

# 應用電磁學

(上冊)

Applied Electromagnetics

原著者：Martin A. Plonus

譯述者：婁 祥 麟

乾泰圖書有限公司

# 原 序

本書是繼大一物理學後，作為大學部第一年電磁學課程而編寫的，有兩點與普通電磁學書不同。筆者教了許多年第一年的電磁學課程，發現有某些特殊困難，而使學生困擾。必需不惜增加章節詳細說明，使其更為嚴格並包羅更多主題的特色以助學生瞭解，而不需參考其他書籍。也可幫助教師，在短期課程中可刪去某些材料而仍不失其連貫性。本書第二個特色，是強調電磁學的應用方面。許多章節都用電磁學原理來說明許多組件或現象。目的是希望學生對各方面有所了解，如固態物理、電子學、線性與旋轉機器、微波與超導體等而與電磁學有關的各方面。至於討論組件的部分，是為要提高學生的興趣，免得一直在數學算式中打轉。

要瞭解電磁學，除討論若干應用，與利用電磁學在其他部門外，對微觀或巨觀最低限度的瞭解是必需的。因此，分佈在（如 2.1 節與 4.2 節）本書的各部分。要完整的說明所有電磁學，在一個學季，甚至一學期內包容全局是不可能的。

如要作為一學期的課程，只要包括三部分，靜電、靜磁與這兩部分的綜合，Maxwell 兩方程式，以及該方程式的若干基本應用（如平面波與能量的傳遞等）。以下是上一學期課程用的章節綱要。

第一章的所有各節，除可刪去的 1.19 與 1.20 節。

第二章的 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.6, 2.8, 2.9, 2.10 各節，加上 1 或 2 節的應用。

第三章的 3.1, 3.2, 3.3, 3.5, 3.6, 3.7 各節。

第四章的 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.9, 4.10, 4.11, 各節。

第五章的所有各節，除可刪去的 5.12，5.15，5.16，5.17 各節。

第六章的 6.1 至 6.11 節，加上 1 或 2 節的應用。

第七章的所有各節。

第八章的所有各節，除刪去 8.4，8.5 兩節。

第九章的 9.1 至 9.5 節與 9.9 節。

第十章的 10.1 至 10.7 節，加上若干應用的各節。

第十一章的所有各節，除刪去 7.4 與部分的 7.8，7.9 等節。

第十二章的 12.1，12.2，12.3 等節。

第十三章的 13.1 至 13.4 節，如時間允許，加上其餘各節。

第十四章與第十五章可隨意選修。

以上所列，只可作為參考。如半個學期要上完，是太過分些，如課程能比一學期長些，則其餘課程或更深的課程也可包括進去。典型的電機工程課程，第二學期的電磁學，是從 Maxwell 方程式開始。接着的應用是傳輸線、波導、波傳遞、波反射以及輻射問題等。

寫本書的動機，是在填補正統處理該理論的缺失，加進若干該理論的應用。如在課堂上不去彌補這些缺失，而與以往一樣強調數式的推導而使開始學電磁課，就有苦澀感覺，以致無法產生興趣，這樣對學生是沒有幫助的。因他們總想問教師有關實際應用的問題，而不是理論的內容。但一本專講應用方面的書，也有其缺點，必需增添許多章節與內容。另一方面，要平衡所選取的材料。本書能供理論或實用的教本，只要你仔細選取適當的章節。

本書的結構是按傳統方式，靜電、靜磁、接着電磁一同考慮。在開始時，說明一些簡單的應用。此外亦有說明 Maxwell 方程式或相對論，希望加強學生的興趣。但想要瞭解較深的觀念，而不將其基本弄懂，那是徒勞無功的。這種較具邏輯層次的傳統方法，可使一些讀工程學生，將理論與實際問題關連起來，這些均已列在本書應用的章節中。

謝 辭

我很感謝 R.F.Frerichs 教授，討論許多微觀現象。他是 CdS 光導電池的發明人。又很感謝 R.E Beam 教授仔細閱讀原稿，S.C.H. Wang 處理習題的解答。並感謝內子 Tina 的幫助繕寫。打字是由 Mrs Leslie Rindler, Miss Joanna Hague 與 Paul Burczyk 完成的。

