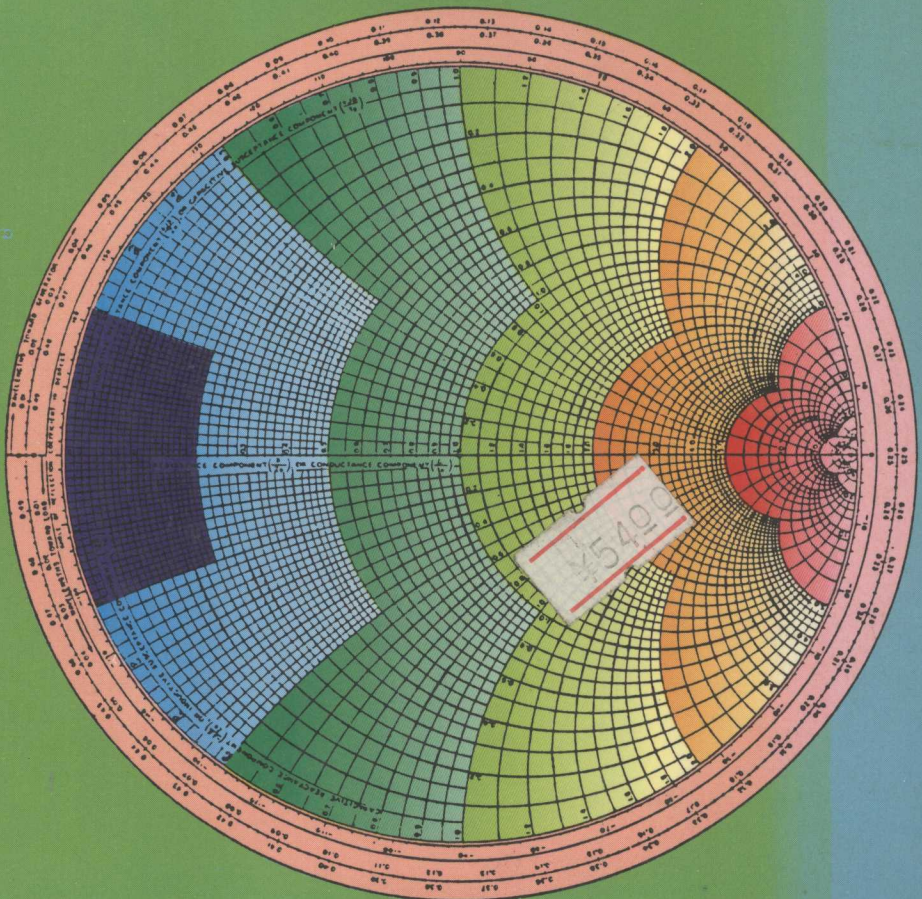


應用電磁學

曹大鵬 編著



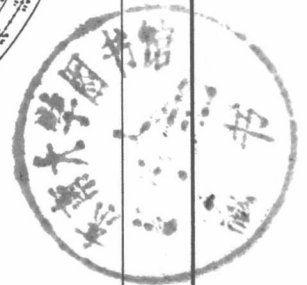
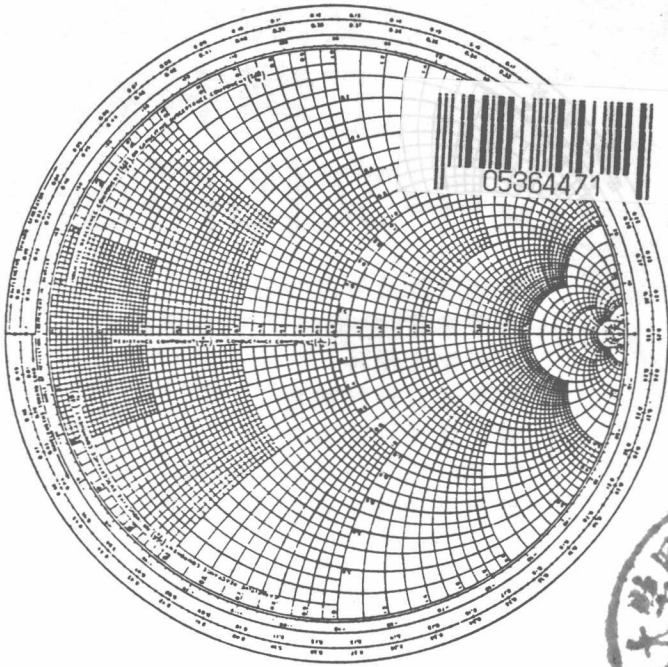
全華科技圖書股份有限公司 印行

