

第三章

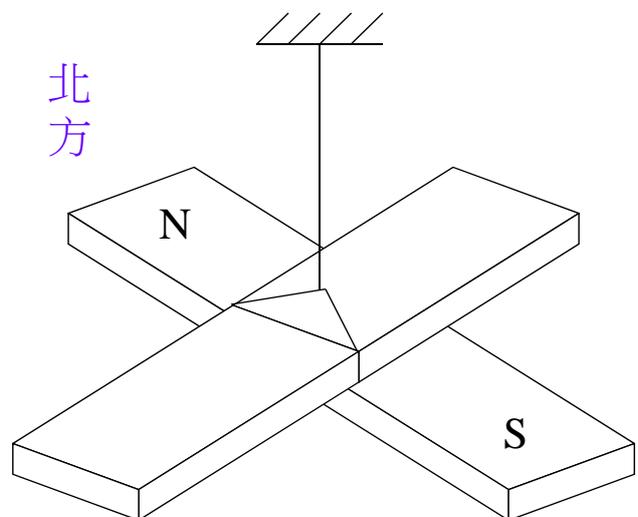
第一節

- 磁場
- 磁通，磁通密度
- 電磁場
 - 磁路
- 磁動勢
- 磁場強度
- 磁導率

1

磁鐵

- 將一條形磁鐵水平地懸掛，當磁鐵平定下來的時候，磁鐵的一端會指向地球的北方，另一端指向地球的南方。
- 指向北方的一端叫做的北磁極
- 指向南方的一端叫做的南磁極

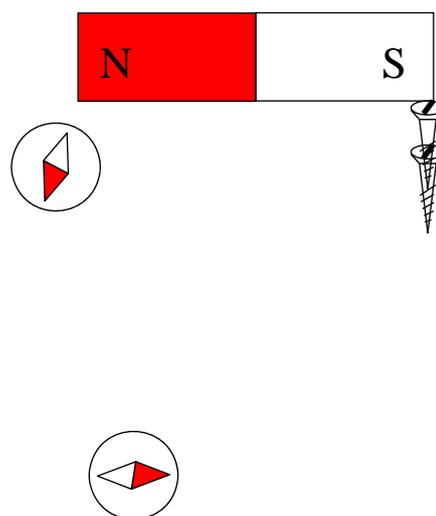


南方

2

磁場

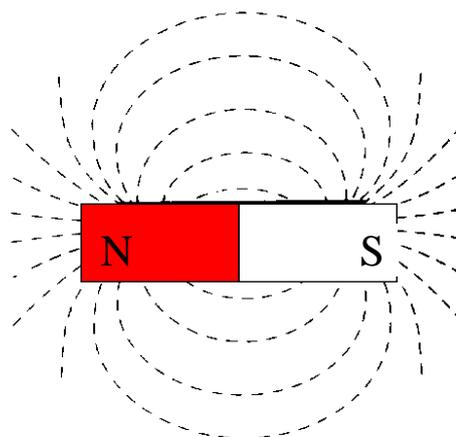
- 當磁性物體 (如：鐵、鋼等) 靠近磁鐵時，物體會感受一鼓來自磁鐵的力量
- 離磁極較近，感受的磁力較強；
- 離磁極較遠，像不受的磁力的影響



3

磁場

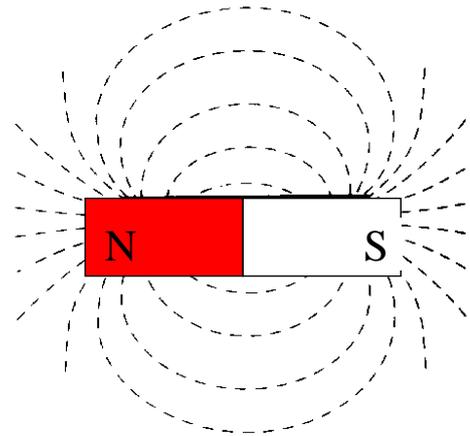
- 磁鐵的周圍，可使其他磁性物體感受到磁力的空間，叫做磁場
- 將薄膠板放於磁鐵上，再將鐵粉均勻地撒下膠板上
- 輕敲膠板後，鐵粉會在磁鐵的兩極間組成鏈狀的曲線，顯示磁鐵周圍的磁場形態



4

磁場

- 從鐵粉組成鏈狀曲線的形狀引入磁通(磁力線)的概念。
- 磁通是沒有實質和是不看見的，磁通是假想的。
- 磁通濃密的位置，磁力較強



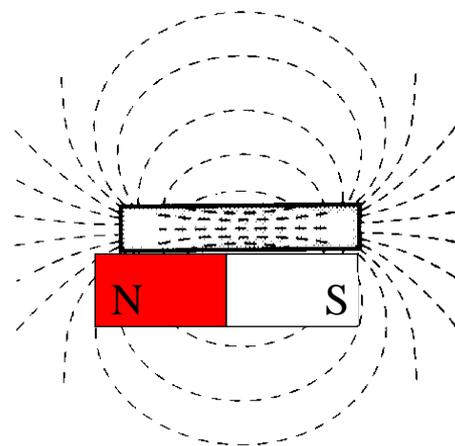
5

磁通

符號： ϕ

量度單位：韋伯 Weber

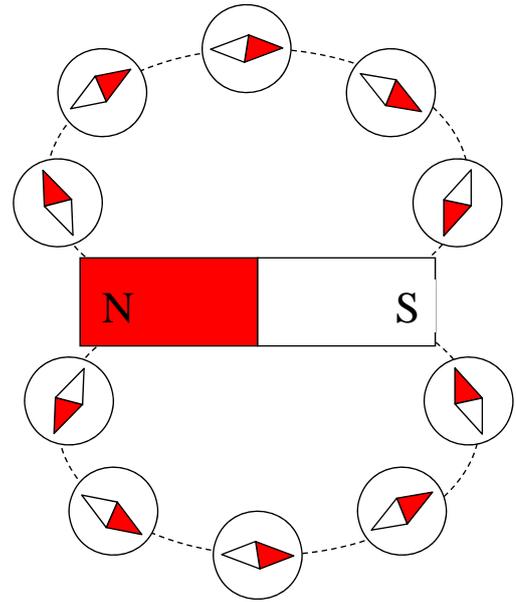
單位的簡寫：Wb



6

磁通的特性

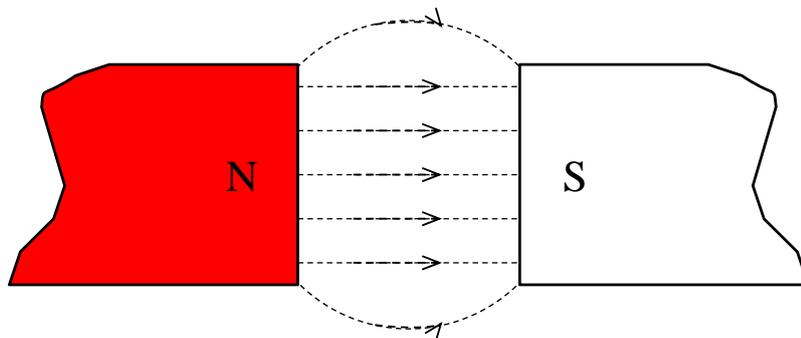
- 在磁場放置指南針，依照小磁針的指示方向一個跟一個地排列
- 指南針顯示磁通的形狀和方向
- 可假設磁通是由磁鐵的北磁極發出，並且歸於南磁極。



7

磁通的特性

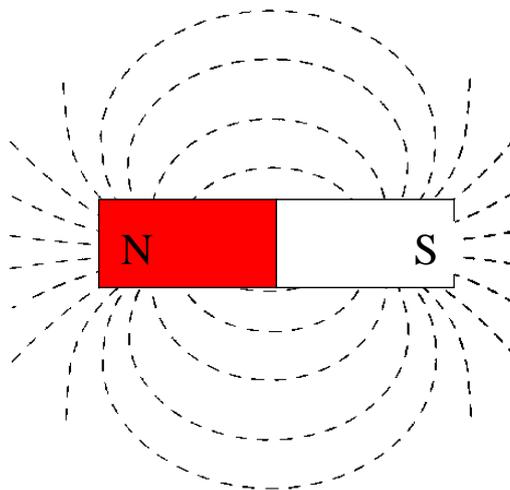
- 在非磁性物質，如空氣，磁通的方向是由北磁極指向南磁極



8

磁通的特性

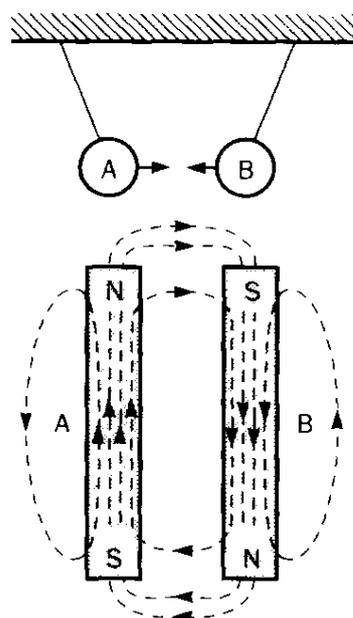
- 每條磁通必組成閉合的迴路
- 磁通永不交叉



9

磁通的特性

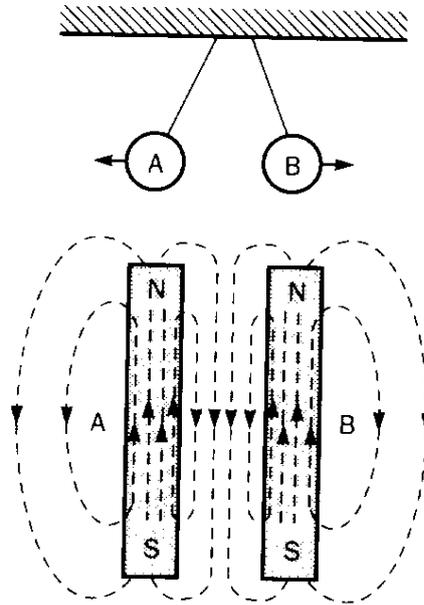
- 磁通有如被拉長的橡根圈，永遠企圖縮短



10

磁通的特性

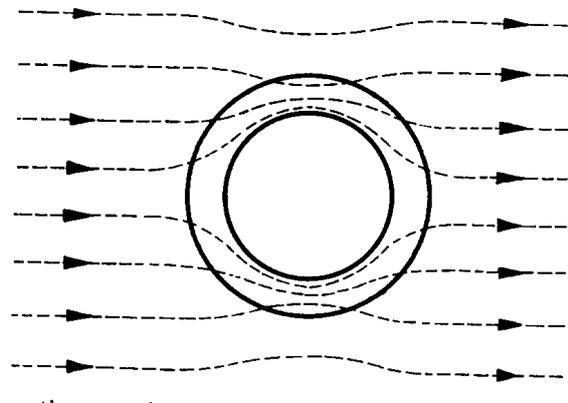
- 同方向的磁通會互相排斥



11

磁屏蔽

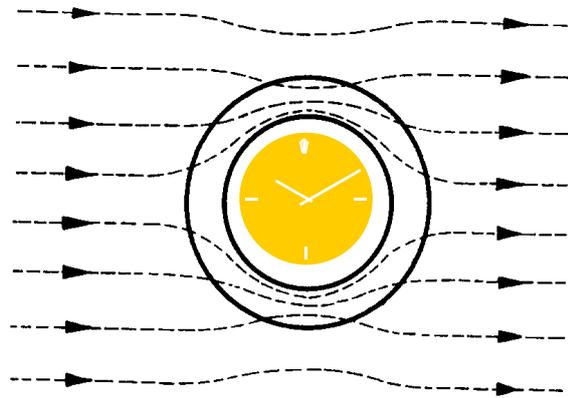
- 磁場中放置一個鐵環
- 磁通會順著鐵環通這段空間
- 鐵環中間形成沒有磁場的地帶



12

磁屏蔽

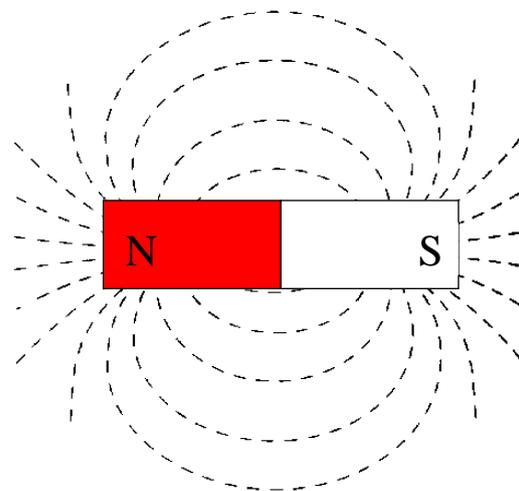
- 將物體放置在一個閉合的鐵盒內，鐵盒把外磁場隔開
- 盒內的物體不受磁場影響，鐵盒為盒內的物體中做成磁屏蔽



13

磁通密度

- 磁場中磁通越密的地方，那裏的磁場越強，磁效應越大
- 越近磁鐵的兩極，磁通密度越高，磁力越強



14

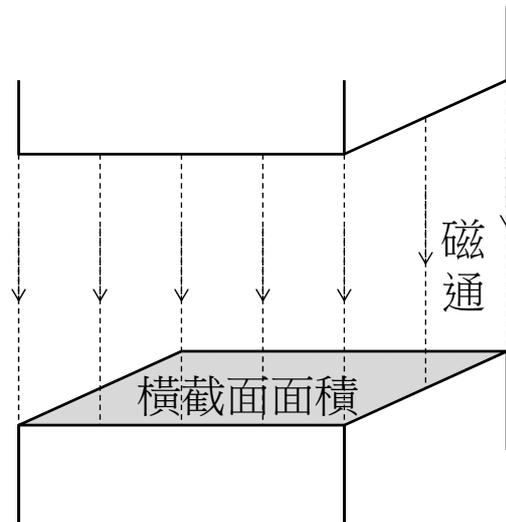
磁通密度

- 每單位面積的磁通量叫做磁通密度

$$\text{磁通密度} = \frac{\text{磁通}}{\text{面積}}$$

$$B = \frac{\phi}{a}$$

B = 磁通密度 ϕ = 磁通 a = 橫截面面積

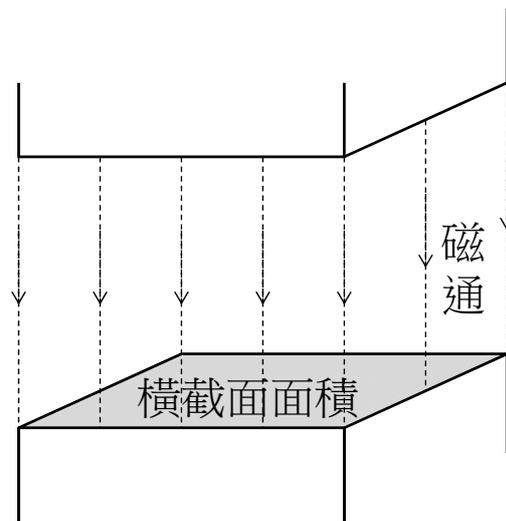


15

磁通密度

- 磁通密度的量度單位是泰斯拉 Tesla
- 單位的簡寫是 T
- 當面積 a 是 1 m^2 磁通量 ϕ 是 1 Wb 時則磁通密度 B 是 1 T

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$$



16

影響磁通密度的因素

- 飽和 (Saturation)
- 空隙 (Air Gaps)
- 疊片 (Lamination)
- 堆疊因數 (stacking factor)

17

飽和 Saturation

當所有磁疇都排列成同一方向時稱為飽和。一切非磁性物質如空氣，其磁通密度恒與其磁動勢成正比。但磁性物質中，當開始磁化時，所有的磁疇皆互相連結組成閉合環路，因此當磁動勢開始增加時，會有大量磁疇依照磁動勢之方向排列從而產生大量磁通，磁通密度在磁化初期增加較大。當磁動勢繼續增大時，因大部的磁疇經已排列，因此只有僅餘的少量尚未排列的磁疇會依照增加的磁動勢排列，增加的磁通量有限，磁通密度增加較細，當導磁材料達至飽和時，通過的磁通也同時達至最大量，磁通量不會增大，因此當導磁材料達至飽和時，其磁通密度亦不會再增加而達至最大值。

18

空隙 Air Gaps

當磁路中的磁通通過磁路的空隙時，邊緣磁通會向外彎曲(**fringing**)，空隙磁路的週界向外擴大，磁路的截面積增大，因此就相同的磁通量，實際的截面積增大，空隙中的磁通密度會因而減少。增大截面積或縮短空隙可有效減少邊緣磁通的影響。但空隙實際截面積增大後，會另磁阻降低，若有足夠磁動勢使磁通相應增加，則空隙中的磁通密度不受其直接影響。

19

疊片 Lamination

為了減少渦流損失，一般的鐵芯都會採用疊片製成，每疊片之表面都塗上絕緣材料，因此當疊片疊合後，鐵芯並非實心固體，其有效磁路面積較其外表面積為細，從而導至磁通密度增大。

20

堆疊因數 stacking factor

實際鐵磁材料面積與其外表面積的比率。用以計算鐵芯的有效面積。

21

磁通密度

例題

在一有效面積是 4cm^2 的空氣隙中，有磁通 0.25mWb ，計算空氣隙的磁通密度。

答案

$$\begin{aligned}\text{空氣隙面積 } a &= 4 \text{ cm}^2 \\ &= 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{磁通 } \phi &= 0.25 \text{ mWb} \\ &= 0.25 \times 10^{-3} \text{ Wb}\end{aligned}$$

$$\text{磁通密度 } B = \frac{\phi}{a} = \frac{0.25 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-4}} = 0.625 \text{ T}$$

$$1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$$

$$1 \text{ cm}^2 = 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$$

$$= 0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$$

$$= 0.0001 \text{ m}^2$$

$$= 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

22

磁通密度

例題

某變壓器的鐵芯是由寬32mm的硅鋼片疊厚至32mm做成。硅鋼片的最高磁通密度是 0.9 T，計算鐵芯的最大磁通量。

答案

鐵芯面積 a

$$\begin{aligned} &= 32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm} \\ &= 32 \times 10^{-3} \times 32 \times 10^{-3} \\ &= 1024 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{磁通} &= \text{磁通密度} \times \text{面積} \\ &= 0.9 \times 1024 \times 10^{-6} \\ &= 921.6 \times 10^{-6} \text{ (Wb)} \\ &= 921.6 \text{ (}\mu\text{Wb)} \end{aligned}$$

23

磁通密度

例題

有一截面積為0.02米²之鐵芯，其通過的磁通密度為0.4 T。若相同數量之磁力線通過另一面積為0.01米²之另一鐵芯，求此另一鐵芯之磁通密度為若干？

答案

$$\begin{aligned} \text{磁通 } \Phi &= B \times A = 0.4 \times 0.02 \text{ 韋伯} \\ &= 0.008 \text{ 韋伯} \\ B_2 &= \Phi / A_2 = 0.008 / 0.01 \\ &= \underline{0.8 \text{ T Ans}} \end{aligned}$$

24

課堂練習

練習一

有一疊片鐵芯，其外表面積為0.04米乘0.05米，其堆疊因數為0.85，求

- (i) 鐵芯的有效磁面積
- (ii) 磁通密度，若磁通量為 1.4×10^{-3} 韋伯

答案

- (i) $(0.04 \times 0.05) \times 0.85 = 1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
- (ii) $B = \Phi/A = 1.4 \times 10^{-3} / 1.7 \times 10^{-3} = 0.8235\text{T}$

課堂練習

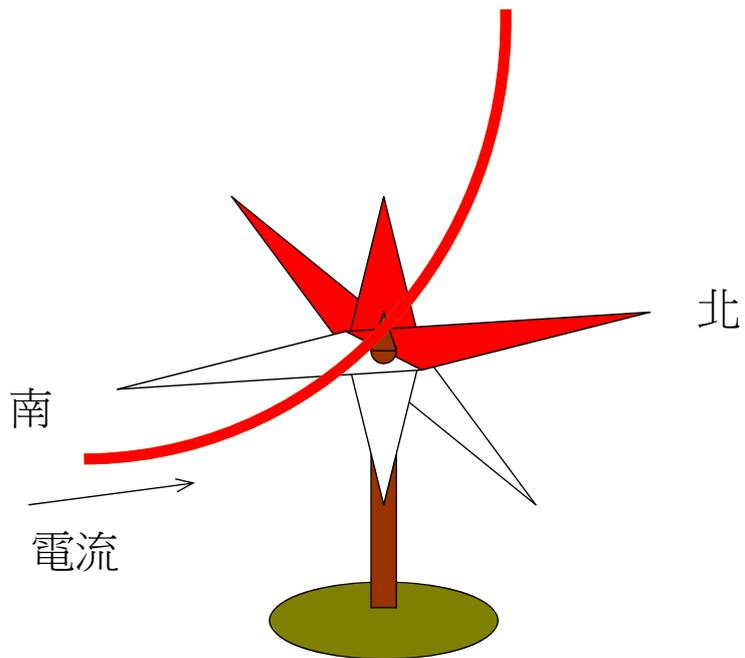
練習二 (07-08 第10b題)

