

物 理 學

編 著 者

董敏男 張啓陽 蔡繁仁
王龍錫 張 鋌 梁樹根

(下冊)

興業圖書股份有限公司出版

物 理 學

編 著 者

董敏男 張啓陽 蔡繁仁
王龍錫 張 鋌 梁樹根

(下冊)

興業圖書股份有限公司出版

版權所有・翻印必究

中華民國六十四年九月一版

物 理 學

下冊 基本定價三元

編 著 者：董敏男 張啓陽 蔡繁仁
王龍錫 張 鉉 梁樹根

發 行 人：王 志 康

內政部登記證內版台業字第一七九四號

出 版 者：興業圖書股份有限公司

印 刷 者：永 紳 彩 色 印 刷 廠

臺南市忠孝街五十九號

發 行 所：興業圖書股份有限公司

臺南市勝利路一一八號

電 話：五 三 二 五 三 號

學校團體採用購買另有優待

目 錄

第十三章 靜電學：電荷與電場

13-1	電荷	1
13-2	庫倫定律	3
13-3	電場觀念	6
13-4	點電荷的電場	7
13-5	電力線	15
13-6	電場通量	17
13-7	電場的高斯定律	18
13-8	導體的電場	23

第十四章 靜電位與靜電能

14-1	電位差	31
14-2	電位和電場強	33
14-3	點電荷之電位	34
14-4	電雙極之電位	39
14-5	靜電場與靜電位之關係	40
14-6	電荷的靜電位能	43
14-7	電場內的能量關係	46

第十五章 電容器與介電質

15-1	電容	53
15-2	電容之計算	56
15-3	有介電質之平行板式電容器	60
15-4	介電質——原子觀點	63
15-5	介電質與高斯定律	66
15-6	電場內所儲存之能量	70

第十六章 電流，電阻，及電路

16 - 1	電流與電流密度	80
16 - 2	電阻與電阻係數	84
16 - 3	歐姆定律及導電係數	89
16 - 4	電阻係數——原子觀點	92
16 - 5	電路中能量之轉變	94
16 - 6	電動勢	96
16 - 7	迴路定理	97
16 - 8	電位差之計算	102
16 - 9	多迴電路	106
16 - 10	RC 電路	109

第十七章 磁 場

17 - 1	磁 場	120
17 - 2	B 的定義	120
17 - 3	電流上的磁力與線圈上的轉矩	122
17 - 4	霍爾效應	127
17 - 5	迴旋加速器	129
17 - 6	安培的定律	133
17 - 7	安培的定義	136
17 - 8	螺線圈	137
17 - 9	Biot-Savart 定律	140

第十八章 電磁感應

18 - 1	法拉第感應定律	150
18 - 2	感應電動勢的方向	153
18 - 3	感應電場	155
18 - 4	電感	160
18 - 5	LR 電路	162
18 - 6	磁場中的能量	166

第十九章 物質之磁性

19 - 1	引言	177
19 - 2	物質之磁性	177
19 - 3	磁場強度 H	182
19 - 4	導磁係數	184
19 - 5	B 與 H 之特性	185
19 - 6	磁性物質中之磁能	188
19 - 7	順磁性	188
19 - 8	反磁性	190
19 - 9	鐵磁性	193
19 - 10	磁滯功率損耗	196
19 - 11	磁化物體之磁極	198
19 - 12	磁路	200

第二十章 電磁波

20 - 1	引言	208
20 - 2	廣義電磁理論	208
20 - 3	位移電流	210
20 - 4	馬克士威方程式	216
20 - 5	電磁振盪	218
20 - 6	波方程式	226
20 - 7	真空中的電磁波	231
20 - 8	電磁波的能量	236
20 - 9	電磁波的產生	240
20 - 10	電磁波的動量	242
20 - 11	波源的運動	244
20 - 12	電磁波之都卜勒效應	246
20 - 13	電磁波之波譜	249

第二十一章 幾何光學

21 - 1	前言	254
21 - 2	球面的反射	254
21 - 3	透鏡	259
21 - 4	光學儀器	269

21-5 稜鏡.....	272
--------------	-----

第二十二章 物理光學

第一部份 干涉	
22-1 楊氏實驗.....	277
22-2 薄膜干涉.....	279
第二部份 繞射	
22-3 繞射.....	284
22-4 X-射線之繞射	288

