

# 插銑加工技術研究並應用於相機外殼塑膠模具切削

張博文<sup>1</sup> 陳俊龍<sup>2</sup> 許進忠<sup>3</sup>

## 摘要

本研究以正方形及三角形插銑加工路徑計算方法為基礎，探討 Pro/E 及 Power Mill 二套軟體的插銑路徑設計，並與數種傳統等高粗加工路徑設計比較，以瞭解等高粗加工與插銑粗加工之異同。本研究以鋁合金 6061-T6 進行切削實驗，利用田口實驗計畫法找出較佳之等高粗加工及插銑粗加工路徑及切削條件，以材料移除率望大為目標比較二者差異。其實驗結果發現，對插銑加工言，其受力主要在插銑進給軸向。在插銑進給率 610mm/min、轉速 4200 rpm、螺旋式插銑及刀間距 16mm 的切削條件下，有最佳材料移除率，且將此最佳條件用於不同模穴深度及有無凸島特徵之插銑模擬比較，模穴深度越深，插銑粗加工較傳統等高粗加工效率高出許多。且進一步的將插銑路徑進行重新分配設計，插銑粗加工效率有提高趨勢。

關鍵字：插銑粗加工、加工路徑設計、材料移除率

---

<sup>1</sup>高雄市立高雄高工 機械科教師

<sup>2</sup>台北市立木柵高工 教學助理

<sup>3</sup>國立高雄應用科技大學 模具工程研究所 教授

# Study of plunge milling technology with the application of mold machining of camera shell

Bo-Wen Chang<sup>1</sup> Chun-lung Chen<sup>2</sup> Jinn-Jong Sheu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanic Engineering , Municipal Kaohsiung Senior Vocational Industrial High School.

<sup>2</sup> Taipei Muzha Vocational High School.

<sup>3</sup> Department of Mold and Die Engineering , National Kaohsiung University of Applied Sciences.

## Abstract

In this research, plunge roughing tool path designs of different software (Pro/E and Power Mill) had been evaluated based on the rectangular and the triangular path calculation criteria. The cutting results of the traditional Z-plane and the plunge roughing were compared. Design of experiments (DOE) method was adopted to find the better tool path designs and cutting conditions of both roughing methods. Finish cuttings were also taken into consideration to obtain more complete efficiency comparison. Aluminum alloy 6061-T6 was adopted in all of the cutting experiments. The better material removal rate was obtained under the condition of plunge feed rate 610 mm/min, 4200 rpm, step distance 16mm, and spiral tool path design. The cutting simulations also showed the cutting efficiency of plunge roughing is increased with increase of cutting depth with respect to the Z-plane roughing. The relocate tool path proposed in this research can also improve the cutting efficiency.

Keywords.

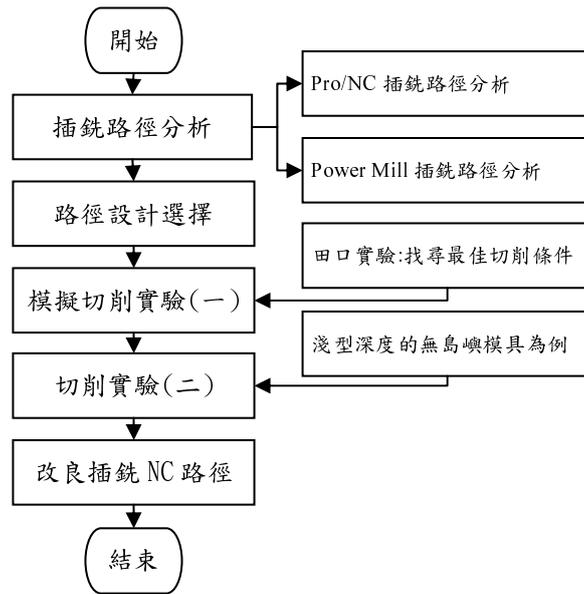
Plunge Roughing, Cutting path design, Material removal rate

