

大學用書選譯

基本電工學

(上 册)

盛 慶 球 譯

教 育 部 出 版
正 中 書 局 印 行

PDG

原 序

電機工程領域之加速發展，曾於工程教育中造成嚴重之問題，尤在為訓練未來工程師而選擇並安排教材時為然。對此種問題之一極其普通而健全之辦法，則為強調工程中之科學方面。此辦法之被廣泛採用，不僅可證實本書初版時所採用一般觀點之價值，且對再版之修正，亦具有極大之影響也。

廣義言之，本版之修正，實具有下列三個主要目的：

1. 利用數年來使用本書初版之教學經驗，求其更易於教學及了解。
2. 使充分認識現代控制及測定技術之重要性。
3. 將迴路理論，電機機械，及電子學中之最近發展及概念併合於本書之內，此種發展及概念對於所有工程部門均具有廣大之意義。

為求達此目的，故必須將本書內容重行組織，並將若干章及另外數章之重要部分完全重寫。為求達第一個目的，故將新概念漸次引入，並加以充分說明。例如關於電路，磁路，電機機械，及電子學之數章引論，均係自簡單而基本之原理出發，其中大多為古典科學實驗之直接結果。測定及控制相關部門之大為擴充，亦屢見於本書中，蓋著者深感此種新穎而重要之材料，實不應僅作一不相關之附錄。是以回饋控制所基之思考過程雖於迴路理論之數章中見到，而在討論電機機械及電子學時，又復重現，俾在研究回饋控制之前，對之早已熟悉。依照上述目的而新編入之裝置及概念，則為磁性放大器，電晶體，自行平衡記錄器及控制器，相敏調幅及解調，控制放大器，直流及交流控制電動機，以及傳達函數與頻率應答分析等。

本書篇幅之增加，實為無可避免之結果。本書已包含較一每週三小時之二學期課程中所能教授者為多之材料。然而在組織及編著時，著者曾經常顧及使用時之伸縮性，且著者感到可有各種不同長度及題材之課程，能應用本書。在此種情況下，著者希望

講授者能自由選擇材料，以適合其特殊需要及環境，而不致於過分犧牲材料之連續性。

若干講授者曾費去極多之時間與精力，予著者以可貴之批評及建議。著者因曾有機與各種工業中之工程師密切接觸，故對題材之選擇及其相對重要性等問題，均大獲裨益。對此謹表示誠摯之感謝。

A. E. 費茲吉拉特
台維持 E. 奧根鮑純

目 錄

第一章 直流電路 1

基本電氣量——電路常數——電阻；歐姆定律
——基本迴路定律；克希霍夫定律——直流電
路——較為複雜之直流電路——網絡簡化——
重疊原理——西佛寧定理

第二章 交變電流及電壓 37

交變電壓之發生——正弦式電壓及電流——純
粹電阻交流電路——根均平方或有效電流及電
壓——自感——純粹電感交流電路——電容
——純粹電容交流電路——迴路參數作為物理
的實體

第三章 相量代表法及複數代數 61

電流及電壓之加法；相量代表法——直座標形
式之相量——極座標形式之相量——冪數形式
之相量——阻抗概念——諧波；富理葉級數。

第四章 交流電路；電流電壓關係 87

迴路元件之串聯組合——電阻電感串聯迴路——
複數記號法之應用——電阻電容串聯迴路——
電阻電感電容迴路——並聯迴路——網絡簡
化；串並聯迴路——多電源網絡——西佛寧定
理

第五章 交流電路；功率及頻率應答 123

功率及電抗功率——功率因數及伏安——功率

因數校正——頻率應答及共振——耦合網絡——
四端點網絡——最大功率情況——總結

第六章 多相電路..... 161

3相電壓之發生——三相電壓，電流，及功率
——Y連接之迴路—— Δ 連接之迴路—— Δ —
Y之等效——平衡3相迴路之分析；單線圖——
——3相功率測定——其他多相系統——成本考
慮及電價計算