MARTIN A. PLONUS 波隆納斯

## 直角座標

$$\nabla f = \hat{x} \frac{\partial f}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial f}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial f}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \hat{x} \left( \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) + \hat{y} \left( \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) + \hat{z} \left( \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right)$$

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{F} = \hat{x} \nabla^2 F_x + \hat{y} \nabla^2 F_y + \hat{z} \nabla^2 F_z$$

---

## 圓柱座標

$$\nabla f = \hat{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + \hat{\phi} \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \phi} + \hat{z} \frac{\partial f}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho F_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \hat{\rho} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_z}{\partial \phi} - \frac{\partial F_\phi}{\partial z} \right) + \hat{\phi} \left( \frac{\partial F_r}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial \rho} \right) + \hat{z} \left( \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho F_\phi] - \frac{\partial F_r}{\partial \phi} \right)$$

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

$$\nabla^2 \mathbf{F} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{F}$$

---

## 球座標

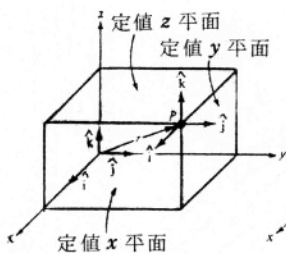
$$\nabla f = \hat{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} + \hat{\phi} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \phi}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 F_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (F_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial F_\phi}{\partial \phi}$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \hat{r} \frac{1}{r \sin \theta} \left( \frac{\partial}{\partial \theta} (F_\phi \sin \theta) - \frac{\partial F_\theta}{\partial \phi} \right) + \hat{\theta} \frac{1}{r} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial F_r}{\partial \phi} - \frac{\partial}{\partial r} (r F_\phi) \right) + \hat{\phi} \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r F_\theta) - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right)$$

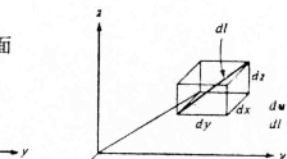
$$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{F} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{F}$$



$$\mathbf{r} = r(x, y, z) = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$$

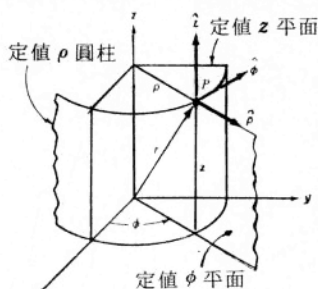
$$d\mathbf{l} = dx\hat{i} + dy\hat{j} + dz\hat{k}$$



$$dv = dx dy dz$$

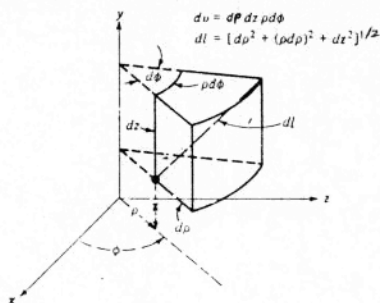
$$dl = (dx^2 + dy^2 + dz^2)^{1/2}$$

向量  $\mathbf{r}$  端點  $P$  交於定值  $x, y, z$  平面而被決定



$$\mathbf{r} = r(\rho, \phi, z) = \rho\hat{\rho} + z\hat{z}$$

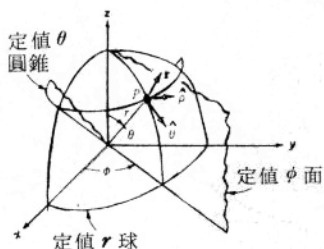
$$d\mathbf{l} = d\rho\hat{\rho} + \rho d\phi\hat{\phi} + dz\hat{z}$$



$$dv = d\rho dz \rho d\phi$$

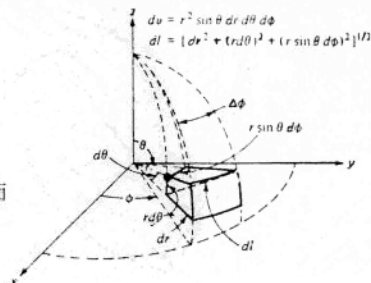
$$dl = [d\rho^2 + (\rho d\phi)^2 + dz^2]^{1/2}$$

