

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

等負載加工之參數訂定策略

Cutting parameters setting strategy for constant load
milling process

蔡穎德

Ying-Te Tsai

指導教授：李貫銘 博士

Advisor: Kuan-Ming Li, Ph.D.

中華民國 109 年 6 月

June, 2020

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

等負載銑削加工之參數訂定策略

Cutting parameters setting strategy for constant load
milling process

本論文係蔡穎德 君 (R07522701) 在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 109 年 06 月 23 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

李貫銘

李貫銘

(簽名)

(指導教授)

廖運炫

廖運炫

蔡曜陽

蔡曜陽

系主任

黃美嬌

(簽名)

致謝



碩士班的這兩年要感謝許多人的幫助、支持及陪伴，讓我順利完成碩士學業。首先，要感謝我的指導教授李貫銘教授，在研究的過程中提供我許多寶貴的經驗與知識，讓我可以再研究中充實自己。並且，我也要謝謝楊宏智教授在研究中給予我建議與方向，也教導我很多研究以外的寶貴知識。

感謝口試委員台灣大學廖運炫教授與蔡曜陽教授，在百忙之中撥冗參加學生的口試，並給予寶貴的建議與指教，使本論文更加完善。

謝謝呈毅與力維學長知識的傳承，讓我的研究能更順利與豐富。感謝實驗室助理鍾小姐兩年來對於我生活與研究上的照顧與鼓勵。謝謝學長貫毅、志和的照顧與鼓勵，教導我許多人生道理。謝謝實驗室同窗子耀、俞亘、卜綺、浚惟、溫雅、禮揚、皓倫、威漢在課業、研究與生活上的陪伴。也謝謝學弟翰霖在研究上的協助，讓研究能順利推進。

最後，感謝家人的支持，沒給我太多生活上的壓力，並讓我自由發展我的校園生涯，謝謝你們當我最堅強的後盾。最後，感謝台大這兩年來的相伴。

摘要



隨著工具機技術越來越成熟，銑削加工製程應用也日趨廣泛。傳統銑削加工通常會考慮加工中最嚴苛的加工條件，固定主軸轉速與進給率進行加工，以避免工件、機台、刀具損壞。其過程雖確保加工製程的穩定性，卻也因為使用了較為保守的加工參數，使得加工效率並未達到最佳化。藉由適應性控制適時調整進給率的變化來維持等負載進行加工，可以有效提高加工效率。

文獻對於等負載加工控制系統，多集中於探討控制器設計與演算方法，較少針對等負載加工中刀具磨耗、表面粗糙度、與加工訊號之關係進行探討。因此，本研究擬建立進給率與刀具磨耗之關係，並進一步以此關係做為等負載加工參數設定的準則以及加工中刀具磨耗監測之參考。

本研究中提出一套設定等負載銑削加工參數：進給率上限、進給率下限以及主軸參考電流的設定方法。以刀具強度與表面粗糙度為參考，設定適合的進給率上限與主軸負載電流。再者，以刀具磨耗或破壞為基準，設定判斷加工結束與換刀之進給率下限，達到在等負載加工中，以進給率下降幅度作為換刀參考指標之目的。實驗結果顯示，本研究建立之等負載加工參數，能以等負載加工中之進給率作為刀具磨耗之監測指標，並且可於進給率到達設定之下限值時，控制刀具磨耗於設定之範圍內，防止刀具過度磨耗產生之加工風險。該加工參數訂定流程，亦可適用於槽銑、端銑與兩者之混合加工中，並且皆能達到利用進給率作為刀具磨耗監測之目的。再者，與等進給率加工比較，本研究所提出之參數訂定流程，亦能在加工中有較優異刀具壽命與材料移除率。

關鍵字：等負載控制、主軸負載電流、刀具磨耗

Abstract



The application of milling process has expanded rapidly as CNC technology advanced. Traditionally, constant spindle speed and feedrate has been widely adopted in milling, which are conservative cutting conditions, in order to prevent machine, workpiece and cutting tool failure. This method ensures the stability and reliability of the milling process, but on the other hand prevents engineers to further improve machining efficiency. However, through adaptive cutting force control system, it's possible to increase machining efficiency through adjusting feedrate during machining process.

Although there are plenty of researches regarding adaptive cutting force control, those researches focus on the design of controller and their computational algorithm, few of them discuss the relation between control signals, surface roughness and tool wear. This research will establish the relation between feed rate, spindle current and tool wear. The relation can serve as a reference when setting machining parameters and tool wear monitoring in adaptive cutting force control.

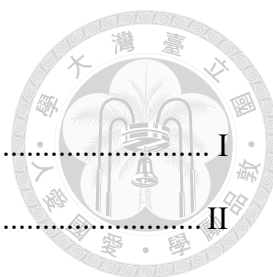
This research proposes a method to set machining parameters in constant cutter load machining: feedrate upper limit, feedrate lower limit, spindle current. Feedrate upper limit and spindle current is set to sustain cutting force under tool strength and surface roughness under specification. Feedrate lower limit is set to provide tool wear information that can sustain tool wear condition within certain range to prevent severe and unstable tool wear. Experiment results show that machining parameters setting method proposed in this research are able to keep tool wear within the setting value when feedrate decrease to feedrate lower limit, preventing potential risk of tool failure. The machining parameters setting method can be adapted to slot milling, end milling and the combination of both milling methods. In comparison with constant feedrate

machining, the constant cutter load machining parameters proposed in this research have better performance in both tool life and material removal rate.



Keywords: constant cutting force control, spindle current, tool wear

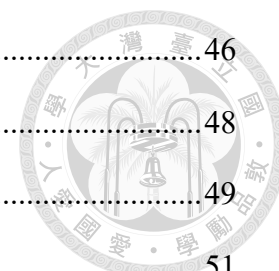
目錄



口試委員審定書.....	I
致謝.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	IV
圖目錄.....	IX
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.....	3
1.3 研究架構.....	4
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 適應性控制技術.....	5
2.1.1 最佳化適應性控制.....	5
2.1.2 有限制性適應性控制.....	6
2.1.3 幾何適應性控制.....	6
2.2 等切削力技術.....	7
2.2.1 動態系統建立.....	7
2.2.2 控制器設計.....	8
2.3 刀具磨耗診斷.....	9
2.4 小結.....	10
第三章 研究方法.....	11
3.1 研究流程.....	11
3.2 系統設備規格.....	13
3.2.1 立式加工機.....	13



3.2.2	訊號擷取卡.....	14
3.2.3	數位類比轉換器.....	15
3.2.4	電流鉤表.....	17
3.2.5	CCD 攝影機.....	18
3.2.6	千分錶.....	19
3.3	控制系統架構.....	20
3.4	控制器設計.....	22
3.4.1	PI 控制器.....	23
3.4.2	Labview.....	24
3.5	等負載銑削參數之選定流程.....	26
3.5.1	進給率與主軸電流之設定.....	26
3.5.2	常見之換刀時機.....	28
3.5.3	可監測刀具磨耗之等負載銑削加工設定流程.....	29
3.6	刀具磨耗.....	31
第四章	實驗規劃.....	33
4.1	等進給率實驗.....	35
4.1.1	參考電流.....	35
4.1.2	進給率上限.....	35
4.1.3	進給率下限.....	39
4.2	控制器設計與效果驗證.....	42
4.3	等負載加工驗證實驗.....	43
4.4	載具加工驗證實驗.....	43
第五章	實驗結果與討論.....	45
5.1	等負載加工參數選定流程 – 槽銑.....	45
5.1.1	主軸參考電流.....	45



5.1.2	表面粗糙度.....	46
5.1.3	進給率上限.....	48
5.1.4	進給率下限.....	49
5.2	等負載加工驗證 – 槽銑.....	51
5.2.1	等負載控制驗證.....	51
5.2.2	換刀時機驗證.....	55
5.2.3	材料移除率與刀具壽命.....	60
5.2.4	小結.....	61
5.3	等負載加工參數選定流程 – 端銑.....	62
5.4	等負載加工驗證 – 端銑.....	64
5.4.1	等負載控制驗證.....	65
5.4.2	換刀時機驗證.....	67
5.4.3	材料移除率與刀具壽命.....	69
5.5	載具加工驗證實驗.....	71
第六章	總結與未來展望.....	76
6.1	總結.....	76
6.2	未來展望.....	76
	參考文獻.....	78

圖目錄



圖 1 適應性控制器分類[3]	3
圖 2 研究流程	12
圖 3 CNC 加工機	13
圖 4 NSK Nakanishi NR-3060S 主軸	13
圖 5 NI NSB 6341 DAQ 擷取卡	14
圖 6 NI-9215 DAQ 擷取卡	15
圖 7 數位類比轉換器	16
圖 8 專用輸出端子版	16
圖 9 FLUKE i-200s 電流鉤表	17
圖 10 SAGE VISION HD4600 CCD Camera	18
圖 11 Mitutoyo 2109S-10 千分錶	19
圖 12 控制系統架構圖	20
圖 13 控制系統設備	21
圖 14 控制系統方塊圖	21
圖 15 控制系統架構簡圖	22
圖 16 適應性控制器程式之 block diagram	25
圖 17 適應性控制器人機介面	25
圖 18 加工機終端操作人員之換刀評估流程圖	29

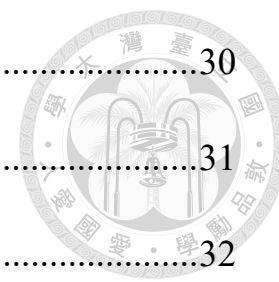
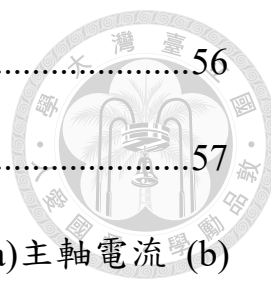


圖 19 等負載加工參數之示意圖	30
圖 20 刀具磨耗之拍攝方式示意圖	31
圖 21 磨耗量測示意圖	32
圖 22 碳化鎢銑刀	33
圖 23 槽銑加工示意圖	34
圖 24 端銑加工示意圖	34
圖 25 端銑刀之刀具幾何[30]	36
圖 26 刀尖凹角拍攝及量測情形	37
圖 27 等負載加工進給率上限示意圖	38
圖 28 新刀之進給率與主軸電流關係實驗數據[29]	38
圖 29 參考電流與新刀進給率關係示意圖	38
圖 30 進給率下限訂定方式示意圖	40
圖 31 刀具端面刀腹尺寸	40
圖 32 刀具磨耗 230 μm 發生之不穩定磨耗.....	41
圖 33 掃頻訊號方塊圖	42
圖 34 載具造型	44
圖 35 載具幾何尺寸、加工長度、刀具路徑	44
圖 36 等進給率槽銑加工 – 進給率 800mm/min 之主軸電流變化 ..	45
圖 37 等進給率槽銑加工 – 進給率 800mm/min 切削長度 2700mm 後	



之刀具磨耗.....	46
圖 38 等進給率槽銑加工 400 mm/min – 700 mm/min 之主軸電流訊號.....	46
圖 39 槽銑加工進給率與表面粗糙度之關係.....	47
圖 40 表面粗糙度之量測位置.....	48
圖 41 槽銑加工進給率與主軸電流之關係.....	48
圖 42 槽銑加工進給率 500mm/min 實驗結果 (a)主軸電流 (b)刀具磨耗.....	49
圖 43 槽銑加工進給率 400mm/min 實驗結果 (a)主軸電流 (b)刀具磨耗.....	50
圖 44 掃頻實驗結果之 (a)掃頻實驗原始訊號，(b)前處理後結果...52	
圖 45 系統識別與實驗輸出結果比較.....	52
圖 46 等負載切削槽銑加工之控制效果之 (a) 進給率 (b) 主軸電流訊號.....	53
圖 47 等負載切削槽銑加工 – 進給率到達下限後之 (a) 進給率 (b) 主軸電流 訊號.....	53
圖 48 等負載槽銑加工主軸電流.....	54
圖 49 等負載槽銑加工 (a)進給率 (b)刀具磨耗.....	55
圖 50 等負載切削槽銑加工之進給率達下限時之 (a) 進給率 (b) 主	



軸電流訊號.....	56
圖 51 等負載槽銑加工之進給率與主軸電流訊號.....	57
圖 52 等負載槽銑加工 – 進給率下限 400 mm/min 之(a)主軸電流 (b) 進給率 (c)刀具磨耗	59
圖 53 等負載切削槽銑加工 – 進給率達下限 400 mm/min 之即時訊 號(第 14 道加工)	60
圖 54 等進給率 400mm/min 與等負載槽銑加工之磨耗比較	61
圖 55 等進給率端銑加工 – 進給率 1000 mm/min 之主軸電流變化	62
圖 56 等進給率端銑加工 – 進給率 1000 mm/min 電流上升至 0.298 A 之刀具磨耗	62
圖 57 端銑加工新刀具進給率與主軸電流之關係	63
圖 58 等進給率端銑加工進給率 600 mm/min 與 700 mm/min 之 (a) 主軸電流 (b)刀具磨耗	64
圖 59 等負載切削端銑加工之控制效果	65
圖 60 等負載切削端銑加工 – 進給率到達下限後之 (a) 進給率 (b) 主軸電流 訊號	66
圖 61 等負載端銑加工主軸電流	66
圖 62 等負載端銑加工 (a)進給率 (b)刀具磨耗.....	67
圖 63 等負載端銑加工之進給率與主軸電流訊號	68

圖 64 等進給率與等負載端銑加工之磨耗比較	70
圖 65 等進給率端銑加工 – 進給率 800 mm/min 之主軸電流	70
圖 66 進給率 800 mm/min 之刀具 chipping 現象	70
圖 67 實驗(一) 進給率達下限之加工道次	72
圖 68 載具加工實驗(一)換刀前之加工訊號 (a) 進給率 (b) 主軸電 流	72
圖 69 載具加工實驗(一) 進給率達下限時之刀具磨耗影像	73
圖 70 實驗(二) 進給率達下限之加工道次	73
圖 71 載具加工實驗(二)換刀前之加工訊號 (a) 進給率 (b) 主軸電 流	74
圖 72 載具加工實驗(二) 進給率達下限時之刀具磨耗影像	74
圖 73 載具加工實驗成品	75



表目錄



表 1 CNC 規格表.....	13
表 2 NI USB-6341 規格表.....	14
表 3 NI 9215 規格表.....	15
表 4 數位類比轉換器規格表.....	16
表 5 專用輸出端子版規格表.....	16
表 6 電流鉤表規格表.....	17
表 7 SAGE VISION CCD 規格表.....	18
表 8 碳化鎢立銑刀規格.....	34
表 9 等負載槽銑加工之加工參數.....	51
表 10 等負載槽銑加工進給率達下限之刀腹磨耗數值結果.....	58
表 11 等負載端銑加工之加工參數.....	64
表 12 等負載端銑加工進給率達下限之刀腹磨耗結果.....	69
表 13 載具加工使用之加工參數表.....	71




第一章 緒論

1.1 研究背景

在工業化與工具機數值化的今日，電腦數值控制(Computer Numeric Control, CNC)工具機之加工製程設計有了電腦輔助設計(Computer Aided Design, CAD)與電腦輔助製造(Computer Aided Manufacturing, CAM)的幫助，使工程師可將產品設計與製程藉由電腦快速達成任務。此外，工具機隨著軟硬體技術的升級，已發展出更友善之人機操作介面、更快的資料處理速度、高主軸轉速、高進給率、多軸加工等功能，增加工具機的應用範圍。目前國內工具機廠商之硬體技術與生產品質，在國際已佔有一席之地。然而，國外大廠除了升級硬體設備之性能與可靠度之外，亦在工具機控制器上導入許多軟硬體整合之功能，提升工具機的附加價值。因此，除了硬體設備之升級外，吾人認為國內工具機下一個轉型的機會就是將軟硬體整合與製程整合等高附加價值的功能導入機台，提升台灣工具機之國際能見度。

在感測器與資料處理技術成熟與成本降低後，加工製程監控之可行性與經濟效益逐漸提升。感測器經過資料擷取、訊號分析及可視化後，可進一步搭配回授控制系統，用於加工製程的監控或是以適應性控制進行加工，可以提升加工效率、品質與製程穩定性。切削加工領域之研究，最為常見的監控物理量為以動力計所量測之切削力訊號[1][2]，加工製程中的刀具磨耗、表面形貌等因素皆與切削力訊號有關聯，使得切削力訊號為切削加工最具代表性的參數。

傳統之 CNC 切削加工參數，多仰賴刀具廠商提供之加工參數手冊。而工廠實際的加工參數，仍需由有經驗的操作人員經切削試驗後決定符合製程需求的參數。經過長期經驗的累積與傳承，在業界已經建立許多加工資料庫以及人工判斷加工狀況的準則。然而，仰賴人為經驗作為加工參數訂定的標準，會為了避免機台受損、刀具破壞，造成工件精度與表面品質受到影響而趨於保守。



為了提升加工效率、品質與經濟效益，適應性控制(Adaptive Control)的概念於 1960 年代被提出[3]，而適應性控制系統主要可以被分為三個種類，如圖 1 所示。有限制性適應性控制(Adaptive Control with Constraint, ACC)、最佳化適應性控制(Adaptive Control with Optimization, ACO)跟幾何適應性控制(Geometric Adaptive Control, GAC)；ACC 用來在特定的製程或系統限制(例:最大容許切削力)之下，找出最好的製程參數(例:進給率、主軸轉速)。通常透過安裝各種感測器如動力計或主軸功率感測器擷取加工過程中各種具有代表性物理意義之訊號，並且即時對加工參數進行修正；ACO 則主要討論加工表現的最佳化，目的是為了達到最高的產能或經濟效益；GAC 主要是用於精加工，透過即時補償刀具的變形及磨耗情形，GAC 可以使加工結果達到所需的表面形貌與尺寸精度並維持其穩定性與一致性[4]。

在過去的文獻當中，對於 ACC 控制系統已有過許多討論，過去的研究已證實等負載銑削加工與對於加工效率的貢獻，其原理為透過在切深較小時適當的調高進給率，維持主軸負載電流於設定之水平。除了維持切削力的穩定之外，還可以顯著提升加工效率。然而此系統仍未被廣泛使用，原因在於感測技術與控制系統可靠度的尚未成熟，以及控制器於加工過程中的穩定性仍有待加強等因素造成線上監控不易於實踐，是 ACC 於大規模生產中仍未普及的原因之一。

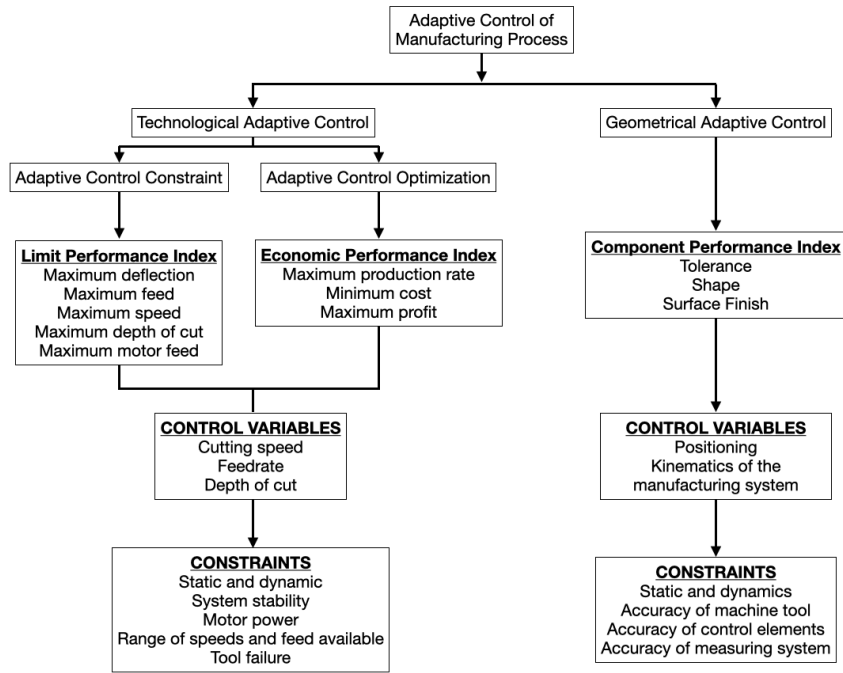


圖 1 適應性控制器分類[3]

1.2 研究動機與目的

近年來電子設備與感測器技術快速發展，大幅提升感測技術之可靠度，使工具機的加工監控技術更易於被採用；此外，針對穩定加工製程中切削力所設計之 ACC 系統，由於可穩定加工中的切削刀刀受力，在過去文獻中皆預期對於刀具壽命與穩定性具有正面幫助[5]。然而，近期對於 ACC 控制與刀具壽命的研究指出[6]，若期望提高刀具壽命與材料移除率，須考慮如何訂定 ACC 控制系統之主軸負載電流參考值與進給率上下限值。然而，過去之文獻亦多著墨於如何改良控制器與演算法設計，至於 ACC 應用於銑削加工之加工參數設定以及對於刀具磨耗之影響並無大篇幅之研究與探討。因為 ACC 系統的設計需要掌握工具機之系統動態特性，故過去的文獻中多半探討如何藉由工具機動態與控制理論的推導得出系統之動態特性，然而多數工具機零件的參數須經由製造商取得，且為了彌補切削行為的複雜作用所導致之動態系統的改變，文獻中[7]討論了各種不同的控制架構及控制器演算法，然而由於這些方法過於複雜，造成實際應用上亦有諸多困難。近期鄭力維[6]與鄭呈毅[8]使用對切削系統輸入進給率掃頻訊號之方法進

行系統識別，快速獲得進給率與主軸電流訊號間之系統動態方程式，並利用該方程式設計符合控制需求之等負載銑削 PI 控制器，達到快速獲得系統動態資訊與設計控制器之目的。因此，本研究亦使用此方法設計等負載切削控制器。

針對文獻中缺乏之等負載銑削加工參數設定方法，本論文以刀具磨耗監測為目標，以電流訊號取代切削力訊號建立等負載銑削加工中的製程參數之訂定流程，並探討對於刀具壽命與材料移除率之影響。參數之訂定透過等進給率實驗方式，探討刀具磨耗、刀具強度與主軸負載電流之關係，並從中探討合理之加工參數訂定策略。同時，本研究將等負載銑削加工所設定之加工參數應用於槽銑、端銑以及兩者混合之加工路徑，以實驗方式驗證加工參數訂定流程之正確性、刀具磨耗監測之準確性與重複性，並希望能以等負載銑削之進給率，作為加工中的換刀輔助資訊，減少切削加工需停機檢視刀具狀態的時間以及人為判斷換刀時機之誤判機會。

1.3 研究架構

本論文共有六章，分為：

第一章：緒論。介紹本文的研究背景、目的。

第二章：文獻回顧。首先介紹適應性切削技術，回顧切削動態系統的建立以及適應性控制器的設計。接著，呈現刀具磨耗監測相關的文獻。

第三章：研究方法。介紹研究流程、研究設備、控制器設計及本研究所提出的等負載銑削加工參數訂定流程。

第四章：實驗規劃。實驗時所使用的設備、加工條件與實驗策略。

第五章：實驗結果與討論。探討本實驗所提出的等負載銑削加工參數定流程是否能應用於槽銑、側銑與混合路徑之刀具磨耗監測，並且探討換刀之準確性與重複性。

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 適應性控制技術

工具機應用之適應性控制系統，其將適應性控制系統可分三大類[3]：有限制性適應性控制(Adaptive Control with Constraint, ACC)、最佳化適應性控制(Adaptive Control with Optimization, ACO)跟幾何適應性控制(Geometric Adaptive Control, GAC)，本節會對此三種方式進行介紹。

2.1.1 最佳化適應性控制

ACO 系統常用於增加加工效率與經濟效益。Koren [9]所提出之 ACO 系統利用量測到之進給率、主軸扭力、刀具溫度、機台震動，計算刀具磨耗率(Tool wear rate, TWR)與材料移除率(Material Remove Rate, MRR)，並加入各項加工成本，包含機台及操作員費用(Cost of Machine & Operator per Unit)、換刀與修整費用(Cost of Tool and Regrind per Change)、換刀時間 Tool Changing Time)，計算製程之性能指標(Performance Index)，並回授到電腦進行運算，透過 NC 控制器進行控制。ACO 在當時由於缺乏可以即時回傳加工資訊(例:刀具磨耗)之感測器，因此於應用上較為困難。

近年來由 Coppel 將所提出之 ACO 系統應用於微銑削(Micro-milling) [10]。該研究中的 ACO 系統是由動力計監控系統(Monitoring System composed of a Dynamometer)、基於類神經網路模型之評估系統(an Estimation Module with Artificial Neural Networks models)、基於演化式演算法之優化模型(an Optimization Module with Evolutionary Optimization Algorithm)及 CNC 等四個模組相互作用。將這些模組的資訊整合回控制器，其主要的應用為根據刀具磨耗狀況優化表面粗糙度與尺寸精度，並進而達到提升經濟效益之目的。



