

國立臺灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文



Graduate Institute of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

五軸刀具軸向對切削狀態之影響

Influences of tool orientation on cutting forces
in 5-axis milling

何達仁

HO,TA-JEN

指導教授：李貫銘 博士

Advisor: Kuan-Ming Li, Ph.D.

中華民國 111 年 9 月

September, 2022

口試委員審定書



國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書 MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

(論文中文題目) (Chinese title of Master's thesis)

五軸刀具軸向對切削狀態之影響

(論文英文題目) (English title of Master's thesis)

Influences of tool orientation on cutting forces in 5-axis milling

本論文係何達仁 (姓名)R09522704 (學號) 在國立臺灣大學機械工程所(系/所/學位學程)完成之碩士學位論文，於民國111年8月11日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Mechanical Engineering on 11 (date) 08 (month) 2022 (year) have examined a Master's thesis entitled above presented by HO.TA-JEN (name) R09522704 (student ID) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

李貫銘 教授 李貫銘 (簽名) (指導教授)
蔡曜陽 教授 蔡曜陽 (簽名)
盧銘詮 教授 盧銘詮 (簽名)

系主任/所長 Director: 林許群

致謝



這兩年的碩士歷程，首先要感謝的是指導教授，李貫銘教授，提供了我各方面的指導與幫助，讓我也能夠順利進行研究，也給了我很多知識上的學習機會以及豐富的經驗。非常感謝老師這兩年的指導，使我收穫良多。

感謝台灣大學機械所蔡曜陽教授，中興大學機械所盧銘銓教授撥出時間來擔任我的論文口試委員，指導我的論文，給了我很多非常有幫助的建議，讓我的論文能夠更加的完善。

感謝林恒建師傅，協助我操作五軸加工機，幫助我進行實驗。感謝何清模師傅協助我加工實驗用材料。感謝參與AMP3計畫的張庭華學長、洪儲鈞、黃顯雄同學，在研究的過程中與我進行討論，給了我很多實用的幫助，也讓我借用實驗器材可以進行實驗。感謝實驗室學長姐翰霖、奕言、景揚、欣芳、宜楷與胤丞，在實驗室給了我很多課業、生活與研究上的幫助。感謝同屆一起努力的同學們冠良、浩平、柏瀚、柏秀、俊延、鵬育與泓諭，在這兩年間一起努力、一起吃飯玩樂，能遇到各位真是太好了。感謝學弟們志綱、翊恩、仁辰、侑杰與昂霆在生活上以及研究上都幫了很多忙。

最後要感謝我的家人與親戚，提供我生活上的一切資源，使我可以全神貫注在碩士生涯上。感謝兩年間一起互動的每位朋友，讓我的生活更加豐富，也能夠更快樂的度過每一天。感謝台大工學院、機械所、以及台大校園的一切給我幫助，讓我也能夠完成學業、完成研究。感謝各位。

何達仁

摘要



五軸加工擁有高自由度的特性，可進行自由曲面加工，在模具製造、航太製造等先進製造產業中廣泛使用。五軸加工的路徑規劃主要依據路徑平滑化與降低工件尺寸誤差，依照工件表面之曲率來規劃使用的刀具軸向及進給方向。如果能在事前規劃上考慮到刀具軸向改變對於切削力與工件表面品質的變化，能夠提升加工的品質與穩定性。因此研究五軸加工下刀具軸向改變對於切削力以及表面品質的影響，是非常重要且值得的研究目標。

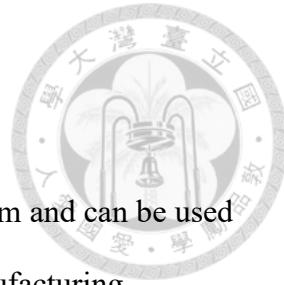
本研究討論球刀槽銑鋁製工件的情況。透過模擬計算不同刀具軸向下的切削力變化。使用動力計量測五軸加工時的切削力，紀錄使用不同刀具軸向進行槽銑的切削力數據。使用表面粗度儀量測切削後的工件表面，紀錄使用不同刀具軸向進行槽銑的表面品質。根據實驗結果整理出各刀具軸向的切削力變化與表面粗糙度之間的關係，當刀具前傾角(lead angle)接近零時，因部分接觸點的切削速度很低，會產生刀尖接觸與表面黏附損傷等現象，導致切削力激增且表面品質差。增加前傾角避免刀尖接觸點的切削速度過低，可以穩定切削力與提升表面品質。當刀具向左傾斜，側傾角(tilt angle)為負時，因為切屑排出方向隨著刀具旋轉方向改變而更傾向往未切削工件方向排屑，增加切屑厚度與堆積現象，造成切削力不穩定與表面切屑黏附。而刀具向右傾斜時切削力較穩定，但是會造成表面產生波浪狀的刀痕。側傾角的正負選擇還可以根據切屑堆積位置做決定，刀具的側傾方向會導致該方向的切屑堆積而減低表面品質，例如側傾角為正時刀具右傾，槽銑後的工件表面靠右側處較為粗糙，靠左側處則較平滑，反之亦然。本研究依據實驗結果整理五軸刀具軸向對於切削狀態之影響，刀具軸向改變會造成某些形況下刀具與工件接觸點的切削速度過低，導致表面品質變差，以及改變刀具軸向造成切屑排出的方向改變，造成切屑的堆積。

現象。根據本研究的結果可以避免五軸切削時因為使用了不適當的向量而造成切削品質的落差。



關鍵字:刀具軸向、切削力、表面粗糙度、五軸加工、路徑規劃

Abstract



Five-axis machining is characterized by high degree of freedom and can be used for free-form surface machining. It is widely used in advanced manufacturing industries such as mold manufacturing and aerospace manufacturing. Tool path planning for five-axis machining mainly based on smooth trajectory and reducing form error. Tool orientation and feed direction are planned according to curvature of workpiece surface. The quality and stability of machining can be improved if changes in cutting force and surface quality due tool orientation changes can be considered in prior planning. Therefore, it is very important and worthwhile to study the influence of tool orientation change on cutting force and surface quality under five-axis machining.

This study deals with ball-end slot milling of aluminum workpieces. The cutting force variations under different tool orientation are calculated by simulation. The cutting force during five-axis machining with different tool orientation is measured by dynamic metering. The surface roughness tester is used to measure the surface of the cut workpiece and record the surface quality of the slot milling with different tool orientation. According to the experimental results, the cutting performance of each tool orientation is sorted out. When the lead angle of the tool approaches zero, the tool tip contact and surface adhered damage will occur, which will lead to sharp increase of cutting force and poor surface quality. Increasing the lead angle to avoid tool tip contact can stabilize cutting force and improve surface quality. When the tool tilts to the left, tilt angle is negative, chip thickness and accumulation will increase, resulting in unstable cutting force and surface adhered . While the cutting force is more stable when the tool is tilted to the right, but it will cause wavy tool marks on the surface.

The positive and negative selection of the tilt angle can also be determined by the position of chip accumulation. The direction of tool tilt will result the chip thickness increase and lower surface quality in this direction. The tool tilt to the right when the tilt angle is positive, The surface is rough on the right, smooth on the left after slot milling, and vice versa. In this study, the influence of the five-axis tool orientation on the cutting state is sorted out based on the experimental results, which can be used as a reference for tool orientation selection in tool path planning.

Keywords: tool orientation, cutting force, surface roughness, 5-axis machining, path planning

目錄



口試委員審定書.....	I
致謝.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	V
目錄.....	VII
圖目錄.....	X
表目錄.....	XIV
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 刀具軸向定義.....	3
2.2 切削力計算.....	4
2.3 順銑(Down milling)與逆銑(Up milling)	5
2.4 切屑堆積.....	6
2.5 邊緣效應與犁切效應.....	7
2.6 刀具軸向對切削狀態之影響.....	8
2.7 小結.....	9
第三章 研究方法.....	10
3.1 研究流程.....	10
3.2 切削力模型.....	11
3.3 研究設備規格.....	20
3.3.1 五軸加工機.....	20
3.3.2 動力計.....	21



3.3.3	訊號放大器.....	22
3.3.4	訊號擷取卡.....	23
3.3.5	表面粗糙度儀.....	23
3.3.6	碳化鎢球刀.....	24
3.4	表面粗糙度.....	25
第四章	實驗規劃.....	26
4.1	實驗設備.....	26
4.2	實驗參數與路徑.....	27
4.3	切削深度與傾斜角度.....	29
4.4	表面粗糙度量測.....	30
第五章	實驗結果與討論.....	32
5.1	刀具軸向無傾斜的切削力與表面狀態.....	32
5.1.1	動力計數據.....	32
5.1.2	與模擬切削力數據比較.....	33
5.1.3	表面狀況.....	35
5.2	只有側傾無前傾的切削力與表面狀態.....	37
5.2.1	動力計數據.....	37
5.2.2	與模擬切削力數據比較.....	39
5.2.3	表面狀況.....	41
5.3	只有前傾無側傾的切削力與表面狀態.....	43
5.3.1	動力計數據.....	43
5.3.2	與模擬切削力數據比較.....	44
5.3.3	表面狀況.....	46
5.4	同時有前傾與側傾的切削力與表面狀態.....	48
5.4.1	動力計數據.....	48



5.4.2	與模擬數據比較.....	53
5.4.3	表面狀況.....	57
5.5	討論.....	61
5.5.1	不同刀具軸向下的邊緣效應.....	61
5.5.2	小結.....	66
第六章 結論與未來展望.....		69
6.1	結論.....	69
6.2	未來展望.....	70
參考文獻.....		71
附錄.....		73



圖目錄

圖 1 Lead angle 與 Tilt angle 定義[1].....	3
圖 2 刀具上 t、r、a 方向示意圖[2].....	4
圖 3 順銑(Down_milling)與逆銑(Up_milling)[5].....	5
圖 4 燕尾形/螺旋形切屑[6].....	6
圖 5 Wojciechowski 等實驗結果之前傾角與邊緣力關係[7]	7
圖 6 研究流程圖.....	10
圖 7 切削力模型示意圖[12].....	11
圖 8 刀具軸向轉換成 incx 與 incy[2]	12
圖 9 刀具工件接觸區域[2].....	13
圖 10 開始切削角與結束切削角[3].....	14
圖 11 Ki 示意圖.....	15
圖 12 K 小於 Ki 時的切削角範圍示意圖.....	16
圖 13 切削力模型架構流程圖.....	19
圖 14 模擬切削力繪圖範例.....	20
圖 15 五軸加工機 NFX-400A	21
圖 16 動力計 Kistler 9257B	22
圖 17 訊號放大器 Kistler 5070A.....	22
圖 18 訊號擷取卡 NI USB-6341	23
圖 19 表面粗度儀 SJ-411.....	24
圖 20 MG 鋁用 2 刀球型立銑刀	24
圖 21 表面曲線與評估長度.....	25
圖 22 實驗設備架構圖.....	26
圖 23 切削實驗照片	27

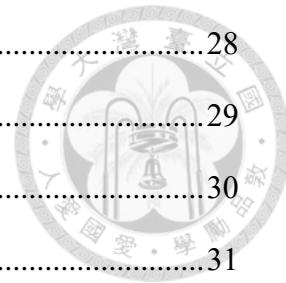


圖 24 工件座標與切削路徑示意圖.....	28
圖 25 傾斜角度與最大切深關係圖.....	29
圖 26 切削實驗完工件照.....	30
圖 27 工件刀痕示意圖.....	31
圖 28 無傾斜動力計數據.....	33
圖 29 撈取比較部份示意圖.....	33
圖 30 無傾斜前段切削力比對圖.....	34
圖 31 無傾斜後段切削力比對圖.....	34
圖 32 無傾斜切削工件表面.....	36
圖 33 無傾斜切削第二組照.....	36
圖 34 tilt10 動力計數據	38
圖 35 tilt-10&-30 動力計數據	39
圖 36 tilt 10 切削力比對圖	40
圖 37 tilt -10 切削力比對圖	40
圖 38 tilt -30 切削力比對圖	41
圖 39 不同側傾角的刀具旋轉方向示意圖	41
圖 40 無前傾有側傾工件表面.....	42
圖 41 lead angle10~30 動力計數據	44
圖 42 lead10 切削力比對圖	45
圖 43 lead20 切削力比對圖	45
圖 44 lead30 切削力比對圖	46
圖 45 有前傾無側傾工件表面.....	47
圖 46 lead5 、 tilt±5 動力計數據	49
圖 47 lead10 、 tilt±20 動力計數據	50
圖 48 lead15 、 tilt±15 動力計數據	51

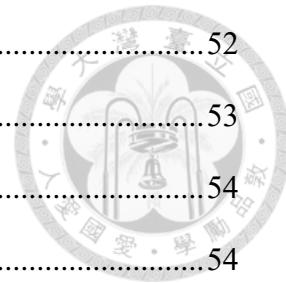


圖 49 lead20、tilt \pm 10 動力計數據	52
圖 50 5_-5 切削力比對圖	53
圖 51 5_5 切削力比對圖	54
圖 52 10_-20 切削力比對圖	54
圖 53 10_20 切削力比對圖	55
圖 54 15_-15 切削力比對圖	55
圖 55 15_15 切削力比對圖	56
圖 56 20_-10 切削力比對圖	56
圖 57 20_10 切削力比對圖	57
圖 58 lead5° tilt \pm 5° 工件表面	58
圖 59 20_10 工件表面	59
圖 60 20_-10 工件表面	59
圖 61 10_20 工件表面	60
圖 62 10_-20 工件表面	60
圖 63 20_10 表面波形	61
圖 64 20_-10 表面波形	61
圖 65 刀具無傾斜的切削速度分布	62
圖 66 刀具無前傾的切削速度分布	62
圖 67 前傾 10、側傾-20 的切削速度分布	62
圖 68 前傾 10、側傾 20 的切削速度分布	62
圖 69 高轉速無傾斜切削力比對圖	63
圖 70 無傾斜、高切削速度分布	63
圖 71 無傾斜表面照	63
圖 72 刀具無傾斜時高低轉速切削力對比	64
圖 73 低轉速無傾斜切削時的邊緣力大小	64

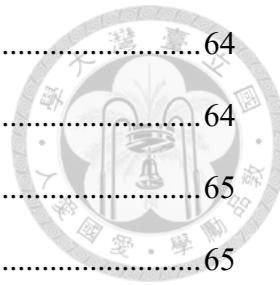


圖 74 低轉速切削表面照.....	64
圖 75 高轉速切削表面照.....	64
圖 76 切屑厚度討論點位置示意圖[13].....	65
圖 77 不同刀具軸向下的切屑厚度.....	65
圖 78 不同刀具軸向下的邊緣力變化.....	68
圖 79 不同刀具軸向下的表面狀況.....	68



表目錄

表 1 切削系數.....	18
表 2 五軸加工機規格表.....	21
表 3 動力計規格表.....	22
表 4 放大器規格表.....	23
表 5 撷取卡規格表.....	23
表 6 表面粗糙度儀規格表.....	24
表 7 MG2 刀球型立銑刀規格表	25
表 8 實驗參數表.....	28
表 9 實驗使用刀具軸向一覽表.....	28
表 10 表面粗糙度儀量測方式.....	31
表 11 無傾斜第二組表面粗糙度 Ra(μm)	36
表 12 無前傾有側傾表面粗糙度 Ra(μm)	42
表 13 有前傾無側傾表面粗糙度 Ra(μm)	47
表 14 刀具軸向列表.....	48
表 15 lead 5° tilt $\pm 5^\circ$ 表面粗糙度 Ra(μm)	58
表 16 lead 20° tilt $\pm 10^\circ$ / lead 10° tilt $\pm 20^\circ$ 表面粗糙度	59



第一章 緒論

1.1 研究背景

隨著科技不斷的進步，工具機也從最初的手動控制，進步至電腦數值控制(Computer Numeric Control, CNC)，再到了現代強調自動化、智慧化。生產加工的目標也從講求快速大量生產，擴展到多樣化、複雜化生產。製造上要求的複雜度與精細度也會越來越高。要提升工具機的加工精度除了機器本身的剛性提升，機台誤差補償等等，從加工事前規劃改善也是一個重要的方法。目前加工規劃多仰賴電腦輔助設計(Computer Aided Design, CAD)與電腦輔助製造(Computer Aided Manufacturing, CAM)的幫助，如果能夠在這些事前規劃之軟體中加入基礎研究的領域知識(domain knowledge)，相信能夠提升規劃的實用性。

五軸加工機顧名思義就是比三軸加工機多了兩個旋轉軸，這兩個旋轉軸使得加工時刀具不再只能固定單一向量進行切削，而是可以調整成各種不同角度來進行工件的材料移除。在模具製造、航太製造等先進製造技術中工件形狀並非單純平面，有很多複雜曲面且精度要求高，這種場合就適合使用五軸加工機來進行。也因為五軸加工常用於自由曲面(freeform surfaces)加工，工件的形狀複雜，在切削時常發生刀具軸向(cutter orientation)之變化而影響表面品質或加工精度。一般而言，五軸加工的路徑規劃主要假設刀具與工件都是剛體，以路徑平滑化與降低工件尺寸誤差為目標，依照工件表面之曲率來規劃使用的刀具軸向及進給方向，並未考慮切削力變化的影響。使用不同的刀具軸向進行會改變切削力的大小及方向，也會改變刀具與工件接觸的位置，從而影響加工的效率與加工的品質。在刀具路徑規劃時如果可以考慮刀具軸向對切削力以及工件表面

之影響可以提升加工的品質，因此研究不同刀具軸向加工對切削狀態之影響是
非常重要且值得的研究目標。



1.2 研究動機與目的

切削力是切削加工中最重要的參數之一，切削力的大小及穩定度會影響切削的效率以及品質。切削力的預測也一直是很熱門的研究題目，而本研究基於文獻建立五軸加工下不同刀具軸向的切削力預測模型，用於快速判讀改變切削刀具軸向所對應的切削力大小及方向變化。

在五軸加工時改變刀具軸向會改變刀具與工件接觸的位置，也就是說切削時刀具傾斜代表會使用到刀具的不同部位進行加工。而刀具不同的部位加工會有不一樣的表面品質[1]。本研究透過動力計量測實際五軸加工時，改變不同的刀具軸向，量測與歸納不同刀具軸向加工時對應的切削力以及表面粗糙數據，並與切削力估測模型比對，探討刀具軸向對五軸切削狀態之影響。結合模型估測與實機加工數據，歸納五軸加工時各種刀具軸向的特性，快速了解切削力及工件表面粗糙度的變化。

本論文共有六章，分為：

第一章：緒論。介紹本論文的研究背景、目的。

第二章：文獻回顧。首先介紹切削力計算方式。接著，說明刀具軸向對切削狀態影響的文獻。

第三章：研究方法。介紹研究流程、切削力模型、研究設備。

第四章：實驗規劃。實驗時所使用的設備、加工條件與實驗方法。

第五章：實驗結果與討論。以實驗量測切削力對照模型計算結果，加上表面粗糙度進行討論，使用結果歸納出刀具軸向對切削狀態之影響。

第六章：結論與未來展望。針對本研究總結，並討論未來可延伸之研究方向。



第二章 文獻回顧

2.1 刀具軸向定義

五軸加工時刀具可以改變與工件之間的夾角，也就是可以各種不同的刀具軸向進行切削加工。而為了可以描述刀具軸向，需要先定義刀具與工件之間的夾角。根據文獻[1]，使用兩個角度來描述刀具軸向，分別為 Lead angle(前傾角)，代號 α 與 Tilt angle(側傾角)，代號 γ ，如下圖 1 所示。

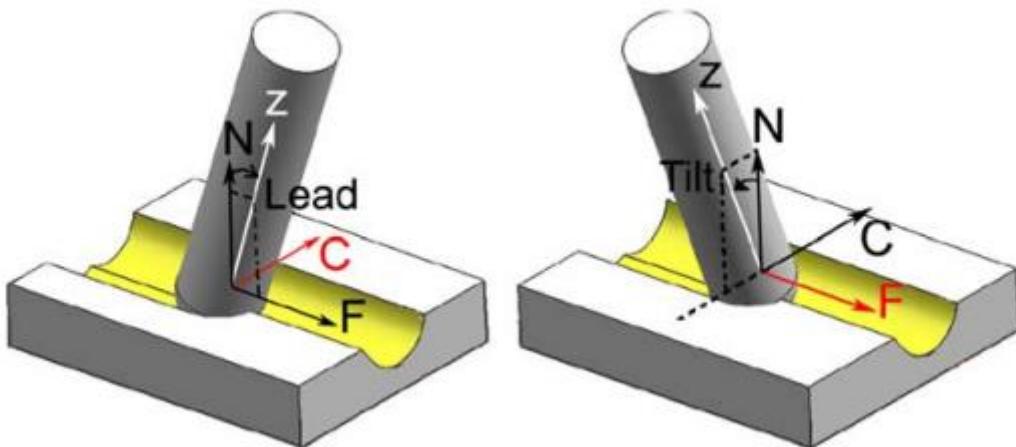


圖 1 Lead angle 與 Tilt angle 定義[1]

Lead angle 代表著刀具在沿著 Feed 方向上(圖 1 中的 F)，與 Normal 方向(圖 1 中的 N)的夾角。也就是代表著刀具往加工前進方向傾斜的角度，本研究為方便解說，將此角度稱為前傾角，以 α 表示。Lead angle 的正負代表著刀柄在刀尖的前方或後方，刀柄超前刀尖的 Lead angle 為正(如圖 1 中左圖)，刀柄在刀尖後的 Lead angle 為負。

Tilt angle 代表著刀具在沿著 Cross 方向上(圖 1 中的 C)，與 Normal 方向的夾角。也就是代表著刀具往加工前進方向側邊傾斜的角度，本研究為方便解說，將此角度稱為側傾角，以 γ 表示。Tilt angle 的正負代表著刀柄在刀尖的左

方或右方，以沿著 Feed 方向為基準，刀柄位於刀尖的右側 Tilt angle 為正(如圖 1 中右圖)，刀柄位於刀尖的左側則 Tilt angle 為負。



2.2 切削力計算

銑削加工中切削力的計算可透過切削係數、切屑厚度、接觸長度等參數預估切削力[2-4]。切削力的計算方式主要是將刀具與工件接觸區域細分為厚度為 db 的圓盤，分別計算每一層的切削力，再疊加而成。如圖 2 所示，可用公式(1)-(3)計算刀具上方單位區域的瞬間切削力。

$$dF_t = K_{tc}hdb + K_{te}dS \quad (1)$$

$$dF_r = K_{rc}hdb + K_{re}dS \quad (2)$$

$$dF_a = K_{ac}hdb + K_{ae}dS \quad (3)$$

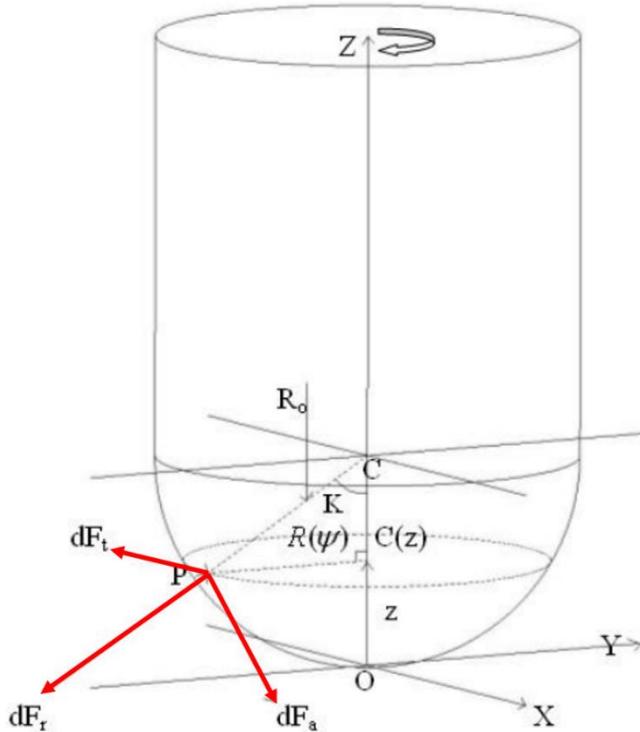


圖 2 刀具上 t、r、a 方向示意圖[2]

其中 t 代表 tangential，r 代表 radial，a 代表 axial，用此三個方向描述切削加工時刀具上方單位面積的瞬間切削力。切削力分為剪切力(shear cutting force)與邊緣力(edge force)，式(1-3)中前項為剪切力，其中 K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 代表剪切力

切削係數，式(1-3)中後項為邊緣力，其中 K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 代表邊緣力切削係數。兩種切削係數可由實驗獲得。 dS 代表 length of a cutting edge，單位面積內的長度，由該處的切削半徑與單位切削旋轉角大小決定。 db 代表 width of a discrete disc，單位面積內的寬度，為計算區域最高點與最低點的差。 h 則代表 chip thickness，接觸點的切屑厚度。

利用公式(1)-(3)可以依據各種切削條件來計算對應的切削力。實際在應用上須要先計算進行加工的切削刀刃位置，再利用積分的概念將切削刀分成數等分，分別計算每個區域切削力後再加總，用此方法計算出加工時刀具上所受到的切削力。

2.3 順銑(Down milling)與逆銑(Up milling)

順銑(Down milling)的定義為刀刃的切削速度方向與工件的前進方向一致，而逆銑(Up milling)則是切削速度方向與工件的前進方向相反，如下圖 3 所示。在加工上的影響主要來自於切削區域的變化不同，順銑切削時刀尖一開始接觸到切屑最厚的部分，再逐漸變薄，最後從切屑最薄的部分離開。而逆銑剛好相反，切削區域從薄到厚。因此造成兩種情況在切削力大小、切削力穩定、表面狀況上有所不同。Laamouri et. al.[5]提到，順銑的表面完整性會比較差。

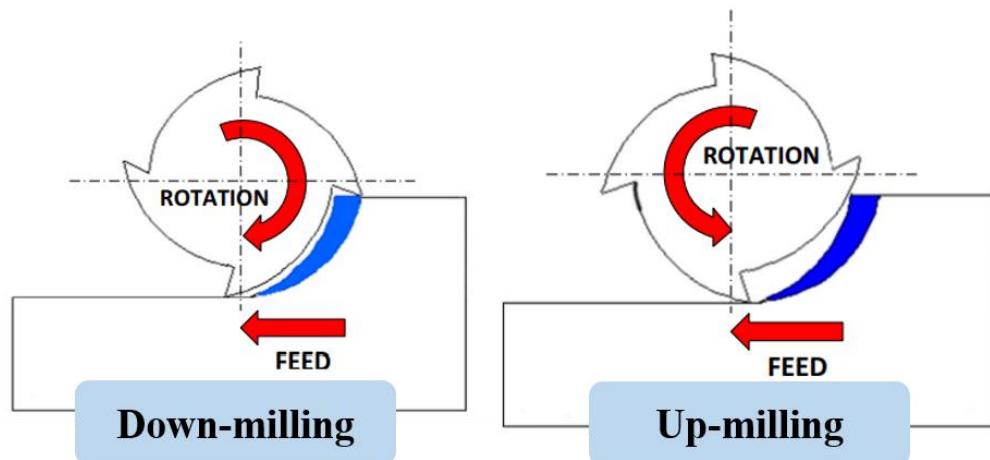


圖 3 順銑(Down_milling)與逆銑(Up_milling)[5]

五軸加工時，改變刀具軸向會造成刀具與工件的接觸位置改變。以三軸銑削為例，在槽銑加工時，如果刀具軸向未傾斜，也就是刀具垂直於工件表面時，可以視為刀具的一半在進行順銑(Down-milling)而另一半在進行逆銑(Up_milling)。當刀具軸向在側方向發生傾斜，也就是 Tilt angle 產生變化時，順銑與逆銑的比例會產生改變。以順時針旋轉(如圖 3 左圖中的刀具旋轉方向)的刀具為例，當 Tilt angle 往正向增大(向右傾斜)時，順銑的部分會增加，整體的切削狀態會可能趨向順銑的特徵。

2.4 切屑堆積

改變刀具軸向會造成切屑的厚度與形狀不同，進而影響是否會發生表面黏附損傷(surface adhered damage)。Zhang et. al.[6]使用不同刀具軸向加工 Ti6Al4V，發現有些情況下切屑會黏附於切削刀與工件表面，使得刀具會對於工件產生擠壓(extrusion)導致表面品質降低。像是刀具切入工件處會比較容易發生黏附現象，以及當刀具尖端(tool tip)進行切削時切屑的形狀會變成燕尾形(dovetail)，累積後形成螺旋形(spiral)切屑，進而產生犁切(ploughing)現象導致黏附產生，切屑形狀如下圖 4。

