

刀具顫振穩定圖預測分析模組 之開發與應用

■ 王栢村、梁秀璋

摘要：

一般來說要得到刀具顫振穩定圖(Stability Lobe Diagram, SLD)需要有實驗之刀具頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)結果，便可由SLD之中選擇加工參數，降低切削顫振的發生。本文主要針對刀具顫振穩定圖之預測及其結果進行討論，首先說明銑削顫振對加工工件之影響，並說明加工時顫振發生之原因。接著假設刀具為單自由度振動系統並討論不同加工參數下，單自由度所預測之顫振穩定圖結果。最後以單自由度延伸至多自由度振動系統，並討論不同加工參數時預測之結果。希望藉由本文能使相關使用者易於瞭解切削顫振的發生，且透過單自由度與多自由度模組可快速得到不同參數下之刀具顫振穩定圖，方便加工時做為加工之參考。

一、銑削顫振概述

銑削，特別是高速銑削，通常被現今的製造產業廣泛應用於獲得最終形狀的機械加工方法。舉例來說，金屬切割時所需用的模具或壓鑄模，甚至在汽車業、航空工業，皆需要能對材料有較高的材料移除率(Metal Removal Rate, MRR)與高生產率，並仍有精確性的加工程序。切削顫振(Chatter)是一種自激激振(self-excited vibration)的現象，通常發生於機械加工時，在眾多引發切削振動之成因中以顫振對加工品質影響最劇，並限制了生產率。切削顫振會有許多不良的影響，像不良的加工表面、嚴重的精度誤差及吵雜的噪音，並增加刀具的磨耗、加工機具的損壞及降低材料移除率，導致加工時間、材料及能源等成本相對增加。

欲獲得顫振穩定圖形已有許多應用方法，Yue [1]藉由頻率響應函數運算可得到結構對應之SLD。王[2]探討銑削時之切削顫振現象與其理論分析，發展刀具顫振穩定圖之預測分析模組，並以實驗量測之刀具頻率響應函數進行

刀具顫振穩定圖形預測。Quintana et al. [3,4]進行簡易的實驗，以不同主軸轉速及工件銑削深度，獲得銑削時相關聯之SLD。在得到顫振穩定圖形後，可從中選取適當之切削參數以避免切削顫振發生。

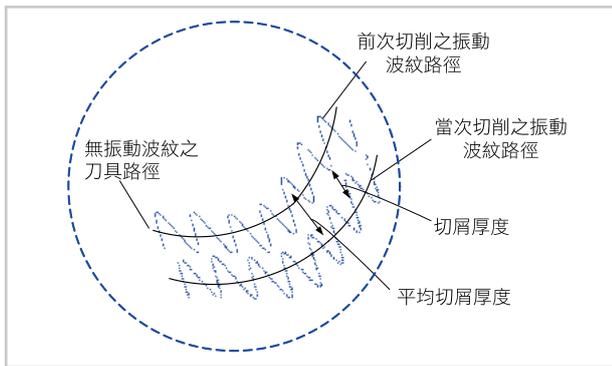
刀具頻率響應函數可藉由實驗方式或理論分析求得，Erturk et al. [5]利用有限元素分析模型與實驗進行比對驗證，瞭解主軸-刀柄-刀具在不同設計及操作參數下之頻率響應函數之變化，以及連帶改變其顫振穩定圖形之影響。Altintas and Cao [6]對工業用之刀具主軸進行模擬設計與最佳化主軸參數，藉由預測刀具之頻率響應函數進行變更設計，最後得到一組最佳化之顫振穩定圖形結果。可發現工具機與主軸構件耦合之結構動態特性，連帶影響耦合後之頻率響應函數及顫振穩定圖形。

圖1為銑削加工圖，當實際銑削作業將銑刀夾持於工具機之主軸，刀具與工具機則為一耦合結構系統，透過實驗可得知銑床結構之自然頻率與模態振型，表示當機械加工時與刀具及工具機耦合系統頻率相同便可能發生顫振現象，導致前次切削之振動波紋路徑與當次切削之振動波紋路徑相異如圖2所示，使得加工表面產生不良影響等。藉由刀具單自由度(single degree of freedom, SDOF)與多自由度(multiple degree of freedom, MDOF)系統之假設與理論分析，建置刀具SLD預測模組，以預測分析刀具與工件加工組合之SLD，可降低機械加工時顫振現象發生。

