

# 被動式磁力控制系統之研發

黃光裕、林沛群、蔡昇富  
國立臺灣大學 機械工程學研究所  
國家會計劃編號 NSC 87-2622-E-110-001

## 摘要

本論文主要是在開發一個被動式磁力控制系統，探討如何經由磁迴路結構之造型設計，將永久磁石之磁能來產生與導磁元件位移有特定關係之磁力曲線。研究進行方式採用實驗測試與 ANSYS 有限元素分析並行。為瞭解永久磁石之基本特性，首先在無磁迴路架構下進行永久磁石相互之間以及永久磁石與導磁材料之間正向磁吸力與側向磁吸力之實驗測試與分析。然後在 C 型磁迴路架構下探討磁迴路中永久磁石配置方式、磁迴路中空隙間隙周圍之幾何造型以及被導磁塊之幾何造型對磁力之影響。依據實驗以及分析結果歸納出磁力峰值、磁力峰值位置與磁力曲線外形等影響參數，其中包括磁石以及導磁材料之磁性性質以及相關幾何造型參數。

關鍵字：永久磁石、磁力控制、磁迴路、造型設計

## 一、介紹

本研究主要是針對目前市購之滾子凸輪間歇分割器 (Roller Gear Cam Index Unit) 進行改良。此型態之分割器在現今產業自動化過程中佔有重要地位，尤其在自動化生產線上將工件或工具進行間歇進給及定位動作。滾子凸輪間歇分割器如圖 1，將輸入端之連續定速運動經由特殊設計之滾子凸輪轉換為輸出端之間歇運動。

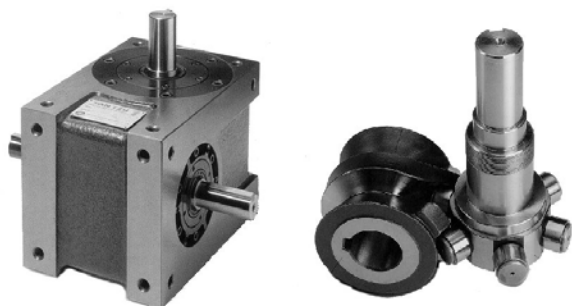
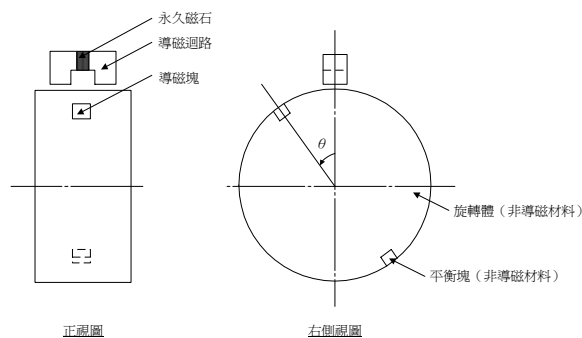


圖 1：滾子凸輪間歇分割器（潭子精密機械公司）。

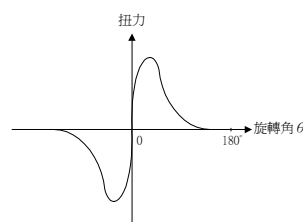
輸入端之連續等速運動一般都是由馬達驅動，在輸出端產生“停止—旋轉—停止”間歇運動，而有加速與減速的變化。對於輸入端而言，能量的傳遞

是不連續的。在輸出端由靜止起動旋轉，輸入端也會受到反向的扭力牽制；而在輸出端停止旋轉時，輸入端則因輸出端的慣性作用有順向扭力的拖動，以及後續的殘震現象，會嚴重影響輸出端間歇運動平穩與快速性。為解決上述所提之問題，於輸入端加入扭力補償機構，使輸入端運作平順化，以確保輸出端運作之穩定性、提高輸出端之定位精度、減少震動與提昇機構運作速度。本研究以磁力相吸的作用原理使旋轉物體產生扭力的變化，而與分割器輸入端之特有扭力變化產生補償作用，使輸入端扭力控制在固定值。

運用磁力來使旋轉物體產生扭力變化，其基本概念設計結構如圖 2(A)所示。在非導磁材料製成之旋轉體上安置導磁塊，於旋轉體旁之固定端設置由永久磁石及導磁材料組成之導磁迴路，並顧慮旋轉平衡在旋轉體上也安置平衡塊。基本上永久磁石也可以和產生磁場的線圈共同作用，但初步研究則只採用永久磁石而不使用線圈，原因是控制線圈需要另外電能供應，而且線圈會產生大量電阻熱損耗，容易使設計複雜化且又事倍功半。不需外加能量之永久磁石經由適當結構及造型設計，也是可以達到扭力矩平衡之功能。



(A) 磁扭力控制系統概念設計圖



(B) 磁扭力對旋轉角關係圖

圖 2：磁扭力控制系統之概念設計圖。

圖 2(A)中，當導磁塊旋轉接近導磁迴路時，磁力作用使兩者間產生相吸的現象，使旋轉體產生一順向扭力矩；反之當導磁塊遠離導磁迴路時，也因磁力使兩者間相吸使旋轉體產生一逆向扭力矩。對旋轉體所產生正反兩方向的扭力矩，其與旋轉角的變化趨勢如圖 2(B)中所示。由於實際的扭力曲線是由許多的因素所共同決定，是無法由直觀方法推得。本研究著重於以實驗測試與理論分析之方式探討磁迴路之設計與磁力關係，以作為後續設計理論之根據。旋轉運動基本是由線性運動轉換成，而且線性系統在實驗模型及元件製作上也比較容易以現有技術達成，所以以線性運動系統中磁力探討作為研究起始。實驗中採用具有高磁能之釹鐵硼磁石，以磁迴路之設計方式將磁場導引至特定工作區域，以進行探討導磁塊之接近或遠離位移對磁能與機械能之轉換。