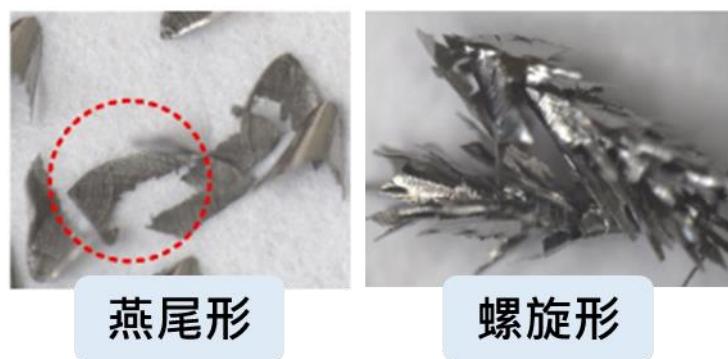


圖 4 燕尾形/螺旋形切屑[6]



2.5 邊緣效應與犁切效應

在 2.2 節介紹的切削力公式(1-3)中包含兩種切削係數(cutting force coefficients)， K_c 為剪切力係數(shear cutting force coefficients)，代表刀具去除材料時的力量，而 K_e 為邊緣效應係數(edge cutting force coefficients)，代表移除材料以外的所需的切削力，主要的來源為刀具磨耗與犁切效應(ploughing effect)。

曲面加工大多選擇使用球刀進行加工(ball-end-milling)。球刀顧名思義刀具的前端為半球型，越接近刀尖處半徑越小，刀尖處半徑為零。當進行加工時無論轉速為多少，刀尖處的速度都為零，進而引起邊緣效應。Wojciechowski et. al.[7]透過理論與實驗找出切削合金鋼 55NiCrMoV6 (58 HRC)時的前傾角(lead angle)與邊緣切削力(edge force)的關係，文獻中使用實驗數據計算出受刀具傾斜角度影響的切削係數回歸方程式，根據該文獻的方程式繪製成下圖 5 以方便觀察前傾角與邊緣力的關係，可以看到當前傾角為零時邊緣切削力最大，而當前傾角大於 15°之後前傾角的改變就對於邊緣力影響較少。

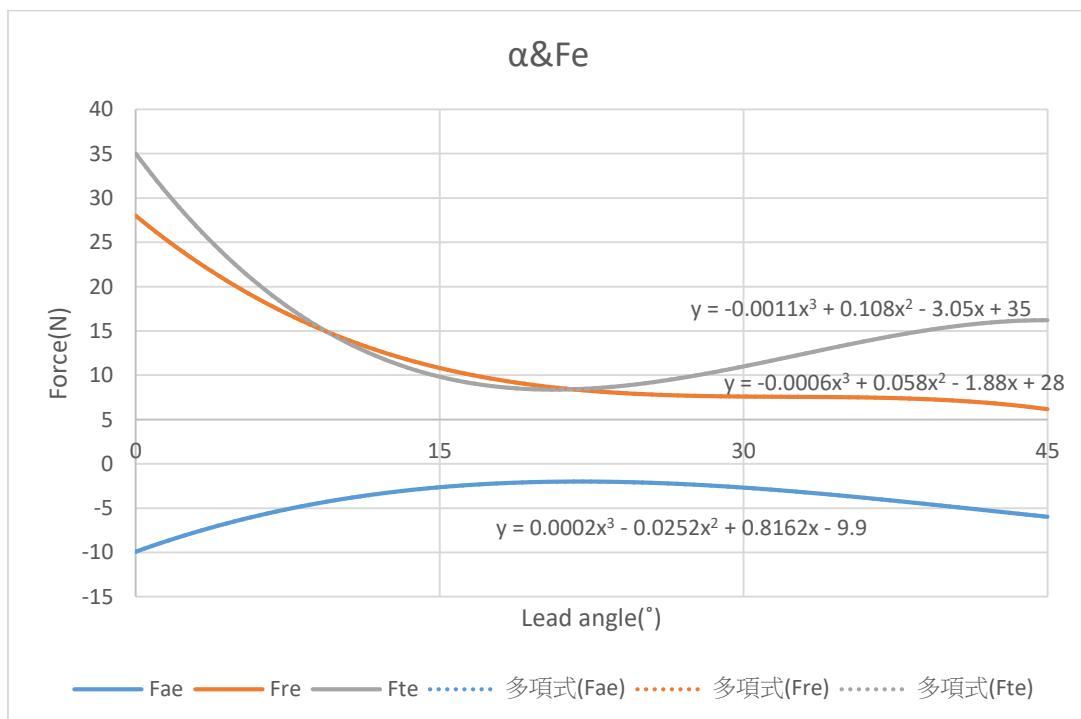


圖 5 Wojciechowski 等實驗結果之前傾角與邊緣力關係[7]

Sadilek 與 Hajnys[8]提到，在五軸加工時，刀具前傾(Lead angle 為正)加工的表面品質優於刀具後傾(Lead angle 為負)。這是因為刀具往前傾可以避免刀具的尖端接觸到工件。Fontaine et. al.[9]提到當切削速度與切屑厚度接近零時，犁切效應在整體切削力中的比重較大。Ozturk et. al.[1]提到，刀具垂直((Lead angle 為零)加工時，會在表面留下較明顯的接觸痕跡，而刀具前傾(Lead angle 為正)加工較不會留下痕跡。

2.6 刀具軸向對切削狀態之影響

改變刀具軸向進行切削，除了順銑與逆銑、切屑堆積、犁切效應等的影響之外，過往的研究中也有提到其他因為刀具軸向改變造成的切削狀況變化。

Tao Huang et. al.[4]提到，在工件厚度較薄的加工環境下，往工件最薄的方向進行加工時，改變刀具軸向可以減少工件發生變形造成切削瑕疵。因為適當地改變刀具軸向，可以降低工件剛性較低方向的切削力，使得工件變形較小而提高加工精度。Ozturk 等[1]對於 Lead angle 的變化認為使用順時針旋轉的刀具進行切削時，選擇刀具右傾(Lead angle 為正)較不會產生過切(overcut)現象。

Vakondios et. al.[10]透過實驗發現不同的刀具軸向加工會對於表面品質造成影響，像是單純刀具後傾或是單獨側傾的表面粗糙度大，但同時後傾配合側傾的表面粗糙度小。



2.7 小結

相較於三軸加工，五軸加工有更高的自由度以應付更加複雜的工件形狀。相對的也代表在五軸加工時須要考慮的因素也更多。刀具軸向的選擇就是其中一大重要因素，從文獻中的討論可以看到改變刀具軸向會於切削力、表面粗糙度等造成很大的改變。在以往的刀具路徑規劃上較少依據這些變因去調整使用的刀具軸向，因此本研究將結合文獻中的切削力模擬計算，以及實際切削實驗觀察到的現象，完整的探討五軸加工時改變切削刀具軸向對於切削狀態之影響。利用不同刀具軸向的數據進行對照與比較，分析刀具軸向改變造成切削力與表面粗糙度改變的因素，建立清楚且完整的變化關係。



第三章 研究方法

3.1 研究流程

本研究的流程如下圖 6，先建立切削力模型，計算出刀具軸向不同時切削力如何變化。同時進行實際切削加工，利用動力計量測加工時的切削力。實際數據與模型計算數據對比可以找出不同刀具軸向下邊緣效應的影響程度，分析那些角度邊緣效應的影響較大。再利用表面粗糙度儀量測各刀具軸向切削後的表面粗糙度，從表面粗糙度對照切削力數據。綜合歸納出隨著刀具軸向的變化，切削狀態會如何受其影響產生改變。

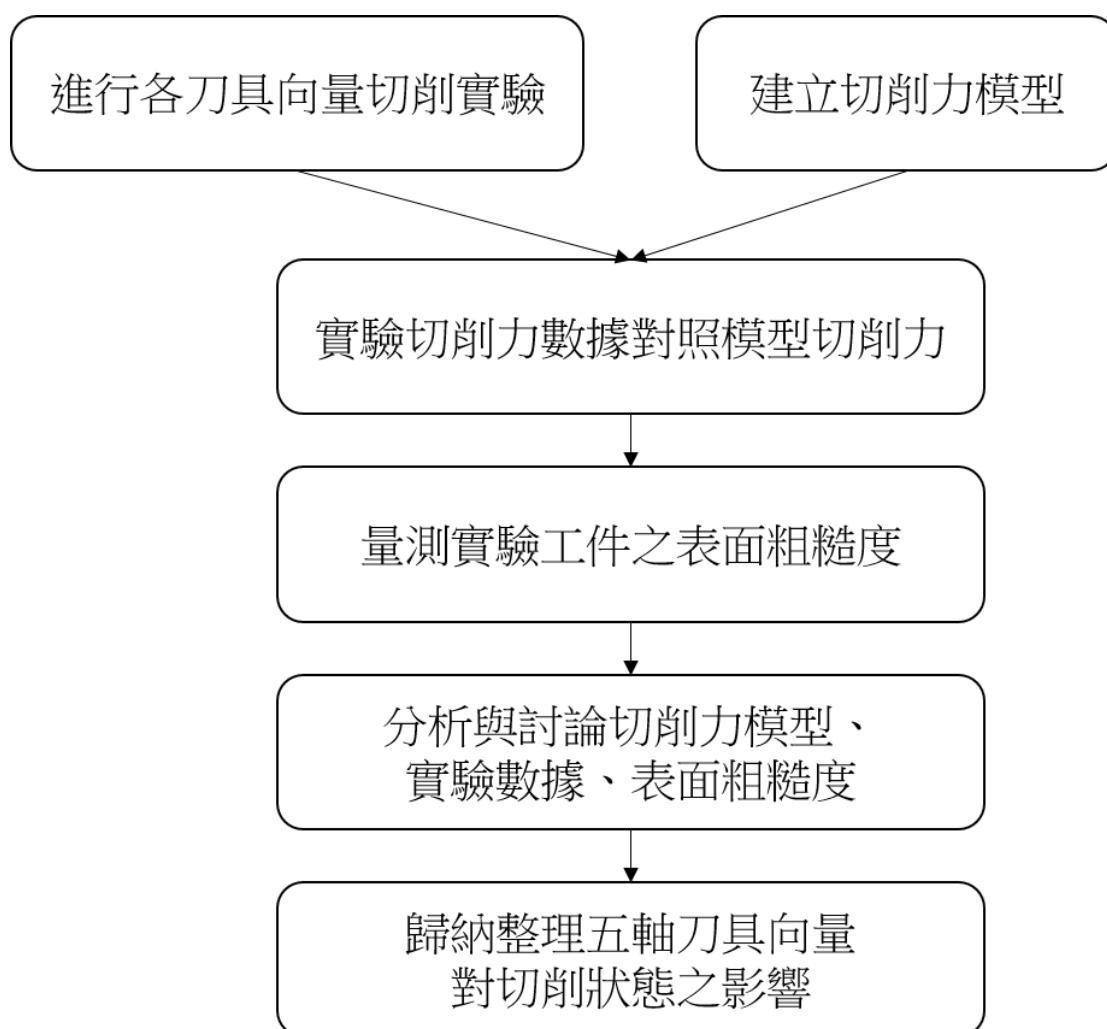


圖 6 研究流程圖



3.2 切削力模型

本研究為了探討使用球刀進行五軸加工時，在不同刀具軸向下切削力會如何變化，首先利用理論公式分析在特定切削條件與刀具軸向下進行加工時，刀具旋轉一周的切削力變化。以下介紹此切削力模型的計算流程。

以三軸加工的端銑刀的順銑為例，圖 7 中左半邊顯示了切削時刀具與工件的接觸區域，可以從上視圖了解哪個切削刃正在進行切削，而在側視圖可以看到切削的深度，由這兩方向界定出切削區域，利用數值積分的概念把接觸區域中的切削刃分為數個微小的區域，分別計算各區域的切削力，再加總各區域的切削力以求出該瞬間的整體切削力。

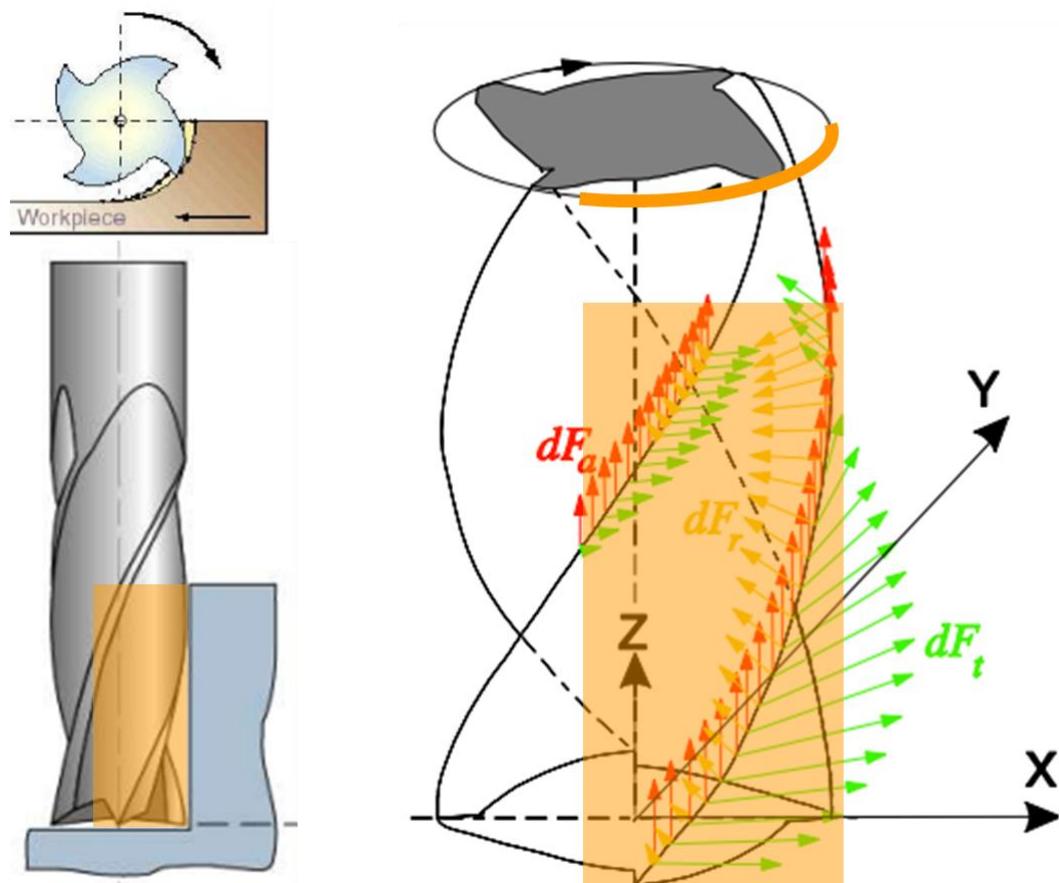


圖 7 切削力模型示意圖[12]

與端銑刀不同，使用球刀進行五軸加工時隨著刀具軸向改變，切削時刀具與工件接觸的位置會隨之改變。由切削條件與刀具軸向計算出球型刀具與工件接觸的區域，再以數值積分的方式計算出區域內的總切削力。

本研究假設僅刀具前端半球型區域與工接觸，刀具工件接觸區域是依據 Ozturk 與 Budak[2]的切削力模型，再修改其中計算開始切削角與結束切削角的方式，因為文獻中的公式是以垂直工件平面的 Z 軸方向切分刀具，本研究則是依照傾斜後的刀具 Z 軸切分不同高度的刀具，所以重新設計公式，以方便建立模型，分析球刀前端半球型部分與工件的接觸區域，進而求得切削力。

第一步為了簡化接觸區域的計算，先將刀具軸向的 Lead angle(α)與 Tilt angle(γ)從刀具座標系統(xyz)轉換至工件座標系統(XYZ)，如下圖 8。

$$\text{incx} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\gamma)}\right) \quad (4)$$

$$\text{incy} = -\gamma \quad (5)$$

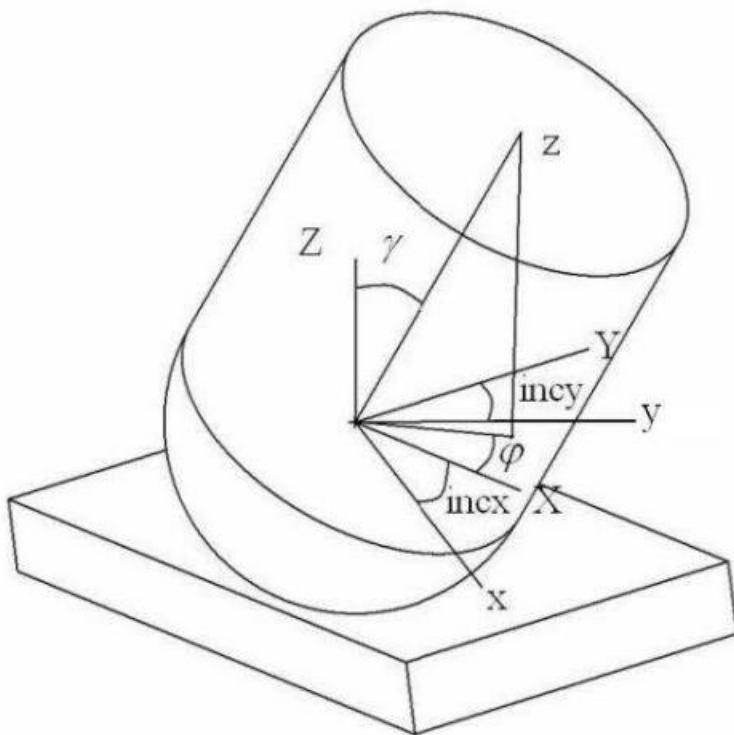


圖 8 刀具軸向轉換成 incx 與 incy[2]

第二步計算刀具上接觸區域的最低位置(K1)與最高位置(K2)，分別為 Z 軸座標方向上的最大值與最小值，這邊以角度的方式記錄，最低點定為 0° ，因為只考慮刀具前端球形的部分故最高點定為 90° ，如圖 8 所示。以刀具半徑(R)、軸向切深(a)與 incx 傾斜角度計算出接觸區域的最高點與最低點。因為本研究不考慮後傾(lead angle 小於零)，所以 K1 的最小值為零。

$$\text{最低點 } K1 = \text{incx} \quad (6)$$

$$\text{最高點 } K2 = \text{incx} + \cos^{-1}\left(1 - \frac{a}{R}\right) \quad (7)$$

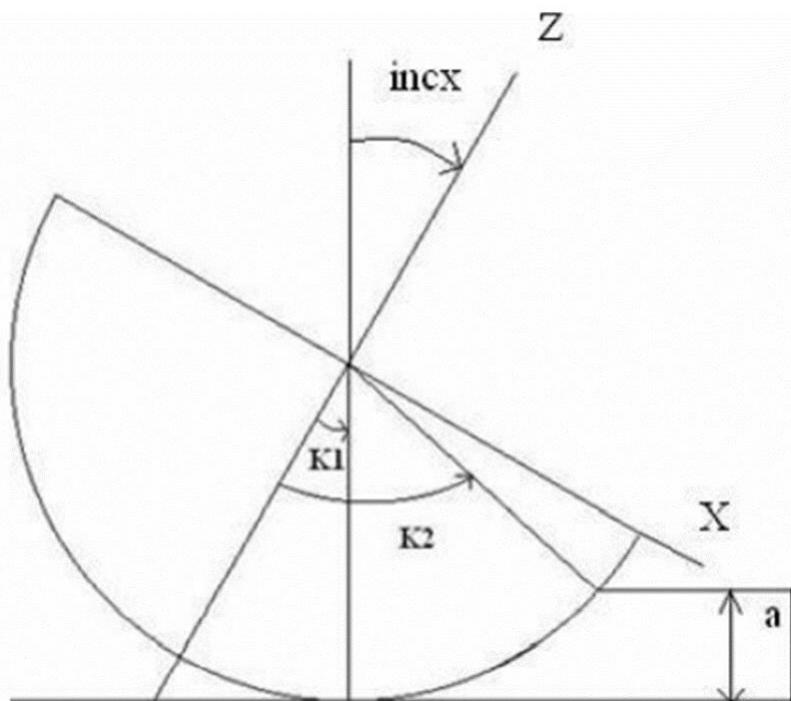


圖 9 刀具工件接觸區域[2]

第三步為計算每個高度下，刀具與工件的接觸範圍，也就是該高度的開始切削角 - start angle(\emptyset_{st})與結束切削角 - exit angle(\emptyset_{ex})。本研究探討的切削模式為槽銑，在刀具軸向未傾斜的情況時任何高度的切削角範圍皆會是 0° 至 180° 。但在刀具傾斜的狀況下切削角範圍會隨著高度改變。

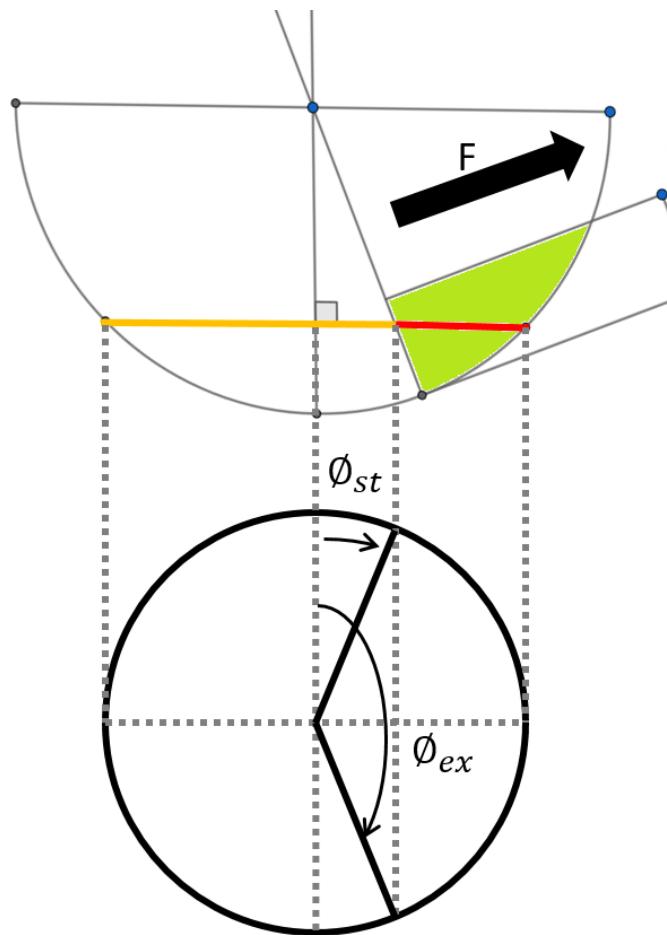


圖 10 開始切削角與結束切削角[3]

因為刀具傾斜的緣故，高度增加時切削角範圍會從零開始增大，到了一定高度後再往上切削角範圍則是會漸漸縮小直到變回零，這個切削角度最大的臨界點的高度位置定為 K_i ，如圖 11 所示。

$$K_i = \sin^{-1} \frac{\sqrt{R^2 - [(R-a)\cos(\text{incx})]^2}}{R} \quad (8)$$

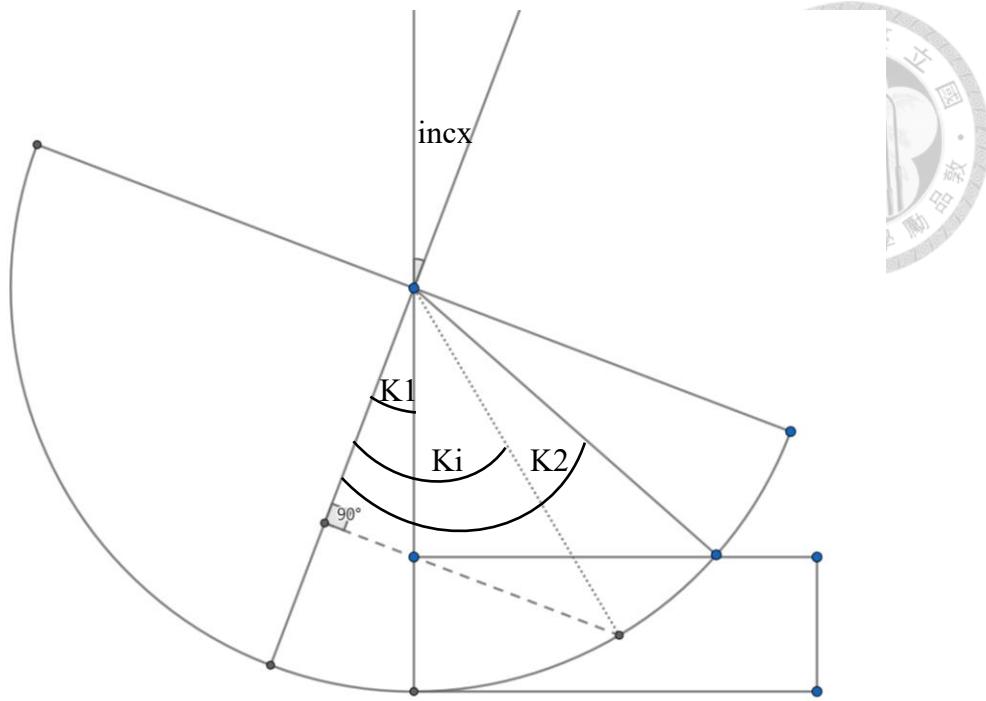


圖 11 Ki 示意圖

當高度位置角 K 小於 K_i 時，其開始與結束切削角為：

$$\phi_{st} = \sin^{-1}\left(\frac{\text{offset}}{R'}\right) \quad (9)$$

$$\phi_{ex} = \pi - \phi_{st} \quad (10)$$

其中 $\text{offset} = (R - H)\sin(\text{incx})$ 、 $R'^2 = R^2 - [(R - H)\cos(\text{incx})]^2$ ，

$H = a \frac{K - K_1}{K_i - K_1}$ 。如圖 12 所示。

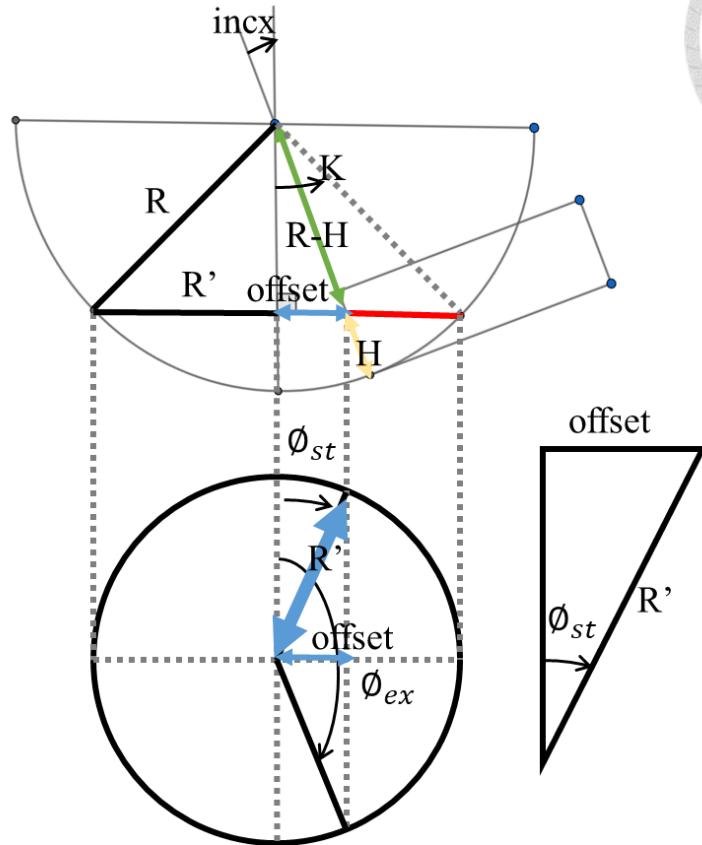


圖 12 K 小於 K_i 時的切削角範圍示意圖

當高度位置角 K 大於 K_i 時，其開始與結束切削角為：

$$\phi_{st} = \phi_{sti} + \left(\frac{\pi}{2} + \phi_{sti}\right) \frac{K - K_i}{K_2 - K_i} \quad (11)$$

$$\phi_{ex} = \pi - \phi_{st} \quad (12)$$

其中 ϕ_{sti} 為 $K=K_i$ 帶入式(9)的 ϕ_{st} 。

根據上述的方法計算完高度範圍 K_1 、 K_2 ，以及計算任何高度下 ϕ_{st} 、 ϕ_{ex} ，可建構出刀具工件接觸範圍。利用第 2.2 節的切削力計算式(1)、(2)、(3)，計算通過接觸範圍內的刀刃切削力，並透過座標轉換將切削力方向調整至工件座標，最後使用數值積分方法累計算出該瞬間刀具上切削力，與動力計量測的切削力比較。

