



工具機主軸動態特性分析與狀態監測技術

Analysis and Monitoring Technology of Machine Tool Spindle Dynamics and Conditions

謝秉澂 / 周永樂

工研院機械所 工業物聯網技術組 預診決策技術部

摘要：工具機中最關鍵且與切削力傳遞最直接相關的組件為主軸系統，其旋轉精度與動態特性影響最終的加工品質，故各類工具機對於主軸系統都有相當高的穩定性要求，因此在機器設計階段，如何正確分析與掌握主軸系統的動態特性已成為重要的研究課題。另外，隨著感測器、微機電、網路通訊和軟體技術的快速發展，工具機智慧監控技術這幾年在業界已逐步實現，其中主軸智慧化技術是最受業者重視的項目之一。基於上述情況，本文將對此兩議題所對應之核心技術(主軸轉子動態分析、主軸狀態監測)作一介紹，提供相關領域研發人員做為技術開發之參考。

Abstract : Since the most important component in the machine tool is the spindle system, the rotation accuracy and dynamics of the spindle system are key affecting factors of production quality. The high reliability of the spindle is strongly demanded for machine tools. Therefore how to correctly analyze and control the dynamic characteristics of the spindle system at machine design stage has become an important research topic. In addition, with the rapid development of sensors, microelectromechanical systems, network communications and software technology, intelligently monitoring machine tools has been gradually realized in recent years. The spindle intelligentization technology in particular is one of the most important development topics. In light of the above mentioned development and to provide reference for R&D personnel in technology development, this article introduces the techniques of machine tool spindle dynamics analysis and condition monitoring.

關鍵詞：工具機、主軸、監測

Keywords : Machine Tool, Spindle, Monitoring

前言

工具機中最關鍵且與切削力傳遞最直接相關的組件為主軸系統，其旋轉精度與動態特性影響最終的加工品質，因而各類工具機對於主軸系統都有相當高的穩定性要求，即長期高速運轉下要能維持高旋轉精度、低溫升熱變形、低振動噪音等性能。

另外，主軸系統亦是工具機中轉速最高與耗能較大的組件，且在汽機車零件與 3C 電子產品等量產型高稼動率的加工應用場合中，主軸需進行非常頻繁的高加減速運動，因而使其成為工具機中失效率較高的組件之一[1]如圖 1，加上為提高加工效率，主軸技術持續往高速化發展，由系統臨界轉速引起的振動問題及散熱冷卻相關的熱變形問題愈發顯著，



因此在工具機設計階段，如何正確分析與掌握主軸系統的動態特性已成為重要的研究課題。如同前述，主軸系統的穩定性與可靠度已成為產品販售的重要競爭指標，如 DMG 公司在型錄上明確標示提供主軸 10,000 小時或 18 個月保固，且其夾刀系統可提供 5 億次穩定夾持。

另外，隨著感測器、微機電、網路通訊和軟體技術的快速發展，工具機智慧監控技術近幾年在業界已逐步實現，其中主軸智慧化技術是最受業者重視的項目之一，如 DMG 公司提供機器保護控制功能，其係透過主軸內振動感測器進行加工監視、碰撞防護等，當發生振動異常時可在 10 ms 內快速停機，保護主軸避免受損；Mikron 公司則透過埋設在主軸內的渦電流位移計搭配熱變位補償軟體進行主軸熱誤差之控制，以維持加工品質。而國產工具機主軸系統的保固期大多為 1 年，且僅提供主軸負載狀態之監測，並無其他智慧化功能，如主軸熱變位監控與補償、主軸關鍵零件狀態監測與保養預估功能等。

綜上所述，提升工具機主軸可靠度與發展工具機主軸智慧監控技術已成為國內各產學研單位之研發目標，本文將分別對此兩部份之核心技術做一簡介，提供相關領域研發人員做為技術開發之參考。於本文後續的各章節中，將先介紹主軸系統轉

子動態分析流程，包括轉子動態分析模型建立、無阻尼臨界轉速分析、軸承支撐剛性計算、側向臨界轉速坎貝爾圖及振型分析等，並以一內藏式主軸為例進行轉子動態分析說明，最後概要介紹主軸狀態監測技術，包括感測器規格選用與安裝位置建議、主軸軸承運作特徵分析與狀態監測等。

主軸系統轉子動態分析技術

主軸系統的轉子動態特性與轉速有極密切的關係，主因為轉子(如心軸)旋轉運動所產生的陀螺效應(gyroscopic effects)，以及組成轉子系統的重要元件(如軸承)在不同轉速與負載下，其剛性與阻尼並非定值，因此藉由轉子動態分析技術可提供主軸轉子系統的臨界轉速(critical speeds)、振型(mode shapes)及振動反應等數據，確認主軸的安全運轉範圍，協助機械設計人員了解主軸設計是否符合要求，其中臨界轉速的定義是指：「當運轉轉速(或其它激發力)與該轉子系統中的一個自然頻率所對應的轉動頻率相同時，所產生共振現象的轉速」。

1. 轉子動態分析流程[2]

一般而言，主軸系統的轉子動態分析流程為如圖 2 所示：

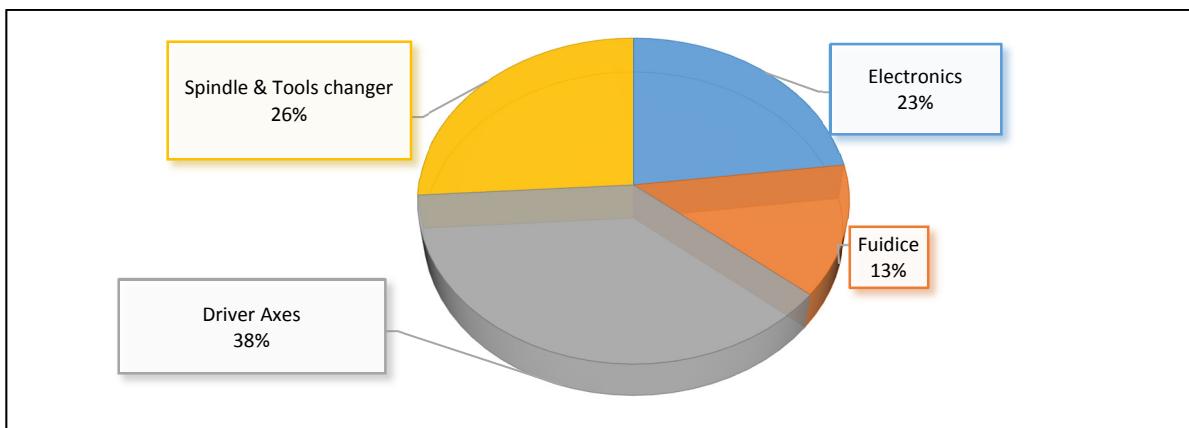


圖 1 工具機中關鍵組件之失效率佔比[1]

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】413期・106年8月號

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

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：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