## 壹、前言

在業界對於材料的大量移除的加工視為一個重點，因為提高移除率相對也提高了加工效率，在國內外也有許多學者[1-10]提出研究成果，如 Wakaoka[1]等人提出利用更換式刀具(材質為鋁合金陶瓷刀具)且切削速度超過 900m/min 切削碳鋼垂直壁時，其垂直壁的精度及表面粗糙度也相對的提高，在使用立方氮化硼的刀具切削鑄鐵是比較容易切削。吳[2]，以順銑加工瞭解工件表面溫度，並以田口法評估其因子的顯著性，且探討基於切削溫度之最大材料移除率。Ko[3]提出利用振動的原理，找到切削深度及轉速的穩定範圍，且探討刀具在插銑時的側向力及扭轉，了解插銑時各個方向的切削力。Ko[4]等人利用插銑切削力的公式及未切削之切屑厚度，決定切削力係數，插銑加工實驗印證其切削力及插銑切削力的誤差。2006年，王[5]，以馬鞍型拋物曲面模型，利用漢默斯里序列採樣法(Hammersley Sequence Sampling,HSS)，將量得的數據應用田口法尋求最後的曲面切削條件及影響因子的貢獻率。曾[6]，以田口方法動態特性理論的理想機能模式，滿足模具製造業對於高速、高品質、與短交期之需求。另應用田口品質損失函數的方法，以開發高速加工的多重品質特性的最佳製程參數。秦等人[7]，利用插銑方式加工鈦合金(Ti-6Al-4V)，建構切削分析平台，對於插銑切削力的變化進行研究，以建立一切削力模型。Ko[8]等人提出以時間為主軸的數學模型，預測切削力、扭轉及振動，以插銑方式找出切削時刀具振動及穩定狀態的曲線圖，發現插銑加工之振動是因切屑排出時所產生。Ko[9]等人建立插銑動態方程式及未切削之最大切屑厚度模型，以預測切削力係數。許[10]提出對較常使用的模具材料進行實驗，且在不同模具深度(以淺、中、深作為區別)時，插銑較一般粗加工的效率，又有所不同，規劃不同的刀具路徑比較效率上的差別。而本研究主要以相機外殼母模為一個應用實例，比較一般粗加工與插銑加工之異，且進一步建立新的插銑加工路徑。

## 貳、研究方法與過程

本研究爲了提高材料切削移除率主要探討一般粗加工與插銑粗加工於加工時不同的差異性，分別先利用插銑專用的油路刀把進行模擬比較，決定之後實驗加工設定 NC 路徑的軟體，且利用田口方法找尋此兩種加工方法最佳條件組合，分別模擬探討其淺、中、深三種形式模具的移除率，並以淺型模具進行實際切削比較，最後再以近似平行往復式加工路徑加以改良。其研究方法與流程如圖一所示。



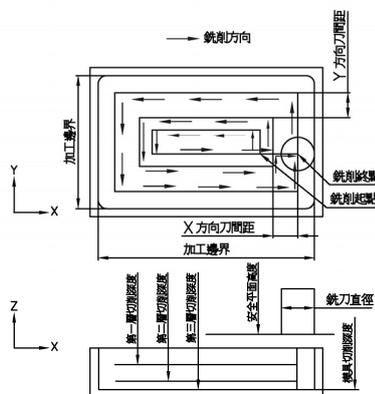
圖一 研究架構與流程

## 一、理論探討

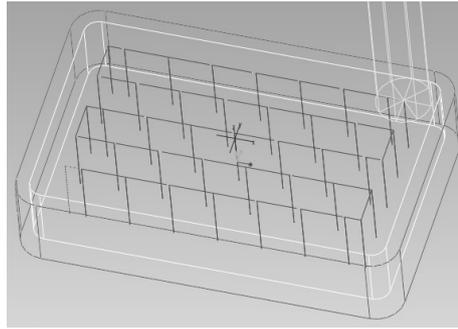
### (一)一般加工與插銑加工路徑形式

一般材料移除模式，大部分皆以等高方式進行粗加工，而粗加工之型式可分平行等高粗加工及環繞等高粗加工，其動作模式為刀具在同一平面上作等間距及一固定深度的加工，待完成一平面加工後，刀具提刀至安全平面，快速移動至下一切削位置，進行第二層加工，其示意圖如圖二(a)所示。

插銑加工其加工原理為垂直於銑床平台的加工，如圖二(b)所示，其動作方式類似於鑽孔加工，以定義 X、Y 方向之間距進行加工一般設定 X、Y 的間距應為相同，且可一次加工至模具外形的深度，對於不易加工的材料、刀具懸伸較長或切槽處的加工，都較一般等高加工法的效率來得高許多。