53.67/41

大 專 用 書

應用電磁學

曹大鵬 編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

全 佑
文化廣場

斗六市大同路



全華圖書

法律顧問：陳培豪律師

應用電磁學

曹大鵬 編著

出版者 全華科技圖書股份有限公司
地址 / 台北市龍江路76巷20-2號2樓
電話 / 5 0 7 1 3 0 0 (總 機)
郵撥帳號 / 0 1 0 0 8 3 6 - 1 號
發行人 陳 本 源
印刷者 宏懋打字印刷股份有限公司
電話 : 5 0 8 4 2 5 0 • 5 0 8 4 3 7 7

門市部 全友書局(黎明文化大樓七樓)
地址 / 台北市重慶南路一段49號7樓
電話 / 3 6 1 2 5 3 2 • 3 6 1 2 5 3 4

定 價 新台幣 200 元
初版 / 79年 4 月

行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號

ISBN 957-21-0048-3 版權所有 翻印必究 圖書編號 0111975

我們的宗旨：

提供技術新知
帶動工業升級
為科技中文化再創新猷

資訊蓬勃發展的今日，
全華本著「全是精華」的出版理念
以專業化精神
提供優良科技圖書
滿足您求知的權利
更期以精益求精的完美品質
為科技領域更奉獻一份心力！

為保護您的眼睛，本公司特別採用不反光的米色印書紙！！



序 言

電磁學在電機工程學科中爲一主要研讀課程。然而，由於目前各大專院校及專科學校均將各類科學新知介紹列入爲教學重點，以致基礎課程——電磁學教授時數有逐年遞減之趨勢。同時一般學生亦認爲電磁學觀念艱澀，導致學習興趣泛泛。但是作者堅信忽視電磁學理論對研習電機工程的學生在未來從事電機生涯中將造成重大之缺失，而上述忽略電磁學理論的理由亦稍嫌牽強。

本書主要目的在不減少電磁學基本理論前題下，精簡各類電磁理論敘述。如何將電磁理論應用到實際生活中亦爲本書最大特點之一。

本書共計十五章。授課時數約爲五十小時，同時必須配合實驗室實習與課業輔導。如需分上、下兩學期講授時，第九章將可爲中間區分點。

作者特別感謝行政院國家科學委員會的邀約，以致有足夠時間整理完成此書。國立中山大學電機工程學系暨研究所提供的優良研究與教學環境以及系所全體師生的鼓勵與協助，亦爲完成此書的主要原動力。特別感謝博士研究生沈鎮南先生爲我整理手稿，使本書得以順利發行。



