的磁力線的方向也是自左至右的;那末,電流減小,減少的磁力線的方向是自右向左的。假使線卷裏電流的方向相反,磁場的磁力線的方向是自右至左,電流增加,增加的磁力線的方向,也是自右至左的;電流減小,減少的磁力線的方向是自左至右的。

我們現在知道,要使一個線卷有應電動勢,線卷裏的磁力線一定要有變更,或者說線卷的導體和磁力線一定要有截割。假使

線卷和磁力線都是固定的：或者線卷和磁力線的運動不能夠使線卷裏的磁力線變更，那就不能夠使線卷裏有應電動勢。例如一個線卷在一個均一磁場裏移動而沒有轉動；或者線卷的平面和磁力線的方向平行，磁力線雖有變更，但是變更的磁力線，並不穿過線卷；在這種情形之下，線卷裏就不能感生應電動勢。

14.3 用條形磁鐵發生的應電流 利用磁感應的原理來發生電動勢的方法很多，主要

的方法不外乎使一個線卷裏的磁力線有變更。圖14.1所示，是用一根條形磁鐵來發生電動勢的試驗。 $a$  是一個螺管， $b$  是一根條形磁。螺管的兩端  $c$  和  $d$  是接在一個線卷上，這個線卷是繞在一個羅盤  $e$  的上面。線卷平面的方向是南北的，所以羅盤裏的磁針

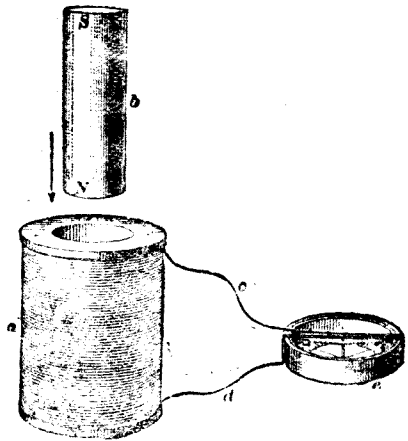


圖 14.1

用一根條形磁鐵和一個線卷發生電動勢的試驗。是在線卷的平面上的，假使線卷裏有電流，羅盤裏的磁針，就有向左或者向右的偏轉。偏轉的方向要看線卷裏電流的方向而定的。假使條形磁北極朝下很快的塞進螺管裏去，羅盤裏的磁針，就向一個方向偏轉。證明螺管裏有電流了。但是條形磁停在螺管裏不動的時候，羅盤裏的磁針就回到原來的位置停着，沒有偏

轉，證明螺管裏是沒有電流了。假使把條形磁很快的從螺管裏拔出來，羅盤裏的磁針又有偏轉，但是方向相反，螺管裏又有電流了。條形磁拔出以後，停止不動，磁針就回到原來的位置停着，沒有偏轉，證明螺管裏又沒有電流了。

再把條形磁倒一個頭，南極朝下，很快的塞進螺管裏去，羅盤磁針的偏轉是和北極朝下時的偏轉，方向相反的。拔出來的時候，羅盤磁針的偏轉，也和北極朝下時發生的偏轉，方向相反的。

若是條形磁不動，把螺管移動，也可以使羅盤的磁針發生偏轉，或者說使螺管裏發生電流。

磁針偏轉的大小，同條形磁和螺管的相對運動的快慢有關係的。越快偏轉越大，越慢偏轉越小。

從上面幾個試驗，我們得到下面幾個結論：

(1) 要使螺管線卷裏發生電動勢和電流，磁力線或者磁通量和螺管的線卷一定要有相對的運動。有了相對的運動，方才可以使螺管裏的磁通勢有變更。

(2) 螺管線卷裏磁通量的變更率越快，感生的應電動勢和電流也越大。電流是要有電動勢來策動的，所以螺管裏若有應電流，一定要有應電動勢。

假使另外把一個小羅盤來試驗螺管上端由應電流而成的磁極，可以得到下面幾個結果：條形磁北極朝下塞進螺管的時候，螺管上端是北極，條形磁和螺管的作用是推斥；條形磁北極朝下，拔出螺管的時候，螺管上端是南極，條形磁和螺管的作用是吸

引；條形磁南極朝下，塞進螺管，螺管上端是南極，作用是推斥；條形磁南極朝下，拔出來的時候，螺管上端是北極，作用是吸引。我們可以說應電流所成的磁極是和條形磁的作用是相反的，條形磁塞進去的時候，應電流的作用是把它推開來，條形磁拔出來的時候，應電流的作用是把它拉攏來。這種作用在後面還要講到。

14.4 由電流的變更而發生的應電流 除了用條形磁可以發生應電流以外，若是一個線卷裏的電流有變更，也可以在另一個線卷裏感生應電流。像圖 14.2，*A* 和 *B* 是兩個平行的線卷，線卷 *A* 通了電流，和條形磁一樣，只要把它移近和移離線卷 *B*，就可以使穿過線卷 *B* 的磁力線或者磁通量增加或者減少。若是在線卷 *A* 的電路裏接一個叩錠(key)，就是不把線卷 *A* 移動，也可以在線卷 *B* 裏感生應電流。把叩錠撤下，電路通流，線卷 *A* 裏的電流開始流動，線卷 *B* 裏就有一個暫時的應電流。*B* 裏應電流的方向和 *A* 裏電流的方向，恰正相反，所以兩個線卷的磁場的極性，也是相反的。我們可以把 *B* 裏的電流當做反向電流。*B* 裏的電流是暫時的，當 *A* 裏的電流開始流動，從零值增到最高值的一個時間內，磁通勢才有變更，*B* 裏才有應電流。一到 *A* 裏電流穩定，磁通勢沒有變更，*B* 裏就沒有電流了。若是把叩錠放開，*A* 裏的電流從最高值減到零，磁通量也從最高值減

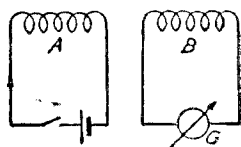


圖 14.2 把一個線卷裏的電流變更，可以在另一個線卷裏發生應電流。

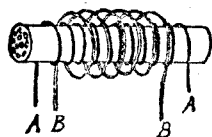


圖14.3 一個線卷繞在另一個線卷上面，電磁的感應效應，尤為顯著。

到零， $B$ 裏也有暫時的應電流。應電流的方向和 $A$ 裏電流的方向是一樣的，兩個線卷的磁極在這個時候是相同的。我們可以把 $B$ 裏的電流當做正向電流。假使 $B$ 線卷繞在 $A$ 線卷的上面，像圖14.3，電磁的感應效應，尤為顯著。

14.5 一個簡單的變壓器 在圖14.3所示的線卷裏面，放一根軟鐵桿。 $A$ 線卷的電路裏接一個電池和一個叩鍵， $B$ 線卷的電路裏接一個電流計（電池，叩鍵和電流計，圖14.4裏，均沒有繪）。叩鍵按下和放開的時候， $B$ 裏應電流比沒有軟鐵桿的時候大得多。這是因為軟鐵桿的導磁係數很大，所以 $A$ 線卷裏電流通過時發生的磁通量增加得很多。穿過 $B$ 線卷的磁通量自然也跟着增加，應電流也大。線卷 $A$ 叫做主線卷(primary coil)，線卷 $B$ 叫做副線卷(secondary coil)。照圖14.3的佈置，就是不用叩鍵來通斷主線卷裏的電流，也可以在副線卷裏的發生應電流。只要主線卷裏有一個穩定的電流，把軟鐵桿塞進或者拔出線卷，就可以有應電流。假使軟鐵桿變成一個環，一邊繞主線卷 $A$ ，另一邊繞副線卷 $B$ ，像圖14.4，感應的作用，比較還要大，因為這樣裝置，磁路都在鐵的裏邊。主線卷所有的磁通量，差不多都通過副線卷，所以感應的作

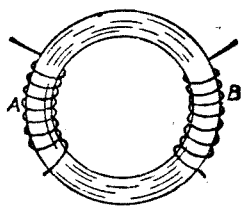


圖14.4 把兩個線卷，繞在一個環形鐵心上，可以增加電磁的感應效應。

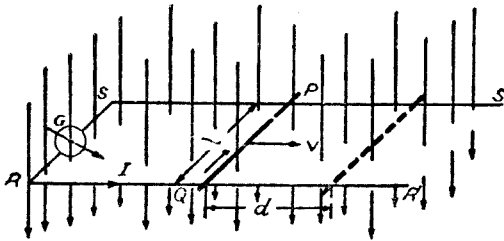
用，增加得比圖 14.3 裏的裝置尤多。若是主線卷裏的電流是交流，因為交流是時時變更的，所以副線卷裏就有感生的交流，叩鍵和電池都不必用的。這種裝置，就是一個最簡單的交流變壓器。

**14.6 楞次定律** 在上節裏講的感應作用，無論用條形磁或者電流，應電流發生的作用和條形磁或者電流的作用是相反的。條形磁和螺管裏發生的應電流，塞進去的時候，它們的作用是排斥；拔出來的時候，它們的作用是吸引。若是條形磁的北極是向下的，塞進螺管的時候，螺管裡磁通量的增加方向是向下的，但是由應電流而發生的磁通量是向上的。用電流發生應電流，若是在叩鍵撤下的時候，A 線卷，圖 14.2 裏磁通量的變更的方向是自左至右，B 線卷裏應電流的磁通量的方向是自右至左。叩鍵放開的時候，線卷 A 裏磁通量的變更是自右至左的，線卷 B 裏應電流的磁通量的方向是自左至右的。所以，用任何方法發生應電流的時候，感電流 (inducing current) 和應電流的作用總是相反的。

從上面幾個試驗的結果，楞次 (Lenz) 把磁感應作用的關係歸納成功一個結論，叫做楞次定律 (Lenz's law)。它說：應電流的方向，一定使由它而生的作用的方向，和感電流作用的方向相反。用這個定律來定應電流的方向，比較簡便。

**14.7 用截割的說法來講應電流的發生** 有些時候，一個電路裏的應電流或者應電動勢是由電路裏一部分的導體的移動





而發生的。例如圖 11.5 裏的  $PQRS$  是一個電路，它的平面，和磁場垂直。 $PQ$  是電路一部分的導體，可以在  $SS'$  和  $RR'$  上滑移。滑移的時候， $PQ$  截割磁通量。要求  $PQRS$  電路裏應電流或者應電動勢的方向，我們假定導體  $PQ$  用某一速度  $v$  向右移動。照楞次的定律，應電流的方向，一定要使  $PQ$  有向左移動的作用，所以  $PQ$  右邊的磁場一定要比左邊大。因為  $PQ$  裏應電流的磁通量是繞着  $PQ$  的圓圈，在  $PQ$  的右邊，應當向下，同原來磁場的方向相同，增加磁場的強度；在  $PQ$  的左邊，應當向上，同原來磁場的方向相反，減小磁場的強度； $PQ$  方才有向左移動的作用。要使  $PQ$  裏的應電流有這種方向的磁通量，電流的方向應當是從  $Q$  到  $P$ ，用同樣的講法，若是  $PQ$  向左移動，它的應電流應當從  $P$  到  $Q$ 。

