

冷卻流體適應性控制於工具機主軸精度之提昇

Adaptive Control of Cooling Fluid for the Improvement of Spindle Accuracy

李坤穎^{1,3*}、駱文傑²、魏士傑⁴、洪祥豪⁵

¹ 工研院智慧機械科技中心 智慧機械技術組 工作機械技術部 工程師

² 國立勤益科技大學 特聘教授兼工學院院長

³ 國立勤益科技大學 精密製造科技研究所

⁴ 工研院智慧機械科技中心 智慧機械技術組 工作機械技術部 副工程師

⁵ 國立勤益科技大學 冷凍空調系 研究生

摘要：工具機加工過程中，主軸的高速旋轉會產生大量的摩擦熱，此些熱量會使得主軸於運轉過程中產生熱偏移的狀況，從而對於加工工件的準確度產生很大的影響。因此，於運轉過程中所產生的熱量，必須透過冷卻系統即時將熱量由運轉中的主軸排除。本研究中，我們針對工具機使用的直結式主軸做熱變位分析，並使用自適應性冷卻控制系統，針對工具機加工過程中不同的負載及轉速所產生的熱量進行熱交換冷卻的動作，來達到熱誤差抑制的效果。從散熱量實驗方面可以發現，冷卻流體適應性控制可隨著工具機加工時的負載狀態進行冷卻流體的調變，最多能帶走將近 148.66 W 的熱量，並做出更有效且立即性的熱抑制，降低熱變形量。

Abstract : During cutting process of the machine tool, high-speed rotation of a spindle generates a large amount of frictional heat. This heat causes the spindle to generate a thermal offset during operation, which has a great influence on the accuracy of the workpiece. Therefore, the heat generated during operation must be immediately removed from the spindle by the cooling system. In this study, we perform the thermal displacement analysis on the straight-through spindle used in machine tool. The adaptive cooling control is used to suppress the thermal effect. From the thermal energy experiment, it can be found that the adaptive control of cooling system can be adjusted according to different loads and rotation speeds. It can dissipate up to 148.66 W of thermal energy, thus make more effective and immediate thermal suppression.

關鍵詞：熱變位、主軸、工具機

Keywords : Thermal deformation, Spindle, Machine tool

前言

在工業發達的時代，機台須多樣且符合各個生產位置，工具機機台的穩定性要求更是嚴苛，無論是工具機本身或是外在環境都將直接或間接的影響加工的精密度；然而，近年來熱變形的要求逐漸受到重視，工具機除了要求轉速快之外，更重視了長時間加工所導致工具機精密度等問題；因此，必須找出主軸與機台間的熱溫狀態，評估工具機熱變形的加工精度。工具機熱源種類可分

為外部與內部熱源。外部熱源主要包括外在環境與人為影響所造成的溫度變異；內部熱源則是包括機械本體運轉與切削過程中產生的熱，機械本體熱源主要有各軸向馬達、主軸、冷卻系統、導軌或螺桿等運動介面所產生的熱量，而切削過程產生的熱主要是由刀具與工件之間相對運動以及其所產生之切屑摩擦所造成。不管是外部或是內部熱源，上述各種熱源會以傳導、對流、或是輻射的方式來改變機械結構的熱狀態，致使刀具尖

點產生位移而造成所謂之熱誤差。可見其對於工具機加工精度之影響，扮演著絕對關鍵的角色。現今工具機技術發展的重點，即在於如何有效地控制熱變位所導致的誤差。一般而言，最常採用的措施有熱源抑制、熱源隔絕及熱平衡設計等方式。如何有效地控制溫升效應，盡量降低工作元件的熱變位，是設計精度工具機的主要項目之一。

一般而言，影響工具機精度的因素包括：機械本身的靜態幾何誤差與動態熱誤差、切削時的刀具磨耗與工件熱變形以及外在工作環境的變異。根據文獻 [1]，工具機加工時之誤差有 40% 至 70% 是由熱變位所造成，因此，工具機熱行為表現的優劣程度，可視為衡量精度與穩定度的重要指標；若熱行為表現具有重現性與穩定性，表示可長時間維持良好加工品質；反之，若工具機的熱行為模式變異過大，則加工品質便難以確保。