2.1.2 有限制性適應性控制

Adaptive control with constraints(ACC)之功能為將特定之加工參數維持於使用者訂定之目標值，如切削力、主軸扭力、主軸功率等。ACC 較適用於粗加工，其能夠在不同之加工條件（如切寬、切深、刀具磨耗）維持特定參數於目標值水平，並提升其他參數(如進給率)，以提高材料移除率(MRR)。ACC 在切削力與進給率的選擇上，通常會考慮在刀具材料機械強度之可承受切削力、扭力或主軸之最大輸出功率之範圍內，使一個以上的加工參數(如進給率、主軸轉速)達到最大值，使材料移除率或加工效率最大化。

ACC 常見的應用為在加工中維持等切削力、主軸扭力或主軸負載電流。以切削力為例，切削力加工訊號透過額外安裝之動力計將量測到的切削力訊號回饋至控制系統，當反饋值大於設定值，控制器即發出下降進給率的命令來維持切削力，保護刀具，使之不承受過大之切削力或扭舉造成破壞；相反的，當反饋值小於設定值，控制器就會發出提高進給率的命令，提升材料移除率。

Koren [9]基於車削加工，建立 ACC 等切削力控制系統，該系統能夠在切深增加時，將進給量往下降以維持等切削力。近年鄭呈毅[8]使用 ACC 等切削力系統之進給率變化監測表面粗糙度之狀態，當加工中刀具逐漸磨耗而產生較大之表面粗糙度時，控制器調低進給率使表面粗糙度維持，並使切削加工維持等切削力，同時可將進給率下降之幅度作為表面品質下降之指標。。

2.1.3 幾何適應性控制

GAC 之目標為維持表面粗糙度或尺寸精度於要求範圍內，適用對於加工要求較嚴苛之精加工。GAC 可應用於車削加工、銑削加工、磨削加工[9]。例如車削加工中，由於表面粗糙度同時為刀鼻半徑及進給率的函數，因此可藉由刀具磨耗造成之刀具幾何變化，適當調整進給率與磨耗補償，達到表面粗糙度與產品尺寸要求。而銑削加工中，由於切削加工會造成刀具偏擺，因此可對刀具偏擺量進

行補償，使尺寸精度達到要求。

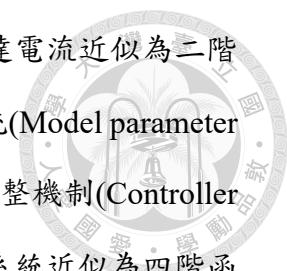


2.2 等切削力技術

適應性控制系統之設計與切削加工之可靠性需建立在對切削系統之了解與控制器設計之方法。過去有許多研究以實驗或理論推導方法得到切削系統動態特性，並驗證其在不同情境下切削加工之效能。而由於切削加工之刀具磨耗、切削深度、切削寬度會隨著製程規劃與工件設計有所不同，適應性控制器必須確保在不停變化之切削製程中能穩定控制切削力或主軸電流。

2.2.1 動態系統建立

過去文獻透過理論與實驗推導得到系統動態特性，系統動態特性可以包括切削加工之特性、進給驅動馬達特性、整體閉迴路控制特性等等。Lauderbaugh 及 Ulsoy [11]設計切削步階響應實驗，對進給率電壓輸入步階函數，觀察系統於固定與切深變化時之暫態響應。步階響應實驗結果指出，其切削動態系統為二階函數，再藉由實驗擬合出各項參數，如自然頻率、阻尼比與切削力，並設計 PI 控制器與線性模型參考系統(Linear Model Reference Controller, LMRC)控制器驗證結果，實驗結果顯示當切深改變以及工件材料改變由鋼材變為鋁合金時，於進刀後皆會有切削力過衝導致控制效果不佳的情況。Altintas [12]等人透過推導方式，將切削系統分為兩部分，第一部分為馬達進給驅動系統之動態，此系統為保護機台，避免床台過衝，通常可用高阻尼的二階函數近似，第二部分為銑削之動態特性，透過理論推導之結果為一階函數，兩部分結合後為三階轉移函數，之後再設計控制器，並以 X&Y 雙軸同動實驗驗證切深改變之控制效果。Stein[7]利用進給直流驅動馬達之電流建立該電流訊號與切削力的關係，其將馬達進給率控制系統視為一階函數。Kim [13]則利用進給率交流驅動馬達作為取代切削力作為加工監測之訊號，以理論推導進給率與馬達電流動態特性，並設計 PID 控制器，以提高實用性。Yang [14]等人藉推導主軸電流與切削力之關係，以主軸電流訊號取代動



力計並進行等切削力控制，並以理論及實驗數據將切削力與馬達電流近似為二階函數，其控制系統由設備模型(Plant model)、系統參數評估系統(Model parameter estimator)、強健伺服控制器(Robust servo controller)、控制器調整機制(Controller adjustment mechanism)四個系統所構成，並將整體閉迴圈控制系統近似為四階函數。Kooi [15]利用 G-code 製作偽亂數二進位數列(Pseudo Random Binary Sequence, PRBS)，進行切削力系統識別，其使用 ARMAX model 並得到切削力與進給率之間為一階 ARMAX model，並進行線性與非線性適應性控制。Charbonnaud [16]也使用 PRBS 訊號，識別伺服馬達進給系統與切削力之關係，得到 6 階函數，並設計 RST 控制器進行等切削力加工驗證。Yang [17]等人同樣使用 PRBS 訊號與 ARX model 進行伺服馬達系統鑑別，並利用掃頻訊號(即頻率隨時間改變的正弦波)進行系統驗證，得到伺服進給系統為五階轉移函數。

2.2.2 控制器設計

過去已有許多文獻探討等切削力控制器之設計，銑削加工之系統動態特性不只隨著刀具材料、工件材料、工具機狀態變化，也會與刀具磨耗與切削條件等加工狀況有關，並且會導致許多非線性的情況。因此，除了以傳統的控制方法進行等切削力控制外，也有文獻提出控制非線性系統的方法。

Spence and Altintas [18]透過切削理論模型建立切削力與進給率間之轉移函數設計等切削力控制器，並且以 CAD 所模擬出之刀具路徑，以切削理論計算切深或切寬變化時之切削力並回授到等切削力控制器提前降低進給率，預防切削條件變化造成切削力突增與刀具損壞。Yang 等人 [19]提出可調式增益控制器(Adjustable P control)作為等切削力控制器，其可針對切削條件的改變，即時調整控制器之增益值，並以微控制(Fine-control)取代積分控制(I control)，以彌補積分控制在縮小穩態誤差的同時可能會造成的進給浮動現象。Fussell and Srinivasa [20]提出以 MRAC (Model Reference Adaptive Control)為控制器設計方法，其基礎為銑削理論模型，並加入主軸偏擺、傾斜等切削狀態，其控制方法能有效控制切削

力，並於切削條件改變時，如切深、切寬，能有效抑制進給率的變化，使其不產生過衝現象。Fussell and Srinivasa [21]以其所提出的 MRAC 控制器與不同的控制器進行比較，包含固定增益值的 PI 控制器(Fixed-gain PI controller)、可調式增益值 PI 控制器(PI Controller with adjustable gain)、除法演算法(Division algorithm)，實驗的結果顯示固定增益值的控制器，由於無法針對加工過程中的變化即時調整控制器參數，效果最差，其餘三種方法中，除法演算法因為控制方法最簡單所以反應是最迅速的，而從實驗中控制器輸出的訊號平滑程度來看則 MRAC 是最好的。

近年來由於電腦運算速度大幅提升，因此也有學者提出其他控制方法，以達到等切削力控制之目的，並試圖解決進給率與切削力之間非線性且隨刀具磨耗改變的特性。近期 Zuperl 等人 [5]與 Liu 等人[23]提出了以類神經網路控制(Neural network control)設計等切削力控制器，並與其他傳統控制方法比較，得到最佳的控制效果。然而，近期 Yang 等人 [19]指出，雖然類神經網路可適用於複雜且不確定性較高的系統，然而由於類神經網路控制所需具備的硬體資源較高，且參數調控依賴經驗法則，因此在不了解系統特性的情況下，錯誤的參數選擇可能導致系統不穩定，且難以回復到穩態。

2.3 刀具磨耗診斷

切削加工中之刀具磨耗為影響表面粗糙度及尺寸精度之重要現象，因此過去研究中採用過各種物理訊號監測刀具磨耗，包括馬達電流、切削力、主軸扭力、聲射訊號、振動訊號與切削溫度等。

由於刀具磨耗將進一步導致刀刃幾何改變，並導致切削力提升，因此，切削力最常被用於刀具磨耗檢測指標上。Li 等人 [1]以切削力時域訊號，例如切削力峰值、平均切削力，作為切削鎳合金之刀具磨耗指標。Elbestawi 等人 [2]以切削理論與實驗驗證，提出對切削力訊號做傅立葉轉換之頻域訊號進行特徵擷取的方式作為即時刀具磨耗監測指標。

由於主軸或馬達電流為不需外接感測器即可收集到之切削資訊，且其頻寬與解析度皆能反應切削狀態，因此亦為常見之刀具磨耗監測指標。Shao 等人 [24] 使用主軸功率時域訊號之平均功率作為判斷刀具磨耗指標。Lee 等人 [25]則使用主軸電流進行離散小波轉換作為刀具磨耗與破壞指標。Grosvenor 等人 [26]則使用進給驅動馬達之電流訊號與其傅立葉轉換後之頻域訊號作為刀具斷刀之指標。

而等負載加工中之刀具磨耗監測，以往文獻較少對此議題進行深入探討。Lee [27]曾提出以控制主軸負載加工時進給率下降之幅度作為刀具磨耗判斷依據，其以切削理論得到磨耗量與進給率彼此之轉換公式，並以進給率作為判斷刀具磨耗之依據。

2.4 小結

目前針對等切削力與等負載銑削加工之研究已有針對不同之系統輸入與輸出，以不同方法進行其切削系統動態之研究，包括系統鑑別與系統動態方程理論推導之方式。而適應性控制器之設計，過去亦提出許多方法試圖解決切削加工中加工狀態改變時之系統表現，試圖在切深改變、刀具磨耗等狀況下，切削力或主軸電流能控制的更加穩定。

刀具磨耗監測技術方面，以切削力或主軸電流偵測刀具狀態已有相當多之研究，以等進給率加工中之時域訊號或頻率域訊號之特徵進行刀具狀態的監測。

然而，由於過去之研究多集中於適應性控制器之設計與等進給率加工刀具磨耗之監測，尚無文獻針對等負載加工之參數訂定與等負載加工之刀具磨耗監測進行深入之研究。因此，本研究將探討設定等負載加工參數之方法以及等負載加工中刀具磨耗之監測方式。

第三章 研究方法



本章節將會介紹本研究之實驗架構，對於所採用的訊號處理方法及等負載加工訊號與刀具磨耗之關係進行簡要的說明。

3.1 研究流程

本研究之研究流程主要共可分為三部分，研究之流程圖如圖 2 所示。其一，建立等負載銑削加工參數訂定策略，以等進給率實驗建立槽銑與端銑加工之進給率、主軸負載電流、刀腹磨耗與表面粗糙度之關係。本研究以刀刀強度作為主軸參考電流與進給率上限之訂定標準以達到最高材料移除率，並設定刀具磨耗終點之刀腹磨耗區間作為進給率下限訂定標準，提供使用者以進給率作為換刀之即時訊號參考。其二，進行等負載加工，分別進行槽銑與端銑實驗，驗證加工參數訂定策略之正確性、重複性，並且進一步驗證以進給率達到下限值作為刀具磨耗終點進行換刀動作的準確性與重複性。其三，設計一實驗載具，並將加工路徑設計為槽銑、端銑混合加工，以等負載銑削進行加工並觀察刀具磨耗監測與驗證換刀時機。

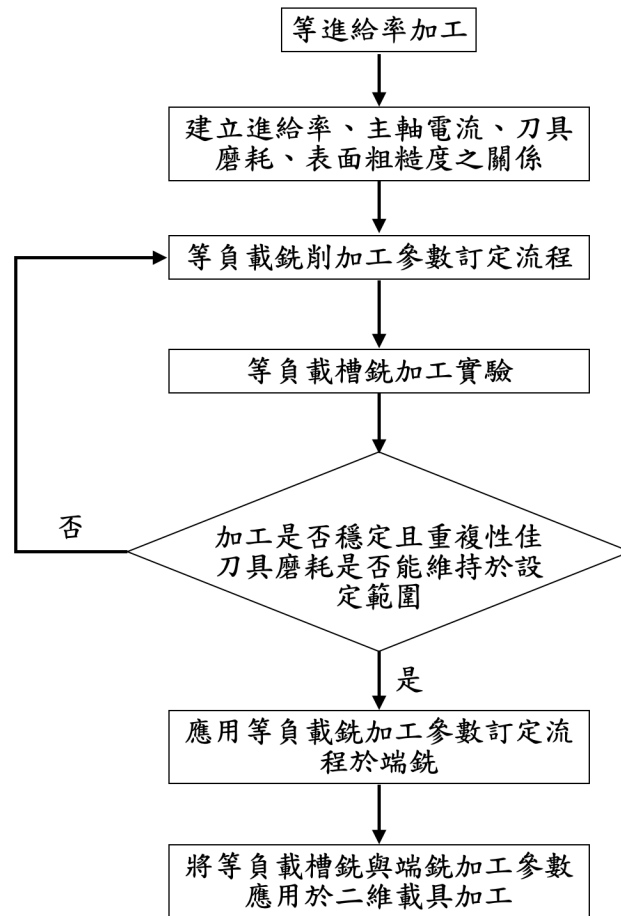


圖 2 研究流程



3.2 系統設備規格

3.2.1 立式加工機

本研究加工時所使用之加工機具為 PMC 財團法人精密機械研究中心所開發的小型五軸加工機，如圖 3，搭配之主軸為 NSK Nakanishi NR-3060S 主軸如圖 4，其規格如表 1。



圖 3 CNC 加工機



圖 4 NSK Nakanishi NR-3060S 主軸

表 1 CNC 規格表

機台尺寸 (Machine size)		主軸規格	
高	172 cm	型號	NSK Nakanishi NR-3060S
深 x 寬	75x66 cm	最高轉速	60000 rpm
重量	250 kg	Spindle Accuracy	1 μ m
進給軸 (Feed drive)		重量	260 g
X 軸	206 mm		
Y 軸	150 mm		
Z 軸	194 mm		
重現精度	3 μ m		

3.2.2 訊號擷取卡

本研究擷取主軸電流訊號及送出進給率命令時，使用之訊號擷取卡(DAQ)為美商國家儀器公司(National Instrument Corporation)之 NI USB-6341(如圖 5，其規格如表 2)與 NI-9215(如圖 6，其規格如表 3)共兩張，其以 BNC 接頭連接感測訊號，再將數位訊號藉由通用序列匯流排輸至 PC 後供 Labview 進行後續訊號處理。



圖 5 NI USB 6341 DAQ 擷取卡

表 2 NI USB-6341 規格表

型號	NI USB-6341
Single-Ended Channels	13
Differential Channels	8
Resolution (bits)	16
Sample Rate (kS/s)	500
Throughput (kS/s)	500
Number of Ranges	4



圖 6 NI-9215 DAQ 擷取卡

表 3 NI 9215 規格表

型號	NI 9215
Signal levels	+/-10 V
Channels	4 differential
Resolution (bits)	16
Sample Rate (kS/s)	50
simultaneous	yes
connectivity	BNC

3.2.3 數位類比轉換器

本研究之控制器命令訊號由 DAQ 輸出類比訊號，經由新代科技提供之數位類比轉換器(ADC)，如圖 7，其規格如表 4，轉為數位訊號之後再由工具機所接收。ADC 卡之取樣頻率乃透過加裝之專用輸出端子板，如圖 8，其規格如表 5，先於工具機內部編寫 PLC 程式，設定輸出頻率後，送出觸發訊號至輸出端子板，再由端子板連接至 ADC 卡之上緣觸發接孔，當 ADC 卡感測到觸發訊號之後，便會擷取控制器訊號。於本研究中，取樣頻率設定為 50Hz。



圖 7 數位類比轉換器



圖 8 專用輸出端子版

表 4 數位類比轉換器規格表

規格	SYNTEC TB16IN-2AD
供應電壓	24 V
解析度	8 (bits)
輸出電壓範圍	0~10 V

表 5 專用輸出端子版規格表

規格	SYNTEC TB16OUT-T16
供應電壓	24 V
輸出組數	16
每組可供應最大電流	2 A
總額最大輸出電流	12 A

3.2.4 電流鉤表

本研究需量測主軸負載做為控制系統的回授信號，故採用 Fluke i-200S 電流鉤表，如圖 9，其規格如表 6，將其安裝於工具機機箱中之主軸電源上，吾人便可將主軸電流值經特定比例轉換為電壓訊號，並由訊號擷取卡所接收。

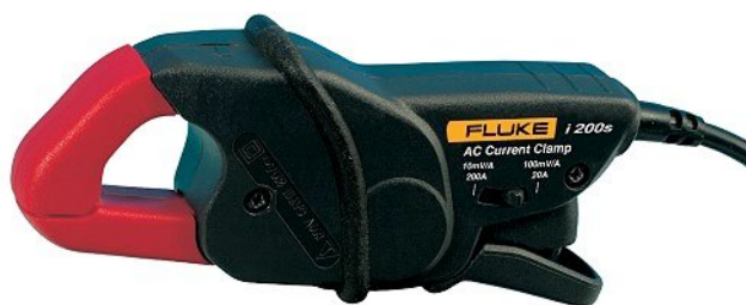


圖 9 FLUKE i-200s 電流鉤表

表 6 電流鉤表規格表

規格	Fluke i-200S
量測範圍	0.1 A-24 A
可通過之最大電流	200 A(frequency<200 Hz)
輸出訊號	100 mV/A
基本準確度	1%+0.5 A(@48-65 Hz)

3.2.5 CCD 攝影機

本研究於紀錄刀具磨耗時，使用 SAGE VISION HD4600 CCD Camera 進行拍攝，如圖 10，其規格如表 7 所示。捕獲照片後，使用 TOUPVIEW 軟體進行圖片編輯及尺寸量測。



圖 10 SAGE VISION HD4600 CCD Camera

表 7 SAGE VISION CCD 規格表

規格	HD 4600
畫素	200萬
傳感器型號/尺寸	Sony IMX236(C) 尺寸 1/28"
像素尺寸	2.8x2.8 μm
放大倍率	1.5x - 4.5x
G光靈敏度	1/30 s
曝光時間	0.4 ms~999 ms

3.2.6 千分錶

本研究使日本 Mitutoyo 公司生產之千分錶量測加工前工件材料之平面度，千分錶型號為 2109S-10 如圖 11，其量測精度為 $1\ \mu\text{m}$ 。校正平面度時，將千分錶安裝於磁力座並吸附在工具機主軸上量測工件 x 與 y 方向之平面度。



圖 11 Mitutoyo 2109S-10 千分錶

3.3 控制系統架構

本研究使用 PMC 財團法人精密機械研究中心所開發的小型五軸加工機，搭載新代科技之國產控制器，進行等負載銑削控制之實驗。本研究之等負載控制技術之系統，乃藉由 Labview PI 控制器調整進給率使主軸負載電流維持於參考值。工具機控制器採用新代之 PC-base 控制器，而控制訊號的輸出以及主軸電流訊號的擷取，則是藉由國家儀器的資料擷取卡，整體是一閉迴路控制系統，示意圖如圖 12。

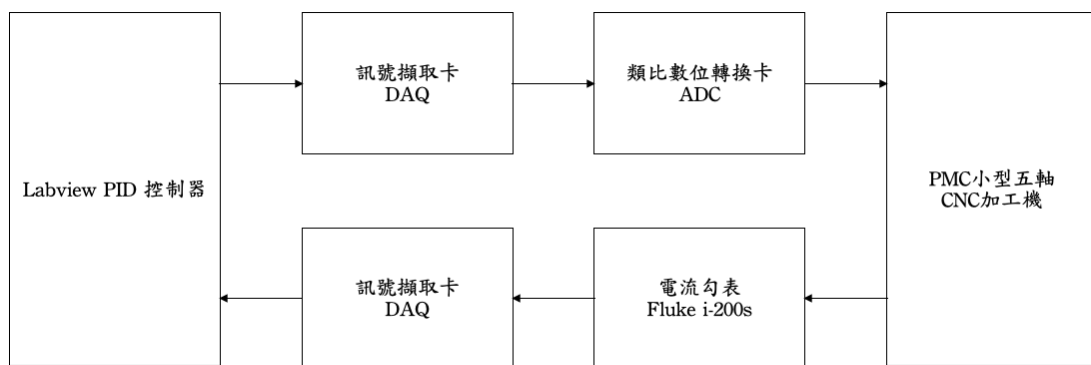


圖 12 控制系統架構圖

本研究所採用之硬體設備迴路如圖 13，工具機為 PMC 財團法人精密機械研究中心所開發的小型五軸加工機，搭載新代科技公司之國產控制器。而本研究所設計之等負載銑削控制器是基於 Labview2014 軟體環境所開發，所採用之資料擷取卡驅動程式為 DAQmx17.6，主要由主軸參考電流、PI 控制器和動平均 (Moving Average) 濾波等元件所組成，再配合國家儀器之訊號擷取卡輸出控制訊號，訊號擷取卡以零階保持 (Zero-order Hold) 電壓形式輸出控制訊號，途中經 ADC 轉換卡將類比訊號轉為數位訊號，以 50Hz 的更新頻率將控制訊號送至工具機 PLC，藉以改變工具機之加工進給率；當進給率被改變，主軸負載即受到影響，接著利用 fluke i-200s 電流鉤表由主軸電源測得主軸負載電流，經過訊號擷取卡取樣後，回饋至電腦控制器。此系統運作過程中包含連續與離散之訊號轉換，可依據數位控制理論，將整體系統推導為一離散系統。

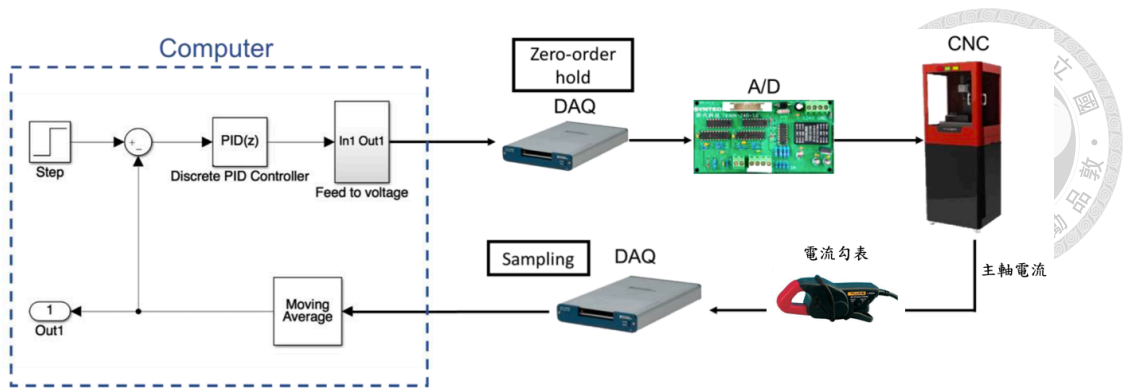


圖 13 控制系統設備

根據數位控制理論，電腦中之控制器所進行之數值運算為離散訊號，可於 z -domain 下表示，離散訊號經過 DAQ 時，乃透過零階保持(ZOH)轉為類比訊號，藉以控制切削過程中之進給率，而工具機主軸的負載電流，則透過電流鉤表輸出至訊號擷取卡，經過取樣後得到離散之電流訊號，上述過程包含 DAQ 之零階保持(ZOH)與取樣(Sampling)，兩者之動態特性皆可由理論推導而得，然而本研究設計 PI 控制器參數時，即已將零階保持、工具機動態特性納入考量，因此不須針對零階保持與取樣這兩項行為進行個別的系統動態特性之推導；整個系統能夠以圖 14 表示，上圖中，ZOH 及採樣行為之轉移函數皆與工具機之系統動態特性分別表示，而下圖中，將上述兩個行為與工具機之系統動態特性合併表示，可簡化為 $G_{cnc}(z)$ 。

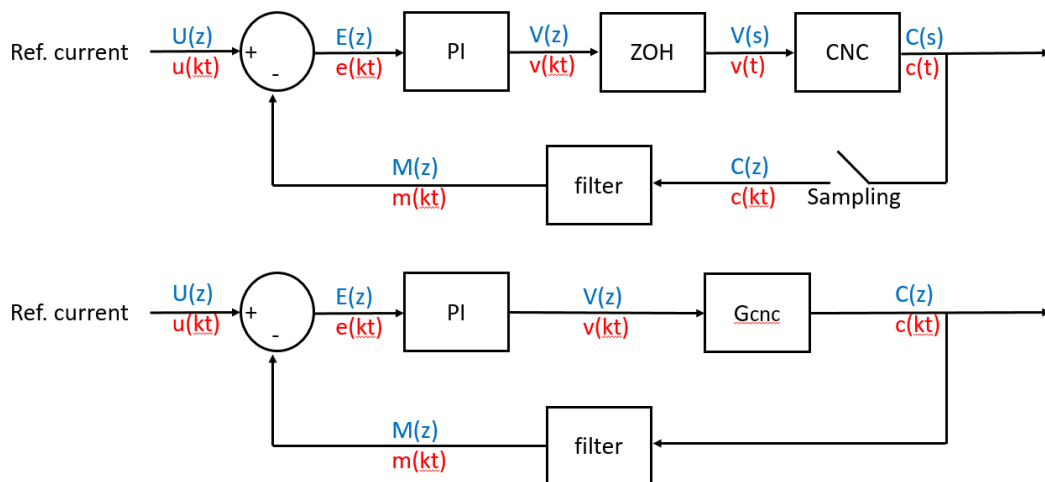


圖 14 控制系統方塊圖



3.4 控制器設計

本研究之閉迴路控制系統之架構如圖 15。先前之研究[28]已指出切削力與主軸電流成正相關之關係。故於加工開始前，必須針對刀具、加工品質、材料移除率等因素，設計符合需求之主軸參考電流，作為加工時刀具進給率調控的基準。而進給率之數值亦會在控制器中進行設定，包含進給率上限與進給率下限。進給率上限可依表面粗糙度要求進行限制，或欲達到最大材料移除率而採用不使刀具破壞之較高進給率上限設定。進給率下限則可考慮刀具磨耗與刀具幾何進行設定，防止進給率過低造成刀具之快速磨耗。設定主軸參考電流以及進給率上下限為本研究之研究主軸，會於後續章節詳細的說明。另一方面，加工當下所產生之主軸負載會經過電流鉤表反饋至控制器，控制器將參考值與此訊號做比較後，根據兩者之差值與 PI 控制器的演算法輸出一個新的進給命令，以達成穩定主軸負載的效果。