## 二、磁迴路系統結構與實驗測試台之設計

近幾年新研發成功具有良好磁特性之永久磁石[3][4][9][10][12][13]，大多以粉末冶金方式製造，優點是可大量生產，但缺點是不易進行後續切削加工，所以磁石本身造型是無法任意變更。因此磁迴路都採用能切削加工且導磁性佳之導磁材料，來引導與使用永久磁石內部之磁能。將永久磁石單獨放置在空氣中，磁力線將散發至周遭空氣場域中，形成無數之磁迴路，但因迴路散亂且每一迴路儲能小，磁石無法有效釋能。磁迴路設計即是利用導磁性佳之物質接近磁石，將永久磁石散發至空氣場域中之磁力線匯集，使磁力線依預設之路徑流動，如此便可將磁能充分有效利用。為了磁動勢形成以及其他物件之導入，磁迴路中間則必須加上適當空氣間隙。

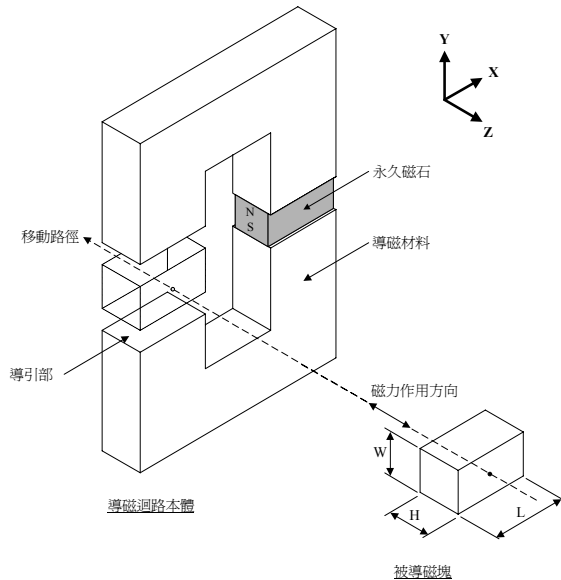


圖 3：單磁石後置之 C 型導磁迴路

兩個主要研究方向為經由導磁迴路本體或被

導引塊幾何造型改變探討磁力對兩者間距離之關係以及尋求最大相互作用磁力。導磁迴路則以圖 3 單磁石後置 C 型導磁迴路及圖 4 雙磁石前置 C 型導磁迴路兩種模型為主。永久磁石安置於 C 型導磁迴路本體上是屬於固定端，移動物件採用導磁材料純鐵塊。座標定義以 C 型迴路本體厚度方向為 Z 軸，被導磁塊長 L、寬 W 及高 H 方向則是依照絕對座標之 X、Y、Z 方向定義。圖 3 將磁石後置之目的在於使空氣間隙附近呈現開放性狀態，可以外加或改變導磁元件造型來使導磁迴路本體與被導磁塊間之磁力產生變化。

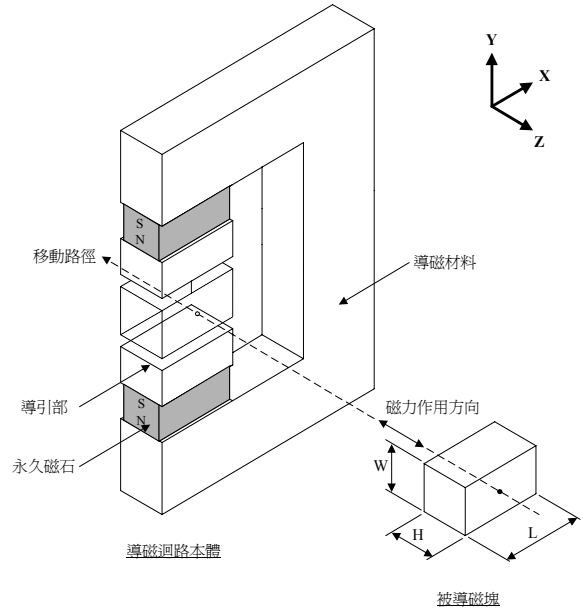


圖 4：雙磁石前置之 C 型導磁迴路

由參考文獻[3][4][9][10][12][13]中可知永久磁石愈接近空氣間隙，磁漏程度愈少。圖 4 中所示是將永久磁石安置於空氣間隙附近，並以對稱方式安置兩顆永久磁石，此磁迴路主要用於探討被導磁塊幾何造型變化對磁力之影響，並探討如何以被導磁塊幾何造型變化來獲得最大磁力。

本論文研究是採取實驗及有限元素分析並行方式，探討永久磁石、磁迴路、與導磁元件設計對磁力大小及磁場分佈之影響，以求得磁迴路設計準則。實驗測試台如圖 5 中所示。具 X、Y 兩方向自由度，一為被量測體路徑移動方向，另一為微調固定體與被導磁塊相對位置用。在不影響磁力分析之前提下，實驗台以不導磁鋁合金建構本體，以銅螺絲及不鏽鋼螺絲作為接合元件，完全不導磁的銅螺絲用於磁力作用區周圍，不鏽鋼螺絲用於實驗台周邊需較大鎖合力之接合面上。由於量測器、導軌等市購元件皆具有導磁性，所以必須遠離磁力作用區，以減少量測誤差。被導磁塊夾持元件經由力量導引桿與荷重計(Load Cell)相接，而力量導引桿支撐點建構於用於線性移動之平移台上，以手動旋轉帶動平移台帶動被導磁塊。