座標轉換的步驟有兩步，式(1)、(2)、(3)算出的切削力是在刀具的表面座標系(tra)，如圖 2 中所示，也就是會根據計算的位置位於刀具上不同位置而有所差異。第一步是將其轉換至依據刀具軸向與進給方向的刀具座標系(xyz)。第二步則是根據刀具軸向傾斜的角度，將切削力轉換成跟工件受力一樣的工件座標(XYZ)。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin K \sin \theta & -\cos \theta & -\cos K \sin \theta \\ -\sin K \cos \theta & \sin \theta & -\cos K \cos \theta \\ \cos K & 0 & -\sin K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ t \\ a \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(incx) & 0 & \sin \alpha \cos \gamma \\ 0 & \cos(incy) & \sin \alpha \sin \gamma \\ -\sin(incx) & \sin(incy) & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 θ 為當時刀具加工的瞬時旋轉角度。

在式(1)、(2)、(3)中有 K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 、 K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 。因本研究不考慮刀具磨耗，其中的 K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 對切削力計算的結果不隨著時間改變。如 Wojciechowski et. al. [7]的研究結果所示，在特定的刀具軸向下，邊緣效應造成的切削力很小，可以忽略；然而在其他刀具軸向下(例如前傾角為零)，邊緣效應造成的切削力會增加，同時會使的工件表面粗糙度增加。因此本研究擬先計算不考慮邊緣效應的切削力，若實際切削力與預估值相近，該刀具軸向即為適用於精加工的刀具軸向。因此本研究先計算忽略 K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 的理論切削力，再與量測值比較。其中剪切力(shear cutting force)的切削係數 K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 的數值則必須由實驗數據計算而成。根據 Altintas[12]中說到，槽銑切削的係數可由式(15)-(17)計算，使用實驗量測的平均切削力平均，再經由式(13)(14)進行座標轉換，將平均切削力以及切削刃數(N)、切削深度(a)與進給(c)帶入式(15)-(17)計算出切削係數。本研究使用前傾角 30° ，側傾角 0° 的實驗數據計算切削係數，Wojciechowski et. al. [7]說到當前傾角大於 15° 後邊緣效應的影響很小，且 Zhang et. al.[6]的實驗結

果顯示側傾角為零時的切屑堆積現象較不明顯，因此本研究選擇此角度組合。本研究的切削力模型使用之切削係數列於表 1 中所示。



$$\overline{F}_x = -\frac{Na}{4} K_{rc} c \quad (15)$$

$$\overline{F}_y = \frac{Na}{4} K_{tc} c \quad (16)$$

$$\overline{F}_z = \frac{Na}{\pi} K_{ac} c \quad (17)$$

其中 N 表刀具刃數，a 為切削深度，c 為進給。

表 1 切削系數

切削係數	N/mm ²
K _{rc}	401.62
K _{tc}	82.44
K _{ac}	-75.14

表 1 中 K_{ac} 的數值帶有負號是因為本研究使用的動力計 z 方向為向下為正，而模型中的 a 方向則是向上為正，因此使用帶有負號的 a 方向係數計算切削力才會與實驗數據相符合。

綜合以上步驟，切削力模型的計算流程如下圖 13。

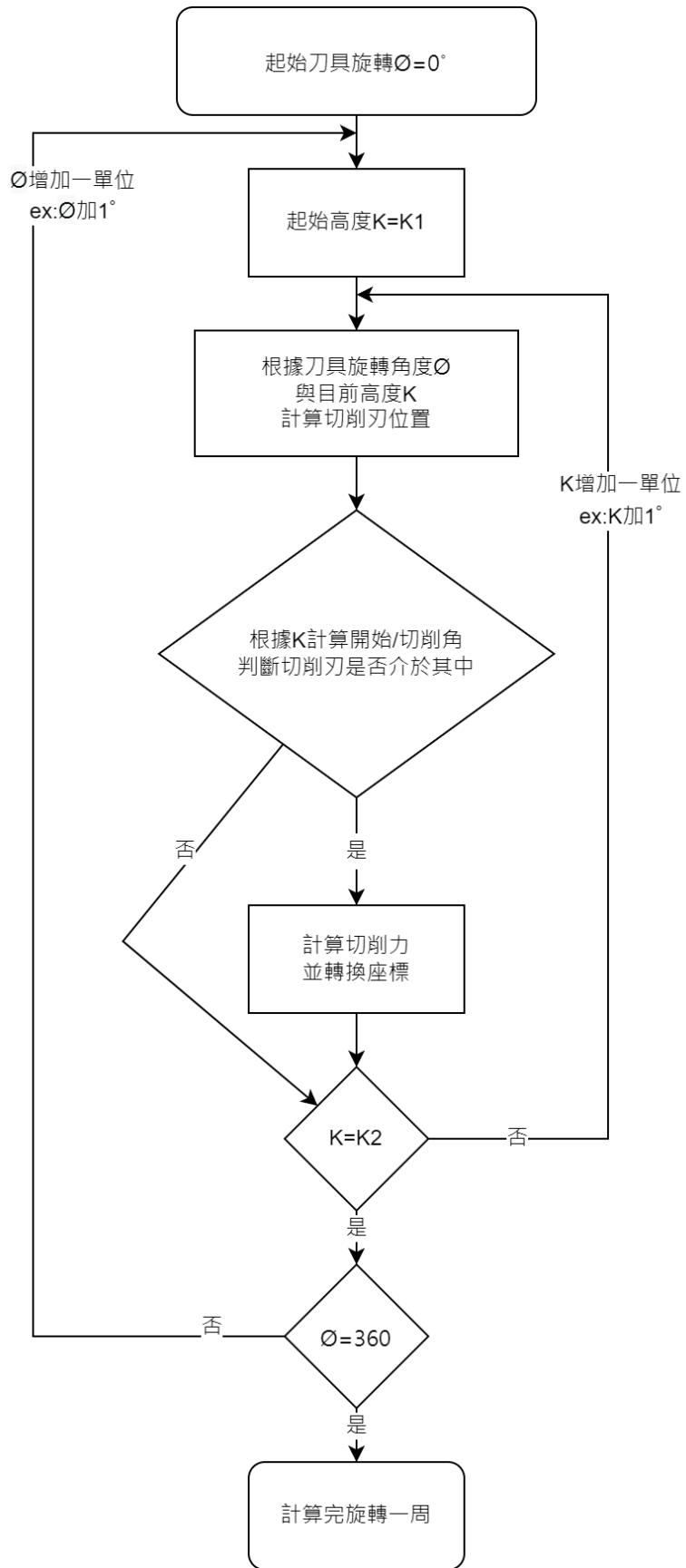


圖 13 切削力模型架構流程圖

實際代入實驗的切削參數，包括切深、轉速、進給等等，將結果繪製成圖
如下圖 14

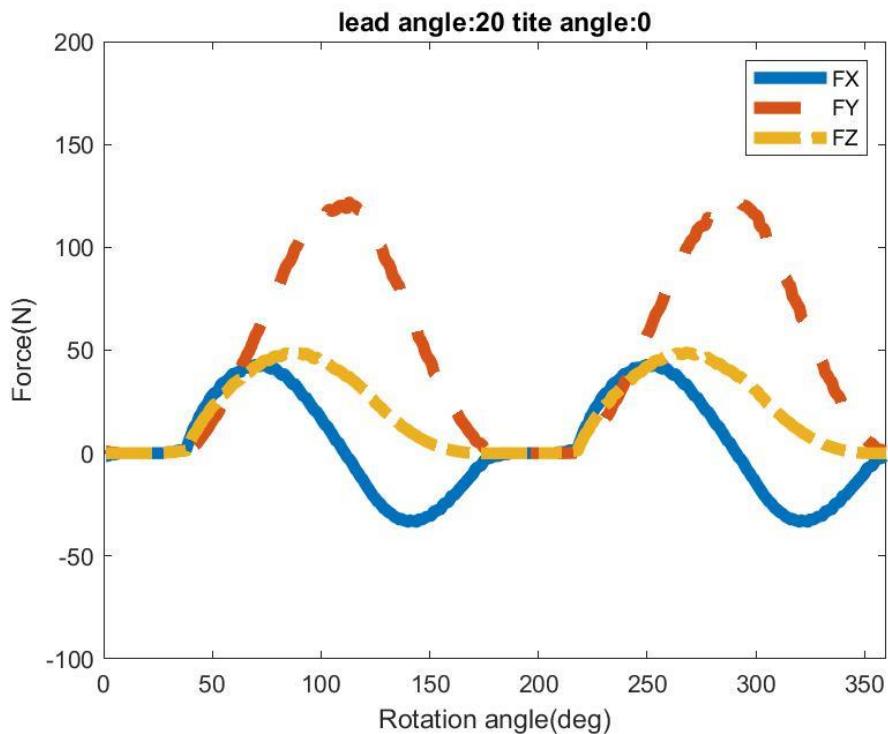


圖 14 模擬切削力繪圖範例

3.3 研究設備規格

3.3.1 五軸加工機

本研究進行切削實驗的五軸加工機為永進機械的 NFX-400A 五軸立式銑床
(如圖 15)，搭配海德漢 TNC640 控制器。主軸為永進 IDD PLUS S 直結式主
軸。規格如下：



圖 15 五軸加工機 NFX-400A

表 2 五軸加工機規格表

NFX-400A 規格表	
主軸最高轉速	12000rpm
最大主軸馬達功率	18.5kw
X 軸行程	650mm
Y 軸行程	520mm
Z 軸行程	480mm
A 軸範圍	+30° / -120°
C 軸範圍	360°

3.3.2 動力計

本研究於五軸加工機工作台上安裝動力計以量測切削時工件的受力情形，使用之動力計為奇石樂(Kistler)所生產的 9257B 動力計(圖 16)，可量測三個方向的受力，再搭配訊號放大器與擷取卡可將切削力數據紀錄於電腦中。規格如下：



圖 16 動力計 Kistler 9257B

表 3 動力計規格表

Kistler 9257B 規格表	
量測範圍	-5...5 kN
X,Y 方向靈敏度	-7.5 pC/N
Z 方向靈敏度	-3.7 pC/N

3.3.3 訊號放大器

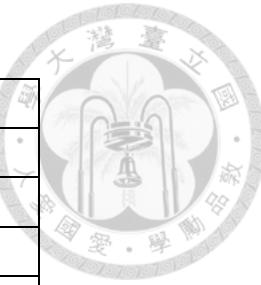
為了接收動力計的訊號，需先將動力計連接至訊號放大器將動力計產生的電壓訊號放大。本研究使用的為奇石樂(Kistler)所生產的 5070A 訊號放大器(如圖 17)。將動力計的電壓訊號放大到 10V 至-10V 之間，再利用擷取卡將電壓訊號記錄到電腦儲存。規格表如下：



圖 17 訊號放大器 Kistler 5070A

表 4 放大器規格表

Kistler 5070A 規格表	
頻道數	8
最大頻率	45kHz
輸出電壓	$\pm 10V$
輸出電流	小於 2mA



3.3.4 訊號擷取卡

本研究使用美商國家儀器公司(National Instrument Corporation)生產的多功能 I/O 介面卡 NI USB-6341(如圖 18)，此卡有八個類比訊號輸入頻道可以接收動力計經過放大器之後的電壓訊號，再透過電腦軟體 LabVIEW 將訊號儲存以進行後續訊號處理及分析。



圖 18 訊號擷取卡 NI USB-6341

表 5 擷取卡規格表

NI USB-6341 規格表	
差分輸入通道數	8
最大取樣頻率	500kHz
輸入電壓	$\pm 0.2V$ 、 $\pm 1V$ 、 $\pm 5V$ 、 $\pm 10V$

3.3.5 表面粗度儀

本研究使用三豐(Mitutoyo)生產的 SJ-411 表面粗糙度測定儀來量測切削實驗後的工件表面狀況。規格如下：



圖 19 表面粗度儀 SJ-411

表 6 表面粗度儀規格表

SJ-411 規格表	
量測範圍	800μm
解析度	0.01 μ m(800 μ m 範圍) 0.001 μ m(80 μ m 範圍) 0.0001 μ m(8 μ m 範圍)
測針材質	金剛鑽
檢出方式	differential indistance
對應粗糙度規格	JIS1982 / JIS1994 / JIS2001 / ISO1997 / ANSI / VDA
評估曲線	斷面曲線、粗度曲線、 DF 曲線、波浪曲線、粗 度基調(motif)曲線、波浪 基調(motif)曲線

3.3.6 碳化鎢球刀

本研究使用仁武正順車刀有限公司生產的 MG 鋁用 2 刀球型立銑刀，照片如下圖 20，規格如下表 7。圖 20 MG 鋁用 2 刀球型立銑刀



圖 20 MG 鋁用 2 刀球型立銑刀



表 7 MG2 刀球型立銑刀規格表

型號	ASK245M-R0300-D6
刀徑 R	3mm
刀長 L1	15mm
柄徑 D	6mm
全長 L	50mm
材料	超微粒碳化鎢
刃數	2 刀

3.4 表面粗糙度

表面粗糙度參數 R_a (算術平均粗糙度)是指在量測範圍內，表面曲線到平均線的偏差絕對值合計再平均。如下圖 21 所示，儀器可以將範圍內的工件表面狀況描繪出來，並算出平均線位置後計算 R_a 值。表面粗糙度是衡量加工品質的一大重要指標，Ozturk 等[1]與 Sadilek 等[8]也提到使用不同的刀具軸向會影響表面品質。因此本研究會於切削實驗完之後量測工件的表面粗糙度，以辨別改變刀具軸向進行加工會對於工件表面品質有何影響。

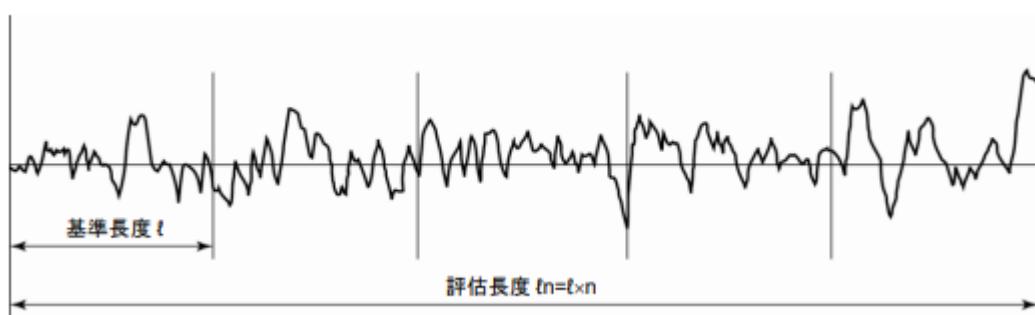


圖 21 表面曲線與評估長度



第四章 實驗規劃

本研究的實驗使用動力計量測不同刀具軸向下球刀槽銑鋁材的切削力，對比模型計算的切削力與實驗量測切削力的差異，探討造成數據差異的原因。結合模型與實驗的結果歸納刀具軸向對切削力的影響。同時利用表面粗度儀量測與觀察切削實驗後的工作表面，整理出刀具軸向改變對於工件之表面影響。各小節將詳細說明實驗設備的架設方式、與刀具軸向之選擇、實驗切削參數之選擇以及表面粗糙度的量測方式。

4.1 實驗設備

如下圖 22，本研究將動力計(Kistler 9257B)鎖固於五軸加工機(NFX-400A)的工作平台上，鋁製工件以螺絲固定於動力計。動力計的訊號線連接至放大器(Kistler 5070A)，透過擷取卡(NI USB6341)將訊號傳送至電腦，以 LabVIEW 軟體將數據儲存進行後續分析。

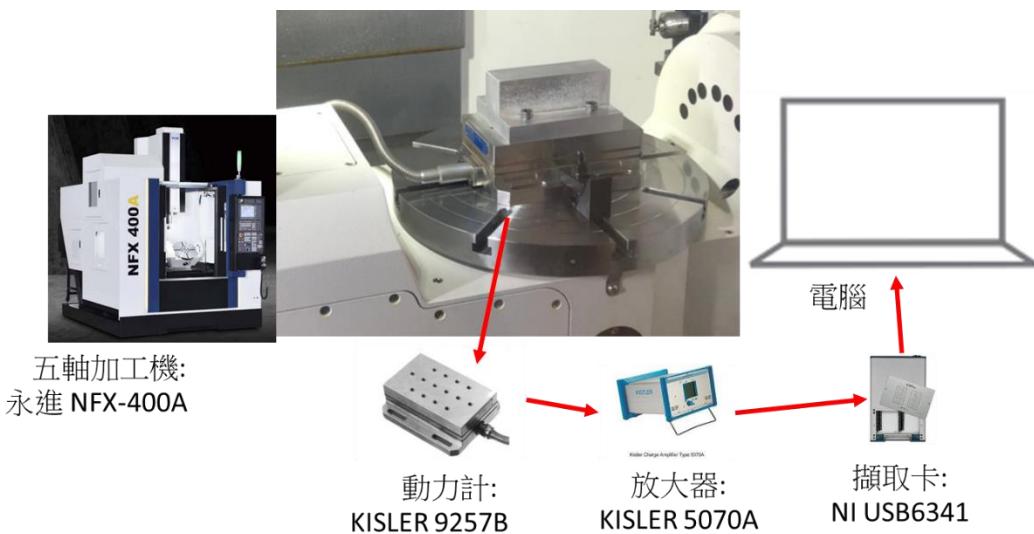


圖 22 實驗設備架構圖

如下圖 23，進行切削時五軸工具機的兩個旋轉軸(A、C 軸)會將工作平台傾斜，與主軸形成一定的夾角，刀具沿著工件的位置及角度進行等深度直線槽銑。而動力計與工件緊密鎖固，進行切削實驗時皆會量測到工件座標系的切削力，也就是說即使刀具軸向不同，動力計量測到的切削力皆會是在相同座標系之下，因此可以使用動力計數據進行比較不同刀具軸向切削時的切削力變化。

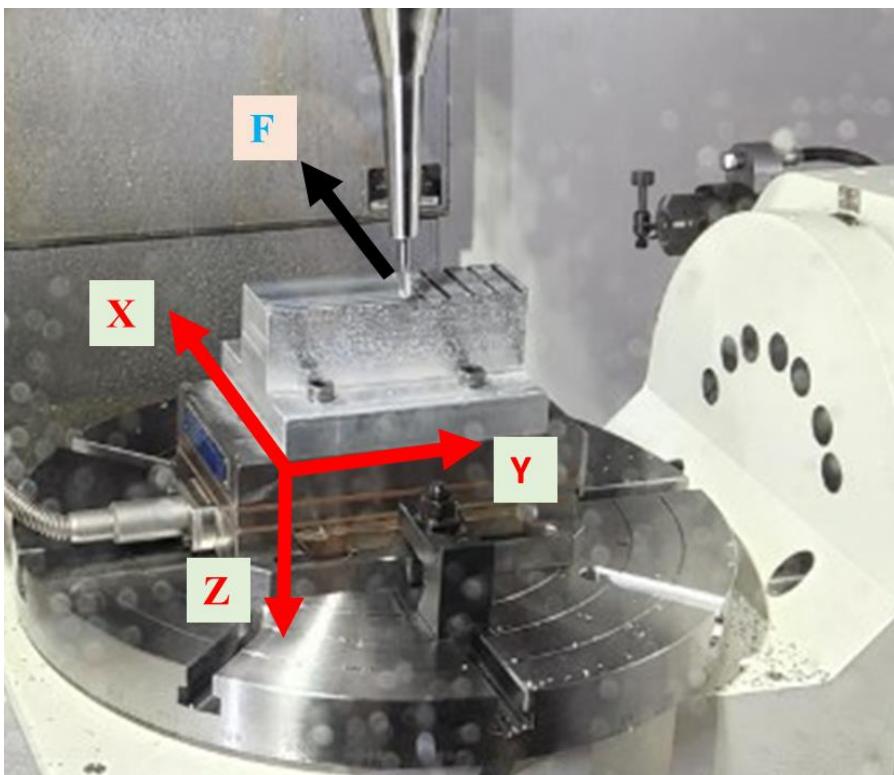


圖 23 切削實驗照片

4.2 實驗參數與路徑

本研究使用的刀具、材料、加工參數如下表 8。圖 24 中，紅色箭頭所示為切削時刀具的行進路徑，單一條路徑切削時都使用固定的刀具軸向。左上角座標為動力計量測的工件座標系，X 軸跟進給(F)相同，向下為 Z 軸，右側為 Y 軸。圖中也標示了切削區域的長度為 40mm。實驗使用的刀具軸向則列在表 9 中。

刀具參數		加工參數	
刀具類型	球刀	主軸轉速	4750rpm
材質	碳化鎢	進給速度	475 mm/min
刀具直徑	6mm	切削深度	1.5mm
刃數	2	工件	
螺旋角	45°	工件材料	鋁 6061

表 8 實驗參數表

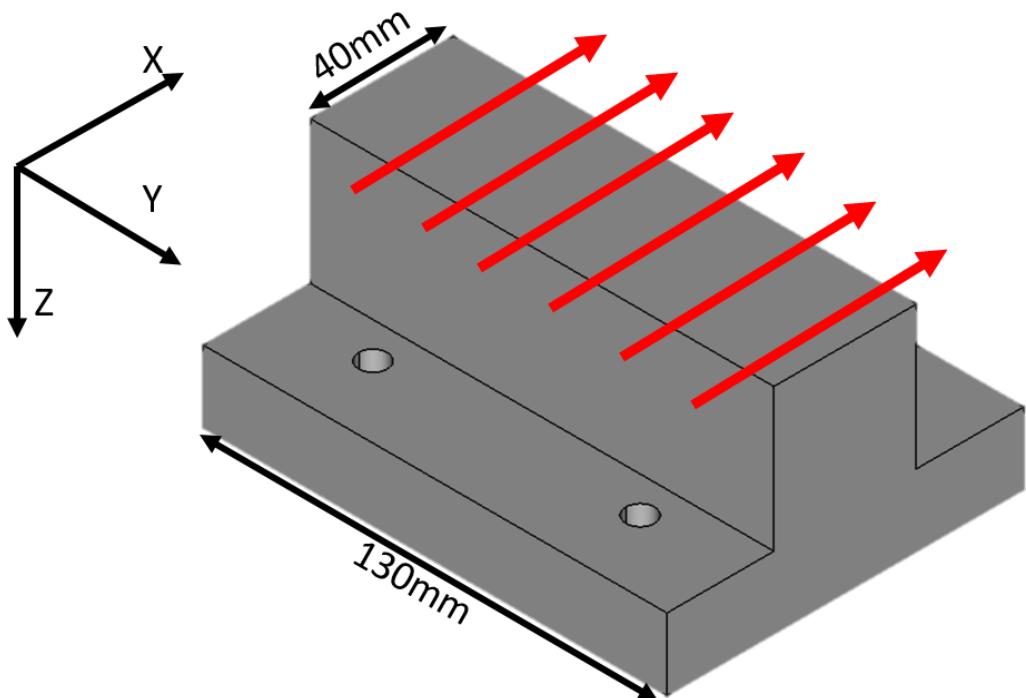


圖 24 工件座標與切削路徑示意圖

表 9 實驗使用刀具軸向一覽表

Lead angle(α)	Tilt angle(γ)	Lead angle(α)	Tilt angle(γ)
0°	0 °	10°	20°
0°	10°	10°	0°
0°	-10°	10°	-20°
0°	-30°	20°	10°
5°	5°	20°	0°
5°	-5°	20°	-10°



4.3 切削深度與傾斜角度

本研究僅探討球刀前端與工件接觸的切削區域，也就是半球型的部分。所以在實驗規劃時要依據切削深度設定刀具軸向傾斜的角度上限，以避免刀具傾斜過大時，使用到刀具後段圓柱形的部分進行切削。如下圖 25 所示，傾斜角度 ϕ 與最大容許切深 a 以及球型刀具半徑 r 的關係為下式(14):

$$a=r-r \times \sin\phi \quad (14)$$

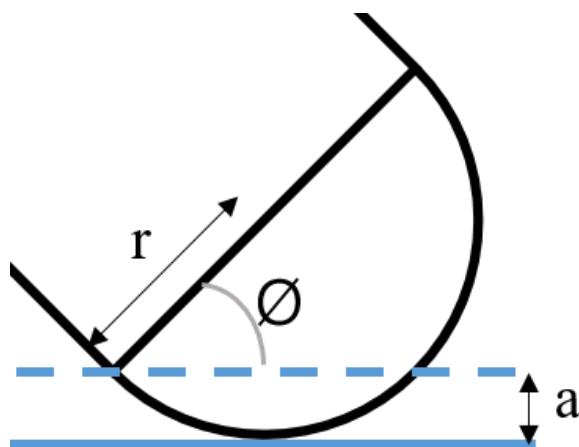


圖 25 傾斜角度與最大切深關係圖

以本研究預計進行的實驗係數，切深 a 為 1.5mm，刀具半徑 3mm。推算出的角度為 30° 。因此本研究進行實驗時必須注意刀具傾斜最大的極限為 30° 。當預計進行 Lead(α)與 Tilt(γ)角度皆不為零，必須確定兩個角度的綜合角小於 30° 。公式(15)用於計算同時前傾與側傾的刀具傾斜角度:

$$\sin^2\phi = \sin^2\alpha + \sin^2\gamma \quad (15)$$



4.4 表面粗糙度量測

如下圖 26 照片中可以看到，不同刀具軸向切削完的工件有著不同的表面狀態。本研究使用表面粗糙度儀來量測工件的表面，以記錄與描述不同刀具軸向切削所造成的表面狀態。

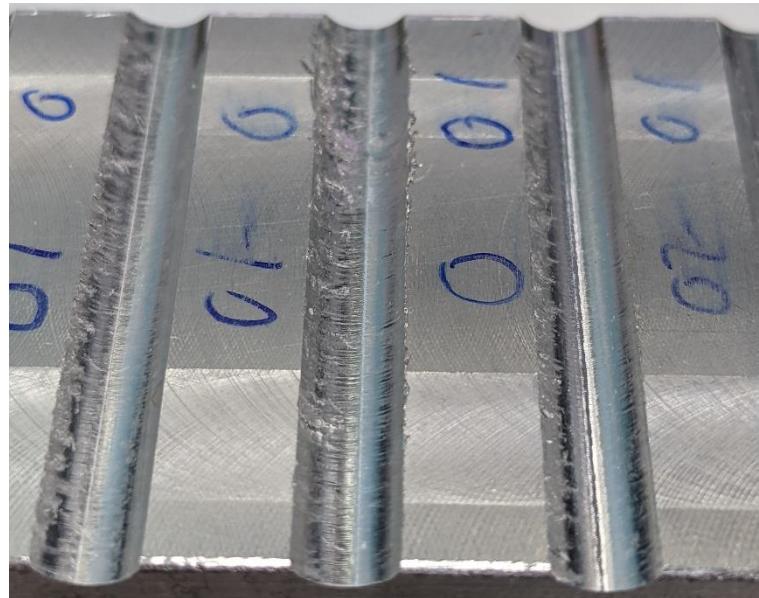


圖 26 切削實驗完工件照

切削完的工件表面，觀察發現如下圖 27 所示面對進給方向(F)的左側與右側會有相較明顯的粗糙感。量測數道不同刀痕後也確認左側與右側的表面粗糙度數值高於底部的表面粗糙度且各組不同，而底部的表面粗糙度各組相近。所以實驗以量測刀痕左側與右側為主，透過表面粗糙度儀的數據來描述不同刀具軸向切削後的刀痕表面狀況。

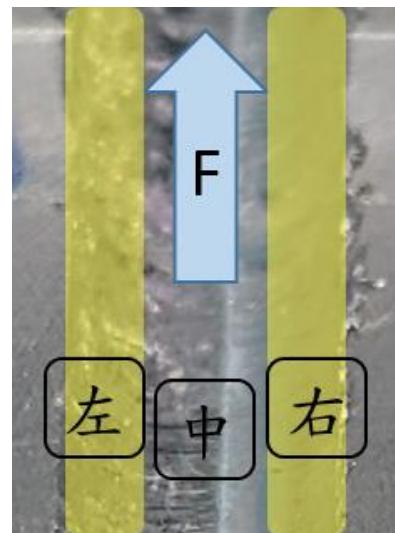


圖 27 工件刀痕示意圖

本實驗使用三豐(Mitutoyo)生產的 SJ-411 表面粗糙度測定儀來進行量測，相同一道刀痕會在左側與右側各取三個位置量測 Ra 值，藉此了解同一側的表面粗糙度是相近抑或是有明顯的變化，也可以了解兩側的表面粗糙度相異之處。實際量測方式如下表 10

表 10 表面粗度儀量測方式

量測左側	量測中間	量測右側
		



第五章 實驗結果與討論

本章節會依照刀具軸向分類，依序介紹在不同刀具軸向下進行切削加工實驗的動力計數據、模型計算數據與實際數據比較、工件表面照片、工件表面粗糙度數據。相同刀具軸向加工皆有進行重複實驗，如重複實驗之結果類似會擇一展示於本章節。未於本章節展示的實驗結果會呈現於附錄。

