

1. 電荷

• 電荷的單位和起電

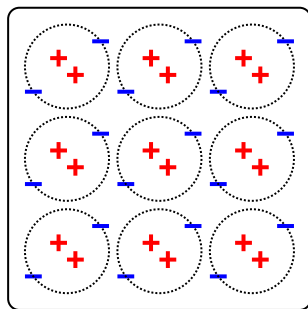
1 e = 一個質子所帶的電荷。

$1\text{ C} = 6 \times 10^{18}$ 個質子所帶的電荷。（所以 6×10^{18} 個電子所帶的電荷為 -1 C ）

一個中性的物體內，電子和質子的數目相等。如果把物體部份電子抽走，這個物體便會帶正電；相反，如果把額外的電子加進去，這個物體便會帶負電。這個過程稱為對物體**起電**。

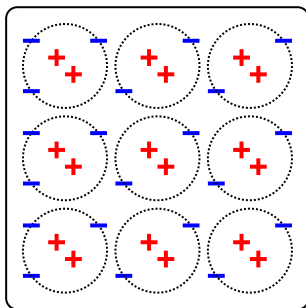
• 對絕緣體起電

絕緣體內**軌道電子**圍繞所屬原子核不停轉旋。

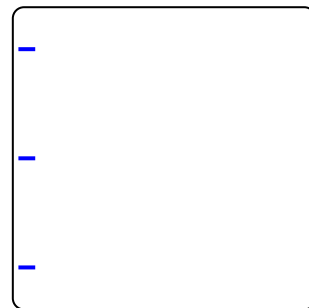


一塊中性的絕緣體

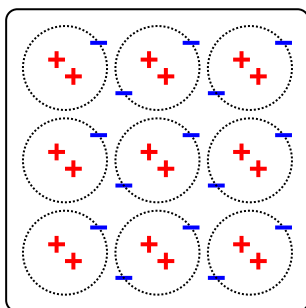
用另一塊不同物料的絕緣體摩擦它時，它的表面可能有電子被取走或有額外電子被加入。當額外的電子加進它表面時，這個部份便會帶有負電荷：



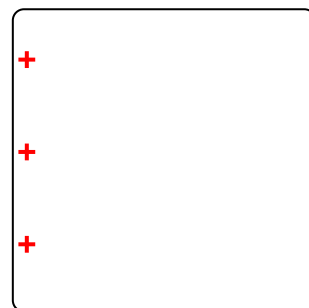
繪作



當表面的電子被取走時，這個部份便會帶正電荷：



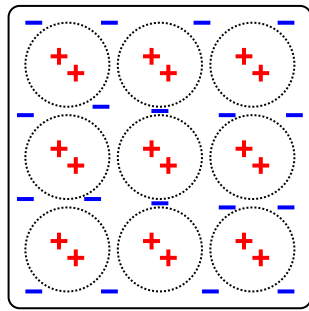
繪作



絕緣體內的電荷會停留在原來地方，不會移動。絕緣體表面的電荷可以用火來回掃幾次來消除。

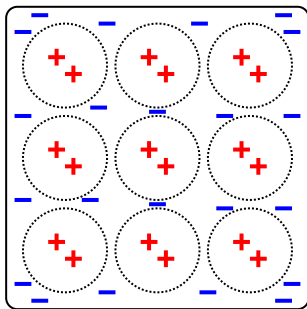
- 對導體起電

導體內自由電子不停穿梭整個物體。

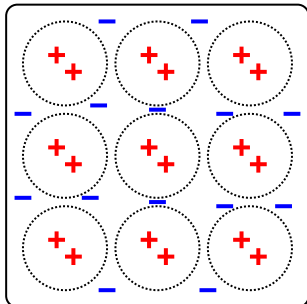
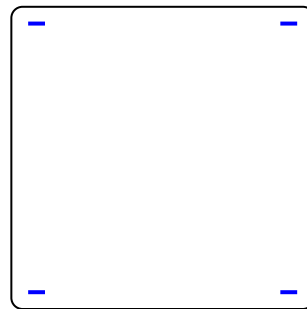


一塊中性的導體

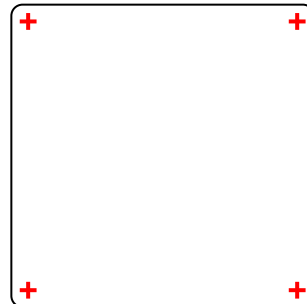
當原有電子被取走時，導體會帶正電荷；當有額外電子被加進時，導體會帶負電荷。但不論電荷加在導體的什麼地方，電荷都會在導體內重新分佈至表面（尤其尖角凸出）的地方。



繪作



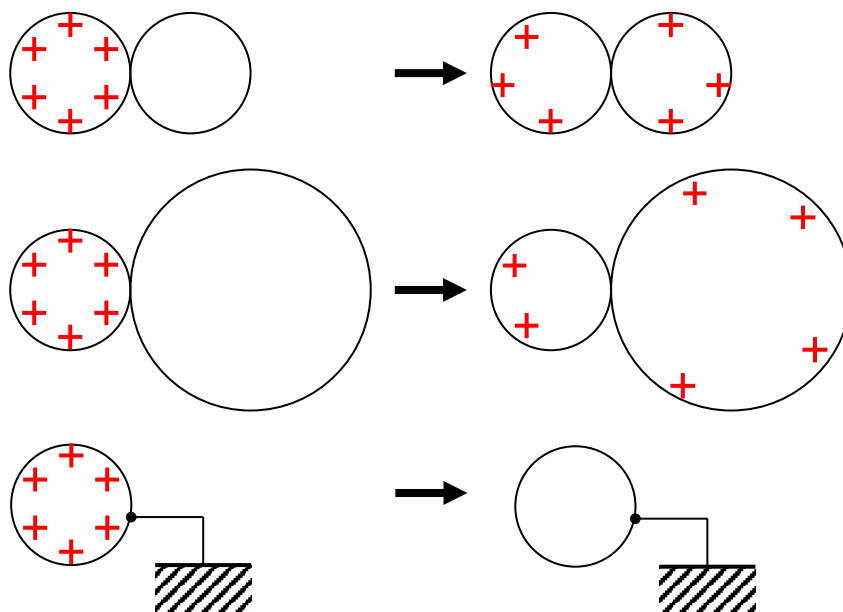
繪作



導體可以透過 (1) 連接超高壓電源(EHT)，(2) 授受或 (3) 感應起電。導體的電荷可以透過接地移除。

- **兩個導體間的授受**

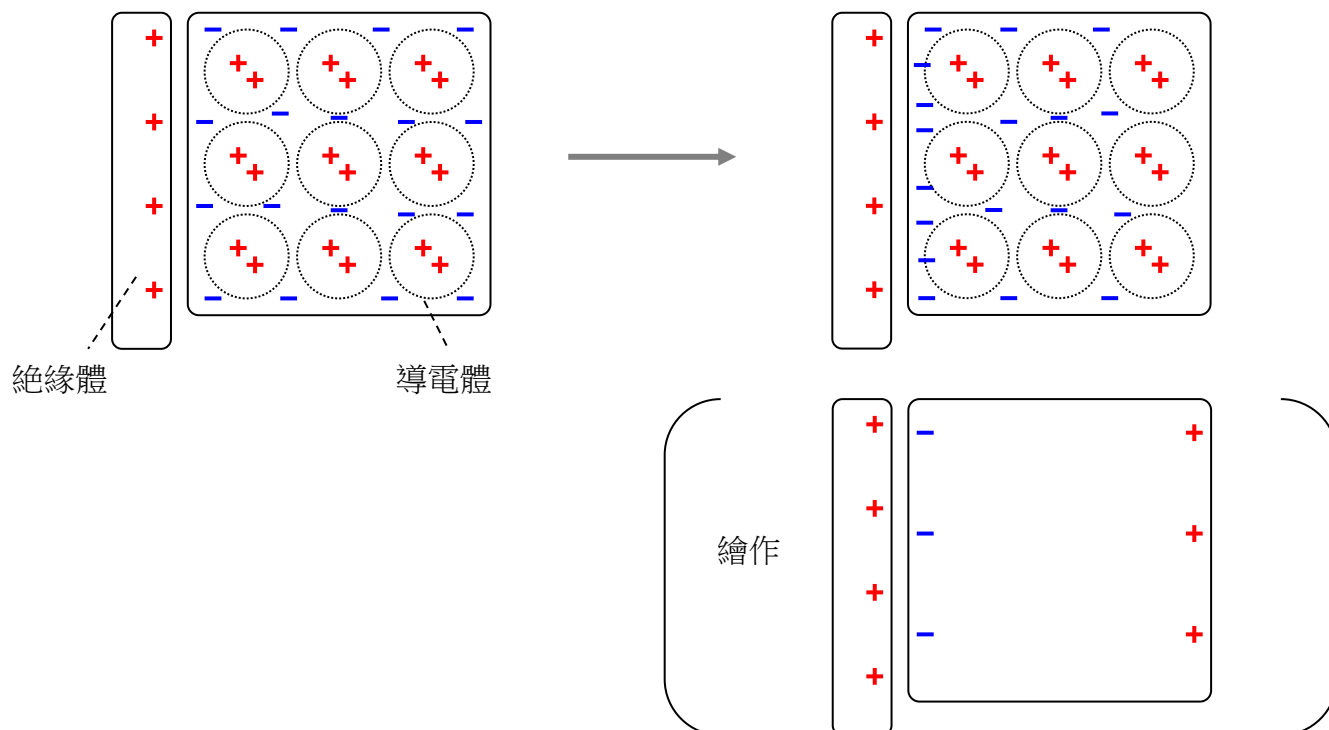
一個帶電的導體接觸到一個中性的導體時，電荷會重新分佈至兩個導體的表面，較大的一個會分得較多電荷。



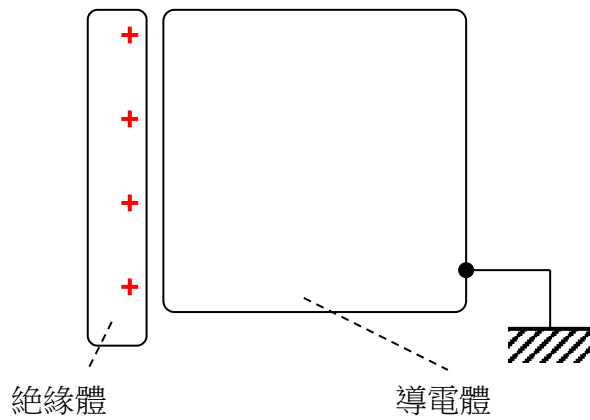
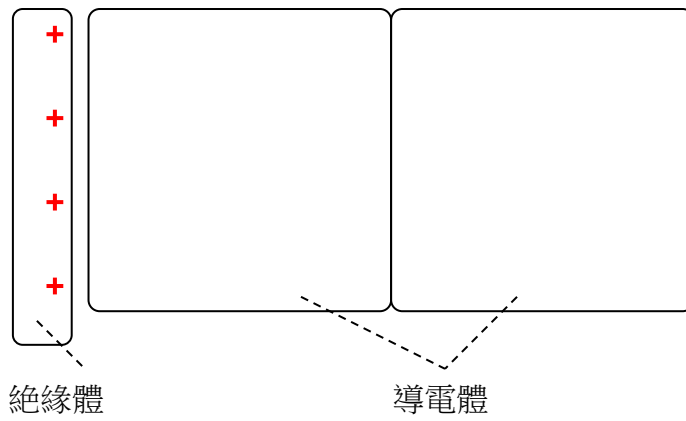
海洋是地球上最大的導體。如果一個帶電的導體跟海洋連接，它的所有電荷都會被海洋分去，這個去除電荷的方法稱為**接地**。