(a) 一般加工路徑示意圖-以環繞等高法為例



(b) 插銑加工路徑示意圖

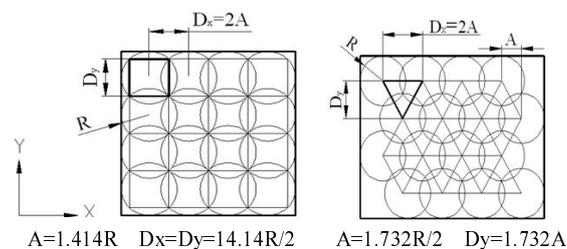
圖二 一般加工與插銑加工路徑示意圖

(二)插銑加工刀間距之配置設計方式

本研究以相機外殼約 25mm 的淺型模具為例，首先探討 Pro/NC 及 Power Mill 材料移除率之比較，且以相同的切削條件如表一所示，找到最佳材料移除率，而刀間距採用許[10]正方形及三角形方式計算如圖三。插銑刀具直徑為 19.05mm，經由下圖的正方形公式代入後，其刀間距值約 13.5mm；三角形之值約為 16.5mm，所以在刀間距的比較下則選擇比較 13~17mm 之間。經模擬及計算分析後的結果，得到 Pro/NC 的材料移除率在刀間距 13mm、15mm、17mm 有較大的移除率，Power Mill 材料移除率則在 15mm、16mm、17mm，如表二所示。但因使用 Power Mill 在路徑較不易控制且大刀間距會有殘料發生，故本文之後的加工模擬則以 Pro/NC 來設定 NC 路徑，以方便進行模擬比較。

表一 插銑路徑分析之切削條件

刀具直徑	19.05mm	進給率	610 m/min
刀間距	12~17 mm	工法	平行式
進刀進給率	100mm/min	轉速	5100rpm
退刀距離	5mm		



圖三 正方形與三角形刀間距計算方法

表二 Pro/NC 與 PowerMill 切削路徑比較

刀間距 (mm)	Pro/NC		PowerMill	
	切削長度 (mm)	材料移除率 (mm <sup>3</sup> /min)	切削長度 (mm)	材料移除率 (mm <sup>3</sup> /min)
13	1731.12	16629.18	2917.16	13779.00
14	1725.55	13363.34	1034.15	16110.14
15	1429.31	16006.85	2104.49	17355.40
16	1402.88	15622.38	2302.56	16408.71
17	1428.76	15985.95	1773.07	17158.76

## (三)田口實驗設計方法

田口實驗法(Taguchi Method)主要兩個工具為直交表(Orthogonal array)及 SN 比(Signal to noise ratio)，其強調產品或製程設計時考慮品質問題，亦即如何降低產品績效的變異。本研究以田口法作為實驗的目的為取得一般粗加工 L18(2<sup>1</sup>X3<sup>4</sup>)及插銑粗加工 L9(3<sup>4</sup>)之材料移除率最佳切削條件，以目標函數為材料移除率，特性為望大特性，其定義如下式：

$$SN_{LTB} = -10 * \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

## 二、一般粗加工與插銑粗加工之切削條件比較

本研究為了瞭解插銑粗加工及一般粗加工實際切削時材料移除率其效率上的差異，所以先以田口實驗方法先找到最佳的參數條件，再進一步以淺型、中型與深型模具來比較差異。本實驗所採用的加工機為 LeadWell V-30，插銑實驗用刀具採用 Ingersoll 二刃捨棄式刀片的油路刀把，刀具直徑為 19.05mm，一般粗加工所使用的刀具為螺旋角 45°的鋁用銑刀，材質為 HSS-CO 直徑為 20mm，其實驗規劃詳述如下：

## (一)一般粗加工田口實驗之比較

在一般粗加工中，其實驗目的為利用 L18(2<sup>1</sup>×3<sup>4</sup>)田口直交表求得最佳之材料移除率，本實驗所使用之刀具為 2 刃、直徑 20mm 之鋁用刀。參考銑刀之切削條件刀間距為銑刀直徑的 0.25 倍(水準定為 0.2D、0.25D、0.3D)、切削深度為一個銑刀直徑，模具的最大深度約為 25mm，將切削深度水準加大(5mm、10mm、20mm)，以看出水準的影響程度，切削速度依據鋁合金材料之切削條件最大為 60 m/min，進給率依銑刀之切削條件，每刃進刀量最大為 0.05 mm/t。其詳見表三為一般粗加工之因子水準表。

表三 一般粗加工田口實驗要因水準表

因子 水準	A	B	C	D	E
	加工 方法	刀間距 (mm)	切削 深度 (mm)	轉速 (rpm)	進給率 (mm/min)
1	平行	4	5	800	160
2	環繞	5	10	960	290
3		6	20	1200	440