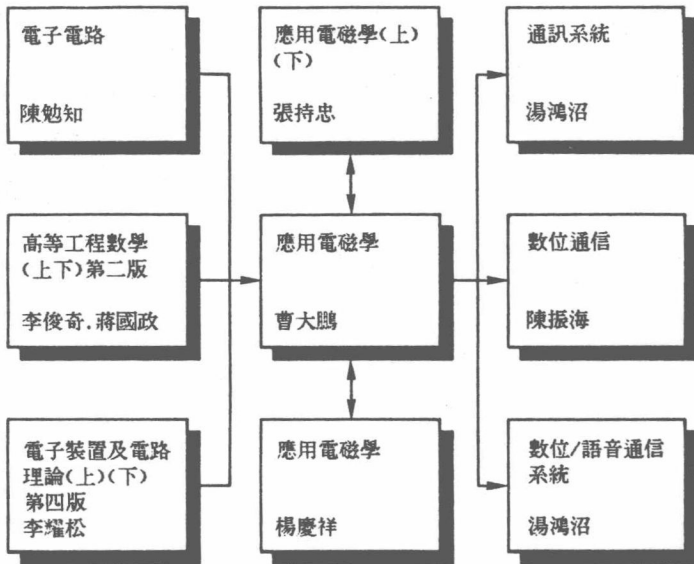
編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書排除坊間有關電磁學書籍「流於理論、內容艱澀」的缺失，以精簡平實的方法，深入淺出的敘述各種電磁理論，並將理論應用融合於實際生活中，有助於讀者吸收精要並提高興趣，不再視學習電磁學課程為畏途。是大專電子、電機相關科系中之“應用電磁學”最佳教材。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習相關方面的叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。

流 程 圖





目 錄

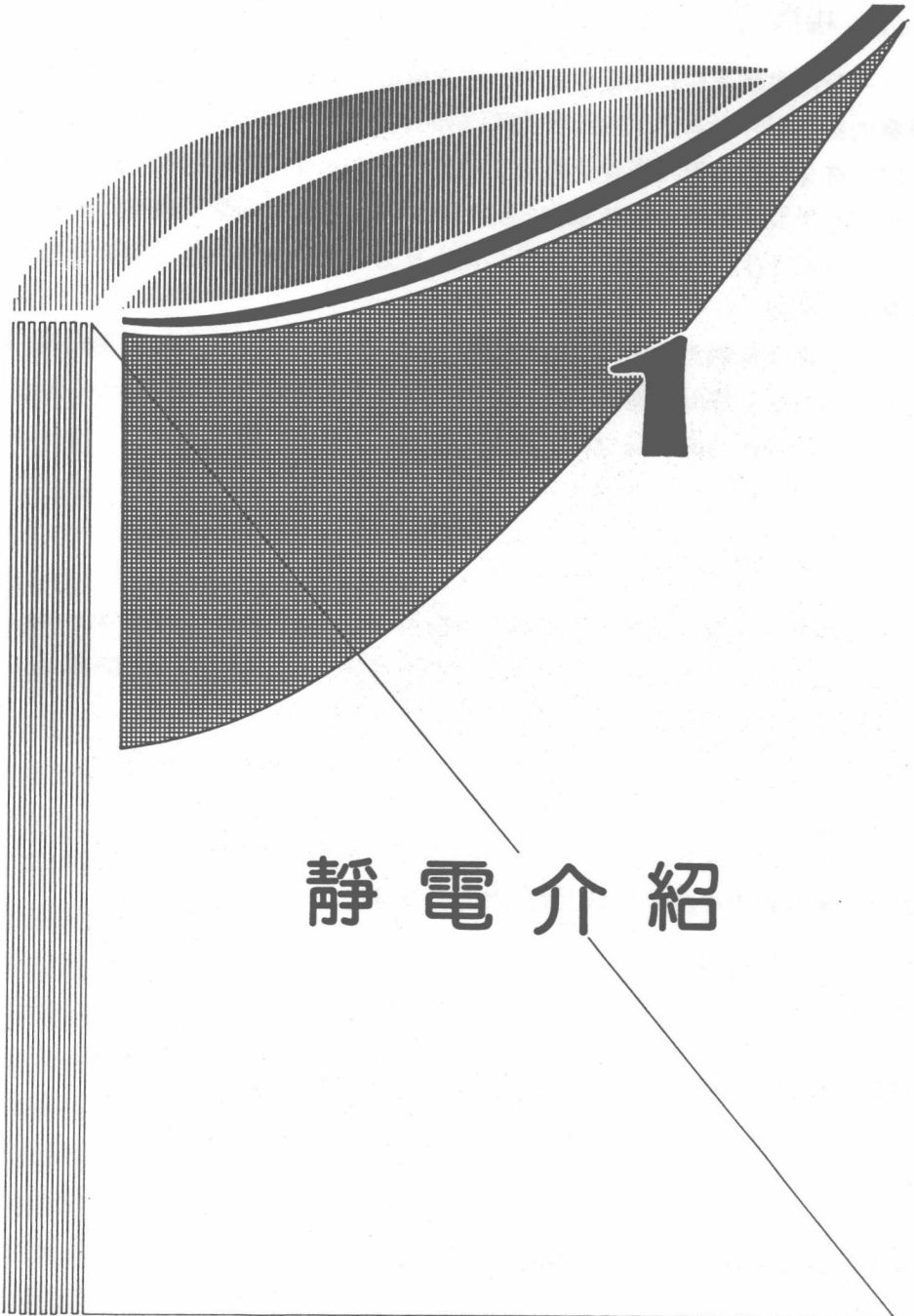
第1章 靜電介紹	1
1.1 場與力	2
1.2 電通密度與高斯定律	3
1.3 靜電場不同的表示方式	5
1.4 純量電位	6
1.5 帕易森 (Poisson's) 方程式	8
1.6 總 結	9
第2章 靜電場之使用及計算	11
2.1 一些實際上的應用	12
2.2 靜電場的計算範例	13
2.3 介質及電通密度	17
2.4 界面的情況	21
2.5 中段總結	23
2.6 電容及其計算	23
2.7 靜電場中的能量	27
2.8 一些更進一步的實際應用	29
2.9 靜電場中之邊界值問題	31
2.10 總 結	34
第3章 電流(簡要的瀏覽)	37
3.1 導體及非導體	38