- **感應**

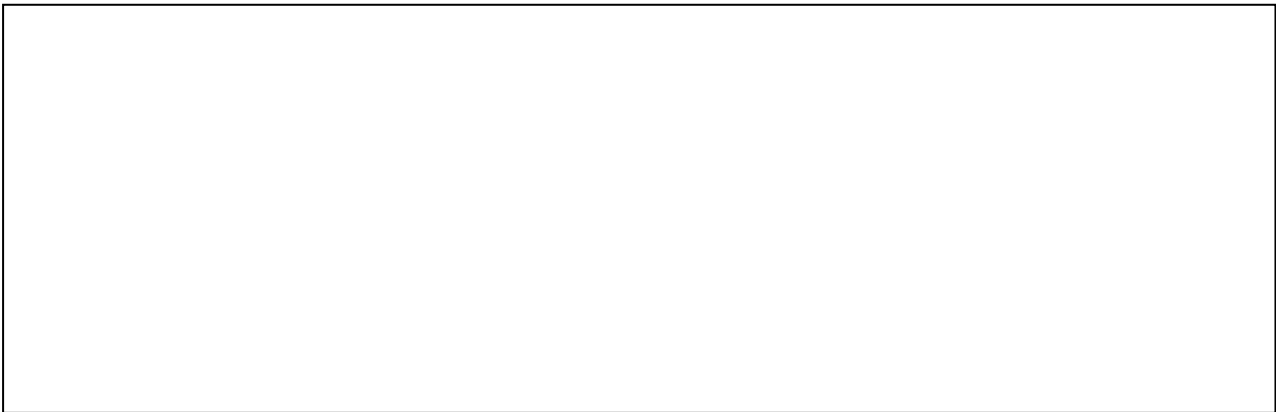
導體內電荷的分佈會受到附近帶電物體的影響，這個現象稱為**感應**。



例：



- 靜止電荷的應用



2. 電場

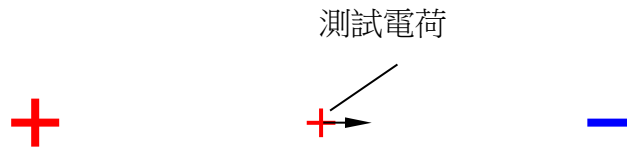
- 如何求得電場圖案？

舉例，以下空間有一正電荷區域和一負電荷區域，要得知這個空間的電場圖案，可使用以下步驟：

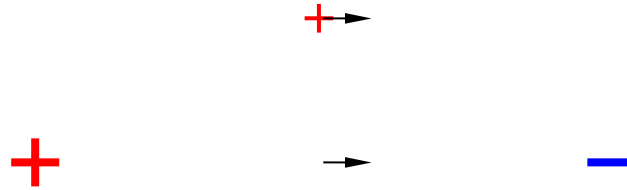
+

-

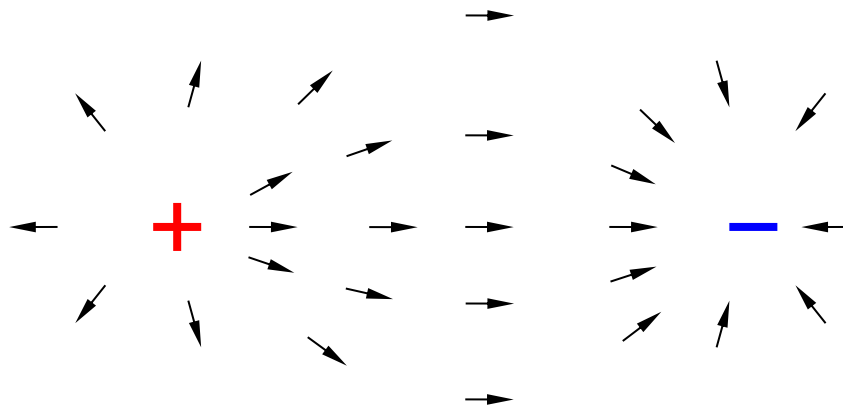
在空間內隨意選一點，把一個細小的正電荷（稱為**測試電荷**）放在這點，然後以箭頭記錄測試電荷受到的力的方向：



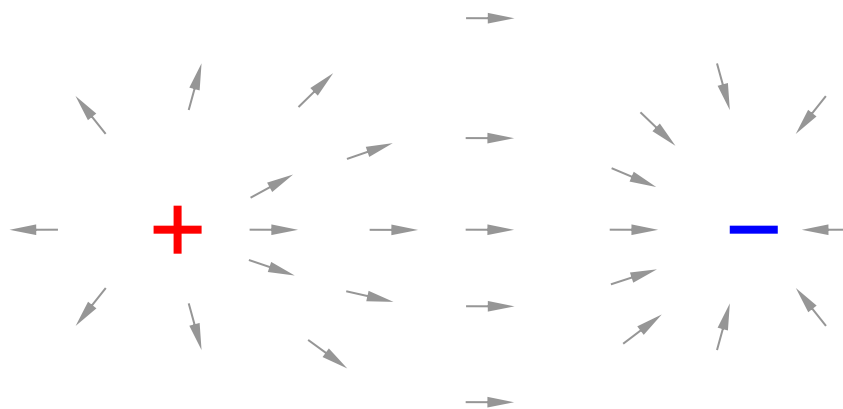
然後再隨意選另一點，把測試電荷放在這點，再記錄測試電荷受到的力的方向：



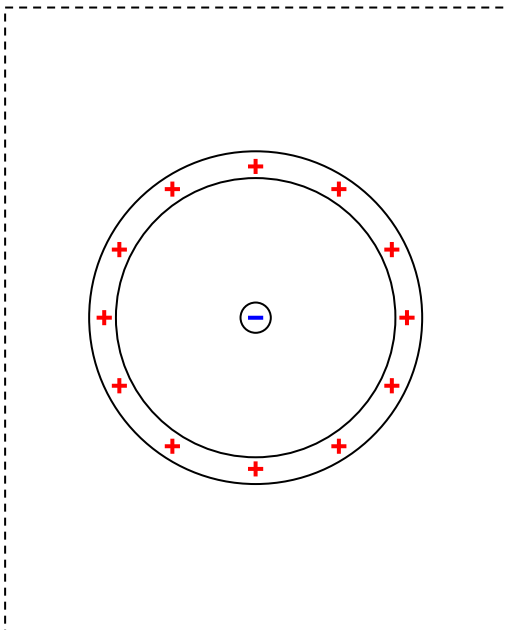
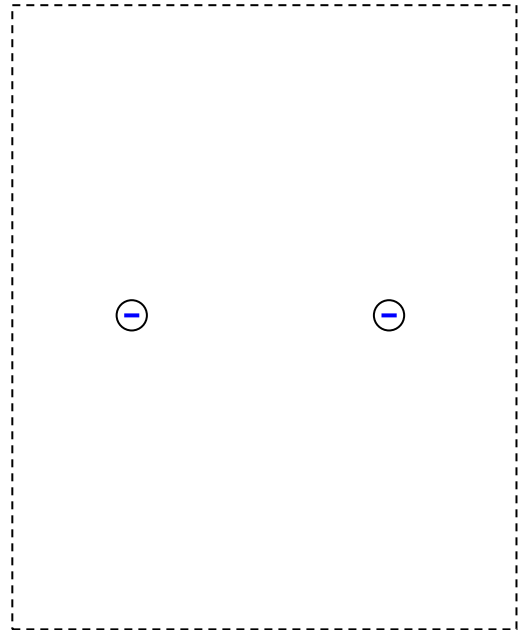
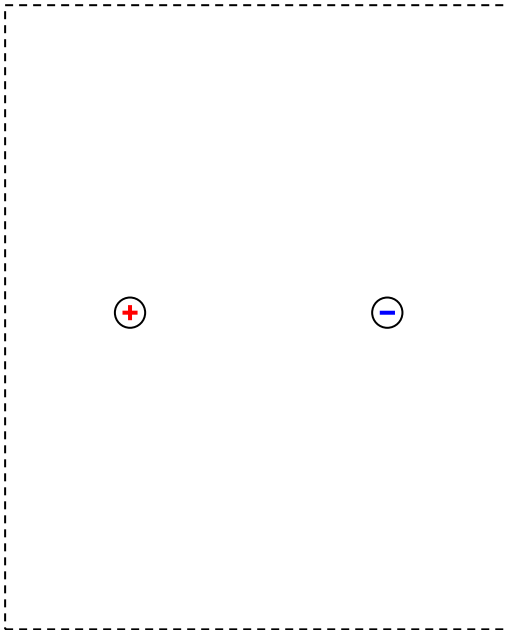
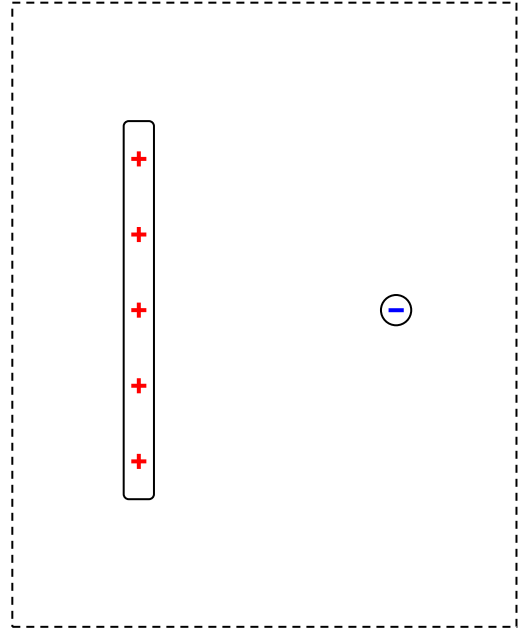
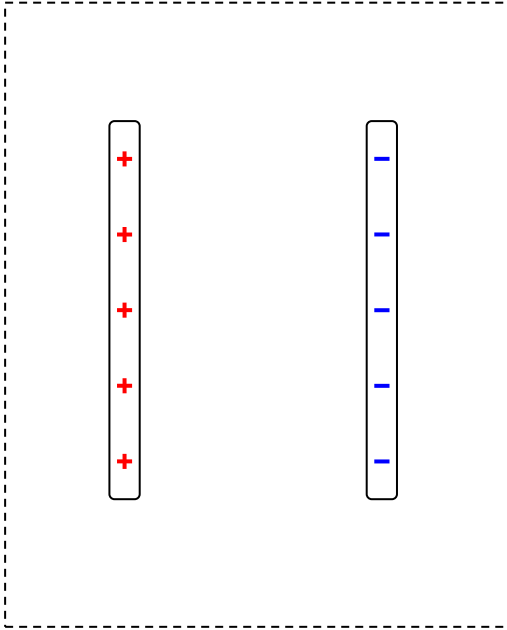
重復以上步驟便可在空間上記錄很多箭頭，這就是**電場圖案**。