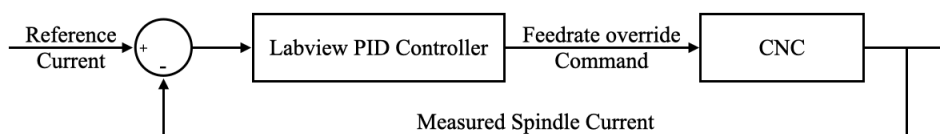


圖 15 控制系統架構簡圖

ACC 控制系統藉由調整進給率改變切削力大小，本研究以監測主軸負載電流方式進行等負載控制，取代傳統動力計量測之切削力，由工具機外部輸入電壓於五軸加工機控制器，改變加工程式原始設定進給率比例(Feed rate override)。輸入+5V 為原始 G 碼設定之進給率 100%，輸入 0V 為原始 G 碼設定之進給率 0%。最大輸出之電壓為 10V，即 G 碼設定之進給率之 200%。為了可由控制訊號監控切削狀態，了解控制過程中進給率的改變，控制器輸出使用改變進給率表示，也就是進給率改變比例乘 5，即為電壓，其換算關係如下：

$$Actual\ feedrate = \frac{(G\ code\ feedrate) \times (Input\ voltage)}{5} \quad (1)$$



3.4.1 PI 控制器

在控制器設計的部分，本研究採用比例-積分控制器(Proportional-Integral controller)進行控制，又稱為 PI 控制器。PI 控制器乃一較容易設計且適用於大多數閉迴路系統的控制方式，PI 控制器有結構簡單、易於調整、穩定性高等優點。

PI 控制器主要是由兩個常數所組成，比例增益(K_p)及積分增益(K_i)，其中，比例增益主要影響的是系統的響應速度，其輸出可表示為：

$$K_p \times e(t) \quad (2)$$

然而，當控制器內只有比例控制時，系統之輸出會存在穩態誤差(Steady state error)。積分增益主要的目的則是根據系統的誤差積分值來消除穩態誤差，其輸出可表示為：

$$K_i \times \int_0^t e(t)dt \quad (3)$$

另外還有微分增益(K_d)，其主要的功能是改善系統的動態特性。通常比例增益項較大時，系統響應速度較快，容易產生過衝(Overshoot)或是震盪(Oscillating)等系統不穩的現象，而微分增益項的加入即可以根據系統誤差的變化程度(誤差微分值)來減緩上述情況的發生，其輸出可表示為：

$$K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

本研究所設計之控制器未來希望能夠應用於實際加工環境中，故需要考量控制器之穩定性，而微分增益項的缺點是會放大雜訊對於系統的影響，使系統較不穩定，因此決定本研究之控制器不採用微分增益，僅使用 PI 控制器。綜合各項增益之輸出，PI 控制器之輸出可以表示為：

$$U = K_p \times e(t) + K_i \times \int_0^t e(t)dt \quad (5)$$

其中 U 表示我們所控制的訊號， $e(t)$ 為切削力誤差值（設定值減去量測值）， K_p 為比例控制常數， K_i 為積分控制常數。

然而，若考量到取樣時間點並以離散時間表示 PI 控制器，則其輸出可以表示為：

$$y[n] = K_c e[n] + K_i T_s (e[n] + e[n - 1] + e[n - 2] + \dots) \quad (6)$$

其中 $y[n]$ 為控制輸出訊號、 $e[n]$ 為系統輸出與參考值之誤差值、 n 為離散時間點、 T_s 表示取樣時間。採樣後之訊號經 Z 轉換至頻域後可以表示為：

$$\frac{Y(z)}{E(z)} = K_c + K_i T_s \frac{z}{z - 1} \quad (7)$$

其中， $Y(z)$ 為頻域訊號輸出， $E(z)$ 為頻域誤差。而 MATLAB 之 Simulink 套件中，PI 控制器的表示法與上述之公式略有差異，其表示法為：

$$\frac{Y(z)}{E(z)} = P \left(1 + I * T_s \frac{1}{z - 1} \right) \quad (8)$$

其中，

$$K_c = P$$

$$K_i = P * I$$

3.4.2 Labview

本研究使用 Labview2014 為基礎設計之控制器達成等負載控制。藉由 Labview 內建之 PID 控制模組能夠於本實驗之硬體架構下快速實現 PI 控制器功能，Labview 控制系統之方塊圖如圖 16 所示。基於控制系統所設計之人機介面可以方便使用者進行參數調控，包含主軸電流參考值、進給率電壓輸出上下限、比例增益 K_c 、積分時間 T_i 與微分時間 T_d ，如圖 17 所示。

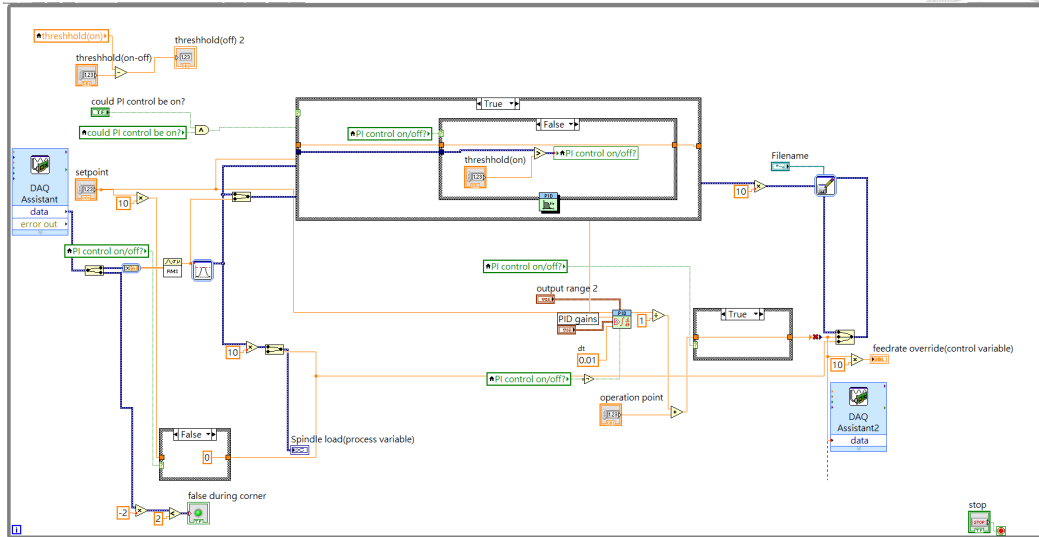


圖 16 適應性控制器程式之 block diagram

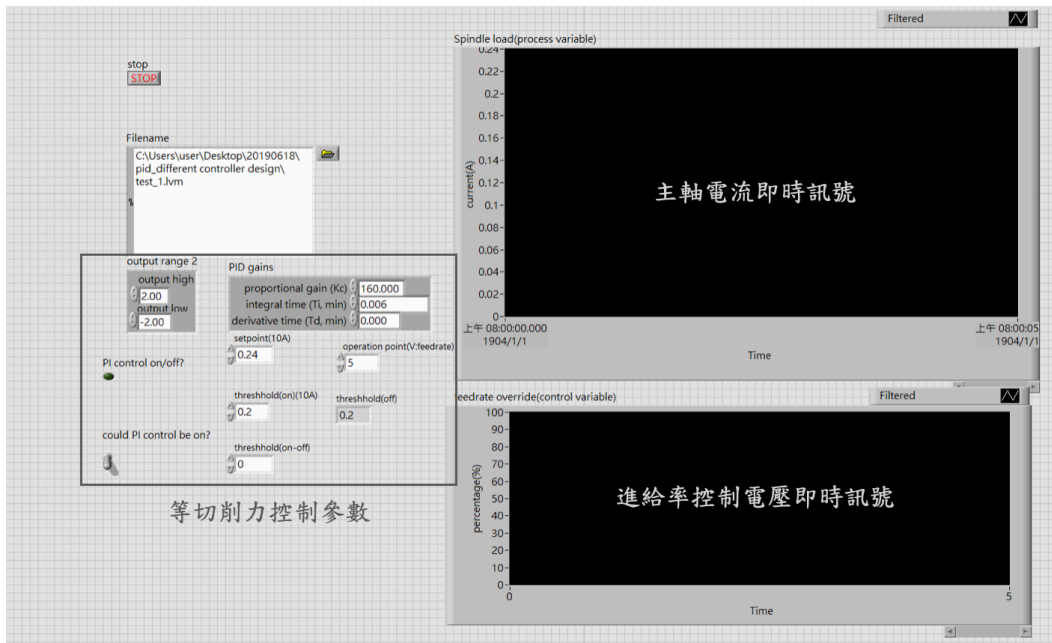


圖 17 適應性控制机器人機介面

在 Labview 中，PID 控制器之參數表示與 3.4.1 節當中所提到的略有差異，
 積分時間 T_i 與積分增益 K_i 之關係可表示為：

$$K_i = \frac{K_c}{60 \times T_i} \quad (9)$$



3.5 等負載銑削參數之選定流程

加工參數如何設定必須先瞭解設定主軸電流之考量點以及刀具磨耗與換刀時機之關係。

3.5.1 進給率與主軸電流之設定

進給率之設定有許多考量之因素，包括表面粗糙度標準、刀具機械強度、材料移除率以及刀具磨耗。由切削理論可知，較低的進給率可加工出較優質的表面粗糙度，卻會有較低的材料移除率與較高的刀具磨耗率；而較高的進給率雖有較差的表面粗糙度，卻可以有較高的材料移除率與刀具受命。然而，表面粗糙度之特性與刀具幾何、材料以及工件材料息息相關，實際加工的結果未必符合理論所提出趨勢。因此，表面粗糙度與進給率之關係仍有待實驗確認。

工具機主軸之動態方程式可以下式表示[29]：

$$K_t I_M = J \frac{d\omega}{dt} + B_M \omega + T_f + T_d \quad (10)$$

其中 K_t 為主軸馬達常數， I_M 為主軸電流， J 為馬達之轉動慣量(Moment of inertia)， ω 為主軸轉速， B_M 為阻尼系數(Damping coefficient)， T_f 為庫倫摩擦力(Coulomb coefficient)， T_d 為擾動力矩(Disturbance torque)。在切削加工中， T_d 即為切削力對主軸所產生之扭矩。

本研究切削實驗採用固定主軸轉速進行加工，因此可得：

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (11)$$

以及並可將阻尼項與庫倫摩擦項化為常數：

$$B_M \omega + T_f = C_s \quad (12)$$

並化簡為：

$$K_t I_M = C_s + r \cdot F_c \quad (13)$$

其中 r 為刀具半徑， F_c 為平均切削力。若使用切削理論之 Card Model 計算每轉之平均切削力 F_c ，可得出主軸電流與進給率之關係：

$$K_f I_M = C_s + r^0 \frac{\int_0^{2\pi} \left(\sum_{k=1}^{N_t} K_{f_k} \frac{r}{\tan \alpha_h} \sin \alpha \, d\alpha \right) d\phi}{T} f_t \quad (14)$$

其中 K_f 切削力係數， α 為各刃之角度， α_h 為刀具之螺旋角， ϕ 為刀具旋轉之角度， T 為刀具每轉所需時間， f_t 每刃進給率。並可將上式進一步簡化為：

$$I_M = A + B \cdot f_m \quad (15)$$

其中 f_m 為加工進給率。上式為考慮刀具未磨耗之加工狀態(新刀)所推倒之主軸電流與進給率之關係。因此，等負載銑削之主軸參考電流與進給率上限為互相關聯之參數，必需同時決定。

當刀具磨耗開始後，切削理論[24]與實驗結果[27]皆顯示切削力會隨之上升，切削力中法線方向切削力 F_t 與刀腹磨耗 V_B 之關係為：

$$F_t = K_s b f_t \sin(\phi) + C_w b V_B \quad (16)$$

其中， K_s 為切削力係數， b 為軸向切削深度， C_w 為邊緣區切削力係數。若將考慮磨耗之切削力公式帶入主軸電流與切削力關係之公式，可得主軸電流、進給率與刀腹磨耗之關係：

$$I_M = A + B \times f_m + k \times V_B \quad (17)$$

其中， A 可視為主軸空轉無切削之電流， B 為進給率常數， k 為磨耗常數。若為等進給率加工， f_m 為定值，便可再將上式簡化為刀具磨耗與主軸電流之關係：

$$I_M = C_1 + k_1 \times V_B \quad (18)$$

其中 C_1 為與主軸轉速及進給率有關之常數。若為等負載加工，則主軸電流 I_M 為定值，便可得出進給率與刀腹磨耗之關係：

$$k_2 \times V_B = C_2 - f_m \quad (19)$$



其中， C_2 為與主軸負載電流、主軸轉速、進給率有關之常數。

由式 17 可知，維持固定主軸電流進行加工時，隨著刀具磨耗增加，進給率將逐漸下降，並且兩者可視為一線性關係。然而，線性關係是否成立仍與刀具與工件材料特性有關，必須以實驗數據佐證之。又因為常數 C_2 為與主軸參考電流有關之參數，因此進給率下限值之訂定，除了與刀具磨耗量有關，亦與設定之主軸參考電流有關。

3.5.2 常見之換刀時機

本研究之目標為設定終端使用者能遵循的等負載加工參數訂定流程，並且將換刀時機納入參數訂定之考慮因素。因此，本研究所採用之訂定流程考慮終端使用者最常考慮之刀具磨耗作為訂定加工參數之考慮範圍。在加工現場，換刀時機主要考量指標有二。其一，當加工成品之表面粗糙度因刀具磨耗而上升，並達到或超過產品要求之表面粗糙度時，便進行換刀。其二，若刀具因磨耗過程產生非穩定磨耗，如刀尖材料剝落(Chipping)或刀尖破壞(Fracture)，便須提前進行換刀動作以避免非穩定磨耗產生表面粗糙度或加工精度產生非預期的變化。

當刀具磨耗進如一定範圍後，會使刀刃之摩擦力上升，並進一步加速磨耗或產生非穩定磨耗(Chipping, fracture)與表面粗糙度變差之現象。因此，刀具磨耗達到一定數值後，便需進行換刀，以避免刀具之劇烈磨耗產生，亦或是表面粗糙度超出設定標準。

本研究建立一終端操作人員可遵循之換刀流程如圖 18。3.5.1 節提到，等負載加工之進給率與刀具磨耗可簡化為一線性關係。因此，遵循本研究之加工參數設定流程，當加工中進給率下降至設定值下限值時，便代表刀具磨耗值已達換刀之標準，便可進行換刀動作，並繼續進行後續加工。

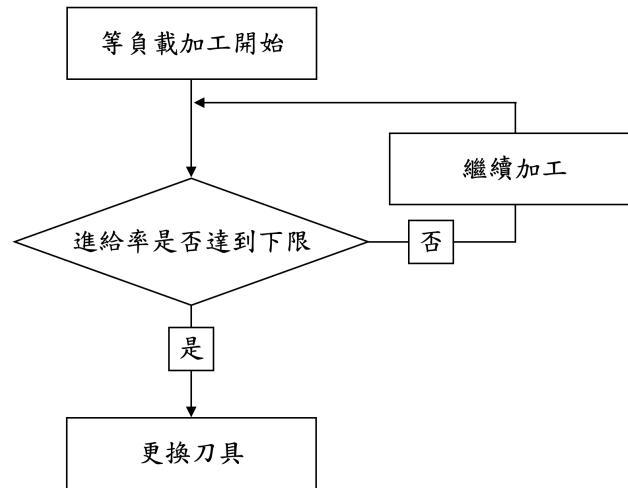


圖 18 加工機終端操作人員之換刀評估流程圖

3.5.3 可監測刀具磨耗之等負載銑削加工設定流程

由上述討論中，刀具磨耗為影響加工品質之加工指標，並且可作為判斷換刀時機之數值。若表面粗糙度會隨著進給率提升而上升，則考慮進給率上限時便須考慮表面粗糙度指標。若表面粗糙度與進給率無明顯趨勢，則可在刀刀不產生崩刃的前提下，提高進給率上限與主軸參考電流，以提升加工時的材料移除率，並且降低刀具磨耗率。

由過去之等負載加工刀具磨耗實驗結果[6]可知，隨著刀具磨耗，進給率會逐漸下降。而進給率之下限與刀具之磨耗量與磨耗率相關，進給率下限過低會導致刀具快速及過度磨耗，並減低刀具壽命與材料移除率。因此，設定適當的進給率下限，可避免刀具快速磨耗，並產生表面粗糙度變差或是刀具損壞等不良現象。其示意圖如圖 19。

在等負載銑削加工中，主軸電流、進給率與刀具磨耗之關係可表示為：

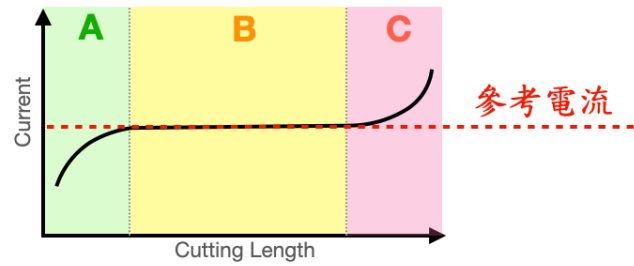
$$I_M = A + B \times f_m + k \times V_B \quad (20)$$

等負載加工下，主軸電流 I_M 維持在參考電流水平，因此為定值。加工初期無磨耗狀態下，磨耗值 V_B 為零。因此，加工初期之進給率可視為在無磨耗狀態下，主軸參考電流所對應到之新刀進給率，即可設定為進給率上限 $f_{m.max}$ 。當刀具逐

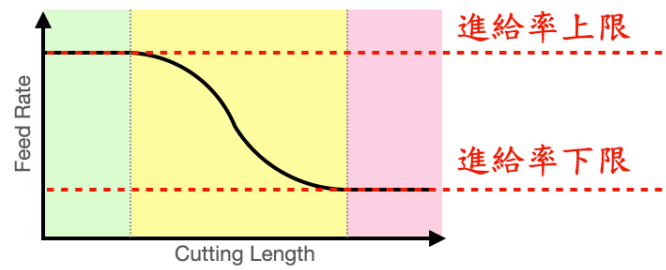
漸磨耗，磨耗值 V_B 逐漸上升，則進給率 f_m 會逐漸下降。而當建議換刀之刀具磨耗 $V_{B.MAX}$ 被決定，即得出換刀時所對應之進給率下限 $f_{m.min}$ 。



主軸負載電流



進給率



刀具磨耗

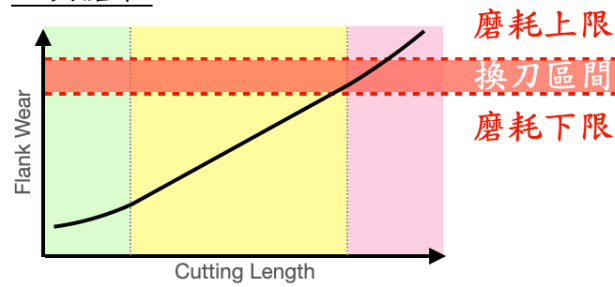


圖 19 等負載加工參數之示意圖

由上述等負載銑削加工參數之關係，可以參照下列流程訂定等負載銑削加工之主軸參考電流與進給率上/下限：

- (a) 由等進給率實驗得出在刀具不產生破壞下所能承受之最高主軸電流，並加入安全係數設定主軸參考電流。
- (b) 由新刀(無磨耗狀態)之進給率與主軸電流之關係，得出無磨耗狀態參考電流所對應之新刀進給率。
- (c) 若進給率與表面粗糙度關係之趨勢明顯，則須將表面粗糙度列入進給率上限之考量。若無明顯趨勢或表面粗糙度之數值為可接受之數值，則可將進給率上限設定為無磨耗狀態下，參考電流對應之新刀進給率
- (d) 由等進給率磨耗實驗觀察刀具嚴重磨耗並開始產生非穩定磨耗如崩刀等現象之刀腹磨耗數值，並設定建議換刀之刀腹磨耗區間。並逐漸降低每組實驗之進給率，直到刀具磨耗達設定之區間時，主軸電流正好等於參考電流的數值，此進給率便可作為等負載銑削加工之進給率下限。

3.6 刀具磨耗

刀具磨耗乃判斷刀具壽命之指標之一。刀腹磨耗之量測方法為以 CCD 捕捉刀具端面之影像如圖 20，並量測端面之各刃最大刀腹磨耗 w ，捕捉到之影像與磨耗之量測方法如圖 21，刀具磨耗之衡量方法為兩刃端面最大刀腹磨耗之平均值。



圖 20 刀具磨耗之拍攝方式示意圖

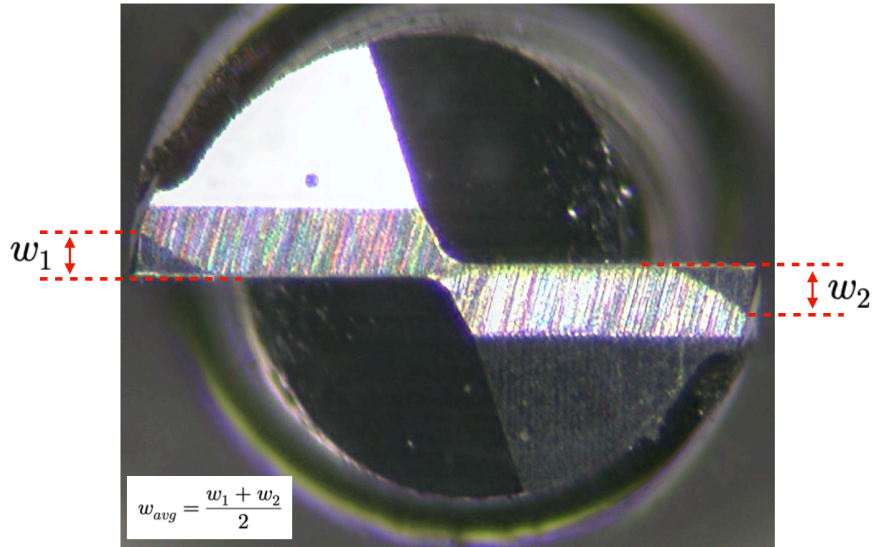


圖 21 磨耗量測示意圖

第四章 實驗規劃

本研究首先以等進給率加工了解刀具強度與磨耗趨勢，並以其為參考資訊訂定等負載切削之加工參數。參考電流與進給率上限以刀具不產生破壞以及表面粗糙度穩定為基礎進行設定。進給率下限則以刀具磨耗量為參考，當進給率到達下限時，預期使刀具磨耗數值維持於本研究設定之範圍內。完成加工參數制定後，將先設計並驗證 PI 控制器參數之控制效能，PI 控制器之參數以能穩定主軸電流於參考電流為主。接著驗證先前設定之等負載加工參數是否能穩定加工且在進給率到達下限時，刀具磨耗保持於設定範圍內，為換刀之時機。

本研究使用中碳鋼 S45C 進行銑削實驗，使用之刀具為景明精密工具所生產之直徑 2.0 mm 二刃端銑刀如圖 22，其規格表如表 8。進行實驗時每道切削長度為 150 mm，軸向深度為 200 μm ，並分別進行槽銑與端銑之實驗，槽銑之示意圖如圖 23 所示。端銑之徑向切削深度為 1.4 mm (刀具直徑之 70%)，加工方式為順銑，示意圖如圖 24 所示。進行磨耗實驗時，等進給實驗之部分紀錄每道加工之主軸負載電流與加工結束之刀具磨耗。等負載切削加工磨耗實驗部分，則紀錄每道加工之進給率、主軸負載電流與刀腹磨耗。



圖 22 碳化鎢銑刀

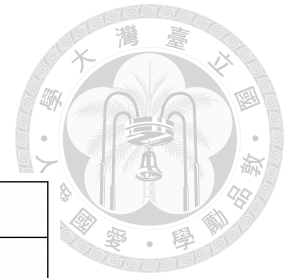


表 8 碳化鎢立銑刀規格

型號	AA238M-0200-D4-ML10
刀徑 d	2 mm
刀長 L ₁	5 mm
柄徑 D	4 mm
全長 L	50 mm
材料	粒徑0.4 μm碳化鎢 WC 88%, Co 12%
刀數	2刃

