

# 微軸承壽命測試機構之研發

## An innovative life test mechanism for micro bearing

胡志中 許春耀 徐瑞廷 張君豪 陳健志

Chih-Chung Hu Chun-Yao Hsu Ruci-Ting Hsu Chun-Hao Chang Chien-Chih Chen

### 摘要

本研究開發微軸承壽命測試機構，測試受測微軸承的耐用性。微軸承之壽命測試機構包括受測軸承、支撐軸承、固定鞍座、襯套、荷重及中心轉軸。受測軸承緊配於支撐軸承內，支撐軸承緊配於固定鞍座內。支撐軸承兩旁環繞一組襯套，襯套之中心軸孔與受測軸承同軸心。測試受測軸承壽命時，由於中心轉軸轉動時材料摩擦發生升溫現象，監測支撐軸承溫度，超過預設值時即判定該受測軸承達到其使用壽命。為縮短測試時間，一組可調整重量之水箱經鋼索或重物將荷重施加於固定鞍座上。本研究將此微軸承磨耗測試機構，測試多槽形液靜壓微軸承之使用壽命。實驗資料可作為多槽形液靜壓微軸承，切削加工油槽幾何形狀與油槽深度參數之修正依據。實驗結果證實本研究發展之壽命測試裝置，可簡短微軸承使用壽命測試時間，提昇微軸承的設計效率，降低製造成本。

關鍵詞：壽命測試、微軸承、多槽形液靜壓微軸承

### ABSTRACT

This study developed an innovative life test mechanism for micro bearings which inner diameter could be 2 mm. It is consisted of a supporting bearing, a fixed saddle, a bushing, a shaft and loading elements. The tested micro bearing is fastened to the supporting bearing which is fixed to a saddle surrounded by a bushing. The temperature of the supporting bearing is monitored with a sensor. When the setting temperature is measured, it implies the tested bearing reaches its lifetime. A set of loading elements using water tank is attached on the saddle to shorten the testing time. In this study the mechanism was applied to test the lifetime of a micro multi-recess type hydrostatic bearing. The results could be used for designing the shape and depth of the oil groove inside the tested bearing for optimal lifetime. It was proved that the life test mechanism could shorten testing time, increase design efficiency and reduce cost of production for micro bearings.

Keywords: Life test, Micro bearing, Micro multi-recess type hydrostatic bearings



## 一、前言

軸承為支承、導承結構中二元件相對運動之用，目的在促進動作的平滑性，降低摩擦，是機構元件中支撐旋轉軸的重要零件。在工具機產業、航太工業、半導體業，化工業與民生工業中，隨時都可以見到旋轉機構的應用。軸承為旋轉機構系統運作功能的中樞，直接影響系統的良莠，控制著精度及穩定性，為機械中不可或缺的關鍵組件。尤其在要求高精度、高效率的設備中，對於轉動機構的壽命與穩定性要求逐漸提高，更顯得軸承的重要地位。

隨著科技的進步，旋轉機構的轉速不斷的提昇。在提高轉速的同時，旋轉機構內部的軸承系統往往發生運轉壽命降低、振動量加劇的問題。振動量加劇影響機構的精密度，運轉壽命下降導致成本增加。為了能夠加強技術能力，必須對高速軸承系統作進一步的分析與研究[1]。

應用在旋轉機構的軸承系統主要可區分為磁浮、氣體、液動壓、液靜壓和滾動軸承等。目前習用之軸承以滾珠軸承及油潤式軸承為主。滾珠軸承內設置滾珠，配合特殊潤滑油產生潤滑作用，減少主軸轉動時之內部摩擦，並使轉軸穩定。此類軸承雖有高負荷與高穩定性的優點，但轉速受到限制，配裝難度較高。此外，滾珠軸承易產生振動，隨著電子設備對高轉速及小型化馬達之需求日增，需要更高速運轉的機械元件，滾珠軸承逐漸被油潤式軸承所取代。

油潤式軸承分為動壓及靜壓軸承兩種。動壓軸承的設計，先在軸承上方開一或數個小孔，運作時將潤滑油注入，當轉軸轉動時帶動潤滑油，使轉軸得到潤滑。有些設計甚至會在軸承內側刻畫溝紋使得轉軸旋轉時更加穩定。液動軸承的微溝槽產生動壓油膜，使心軸與襯套無接觸，達到低摩擦、高轉速、低噪音及高穩定的特性，正好可以滿足上述需求。因此，液動軸承廣泛應用於硬碟、光碟機、雷射印表機產品上。

