

Revised Printing

Fundamentals of Physics

Halliday

Resnick

物理學基本原理解

譯者

王
王

唯
明

農
建

第

4

冊

東華書局印行

物理學基本原理解

第 四 册

著 者

雷 士 勒 霍 立 德
(*R. Resnick*) (*D. Halliday*)

譯 者

王 唯 農 王 明 建

東 華 書 局 印 行



版權所有·翻印必究

中華民國六十六年六月初版

大學
用書 物理學基本原理

第四冊 定價新臺幣四十元整

(外埠酌加運費滙費)

原著者	雷士勒 霍立德
譯者	王唯農 王明建
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 電話：3819470 郵撥：6481
印刷者	中 臺 印 刷 廠 臺中市公園路三十七號

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
(66024)

物 理 常 數

(參閱附錄A之附表, 該表較完整)

光速	c	3.00×10^8 米/秒 = 1.86×10^5 哩/秒
質量能量關係	$c^2 (= E/m)$	$931 \text{ MeV/amu} = 8.99 \times 10^{16}$ 焦耳/仟克
重力常數	G	6.67×10^{-11} 牛頓米 ² /仟克 ²
普遍氣體常數	R	8.31 焦耳/摩爾 K ^o = 1.99 卡/摩爾 K ^o = 0.0823 升 atm/摩爾 K ^o
水的三相點	T_{tr}	273.16 °K
導磁常數	μ_0	1.26×10^{-6} 亨利/米
容電常數	ϵ_0	8.85×10^{-12} 法拉/米
亞佛加德羅常數	N_0	6.02×10^{23} 分子/摩爾
波爾茲曼常數	k	1.38×10^{-23} 焦耳/分子 K ^o
蒲朗克常數	h	6.63×10^{-34} 焦耳秒
基本電荷	e	1.60×10^{-19} 庫倫
電子靜止質量	m_e	9.11×10^{-31} 仟克
電子荷質比	e/m_e	1.76×10^{11} 庫倫/仟克
質子靜止質量	m_p	1.67×10^{-27} 仟克
電子磁矩	μ_e	9.27×10^{-24} 焦耳/tesla

物 理 性 質

空氣密度(STP)	1.29 仟克/米 ³
水密度(20°C)	1.00 × 10 ³ 仟克/米 ³
水銀密度(20°C)	13.6 × 10 ³ 仟克/米 ³
乾燥空氣(STP)中之聲速	331 米/秒 = 1090 呎/秒
重力加速度(標準)	9.81 米/秒 ² = 32.2 呎/秒 ²
標準大氣壓力	1.01 × 10 ⁵ 牛頓/米 ² = 14.7 磅/吋 ² = 760 毫米水銀柱
地球平均半徑	6.37 × 10 ⁶ 米 = 3960 哩
地球-太陽平均距離	1.49 × 10 ⁸ 仟米 = 92.9 × 10 ⁶ 哩
地球-月球平均距離	3.80 × 10 ⁵ 仟米 = 2.39 × 10 ⁵ 哩
地球質量	5.98 × 10 ²⁴ 仟克
水的溶解熱(0°C, 1atm)	79.7 卡/克
水的汽化熱(100°C, 1atm)	539 卡/克
水的熔點	0.00°C = 273.15°K
空氣(20°C)之比熱比(γ)	1.40
鈉光黃色雙線的波長	5892Å
水的折射率(@5892Å)	1.33
冕牌玻璃的折射率(@5892Å)	1.52

物理學基本原理

第四冊 目次

第三十四章 電磁振盪..... 1~18

- | | | | |
|------|------------|------|---------|
| 34-1 | LC振盪 | 34-4 | 感應磁場 |
| 34-2 | 與簡諧運動的類比 | 34-5 | 位移電流 |
| 34-3 | 電磁振盪——數量方面 | 34-6 | 馬克士威方程式 |

第三十五章 電磁波19~56

- | | | | |
|------|-------------|-------|-----------|
| 35-1 | 導論 | 35-6 | 偏振 |
| 35-2 | 輻射源 | 35-7 | 電磁波譜 |
| 35-3 | 進行波和馬克士威方程式 | 35-8 | 光速 |
| 35-4 | 能量和坡印亭向量 | 35-9 | 運動的光源和觀察者 |
| 35-5 | 動量 | 35-10 | 都卜勒效應 |