用綫把箭頭連起來會較易表達。

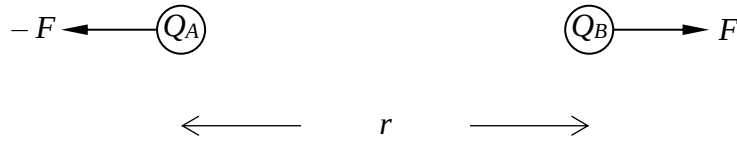


- 常見電場圖案



• 靜電力及電場強度

兩個帶電點分別帶有 Q_A 和 Q_B 的電荷，它們相距 r 。



它們之間的靜電力可用下式求得：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_A Q_B}{r^2}$$

F 靜電力 [N]（正為相斥，負為相吸）

ϵ_0 真空介質常數 $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$

Q_A 及 Q_B 兩個帶電點的電荷 [C]

r 兩個帶電點的距離 [m]

如果把上圖的其中一個帶電點（例如 Q_B ）看作是一個測試電荷， $\frac{F}{Q_B}$ 則是「每多放入 1 C 電荷在 Q_B 時， Q_B 多受到的靜電力」，這稱為**電場強度**。電場強度與靜電力同是向量。

$$E = \frac{F}{Q_B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_A}{r^2}$$

E 電場強度 [N C^{-1}]（正為相斥，負為相吸）

F 靜電力 [N]（正為相斥，負為相吸）

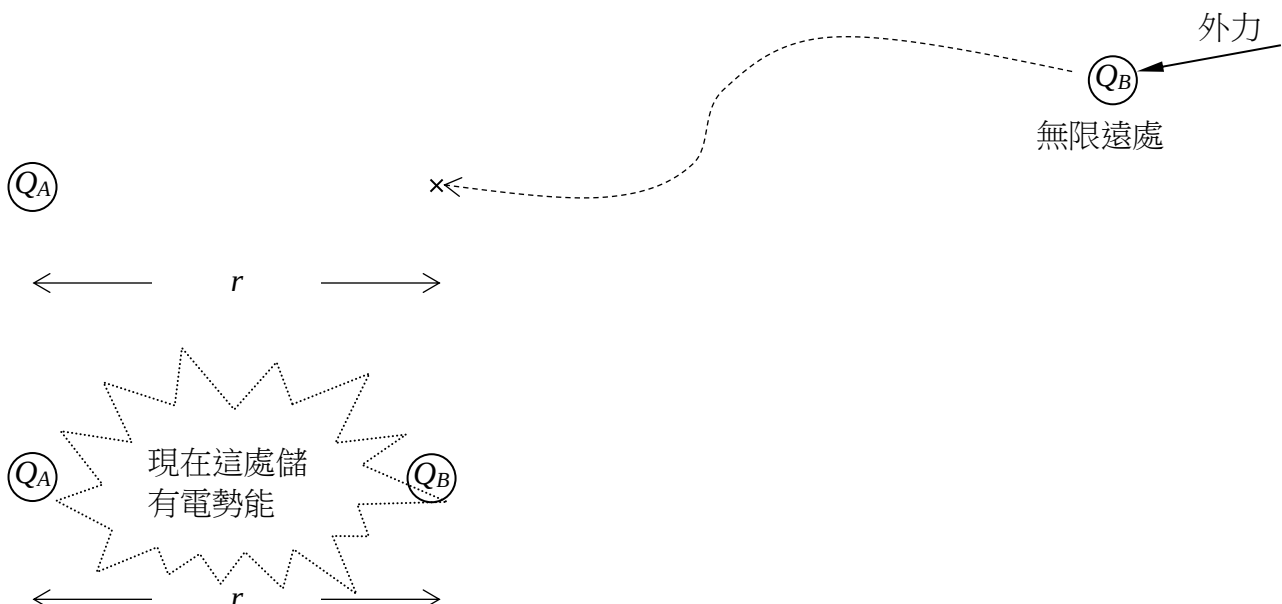
ϵ_0 真空介質常數 $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$

Q_A 及 Q_B 兩個帶電點的電荷 [C]

r 兩個帶電點的距離 [m]

• 電勢能及電勢

如果 Q_A 和 Q_B 相距極遠，它們便互不施力，整個系統亦無能量。現先假設 Q_A 和 Q_B 帶同性電荷，則 Q_A 和 Q_B 互斥。如果用外力把 Q_B 很慢地壓至與 Q_A 的距離為 r 的位置，期間所作的功便是加進系統的能量，稱為系統的**電勢能**。



同樣，如果 Q_A 和 Q_B 帶為異性電荷，系統便會透支電勢能。另外，電場與所有物理上可接納的力場一樣，必須是**與路徑無關**。

新系統的電勢能可用下式求得：

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_A Q_B}{r}$$

U 電勢能 [J]（正為電場儲入勢能，負為電場放出勢能）

ϵ_0 真空介質常數 $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$

Q_A 及 Q_B 兩個帶電點的電荷 [C]

r 兩個帶電點的距離 [m]

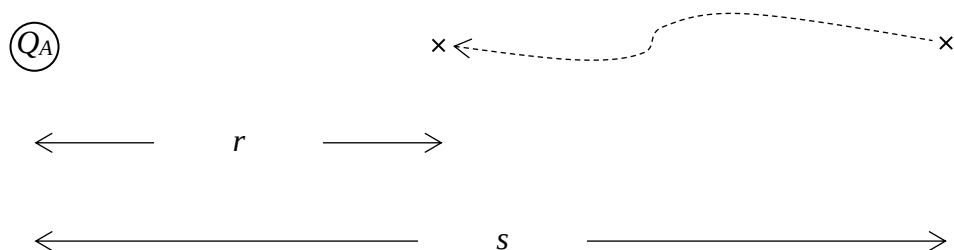
證明：

如果把上圖的其中一個帶電點（例如 Q_B ）看作是一個測試電荷， $\frac{U}{Q_B}$ 則是「每把 1 C 電荷由無限遠移至與 Q_A 的距離為 r 的位置時，電場因而多儲存的電勢能」，這稱為**電勢**。電勢能與電勢同是標量。電勢可用下式求得：

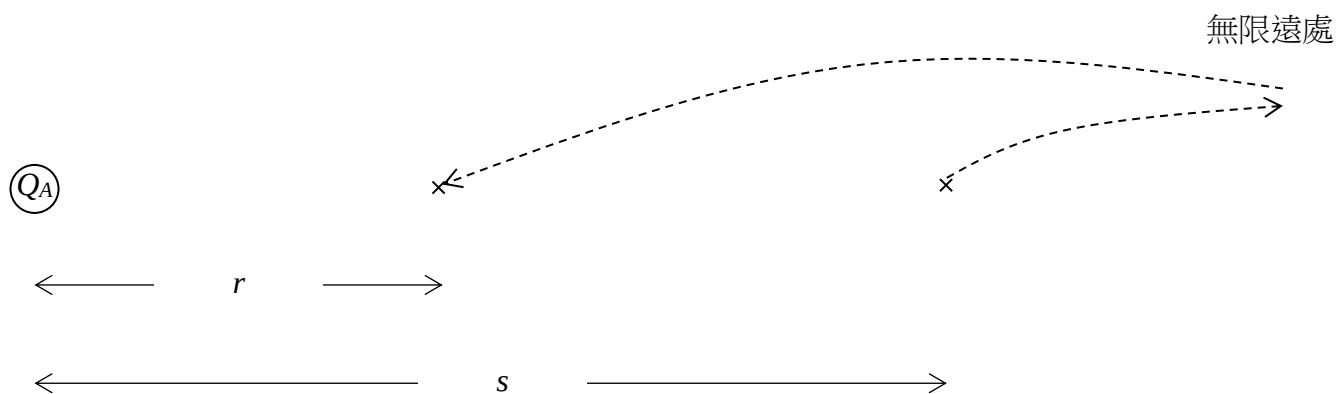
$$V = \frac{U}{Q_B} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_A}{r}$$

V	電勢 [J C^{-1}] (正為電場儲入勢能, 負為電場放出勢能)
U	電势能 [J] (正為電場儲入勢能, 負為電場放出勢能)
ϵ_0	真空介質常數 $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$
Q_A 及 Q_B	兩個帶電點的電荷 [C]
r	兩個帶電點的距離 [m]

電勢差是指「每把 1 C 電荷由與 Q_A 的距離為 s 的位置, 壓至與 Q_A 的距離為 r 的位置時, 電場因此而多儲存的電势能」。



但由於力場是與路徑無關, 現把路徑改為先由與 Q_A 的距離為 s 的位置移至無限遠處, 再由無限遠處移至與 Q_A 的距離為 r 的位置。



從而得知

$$V_{sr} = V_r - V_s$$

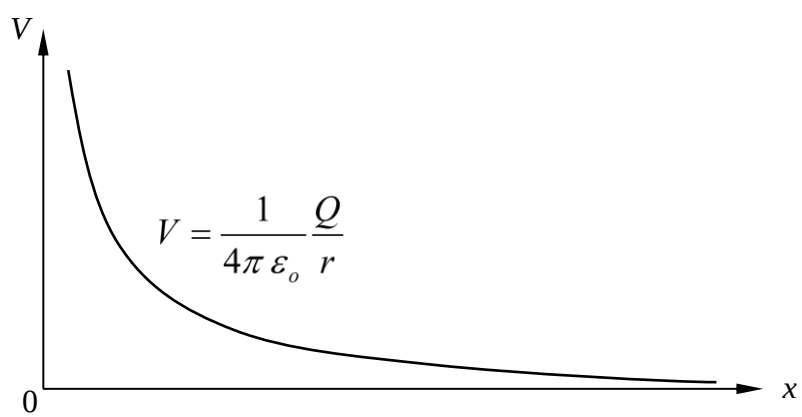
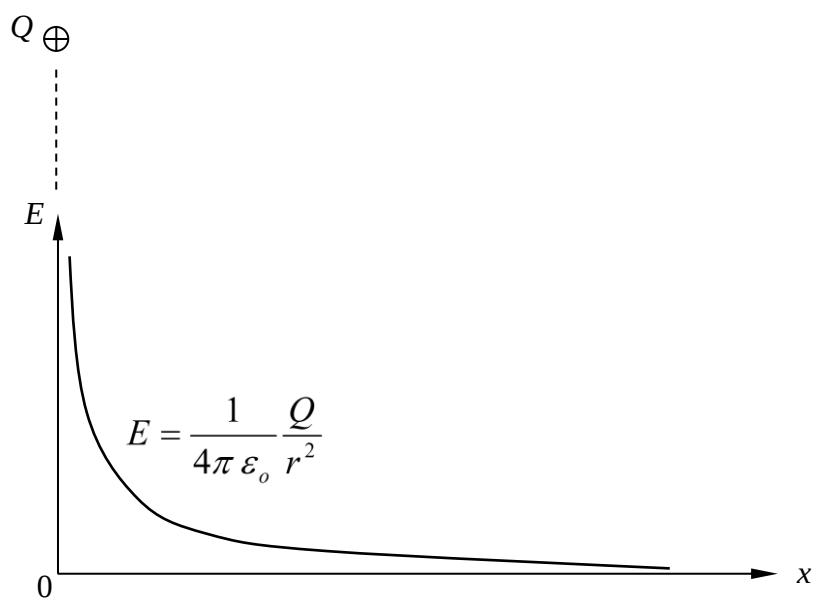
V_{sr} 由位置 s 移至位置 r 的電勢差 [J C^{-1}]

