

Engineering Electromagnetic Fields and Waves

# 工程電磁學的 場與波

● Carl T.A. Johnk 著 ● 劉建君 譯

 WILEY  
Publishers Since 1807

 五南

# 工程電磁學的場與波

*Engineering Electromagnetic Fields and Waves*

Carl T. A. Johnk 著  
劉建君 譯

五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

工程電磁學的場與波／Carl T.A. Johnk著；  
劉建君譯.-- 初版.-- 臺北市：五南，  
2002〔民91〕  
面；公分  
譯自：Engineering Electromagnetic  
Fields and Waves, 2nd ed.  
ISBN 957-11-3044-3(平裝)  
I. 電磁學  
338.1 91017655

*Engineering Electromagnetic Fields and Waves*  
**工程電磁學的場與波**

---

作者 Carl T.A. Johnk  
譯者 劉建君  
編輯 田惠敏

---

出版者 五南圖書出版股份有限公司  
發行人 楊榮川  
地址：台北市大安區106  
和平東路二段339號4樓  
電話：02-27055066  
傳真：02-27066100  
郵政劃撥：0106895-3  
網址：<http://www.wunan.com.tw>  
電子郵件：[wunan@wunan.com.tw](mailto:wunan@wunan.com.tw)

---

顧問 財團法人資訊工業策進會科技法律中心

---

版刷 2002年11月 初版一刷

---

定價 780元

版權所有·請予尊重

## 序 言

此本教科書的第一版，是被科羅拉多大學電機和電腦工程學系於一連續兩學期的課程所採用，而且使用後非常成功。在第一學期課程內容包含了第 1~第 5 章，而第二學期為第 6 章~第 10 章（和第 11 章的部分）。在此修訂過的第二版中，起始章節的排列和主題內容是大量被保留的。一些改變和新增的內容是一起被併入了此版中。一些主題是被移入了附錄中，使得此書的主體更流暢，並且在課程表的設計上能夠更有彈性。在本書修正過的第二版形式下，此書適用於一連續兩學期電磁場和波傳輸的課程內容，或是局限於一學期的課程。

此書有許多已解出的範例，它們其中一些為此版本所新加的，如此能夠使得學生用此書自習時獲得更大的幫助。一組幾乎全新的問題，是包含在每章的最末，而且每組問題還加了這些問題是屬於哪個章節的標題。

此書保留了第一版的主題、目標。一開始先介紹馬克士威爾方程式，並把它們發展為熟悉有用的工具，這些內容於前三章中透過了運用關於在真空中有簡單對稱性的基本時靜系統之循序漸進的範例來完成。大部分學生因為在先前的物理課程中已學過了部分電和磁的基本概念，這使得了一開始馬克士威爾方程式的介紹並不會太生澀，需要較高深物理背景觀點的內容在這裡是避免掉了。

當一開始的三章完成後，學生將有推導和運用真空和材料區域中馬克士威爾方程式之積分和微分形式的的能力，而大部分的應用練習只局限在時靜場範例。除了（在第 2 章末）一些基本，有合理包含性關於在無電流電荷源空間中的均勻平面波討論，和第 3 章中波在有損耗介質傳播，牽涉到時變場。較早包含到時變場解的討論是非常有益的，因為這樣不僅可以更加瞭解在時域中馬克士威爾方程式，還可以得到一些關於損耗正切概念、複數介電係數和肌膚效應的知識，這些都和材料常數有關。而且若第 6 章從課程表省略，這對提供一平面波理論的基礎背景，也是非常有利的。

在本書中，重要的數學工具，於前三章中已發展完成。剩餘的章節和

## 2 序 言

前三章有相當大的關係，這也使得剩餘八章的上課順序相對上較不重要（除了第 10 章，必須先上完第 9 章）。這種順序上的彈性使得此書在各種不同章節的組合下，適用於兩學期和一學期課程，一些章節能依需要被選用。雖然另外一些組合可能存在，但在這裡我們仍給了一些單一學期課程所適用的四章範圍組合。如所註明而省略掉的特定非重要章節，成為了剩餘內容所需要的額外時間。