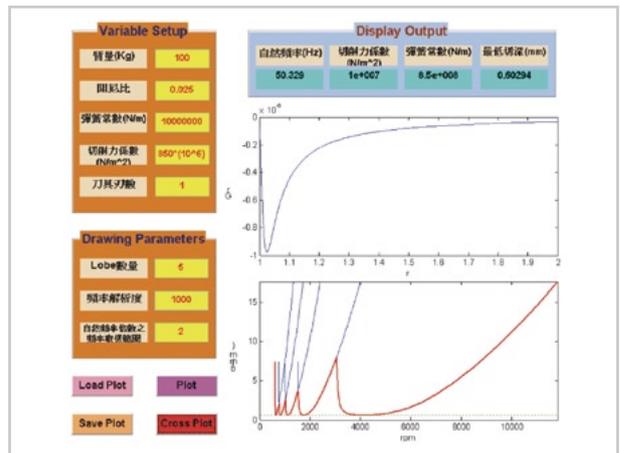


▲ 圖1、銑削加工圖

社 群 顧 問 開 講



▲ 圖2、刀具路徑示意圖

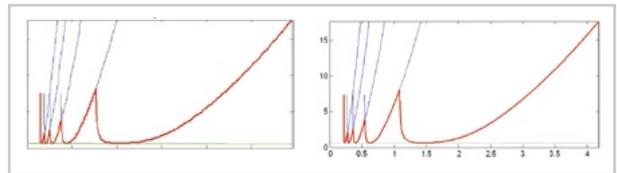


▲ 圖3、單自由度顫震穩定圖預測模組介面圖

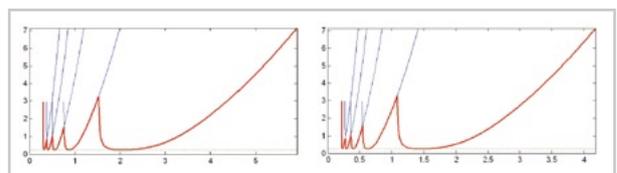
二、單自由度理論顫振穩定圖形預測模組

圖3為預測顫振穩定圖之SDOF模組介面圖，在此模組中可輸入刀具參數質量(Kg)、阻尼比、刀具等效彈簧常數(N/m)、刃數，以及加工工件之切削力係數 $K_s(N/m^2)$ ，便可即時獲得對應之輸出參數，如：刀具自然頻率、最小切深以及SLD預測結果，介面圖中左側為相關參數輸入，上方為預測結果輸出，上圖為無因次之刀具頻率響應函數，下圖為SLD預測結果以rpm為x軸，切深為y軸。圖4為SDOF以不同輸入參數預測之結果，分析時變更質量、工件切削力係數及刀具刃數，並固定彈簧常數為 $10^7(N/m)$ 、阻尼比為0.025，皆設定得到5個lobe，綜合討論如下：

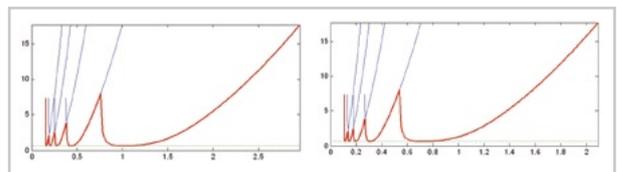
1. 圖4中5個圓弧即對應之5個lobe，所連成之粗實線即為SLD曲線，SLD曲線下方之刀具轉速與切深組合為穩定切削區域，無切削顫振之虞，反之，於SLD曲線上方之組合，將產生切削顫振。
2. 由圖4 (a)及(b)結果可以看出，當質量增加時，刀具自然頻率降低，會降低加工時主軸轉速。
3. 從圖4(a)及(c)分析預測結果可以發現，當改變加工工件之切削力係數，則會影響SLD切削深度，也同樣影響加工時最低切削深度；而工件之切削力係數越高，亦即工件剛性越大，所降低的切削深度越多。
4. 由圖4(a)及(e)分析預測結果，可以看出當增加刀具刃數時，加工時主軸轉速有大幅降低的現象。



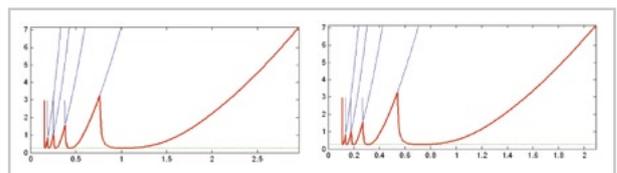
▲ (a) Kg:1;Ks:850×10⁶;z:2 ▲ (b) Kg:2;Ks:850×10⁶;z:2