V_r 位置 r 的電勢 [J C^{-1}]

V_s 位置 s 的電勢 [J C^{-1}]

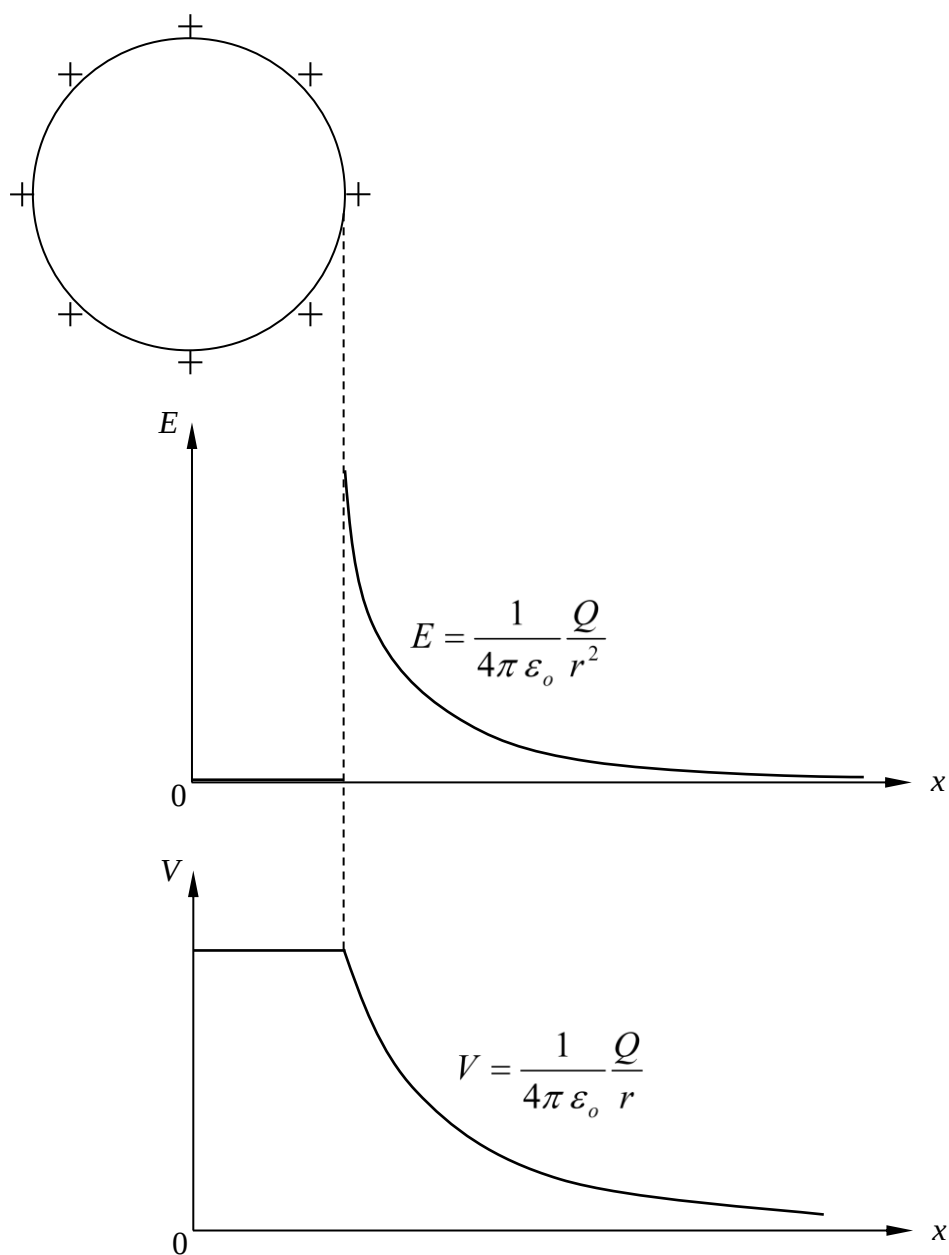
- 常見電勢

- (1) 點電荷



(2) 空心球殼形電荷分佈

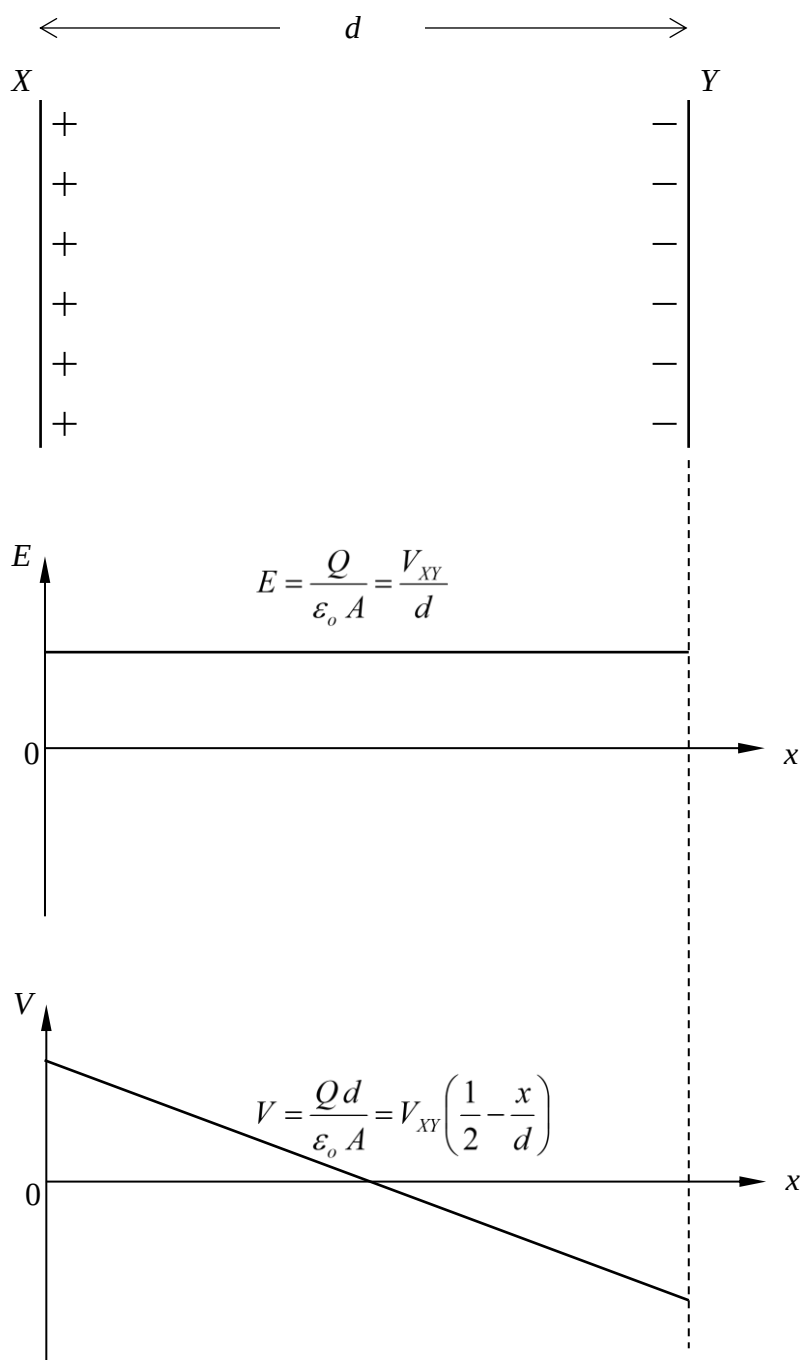
殼內電場強度 E 為 0，電勢 V 為常數；殼外電場強度 E 跟如果所有殼上的電荷集中在球心所產生的電場強度相同，電勢 V 亦跟如果所有殼上的電荷集中在球心所產生的電勢相同。