1. 一學期的場課程，若為強調靜場，能包含首五章。第 1、2、3 章大概需要 6 週（在每週 3 小時，一學期的課程），再加上第 4 章（可以省略 4-9、4-10、4-12、4-16 節）和第 5 章（省略 5-9 節和選擇 5-10、5-11 和 5-12 部分）。
2. 若一學期的課程較不強調靜場，但包含了傳輸線應用將包含第 1、2、3 章和第 4、第 5 章部分（4-1~4-6 節和 5-3、5-7 和 5-11）再接著第 9 章（9-1~9-4 節加上 9-7）和第 10 章。
3. 若單一學期內容強調的是電磁功率、波導管和天線則在首三章結束後，可選擇第 6 章部分（6-1~6-4 再加上 6-9）、第 7 章和第 8 章（8-1~8-4）和第 11 章部分（11-1~11-4）。
4. 單一學期有深度的課程關於導波和雷射應用光學能包含第 1、2、3、6 章（6-1~6-4 節）、7 和 8 章。

一些章節的特色與第一版比較起來所作的改變如下所示：第 1 章以發展向量代數的規則開始，並推廣到適當相關連的線、面和體積分。這些技巧可運用於馬克士威爾積分定律的解釋和簡單運用，此定律於真空中的形式是在 1-11 節提出。一較短關於座標轉換的章節附於如後。

第 2 章內容是關於真空中馬克士威爾方程式微分形式的發展，包含了定義散度和旋度運算子。處理過真空中的平面波後加上了關於波極化效應的 2-11 節。

第 3 章發展了馬克士威爾方程式於材料區域中加上了極化和導通效應的結果，並在此效應下推導了邊界條件。均勻平面波解的發展是用來強調材料參數的概念。第一版的 4-3 和 4-14 節更適切的被移到此章的 3-6 和 3-11 節。

第 4 章為馬克士威爾方程式靜電場的解作一統合之處理。新加的範例包含了靜電力線和面電荷分布和二維拉普拉斯方程式有限差異法的解法。這是相當長的章節，我們可以選擇幾個需要的主題作為課程內容。

第 5 章包含了馬克士威爾方程式靜磁和準靜磁場的解，大致上來說沒有太大變化。

第 6 章擴展了第 2 和第 3 章中平面波一般化的解到平面邊界的反射和透射，關於斜向入射的一節已被加入。非必須的章節包含了史密斯圖和駐波概念，史密斯圖理論上的推導本版中出現在附錄 D 以作為此章和第 10 章傳輸線選擇性的應用。

第 7 章被大幅的修改，對波印亭理論有相當深度的處理。第 8 章提供了一關於直角波導管的模態理論之仔細介紹，並強調支配性模態的概念。第 9 章修正為將原有傳輸線參數的章節移入了附錄 B，這樣則較有參考性和完整性。原來 10-6 節於無損耗線上的非弦波出現在第 9 章最後 9-7 節。非常清楚的若授課者要先教授波導管此章開始之前的傳輸線，則可在第 8 章之前依序上 9 章、10 章，因此這些最後的章節之上課順序可以任意排列。

在第 11 章非齊次的波動方程式之積分過程細節已被移入附錄 C，關於天線指向增益和接收天線為新加的。

特別值得一提，有許多有用的建議分別來自：Ezekiel Bahar, David Chang, Edward Kuester, Leonard Lewin, Samuel Maley, Herbert Reno, 和 Henry J. Stalzer Jr。來自許多學生的回響也有相當大的助益，而且我對這些熱情的回響也非常感激。Mrs. Marie Kindgren 和 Mrs. Mae Jean Ruhlman 在此書打字方面有相當大的貢獻。最後我對未來讀者可能提出的修正和改進的建議作出由衷的感謝！

CARL T. A. JOHNS

# 目 錄

## 第 1 章 向量解析和真空中的電磁場 1

- 1-1 純量和向量場 2
- 1-2 向量和 4
- 1-3 向量和純量積 5
- 1-4 座標系統 5
- 1-5 空間中的微分元素 10
- 1-6 位置向量 13
- 1-7 向量之純量和向量積 17
- 1-8 向量積分 23
- 1-9 電荷、電流和它們的密度 27
- 1-10 由電力和磁力觀點討論其場 32
- 1-11 在真空中的馬克士威爾積分關係式 34
- 1-12 座標轉換 51
- 1-13 單位和因次 55
- 參考文獻 58
- 問 題 58