5.1 刀具軸向無傾斜的切削力與表面狀態

5.1.1 動力計數據

刀具前傾角為零的切削狀況十分不穩定，此角度(lead:0°、tilt:0°)進行三次實驗都有此現象，動力計數據上可以看到切削力的變化劇烈。從圖 28 可以看到，整體的切削力都有逐漸增大的趨勢，而且有量測到數次切削力遽增的現象，例如圖中紅圈處，這可能是因為產生犁切現象，形成切屑堆積造成的，後續觀察工件表面與表面粗糙度可以注意是否有這種現象。

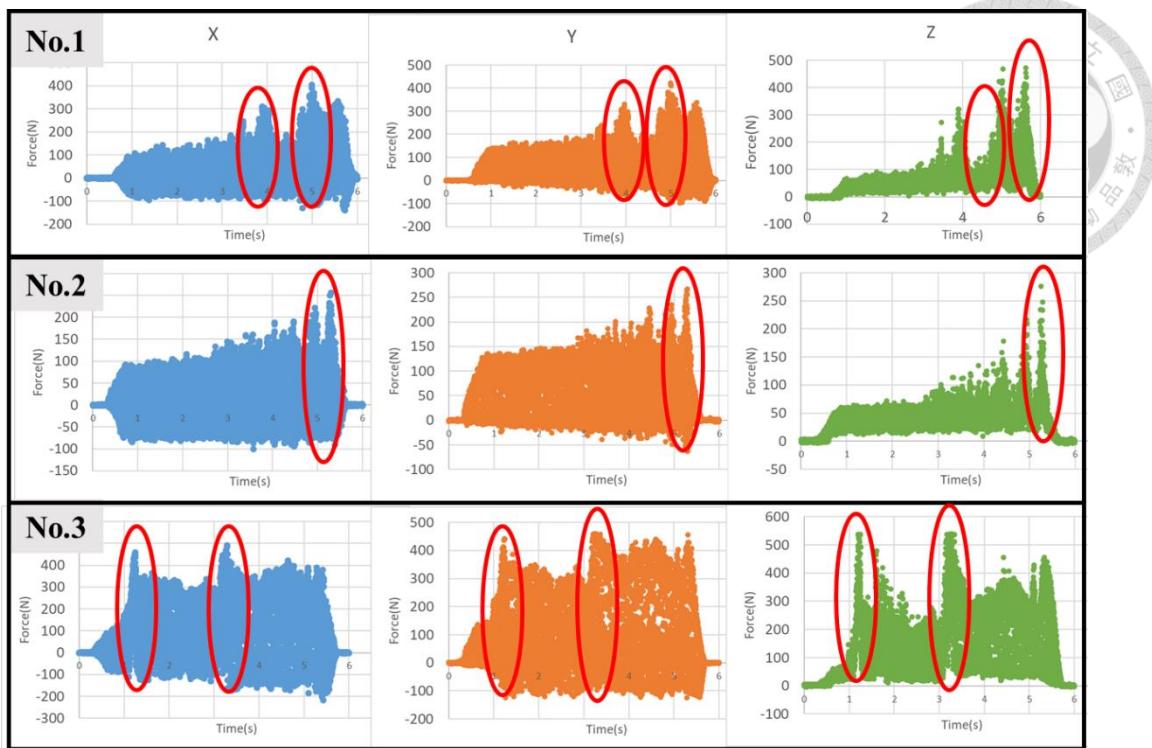


圖 28 無傾斜動力計數據

5.1.2 與模擬切削力數據比較

如圖 29 紅圈標示，擷取第一組實驗前段與後段兩個部份的數據與模擬數據進行比較，動力計量測的數據以小寫的 xyz 標示，圖中以點與細線段呈現，模型計算出的模擬切削力以大寫的 XYZ 標示，圖中僅以圓點呈現。

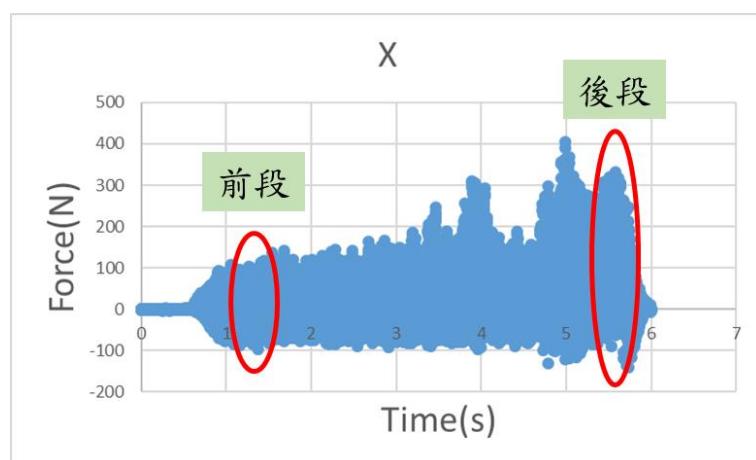


圖 29 擷取比較部份示意圖

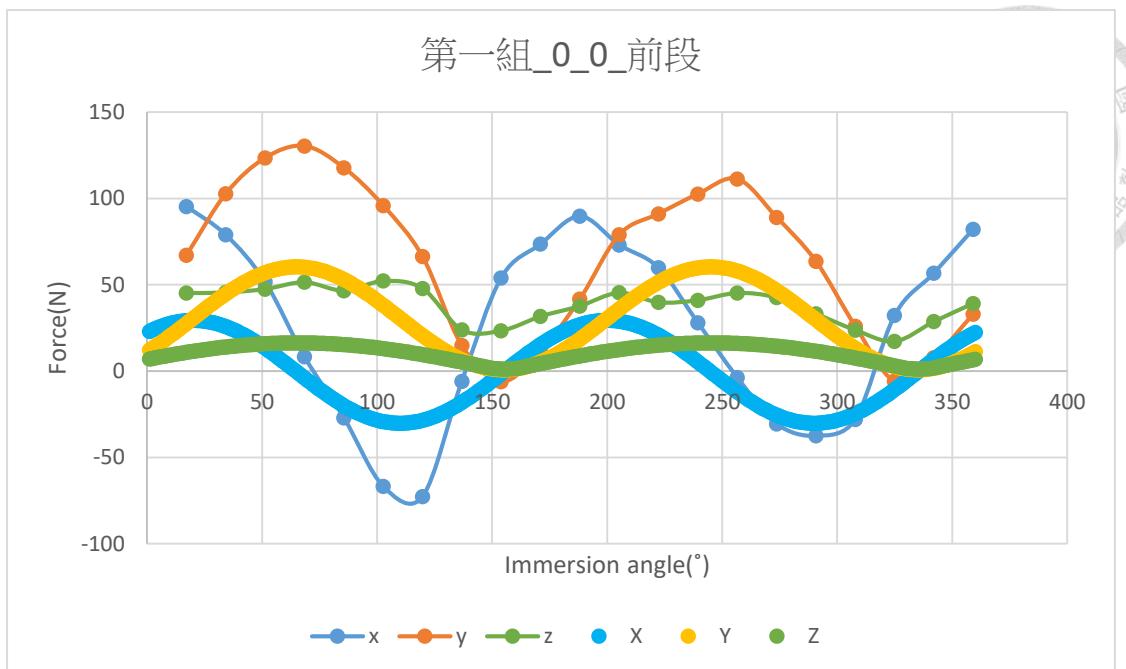


圖 30 無傾斜前段切削力比對圖

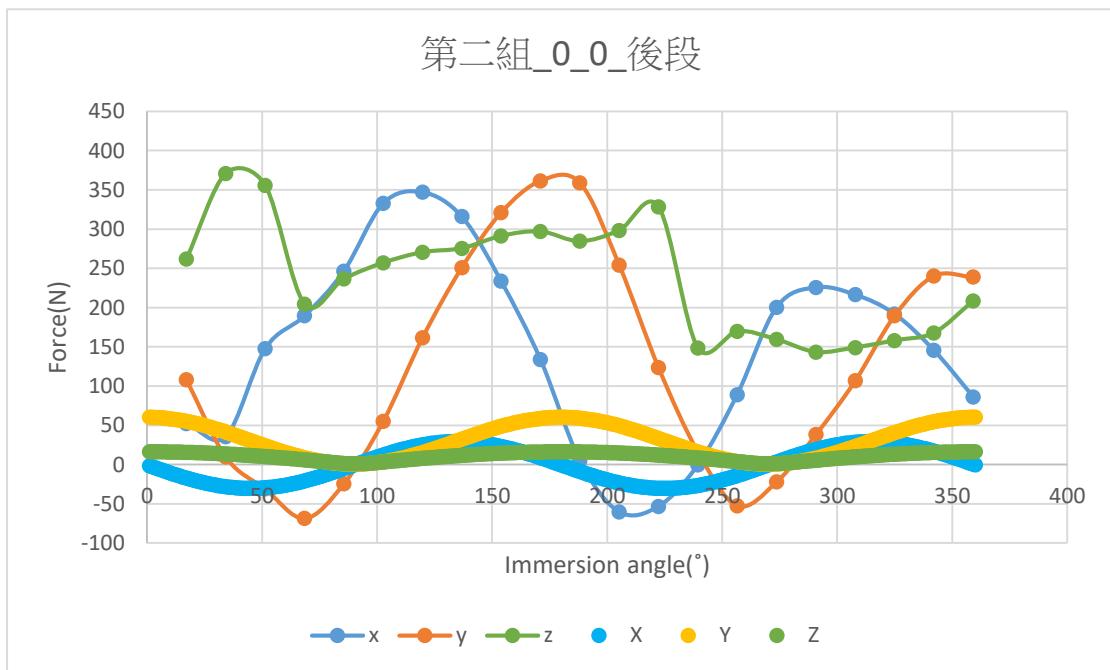


圖 31 無傾斜後段切削力比對圖

在圖 30 可以看到動力計量測到的切削力比模型計算的數值大上不少，即使在圖 29 中前段看似相較平穩沒有切削力遽增，但根據比較的結果可以發現在剛開始加工時切削力就比理論值大 100%以上，在圖 31 中量測切削力為模型計算數倍甚至是數十倍。代表在刀具軸向無傾斜使用球刀進行槽銑因刀尖的切

削速度為零產生極大的邊緣效應，主要的切削力為邊緣力，且隨著加工長度增加，邊緣效應顯著的增長，導致剪切力的比例低到幾乎可以忽略。根據文獻[7]推測是因為刀尖接觸工件造成犁切現象且因為排屑不易導致切屑持續堆積加劇了邊緣力的增加。對於追求高精度加工時，此刀具軸向就不屬於適合選用的範圍。

5.1.3 表面狀況

圖 32 為無傾斜切削的三次重複實驗工件表面照片，切削方向為圖中左側切至右側。照片中可看到三者皆有明顯的粗糙痕跡，且可以觀察到切屑堆積的現象。第一組與第二組在後段痕跡較明顯，而第三組則是幾乎整條都佈滿痕跡，與圖 28 中出現切削力遽增現象的位置符合。表 11 為第二號工件上挑選後半部有明顯痕跡處進行粗糙度量測的數據，左中右各挑選三個點，編號順序無特別意義，從粗糙度數值(Ra)可以看到左側表面品質非常糟糕。本研究使用順時針刀具切削，刀刃切入處位於面向進給的左側。圖 33 為第二組實驗的尾段，面向刀具進給(feed)方向的特寫照片，可以發現左側的粗糙程度更加的明顯，與 Zhang 等[6]提到刀刃切入材料處較容易發生材料沾黏的現象相符。表 11 為量測第二組實驗工件的表面粗糙度數值，挑選了靠近後段的三個位置量測凹槽的左側、中間及右側。左側的表面粗糙度比中間及右側大許多。

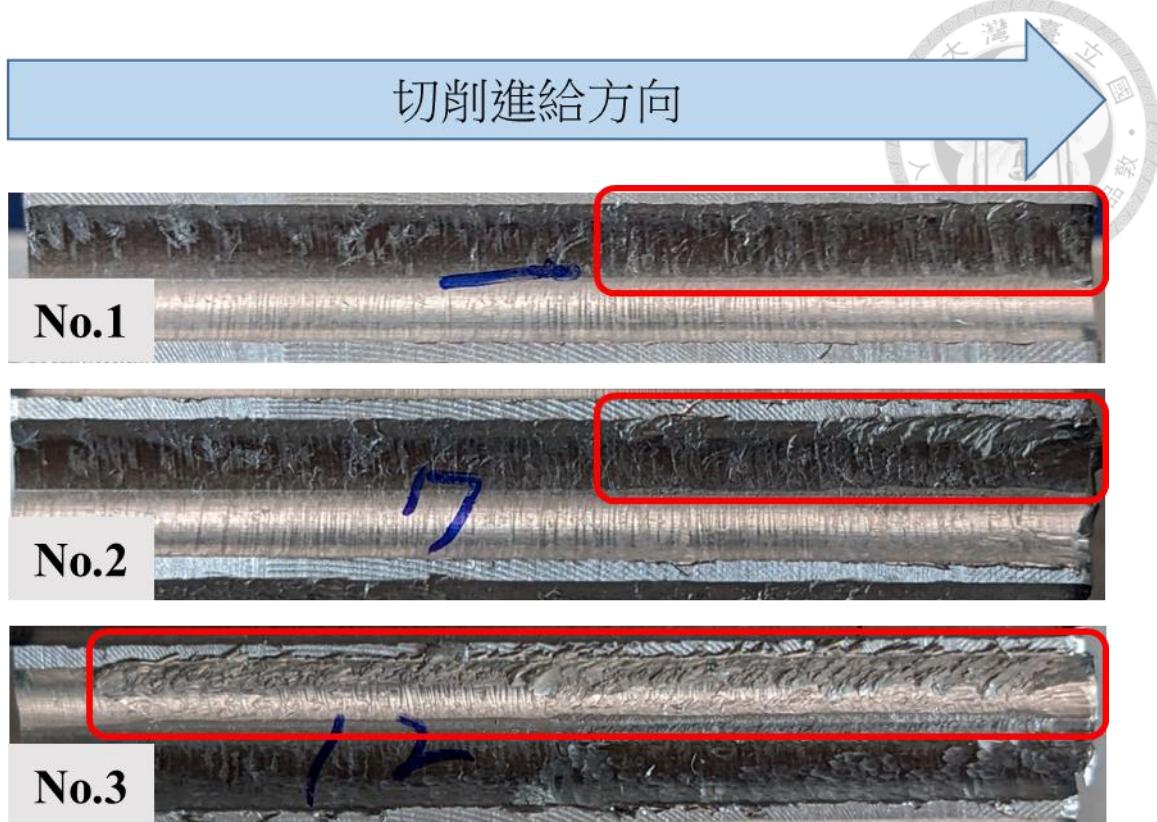


圖 32 無傾斜切削工件表面



圖 33 無傾斜切削第二組照

表 11 無傾斜第二組表面粗糙度 $R_a(\mu m)$

刀具軸向	位置	量測點 1	量測點 2	量測點 3	平均
0_0	左	9.84	10.81	7.01	9.22
	中	0.76	1.26	1.38	1.13
	右	1.47	2.06	1.04	1.52



5.2 只有側傾無前傾的切削力與表面狀態

這一小節呈現當前傾角(lead angle)為零，側傾角(tilt angle)不為零的刀具軸向進行加工的切削力及表面狀態。包含的刀具軸向為向右傾(側傾角為正)一組與向左傾(側傾角為負)兩組。當側傾角為正時進行槽銑，刀具順銑(down-milling)的比例會增加。而側傾角為負時則是以逆銑(up-milling)的部分較多。

5.2.1 動力計數據

圖 34 呈現了側傾角為正的切削力數據，可以看到整體的切削力穩定性很好，大小的變化約為 20N，而在圖 35 中則是呈現了側傾角為負時的切削力數據，切削力的趨勢類似上一節的無傾斜切削力趨勢，都會有逐漸上升的趨勢，而且都會有幾處切削力突然升高。

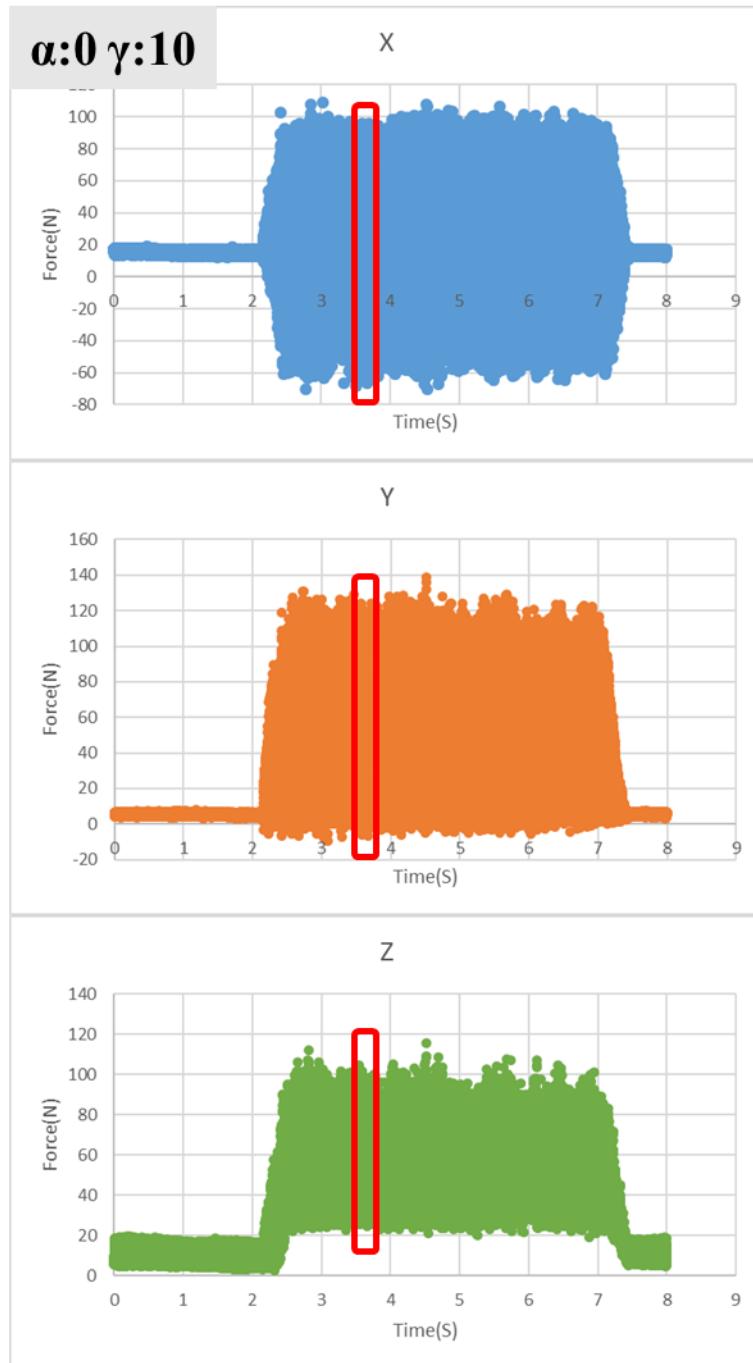


圖 34 tilt10 動力計數據

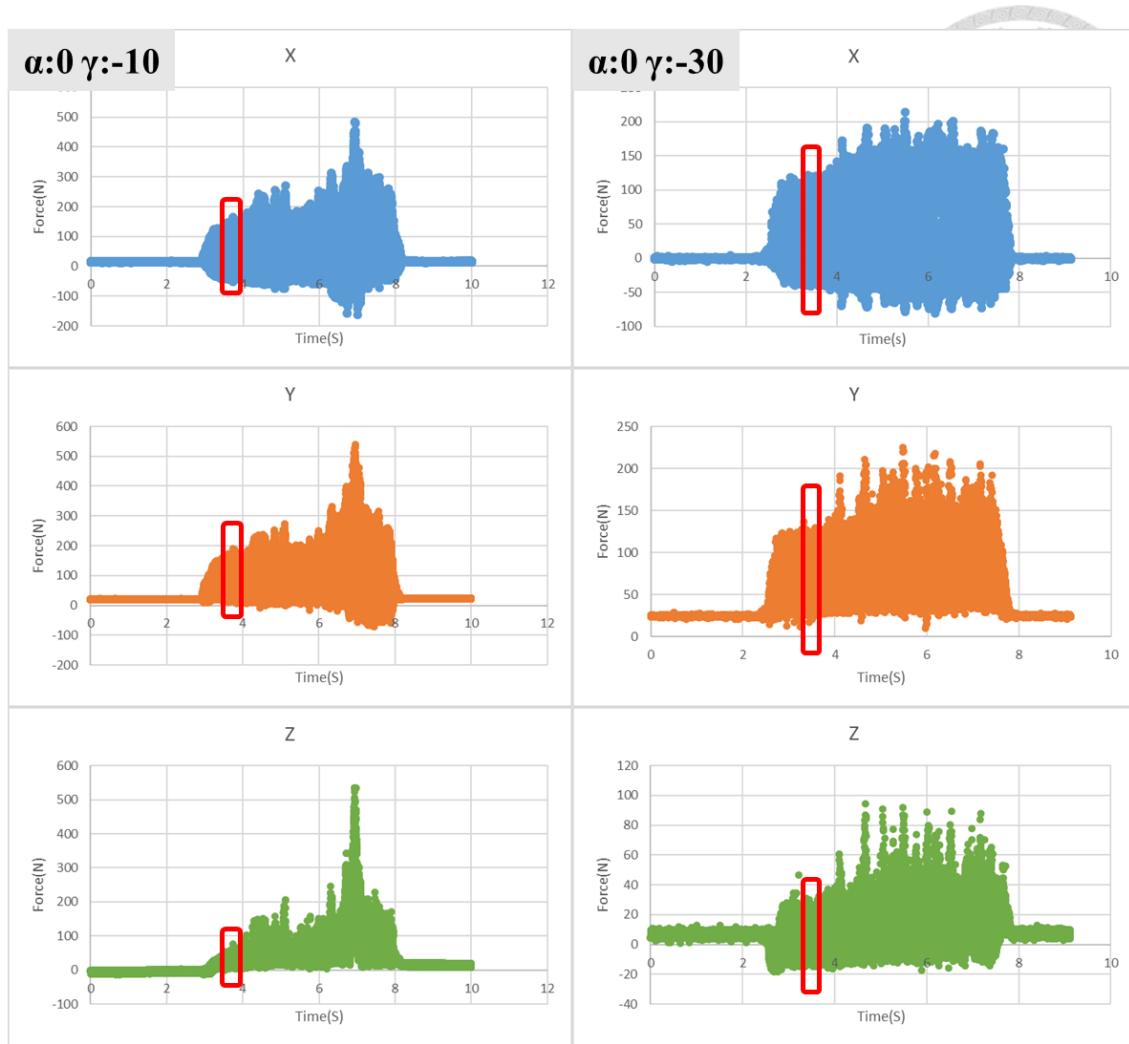


圖 35 tilt-10&-30 動力計數據

5.2.2 與模擬切削力數據比較

三個角度都擷取圖 34 圖 35 中框選處的切削力與模擬數據進行疊圖比較，其中切削力較不穩定的側傾角為負的兩組，是挑選前段切削力較小的部分進行比較。圖 36 為側傾角為正的刀具軸向加工，可以看到 Y 軸方向的切削力比模型數據大 20%左右，而另外兩方向的切削力則約略比模型數據大 100%。但圖 37 圖 38 顯示了當側傾角為負值的刀具軸向加工，X 軸、Y 軸方向的切削力皆是大於模型數據 60%以上。兩者的差異來自於排屑的方向不同，如圖 39 所示，側傾角為正的情況下把切屑往下排導致 X、Z 軸邊緣力上升，而側傾角

為負的情況則是往側前方排屑導致 X、Y 軸方向上邊緣效應較為明顯，且會持續增加，切屑堆積現象較為明顯。

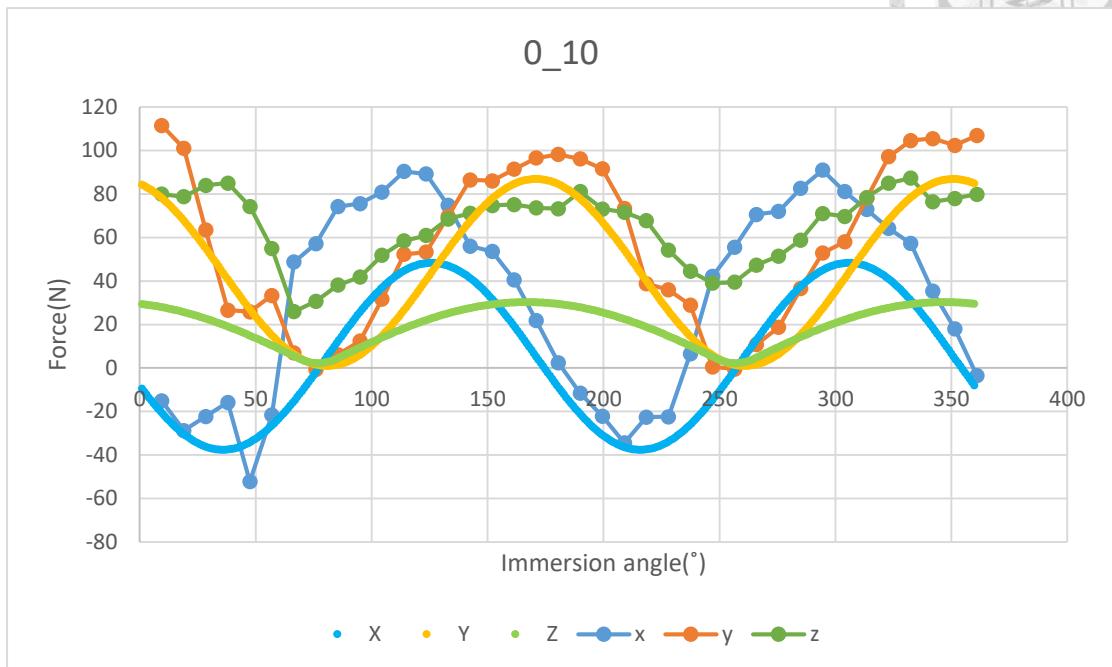


圖 36 tilt 10 切削力比對圖

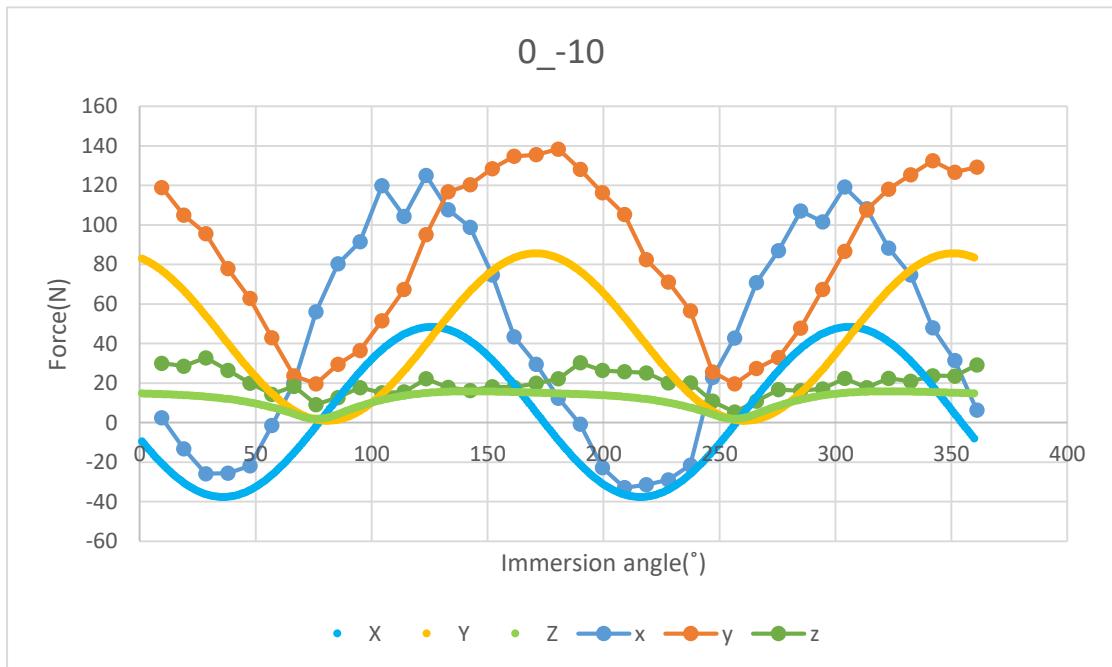


圖 37 tilt -10 切削力比對圖

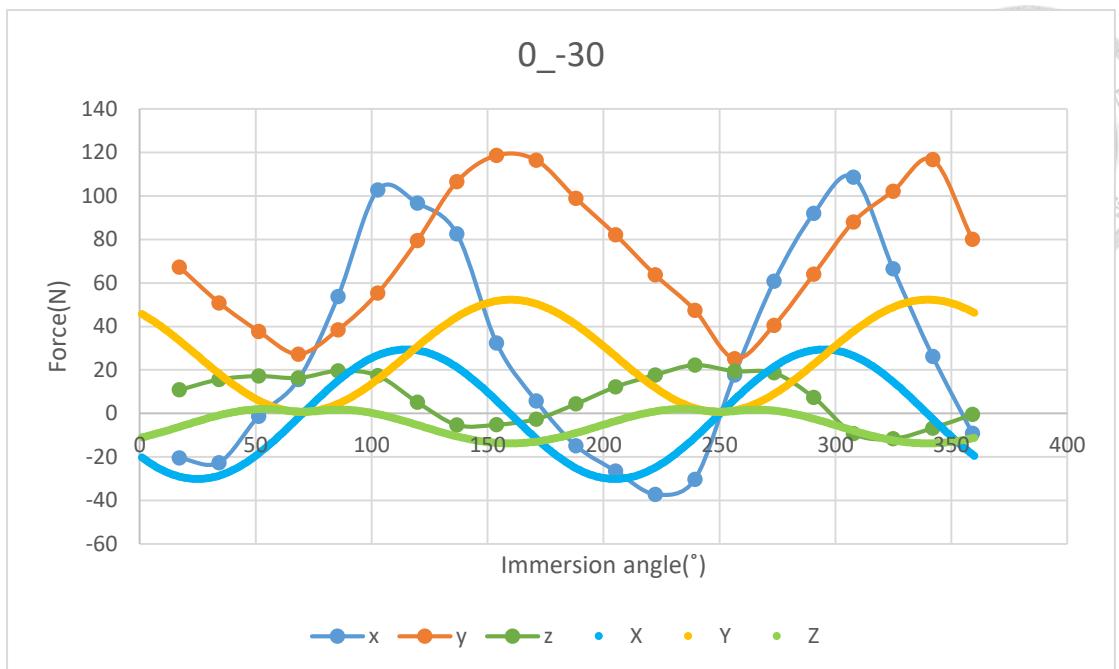


圖 38 tilt -30 切削力比對圖

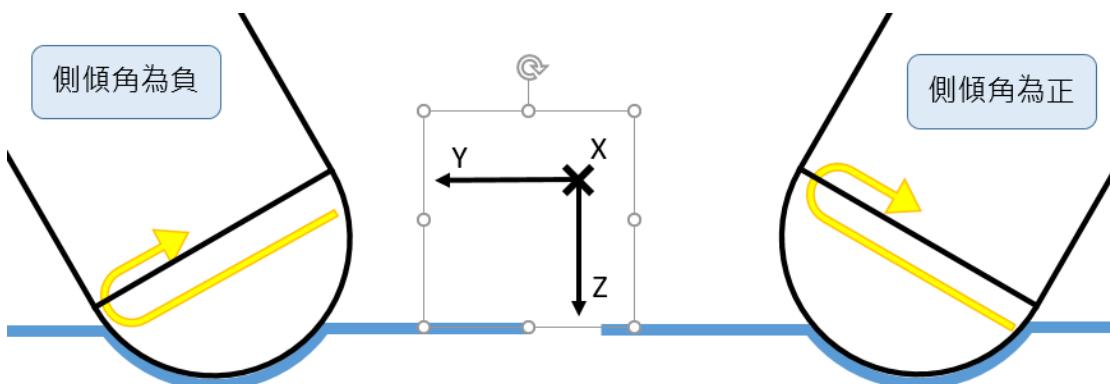


圖 39 不同側傾角的刀具旋轉方向示意圖

5.2.3 表面狀況

在圖 40 中可以看到，三組的表面都還是有些紋路，但是不大相同。側傾角為 10° 的表面紋路較細且規律，前後段差距不大，表面品質不錯，而且集中在面向刀具進給(feed)方向的右側。側傾角為 -10° 的表面紋路明顯，且在後段有很明顯的表面破壞，非常粗糙，與圖 35 中切削力增加的趨勢相符，面向刀具進給(feed)方向的左側紋路較多。側傾角為 -30° 的紋路出現的比較不規律，隨不規則的出現切屑堆損傷，且集中於左側。搭配表 12 可以更明確發現側傾角

