

內藏式磁浮高速主軸之研發 (II)  
The research and development of high speed spindle  
with active magnetic bearing (II)

計畫編號：NSC 88-2212-E-009-034

執行期限：87年8月 - 88年7月

主持人：李安謙 E-mail: [aclee@cc.nctu.edu.tw](mailto:aclee@cc.nctu.edu.tw)

執行單位：交通大學機械系

一、中文摘要(關鍵詞：磁浮軸承、徑向磁浮軸承、軸向磁浮軸承、磁浮主軸)

本計畫為二年期計畫之第二年計畫，目標在完成一內藏式磁浮高速主軸之設計、特性分析以及穩健控制器、力量估測器之研發，其中，吾人是以純電磁鐵式磁浮軸承為主軸支撐之架構。

在第二年計畫中，我們完成之項目有：(1)系統判別；(2)穩健控制器之設計；(3)力量估測器之設計。藉由原型機的理论與實驗分析，我們希望能提供更多資訊，以作為工業界應用於內藏式高速磁浮主軸之基礎。

英文摘要(Keyword: Magnetic bearings, Radial magnetic bearings, Thrust magnetic bearings, High speed spindle with magnetic bearings)

This project is the second part of two-year project. The aims of this project are to design a upright type 5-DOF high speed spindle with magnetic bearings, acquire and analysis the characteristics of the magnetic bearings, design the robust controller and force estimator.

In the year, we finish the following investigations: (1) the identification of magnetic bearing system, (2) the design of the robust controller, (3) the design of the force estimator . The implementation of upright type 5-DOFs high speed spindle with

magnetic bearings will be investigated in the project. We hope that this project can be the base of industrial application about high speed spindle.

二、計畫緣由與目的

國外對磁浮軸承之研究起步甚早，目前已實際應用在工具機、高速主軸、光學掃描器、渦輪發電機、真空幫浦等方面。隨著航太工業、精密機械列入重點科技，高速銑床、高速主軸的研發已是提升精密零組件自製能力關鍵之所在。雖然目前有高速滾柱軸承使用於高速主軸，但主動式磁浮軸承對於高速轉動主軸所產生之振動、噪音等問題可以一併解決，此外因為主軸不會和軸承接觸，傳統接觸式軸承因摩擦所產生污染的現象，在磁浮軸承中也不會發生。這些優點是高速滾珠、滾柱軸承所沒有的，因此在某些場合下，如工作環境為無塵室，內藏式磁浮主軸仍是選擇的對象之一。本計畫之目的即在沿續以往多年來針對轉子系統的動態特性研究、純電磁鐵磁浮軸承之設計經驗以及控制理論之發展，並輔以工業界常用之內藏式主軸，以磁浮軸承取代滾珠、滾柱軸承，發展一組適用於切削的內藏式高速磁浮主軸，並為未來工業上使用提供一設計參考。

三、研究方法及成果

根據第一年之發展，我們進行系統鑑別，首先我們利用頻譜分析儀求出閉迴

路PD控制系統之頻譜圖，如圖一，藉由這頻譜圖，我們可求出系統參數值，理論與實驗值如表一、表二，由表我們發現  $k_i$ 、 $k_d$  比理論值小，為這是因為磁漏之故；而電感值比理論值大，其原因在於測試頻率不同及測試之工作點(由偏電流決定)不同，電感值也不同，而理論值卻和頻率無關，所以和實驗結果不同；最後感應反電動勢係數部份，則是因為計算上的誤差造成實驗結果之差異。

其次利用表二之結果以及QFT控制理論，我們進行穩健控制器之設計，控制架構圖如圖二。QFT控制器設計結果如下：

大軸承：

$$k_1 = 1.4798 + 153.9 / (s / 0.1 + 1) \quad (1)$$

小軸承：

$$k_2 = 2.206 + 207.8 / (s / 0.1 + 1) \quad (2)$$

在偏心力補償部分，我們將偏心力模型建立成如下之型式：

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_0 \\ \dot{d} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ w^2 & -w^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_0 \\ d \\ \dot{d} \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此磁浮軸承系統動態方程式加上

偏心力模型可建立下列之動態方程式：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{d}_0 \\ \dot{d} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{4k_d}{m} & 0 & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & w^2 & -w^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ d_0 \\ d \\ \dot{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4k_i}{m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i \quad (4)$$

$$y = [g_s \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ d_0 \\ d \\ \dot{d} \end{bmatrix}$$

藉由這個模型，搭配Luenberger於一九七一年所提出的觀測器理論[1]於數位系統的應用，以及Utkin於一九九六年所整理的數位式可變結構觀測器[2]，我們可以得到不錯的抑制效果，系統架構圖如圖三，實驗結果如圖四至圖六。

