

電磁學

徐 韋 立



1940

電信界叢書第一種

楊裕昆先生

贈

01348

緒 言

1939年冬應電信界月刊社的邀約，特就過去於担報任
務員訓練班教員時，應報訓班諸同學的要求而編就的電磁
學補充講義，重新整理了一下，把所有電磁學的重要原理
，定律，都收羅起來，成功了這本小書。

這本小書中，值得提出的是有許多節在別的電磁學書
中，也許很少說到的；譬如1939年秋軍校特訓班畢業同學
應二等報務員甄別及試的試題中有何謂反平方定律？何謂
高斯定律？這許多定律是在一般電磁學書中所極少講到的
，在這裏特別都引用到了。

此外還有許多如1.單位磁極，2.馬克士威螺旋定則，
3.鋼鐵之磁導與磁屏，4.磁導係數與磁納係數，5.磁動率
，6.磁暴，7.電池內阻及其壽命，8.拉潑拉斯定律，9.磁
滯作用，10.馬克士威電動定則等，都是很重要而為坊間
書本所少講到的

因為電磁學是電信科學的基本學科，舉凡一切必須具
備的電磁知識，在這本小書中大概都包羅完備了，聊堪告
慰讀者諸君的，但以時間的匆促，必須趕在去年歲尾脫稿
付印，寫來非常草率，可是直到今年二月下旬纔加工趕排

，早知要擱在印刷所這麼久的日子，那儘可以從容重寫總可以比現在編得精彩一些，這是很抱憾的一件事！還有佔空書三分之一強的提要，舉例，習題，解答等，因為排版的困難，印刷時間的不及，只好臨時忍痛抽出，這是應該向讀書諸君道歉的！關於這些此刻沒有做到的，希望將來用道林紙或白報紙再版時，都能一一實現。

成都的印刷比不上滬港等地，雖然這本小書從寫稿畫圖，以至校對，跑印刷所，所有公式等還親自到排字房去校正，編者個人耗去了足足好幾個月的時間，費盡了九牛二虎之力，總算印成了，但其中錯誤遺漏，在所難免，要請讀者諸君原宥，隨時予以校正。

本書承電信界月刊社諸先生設計封面，成城出版社姜經理尹孚和諸位職員工友的熱忱合作，還有許多同事好友的幫忙，都是非常感謝的。

徐 韋 立

1940年3月30日於成都電報局。

電磁學目錄

緒言

第一章 電之概念

- (一) 電爲何物
- (二) 電子學說
- (三) 電子學說摘要
- (四) 離子與荷電體
- (五) 電位差與電動力
- (六) 電流
- (七) 電阻
- (八) 電路

第二章 靜電原理

- (九) 摩擦生電
- (十) 電感應
- (十一) 導體與非導體
- (十二) 電在導體上之分佈

(十三) 尖端放電作用

(十四) 大氣電

第三章 電場與電力線

(十五) 庫侖定律

(十六) 單位電量

(十七) 電場

(十八) 電力線

(十九) 電力線之方向

(二〇) 電力線分佈狀況

(二一) 電力線管及電力線密度

第四章 電位與破裂電壓

(二二) 電位及電位差

(二三) 空間電位與絕對電位

(二四) 電位差之單位

(二五) 電位之計算

(二六) 電位差與電動力

(二七) 絕緣破裂與破裂電壓

第五章 電容器

- (二八) 電容器定義及其作用
- (二九) 導體電位與電容
- (三〇) 球形導體之電容
- (三一) 電容器之電容
- (三二) 非導體之誘電率
- (三三) 來頓瓶
- (三四) 電容器之計算
- (三五) 定量電容器
- (三六) 電解質電容器
- (三七) 乾電解質電容器
- (三八) 變量電容器
- (三九) 共軸電容器
- (四〇) 電容器之損失
- (四一) 電容器之破裂電壓
- (四二) 電容器之串聯與並聯

第六章 磁與地磁

- (四三) 天然磁鐵與人造鐵磁
- (四四) 磁鐵之定義
- (四五) 反平方定律與單位磁極

- (四六) 磁感應
- (四七) 分子磁說
- (四八) 磁場
- (四九) 磁力線及其方向
- (五〇) 磁力線密度
- (五一) 磁極之磁力線數
- (五二) 鋼鐵之磁導與磁屏
- (五三) 磁導係數與磁納係數
- (五四) 磁動率
- (五五) 地磁
- (五六) 地磁之要素
- (五七) 磁暴
- (五八) 均勻磁場之轉矩

第七章 電流與電池

- (五九) 電流及其強度
- (六〇) 電流之傳達
- (六一) 歐姆定律
- (六二) 電流之磁力
- (六三) 圓電流之磁場

- (六四) 電磁單位
- (六五) 電磁單位與靜電單位
- (六六) 接觸電壓
- (六七) 伏打電池
- (六八) 關氏電池
- (六九) 關氏電池之裝置與管理
- (七〇) 乾電池及其壽命與內阻
- (七一) 熱電偶

第八章 電路及電阻係數

- (七二) 電路
- (七三) 電位降
- (七四) 線路電位降與遠端電壓
- (七五) 電阻之串聯與並聯
- (七六) 克希荷夫定律
- (七七) 簡易電路分解
- (七八) 電阻係數與溫度係數

第九章 電功率及電解

- (七九) 電功率之單位

- (八〇)電功率之測量
- (八一)電能及其單位
- (八二)電能及熱能
- (八三)電具之效率
- (八四)電解
- (八五)電池之連接與輸出功率

第十章 電磁與電磁感應

- (八六)磁之電子說
- (八七)螺形線圈
- (八八)拉潑拉斯定律
- (八九)圓線圈之磁場強度
- (九〇)安培原理
- (九一)電磁鐵與製造磁鐵方法
- (九二)磁滯作用
- (九三)電磁感應
- (九四)侖茲定律及渦流
- (九五)感應電壓及其方向
- (九六)電動
- (九七)弗來明左手定則與馬克士威電動規則

這 本 小 書

紀 念

為 抗 戰 而 犧 牲 的

電 信 界

烈 士 們 ！

電 磁 學

第一章 電之概念

(一) 電為何物

往昔世人認為電之為物，神奇難解，泊乎近世，始知所謂電者，乃係一種電子 (Electrons) 流動之現象。如電子繼續流動，即構成電流。但何為電子及構成電流之電子之來源，可以電子學說 (Electron Theory) 解釋之。

(二) 電子學說

由化學及物理學之研究，知物質 (Matter) 有三態，如銅，鐵、石等稱曰固體 (Solid)；如水，油，水銀等曰液體 (Liquid)；如空氣，氫，氫等曰氣體 (Gas)，因溫度及壓力之異同，則物質於氣液固三態，均可遞嬗變更

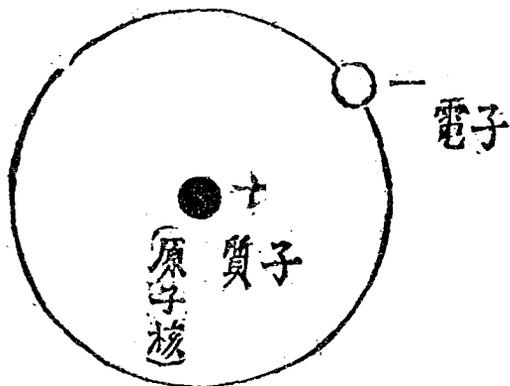
如水之為氣為水為冰，氧在尋常溫度為氣體，如冷至相
對溫度時，則變為液體及固體，鐵在尋常溫度為固體，加熱至
相對溫度時，可化為液體及氣體，而在化學上分析，不論
固體液體氣體之別，俱為九十二種元素，(Element)
組成此種元素或獨立如金銀硫磷之類，或與他物質化合而

成之化合物 (Compound)，如水，食鹽等。每一元素其最小粒子謂之原子，此項原子已不能再行化學之分析。至晚近三十年科學家之研究，乃知原子尚可分解，而萬物之基本單位，實為帶電之微小粒子而成。每一原子在中心原子核，包含有一個或一個以上之正電子 (Protons) 或稱質子，通常即叫此項正電子為原子核。在原子核之四週，有一個或數個之負電子 (Electron) 或即叫電子 (平時所謂電子二字，如不冠以正或負，不指明其帶陰電或陽電，則其意義均指負電子)。每一原子中之電子雖有多少，但其形狀質量等均相同，電子之形如圓球，其半徑為 1.9×10^{-13} 或 $\frac{1.9}{10,000,000,000}$ 公分 (c m)，重量為 8.8×10^{-28} 公分 (c m)，所荷之負電量為 1.5×10^{-19} 庫倫 (Coulomb) 質子在任何原子內，其質量，體積，與所荷之電量，亦均彼此相同。每個質子之陽電荷，與電子所荷之陰電荷相等，惟較電子大 1850 倍耳。

倡電子學說者為陶姆遜 (Thomson)，彼謂物質電子本自一體，原子自身，係由帶陽電之原子核與圍繞在其周圍之電子而成，原子核無異為其中心之太陽，而電子則為按相當軌道運行之星球。惟原子與太陽星系略有不同；太陽

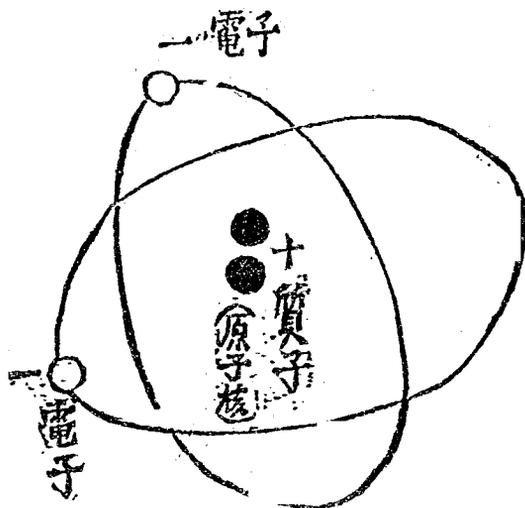
，而電子則為按相當軌道運行之星球。惟原子與太陽星系略有不同；太陽系之行星，係按一定軌道而緊繞於太陽以運行；而原子之軌道，有時雖一定，有時則因外界之影響而改變其形狀，且如外界影響過大，則將離本原子組織而飛入別個原子之體系內，以成離子 (Ion)。電子循原子核運行，每一軌道多不僅一電子運行，有時竟達數十個電子之多，視各種物質而異。電子之所以能圍繞原子核而運行，係受電子與電子間之斥力，及電子與陽核間之吸力作用。原子核之組織，不僅一個質子或數個質子，多有電子與質子混合而成，惟其所荷者必屬陽電體無疑；最簡單之氦原子之組織，為一個質子所成之原子核與一個電子圍繞而成。他如氦 (Helium) 為二個質子組成一個原子核，而二個電子各運行於一個規道圍繞而成。碳之原子核有十二個質子合六個電子所成，其排列狀態為中心二個質子，內圍六個電子，外圍再是十個質子。圍繞此核心者，為電子軌道二圈，內圈為二個電子，外圈為四個電子。

原子模型如下圖



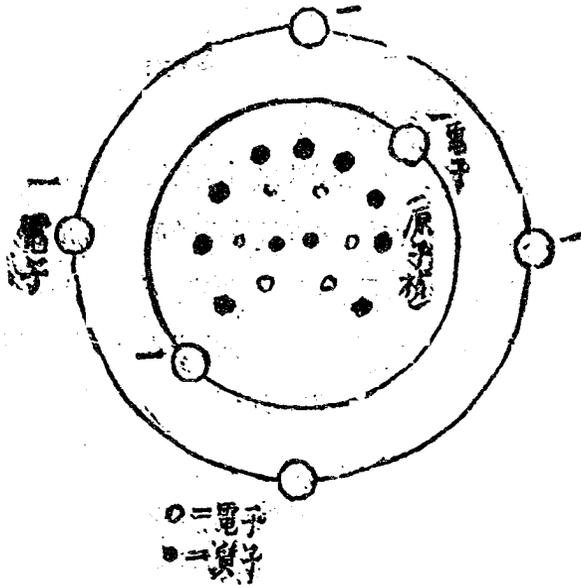
氫(Hydrogen)原子

第 一 圖



氦(Helium)原子

第 二 圖



碳(Carbon)原子

第 三 圖

(三)電子學說摘要

- (1) 宇宙萬物均由荷陰陽電之電子與質子組成。質子荷陽電，電子荷陰電。
- (2) 一切物質之最小粒子謂之原子，原子係由電子與原子核兩部組成。原子核除含有質子，尚含有電子，其多少或有無，隨物質元素而異，
- (3) 原子內之質子與電子數量在通常狀態下，恰相等

，以成中和。

(4) 各原子中電子之性質，重量，大小，形狀，電荷，均完全相同。

(5) 原子之重量視原子核之重量為依歸，因電子之重量較甚輕，而質子之重量較電子重1850倍，以此比例，電子之重量幾等於零故原子重量全視質子之多寡為斷。惟電子與質子之大小幾相等，原子核與電子所佔之空間極小，惟原子核與電子間隙則甚大。

(6) 電子在原子內循規道而運行，其軌道有圓形，橢圓形之別，軌道多寡不一，視原子之性質而異，除循軌道運行外，尚有突躍飛射之運動方式。

(7) 一切物質元素性質之所以不同，皆係其原子所含質子及電子數多少，及其組織情形不同之關係。

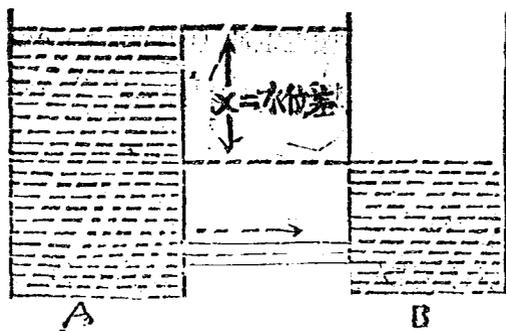
(四) 離子(Ion)與荷電體(Charged body)

原子在物質內常作劇烈運動，故恆有若干原子因撞擊磨擦而得失電子，增得電子者必荷陰電，損失電子者必荷陽電。凡因得一電子或失一電子而荷電之原子名曰離子或稱伊洪。荷陽電者曰陽離子，荷陰電者曰陰離子。酸類或鹽類為水所溶解，其原子亦裂為二種離子。例如硫酸溶於

水內，其原子裂成 H_2 及 SO_4 二部， H_2 成荷陽電爲陽離子， SO_4 荷陰電爲陰離子。此二離子雖裂而猶相結合，故仍具硫酸之特性。

平常物質內雖恆有若干原子成爲離子，然物質全部並未得失電子。故二種離子勢力平衡，不能對外顯示電性。是爲中和體。若物質因磨擦或其他作用而得失電子，則陰陽電勢力不復平衡，故對外顯示電性，是爲荷電體。損失電子者爲陽電體，增得電子者爲陰電體。

(五) 電位差與電動力 (Potential Difference and E. M. F.)



第 四 圖

水由高處必往下流，假定如第四圖，A 與 B 爲兩盛水器，近底處聯以鐵管，如 A 中水位高於 B 時，水必由 A 向 B 而流，直到兩器內水位等高爲止。A B 兩器內水位相差

之高度曰水位差。電之現象亦如此，設兩個荷電體 x 與 y 間接以導綫(能傳達電流之綫爲導綫)，若荷電體 x 之電位高於荷電體 y 之電位。電即由 x 向 y 移動。兩者間電位相差之數曰電位差 (Potential difference) 因電位差而使電子傾向低電位之流動力曰電動力或電壓 (Electromotive Force, 或 $E, M, F.$)。測水位之單位 是用呎或公尺表之；測電位差之高低或電壓之大小，亦皆須用一單位計算，此單位曰伏特 (Volt)。計算伏特之標準，以大地之電位作零數，電位高於大地曰正電，簡稱曰正；反之曰負電，簡稱曰負。或不同電位之兩點相較，其中電位較高者亦得曰正，較低者爲負。實驗時以克蘭克電池 (Clarks's Cell) 在攝氏 15 度時，量得二極之間，有 0.6974 或 $\frac{1000}{1434}$ 之電壓是謂一伏特。

(六) 電流 (Electric Current)

兩個不同電位之荷電體，接以導綫，電即由高電位向低電位流去，如此移動之電曰電流 (Electric Current)。表示電流強度之單位曰安倍 (Ampere)，一安倍之電流，即在一秒鐘時間內，一不變之電流通過硝酸銀溶液 (Silver Nitrate) 而能分析出 0.001183 公分 (Gramme) 白銀時之電流強度。如電流繼續流動則電位高的漸次下降，

電位低的逐漸增高，直至二電位相等，電流亦終止，如有相當方法，能使兩點間保持其永久具有電位差，則電流亦可永久流動不斷，能保持相當時間之電位差者有原電池，蓄電池及發電機。

(七)電阻(Resistance)

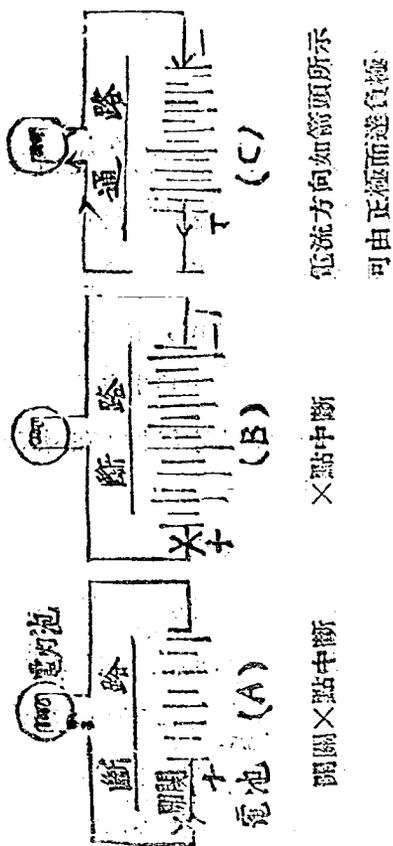
水在鐵管流過。鐵管受摩擦而阻止水流，同樣理由，電流通過任何物質時，也受抵抗，物質阻止電流通行之性質曰電阻，各種物質，阻止電流通行能力各不相同，阻力小者曰導體，反之曰絕緣體或不良導體。

電阻之單位，曰歐姆 (ohm)，標準歐姆為106.3公分 (cm) 長及其截面均等為 0.009999平方公分之面積，有水銀重14,4521公分 (gramme) 之水銀柱，在攝氏零度或華氏32度時所抵抗電流之強度。

(八)電路(Electric Circuit)

設不同電位之兩點間，若無導綫聯接，則電流不能由高電位向低電位流行，因中間尚無電流經行之道路。電流經行之路曰電路 (Electric Circuit)，電路可分斷路與通路二種，斷路者即由正極至負極間電流應通行之路綫中，至少有一點間斷，電流因此不能由正極而達負極，是曰斷路，如第五圖 A與Bix 點所示。通路者，即由正極至負

極之綫路中直接串通，電流可由正極流抵負極，是曰通路，如第五圖C所示，日常所用之電燈開關等，為控制其電路使成斷路或通路之工具。



第 五 圖

第二章 靜電原理

(九) 摩擦生電

生電之道不一，發明最早者為摩擦生電，設以甲乙二物體相擦，必有若干電子離甲之表面分子，而入乙之表面分子，同時亦必有若干電子離乙之表面分子，而入甲之表面分子。若二體為相異物質，則電子離去表面分子有難易之別，摩擦以後，失去電子較易者，必損失若干電子而荷陽電，失去電子較難者，必增得若干電子而荷陰電。下列十四種重要物質，以電子脫離其表面分子之難易程度為序：(1) 貓皮，(2) 法蘭絨，(3) 象牙，(4) 紙，(5) 光玻璃，(6) 木棉，(7) 絹，(8) 毛玻璃，(9) 金屬，(10) 橡皮，(11) 膠木，(12) 火漆，(13) 松香，(14) 硫磺。序次較前者，較易失去電子，摩擦後必損失電子而生陽電。序次較後者，不易失去電子，摩擦後必增得電子而生陰電。例如以絲絹擦玻璃，則玻璃生陽電，絲絹生陰電。以貓皮擦火漆，則

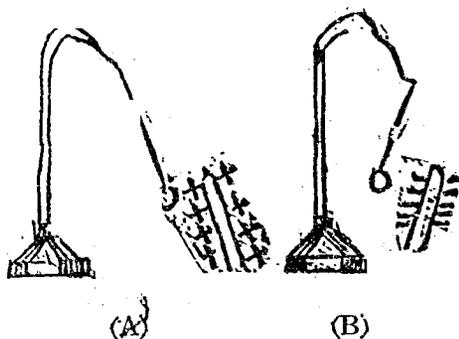
貓皮生陽電，火漆生陰電。

電之產生實由物體內陰陽二電均勢之打破，故二電均不能單獨產生，而必須同時等量產生。例如絲絹擦玻璃，玻璃所生之陽電量，必等於絲絹所生之陰電量。貓皮擦火漆，火漆所生之陰電量，必等於貓皮所生之陽電量。

同物質相擦，電子離表面分子之機會均等，難易無別，故不能生電。大多數物質因電子離表面分子之難易相差不遠，故摩擦生電之實驗，恆限於非金屬，庶所生之電能逐漸積增，而獲顯著之效果

摩擦生電之原因，實不外由前所述原子內電子運動之關係，我人知一原子，在通常狀態，其內所有質子之陽電，恰與其電子之陰電相等，故相互平衡，不現荷電現象。惟當此一物體與另一物體摩擦之原子，互相接觸。因摩擦之力，遂令此一原子之電子，逃至另一原子之體系內，凡物質之原子內部，對於電子需要較甚，而所生之吸力較大者，恆取得電子，而荷負電。反之，其對電子吸力較小者，恆易失去電子，而荷正電。此種吸引力之大小，亦係比較關係，無絕對標準。大致在上述摩擦次序列前者，吸力甚小，排列愈後，吸力亦愈大。

(十)陰陽電定義



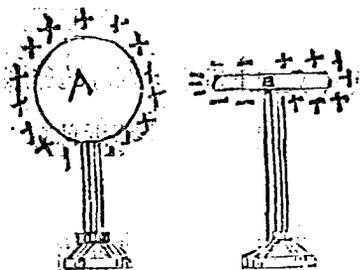
第六圖

絲綫懸通草球，(如第六圖所示)以貓皮擦過之火漆棒觸球，使分得若干火漆上電量，則球隨卽颯開，(B) 示與棒相拒。若以絲絹擦過之玻璃棒移近此球，則球趨前迎接，而黏着於玻璃棒，(A) 示與棒相吸。可見二棒所荷之電，並不相同。十八世紀中葉，英人弗蘭克林 (Franklin) 始以陽電及陰電二名區別之，凡與絲絹擦過之玻璃棒上荷電相同者，稱爲陽電，記號爲(+)。凡與貓皮擦過之火漆棒上荷電相同者，稱爲陰電，記號爲(-)。同性之電相拒，而異性之電相吸，此定律爲電磁原理之基本也。

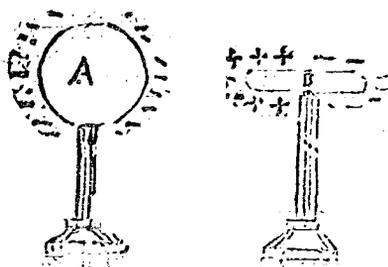
(十) 電感應 (Electric induction)

金屬原子極易失去電子，故金屬體內恆有若干自由電子 (Free Electron)，游盪自如。今設以荷電體 A 移近導體 B，則 B 內必有若干自由電子，被吸拒而移動。若 A 荷

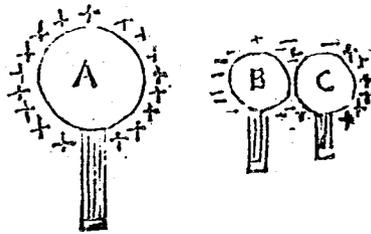
陽電，自由電子吸向 B 近端，使 B 近端因電子數增而生陰電，遠端因電子數減而生陽電（如第七圖所示）。若 A 荷陰電，自由電子驅向遠端，使遠端生陰電而近端生陽電（如第八圖所示），故凡導體受附近荷電體 A 之作用，其兩端必生等量之電，近端與 A 異性，而遠端與 A 同性。若移去 A，二電隨即消失，兩端仍回復中和原狀。此現象名爲電感應。(Electric induction)



第 七 圖



第 八 圖



第九圖

又設以 B C 二銅球相觸而移 A 近 B (如第九圖所示，則依電感應原理，B 生陰電而 C 生陽電。若此時先分開 B C 使互相絕緣，然後再移去 A，則 B 永荷陰電，而 C 永荷陽電，不復消失，實用上恆以吾人身體代 C。其法當荷電體移近導體時，只須以手指略觸導體，隨即分開，然後再移去荷電體，則導體必永荷異性之電，是為感應生電。故設有荷電體 A 與中和體 B，用接觸傳電法，可使 B 荷與 A 同性之電，用感應生電法，可使 B 荷與 A 異性之電。

(十一) 導體與非導體 (Conductor and Non-Conductor)

荷電後之火漆棒，或持在手內，或用銅綫等使其與荷陽電之 A 球連結，則火漆上所荷之陰電，即失去其一部分，又若將銅球，放在玻璃板或橡膠板上，以荷電後之火漆棒接觸之，銅球亦能荷電。即荷電後之火漆棒上之電，移到銅球上。其次再將絕緣之銅球，與荷電之銅球相接觸

，電亦由此球移到彼球，使絕緣之銅球荷電。再用手或用銅綫等類，將荷電後之絕緣銅球與 A 球聯結，則其所荷之電，即完全消歸烏有。

綜上觀之，同與 A 球聯絡之金屬與火漆相接觸，則僅有相接觸之一部份失却電荷。如係銅球與 A 球一點相連，則其全部電荷均行失去。可見火漆等類物質，電在其上移動，極不自由，而在銅球上，則甚自由，凡電能在其上自由移動之物質，稱為導體 (Conductor)，一般之金屬均為導體。又人體，水，礫，含有水分之纖維物質等，亦均為導體。與此相對，電在其上移動不自由者，曰非導體 (Non-conductor)。空氣，玻璃，火漆，橡皮，硫，綢，油類，乾燥之紙，木料等，均為人所盡知之非導體。

一切物質，不問其為天然產生，或由人工製造而成，均可分作導體與非導體。但，此兩者間之嚴格區分，殊屬困難，完全之導體固不存在，完全之非導體亦無之，實際之一切物體，均介於導體與非導體兩者之間。其相互間之差異，僅其中含有之自由電子數，有多寡之不同而已。但自由電子之數，又須視此物質之物理狀態而有變化。例如石蠟一物，在固體時為非導體，但受熱溶成液體後，即成為顯著之導體矣。故何種物質為導體，何種物質為非導

體，實難斷言。只能將特別容易導電者，亦即電流通過此物質之阻力 (Resistance) 甚少者，認為導體；特別不容易導電者，亦即電流通過此物質之阻力甚大者，認為非導體而已。通常對於比玻璃稍易導電之物質，如柚木等特稱為半導體 (Semi-conductor)，他如濕地，金屬，生礦等次於良導體者，特稱為中等導體 (Second Conductor)。

下列導體表係就其導電易難為先後，順次排列：

良導體 (Good Conductor) 1. 銀 2. 銅 3. 金 4. 鋁

5. 鋅 6. 黃銅 (須視成分如何) 7. 鉑 (白金) 8. 鐵
9. 鎳 10. 錫 11. 鉛 12. 白銅 (銅與鎳之合金)
13. 假白金 (白銅與鎊之合金) 14. 銻 15. 汞
(即水銀又作) 16. 銻

中等導體 (Second Conductor) 1. 木炭和焦煤 2. 石炭

3. 黑鉛 (石墨) 4. 酸類液體 5. 海水 6. 鹽類液
體 7. 金屬生礦 8. 生蔬 9. 濕地

半導體 (Semi-Conductor) 1. 水 2. 人身 3. 火焰

4. 麻紗 5. 棉 6. 桃花心木 7. 松 8. 紅木
9. 烏木 10. 柚木

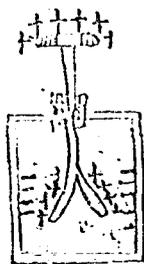
非導體 (Non-Conductor or Insulator) 1. 石板

2. 油類 3. 礮 4. 乾皮 5. 羊毛 6. 絲 7. 火漆
8. 硫磺 9. 樹脂 10. 膠木 11. 橡皮 12. 虫膠

(Shellac 譯名“舍來克”俗稱洋乾漆) 13.大連石 14.硬橡皮 15.雲母石 16.黑玉 17.琥珀 18.白蠟 19.玻璃(因實質的差異而不同) 20.乾燥空氣

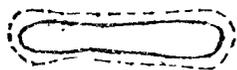
(十二)電在導體上之分佈

電在任何導體上，依同性相拒之理，必自相拒斥而分佈於其凸面之最外層。導體內部及其凹面各處均不容電之存留。高斯定律 (Gauss's Law) 曰：凡表面不平或中空之任何導體，其導體內部或中空之裏面，或凹面，均不能荷電。昔英人法拉第 (Faraday) 常構一小屋，長寬高均為六呎，屋外遍糊錫箔，令其助手在屋外用靜電發電機充電於錫箔，至能引得極長火花之程度為止。彼則攜極靈敏之驗電器在屋內試驗。(註)(驗電器中最普通者為金箔驗電器



第十四圖

(Electroscope), 其構造爲一玻璃或罩瓶, 一銅桿穿過瓶塞, 上端戴銅盤或銅球, 下端繫二片金箔。瓶內外各糊錫箔, 由一錫條繞上口或下底以相連接。設以荷電體觸銅球, 或移近銅球, 或由感應生電法使金箔荷電。則二片金箔即相拒而張開。同時感應作用又使瓶內錫箔生異性電與金箔相吸, 增加長度。此驗電器如第十圖所示) 法拉第用盡方法, 終不能發現電之痕迹。此即因該小屋滿糊錫箔, 法拉第助手雖用靜電發電機充電於錫箔, 至引起極長之火。然靜電俱分佈於錫箔面上, 法拉第在屋內無法發現電之痕迹。故今日貴重儀器, 恆用鋼皮包裹, 或盛於金屬箱籠。建築物亦有用鋼皮包裹者, 皆用以分散電力, 以避禦雷之襲擊。一般無線電發報房多用鉛皮包裹全屋者, 所以避免靜電干擾, 即此理也。



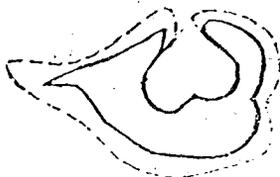
第十一圖



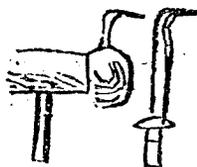
第十二圖

電量分佈於導體凸面, 除球體外, 皆不均勻, 即表面密度 (Surface density) 並不相等。例如圓柱體荷電時 (第十一圖) 兩端密而中部稀。梨形導體荷電時 (第十二圖) 尖頂最密, 圓底次之, 中部平坦則最稀。第十三圖爲無規

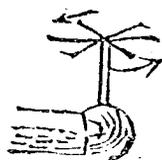
則之導體，平處密度小，凸處密度大，凸而尖者尤大，凹處則不論有無凸出部份，均無電之存在。由此三例，可得結論如下：電量皆分佈於導體之凸面，而愈凸則密度愈大，尖端之密度最大，此高斯定律之確證也。



