

電工原理

薛 勝 太
俞 國 平 編著

興業圖書股份有限公司

版權所有・翻印必究

中華民國六十八年九月二十一日初版

電 工 原 理

編 著 者：薛勝太・俞國平

發 行 者：王 志 康

本公司登記證局版台業字第〇四一〇號

出 版 者：興業圖書股份有限公司

印 刷 者：美光彩色印刷公司

臺 南 塩 埕 七 號

發 行 者：興業圖書股份有限公司

臺南市勝利路一一八號

電話：(062)373253 號

郵政：南字 31573 號

上册定價壹佰伍拾元

下册定價貳佰伍拾元

精裝合訂本定價叁佰伍拾元

目 錄

第一章	電的基本概念.....	1
第二章	電 阻.....	13
第三章	歐姆定律、功率及能量.....	30
第四章	串聯及並聯電路.....	44
第五章	串並聯網路.....	72
第六章	直流網路分析.....	88
第七章	電 場.....	177
第八章	電容器.....	204
第九章	磁之概念.....	224
第十章	磁 場.....	241
第十一章	磁 路.....	251
第十二章	電磁感應及電感.....	281
第十三章	正弦波——交流電路之基礎.....	301
第十四章	複數和相量.....	331
第十五章	兩端正弦穩態電路.....	350
第十六章	交流電路之網路分析.....	389
第十七章	交流電路之功率與能量.....	421
第十八章	諧 振.....	444

第一章 電的基本概念

1-1 物質的基本構造

一切物質均由原子所構成，原子之構造如圖 1-1 所示，原子之中心由帶正電之質子與中性之中子積聚而成原子核。核外為帶負電之電子，依固定之軌道繞原子核而運轉。在正常狀態下，原子之質子數與電子數相等，而每一質子與電子所荷之電量相等，故原子本身呈中性。質子所帶正電荷與電子所帶負電荷相等，然而，電子的質量僅約為質子或中子的 $1/1840$ 。

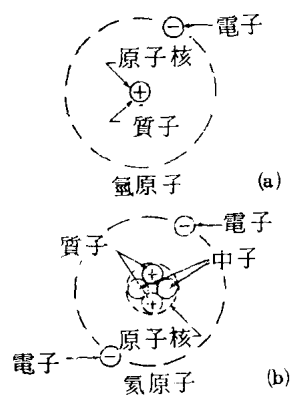


圖 1-1 原子之構造

電子運轉所遵循之軌道有內外之分，依電子數目之多寡分為多層，各層軌道內電子所具有之能量各不相同。愈外層之電子能量愈高。最外層之電子能量最高，也最容易自外界獲得能量。當其獲得足夠之能量，即脫離原子核之束縛而逸出原子，成為可移動之帶電質點，此一質點帶負電，失去電子之原子稱為游子或離子，帶正電。這種容易逸出原子而運動之電子，即稱為自由電子。

1-2 電荷與庫侖定律

電荷可分為正電荷與負電荷兩種，同性電荷相斥，異性電荷相吸。當一自由電子自原子中逸出，其所帶之電量，即為一基本單位負電荷；失去電子之原子帶一基本單位之正電荷，亦即一質子所帶之電量。電量之實用單位為庫侖，簡稱為庫。一質子所帶電量為

$+ 1.60 \times 10^{-19}$ 庫，一電子所帶之電量即為 $- 1.60 \times 10^{-19}$ 庫。

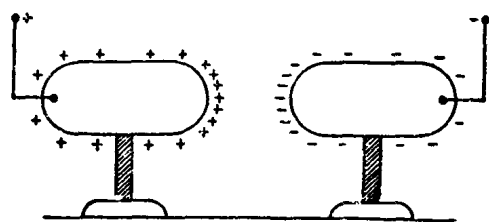


圖 1 - 2 帶相異電荷之兩導體

圖 1 - 2 示兩相互絕緣之長形導體，分別接於一靜電感應機之正、負兩端。接於正端之導體，因受外加電壓影響，一部分自由電子，經靜電感應機移動至接於負端之導體，故接於正端之導體帶正電，接於負端之導體帶負電。每一導體上所帶之電荷分佈於導體之表面，由於異性電荷相吸，遂使二導體相鄰之兩端，電荷之分佈密度較其他部份為大。