第三十六章 幾何光學.....57~99

- | | | | |
|------|---------------|-------|------------|
| 36-1 | 幾何光學 | 36-6 | 布呂斯脫定律 |
| 36-2 | 反射與折射——平面波與平面 | 36-7 | 球面波——平面鏡 |
| | | 36-8 | 球面波——球面鏡 |
| 36-3 | 惠金斯原理 | 36-9 | 球面波——球形折射面 |
| 36-4 | 折射定律 | 36-10 | 薄透鏡 |
| 36-5 | 內部全反射 | | |

第三十七章100~124

- | | | | |
|------|------|------|---------|
| 37-1 | 波動光學 | 37-4 | 干涉波的強度 |
| 37-2 | 楊氏實驗 | 37-5 | 薄膜之干涉 |
| 37-3 | 相參性 | 37-6 | 邁克爾孫干涉儀 |

第三十八章 繞射、光柵和光譜.....125~164

- | | | | |
|------|------------|-------|--------|
| 38-1 | 繞射 | 38-6 | 雙縫繞射 |
| 38-2 | 單縫 | 38-7 | 複縫 |
| 38-3 | 單縫繞射——性質方面 | 38-8 | 繞射光柵 |
| 38-4 | 單縫繞射——數量方面 | 38-9 | 光柵的鑑別率 |
| 38-5 | 圓孔繞射 | 38-10 | X-射線繞射 |

第三十九章 光和量子物理學165~195

- | | | | |
|------|-----------|------|-------------|
| 39-1 | 光源 | 39-6 | 康普頓效應 |
| 39-2 | 空腔輻射體 | 39-7 | 明線光譜 |
| 39-3 | 蒲朗克輻射公式 | 39-8 | 原子模型——波爾氫原子 |
| 39-4 | 光電效應 | 39-9 | 相當原理 |
| 39-5 | 愛因斯坦的光子理論 | | |

第四十章 波動和粒子.....196~213

- | | | | |
|------|---------|------|------------|
| 40-1 | 物質波 | 40-4 | Ψ 的意義 |
| 40-2 | 原子構造和駐波 | 40-5 | 測不準原理 |
| 40-3 | 波動力學 | | |

附 錄214~238

單號習題答案.....239~242

第三十四章

電 磁 振 盪

(Electromagnetic Oscillations)

34-1 LC 振盪 (LC Oscillations)

圖 34-1 的 LC 系統與質量-彈簧系統(見圖 7-4)相似之處為每系統各有一振盪的特徵頻率。欲明瞭這點,可假設在起初時,圖 34-1a 的電容器 C 帶有電荷 q_m , 而感應器上的電流 i 為零。在此瞬間,儲於電容器的能量由式 26-16 得之,即

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C}. \quad (34-1)$$

儲於感應器的能量為

$$U_B = \frac{1}{2} Li^2, \quad (34-2)$$

因電流為零,故 U_B 為零。現電容器開始經感應器而放電,正電荷載體反時針方向移動,如圖 34-1b 所示。這意謂在感應器中向下生一電流 i , 等於 dq/dt 。

當 q 減少時,儲於電容器的電場中之能量亦減少,因感應器中產生電流 i , 此能量轉換為磁場而出現於感應器的周圍。因此電場減小,建立磁場,能量從前者轉換至後者。

在相當於圖 34-1c 之時,電容器上的所有電荷均已消失,電容器中的電場為零,儲於該處之能量全部轉換為感應器的磁場。根據式 34-2,則感應器上應有電流——事實上是最大值。注意即使 q 等於零,此時電流(為 dq/dt)並不為零。

2 物理學基本原理

在圖 34-1c 中感應器上之大電流繼續將正電荷從電容器的上板輸至下板，如圖 34-1d 所示；此時能量自感應器流回電容器，再度建立電場。最後，能量完全轉回電容器，如圖 34-1e。圖 34-1e 的情況與起初的情況相像，唯電容器在相反方向充電。

