

電磁學

—大學物理學之三—

陳錫桓 編著

中央圖書出版社出版

序

物理學不僅是探求存在於我們生活空間和時間內的一切現象。更重要的是要藉着對這些現象的探討來改進我們生活的條件。所以，在研究這些原理的同時，也應該留意如何去應用它們。

本書的重點是強調物理觀念，作有系統的整理；在解述方式上，儘量以我們日常親近的事物為例，來闡釋深奧的物理原理及其應用，以提高學生的學習興趣；在內容上，於每章後面都有很多附有詳細解答的例題，使學習者能更深入、更透澈瞭解所介紹的原理。

本書主要取材於：

1. Halliday & Resnick : Fundamentals of Physics (Extended) 2nd edition .
 2. Frederick Bueche : Introduction of Physics for Scientists and Engineers , 3rd edition .
 3. Sears, Zemansky, Young : University Physics , 6th ed .
- 并參考：

1. Zafiratos : Physics
2. McKelvey Grotch : Physics for Science and Engineering .
3. Falk Radin : Physics for Scientists and Engineers .
4. Meriam : Dynamics
5. Marion : Classical Dynamics of Particles and Systems .
6. Eastop and McConkey : Applied Thermodynamic .
7. Holman : Heat Transfer .
8. Lorrain Corson : Electric and Magnetism .
9. Miles V. Klein : Optics .

10. Hecht Zajac : Optics .

等書編著而成。可作為大學及專科學校教材，由於敘述明確扼要，例題週詳實用。容易提高學習興趣，所以，容易教、也容易學。但在另一方面來看，則因本書是以上述各書為基礎，綜合摘取各書長處所編成的一套有系統的物理學，故極適宜自修及複習，為一非常完整的，也可說是非常完美的參考書。

本書係於課餘之際編成，雖經細心校正，掛一漏萬，在所難免，敬祈各先進惠予指正，俾作再版時修正之參考，不勝感幸。同時，在編寫期間承蒙孫助教及其他多位先生提供資料，始得以完成，在此一併致謝！

陳 錫 桓 謹誌

中華民國七十二年二月

0455497

電 磁 學

— 大學物理學之三

內政部著作權執照

著者姓名	著作名稱	著作種類	著作完成日期	著作權人	著作權人住所	執照字號	有效年限
電磁學	全壹冊	物理學	民國二十一年一月九日	陳錫桓	台灣省台南市	台內著字第貳零陸伍捌號	五年
電磁學	全壹冊	物理學	民國二十一年一月九日	陳錫桓	台灣省台南市	台內著字第貳零陸伍捌號	五年
電磁學	全壹冊	物理學	民國二十一年一月九日	陳錫桓	台灣省台南市	台內著字第貳零陸伍捌號	五年

中華民國



洋港

月

日

目 錄

序

第一章 庫倫定律與電場

1-1 庫倫定律	1
1-2 電場	3
1-3 電力線	5
1-4 電場的計算	6
1-5 電場中之電偶極	12
本章範例	14

第二章 高斯定律

2-1 電通量	41
2-2 高斯定律	44
2-3 高斯定律的應用	44
本章範例	51

第三章 電位和電位能

3-1 電位差	71
3-2 等位線和等位面	72
3-3 點電荷的電位	74
3-4 由數個分立的點電荷所產生的電位	75
3-5 連續分佈的電荷所產生的電位	76
3-6 電偶極的電位	81
3-7 電位能	84

VI 目 錄

3-8 由電位求電場·····	87
3-9 VAN DE GRAFF發電機·····	89
本章範例·····	93

第四章 電容與電介體

4-1 電容·····	115
4-2 平行板電容器·····	116
4-3 圓柱形電容器·····	118
4-4 電容器的組合·····	119
4-5 電容器中儲存的能量·····	121
4-6 電介體的效應·····	124
4-7 電介體感應電荷的分子論·····	128
4-8 偏極和位移·····	131
本章範例·····	135

