# 工具機震刀異常情況實驗規劃與流程

## 1. 引言

工具機在切削加工過程中，常會遭遇所謂的「震刀」現象，這是一種由刀具、工件或機台系統的振動所引起的不穩定狀況。震刀不僅會導致加工表面品質劣化，產生波浪紋或顫紋，更會加速刀具磨損，縮短機台壽命，甚至對操作人員造成噪音污染和安全隱患。對於精密加工而言，震刀更是無法容忍的缺陷，直接影響產品的精度和合格率。

本實驗規劃與流程旨在針對目前生產機台所面臨的震刀異常情況，提出一套專業且詳盡的量測與分析方法。透過系統性的實驗設計，我們將量測工具機在不同切削條件下的振動響應，並結合數據分析，深入探討震刀產生的根本原因。最終目標是為有限元素分析（FEA）提供可靠的實驗驗證數據，並為後續的機台結構優化或製程參數調整提供科學依據，從而有效解決震刀問題，提升加工品質與生產效率。

## 2. 實驗目標

本實驗的主要目標是全面了解工具機震刀異常情況的特性、識別其主要影響因素，並為後續的改善措施提供數據支持。具體目標包括：

* **量化震動特性**：精確量測工具機在震刀發生時的振動頻率、振幅和加速度，建立震動數據庫。
* **識別震刀模式**：分析不同切削條件下震刀的表現形式，區分主軸、刀具、工件或機台結構的振動模式。
* **探究影響因素**：系統性地改變切削參數（如切削深度、進給速度、主軸轉速）、刀具狀態（如刀具磨損、刀具伸出長度）和工件夾持條件，分析其對震刀的影響。
* **建立實驗數據與FEA模型關聯**：獲取可靠的實驗數據，用於驗證和校準工具機的有限元素分析模型，提高模擬的準確性。
* **為改善措施提供依據**：根據實驗結果，明確震刀的主要原因，為刀具選型、切削參數優化、機台結構改進或減振裝置設計提供量化依據。

## 3. 實驗規劃

本實驗規劃將採用系統性的方法，通過控制變量和量測響應來探究工具機震刀的根本原因。實驗設計將涵蓋切削參數、刀具狀態、工件特性和機台動態響應等多個方面。

### 3.1. 實驗參數與變量

為了全面分析震刀現象，我們將控制和量測以下關鍵參數：

#### 3.1.1. 自變量 (Independent Variables)

* **切削參數 (Cutting Parameters)**：
  + **主軸轉速 (Spindle Speed, N)**：RPM (revolutions per minute)。將選擇多個轉速點，涵蓋常用加工範圍及可能發生震刀的轉速區間。
  + **切削深度 (Depth of Cut, ap)**：mm。將從淺切削逐步增加，觀察其對震刀的影響。
  + **進給速度 (Feed Rate, Vf)**：mm/min 或 mm/rev。將選擇不同進給速度，分析其對切削穩定性的影響。
  + **切削寬度 (Radial Depth of Cut, ae)**：mm。對於銑削加工尤其重要，將控制其與刀具直徑的比例。
* **刀具狀態 (Tool Condition)**：
  + **刀具伸出長度 (Tool Overhang, L)**：mm。將使用不同伸出長度，分析其對刀具剛性的影響。
  + **刀具磨損程度 (Tool Wear)**：新刀、輕微磨損、中度磨損。通過預先磨損或使用不同壽命的刀具進行對比實驗。
  + **刀具類型 (Tool Type)**：不同幾何形狀、材料和塗層的刀具（例如：立銑刀、球頭銑刀；硬質合金、高速鋼）。
* **工件特性 (Workpiece Characteristics)**：
  + **工件材料 (Workpiece Material)**：不同材料的切削性能和阻尼特性不同（例如：鋁合金、鋼、不鏽鋼）。
  + **工件夾持方式 (Workpiece Clamping)**：夾持剛性對振動傳遞有顯著影響（例如：虎鉗夾持、專用夾具）。