實驗均採用釹鐵硼(NdFeB)永久磁石，尺寸為

20mm×10mm×10mm，此型磁石之退磁曲線呈現近似線性之狀態，導磁係數則假設為定值 1.05，殘留磁感設定為 1.08 Telsa。導磁材料方面是採用日製純鐵板 ME1，厚度為 13mm，其導磁係數 $\mu_s$ 約為 10000。周圍之空氣場域之導磁係數 $\mu_a$ 設定為 1。

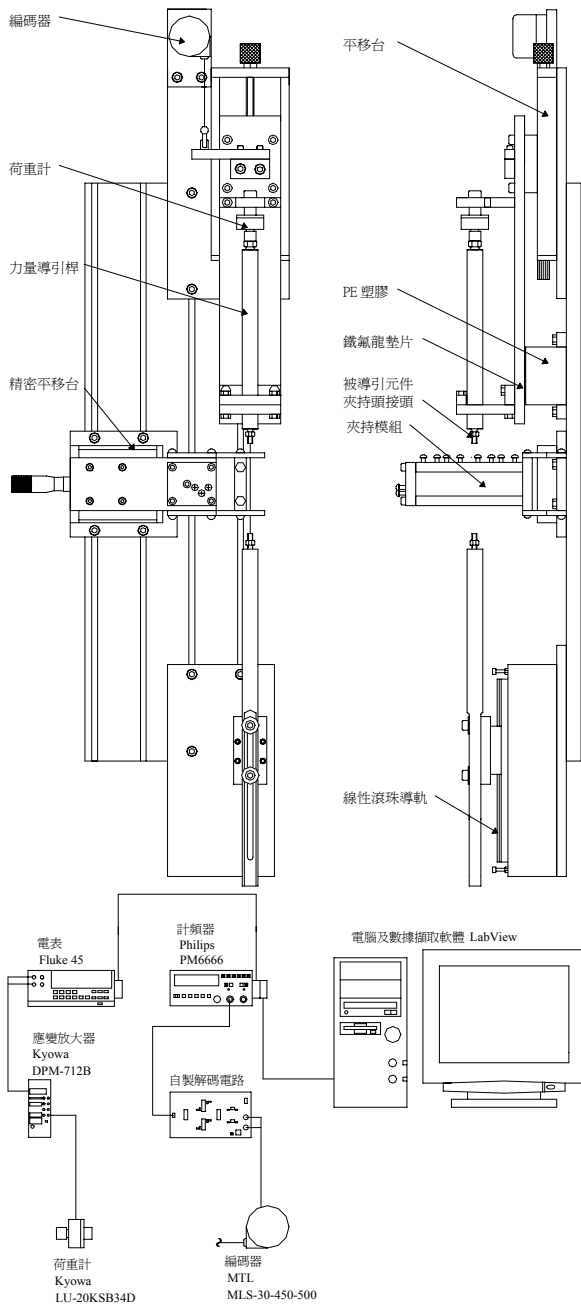


圖 5：實驗測試系統之架構

在磁場及磁力理論分析上採用有限元素套裝軟體 ANSYS Release 5.3 Research FS 版作為分析工具(Ansys,1997)，安裝在內含 Pentium 200MMX CPU 的個人電腦上進行模擬分析工作，電腦作業系統為 Microsoft Windows NT 4.0 Workstation 版。模型本身假設為剛體，由於優異之網格分割能力，因此磁場現象模擬採用 solid 98 四面體結合場實體元素。有限元

素模型之建立首先將被模擬物件粗分為許多長方體堆疊而成，並於其頂點建立關鍵點(key point)，再利用這八個關鍵點建立一個長方體實體，將所有長方體實體組合起來即為被模擬物件之模型，長方體實體於相接之面上必須共享所有關鍵點及面(area)。

建立物件實體模型後，必須再建立周圍空氣場域。建立空氣場域之方式有兩種，第一種方法為於空間中建立一大型長方體，利用布林運算(Boolean Operation)將磁迴路實體模型減去後剩餘實體即為空氣場域。第二種方法將空氣場域也如同磁迴路元件般分割成許多長方體，利用建立關鍵點組成長方體實體再組合成空氣場域。空氣場域建立方式和網格分割有極大關連，也和所欲模擬項目有關，因此隨模型之不同而採用不同方式。

由於實體元件幾何造型複雜度不同所以網格分割分別採用自由網格分割(free-mesh)或智慧型網格分割(smart-mesh)，以增加時效與運算準確性。本論文中被量測磁力構件是以手動方式進行位移，其運作方式相似於虛功法之計算，所以分析上採用虛功法進行磁力值之計算。

### 三、實驗測試與分析

#### 3.1 永久磁石磁力測試與分析

首先探討單純兩永久磁石在正面與側向移位對磁力之關係，以詳細瞭解永久磁石之基本特性，並作為未來測試結果之比較指標。圖 6 顯示兩永久磁石在正面移位下磁力之 ANSYS 模擬值與實驗值之比較，兩曲線趨勢極為吻合，誤差均在 10%以內，可以證明所建立之有限元素模型屬合理，磁石之遲滯曲線表現如型錄所描繪，而磁石之平均殘留磁感值比型錄中所示要大，所以實驗值以微小幅度超越模擬值。