## (二)插銑粗加工田口實驗之比較

插銑粗加工田口則以  $L_9(3^4)$  直交表來進行，其工法為平行往復式、螺旋式、單向式之加工法、刀間距之選用以之回應圖為依據，目標函數為望大特性(材料移除率越大越好)。詳見表四實驗因子水準表。

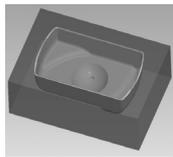
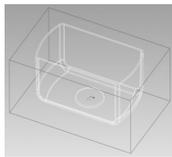
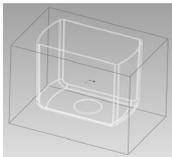
表四 插銑粗加工田口實驗要因水準表

因子 水準	A	B	C	D
	加工 方法	刀間距 (mm)	轉速 (rpm)	進給率 (mm/min)
1	往復	14	3400	270
2	螺旋	15	4200	420
3	單向	16	5100	610

## 三、一般粗加工與插銑粗加工之材料移除率比較

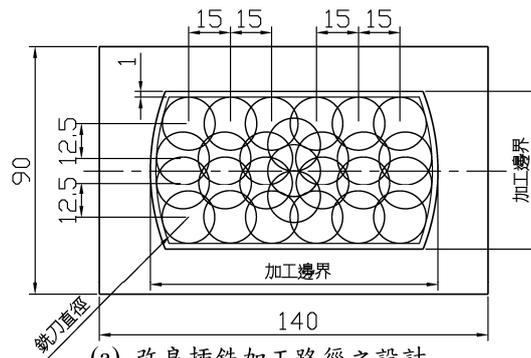
此部分即將利用上述最佳化組合的切削條件進行切削模具，而模具則以無島嶼模具為例。其模具依深度再區分淺型、中型、深型三種，在比較其材料移除率與總加工時間，如表五所示。

表五 淺、中、深型無島嶼模具示意圖

		
淺型無島嶼模具 (深度：25mm)	中型無島嶼模具 (深度：55mm)	深型無島嶼模具 (深度:105mm)

## 四、插銑加工路徑改良之設計

本研究為了使切削時間降低，將模具的插銑路徑重新設計與分配，將邊界尺寸裕留量 1mm，且以近似平行往復式加工的方式重新排列加工路徑，其規劃與模擬切削的路徑，如圖四所示。其切削條件以插銑田口實驗中最佳條件作為依據，而在改良路徑部份，刀間距經計算過以 15mm 為移除率較適宜。



(a) 改良插銑加工路徑之設計



(b) 改良插銑加工路徑之模擬路徑

圖四 改良插銑加工路徑

## 參、結果與討論

### 一、一般粗加工與插銑粗加工之田口實驗比較結果

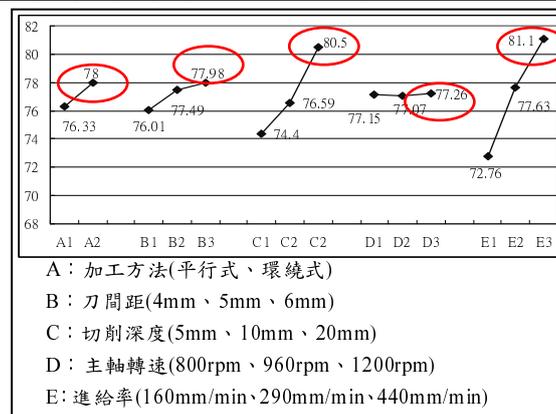
在探討一般粗加工與插銑出加工最大移除率前，先利用田口實驗方法對一般粗加工與插銑粗加工最佳切削條件探討，在利用此條件用於相機母模穴進行材料移除率切削比較實驗。

#### (一) 一般粗加工田口實驗之比較結果

在確定實驗條件與水準後，則將條件置入 L18 直交表當中，且實際進行實驗並紀錄，再將實驗結果計算 SN 比如表六。其最佳實驗組合可以由 SN 回應圖得知最佳參數組合為 A2、B3、C3、D3、E3(環繞加工、刀間距 6mm、切深為 20mm、轉速為 1200rpm、進給率為 440 mm/min)，如圖五所示。而此實驗中加工方法、刀間距、切削深度及進給率四個條件影響較為顯著，對於材料移除率非常重要，尤其是進給率與切深，經實驗觀察研判進給率高且在不影響刀具磨損的狀態下有提高移除率之用；相同的，若是模穴的深度淺、深不同時，對於移除率也有相當的影響。若將最佳切削條件組合實際加工，可以得知時間約為 3.00min 及移除體積為 64092.4mm<sup>3</sup>，其材料移除率為 21337.88mm<sup>3</sup>/min，其較之前的 18 組實驗提高相當多的移除率，其後且將此組合用於無島嶼模穴比較中。

