

# 電 磁 波

D · K · 切格 著

曉 園 出 版 社  
世 界 圖 書 出 版 公 司

# 電 磁 波

原著者 David K. Cheng

譯著者 李永勳 顏仁鴻

曉園出版社  
世界圖書出版公司

电 磁 波

D.K.切格 著

李永勋 颜仁鸿 译

晓 园 出 版 社 出 版

世界图书出版公司北京分公司重印

(北京朝阳门内大街137号)

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年5月 重印 开本 850×1168 1/32  
1992年5月第一次印刷 印张 21,125

印数: 0,001—1,650

ISBN: 7-5062-1168·8/O·26

定价: 17.00元

世界图书出版公司通过中华版权代理公司

购得重印权 限国内发行

# 譯 序

電磁學對近代人類所造成的影響可謂廣泛而深遠。

在理論上，它綜合了一種最普遍也最可用的能量——電磁能的物理行為；在應用上，它創造了電機工程的整個領域，並進而與量子力學結合開拓出光電科技；這也同時在人類的歷史上造成一股新的潮流。今日人際由於訊息交通之便利，而在人文上寫出完全新的一章，均植基於此。

正因電磁學的多樣性使得其全貌常不易為人所知。許多相關書籍因應而生，但不同的作者觀點與讀者程度也造成了選擇與閱讀的不便。本書貴於將物理觀點以圖示表達，在理論模型推導時儘可能利用數學基礎下來推導驗證之，使艱深的理論能化為有條理、有系統的敘述，並藉著許多範例來說明如何應用這些觀點。其每章所附之問題更可供讀者熟悉運用所學之知識。因其適用於本國之大專程度之電磁教科書，故曉園出版社發行中文譯本以應所需並將此好書推薦給大家。本書所涵蓋的範圍極適合當二年的教材，對於自修或參考皆有其絕對的價值。

另外，學習物理或工程，自我訓練是獲得成效的不二法門。故誠心建議讀者儘量多作題目，課本後有參考答案而曉園出版社亦不遺餘力地發行其題解，更進一步增加此套教材的教育性。讀者的收穫與回饋是曉園及作者最樂見者，謝謝！

本書之翻譯，除前六章為顏仁鴻執筆外，其餘部分由李永勳負責完成，同時亦感謝林木清、葉雲烜兩位先生之協助與建議。

李永勳·顏仁鴻 謹識

1988年2月

# 原 序

一般電磁學的書大致可分為兩大類。第一類採用傳統推導方式：先由實驗定律著手，並且將推導過程予以一般化，最後綜合得到馬克斯威爾方程式，這種推導的方式，稱之為歸納法。第二類採用假設公理式的推導：先由馬克斯威爾方程式著手，然後每一式子均用適當的實驗來驗證它，並且將其一般化，以便於用來解析靜態和時變狀態的問題，這種推導方式稱為演繹法。有些書由狹義相對論的論述開始，並且以庫侖定律來推導所有的電磁定律；但是這種推導法首先必須要討論及瞭解狹義相對論，這種方法較適合於高等程度的授課內容。

贊同傳統式推導的學者，他們認為這種方法是由歷史角度來詮釋電磁理論的方法（由特定的實驗定律推導馬克斯威爾方程式），這種方法比其它方法較容易讓學生接受。但是，筆者認為這種解釋知識本體的方法並不是教導學生的最好方法，因為最後結果會有殘缺不全之憾，同時不能完全瞭解到向量積分的優點，學生對接下去介紹的梯度、散度和旋度等運算可能會有困惑之感，因而可能形成學習上的心裏障礙。此外，對電磁模型的公式化過程缺乏簡捷性。

公理的推導往往是由四組馬克斯威爾方程式著手，其表示式可能是微分式也可能是積分式，然後把這些推導公式當作基本假設。這些方程式都是相當複雜而且艱難的，如果讓學生一開始就接觸到它，可能引起學生的反感和排斥，程度好的學生可能會懷疑場向量的意義和這些方程式需要性和完備性。在開始階段學生會對這些電磁模型感到困惑，因此對這些數學運算可能無法完全瞭解。在任何情況下，馬克斯威爾方程式能夠立即簡化以應用到靜態場，而且馬克斯威爾方程式允許分別考慮，靜電場和靜磁場問題，這也就是為什麼一開始就探討馬克斯威爾方程式的原因。