假使磁場的磁感應強度是  $B$ ，導體  $PQ$  的長度是  $l$ ，移動的速率是  $v$ ，應用能量不滅定律，可以計算電路裏的應電動勢，

$$E = \frac{Blv}{10^8} \text{ 伏。}$$

若是  $B$  的單位是每平方厘米磁力線數， $l$  的單位是厘米， $v$  的單位是每秒鐘厘米數，那末  $E$  的單位是伏特數。若是電路  $PQRS$

裏的電阻是  $R$ ，照歐姆定律，應電流  $I = \frac{E}{R}$ ，所以

$$i = \frac{E}{R} = \frac{Blv}{R \times 10^8} \text{ 安。}$$

**14.8 用磁通量的變更率來講應電流** 在圖 14.5 裏， $PQ$  移到虛線的位置，穿過  $PQSR$  裏的磁通量就有增加。增加的磁通量的方向是向下的。由應電流而發生的磁通量照楞次定律，應當向上。要發生向上的磁通量， $PQRS$  裏的應電流應當從  $Q$  到  $P$ 。同時，速率  $v = \frac{\text{距離 } d}{\text{時間 } t}$ ，增加的磁通量  $\Phi = \text{磁應感強度 } B \times \text{增加的面積 } A$ ，所以，

$$E = \frac{Blv}{10^8} = \frac{Bld}{10^8 \times t} = \frac{BA}{10^8 \times t} = \frac{\Phi}{t} \times 10^{-8}。$$

假使有  $N$  個同樣的電路串聯接起來，應電動勢  $E_N$  應當是  $N$  倍，所以，

$$E_N = \frac{N\Phi}{t} \times 10^{-8} \text{ 伏。}$$

一個有  $N$  圈數的線卷或者螺管，假使受到的磁通量變更率是  $\frac{\Phi}{t}$ ，應電動勢的大小，也是用上面的公式來計算的。

**14.9 應電流的阻尼作用** 應電流的產生，一定要有使它產生的主動作用，像上面幾節裏講的條形磁的移動，和電流的變更。應電流對於主動作用就有一個反作用。例如在一對很强的磁極中間，懸掛一個銅擺 (pendulum)。銅擺平面的運動，同磁力線成正交。當擺在磁極的磁場裏運動的時候，銅擺裏就有應電流。

應電流的作用，照楞次定律，使銅擺有相反的作用，換句話說，擺的運動向下的時候，應電流的作用使它向上，減小擺向下運動的速度。假使擺的運動向上，應電流的作用使它向下，減小它向上運動的速度。若是用鉛或者鐵來做擺，應電流的反作用比較來得小。這是因為鉛或者鐵的電阻比銅大，所以擺裏的應電流小。這種作用叫做阻尼(damping)。

電流計裏銀卷的轉動，卷框(frame)裏就有應電流。它的阻尼作用使銀卷的速率減低，沒有搖擺(oscillation)。安培計和伏特裏指針能夠立刻停在一處，沒有搖擺，也是這個道理。

**14.10 自感** 在上面已經講過，凡是銀卷裏的磁通量有變更，就發生應電動勢。應電動勢的大小和磁通量的變更率是有關係的，變更率越大，應電動勢越大。銀卷裏一有電流，就有磁通量。若是直流，在開始通流的時候，電流漸漸的增加，所以磁通量也跟著增加；等到直流穩定，磁通量就沒有變更。只要銀卷裏電流有變更，就使磁通量變更，銀卷的本身就有應電動勢，這種現象，叫做自感(self-induction)，

在圖 14.6 裏， $ab$  和  $ef$  是導線的一部分，屬於同一銀卷，並且在同一面的，虛線表示銀卷背後部分。銀卷的電路裏，有一個叩鍵和一個電池組。開始通流的時候，把叩鍵按下，像圖 14.6(a)， $ab$  部分就有電流。使完全銀卷裏有一個變更的磁通量，發生應電動勢。應電動勢的方向，照楞次定律應同外施電壓的方向相反。圖 14.6(a)， $ef$  裏的箭頭  $h$  就是應電動勢的方向，同電池組

加到線卷上電壓或者外施電壓的方向是相反的。電壓的方向是用箭頭  $i$  來表示的。開始的時候，磁通量的變更率很大，等到電流漸漸穩定，磁通量的變更率也漸漸減小到零。所以線卷裏反向的應電動勢也是從最高值漸漸減小到零，這是因為電流穩定的時候，磁通量沒有變更，所以應電動勢是零。

當叩鍵開斷的時候，線卷裏的電流從最高值漸漸減小到零。線卷裏應電動勢的方向是圖 14.6(b) 箭頭  $h$  所示的方向，

和線卷裏電流流動的方向  $i$  是一樣的。線卷裏電流的方向同電壓的方向是一樣的。這樣，電流不是立刻停止而延長它流動的時間，也許可以在叩鍵觸點間隙內發生電花。

電路裏電流增加或者減少的時候，自感的作用，終是延緩這種變更的。自感和力學上的慣性(inertia) 相像。一個電路裏的自感，阻止電流的變更；和一個物體的慣性阻止它速度的變更，有一樣的作用。物體既動之後，就是把使它動的力去掉，仍是用原來的速度，繼續運動，除非有摩擦，方才漸漸停止。電流也是這

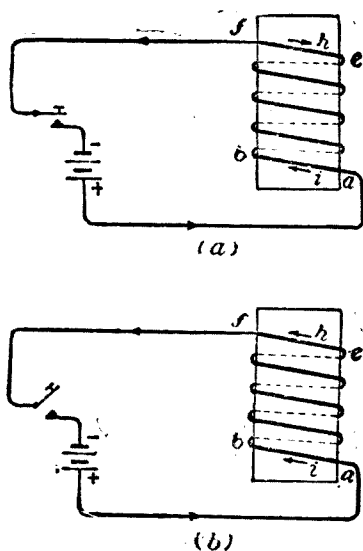


圖 14.6 線卷的自感；(a) 電流開始時的情形；(b) 電流停止時的情形。

樣，電壓去掉以後，仍舊繼續流動，除非有電阻，方才漸漸停止。有鐵心線卷的電路，自感比較大，換句話說，電流變更的時候，由自感而發生的應電動勢也大。一根直的導線，沒有鐵的物件在它的附近，自感很小，導線裏電流變更的時候，由自感而發生的應電動勢也小。

直流電路裏，只有電流變更的時候，或者通連和開斷的時候，有自感效應的存在。但是在交流電路裏，通路的時候，終是有自感效應的存在；因為交流的大小和方向是時時變更的，所以磁通量也跟着增加和消滅，使電路裏時常有應電動勢的存在。

**14.11 自感係數** 線卷或者電路裏自感的大小和線卷裏的電流，匝數，磁通量都有關係的。一個線卷的匝數和穿過線卷的磁通量的乘積叫做磁通鏈(flux linkage)。假使一個線卷裏的電流是 1 安，那末所有的通鏈就是這個線卷的自感係數 (self-inductance 或者 coefficient of self-induction)。自感係數也可以用電流的變更率來計算，假使線卷或者電路裏電流變更率是每秒鐘 1 安培，那末線卷或者電路裏應電動勢就等於自感係數。若是每秒鐘 1 安的電流變更率可以發生 1 伏的應電動勢，線卷就有一個單位的自感係數。自感係數的單位叫做亨利 (henry)，簡寫作亨。亨的千分之一叫做毫亨 (millihenry)，1 毫亨 =  $\frac{1}{1,000}$  亨，1 亨等於 1,000 毫亨。

**14.12 自感效應的一個表演** 圖 14.7 的佈置是用來表演一

個自感效應的試驗。 $A$  是一個 110 伏的電燈，和一個電阻  $R$  串聯。同時和一個自感很大的線卷  $L$  並聯。用一個 110 伏的電池組做電源。叩鍵  $K$  通連的瞬時，電燈暫時很亮，漸漸的就暗下去。叩鍵開斷的瞬時，電燈也暫時發亮，方才熄滅。假使用一個沒有自感的碳片電阻器(carbon rheostat) 來代替  $L$ ，把它的電阻調整，使電燈有相當的亮度。換了這種電阻器，叩鍵通連和開斷的時候，電燈就沒有暫時發亮的現象。

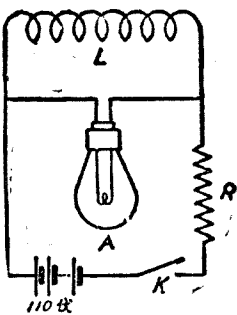


圖 14.7

一個自感效應的表演。

上面講的現象，是因為線卷  $L$  裏有應電動勢的關係。當叩鍵通連的時候， $L$  裏的應電動勢阻止電流通過，所以大部分的電流都流到電燈  $A$  裏去了。但是在一兩秒鐘以後， $L$  裏的電流穩定，就沒有應電動勢， $L$  就分去一部分的電流，燈光就減低。當叩鍵開斷的時候， $L$  裏的電流很快的減小，所以有一個很大的應電動勢發生。在這個情形時，電燈和  $L$  是串聯的，所以電燈裏暫時有一個很大的電流通過。

14.13 變感電阻 上節裏講的碳片電阻器，它的自感很小，平常用的線卷，終是有電感的。用直流的量度，自感沒有很大的關係，但是用交流來量度的時候，自感的關係很大，所以一個線卷，不可以只計算它的單純電阻(pure resistance)而不計算它因為自感而成的表觀電阻。碳片電阻的自感雖然很小，但是電阻

很容易變更，不能夠用來做標準電阻器的。優良的電阻器裏的線卷，用一種特別方法繞成的。這種方法叫做無感繞法 (non-inductive winding)。最簡單的是把一個導線雙折繞成線卷。電流變更的時候，兩折導線所生的磁場，恰正相反，磁通量互相抵消，所以沒有自感的作用。

14.14 互感 假使兩個不相連的線卷或者導線，放得很近，若是一個線卷  $A$  的電流有變更，這個變更電流發生的磁通量，就穿過另一個線卷  $B$ 。線卷  $B$  裏就有應電動勢。導線也有同樣的作用，一根導線裏的電流變更，發生的變更磁通量就截割另一導線，使它有應電動勢。這種現象，叫做互感 (mutual induction)。變壓器能夠把電壓增高或者減低，就是利用這個原理。變壓器裏