第一三圖



第十四圖



第十五圖

(十三) 尖端放電 (Point discharge) 作用

如尖端面積為零，荷電時密度為無限大。無限大密度為事實上所不能。故電在尖端實處於不穩形勢，唯有立即逸入鄰近空氣之一途。是為尖端放電作用。

尖端放電時，電逸入鄰近空氣，使空氣分子成離子而

與尖端相距。若尖端固定，此拒力驅使離子離開尖端發生電風(Electric wind) 見第十四圖。若尖端並不固定，則此拒力驅使尖端向後移動。見第十五圖。

尖端既能放電，故可用以消滅附近荷電體所荷之電。例如握針移近荷電之金箔驗電器，則金箔隨即失電下落，猶如相觸，蓋當針移近時，針即感應生異性電。此異性電即逸入空氣，使成離子而驅向驗電器與金箔上電相中和。故金箔即失電而落下，避雷器 (Lightning arrester) 之構造即基此理。

(十四) 大氣電 (Atmospheric electricity) 及避雷器

若以噴氣管向上吹氣，使迅速穿過正在下降之水滴，則此一滴之水分裂為無數水點，同時水點荷陽電，空氣荷陰電。故辛博森博士 (Dr. Simpson) 論大氣電 (Atmospheric electricity) 發生於空中水點與空氣之劇烈摩擦，摩擦生電後，復互相感應而積極擴大之陰陽電間吸力達相當程度時，衝破空氣而成火光 (Spark)，是為電光，同時空氣份子被火花振動而成音響，加以遠近回聲，隆隆不絕，以成雷聲。

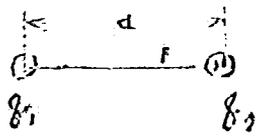
大氣電與地面上感應所生之電相吸而發生火花時，人物當其衝則遭毀滅，欲保護建築物，避免雷擊，以裝置避

雷器最爲簡易，只須以尖針置屋頂上，由導線下通入地卽成。蓋當荷電雲塊行近屋頂時，針尖卽放電以消滅雲中電量，庶不生火花，而災禍自免。大廈之保護宜於屋頂各角，均設一針，以銅線繞屋週匝而聯接之。然後擇對角二點，下通入地。導線可用較粗之電報線（8號塗鋅鐵線）或扁闊銅條爲妥。地而不盡容易傳電。通地方法宜以導線繞繫自來水管，或繞銅板上而埋入水溝，或掘地數呎得泉而埋其內。

第三章 電場與電力線

(十五)庫侖定律

1785年，法人庫侖由實驗斷定，凡二荷電體間拒力 (Repulsive force) 或吸力 (Attractive force) 必依其所荷電量之大小為正比，而依二體間距離之平方為反比 (第十六圖) 即



第十六圖

$$F = K \frac{q_1 q_2}{d^2} \text{ 達因} \quad \text{公式 1a}$$

此公式稱曰庫侖定律，式內 K 為比例常數，(或誘電率) 其值視 q, d, F 之單位及荷電體間所隔之非導體而異。 F 為二荷電體間之力 (Force between Charges)。

(十六)單位電量

電力既依電量 (Quantity of electricity) 為正比，故電量之大小，可由其電力強弱為計。凡電量在真空或空

氣中對於相隔1公分 (Centimeter)之另一相等電量發生1達因 (dyne) 拒力者為1絕對單位電量 (Absolute unit of quantity of electricity)。此由靜電吸拒力所規定之單位電量名曰靜電單位 (Electro-static unit)，以別於由電的磁力所規定之單位電量名曰電磁單位 (Electro-magnetic unit)

在庫侖定律內，若 q 之單位為靜電單位， d 之單位為公分， F 之單位為達因，而荷電體間所隔之非導體為真空或空氣，因空氣或真空之誘電率為1則 $K=1$ ，故庫侖定律可重

$$\text{列爲 } F = \frac{q_1 q_2}{d^2} \text{ 達因} \quad \text{公式 1b}$$

絕對單位不便於實用，各種電學上數量在實用時均另有適宜的單位，是為實用單位。電量之實用單位曰庫侖 (Columb)，其兆分之一曰微庫侖 (microcolumb) 其兆兆分之一曰微微庫侖 (micro micro columb)。一庫侖為 3×10^9 靜電單位之電量。即一庫侖含有 6.28×10^{18} 電子。

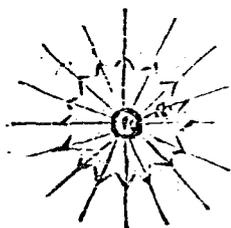
(十七) 電場 (Electric field)

凡有荷電體或電荷存在之空間，如再來另一荷電體或電荷，即發生吸引或排斥之作用。在此種空間內所生之各

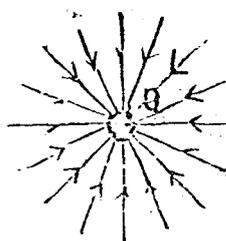
種物理現象，與沒有電荷或荷電體存在之空間中發生者，大不相同。即與荷電體或電荷相隔極遠之處發生者，亦復有異。由此可見有荷電體或電荷存在時，其近旁之空間，別有一種特殊狀態。當然此種特殊狀態之所由起，完全出於存在其近旁之電荷或荷電體之作用，如是之空間，通常稱之為電場 (Electric field)。如電量 Q 附近為 Q 之電力綫所及，遂稱為 Q 之電場。置另一電量 q 於電場內，即被吸引而移動，獲得動能 (kinetic energy)。按能力不滅定律，此動能必取自電場。可見凡電場內均貯有一種能力，非若尋常空間之漠無情感，毫無能力表現。無線電報即藉電場以傳播能力，故吾人須深切研究其內容而不可忽視

其次若使荷電體上之電荷，或單獨之荷電本身，增加若干，則其周圍空間中所表現之特性，亦隨之顯著。換言之，即表現之吸引或推斥作用，隨之增大。其他之各種物理現象，亦復如是。故在電場中言及一種現象，必須連帶聲明其電場強度。例如將一陽電荷，拿到一電場中，即見電荷因受電場之影響，向一定方向運動時，由此遂想到電場之方向。故言及電場，必須對於強度及方向，兩方面同時舉出。茲將其定義如下：(1) 設以一陽電量 (+ q)

置電場內，其被驅而移動之方向為電場方向。例如陽荷電體附近之電場方向為自荷電體向外（第十七圖），陰荷電體附近之電場方向為自外向荷電體（第十八圖）。



第 十 七 圖



第 十 八 圖

體附近之電場方向為自外向荷電體（第十八圖）。(2) 設以單位陽電荷置電場內某點，其感受之電力為該點之電場強度(Intensity of electricity) 例如有電荷 Q 存在時，距此電荷有 d 公分距離之一點上，如有單位電荷存在，則按庫侖定律，此單位電荷應受到 $\frac{Q}{d^2}$ 之力作用。故此一點之電場強度，即為 $\frac{Q}{d^2}$ 。惟距此電荷 Q 愈遠之處，其 d 之值愈大，故其處之電場愈小。即電場強度與距電荷之距離平方成反比例。即得電場強度 f

$$f = \frac{Q}{d^2} \text{ 達因} \quad \text{公式 2a}$$

故凡荷電體附近之電場均顯而易見，稍遠則強度即降

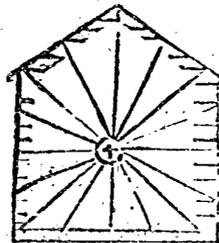
至極微不易覺察矣。若已知某點之電場強度為 f 達因，而置電量 q 於該點。則 q 必感受電力而移動，其動力 F 為

$$F = fq \quad \text{達因} \qquad \text{公式 2b}$$

(十八) 電力綫 (Lines of electric force)

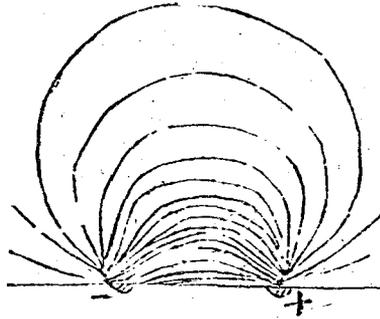
沿電場方向而作之直線或曲線，通稱為電力綫 (Lines of electric force)，百年前科學家認為二電量能遙相吸拒，乃電之本能，不求解說。英人法拉第始主張吸拒為電量間媒介體之作用，而非發源於電量本身。此主宰電量吸拒之媒介體，即電力綫。其特性如下：

- (1) 電力綫為一種特殊之能媒，雖佔空間而非物質。
- (2) 電力綫兩端繫等量異電。故陰陽電皆不能單獨產生或單獨消失。設懸荷電體於空中，則四周牆壁屋頂地板上由感應而生異電(第十九圖)其和等於荷電體所荷電量



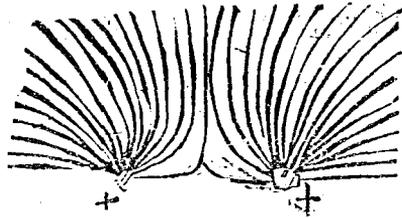
第 十 九 圖

(3) 電力綫富有收縮方、(Contraction) 故異性電相吸。(第二十圖)



第 二 十 圖

(4) 電力綫富有旁壓力 (Lateral Pressure) 能向四週側面無限擴張。故同性電相拒(第二十一圖)



第 二 十 一 圖

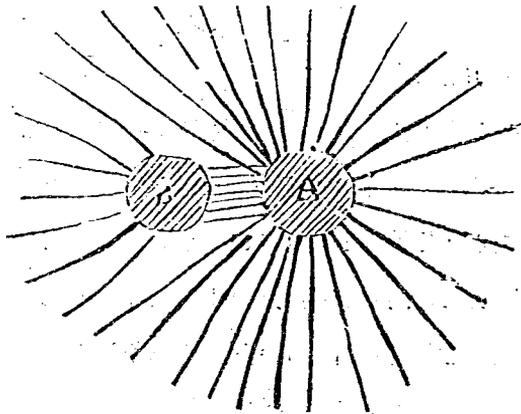
(5) 電力綫可從其兩端所繫電量為計。單位電力綫之形體各視環境勢情而異。如第十九圖內者為立椎體，第二十圖內者為端窄而中部擴張之柱體。圖上幾何綫僅示各單

位電力綫之中央軸綫(Central axis)至其全體則瀰漫充塞於所及之電場，能意會而不能圖示

(6) 電力綫能通過真空及任何物質。故電力能透過一切物體(導體或非導體)以發生感應作用。

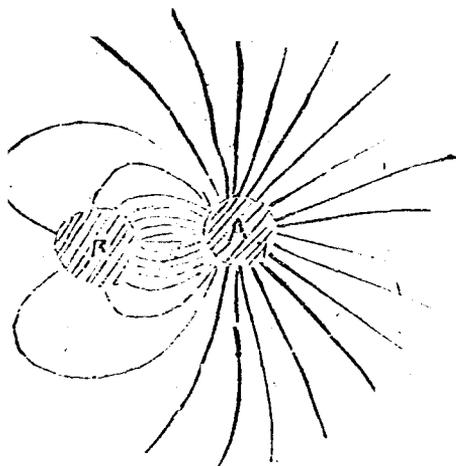
(7) 非導體能抗電力綫之收縮。故電在非導體上不能自由移載。

(8) 導體對於電力綫毫無阻力。故等量異電在同一導體上即由電力綫收縮而消失。若置導體於電場內，則通過導體之電力綫即收縮消失。遂使導體兩端產生等量異電(第二十二圖)，是爲電感應。設觸以手指則遠端所生之同



第二十二圖

性電因電力線收縮而消失。故導體上僅餘異性電存在（第二十三圖）是爲感應生電。

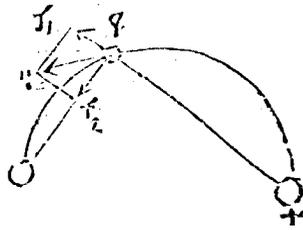


第 二 十 三 圖

(十九)電力線之方向

對於電量而言，電力綫爲主使電量相吸拒的媒介體。對於電場而言，電力綫亦爲代表電場內電力的矢線 (vector) 其方向須表示陽電量 q 被驅而移動之方向。故陽電體附近電力綫之方向爲自荷電體向外（第十七圖）。陰電體附近電力綫之方向爲自外向荷電體（第十八圖）。陰陽二電間電力綫之方向爲自陽電向陰電（第二十圖）。電力綫在電場內某點之方向爲陽電量 q 在該點所感受之合力

(Resultant force) 方向 (第二十七圖)。因 q 不能同時循

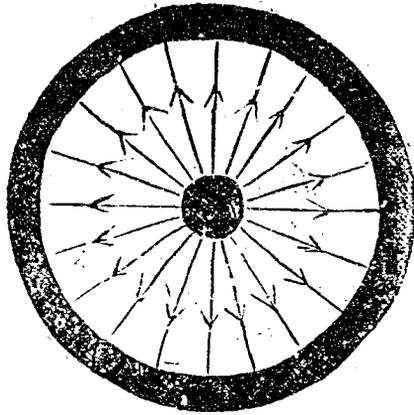


第二十四圖

幾何方向移動，故電場內決無二電力綫相交或相遇。導體荷電時，所荷電量靜止於其表面。故凡電力綫必垂直於導體表面。若導體為球形(不論實體或中空)，則電力綫均直垂於球面，是與自球心發出無異。故分佈於球面之電量可視為集中於球心。

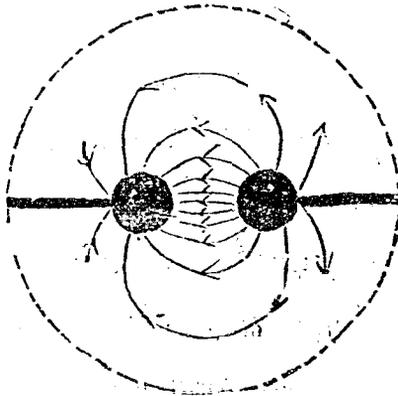
(二十)電力綫分佈狀況

電場中之電力綫分布狀況，可用一簡便方法求之。將木屑或金紅石粉，撒布於玻璃板上，再用玻璃棒輕敲板邊，則板上粉屑。即按照力綫方向排列而出。第二十五圖所



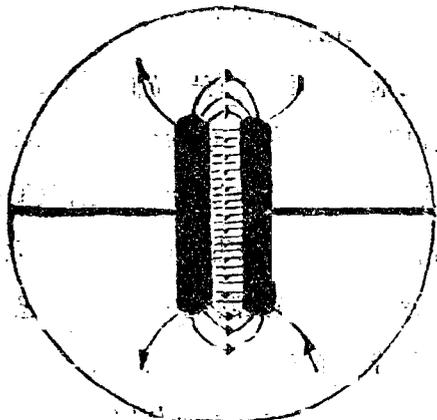
第 二 十 五 圖

示者，爲中央圓板爲陽極，周圍之輪形爲陰極時，電場中電力綫分布之狀況。第二十六圖所示，則爲兩圓板相對而



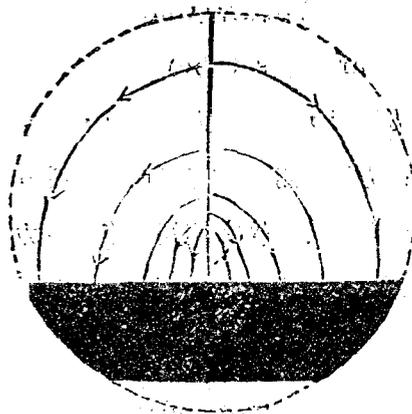
第 二 十 六 圖

立，一為陽極，一為陰極時之電力綫分布狀況。第二十七圖所示，為兩板平行排列，一為陽極，一為陰極時，其間



第 二 十 七 圖

之電場中電力綫排列之狀況。第二十八圖所示，為一板及



第 二 十 八 圖

一棒，棒與板恰成垂直，一方爲陽極，一方爲陰極時，造成之電場中電力綫分佈之狀況

(二一) 電力綫管及電力綫密度

在電場之垂直截面內，每單位面積 (1 cm^2) 所通過之電力綫數名曰電力綫密度 (Electric density) 任何大小面積內所通過之電力綫總數名曰電力綫管 (Tube of force)，凡帶有陰電與帶有陽電之物體互相對立，即有電力綫從陽電一方發出，進入陰電一方之內。如是之電力綫爲數甚多，由若干條電力綫相聚而成管，即爲電力綫管。電力綫管之兩端，一爲陰電，一方陽電，其量恰相等。如兩端面積上所有之電荷，適等於單位電荷，(1達因) 時此電力綫管即稱爲單位電力綫管 (Unit tube of force)，又名法拉第管 (Faraday's tube)

上述之電力綫管，亦與電力綫相同，具有特殊之物理性質。如從此種力綫管側面，施以垂直之壓力，則電力綫管即行縮短。如從電力綫管之兩端，施以張力，則電力綫管即行伸長。種種靜電現象，均可用如是之電力綫管解釋之。

例如令有一帶陽電之導體，與地球表面接近，則此兩種物體間之電力綫管，即行縮短。其次令接地之導體，與

帶電體接近，則電力綫管次第縮短，直至兩導體互相接觸時，電力綫管已縮短至無可再縮而完全消滅，此即放電之現象。

關於電力綫管已詳加說明，今將電力綫密度論述如下

電力線之稀密，實為電場強弱之主因。故電力線雖可從其所繫電量為計，而電力綫密度則宜從電場強度為計。例如設某點強度為 f 達因，則該點之電力綫密度，即為每單位面積通過 f 之電力綫。

高斯定律(Gauss's law)曰：任何荷電體所放射之電力線總數〔Electric flux〕必等於其總荷電量之 4π 倍，即 $\Sigma 4\pi q$ ；

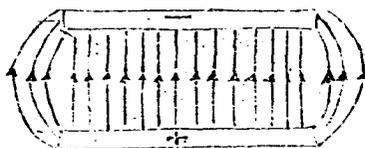
則凡電場內每單位垂直面積所通過之電力線數，即等於單位電量 q 在該處所感受電力之達因數，凡兩端繫單位電量之電力線管，不復成一單位，而為 4π 單位所組合之電力線管，試證如下：

設懸電量 q 於空中，則與 Q 相距 d 公分處之電力線密度為 $f = \frac{Q}{d^2}$ ，以 Q 為圓心， d 半徑之球，面積為 $A = 4\pi r^2$ 。故 Q 所連繫之電力線管為

$$\psi = fA = 4\pi Q \quad \text{公式8}$$

設 $Q = 1$, 則 $\psi = 4\pi \times 1$ 可見每單位電量, 實連繫 4π 電力線, 而凡電力線管必等於其所繫電量之 4π 倍。

導體內部或其凹面空間, 不能有電力線存在, 故凡此等處之電場強度為零。二荷電平板間 (第二十九圖), 電



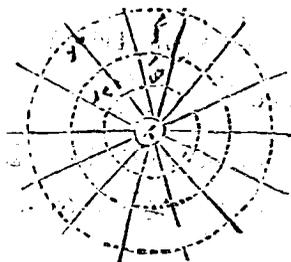
力線平行, 而密度處處相等, 即電場強度處處相等, 不因距離平板之遠近而異, 是為均勻電場 (Uniform field)。

第四章 電位與破裂電壓

(二) 電位及電位差 (Electric Potential and Potential Difference)

電位及電位差之意義，極為重要，應先加以說明。譬有兩導體 A 及 B 間中聯以導線，而有一電流由 A 至 B，則此二導體 A 及 B 間，必有電位差存在。即 A 之電位，必高於 B 之電位，否則必無電流流動。此種電位差在靜電電荷方面，只能暫時存在，因當不同電位之兩導體，以導線聯接之後，其電位亦即變為相同。惟在電池或發電機，此種電位差可繼續存在。

電位比之水，電位差比之水位之高低差度正相似，意義亦同，在首章已略論及。設有一荷正電 Q 之球體，於周圍之電場內 x 處，置一單位正電荷之質點，設其距離為 d ，則此質點所受之斥力，當為 $\frac{Q}{d^2}$ 。如將此質點移向荷電球體，則因反抗此斥力，必須由外給以相當之功 (works)；相距愈近，斥力愈大，所須之功亦愈多，由 x 點將質點移至 y 點所需之功，即成為 y 之勢能 (Potential Energy) 而蓄積於媒質內部。其情形與壓縮空氣，蓄積由外得來之能，高舉物體，將物體之勢能增加，完全相似。



第 三 十 圖

如質點與荷電體之距離為無窮遠，因斥力為零，則質點對於荷電體之電位亦為零。如對此質點而言，則當其在 x 時所有之勢能，即等于由無窮遠移至此點時所需之功，亦即等此於單位正電荷自 x 移至無窮遠所能作之功。此功即 x 點時之勢能，可以 V_x 表之。同理，在 y 點之電位則為 V_y 。在一電力場內，此種電荷之勢能，與他種勢能相同，完全視其最後位置而定，與如何至此點之途徑，絲毫無關。因之，在電場內之任一點，均有一定之電位，而在任兩點 x 及 y 間之電位差，即 $V_y - V_x$ 亦為一定。故電位差可定義如下：在一電場內，任兩點 x 及 y 之電位差，即等於一單位正電荷，由 x 點移至 y 點所需之功（功之單位為爾格 ergs）。如此功為一正值，即由外給以相當之功，則電位 V_y 必高於電位 V_x （第三十圖）

與‘水就下’同理，此種在電場內之陽電荷，亦恆由高位移向低位；而成保持勢能最小之傾向。

電位高低以陽電荷移動方向爲斷。陽電荷離開之點電位較高。陽電荷流入之點，電位較低。陽荷電體通地時，陽電荷即自荷電體流入於地。陰荷電體通地時，則陽電荷自地流入荷電體。可見地之電位常高於陰荷電體，而低於陽荷電體，故宜用爲比較電位之標準。猶之度量地之高低，須定海面爲標準；同理，度量電位之高低，亦必須相當標準以爲測量之起點。此種電位之標準，爲便利起見即以大地之電位爲標準，假定大地之電位爲零。蓋大地亦爲一導體，爲維持電荷之平衡起見，則任一點之電位必均相同。設有正電荷由某導體 A 流向地面，或自由電子由地面流向導體 A，則此導體 A 之電位，必較大地之電位爲高，即爲正電位(Positive Potential)，反之，如有自由電子由導體 B 流向地面，則此導體 B 之電位爲負。

此種以地面爲標準之電位，亦即等於一正電荷由地面移向某點或某導體，所需之功。如此功爲正，電位亦爲正；反之，電位即爲負。

(二三)空間電位與絕對電位

導體荷電時，不但表面荷電各點之電位均等，即內部

無電荷各點，亦必發生相等電位，故所荷電量能靜止不流，法拉第在其特製小室內無法能使驗電器荷電，可見室內空中各點之電位，必已與錫箔表面相等。故電位之存在，不限於電量之附着點，即空間各點亦能由附近電量之影響而發生電位。任何中和體置於電位存在之空間內，即獲得其所在點之電位。荷電體之電位，則為其本身電位與空間電位二者之和。

吾人所稱某物體之電位，並非其絕對電位 (absolute Potential) 而為與地相比較之電位差。絕對電位乃隨地面空中所荷電量，太陽光綫，及其他星體之感應而變化頻繁。雷雨天氣尤甚。室內物體之絕對電位，常隨地同升同降，故其與地相比較之電位不受影響而有所變更。

(二四) 電位差之單位

以相當重量之物體自低處舉至高處，必反抗地心吸力而作功於物體。以陽電荷 q 自低電位移至高電位，亦必反抗電力而作功於 q 。重體舉起之高度，依所費之功為正比。 q 移動之電位差，亦依所費之功為正比。若所舉為單位物體，則舉起之高度，可直接以所費之功計算之。例如費 100 呎磅 (foot pound) 之功以舉起 1 磅之重物，可舉起之高度必為 100 呎。以此例彼，可見凡二點間之電位差，亦

可以移動一單位陽電時所費之功計算之。故單位電位差 (unit P. d.) 之定義如下：

設以 1 靜電單位陽電，自 A 點移至 B 點，而費一爾格之功，則 B 點高於 A 點之電位差為 1 靜電單位，是為電位差之絕對單位。設以 1 庫倫陽電，自 A 點移至 B 點，而費一焦耳 (Joule) 之功，則 B 點高於 A 點之電位差為 1 伏特，為電位差之實用單位 (Practical unit)。

$$\text{因 } 1 \text{ 庫倫} = 3 \times 10^9 \text{ 靜電單位電量}$$

$$1 \text{ 焦耳} = 10^7 \text{ 爾格}$$

$$\text{故 } 1 \text{ 伏特} = \frac{1}{300} \text{ 靜電單位電位}$$

又如 1 靜電單位之電量，由 A 點移至 B 點，如其所需之功為 $\frac{1}{300}$ 靜電單位，則此兩點之電位差為 1 伏特，故 1 庫倫之電量，在電位差等於 1 伏特之兩點間移動時，則所需之功，應為 $\frac{1}{300} \times 3 \times 10^9 = 10^7 \text{ 爾格} = 1 \text{ 焦耳}$ 。今設電量 Q 自 A 點移至 B 點，電位 V_A 與 V_B 不隨 Q 之移動而變更，即 Q 移動時，AB 間電位差固定不變，則輸入或放出之

電能 (work) 爲

$$W = Q(V_B - V_A) \quad \text{公式4}$$

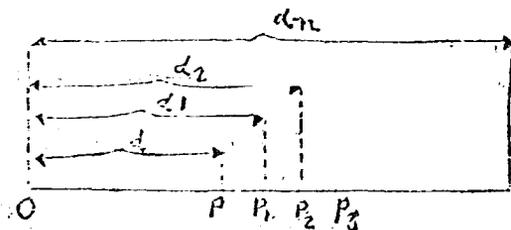
若 Q 與 V 之單位爲靜電單位，則 W 之單位爲爾格。若 Q 與 V 單位爲庫侖與伏特， W 之單位爲焦耳。或

$$\text{功 (Work)} = Q (\text{庫侖}) \times V (\text{伏特}) = \text{焦耳}$$

$$W (\text{功}) = Q (\text{靜電單位}) \times V (\text{靜電單位}) = \text{爾格}$$

(二五) 電位之計算

二點間電位差既以移動單位陽電所費之功爲計。故欲求任何一點之電位，可假設一單位陽電，自無限遠移至該點，而計算其所作之功。例如設 O 爲電量 Q 之所在點（第三十一圖）， P 爲與 Q 相距 d 公分 (cm) 之某點，欲求 y 點電位，其法如下：



第 三 十 一 圖

作 Op 點綫而引長至無限遠之 x 點，均分 px 爲 n 極小等

分，其分點 p_1, p_2, p_3, \dots, x 與 O 點之距離為 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ 。今假設此單位陽電自 x 移至 p 點而求其所作之功。在移動進程中，所抗之拒力逐漸增高。達 p 點時，拒力始增為 $\frac{Q}{d^2}$ 。在 p_1 點時，拒力較小，為 $\frac{Q}{d_1^2}$ 。自 p 至 p_1 之平均拒力為 $\frac{Q}{dd_1}$ 。故自 p_1 至 p 所作之功為 $W_1 = \frac{Q}{dd_1}$

$(d_1 - d)$ 即

$$W_1 = \frac{Q}{d} - \frac{Q}{d_1}$$

由是類推，自 p_2 至 p_1 為

$$W_2 = \frac{Q}{d_1} - \frac{Q}{d_2}$$

自 p_3 至 p_2 為

$$W_3 = \frac{Q}{d_2} - \frac{Q}{d_3}$$

.....

.....