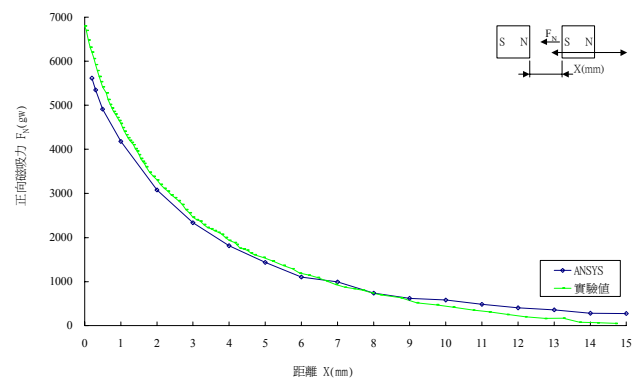


圖 6：兩個永久磁石正向磁吸力對兩者間距離關係圖

作用元件以相對側向位移方式可以增加作用元件之相對位移空間，也是磁扭力控制裝置中基本架

構所採用相對位移方式。磁石與導磁塊間側向磁吸力之實驗值與模擬值如圖 7 所示，其中模擬值已經過摩擦力之補償。實驗是以磁石與導磁塊相吸引之狀態為起始，再逐漸進行側向位移。實驗值於開始側向位移時力量呈現急速上昇現象，位移至 4mm 左右開始呈現穩定狀況，到 16mm 左右開始遞減。0mm 至 4mm 緩昇現象成因為磁石在小側向位移量時，大部份磁力線仍可垂直通過其相接介面，磁力線不偏轉就沒有側向分力。但隨著磁石側向位移量增加，兩者相接面積變小無法完全接納所有大量磁力線通過，所以有磁力線開始從側面通過，另一方面則由於磁力線側向偏移過大而使磁力線走向偏轉，因此造成側向磁力增加。而磁力峰值大約是正向位移之磁力峰值的一半，其峰值區域約在 X=4mm 至 12mm 範圍，也就是磁石與導磁塊重疊面積區域為 8mm x 10mm 大小，重疊面積再縮小時磁力線開始明顯從磁石側面流出。

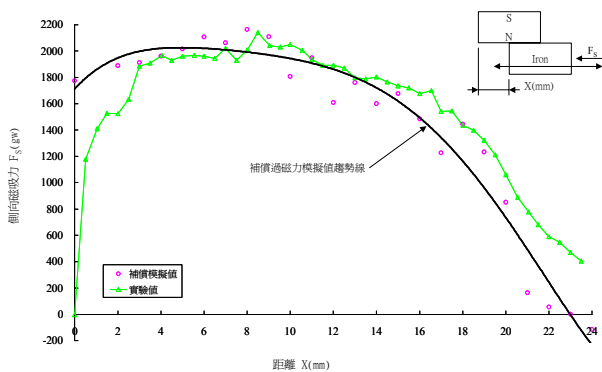


圖 7：磁石與導磁塊間側向位移對磁吸力之影響。

### 3.2 空氣間隙之變化對磁力之影響

上述以直接接觸並進行側向位移方式，所面臨最大之問題是摩擦力，為了免除摩擦作用力之干擾，作用元件之間必須保持一定作用空隙。空隙愈小所得磁力愈大。為求得實驗所能進行之最小空氣間隙、導磁迴路本體幾何造型與被導磁塊基準尺寸，首先探討不同寬度 W 之被導磁塊所受磁力和導磁迴路本體與被導磁塊間距離之關係，設定長度 L 為 13mm 及厚度 H 為 10mm，而採用五種寬度 W=13、11、9、7、5mm 進行測試，實驗結果如圖 8 中所示。隨著空氣間隙之減少磁力峰值逐漸升高，但峰值發生位置並沒有改變，可以察覺到磁能轉換成機械功之效果提昇。磁力曲線在被導磁塊接近與遠離導磁迴路本體過程有明顯不對稱現象，其原因是由於導磁材料之滯滯現象所造成不同磁化與退磁化路徑，左右能量差異應該等於遲滯能量耗損。

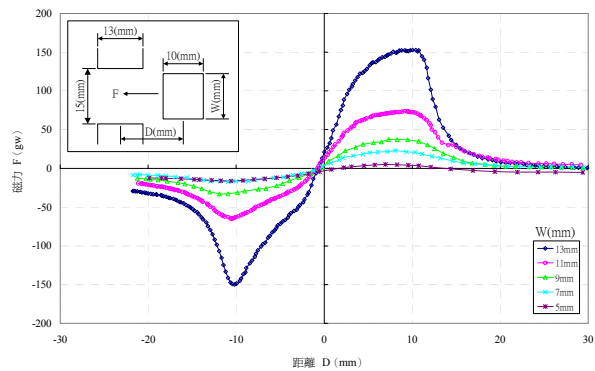


圖 8：不同空氣間隙下被導磁塊所受磁力對兩者間距離之關係。

將圖 8 實驗值作磁力峰值對空氣間隙大小之趨勢分析如圖 9 中所示，由外插法顯示空氣間隙 0.1mm 時磁力峰值可達 275gw。所得磁力峰值與先前實驗所得磁力峰值相差甚遠，將以導磁迴路本體之幾何造型設計來改善。

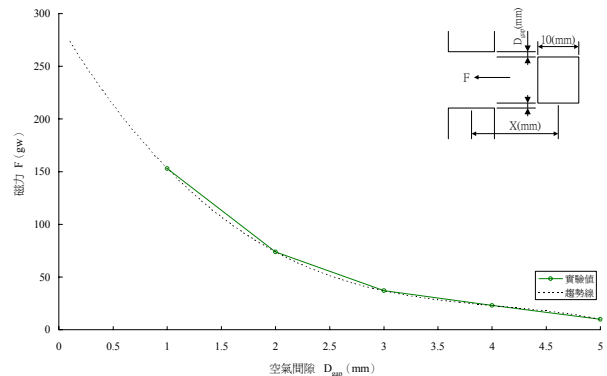


圖 9：不同空氣間隙造成磁力峰值變化之趨勢分析

### 3.3 空氣間隙截面積之變化對磁力之影響

在磁迴路造型設計方面，可變因子有磁石配置、導磁截面積大小與截面積造型等。以導磁截面積大小變化為主之實驗項目如圖 10 中所示，除標準型外還有單側上下端加置相同截面積導磁塊以及雙側上下端加置相同截面積導磁塊之實驗測試。在無被導磁塊通過狀況下，C 型磁迴路由於過大空氣間隙而發生較大磁漏現象，因此也可藉由截面積變化來增加空氣間隙磁通密度之可能性。