電容器又開始放電，現電流為順時針方向，如圖 34-1f。依前述之

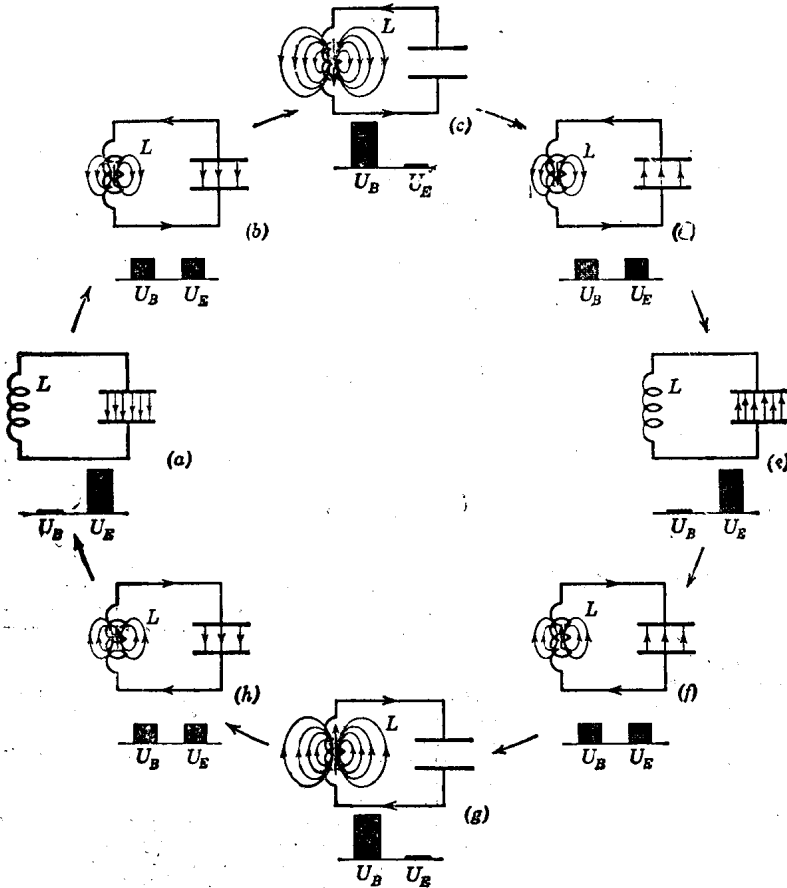


圖 34-1 圖示 LC 電路振盪一週期的八個階段，各圖下面的黑帶圖形陳示儲存的磁位能和電位能，感應器軸上的垂直箭號表示電流。讀者應將此圖與圖 7-4 詳細比較之，兩者恰相對應。

理,可知電流終於回至其起初情況,此過程以一定頻率 ν (如以週/秒量之)進行,這相當於一定之角頻率 $\omega(=2\pi\nu$,並以弧度/秒量之)。這種 LC 振盪一旦開始(在上述理想情形時,電路中無電阻),則無限期繼續進行,能量在電容器的電場與感應器的磁場間來回變換。圖34-1中的任一位形均可作為起始情況,振盪即從該點順時針方向沿圖進行。讀者應將這些振盪情形與圖7-4所述之質點-彈簧系統的振盪仔細比較之。

欲測電荷 q 為時間 t 的函數,可測定跨過電容器 C 的可變電位差 $V_C(t)$,關係式

$$V_C = \left(\frac{1}{C}\right)q$$

顯示 V_C 與 q 成正比。欲測電流,可在電路中接入一小電阻 R ,並測其兩端的電位差,此電位差與 i 成正比,其關係為

$$V_R = (R)i.$$

此處假設 R 甚小,故其對於電路行徑的影響可予忽略。 q 和 i 兩者,或更正確者與 q 和 i 成正比之 V_C 和 V_R ,可在陰極射線示波器上展示之,

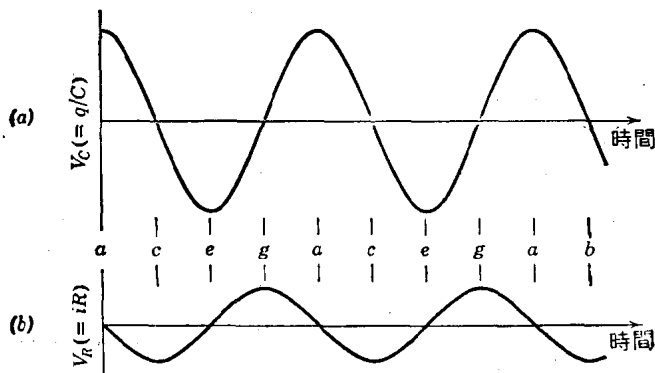


圖 34-2 示波器幕上的圖形陳示圖 34-1 電路中的電位差與(a)電荷及(b)電流成正比,均為時間的函數。字母表示對應於該圖的振盪相位。注意因 $i = dq/dt$,下面曲線與上面曲線的導式成正比。