最後，自 x 至 p_{n-1} 為

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n = \frac{Q}{d}$$

$$- \frac{Q}{d_n}$$

且 d_n 為無限遠，即 $\frac{Q}{d_n} = 0$

$\therefore W = \frac{Q}{d}$ 爾格

即p點電位爲
$$V = \frac{Q}{d} \text{ 靜電單位} \quad \text{公式5a}$$

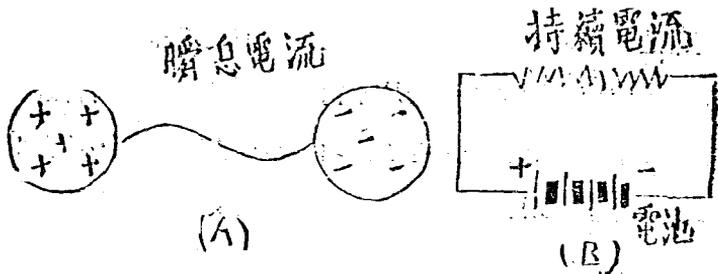
若不止一個電量在p點附近，則p點電位爲各電量所生電位之代數和(Algebraic sum)，即

$$V = \sum \frac{Q}{d} = \frac{Q_1}{d_1} + \frac{Q_2}{d_2} + \frac{Q_3}{d_3} + \dots$$

公式5b

(二六) 電位差與電動力(或電壓)

電位差與電動力(或簡稱電壓)之意義不同：電位差者，乃兩物體電位不同之謂，而電動力或電壓者，乃發生此電位差之原動力。譬有兩金屬球如第三十二圖A，一荷正電，一荷負電，其間雖有一電位差存在，但無發生電位差之原動力，故常用導綫將兩荷電體一經聯接，發生一瞬息電流後，電位差即不存在。但如圖(B)因電池A發生電動力，故常用導綫聯接後，可有一持續電流發生，直至電池用壞，此電流始停。此情形與欲保持水管內水流不斷，必須維持水管兩端水位差不變正同。發生電動力之裝置，除電池外，尚有發電機等。

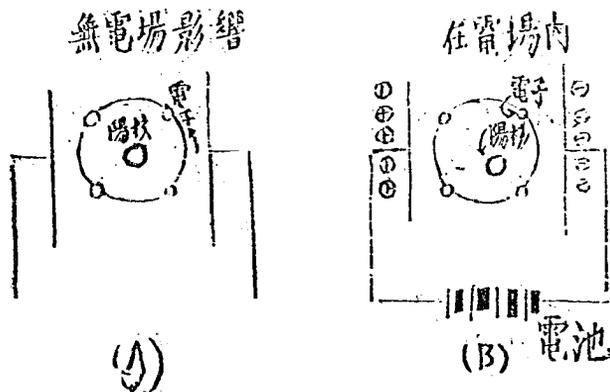


第三十二圖

(二七) 絕緣破裂與破裂電壓

任何絕緣體，當施以相當電壓，均不免有若干漏電發生，然此尚係假定所施之電壓，不致令絕緣破裂者。蓋當加絕緣物以電壓，漏電固不能免，但如電壓高至相當程度，甚至可令絕緣因漏電過多，而致破裂，是謂絕緣破裂 (Insulation breakdown)。考此種破裂原因，蓋絕緣物在通常狀態下，其原子內電子，因陽核（或原子核）之影響，固不能自由逃去，但如當施以相當電壓時，因此電壓所成之靜電力場，影響其原子內部，亦不得不改變其組織狀況，以期達力之平衡，如第三十三圖 A 為一絕緣物未施以電壓時之組織情形。小圈代表電子，大圈代表陽核，但當施以電壓後，則其組織改變，如圖 (B)，陽核將與所施電壓之負端傍近，電子則與正端傍近。同時所施之電壓

既高，則作用於電子之電力亦大，因之，每個自由電子之運動速度，亦不得不增加。當此運動速度增至相當程度，因原子內部範圍過小，於是不得不逸出軌道，而將傍近之中和原子內吸力較弱之電子撞出，以成自由電子，此自由電子既加多，則在絕緣物內，成一導電支路，結果，絕緣破裂。當此破裂發生時，隨之發生火花。絕緣物如為木材。絲絹，膠木等，則其間將因破裂時之高熱而燒穿，如為瓷器或玻璃，亦將為之破碎。



第 三 十 三 圖

此種破裂發生，與一般之漏電情形迥異。除自療性之誘電體，如空氣及電解質電容器 (Electrolytic Condensers) 之氧化物薄膜外，一切絕緣物，如一經破裂，則全

歸無用。此種令絕緣物發生破裂之電壓，是謂破裂電壓 (Break down Voltage)，此種強度，一般是以每公分 (cm) 或每英寸厚所能忍受之電壓為標準，(實際上多用公厘或米爾為單位，因公分與英寸常嫌太大)，最適用之數種絕緣物之破裂電壓，如下表所示：

物 質	破裂電壓或誘電體強度 每公厘(mm)厚所能受之伏特
棉紗(單層)	10200 — 13400
棉紗(雙層)	8300 — 9500
絲 (單層)	14800 — 22500
絲 (雙層)	13600 — 16600
雲母片	78700 — 81500
蠟紙	31500 — 39400
石棉	9860 — 3940
玻璃	5000 — 11800
乾瓷器	39400 —
橡皮	11800 — 19700
乾燥空氣	1970 —

破裂電壓因試驗時之情形不一，極難得正確之數字。

故此間特將其最大及最小之限度表出。除乾燥之空氣不能完全與其厚薄成正比外，餘均愈厚則破裂電壓愈高。例如1公厘(mm)厚之雲母片，其破裂電壓為75700伏特，則三公厘厚，當為236100伏脫。為安全計，絕緣物當以較厚為較佳。同時，多數絕緣物之性質，與所施電壓之周率亦有關係。譬有一絕緣物如所施之壓力為60週一秒，則雖僅20000伏特，或如所施之電壓為150000週一秒，則雖僅2000伏特，其絕緣能力亦可至損壞，而成一導體。

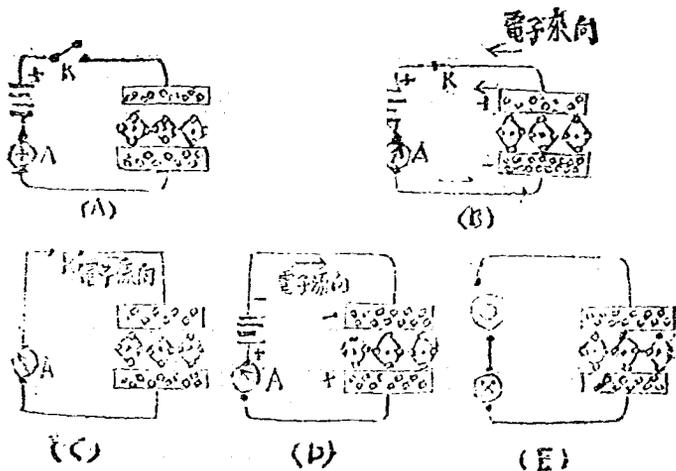
在接收或傳送電信之裸天綫上，通常多用瓷器，玻璃或乾木材絕緣體，一般電信設備上通用之絕緣物，大概為膠木，硬橡皮，雲母片，白臘，棉紗，絲，漆，玻璃，及特製之紙等。每種均有一定之特性，如硬度，彈性，撓曲性及韌性等。可按需要，任意選擇應用。

第五章 電容器

(二八) 電容器定義及其作用

電容器之意義，簡單言之，實不過兩導體，中間以絕緣體，以使其有一電位差存在之一種裝置。天線與地線，固為最具體之電容器，即兩導線，其兩端接以電動力，另兩端則於空中分開，亦何嘗非一電容器。所不同者，此間不過因面積過小，電容量非常之小耳。

欲知電容器之作用，最好參照第三十四圖而分別論之：



第三十四圖

圖中電容器，係由兩金屬片，中隔以絕緣體，曰誘電體 (Dielectric) 而成。小圈係代表電子；小黑點則為陽核。圖(A)，為開關未合閉時之情形，其誘電體均在通常狀態。圖(B)係合閉後之情形。當電池之電壓加於其上時，上面金屬片，因與正極相接，故其原子內之電子，多逃至電池。下面金屬片，因與負極相接，故電池內之電子，又多奔至其上，而情形成一暫時之電子流。此於安培表指針之移動，可以見之。同時，誘電體因上面金屬片為正電位，而下面金屬片為負電位，其本身原子內之電子，雖不能自由逃出，但因受此電力影響，亦呈一種緊張狀態，電子為正電所吸，而陽核則與負極靠近。此即電容器充電時之狀況。現假定將其電動力切斷，而將電容器之兩端，接以導綫，如圖(C)所示，則其前所奔聚於下面金屬片上之電子，將一一回流回上面金屬片，以冀恢復原來中和狀態，而發生電子流。此亦可於安培表指針偏向見之。惟方向適與前次相反，此即電容器放電時之情形，設以方向相反之電壓，加於其上，則其充電放電一如前次之情形，不過方向均相反，如圖(D)所示。假定現在所加於電容器者，不為直流，而為交流電壓，如圖(E)，則上述之情形，將須重複又重複，忽而電子流由此片流出，忽而又由彼片流出。

惟當注意者，即此種電子流，僅由外部電路通過，並不經過電容器本身，簡單之理由，即以電容器之金屬片，早為誘電體所絕緣。

設此種充電之方向變動過速，如上例(E)所引用者，為交流電壓，則誘電體內部，將一時如圖(B)，一時又如圖(D)，結果呈一種永遠紊亂狀態。且因摩擦，以致生熱，此種熱量，顯然於電壓及變動之速度有關。電壓愈高，變動愈速（即每秒之週率愈大）所發生之熱量即愈多。如熱量增至相當程度，則電容器之滲雜物質，將被滲化，而使誘電體絕緣能力減弱，甚至由此已減弱之物質洩出之電子，而使電容器不能支持，以致損壞。

當電容器用在電壓不穩之直流電路時，其充電時方向，並不完全相反，僅如由(A)至(B)之反復變化。但即此種變化，對於電容器之誘電體，亦同樣具有相當之破壞能力。

由以上之討論，電容器在一電路中，確有儲電或蓄電之作用。但與蓄電池絕不相同，因後者充電時，係將化學能力儲起，而於放電時，再將電能放出，電容器之充電，則係此組導片上之電子，強迫使奔存於另一組上，如一有機會，此被逐出之電子，將立即逃回。當此電子，因有道

路而逃同時，其薄片即恢復其中和狀態

(二九) 導體電位與電容量

荷電導體連接金箔驗電器時，金箔張開之角度，即表示導體之電位。設另取一中和導體與之相接，則金箔必稍落，表示電位因電荷面積擴大而降低。故凡導體電位，必隨電荷面積擴大而降低，隨電荷面積縮小而增高。其要素有三：

- (1) 導體本身所荷電量；
- (2) 空間電位，即鄰近電量之影響；
- (3) 導體之形狀大小，即導體電容量之多少。

導體之電容為其所荷電量與電位之比例常數。設某導體荷 Q 單位電量時，其電位為 V ，則該導體之電容為

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{或} \quad V = \frac{Q}{C} \quad \text{或} \quad Q = CV, \quad \text{公式6.}$$

凡導體所荷電量增減一靜單位，而其電位隨之升降1靜電單位者，其電容為1靜電單位是為電容之絕對單位。凡導體所荷電量增減1庫侖，而其電位隨之升降1伏特者，其電容為一法拉(f)。法拉之 $\frac{1}{10^6}$ 為1微法拉(μf)。1微法拉之 $\frac{1}{10^6}$ 為1微微法拉($\mu\mu f$)是為電容之實用單

位。

因 1 庫侖 $= 3 \times 10^9$ 靜電單位電量

1 伏特 $= \frac{1}{300}$ 靜電單位電位

故 1 法拉 $= 9 \times 10^{11}$ 靜電單位電容

1 $\mu\mu\text{f}$ $= \frac{9 \cdot 7}{10}$ 靜電單位電容

(三〇) 球形導體之電容

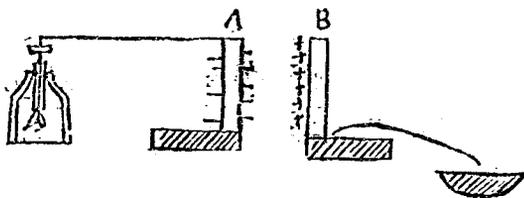
若鄰近無其他電量，荷電銅球之單位為 $V = \frac{Q}{R}$ 。與

公式6 相比較，可見凡不受鄰近電量影響之球形導體，其電容之靜電單位數，適等於其半徑長度之公分數，即

$$C = r \text{ 靜電單位} \quad \text{公式7}$$

(三一) 電容器之電容

單獨導體之電容皆極小。雖荷電面積寬廣，亦不能蓄多量之電。欲多蓄電量，必須別謀良法以擴大荷電體之電容，致鄰近電量之影響足以變更荷電體電位。若鄰近電量為同性，其影響為增高荷電體電位，是猶減小荷電體之電容。若鄰近電量為異性，其影響為降低荷電體電位，是猶擴大荷電體之電容。例如設有A.B 二片金屬板（第三十五圖）A 板接驗電器，B 板通地，而互相絕緣。先移開 B 而



第三十五圖

充電於A，則A荷電無幾即達相當電位。再以B向A移近，則B感應生異性電，A受其影響而電位漸降。A,B相距極近時，A須增蓄千萬倍電量始回復最初之高電位。可見A因接近荷異電之B板，其電容遂擴大至千萬倍。此相近而相絕緣，各荷異電以擴大電容之二金屬板，實為一最簡單之電容器。

凡電容器蓄電量Q即A,B二金屬板各荷電量Q。一為陽電，一為陰電。一由外方輸入，一由感應所生。各分佈於二板相距最近之表面。二板間造成均勻電場。設二板荷電面積各為A平方公分 (Sq. CM) 空氣厚度為d公分。若以單位陽電自A板表面移至B板表面，則所抗之力 (Force) 為

$$F = \frac{4\pi Q}{A} \text{ 達因}$$

所作之功 (work) 為 $W = Fd = \frac{4\pi dQ}{A}$ 爾格

即二板間電位差爲 $V = \frac{4\pi dQ}{A}$ 靜電單位

故此電容器之電容爲

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{A}{4\pi d} \text{ 靜電單位}$$

$$\text{或 } C = \frac{A}{4\pi d} \times \frac{10}{9} = 0.0884 \frac{A}{d} \mu\mu f$$

公式8a

此公式證明凡導體之電容依荷電面積爲正比，而依鄰近電量之距離爲反比。

(三二)非導體之誘電率 (Dielectric constant, or specific Inductive capacity)

電容器二片金屬板間所隔之空氣，若易以其他非導體，如玻璃，雲母等，則電容量尤大。此擴大之倍數名曰誘電率。例如一空氣電容器之電容爲 C_{Ca} 若以某非導體充空氣，而其電容增爲 C_x ，則此非導體之誘電率爲

$$K = \frac{C_x}{C_a} \quad \text{公式9}$$

空氣，真空及各種氣體之誘電率皆爲1，其他非導體均大於1，茲舉各重要物質之誘電率（以k爲代表）如下表：

物質	誘電率k
空氣(Air)	1.0
氫氣(Hydrogen)	0.99
玻璃(Glass)	3.0—10.0
硬膠或膠木(Ebonite)	3.2
馬來膠(Guttapercha)	2.5
橡皮(India Rubber)	2.2—2.5
松香(Resin)	2.6
洋乾漆(Shellac)	2.7
硫磺(Sulphur)	3.9
雲母(Mica)	6.0—8.0
白蠟(Paraffin)	2.3
白蠟油(Paraffin oil)	1.9
石蠟(Ozokerite)	2.15
磁器(Porcelain)	4.4—5.4
水晶(Quartz)	4.6
火油(Petroleum)	2.0
松脂油(Turpentine oil)	2.15—2.28

故凡二片金屬板中隔任何非導體之電器，其電容為

$$C_x = \frac{kA}{4\pi d} \left. \begin{array}{l} \text{靜電單位} \\ \text{或 } C_x = 0.0854k \frac{A}{d} \mu\text{f} \end{array} \right\} \text{公式8b}$$

(三三)萊頓瓶(Leyden jar)

電容器之發明最早者為來頓瓶，1746年創造於荷蘭之來頓，故錫是名，其構造為一玻璃瓶(第三十六圖)內外二



第 三 十 六 圖

面各糊錫箔，高及瓶三分之二，一銅桿通過瓶塞，上戴銅球，下垂銅鏈，以連接瓶內錫箔，充電時須以瓶外錫箔通地或握於手，而後充電於瓶內錫箔，方能多蓄電量，否則蓄電極微，不能得其效用，來頓瓶之應用僅限於實驗室，蓋其電容猶甚小，而體積巨大，管理不便，故不適於實用也。

(三四)電容器之計算

一電容器之電容量，與下列三項有直接關係。

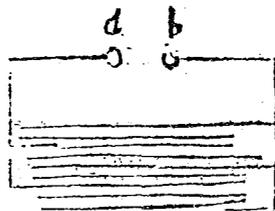
(1) 與導片之面積成正比。面積愈大，電容量愈大

(2) 與導片間之距離成反比，距離愈近，電容量愈

大。

(3) 與電容器中誘電體誘電率 (Dielectric constant) 有關。凡誘電率愈大，電容量亦愈大。通常空氣之誘電率為1，玻璃為3 與10，雲母為6與8之間，其他均可由誘電率表查視。

適於實用之電容器，須備構造輕便，而電容較大二項條件。故凡實用电容器之構造，均疊置 n 片金屬板，中隔極薄非導體，而相間的聯為 ab 二組(第三十七圖)。充



第三十七圖

電時， ab 二組金屬板之表面荷等量異性電猶簡單電容器之二板。如是構造則體積增大無幾，而電荷面積大 $(n-1)$ 倍故電容亦增為 $(n-1)$ 倍。設二組金屬板之總片數為 n ，每片金屬板每面平均面積為 A 平方公分，二片間非導體厚度為 d 公分，非導體之誘電率為 k ，則此電容器之電容為

$$C = \frac{k(n-1)A}{4\pi d} \text{ 靜電單位}$$

$$\text{或 } C = 0,0884k(n-1) \frac{A}{d} \mu\mu\text{f}$$

$$\text{或 } C = 0,884k(n-1) \frac{A}{d} \times 10^{-6} \mu\text{f}$$

公式8c

(三五) 定量電容器 (Fixed condenser)

電容器之電容量，不可以改變或增減者，是為定量電容器。多數之較小固定電容器，均以一英寸平方大小雲母為其誘電體。蓋雲母之損失少，誘電率大（約6與8之間）且破裂電壓極高，對於電壓不過高之小量固定電容器，實極相宜。普通定量電容器，係將雲母片與錫箔 (tin foil) 層層相間。堆積而成。（參閱第三十八圖）其誘電體所以較導片突出一部者，係為便利絕緣之關係，所有已堆積之各層，均封置於一膠木盒內，而以白銅之接頭，為連接引線之用。此種電容器之電容量，普通約自0,00002 μf ，至0,015 μf ，無線電路上應用甚廣。有線電路上所用者較大，約自0,125至7,75 μf 裝成一木匣。

每電容器由廠方所註明之電容量，除特別標明者，大致可準確至百分之十上下。



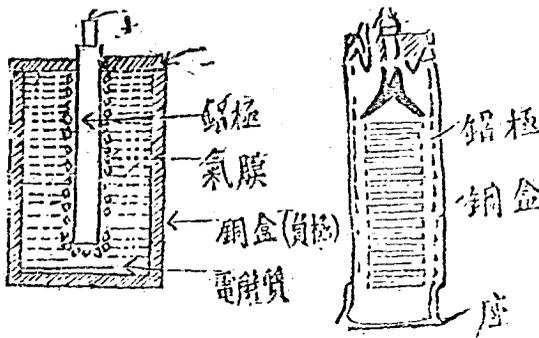
第 三 十 八 圖

電容量較大，約在 $0.2\mu\text{f}$ 以上之定量電容器，普通多以臘質極薄之紙為誘電體，而以甚薄之錫或鋁片為導片，其製法係將長而狹之兩層錫箔，與中間紙數層，同時捲繞或平壓而成。每層錫片，均以易撓之金屬焊一接頭，以接引綫。當捲繞手續完畢後，乃將其間之空氣抽出，而將蜡質物滲雜其間，以加強其忍受高電壓強度，及避免潮氣侵入。最後乃其置於金屬或硬紙盒內。

(三六)電解質電容器 (Electrolytic Condensers)

近數年來，在有無線電工程方面所用之電力濾波電容器，多有引用電解質電容器之傾向。此種傾向之所以普遍，蓋有數因：主要為成本低廉，所佔空間較小，且其誘電體有自療之性質。以相同之電容與電壓比之，紙電容器佔50立方英寸之空間，而電解質電容器只須7.5立方英寸，為50與7.5之比。

對於電解質電容器原理，解說甚多，最普遍採用者，有下述之一種：當一直流電壓加於兩電極即將正極接於中心之鋁極（參照第三十九圖A）而使負極與溶液相聯時，即有電流通過，但不久鋁極上即為極薄之氧化鋁，或氫氧化鋁之外表所被。同時由電解質所生之氧氣薄膜，亦附着於此固體層外表之上。由此兩種經化學作用得來合併而成之薄膜，即構成此電容器之誘電體。此薄膜極薄，普通安全最高電壓為500 伏特之電容器，亦不過十萬分之一至百萬分之一英寸然即此已足將在中心之鋁極，與環繞周圍之導體電解質，隔開而不致導電。此薄膜既極薄，而電容量又與其厚薄成反比。故此種電容器，只須較小之裝置，即可有甚大之電容量。



第 三 十 九 圖

電解質電容器之正極有用鎢 (Tantalum) 者、惟其需酸類電解質，甚多不便。鋁則可用數種非酸性之電解質。惟此種電容器由電路拆下，或將電壓接入時，其氣膜常有被溶解於溶液，而成氫氧化鋁之傾向，常電壓接入後，因漏電之影響，新氣膜固可從新造成，但以飽和後之氫氧化鋁，將沉澱而為膠質之故，容電器之壽命，將大為減短。

因此，對於電解質，必須加以審慎選擇，而以不致溶解氣膜，及電極物質，者為佳。硼砂 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 及硼酸解 (H_2BO_3) 之溶液，其所以常用於電解質電容器者，即以其一則無腐蝕性質；二則對於氣膜即在480 特伏時。仍不溶解。如電壓不過300 伏特上下，則各種磷酸鹽，葡萄糖鹽，硼酸鹽，以及碳酸鹽等之濃溶液，均可選用。簡單之電解質電容器內，有一鋁製電極，置於溶液中；及一不與溶液起化學作用之電極，以便聯接電解質於電路之負極。普通出售之濕電解質電容器，即以盛溶液之銅匣為直接連電解質之極。

為加大電容量起見，其鋁極之面積，可用種種方法增大，第三十九圖(B) 為司卜賴 (Sprague) 電容器之剖面圖。其鋁極係中空，且起波紋，中空部份俱實溶液，故所

得之有效面積增大。其純銅製盛盒之底，可置於有螺旋之插座上，匣內滿盛電解質，

電解質電容器有正負極之分，與一般電容器迥異。蓋其中之鋁極，必須與電路中正極相聯，否則一有接錯，則電容器之漏電，可立將電容器變熱，而發生損壞。故此種電容器，絕不能用於交流電路，不過在有顫動電流之直流電路，如電力整流之濾波電路上，仍可引用，此種電容器之另一缺點，即時時有甚小之漏電，由正極經溶液而流至負極上，不過新式電解質電容器，此種漏電已能減至極小，每平方公分之薄膜面積，僅百萬分之安培。故每 10^6 f 而用 300 伏特之電壓，亦不過一二千分之一安培而已

電解質電容器之最大優點，為其不致為破裂電壓所損壞。一般誘電體之電容器，一有過量電壓，即可致永久破裂而不能復用。至電解質電容器，即有暫時過量電壓，即薄膜被損壞，但當此過量電壓一去，此種薄膜可立即恢復。因此薄膜不過為氧化物，由其本身漏電之電化學作用，即可立刻產生，故此種電容器之原來特性，可迅即恢復，而又能復用。

(三七) 乾電解質電容器

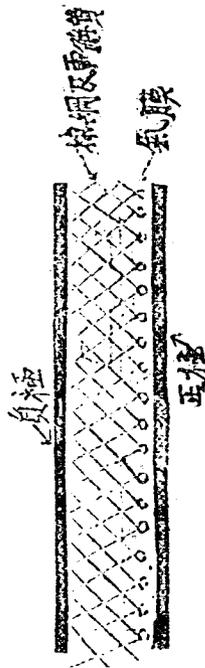
有如電池之有乾電池，電解質電容器亦可製成乾的形式。此種乾電解質電容器，其正極亦由極薄鋁片所構成。在其上面，亦有氧化鋁及氧氣之薄膜，以作誘電。其另一面亦為鋁片，不過僅充導電之用。在負極鋁片與薄膜之間，為含足電解質之棉網，其內部情形可參照策四〇圖。此種在交流電路上，仍不可用。惟其優點除成本低，及效率高外，較其他電容器均小而輕便，且液體電解質電容器之一般缺點如液體之易洩出、不能受振動等，均已免除。

(三八) 變量空氣電容器 (Variable Condenser)

電容器之電容量，可任意增減者，是為變量電容器，由第三十四節公式 ϵC ，可知一電容器由改變其導片數，導片之有效面積，誘電體之物質，或導片間距離，即可將其電容量任意增減。無線電路上之各種變量電容器，上述之四種方法，雖均可任意採用，但最通用者，則惟改變其導片間有效面積之變量空氣電容器一種。

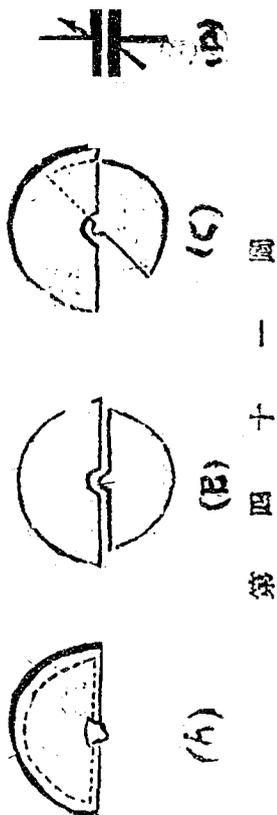
變量空氣電容器，是以空氣為誘導體。其導片分兩組：一組不動，曰定片組，一組有軸，可轉動，曰動片組。各片互相並行，此組各片與彼組各片相間而置，每組各片，彼此相連，但不與他組相觸。當動片組轉與定片組完全

相合時，電容量最大，如第四十一圖(A)。完全不相合時，電容量最少，如圖(B)，一部相合，則電容量可由最小至最大，任意變化，如圖(C)。



第 四 十 一 圖

此種電容器導片，多由薄而硬之黃銅或鋁片所製成，黃銅焊接較易，即稍薄亦不易彎曲，鋁片則較輕，且在普通情形下不易生銹。



(三九) 共軸電容器

新式無線電收音機收報機，因須獲得其必要之選擇性，往往有四五級，甚至六級電諧。其每級配諧電容器，通常將其動片組置於同一軸上，而令其定片組置於適當處所。

仍獨立地相互絕緣。當其共同軸轉動時，各電容器之電容量，均同時改變，此種裝置，稱爲共軸電容器 (Gang Condenser)。但因在實際上，各組之配諧，絕難完全相似，故於各主要電容器外，更裝以一種可調整之小量補償電容器 (Adjustable Compensating Condenser)。此電容器多以兩導片及夾以一長條雲母而成，其電容量係調整夾壓兩導片之螺旋，而改變大小。每個補償電容器，均與其主要電容器並接

電容器之採用，固須視其電容之大小，又須注意器上所規定之電位差限度。若電位差超過限度，則其間非導體即不能抗高壓發生火花而破裂

二片導體中隔非導體，即成電容器。故凡綫與綫，綫與地，或其他遙隔之任何導體間，皆有電容存在。此類沿綫分佈之電容稱曰分佈電容 (Distributed Capacity)。分佈電容雖屬極微，然在交流電路內影響甚大，不可忽視

(四〇)電容器之損失

上述之電容器，係假定爲純粹完善，即以此電容器爲無漏電，無電阻，以及誘電體損失極微者，但實際上，電容器並不能如理想上之完美，而必有許多不可避免之損失

此種損失，細別之，有下列四種：

A, 電阻損失 (Resistance loss): 電子必須流經連接導綫，及導片本身，則此等部分上之電阻，勢必阻礙電子流動，因之發生 I^2R 損失

B, 漏電損失 (Leakage loss): 設電容器誘電體之絕緣電阻，並不甚高，則一部自由電子，將經誘電體，由負極而流向正極，是為漏電。此種漏電，不僅將負極金屬片上所聚之電子數量減少，且在誘電體本身內發生有損害之熱量。漏電亦可在電容器外部發生，或經導綫上絕緣物，或經由潮濕之空氣，即以漏電之故，一電容器充電以後，多則數日，少則數時，其所聚之電，即可完全失去。空氣或雲母電容器，漏電損失較少，至紙或電解質電容器，漏電損失則頗大。

C, 誘電體吸收損失 (Dielectric Absorption loss)
：設有一以紙絕緣之電容器，於已充電後，將其放電。再待若干時後，如以極靈敏之測電表測之，仍可較低之電壓，且須再度放電，此蓋因誘電體原子內部組織，必須經相當時間後，始能回復其原來位置與形狀，因此，在負極上之過剩電子，雖已有完全電路，仍不能立刻由此電路，而推回至正極上，當在無線電高週率電路時，電容器更少

充分之時間，以便電壓此一高峯至另一高峯間，將所有被吸收或殘留之電荷，完全放出，因此，一部之電荷已損失，而永不能由電容器中恢復，此種損失，全視誘電體之物質而異：以雲母，空氣，及油類為誘電體，此種損失可較少。損失最重者，為劣質之紙等，

D, 誘電滯後損失 (Dielectric Hysteresis loss) :
當一交流電壓加於電容器時，其中間誘電體原子之電子，被交替之引力所伸張，而變動其原來位置，此被伸張之電子，對於在誘電體內所生之靜電力場之消失，發生一種滯後 (lag) 作用，此種作用正與磁滯相似，亦可稱為誘電滯後，此為極有理性之假定，即當一電容器充電後，其誘電體原子內電子，既被改變其位置，則當放電時，必有一種拉回力量加於其上，始能恢復其(電子)原來狀況，因此，在週波之另一方向時充電，必須些許能力以助其改為相反狀態，此種能力 (Energy) 是為誘電滯後損失，週率愈高，電子反復改變其位置次數愈多，則此種損失愈大，射電週率電路內用之電容器，其電流週率每秒在百萬週以上，故此種滯後損失必以愈小愈佳

以上之各種損失，有時為便利起見，歸納之為一種損失，即等量串聯之電阻 (Equivalent series resistanc-

ca) 一般之空氣電容器，損失極小；損失最大者為紙電容器，與電解質電容器等。

(四一)電容器之破裂電壓

由上節之討論，知當一電壓加於一電容器時，其誘電體原子內部，即呈緊張狀態。電壓愈高，緊張愈甚。如將電壓加高至相當數量，則積聚於負極之自由電子，可經由誘電體而發生火花放電，其絕緣物遂被損壞，使發生此種現象之電壓，是為電容器或誘電體之破裂電壓，此種破裂電壓，固與誘電體之組成有關，但，溫度高低，時間長短，均有影響，破裂電壓最高之誘電體為雲母 (Mica) 及蠟紙等，故此二種，電容器上多用之，而雲母及蠟紙相較，雲母則優於蠟紙；雲母優點有三：(一)誘電率大，可得較大電容，(二)誘電率固定，不隨溫度氣候及電位差之大小而異，可得固定電容，(三)電位差限度極高，其厚度可減至極薄，以增加電容，無慮電位差過高之危險，

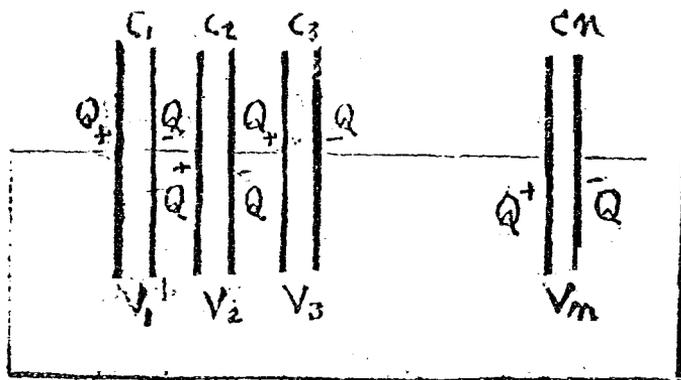
如電容器之誘電體為雲母或蠟紙等，當為過量電壓所刺穿後，一較久之短絡，將在誘電體內發生，而此電容器即歸無用，但以電解質或空氣為誘電體之電容器，即為過量電壓所刺穿，且亦在導片間發生短絡，但如立時將電壓切斷，或將電容器於電路中拆出，其誘電體之

絕緣性質，仍可自動恢復，而此電容器已能照常應用，此種式樣，是稱為自癒 (Self-healing) 誘電體。

破裂電壓既如是重要，故每一電容器之安全最高電壓均由廠家註明，用者在選購時，必須注意之。

(四二) 電容器之串聯與並聯

若一個電容器之電容不適於用，則可以幾個電容器相聯，其聯法有二，分述於下：



第 四 十 二 圖

(1) 以第一電容器之B板，接第二電容器之A板，復以第二電容器之B板接第三電容器之A板(第四十二圖)最後以第N電容器之B板通地而充電於第一電容器之A板。

此 N 個電容器連接成串，名曰串聯，充電後，第一電容器蓄電量 Q 其他各個亦由感應而蓄相等電量 Q ，各器二板間電位差之和為此串聯組之總電位差，茲命

$C_1 C_2 C_3 \dots \dots \dots C_n$ 為各電容器之電容

$V_1 V_2 V_3 \dots \dots \dots V_n$ 為各電容器之電位差

$Q \dots \dots \dots$ 為各電容器之電量

$$\text{因 } C_1 = \frac{Q}{V_1}, \quad C_2 = \frac{Q}{V_2}, \quad C_3 = \frac{Q}{V_3} \dots \dots$$

$$C_n = \frac{Q}{V_n}$$

$$V_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad V_3 = \frac{Q}{C_3} \dots \dots$$

$$V_n = \frac{Q}{C_n}$$

$$2 \quad V = V_1 + V_2 + V_3 \dots \dots \dots + V_n$$

$$= \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \dots \dots \dots + \frac{Q}{C_n}$$

$$= Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots \dots \dots + \frac{1}{C_n} \right)$$

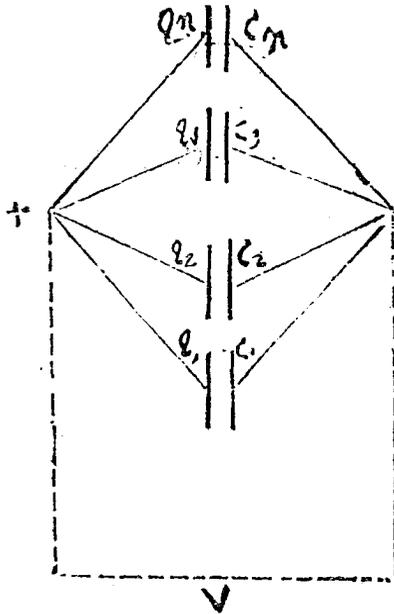
公式10A

設 C 為總電容，則得次式

$$C_s = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} \text{ 公式10b}$$

故為串聯連接一組之電容時，其總電容器為各電容器電容之倒數和之倒數，若各電容器之電容互等，即

$$C_1 = C_2 = C_3 \dots \dots \dots = C_n = C$$



第 四 十 三 圖

即得

$$C = \frac{1}{\frac{1}{n} \frac{1}{C}} = \frac{C}{n} \quad \text{公式(16)}$$

即總電容為各個電容之 $\frac{1}{n}$ 倍也

(2) 聯合所有B板而通於地。聯合所有A板而受電充灌，(第四十三圖)，名曰並聯，充電後，各電容器二板間電位差均相等。而各器所蓄電量之和為此並聯組所蓄之總電量，因其有效面積既增加，故其總電容，亦必以同樣比率增加