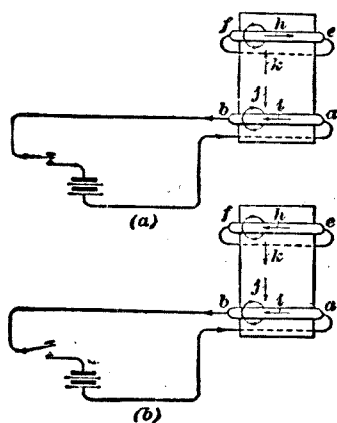


圖14.8 線卷的互感：(a)電流開始時的情形；(b)電流停止時的始時情形。

的兩個繞組 (winding) 和兩個線卷一樣，一個繞組裏有變更的電流，另一個繞組裏就有應電動勢。應電動勢的大小，和兩個繞組的匝數是有關係的。互感的作用，我們可以用圖 14.8 來解說。導線  $ab$  是一匝線卷的一部分，虛線表示線卷後面的部分。這個線卷和叩鍵、電池組串聯起來，成一個完全的電路。我們叫它主電路 (primary circuit。) 導線  $ef$  是另一

而線卷朝外的一部分和虛線的部分也成一個電路。我們叫它副電路(secondary circuit)。圖 14.8(a) 是假定開鍵剛才通連時候的現象。 $ab$  裏的電流  $i$  從零漸漸增加到最高值，磁通量的方向是朝下的，就是圖裏的箭頭  $j$ 。照楞次定律， $ef$  裏的應電動勢所生的應電流的通量  $k$  的方向應當向上，所以箭頭  $k$  是朝上的。箭頭  $k$  表示線卷  $ef$  裏的應電動勢和應電流的方向。在線卷的心子裏，兩個磁通量的方向是相反的。

當主電流(primary current)或者線卷  $ab$  裏的電流增加的時候，副電路應電流的磁通量和主線卷的磁通量，方向相反，使它不能夠立刻增加到最高值。所以主磁通量(primary flux)截割主電路裏有效導線(active conductor)的數目逐漸的減少。主電路裏由自感而生的應電動勢因為這個理由，也減小。

當主電路裏的電流減小，像圖 14.8(b) 所示電鍵開斷的時候，主線卷裏的磁通量，和副線卷裏應電流的磁通量  $j$  和  $k$ ，方向相同。副線卷裏應電動勢和應電流的方向  $k$  也和主線卷裏電流的方向相同。主線卷裏的磁通量，因為電流減小，逐漸減少。但是副線卷裏應電流所生磁通量的方向，是同主線卷磁通量的方向是相同的，使主線卷的磁通量不能夠立即消滅；換一句話說，延緩主線卷磁通量的變更率，減小主線卷裏由自感而生的應電動勢。

上邊講的幾個現象，使我們明白互感的效應，可以中和一部分的自感效應，使電流的變更率比只有自感而沒有互感的線卷



來得快。變壓器就利用這個作用來更變電壓的。

**14.15 互感係數** 兩個線卷或者導線互感的作用，同線卷的式樣，大小，位置，距離和匝數都有關係的。兩個線卷的平面平行，線卷繞的方向相同，總電感最大；若是線卷繞的方向相反，總電感最小。兩個線卷的平面成正交，或者離開得很遠互感的作用很小，可以略去不計。同時，線卷的式樣，大小，位置，匝數，都是一樣，距離越小，互感越大。有鐵心的線卷，因為磁通量的增加，所以兩線卷間的互感也增加。圖 14.4 裏的裝置，使所有的磁通量都在鐵心內通過，一個線卷的磁通量有變更，另一個線卷受到同樣的磁通量變更，換句話說，穿過一個線卷的磁通量也穿過另一個線卷。同時鐵的導磁係數高，磁通量也大，所以這種裝置，互感是最大。變壓器是利用這個原理的。

假使主線卷裏的電流是一安培，副線卷裏的磁通鏈數就是兩個線卷間的互感係數 (coefficient of mutual induction 或者 mutual inductance)。互感係數也可以用副線卷裏的應電動勢來計算的。假使主線卷裏電流的變更率是每秒鐘一安培，那末，副線卷裏的應電動勢數就是兩個線卷間的互感係數。若是主線卷裏電流的變更率是每秒鐘一安培，副線卷裏的應電動勢是一伏特，那末兩個線卷裏有一個單位的互感係數。互感係數的單位也叫做亨利。

## 第十五章

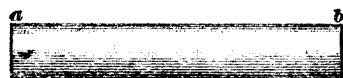
# 錄規和錄表

**15.1 截面面積** 假想一個平面和導體的長度的方向成正交，這個平面截割導體所成的面叫做截面。截面的面積叫做截面面積。

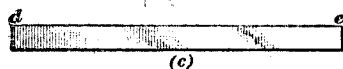
一個實體的圓柱形導體  $ab$ ，圖 15.1



(a) 的截面是一個實心圓  $c$ 。一個圓管導體  $ab$ ，圖 15.1(b)，



的截面是一個空心圓  $c$ 。截面表示導體在截割處的式樣。例如，假使



截面是一個實心或者



空心圓，像  $c$ ，導體  $ab$  一定是一個實體的圓導體或者圓管；假使

截面是長方形或者正方形像圖 15.1(c)和(d)所示，導體  $de$  一定是方導體或者扁導體。上面講的幾種導體，都是平常用的。

計算導線或者導體的電阻，所用的截面，應當同電流的方向成正交。導線裏電流的方向，大都是循着錄的長度的方向流動的，所以截面是和錄的長度的方向是成正交的。

圖 15.1 各種導體(a)實體的圓柱，(b)圓管，(c)長方形，(d)方形。

**15.2 長度的單位** 導線長度的單位在米制中是米。米的百分之一叫做厘米；千分之一叫做毫米。仟米 = 1,000 米是一個較大的單位。導線的直徑是用毫米做單位的。

英美制的長度單位是英尺，英尺的十二分之一叫做英寸。英寸還可以分成功十六分，三十二分，或者六十四分。1 英寸等於 2.540 厘米。1 英尺等於 30.48 厘米。較大的單位英里等於 5280 英尺，合 1.609 仟米。

在工程計算上，英寸分成十六，三十二，或者六十四分，不很方便。導體的直徑，鋼板和絕緣物的厚薄是用密爾來計算的。1 密爾等於一千分之一英寸，或者 1 密爾 = 0.001 英寸；1 英寸 = 1,000 密爾。計算導線的電阻，平常用 1,000 英尺或者 1 英里做單位的。

**15.3 截面面積的單位** 米制裏面積的單位是用平方厘米的，導線的截面面積是用平方毫米來計算的。1 平方厘米 = 100 平方毫米。假使一根圓導線的直徑是 10 毫米，它的面積是等於  $3.1416 \times (10/2)^2 = 3.1416 \times 5^2 = 3.1416 \times 5 \times 5 = 78.54$  平方毫米。

英，美制裏的面積應當是平方英尺或者平方英寸，但是用來計算導線的截面，這種單位，都覺得太大。並且圓的面積一定要用 3.1416 來乘半徑的平方，也覺得麻煩；所以計算導線截面面積，另用一種簡便的單位叫做圓密爾(circular mil)。圖 15.2 裏的  $d$  是導線截面的直徑。圓導線截面面積圓密爾數等於直徑密爾數的平方。假使一根導線的直徑是 100 密爾，它的截面面積是

$100 \times 100 = 10,000$  圓密爾；一根導線有 1 英寸或者 1,000 密爾的直徑，它的截面面積是  $1,000 \times 1,000 = 1,000,000$  圓密爾。一根直徑 10 毫米的導線，在英善制中，它的直徑是 0.3937 英寸，或者 393.7 密爾。 $(393.7)^2 = 393.7 \times 393.7 = 155,000$  圓密爾。

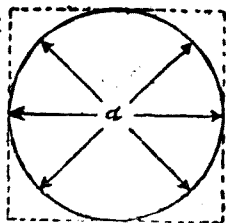


圖 15.2

圓密爾和直徑的關係。

長方形或者方形的導線的截面，也用圓密爾來計算的。圖 15.2 裏的虛線是一個切圓的正方形。正方形每邊的長，就是圓的直徑。正方形的面積方密爾(square mil)數，等於正方形每邊長度密爾數的平方。這個面積，很容易看得出，是圓面積的  $\frac{4}{3.1416}$  倍。圓的面積是  $3.1416 \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 3.1416 \times \frac{d^2}{2 \times 2} = \frac{3.1416}{4} \times d^2 = 0.7854d^2$ ，只有正方形面積的 0.7854 倍。要求正方形或者長方形面積的圓密爾數，只要先求它面積的方密爾數，再把 0.7854 來除。所以

$$\text{圓密爾數} = \frac{\text{方密爾數}}{0.7854}$$

【例題 1】一個長方形導線的截面的兩邊是  $\frac{1}{8}$  英寸和  $\frac{3}{8}$  英寸，求它截面面積圓密爾數。

【解】  $\frac{1}{8}$  英寸 = 0.125 英寸 = 125 密爾；

$\frac{3}{8}$  英寸 = 0.375 英寸 = 375 密爾。

$$\text{圓密爾數} = \frac{125 \times 375}{0.7854} = 59,638。$$

【例題 2】一個正方形導線，它的截面面積是 1 英寸平方，求它截面面積的圓密爾數。

$$1 \text{ 英寸} = 1,000 \text{ 密爾},$$

$$\text{圓密爾數} = \frac{1,000 \times 1,000}{0.7854} = 1,273,237.$$

有時，一個長方形導線一邊的長度和它截面面積圓密爾數是知道的，要求它另一邊的長度。那末我們先要把圓密爾數化成方密爾數，再用已知的一邊的長度密爾數來除，就可以得到另一邊長度的密爾數。因為。

$$\text{圓密爾數} = \frac{\text{方密爾數}}{0.7854};$$

所以，

$$\text{方密爾數} = 0.7854 \times \text{圓密爾數}.$$

【例題】一根扁帶形的導線，它的厚度已定為 120 密爾，截面面積約為 46,000 圓密爾，問導線截面的闊度應當是多少密爾？

【解】方密爾數 =  $0.7854 \times 46,000 = 36,128$ ;

$$\frac{36,128}{120} = 301.07 \text{ 密爾}.$$

最近的整數，導線截面可以用 120 密爾  $\times$  300 密爾。  $120 \times 300 = 45,837$  圓密爾，和已定的面積 46,000 圓密爾相差不多，可以說是最適當的尺度。

### 習 題

1. 一根長方形截面的導線，它的兩邊是 160 和 375 密爾，問它的截面面積是多少圓密爾？  
答，約 76,400 圓密爾。

2. 一根扁帶形導線，它的厚度是  $\frac{1}{8}$  英寸，一定要有約 56,000 圓密爾的面積，問導線的闊度是多少密爾？  
答，約 351.8 密爾。

最近的整數是 350 密爾。 $125 \times 350 = 55,740$  圓密爾, 和 56,000 很相近。

3. 一根圓導線的直徑是  $\frac{1}{8}$  英寸, 問它的截面面積是多少圓密爾?

