



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，稱為場源電荷。若在與場源電荷距離 r 處置入電量 q 的測試點電荷，則該電荷所受靜電力量值為 F ；若測試電荷之電量增加為 $2q$ ，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，測試電荷所受的靜電力 \vec{F} 與其電量 q 的比值，即 \vec{F}/q ，將與測試電荷本身電量無關，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

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (6-2)$$

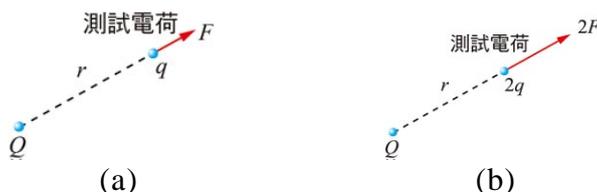


圖 6-12 當檢驗電荷在電場的位置不變，若其電量由 q 增為 $2q$ ，則其所受靜電力量值由 F 增為 $2F$ 。

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

$$E = \frac{KQ}{r^2} \quad (6-3)$$

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。

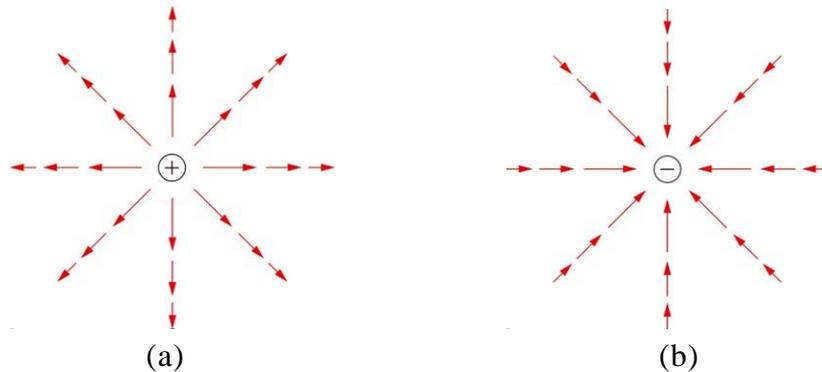


圖 6-13 位於中心處的(a)正電荷與(b)負電荷在各位置所產生的電場，紅色箭頭之長度及方向分別代表電場之量值與方向。

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

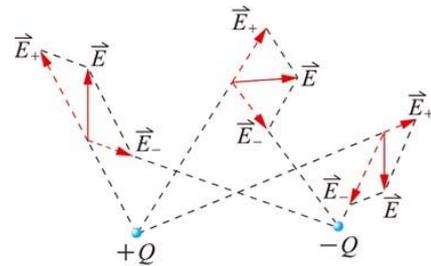


圖 6-14 在空間中任意點的電場 \vec{E} 為電量 $+Q$ 與 $-Q$ 的點電荷所產生電場 \vec{E}_+ 及 \vec{E}_- 的向量和。

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 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 6-2 |

