

電機工程基本原理

序

本書是寫給工程事業中各項中級工程人員用的，所以在內容上着重電機工程中基本現象和基本原理的講述，尤注重其應用。在文字上則儘可能的使其明白淺顯。更避免運用高深的數學及其他的物理知識。讀者雖缺乏數學訓練及物理知識，仍然可以毫無困難的進行學習。爲了幫助讀者的理解和記憶，附圖 223 幅；習題 142 則，俾收熟能生巧的功效。凡技術訓練班、技術學校等採爲課本，最爲適合，對於有志自修的讀者亦是一本很適當的讀物。

本書大部份是編者在國立廈門大學授課之餘寫的，時作時輟，寫了八個月，其間得到同學葉慶桐先生的鼓勵不少，因此得以完成。國立交通大學王季梅先生的幫助也很多。還有丁依羣小姐代爲繕正，都在此謹致敬禮。

本書中名詞大致根據前教育部公佈的物理學名詞及電機工程名詞。

王乃觀 1950 年 5 月

電機工程基本原理目次

第一章	物質概論	1
第二章	靜電	4
第三章	電流	8
第四章	電路	13
第五章	電動勢	20
第六章	歐姆定律	26
第七章	電功率	29
第八章	串聯電路	35
第九章	並聯電路	41
第十章	串並混聯電路	47
第十一章	磁	52
第十二章	電磁	61
第十三章	電磁感應	68
第十四章	發電機	79
第十五章	直流電動機	91
第十六章	交流電動機	104
第十七章	交流電路	117
第十八章	變壓器	126
第十九章	量電儀器	134
第二十章	真空管	151
附表	基本公式	1
練習問題		1

電機工程基本原埋

第一章 物質概論

電是什麼？這問題到現在，還沒有具體確實的答案；科學家的工作是從自然界中收集許多電的現象，從這許多現象中，推想電是什麼，而且假定電有什麼性質。這推想與假定就是他們的學說，根據這學說來解釋電。如果他們的學說是準確的，當然能解釋電的任何事實和現象，反之，如學說不準確，則必定有一部份事實和現象無法解釋。現在各方面的事實證明，他們的電的學說非常準確。我們在研究電機工程之前，對電的學說必先有一個簡略的了解。

科學家現在公認，解釋電最成功的學說是電子學說。根據這學說，我們四周的實物，凡是有重量而且佔空間的稱之為物質。所有的物質均由極小的顆粒構成，這顆粒稱之為分子；分子又由原子構成；而原子又由電子和質子構成。這電子和質子就是電。

現在我們用一例來解釋這許多名詞；假使我們粉碎一塊磚瓦，可以得到一堆泥沙，整塊的磚瓦是物質（matter），這堆泥沙在科學家看來亦是物質。假使我們進而再粉碎一小部份的泥沙，可能得到幾萬兆個分子（molecules），分子是很小的，300,000,000 個分子一個一個接起來，其長度不過一時而已。分子是任何物質能夠存在，而且不改變原來物質性質的最小基元。如使分子再分裂成更小的部分，我們稱這更小的部分為原子（atom）；但是原子不是原有的物質了，分裂沙的分子，可以得到兩種不同的原子，即氧原子與砂原子。世界上祇有九十二種不同的原子。世界上任何物質，無論鋼、銅、水、橡皮、漆、油、……所有的一切，不過是這九十二種原子結合而成的。我們得到原子後如果有一座原子衝擊機，就可以用

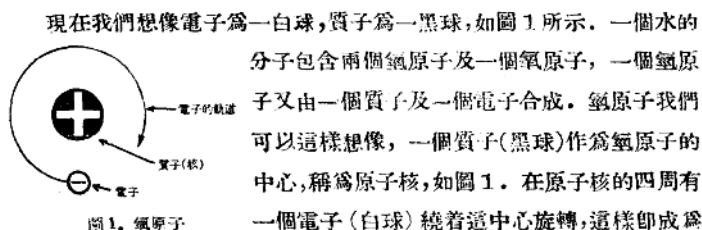
這機器衝擊一個原子，使原子再分裂成更小的部份，即質子 (proton) 和電子 (electron)。現在的科學家的確能夠使原子分解為質子和電子。