答。 15,625 圓密爾。

**15.4 線規** 導線直徑小於  $\frac{1}{8}$  英寸的, 平常是用一種協定標號 (arbitrary scale) 來表示的。這種標號叫做線規 (gage)。實體的大小或者規號 (gage number) 是指導線的截面而言的。較大的導線是用它截面面積圓密爾數來表示的。表五是現在通用的幾種線規和直徑密爾數。各種規號除了米制線規以外, 規號越大, 直徑越小。米制規號, 規號越大, 直徑越大。較大的導線, 直徑在  $\frac{1}{8}$  英寸以下的, 英, 美制用四個, 三個, 二個, 和一個圈來表示。鋼線規 (steel wire gage) 和英國標準線規 (standard wire gage 或者簡稱 S.W.G.) 用到七個, 六個和五個圈來做標號的。用圈做標號, 有兩種寫法。例如四個圈可以寫成 4-0 或者寫成 0000, 都讀做四零。

現在通用的線規有下面幾種:

(1) 米制線規 (metric wire gage)。米制規號是導線直徑毫米數的十倍。表五裏, 米制線規密爾數 98.4 的規號是 25。這是因為  $98.4$  密爾 =  $0.0984$  英寸,  $1$  英寸 =  $25.4$  毫米, 所以  $0.0984$  英寸 =  $2.5$  毫米。2.5 的十倍是 25, 所以規號是 25。

(2) 美制線規或者白朗夏泊制線規 (American wire gage 或者 Brown and Sharpe wire gage, 簡稱 A.W.G. 或者 B. & S.)。這是美國通用的線規, 用來量度銅線, 鋁線和電阻線的。

表五 各種線規直徑密爾數比較表

規號	美制線規 (B & S. 或者A. W.G.)	鋼線規 (Steel wire gage)	旧明罕制 線規 (Birm- ingham wire gage)	舊英制 線規 (Old English wire gage)	可脫初編 線規 (Stub's steel wire gage)	英國標準 制線規 (S.W. G.)	米制* 線規 (metric wire gage)	規號
7-0	...	490.0	...	...	...	5 0	...	7-0
6-0	...	461.5	...	...	...	464	...	6-0
5-	...	437.5	...	...	...	4 2	...	5-0
4-0	460	393.8	454	452	...	401	...	4-0
3-0	440	362.5	425	425	...	372	...	3-0
2-0	3 5	3 1.0	380	380	...	343	...	2-0
0	3 5	3 6.5	340	340	...	3 4	...	0
1	289	283.0	300	3 0	227	300	3.94	1
2	258	262.5	284	284	219	276	7.87	2
3	2 9	243.7	259	259	212	252	11.8	3
4	204	225.3	238	238	207	232	15.7	4
5	182	207.0	220	220	2 4	212	19.7	5
6	162	192.0	203	203	201	192	23.6	6
7	144	177.0	180	180	199	176	27.6	7
8	123	162.0	165	165	197	160	31.5	8
9	111	148.3	148	148	194	144	35.4	9
10	102	135.0	134	134	191	123	39.4	10
11	91	120.5	120	120	188	116	...	11
12	81	105.5	109	109	185	1 4	47.2	12
13	72	91.5	95	95	182	92	...	13
14	64	80.0	83	83	180	80	55.1	14
15	57	72.0	72	72	178	72	...	15
16	51	62.5	65	65	175	64	63.0	16
17	45	54.0	58	58	172	56	...	17
18	40	47.5	49	49	168	48	79.0	18
19	36	41.0	42	42	164	40	...	19
20	32	34.3	35	35	161	35	78.7	20
21	28.5	31.7	32	31.5	157	32	...	21
22	25.3	28.6	28	29.5	155	28	...	22
23	22.6	25.8	25	27.0	153	24	...	23
24	20.1	23.0	22	25.0	151	22	...	24
25	17.9	20.4	20	23.0	148	20	98.4	25
26	15.9	18.1	18	20.5	145	18	...	26
27	14.2	17.3	16	18.75	143	16.4	...	27
28	12.6	16.2	14	16.50	139	14.8	...	28
29	11.3	15.0	13	15.50	134	13.6	...	29
30	10.0	14.0	12	12.75	127	12.4	118	30

表五 各種線規直徑密爾數比較表 (續前頁)

規號	美制線規 (B. & S. 或者A. W. G.)	鋼線規 (Steel wire gage)	伯明罕制 線規 (Birm- ingham wire gage)	舊英制 線規 (Old Englist wire gage)	司脫勃爾 線規 (Stub's steel wire gage)	英國標準 制線規 (S. W. G.)	米制* 線規 (metric wire gage)	規號
31	8.9	13.2	10	12.25	120	11.6	...	31
32	8.0	12.8	9	11.25	115	10.8	...	32
33	7.1	11.8	8	10.25	112	10.0	...	33
34	6.3	10.4	7	9.50	110	9.2	...	34
35	5.6	9.5	5	9.00	108	8.4	138	35
36	5.0	9.0	4	7.5	106	7.6	...	36
37	4.5	8.5	...	6.50	103	6.8	...	37
38	4.0	8.0	...	5.75	101	6.0	...	38
39	3.5	7.5	...	5.00	99	5.2	...	39
40	3.1	7.0	...	4.50	97	4.8	157	40
41	...	6.6	...	...	95	4.4	...	41
42	...	6.2	...	...	92	4.0	...	42
43	...	6.0	...	...	88	3.6	...	43
44	...	5.8	...	...	85	3.2	...	44
45	...	5.5	...	...	81	2.8	177	45
46	...	5.2	...	...	79	2.4	...	46
47	...	5.0	...	...	77	2.0	...	47
48	...	4.8	...	...	75	1.6	...	48
49	...	4.6	...	...	72	1.2	...	49
50	...	4.4	...	...	69	1.0	197	50

\*米制線規的直徑毫米數，只要把規號用 10 來除即得。例如米制規號 25，用 10 來除得 2.5，所以導線規號 25 的直徑是 2.5 毫米，合 0.098 4 英寸，或者 98.4 密爾。

美制線規裏的兩個連續規號的比約為 1.1229。導線規號 36 的直徑是 5 密爾，所以導線規號 35 的直徑是  $5 \times 1.1229 = 5.61$  密爾。表五裏美制線規一項裏，規號 36 的直徑是 5 密爾，規號 35 的直徑是 5.6 密爾。依此類推，到規號 0000 的導線直徑是 460 密爾。

導線的電阻和它的規號，可以用下面的方法來計算：



## 表六 實體銅線表

米制規號, 米制單位和圓密爾數。

電導係數百分之百; 密度 8.89; 溫度 20°C.

直徑 毫米數	截面面積 平方毫米數	每仟米歐姆數 20°C.	每仟米仟克數	截面面積 圓密爾數
10.0	78.54	0.2195	698.2	155,000
9.0	63.62	0.2710	565.6	125,550
8.0	50.27	0.3430	446.9	99,200
7.0	38.48	0.4480	342.1	75,950
6.0	28.27	0.6098	251.4	55,800
5.0	19.64	0.8781	174.6	38,750
4.5	15.90	1.084	141.4	31,380
4.0	12.57	1.372	111.7	24,800
3.5	9.621	1.792	85.53	18,900
3.0	7.069	2.439	62.84	13,950
2.5	4.909	3.512	43.64	9,690
2.0	3.142	5.438	27.93	6,200
1.8	2.545	6.775	22.62	5,010
1.6	2.011	8.575	17.87	3,970
1.4	1.539	11.20	13.69	3,040
1.2	1.131	15.24	10.05	2,230
1.0	0.7854	21.95	6.982	1,550
0.90	0.6362	27.10	5.656	
0.80	0.5027	34.30	4.469	
0.70	0.3848	44.80	3.421	
0.60	0.2827	60.98	2.514	
0.50	0.1964	87.81	1.746	
0.45	0.1590	108.4	1.414	
0.40	0.1257	137.2	1.117	
0.35	0.09621	179.2	0.8553	
0.30	0.07069	243.9	0.6284	
0.25	0.04909	351.2	0.4364	
0.20	0.03142	548.8	0.2793	
0.15	0.01767	975.6	0.1571	
0.10	0.00854	2195	0.06982	
0.05	0.001964	8781	0.01746	

原  
书  
缺  
页

原  
书  
缺  
页

## 表九 實體銅線表

美國線規或稱白朗夏泊線規；米制單位。

電導係數百分之百；比重 8.89；溫度 20°C.

線 號	直徑毫米數	截面平方毫米數	每千米歐姆數 20°C.	每千米仟克數
0000	11.68	107.2	0.1608	954.2
000	10.49	85.03	0.2026	755.9
00	9.266	67.43	0.2557	599.5
0	8.252	53.43	0.3224	475.4
1	7.348	42.41	0.4066	377.0
2	6.544	33.63	0.5126	299.0
3	5.827	26.7	0.6464	237.1
4	5.189	21.15	0.8152	188.0
5	4.621	16.77	1.023	149.1
6	4.115	13.70	1.296	118.2
7	3.665	10.55	1.634	93.78
8	3.264	8.366	2.061	74.37
10	2.583	5.261	3.277	46.77
12	2.053	3.09	5.211	29.42
14	1.628	2.081	8.285	18.50
15	1.450	1.670	10.45	14.67
16	1.291	1.309	13.18	11.63
17	1.150	1.038	16.61	9.226
18	1.024	0.8231	20.95	7.317
19	0.9116	0.6527	26.42	5.803
20	0.8118	0.5176	33.31	4.602
21	0.7220	0.4105	42.00	3.649
22	0.6438	0.3255	52.96	2.894
23	0.5733	0.2582	66.79	2.295
24	0.5106	0.2047	84.22	1.820
25	0.4547	0.1624	106.2	1.443
26	0.4049	0.1288	133.9	1.145
27	0.3606	0.1021	168.8	0.9078
28	0.3211	0.0798	212.9	0.719
29	0.2849	0.06422	268.5	0.5709
30	0.2546	0.05093	338.6	0.4427
31	0.2268	0.04039	426.9	0.3590
32	0.2019	0.03203	538.3	0.2847
33	0.1798	0.02540	678.8	0.2258
34	0.1601	0.02014	856.0	0.1791
35	0.1426	0.01597	1,079	0.1420
36	0.1270	0.01267	1,361	0.1126
37	0.1131	0.01005	1,716	0.08931
38	0.1007	0.007967	2,164	0.07083
39	0.08969	0.006318	2,729	0.05617
40	0.0807	0.005010	3,441	0.04454
41	0.07113	0.003973	4,339	0.03532
42	0.06334	0.003151	5,472	0.02801
43	0.05611	0.002499	6,900	0.02222
44	0.05023	0.001982	8,700	0.01762