注意：電荷傳入實心金屬球體後，電荷分佈仍是空心球殼形。

(3) 平行板形電荷分佈

每塊板的面積均為 A ，它們分別帶有 $+Q$ 和 $-Q$ 的電荷。



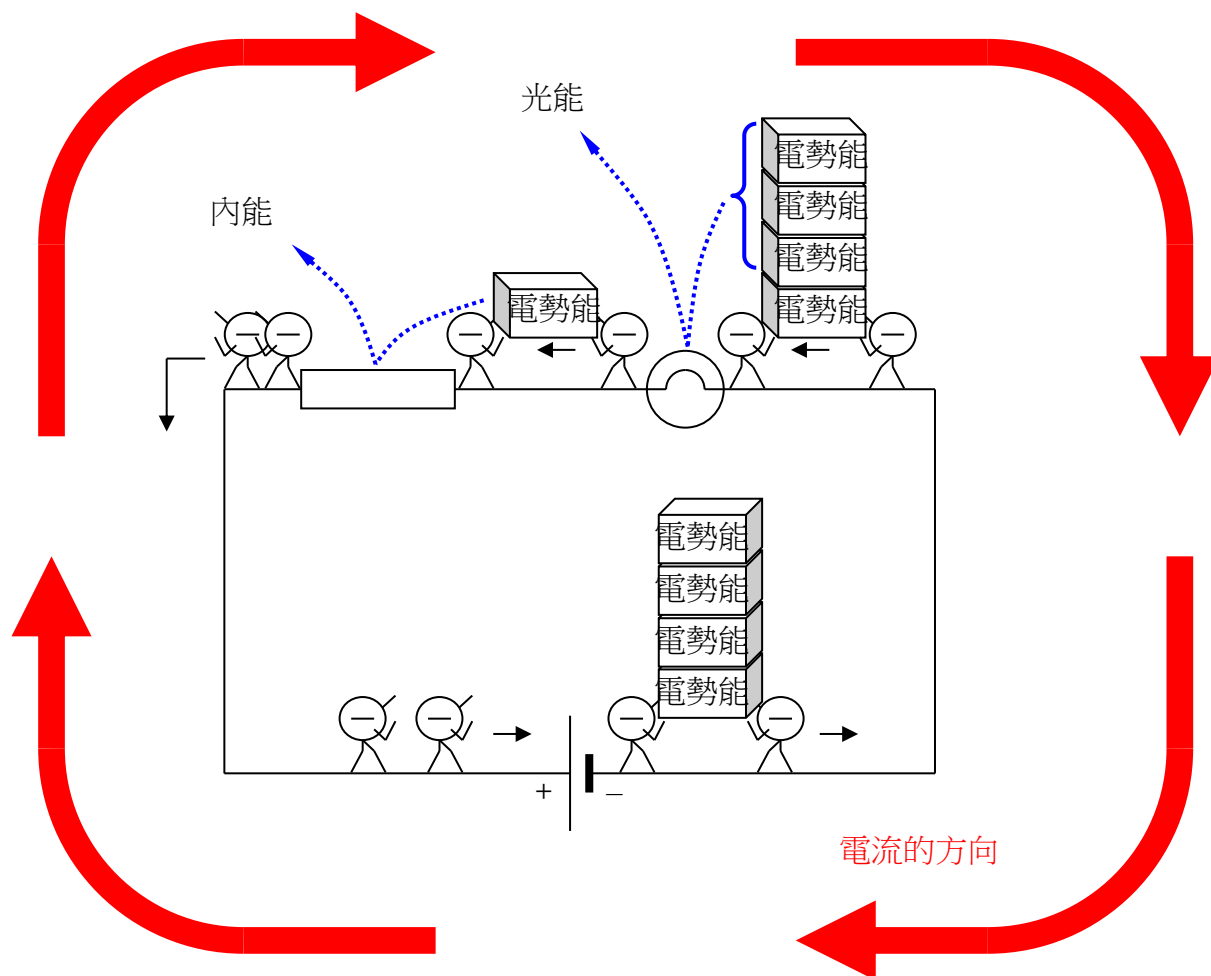
- **電場強度量值與電勢的數學關係**

你現在想用電勢找出某個位置的電場強度的量值，下式只能用於你已經知道通過該位置的電場線（包括其方向）。

$$E = -\frac{dV}{dx}$$

證明：

3. 電路



注意：

- 電子是由電池的負極流出，最後返回電池的正極。但基於歷史原因，我們常說有「電流」從電池的正極流出，再流回電池的負極。
- 電路中流動的電子是來自電路內的導線等金屬物，而非來自電池。電池只是為每顆流經的電子補充電勢能。
- 每顆電子回到電池正極前必須放下所有電勢能。
- 所有電子由電池負極流出後，最終必須返回電池正極。

流經某點的**電流** I [A] = 每秒有多少庫倫的電子流經該點

某電池的**電動勢** [V] = 該電池為每「庫倫」流經的電子補充多少能量

某零件上的**電壓降** V [V] = 每「庫倫」流經該零件的電子放出多少能量

某零件上的**功率** P [W] = 每秒有多少能量在該零件上放出

從上述定義可獲得

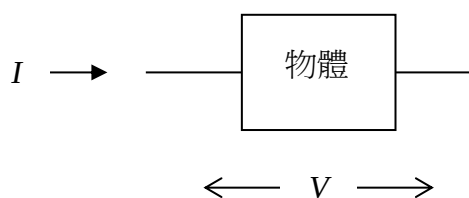
$$P = VI$$

證明：

4. 歐姆定律

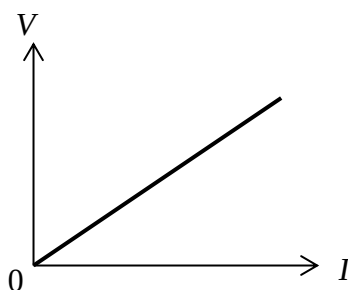
• 電流-電壓關係

我們常希望得知跨在一個物體的電壓 V 跟流經它的電流 I 的關係



• 歐姆定律

如果上圖中的物體是金屬塊，我們發現 $I \propto V$ 。



V - I 綫圖的斜率稱為電阻 R 。

$$R = \frac{V}{I}$$

R 金屬塊的電阻 [Ω]

V 金屬塊上的電壓降 [V]

I 流經金屬塊的電流 [A]

注意：以上關係只限於金屬，並只限於流經的電流不太大，從而不會使金屬發熱。

利用以上發現，可以得知：

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2 R$$

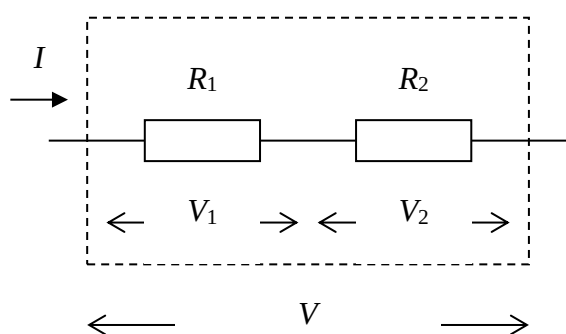
P	金屬塊上的功率 [W]
R	金屬塊的電阻[Ω]
V	金屬塊上的電壓降[V]
I	流經金屬塊的電流[A]

證明：

電阻器其實只是一塊金屬，在電路中提供指定的電阻。

- 串聯和並聯電阻的等效值

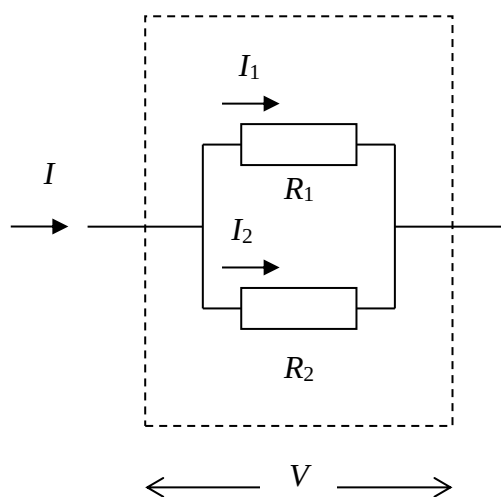
串聯



$$R = \frac{V}{I} = R_1 + R_2$$

R 代表圖中虛綫部份的等效電阻

並聯



$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

上述結果可以用於多於兩個電阻串聯或並聯。

證明：

串聯便捷公式：

電壓

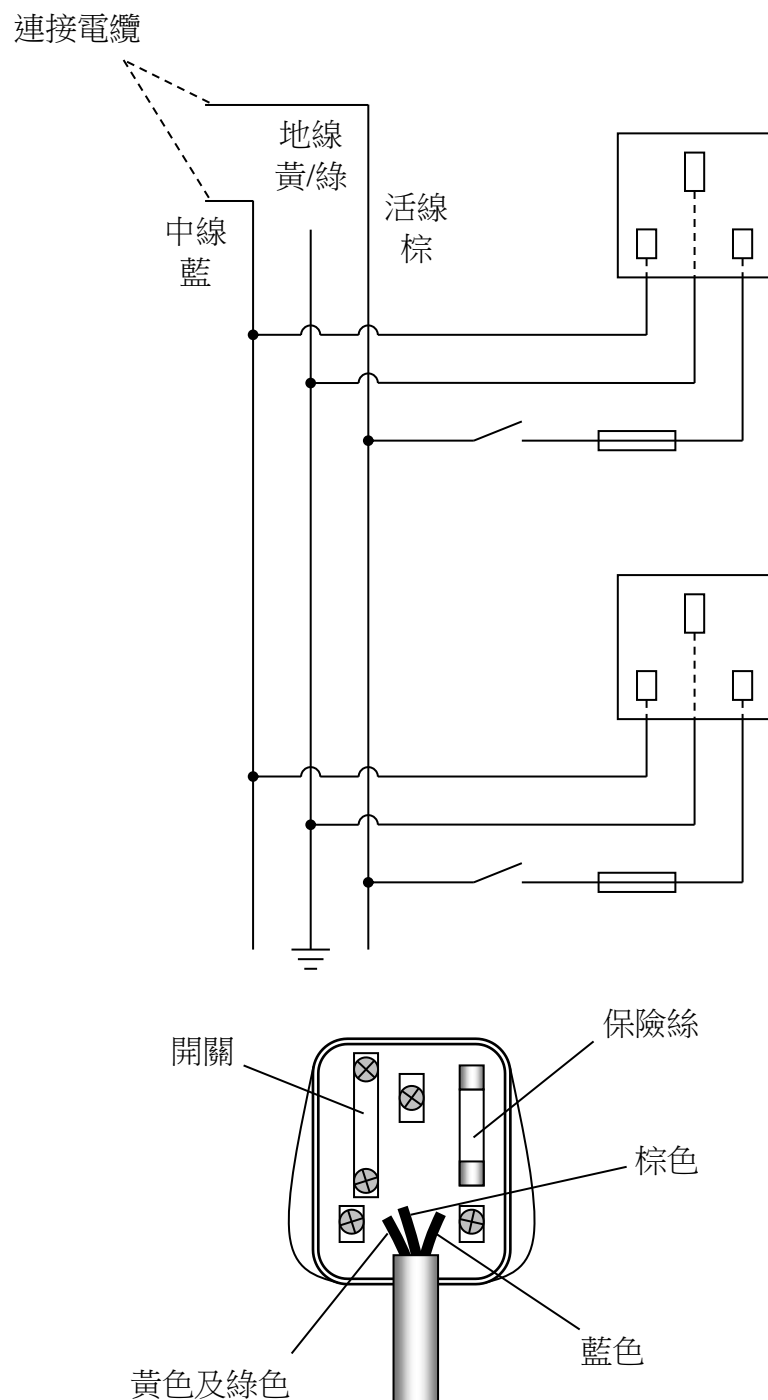
電流

並聯便捷公式：

電壓

電流

5. 家居電路



注意：

- 香港的電力公司為家庭用戶提供的「平均」電壓為 220 V，頻率為 50 Hz 的交流電。供電的峰值電壓其實是 $220 \times \sqrt{2}$ V，即是 311 V。
- 用戶的地線並非通往電廠。
- 開關及保險絲應接在活線上。
- 保險絲的額定電流值應略大於正常工作電流。

6. 磁力及磁場強度

理論上磁場的公式與電場相似：

$$\text{磁力} = \text{常數} \times \frac{(\text{磁荷}_{\text{授}}) \times (\text{磁荷}_{\text{受}})}{r^2}$$

而磁場強度的定義亦跟電場相似。則當受方磁荷很小時，每增加單位受方磁荷放該處時，受方所多受到的磁力。所以

$$\text{磁場強度}_{\text{授}} = \text{常數} \times \frac{(\text{磁荷}_{\text{授}})}{r^2}$$

或者

$$\text{磁力} = \text{磁場強度}_{\text{授}} \times (\text{磁荷}_{\text{受}})$$

問題是以上公式中「磁荷」是向量：

$$\text{磁荷} = \text{電流} \times \text{相關的電線長度} \quad \text{或者} \quad \text{磁荷} = \text{粒子所帶的電荷} \times \text{速度}$$

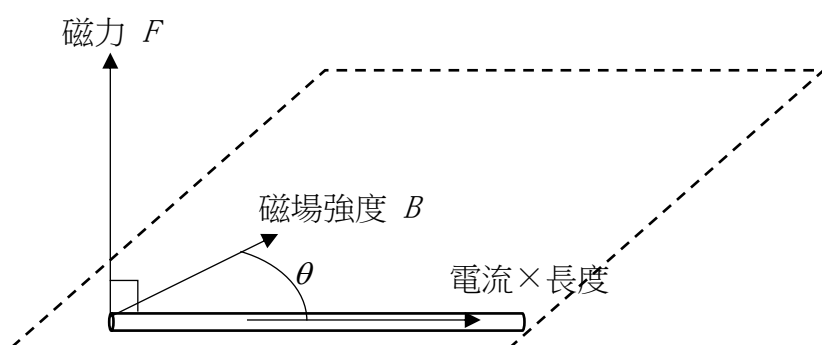
以上各式涉及向量相乘，中學程度難於操作。解決方法是我們直接使用一些預先做好的常見生磁物件的電場強度公式，並用下式求磁力。