第七章 暫 態..... 193

電氣暫態——有恆定所加電壓之RL暫態——
有恆定所加電壓之RC暫態——時間常數——
LC迴路；振盪——更具一般性的暫態問題——
——交流暫態

第八章 磁 路..... 217

電流之磁效應——磁路概念——BH曲線——
磁性材料之特性——實用磁路——有直流激磁
之磁路——磁力及其利用——磁感應電壓；自
感——有交流激磁之磁路——磁壓及渦流損耗
——激磁電流——有交流及直流激磁之磁路；
可飽和鐵心電抗器。

第九章 變 壓 器..... 247

變壓器構造——理想的變壓器中之作用——與
理想之出入；漏電抗；等效迴路之演化——等
效迴路——短路及開路試驗——效率及調整——
——可變頻率變壓器——自耦變壓器；儀表變壓
器——3相迴路中之變壓器——互感；空氣心

子變壓器。

第十章 電機機械之物理觀..... 281

電氣機械能量變換——電壓及轉矩——磁場之交互作用——交流發電機——直流發電機——電動機——損耗及效率——應用電機時之考慮——電機定額

第十一章 直流電機..... 329

整流作用——電樞電動勢——等效迴路——磁化曲線——發電機行爲——自激發電機——電動機行爲——分激電動機——串激及複激電動機——電動機啓動——速率控制——整流磁場——電樞反應；補償磁場

第十二章 三相感應電動機..... 369

迴轉磁場——感應電動機作用——等效迴路——基於簡化等效迴路之分析——無載及阻塞轉子試驗——雙鼠籠式電動機；鼠籠式電動機之分類——感應電動機啓動

第十三章 多相同步電機..... 396

同步電動機作用——同步阻抗及激磁電壓——等效迴路及相量圖——凸極及飽和之效應——基於等效迴路之電動機行爲近似分析——交流電動機之功率因數——同步電動機啓動

第十四章 分數馬力電動機..... 411

單相感應電動機——單相感應電動機之啓動及運轉行爲——交流串激電動機；通用電動機——

—推斥電動機——小型直流電動機；裂相串繞
及裂相複繞電動機

第十五章 高度真空管之物理觀及其關聯

迴路.....411

基本過程之考察——電子發射——高度真空熱
離子二極管——柵極控制高度真空管；三極管
——真空管因數——四極管及五極管；電子注
功率管——高度真空管之比較——靜止情況及
動態運用——真空管迴路：放大器——調幅及
解調——真空管振盪器

第十六章 高度真空管作為迴路元件.....463

電壓及電流記號——圖解分析——等效迴路
——有自給偏壓之等效迴路——功率放大；圖解
與等效迴路方法之比較。

第十七章 真空管放大器.....489

放大器之分類——極際電容及輸入阻抗——電
阻電容耦合放大器——變壓器耦合放大器——
直接耦合放大器——推挽式迴路——陰極耦合
器放大器——倒回饋放大器

第十八章 真空管振盪器.....515

自激之條件——回饋振盪器之必要條件——振
盪之發動及限制——振盪器迴路——振盪器應
用；感應及介質加熱

第十九章 特殊目的真空管及半導體器械.....525

含氣熱離子二極管——整流——基本的整流器

分析——半導體；電晶體——冷陰極含氣管；
 輝光管，汞弧整流器，及引燃整流管——光敏
 管——光電管應用

第二十章 控制放大器及其關聯設備.....557

閘流管——閘流管控制迴路——磁性放大器
 ——直流發電機作為放大器——Rototrol 及
 Regulex——安浦立達因——控制電動機——
 同位器

第二十一章 儀表使用.....599

電氣測定儀表——標準電池——電位計——暫
 態及週波現象之測定：示波器——電阻電橋—
 —阻抗電橋——非電氣量以電氣方法測定——
 若干特殊例子——自行平衡連續記錄器——閃
 光測頻計——特殊目的中之儀表使用——儀表
 使用與控制之關係