第二十三章 光量子與波爾氫原子

23-1 熱輻射.....	295
23-2 空腔輻射體.....	296
23-3 浦郎克輻射公式.....	298
23-4 光電效應.....	301
23-5 康卜吞效應.....	306
23-6 光譜.....	311
23-7 氫原子光譜.....	313
23-8 原子模型.....	316
23-9 波爾氫原子.....	318
23-10 氫原子能階圖.....	321
23-11 對應原理.....	323

第二十四章 波動和粒子

24-1 德布格里假說.....	329
24-2 德維生和季墨耳的電子繞射實驗.....	330
24-3 德布格里波的速度.....	333
24-4 波速與羣速.....	336
24-5 羣速和質點速度.....	337
24-6 波動力學.....	338
24-7 ϕ 的意義.....	341
24-8 測不準原理.....	342

13

靜電學：電荷與電場

13-1	電荷.....	1
13-2	庫倫定律.....	3
13-3	電場觀念.....	6
13-4	點電荷的電場.....	7
13-5	電力線.....	15
13-6	電場通量.....	17
13-7	電場的高斯定律.....	18
13-8	導體的電場.....	23

電磁學雖為近代的知識，但其由來則頗久。電學起源於公元前六百年，當時古希臘人即知與毛皮摩擦後的琥珀能吸引毛髮、紙屑等輕物。而對磁學的探討，則可溯及對天然磁鐵能吸引鐵的現象之觀察。國人早在公元121年即知，一鐵棒經與天然磁鐵接近後，即能獲得並保持天然磁鐵的性質。這兩種現象初看起來似乎毫不相干，因此直到公元1820年奧斯特 (Hans Christian Oersted) 發現導線中的電流，能影響羅盤內的磁針之後，才知道電性作用與磁性作用間的關係是十分密切的，事實上祇是物質的同一性質（電荷）的兩面，磁性是電荷在運動時的表現而已。至此電與磁才取得了聯繫，而對此二者之研究的科學被合稱之為電磁學。

大致說來，電磁學和人類的感覺沒有太直接的關係，因此它的理論形成，也較古典物理內的其他幾部門為遲。至十九世紀電磁學與電磁輻射的理論（與光學連合）才被建立起來。由於法拉第 (Michael Faraday)，馬克士威爾 (James C. Maxwell) 和羅倫茲 (H. A. Lorentz) 等人的努力，才使得古典電磁學建立得如此的完美。

古典電磁學主要在研討電荷，電流以及其間的相互作用，而且每一個量都可以極精確地分別量出來。馬克士威爾將那些發現電磁本性的科學家們所得的電磁定律，加上他本人的創建，歸納出四條簡潔的方程式，稱之為馬克士威爾方程式。用之足可以解釋我們日常生活中所見的電與磁的現象。以這些理論應用於線圈、電容、雷達波甚至於光波等方面也都很如意，且亦不因量子力學與狹義相對論的引入，而使馬克士威爾方程式黯然失色。是以馬克士威爾方程式在電磁學中的重要性，與牛頓的運動定律與重力定律在力學中的重要性是相同的。不過，當我們要研究小至 10^{-10} cm 之範圍時古典電磁學便不適用了，那時就需要用到量子電動力學了。

13—1 電荷

電荷的觀念與質量的觀念是極為類似的，正如每一個質點或物體

有一特定的質量一樣，每一質點或物體亦有一內含的電荷，爲正的，爲負的，或爲中性的。我們把這一種抽象的觀念賦與質點或物體後，可簡化許多問題。譬如質量觀念的提出，可以具體的去描述重力交互作用；而電荷觀念的引入，使得我們可以很清楚的、很簡單的描述出庫倫力。是以當我們說某一質點或某一物體帶了某一定量的電荷時，實在是指它的某種特性而已，如此則使我們對某些物理定律的描述較爲方便。

如果將一塊物質 A 與另一塊物質 B 相摩擦，則 A 上的一些軌道電子就會與 B 上的一些電子發生作用，以致於 A 上的電子跑到 B 上去，或者 B 上的電子跑到 A 上來，而使得 A 帶一些正電荷 B 帶等量的負電荷；或者 A 帶負電而 B 帶等量的正電。我們所說的荷正電或荷負電是依照當年富蘭克林 (Benjamin Franklin) 所訂定的，他將與絲絹摩擦後的玻璃棒上所帶的電稱爲正電；而與毛皮摩擦後的硬橡皮棒上所帶的電稱爲負電。在適當的情況下，任何兩種物質相摩擦後多少都會帶些電，將其中之一，與帶電的玻璃棒或帶電的硬橡皮棒接近，則不是見到其與

