

# 工程電磁學

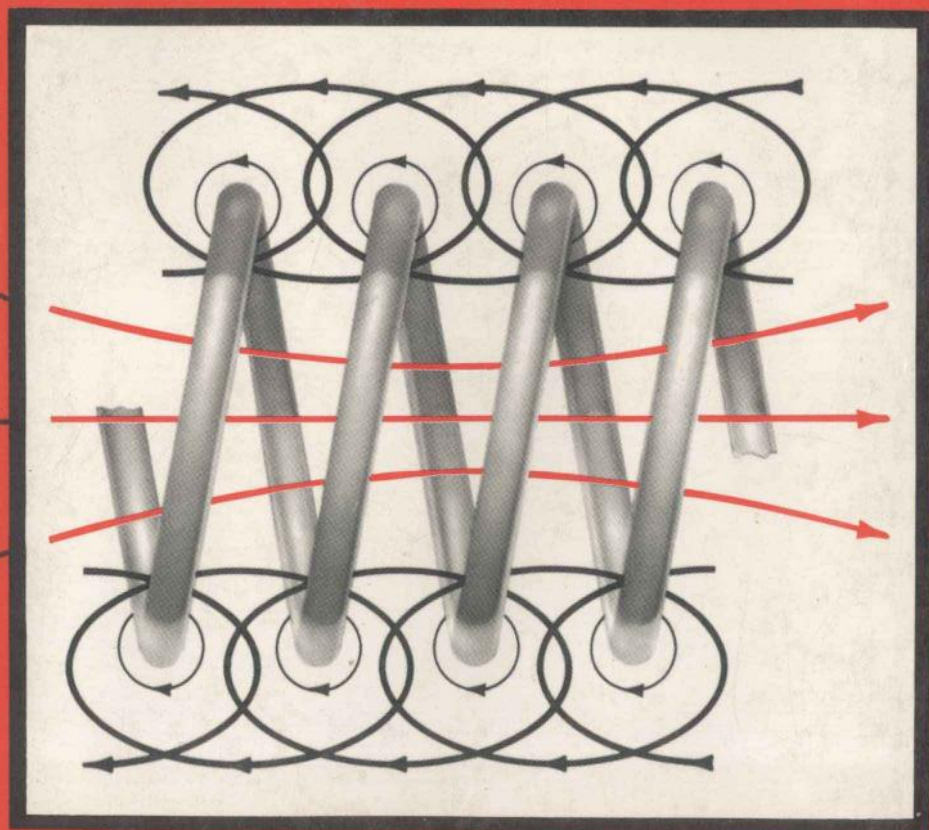
Fifth Edition

原著者

WILLIAM H. HAYT, Jr.

譯者

謝芳生



東華書局印行

# 工程電磁學

Fifth Edition

原著者

William H. Hayt, Jr.

譯者

謝芳生

東華書局印行



(79037)

**版權所有·翻印必究**

中華民國七十九年八月初版

工程電磁學

定價 新臺幣叁佰元整

(外埠酌加運費匯費)

著者	William H. Hayt, Jr.
譯者	謝芳生
發行人	卓鑫森
出版者	臺灣東華書局股份有限公司 臺北市博愛路一〇五號 郵 撥: 00064813
印刷者	正文印刷廠

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號

ISBN 957-636-265-2

## 發散度

---

卡迪遜  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$

柱形  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho D_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$

球形  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 D_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (D_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi}$

## 梯 度

---

卡迪遜  $\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{a}_z$

柱形  $\nabla V = \frac{\partial V}{\partial \rho} \mathbf{a}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \phi} \mathbf{a}_\phi + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{a}_z$

球形  $\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r} \mathbf{a}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \mathbf{a}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \mathbf{a}_\phi$

## 旋 度

---

卡迪遜 
$$\nabla \times \mathbf{H} = \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \mathbf{a}_x + \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \mathbf{a}_y + \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \mathbf{a}_z$$

柱形 
$$\nabla \times \mathbf{H} = \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} \right) \mathbf{a}_\rho + \left( \frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \mathbf{a}_\phi + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial(\rho H_\phi)}{\partial \rho} - \frac{\partial H_\rho}{\partial \phi} \right] \mathbf{a}_z$$

球形 
$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{r \sin \theta} \left[ \frac{\partial(H_\phi \sin \theta)}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial \phi} \right] \mathbf{a}_r + \frac{1}{r} \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial H_r}{\partial \phi} - \frac{\partial(r H_\phi)}{\partial r} \right] \mathbf{a}_\theta + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial(r H_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \mathbf{a}_\phi$$

## 拉普拉欣

---

卡迪遜 
$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

柱形 
$$\nabla^2 V = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial V}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