4 物理學基本原理

這種儀器能自動將與 $q(t)$ 和 $i(t)$ 成正比的圖形繪於其幕上，如圖 34-2。

【例 1】 1.0 微法拉之電容器充電至 50 伏特，然後拆去充電的電池，將一 10 毫亨利之線圈跨接於電容器上，而產生 LC 振盪。線圈上之最大電流為若干？設電路中無電阻。

由能量守恆原理，儲於電容器的最大能量應等於儲於感應器的最大能量，故由式 34-1 和 34-2 得

$$\frac{1}{2} \frac{q_m^2}{C} = \frac{1}{2} L i_m^2,$$

i_m 為最大電流， q_m 為最大電荷。注意最大電流和最大電荷並不同時出現，而係相距四分之一週；見圖 34-1 和 34-2。解出 i_m 並以 CV_0 代 q_m 得

$$i_m = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} = (50 \text{ 伏特}) \sqrt{\frac{1.0 \times 10^{-8} \text{ 法拉}}{10 \times 10^{-3} \text{ 亨利}}} = 0.50 \text{ 安培}。$$

在實際 LC 電路中，振盪並不無限期繼續進行，因電路中總有若干電阻，由焦耳效應而消耗能量。振盪一經開始後，即逐漸消失，如圖 34-3。

若從外源自動而週期地（譬如每週一次）供給足夠能量，以補償內能的損失，則電磁振盪能保持不斷。時鐘擒縱機件為一種由彈簧或下墜砝碼將能量饋入振盪鐘擺的裝置，以補償摩擦損耗，否則摩擦損耗促使振盪消失。頻率 ν 可在某限度內變化的振盪器市上有裝封成件者，每件有甚大的頻率範圍，從極低之成聲頻率（低於 10 週/秒）至微波頻率（高於 10^{10} 週/秒）皆有。

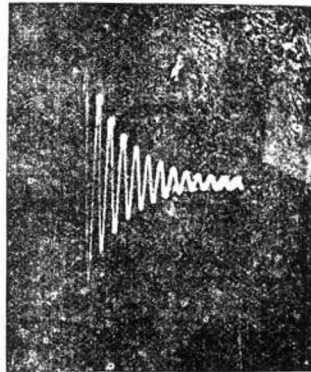


圖 34-3 示波器的示踪相片顯示在 LRC 電路中，因焦耳效應，能量轉換至電阻器成內能，而使振盪消失的情形。此圖乃電阻器兩端電位差為時間函數的圖形。

34-2 與簡諧運動的類比

(Analogy to Simple Harmonic Motion)

表 34-1 能量公式

機 械 能	電 磁 能
彈 簧 $U_P = \frac{1}{2} kx^2$	電 容 器 $U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$
質 量 $U_K = \frac{1}{2} mv^2$	感 應 器 $U_B = \frac{1}{2} Li^2$
$v = dx/dt$	$i = dq/dt$

圖 7-4 陳示從事簡諧運動的質量-彈簧系統，正如振盪之 LC 電路，產生兩種能量，一為壓縮或伸長彈簧的位能，另一為運動質量的動能，這些能量的公式列於表 34-1 中之第一欄。在形式上該表提示電容器像彈簧，感應器像質量，某些電磁量“相當”於某些力學量，即

q 相當於 x ,

i 相當於 v ,

C 相當於 $1/k$,

L 相當於 m .

