

# 磁路概要

---

**C. M. Liaw (廖聰明)**

**Department of Electrical Engineering,  
National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, ROC.**

# 磁路概要

- 藉由磁動勢 $Ni$ 在由鐵心與氣隙組成之串聯磁路產生磁化
- 假設鐵心 $B$ 與 $H$ 間之關係為線性， $B = \mu_c H_c = \mu_r \mu_0 H_c$

$$\oint H \cdot dl = Ni = H_c l_c + H_g g = \frac{B_c}{\mu_c} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} g = \frac{B_c}{\mu_r \mu_0} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} g$$

$$Ni = \phi \left( \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g} \right) = \phi (R_c + R_g)$$

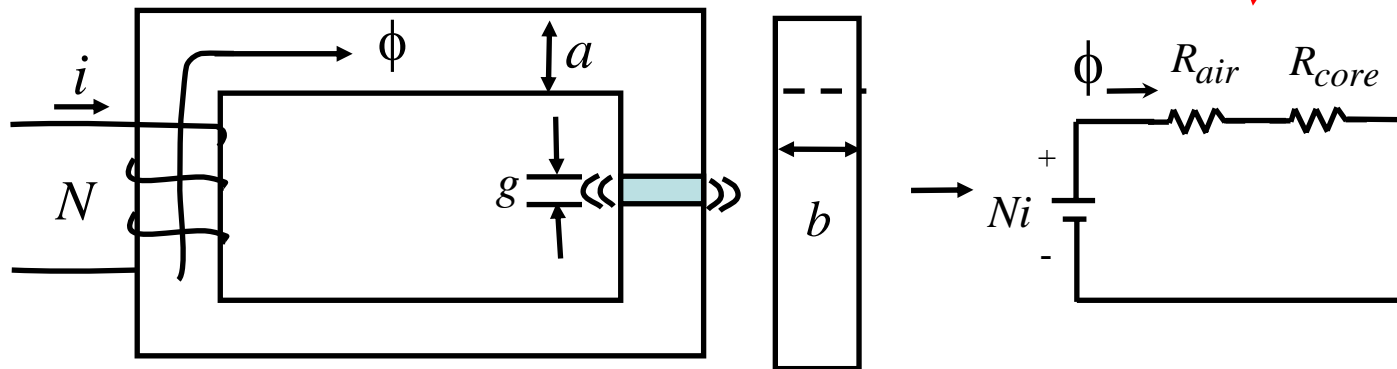
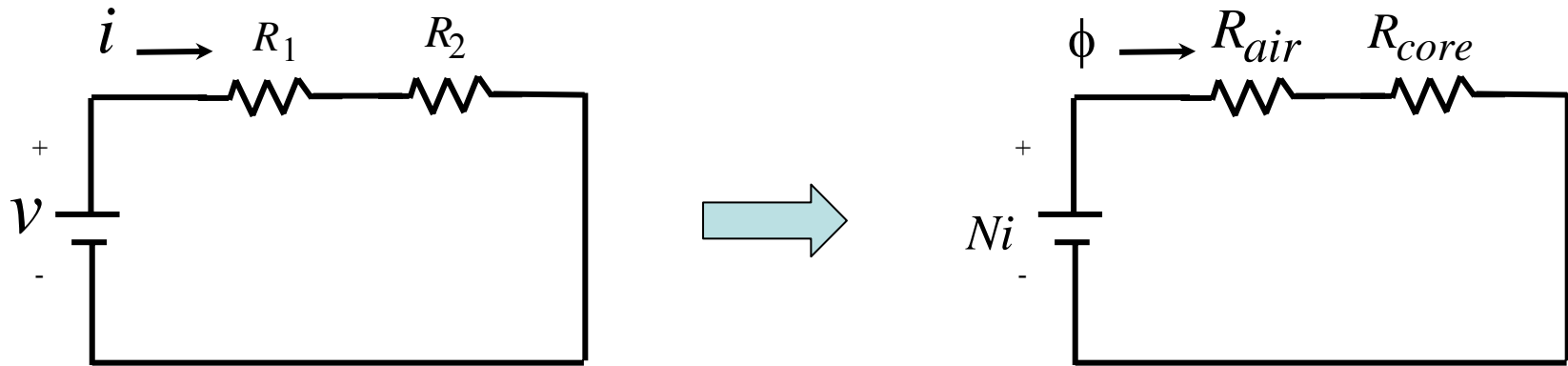


圖2.1：一個含有間隙之磁路裝置。

## 磁路與電路之類比、磁路之組態

---



- 電路： $v = i( R_1 + R_2 )$ ：電動勢(電壓降) = 電流  $\times$  電阻
- 磁路： $Ni = \phi( R_c + R_g )$ ：磁動勢(磁壓降)  
= 磁通  $\times$  磁阻