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？

[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 點所生電場則為 \vec{E}_2

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

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 點

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

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

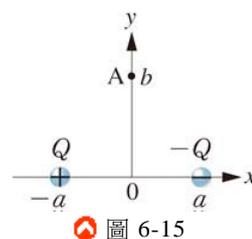


圖 6-15

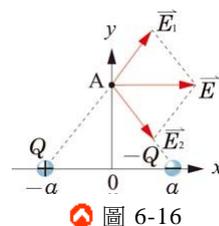


圖 6-16

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。

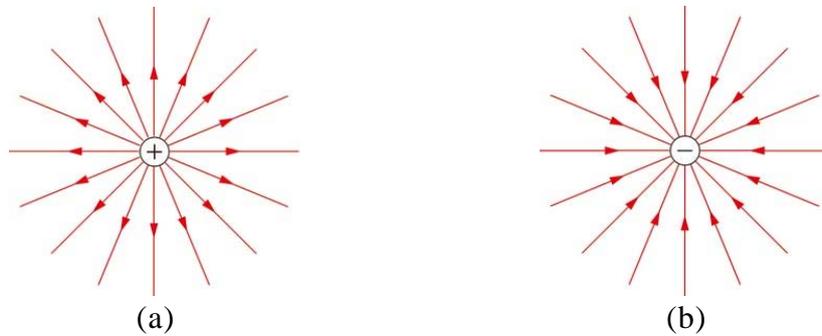


圖 6-17 (a) 正電荷與 (b) 負電荷的電力線分布，紅色有向曲線代表電力線。

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。

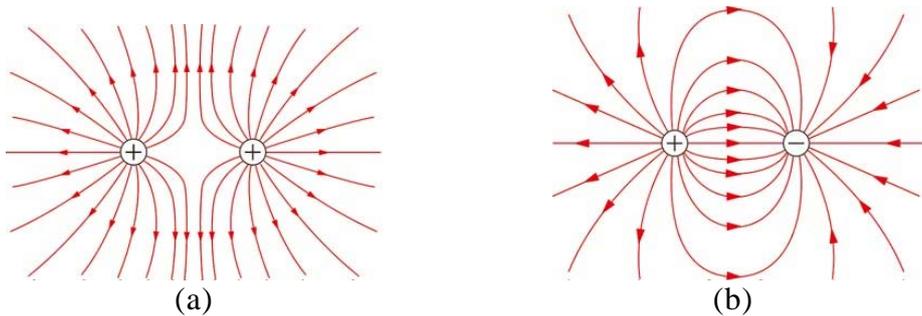


圖 6-18 (a) 鄰近的兩個等量同性電荷與 (b) 鄰近的兩個等量異性電荷周圍之電力線。

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代表電場量值。

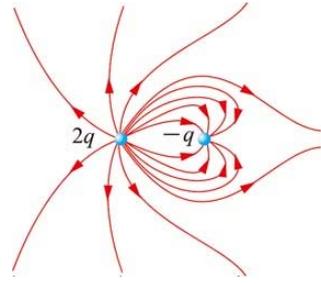


圖 6-19 鄰近的兩個不等量異性電所生之電力線。

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

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。

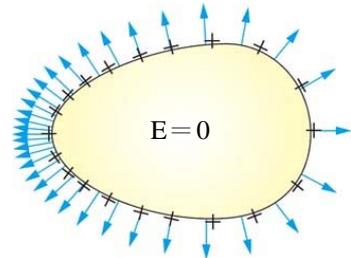


圖 6-20 靜電平衡時，淨電荷分布在導體表面，導體內部的電場 E 為零。

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。