茲設 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 為各電容器之電容

$q_1, q_2, q_3, \dots, Q^n$ 為各電器之電量

V 為電位差

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

$$\text{因 } C_1 = \frac{q_1}{V}, C_2 = \frac{q_2}{V}, C_3 = \frac{q_3}{V} \dots \dots \dots$$

$$C_n = \frac{q_n}{V}$$

$$\text{故 } Q_1 = C_1 V, Q_2 = C_2 V, Q_3 = C_3 V \dots \dots \dots$$

$$Q^n = C^n V$$

今命 Q 為各電器之總電量， C 為其總電容，則

$$\begin{aligned}
 Q &= q_1 + q_2 + q_3 \cdots \cdots + q_n \\
 &= C_1 V + C_2 V + C_3 V \cdots \cdots + C_n V \\
 &= (C_1 + C_2 + C_3 \cdots \cdots + C_n) V \\
 C &= \frac{Q}{V} = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 \cdots \cdots + C_n) V}{V} \\
 C &= C_1 + C_2 + C_3 \cdots \cdots + C_n.
 \end{aligned}$$

公式11A:

即各電容器並列時，其總電容與各電容器之和相等
如各電容器之電容互等時，即

$$C_1 = C_2 = C_3 \cdots \cdots = C_n = C$$

則得 $C = nC$

公式11b

故串聯與並聯之效果相反。串聯猶增加二板間距離使電容減小。並聯猶增加二板之電荷面積，使電容擴大。若嫌所用電容器之電容太小，可添一電容器與以並聯。若嫌所用電容器之電容太大，可添一電容器與之串聯。

(四二) 電場內所貯之電能

導體或電容器荷電量 Q 時，其電場內貯有電能。按能量不滅律，此電能必等於 Q 自零電位移上該導體或電容器時所作之功。若該導體或電容器之電位常固定為 V ，不隨所荷電量而變遷，所作之功為 $W = QV$ 。但此與事實不付，

其電位實隨 Q 之移上、始自零漸升為 $V = \frac{Q}{C}$ 。可見所移過電位差，決非最初之零，亦非最後之 V 。整個 Q 同時移上導體與分為若干份依次漸移，其效果毫無差別。若分 Q 為 N 極小等分而後移動，則第一等分所移過之電位差為零。第 N 等分為 V ，其間各等分則自零至 V 依次漸增。故整個 Q 所移過之電位差，應為零與 V 之平均值 $\frac{V}{2}$ 而所作之功實為

$$W = Q \left[\frac{V}{2} \right] = \frac{1}{2} QV$$

故凡導體或電容器，因荷電量 Q 而發生 $V = \frac{Q}{C}$ 之電位者，其電場內所貯之電能為

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad \text{公式12}$$

若 Q, V, C 之單位均為靜電單位，則 W 之單位為爾格。

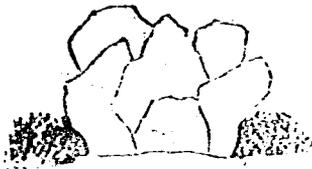
若 Q, V, C 之單位均為實用單位，則 W 之單位為焦耳。

第六章 磁與地磁

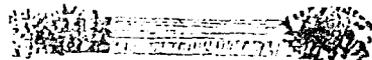
(四三)天然磁鐵與人造磁鐵

由電磁學發展之歷史言之，吾人對於電磁學之智識最早發現者，當即磁鐵 (Magnet) 之磁性 (Magnetism) 蓋於往古時代，吾人即已發現鐵物中之磁鐵礦 (Magnetite, Fe_3O_4)，有一種吸鐵之性質；且如將磁鐵懸於空中則常指南北而靜止。吾國人所常自詡三大發明之一之指南針 (Compass) 蓋即所以利用此種磁性之最早者也。

上述之磁鐵礦，最早係發現於小亞細亞之 Magnesia 地方，於紀元前 505 年即傳至希臘 (Greece) 希臘人遂以 Magnes 名之。今之英文所稱為磁鐵與磁性者，蓋即由 Magnes 一字脫胎耳。



天然磁鐵



人造磁鐵

第四十四圖

磁鐵分為兩種：一為出於天然者，如磁鐵礦黃鐵礦 (Magnetic Pyrite Fe_3S_4) 及鉛鋅等之礦石，因在天

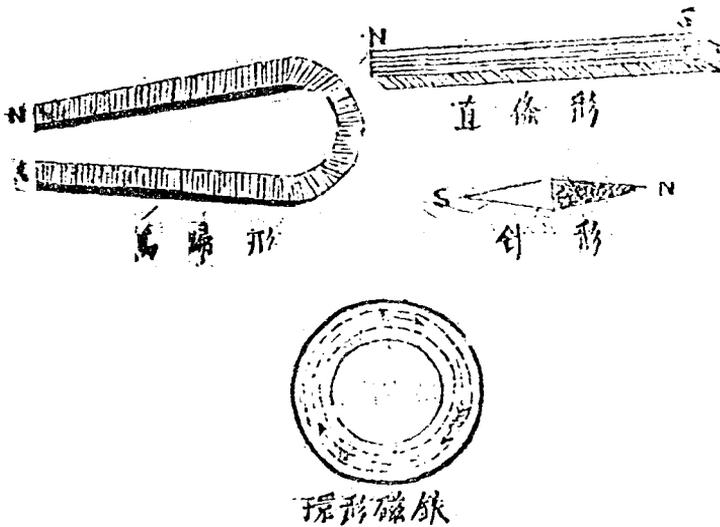
然中，已具一種磁性，故曰天然磁鐵 (Natural Magnet)。一為由人力造成者，如以鋼製之小棒，用一已具有磁性之磁鐵，順序摩擦數次之後，即帶磁性。且其吸引鐵屑之程度，較天然磁鐵，或且過之。此種用人工而得磁化之鋼棒，是稱人造磁鐵 (Artificial Magnet)。人造磁鐵，因其大小形狀，可隨人意製造，且較方便，且磁性較強，故現今均用人造磁鐵，而不用天然磁鐵。且除上述以磁鐵磁化得磁外，現今一般強磁石，均以通電流於圍繞鋼鐵線圈上得之。

(四四) 磁鐵之定義

凡具有吸引鐵屑特性之鋼鐵謂之磁鐵 (亦名磁石)。試將一直條形磁鐵置於鐵屑內，則鐵屑叢集於兩端 (第四十四圖)，漸近中部磁性漸弱以至完全不顯。此磁性集中之兩端名曰磁極 (magnetic pole)。磁性不顯，未附鐵屑之中部，名曰中和段 (Neutral region)。將此直條形磁鐵繫其中部而懸之，則此磁鐵必往復轉動至一極指北一極指南而止。其停止不動時所指方向大致與地球之南北方向一致。其指地球南極之一端，稱為磁鐵之指南極 (South seeking pole) 簡稱之即為南極 (S pole)；其另一端，稱為磁鐵之指北極 (north seeking pole)，簡稱之即為北極 (N po

e)。今若將此磁鐵任意旋轉而待其靜止，則兩端所指永為原指方向而不變。

由磁鐵兩極之相對極性，又有正極 (Positive pole) 及負極 (Negative pole) 二名詞，正極所指為指北極，負極所指者為指南極。



通常所用之人造磁鐵

第四十五圖

一般所謂磁鐵多指人造磁鐵，因天然磁鐵並不實用。人造磁鐵可分二種(第四十五圖)，永久磁鐵 (Permanent magnet) 與電磁鐵 (Electro-magnet)。其形式因用途不

同而各異。最普通者爲(1)直長如棒者曰直條形磁鐵(2)細薄如針或如菱形兩端尖銳者曰磁針。(3)彎如馬蹄之鐵曰馬蹄形磁鐵，(4)連續成環者曰環形磁鐵。環形磁鐵之磁極不露於外，故無磁極。其他磁鐵均有南北 (S, N) 兩極在其兩端。試以直條形磁鐵之 N 極移近磁針，則針之 N 極被拒而與 S 極相吸。可得磁之定律如下；同性之極相拒，異性之極相吸。此相拒或相吸之力稱曰磁力 (Magnetic force)。

(四五)反平方定律與單位磁極

二極間之磁力如何計算，實爲磁學上之基本法則。是項計算首由法人庫倫 (Coulomb) 利用扭轉平衡儀 (Torsion balance) 由實驗測知凡二極間之磁力必與二極間距離之平方成反比。此項定律名曰反平方定律 (Inverse Square law) 如下：凡二磁極間之吸力或拒力必依據該二極之磁極強度爲正比，而依據該二極間距離之平方成反比。公式爲

$$F = k \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad \text{公式 13 a}$$

式內 k 爲介質常數，其值視二極間所隔物質而異。 F 爲二磁極間之吸力或拒力 (同極爲拒力，異極爲吸力)。 m_1

m_1, m_2 爲二極之強度， d^2 爲二極間距離之平方。

此項反平方定律因首由庫侖實驗證明，故亦名庫侖定律 (Coulumb's law)

磁力之計算既依磁極強度爲正比，則磁極強度亦可由其磁力之大小爲計。凡一磁極在空氣或真空中對於相隔 1 公分 (Cm) 之另一相等磁極，能發生一單位之拒力即 1 達因之拒力者，是爲一單位磁極。若 m_1, m_2 之單位爲絕對單位， d^2 之單位爲公分 (Cm)， F 之單位爲達因，則二磁極在真空或空氣中所發生之磁力 (Force) 爲 (因在真空或空氣中 $k=1$)

$$F = \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad \text{公式 13b}$$



第 四 十 六 圖

(四六)磁感應

軟鐵片在磁極附近即化成磁鐵，其兩端生兩極 (第四十六圖) 設驗以磁針，可證接近原動磁極之一端爲異極，

而遠端爲同極。若移開原動磁極，則兩極隨即消失，復爲無磁性之鐵片。此現象名曰磁感應 (Magnetic induction)。磁鉄所以能吸鉄屑或鉄片，卽緣鉄屑或鉄片先被感應而磁化 (Magnetize)，近端生異極遂與原動磁極相吸也。

凡能被磁力所感應而磁化之物質，名曰磁質 (Magnetic substance) 不能被磁力所感應之物質，名曰非磁質。 (Non-magnetic substance)。磁質可分常磁性物質及反磁性物質二種 (1) 常磁性物質 (Para-magnetic Substance) 如鉄，銅，銀，鈷，鎳，錳，鉻，鉑等，如置此等物質於甚強之磁場內，則亦同樣磁化 (magnetising) 變爲磁鉄，且與所磁化之磁場方向相同。常磁性物質中以鉄，鎳，鈷三者之效應最著，卽極弱之磁場，亦能感應甚強之磁性，故又稱爲強磁性物質 (Ferromagnetic Substance) (2) 反磁性物質 (Diamagnetic Substance) 此類物質，如置於一極強之磁場內，雖亦能感應得極微弱之磁性，惟其方向却與所放置之磁場方向相反，如錳，鎳，銅，銀，鉻，硫，鎳，金，及石英等，均屬此類。

非磁質者乃凡一物質，雖置於極強之磁場內，無論常磁性或反磁性，均不顯著。惟所謂磁性與非磁性，亦僅程

度上之差別，實質上並無顯然之界限存在其間。

通用之磁性物質，當首推鋼與鐵二者，一般市售之永久磁石，為獲得較強之磁性與其特性起見，尚有於鋼內加少許銀，鉛，銻，或錫以成一種特製之合金者。至如空氣，白銅，銅，鉛，鋅，及玻璃等，因其在極強之磁場內，其本身亦甚難磁化，實際上均當作非磁性物質。

磁質以鋼鐵為最著，鋼鐵以外之物質大都為非磁質。鐵愈軟者，感應愈易，化磁較強。愈硬則感應愈難，化磁較弱。最良軟鐵離開原動磁力後，其由感應所生之磁性，隨即完全消失。硬鋼則能保留若干磁性，成為永久磁鐵。(Permanent magnet)。普通軟鐵亦能保留少許磁性。稱曰剩磁 (Residual magnetism or Rémanence)。凡鋼鐵能於離開原動磁力後保留磁性之特性，名曰頑磁性 (Retentivity)。鋼鐵愈硬則頑磁性愈強。鋼鐵鍛鍊時，若摻入百分之十錳質，則保磁性極強。製造永久磁鐵者多用之。



第 四 十 七 圖

(四七)分子磁說

N 極與 S 極固不能單獨發生或消失，亦不能單獨存在於一磁鐵。若以細長磁針折為二段，則得二完整磁鐵。再折為四，則得四完整磁鐵，折斷處，均發現二異極（第四十七圖）可見設分裂磁鐵至於極小之分子，各分子必仍為整個磁鐵。磁化之鋼鐵亦然，故可斷定鋼鐵分子本屬整個小磁鐵，是為分子磁（Molecular magnets）說。

設以一磁極在滿貯鐵屑之玻璃管外，依一定方向沿管摩擦數次。此鐵屑柱即化成條形磁鐵，摩擦起點生同極，終點生異極。若管稍搖動，則磁性立即消失。又設有一無磁性之鐵片。若以一磁極依一定方向沿鐵片長度摩擦數次。或以鐵片燒紅，而後在磁極附近逐漸冷卻。此鐵片亦能化成永久磁鐵。若以有磁性鐵片敲擊數下，或以火燒熱，則磁性立即消失。可見鋼鐵之磁化，必由於內部有若干分子，排成相當整齊之行列（第四十八圖 A, C,）成整齊行列之分子愈衆，則磁性愈強。無磁性鋼鐵之分子行列必錯亂萬般，至不整齊，以致其異同極間之作用互相抵消，不呈磁性。（第四十八圖 B.）

轉動較易，故化磁易而失磁亦易。硬鐵分子轉動較難，故化磁難而失磁亦難，原動磁力愈強，則轉動而成整齊行列之分子愈衆，故感應所生之磁性已達最高限度。此現象名曰飽和 (Saturation)

(四八) 磁場

凡磁力 (magnetic force) 所及之域名曰磁場 (magnetic field)。在磁鐵周圍爲其磁力所及之空間，是爲該磁鐵之磁場。地球實爲一大磁鐵，地面上空間均爲地球磁力所及之域，故吾人之所在即在地球之磁場內。在磁鐵磁場內置入另一磁極，即被驅而移動。置磁針於磁場磁鐵內，則發生轉動。此項轉動係受磁場之磁力作用而發生之動能，於此可見磁場亦蓄有一種能力

磁場之方向與強度簡要言之，約如下述：(1) 1 單位 n 極在磁場內之某點，被驅而移動之方向，是爲該點之磁場方向。故 N 極附近各點之磁場方向爲自 N 極向外， S 極附近各點之磁場方向爲自外向 S 極。(2) 1 單位 n 極在磁場內某點所感受之併合磁力或合力 (Resultant force) 即爲該點之磁場強度 (magnetic force or intensity) 以 H 爲代表。磁場強度之絕對單位名曰高斯 (Gauss)。1 高斯爲 1 單位 n 極感受 1 達因磁力之磁場強度。1 磁

場之單位強度爲 1 平方公分 (Sq. cm) 有 1 單位磁力綫而能使 1 單位磁極被驅移動。設強度爲 m 絕對單位之另一磁極，在某點感受 F 達因之磁力，則該點之磁場強度 H 爲

$$H = \frac{F}{m} \text{ 高斯} \quad \text{公式 14a}$$

若已知某點之磁場強度爲 H 高斯，則磁極 m 在該點所受之磁力爲

$$F = H m \text{ 達因} \quad \text{公式 14b}$$

亦有以磁位 (magnetic potential) 以解釋兩磁極之磁場強度者，其磁位與磁場強度之關係，約如下述：
磁位在任何一點均等於將一磁極 (單位北極) 自無窮遠移至與另一磁極相距 d 公分所需之工作， $\frac{m}{d}$ 爲一磁位磁極與另一磁極 m 相距 d 公分時之位能 (potential energy)，或即磁極 m 於 d 公分距離之單位。故一點與一磁極相距 1 公分，其磁場強度爲 m 單位，則此點之磁位 U 爲

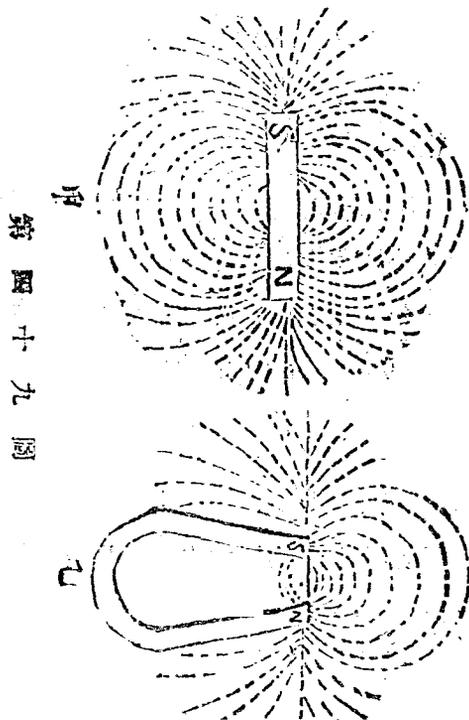
$$U = \frac{m}{P} \quad \text{或} \quad m = Ud$$

磁場內單位相等之各點面積謂之單位面 (Equipotential surface) 單位面上連接相等單位各點之直綫或曲綫，謂之單位綫 (Equipotential lines)，

(四九) 磁力綫及其方向

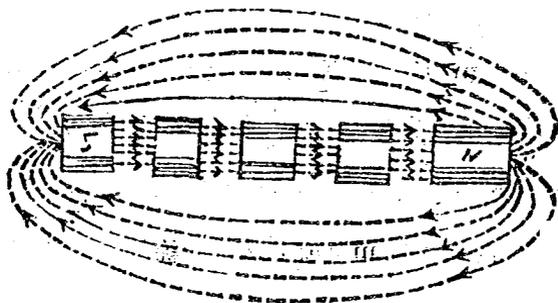
1837 年法拉第 (Faraday) 用實驗方法證明磁力非磁

極之本能而為磁極間媒介體之作用。此媒介體即為磁力綫 (Lines or tubes of force)。磁力綫連繫強度相等之異極，富有收縮力，故異極相吸，富有旁壓力，故同極相拒。磁力線之形象，雖不可目見，可以實驗證之。試取一磁鐵，覆以破片，散佈鐵屑其上，輕擊玻璃，則鐵屑逐漸移動，終至於列成無數有規則之弧線，此即磁力線。(第四十九圖)



第 四 十 九 圖

磁力線亦為代表磁場內磁力之矢線。設置 1 單位 n 極於磁場內，則必遵磁力線方向而移動，故凡磁場內磁力線之方向皆自 N 極向 S 極。誠以一磁鐵分割數段(第五十圖)則見割斷處皆有磁力線相連。故磁力線實為並無起迄之連續環線，吾人可視為自 N 極發出，經外面磁場而入 S 極，復經磁鐵內部而回至 N 極而完成一通路。其磁鐵未割斷前，中部所以不顯磁性者，因磁力線均在磁鐵內部成通路，不散於外之故。



第 五 十 圖

(五〇) 磁力線密度

磁場為磁力線所及之域。磁場之垂直截面內每單位面積即一平方公分 ($Sq\ cm$) 所通過之磁力線數是為磁力線密度 (Flux density)

任何面積所通過之磁力線總數是為磁束或磁力線管

Total lines or tubes of force, or flux), 以 ϕ 爲代表。磁場內磁力線之稀密，即表示磁場之強弱，故磁力線密度可以磁場強弱爲計。例如設某處磁場強度爲 H 高斯，即指該處與磁場成垂直之單位面積（即 1 平方公分 Sq cm）內所通過 H 磁力線。若此垂直截面內磁力線密度處處相等，則通過面積 A 之磁束 ϕ ，磁束單位爲馬，（1 馬 = 1 單位磁力線）爲

$$\phi = HA \text{ 馬 (maxwell)} \quad \text{公式 15a.}$$

(五一) 磁極之磁力線數

欲求磁極 m 所發出之磁力線數，須假設 m 爲不受附近磁極影響之獨立磁極。此時其磁力線必均勻四射。凡以 m 爲圓心之球面內磁力線強度得處處相等，其值爲

$$H = \frac{m}{d^2} \text{ 高斯。因 } m \text{ 所放射之磁力線總數，即等於此}$$

$$\text{球面所通過之磁束，故 } \phi \text{ 爲 } \phi = HA = \frac{m}{d^2} \times 4\pi d^2 = 4\pi m$$

公式 16a

若 $m = 1$ ，則 $\phi = 4\pi$ ，故

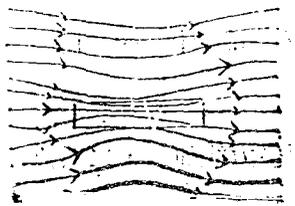
高斯定律 (Gauss's law) 曰凡單位 n 極必發出 4π 磁力線，而任何磁極所放射之磁力線總數或磁束，必等於其

磁極強度之 4π 倍。公式爲

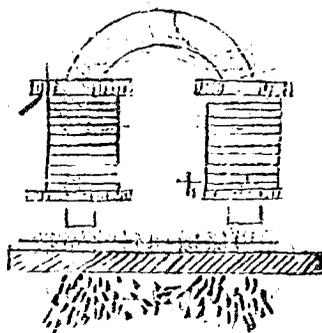
$$\phi = 4\pi m \quad \text{公式 16 b}$$

(五二) 鋼鉄之磁導與磁屏

磁力綫能通過任何非磁質。無異於通過真空或空氣。即磁力能透過任何非磁質以感應鋼鉄。磁力綫對於鋼鉄尤易通過。設置鉄片於磁場內(第五十一圖)，則其四周鄰近之磁力綫亦取道於鉄片，使鉄片內磁力綫加密而其附近則減稀。此種現象是謂磁導 (magnetic permeance)。鋼鉄能磁導，故若以鉄片跨接磁鉄兩極，則磁力綫均由鉄片內通過不散於外。若磁鉄之磁力綫完全取道鉄片以成通路，則磁鉄分子之行列可保固定，磁性即不易消失。一般馬蹄形磁鉄之取鉄片加其兩極，即此之故，此項鉄片名曰保磁

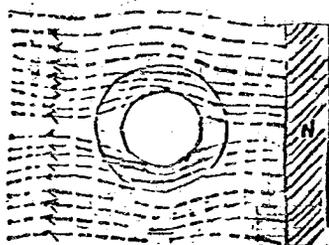


第 五 十 一 圖

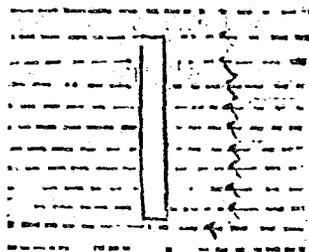


第 五 十 二 圖

鋼鉄既能導磁，亦能隔離磁力。馬蹄形磁鉄加保磁子後，磁力即爲鉄片隔離不能及外，是爲磁屏 (magnetic Shielding)。設置玻璃片於磁極前而取鉄屑近之，鉄屑仍能被吸而粘於玻璃片(第五十二圖)。再於玻璃片與磁極間插入一甚薄之 A 板，此 A 板如仍爲玻璃木材等非磁質，則鉄屑毫不受其影響。若 A 板易爲鉄片等磁質，則鉄屑立即下落盡淨。如將鋼鉄製一鉄箱或鉄球，則任何磁力均不能進入鉄箱或鉄球之內部(第五十三圖)。如取鉄板置於均勻磁場內，若板面垂直於磁力綫(第五十四圖)，則其磁導與磁屏之作用均極微弱無異爲非磁質。



第五十三圖



第五十四圖

(五三)磁導係數與磁納係數

鋼鉄在磁場內一因導磁作用而磁力綫加密，二因感應磁化作用而磁力綫愈強，凡鋼鉄內部之磁力綫密度 (Flux density) 名曰磁感應強度 (magnetic induction)，以 B

代表之，鋼鉄所在點之原有磁場強度(magnetic intensity)，名曰磁化力，(magnetising force)，以 H 代表之，鋼鉄之感應強度與其磁化力相比之倍數名曰磁導係數 (magnetic Permeability) 亦即物質對於磁之傳導率，設某種鋼鉄在 H 高斯磁場內發生 B 高斯之感應強度，則此時鋼鉄之磁導係數為

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{公式 17}$$

式中 μ 代表磁導係數，凡磁化愈易之物質，在一定感應磁場內，所感應之磁性強度必愈大。空氣或真空與其他非磁質之磁導係數均為 1。磁質之磁導係數均大於 1 或數千百倍於 1。反磁質之磁導係數均小於 1。普通所用之鑄鉄 μ 約為 240，軟鉄約為 600，鑄鋼約為 3550，軟鋼約為 14800

設磁場在空氣中之分佈均勻，每單位面 (1sq,cm) 之磁力綫為 B ，而與磁場垂直之面積為 A 平方公分，則此面積之磁力綫總數或磁束為 $B \times A$ ，故

$$\phi = B A \quad \text{公式 15 b}$$

由公式 17 知 $\mu = \frac{B}{H}$ ，故 $B = \mu H$ ，

$$\phi = \mu H A \quad \text{公式 15 c}$$

一物質在任何一點所受磁化強度 (Intensity of ma-

netisation) I 與磁場強度 H 之比，是為該物質之磁納係數 (magnetic susceptibility) k ，即：

$$k = \frac{I}{H} \quad \text{公式 17b}$$

由於高斯定律凡單位 n 極必發出 4π 磁力綫，則 $4\pi kI$ 乘磁化強度 I ，再加原有之磁場強度 H ，即為感應強度 B 。公式為

$$B = H + 4\pi I \quad \text{公式 17c}$$

$$\begin{aligned} &= H + 4\pi k H \\ &= H (1 + 4\pi k) \end{aligned}$$

由此可知磁導係數與磁納係數之關係為

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{H(1+4\pi k)}{H} = 1+4\pi k$$

$$k = \frac{I}{H} = \frac{\mu-1}{4\pi}$$

(五四) 磁動率

設在均勻磁場中，放一長 l ，截面積為 S 之細長圓筒形磁性體，其軸綫與磁場方向平行，由感應作用，在磁性體兩端生出一 m 及一 m 之極，此項磁性強度 m ，與其長度 l 之乘積 ml ，稱為因磁性體之感應而生之磁鐵之磁動率 (magnetic moment) μ 。但磁量 m 則與磁性體之截面積 S ，及磁化強度 I 之積乘 IS 相等。故若

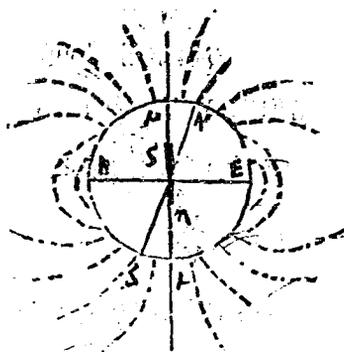
將上述之磁性體，放在單位強度之磁場內，俾與磁場成爲垂直，此時當受 ml 之力偶作用 (Couple) 而起轉動。故有磁動率之稱。通常即以 M 表磁動率，故 $M = ml = ISV$ \equiv IV 式中之 V ，表 SI ，即磁性體之體積 (Volume) 故

$$I = \frac{M}{V}$$

即磁化強度 I ，等於單位體積所有之磁動率。

(五五) 地磁 (Terrestrial magnetism)

1600 年電磁學鼻祖英人吉柏 (Gilbert) 始設想地球爲一大磁鐵。由磁針指北指南之現象，與異極相吸之規則，可以斷定地磁之 N 極，必在地理上南極附近，而 S 極則在北極附近。1831 年與 1841 年探險家英人洛司叔姪 (John Ross, James Ross) 相繼發現地磁兩極之所在點。乃叔於 1881 年發現 S 極在加拿大之波細亞半島近傍，北緯 $70^{\circ}5'$ 西經 $96^{\circ}46'$ 。乃姪於 1841 年發現 N 極在新西蘭島之南，南緯 $72^{\circ}7'$ 東經 156° 。兩極位置逐年微有移動，並不固定。第五十五圖所示地磁兩極位置及其磁力綫之大概。



第 五 十 五 圖

地球何以有磁性，現在尙無定論，似原因複雜，不正一端。地殼以內雖或富有磁質，然溫度高逾尋常，分子不易成相當行列，以生極強磁性。表面地層之磁質，僅足使地面上磁場局部的改變方向與強度，亦非地磁之主體，最合理之原因，似為地面與空中所荷電量隨地旋轉之作用，然亦未易證明。

(五六)地磁三要素

能迴繞直立軸旋轉之磁針名曰羅盤針，能迴繞水平軸旋轉之磁針名曰磁傾針 (Dipping needle)。地磁兩極位置，不與地理上兩極相符，故羅盤針在地面上各處，實非正指南北，羅盤針偏出於地理上子午綫 (Meridian) 之角

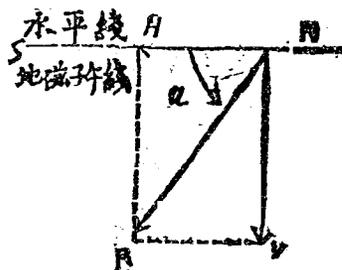
度名曰磁偏角 (Magnetic declination) (第五十六圖) 除地磁赤道附近外，地面上磁力綫均不與水平綫平行，故磁傾針不能靜止於水平綫位置。磁傾針自水平綫傾斜之角度名曰磁傾角 (Magnetic dip) (第五十七圖)。在南半球， n 極向上斜，磁傾角爲正。在北半球， n 極向下傾，磁傾角爲負。地磁有磁傾角，故加於羅盤針兩端之有效強度，實爲地磁強度之水平分力。磁偏角磁傾角，與水平分力，(Horizontal Component) 稱爲地磁之三要索。蓋知斯三者，則地磁之強度與方向瞭如指掌矣。



第五十六圖



第五十七圖



第 五 十 八 圖

第五十八圖所示地磁強度 R ，水平分力 H ，垂直分力 V ，與磁傾角 a 四項之互相關係。以算式表之為

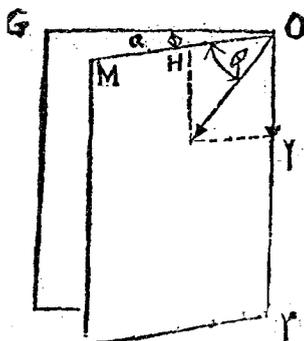
$$H = R \cos a$$

$$V = R \sin a$$

在地磁赤道附近，磁傾角為零。愈近兩極，磁傾角愈大。在兩極附近，磁傾角為直角，愈近兩極，地磁強度愈強，而其水平分力則愈弱。在兩極附近，地磁最強，水平分力為零，羅盤失其效用。在地磁赤道附近，地磁最弱而水平分力為最大。

地磁三要素之定義可規定如下：(1) 磁偏角係地球上之地磁子午綫 (magnetic meridian) 與地理子午綫 (Geographic meridian) 間之角度，如其偏向東方則取正號，

偏向西方則取負號，故其範圍在於零度與正 180° 及零度與負 180° 之間。(2) 磁傾角為磁針之方向與水平面間之角度，故在地球之磁極上，磁針現垂直方向，故其磁傾角等於 90° 。在赤道上，磁針停止於水平方向，故其磁偏角等於零。(3) 水平分力為地磁強度加於磁針兩端之水平強度。在地球磁極上，磁針現垂直位置，故其處之水平分力為零。在地磁赤道上，磁針在水平方向上，可取任意位置，故此處之水平分力為最大。最簡單之圖解如第五十九圖所示，為此三要素之相互關係。圖中 $G O Y$ 為一垂直平面，表示地理上子午綫面， $M O Y$ 表示地磁子午綫面， $O I$ 表示地磁之磁場方向及其強度，位置即在於 $M O Y$ 平面內， a 角表示磁偏角， θ 角表示磁傾角， $O H$ 表示地磁之水平分力， $O V$ 表示其垂直分力 (Vertical Component)， O 表示觀測地點。



