

高速主軸適應式熱平衡冷卻系統設計分析

Analysis and Design of an Adaptive Thermal Balance Cooling System for High Speed Spindle

周揚登¹、馬淮龍¹、劉又齊²、李明蒼^{1,3*}

¹ 國立中興大學機械工程學系

² 財團法人資訊工業策進會

³ 國立清華大學動力機械工程學系

摘要：本文以模擬與實驗解析一國產高速主軸的熱變位特性，並將「適應式熱平衡」(Adaptive Thermal Balance[®])技術概念應用於冷卻水套設計及控制。由於主軸不對稱的溫度分佈，導致主軸產生熱彎曲，從而對加工精度產生顯著的影響。為改善此熱誤差，我們藉由模擬瞭解主軸在穩定運轉下的溫度分佈以及熱變形，接著設計一個主軸溫度調控水套，調節控制主軸的徑向均溫性。實驗證實，此技術能有效地將主軸前後溫度差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 內，不僅改善了主軸溫度均勻性及對稱性，同時減輕主軸內部預壓環及軸承的溫升以及不對稱的結構熱膨脹，進而能夠降低熱變形所造成的主軸軸承損耗。

Abstract : In this study, simulation and experimental measurement are used to analyze thermal displacement characteristics of a high-speed spindle. The "Adaptive Thermal Balance[®]" technology is applied to control the spindle cooling. In common machine tools, the asymmetric temperature distribution of the spindle head structure causes thermal bending of the spindle, which leads to significant thermal errors that affect the machining accuracy. Such kind of thermal bending deformation and the resulted thermal errors cannot be resolved effectively by conventional compensation technique. To address this issue, we performed a numerical analysis to investigate the temperature distribution and the characteristics of thermal deformation. Then, based on our simulation results, an intelligent spindle temperature control water jacket system was designed and prototyped to evaluate its ability of controlling the radial uniformity in temperature of the spindle, and thus reduces its thermal bending. According to the experimental results, the designed water jacket and control system can accurately and effectively maintain the temperature difference between the front and the back sides of the spindle within $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, which not only improves the temperature uniformity and symmetry of the spindle thermal deformation, but also reduces the temperature rise of the preload ring and bearings and results in a more asymmetric thermal expansion of the structure. In consequence, the possibility of spindle run out caused by thermal deformation could be greatly reduced. The result of this study proved a feasible method for improving the thermal stability as well as the machining accuracy for highly precision machine tools.

關鍵詞：工具機熱誤差、適應式熱平衡、主軸溫升補償、智慧機械

Keywords : Thermal error, Adaptive Thermal Balance, Thermal compensation, Smart machinery

前言

近年隨著精密機械與精密電子產品相關產業的蓬勃發展，工具機主要訴求重點在於加工效率和產品良率的良好控制，因此對於主軸 DN 值 (DN 值 = 軸承節徑 (mm) x 最高轉速 (rpm)) 的要求也隨之提高。然而現行技術遭遇到成長瓶頸，主

要是在於高速軸承使用油脂潤滑，運轉時產生高溫使得軸承過熱而造成燒結，進而限制了主軸轉速。根據文獻探討的結果，工具機本身誤差有高達 50~60% 是來自於溫度的影響 [1, 2]，因此熱誤差是影響工具機加工精度的重要因素之一。近年來隨著材料技術的發展，主軸 DN 值逐漸提高，伴隨而來的則是主軸發熱量的持續提升。因此如

何降低軸承發熱量以及提升主軸 DN 值，已經成為精密機械製造技術發展中最重要、最迫切的研究課題。本文針對一個國產鑽孔攻牙機直結式高速主軸進行分析探討，其材料選用陶瓷滾珠軸承，可以在高轉速且短暫無供油情況下仍繼續運轉，對於軸承磨損抑制有良好的效益。此外，由於陶瓷滾珠軸承可以使用較少量潤滑，能夠有效減 30~50% 的摩擦 [3]，進而大幅的降低軸承發熱量。一般傳統工具機（例如三軸立式加工中心機及斜背式車銑複合機等）因重量及加工區域等設計因素考量，主軸頭鑄件結構不易設計為對稱，導致主軸在徑向上呈現溫度分佈不均勻現象，進而造成主軸熱彎曲的發生，使主軸產生熱偏移，影響加工精度。由於此主軸熱彎曲的現象所造成的加工誤差為角度偏差，在大部份的機台上相當難以利用數控熱補償的方式進行修正；因此對於此類型的熱誤差，必須採用更創新且有效的技術進行修正，以提高整體加工精度。同時，熱彎曲效應亦可能使軸承產生偏磨現象，造成軸承因不正常磨耗而加速其損壞。

