

動態平衡系統中電磁式補償控制系統
之控制研究與特性測試

執行期間：90 年 08 月 01 日至 91 年 07 月 31 日

共同主持人：

☐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 91 年 09 月 09 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

動態平衡系統中電磁式補償控制系統之控制研究與特性測試

Control Research and Performance Testing of Electromagnetic Compensating Control System in a Dynamic Balancing System

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-211

執行期限：90 年 08 月 01 日至 91 年 07 月 31 日

主持人：黃光裕 國立臺灣大學 機械工程學系

計畫參與人員：莊明聖、吳兆棋 國立臺灣大學 機械工程學研究所

e-mail : kyhuang@ccms.ntu.edu.tw

一、中文摘要

本研究計畫目標為設計開發高轉速小型轉子之動態平衡系統，為使其能夠適用於各種不同小型轉子型式與不平衡量，動態平衡系統中受測轉子之懸吊系統將採用以主動式與被動式整合之電磁式補償控制系統，使懸吊系統之剛性可以隨任務需求而自動調整。

關鍵詞：動態平衡、懸吊系統、剛性調整、電磁式補償控制

Abstract

The aim of this research project is to develop a dynamic balancing system for small high-speed rotor. For adapting different types of small rotors and unbalances an electromagnetic compensating control system will be applied to the suspension system for tested rotor. Consequently the stiffness of the suspension system can be automatically adjusted on demand.

Keywords: dynamic balancing, suspension system, stiffness adjustment, electromagnetic compensating control

二、緣由與目的

隨著科技與產業技術提昇，機器速度增加與輕薄短小為未來趨勢。速度之提昇使得轉軸因不平衡所造成之偏心力增加，

而輕薄短小使動平衡機具精度必須提高，所以動平衡量測儀器需具備更佳的解析精度與更高量測轉速為目前的發展方向。平衡技術在於改善旋轉體之質量分佈，使其旋轉慣性軸心線與旋轉支撐軸心線能夠重疊在一起使所有離心力達到平衡。平衡工作開始時，首先依轉動體外型與剛性分成剛性軸、半撓性軸、撓性軸等[1]，不同種類的轉軸其轉動特性相異，各有其不同的分析與計算方式，再者，依照轉動體長度與直徑比，將平衡方式分成靜平衡技術(Static Balancing)與動平衡技術(Dynamic Balancing)兩種，靜平衡技術又稱單面平衡(Single-plane Balancing)，適用於轉軸的長度與半徑比值小於 1 之轉動體（或稱為轉盤），僅量測轉盤在一個轉動平面上的振動量，經由計算後，施加一個適當質量於轉盤上適當位置來調整轉動體的質量分佈，使其殘留靜態不平衡量控制在一定範圍內；動平衡技術則稱為雙面平衡(Two-plane Balancing)，適用於轉軸的長度與半徑比值大於 1 之轉動體（或稱為轉軸），量測轉軸在兩個轉動平面上的振動量，經由計算後，施加兩個適當質量於轉軸上兩個量測面之適當位置來調整轉動體的質量分佈，使其殘留動態不平衡量控制在一定範圍內，動平衡技術至少要量測轉軸上兩個轉動面的振動量，才能使其旋轉慣性軸心線與旋轉支撐軸心線能夠重疊而達到平衡。

靜平衡之計算法則較為簡單，僅要量測一平面之振動向量即可找到修正質量大

小及方向，動平衡之計算法則較多樣且複雜，方法有反應轉子模態特性為主之模態平衡法(Modal Balancing)、特別重視個別不平衡量重疊效應之影響係數平衡法(Influence Coefficient Balancing)，以及綜合上述兩種方法優點所提出之合成平衡法(Unified Balancing Approach)。實際使用時，剛性軸採用影響參數平衡法，將兩個測試面的不平衡量影響視為線性加成；而撓性軸大都是採用模態平衡法，找出撓性軸在各種臨界轉速下的運動模態來加以分析[1]。經由計算所得之修正質量(Correction mass)，可以用施加或是去除的方式來平衡一待測轉軸，使轉軸之殘留不平衡量 U 減少到標準值以下， U 的定義是不平衡質量的大小乘以旋轉半徑，單位為 $\text{kg} \cdot \mu\text{m}$ 。