規號增 1, 電阻約增百分之 25;

規號增 2, 電阻約增百分之 60;

規號增 3, 電阻約增百分之 100;

規號增 10, 電阻約增 10 倍。

我們可以用表八裏規號 20 的導線來做個例子。規號 20 的銅導線, 在  $20^{\circ}\text{C}$ . 時候, 每 1,000 英尺的電阻是 10.15 歐姆。照上面講的方法, 規號 21 的導線, 每 1,000 英尺在同一溫度的時候, 應當是  $1.25 \times 10.15 = 12.68$  歐姆, 和表上的 12.80 歐姆相差不多。規號 22 的電阻應當是  $1.60 \times 10.15 = 16.24$  歐姆; 規號 23 的電阻應當是  $2 \times 10.15 = 20.30$  歐姆; 規號 30 的電阻應當是  $10 \times 10.15 = 101.5$  歐姆。表上規號 22 的電阻是 16.1, 歐姆, 規號 23 的電阻是 20.36 歐姆; 規號 30 的電阻是 103.2 歐姆; 和上面的約值相差不多。

一根美制線規規號 10 的銅導線有下邊幾個約值:

電阻每 1,000 英尺歐姆數	1
面積圓密爾數	10,000
重量每 1,000 英尺磅數	32

一根美制線規規號 10 的鋁導線也有幾個約值:

電阻每 1,000 英尺歐姆數	1.6
面積圓密爾數	10,000
重量每 1,000 英尺磅數	9.5

上面幾個約值的計算的方法, 若是能夠記牢, 很容易計算別

個規號導線的大小，電阻，面積和重量的約值。例如，規號 12 銅導線每 1,000 英尺的電阻是  $1.6 \times 1 = 1.6$  歐。它的面積同電阻成反比，規號 10 的面積是 10,000 圓密爾，所以規號 12 的面積是  $\frac{10,000}{1.6} = 6,250$  圓密爾。它的直徑是  $\sqrt{6,250} = 79$  密爾。每 1,000 英尺的重量是  $\frac{32}{1.6} = 20$  磅。

(3) 美制鋼線規 (U.S. steel wire gage 簡稱 S.W.G.)。這個規號在美國是用來量度鋼線或者鐵線的。很容易和下面講的英制鉛規制混淆。

(4) 伯明罕制線規 (Birmingham wire gage) 或者司脫勃制鐵線規 (Stub's iron wire gage 簡稱 B.W.G.) 這個線規，在美國仍舊通用，英國也有一部分採用。大都是用來規定黃銅的大小的。司脫勃鋼線規 (Stub's steel wire gage) 是另一種線規，和這種線規不同。

(5) 英國標準線規 (British standard wire gage 或者 Standard wire gage 簡稱 S.W.G.) 有時也叫做新英國標準 (new British standard 簡稱 N.B.S.) 這個線規是英國各種線的法定標準。表七是英國標準線規實體銅線的直徑，面積，電阻重量。

表九是美國線規或者白朗夏泊線規，用米制的單位。直徑是毫米數，截面面積是平方毫米數。第四項是銅導線是在  $20^{\circ}\text{C}$ 。每仟米的電阻歐姆數。第五項每仟米銅導線的重量仟克數。有時，

我們要把美制錄規合成米制上的單位，這個表很有用途。

15.5 電阻係數和導電係數 一種材料的電阻係數(Specific resistance 或者 resistivity)。在米制裏是一個立方厘米的物料，兩個相對平面間的電阻。這兩個平面應當和電流成正交，立方裏電流的分佈固然要均勻，物料的成分也要均勻。所以和電流成正交的截面應當是 1 平方厘米，和電流平行的長度應當是 1 厘米。

英美制裏的電阻係數是用密爾英尺的歐姆數來計算的。就是一根一圓密爾截面面積，一英尺長的導線的電阻歐姆數。平常計算的時候，銅導線的電阻係數密爾英尺歐姆數在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 或者  $68^{\circ}\text{F}$ . 的時候，可以當做 10.4。

電導係數(electrical conductivity) 是電阻係數的倒數。物料的電導係數是根據國際電工技術委員會的國際韌煉銅標準(international annealed copper standard) 來計算的。把這個標準的電導係數作為百分之 100。標準是用一根成分，大小都均勻的韌煉銅線，長 1 米，截面面積 1 平方毫米來做的。線的密度是每立方厘米 8.89 克。在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 的時候，電阻是  $\frac{1}{5.8}$  歐 = 0.017241 歐。電阻的溫度係數在  $20^{\circ}\text{C}$ . 時是每度 0.00393 歐。任何一種物料的線，假使它的長度是  $L$  厘米，它的截面面積是  $A$  平方厘米，在  $20^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻是  $R_{20}$  歐姆，那末這根線的電導係數是

$$C = \frac{15\,328L}{88,900 AR_{20}} \text{ 百分數。}$$

軋煉銅的電導係數，普通大約是百分之 100，硬抽的銅 (hard-drawn copper) 的電導係數約為百分之 97。平常硬抽的鋁的電導係數約為百分之 61，鐵線或者鋼線的電導係數在百分之 8 至百分之 16 之間。

用其它單位表示的電阻係數，把軋煉的銅做個例子，大約有下面幾種：

- (1) 0.017241 歐 ————— 每平方毫米—米的電阻；
- (2) 10.37 歐 ————— 每圓密爾—英尺的電阻；
- (3) 1.7241 微歐 ————— 每厘米—平方厘米的電阻；
- (4) 0.67879 微歐 ————— 每英寸—平方英寸的電阻；
- (5) 0.15328 歐 ————— 每米—克的電阻；
- (6) 875.19 磅 ————— 每英里—歐的重量。

上面講的六種電導係數，從第(1)式到第(4)式很容易明瞭。第一項是電阻歐數或者微歐數；第二項裏，一部分是指長度，一部分是指截面面積。第(5)式是一根 1 克重 1 米長大小均勻的軋煉銅線的電阻歐數。第(6)式是一根一英里長有一歐電阻的軋煉銅線重量磅數。第(5)和第(6)式，和線的密度是有關係的；第(1)到第(4)式，全靠導線的長度和大小，同密度是沒有關係的。

電阻係數的應用方法，在第 15.7 節裏還要講到，讀者可以參閱下文。

表十是各種金屬物的電阻係數，電導百分數和電阻溫度係數的數據。電阻係數是一根一厘米長一平方厘米截面面積在溫



## 表 十

各種金屬物在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻係數，  
電導百分數，和電阻溫度係數。

金 屬	電阻係數 微歐-厘米	電導係數 百分數	電 阻 溫度係數
「前進」(advance見康銅)	—	—	—
鋁	2.824	61	0.0039
黃銅	7	24.6	0.002
「登峯」(climax)	87	1.98	0.0007
鈷(Cobalt)	9.8	17.6	0.0033
「康銅」(Constantan)	49	3.52	0.00001
銅, 初煉	1.7241	100	0.00393
銅, 硬抽	1.771	97.3	0.00382
氣體碳	5000	0.0345	0.0005
「德銀」18%銀	33	5.23	0.0004
鐵 99.98%	10	17.24	0.005
鉛	22	7.84	0.0039
「錳銅」(manganin)	44	3.92	0.00001
汞	95.783	1.8	0.00029
鉬(molybdenum硬抽)	5.7	3.03	0.004
「鎳鉻」(nichrome)	100	1.724	0.0004
鎳	7.8	22.1	0.006
「磷銅」(phosphor bronze)	7.8	22.1	0.0018
鉑	10	17.24	0.003
銀	1.59	108.5	0.0038
鋼	10.4-11.9	16.58-14.48	0.005-0.004
鋼, 含錳	70	2.465	0.001
錫	11.5	15	0.0042
鎢, 硬抽	5.6	30.8	0.0045
鋅	5.8	29.7	0.0037

度  $20^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻微歐數。電導百分數是把軋煉銅的電導係數作為百分之 100。例如鐵，在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 的時候，電阻係數是 10 微歐，軋煉銅的電阻係數是 1.7241 微歐。鐵的電導係數百分數就是  $(1.7241 \div 10) \times 100 = 17.24$ 。電阻溫度係數是電阻在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 的時候，溫度增加  $1^{\circ}\text{C}$ . 時，每單位電阻增加或者減少的量值。計算的方法，可以參閱第 15.7 節。氣體碳和別種碳製品，它們的導電係數是負的。換句話說，若是溫度增高，它們的電阻，非但不增加，反而減少，這是碳的特性，和其它物料是不同的。

表裏金屬項內，物品名稱上加有『』符號的表示市場名稱 (trade name)。

**15.6 導體電阻的計算方法** 導體的電阻在第 2.11 節裏已經講過：(1)同導體的長度成正比，(2)同導體的截面面積成反比。也可以說同截面面積的倒數成正比。除了上面講的兩點以外，若是溫度增加，電阻也有變更，但不是正比。平常用的物料，除碳以外，電阻都是跟着溫度增加。一個導體，把它的長度增加一倍，截面面積和溫度都不變，電阻就增加一倍。若是把它的截面面積增加一倍，長度和溫度不變，電阻就減小一半。若是截面面積和長度都不變，溫度變更，電阻也跟着變更。同時，長度，截面面積和溫度都相同，還要看用的是什麼物料。各種物料有各種不同的電阻。電阻係數和所用的物料是有關係的。照上面講的幾點，一個導體的電阻

$$R = \rho \frac{l}{A}, \text{-----(1)}$$

公式裏的  $\rho$  是導電係數， $l$  是長度， $A$  是截面面積。應用這個公式的時候，有幾點應當注意的：(1)  $l$  是導體順着電流方向的長度， $A$  是導體和電流成正交的截面面積。(2)  $l$  和  $A$  的單位要同  $\rho$  所用的長度和面積的單位相同。例如  $\rho$  用的長度單位是厘米，面積單位是平方厘米，那末  $l$  應當用厘米， $A$  應當用平方厘米。假使  $\rho$  用的長度單位是英尺，面積的單位圓密爾，那末  $l$  應當是英尺， $A$  應當是圓密爾。 $R$  的電阻單位應當和  $\rho$  用的電阻單位是一樣的。假使  $\rho$  用的電阻單位是歐， $R$  的單位也是歐；假使  $\rho$  用的電阻單位是微歐， $R$  的單位也是微歐。(3) 電阻係數和溫度是有關係的，假使  $\rho$  的量值是在某一溫度取的，那末用上面公式求到的電阻，也是在同一溫度時候的量值。