表六 一般粗加工 18 組之實驗結果

∖	A	B	C	D	E	MRR	S/N ratio
1	1	1	1	1	1	2467.255	67.844
2	1	1	2	2	2	5797.015	75.264
3	1	1	3	3	3	13711.25	82.741
4	1	2	1	1	2	5442.297	74.715
5	1	2	2	2	3	9637.293	79.679
6	1	2	3	3	1	6128.483	75.747
7	1	3	1	2	1	3045.698	69.673
8	1	3	2	3	2	6991.521	76.891
9	1	3	3	1	3	16558.01	84.380
10	2	1	1	3	3	7901.506	77.954
11	2	1	2	1	1	3920.409	71.866
12	2	1	3	2	2	10489.93	80.415
13	2	2	1	2	3	9442.850	79.502
14	2	2	2	3	1	4741.791	73.518
15	2	2	3	1	2	12287.42	81.789
16	2	3	1	3	2	6844.072	76.706
17	2	3	2	1	3	13053.71	82.314
18	2	3	3	2	1	7857.062	77.905



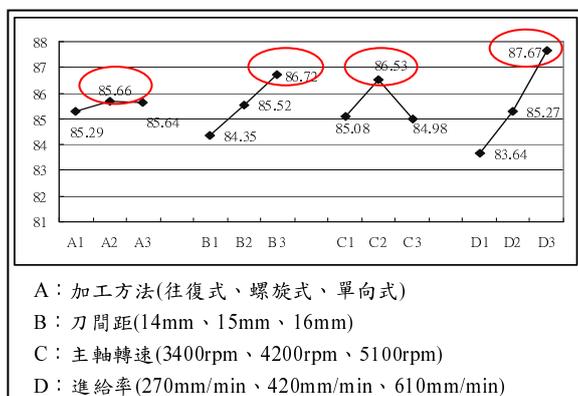
圖五 一般粗加工 SN 回應圖

(二)插銑粗加工田口實驗之比較結果

在插銑部份，依序完成直交表實驗順序，並記錄實驗數據與 SN 比其結果如表七所示。由圖六可得知最佳參數組合為螺旋式插銑粗加工、刀間距為 16mm、轉速為 4200rpm、進給率為 610mm/min，將其最佳切削條件實際加工，時間約為 1.9min 及移除材料的體積為 53844.7mm<sup>3</sup>，材料移除率為 28337.8mm<sup>3</sup>/min。

表七 插銑粗加工 9 組之實驗結果

	A	B	C	D	MRR	S/N ratio
1	1	1	1	1	12257.486	81.768
2	1	2	2	2	20025.434	86.031
3	1	3	3	3	25325.613	88.071
4	2	1	2	3	24050.059	87.622
5	2	2	3	1	14471.937	83.210
6	2	3	1	2	20259.485	86.132
7	3	1	3	2	15239.053	83.659
8	3	2	1	3	23242.067	87.325
9	3	3	2	1	19819.719	85.941



## 二、一般粗加工與插銑粗加工材料移除率比較結果

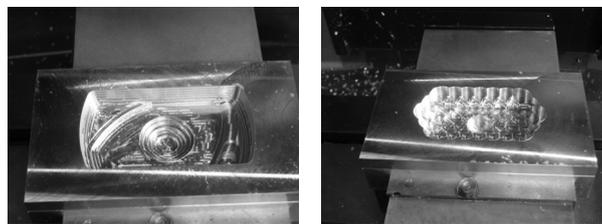
在此部份以淺型、中型、深型的無島嶼模具為例進行比較，而本文主要先以將淺型模具、中型模具、深型模具三者先進行模擬其材料移除率的相關比較如表八所示，再以淺型模具實際切削，其實際切削的路徑與加工時間與模擬結果相差不多。而在模擬材料移除切削的比較下，若以一般加工為 1.00，則插銑粗加工皆大於一般粗加工，加工時間也較一般粗加工有減少的趨勢。若是使用一般粗加工，則隨著模穴越高，則其加工時間會較插銑時間來的長，且有更明顯的差別。而一般粗加工與插銑粗加工的過程與成品照片，如圖七所示。