第二十二章 回饋控制系統.....629

控制系統之型式——電機行為之回饋控制——
 不連續回饋控制系統——定態情況；增益規格
 ——頻率應答——傳達函數及區塊圖——穩定
 度考慮——綜合應答——補償

附 錄.....679

標準韌化銅電線表（實心）
 標準韌化銅電線表（絞線）
 真空管之運用數據

第一章 直流電路

電機工程為關於將其他形式之能量變換為電能，關於電能之輸送與分配，以及關於其控制及為最後利用而將其再行變換之學問。就最終目的而言，電能本身通常並無用處；在電動機、電泵，及電磁鐵中，電能係變換為有用之機械能；在電爐及電灶中變換為熱能；在揚聲器中變換為聲能；在電燈中變換為光能（常先變換為熱能）；或在電解過程中變換為化學能。

電機工程與其他之專業密切相關：僅舉少數例子，機械工程師使用電機工程之產品於電動機之應用與控制，用為電力廠之一主要部分，以及用於遙示儀表與遙控。化學工程師使用同樣之產品於製造過程之控制，用於保溫與冷藏，以及用於自動記錄與指示設備。土木及結構工程師則涉及電動機之應用，屋內配電，以及應力與磨變之測定等。航空工程師於飛機及飛彈中處理甚多發電，測定及控制之重要應用。在化學家及物理學家之研究中，電氣測定裝置為甚有價值之輔助物。上述各種用處之經濟方面，則對行政及管理人員極具重要性。

電機工程對二十世紀技術進步之顯著貢獻，主要係由於此一事實：即電能不但易於變換且易於控制並可便利而經濟地運送至長距離之外。電機工程之研究乃成為對用於能量變換及輸送的器械之研究，而特別着重於欲獲得為求得外在行為所必需之內在特性。本章乃藉對基本名詞下以定義，並闡明其必要之概念，而對此種研究立下基礎。關於電路理論的導論，將為基於直流電路者。

1-1 基本電氣量

在吾人可以研究電氣系統及器械的行為之前，吾人必須先熟悉用以表示其行為之基本量，此種量之性質與特徵，以及其所遵守之定律。此等定律乃大量之實驗研究及對此種實驗結果所作理

論關聯之結果。因此，在本章前數節中有甚多陳述，表面似甚為隨意或並無理論根據，因其證實乃完全在於彼等能符合所有已知實驗之故。

最基本之量為電荷 (Electric Charge)，或電量，猶如液體之體積在水力學研究中或位移在力學研究中可視為基礎然。電荷或為正 (如在質子中) 或為負 (如在電子中)。在米鈺秒制中，電荷係以庫倫 (Coulomb) 量計。例如一電子上之電荷為負的而等於 1.591×10^{-19} 庫倫。反之，約需 6.4×10^{18} 個電子以形成等於 1 庫倫之電荷。

電荷之存在使其周圍區域內發生力效應。明白言之，二電荷可互相推斥或吸引 (視其記號為相同或相反而定)，其力之大小係與二電荷大小之乘積成正比，而與其間之距離成反比。此效應常被描述為在電荷之鄰近有一力場；此力場乃稱為電場 (Electric field)。

然而吾人對運動中之電荷較靜止中之電荷更具興趣，蓋如欲達成能量變換電荷必須運動之故。吾人特別 (雖然並非唯獨地) 對電荷運動係限制於由銅或鋁等材料所形成確切通路內之情況感到興趣；此種材料由經驗證明為電之良導體 (Conductors)。與此相對比者，其他材料諸如瓷器、雲母、玻璃，以及在若干情形下之空氣，已知其為極端不良之導體。彼等乃稱為絕緣體 (Insulators)，並可藉其構成導體通路對外分路之防壁，而用以限制電荷於特定導體通路之內。此種通路乃稱為迴路 (Circuits)，而係類似於水力情形中之管道系統。