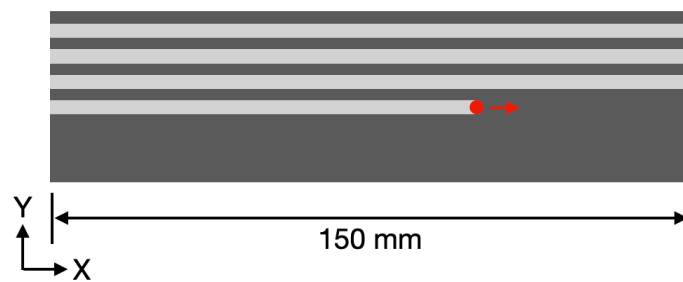


圖 23 槽銑加工示意圖

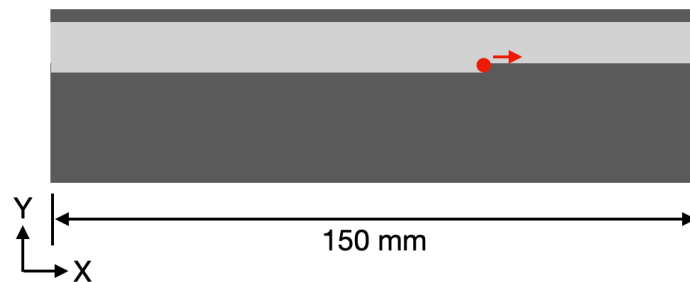


圖 24 端銑加工示意圖



4.1 等進給率實驗

本研究以等進給率實驗結果與數據為基礎訂定等負載銑削加工參數。由刀具商之加工參數參考資料，本實驗所使用之刀具廠商建議之轉速為 10000 rpm，進給率為 380 mm/min。由於刀具商建議之加工參數往往較為保守，因此，在進行主軸電流與進給率上限實驗時，會將進給率依序實驗進行提升，以測試刀具之加工極限與強度，並記錄每道加工之平均主軸負載電流與每道加工結束之刀具磨耗。主軸轉速則固定於 10000 rpm。

4.1.1 參考電流

本研究之參考電流設定準則為在刀具不產生崩刃、斷刀等非穩定磨耗為前提，盡量提高參考電流以達到最高之材料移除率。由於平均切削力與平均主軸電流為線性關係，主軸電流越大代表加工之切削力越大。因此，可將刀具發生崩或斷刀時之切削力，視為所能承受之最大切削力，而當時的主軸電流即視為加工之最高主軸電流。參照刀具商的建議，等進給率實驗的進給率從接近刀具商建議之 400 mm/min 開始，每組實驗提升 100 mm/min，直到刀具發生崩刃或斷刀等非穩定磨耗並造成主軸負載電流徒增，以主軸負載電流突增前一道次之平均主軸電流作為最高主軸電流。雖然目前刀具製造技術已相當成熟，但為了避免每把刀具之刀具幾何或材料均值性等不確定性而導致加工中的風險，本研究會將等進給率實驗之最高主軸電流設定一 1.17 之安全係數作為等負載加工之主軸參考電流。

4.1.2 進給率上限

由於切削理論中[30]，進給率與表面粗糙度之關係可表示為：

$$Ra = \frac{s_z}{4 \cot(\kappa')}$$

式 21

，其中 s_z 為進給率， κ' 為刀端凹角，其刀具幾何示意圖如圖 25。本實驗使用刀具之 κ' 角量測方式為先以 CCD 拍攝並量測另一邊之角度，再以 180° 減去該角度除以二即是 κ' 角，如圖 26 所示。

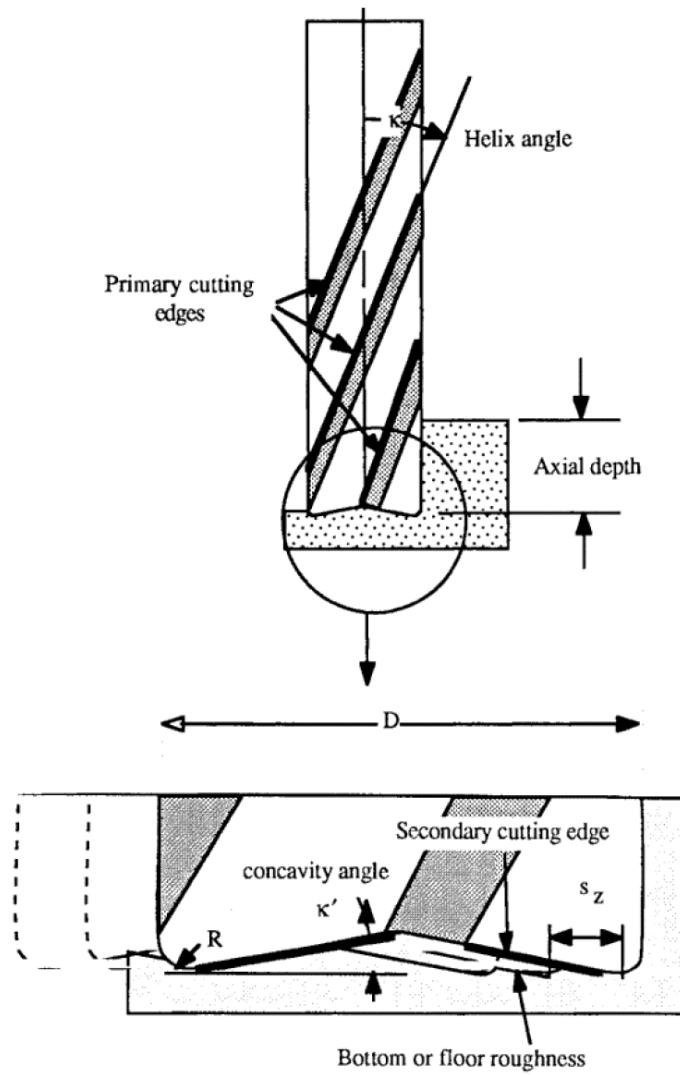


圖 25 端銑刀之刀具幾何[30]

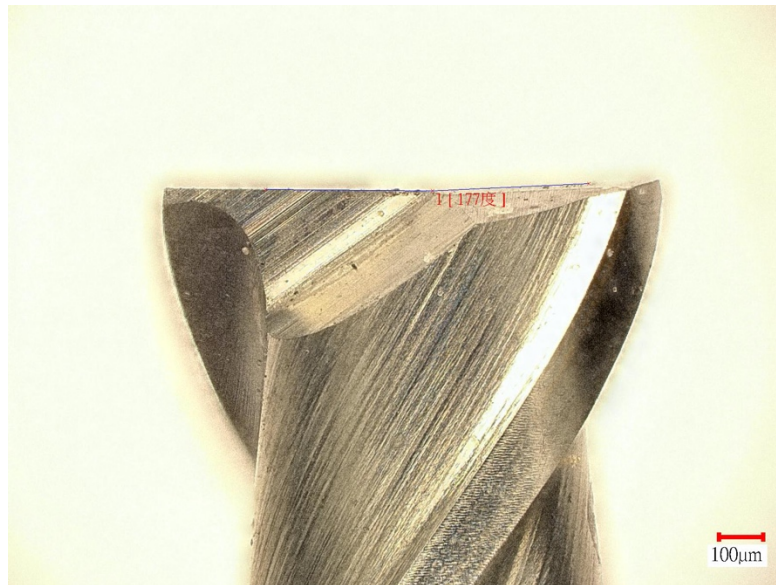
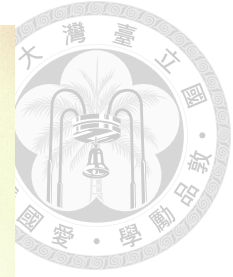


圖 26 刀尖凹角拍攝及量測情形

因此，進給率上限亦需將表面粗糙度列入考慮。本研究會以等進給率實驗確認進給率與表面粗糙度之關係，以釐清兩者之相關性，並參照實驗結果設訂適當的進給率上限之參考值。

而在等負載加工中，進給率上限即為加工初期之進給率，其示意圖如圖 27，且由 Yang 等人[29]之理論推導可知，進給率、主軸電流與刀具磨耗為一線性關係：

$$I_M = A + B \times f_m + k \times V_B \quad (22)$$

其中 I_M 為主軸電流， f_m 為進給率， V_B 為刀具磨耗， A 為與工具機特性與轉速有關之常數， B 為與切削材料、刀具、切削寬度與機台特性有關之常數， k 為刀具磨耗常數。而加工初期無刀具磨耗之情況下， V_B 為零，因此主軸電流 I_M 與進給率 f_m 為線性關係，其實驗結果如圖 28 所示。因此，加工初期新刀狀態下之進給率會與訂定的參考電流有關，如圖 29 所示。

所以，若主軸參考電流所對應之新刀進給率之表面粗糙度於設定範圍內，且刀具不會產生破壞之情況下，進給率上限值即可設定為該參考電流所對應之新刀具進給率。

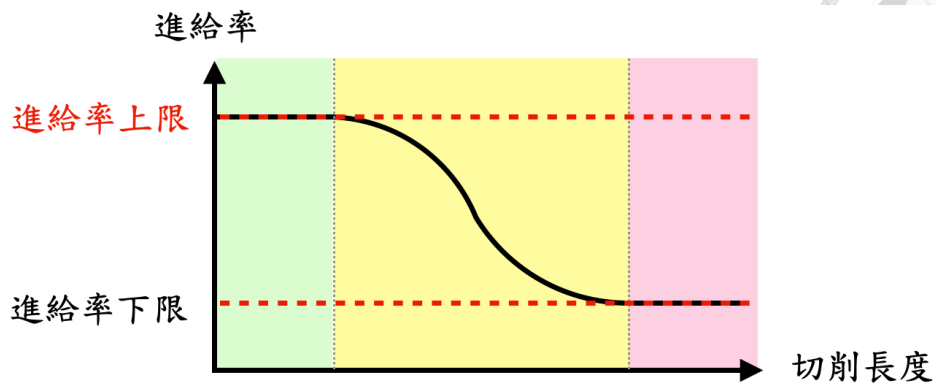


圖 27 等負載加工進給率上限示意圖

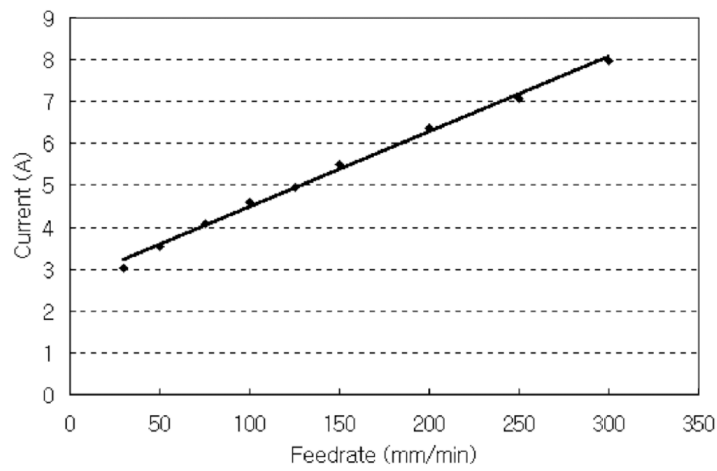


圖 28 新刀之進給率與主軸電流關係實驗數據[29]

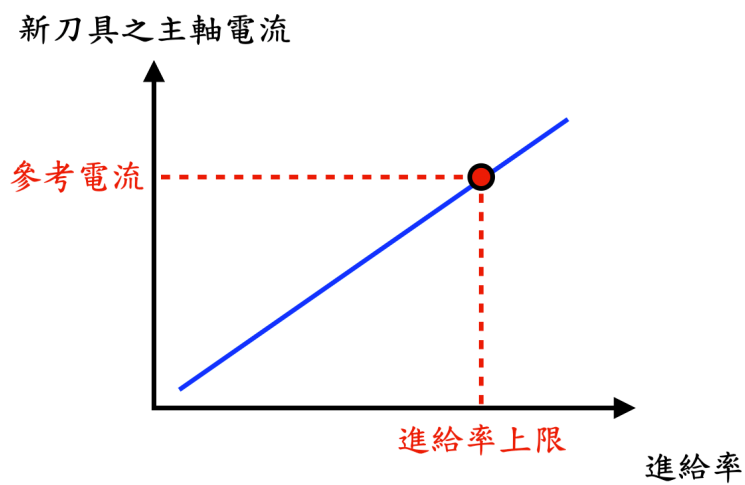


圖 29 參考電流與新刀進給率關係示意圖

4.1.3 進給率下限

銑削加工中，常見之刀具磨耗量化方式為量測刀具主切削刃之磨耗以及端面次切削刃之磨耗，而其中次切削刃之磨耗為加工中較易取得之磨耗資訊，而在穩定加工中，次切削刃之磨耗數值與主軸電流亦有相當明顯之趨勢。因此，本研究以次切削刃刀腹磨耗作為進給率下限之訂定指標。由 Lee[27]等人之推導，主軸電流、進給率與刀具磨耗之關係可表示為：

$$I_M = A + B \times f_m + k \times V_B \quad (23)$$

其中， I_M 為主軸電流， f_m 為等負載銑削加工之進給率， V_B 為刀具磨耗， A 為與機台特性有關之常數， B 為與切削參數與刀具幾何有關之常數， k 為磨耗常數。因此，當等負載加工之參考電流 I_{rf} 與判定為換刀之刀腹磨耗區間 $V_{B.MAX}$ 被決定時，便可得進給率下限 f_{min} ，可表示為：

$$f_{min} = \frac{I_{rf} - k \times V_{B.MAX} - A}{B} \quad (24)$$

而進行等進給率實驗時，進給率下限之刀具磨耗與主軸電流之關係如圖 30 所示。 f_{min} 為進給率下限，當刀具逐漸磨耗，主軸電流上升至參考電流 I_{rf} 時，刀具磨耗亦會位於換刀磨耗區間內，由此判斷適合該進給率適合作為進給率下限。

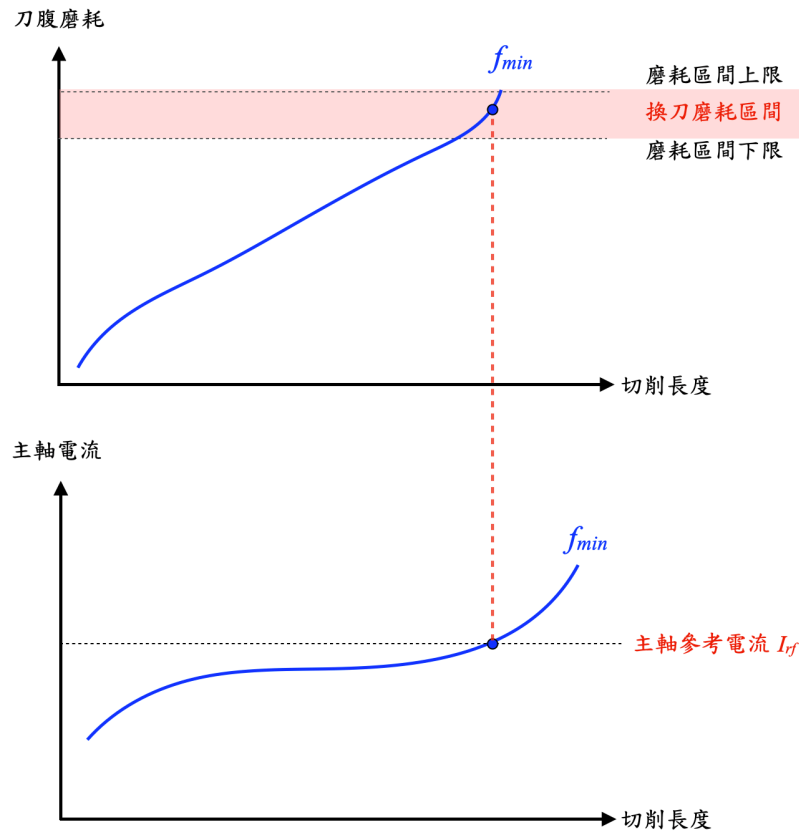


圖 30 進給率下限訂定方式示意圖

而換刀磨耗區間之設定，由於刀具尺寸之限制，刀具磨耗 w 的最大值為 $230\ \mu\text{m}$ ，如圖 31 所示。再者，本實驗使用之刀具，磨耗值 w 於 $220\ \mu\text{m} - 230\ \mu\text{m}$ 左右時，會開始出現較不穩定之磨耗現象，如圖 32 所示。因此，本研究設定之換刀磨耗區間為 $180\ \mu\text{m} - 220\ \mu\text{m}$ 。

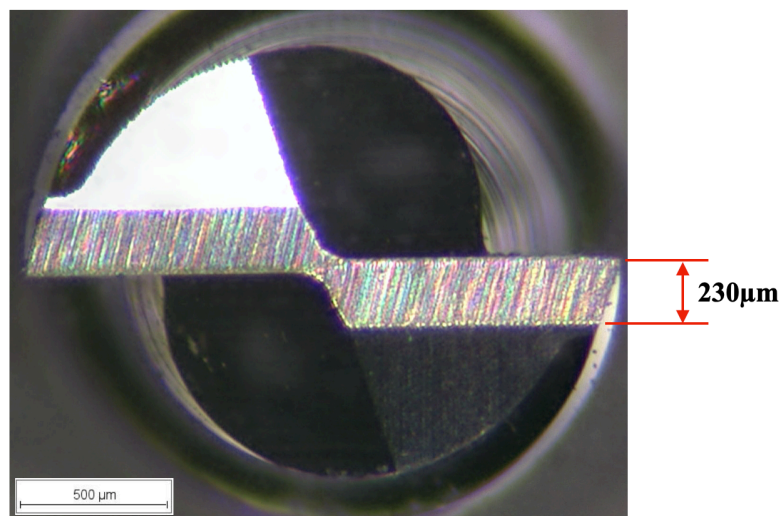


圖 31 刀具端面刀腹尺寸

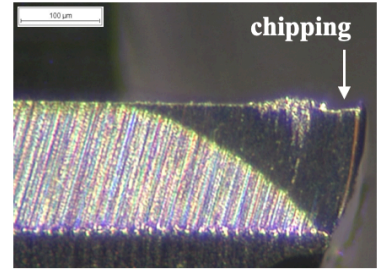
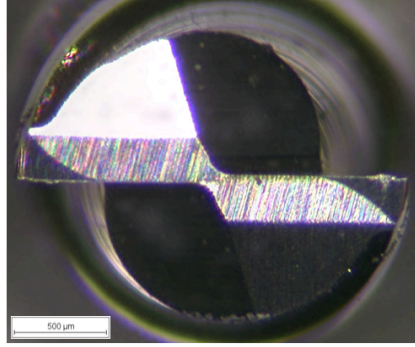
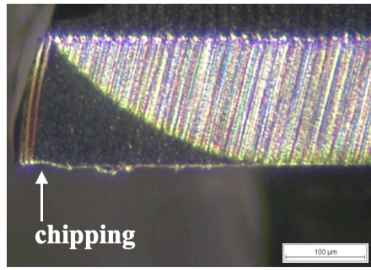


圖 32 刀具磨耗 230μm 發生之不穩定磨耗



4.2 控制器設計與效果驗證

本研究以掃頻訊號對切削動態進行系統識別得到系統動態方程，並以之設計等負載銑削 PI 控制器，方法為參考鄭力維[6]與鄭呈毅[8]之研究。

本研究以 Labview 設計掃頻訊號，程式方塊圖如圖 33，其中 f_1 與 f_2 分別為掃頻訊號之起始頻率與結束頻率，並配合 DAQ 將訊號輸入至 CNC 控制器，輸入之訊號為控制進給率之電壓訊號，掃頻訊號將改變切削過程之進給率。CNC 之輸出訊號為主軸負載電流訊號，輸出時以 DAQ 接收，並以 Labview 記錄訊號。得到輸入與輸出訊號後，利用 Matlab 進行訊號前處理移除訊號之平均值。經前處理之訊號藉由 Matlab 之 Arx Model 進行系統識別，得到輸入與輸出間之動態方程。PI 控制器之設計，則藉由 Matlab Simulink 之 PID Tuner 模組設定適當之比例增益 K_c 與積分增益 K_i 作為穩定控制主軸電流之參數。系統識別實驗使用之刀具為全新刀具，主軸轉速 10000 rpm，切深 0.2 mm 之槽銑加工。

得到控制器之控制參數後，並開始進行刀具磨耗之實驗。控制器驗證之步驟需驗證設定之 K_c 與 K_i 是否能於槽銑、端銑皆能穩定控制主軸電流於參考電流。並且於刀具逐漸磨耗，仍能維持等主軸負載直到進給率到達設定之下限，故控制效果驗證實驗會與磨耗驗證實驗同步進行。

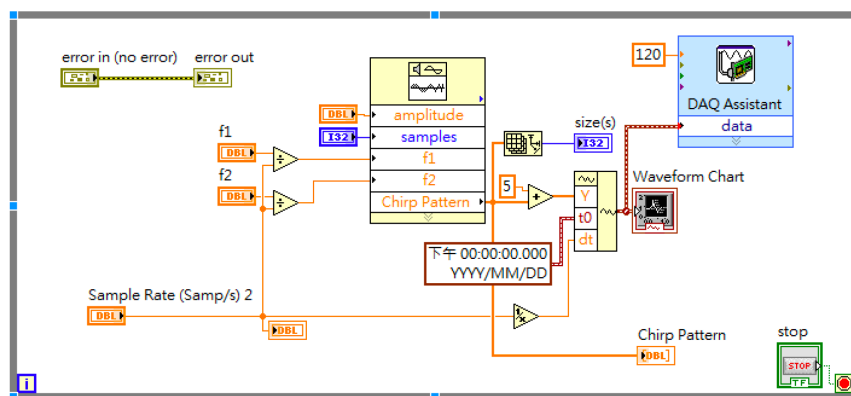


圖 33 掃頻訊號方塊圖



4.3 等負載加工驗證實驗

完成等進給率實驗並根據 3.5.3 節所提出之等負載加工參數設定流程，設定出符合刀具強度與磨耗指標的主軸參考電流與進給率上、下限後，本研究將針對槽銑與端銑分別驗證訂定之參數是否達到預期效果，槽銑與端銑會分別進行五組實驗，驗證本研究提出的加工參數設定流程之重複性與穩定性，並且於進給率降至下限時，刀具磨耗是否位於設定之磨耗值範圍內，準確提供換刀時機建議。由於進給率下限之設定會影響換刀之時機判斷，本研究亦會於等負載切削槽銑加工達到進給率下限後，持續降低進給率進行加工，並探討其所造成之刀具過度磨耗與延遲換刀現象。

再者，由於鄭力維[6]曾探討等負載加工與等進給加工之刀具壽命關係，因未針對等負載加工參數進行優化，故等負載加工並未能如等進給率加工有更為優異的刀具壽命與總移除材料。因此，本研究除了紀錄每刀之刀具磨耗外，亦會紀錄每刀進給率與加工時間之變化，並探討等負載加工之刀具壽命與材料移除率。

4.4 載具加工驗證實驗

過往文獻由於多集中探討等負載與等切削力控制器設計，較少探討其於實際加工中之效能與優勢。因此，本研究設計一載具如圖 34，並將刀具路徑設計為槽銑、端銑混合式加工如圖 35，以一道槽銑搭配兩道端銑，共 28 道直線加工，以符合實際加工常見的加工方式，並且採用 4.2 節所設計之等負載槽銑與端銑之加工參數，實際演示等負載加工之即時加工參數(進給率)於連續加工時可作為的刀具磨耗監測與換刀時機的參考資訊，讓終端使用者能在進給率到達下限時，暫停加工進行換刀，並且繼續完成加工。為模擬實際加工狀況，加工中僅記錄主軸電流與進給率訊號，唯有當進給率到達下限時才會進行刀具磨耗拍攝與量測。