若此二導體能自由運動，則因二異性電荷互相吸引，二導體間產生一種靜電吸力而使此二導體相向運動。當兩導體接觸時，於接觸之瞬間，將產生一火花，顯示有一瞬間電流，自一導體流向另一導體。

電荷與電荷之間彼此會產生一種同性相斥，異性相吸的電力，兩帶電體間之電力，與兩帶電體所荷電量之乘積成正比，與兩帶電體中心間距離之平方成反比。此處所言帶電體之中心係指對帶電體外任何一點而言，當帶電體之電荷全部集中於中心時，對該點產生之電效應不變。倘帶電體為一球體，則此處所言之中心即為其球心。

設兩帶電體所荷電量分別為 Q_1 及 Q_2 ，兩帶電體中心間之距離為 d ，則由 Q_1 ， Q_2 所生之電力為

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \quad (1-1)$$

其中 k 爲一常數，其值視兩帶電體周圍之介質而定。此一定律稱爲庫倫定律 (Coulomb's Law)。

若兩電荷之電量相等，即 $Q_1 = Q_2$ ， $d = 1$ 厘米 (cm)，在真空內此二電荷間之作用力恰好爲 1 達因時，此時二電荷之電量我們定爲一靜電庫倫。換言之，若 $Q_1 = Q_2 = 1$ 靜電庫， $d = 1$ cm，在真空或空氣中， $F = 1$ 達因。可知真空或大氣中，用上述之單位時， k 之值爲 1。

在 $M.K.S.$ 單位制中，電量之單位爲庫倫，距離之單位爲米，力之單位爲牛頓，由於 1 庫 $= 9 \times 10^9$ 靜庫，可以得出 k 之值爲 9×10^9 。故使用 $M.K.S.$ 單位制時，在真空或大氣中，庫倫定律可以下式表之：

$$F = 9 \times 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \text{ 牛頓 (nt.)} \quad (1-2)$$

例題 1—1：

兩電荷 $Q_1 = + (5 \times 10^{-6})$ 庫倫， $Q_2 = - (3 \times 10^{-9})$ 庫倫，在真空中相距 10 厘米，求其間相互作用之力若干？是爲引力或斥力？

$$\begin{aligned} \text{解：} \quad F &= k \cdot \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 10^{-6} \times (-3 \times 10^{-9})}{(10^{-2})^2} \\ &= -1.3 \text{ 牛頓} \end{aligned}$$

作用力大小爲 1.3 牛頓

負號表示引力

1-3 靜電感應

若將一帶電導體趨近一完全隔絕之不帶電導體，則此中性導體鄰近帶電體之一端即感應而生與帶電體電性相反之電荷，遠離帶電體之另一端則生與帶電體電荷性相同之電荷。此一現象，稱為靜電感應。感應而生之電荷，稱為應電荷（ Induced Charge ）。

圖 1-3 示帶正電之 A 導體，在 B 導體上感應出電荷之情形。很顯然的， A 導體上的正電荷均集中至接近 B 導體之一端。此時若將 B 導體上正電荷聚集之一端接地，則 B 導體上之正電荷流向地中，如圖 1-4 所示。

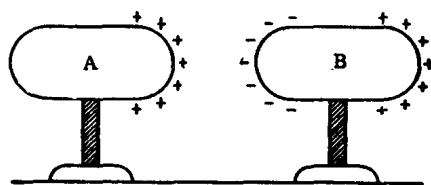


圖 1-3 靜電感應

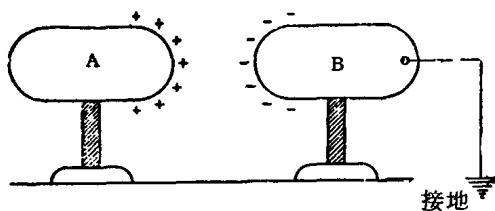


圖 1-4 被感應導體一端接地

1-4 電場與電力線

假定一帶電體 Q_1 為固定不動者，將另一帶電體 Q_2 移近 Q_1 時，二者之間將產生一吸力或斥力，視此兩帶電體電荷之性質而定，此二者間之電力，隨著 Q_2 之遠離而變弱。這表示帶電體 Q_1 的周圍必有一區域，任何電荷在此區域中將產生一電力，此一區域即稱為電場。

欲檢驗空間某點是否有電場存在，只需在該處放置一試驗電荷，若此電荷受力之作用，則表示在該處有電場存在；因力有大小，有方向，故該點之電場亦可視為具有大小及方向之向量。