迴路中電荷運動之速率乃稱為電流 (Current)。電流之單位為安培 (Ampere)；當電荷以一庫倫每秒之速率流動時即有一安培存在。以公式表示

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{安培} \quad (1-1)$$

或反之，

$$q = \int i dt \quad \text{庫倫} \quad (1-2)$$

q 為流動之電荷而 t 為時間以秒計。小寫字母 $i, q,$ 及 t 乃用以代表一般之情形，此中 i 及 q 可為時間之函數。大寫字母（例如 I, Q ）則將用以代表不隨時間而改變之量。

注意電荷為流經迴路之電量；電流為電荷流動之時間率，而類似機械系統中之速度或水力系統中之流體流動率。有如速度，電流既有大小又有方向。正電流之方向為正電荷流動之方向，或相反於電子流動之方向。

能量改變或能量轉移通常伴以電荷之運動。迴路中二點 a 與 b 間之電位差（Potential Difference）為自一點傳送一單位正電荷（1 庫倫）至另一點所關聯之功或能。在米姪秒制中，每單位電荷之功或能係以伏特（Volts）量計；電壓乃類似機械系統中之力或水力系統中之水壓或水頭。與移動一電荷 q 經一 e 伏特之電位差所關聯之能量為

$$W = eq \quad \text{焦爾，或瓦秒} \quad (1-3)$$

若功係作於此單位電荷上，因而自 a 移至 b 時，其位能增加，則在自 a 至 b 之方向有一電壓升（Voltage rise）存在。反之，即在自 b 至 a 之方向有一電壓降（Voltage drop）存在。當 a 與 b 間有若干迴路存在時，不論選取何條通路此種說法均為真實。與電能源相關聯之電位差（即與能量變換相關聯，如在電池組中化學能變換為電能是）乃稱為電動勢（Electromotive force，簡寫為 emf ）。

當有電流存在於迴路中時。在迴路附近發生另一種力場。此場係稱為磁場（Magnetic field），乃與由電荷引起之電場同時存在者。磁場能於其他載流元件或鐵片上發生力之作用。當引起磁場之電流係隨時間而改變時，磁場亦能產生電壓於鄰近之迴路中，稱為感應電壓（Induced Voltage）。此種磁效應將於第八章中再行研究。目前磁場可視為影響電路之功率及能量傳達性質之另一函數。

除用於公式（1-3）中之記號 e 外，記號 v 亦係用以表示電

壓。對於電機機械或與電機機械關聯之迴路，普通係用 e 表示在電機中感應得之電壓而用 v 表示其他電壓以示其區別。電子學中習慣上所用之記號則並無此種區別，記號 e 係用於所有之電壓。在本書中除在討論變壓器及電機之數章中（第九章至第十四章），用上述 e 與 v 間之區別外，其餘均用記號 e 。

功率（Power），或能量之轉移率，為能量之時間微分。因此，功率 P 為

$$p = \frac{dW}{dt} = e \cdot \frac{dq}{dt} = ei \quad \text{瓦，或焦爾/秒} \quad (1-4)$$

若電流與電壓為時間之函數，此在甚多問題中確保如此，轉移之總能量可表示為

$$W = \int_0^t p \, dt = \int_0^t ei \, dt \quad \text{瓦秒，或焦爾} \quad (1-5)$$

當 e 及 i 係恆定於 E 及 I 之值時（與時間無關），在 t 時間內之能量成為

$$W = EIt \quad \text{焦爾} \quad (1-6)$$

表1-1列示電路中各種量與其單位以及相互之關係。其中並列示機械及水力系統中之各相當量。

表1-1 主要電量一覽表

電量	記號	單位 (米瓦秒制)	相關公式	機械類似	水力類似
電荷	q, Q	庫倫		位置	體積
電流	i, I	安培	$i = dq/dt$	速度	流量
電位差 或電壓	$e, E, \text{或}$ v, V	伏特	$e = W/q$	力	水頭，或 水壓
功率	p, P	瓦	$p = ei$	功率	功率
能，或功	W	焦爾，或瓦 秒	$W = eq, \text{或}$ $W = \int_0^t ei \, dt$	能，或 功	能，或功

