

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

智慧型電磁式致動器之開發與特性研究

Development of A Smart Electromagnetic Actuator And Research on Its Characteristics

計畫類別： 個別型計畫          整合型計畫

計畫編號：NSC89-2212-E-002-079-

執行期間：民國 88 年 8 月 1 日至民國 89 年 7 月 31 日

計畫主持人： 黃光裕

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系

中華民國八十九年九月四日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

計畫名稱：智慧型電磁式致動器之開發與特性研究

Development of A Smart Electromagnetic Actuator And Research on Its Characteristics

計畫編號：NSC89-2212-E-002-079-

執行期限：自民國 88 年 8 月 1 日至民國 89 年 7 月 31 日

主持人：黃光裕 國立臺灣大學機械工程學系

## 一、中文摘要

本計畫之主要研究目的是以模組化設計方式將致動與位移感測功能整合於單一元件之智慧型電磁式致動結構，使其能夠擔任各式磁浮任務。首先以實體模型實驗方式開發出智慧型電磁式致動結構，並將其安置在所開發之單自由度磁浮軸承系統中，使其擔任主動軸向軸承的工作。運用實驗測試與有限元素分析方法進行系統識別工作，配合數位信號處理器 (DSP) 電腦控制程式與控制電路，以達成穩固的磁力懸浮旋轉；並對磁浮軸承系統進行各種特性測試包括轉速、負載性、剛性、偏擺、熱損耗與能量效率等。所開發之智慧型電磁式致動器有幾項異於傳統的特性：(1)整合致動與感測之智慧型致動結構；(2)極富應用彈性之模組化設計；(3)強力永久磁石配合低磁漏磁迴路設計提昇負載功率比值，而不需外加散熱系統；(4)大磁致動間隙適用於特殊環境狀態。

**關鍵詞：**模組化、智慧型結構、電磁致動器、永久磁石、磁浮軸承、自動控制

## Abstract

The aim of this project is to develop a smart electromagnetic actuator with actuating and position sensing function integrated into a single element, and its modular design can be applied to different kinds of magnetic levitating areas. According to the results of a series of experimental testing a smart actuator is developed, and it works as an active axial bearing in an 1-dof magnetic bearing system. The system identification is done by using experimental testing and finite element analysis. The implement of the digital signal processor DSP based controller

achieves the stable levitating function. Finally performance testing including rotating speed, load capacity, bearing stiffness, vibratory displacement, thermal loss and energy efficiency is carried out. There are several characteristics, which differentiate this magnetic levitation module from its traditional counterparts: (1)integrating actuating and position sensing function into a smart structure, (2)modular design allowing different kinds of application, (3)strong permanent magnet in low-leak magnetic loop increasing load power ratio without additional heat system, and (4)big actuating gap which make application in special environment possible.

**Keywords:** modular design, smart structure, electromagnetic actuator, permanent magnet, magnetic bearing, automatic control

## 二、計劃緣由與目的

電磁作用原理由於其多項優點與特性，也能一再隨著科技發展而接受與完成各種新的具有挑戰性任務，從大型磁浮車輛至微小透鏡對焦系統都能察覺它的存在。電磁作用原理在致動功能佔有重要地位，但如何與量測器結合在一起以完成有效率的微小化回饋控制系統，則是可以努力專研之課題。由於位移量測設備之硬體與週邊控制器之大體積，往往不適用於直接運用在小型化裝置中。位移量測器微小化是絕對有其必要性。霍耳元件是以半導體製程製成之體積微小磁場量測元件，目前已廣泛用在磁場、電流、角度與轉速量測上。經由適當能量轉換位移變化也是可以藉由磁場變化量測得，霍耳元件也就可以