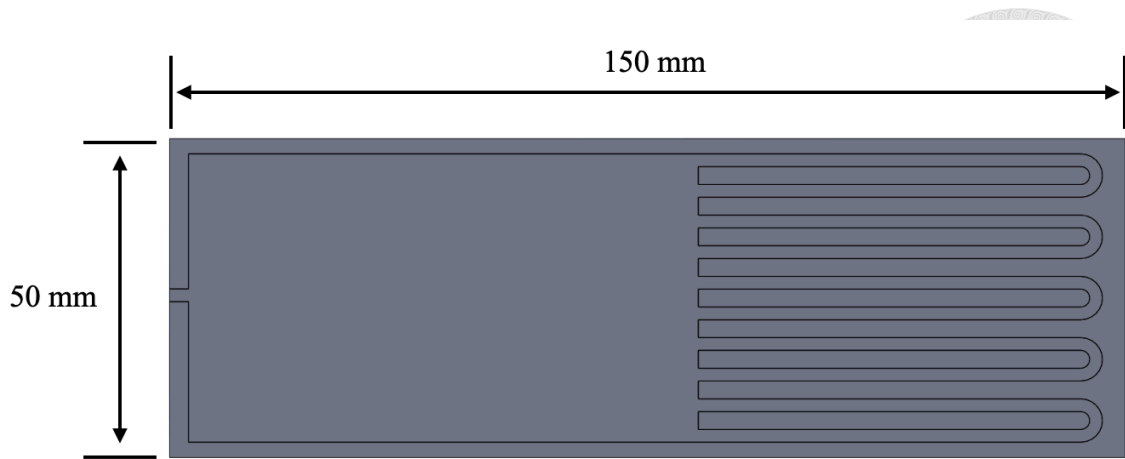


圖 34 載具造型

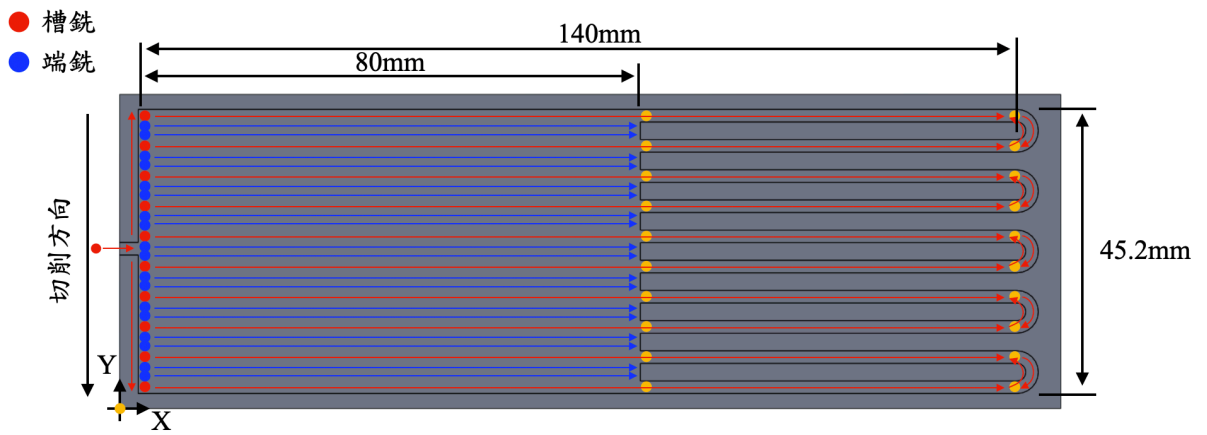


圖 35 載具幾何尺寸、加工長度、刀具路徑

第五章 實驗結果與討論



5.1 等負載加工參數選定流程 – 槽銑

5.1.1 主軸參考電流

本研究之主軸參考電流首先根據刀具所能承受之最大切削力為準進行設定，等進給率槽銑加工由進給率 400 mm/min – 800 mm/min，每 100 mm/min 進行一組等進給率實驗，紀錄主軸電流與刀具磨耗狀態。實驗結果顯示，進給率 800 mm/min 時，刀具磨耗於主軸電流 0.28 A 開始產生刀刀材料崩落(chipping)之現象，並且，主軸電流由 0.2822 A 急遽上升至 0.3025 A。主軸電流訊號如圖 36 所示，刀具磨耗狀態如圖 37 所示。由刀尖之磨耗觀察，於切削長度 2700 mm (第 18 刀)後，已可觀察出刀刀有 chipping 之現象。

因此，由實驗結果可知的磨耗後刀具所能承受之最高主軸電流約在 0.2822A。由於刀具間之製造誤差與初始狀態不一，為了降低加工中崩刃或斷刃之風險，本研究將主軸參考電流設定一安全係數 1.17，亦即將主軸最高電流 0.28 A 乘以 0.85 作為參考電流 0.24 A。

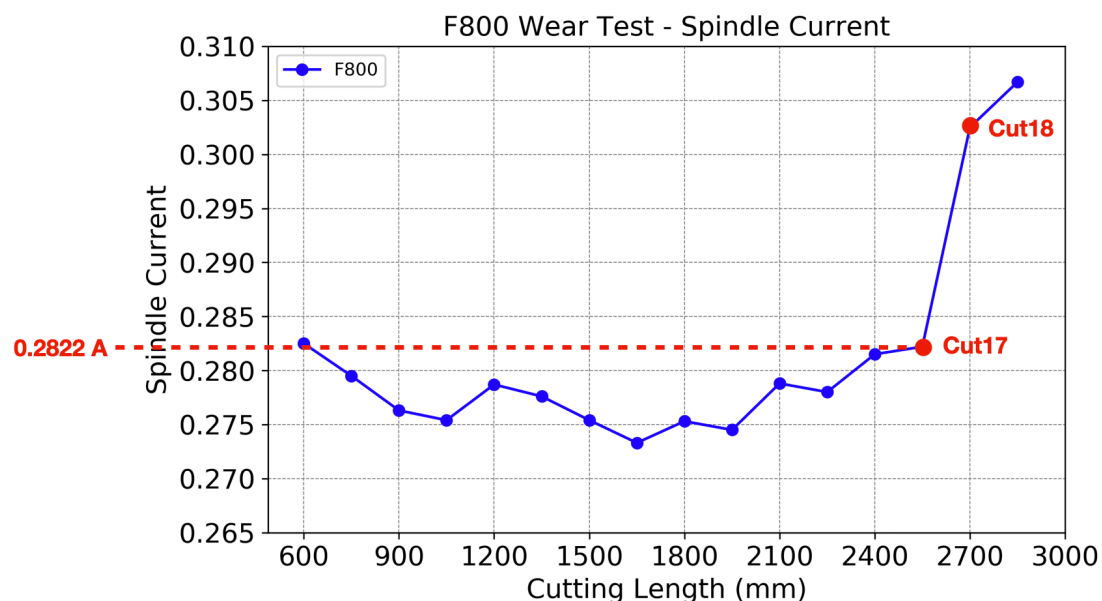


圖 36 等進給率槽銑加工 – 進給率 800mm/min 之主軸電流變化

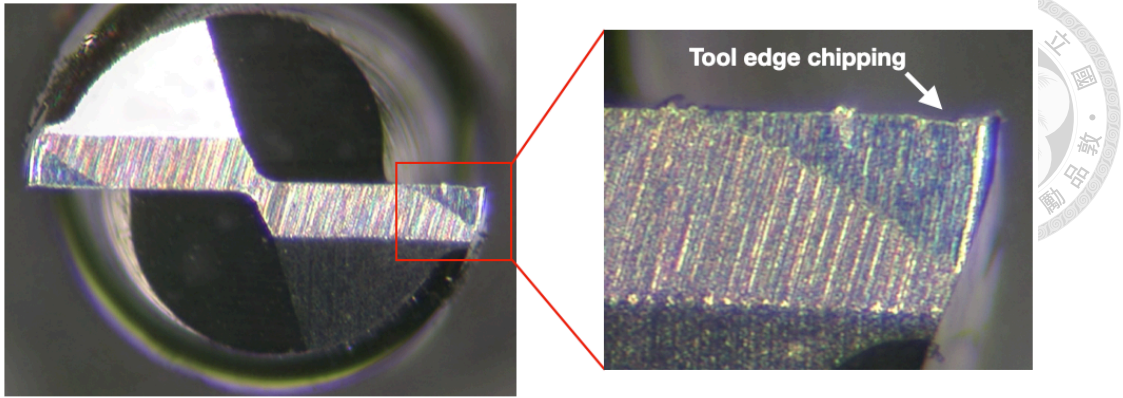


圖 37 等進給率槽銑加工 – 進給率 800mm/min 切削長度 2700mm 後之刀具磨耗

而進給率 400 mm/min – 700 mm/min 之主軸電流如圖 38 所示，加工中之主軸電流呈現穩定上升趨勢，並無如進給率 800 mm/min 急劇上升之情況。

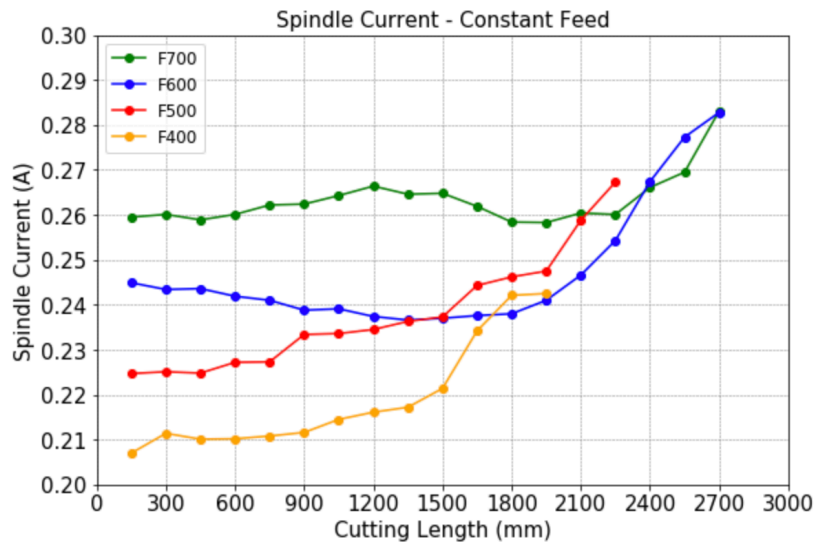


圖 38 等進給率槽銑加工 400 mm/min – 700 mm/min 之主軸電流訊號

5.1.2 表面粗糙度

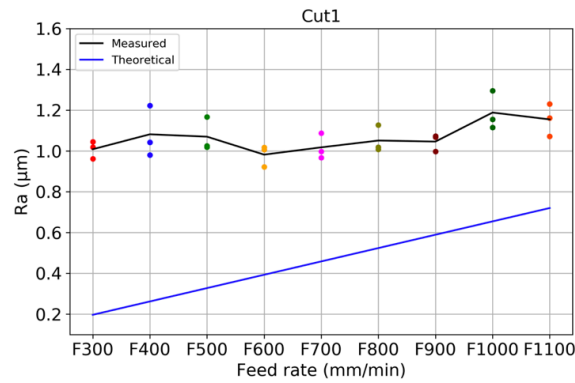
在考慮進給率上限之設定之前，須先確認表面粗糙度與進給率之關係。

槽銑實驗之進給率與表面粗糙度之關係如圖 39 所示。表面粗糙度之量測為每道加工量測 5 點並取平均值，如圖 40 所示。由前三刀實驗之表面粗糙度量測結果，表面粗糙度與進給率之間並無如理論公式之變化趨勢，實際量測之數值亦較理論值大。由 Zahoor 等人之研究[31]指出，表面粗糙度除與切削參數有關，也與主軸振動有關，並且主軸震動之影響程度較切削參數來的顯著。此處表面粗糙

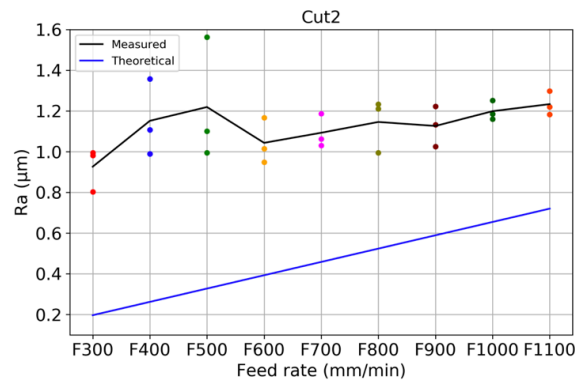
度與進給率無趨勢之現象，可能是由於機台或主軸震動對表面粗糙度之影響已大於進給率變化所造成之表面粗糙度變化，造成進給率之變化無法顯著的反應在與表面粗糙度數值之趨勢上。因此，本研究訂定進給率上限時，即不將表面粗糙度納入考量。



(a) 0~150mm



(b) 150mm~300mm



(c) 300mm~450mm

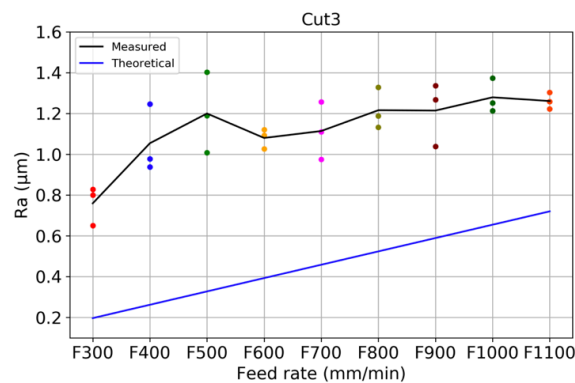


圖 39 槽銑加工進給率與表面粗糙度之關係

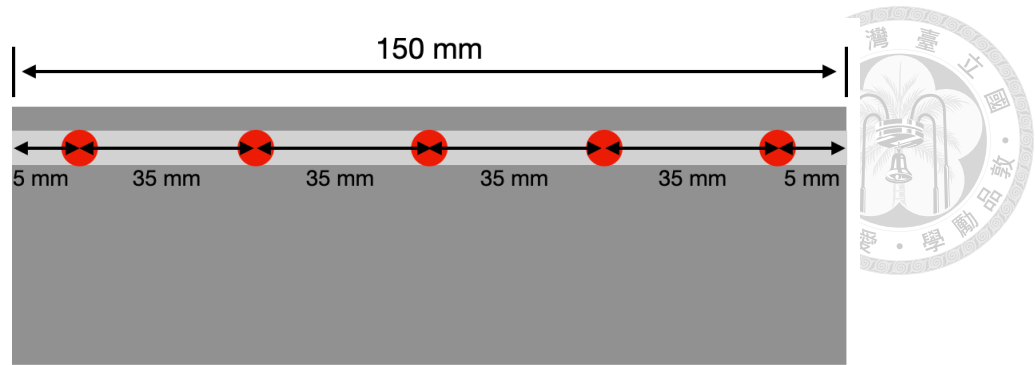


圖 40 表面粗糙度之量測位置

5.1.3 進給率上限

於 5.1.1 節，吾人已將參考電流設定為 0.24 A，發現表面粗糙度與進給率無直接關聯性。因此，進給率上限之設定，僅需參考新刀之進給率與主軸電流之關係，並適當調高進給率上限以適應不同之刀具初始狀態並達到最高之材料移除率。槽銑之新刀進給率與主軸電流之關係如圖 41，由實驗結果可知，參考電流 0.24 A 所對應到之進給率為 600 mm/min，而為了因應刀具狀態不同並提高進給率，因此，將槽銑之進給率上限設定為 700 mm/min。

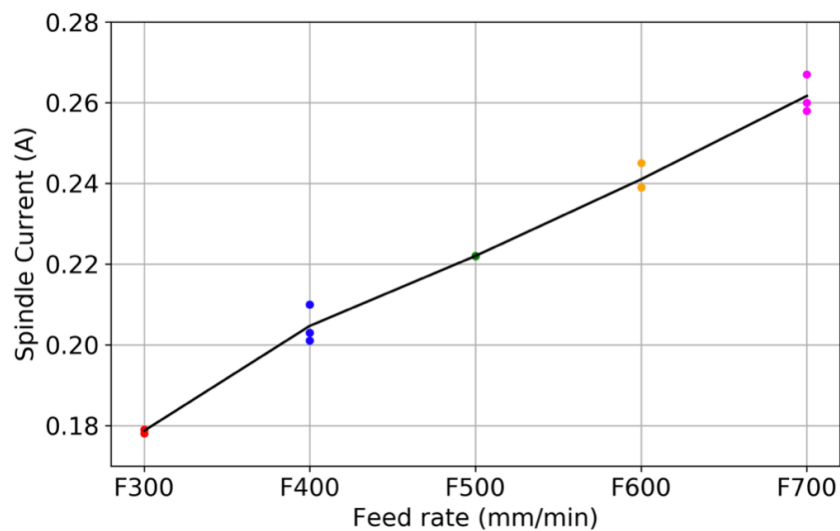


圖 41 槽銑加工進給率與主軸電流之關係

5.1.4 進給率下限

進給率下限值設定與參考電流及換刀磨耗範圍有關。由 4.1.3 所提到之進給率下限訂定方式，吾人進行了進給率 500 mm/min 以及 400 mm/min 之槽銑磨耗實驗，並紀錄每一刀之平均主軸電流與每道加工結束之刀具磨耗狀態。本研究所設定之換刀範圍為 180 μm 至 220 μm ，此乃由於本研究使用之刀具幾何限制以及磨耗超過換刀範圍後，刀具便會開始產生刀具材料剝落與崩刀等現象。

觀察進給率 500 mm/min 之主軸電流與刀具磨耗實驗結果，如圖 42 所示。當主軸電流達到參考電流 0.24 A 時，刀具磨耗約為 180~190 μm 之區間，位於換刀區間 180 μm – 220 μm 之下緣，為稍微保守但合理之進給率下限設定值，可保留一段切削長度讓使用者能完成該道次加工且不會使刀具磨耗超過磨耗範圍。

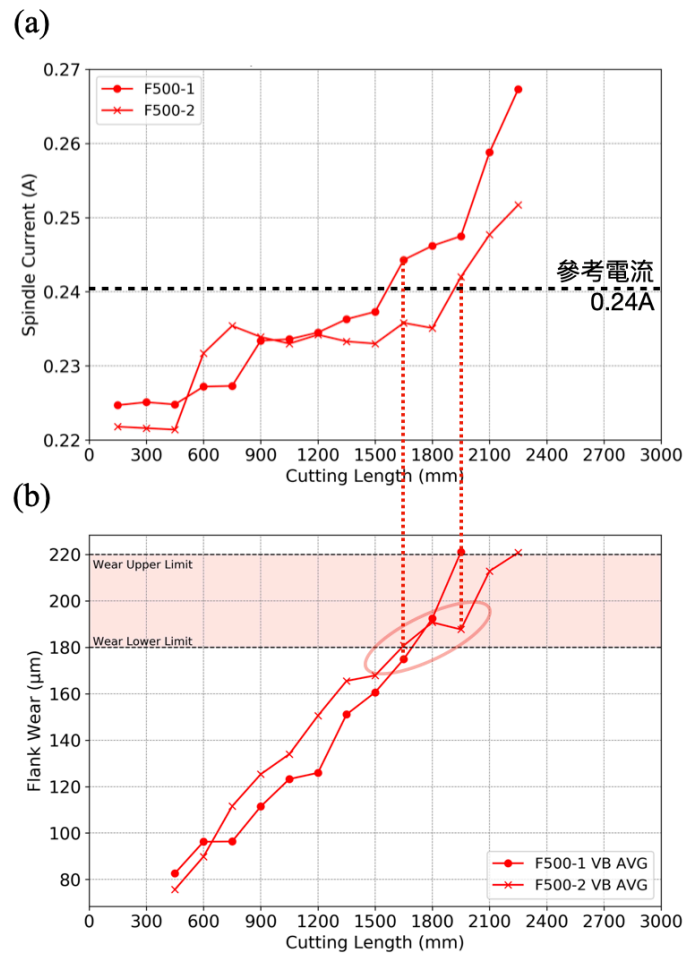


圖 42 槽銑加工進給率 500mm/min 實驗結果 (a)主軸電流 (b)刀具磨耗

而若觀察進給率 400 mm/min 之主軸電流與刀具磨耗實驗結果，如圖 43 所示，當刀具磨耗到達換刀區間之下緣時，主軸電流皆離參考電流 0.24 A 有約 0.6 A~1.2 A 之距離，而當主軸電流達到參考電流 0.24 A 時，實驗 F400-2 的刀具磨耗已經超出區間之上限。因此，使用進給率 400 mm/min 作為進給率下限為較具風險的做法，可能會發生當進給率下降至下限時，刀具磨耗已經超過設定之換刀範圍之現象。因此，進給率 500 mm/min 為較適合之進給率下限值。

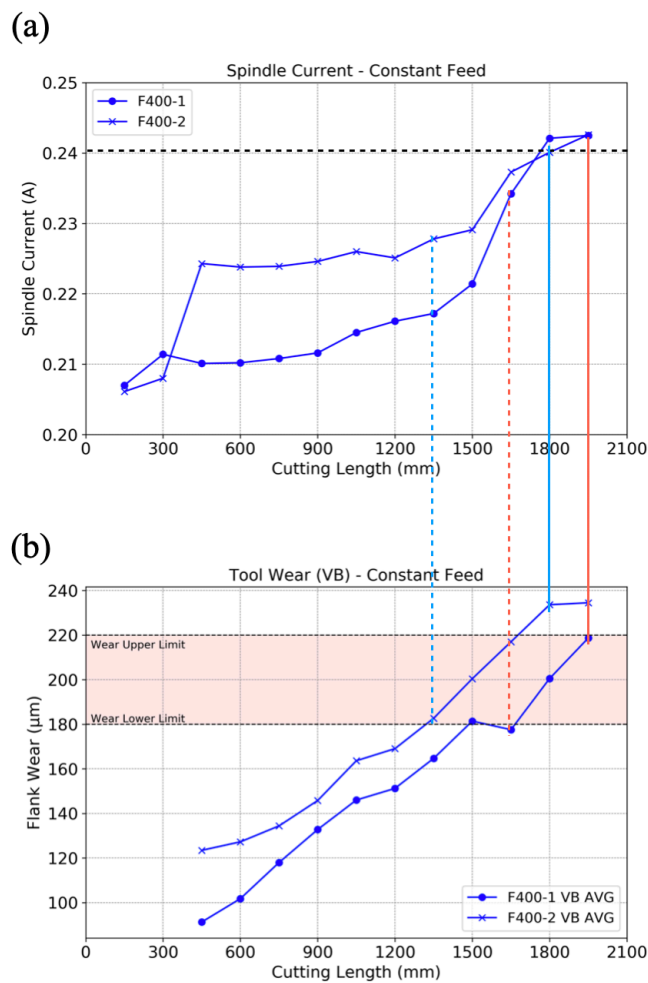


圖 43 槽銑加工進給率 400mm/min 實驗結果 (a)主軸電流 (b)刀具磨耗



5.2 等負載加工驗證 – 槽銑

由 5.1 之等負載加工參數訂定流程所建立之加工參數如表 9 等負載槽銑加工之加工參數所示。

表 9 等負載槽銑加工之加工參數

參考電流	0.24A
進給率上限	700mm/min
進給率下限	500mm/min

5.2.1 等負載控制驗證

以表 9 之等負載加工參數進行等負載槽銑加工，並設定 PI 控制器之比例增益 K_p 為 160、積分增益 K_i 為 0.006 進行加工。PI 控制器之設計乃先藉由 Labview 製作，並以 DAQ 對工具機輸入頻率不斷變化之正弦波掃頻訊號，公式如下：

$$y = A \times \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{f_1 - f_0}{2T}t\right)t\right) \quad (25)$$

其中 A 為強度， f_0 為初始頻率， f_1 為結束頻率， T 為目標時間， t 為當下時間， y 為輸出波形。本研究由 DAQ 輸出強度 2.5 V，目標時間 15 秒，頻率由 0.1 Hz 增加至 2 Hz 之正弦波進給率電壓掃頻訊號，改變切削時之進給率，並由 DAQ 回收工具機輸出之電流訊號。得到工具機之電流輸出結果後，先進行訊號前處理移除輸出與輸入訊號之平均值，如圖 44，再將後處理過之輸入進給率電壓與輸出電流訊號匯入 Matlab 軟體之 Arx Model 進行系統動態方程識別，得到進給率輸入電壓與主軸電流輸出間之轉移函數：

$$G_{CNC} = \frac{0.0611z^{-1} - 0.1338z^{-2} + 0.0752z^{-3}}{1 - 2.0311z^{-1} + 1.2104z^{-2} - 0.1655z^{-3}} \quad (26)$$

