

應用電磁學

(下冊)

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，甚至一學期內包含全局是不可能的。

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。

2 應用電磁學(上冊)

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

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

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

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

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

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

球座標

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

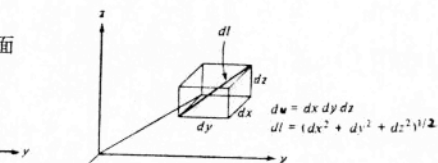
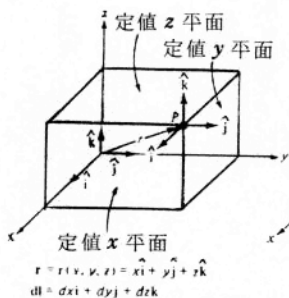
$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 F_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (F_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial F_\phi}{\partial \phi}$$

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

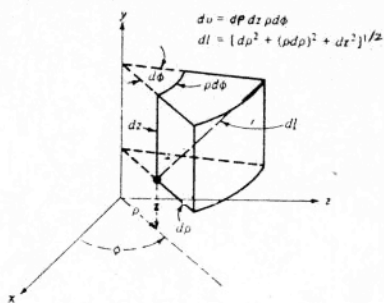
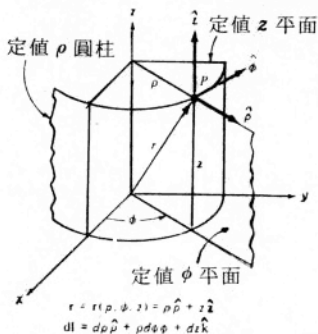
$$+ \hat{\phi} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r F_\theta) - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right)$$

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

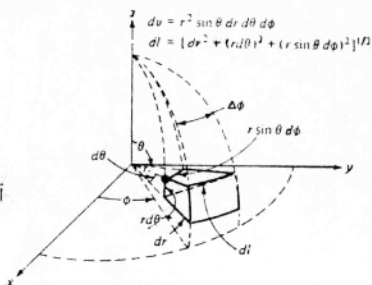
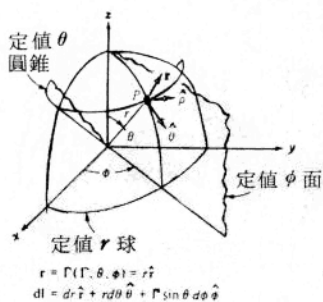
$$\nabla^2 \mathbf{F} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{F}$$



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



點 P 由定值 z 平面, 定值 ϕ (半平面) 與定值 ρ (圓柱) 面相交來決定



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

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	\mathcal{K}	kelvin (K)	K
照 度	\mathcal{J}	candela (cd)	cd
速 度	v	meter/second (m/s)	$m \cdot s^{-1}$
加 速 度	a	meter/second ² (m/s ²)	$m \cdot s^{-2}$
面 積	A	meter ² (m ²)	m ²
體 積	v	meter ³ (m ³)	m ³
能 量, 功	W	joule (J)	$kgm^2 s^{-2}$
能 量 密 度	w	joule/meter ³ (J/m ³)	$kgm^{-1} s^{-2}$
力	F	new ton (N)	$kgms^{-2}$
動 量	mv	new ton-second (N · s)	$kgms^{-1}$
扭 矩	T	now ton-meter (N · m)	$kgm^2 s^{-2}$
功 率	P	watt (W)	$kgm^2 s^{-3}$
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	Ψ	coulomb (C)	A · s
電 通 量 密 度	D	coulomb/meter ² (C/m ²)	Asm^{-2}
體 電 荷 密 度	ρ	coulomb/meter ³ (C/m ³)	Asm^{-3}
面 電 荷 密 度	ρ_s	coulomb/meter ² (C/m ²)	Asm^{-2}
線 電 荷 密 度	ρ_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 ² (A/m ²)	$A \cdot m^{-2}$
電 容	C	farad (F)	$A^2 s^4 kg^{-1} m^{-2}$
極 化	P	coulomb/meter ² (C/m ²)	Asm^{-2}
電 偶 極 矩	$p = ql$	coulomb-meter (C · m)	mAs
阻 抗	Z	ohm (Ω)	$kgm^2 A^{-2} s^{-3}$
電 阻	R	ohm (Ω)	$kgm^2 A^{-2} s^{-3}$
電 阻 率	ρ	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	σ	siemens/meter (S/m)	$A^2 s^3 kg^{-1} m^{-3}$
電容率	ϵ	farad/meter (F/m)	$A^2 s^4 kg^{-1} m^{-3}$
磁導率	μ	henry/meter (H/m)	$mkgs^{-2} A^{-2}$
電感	L	henry (H)	$kgm^2 A^{-2} s^{-2}$
磁通量	ϕ	weber (Wb)	$kgm^2 A^{-1} s^{-2}$
磁通量密度	B	tesla (T) = weber/meter ² (Wb/m ²)	$kg A^{-1} s^{-2}$
磁場強度	H	ampere/meter ($A \cdot m^{-1}$)	$A \cdot m^{-1}$
磁偶極矩	$m = IA$	ampere-meter ² ($A \cdot m^2$)	$A \cdot m^2$
連通量	Λ	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	ρ_m	ampere/meter (A/m^2)	$A \cdot m^{-2}$
磁面極密度	$\rho_{s,m}$	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{S}	watt/meter ² (W/m^2)	$kg \cdot s^{-3}$
衰減常數	α	neper/meter (Np/m)	m^{-1}
相常數	β	radian/meter (rad/m)	m^{-1}
頻 率	f	hertz (Hz) = cycle/s	s^{-1}
波 長	λ	meter (m)	m
內阻抗	η	ohm (Ω)	$kgm^2 A^{-2} s^{-3}$
槽 深	δ	meter (m)	m