#### 3.1.2. 因變量 (Dependent Variables)

* **振動信號 (Vibration Signals)**：
  + **加速度 (Acceleration)**：m/s²。通過加速度計量測，反映振動的劇烈程度。
  + **速度 (Velocity)**：mm/s。通過對加速度信號積分獲得，反映振動能量。
  + **位移 (Displacement)**：μm。通過對速度信號積分獲得，反映振動的振幅。
* **切削力 (Cutting Force)**：N。通過測力儀量測，反映切削過程的穩定性。
* **加工表面品質 (Surface Finish)**：Ra (μm)。通過表面粗糙度儀量測，反映震刀對加工質量的影響。
* **噪音水平 (Noise Level)**：dB。通過噪音計量測，反映震刀產生的聲學影響。

### 3.2. 實驗設備

為確保實驗數據的準確性和可靠性，將使用以下主要設備：

* **工具機 (Machine Tool)**：待驗證的目標工具機，例如CNC銑床或車床。
* **振動量測系統 (Vibration Measurement System)**：
  + **加速度計 (Accelerometers)**：高靈敏度、寬頻響應的三軸加速度計，用於量測主軸、刀具、工件和機台結構的振動。建議選用IEPE型加速度計，便於供電和信號傳輸。
  + **數據採集卡 (Data Acquisition Card, DAQ)**：多通道、高採樣率的DAQ卡，用於同步採集多個加速度計的信號。例如：NI cDAQ系列或同等產品。
  + **信號處理與分析軟體 (Signal Processing and Analysis Software)**：例如：LMS Test.Lab, B&K Pulse, MATLAB/LabVIEW等，用於數據採集、頻譜分析、時域分析、模態分析等。
* **測力儀 (Dynamometer)**：三向或多向壓電式測力儀，用於量測切削力（Fx, Fy, Fz）。例如：Kistler或DynoWare測力儀。
* **表面粗糙度儀 (Surface Roughness Tester)**：用於量測加工後的工件表面粗糙度。例如：Mitutoyo Surftest。
* **噪音計 (Sound Level Meter)**：用於量測加工過程中的噪音水平。
* **高速攝影機 (High-Speed Camera)** (可選)：用於捕捉震刀發生時刀具與工件的微觀動態行為，提供視覺化輔助分析。
* **工件與刀具 (Workpieces and Tools)**：根據實驗設計準備不同材料、尺寸的工件，以及不同類型、磨損程度的刀具。
* **夾具 (Fixtures)**：確保工件和刀具夾持的穩定性和重複性。

### 3.3. 實驗方法

本實驗將採用以下方法進行數據採集和分析：

#### 3.3.1. 感測器佈置

* **主軸**：在主軸箱體或主軸前端安裝加速度計，監測主軸的徑向和軸向振動。
* **刀具/刀柄**：在刀柄上或靠近刀具切削點的位置安裝微型加速度計，直接監測刀具振動。若條件不允許，可通過間接方式（如主軸振動）推斷。
* **工件**：在工件或工件夾具上安裝加速度計，監測工件的振動響應。
* **機台床身/立柱**：在機台主要結構部件上安裝加速度計，監測機台整體的振動傳遞路徑。
* **測力儀**：將測力儀安裝在工件夾具下方或刀塔下方，量測切削力。

#### 3.3.2. 實驗步驟概述

1. **設備校準與連接**：確保所有量測設備（加速度計、測力儀、DAQ卡等）均已校準，並正確連接至數據採集系統。
2. **工件與刀具準備**：根據實驗設計準備工件和刀具，並進行精確安裝和夾持。
3. **切削參數設定**：在工具機控制系統中設定實驗所需的切削參數（主軸轉速、進給速度、切削深度等）。
4. **數據採集**：在切削過程中，同步採集振動信號、切削力信號和噪音信號。確保採樣頻率足夠高，以捕捉高頻振動成分。
5. **加工表面品質評估**：每次切削完成後，量測工件的表面粗糙度，並記錄加工表面形貌。
6. **數據分析**：對採集到的數據進行時域、頻域分析，識別震動頻率、振幅，並與切削參數進行關聯分析。
7. **重複實驗**：對每個實驗條件重複多次，以確保數據的可靠性和統計學意義。