1-2 電路常數

分析電路時，在所研究之因果關係中一個或數個所加電壓（能源）常可視為原因；而因此在迴路各部分中所發生之電流則可視為吾人所感興趣之結果，蓋當電流求出以後，其他有關之量可自如公式（1-2）至（1-6）之關係中求得。常見之問題為自一已知原因（電壓）求其結果（電流）；或求欲產生一所需結果（電流），所必須具備之原因（電壓）。

迴路中電壓與電流間之關係係建立於實驗基礎上。有三種不同之相互關係存在，故欲將其俱包括在內必須認識三種迴路元件。此種相互關係及其相當的迴路元件型式係如下：

1. 一種迴路元件需要一與流經其中的電流成正比之電壓。此比例常數乃稱為電阻（Resistance）。此迴路常數，或參數，係與迴路中散逸為熱之能量密切相關。此當於下節中再詳細研究。

2. 另一種迴路元件需要一與電流之時間微分或改變率成正比之電壓。其比例常數乃稱為電感（Inductance）。此迴路參數係與迴路之磁場密切相關。此將於第2-5節中再加考慮。

3. 第三種迴路元件需要一與電流之時間積分成比例之電壓。其比例常數之倒數乃稱為電容（capacitance）。此迴路參數係與迴路之電場密切相關。在第2-7節中當再充分討論。

所有電路均為此三種迴路元件之配合，雖就實際目的而言，無需認為每個迴路中有各種元件存在。當有一電壓突然加於迴路時，電流最後達到一最終行為模式稱為定態（steady state）。然此定態乃並非立即達到者，蓋必須有一段時間始能安定至最終模式。此種調準所需要之時期乃稱為暫態（Transient）時期。本書中重點係置於定態。在第七章中將稍討論暫態分析之初步。

1-3 電阻；歐姆定律

上節中所述之第一種迴路元件需要一與流經其中之電流成正

比之電阻跨越此元件。用數量表示，其電壓為

$$e = Ri \quad \text{伏特} \quad (1-7)$$

此中 i 為電流以安培計。比例常數 R 為元件之電阻而係以歐姆 (ohms) 量計。其主要電氣特性為電阻之物理器械乃稱為電阻體 (resistor)。公式 (1-7) 中所表示之電壓電流關係乃稱為歐姆定律 (Ohm's law)。

電阻可比之於水力模擬中水管摩擦或機械系統中之摩擦。電阻或摩擦直接反抗電流，水流，或運動，而克服此反抗所散逸之能量乃表現為熱。因電荷經過電阻時放出能量，故公式 (1-7) 中之電壓 e 在電流之方向為一電壓降。易言之， e 在與電流相反之

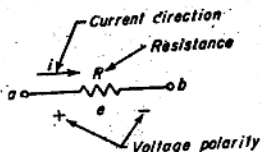


圖1-1 電阻之圖形代表

Current direction	電流方向
Resistance	電阻
Voltage polarity	電壓極性

方向為一電壓升。電阻之習慣的圖形表示，以及電流方向之指示與電壓極性，係示於圖 1-1 中。其正負號乃表示自左至右 (或自正至負) 有一電位減低，或電壓降；換言之，彼等乃指示自右至左 (或自負至正) 有一電位增加，或電壓升。

散逸於電阻中之功率可將公式 (1-4) 與公式 (1-7) 併合而求出：

$$p = ei = (Ri)i = i^2 R \quad \text{瓦} \quad (1-8)$$

在 t 時間中之能量損耗則由公式 (1-5) 表示。

猶如所有機械器械均顯示摩擦效應，所有電導體亦均呈現電阻效應。電導體之電阻係與其長度成正比，而與其面積成反比，並為導體材料之函數。導體材料之電阻係數 (resistivity) 為一有單位或面積與單位長度的體積之電阻。在米克秒制中電阻係以歐姆乘平方公尺每公尺計，或即歐姆公尺計。在大多數工程

