

工具機結構熱平衡基礎技術

¹李坤穎 / ²蕭錫鴻 / ¹羅世杰 / ¹魏士傑 / ¹廖彥欣

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

²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 經理

前言：熱誤差是超精密加工機最主要的誤差來源，而在切削加工過程中所產生的溫昇造成的熱變位往往使得加工精度降低及品質不佳。由於近來精密模具、生醫應用、消費性電子…等產業之精微加工需求，溫度變異對於機台精度之影響更是不容忽視，發展有效且可靠的熱誤差因應技術，已是成為主要課題。本文主要針對目前國內工具機精度穩定性不佳之問題，由溫升與熱誤差觀點，探討與發展維持長期精度穩定性工具機結構熱平衡設計基礎技術之方法。

工具機結構熱平衡技術，主要針對工具機本身的內外部熱源，如馬達、主軸、軸承、螺桿、螺帽、軌道、或是周邊裝置等，均具有妥善的配置設計或抑制規劃，讓工具機結構本身可維持穩定且平衡的工作狀態，以保持高精度與高穩定的加工表現。近幾年的國際工具機大展(2008~2016年/JIMTOF、EMO、IMTS、TIMTOS)，不少研發超精密工具機的標竿廠(日本 YASDA、Makino、Roku Roku、Sodick 以及德國 Kern、Röders 等)著墨於熱源的抑制、甚至是溫度管理技術的展現，**圖 1** 為 Makino 熱平衡技術對策。其目的即是對應高精度、高穩定、與高耐久性的使用需求。超精密加工設備，其主要的結構特色即為高剛性與高穩定特性，因此，對於結構溫升變化的熱對稱性訴求、或是結構溫升的主動抑制需求，藉由直接或間接減少溫度變化對於結構精度影響的手段，已是基本且必須的設計考量要素。