把公式(1)的右項，分母分子都用  $l$  來乘，得到，

$$R = \rho \frac{l^2}{lA},$$

$lA$  是導線的體積，我們把  $V$  字來代替它，上面的公式變成，

$$R = \rho \frac{l^2}{V},$$

再用密度  $\delta$  來乘右項的分母和分子，得到

$$R = \rho \frac{l^2 \delta}{V \delta},$$

$V$  和  $\delta$  的乘積就是導體的質量，用  $M$  來代表它，得到

$$R = \rho \delta \frac{l^2}{M} = \rho' \frac{l^2}{M} \quad \text{----- (2)}$$

$\rho' = \rho \delta$ 。任何一根導線， $\rho$  和  $\delta$  都是常量(constant)，所以電阻  $R$  和  $l$  長度的平方成正比，和它的質量  $M$  成反比。 $\rho'$  就是一個導體有單位長度和單位質量的電阻，也是電阻係數的一種。第 15.6 節裏，電阻係數 (1) 式到 (4) 式是應用計算電阻的第 (1) 公式，所以只和長度同面積有關係；(5) 和 (6) 式是應用計算電阻的第 (2) 公式，所以和長度同質量有關係。

【例題 1】 一根米制線規規號 10 的實體銅線，長度是 700 米，在溫度  $20^{\circ}\text{C}$  的時候，它的電阻是多少歐？

【解】 米制規號 10 的銅線的直徑應當是規號的數值用 10 來除得到的毫米數。 $\frac{10}{10} = 1$ ，所以直徑是 1 毫米。它的截面面積  $A$  是  $\pi \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0.7854$  平方毫米。在第 15.6 節裏電阻係數的第 (1) 式，一根導線有 1 平方毫米的截面面積，1 米的長度，它的電阻是 0.017241 歐。這就是  $\rho$  的量值。

應用計算電阻的第 (1) 公式，

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{0.017241 \times 700}{0.7854} = 15.36 \text{ 歐}$$

上面講的導體的長度和面積，也可以合成厘米。長度米數用 100 來乘，就是長度厘米數，所以 700 米 =  $700 \times 100 = 70,000$  厘米。面積平方毫米數用 100 來除就是面積平方厘米數，所以 0.7854 平方毫米 =  $\frac{0.7854}{100} = 0.007854$  平方厘米。第 15.6 節裏電阻係數的第 (3) 式， $\rho = 1.7241$  是一根一厘米長，一平方厘米截面導線電阻的微歐數，所以

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{l}{A} = \frac{1.7241 \times 700 \times 100}{0.007854} = 15,360,000 \text{ 微歐} \\ &= 15.36 \text{ 歐。} \end{aligned}$$

在表六裏，也可以找到米制線規規號 10，或者直徑 1 毫米實體銅線一  
千米的電阻在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 的時候是 21.95 歐。700 米的電阻  $= \frac{21.95 \times 700}{1,000}$   
 $= 15.6$  歐。同上面得到的數值是一樣的。

【例題 2】 一根 1 千米長的實體銅導線，它的質量是 111.7 克，問它的  
電阻在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 的時候是多少歐？

【解】 1 千米  $= 1 \times 1,000$  米；111.7 克  $= 111.7 \times 1,000 = 111,700$  克；  
應用第 15.6 節裏電阻係數第(5)式，我們知道一根實體銅導線 1 米長，1  
克重的電阻是 0.15328 歐，這就是計算電阻公式(2)裏的  $\rho'$ ，因為

$$R = \rho' \frac{l^2}{M} = 0.15328 \times \frac{1,000 \times 1,000}{111,700} = 1.372 \text{ 歐.}$$

在表九裏，也可以得到每千米的實體銅線，若是質量是 111.7 克，它的電  
阻是 1.372 歐。

【例題 3】 一根美國線規規號 6 的實體銅線，長度是 2,000 英尺，在  
溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻係數是每圓密爾英尺 10.37 歐，問它的電阻是多少  
歐？

【解】 從表八可以找到美國線規規號 6 的截面面積  $A$  是 26,250 圓  
密爾； $l$  是 2,000 英尺；電阻係數  $\rho$ ，每圓密爾英尺是 10.37 歐。應用計  
算電阻公式(1)，得

$$R = \rho \frac{l}{A} = 10.37 \times \frac{2,000}{26,250} = 0.790 \text{ 歐.}$$

從表八也可以找到美國線規規號 6 的實體銅線，每 1,000 英尺的電阻是  
0.3951 歐，所以 2,000 英尺的電阻應當是  $2 \times 0.3951 = 0.790$  歐。

15.7 電阻的溫度係數 無論那一種物質，溫度變更的時候，  
電阻也跟着變更。用在電機工程上的許多金屬物和合金，溫度增

加的時候，電阻也跟着增加；非金屬的導體，像礮和電解質(electrolyte)，和許多電介質(dielectrics)，溫度增加的時候，它的電阻，反而減小。一個固定質量的物質，在任何溫度  $t$  時候的電阻  $R_t$ ，可以用它在溫度零度時候的電阻  $R_0$ ，演成一個級數：

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2 + ct^3 \dots \dots \dots),$$

級數裏  $R_t$  和  $R_0$  的單位是歐， $t$  是溫度百分度數， $a$ ， $b$  和  $c$  等是常數。實際應用上，若是溫度的變更，不是很大，金屬導體像銅和鋁，可以用下面一個公式來計算電阻變更的準確度，已經很夠：

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 t) \dots \dots \dots (1)$$

公式裏的  $\alpha_0$  是零度時候的電阻溫度係數 (zero degree temperature coefficient of resistance)，也就是每一個歐姆的電阻在溫度  $0^\circ C$  左右，溫度變更  $1^\circ C$  時候電阻變更的歐姆數。至於電介質，公式(1)是不適用的，因為電阻的變更，就是溫度的變更不大，也不是和溫度成正比的。其它的物質，若是溫度增加，電阻也增加， $\alpha$  是正的；假使溫度不增加反而減小， $\alpha$  是負的。

表六到表十的電阻，都是在溫度  $20^\circ C$  時候的歐姆數。若是要計算在另一溫度  $t$  時候電阻歐姆數，應用下面的公式(2)，

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha_{20}(t - 20)] \dots \dots \dots (2)$$

公式(2)裏的  $\alpha_{20}$  是導體在溫度  $20^\circ C$  時候的電阻係數，也就是一個歐姆的電阻在溫度  $20^\circ C$  左右，溫度變更  $1^\circ C$  時候，電阻變更的歐姆數。若是導體是韌煉銅， $\alpha_{20} = 0.00393$ ；若是導體是鋁， $\alpha_{20} = 0.004$ 。所以在溫度  $t^\circ C$  時候，韌煉銅線的電阻是，

$$R_t = R_{20}[1 + 0.00393(t - 20)] \quad (3a)$$

鉛鎳的電阻是，

$$R_t = R_{20}[1 + 0.004(t - 20)] \quad (2b)$$

普通用的銅或者鉛鎳，電阻的增加和溫度的關係，可以用下面的方法計算的。若是溫度的增加是  $2.5^\circ C$  或者  $4.5^\circ F$ ；電阻的增加大約是百分之一。若是溫度的增加是  $25^\circ C$ ，電阻的增加是  $\frac{25}{2.5} \times \frac{1}{100} = \frac{10}{100}$  百分之十。用這個方法來計算，得到的結果在平常應用上，準確度也已夠足。

【例題 1】 假使銅鎳的電阻在  $20^\circ C$  是 0.823 歐，問在  $55^\circ C$  時候的電阻是多少歐？

【解】 應用公式(3a)  $R_2 = 0.823$  歐； $t = 55^\circ C$ ，所以，

$$\begin{aligned} R_t &= 0.823[1 + 0.00393(55 - 20)] \\ &= 0.823(1 + 0.00393 \times 35) \\ &= 0.823 \times 1.1376 = 0.936 \text{ 歐。} \end{aligned}$$

若是用約值的方法，我們知道溫度的增加是  $55 - 20 = 35^\circ C$ ；電阻的增加應當是  $35 \div 2.5 = 14$  或者百分之十四。0.823 的百分之十四是  $\frac{14 \times 0.823}{100} = 0.115$ 。所以在  $55^\circ C$  時候的電阻是  $0.823 + 0.115 = 0.938$  歐。

或者把原來的電阻歐姆數當做百分之一百，溫度在  $55^\circ C$  時候增加的電阻是百分之十四，兩數相加是等於百分之一百十四或者 1.14 倍。 $0.823 \times 1.14 = 0.938$  歐。

用約值的方法得到的結果，和用公式得到的結果，差得很少。

【例題 2】 求 500 英尺美國鎳規規號 14 的銅鎳在溫度 (a)  $45^\circ C$  和

(b) 75°C. 時候的電阻。

【解】 銅線的電阻係數，在溫度 20°C. 時是每圓密爾英尺 10.37 歐。規號 14 的截面面積是 4,107 圓密爾 (表八)。應用第 15.7 節裏計算電阻第(1)公式，得

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{10.37 \times 500}{4,107} = 1.262 \text{ 歐。}$$

(a) 再應用第 15.8 節裏的計算電阻溫度係數公式(3a)，在 45°C. 的時候，

$$\begin{aligned} R_t &= R_{20} [1 + 0.00393(t - 20)] \\ &= 1.262 [1 + 0.00393(45 - 20)] \\ &= 1.262(1 + 0.00393 \times 25) \\ &= 1.262 \times 1.0983 = 1.386 \text{ 歐。} \end{aligned}$$

(b) 在 75°C. 的時候，

$$\begin{aligned} R_t &= R_{20} [1 + 0.00393(75 - 20)] \\ &= 1.262(1 + 0.00393 \times 55) \\ &= 1.262(1 + 0.216) \\ &= 1.262 \times 1.216 = 1.534 \text{ 歐。} \end{aligned}$$

用約值的方法，在 45°C. 的時候，溫度的增加  $45 - 20 = 25^\circ\text{C}$ ，相當  $25 \div 2.5 = 10$ ，或者百分之十。把兩數相加起來， $\frac{100}{100} + \frac{10}{100} = 1.10$  倍。應

