

Halliday · Resnick

Physics

物理學

第三冊

譯者

王唯農

王明建 蔡正治

東華書局印行

73

物理學

第 三 冊

著 者

雷 士 勒 霍 立 德

譯 者

王 唯 農

王 明 建 蔡 正 治

東 華 書 局 印 行



版權所有·翻印必究

中華民國五十七年三月初版
中華民國六十八年三月十二版

大學
用書 物 理 學

第三冊 定價新台幣六十元整

(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 蔡正治

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

(56029)

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 = 1.86×10^8 哩/秒
質量能量關係	$c^2 (=E/m)$	931Mev/amu = 8.99×10^{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 = 1.99 卡/摩爾 °K = 0.0823 升 atm/摩爾 °K
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
蒲朗克常數	h	6.63×10^{-34} 焦耳秒
基本電荷	e	1.60×10^{-19} 庫侖
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} 庫侖/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

Handwritten note:

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)	$9.81 \text{ 米/秒}^2 = 32.2 \text{ 呎/秒}^2$
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
冰的熔點	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	5892 Å
水的折射率(@ 5892 Å)	1.33
冕牌玻璃的折射率(@ 5892 Å)	1.52

原書下冊序

物理學下冊爲 Physics for Students of Science and Engineering 一書第二版之修訂本。在這本下冊之(1966)新版中,有下列之修正:

1. 提供 142 則補充習題。此等習題經慎密安排,與原有之大量習題配合,興趣範圍和艱難程度較前有更廣泛之選擇。
2. 馬克士威方程式的微分形式和電磁波方程式已新編爲補充題材,供討論此較深材料參考之用。
3. 原有附錄已予擴大及現代化,并添加若干新材料,以增加此等參考材料的效用和準確。本書首尾之襯頁已隨之改變。
4. 頁數標記參考數字,符號和單位必要者均已更改,以使新上冊和修訂之下冊一致。

譯 本 序

在 1960 年霍立德與雷士勒合著之 *Physics for Students of Science and Engineering* 問世，1962 年將下冊予以修正，發行以來，已被普遍採用。本年又將上冊大量修改，並更名爲 *Physics*；全書對物理學之基本觀念，古典力學的適用範圍，及近代物理學的基本概念，均予深入闡釋及討論。數學方面全部用向量和微積分，程度大爲提高。最近二十年來，物理學發展之範圍甚廣，進步亦大，本書取材新穎，立論精闢，頗能適合近年教學之需。國外著名大學如哈佛，麻省理工等校均採用此書。爲便利國內學生易於閱讀並能徹底了解起見，故予譯述。

全書譯文，盡量接近原文字義，流暢通順爲原則；但在艱澀之處，則以淺近之中文句法表達，而不失物理意義爲主。所有名詞翻譯，以教育部公布之物理學名詞爲準，其原文字義變更，及新生名詞未及列入者，均按其物理意義，予以訂定，務使文意相符，簡明劃一爲原則。書內對甚多高深論題，歷史敘述及哲理解說，均以小字排印，屬於選用教材，可酌情決定取捨。

本書譯校，以時間短促，疏漏之處難免，尚祈教師及讀者諸君隨時指正，俾於再版時修訂，至深感荷。

王唯農 王明建 蔡正治 謹識

五十七年二月於國立清華大學

物 理 學

第 三 冊 目 次

第二十六章 電荷與物質 1~14

- | | |
|--------------|------------|
| 26-1 電磁學——前言 | 26-2 電荷 |
| 26-3 導體和絕緣體 | 26-4 庫侖定律 |
| 26-5 電荷量子化 | 26-6 電荷和物質 |
| 26-7 電荷守恒 | |

第二十七章 電 場 15~33

- | | |
|--------------|---------------|
| 27-1 電場 | 27-2 電場強度 E |
| 27-3 力線 | 27-4 E 之計算 |
| 27-5 電場中之點電荷 | 27-6 電場中之雙極 |

第二十八章 高斯定律 34~52

- | | |
|-------------------------|---------------|
| 28-1 電場通量 | 28-2 高斯定律 |
| 28-3 高斯定律和庫侖定律 | 28-4 絕緣之導體 |
| 28-5 高斯定律和庫侖定律
的實驗證明 | 28-6 高斯定律——應用 |
| 28-7 原子的核模型 | |