圖 34-1 陳示 LC 電路的振盪，圖 7-4 陳示質量-彈簧系統的振盪，比較二圖，顯出密切的對應關係。注意在兩圖中 v 和 i 對應， x 和 q 亦然。並注意在各情形中能量在兩種形式之間的變化情形， LC 系統為磁能和電能，質量-彈簧系統為動能和位能。

在第 13-3 節已知無阻尼之質量-彈簧系統振盪的固有角頻率為

$$\omega = 2\pi\nu = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

由對應的方法提示求 LC 電路之固有頻率的方法，可令 $1/C$ 代 k ， L 代 m ，得

$$\omega = 2\pi\nu = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (34-3)$$

此式實為正確，將於下節證明之。

34-3 電磁振盪——數量方面

(Electromagnetic Oscillations—Quantitative)

現用能量守恆原理推導 LC 電路的振盪頻率，在任何時刻，振盪之 LC 電路中總能量 U 為

$$U = U_B + U_E = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C},$$

該式表示在任意時刻，能量部分儲於感應器的磁場中，部分儲於電容器的電場中。若假設電路電阻為零，則無能量轉換為內能，即使 i 和 q 均變化， U 隨時保持不變，以更正式的說法， dU/dt 應為零，於是

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \right) = Li \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} = 0. \quad (34-4)$$

今 q 和 i 不是獨立變數，兩者關係為

$$i = \frac{dq}{dt},$$

微分得

$$\frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}.$$

將此二式代入式 34-4 得

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{C} q = 0. \quad (34-5)$$

這是描述（無電阻） LC 電路振盪的微分方程式。直接由迴路定理（這與能量守恆的方法完全一樣；詳第 28-2 節）當通過電路時加上電位

$-L di/dt (= -L d^2q/dt^2)$ 和 $-q/C$, 也能得到 34-5 式。

欲解式 34-5, 首先應注意此式與式 13-6

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad (13-6)$$

在數學上形式完全相同, 該式為質量-彈簧振盪的微分方程式。基本上, 比較這兩式, 即產生第 5 頁的對應關係。

式 13-6 之解為

$$x = A \cos(\omega t + \phi), \quad (13-8)$$

$A (= x_m)$ 是運動的振幅, ϕ 是任意相角常數。 q 既相當於 x , 式 34-5 之解可寫為

$$q = q_m \cos(\omega t + \phi), \quad (34-6)$$

ω 是仍然未知之電磁振盪的角頻率。

式 34-6 是否為式 34-5 之解, 可將式 34-6 及其二次導式代入式 34-5 中以試驗之。欲求第二次導式, 可寫

$$\frac{dq}{dt} = i = -\omega q_m \sin(\omega t + \phi) \quad (34-7)$$

及

$$\frac{d^2q}{dt^2} = -\omega^2 q_m \cos(\omega t + \phi).$$

將 q 及 d^2q/dt^2 代入式 34-5 得

$$-L\omega^2 q_m \cos(\omega t + \phi) + \frac{1}{C} q_m \cos(\omega t + \phi) = 0.$$

消去 $q_m \cos(\omega t + \phi)$ 並移項, 得

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

故若 ω 為常數值 $1/\sqrt{LC}$, 式 34-6 實為式 34-5 之解。此 ω 的表示式與

式 34-3 相符，後者為由對應方法而得者。

式 34-6 中之相角常數 ϕ 由 $t=0$ 時的條件所決定，若初具條件為如圖 34-1a 所示者，則欲使 34-6 式中當 $t=0$ 時有 $q=q_m$ ，須令 $\phi=0$ 。若選 $\phi=90^\circ$ ，則圖 34-1 中初具條件為何？

【例 2】振盪之 LC 電路其電感為 $L=10$ 毫亨利，電容為 $C=1.0$ 微法拉。

(a) 振盪頻率若干？

由 34-3 式得頻率為

$$\begin{aligned}\omega &= \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{(10 \times 10^{-3} \text{ 亨利})(1.0 \times 10^{-6} \text{ 法拉})}} \\ &= 1.0 \times 10^4 \text{ 弧度/秒}\end{aligned}$$

及

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 1.6 \times 10^3 \text{ 週/秒。}$$

(b) 若跨過電容器的最大電壓為 100 伏特，試求線圈中的最大電流。

由 34-7 式

$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega q_m \sin(\omega t + \phi),$$

故

$$i_{max} = \omega q_m,$$

由最大電壓 V_m 可得最大電荷

$$q_m = CV_m,$$

故最大電流 i_m 為

$$i_m = \omega CV_m = (1.0 \times 10^4 \text{ 弧度/秒})(1.0 \times 10^{-6} \text{ 法拉})(100 \text{ 伏特}) = 1.0 \text{ 安培。}$$

