

內藏式高速磁浮主軸及其監控系統之研究 (1/3)

The research of high speed spindle with active magnetic bearing and its monitoring system (1/3)

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-047

執行期限：88年8月 - 89年7月

主持人：李安謙 E-mail: aclee@cc.nctu.edu.tw

執行單位：交通大學機械系

一、中文摘要

本計畫為三年期計畫之第一年計畫，整個計畫之目標在完成一內藏式磁浮高速主軸系統之研發，其內容包含磁浮主軸、DSP控制板與PWM驅動器之整合設計與安全監控系統與調適三大目標。

本計畫第一年完成之工作項目包括：

- 1、磁路分析。
- 2、磁浮軸承主軸設計、製造。
- 3、多變元系統判別理論推導與模擬。
- 4、進行系統判別實驗並得出各個工作範圍之參數。
- 5、磁浮軸承靜態特性之量測。

關鍵詞：磁浮軸承、磁浮主軸、多輸入多輸出系統鑑別

Abstract

This project is the first part of three-year project. The aims of the entire project are to investigate and develop the active magnetic bearings (AMB) high-speed spindle, to integrate DSP controller and PWM current amplifier, and to monitor and self-tune system.

In the first year, we finish following work items:

1. magnetic flux analysis,
2. design and manufacture to the AMB high-speed spindle,
3. theoretic deduction of the MIMO system identification and its simulation,

4. performing the experiment of MIMO system identification and finding the parameters,
5. measurement of the static characteristics of magnetic bearing system.

Keywords: magnetic bearing, AMB spindle, MIMO system identification

二、計劃緣由與目的

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。本計劃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。此外，並發展一線上監控系統與適應控制調適法則以及外力估測器，此系統將進行溝通與監控，於系統發生異常狀態時，可以即時處理，增加系統之安全性。

三、研究方法及成果

根據第一年之發展，首先我們進行磁路分析，如圖一之簡化後之磁力線行進方式示意圖，我們得到電磁力

$$\begin{aligned} F_n &= 2f \cos r \\ &= \frac{\Phi_n^2}{\sim_0 A_g} \cos r \\ &= \frac{\sim_0 A_g N^2 I_n^2 \cos r}{(G - d \cos r)^2}, \quad n=1 \sim 8 \end{aligned} \quad (1)$$

where, Φ_n : 第 n 組繞線的磁通量
 N : 第 n 組繞線的有效匝數
 I_n : 第 n 組繞線的電流
 G : 氣隙
 d : 主軸在 MB 上的位移量
 $(|x_L|, |y_L|, |x_S|, |y_S|)$
 r : $1/2$ (兩磁極的夾角)
 \sim_0 : 空氣的磁導係數
 A_g : 磁極有效磁通面積
 $n=1 \sim 4$: 表大軸承的磁極組
 $n=5 \sim 8$: 表小軸承的磁極組

將把(1)式線性化後得

$$F_n \cong f + k_i \cdot i_n + k_d \cdot d, \quad n=1 \sim 8 \quad (2)$$

其次利用圖二與圖三之關係推导出動力方程式。

$$M\ddot{X} + D\dot{X} + KX = BU$$

where

$$X = [x_L \quad x_S \quad y_L \quad y_S]^T$$

$$U = [i_{1L} \quad i_{1S} \quad i_{2L} \quad i_{2S}]^T$$

$$M = \mathbf{I}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -a\zeta & a\zeta \\ 0 & 0 & -b\zeta & b\zeta \\ a\zeta & -a\zeta & 0 & 0 \\ b\zeta & -b\zeta & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K = \frac{-2}{mI} \begin{bmatrix} k_{dLx} I_a & k_{dSx} I_s & 0 & 0 \\ k_{dLx} I_s & k_{dSx} I_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{dLy} I_a & k_{dSy} I_s \\ 0 & 0 & k_{dLy} I_s & k_{dSy} I_b \end{bmatrix}$$