作為非接觸式位移量測器；除此外霍耳元件也具有極佳動態特性，一般都可以量測頻率 20 kHz 以下之磁場變化。再與電磁式致動器隔空傳導磁能之特性結合在一起，必定能使電磁作用原理發揮得淋漓盡致。功能整合還可以使整體體積更為緊緻，並有利於模組化系統之開發。本研究計畫之主要目的在開發一個兼具位移量測功能與致動功能於一體之智慧型電磁式致動器。位移量測功能將採用霍耳感測元件(Hall sensor)，藉由磁場強度之變化來量測作用元件與致動元件之間位移變化量。致動功能則採取電磁作用原理，利用通電流之線圈所產生磁能隔空傳導至作用元件上。系統特性如位移感測精度、電磁力、位移精度與動態特性等也將深入探討與分析，以作為進一步系統最佳化設計之依據。

### 三、結果與討論

將電磁式致動器與霍爾感測器相互搭配，開發出智慧型磁浮模組，前後陸續完成四代設計：訊號補償式設計、訊號補償式設計、改良式口字形迴路設計與對稱迴路磁場導引式設計。對稱迴路磁場導引式之設計結構如圖 1 所示，整體為軸對稱型設計，使得磁浮轉子可以作平順的旋轉運動，當磁浮定子與磁浮動子同軸運轉時整體磁阻為最小，所以相吸引狀態下磁浮轉子擁有徑向穩定性。又在動子與定子達成封閉磁迴路以降低磁漏，並加入強力釹鐵硼磁石以增加磁通密度，進而增加磁力並提昇效率。配合非導磁材料以避免致動磁場影響霍爾 IC，將大部分磁力線導引至外圍，使動子的位移能夠由中央的霍爾 IC 精確量測得。

霍爾 IC 之小感測面積  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ ，符合緊緻結構的需求；再加上優良訊號靈敏度與線性度十分適於動子的位移量測。然而霍爾 IC 高雜訊與溫度飄移問題必須在訊號處理中加以克服改善。霍爾輸出是屬於小類比訊號，為了提昇訊號敏感度必須將訊號作千倍放大，在後續控制電路則須加入適當濾波器以消除訊號放大與處理所產生之高頻雜訊。由於致動器與感測器整合

在同一元件上，線圈之熱損耗會直接影響感測器，降低致動功率才能有效改善熱飄移效應。

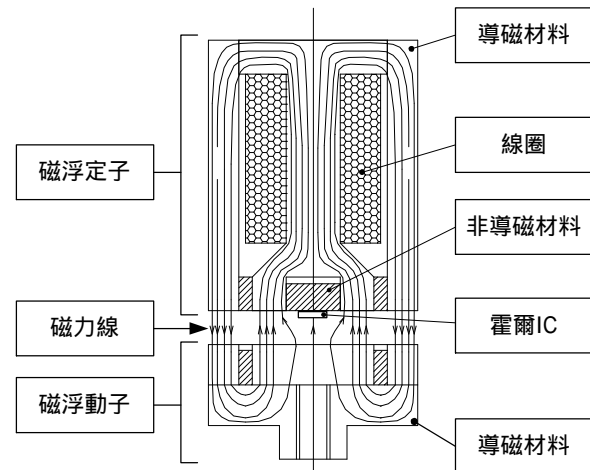


圖 1：對稱迴路磁場導引式之設計結構。

經過多次實驗測試求得較佳線圈參數，致動線圈之線徑為 0.4mm，線圈電阻值為  $5\Omega$ ，電感值約 20mH，匝數  $N$  為 750 匝。功率放大器之最大電流輸出為 3A，所以磁動勢  $NI$  極值為 2250A。配合功率放大器的穩態工作電流設定在 0.2A，線圈之平均熱功率僅為 0.2W，極低發熱量不需要外加散熱系統冷卻。並以實驗測試方式確定其穩定區範圍、靜態負載與各種時域響應等特性。為探討智慧型電磁式致動器之整體特性，作了一系列系統識別實驗，其特性分別如圖 2 與圖 3 所示。經過實際懸浮實驗，發現其具有幾項特性：(1) 穩定區寬廣，可輕易達成穩定磁懸浮。(2) 致動間隙大，可承載大負載。(3) 動子可作平順旋轉運動。(4) 低功率消耗與發熱，可在無外加冷卻系統的條件下達到長時間穩定懸浮。

