

工具機動態特性分析基礎技術

謝秉激¹、周永樂¹、謝其懋¹、王俊傑²

¹工研院機械所 工業物聯網技術組 預診決策技術部

²工研院機械所 工業物聯網技術組 預診決策技術部 經理

前言：本團隊深耕於工具機動態特性分析技術，用以改善模擬分析與實驗量測兩階段皆存在不確定性與分析誤差之問題，協助正確掌握機器動態特性及操作頻率範圍，避免機台運轉異常振動發生。另針對工具機主軸系統建立轉子動態分析技術與發展智慧監控技術，期望對國內工具機主軸業者在產品性能與附加價值的提升上有所助益。

工具機動態特性分析技術

工具機朝向高材料移除率、高加工精度、及高精度壽命等方向發展，其中提升材料移除率可藉由高轉速及高切深的手段達成，但伴隨而來的是振動問題，其不僅會影響機器當前的加工精度及運轉效率，長期累積下更可能造成元件斷裂、機器損壞等情況。目前振動問題可藉由主動控制或被動抑制的方式處理，但此兩種方式皆需對工具機的動態特性有準確之掌握方能有效達成。

工具機的動態特性可藉由動態分析或測試來瞭解，包括模態分析、頻譜分析、簡諧分析、暫態分析等類型。機器運轉之振動來源主要來自於轉動件，當這些轉動件之運轉激振頻率接近系統自然頻率時，機器將產生異常共振。由於異常振動來源與發生機制相當複雜，如軸偏心、鬆脫等皆會產生與轉速頻率相關之簡諧振動。另外，3C 電子及汽機車零件的加工通常具短行程高加減速變化之特性，使得工具機易因進給系統頻繁的高加減速運動而產

生振動問題。

由於現有工具機動態特性分析技術在模擬分析或實驗量測兩個階段皆存在許多不確定性與分析誤差，為改善此問題，本團隊深耕發展一結構動態特性模擬與量測雙向驗證之技術，其係基於傳統的有限元素分析流程 (finite element analysis, FEA) 及實驗模態分析流程 (experimental modal analysis, EMA) 之外，並導入模態參與因子分析 (modal participation factors analysis) 及模態保證準則分析 (modal assurance criterion, MAC)，首先利用有限元素分析找出各關鍵零組件之主要振形，並根據此結果定義出最佳之模態測試敲擊位置與方向，以輔助讓敲擊試驗以及自然頻率擬合結果更為準確，接著再利用實驗量測所得之自然頻率數值修正有限元素模型之材料及接觸剛性等參數，讓模擬與實驗結果誤差低於 5%。

當各組件單體的動態特性預估具有最大之可信度後，後續的組合特性分析步驟才不會因各組件單體間之結合而放大或累積分析誤

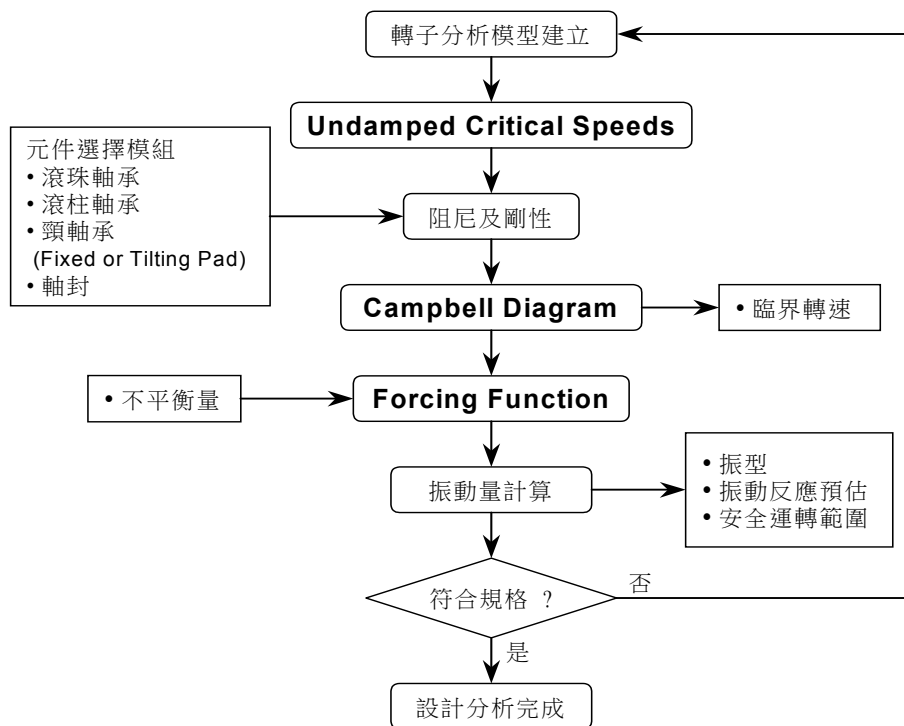


圖 1 轉子動態分析流程

差。另外，對於較複雜之振形分析可藉助前述提及的模態保證準則來進行兩個振形向量之比對，模態保證準則可用來輔助判斷對應振形之相關性，其數值介於 0 與 1 之間，可自動比對出兩振形之相關程度，0 為完全不相關，也就是兩個振形向量正交，1 則為完全相同，此法可改善因模態耦合而造成分析誤判之問題。從案例的分析結果顯示，本技術結合模擬分析與實驗量測此兩種動態特性解析方法之優點，避開分析與測試之盲點，有效提升分析結果的準確性。

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」。一般而言，主軸系統的轉子動態分析流程如圖 1 為：(1)根據主軸系統中轉子部份之圖面尺寸、材料特性等，建立轉子動態分析模型，並選定軸承位置；(2)計算轉子系統的無阻尼臨界轉速(undamped critical speeds)或稱為剛性圖，即在不同的軸承支撐剛性(stiffness)時，分析轉子系統各階(mode)自然頻率的變化；(3)由選定的運轉轉速、轉子系統的自然頻率，決定可用的軸承剛性範圍，再選定軸承型式；(4)計算軸承在不同轉速下的阻尼 C 及剛性 K；(5)進行轉子系統的坎貝爾圖(Campbell diagram)分析，以獲得轉子系統的臨界轉速、振動反應等數據。