第 五 十 九 圖

(五七) 磁暴

磁暴 (magnetic Storms) 為地磁之激烈變化，或非常之變化。其顯著之現象為水平分力及磁偏角靜止之磁針，突然發生劇烈之振動，且漫無一定之方向，此項現象謂之暴磁，其經過時間通常均極短，曾有一次最長者達二小時。磁暴中變化最大者為水平分力，磁偏角之變化不多。磁暴在晝間所發生者較夜間為強烈，惟發生次數在正午時為最少，晚間為最多。一年之間，二月與十月佔最多數，六月與十二月佔最少數。據觀測結果，磁暴發生之次數與太陽黑點 (Sunspot) 週率之變化，大致成並行。磁暴之發生一般科學家有認為係電子自太陽飛來，經過空氣而入

地，因此空間有電子流動，根據電子學說，其間即發生電流，於是感應地磁，而擾動磁針，此說頗為有力。

(五八) 均勻磁場之轉矩

地磁兩極相距千百萬里，故磁力幾在我人所處之地面上均相平行而密度相等，是為均勻磁場。其方向雖並非與地面平行，然磁針或直條形磁鐵多附於水平面內轉動，兩端所受之有效磁力實為地磁水平分力之作用，故實用上地磁場內磁力綫可視為與地面平行，而以水平分力為其強度。今設以一直條形磁鐵之磁極強度為 m ，兩極間長度為 l 公分，則兩極所受之磁力均為 $F = Hm$ 達因。此二力相等相平行而方向相反（第六十圖），造成一力偶 (Couple) 驅使直條形磁鐵循中心點而旋轉。直條磁鐵旋轉之效果視此力偶之轉矩 (Torque) 大小為斷。磁場長度垂直於磁力綫時（第六十圖），轉矩最大，其值為

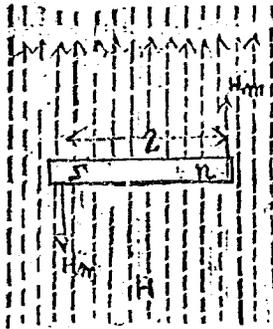
$$T = Fl = Hml \quad \text{達因公分 (dyne Cm)}$$

直條形磁鐵長度與磁力綫相交成 θ 角時（第六十一圖），轉矩為

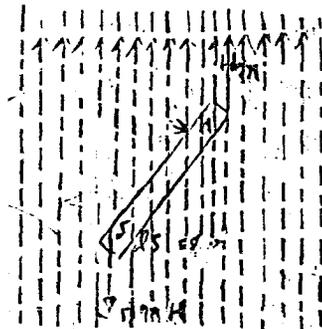
$$T = Fl \sin \theta = Hml \sin \theta \quad \text{達因公分}$$

若直條形磁鐵長度與磁力綫平行（第六十二圖），則轉矩為零。故凡磁針或直條形磁鐵最後必靜止於與磁力綫

平行之位置。由此即可證明磁針在靜止時必永指南北方向也。



第六十圖



第六十一圖

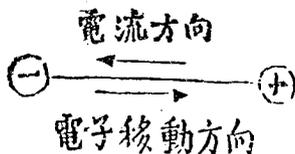


第六十二圖

第七章 電流與電池

(五九) 電流及其強度

電子之移動名曰電流。電流雖實為陰電子之移動，然其方向則沿撥舊說仍從陽電量移動之方向（第六十三圖）。



第六十三圖

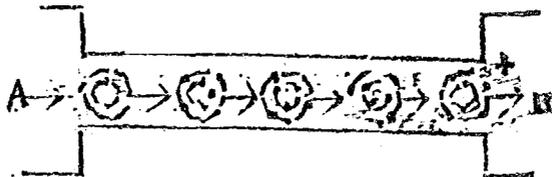
導體垂直截面內每秒所通過之電量名曰電流強度。其實用單位名曰安培（Ampere），1安培為每秒通過1庫侖電量之電流強度，設 t 秒內導體截面所通過之電量為 Q 庫侖，則其電流強度之平均值為

$$I = \frac{Q}{t} \text{ 安培} \quad \text{公式18}$$

電流強度亦簡稱為電流。故電流一名有二義：（1）泛指電子或電量之移動，如言電燈發光對燈絲上有電流，是僅指燈絲上有電子移動而已。（2）說明電量移動之強度，如言燈絲上電流為 I 安培，則對僅指電子移動，且說明移動之強度矣。

(六〇) 電流之傳達

電位差爲電子移動之原因。導體上任何二點間若有電位差，其間卽有若干電子被驅而移動。因原子之阻礙，故電子移動之速度至爲遲緩，雖被驅於極高電位差，亦不過每分鐘移過數寸而已。然我人習見電廠輸送電燈內電流，有遠至數十里者，有綫電通信之路程更有遠至數千里者。皆祇須接上電鍵，其電流卽送達，不隔瞬息之時間。其故蓋緣所傳達者爲電子之移動，而非移動之電子。例如第六十四圖，導體上 AB 二點若有電位差，其間各原子卽同時受到一種勢力，驅使若干活動電子，脫離其原隸原子，而向高電位移動。此種勢力實爲前後原子互相逼迫拉引，以求中和平衡之力，可見前後原子內同時移動之電子數必相等。故凡導體上有電流時，移動者爲電子或電量而非電流，電流則沿導體長度處處同時發生，且強度相等。



第 六 十 四 圖

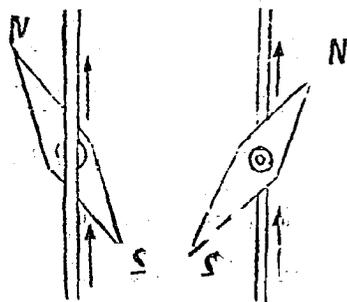
(六一) 歐姆定律

導體內部原子對於電子移動之阻力名曰電阻。各導體之電阻，視導體之形狀大小，及其原子之性質結構而異。就一固定導體言，則其電阻爲一常數，不隨電位差之大小，或電流之強弱而變遷。凡導體上電流之強弱，依其兩端電位差爲正比，而依其電阻爲反比。此規則爲1826年德人歐姆(ohm)所發明，故稱曰歐姆定律(Ohm's law)。電阻之實用單位即名曰歐姆。1歐姆爲導體在1伏特電位差間發生1安培電流之電阻。故若導體之電阻，爲R歐姆，其兩端間電位差爲V伏特，則導體上電流之強度爲。

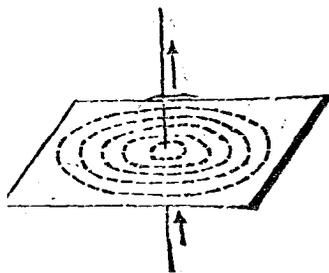
$$I = \frac{V}{R} \text{ 安培} \quad \text{公式19a}$$

(六二)電流之磁力

電流有磁力之現象爲1819年丹麥人奧斯特所發明(第六十五圖)。架一水平導綫與一磁針相平行。若綫上無電流，則磁針不論在綫上或綫下，皆靜止於與綫平行之位置。若綫上發生向北之電流，則磁針立即偏斜如圖。若電流方向易爲向南，則磁針偏斜方向相反。若設計用一磁鐵以抵消地磁之磁力，則磁針必靜止於與電位成直角之位置。



第 六 十 五 圖



第 六 十 六 圖



第 六 十 七 圖



第 六 十 八 圖



第 六 十 九 圖

用鉄屑實驗，可視電流之磁力綫形象。若鄰近無其他磁力之影響，則電流之磁力綫，皆為垂直於電流，而以電流為圓心形成圓圈之磁力綫，曰同心圓(第六十六圖)。近電流處最密，較遠則漸稀。置小磁針於第六十六圖之紙板上

可測定磁力綫方向與電流方向之關係。以求此二項方向之簡捷法為安培右手定律(Ampere's Right hand rule)(第六十七圖)。若已知電流方向，則先展開右手拇指代表電流，而其他四指圍繞電流成圈。四指即為磁力綫方向。若已知磁力綫方向，則先以四指代表磁力綫圍繞電流，然後展開拇指。拇指所指即為電流方向。

(六三)圓電流之磁場

設曲導體為圓(第六十八圖)。則圓內磁力綫因相擠而加密，圓外磁力綫因張散而減稀，不復成圈繞電流之同心圓(第六十九圖)。宛如一圓磁殼(magnetic shell)，磁力

綫自圓之一面發出，經圓外空間而回進他面，磁力綫發出之面爲N極，磁力綫回進之面爲S極。若以絲綫懸之使能自由旋轉，則圓必轉動而靜止於N極向北，S極向南之位置。

1875年勞倫特製一膠木圓板。先擦以貓皮，而使環中心軸極速旋轉。板之前後面即發生二磁極，能吸動附近之磁針。板靜止時則毫無磁性。可見磁力並非電子所固有，而爲電子運動之徵象。分子未嘗有熱，分子運動乃表視爲熱。電子亦未嘗有磁力，電子運動乃表視爲磁力耳。

(六四) 電磁單位

電流既有磁力爲其徵象，故視察磁力之有無可知電流之存滅，比較磁力之大小，可計電流之強弱。根據電流磁力以規定之各項單位，名曰電磁單位，其定義列舉如下：

(a) 電流 設兩導綫爲半徑1公分之圓，若每公分弧綫上電流能使其間心發生1高斯磁場強度（即全圓周能使圓心發生 2π 高斯之磁場強度），則此導綫上電流之強度爲1

電磁單位。爲應用便利起見，以1電磁單位電流之 $\frac{1}{10}$

爲實用單位，而名之曰安培。故

$$1 \text{ 安培} = \frac{1}{10} \text{ 電磁單位電流}$$

(b) 電量 若導體載 1 電磁單位電流，則導體截面每秒所通過之電量為 1 電磁單位電量。因 1 庫侖為導體載一安培電流時導體截面每秒所通過之電量，故

$$1 \text{ 庫侖} = \frac{1}{10} \text{ 電磁單位電量}$$

(c) 電位差 若 1 電磁單位電量自 A 點移至 B 點之工作為 1 爾格，則 A B 二點之電位差為 1 電磁單位電位差。因 1 庫侖電量自 A 點移至 B 點之工作若為 1 焦爾，則 A B 二點之電位差為 1 伏特，故

$$1 \text{ 伏特} = 10^9 \text{ 電磁單位電位差}$$

(d) 電阻 若導體在 1 電磁單位電位差間發生 1 電磁單位電流，則此導體之電阻為 1 電磁單位電阻，因 1 歐姆為導體在 1 伏特電位差間發生 1 安培電流之電阻，故

$$1 \text{ 歐姆} = 10^9 \text{ 電磁單位電阻}$$

(六五) 電磁單位與靜電單位之關係

1862 年英人馬克士威發明光為電波 (Electric wave) 之一種，溝通電與光之關係。同時馬克士威 (maxwell) 斷定 1 靜電單位電量，依光波速度移動之效果，必等於 1 電磁

單位電流。是已由學理論定1電磁單位電量，與1靜電單位電量之比等於光速。其後各科學家經無數實驗，均證明此說不謬。故

$$\frac{1\text{電磁單位電量}}{1\text{靜電單位電量}} = 3 \times 10^{10}$$

$$\text{即} 1\text{電磁單位電量} = 3 \times 10^{10}\text{靜電單位電量}$$

$$1\text{庫侖} = \frac{1}{10} \text{電磁單位電量}$$

$$1\text{庫侖} = 3 \times 10^9 \text{靜電單位電量}$$

(六六)電壓

電位差為電流之原動力。尋常荷電體電位，均隨電量移動而趨於平衡，故電流延時甚暫，電容器雖蓄電較多，電位差較高，若以之放電，亦僅見火花一閃，表示電流存在時間亦異常短促。此轉瞬即滅之電流，不適於工業上需要。欲得繼續不綴之電流，須設法保持電位差不隨電量移動而變更。自來水廠用以保持水位高度之原動力，為抽水機之壓力，故凡保持電位差之原動力名曰電壓。電壓之大小，即從其保持之電位差為計。產生電壓之方法大別有二：

1) 異類導體之接觸；(2) 電磁感應，由電磁感應以得電壓之機械，為電磁發電機。由異導體相接觸以得電壓之機

械有電池(cell)熱電偶(Thermocouple)二種。

(六七)接觸電壓(contact e.m.f.)與伏打規則

(Volta's law)

接觸電壓之原理可以電子說爲解。金屬分子皆易失電子，然就各種金屬而論，亦有難易之別。二金屬相觸，失電子較易者，必損失電子而生正電位，失電子較難者，必增得電子而生負電位。生正電位後必反抗電子之脫離，生負電位後必反抗電子之加入，故二金屬之電位差必增至電子移動形勢平衡而固定。此固定電位差，僅由二金屬接觸所發生，故名曰接觸電壓，因先有接觸電壓之發明，後遂有電池之構成。

伏打規則係伏打依據實驗結果，對於接觸電壓，定如下之定義：

(1) 接觸電壓之大小，視接觸之物質，及接觸點之溫度而異，與接觸面積之廣狹，及接觸時間之久暫無涉

(2) 各種金屬分子失去電子之難易程度有一定次序如下：

鋅，鉛，錫，鐵，銅，金，碳。任何二金屬相觸，序次在前者，失電子較易而生正電位，序次在後者，失電子較難而生負電位。由此規則可定接觸電壓之方向。

(3) 若以上列次序內，每二金屬相觸，而比較其電壓大小，則結果如下：

鋅，鉛 = 5

鉛，錫 = 1

錫，鐵 = 3

鐵，銅 = 2

銅，銀 = 1

鋅，銀 = 12

錫，銅 = 5

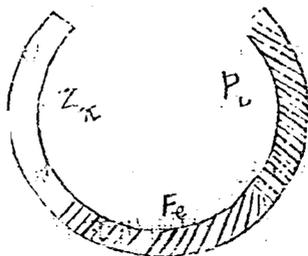
鋅，鐵 = 9

由是可見任何二金屬之接觸電壓等於介在該二金屬間每二金屬之接觸電壓之和，即

錫，銅 = 錫，鐵 + 鐵，銅

鋅，鐵 = 鋅，鉛 + 鉛，錫 + 錫，鐵

(4) 若鋅，鐵，鉛三金屬連續接觸，(第七十圖)則



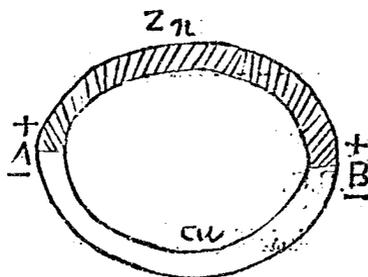
第 七 十 圖

鋅，鉄 = 9

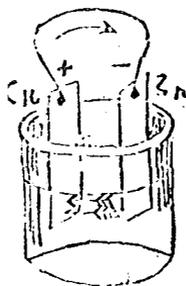
鉛，鉄 = 4

鉄，鉛 = 4

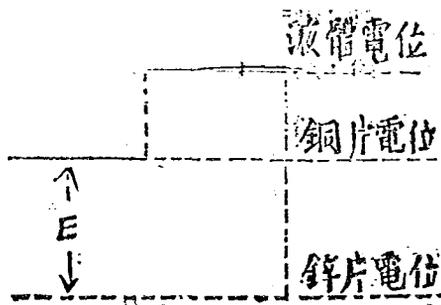
鋅，鉄，鉛 = 鋅，鉄 + 鉄，鉛 = 5 = 鋅，鉛



第 七 十 一



第 七 十 二 圖



第七十三圖

同理， $A, B, C, \dots, N = A, N$

由是可見凡二種以上金屬連續接觸，其兩端金屬片間之總電壓，即等於該二金屬單獨相觸之電壓。

(六七) 伏打電池 (Voltaic cell)

二金屬相觸而生接觸電壓，已如上述。此電壓猶不能直接利用以得電流，例如第七十一圖。銅鋅二片之A端相觸，銅鋅間發生鋅高於銅之電壓。若再以其B端相觸，則銅鋅間又生一同樣電壓。二電壓相等而相抗，結果電壓為零，電流自無由發生。若連接二種以上金屬成通路，則最後接觸點所生之電壓，亦與所接二金屬之原有電壓相等相抗，故不論以若干金屬連續接觸成通路，其結果電壓皆為零，皆不能發生電流。金屬與酸類 (Acid)，鹽類 (Salt) 或鹼基 (Base) 之水溶液 (Water solution) 相觸，則除因

電子自由移動而生接觸電壓外，復因物質間化合作用，而生更顯著之電位差。故連續數種金屬與此液體成通路，則結果電壓不復爲零，而等於由化合作用所生之結果電位差，電池之構造卽基此理

銅銻二片浸於稀硫酸內(第七十二圖)卽成一最簡單之電池名曰伏打電池(Voltaic cell)。銅在液體內與負游子(SO_4)起化合作用，銅分子挾陽電量而溶入液體，使銅生負電位，而液體生正電位，卽銅與液體間發生液體高於銅之電位差。此電位差增至與化學親和力(Chemical affinity)平衡而固定。銻在液體內亦然。因 SO_4 對於銅之親和作用弱，而對於銻之親和作用強，故銻片電位較銅尤低(第七十三圖)，卽銅銻間發生銅高於銻之電位差。銅片電位較高名曰正極，銻片電位較低，名曰負極

若以導線連接兩極，使與液體相連續成通路。此通路內所有因電子自由移動而發生之接觸電壓，其和爲零。祇餘兩極間化合作用所生之電位差，爲其結果電壓。故導線上發生自銅向銻之電流。同時電池內部因維持化合力與電位差相平衡，而呈下列五項現象：(1)液體內發生正負游子之對流，其效果等於自銻向銅之電流。此電流與導線上電流同時發生，且強度相等。(2)銻片爲游子 SO_4 所親和，遂漸

消蝕而沉澱為硫酸鋅 $ZnSO_4$ 。(8) 銅片與液體接觸之表面發現氫泡，減小接觸面積，而增加通路內電阻，使電流漸弱，此現象名曰電池之極化 (Polarisation) (4) 液體因失去硫酸分子而漸稀。(5) 銅鋅間電位差維持固定，不因電量移動，或電流強弱而有所變更。此固定電位差名曰電池之原生電壓 (Electromotive-force) 伏打電池之原生電壓約為 1 伏特。自伏打氏以後各種實用電池相繼發明。其構造原理皆同，所異者在如何防避極化及其他弊病，以增高電池之效用而已。

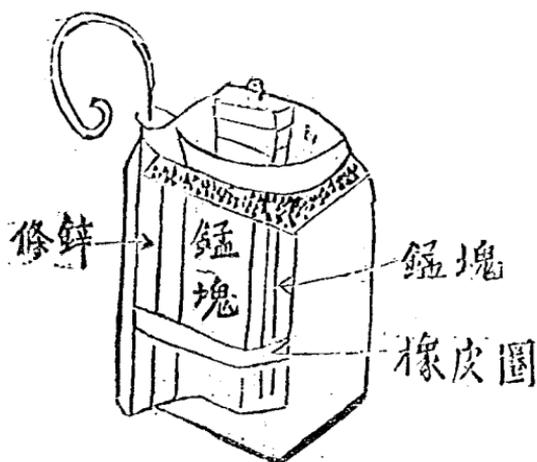
(六八) 蘭氏電池 (Leclanche cell)

電池之種類甚多，以上所述之伏打電池，不能實用。昔日我國電報局應用最廣者，名曰蘭氏電池，乃於 1866 年為法國東方鐵路公司職員蘭克電治氏 (Leclanche) 所發明者。

蘭氏電池內：以鋅為正電板，炭精為負電板。彼之去極劑 (Depolarizer) 即去除此種極化之藥品，為二氧化錳 (MnO_2)，簡稱曰錳。錳為含養極多之礦物，能與附着於炭板上之輕氣化合，而變成水 (H_2O)。用於電池內之錳，須用粗粒者，即以似粉末之細粒，以篩篩去，且和以等量之炭屑。以利通電。

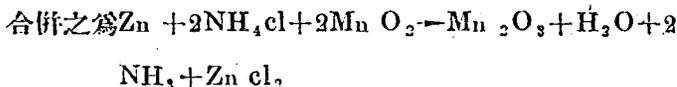
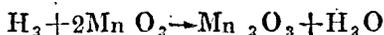
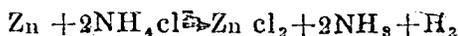
以二養化錳，和以酒精，洋乾漆 (shellac 又名舍來克，係黃色片狀物，和以酒精即溶化) 用水力壓榨器，壓成塊狀物，名曰錳塊。

蘭氏電池之構造法，即以圓口方玻璃瓶一，滿貯鹽腦水，中置錳塊二枚，以橡皮圈綁縛於炭精板兩旁，復插鋅條一根，放於有鹽腦水之玻璃瓶內，即成蘭氏錳塊式電池 (第七十四圖) 此種電池有下列三優點，(1) 內部阻力 (Internal Resistance) 較舊式減小。(2) 二養化錳避免極化可儘量利用。(3) 一經裝就，立即可以發電。



第 七 十 四 圖

蘭氏電池之化學作用如下列化學方程式：



以上之化學方程式，即鋅條與炭精板，於電池外面，爲任何導體聯結後，所起之化學作用；鋅爲鹽腦水內之綠氣所攻擊，成爲綠化鋅（ ZnCl_2 ）溶解於水內，或於鋅條上結成不透明之白塊狀物。鹽腦之成分除綠氣外，尚有銻（ NH_4 ）當銻發散時，爲二養化錳內之養氣所化，即成水與阿摩尼亞二物（阿摩尼亞 Ammonia NH_3 ，乃一種有刺激性之氣體，能清醒神經，）因此簡單之化學作用，電池之極化可完全避免，因輕氣之一部份變成水，另一部份變成阿摩尼亞氣體，發散於空氣中，故電流之力量可始終如一。結果能造成綠化鋅，阿摩尼亞水，並將二養化錳漸變成三養化錳（Sesquioxide）（ Mn_2O_3 ）

（六九）蘭氏電池之裝置與管理

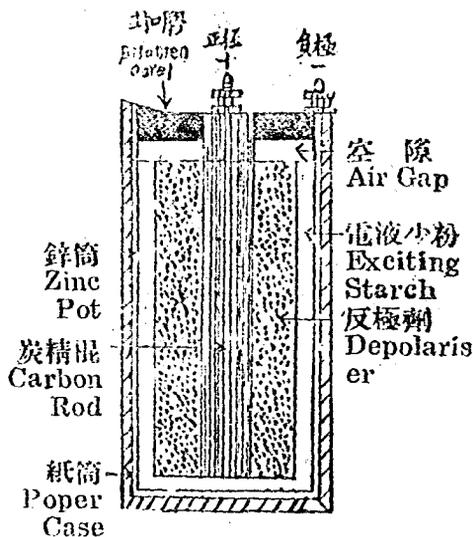
每一電池約須鹽腦五兩。先將鹽腦放入瓶內，再加清水，至玻璃瓶一半高度，至鹽腦完全溶化後，再將鋅條，炭精板，錫塊等（俗稱電池心子）放入瓶中，若一時不易知曉每只電池應需鹽腦之正確重量，可用半飽和鹽腦水，其法

用小缸一，盛清水半缸，將鹽腦漸漸加入，同時用竹桿攪和，至白色鹽腦沉澱缸底，不能再溶化爲止，即成飽和溶液。將飽和溶液用器量入另一缸內，再和以等分清水，即成半飽和溶液。電池內所用鹽腦水，最忌太濃，太濃則鋅條易被腐蝕，並在錳塊，炭精板，鋅條上結成鹽晶。電池裝就後，鹽腦水之高度，約佔全玻璃瓶之三分之二。鹽腦水須先灌入瓶中，再將電池心子加入。玻璃瓶外之鹽腦水宜揩拭乾淨，銅螺絲及接綫頭上，切不可沾濕，以免銅綠腐爛。如果瓶內鹽腦水日久減少，宜用清水補足，若混濁不清，須速更換。鋅條蝕去一半，錳塊凹凸不平，須易新者。炭精板如板上螺絲完整，接續處並不搖動，則永久可用，不必更換。電池心子上發現鹽腦結晶，宜速將心子取出，置於滿盛清水之木盆內溶去之。瓶口本塗黑漆或白蜡，如已脫落，宜用布蘸黃凡士林在瓶口內外揩拭一遍，以防鹽腦爬出。螺絲及接綫頭，須用砂紙摩擦清潔。電池櫃不可置於潮濕之處，櫃之四足，尤宜與地氣隔絕，蘭氏電池之電壓，新裝時，每只約1.45至1.50伏特。

(七〇) 乾電池(Dry cell)及其壽命與內阻

乾電池實即蘭氏電池變相，唯上所述之蘭氏電池內之鹽腦水乃純粹之流體，不便攜帶。乾電池內則將鹽腦水吸

收於蓋層或其他如棉花，吸水紙，麵粉，石膏粉，小粉，玉蜀黍粉等能吸水份之物質內，以代替純粹之流質，故名曰乾電池。(第七十五圖)



乾 電 池 之 剖 面

第 七 十 五 圖

乾電池之製造法，隨各製造廠商業秘密而微有出入，唯所用原料，大致相同。乾電池之外壳為鋅片製成，名曰鋅筒(面積較濕電瓶之鋅條為大)炭精棍置於鋅筒之中，故電池旁邊之螺絲為負極(Zinc terminal)，正中之螺絲為正極(Copper terminal)第七十五圖為乾電池之剖面圖，

正中爲炭精棍，四周爲去極劑以錳屑爲主體，中和以五與三之比之石墨粉（即鉛筆粉，此物濕電瓶內不用）以減少電池內之內部阻力。錳屑外面，爲鹽腦水所浸之棉花，或吸水紙，小粉，石膏粉等所製之糊狀物。再外爲鋅筒，鋅筒外塗一層白蜡，使與潮氣隔離，此外復套以浸蜡之紙筒。電池之上部有一空隙(Airgap)，乃阿母尼亞之儲藏所，空隙上面以火漆封口。此種封膠有紅黑二種，紅者以松香，白蜡，銀石膏粉加土紅所製。黑者以松香，柏油，磚灰所製。

乾電池之利益甚多，如不易破碎，便於攜帶，隨便放置，與不須裝配等，然亦有缺點，若放置不用，即漸漸自行損壞，於潮濕炎熱之氣候爲尤甚。原因爲內部漸漸乾燥，及內部物料發生變化。故最優良之乾電池，僅有二年之壽命。乾電池損壞後，亦能如濕電瓶，而加以洗換重裝。其法先將乾電池上之封口膠鑿去，加入半飽和鹽腦水，復將瓶外紙筒除去，用菜刀於鋅片筒上砍六七刀後，放入含有鹽腦水之玻璃瓶內即成。

乾電池之電壓，僅有1.5伏特。因彼之內部阻力甚小，故發出之電力較濕電池強。裝用新乾電池時，每只電池須接用2歐姆阻力綫一根。如不用阻力綫，須配用相當阻力

盒。若兩俱不用，則內阻力太小，發出電流太大，易將機件燒毀。

原電池之壽命

乾電池與濕電池皆曰原電池。每個原電池所能供給之最大電流，均有定值，不能超過。設有不慎，致電池荷載過量，則損壞隨之，每個電池之壽命與所供應之電流多寡有關，電流供應愈大，則壽命愈短。各電局所用乾電池多為英美製品，售價甚高，應用時尤不可不慎。普通所用之六英寸哥倫比亞(Columbia)鷹牌五號圓乾電，或永備(Everready)五號圓乾電其所供給之電流與其本身壽命之關係可以下表表出之：

供給電流 (Ampere)	$\frac{1}{4}$ 安培	$\frac{1}{9}$ 安培	$\frac{3}{4}$ 安培	1 安培
壽 命 (Hour)	100 小時	40 小時	19 小時	9 小時
容 量 (Ampere Hour)	25 安培時	20 安培時	14.2 安培時	9 安培時

普通雜牌乾電池及雷氏電池之工作壽命，約照上

波短百分之二十至四十。

原電池之試驗

我國電局所用之雷氏鎳塊式電池全新時之電壓 (Voltage) 當在 1.45 至 1.50 伏特之間。如少於 1.45 伏特即為裝置或配合不良，應即重新配合。雷氏電池應用相當時日後，發見其瓶中鹽腦水混濁不清時，應用電表加以測驗，如電壓低於一伏特或其內部阻力超過二歐姆時，該電池即已無用，必須換新者。雷氏電池全新時之內部阻力約在一至一歐姆半之間。

普通優良之乾電池全新時以 1.5 伏特之電壓為標準。美國貨上等乾電池全新時有高至 1.6 或 1.95 伏特者。乾電池之內部阻力甚低，全新者約在 .1 至 .7 歐姆，最上等者甚有僅達 0.05 歐姆者。如發見其電壓降至 1 伏特以下，或內部阻力增至二歐姆者，則該電瓶已不堪應用。

試驗電池有用安培表 (Ammeter) 者。此法甚易損傷電池非確具經驗者，以不用為妙。其法係用一阻力較低 (約為 0.01 歐姆) 之安培表，直接聯於電池之兩極，同時注意安培表之指示為若干安培，據普通所定標準六英寸之五號圓乾電及全新之雷氏電池，可有二十至三十安培。惟須十分注意者；此種短絡 (Short circuit) 之聯接時間不

能過久，當記數在一剎那間讀過後，應立即將導線拆開以免電瓶損壞。如電瓶用之已久，則因內部阻力增加，電壓降低，此項電流當必同時減少，如測得不到五安培電流時，則該電瓶即歸無用。

電池內部阻力之測算

電池內部阻力之測算方法雖有多種惟實用方面，須立刻測知其內阻力，毋需繁複之算式者，惟有利用電壓表 (Voltmeter) 之電位差 (Potential Difference) 的電壓表分流法 (Voltmeter Shunt method)，如上圖電池 B 之電動力 (E.M.F.) 為 30 伏特 (Volt)，倘接入一外阻力器 R 為 70 歐姆 (ohm) 再在 AB 兩點用電壓表測得其電位降 (potential Drop P.D.) 為 23 伏特，求其電池 B 之內部阻力

電池原生電壓或電動力 (E.M.F.) = 30 伏

(可用電壓表在電池兩端不接外阻力器測得之)。

電位降 (P.D.) = 23 伏特

(可接入 70 歐姆之外阻力器在 AB 兩點用電壓表測得之)