點  $P$  由定值  $z$  平面，定值  $\phi$  (半平面) 與定值  $\rho$  (圓柱) 面相交來決定



$$\mathbf{r} = r(\Gamma, \theta, \phi) = r\hat{r}$$

$$d\mathbf{l} = dr\hat{r} + r d\theta\hat{\theta} + r \sin\theta d\phi\hat{\phi}$$



$$dv = r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi$$

$$dl = [dr^2 + (r d\theta)^2 + (r \sin\theta d\phi)^2]^{1/2}$$

$P$  由定值 (圓錐) 定值  $r$  (球) 與定值  $\phi$  (半平面) 面相交來決定

## SI 單位

國際單位制 (International System of Units), 簡稱 SI。此單位制已是電機工程中所使用的標準制, 本書採用此單位制。SI 單位的基本因次, 是長度、質量、時間、電流、溫度、照度等。因次為 (m), (kg), (s), (A), 絕對溫標 (K), 燭光 (cd)。其他的量, 都可由這些基本單位組成之。

在 SI 中, 為求方便, 採用某些單位的倍數, 如  $10^3$  或  $10^{-3}$ 。如 Km, m, mm,  $\mu\text{m}$  等都是常用到的單位, 但 cm 則不用。例如: 用 35 mm, 而不用 3.5 cm。

SI 的數量級, 常用字首 (原文) 來表示。參考表 1, 不用 10 的指數表示。譬如: 力的單位是 N (newton), 可用 mN、N、kN 表示, 長度則用 mm, m, km 表示等等。如 12,300 m 或  $12.3 \times 10^3$  m, 可寫成 12.3 km,  $0.0123 \mu\text{A}$  或  $12.3 \times 10^{-9}$  A, 可寫成 12.3 nA。選擇字首使數值介於 0.1 與 1000 之間。兩個字首疊用, 或加連線都不可, 譬如, 使用 GW (gigawatt) 而不用 kW, 使用 pF (picofarad) 而不用  $\mu\mu\text{F}$ , 使用 Gg (gigagram) 而不用 Mkg。SI 單位中, 字首的使用有一定的。

表 1 SI 單位字首表

字首	SI 符號	因數
微微	a	$10^{-18}$
微微	f	$10^{-15}$
微微	p	$10^{-12}$
微微	n	$10^{-9}$
毫	$\mu$	$10^{-6}$
毫	m	$10^{-3}$
厘	c	$10^{-2}$
分	d	$10^{-1}$
十	da	10
百	h	$10^2$
千	k	$10^3$
萬	M	$10^6$
億	G	$10^9$
兆	T	$10^{12}$





表2 電磁學用量的單位

量	符號	SI單位及縮寫	SI單位換成基本單位
長度	$l$	meter (m)	m
質量	$m$	kilogram (kg)	kg
時間	$t$	second (s)	s
電流	$I$	ampere (A)	A
溫度	$\theta$	kelvin (K)	K
照度	$\phi$	candela (cd)	cd
速度	$v$	meter/second (m/s)	$m \cdot s^{-1}$
加速度	$a$	meter/second <sup>2</sup> (m/s <sup>2</sup> )	$m \cdot s^{-2}$
面積	$A$	meter <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>
體積	$v$	meter <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup>
能量, 功	$W$	joule (J)	$kgm^2s^{-2}$
能量密度	$w$	joule/meter <sup>3</sup> (J/m <sup>3</sup> )	$kgm^{-1}s^{-2}$
力	$F$	new ton (N)	$kgms^{-2}$
動量	$mv$	new ton-second (N · s)	$kgms^{-1}$
扭矩	$T$	new ton-meter (N · m)	$kgm^2s^{-2}$
功率	$P$	watt (W)	$kgm^2s^{-3}$
電荷	$Q \cdot q$	coulomb (C)	A · s
電場場度	$E$	volt/meter (V/m)	$mkg s^{-3} A^{-1}$
電位, 電動勢 (emf)	$V \cdot \phi \cdot \gamma$	volt (v)	$kgm^2 A^{-1} s^{-3}$
電通量	$\Psi$	coulomb (C)	A · s
電通量密度	$D$	coulomb/meter <sup>2</sup> (C/m <sup>2</sup> )	$Asm^{-2}$
體電荷密度	$\rho$	coulomb/meter <sup>3</sup> (C/m <sup>3</sup> )	$Asm^{-3}$
面電荷密度	$\rho_s$	coulomb/meter <sup>2</sup> (C/m <sup>2</sup> )	$Asm^{-2}$
線電荷密度	$\rho_L$	coulomb/meter (C/m)	$Asm^{-1}$
面電流密度	$K$	ampere/meter (A/m)	$A \cdot m^{-1}$
電流密度	$J$	ampere/meter <sup>2</sup> (A/m <sup>2</sup> )	$A \cdot m^{-2}$
電容	$C$	farad (F)	$A^2 s^4 kg^{-1} m^{-2}$
極化	$P$	coulomb/meter <sup>2</sup> (C/m <sup>2</sup> )	$Asm^{-2}$
電偶極矩	$p = ql$	coulomb-meter (C · m)	mAs
阻抗	$Z$	ohm ( $\Omega$ )	$kgm^2 A^{-2} s^{-3}$
電阻	$R$	ohm ( $\Omega$ )	$kgm^2 A^{-2} s^{-3}$
電阻率	$\rho$	ohm-meter ( $\Omega \cdot m$ )	$kgm^3 A^{-2} s^{-3}$