混壓軸承的設計研究，早期以靜態特性探討為主。Davies[2] 根據 Raimondi 及 Boyd[3] 的明志學報 第 42 卷第二期

‘Thin-land’理論建立一般化靜壓軸承分析方法。Donoghue與Rowe等人[4, 5]以外部加壓軸承設計為例，假設主軸偏心很小，根據摩擦功率損失為最小的情況，研究速度參數及周向節流面積與周向軸承面積的比值等，來找出多油腔軸承的最佳設計條件。Chen與Ho[6]採用Davies的靜壓軸承分析方法，建立電腦輔助分析程式的應用。Dumbrava[7]建立靜壓軸承最佳化設計所需要的參數及設計目標。Rowe[8]彙整許多研究的結果，提供了靜壓軸承在設計上的流程和公式。Rowe等人[9]在麥金塔(Macintosh)電腦上，以HYPERCARD軟體為工具，建立具有人工智慧的軸承設計軟體。Cheng與Rowe[10]以外部加壓軸承設計軟體建立起整套的人機介面軟體，使得軸承設計和資料庫整合在一起，並且可以提昇設計的效率。Zhang和Chang[11]探討氣室混合型氣體軸承(shallow pocket hybrid gas journal bearing)的穩定性分析，對於該類型軸承進行動態穩定性分析，並進行氣室尺寸的最佳化設計，以直接搜尋法(direct method)中的complex搜尋為最佳化法則。Zeng和Bogy[12]利用都卜勒雷射量測器(LDV)量測硬碟磁頭振動的軌跡圖，分析磁頭的剛性值以及阻尼值，結果顯示，剛性值與阻尼值和磁頭的外形尺寸設計有很大的關聯性，磁頭產生過大的振動時，會造成磁頭與硬碟的接觸，而產生永久性的破壞。

一般液動壓潤滑軸承理論探討，著重於潤滑油膜於軸承間隙的數學模型建立，依不同模型情況簡化雷諾方程式，經由數值疊代方法求得壓力數值解，經由壓力計算相關軸承性能參數[13]。常見者為軸頸軸承與平面滑動軸承之研究論文，如Buckholz與Lin[14]討論軸頸軸承在發生偏心與不對稱效應之情況下對軸承性能影響；Hamrock[15]討論滑動軸承在等黏性條件下，軸承間隙發生彈性變形後對軸承性能之影響；Jang及Chang[16]考慮軸頸軸承的油膜在等溫及絕熱邊界條件下，討論偏心與不對稱效應對軸承性能之影響。上述液動壓文獻中，液動壓潤滑機構模型的建立與基本



原理是相似的。

靜壓軸承屬於比較高級的軸承，具有極高精度的特性，靜壓軸承在軸承間形成的潤滑油膜或潤滑空氣薄膜比其他形式軸承厚，具有緩和軸與軸承面形狀誤差，發揮並實現平滑的運轉效果，將此運轉效果稱為潤滑薄膜的均化效果。

手提電腦及桌上型電腦快速發展(小型旋轉機件)，產值龐大並且汰換速率高，目前電腦仍須靠風扇來散熱。散熱用風扇軸承為電腦散熱的重要元件，需求量很大，元件尺寸愈小愈貴。目前散熱用風扇以滾珠軸承為主，日本已開發成功液靜壓軸承，台灣尚無該項技術。而且電子產品越來越輕薄短小，所配用之軸承之尺寸也日益減小，如何測試細小軸承之壽命便成為一項重要之課題。本研究設計一創新且具進步性之微軸承壽命測試裝置，以解決上述問題。

## 二、研發設計方法

微軸承壽命測試裝置機台之立體圖如圖1所示。微軸承壽命測試裝置設計中最重要特性乃利用塑膠襯套與支撐軸承支撐受測軸承，對於不同之受測軸承，只要更換不同大小之襯套及支撐軸承即可，操作簡單，可減少測試成本。研發設計成果詳述如下：