基於以上有關專利分析與相關文獻資料，工具機加工過程中，主軸高速旋轉會產生大量的摩擦熱，此些熱量會使得主軸於運轉過程中產生熱偏移的狀況，從而對加工零件的準確度產生很大的影響。因此，於運轉過程中所產生的熱量，必須透過冷卻系統即時將熱量由運轉中的主軸排除。

此外，當主軸在停機時，主軸的溫度相對是較低。再開始進行加工前，主軸往往需要進行一段足夠的暖機時間，使得主軸的溫度能達到運轉加工時的溫度。

然而，一般未裝置加熱系統的工具機，暖機往往需要花費 1 小時的時間，是相當的耗時。因此，為增進工具機的加工準確度與縮短系統暖機所需的時間，於暖機時進行強制加熱，且於加工運轉時進行即時的冷卻，將是未來高精度工具機發展的趨勢。如何縮短暖機時間，並針對主軸加工的熱負荷，進行即時與有效的冷卻，使主軸運轉溫度維持恆定。

過去有關工具機冷卻熱抑制控制手段相關的文獻，Hong 等人 [2] 於 2007 年研究探討碎形微通道網路的散熱器。考慮到在微通道壁的共軛傳熱數值研究，利用三維 Navier-Stokes 方程式與能

量方程式計算出碎形微通道的流體力學及熱傳特性，研究發現，由於直角形微通道網路的結構的限制，熱點有可能出現在散熱器通道底壁上，修改成碎形結構後，散熱片的流體力學和熱性能有很大的改善。Chien 與 Jang[3] 於 2008 年實驗分析一個電動高速主軸，內部置入一螺旋水冷卻通道系統，並以模擬分析冷卻水在通道的流動方式以及溫度場分佈。實驗結果表示，幾乎所有的熱點都集中靠近主軸中心，證明螺旋水冷卻通道系統能夠顯著的抑制轉軸溫升。Fajing Li[4] 等人對於迴路熱虹吸管設計了磨削電主軸的軸冷卻結構。在特殊條件下針對單迴路熱虹吸管的傳熱性能和啟動特性進行了實驗研究。然後，根據獲得的實驗數據模擬軸上的冷卻效果。結果表明，在特殊條件下，迴路熱虹吸器的最佳液體填充率在 50% 至 60% 之間。此外，發現 20 W 和 40 W 之間的加熱功率的臨界值。最後，根據模擬結果，在設計的冷卻結構的作用下，電主軸的最高溫度降低了大約 28%。在過去的研究中，Zhang[5] 等人研究發明一種新式優化工具機性能的結構設計，在結構兩側和主軸架前部建立導熱槽，將冷卻液注入槽中，可以冷卻主軸箱和主軸，進而降低整個結構因加工所產生的溫度上昇以減少熱變形。Xu[6] 等人發現滾珠導螺桿的熱誤差會直接影響工具機的定位精度，所以他們研究了一種中空形式的滾珠導螺桿，並在工具機的中空結構中注入冷空氣使其產生強制對流，使其能更快達到熱平衡並降低熱誤差，該研究使用集總電容法 (MLCM) 以及有限元素法 (FEM) 進行數值分析，並與實際實驗比較。Florentina Pavliček[7] 研究了 CO₂ 冷卻與油冷卻對機台精度的熱影響。探討在加工時兩種冷卻機對機台熱傳的溫度分佈與機台精度的影響。發現冷卻液的選擇對機台的精度有重要的影響。當冷卻液從油變成 CO₂ 時，在 Y 軸的精度能維持在 15 μm，但在 X 軸的精度偏差卻增加了約 4 μm。Yifan Zhang[8] 等人發現一般電主軸的定位精度會受環境熱對流和主軸傳熱的影響。該研究針對主軸熱平衡控制開發了一種主動冷卻策略，

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