計畫中並設計一套單自由度磁浮軸承系統，將所開發智慧型磁浮模組擔任其主動軸向軸承的任務，以便對其性能進行動態測試。單自由度磁浮軸承系統共包括五個子系統：軸向主動磁浮軸承、徑向被動磁浮軸承、旋轉主軸、旋轉致動器、和測試平台。

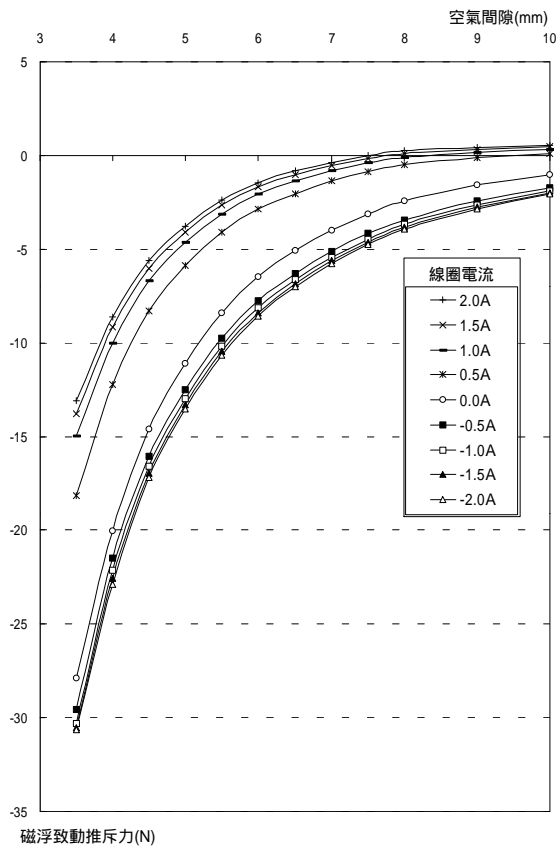


圖 2：不同線圈電流量下致動間隙對致動排斥力的影響。

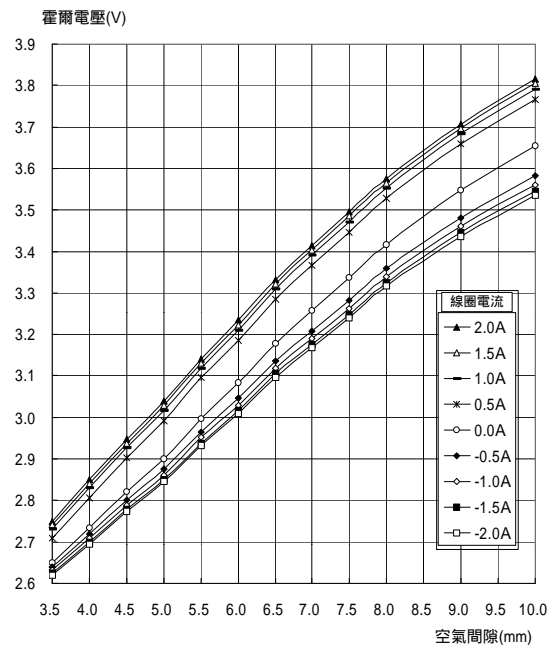


圖 3：不同線圈電流量下致動間隙對霍爾電壓的影響。

旋轉致動器以馬達帶動磁耦之方式非接觸式傳遞扭矩予旋轉主軸，使其能夠懸

浮旋轉。測試平台用於量測旋轉主軸的各種運動特性。設備總組合圖如圖 4 所示，圖 5 為推導得之系統數學模型之方塊圖。磁浮軸承系統而言暫態響應相對於穩態響應來得重要，所以採用正比-微分控制法則 (PD control)，可以有效地使磁浮軸承系統達成穩定懸浮旋轉，圖 5 中控制器的轉移函數則設定為  $C(s) = K_D s + K_P$ 。加大正比參數  $K_P$  可以減小穩態誤差而提高系統剛性；而加大微分參數  $K_D$  可以減小超越量 (overshoot) 而提升暫態響應。選定正比參數  $K_P=15$ ，微分參數  $K_D=0.1$ ，低通濾波器截止頻率為 213Hz。

