

端銑刀有限元素模型驗證與振動模態特性探討

王栢村¹、梁秀璋²、簡文通¹、吳育仁³、周嘉莉⁴

¹屏東科技大學機械工程系教授

²屏東科技大學機械工程系研究生

³屏東科技大學機械工程系助理教授

⁴精密機械研究發展中心 系統工程師

摘要

為了得到銑削時其響應之模擬，適當且準確的有限元素模型便是相當必要的，故本文目的在建立可拋棄刀片之端銑刀之有限元素模型，模型則以 ANSYS 有限元素分析軟體進行建構。首先分別建構刀具在自由及挾持邊界情況下之有限元素模型，並運用實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)技術得到刀具於自由邊界之振動特性。結果顯示於挾持邊界之刀具其自然頻率有明顯降低之現象。藉由模態參數比對之結果可以確定所建構之有限元素模型等效於實際結構，未來更可特別在挾持邊界之有限元素模型進行其他分析，如頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)之模擬及切削響應之預測。

關鍵字：有限元素分析、實驗模態分析、拋棄式端銑刀、振動特性

1. 前言

銑削製程，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零件。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，並限制了其生產率。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。

有鑑於此，針對銑削刀具之振動特性進行探討，一直以來運用有限元素分析法(Finite Element Analysis, FEA)與實驗模態分析法得到結構振動特性是相當普遍的，黃等人[8]對立式 CNC 工具機運用有限元素分析法與實驗模態分析法，進行工具機結構動態剛性分析。Erturk *et al.*[1]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動態特性。

經由模型驗證除了獲得等效模型外，也能得到結構之振動特性，便可利用所得之頻率響應函數運算得到 SLD 預測圖形，藉由 SLD 可避開銑削加工可能發生切削顫振之位置，Quintana *et al.*[2-3]進行簡易的實

驗方法，以不同主軸轉速及工件銑削深度，獲得銑削時相關聯之 SLD；並探討高速銑削時與聲音的關聯性，將銑削過程時的 SLD 應用於聲音立體圖(Sound mapping)的方法。Smith *et al.*[4]提出新的 Power Lobe Diagram (PLD) 方法，是由主軸功率曲線及轉速所組合，可得到功率與加工之穩定關聯性。Lan *et al.*[5]呈現新的穩定模擬預測工具 Stability Map，可模擬工件加工時切削深度與切削顫振關係。

除了運用 SLD 方式選擇穩定的銑削區域之加工參數外，楊與廖[10]使用電腦監測切削時切削力的訊號，當顫振現象發生時以控制器以調整主軸轉速，使加工達到穩定。蔡等人[9]利用微型麥克風擷取切削時的聲音訊號，對抖顫特性之切削狀態進行監測，作為切削主軸轉速的依據。Tang *et al.*[6]發展一套考慮到系統多模態(Multi-mode)之理論方法，瞭解加工參數設定使加工時有最大 MRR 且無切削顫振的產生。Budak and Tekeli [7]透過理論公式推導並驗證無切削顫振時最大 MRR 與切削半徑深度及軸向切削深度之關係。

本文目的為運用 EMA 與 FEA 方法對可拋棄刀片之端銑刀進行模型驗證，藉此得到等效於實體結構之有限元素模型，經由實驗與分析之結果可得到端銑刀之模態參數，可進一步瞭解端銑刀之振動特性，未來更可藉由實驗所量測之頻率響應函數進行加工製程時穩定顫振圖形之預測。圖 1 為端銑刀具之模型驗證流程圖。

2. 有限元素分析

本文使用套裝軟體 ANSYS 進行有限元素分析，將端銑刀與拋棄式刀片之有限元素模型視為一體，且設定整體之端銑刀具為等向性材料並進行有限元素分析。由模態分析可求得結構之理論自然頻率及模態振型，經由簡諧響應分析可求得結構之理論頻率響應函數。由於加速度計之質量相對於端銑刀而言較小，故忽略加速度計之質量效應。表 1 為端銑刀具之尺寸及材料性質表，圖 2 為端銑刀具之實體結構圖，圖 3 為其尺寸圖。模型建構說明如下：

1. 元素選用：端銑刀具使用線性立方體元素(Solid45)進行建構，如圖 4 所示。
2. 元素分割：模型分割使用 free mesh 方式將整體模型分割為 23951 個元素。
3. 位移限制條件：當以全自由邊界模擬無須設定任何位移限制。
4. 負荷條件：模態分析不需設定負荷；簡諧響應分析

