

## 龍門工具機主軸熱抑制冷卻分析研究

### Simulation Analysis on Thermal Inhibition Cooling Method of a Gantry Machine Tool Spindle

李坤穎<sup>1,\*</sup>, 林育舟<sup>2</sup>, 蔡沅紘<sup>2</sup> 紀凱元<sup>3</sup>

<sup>1</sup>智慧自動化工程系 助理教授, 國立勤益科技大學

<sup>2</sup>設計課長, 永進機械工業股份有限公司

<sup>2</sup>工程師, 永進機械工業股份有限公司

<sup>3</sup>機械工程系 研究生, 國立勤益科技大學

科技部計畫編號: MOST 110-2222-E-167-001-MY3 及 產學合作研究案計畫編號: NCUT20TEP033

### 摘要

工具機加工時之誤差有40%至70%是由熱變位所造成的[1], 工具機熱誤差問題長期以來受到產業界與學術界的關切。本研究主要針對龍門工具機的直結式主軸進行熱流固耦合分析, 找出影響主軸熱變位關鍵因子並進行冷卻熱抑制分析的改善。透過實際量測機台幾何及溫度資訊來建立模擬分析模型, 並將分析結果與實體機台進行比對同時進行模型修正。最後, 在現有機台架構上, 來探討可行的機台熱平衡優化技術, 使機台在動態加工的條件下溫度均勻分佈, 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, 變形量得以線性變化, 讓熱變位較容易透過控制進行補償。

**關鍵字:** 龍門工具機、直結式主軸、冷卻、雷諾數

### 前言

工具機精度影響的因素包括: 機械結構的靜態幾何誤差與動態加工中所產生的熱誤差、刀具磨耗與工件的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%是由熱變位所造成的, 因此, 工具機熱行為表現的優劣程度, 將可被視為衡量精度的重要指標; 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精度; 反之, 若工具機的熱行為變異過大, 則加工精度便難以穩定保持。觀察歐、日先進國家之技術發展趨勢, 部分大廠便已將其熱誤差因應技術, 視為達到高精度與高穩定度的技術象徵, 可見工具機熱誤差問題已是必需解決的重要課題之一。

### 研究設備

本研究主要針對龍門式直結式主軸進行熱誤差分析(如圖1), 找出影響主軸熱變位關鍵因子並進行冷卻熱抑制改善。本研究項目實際量測機台幾何及溫度資訊來建立分析模型, 並將分析結果與實體機台進行比對同時進行模型修正。

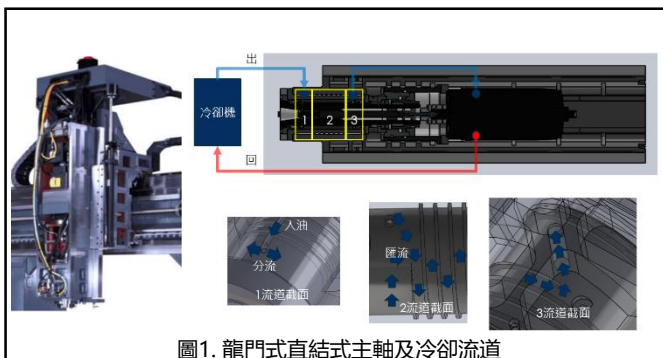


圖1. 龍門式直結式主軸及冷卻流道

### 主軸冷卻流場及發熱理論

在主軸冷卻流道內部為維持流場的均勻性, 因此流體的流速不大, 假設流場計算區域的流體為不可壓縮流體。簡化的平均時間Navier-Stokes方程及能量方程式, 三維的不可壓縮流體可寫為如下:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3$$

$$\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i \beta (T - T_\infty) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right), \text{ and } \frac{\partial(TU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - T' u_j \right) \quad (1)$$

在軸承(bearing)發熱理論及計算中, SKF於2003年提出軸承發熱量(heat generating rate)計算公式, 根據滾動軸承中不同摩擦類型, 分別計算出不同摩擦源的影響[27], 其公式如下:

$$M = \varphi_{ish} \varphi_{rs} M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (2)$$

### 研究結果

**初步分析結果:** 模擬分析10K主軸的環境溫度設定為19.6°C、冷卻油入口溫度20°C、冷卻油流量為18 L/min, 如圖2所示, 此條件為實驗量測之結果。鑄件溫度曲線, 在兩次量測下, 重現性算相當高。前軸承的溫度溫度變化最大、也最高, 在最高轉速(10,000rpm)下, 溫度達26°C。

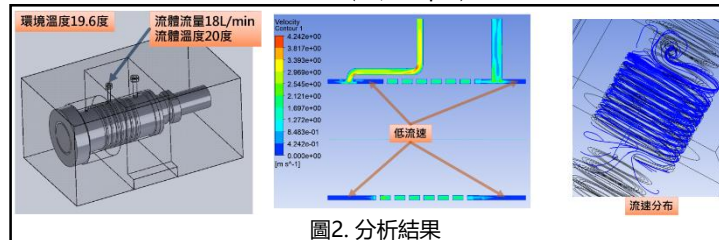


圖2. 分析結果

**優化分析結果:** 複合式冷卻流道在主軸內部冷卻流道溫的分析結果。從外部螺旋式冷卻流道可以看出, 前後軸承端位置的溫度會比中間部份來的高, 其溫度差值約0.5°C到1°C, 主要此複合式可藉由螺旋式冷卻流道的冷卻效應來降低主軸結構外部的溫度。

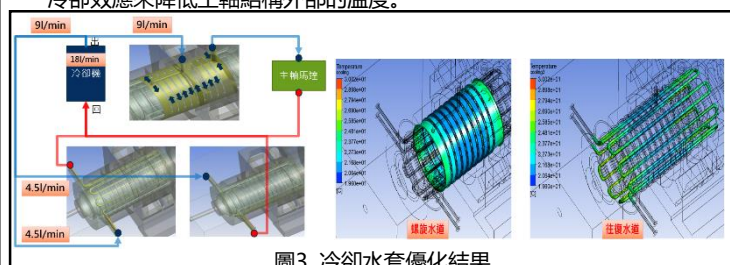


圖3. 冷卻水套優化結果

### 結論

複合式冷卻流道在不改變冷卻油最大流量18L/min的條件下, 分配給螺旋及往復水道流量, 分析比較原始螺旋式冷卻流道設計, 整體溫度下降約3°C, z軸方向的變形量降低17μm, 已有明顯的改善。除了主軸熱誤差之外, 在第四、五軸旋轉工作台的熱溫升也會使加工精度造成影響, 因此在降低第四、五軸旋轉工作台的熱誤差與建立數學預測模型是未來研究重點。

### Reference:

[1]J. Bryan, 1990, "International Status of Thermal Error Research", Annals of the CIRP, vol. 39, pp. 645-656.