3.2	電流密度	38
3.3	電動勢	39
3.4	總 結	41
第4章 靜磁的介紹		43
4.1	力與磁場	44
4.2	磁通與磁通密度	46
4.3	安培定律及磁場強度的計算	47
4.4	磁場的非保守本質	49
4.5	磁場的發散	50
4.6	總 結	52
第5章 磁場電感及其能量		53
5.1	磁場中的位勢	54
5.2	磁交鏈與電感	55
5.3	使用向量 \mathbf{A} 去計算電感	56
5.4	磁場中的能量	59
5.5	電感的計算範例	62
5.6	總 結	65
第6章 映像的方法		67
6.1	靜止系統的映像方法	68
6.2	利用映像法計算電容	70
6.3	映像法應用於磁場	73
第7章 時變場；第一部份：擴散		77
7.1	法拉第 (Faraday's) 定律	78
7.2	擴散入物質之場	80
7.3	導電物質之集膚深度	82
7.4	損失的計算	83

7.5	特殊的情況（電感及電阻極限）	85
7.6	變壓器的磁化阻抗	86
7.7	總 結	88
第8章 時變場；第二部份：電磁波		91
8.1	馬克士威爾的假設	92
8.2	完整的馬克士威爾方程式	95
8.3	電磁平面波	95
8.4	平面波之行進	99
8.5	高頻與低頻	102
8.6	尺度大小的問題	102
8.7	電磁場的結構	103
8.8	總 結	104
第9章 傳 輸 線		107
9.1	循軌電波	108
9.2	通用化的傳輸線	110
9.3	在線上的時間諧波	112
9.4	傳輸線的特殊情況	114
9.5	傳輸線的參數	117
9.6	有限長傳輸線上的波	118
9.7	傳輸線的阻抗	120
9.8	傳輸線的反射	122
9.9	總 結	124
第10章 某些延伸的回顧		127
10.1	靜電的簡要總覽	128
10.2	物質的介質	131
10.3	時間變化（時變）	132
10.4	總 結	137

