

考慮刀具振動之切削路徑動態模擬

王栢村¹、謝長鴻²、謝宗廷²

¹ 國立屏東科技大學機械工程系 教授

² 國立屏東科技大學機械工程系 研究生

E-mail:wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

刀具顫震是影響銑削工件精度的重要因素，國內外已有許多研究，但較少探討刀具顫震對於切削路徑之相關影響。首先將刀具切削理論配合軟體程式，開發一套人機介面(GUI)的刀具切削路徑動態模擬程式，便於操作快速得到刀具切削之行進路線動畫與切屑厚度變化。本文主要探討不同刀具參數與加工參數，引起顫震現象對於刀具切削路徑影響與切屑厚度變化。探討得知主要影響切削路徑因素，為刀具自然頻率與主軸轉速頻率之比值、刀具之顫震位移振幅；影響切屑厚度大小，包括：刀具每轉進給量、刀具之顫震位移振幅；切屑厚度變化趨勢，刀具刀數，刀具自然頻率、主軸轉速頻率三種參數決定。並發現刀具自然頻率與主軸轉速頻率比值為刀具刀數的整數倍，本身刀具有顫震現象，切屑厚度尺寸還是一致，呈現穩定切削。另外本文所開發程式，可作為切削與振動課程之教具使用，易於了解顫震對於切削加工影響。未來可配合銑削實驗進行比對驗證，使開發程式更加接近符合真實切削路徑。

關鍵詞：顫震、切削、動態模擬、刀具自然頻率

變數	變數意義	單位
D	刀具直徑	mm
f	主軸轉速頻率， $f = N/60$	Hz
f_c	刀具自然頻率	Hz
F_r	刀具每轉一圈之進給量， $F_r = F_s/f$	mm/rev
F_s	刀具每秒之進給量	mm/sec
h_n	刀具第 n 刃切削之切屑厚度	mm
L	工件長度	mm
m_a	正整數， $m_a = 1, 2, 3, \dots, \infty$	
m_b	常數，並且 $0 \leq m_b < 1$	
M	r/z 的比值， $M = r/z = m_a + m_b$	
n	刀具之第 n 個刀刃	刃
N	主軸每分鐘轉速	rpm
r	刀具自然頻率與主軸轉速頻率之比值， $r = f_r/f$	
t	刀具加工第 t 秒時間	sec
T_c	刀具之顫震振動週期， $T_c = 1/f_c$	sec
x_n	刀具第 n 刃之 x 方向位移	mm
X_c	刀具之顫震位移振幅	mm
$y_n(t)$	刀具第 n 刃之 y 方向位移	mm
z	刀具共有 z 個刀刃	刃

1. 前言

在機械加工中，銑削具有高材料移除率、高生產率與產品尺寸精確優點。高速銑削加工品質好壞，必須避免切削顫震(chatter)最為重要。

切削顫震相關方面研究，Yue[1]利用頻率響應函數發展 SLD 的簡易計算方法，得到優化加工參數，Lan et al.[2]發展切削深度與顫震關聯性之顫震穩定預測工具程式。楊[3]利用監測系統得到加工切削力，作為顫震現象發生基準，並以調整主軸轉速避免顫震方法。Weingawrtner et al.[4]研究高速銑削的加工參數之影響，並以聲音頻譜與工件表面粗糙度作為顫震是否發生。Smith et al.[5]利用有限元素法與實際實驗，探討刀具長度對於穩定材料移除率之影響。邱等人[6,7]利用振動量測技術，探討刀具不同磨耗情況下，對於刀具工件時，振動頻譜之影響。蔡等人[8]利用麥克風聲音量測，取代加速規量測方式，發展作為銑削加工時顫震監測系統。王等人[9]發展單自由度與多自由度刀具顫震穩定預測模組，在已知刀具參數與切削阻力下，可模擬分析得到最佳主軸轉速與切削深度。

在銑削中切削顫震的監測與抑制已有上述許多研究，然而較少探討銑削發生顫震對於切削路徑與切削厚度之影響。

本文目的考慮多刃端銑刀在切削過程中，所發生之刀具顫震現象，建立多刃端銑刀之各刀刃之切削路徑解析方法。以軟體撰寫多刃端銑刀之切削路徑動態模擬程式，並以動畫呈現藉以觀察刀刃路徑，並解釋切削顫震之現象，可作為切削加工之輔助教具。

本文模擬不同參數組合，包括：主軸轉速、刀具每圈進給率、刀具刀數、刀具自然頻率、刀具之顫震位移振幅等，探討切削路徑之影響與切屑厚度變化。

2. 多刃端銑刀切削路徑模擬

2.1 數學模式假設

本文只探討刀具顫震對於切削路徑與切屑厚度變化影響，所以對多刃端銑刀之銑削加工工作簡化與假設：

假設理想刀具無磨損、刀具無磨耗、與工件無摩擦、無阻力、呈單點接觸。忽略切削深度(axial depth of cut)效應與全徑向切削深度(radial depth of cut)。如圖 1 所示，假設刀具單自由度振動系統，僅考慮刀具在進給(x)方向之刀具側向振動效應。主軸旋轉方向為逆時針。

