

## 探索 HSM 極致效能的秘密

找出進給速率與速度設定以追求極致且穩定的高速機械加工效能的實用方法

[www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm)

白皮書



- ▶ 本白皮書簡介以震動理論為基礎，介紹一套實際的無成本程序，旨在找出材料移除的最高速率，以達到安全、穩定的機械加工條件。為了讓您在高速工具機 (HSM) 上的投資享有一定優勢，NC 程式設計師需要了解所屬系統的極致效能限制。本白皮書討論如何針對任何特定的工具、支托、工具機與工件材料組合找出最佳的 HSM 切割參數。在某些情況下，此方法最多可提升 6 倍的切割效率。

# PLM Software

Answers for industry.

**SIEMENS**

目錄

摘要	1
全新提議的流程	2
結論	6

## 摘要

NC 程式設計師每天面對的重大挑戰之一，便是找出重要的機械加工參數，例如切割深度、切削步距、軸心速度與進給速率。傳統上我們會從機械加工資料手冊或是透過生產線上資訊機械師的經驗著手取得這項資料。在大多數情況當中，此資料不只非常保守且可能過時。一旦出現問題，通常會以減少一或多項重要的機械加工參數來處理。然而這些補救措施卻會降低金屬移除速率 (MRR)。儘管在過去大家還能忍受這項缺點，不過今日競爭激烈的沖模/模具機械加工市場卻強迫使用者將產能推升到極限。

過去數年間廣泛應用的高速工具機讓生產線上的製造方法有了全新的面貌。若只是單純地增加軸心速度與進給速率並大幅減少進刀量，其實無法構成高速機械加工條件。為了讓高速工具機與配件上的鉅額投資發揮應有的效益，NC 程式設計師需要最佳化系統並達到其安全限制。



圖 1：兩次切割顯示穩定與震動機械加工條件。

全新的方法善用這些簡單的特徵，針對任何特定的工具、支托、工具機與工件材料組合找出最佳的軸心速度與刀具負載。基本上，這項方法會以不同的軸心速度進行多次的 Z 等級切割，進而找到穩定的機械加工條件。

我們在測試區塊的傾斜面進行連續數次相同的進刀路徑，如圖 2 所示。每次進刀都增加軸心速度與進給速率，以維持相同的進刀量。聆聽切割聲音並檢查每次進刀後的表面精削效果，即可找出穩定切割的條件。

圖 3 中的每一條平行線顯示以漸增的軸心速度進行一系列的 Z 等級進刀。這些平行線在上坡時顯示越來越快的金屬移除速率。垂直線則顯示在每一項已識別的穩定軸心速度下找出上限的方法。

凸角穩定圖 (圖 3) 繪製了穩定試驗條件與切割路徑。依據此圖與簡單方程式，可以計算出每一個軸心速度與切割深度組合的材料移除速率 (MRR)。在尖峰 MRR 與安全穩定的限制條件下操作系統可確保機械加工設備獲得最佳的使用效率。

本白皮書不只討論重要的機械加工參數與高速機械加工之間的關係，更透過全新流程的簡介來強調針對高速車銼應用程式取得切割資料的重要性。此方法師法震動理論，並善用凸角穩定圖來建議實用的無成本實作方式。