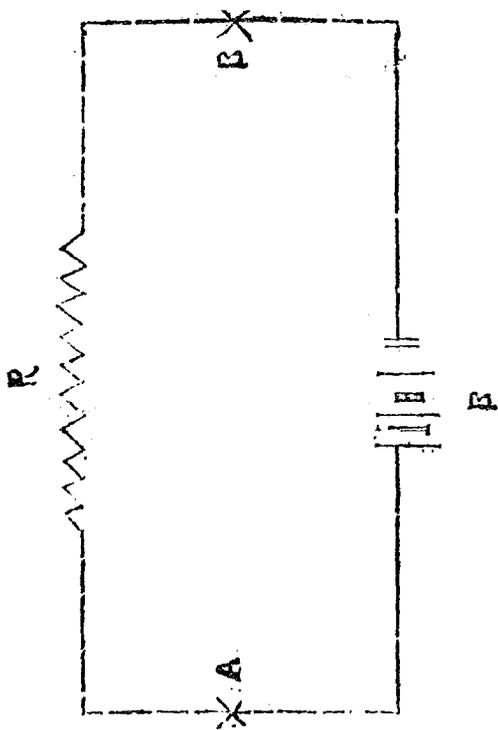


圖 六 十 七 第

電池內電動力(E.M.F.)之損失

$$= 30 - 23 = 7 \text{ 伏特}$$

由歐姆定律(Ohm's Law)可得下列比例：—

$$.23 : 7 :: 70 : \text{電池內部阻力}$$

$$\text{電池內部阻力} = \frac{7}{.23} \times 70 = 21.3 \text{ 歐姆}$$

從上述算法，可得下列計算電池內部阻力之最簡單公式：

$$r = S \times \frac{E - V}{V} \quad (\text{歐姆})$$

此間

r = 電池內部阻力單位為歐姆。

E = 電池電動力 (E. M. F.) 單位為伏特

V = 接入外阻力器後電壓表所示之電位降 (P. D.) 單位為伏特。

S = 接入外阻力器之電位單位為歐姆。

如以上述舉例代入公式即得

$$r = 70 \times \frac{30 - 23}{22} = 21.3 \text{ 歐姆}$$

我國電局所用之電壓表有丹麥製之圓形 0—100 伏特者其表之上部有一撒鈕，即備以測量電池之內阻力者。表內接入一個 500 歐姆並聯之分流阻力器，如將此撒鈕按下，此項 500 歐姆之並聯分流阻力器即行接入，電壓表之指針即能指示電位降之度數。在應用時另備一對照表，（見下列之表）即能一望而知其電池之內部阻力為若干。如用此電壓表測算電池之內部阻力，可以下列公式計算之：

$$r = 500 \times \frac{E - V}{V} \quad (\text{歐姆})$$

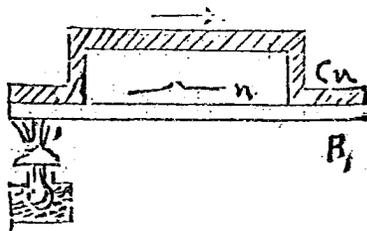
$r =$ 電池之內部阻力

$E =$ 用此電壓表未按揷鈕時所測得之電動力 (E.M.F.) 度數。

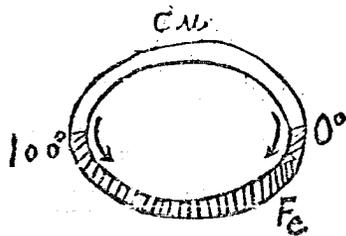
$V =$ 用此電壓表按下揷鈕時所測得之度數

$500 =$ 電壓表之分流電阻。

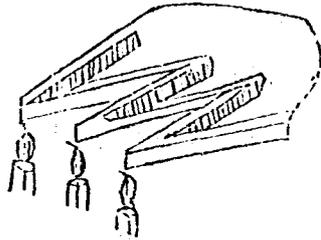
平時如備有下表，則不必再以上列公式計算，即可一望而知其內部阻力為若干。



第 七 十 七 圖



第 七 十 八 圖



第 七 十 九 圖

(七一) 熱電偶(Thermocouple)

接觸電壓之大小亦視溫度而異。故僅由二金屬連成之通路內，若二接觸點之溫度不同，則接觸電壓各異而結果電壓不等於零。此由熱生電之現象為 1826 年德人席貝克(Seebeck) 所發現，故今日猶稱為席貝克效應(Seebeck's effect)。席氏由磁針偏動而測見電流之發生，熱最初之實驗係用銅鐵二金屬加熱，中間置一磁針，即可察見磁針之偏動(第七十七圖)此種使磁針偏動之電壓電流係熱能所轉變，故名熱電壓及熱電流。用以發生熱電流之裝置名曰熱電偶(Thermocouple)。熱電偶之電壓異常微弱，例如銅鐵通路內(第七十八圖)若二接觸點溫度為 100° ，與 0° 則此熱電壓約為 0.001 伏特。串聯若干對金屬片而使其接觸點相間的處于高低溫度(第七十九圖)，則電壓雖可增高

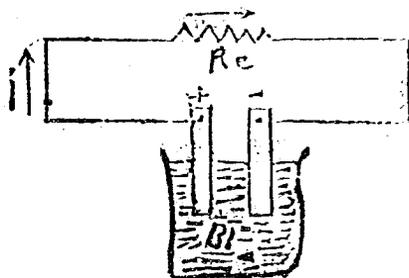
，然所增亦無幾，且裝設不便，故凡熱電偶尚不適於發電之用，其應用範圍祇及測量溫度表所不能測之極高及極低之溫度等類。

第八章 電路及電阻係數

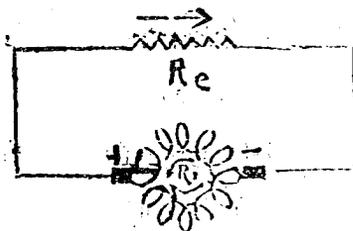
(七二)電路

電流所通過之綫路名曰電路 (Electric circuit)。凡線路必須聯接於電池，或電磁發電機之兩極間，始能發生繼續不絕之電流。電池內部為良導體的液體 (第七十九圖)，發電機內部為良導體的銅線，(第八十圖)。可見凡電路皆為若干導體循環啣接之合路。接於電池或發電機兩極外之電路稱曰外電路 (External circuit)，其電阻稱曰外電阻 (External resistance)。電池或發電機內部稱曰內電路 (Internal circuit) 其電阻稱曰內電阻 (Internal resistance)。外電路發生自正向負之電流，同時內電路亦生自負向正之電流以維持電壓之固定。全電路實同時發生強度相等而方向相同之電流，故各處皆始終未嘗有電子或電量之增減。電池與發電機之任務並非發出電子電量，而為維持電路內電子之移動，外電路與內電路連接成通路時，電路通而發生電流，稱曰通路。任何處中斷則電路斷而電流停止，稱曰斷路。我人恆用電鍵 (Switch) 以司電路之通斷。接上電鍵，即使其接觸點密接以通電路。解放電鍵

，即使其接觸點離開而斷電路。



第七十九圖



第八十圖

電路內電流之強度依電壓為正比與電阻為反比。設電壓為 E 伏特，電阻為 R 歐姆，則電流強度為

$$I = \frac{E}{R} \text{ 安培} \quad \text{公式19b}$$

是為歐姆定律。此定律律簡而用繁，用於計算亦似易而實難，稍不慎即致錯謬。欲免錯謬，第一須認清公式內 E 與 R 應相符合。若 E 為作用於全電路之電壓，則 R 應為全電路之電阻；若 E 僅為電路內一部份電阻，則 E 應為作

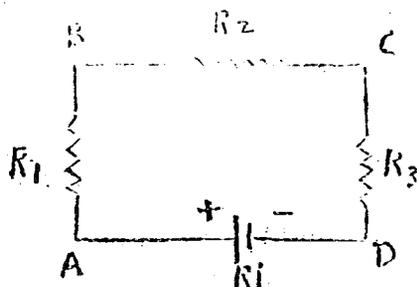
用於該部份之電壓。例如一電池之原生電壓為 E_0 ，接於其兩極間之外電阻為 R_0 ，通路時所生電流 I 為 $\frac{E_0}{R_0}$ ，蓋 E_0 為作於全電路之電壓，而 R_0 非全電路之電阻，不相符合也，若此電池之內電阻為 R_i ，則全電路電阻為 $R_0 + R_i$ ，是與 E_0 相符，故通路後電流強度為

$$I = \frac{E_0}{R_0 + R_i} = \frac{E_0}{R_0 + R_i}$$

(七三) 電位降 (Potential drop)

任何二點間無電位差則無電流。故電路內發生電流時，沿路電位必依電流方向逐漸降低。電流 I 通過電阻 R 所降低之電位，必等於 R 兩端之電位差，即

$$V = I R$$



第八十一圖

故沿路降低之電位名曰 IR 電降位。例如第八十一圖設電池正極 A 為電位最高點。自 A 至 B 電位降低 IR_1 ，

伏特。自 B 至 C，復降低 IR_2 伏特，自 C 至 D，復降低 IR_3 伏特。自 D 至 A，復降低 IR_i 伏特。全電路降低之電位 $\Sigma IR = I(R_o + R_i)$

因 $E_o = I(R_o + R_i)$

故 $E_o = \Sigma IR$

即電池或發電機之原生電壓，適等於全電路電位降之和。由是可見原生電壓，雖為作用於全電路之整個電壓，然其勢力實按電阻之大小分配於各段。每段所分配之電壓等於該段之 IR 電位降，即

$$E = IR$$

故若由歐姆定律以計算一部份電路之電流，則 E 須為分配於該部份之電壓， R 為該部份之電阻，而後 $I = \frac{E}{R}$

方為流過該部份之電流。

(七四) 內路電位降與路端電壓

電池或發電機輸出電流時，其內電路亦生自負向正之電流。內電路電流之作用，一方面維持原生電壓之固定，一方面反抗內電阻而發生 IR_i 電位降。故兩極間電位差必降低為 $E_o - IR_i$ 是即作用於外路之電壓。此由內路電位降所餘存於兩極間，而作用於外路之電壓名曰路端電壓

(Terminal Voltage) 其值為：

$$E^t = E^o - IR_i = IR_e$$

原生電壓為電池或發電機內部之電勢，其值固定而不必與兩極間電位差相等。路端電壓則常與兩極間電位差相等，其值視電池而異。輸出電流愈大，路端電壓愈低。斷路或無電流輸出時，原生電壓，兩極間電位差，外端電壓三者始均相等。

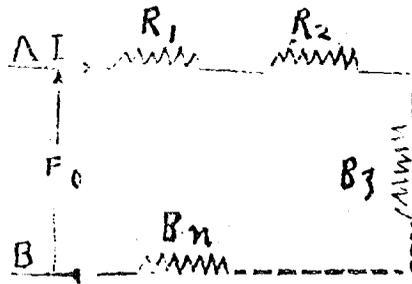
(七四) 綫路電位降與遠端電壓

在距離極近之電路內，自電池或發電機接至目的物之導線短，電阻極微，通電流時，線上電位降可置不論。若線路較遠，則導線長而電阻著。路端電壓須分配其一部份以使電流通過此顯著之電阻。即沿線發生顯著之電位降 IR^t 稱曰線路電位降 (Line drop) (IR^t) 故電路之遠端電壓 (Receiving end Voltage) (E^p) 即作用於目的物之電壓，不能等於路端電壓 (E^t) 之全部，而減低為

$$E^p = E^t - IR^t$$

(七五) 電阻之串聯與並聯

設將 n 導體首尾啣接通路時，通過各分段之電流相同名曰串聯。串聯電路之結果電阻為各分段電阻之和。其證如下：



第 八 十 二 圖

$$E_0 = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots + IR_n$$

$$\therefore \frac{E_0}{I} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

因 $\frac{E_0}{I} = R_0$ 為 AB 間結果電阻

$$\therefore R_0 = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad \text{公式 20a}$$

若各分枝電阻均相等，則結果電阻為每段電阻之 n 倍

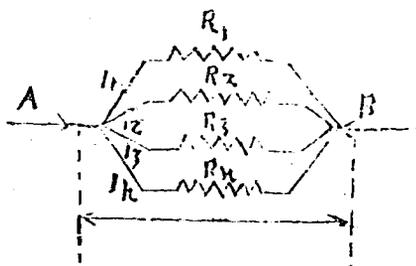
，即

$$R_0 = nR \quad \text{公式 20b}$$

n 導體之兩端各連為一，通路時作用於各分路之電壓相同，名曰並聯。並聯電路之結果電阻其倒數為各分路電阻倒數之和，其證如下。

$$I_0 = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$\text{即 } I_0 = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \frac{E}{R_3} + \dots + \frac{E}{R_n}$$



第八十三圖

$$\therefore \frac{I_0}{E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots + \frac{1}{R_n}$$

因 $\frac{E}{I_0} = R_0$ 為 AB 間結果電阻

$$\therefore \frac{I_0}{E_0} = \frac{1}{R_0}$$

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

公式 21 a

若各分路電阻均相等，則結果電阻為每分路電阻之

$$\frac{1}{n} \text{ 即}$$

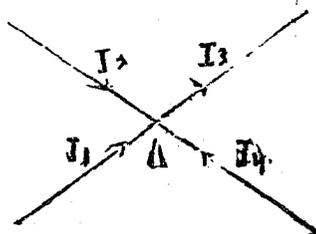
$$R_0 = \frac{R}{n} \quad \text{公式 21b}$$

故串聯之效果為增加電路內阻力，使電池或發電機輸出電流致弱。並聯之效果為減小電路內阻力。使電池或發

電機輸出電流較強。

(七六)克希荷夫定律 (Kirchhoff's law)

克希荷夫 (Kirchhoff) 就歐姆定律之理增列二式
為解繁復電路者開一捷徑，是為克希荷夫定律



第 八 十 四 圖

克希荷夫第一定律曰：於電路內任擇一點，流向此點
之電流，必與離開此點之電流相等

或假定流向此點之電流為正，離開此點之電流為負，
則各電流之代數和必為零。換言之：電路中諸導線之接點
，其電流之代數和必等於零，即

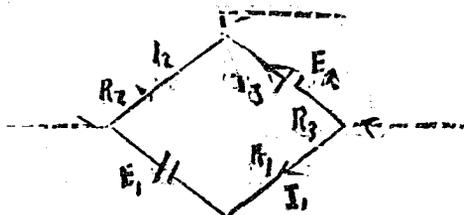
$$\sum I = 0$$

公式 22

例如(第八十四圖)電路內擇 A 點，則 $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$ 。

克希荷夫第二定律曰：於電路內任擇一通路，假定某
種方向 (順鐘或反鐘方向) 之電流電壓為正，相反方向之
電流電壓為負，則所有 IR 電位降之代數和必等於各原生

電壓 (E. M. F.) 之代數和 即



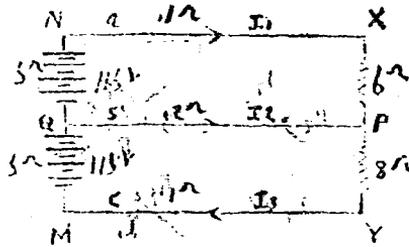
第八十五圖

$$\Sigma I R = \Sigma E_0 \quad \text{公式 23}$$

例如 (第八十五圖) 所示之通路內, $I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - E_2 = E_1 - E_2$ 。若通路內無原生電壓, 則 $I R$ 電位降之代數和為零。故其第二定律亦曰: 電路中任何連合通路中電位降落之代數和必等於零

引用克希荷夫定律以解電路問題時須先作圖代表電路全部。分別標明各電流電壓之方向。凡屬已知或能由推測以決定者固宜標明其正確方向。凡不能由推測以決定者, 亦可任意假設一方向暫記於圖。然後引用克希荷夫定律列出 n 式以解 n 未知數。解出結果後, 若電流電壓為負值, 即示其方向實與所假設者相反。其值則不謬, 故無煩重解
試舉例如下:

1. 今有蓄電池兩組, 接成三線制, 如圖所示。其負載 (load) 為 6 與 8 歐姆, 求 I_1, I_2, I_3 之電流



答：題中有三未知數立三個獨立方程式，始能解答。擇P點應用第一定律立一式，再就NXQP及MQPY兩環路內應用第二定律立二式，即得

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_1(0.5 + 0.1 + 6) - 0.2 I_2 = 115$$

$$0.2 I_2 + I_3(8 + 0.1 + 0.5) = 15$$

從以上三獨立方程式，用聯立方程式之解法，即求得
 $I_1 = 17.31$ 安培， $I_2 = -3.84$ 安培， $I_3 = 3.47$ 安培
 (I_2 得負號為 I_2 之電流與圖所假定者適相反)

其上述方程式亦可開列如下之三式，所得結果正相同

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$+115 - I_1(0.5 + 0.1 + 6) + 0.2 I_2 = 0$$

$$+115 - 0.2 I_2 - I_3(8 + 0.1 + 0.5) = 0$$

有時稍一疏忽，每易將方程式開成不能獨立之方程式而不能求得其結果，譬如誤就MQNXPY之環路，依

第二定律關係：

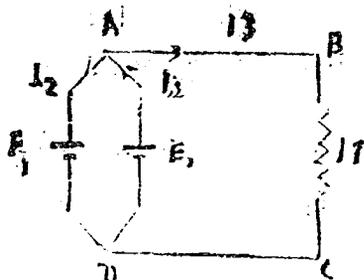
$$+115 - I_2(8 + 0.1 + 0.5) + 115 - I_1(0.5 + 0.1 + 6) = 0$$

以式並不能表示獨立關係，因將前式中之後兩式相加亦可得之。故開取方程式時應注意三端

(a) 應用第一及第二定律所立之方程式應等於電路未知數之數目。

(b) 應用第一定律在網格中各接點立式時，應找取關係獨立之式，而免去重復者

(c) 其餘必需之方程式應於各環路中依第二定律立式。每環路所佔通路，必有一新部分為已往立式環路中未曾包括或應用者。



2. 今有二不同電壓之電池相並聯而接於外電阻 \$R\$，其原生電壓 \$E_1 = 12\$ 伏特，內電阻為 \$0.5\$ 歐姆，\$E_2 = 10\$ 伏特，內電阻為 \$0.3\$ 歐姆，得外路電流 \$I_3 = 8\$ 安培。求 \$I_1\$

及 I_2 之電流各若干 (即電池 E_1 及 E_2 所輸送之電流各若干)? 路端電壓及外路電阻 R 之數值?

答: 在 A 點用第一定律得

$$I_1 + I_2 = 8$$

在 ABCDE₁ 環路, 用第二定律得

$$0.5 I_1 + 8 \cdot R = 12$$

在 ABCDE₂ 環路, 用第二定律得

$$0.3 I_2 + 8 R = 10$$

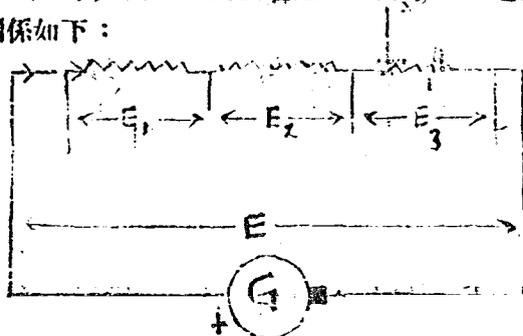
從以上三方程式, 即得 $I_1 = 5.5$ 安培, $I_2 = 2.5$ 安培

$R = 1.15$ 歐姆。路端電壓為 $I \times R = 8 \times 1.15 = 9.2$ 伏

特:

(七七) 簡易電路分解

(1) 串聯電路——凡兩個以上之電阻順次連接而完成一電路 (八十六圖), 則其電阻 R , 電壓 E , 電流 I 者之關係如下:

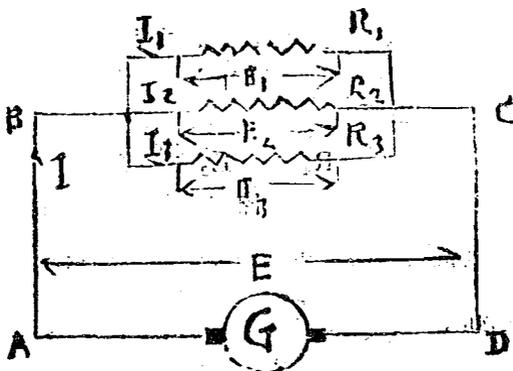


第 八 十 六 圖

電阻：串聯後之總電阻為各電阻之和，即

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3$$

電壓：串聯後之總電阻兩端所受之電壓，等於各電阻兩端所受電壓之和，即



第八十七圖

$$E_0 = E_1 + E_2 + E_3$$

電流：串聯電路經行各電阻內之電流，完全相等，即

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_3$$

(2) 並聯電路——凡兩個以上之電阻接成並列電路，(第八十七圖)則其電阻 R ，電壓 E ，電流 I 三者之關係如下：

電壓：各電阻兩端所受之電壓，等於其總線兩端所受之電壓，即

$$E_0 = E_1 + E_2 + E_3$$

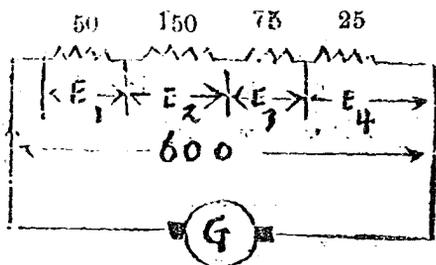
電流：總線上經行之電流，等於各電阻上經行之分電流之和，即

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3$$

電阻：並聯電阻為各電阻倒數之和之倒數；即

$$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

(3) 混聯電路——凡電路內之各電阻有串聯者亦有並聯者，是為混聯電路，可逐段分開照串聯及並聯方法分解之。舉例如下：



1. 設有電阻 R_1, R_2, R_3 及 R_4 互相串聯，總電阻兩端所受之電壓為 600 伏特，試求 (a) 總電阻，(b) 經過各電阻之電流，(c) 各電阻兩端所受之電壓？

答：(a) R_0 (總電阻) $= R_1 + R_2 + R_3 + R_4$

$$= 50 + 150 + 75 + 25 = 300 \text{ 歐姆}$$

$$(b) I_0 = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = \frac{E_0}{R_0} = \frac{600}{300} = 2$$

安培

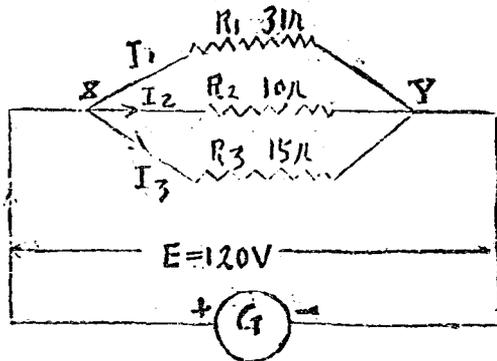
$$(c) E_1 = I_1 \times R_1 = 2 \times 50 = 100 \text{ 伏特}$$

$$E_2 = I_2 \times R_2 = 2 \times 150 = 300 \text{ 伏特}$$

$$E_3 = I_3 \times R_3 = 2 \times 75 = 150 \text{ 伏特}$$

$$E_4 = I_4 \times R_4 = 2 \times 25 = 50 \text{ 伏特}$$

2. 設有電阻 R_1, R_2, R_3 , 互相並聯, 總線兩端接 120 伏特發電機, 求 (a) 各電阻兩端所受之電壓, (b) 通過各電阻之電流, (c) 發電機輸出之總電流, (d) 總電阻。



答: (a) $E_0 = E_1 = E_2 = E_3$

$$E_1 = 120 \text{ 伏特}$$

$$E_2 = 120 \text{ 伏特}$$

$$E_0 = 120 \text{ 伏特}$$

$$(b) I_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{120}{5} = 24 \text{ 安培}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2} = \frac{120}{10} = 12 \text{ 安培}$$

$$I_3 = \frac{E_3}{R_3} = \frac{120}{15} = 8 \text{ 安培}$$

$$(c) I_0 = I_1 + I_2 + I_3 = 24 + 12 + 8 = 44 \text{ 安培}$$

$$(d) R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{15}}$$

$$= \frac{1}{\frac{6+3+2}{30}} = \frac{30}{11} = 2.73 \text{ 歐姆}$$

$$\text{或 } I_0 = \frac{E_0}{R_0} \quad R_0 = \frac{E_0}{I_0} = \frac{120}{44} =$$

2.73 歐姆

3. 設有電阻 R_2, R_3 並聯，再與電阻 R_1 直聯，求 (a) 總電阻，(b) 電池輸出總電流，(c) 各電阻兩端所受之電壓，(d) 通過各電阻之電流。

$$\text{答 (a) 總電阻 } R_0 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = 5 +$$

$$\frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{15}} = 5 + \frac{150}{25} = 5 + 6 = 11 \text{ 歐姆}$$

(b) 總電流 $I_0 = \frac{E_0}{R_0} = \frac{120}{11} = 10.91$ 安培

(c) R_1 兩端所受之電壓。

$$E_1 = I_1 \times R_1 = 10.91 \times 5 = 54.5 \text{ 伏特}$$

R_2 與 R_3 兩端所受之電壓。

$$E_2 = E_3 = E_0 - E_1 = 120 - 54.5 = 65.5$$

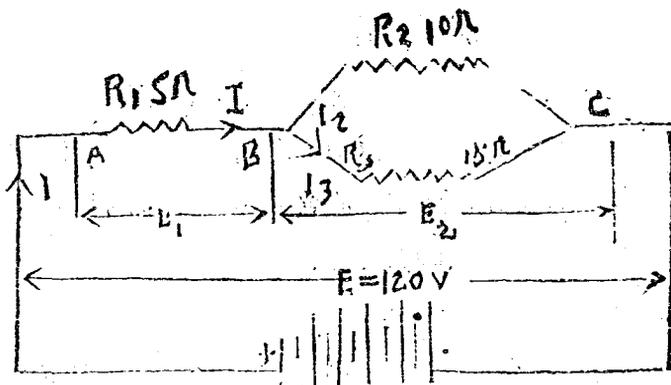
伏特

(d) $I_1 = I_0 = 10.91$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2} = \frac{65.5}{10} = 6.55 \text{ 安培}$$

$$I_3 = \frac{E_3}{R_3} = \frac{65.5}{15} = 4.36 \text{ 安培}$$

(七八) 電阻係數與溫度係數



電阻定律 (Law of resistance)¹曰：導線之電阻與其長度 l 成正比，而與其垂直截面面積 A 成反比，即

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{公式 24 a}$$

公式內 ρ 為比例常數，其值視導線物質而異，若 $l=1$ 公分， $A=1$ 平方公分，則 R 即等於 ρ 歐姆。可見 ρ 即等於 1 公分長，1 平方公分截面積線段之電阻，亦即等於導線一立方公分之電阻。故名之曰電阻係數 (Resistivity or Specific resistance) 電阻係數愈小，則其導電之能力愈佳。一般以銀之電阻係數為最小，銅次之。惟以銀較貴，故用多銅為導線。鋁之電阻係數亦不大，且極輕，亦常用為導線，尤利軍用。英國通用呎 (foot) 為線長單位，圓密爾 (circular mil) 為截面單位，故通常 ρ 為每一圓密爾呎 (mil-foot) 之電阻。如一直徑為一密爾 (0.001 吋)，其面積即為一圓密爾。如直徑為 d 密爾時，其面積即為 d^2 圓密爾。用以代替平方吋計算面積，簡易殊多。一種物質在一定之溫度時，其電阻係數不變，但溫度變更時，即隨之而變。電阻係數與溫度之關係可以下式表之，吾人既知 0°C 時之電阻係數 ρ_0 ，以維求其他溫度時之電阻係數 ρ_t ，即，

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t) \quad \text{公式 25 a}$$

普通金屬物質之電阻，無不隨溫度增減而迅速變化，溫度上昇電阻即增，溫度下降電阻即減。故在某溫度時之導體電阻，亦可以下式求之：

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad \text{公式 25 b}$$

以上二公式中

ρ_t = 攝氏 t 度時之電阻係數

ρ_0 = 攝氏 0 度時之電阻係數

ρ_t = 攝氏 t 度時之電阻

R_0 = 攝氏 0 度時之電阻

α = 溫度係數

t = 攝氏 t 度

溫度係數 (Temperature Coefficient) 實為 0°C 時 1 歐姆電阻平均每度增加之歐姆數，即

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} \quad \text{公式 25 c}$$

公式 24 a 之電阻 R 與 ρ 應先同其溫度，故應寫作

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{A} \quad \text{公式 24 b}$$

$$R_t = \rho_t \frac{l}{A} \quad \text{公式 24 c}$$

各種金屬物質之溫度係數與電阻係數如下表：

金屬名稱	電阻係數 ρ 在 20°C (每 圓密爾呎之 歐姆數)	電阻係數 ρ 在 0°C (每1 立方公分之 微歐姆數)	溫度係數 在 0°C
銀 (Silver)	9.56	1.468	0.0040
銅 (copper)	10.40	1.561	0.0043
金 (Gold)	14.60	2.197	0.0034
鋁 (Aluminum)	17.00	2.665	0.0039
鋅 (Zinc)	35.00	5.751	0.0037
鐵 (Iron)	66.00	9.065	0.0062
錫 (Tin)	69.00	13.043	0.0047
鉛 (Lead)	132.35	20.38	0.0039
水銀 (mercury)	576.00	94.07	0.0008
德銀 (German silver)	198.00	26.00	0.0004
石墨 (Graphite)	4300.00	300.00	0.0001

上表第三行為電阻係數 ρ 在 0°C 每一立方公分之微歐姆數，即公式24中 l 為公分， A 為平方公分時，則 ρ 為立方公分之電阻微歐姆數。第一行在溫度 0°C 時，銀之電阻係數每一立方公分為 1.468 微歐姆，或 1.468×10^{-6} 歐姆。美國多用 1 呎 A 圓密爾為單位，則電阻係數應為每一圓密爾

呎(呎×圓密爾)之歐姆數。在上表第二行即根據美國常用之電阻係數在 20°C 時每一圓密爾呎之歐姆數。第一行在溫度 20° C 時銀之電阻係數每一圓密爾呎之電阻係數，在計算時，其為公分或呎，必須與平方公分或圓密爾之單位絕對相同，不能用不同之單位計算之。

由公式 25b，欲求在某溫度時之導體電阻，可化一最簡便之通用公式，一如比例然，即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t_1}{\frac{1}{\alpha} + t_2}$$

普通所欲計算者多為銅或鐵之電阻，銅之溫度係數為 .0043，鐵之溫度係數為 0.0062，則該項公式可寫作

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{1}{\alpha} + t_1}{\frac{1}{\alpha} + t_2} = \frac{\frac{1}{.0043} + t_1}{\frac{1}{.0043} + t_2} = \frac{234.5 + t_1}{234.5 + t_2} \quad (\text{銅})$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{1}{.0062} + t_1}{\frac{1}{.0062} + t_2} = \frac{162 + t_1}{162 + t_2} \quad (\text{鐵})$$

式中 R_1 及 R_2 為在 t_1 及 t_2 溫度時之電阻。

美國銅線有一定之標準，可記其三點，即可推算其他：

(a) 十號線 (A.W.G. 或 B&S 線規) 有直徑 100 密爾 (0.1 吋)，截面積為 10000 圓密爾，在 75°F 普通室內溫度，每千呎之電阻為一歐姆。

(b) 線規每大三號截面積即大一倍，每小三號則減半。
(以十號線為標準)

(c) 線規每大十號，截面增大十倍。(以十號線為標準) 此項推算雖不能十分準確，然亦相去不遠矣。

第九章 電功率及電解

(七九)電功率之單位

凡電具定額，通常不僅表明其工作時所需之電壓，即每秒鐘產生或消耗之電能亦同時表明，每秒鐘所產生消耗之電能曰電功率。測量電功率之單位為華特 (Watt) 及千華 (Killo-Watts)，所以恆見某電燈泡之定額為50華特，110伏特，或發電機之定額為1000千華，600伏特等。

電流在電路中經行，一似水流在水管中流動，每分鐘水流之數量則恆以加侖數或立方呎表之，電流則以安培數表之。保持水流繼續流動所需之功率，為每分鐘內流出之立方呎水量乘其每方呎所受水壓之磅數，故以每分鐘之平方呎磅 (Foot- Pound) 表之。

每單位時間所作之功，名曰功率。每秒1爾格之功率為1爾格秒 (Erg second)。每秒1焦爾之功率為1華特。1000華特為千華。英制功率之單位為馬力，1馬力為每分鐘33000呎磅，或每秒550呎磅之功率。

同理保持電流繼續流動所需之功率為電流(安培)乘電壓(伏特)之積，此即電功率之華特數。

$$\text{華特 (Watt)} = \text{安培 (Ampere)} \times \text{伏特 (Volt)}$$

用代數公式表明, $P = I \times E$ 公式 26a

$P =$ 電 功 率 (瓦 特)

$I =$ 電 流 (安 培)

$E =$ 電 壓 (伏 特)

因歐姆定律可寫成三種不同公式

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

$$(2) \quad E = I R$$

$$(3) \quad R = \frac{E}{I}$$

故電功率公式亦有二種變化如下!