一般的動態平衡測試機大多為專用機，亦即僅適用某一種特定尺寸及平衡等級的轉軸，對於一超越適用範圍精度的轉軸進行量測將可能無法判定信號，對於製造精度不高的轉軸將可能因偏心量過高使振幅過大而造成撞擊而傷及測試機具。為了提昇量測的精準度，所以希望待測轉軸的支撐系統有較小剛性，支撐系統才能明顯反應出轉軸因轉動動態不平衡所導致的偏擺量；但為了增加機具的測試範圍，待測轉軸的支撐系統必須有較大之剛性，以承受等級不同轉軸之較大不平衡偏擺量，但是偏擺量測精度卻會因此下降。轉軸支撐系統之平行導引彈簧之剛性會影響振幅之表現，為兼顧上述兩種量測需求，所設計的動態平衡測試機必須可以調整支撐系統剛性。

三、結果與討論

在本研究中之動態平衡測試機中，轉軸支撐系統將與電磁式振動抑制系統配合，使支撐系統之剛性可以隨振幅大小而給以改變，以達到提昇不平衡量測試範圍之目的。而改變剛性的方法，又可分類為被動控制式與主動控制式。所謂的被動式控制指的是電磁鐵產生固定之電磁力，或是固定永久磁石間距直接加在在平行導引系統，藉由調整電磁鐵之電磁力或是永久

磁石之作用距離來改變剛性，其作用相當於並聯一具有可調剛性之彈簧。圖 1 顯示所設計的兩種被動式方案示意圖。在 a 組設計中，電磁鐵與永久磁石的空氣間距可以調整來找尋最佳之致動氣隙，而 b 組中，兩個永久磁石的間距能夠經由微調平台調整來改變其作用距離，進而改變磁力以達到剛性可調之功能。除了彈簧片剛性外，尚有電磁力或磁力所造成之等效剛性，兩者加成後即為振動系統的等值剛性。

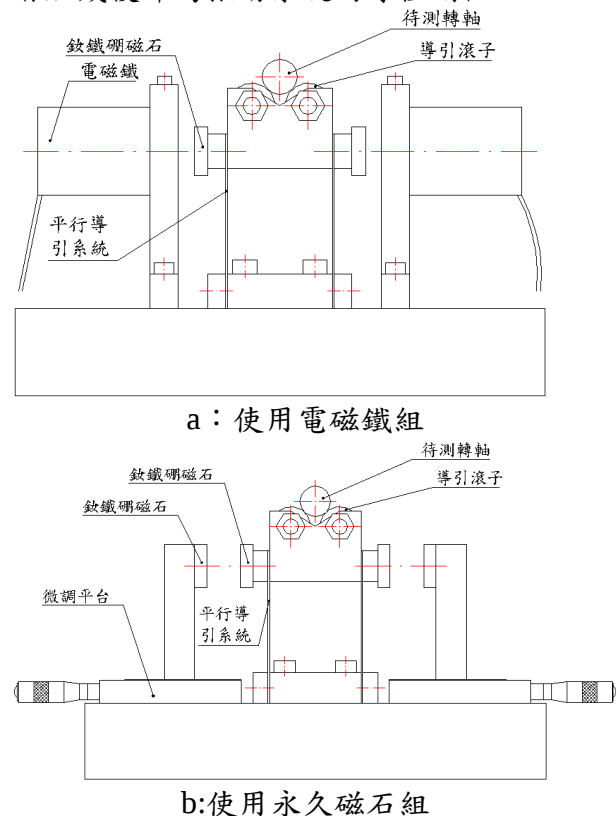


圖 1：電磁式振動抑制系統示意圖

而所謂的主動式控制，則是採用閉迴路控制來抑制振動，依據平行導引彈簧的振幅，來控制電磁鐵之磁力。電磁補償的振動抑制系統之先驅研究已由洪紹剛[9]與林康寧[10]完成，本研究將承襲其設計而運用在本實驗機上。主動式振動抑制系統之架構與運作，偏擺訊號採用不平衡量量測系統之輸出，並經由一組訊號調理電路進行濾波及輸出交流之振幅訊號，再經過電流控制器與功率放大器，使控制訊號變成功率用以驅動電磁鐵。一組兩個電磁鐵為了讓左右電磁鐵產生推拉電磁力，一個產生磁吸力拉回遠離的支撐系統，另一個產生磁斥力來斥開接近的支撐系統。永久磁

石與電磁鐵之間磁力的大小以及電磁力相對振動之延遲相角大小即決定了振動抑制之機制。

被動之振動抑制系統硬體設備較單純，僅要用一台穩定之電流供應器，藉由調整其輸出電流來改變四個電磁鐵（兩個一組）的電磁力，或是使用微調平台來改變永久磁石的間距。圖 2 顯示電磁鐵的細部設計，電磁鐵線徑為 0.4mm，繞線圈數為 500 圈。被驅動部分採以鈦鐵硼強磁性永久磁石，使系統得以較小的控制電流驅動，或是在較大的氣隙下操作。利用鐵心將磁力線導引至工作氣隙，使得繞線部分與被驅動部分有較良好的隔離，除磁力線通過外沒有其他交互作用如熱傳產生，亦不需額外的導引裝置。設計電磁鐵需配合適當的磁迴路設計以提昇電磁鐵效率，而電磁鐵與永久磁石之間空氣間隙、線圈控制電流、永久磁石類型與尺寸是決定可變剛性範圍大小的主要參數。