設試驗電荷之電量為 Q 庫（ Coul ），在電場中某一點所受之力為 F 牛頓（ nt ），則該點之電場強度 ϵ 可以下式表示之：

$$\epsilon = \frac{F}{Q} \quad nt/coul \quad (1-3)$$

由上之向量式可知，若 Q 爲正電荷，則 ϵ 與 F 同向，若 Q 爲負電荷，則 ϵ 與 F 反向；換言之，即正電荷在電場中受力之方向，即爲電場之方向。

同樣，一電量爲 Q 之電荷，在電場強度爲 ϵ 之處，所受之電力爲

$$F = Q\epsilon \quad (1-4)$$

例題 1—2：

設兩平行板之間有一均勻電場，若電場強度爲 10^4 牛頓／庫，試求一電子於此兩平行板間所受之力爲若干？

解： 一電子之電量爲 $Q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ coul}$

$$\begin{aligned} \text{故 } F &= Q\epsilon = (1.6 \times 10^{-19}) \times 10^4 \\ &= 1.6 \times 10^{-15} \text{ nt.} \end{aligned}$$

因電子荷負電荷，故所受之力與電場方向相反。

電場的許多特性可以利用電力線來表示之，電力線爲虛設之線條，其上任何一點之切線方向即爲該點電場之方向。圖 1—5 所示

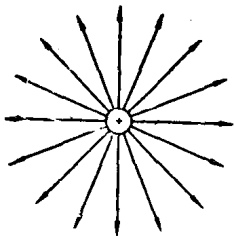


圖 1-5

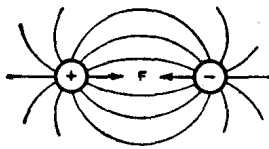


圖 1-6

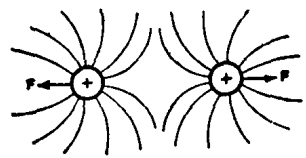


圖 1-7

爲一單獨之正電荷周圍所生之電場。圖 1—6 及圖 1—7 則分別示同性及異性兩電荷周圍之電場。由上述圖中可知，每一電力線均爲自正電荷發出而終止於負電荷之連續曲線，圖 1—5

及 1—7 中之負電荷可視為在無窮遠處，由於任一點之電場僅能有一個方向，故電場中任一點也僅能畫一條電力線。換言之，電力線永不相交。

1—5 電 流

圖 1—8 為一段銅線，若用一假想平面垂直割切此線，可產生一圓截面。在室溫情況下，雖無外施力場，但銅線中的電子，仍可自附近環境介質中吸收熱能，而成為自由電子，可以任意活動。當一原子失去電子時，其淨電荷為正，成為正離子。自由電子可在正離子所在區域中移動，但正離子僅能在某一平均固定位置振動，所以自由電子即為銅線或其他導體的電荷載子。

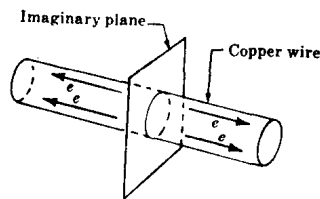


圖 1-8

圖 1—9 說明正離子與自由電子排列的情況，在此排列中，自由電子藉方向及速度的改變，不斷損失或獲得能量。形成電子任意

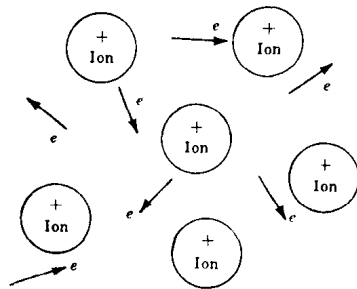


圖 1-9

活動的因素有三：

①電子與正離子或其他電子的碰撞。

②受正離子的吸引。

③受其他電子的排斥。

在圖 1—8 圓截面部分的自由電子，經過一段時期的任意活動後，向左方移動的電子數必等於向右方移動的電子數，所以在無外力情況下，電荷在任何一方向的淨流動量均為零。

將銅線接在電池兩接線柱上，如圖 1—10 所示。因為電池將化學能轉變為電能，使接線柱一端為淨正電荷，另一端為淨負電荷，所以當銅線接到二接線柱的瞬時，自由電子即被正端吸引，留下的正離子將繼續在其固定位置振動。電池的負端則供給電子，到達距負端最近的銅線，並向正端方向移動。因為從負端供給的電子數與正端吸引的電子數相等，所以在銅線上任何部分仍保有電性中和狀態，如圖 1—10 的 ab 段。