不穩定的機械加工會導致表面精削品質不良且呈現波浪紋路，讓許多人聯想起震動雜訊。

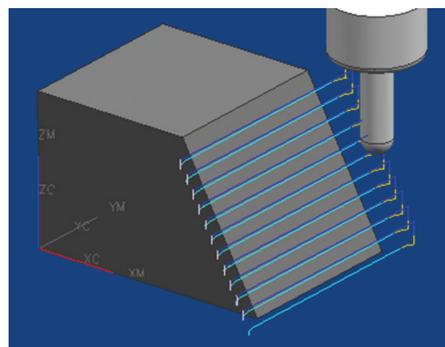


圖 2：NX 軟體擷取畫面顯示測試工件上的 Z 等級切割。

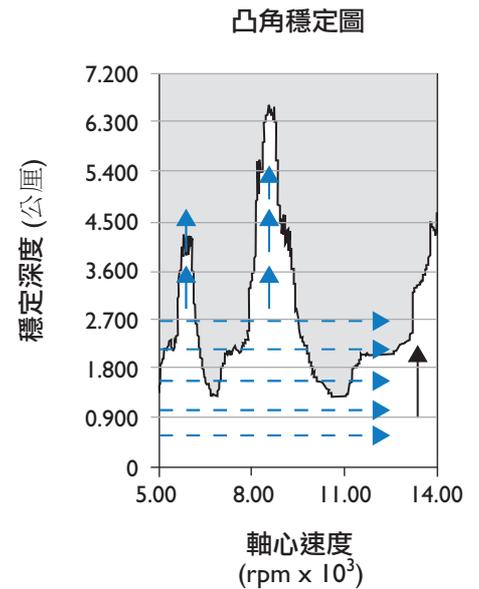


圖 3：凸角穩定圖顯示軌跡切割條件。

## ▶ 全新提議的流程

全新提出的替代流程已正式引進 **Makino V33**。在此案例中，分析對象為直徑 **10公厘** 的 **Jabro Tornado Ball end Mill**。在 **HSK** 支托上，此工具長度設為 **30 公厘**。測試工件使用長度 **82 公厘**、寬度 **65 公厘**與高度 **48 公厘**的 **P20** 工件。我們在區塊一端切割出 **30 度**的倒角來搭配支托，以便清楚檢視每一次切割。

在此範例中，我們假定切割深度相當於工具直徑的 **30%**。如果有其他可能限制工具進刀的考量，請以較低限制為準。請確保工具建立清楚的尖角以區分彼此的深度，區塊高度至少需能容納 **12 個**切割深度。切割面上的斜坡不可放置工具支托。區塊長度必須足以放鬆夾鉗以允許至少 **10 次**的側邊進刀動作，寬度應該足以讓人看清楚切割動作。

## 從工具目錄汲取相關資料

切割速度 Vc							
材料	Seco group 編號	溝槽車銑粗削 公尺 / 分鐘	Helic/ 傾斜精削 公尺 / 分鐘	側邊車銑粗削 公尺 / 分鐘	側邊車銑精削 公尺 / 分鐘	副本車銑粗削 公尺 / 分鐘	副本車銑精削 公尺 / 分鐘
軟鋼	1-2	90/225*	250	375	450	325	500
正常鋼	3-4	80/180*	210	310	390	280	385
工具鋼 <48 HRc	5-6	50/160	180	280	350	240	325
硬化鋼 >48-56 HRc	7	125	150	250	300	200/170*	280
硬化鋼 >56-62 HRc	7	80	90	150	175	120/100*	150
硬化鋼 >62-65 HRc	7	50	55	80	90	100/80*	110
硬化鋼 >65 HRc	7	35	35	55	60	80/60*	85
不鏽鋼	8-9	95	100	155	200	125	210
難以處理的不鏽鋼	10-11	60	70	120	145	80	125
軟鑄鐵	12-13	175	185	250	285	250	345
硬鑄鐵	14-15	150	160	200	245	200	290
鋁 (矽含量 <16%)	16	最大值	最大值	最大值	最大值	最大值	最大值
鋁 (矽含量 >16%)	17	250	280	295	325	300	345
超合金	20	50	60	80	120	100	150
難以處理的超合金	21	25	30	40	50	50	75
鈦合金	22	75	80	120	145	100	170
石墨		600	600	600	400	800	500
軟塑膠 **		300	400	385	450	最大值	最大值
硬塑膠 **		150	175	190	250	200	175
銅		350	450	450	550	最大值	最大值

\* 請參閱工具選擇表中的替代工具。

進給速率/齒輪 Fz Ø 8-10 公厘							
材料	Seco group 編號	溝槽車銑粗削 公尺 / 分鐘	Helic/ 傾斜精削 公尺 / 分鐘	側邊車銑粗削 公尺 / 分鐘	側邊車銑精削 公尺 / 分鐘	副本車銑粗削 公尺 / 分鐘	副本車銑精削 公尺 / 分鐘
軟鋼	1-2	0.090/0.045*	0.057	0.081	0.085	0.130	0.117
正常鋼	3-4	0.80/0.042*	0.053	0.076	0.079	0.121	0.109
工具鋼 <48 HRc	5-6	0.070/0.041*	0.051	0.072	0.076	0.115	0.105
硬化鋼 >48-56 HRc	7	0.039	0.049	0.070	0.074	0.150/0.112*	0.101
硬化鋼 >56-62 HRc	7	0.036	0.045	0.065	0.068	0.120/0.104*	0.093
硬化鋼 >62-65 HRc	7	0.030	0.038	0.054	0.057	0.100/0.086*	0.078
硬化鋼 >65 HRc	7	0.030	0.038	0.054	0.057	0.090/0.086*	0.078
不鏽鋼	8-9	0.045	0.057	0.081	0.085	0.091	0.117
難以處理的不鏽鋼	10-11	0.042	0.053	0.076	0.079	0.085	0.109
軟鑄鐵	12-13	0.045	0.057	0.081	0.085	0.104	0.117
硬鑄鐵	14-15	0.042	0.053	0.076	0.079	0.097	0.109
鋁 (矽含量 <16%)	16	0.060	0.076	0.108	0.113	0.173	0.156
鋁 (矽含量 >16%)	17	0.050	0.063	0.090	0.095	0.144	0.130
超合金	20	0.040	0.050	0.072	0.076	0.081	0.104
難以處理的超合金	21	0.036	0.045	0.065	0.068	0.073	0.093
鈦合金	22	0.042	0.053	0.076	0.079	0.085	0.109
石墨		0.055	0.069	0.099	0.104	0.159	0.143
軟塑膠		0.050	0.063	0.090	0.095	0.144	0.130
硬塑膠		0.045	0.057	0.081	0.085	0.123	0.117
銅		0.048	0.061	0.086	0.091	0.138	0.124