物理常數

真空中電容率	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
真空中磁導率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
電子電荷量	q_e 或 $e = 1.602 \times 10^{-16} \text{ C}$
真空中光速	$c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$
電子靜止質量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Planck 常數	$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Boltzmann 常數	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
自由空間波阻抗	$\eta_0 = 376.7 (\approx 120\pi) \Omega$
標準重力加速度	$g = 9.807 \text{ m/s}^2$

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, μm 等都是常用到的單位, 但 cm 則不用。例如: 用 35mm, 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 12,300m 或 12.3×10^3 m, 可寫成 12.3 km, $0.0123 \mu\text{A}$ 或 12.3×10^{-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
微微微	a	10^{-18}
毫微微	f	10^{-15}
微微微	p	10^{-12}
毫微微	n	10^{-9}
微微	μ	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
百 萬	M	10^6
十 億	G	10^9
兆	T	10^{12}

應用電磁學(下冊)

目 錄

第九章 磁性材料、磁鐵與超導體

9.0	前 言.....	1
9.1	磁場的源.....	1
9.2	B, H與M間的關係.....	8
9.3	永久磁鐵的H與B場：等效的磁荷型式.....	13
9.4	永久磁鐵的H與B場—等效電流的形式.....	24
9.5	反磁性, 順磁性與鐵磁性材料.....	32
9.6	在鐵磁性材料中磁域的形成.....	58
9.7	在遲滯曲線變化時, 磁域旋轉與磁域壁運動間的關係.....	70
9.8	鐵滲氧鐵.....	74
9.9	超導性.....	76
9.10	習 題.....	92

第十章 磁性的應用

10.1	遲滯週期內的能量損失.....	97
10.2	渦電流的損耗.....	101
10.3	在磁鐵中儲存的能量.....	107
10.4	磁 路.....	109
10.5	磁路中有空氣間隙(電磁鐵).....	113
10.6	永久磁鐵的磁路.....	118

2 應用電磁學 (下冊)

10.7	磁鐵的上舉力	124
10.8	變壓器	127
10.9	自感與互感	133
10.10	鐵心的電感器與變壓器	137
10.11	實例、磁錄音帶	140
10.12	習題	148

第十一章 Maxwell 方程式

11.0	前言	155
11.1	Faraday 定律與Maxwell 第一方程式	156
11.2	Gauss 定律與Maxwell 第二方程式	159
11.3	Ampère 定律與Maxwell 第三方程式	160
11.4	磁通量與Maxwell 第四方程式	163
11.5	Maxwell 方程式總結	165
11.6	材料介質的Maxwell 方程式	168
11.7	時變場的位	169
11.8	存在可極化介質中的位	171
11.9	習題	172