## 第 2 章 向量微分關係式和於真空中馬克士威爾的微分關係式 73

- 2-1 向量場的微分 73
- 2-2 純量函數的梯變 75
- 2-3  $\nabla$  (Del) 運算子 78
- 2-4 向量函數的散度 80
- 2-5 向量場的旋度 91
- 2-6 馬克士威爾方程式：複數時變諧振的形式 102

## 2 工程電磁學的場與波

- 2-7 拉普拉斯和旋度、旋度運算子 104
- 2-8 格林積分定理：唯一性 109
- \*2-9 在真空中電場和磁場的波動方程 110
- \*2-10 在無電流電荷源空間中的均勻平面波 112
- 2-11 波的極化 121
- 參考文獻 123
- 問題 124

## 第 3 章 馬克士威爾方程式和靜止材料區域中的邊界條件

133

- 3-1 金屬的導電性 134
- 3-2 材料的電極化和  $\mathbf{D}$  向量之散度 139
- 3-3 材料中的散度  $\mathbf{B}$ ：它的積分形式和法線分量  $\mathbf{B}$  的邊界條件 151
- 3-4 磁極化和材料中的  $\mathbf{H}$  旋度 152
- 3-5 馬克士威爾旋度  $\mathbf{E}$  的關係式：它的積分形式和切線  $\mathbf{E}$  的邊界條件 175
- 3-6 電荷守恆 179
- \*3-7 在一無封閉導體區域中的均勻平面波 182
- 3-8 導體介質的分類 190
- 3-9 材料中的線性、均勻和各向同性 194
- 3-10 一般材料的電磁參數 199
- 3-11 法線  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{J}$  分量的一般邊界條件 201
- 參考文獻 206
- 問題 207

## 第 4 章 靜電場與準靜電場

219

- 4-1 對靜電場的馬克士威爾方程式 220
- 4-2 真空中固定電荷之靜電場之總合 221
- 4-3 高斯定律的再研究 228
- 4-4 靜電純量電位 229



- 4-5 電 容 237
- 4-6 靜電場的能量 241
- 4-7 卜瓦松 (Poisson's) 及拉普拉斯 (Laplace's) 方程式 246
- \*4-8 靜電場解的唯一性 249
- 4-9 拉普拉斯方程式及邊界值問題 252
- 4-10 有限差分解的方法 259
- 4-11 虛像法則 264
- 4-12 對於多帶電荷導體之近似法 271
- 4-13 被場所成像之二維系統之電容 275
- 4-14 電容的電導相似性 280
- \*4-15 靜電力跟力矩 290
- 參考文獻 295
- 問 題 295

## 第 5 章 靜態與準靜態磁場 313

- 5-1 馬克士威爾方程式與靜磁場的邊界條件 313
- 5-2 安培迴路定律 314
- 5-3 磁 路 318
- 5-4 向量磁位 325
- 5-5 在自由空間中的積分解：比歐—沙伐定理 326
- 5-6 準靜態電磁場 333
- 5-7 開路感應電壓 335
- 5-8 運動電動勢和電壓 338
- 5-9 從時變向量磁位所感應的電動勢 (emf) 343
- 5-10 電壓發電機和克希荷夫定律 348
- 5-11 磁能和自感<sup>12</sup> 355
- 5-12 耦合電路與互感 379
- 5-13 磁力與磁力矩 391
- 參考文獻 395

#### 4 工程電磁學的場與波

問題 395

### 第 6 章 波在平面邊界間的反射與穿透 411

- 6-1 邊界值問題 411
- 6-2 正向入射到平面導體的反射 413
- 6-3 兩個區域間的反射和穿透 417
- 6-4 多區域的正向入射 421
- 6-5 利用反射係數和波阻抗來求解 424
- \*6-6 史密斯圖解法 430
- \*6-7 駐波 434
- 6-8 斜向入射的反射和穿透 440

