

智能化適應性冷卻控制於工具機加工精度之提昇

Intelligent Adaptive Cooling Control for Improvement of Machine Tool Machining Accuracy

李坤穎^{1*}、駱文傑²、魏士傑⁴、羅世杰¹、廖彥欣⁴

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 精密製造科技研究所

³ 國立勤益科技大學 精密製造科技研究所 特聘教授兼工學院院長

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

摘要：本研究主要是針對工具機主軸冷卻機進行適應性冷卻控制，針對工具機加工過程中不同的負載所產生的熱量進行熱交換冷卻的動作。從散熱量實驗方面可以發現，冷卻流體適應性控制，能帶走將近 148.66 W 的熱量；另外，主軸在變負載的情況下，適應性冷卻控制能有效抑制主軸的軸向熱變形 30 % 以上。在實際的加工應用上，進行工件的加工，長時間精加工下，其平行度、平面度及尺寸的加工精度可以提升 40% 以上。由研究的結果中，可以說明主軸透過適應性冷卻控制方法進行熱抑制，除了可有效降低熱變形外，更可使加工的精度提昇，為提昇工具機精度的有效方法。

Abstract : In this study, an adaptive cooling control was developed for cooling system in a machine tool, with the aim of attaining effective thermal suppression one requires information of the spindle rotation under different loads to adjust the cooling system conditions correspondingly. From the heat dissipation experiments, it can be found that the adaptive control of cooling system can dissipate nearly 148.66 watts of heat and achieve more effective and immediate thermal suppression. From the thermal deformation experiments with the adaptive cooling control, the in-axis thermal deformations can be greatly reduced by more than 30%. In practical machining experiments, the machining accuracy with the adaptive cooling control can be greatly enhanced by 40%. The adaptive cooling control system in the machine tool spindle can be effectively deployed to reduce the thermal deformation and greatly enhance the machining accuracy.

關鍵詞：熱變形、適應性冷卻控制、熱抑制

Keywords : Thermal deformation, Adaptive cooling control, Thermal suppression

前言

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。在 1960 年代，已有研究者 McClure [1] 及 Bryan [2] 提出，工具機運轉時的動態熱誤差大小隨加工條

件而有不同，大體而言也在數拾微米到數百微米左右，許多專家甚至把熱變形列為高精度工具機的最大誤差源，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。

工具機在設計時之熱誤差改善方法，欲有效的改善工具機加工環境變異與產生的熱誤差，可以採取以下等方法進行：環境溫度控制、使用切削液、使用冷卻風扇、使用熱管 [3]。此外，環境溫度變化對工具機熱變形的影響亦不容忽視 [4]，較精密等級的工具機對於環境溫度變化較為敏感，所以高精度等級之工具機通常設置在有環境溫度控制的廠房中，以避免因環境溫度變化會造成工具機材料受溫度變化而影響其幾何精度，但有環境溫度控制的廠房，設備成本高。森脇俊道 [5] 等人針對在環境溫度變化對於機械內部的熱變形進行研究，透過實驗和暫態三維有限元分析可以確認工具機中心空氣溫度變化取決於高度和氣流等條件，加工中心的表面溫度相對於環境溫度有 2-3 小時的延遲，而環境溫度變化小於加工中心表面溫度變化。Bo Tan [6] 等人在以 XK2650 大型龍門式機床為實驗機台，探討環境溫度變化的熱延遲效應對於大型機床的熱誤差，環境溫度對於大型工具機與熱變形有著巨大的影響，與一般工具機不同，Bo Tan 等人進行大型機床熱滯後的分析，得到滯後時間的波動隨著季節性天氣和環境溫度不同而變動。Naeem S. Mian [7] 等人提出以有限元素法分析環境溫度對機台變形的影響。工具機容易受到外部原因的影響，其中主要原因在不同的環境條件下，例如白天和黑夜或不同季節等較大的環境溫度變化中，就可能產生影響。而內部影響在於加工中熱梯度導致熱量通過機器結構傳導並導致非線性結構的熱變形。此研究採用有限元分析 (FEA)，並以此模擬分析方法得到的數據與實驗結果，殘差可以小於 12 μm 。張輝 [8] 等人在微奈米測量環境控制機制及系統研究中發現，在微奈米測量和控制領域裡，都需要高精度的恆溫、恆濕、潔淨抗振的環境空間。此文主要研究微奈米測量環境控制機理和保障系統的設計與實現，並建立一個高精度恆溫恆濕抗震潔淨的環境空間的條件，而獲得成果如下。高精度溫度測量與控制系統研究中，探討了多種 PID 控制方式的優缺點和性能，並將模糊推理引入到 PID 控制策

略中，完成了基於模糊控制法則的自整定 PID 控制策略的研究。恆溫室氣流的組織和環境控制箱的結構優化研究：通過對環境控制箱的結構設計的優化和氣流組織形態的深入研究，採用數值分析方法和 CFD 軟體模擬，對恆溫腔的恆溫氣流進行有效的控制達到溫度的動態平衡，還可以將恆溫腔內的局部熱源進行隔離，達到溫度場的均勻化，達到溫度控制精度要求。

Yogie Rinaldy Ginting [9] 等人探討環境空間中使用冷空氣進行加工冷卻，儘管很多研究採用使用冷風冷卻切削區，但許多企業傳統依舊在切削區使用冷卻液的散放方法當作首選。本研究的目的在設計於冷風冷卻系統能有效的對加工工件進行冷卻，此設備沒有使用傳統切削液，本研究表明，透過熱電冷卻所產生的冷空氣將會更加節能使用更方便。朱佑泰 [10] 等人發現工具機朝向高速化、高精度化的發展趨勢，為了達到此目的，工具機主軸轉速與進給速率勢必提高，但速度提高時，所造成的溫升熱變形，會直接地影響到加工件的加工精度。朱佑泰等人針對商用型龍門加工中心機，在不同的主軸轉速與進給速率，量測主軸與進給的溫升熱變形，討論主軸與進給之溫升熱變形是否相互影響，並且建立主軸熱誤差模型，提高加工件精度。陳紹賢 [11] 等人發現影響工具機加工精度主要誤差來源在於切削期間因主軸熱溫升使結構熱變形所產生的熱誤差，因此針對主軸溫升熱變形進行量測與實機補償，以智能化模組建立一套熱溫升與熱位移量測系統透過 Macro Executor 補償監控畫面進行補償驗證。由實驗結果得知，補償後主軸 Z 方向熱誤差變形由 106 μm 降低至 40 μm 。

現今工具機技術發展的重點，即應用智慧技術來達到適應性的控制熱變位所導致的誤差。然而，一般常見的工具機主軸冷卻方法均未針對加工運轉時負載變動進行即時的冷卻，如何有效益的即時與有效的冷卻，使主軸運轉溫度維持恆定，亦會是相當重要的一個課題。本研究主要是針對工具機主軸專用油冷卻機進行適應性冷卻控制，

更完整的內容

詳見 ■ 機械工業雜誌 ■ · 432 期 · 108 年 3 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