#### 3.3.3. 數據分析方法

* **時域分析 (Time Domain Analysis)**：觀察振動信號的原始波形，分析其幅值、峰值、均方根值等，判斷振動的穩定性。
* **頻域分析 (Frequency Domain Analysis)**：對振動信號進行快速傅立葉變換 (FFT)，獲得頻譜圖，識別振動的主要頻率成分，特別是與主軸轉頻、刀具齒頻、機台固有頻率相關的頻率。
* **瀑布圖/頻譜圖 (Waterfall Plot/Spectrogram)**：分析振動頻率隨主軸轉速或切削條件變化的趨勢，識別共振點和顫振區。
* **穩定性葉瓣圖 (Stability Lobe Diagram)**：通過理論計算和實驗驗證，繪製切削穩定性葉瓣圖，指導選擇無顫振的切削參數。
* **模態分析 (Modal Analysis)**：對機台結構進行實驗模態分析 (Experimental Modal Analysis, EMA)，獲取機台的固有頻率和模態振型，與切削振動頻率進行對比，判斷是否發生共振。
* **切削力分析 (Cutting Force Analysis)**：分析切削力的波動情況，切削力波動越大，通常表示切削過程越不穩定，越容易發生震刀。
* **表面粗糙度與振動關聯分析**：分析表面粗糙度與振動信號之間的相關性，量化震刀對加工品質的影響。

本實驗規劃將為後續的實驗操作提供清晰的指導，確保能夠系統性地收集到關鍵數據，為深入分析工具機震刀異常情況提供堅實基礎。

## 4. 詳細實驗流程

本節將詳細闡述實驗的具體操作步驟，包括實驗準備、數據採集、數據處理與分析，以及結果驗證與報告。

### 4.1. 實驗準備

1. **安全檢查**：
   * 確認工具機及其周邊環境符合安全操作規範。
   * 檢查所有電氣連接、氣動和液壓系統是否正常。
   * 確保急停按鈕功能正常。
   * 操作人員穿戴好個人防護裝備（安全眼鏡、耳罩等）。
2. **設備安裝與校準**：
   * **工具機**：確保工具機處於良好工作狀態，主軸、導軌等關鍵部件無異常。
   * **加速度計安裝**：
     + 根據實驗規劃，在主軸箱、刀柄、工件夾具和機台床身等指定位置，使用磁性底座或螺栓固定方式，牢固安裝加速度計。確保感測器軸向與量測方向一致（例如：X、Y、Z三軸）。
     + 記錄每個加速度計的安裝位置和方向。
     + 連接加速度計至DAQ卡的輸入通道，並確認連接穩固。
   * **測力儀安裝**：
     + 將測力儀安裝在工件夾具下方或刀塔下方，確保其與切削力傳遞路徑垂直。
     + 連接測力儀至DAQ卡的輸入通道。
   * **數據採集卡 (DAQ) 設定**：
     + 設定DAQ卡的採樣頻率。根據奈奎斯特採樣定理，採樣頻率應至少是最高感興趣頻率的兩倍。考慮到工具機振動頻率可能高達數千赫茲，建議採樣頻率設定在10 kHz至20 kHz之間，以確保捕捉到足夠的頻率成分。
     + 設定採樣時間和觸發模式（例如：連續採樣或觸發採樣）。
     + 確認所有通道的增益和量程設定正確，避免信號飽和或分辨率不足。
   * **表面粗糙度儀**：檢查儀器電量，校準測量頭。
   * **噪音計**：檢查儀器電量，校準麥克風。
3. **工件與刀具準備**：
   * 準備足夠數量的工件，確保材料、尺寸和表面狀態一致。
   * 準備不同類型、磨損程度的刀具，並記錄其詳細參數（型號、幾何形狀、塗層、新舊程度、刀具伸出長度等）。
   * 將工件牢固夾持在工具機工作台上，確保夾持剛性良好且重複性高。
   * 將刀具安裝在主軸或刀塔上，並檢查刀具跳動量。
4. **切削參數設定**：
   * 根據實驗規劃，在工具機數控系統中輸入或調整切削參數（主軸轉速、進給速度、切削深度、切削寬度等）。
   * 對於每個實驗條件，建議從較保守的參數開始，逐步調整，以避免對機台或刀具造成損壞。

