

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以 DSP 實現轉子之主動式振動控制系統

DSP Implementation of an active vibration control system for rotors

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-007

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 30 日

主持人：白明憲 國立交通大學機械工程學系

一、中文摘要

本研究著重的重點有兩個：第一個重點是自行設計出適合轉子系統的動圈式線性致動器，試圖以機電類比的方法來模擬出致動器的動態，並且藉由頻率響應的分析來決定相關機電常數，已制定出最佳的致動器規格。第二個重點是嘗試以 MIMO 多通道 Model-based Predictive Control 的方法來實現轉子主動式的振動控制，並且期望能結合線上即時的系統判別方法來達到系統的最佳控制架構與效果。現階段我們已設計出最佳之致動器並且製作完成完整系統。本研究提出的控制方法均用浮點數位訊號處理器 (floating-point DSP) 來加以實現，並以一轉子系統加上一個不平衡質量作為實驗用之振動源。在實驗中，我們所使用的控制方法有兩種：第一種是 Model-based Predictive control 再加上 LQG 回饋補償的混和控制架構。第二種方法則是屬於特殊前饋控制架構的 Generalized Predictive Control。由實驗的結果，我們發現根據這兩種控制方法所設計出來的控制器都能夠有效地抑制因為轉子不平衡所造成的振動。而且我們也成功地克服了轉子變轉速系統振動消除的問題。

關鍵詞：動圈式致動器、轉子、主動式振動控制

Abstract

In this paper, the research will be discussed into two parts that contain the electromagnetic actuator design and active

rotor vibration control scheme. First of all, we intend to implement the mechanical-electrical analogy method to simulate the dynamics of the actuator, and design an optimal linear electromagnetic actuator according to the analysis of frequency response that can apply in our rotor system. The proposed actuator operates primarily by means of electromagnetic interactions between a voice coil and a permanent magnet. The device is purposed to produce linear motions with large forces that are required in active rotor vibration control. In part II, AVC technique will employ Spatially feedforward and hybrid configuration as the major control structures. The multiple-input-multiple-output (MIMO) model-base predictive control algorithm that is applied the on-line parameter estimation and time-domain system identification both are employed for controller synthesis. The controller are implemented by using a digital signal processor (DSP). In experiments, we use two different control methods. One is the Model-based Predictive control with LQG feedback compensation which is hybrid structure, the others is the Generalized

Predictive Control which is spatially feedforward structure. The experiment results indicate that two methods both have high performance of the vibration attenuation that is caused by rotor unbalance. Furthermore, we also overcome the vibration attenuation of variable rotor speed system.

Keywords: actuator, rotor system, active vibration control

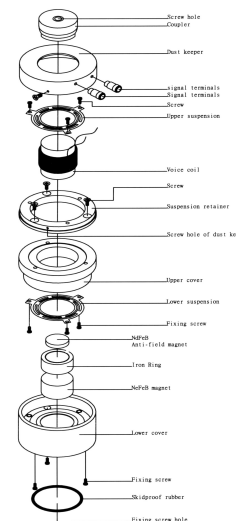
二、緣由與目的

機器中繞軸線旋轉的機件稱為機器的轉子，在許多的設備和機器中都可以看見，可說是運用範圍相當的廣泛。但是就不同轉速，不同的轉子都存在一個相同的問題，那便是都有不平衡問題的存在，在旋轉機械上不平衡是產生振動的主要因素，一旦產生了振動，便會對系統產生不良的影響，例如工具機的主軸便是一例；若主軸因為切削所引起的振動如果太大，便會嚴重影響精度。轉子不平衡可定義為轉子得質量分佈不均勻，可能是外型的不對稱，本身材質密度不均勻，安裝不對心，或是因為產生熱變形或磨損，所以我們的目的就是在於消除掉這不平衡的產生，以避免這些振動透過軸承傳遞到機台引起損壞，降低機械壽命和加工精度，更可避免因振動而產生的噪音。然而在傳統的方法中，大多都是經過動平衡的校正來處理這一類的問題。可是往往只要整個系統一有些許變動，便還要經過一次動平衡校正，這樣的方法是非常耗時間且耗人力。如何用現代的控制方法改善便成了這一類的問題焦點，也就是說如何運用線上即時的控制方式來平衡轉子，已成為了轉子振動控制的重要課題。

三、結果與討論

首先我們利用機電類比常數法所設計

出來的致動器，確實能夠符合我們的要求，並且有效率地應用在我們的轉子系統上。在結構上與眾不同的設計有三：1. 反磁式的結構，用來避免磁漏現象。2. 兩個環形懸吊器，用來確保線性運動的精準。3. 關鍵零組件可拆解，以便於維修保養。致動器的結構詳圖如下：