球形 
$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2}$$

## 發散度

---

卡迪遜  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$

柱形  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho D_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$

球形  $\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 D_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (D_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial D_\phi}{\partial \phi}$

## 梯 度

---

卡迪遜  $\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{a}_z$

柱形  $\nabla V = \frac{\partial V}{\partial \rho} \mathbf{a}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \phi} \mathbf{a}_\phi + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{a}_z$

球形  $\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r} \mathbf{a}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \mathbf{a}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \mathbf{a}_\phi$

## 旋 度

---

卡迪遜  $\nabla \times \mathbf{H} = \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \mathbf{a}_x + \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \mathbf{a}_y + \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \mathbf{a}_z$

柱形  $\nabla \times \mathbf{H} = \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} \right) \mathbf{a}_\rho + \left( \frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \mathbf{a}_\phi + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial(\rho H_\phi)}{\partial \rho} - \frac{\partial H_\rho}{\partial \phi} \right] \mathbf{a}_z$

球形  $\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{r \sin \theta} \left[ \frac{\partial(H_\phi \sin \theta)}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial \phi} \right] \mathbf{a}_r + \frac{1}{r} \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial H_r}{\partial \phi} - \frac{\partial(r H_\phi)}{\partial r} \right] \mathbf{a}_\theta + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial(r H_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \mathbf{a}_\phi$

## 拉普拉欣

---

卡迪遜  $\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$

柱形  $\nabla^2 V = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial V}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$

球形  $\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2}$

# 序

雖然大多數電機工程的課程是從電路與磁路的研討開始的,但是現在已經被大家所公認了在課程的安排上下一個值得注意的則是較為基本的電場與磁場理論。對於電路觀念的一些認識以及微積分方面的知識使我們能在三年級來講場的理論,它是由馬克士威爾方程式開始的,再說明一些近似關係而導致電路理論。

這本書是以馬克士威爾方程式為中心主題的。這些方程式是從歷史觀點導出來的,其中幾條實驗定律逐個地被引入,同時以漸漸地增加的向量微積分的知識為幫助來運算它們。在遇到馬克士威爾方程式時就加以點明,即使是在被應用到靜態場上也一樣,所以當整個理論最後被導完時就會有種頗有成就之感。這些方程式的幾項應用則說明在隨後的各節中,包括波動、表皮效應、輸送線現象、電路理論、及諧振空腔。輻射及天線的初步概念也包含在內。

本教材比一學期的課所需要的多。依照教學的程度而定,也許可以將關於實驗圖畫法、拉普拉氏方程式的解、馬克士威爾方程式的應用、以及輸送線各章中的一部份略去比較合適。

這本書寫的時候的目標是要盡量使它容易到學生能自己教自己讀。為了達到這目的起見我們在每一章以內以及各章之間小心地應用一種漸漸增加的程度,並且提供許多例子以便說明並應用每一個基本的結果,同時在可能的地方援用數值例題,還包括很多個練習題,它們的數值答案都已給了,並且避免涉及太多的解析幾何及向量幾何;也避免用它們來解釋場的觀念。

比較難的題材被放在各章末了或者放在這問題的一個階段的末了處。程度稍差的學生不能像較好的學生一樣地吸收同樣多的材料,就會被



每章開始處較為基本的材料所吸引。由於下一章的講題不一定是基於前一章最深的那部份上，他就可以從他那稍差但仍合用的基礎上再從新開始。而較深的講材則為較好的學生提供必要的挑戰。

凡是介紹了一個公式或一條定律的各節末了處大多數都有練習題，只要它們能被表示成一個習題的形式。練習題通常都有幾個部份，並且為了自行研讀方便起見，該練習題的答案就依序列在每一部份的下面。各章末了處的題目則比較難，也比較有趣；單數題目的答案均列在附錄D中。每章中除去一、二個題目要學生參考專門性的文章或別的書以便使他們對圖書館能略為熟悉一點以外，別的題目都是依着書中相當的教材的次序而列的。

第五版中全部習題均已換新。但其中仍有四、五個題目，因為是作為理論步驟的補充，故仍保留在本版中。另外幾個著者特別偏愛的題目；經稍加修改後，也仍保留在本版中。總計本版約較前版多出少許題目。但有一句話欲奉告各任課老師：以前各版的大部份題目，仍然是非常適用。只不過偶而有一兩個符號需要更換一下而已。由於複印機和印刷方法的進步，要使用以前各版的題目是件非常容易的事。而出版者當然是允許複印舊版習題的。另外還有一句話，告訴使用本書的學生：如果能夠做完新舊各版全部題目，則以後的考試就不會遭遇到困難了。