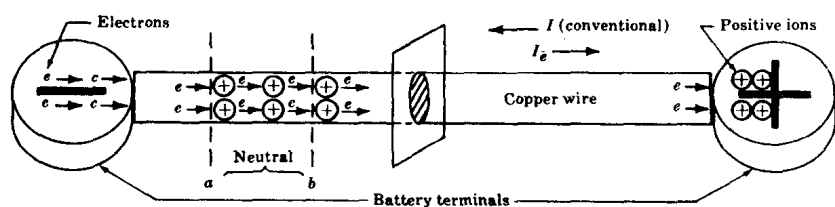


Figure 2.6

圖 1-10

流經圓截面的電荷，或稱電流，以定速每秒通過的電子數為 6.242×10^{18} 時，此電流量稱為 1 安培。在 MKS 制單位中，一個電子的荷電量為 1.6×10^{-19} 庫侖，所以 6.242×10^{18} 個電子的荷電量為：

$$6.242 \times 10^{18} (1.6 \times 10^{-19} \text{ 庫侖}) = 1 \text{ 庫侖}$$

故電流的安培數由下式決定：

$$I (\text{安培}) = \frac{Q (\text{庫侖})}{t (\text{秒})}$$

例題 1—2：

流經銅線某點的電流，若每分鐘為 1.20 庫侖，求電流？

解：

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{1.20}{60} = 0.02 \text{ 安培}$$

例題 1—3：

若電流為 0.2 安培，以 0.004 庫侖電荷量通過某點，求所需時間？

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{0.004}{0.2} = 2 \times 10^{-2} \text{ 秒}$$

欲使二帶正電荷體聚合，必須有一種力量能夠克服二正電荷間依庫侖定律所決定的斥力。圖 1—11 有一小的正電荷 n 及一大的正電荷 c ，欲使 n 到達 x 及 y 兩不同位置，現在要考慮需要多大的力量。

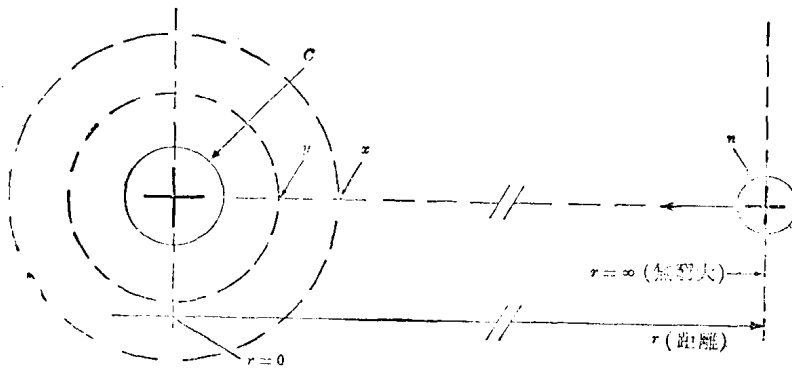


圖 1-11

為探求二電荷接近所需的力量，必須先有一參考基準，方可便於計算。現假設二定量電荷間的距離極大，則由庫侖定律可知，二

電荷間的斥力必極小，若將距離增至無窮遠，則其相互斥力更小，甚至可以說此二電荷間將互不影響。所以，參考基準定在無窮遠的距離。

使正電荷 n 到達 x 點位置，需要有定量的能量加於電荷，此種使質點變更位置的力量，稱為位能。

電荷 n 在 x 點，若失去位能，則因二電荷間的斥力，將返回無窮遠的位置，該位置的位能為零。若將電荷 n 從 x 點移至 y 點，則須更大的力量，克服二電荷間增大的斥力，所以電荷 n 在 y 點較在 x 點有較高電位，二位置的電位差數，稱為電位差。

在 *MKS* 制，此種移動電荷力量的單位為焦耳，若移動 1 庫侖電荷從一點到另一點，需要 1 焦耳能量，則此兩點間存在的電位差為 1 伏特。

x 點及 y 點間的電位差，可用下列公式表示：

$$V_{y\infty} - V_{x\infty} = V_{yx} \text{ (伏特)} = \frac{W \text{ (焦耳)}}{Q \text{ (庫侖)}} \quad (2-3)$$