2.2 刀具切削路徑模擬理論說明

如圖 2 所示，在快速移除工件材料採用水平移動方

式；在局部放大圖中，兩條深色圓弧線為假設刀具為剛體無顫震情況下的相鄰兩刀刀切削路徑；兩條淺色線為當刀具有顫震情形發生，每刀的切削路徑會變成有振盪現象的圓弧線。將圓弧線拉成直線來看，刀具無顫震現象，切削工件的切屑厚度尺寸都一致，當有顫震現象切屑厚度尺寸會隨著時間持續變化。

圖 3 為本文所開發程式的刀具切削路徑模擬解析，如數學模型假設，不考慮切削深度影響，只考慮 2 維平面加工切削。X 軸向為切削工件刀具移動方向，所以由刀具第 n 刀來看，影響刀刃在不同時間下 X 軸移動因素，包含了主軸旋轉效應、刀具進給率、刀具顫震現象，第 n 刀 X 方向切削路徑方程式可寫成：

$$x_n(t) = \frac{D}{2} \cos\left(2\pi\left(ft + \frac{n-z-1}{z}\right)\right) + F_s t + X_c \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

本文假設，影響刀刃在 Y 軸移動因素只有主軸旋轉效應，第 n 刀 Y 方向切削路徑方程式可寫成：

$$y_n(t) = \frac{D}{2} \sin\left(2\pi\left(ft + \frac{n-z-1}{z}\right)\right) \quad (2)$$

本文切削加工的主軸旋轉方向採逆時針；圖 4 為主軸順時針與逆時針旋轉對於刀刃切削順序影響，如果假設刀具為 4 刃，編號如圖所示，採用逆時針刀具切削到工件先後順序會 4、3、2、1、4、3...依序切削，相鄰兩刀時間差為 $1/f_z$ 。

切屑厚度計算方式說明為圖 5 所示，計算第 n 刀切屑厚度條件要在 Y 軸高度要一致所以 $y_n = y_{n-1}$ ，已知相鄰兩刀時間差 $1/f_z$ ，主軸旋轉為逆時針，刀刃編號如圖 4 順序方式，所以每 n 刀切屑厚度計算方程式寫成：

$$h_n(t) = x_n(t) - x_{n-1}(t - 1/f_z) \quad (3)$$

2.3 刀具振動切削動態模擬程式

刀具切削路徑模擬程式以前兩節所提到數學模型假設與相關方程式，來模擬動態切削路徑與切屑厚度變化。

圖 6 為刀具振動切削動態模擬程式流程圖，可看到程式藉由輸入刀具直徑(D)、刀具自然頻率(f_c)、每轉進給量(F_r)、刀具自然頻與主軸轉速頻率之比值(r)、刀具之顫震位移振幅(X_c)與刀具刀刃數目(z)，得到刀具切削動態路徑與切屑厚度(h_n)變化；在方程式中主軸轉速頻率(f)是用 f_c 與 r 兩種輸入參數控制($f = f_c/r$)，主軸轉速(N)由 f 換算($N=60f$)，每秒進給量(F_s)由 F_r 與 f 參數組合($F_s = F_r \times f$)。

控制參數有儲存檔案名稱與假設工件長度(L)，分別用來決定相關動畫、圖片、數據儲存名稱，與切削工件所需要時間。

在本文中相關單位時間為秒(sec)、長度與刀具之顫震位移振幅為公厘(mm)、主軸轉速為每分鐘幾轉(rpm)；本文不在求得實際刀具之顫震位移振幅，但是為了模擬顫震效果對切削路徑的顯著影響效應，所以 X_c 的數值為假設參數。

圖 7 為程式製成人機介面(GUI)模組，主要方便

使用者操作輸入不同參數，快速得到相關銑削。因製作切削路徑的動畫較為費時，所以分成有無錄製動畫兩種執行模式。

3. 結果與討論

藉由本文所開發 GUI 模組，藉以探討刀具相關參數，或加工切削參數對於切削路徑與切屑厚度之影響。其探討相關參數有：

1. 不同刀具之顫震位移振幅(X_c)
2. 不同刀具刀刃數(z)
3. 不同刀具每圈進給量(F_r)
4. 不同刀具自然頻率(f_c)
5. 不同主軸轉速(N)
6. 不同 $\frac{r}{z}$ (M)對切屑厚度變化量

3.1 刀具之顫震位移振幅(X_c)相關影響

表 1 為三種刀具之顫震位移振幅(X_c)之刀具切削路徑(h_n)徑示意圖與切屑厚度變化量圖表，其中固定參數為刀具直徑(D)為 20 mm、刀具刀刃數(z)為 4 刃、刀具自然頻率(f_c)為 180 Hz、刀具每轉進給量(F_r)為 20 mm/sec、刀具自然頻率與主軸轉速頻率之比值(r)為 5、主軸轉速頻率(f)為 36 Hz，相當於主軸轉速(N)為 2160 rpm。探討刀具之顫震位移振幅(X_c)為 0、1 與 2 mm，三種情況對於切削路徑影響與切屑厚度(h_n)變化情形。

當 $X_c=0$ mm 時，可代表無刀具之顫震位移振幅或刀具為剛體無振動發生。標準切削厚度 h_n 經過推導方程式為 F_r/z ，由表可看到刀具每刀切削路徑都呈現圓滑的圓弧線，最大 h_n 與最小 h_n 相同。當 $X_c=1$ mm 時，每刀切削路徑則呈現振盪現象，則使切屑厚度不均勻，最大 h_n 與最小 h_n 相差值約為 2.8 mm；當 $X_c=2$ mm 時，每刀刀具切削路徑振盪現象，又更為明顯，最大 h_n 與最小 h_n 相差值約為 5.6 mm 約為 $X_c=1$ mm 的 2 倍。另外由 $X_c=1$ mm 與 $X_c=2$ mm 可看出刀具之顫震位移振幅，不影響每刀切削厚度變化趨勢。

圖 8 是探討不同刀具位移振幅(X_c)對於切屑厚度(h_n)變化量之影響，固定參數與表 1 相同，將刀具之顫震位移振幅從 0 到 4 mm，畫出標準切屑厚度 h_n 、最大 h_n 與最小 h_n 三者的數據變化。由圖 8 可看出刀具之顫震位移振幅(X_c)大小，和最大 h_n 與最小 h_n 的相差值成正比，代表 X_c 越大，最大 h_n 更大，最小 h_n 更小。

刀具之顫震位移振幅(X_c)在 3.6 mm 以上時，最小 h_n 低於 0 mm，代表有刀具刀刃切削工件有空切情況發生，這對切削加工為不良之影響。

3.2 刀具刀刃數(z)之相關影響

表 2 為三種刀具刀刃數(z)之刀具切削路徑示意圖與切屑厚度(h_n)變化量圖表，其中固定參數為刀具直徑(D)為 20 mm、刀具自然頻率(f_c)為 180 Hz、刀具之顫震位移振幅(X_c)為 1 mm、刀具每轉進給量(F_r)為 20 mm/sec、刀具自然頻率與主軸轉速頻率之比值(r)為 5、主軸轉速頻率(f)為 36 Hz，相當於主軸轉速(N)為 2160 rpm。探討刀具刀刃數(z)為 2、4 與 6 刃，三種情況對

於切削路徑影響與切屑厚度(h_n)變化情形。

當 $z=2$ 刀時，刀具切削路徑有振盪現象，標準切屑厚度 h_n 為 10 mm，切屑厚度變化，最大 h_n 與最小 h_n 相差值約為 4 mm。當 $z=4$ 刀時，刀具切削路徑有振盪現象，標準切屑厚度 h_n 為 5 mm，最大 h_n 與最小 h_n 相差值約為 3.6 mm。當 $z=6$ 刀時，刀具切削路徑有振盪現象，標準切屑厚度 h_n 為 3.33 mm，最大 h_n 與最小 h_n 相差值約為 2 mm。當固定刀具每圈進給量(F_r)，刀具刀數(z)越多，標準切屑厚度 h_n 越小。另外刀具刀數(z)多寡，也會造成刀具相同刀刀編號的切屑厚變化趨勢不一樣。

圖 9 是探討不同刀具刀數(z)對於切屑厚度(h_n)變化量之影響，固定參數與表 2 相同，將刀具刀數從 2 到 16 刀，每隔 2 刀畫出標準切屑厚度 h_n 、最大 h_n 與最小 h_n 三者的數值變化。可看刀具刀數(z)越多，標準切屑厚度 h_n 出越來越小，在刀具刀數(z)在 10 刀以上與此固定參數下，刀具刀數就有發生空切現象。

3.3 刀具每轉進給量(F_r)之相關影響

表 3 與圖 10 探討每轉進給量(F_r)對刀具切削路徑影響與切屑厚度(h_n)變化影響，其中固定參數為刀具直徑(D)為 20 mm、刀具自然頻率(f_c)為 180 Hz、刀具刀數(z)為 6 刀、刀具之顫震位移振幅(X_c)為 1 mm、刀具自然頻率與主軸轉速頻率之比值(r)為 5、主軸轉速頻率(f)為 36 Hz，相當於主軸轉速(N)為 2160 rpm。探討刀具每轉進給量(F_r)為 12、18 與 24 mm/rev，三種情況對於切削路徑影響與切屑厚度(h_n)變化情形。

在刀具顫震情況下，當 $F_r=12$ mm/rev 時，標準切屑厚度 h_n 為 2 mm，最大 h_n 與最小 h_n 相差值為 2 mm。當 $F_r=18$ mm/rev，標準切屑厚度 h_n 增加到 3 mm，最大 h_n 與最小 h_n 相差值維持 2 mm。當 $F_r=24$ mm/rev，標準切屑厚度 h_n 增加到 4 mm，最大 h_n 與最小 h_n 相差值維持 2 mm。刀具每轉進給量(F_r)與標準切屑厚度 h_n 成正比，但不影響最大 h_n 與最小 h_n 相差值。另外由三種情況，得到第 n 刀切屑厚度(h_n)趨勢都一致，可代表刀具每轉進給量(F_r)也不影響每刀切屑厚度(h_n)變化趨勢。

3.4 刀具自然頻率(f_c)之相關影響

表 4 與圖 11 是在主軸轉速(N)固定為 6000 rpm 下，也就主軸轉速頻率(f)為 100 Hz，探討不同刀具自然頻率(f_c)，對於切削路徑影響與切屑厚度變化。其中固定參數包含：刀具直徑(D)為 20 mm、刀具刀數(z)為 6 刀、刀具之顫震位移振幅(X_c)為 2 mm、刀具每轉進給量(F_r)為 24 mm/sec。探討刀具自然頻率(f_c)從 100 Hz 到 1200 Hz，切削路徑與切屑厚度(h_n)變化。由表 4 與圖 11 可得知，刀具自然頻率(f_c)不影響標準切屑厚度 h_n ，但影響最大 h_n 與最小 h_n 的相差值及切屑厚度變化趨勢。

由圖 11 為刀具自然頻率(f_c)與切屑厚度(h_n)關係，對最大 h_n 與最小 h_n 的相差值影響因素，包含刀具自然頻率(f_c)與主軸轉速頻率(f)之比值(r)、刀具刀數(z)；經過圖中數據推導，刀具自然頻率(f_c)與主軸轉速頻率(f)之比值(r)除以刀具刀數(z)寫作為 M ，即為 $M = r/z$ 。 M 又可分成 m_a+m_b ， m_a 為正整數， m_b 為介在大於等於 0，

且小於 1 的小數，其相關方程式可寫成：

$$M = r/z = m_a + m_b \quad (4)$$

$$m_a = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (5)$$

$$m_b \geq 0, m_b < 1 \quad (6)$$

經過方程式(3)帶入(1)可求得，當 m_b 等於 0 時，最大 h_n 與最小 h_n 的相差值有 0 mm，代表就算有刀具顫震情況，切屑厚度(h_n)變化，最大 h_n 與最小 h_n 都等於標準切屑厚度 h_n ，可由表中刀具自然頻率(f_c)為 600 Hz，帶入上述方程式 m_b 為 0，切削路徑雖然為振盪現象的圓弧線，但在相同 Y 軸位置上，每個刀刀 X 方向顫震都同步向前或向後；導致切削厚度(h_n)一致。

當 m_b 等於 0.5 時，最大 h_n 與最小 h_n 的相差值，有最大值，由圖 11 的 f_c 為 300 Hz 與 900 Hz，最大 h_n 與最小 h_n 相差值，有最大值為 8 mm 可得証此現象。

3.5 主軸轉速(N)之相關影響

上小節是固定主軸轉速(N)，改變刀具自然頻率(f_c)。本節探討固定刀具自然頻率(f_c)，改變主軸轉速(N)參數探討對於切削路徑影響與切屑厚度(h_n)變化。其中固定參數包含：刀具直徑(D)為 20 mm、刀具自然頻率(f_c)為 180 Hz、刀具刀數(z)為 6 刀、刀具之顫震位移振幅(X_c)為 2 mm、刀具每轉進給量(F_r)為 24 mm/sec，表 5 與圖 12 其模擬分析結果。

表 5 取主軸轉速(N)為 1200 rpm、1350 rpm 與 1800 rpm，其 M 值分別為 1.5、1.33 與 1.0，所以 m_b 可寫成 0.5、0.33 與 0.0。由上節提到 $m_b=0.5$ 的最大 h_n 與最小 h_n 相差值，一定比 $m_b>0.5$ ，或 $m_b<0.5$ 的相差值來的大。結果顯示主軸轉速(N)在 1200 rpm 的最大 h_n 與最小 h_n 相差值為 8 mm、主軸轉速(N)在 1350 rpm 的相差值為 6.92 mm，主軸轉速(N)在 1800 rpm 的相差值為 0 mm，此與前節之推論相符。

3.6 $\frac{r}{z}$ (M)之相關影響

已知 m_b 值為 0 時，就算刀具顫震發生，切屑厚度(h_n)呈現一致，即為 $M=1, 2, 3, 4, 5, \dots$ ，都會符合此規則。因此帶入固定參數刀具直徑(D)為 20 mm、刀具自然頻率(f_c)為 180 Hz、刀具刀數(z)為 6 刀、刀具之顫震振幅(X_c)為 2 mm、刀具每轉進給量(F_r)為 24 mm/sec。變動參數有主軸轉速(N)、主軸轉速頻率(f)、刀具自然頻率(r)與主軸轉速頻率(f)之比值(r)，依照 M 值不同，反推求切屑厚度變化情形。

圖 13 為 M 值與切屑厚度(h_n)關聯變化，結果顯示 M 值為正整數時，最大 h_n 與最小 h_n 都等於標準 h_n 。並與文獻[9] 求得容許切削深度之刀具顫震穩定圖，帶入相同參數，比較在有刀具顫震情況下特定主軸轉速(N)，是否有相對極大的容許切削深度。

圖 14 為單自由度刀具顫震穩定圖，可看到 M 值為正整數 1 至 5 時，得到的容許切削深度都比相鄰的轉速有相對極大值。

4. 結論

本文目的探討不同刀具與加工參數組合下刀具顫

震時，對於切削路徑影響與切屑厚度變化，發展成 GUI 程式模組，可方便操作與教學教具之用，各種參數影響結果綜合如下：

1. 主要影響切削路徑因素，為刀具自然頻率與主軸轉速頻率之比值、刀具之顫震位移振幅。
2. 影響切屑厚度尺寸大小，與刀具每轉進給量、刀具之顫震位移振幅兩種參數成正比。
3. 影響每刀切削厚度變化趨勢，為刀具刀數，刀具自然頻率、主軸轉速。
4. 當刀具自然頻率除以主軸轉速頻率，其數值為刀數的整數倍，就算切削加工時，有刀具顫震效應，切屑厚度呈現均勻性，可為穩定銑削。

未來可進行實際銑削實驗比對驗證，使增進程式模擬分析能力，更加接近符合真實切削路徑。

5. 參考文獻

- [1] Yue, J., 2006, "Creating a Stability Lobe Diagram," *Proceedings of the 2006 IJME - INTERTECH Conference*, New York, pp. 301-050.
- [2] 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.
- [3] 楊益群，廖運炫，1998，「CNC銑床之顫震控制」，*機械月刊*，第24卷，第3期，第257-265頁。
- [4] Weingaertner, W. L., Schroeter, R. B., Polli, M. L., and Gomes, J. O., 2006, "Evaluation of High-Speed End-Milling Dynamic Stability through Audio Signal Measurements," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 179, pp. 133-138.
- [5] Smith, S., Winfough, W. R., and Halley, J., 1998, "The Effect of Length on Stable Removal Rate in High Speed Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 47, pp. 307-310.
- [6] 邱武耀，賴姿吟，楊淳守，譚世偉，陳彥伊，馮昶欽，2008，「利用刀具狀態探討鑽頭於不同磨耗的振動特徵」，*第十六屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*，台北，論文編號：B-11。
- [7] 邱武耀，黃瑞淵，陳彥伊，2006，「利用振動特徵分析監測鑽頭於磨耗時的狀態」，*第十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*，宜蘭，論文編號：B-34。
- [8] 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。
- [9] 王栢村，梁秀璋，周嘉莉，2009，「單自由度與多自由度系統模型於刀具顫震穩定圖之分析」，*中華*

民國振動與噪音工程學會第 18 屆學術研討會，台北，論文編號：E-128。

Tool Cutting Path Simulation Considering Tool Vibration Effects

Bor-Tsuen Wang¹, Hsieh-Chang Hung²,
Tsung-Ting Hsieh²

¹ Professor, ² Graduate Student,

Department of Mechanical Engineering,
National Pingtung University of Science and
Technology

ABSTRACT

Tool chatter is a crucial factor affecting machining precision. There are lots of literatures dealing with the chatter mechanism but less work discussing about the cutting path related to tool chatter. This paper aims to discuss the effects of different tool and machining parameters on the cutting path and the cutting chip width induced by tool chatter. The cutting tool simulation program is developed base on the cutter vibration model to obtain the animation of cutting path for each cutting tooth as well as the chip width in machining. The main factors in affecting the cutting path are the ratio between the natural frequency and rotating speed frequency of the cutter as well as the vibrating amplitude of the cutter. The chip width is mainly dependent on the feed rate and the cutter vibration amplitude. And, the variation of chip width due to tool chatter is shown dominated by the number of cutter teeth, tool natural frequency and cutter rotating speed. If the ratio between the natural frequency and rotating speed frequency of the cutter divided by the cutter teeth number is exactly an integer value, the chip width maintains uniform and results in stable cutting. In addition, the developed graphics user interface (GUI) program for tool path simulation can be applied to educational purpose in machining and vibration classes for realizing the effect of tool chatter on the cutting path. The program can also be calibrated by experiments to simulate the realistic machining process in future work.

Keywords: Chatter, Cutting, Dynamic Simulation, Tool Natural Frequency.

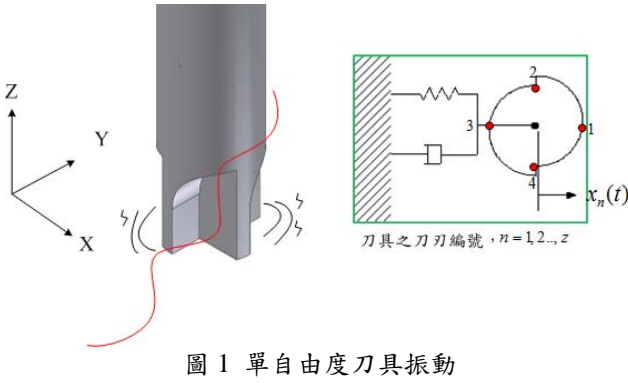


圖 1 單自由度刀具振動

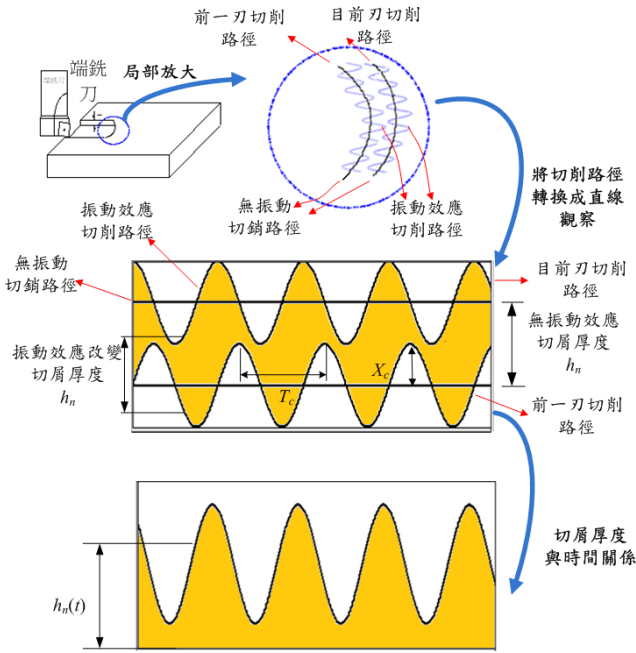


圖 2 刀具振動效應切削路徑與 h_n 之影響

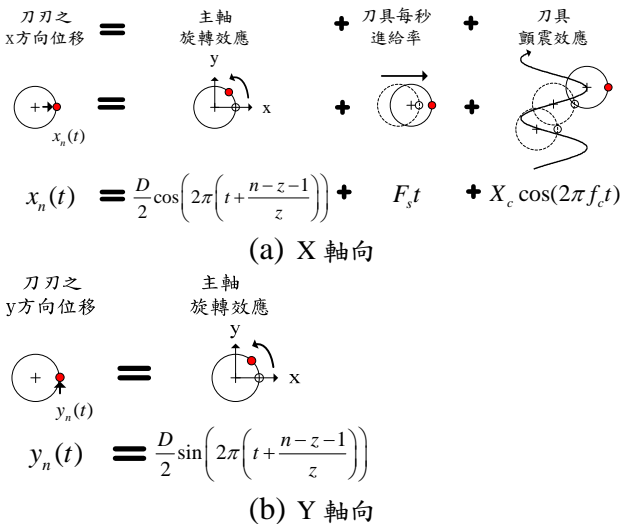


圖 3 刀具切削路徑模擬解析圖

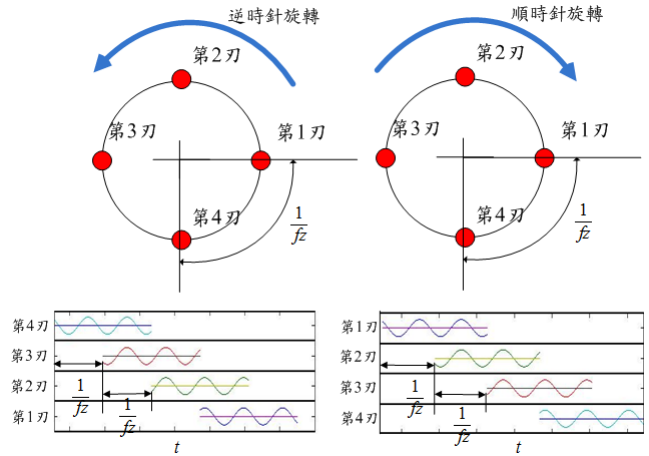


圖 4 主軸順/逆時針旋轉對於刀刃切削順序影響

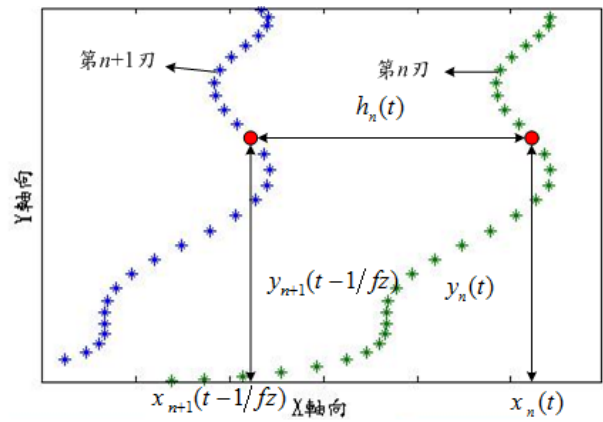


圖 5 切屑厚度計算示意圖

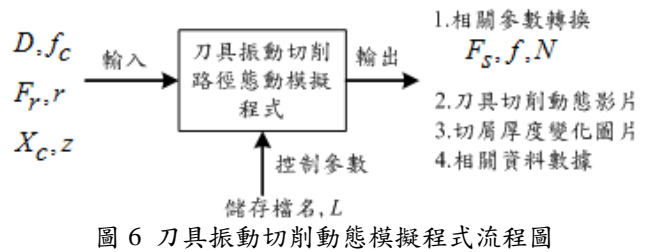


圖 6 刀具振動切削動態模擬程式流程圖

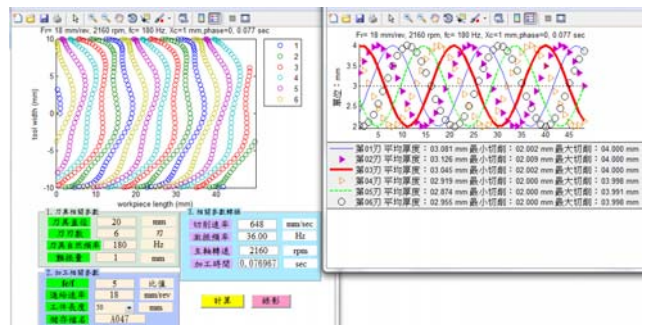


圖 7 刀具振動切削動態模擬之人機介面(GUI)模組

表 1 三種種刀具之顫震位移振幅(X_c)之刀具切削路徑示意圖與切屑厚度(h_n)變化量

變數	$X_c = 0$ mm	$X_c = 1$ mm	$X_c = 2$ mm
切削路徑示意圖			
切屑厚度變化圖			
(mm)	標準 $h_n = 5$ 最小 $h_n = 5$ 最大 $h_n = 5$	標準 $h_n = 5$ 最小 $h_n = 2.80$ 最大 $h_n = 6.40$	標準 $h_n = 5$ 最小 $h_n = 2.21$ 最大 $h_n = 7.79$
備註	$D = 20$ mm、 $z = 4$ 刃、 $f_c = 180$ Hz、 $F_r = 20$ mm/rev、 $r = 5$ 、 $N = 2160$ rpm、 $f = 36$ Hz。		

表 2 三種刀具刀數(z)之刀具切削路徑示意圖與切屑厚度(h_n)變化量

變數	$z = 2$ 刃	$z = 4$ 刃	$z = 6$ 刃
切削路徑示意圖			
切屑厚度變化圖			
(mm)	標準 $h_n = 10$ 最小 $h_n = 8$ 最大 $h_n = 12$	標準 $h_n = 5$ 最小 $h_n = 2.80$ 最大 $h_n = 6.40$	標準 $h_n = 3.33$ 最小 $h_n = 2.33$ 最大 $h_n = 4.33$
備註	$D = 20$ mm、 $f_c = 180$ Hz、 $X_c = 1$ mm、 $F_r = 20$ mm/rev、 $r = 5$ 、 $N = 2160$ rpm、 $f = 36$ Hz。		

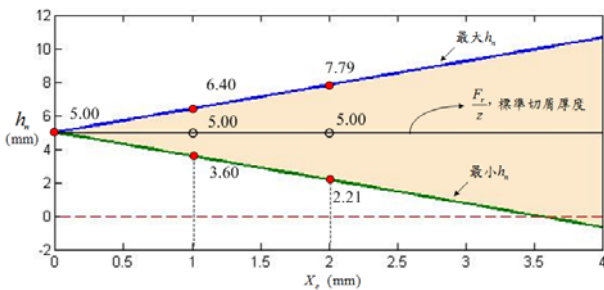


圖 8 刀具之顫震位移振幅(X_c)對切屑厚度(h_n)變化量之影響

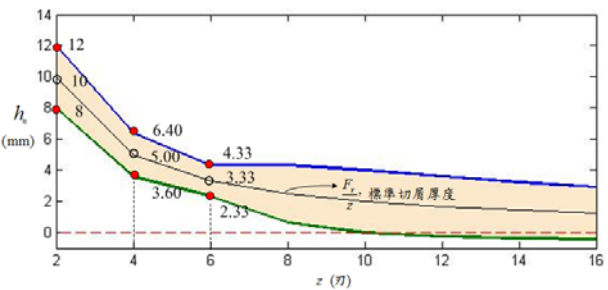


圖 9 刀具刀數(z)對切屑厚度(h_n)變化量之影響

表 3 三種刀具每圈進給量(F_r)之刀具切削路徑示意圖與切屑厚度(h_n)變化量

變數	$F_r=12$ mm/rev	$F_r=18$ mm/rev	$F_r=24$ mm/rev
切削路徑示意圖			
切屑厚度變化圖			
(mm)	標準 $h_n=2$ 最小 $h_n=1$ 最大 $h_n=3$	標準 $h_n=3$ 最小 $h_n=2$ 最大 $h_n=4$	標準 $h_n=4$ 最小 $h_n=3$ 最大 $h_n=5$
備註	$D=20$ mm、 $z=6$ 刃、 $f_c=180$ Hz、 $X_c=1$ mm、 $r=5$ 、 $N=2160$ rpm、 $f=36$ Hz。		

表 4 三種刀具自然頻率(f_c)之刀具切削路徑示意圖與切屑厚度(h_n)變化量

變數	$f_c=200$ Hz、 $r=2$ 、 $m_b=0.33$	$f_c=400$ Hz、 $r=4$ 、 $m_b=0.66$	$f_c=600$ Hz、 $r=6$ 、 $m_b=0$
切削路徑示意圖			
切屑厚度變化圖			
(mm)	標準 $h_n=4$ 最小 $h_n=0.54$ 最大 $h_n=7.46$	標準 $h_n=4$ 最小 $h_n=0.54$ 最大 $h_n=7.46$	標準 $h_n=4$ 最小 $h_n=4$ 最大 $h_n=4$
備註	$D=20$ mm、 $z=6$ 刃、 $X_c=2$ mm、 $F_r=24$ mm/rev、 $N=6000$ rpm、 $f=100$ Hz。		