表 2 電磁學用量的單位 (續)

量	符 號	SI 單位及縮寫	SI 單位換成 基本單位
導電率	$\sigma$	siemens/meter (S/m)	$A^2 s^3 kg^{-1} m^{-3}$
電容率	$\epsilon$	farad/meter (F/m)	$A^2 s^4 kg^{-1} m^{-3}$
磁導率	$\mu$	henry/meter (H/m)	$mkgs^{-2} A^{-2}$
電感	$L$	henry (H)	$kgm^2 A^{-2} s^{-2}$
磁通量	$\phi$	weber (Wb)	$kgm^2 A^{-1} s^{-2}$
磁通量密度	$B$	tesla(T)=weber/meter <sup>2</sup> (Wb/m <sup>2</sup> )	$kgA^{-1}s^{-2}$
磁場強度	$H$	ampere/meter ( $A \cdot m^{-1}$ )	$A \cdot m^{-1}$
磁偶極矩	$m=IA$	ampere-meter <sup>2</sup> ( $A \cdot m^2$ )	$A \cdot m^2$
連通量	$\Lambda$	weber-turn (Wb)	$kgm^2 A^{-1} s^{-2}$
磁化	$M$	ampere/meter ( $A \cdot m^{-1}$ )	$A \cdot m^{-1}$
磁動力 (mmf)	$\mathcal{F}$	ampere-turn (A)	A
磁純量電位	$\phi \cdot \Phi$	ampere (A)	A
磁向量電位	$A$	weber/meter (Wb/m)	$kgmA^{-1}s^{-2}$
磁極強度	$Q_m$	ampere-meter ( $A \cdot m$ )	$A \cdot m$
磁面極強度	$\rho_m$	ampere/meter ( $A/m^2$ )	$A \cdot m^{-2}$
磁面極密度	$\rho_{sm}$	ampere/meter ( $A/m$ )	$A \cdot m^{-1}$
磁阻	$\mathcal{R}$	1/henry ( $H^{-1}$ )	$A^2 s^2 kg^{-1} m^{-2}$
Poynting向量	$\mathcal{P}$	watt/meter <sup>2</sup> ( $W/m^2$ )	$kg \cdot s^{-3}$
衰減常數	$\alpha$	neper/meter (Np/m)	$m^{-1}$
相常數	$\beta$	radian/meter (rad/m)	$m^{-1}$
頻 率	$f$	hertz (Hz) = cycle/s	$s^{-1}$
波 長	$\lambda$	meter (m)	m
內阻抗	$\eta$	ohm ( $\Omega$ )	$kgm^2 A^{-2} s^{-3}$
膚 深	$\delta$	meter (m)	m