式中 W 為使電荷從 x 點移至 y 點所需能量的焦耳數， Q 為電荷的庫侖數。

參考圖 1—11 若 1 庫侖電荷從無窮遠移至 x 點，需要 6 焦耳的能量，則 x 點與無窮遠間的電位為：

$$V_{x\infty} = \frac{W}{Q} = \frac{6 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 庫侖}} = 6 \text{ 伏特}$$

若將此電荷從無窮遠移至 y 點，需要 8 焦耳電能，則從無窮遠到 y 點的電位為 8 伏特，由此可知兩點間的電位差為 $8 - 6 = 2$ 伏特。再假定在 x 點及 y 點間，放置一根銅線，如圖 1—12 所示，則在 y 端正離子較在 x 端的正離子有較高的電位。

現在再考慮圖 1—12 中的隔離正電荷，此在 y 端的正電荷失去控制後，將返回 x 點。在銅線中的正電荷受外力後，僅在原位置上振動，但電子在此情況下，可從 x 端移動到 y 端，因 x 端電位較

低。所以在 xy 兩端間，因有電位差的存在，發生暫短的電流流動。

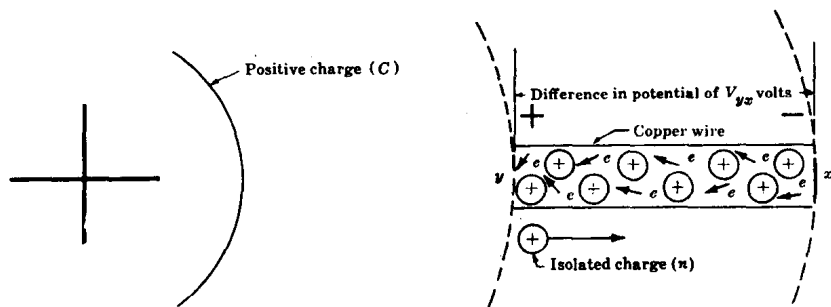


圖 1-12

若跨銅線兩端接一電池，好圖 1—10 所示，電流則不斷流動。再將銅線取掉， xy 兩點的電位差，則等於 1 庫侖正電荷從電池的負端到正端所需要的力量（或 1 庫侖負電荷從正端至負端）。電池的電位差由化學作用產生，常用作電源電壓或電池電動勢，雖然常被認為能源，但仍以伏特為測量單位。若使用英制單位，定義如下：兩點間的電位差為一伏特，等於將一庫侖電荷從一點移至另一點需要 0.738 呎磅的功。

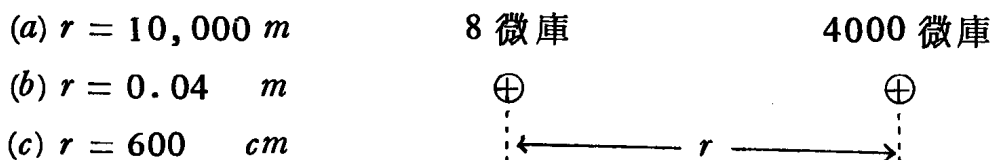
功的單位，若用 *M.K.S.* 制，則為焦耳，因為一焦耳等於 0.738 呎磅。所以，兩點間的電位差為一伏特，等於將一庫侖電荷從一點移至另一點需要一焦耳的功。

伏特的定義亦可由下式表示之

$$V \text{ (伏特)} = \frac{W \text{ (焦耳)}}{Q \text{ (庫侖)}}$$

習題一

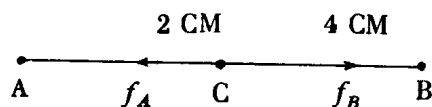
1 如下圖所示，求 Q_1 及 Q_2 之間斥力的牛頓數。



2 兩帶電體相距 10 公分，一帶電體 $+2$ 庫侖，另一帶電體 -5 庫侖，求其間之作用力。

3 兩大小相等之金屬球各帶 $+10$ ，與 -30 庫侖之電且相隔 3 米，求其間之作用力為若干達因？如將二球接觸後再放回原處，則其間作用力如何？

4 如下圖， A 球帶有 $+4 \times 10^{-6}$ 庫侖， B 球帶有 $+6 \times 10^{-6}$ 庫侖， C 球帶有 -5×10^{-6} 庫侖的電荷，求 C 球所受之力？