第十二章 相對論與 Maxwell 方程式

12.1	Maxwell 方程式的不變性	176
12.2	一些困難	177
12.3	一般情況：運動的與變壓器的電動勢	179
12.4	運動通量應注意點	182
12.5	由Galilean到Lorentz的轉換	184
12.6	由Coulomb定律與狹義相對論導出Maxwell方程式	187
12.7	習題	189

第十三章 Maxwell 方程式的應用：EM 波與 能量傳遞

13.1	波方程式	192
13.2	自由空間的波方程式 (無能量損耗情況)	193
13.3	在介質中的波方程式 (無損耗情況)	197
13.4	正弦平面波	199
13.5	絕緣或介電質中的平面波	204
13.6	在導電介質中的平面波	211
13.7	能量的流動與 Poynting 向量	215
13.8	正弦時間變化的 Poynting 向量	222
13.9	電磁波的力與輻射壓	230
13.10	習 題	233

第十四章 Maxwell 方程式的應用：EM 波的反射

14.1	電磁波的反射	239
14.2	由完全導體平面波的反射—垂直入射	240
14.3	在任何方向平面波的傳遞	246
14.4	被完全導體反射—任意方向的入射	248
14.5	介電質的反射—垂直入射	255
14.6	有許多層介電質的反射	262
14.7	介電質反射—任意角的入射	269
14.8	全反射	281
14.9	習 題	288

第十五章 傳輸線

15.0	前 言	292
15.1	導 言	293
15.2	均一的傳輸線	294

4 應用電磁學 (下冊)

15.3	在線端點不連續處的反射與穿透.....	298
15.4	在線上不連續處的反射與穿透.....	308
15.5	有電容終端的傳輸線.....	310
15.6	無損耗傳輸線有正弦電壓源.....	313
15.7	反射與電壓駐波比值 S	318
15.8	阻抗匹配與轉換.....	324
15.9	功率傳到負載對駐波的效應.....	330
15.10	有損耗的線.....	333
15.11	習題.....	337

第九章 磁性材料、磁鐵與超導體

9.0 前言

本章內容分成三部分，第一部分包括傳統工程上的磁鐵，使讀者了解磁性物質的磁化行爲。本章的前四節，另加上“鐵磁性”、“鐵磁物質中的遲滯現象”與第五章“軟、硬的鐵磁性材料”，均應包括在電磁學的基本課程中。

第二部分的內容，是從第 5 至 8 節，討論磁學微觀的性質。很不幸，磁學整體的研究不能只限於討論巨觀性質。問題最終回答，只有訴諸微觀特性。這些節可略去而不失其連續性。若課程的時間許可，或對“爲何”會有遲滯現象，與軟、硬鐵磁材料的讀者，這部將會提供許多材料。

最後一節的主題是超導性。接在前面部分之後是很自然的。因超導體除爲完全導體外，還是完全順磁性物質。

9.1 磁場的源

在 6.0 節所述，磁場的源 (source) 是由於電荷的運動。因電荷的運動造成電流，而磁場的源是電流。

[1] 電流

在前面幾章，已研究一些實際的處理，產生磁場。它們是由載流導線，扭成各種不同的形式，如圖 9.1 所示。

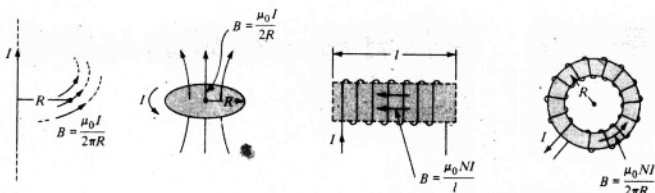


圖 9.1 由載流導線扭成各種形式的磁場

[2] 永久磁鐵

我們知道，永久磁鐵在其附近的空間產生磁場。因在磁鐵中並無普通的電流，什麼樣形式的電流存在磁鐵中，會產生外在的磁場 B ？近代物理的說明是；電子除繞原子核的軌道運動外，尚繞着自己本身的軸旋轉*。電子的自旋在永久磁鐵中產生很大的磁場。