▲ (c) Kg:1;Ks:2100×10⁶;z:2 ▲ (d) Kg:2;Ks:2100×10⁶;z:2



▲ (e) Kg:1;Ks:850×10⁶;z:4 ▲ (f) Kg:2;Ks:850×10⁶;z:4



▲ (g) Kg:1;Ks:2100×10⁶;z:4 ▲ (h) Kg:2;Ks:2100×10⁶;z:4

▲ 圖4、SDOF模組之SLD預測結果

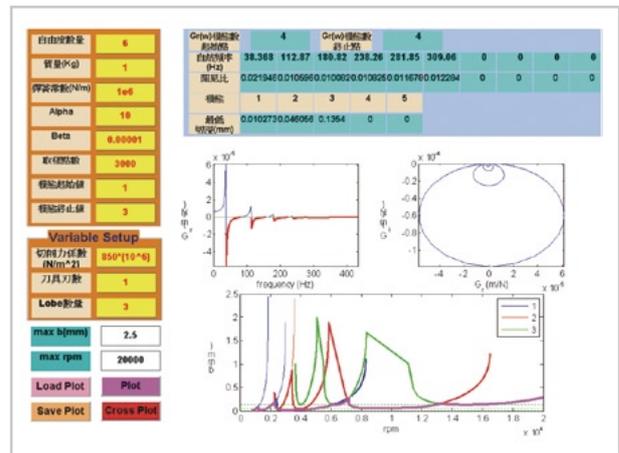
單自由度理論顫振穩定圖形預測模組有以下特點：

1. 可由使用者自行定義變數大小，以單自由度的理論預測方式，達到顫振穩定圖形之預測。
2. 透過設定不同之輸入參數，可以得到理論分析之自然頻率與其對應之顫振穩定圖形。
3. 經由單自由度理論預測分析結果，可以得知刀具基礎自然頻率所對應產生一組lobe之SLD預測結果。

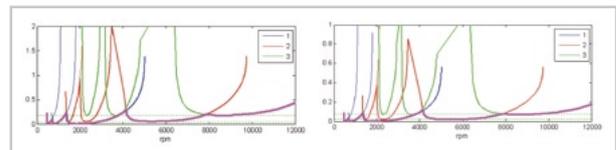
三、多自由度理論顫振穩定圖形預測模組

圖5為刀具MDOF假設之SLD預測模組介面圖，在此模組中可輸入刀具系統自由度、質量(Kg)、刀具等效彈簧常數(N/m)、刃數與加工件之切削力係數 K_s (N/m²)，並可即時獲得對應之輸出參數，如：刀具各模態之自然頻率、阻尼比、最低切深以及SLD預測結果，介面圖中左側為相關參數輸入，上方為預測結果輸出，圖形區域之左上圖為頻率響應函數之實數部，右上圖為奈氏圖，下圖為SLD預測結果以rpm為x軸，切深為y軸。圖6為MDOF模組以不同輸入參數預測之結果，變更工件切削力係數、刀具刃數以及lobe數量，並固定彈簧常數為(N/m)與其他參數，綜合討論如下：

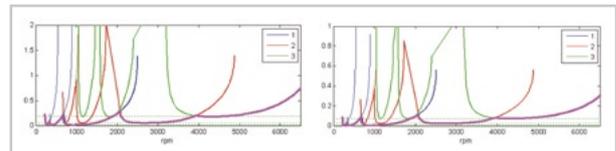
1. 圖6均取刀具前3個振動自然模態，各模態設定3個或4個lobe之SLD預測結果，粗實線為各模態及其各lobe之SLD曲線，SLD曲線下方為穩定切削區域。
2. 由圖6(a)及(b)結果可以看出，當改變加工工件之切削力係數，則會影響SLD切削深度。
3. 由圖6(a)與(c)分析預測結果，可以看出當增加刀具刃數時，加工時主軸轉速有大幅降低的現象。
4. 當設定不同數量之lobe時，可從圖6(a)及(e)分析預測結果可以發現，每一模態皆有對應設定lobe數，每條lobe交疊後即為SLD之預測結果。



