

電磁感應

University Physics

感應電流

- 法拉第使用類似圖 22-1 所示的裝置做實驗，發現
 - 當開關 S 按下之後，線圈 A 上會出現短暫的電流，但開關 S 若持續按下，線圈 A 所連接的檢流計並不會偏轉。

- 若再將開關 S 掀起時，線圈 A 上又會出現短暫的電流。事實上，若將開關 S 持續按下，並將線圈 B 移動接近或遠離線圈 A 時，在線圈 B 移動的過程中，線圈 A 上也會出現電流。

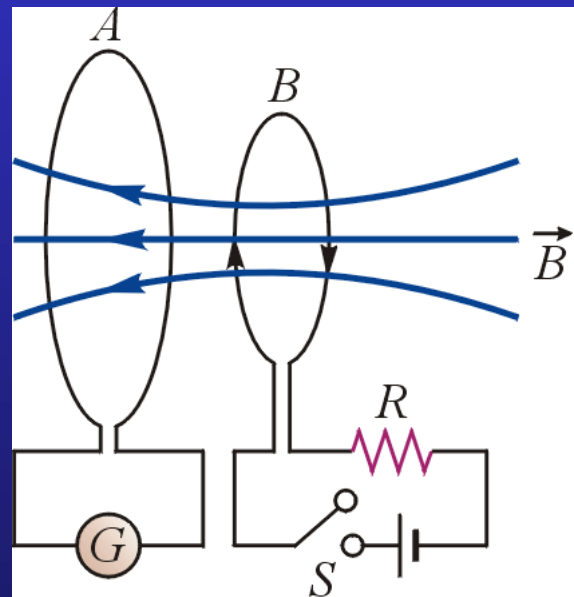
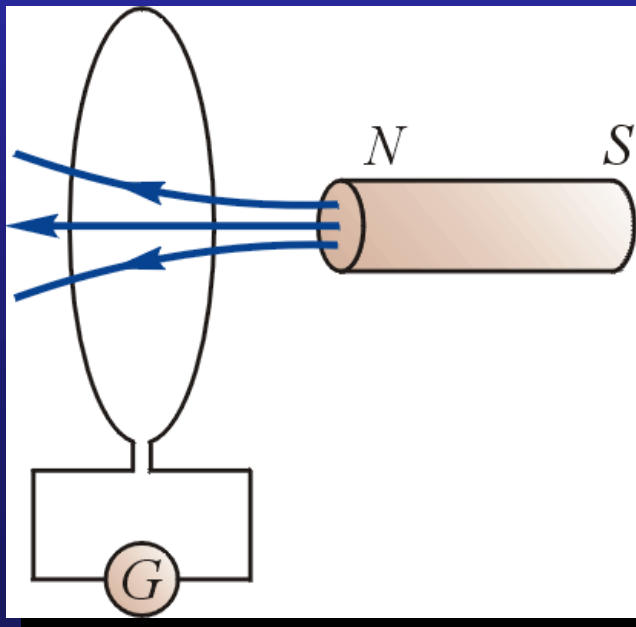


圖 22-1 當開關 S 按下或掀起時，線圈 A 上會出現短暫的感應電流。

- 法拉第接著拿磁棒插入線圈 A 中，如圖 22-2 所示，則在磁棒移動的過程中，線圈 A 上也會出現電流。
- 上面的這些現象稱為**電磁感應**（**electromagnetic induction**），而
 - 電流則稱為**感應電流**（**induction current**），而
 - 相關的電動勢稱為**感應電動勢**（**induced electromotive force**）。



⌚ 圖22-2 在磁棒靠近或遠離的運動過程中，線圈上會出現短暫的感應電流。

法拉第定律與冷次定律

- 法拉第經由實驗的觀察，歸納出下列結論：
 - 一個線圈上之所以會出現感應電動勢，乃因通過線圈的磁通量隨時間改變之故。
 - 磁通量的時變率越大，感應電動勢也越大。這稱為法拉第定律（Faraday's law），或法拉第感應定律。法拉第定律可以用下式表之，

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \equiv -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (22-1)$$

ε 為感應電動勢， Φ_B 為通過線圈的磁通量。

➤(22-1)式中等號右邊的負號代表感應電動勢或感應電流的方向，其所代表的物理意義為感應電流的方向是朝對抗磁通量的改變，這種傾向稱為冷次定律

➤ 下面三種情況皆可能產生感應電動勢：

1. 當產生磁場 \vec{B} 的電流隨時間改變；
2. 當線圈與磁場源之間有相對運動；及
3. 產生磁場 \vec{B} 的電流隨時間改變，且線圈與磁場源之間有相對運動。