當帶電粒子連續流動時：

$$\vec{F} = \vec{B} \times (\vec{I} l) \quad \text{或者} \quad F = B (I l) \sin \theta$$

當只有一粒帶電粒子移動時：

$$\vec{F} = \vec{B} \times (q \vec{v}) \quad \text{或者} \quad F = B (q v) \sin \theta$$



F 受方受到的磁力 [N]

B 授方的磁場強度 [T]

I 受方電流 [A]

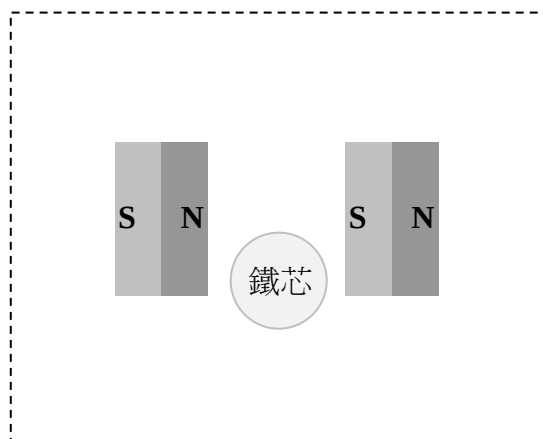
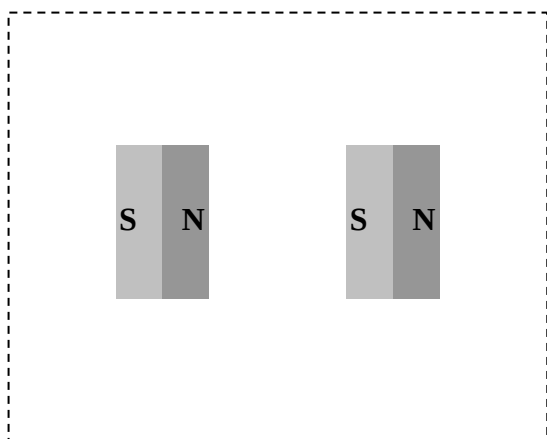
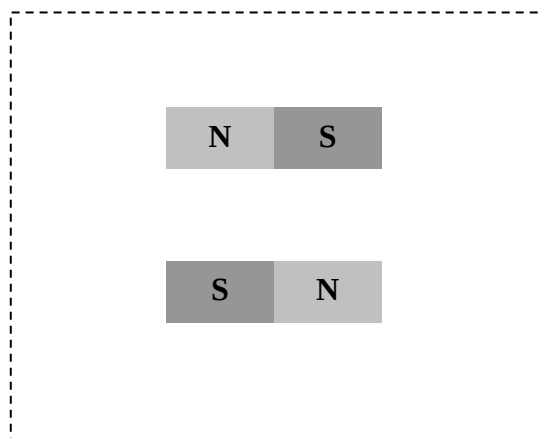
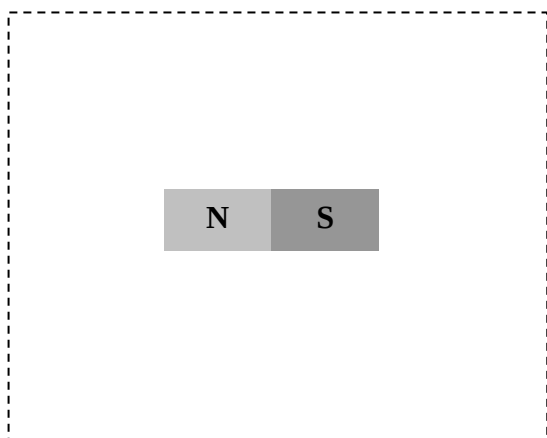
l 在授方磁場內的受方電線長度 [A]

q 受方粒子所帶的電荷 [C]

v 受方粒子的速度 [m s⁻¹]

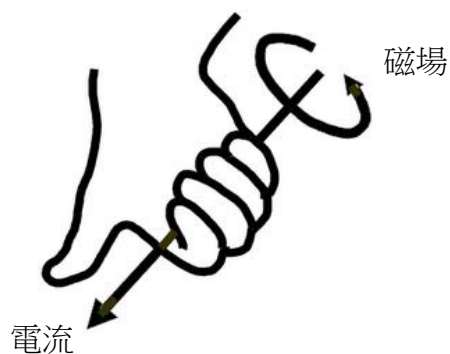
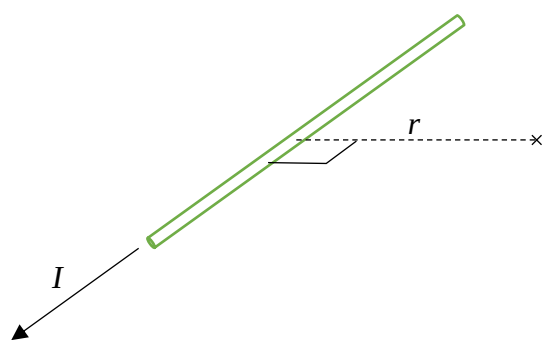
7. 常見磁場

- 常見由磁石所生的磁場圖案



- 常見由電流所生的磁場

直導線上的電流



右手法則 I

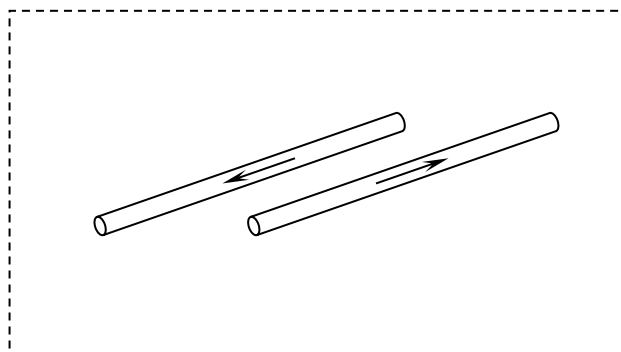
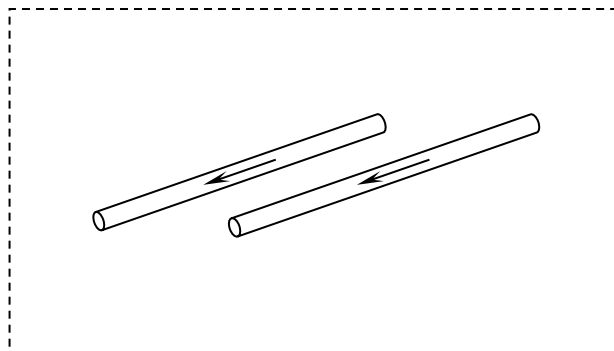
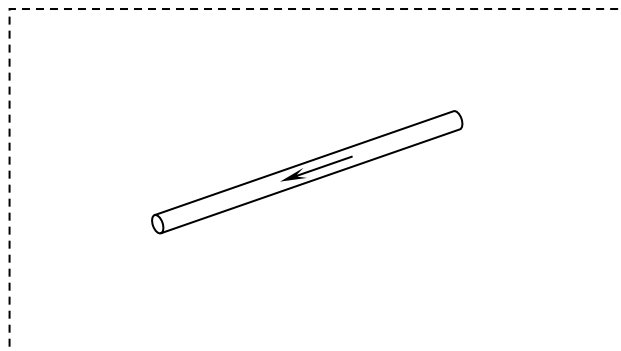
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

μ_0 真空磁導率常數 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$)

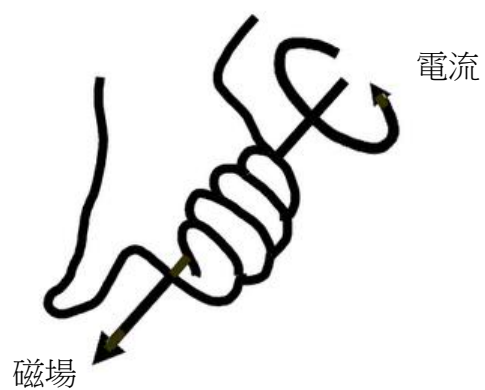
B 磁場強度 [T]

I 電流 [A]

r 與導線的距離 [m]



線圈上的電流



右手法則 II

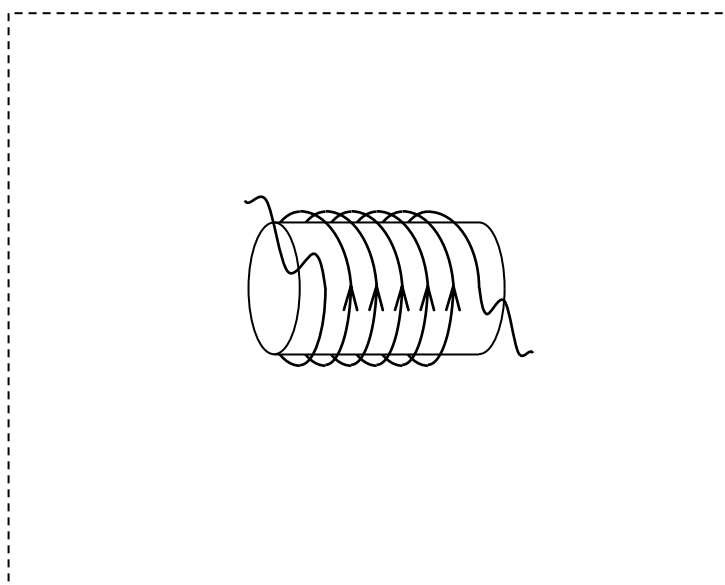
$$B = \mu_0 n I$$

μ_0 真空磁導率常數 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$)

B 磁場強度 [T]

I 電流 [A]

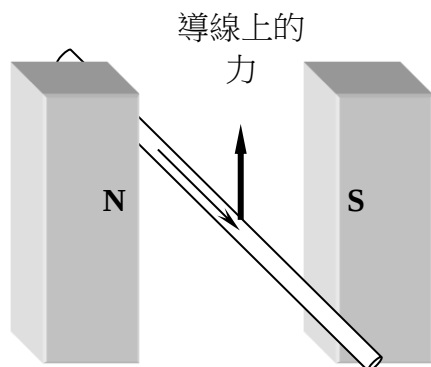
n 線圈每公尺內有多少圈 [m^{-1}]



8. 在磁場中帶電流導線所受到的力

• 如何決定力的方向和大小？

把一條帶電流的導線放在一個磁場中，導線便會受到一個跟電流及磁場垂直的力。決定力的方向時可以使用弗林明左手法則。（當求這個力的方向時，不用考慮帶電流導線本身產生的磁場。）



弗林明左手法則

帶電流導線受到的力可用下式求得：

$$F = B (I l) \quad \text{或} \quad F = B (q v)$$

F 帶電流導線受到的力 [N]

B 磁場強度 [T]