雖然庫侖定律是建立在實驗的驗證情況，但是，事實上它也是一種假設。庫侖定律有兩項敘述值得爭議的：電荷本身之大小遠小於電荷間距離

和電荷間的力與其間之距離平方成反比。在第一項敘述所發生的問題是：電荷本身要多小才符合“遠小於”其間距離？實際上，電荷本身並非沒有大小，且很難決定兩有限大小電荷之間“實際”距離。若已知電荷大小，而比較其間距離的精確性，則其相隔距離愈大所測距離愈精確。但是實際上一些因素（如力的弱度、外界電荷的存在等）限制了實驗室所能使用的距離和實驗的誤差無法全部避免。這就導致對於其第二項敘述距離平方成反比的關係，產生很大的疑問。即使假設電荷本身沒有大小，無論實驗者技術多熟練，態度多謹慎，所測量出來的結果也無法完全精確。那麼庫侖先生怎麼知道此力正好與距離平方（而不是  $2.000001$  或  $1.999999$  冪次）成反比呢？這問題顯然不能由實驗的觀點來加以解釋，因為庫侖先生的那時代的實驗結果不可能精確到數字的第七位。因此，我們可以因此斷言庫侖定律本身就是一種假設，它是一項自然的定律，而且是一種基於他的有限精確度實驗下的一種假設（參考 3-2 節）。

本書以公理逐步推導法來建立電磁模型：首先是針對靜電場（第三章），接下來是靜磁場（第六章），最後以時變場觀念導出馬克斯威爾方程式（第七章）。在其中每一階段的推展都是以赫姆霍茲定理做為數學基礎，其理論如下：假設任一向量場的散度及旋度已知時，即可得知該向量場且其值應在某一常數限制以內。因此在推導真空中的靜電模型時，只須設定單一向量的散度和旋度為基本假設，就可定義該向量（稱之為電場強度  $\mathbf{E}$ ）。所有真空中有關靜電場的關係式，包括庫侖定律和高斯定律，都能夠由這兩項簡單的假設而推導出來。有關材料介質的靜電關係式，也就不難藉被極化介質之等量電荷分佈的觀念推導之。

同理，對於真空中的靜磁模型而言，也只須假設單一向量之散度及旋度為基本假設，即可定義該單一磁通密度向量  $\mathbf{B}$ ；其他的關係式均可由此兩個基本假設而求得。有關材料介質的關係式可由等量電流密度的觀念推導出來。當然，這些假設的有效性在於其與實驗結果的吻合程度而定。

對於某一時變場而言，電場強度和磁場強度是互相耦合的。對於靜電模型的電場旋度（ $\text{curl } \mathbf{E}$ ）的假設而言，必須經過修正才能符合法拉第定理，此外，對於靜磁模型的磁場旋度（ $\text{curl } \mathbf{B}$ ）的假設而言，也一樣必須經過修正以後才能符合連續方程式。然後，我們就可利用這修正後的四項

馬克斯威爾方程式來建立電磁模型，筆者相信基於赫姆霍茲定理所建立的電磁模型及其逐步所推導的結果，對學生而言，將是有趣的、有系統的，而且非常容易被接受的。

本書的內容，筆者盡力追求清楚、統一、流暢和有邏輯的流程觀念。書內包括許多詳細解析的例題（共有 135 題）用來強調基本概念和說明一些典型解題的方法。每一章後面皆有一些問答題，用來測試學生對本章內容的記憶及瞭解的程度。而每章後面的習題則用來加強學生公式中不同量值之間的關係之理解力，同時也可增進學生應用這些公式來解一些實際問題的能力。相信這些簡單練習式的習題不僅是讓學生演算題目而已，而是有更多讓學生去思考的目的。

本書的範圍除了基本電磁理論之外，還包括傳輸線、波導裝置、共振器、天線及輻射系統。這些基本概念和電磁理論架構並不會因為新的電磁設備產生而有所改變。對於學習電磁基本原理的理由和動機在 1-1 節將會詳細說明。筆者希望本書的內容，小說式的敘述架構，能帶給學生可靠且充分的能力來瞭解和分析基本電磁的現象，以及提供他們學習更深一層的電磁理論的基礎。