參考文獻 456

問題 457

### 第 7 章 波印亭理論及電磁波功率 465

- 7-1 波印亭理論 465
- 7-2 平均波印亭向量和平均功率 475

參考文獻 485

問題 485

### 第 8 章 波導管的模態理論 493

- 8-1 場具  $e^{j\omega t - \gamma z}$  相關的馬克士威爾關係式 495
- 8-2 TE、TM 和 TEM 模態關係 498
- 8-3 矩形波導管的 TM 模態解 503
- 8-4 矩形波導管的 TE 模態解 515
- 8-5 中空波導管的色散：群速度 529
- 8-6 中空波導具損失的傳遞行為 537

參考文獻 542

問題 542

<b>第 9 章</b>	<b>兩導體傳輸線上的 TEM 電磁波</b>	<b>547</b>
9-1	根植於靜態場的 TEM 模式場	549
9-2	特徵阻抗	560
9-3	完美導體假設的傳輸線參數	562
9-4	完美導體傳輸線的電路模式	571
9-5	完美導體傳輸線的波方程式	572
9-6	包含導體阻抗的傳輸線參數	573
9-7	無損失線上任意波形的波	579
	參考文獻	596
	問 題	597
<b>第 10 章</b>	<b>反射型傳輸線的向量分析</b>	<b>607</b>
10-1	有反射的線上電壓電流之運算	608
10-2	使用史密斯圖的圖形解	618
10-3	傳輸線上的駐波	626
10-4	線阻抗的分析表示法	632
10-5	阻抗匹配：無損失線的分支匹配	638
	參考文獻	641
	問 題	642
<b>第 11 章</b>	<b>自由空間中的天線輻射</b>	<b>651</b>
11-1	純量電位 $\Phi$ 及向量磁位 $\mathbf{A}$ 滿足的波動方程式	652
11-2	自由空間中非齊次波動方程式的積分	655
11-3	無限小電流元件的放射場型	656
11-4	線性中央饋入薄天線的輻射場	662
11-5	對稱的馬克士威爾方程式和其向量位能	671
11-6	天線定向增益	682
11-7	傳輸—接收系統：接收天線	686
	參考文獻	696
	問 題	696

附 錄 \_\_\_\_\_ 703

- A 斜向入射：區域 2 為具導電性之情形 703
  - A-1 區域 2 之解 / 703
  - A-2 區域 2 為良導體 / 706
- B 傳輸線參數 711
  - B-1 電流於導線之肌膚效應：內部分布參數 / 711
  - B-2 平行導線之分布參數，包含導體阻抗 / 719
  - B-3 同軸線之分布參數，包含導體阻抗 / 721
- C 非齊次波動方程式之積分 727
- D 史密斯圖 733

# 1

---

## 向量解析和真空中的電磁場

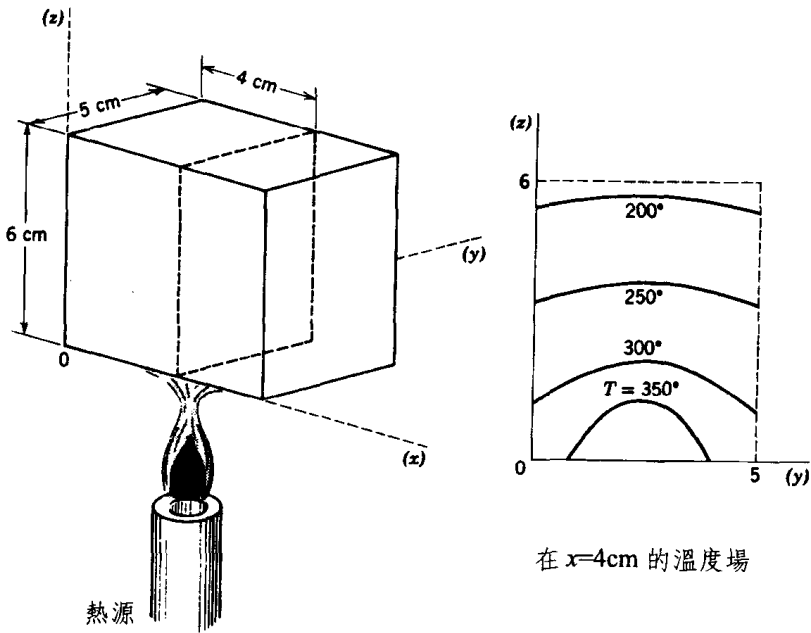
向量解析的開始是始於十九世紀中且為數學領域中非常重要的分支。到目前為止它已發展了許多物理學家和工程師所必須用到的工具。此書前兩章所討論的向量解析目的是為了應用於本書的其餘部分。在本章節中，重點是在純量和向量積，和特定的向量積分。這些內容將為瞭解定義出電場和磁場的羅倫茲力和這些場與電流源和電荷源的馬克士威爾積分關係式之基礎。座標系統的使用將局限在常用的直角、圓柱和球座標系統。為了統一討論起見，我們將先討論一般化座標系統。這種節省時間的討論法將允許我們發展出一套向量運算的一般化法則，可以用觀察的方式在一給定的座標系統寫出需要的向量運算。這避免了在介紹每個新座標系統時，都需重新推導運算式的麻煩。

