



# 垂直立柱主軸結構線軌預壓效應 之動態特徵研究

## Analysis on the Dynamic Characteristics of a Vertical Column-Spindle System with the Preload Effect of Linear Guides



洪瑞斌

國立勤益科技大學  
機械系  
副教授

羅佐良

工研院機械所  
智慧機械技術組  
工程師

林清源

工研院機械所  
智慧機械技術組  
副組長

張恩生

工研院機械所  
智慧機械技術組  
經理

### 關鍵詞

- 線性滑軌      Linear guide
- 接觸剛性      Dynamic stiffness
- 動態特性      Contact stiffness

### 摘要

本研究應用電腦輔助工程分析技術，探討線性滑軌預壓力對 CNC 立式機柱動態特性之影響。線性滑軌是加工機進給定位機構之主要導引元件，其中鋼珠在滑槽中形成滾動接觸之剛性與接觸負荷之間的非線性關係，是影響結構剛性與動態特性之重要因素。因此，本研究提出鋼珠接觸剛性模擬法則，並導入 CNC 立式機柱結構之有限元素模型中，以進行動態分析與振動實驗。

研究結果發現，立式機柱之低頻振形主要為機柱本體與主心軸組合結構之彎曲與扭轉運動，而高

頻振動則是主心軸本體之搖擺與傾斜運動，此振動將直接影響刀具心軸之加工精度，其振動頻率則明顯受到線軌預壓等級所影響。數據顯示高預壓(ZB)與低預壓(Z0)線軌對此高階振頻之影響，相差達12%。此外，有限元素模態分析與振動實驗結果之最大差值為3.3%，顯示本研究使用彈簧元素結合赫茲理論來模擬線性滑軌介面剛性之方法具有相當高的正確性與精確度。

The column spindle system is a major module affecting the machining performance of a vertical milling machine. Realization on the dynamic behavior of a column spindle system is of importance for enhancing the total structural characteristic at design stage. In a vertical milling machine, the spindle head is feed through a ball screw driven mechanism, which consists of ball bearings and rolling guides. In order to assess the influence of the linear guide on the dynamic characteristics of a vertical column spindle system, this study developed a finite element model integrated with



the modeling of the linear components and implementation of contact stiffness at rolling interface. Both the finite element simulations and experimental measurements show that the preload amount of the linear guide significantly affects the vibration behavior mainly associated with the spindle head. Current results clearly show that the simulations agree well with experimental measurements. This confirms that the proposed model could be successfully applied to evaluate the dynamics characteristics of a machine tool system of various configurations.

---

## 前言

---

隨著高科技的進步追求高速、高精度、高效率的方向發展，許多實際的共通性關鍵技術目前已經成為瓶頸，以 CNC 立式主軸而言就必須考慮結構靜態剛性與動態特性，足夠剛性將可有效避免結構體在可能負荷範圍內產生變形，影響機台精度與加工精度。為避免切削共振發生，通常會要求結構之自然頻率高於切削加工速率，而結構之自然頻率又與自身剛性及重量有關，因此，在結構設計時就必須掌握整體結構之動態特性，並進行適當規劃設計，以獲得較佳的機械性能。

基本上，CNC 工具機整體機台係由數個結構件所組成，各組件彼此間則藉由不同機構，例如螺栓或滑軌裝置，予以連結形成整合系統。有別於個別結構元件之分析，在設計階段，若能以整機模式進行動態分析，將可獲得合理之設計結果。由於工具機整體結構越來越複雜，在設計考量上就需要更精確的分析技術來配合。特別是在結構組件之間的結合介面，對結構動態特性有很大的影響。根據 Beard[2]之研究顯示，對組合結構體而言，有 60% 之剛性係取決於結合介面之剛性。這說明，結合介面

之剛性將顯著影響整機之動態行為，因此，在有限元素模型中若無法表現出接點或結合介面的特性，將會使得分析結果無法呈現結構真實的狀態，而這也是執行工具機結構動態行為分析時所必須考慮的。由於理論方法難以解析整體的動態特性。因此，在探討接合介面問題方面，大多以實驗模擬分析法或配合有限元素分析法模擬接合結構來進行理論分析[2,3]。

在傳統工具機結構分析中，通常是以固定介面模式來處理動件與機台結合關係，藉此簡化有限元素模型，以節省有限元素計算時間。此種在分析中以固定的方式建模，無法正確描繪整體結構之動態力學行為，特別是在整體結構中，具有滾動介面之線性滑軌組件，因為在線軌中滾動介面之力學行為係屬於赫茲接觸理論之非線性模式，其剛性變化對結構動態行為之影響是不容忽視的。本研究以 CNC 立式機柱結構為分析對象，並提出鋼珠接觸剛性之有限元素模擬法則，以探討線性滑軌預力對其動態特性之影響，進而評估整機結構自然振動頻率，隨動件位置變化之趨勢，此結果可做為工具機設計或加工精度控制依據。

---

## 有限元素模態分析

---

### 一、接觸元素理論

在有限元素法的使用上，對於分析複雜不規則外形之結構物，可藉由網格的分割，得到合理且正確的分析數值。但在工程問題上，常面臨結構體並非為單一材料所組成，若兩相鄰組織之剛性差異太大，在使用有限元素法之連續理論時，便會在分析的過程中產生較明顯之誤差，為解決此一問題，本計畫將使用接觸元素。

在接觸元素理論推導的過程中，首先將兩元素接觸面上任一點的位移值以內插函數之概念表現出



更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】324期・99年3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