#### 四、結論與討論

在本次研究中，經由磁力線推導、五軸磁浮軸承本體之設計、動態方程式推導、穩定性分析到動態特性之模擬，提供了一系列有關於磁浮軸承設計時，可供參考之資料。而在第二年的計畫中，我們完成下面事項：

- (1) 系統判別。
- (2) 穩健控制器之設計。
- (3) 力量估測器之設計。

基於這些研究對於磁浮軸承特性有進一步之瞭解，也更能掌握磁浮軸承系統。

#### 五、參考文獻

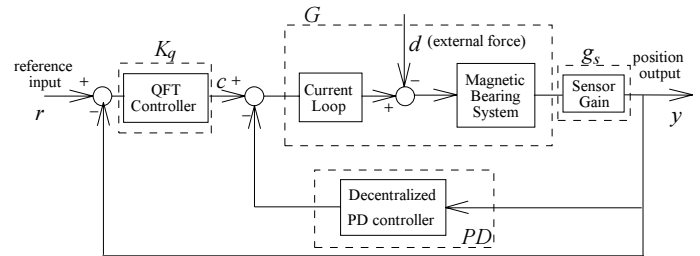
1. D.G.Luenberger, "An Introduction to Observers," IEEE Trans. Auto. Control, Vol.AC-16, No. 6, pp.594~602, 1971.
2. Vadim Utkin, "On Variable Structure Observers," IEEE International Workshop on Variable Structure Systems, pp. 193~198, 1996.
3. M. Fumio, K. Hidehiko, "Fundamental Equation for Horizontal Shaft Magnetic Bearing and its Control System Design," Electrical Engineering in Japan, Vol. 101, No. 3, pp. 123-130, 1981.
4. M. Fumio, K. Mamoru, and T. Yoshimi, "Design Method of Horizontal Shaft Attractive Controlled Magnetic Bearing and Its Characteristic," Electrical Eng. in Japan, Vol. 103, No. 3, pp. 130-137, 1983.

5. M. Takeshi, and H. Toshiro, "design of the Control System of Totally Active Magnetic Bearing- Structures of the Optimal Regular," Int. Symposium on Design and Synthesis, pp. 534-539, July 11-13, 1984.
6. K. D. Reinig, A. A. Desrochers, "Disturbance Accomodating Con-trollers for Rotating Mechanical Systems," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, pp. 24-31, March 1986.
7. Rene Larsonneur, Design and Control of Active Magnetic Bearing Systems for High Speed Rotation, Offsetdruckerei AG, Zurich, 1990.
8. D. Pang, J. A. Kirk, and C. Huang, "Design Optimization for Magnetic Bearing," Proceedings of the 26th Intersociety Energy Conversion Engineering, Conference - IECEC '91, Boston, MA, USA, pp. 186-191, Aug. 4-9, 1991.
9. K. Youcef-Toumi, S. Reddy, "Dynamic Analysis and Control of High Speed and High Precision Active Magnetic Bearings," Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 114, pp.623-633, Dec. 1992.
10. D. K. Rao, G. V. Brown, P. Lewis, and J.Hurley, "Stiffness of Magnetic Bearings Subjected to Combined Static and Dynamic Loads," Trans. of ASME, J. of Tribology, Vol. 114, pp.785-789, Oct. 1992.
11. 范仲宙, "考慮實際性能限制之磁浮軸承最佳化設計," 國立交通大學碩士論文, 1993.

## 六、圖表

表一 磁浮軸承參數理論值

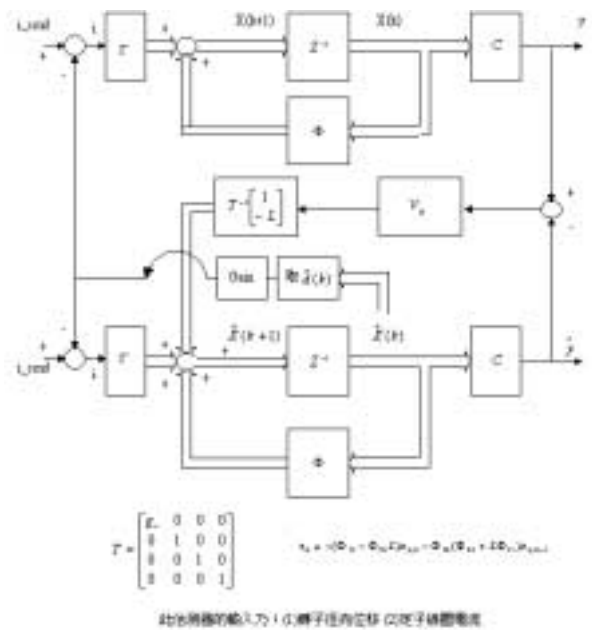
	理論值 $k_i$	理論值 $k_d$	理論值L
大軸承x軸	1842.2	14753690	0.115
大軸承y軸	1838.3	14767000	0.115
小軸承x軸	697.5	5435091	0.045
小軸承y軸	704.8	5520681	0.045