接下來是提出由電流和電荷源產生在自由空間中的電場、磁場之馬克士威爾積分關係式。運用先前發展出的向量規則，一些較為簡單的對稱型靜電荷和靜電流分布題型之解是可以被討論的。此章的討論還包含了三種座標系統之間的轉換。

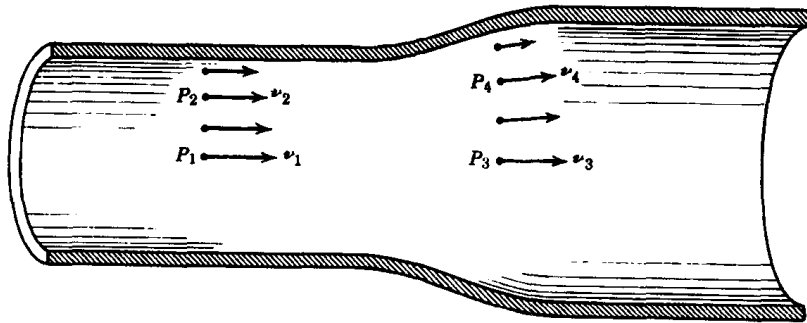
### 1-1 純量和向量場

場的意義是指一時間和空間的數學函式。場能被分類成純量和向量場。一純量場是指一在任何時刻下，空間中屬於一區域的任何點都能有一特定強度值之數學函式。依此定義在如圖 1-1(a)的材料中之溫度場  $T(x, y, z, t)$  是一個純量場。在其中任一點  $P(x, y, z)$  任何一時間均有一對應的溫度  $T(x, y, z, t)$ 。

圖 1-1(b)中所表示的是管內液體流動的速度，此圖為一向量場的例子。當管內截面積改變時，管內流體速度的強度和量值均會隨著改變。另外一些純量場的例子為質量、密度、壓力和重力位能。而像作用力場、速度場和加速度場則是為向量場的例子。純量的數學符號是可以用任何字母例如說  $A, T, a, f$ 。向量的符號則是任何粗黑體的羅馬字母例如說： $\mathbf{A}, \mathbf{H}, \mathbf{a}, \mathbf{g}$ 。向量值用圖形的方式來表示的話則為箭號，或有方向性的線段。如圖 1-2 表示。向量  $\mathbf{A}$  的量值或長度寫為  $|\mathbf{A}|$  或簡單的寫為一個正的實數純量  $A$ 。一個向量的負值，即為取它的相反方向將其箭頭指向一相反方向。一單位向量就是任何量值為 1 的向量。「 $\mathbf{a}$ 」這個符號則用來表示一單位向量。若在其上加上一駐碼則表示一特別的方向。例如： $\mathbf{a}_x$  其意為正  $x$  方向的單位向量。兩向量若它們有相同的大小或相同的量值則被說為「相等」（它們不須共線，但必須互相平行）。



(a)



(b)