有一疊片鐵芯，其外表面積為6mm(毫米)乘8mm(毫米)，其堆疊因數為80%，求

- (i) 鐵芯的有效磁面積
- (ii) 磁通密度，若磁通量為 1.5×10^{-3} 韋伯

電磁場

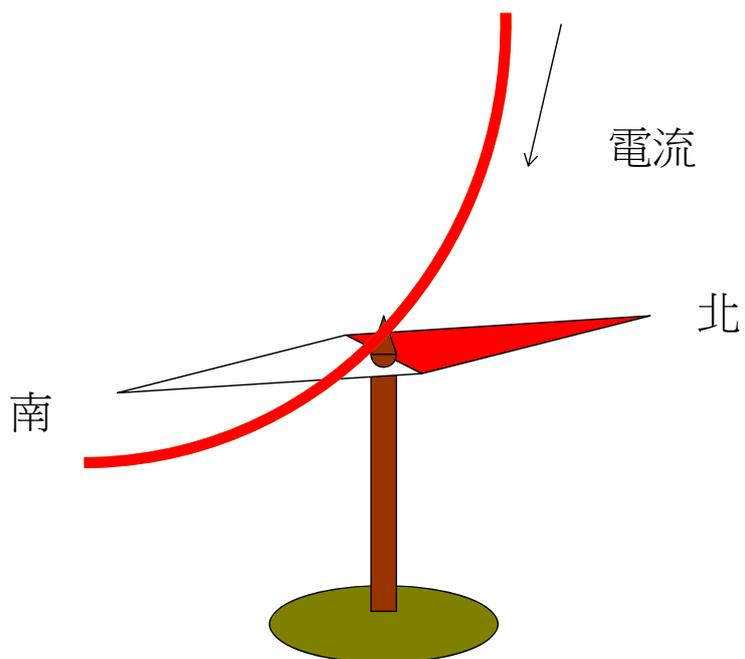
- 磁針上放置一根電線
- 當電線帶有電流時，磁針出現擺動



27

電磁場

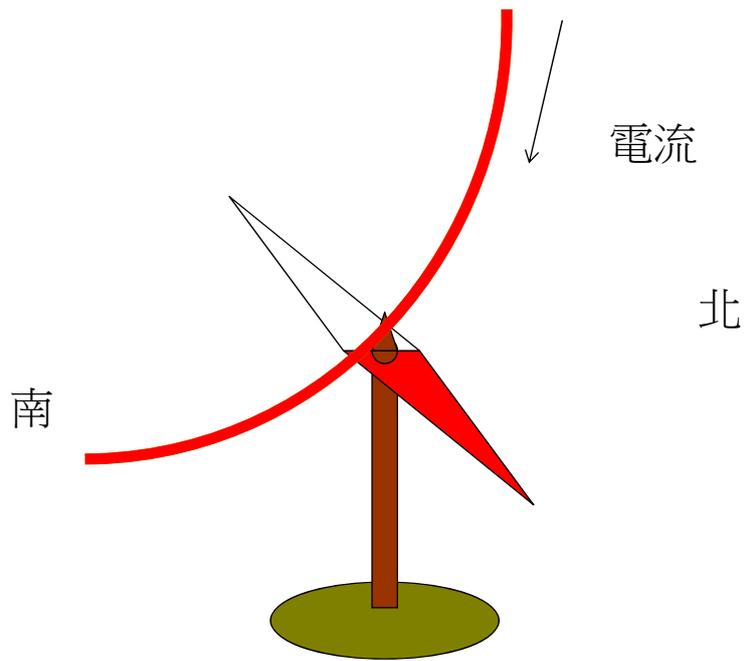
電流方向改變時，磁針擺動的方向也改變



28

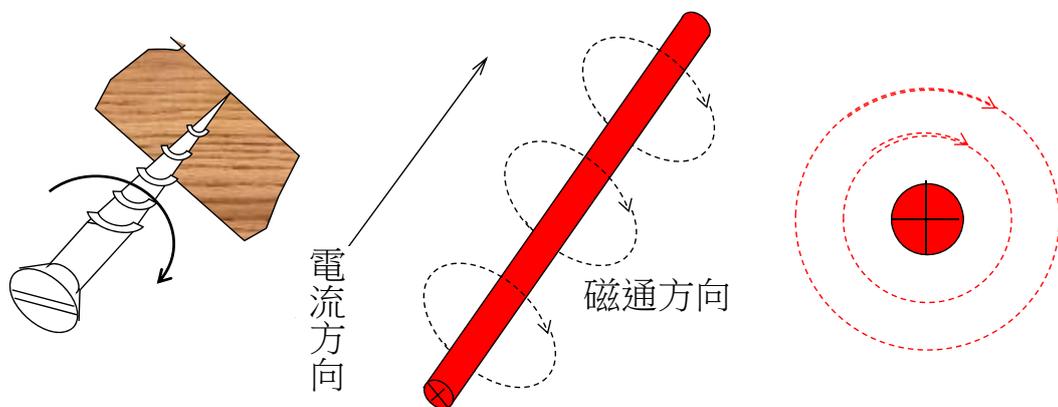
電磁場

電流方向改變時，磁針擺動的方向也改變



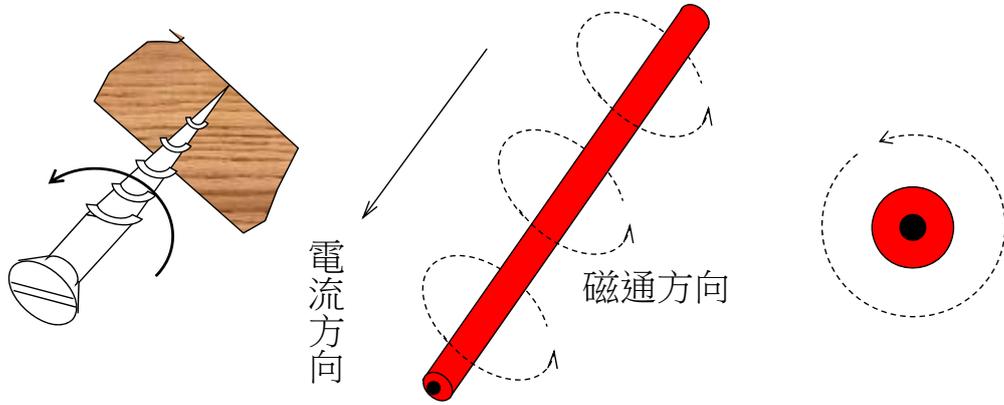
電磁場

電流流入導線，產生順時針方向的磁通



電磁場

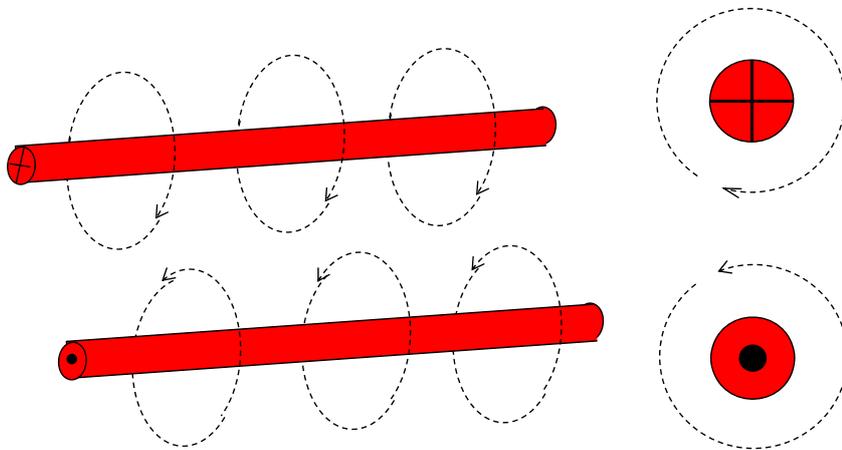
電流流出導線，產生逆時針方向的磁通



31

電磁場

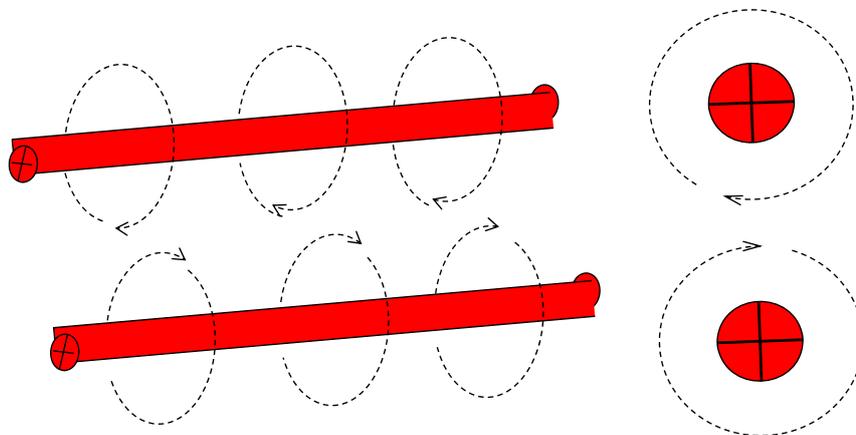
電流方向相反，互相排斥



32

電磁場

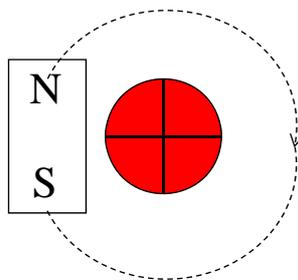
電流方向相同，互相吸引



33

電磁場

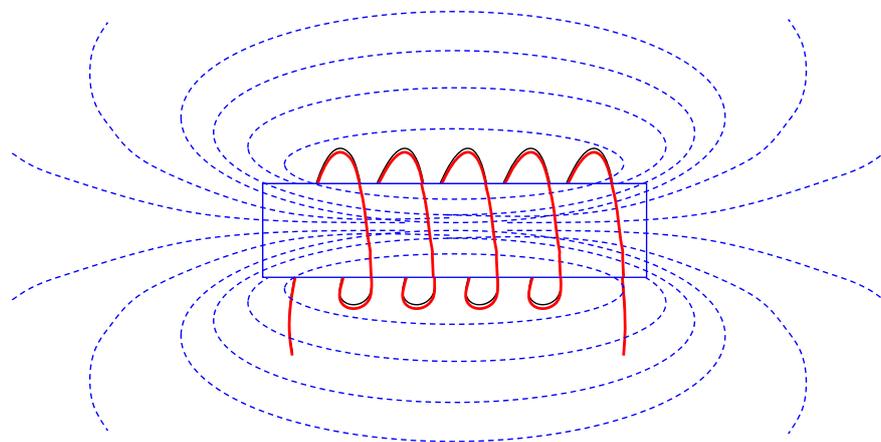
鐵片靠近導線，鐵片充磁



34

電磁場

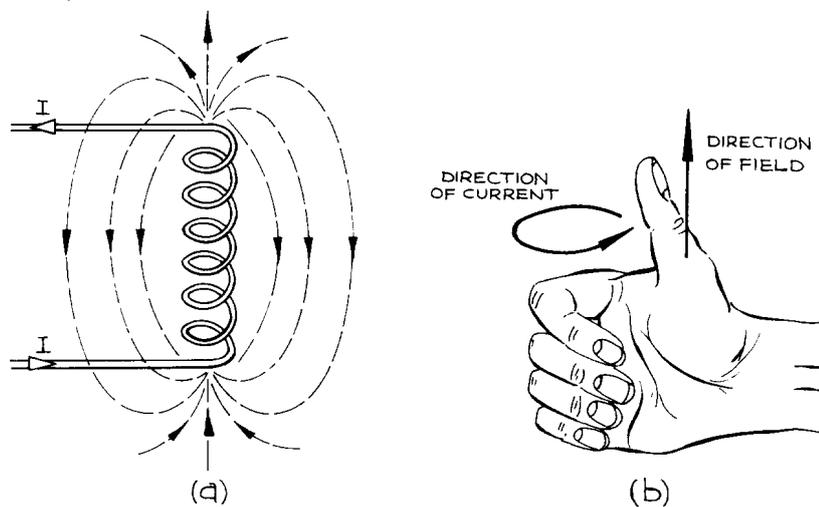
線圈帶電流，成棒形磁鐵



35

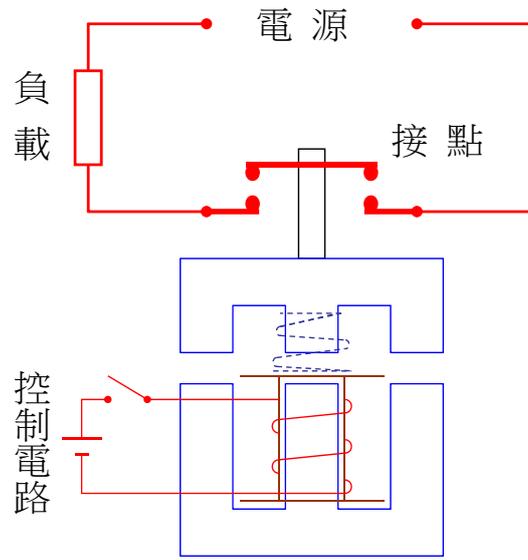
電磁場

右手握拳法：手指指示電流，姆指指示磁通



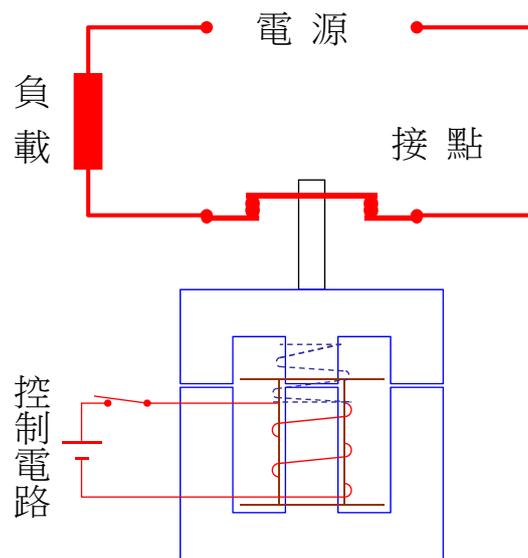
36

電磁場



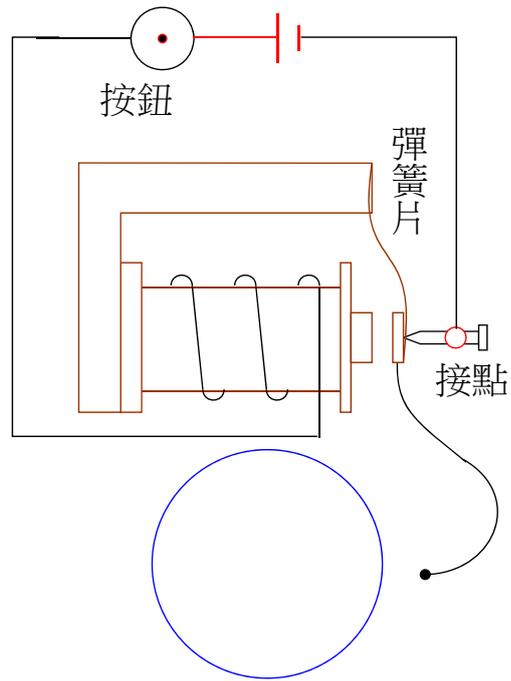
電磁制 / 繼電器

電磁場



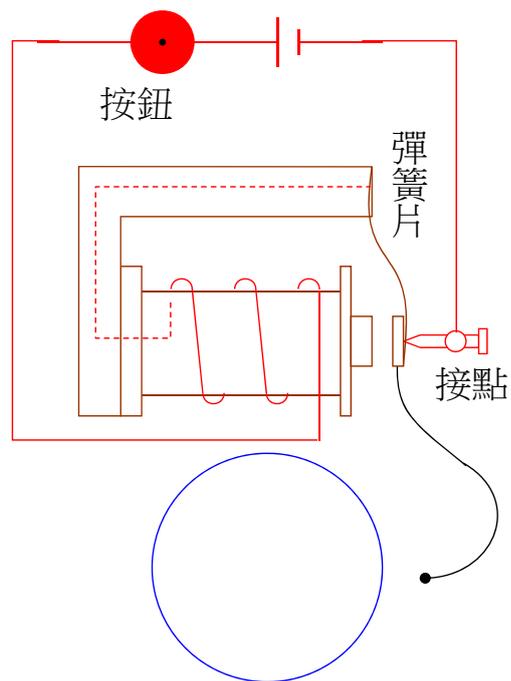
電磁制 / 繼電器

電磁場



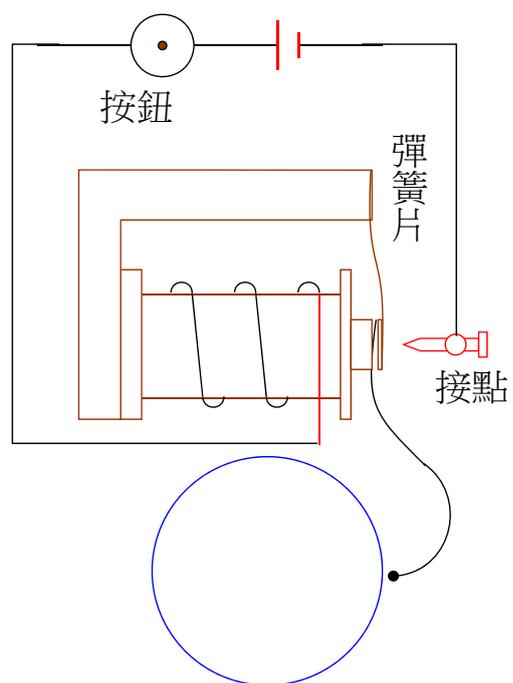
門鈴

電磁場



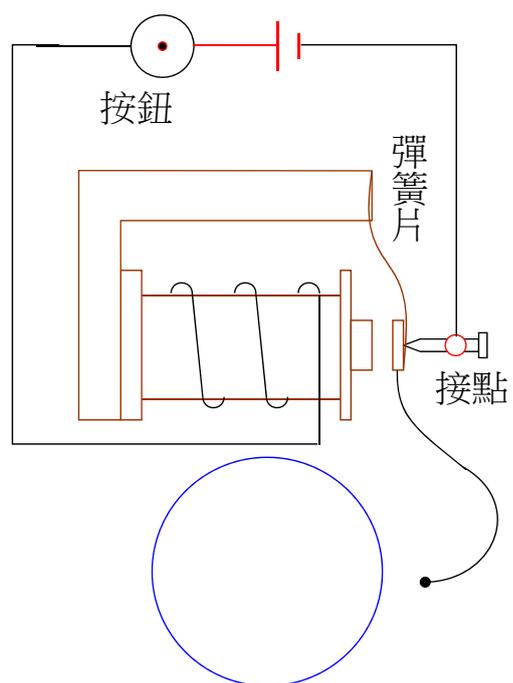
門鈴

電磁場



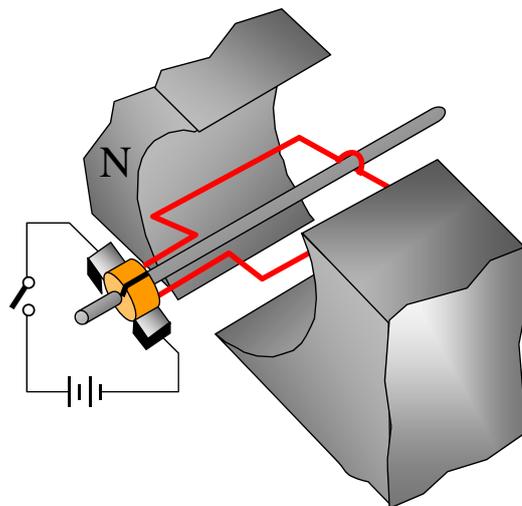
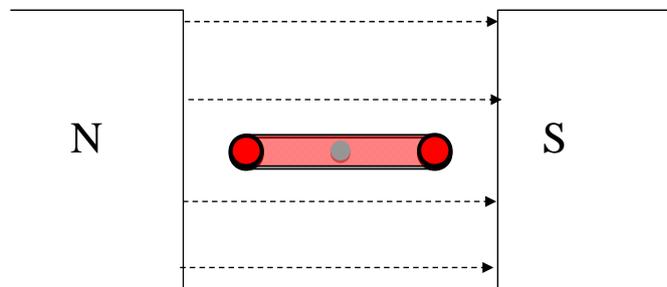
門鈴

電磁場



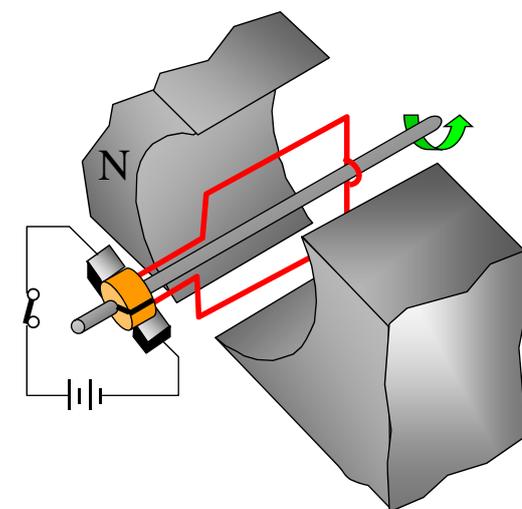
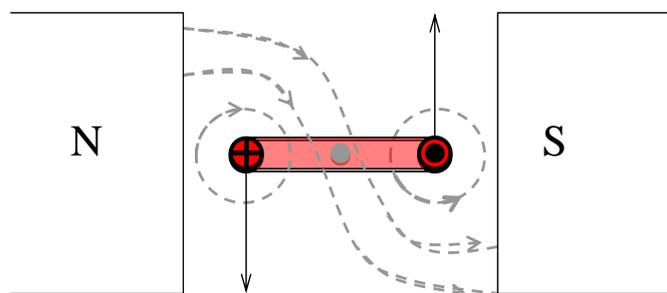
門鈴

電磁場



43

電磁場



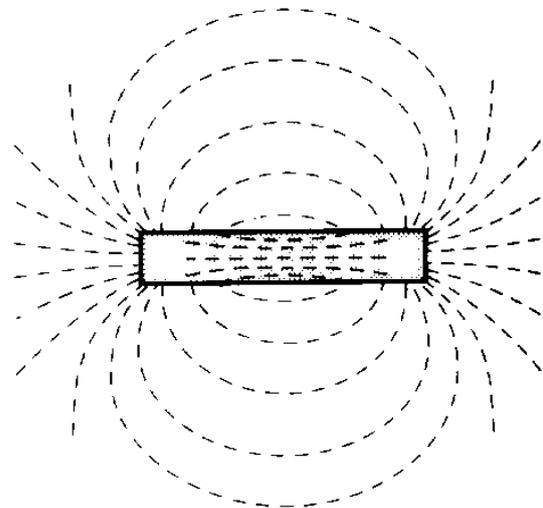
44

磁路 Magnetic Circuit (一)