在轉子系統的振動消除研究方面，首先我們的轉子系統如附錄之圖一及圖二。在實驗中，我們所使用的控制方法有兩種：第一種是 Model-based Predictive control 再加上 LQG 回饋補償的混和控制架構。第二種方法則是 Generalized Predictive Control。由實驗的結果（錄於表一），我們可以得到以下結論：1. 我們發現根據這兩種控制方法所設計出來的控制器都能夠有效地抑制因為轉子不平衡所造成的振動。2. 我們成功地克服了轉子變轉速系統振動消除的問題。3. 其中 GPC 的控制方法雖然比較複雜，但是其控制的效果以及收斂的速度都比 MPC 要佳。

四、計畫成果自評

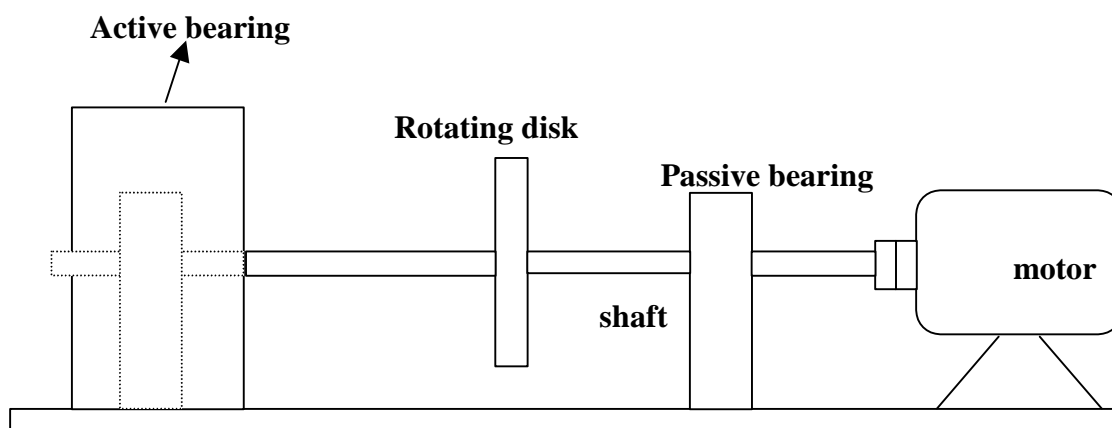
根據整個研究過程以及結果方面，我們知道，我們依照著整個計畫所規劃的流程以及目標進行努力。而且也如期地達成了所既定的目標。有關致動器的設計，經由我們的努力及巧思也成功地研發出來加以

應用，並且申請了專利。我們所提出的控制方法可以成功地解決轉子系統變轉速的問題，這個突破已經我們在轉子振動消除的問題更加跨進了一大步。我們也期望本次的研究能夠都登錄在國際的期刊。