應用中之混合英國制中，長度之單位為呎而截面積之單位為圓密爾。圓密爾乃直徑為1密爾（0.001吋）之圓面積。因此圓面積以圓密爾計即可將以密爾計之直徑平方而求得。電阻係數之單位於是為歐姆圓密爾每呎。電阻係數為 ρ ，長度為 l ，面積為 A 的導體之電阻為

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1-9)$$

在公式(1-9)中可用任何一致的單位組。

導電材料之電阻又視材料之溫度而定。可用實驗證明在攝氏溫度 t_2 時一導體之電阻 R_2 可用溫度 t_1 時之電阻 R_1 表示為

$$R_2 = R_1(1 + \alpha_1(t_2 - t_1)) \quad (1-10)$$

α_1 為此材料在溫度 t_1 時之溫度係數。對於標準純化銅，有一方便之經驗公式

$$R_2 = R_1 \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1} \quad (1-11)$$

公式(1-10)及(1-11)常被用以自測得之熱及冷電阻，求得溫升。

對於標準純化銅， 20°C 時之電阻係數 ρ 為0.017241微歐姆公尺（1微歐姆= 10^{-6} 歐姆）或10.371歐姆圓密爾/呎。在 20°C 時之溫度係數 α 為0.00393。商用銅線之電阻係列於表A-1及A-2中。

例題 1-1. 用銅在 20°C 時之電阻係數 $\rho=10.4$ 歐姆圓密爾/呎，計算1,000呎4號線（實心導體）在 20°C 及 75°C 時之電阻，並將 20°C 時之值與表A-1中者相比較。

解：自表A-1知4號線有一截面積41,740圓密爾。自公式(1-9)得

$$\begin{aligned} R_{20} &= \frac{(10.4)(1,000)}{41,740} \\ &= 0.249 \text{ 歐姆每 } 1,000 \text{ 呎於 } 20^\circ\text{C} \end{aligned}$$

表 A-1 中之值爲 0.2485 歐姆每 1,000 呎。

自公式 (1-11) 得在 75°C 時之相當值爲

$$R_{75} = 0.249 \frac{234.5 + 75}{234.5 + 20}$$

$$= 0.304 \text{ 歐姆每 } 1,000 \text{ 呎於 } 75^\circ\text{C}$$

或用公式 (1-10) ；

$$R_{75} = 0.249(1 + (0.00393)(75 - 20))$$

$$= 0.304 \text{ 歐姆每 } 1,000 \text{ 呎於 } 75^\circ\text{C}$$

所有電導體當載有電流時均散逸熱量。所能安全散逸之熱量係決定於最大容許溫度。國家電氣規則列有電導體之容許電流，此種值視導體材料（即電阻係數），導體大小，絕緣，及裝置之型式而定。表 A-2 中即列有此表。

1-4. 基本迴路定律；克希霍夫定律

電路之基本定律乃自第 1-2 節所論的電氣量之性質而合理推出。彼等直接引出對電路作系統研究之方法。此種定律，稱爲克希霍夫定律者，乃如下述：

1. 所有流向一接合點電流之代數和爲零。
2. 在一指定方向繞一閉合迴路所有電壓升之代數和爲零。

當應用第一定律時，流入接合點之電流係視爲正而自接合點流出之電流則視爲負。在圖 1-2 中，接合點 *a* 處之電流方程式爲

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

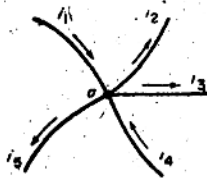


圖 1-2 迴路接合點

此乃相當於謂流入接合點之所有電荷必須再自其流出。破壞此電流定律，將引起一「安培流」自接合點 *a* 流入於空間，此乃顯然不可能者。在開始解一問題時，真正之正電流方向常爲未知。然在任何情形中，電流方向可任意假定，不論其是否與物