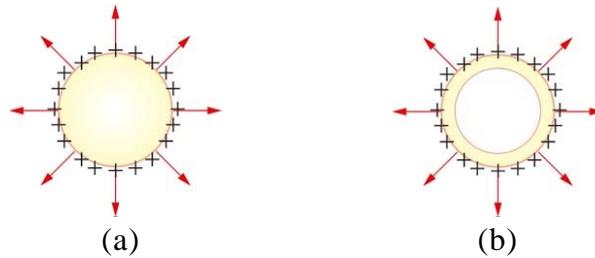


圖 6-21 (a)導體球與(b)導體球殼上的電荷分佈與其周圍之電力線。

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）。

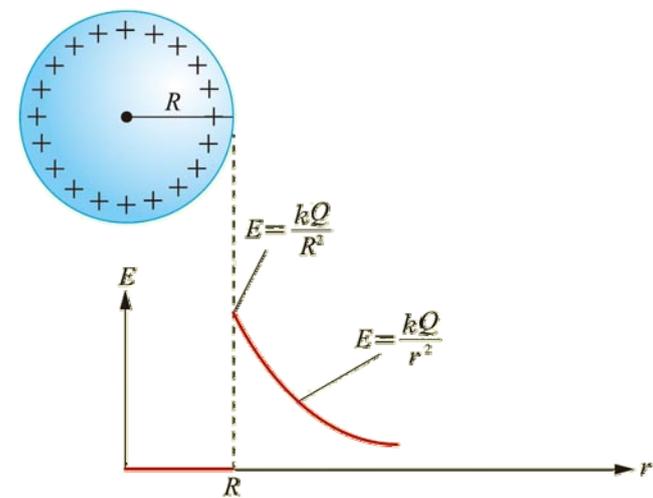


圖 6-22 半徑為 R 、帶電量為 +Q 之導體球（殼），與球心相距 r 處之電場量值 E 的關係圖。

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。

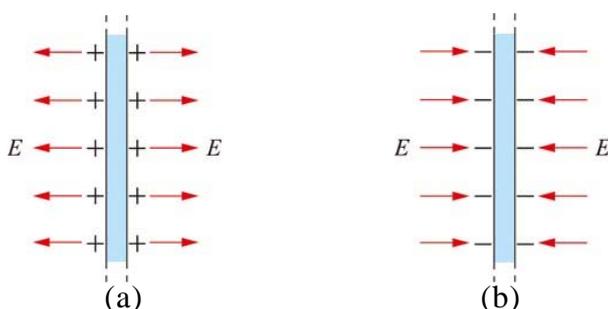


圖 6-23 (a) 均勻帶正電的大平板與 (b) 均勻帶負電的大平板周圍之電力線

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）。

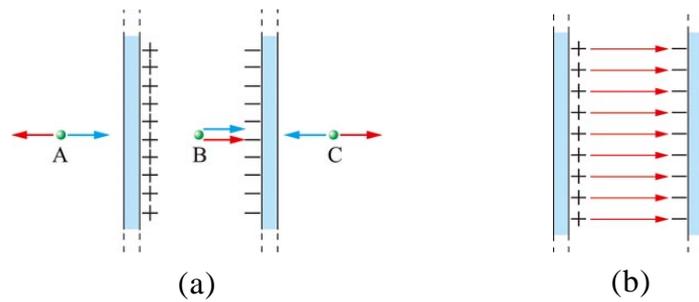


圖 6-24 帶等量但電性相反的無限大導體平板平行而立所生之電場與電力線。(a)紅色和藍色箭矢分別代表正電板和負電板所產生的電場。在 A 和 C 兩點的電場剛好抵消，而在 B 點的電場則因同向疊加而加倍。(b)電力線僅存在於兩導體平板間的區域，且為均勻電場。

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，故運動軌跡向下偏折。

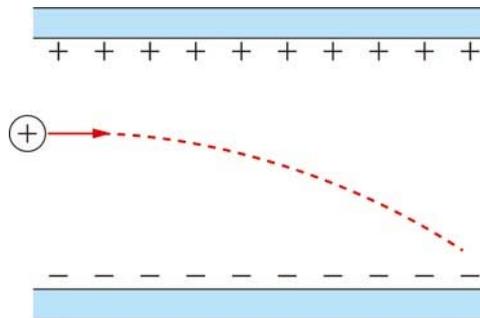


圖 6-25 正電荷水平進入垂直向下的均勻電場，受到向下的靜電力作用後，運動軌跡向下偏折。（電荷所受重力遠小於靜電力，而可不計重力）

| 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

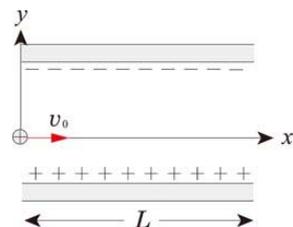


圖 6-26

- (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。

- (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 的 y 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。

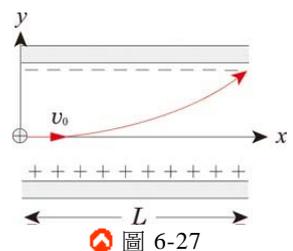


圖 6-27