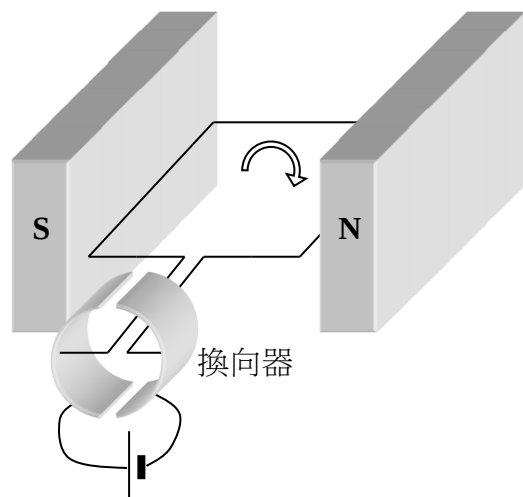
I 電流 [A]

l 在磁場中的那部分導線的長度 [m]

q 每個載體所帶的電荷 [C]

v 載體的速度 [m s^{-1}]

• 直流電動機



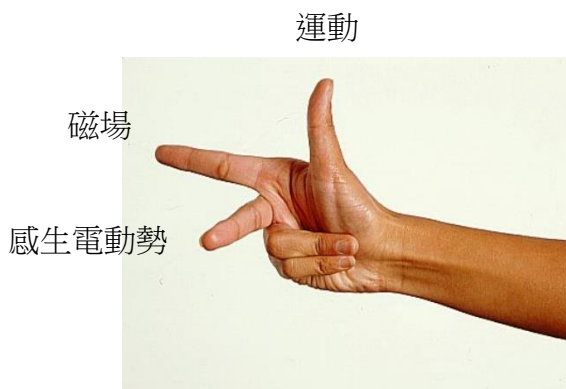
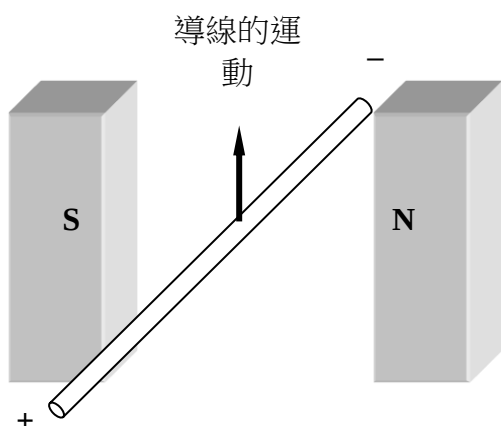
由於換向器的設計，線圈每轉動 180° ，圈中的電流方向便會逆轉一次，使線圈無論旋轉到什麼位置，近 S 的一邊導線永遠受到向上的力，近 N 的一邊導線永遠受到向下的力，線圈便會連續旋轉。

9. 感生電動勢

• 如何決定感生電動勢的方向？

把一個導體在磁場中以垂直於磁力線的方向推動，導體內的電子便會受到一個**感生電動勢**（或稱**感生電壓**），使它們「想」向某方向流動。但這些電子實際上能否流動則視乎有沒有迴路讓它們走；如果有，導體上便會出現**感生電流**。

決定感生電動勢的方向時可以使用**弗林明右手法則**。當要指出電動勢的**極性**，應以導線**外段**的電流方向為準。（當求感生電動勢的方向時，不用考慮導線本身產生的磁場。）



弗林明右手法則

感生電動勢的方向除可使用弗林明右手法則求得外，也可使用**楞次定理**求得：

“感生電動勢的極性是要能在感生電流一旦出現時，它產生的磁場會對抗導線的運動。”

• 如何決定感生電動勢的大小？

法拉第定律描述均勻磁場中的電荷受到的感生電動勢的量值：

$$\varepsilon = \frac{d(B A \cos \theta)}{d t}$$

ε 線圈每圈受到的電動勢的量值 [V]

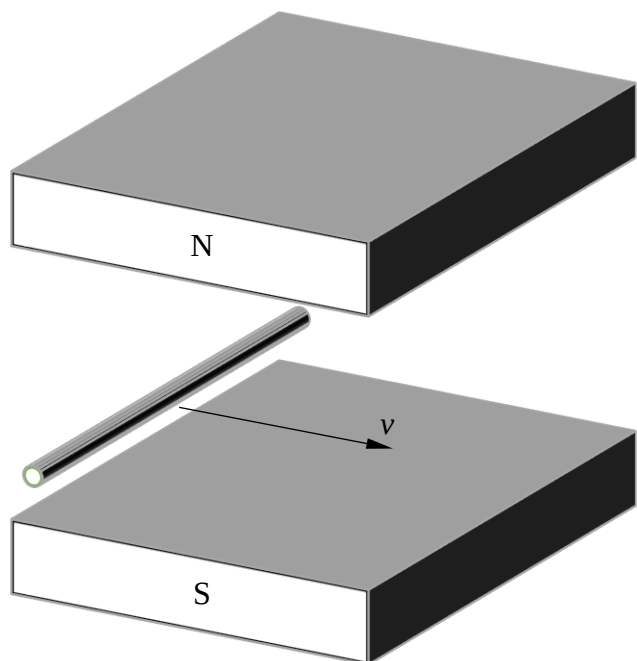
B 磁場強度 [T]

A 線圈的面積 [m²]

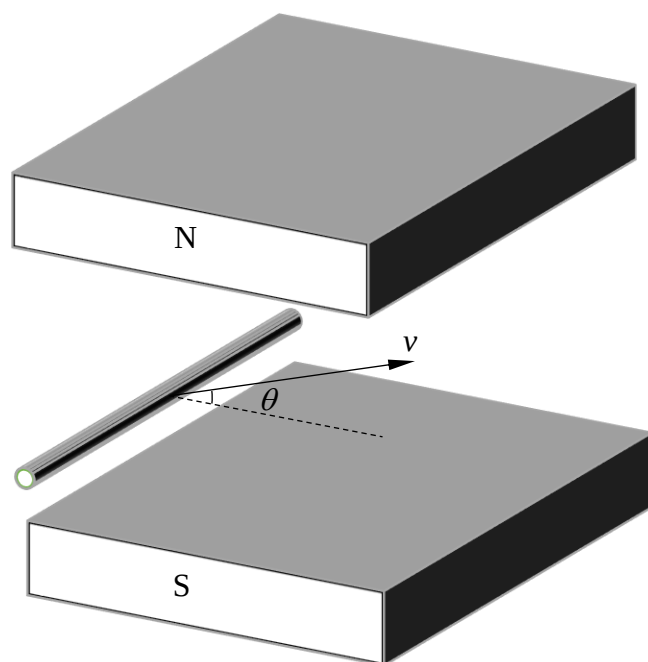
θ 線圈的平面與磁場所成的夾角 [°]

t 時間 [s]

