

# 工具機數位設計分析基礎技術

廖建智 何筱晨

工研院智慧機械科技中心 智慧製造技術組 智能化機器技術部

## 前言

台灣為全球工具機出口大國，產業分布型態以中小型企業居多，近年來在面臨國際大廠客製化設備技術優勢競爭下，國產工具機勢必需進行結構性的創新來縮短技術差距，工業基礎技術\_高階製造系統基礎技術其中一項主要工作即是協助國內業者建立工具機設計分析模擬技術，藉由科學化的方法跳脫傳統依靠大量試誤的設計模式，本技術導入大量的科學理論基礎與設計工具，使每一個設計步驟皆有法則可依循，藉此有效對準機台終端使用需求並大幅提高設計效率。

工具機終端應用大致上可分為高移除量的粗加工製程與要求精度與表面粗糙度的精加工製程，近年來，國內工具機產業雖已漸漸導入 CAE 電腦模擬分析技術於機台開發，但大部分仍以靜態剛性分析為主，分析結果尚無法與加工使用者所在意的切削效率與切削精度有直接關聯，導致經常發生機台開發完成後加工效率不符合客戶預期或模具表面加工紋路異常現象，工具機數位設計分析基礎技術自執行以來即針對上述問題進行探討，以整合切削加工與伺服控制相對應的技術於工具機結構開發上為主要策略，希望藉由整合切削與控制的理論模型來有效提升機台結構的強度與動態響應

本技術首先導入結構拓樸優化技術 (topology optimization) 來協助設計工程師，該技術依據設定的邊界條件自動進行結構幾何生成，其肋板排列方式均由電腦運算模擬分析，有效減低人為主觀因素之影響，達成真正的高效率結構優化設計，產生跳躍式的性能提升；在切削效率的指標連結上也與英屬哥倫比

亞大學 MAL 實驗室合作導入顫振穩態耳垂圖 (chatter stability lobe) 理論模型做為機台切削性能的指標，其主要核心技術是透過整機頻率響應函數 (frequency response function, FRF) 計算顫振穩態耳垂圖進行分析，預測最佳切深與主軸轉速，本設計流程中，經由上述虛擬整機特性 FRF 數據的輸入，可計算出以目前結構剛性為基準之顫振穩態耳垂圖，此結果可做為靜動剛性指標的判斷基準。若切削性能需要調整，則可再回饋至結構剛性做調整；在切削精度的指標連結上，本技術整合伺服控制迴路與多體動力學模型進行機電模擬分析，目前已完成 70% 商用控制器伺服迴路的鑑別工作並整合至多體動力學模型中以真正的馬達響應驅動機台虛擬模型進行循跡誤差模擬。

上述技術於實際機台開發流程如圖 1，機台如以粗加工為訴求其指標即要求高切削效率，設計工程師完成初版 3D 模型後進行 FRF 分析，搭配切削製程的刀具參數與工件材質即可計算顫振穩態耳垂圖以評估加工效率(顫振穩態耳垂圖 X 軸為主軸轉速、Y 軸為切削深

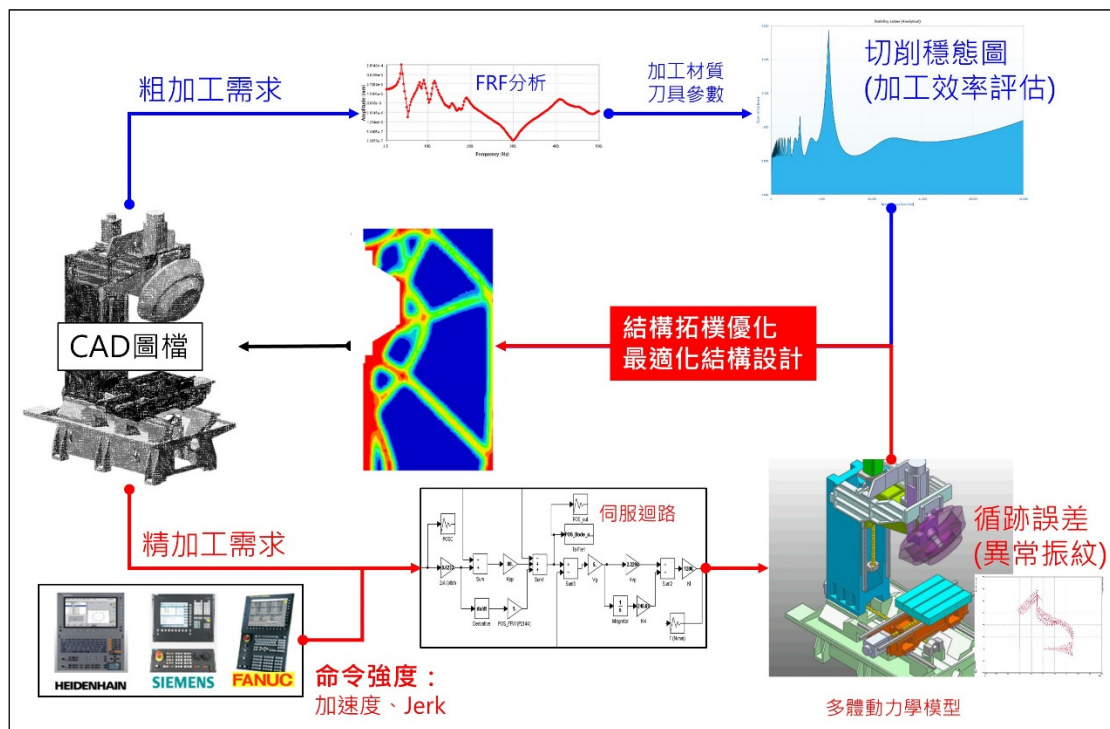


圖 1 工具機數位設計分析基礎技術實施方法

度，曲線以下為穩定加工區域，曲線以上為不穩定加工區域，曲線以下面積愈大表示加工效率愈好，並結合拓樸優化技術進行結構快速修正，即可有效對準客戶需求進行機台開發，本技術於第一期計畫中透由顫振穩態耳垂圖整合拓樸優化技術產出一龍門型加工機，其整機重量較初版設計降低 15%，動剛性提升 50%，為一質輕高剛性的機台設計應用；機台如以模具精加工為訴求其指標即要求不能出現異常振紋，設計工程師同樣完成初版 3D 模型後加入馬達伺服迴路，同時可選擇輸入不同品牌的商用控制器命令來模擬機台運動的循跡誤差與動態位置誤差，藉以判斷模具表面粗糙度是否符合客戶需求，同時整合結構拓樸優化技術進行結構快速修正。

工具機數位設計分析基礎技術具有工基計畫強調的高共通性、高技術挑戰性、高經濟影響力、廣泛應用價值，在國產工具機產業已建立起的大量出口市場基礎下，進行設計技術

的深化藉以提高產品附加價值，使台灣工具機廠擺脫跟隨者的角色，開發屬於台灣本土技術之高階機種。

【專有名詞釋義】

- 拓樸優化技術(topology optimization)：拓樸優化(topology optimization)技術為有限元素法(finite element method)結合數學規画法在一個設計空間依據邊界條件之限制對給定之目標(如剛性,體積...)而形成之優化設計方法。
- 顫振穩態耳垂圖(chatter stability lobe)：亦可稱切削穩態圖，以主軸轉速為橫座標，切削深度為縱座標來表示工具機切削的極限穩定曲線，曲線以下為加工穩定區域，曲線以上為加工不穩定區域。
- 頻率響應函數(frequency response function, FRF)：為一種數學表示方法，代表系統輸入與輸出的關係式，於工具機之應用常稱為動剛性。