# 串並聯之磁路例

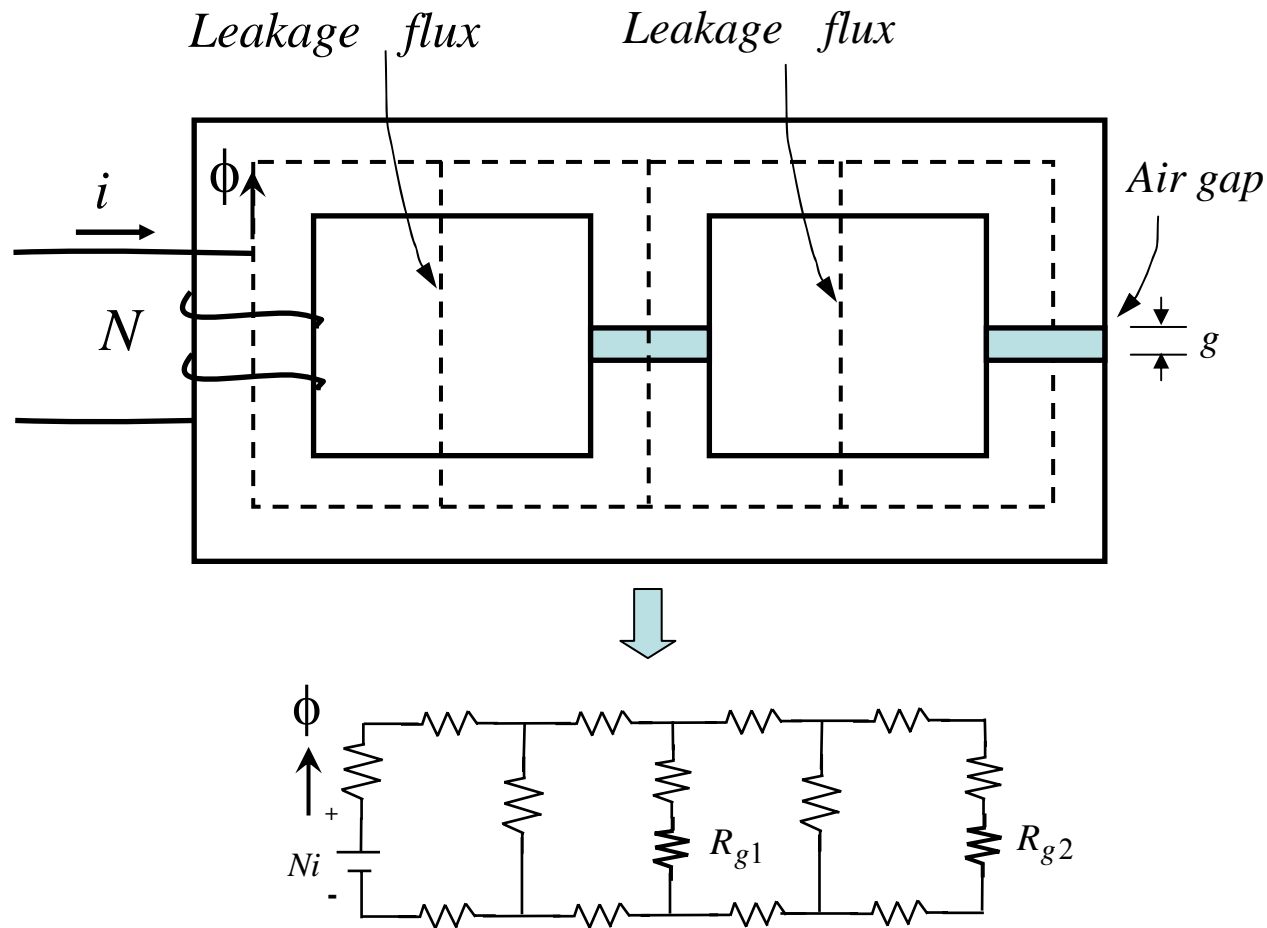


圖2.2：串並聯之磁路結構及其等效電路。

## 磁路與電路之間之不同

---

- (i) 鐵心為鐵磁材料用以導引磁通流動路徑，其磁阻仍大，鐵心存在鐵損，而電導線之電阻很小。
- (ii) 由於鐵心鐵磁材料之相對導磁係數非為無窮大，磁漏洩一般存在，電路則幾乎無。
- (iii) 在氣隙處磁通會外擴產生邊緣效應(Fringing effect)。

# 磁路磁阻之修正

- 鐵心部分：為減少渦流損，一般鐵心由疊片組成：

$$A_c \rightarrow K_s A_c \quad (K_s < 1) \Rightarrow$$

$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \rightarrow \frac{\phi}{K_s A_c} \uparrow, \quad R_c = \frac{l}{\mu_c A_c} \rightarrow \frac{l}{K_s \mu_c A_c} \uparrow$$

- 氣隙部分：氣隙處磁通會外擴之邊緣效應（方式之1）：

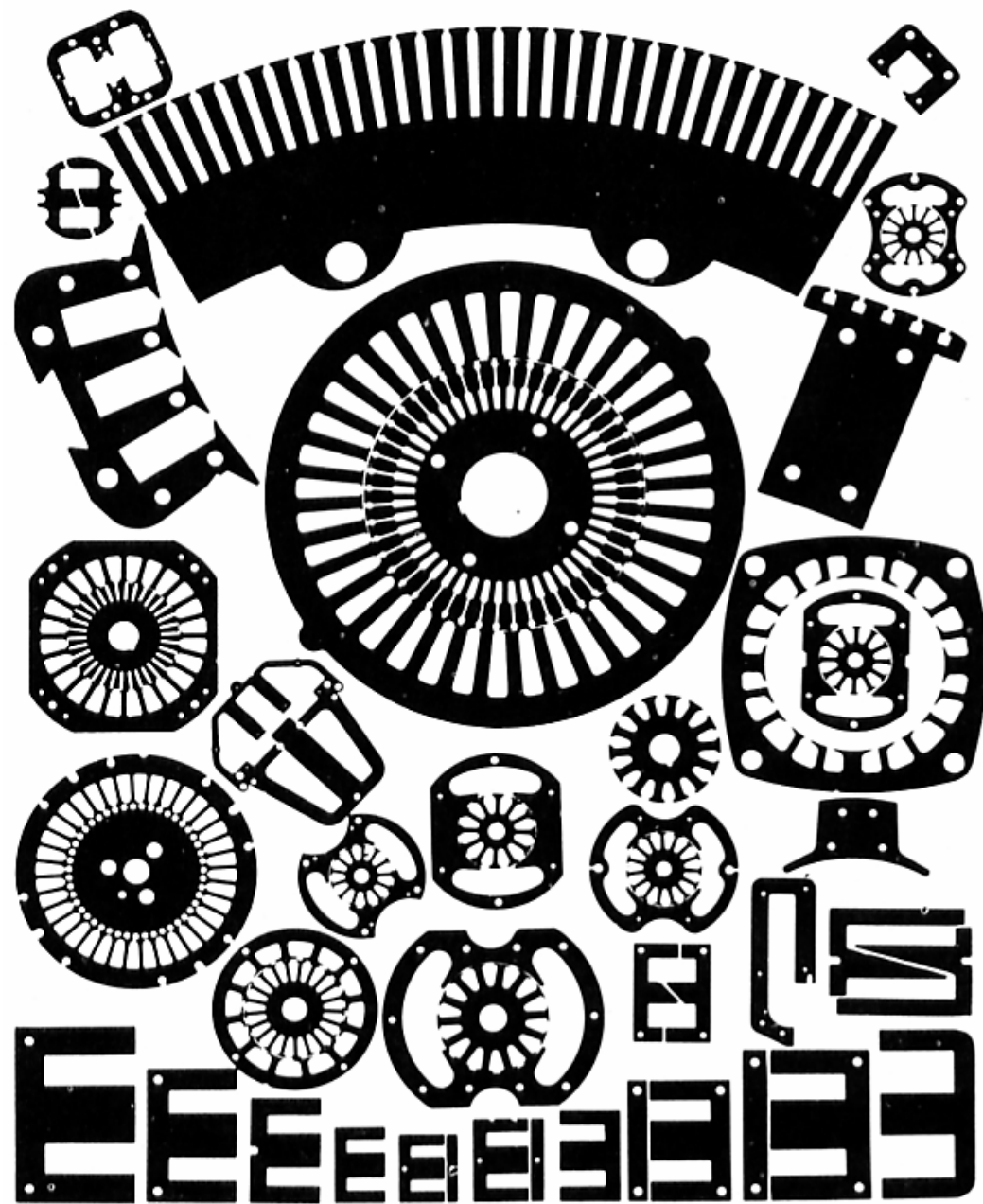
$$A_g = (ab) \rightarrow A_g = (a + g)(b + g) \uparrow \Rightarrow$$

$$B_g = \frac{\phi}{(ab)} \rightarrow \frac{\phi}{(a + g)(b + g)} \downarrow,$$

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 (ab)} \rightarrow \frac{g}{\mu_0 (a + g)(b + g)} \downarrow$$

# 常見之鐵心疊片

---



# 磁路間隙邊緣效應之考慮

---

## (A) 方式1

一般以長與寬各增一氣隙之截面積長度考慮之：

$$A_g = (ab) \rightarrow A_g = (a + g)(b + g) \uparrow$$

$$P_g = \frac{1}{R_g} = \frac{\mu_0(a + g)(b + g)}{g}$$



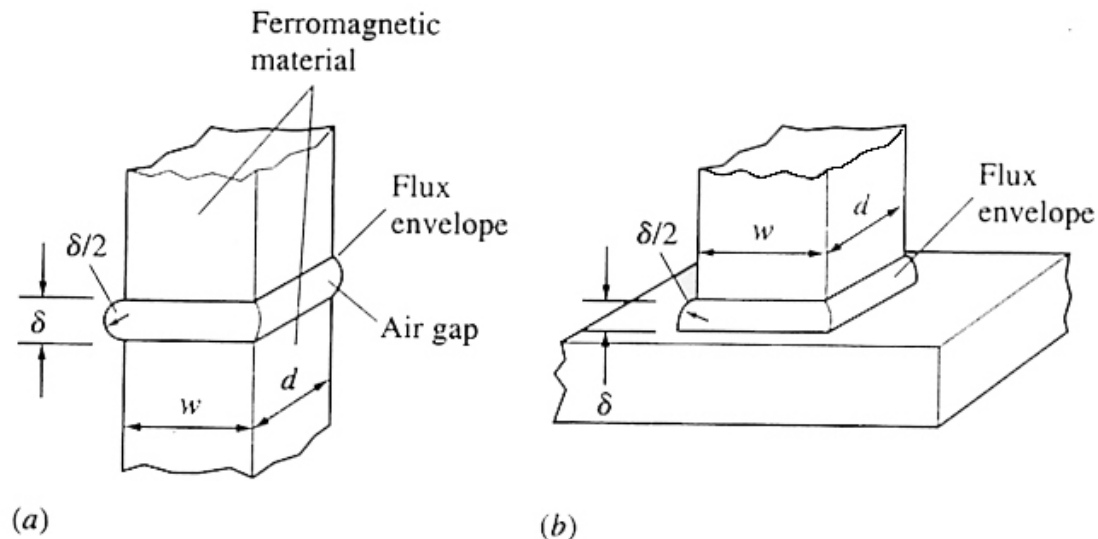
## (B) 方式2

### (a) 兩對邊相同截面積

$$P_g = \frac{1}{R_g} = \mu_0 l \left[ \frac{wd}{\delta} + 0.52(w + d) + 0.308\delta \right]$$

### (b) 一對邊為截面積較大之平板：

$$P_g = \frac{1}{R_g} = \mu_0 l \left[ \frac{wd}{\delta} + 1.04(w + d) + 0.616\delta \right]$$