影響工具機加工精度主要可分為三大類：

1. 機械因素：主要包括機器結構與其元件本身的靜態幾何誤差與動態熱誤差、以及進給軸伺服控制誤差機械因素等，其佔精度誤差貢獻 90%以上。

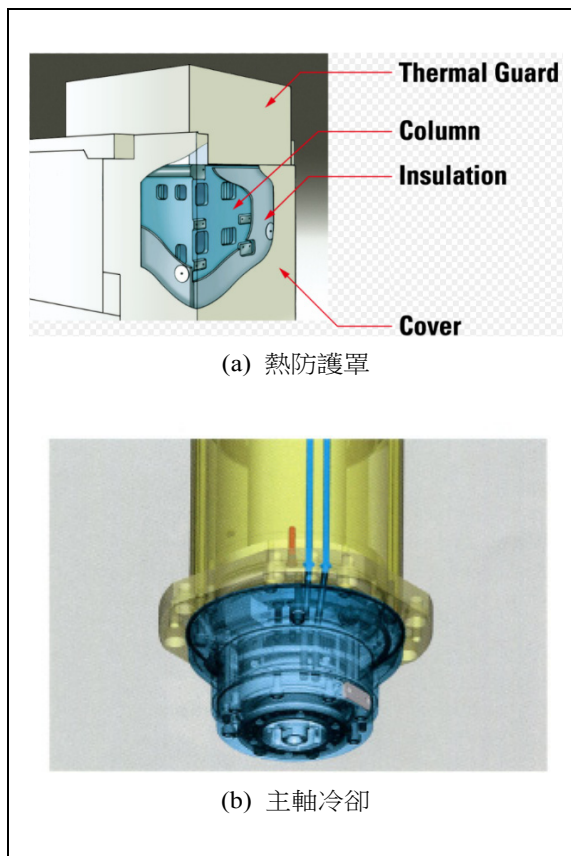


圖 1 MAKINO 公司的熱平衡技術對策

2. 切削加工因素：刀具磨耗、熱變形、切削顫動、工件殘留應力變形等。
3. 環境變動因素：包括環境溫度、外來振動、地基剛性等。

由於這些因素的交互作用，使得工具機加工成品之精度不佳，尤其是靜態幾何誤差及動態熱誤差，幾乎決定了該工具機產品在市場上的價格與競爭力。

提高工具機精度的方法基本上有二：(1)積極消除誤差：積極的改良機器性能乃是由設計階段，零組件製造及組裝，整個過程中力求機器結構剛性高，良好的熱平衡和溫昇控制，以及高精度加工和裝配力求機器誤差於最小。(2)消極誤差補償：早期於熱誤差補償技術開發上都不作實際切削，僅以主軸高轉速及高進給率來模擬切削的熱誤差效應。然而於實際的切削過程中，摩擦力與切削熱累積在機器上造成的誤差，無法由空轉切削模擬得知。因此，近來的進階的研究多採用實切削方式或以空切削與實切削之混合模式(hybrid model)建立熱誤差預估模型，以此模型作為誤差資料庫，當實際切削加工時，在根據預先建立的數學模型進行熱誤差變化分析。

專利分析工作主要目的在於瞭解國際間對於工具機熱誤差問題的解決方式與技術發展方向，藉以作為未來技術佈局的參考依據。由於工具機熱變位誤差控制技術屬各國外工具機廠的機密，一般人無法輕易取得，為了避免未來引起專利侵權的困擾，在研發高精密工具機熱變位誤差技術之前必須先完成嚴密的專利佈局工作。此項工作須從既有世界上的專利中進行搜尋，並做技術分析，從而整理出已被各國保護的相關技術，此即所謂的技術探勘工作(technology mining)。在專利搜尋方面，擬採用專利搜尋引擎(search engine)，以各種關鍵詞來找出所有相關專利文獻。並一一判讀各專利所聲明的技術項目，

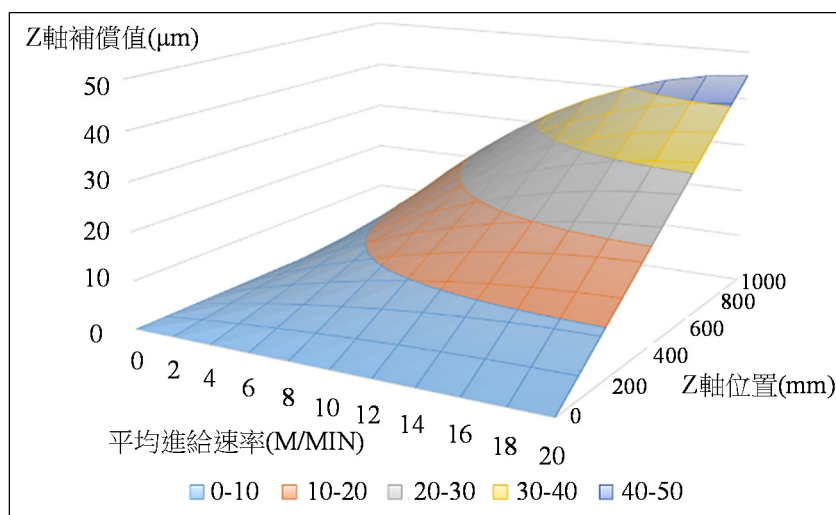


圖 2 進給系統補償數值曲面關係圖

從而分析整理出一份技術調查報告，除了可瞭解各企業的技術發展重點及技術發展趨勢，消極面發掘專利地雷以避免侵權，積極面進行專利組合佈局及迴避設計，突破研發瓶頸。

工研院於工具機結構熱平衡基礎技術主要發展方向為除了優化工具機結構達成熱平衡技術之外，亦針對主軸及進給系統進行高精度補償，使機器在動態加工的情況下溫度均勻分佈，減少局部溫升所造成的結構扭轉現象，結構各部位溫度變異減小使變形量得以線性變化，讓熱變位容易透過控制進行補償。圖 2 為進給系統補償數值曲面關係圖。

隨著高效率及高精度化的加工需求不斷地提升，工具機在動態加工時精度上的要求也越來越高。然而，在高精度的工具機開始運轉後，機件之間的摩擦及加工所產生的熱能，卻是影響工具機加工精度的關鍵因素。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所造成，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。我們分析現有歐、日大廠產品之熱誤差因應對策及專利說明，作為業界執行研究時之參考，亦可作為技術開發之專利佈局參考。