

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

高轉速小型轉子動態平衡系統之開發研究

計畫類別： ☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC89 - 2212 - E - 002 - 089 -

執行期間：89 年 08 月 01 日至 90 年 07 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 90 年 09 月 19 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高轉速小型轉子動態平衡系統之開發研究

Research and Development of A Dynamic Balancing System for Small High-Speed Rotor

計畫編號：NSC89 - 2212 - E - 002 - 089 -

執行期限：89 年 08 月 01 日至 90 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：林康寧、莊明聖 國立臺灣大學 機械工程學研究所

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，輕薄短小是機器設備勢之所趨，機器動力與速度也同時在提昇。速度之提昇使得轉子偏心不平

衡所造成之離心力與離心力矩也隨著增加，進而造成軸承過大負荷與磨損。所以機器轉速愈高者，轉動動態平衡品質之要求也愈嚴格。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，進而促成在旋轉體上所有離心力達到平衡。平衡技術又可視為將旋轉體之旋轉支撐軸心線轉變成自由軸心線。平衡技術粗分為靜平衡技術(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)，調整轉動體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)，調整轉動體質量分佈使其殘留動態不平衡量控制在一定範圍內[1]-[4]。由上述平衡技術之定義可以歸納出平衡系統所需具備之主要功能：待測轉子之支撐與驅動、不平衡量之量測、平衡補償、平衡品質之控制。

小型轉子由於小質量與較精密製造公差等級，所以不平衡量 U 也因此比大型轉子之不平衡量 U 小。不平衡量以離心力形式外顯，為達到平衡品質，必須先精確量測得離心力或由其所產生之變形位移，以及其相關向位角度關係。根據文獻記載，對於高精度不平衡量 U 之量測採用功率計原理(Wattmetric Principle)之訊號處理方式，經由電腦信號分析後，僅擷取和轉動頻率一樣之信號，可以分離干擾振動之影響而提升量測精度，可測得不平衡量 U 所造成之最小振幅在 0.001 至 0.002 μm 範

圖，及量測其不平衡量 U 之角度位置[1]。由於重量減輕之趨勢，轉子剛性也隨之減弱，撓性轉子之平衡也漸漸成為研究探討題目[1] [2]。為防止初始無法預估之過大不平衡量造成待測轉子過大偏擺，有部份研究已採用磁浮(Magnetic Bearing)系統以主動補償控制方式來抑制[2][4]。本研究則運用電磁式致動器輔助動態平衡系統中支撐系統，使系統能夠適應不同任務要求。本研究之目標是設計開發一動態平衡測試機，並進行一系列之特性研究，達到轉軸自動化測試及平衡之目的。

三、結果與討論

由平衡系統所需具備之主要功能：待測轉子之支撐與驅動、不平衡量之量測、平衡補償、平衡品質之控制，逐步完成各部主要之設計構思，圖 1 為系統之結構圖。依所設計之外型及尺寸製造實驗機，其總組合圖如圖 2 所示。

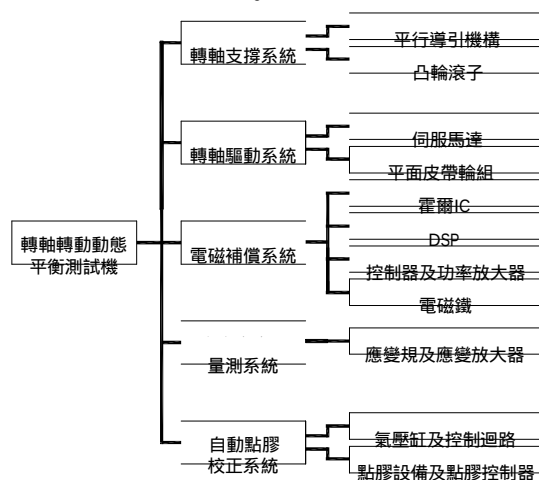


圖 1：轉軸轉動動態平衡測試機系統結構

轉軸支撐系統為了達到支撐轉動之轉軸，以及易隨轉軸轉動偏心力所導致之振動而偏擺以利量測，並且是開放式之系統可以快速裝拆轉軸，於是開發設計出以平行導引系統作為轉軸支撐系統，其優點為無外摩擦，可以忠實地反應轉軸之振動行為。轉軸驅動為了達到快速安裝及不打滑驅動並節省空間，設計採用直流無刷馬達帶動一平面皮帶輪組，以平面皮帶壓於轉軸上以摩擦力直接驅動轉軸。為防打滑設