若線圈係由導線繞 N 圈而得，且通過每一圈的磁通量 Φ_B 皆相等時，則感應電動勢為

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

(22-2)

運動的感應電動勢

- 當線圈在磁場中移動或轉動時，線圈上的感應電動勢可藉法拉第感應定律，即(22-1)式，去理解與計算。這種因相對運動而產生的電動勢，稱為運動的電動勢 (**motional emf**)。運動的電動勢也可以從感應電場的角度加以分析。
- 考慮一條長度為 l 的金屬細桿，以等速度 \vec{v} 垂直於均勻磁場 \vec{B} 移動，如圖 22-6 所示。

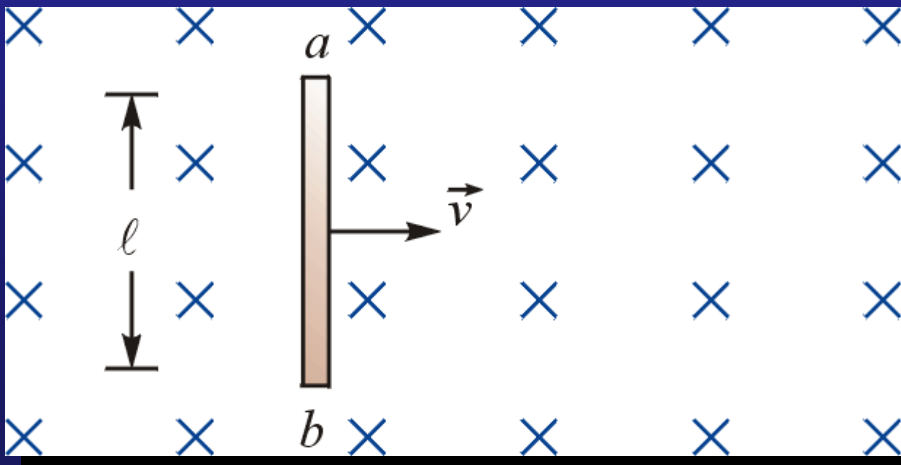


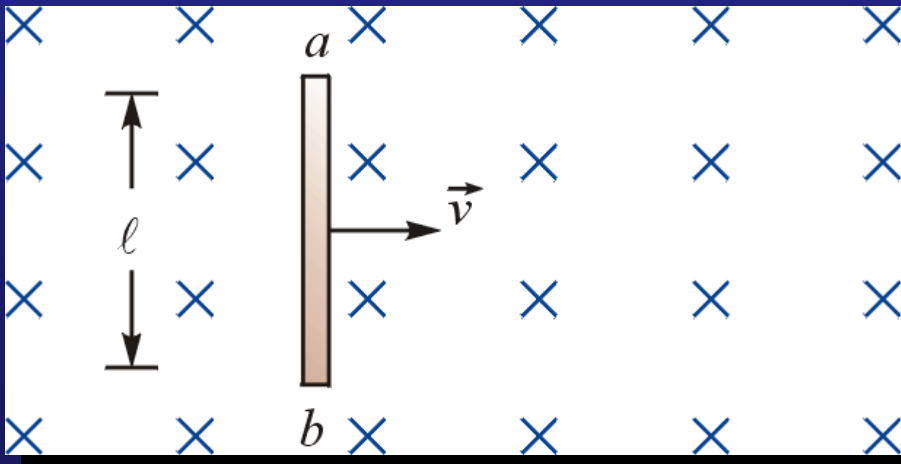
圖22-6 長為 l 的金屬細桿，以等速度 \vec{v} 垂直於均勻磁場運動。

➤ 圖 22-6 ，當金屬細桿向右移動時，其導電電子受到向下的磁力



$$\vec{F}_m = (-e)\vec{v} \times \vec{B}$$

電子因而向金屬桿下端 b 移動，而正離子則留在原處。當 b 端積聚負電荷（導電電子）時，上端 a 也因欠缺導電電子而帶正電。 a 與 b 端的正、負電荷會在金屬桿內形成由 a 指向 b 的電場 \vec{E} ，此一電場對金屬桿內的導電電子施以由 b 指向 a 的電力。