我們知道分子是很小的，但是每一個分子又包含兩個或兩個以上的原子，而原子又包含許多個質子和電子，所以一堆沙中的質子和電子，其數之多可以想見。

質子比電子約重兩千倍，每一個質子和電子都有電的特性。電的特性稱為電荷 (charge)。一物體帶有電的特性，我們稱這物體帶電荷，因為質子和電子都有電的特性，所以我們說電子和質子均帶電荷，但質子和電子彼此所帶的電荷是不同的。我們分別這兩種電荷為正電荷 (positive charge) 與負電荷 (negative charge)，並且規定電子帶負電荷，質子帶正電荷。

分子的結構

我們不能從顯微鏡中窺見電子，質子，原子以及分子。所以關於分子的結構，祇能根據電子學說的推想去想像。



現在我們想像電子為一白球，質子為一黑球，如圖 1 所示。一個水的分子包含兩個氫原子及一個氧原子，一個氫原子又由一個質子及一個電子合成。氫原子我們可以這樣想像，一個質子(黑球)作為氫原子的中心，稱為原子核，如圖 1。在原子核的四周有一個電子(白球)繞着這中心旋轉，這樣即成為一個氫原子。至於氧原子比氫原子複雜得多，事實上，除了氫原子之外的九十一種原子，都比氫原子複雜。一個氧原子，由十六個質子和八個電子，彼此緊擠在原子的中心，形成一個原子核，此外還有八個電子，急速的繞着這原子核在軌道上旋轉，如圖 2 所示。原子中心的原子核被軌道上電子的引力約束着，所以原子核不離開電子。

從圖 1 氫原子及圖 2 氧原子中可以看到，一個正常的原子中，質子的數目與電子的數目一定相等。依此類推，每個正常的分子中，所含的質子數目與電子數目相等。

我們知道質子帶正電荷，電子帶負電荷；但一個正電荷與一個負電荷

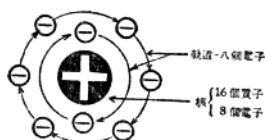


圖 2. 氦原子

相遇時，結果中和，不帶電，所以在正常形態下的分子，原子 其中質子和電子數目相等，而不帶電。這就是為什麼一切物質是電構成的，而我們却不覺得物質有電的性質的理由。

今有一個氧原子與兩個氫原子，原子中急速旋轉着的電子，彼此交叉着它們的軌道，這樣使原子與原子互相鎖住。一個水分子就是由一個氧

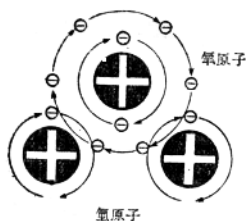


圖 3. 水分子的組織

原子及兩個氫原子互相鎖住而成的，如圖3所示。我們可以想像一杯水是幾千幾萬個這樣的分子合成的。水祇是物質的一種而已，其他鋼，米，空氣，布以及食物，甚至我們人體，相仿的亦是這樣形成的。

質子和電子相合而成九十二種元素的原子。原子與原子合成分子，許多分子彼此集起來又形成物質，大到我們可以看到，如圖 4 所示。

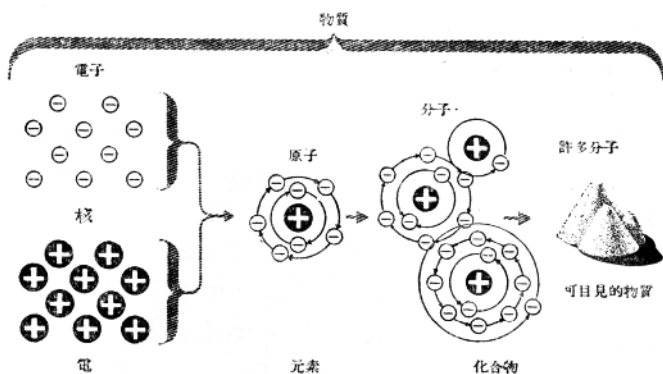


圖 4. 電與物質

第二章 靜 電

圖 5 中, *a* 示一橡膠棒及一簇獸毛, *b* 示用這簇獸毛與橡膠棒摩擦, 摩擦後兩者有相吸引的傾向, 獸毛一一互相推斥, 分離直立向橡膠棒。

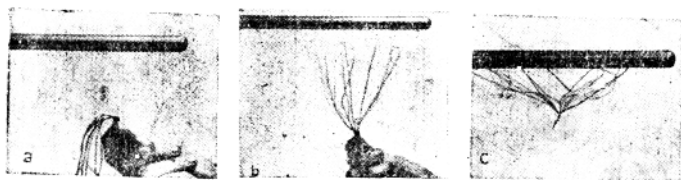


圖 5. 靜電現象

c 示放手後, 獸毛被橡膠棒向上吸。待獸毛與棒一接觸, 獸毛立刻向下降落, 回復圖 *a* 的情景。上面三幅照片表示自然界的一種現象。電子學說必需加以解釋。

根據電子學說, 兩個物體摩擦時, 有一物體, 其中一部分電子被另一物體摩擦而去。獸毛與橡膠棒摩擦, 獸毛上一部份的電子被橡膠棒擦去。獸毛失去電子, 原來獸毛是中和不帶電的, 失去電子後獸毛上質子比電子多, 所以獸毛帶正電荷。即每一縷獸毛上都帶正電荷, 相同的電荷有互相推斥的傾向。每一縷獸毛上都帶相同的正電荷, 所以獸毛一一互相推斥分離, 這就是獸毛能如圖 5 *b* 情形的解釋。

橡膠棒與獸毛摩擦, 獸毛上失去電子。這失去的電子都附於橡膠棒上, 結果橡膠棒上帶負電的電子比帶正電的質子多, 所以棒帶負電荷。因為不相同的電荷有互相吸引的傾向。所以帶負電荷的棒, 有吸引帶正電荷的獸毛的傾向, 這就是獸毛被棒吸住的解釋。

“相同的電荷互相推斥, 不相同的電荷互相吸引”是電學上最基本的定律。兩個物體摩擦使電子遷移, 結果使兩個物體都帶電, 一帶正電荷, 另

一帶負電荷。兩個帶不相同電荷的物體互相吸引。兩個帶相同電荷的物體互相排斥。假使兩個帶不相同電荷的物體接觸時，電子立刻就跳回原來失去電子的物體上去。這現象的擴大就是雲上的電子跳到地上成為閃電和雷。

棒上電子跳回獸毛，獸毛原來已失去電子，現在電子回來了。橡膠棒原來電子過多，現在電子逸去，所以棒與獸毛都回復正常的狀態。換言之，棒或獸毛中每一個負電子都與一個正質子相平衡。結果獸毛與棒都回復不帶電狀態，所以獸毛離開棒，如圖5a。

圖6示兩個原子，一個是平衡的，不帶電的；另一個是不平衡的，帶電的；因為這原子祇有十一個電子，但質子有十二個，已經失去一個電子，因此有一個額外的質子。所以這原子帶正電荷，不平衡，如我們加一個電

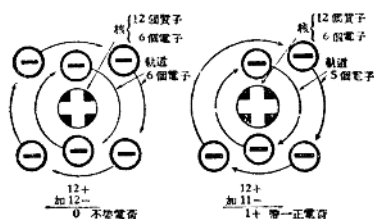


圖6. 帶電與不帶電的原子

子給這不平衡的原子，這原子立刻回復平衡，而不帶電荷。

如果原子中的電子很容易被移去的話，這種電子稱為自由電子(free electrons)。反之，原子中的電子很不容易被移動的話，這種電子我們稱為束縛電子(bound electrons)。

電子的移動

當獸毛與橡膠棒摩擦時，質子並不從獸毛上移向棒，亦不從棒移向獸毛。這因為質子比電子重得多。質子比電子重1838倍，近2000倍，即電子與質子之比，相當於1磅與1噸之比，所以摩擦時電子移動而質子不移動。

水有一種傾向，即從高的一邊流向低的一邊；電子亦有一種傾向，即從電子多的一邊流向少的一邊，如圖7。

任何不平衡的原子或帶電體都有吸引別的電子，或放出多餘電子的傾向，這傾向使電子發生移動，我們稱這傾向為勢(potential)；當兩個帶

電體有高低不同的電勢時，即有**勢差**(potential difference)存在於這兩帶電體之間。簡言之，電子就從勢高的一體移向勢低的一體，所以**勢差**是使電子發生移動的原因。

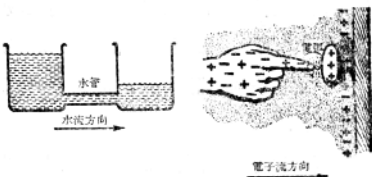


圖 7. 水與電勢

圖 8 中，示**電子流**移動的方向。從這圖中可以看到，總是電子多的一方流向電子少的一方。A 中， $[2-]$ 表示多兩個電子， $[4+]$ 表示多四個

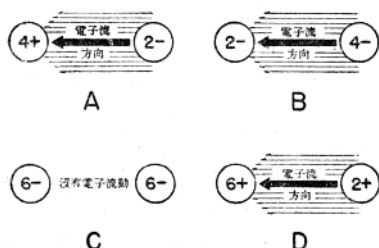


圖 8. 電勢與電子流

質子，即少四個電子。所以兩者相較， $[2-]$ 比 $[4+]$ 多六個電子。B 中 $[4-]$ 比 $[2-]$ 多兩個電子。C 則電勢相等，所以沒有電子流動。D 則 $[2+]$ 比 $[6+]$ 多四個電子。

當電子在靜止時負電荷，稱為**靜電**。當電子在運動時，

即為**電流**。在電機工程中，常討論電流，靜電討論得很少。

使電子通過導線，比通過空氣容易得多，所以我們常用導線傳遞電流。火花就是電流在空氣中流動，但這是偶然的。

容電器

容電器(condenser)是一種儲蓄電荷的裝置。我們可用萊頓瓶(Leyden jar)作說明，參看圖 9。在萊頓瓶的裏面及其外面，下半部都裹着鉛或錫的箔片。一銅球棒通過木的或橡皮的瓶塞子；用絞起來的金屬線接於裏面的箔片上，外面的箔片**接地**(ground)，所謂接地祇是從箔片接一金屬線到地上而已。這線是一捷徑，可以使電子從地上經過這線到箔片，亦可以從箔片到地上。

灌電時用帶負電的帶電體接觸銅球。帶電體上的電子就被移到銅球上，銅棒上，鏈上，直到裏面的箔片上，電子就堆在裏面的箔片上，並推

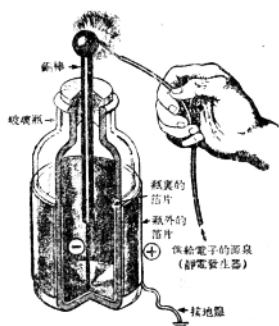


圖9. 萊頓瓶的灌電

的電子可以不斷增加，一直增加到瓶裏箔片的電勢，與供給電子的帶電體的電勢相等時，電子才停止移動。我們常用靜電發生器 (electrostatic-generator) 作為供給電子的帶電體。靜電發生器如圖10所示。

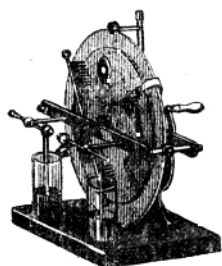


圖10. 靜電發生器

斥瓶外面箔片上的電子。因為外面箔片是接地的，所以外面箔片上的電子，被裏面箔片上的電子推斥，通過接地線逃至地中。這樣裏面箔片上的電子可以不斷的加多，電荷不斷的增高，亦就是電勢增高。

如果沒有接地線，則瓶外箔片上的電子，將存在於外面箔片上，推斥瓶裏箔片的電子，不使瓶裏的電子增加。現在有接地線，所以瓶裏的電子增加若干，瓶外箔片上的電子就從接地線上逃去若干。瓶裏

萊頓瓶的放電，是在瓶外箔片上或地上接一絕緣導線，用這導線去接觸銅球，當這導線剛接觸到銅球時，立刻有一個很大的火花從銅球上跳到線上去。這火花（亦稱電弧）就是電子流。這電子流就是在高壓下，堆積在瓶裏箔片上的電子的流動。這電弧的所以發生，是因為瓶裏箔片的電子比瓶外箔片或地的電子多，因此發生流動而形成電子流。

第三章 電 流

如果我們放一電子在銅線的一端，則這電子使線裏分子的電荷失去平衡，因此產生一個排斥力，去排斥最靠近它的別一個電子。亦就是，加進去的電子使線一端的電勢高於另一端。我們加進去電子的推力，使第一個原子的電子，從軌上脫出，而我們加進去的那個電子，立刻代替了那個被它逼走的電子，補充在它的位置裏。從第一個原子裏驅逐出來的電子，又去逼第二個原子裏的電子。第二個又去逼第三個……這樣不斷的推下去。一直到線的另一端。

電子這樣移動到線中另一端最後一原子時，我們說一個電子通過這線的全長。雖然，最後的電子並不是我們所加進去的那個電子。但因為所有的電子是一個樣子的，所以我們可以說一個電子流過電線。圖 11 是一個在動的電子，放得極大的情形。我們知道僅僅一個電子，能力太小，沒有什麼用處。在一個實際有用的電路中，常有幾千萬萬個動的電子。



圖 11. 在導線中的電子流

安倍

量測一個瀑布的大小，我們常說它是大瀑布或小瀑布，但嚴格的說，這種說法並不準確。首先，我們必需有一個量測的單位，如，一滴，兩滴，一噸，一品脫或一加侖等。在這些量測液體的單位裏，我們必需先選擇一個不太大，亦不太小的，然後才能解決這問題。

如果我們選加侖為量測單位，則我們說水流出多少加侖是否已能決定這瀑布的大小呢？譬如說尼亞加拉大瀑布流出 5,000,000 加侖的水，

我們還是不能明確知道這句話的意義。我們必需同時知道，流出這許多水需要多少時候？一年呢？一個月？一日還是一個鐘點？有許多小的瀑布要得到5,000,000加侖的水，需在它下面等上一年之久。但是尼亞加拉是世界上最大的瀑布，所以祇需在它下面等一個鐘點，就可得5,000,000加侖。這指出，量測一個瀑布的大小，或一個瀑布的強弱，必需在一個單位時間內量測其流過的單位。這稱為**流率**(time rate of flow)。水流的量測常用**每秒加侖**或**每秒品脫**等，作為量測單位。

量測電流時，首先，我們選一量測單位，以一個電子，兩個電子作單位來量測，這單位太小；我們取六百三十萬萬萬個電子，即6,300,000,000,000,000個電子作為一單位，這單位稱為**庫侖**(coulomb)。庫侖是標準的電的量測單位。

用庫侖這單位量測電流的強弱(或說大小)是不夠的。這相當於單用加侖量測瀑布的大小一樣。我們量測電流，亦需用庫侖以及一個單位時間。我們常用的單位是每一秒流過一庫侖，這正相當於水流的每秒流過一加侖。**每秒庫侖**稱為一個**安倍**(ampere)。**安倍是量測電流強弱的單位**。一庫侖電量在一秒間通過電路的一垂直橫斷面，也就是說630萬萬萬個電子在一秒內通過電路的某一處，即為一個安倍，兩庫侖在一秒間通過，就是兩安倍。換言之，100庫侖在一秒間通過，即100安倍。反之，100庫侖在二秒間通過，則為50安倍(每秒50庫侖)。安倍是電流率(rate of flow)的量測單位。

日常用的電燈祇需要半個安倍，但一個36吋的探海燈需要180安倍。所以探海燈所需要的電流，300倍於日常用的電燈。

電阻 (Resistance)

銅線常用以作為電路，因為銅的自由電子(free electrons)多，即容易被移動的電子多。每一銅原子的原子核，有保持電子(包括自由電子)不使其失去的傾向，所以要自由電子移動，必需有**勢**超過其保持電子，不使失去的傾向。這樣電子才能流動。

這種保持電子不使失去的本領，就是電阻(resistance)。所有的物體

(包括銅線)多少有若干電阻存在其中。

線路的電勢必需超過線路保持其電子的本領(電阻)，電流才能通過線路，如果電勢大，電阻小，則通過的電流強。反之，如電勢小，電阻大，則通過的電流弱。

導體及絕緣體(Conductors and Insulators)