為正的切削表面粗糙紋路集中於右側，側傾角為負則集中在左側，皆是該處切屑堆積沾黏造成表面粗糙。



圖 40 無前傾有側傾工件表面

表 12 無前傾有側傾表面粗糙度 Ra(μm)

刀具軸向	位置	量測點 1	量測點 2	量測點 3	平均
0_-10	左	0.47	0.67	0.65	0.59
	右	1.37	2.61	1.89	1.96
0_-10	左	21.62	7.05	2.06	10.24
	右	1.74	1.80	1.62	1.72
0_-30	左	3.29	2.69	2.90	2.96
	右	0.94	1.84	1.49	1.42

綜合 5.1 與 5.2 節的結果，可以發現當沒有前傾(lead angle 為零)進行切削時，切削狀態比較不穩定，量測切削力會高於僅考慮剪切力的理論模型數據，代表邊緣效應影響劇烈，並且造成表面品質差。可以發現刀具左側以逆銑(up-milling)方式加工的部份容易出現不穩定的現象，切削力突然升高且於表面留下短且深的痕跡，但右側以順銑(down-milling)方式加工的部分比較穩定，即使出現晃動切削力也只是在較小的範圍內起伏，且表面的痕跡也較規律。

5.3 只有前傾無側傾的切削力與表面狀態

這一小節會呈現前傾角(lead angle)大於零，側傾角(tilt angle)為零的刀具軸向下，進行切削加工實驗的結果。前傾角的大小包含 10° 、 20° 與 30° ，這三個角度的實驗數據都具有重複性。

5.3.1 動力計數據

不同於前二小節的無前傾加工的切削力變化趨勢，圖 41 中可以看到，有前傾加工的切削力相對穩定，沒有太明顯的漸增現象，也沒有突然切削力大幅度增高的狀況。

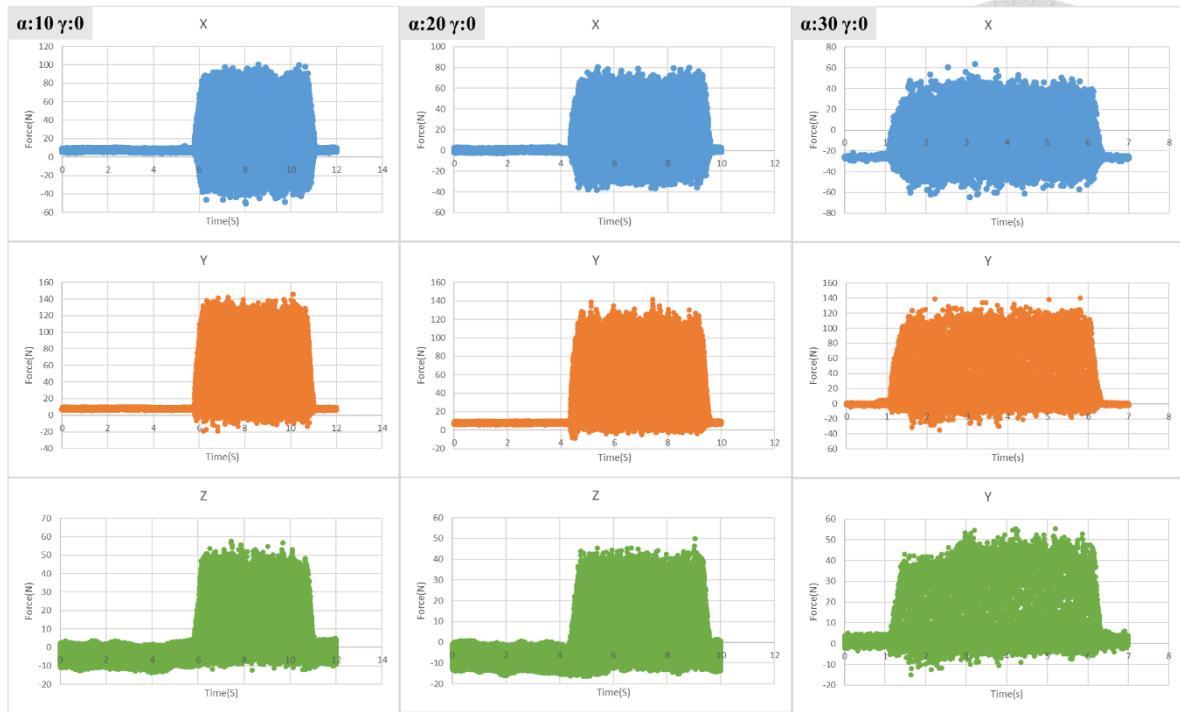


圖 41 lead angle10~30 動力計數據

5.3.2 與模擬切削力數據比較

從圖 42 圖 43 圖 44 三個不同前傾角的動力計量測切削力與模型計算的切削力比對圖都可以看到高度的相似性。在三個方向上，無論是切削力大小或是變化趨勢都接近模型數據，量測力比模型計算大約 15%。可以認為在只有前傾而沒有測傾的刀具軸向下進行切削時邊緣效應不顯著，切削力大部分來自於剪切力，與 Wojciechowski et. al.[7] 實驗結果符合。

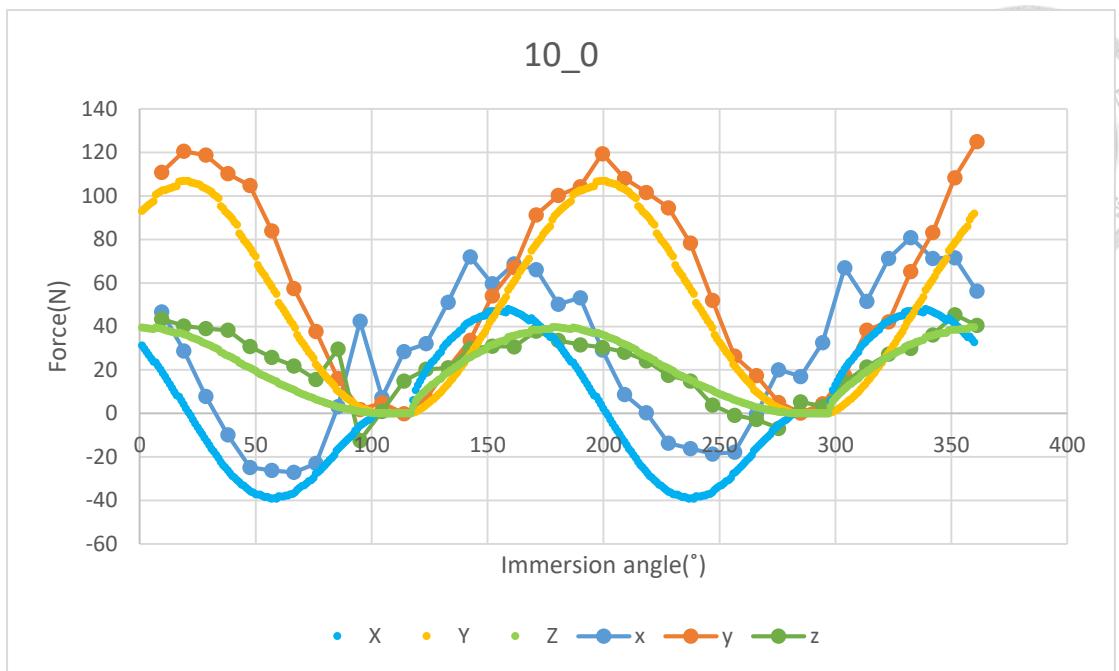


圖 42 lead10 切削力比對圖

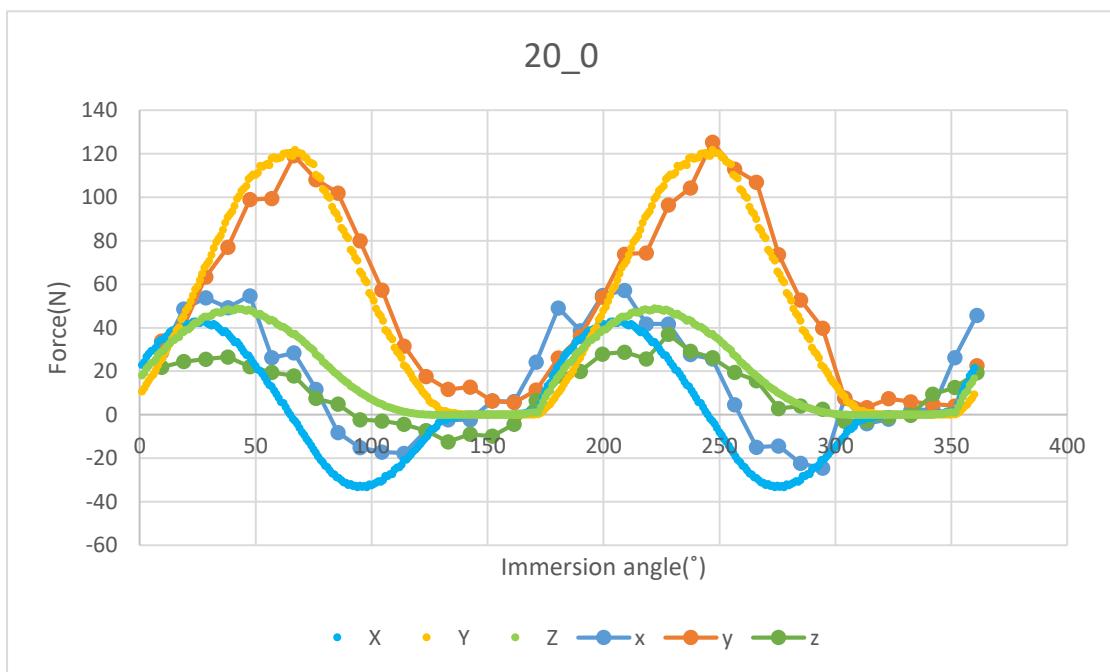


圖 43 lead20 切削力比對圖

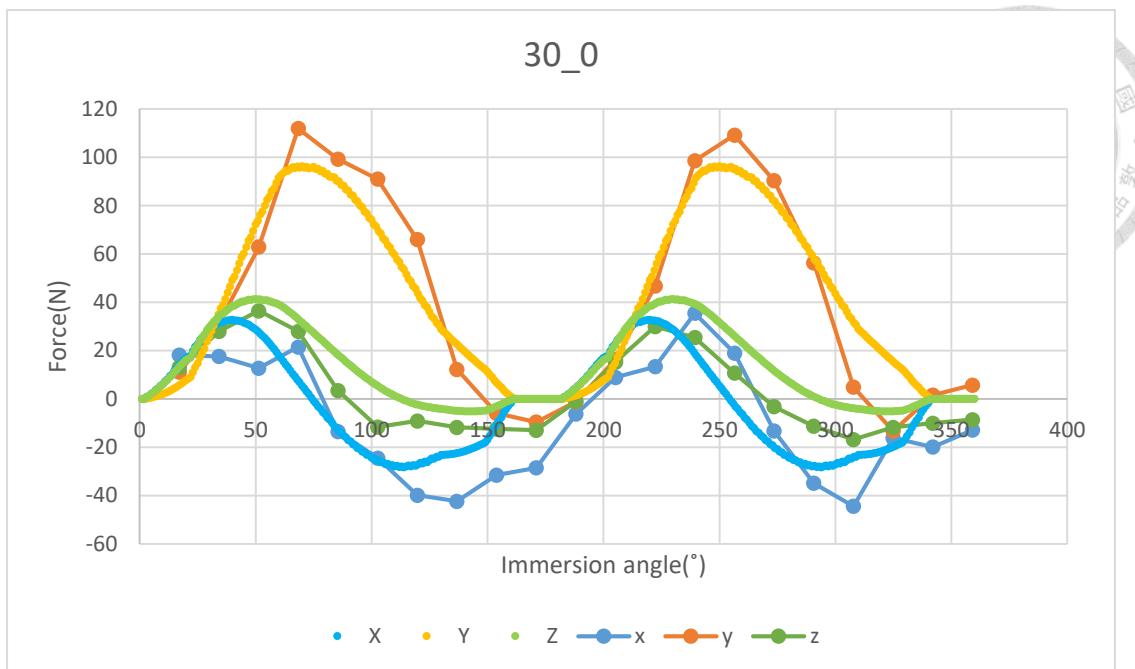


圖 44 lead30 切削力比對圖

5.3.3 表面狀況

在圖 45 的工件表面照片可以看到前傾角為 10° 的左側有較明顯的痕跡，而另外兩組的表面相較平順，紋路不明顯。從表 13 的 Ra 值也可以確認前傾角為 10° 的左側粗糙度較大。表面缺陷集中在左側的現象類似 5.1 節的無傾斜切削，但粗糙度比較小。由於前傾角為 10° 的傾斜幅度較小，還有些許邊緣效應產生，導致了類似刀具無前傾的表面粗糙現象，但粗糙度略有改善。而在前傾角為 20° 、 30° ，傾斜幅度較大的條件下切削，邊緣效應幾乎不存在，表面品質就相對的提升。可以認為增加刀具軸向前傾的角度可以改善工件的表面品質。

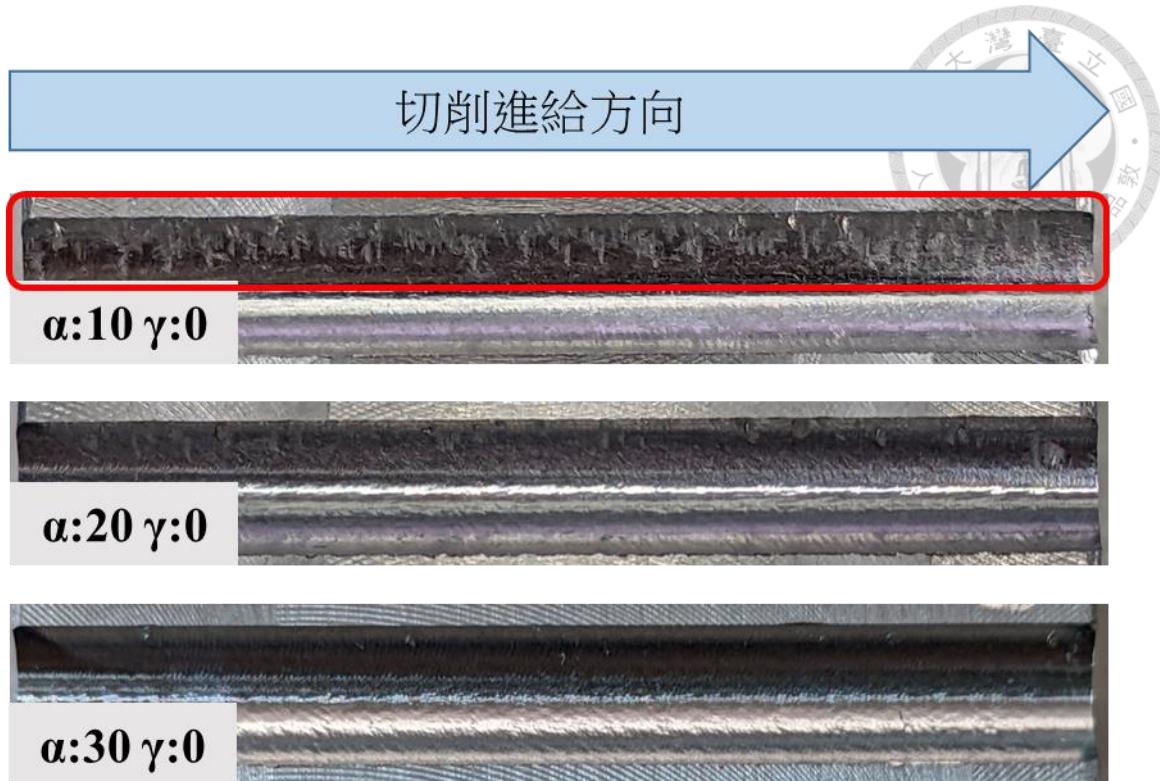


圖 45 有前傾無側傾工件表面

表 13 有前傾無側傾表面粗糙度 Ra(μm)

刀具軸向	位置	量測點 1	量測點 2	量測點 3	平均
10_0	左	8.089	2.889	3.332	4.77
	中	0.381	0.367	0.321	0.356333
	右	1.217	1.272	1.294	1.261
20_0	左	1.423	0.567	0.53	0.84
	中	0.328	0.323	0.322	0.324333
	右	0.792	0.975	0.968	0.911667
30_0	左	0.545	0.577	0.482	0.534667
	中	0.619	0.537	0.522	0.559333
	右	1.506	1.207	1.065	1.259333



5.4 同時有前傾與側傾的切削力與表面狀態

本小節會依據前傾角(lead angle)的大小，依序介紹三組相同前傾角(α)而側傾角(tilt angle、 γ)大小相同方向相反的刀具軸向切削數據，詳細如下表 14。

根據這總共六個不同刀具軸向再配合前面介紹過的刀具軸向之切削結果，來歸納討論刀具軸向會如何的影響切削加工狀態。

表 14 刀具軸向列表

$\alpha=5^\circ$ 、 $\gamma=5^\circ$	$\alpha=10^\circ$ 、 $\gamma=20^\circ$	$\alpha=15^\circ$ 、 $\gamma=15^\circ$	$\alpha=20^\circ$ 、 $\gamma=10^\circ$
$\alpha=5^\circ$ 、 $\gamma=-5^\circ$	$\alpha=10^\circ$ 、 $\gamma=-20^\circ$	$\alpha=15^\circ$ 、 $\gamma=-15^\circ$	$\alpha=20^\circ$ 、 $\gamma=-10^\circ$

5.4.1 動力計數據

圖 46 表示 前傾角為 5° 、側傾角為 $\pm 5^\circ$ 刀具軸向的切削力，側傾角為正的切削力比較穩定，側傾角為負的切削力有小幅度變化，但不像圖 35 中無前傾的切削力變化之巨大。可見前傾角增加對於切削力的穩定有影響。

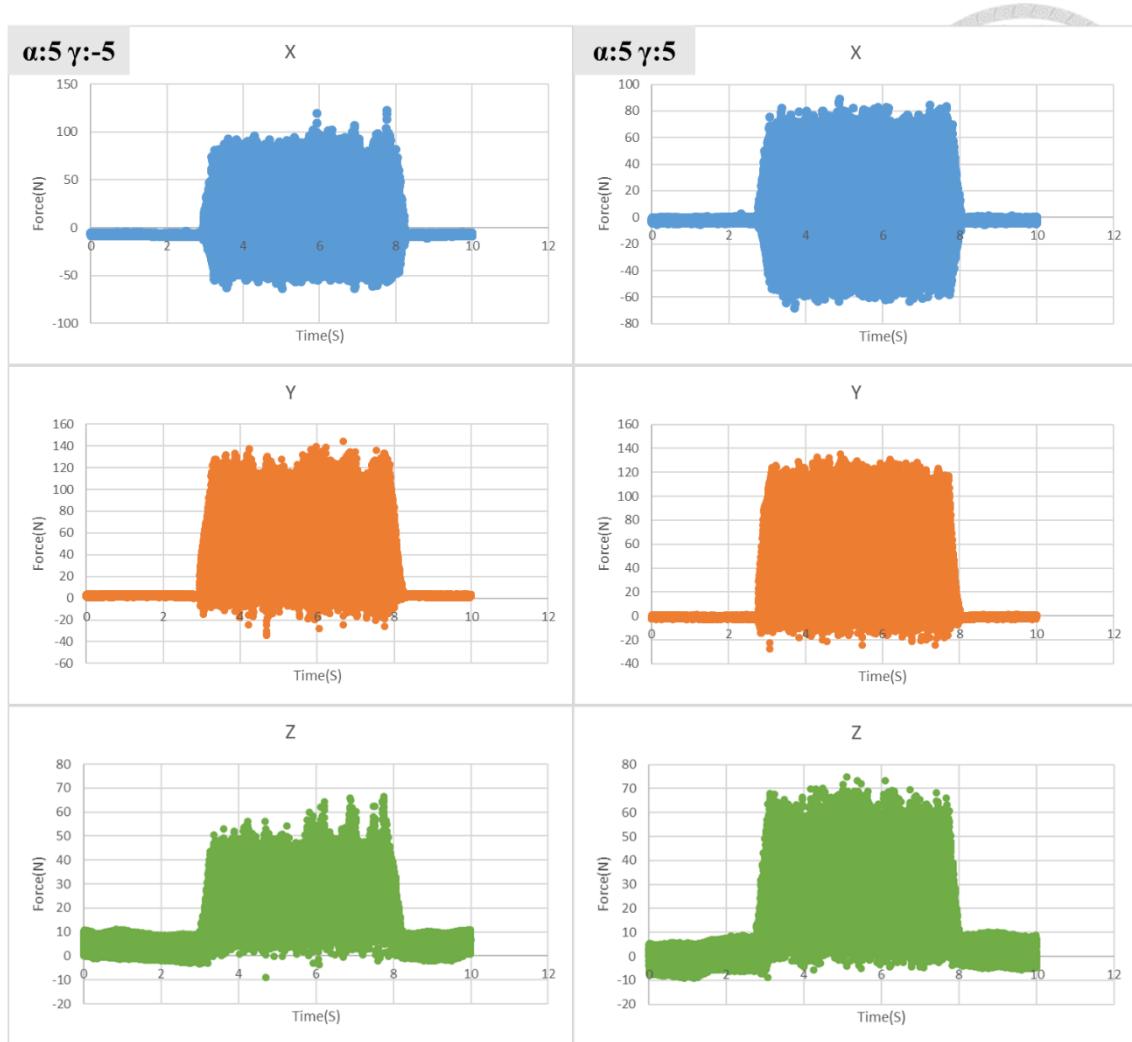


圖 46 lead5、tilt \pm 5 動力計數據

圖 47 為前傾角為 10° 、側傾角為 $\pm 20^\circ$ 刀具軸向的切削力，側傾角為正的切削力穩定性依舊很好，而側傾角為負的切削力則是有小部份的不穩定現象，但不像圖 28 與圖 35 變化劇烈。