### 4.2. 數據採集

1. **預切削與熱機**：
   * 在正式實驗前，進行幾次預切削，使工具機達到穩定的熱平衡狀態，並確保切削過程順暢。
   * 觀察機台運行情況，確認無明顯異常。
2. **單次實驗運行**：
   * 啟動數據採集系統，開始記錄所有感測器信號。
   * 啟動工具機，按照預設的切削參數進行加工。
   * 在切削過程中，密切觀察機台運行狀態，特別是是否有震刀現象發生，並記錄觀察到的現象（例如：噪音、火花、加工表面變化）。
   * 切削完成後，停止數據採集。
3. **數據保存**：
   * 將採集到的原始數據以清晰的命名方式保存，包括實驗日期、時間、實驗條件（切削參數、刀具、工件等）和實驗編號。
   * 建議使用數據採集軟體自帶的數據管理功能，或建立統一的數據文件夾結構。
4. **加工表面品質量測**：
   * 取出加工後的工件，使用表面粗糙度儀量測加工表面的Ra值，並記錄。
   * 目視檢查加工表面，記錄是否有顫紋、波浪紋或其他異常。
5. **重複實驗**：
   * 對每個實驗條件重複至少3次，以確保數據的重複性和可靠性。若數據波動較大，可適當增加重複次數。
   * 每次重複實驗前，檢查刀具狀態和工件夾持，確保一致性。

### 4.3. 數據處理與分析

1. **數據預處理**：
   * **濾波**：對原始信號進行濾波處理，去除高頻噪音和低頻漂移，確保信號質量。
   * **去趨勢**：對於可能存在的直流分量或緩慢變化趨勢進行去除。
   * **重採樣** (如果需要)：將不同採樣頻率的數據統一到相同採樣頻率。
2. **時域分析**：
   * 計算振動信號的均方根 (RMS) 值、峰值 (Peak Value)、峰峰值 (Peak-to-Peak Value) 等統計參數，反映振動的整體能量和劇烈程度。
   * 繪製振動信號的時域波形圖，直觀觀察信號的穩定性、週期性或隨機性。
   * 分析切削力信號的時域波形，判斷切削過程的穩定性。
3. **頻域分析**：
   * 對振動信號和切削力信號進行快速傅立葉變換 (FFT)，生成功率譜密度 (PSD) 或頻譜圖。
   * **識別主要頻率成分**：
     + **主軸轉頻 (Spindle Rotational Frequency)**：與主軸轉速相關的頻率及其倍頻。
     + **刀具齒頻 (Tool Passing Frequency)**：刀具齒數乘以主軸轉頻。
     + **機台固有頻率 (Machine Tool Natural Frequencies)**：通過實驗模態分析或理論計算獲得的機台結構固有頻率。
     + **顫振頻率 (Chatter Frequency)**：通常表現為在切削頻譜中出現的寬頻或多個尖銳峰值，且不與主軸轉頻或刀具齒頻直接相關的頻率。顫振頻率通常接近於機台-刀具-工件系統的固有頻率。
   * **瀑布圖/頻譜圖**：繪製不同切削參數下的頻譜圖，觀察頻率成分的變化趨勢，特別是顫振頻率的出現和演變。
4. **穩定性葉瓣圖分析**：
   * 根據實驗數據，特別是切削深度和主軸轉速的組合，判斷哪些參數組合會導致震刀，哪些是穩定的。
   * 將實驗結果標註在理論穩定性葉瓣圖上，驗證理論模型的準確性，並指導優化切削參數。
5. **模態分析 (若有條件)**：
   * 對工具機進行實驗模態分析 (EMA)，獲取機台結構的固有頻率和模態振型。
   * 將實驗模態參數與切削振動頻率進行對比，判斷震刀是否由機台結構共振引起。
6. **關聯性分析**：
   * 分析振動信號、切削力、表面粗糙度與切削參數、刀具狀態之間的相關性。
   * 例如，繪製不同切削深度下振動RMS值與表面粗糙度的關係圖，量化震刀對加工品質的影響。