第二十九章 電 位 53~78

- | | |
|-------------|--------------|
| 29-1 電位 | 29-2 電位和電場強度 |
| 29-3 點電荷之電位 | 29-4 點電荷羣 |

- | | |
|-------------------|------------|
| 29-5 電雙極之電位 | 29-6 電位能 |
| 29-7 由 V 計算 E | 29-8 絕緣之導體 |
| 29-9 靜電發電機 | |

第三十章 電容器和介電質 79~103

- | | |
|----------------------|----------------|
| 30-1 電容 | 30-2 計算電容 |
| 30-3 有介電質之平行板
電容器 | 30-4 介電質——原子觀點 |
| 30-5 介電質與高斯定律 | 30-6 三個電向量 |
| 30-7 儲於電場中之能量 | |

第三十一章 電流與電阻 104~119

- | | |
|---------------|-----------------|
| 31-1 電流和電流密度 | 31-2 電阻、電阻率和導電率 |
| 31-3 歐姆定律 | 31-4 電阻率——原子觀點 |
| 31-5 電路中之能量轉換 | |

第三十二章 電動勢與電路 120~141

- | | |
|-------------|---------------|
| 32-1 電動勢 | 32-2 計算電流 |
| 32-3 其他單迴電路 | 32-4 電位差 |
| 32-5 多迴電路 | 32-6 測量電流和電位差 |
| 32-7 電位計 | 32-8 RC 電路 |

第三十三章 磁 場 142~168

- | | |
|-------------|---------------|
| 33-1 磁場 | 33-2 B 之定義 |
| 33-3 電流上之磁力 | 33-4 電流迴路上之力矩 |
| 33-5 霍爾效應 | 33-6 環行之電荷 |
| 33-7 迴轉加速器 | 33-8 湯姆孫實驗 |

第三十四章 安培定律 169~191

- | | |
|-----------|-----------------|
| 34-1 安培定律 | 34-2 長導線附近之 B |
|-----------|-----------------|

- 34-3 磁感應線
34-5 螺線管之 B
- 34-4 兩平行導體
34-6 畢奧——沙瓦定律

第三十五章 法拉第定律192~217

- 35-1 法拉第實驗
35-3 楞次定律
35-5 時變磁場
35-7 感應與相對運動
- 35-2 法拉第感應定律
35-4 感應——量的研究
35-6 貝他加速器

第三十六章 電感218~232

- 36-1 電感
36-3 LR 電路
36-5 能量密度與磁場
- 36-2 電感的計算
36-4 能量與磁場

第三十七章 物質之磁性233~257

- 37-1 磁極與磁雙極
37-3 順磁性
37-5 鐵磁性
37-7 三種磁向量
- 37-2 磁學之高斯定律
37-4 抗磁性
37-6 原子核磁性

第三十八章 電磁振盪258~283

- 38-1 LC 振盪
38-3 電磁振盪——數量方面
38-5 集結基素和分佈基素
38-7 感應磁場
38-9 馬克士威方程式
- 38-2 與簡諧運動之類比
38-4 強迫振盪和共振
38-6 電磁空腔振盪器
38-8 位移電流
38-10 馬氏方程式和空腔振盪

第三十九章 電磁波284~302

- 39-1 輸電線
39-3 波導管
- 39-2 同軸電纜——場和電流
39-4 輻射

39-5 進行波和馬克士威 39-6 坡印亭向量
方程式

附錄 單號習題解答.....303~307

第二十六章

電荷與物質

26-1 電磁學——前言

電學的知識以觀察為其根源，公元前 600 年 Miletus 城的 Thales 即知摩擦過的琥珀會吸引稻草屑。磁學的研究溯及對天然“石塊”(即磁鐵礦)會吸引鐵之觀察。這兩種科學各自發展；直到 1820 年奧斯特(Hans Christian Oersted 1777-1851)才觀測到二者間之關係，即導線中電流能影響羅盤的磁針(第 33-1 節)。