45

磁路 Magnetic Circuit

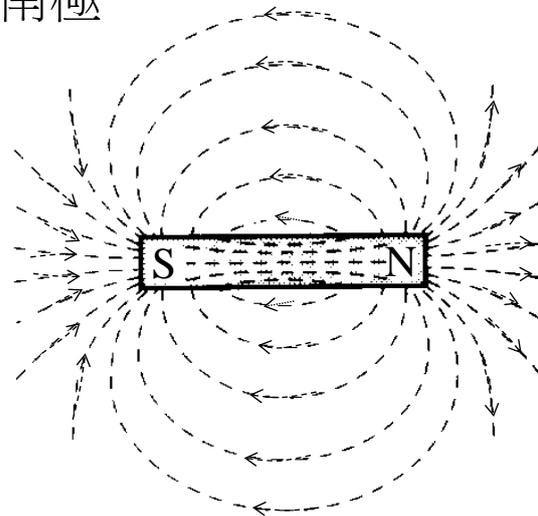
- 磁通所循的路線，叫做磁路



46

磁路 Magnetic Circuit

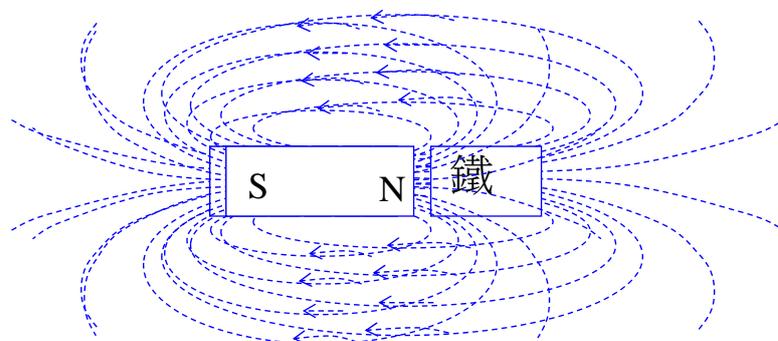
- 磁路是閉合的，磁通由磁鐵的北極發出，經過磁鐵周圍的空間，然後歸於南極



47

磁路 Magnetic Circuit

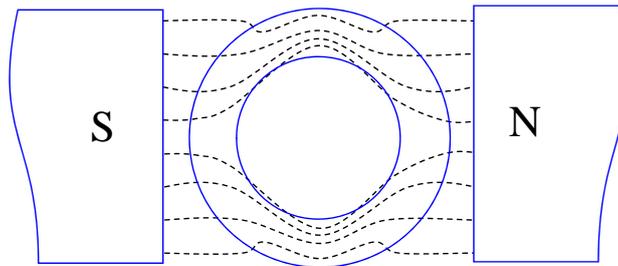
- 磁路中當有磁性物質(如鐵、鋼)時，磁通會意圖集中地通過該等物質



48

磁路 Magnetic Circuit

- 磁路中當有磁性物質(如鐵、鋼)時，磁通會意圖集中地通過該等物質

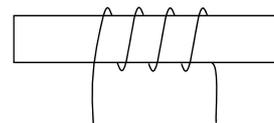


磁屏障

49

磁路 Magnetic Circuit

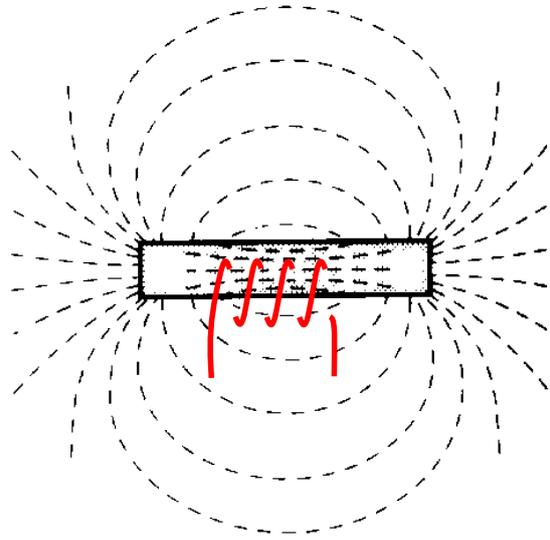
- 將導線繞成線圈



50

磁路 Magnetic Circuit

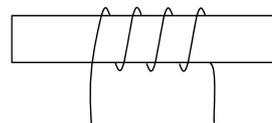
- 將導線繞成線圈，當線圈通以電流時，線圈芯的物質便會被磁化，有著磁鐵一樣的特性。



51

磁路 Magnetic Circuit

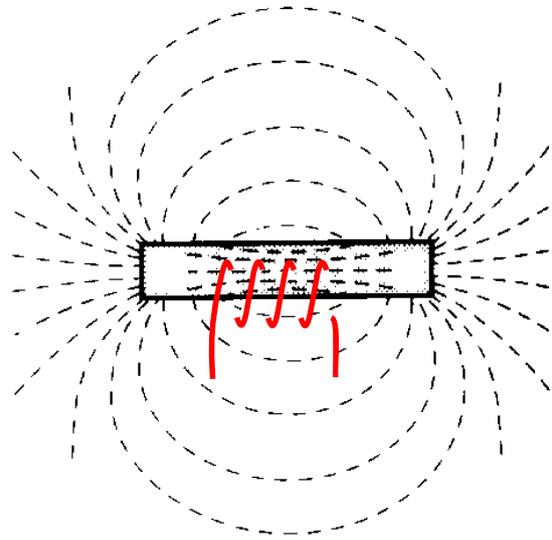
- 線圈的電流被切斷時，磁場消失，線圈芯物質回復原來的性能。



52

磁路 Magnetic Circuit

- 線圈帶有電流時，產生磁場，做成一個磁路，維持磁通在線圈的周圍出現。
- 有如電路的電動勢維持電流的一樣，線圈通以電流時，產生磁動勢，維持磁通。



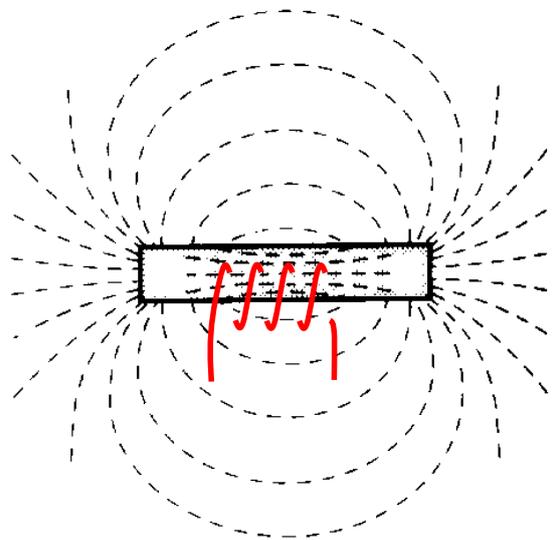
53

磁動勢 Magnetomotive Force

- 磁動勢的簡寫是 m.m.f.
- 量度單位是安培 (A)

$$\text{m.m.f.} = IN$$

- I = 線圈的電流
- N = 線圈的匝數
- 當1A的電流通過1匝的線圈時，便會產生1A的磁動勢



54

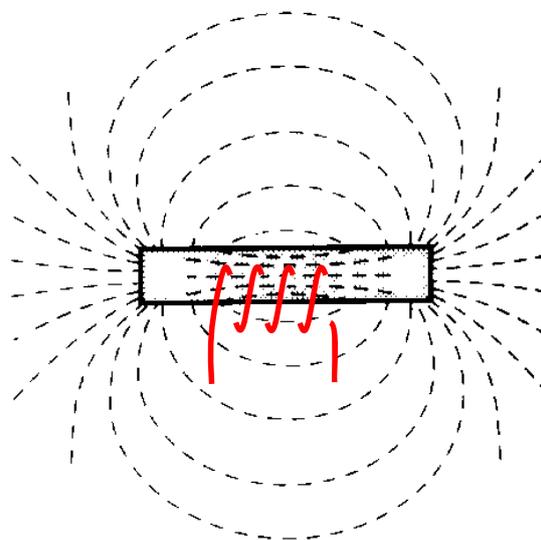
磁動勢 Magnetomotive Force

例：

在一個祇有1匝數的線圈中，如果需要有1000A的磁動勢，需要的電流是多少？

答：

$$\begin{aligned} \text{m.m.f.} &= IN \\ 1000 &= I \times 1 \\ \text{電流 } I &= 1000 \text{ A} \end{aligned}$$



55

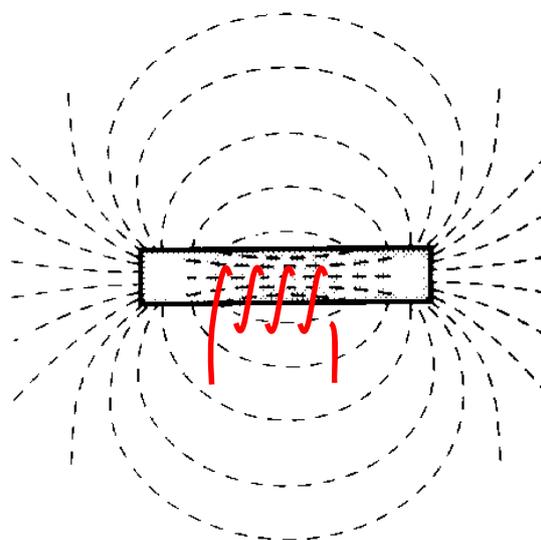
磁動勢 Magnetomotive Force

例：

在一個有1000匝數的線圈中，如果需要有1000A的磁動勢，需要的電流是多少？

答：

$$\begin{aligned} \text{m.m.f.} &= IN \\ 1000 &= I \times 1000 \\ \text{電流 } I &= 1 \text{ A} \end{aligned}$$



56

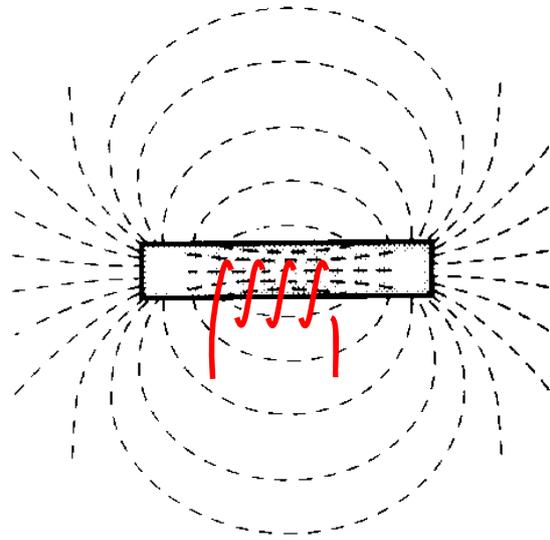
磁動勢 Magnetomotive Force

例：

如果線圈錄有1000A的磁動勢，而線圈的電流是2.5A，問這線圈匝數的是多少？

答：

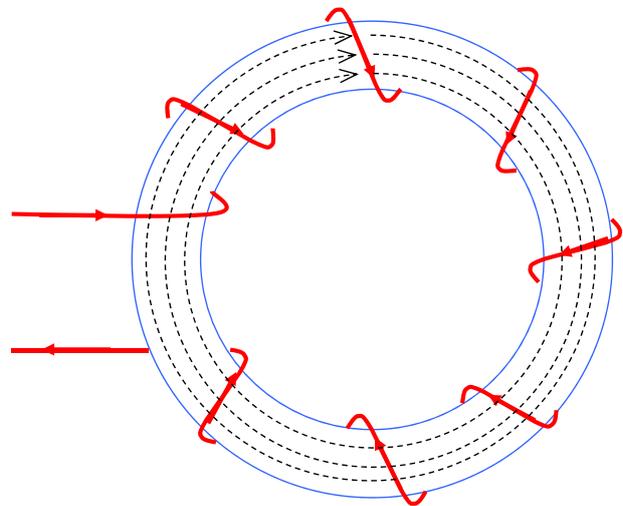
$$\begin{aligned} \text{m.m.f.} &= IN \\ 1000 &= 2.5 \times N \\ \text{匝數} N &= 400 \text{ 匝} \end{aligned}$$



57

磁場強度 Magnetic Field Strength

- 在鐵環上繞有線圈，線圈通以電流時，鐵環被磁化，成為一磁環，磁通集中在鐵環內出現。
- 將線圈芯物質磁化的力量叫做磁化力，或叫做磁場強度。



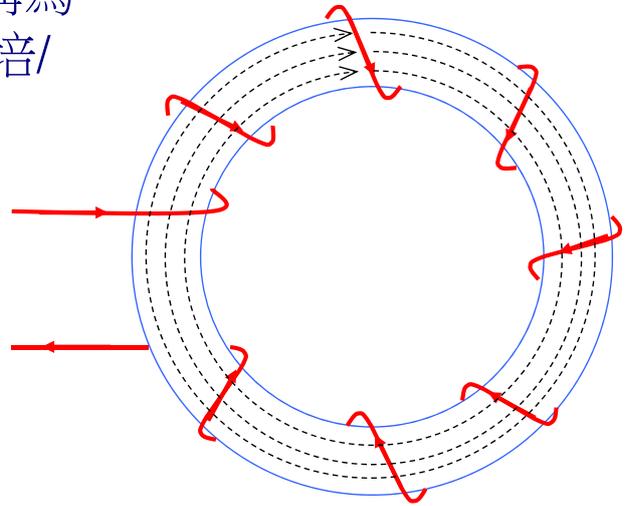
58

磁場強度 Magnetic Field Strength

每單位磁路長度的磁動勢稱為磁場強度，量度單位是安培/米 (A/m)

$$\text{磁場強度} = \frac{\text{磁動勢}}{\text{磁通長度}}$$

$$H = \frac{IN}{l}$$



59

磁場強度 Magnetic Field Strength

例題

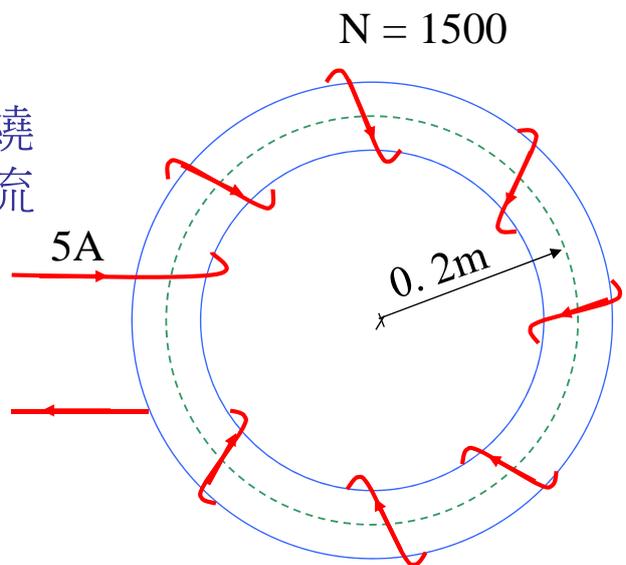
在平均半徑0.2m的鐵環上繞上線圈1500匝，線圈的電流是5A，計算磁場強度。

答案

$$\text{平均磁通長度 } l = 2\pi r$$

$$= 2\pi \times 0.2 = 1.25 \text{ m}$$

$$\text{磁場強度 } H = \frac{IN}{l} = \frac{5 \times 1500}{1.25} = 6000 \text{ A/m}$$



60

磁場強度 Magnetic Field Strength

例題：

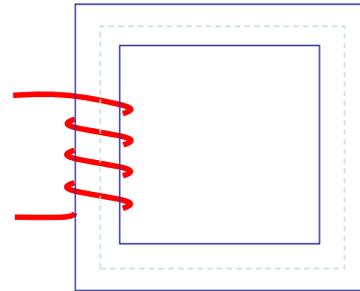
如果要在900匝線圈的鐵芯內產生8 000 A/m的磁場強度，鐵芯的平均長度是16cm，計算磁動勢和線圈的電流。

答案： $\ell = 16 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}$

$$H = \frac{IN}{\ell}$$

磁動勢 $IN = H\ell = 8000 \times 0.16$
 $= 1280 \text{ A}$

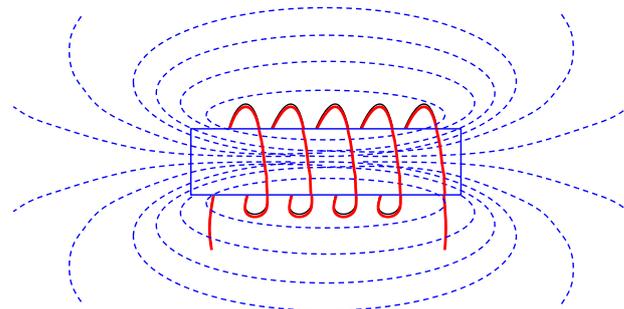
電流 $I = \frac{\text{m.m.f.}}{N} = \frac{1280}{900} = 1.42 \text{ A}$



61

磁導率 Permeability

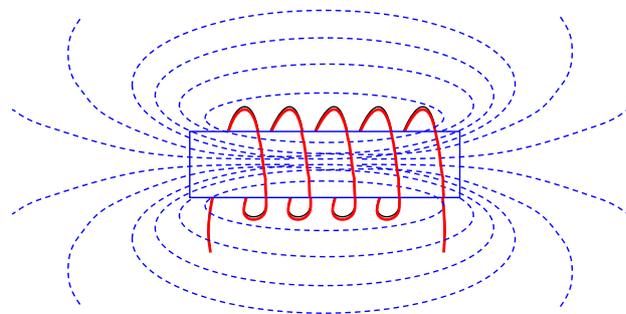
- 一個空芯的線圈通以電流後，線圈的周圍產生磁場，但是所得的磁力是較弱的。
- 但當線圈插入鐵芯後，磁力便大大增強。
- 鐵芯的磁導性能較空氣強，在同樣的磁場強度下，可產生較高的磁場密度。



62

磁導率 Permeability

- 當線圈通以電流時，線圈芯被磁化，產生磁場強度 H
- 與此同時，我們可於線圈的周圍感受到磁力，線圈芯的磁通密度 B 越高，磁力越強。



63

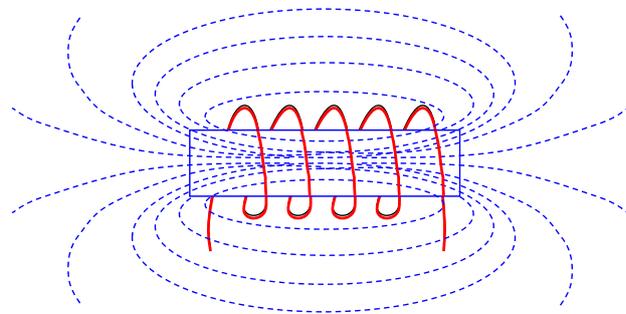
磁導率 Permeability

- 磁路中，每單位磁場強度的磁通密度就是磁導率。

$$\text{磁導率} = \frac{\text{磁通密度}}{\text{磁場強度}}$$

$$\mu = \frac{B}{H}$$

磁導率的量度單位是 亨利/米 (H/m)



64

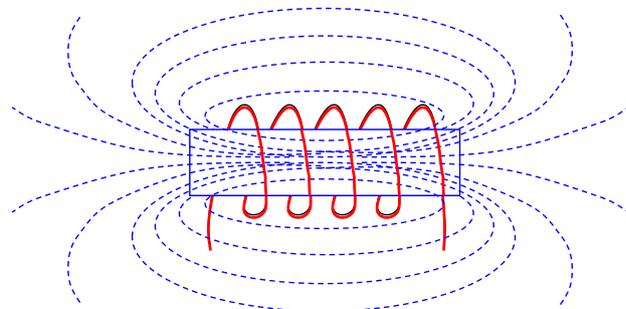
磁導率 Permeability

磁導率 μ 由兩部份組成：

1. 真空磁導常數 μ_0
2. 相對磁導係數 μ_r

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

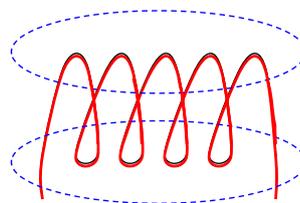
$$\frac{B}{H} = \mu_0 \mu_r$$



65

真空磁導常數 Space Permeability

- 利用真空作為比較各種物質磁導性能的基準。
- 放置空芯線圈於真空中，通以勵磁電流，當它產生的磁場強度 H 是 1 A/m 時，磁路的磁通密度 B 則是 $4\pi \times 10^{-7}$ (T)。



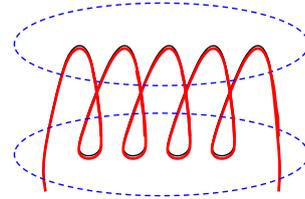
66

真空磁導常數 Space Permeability

- 真空磁導常數的符號是 μ_0

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

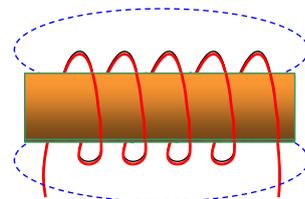
- 真空磁導常數的量度單位是 亨利/米 (H/m)。



67

相對磁導係數 Relative Permeability

- 各種物質有著不同的磁導性能。
- 非磁導物質的磁導性能與真空的相約，磁導性能約是真空的1倍。

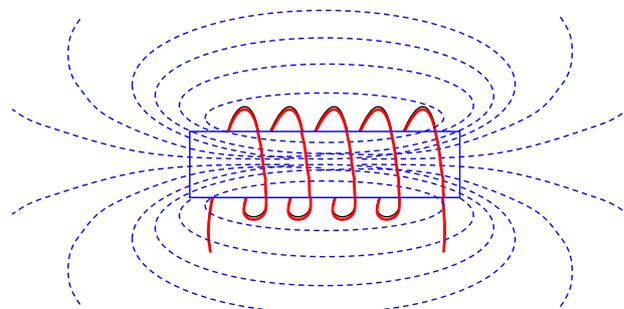


空氣、紙、木、
銅、鋁

68

相對磁導係數 Relative Permeability

- 鐵類物質作為線圈芯時，它便可以產生很強的磁力，一些合金的磁導能力很強，磁導能力較真空的高越十萬倍。

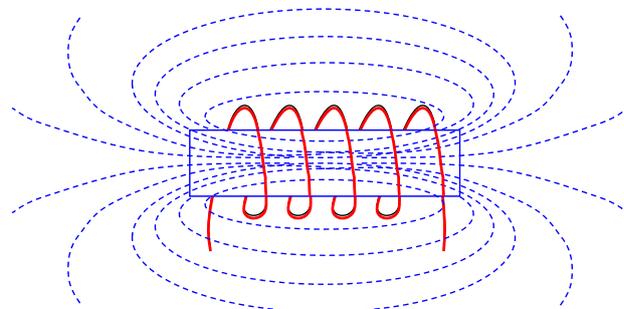


鐵芯

69

相對磁導係數 Relative Permeability

- 矽鋼的相對磁導係數約是6000，這表示線圈芯是矽鋼時，它的磁力會比真空的強6000倍，因為在相同的磁場強度情況下，矽鋼的磁通密度是真空的6000倍。



矽鋼鐵芯

70

相對磁導係數 Relative Permeability

- 物質的磁導能力與真空的比較，其倍數就是該物質的相對磁導係數。
- 代表相對磁導係數的符號是 μ_r

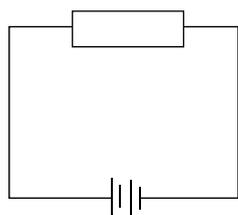
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{或} \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

- 因為相對磁導係數是一個倍數，所以是沒有量度單位的。

71

複習

電路



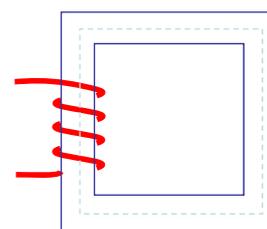
電動勢 E (V)

電流 I (A)

電阻 $R = \frac{E}{I}$ (Ω)