用計算的公式，再乘上 1.10 倍，得

$$R_t = \frac{1.1 \times \rho l}{A} = \frac{1.1 \times 10.37 \times 500}{4,107} = 1.388 \text{ 歐。}$$

在 75°C. 的時候，溫度的增加是  $75 - 20 = 55^\circ\text{C}$ 。電阻的增加是  $55 \div 2.5 = 22$ ，或者百分之二十二。把兩數相加起來是百分之一百二十二。或者 1.22 倍。

$$R_t = \frac{1.22 \times \rho l}{A} = \frac{1.22 \times 10.37 \times 500}{4,107} = 1.54 \text{ 歐。}$$



## 習 題

1. 求 1,000 英尺美國線規規號 10 的銅線在溫度 (a)  $45^{\circ}\text{C}$ . 和 (b)  $75^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻。  
答 (a) 1.097 歐 (b) 1.214 歐
2. 求 5,000 英尺美國線規規號 12 銅線在溫度  $55^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻。  
答 9.028 歐。
3. 求 5 英里美國線規規號 0 的銅線在溫度  $40^{\circ}\text{C}$ . 時候的電阻。  
答 2.80 歐。

# 英漢名詞對照索引

absolute c. g. s. electromagnetic system 厘米克秒絕對電磁制	107	battery 電池組	24
absorptive power of dielectrics 介質的吸收本領	86	bearing 軸承	36
acceleration of gravity 重力	44	Birmingham wire gage 伯明罕制線規	154,155,161
加速度	44	bismuth 鉍	116
accuracy 準確度	27	bobbin 胎型	123
across 跨接	30	braking system 掣動裝置	34
active conductor	147	branch 支路	53
advance 前進	164	branch circuit 支路電路	66
aging 陳腐	114	break down 疲竭	75,86
air condenser 空氣容電器	77	British standard wire gage 英國標準線規	161
air gap 空氣隙	89	British thermal unit 省寫作 B. T. U. 英熱單位	36
alternating current 交流	13	Brown and Sharpe wire gage 簡稱 B. & S. 白朗夏泊制線規	153,154
aluminium 鋁	13	burned 燒焦	86
amalgamation 汞齊化	19	buzzer 蜂音器	123
amber 琥珀	3	calibration 校準	22
American wire gage 簡稱 A.W.G. 美制線規	153,154,155	caloric 卡路里	36
ammeter 安培計	25,27	capacitance 電容	82
ampere 安培	27	capacity 電容	78,82
ampere hour 安培小時	23	carbonized 碳化	86
ampere turn 安培匝	107	carbon rheostat 碳片電阻器	145
analogy 類喻	9	cast steel 鑄鋼	115
antimony 銻	116	cell 電池	10
arbitrary scale 協定標號	153	centigrade thermometer 百分溫度計	2
armature 銜鐵	97	centimeter 厘米	12
asbestos 石棉	15	centimeter gram second system 簡稱 c. g. s. system 厘米克秒制	100
atomicity 原子性	1	charge 電荷, 充電	3,23
atomic weight 原子量	3	charged 帶電	3
atoms 原子	2	charged or electrified 帶電的	7
audio frequency 音頻	114	chemical methods 化學方法	18
bakelite 培克來膠	15		
ballistic galvanometer 衝擊電流計	28		
bar magnet 條形磁鐵	97		

cheval vapeur 法國蒸汽馬力	43	coulombmeter 庫倫計	26
choke coil 抗流線卷	78	counter clockwise 反時針的	118
chromium 鉻	96	counter electromotive force 反電 動勢	18
circuit diagram 電路圖	48	couple 偶力	132
circular mil 圓密爾	150	crest value 巔值	89
Clark standard cell 葛拉克 標準電池	22	cross section 截面	11
climax 登峯	164	current coil 電流線卷	32
clockwise 順時針的	118	current transformer 電流 變量器	32
closed 通流的	11	curve of magnetization 磁化 曲線	108
closed circuit 通流電路	49	cutting 截割	133
closed circuit cell 常流電池	19	cycle of magnetization 磁化 循環	127
coefficient of mutual induction 互感係數	148	damping 阻尼	142
coefficient of self-induction 自感係數	144	Daniel cell 丹亞瑟電池	19
coercive force 矯頑力	127	daraf 台拉法	93
coil 線卷	28,107	data 數據	89
coke 焦煤	21	decompose 分解	26
commutator type 換向式	34	deflection 偏轉	118
compass 羅盤	96	demagnetize 去磁	123
compensating device 補償裝置	25	depolarizer 去極化劑	21
compound 化合物	2	deposit 銅片澱積	20
compound circuit 混合磁路	106	device 設置	10
concentration 濃度	26	dial 晷盤	28
conductance 電導	30	diamagnetic substance 反磁質	115
conductivity 導體的電導	85	dielectric 介質,電介質	77,169
conductor 導體	14	dielectric constant 介質常量	85
consequent pole 庶極	104	dielectric strength 介質強度	86
constant 恆定,常量	27,38,167	dielectric stress 介質應力	79
constantan 康銅	24,164	difference of electric potential 電勢差	8
continuous direct current 恆定 直流	13	difference of level 面位差	9
copper sulphate 硫酸銅		diffusion 擴散	19
copper voltameter 銅解電量計	26	diluted sulphuric acid 稀硫酸	18
core 卷心,鐵心	114,121	direct current 直流	13
coulomb 庫倫	28		

- |                               |          |                              |        |
|-------------------------------|----------|------------------------------|--------|
| disc 圓盤                       | 34       | electric quantity 電量         | 26     |
| discharge 放電                  | 23,75,81 | electrification 起電           | 70     |
| displacement 位移               | 14       | electrified 帶電               | 3      |
| disrupted 疲竭                  | 86       | electrified body 帶電體         | 70     |
| distorted 畸變的                 | 104      | electrochemical method 電化    |        |
| distortion 畸變                 | 78       | 方法                           | 18     |
| disturbance 擾動                | 4        | electrode 電極                 | 18     |
| drop of potential 電勢降落        | 60       | electrodynamometer ammeter   |        |
| drop of pressure 水壓降落         | 61       | 力測安培計                        | 28     |
| dry cell 乾電池                  | 21       | Electrokinetics 動電學          | 17     |
| dyne 達因                       | 100      | electrolysis 電解              | 5,26   |
| ebonite 硬橡膠                   | 87       | electrolyte 電解液,電解質          | 18,169 |
| eddy current 渦流               | 114      | electromagnet 電磁鐵            | 121    |
| Edison alkaline cell 愛迪生鹼液    |          | electromagnetic induction 電磁 |        |
| 電池                            | 23       | 感應                           | 133    |
| effect 效應                     | 26       | electromagnetic wave 電磁波     | 12     |
| efficiency 效率                 | 45       | electromagnetism 電磁          | 117    |
| elastance 倒電容                 | 93       | electromotive force 電動勢      | 10     |
| electrical conductivity 電導    |          | electron 電子                  | 3      |
| 係數                            | 162      | electron spin 電子旋轉           | 132    |
| Electrical Engineering 電機     |          | electron theory 電子論          | 1      |
| 工程                            | 15       | electronic current 電子流       | 11     |
| electrical measurement 電工量度   | 21       | electrostatic capacity 靜電容   | 82     |
| electric circuit 電路           | 11       | electrostatic induction 靜電   |        |
| electric condenser 容電器        | 77       | 感應                           | 74     |
| electric current 電流           | 12       | electrostatic voltmeter 靜安   |        |
| electric device 電工設置          | 12       | 伏特計                          | 29     |
| electric energy 電能            | 23       | Electrostatics 靜電學           | 17     |
| electric field 電場             | 7        | element 元素                   | 2      |
| electric field intensity 電場強度 | 8        | enamel 瓷漆                    | 122    |
| electric force 電力             | 7        | energy 能[量]                  | 15,30  |
| electric heater 電熱器           | 41       | equipotential surface 等勢面    | 10     |
| electric potential 電勢         | 8        | ether 以太                     | 1      |
| electric power 輸電功率           | 15       | Ewing's theory of magnetism  |        |
| electric resistance 電阻        | 15       | 依莫的磁論                        | 129    |
| electric series 摩擦電序          | 72       | external circuit 外電路         | 49     |
| electric shock 電震             | 75       | extension of Ohm's law 歐姆定律  |        |

的擴發	65	ground return circuit 地回電路	50
fall of potential 電勢降落	60	gun cotton 火綿	73
farad 法拉	84	gutta-percha 馬來樹膠	73,87
Faraday 法拉第	1	gyroscope 迴轉器	132
ferro-magnetic substance 鐵磁質	115	hard crown glass 冕牌硬玻璃	87
final temperature 終溫度	41	hard-drawn copper 硬抽的銅	163
fixture 架燈	46	heat energy 熱能	16
fixed condenser 固定容電器	81	heating effect 發熱作用	17
flannel 絨布	17	hectowatt hour 佰瓦小時數	34
flash 閃光	74	hipernik 精煉磁齊	114
flint glass 火石玻璃	87	horse power 馬力	43
flux 通量	102	horse-shoe magnet 蹄形磁鐵	96
flux linkage 通鏈	144	hot wire ammeter 熱線安培計	28
footpound 呎磅	38	hysteresis 磁滯	114,127
frame 卷框	142	incandescent lamp 白熾電燈	55
Franklin, Benjamin 本雅明	1	induced charge 應電荷	75
佛蘭克林	1	induced electric current 應電流	133
free junction 閑接頭	24	induced electromotive force 應電動勢	133
free pole 自由極	98	inducing current 感電流	139
friction 摩擦	16	induction type 感應式	34
furnace 熔爐	25	inertia 慣性	143
gage 線規	153	initial electromotive force 初電動勢	20
gage number 規號	153	initial permeability 初導磁係數	114
Galvanic cell 賈法尼電池	17	input 輸入	45
galvanometer 電流計	24	instant 瞬時	13
gas 氣體	2	insulating oil 絕緣油	88
generator action 發電機作用	133	insulating wire 絕緣線	122
German Silver 德銀	14	insulation resistance 絕緣電阻	29
gilbert 吉柏	107	insulator 絕緣體	14
glycerine 甘油	87	internal circuit 內電路	49
gram-calorie 克蘭姆-卡路里	36	internal resistance 內電阻	18
graphical symbol 圖形符號	48,82	international ampere 國際安培	27
graphite 石墨	21		
grinding machine 磨鉢	123		
ground 通地	50		
grounded circuit 通地電路	50		