前四版的大部份目標對本書而言仍然是妥確適宜的。但是，本書三十幾年來的長期使用，已有許多學生、同事及有信件往來的人都建議在新版中作部份修訂。

第五版最大的改變是新增了許多範例。在第1章，加進了一個範例用來說明純量和向量投影的計算。第四版2.2節和2.3節的材料在第五版中都歸併到2.2節，並且增加一個範例，闡述了多個點電荷所形成的電場的計算。另外，在線電荷的例子中，相關的名詞用法已經改進。在2.3節，有一個範例是用來探討並非置於 $z$ 軸上的線電荷的情況。2.6節也加進一

個範例，介紹通過特定點的特定流線方程式的求法。

第3章有3個新增範例。第4章則新增了一個範例，目的是為了說明線積分在守恆場的應用以及梯度的使用。

第5章有5個新增範例，另外在5.6節加進了一些最新的數據資料。

第6章引進了面電阻的概念，同時有新的範例來呈示重複法可應用在不規則和曲線邊界的情況。

在8.1節，有個數值範例探討有限長度電流單元所形成的磁場該如何計算。

第9章，有關霍爾效應電壓的描述以及帶電流導體間的力和力矩的計算均已作修訂改進。新增了一張表格列了六種不同的磁性物質的參數以供比較。此外還增加一個範例，說明如何使用邊界條件來計算磁場的值。

在11章，有一個新範例用來輔助說明純量和向量的頻率域 - 時間域的轉換。另外，關於速度、波長和相位常數的解說較前版更為審慎嚴謹。對於在有損耗介質中傳遞的平面波一些參數的計算，本書採用了更高精度的數值。同樣的參數值仍然使用近似法計算求得，並將結果與較精確的值作比較。最後有一個範例，說明一個均勻平面波在有損耗介質和良導體中傳遞時波印亨向量的計算。

12.2節討論輸送線參數的問題，有關同軸、雙軸和片狀輸送線在高頻和低頻的  $C$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $R$  和  $Z_0$  的計算公式均已大幅改寫。對於末端接一般負載阻抗的輸送線，有一個新的範例用來計算其反射係數、駐波比和輸入阻抗。此外還增加了一些新內容，目的是解說和應用史密斯圖。

為了配合最新的光速定義值：每秒 299792458 米，附錄B也重新寫過。附錄C的表C4中，電子的質量、自由空間的容許係數、光速等值均已修訂。

第五版一個整體性的修訂是所有體積電荷密度皆使用  $\rho_v$  這個符號。

各章後面的參考書都增添了一些新書，也各自略去了部份材料較舊的

參考資料。同時在資料的引據上均採用最新的版本。

筆者要再一次感謝 Purdue University 的 W. L. Weeks 教授對於原稿的指正。多位審閱者也提供了許多改進意見，這些都在這一版本中修正了，他們包括 Walter Kurt Kahn, George Washington University; Sigrid McAfee, Rutgers University; Leonard S. Taylor, University of Florida; 以及 Walter Weeks, Purdue University。學生們也寫信指出一些錯誤之處和容易混淆的段落。所有這些幫助著者都非常感謝，並衷心期盼他們繼續提供寶貴意見。

# 工程電磁學

## 目 錄

第一章 向量分析.....	1
1. 純量與向量.....	2
2. 向量代數.....	3
3. 卡迪遜坐標系統.....	5
4. 向量的分量和單位向量.....	8
5. 向量場.....	11
6. 點乘積.....	12
7. 叉乘積.....	15
8. 另一種坐標系統: 圓柱坐標.....	18
9. 球形坐標系統.....	24
第二章 庫倫定律和電場強度.....	32
1. 庫倫的實驗定律.....	33
2. 電場強度.....	37
3. 一個連續的體積電荷分佈所引起的電場.....	42
4. 一根線電荷的電場.....	46
5. 一頁電荷的電場.....	53
6. 流線以及電場的素描.....	56

第三章 電通量密度，高斯定律，及發散度	64
1. 電通量密度	64
2. 高斯定律	69
3. 高斯定律的應用：幾種對稱的電荷分佈	74
4. 高斯定律的應用：微小體積單元	81
5. 發散度	85
6. 馬克士威爾的第一式（靜電學）	89
7. 向量運算素 $\nabla$ 以及發散定律	91
第四章 能量與電位	101
1. 在電場中移動一個點電荷時所化的能量	101
2. 線積分	102
3. 位差及位能的定義	110
4. 一個點電荷的位場	113
5. 電荷系統的位場：守恒性質	116
6. 電位梯度	122
7. 偶極	131
8. 靜電場中的能量密度	136
第五章 導體、介電質、及電容	146
1. 電流及電流密度	146
2. 電流的連續性	148
3. 金屬導體	152
4. 導體的性質	159
5. 映像法	165
6. 半導體	167