\* 請參閱工具選擇表中的替代工具。

圖 4：這些表格顯示製造商建議的切割資料。

工具製造商提供兩項非常重要的資訊：最大的切割速度與進刀量。最大切割速度取決於工具表面的披覆類型與其可忍受的最大溫度安全上限；而進刀量 (進給速率/齒輪) 係依據工具尖端的材料與幾何形狀而定。

依據附表，最高切割速度為 280 公厘 / 分鐘，而進刀量為 0.072 公厘 / 齒輪。此範例針對試驗工件假定了側邊車銑粗削的條件。

為了不違反最大切割速度，您需要維持在 9000 rpm 以下。  
(注意：在精削條件下，此值可向上調升。)

$$\text{最大 RPM} = \frac{\text{最大切割速度 (公厘 / 分鐘)}}{\pi * \text{工具直徑}}$$

$$\text{最大 RPM} = \frac{280 * 10^3}{\pi * 10} = 8912 \approx 9000$$

### 縮小試驗工件範圍

在這些試驗當中，軸心速度從 6000 到 11500 不等，間隔速度為 500 rpm。我們同時提升了最大 rpm 以保持適用精削條件的結果。每一次 Z 等級切割深度為 4 公厘。我們手動編輯了計劃內容來反映每一個切割等級的軸心速度變化。

### 保持一致的進刀量

我們適當調整進給速率以在試驗過程中維持一致的進給速率/齒輪。

$$\text{進給速率 (公厘 / 分鐘)} = \text{每齒輪的進給速率} * \text{齒輪數量} * \text{RPM}$$

### 機械加工

我們在斜坡上開始下刀，並切割出 0.5 公厘的側邊切削步距。接著在工具機的 X 偏移點調整側邊切削步距。如此一來，便不需要在每一個週期施行新的計劃。

我們針對每一個週期，在初始下刀期間重複實施 0.5 公厘的切削步距以取得類似的起始條件。此切割動作可對整個斜坡產生穩定的切割效果 (因為切割速度變慢的關係，尖角底部有某些切割部位會變鈍)。

我們將切削步距提升為 1 公厘並重複週期。即使凸角穩定圖預測在所有軸心速度下能夠維持穩定的機械加工條件，軸心速度的兩端還是會出現很低的震動訊號。在此過程，我們逐漸提升切削步距值，直到出現 2 公厘的嚴重震動訊號。此週期清楚顯示穩定的切割速率為 7000 rpm 與 9500 rpm。

切削步距值持續提升到 3 公厘，而在 7000 rpm 與 9500 rpm 條件下進行的切割作業則維持穩定狀態。

## 結果

圖 5 中的零件顯示穩定與不穩定的機械加工條件。此圖顯示 4 公厘的切割深度與 3 公厘的側邊步距。請注意，第 3 與第 8 步距顯示在 7000 rpm 與 9500 rpm 條件下可產生乾淨的切割效果。