而將鑑別結果與實驗輸出比較如圖 45，得到切削系統之動態方程後，透過 Matlab

Simulink 之 PID Tuner 模組得出符合系統響應需求之比例增益與積分增益。

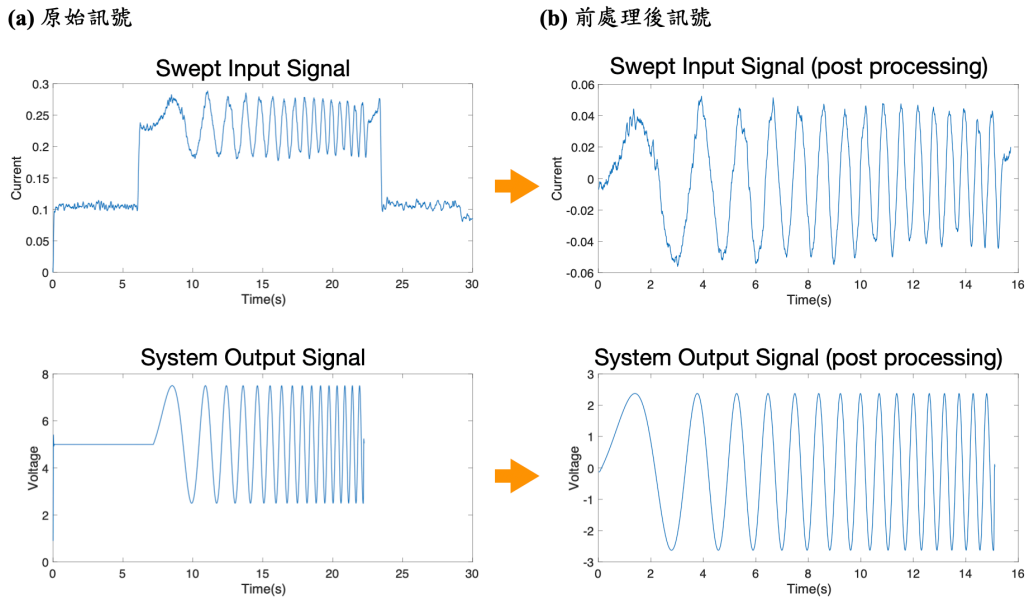


圖 44 掃頻實驗結果之 (a)掃頻實驗原始訊號，(b)前處理後結果

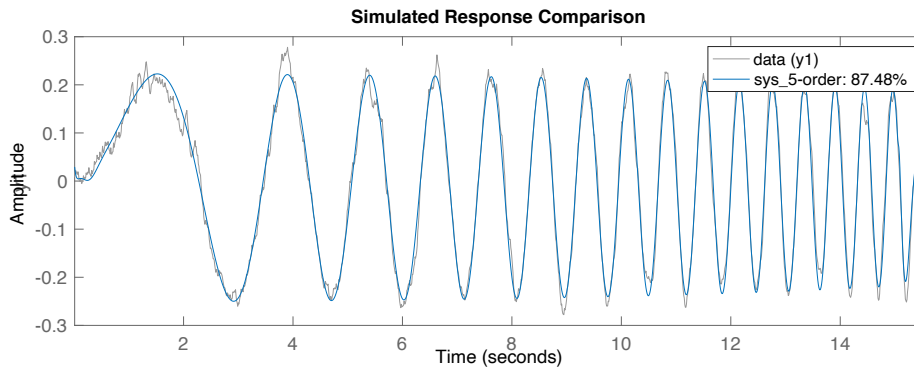
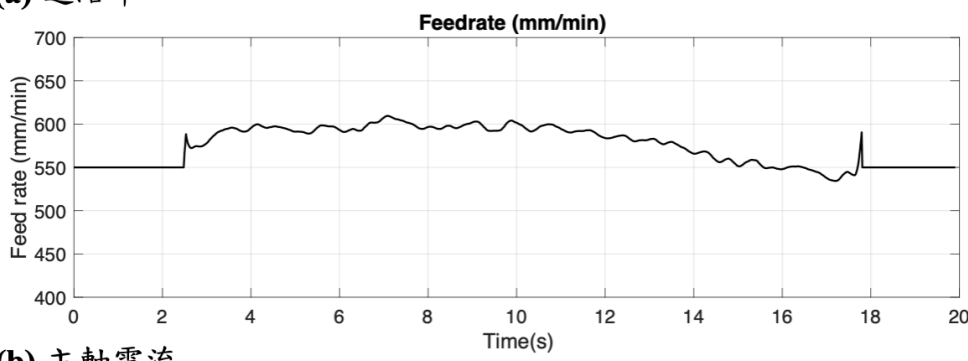


圖 45 系統識別與實驗輸出結果比較

將 PI 控制器參數應用於等負載切削之即時訊號如圖 46 所示，參考電流為 0.24 A，而實際加工之平均電流控制於 0.2399 A，於加工時之電流變異(最大電流和最小電流之差值)為 7.5%。然而，當進給率下降至下限時，由於控制器無法繼續隨著刀具磨耗增加而降低進給率維持等主軸負載，因此主軸電流會開始上升，無法繼續維持於設定之參考電流，其即時訊號如圖 47 所示。等負載切削之平均主軸電流隨刀具磨耗之變化如圖 48 所示，test 1 - test 3 皆可將電流控制於參考電流之 1%內。



(a) 進給率



(b) 主軸電流

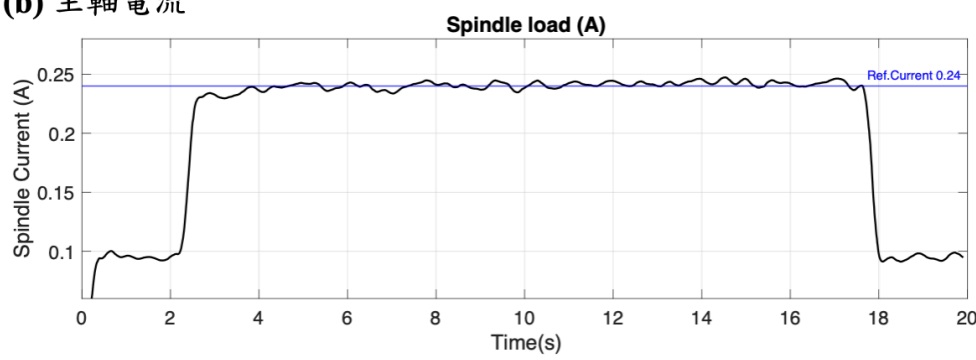
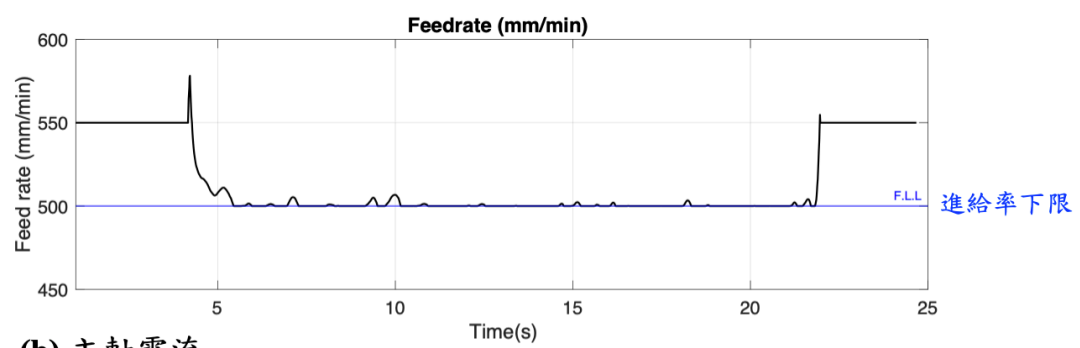


圖 46 等負載切削槽銑加工之控制效果之 (a) 進給率 (b) 主軸電流 訊號

(a) 進給率



(b) 主軸電流

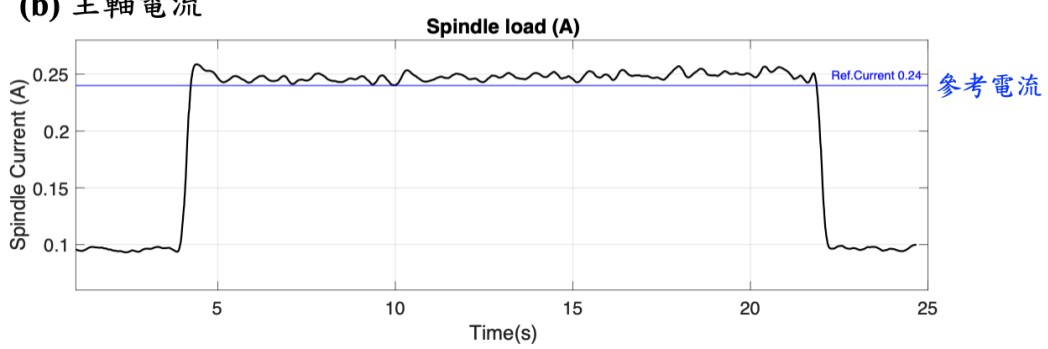


圖 47 等負載切削槽銑加工 - 進給率到達下限後之 (a) 進給率 (b) 主軸電流 訊號

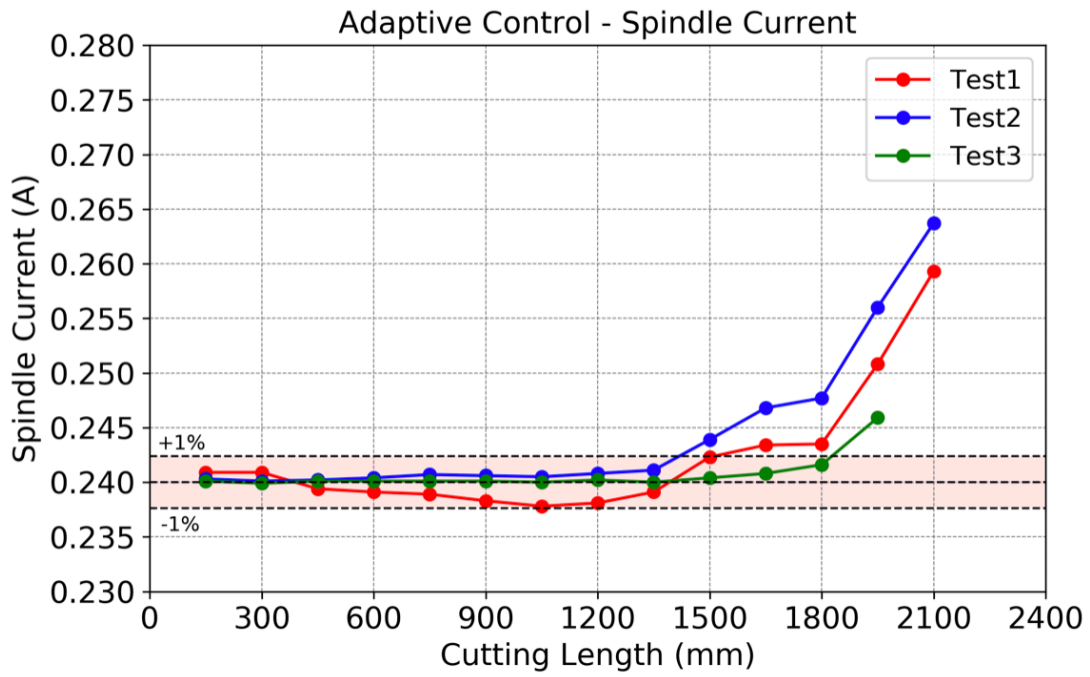
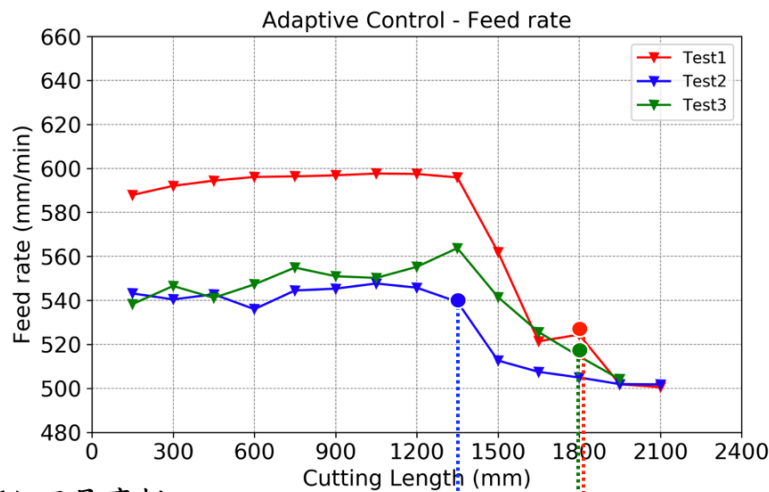


圖 48 等負載槽銑加工主軸電流

5.2.2 換刀時機驗證

等負載槽銑加工之平均進給率與刀具磨耗結果如圖 49 所示，圖中標示並以虛線連接之資料點為進給率下降至進給率下限時之資料點與其相對應之刀具磨耗數值，Test1 進給率達下限之即時訊號如圖 50 所示，進給率與主軸電流之即時訊號如圖 51。表 10 為當進給率首次到達下限之工序結束所量測之刀具磨耗數值整理。結果顯示，當進給率到達下限時，刀具磨耗皆無超出換刀區間上限，其平均值為 $182.13 \mu\text{m}$ ，位於本研究設定之 $180 \mu\text{m} - 220 \mu\text{m}$ 範圍內。

(a) 進給率



(b) 刀具磨耗

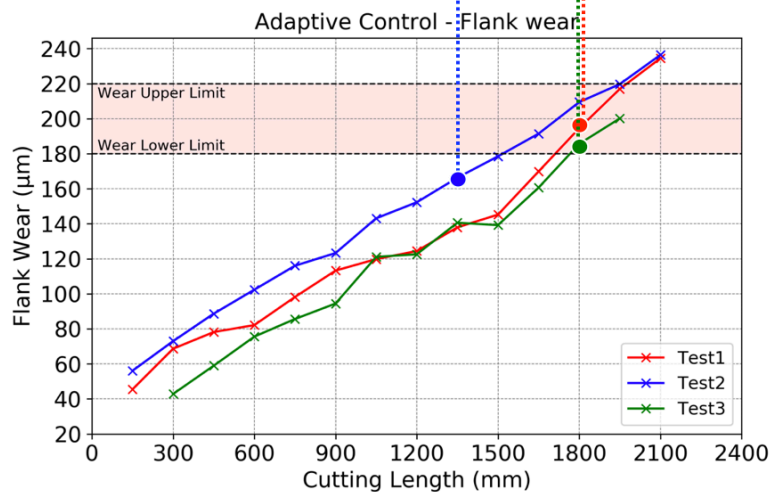
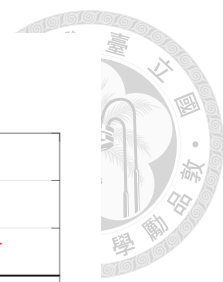
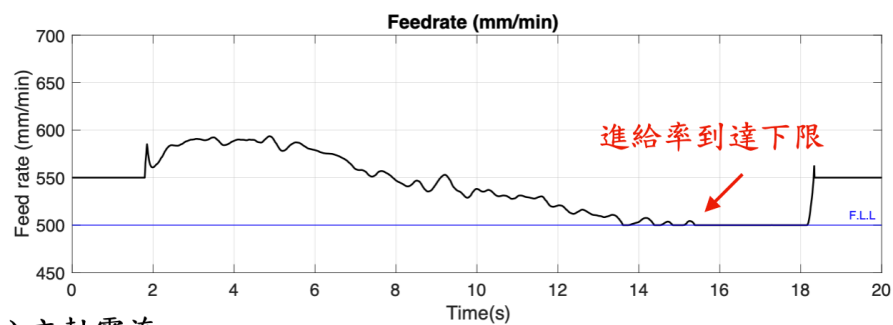


圖 49 等負載槽銑加工 (a)進給率 (b)刀具磨耗



(a) 進給率



(b) 主軸電流

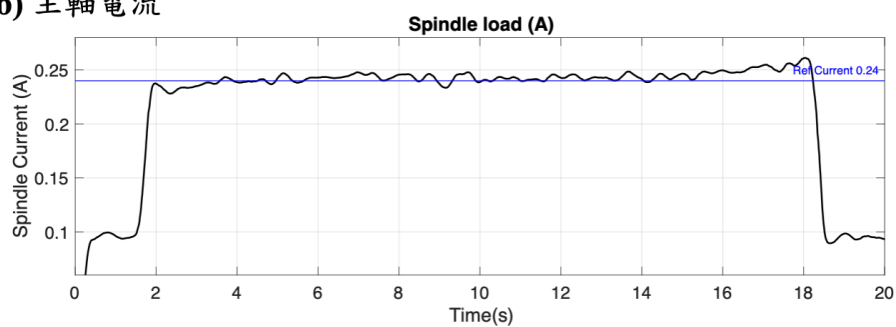
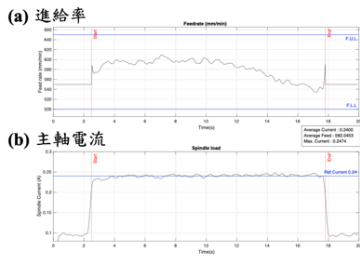
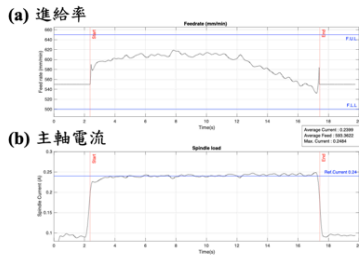


圖 50 等負載切削槽銑加工之進給率達下限時之 (a) 進給率 (b) 主軸電流訊號

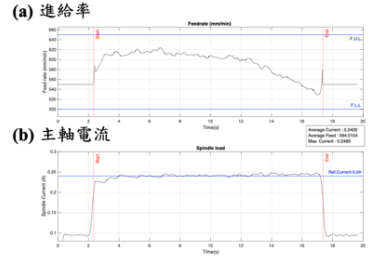
第一道



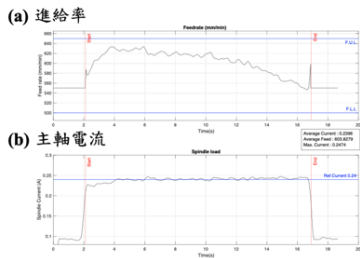
第二道



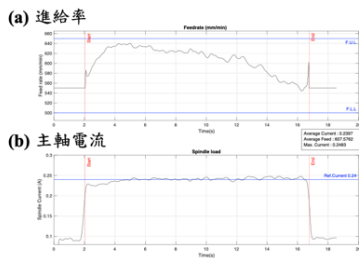
第三道



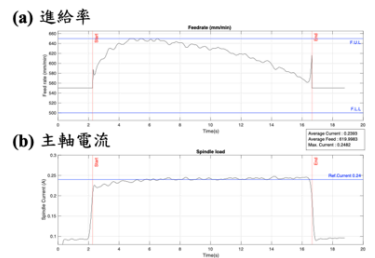
第四道



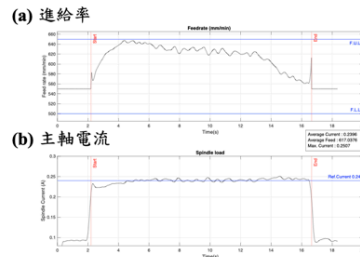
第五道



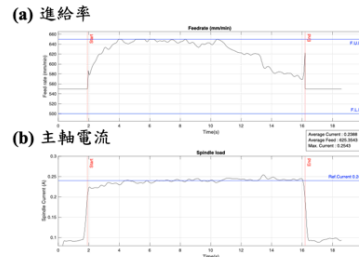
第六道



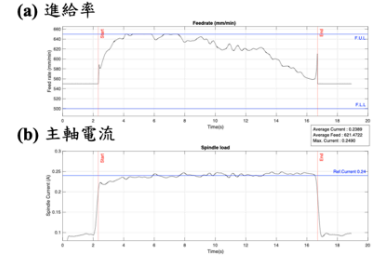
第七道



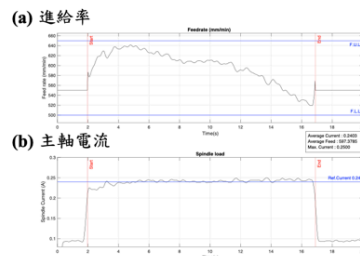
第八道



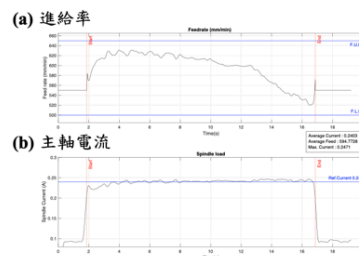
第九道



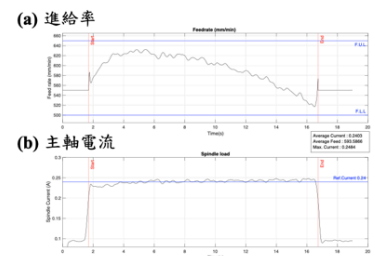
第十道



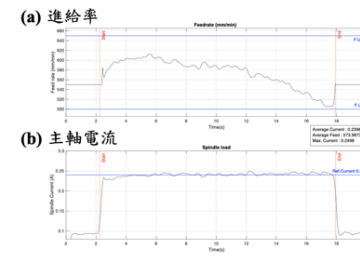
第十一道



第十二道



第十三道



第十四道

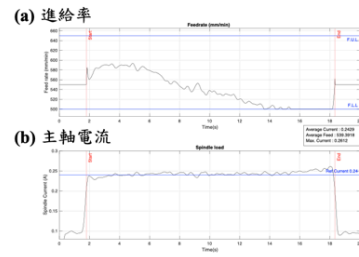
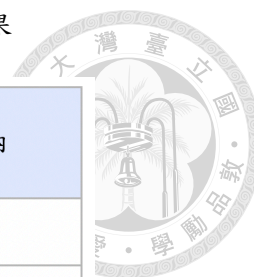


圖 51 等負載槽銑加工之進給率與主軸電流訊號

表 10 等負載槽銑加工進給率達下限之刀腹磨耗數值結果

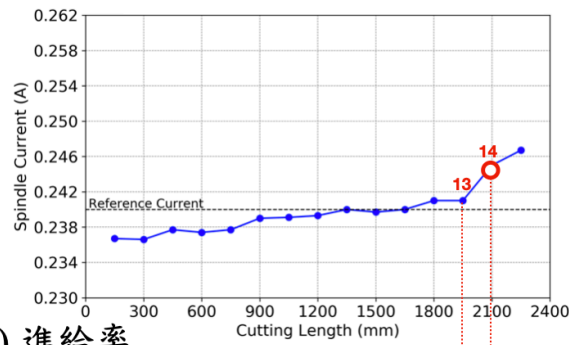


Test	進給率降至下限後之磨耗數值(μm)	磨耗指標是否位於換刀區間內
1	194.53	是
2	166.27	較區間下限低 13.7 μm
3	185.60	是
平均	182.13	-

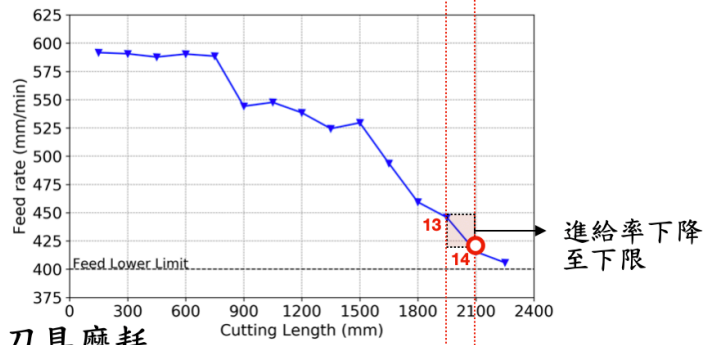
然而，於 4.1.3 之討論曾提到，進給率之下限設定與換刀時之刀具磨耗習習相關，若設定過低的進給率下限，可能會造成當進給率到達下限時，刀具已超過設定之磨耗範圍的現象，將可能造成刀具損壞、尺寸精度變差等負面影響。因此，吾人以進給率 400 mm/min 作為進給率下限進行一組等負載加工，加工結果如圖 52 所示。由實驗結果顯示，進給率在第 14 道加工到達進給率下限 400 mm/min，如圖 53 所示，而第 14 道加工結束之刀具磨耗為 224.06 μm ，已超過本研究所設定之磨耗換刀區間 180 μm – 220 μm 。可證明進給率 400 mm/min 為風險較大之進給率下限設定值，可能會造成刀具過度磨耗的現象。



(a) 主軸電流



(b) 進給率



(c) 刀具磨耗

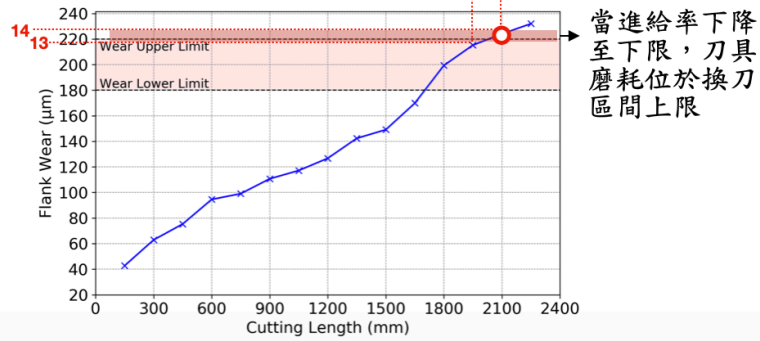
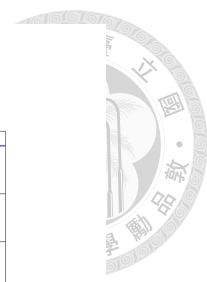
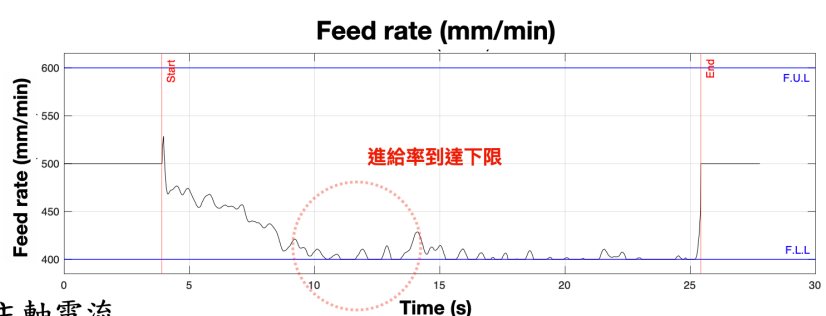