需在分析時給予 1(N)之單位力。

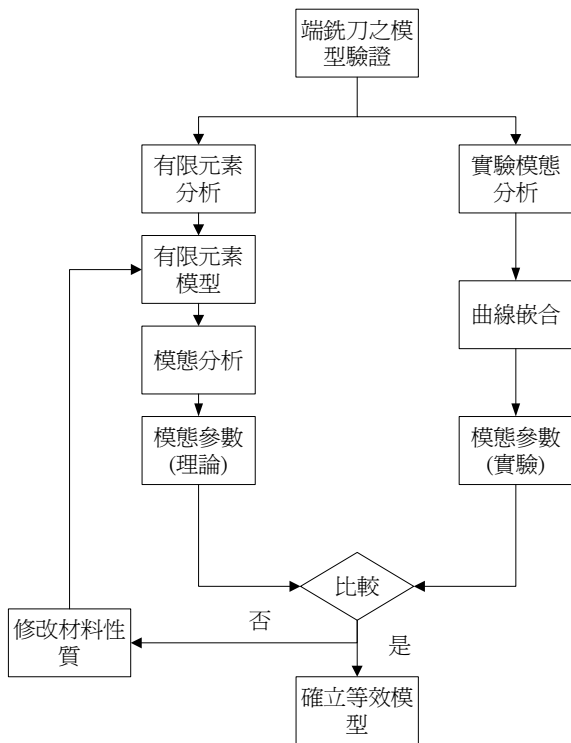


圖 1 可拋棄刀片之端銑刀模型驗證流程



圖 2 可拋棄刀片之端銑刀之實際結構圖

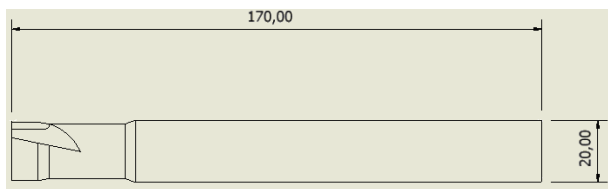


圖 3 可拋棄刀片之端銑刀之尺寸圖

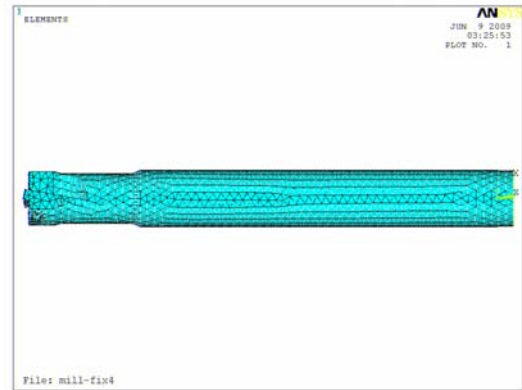


圖 4、PCB 有限元素模型

表 1 端銑刀具之尺寸及材料性質表

端銑刀身長	170 mm
端銑刀直徑	$\phi 20$ mm
楊氏係數 E	194 GPa
浦松比 ν	0.2976
密度 ρ	$7.849 \times 10^{-9} \text{ g / mm}^3$

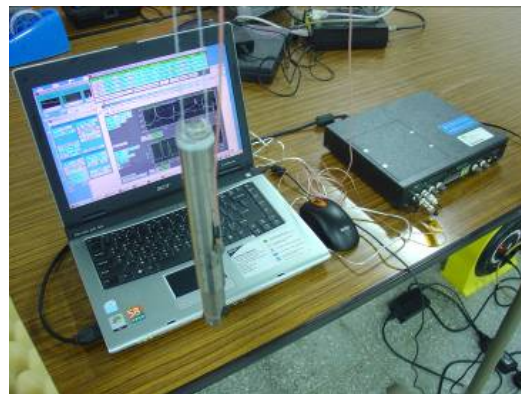


圖 5 實驗量測示意圖

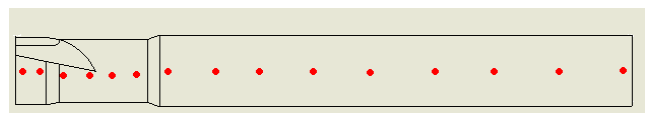


圖 6 量測點規劃示意圖

3. 實驗模態分析

如圖 5 實驗量測示意圖所示進行實驗模態分析，實驗量測點規劃如圖 6 所示，於圓周方向每 60 度規劃一條量測路徑共分六條路徑及刀片周圍規劃 4 個量測點，共計總量測點共 98 點；實驗時使用微型衝擊錘作為驅動器並使用加速度計作為感測器，利用頻譜分析儀擷取敲擊時之響應訊號並得到結構之頻率響應函數，再利用曲線嵌合技術擷取結構之模態參數：自然頻率、模態振型及阻尼比，最後將實驗與理論之模態參數進行驗證比對。

表 2 理論分析與實驗量測之自然頻率比對表

實驗量測之自然頻率		原始分析之自然頻率		自然頻率誤差	修改分析後之自然頻率		自然頻率誤差
Mode	EMA	Mode	FEA	%	Mode	FEA	%
1	3274.8	7	3418.6	4.39	7	3267.9	-0.21
		8	3425		8	3274.1	
2	8114.3	9	8464	4.31	9	8091.8	-0.27
		10	8484		10	8110.1	
3	10360	11	11035	6.51	11	10549	1.82
4	14236	12	14953	5.03	12	14294	0.41
5	14376	13	14997	4.31	13	14336	-0.27
6	16092	14	16344	1.56	14	15624	-2.91
7	18942	15	X	X	15	19661	3.79

表 3 理論分析與實驗量測之模態振型比對表

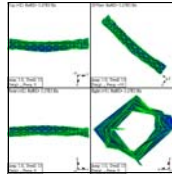
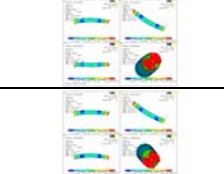
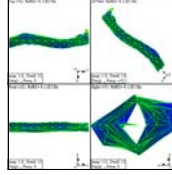
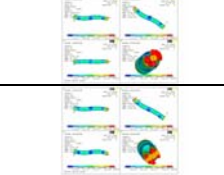
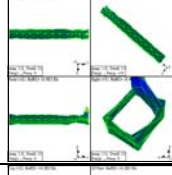
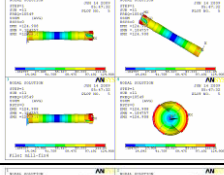
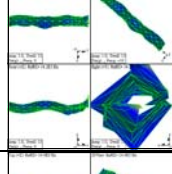
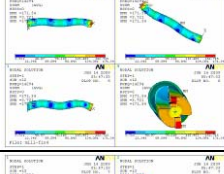
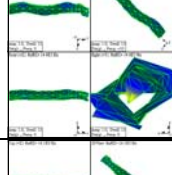
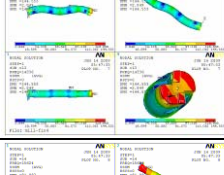
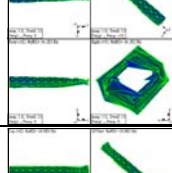
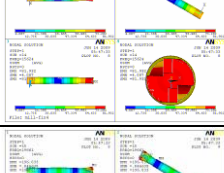
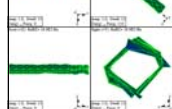
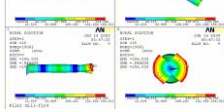
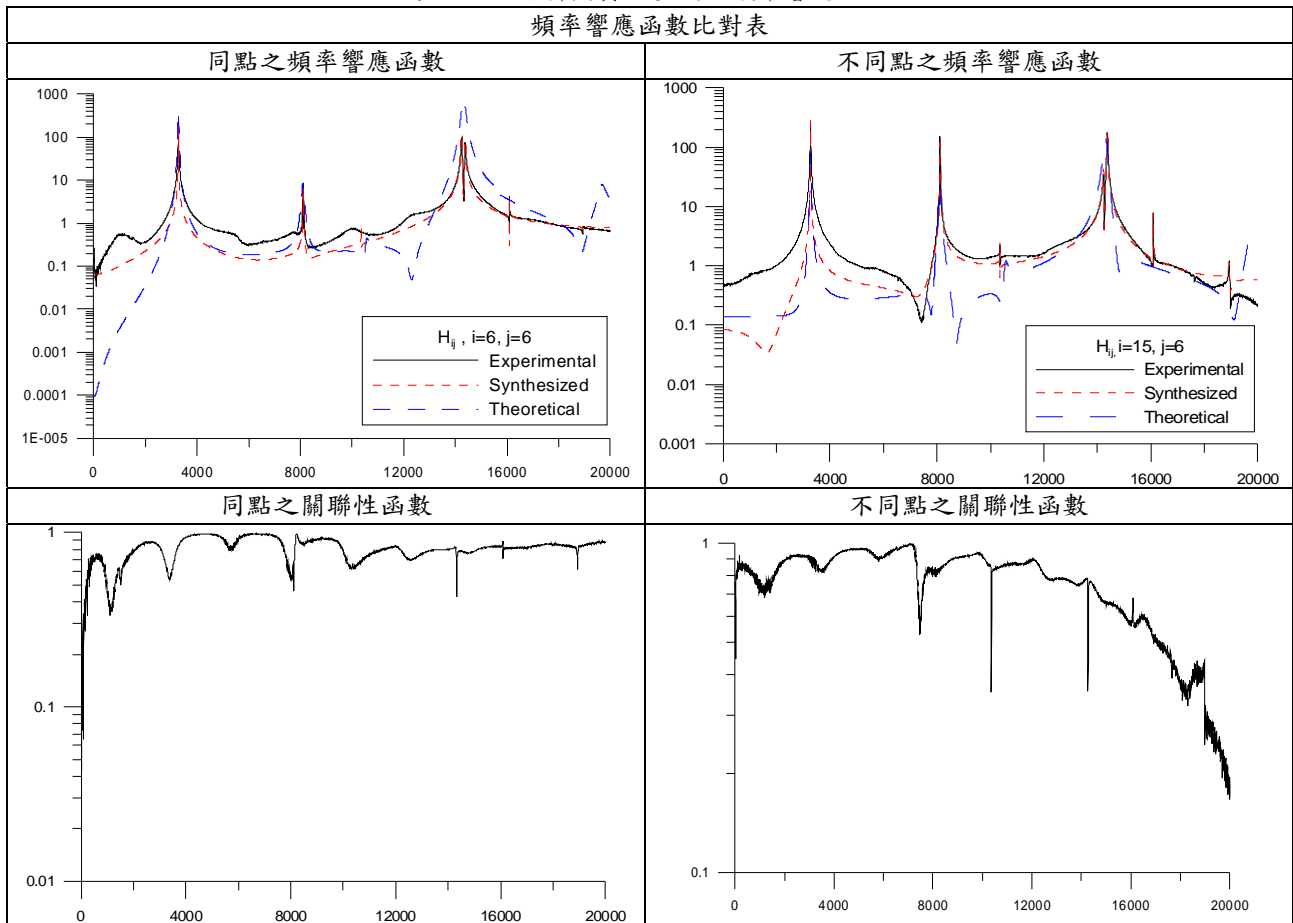
實驗之模態振型			修改分析後之模態振型		
Mode	頻率(Hz)	模態振型	Mode	頻率(Hz)	模態振型
E-01	3274.8		F-07	3267.9	
			F-08	3274.1	
E-02	8114.3		F-09	8091.8	
			F-10	8110.1	
E-03	10360		F-11	10549	
E-04	14236		F-12	14294	
E-05	14376		F-13	14336	
E-06	16092		F-14	15624	
E-07	18942		F-15	19661	

表 4 理論分析與實驗量測之頻率響應函數



4. 結果與討論

本文主旨對可拋棄刀片之端銑刀進行模型驗證，藉此得到等效於實體結構之有限元素模型，經由實驗敲擊與進行有限元素分析，透過擷取出之結果可得到結構之模態參數包括自然頻率、模態振型及頻率響應函數，藉由模態參數可瞭解結構之特性。綜合討論如下：

1. 由表 2 理論分析與實驗量測之自然頻率比對表可以看出，原始分析之自然頻率與實驗量測之自然頻率誤差約 4%，且在 18000Hz 的模態並未被激發，經材料參數修改後可以發現自然頻率誤差最高約 3%。
2. 表 3 為理論分析與實驗量測之模態振型比對表，可觀察出前四個分析之模態振型有兩兩成軸對稱模態的現象，而其自然頻率也相當接近，經實驗與分析模態比對後可看出模態振型相似但角度不相同，推估對稱模態出現可能是由於結構為圓柱體導致。
3. 由表中可以得知刀具的模態振型除了常見的彎曲模態外，還有扭轉以及伸縮的模態產生。
4. 藉由實驗與理論分析之模態振型可以看出兩者皆有一定的對應性，且自然頻率誤差也相當接近。

5. 從表 4 理論分析與實驗量測之頻率響應函數得知，實驗與合成之頻率響應函數皆有一定的對應性，顯示曲線嵌合相當成功且由嵌合之模態參數也具有一定的可靠度；實驗與分析之頻率響應函數整體也有一定的趨勢，表示分析之結果也相當合理。

6. 當關聯性函數趨近於 1 時表示其實驗品質良好，由表中可以看出在刀具同點之關聯性函數只有在反共振點的位置較低其餘皆趨近於 1；在刀具不同點之關聯性函數則在高頻有明顯降低之趨勢，推估是因為敲擊時無法準確的敲擊於曲面的切線上，且敲擊點是位於於刀具端點之位置離加速度計較遠導致。

5. 結論

本文主要使用 EMA 與 FEA 方法對可拋棄刀片之端銑刀進行模型驗證，藉此得到等效於實體結構之有限元素模型，進一步瞭解端銑刀之振動特性。本文綜合結論如下：

1. 由理論分析與實驗量測之結果可以發現其自然頻率誤差最高約 3%，而在模態振型也有一定的對應性，表示模型驗證相當成功所建立之有限元素模型是可等效於實際結構。
2. 可拋棄刀片之端銑刀本身自然頻率較高，固不容易

受到其他外力激振的頻率達到共振現象。

3. 日後進行模型驗證時，可針對局部結構進行比對避開結構幾何形狀較複雜的部份，使得比對結果可以更精確。
4. 未來更可藉由實驗所量測之頻率響應函數進行加工製程時穩定顫振圖形之預測。

6. 參考文獻

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Smith, S., Winfough, W. R., and Borchers, H. J., 2000, "Power and Stability Limits in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 49, pp. 309-312.
- [5] Lan, J-V. L., Marty, A., and Debongnie, J-F., 2007, "Providing Stability Maps for Milling Operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1493-1496.
- [6] Tang, W. X., Song, Q. H., Yu, S. Q., Sun, S. S., Li, B. B., Du, B., and Ai, X., 2009, "Prediction of Chatter Stability in High-speed Finishing end Milling Considering Multi-mode Dynamics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 2585-2591.
- [7] Budak, E., and Tekeli, A., 2005, "Maximizing Chatter Free Material Removal Rate in Milling through Optimal Selection of Axial and Radial Depth of Cut Pairs," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 353-356.
- [8] 楊益群，廖運炫，1998，「CNC 銑床之顫振控制」，*機械月刊*，第 24 卷，第 3 期，第 257-265 頁。
- [9] 蔡南全，陳定成，李榮茂，2008，「銑切抖顫之聲訊回授與補償」，*中國機械工程學會第二十五屆全國學術研討會論文集*，彰化，論文編號：B14-03。
- [10] 黃運琳，王惠綺，吳柏毅，林乘鵬，柯忠志，陳冠廷，馮昶欽，2006，「立式 CNC 工具機之結構動態剛性分析」，*中國機械工程學會第二十三屆全國學術研討會論文集*，台南，論文編號：C3-040。

Finite Element Model Verification and Vibration modal Characteristics of End Mills

Bor-Tsuen Wang¹, Xiu-Wei Liang²,
Wen-Tung Chien¹, Yu-Ren Wu³,
Chia-Li Chou⁴

¹ Professor, Department of Mechanical Engineering, Pingtung University of Science & Technology.

² Student, Department of Mechanical Engineering, Pingtung University of Science & Technology.

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Pingtung University of Science & Technology.

⁴ Engineer, Precision Machinery Research Development Center.

Abstract

For milling response simulation, the proper and accurate model is desired. This work intends to develop the finite element (FE) model of the end mill with the discarded cutters by the FE code, ANSYS. The mill in both the free in tool fixture is considered, and constructed for their FE models. The experimental modal analysis (EMA) is also carried out to determine the modal characteristics of the end mill in free and fixed conditions. Results show that the resonant frequencies are much lower in fixed boundary than in free. By comparing the modal properties, the FE model can be well calibrated to obtain the equivalent analytical FE model of the end mill. In particular, the end mill model for the fixed condition can be adopted for further analysis, such as frequency response function (FRF). simulations and cutting response predictions.