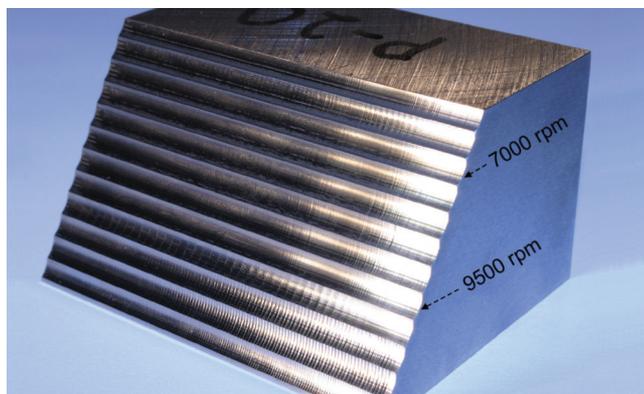


圖 5：最終證明。

軸心速度 (rpm)	進給速率 (公厘 / 分鐘)	進刀量 (公厘 / 齒輪)	切割深度 (公厘)	側邊切削步距 (公厘)								
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5		
6000	840	0.072	4									穩定
6500	910	0.072	4									輕微震動
7000	980	0.072	4									嚴重震動
7500	1050	0.072	4									穩定
8000	1120	0.072	4									輕微震動
8500	1190	0.072	4									嚴重震動
9000	1260	0.072	4									穩定
9500	1330	0.072	4									輕微震動
10000	1400	0.072	4									嚴重震動
10500	1470	0.072	4									穩定
11000	1540	0.072	4									輕微震動
11500	1610	0.072	4									嚴重震動

圖 6：凸角穩定圖。

注意：圖 6 中顯示的凸角穩定圖係依據相同的工具/支托/工具機設定來計算。請注意，實際行為依循一般預設的模式進行，不過實際數值有 1000 rpm 左右的差距。

要在各種不同的軸心速度與 MRR (材料移除速率) 條件下找出穩定的切割條件，凸角穩定圖是很好用的一項工具。在特定軸心速度條件下，此圖可用來尋找可允許的最大 MRR，這乃是機械加工效率的重要效能指標。在任何 RPM 條件下都能達到穩定的機械加工效果，不過卻可能會犧牲掉 MRR，這點請務必注意。藉震動預測硬體工具或由本白皮書所述的方式，可有效計算出凸角穩定圖的全域檢視，協助使用者在某些穩定的 RPM 條件下提高 MRR。

### 降低速度不見得是改善震動的最快方式

在許多情況中，機械師一旦碰到震動情況，通常會降低軸心速度來消除震動。雖然這麼做可以獲致穩定的切割條件，不過可能會降低效率。反之，您也可以提升軸心速度，這麼做不但可消除震動，還能提升切割效率。

在下圖中，A 點 (8,000 rpm 與 2.0mm 的側邊切削步距) 出現了輕微的震動。除了以較小的切削步距來重新對零件進行編程之外，減少或增加軸心速度都能輕鬆地解決震動問題。由於凸角穩定圖清楚顯示提升軸心速度可以獲致穩定的切割條件，而且還能提升效率，因此這是最好的選擇。

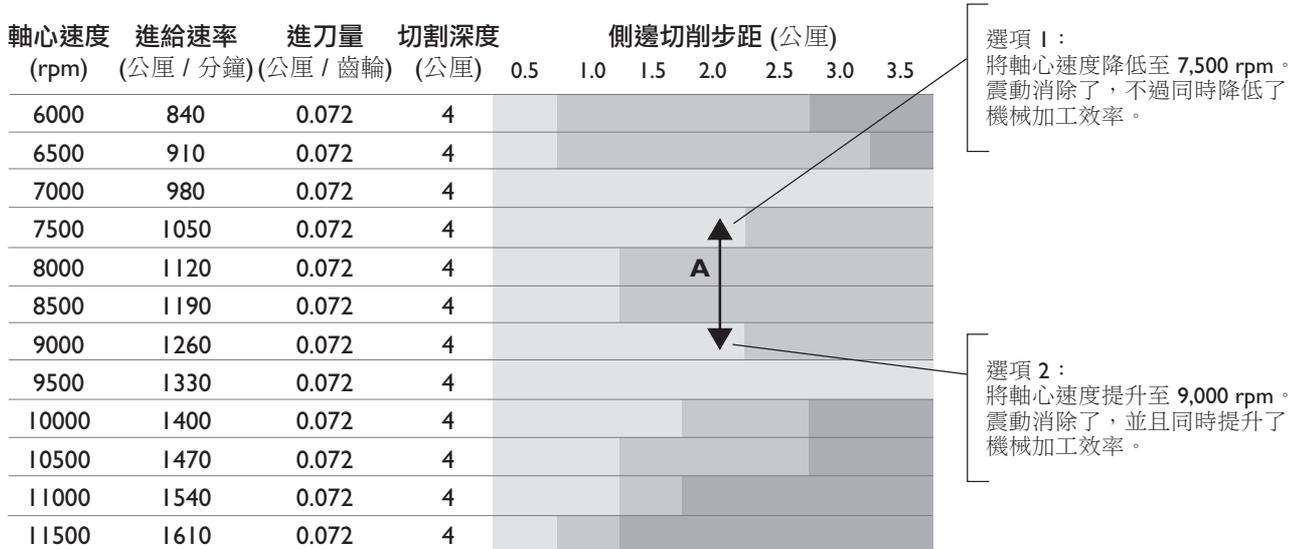


圖 7：增加軸心速度可獲致穩定的切割條件與更高的機械加工效率。

## 以較高速度進行機械加工不一定會達到最高效率

當我們使用高速工具機時，通常習慣以可容許的最高速度來操作工具機。雖然可以透過極速來獲致無震動的條件，依據 MRR (材料移除速率) 所測得的機械加工效率可能會很低。

$$\text{材料移除速率} = \text{進給速率 (公厘 / 分鐘)} * \text{切割深度 (公厘)} * \text{側邊切削步距 (公厘)}$$