第11章 諧振腔及波導模式	139
11.1 諧振之另一種解釋	140
11.2 諧振腔	146
11.3 腔的模式	147
11.4 波導的介紹	150
11.5 矩形波導	150
11.6 波導之截止頻率	155
11.7 波導內的場分佈	157
11.8 波導內功率潮流及波印亭向量	158
第12章 損失與波導介質	163
12.1 求出波導中的 α	164
12.2 傳導損失	165
12.3 介質損失	166
12.4 波導之表面電阻	169
12.5 介質波導	171
12.6 奇階模式的傳播	172
12.7 介質中的其他模式	174
12.8 截止頻率	175
第13章 線型天線及輻射	177
13.1 阻滯電勢	178
13.2 洛仁茲條件	179
13.3 赫茲偶極	181
13.4 由偶極流出之功率潮流	185
13.5 輻射電阻	186
13.6 極線圖型或輻射圖型	187
13.7 天線增益	189
13.8 薄線型天線	190

13.9	輻射特性	194
13.10	半波偶極之計算	195
第14章 天線陣列及隙孔		199
14.1	簡單的陣列	200
14.2	陣列因數及圖型乘積	202
14.3	一些通用的陣列	202
14.4	通用的均勻線性陣列	205
14.5	隙孔輻射	210
14.6	矩形的隙孔分佈	212
14.7	端點開口的波導	215
14.8	互易定理	217
14.9	佛立斯傳輸關係	218
第15章 電磁加熱		221
15.1	簡 介	222
15.2	介電係數的新定義	223
15.3	通用解	224
15.4	金屬及傳導介質的功率消散	227
15.5	α 及 δ 之關係	228
15.6	直接電阻及感應加熱	229
15.7	感應焗解	235



靜電介紹

1.1 場與力

一般電磁學著作首先都會談到向量微積分，但我相信先研究向量微積分對課程的接受並非很有用；因此我們將選擇由比較正確之起點來作為對電磁學的入門。首先考慮磁場及電場之觀念。一個場（field）簡單的說就是在空間中我們希望量測的量的影響能被偵測到，場本質上可以是向量，也可以是純量。力則是場所產生的一種現象，力需由大小及方向來完整的描述；溫度可以說是純量場之範例。

大家都非常熟悉，任何的帶電體其四周充滿著力場，此力場可用介入一個帶有小電荷量的探針來測試。探針上的電荷量越大則所受的力也越大，因此可以說探針所受的力與探針之帶電荷量成正比。

因此可定義：

$$\mathbf{F} \propto QE$$

其中 Q 為探針之帶電荷量，而 E 則為電場強度（electric field strength）。如果此電場是由帶有 Q_2 電荷之荷電體所產生，且我們選用比例常數為 1，且假設探針的電荷量為 Q_1 ，則有：

$$F = Q_1 E \quad (1.1)$$

法國科學家庫倫（J. Coulomb）發現“兩個帶電體間之作用力正比於兩者電荷量且與兩者距離之平方成反比。”亦即：

$$\mathbf{F} \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1.2)$$

若 \mathbf{F} 的單位是牛頓， Q_1 及 Q_2 為庫倫， r 為米，則：

$$\mathbf{F} = 9 \times 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r}$$

若將球體表面積 $4\pi r^2$ 由上式中分離，則有：

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1.3)$$

其中 $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ 為重要的電的常數，通常稱它為自由空間的介電常數 (permittivity)。

現在，我們比較式 (1.1) 及式 (1.3)，可定義 \mathbf{E} 為：

$$\mathbf{E} = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r} \quad (1.4)$$

注意： \mathbf{E} 是由 Q_2 所產生，而 \mathbf{F} 則由 Q_1 與 \mathbf{E} 之互相作用而產生的，在 (1.1) 及 (1.4) 式中電荷量之下標可以省略。

在電場 \mathbf{E} 中移動電荷 Q_1 ，須做功；但如 Q_1 回到原起點，則所作的總功變為零。以數學式來表示，即 $\int \mathbf{F} \cdot d\ell = 0$ ，且因 \mathbf{F} 與 \mathbf{E} 有常數量的關係，因此我們又可寫成：

$$\int \mathbf{E} \cdot d\ell = 0 \quad (1.5)$$

滿足這個式子的場稱為保守場 (conservative field)，電場為一個保守場。

1.2 電通密度與高斯定律

現在我們來做一個實驗，以量測由一個封閉曲面所涵蓋之空間內，包含已知電荷量時，電場之總流出通量，如圖 1.1 所示。

由實驗可知，在空氣中任何大小範圍內之電荷或表面積，有下列之關係存在

$$\epsilon_0 \iint \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} ds = Q \quad (1.6)$$