### 4.4. 結果驗證與報告

1. **結果總結**：
   * 根據數據分析結果，總結震刀發生的主要條件、振動特性和影響因素。
   * 明確震刀的根本原因，例如：切削參數不當、刀具剛性不足、機台結構共振等。
2. **實驗數據與FEA模型驗證**：
   * 將實驗量測到的振動頻率、振幅、模態振型等數據與FEA模擬結果進行對比。
   * 根據實驗數據校準FEA模型的邊界條件、材料參數或阻尼比，提高FEA模型的準確性和預測能力。
3. **提出改善建議**：
   * 根據實驗結果和FEA驗證，提出具體的改善建議，例如：
     + 優化切削參數：提供無震刀的切削參數範圍或最佳切削參數組合。
     + 刀具選型與優化：建議使用更高剛性、更短伸出長度或具有減振功能的刀具。
     + 機台結構改進：若為機台結構共振引起，建議進行結構補強、增加阻尼或調整結構設計。
     + 夾具優化：提高工件夾持剛性。
4. **撰寫實驗報告**：
   * 編寫一份專業的實驗報告，內容應包括：引言、實驗目標、實驗規劃（參數、設備、方法）、詳細實驗流程、數據處理與分析結果、結論與改善建議、參考文獻和附錄。
   * 報告中應包含清晰的圖表（時域波形、頻譜圖、瀑布圖、穩定性葉瓣圖等）和數據，支持分析結論。

這份詳細的實驗流程將確保實驗的系統性、科學性和可重複性，為精確診斷工具機震刀異常情況提供堅實的基礎。

## 5. 參考文獻

[1] Altintas, Y. (2000). *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge University Press.

[2] Tlusty, J., & Polacek, M. (1963). The Stability of the Machining Process. *Proceedings of the 3rd International MTDR Conference*, 147-154.

[3] Schmitz, T. L., & Smith, K. S. (2009). *Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity*. Springer.

[4] 陳宗賢. (2018). *工具機切削顫振之研究與分析*. 國立成功大學機械工程學系碩士論文.

[5] 王文華. (2020). *基於振動量測之工具機健康監測與故障診斷*. 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文.

## 6. 附錄

### 6.1. 感測器安裝位置示意圖

(此處可插入工具機各關鍵部位感測器安裝位置的示意圖，例如：主軸、刀柄、工件夾具、機台床身等)

### 6.2. 數據採集系統連接示意圖

(此處可插入加速度計、測力儀、DAQ卡、電腦等設備的連接示意圖)

### 6.3. 實驗數據範例

(此處可插入部分原始振動時域信號、頻譜圖、瀑布圖等數據範例，以供參考)

### 6.4. 實驗日誌範本

| **日期** | **時間** | **實驗編號** | **工具機型號** | **切削參數 (N, ap, Vf, ae)** | **刀具類型/磨損** | **工件材料/夾持** | **觀察現象 (震刀/噪音)** | **表面粗糙度 (Ra)** | **備註** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| YYYY/MM/DD | HH:MM | Exp-001 | XYZ-500 | N=5000, ap=0.5, Vf=2000, ae=0.1D | 新刀, 伸出50mm | 鋁合金, 虎鉗 | 輕微震刀 | 0.8 | 首次測試 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |