

中國
工程師手
冊
電機類
上

中國
工程師手冊
電機類
上

中國電機工程學會編

序

我國經濟建設突飛猛進，各項工業高速發展，而電機工程科技則日新月異，更居於領先地位。本學會為提倡科學與技術之研究，及協助政府及工程界推動電機工業，乃於一九六八年決議編訂「電機工程手冊」，並成立編輯委員會，推請李理事佛續為主任委員主特其事。

本手冊內容注重基本科學理論與實際工程技術，採用我國度量衡標準及國立編譯館公布之專門名辭，並盡量納入適合國情之資料。全書共二十六篇，分裝上中下三冊出版。由於編輯期間長達十年，在此科技發展日新月異的時代，當有若干新技術須予補充及部分規範與標準有所修改，因此在出版之前，特將全書各篇再予修訂，冀能以最新之資料與讀者見面。本手冊雖經各委員審慎編撰，惟在付印過程中難免有遺漏與錯誤之處，敬希讀者先生不吝指教，隨時提供卓見以供日後修訂時補正。

編輯委員會各委員本身各有其公務，編撰工作均利用公餘時間兼辦，其對學會服務之熱誠，令人欽佩。本人謹代表學會深致謝忱。

理事長 梁廣平 謹序

公元一九八〇年十一月

編輯經過

中國電機工程學會爲編輯電機工程手冊，於一九六七年成立電機工程手冊編輯委員會着手籌辦，預定於三年內完成出版。但由於所有委員均爲兼任，平時公務極爲繁忙，僅能利用公餘時間編撰，同時在編審期間，有部分委員受聘出國講學或工作，須另聘委員重新撰寫，因此就誤預定進度，未能如期完成。於是商洽科技圖書公司先將已完稿各編，分別印出單行本，以供工程界人士及學生應用與參考。全書稿件延至一九七八年底始全部編就。又因本手冊稿件有半數以上係於五年前完稿，爲避至其內容不能趕上時代，故在付梓前將全部稿件寄請原主編人，以四個月時間重新審查修正及補充最新資料。致編輯工作，歷時過久，本人深感歉疚，萬分慚愧，敬希各位會員先生原諒。

本手冊係參考美國及日本出版之電機工程手冊而編訂者，全書分二十六篇，共五百萬餘字，分裝上中下三冊。其內容爲適應本國之標準，度量衡採用公制，專門名辭以國立編譯館公布者爲準，但如有尚未頒定之名辭而由編撰人斟酌擬定者，則綴以英文原名。在各冊後面附有中英文對照之索引，依筆劃順序排列，以便查閱。本手冊之完成應歸功於歷屆理事長及理監事之大力支持與鼓勵，以及各編輯委員之努力與辛勞，本人特表最高之敬意與感謝。

本委員會首次編輯如此巨著，因缺乏經驗，故疏漏及不理想之處在所難免，尚希各界先進，讀者諸君不吝指教。

編輯委員會主任委員 李佛績 敬識

公元一九七九年十二月

中國工程師手冊

電 機 類

上 冊

總 目 錄

第一篇 電學理論

第一章	電流流動	1— 1
第二章	直流電路	1— 7
第三章	電熱作用	1— 13
第四章	光電作用	1— 19
第五章	電和化學作用	1— 25
第六章	磁	1— 31
第七章	電磁作用	1— 42
第八章	電磁感應	1— 53
第九章	靜電	1— 65
第十章	交流電路	1— 78
第十一章	暫態現象	1— 112
第十二章	物理電學	1— 122

第二篇 電子學

第一章	真空中電子彈道學及其應用	2— 1
第二章	金屬與半導體的導電	2— 14
第三章	電子管	2— 31
第四章	電晶體	2— 58

第五章	放電管及矽控整流器	2—122
第六章	場效電晶體	2—131

第三篇 電子電路

第一章	真空管和電晶體基本電路	3—1
第二章	非調諧小信號放大器	3—19
第三章	非調諧功率放大器	3—35
第四章	調諧小信號放大器	3—55
第五章	正弦波振盪器	3—69
第六章	調變及解調變	3—80
第七章	脈衝電路	3—110
第八章	拂掠產生器	3—160

第四篇 電磁測定及電儀表

第一章	電氣單位與標準	4—1
第二章	電儀表	4—8
第三章	指示計器	4—19
第四章	積算計器	4—36
第五章	儀器用變化器	4—50
第六章	記錄儀器與遙測儀器	4—59
第七章	特殊儀器	4—65
第八章	檢流計	4—73
第九章	示波器	4—87
第十章	電位差計	4—93
第十一章	電阻之測定	4—98
第十二章	電力測定法	4—116
第十三章	感應及電容測定法	4—121
第十四章	頻率測定法	4—130

第十五章	磁性測定法	4—134
第十六章	應用電氣測定法	4—140
第十七章	放射線之測定	4—159

第五篇 自動控制

第一章	緒 論	5— 1
第二章	拉氏變換法	5— 10
第三章	轉移函數	5— 36
第四章	暫態響應	5— 53
第五章	頻率響應	5— 59
第六章	轉移函數之圖示法	5— 70
第七章	穩定度判別法	5—108
第八章	伺服機構	5—119
第九章	散譜控制系统	5—135
第十章	非線性控制系统	5—166
第十一章	最佳控制理論	5—207

第六篇 電工材料

第一章	絕緣材料	6— 1
第二章	導電材料	6— 26
第三章	磁性材料	6—144
第四章	材料試驗法	6—167

第七篇 電 機

第一章	總 論	7— 1
第二章	變壓器	7— 11
第三章	感應電動機	7— 45
第四章	同步機	7— 86

第五章	直流機	7—126
第六章	整流電動機	7—173
第七章	旋轉換流機	7—190
第八章	特殊機器	7—205

第八篇 電機設計

第一章	基本事項	8— 1
第二章	變壓器	8— 18
第三章	感應電動機	8— 41
第四章	同步發電機	8— 65
第五章	直流機	8— 89
第六章	附 註	8—121

第九篇 水力發電

第一章	總 論	9— 1
第二章	河川流量	9— 9
第三章	引水及制水設備	9— 18
第四章	水力機械	9— 46
第五章	電機設備	9— 81
第六章	廠房及附屬設備	9— 95
第七章	抽蓄發電	9— 99
第八章	水力發電廠之設計、裝機、試驗及維護	9—106

第一篇

電學理論

目 錄

第一章	電流流動	頁
1.1	電流.....	1— 1
1.2	電動勢——電壓.....	1— 2
1.3	歐姆 (Ohm) 定律.....	1— 3
1.4	電阻.....	1— 3
1.5	溫度對電阻的影響.....	1— 4
1.6	電功率.....	1— 5
1.7	電能.....	1— 5
第二章	直流電路	
2.1	電路連接.....	1— 7
2.2	串聯電路.....	1— 8
2.3	並聯電路.....	1— 9
2.4	串並聯電路.....	1— 10
2.5	克希荷夫 (Kirchhoff) 定律.....	1— 11
第三章	電熱作用	
3.1	焦耳 (Joule) 定律.....	1— 13
3.2	散熱和安全電流.....	1— 14
3.3	接觸電位差.....	1— 14
3.4	熱偶.....	1— 16
第四章	光電作用	
4.1	光電發射.....	1— 19
4.2	光電傳導性.....	1— 21
4.3	光電伏打效應.....	1— 22
第五章	電和化學作用	
5.1	電解.....	1— 25

5.2	法拉第 (Faraday) 電解定律	1— 26
5.3	原電池	1— 27
5.4	二次電池	1— 29
第六章 磁		
6.1	磁極	1— 31
6.2	庫侖 (Coulomb) 定律	1— 31
6.3	磁場強度	1— 32
6.4	磁力線	1— 35
6.5	磁感應	1— 36
6.6	磁通密度	1— 37
6.7	磁轉力偶	1— 37
6.8	磁化	1— 38
6.9	磁導係數, 相對磁導係數和磁納係數的關係	1— 39
6.10	磁簾	1— 40
6.11	地磁	1— 40
第七章 電磁作用		
7.1	電磁場	1— 42
7.2	安培 (Ampere) 公式	1— 42
7.3	由閉合迴線產生的磁場	1— 44
7.4	由無窮長導線產生的磁場	1— 45
7.5	環狀導線及螺管內的磁場強度	1— 46
7.6	鐵的磁化現象	1— 47
7.7	磁路	1— 49
7.8	磁路計算法	1— 49
7.9	左手定則	1— 51
7.10	磁場和通有電流的導體所互生的力	1— 52
第八章 電磁感應		
8.1	法拉第 (Faraday) 感應定律	1— 53
8.2	楞次 (Lenz) 定律	1— 54
8.3	右手定則	1— 55
8.4	感應電勢	1— 55
8.5	自感	1— 56

8•6	自感的計算	1— 58
8•7	互感	1— 58
8•8	互感的計算	1— 60
8•9	自感與互感的關係	1— 60
8•10	磁場中所儲的能	1— 62
8•11	磁鐵吸引力	1— 64
第九章 靜電		
9•1	電荷	1— 65
9•2	靜電感應	1— 65
9•3	庫倫 (Coulomb) 定律	1— 66
9•4	電力線和電場強度	1— 67
9•5	高斯 (Gauss) 定律	1— 69
9•6	電通密度	1— 70
9•7	電位	1— 70
9•8	等位面	1— 72
9•9	像場	1— 73
9•10	電容	1— 73
9•11	電容連接	1— 75
9•12	電容中所儲的能	1— 76
9•13	靜電吸引力	1— 77
第十章 交流電路		
10•1	交流電壓和電流	1— 78
10•2	正弦波交流電的性質	1— 80
10•3	向量	1— 83
10•4	純粹電阻交流電路	1— 86
10•5	純粹電感交流電路	1— 87
10•6	純粹電容交流電路	1— 88
10•7	功率和功效因數	1— 89
10•8	交流串聯電路	1— 91
10•9	交流並聯電路	1— 95
10•10	交流串並聯電路	1— 97
10•11	非正弦波交流電	1— 98

10.12	解網路的幾種定理	1—99
10.13	變壓器	1—103
10.14	三相電路	1—106

第十一章 暫態現象

11.1	電的暫態狀態	1—112
11.2	rL 電路	1—112
11.3	rC 電路	1—115
11.4	時間常數	1—116
11.5	rLC 電路	1—117
11.6	交流暫態	1—120

第十二章 物理電學

12.1	半導體	1—122
12.2	真空中的電子運動	1—124
12.3	放電現象	1—127
12.4	X射線	1—129
12.5	放射性	1—130
12.6	電磁波	1—132

索 引

第一篇

電學理論

張 焜

第一章 電 流、流 動

1.1 電 流

一個電子在原子外層軌道上環繞，所受原子核的吸引力，比在原子核附近軌道上的電子所受的力為小。這些在外層軌道上的電子，一旦受到外力時，容易脫離軌道，被迫逸出變成自由電子。這些自由電子會被失去電子的原子所吸引，其結果，在物質內的自由電子能在原子間不停地雜亂流動。這些電子的雜亂流動，在物質內各方向是相等的，故對物質的某一部份而言，可以說未失去電子或未獲得電子。但是，當有許多電子的流動在同一方向行進時，物質的某一部份就失去電子，而另一部份則獲得電子，這樣的電子流動叫做電流流動。

圖 1.1.1 所示為在電池的正負極間連接一金屬導線。在電池的接端未連接導線以前，由於電解液與兩極板間有化學的反應作用，使電子由正極板移至另一負極板，故在負極上有超額電子，而在正極上缺少電子。

當電池正負兩極端間連以導線，負極上的電子，離開負極，推動導線中的自由電子而流至正極。此時負極又有空餘的地方可以容納電解液再度送來的電子，此項電子仍由正極獲得。因此，只要正負兩極連有導線，電子能連續不斷地由負極經電池外面連接的導線到達正極，電解液在電池內部從正極輸送電子

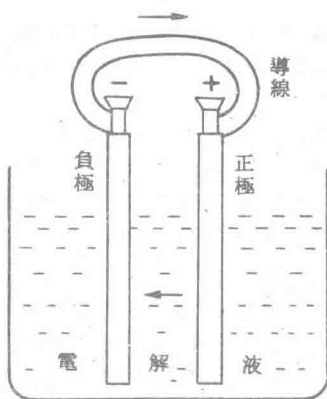
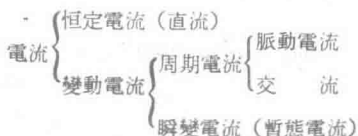


圖 1.1.1 電池和導線中的電子流動

至負極，補充負極的需要，故有一股電子流繼續不斷的流動。

每一電子帶有 1.6×10^{-19} 庫倫的電荷量，因此一個庫倫約相當於 6.25×10^{18} 個電子所帶的電荷量。在上述導線截面內每秒鐘流過 6.25×10^{18} 個電子稱為電流的單位，這一電流單位稱為安培。所以一安培為一秒鐘內在物質中流過一庫倫的電荷量，如一秒鐘內流過二庫倫即是二安培。電流的方向在習慣上與電子流的流動方向相反。

在某段時間內電流的數值和方向，視其變化情形可分類為：



1.2 電動勢——電壓

物質內電子向一個方向流動時，就有電子流產生。這種流動是從負電荷至正電荷的。祇要有電荷的差額時，電子流動便永遠存在。

如要產生電荷，必須把電子移動，使某一處電子過多，或另一處電子缺少，在此過多或缺少電子之處，電荷就產生。這些電子移動，產生電荷，是由電源能量所供給，一旦電荷產生後，就變成電能，在電荷中存有的電能等於產生電荷的能量。

當電流流動時，電荷中存有的電能用來推動電子，使電子從負電荷移至正電荷，或使電流由正電荷流向負電荷，這種電能稱為電動勢，為一種使電流流動的動力。

無論正的或負的電荷都表示儲存有能量，這種儲存而尚未用的能量稱為位能。一個電荷的位能是等於產生這一電荷所做的功，測量這功的單位稱為伏特。因此，一個電荷的電動勢等於此電荷儲有的位能，而用伏特數來表示。

當有兩個不相等的電荷存在時，在這兩個電荷間的電動勢，應等於這兩個電荷的電位差。由於每個電荷的位能是以伏特為單位，所以電位差的單位亦以伏特來表示。兩個電荷間的電位差就是這兩個電荷間的電動勢，通常稱為電壓。

以上所述，知道兩個不相等的電荷間可以產生電壓或電位差，可是，一個未帶電荷的物體，對帶電荷的物體，亦有電位差。未帶電荷的對負電荷為正，而對正電荷為負。因此，在兩個不相等的正電荷之間，或者在兩個不相等的負電荷之間，都有電位差或電壓存在，所以電壓純粹為相對的，不能用來表示電荷的絕對量，祇能用來比較兩個電荷，即此兩電荷間存有的電動勢。

電池的正負兩極，因為正極帶有正電荷，負極帶有負電荷，因此，在該兩極端之間就有電壓存在。在兩極端連接導線，電子流由負極流經導線至正極，電流由正極流經導線至負極。

無論何時，祇要把兩個不相等的電荷端連接起來，就有電子流從負電荷至正電荷，或電流從正電荷流到負電荷。兩電荷間的電位差或電壓愈大，電流亦愈大。

1.3 歐姆 (Ohm) 定律

電流在各種導線中流過，並不都是相同的。電流本身乃是物質內自由電子的流動，因此物質內自由電子的多寡，可決定電流所受的阻力。有些物質的原子極易失去其外層電子，變成自由電子，這些物質對其電流的阻力小。但有些別種物質能保持其外層電子，不使變成自由電子，這種物質對電流有極大的阻力。即各種導線對電流總有一些或大或小的阻力，這種阻力稱為電阻。

同時，電流的流動為電動勢或電壓迫使電子流動所致。因此電流的大小，須視所用電壓和電阻的數量而定。這一事實為 George S. Ohm 所發現，成為著名的 Ohm 定律，其關係為

$$\text{電流} = \frac{\text{電動勢 (或電壓)}}{\text{電阻}}$$

$$\text{或} \quad \text{安培} = \frac{\text{伏特}}{\text{歐姆}}$$

上式歐姆為電阻的單位。由公式可知，電流，電壓和電阻的基本關係如下：

- (1) 當電阻不變時，其電流將隨電壓升高而增大。
- (2) 當電壓不變時，其電流將隨電阻增大而減小。

1.4 電 阻

任何一個物體均有電阻，以一根導線而言，其電阻由四個因素決定，即構成導線的物質、長度、截面積和溫度。

一根導線愈長，對電流的阻礙增加，電阻愈大。反之，導線愈短，對電流的阻礙減小，電阻亦愈小。導線的截面積為其截斷處的面積，截面積愈大，線的電阻愈小，截面積愈小，線的電阻愈大。因此，導線的電阻 r 對其長度 l 成正比，對其截面積 A 成反比，或

$$r = \rho \frac{l}{A} \quad (1.1.1)$$

式 1.1.1 中的比例係數 ρ 稱為物質的電阻係數，隨構成導線的物質而異，其單位為每公分微歐姆 ($\mu\Omega\text{-cm}$)，即 1 公分長度 1 平方公分截面積導線的電阻，在溫度 20°C 時，銀為 1.62，銅為 1.69，鋁為 2.62，鐵為 10.0。