其中 Q 為由 s 封閉曲面所包含之電荷量。

如果我們不在空氣中，而在其他的物質中進行此項實驗時，我們可以發現，實驗的結果隨實驗所在之物質之不同而有所改變。如果我們考慮不同物質產

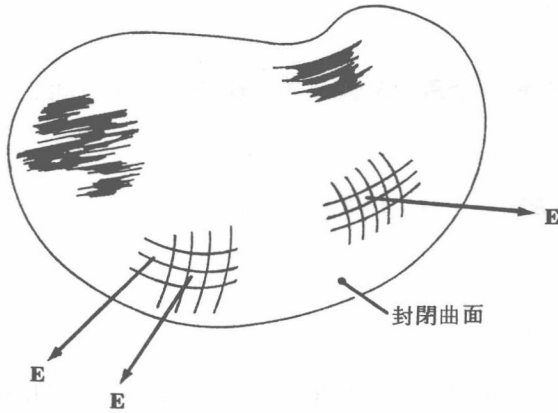


圖 1.1 封閉曲面之電場

生之不同的改變，可定義電通密度 (electric flux density) $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ ，其中 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ， ϵ_r 為物質相對於空氣之相對介電常數 (relative permittivity)。我們可以想像成 ϵ_r 可提供了了解物質對電通量的支持程度強弱之量測，亦即支援電通量流通之程度。電力線 (line flux) 只是想像的一種線，它可以幫助我們去“觀察”電場，電力線由正電荷出發而終止於負電荷，且它們必須是連續的；電力線密度即電通密度，可想成電力線正交於表面 a 之單位面積的電力線數，如圖 1.2 所示。

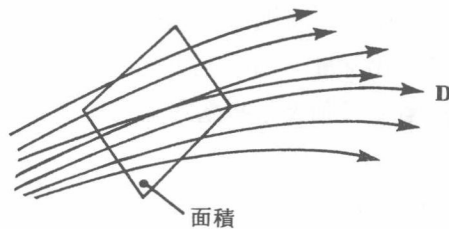


圖 1.2 穿過面積之電通量

所以，(1.6) 式可寫成：

$$\iint \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} ds = Q \quad (1.7)$$

若電荷量 Q ，改以電荷密度（即每單位體積之電荷量）來表示，則由 s 曲面所包含空間內之電荷量為 $\iiint \rho dv$ ，因此：

$$\iint \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} ds = \iiint \rho dv \quad (1.8)$$

此即我們所熟知之高斯定律（Gauss's Law），此定律在電磁學中相當重要。

1.3 靜電場不同的表示方式

雖然在式（1.5）及（1.8）中我們用積分式來表示，但它們可以用一些不同而更普遍之方式來表示。

考慮式（1.8）中等號的左右兩側，可清楚的了解，式子即表示由封閉曲面 s 所定義之體積內電通量之流出量，此可看成電通量的散度（divergence），即：

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \left(\frac{\partial D}{\partial x} \mathbf{x} + \frac{\partial D}{\partial y} \mathbf{y} + \frac{\partial D}{\partial z} \mathbf{z} \right)$$

但散度定理告訴我們：

$$\iiint \nabla \cdot \mathbf{D} dv = \iint \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} ds \quad (1.9)$$

因此比較式（1.8）及（1.9）可以得知：

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.10)$$

此關係式說明電通密度與電荷密度之關係。

其次再考慮式（1.5）。等號左側之 $\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 即是向量 \mathbf{E} 之環流量（circulation），此環流量即為向量 \mathbf{E} 之旋度，亦即 $\text{curl } \mathbf{E}$ 或 $\nabla \times \mathbf{E}$ ：