## 物理常數

真空中電容率	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$
真空中磁導率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$
電子電荷量	$q_e$ 或 $e = 1.602 \times 10^{-19} C$
真空中光速	$c = 2.9979 \times 10^8 m/s$
電子靜止質量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} kg$
Plank 常數	$h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$
Boltzmann 常數	$k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$
自由空間波阻抗	$\eta_0 = 376.7 (\cong 120\pi) \Omega$
標準重力加速度	$g = 9.807 m/s^2$

# 應用電磁學(上冊)

## 目 錄

### 原 序

### 第一章 靜電場

1.1	因次與單位 .....	1
1.2	Coulomb 力的定律 .....	2
1.3	電 場 .....	4
1.4	電 位 .....	7
1.5	連續電荷分佈所產生的場 .....	12
1.6	等位面 .....	14
1.7	線與面電荷所產生的場 .....	15
1.8	梯度以及用來從功場得到力場 .....	22
1.9	梯度與方向導數的關係 .....	24
1.10	電通量密度與 Gauss 定律 .....	27
1.11	Gauss 定律與 Coulomb 定律的關係 .....	32
1.12	Gauss 定律的若干應用 .....	33
1.13	電場的邊界條件 .....	41
1.14	Gauss 定律的微分形式及散度 .....	44
1.15	Gauss 的散度定理 .....	47
1.16	Laplace 算符與 Laplace 方程式 .....	48
1.17	Poisson 與 Laplace 方程式的解 .....	51
1.18	具簡單邊界條件的 Laplace 方程式解 .....	53
1.19	電位的極大與極小, 以及 Laplace 方程式的解 .....	59

## 2 應用電磁學(上冊)

1.20 解靜電場問題方法的總結 .....	60
1.21 習題 .....	62

## 第二章 導體與電荷

2.0 前言 .....	67
2.1 物質的一般特性 .....	68
2.2 電流 .....	70
2.3 電荷守恆與連續方程式 .....	73
2.4 在一點上的 Ohm 定律與導電率 .....	75
2.5 金屬的自由氣體模型與導電率 .....	78
2.6 導電率與溫度關係 .....	81
2.7 導體、完全導體與超導體 .....	82
2.8 在導電物質中自由電子的重組時間 .....	84
2.9 導體內部與外部的場與邊界條件 .....	87
2.10 導體上的感應電荷與靜電屏蔽 .....	91
2.11 導體平面附近的點電荷——映像法 .....	97
2.12 實例：使電子不離開金屬面的力 .....	99
2.13 尖端的氣體崩潰與電暈放電 .....	105
2.14 實例：雷雨與避雷針原理 .....	111
2.15 實例：靜電沈澱器控制空氣污染 .....	113
2.16 實例：靜電攝影術、電子照像法 .....	117
2.17 習題 .....	121

## 第三章 電源電壓(EMF)與穩態電流

3.1 電池的 EMF 與非守恆電場 .....	124
3.2 EMF 的性質 .....	128
3.3 電源的 EMF .....	130
3.4 電動車用電池 .....	133

3.5	導體與介電質交界面上存有電流的邊界條件 .....	134
3.6	導體與導體邊界上電流的折射 .....	137
3.7	導電介質中電位分佈的 Laplace 方程式 .....	140
3.8	任意形狀導體的電阻 .....	141
3.9	電流流動與能量間的 Joule 定律 .....	145
3.10	習 題 .....	147

## 第四章 介電質與極化現象

4.0	前 言 .....	149
4.1	介電質的極化現象 .....	149
4.2	微觀與巨觀的場 .....	153
4.3	電偶極場 .....	154
4.4	極化與介電常數 .....	160
4.5	介電物體外部的場 .....	163
4.6	人造介電場 .....	166
4.7	介電質與導體的極化場比較 .....	168
4.8	極化電流 .....	172
4.9	實例：永久極化棒的場 .....	173
4.10	實例：永久極化球的場 .....	175
4.11	實例：均一電場* 中的介電質球 .....	178
4.12	介電材料中的空洞 .....	185
4.13	實例：均一電場中的金屬球 .....	186
4.14	習 題 .....	190