第五章 電流、電阻和電動勢

5-1 電流與電流密度·····	163
5-2 電阻與電阻率·····	166
5-3 電動勢·····	169
5-4 電路中的電功率·····	172
本章範例·····	177

第六章 直流電路

6-1 串聯和並聯電阻·····	197
6-2 克希荷夫規則·····	199
6-3 Y - Δ 電阻的變換·····	202
6-4 電阻的測定·····	205
6-5 R - C串聯電路·····	210
6-6 位移電流·····	214
本章範例·····	216

第七章 磁場

7-1 磁場和磁通量	245
7-2 在磁場中運動的帶電質點	247
7-3 作用在導體上的力	249
7-4 閉合電路的力和力矩	252
7-5 HALL 效應	255
7-6 電子的 e/m 測量法	257
7-7 迴旋加速器	259
7-8 直流馬達	261
本章範例	264

第八章 安培定律

8-1 磁場和電流	289
8-2 安培定律	290
8-3 長螺線管的磁場	295
8-4 螺線環的磁場	298
8-5 平行板間的磁場	298
8-6 Biot-Savart 定律	299
8-7 短螺線管的磁場	304
本章範例	308

第九章 法拉第的感應定律

9-1 由運動產生的電動勢	333
9-2 法拉第定律	336
9-3 LENTZ 定律	340
9-4 感應的電場	341
9-5 渦電流	344
本章範例	346

VIII 目 錄

第十章 電感量

10-1	互感量	373
10-2	自感量	375
10-3	自感量的計算	377
10-4	電感器的串聯和並聯	378
10-5	R - L 電路	380
10-6	電感器中所儲存的能量	384
本章範例		388

第十一章 電磁振盪

11-1	LC 振盪器	403
11-2	LC 振盪器的能量	405
11-3	LC 阻尼振盪	408
11-4	強迫振盪和共振	410
本章範例		413

第十二章 交流電路

12-1	序言	421
12-2	RCL 單元件電路	422
12-3	R - L - C 串聯電路	426
12-4	交流電路的電功率	430
12-5	交流電流之整流與濾波	434
12-6	RCL 並聯電路	438
12-7	變壓器	440
本章範例		443
附錄一		1-6
附錄二		7-8

第一章

庫倫定律與電場

1-1 庫倫定律

電荷之間的作用力早已知道同性相斥，異性相吸，但其數量方面的分析，則遲至 1785 年才經庫倫利用類似卡文狄西裝置測得之結果，可表之為

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-1)$$

其中 r 為兩電荷 q_1 與 q_2 之間的距離， ϵ_0 為容電常數 (Permittivity constant)。

在 MKS 制中， $\epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ ，

或
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

例 1-1 兩個質點，質量各為 0.20 g ，懸於質量可以忽略的繩端。質點帶電而分開。兩繩各與垂線成 37° ，若繩長 50 cm ，則質點上之電荷各若干？（假定兩質點之電荷相等）

【解】：將繩子的張力 T 分解為 x ， y 兩分量，如圖 1-1 所示。 F 為電力。因質點處於平衡狀態，因此

$$\Sigma F_x = 0, \quad \Sigma F_y = 0$$

即
$$F - 0.6T = 0$$

$$0.8T - (0.2)(10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 0$$

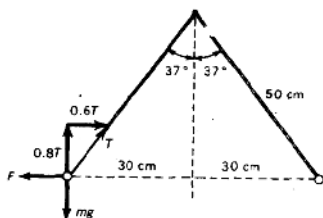


圖 1-1

解之得 $T = 2.45 \times 10^{-3} \text{ N}$

$F = 1.47 \times 10^{-3} \text{ N}$

將 F 代入庫侖定律中

$$1.47 \times 10^{-3} \text{ N} = (9 \times 10^9) \times \frac{q^2}{(0.6)^2}$$

得 $q = 2.4 \times 10^{-7} \text{ C}$

如果在空間內有許多點電荷 $q_1, q_2, q_3, q_4, \dots$ 存在，則每一對點電荷均遵守庫侖定律，某一點電荷 q_1 所受之力為其他各電荷對其作用的向量和，即