電流在若干種物質中祇需很小的電勢就能通過。反之，電流在有的物質中，必需很大的電勢，才能通過。甚至有的物質根本不允許有電流通過。大多數科學家相信這個歧異是由於：許多物質的分子，其中有許多自由電子，原子核與自由電子間的束縛很弱，因此自由電子很容易被移動。這種物質我們稱為**導體**(conductors)。許多非金屬，則與此相反，非金屬的分子中，電子之間的束縛很緊，而且其中自由電子很少。事實上有許多非金屬是沒有自由電子的，在這種物質中要電子移動，似乎不可能。這種非金屬電阻很高，是極不好的導體，所以謂之**絕緣體**(insulators)。

導體與絕緣體之間並沒有很明顯的分界綫，電工人員用導體作為線，以通電流。用最壞的導體作為絕緣體，以阻止電流的移動。導體與絕緣體都是很有用的。例如，輸送電力的電線必需是導體(如銅)。但在導體外面又常裹一層絕緣體(如橡皮)阻止導體內的電流洩漏。所以導體和絕緣體是一樣很有用的。

下表列出若干良好的導體以及若干良好的絕緣體(即最壞的導體)。

導體	絕緣體
銀	乾燥的空氣
銅	玻璃
鋁	雲母
黃銅	橡皮
鋅	石棉
鐵	人造樹脂

電流的控制

導線中電流強弱，可以有兩種方法控制，一種是調節電位差的高低，

一種是調節電阻。

我們已經了解，“勢”(potential)是使電子移動的原因。兩個物體之間或導線的兩端之間有不同的電勢存在時，即所謂有**電位差**(potential difference)有時簡稱**電勢**。電勢是控制導線中電流強弱的一個因素。在水管的一端加壓力，則水流增加。同理，導線兩端的電勢增加，電流亦增加。參看圖12。

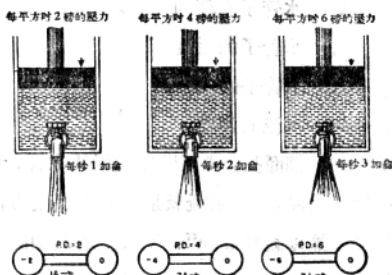


圖 12. 電位差與電流

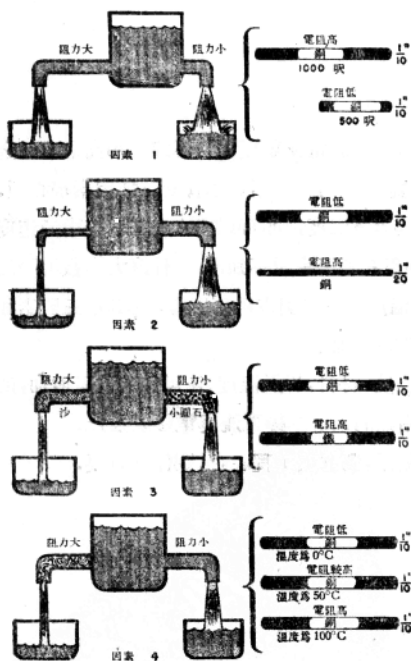


圖 13. 阻力因素及電阻因素的比較

如果阻礙水流流動的阻力不變，當水上的壓力增加一倍時，則水管中的水流亦多一倍。如壓力加三倍，水流亦多三倍。同理導線的電阻不變時電壓加倍，電流亦加倍。如導線兩端電位差為2，祇有1個安倍通過這導線。則電位差為4時，將有2個安倍通過這導線。電位差為6時，將有3個安倍通過這導線。所以電位差加多，電流亦加多。換言之，電阻不變時，電流與電位差成正比。這是一個電勢與電流之間的關係，這關係很重要。

控制電流的第二個因

素是電阻的高低，如果導線兩端的電勢不變，電阻增高則電流減少，電阻減低則電流增加。圖13在水管中決定水流的阻力者有四個因素，即

1. 水管子直徑的大小。
2. 水管子的長度。
3. 水管子的種類。
4. 水流的速度。

一個細而長，裏面填滿污垢的水管，水在這管子中流動有許多阻礙，一定不通暢。有阻礙就是說對水有阻力，如阻力大，則管中的水流小。

導線可視為電的“管子”。導線中的阻力(電阻)亦決定於四種因素，即

1. 導線直徑的大小。
2. 導線的長度。
3. 導線的種類。
4. 導線中的溫度。

圖13，假使導線長而細則電阻高，電流就變弱。導線如用高電阻的金屬做成(像鐵之類)，則電流亦變弱。這三因素與水管前三種因素很相似。

決定導線電阻的第四個因素為溫度，亦可以與水流在水管中的速度相比擬。由於許多的原因，到現在科學家還不知道，為什麼大多數導體的溫度增加，電阻亦增高。但溫度的改變對電阻的影響，與其他三因素相比，還不太大，普通情形下可將其忽略。