【例 3】(a) 在例 2 的振盪 LC 電路中，當能量等分於電場和磁場中時，電容器上的電荷為何值？以最大電荷表之。

電容器所儲能量及其最大儲存能量分別為

$$U_E = \frac{q^2}{2C} \quad \text{及} \quad U_{E,m} = \frac{q_m^2}{2C}$$

以 $U_E = \frac{1}{2} U_{E,m}$ 代入得

$$\frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} \frac{q_m^2}{2C} \quad \text{即} \quad q = \frac{1}{\sqrt{2}} q_m.$$

(b) 欲達此情況須費時多久？設最初電容器已完全充電。
 在式 34-6 中設 $\phi=0$,

$$q = q_m \cos \omega t = \frac{1}{\sqrt{2}} q_m,$$

得
$$\omega t = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{4}, \quad \text{即} \quad t = \frac{\pi}{4\omega} = \frac{1}{8} T,$$

T 是週期。利用由例 2 所得之角頻率 ω 得

$$t = \frac{\pi}{4\omega} = \frac{\pi}{(4)(1.0 \times 10^4 \text{ 弧度/秒})} = 7.9 \times 10^{-3} \text{ 秒}.$$

利用式 34-6, 儲存於 LC 電路中的電能為

$$U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2(\omega t + \phi) \quad (34-8)$$

利用式 34-7, 磁能為

$$U_B = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} L \omega^2 q_m^2 \sin^2(\omega t + \phi).$$

以 ω (式 34-3) 之表示式代入上式得

$$U_B = \frac{q_m^2}{2C} \sin^2(\omega t + \phi). \quad (34-9)$$

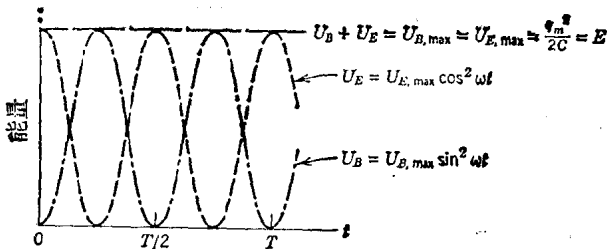


圖 34-4 圖 34-1 的電路中所儲存之磁能和電能, 注意兩者之和為常數。

圖 34-4 陳示 $\phi=0$ 時 $U_E(t)$ 和 $U_B(t)$ 的圖形。注意 (a) U_E 和 U_B 的最大值相同 ($=q_m^2/2C$); (b) 在任何瞬間, U_E 及 U_B 之和為常數

($=q_m^2/2C$); (c) 當 U_E 爲極大值時, U_B 爲零, 反之亦然。以上分析支持第 34-1 節的性質分析。讀者應將此討論與第 13-4 節質量-彈簧系統的能量轉換之討論予以比較。

34-4 感應磁場 (Induced Magnetic Fields)

既然已經討論產生時變電場的方法, 爲了完成對電磁學基本方程式的描述, 茲介紹一新觀念: 即正在改變的電場產生磁場。這是與法拉第的感應定律相對稱的觀念, 我們將以對稱的推論發展這種觀念, 並由與實驗相符的情形自行說明這種觀念。與實驗的比較將在第三十五章詳加討論, 這種比較形成電磁理論的主要實驗根據之一。由實驗測定在自由空間中可見光的速率 c 與純電磁量的關係爲

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (34-10)$$

是電磁理論主要成就的實證。這種實證不僅顯露光學是電磁學的一支脈, 而且直接導致電磁光譜的觀念, 後者又繼而促成無線電波的發現。

圖 34-5a 陳示滿佈於圓柱空間區域中的均勻電場 E , 如圖 34-5b 所示, 圓形平行板容電器可產生此電場。設 E 以 dE/dt 之穩定率增加, 意即應以穩定率將電荷供予電容器板; 欲供入此電荷需有穩定電流 i 流入正板, 及相等之穩定電流 i 自負板流出。注意圖 34-1 並非這種情形。

若能從事頗爲精密的實驗, 即可發現由改變中的電場生成磁場。圖 34-5a 陳示任意四點之 B , 圖 34-5 顯示自然的對稱性的佳例。改變中的磁場生感應電場 (法拉第定律); 現在可知改變中的電場生感應磁場。

欲就數量描述此新效應, 可由法拉第感應定律

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (34-11)$$

類推而得, 此定律斷言由改變的磁場 (右端) 產生電場 (左端)。其對