- 5 一天線上有 $5\mu A$ 之電流，則每秒有多少電子通過此線？
- 6 一電燈需 0.5 安培的電流，則此電燈使用 2 小時共有若干電子通過電線？
- 7 一正電荷，其電量為 10^{-9} 庫侖，試求 1 公分，10 公分及 1 米處之電場強度？
- 8 導線內，50 秒通過 650 庫侖電荷，求電流的安培數。
- 9 如果導體的電流是 20 毫安，一分鐘內有多少電子通過？
- 10 保險絲的額定值是 1 安培，如果在 1.2 分鐘內通過 76 庫侖，會燒斷嗎？
- 11 兩點間的電位差如果是 42 伏特，把 6 庫侖從一點移到另一點，

需要多少功？

12. 電池組的電動勢是 22.5 伏特，如果用掉的能是 90 焦耳，可移動多少電荷？
13. 導體中電荷的流率是 420 庫侖／分，如果在一分鐘之內將 742 焦耳的電能，轉變成熟能，導體兩端的電位差是多少？
14. 電荷各為 +50, +250 及 -300 靜庫之小球，以 10 公分之間隔依次排列於同一直線上，試求各小球所受之力。
15. 有一小物體，帶電荷 -5×10^{-9} 庫侖，當其置於一電場中某一點時，遭受有 20×10^{-9} 牛頓之電力，問此點電場強度為若干？

第二章 電 阻

2-1 簡 介

電阻為物質對電流呈現反對的特性，雖然少數物質在絕對溫度時的電阻幾乎為零，但在普通情況下，幾乎所有的物質對電流皆呈現電阻。

電荷在任何導體中流動，有類似機械磨擦的阻力，此種反對電荷流動，並轉變電能為熱的特性，稱為電阻。電阻測量單位為歐姆，用希臘字母 Ω 代表，並以鋸齒線為電阻符號。

均勻截面積的線，其電阻由以下四因素決定，

- 1 物質種類
- 2 長度
- 3 截面積
- 4 溫度

導體在室溫 20°C 時的電阻，可由下列公式決定：

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-1)$$

式中 R 為電阻歐姆數

l 為長度呎數

A 為截面積圓密爾數

ρ 為電阻係數

由上式知，電阻與導線長度及電阻係數成正比例並與截面積成反比例

。導體愈長，或電阻係數大，而截面積小，則其電阻愈大。截面積測量以圓密爾為單位，並非用平方米或吋，其由下式決定：

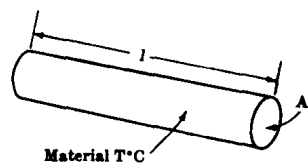


圖 2-1

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2-2)$$

式中 D 爲直徑，爲求面積單位爲圓密爾，首先必須將其他單位改成密爾，因爲 1 密爾爲千分之一吋，將吋改變爲密爾，僅將小數點向右移 3 位即可，如下例：

$$0.123 \text{ 吋} = 123.0 \text{ 密爾}$$

由定義知，直徑爲 1 密爾的導線，其面積爲 1 圓密爾。若將直徑爲 1 密爾代入公式 (2-2)，則面積爲 $\pi/4$ 平方密爾，此即爲 1 圓密爾。所以

$$1 \text{ 圓密爾} = \frac{\pi}{4} \text{ 平方密爾}$$

$$1 \text{ 平方密爾} = \frac{4}{\pi} \text{ 圓密爾}$$

再選用另一任何直徑爲 N 密爾的導體，則其面積爲

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi N^2}{4} \text{ 平方密爾}$$

代入 $4/\pi$ 圓密爾 = 1 平方密爾，則

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi N^2}{4} \text{ (平方密爾)} \\ &= \left(\frac{\pi N^2}{4} \right) \left(\frac{4}{\pi} \text{ 圓密爾} \right) \\ &= N^2 \text{ 圓密爾} \end{aligned}$$

因爲 $D = N$ ，面積的圓密爾數等於直徑的平方密爾數。所以：

$$A_{CM} = (D_{\text{mils}})^2 \quad (2-3)$$

式中 CM 爲圓密爾， mils 爲密爾。

各種導體的電阻係數皆不相同，其爲長度等於 1 呎及直徑等於 1 密爾在 20°C 時測量的電阻值，如圖 2-2。電阻係數 ρ 值的測量單位，可由公式 (2-1) 決定如下：