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (\Omega)$$

磁路



磁動勢 IN (A)

磁通 ϕ (Wb)

磁阻 $S = \frac{IN}{\phi}$ (A/Wb)

$$S = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A} \quad (\text{A/Wb})$$

72

複習 - 磁路

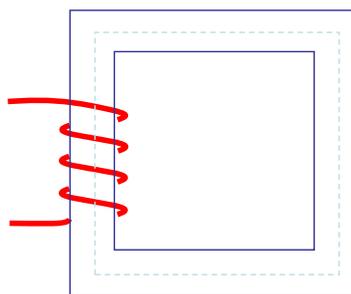
磁動勢 IN (A)

磁場強度 $H = \frac{IN}{\ell}$ (A/m)

磁通 ϕ (Wb)

磁通密度 $B = \frac{\phi}{A}$ (T)

磁導率 $\mu_o\mu_r = \frac{B}{H}$ (H/m)



磁阻 $S = \frac{IN}{\phi}$ (A/Wb)

$S = \frac{\ell}{\mu_o\mu_r A}$ (A/Wb)

73

複習 - 磁阻

磁阻 $S = \frac{IN}{\phi}$ (A/Wb)

$= \frac{H\ell}{BA}$ (A/Wb)

$= \frac{H}{B} \cdot \frac{\ell}{A}$ (A/Wb)

$S = \frac{\ell}{\mu_o\mu_r A}$ (A/Wb)

$H = \frac{IN}{\ell}$ $IN = H\ell$

$B = \frac{\phi}{A}$ $\Phi = BA$

$\mu_o\mu_r = \frac{B}{H}$ $\frac{H}{B} = \frac{1}{\mu_o\mu_r}$

74

課堂練習

問題(一)

有一空氣隙，闊2.5mm，有效截面面積是200cm²的，現在要空氣隙中產生磁通0.015Wb，計算所需的磁動勢。

問題(二)

有一截面面積是600mm²的鐵圓環，它的平均周長是300mm，鐵環上繞有線圈200匝，如果鐵環的相對磁導係數是1500，計算

- 在圓環中產生800μWb磁通所需的電流，
- 圓環的磁阻

75

課堂練習

問題(三)

某磁路的鐵芯是由截面面積200mm²的鑄鋼造成，磁路的平均長度是120mm，磁路中有一個闊0.2mm的空氣隙，現需要在磁路中產生磁通0.05mWb，計算

- 空氣隙的磁阻
- 空氣隙部份所需的磁動勢
- 鐵芯的磁通密度
- 據B/H曲線，求出鐵芯的磁場強度
- 鐵芯部份所需的磁動勢

鑄鋼的磁化曲線數據

磁通密度 B(T)	0.1	0.2	0.3	0.4
磁場強度 H (A/m)	170	300	380	460

76

課堂練習

問題(四)

某線圈的鐵芯是由闊25mm的硅鋼疊厚至25mm造成，磁路的平均長度是150mm，硅鋼的磁通密度是1T，線圈有1600匝，電流是0.109A，計算

- a) 磁動勢
- b) 磁場強度
- c) 磁通
- d) 相對磁導係數
- e) 鐵芯的磁阻

如果磁路上有兩條闊1mm的空氣隙，計算

- f) 空氣隙的磁阻
- g) 整個磁路的磁通

第三章

第二節

- 磁化特性
- 磁滯迴線
- 磁動勢
- 電磁感應
- 法拉第電磁感應定律
- 磁滯損失及渦流損失
- 磁性材料

1

磁路

Magnetic Circuit

(二)

2

磁化特性

Magnetization Characteristic

當線圈通以電流時，線圈芯被磁化，

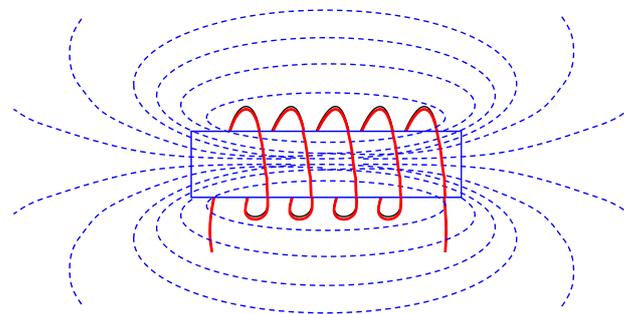
$$\text{磁場強度 } H = \frac{IN}{l}$$

與此同時，我們可於線圈的周圍感受到磁力，
線圈芯的磁通密度 B 越高，磁力越強。

3

磁化特性

Magnetization Characteristic



一個空芯的線圈的磁力是較弱的。

但當線圈插入鐵芯後，磁力便大大增強，
鐵芯的磁導性能較空氣強。

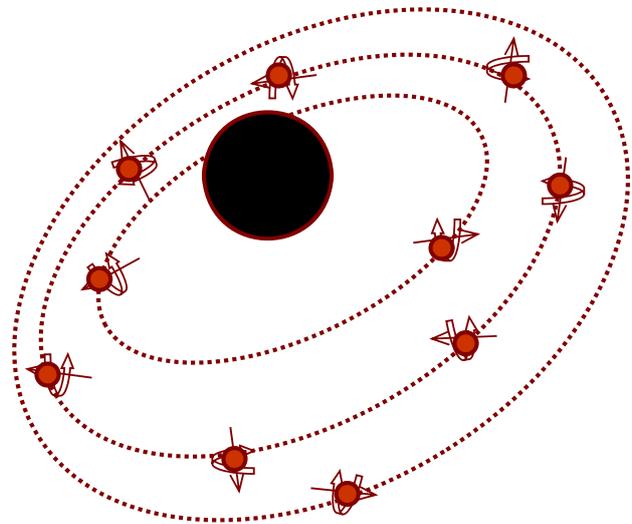
4

磁化特性

Magnetization Characteristic

原子是包括有一個帶正電性的核心和帶負電性的電子。

電子除在軌道上環繞原子核運行外，其本身也作自轉。

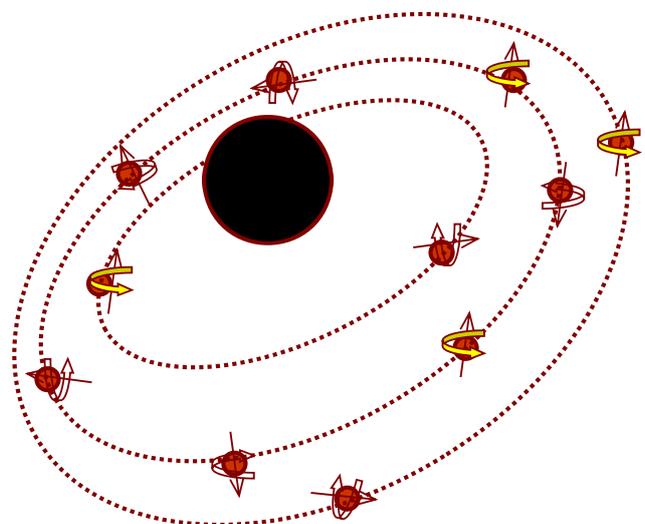


5

磁化特性

Magnetization Characteristic

每個鐵原子中，有四個電子是平衡地以相同的方向自轉，使原子帶有磁性。

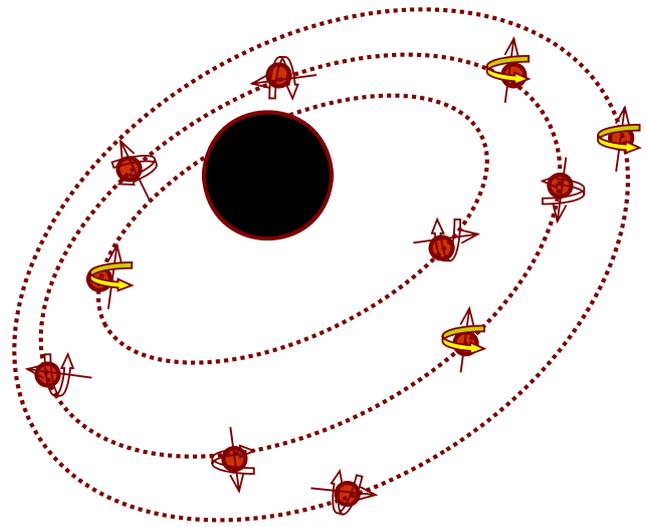
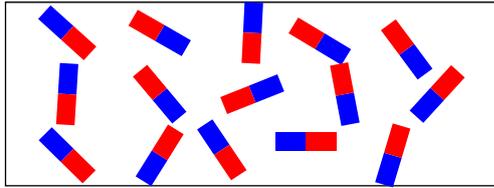


6

磁化特性

Magnetization Characteristic

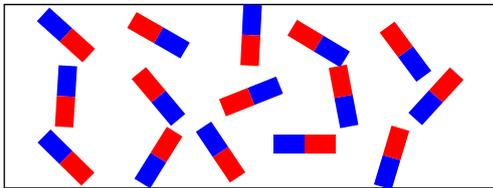
磁軸平衡的原子又會組成磁疇。



7

磁化特性

Magnetization Characteristic

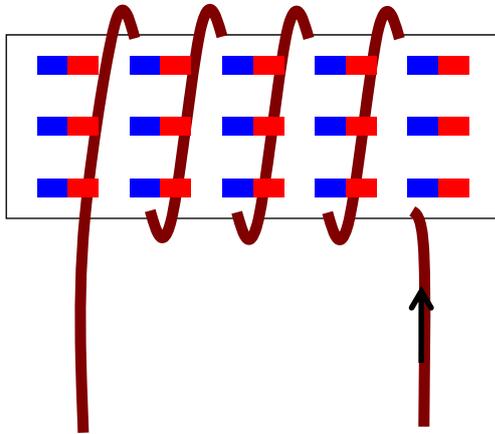


一個不帶磁性的鐵磁物體，各個磁疇有著不同的磁軸，磁力互相抵消。

8

磁化特性

Magnetization Characteristic



當鐵磁物體被放進一個帶電的螺線管時，電流產生的磁場使磁疇跟螺線管的磁場方向排列，結果增加了電磁場的磁通。

9

磁化特性

Magnetization Characteristic

原子是包括有一個帶正電性的核心和帶負電性的電子。電子除在軌道上環繞原子核運行外，其本身也作自轉，電子的自轉等同於一個微少的帶電體在圓環內移動，帶電體的移動形成電流，電流會產生磁場，鐵磁物質的磁導性能主要是基於電子的自轉而產生的。

10

磁化特性

Magnetization Characteristic

一般物質的電子，是以不同的方向自轉，磁力互相抵消，但是每個鐵原子中，則有四個電子是平衡地以相同的方向自轉，這樣一來，使原子帶有磁性。再者，磁軸平衡的原子又會組成約闊0.1mm的小區，這些小區叫做**磁疇**。

11

磁化特性

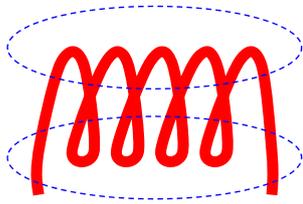
Magnetization Characteristic

一個不帶磁性的鐵磁物體，物體內的各個磁疇有著不同的磁軸，磁力互相抵消。但是，當鐵磁物體被放進一個帶電的螺線管時，電流產生的磁場使磁疇跟螺線管的磁場方向排列，結果增加了電磁場的磁通。

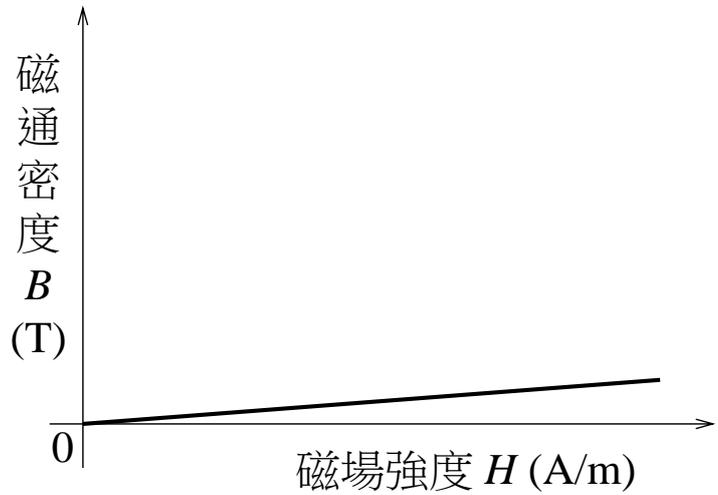
12

磁化特性

Magnetization Characteristic



空芯線圈

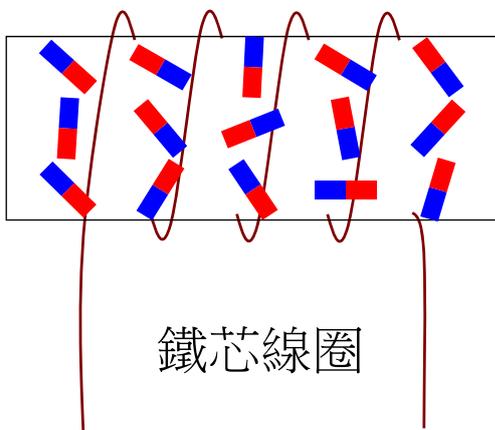


線圈的電流增加時，磁場強度增強，磁通密度作線性地增加，惟增幅很少。

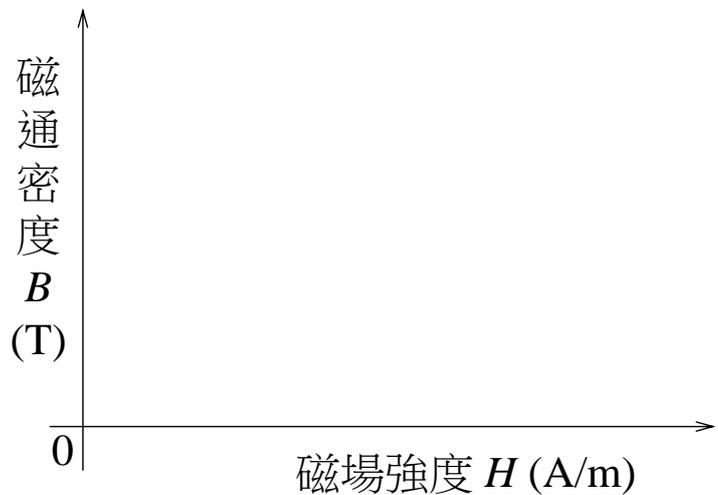
13

磁化特性

Magnetization Characteristic



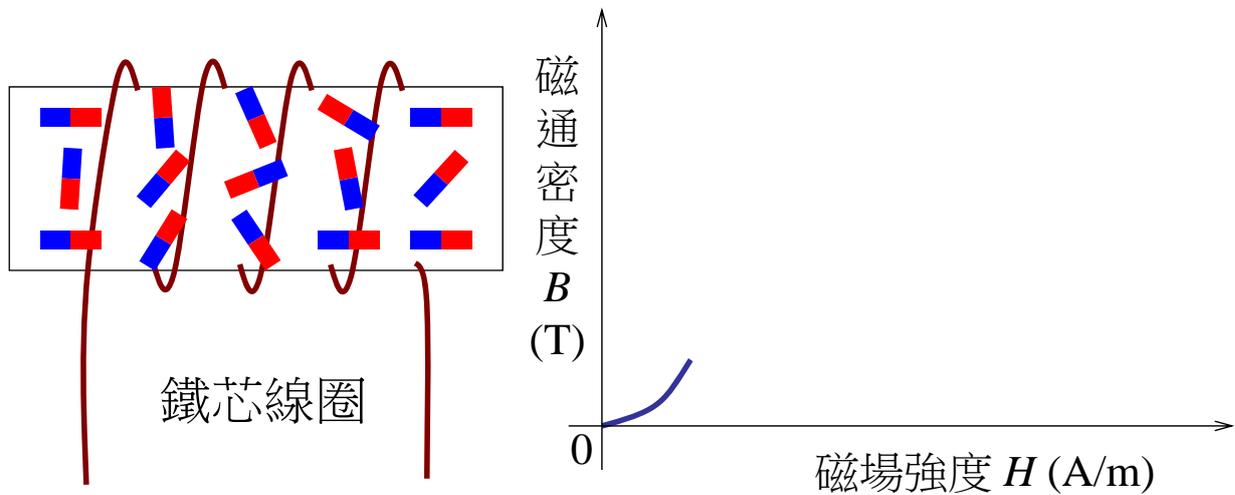
鐵芯線圈



14

磁化特性

Magnetization Characteristic

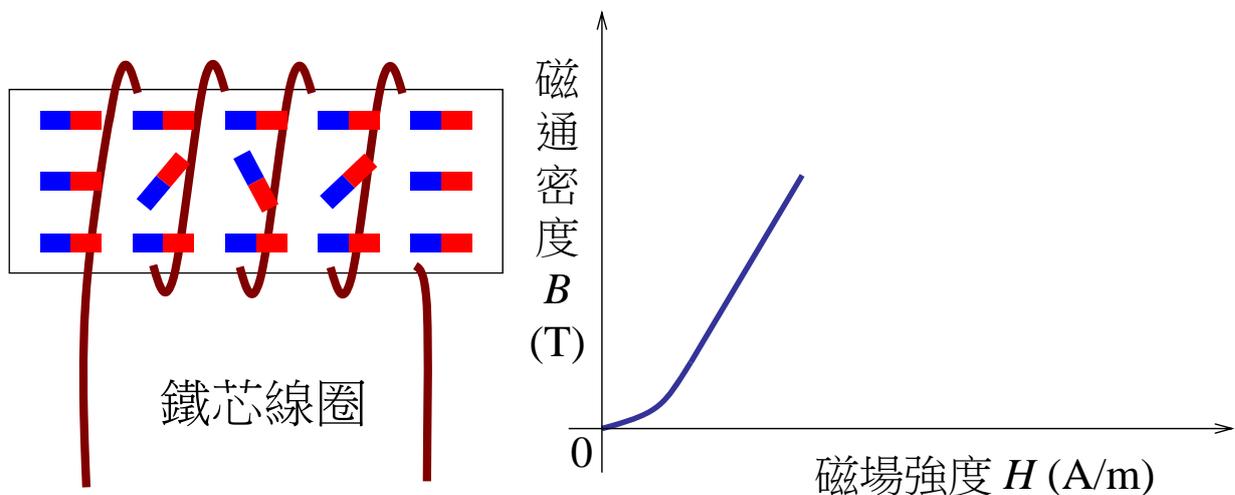


當線圈通電，開始時，勵磁電流增加，線圈的磁場強度增強，磁通密度隨之增加。

15

磁化特性

Magnetization Characteristic

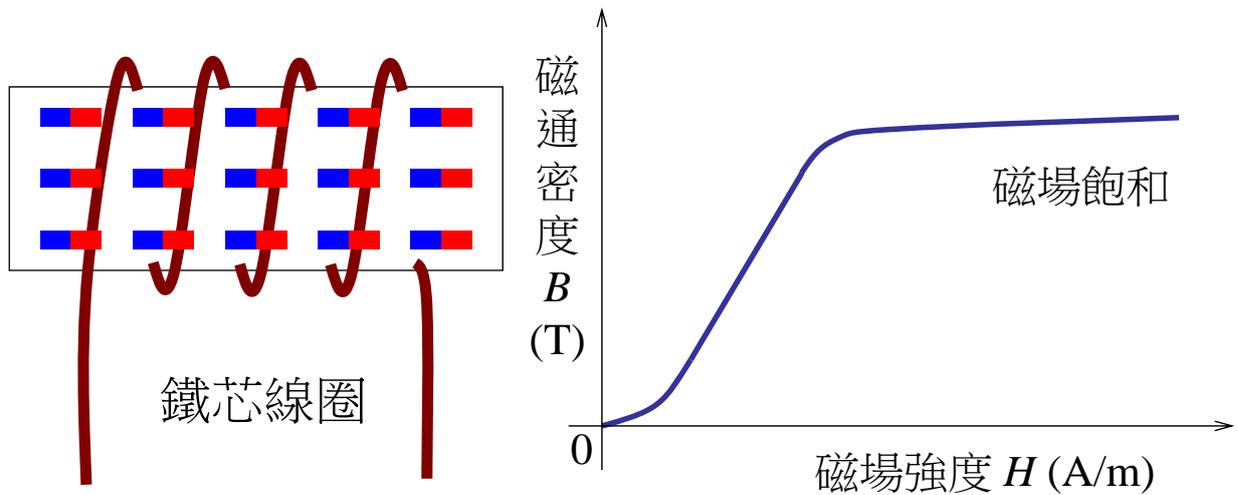


跟著，勵磁電流增加，線圈的磁場強度增強，線圈芯的磁通密度增加很快，磁通密度與磁場強度成正比。

16

磁化特性

Magnetization Characteristic



勵磁電流繼續增加，磁場強度繼續增強，但磁通密度的相應增加較少，甚至幾乎保持不變；這時磁場稱為到達飽和狀態。

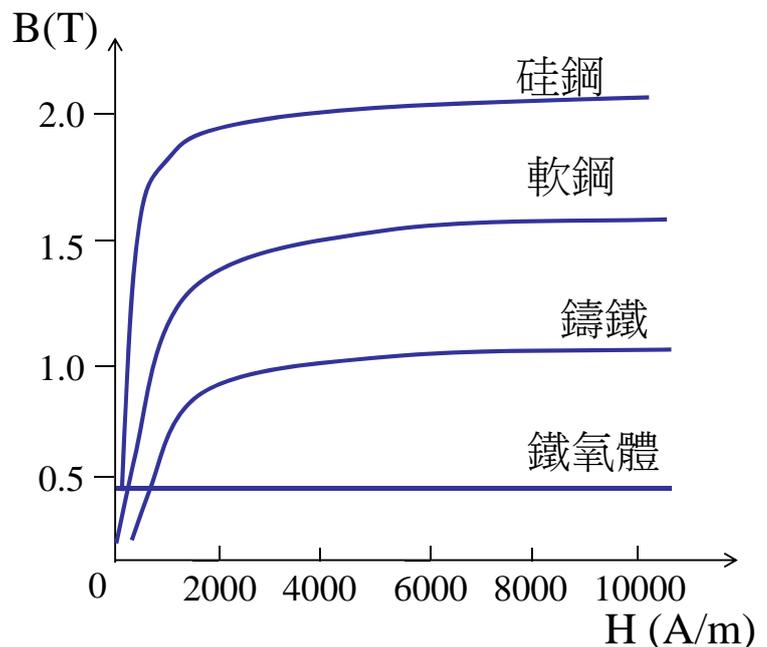
磁化特性

Magnetization Characteristic

B/H 曲線顯示物質的磁通密度與磁場強度間的變化。

圖中物質比較，在較低的磁場強度，硅鋼已達飽和，且有較高的磁通密度，這表示硅鋼的磁導能力較佳。

變壓器和電動機的鐵芯是由硅鋼造成。



課堂練習

問題(三)