與 z 軸

$$m\ddot{z} = (2k_{dL} \cdot z + 2k_{dR} \cdot i_T) - mg \quad (4)$$

由於磁浮軸承系統為不穩定系統，如圖四所示，因此，我們必須先設計初步控制器加入系統，使系統趨於穩定，才能對系統進行參數鑑別，如圖五所示。電感值原本就是一個時變的係數，因此，對它做校正的工作是必然且需要的。而電流參數與位移參數皆為線性化係數，是為了將電磁力線性化所衍生出的修正係數，這過程中作了一些假設與忽略，因此，必須對這些係數作修正，使我們所假設的線性系統能更接近真實的非線性系統系統。系統參數鑑別步驟是先使軸不轉動，即 $\Omega = 0$ 時，這時(3)式可簡化成

$$MX + KX = BU \quad (5)$$

採以頻率響應函數(frequency response function)為量測的系統鑑別的方法，先利用 sine-wave-match 配合最小平方來估測加速度，並採用 Eykhoff 所提出的 Levy 方法，假設一個最小相位轉移函數並求其誤差 2-norm 最小值，即可估測所需參數。整個 MIMO 系統之系統鑑別關係圖如圖六所示，為求收斂至最佳解，再加上一個疊代的方法來改善。

完成磁浮主軸之製造後，磁浮軸承靜態參數如電流剛性與位移剛性特性可由圖七之測試架來測得。

四、結論與討論

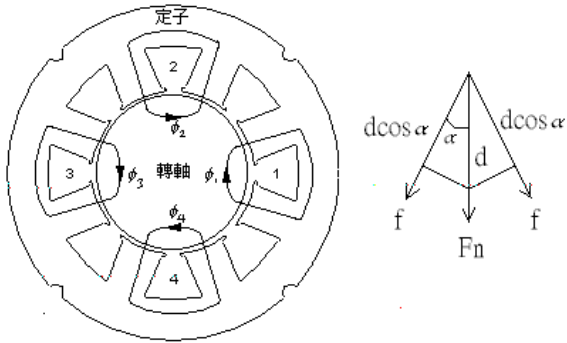
在第一年計劃中，重點將放在磁浮主軸之設計與製造以及系統鑑別。在過去的發展經驗中，磁浮軸承之關鍵問題為材質選擇問題，我們對此進行評估。此外，本計劃運用過去發展之經驗與現有之設備進行多輸入多輸出(MIMO)系統鑑別，以求得更接近實際之系統特性。在本次研究中，經由磁力線推導、五軸磁浮軸承本體之設計、動態方程式推導、穩定性分析到動態特性之模擬、靜態參數之量測等，提供了一系列有關於磁浮軸承設計時可供參考之資料

，使得控制器設計更精確，同時也可提供以後兩年計劃所需要之資訊。

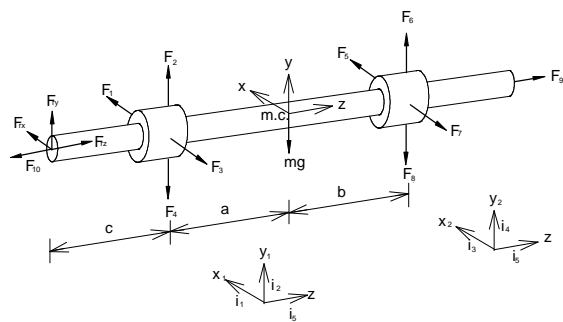
五、參考文獻

1. M. Weck and A. Koch, "Spindle-bearings system for high speed applications in machine tools," *Annals of CIRP*, Vol. 42, 1993.
2. T. Yoshimoto, "Eddy Current Effect in a Magnetic Bearing Model," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. MAG-19, No. 5, pp. 2097-2099, Sep. 1983.
3. T. Yoshimoto, "Effect of Nonlinear Permeability on Attractive Force and Counter Torque in a Magnetic Bearing Model," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-20, No. 5, pp. 1959-1961, Sep. 1984.
4. S. Inami, and M. Hisatani, "Dynamic Characteristic Simulation of Active Magnetic Bearings," *JSME Int. J., Series III*, Vol. 32, No. 4, pp. 612-617, 1989
5. B. Brunelli, D. Casadei, U. Reggiani, G. Serra, "Transient and Steady-State Behaviour of Solid Rotor Induction Machines," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 2650-2654, Nov. 1983.
6. K. R. Bornstein, "Dynamic Load Capabilities of Active Electromagnetic Bearings," *ASME Trans., Journal of Tribology*, Vol. 113, pp. 598-603, July 1991.
7. 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
8. 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.
9. C. Gahler, R. Herzog, "Identification of Magnetic Bearing Systems", *Proc. Of the 4th Int. Symp. On Magnetic Bearing*, pp. 293-298, 1994.
10. C. W. Lee, Y. H. Ha, and C. S. Kim, "Identification of Active Magnetic Bearing System using Magnetic Force Measurement", *Proc. Of the 4th Int. Symp. On Magnetic Bearing*, pp. 305-310, 1994.
11. C. Gahler, M. Mohler, and R. Herzog, "Multivariable Identification of Active Magnetic Bearing Systems", *Proc. Of the 5th Int. Symp. On Magnetic Bearing*, pp. 7-12, 1996.
12. A. C. Lee, Y. Kang and S. L. Liu, "Steady-State Analysis of a Rotor Mounted in Nonlinear Bearings by the Transfer Matrix Method," *Int. Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 6, 1993, pp. 479-490.
13. A. C. Lee, F. Z. Hsiao and D. Ko, "Performance Limits of Permanent Magnet Biased Magnetic Bearings," *Int. J. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series III*, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 783-794.
14. A. C. Lee, F. Z. Hsiao and D. Ko, "Analysis and Testing of a Magnetic Bearing with Permanent Magnets for Bias," *Int. J. of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series III*, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 774-782.
15. Rene Larssonneur, "Design and Control of Active Magnetic Bearing System for High Speed Rotation", *Offsetdruckerei AG, Zurich*, 1990.
16. 方崇智, 蕭德云, "過程辨識", 儒林出版社, 1993
17. C. K. Sanathanan, J. Koerner, "Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Complex Polynomials.", *IEEE Trans, Automatic Control*, Vol. 8, 1963.
18. 陳政原, "五自由度磁浮軸承支撐之高速主軸設計", 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 1996.
19. Hannes Bleuler, "Decentralized Control of Magnetic Rotor Bearing Systems", *Swiss Federal Institute of Technology, Zurich*, 1984