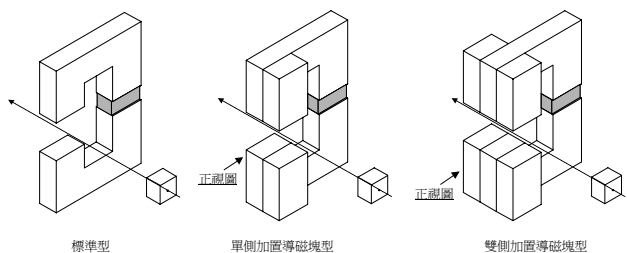


圖 10：不同空氣間隙截面積之導磁迴路示意圖。

實驗結果如圖 11 中所示，隨著導磁迴路本體上導磁塊的加置，磁力峰值發生點平移至被導磁塊剛進入導磁迴路本體空氣間隙時，原通過空氣間隙之磁力線因被導磁塊之加入而重新分佈。由於空氣間隙截面積增大，在被導磁塊進入時有部份磁力線仍直接穿過空氣間隙形成迴路，因此相較於標準型磁迴路磁力峰值有些許降低；而雙側加置導磁塊型空氣間隙截面積又更大過於單側加置導磁塊型，磁力峰值又再減少，但峰值區域擴大。由磁力曲線所涵蓋之區域可以判斷總能量是大致相同的。

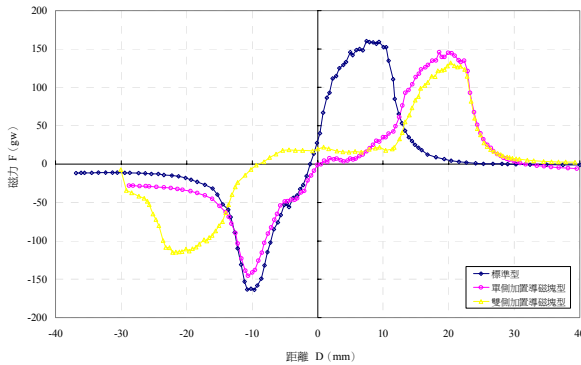


圖 11：不同空氣間隙截面積下被導磁塊所受磁力對兩者間距離之關係（單側空氣間隙=1mm）

### 3.4 導引角之變化對磁力之影響

增加空氣間隙之作用截面積對被導磁塊所受磁力之影響主要在於磁力峰值發生位置之改變，由於導磁迴路本體與被導磁塊於接近時其幾何造型沒有變化，所以磁力曲線形狀大致相同而未有改變。此處將加置導磁塊於空氣間隙處切斜角如圖 12，該切斜角為導引角 $\theta_{in}$ ，以探討其對磁力曲線之影響。

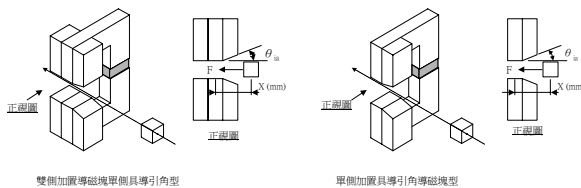


圖 12：加置具導引角導磁塊之導磁迴路示意圖

實驗以 $\theta_{in}=5^\circ$ 及 $10^\circ$ 兩種不同導引角進行測試，圖 13 為被導磁塊於雙側加置導磁塊單側具導引角型下之實驗結果，導引角造成磁力峰值明顯降低約 65% 而且使峰值發生點移位約 10 mm，但角度 $5^\circ$ 與 $10^\circ$ 之間磁力值卻沒有太大差異，總能量大小大致相同。

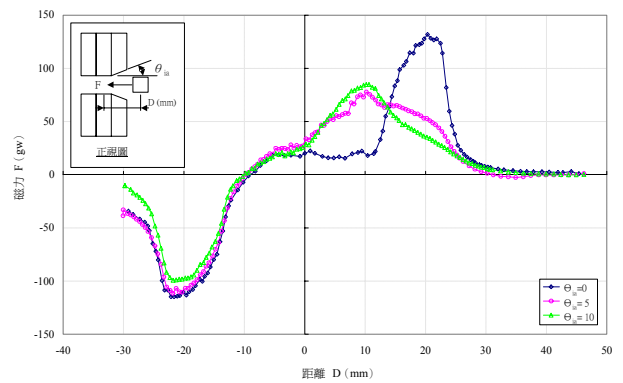


圖 13：被導磁塊於雙側加置導磁塊而單側具導引角型下之磁力曲線(單側最小空氣間隙=1mm)