某磁路的鐵芯是由截面面積 200mm^2 的鑄鋼造成，磁路的平均長度是 120mm ，磁路中有一個闊 0.2mm 的空氣隙，現需要在磁路中產生磁通 0.05mWb ，計算

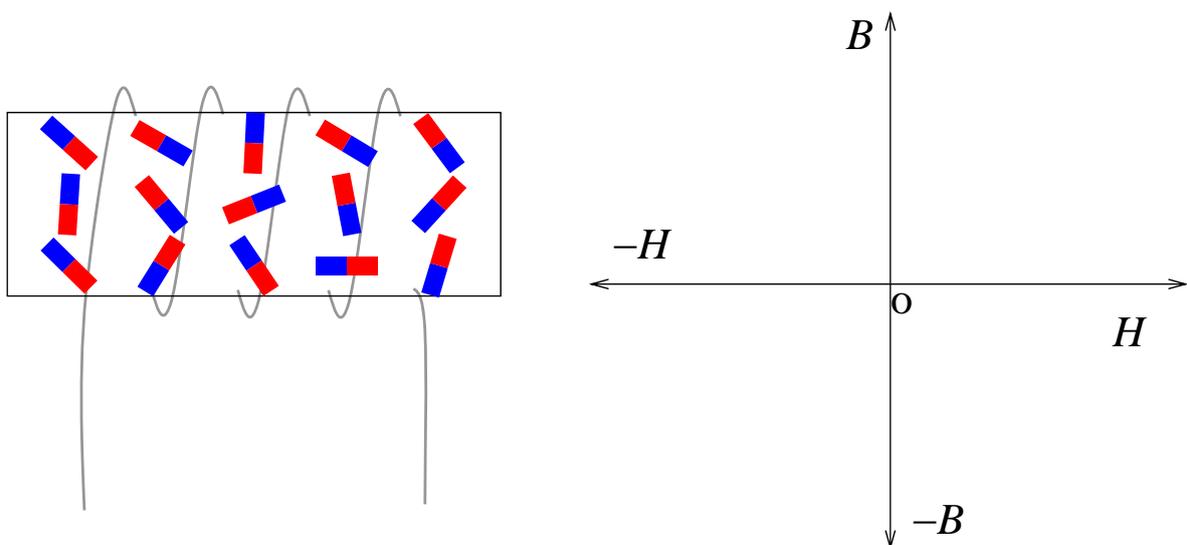
- 空氣隙的磁阻
- 空氣隙部份所需的磁動勢
- 鐵芯的磁通密度
- 據 B/H 曲線，求出鐵芯的磁場強度
- 鐵芯部份所需的磁動勢

鑄鋼的磁化曲線數據

磁通密度 $B(\text{T})$	0.1	0.2	0.3	0.4
磁場強度 $H(\text{A/m})$	170	300	380	460

19

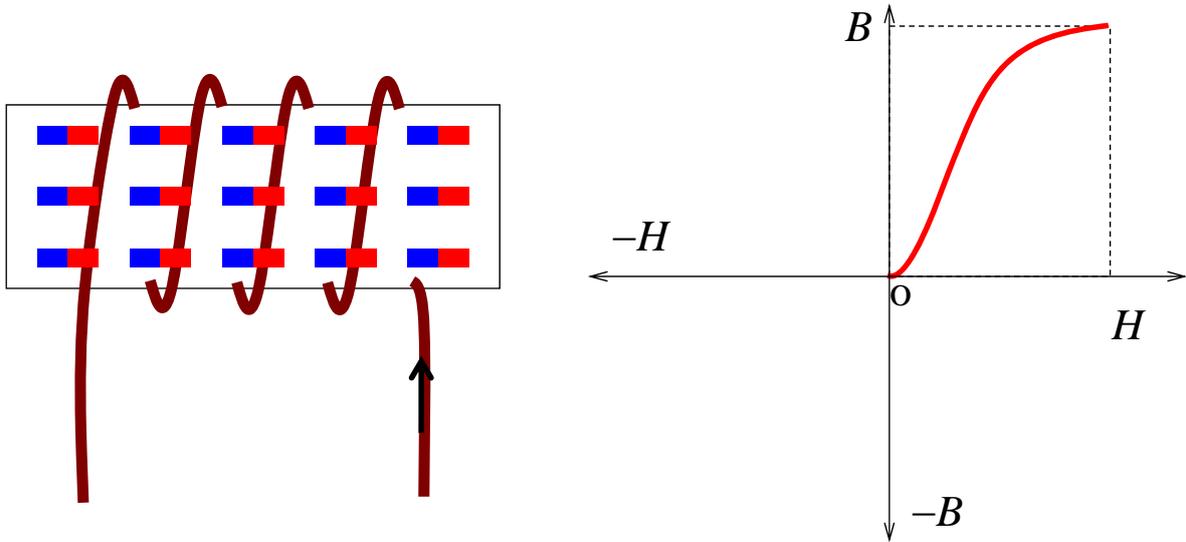
磁滯迴線 Hysteresis Loop



將一完全不帶磁力的鐵磁物質放於線圈中，準備供應電流至線圈，改變磁場的磁場強度，觀察鐵磁物質的磁化情況。

20

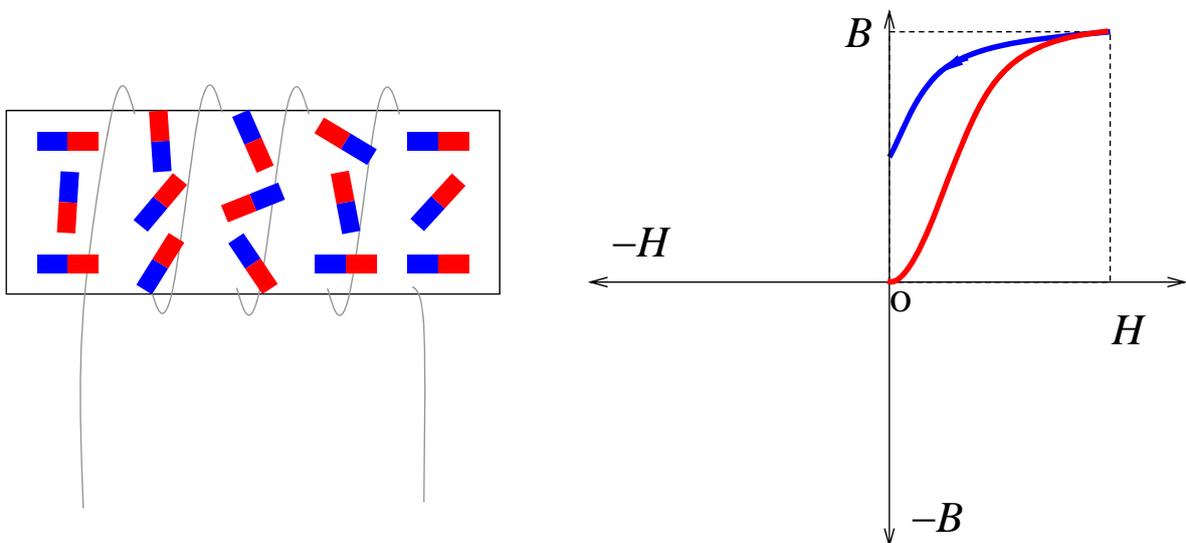
磁滯迴線 Hysteresis Loop



電磁鐵通以勵磁電流，鐵芯充磁，在磁場未達飽和前，勵磁電流增加，磁力增強。

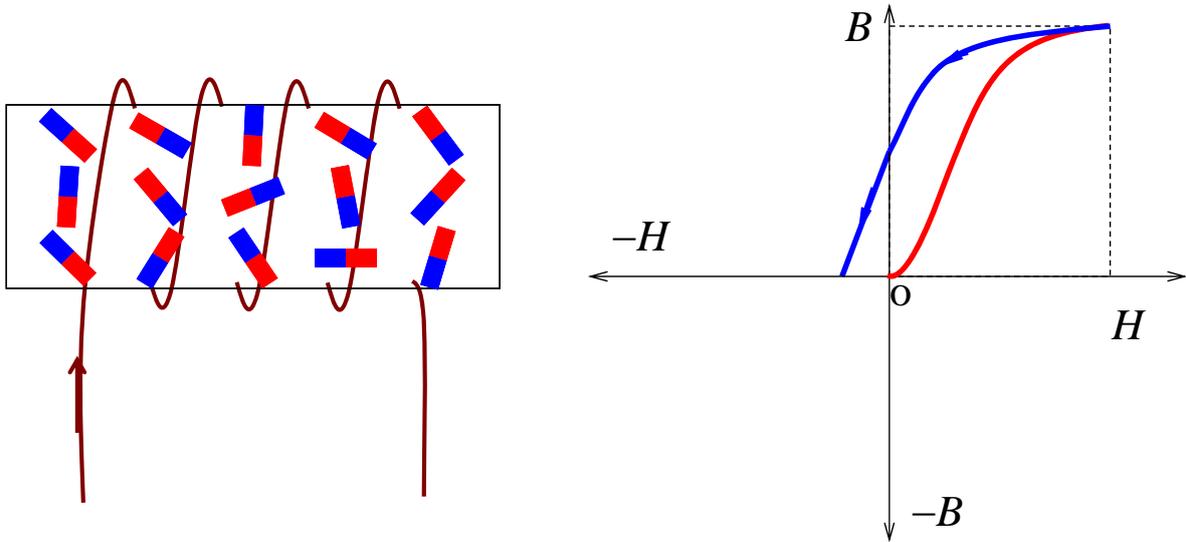
21

磁滯迴線 Hysteresis Loop



勵磁電流減少，磁力隨之減弱，不過，減幅較充磁時的為低，就是勵磁電流減至零，鐵芯仍保留一些磁力，這些磁力，叫做剩磁，相對的磁通密度叫做剩磁密度。²²

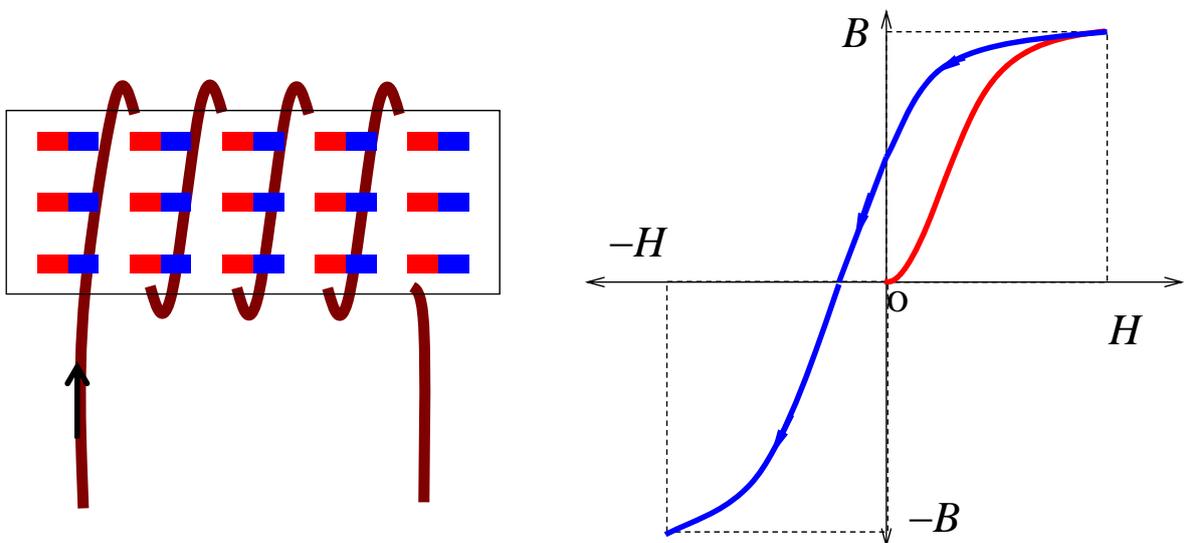
磁滯迴線 Hysteresis Loop



通以反方向的勵磁電流，可消除剩磁。消除剩磁密度的磁場強度叫做矯頑力。

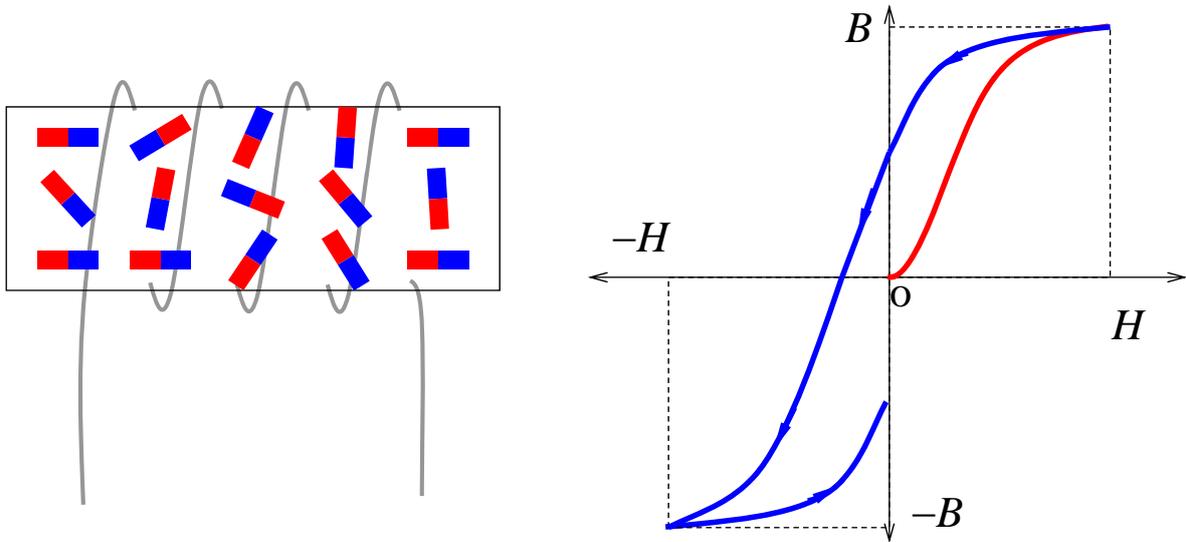
23

磁滯迴線 Hysteresis Loop



反方向的勵磁電流繼續增加時，磁鐵再被充磁，惟鐵芯的磁極反轉。反向的磁場強度與正向時的數值一樣時，鐵芯磁通密度的數值也是相同的，但極性相反。²⁴

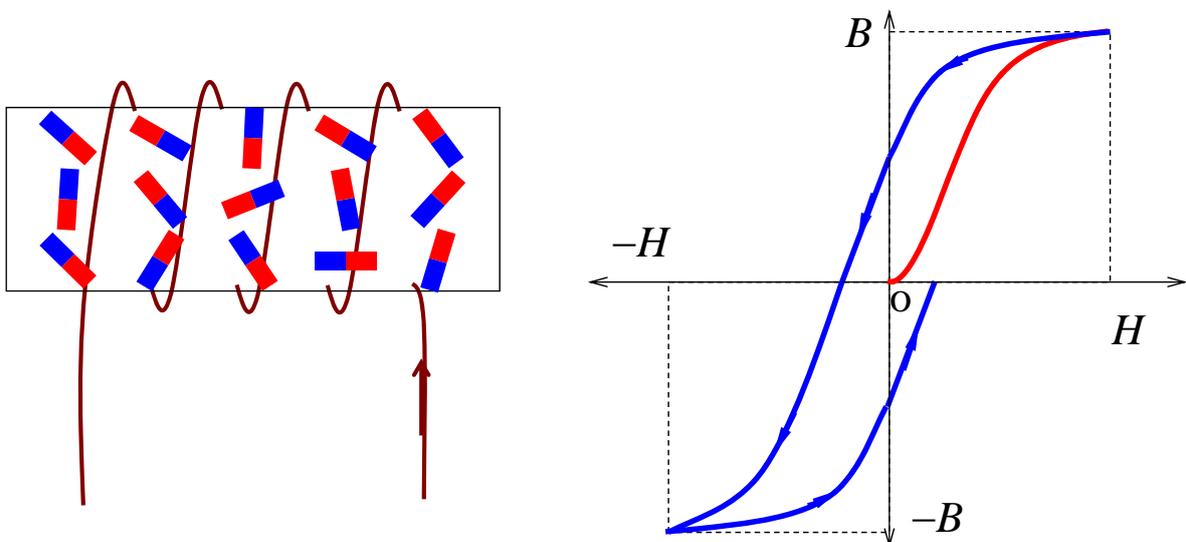
磁滯迴線 Hysteresis Loop



反向的勵磁電流減少至零，鐵芯仍保留一些反向的剩磁密度。

25

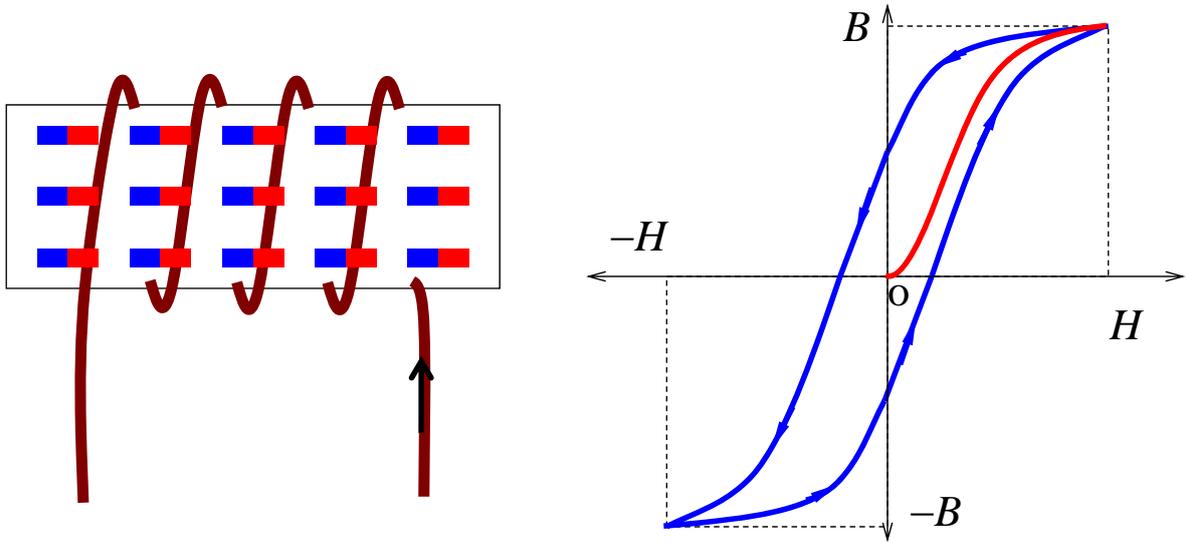
磁滯迴線 Hysteresis Loop



勵磁電流再向正性增加，給出矯頑力，消除反向的剩磁密度。

26

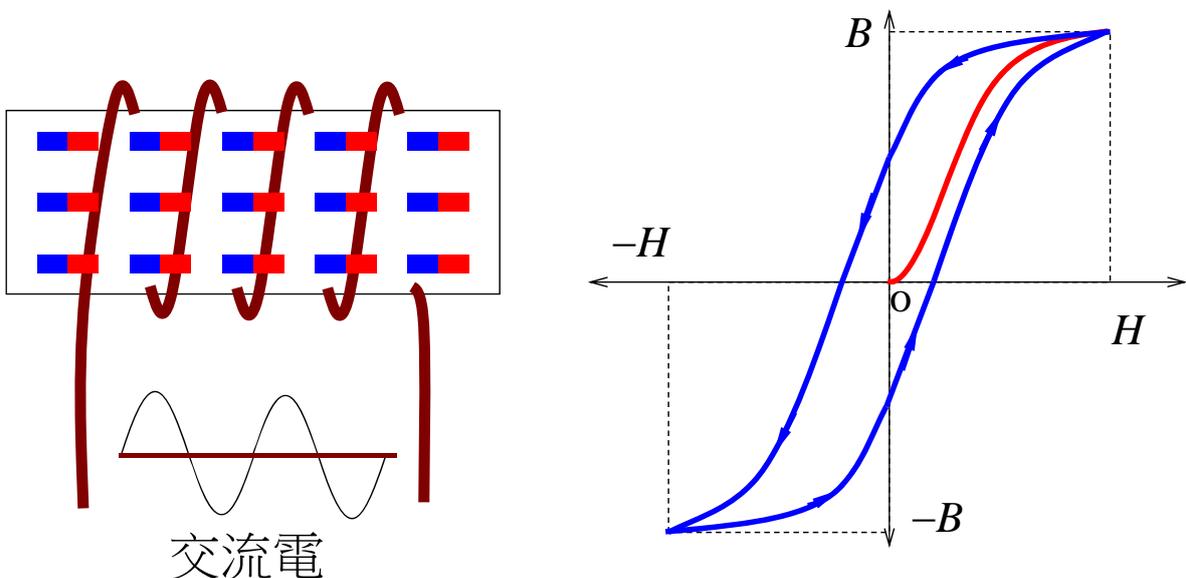
磁滯迴線 Hysteresis Loop



勵磁電流繼續正性地增加，再將電磁鐵充磁。

27

磁滯損耗 Hysteresis Loss



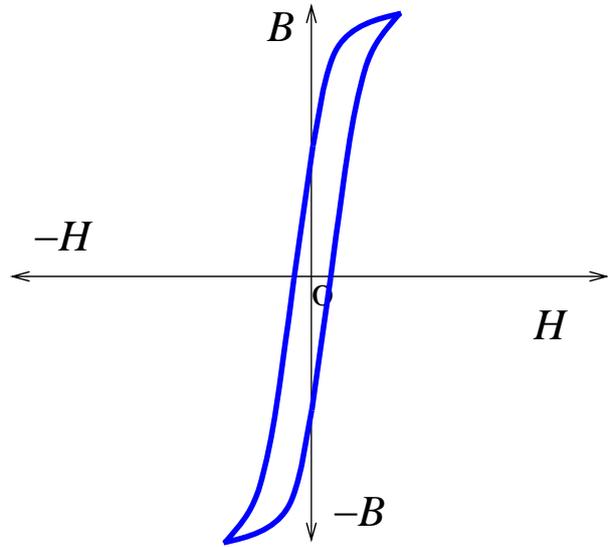
線圈通以交流電，電磁鐵不停地充磁和退除剩磁，過程間有能量的損耗，這叫做磁滯損耗。