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots \quad (1-2)$$

$\mathbf{F}_{12}$ 為 q_2 作用於 q_1 之力，依此類推，同理 q_2 所受之作用力可仿照 (1-2) 式。此種求作用力的方法是利用重疊原理。

例 1-2 有三個點電荷，其位置如圖 1-2 所示，試求 $5 \mu\text{C}$ 電荷所受之作用力。 $(1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C})$

【解】：利用庫侖定律求 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ 大小分別為

$$F_1 = 0.270 \text{ N}, \quad F_2 = 0.360 \text{ N}$$

將其分解為 x, y 分量，然後依重疊原理求得總作用力的 x, y 分量

$$F_x = 0.6 F_2 + (-0.8 F_1) = 0$$

$$F_y = 0.6 F_1 + (-0.8 F_2) = -0.126$$

即作用於 $5\ \mu\text{C}$ 點電荷之力為 $0.126\ \text{N}$ ，朝負 y 方向

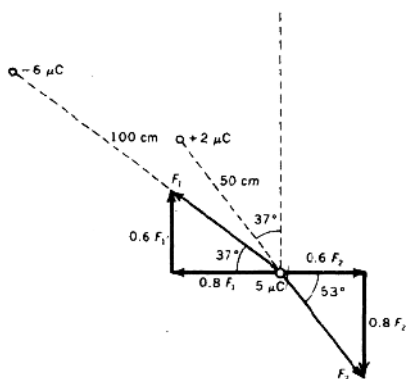


圖 1-2

例 1-3 Bohr 的氫原子模型是由一個電量是 $-e$ 的電子以圓周軌道繞著電量是 $+e$ 的一個質子旋轉所構成，試求其第一個 Bohr 軌道的半徑。

【解】：由於電子和質子之間的靜電力構成電子在其軌道上運轉。如果 v 是其軌道速度，則

$$k \left(\frac{e^2}{r^2} \right) = m \left(\frac{v^2}{r} \right)$$

由 Bohr 的理論，電子只能在許多特定的軌道之一運轉，半徑最小的軌道是電子的角動量等於 $h/2\pi$ 時，其中 h 是 Plank 常數，其值是 $6.625 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$ ，因此

$$L = m v r = h / 2 \pi$$

由上兩式消去 v ，可得

$$r = \frac{h^2}{4 \pi^2 k m e^2}$$

1-2 電 場

兩個電荷之間有作用力的存在，此種超越空間的作用力稱為超距

力，若想以此觀點來解釋其他現象可能會造成困難，因此我們可以換個觀點來探討。如果有一個電荷處於空間，只要碰到另外的電荷就跟它作用，換言之，因電荷 Q 的存在而使空間具有一種“性質”此種性質稱為電場 (Electric field)

凡是處於電場中的電荷會受到電力的作用，我們可以給電場強度 (Intensity of the electric field) 下個定義，即將單位正電荷置於電場中某一點，其所受的電力稱為該點的電場強度。

如果有某一點電荷 q_0 ，置於電場強度為 E 之空間內，其所受之力 F 有下列之關係

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1-3)$$

由於此一點電荷之存在，會影響原來空間電場之分佈，嚴格說來，上式應改為

$$E = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{F}{q_0} \quad (1-4)$$

由 (1-3) 式，若力的單位是牛頓 (N)，電量之單位是庫倫 (C)，則電場之單位為牛頓/庫倫 (N/C)。又由 (1-3) 式，可得

$$F = qE \quad (1-5)$$

由此式可得到下列之結論：當 q 為正時， F 與 E 同向；當 q 為負時， F 與 E 反向，換言之；正電荷置於電場中，其所受電力與電場方向相同；負電荷置於電場中，其所受電力則與電場方向相反。