international annealed copper standard 國際軟煉銅標準	162	line of magnetization 磁化線	106
international coulomb 國際庫倫	28	liquid 液體	2
International Electrotechnical Commission 國際電工技術委員會	27	load 負載	32
international ohm 國際歐姆	28	loading coil 加感線卷	78
international volt 國際伏特	29	local action 局部作用	19
intensity of magnetization 磁化 強度	99	lodestone 導向石	96
ion 離子	4	Lorentz. H.A. 羅倫徹	1
ionization 電離	6	loss of potential 電勢的損失	63
IR drop IR 降落	64	lubricating oil 滑潤油	36
iridium 銻	25	magnet 磁體,磁鐵	96
iron-clad electromagnet 鐵包電 磁鐵	124	magnet pole 磁極	97
iron grid 鐵柵	49	magnetic axis 磁軸線	97
joule 焦耳	31,38	magnetic chuck 磁力吸板	123
Kelvin bridge 愷爾文電橋	29	magnetic circuit 磁路	102,106
Kelvin current balance 愷爾文 電流電秤	28	magnetic effect 磁效應	117
keeper 銜鐵	97	magnetic field 磁場	99
key 明鍵	137	magnetic field intensity 磁場 強度	100
kilogramcalorie 仟克卡	36	magnetic flux 磁通量	102
kinetic electricity 動電	17	magnetic flux density 磁通量 密度	107
kilovolt 仟伏特	29	magnetic hysteresis loop 磁滯 迴線	127
kilowatt 仟瓦特	31	magnetic induction 磁感應,磁感 應強度	17,106,107
kilowatt-hour 仟瓦特小時	33	magnetic length 磁長度	97
law of magnetic action 磁性作用 的定律	98	magnetic line of force 磁力線	99
lead cell 鉛電池	19	magnetic moment 磁矩	98
lead glass 鉛玻璃	87	magnetic property 磁性	96
Leclanche cell 勒克蘭社電池	18	magnetic saturation 磁性飽和	108
Lenz 楞次	139	magnetic substance 磁質	104
Lenz's law 楞次定律	139	magnetic susceptibility 磁化 係數	109
lightning 電閃	74	magnetite 磁鐵礦	96
line of magnetic induction 磁感 應線	106	magnetization by induction 感應 起磁	105
		magnetized 磁化	97

magnetizing coil 磁化線卷	122	milling machine 銑床	123
magnetizing current 起磁電流	134	millivolt 毫伏特	29
magnetizing field 磁力場	126	molecular magnet 分子磁	129
magnetizing force 磁化力	126	molecules 分子	2
magnetizing power 磁化本領	125	molybdenum 鉬	164
magnetomotive force 磁通勢	107	motor 電動機	11
major calorie 大卡路里	36	movable plates 動片組	82
manganin 錳銅	164	moving iron ammeter 輕鐵 安培計	27
Manila paper 馬尼刺紙	87	mutual induction 互感	146
maple wood 楓木	87	mutual inductance 互感係數	148
matter 物質	1	natural magnet 天然磁鐵	96
maxwell 馬克士威	102	needle gap 針隙	89
mechanical energy 機工能量	37	negative charge 陰電荷	71
mechanical equivalent of heat 熱功當量	38	negative ion 陰離子	5
megger 高阻計	29	negative pole 陰極	18
megohm 兆歐姆	29	negative potential 負電勢	9
mercury and disc type 水銀和 盤式	34	neutral 中和	3
meter-kilogram 米仟克	38	neutral region 中和區	97
methyl alcohol 甲醇	87	neutron 中子和子	3
metric horse power 米制馬力	44	new British standard 簡稱 N.B.S 新英國標準	161
metric system 米制	38	nichrome 鎳鉻	164
metric wire gage 米制 線規	153,154,155	non-conductor 非導體	14
mho 姆歐	30	non-inductive winding 無感 繞法	146
mica 雲母	15	non-magnetic metal 非磁性 金屬物	34
mica condenser 雲母容電器	77	non-magnetic substance 非磁質	105
microampere 微安培	22,27	non-uniform electric field 不均 強電場	8
microfarad 微法拉	92	non-uniform magnetic field 不 均強磁場	101
micromicrofarad 微微法拉	92	normal 正常	4
microohm 微歐姆	29	normal induction 正常感應	109
microvolt 微伏特	29	north pole 北極	98
mil 密爾	88	north seeking pole 指北極	98
milliampere 毫安培	27		
millihenry 毫亨利	144		
milli-microfarad 毫微微法	92		

nucleus 原子核	3
oak wood 橡木	87
oersted 奧斯特	108
ohm 歐姆	21,28
ohmmeter 歐姆計	29
Ohm's law 歐姆定律	58
Old English wire gage 舊英制 線規	154,155
olive oil 橄欖油	87
open circuit 斷流電路	50
open circuit cell 暫流電池	19
oscillation 搖擺	142
output 輸出量	23,45
oxydizing agent 氧化劑	18
paddle 翼槳	37
paper condenser 紙容電器	77
paraffin 石蠟	15
paraffin waz 石蠟	87
parallel connection 並聯接法	53
parallel plate condenser 平行 面片的容電器	84
parallel-series 混聯	56
parallel-series connection 混聯 接法	57
paramagnetic substance 順磁 質	115
particle 質點	2
path 路徑	48
pendulum 擺	141
perfect insulator 完全絕緣體	14
permanent magnet 永久磁鐵	96
permanent magnet moving coil ammeter 永久磁轉卷安培計	27
permalloy 高導磁齊	108,114
permeability 導磁係數	109
permeance 磁導	108
Phosphor bronze 磷青銅,	

磷銅	14,164
phosphorus 磷	116
Plante lead cell 普隆特鉛電池	23
plaster of Paris 焦石膏	21
Platinum 鉑	14,25
plug 插頭	28
plunger 活杵	123
Polarity 極性	7
Polarization 極化	18
pole strength 極強	98
porcelet 朋西來	43
Porous cup 多細孔的杯	19
portative electromagnet 吸持式 電磁鐵	123
positive charge 陽電荷	71
Positive ion 陽離子	4
positive pole 陽極	18
positive potential 正電勢	9
positron 陽電子	3
potential coil 電勢線卷	32
potential transformer 電勢 變量器	32
potentiometer 電勢計	28
power 功率	30
practical system 實用制	27
pressure 壓力	9,60
pressure gauge 壓力計	60
primary battery 原電池組	24
Primary cell 原電池	17
primary circuit 主電路	146
primary coil 主線卷	138
primary current 主電流	147
primary flux 主磁通量	147
process 過程	6
protective equipment 保護設備	51
protons 質子	3
pulsating current 脈動電流	13



punctured 擊穿	75,86	silicon steel 矽鋼	103,114
pure Indian rubber 純橡膠	87	silver nitrate 硝酸銀	27
pure resistance 單純電阻	513	silver voltameter 銀解電量計	26
quartz 石英	25	sine wave 正弦波形	89
radial 沿徑	99	single fluid 單液	19
range 量程	82	Single fluid theory 單液體說	1
rated output 額定量	31	slate 板石	88
reading 讀數	25,28	solenoid 螺管線卷	121
reciprocal 倒數	30	solid 固體	1
relay 替續器	115	solution 溶液	19
reluctance 磁阻	107	Source 電源	48
reluctivity 磁阻係數	109	source of hydraulic pressure 水	
residual magnetic effect 剩磁		壓源	80
效應	126	south pole 南極	98
resistance box 電阻箱	28	south seeking pole 指南極	98
resistance coil 電阻線卷	28	spark 電花	74
resistivity 電阻係數	162	spark gap 電花隙	30
resistor 電阻器	49	Specific inductive capacity 介質	
retentivity 頑磁性	127	常量	85
return shork 回震	75	Specific resistance 電阻係數	162
root mean square 或簡作 r.m.s.		sphere gap 球隙	89
均方根	91	square mil 方密爾	151
rotor 動片組	82	standard wire gage 簡稱 S.W.G.	
sal-ammoniac 氯化銨	20	英國標準線規	153,154,155,161
saturation point 飽和點	108	static electricity 靜電	17
scale 標度	25	stationary plates 靜片組	82
secondary circuit 副電路	147	stator 靜片組	82
secondary coil 副線卷	138	steel armour 鋼的裝鐵	77
self-inductance 自感係數	144	steel wire gage 鋼線規	153,154,155
self-induction 自感	142	storage battery 蓄電池組	24
series 串聯	25	storage cell 蓄電池	23
series connection 串聯接法	52	strain 形變	1
series-parallel 混聯	56	Stub's iron wire gage 簡稱 B.W.G.	
shell 電子層	131	司脫勃鐵線規	161
short circuit 捷路	51	stress 應力	29
shunt 分流器	32	Stub's steel wire gage 司脫勃	
Shunt circuit 分流電路	53	鋼線規	154,155,161

surface hardened cast iron 碳鋼 和表健的鑄鐵	125	vapor 汽	2
switch 司路器, 開關	49	variable condenser 可變容電器	81
switchboard 交流司路屏	27	velocity 速度	12
Symmer Robert 昔摩羅伯	1	vertical 鉛直	37
terminal 端鈕	10	virgin curve 原曲線	127
thermocouple 溫差電偶	17	volt 伏特	20,29
thermocouple ammeter 溫差電 偶安培計	28	voltage 電壓	10
thermoelectric couple 溫差電偶	25	Voltaic cell 伏打電池	17
thermoelectric electromotive force 溫差電動勢	24	voltmeter 電量計	26
thermoelectric pyrometer 溫差 電偶高溫計	25	voltmeter 伏特計	23,29
Thompson J. J. 湯卜遜	1	volume 容積	83
three states of matter 物質三態	2	vulcanized fibre 硬化纖維	87
top 陀螺	132	water head 水動勢	60
trace 循掃	103	water level 水面位	9
tractive electromagnet 曳引電 磁鐵	123	watt 瓦特	31
trade name 市場名稱	165	Watthour 瓦特小時	24,33
transformation 變換	13	watthour meter 瓦特小時計	33
transformer 變壓器	134	wattmeter 瓦特計	32
transformer action 變壓器作用	133	wattsecond 瓦特秒	33
transmission line 輸電線路	14,78	Wheatstone bridge 惠斯登電橋	29
tungsten 鎢	96	Western Electric Co. 西方電器 公司	109
turns 匝數	119	Westinghouse Electric Co. 德 亨豪斯電器公司	114
two fluid theory 兩流體說	1	Weston 衛斯吞	22
uniform electric field 均強電場	8	winding 繞組	146
uniform magnetic field 均強 磁場	101	work 功, 功量	26,30
U.S. steel wire gage 簡稱 S.W.G. 美制鋼線規	161	yoke 軛鐵	124
		zero degree temperature coeffi- cient of resistance 零度時候 的電阻溫度係數	169
		zero level 零面位	9
		zero potential 零電勢	9