圖 14 為被導磁塊於單側加置具導引角導磁塊型下之實驗結果，由於單側加置導磁塊所以磁力峰值與曲線都比雙側加置導磁塊來的高些。導引角愈大，曲線中峰值愈明顯。

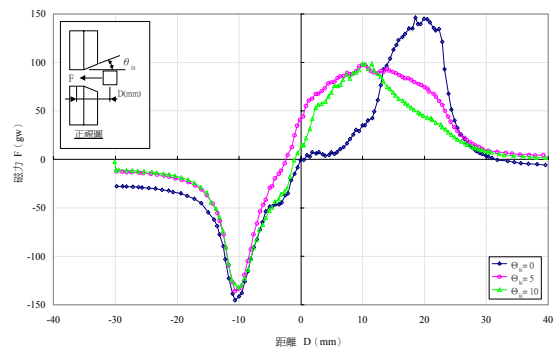


圖 14：被導磁塊於單側加置具導引角導磁塊導磁迴路下之磁力曲線(單側最小空氣間隙=1mm)。

### 3.5 導引造型之變化對磁力之影響

被導磁塊移動過程中欲改變磁力曲線分佈除了前面所提利用導引角之方式改變兩者間空氣間隙外，另一種方式便是改變被導磁塊移動過程中有效空氣間隙截面積。若使被導磁塊於接近整個導磁迴路本體時相接近之空氣間隙截面積以漸增方式，磁力線分佈將緩緩重新分佈，磁力量值便會緩緩變化。欲達成上述有效截面積緩緩變化其中一種方法是將導磁迴路本體於 Z 軸方向設計成三角型，使被導磁塊於接近過程中進入空氣間隙之截面積緩緩增加。實驗結構如圖 15 所示，設計不同之進入角 $\theta_{in}$ 以探討被導磁塊所受磁力狀況。

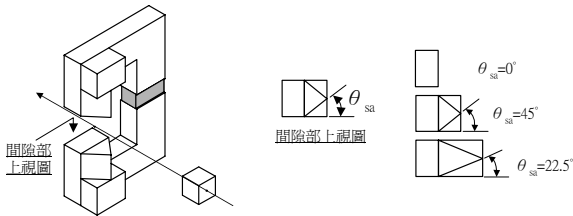


圖 15：加置具進入角導磁塊之導磁迴路示意圖

實驗中進行進入角 $\theta_{si}=22.5^\circ$ 及 $\theta_{si}=45^\circ$ 兩種變化，由於三角形底邊長度固定，所以 $\theta_{si}=22.5^\circ$ 會有較伸長之導磁塊造型。實驗結果如圖 16 中所示。磁力曲線分佈如預期呈現較平緩之分佈，不論進入角 $\theta_{si}$ 為 $22.5^\circ$ 或是 $45^\circ$ ，磁力峰值發生點均發生在三角形空氣間隙截面積底邊為 $5\text{mm}$ 時。

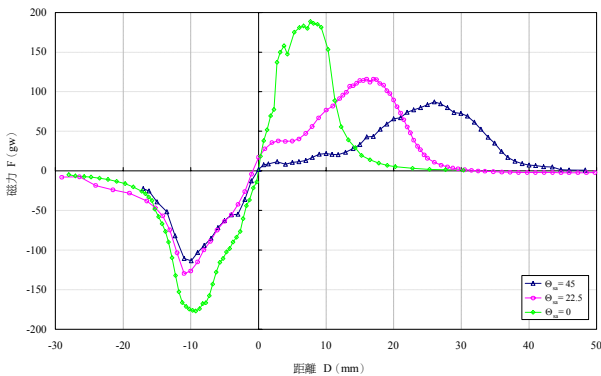


圖 16：被導磁塊於單側加置具進入角導磁塊導磁迴路下磁力對距離之關係。

### 3.6 被導磁塊固定作用面積下幾何造型變化對磁力之影響

前面所進行之被導磁塊幾何尺寸變化中，被導磁塊於接近與進入導磁迴路本體時兩者接近邊緣之幾何形狀大略相似，因此於趨勢分析時雖然磁力峰值與磁力峰值發生位置有所不同，磁力曲線之外形上大致上相似。在相同空氣間隙面積下，可能之幾何外形變化方式有如圖 17 所示，將被導磁塊前後側長度 $L_{Aa}$ 與 $L_{Ab}$ 其中一側長度設定與導磁迴路本體相同為 $20\text{mm}$ ，而只進行另一側長度之變化，被導磁塊造型於空氣間隙面(XZ 平面)方向則會由長方形變為梯形與三角形。如此被導磁塊對 Z 軸呈現不對稱造型，較難定義其中點，因此距離 D 改定義為導磁迴路本體中點至被導磁塊最接近導磁迴路本體邊緣之距離。固定 $L_{Aa}$ 而改變 $L_{Ab}$ 則使被導磁塊以前尖後鈍方式接近導磁迴路本體，其模擬結果如圖 18 所示，而固定 $L_{Ab}$ 而改變 $L_{Aa}$ 被導磁塊則以前鈍後尖方式接近導磁迴路本體，其模擬結果如圖 19 中所示。

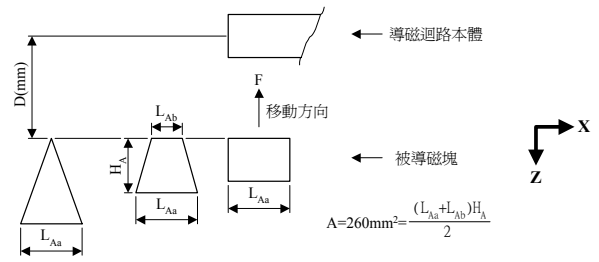


圖 17：被導磁塊於固定空氣間隙面積下之幾何外形變化示意圖

由圖 18 隨著 $L_{Ab}$ 變短使磁力峰值降低愈多，磁力曲線漸漸趨向平緩化並有變寬之趨勢，代表被導磁塊於進入導磁迴路本體過程中，由導磁迴路本體發出通過被導磁塊之磁力線是由長度方向中點漸漸向外擴散增加，磁力曲線自然平緩化，且由於被導磁塊已進入導磁迴路本體之部分允許部份磁力線直接通過而無 Z 軸方向磁力分量，因此使平均磁力值減少，但由於此幾何造型之被導磁塊於進入過程中於空氣間隙面長度持續增加，使 Z 方向磁力分量持續存在，磁力值維持不墜，進而造成曲線寬廣之外形，此分析所得結果類似圖 16 導磁迴路本體設計進入角 $\theta_{si}$ 導引被導磁塊實驗所得結果，由於兩者差異只在於改變幾何造型之物件不同，因此可推斷影響磁力曲線分佈之原因主要為兩者接近邊緣之幾何造型。