圖 52 等負載槽銑加工 – 進給率下限 400 mm/min 之(a)主軸電流 (b)進給率 (c)刀具磨耗



(a) 進給率



(b) 主軸電流

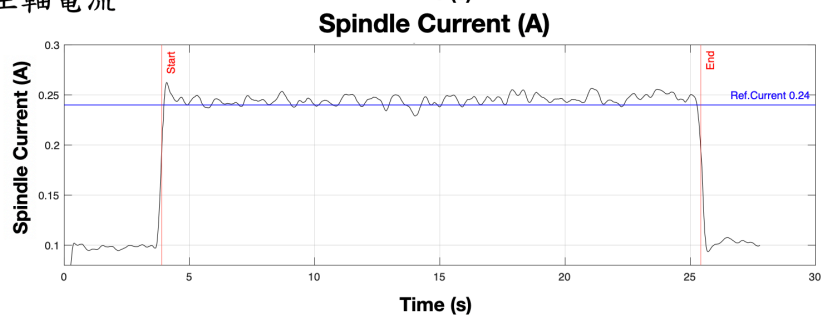


圖 53 等負載切削槽銑加工 – 進給率達下限 400 mm/min 之即時訊號(第 14 道加工)

5.2.3 材料移除率與刀具壽命

材料移除率與刀具壽命為衡量加工成本與經濟效益之重要指標。本實驗所使用之刀具，參考刀具廠商所提供之加工參數，因此，本研究以等進給率 400 mm/min 之刀具磨耗表現與等負載槽銑切削進行比較。兩者之刀具磨耗表現如圖 54 所示。實驗結果顯示，等負載加工之磨耗率與切削長度皆較刀具廠商提供之參數要優異。到達設定之換刀區間時，等負載加工之材料移除率平均值為 3.82 mm³/s，平均切削長度為 1762 mm，等進給率加工之材料移除率平均值為 2.53 mm³/s，平均切削長度為 1350 mm。等負載加工之材料移除率提升 51%，切削長度提升 30%。

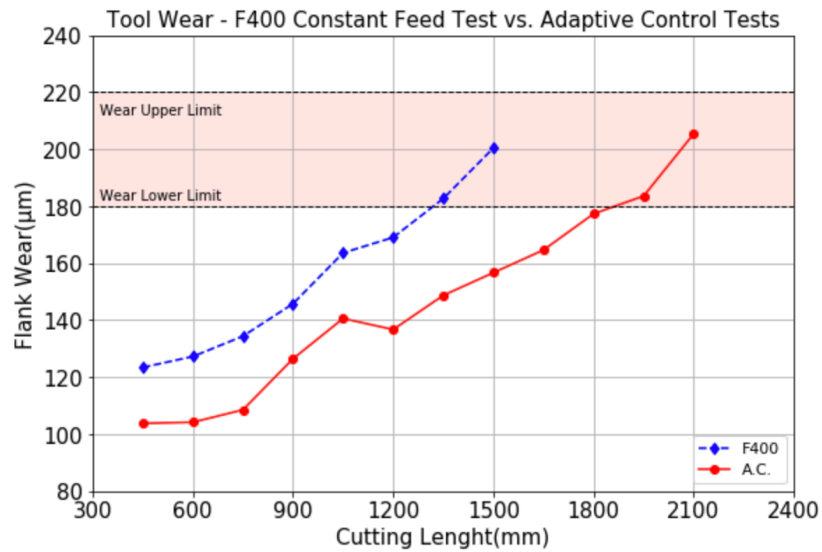


圖 54 等進給率 400mm/min 與等負載槽銑加工之磨耗比較

5.2.4 小結

基於研究所提出之等負載加工參數訂定流程於本小節進行實際加工，刀具磨耗可準確反映於即時進給率變化中，當進給率下降至下限，刀具磨耗皆處於換刀區間內亦或是即將到達區間。再者，比較等進給加工參數與等負載加工之刀具磨耗，等負載加工無論在材料移除率與刀具壽命皆有較優異之表現。

5.3 等負載加工參數選定流程 – 端銑

端銑加工之等負載加工參數選定流程與槽銑之流程相同。於等進給率 1000 mm/min 之磨耗實驗中主軸電流於 0.277 A 後急劇上升至 0.298 A，如圖 55 所示，而上升至 0.298A 之刀具磨耗如圖 56 所示，可從磨耗照片觀察出刀刀 chipping。因此，由實驗結果可知磨耗後之刀具能承受之最高主軸電流約在 0.28 A，並設定一安全係數 1.17，亦即將主軸最高電流 0.28A 乘以 0.85 設定主軸參考電流 0.24 A。

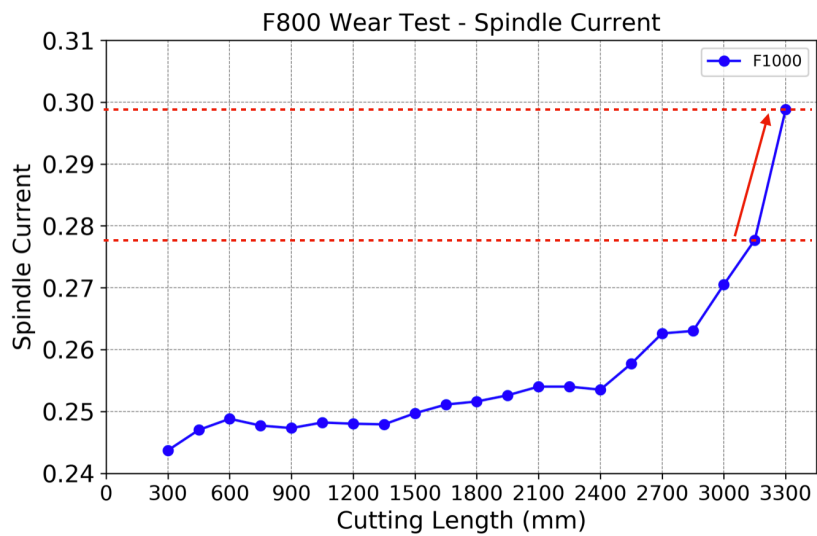


圖 55 等進給率端銑加工 – 進給率 1000 mm/min 之主軸電流變化

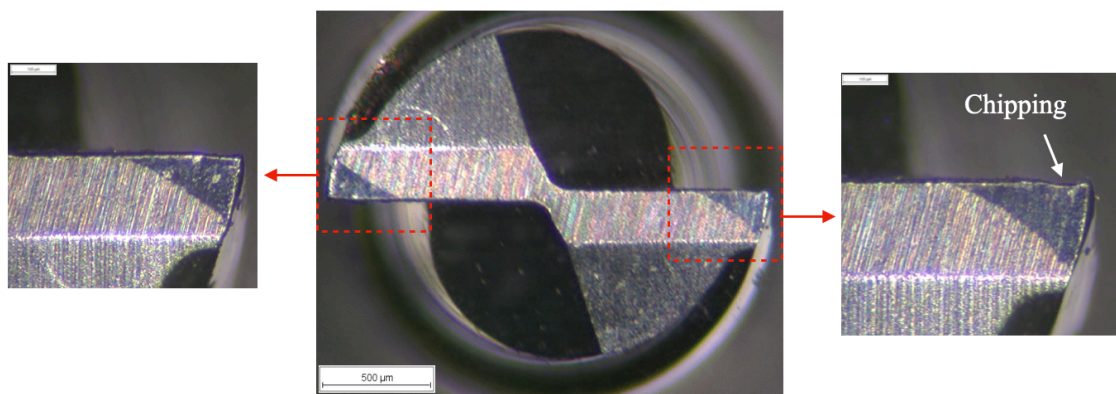


圖 56 等進給率端銑加工 – 進給率 1000 mm/min 電流上升至 0.298 A 之刀具磨耗

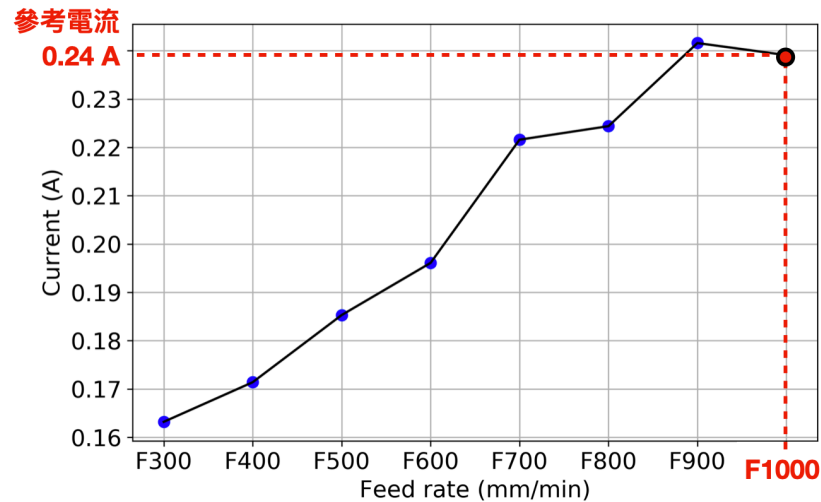


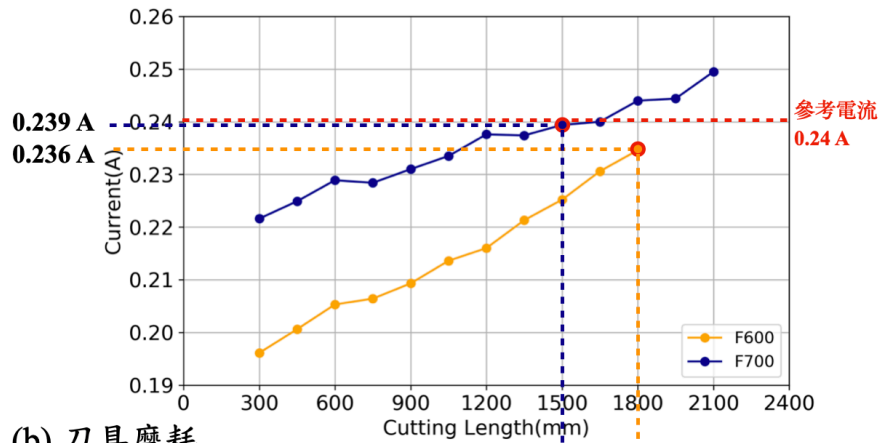
圖 57 端銑加工新刀具進給率與主軸電流之關係

槽銑加工之新刀進給率與主軸電流之關係如圖 57 所示。由實驗結果觀察，初始主軸電流 0.24 A 所對應進給率約為 1000 mm/min，故端銑之進給率上限設定為 1100 mm/min 以達到最高之材料移除率。

進給率下限設定之磨耗實驗如圖 58 所示。當進給率 700 mm/min 之主軸電流接近參考電流 0.24 A 時，刀具磨耗為 167.3 μm ，尚未進入磨耗範圍 180 μm – 220 μm ，因此，若設定 700 mm/min 為進給率下限，可能會造成銑削實驗結束時刀具磨耗尚未進入設定之換刀範圍內的現象。當進給率 600 mm/min 之主軸電流於 0.236 A，刀具磨耗為 205.1 μm ，位於磨耗範圍 180 μm – 220 μm 之中段，因此，將 600 mm/min 設定為進給率下限，應可使進給率到達下限時，刀具磨耗亦處於換刀範圍內。



(a) 主軸電流



(b) 刀具磨耗

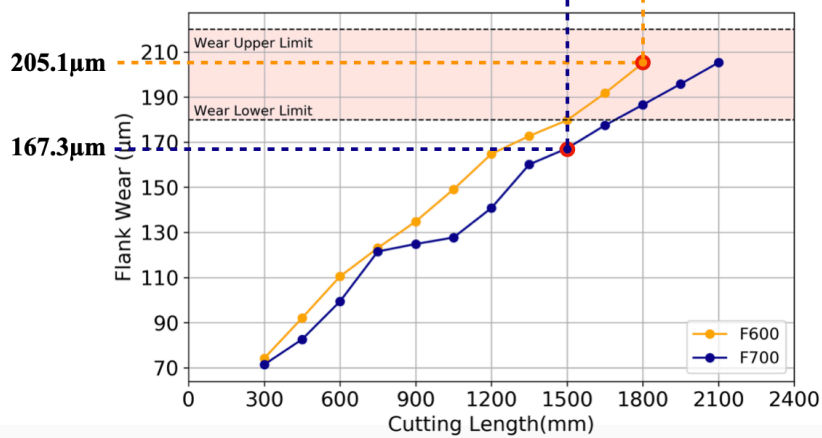


圖 58 等進給率端銑加工進給率 600 mm/min 與 700 mm/min 之 (a)主軸電流 (b)刀具磨耗

5.4 等負載加工驗證 – 端銑

由 5.3 節所設定之端銑等負載加工參數如表 11 所示。

表 11 等負載端銑加工之加工參數

參考電流	0.24A
進給率上限	1100mm/min
進給率下限	600mm/min

5.4.1 等負載控制驗證

以表 11 之加工參數進行等負載加工，並將端銑之切削系統動態方程近似於槽銑，同樣設定 PI 控制器之 K_p 為 160、 K_i 為 0.006 進行加工。等負載加工之即時控制訊號如圖 59 所示，其設定之參考電流為 0.24 A，平均電流為 0.2387 A，於加工時之電流變異(最大電流和最小電流之差值)為 7.6%，直到進給率到達下限值時，控制器無法繼續降低進給率以維持等負載加工後，主軸電流即開始上升，如圖 60。其主軸電流隨刀具磨耗之變化如圖 61，於 test 1 – test 5 皆在進給率到達下限前將電流控制於參考電流之 1% 內，。

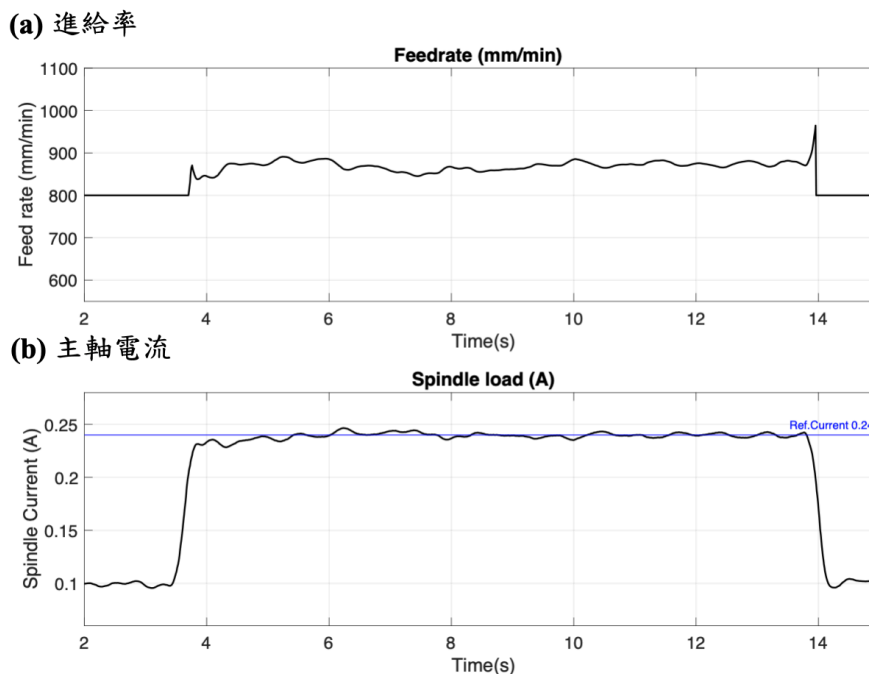
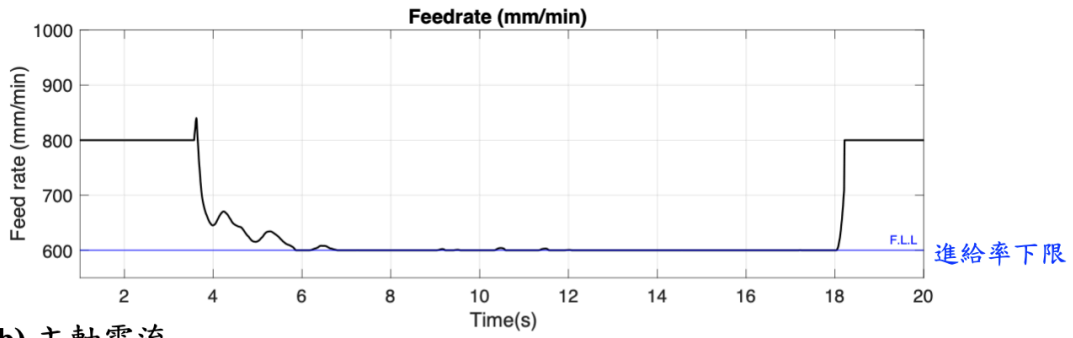


圖 59 等負載切削端銑加工之控制效果

(a) 進給率



(b) 主軸電流

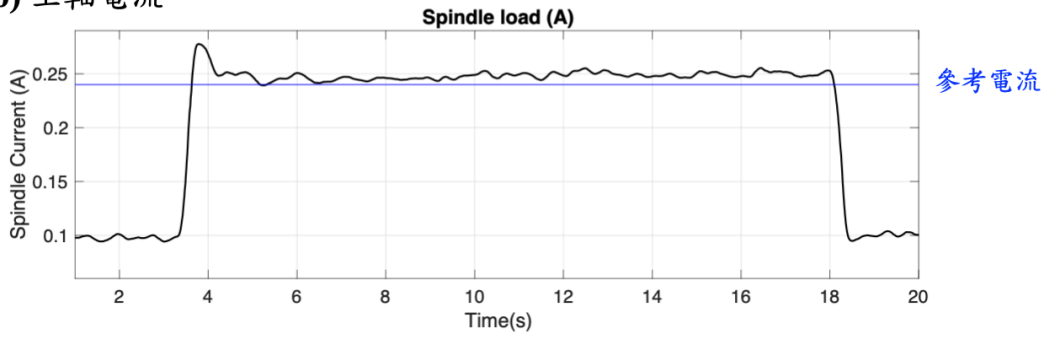


圖 60 等負載切削端銑加工 - 進給率到達下限後之 (a) 進給率 (b) 主軸電流 訊號

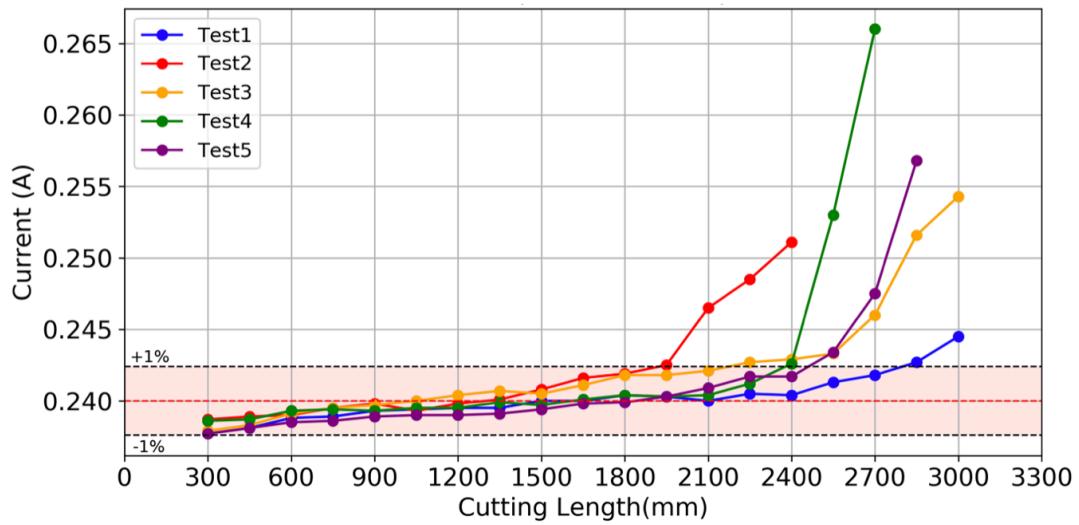


圖 61 等負載端銑加工主軸電流



5.4.2 換刀時機驗證

等負載端銑加工之進給率與刀具磨耗結果如圖 62 所示，圖中標示之資料點為該次銑削時進給率下降至進給率下限相對應之磨耗數值，圖 63 則為進給率與主軸電流即時訊號。表 12 為當進給率首次到達下限之銑削結束所量測之刀具磨耗整理。結果顯示，當進給率到達下限時，刀具磨耗皆無超出換刀區間上限，其平均值為 201.09 μm ，約位於換刀區間之中段，符合刀具磨耗位於換刀區間的目的。

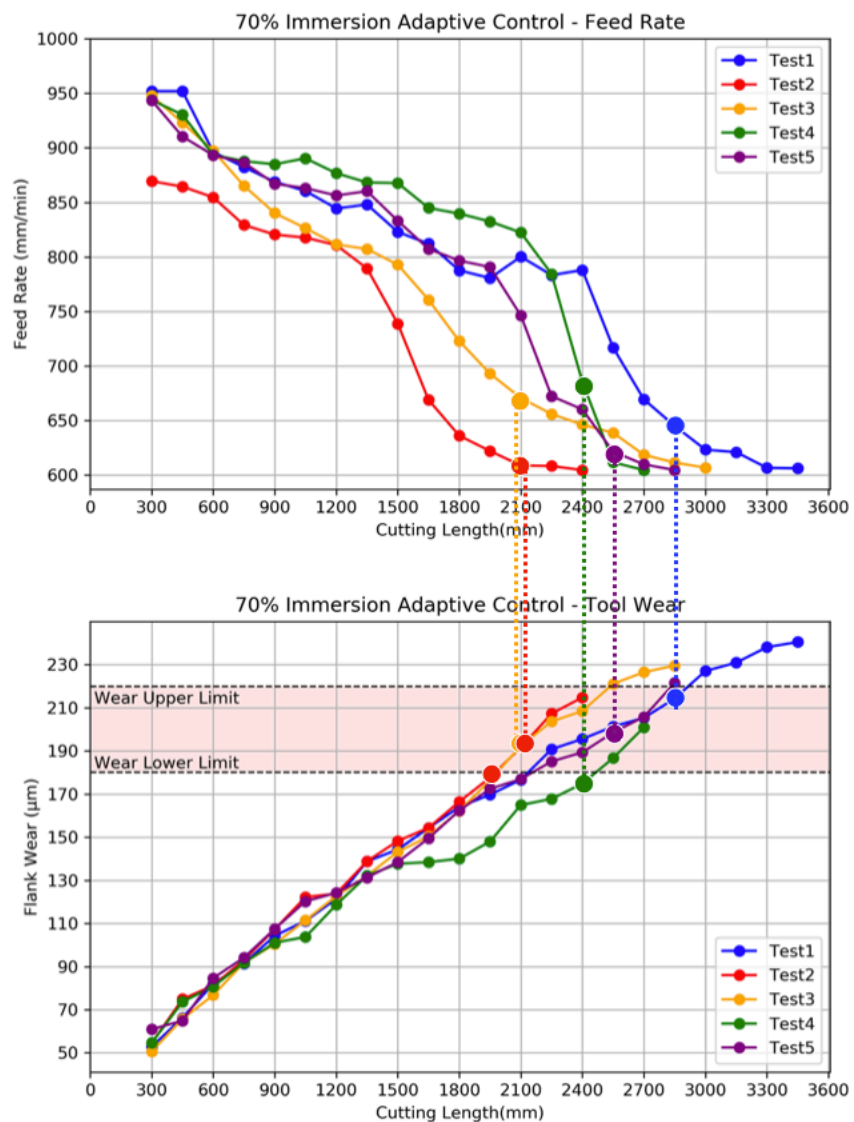


圖 62 等負載端銑加工 (a)進給率 (b)刀具磨耗

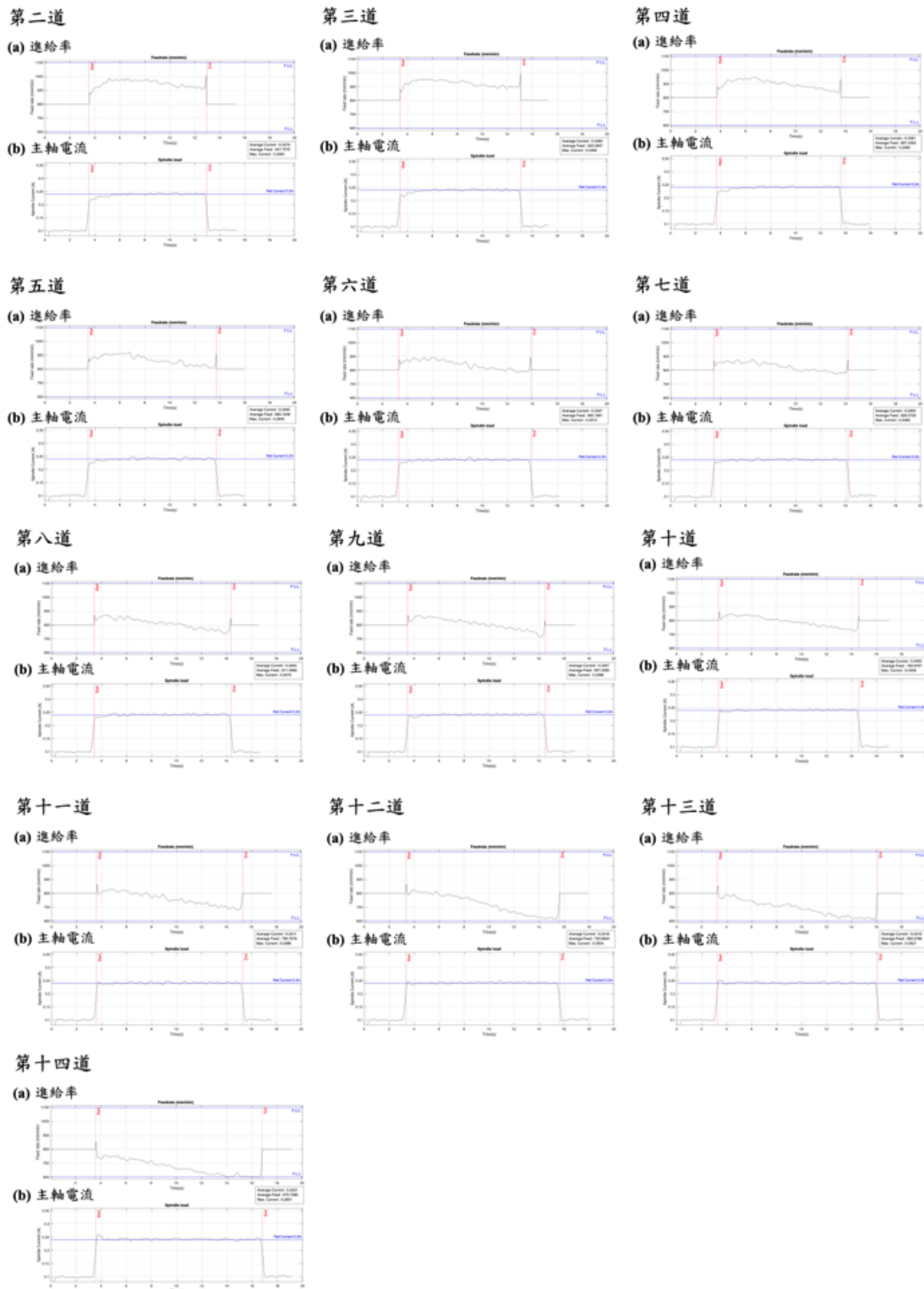


圖 63 等負載端銑加工之進給率與主軸電流訊號

Test	進給率降至下限後之磨耗數值(μm)	磨耗指標是否位於換刀區間內
1	214.30	是
2	194.45	較區間下限低 5 μm
3	192.34	是
4	198.59	是
5	205.80	是
平均	201.09	-