⌚ 圖22-6 長為 l 的金屬細桿，以等速度 \vec{v} 垂直於均勻磁場運動。

當此電力和磁力平衡時，導電電子即不再向 b 端移動。於是在金屬桿內便存在一由 a 指向 b 的穩定電場。平衡的條件為

$$(-e)E = (-e)vB$$

$$E = vB$$

平衡後，金屬細桿的兩端出現一電位差 V_{ab} ，

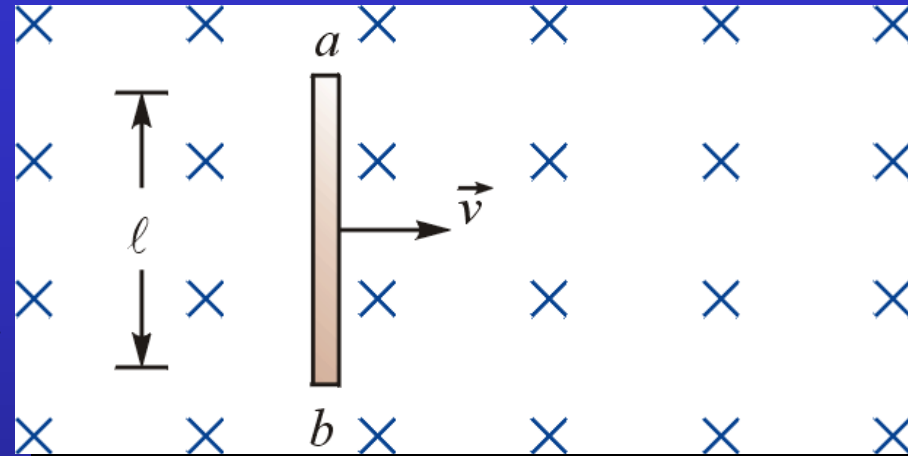
$$V_{ab} = El = B\ell v$$

在磁場中移動的金屬細桿形如一個電動勢源，而這種電動勢起因於磁力。事實上，在移動的金屬內部，此磁力之效應相當於一感應電場 E_{ind} ，即

$$\vec{E}_{ind} = \vec{v} \times \vec{B}$$

(22-14)

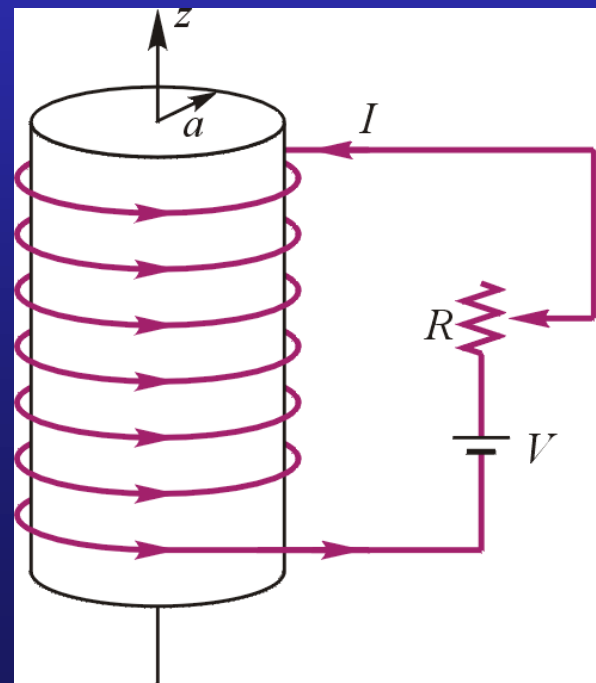
在運動的金屬內部，可視為存在有感應電場



感應電場

- 當一個導體在穩定的磁場中運動時，導體內各部份有感應電場 $\vec{E}_{ind} = \vec{v} \times \vec{B}$ ， \vec{v} 為導體內各該部份的速度。
- 當空間中的磁場隨時間改變時，也可視為空間中出現感應電場。
- 考慮一細長的螺線管之兩端點串聯於一可變電阻 R 及一直流電源，如圖 22-7 所示。