因 $E = I R$ 代入公式 26a 得

$$P = I (I \times R) = I^2 R \quad \text{公式 26b}$$

因 $I = \frac{E}{R}$ 代入公式 26a 得

$$P = \frac{E}{R} \times (E) = \frac{E^2}{R} \quad \text{公式 26c}$$

因 1 華特 (Watt) $= 10^7$ 爾格/秒

故

$$P = I \times E \times 10^7 \text{ 爾格/秒 (Ergs per second)}$$

(八〇) 電功率之測量

欲知電路中某部份消耗之電功率，可將電流表接入部之綫路再用電壓表跨接該部之二端，將二者讀得之數相乘，即為該部份耗電功率之華特數，可用公式表之如下

華特(消耗在 X 部之電功率) = 電壓(X 部兩端之電壓) × 電流(經 X 部之電流)。

應用上述公式時，須注意二點：(1) 電流與電壓，須為同一部份，及同一時間內測得之值。(2) 電流與電壓值之乘積，僅其電路中該部消耗之電功率。電功率之單位華特在實用上殊嫌太小，故實用之電功率單位為千華，等於 1000 華特。

若將電功率單位華特，化為馬力，則其關係如下：

$$1 \text{ 馬力} = 746 \text{ 華特} = \frac{3}{4} \text{ 千華}$$

或 1 千華 = 1.34 馬力

(八一) 電能及其單位

功率係單位時間內所作之功，故一定時間內所作之功，即等於功率與時間之乘積，就電功率而言，則為電能(Energy)。例如電路中某一部份之兩端間之電壓為 E 伏特，通過之電流為 I 安培，經歷時間為 t 秒，則在此部份內所消耗之電能 W (焦爾)，當為

$$W(\text{work}) = IEt \quad (\text{焦爾}) \quad \text{公式 27a}$$

即焦爾數 = 安倍數 × 伏特數 × 秒數

因 I 與 E 之乘積為電功率，故公式 27a 又可改寫為

$$W = P.t \quad \text{公式 27b}$$

即華秒數 (1 華秒 = 1 焦爾) = 華特數 × 秒數

電能之單位華秒，殊嫌太小，故實用上功皆為馬力，開時為小時，其乘積乃為馬力小時 (Horsepower-Hour)。

同理若其功率為千華，時間為小時，則其所作之功為千華小時 (Kilowatt-Hour)。

馬力小時與千瓦小時，二者皆為實際上電能單位。

由上可知電能與功率之關係。每一單位時間內作功所消費之電能，即為功率 (Power)，故全部工作所消費之電能 (單位為焦爾) 被除於所耗費之時間，即為功率。功率之單位為華特，換言之，一華特即為一伏特與一安培之功率，或一焦爾秒 (Joule per second)。以公式表之如下

$$\begin{aligned} (\text{單位為華特 Watt}) &= \frac{\text{焦爾}}{\text{秒}} \\ &= \frac{\text{伏特} \times \text{安倍} \times \text{秒}}{\text{秒}} = \text{伏特} \times \text{安倍} = E \times I \end{aligned}$$

(八二)電能與熱能

電能設非變為光或化學或機械能，則必全部變為熱能。即在變為光，化學或機械能時，亦有一部份電能變為熱能，例如電動機不克盡將電能變為機械能者，即由於其中一部份變為熱能之故。熱之所以產生，則由於抵抗電路中電阻，一如機器轉動時，因抵抗摩擦而發熱相同。

電路內之電阻，等於機器轉動時之摩擦阻力。電能消耗在抵抗導線上電阻，即在導線上轉變成熟。等於機械能消耗在抵抗器軸承之阻力，即在軸承上轉變為熱。欲減少導體上消耗之電功率，須減小負載電流導線之電阻，換言之，即增加導線之截面，使其易於散熱，可免產生大量之熱。

電能可轉變為熱能。熱能之單位為卡(Calorie)，電能之理論上單位為華秒(Watt-second) 即 $\frac{1}{1000 \times 60 \times 60}$ 之一千華小時，兩者之關係可在實驗中確定之。假令1安培之電流，通過1歐姆之電阻1秒鐘，所產生之熱量能使1公分(Grám)水之溫度，升高攝氏0.24°。焦爾定律(Joule's law)曰：凡電流所放出之熱量，依(1)電流強度之平方。(2)所通過之電阻。(3)電流存在之時間為正

比。即： $H = 0.24I^2Rt$ 公式28

$H =$ 熱量(卡)

$I =$ 電流(安培)

$R =$ 電阻(歐姆)

$t =$ 時間(秒)

因 $I^2R =$ 瓦特

則 $I^2Rt =$ 瓦秒 (Watt.second) 或焦爾

(Joule)

故 $H = 0.24$ 瓦秒或焦爾

此0.24之常數，名曰電之相當熱量 (Equivalent heat)

焦爾於1843年發明此定律後，又經實驗結果，又求得熱之機械當量，即名曰焦爾當量 (Joule's equivalent)，即 4.19×10^7 爾格之做功可使一公分 (Gm) 之水昇高攝氏一度。

(八三) 電具之效率

一切電具必有電阻，故電流經行其內，熱必相伴發生，除電熱器外(電爐，電熨斗，電烙鐵等)則此發生之熱，皆屬電能損失。故電具俱不能將輸入之電功率悉數輸出者，即由此故，若電動機之輸入為10千華，其輸出為9千華

，則其效率為百分之九十

效率之定義為輸出功率被輸入功率所除得之商，即

$$\text{效率} = \frac{\text{輸出功率}}{\text{輸入功率}} \quad \text{公式 29}$$

$$\text{或} \quad \text{Efficiency} = \frac{\text{output}}{\text{input}}$$

因輸出功率恆小於輸入功率，故效率恆為分數，又輸入與輸出功率須為同一單位，設輸出功率為千瓦，輸入功率為馬力，則二者應同化為馬力或千瓦，然後前者被後者所除得之商，方為效率。

(八四)電解

電流通過酸類鹽類，或鹽基之水溶液，則正負游子對流而分離化，合物分解而放出原質，此現象名曰電解 (Electrolysis)。液體須盛於器皿，液體內須裝設二片固體導體以通電流。如是設備完全用以發生電解之器皿名曰電解池 (Electrolytic cell)。池內起電解作用之液體名曰電解液 (Electrolyte)。出入電流之二片固體導體名曰電解池之兩極或電極 (Electrodes)，電流入液之極為正極 (Anode)，電流離液之極為負極 (Cathode)

(八五)法拉第定律

法拉第 (Faraday) 於1833年對電解做研究，發明如下定律，是為法拉第定律 (Faraday's laws)

第一定律曰：電流所分解而放出其物質之質量，依電流強度與電流存在之時間為正比，而與電解液之種類成分無關。換言之，即電流經過電解液時，電解液被分解質量之多少，僅與通過電解池之電量為正比，即

$$M = Z Q = Z I t \quad \text{公分} \quad \text{公式30a}$$

式內M為電解之質量，Q為電量，I為電流，t為時間，Z為比例常數，其值視所分解之物質而異。如 $Q=I \cdot t$ ，則 $Z=M$ ，可見Z實為每一庫侖（或一秒鐘一安培）電量所分解而放出之質量，故名之曰電解率或電解當量 (Electro-chemical equivalent)

第二定律曰：電解率視物質而異，各物質之電解率依其化合量為正比。某物質之原子價 (Atomic valence or Valency) 除其原子量 (Atomic weight) 所得之商與無原子量之比，是為該原子價之化合量 (Combining weight)。

若已知一種物質之電解率，則依據第二定律即可推算其他各物質之電解率。通常以銀之電解率0.001118公分/安培推算其他物質電解率之比數標準。故設X質物之原子量為

C_x，銀之原子量爲Ca，X物質之原子價爲g，則該物質之電解率爲

$$Z_x = 0.001118 \frac{C_x}{C_a g} \quad \text{公式 31}$$

例如銀之原子量Ca爲107.9，銅之原子量Cx爲63.6，銅之原子價g爲2，則銅之電解率爲

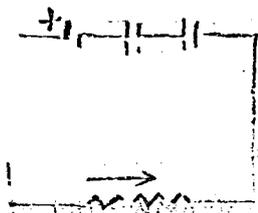
$$\begin{aligned} Z_x &= 0.001118 \times \frac{C_x}{107.9 \times g} = \\ &= 0.001118 \times \frac{63.6}{107.9 \times 2} \approx 0.00329 \end{aligned}$$

如將上述二定律合而爲一，則電流I於t秒內所能電解某原質之質量爲

$$M_x = 0.001118 \frac{C_x}{107.9 \times g} I t \quad \text{公分} \quad \text{公式 30b}$$

由於電流分解物質之效果可以推算電流之強度，即

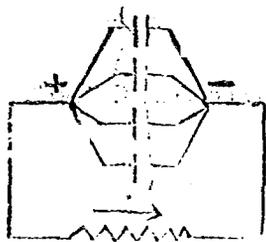
$$I = \frac{M}{Zt} \quad \text{公式 30c}$$



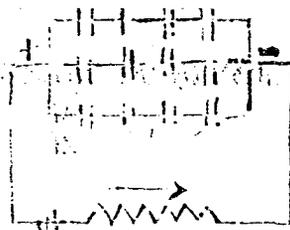
第 八 十 八 圖

(八五)電池之連接與輸出功率

欲增加電池電路內電流之強度，除減小外電阻外，可添接若干電池與原有電池串聯或並聯。以第一電池之負極接第二電池之正極，第二電池之負極接第三電池之正極，連續啣接至第 n 個電池之正極，餘留第一電池之正極與第 n 電池之負極以接於外電路，是為串聯(第八十八圖)如各電池之正極聯結為一，其負極亦聯結為一，是為並聯(第八十九圖)。若干電池串聯或並聯後，其全部整個電池名曰電池組 (Battery)。電壓相等之電池方能並聯成組，否則發生內電路電流而損失破壞隨之，此不可不慎



第八十九圖



第九十圖

設各電池之原生電壓均為 E_i ，內電阻均為 R_i ，則串聯電池組之總電壓為 nE_0 總內電阻為 nR_i ，輸出外電路之電流為

$$I = \frac{nE_o}{R_e + nR_i} \quad \text{公式 32a}$$

串聯效果為增加總電壓以求增加電流。唯內電阻亦隨電壓同增。若外電阻較小，則內電阻足以影響電流 $\frac{nE_o}{R_e + nR_i}$ 幾等於 $\frac{E_o}{R_i}$ 較單用 1 個電池所增極微。反之，若外電阻較大，則內電阻影響尚微，今電流 $\frac{nE_o}{R_e + nR_i}$ 幾等於 $\frac{nE_o}{R_e}$ ，較單用 1 個電池約增 n 倍。

並聯電池組之總電壓仍為 E_o ，總內電阻為 $\frac{R_i}{n}$ 輸出外電路之電流為

$$I = \frac{E_o}{R_e + \frac{R_i}{n}} \quad \text{公式 32b}$$

並聯效果為減小內電阻以求增加電流。若外電阻較大，則內電阻影響甚微，電流所增無幾。反之，若外電阻較小

則內電阻影響極大，電流 $\frac{E_o}{R_e + \frac{R_i}{n}}$ 幾等於 $\frac{nE_o}{R_i}$ 較

單用一個電池約增 n 倍。故並聯電池組之應用僅限於外電阻極小之電路。

電池組又可由若干電池串聯兼並聯而成(第九十圖)。串聯所以增加電能，並聯所以減少內電阻，皆足以增加外路所得之電流。設每 x 個電池串聯為一排，而並聯 y 排為一組。則此電池組之電池數為 $n = xy$ ，電壓為 xE_0 ，內電阻為 $\frac{x}{y} Ri$ 。故外電路所得電流為

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

因 E 、 R 及 n 皆為常數，故電流強弱僅視 xy 二數若何編配而異。欲得最大電流則分母 $(yR_e + xRi)$ 須為最小。

$$\text{因 } yR_e + xRi = \left(\sqrt{yR_e} - \sqrt{xRi} \right)^2 + 2\sqrt{nReRi}$$

$$\text{故 } \sqrt{yR_e} - \sqrt{xRi} = 0$$

$$\text{或 } \frac{x}{y} Ri = Re$$

即結果內電阻等於外電阻時電流方為最大。故若外電阻為定值，則電池之聯接，必須配至其結果內電阻等於外電阻，或相近其值，方能輸出最大電流或最高功率於外電路。反之，若電池或電池組固定，內電阻為定值，則外電阻必須配至等於內電阻以得最高功率，電池或電池組輸出最高功率時，其效率為50%，電池斷路時效率為最高，電池短路或短絡 (Short circuit) 時電流為最大。

第十章 電磁與電磁感應

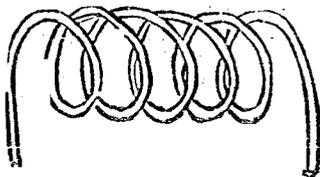
(八六) 磁之電子說

由第七章六二節電流之磁力知電流經一導線時，導線之周圍即產生一磁場。此磁場既因電流而產生，則此磁場之力綫：當必即由在此導線上之電子運動結果，因此遂由磁氣之分子說與近世電子學說發展之結果，遂成磁之電子說。

由電子學說，吾人知同性之荷電體相斥，異性之荷電體相吸。電子與電子間，既為荷有同樣電荷，遂發生相斥之力，而電子與陽離子間，則發生相吸之力。此種斥力或吸力，不僅在靜止時存在，而在電子運動時，亦同樣存在於其周圍之空間。此種因電子運動而發生於其周圍之力由於實驗知與永久磁石所發生者相同，故亦稱為磁力或磁力綫，此即電流之所以能產生磁氣作用。

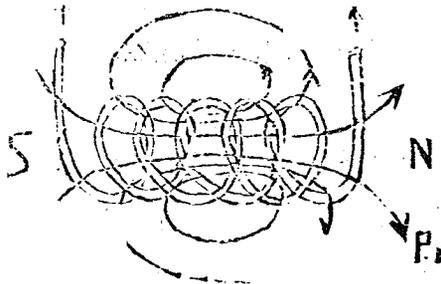
(八七) 螺形線圈

以導線繞成如螺紋進展之線圈(第九十一圖)，是為螺



第九十一圖

形線圈或螺管 (Solenoid)。螺形線圈載電流時，每圈導線所成之磁場如第七章六三節所論：等於一圓電流所造成之圓磁殼 (Magnetic shell)。線圈全部等於若干磁殼所疊成之直條形磁鐵 (第九十二圖)。線圈內磁力線皆與線圈長



第 九 十 二 圖

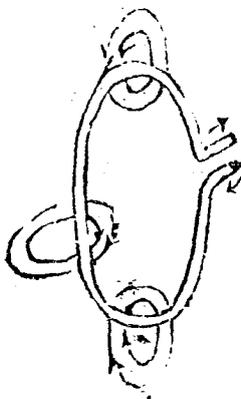
度成平行，自一端發出而回進他端。磁力線發出之一端為 N 極回進之一端為 S 極。若以線圈懸空使能自由旋轉，則亦轉至 N 極一端指北，S 極一端指南而止，與磁鐵無二致。由電流方向即可定線圈兩極然為 N 極，其簡捷法亦為安培右手定則 (Amperes right hand rule)，以右手握線圈 (第九十三圖) 使四指順電流方向圍繞線圈而展開拇指，則



第 九 十 三 圖

拇指即指N極所在之一端。

通電後螺形線圈之磁力線與每一線圈相連，宛如一鏈條，(第九十四圖)。鏈 (Linkage) 之名稱，即由此來。



第 九 十 四 圖

此項由電流所生與線圈相連之磁力線方向與電流之方向有一定之關係。磁場之正方向，即指一自由正磁極，置於磁力線上時所受作用之方向。設有一右旋螺絲，以釘帽之旋轉依電流之方向，則釘尖移動之方向即磁力線之正方向。尚有馬克士威螺旋定則 (maxwell's corkscrew rule) 用以決定磁力線與電流方向之關係者，其言曰；(1) 設以右手掌疊線圈上使四指順電流之方向，而將拇指伸直，則拇指所指之方向，即磁力線之正方向；(2) 設將右手握導線，拇指順電流之方向，則四指即依磁力線之正方向與導線

相銜。

螺形線圈既等於若干磁殼所疊成之直條形磁鐵，其磁極強度必等於每片磁殼之磁極強度。設線圈長度為 l 公分，圈數為 n 圈，則每片磁殼厚度為 $\frac{l}{n}$ 公分，又設每圈平均面積為 A 平方公分，其磁極強度為 m ，則線圈導線所載電流為 $i = \frac{ml}{AN}$ 電磁單位。故螺形線圈之磁極強度及磁力線管或磁束為

$$m = \frac{NIA}{l}$$

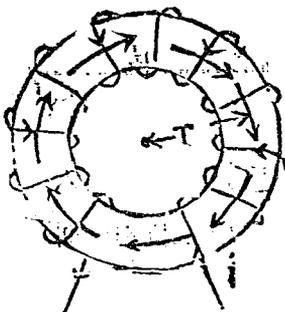
及 $\phi = 4\pi m = \frac{4\pi NIA}{l}$ 馬 公式'33a

若線圈所載電流為 I 安培，則螺形線圈之磁極強度及磁力線管為

$$m = \frac{NIA}{l}$$

及 $\phi = 4\pi m = \frac{4\pi NIA}{l}$ 公式33b

若將螺形線圈曲之如環(第九十五圖)使首尾相接，則



第 九 十 五 圖

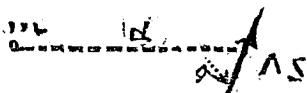
磁力線管 ϕ 均在線圈內成通路，故線圈內磁力線密度處處相等，其值為

$$H = \frac{\phi}{A} = \frac{4\pi NI}{10l} \text{ 高斯} \quad \text{公式 34}$$

(八八) 拉潑拉斯定律 (Laplace law)

拉潑拉斯 (Laplace) 對於電流在磁場中發生之力的
大小與電流及磁場強度之關係，下如下之定律曰：一極短線
段電流加於附近磁極之磁力，(1) 依其間距離之平方成正
比，而 (2) 依線段長度 (3) 電流強度，(4) 磁極強度，及 (5)
線段長度與距離線相交角之正弦為正比。

例如設有一極短線段其長為 Δs 公分，載電 i 單位電
流 (第九十六圖)。磁極 m 離線段中點 d 公分 線段長度與



第九十六圖

距離線之相交角爲 θ ，依拉潑拉斯斯定律， ΔS 加於 m 之磁力爲

$$\Delta F = K \frac{mi \Delta S \sin \theta}{d^2} \quad \text{達因} \quad \text{公式 35a}$$

公式中 K 爲比例常數。若各數量之單位皆爲絕對單位，則 $K=1$ ，而此定律爲

$$\Delta F = \frac{mi \Delta S \sin \theta}{d^2} \quad \text{達因} \quad \text{公式 35b}$$

若 $m=1$ ， ΔF 爲 ΔS 加於 m 所在點磁場強度 ΔH ，即

$$\Delta H = \frac{i \Delta S \sin \theta}{d^2} \quad \text{高斯} \quad \text{公式 35c}$$

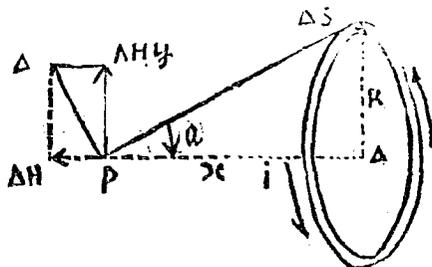
拉潑拉斯斯定律又名別脫薩凡定律 (Biot-Savart law)

多以下列公式表之

$$df = \frac{m}{r^3} i dl \sin \theta$$

(八九) 圓線圈之磁場強度

設有強度爲 i 之電磁單位之圓電流 (第九十七圖) p 爲圓心



第九十七圖

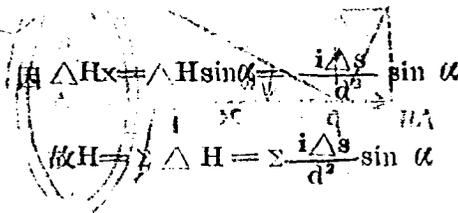
垂線上離圓心 x 公分之任何點。欲求 p 點之磁場強度其法如下：

於圓電流內任擇一極短線段 ΔS ，連 ΔS 中點至 p 點之距離線與 ΔS 長度成直角，即 θ 為直角而 $\sin\theta=1$ 。故 ΔS 加於 p 點之磁力為

$$\Delta H = \frac{i \Delta S}{d^2} \quad \text{高斯} \quad \text{公式 35d}$$

其方向依右手定則必垂直於 d 如圖所示。此磁力 ΔH 可分解為 ΔH_x 與 ΔH_y 二分量， ΔH_x 平行於圓心垂線 op ， ΔH_y 垂直於 op 。圓內必有與 ΔS 成對稱於圓心之相等線段。其加於 p 點磁力之垂直分量與 ΔH_y 方向相反而相消，平行分量則與 ΔH_x 方向同而相加。圓電流全部可分為無窮數成對的對稱線段。每對線段加於 p 點之垂直分量相

皆為零。故p點之磁場強度僅為各線段如於該點平行分力之和。



$$\frac{i \sin \alpha}{d^2} \sum \Delta S$$

$$\text{因 } \sum \Delta S = 2\pi r, \quad d^2 = x^2 + r^2,$$

$$\sin \alpha = \frac{r}{d} = \frac{r}{\sqrt{x^2 + r^2}}$$

$$H = \frac{i \cdot 2\pi r^2}{(x^2 + r^2)^{3/2}} \quad \text{高斯 公式35}$$

若p點為圓心則 $x=0$ ，故圓心o點之磁場強度為

$$H = \frac{2\pi i}{r} \quad \text{高斯 公式37a}$$

若圓線圈為N圈導線密繞而成，其厚度較半徑為極小，是無異增加電流強度為N倍，故其圓心之磁場強度為

$$\text{當其通電時則 } H = \frac{2\pi Ni}{r} \quad \text{高斯 公式37b}$$

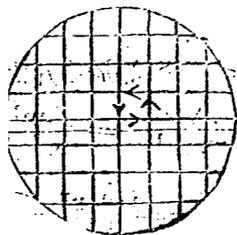
若導線所載電流為1安培，則

$$H = \frac{2\pi NI}{10r} \quad \text{高斯} \quad \text{公式37c}$$

(九〇) 安培原理

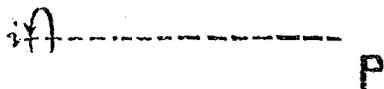
1823年安培 (Ampere) 以圓電流為等於一圓磁殼而計算其磁極強度之關係，是為安培原理 (Ampere's theory)，其言曰：

圓電流之磁殼可視為無數極小之磁片拼集而成 (第九十八圖)。磁殼全部為電流 i 所流繞，故生磁性。各小磁



第 九 十 八 圖

片亦可視為各有電流 i 流繞其邊界以生磁性。各小磁片對外之磁力即等於其邊電流之磁力，設小磁極強度為 Δm ，厚為 l ，半徑為 r ， P 為中心垂線上離磁片 x 公分之任何點 (九十九圖)。則此磁片加於 P 點之磁場強度為



第九十九圖

$$\frac{\Delta m}{x^2} = \frac{\Delta m}{(x+1)^2} = \frac{i \cdot 2\pi r^2}{3(x^2+r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

則與 r 皆極小面 πr^2 等於磁片之面積 ΔA ,

$$\begin{aligned} \text{故} \quad \frac{\Delta m}{x^2} &= \frac{\Delta m}{(x+1)^2} = \frac{\Delta m(2x+1)}{x^2(x+1)^2} = \frac{2\Delta m}{x^3} \\ &= \frac{i \cdot 2\pi r^2}{3} = \frac{i \cdot 2\pi r^2}{x^3} = \frac{2i \Delta A}{x^3} \\ &= \frac{2i \Delta m}{x^3} \end{aligned}$$

$$\text{因} \quad \frac{2\Delta m}{x^3} = \frac{2i \Delta A}{x^3}$$

$$\text{故} \quad \Delta m = \frac{i}{1} \Delta A$$

磁殼全部之磁極強度為各小磁片磁極強度之和，即

$$m = \sum \Delta m = \sum \frac{i}{1} \Delta A = \frac{i}{1} \sum \Delta A = \frac{i}{1} A$$

故

$$i = \frac{m}{A}$$

電磁單位

公式38

是即開電流等於一圓磁殼，而電流之電磁單位數等於磁殼單位面積內磁極強度與其厚度之相乘積。

(九一)電磁鐵與製造磁鐵方法

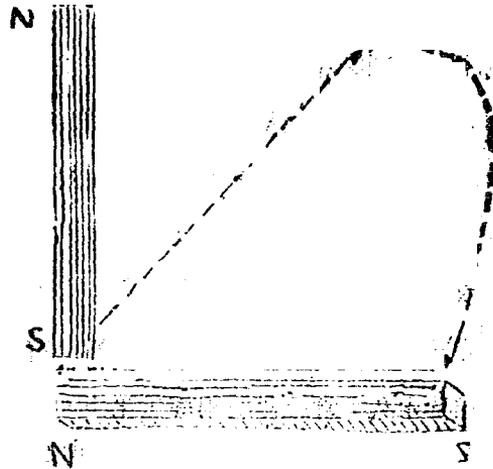
螺形線圈內實以鐵心，則線圈有電流通過時，鐵心感應化磁，變成磁鐵，是為電磁鐵 (Electro magnet) 緣於電磁鐵上使鐵心磁化之線圈名曰勵磁線圈 (Exciting coil)。

普通製造永久磁鐵之方法多用硬鋼為鐵心，繞以線圈，通以電流，則硬鋼保留磁性而成永久磁鐵。製造永久磁鐵之鋼加入百分之四鉛鋼及百分之五錫鋼為最佳。普通之鋼並不堅硬，必須予以淬火，淬火法即取鋼燒紅，投入冰冷水中。然後取出，繞以線圈，通以電流，使其磁化達飽和點即成永久磁鐵。

永久磁鐵之磁性以經久不變為佳，惟事實上磁性之強度並不能維持永久。當一磁鐵剛經磁化後，其強度甚易減弱，因此永久磁鐵製成後須加以益壽 (Ageing) 之方。製造永久磁鐵最佳之法應將鋼鐵經淬火後，再加以熱煉，其法即置於蒸氣中二十至三十小時，然後繞以線圈，通以電流，使其磁化達飽和點後，再浸於蒸氣中經五小時之久，是為益壽。普通市售之永久磁鐵多用火熱益壽法，於永久磁

鐵製成後，再加火熱，至攝氏 100° ，經十二小時之久，
惟不如蒸氣益壽法之佳耳

將鋼鐵磁化之最簡單方法除用通電流法外，可用一永久磁鐵去摩擦鐵片或鋼片，即能使鐵片或鋼片磁化，而成為永久磁鐵，惟其磁性極易消失耳。摩擦時須注意者，必須順向摩擦（第一百圖），即摩擦時沿着一定之方向如圖所

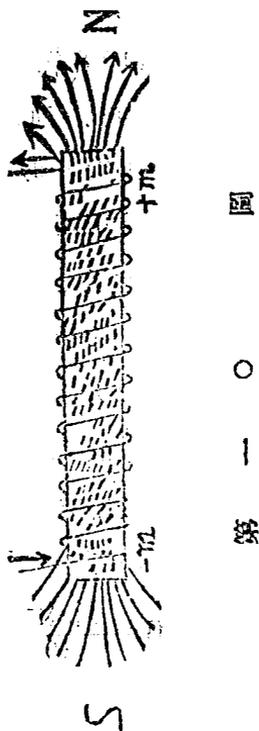


第 一 百 圖

試將鉄心插入勵磁線圈中（第三〇三圖），通以適當之

電流，即成電磁鐵。電磁鐵兩端之磁場強度，較空心螺形線圈(第九十一圖)增加甚多。每單位面積(1平方公分)之磁力線數，常用B代表之，其磁場強度以H代表之，故在空氣中

$$B=H$$



因空氣之磁導係數為1。今空心螺形綫圈實以鐵心，鐵之磁

滲係數較空氣大為增加，故 B 不再等於 H ，而為

$$B = \mu H$$

蓋鐵心受感應作用而磁化，兩端即發生 $+m$ 及 $-m$ 之磁極強度，故原來磁束之外，又加此磁極發生之新磁束，所有新磁力綫，皆自北極發出，經過四週介質 (medium) 而至南極，再經過鐵心復回至北極，以完成完全之通路。故電磁石之磁場強度 H 仍與空心螺形綫圈或勵磁綫圈相同，惟每單位截面所有之磁力綫，則大為增加，換言之即 B 較 H ，用鋼鐵可大至二三千倍，如用錳鐵合金， H 雖甚小而 B 比 H 可增至八萬至二十萬倍，以鐵心代空氣心，其磁束即大為增加，譬如以水通過一砂層之水管，其水流之多少，依壓力與砂層小孔之多少而定，若砂層中空隙多，則水即向此聚集流出，故壓力雖未變，而流出之水量則已大增，蓋因空隙阻力較少之故。同樣理由，鐵即磁之空隙，可使磁束較在空氣中易於傳導。

故電磁鐵內磁力綫密度

$$B = \mu H = \frac{4\pi NI\mu}{10^7} \text{ 高斯}$$

及磁束

$$\phi = BA = \frac{4\pi NI\mu A}{10^7} \text{ 馬}$$

凡磁力綫所通過之路名曰磁路(magnetic circuit)。磁路與電路相同，磁路內之磁束名曰磁流(magnetic flux)，其值為

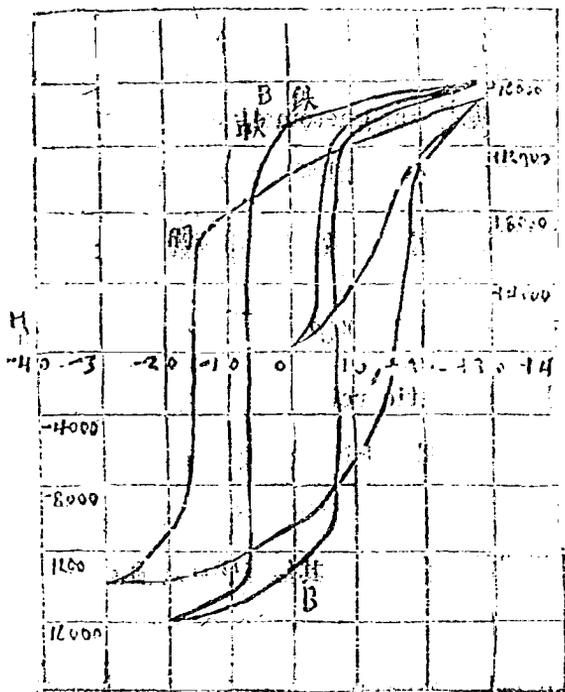
$$\phi = BA = \frac{4\pi NI\mu}{10^7} \text{ A} = \frac{\frac{4\pi}{10} NI}{\mu A} = \frac{\text{m.m.f.}}{R} \text{ 馬}$$

磁流與電流相似，故稱為磁流之歐姆定律，公式中 $\frac{4\pi}{10} NI$ 為發生磁流之原動力，猶電壓為發生電流之原動力，故名曰磁壓 (magnetomotive force) 以 M.M.F. 代表之。磁壓之大小依勵磁綫圈之安培圈數 (NI) 為正比。不能單就電流強弱或圈數多寡以斷磁壓之大小。 $\frac{1}{\mu A}$ 之作用在限制磁流，猶電阻 $\frac{1}{A}$ 之作用為限制電流，故名曰磁阻 (magnetic reluctance) 以 R 代表之。磁阻依 μ 為反比，空氣之磁阻比鋼鉄大數千百倍。磁流所經若非盡屬鋼鉄，則雖有極小空隙能使磁流銳減甚多，故環形及馬蹄形之電磁鉄之磁性恆較其他電磁鉄為強。