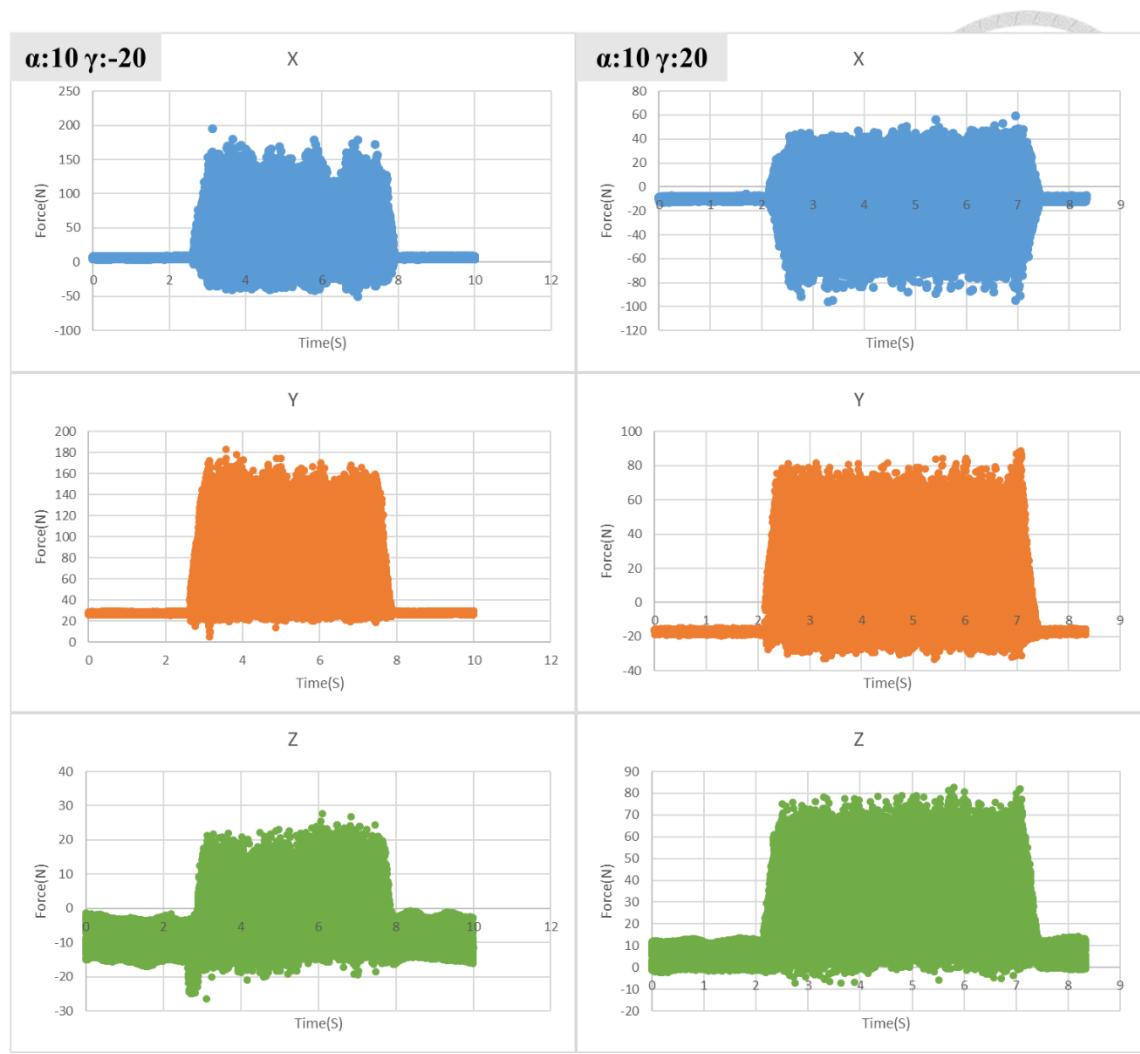


圖 47 lead10、tilt \pm 20 動力計數據

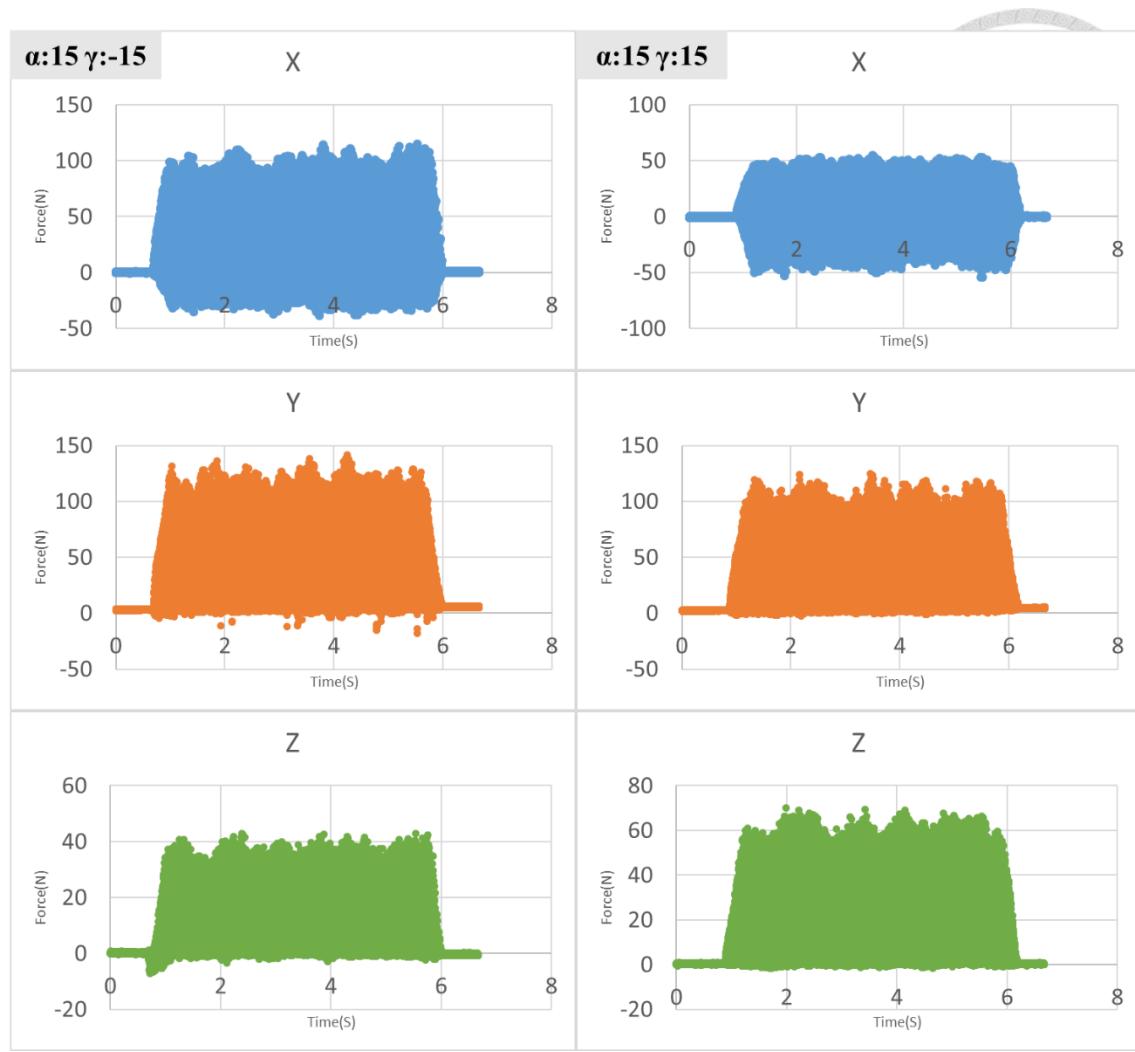


圖 48 lead15、tilt \pm 15 動力計數據

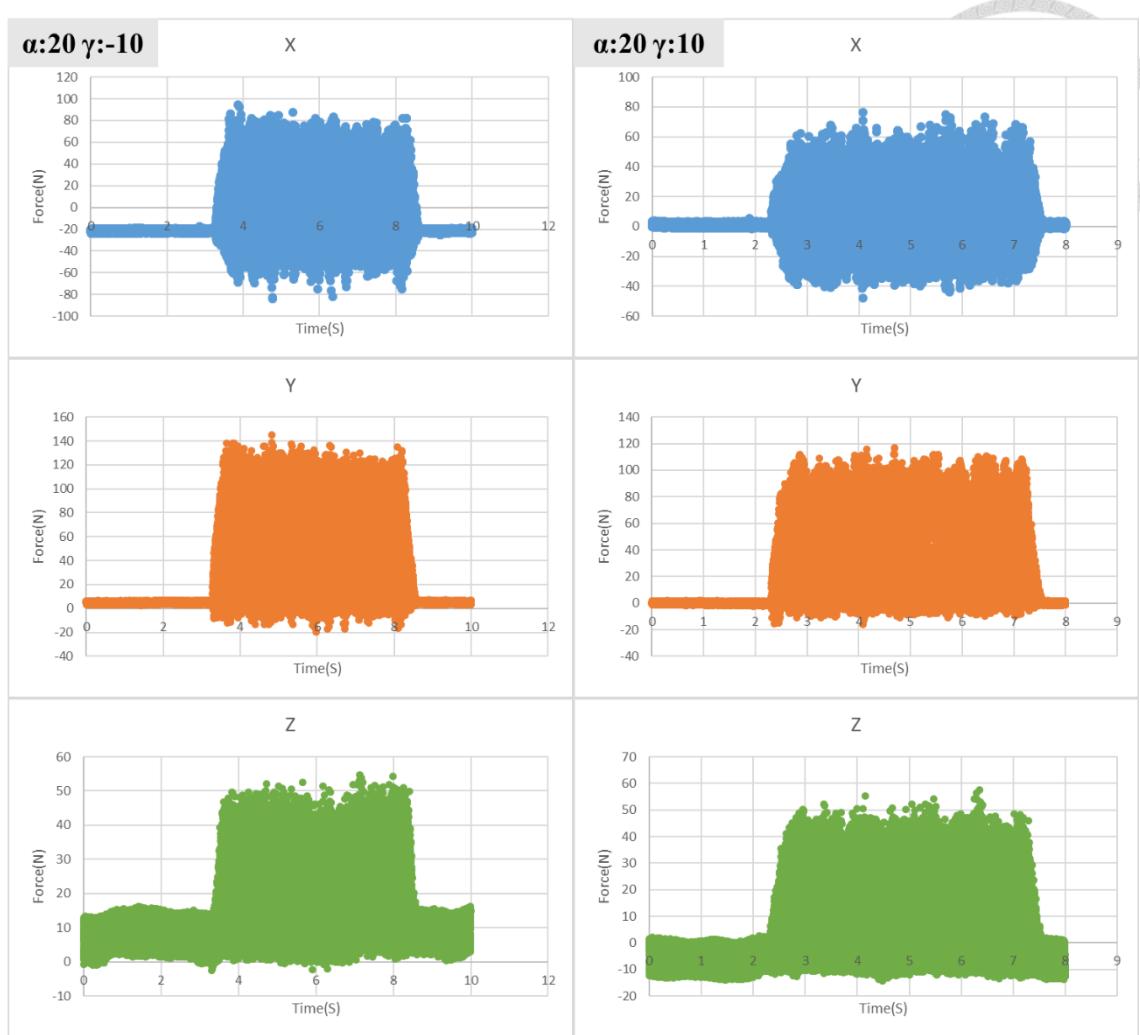


圖 49 lead20、tilt \pm 10 動力計數據

圖 48 代表 前傾角為 15° 、側傾角為 $\pm 15^\circ$ 、圖 49 代表 前傾角為 20° 、側傾角為 $\pm 10^\circ$ 刀具軸向的切削力，在切削力的穩定度上就沒有發現明顯區別，可以認為側傾角增大，切削力的穩定度也變好。



5.4.2 與模擬數據比較

從圖 50 到圖 57 是同時有前傾與側傾的刀具軸向進行切削時量測到的動力計數據與模擬計算切削力對比圖。每個情況下實際切削力與模擬都大致符合。仔細比較可以發現側傾角為正的情況下切削力會略低於模型數據 5%-20%，側傾角為負的切削力則是略高於模型數據 5%-20%。理論切削力應該小於或等於實際切削力，會發生實際切削力小於理論的原因是本研究在切削係數的使用僅來自單一刀具軸向的實驗數據，代表性較為缺乏，所以在側傾角數值較大時的理論數值準確度較低。使用多組切削條件與刀具軸向計算切削參數可以改善此問題。

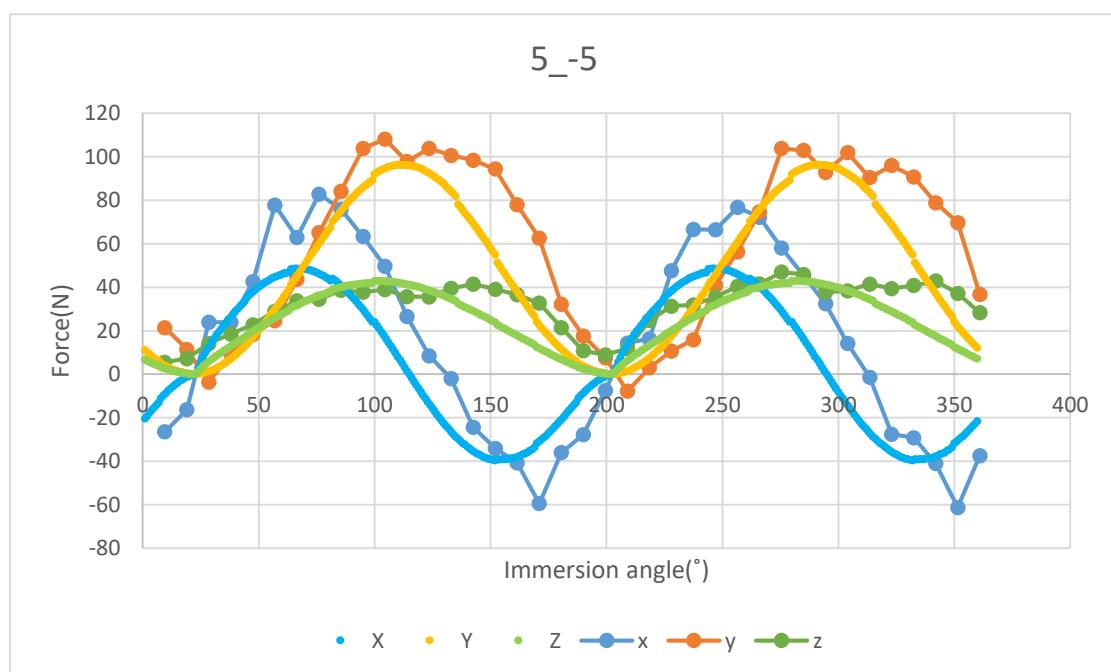


圖 50 5_5 切削力比對圖

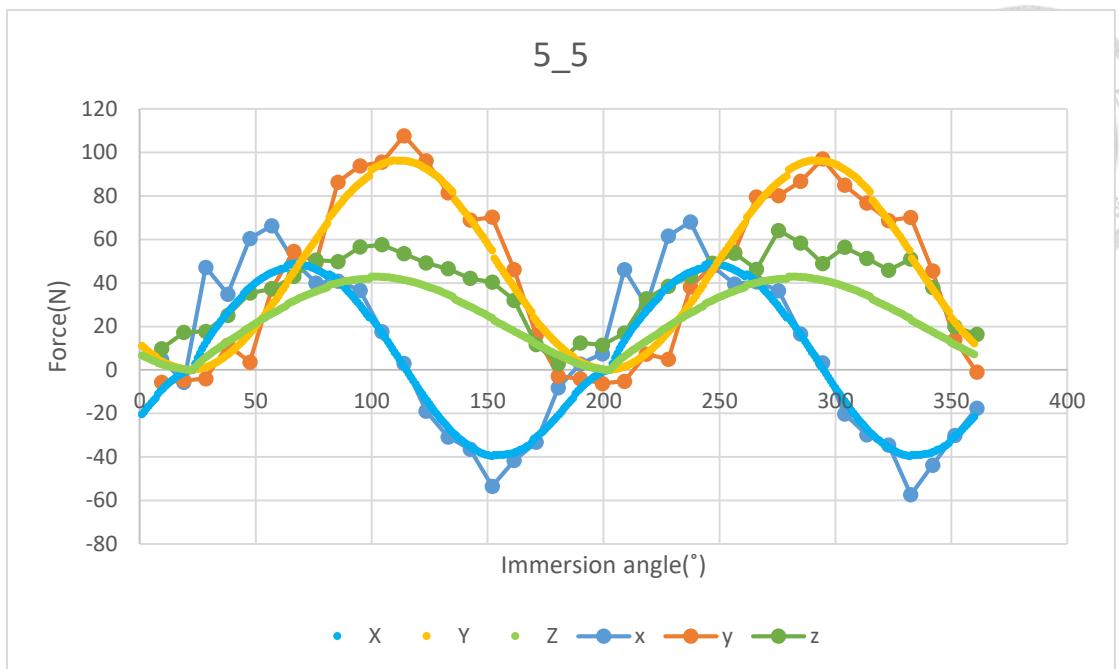


圖 51 5_5 切削力比對圖

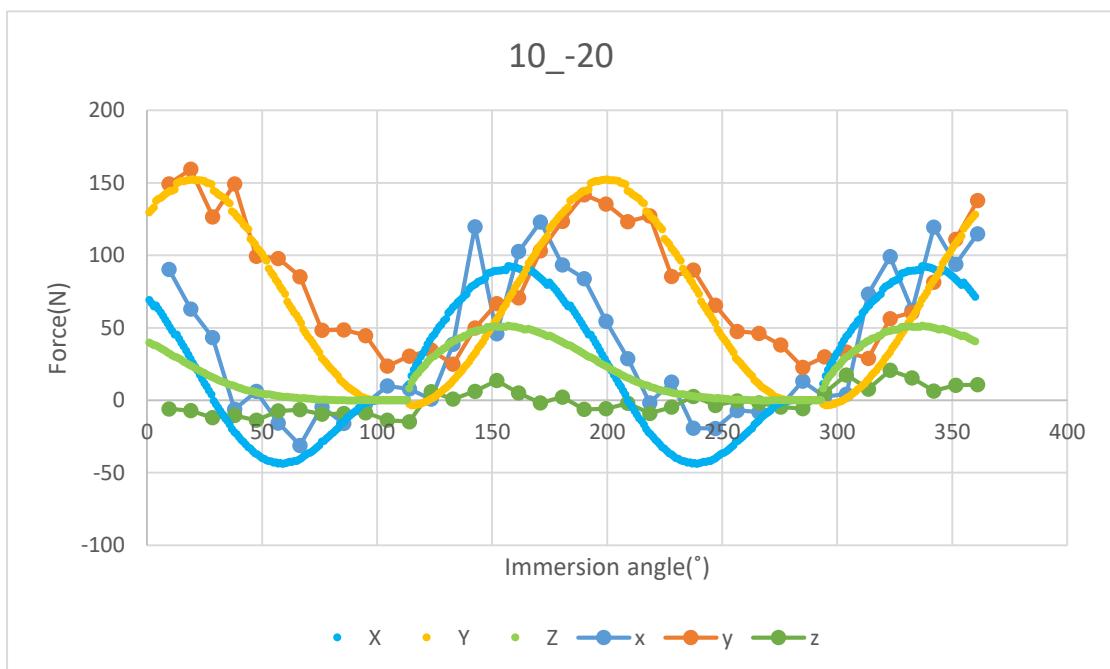


圖 52 10_-20 切削力比對圖

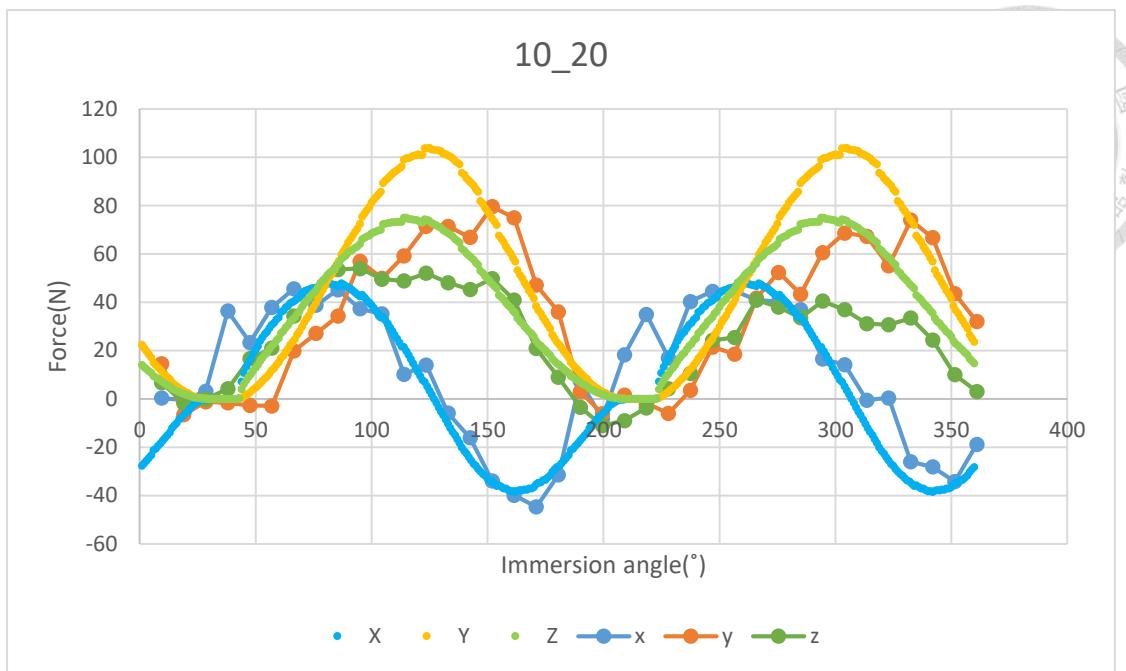


圖 53 10_20 切削力比對圖

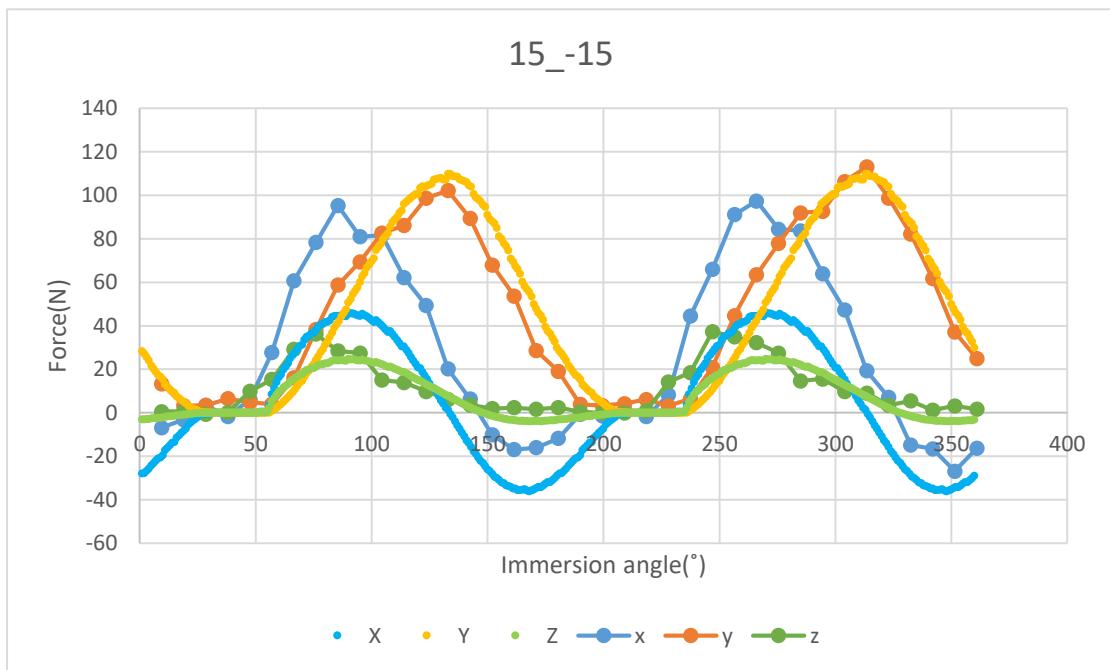


圖 54 15_-15 切削力比對圖

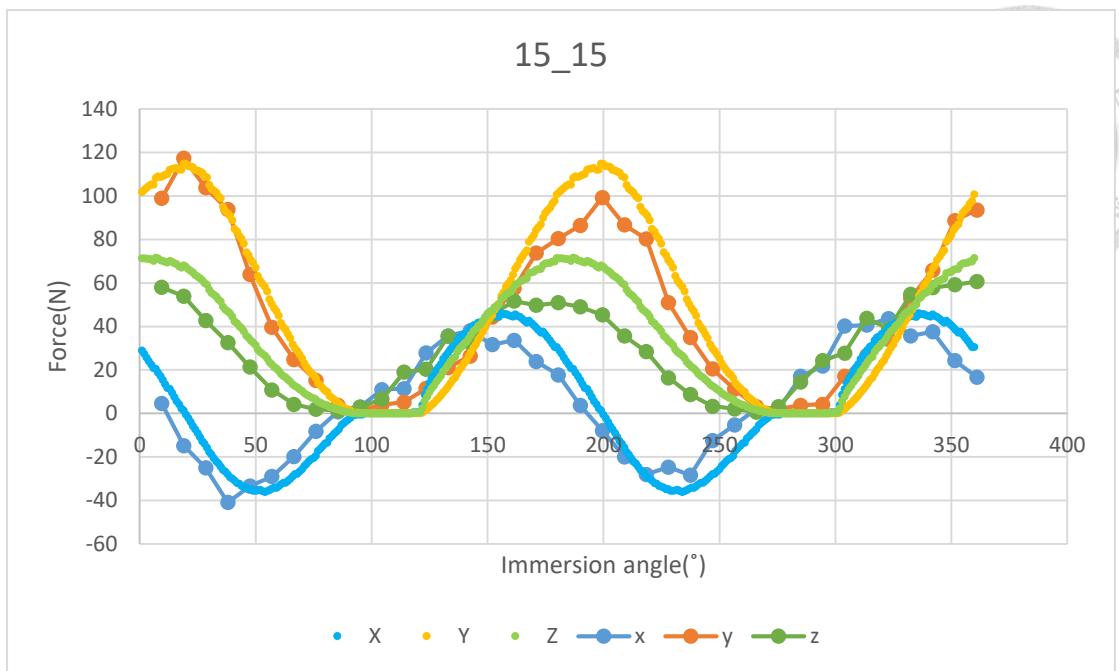


圖 55 15_15 切削力比對圖

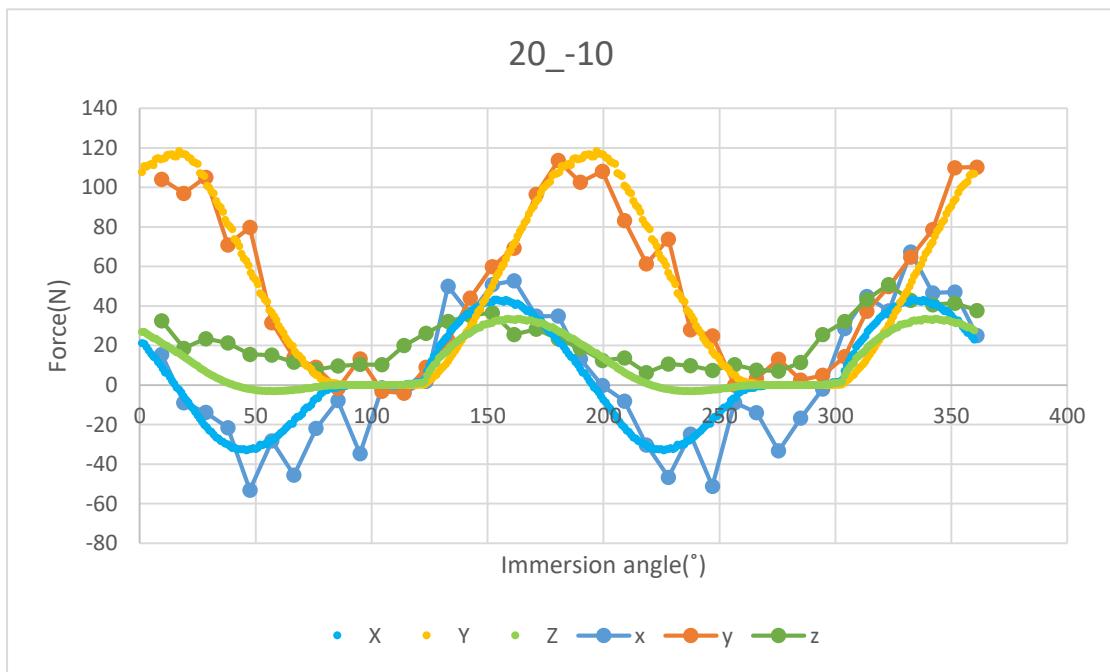


圖 56 20_-10 切削力比對圖

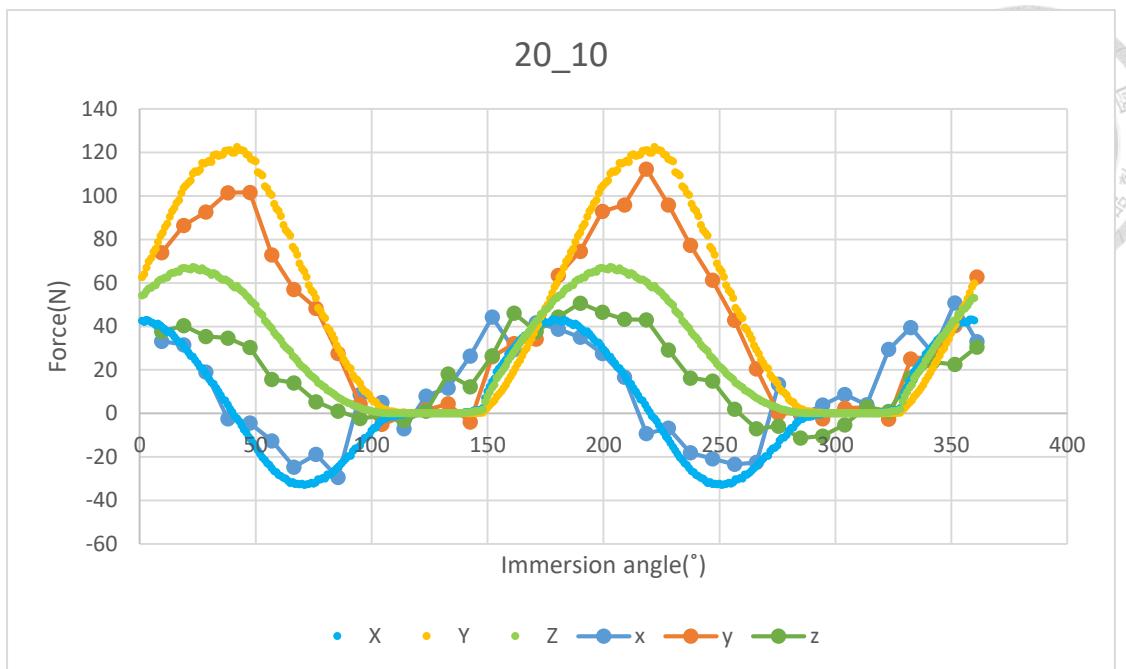


圖 57 20_10 切削力比對圖

5.4.3 表面狀況

從圖 58 表 15 可以看到小角度的刀具傾斜，表面品質不佳。因為切屑堆積導致瑕疪集中於刀具傾向的那一邊，側傾角為正時瑕疪集中在右側、側傾角為負時瑕疪集中在左側。當加工遇到刀具軸向可傾斜角度較小的情況時，可以利用這個趨勢當作規劃的依據，將瑕疪留在表面品質要求比較低的位置。