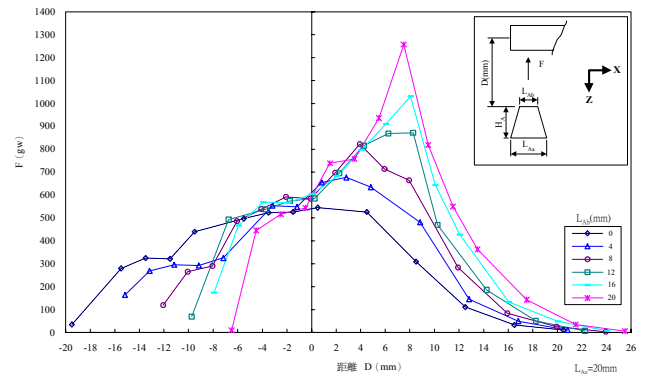


圖 18：被導磁塊接近側長度 $L_{Ab}$ 改變下磁力與兩者間距離之關係。

圖 19 中被導磁塊接近時之長度不變，在其接近導磁迴路本體時兩者接近邊緣幾何造型相似，所以磁力曲線上升趨勢相同而且磁力值也相近。當被導磁塊位於導磁迴路本體中央時，不同造型之被導磁塊會有相近之磁力值，但當被導磁塊脫離導磁迴路本體後，磁力值隨不同邊緣幾何造型改變而變化。由於圖 18 與圖 19 之實驗對 Z 軸對稱，因此於圖 19 中負磁力值之趨勢與圖 18 中正磁力值之趨勢是相同的。

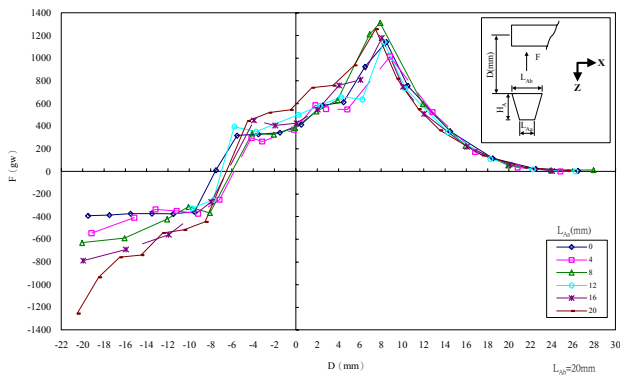


圖 19：被導磁塊遠離側長度  $L_{Aa}$  改變下磁力與兩者間距離之關係。

被導磁	長度 L	○		
	寬度 W	○		
	厚度 H		○	
	固定作用面積下長度與厚度變化	○	○	
	固定作用面積下幾何造型變化	○	△	○

主要影響參數：○  
次要影響參數：△

#### 四、磁力曲線特徵之影響參數

磁力曲線大致圖形如圖 20 所示，曲線之特徵包含兩個磁力峰值 ( $F_{max}$  與  $F_{-max}$ )、兩個磁力峰值發生位置 ( $D_{max}$  與  $D_{-max}$ ) 與三段曲線外形 (1、2 與 3)。這些曲線特徵與其相關影響參數依據實驗分析結果彙整成表 1，其中主要影響參數與次要影響參數之區分是依據量值分析所得。相關影響參數則包含材料特性與磁場迴路之造型參數，材料特性與材質及熱處理程序有關，目前是以市購材料之規格為依據，材質較難進行變化，因此要完成特定磁力曲線之形狀則主要是靠磁場迴路之造型設計。

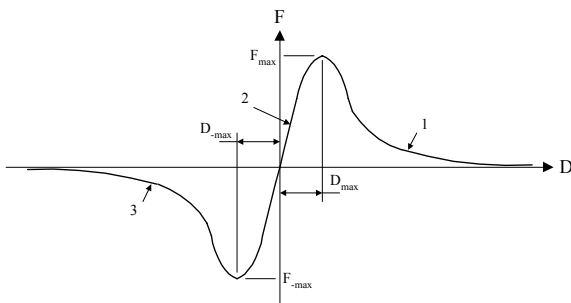


圖 20：磁力曲線與重要曲線特徵之示意圖

表 1：磁力曲線影響參數一覽表

影響參數	曲線特徵	磁力峰值	磁力峰值位置	曲線外形
永久磁石之特性		○		○
導磁材料之特性		○	△	○
空氣間隙 $D_{gap}$		○		
永久磁石配置方式		○		
導磁迴路本體	空氣間隙作用截面造型	△	○	
	導引角 $\theta_{ia}$	○	○	○
	進入角 $\theta_{sa}$	○	○	○

#### 五、結論

永久磁石類似飛輪、彈簧等為一種儲能系統，藉由磁能可以和其他能量型態如電能、機械能等進行能量轉換。將永久磁石置於空間中，將與周遭物質依磁阻大小形成不同磁通量大小之磁迴路，永久磁石之磁性會依照外在磁迴路總磁阻大小移至消磁曲線上某一工作點，磁迴路總磁阻不同將改變其工作點。工作點移動也代表永久磁石之磁能改變，改變之磁能即是與外界進行轉換之能量以及熱損耗之總和。永久磁石與周遭物質形成之磁迴路磁阻變化量愈大，可由磁能轉換得出之能量就愈大。於無磁迴路設計狀況下，永久磁石與永久磁石或導磁材料間之正向磁吸力對兩者間距離之關係可以多項式四次方得到良好之近似。對兩磁石進行側向磁吸力探討發現由起始側向移動至兩者完全分離前磁力會維持於某一定量大小，而完全分離後磁力則會快速減少至零。