(九二) 磁滯作用

磁化強度與磁場強度間之關係，隨磁性體之種類而定。如使磁性體循環不已而受磁化，用曲綫表出其間磁場強

度，磁化強度以及磁感應強度間之關係時，可得一閉鎖之迴綫，內包一定之面積，此迴綫是為磁滯迴綫(Hysteresis loop)或磁滯曲綫(Hysteresis Curve)。其所包括之面積表示受循環磁化期間所消費之能量，是為一種虛耗，故曰磁滯損失(Hysteresis loss)。迴綫中之面積，隨物質種類而有不同，(第一〇二圖)實線迴綫為軟鐵，面積較小。



虛線爲鋼其面積較大。因所施之磁壓 (NI) 變化，故所生之磁束或磁流亦發生變化。惟由實驗結果，此種磁束之變化，常較磁壓 (mmf 即 NI) 之變化滯後。第一〇二圖之實線爲軟鐵之磁滯曲綫。當磁壓 (即電流 I ，因 N 爲常數) 由零逐漸增加時 (自 0 至 +30) 磁流亦沿 0 至 +16000 線增加，直至磁力線密度 (B) 增至 +16000，因已達飽和點，故成水平。設此時將磁壓 (I) 逐漸減小，磁流亦逐漸減小，惟至磁壓爲零時，磁流並不能爲零，而尙有磁感應強度 (B) +13200，此項 +13200 之磁感應強度是爲剩磁 (Remanence or residual magnetism)。假定此時施以相反之磁壓 (I)，即通以相反之電流，必須電流自 0 增至 -7.5 時，始能令此電磁鐵之磁性完全消失。此項 0 至 -7.5 相當之磁場強度或磁壓稱爲矯頑磁力 (Coersive force)。設此時繼續令此相反之磁壓增加，則此電磁鐵又復磁化。惟磁鐵之南此極恰與前此相反，假定令此反磁壓 (I) 減小，磁感應強度 (B) 將自 -16000 至 -13200，磁壓爲零時，磁感應強度仍不能爲零，於是又施以相反之磁壓，則得一完全之實綫曲綫。至鋼之虛綫曲綫與軟鐵同理，可以舉一反三。

磁導係數 (Permeability) 之倒數 (reciprocal) 是爲

磁阻係數(Reluctivity) 以 $\frac{1}{\mu}$ 代表之，即物質對於磁之磁阻率。

在 $H = \frac{4\pi NI}{10 l}$ 公式中， NI 表示磁壓之安培圈 (Ampere-turn) 數， $\frac{NI}{l}$ 表示每公分之安培圈，故知

$$\text{每公分之安培圈數 } \frac{NI}{l} = \frac{10}{\pi} H = 0.8 H$$

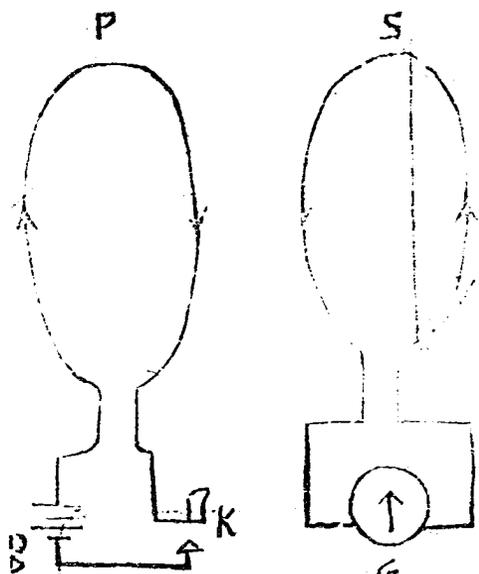
$$\text{故 } NI = \frac{IH}{\frac{4\pi}{10}} = \frac{IH}{0.4\pi} = \frac{IH}{1.257} = 0.8 IH$$

$$I = \frac{IH}{\frac{4\pi}{10} \cdot N} = \frac{IH}{1.257 \times N} = \frac{0.8 IH}{N}$$

$$N = \frac{IH}{\frac{4\pi}{10} \cdot I} = \frac{IH}{1.257 \times I} = \frac{0.8 IH}{I}$$

(九三) 電磁感應

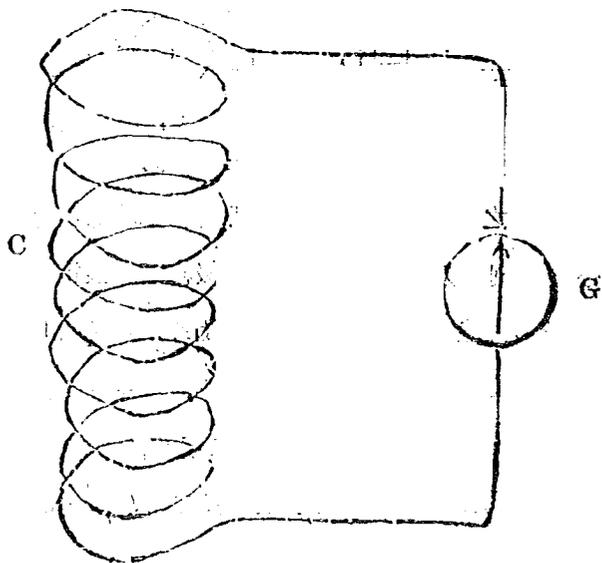
1831年佛拉第(Faraday) 發現磁生電之現象，即令一導體在一磁場內移動，或令一磁石向一導體移動，在此導體上均可產生一電壓(E.M.F)。設此導體成一通路，則在此通路內即有一感應電流(induced current)流動其間。



第 一 〇 三 圖

感應電流之產生，可取線圈二個(第一〇三圖) p爲初級線圈，接電池B及電鍵K。S爲次級線圈，接電流表G。試將P及S二線圈互相絕緣而貼對置之，按電鍵K則P線圈通電流，S線圈中之電流表之指針震偏一方，是知S線圈中卽有霎時電流產生，其方向與P之電流相反。次再切斷P線圈之電流，則S線圈中電流表之指針震偏他方。此時S線圈之電流方向與前相反，而與P之電流相同：

試取一線圈C(第一〇四圖)將其兩端接一電表G，取



第 一 〇 四 圖

一直條形磁鐵，驟然插入線圈時，則電流表之指針即霎偏一方，當磁鐵靜止，指針即又復返零位。設此時將磁鐵由線圈內驟然取出，則指針即霎偏他方。此種插入或取出之動作愈快，則指針偏向愈大，表示所產生之電壓與電流愈大。假如將磁鐵之磁性加強，即取兩磁鐵相合，或將線圈之轉數加多，則由此可使所產生之電流與電壓亦愈大。

由上述二實驗所得之各種現象，是為電磁感應 (Electromagnetic induction)，由此種電磁感應方法而產生之電動力或電壓，稱為感應電壓 (Induced E. m. f.)。由感應電壓所產生之電流，是為感應電流 (Induced current)。

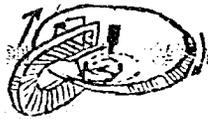
法拉第由上述諸實驗定下感應定律，是為法拉第電磁感應定律 (Faraday's Electromagnetic induction law)，其言曰：感應電流之產生條件為線圈或電路內磁力線數之變更。若線圈所包圍之磁力線數或增或減，則線圈內必產生感應電流。若電路所包圍之磁力線或增或減，則聯成此電路之導線上必產生感應電流。若線圈或電路內磁力線數固定不變，則感應現象立即消滅。

(九四) 俞茲定律與渦流

感應電流之產生既因線圈或電路內磁力線數之變更，

則磁力線增減時必輸入工作或能於線圈以轉變為電能。換言之，磁力線必反抗感應電流之阻力而增減以作工於線圈，1834年俞茲 (Lenz) 據是理而定感應電流之方向，是為俞茲定律 (Lenz's law) 其定義曰：感應電流之磁力必反抗線圈內原有磁力線數之變更。若原有磁力線增加，則發生反方向磁力線之感應電流以阻其增。若原有磁力線減少，則發生同方向磁力線之感應電流，以阻其減。

感應電流之產生，不惟限在線圈上，即在任何形狀之導體內，亦同樣可以產生。假定令一銅盤在一馬蹄磁鐵 N, S. 間旋轉 (第一〇五圖) 則在此 N, S. 間之一部份銅盤



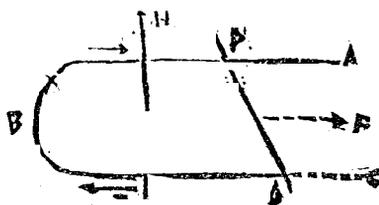
第 一 〇 五 圖

因其間之磁力線發生變更，故亦有感應電壓發生。因此銅盤面積較大，遂自成合路，而使所發生之感應電流如虛線所示。此種感應電流根據俞茲定律，其所生磁場，係取反對此銅盤變動之方向。此種感應電流因通行銅片內部成渦流 (Eddy current)。因由佛科脫 (Foucault) 所發明，故亦曰佛科脫電流 (Foucault current)。由此感應電流而發

生之熱效，因須取給於銅片之動能，而為一種虧耗，故曰過流損失 (Eddy current loss)。此種過流損失在變壓器與電機構造上，視為極有損害之因子。故為免除此種損失計，多取多數較細之軟鐵絲，或極薄之軟鐵片，分別絕緣，則磁力線所截割之面積，即分成極小小塊，過流自不易發生，而此種損失自可減少。

(九五) 感應電壓及其方向

電磁感應既使電路內發生電流，自必先有電壓。感應電壓之方向可由電流方向決定之。其大小關係則可由工作轉變電能之理決定之。設在磁場強度 H 高斯之均勻磁場內，置金屬軌道 ABC (第一〇六圖)。金屬棒 PQ 由滑接器



第 一 〇 六 圖

(sliding contactor) 聯接軌道成 PBQ 通路。以棒向右等速移動，則通路由磁力線漸增，故產生感應電壓及感應電流。設電壓為 e ，電流為 i ，其單位為電磁單位。又設

金屬棒垂直於磁力線之長度為 1 公分，在 t 秒內向右移過 x 公分，則以棒移動所抗阻力 F 及 t 秒內所費工作 W 為

$$F = H il$$

$$W = Fx = H ilx \quad \text{爾格}$$

$$W = e it \quad \text{爾格}$$

$$\text{因 } e it = H ilx$$

$$\text{故 } e = \frac{H ilx}{t} \quad \text{電磁單位}$$

因 $\frac{H ilx}{t}$ 實為電路內每秒所增之磁力線數，故感應電壓之

電磁單位數即等於電路內每秒增減之磁力線數。若電路內每秒增減 1 單位磁力線，則感應電壓為 1 電磁單位。設單圈綫圈或電路於 t 秒內等速的增減磁束 ϕ ，則此綫圈內所生之感應電壓為

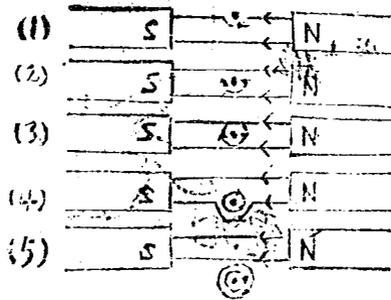
$$e = \frac{\phi}{t} \quad \text{電磁單位} \quad \text{公式 39a}$$

$$\text{或 } E = \frac{\phi}{t} \times 10^{-8} \quad \text{伏特} \quad \text{公式 39b}$$

若綫圈有 N 匝導線，則其感應電壓為

$$E = N \frac{\phi}{t} \times 10^{-8} \quad \text{伏特} \quad \text{公式 39c}$$

磁力綫皆首尾聯接如環，若綫圈內磁力綫漸增，增多之磁力綫必被導綫所截割，(cutting) 方能闖入圈內。若綫圈內磁力綫漸減，減少之磁力綫亦必被導綫所截割方能退出綫圈之外。故感應電流之產生固可謂由於綫圈內磁力綫數之變更，亦可謂由於導綫截割磁力綫。第一〇七圖示導綫

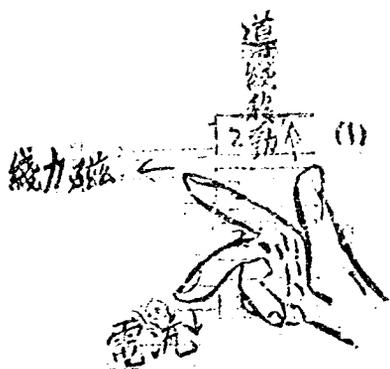


第 一 〇 七 圖

截割磁力綫所以能產生電流之原理。當導綫在磁場內移動時，磁力綫先被壓而彎曲，繼即合圍導綫，脫離原有磁場而另成圍繞導綫之圓磁場，由是導綫內發生電流。

導綫截割磁力綫所生感應電壓與其所生電流之方向可依侖茲定律或弗來明右手定則 (Fleming's right hand rule) 以決定之。由侖茲定律，則感應電流必阻攔導綫之移動，故其磁力綫在導綫前方者必與原有磁場同向以增其密度，在導綫後方者必與原有磁場異向以減稀密度，由是

發生反抗導線移動之阻力。若依弗來明右手定則其法如下：將右手之拇指，食指及中指伸直使互成垂直角（第一〇八圖），使食指指磁力線之方向，拇指指導線在磁場中移



第 一 〇 八 圖

動之方向，則中指所指者，即為感應電壓與其所生電流之方向。

由導線 PQ 之（第一〇九圖）向右移動則生成感應電壓可為 $\frac{Hlv}{t}$ 因 $\frac{dl}{dt}$ 為 PQ 移動之速度，故凡導線截割磁力線所生之感應電壓為

$$e = Hlv \text{ 電磁單位} \quad \text{公式 40a}$$

$$\text{或 } e = Hlv \times 10^8 \text{ 伏特} \quad \text{公式 40b}$$

公式內 l 為導線垂直於磁力線之長度 (單位為公分), v 為導線移動垂直於磁力線之速度。(單位為公分秒)

(九六) 電動

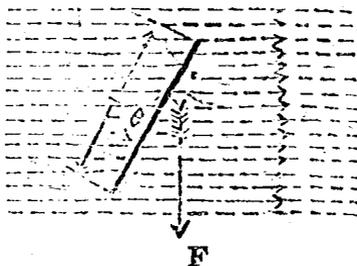
由於拉發拉斯定律, 已知一極短線段電流加於其附近磁極之磁力為

$$\Delta F = \frac{m_i \Delta S \sin \theta}{d^2} \quad \text{公式 36a}$$

此磁力存在於電流與磁極之間。若導線固定, 則磁極被驅而移動, 反之若磁極固定則導線被驅而移動, 即電流在固定磁場內必感受動力。上式內 $\frac{m}{d^2}$ 為磁極 m 加於 ΔS 所在點之磁場強度 H , 故 ΔS 在 H 高斯磁場內所受之動力為

$$F = H_i \Delta S \sin \theta \quad \text{達因}$$

長 1 公分之直線電流在 H 高斯均勻磁場內 (第一〇九圖) 所受之動力為



第一〇九圖

$$F = \frac{2}{c} I \Delta S H \sin \theta = H i \sin \theta \cdot \Delta S$$

$$= H i l \sin \theta \quad \text{達因}$$

若導線長度垂直於磁場則

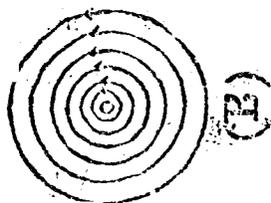
$$F = H i l \quad \text{達因} \quad \text{公式 11a}$$

若電流為 I 安培

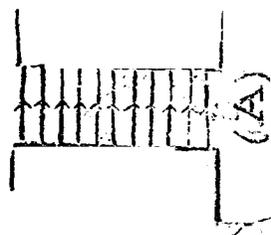
$$F = \frac{2 I I_0}{10} \quad \text{達因} \quad \text{公式 11b}$$

(九七) 弗來明左手定則與馬克士威電動規則

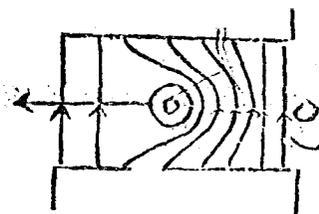
磁場內加於電流之動力或加於磁極 m 之電磁力實為電流與磁極間媒介體之作用，換言之即為結果磁力線之作用
 例如第一一〇圖 (A) 為固定磁場，(B) 為直線電流之磁



(B)



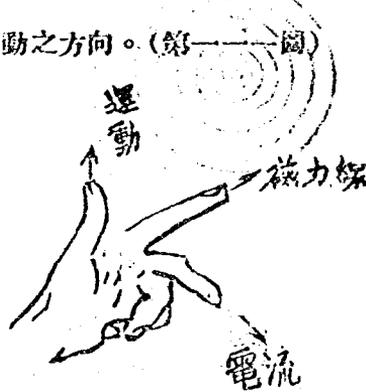
(A)



(C)

場，(C)為直線電流置於固定磁場內所造之結果磁場。在導線上方二磁場方向相反，故結果磁力線疏。在導線下方則二磁場方向相同，故結果磁力線加密。結果磁力線之收縮力與旁壓力遂壓迫導線向上移動。由是理論已能決定電流在磁場內所受動力之方向，而弗來明左手定理尤為簡單便捷。其定則曰：伸左手令拇指，食指，及中指互相成

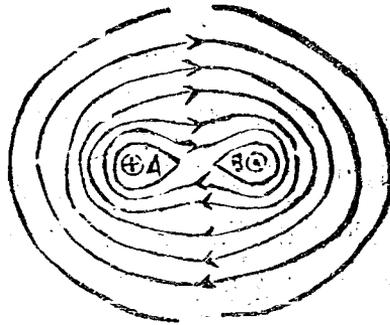
直角，設以食指指磁力綫方向，中指指電流方向，則拇指所指者必為運動之方向。(第一一圖)



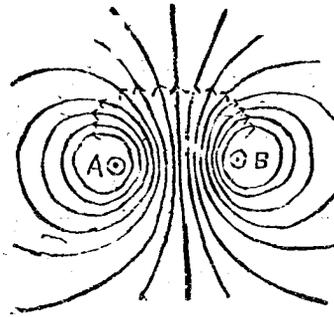
第 一 一 一 圖

凡電流與電流或電流與磁場間動力之方向，及導線或線圈運動之方式可由馬克士威運動規則(maxwell's motion rule) 決定之。

(1) 二平行導線載同方向電流則相吸(第一一二圖) 載異方向電流則相拒(第一一三圖)。



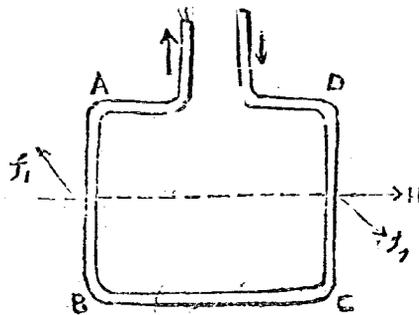
第 一 一 二 圖



第 一 一 三 圖

(2) 二平行線圈載同方向電流則相吸，載異方向電流則相拒。

(3) 線圈在均勻磁場內，則相對稱之二邊感受相等而相反之動力(第一一四圖) 此二力造成轉力，使線圈發生旋



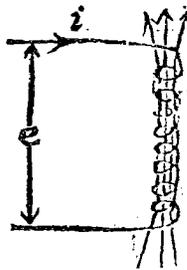
第 一 一 四 圖

轉，至包圍最多磁力線而止。

(4) 凡電流所受動力必使導線或線圈向包圍最多磁力線之方向運動。

(九八) 自感應

線圈本身電流變更線圈內產生感應電壓之現象，名曰自感應 (Self-induction)。例如 (第一一五圖) i 漸增



第 五 圖

則 ϕ 亦漸增，根據侖茲定律線圈內必生感應電壓以阻其增， i 漸減則 ϕ 亦漸減，線圈內必生感應電壓以阻其減。自感應原因為線圈本身電流之變更，其效果為阻抗此電流之變更。

交流電時時變更，故交流電路內自感應之影響尤著。直流電穩定不變，故平常直流電路內線圈與展長直線無異

，除銅線電阻 (copper resistance) 外無其他作用。唯直流電路在通路之初，若電流自零驟增為 $\frac{E}{R}$ ，電路內必發生自感應以增其增。故直流電壓雖隨電鍵接通立即加於電路，而電流則須經過相當時間方能漸增至 $\frac{E}{R}$ 。此現象名曰電流之上升 (growth of current)。直流電路在脫離電壓之頃，若電流自 $\frac{E}{R}$ 驟降為零，電路內亦必發生自感應以阻其降。故電流不隨電壓脫離立即消滅，必須經過相當時間方能漸降至零。此現象名曰電流之衰落 (Decaying of current)。在衰落時期繼續存在之電流名曰額外電流 (Extra current)。若電壓之脫離由於電鍵開斷，則額外電流即在開斷之處發生火花 (Spark)。

自感應為自感應電壓抗阻電流變更之現象。故凡電路內自感應顯著與否，恆視自感應電壓之大小為斷。設線圈之圈數 (第一一五圖) 之圈數為 N ，長度為 l ，每圈平均截面積為 A ，鐵心磁導係數為 μ 。又設電流於 t 秒內自 0 增至 I ，同時磁力線自零增為

$$\phi = \frac{4\pi Ni\mu A}{l} I$$

則此時線圈內自感應電壓之平均值爲

$$e = N \frac{\phi}{t} = \frac{4\pi N^2 \mu A}{l} \times \frac{i}{t}$$

公式內 $\frac{i}{t}$ 爲主使線圈產生自感應電壓之原動力，故

e 依 $\frac{i}{t}$ 爲正比。 $\frac{4\pi N^2 \mu A}{l}$ 爲線圈所產生自感應電壓

(與其原動力之比例常數，名曰線圈之自感量 (Self-inductance))。若每秒變更 1 電磁單位電流之原動力能使線圈產生 1 電磁單位自感應電壓，則此線圈之自感量爲 1 電磁單位。若每秒變更 1 安培電流之原動力能使線圈產生 1 伏特自感應電壓，則此線圈之自感量爲 1 實用單位名曰 1 亨利 (Henry) 以 h 爲代表。1 亨利之 $\frac{1}{1000}$ ，名曰米厘亨利

(mh)，1 亨利之 $\frac{1}{10^6}$ 名曰微亨利 (μh)。

因 1 伏特 = 10^8 電磁單位電壓

1 安培 = $\frac{1}{10}$ 電磁單位電流

故 1 亨利 = 10^9 電磁單位自感量

倘量則線之自感量 L 可計算如下

$$L = \frac{4\pi N^2 \mu A}{l} \text{ 電磁單位} \quad \text{公式42a}$$

$$\text{或 } = L \cdot \frac{4\pi N^2 \mu A}{l} \times 10^{-9} \text{ 亨利} \quad \text{公式42b}$$

若已知綫圈之自感量為 L 電磁單位，則由 $\frac{I}{t}$ 所生之自感應電壓為

$$e = L \frac{I}{t} \text{ 電磁單位} \quad \text{公式43a}$$

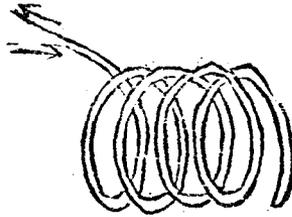
若綫圈之自感量為 L 亨利，則由 $\frac{I}{t}$ 所生之自感應電壓

$$E = L \frac{I}{t} \text{ 伏特} \quad \text{公式43b}$$

綫圈之自感量既依導綫圈數之平方及鉄心之導磁係數為正比(公式49)，故空氣綫圈之自感量較小，鉄心綫圈之自感量均極大。圈數少之綫圈自感量較小，圈數多則自感量較大。自感量大者，自感應電壓亦高，自感作用恆顯著而能發生重大影響，自感量小者，自感應電壓低，自感作用或微而不顯。

若以一導綫等分為二段來回綫，互相絕緣並列，則不論綫上電流為何值，其周圍之結果磁場常自相抵消為零，不隨電流增減，並不能產生自感電壓，如是並列之電阻綫，祇有電阻而無自感量，名曰無感應電阻綫(non-inductive resistance)。用此項無感電阻綫所繞成之綫圈(第

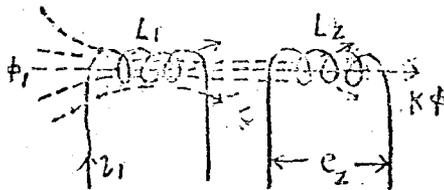
一一六圖) 亦祇有電阻而無自感量，名曰無感應綫圈 (non-inductive coil)。



第 一 一 六 圖

(九九)互感應

綫圈內電流變更使鄰近他綫圈產生感應電流之現象名曰互感應 (mutual induction)。例如 (第一一七圖)，設



第 一 一 七 圖

綫圈₁載電流 i_1 ，而一部分磁力綫 $k\phi_1$ 為被綫圈₂所包圍。則 i_1 電流變更時， L_2 必因變更而生互感應電壓，其值為

$$e_2 = N_2 \frac{k\phi_1}{\tau}$$

因 N_2 及 k 為常數，而 ϕ_1 依 i_1 比。故互感應電壓 e_2 依其原

動力 $\frac{i_1}{t}$ 爲正比，即

$$e_2 = M \frac{i_1}{t} \quad \text{公式44a}$$

公式內 M 爲互感應電壓 e_2 與其原動力 $\frac{i_1}{t}$ 之比例常數，名曰二線圈間之互感量 (mutual inductance)。互感量爲二線圈間所公有，若二線圈間有互感量 M 則， L_1 內電流變更因使 L_2 產生互感應電壓 $e_2 = M \frac{i_1}{t}$ ，而 L_2 內電流變更亦使 L_1 產生互感應電壓，即

$$e_1 = M \frac{i_2}{t} \quad \text{公式44b}$$

互感量之單位與自感量同，其值視二線圈之構造及二線圈間地位關係而異。大概二線圈若相距甚遠成密接而相垂直成直角，則不能產生互感應，是因無互感線圈。二線圈接近至一線圈之磁力線能被他線圈所包圍，始發生互感應而有互感量。線圈密接而平行者互感量最大。若二線圈大小不相等，可置小線圈於大線圈內且使其位置相平行，則二線圈關係愈密切而互感量愈大。若二線圈繞於同一鐵心，則一線圈之磁力線能全部通過他線圈，故其互感量爲最高。

二線圈繞於同一鐵心則其間之互感量 M 爲幾和之和，

$$\text{即 } M = \sqrt{L_1 + L_2}$$

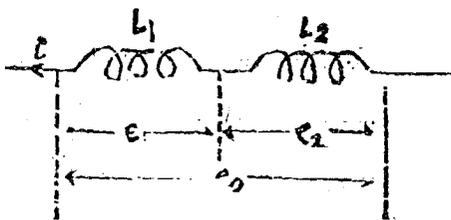
$$\text{或 } M = \frac{4\pi N_1 N_2 \mu A}{l} \quad \text{電磁單位} \quad \text{公式45a}$$

$$\text{或 } M = \frac{4\pi N_1 N_2 \mu A}{l} \times 10^{-9} \quad \text{亨利} \quad \text{公式45b}$$

一百) 感應綫圈之聯接

無互感綫圈串聯或並聯之效果與電阻之串聯與並聯相似。串聯自感量等於各自感量之和，並聯自感量等於各自感量倒數之和，即

(1) 設 L_1 與 L_2 相串聯 (第一一八圖) 所載電流 i 於 t 秒內等速變更，則



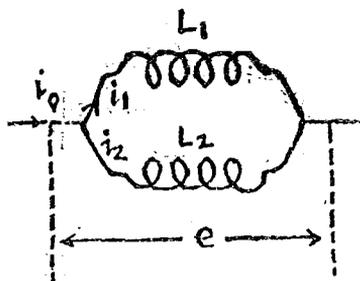
第一一八圖

$$e_1 = L_1 \frac{i}{t}, \quad e_2 = L_2 \frac{i}{t}$$

$$e_0 = (L_1 + L_2) \frac{i}{t} = L_0 \frac{i}{t} \quad \text{故 } L_0 = L_1 +$$

L_2 公式46

(2) 設 L_1 與 L_2 相並聯 (第一一九圖), 所載電流於 t 秒內等速變更, 則



第一一九圖

$$e = L_1 \frac{i_1}{t} = L_2 \frac{i_2}{t} = L_0 \frac{i_0}{t} \quad \text{因 } i_0 = i_1 + i_2$$

$$\text{故 } \frac{i_1}{t} = \frac{e}{L_1}, \quad \frac{i_2}{t} = \frac{e}{L_2}, \quad \frac{i_0}{t} = \frac{e}{L_0}$$

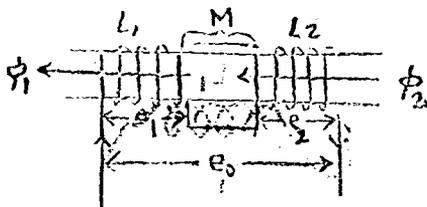
$$\text{故 } \frac{i_0}{t} = \frac{i_1}{t} + \frac{i_2}{t}$$

$$\text{即 } \frac{e}{L_0} = \frac{e}{L_1} + \frac{e}{L_2}$$

$$\text{故 } \frac{1}{L_0} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

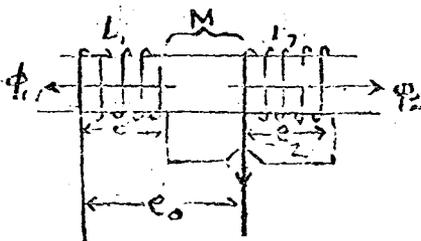
$$\text{或 } L_0 = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}}$$

若二線圈間有互感量，則串聯與並聯之情形各有二別
 爲二線圈電磁方向相同(第一二〇圖及一二二圖)，互



第 一 二 〇 圖

感應協助自感應以阻電流之變更，即各線圈所生之感應電
 壓爲自感應與互感應二者之和，一爲二線圈電磁方向相反
 (第一二一圖及一二三圖)，互感應即減少自感應之效果，即



第 一 二 一 圖

各線圈所生之感應電壓爲自感應與互感應二者之差，

(1) 串聯(第一二〇圖及一二一圖)

$$L_0 = L_1 + L_2 + 2M$$

公式43

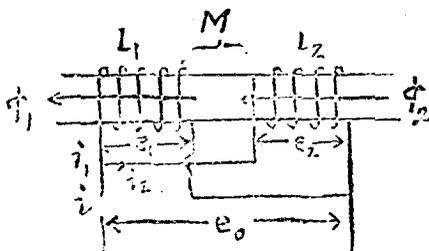
例如第一二〇圖二線圈電磁方向相同，則

$$L_0 = L_1 + L_2 + 2M$$

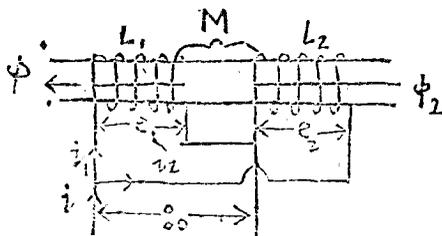
例如第一二圖二線圈電磁方向相反，則

$$L_0 = L_1 + L_2 - 2M$$

(2) 並聯(第一二二圖及一二三圖)



第 一 二 二 圖



第 一 二 三 圖

$$L_0 = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}$$

公式19

例如第一二二圖二線圈電磁方向相同，則

$$L_0 = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

例如第一二三圖二線圈電磁方向相反，則

$$L_0 = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \pm 2M}$$