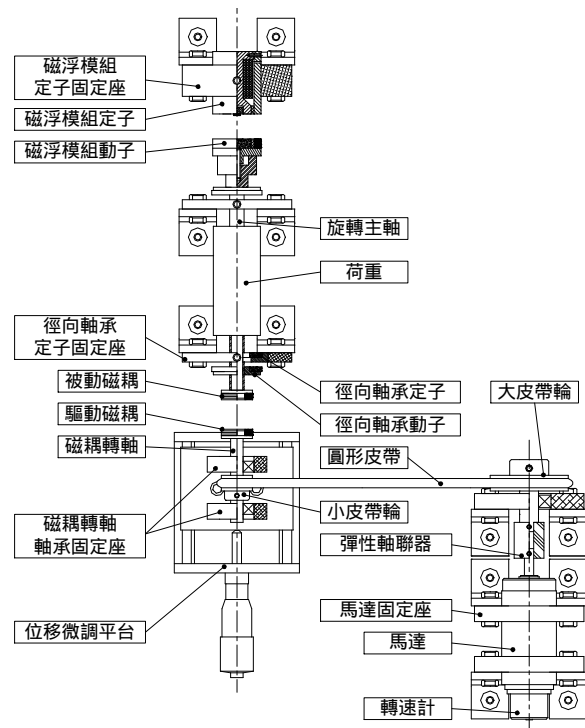


圖 4：磁浮軸承設備總組合圖。

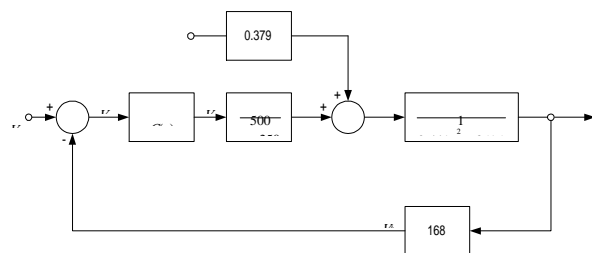


圖 5：磁浮軸承系統數學模型之方塊圖。

### 負載與熱損耗功率

最大懸浮質量 3kg 時，磁浮致動間隙小於 3mm，懸浮質量並可作 10 rpm 低速慣

性轉動，線圈之溫升僅為 4 ，線圈電流恆小於 0.1A，其功率小於 0.05W，證實所開發磁浮模組設計可達成近零功率高荷重磁浮之目標。

#### 轉速與徑向偏移

由於旋轉主軸系統未經過動平衡處理，而且各軸承系統有裝配上的誤差，所以隨著轉速增加，主軸的徑向偏移也會隨之增加，在加速測試過程中，主軸徑向偏移與轉速關係如圖 5.2 所示。最大轉速約為 284 rpm ( 29.74 rad/s )，在 300rpm 的轉速以下，最大偏移量約為 0.3mm。