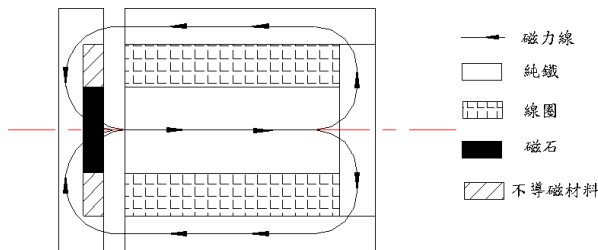
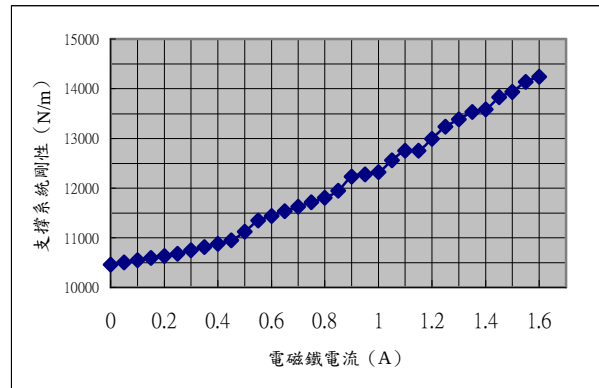
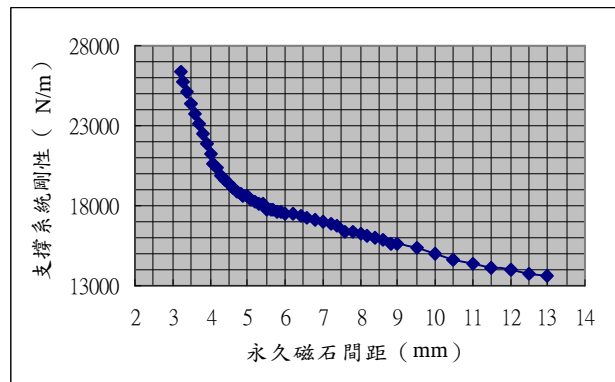


圖 2：電磁鐵磁迴路示意圖(含永久磁石時)

圖 3(a)顯示電磁鐵組中電流對支撐系統剛性之關係，圖 3(b)則是永久磁石間距對支撐系統剛性之關係。綜合電磁振動抑制系統之測試結果得知，在以提昇剛性來抑制振動振幅方面，採用兩組相斥之永久磁石之效果最凸顯，可以被動方式提昇剛性值達兩倍；或是以電磁鐵進行主動控制方式與定電流控制方式改變支撐系統剛性。以改變共振頻率來提高量測精度策略方法上，系統也可以採用兩組相斥之永久磁石達到更大剛性調整範圍。



(a)：電磁鐵電流對支撐系統剛性



(b)：永久磁石間距對支撐系統剛性

圖 3：支撐系統剛性改變方法

圖 4 顯示電磁鐵組安裝於轉軸軸向時，對於支撐系統上之永久磁石施以吸力之情形，圖 5(a)顯示在此姿態時，以 3mm 之永久磁石間距下改變電磁鐵電流，觀察其對於支撐系統剛性改變情形；圖 5(b)則顯示在定電流 1.5A 下改變永久磁石間距，觀察其對於支撐系統剛性改變情形。由圖 5(a)、(b)得知，以電磁鐵之電流大小及間距對支撐系統剛性的影響極不明顯，其剛性值皆約為 13100 N/m 左右，與原先支撐系統之測試數據相較差別甚小。

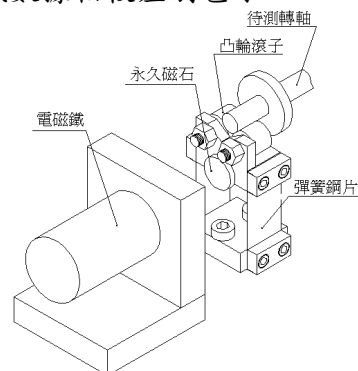
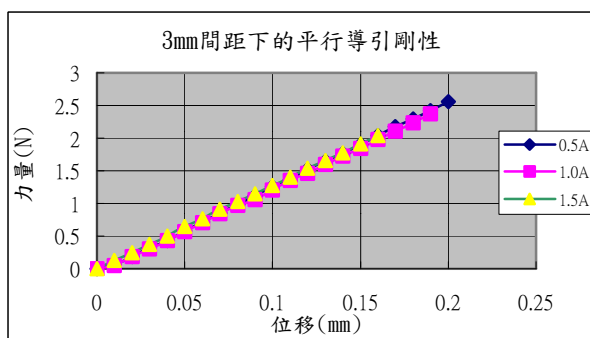
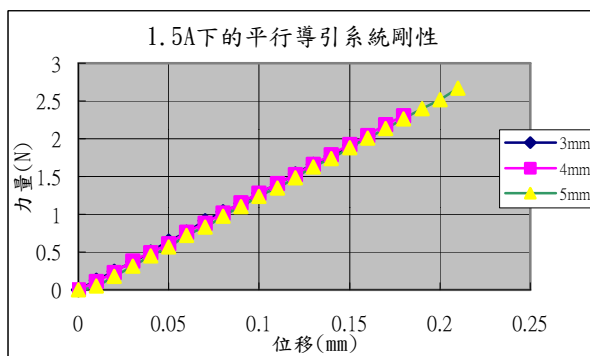


圖 4：電磁鐵於軸向對支撐系統剛性影響示意圖



(a)：電磁鐵電流對支撐系統剛性影響



(b)：永久磁石間距對支撐系統剛性

圖 5：轉軸軸向電磁鐵對支撐系統剛性影響

電磁鐵在增加磁力之作用下，系統之阻尼係數 λ 值並沒有明顯增加，故 ω_d 值與 ω_n 值依舊相當接近，而在鈹鐵硼磁石強能量密度作用下， k 值提昇很多，不過在振動系統增加兩個永久磁石質量的關係，系統共振頻率 ω_n 值改變約 40%。但是電磁鐵無法兼顧小工作氣隙的高電磁力與大工作氣隙的低磁吸力這兩種需求。綜合電磁振動抑制系統之測試結果得知，在以提昇剛性來抑制振動振幅方面，採用兩組相斥之永久磁石之效果最凸顯，可以被動方式提昇剛性值達兩倍；或是以電磁鐵進行主動控制方式與定電流控制方式改變支撐系統剛性。以改變共振頻率來提高量測精度策略方法上，也可以採用兩組相斥之永久磁石達到更大剛性調整範圍，而或是可以採用相吸引磁石組來調低剛性，進而降低共振頻率，不過在振幅過大時會有非線性的剛性變化，容易使系統不穩定發散。

四、計畫成果自評

本研究計畫如原預期規畫，以設計分法、分析與測試實驗等方式完成設計開發

出高轉速小型轉子動態平衡系統中之電磁式補償控制系統。轉子之驅動特性測試，轉軸轉速可達 10000rpm，動態平衡系統可以用於測試長度在 100 至 150 mm，外徑 10 至 25 mm 之轉軸。電磁式振動抑制系統以兩組線徑 0.4mm、500 匝的電磁鐵，對安裝在平行導引系統上之鈹鐵硼磁石進行主動式控制與定電流控制方式，或是以被動式提昇轉軸支撐系統之剛性；可在較小剛性情形下，忠實地反應轉軸因轉動動態不平衡所導致的偏擺量，並在振幅過大時，轉軸對測試機台的撞擊及損壞，兩情況兼顧之；對於不同尺寸的轉軸給予適當的轉軸支撐系統剛性。

五、參考文獻

- [1]Ehrich, F. F., *Handbook of rotordynamics*, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [2]Darlow, M. S., *Balancing of high-speed machinery*, Springer-Verlag, New York, 1989.
- [3]Federn, K., *Auswuchttechnik*, Springer Verlag, Berlin, New York, 1977.
- [4] Rao, J. S., *Rotor dynamics*, Wiley, New York, 1991.
- [5]Goodwin, M. J., *Dynamics of rotor bearing systems*, London, Boston, Unwin Hyman, 1989.
- [6]Vance, J. M., *Rotordynamics of Turbomachinery*, New York, Wiley, 1988.
- [7]Tongue, B. H., *Principles of Vibration*, Oxford University Press, New York, 1996.
- [8]德國 SCHENCK 公司所研發之動平衡機開發概念介紹, *Balancing of small light-weight rotors and complete assemblies*.
- [9]洪紹剛，智慧型磁浮模組之設計與研究，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，2000。
- [10]林康寧，電磁式振動控制系統之設計開發與特性研究，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，2001。