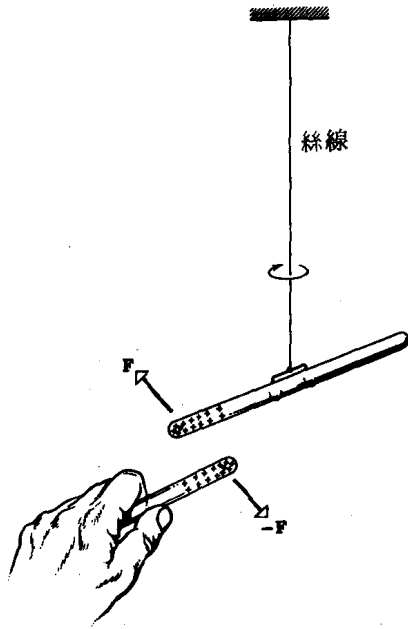


圖 13-1 電性試驗

前者相斥後者相吸，就是與前者相吸後者相斥（圖 13-1）。所有的實驗都告訴我們祇有這兩種情形，是以電荷祇要被分爲“正的”與

“負的”兩種，且同類的互相排斥，異類的互相吸引，就能夠解釋我們所觀察到的現象了。這種對於荷正電或荷負電的選擇完全是偶然的，以致於現在我們說電子帶負電，而引起在導體與真空管中有電流與電子流的說法，如當初富蘭克林作了一個相反的選擇，則現今在處理上述問題時當會覺得更方便些了。正負電荷與正負數不同，二者是無法比較的，譬如一個正數與其負數的乘積為其平方的負數，而兩個電荷相乘，其積並非為電荷，這一點我們該加以注意。我們的宇宙是這一些“正”“負”電荷的混合體，由於同類相斥、異類相吸的緣故，這種混合必然是很均勻的。因此對整個宇宙講，它的電性是中性的。

上面說到祇有正負兩種電荷的存在，可說是電荷的一個基本性質。電荷的另外兩個性質是：一為“電荷守恒定律”，即在隔離系統中的總電荷（正負電荷的代數和）永遠不變。另一為“電荷是量子化的”，也就是有基本電荷的存在。電荷量子化的問題不在古典電磁學的範圍內，我們通常將它忽視，而認為一個帶電粒子可帶有任何數量的電荷。

手握金屬棒並以毛皮摩擦，似乎不會產生電荷，但若在握手處加以玻璃或硬橡皮棒後，再摩擦之，則金屬棒便能帶電。其因乃由於金屬，人體與地球是電的導體（conductor）；玻璃、硬橡皮與塑膠等是絕緣體（insulator），亦稱為介電質（dielectrics）。在導體中電荷能經物質而自由移動，而在絕緣體中則否。

13-2 庫倫定律

公元1785年，庫倫（Charles Augustin de Coulomb）首先就數量方面測量電的吸引和排斥作用，並推導且決定其間關係之定律。他所用的儀器稱為扭秤，如圖13-2所示。當小球 a 與小球 b 帶電時，由於 a 球上所受之電力將使懸線纖維扭轉。庫倫將懸頭轉動一 θ 角度以抵消此電力扭轉作用，而保持此兩電荷間在特定的相隔距離，這個 θ 即可用來表示 a ， b 間作用力的大小。由實驗的結果直接

或間接地證實了下列五點：

I 由於相互間的吸引力或排斥力得知電荷的存在。

II 電荷有兩種。同性的相斥；異性的相吸，且作用力必沿二帶電粒子連線的方向上，因為在空的 (Empty) 及無向性的 (Isotropic) 空間，兩個點電荷間的作用力是不可能沿着其他的方向的。

III 兩點電荷間的作用力與其相隔距離的平方成反比。

IV 兩點電荷間的作用力與其電量的乘積成正比。

V 兩點電荷間的作用力不因其他電荷的存在而有所影響。

由以上所述知，二個靜止電荷間之作用力可以庫倫定律 (Coulomb's law) 來表示：

$$\mathbf{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2 \hat{\mathbf{r}}_{21}}{|\mathbf{r}_{21}|^2} \quad (1)$$