電子的電荷，繞自己的軸旋轉，可視為等效的細小電流**，具有磁矩 $m = IA$ ， I 與 A 分別為等效的電流與面積。如圖 9.2 所示。每個微觀的環電流，用同樣方式產生磁場，如圖 9.1 所示。通常，因熱激動使其任意排列（見 2.1 節）。在磁鐵中，分子方向因而排列隨意，不產生磁場。不過，在永久磁鐵中，分子磁矩排列一致，數以億計的總合效應，使永久磁鐵有顯著的磁場效應。此效應稱為鐵磁性（ferromagnetism）。永久磁棒的外部磁場與磁鐵棒內部分子排列，如圖 9.3 所示。注意磁棒外部場與自旋電子類似的情形。多數自旋電子磁場合成，看起來像是一個大的偶極。

* 嚴格的說，電子自旋是量子力學的效應。在原子尺度，自旋的電子具有角動量，換句話說是與磁矩有關。電子的軌道運動形成電流環而產生磁場。此效應稱為順磁性（diamagnetism）是非常弱的性質；軌道運動所產生的磁場弱到可以忽略。雖然所有物質都是順磁性的，只有由自旋產生磁場的那些物質，才有在電動機、發電機、變壓器、永久磁鐵等的實際用途。

** 用類似巨觀旋轉的帶電球，我們知道電荷在赤道附近移動的要比在極處為快，與環電流繞該球赤道的情形一樣。

因為磁棒的磁場很像電偶極，一端具有正電荷，另一端具有負電荷，以往將磁棒想像成棒的兩端有南北極如圖 9.4 所示。北極與南極分別被視為有正與負磁荷。將一長的磁針，分段切成小段去尋找磁荷

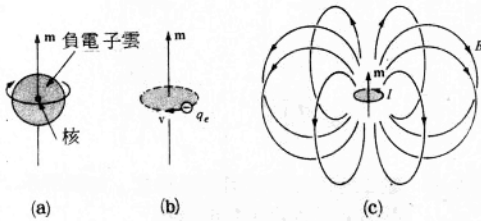


圖 9.2 (a) 電子，可想成一個帶負電的球，繞其自己的軸旋轉，其磁矩 m 如圖所示；(b) 自旋球形的電荷（巨觀的說等於繞轉的電荷 q_e ）；(c) 繞轉的電荷，可視為一偶極 m ，其磁場如圖所示

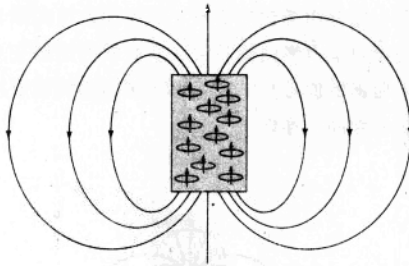


圖 9.3 磁鐵棒橫切面內部分子磁矩的分佈，以及產生的外磁場

，將會徒勞無功。因為如此，只會造成更小段的磁鐵而已。每個磁鐵都具南北極。很顯然，本來就應該如此，磁棒的內部充滿數以億計的自旋電子。每個都想成微小的磁鐵，而都具南北極，這也就是 Gauss（磁學）定律為什麼是 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$ ，而不是 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = \mu_0 Q_m$ ；亦即，

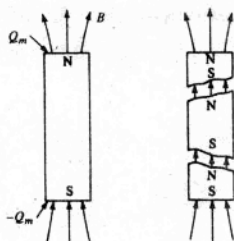


圖 9.4 磁棒的磁極無法切割而獨立。如圖所示，在切斷的面所會產生新的磁極

任何體積，無論多小，都含有正負相同數目的磁荷。

雖然，磁極或磁荷無法孤立，在長磁針的兩極用磁單極 (magnetic monopole) 來近似是相當好的，如圖 9.5 所示。例如，用鐵屑可描出此場的形狀。

小磁棒與小電流環等效的情形，很明顯的可從圖 9.6 看出。在該圖中，兩者的遠距離 B 場結構相同。此等效的情形在 6.10 節中會詳細討論。如果小磁鐵的偶極矩 $p_m = q_m l$ 與環流的偶極矩相同時， $m = IA$ ，磁場強度將會相同；亦即

$$q_m l = IA \quad (9.1)$$

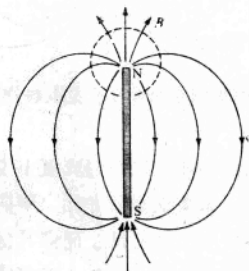


圖 9.5 在虛線內的磁場，係由於長磁針取近似正磁荷所造成的