圖 1-1 純量和向量場的例子：(a)在一塊材料中的溫度場；(b)在一改變截面積管內的流體速度

#### 4 工程電磁學的場與波

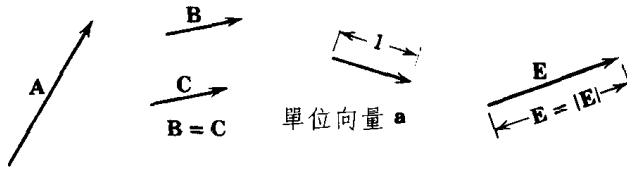


圖 1-2 向量的圖解表示，相等向量，單位向量和一個向量的長度和量值表示

### 1-2 向量和

**A** 和 **B** 的向量和是如圖 1-3 用圖形畫出向量的方式來定義的。一個實際向量和的例子是在空間中的位移相加。因此，若有一質點連續從向量位置 **A** 移動到 **B** 它的最後位置被表為向量和  $\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{C}$  如圖 1-3(a)。若將位移的順序反相也可得到相同的向量和 **C**，所以

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A} \quad (1-1)$$

此為向量相加的交換律。若一些向量相加則有一結合律

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{D} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{D}) \quad (1-2)$$

它也遵守著向量和的定義如圖 1-3(b)。

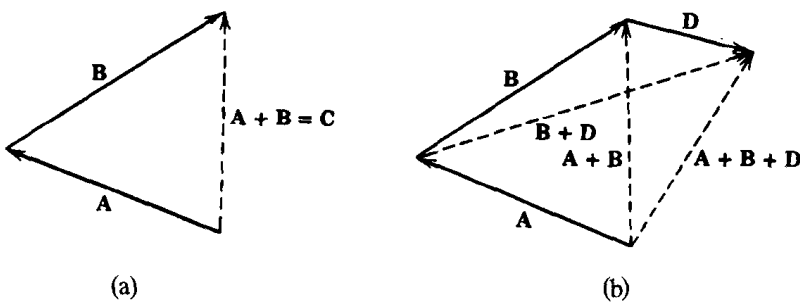


圖 1-3 (a)兩向量和的圖形定義；(b)向量相加的分配律



### 1-3 向量和純量積

若有一純量為  $u$ ，和一向量  $\mathbf{B}$  則它們的積  $u\mathbf{B}$  意思為此向量的量值為  $\mathbf{B}$  的  $u$  倍，並且若  $u$  為一正的純量時，則其有和  $\mathbf{B}$  一樣的方向，若  $u$  為一負的純量則其和  $\mathbf{B}$  的方向相反。下面為一些向量和純量積的法則。

$$u\mathbf{B} = \mathbf{B}u \quad \text{交換律} \quad (1-3)$$

$$u(v\mathbf{A}) = (uv)\mathbf{A} \quad \text{結合律} \quad (1-4)$$

$$(u+v)\mathbf{A} = u\mathbf{A} + v\mathbf{A} \quad \text{分配律} \quad (1-5)$$

$$u(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = u\mathbf{A} + u\mathbf{B} \quad \text{分配律} \quad (1-6)$$

### 1-4 座標系統

一物理問題的解析通常需要引進一座標系統作為其骨架，特別是在想要得到一明顯解時。其中最為工程師和科學家熟悉的座標系統為笛卡兒或直角座標系統。然而另外還有兩種常使用的座標系統為圓柱和球座標系統。這些正交系統常用的獨立座標變數如下所列：

1. 直角座標  $(x, y, z)$
2. 圓柱座標  $(\rho, \phi, z)$
3. 球座標  $(r, \theta, \phi)$

在圖 1-4(a) 空間中的  $P$  點和原點相對起來，表示為三種一般正交系統的座標變數。如  $P(x, y, z)$  在直角系統， $P(\rho, \phi, z)$  在圓柱系統和  $P(r, \theta, \phi)$  在球座標系統。在圓柱和球系統中可以看到在直角座標中的軸  $(x)(y)(z)$  是被保留的。如此才可建立出適當的角度參考。大家應該可以注意到座標變數  $\phi$  在球座標和柱座標中是共用的，且均是用  $x$  軸當作  $\phi=0$  的參考面， $\phi$  是從  $x \rightarrow y$  方向定義為正方向（依據右手定則，若大拇指指的方向