圖22-7 一個螺線管接至一個直流電源



➤ 圖 22-7 所示。當載有電流 I 時，線圈內有均勻磁場，其方向平行於 z 軸，其量值為

$$B = \mu_0 n I$$

n 為單位長度所繞的圈數。

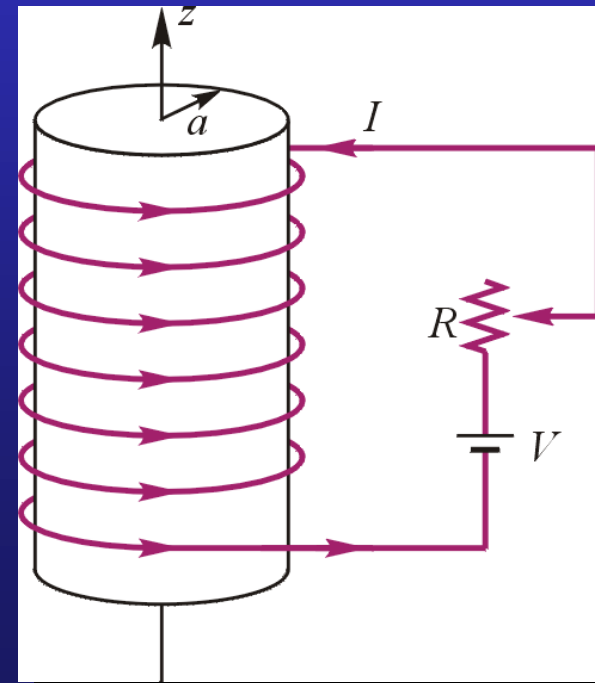
改變可變電阻 R 可以改變線圈上的電流 I 。若電流緩緩增加，即

$$I = \alpha t$$

上式中， $\alpha > 0$ ，則線圈內的磁場值亦隨時間緩慢增加，即



$$B = (\mu_0 n \alpha) t$$



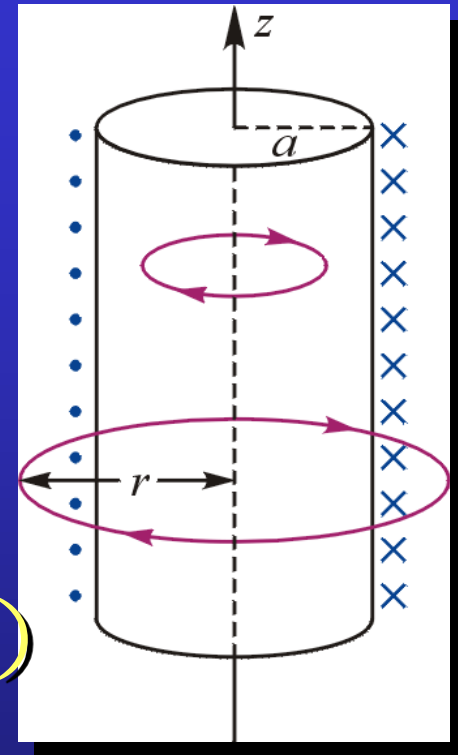
➤ 假如我們在線圈內置放一個半徑為 r ，圓心在 z 軸上的圓形線圈，如圖 22-8 所示，則通過圓形線圈的磁通量為

$$\Phi_B = B \pi r^2 = \mu_0 n \alpha \pi r^2 t$$

此磁通量隨時間增加，故由法拉第定律知圓形線圈上有感應電動勢，其量值為

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} = \mu_0 n \alpha \pi r^2$$

(22-19)



感應電流的方向，依冷次定律，為順時針方向，如圖 22-8 所示。因磁場隨時間改變，出現了感應電場。此感應電場的方向在感應電流的方向，且在圓周各處之量值相同。

圖 22-8 兩個單圈圓形導線，其半徑分別小於及大於螺線管的半徑

因磁場隨時間改變，出現了感應電場。此感應電場的方向在感應電流的方向，且在圓周各處之量值相同。因此

$$\varepsilon = \int_c \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = E_{ind} (2\pi r) \quad (22-20)$$