在下圖中，A 點 (11,500 rpm 與 0.5 公厘的側邊切削步距) 達到了穩定的切割條件。由於軸心採高速運作，通常我們會假定系統效率會跟著提升。不過，如凸角穩定圖所示，情況並非如此。B 點 (切割速度較慢，但是切割深度較深) 機械加工效率將近高出 6 倍。

軸心速度 (rpm)	進給速率 (公厘 / 分鐘)	進刀量 (公厘 / 齒輪)	切割深度 (公厘)	側邊切削步距 (公厘)						
				0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
6000	840	0.072	4							
6500	910	0.072	4							
7000	980	0.072	4							
7500	1050	0.072	4							
8000	1120	0.072	4							
8500	1190	0.072	4							
9000	1260	0.072	4							
9500	1330	0.072	4							<b>B</b>
10000	1400	0.072	4							
10500	1470	0.072	4							
11000	1540	0.072	4							
11500	1610	0.072	4	<b>A</b>						

在 9,500 rpm 與 3.5 公厘的側邊切削步距條件下，達到無震動的機械加工目標

MRR = 18,620mm<sup>3</sup>/分鐘

在 11,500 rpm 與 .5 公厘的側邊切削步距條件下，達到無震動的機械加工目標

MRR = 3,220mm<sup>3</sup>/分鐘

圖 8：在追求穩定的機械加工目標時，以較低速率搭配較深切割深度，會比以較高速率搭配較淺切割深度來得有效率許多。

## 使用注意事項

- 依循實用、可重複的條件 (例如，每次都以相同的扭力來鎖緊夾具)。您需要針對每一項工具/支托/工具機組合重複此動作。此程序看似繁瑣，卻可輕易獲致高效率。
- 甜蜜點可直接轉移至其他工件材料。對應的最大切割深度與切削步距值將會有所差異。
- 您可以使用來自同一家製造商的類似替代工具來更換工具。結果仍舊有效，而且同樣適用支托。
- 盡可能將工具長度重設為接近測試條件。
- 您可以增加切割深度，同時減少切削步距，反之亦然。
- 請勿在薄壁零件上使用這項資料，因為在機械加工過程中，加工零件的自然頻率會出現變化。

## 關於 Siemens PLM Software

西門子工業自動化事業部旗下機構 **Siemens PLM Software** 是全球領先的產品生命週期管理 (PLM) 軟體和服務廠商，在全球有超過 **63,000** 個客戶，約 **670** 萬套裝機量，總部位於美國德克薩斯州普萊諾市。以開放式的解決方案與企業協同工作，幫助他們將更多的創意轉換為成功的產品。欲了解關於 **Siemens PLM Software** 產品和服務的更多資訊，請造訪網站 [www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm)。

### Siemens PLM Software

#### 總部

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
972 987 3000  
傳真 972 987 3398

#### 美洲

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
800 498 5351  
傳真 972 987 3398

#### 歐洲

3 Knoll Road  
Camberley  
Surrey GU15 3SY  
United Kingdom  
44 (0) 1276 702000  
傳真 44 (0) 1276 702130

#### 亞太地區

Suites 6804-8, 68/F  
Central Plaza  
18 Harbour Road  
WanChai  
Hong Kong  
852 2230 3333  
傳真 852 2230 3210

#### 台灣

台北市 114  
內湖區洲子街  
63 號 9 樓  
886 2 2657 0000  
傳真 886 2 2657 6677

[www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm)

© 2009 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 保留所有權利。西門子 (Siemens) 和西門子標誌是西門子公司 (Siemens AG) 的註冊商標。Teamcenter、NX、Solid Edge、Tecnomatix、Parasolid、Femap、I-deas 和 Velocity Series 均為 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 或其子公司在美國與其他國家的商標或註冊商標。此處使用的其他所有標誌、商標、註冊商標或服務商標均屬於其各自擁有者的財產。

WI12-TA 17610 11/09 B