無論由那一原因(直徑，長度，材料，以及溫度)使導線的電阻增加，則電流減弱。換言之，若導線兩端的電勢不變電流與電阻成反比。

這是電流與電阻之間的關係，對電機工程說，這關係很重要。

第四章 電 路

線圖 (Diagram)

在工程上我們常用一張簡單的線圖，用以說明一件工程上的工作，這常比千言萬語更為明白與準確。

電工人員常根據線圖來裝置，修理，維護，及製造各種電器。所以，線圖的學習，對於電工人員說，是很重要的。線圖有兩種，一為架線圖(wiring diagram)，一為裝置圖(schematic diagram)。

架線圖除示出一電路的電的接合之外，還表示其結構部分，如支持物，架構之類。而裝置圖則用符號示出電路的接合和電器的佈置，至於支持物，架構之類是不畫的。

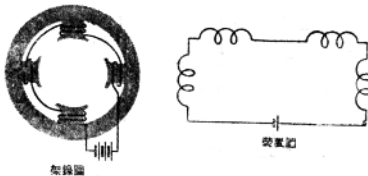


圖 14. 線圖

圖 14 所示的兩線圖，表示同一事物，一是架線圖，一是裝置圖，同示一電動機上線圈的連接。由此可見，裝置圖很類如速記術。

圖 15 是一電機與無線電的符號表，可作參考。

完全電路

所謂完全的電路，是電路一端從電源來，至負載 (load)，另一端從負載至一電源。圖 16 的一電池組作為一個電力之源頭，我們簡稱電源。

沿着箭的方向追索線路，電流從負極出發，通過導線到這電路的負載燈泡中，電流通過燈泡，再經過導線回至電池組的正極。這電流所通過的路徑是一完全電路。

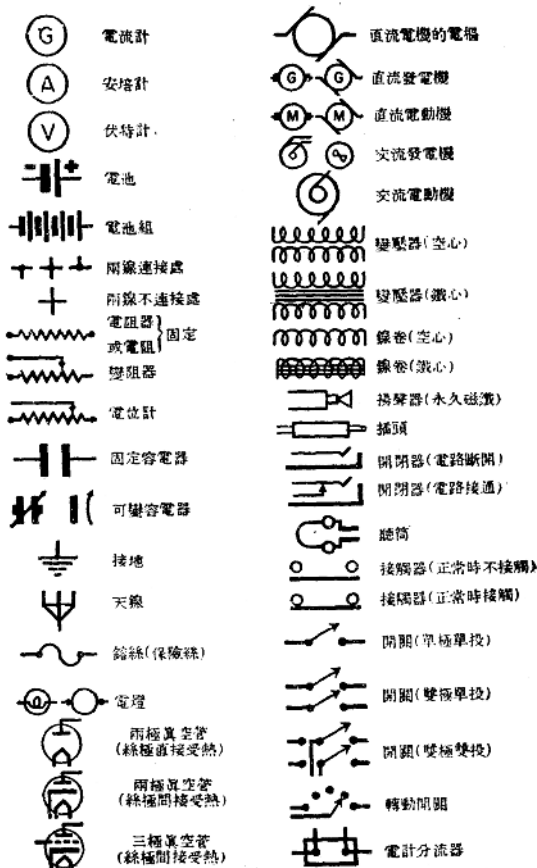


圖 15. 電機與無線電符號表

在這電路中，除用一導線把電能供給燈泡外，又裝一導線使電流可以回到電池組中。如果沒有這一回路，電子在燈泡裏堆集起來，不多時燈泡的電勢與電池組的電勢完全相等。如燈泡與電池組的電勢一相等，就沒有電流在燈與電池組之間流動，這時燈就熄滅，所以所有的電路必須有導線作為回路。亦就是說必需是完全電路，從電源至負載，從負載回至電源。