計有皮帶下壓力可調整機構 凡長度在 100 ~ 150 mm，而外徑 10 ~ 25 mm 之轉軸均能測試，轉軸轉速可達 10000rpm。

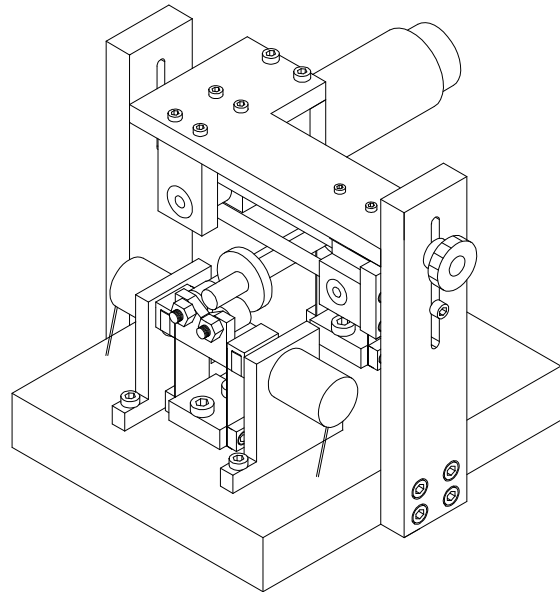


圖 2：轉軸轉動動態平衡測試機組合圖

為了能夠兼顧測試各種不同平衡等級之轉軸，但是又要避免因未知不平衡量之過大振幅而導致系統碰撞產生危險，所以平行彈簧剛性可調整性是必有必要的。所開發之主動式可調剛性採用電磁補償系統。每一轉軸都需要兩組轉軸支撐系統來支撐。

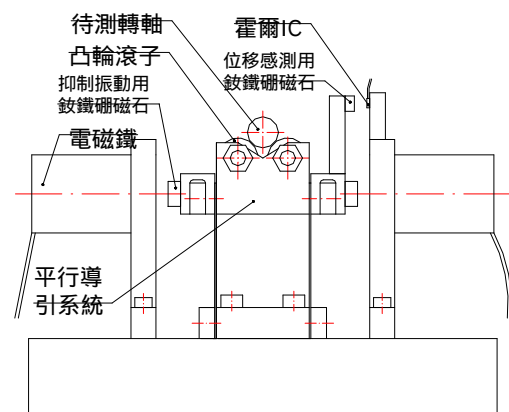


圖 3：電磁量測及電磁補償系統示意圖

每一組轉軸支撐系統採用一個霍爾 IC 來量測支撐系統之振動偏擺，所得訊號經過運算後，控制訊號再經電流控制器與功率放大器來驅動兩個相向配置電磁致動器，其作用力正好相反，用以抑制轉軸支

撐系統之振動，如圖 3 所示。

在主動式電磁補償系統之作動下，平行導引彈簧還是會有殘留轉動不平衡偏擺量存在。為量測此微小殘留偏擺量，同時考量小配置空間與高頻寬之要求，不平衡量測系統則採用應變規來量測轉軸支撐系統上之彎曲變形。圖 4 顯示整個動態量測系統訊號處理之架構，所有訊號均經由資料擷取卡進入電腦進行運算，人機介面為 Lab-View 軟體。

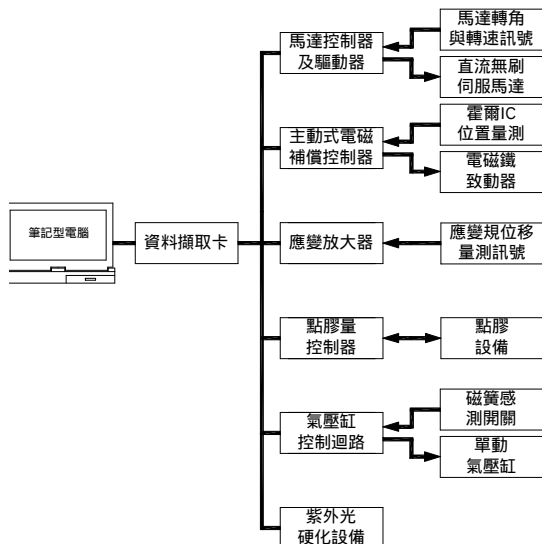


圖 4：整體系統訊號處理架構

支撐系統剛性與偏擺量之量測量測

以微調平台與測力規量測平行導引彈簧之位移與作用力關係，即可算出此平行導引彈簧之剛性值。

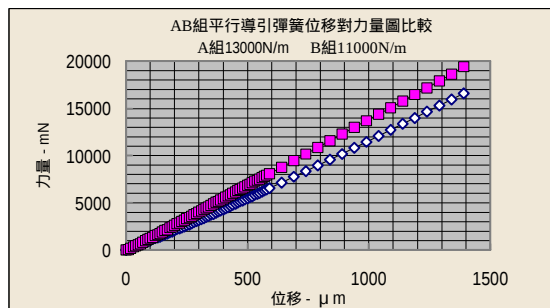


圖 5：轉軸支撐系統位移對應施加力量

實驗結果如圖 5 所示，在位移量 1.5mm 內系統之剛性值為定值。而兩組相等轉軸支撐系統有約 10% 差異，是由微小組裝差異所導致運動邊界不一致所造成。

偏擺量量測實驗結果如圖 6 所示，兩組導引系統在位移 0.3mm 內，應變規之電壓訊號正比於偏擺位移，而兩組系統數值差異來自於應變規配置上些微誤差。藉由上述實驗，可獲知應變規電壓訊號對應轉軸支撐系統受外力之關係，亦可得知轉軸所受反覆偏心力之大小，配合轉軸轉速資訊即可以求得偏心量之大小。

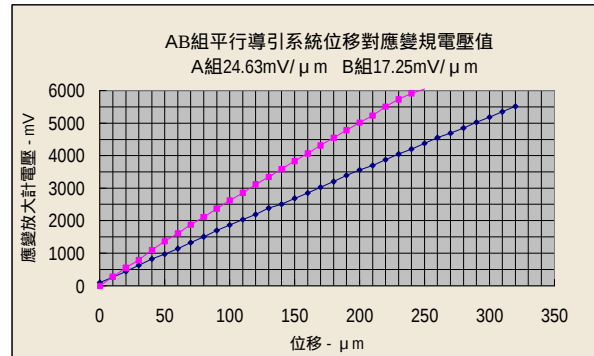


圖 6：轉軸支撐系統位移對應應變規電壓值

主動式電磁補償系統首先對偏心轉子振動行為進行分析，建立數學模式，並由軟體模擬估計各種偏心運轉情況下之偏心力。隨後根據偏心力估計確定電磁致動系統之規格，並以有限元素分析輔助磁迴路及實體設計，製作完成後並進行性能測試。為改善電磁致動器之動態特性，設計並製作了線性電流驅動器，方塊圖如圖 7 所示。硬體性能驗證測試結果證實，致動器 (450 圈繞線) 在電流控制下響應頻譜之增益均在 2kHz 後才衰減至 -3dB。電流控制驅動比電壓直接驅動可以大幅提昇頻寬。

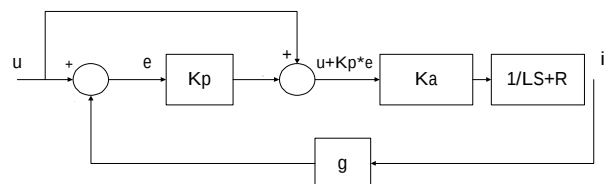


圖 7：電流驅動器方塊圖

在偏心轉子系統之振動補償控制上，先建立系統之參數化模型，配合閉迴路頻率響應系統識別取得系統參數，並進行數位 PD 控制實驗。為進一步壓制轉動不平衡

之振動，也採用了可變結構控制演算法 (Variable Structure Control)，並配合類比 PD 控制器進行振動控制。除了在數學上證明其為穩定並以軟體模擬驗證，實驗結果亦顯示可變結構控制之加入的確能有效改善系統對外來激振之強健性，且壓制振幅之效果較 PD 控制器為優，亦不會有穩態誤差。實驗結果如圖 8 所示。系統位移振幅(ch2)被控制在 20mV，約 0.05mm 以內。整體而言可變結構控制下振動抑制之效果並不如軟體模擬分析結果，最可能之原因是系統模型存在誤差，而影響了控制表現。系統模型之不確定性來自對系統結構之二階簡化與參數之不準確。

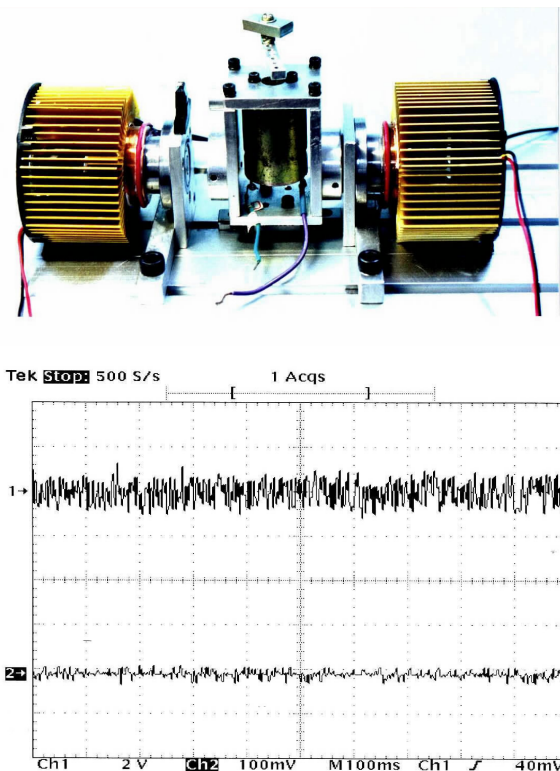


圖 8：實驗測試臺與實驗結果，轉速 4200 rpm，ch1 為控制電流，ch2 為位移訊號。

四、計畫成果自評

本研究計畫如原預期規畫，以分析、測試實驗與設計分法等方式完成設計開發出高轉速小型轉子動態平衡系統。也完成主動式電磁補償系統之數學模式建立，並以有限元素分析輔助磁迴路及實體設計，製作完成後並進行性能測試。其中包含電磁致動器與線性電流驅動器之設計製作。以

TMS320 C26 數位訊號處理器進行可變結構控制演算法，並配合類比 PD 控制器進行振動控制。以各種實驗測試方式也完成一些特性測試。轉子之驅動特性測試，轉軸轉速可達 10000rpm，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。計畫進度如預期規劃完成，完成之項目比原先規劃項目有些微超越，有助於下年度之研究進展。

五、參考文獻

1. Klaus Federn, *Auswuchttechnik*, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1977
2. Mark S. Darlow, *Balancing of high-speed machinery* Spring-Verlag, New York, 1989
3. Lingener, Adolf: *Auswuchten-Theorie und Praxis*. 1 .Auflage, Verlag Technik GmbH Berlin, Berlin, 1992.
4. William Ker Wilson, *Vibration engineering; a practical treatise on the balancing of engines, mechanical vibration, and vibration isolation*, C. Griffin, London, 1959.