本書的內容足夠二個學期的教材。第一章到第七章的內容討論有關電磁的場量，而第八章到第十一章則在探討電磁波及其應用。對於電磁學僅開一個學期的學校，第一章到第七章，再加上第八章的前四分之一，即可提供在電磁場量及無邊界電磁波方面完備的基本概念。其它的部分，在應用上可做為實用的參考資料，或做為選修的教材內容。若授課時間受到限制下列一些內容，譬如 2-2 節之例題 2-2，3-11-2 節的靜電力，6-5-1 節之純量磁位能，6-8 節磁路，6-13-1 節之磁力和 6-13-2 節之磁力及轉矩等皆可略去不授。對於一年有四個學期授課時間的學校而言，只須依電磁科目所分配的全部上課時數加以調整即可將本書全部授完。

筆者以本書的手稿在 Syracuse 大學所開的電磁學課程試教多次。筆者感謝那些授課班級學生對整本書內容給予筆者一些回響。同時，筆者亦非常感謝所有校閱手稿人士，他們給予筆者不少鼓勵和有價值的建議。特

別感謝 Mr. Chang-hong Lian 及 Mr. Bai-lin Ma , 由於他們的協助提供  
一些問題的解答。

Syracuse, New York  
January 1983

D. K. C.



# 目 錄

## 第一章 電磁模型 1

1-1 簡 介 .....	1
1-2 電磁模型 .....	3
1-3 SI(國際單位系統)及一般常數 .....	7
複習問題 .....	9

## 第二章 向量分析 11

2-1 概 論 .....	11
2-2 向量的加法和減法 .....	12
2-3 向量的乘法 .....	14
2-4 正交座標系統 .....	20
2-5 純量場的梯度 .....	41
2-6 向量場的散度 .....	46
2-7 散度定理 .....	51
2-8 向量場的旋度 .....	56
2-9 史托克定理 .....	61
2-10 兩條零恒等式 .....	64
2-11 赫姆霍茲定理 .....	67
複習問題 .....	71
習 題 .....	72

## 第三章 靜電場 77

3-1	簡 介 .....	77
3-2	真空中靜電學的基本假設 .....	78
3-3	庫侖定理 .....	81
3-4	高斯定律及其應用 .....	91
3-5	電 位 .....	97
3-6	靜電場中之導體 .....	107
3-7	靜電場中之介電質 .....	111
3-8	電通密度及介電常數 .....	116
3-9	靜電場的邊界條件 .....	123
3-10	電容及電容器 .....	127
3-11	靜電能及靜電力 .....	136
	複習問題 .....	147
	習 題 .....	149

#### 第四章 靜電問題的解 155

4-1	簡 介 .....	155
4-2	帕松方程式及拉普拉斯方程式 .....	155
4-3	靜電問題解的唯一性 .....	162
4-4	映像法 .....	164
4-5	笛卡兒座標中的邊界值問題 .....	175
4-6	圓柱座標中之邊界值問題 .....	183
4-7	球狀座標中之邊界值問題 .....	190
	複習問題 .....	195
	習 題 .....	196

#### 第五章 穩定電流 201

5-1	簡 介 .....	201
5-2	電流密度與歐姆定律 .....	202

5-3	電動勢與克希荷夫電壓定律	207
5-4	連續方程式與克希荷夫電流定律	209
5-5	功率消散及焦耳定律	212
5-6	電流密度的邊界條件	213
5-7	電阻計算	218
	復習問題	223
	習題	224

## 第六章 靜磁場 229

6-1	簡介	229
6-2	自由空間中靜磁學的基本假設	230
6-3	向量磁位	236
6-4	畢歐沙瓦定律及應用	238
6-5	磁偶極	244
6-6	磁化及等價電流密度	249
6-7	磁場強度與相對導磁係數	253
6-8	磁路	257
6-9	磁性材料的行為	262
6-10	靜磁場之邊界條件	266
6-11	電感及電感器	270
6-12	磁能	281
6-13	磁力及轉矩	287
	復習問題	299
	習題	301

## 第七章 時變場和馬克斯威爾方程式 311

7-1	概論	311
7-2	法拉第電磁感應定律	312

7-3	馬克斯威爾方程式 .....	323
7-4	電位函數 .....	328
7-5	電磁邊界條件 .....	332
7-6	波方程式和波方程式的解 .....	336
7-7	時域諧波場 .....	340
	復習問題 .....	349
	習題 .....	350