上式中的 q_1 與 q_2 表各相應電荷的值並包含其符號； $\mathbf{r}_{21}$ 是由電荷 1 指向電荷 2 的單位向量； $\mathbf{F}_{21}$ 是電荷 1 作用於電荷 2 上的力，(1) 式很明白的顯示出同性相斥，異性相吸的這個事實，同是也指出了這種力是牛頓力 (Newtonian force)，即 $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$ ； $|\mathbf{r}_{21}| = r_{21}$ 是兩電荷間的距離，(1) 式中的兩個荷電粒子的電荷都是集中的，也就是說，它們分佈的範圍遠較 r_{21} 小，不然則 r_{21} 就無法被確定，以至 (1) 式不能成立，且 (1) 式中的電荷應為靜止的，因為運動的電荷將產生磁力。

(1) 式中的常數 k 是看我們用什麼單位制度而定的。



圖 13-2 庫倫的扭秤

在MKS制中， q 的單位爲庫倫， r 爲公尺， F 爲牛頓則這個數值 k 由實驗所得的公認值爲：

$$\begin{aligned} k &= 8.9875 \times 10^9 \text{ 牛頓} \cdot \text{米}^2 / \text{庫倫}^2 \\ &\simeq 9 \times 10^9 \text{ 牛頓} \cdot \text{米}^2 / \text{庫倫}^2 \end{aligned}$$

在一般應用上，比例常數 k 常被寫成

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

如此則可使由庫倫定律所導得的其他電磁學公式更爲簡潔些。因此，庫倫定律通常被寫成下式的形式：

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

ϵ_0 稱爲真空中之“容電常數”(permittivity constant)，其值爲

$$\epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} \text{ 庫倫}^2 / \text{牛頓} \cdot \text{米}^2$$

庫倫定律中有物理意義的部分祇是平方反比關係以及電荷效應的可加性(additivity)。實驗的結論告訴我們，庫倫定律從 10^{-13} 厘米到幾公里的範圍內是可以適用的。我們不必爲這似不夠精細的實驗(圖13-2)結論而憂慮，我們大可放心的將它當作我們描述電磁現象的基礎。

例1. 如圖13-3所示，三個電荷排成一直線，試求每個電荷所受力。

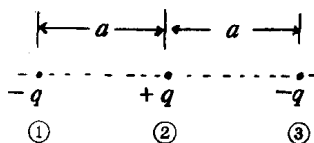


圖 13-3

解：由於靜電力是聯心力，故每

一個電荷所受之力，必沿電荷排列之直線上，設我們定力的方向向右爲正，向左爲負。則由重疊原理知，每一電荷所受之力爲其它兩個電荷對它所施力的向量和。故每一電荷所受之力 F_1 ， F_2 ， F_3 分別爲

$$\begin{aligned} F_1 &= F_{12} + F_{13} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{a^2} + \left(-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{4a^2} \right) \\ &= \frac{3}{16\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{a^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 &= F_{21} + F_{23} \\ &= -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{a^2} + \left(+\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{a^2} \right) = 0 \end{aligned}$$

$$F_3 = F_{31} + F_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{4a^2} + \left(-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{a^2} \right) = -\frac{3}{16\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{a^2}$$

13-3 電場觀念

在法拉第之前的時代，人們認爲荷電質點間之作用力爲二質點間之直接與瞬時的互相作用。這種超距作用 (action at a distance) 的觀念要求兩電荷間作用力之傳遞是不需要費任何時間的，而這要求與實驗並不符合。爲了避免這種超距作用的觀念，我們提出電場 (electric field) 的觀念來分析力。在圖 13-4 中 P 與 R 處分別有二個電荷 q_1 與 q_2 ，其相互間之作用力可由庫倫定律表之。

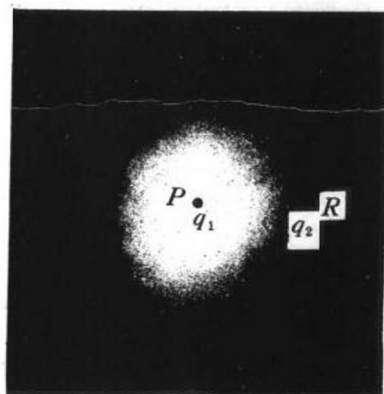


圖 13-4 電荷 q_1 建一電場，施力 F 於電荷 q_2

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}$$

如用電場的觀念來分析這個問題時，我們就說： P 處的電荷 q_1 在 R 處產生了一種“狀況”，當你將 q_2 置於 R 處時，它就“感受”到一個力。用這一種方式來描述力時，我們可以將力 $\mathbf{F}$ 分成二部分，就是 q_2 乘上一個由 q_1 所產生的“狀況”之量 $\mathbf{E}$ ，這個 $\mathbf{E}$ 是不論有沒有 q_2 它都存在的，而 $\mathbf{F}$ 就是 q_2 對 $\mathbf{E}$ 的反應。 $\mathbf{E}$ 稱為電場，它是一個向量，它的單位是力的單位除以電量的單位，如牛頓／庫倫，亦可用伏特／米來表示。因此現在我們以

$$\text{電荷} \rightleftharpoons \text{電場} \rightleftharpoons \text{電荷}$$

的觀念來考慮問題，而不以超距作用的觀念

$$\text{電荷} \rightleftharpoons \text{電荷}$$

來處理問題。

13-4 點電荷的電場

由前節的討論我們得知：點電荷 q 在距其 r 距離處之某點所建立的電場強度 $\mathbf{E}$ ，為當另一單位檢驗電荷 q_0 置於該點時其所受之力 $\mathbf{F}$ 。即

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{\mathbf{F}}{q_0} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{E}$ 的方向在 q 與 q_0 之連線上，若 q 為正則指向外；若 q 為負則指向 q ；即 $\mathbf{E}$ 是指向負電荷而離開正電荷的（圖13-5）。

欲求一群點電荷所建立的電場強度 $\mathbf{E}$ ，則應先求得每一點電荷在該處所建立的電場強度 $\mathbf{E}_i$ ，然後再求彼等之向量和即得。

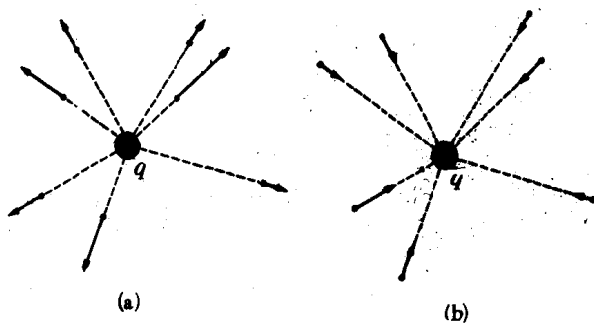


圖 13-5 正電荷與負電荷所產生的電場

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E} &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n \\
 &= \Sigma \mathbf{E}_i \\
 &= \Sigma \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i
 \end{aligned}$$

若為連續分佈之電荷，則其在任何點 P 所建立之電場，可先將電荷分成許多無限小之基素 dq ，利用(2)式求得 dq 在該點所建立的電場 $d\mathbf{E}$ 為

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2}$$

式中 r 為 dq 至 P 的距離。故在 P 點的總電場 $\mathbf{E}$ 將上式積分即得

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} \quad (4)$$

這個積分是向量積分，通常處理起來是相當麻煩的，但在某些具有對稱性的電荷分佈問題中，上式向量積分可簡化為一般的積分。

例2. 電雙極 (electric dipole) 是由兩個大小同為 q 的正負電荷相距為 $2a$ 所構成，如圖 13-6 所示。試求圖中 P 點處由二點電荷所建立之電場為何？

$$\begin{aligned} \text{解：} \because E_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2} = E_2 \\ \therefore E &= |\mathbf{E}| = |\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2| \\ &= 2E_1 \cos \theta \\ &= \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2aq}{(a^2 + r^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

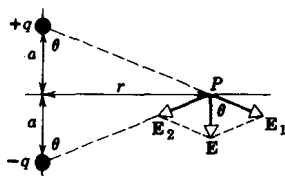


圖 13-6

即在 P 處之電場為垂直向下 (亦即與自 $-q$ 至 $+q$ 之連線相平行)，大小如上式所示。

若 $r \gg a$ ，則上式化為

$$E \simeq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{P}{r^3}$$

式中 $P = (2a)q$ 叫做該電雙極的電雙極矩 (electric dipole moment)，我們可將 P 看作向量，方向為自負電荷至正電荷。

由上式可知， E 與 P 成正比。即自離電雙極各不同距離處所測得之 E ，不能分別推求得 q 與 $2a$ 各為若干；若 q 加倍同時 a 減半，則在距電雙極甚遠處的電場不會改變的。又如電雙極中兩相等而電性相反的二電荷雖置於相距甚近之處，而其在遠處各自所生之電場幾乎抵消，但並未完全抵消，此可由電雙極在遠處所建立之電場與 r^{-3} 成正比，而點電荷則與 r^{-2} 成正比可看出來。