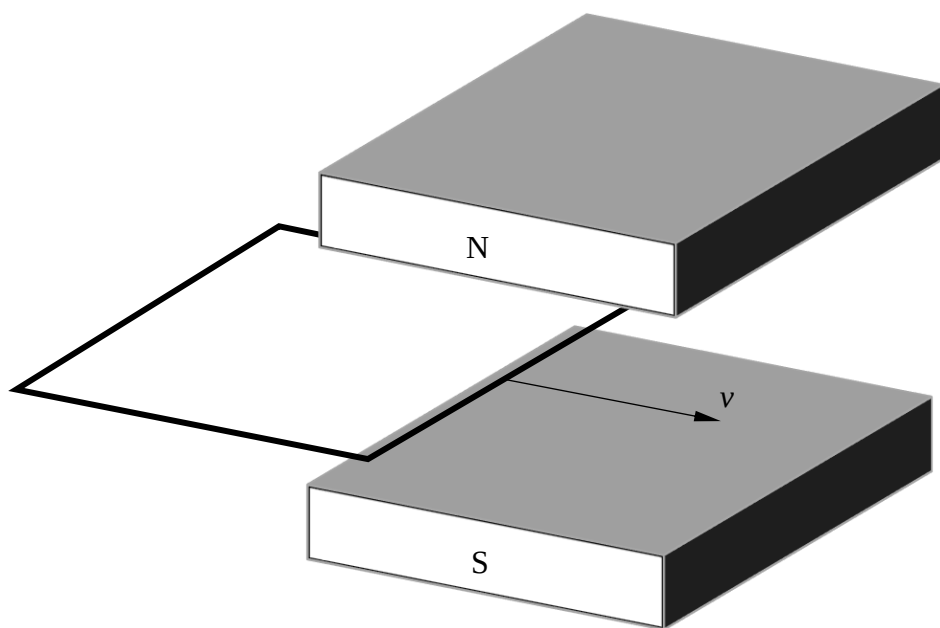
例一



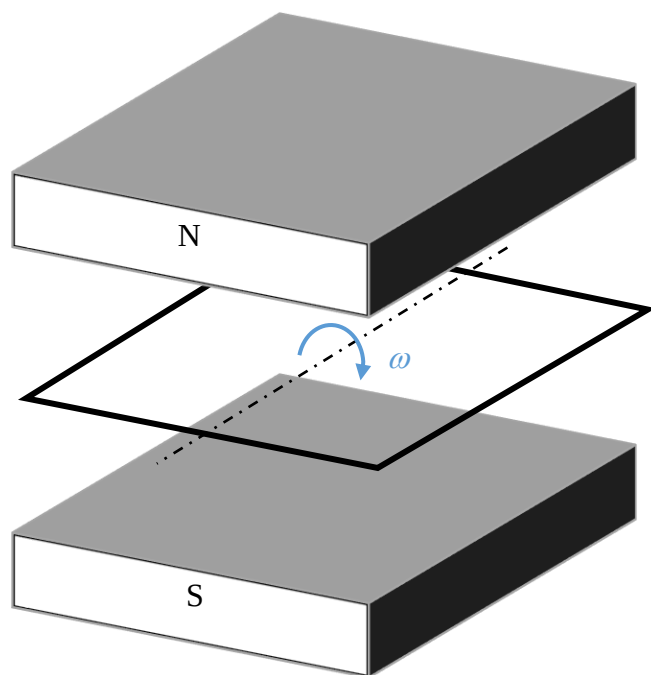
例二



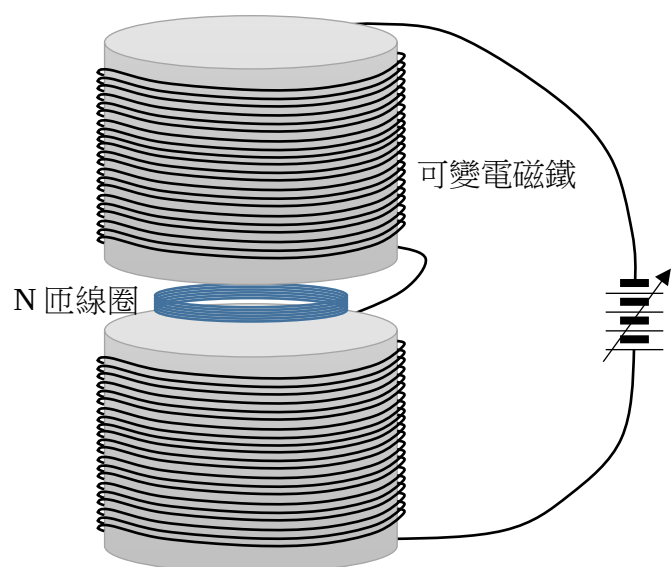
例三



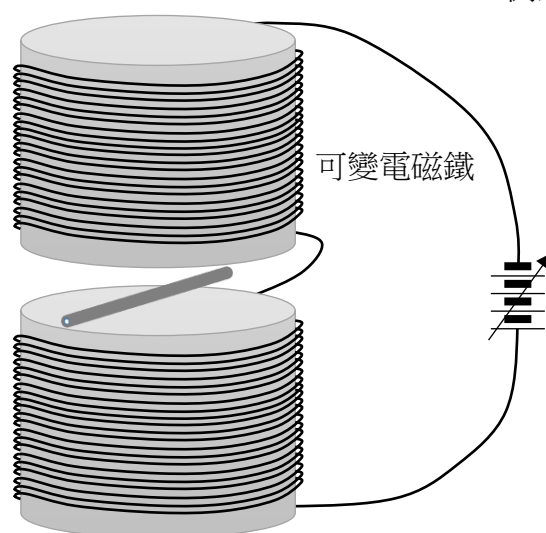
例四



例五



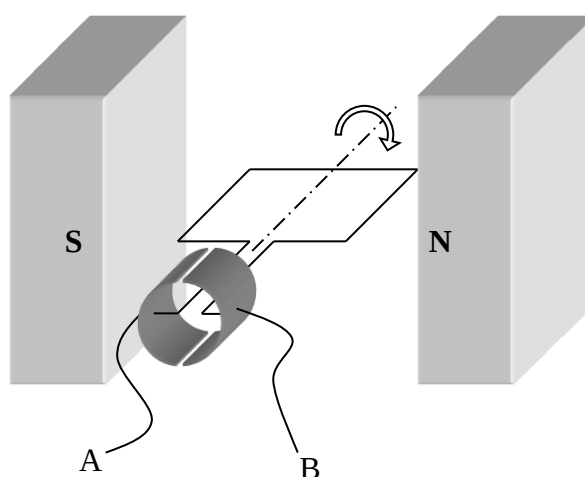
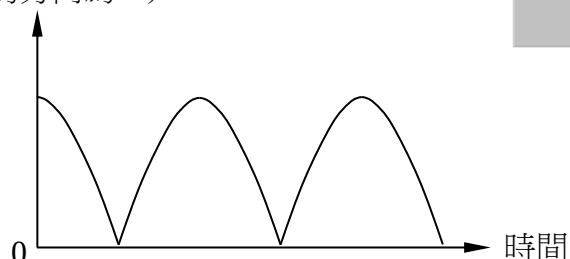
例六



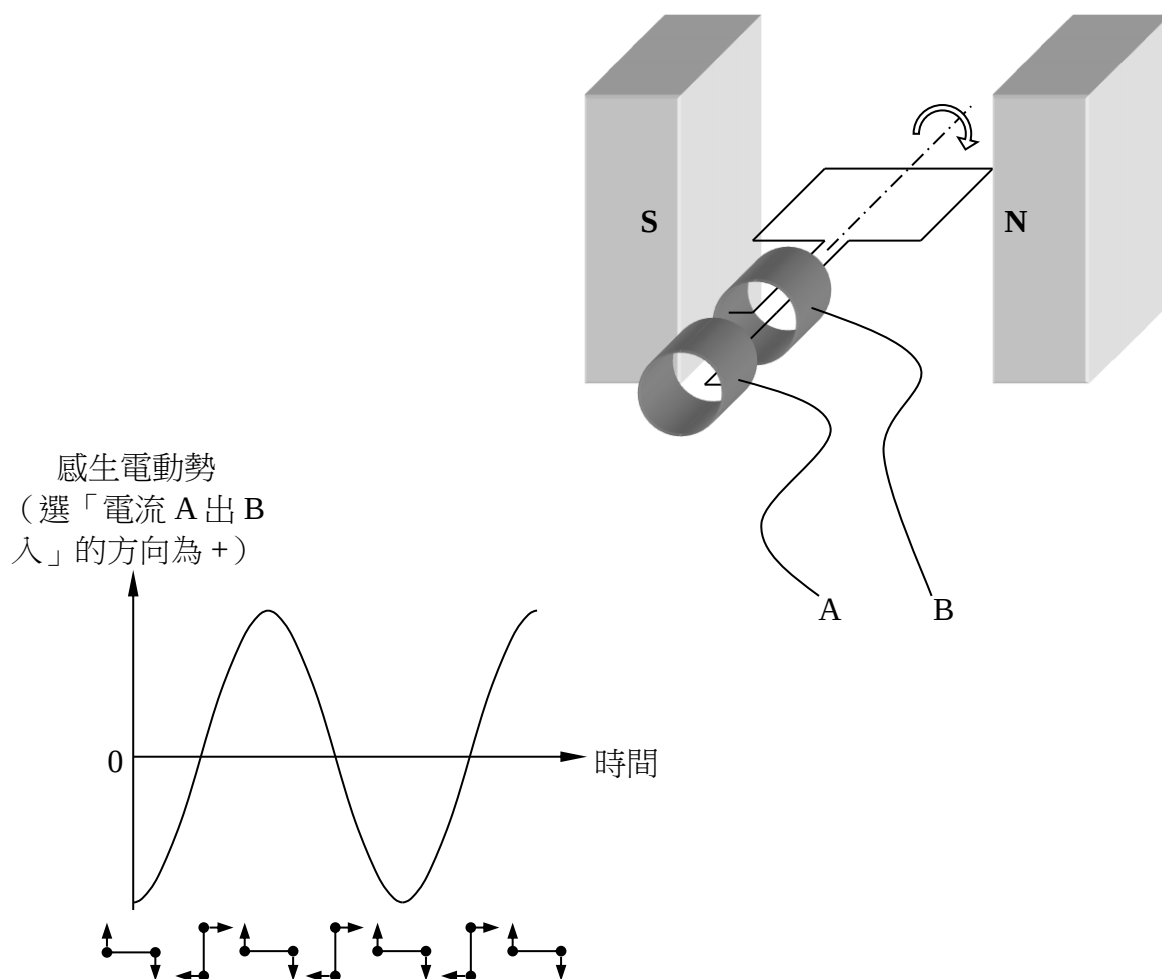
另外，在 $\varepsilon = \frac{d(B A \cos \theta)}{dt}$ 式中的 $\Phi = B A \cos \theta$ 亦稱作磁通量，單位為 [Wb]，所以 $\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}$ 。

- 直流發電機

感生電動勢
(選「電流 A 出 B 入」的方向為 +)



- 交流發電機

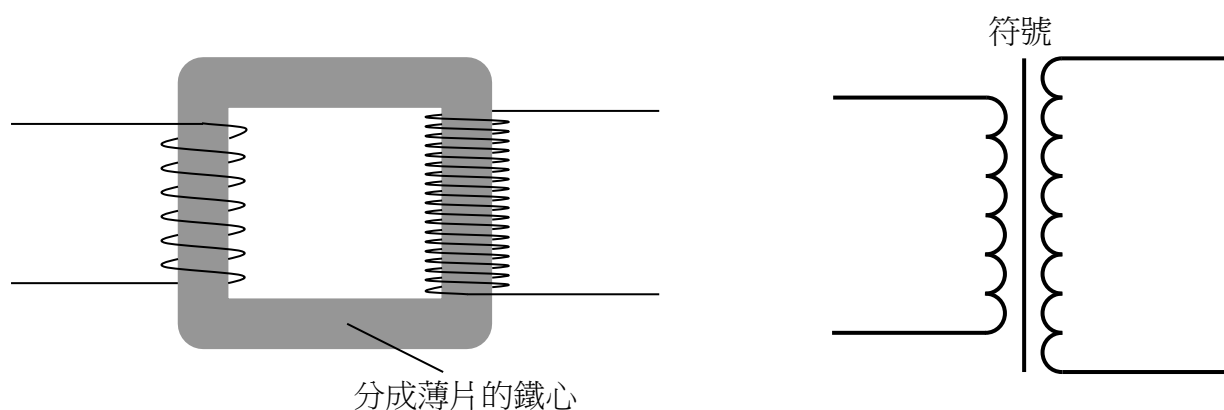


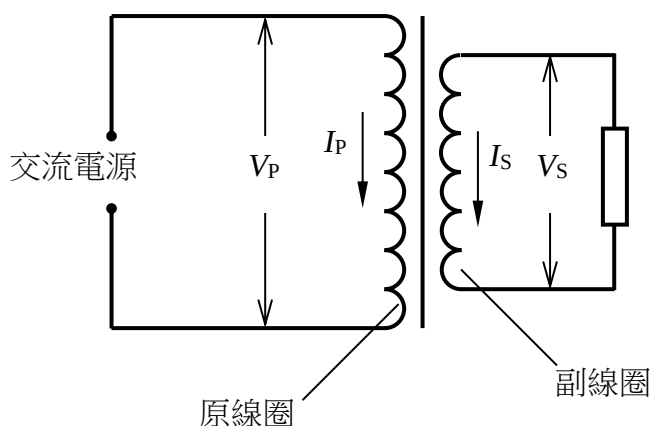
不論直流還是交流發電機，都可用以下方法增加輸出的電壓：

- (1) 增加磁場的強度；
- (2) 在線圈中加上軟鐵心；
- (3) 增加線圈的圈數。

增加線圈的轉速也能增加輸出的電壓，但電壓的變換頻率也會增加。

10. 變壓器





副線圈受到的感生電壓可用下式求得：

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

V_P 跨於原線圈上的電壓降 [V]

V_S 副線圈受到的感生電壓 [V]

N_P 原線圈的匝數

N_S 副線圈的匝數

證明：省略

如果副線圈的圈數比原線圈的多，副線圈輸出的電壓便會高於交流電源的電壓，稱為**升壓**；相反，如果副線圈的圈數比原線圈的少，副線圈輸出的電壓便會低於交流電源的電壓，稱為**降壓**。

上圖電路中，原線圈從電源取走的功率為 $V_P I_P$ ，但這些功率並非消耗掉，而是傳送到副線圈，副線圈便好像自己變成一個電源般提供電能讓電阻器發熱。電阻器發熱的功率為 $V_S I_S$ 。

由於原線圈通常都不能把能量毫無損耗地傳送到副線圈， $V_S I_S$ 通常都小於 $V_P I_P$ 。損耗原因如下：

損耗原因	改善方法
電子在原線圈和副線圈的電線流動時產生熱。	使用較粗和導電性較佳的電線。
變壓器的鐵心出現 渦電流 ，使鐵心發熱。	使用分成薄片的鐵心。

變壓器的**效率**定義為：

$$\eta = \frac{V_S I_S}{V_P I_P}$$

η 變壓器的效率

V_P 跨於原線圈上的電壓降 [V]

V_S 副線圈受到的感生電壓 [V]

I_P 流經原線圈的電流 [A]

I_S 流經副線圈的電流 [A]