直結式主軸的熱源主要來自於磨擦熱和切削熱，其熱源並不像內藏式主軸集中於主軸結構內部，對於散熱的需求較小，甚至可以不需外掛油冷機構。然而，為了進一步提升主軸壽命及減少熱變位對於主軸加工精度的影響，本文將呈現適應式熱平衡技術對於改善工具機熱誤差的實證效果。一般而言，高速鑽孔攻牙機在主軸頭幾何結構設計上有前後不對稱之特性，加上金屬切削時所產生的局部高溫，會導致主軸在徑向上產生熱彎曲 (Thermal-bending) 的情況。此現象更可能造成主軸內部件的相對位置嚴重改變、軸承預壓力改變等問題，進一步放大加工誤差以及減損主軸的使用期限。

本文針對主軸溫度與熱應力分佈不均所提出的解決對策為：設計一環型的對稱式冷卻水套，並且在徑向上分流為前、後兩組水道，主要目標為修正主軸及固定件在主要可能發生熱彎曲的軸向上溫度分佈不均的情形。首先利用工程分析軟

體 ANSYS® 針對高速旋轉的主軸進行熱流固多重耦合分析，模擬主軸結構的溫度分佈與熱變形量，並搭配實驗之溫度量測數據進行模型修正。接著根據本研究目標，設計一具備閉迴路控制的往復流道冷卻水套系統。最後經由上機進行實測，驗證此主軸溫度調節系統的調控能力與響應速度。本研究設定的目標為：主軸徑向的前後溫度差控制範圍在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 內，並且證實適應式熱平衡技術可以達到主軸智慧溫控調節的需求。再者，本文所提出的智慧型主軸冷卻水套設計只需局部變更管路設計以及調整主軸冷卻參數，可望推廣至其他各型機台。本文所提之適應式熱平衡概念與國外先進工具機廠的熱親和技術 [4] 相呼應：經由設計端抑制溫度對工具機台加工精度的影響，提升機台穩定性、提高加工精度及延長機台使用壽命。

研究方法

本文使用有限元素法分析軟體 (ANSYS®) 針對直結式高速主軸建立三維全尺寸模擬分析模型，從溫度分佈、熱應力及熱變形誤差演化過程進行主軸溫升熱變形的特性分析。模擬分析使用的統御方程式包括連續方程式、動量方程式與能量方程式，熱源以及邊界條件設定則參考文獻中的經驗模型進行估算，並搭配實驗量測數據進行適當的修正，目的為使此模擬模型能夠有效準確地估測此主軸的溫升與熱變形。高速主軸內部的溫度及熱應力分佈之全貌，一般感測設備無法直接進行量測，因此需藉由模擬分析結果獲得較為完整的主軸溫升熱變形相關資訊。此外，模擬結果將作為冷卻水套優化設計的參考依據，可準確評估流道流量與控制參數對於主軸結構熱變形的改善效果。本研究利用 ANSYS® 作為熱流固多重耦合，模擬流程主要分為四個部份：(1) 前處理部分為幾何模型建立，本研究使用工程繪圖軟體建立幾何模型，同時在此步驟進行網格分割及邊界條件定義；(B) 以 Fluent 模組進行有限元素法之數值模擬運算，求解流場以及溫度場等資訊；(C) 後處理則是利用 CFD-Post 模組將運算結果以數據、圖表、

更完整的內容

詳見 ■ 機械工業雜誌 ■ · 428 期 · 107 年 11 月號

機械工業雜誌 · 每期 **220** 元 · 一年 12 期 **2200** 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

匯款帳號：兆豐國際商業銀行新竹分行(代號 017)，帳號/ 203-07-02288-0

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌 · 官方網站：www.automan.tw

機械工業雜誌 · 信箱：jmi@itri.org.tw