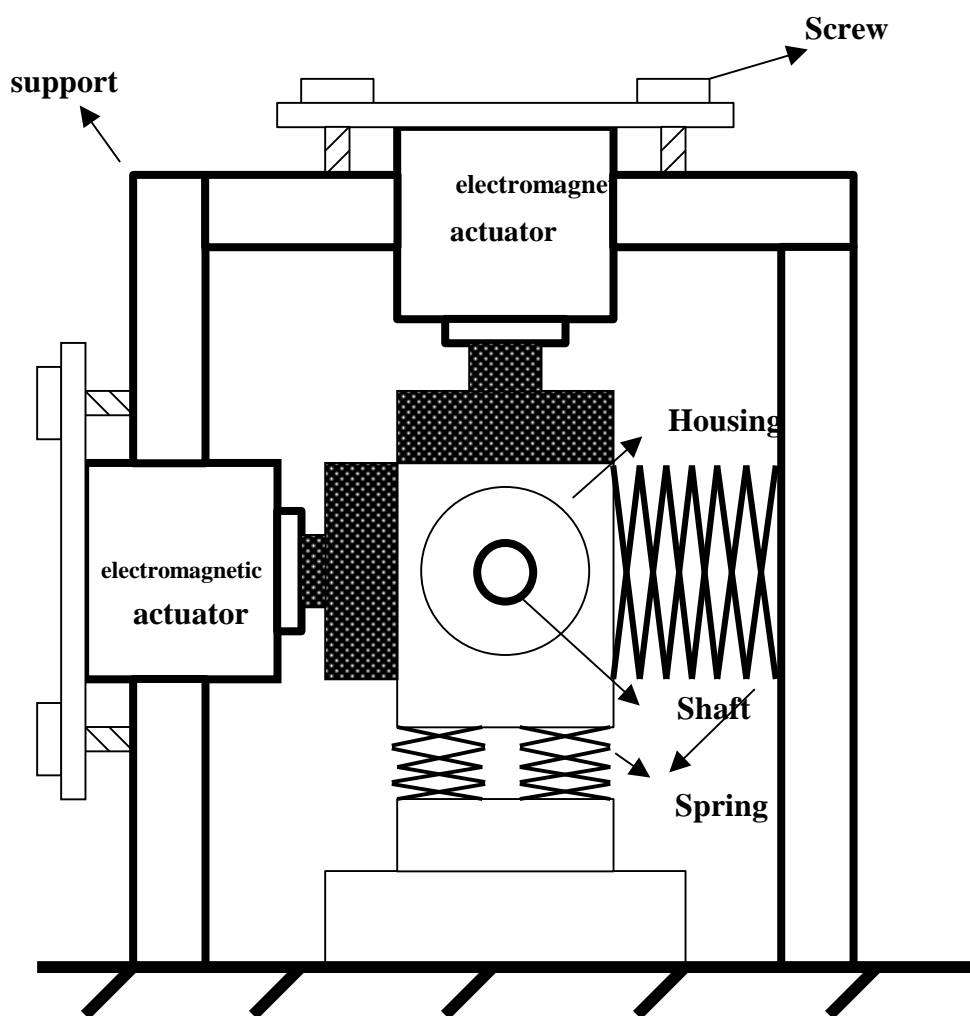
五、參考文獻

- [1] A. B. Palazzolo, R. R. Lin, A. F. Kascak, J. Montague and R. M. Alexander, " Test and Theory for Piezoelectric Actuator-Active Vibration Control of Rotating Machinery," ASME, J. Vib. Acoust., Vol. 113, pp. 167-175, 1991.
- [2] A. B. Palazzolo, R. R. Lin, A. F. Kascak, R. M. Alexander, " Active Control of Transient Rotordynamic Vibration by Optimal Control Methods," ASME, J. Vib. Acoust., Vol. 111, pp. 264-270, 1989.
- [3] A. B. Palazzolo, S. Jagannathan, A. F. Kascak, G. T. Montague, and L. J. Kiraly, Hybrid Active Vibration Control of Rotorbearing Systems Using Piezoelectric Actuators, " ASME, J. Vib. Acoust., Vol. 115, pp. 111-119, 1993.
- [4] C. R. Knospe, S. J. Fedigan, R. W. Hope and R. D. Williams, " A Multitasking DSP Implementation of Adaptive Magnetic Bearing Control " IEEE Trans. Contr. Syst. Tech., Vol. 5, pp. 230-237, 1997.
- [5] C. T. Chen, Linear System Theory and Design, Holt, Rin ehart and Winston, New York. Carlos E. Garcia, David M. Prett and Manfr ed Morari, " Model Predictive control Theory and Practices-a survey*, " Automatica, Vol. 2 5, No. 5, pp. 335-348, 1989.
- [6] D. W. Clarke and C. Mohtadi, " Properties of Generalized Predictive Control*, " Automatica, Vol. 25, No. 6, pp. 859-875, 1989.
- [7] D. W. Clarke, C. Mohtadi and P. S. Tuffs, " Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm*, " Automatica, Vol. 23, No. 2, pp. 137-148, 1987.
- [8] D. W. Clarke, C. Mohtadi and P. S. Tuffs, " Generalized Predictive Control-Part II. Extensions and Interpretations*, " Automatica, Vol. 23, No. 2, pp. 149-160, 1987.
- [9] E.F. Camacho and C. Bordons, Model Predictive Control in the Process Industry. Springer, 1995.
- [10] F. L. Lewis and V. L. Syrmos, Optimal Control, John Wiley and Sons, New York, 1995.
- [11] M. Q. Phan and J. N. Juang, " Deadbeat Predictive Control, " Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 1, pp. 25-37,1997.
- [12] M. Q. Phan and J. N. Juang, " Predictive Controller for Feedback Stabilization, " Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 21, No. 5, September-October ,1998.
- [13] R. M. C. De Keyser, PH. G. A. Van Der Velde and F. A. G. Dumortier, " A Comparative study of Self-adaptive Long-range Predictive Control Methods, " Automatica, Vol. 24, No. 2, pp. 149-163, 1988.
- [14] M. Lalanne and G. Ferraris, Rotordynamics Prediction in Engineering, John Wiley and Sons, New York, 1990.
- [15] K. J. Aström and B. Wittenmark, Computer Controlled System: Theory and Design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.

六、附錄



圖一、轉子側向視圖



圖二、轉子軸向視圖

表一、實驗結果摘要.

	AXIS	ATTENUATION (DB)		CONVERGENCE SPEED	PERFORMANCE	VARIABLE SPEED CONTROL
		50 Hz	40~50 Hz at 0.5 sec			
Fixed Hybrid MPC with LQG	x-axis	11.4	12.3	Very Fast	Medium	Yes
	y-axis	12.1	12.3			
Fixed Spatially Feedforward GPC	x-axis	24.3	/	Very Fast	Very Good	No
	y-axis	17.2				
Adaptive Hybrid MPC with LQG	x-axis	10.2	11.5	Fast	Medium	Yes
	y-axis	11.3	11.6			
Adaptive Spatially Feedforward GPC	x-axis	21.4	22.2	Fast	Very Good	Yes
	y-axis	20.8	21.9			