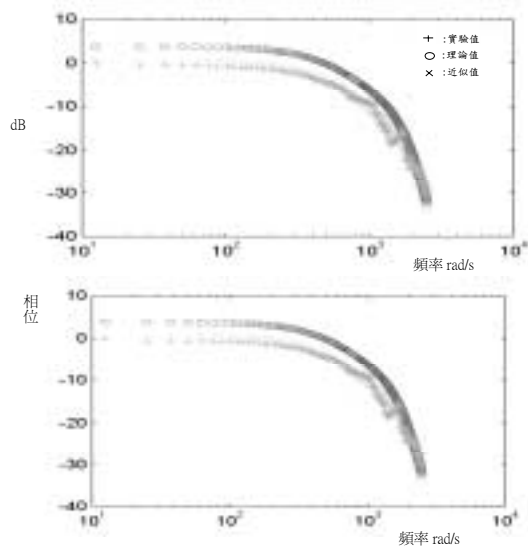
圖二 控制架構圖

表二 磁浮軸承參數實驗值

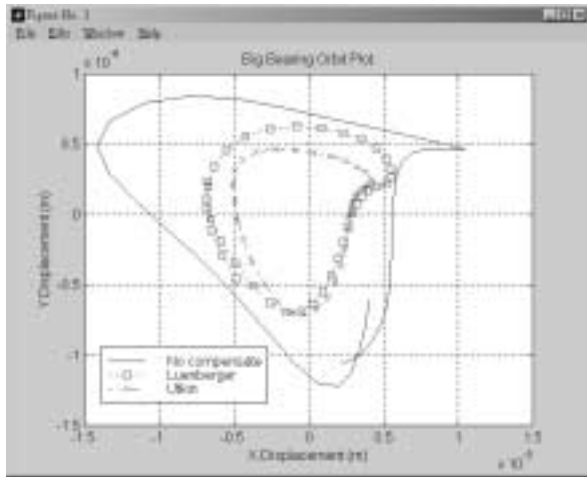
	實驗值 $k_i$	實驗值 $k_d$	實驗值L	實驗值 $k_b$
大軸承x軸	1537	11198485	0.118	633.9
大軸承y軸	1337	9392742	0.158	658.5
小軸承x軸	529	3994283	0.046	1591.6
小軸承y軸	440	3314708	0.051	1202.6



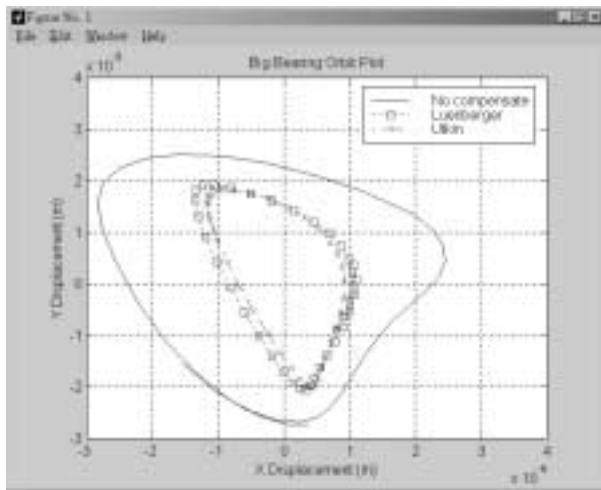
圖三 估測器與系統架構圖



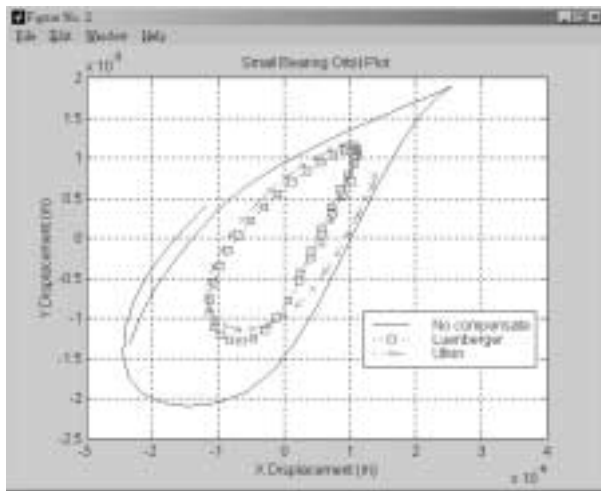
圖一 磁浮軸承之頻譜圖



圖四 估測器抑制效果比較  
(1200RPM)



圖五 估測器抑制效果比較  
(3900RPM)



圖六 估測器抑制效果比較  
(6300RPM)