磁通量愈大之磁力線路徑代表所通過之能量愈大，因此磁迴路設計目的便是在於設計磁阻小之特定磁力線路徑，使永久磁石提供之磁通量能流至所設計之迴路中，但是迴路中必須具備有空氣間隙，使通過此路徑之磁力線也有向外轉移之可能性，以擴展能量轉換空間。本論文中是以導磁元件通過 C 型磁迴路空氣間隙之方式，進行機械能與磁能間之轉換。

以具有較高導磁係數之導磁材料所建構之 C 型磁迴路可以將永久磁石之磁力線匯集在特定區域。當被導磁塊接近導磁迴路本體過程中，原本大量通過空氣間隙之磁力線因導磁材料之接近而提供另一低磁阻之磁力線路徑，使磁力線改道通過被導磁塊並使其被磁化，被導磁塊中磁力線所產生磁力於導引方向之分量即是被導磁塊所受導磁迴路本體牽引之磁力。因為被導磁塊之接近使迴路總磁阻降低，永久磁石之工作點也有所變更，儲存磁能有部份轉換為機械能。整塊被導磁塊在移動過程也不是均勻磁化的，被導磁塊上不同磁化區域之工作點會隨著位移不同不斷更動，磁化與退磁化時其工作點都有不同路徑依

循。所以被導磁塊於進入和遠離導磁迴路本體之磁力曲線會呈現不對稱現象，並隨著幾何造型與空氣間隙不同磁力曲線也有不同呈現。

磁力變化主要取決於被導磁塊與導磁迴路本體於相對位移之過程中每單位位移量下空氣路徑長度的變化量與路徑於移動方向之分量所共同決定，而空氣路徑變化之成因來自於兩者之幾何外型。在未添加任何導磁塊之單磁石後置 C 型磁迴路系統於被導磁塊進入時，因兩者間空氣路徑長度驟然變小與作用面積驟然變大使磁力值明顯提昇，而於加置導磁塊設計導引角 $\theta_{in}$ 與進入角 $\theta_{sa}$ 之場合中則使曲線平緩化，並有較寬廣曲線外形，但三者所獲得之總能量是大致相等。

單純以導磁迴路本體考量，將永久磁石安置於空氣間隙附近將減少磁漏現象；而於既定磁迴路中，被導磁塊幾何尺寸變化也影響磁力曲線。以尋求最大磁力值之觀點考量下，被導磁塊長度 L 需略大於導磁迴路本體長度，而寬度 W 則是儘可能大以致被導磁塊還能夠以非接觸方式通過之最小空氣間隙為止，厚度 H 則以被導磁塊磁通密度未達飽和情況即可。在實際尺寸設計上，則必須依使用場合不同需求與限制而定，以最大磁力峰值、磁力重量比、磁力曲線外形作為設計參數。

## 誌謝

本文之研究成果，承蒙行政院國家科學委員會產學合作研究計劃編號 NSC 87-2622-E-110-001 支助下完成，特此誌謝。

## 六、參考文獻

1. ANSYS / *Electromagnetic Field Analysis Guide* , Version 5.4 , ANSYS Inc. , 1997
2. Biedinger , D. Lemoine , “Shape Sensitivity Analysis of Magnetic Forces “*IEEE Transaction on Magnetism* , vol. 33 , No. 3 ,1997 , pp.2309-2316.
3. Fred M. Lilienstein , *Magnetics Engineering fundamentals and Computer-Aided Design Solutions* , Van Nostrand Reinhold , 1993
4. Hadfield , *Permanent Magnets and Magnetism* , John Wiley & Sons Inc. , 1962
5. Jang , J. W. Yoon , “ Torque and Unbalanced Magnetic Force in a Rotational Unsymmetric Brushless DC Motors “ , *IEEE Transaction on Magnetism* , vol. 32 , No. 5 , 1997 , pp.5157-5159.
6. Jang , J. W. Yoon , K. C. Ro , N. Y. Park , S. M. Jang , “ Performance of a Brushless DC Motor due to the Axial Geometry of the Permanent Magnet “ , *IEEE Transaction on Magnetism* , vol. 33 , No. 5 ,

- 1997 , pp.4101-4103.
7. John D. Kraus , *Electromagnetics* , 4<sup>th</sup>ed , McGraw-Hill Inc. , 1991
8. Kokichi Ogawa , Yoko Horiuchi , Nobuo Fujii , “ Calculation of Electromagnetic Forces for Magnetic Wheels “ , *IEEE Transaction on Magnetism* , vol. 33 , No. 2 , 1997 , pp.2069-2072.
9. Lester R. Moskowitz , *Permanent Magnet Design and Application Handbook* , 2<sup>th</sup>ed , Krieger Publishing Company , 1995
10. Malcolm McCaig , Alan G Clegg , *Permanent Magnets in Theory and Practice* , 2<sup>th</sup>ed , John Wiley & Sons , 1987
11. Nobuo Fujii , Makoto Chida , Kokichi Ogawa , “ Three Dimensional force of Magnetic Wheel with Revolving Permanent Magnets “ , *IEEE Transaction on Magnetism* , vol. 33 , No. 5 , 1997 , pp.4221-4223.
12. Rollin J. Parker, *Permanent Magnets and their Application* , John Wiley & Sons Inc. , 1962
13. Rollin J. Parker, *Advanced in Permanent Magnetism* , John Wiley & Sons Inc , 1990