### 2.1 微軸承壽命測試機台

微軸承壽命測試機台分成六大部份：(1)機台本體、(2)測試模組、(3)測試平台、(4)溫度探針及(5)荷重模組。

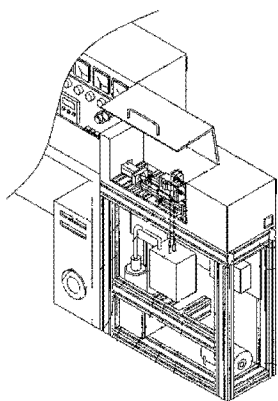


圖 1. 微軸承壽命測試機構示意圖

機台本體包括電腦主機、顯示螢幕、氣液壓控制箱及機台箱體。箱體之拉門可以防止意外發生。顯示螢幕連接電腦主機，用以顯示所有測試條件及結果。

測試平台上有滑座組與滑軌軸，裝載測試模組。溫度探針安裝於測試模組內，監測支撐軸承溫度。

荷重模組可由荷重水箱、鋼索、抽水機與伺服馬達所組成。荷重水量由抽水機與伺服馬達控制，透過轉速計、伺服馬達控制板回授至控制電腦模擬微軸承承受之荷重。抽水機將水箱中的水抽送到荷重水箱，連接荷重水箱的鋼索連接至測試模組，使得氣液壓控制箱可以經由該抽水機控制測試模組內之液壓荷重。

氣液壓控制箱連接抽氣泵及抽水機，用以控制所需之氣壓及液壓。抽氣泵連通抽氣管及抽氣軟管，抽氣軟管連接至測試模組，使得氣液壓控制箱可以經由抽氣泵控制測試模組內之氣壓壓力。

### 2.2 微軸承壽命測試裝置

位於機台上方之微軸承壽命測試裝置如圖2所示，包括測試模組、測試平台與滑座組，如圖3所示。測試模組固接於滑座組上，控制訊號可以經由伺服馬達控制板、伺服馬達、滑軌軸控制滑座組於水平方向之移動，使得測試模組在水平X軸作精密定位。受測微軸承中心轉軸之轉速亦透過伺服馬達控制板，由伺服馬達控制作精密控制。

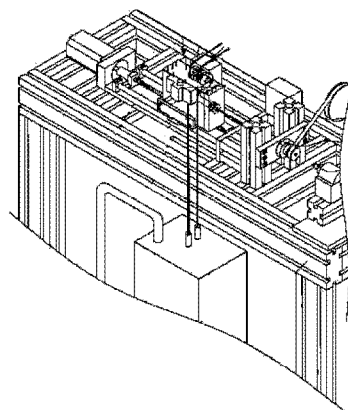
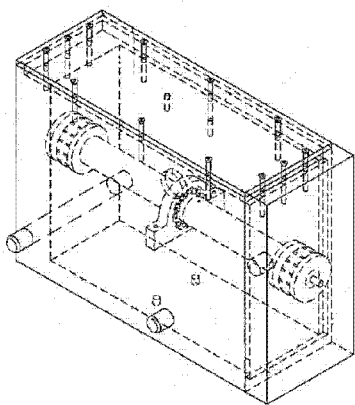
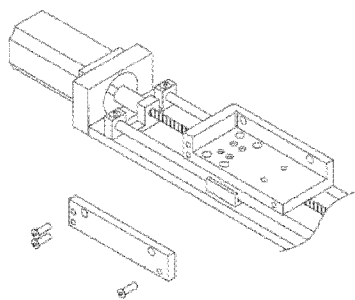


圖 2 微軸承壽命測試裝置



(a)微軸承壽命測試模組



(b)微軸承壽命測試平台與滑座組  
圖 3 微軸承壽命測試模組與滑座組

### 2.3 微軸承壽命測試模組

微軸承壽命測試模組如圖4所示，測試模組之立體分解圖如圖5所示，剖面圖如圖6所示。微軸承壽命測試模組分成六大部份，包括(1)受測軸承、(2)支撐軸承、(3)固定鞍座、(4)襯套、(5)荷重及(6)中心轉軸。

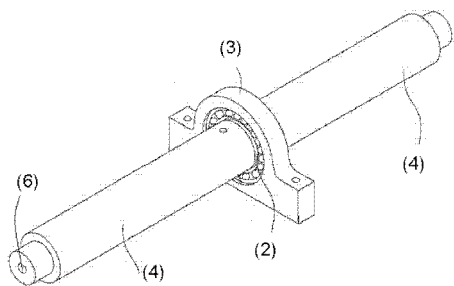


圖 4 微軸承壽命測試模組

受測軸承為油潤式軸承，其內側壁具有一鋸齒狀油溝，可填充潤滑油。受測軸承緊配於支撐軸承內，再緊配於固定鞍座內。支撐軸承使用滾珠軸承。在本研究之實驗，使用二個支撐滾珠軸

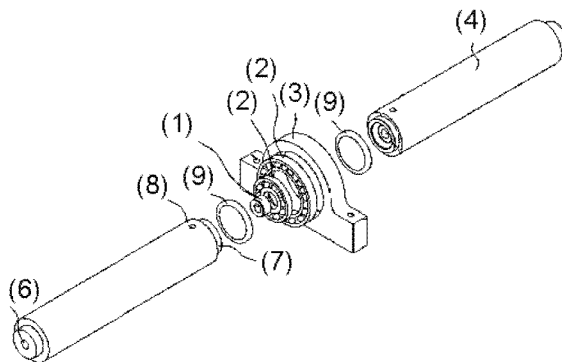


圖 5 微軸承壽命測試模組立體分解圖

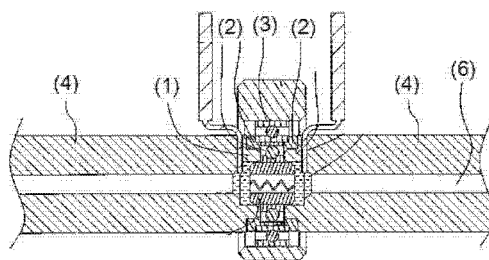


圖 6 微軸承壽命測試模組剖面圖

承。

二個塑膠襯套分別位於固定鞍座之二側，其中心軸孔與受測軸承連通且同軸心。襯套的一端頂著支撐軸承，另一端具有內環溝(圖5-(7))、環凸緣及探針孔。環凸緣環繞著內環溝，再套著受測軸承。環凸緣之外套設一橡膠圈(圖5-(9))。探針孔(圖5-(8))供溫度探針穿過而伸至內環溝。內環溝用以容置潤滑油。

測試模組腔體形成一封閉空間，容納固定鞍座及襯套。啟動抽氣泵將測試模組內空氣抽出至 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。荷重施加於固定鞍座上。荷重水箱內最大荷重約為3公斤。

中心轉軸之轉速最高可達15000rpm。中心轉軸轉動後，溫度探針監測支撐軸承溫度，超過預設值時即判定該受測軸承達到其使用壽命。在正常情況下，中心轉軸與受測軸承之內側壁及襯套之內側壁間具有適當間隙(約為數 $\mu\text{m}$ )，因此中心轉軸可以順利地轉動。然而，當受測軸承損壞時，中心轉軸會接觸到受測軸承之內側壁或襯套之內側壁。此時由於高速摩擦作用，受測軸承、潤滑油及襯套之溫度會急速上升。因此，當溫度探針



所監測之支撐軸承溫度超過一預設值時即判斷該受測微軸承達到其壽命。溫度感測器也可以連接至襯套或固定鞍座，監測此二元件之溫度，亦可判斷受測軸承的壽命。

### 三、結果與討論

研發完成之微軸承壽命測試機台如圖 7，圖 7(a)為設計完成之立體圖，圖 7(b)與(c)為微軸承壽命測試機台掀蓋與關蓋狀態下之外觀。圖 7(b)中，(1)為感溫線；(2)內包括受測軸承、支撐軸承與固定鞍座；(3)為支撐座；(4)為滑座組；荷重模組簡化為荷重塊(5)；馬達控制改用變頻器(6)與變頻馬達(7)。圖 7(c)中(8)為可掀式蓋板；(9)為可攜式溫度錶、(10)為機器本體。

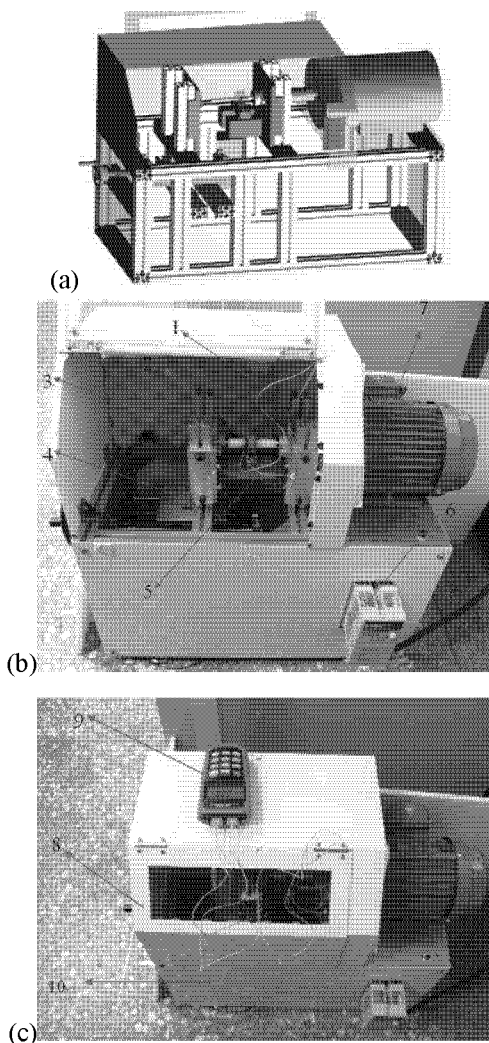


圖7 研發完成之微軸承壽命測試機台  
(a)立體圖 (b)掀蓋狀態 (c)關蓋狀態

微軸承壽命測試模組組裝，如圖8所示。組裝時受測微軸承安置於支撐軸承內(a)，再旋轉滑座組把手移動滑座組(c)，使襯套頂住支撐軸承(b)。感溫線穿過襯套孔(d)，透過可攜式溫度錶量測支撐軸承溫度。

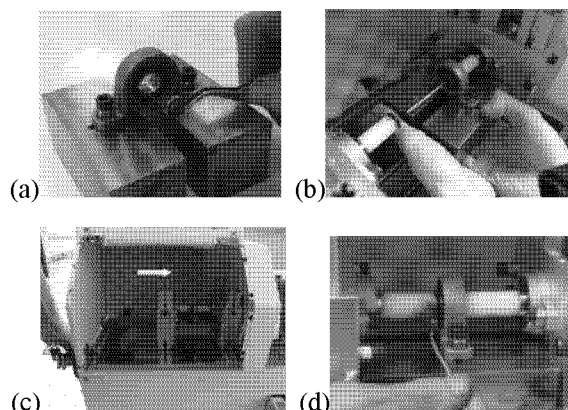


圖8 微軸承壽命測試模組組裝圖

將多槽形液靜壓微軸承(圖 9)，應用本研究所完成的微軸承壽命測試機構進行軸承壽命測試。由於銅合金材料軸承優點為成本低、壽命長、可承受負載高及乾運轉特性佳，而且黃銅合金的摩擦係數比 SAE 660 青銅低，因此本實驗選用銅合金(SAE841+鎳)作為軸承材料。

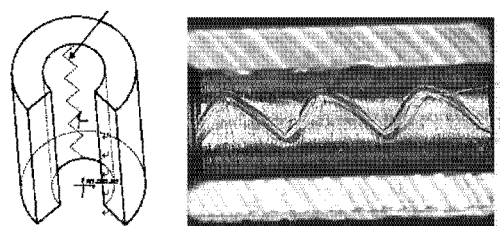


圖9 多槽形液靜壓微軸承

軸承尺寸參數為內徑 2mm、外徑 5 mm、高 4mm、油槽深度 0.03mm，油槽數 4 條。測試時主軸轉速設定為 3500rpm，軸承荷重 3Kg，經過 540 小時運轉測試，紀錄時間溫度關係，如圖 10 所示。運轉測試後多槽形液靜壓微軸承剖面，如圖 11 所示，顯示軸承溫度變化不大，而且軸承剖面圖亦無損壞跡象，證實銅合金軸承具有壽命長之特性。



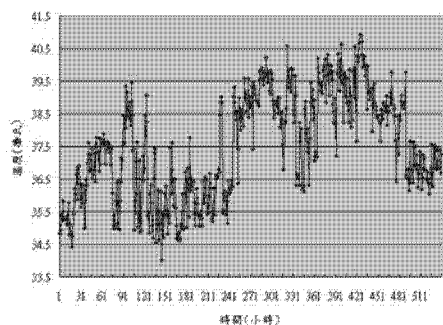


圖10多槽形液靜壓微軸承運轉時間與溫度關係



圖11 經540小時運轉測試，多槽形液靜壓微軸承剖面

#### 四、結論

微軸承壽命測試機構之研發順利完成，該設計構造簡單，整體造價便宜，操作方便，只需更換適當襯套及支撐軸，即可測試不同軸徑之軸承。軸承壽命測試運轉時間長，若以氣動馬達取代變頻馬達，可提高測試安全性。本研究對於產業競爭力、產業設計水準與製造精密度，將有實質的提昇。

感謝國科會 (NSC 99-2622-E-262 -005 -CC3) 補助研究經費。



參考文獻

- [1] 周麟恩, “高速主軸軸承系統之運動與動態特性分析”, 國立中山大學機械工程研究所碩士論文(2001)。
- [2] P. B. Davies, “A general analysis of multi-recess hydrostatic journal bearings”, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineering, Part 1*, Vol. 184, No. 43, pp. 827-838 (1969).
- [3] A. A. Raimondi, J. Boyd, “An analysis of orifice and capillary compensated hydrostatic journal bearings”, *Journal of the American Society of Lubrication Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp.28-37 (1957).
- [4] J. P. Donoghue, W. B. Rowe, “Hydrostatic bearing design”, *Tribology International*, Vol. 2, No. 1, pp.25-71 (1969).
- [5] K. J. Stout, W. B. Rowe, “Externally pressurized bearings design for manufacture Part 3: design of liquid externally pressurized bearings for manufacture including tolerancing procedure”, *Tribology International*, Vol. 7, No. 5, pp.195-212 (1974).
- [6] N. N. S. Chen, Y. S. Ho, “Computer-aided design of hydrostatic journal bearings including shaft bending effect”, *Tribology International*, Vol. 10, No. 4, pp. 221-228 (1997).
- [7] M. A. Dumbrava, “Review of principles and methods applied to the optimum calculation and design of externally-pressurized bearings: Part 1: Low/moderate speed bearings”, *Tribology International*, Vol. 18, No.3, pp. 149-156 (1985).
- [8] W. B. Rowe, “Hydrostatic and hybrid bearing design”, Butterworths, London, UK (1983).
- [9] W. B. Rowe, K. Cheng, D. Ives, “An intelligent design system for recessed hydrostatic journal bearings”, *Wear*, Vol. 159, No. 1, pp. 95-105 (1992).
- [10] K. Cheng, W. B. Rowe, “A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings”, *Tribology International*, Vol. 28, No. 7, pp.465-474 (1995).
- [11] R. Q. Zhang, H. S. Chang, “A new type of hydrostatic/hydrodynamic gas journal bearing and its optimization for maximum stability”, *Tribology Transactions*, Vol. 38, No. 3, pp. 589-594 (1995).
- [12] Q. H. Zeng, D. B. Bogy, “Experimental evaluation of stiffness and damping of slider-air bearings in hard disk drivers”, *ASME Trans., Journal of Tribology*, Vol. 121, No. 1, pp. 102-107 (1999).
- [13] 潘誌銘, “圓錐液壓軸承之數值模擬與分析”, 國立中央大學機械工程研究所碩士論文 (2000)。
- [14] R. H. Buckholz, J. F. Lin, “The effect of journal bearing misalignment on load and cavitation for non-Newtonian lubricants”, *Journal of Tribology*, Vol. 108, No.4, pp. 645-654 (1986).
- [15] B. J. Hamrock, S. R. Schmid, B. O. Jacobson, “Fundamentals of Fluid Film Lubrication”, McGraw-Hill Book Co., Singapore, pp. 141-186 (International Editions 1994).
- [16] J. Y. Jang, C. C. Chang, “Adiabatic solutions for a misaligned journal bearing with non-Newtonian lubricants”, *Tribology International*, Vol. 20, No. 5, pp. 267-275 (1987).