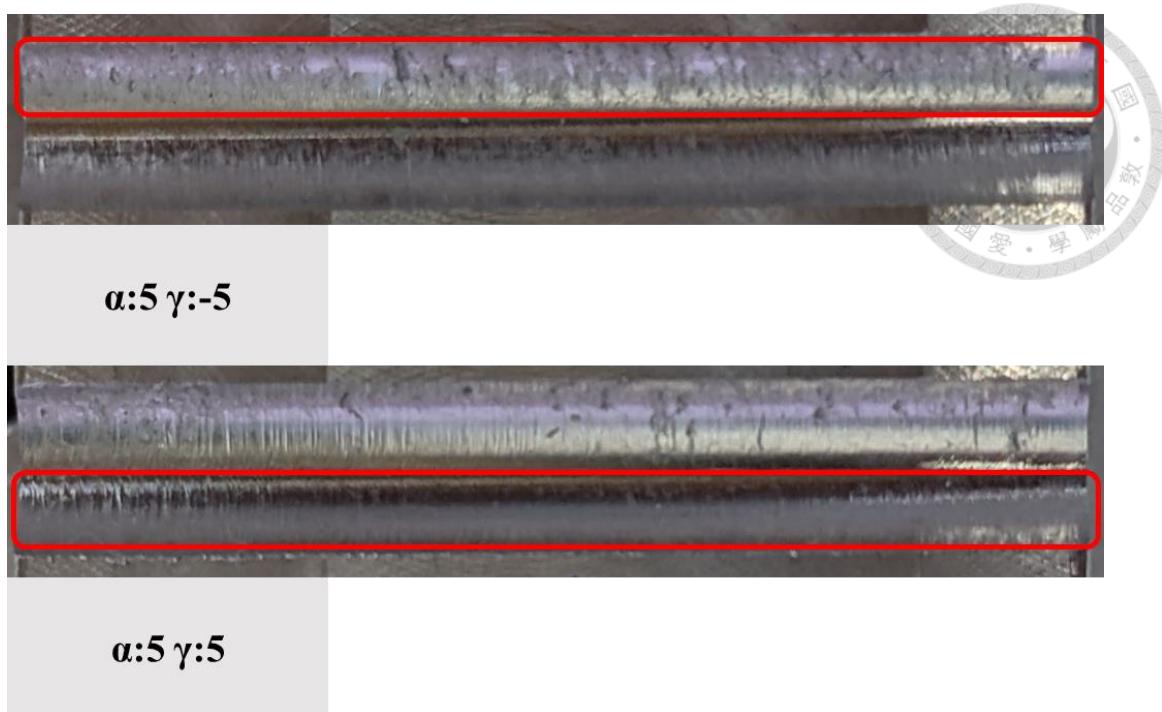


圖 58 lead 5° tilt $\pm 5^\circ$ 工件表面

表 15 lead 5° tilt $\pm 5^\circ$ 表面粗糙度 Ra(μm)

刀具軸向	位置	量測點 1	量測點 2	量測點 3	平均
5_-5	左	2.57	6.65	4.37	4.53
	右	0.91	1.65	1.97	1.51

5_5	左	0.90	1.35	1.30	1.18
	右	3.22	8.93	7.92	6.69

表 16 是 lead 20° tilt $\pm 10^\circ$ / lead 15° tilt $\pm 15^\circ$ / lead 10° tilt $\pm 20^\circ$ 的表面粗糙度，可以於表中看到 t 側傾角為負的左側 Ra 值是優於側傾角為正的右側 Ra 值，只看數字可能會認為側傾角為負的表面品質優於側傾角為正，但實物觀察的結果卻相反。因為側傾角為正時的刀痕明顯，如圖 59 與圖 61，產生了很穩定的高低起伏，而側傾角為負時刀痕比較不明顯。但是仔細觀察工件可以發現側傾角為負時的表面會留下一些隨機出現的切屑沾黏顆粒，如圖 62，這是在使用粗度儀量測時不容易被探針碰觸到，所以儀器量測的 Ra 值相對低，但是使用手指接觸表面會覺得較粗糙。

表 16 lead 20° tilt $\pm 10^{\circ}$ / lead 10° tilt $\pm 20^{\circ}$ 表面粗糙度

Ra(μm)	位置	量測點 1	量測點 2	量測點 3	平均
20_10	左	0.74	0.59	0.50	0.61
	右	2.68	2.22	1.98	2.29
20_-10	左	1.32	2.43	1.11	1.62
	右	1.09	0.84	0.72	0.88
15_15	左	0.96	1.19	1.84	1.33
	右	2.99	3.74	2.69	3.14
15_-15	左	7.51	0.98	1.02	3.17
	右	1.59	1.16	1.01	1.25
10_20	左	0.81	0.83	0.95	0.86
	右	2.12	2.22	2.08	2.14
10_-20	左	0.86	0.95	0.88	0.90
	右	0.69	0.70	0.69	0.70



圖 59 20_10 工件表面



圖 60 20_-10 工件表面



圖 61 10_20 工件表面



圖 62 10_-20 工件表面

圖 63 圖 64 是表面粗度儀量測時的表面波型，在前傾角為 20° 且側傾角為 10° 的表面是很規律變化。而前傾角為 20° 且側傾角為 -10° 的表面則是大部分時間平滑，但突然會有一處凸起。在計算 Ra 值時圖 63 略高於圖 64。但是實際加工時大多偏好有規則的刀紋，因為其具有可預測性。從這個例子可以對照前面動力計量測到的切削力趨勢，側傾角為負的刀具軸向加工比較容易出現不規則的切削力變動，所以在工件表面上比較容易留下不規則的表面瑕疵。即使因為增加了前傾角來降低切削力不穩定的現象，但是側傾角為負依舊比較容易出現不規則的切削力增加導致工件表面留下瑕疵。

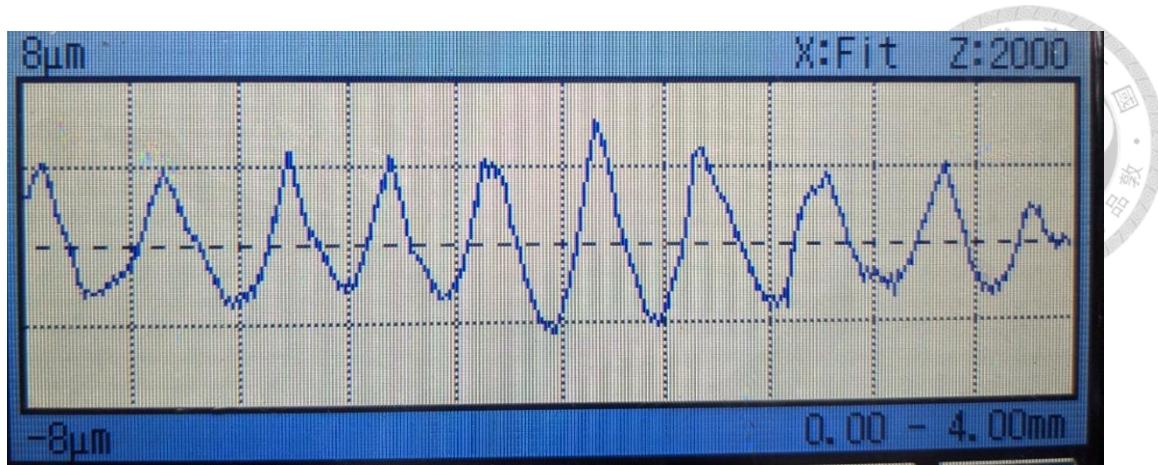


圖 63 20_10 表面波形

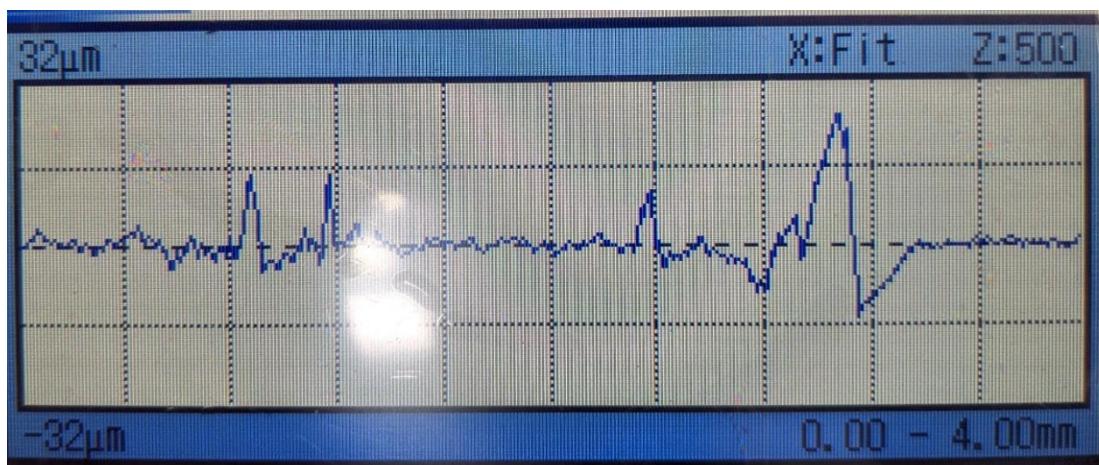


圖 64 20_-10 表面波形

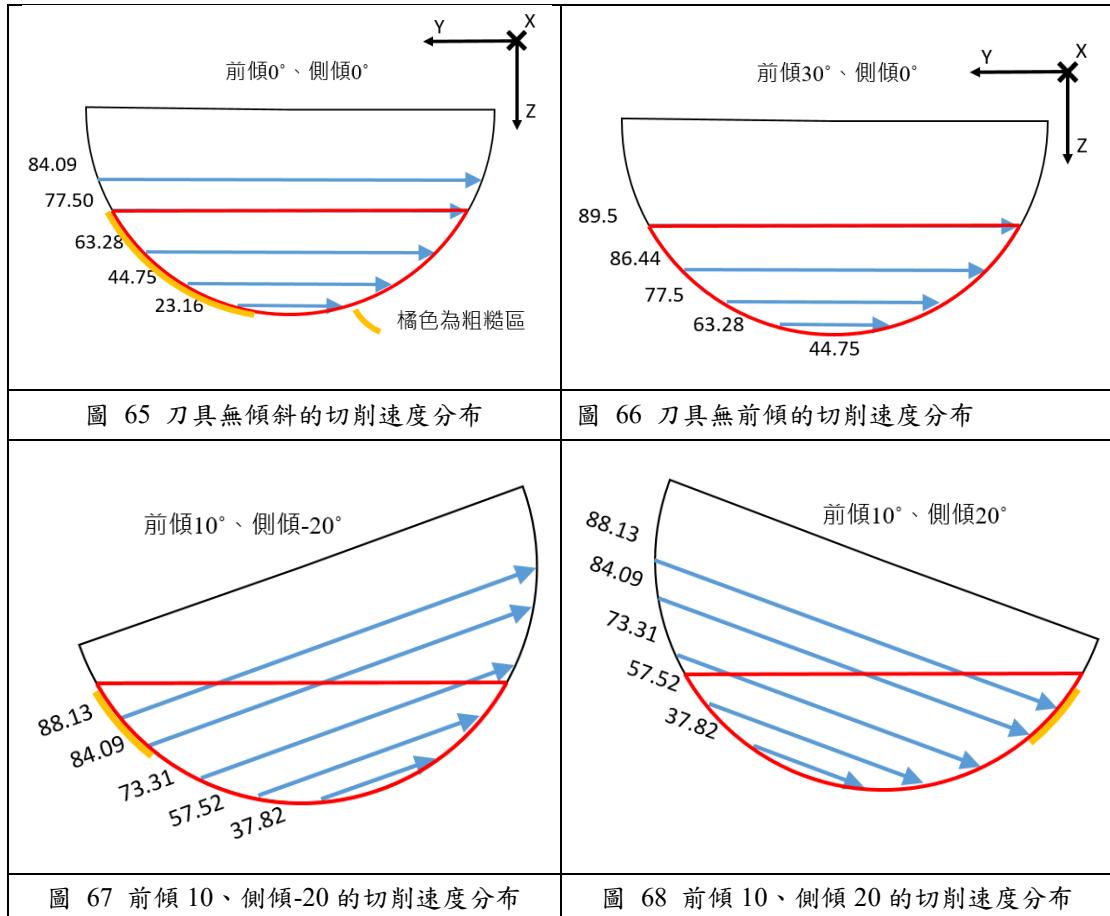
5.5 討論

5.5.1 不同刀具軸向下的邊緣效應

實驗結果可以發現刀尖接觸是邊緣效應的主要來源，在圖 30、圖 36、圖 37、圖 38 這四組前傾角為零的切削力數據可以看到，邊緣力的大小在切削初期約為剪切力的 100%，而在切削後期的圖 31 中邊緣力約為剪切力的 600%。只要前傾角為零，邊緣力都占了整體切削力極大部分，但當前傾角不為零，即

使角度不大，邊緣效應也會明顯的減少。圖 50 與圖 51 顯示了前傾角為 5° 的情況下，邊緣力只有剪切力的 20%左右。

以各刀具軸向的切削速度來看，本研究使用的刀具直徑 6mm，轉速 4750rpm，在刀具前端球型最高處以及後端圓柱形的位置上的切削速度約為 89.5m/min，越接近刀具尖端的切削速度越接近零。



刀尖接觸除了造成極大的邊緣力之外，本研究在量測表面粗糙度時發現當前傾角為零時，工件表面的粗糙紋路散佈較廣，幾乎占據接近整個左半邊，約為整體的 45%。增加前傾角至 5° 時紋路約略佔據 40%，而前傾角大於 10° 之後只占表面約 20%，集中於切削速度較大的側邊，工件中心部分較平滑。

本研究也進行了較高切削速度的實驗，使用相同的材料與切削深度、進給等條件，提升主軸轉速至 9500RPM，更換尺寸更大的 R5 球刀，結果如下。

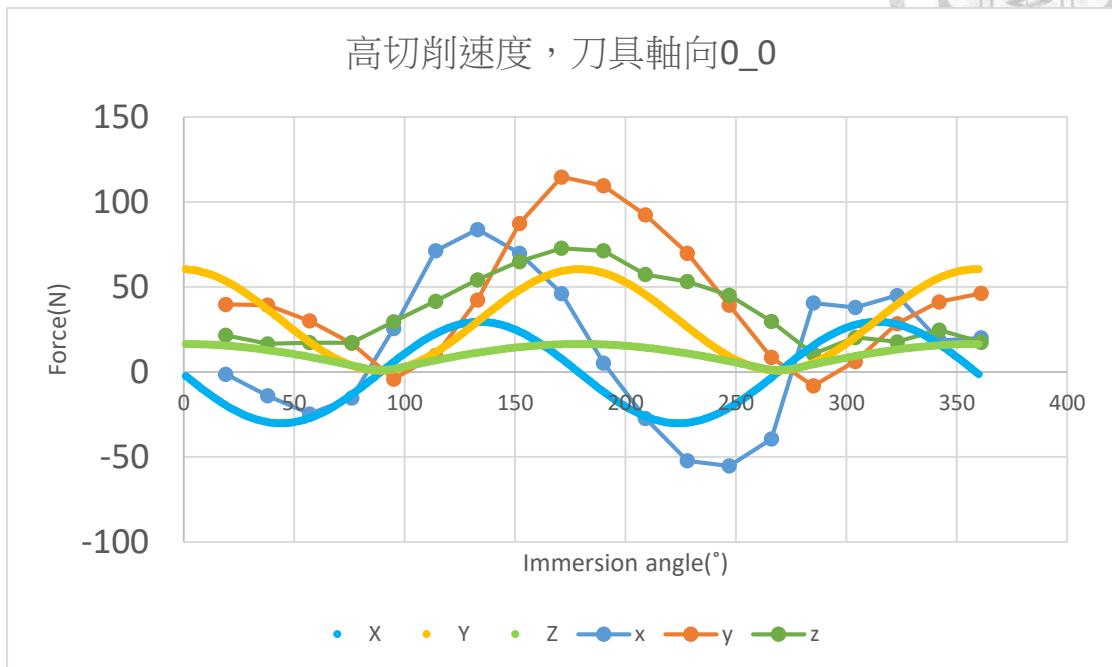


圖 69 高轉速無傾斜切削力比對圖

在刀具未傾斜的情況下，邊緣力約為剪切力的 100%。

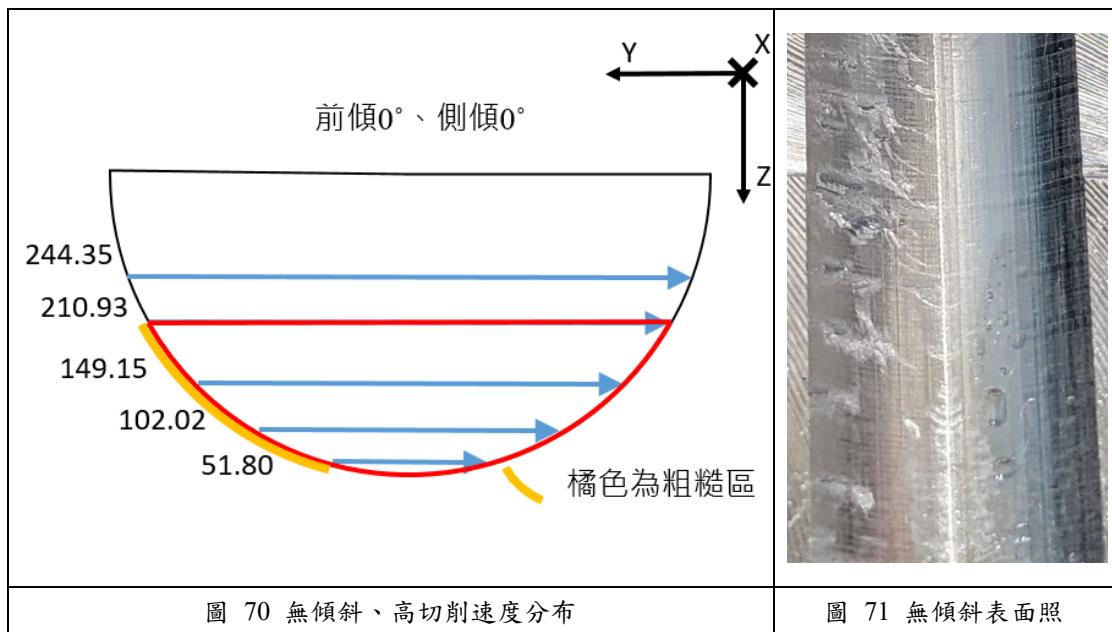


圖 70 無傾斜、高切削速度分布

圖 71 無傾斜表面照

圖 71 中可以看到表面粗糙的區域略有減少，代表提高轉速與刀具半徑，提升整體切削速度的情況下，表面粗糙的情況有小幅改善，但是無傾斜的狀況下刀尖依然接觸表面，還是會有邊緣效應產生。

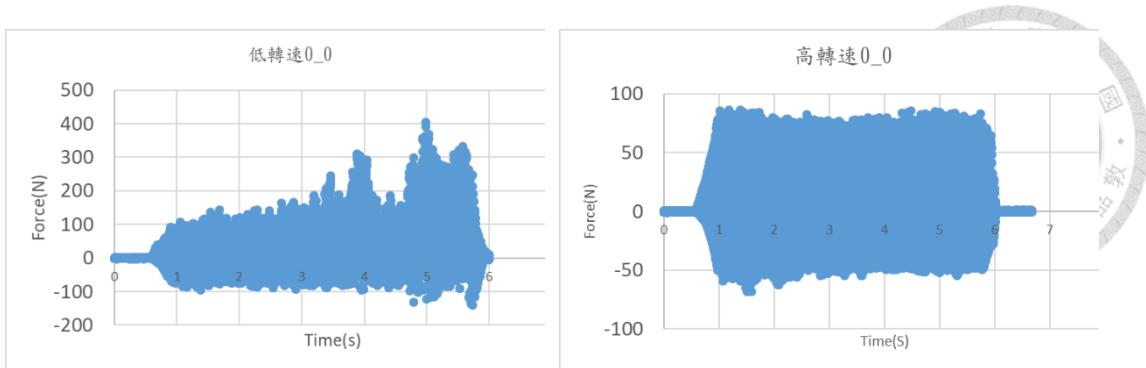


圖 72 刀具無傾斜時高低轉速切削力對比

因為機台限制與廠商建議，使用高轉速切削時降低了進給，所以切削力理論值較小。圖 72 中可以看到高轉速切削下整體切削力穩定，無漸增現象。

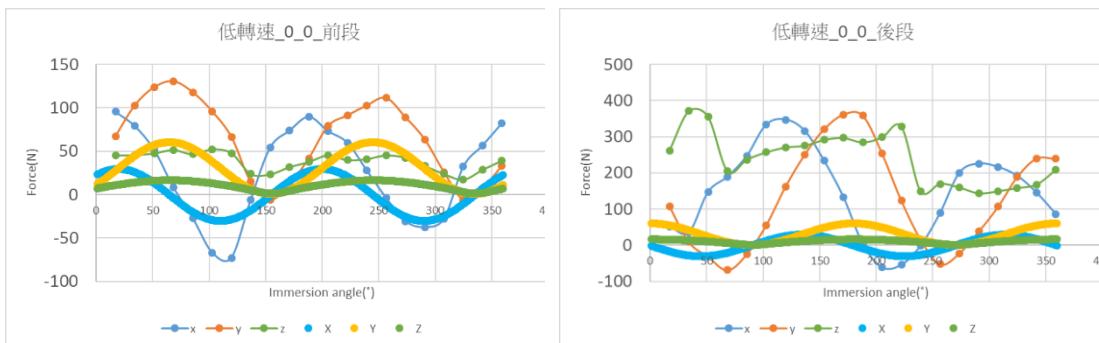
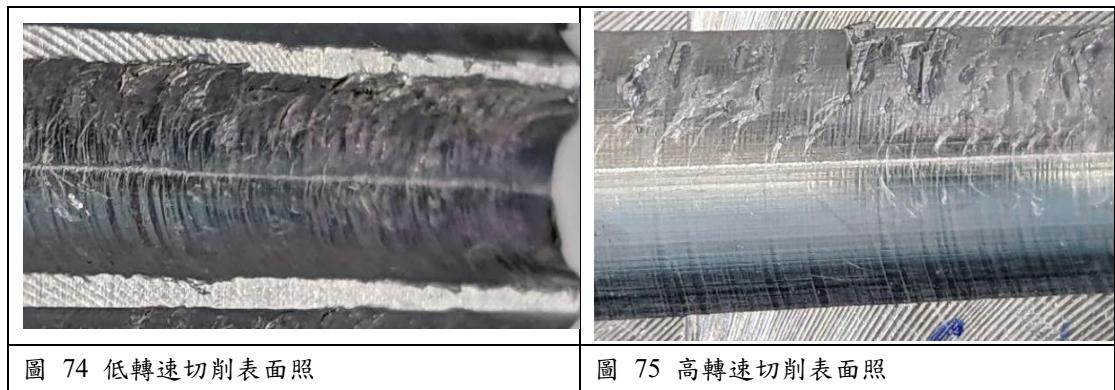


圖 73 低轉速無傾斜切削時的邊緣力大小



比對圖 69 與圖 73，在高轉速切削以及低轉速切削前段，邊緣力的大小都約為剪切力的 100%，兩者趨勢相似，但低轉速切削時邊緣力持續增大，最大時邊緣力達到剪切力的 600%，而高轉速整體切削狀況較穩定。圖 74 與圖 75 的表面狀況對比可以看到低轉速切削的粗糙範圍較大且較密集，高轉速切削時的粗糙範圍較小且較稀疏。

刀具軸向改變也會造成切屑厚度改變，以下以切削區域的左、中、右、下四個位置的切屑厚度來討論。位置標示於圖 76 中。

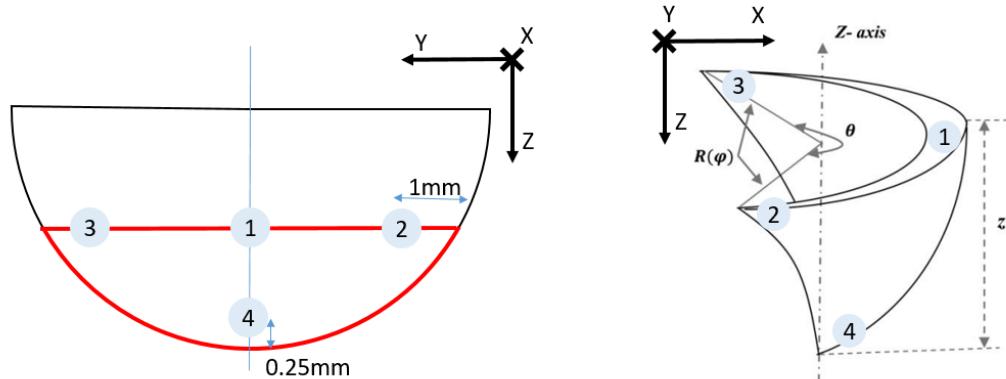


圖 76 切屑厚度討論點位置示意圖[13]

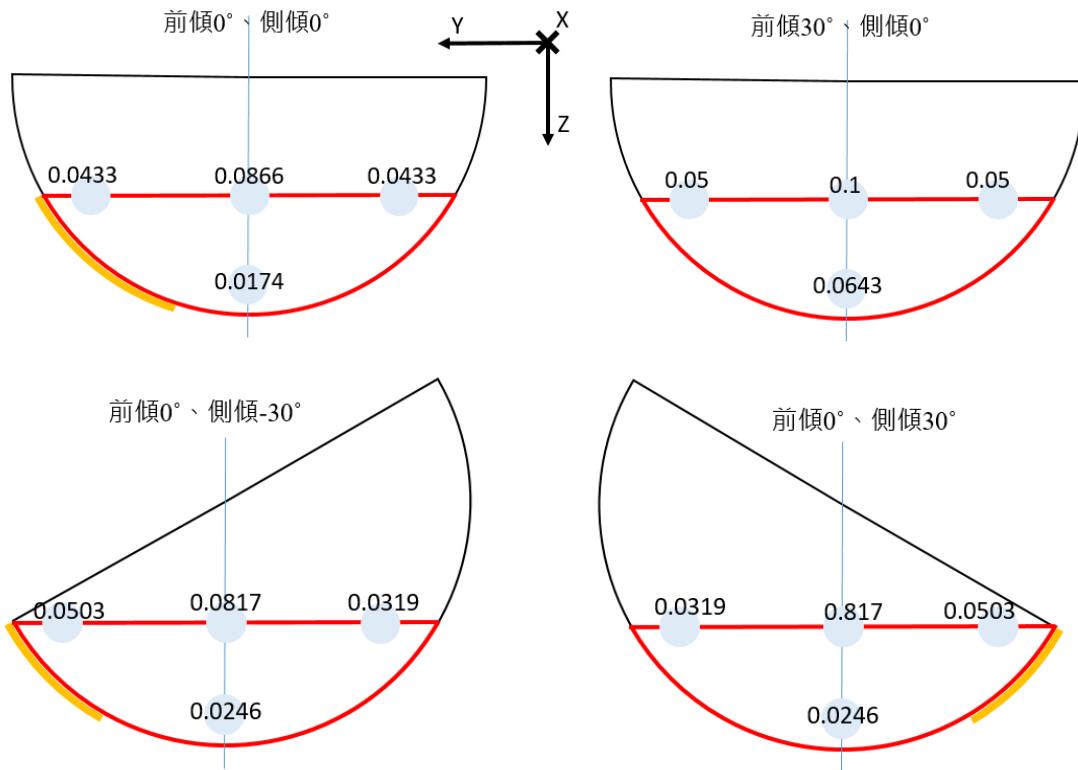


圖 77 不同刀具軸向下的切屑厚度

刀具前傾時，切削區域底部的切屑厚度變化最大，側邊的變化較小。側傾時刀具傾向的那一側切屑厚度增加，另一側厚度減少，在切屑厚度較厚的那一側表面較為粗糙。



5.5.2 小結

本研究的切削力模型因不考慮刀具磨耗，不計算邊緣力(edge force)，只計算剪切力(shear cutting force)，透過與實際加工量測到的切削力比對即可知道在該刀具軸向下邊緣效應(edge effect)的大小。以實驗結果整理不同刀具軸向進行加工的表面狀況，歸納前傾角(lead angle)與側傾角(tilt angle)的對切削狀態之影響。