表八 淺、中、深型模具之模擬比較

淺型 模具	加工方法	一般	插銑	總加工時間
	移除體積(mm <sup>3</sup> )	64092.4	53844.7	一般法
	時間(min)	3.00	1.9	60.25min
	材料移除率 (mm <sup>3</sup> /min)	21364.13	28339.32	插銑法
	材料移除率比較	1.00	<b>1.33</b>	59.15min

中型 模具	移除體積(mm <sup>3</sup> )	239531.3	225906.2	一般法
	時間(min)	8.77	5.25	63.12min
	材料移除率 (mm <sup>3</sup> /min)	27312.58	43029.76	插銑法
	材料移除率比較	1.00	<b>1.58</b>	59.60min
深型 模具	移除體積(mm <sup>3</sup> )	488169.1	406609.3	一般法
	時間(min)	8.03	8.03	116.8min
	材料移除率 (mm <sup>3</sup> /min)	27784.24	50636.28	插銑法
	材料移除率比較	1.00	<b>1.82</b>	107.26min

註：以一般粗加工的材料移除率“1.00”



(a) 一般粗加工半完成品 (b) 插銑粗加工半完

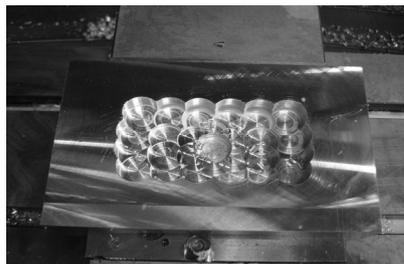
圖八 一般粗加工與插銑粗加工之半完成品

### 三、插銑加工路徑改良之設計

而在此部份針對上述了解到插銑在使用上較一般粗加工可以有效切削，而本研究更進一步以近似平行往復式加工的方式重新排列加工路徑。且將前述的兩種方法比較於表九，其改良的插銑路徑約減少兩次提刀，因此減少了些微加工不必要的時間，也提高約 2.9 倍的移除率，其原因是能更有效率的設計切削邊緣殘料，使得後面加工可以更快速完成，其完成品如圖九所示。

表九 一般粗加工、插銑粗加工與改良後比較表

	一般加工	插銑加工	改良後插銑加工
移除材料體積 (mm <sup>3</sup> )	64092.4	53844.7	64848.8
時間(min)	3.00	1.90	1.16
MRR(mm <sup>3</sup> /min)	21337.88	28337.8	55584.72
插銑刀次(次)		29	27
效率(%)	1	1.48	2.9



(a) 實際切削改良插銑路徑之半成品



(b) 改良插銑路徑之完成品

圖九 實際切削改良插銑路徑之完成品

## 肆、結論與建議

在本研究經由一般粗加工與插銑粗加工分別對相機外殼的母模切削實驗，可以得知插削用於粗加工可以提高材料移除率。而本文且進一步運用近似平行往復式加工路徑做改良，且發現亦有減少加工時間之效果，可提高加工效率，且材料移除率提高將近三倍，也相對減少了加工時間。

## 參考文獻

1. Shunsuke and Wakaoka etc., "High-speed and high-accuracy plunge cutting for vertical walls," Department of Mechanical Engineering, Hiroshima University, 2002。
2. 吳佩霖，在工作溫度限制下最大材料移除率之銑削條件探討，碩士論文，國立成功大學機械工程學系，台南、台灣，2000。
3. Y. Altintas, J. H. Ko, "Chatter Stability of Plunge Milling," Manufacturing Automation Laboratory, Dept. of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada。
4. Jeong Hoon Ko, "Plunge Milling Force Model using Instantaneous Cutting Force Coefficients," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, pp.8-13, 2006。
5. 王雪娥等，以田口法規劃曲面切削之研究，第五屆精密製造學術研討會，國立中山大學，高雄，台灣，2006。
6. 曾彥羲，田口方法應用於高速 CNC 銑削加工製程之最佳參數設計，碩士論文，國立高雄第一科技大學，高雄，台灣，2003。

7. 秦旭達等，基於回爐法的鈦合金(Ti-6Al-4V)插銑銑削力建模分析，北京工業大學學報，第 32 卷第 8 期，2006。
8. Jeong Hoon Ko, Yusuf Altintas, "Dynamics and Stability of Plunge Milling Operations," Transactions of the ASME, pp.32-40, 2007。
9. Jeong Hoon Ko, Yusuf Altintas, "Time domain model of plunge milling operation," The University of British Columbia, Department of Mechanical Engineering, 2006。
10. 許進忠，高效率模具切削方法之研究，研究計畫，國立高雄應用科技大學，高雄，台灣，1998。