28

軟磁物質

Soft Magnetic Material

- 磁滯迴線窄長
- 高導磁率
- 剩磁密度較少
- 矯頑力較少
- 磁滯損耗較低
- 適用於交流電，用作電機、變壓器及繼電器的鐵芯



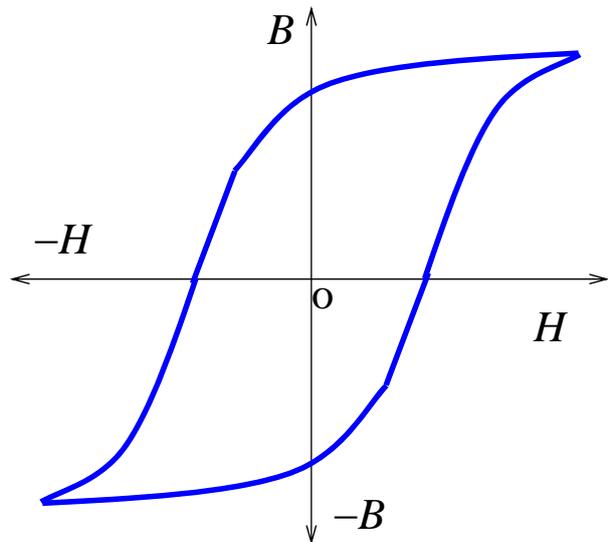
純鐵、硅鋼、
軟磁鐵氧體等

29

硬磁物質

Hard Magnetic Material

- 磁滯迴線闊
- 剩磁密度高
- 矯頑力高
- 磁滯損耗多
- 適用於永久磁鐵，如電錶內的鋼磁和揚聲器等



碳鋼、鋁鈷鎳合金

30

磁化特性

Magnetization Characteristic

- 接著，勵磁電流繼續增加，磁場強度繼續增強，但磁通密度的相應增加較少，甚至幾乎保持不變；這時磁場稱為到達飽和狀態。
- 當線圈通電，開始時，勵磁電流增加，線圈的磁場強度增強，線圈芯的磁通密度增加很快，磁通密度與磁場強度是成正比的；
- 勵磁電流增加，電磁鐵的磁場強度增強，磁通密度 B 增高。

31

磁動勢 Magnetomotive Force

- 當線圈通以電時，便會產磁場。磁場強度的大小，決定於線圈的電流和匝數，以及磁路的長短。以一環形線圈為例，當線圈繞製後，線圈的匝數和磁路的長度經已確定，影響磁場強度的祇有線圈的電流，線圈的電流越大，磁場強度越強；反之，線圈的電流較少時，磁場強度較弱。
- 線圈芯的物質，對電磁鐵的磁力有著絕大的影響。採用磁導性材料，(如鐵、鋼等)做成線圈芯時，就是線圈的電流不變，線圈也可以產很強的磁力，由於磁導性材料的磁通密度較高；非磁導性材料的磁通密度較低，所得的力便較弱。

32

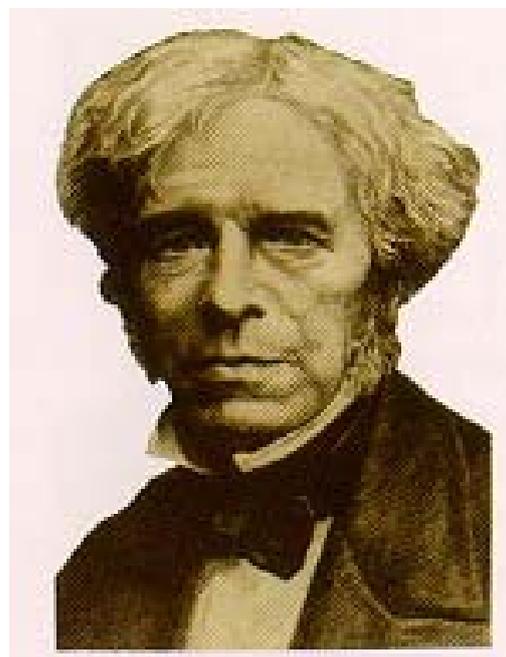
磁動勢 Magnetomotive Force

- 線圈通以交流電，勵磁電流會隨時間作規律性變化，電流由零上升至最大的數值後落回勵磁電流繼續增加磁場強度繼續增強，但磁通密度的相應增加較少，甚至幾乎保持不變；這時磁場稱為到達飽和狀態。
- 當電流正性地增加時，電磁鐵充磁，然後電流下降至零，電磁鐵退磁，並留有剩磁，跟著電流進入負半波，電磁鐵消除剩磁後又反向充磁，之後反向電流減少及再向正性增加，電磁鐵子又留有反向的剩磁消退剩磁後再正向充磁。

33

電磁感應 Electromagnetic Induction

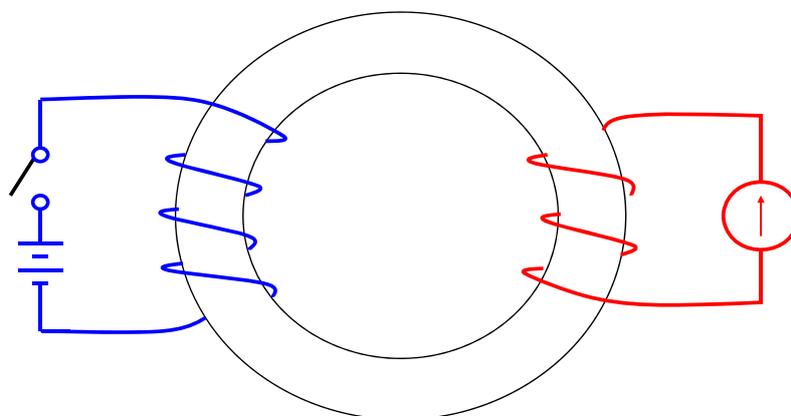
- 於1831年，米高法拉第說明「磁生電」的效應



34

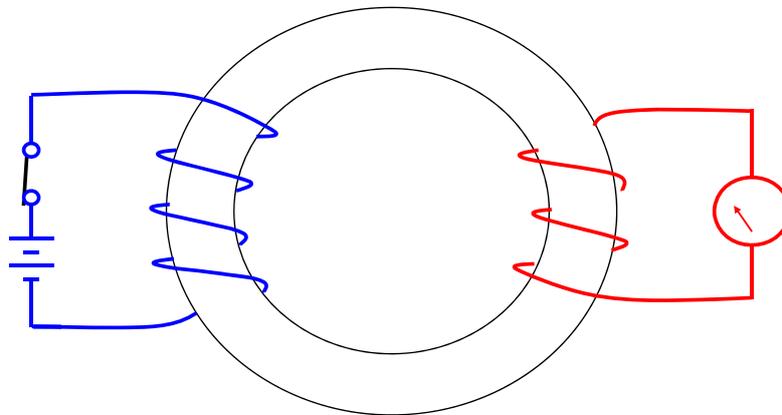


電磁感應 Electromagnetic Induction



- 法拉第在一鐵環上繞上兩個線圈
- 一個線圈準備接上電源，另一個線圈祇接上一個中間零位的電錶

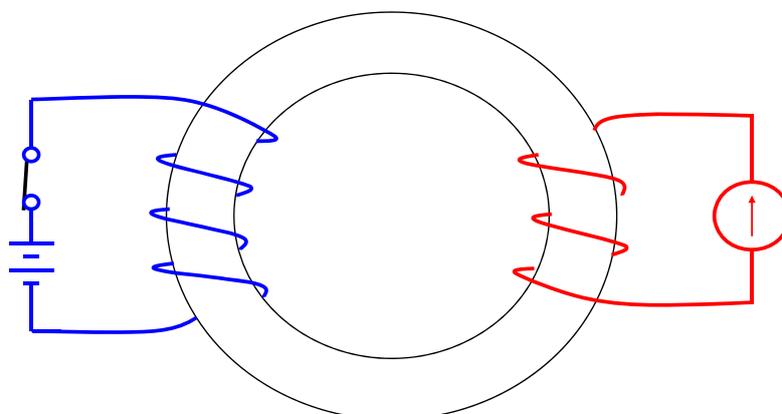
電磁感應 Electromagnetic Induction



- 電制剛關上時，電錶有一擺動
- 說明有電流流經電錶

37

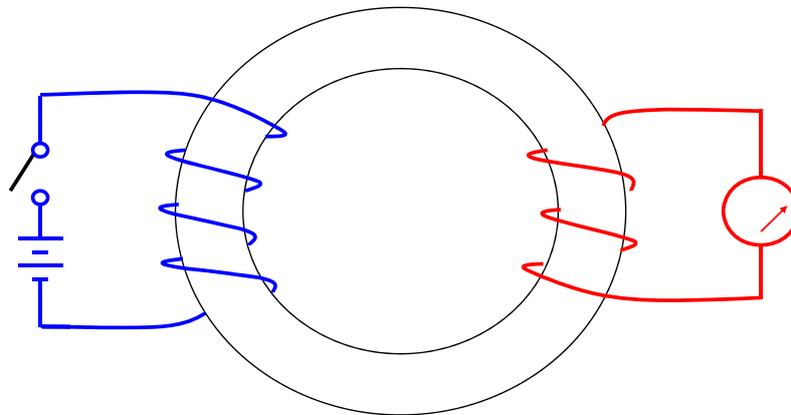
電磁感應 Electromagnetic Induction



- 電錶擺動一下，隨即返回零位
- 再沒有電流流經電錶

38

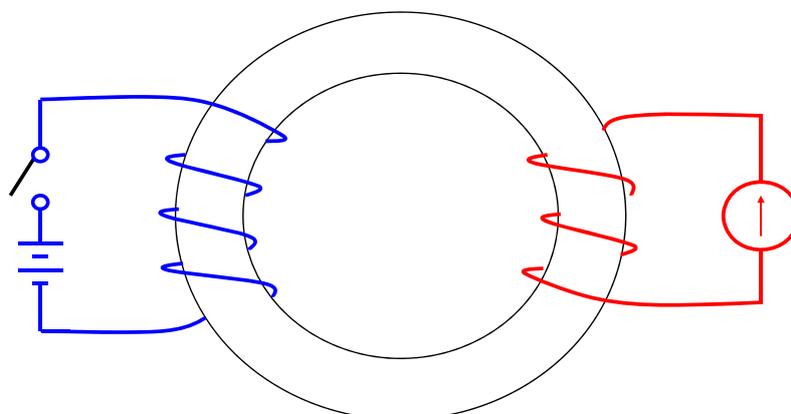
電磁感應 Electromagnetic Induction



- 將電制剛打開時，電錶再有一擺動
- 擺動的方向是相反於剛關制時的

39

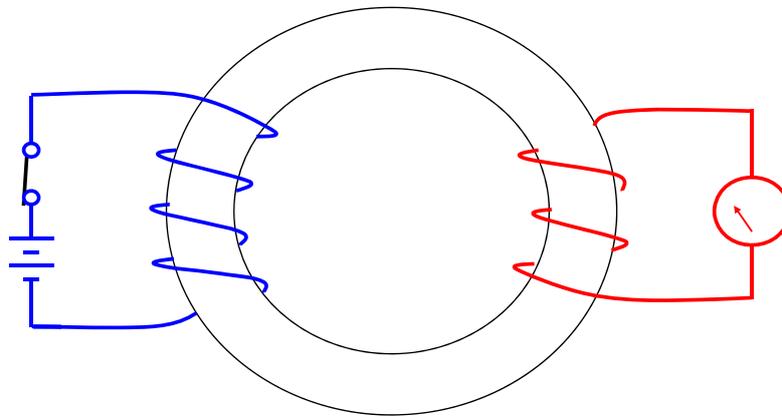
電磁感應 Electromagnetic Induction



- 電錶的指針擺動後隨即再返回零位

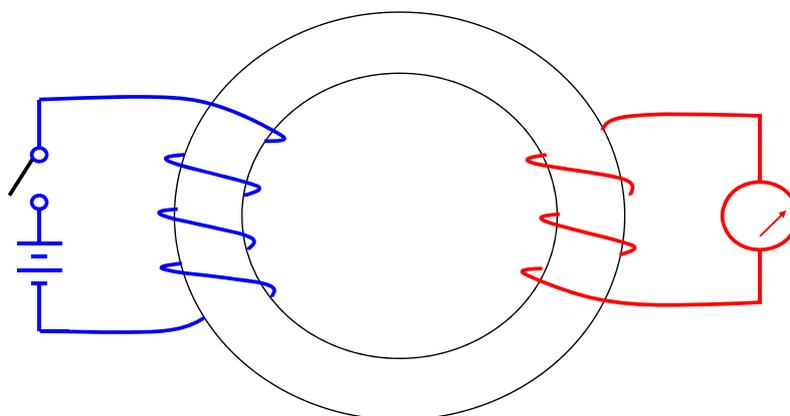
40

電磁感應 Electromagnetic Induction



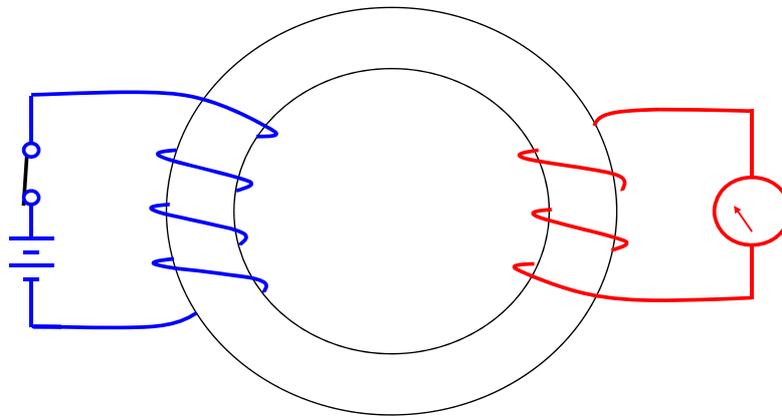
41

電磁感應 Electromagnetic Induction



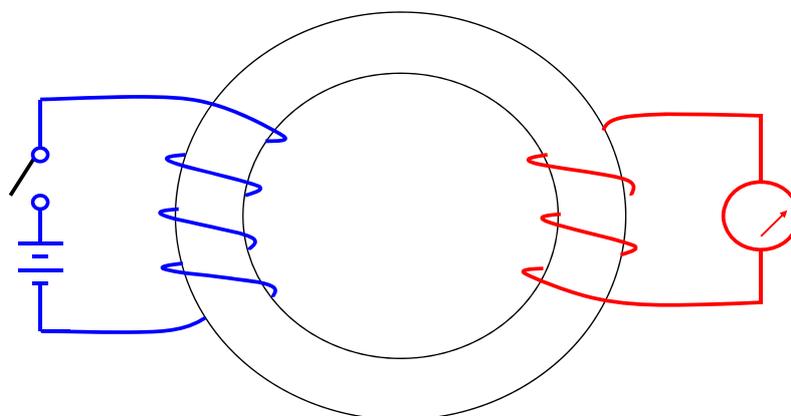
42

電磁感應 Electromagnetic Induction



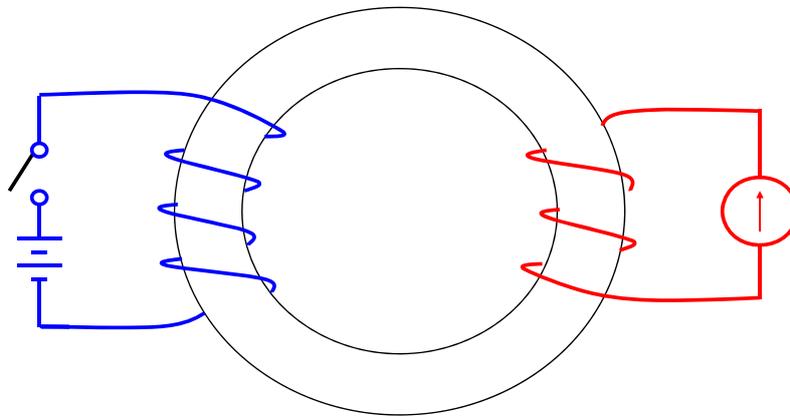
43

電磁感應 Electromagnetic Induction



44

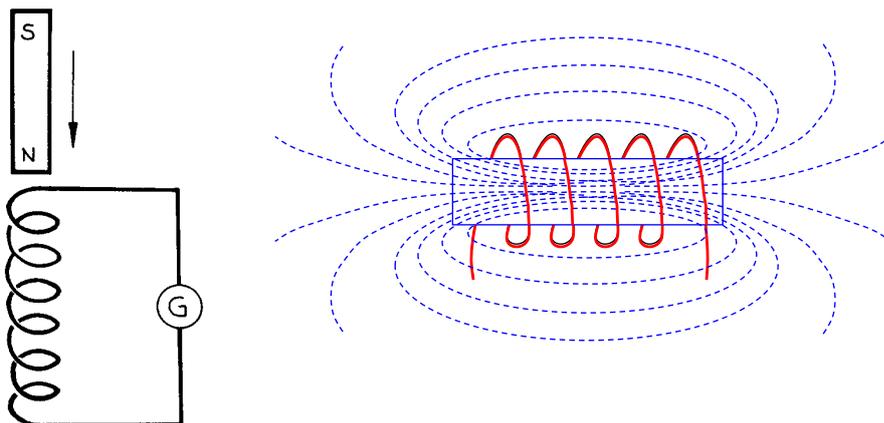
電磁感應 Electromagnetic Induction



45

電磁感應 Electromagnetic Induction

- 數週後法拉第將一永久磁鐵插入的空芯線圈中
- 當磁鐵插入線圈時，連接線圈的電錶有一偏轉
- 當磁鐵揪出線圈時，電錶有一相反的偏轉



46

電磁感應 Electromagnetic Induction

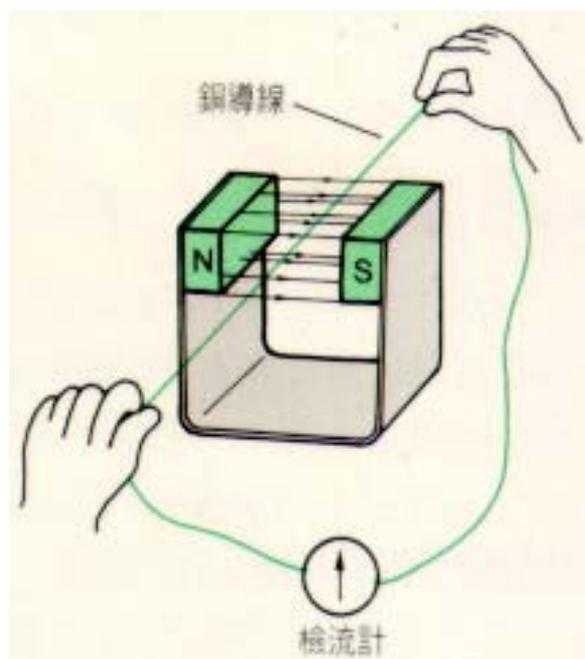
這種現象使法拉第確信，可以借磁通對綫圈的相對運動產生電流。他還證明，綫圈裏感應電動勢的大小與穿過綫圈速率成正比。換句話說，當導體切割磁通或被磁通所切割時，都會在導體中產生感應電動勢，而其數值的大小則決定於導體切割磁通或被磁通所切割的速度。

47

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction

每當有磁通連結或通過線路發生變動時，該電路便會產生感應電動勢，感應電動勢的大小與磁通連結變動速度成正比。



48

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction

- 當一條導線切割磁場或磁場切割導線時導線間便會感應電動勢

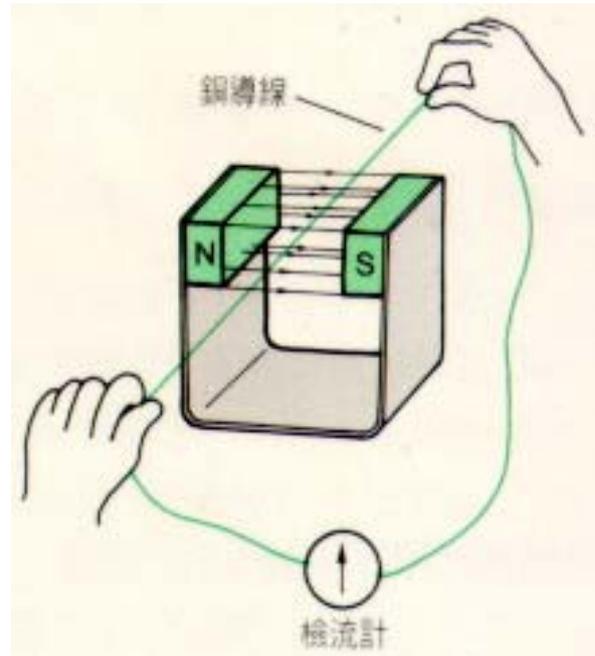
$$E = B l u$$

E = 感應電動勢

B = 磁通密度 (T)

l = 導線在磁場中的長度 (m)

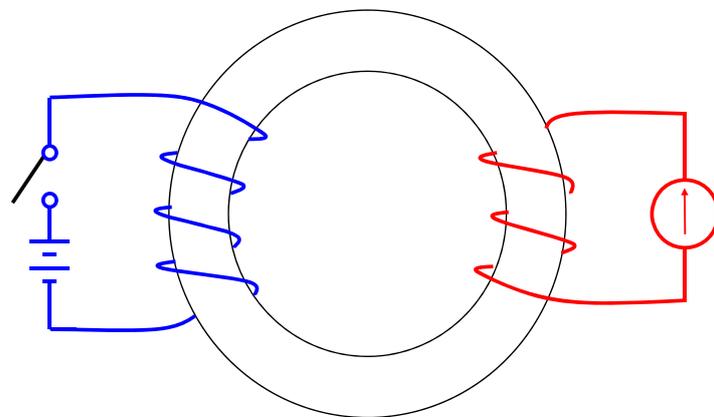
u = 導線切割磁場的速度 (m/s)



49

法拉第電磁感應定律

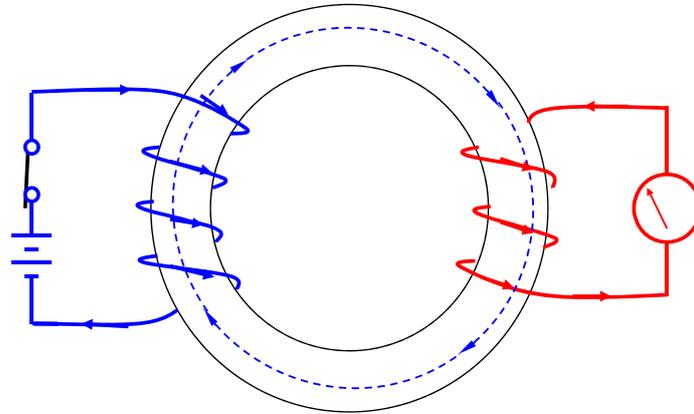
Faraday's Law of Electromagnetic Induction