電阻的倒數為電導。一根導線的電導 g 對其長度 l 成反比，對其截面積成正比，或

$$g = \lambda \frac{A}{l} \quad (1.1.2)$$

式 1.1.2 中的 λ 稱為物質的傳導係數。由於 $g = \frac{1}{r}$ ，導電係數與電阻係數的關係為 $\lambda = \frac{1}{\rho}$ 。

1.5 溫度對電阻的影響

大部份物質在溫度增高時，其電阻亦隨之增加，溫度降低時，其電阻亦隨之減小。這種現象是因為物質的溫度改變，物質內的外層電子逸出軌道難易的程度，而改變的緣故。

有些物質如碳和電解溶液，在溫度增高時，其電阻反而變小。因此，溫度對電阻的影響，隨物質的種類而異。

在通常情況，溫度 $T^\circ\text{C}$ 時，物質的電阻 R_T 的關係為

$$R_T = R_t [1 + \alpha_t (T - t)] \quad (1.1.3)$$

上式 R_t 為起始溫度 $t^\circ\text{C}$ 時的電阻， α_t 為物質在起始溫度 $t^\circ\text{C}$ 時，其電阻的溫度係數。

如物質的起始溫度為 0°C ，此時的電阻為 R_0 ，其溫度係數為 α_0 ，應用式 1.1.3，可分別求得溫度 $t^\circ\text{C}$ 和 $T^\circ\text{C}$ 時的電阻 R_t 和 R_T ，則

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_0 t) \quad (1.1.4)$$

$$R_T = R_0 (1 + \alpha_0 T) \quad (1.1.5)$$

將式 1.1.5 與 1.1.4 相比，得

$$R_T = \frac{1 + \alpha_0 T}{1 + \alpha_0 t} R_t = \left[1 + \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t} (T - t) \right] R_t \quad (1.1.6)$$

將式 1.1.6 與式 1.1.3 比較，得

$$\alpha_t = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + t} \quad (1.1.7)$$

根據國際標準，100% 傳導性銅線線的 $\alpha_0 = \frac{1}{234.5} = 0.00427$ 。所以，對 100 %

傳導性銅線，在 $t^{\circ}\text{C}$ 的溫度係數由式 1.1.7 求得，

$$\alpha_t = \frac{1}{234.5 + t} \quad (1.1.8)$$

當該銅線連續由 $t^{\circ}\text{C}$ 加溫至 $T^{\circ}\text{C}$ ，而在溫度 $t^{\circ}\text{C}$ 和 $T^{\circ}\text{C}$ 時的電阻 R_t 和 R_T 已測得其歐姆值，則可將式 1.1.8 代入式 1.1.3，得到該電阻的升高溫度。

$$T - t = \left(\frac{R_T - R_t}{R_t} \right) (234.5 + t) \quad (1.1.9)$$

1.6 電 功 率

功率是代表做功的速率，凡是一種力能使物體移動，就是做功。電壓是一種電力，能使電子移動，產生電流。如在兩點間有電壓存在而無電流流動，則雖有電壓而未曾做功。凡電壓能使電子由某一點移至另一點，就做了功，這做功的速率稱為電功率。

電功率等於電壓乘電流，亦就是電力乘每秒鐘內通過某點電子的庫侖數，即電子流經某物體做功的速率。電功率的基本單位為瓦特，等於伏特乘安培。

當一穩定電流 I 流經一導線，而在跨導線兩端的電壓為 E ，則對該導線所用的電功率 P 為

$$P = EI \quad (1.1.10)$$

把 Ohm 定律的公式代入此電功率的公式，電功率公式就可以用電流和電阻或者電壓和電阻來表示。根據 Ohm 定律 $E = IR$ ，將電功率公式 1.1.10 中的 E 換成 IR ，電功率就可毋需由電壓決定，得

$$P = (IR) I = I^2 R \quad (1.1.11)$$

同理，由於 $I = \frac{E}{R}$ ，倘使將電功率公式 1.1.10 中的 I 換成 $\frac{E}{R}$ ，則當電壓和電阻為已知時，就可求出電功率，此為

$$P = E \left(\frac{E}{R} \right) = \frac{E^2}{R} \quad (1.1.12)$$

式 1.1.11 和 1.1.12 中，電流單位用安培，電壓單位用伏特，電阻單位用歐姆，則電功率用瓦特單位來表示。

1.7 電 能

電功率的單位瓦特為每秒鐘內所做焦耳的功。亦就是每秒鐘內所用的電能量。

當一個電子，其質量為 m ，其電荷為 e ，受 A 和 B 兩點間的電位差 E_{AB}