## 第五章 電容、能量與力

5.0	前 言 .....	194
5.1	電容定義 .....	194
5.2	電容器的充電：充電能量 .....	196

5.3	實例：球殼電容器	199
5.4	平行板電容與介電強度*	200
5.5	實例：共軸傳輸線的電容	202
5.6	實例：兩平行傳輸線的電容	203
5.7	有介電介質的電容器	208
5.8	電容器的串聯與並聯	211
5.9	儲在電容器內的能量	214
5.10	電場中儲存的能量	217
5.11	場胞與 $\epsilon$ 的意義	219
5.12	聚集電荷儲存的能量	221
5.13	在極化場中儲存的能量	223
5.14	電容器板間的力	225
5.15	作用在充電的導體表面上的力	229
5.16	介電物質何以會向較強電場移動	231
5.17	實例：由於電場，使液體表面的壓力增加	235
5.18	習題	238

## 第六章 自由空間的磁場與磁力

6.1	概論	244
6.2	磁場的兩個假設	245
6.3	兩電流基素與兩運動電荷間的磁力	251
6.4	作用在運動電荷上的總力：Lorentz 力	255
6.5	載電流的長直導線的磁場	262
6.6	兩平行線間的力	264
6.7	由環線所造成的磁場	265
6.8	兩環線間的作用力	268
6.9	螺線管與圓環管中的磁場	269
6.10	環線上的偶矩：磁偶極	273

6.11	電動機與發電機：運動的 EMF ( 電動勢 )	279
6.12	實例：磁制動器	287
6.13	實例：磁流體動力的功率產生	289
6.14	實例：電漿引擎	293
6.15	實例：Hall 效應的電壓	294
6.16	習 題	296

## 第七章 Ampère 定律、電感與磁場中的能量

7.0	前 言	304
7.1	磁通量與通量密度	304
7.2	磁場的 Gauss 定律	305
7.3	Ampère 定律	306
7.4	Ampère 定律及電流基素與磁荷間的關係	308
7.5	磁場強度 H 與磁動力	310
7.6	Ampère 定律的應用	314
7.7	電 感	319
7.8	在電感器中儲存的能量	324
7.9	儲存在磁場中的能量	327
7.10	習 題	329

## 第八章 磁場的微分形式

8.0	前 言	334
8.1	向量場的旋度與環量	334
8.2	Ampère 定律的微分形式	340
8.3	Stoke's 定理	341
8.4	用散度與旋度量測純量與向量的源	342
8.5	兩個向量恆等式與位間的關係	345
8.6	磁場向量位	346

## 6 應用電磁學 (上冊)

8.7	向量位的應用	352
8.8	磁場的邊界條件	358
8.9	電場與磁場邊界條件的總結	362
8.10	靜電場與靜磁場的總結	365
8.11	習題	369

## 附錄A 旋度數學向量恆等式

A1.1	旋度與向量場的環量	373
A1.2	Stoke 定理	378
A1.3	向量恆等式	380



# 第一章 靜電場

## 1.1 因次與單位

本書所用的單位制為 mksa 制 (m-kg-sec-amp)，該制為 SI 單位制中的副制 (subsystem)。通常，因次分析 (dimensional analysis) 是檢查方程式是否正確的第一步\*。許外令人驚訝的錯誤，能在早期就被察覺，只要平衡方程式兩邊的因次，而這些因次只是由四種簡單的基本因次所組成。例如：Newton 第二定律中的力定為 N (newtons)，即為

$$F = ma \quad \text{質量 (長度) / (時間)}^2$$

功 (work) 的元素 (element of work) 被定為 joules (J) 即

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \quad \text{質量 (長度)}^2 / (\text{時間})^2$$

功率 (Power)，是做功的時變率，以每秒做功的 J 數表示

$$P = \frac{dW}{dt} \quad \text{質量 (長度)}^2 / (\text{時間})^3$$

第四個基本量為電流，為電荷流動的時變率。老的 mksq 單位制是用電荷作第四個基本量。最小電荷  $e$ ，是電子所帶的為， $-1.6 \times 10^{-19}$  C。任何帶電體，係由基本粒子所組成，通常為電子。該物體所帶總

---

\* 一種因次，定義一種物理特性，而單位是用數量表示因次的一種標準。例如秒，是表示時間因次的一種單位。不應將物理量與其量測單位的名稱混淆。例如，功率不應表示成每秒所做的功，而應為每單位時間所做的功。