

劉達度譯

工程電磁學

**INTRODUCTORY
ENGINEERING
ELECTROMAGNETICS**

POPOVIĆ

東華書局印行

工程電磁學

原 著 者

BRANKO D. POPOVIC

譯 者

劉 達 度

東華書局印行



版權所有・翻印必究

中華民國六十五年三月初版
中華民國六十七年三月二版

大專
用書

工程電磁學

定價新臺幣壹百陸拾圓整

(外埠酌加運費雜費)

原 著 **BRANKO D. POPOVIC**

譯 者 劉 達 度

發行人 卓 鑫 森

出版者 臺灣東華書局股份有限公司
(臺灣臺北市博愛路一〇五號)

印刷者 台 興 印 刷 廠
台北市大理街130巷2弄1號

內政部登記證 內版臺業字第一〇三一號
(64040)

原 序

本書的原始目的，在作為大學電磁課程的教本。如果配合適當選擇的題材及習題，也可作為研究所的教材。根據編者經驗，本書內容可作為75小時至120小時的教學材料。學習本書所需預習的數學基礎，包括微積分及基本複數量（本書最後數章中需要）。向量的運用也是本書必須預知的知識。在本書最先一章中已有簡短介紹。此外還需預知有關大學物理及網絡理論的知識。雖然後者的用處很多，但並非必須的。

本書計分為五大篇。計有(1)靜電場，(2)穩值電流，(3)靜磁場，(4)半靜電磁場，及(5)馬克斯威爾方程式及其應用。在許多其他電磁課程教本中，也有同樣的劃分。但本書對於五大篇的教材，已經過仔細的處理和平衡的分配。靜電場部份，約佔全書的百分之三十；穩值電流部份佔百分之十。靜磁場及半靜電磁場部份，是常常被一般著者所忽視的地方，但本書對此一部份幾乎佔有百分之三十五的份量。至於最後一部份，馬克斯威爾方程式及其應用一篇，其篇幅可任意延伸，因為此一部份的題材包括幾種專門科學的開端，本書僅討論其中幾種簡單情況而已。

對於一個較高級的課程水準而言，先介紹馬克斯威爾方程式，以統一電磁觀念為開端，似乎是比較合理。但這種方式不大能使大學級的學生接受。因為一般大學生的基本學識，尚不能接受馬克斯威爾方程式的基本觀念。而在此階層的學生，以庫侖定律為起點的教學，似乎比較適宜。因為庫侖定律的場觀念，是由兩個靜止電荷間的力而產生。而這種觀念是一般大學生所容易了解和接受的。另外一種類似的教學方式，將兩個移動的電荷間的相互作用力為場觀念的起點，然後逐步發展為統一電磁場的觀念和方程式。似乎也是一種一貫而可行的方式。不過磁場的觀念僅能勉強用個別電荷間之力的類似庫侖定律法

則表示。電磁感應現象則無法引用此相同方式來處理。

本書將供一種創新的統一電磁場理論。基礎上將各個電荷間之力分為三大項目，其他各種場的觀念，均由已經熟悉之靜電場觀念之形態導出之。著者本人自知，此種觀念的嘗試，仍包含有若干危險和困難。但其益處已可從多方面表現得之。譬如電磁感應現象，為一般學生認為最困難而模糊的觀念，經此種方式處理後變為單純而顯明的事實。又如真空中“位移”電流的觀念，也有了清楚的物理解說。各分別的電場及磁場，僅為真實而僅存的統一電磁場的個別部份，亦由此得更明顯的解釋。在意義上，此種簡單理論，為根據庫侖定律與相對論而得到的最新而深入的方法。

研讀電磁理論的方法，首先須了解其基本觀念，然後還要演算大批習題，以確立並加深其觀念。一般說來，電磁理論的基本觀念並不太難，因此可以說，單就電磁習題本身，就可以構成一門電磁課程。本書是無可置疑地具有大批習題，經教師加以適當的選擇後，可作為各種不同程度的教材之用。本書中的習題，係根據其性質而分為三類：即測驗題(test)，一般性題(general)，及數據題(numerical)。

在測驗題中，需用了解的程度比需用數學的程度要多。有些題目僅為“正”或“負”(“yes or no”)的答式。其目的在培養學生們對某些教材內容的自信心。同時也在迫使學生一再研讀課本中的主要觀念。

次一類習題，即一般性習題(general problems)。其目的在確立學生的觀念，並加深其研討。有些習題在啓示學生解題方法的型態。其中較難解之習題，書中予以詳細解答，其用意在於啓示學生如何解答這類題目。另外一些習題是沒有解答的。不過，獲取信心的重要關鍵，在於屢次的獲取得習題的正確答案。因此所有一般性的習題都應當具有答案，但屬於分析形態者則否。事實上所有特殊數據值的解析，都具有答案(而且儘量與實際情況相接近)。此答案的目的有二：其一在核驗其結果是否有錯誤。其次在使學生對某些特殊數據大

小的幕次有一個概略之觀念。

一般性習題的選擇標準是這樣的：凡是最重要的問題，即是解析實用上的問題（通常為簡化的形式）。不過，實際上並不完全拘泥於此種原則。例如，在靜電場領域內，解題所需的數學技巧就是實用上的解析問題，但是此項技巧的熟練非常簡單。因此，在這一部份的習題，有很多題目是促使學生了解某些特殊的數學方法。其他部份的習題則較少這種性質。

一般性問題中數據大小的幕次觀念，可能存在於某一範圍之內。但是實際上對於某一物理量大小的“直覺”認識却更為重要。因此在每一章中又增添第三類習題——數據習題。學生在練習此類習題時，必須要記住許多重要常數的數值，和一些物理量大小的幕次。

本書是著者任教維吉利亞技術學院(VPI)(現改為維吉利亞工科州立大學)客座教授時所完成。承VPI電機系主任W. A. Blackwell教授的鼓勵，副系主任H. H. Hull博士的贊助與協助。又承VPI其他幾位教授的建議和批評。尤其是R. H. Bond博士的幫助。還有VPI的學生在初稿時替我修正書中的英文。著者一併在此致最大的感謝。

此外，著者更要對本人在Belgrad大學的師長而兼友人的J. V. Sarutka博士，致最高的敬意。本人有幸得從學於J. V. Sarutka博士，又幸運地得與其研討有關電磁理論的邏輯基礎，誠不勝榮幸之至。

Belgrade, Yugoslavia
August 1970

B. D. P.

譯者序

本書以傳統方式寫出電磁理論。自庫侖力為起點，以力的觀念來描述場的觀念，然後發展為統一電磁場理論。自教學的觀點看來，自然比較容易被接受，尤其是對一個中國學生而言。至於其統一電磁場理論，亦有其突出之處。

以習題解說理論，並加深其觀念，分析其性質，顯然是編寫教材的最好方式。東歐科學書籍大多有這種趨向。本書作者 Popovic 教授為南斯拉夫伯爾格來德大學電磁教授。故本書內容編排，不脫離其東歐風格。根據本書習題範疇，加以適當選擇，可作為各種程度的教材，也可作為自修的研讀。

對於介電材料與磁性材料的等值觀念，在第 2 章與第 9 章中有很多舉例的習題。譬如介電材料中有二個等值觀念，其一是 $\mathbf{E} = \mathbf{D}/\epsilon$ ，其二是 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D} - \mathbf{P}}{\epsilon}$ 。假如一定電荷之平板容電器內插入一片介電體，則其中之電場強度及端電壓均減低。根據前式則為介電常數 ϵ 之增大，根據後式則為電偶極之極化電荷使總電荷為之減少。前者視為極化材料之改變，以 ϵ 為計算。後者視為極化電荷在真空中的等效，以 ϵ_0 為計算。又如容電器內有重疊兩片介電體，在二片介電體之界面間， \mathbf{D} 向量為連續但 \mathbf{E} 向量為不連續。因 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ ，而 $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho + \rho_p}{\epsilon_0}$ 。二界面間雖然沒有自由電荷 ρ ，但有極化電荷 ρ_p 存在。所以有 \mathbf{E} 的散度，而 \mathbf{D} 的散度為零。根據這種關係，可分析很多介電材料，也可以簡化很多習題。在第 9 章的磁性材料中，也有完全平行的類似條件。這兩章材料可作為研究教材，但不宜於初等教材之用。

最後，本書原著者 Popovic 係南斯拉夫籍。留美客座教授。本書係其在美國 VPI 工科大學任教時所寫。其英文欠佳，雖書中文字經

該校美國學生修正其文法（根據原序記載）。但多部份表達仍未盡符理論。初學者很難得其奧妙。譯者有見及此，特將全書譯成中文，潤飾其生澀之處。但為“信”“雅”“達”起見，不便增減其內容。

本書於1970年在美國初版，1972年於臺灣省立海洋學院電子工程系初次採用，其後省立臺北工專，國立臺灣大學等相繼採用。本書譯成，掛漏在所難免，敬希採用者不吝賜教。

最後，本書承王冀翹、陳啓明兩先生協助，又承東華書局卓鑫淼先生秉其溝通中西科學文化精神予以出版，謹此誌謝。

譯者 劉達度 謹識

目 次

第 零 章 向量簡述

0.1 引言	1
0.2 純量與向量。純量場與向量場	1
0.3 向量的代數運算	2
0.4 向量之坐標表示法	9

第 一 篇 靜 電 場

第 一 章 真 空 中 的 靜 電 場

1.1 引言	23
1.2 庫侖定律	25
1.3 靜電場觀念	26
1.4 連續分佈電荷之電場	28
1.5 電力線	31
1.6 靜電位	32
1.7 由電位求電場強度。純量的斜率	38
1.8 高斯定律	41
1.9 靜電場中導體的性質	49
1.10 電場強度通量管壁	54
1.11 高斯定律之微分型態—向量之散度	55
1.12 柏松氏方程式及拉氏方程式	58
1.13 拉氏方程式之性質及其解析法則	60
1.14 導體上靜電位與電荷的關係	64

第 二 章 有 介 電 體 之 靜 電 場

2.1 在靜電場中介電體之作用	90
2.2 一電偶極或一羣集成電偶極之電位及電場強度	92
2.3 被極化介質中之等效電荷分佈	95
2.4 高斯定律的一般式。電位移向量	100
2.5 均勻介電體中之電場	104
2.6 邊界條件	107
2.7 電位移線	110
2.8 介電體之物理性質	112

第三章 靜電場中之能量與力

3.1 分佈電荷之位能	135
3.2 靜電場中能量之分佈	138
3.3 荷電導體在真空中所受之力	140
3.4 介電體中靜電力的性質	143
3.5 靜電場中力量計算之一般法則	145
3.6 邊界表面的壓力	149

第四章 靜電場問題的分析解法

4.1 引言	164
4.2 電場映像法	164
4.3 拉氏方程式之直接解析	172

第五章 靜電場問題略值法

5.1 引言	203
5.2 靜電問題圖解法	203
5.3 拉氏方程之數據解析	210
5.4 靜電問題略值類比法	214

第二篇 穩值電流

第六章 固體與液體中之穩定電流

6.1 引言	225
6.2 電流密度與電流強度	226
6.3 連續方程式	229
6.4 固體及液體導體中電流的物理解釋。電動勢之源(發電機)	231
6.5 歐姆定律點的形式。電導係數與電阻係數	235
6.6 焦耳定律	236
6.7 穩值電流的一般性質	238
6.8 兩端發生器及電阻	246
6.9 直流網絡	250
6.10 馳緩時間	253

第七章 真空中之電流

7.1 引言	271
7.2 在電場影響之下，電荷在真空中之運動	271
7.3 真空中(或真空管)之穩值電流	273

第三篇 靜磁場

第八章 真空中的磁場

8.1 引言	283
8.2 兩個微小移動電荷間之磁力	284
8.3 磁場觀念。磁通量密度	287
8.4 穩值電流之磁場。巴薩華定律	289
8.5 磁通密度向量線	294
8.6 磁通量及其性質	295
8.7 安培環路定律	299
8.8 安培環路定律之微分式。向量函數之旋度	307
8.9 向量磁位	311
8.10 純量磁位	317

第九章 磁性物質中之磁場

9.1 磁性物質在磁場中之作用	347
9.2 向量磁位，元件電流迴路與集成電流迴路之磁場	351
9.3 磁性物質之等效大維度雷流	354
9.4 安培環路定律之一般式。磁場強度	358
9.5 邊界條件	363
9.6 磁性物質的純量磁位——“磁荷”的觀念	366
9.7 磁性材料的若干物理性質	370
9.8 磁路	376

第十章 靜磁場問題的解析方法

10.1 分析方法	401
10.2 略值法	410

第四篇 半靜電磁場

第十一章 電磁感應

11.1 兩個小移動電荷間之總力	431
11.2 靜止閉合迴路之雷磁感應	435
11.3 在靜磁場中移動的導體所感應的電動勢	440
11.4 雷磁感應（法拉第定律）的一般式	443
11.5 半細絲導體閉合電路的互感與自感	446

第十二章 靜磁場與半靜磁場中之能與力

12.1 半靜磁場中之能	481
12.2 電感的一般概念	490
12.3 穩值電流系統間之力	494
12.4 荷電質點在磁場及電場中的運動	501

第五篇 馬克斯威爾方程式及其應用

第十三章 馬克斯威爾方程式

13.1 引言	523
13.2 非穩值電流之安培環路定律	524
13.3 電磁場方程式(馬克斯威爾方程式)	529
13.4 馬克斯威爾方程式的重要結論	535

第十四章 集膚效應與網絡觀念

14.1 引言	559
14.2 條形導體中之集膚效應	560
14.3 鐵片中變化磁通的分佈	565
14.4 圓形截面導線的集膚效應	569
14.5 鄰近效應	574
14.6 網絡觀念——網絡的電磁觀念	577

第十五章 均勻平面電磁波

15.1 電磁波的觀念	597
15.2 在均勻無限介質中之均勻平面電磁波	599
15.3 在不完全介體及良導體中之平面波	608
15.4 平面波的反射與折射	613
15.5 游離介質中之平面波	624

第十六章 邊導電磁波

16.1 引言	639
16.2 輸送線	640
16.3 波導	656
16.4 在有微小損失之波導中，波的衰減情況	667

第十七章 電磁波輻射與接受

17.1 引言	683
---------	-----

17.2	電偶極大線 (哈迪遜偶極)	684
17.3	薄徑直線天線	691
17.4	直線天線陣元件	698
17.5	在平面導體表皮附近之天線	700
17.6	孔徑天線	702
17.7	接收天線	704
附錄一	MKSA制單位	715
附錄二	Helmholtz理論	718
附錄三	向量衡等式概要表	720
附錄四	梯度、散度、拉氏、弦度之直角坐標、圓柱體坐標 及球體坐標	723
附錄五	重要常數表	725

第零章

向量簡述

0-1 引言

電磁理論必需以某些數學觀念作為基本工具。有些數學——如微積分——為解釋電磁基本觀念必需的科目。還有些數學——如向量、複數量與轉換等——雖非解釋電磁觀念必要的工具，但必需熟稔其原理，始能對電磁場作正式的簡化與發展。本章之簡化處理不提供任何新理論細則，但着重於原理重要部門的概述，而避免冗長的數學方法。向量觀念與向量函數為本章的中心問題。事實上，今日電磁理論的發展與向量觀念實有不可分割的關係。

本書一開始即以向量為基本運算工具。由於大部份學生，在開始學習電磁場之前，並未能十分瞭解向量，故本書首先介紹向量的基本概念及向量函數。至於較繁雜的向量觀念，則在以後各章中，視情況的需要而陸續介紹之。

0-2 純量與向量。純量場與向量場

許多數學觀念常用來描述各種物理量。純量 (scalar) 與向量 (vector)，則常用於基本電磁理論中。

許多物理量僅需用一單純數量，再輔以適當的單位，即可完全表達其意義者，謂之純量 (scalar quantities or scalars)。譬如，某處的溫度若干？僅需一數字即可以完全表達。故溫度為純量。其他如質量密度，班級的大小，一片麵包的卡路里等僅有大小而無方向性質的量，均稱為純量。

若干物理量非單純數量所能完全表達者，該種物理量同時具有大小及方向兩種性質，稱為向量 (vector quantities or vectors)。譬如颱風速率的大小，不足以完全說明颱風的性質。其方向更為重要

的因素。故颱風速度爲一向量，其他任何物體的速度亦必爲向量。此外如質點的位移、加速度及所受之力等物理量均爲向量。

在物理科學中（包括電磁理論）討論之物理現象，常因空間位置不同而有連續的變化，爲使物理量在空間連續分佈狀態得以數學表達起見，必須對每一點的物理量加以描述。此時吾人用一量場（field）以表明該區域內各點之量。所謂量場係指物理量爲連續分佈之區域。如果該區域內連續分佈之量均爲純量，則稱爲純量場（scalar field）。如果該區域內連續分佈之量均爲向量，則稱爲向量場（vector field）。譬如一房間內每一點的溫度分佈爲一純量場。其他如各種介質的質量密度，地球表面的大氣壓力，大氣中各點的溫度。均爲純量場。至於流體或氣體的速度場——包括某區域內所有質點的任一點的速度——爲向量場。其他如地球重力場對各連續點產生的重力分佈，亦爲向量場。

一純量場的表達，可選擇任一方便的坐標以坐標函數表示之。譬如，欲表明某一房屋內的溫度分佈狀況，可以房屋的任一角頂爲坐標原點，以牆壁相交的三根稜線爲坐標的三垂直軸。由此可將房屋內溫度的分佈狀態，用三坐標簡單函數表達之。

一向量場的表達較爲困難。但如將一向量分解爲三個分量，則每一分量爲一純量。如果三純量場的坐標函數爲已知，則此向量場即可完全決定。在明瞭向量表達之前，首須明瞭向量的代數運算，及其在電磁學上最常使用之幾種坐標系統。茲分別介紹於次。

0-3 向量的代數運算

位移係某一點沿一直線方向移動一段距離，爲最常見的一種物理向量。嚴格說來，所有向量的代數運算，都必須加以定義。但若將位移看作爲向量之模型，則某些運算很合乎邏輯地隨而成立。

在本書中，向量以粗體字註明之，如 \mathbf{A} 。其大小則以斜體字表之，如 A 。向量的標明，非常重要，否則易生混淆。在此吾人必須強調，所有向量必須明確表明，使其與純量有所區別。一般手書文字，常以一箭頭或一橫線冠於文字之上，以表明之。如 \vec{a} 或 \bar{a} 。

圖 0-1 表示一位移向量，箭頭表示其方向，線的長度則表示此向量的大小。起點 M 為向量的原點，終點 N 為向量的端點。

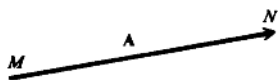


圖 0-1 向量圖示法

設一質點第一次位移 MN ，以向量 \mathbf{A} 表示。第二次位移 NP ，以向量 \mathbf{B} 表示，如圖 0-2，其實際上的位移 MNP 為一折線。如質點直接自 M 點沿直線 MP 至 P 點，其位移為 \mathbf{C} 。則 \mathbf{C} 位移的效果，等於 \mathbf{A} 與 \mathbf{B} 兩次位移之和相同。故 \mathbf{C} 向量即 \mathbf{A} 與 \mathbf{B} 兩向量之和。

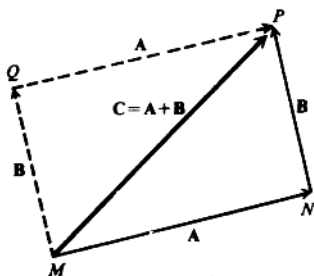


圖 0-2 向量之和及向量和之交換律

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}. \quad (0.3.1)$$

(0.3.1) 式必須以圖 0-2 為根據，否則毫無意義可言。若 \mathbf{A} 及 \mathbf{B} 兩向量自同一原點 (M 點) 出發，則此兩向量構成一平行四邊形之二邊。兩向量之和 \mathbf{C} 即平行四邊形 ($MNPQ$) 之對角線 MP 。由 0-2 圖可知，向量之和與兩向量相加之先後次序無關。即

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A}. \quad (0.3.2)$$

此為向量和之交換律 (commutative law)。

若三向量求和，如 0-3 圖所示，其合成向量與各向量組合之次

序無關。此為向量和之組合律 (associative law)。

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}). \quad (0.3.3)$$

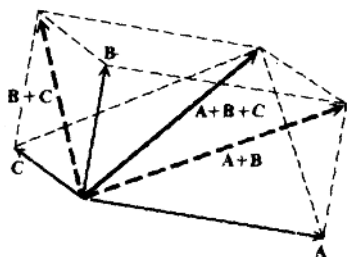


圖 0-3 向量和之組合律

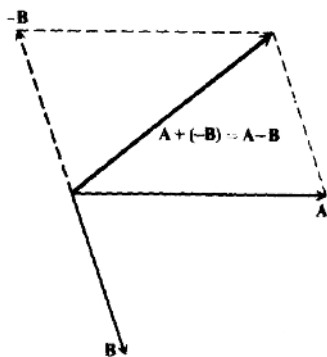


圖 0-4 兩向量之差

一向量與某向量之大小相等而方向相反，則該向量為原向量的負值。如圖 0-4 之 \mathbf{B} 及 $-\mathbf{B}$ 。故 \mathbf{A} 向量減 \mathbf{B} 向量，即 \mathbf{A} 與 $-\mathbf{B}$ 向量之和。

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B}). \quad (0.3.4)$$

一純量 M 與一向量 \mathbf{A} 之積，仍為 \mathbf{A} 向量方向之向量，但其大小為原向量之 M 倍。至於兩向量的乘積則與兩純量的乘積或純量與向量的乘積有完全不同的意義。然則兩向量的乘積為何？事實上向量的乘積並非由向量的定義上得來。在實用上，向量的乘積分為兩類。一類為點積 (dot product) 又稱為純量積 (scalar product)。另一類為交積 (cross product) 又稱為向量積 (vector product)。