例 1-4 當 $100V$ 的電池之兩端接到相距 1cm 的兩片平行板上時，在此兩平行板間的電場幾乎是均勻的，其電場強度 $E = 10^4 N/C$ 。如果此電場方向是向上，計算在此電場中的一個電子所受的電力，並與此電子的重量比較之。

【解】：電子的電量 $q = 1.60 \times 10^{-19} C$

電子的質量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

電子所受之電力

$$F = qE = (1.60 \times 10^{-19})(10^4) = 1.60 \times 10^{-15} N$$

電子所受之重力

$$F = mg = (9.1 \times 10^{-31})(9.8) = 8.9 \times 10^{-30} \text{ N}$$

電力與重力之比值為

$$\frac{1.6 \times 10^{-18}}{8.9 \times 10^{-30}} = 1.8 \times 10^{11}$$

由此可見重力可以忽略

1-3 電力線

力線的觀念是由法拉第所提出，用以幫助了解電場和磁場。在電場中的力線是一種想像的線，其力線通過任何一點時的切線方向與該點的電場方向一致。由於通常在不同點的電場方向都是不同的，因此力線通常是曲線。如圖 1-3 所示。

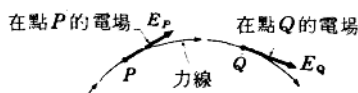


圖 1-3

圖 1-4 分別表示一個單獨的正電荷；兩個電量相等但是一正一負的兩個電荷（一個電偶極子）；以及兩個相同的正電荷，在兩個平面上所產生的力線。在所有這些情況中，在任何一點的合電場方向是沿著通過該點的力線之切線方向。箭頭表示切線所應有的方向。

力線的起點和終點不會在電荷外的空間中。在靜電場中的每一條力線都是連續的，它是以正電荷為起點而以負電荷為終點。但是有時我們為了方便起見只提到一個“單獨”的電荷並將其電場畫成如圖 1-4(a) 所示。這只是表示力線的另一端的電荷是在無限遠的地方，遠超過我們考慮的範圍。例如，如果圖 1-4(a) 中的帶電物體是一個小物體以線懸垂在實驗室的天花板之下，這些力線終點的負電荷是在牆壁

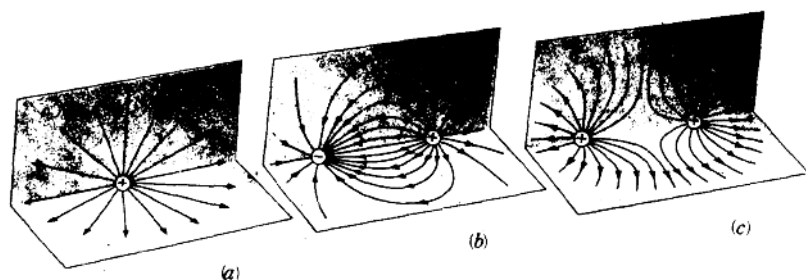


圖 1-4

上、地板、或天花板、或者是實驗室中的其他物質上。

在任何一點，合電場只能有一個方向。因此電場中的任何一點只能有一條力線通過。換句話說，力線是不能相交的。

如果電場中的每一點都要畫上力線，則整個空間和整個圖面上都會充滿這些線，而不能夠分辨個別的一條線。適當的限制用來表示電場的力線之數目，這些線就不僅能夠表示電場的方向也能夠表示其大小。這些線間隔的選定是使垂直於電場的面上每單位面積所通過的力線數目，就電場中的任一點而言都是正比於在該點的電場強度。在電場強的區域，例如圖 1-4(b) 的正負電荷之間，力線比較密而在電場強度比較弱的地方，例如圖 1-4(c) 的兩個正電荷之間，力線就比較疏。若是均勻的電場，力線是互相平行的直線而且是等間隔的。