## 第八章 平面電磁波 355

8-1	概論 .....	355
8-2	在無損耗介質中的平面波 .....	356
8-3	在傳導介質中的平面波 .....	367
8-4	電磁能的流率及坡印亭向量 .....	378
8-5	垂直射入導電邊界平面 .....	386
8-6	斜向射入導電邊界平面 .....	391
8-7	垂直射入非導電邊界平面 .....	397
8-8	垂直射入多層非導電介面 .....	403
8-9	斜向射入非導電邊界平面 .....	409
	復習問題 .....	420
	習題 .....	422

## 第九章 傳輸線的原理及應用 431

9-1	概論 .....	431
9-2	沿平行板傳輸線傳送之橫向電磁波 .....	433
9-3	一般的傳輸線方程式 .....	441
9-4	在有限長傳輸線上波的特性 .....	455
9-5	史密斯圖 .....	479
9-6	阻抗匹配的傳輸線 .....	493

複習問題 .....	507
習題 .....	509

## 第十章 導波管與空心振動器 517

10-1 概論 .....	517
10-2 沿均勻導波裝置傳送的一般特性 .....	518
10-3 平行板導波管 .....	533
10-4 矩形導波管 .....	545
10-5 介電導波管 .....	559
10-6 空心共振器 .....	568
複習問題 .....	577
習題 .....	579

## 第十一章 天線與輻射系統 585

11-1 概論 .....	585
11-2 基本雙極的輻射場量 .....	587
11-3 天線場型與天線參數 .....	593
11-4 線性天線 .....	599
11-5 天線陣列 .....	605
11-6 接收天線 .....	617
11-7 其他型式的天線 .....	623
11-8 孔徑輻射器 .....	631
複習問題 .....	637
習題 .....	639

## 附錄 A 符號與單位 643

A-1 基本 SI (MKSA 制) 單位*	643
A-2 導出量 .....	643

A-3 單位的倍數及約數 ..... 645

**附錄B 一些重要常數 647**

B-1 真空常數 ..... 647

B-2 電子和質子的物理常數 .. ..... 647

B-3 相對介電係數(介電常數)\* ..... 648

B-4 導電係數 ..... 648

B-5 相對導磁係數 ..... 649

**部分習題解答 651**

索引 660

# 第一章

## 電磁模型

### 1-1 簡介

簡而言之，電磁學是在研究靜止及運動中電荷的效應。從基本物理學，我們知道存在有兩種電荷：正電荷及負電荷。這兩種電荷都是電場的來源。移動的電荷產生了電流，而電流能建立出磁場。在此，我們暫時地以較一般化的說法來描述電場和磁場，爾後，我們將以更明確的定義來描述它們。一個場(field)，是一種量的空間分佈狀況，它可以是時間的函數，也可能跟時間無關。一個時變的電場會伴隨著產生磁場，反之亦然。換句話說，時變的電場和磁場會耦合在一起，而產生了電磁場。在某些情況下，和時間有關的電磁場會從起源處輻射出波。在解釋超距的作用時，場和波的概念是最基本而必要的。在本書Field and Wave Electromagnetics中，我們將研討用以解釋電磁現象的電磁學定律，它的原理和應用。

電磁學對物理學家和電機工程師是基本而重要的。電磁學對了解原子粉碎器、陰極射線示波器、雷達、衛星通訊、電視接收、遙測、太空通訊、微波元件、光纖通訊、儀器登陸系統、機電轉換等等原理的過程中是不可或缺的。電路觀念是一特限的章節，代表著電磁理論下的一個特例。正如我們在第七章中會看到的，當電源的頻率變得非常低，使得傳導網路的大小和波長比較起來非常小時，便產生了準靜態，而使得電磁問題簡化成電路問題。然而，附帶聲明一點，電路理論是一門被高度發展而複雜的學問。它可應用於各種不同層次的電機問題，因此它本身也是一門很重要的理論。

有兩種情況可以說明電路理論的不足，因而須要有電磁理論。圖1-1顯示了一種單極的天線，常見於活動對講機上的。在傳輸時，在底部的電源將一帶有信息的電流，以一適當的載波頻率傳到天線上。以電路理論的觀點來看，電源是傳送到一開路的線路中，因為實質上天線的頂端並沒有