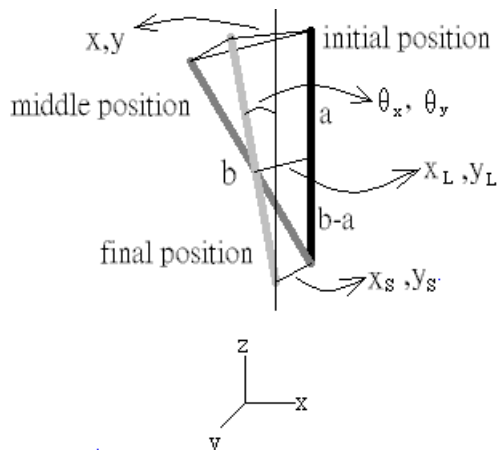
六、圖表



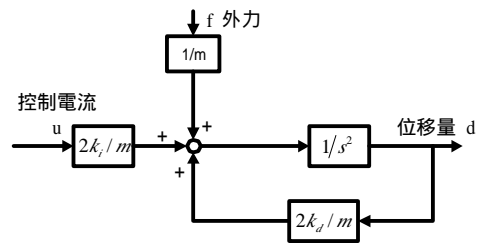
圖一 磁浮軸承簡化後之磁力線行進方式示意圖



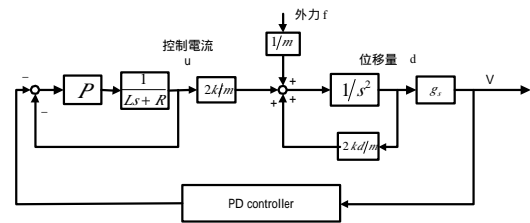
圖二 轉軸系統圖



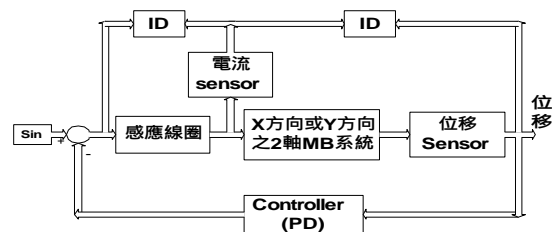
圖三 主軸位移與大小磁浮軸承幾何關係圖



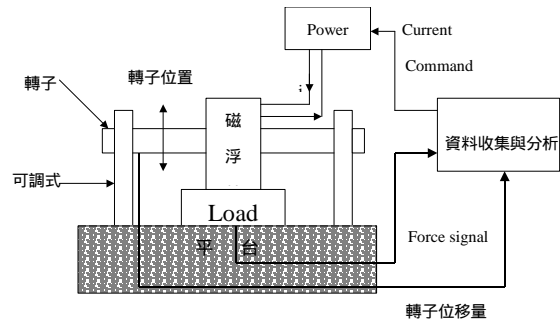
圖四 磁浮軸承任意軸之系統方塊圖



圖五 磁浮軸承系統加入電流控制驅動器與控制器之系統方塊圖



圖六 MIMO系統之系統鑑別關係圖



圖七 磁浮軸承測試架構示意圖