7. 介電材料的本質	168
8. 完全介電材料的邊際條件	177
9. 電容	185
10. 幾個電容的例子	189
11. 雙線電纜電容	194
<b>第六章 實驗映法</b>	<b>206</b>
1. 曲線方塊	207
2. 重複法	214
3. 電流的類比性	222
4. 實際模型	226
<b>第七章 帕桑及拉普拉氏方程式</b>	<b>236</b>
1. 帕桑及拉普拉氏方程式	236
2. 獨一性定理	239
3. 拉普拉氏方程式解答的例子	243
4. 帕桑方程式的解答的例題	254
5. 拉普拉氏方程式的乘積解	259
<b>第八章 穩定的磁場</b>	<b>277</b>
1. 畢奧 — 薩伐定律	278
2. 安培電路定律	288
3. 旋 度	297
4. 斯托克定理	307
5. 磁通量和磁通密度	314
6. 標量和向量磁位	318
7. 穩定磁場的各定律的推導	329

第九章 磁力，材料，和電感	346
1. 在動電荷上的力	346
2. 微小電流單元上的力	348
3. 微小電流單元之間的力	353
4. 一個閉合電路上的力和轉矩	355
5. 磁性材料的本質	364
6. 磁化和導磁係數	368
7. 磁的邊界條件	376
8. 磁路	380
9. 磁性材料上的位能和力	388
10. 電感	391
第十章 時變的場和馬克士威爾方程式	409
1. 法拉第定律	409
2. 位移電流	419
3. 點形式的馬克士威爾方程式	424
4. 積分形式的馬克士威爾方程式	428
5. 阻滯位場	431
第十一章 均勻的平面波	443
1. 自由空間內的波動	443
2. 完全介電質中的波動	455
3. 有損耗介電質中的平面波	458
4. 坡印亭向量和功率的考慮	467
5. 好導體內的傳播：集膚效應	473

6. 均勻平面波的反射	482
7. 駐波比	491
<b>第十二章 輸送線</b>	<b>505</b>
1. 輸送線方程式	505
2. 輸送線參數	513
3. 一些輸送線的例題	520
4. 圖解法	526
5. 幾個實際的問題	536
<b>第十三章 馬克士威爾方程式的另外幾種應用</b>	<b>547</b>
1. 電路理論的定律	547
2. 共振同軸穴	552
3. 輻射	565
<b>附錄 A 向量分析</b>	<b>583</b>
§A.1 一般曲線坐標	583
§A.2 在一般坐標系統中的發散度、梯度、及旋度	584
§A.3 向量恒等式	586
<b>附錄 B 單位</b>	<b>588</b>
<b>附錄 C 材料常數</b>	<b>595</b>
<b>附錄 D 單數習題答案</b>	<b>600</b>



# 第一章

## 向量分析

向量分析是數學上的一個項目，由數學家來教它會比工程師教得好得多。然而大多數工學院的三、四年級學生都不曾有時間（或企圖）來選一門向量分析的課，雖然基本的向量觀念及運算很可能已經在早期的數學課程中被介紹過了。這些基本觀念和運算在這章中將會講到，同時撥給它們的時間則要依過去所知而定。

這裡所採的觀點也是工程師或物理學者的而非數學家們的，因為證明都是指出而非嚴格地考證的同時物理上的解釋則被加以強調。對於一位工程師而言，在知道了一些物理方面的現象及應用之後再去在數學系中讀一門較為嚴密且完整的課時會容易得多。

研讀電學和磁學而不用到向量分析是可能的，同時有些工程方面的學生也許在早先一些電機工程或者基本物理課程中已經這樣做了。然而，若是將這初步的工作再向前推進一點的話很快地就會導致一些很長的式子而其中的各項看來差不多都是一樣的。很快地看一眼這種冗長而類似的式子，若非詳盡的審察這些方程式，我們將對其本質瞭解的非常少，甚至可能將我們原本熟悉的事項都忽略了。

向量分析是一種數學上的縮寫法。它有一些新的符號，一些新的規則，同時像大多數新的學問一樣地這兒一個陷阱，那兒一個陷阱，是以它要求集中注意力並且要練習。練習用的習題，最初在第 1.4 節的末了處會碰到，應當被認為是全書的一個整體的一部份而且每一題都應當做。如果書中有關各節的教材都已經澈底地懂了的話，這些題目應當是不難的。這樣來“讀”這一章會需要稍長的時間，但是時