前傾角對切削狀態之影響，根據 5.1 小節與 5.2 小節的結果來看，前傾角為零的情況下進行加工會因為刀尖接觸工件表面處切削速度過慢，產生摩擦與犁切現象導致邊緣效應顯著，使得切削力穩定度與表面品質普遍都不佳。而在 5.3 小節與 5.4 小節使用前傾角大於零的角度進行加工，使用角度從 5° 至 30° ，從實驗結果發現當前傾角為正的前傾加工，因為避免刀尖接觸，邊緣效應對整體切削力的影響不大，切削力不會有太大的起伏，十分穩定。而在表面粗糙度的表現上可以發現傾斜角度較小(小於 10°)的實驗工件品質較差，而使用較大的前傾角表面品質較佳。

而在側傾角的選擇上，最值得注意的特性在於正負的差異。5.1 小節顯示了當刀具沒有傾斜進行槽銑加工的話，面向刀具前進方向的兩側會留下較大的表面傷害，表面粗糙度也較差，且左側表面品質較右側差。本研究使用的刀具為順時針旋轉，切削方向的左側是類似於逆銑(up-milling)的刀具接觸方式，該處的切屑厚度從最薄開始漸增，且因為使用的刀具是球刀，越接近側邊的切屑增加率越大，而且排屑方向是往前方也就是未切削的方向，無法前進的切屑可能會往側邊移動產生擠壓或堆積現象，所以左側的表面品質較容易受到影響。根據文獻[9]中提到切屑厚度接近零的位置會有犁切效應產生，且文獻[6]中提到刀具切入處較容易發生切屑堆積沾黏，與本研究的實驗結果與討論相符。當刀具軸向選擇側傾角為負時，刀具切入處位於左側，而切出處會從右側往前方移



動，造成工件左側的表面粗糙度會較差。而刀具軸向選擇側傾角為正時，刀具切入處位於前方，發生切屑堆積的痕跡會被下一刀切削移除，切出處則是位於右側留下磨擦痕跡，所以工件右側的表面粗糙度比較差。正向與負向的側傾角差異就在於切屑堆積與摩擦現象會在工件的右側還是左側造成影響而導致表面粗糙。當在刀具路徑規劃時可以根據工件的哪一側表面要求較高來挑選側傾角。而左右兩側要求相同時側傾角正向可能是比較好的選擇，表面粗糙狀況較規律，而側傾角為負時加工的表面會因為切屑堆積導致隨機出現瑕疵。

根據本研究的實驗結果與討論，建議的傾斜角度綜合大於 20° ，且前傾角不能為 0° ，側傾角的正向增加會在表面右側產生規律的刀痕，負向增加則是會於表面左側有隨機的切屑沾黏與摩擦造成的瑕疵。因此在挑選刀具軸向時會希望先增加前傾角，如果因為形狀限制前傾角不能大於 20° 時則增加側傾角，側傾角的左右選擇依照希望哪一側留下較好的表面，選擇往反方向傾斜，例如希望刀具右側的表面平整，則選擇側傾角為負向左傾斜。以這個基準來設定刀具軸向可減解少切削時邊緣效應的產生，提升切削的品質。

把切削力大小的變化與表面狀況的變化彙整，以本研究的實驗數據為基礎，可以將刀具軸向對切削狀態之影響整理出下：

圖 78 顯示了在不同刀具軸向下，邊緣力與剪切力的大小關係。當前傾角為零時，邊緣力大小為剪切力的 60%以上，當綜合刀具傾斜小於 10° 時，邊緣力的大小約為剪切力的 10%至 20%。當傾斜角度更大時，邊緣力則幾乎消失。

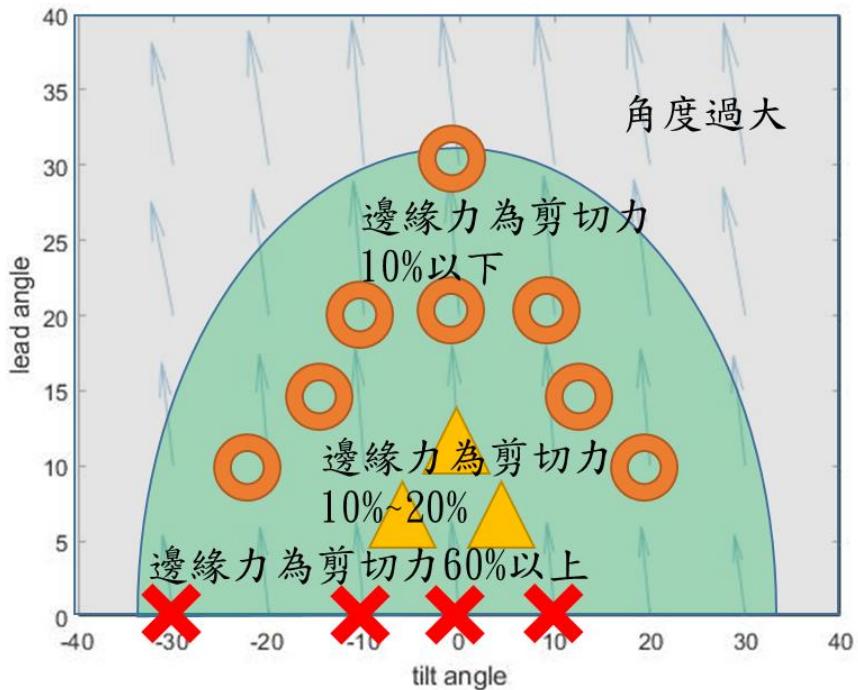


圖 78 不同刀具軸向下的邊緣力變化

圖 79 顯示了不同刀具軸向下，表面狀況的變化。傾斜角度較小且側傾角為負時表面較為粗糙。傾斜角度大且側傾角為負時會有不規則的瑕疵，側傾角為正則是會有穩定刀痕。前傾角大於 20° 且側傾角為零時表面狀況良好。

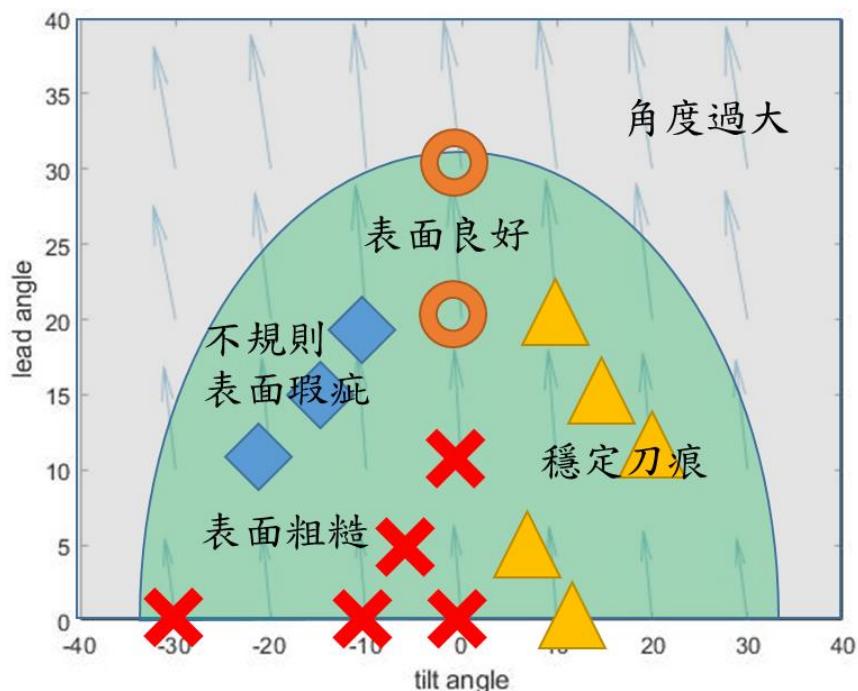


圖 79 不同刀具軸向下的表面狀況



第六章 結論與未來展望

6.1 結論

本研究目標探討刀具軸向對切削狀態之影響，包括切削力的變化以及表面品質的變化。本研究首先以理論計算刀具軸向改變時的切削力，模型中只計算剪切力(shear cutting force)不考慮邊緣力(edge force)，透過實際量測的切削力與模型數據比較可以了解不同刀具軸向下邊緣力占整體切削力的比例大小，找出可減少邊緣效應的刀具軸向。本研究的切削實驗透過在工件下方安裝動力計量測實際切削力，以實驗蒐集相同切削條件下使用不同的刀具軸向加工，切削力大小及方向的數據，藉此對照模型計算的切削力來確認邊緣力的大小。並利用表面粗度儀量測切削實驗後的工件表面狀況，分析不同刀具軸向切削後的表面品質。結合刀具軸向對於切削力與表面的變化，歸納五軸加工時刀具軸向對於切削狀態之影響。

根據模型計算與實驗結果，可整理出使用球刀進行槽銑時刀具軸向對切削狀態之影響。前傾角(lead angle)接近零的時候因為刀尖接觸工件產生切屑摩擦與犁切現象，導致實際切削力大於模型計算數據，代表邊緣效顯著，且工件表面出現較大的表面瑕疵。當前傾角增加，表面粗糙度也會有變小的趨勢且切削力接近模型計算數據，可見增加前傾角會減少邊緣效應的影響。在前傾角較小時增加側傾角(tilt angle)以提升整體的傾斜角度，也能避免刀間接觸來減少邊緣效應導致的表面粗糙。但是在前傾角較大時增加側傾角反而會增加刀具切入處和切出處對表面的接觸造成切屑堆積而留下瑕疵。當側傾角往正向增加時因為刀具切出處位於工件右側留下穩定的刀痕，形成規律的波浪狀表面。而當側傾角往負向傾斜時，則是因為刀具切入處位於工件左側，導致該處留下不規則的表面瑕疵，雖然表面粗糙度數值看似很好，但其實是因為瑕疵出現的位置很

隨機所以不一定能用粗度儀量測到。而側傾角的正負選擇可以依據工件形狀來調整，將刀具傾向表面要求較低的一邊，另一邊就能留下較好的表面品質。



6.2 未來展望

切削加工時的影響因素非常多，本研究探討的刀具軸向對切削狀態之影響還有能改善提升之處，未來如果有更加深入研究時如果能根據以下幾點作提升相信會更加完善：

- (1) 本研究在設計切削力計算模型時不考慮邊緣效應，使用實驗量測與比對的方式了解不同刀具軸向下邊緣效應對於切削力與工件表面的影響。後續研究可以增加不同條件的切削實驗，以計算邊緣力切削參數，使得可以利用模型直接計算不同刀具軸向下的剪切力與邊緣力。
- (2) 本研究專注於直線槽銑的分析，但實際加工上使用順銑或逆銑的場合也非常多，路徑也更加複雜。未來研究可以包含端銑實驗，探討順銑與逆銑的場合，以及探討更複雜的加工路徑，像是使用 S 形載具進行實驗，各種情況下刀具軸向對切削狀態之影響。
- (3) 本研究的切削力計算模型與切削實驗皆只使用刀具前端球形部分，未來研究可以加入討論切深更大或是刀具軸向更大時，使用刀具後段圓柱形部分進行切削的研究。
- (4) 實驗結果可以發現不同刀具軸向會影響切屑的排除方向，文獻中也有提過切屑形狀可能會有所不同。未來實驗時可以更仔細記錄排屑的方向以及蒐集切屑，藉此能夠更了解表面粗糙形成的原因。
- (5) 本研究在量測切削力使用動力計量測，動力計在安裝上比較麻煩，需要先將實驗工件加工成能夠鎖固於動力計上的形狀。如果能夠使用智慧刀把或是量測電流訊號代表切削力，取代動力計的功能，可以簡化實驗的步驟，也更有機會開發線上量測，實現及時調整刀具軸向。



參考文獻

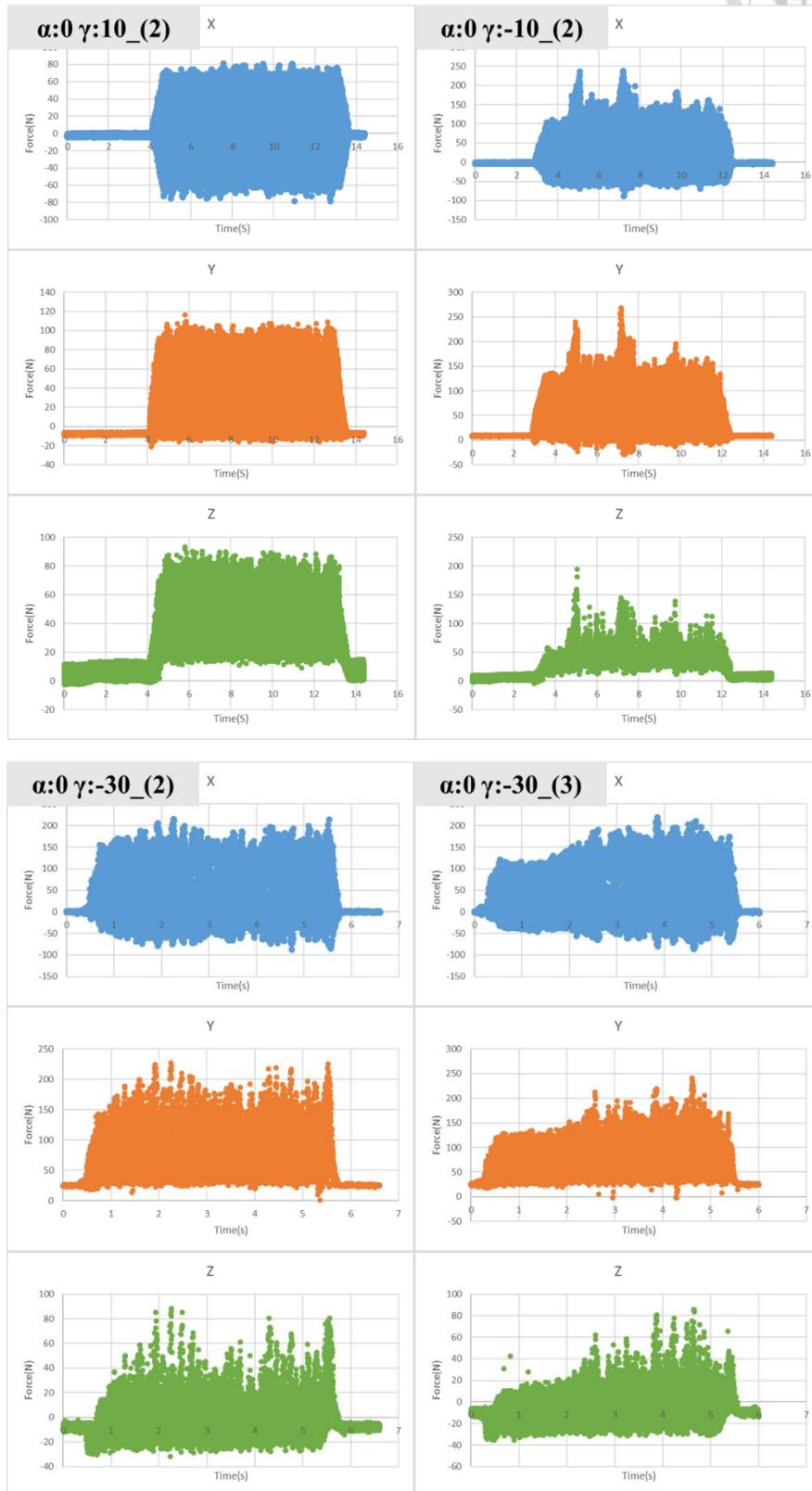
- [1] Erdem Ozturk, L. Taner Tunc, Erhan Budak,"Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes."International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 1053–1062.
- [2] E.Ozturk,E.Budak,"Modelling of 5-Axis Milling Forces."Sabanic University Istanbul,Turkey.
- [3] Changfeng Nan,Dongsheng Liu," Analytical Calculation of Cutting Forces in Ball-End Milling with Inclination Angle."
- [4] Tao Huang, Xiao-Ming Zhang, Han Ding," Tool orientation optimization for reduction of vibration and deformation in ball-end milling of thin-walled impeller blades." ScienceDirect, Procedia CIRP 58 (2017) 210 – 215.
- [5] Adnen Laamouri, Farhat Ghanem, Chedly Braham, Habib Sidhom. "Influences of up-milling and down-milling on surface integrity and fatigue strength of X160CrMoV12 steel."International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Verlag, (2019),1209-1228.
- [6] Anshan Zhang,Caixu Yue,Xianli Liu,Steven Y. Liang" Study on the Formation Mechanism of Surface Adhered Damage in Ball-End Milling Ti6Al4V." Materials, November 2021.
- [7] Szymon Wojciechowskia, Radoslaw W. Marudab, Piotr Nieslonyc, Grzegorz M. Krolczyk." Investigation on the edge forces in ball end milling of inclined surfaces." International Journal of Mechanical SciencesVolume 119,December 2016, 360-369.
- [8] Marek Sadilek, Jiri Hajnys." The Analysis of Accuracy of Machined Surfaces and Surfaces Roughness after 3axis and 5axis Milling."Manufacturing Technology December 2018.

- [9] M. Fontaine , A. Devillez, A. Moufki, D. Dudzinski." Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool–surface inclinationPart II. Influence of cutting conditions, run-out, ploughing and inclination angle." *Journal of Materials Processing Technology* 189 (2007) 85–96.
- [10] Dimitrios Vakondios,Panagiotis Kyratsis,Suleyman Yaldiz,Aristomenis Antoniadis," Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6,"
- [11] G.M. Kim, B.H. Kim, C.N. Chu," Estimation of cutter deflection and form error in ball-end milling processe." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 917–924.
- [12] Yusuf Altintas,"Principles of Machining Engineering and Practice."University of British Columbia - Manufacturing Automation Laboratory(2015) 39.
- [13] Harshad A. Sonawane, Suhas S. Joshi," Analytical modeling of chip geometry and cutting forces in helical ball end milling of superalloy Inconel 718." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3 (2010) 204–217.

附錄

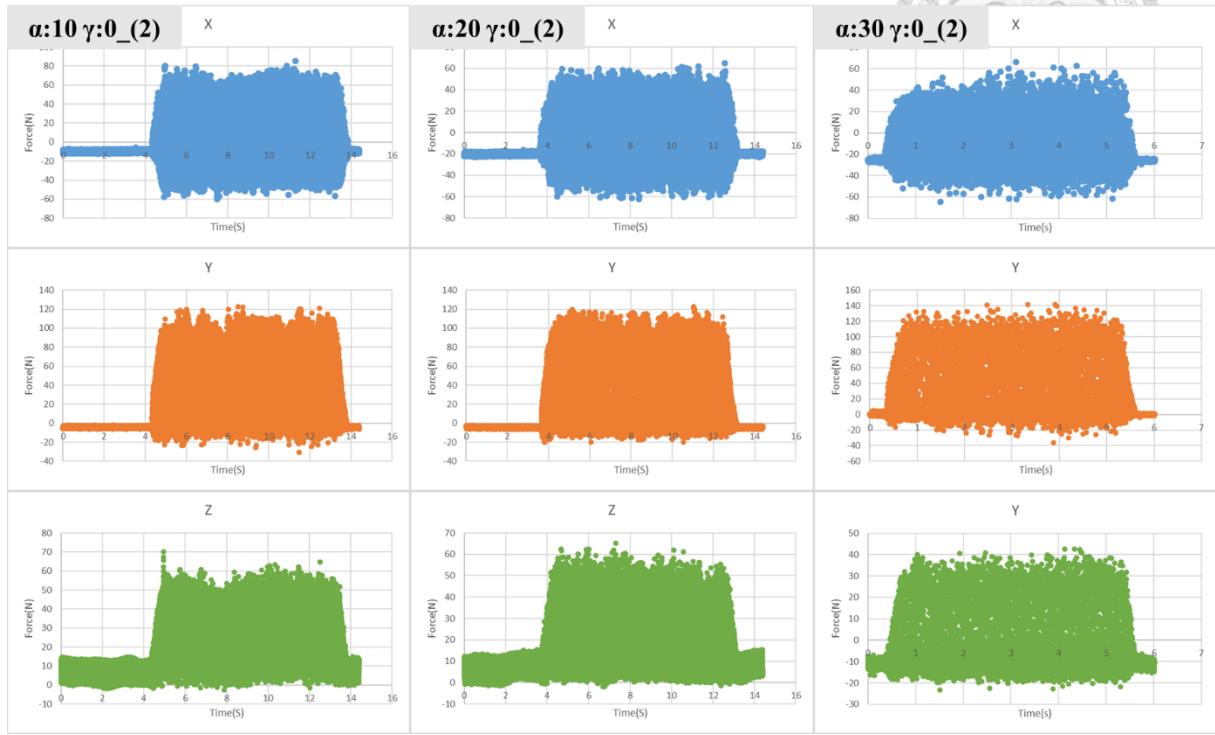


5.2 節中未放入的動力計數據:

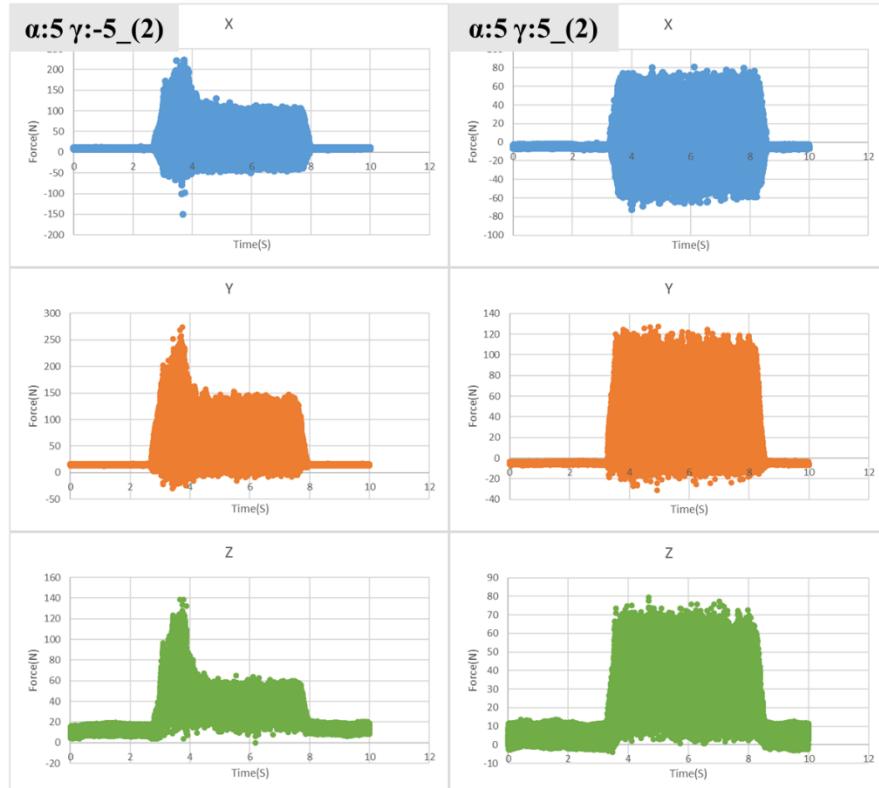


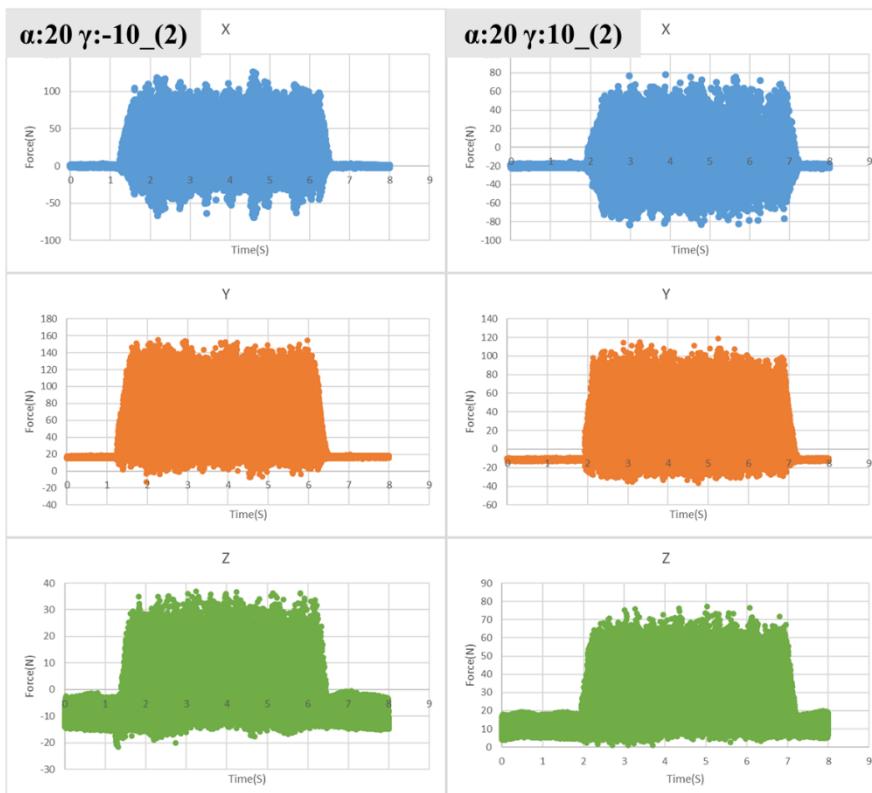
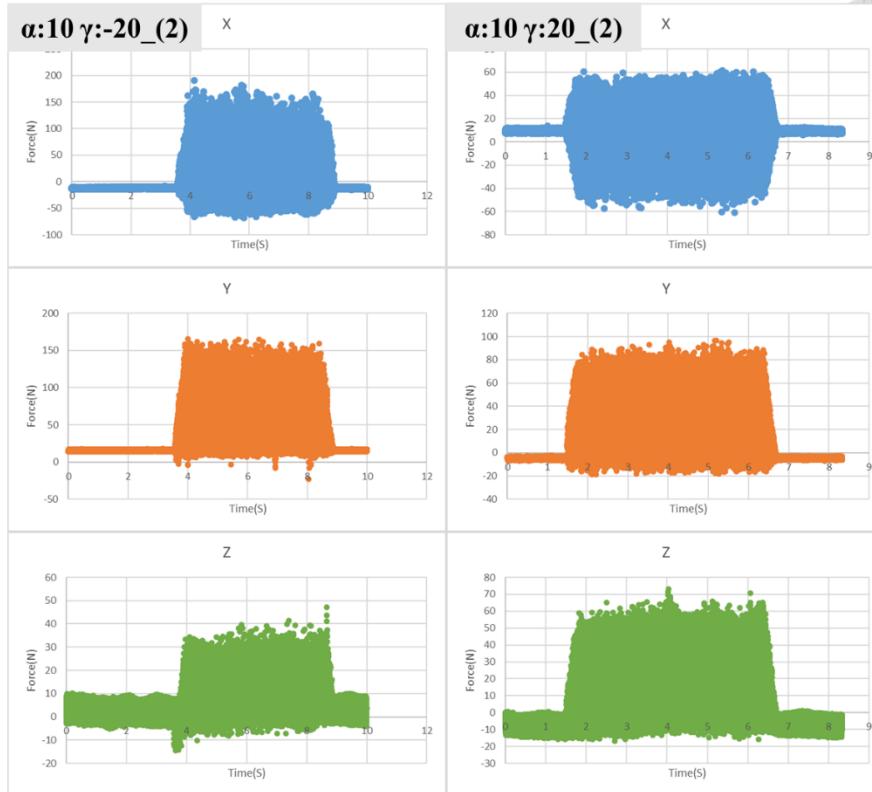


5.3 中未放入的實驗數據

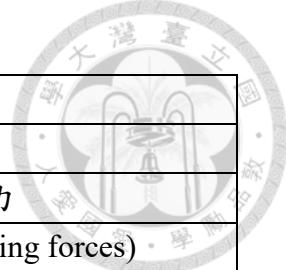


5.4 中未放入的實驗數據





符號表:



α	前傾角(Lead angle)
γ	側傾角(Tilt angle)
dF_t 、 dF_r 、 dF_a	tangential、radial、axial 方向的瞬間切削力
K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac}	剪切力切削係數(cutting constants for shearing forces)
K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae}	邊緣力切削係數(cutting constants for edge forces)
h	切屑厚度(chip thickness)
db	單位面積內的寬度(width of a discrete disc)
ds	單位面積內的長度(length of a cutting edge)
$incx$	工件座標系統中與 X 軸的夾角
$incy$	工件座標系統中與 Y 軸的夾角
a	切削深度
R	切削刀具半徑
K	球刀上位置高度角
K_1 、 K_2	切削範圍最低、最高高度角
K_i	切削寬度最大處的高度角
\emptyset_{st} 、 \emptyset_{ex}	開始切削角、結束切削角
\emptyset	刀具順時旋轉角度
\overline{F}_x 、 \overline{F}_y 、 \overline{F}_z	X、Y、Z 方向上平均切削力
N	切削刀具刃數
c	進給