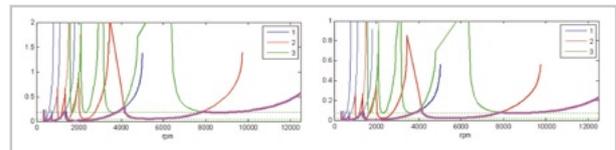
▲ 圖5、多自由度顫震穩定圖預測模組介面圖



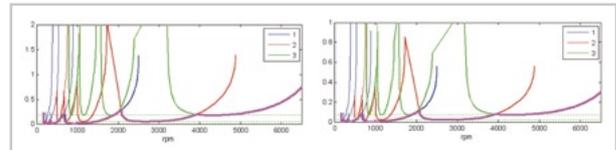
▲ (a) $K_s: 850 \times 10^6; z: 2; \text{lobe: } 3$ ▲ (b) $K_s: 2100 \times 10^6; z: 2; \text{lobe: } 3$



▲ (c) $K_s: 850 \times 10^6; z: 4; \text{lobe: } 3$ ▲ (d) $K_s: 2100 \times 10^6; z: 4; \text{lobe: } 3$



▲ (e) $K_s: 850 \times 10^6; z: 2; \text{lobe: } 4$ ▲ (f) $K_s: 2100 \times 10^6; z: 2; \text{lobe: } 4$



▲ (g) $K_s: 850 \times 10^6; z: 4; \text{lobe: } 4$ ▲ (h) $K_s: 2100 \times 10^6; z: 4; \text{lobe: } 4$

▲ 圖6、MDOF預測結果

講 開 問 顧 群 社



多自由度理論顫振穩定圖形預測模組有以下特點：

1. 此一多自由度系統，可自行定義質量、自由度等相關變數，透過此一特點藉此模擬刀具特性。
2. 使用者更可自行定義程式中之矩陣，使得此預測模組具有彈性。
3. 若針對刀具於夾持邊界情況下，進行實驗模態分析，可得到工具機與主軸刀具之耦合模態參數，由此一模態參數可推算得矩陣，由推算結果便可應用於程式中。
4. 於預測模組中，可由使用者自行輸入不同刀具刃數及工件切削力係數，方便對不同刃數之端銑刀與工件進行SLD預測。
5. 經由多自由度理論預測分析結果，可以得知模態與模態間lobe交錯所圍出之SLD曲線，即為多自由度顫振穩定圖形預測結果。
6. 此一模組可延伸應用於量測之刀具頻率響應函數，藉以得到其對應之刀具顫振穩定圖形。

四、結 論

本文主要針對刀具顫振穩定圖之預測及其結果進行討論，得以瞭解切削顫振之原因，並可經由刀具頻率響應函數運算得到刀具顫振穩定圖。藉由理論運算發展單自由度與多自由度刀具振動系統之顫振穩定圖預測分析模組可利於瞭解結構特性，以及加工參數對顫振穩定預測之影響，模組設定相當容易，操作者可輕易上手使用，且能將此模組作為教學之應用。希望透過單自由度與多自由度模組所得到之刀具顫振穩定圖，有助於銑削時，避免切削顫振且能得到最大金屬去除率之加工參數選擇的參考依據。

五、參考文獻

- [1] Yue, J., 2006, "Creating a Stability Lobe Diagram," *Proceedings of the 2006 IJME - INTERTECH Conference*, New Jersey, Sessions 301-050.
- [2] 王栢村, 2009, 「加工效率與振動問題研究」, 財團法人精密機械研究發展中心委託研發計畫期末

報告, 國立屏東科技大學。

- [3] Quintana, G., Ciurana, J., and Teixidor, D., 2008, "A New Experimental Methodology for Identification of Stability Lobes Diagram in Milling Operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1637-1645.
- [4] Quintana, G., Ciurana, J., Ferrer, I., and Rodriguez, C. A., 2009, "Sound Mapping for Identification of Stability Lobe Diagrams in Milling Processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 203-211.
- [5] Erturk, A., Budak, E., and Ozguven, H. N., 2007, "Selection of Design and Operational Parameters in Spindle-Holder-Tool Assemblies for Maximum Chatter Stability by Using a New Analytical Model," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1401-1409.
- [6] Altintas, Y., and Cao, Y., 2005, "Virtual Design and Optimization of Machine Tool Spindles," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 379-382.

作者簡介

王栢村
國立屏東科技大學 機械工程系 教授
專長：結構振動噪音控制、電腦輔助工程分析

梁秀璋
國立屏東科技大學 機械工程系(所) 研究生