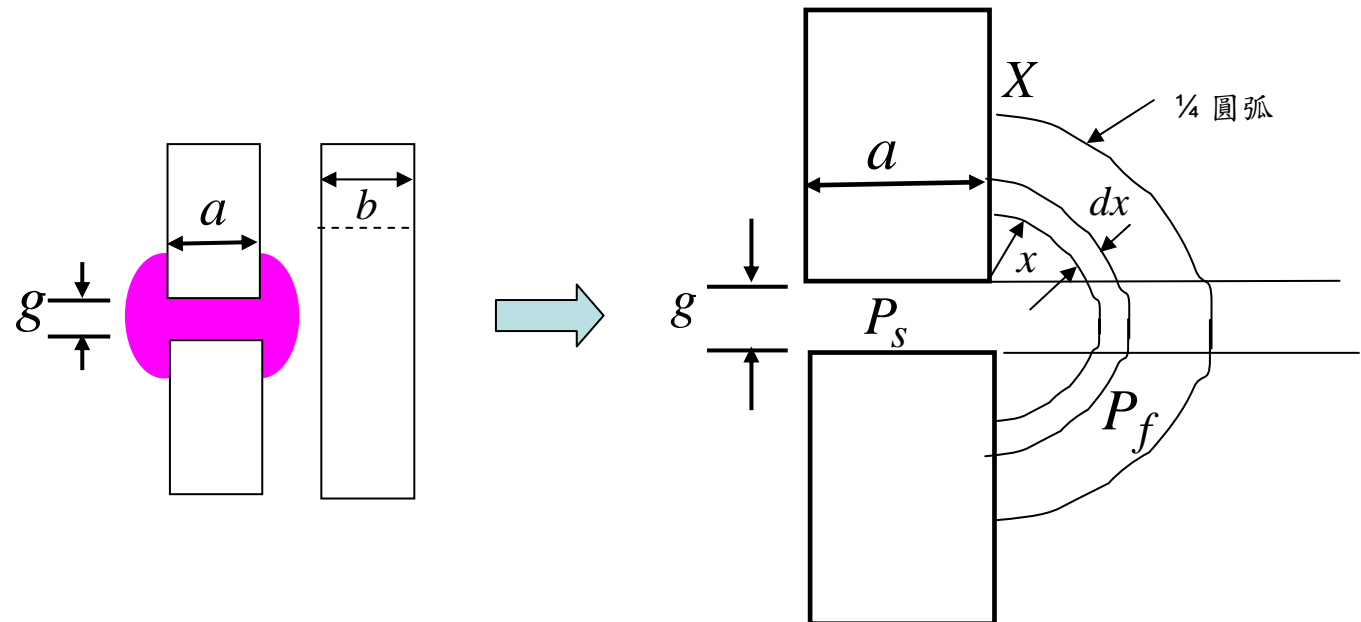


# 圓弧-直線磁導模式法

$$P_g = P_s + 4P_f, \quad P_s = \frac{\mu_0 A}{g} = \frac{\mu_0 ab}{g}$$

$$P_f = \int_0^X \frac{\mu_0 b}{g + \pi x} dx = \frac{\mu_0 b}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi X}{g}\right)$$

其中， $X$ 一般選為氣隙長 $g$ 之數倍( $<10$ )。



## 永久磁鐵及其磁路分析

- 採用永磁式磁場之電磁螺線管閥具有功率密度高、總體產品組件緊湊、體積小、推力產生特性佳等優點。然而欲得良好之致動控制性能，永磁式電磁機構需妥適之分析、設計、製作，始可得到良好之推力性能。

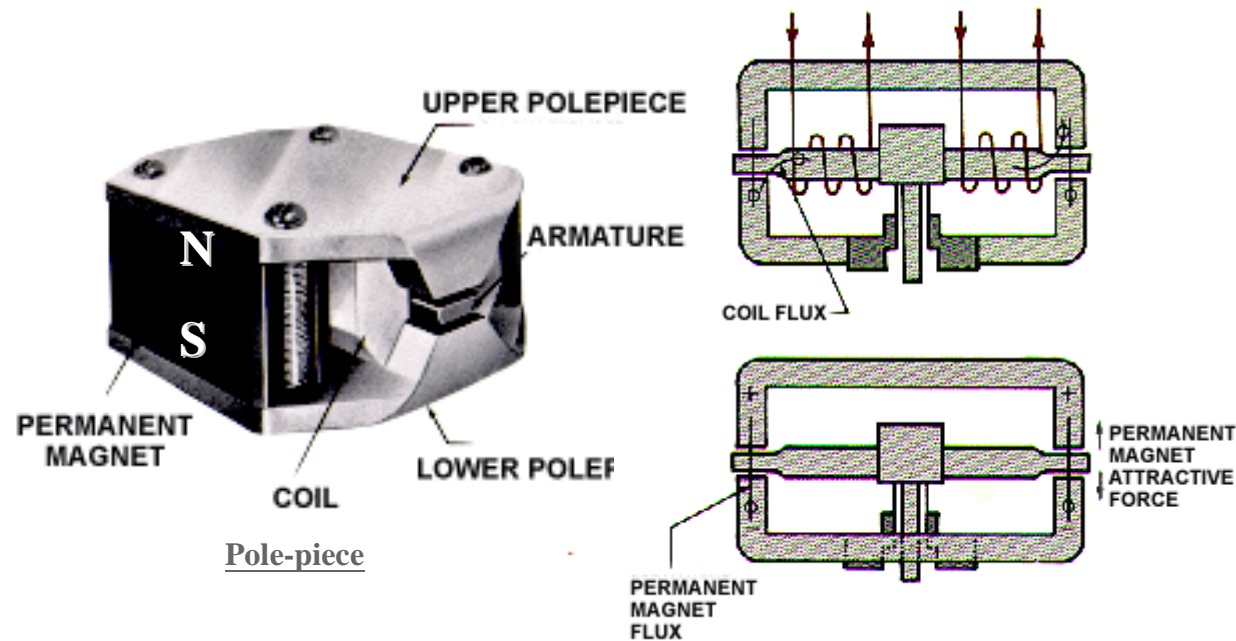
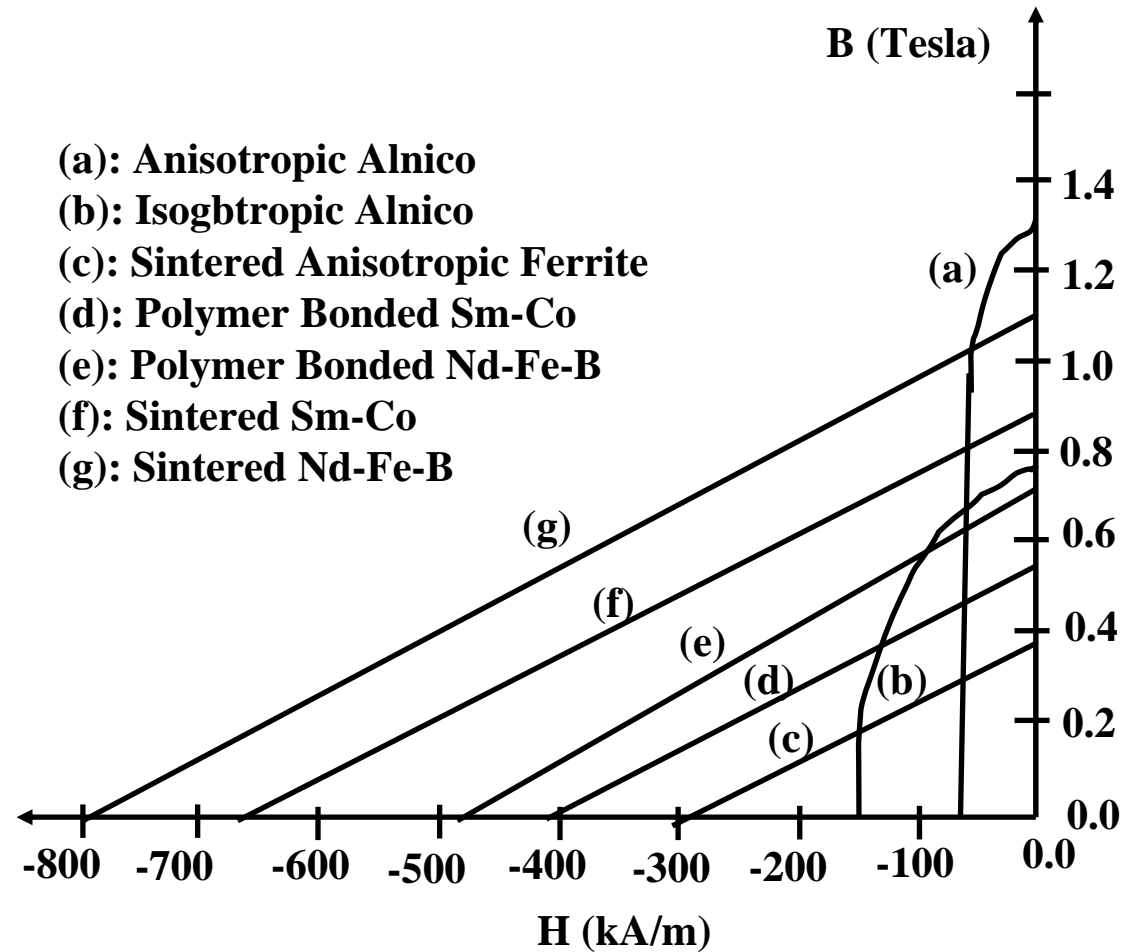
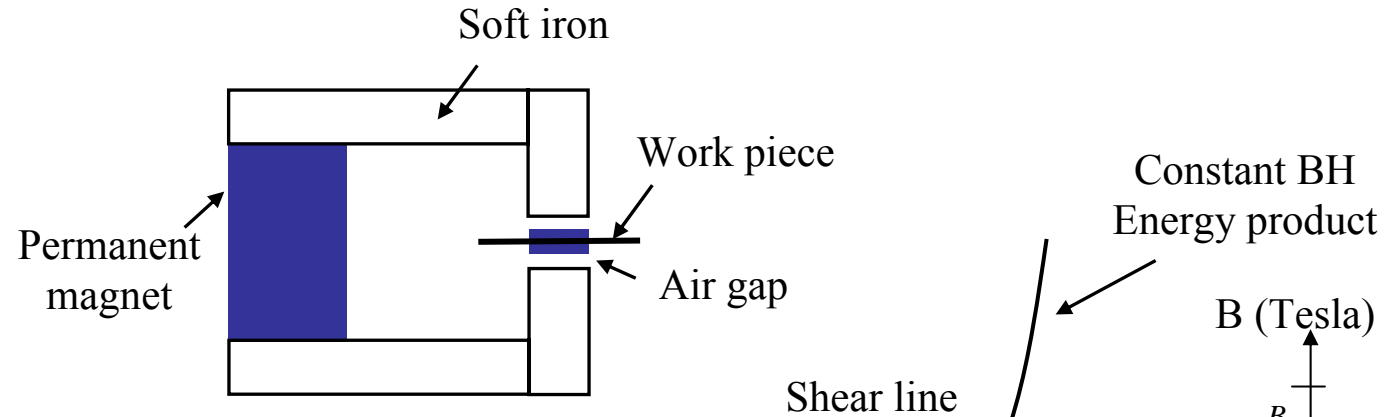


圖2.7：Moog公司之典型永磁式電磁閥([www.moog.com](http://www.moog.com))。

# 一些典型永磁材質之特性



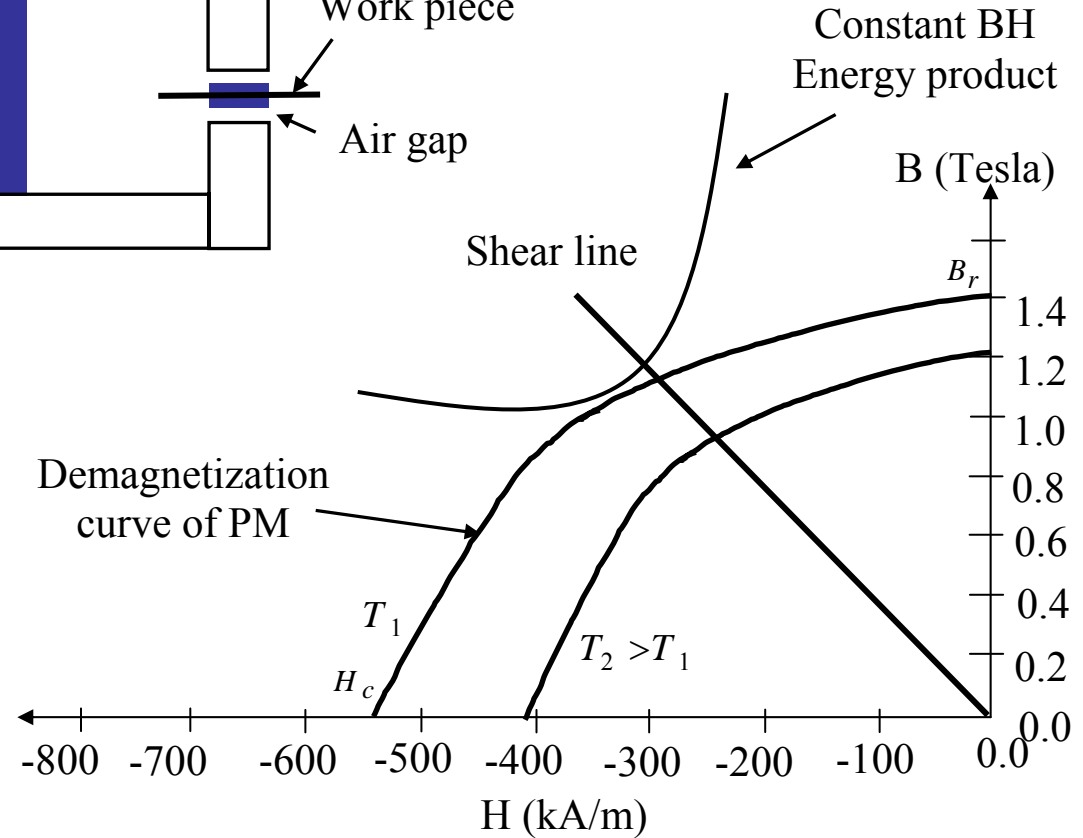
# 永磁磁路之操作點



$$vol_{mag} = \frac{B_g^2 vol_{airgap}}{\mu_0 (-B_m H_m)}$$

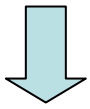


$$BH_{max} \uparrow \Rightarrow vol_{mag} \downarrow$$

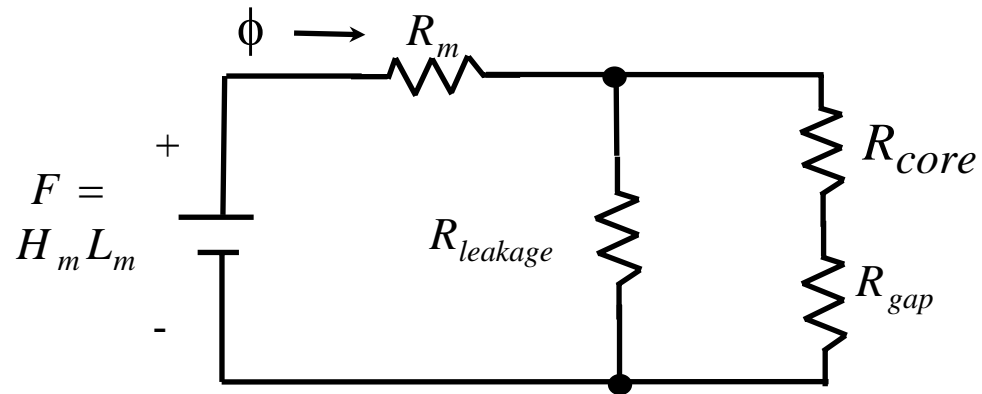
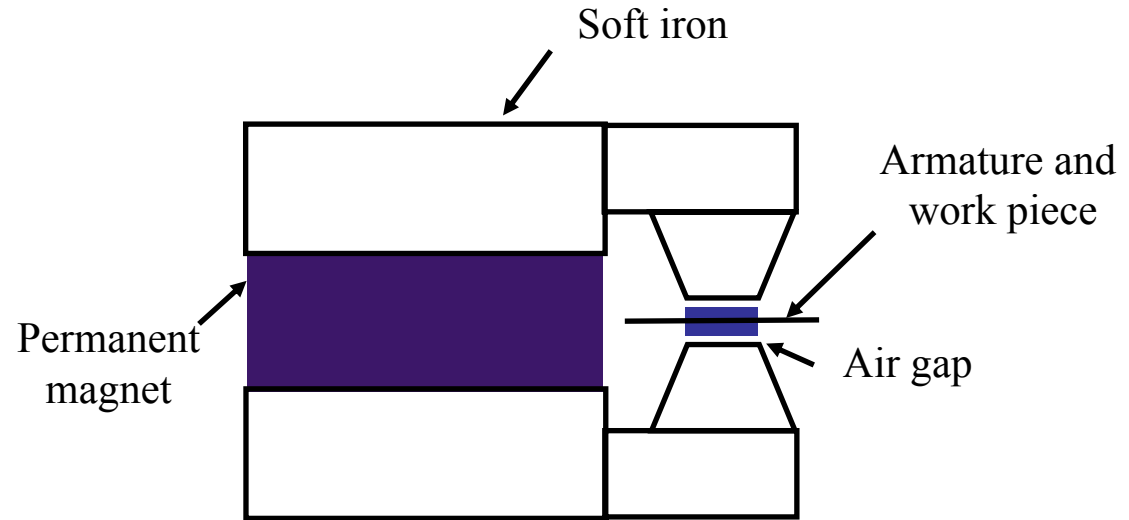


# 永磁電磁閥之磁阻等效電路

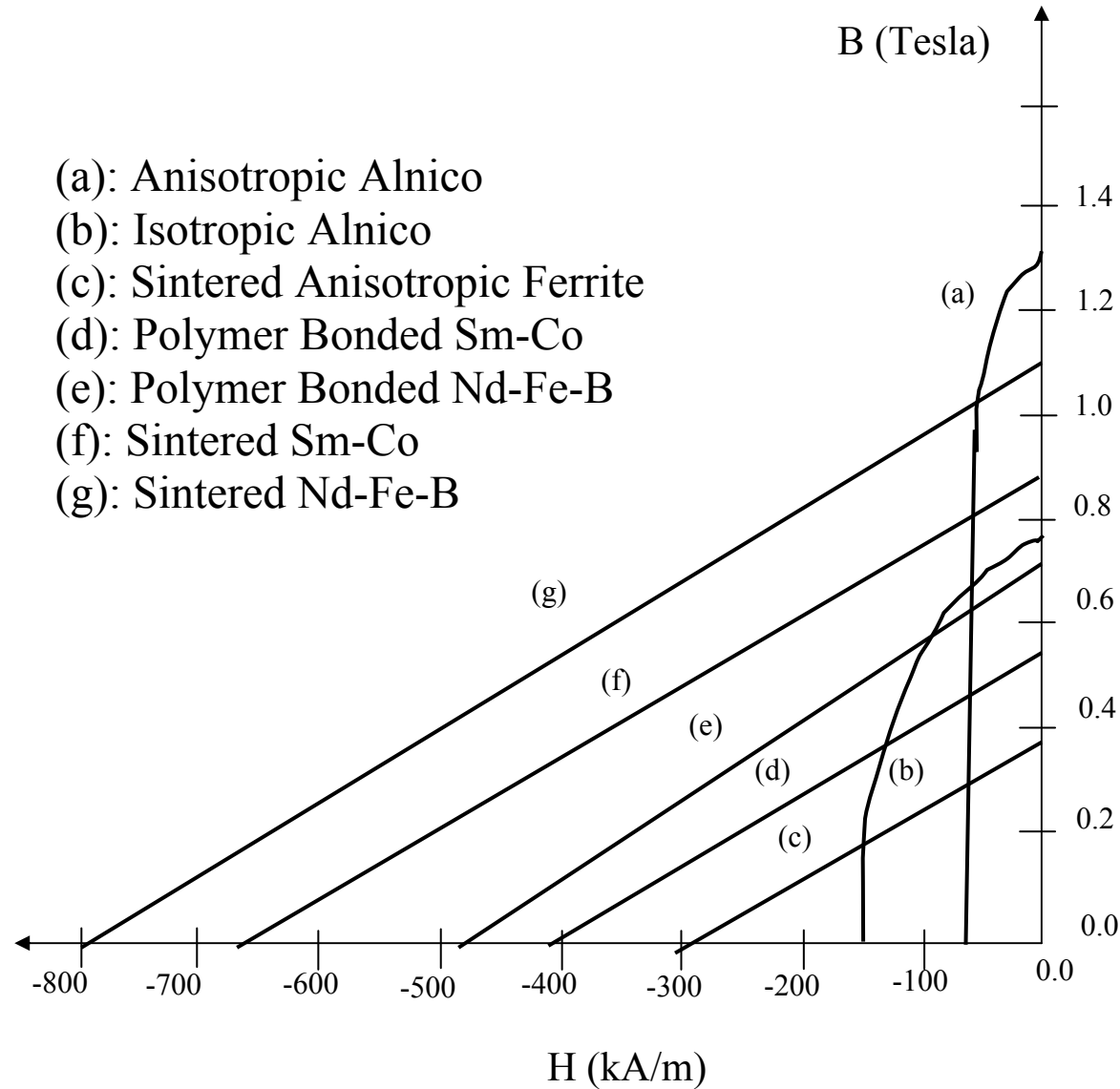
$$B_g = A_m B_m / A_g$$



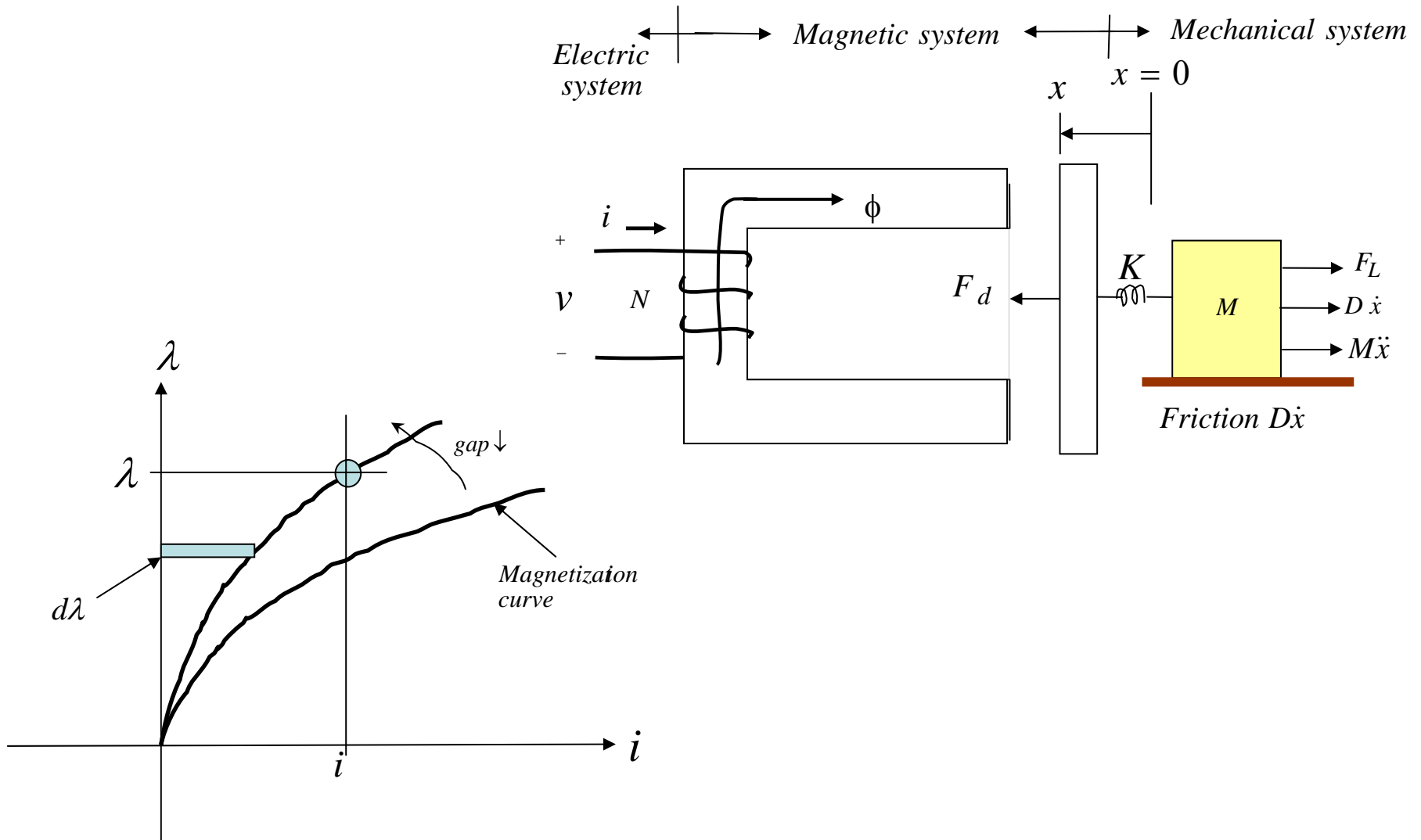
$$A_m = A_g B_g / B_m$$



# 一些典型永磁材質之特性



# 電-磁-機械能量轉換





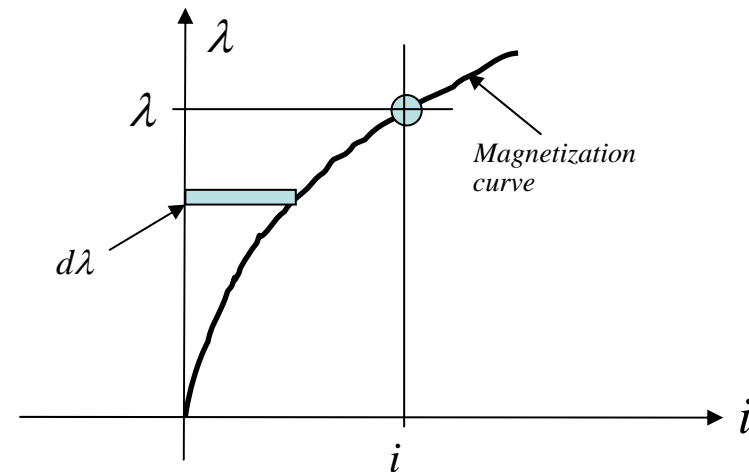
電-磁-機械能量間之關係： $dW_e = dW_f + dW_m$

機械能變化造成電磁推力： $dW_m = F_d dx$

機械力方程式為： $F_d = F_e = M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx + F_L$

磁場儲能： $W_f' = \lambda i - W_f = \int \lambda di$

磁場共能： $W_f = \int id\lambda = W_{fc} + W_{fg} \approx W_{fg}$



# 電-磁-機械能量轉換

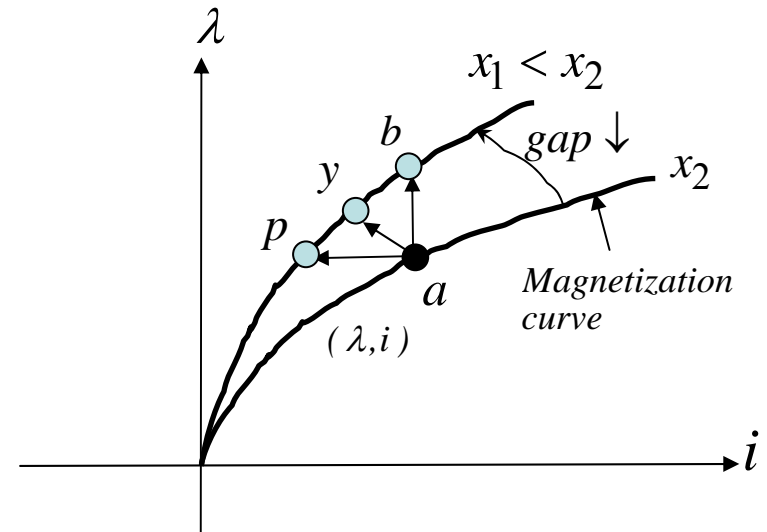
真正路

$a \rightarrow y$

徑：

近似路徑：

$a \rightarrow b$  (constant current) :



$$f_e = f_d = \left. \frac{\partial W'_f(i, x)}{\partial x} \right|_{i=\text{constant}} = \left( -\frac{\partial W_f(i, x)}{\partial x} + i \frac{\partial \lambda(i, x)}{\partial x} \right) \bigg|_{i=\text{constant}}$$

$a \rightarrow p$  (constant  $\lambda$ )

$$f_e = f_d = \left. \frac{-\partial W_f(\lambda, x)}{\partial x} \right|_{\lambda=\text{constant}} = \left( -\lambda \frac{\partial i(\lambda, x)}{\partial x} + \frac{-\partial W'_f(\lambda, x)}{\partial x} \right) \bigg|_{\lambda=\text{constant}}$$

旋轉電磁裝置與線性運動電磁裝置之對應關係為：

---

$$f_d \rightarrow T_d, \quad x \rightarrow \theta$$