

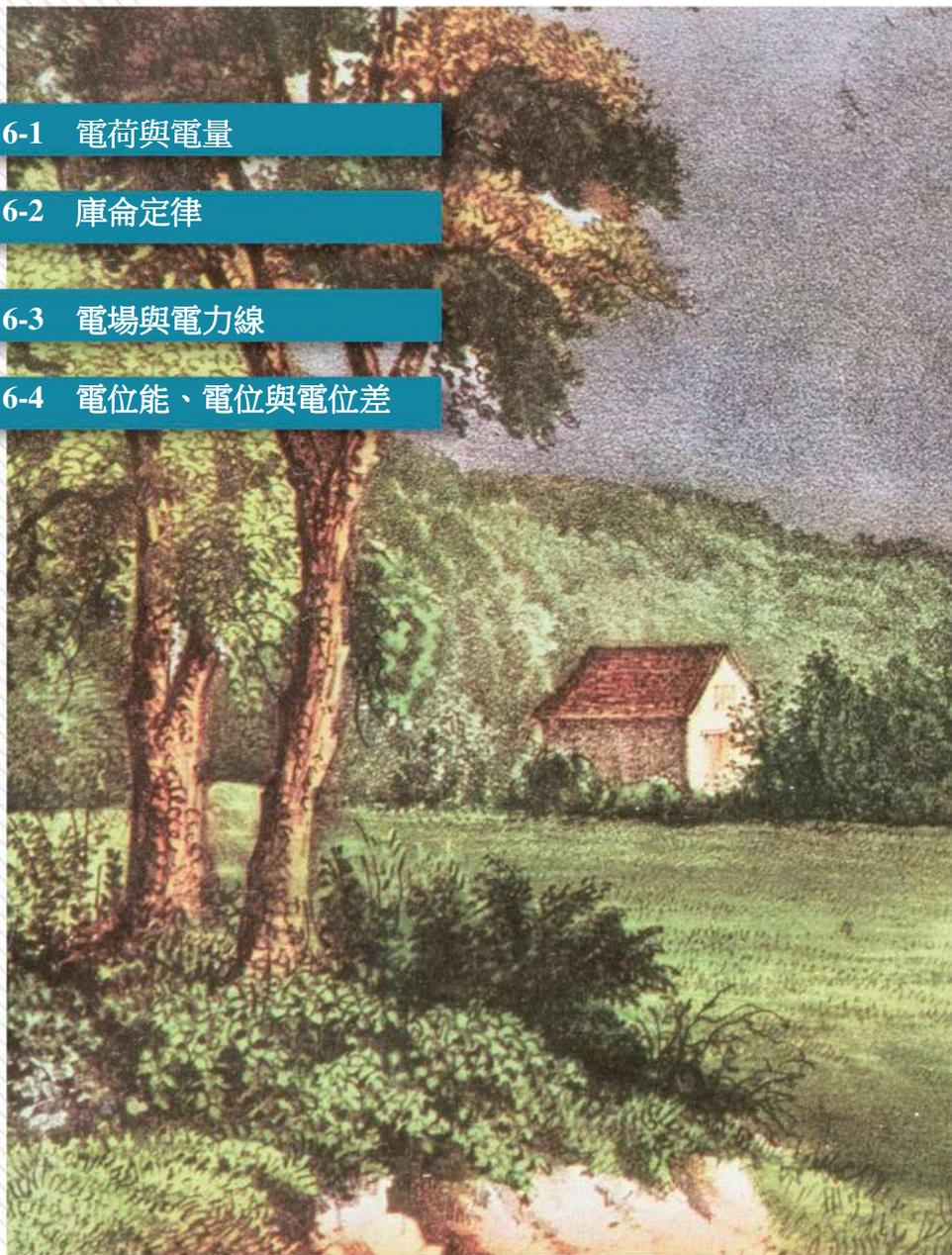
靜電學

6-1 電荷與電量

6-2 庫侖定律

6-3 電場與電力線

6-4 電位能、電位與電位差



普羅米修斯把火引到人間，但那只是神話。但是把神秘的雷電從雲端引到地面的卻真有其人，那就是富蘭克林。



The electrical matter consists of particles extremely subtle since it can permeate common matter, even the densest, with such freedom and ease as not to receive any perceptible resistance.

組成帶電物質的粒子非常微妙，因為它可以滲透一般物質，即使是在最緻密的物質中，也能如此輕鬆與自由而感覺不到任何阻力。

— 密立坎 (Robert A. Millikan, 1868-1953)

在乾燥的天氣，當孩童從溜滑梯滑下時，孩童的頭髮末端常會豎起（圖 6-1）；將塑膠尺與身上的乾燥衣服摩擦幾次，尺就能吸引小紙片，這些都是容易見到的靜電效應。早在西元前六世紀，希臘人就知道摩擦後的琥珀可以吸引小物體。但直到 1600 年，才有英國人吉爾伯特（William Gilbert, 1544 - 1603）發表有系統的研究成果，他稱這種現象為摩擦帶電（triboelectrification），而「電」這個名字便一直沿用至今。



▲圖 6-1 當孩童從溜滑梯上溜下，衣服與塑膠滑梯之間相互摩擦產生靜電使頭髮末端相互排斥而豎起。

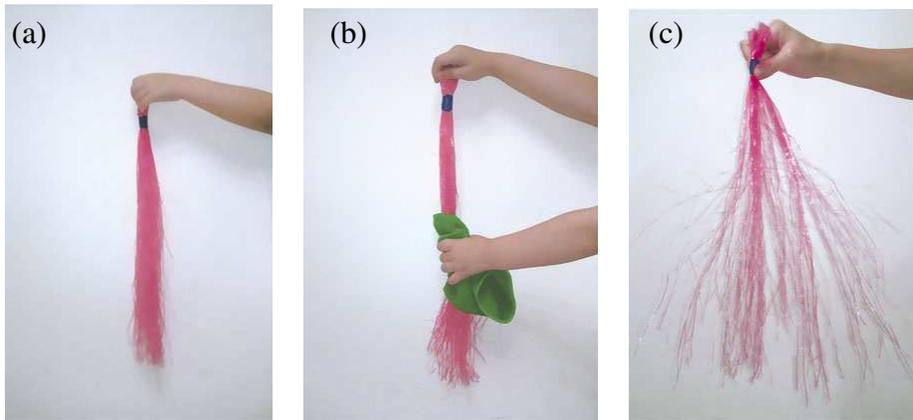
1785 年，法國人庫倫（Charles Coulomb, 1736 - 1806）利用所發明的扭秤作實驗，發現了靜止電荷間交互作用力的關係。此後，靜電學理論開始有了較大的進展，到十九世紀初，靜電學的理论可以說已相當完備。因為對電的性質及其知識了解得愈清楚，我們愈能妥善地利用電來促進生活中的便利。本章將介紹靜電的基本知識，並舉例說明靜電原理的應用。

6-1 電荷與電量

原本不帶電的塑膠吸管，用布料摩擦後便帶電了，且可以吸引小紙片（圖 6-2）。在圖 6-3 中，用布料摩擦原本不帶電的塑膠絲，因為摩擦後塑膠絲彼此間的電性相同，所以會相互排斥；若是將兩個電性相反的物體靠近，則會相互吸引。1747 年，美國人富蘭克林（Benjamin Franklin, 1706 - 1790）首先將帶電物體區分為正、負電兩種，例如，玻璃棒用絲絹摩擦後，玻璃棒上帶「正電荷」，絲絹則帶「負電荷」。



▲圖 6-2 帶電的塑膠吸管吸引紙片。



▲圖 6-3 電性相同的塑膠絲會相互排斥：(a)不帶電的塑膠絲受重力作用呈現下垂狀；(b)用布料摩擦塑膠絲；(c)摩擦後帶同性電的塑膠絲彼此排斥。

隨著二十世紀近代物理學的革命性進展，我們瞭解組成物質的原子是由原子核和核外的電子所構成，原子核由帶正電的質子與不帶電的中子組成。原子核質量較大且不易移動；而電子帶負電，質量很小且容易移動。原來電中性的甲、乙兩物體互相摩擦時，兩物體的原子獲得能量，若甲物體的電子脫離束縛而轉移到乙物體上，如圖 6-4 所示，則乙物體獲得電子而



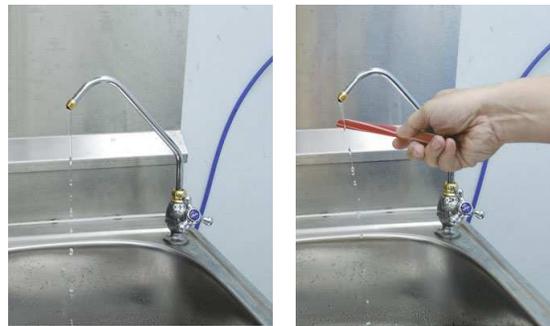
▲圖 6-4 相互摩擦後，甲物體失去電子而帶正電，乙物體獲得電子而帶負電。圖中藍色粒子代表電子。

帶負電，而甲物體因為失去電子而帶正電，這就是物體摩擦後能帶電的原理。此外，因為甲、乙兩物體形成的系統與外界沒有任何電荷的轉移，所以甲物體與乙物體總是產生等量的異性電，也就是系統內的總電量是不變的，此稱為**電荷守恆**（charge conservation）。

根據 SI 制，電量的單位稱為庫侖（coulomb，符號記為 C）。從實驗測量中可知質子與電子所帶的電量均為 1.6×10^{-19} 庫侖。若物體內的質子與電子數目不相等，則物體具有電性，稱為帶電體。帶電體所攜電

量必為 1.6×10^{-19} 庫侖的整數倍，將 1.6×10^{-19} 庫侖稱為自然界中電量的基本單位 e ，即 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 庫侖。

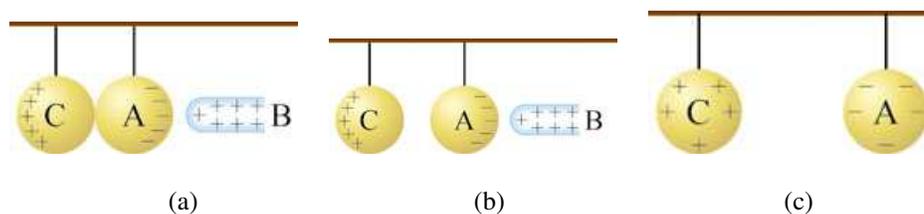
將摩擦後的塑膠吸管靠近水柱，電中性的水柱會被帶電的吸管所吸引（圖 6-5），這是為什麼呢？當帶電體靠近電中性的物體時，物體上靠近帶電體的一端會產生感應異性電荷，而相距較遠的一端則產生感應同性電荷，這種正負電荷分離的現象稱為**靜電感應**（electrostatic induction）。



(a) (b)
▲圖 6-5 水柱的靜電感應現象：(a)由水龍頭流出水柱；(b)帶電吸管靠近水柱，水柱受靜電力吸引而彎折。

由於在電中性物體上的感應，感應之異性電荷比感應之同性電荷更靠近帶電體，所以帶電體對物體的靜電吸引力總是比靜電排斥力來得大，因此，原來電中性的物體也會被帶電體所吸引。相同地，當帶電體靠近紙片，紙片也會因為靜電感應而被帶電體吸引。

對於金屬這類物體我們也可以利用靜電感應的方式使其帶電，稱為感應起電，其步驟如圖 6-6 所示。



(a) (b) (c)
▲圖 6-6 感應起電的步驟：(a)電中性的導體 A 與導體 C 分別以絕緣線懸掛且相互接觸，當帶正電的物體 B 靠近，導體 A 會產生感應負電荷，而導體 C 則產生感應正電荷；(b)將導體 A 與導體 C 分開；(c)移除帶電體 B，導體 A 與導體 C 分別帶有負電與正電。

根據靜電感應的原理，可以設計如圖 6-7 所示的簡易驗電器來檢驗物體是否帶電。在圖 6-7(a)中，可將彎曲的迴紋針與一片廚房用鋁箔視為相連接的導體，且被固定在絕緣的塑膠飲料杯中，凹折的鋁箔片兩半部因本身重量作用而懸垂閉合。如圖 6-7(b)所示，當摩擦布料後，帶電的氣球接近驗電器，對迴紋針與鋁箔發生靜電感應，迴紋針產生異性電，鋁箔產生同性電，且鋁箔片兩半部因同性電而排斥分開。

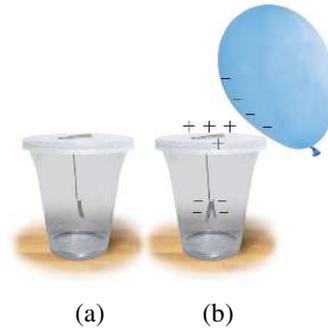
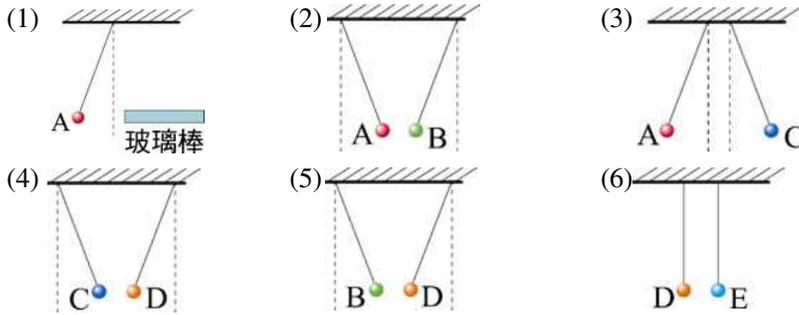


圖 6-7 簡易驗電器用來檢驗物體是否帶電：(a)鋁箔片兩半部因本身重量作用而懸垂閉合，(b)帶電的氣球靠近驗電器，對迴紋針與鋁箔發生靜電感應，鋁箔片兩半部因同性電而排斥分開。

 想一想

1. A、B、C、D、E 五個小導體球分別以絕緣線懸掛，它們可能帶電、可能不帶電。今以絲絹摩擦過帶正電的玻璃棒靠近 A 球，觀察到如圖 6-8(1)~(6)的實驗結果，則各球是否帶電？若帶電，應帶何種電？



▲圖 6-8 由靜電實驗的結果，判斷各導體球的電性。

2. 一金箔驗電器上的金屬盤已帶有未知電性的電荷，且兩金箔片張開 α 角。今以一帶負電的物體逐漸接近之，見金箔片逐漸閉合再張開，此時用手觸摸金屬盤，移去手後再移去帶電體，金箔片最後張開 β 角。則：

- (1) 此時金箔帶何種電？
- (2) β 與 α 何者較大？
- (3) 經手指流到地球的是何種電荷？

6-2 庫侖定律

在十八世紀的中葉，科學家們從實驗中，觀察到電荷間的靜電力與物體間的萬有引力在某些性質上有相似的地方。1785年，法國科學家庫侖首次設計出實驗裝置來測量出電力的量值，並發現電力作用所應遵循的定律。如圖 6-9 所示，一水平橫桿用一條細金屬線垂直懸掛著，水平橫桿受力作用後能以懸線為軸而旋轉。帶電小球 A 固定在鉛直絕緣桿上，帶同性電的小球 B 置於水平橫桿之一端，則小球 B 受到靜電排斥力。當靜電力與



▲圖 6-9 庫侖進行扭秤實驗示意圖，證實兩點電荷間的靜電力與距離的平方成反比的關係。

金屬線轉動所產生的扭力達到靜力平衡時，小球 B 會處於靜止狀態。利用靜力平衡關係，便可求得靜電力的量值。改變二球之電量及其距離，可進一步得出靜電力與二球之帶電量以及其距離的關係。

根據實驗結果，庫侖提出兩靜止點電荷（電荷的體積可忽略）間靜電力的量值，與其電量的乘積成正比，而與其距離的平方成反比，這就是庫侖定律（Coulomb's law），靜電力也可稱為庫侖力。

q_1 與 q_2 表示兩點電荷的電量，當其相距 r 時，其靜電力量值 F 為

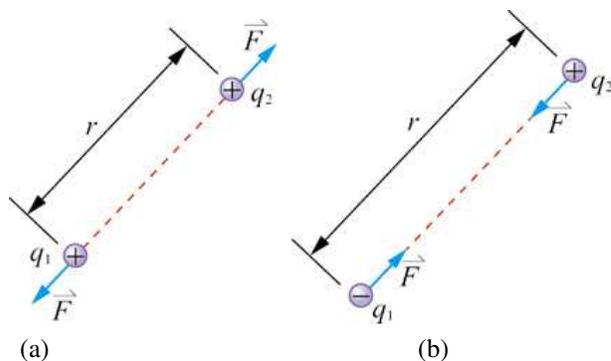
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

6-1 式

若 q_1 、 q_2 為同性電，則靜電力為排斥力（圖 6-10(a)）；若 q_1 、 q_2 為異性電，則靜電力為吸引力（圖 6-10(b)）。靜電力的方向沿著兩電荷

的連線，滿足牛頓第三運動定律。在 SI 制中，電量 q_1 、 q_2 的單位為庫侖 (C)，距離 r 的單位為公尺 (m)，靜電力 F 的單位為牛頓 (N)，式中的比例常數 k ，由實驗得知，在真空 (或空氣) 中之值為

$$k=8.98742\times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2\approx 9.0\times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$



▲圖 6-10 點電荷彼此相互作用，量值為 F 的靜電力，滿足牛頓第三運動定律。
(a)兩電荷為同性電，則靜電力為排斥力；(b)兩電荷為異性電，則靜電力為吸引力。

庫侖定律是電學中第一個以定量方式表述的定律，對電學的發展意義非常重大。值得注意的是庫侖定律和萬有引力定律在形式上非常類似，它們都是力的量值與距離的關係遵守平方反比律。但是，兩物體間的重力僅會相互吸引，兩電荷間的靜電力會因為電性的異同而有吸引或排斥。

兩種作用力的強度差異也頗大，如果兩點電荷的電量皆為 10^{-7} 庫侖 (物體摩擦後所帶電量的數量級)，當其相距 1 公分，兩者間的靜電力約是 0.9 牛頓，此靜電力的強度足以抵抗小紙片的重量而將之吸引起來。若質量相同的兩質點相距 1 公分，欲產生相同強度 (即 0.9 牛頓) 的萬有引力，則每個質點的質量要高達 1000 公斤以上！所以對日常生活的一般物體而言，物體間的萬有引力是比靜電力微弱許多。



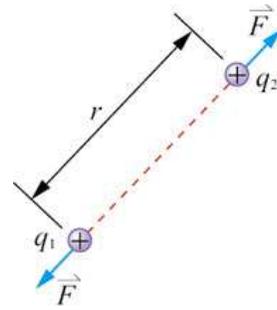
想一想

為什麼天體的運動是受萬有引力規範而非靜電力？

實驗也指出，兩個點電荷間的靜電力關係不因第三個點電荷的存在而改變。不管空間中存在多少個點電荷，每一對點電荷之間的靜電力都遵守庫侖定律，而任一點電荷所受的靜電力則等於所有其他點電荷單獨作用於該點電荷的靜電力之向量和，稱為**疊加原理**

(superposition principle)。利用庫侖定律與疊加原理，可以計算任意幾何形狀的絕緣帶電

體間的靜電力。例如我們可以利用庫侖定律與疊加原理計算兩個帶電量均勻，電量各為 q_1 、 q_2 的絕緣體球，球心相距 r ，其靜電力量值 F 亦為 $\frac{kq_1q_2}{r^2}$ ，且靜電力的方向沿球心連線（圖 6-11）。



▲圖 6-11 兩個均勻帶電的絕緣體球，彼此有量值為 F 的靜電力作用。

◎範例 6-1

氯化鈉晶體是由電量皆 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 的氯離子與鈉離子所組成，氯離子為負電性、鈉離子為正電性，且氯離子的質量為 $5.9 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 、鈉離子的質量為 $3.8 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。當兩者距離相同的時候，兩離子的庫侖力量值為其間萬有引力量值的幾倍？（靜電力常數 k 為 $9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ，萬有引力常數 G 為 $6.7 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ）

[解答] 設兩離子為點電荷，電荷間的距離為 r ，電量各為 q_1 和 q_2 ，

質量各為 m_1 和 m_2 ，則其庫侖力量值 $F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ ，

而萬有引力量值 $F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ ，兩者比值為

$$\begin{aligned} \frac{F_e}{F_g} &= \frac{kq_1q_2}{Gm_1m_2} \\ &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(6.7 \times 10^{-11} \text{ C} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(5.9 \times 10^{-26} \text{ kg})(3.9 \times 10^{-26} \text{ kg})} = 1.5 \times 10^{33} \end{aligned}$$

由此可見，離子間的萬有引力比其庫侖力小得多，因此在研究原子或分子間的相互作用時，經常把萬有引力忽略不計，僅考慮靜電力的影響。

6-3 電場與電力線

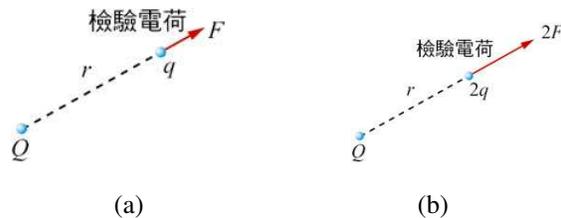
兩個靜止的電荷可以不需要接觸，彼此就有靜電力，稱此為**超距作用**（action at a distance），英國科學家**法拉第**（Michael Faraday, 1791 - 1867）首先提出「場」的概念來解釋靜電力的超距作用。若在空間中放置一電荷，會使得電荷周圍的其他帶電體受到靜電力，則稱此電荷在空間中形成**電場**（electric field）。今天我們已經瞭解，電場在空間中是真實存在的，電荷便是透過其所產生的電場而對空間中的其他電荷產生靜電力。

1. 靜電力與電場

在圖 6-12 中，考慮空間中有電量 Q 的固定點電荷，在其周圍產生電場，因為該電荷為空間電場的來源，稱為**場源電荷**。若在與場源電荷距離 r 處置入電量 q 的檢驗點電荷，則該電荷所受靜電力量值為 F ；若距離 r 固定且檢驗電荷之電量增加為 $2q$ ，由庫侖定律可知，則其所受靜電力量值也隨之增加為 $2F$ 。也就是說，在場源電荷周圍同一位置，檢驗電荷所受的靜電力 \vec{F} 與其電量 q 的比值，即 \vec{F}/q ，將與檢驗電荷本身電量無關，而只與場源電荷的電量 Q 及與該場源電荷的距離 r 有關，因此我們將比值 \vec{F}/q 定義為電量 Q 的場源電荷在周圍產生的**電場強度**，簡稱為**電場** \vec{E} ，即

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

6-2 式



▲圖 6-12 當檢驗電荷在電場的位置不變，若其電量由 q 增為 $2q$ ，則其所受靜電力量值由 F 增為 $2F$ 。

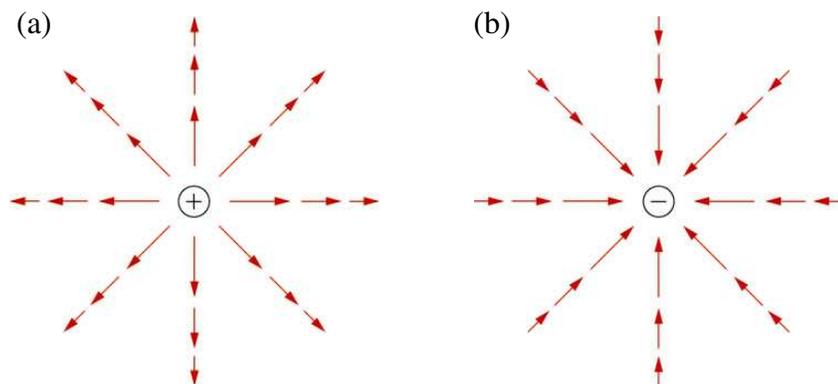
若 q 的電性為正，電荷在電場中受靜電力 \vec{F} 與電場 \vec{E} 方向相同；若 q 的電性為負，則 \vec{F} 與 \vec{E} 方向相反。電場的 SI 單位為牛頓／庫侖（即 N/C），每 1 庫侖的正電荷所受的靜電力以 SI 單位表示時與該處之電場數值相同。

根據庫侖定律與 (6-2) 式，電量 Q 的場源點電荷在距離 r 之處所產生的電場量值 E 為

$$E = \frac{kQ}{r^2}$$

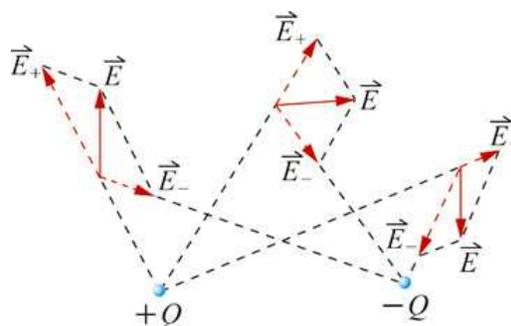
6-3 式

圖 6-13 所示為場源點電荷在各位置所產生的電場，箭頭代表電場方向，長度代表電場量值。正電荷所產生的電場，方向由電荷本身往外輻射；負電荷所產生的電場，方向往內指向電荷本身。無論電場的方向如何，電場的量值均隨著與場源點電荷之距離的增加而減小。



◀圖 6-13 位於中心處的(a)正電荷與(b)負電荷在各位置所產生的電場，紅色箭頭之長度及方向分別代表電場之量值與方向。

由第二節的討論可知，若空間中同時存在多個點電荷，則一電荷所受的靜電力等於所有其他點電荷單獨作用於該點電荷的靜電力之向量和；同樣的，如果空間中有許多場源點電荷同時存在時，則空間中任一位置的電場為各點電荷在該位置所產生電場的向量和，如圖 6-14



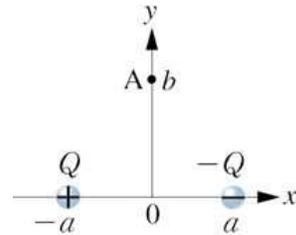
▲圖 6-14 在空間中任意點的電場 \vec{E} 為電量 $+Q$ 與 $-Q$ 的點電荷所產生電場 \vec{E}_+ 及 \vec{E}_- 的向量和。

所示。因此若能知悉帶電體電荷分佈的情形，則由點電荷的電場公式，將電場做向量的疊加，便可得帶電體在空間中各位置產生的電場。

◎範例

如圖 6-15 所示，在坐標 $(-a, 0)$ 處置一電荷 Q ，在坐標 $(a, 0)$ 處置一電荷 $-Q$ ，則

- (1) 在坐標 $(0, b)$ 處之 A 點的電場為何？
- (2) 若 $b \gg a$ 時，A 點電場量值為何？



▲圖 6-15

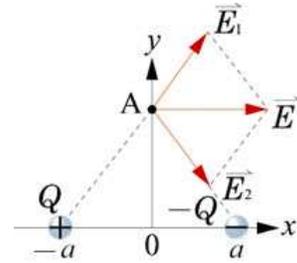
[解答] (1) 如圖 6-16 所示，電荷 Q 在 A 點所生電場 \vec{E}_1 ，

由 (6-3) 式，則

$$\vec{E}_1 = \left(\frac{kQ}{a^2 + b^2} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \frac{kQ}{a^2 + b^2} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)$$

電荷 $-Q$ 在 A 點所生電場 \vec{E}_2 則為

$$\vec{E}_2 = \left(\frac{kQ}{a^2 + b^2} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, -\frac{kQ}{a^2 + b^2} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)$$



▲圖 6-16

因為 A 點的電場為兩個點電荷在該處所生電場的向量和，因此

$$A \text{ 點之電場為 } \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \left(\frac{2kaQ}{(a^2 + b^2)^{3/2}}, 0 \right)。$$

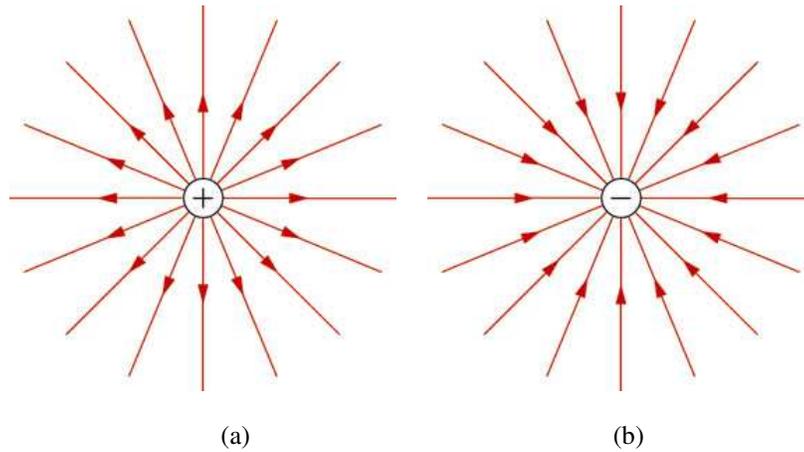
- (2) 若 $b \gg a$ ，則 A 點電場的量值 $E = \frac{2kaQ}{b^3}$ 。

2. 電力線

藉由描述電荷在其周圍產生的電場（例如圖 6-13、圖 6-14），可以了解電荷在空間所形成的特殊性質；此外，法拉第還創立了一種幾何圖像的電力線模型來描述空間各位置的電場性質，甚至在當時，電力線還被認為才是電荷之間有靜電力相互作用的真實媒介。以現代的觀點來看，電力線雖然是不存在的虛擬曲線，但透過電力線的描繪來取代計算

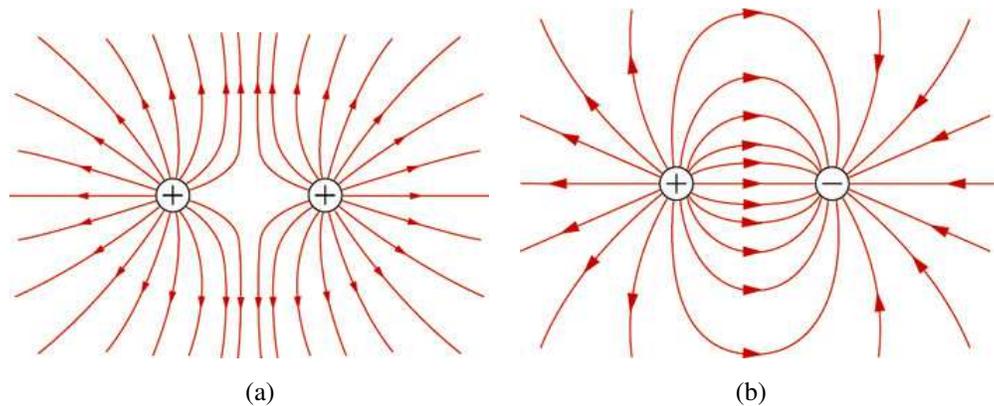
空間各個位置的電場，對於我們觀察或理解電荷在其周圍建立的電場性質，有相當的幫助，因此仍值得在此介紹。

電力線 (line of electric force) 是電場中的有向曲線，電力線上各點的切線方向都與該點之電場方向平行。圖 6-17(a) 為單一正電荷周圍之電力線；圖 6-17(b) 為單一負電荷周圍之電力線。由圖 6-17 可看出，電力線由正電荷出發，終止於負電荷。



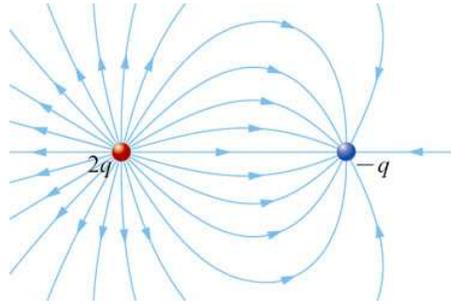
▲圖 6-17 (a)正電荷與(b)負電荷的電力線分布，紅色有向直線代表電力線。

圖 6-18(a) 為鄰近的兩個等量同性電荷周圍之電力線；圖 6-18(b) 為鄰近的兩個等量異性電荷周圍之電力線。由電力線的定義可知，電力線上各點的切線方向，便是該點電場的方向，因此電力線不會相交。



▲圖 6-18 (a)鄰近的兩個等量同性電荷與(b)鄰近的兩個等量異性電荷周圍之電力線。

圖 6-19 為電量 $2q$ 與 $-q$ 的兩個異性電荷周圍的電力線，愈接近電荷的電場強度愈大，且其電力線愈密集。法拉第構想由正電荷所發出的電力線數或終止於負電荷的電力線數須正比於其電量，在圖中自電量 $2q$ 的電荷發出的電力線數目是進入到電量 $-q$ 之電荷的電力線數目的 2 倍，而**電力線的密集程度與電場量值成正比**。



▲圖 6-19 鄰近的兩個不等量異性電所生之電力線。

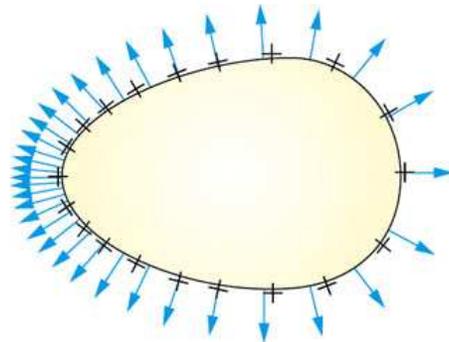


想一想

1. 同一條電力線上各點的電場強度是否都相等？
2. 由正電荷發出的電力線一定會全部進入到負電荷？
3. 電力線是否就是電荷運動的軌跡？

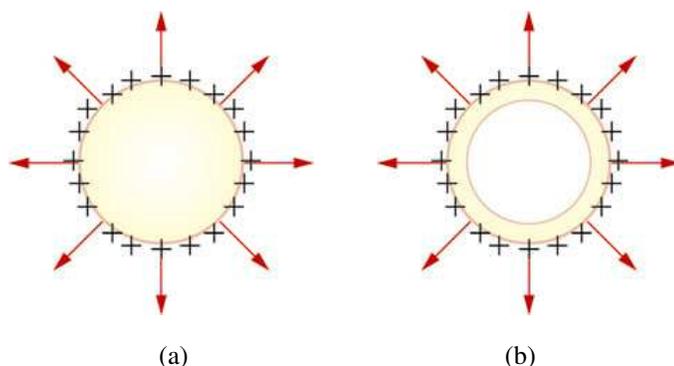
3. 靜電平衡導體的電場與電力線

帶有淨電荷的導體，其內部的自由電荷將因靜電力作用而重新分布，最後自由電荷不再流動，稱為靜電平衡。此時，導體內部電場必定為零，否則其內部的自由電荷仍會繼續受力而移動。因為淨電荷必在其附近產生電場，所以導體內部必定無淨電荷，淨電荷將分布在導體表面上，如圖 6-20 所示。淨電荷在導體表面上產生的電場或是電力線，必定垂直於導體表面，不然自由電荷仍會沿著表面運動。



▲圖 6-20 靜電平衡時，淨電荷分布在導體表面，導體內部的電場 E 為零。

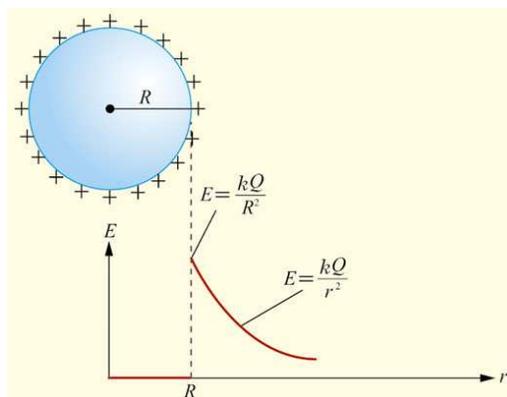
考慮一帶淨電荷的實心導體球，淨電荷的電量為 $+Q$ ，導體球的半徑為 R 。由對稱性知，當達到靜電平衡時，淨電荷將均勻分布在導體球表面上，使球內的電場為零。由導體球表面上所發出之電力線，將對稱地垂直於球面射出，如圖 6-21(a)所示。在導體球外的電力線，與電量 $+Q$ 的點電荷集中在球心時，所形成的電力線一樣。若將實心導體球改成相同半徑的導體薄球殼，則其淨電荷仍將維持平均分布在球面上，如圖 6-21(b)所示，此帶電導體球殼與帶電實心導體球的電力線完全相同。



▲圖 6-17 (a)正電荷(b)負電荷的電力線分布，紅色有向直線代表電力線。

電量 $+Q$ 的導體球（殼）內部電場為零，因為球（殼）外的電力線密度，與電量 $+Q$ 的點電荷集中在球心時之情形一樣，即在球外與球心相距

r 處之電場量值 E 為 $\frac{kQ}{r^2}$ （圖 6-22）。



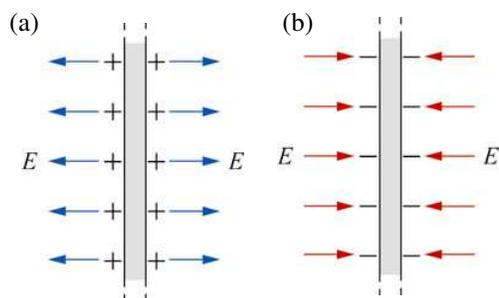
▲圖 6-22 半徑為 R 、帶電量為 $+Q$ 之導體球（殼），與球心相距 r 處之電場量值 E 的關係圖。

4. 均勻帶電平行板間的電場

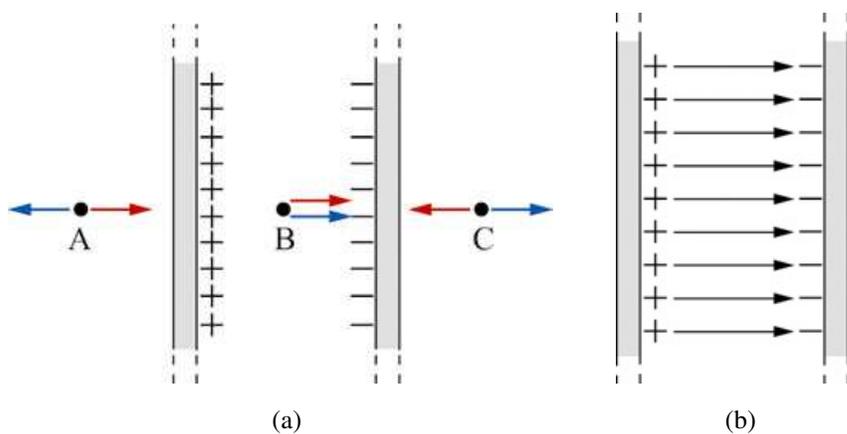
再考慮一帶電的無限大導體平板，達靜電平衡時，電荷均勻分布在表面。平板外部周圍任意位置的電場，均可視為是由平板上無限多個點電荷產生的電場所疊加而成。由電荷分布的對稱性可知，電荷所發出之電力線必定垂直於板面。如圖 6-23 所示，正電板的電力線相互平行由平板射出，負電板的電力線相互平行射入平板，因為板外各位置的電力線密度皆相同，故平板外為一均勻的電場。

從正電平板發出或進入負電平板的電力線數目正比於平板之電量，由於電力線的密集程度即代表電場量值，因此平板兩側的電場量值正比於板上單位面積的電量（即面電荷密度）。亦即一無限大的帶電導體平板在其周圍產生均勻電場，其電場的量值和平板上的面電荷密度成正比。

在圖 6-24 中，兩個無限大的帶電導體平板各帶有等量的正電和負電，彼此平行而立。在兩平板外部的任意位置，因為兩平板各自產生的



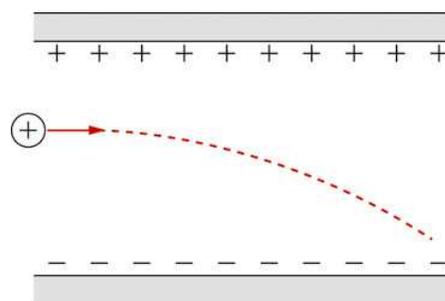
▲圖 6-23 (a)均勻帶正電的大平板與(b)均勻帶負電的大平板周圍之電力線



▲圖 6-24 帶等量但電性相反的無限大導體平板平行而立所生之電場與電力線。(a)藍色和紅色箭矢分別代表正電板和負電板所產生的電場。在 A 和 C 兩點的電場剛好抵銷，而在 B 點的電場則因同向疊加而加倍。(b)電力線僅存在於兩導體平板間的區域，且為均勻電場。

電場量值相同，但是方向相反，所以疊加後的電場為零。在兩平板之間的任意位置，因為電場的量值與方向皆相同，所以疊加後的電場為單一平板電場的兩倍，且其方向由帶正電平板指向帶負電平板。注意在圖 6-24(b)中，各板的電荷由於靜電力相吸引，僅分布在相向的內表面上。因此每一板的面電荷密度為各板單獨存在時的兩倍（當各板單獨存在時，其電荷均勻分布在內外兩個表面）。

帶電質點置於上述的均勻電場中，若質點的質量非常小，所受重力可忽略，則作用在質點的靜電力會使其作等加速運動。在圖 6-25 中，帶正電的質點水平射入帶等量異性電平板，因為板間的均勻電場方向向下，故質點在板間運動過程受量值固定且鉛直向下的靜電力作用。質點在板間的運動依據運動的

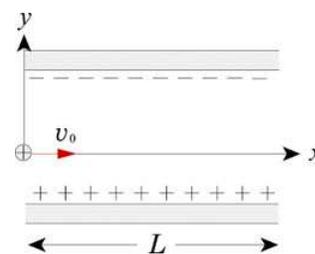


▲圖 6-25 正電荷水平進入垂直向下的均勻電場，受到向下的靜電力作用後，運動軌跡為向下偏折的拋物線。（電荷所受重力遠小於靜電力，而可不計重力）

獨立性可分成沿水平和沿鉛直兩方向的運動，分開來處理，即在水平方向上為等速運動，而在鉛直方向上為等加速運動，故運動軌跡為向下偏折的拋物線。

範例 6-3

如圖 6-26 所示，一質量為 m 、電量為 $+q$ 之質點，以速度 v_0 沿 x 軸射入長度為 L ，內部電場量值為 E 的平行電板中。平行電板所帶的電量相等但電性相反。若忽略重力的影響，則



▲圖 6-26

- (1) 質點的加速度為何？
- (2) 當其自平行板射出時的 y 坐標為何？

[解答] (1) 如圖 6-27 所示，電場在 $+y$ 軸方向，

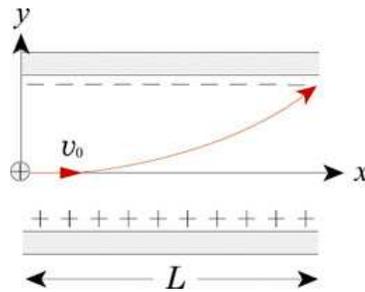
因此質點所受的靜電力 $F=qE$ ，

方向平行於 $+y$ 軸。

由牛頓第二運動定律，可知

$$\text{質點的加速度 } a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m},$$

方向平行於 $+y$ 軸。



▲圖 6-27

(2) 根據運動的獨立性，此質點在 x 軸方向為等速運動，因此穿過平行

板所需的時間 $t = \frac{L}{v_0}$ 。而質點在 y 軸方向為等加速運動，在時間 t

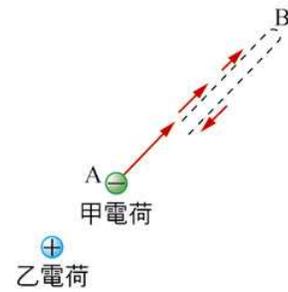
$$\text{的 } y \text{ 坐標為 } y = \frac{1}{2} at^2 = \frac{qEL^2}{2mv_0^2}。$$

該質點的運動軌跡類似於重力場中的水平拋射運動，為一拋物線。

6-4 電位能、電位與電位差

想像空間中有甲、乙兩電荷，如圖 6-28 所示，甲電荷（帶負電）由 A 處射離固定的乙電荷（帶正電），甲電荷受到乙電荷的靜電吸引力，其速率將漸漸減緩，當到達 B 處時，其速率恰為零。當甲電荷由 B 處折返時，因受到乙電荷的靜電力吸引，其速率則又漸漸增快。當甲電荷遠離乙電荷時，靜電力對甲電荷作負功使其動能減少；當甲電荷折返時，靜電力對其作正功而使甲電荷的動能增加。在上述討論中，

當甲電荷遠離乙電荷時，其減少的動能以某種能量的形式儲存在兩電荷的系統內；當甲電荷折返時，這個能量再被釋放出來。所儲存的能量和兩電荷之間的相對位置有關，稱為**電位能**（electric potential energy）。



▲圖 6-28 甲電荷（負電）射離固定的乙電荷（正電），甲電荷減少的動能轉換為電位能儲存。

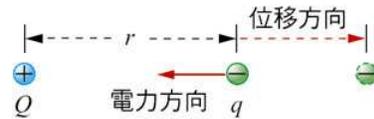
1. 電位能

從「重力位能的一般形式與力學能守恆」的討論中（請參看基礎物理漁 B 下冊第八章第六節），我們知道兩質點間的萬有引力是作用在兩者連線的方向上，且作用力的量值與兩者間的距離平方成反比，該力是保守力。而根據庫侖定律，靜電力作用於兩點電荷的連線上，且靜電力量值與兩電荷間的距離平方成反比，所以靜電力亦屬於保守力。保守力所作的功 W 等於位能差 ΔU 的負值，即 $W = -\Delta U$ ，若靜電力所作的功為 W_e ，且前後兩狀態電位能變化為 ΔU_e ，則

$$W_e = -\Delta U_e$$

6-4 式

如圖 6-29 所示，若電量 q ($q < 0$) 的負電荷在距離電量 Q ($Q > 0$) 的固定正電荷 r 處移至距離無窮遠處，則靜電力對電量 q 的電荷作負功。根據庫侖定律，可得靜電力對電量 q 的電荷作功



▲圖 6-29 電量 q 的負電荷由距電量 Q 的固定正電荷 r 處往右移至距離無窮遠處，靜電力作負功且等於電位能差的負值。

W_e 為 $-\frac{kQ|q|}{r}$ (因為庫侖定律與萬有引力定律皆為平方反比定律，所以兩種力作功的形式相似，請參看基礎物理漁 B 下冊第八章第六節)。

若兩電荷相距 r 時的電位能為 $U_e(r)$ ，因為位能的零位面可以任意選取，且通常取兩電荷相距無窮遠處的電位能為零，即 $U_e(\infty) = 0$ ，所以由 (6-4) 式可得

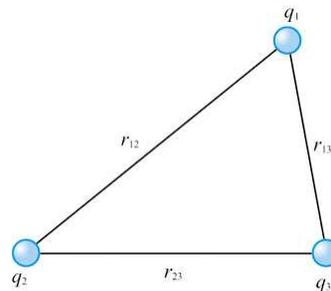
$$U_e(r) = \frac{-kQ|q|}{r} \quad \text{6-5 式}$$

因為電量 q 為負值，即 $q = -|q|$ ，所以上式可整理為

$$U_e(r) = \frac{kQq}{r} \quad \text{6-6 式}$$

雖然以上討論是假設 Q 為正值且 q 為負值，但是上式也可適用於任何電性的電荷。根據上式，若電量 q 與電量 Q 為異性電荷，則電位能為負值；若電量 q 與電量 Q 為同性電荷，則電位能為正值。

如果一個系統內含有兩個或更多的點電荷，則任一對點電荷之間都有靜電力交互作用，也因此具有電位能。整個系統的電位能等於所有成對點電荷電位能之和。例如在圖 6-30 中，三個電量分別為 q_1 、 q_2 、 q_3 的點電荷組成一個系統，



▲圖 6-30 整個系統的電位能等於所有成對點電荷電位能之和。

若彼此間的距離分別為 r_{12} 、 r_{23} 、 r_{31} ，則該系統的電位能為

$$U_e = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} + \frac{kq_2q_3}{r_{23}} + \frac{kq_3q_1}{r_{31}}$$

電荷的動能與電位能的和，稱為力學能。電荷運動時，若僅有保守力做功（重力、彈簧的回復力或是靜電力皆屬於保守力），當保守力作負功時，則電荷的動能減少，轉換為其位能的增加；當保守力作正功時，則電荷的位能減少，轉換為其動能的增加。也就是在保守力作用下，電荷系統的力學能守恆。

範例 6-4

A 和 B 兩質點各帶有電量 $+2.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 和 $+5.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ ，彼此相距 5.0 m。

今將 A 質點固定，施力 F 移動 B 質點，使兩質點相距 2.0 m 時，則

(1) 靜電力所作的功為何？

(2) 若移除 F ，使 B 質點由靜止釋放，當兩質點再度相距 5.0 m 時，B 質點的動能為何？

[解答] (1) 由 (6-6) 式可知，A 和 B 兩質點的起始電位能 U_e 為

$$\begin{aligned} U_e &= (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2.0 \times 10^{-6} \text{ C})(5.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{5.0 \text{ m}} \\ &= 1.8 \times 10^{-2} \text{ J} \end{aligned}$$

A 和 B 兩質點的最後電位能 U_e' 為

$$\begin{aligned} U_e' &= (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2.0 \times 10^{-6} \text{ C})(2.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{5.0 \text{ m}} \\ &= 4.5 \times 10^{-2} \text{ J} \end{aligned}$$

由 (6-4) 式可知，靜電力所作的功 W_e 為

$$W_e = - (U_e' - U_e) = -2.7 \times 10^{-2} \text{ J}$$

(2) 設 B 質點的動能為 K ，由於在靜電力作用下，電荷系統的力學能守恆，則

$$0 + U_e' = K + U_e, \text{ 所以 } K = U_e' - U_e = 2.7 \times 10^{-2} \text{ J}。$$

2. 電位

考慮電量為 Q 的固定場源點電荷在空間中形成電場，若在距離 r 處置入電量 q 的測試點電荷，則電位能為 U_e 。若電量由 q 增加為 $2q$ ，由 (6-6) 式可知，則電位能也隨之增加為 $2U_e$ 。也就是說，電位能 U_e 與電量 q 的比值 U_e/q ，即只與場源點電荷的電量 Q 及與該電荷的距離 r 有關，我們將比值 U_e/q 定義為電量 Q 的點電荷在空間中產生的電位 V ，即

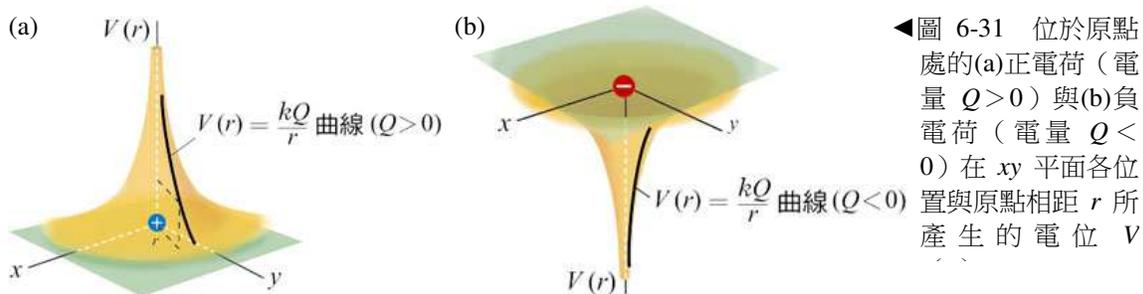
$$V = \frac{U_e}{q} \quad \text{6-7 式}$$

電位的 SI 制為焦耳/庫侖（即 J/C），稱為**伏特**（volt，以 V 表示）。由上式可知電量每 1 庫侖的正電荷在電場中的電位能以 SI 單位表示時與該處之電位數值相同。

根據 (6-6) 式與 (6-7) 式，與電量 Q 的點電荷距離 r 之處的電位 $V(r)$ 為

$$V(r) = \frac{kQ}{r} \quad \text{6-8 式}$$

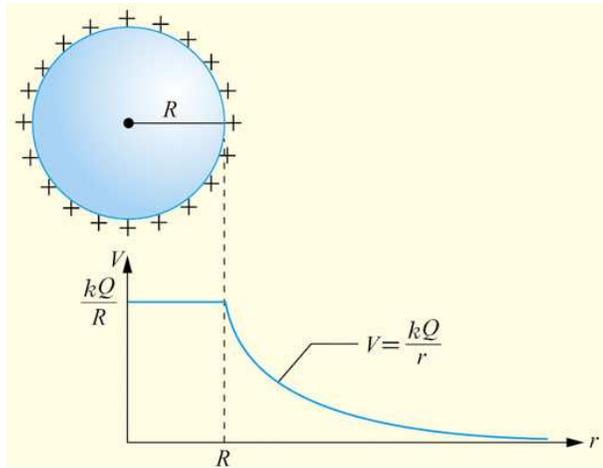
當距離為無窮遠時，電位為零（因為取兩電荷相距無窮遠時的電位能為零），即 $V(\infty) = 0$ 。



若電量 Q 為正，則電位為正值，遵循與距離成反比的關係，愈接近正電荷的電位愈高；若 Q 為負，則電位為負值，距離愈接近負電荷時電位愈低。圖 6-31 所示為置於原點處電量為 Q 的點電荷在 xy 平面上各位置所產生的電位，與平面垂直的第三軸代表與原點距離 r 處的電位值 $V(r)$ 。

若電場是由許多點電荷所共同建立，則空間中某一位置的電位等於各點電荷所生電位的和。因此若已知帶電體的電荷分布情形，其所建立的電場中任一點的電位，則能利用點電荷的電位公式疊加算出。電位和是純量的相加，電場和是向量的相加。

在本章第三節的討論中，我們知道，在靜電平衡時，導體內的電場恆為零，因為電荷（電量極小，不影響導體電荷分布）在導體內移動不受到靜電力作功，所以導體內各點的電位能差為零，即導體內各點的電位都相等，稱為等位體。對於帶電的導體



▲圖 6-32 半徑 R ，電量 $+Q$ 的帶電導體球的

球（或球殼）而言，由於球體外的電場與球體上全部電荷集中在球心時所生的電場一樣，因此球體外的電位等於將全部電荷集中在球心處所生的電位。如圖 6-32 所示，若取與球心相距無窮遠處的電位為零，總電量為 Q ，且半徑為 R 的均勻帶電導體球（殼），則球外距球心為 r 處的電位為 $\frac{kQ}{r}$ ；球（殼）內各點的電位均等於球面上的電位，即 $V = \frac{kQ}{R}$ 。



想一想

1. 均勻帶電導體球在其周圍產生電場，在不影響導體球的電荷分布情況下，將球外一點電荷的電量增加為原來的兩倍，則點電荷在電場中的電位能是否增加為兩倍？點電荷所在位置的電位是否增加為兩倍？
2. 均勻帶電量 Q 的導體球（殼）之半徑為 R ，若取球（殼）表面為電位的零點，則距球心 r ($r > R$) 的電位為何？

3. 電位差

若電場中位置 1 與位置 2 的電位各為 V_1 與 V_2 ，則其**電位差** ΔV 定義為

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad \text{6-9 式}$$

電位差又稱**電壓**，其單位也是伏特，由上式可知每 1 庫侖正電荷由位置 1 移至位置 2 的電位能差以 SI 單位表示時與兩位置間的電位差數值相同。在實際應用上，電位差的概念比起電位更為方便有用。

電量 q 的電荷在此兩點的電位能差 ΔU_e 為

$$\Delta U_e = qV_2 - qV_1 = q\Delta V \quad \text{6-10 式}$$

由上式可知，若正電荷由低電位移至高電位，則電位能增加；若負電荷由低電位移至高電位，則電位能減少。

帶等量異性電平行電板之間為均勻的電場，電場 \vec{E} 的量值與方向皆固定。如圖 6-33 所示，電量為 q 的正電荷，若由 A 點移至 B 點，則靜電力作正功 W_e 為 qEd ，其中 d 為沿電場方向的位移分量。事實上，在均勻電場的作用下，正電荷自 A 沿任意路徑移動到 B，靜電作功仍為 qEd 。由 (6-4) 式，則 A 點與 B 點之電位能差 ΔU_{AB} 為

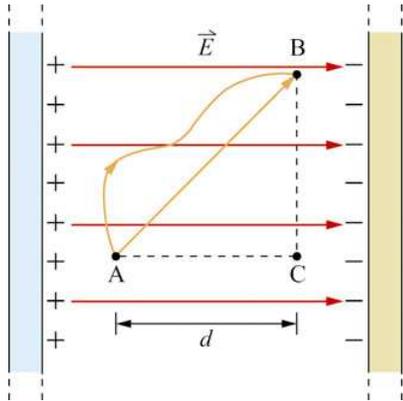
$$\Delta U_{AB} = U_A - U_B = qEd$$

由 (6-10) 式，A 點與 B 點之電位差 ΔV_{AB} 為

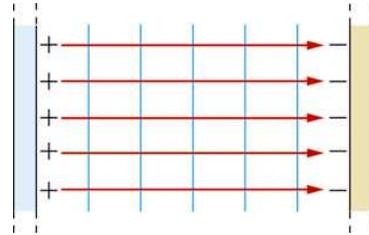
$$\Delta V_{AB} = V_A - V_B = Ed \quad \text{6-11 式}$$

由上式可知，在平行電板間，愈接近正電板處的電位愈高，愈接近負電板處的電位愈低。

在均勻電場 \vec{E} 的作用下，在平行電板間任意兩點的電位差僅與兩點之連線在沿電場方向之投影長度有關。在圖 6-33 中，通過 B 點，且與電力線（電場）垂直的直線上之每一點（例如 C 點），其與 A 點的電位差皆相同。在電場中，相等電位的點形成的線（或面），稱為等位線（或面），各等位線（或面）與電力線垂直，且沿電力線方向移動，其電位逐漸降低，如圖 6-34 所示。



▲圖 6-33 在均勻電場 \vec{E} 內，若 B、C 連線與電力線垂直，則電位差 $V_A - V_B = V_A - V_C$ 。

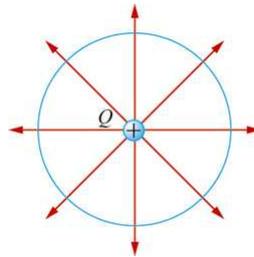


▲圖 6-34 等量異性電平板間的電力線與等位線。藍色實線為等位線，紅色實線為電力線，此處相鄰兩個等位線間的電位差相等。



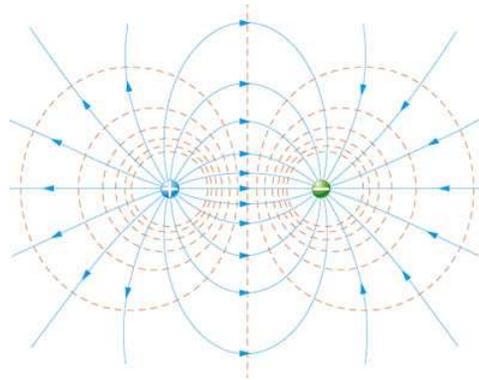
做一做

電量為 Q 的正電荷，其周圍的電力線（紅色實線）如圖 6-35 所示，在圖中的藍色實線則是距離 r 處的等位線，其電位為 $\frac{kQ}{r}$ ，請分別畫出 $\frac{2kQ}{r}$ 及 $\frac{3kQ}{r}$ 的等位線。



▲圖 6-35 正電荷的電力線與電位為 $\frac{kQ}{r}$ 的等位線。藍色實線為等位線，紅色實線為電力線。

電荷在等位線（面）移動時，因為其電位能差為零，即電場並不會對此移動電荷作功，所以等位線（面）與電力線處處互相垂直，如圖 6-36 所示為兩個等量異性電荷的電力線與等位線。且沿著電力線方向移動，其電位會逐漸降低。



▲圖 6-36 兩個等量異性電荷周圍的電力線與等位線。紅色虛線為等位線，藍色實線為電力線，相鄰兩個等位面線的電位差相等。

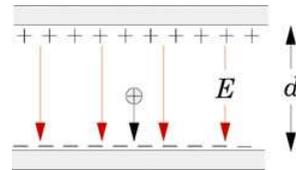


想一想

1. 等位線（面）愈密集處的電場是否就愈強？
2. 電力線可否起迄均在同一導體上？

範例 6-5

如圖 6-37 所示，兩片帶電量相等、電性相反的平行金屬板，相距 d 。已知兩板中電場為 E ，若忽略重力的影響，則



▲圖 6-37

- (1) 兩板間電位差為何？
- (2) 一電量 $+q$ 的電荷由靜止開始自上板向下板運動，到達下板時的動能為何？

[解答] (1) 設上、下板的電位各為 V_1 、 V_2 ，由 (6-11) 式得兩板的電位差

$$\Delta V = V_1 - V_2 = Ed。$$

- (2) 電荷在上板時的電位能較在下板時，高出 $q(V_1 - V_2) = qEd$ ，因為在靜電力作用下，電荷系統的力學能守恆，所以電荷運動至下板時所減少的電位能轉變為動能，即 $K = qEd$ 。

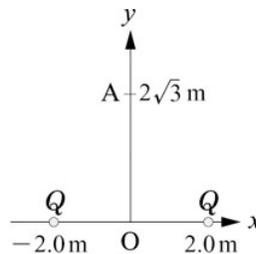
範例 6-6

如圖 6-38 所示，兩固定質點分別放置在 x 軸上 $x=2.0\text{ m}$ 與 $x=-2.0\text{ m}$ 處，其電量均為 $Q=+2.0\times 10^{-8}\text{ C}$ 。

若 A 點位於 y 軸， $y=2\sqrt{3}\text{ m}$ ，則

(1) A 點與原點 O 的電位差為何？

(2) 電子在 A 點與 O 點的電位能差為何？



▲圖 6-38

[解答] (1) 由 (6-8) 式可知，A 點的電位 V_A 為

$$V_A = (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{2(2.0 \times 10^{-8} \text{ C})}{\sqrt{(2\sqrt{3} \text{ m})^2 + (2.0 \text{ m})^2}} = 90 \text{ V}$$

O 點的電位 V_O 為

$$V_O = (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{2(2.0 \times 10^{-8} \text{ C})}{2.0 \text{ m}} = 180 \text{ V}$$

所以 O 點的電位比 A 點的電位高，且 A 和 O 兩點間的電位差 ΔV 為

$$\Delta V = V_A - V_O = -90 \text{ V}。$$

(2) 由 (6-10) 式，可知電子在 A 和 O 兩點的電位能 U_A 與 U_O 的差 ΔU_e 為

$$\Delta U_e = U_A - U_O = (-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(-90 \text{ V}) = 1.4 \times 10^{-17} \text{ J}$$

所以電子在 A 點的電位能比 O 點的電位能高。

在巨觀世界中，以焦耳 (J) 作為能量單位相當適用；但在描述微觀粒子時 (例如電子)，則顯得大而不當。在微觀世界中，常以電子伏特作為能量的單位，其符號為 eV。一電子伏特的意義是：一個電子經過一伏特的電位差時，所獲得或失去的電位能，即

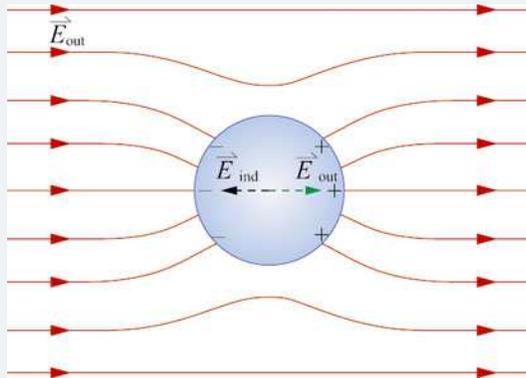
$$1 \text{ eV} = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

所以 $\Delta U_e = 90 \text{ eV}$

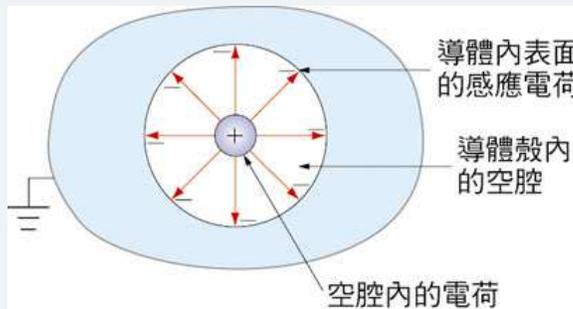
靜電屏蔽

在圖 6-39 中，若將不帶電的實心導體（或導體空腔）置於均勻電場中，則在導體的表面上會產生電量相同的正（+）、負（-）電性之感應電荷。感應電荷在導體（或空腔）的內部任一點所生的電場 \vec{E}_{ind} 會與導體外部電場 \vec{E}_{out} 抵銷，結果在導體（或空腔）的內部任一點的電場均為零。這表示外部電場 \vec{E}_{out} 無法對導體的內部產生靜電作用，也就是說導體具有屏蔽（或隔絕）其外部電場的現象，稱此現象為靜電屏蔽（electrostatic shielding）。

另一方面，如果在導體空腔內置有電荷，則將導體接地後，導體外表面所產生的感應電荷將因接地而消失，結果空腔內電荷所產生的電場，將無法穿透到導體殼的外部，如下圖 6-40 所示，亦即導體外部不會受到空腔內電荷的影響，這也是靜電屏蔽的效應。



▲圖 6-39 置於外部電場 \vec{E}_{out} 中的電中性導體，其內部任一點的電場均為零，即外部電場的電力線無法穿透至導體內部。圖中紅色實線是外部電場的電力線，在球心處，外部電場 \vec{E}_{out} 與感應電荷所生電場 \vec{E}_{ind} 相互抵銷。



▲圖 6-40 若將導體空腔接地，則置於空腔內的正電荷，所生的電場（或電力線）無法穿透到導體外部。圖中紅色實線是空腔內的電力線。

電器、儀表、或傳輸信號的電纜等常會加以金屬外罩，其目的便是為了達到靜電屏蔽的效果，一方面隔絕外界電場對器具內部的干擾，另一方面則可減除器具內部所生電場對外界的影響。

本章學習重點

Chapter Summary

6-1 電荷與電量

1. 電性相同的兩物體靠近，彼此會相互排斥；電性相反的物體靠近，彼此會相互吸引。
2. 電中性的兩物體互相摩擦時，物體的原子最外層電子之得失，是造成物體摩擦起電的原理。
3. 帶電體所攜電量必為 1.6×10^{-19} 庫侖的整數倍，即自然界中電量的基本單位 e 為 1.6×10^{-19} 庫侖。
4. 當帶電體靠近電中性的物體時，因為靜電感應，物體上靠近帶電體的一端會產生感應異性電荷，而相距較遠的一端則產生感應同性電荷。
5. 利用靜電感應的方式使導體帶電，稱為感應起電。

6-2 庫侖定律

6. 兩靜止點電荷間靜電力的量值，與其電量的乘積成正比，而與其距離的平方成反比，這就是庫侖定律，靜電力也可稱為庫侖力。
7. q_1 與 q_2 表示兩點電荷的電量，當其相距 r 時，其靜電力量值 $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ 。
8. 靜電力的方向沿著兩電荷的連線，滿足牛頓第三運動定律。
9. 任一點電荷所受的靜電力等於所有其他點電荷單獨作用於該點電荷的靜電力之向量和，稱為疊加原理。

6-3 電場與電力線

10. 場源電荷在空間中形成電場，使其周圍的帶電體在電場中受到靜電力。
11. 電量 q 的檢驗電荷，在電場中受靜電力 \vec{F} ，則定義電場 $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ 。
12. 電量 Q 的場源點電荷距離 r 之處的電場量值 $E = \frac{kQ}{r^2}$ 。
13. 正點電荷所產生的電場，方向由電荷本身往外輻射；負點電荷所產生的電場，方向往內指向電荷本身。
14. 電力線上各點的切線方向，便是該點電場的方向。
15. 電力線的密集程度與電場量值成正比。

16. 帶有淨電荷的導體達靜電平衡時，其內電場必定為零，淨電荷將分布在導體表面上，導體表面上的電場或是電力線，必定垂直於導體表面。
17. 帶電導體球（殼）外的電場（或電力線），與電量 $+Q$ 的點電荷集中在球心時，所形成的電場（或電力線）一樣。
18. 兩無限大的帶電導體平板平行而立，在板外電場為零，在板間產生均勻電場，其電場的量值和平板上的面電荷密度成正比，且方向由帶正電平板指向帶負電平板。

6-4 電位能、電位與電位差

19. 靜電力對電荷所作的功為 W_e 為電位能變化 ΔU_e 的負值，即 $W_e = -\Delta U_e$ 。
20. 若電量為 Q 與 q 的點電荷相距無窮遠的電位能為零，則相距 r 的電位能

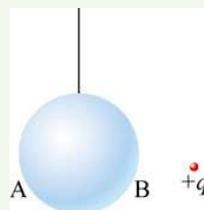
$$U_e(r) = \frac{kQq}{r}$$

21. 整個系統的電位能等於所有成對點電荷電位能之純量和。
22. 電量 q 的檢驗電荷在電場中某處的電位能 U_e ，該處的電位 $V = U_e/q$ 。
23. 電位的 SI 單位為焦耳/庫侖（即 J/C），稱為伏特（volt，以 V 表示）。
24. 電量 Q 的點電荷距離 r 之處的電位 $V(r) = \frac{kQ}{r}$ 。
25. 相等電位的點形成的線（或面），稱為等位線（或面）。
26. 等位線（或面）與電力線處處互相垂直。
27. 導體內各點的電位都相等，稱為等位體。帶電的導體球（殼）外的電位與球體上全部電荷集中在球心時所生的電位一樣。

一、問答題

1. 有三個金屬小球，若任意兩個接近時均互相吸引，則此三個小球的帶電情形有幾種？

2. 一金屬導體球以絕緣細繩懸吊，將一正電荷置於球外右方附近，如圖 6-41 所示，則(1)導體球的電位為正？為負？(2)將接地的金屬導線另一端與導體球的左端 A 點接觸，留在導體球上的感應電荷電性為何？(3)改將接地的金屬導線另一端與導體球的右端 B 點接觸，留在導體球上的感應電荷電性為何？



▲圖 6-41

3. 科學博覽會實驗者站在塑膠凳子上，以手指接觸金屬球，待金屬球開始充電，且電壓達上萬伏特，實驗者的頭髮直豎，如圖 6-42 所示，則下列何者正確？

(A) 實驗者身體與金屬球等電位 (B) 實驗者頭髮直豎是因為心理壓力，和靜電力無關 (C) 因塑膠凳將身體與地面隔絕，電荷不會經由實驗者身體流到地面 (D) 實驗者身體沒有累積任何靜電

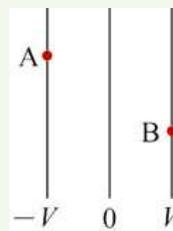


▲圖 6-42

4. 達成靜電平衡時，下列哪些區域的電場為零？

(A) 帶電金屬球的內部 (B) 均勻帶電之絕緣體內部 (C) 帶等量異性電之兩平行金屬板之間 (D) 帶等量同性電之兩平行金屬板之間 (E) 兩等量同性電之點電荷連線的中點處

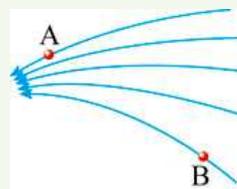
5. 點電荷在電場中運動其軌跡通常都不會沿電力線，但在某些較特殊的狀況下，一個電荷從靜止開始運動，其運動軌跡會沿電力線，請針對此種狀況舉兩個例子。



▲圖 6-43

6. 如圖 6-43 所示，三條直線表示等位線，其電位各為 $-V$ 、 0 、 $+V$ 。今有一電荷 $+q$ 自 A 點移動到 B 點，其間僅受靜電力作用，則此過程中功變化為何？位能變化為何？動能變化為何？

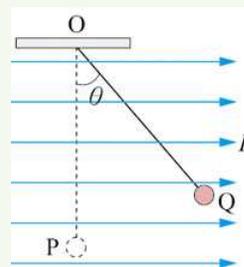
7. 若電力線分布如 6-44 所示，則在位置 A 處與位置 B 處的電場何者較強？在位置 A 處與位置 B 處的電位何者較高？



▲圖 6-44

8. 將兩個電荷由靜止狀態同時釋放，由於彼此靜電力的作用而開始運動，請針對下列狀況，回答過程中靜電力共對電荷作功及電位能變化情形。(1)兩個電荷皆為負電荷；(2)兩個電荷皆為正電荷；(3)一個電荷為正，另一電荷為負。

9. 如圖 6-45 所示，一帶電小球以絕緣細線懸於 O 點，置於均勻向右的電場 E 中（同時有均勻向下的重力場）。將小球由最低點 P 靜止釋放，則小球向右擺 θ 角到達 Q 點後便反向擺回。則小球由 P 點擺動到 Q 點的過程中，其重力位能、電位能、以及總位能（即重力位能與電位能總和）如何變化？



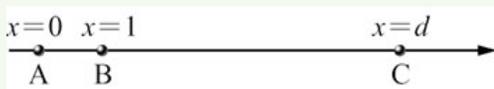
▲圖 6-45

10. 兩平行金屬板上帶等量異性電，兩板距離 d 時，兩平行金屬板的電位差為 V 。若電位差固定，將兩板的距離增為 $2d$ ，則
- (1) 電場變為幾倍？
 - (2) 金屬板的電量變為幾倍？
 - (3) 正電荷 q 從一金屬板受電力作用運動至另一金屬板，靜電力作功變為幾倍？

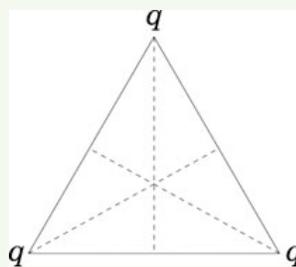
二、計算題

6-2 庫侖定律

11. 甲、乙、丙三個點電荷僅以靜電力交互作用，已知甲受的合力為 $2\vec{i}$ 牛頓，乙受的合力為 $-3\vec{j}$ 牛頓，其中 \vec{i} 與 \vec{j} 分別代表沿 $+x$ 軸與 $+y$ 軸的單位向量，則丙所受的合力為何？
12. 在 x 軸上有三個點電荷，如圖 6-46 所示。電荷 A 置於原點，其電量為 $Q_A = 1.6 \times 10^{-5} \text{ C}$ ；電荷 B 置於 $x=1 \text{ m}$ 處，其電量為 $Q_B = -9.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ ；電荷 C 置於 $x=d$ 處，其電量為 Q_C 。回答下列問題
- (1) 要使電荷 C 所受的靜電力為零， d 應為何？（無限遠處除外）
 - (2) 要使電荷 A 及電荷 B 所受的靜電力也分別為零，則 Q_C 應為何？
13. 如圖 6-47 所示，正三角形三頂點上各置有點電荷 q ，若於此三角形重心處放另一點電荷 Q 後，此四個點電荷恰可成靜力平衡狀態，則 Q 與 q 間之關係為何？

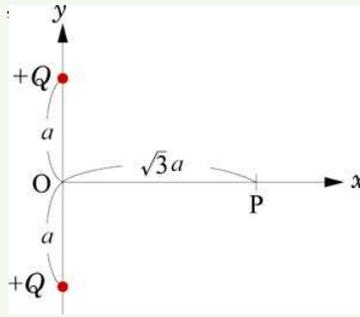


▲圖 6-46



▲圖 6-47

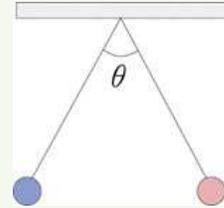
14. 如圖 6-48 所示，在 y 軸上與原點 O 相距 a 之兩點，各置電量均為 $+Q$ 之固定點電荷。今在 x 軸上與 O 點相距 a 之 P 點，有一電量為 $-q$ 的點電荷，其所受的靜電力為何？



▲圖 6-48

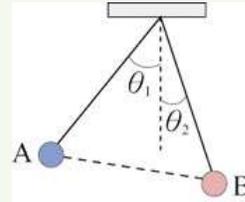
15. A、B、C 是三個完全相同的導體小球，其中 A 和 B 兩球各帶相等電量，相距 d ，其靜電力為 F 。今將原先不帶電之 C 球與 A 球接觸後，再與 B 球接觸，然後將 C 球移到遠處，最後 A、B 兩球間之靜電力為何？

16. 如圖 6-49 所示，質量與帶電量均相等的兩小球，各以等長的絕緣細線懸起。設平衡時兩線之張角為 θ ，則小球所受之靜電力量值與其所受重力量值之比為何？



▲圖 6-49

17. 如圖 6-50 所示，電量各為 $+q_1$ 及 $+q_2$ ，質量各為 m_1 及 m_2 之 A 和 B 二帶電質點，若各以等長之絲線共懸於一點，受靜電力排斥而分開，平衡時兩線與鉛垂線之夾角各為 θ_1 及 θ_2 ，則 m_1 及 m_2 的大小關係為何？



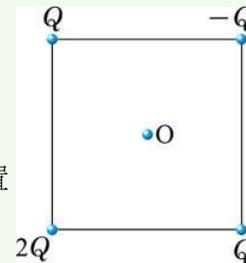
▲圖 6-50

6-3 電場與電力線

18. 在 y 軸上，於 $y=a$ 及 $y=-a$ 處各置一電量為 q 及 $-q$ 之點電荷，則在 y 軸上，於 $y=b$ ($-a < b < a$) 處的電場為何？

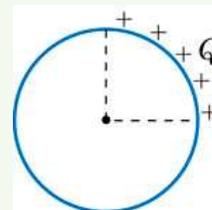
19. 相距為 L 的 A、B 兩電荷，電量分別為 q 以及 nq (n 為一正數)。在 A 和 B 連線上的電場為零處與 A 點的距離為何？

20. 如圖 6-51 所示，一邊長為 L 的正方形，在其四個頂點各放置點電荷，其電量分別為 $-Q$ 、 Q 、 $2Q$ 及 Q ，在正方形的中心點 O 處之電場為何？



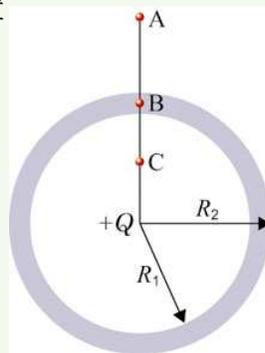
▲圖 6-51

21. 如圖 6-52 所示，當一環狀細絕緣線的四分之一均勻帶有電荷 Q 時，在圓心處產生的電場量值為 0.50 N/C 。若重新安排此絕緣環上的電荷(1)使其圓周的一半均勻帶有電荷 $2Q$ ，則在圓心處造成的電場量值為何？(2)再讓絕緣環的另一半均勻帶有電荷 $-2Q$ ，則在圓心處造成的電場量值為何？



▲圖 6-52

22. 電中性的金屬球殼內外半徑各為 R_1 和 R_2 ，今在其球心處置一點電荷 $+Q$ ，如圖 6-53 所示。若 r_A 、 r_B 、與 r_C 分別表示 A、B、與 C 三點至球心的距離，則(1)在點 A、B、C 處的電場各為何？(2)若將球殼接地，則各點的電場強度又如何改變？

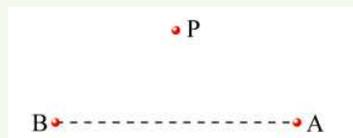


▲圖 6-53

23. 兩個大小相同的導體水銀球，各帶不同電性之電荷，球表面之電場量值分別為 E 及 $2E$ 。今將兩水銀球合成一大水銀球，則此大水銀球表面之電場量值為何？
24. 質量為 m 、帶電量為 $+q$ 的小物體，置於均勻電場 E 中，以長 l 之絕緣細繩懸之，使其作小角度的擺動。若電場方向與重力加速度方向相同，則小物體擺動週期為何？
25. 兩平行金屬板帶等量異性電，一質子射入兩金屬板間，且其射入方向垂直電場方向，當穿出電場時，其偏離原射線之垂直距離為 d_p 。若改用動能相同之 α 粒子，則偏離之距離變為 d_α ，試求 d_p/d_α 為何？
26. 一質子與一 α 粒子同時從均勻電場的正極板處靜止釋放，在不計重力及空氣阻力的影響下，求兩者(1)在板間所受電力量值之比。(2)在板間加速度量值之比。(3)抵達負極板處之速率比。(4)在板間所經歷時間之比。

6-4 電位能、電位與電位差

27. 如圖 6-54 所示，在相距 a 的 A、B 兩處各固定一電量均為 $+q$ 之電荷，P 點位於 AB 連線的中垂軸上，且與 A、B 皆相距 $\frac{a}{\sqrt{3}}$ ，則(1)P 點之電位為何？(2)若 P 點置入



▲圖 6-54

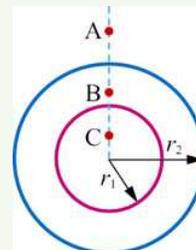
一電量 $+Q$ 的靜止電荷，當該電荷脫離 P 點釋放後，

其動能的最大值為何？(3)若 P 點處改為置入電量 $-Q$ 的靜止電荷，當該電荷自

P 點釋放，並限制在 AB 的中垂面上運動，其動能的最大值為何？

28. 一半徑為 0.5 公尺的金屬球體，置於乾燥空氣中，充電於其上使電壓達 63 萬伏特而無放電現象產生，則此球的帶電量為何？

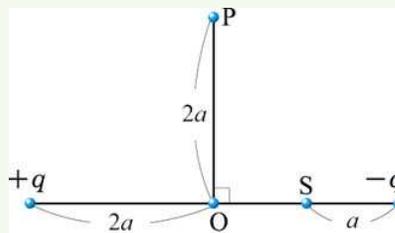
29. 如圖 6-55 所示，兩個半徑分別為 r_1 和 r_2 ($r_1 < r_2$) 之同心金屬薄球殼，各帶正電荷 q_1 與 q_2 。 r_A 、 r_B 及 r_C 分別為 A、B 及 C 三點與球心之距離，則 A、B 及 C 三點之電位各為何？



▲圖 6-55

30. 一半徑為 a 的金屬細圓環，均勻帶 $+Q$ 之電量，則(1)其圓環軸心上與圓環中心相距 r 處的電位為何？(2)若 $r=0$ 及 $r \gg a$ 時，其值各如何？

31. 如圖 6-56 所示，兩個點電荷的電量分別為 $+q$ 與 $-q$ ，其相距距離為 $4a$ 。若取兩電荷連線上之 S 點處的電位為零，則與 O 點相距 $2a$ 之 P 點處的電位為何？

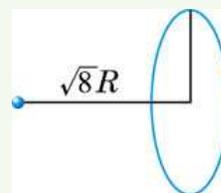


▲圖 6-56

32. 有兩個大小相同的導體水銀球帶不等電量，其電位分別為 V_1 和 V_2 。若將兩水銀球合成一大水銀球，則其電位為何？

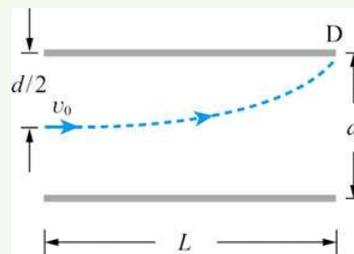
33. 一質子的質量為 m ，電量為 e ，從極遠處以 v 的速度沿兩者連線方向朝靜止的 α 粒子接近，假設 α 粒子可自由移動，且兩者間僅有庫侖力作用，則其間的最接近距離為何？

34. 如圖 6-57 所示，一固定的均勻帶電圓環，半徑為 R ，帶電量為 $+Q$ 。另有一點電荷質量為 m ，帶電量為 $-q$ ，被侷限在圓環的中心垂直軸上運動。若點電荷在離圓環中心 $\sqrt{8}R$ 處由靜止被釋放，則點電荷到達圓環中心時的速率為何？



▲圖 6-57

35. 有帶等量異性電的平行金屬板，內部為真空，上下兩個電極板為正方形，邊長均為 L ，兩板間距為 d ，如圖 6-58 所示。兩板間的電位差為 V ，且形成一均勻電場。一電子從兩板左端的正中央以初速 v_0 射入，其方向平行於電極板之一邊，並恰能到達電極板邊緣處的 D 點。電子的電荷以 $-e$ 表示，質量以 m 表示，重力可不計。回答下列問題



▲圖 6-58

(1) 電子打到 D 點時的動能為何？

(2) 電子初速 v_0 至少必須大於何值，才能避開電極板，逸出板外？