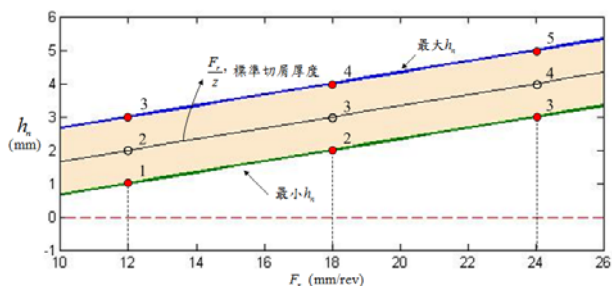


圖 10 每圈進給量(F_r)對切屑厚度(h_n)變化量之影響

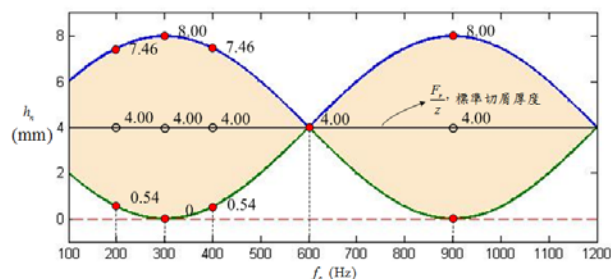


圖 11 刀具自然頻率(f_c)對切屑厚度(h_n)變化量之影響

表 5 三種主軸轉速(N)之刀具切削路徑示意圖與切屑厚度(h_n)變化量圖表

變數	$N=1200 \text{ rpm}$ 、 $r=9$ 、 $m_b=0.5$	$N=1350 \text{ rpm}$ 、 $r=8$ 、 $m_b=0.33$	$N=1800 \text{ rpm}$ 、 $r=6$ 、 $m_b=0$			
切削路徑示意圖						
切屑厚度變化量圖						
(mm)	標準 $h_n=4$	最小 $h_n=0$	標準 $h_n=4$	最小 $h_n=0.54$	標準 $h_n=4$	最小 $h_n=4$
		最大 $h_n=8$		最大 $h_n=7.46$		最大 $h_n=4$
備註	$D=20 \text{ mm}$ 、 $z=6$ 刃、 $f_c=180 \text{ Hz}$ 、 $X_c=2 \text{ mm}$ 、 $F_r=24 \text{ mm/rev}$ 。					

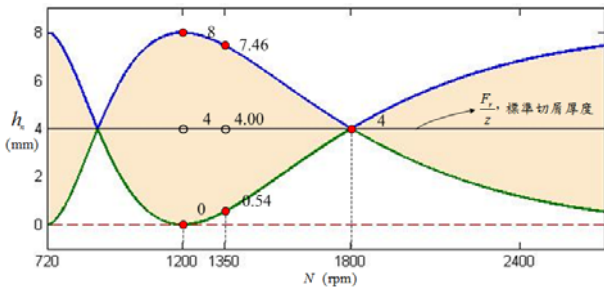


圖 12 主軸轉速(N)對切屑厚度(h_n)變化量之影響

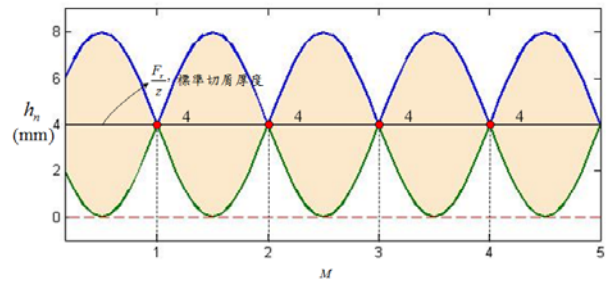


圖 13 不同 $\frac{r}{z}$ (M)對切屑厚度(h_n)變化量之影響

$D=20 \text{ mm}$ 、 $z=6$ 刃、 $f_c=180 \text{ Hz}$ 、 $X_c=2 \text{ mm}$ 、 $F_r=24 \text{ mm/rev}$

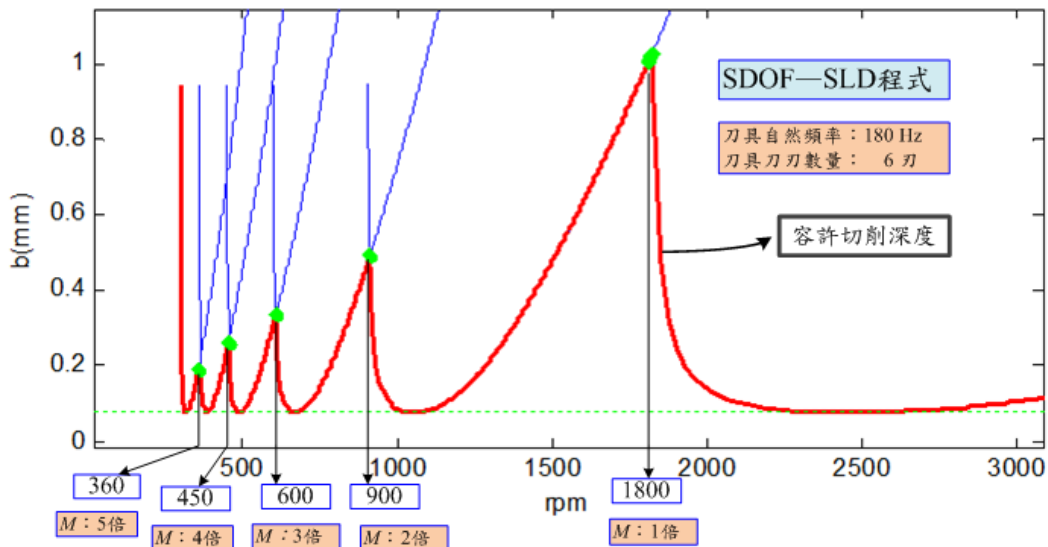


圖 14 單自由度刀具顫震穩定圖 [9]