電磁學係新的科學，由許多研究者予以發展，法拉第 (Michael Faraday 1791-1867) 是其中最重要者之一。馬克士威 (James Clerk Maxwell 1831-1879) 將電磁學的定律成為今日我們所知的形式，這些定律常稱為馬克士威方程式 (Maxwell's equations)，列於表 38-3 中，可供參考。這些定律在電磁學中之重要性，與牛頓的運動定律和重力定律在力學中之重要性相同。

雖然馬氏的電磁綜合理論深賴前輩的研究，但他自己的貢獻仍具主要和重大性。馬氏推論光是電磁的性質，且光速能純粹由電和磁的量度而得，故光學的知識與電學和磁學的知識有密切關係。馬氏方程式的應用範圍實屬非凡，它包括所有大尺度之電磁和光學器具的基本原理，諸如電動機、迴轉加速器、電子計算機、無線電、電視、微波雷達、顯微鏡和望遠鏡。

古典電磁學的發展並未隨馬氏而終止，英國物理學家 Oliver Heaviside (1850-1925)，特別是荷蘭物理學家羅倫茲 (H. A. Lorentz 1853-1928) 對蘭明馬氏理論均有重要貢獻。在馬氏創立其理論之後二十餘年，赫茲 (Heinrich Hertz 1857-1894)* 在實驗室中產生電磁的“馬氏波”，即今日所稱之無線電短波，使電磁學前進一大步。其後馬可尼和其他學者將馬氏和赫茲的電磁波作實際之應用。

目前電磁學之趣旨有二方式。在工程應用方面，馬氏方程式經常普遍地用以解決極多種類之應用問題。在理論基礎方面，人們繼續努力擴展其境域，使電磁學成為更一般性理論的特例。此種一般性理論也包括(譬如)重力和量子物理學的原理

* * 參閱 P. Morrison 和 E. Morrison 合著之“Heinrich Hertz”，刊於 Scientific American, 1957 年十二月號。

論，惟這種偉大的綜合理論尙未完成。

26-2 電 荷

本章以下討論電荷及其與物質之關係。以絲絹摩擦玻璃棒，再以長絲線懸棒，如圖26-1，顯示有兩種電荷。若第二玻璃棒以絲絹摩擦後，持近第一棒經摩擦之端，則二棒互相推斥。另一方面，用毛皮摩擦過之硬橡皮棒會吸引玻璃棒，但用毛皮摩擦之二硬橡皮棒會互相推斥。解釋這些現象，可謂摩擦一棒而給棒以電荷，而且二棒上之電荷互相施力。顯然在玻璃棒上之電荷與硬橡皮棒上之電荷必定性質不同。

第一位美國的物理學家富蘭克林(Benjamin Franklin 1706-1790)有多方面的成就，他將玻璃棒上之電荷稱為正電，硬橡皮棒上之電荷稱為負電；此二名稱沿用迄今。綜結這些實驗，結論為同電荷相推斥，不同電荷相吸引。

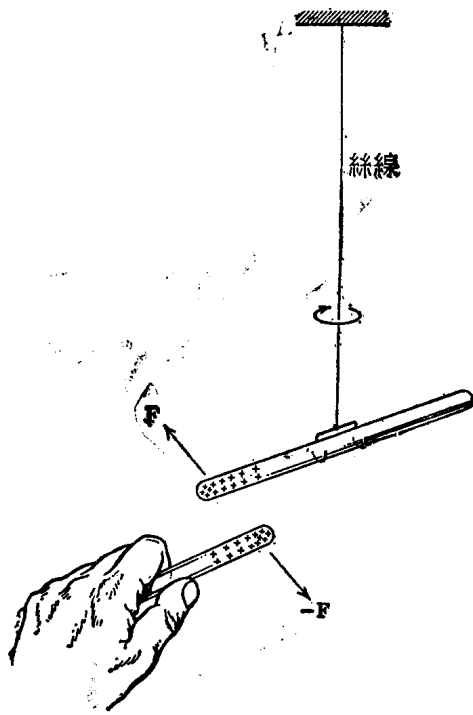


圖 26-1 帶正電荷之二玻璃棒互相推斥。

電的效應並不限於以絲絹摩擦之玻璃，或以毛皮摩擦之硬橡皮。在適當情況任何物質以任何其他物質摩擦後，多少會帶些電荷；將正負不知的電荷與帶電荷之玻璃棒或硬橡皮棒比較，能定其為正電或負電。

大形物質在其正常或中性狀態時，近代觀點是該物質含有等量之正電和負電。若像玻璃和絲絹之二物體相互摩擦，則少量電荷自一物體轉移至另一物體，因而打破各物體的電中性 (electric neutrality)，此時玻璃變為正電性，絲絹為負電性。

26-3 導體和絕緣體

手握金屬棒並以毛皮摩擦，似乎不會產生電荷，但若加以玻璃或硬橡皮柄，摩

擦時金屬不與手接觸，則金屬棒能帶電荷。解釋如下：金屬、人體和地球是電的導體 (conductor)，玻璃、硬橡皮、塑膠等是絕緣體 (insulator)，亦稱介電質 (dielectrics)。

在導體中電荷能經物質而自由移動，然在絕緣體中則否。世上雖無完全的絕緣體，但熔融石英的絕緣性約為銅的 10^{25} 倍，故就許多種實用目的言，若干材料可視為完全絕緣體。

對金屬之一種相當巧妙的實驗叫做霍爾效應 (詳第 33-5 節)，該實驗顯示只有負電荷自由移動，而正電荷不易移動，如同在玻璃或在任何其他介電質中一樣。在金屬中實際之電荷載體 (charge carrier) 是自由電子。當諸孤立原子結合成為金屬固體，原子的外層電子不再與個別原子相連，而在整個固體中自由運動。至於有些導體，如電解質 (electrolytes)，正電荷和負電荷均能移動。

有類材料叫做半導體 (semiconductor)，其導電本能介於導體與絕緣體之間，元素中矽和鎢是熟知之例。在半導體中加入極少量之其他元素，其導電性常能大量增加；因此之故，矽中常加入微量之砷或硼。半導體應用極多，如用於電晶體的製作。欲充分敘述半導體作用的方法，應對量子物理學的基本原理相當了解。

26-4 庫倫定律

在 1785 年，庫倫 (Charles Augustin de Coulomb 1736-1806) 首先就數量方面測量電的吸引和推斥，並推導決定其間關係之定律。所用儀器示如圖 26-2，與圖 26-1 的懸棒類似，只是在圖 26-2 中之電荷集於小球 a 和 b 上。

若 a 和 b 帶有電荷，則 a 球上之電力將使懸線纖維扭轉。庫倫 將懸頭轉動角度 θ 以消除此電力扭轉作用，而保持兩電荷在特定之相隔距離，則角度 θ 為測量作用於電荷 a 之電力的相對標準。圖 26-2 的儀器稱為扭秤，與以後卡文狄西用以測量重力吸引之裝置相像 (第 16-3 節)。

最初庫倫的實驗結果可表之為

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

F 是作用於電荷 a 和 b 上各力的大小， r 是其間之距離。如牛頓第三定律所要求，此二力沿電荷之連線而作用，但朝相反方向。注意即使電荷或許不同，各電荷受力的大小仍相同。

庫倫又研究當球上電荷的相對大小改變時，電力如何變化。例如若將帶電荷之導體球與完全相似但不帶電荷之導體球接觸，原有電荷應由二球平分。以此方法，

庫侖將平方反比關係擴張為

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (26-1)$$

q_1 和 q_2 是球 a 和 b 上電荷的相對大小。式 26-1 稱為庫侖定律；僅當帶電物體的大小遠小於其相互間之距離時方成立，我們常謂僅對點電荷成立。

庫侖定律與重力的平方反比定律類似，重力定律比庫侖實驗之時間早百餘年； q 即相當於重力定律中之 m 。然而重力總是吸引力；這相當於電有兩種而（顯然）質量只有一種。

對庫侖定律的信賴並不在數量上依靠庫侖的實驗。用扭秤之量度難使精密度達到百分之幾以內，這種量度不能使人信服如式 26-1 中之指數恰為 2，而不是 2.01。在 28-5 節將說明由間接的實驗推得庫侖定律，該實驗顯示 26-1 式中之指數約在 2.000000002 與 1.999999998 的限度內，此限度區間太小，故常定指數恰為 2。

前已建立電荷的物理概念，但尚未定義測量電荷的單位。欲定其單位，可將相等之電荷 q 置於扭秤的二球上，當二電荷相距 r 時，測量作用於各球之力的大小 F 。當二電荷相隔為單位距離時，若單位之力作用於各球，即可定義 q 為單位之值，並對如此定義之電荷單位定一名稱。*

為量度精確的緣故，mks 制之電荷單位不用扭秤定義，而自電流的單位導得。若一長導線兩端與電池的兩極相連，可

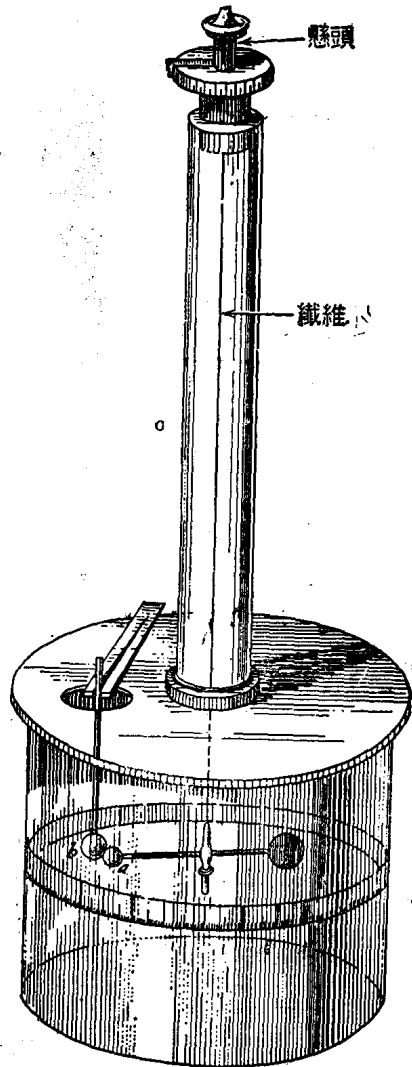


圖 26-2 庫侖的扭秤，採自 1785 年他送呈法國科學院之論文。

* 依照這種辦法而定義之電荷單位稱為靜庫侖 (statcoulomb)，但本書不用這種單位或包括這種單位的單位制，參閱附錄 L。

知導線中產生電流 i ，此電流視為電荷的流動。電流的 mks 單位是安培 (ampere, 縮寫為 amp)，在第 34-4 節將敘述定義安培之操作步驟。

電荷的 mks 單位是庫侖 (縮寫為 coul)，若在導線中有一安培的穩定電流，則在一秒鐘內流過導線某截面之電荷的量，定為一庫侖。以符號表之為

$$q = it, \quad (26-2)$$

若 i 以安培和 t 以秒為單位，則 q 之單位為庫侖。故若導線連一絕緣之金屬球，在 10^{-6} 秒內導線之電流為 1.0 amp，則可置於球上之電荷為 10^{-6} 庫侖。

► 例 1. 銅幣質量為 3.1 克，含有等量之正電和負電，故呈電中性。其電荷的大小 q 為若干？一個銅原子有原子核正電荷為 4.6×10^{-18} 庫侖，和大小相等之電子負電荷。

銅幣中銅原子的數目 N 為

$$\frac{N}{N_0} = \frac{m}{M}$$

N_0 是亞佛加德羅常數， m 是銅幣的質量， M 是銅的原子量。解 N 得

$$N = \frac{(6.0 \times 10^{23} \text{ 原子/摩爾})(3.1 \text{ 克})}{64 \text{ 克/摩爾}} = 2.9 \times 10^{22} \text{ 原子。}$$

電荷 q 為

$$q = (4.6 \times 10^{-18} \text{ 庫侖/原子})(2.9 \times 10^{22} \text{ 原子}) = 1.3 \times 10^5 \text{ 庫侖。}$$

在 100 瓦特 110 伏特之電燈泡中電流為 0.91 安培，讀者應證明上式電荷之量流經此燈泡需時 40 小時。

式 26-1 插入比例常數即可寫成等式，該比例常數不寫為 k ，通常寫成 $1/4\pi\epsilon_0$ 之較複雜形式，即

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (26-3)$$

有些方程式由式 26-3 導得，但較上式更常使用；若寫成上式之形式，則導得之式其形式反較簡單。

在 mks 制中，可測量式 26-3 中之 q_1 、 q_2 、 r 和 F ，而其方法並不依靠庫侖定律。可將這些量定以數字及單位。 ϵ_0 稱為容電常數 (permittivity constant)，此常數並無選擇餘地；其值應使 26-3 式的右邊等於左邊。此常數之 (測得) 值為*

$$\epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} \text{ 庫侖}^2/\text{牛頓米}^2。$$

在本書中取其值為 8.9×10^{-12} 庫侖²/牛頓米²，對所有問題言已够精確。至於庫侖定律的直接應用，或在有量 $1/4\pi\epsilon_0$ 出現之任何問題中，可用

* 由於實用之故，此值實際不是直接應用式 26-3 測得，而是用相當但較曲折的方法，在第 30-2 節將述及。

$$1/4\pi\epsilon_0 = 9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫侖}^2,$$

在本書中用此值够稱精確。

► 例 2. 設銅幣中之總正電荷與總負電荷分開一距離, 使二者之吸引力為 1.0 磅 (= 4.5 牛頓), 則應相距多遠?

用式 26-3

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

令 $q_1 q_2 = q^2$ (見例 1) 並解 r 得

$$\begin{aligned} r &= q \sqrt{\frac{1/4\pi\epsilon_0}{F}} = 1.3 \times 10^5 \text{ 庫侖} \sqrt{\frac{9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫侖}^2}{4.5 \text{ 牛頓}}} \\ &= 5.8 \times 10^9 \text{ 米} = 3.6 \times 10^6 \text{ 哩。} \end{aligned}$$

由此可知大形物體的電中性無法大量改變。若本例之二電荷於相距 1.0 米處, 則其間之力為若干?

若有兩個以上之電荷出現, 式 26-3 對每對電荷仍成立。設電荷為 q_1, q_2 和 q_3 等; 由向量方程式計算所有其他電荷施於任一電荷 (設為 q_1) 之力, 即

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots, \quad (26-4)$$

\mathbf{F}_{12} 為 q_2 施於 q_1 之力, 餘均類似。

► 例 3. 圖 26-3 陳示三電荷 q_1, q_2 和 q_3 , 作用於 q_1 之力為若干? 設 $q_1 = -1.0 \times 10^{-6}$ 庫侖, $q_2 = +3.0 \times 10^{-6}$ 庫侖, $q_3 = -2.0 \times 10^{-6}$ 庫侖, $r_{12} = 15$ 厘米, $r_{13} = 10$ 厘米, $\theta = 30^\circ$ 。

因只注重諸力的大小, 可不計較電荷的符號, 由式 26-3 得

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫侖}^2)(1.0 \times 10^{-6} \text{ 庫侖})(3.0 \times 10^{-6} \text{ 庫侖})}{(1.5 \times 10^{-1} \text{ 米})^2} \\ &= 1.2 \text{ 牛頓} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{及 } F_{13} &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫侖}^2)(1.0 \times 10^{-6} \text{ 庫侖})(2.0 \times 10^{-6} \text{ 庫侖})}{(1.0 \times 10^{-1} \text{ 米})^2} \\ &= 1.8 \text{ 牛頓。} \end{aligned}$$

力 \mathbf{F}_{12} 和 \mathbf{F}_{13} 的方向如圖所示。

作用於 q_1 之合力 \mathbf{F}_1 的二分量 (見式 26-4) 為

$$\begin{aligned} F_{1x} &= F_{12x} + F_{13x} = F_{12} + F_{13} \sin \theta \\ &= 1.2 \text{ 牛頓} + (1.8 \text{ 牛頓})(\sin 30^\circ) = 2.1 \text{ 牛頓,} \end{aligned}$$

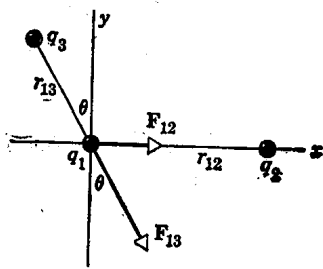


圖 26-3 例 3. 圖示 q_2 和 q_3 施於 q_1 之力。