圖 1-1 單極天線

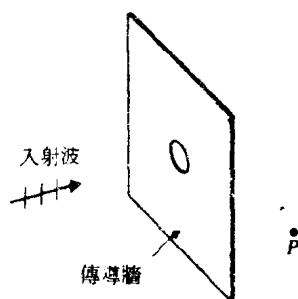


圖 1-2 一個電磁問題

連接任何東西；因此並不會有電流的流動，也不會發生任何情況。這種觀點當然是不能解釋為什麼兩台活動對講機能在遠距離中建立起通訊。在這兒，必須使用電磁學的觀念，在第十一章，我們將會知道，當天線長度是載波波長\*的一個適當比例時，在這開路狀天線中會有不均勻的電流流動產生。這個電流便對著空間輻射出一時變的電磁場，而能使得在一段距離之外的天線產生感應電流。

在圖 1-2，我們顯示了另一種情況，當一電磁波，從左入射到一塊含有一個小孔的大傳導牆時，在牆面右邊的所有點，都會有電磁場存在。例如圖中的  $P$ ，而不一定要在正對著孔的後面。電路理論很明顯的不足以決定（甚或說明存在的理由）在  $P$  點的電場。圖 1-2 的這種狀況，代表著一類重要的問題，它的解和傳導牆有效遮蔽程度的計算有相當的關連。

一般而言，電路理論用以處理集總元件系統——這類電路是由可用集總參數（如電阻、電感、電容）所表示的元件所組成。電壓和電流是這種系統的主要變數。對直流電路而言，這些系統變數是常數，而引導的方程式則是代數方程式。在交流電路中的系統變數是和時間有關的；它們是數值的量並和空間座標沒有關連。在另一方面，大多數的電磁變數是時間和空間座標的函數。有許多是向量，有大小和方向性，因此在處理和表示時須要有向量代數和向量微積分方面的知識。即使在靜態中，引導的方程式也多半是偏微分方程式，因此，基本上，我們必須具備有處理向量和以時

\* AC 訊源頻率與波長的乘積即為波傳播的速率。



間、空間兩者為函數的變數的能力。向量代數和向量微積分的原理將在第二章推導。在處理某些類型的電磁問題時須要用到解偏微分方程的技巧。這些技巧將在第四章中討論。在研習電磁學時，一再強調在使用這些數學工具中獲致熟練的重要性，是絕不為過的。

## 1-2 電磁模型

在推導科學問題上有兩種方法：歸納法和演繹法。在使用歸納法時，我們是依循歷史上對這問題的推導，由觀察一些簡單的實驗開始，並從中推導出規則和理論。它是一種由特殊現象推理到一般原理的過程。而演繹法，則是針對著一理想模型而做基本關係的假設。這些假設的關係便是公理，我們可以從中得到一些特有的規則和理論。這個模型和公理的正確性是看它是否能預測出和實驗的觀察符合之結果而決定。在這本書中，我們較喜歡用演繹法或是公理法，因為它較為簡潔，而且可以把電磁學問題的發展以有次序的方式導出。

我們所採用以研討科學問題的理想模型，必須是和真實世界的情況相關，並且能解釋物理現象的；否則，便只是在做空想而不會有結果。例如，一個人可以建造一個理論的模型，並從中得到很多數學關係；但是若這些關係和觀察的結果不符合，這便是一個無用的模型。這些數學式或許是正確的，但是在這模型之下的假設可能是錯了，或是意味著這種估設是無法被證實的。

在建立理想模型的理論上包含了三個基本的步驟。第一，必須定義由這問題所衍生出來的一些基本量。第二，指出這些基本量的運算規則（數學式）。第三，假設一些基本的關係式。這些假設或規則必須是以在控制狀況下的多次實驗觀察為基礎並以銳利的心智去分析而得出。一個熟悉的例子是以理想電源及純電阻、電感、電容所構成的電路理論。在這種情況下，這些基本量是電壓（ $V$ ），電流（ $I$ ），電阻（ $R$ ），電感（ $L$ ）及電容（ $C$ ）；運作的規則通常是代數式、常微分方程式及拉普拉斯轉換；而基本的假設則是克希荷夫電壓及電流定律。從這個相當簡單的模型，我們可以得到許多關係式和公式，而可以用於決定極複雜網路的響應。這個模型的正確性和數值可以得到很充分的驗證。