50

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction

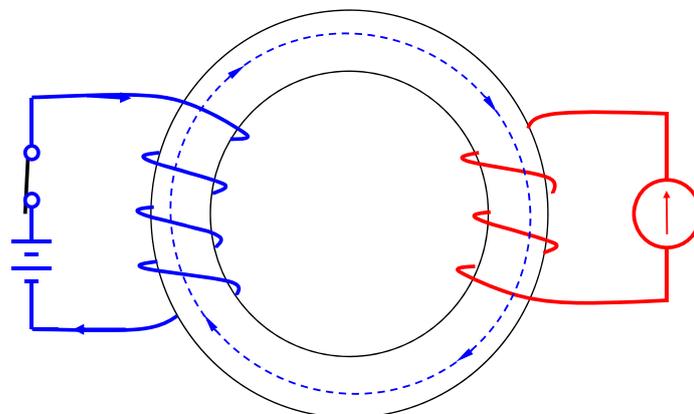


- 電掣剛關上時，鐵環內產生擴張性的磁通，此擴張性的磁通切割S線圈，使S線圈感應電動勢

51

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction

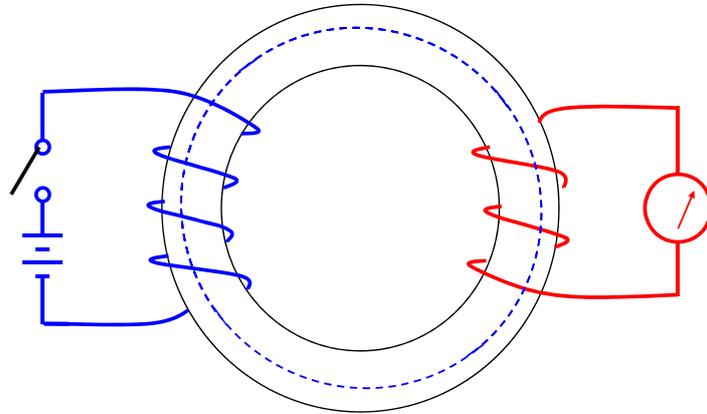


- 當電流穩定後，鐵環內的磁通沒有變化，S線圈未有受磁通的切割，所以沒有感應電動勢

52

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction

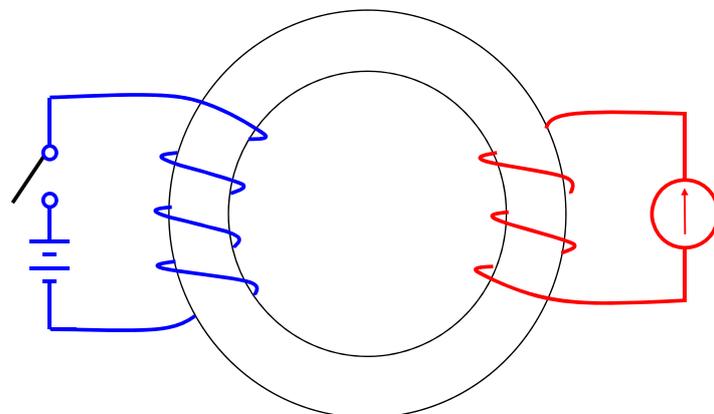


- 當電掣剛打開時，鐵環內的磁通縮減，此收縮性的磁通切割S線圈，使S線圈再有感應電動勢

53

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction



- 在鐵環內的磁通縮減完成後，磁通再沒有變化，S線圈未有受磁通的切割，所以沒有感應電動勢

54

法拉第電磁感應定律

Faraday's Law of Electromagnetic Induction

- 當一條導線切割磁場或磁場切割導線時導線間便會感應電動勢
- 感應電動勢的數值與切割導線的磁場變化率成正比

$$E \propto \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

55

感應電動勢的方向

- 感應電動勢的方向可用兩種方法決定：
 - 一種是利用佛烈明右手定則(Fleming's righthand rule)
 - 另一種是利用楞次定律(Lenz's law)。

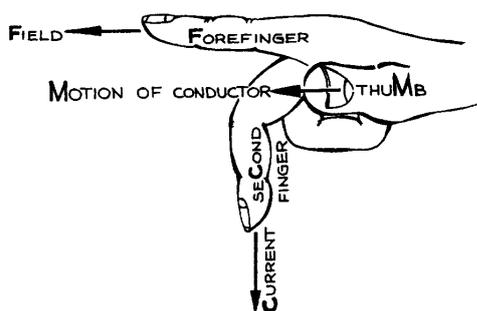
56

佛烈明右手定則

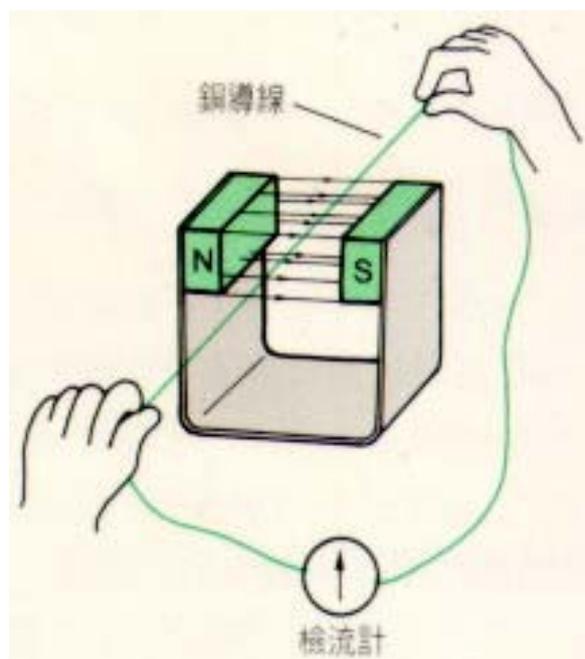
- 伸出右手，用食指代表磁通方向，大拇指垂直於食指，用以代表導體相對於磁場的運動方向，則食指及大拇指均構成垂直位置的中指所指方向，即為導體中感應電動勢的方向。這一方法由佛烈明所提出，故稱為佛烈明右手定則。

57

右手規律



- 右手的姆指、食指和中指互成90度向外伸出
 - 姆指指示導線的運動方向
 - 食指指示磁通的方向時
 - 中指指示感應電流的方向



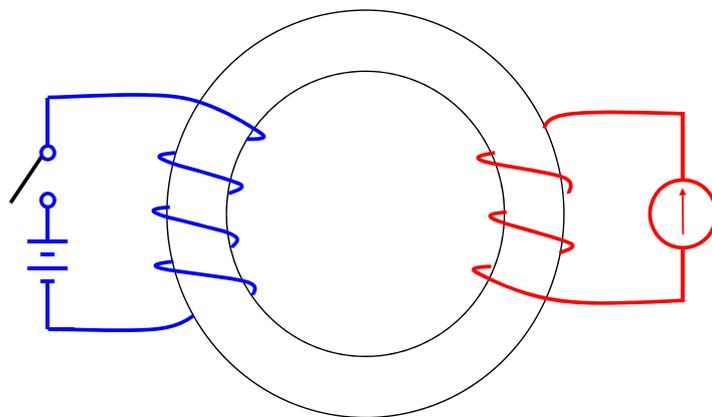
58

楞次定律 Lenz's Law

- 德國物理學家楞次(Heinrich Lenz, 1804~1865)於1834年闡明一個簡單法則，楞次定律可以這樣來解釋：感應電動勢的方向總是這樣的，即它總是趨於產生一個抵消磁通的運動或變化電流，而這些磁通就是感應電勢賴以產生的磁通。

59

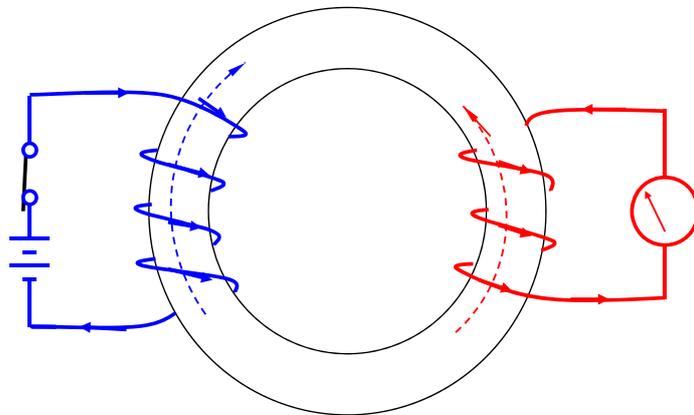
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

60

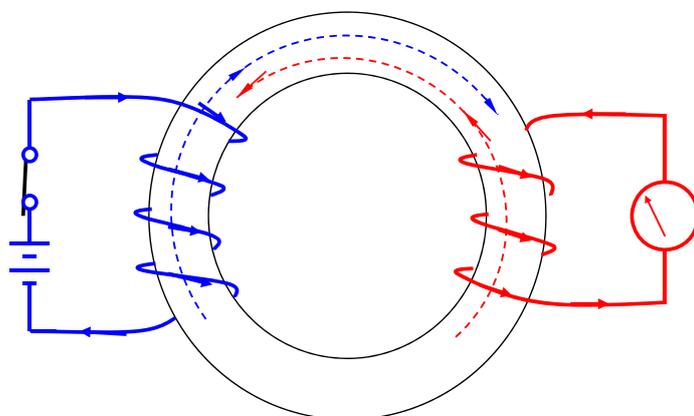
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

61

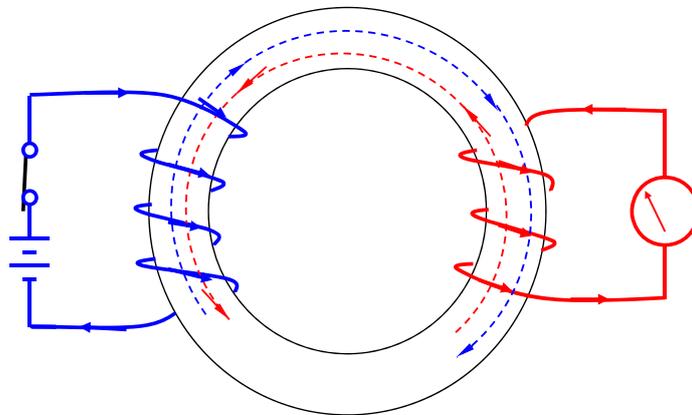
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

62

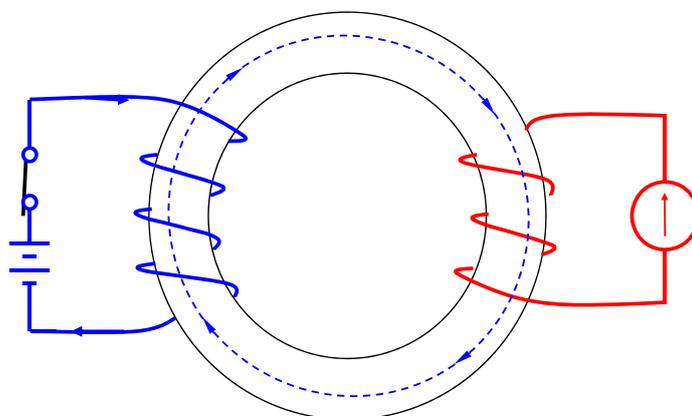
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

63

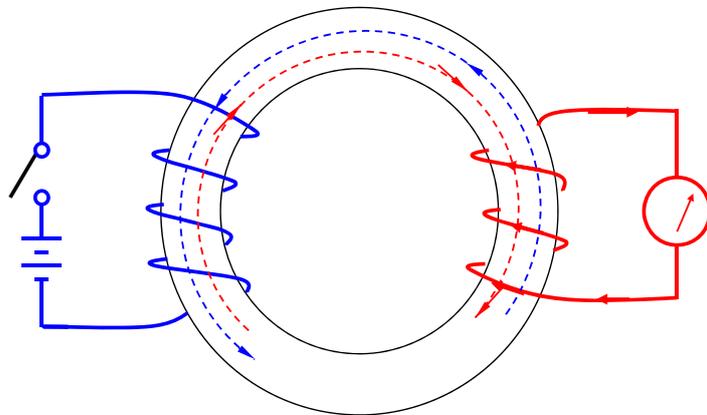
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

64

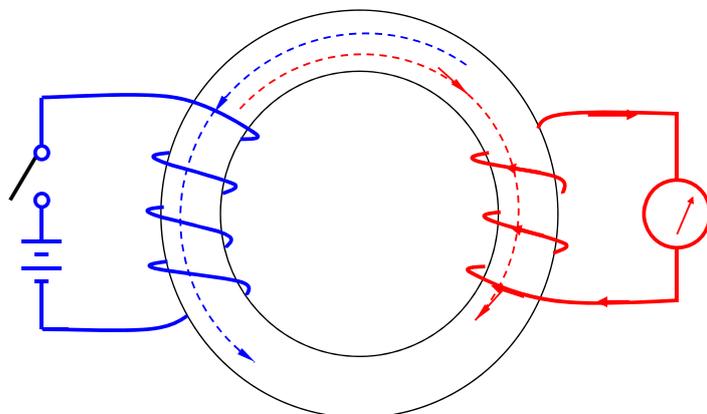
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

65

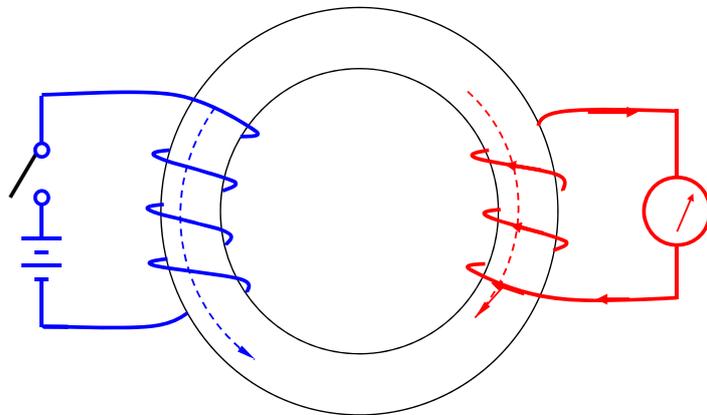
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

66

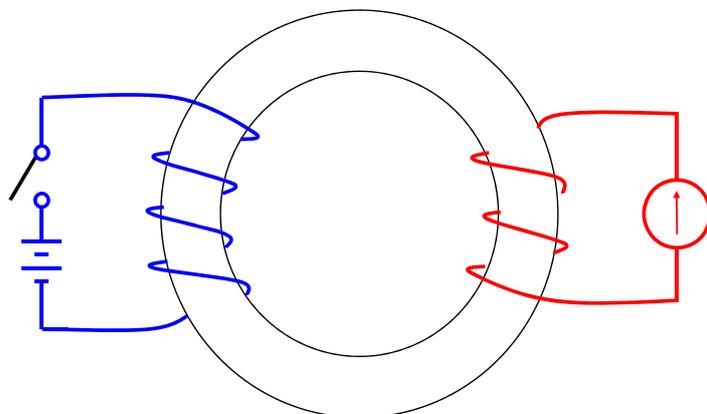
楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

67

楞次定律 Lenz's Law



- 感應電動勢意圖推動電流產生一反抗性的磁通，以抵抗原有磁場的變化

68

線圈的感應電動勢

Magnitude of Induced E.M.F. in a Coil

- 有一個 N 匝的線圈，假如穿過線圈的磁通於 t 秒內均勻地增加 f 韋伯，線圈的平均感應電動勢

$$E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

69

磁滯損失 (Hysteresis Loss)

- 如果將鐵磁條置於螺管內，改變螺線管電流方向時，鐵磁中的磁疇亦隨之反轉，在磁疇反轉過程中，由於反對磁疇或原子轉向的摩擦而產生熱，電能變成熱能，造成損失，稱為磁滯損失。
- 其他內容請參考電機電子工程基礎上冊第八十九頁第三章3.13節最後兩段。

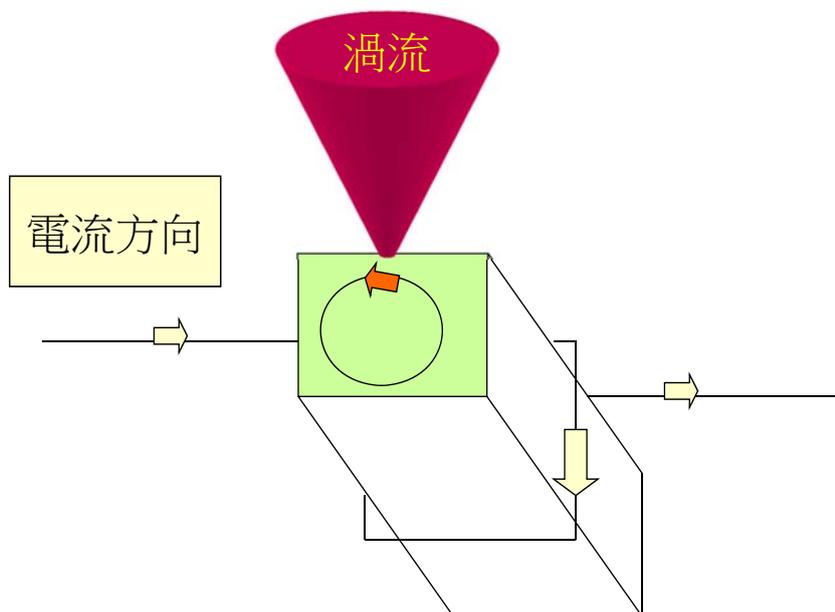
70

渦流損失 (Eddy-current Loss)

- 如果將鐵磁條置於螺管內，若通過螺管的為交流電，依照電磁感應定律，在鐵磁條中會感應出電動勢，此感應電動勢會產生一電流環流於鐵磁條中稱為渦流。若鐵磁條為一整塊的鐵所組成，則環流其間的渦流會很大，渦流通過鐵磁產生熱量，若此熱量不能被應用的話，便會成為損失，維持此渦流所須之功率稱為渦流損失。

71

渦流損失 (Eddy-current Loss)



72

磁性材料 (Magnetic Material)

- 一般的材料可分為常磁性體 (paramagnetic) 及抗磁性體 (diamagnetic)。
 - 常磁性體 (paramagnetic) 當針狀的常磁性材料處於磁場中時，它會與磁場排列成一直線。常磁性材料有鐵iron, 鎳nickel, 鈷cobalt等。
 - 抗磁性體 (diamagnetic) 當抗磁性材料處於一磁場中時，它不會與磁場排列成一直線。

73

鐵質材料 (Ferrous Material)

- 鐵質材料是一種很容易被磁化的材料。組成該物質的原子的電子在軌道運轉時會產生一個與其運轉軌道垂直的磁場。當有大量原子(10^{15} 粒)合成一體時，由運轉電子所產生的磁場合成一個較強的磁場，此合體稱為磁疇(domain)，每一磁疇的一端具有一個南極(south pole)而另一端則有一個北極(north pole)，因此磁疇實則為一個具有南北極的微小磁石(tiny magnet)。

74

鐵質材料 (*Ferrous Material*)

鐵磁材料的三種形態：

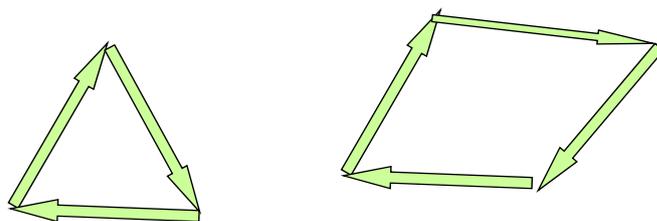
1. 非磁化形態
2. 部份磁化形態
3. 飽和形態

75

鐵質材料 (*Ferrous Material*)

非磁化形態 (un-magnetized)：

磁疇依本身及四週的磁疇所產生的吸力或斥力互相連結合成閉合環路。

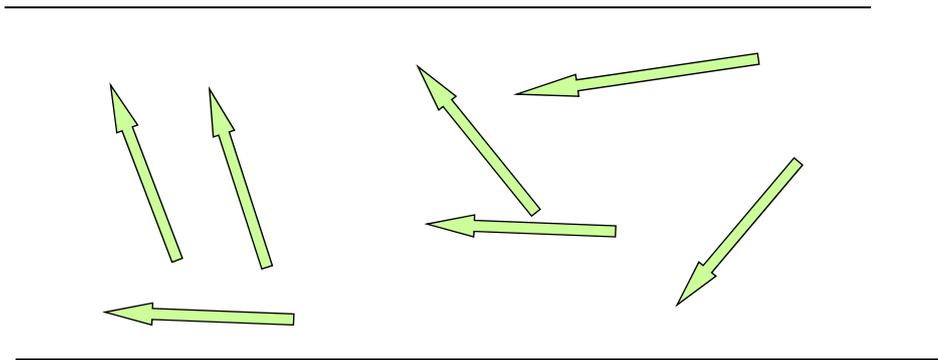


76

鐵質材料 (Ferrous Material)

部份磁化形態 (partially magnetize) :

激磁電流細時，其產生的磁場也細，部份不穩定的磁疇閉合環路被破壞，餘者稍有變位。

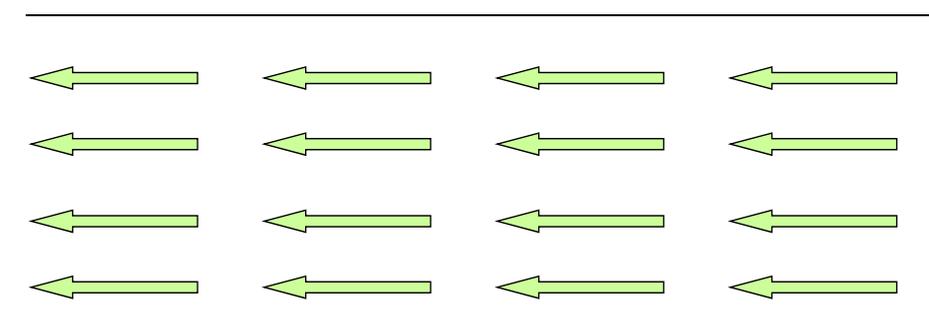


77

鐵質材料 (Ferrous Material)

飽和形態 (saturation) :

繼續增強磁化力,另所有磁疇都向同一方向排列成行，形成一個北極在材料的一端，材料的另一端則成為南極。



78

鐵磁材料 (Ferromagnetic Material)

- 鐵磁材料是一種可容易被強力磁化的材料，磁化是利用電流通過螺管使置於其中的鐵磁材料的磁疇向同一方向排列成行，當失去激磁電流時，磁疇重新互相連結成閉合環路，由於內部摩擦及磁疇間之吸力，有部份被排列成行的磁疇會維持其被磁化後的位置，稱為剩磁。依據剩磁的多少可將鐵磁材料分為硬磁性材料和軟磁性材料。

79

硬磁性材料 (hard magnetic material)

- 此種材料的磁疇的磁性較強，需要較大之磁化力才可將所有磁疇閉合環路破壞及排列成行，當移去磁化力後，因磁疇本身的磁性強所以大部份的磁疇仍首尾吸引排列成行，保持極大部份磁力，因此一般用作製造永久磁鐵之用。此種材料具有很闊的磁滯環線，損耗較大，不適用於交流電路。一般的硬磁性材料有磁性合金(一種由鎳、鐵、鈷、銅及鋁混合而成的合金)。

80

軟磁性材料 (soft magnetic material)

- 此種材料很容易被磁化及只需要細小之激磁電流便可產生強大磁場，但當移除激磁電流或磁化力後會失去大部份磁力，只有極少部份磁力可保留於材料中，一般應用於製造發電機、電動機、變壓器等設備。此種材料具有很窄的磁滯環線，損耗較少，因此可應用於交流電路。一般的軟磁性材料有矽鋼(一種由鐵及矽混合而成的導磁材料)。

第三章

第三節

- 電感值 Inductance 。
- 電感串聯、並聯等效值 。
- 電感器中儲存的能量 。

1

電感 Inductance

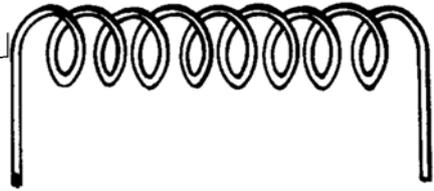
- 1832年，美國工程師若瑟·亨利獨自地發現電磁感應現象
- 任何電路，當有電流變化連同產生磁通變化，結果產生感應電動勢，電路便稱為帶有「電感電路」



2

電感 Inductance

- 當流通元件的電流有所增加或減少，使到元件產生感應電動勢，這一元件便稱帶有「自感」或是叫做帶有「電感」。

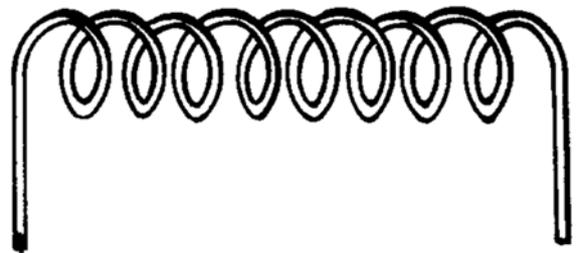


- 線圈是電感性元件

3

電感 Inductance

- 電感的量度單位是亨利
- 如果線圈的電流變化率是 1A/s ，而產生 1V 的感應電動勢，線圈便有電感 1H

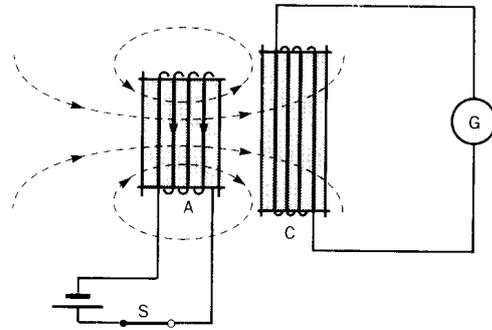


$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

4

互感 Mutual Inductance

- 因一個線圈的電流變化，其它產生的磁通切割另一個線圈，使到另一個線圈產生感應電動勢，兩線圈間便稱為帶有互感



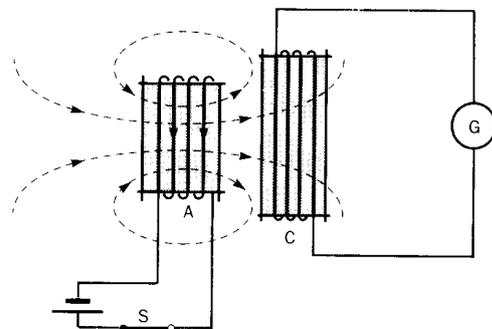
5

互感 Mutual Inductance

- 如果其一的線圈之電流變化率是 1A/s ，使到另一線圈有 1V 的感應電動勢，兩線圈間便有互感 1H

$$E_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

$$E_1 = -M \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$



6

電感 Inductance

- 電流流過線圈時會產生磁場。當線圈的電流增加或減少時，線圈中磁場會隨之增強或減弱，正在變化中的磁場切割線圈的導線，線圈會感應電動勢。據法拉第電磁感應定律和楞次定律，線圈的平均感應電動勢

$$E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ (V)}$$

請參照電機電子工程基礎上冊第四章4.4節

7

電感 Inductance

- 任何電路，如當電流改變而會產生感應電動勢的，此電路便被為電感電路。
- 線圈的電流增加或減少時，會使線圈有感應電動勢，所以線圈是電感性元件。
- 因本身線圈的電流變化，使本身線圈有感應電動勢，這線圈便被帶有自感，或稱帶有電感。
- 電感 L 的量度單位是亨利 (Henry)，簡寫 H
- 電流的變化速度越快，線圈的感應電動勢越高。

8

電感 Inductance

如果某電路有電感 L ，它的電流於 t 秒的時間內由 i_1 增加至 i_2

$$\text{電路的平均電流變化率} = \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \text{ (A/s)}$$

線圈的平均感應電動勢 E

$$E = -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \text{ (V)} \quad ; \quad E = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ (V)}$$

當流經線圈的電流其變化是 1安培每秒 (1 A/s)，使線圈能感應 1 伏特 的電動勢，此線圈便有電感 1 亨利。

9

電感 Inductance

例題一

某線圈有電感 0.2 亨，線圈的電流在 0.015 秒內由 2A 增加至 5A ，計算線圈的平均感應電動勢。

答案

$$\begin{aligned} E &= -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \\ &= -0.2 \times \frac{5 - 2}{0.015} \\ &= -40 \text{ V} \end{aligned}$$

10

電感 Inductance

例題二

一個電感量是12H的線圈接於220V的電源時，它的電流是0.4A，電路斷開時，在0.005秒的時間內電流下降至零，計算線圈的平均感應電動勢。

答案

$$\begin{aligned} E &= -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \\ &= -12 \times \frac{0 - 0.4}{0.005} \\ &= 960 \text{ V} \end{aligned}$$

11

電感 Inductance

例題三

電路中接有一個鎮流器，線圈的電流由零增加至0.25A須時0.01秒，線圈的平均感應電動勢是200V。計算線圈的電感。

答案

$$\begin{aligned} E &= -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \\ 200 &= -L \cdot \frac{0.25 - 0}{0.01} \\ L &= 8 \text{ H} \end{aligned}$$

12

互感 Mutual Inductance

例題四

第一線圈的電流在0.1秒內，由20安培下降至零，
第二線圈的感應電壓是400伏特，計算互感量。

答案

$$E_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} M &= -(400)(0.1-0) / (0-20) \\ &= 2\text{H} \end{aligned}$$

13

影響線圈電感量的因素

假如一個有 N 匝的線圈，它的電流變化是 ΔI (A)時，
產生了 $\Delta\phi$ (Wb)的磁通變化，考慮兩條計算感應電動
勢的公式

$$E = -N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (\text{V}) \quad \text{及} \quad E = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (\text{V})$$

因此 $-L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$

$$L \cdot \Delta I = N \cdot \Delta\phi \quad \longrightarrow \quad L = N \frac{\Delta\phi}{\Delta I}$$

14

影響線圈電感量的因素

根據磁路的公式： 磁動勢 = 磁通 × 磁阻

$$IN = \phi S$$

$$\phi = \frac{IN}{S} \longrightarrow \Delta\phi = \frac{\Delta I \cdot N}{S}$$

將 $\Delta\phi = \frac{\Delta I \cdot N}{S}$ 代入算式 $L = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta I}$ 中

$$\longrightarrow L = N \cdot \frac{\frac{\Delta I \cdot N}{S}}{\Delta I} \longrightarrow \therefore L = \frac{N^2}{S}$$

15

影響線圈電感量的因素

$$L = \frac{N^2}{S}$$

從公式中顯示，線圈的電感是與其匝數的平方成正比，和線圈磁路的磁阻成反比。

又因磁阻 $S = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r a}$

所以線圈的電感 $L = N^2 \mu_0 \mu_r \frac{a}{\ell}$

16

影響線圈電感量的因素

$$L = N^2 \mu_0 \mu_r \frac{a}{\ell}$$

根據右上角的公式，影響線圈電感量的因素包括有：

- 線圈的匝數 -
 - 匝數增加一倍，線圈的電感量是原來的四倍
- 線圈芯物質的磁導性能 -
 - 採用磁導性能良好的物質造成線圈芯，可得到較高的電感量
- 線圈芯的橫切面面積 -
 - 線圈芯直徑越大，橫切面面積越大，可有較高的電感量
- 磁路的長度 -
 - 較短的線圈，電感量較高

17

影響線圈電感量的因素

例題四

供電至一個線圈，線圈的電感是 1.2H，匝數是 1400，若接入電流時線圈產生磁通 25×10^{-3} Wb。計算線圈的電流。

答案

$$L = N \frac{\phi}{I}$$
$$1.2 = 1400 \times \frac{25 \times 10^{-3}}{I}$$
$$I = 29.2 \text{ A}$$

18

影響線圈電感量的因素

例題五

一個有電感 0.5H 的線圈若在 0.01s 的時間內，電流增加 2.5A ，線圈的磁通變化量為 5毫韋伯 ($5 \times 10^{-3}\text{Wb}$)，計算線圈的 a) 感應電動勢 b) 匝數

答案

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad E &= -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \\ &= -0.5 \times \frac{2.5}{0.01} \\ &= -125\text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b)} \quad L &= N \frac{\phi}{I} \\ 0.5 &= N \times \frac{5 \times 10^{-3}}{2.5} \\ N &= 250 \end{aligned}$$

19

課堂練習

題目一

壹個線圈的電感量為 20mH ，若線圈的電流在 0.05s 內從 5A 下降至 2A ，求電流變化時的平均感應電動勢 (E)。

答案

20

課堂練習

題目二

某1100匝的空芯線圈有電感150 mH。計算

- a) 當電流是5A時，產生的磁通
- b) 當5A的電流於8 ms內反轉，計算感應電動勢。

答案

21

課堂練習

題目三

通過1000匝線圈的電流在0.01秒內均勻地由3A增至5A，線圈的磁通則由 1×10^{-4} Wb均勻地增至 3×10^{-4} Wb。

- 計算線圈的
- a) 感應電動勢
 - b) 電感。

答案

22

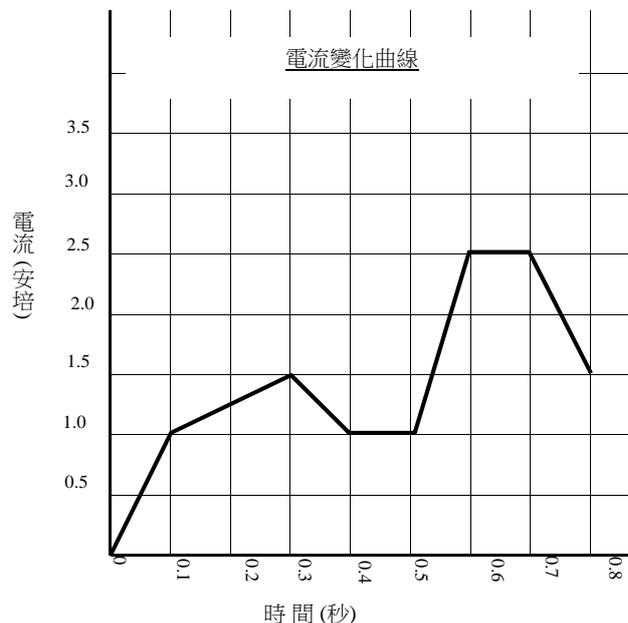
課堂練習

題目四

一個線圈的電感量為 6H ，若線圈電流變化曲線如下圖所示，求

- 時間 0 至 0.1 秒內之平均感應電動勢
- 時間 0.3 至 0.4 秒內之平均感應電動勢
- 時間 0.4 至 0.5 秒內之平均感應電動勢

答案



23

課堂練習

題目五 (07-08 第3題)

一個有電感量 1.29H (亨)的線圈，若在 0.05s (秒)的時間內，電流增加 3.5A ，線圈磁通變化量為 23.15mWb (毫韋伯)，計算線圈的

- 感應電動勢
- 匝數

24

電感串聯、並聯

電感串聯、並聯等效值的計算式與電阻的方法相同。

電感串聯的等效值

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_N$$

電感並聯的等效值

$$1/L_T = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots + 1/L_N$$

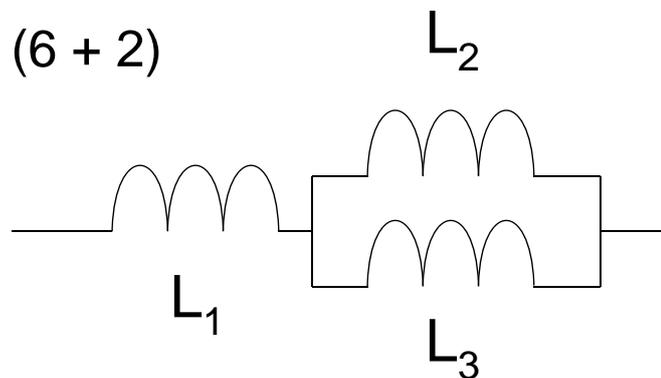
25

電感串聯、並聯

例題：

求電路之總電感值， $L_1=2.5 \text{ H}$ ， $L_2=6\text{H}$ ， $L_3=2 \text{ H}$

$$\begin{aligned} L_T &= 2.5 + (6 \times 2) / (6 + 2) \\ &= 4 \text{ H} \end{aligned}$$



26

電感器中儲存的能量

線圈的電感 L 是一個常數 $L = \frac{I}{t}$

其中電流在時間內以均速從 0 到 I 安培變化

$$\text{電流率均值 } I_{av} = \frac{1}{2}I(A)$$

$$\text{線圈中感應電動勢} = -L\left(\frac{I}{t}\right)(V)$$

即外加平衡這個感應電動勢的電壓為 $\left(L\frac{I}{t}\right)V$

27

電感器中儲存的能量(續)

平均功率 = 平均電流 \times 電壓

$$= \frac{1}{2}I \times L\frac{I}{t} = \frac{\frac{1}{2}LI^2}{t}$$

而磁場吸收的總能量 = 平均功率 \times 時間

$$= \left(\frac{\frac{1}{2}LI^2}{t}\right) \times t = \frac{1}{2}LI^2 \text{ 焦耳}$$

28

電感器中儲存的能量(續)

但普遍性情況下，但電流 I 在 t 時間內是以均速或不均速的速率增長

線圈中感應電動勢 $= -L \frac{di}{dt} (V)$ ， $i =$ 瞬時電流

則磁場在 t 秒內吸收的能量

$$\begin{aligned} &\therefore i \cdot L \frac{di}{dt} \cdot dt \\ &= Li \cdot di \text{ 焦耳} \end{aligned}$$

29

電感器中儲存的能量(續)

當電流由 0 增至 I 安培時

$$\begin{aligned} \text{吸收的總能量} &= L \int_0^I i di \\ &= L \times \frac{1}{2} [i^2]_0^I \\ &= \frac{1}{2} LI^2 \text{ 焦耳} \end{aligned}$$

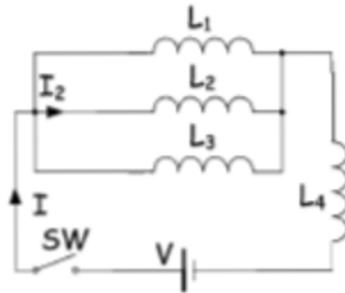
30

課堂練習

題目六 (07-08 第10c題)

四組線圈組合成電路如下圖，電源電壓為10V，線圈的電感值分別為 $L_1=2H$ ； $L_2=3H$ ； $L_3=4H$ 及 $L_4=1H$ ；求

- 電路的總電感值；及
- 線圈 L_4 可儲存的電能量；
如總電流量 $I=5A$ 。



31

電感器中儲存的能量(續)

在均勻磁路， μ 保持不變， $L = N^2 \mu_0 \mu_r \frac{a}{\ell}$

每立方米能量： $= \frac{1}{2} LI^2$

$$= \frac{1}{2} \left(N^2 \mu_0 \mu_r \frac{a}{\ell} \right) \cdot I^2 = \frac{1}{2} I^2 N^2 \frac{\mu}{\ell^2}$$

$$= \frac{1}{2} \mu H^2 \quad \therefore H\ell = NI \quad = \frac{1}{2} BH \quad \therefore B = \mu H$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu} \text{ 焦耳} \quad \text{或} \quad = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} \text{ 焦耳}$$

32

電感器中儲存的能量(續)

在不均勻磁路， μ 不是常數，以上公式便不適用，只可用「計算磁滯迴路綫面積」方法去計算每立方米的磁滯損失。

33

電感器中儲存的能量

例題

有一個鐵磁材料，其綫磁滯迴面積為9.3厘米²，設磁滯迴綫圖形的橫座標是1厘米=1000 安培/米，縱座標是1厘米=0.2泰斯拉，試計算每個循環每立方米的磁滯損失。

答案

用BH單位換算：

$$\text{磁滯迴綫面積} = 9.3 \times 1000 \times 0.2 = 1860$$

所以，個循環每立方米的磁滯損失 = 1860 焦耳

34

若 $L = N^2 \mu_0 \mu_r \frac{a}{\ell}$ (假設均勻磁路) $\mu =$ 保持不變

$$\begin{aligned} \text{每立方米能量} &: = \frac{1}{2} LI^2 \\ &= \frac{1}{2} \left(N^2 \mu_0 \mu_r \frac{a}{\ell} \right) \cdot I^2 \\ &= \frac{1}{2} I^2 N^2 \frac{\mu}{\ell^2} \end{aligned}$$

$$\therefore H\ell = NI \quad = \frac{1}{2} \mu H^2$$

$$\therefore B = \mu H \quad = \frac{1}{2} BH$$

$$\text{或} \quad = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu}$$

$$\text{或} \quad = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} \text{ 焦耳}$$

若 $\mu \neq \text{Constant}$ 以上公式便不適用，只可用「計算磁滯迴路綫面積」方法去計算每立方米的磁滯損失。

例：有一個鐵磁材料，其綫磁滯迴面積為 9.5 厘米^2 ，設磁滯迴綫圖形的橫座標

是 $1 \text{ cm} = 1000 \text{ A/m}$ $1 \text{ 厘} = 1000 \frac{\text{安}}{\text{米}}$ ，縱座標 $1 \text{ 厘米} = 0.2 \text{ 泰斯拉}$

$1 \text{ cm} = 0.2 \text{ T}$ ，試計算每個循環每立方米的磁滯損失。

答：用 BH 單位換算：

$$\text{磁滯迴綫面積} = 9.3 \times 1000 \times 0.2 = 1860.$$

\therefore 每個循環每立方米的磁滯損失 = 1860 焦耳

$$L \text{ 電感} = \text{常數的線圈} \quad L = \frac{I}{t}$$

其中電流在 t 時間內以均速從 0 到 1 安培變化。

$$L_{av} \text{ 電流率均值} = \frac{1}{2} I(A)$$

$$\text{線圈中感應電動勢} = -L \left(\frac{I}{t} \right) (V)$$

$$\text{即外加平衡這個感應電動勢的電壓為} \quad \left(L \frac{I}{t} \right) V$$

平均功率 = 平均電流 X 電壓

$$= \frac{1}{2} I \times L \frac{I}{t} = \frac{\frac{1}{2} LI^2}{t}$$

而磁場吸收的總能量 = 平均功率 X 時間

$$= \left(\frac{\frac{1}{2} LI^2}{t} \right) \times t$$
$$= \frac{1}{2} LI^2 \text{ 焦耳}$$

普遍性情況，電感 $L =$ 常數的線圈，但電流 I 在 t 時間內以均速或不均速的速率增長，線圈中感應電動勢 $= -L \frac{di}{dt} (V)$

瞬時電流 $= i$

$$\text{則磁場在 } dt \text{ 秒內吸收的能量 } \therefore i \cdot L \frac{di}{dt} \cdot dt$$
$$= Li \cdot di \text{ 焦耳}$$

當電流由 0 增至 I 安培時

$$\text{吸收的總能量} = L \int_0^I i di$$
$$= L \times \frac{1}{2} [i^2]_0^I$$
$$= \frac{1}{2} LI^2 \text{ 焦耳}$$

1. 壹個線圈的電感量為 20mH，若線圈的電流在 0.05 秒內從 5A 下降至 2A，求電流變化時的平均感應電動勢 (E)。

$$E = -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} = -20 \times 10^{-3} \times \frac{2 - 5}{0.05} = 1.2 \text{ V}$$

2. 某 1100 匝的空芯線圈有電感 150 mH。 計算

a) 當電流是 5 A 時，產生的磁通

b) 當 5A 的電流於 8 ms 內反轉，計算感應電動勢。

$$L = N \frac{\phi}{I} \quad 150 \times 10^{-3} = 1100 \times \frac{\phi}{5}$$
$$\phi = 0.682 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$E = -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} = -150 \times 10^{-3} \times \frac{-5 - 5}{8 \times 10^{-3}} = 187.5 \text{ V}$$

3. 通過 1000 匝線圈的電流在 0.01 秒內均勻地由 3A 增至 5A，線圈的磁通則由 1×10^{-4} Wb 均勻地增至 3×10^{-4} Wb。
計算線圈的 a) 感應電動勢
b) 電感

解：a)
$$E = -N \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{t_2 - t_1} = -1000 \times \frac{3 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-4}}{0.01}$$
$$= -20\text{V}$$

b)
$$E = -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1}$$

$$-20 = -L \cdot \frac{5 - 3}{0.01}$$

$$L = 0.1 \text{ H}$$

4. 一個線圈的電感量為 6H，若線圈電流變化曲線如下圖所示，求
- 時間 0 至 0.1 秒內之平均感應電動勢
 - 時間 0.3 至 0.4 秒內之平均感應電動勢
 - 時間 0.4 至 0.5 秒內之平均感應電動勢

解： $E = -L \cdot \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1}$

a) $E = -6 \times \frac{1 - 0}{0.1 - 0} = -60 \text{ V}$

b) $E = -6 \times \frac{1 - 1.5}{0.4 - 0.3} = 30 \text{ V}$

c) $E = -6 \times \frac{1 - 1}{0.5 - 0.4} = 0 \text{ V}$