1-4 電場的計算

電荷的分佈可以區分為分立的 (Discrete) 及連續的 (Continuous) 兩種。前者為有限個點電荷所組成，後者則由無限個點電荷所組成。在空間的電場可由各個點電荷所建立的電場之向量和求得，即

$$\begin{aligned}
 E &= E_1 + E_2 + E_3 + \cdots \cdots \cdots \\
 &= \sum_i E_i \quad i = 1, 2, 3, \cdots \cdots \cdots
 \end{aligned}
 \tag{1-6}$$

例 1-5 如圖 1-5 (a) 所示之三個點電荷，試求 P 點之電場

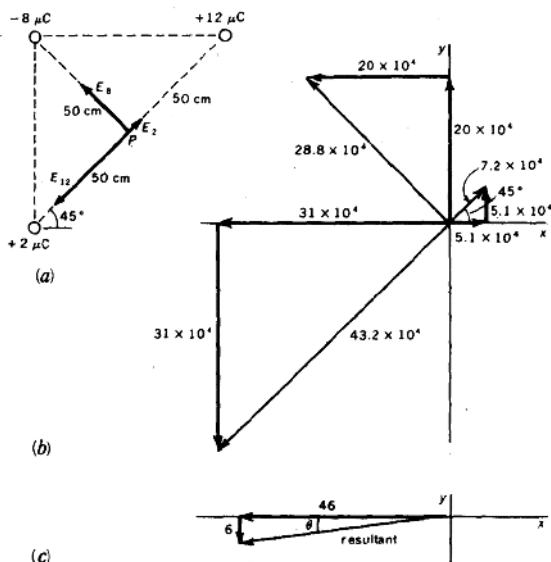


圖 1-5

【解】：由 (1-1) 及 (1-3) 式可以求得 $-8 \mu\text{C}$ 、 $+12 \mu\text{C}$ 、 $+2 \mu\text{C}$ 所建立之電場大小分別為

$$E_1 = 7.2 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_2 = 28.8 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_{12} = 43.2 \times 10^4 \text{ N/C}$$

將此三個電場畫於圖 1-5 (b) 中，並將各電場分解成 x 及 y 分量，然後求得 x 分量及 y 分量之總和為

$$E_x = -46 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_y = -6 \times 10^4 \text{ N/C}$$

將此兩分量再合成如圖 (c)，其大小及方向如下

$$E = 46 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$\tan \theta = \frac{6}{46} = 0.13$$

若電荷的分佈是連續的，則在任何點 P 之電場可將電荷分成無限小的電荷元素 dq 再行計算。計算各元素所生之電場 dE 時，可將元素當做點電荷。又 dE 的大小為

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \quad (1-7)$$

r 為電荷元素 dq 至點 P 的距離。在 P 點之合成電場可將各電荷元素之電場積分即可。即

$$E = \int dE \quad (1-8)$$

例 1-6 有一長為 L 之均勻帶電棒，如圖 1-6 所示，其單位長度的電荷為 λ ，試求 P 點之電場。

【解】：我們先將此棒分成許多小片段，每一小片段可視為點電荷，即 $\lambda \Delta x_i$ 的點電荷在 P 點所生之電場為

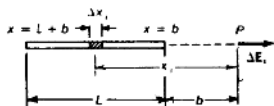


圖 1-6

$$\Delta E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \Delta x_i}{x_i^2}$$

由於此棒之所有片段所產生之電場方向均相同（向右），因此可以直接加起來求其 E ，即

$$E = \Sigma E_i = \Sigma \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda \Delta x_i}{x_i^2}$$

若 Δx_i 足夠小，則可以下式求之

$$E = \int dE = \int_b^{L+b} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dx}{x^2}$$

注意積分的上下限。棒之一端置於 $x = b$ ，而另一端置於 $x = L + b$ 。積分之結果可得

$$E = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{L+b} \right)$$

例 1-7 有一長為 L 之均勻帶電棒，如圖 1-7 (a) 所示，試求 P 點之電場。