比較 (22-19) 與 (22-20) 兩式，得

➔ $E_{ind} = \frac{1}{2}(\mu_0 n \alpha r) \quad (r < a) \quad (22-21)$

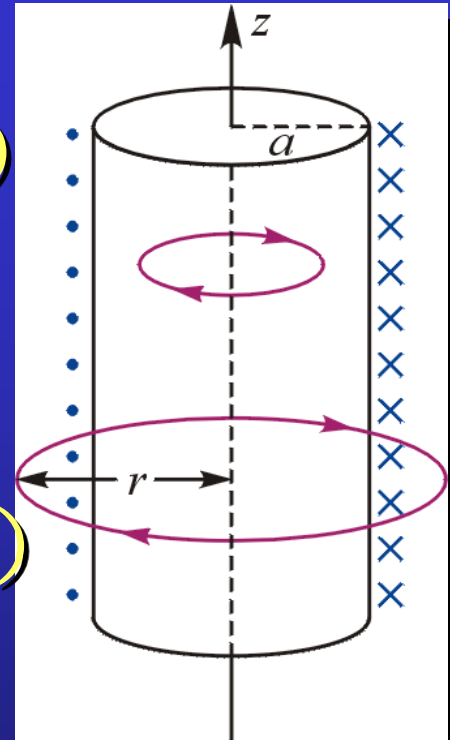


圖22-8

此感應電場的電力線係圓心位在線圈的對稱軸上的圓曲線。這種電力線是封閉的曲線；顯然，這種感應電場的本質是不同於靜電場，一個電荷在此種電場之驅動下走一圈，電場做功不為零，故它不是保守場。

➤ 線圈外的感應電場 ($r > a$)

當磁場隨時間緩慢增加，線圈外的感應電場，其電力線仍為圓心在對稱軸上的圓曲線，而方向也是如圖 22-8 所示的順時針。感應電場沿半徑為 r 的圓周之環場積，其量值等於穿過此圓之磁通量的時變率，即

$$E_{ind} (2\pi r) = \frac{d}{dt} (B\pi a^2) = \pi a^2 (\mu_0 n \alpha)$$

$$E_{ind} = \frac{\mu_0 n \alpha a^2}{2r}$$

$$(r > a)$$

(22-23)

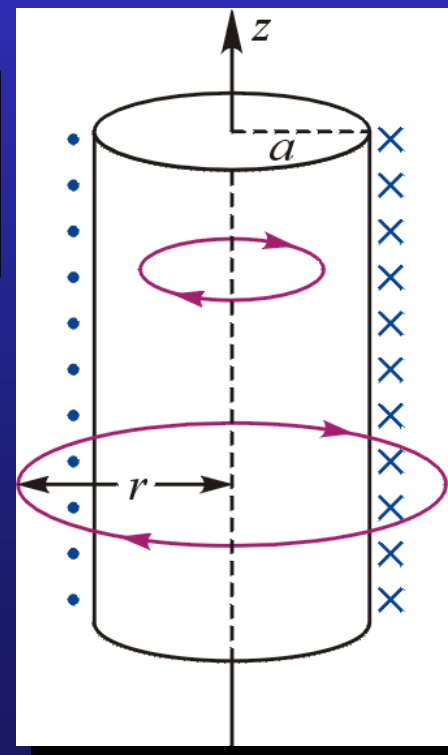


圖 22-8

➤ 感應電場之量值隨徑向距離 r 而改變的關係可用圖 22-9 表示之。

$$E_{ind} = \frac{1}{2}(\mu_0 n \alpha r)$$

$$(r < a)$$

$$E_{ind} = \frac{\mu_0 n \alpha a^2}{2r}$$

$$(r > a)$$

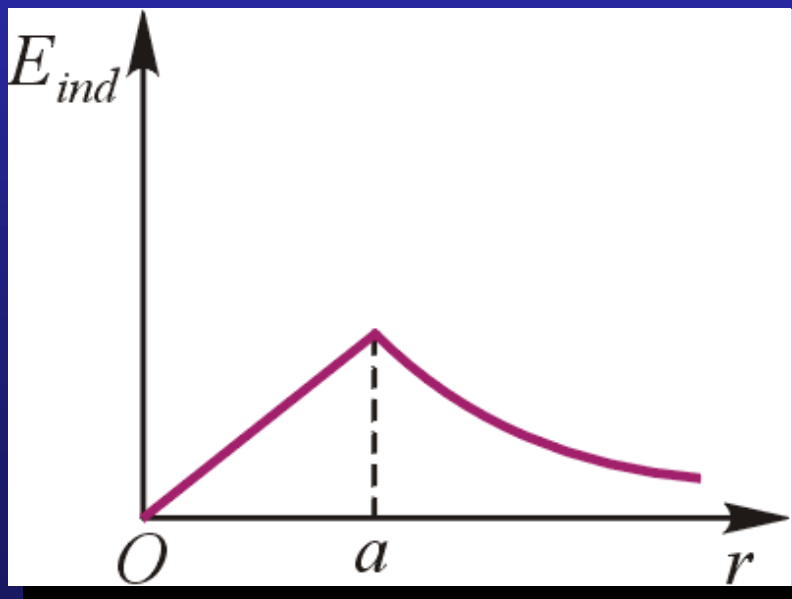


圖 22-9 螺線管內、外感應電場強度與徑向距離的關係圖。