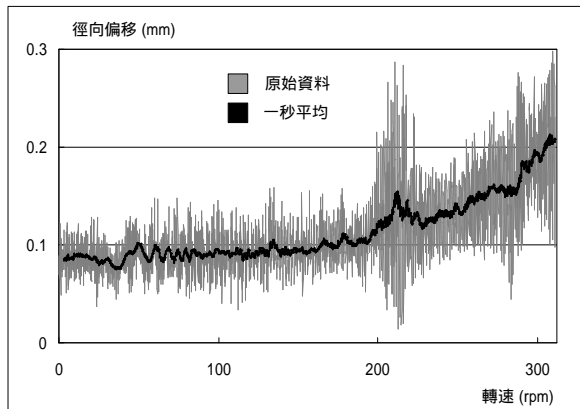


圖 6：徑向偏移與轉速關係。

#### 軸承軸向剛性

磁浮模組配合控制器產生使系統穩定的正彈性係數，以克服兩組徑向軸承所產生使系統不穩定的負彈性係數。磁浮軸承系統之平均軸向剛性為 1.78 N/mm。

#### 四、計畫成果自評

歷經多次測試實驗與結構改良，開發出對稱迴路磁場導引式智慧型電磁式致動器。動態特性方面，在無外加負荷情況下 1.16 kg 轉子最高轉速可達 300 rpm，軸承軸向剛性為 1.78 N/mm，轉子最大偏移半徑為 0.3mm，磁浮致動間隙為 5mm。靜態特性方面，在轉子靜止的情況下磁浮模組最大負載最高可達 3 kgw，磁浮致動間隙為 3mm，線圈電流不超過 0.1A，最大功率消耗不超過 0.05W，最大溫升為 4 。綜觀本研究在學術及工業之貢獻如下：

1. 成功地將致動與位移感測功能整合於單一元件中，形成智慧型電磁式致動器

結構。

2. 模組化設計使所開發之裝置能適用於多類型的磁浮需求。
3. 近零功率消耗能提供優良靜態負載能力。
4. 大磁浮間隙設計適用於特殊環境狀態下之磁浮需求。
5. 藉由所開發的軟體程式可進行系統識別和調整控制參數。
6. 建立一套單自由度磁浮軸承系統化設計開發與測試流程。

本研究計畫如原預期規畫完成智慧型電磁式致動器之設計與製作，以各種實驗測試方式完成必要特性測試，同時也推導出系統數學模型能夠相當有效且準確模擬運動特性與控制參數之選取。

#### 五、參考文獻

- [1] Jung V., Magnetisches Schweben. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [2] Beam J.W., High Rotation Speeds. J. Appl. Phys., 8(1937), pp.795-806.
- [3] Fremerey J.K., Kabelitz H.P., Turbomolecular-Vajumpumpen mit einen Neuartigen Magnetlagerung Vakuu-Technik v.38 n. 1-2(19-22), Feb. 1989.
- [4] Ogawa K., Horiuchi Y., Fujii N., Calculation of Electromagnetic Forces for Magnetic Wheels, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 33, No. 2, 1997, pp.2069-2072.
- [5] Sobotka G., Lange R., Characteristics of a Magnetic Rotor Bearing for Active Vibration Control. Conf. On Vibrations in Rotating Machinery, Instn. of Mech. Emgrs., Cambridge, Sept. 1976, C239/76.
- [6] Marinescu M., Dauermagnetische Radiallager. Firmenschrift, Marinescu IngBuero fuer Magnettechnik, Frankfurt, 1982.
- [7] Boden K., Wide-Gap, Electro-Permanentmagnetic Bearing System with Radial Transmission of Radial and Axial Forces. In Proc. First Intl. Symp. Magnetic Bearing, ETH Zuerich, May

- Springer Verlag , Berlin , 1988.
- [8] Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A.,  
Active Magnetic Bearings ,  
Hochschulverlag AG an der ETH  
Zuerich , 1994, pp92, pp209.
  - [9] 黃忠良，磁懸浮與磁力軸承，復漢出  
版社，1994。
  - [10] 王以真，實用磁路設計，全華科技圖  
書，1995。
  - [11] 鄭振東，實用磁性材料，全華科技圖  
書，1999。
  - [12] 谷腰欣司，磁性感測器及其使用技  
術，建興出版社，1998。
  - [13] 彭啟琮、李玉柏、管慶，DSP 與即時數  
位信號處理，儒林圖書公司，1996。
  - [14] 孫士牧，小型磁浮軸承之設計與特性  
研究，國立台灣大學機械工程學研究所  
碩士論文，1999。