表 12 等負載端銑加工進給率達下限之刀腹磨耗結果

5.4.3 材料移除率與刀具壽命

等負載加工與等進給率加工之刀具磨耗表現比較如圖 64 所示。本研究所使用之刀具，刀具廠商並無提供端銑之加工參數。由於進給率 800 mm/min 加工中會出現主軸負載電流不穩定的現象，如圖 65 所示，並且在刀具磨耗方面產生較明顯的 chipping 現象，如圖 66 所示。因此，此處以進給率 700 mm/min 與 600 mm/min 為比較對象。

由圖 64 顯示，等負載加工之切削長度為 2200 mm，等進給率 700 mm/min 之切削長度為 1800 mm，等負載加工有 23% 的切削長度提升。

而等負載端銑加工之材料移除率為 3.79 mm³/s，等進給率 700 mm/min 之材料移除率為 3.267 mm³/s，等負載加工有 16% 之材料移除率提升。

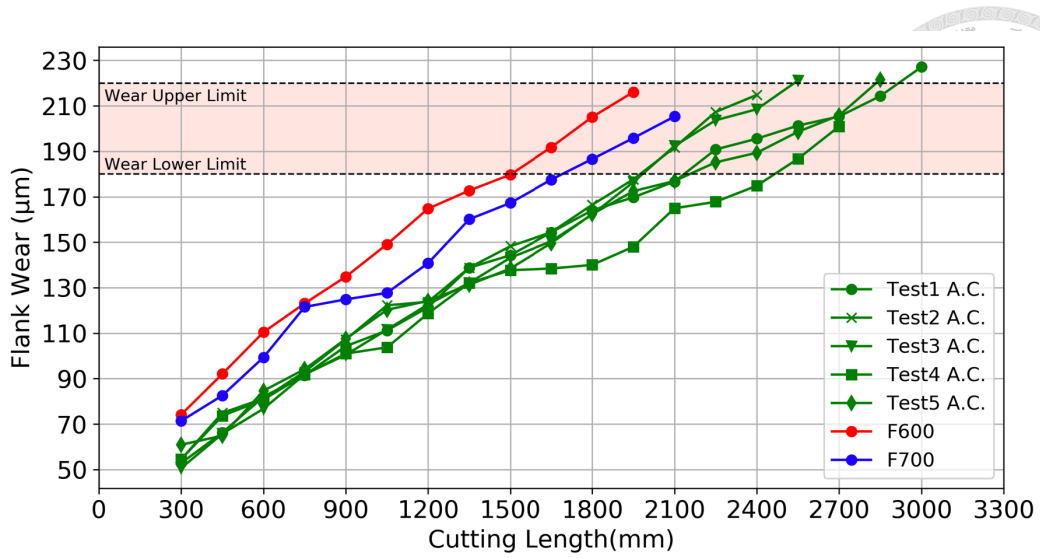


圖 64 等進給率與等負載端銑加工之磨耗比較

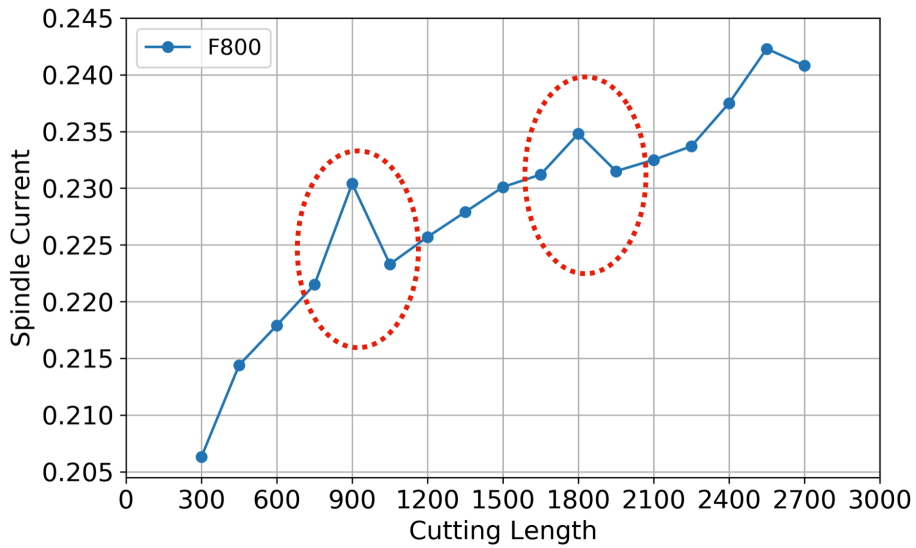


圖 65 等進給率端銑加工 - 進給率 800 mm/min 之主軸電流

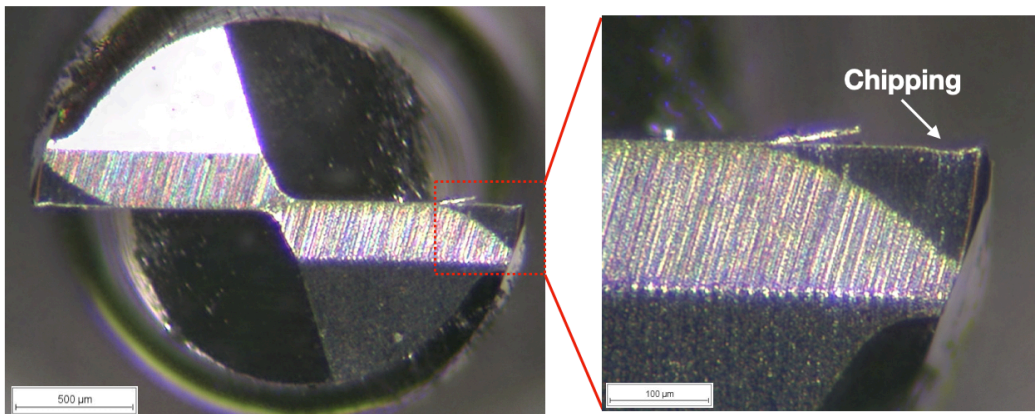


圖 66 進給率 800 mm/min 之刀具 chipping 現象



5.5 載具加工驗證實驗

載具加工驗證實驗之刀具路徑採用槽銑、端銑混合方式進行加工，槽銑與端銑分別使用 5.1 與 5.3 小節所建置之加工參數如表 13。本研究共進行兩次載具加工驗證實驗，實驗中僅記錄進給率與主軸電流。當進給率下降至進給率下限設定值，便將 Z 軸提起量測刀腹磨耗。

表 13 載具加工使用之加工參數表

槽銑	
參考電流	0.24 A
進給率上限	700 mm/min
進給率下限	500 mm/min
端銑	
參考電流	0.24 A
進給率上限	1100 mm/min
進給率下限	600 mm/min

實驗(一)中，進給率於進行第七道槽銑時到達進給率下限如圖 67，進給率與主軸電流訊號如圖 68 所示，刀具磨耗 CCD 影像如圖 69 所示。刀具之刀腹磨耗平均值為 179.48 μm ，正好位於換刀區間之下限，符合換刀磨耗指標。

實驗(二)中，進給率於進行第九道槽銑時到達進給率下限如圖 70，進給率與主軸電流訊號如圖 71 所示，刀具磨耗 CCD 影像如圖 72 所示。刀具之刀腹磨耗平均值為 199.63 μm ，位於換刀區間之中間區段，符合換刀磨耗指標。

兩次實驗在進給率到達下限後，皆能保持磨耗於磨耗區指標間內，並且進行提刀與換刀，繼續完成加工，加工成品照片如圖 73 所示。

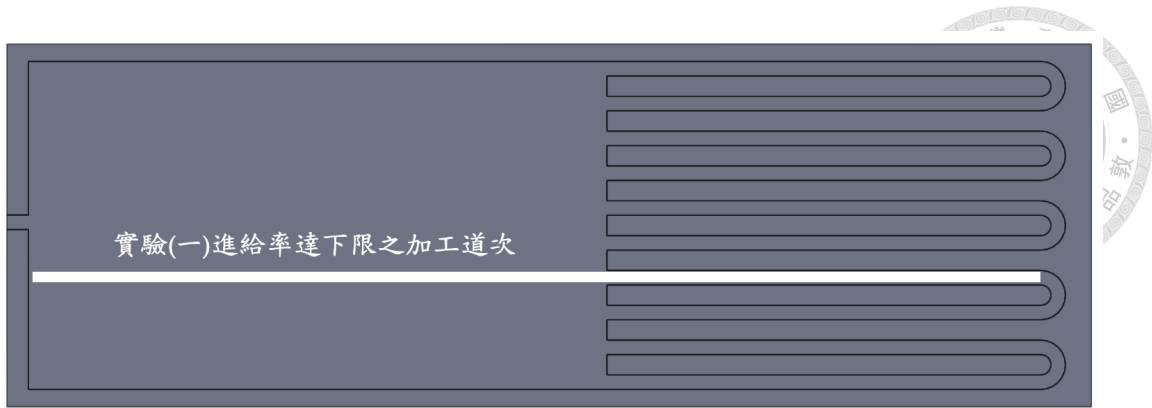
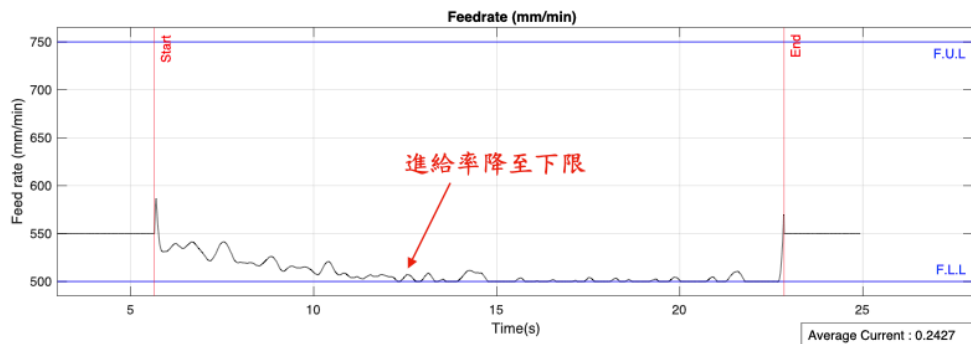


圖 67 實驗(一) 進給率達下限之加工道次

(a) 進給率



(b) 主軸電流

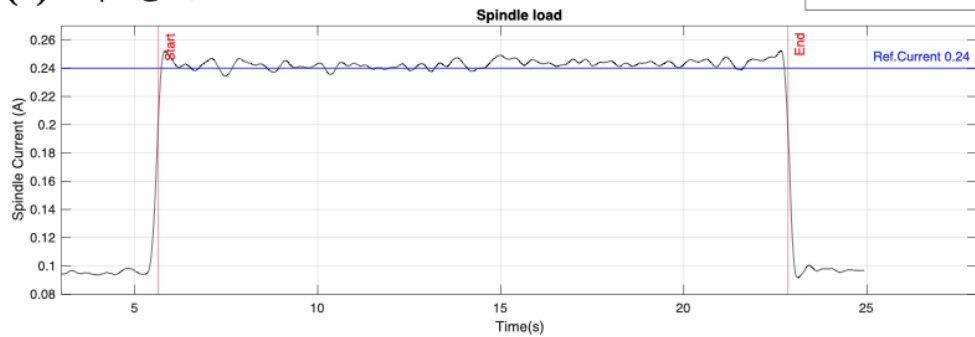


圖 68 載具加工實驗(一)換刀前之加工訊號 (a) 進給率 (b) 主軸電流

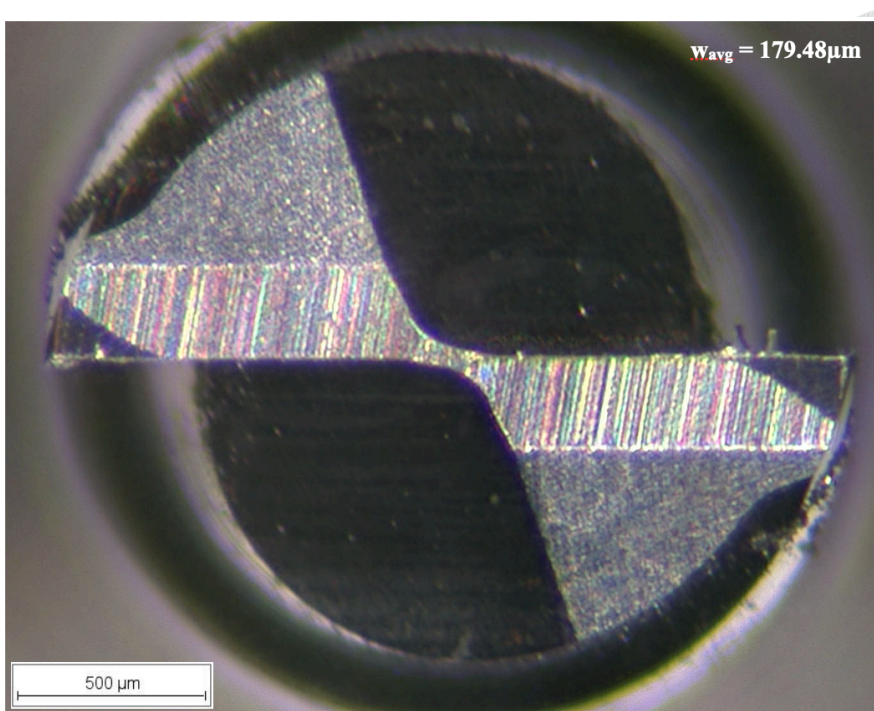
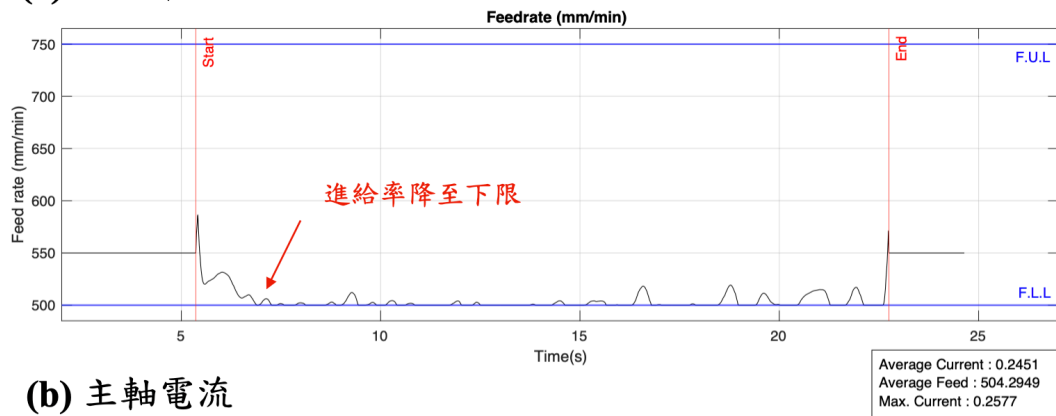


圖 69 載具加工實驗(一) 進給率達下限時之刀具磨耗影像



圖 70 實驗(二) 進給率達下限之加工道次

(a) 進給率



(b) 主軸電流

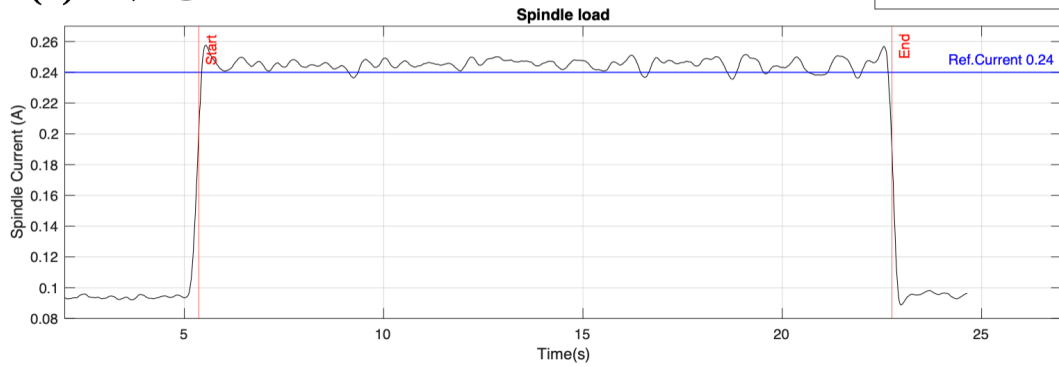


圖 71 載具加工實驗(二)換刀前之加工訊號 (a) 進給率 (b) 主軸電流

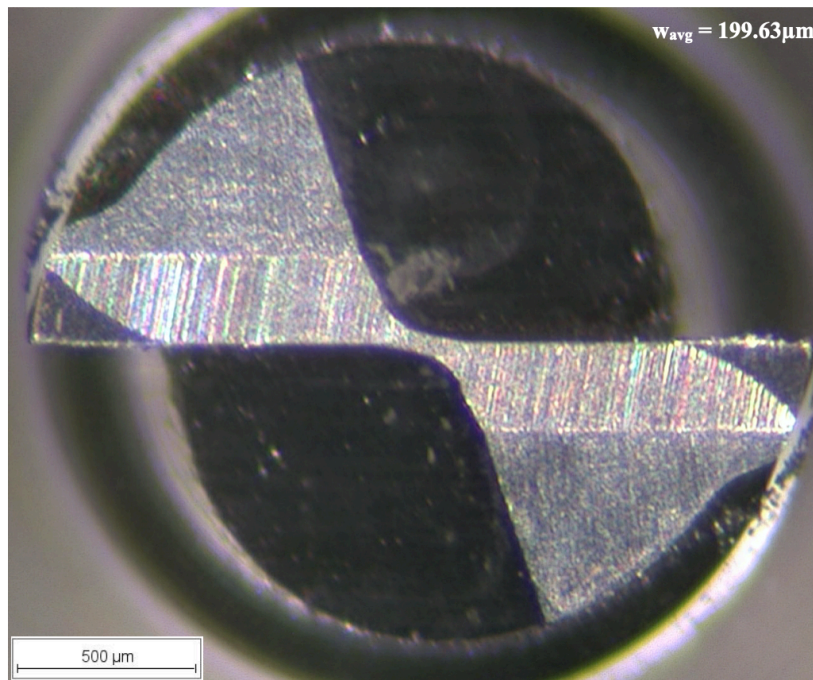


圖 72 載具加工實驗(二) 進給率達下限時之刀具磨耗影像

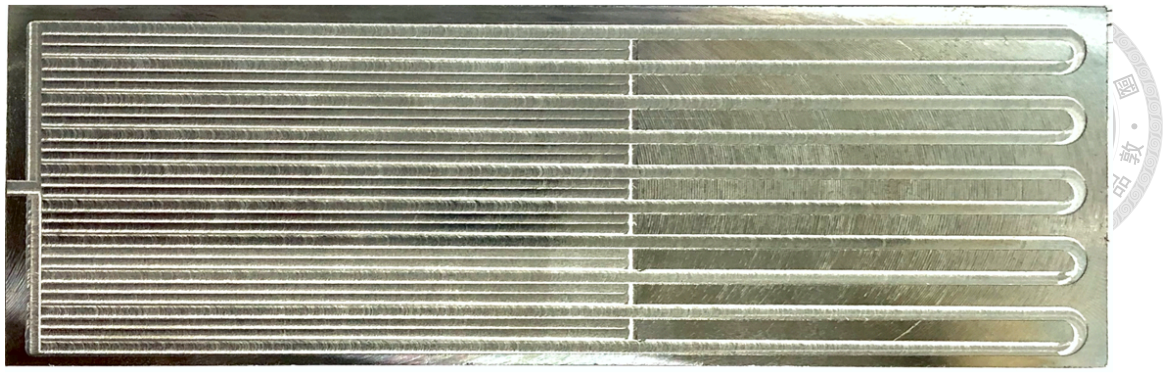


圖 73 載具加工實驗成品

第六章 總結與未來展望



6.1 總結

本研究所提出之等負載切削加工參數訂定策略，可透過等進給率實驗取得所需資訊。經由了解刀具磨耗、主軸電流與進給率之關係，並依照刀具強度與刀具磨耗特性設定等負載切削參數。而依照該流程建立之參數，可有效以進給率下限作為刀具磨耗監測指標，作為換刀之參考資訊。

經由等負載切削加工之驗證，以本研究之方法所設定之等負載切削加工參數，能以加工中之進給率變化作為刀具磨耗之監測指標，當進給率達到設定之進給率下限時，刀具磨耗皆可維持於磨耗設定範圍內或略低於磨耗範圍，可有效作為換刀之依據。而可切削長度與材料移除率，與刀具廠商所建議之加工參數相比，亦皆能有效優異的表現。端銑部分，等負載切削能有 23% 之切削長度提升與 16% 之材料移除率提升。槽銑部分，等負載切削能提升材料移除率 51%，切削長度 30%。

而透過槽銑、端銑混合路徑之載具加工實驗，本研究也進一步演示等負載加工應用於實際加工之可行性，以及以進給率作為刀具磨耗監測指標之可行性與準確性。

6.2 未來展望

在研究過程中，發現了一些可以改進的項目，未來若能朝此方向進行研究，能夠提升將適應性控制器應用於業界的可行性：


- (a) 本研究之實驗結果指出等負載銑削加工參數之訂定可由等進給率實驗獲得所需的參考資訊。然而，等進給率實驗仍需耗費較多時間進行，若能降低實驗所需之時間，以切削理論、材料力學理論與刀具破壞理論搭配實驗進行加工參數訂定，有機會可降低訂定加工參數所需之時間與人力成本。
- (b) 本研究之等負載銑削加工為以電流為參考，並以進給率變化判斷刀具磨耗程

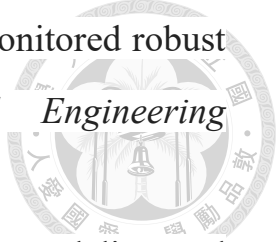
度。主軸電流於過去之文獻中，亦多作為刀具磨耗之參考訊號。而加工中另一重要之加工指標為表面粗糙度，表面粗糙度為較為複雜、影響因素較多之指標。因此，主軸電流與表面粗糙度並不一定存在趨勢性。若在等負載銑削加工中，以其他加工訊號，如加速規、動力計、聲射訊號等，作為監測表面粗糙度之參考資訊，有機會可將表面粗糙度列為等負載銑削加工製程之監測指標之一。


參考文獻



- [1] Li, H. Z., H. Zeng, and X. Q. Chen. "An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts." *Journal of Materials Processing Technology* 180.1-3 (2006): 296-304.
- [2] Elbestawi, M. A., T. A. Papazafiriou, and R. X. Du. "In-process monitoring of tool wear in milling using cutting force signature." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 31.1 (1991): 55-73.
- [3] Ulsoy, A. Galip, Yoram Koren, and Fred Rasmussen. "Principal developments in the adaptive control of machine tools." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 105.2 (1983): 107-112.
- [4] L Liang, Steven Y., Rogelio L. Hecker, and Robert G. Landers. "Machining process monitoring and control: the state-of-the-art." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126.2 (2004): 297-310.
- [5] Zuperl, U., F. Cus, and M. Reibenschuh. "Neural control strategy of constant cutting force system in end milling." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27.3 (2011): 485-493.
- [6] 鄭力維，工具機等切削力控制與刀具磨耗關係之探討。國立台灣大學碩士論文(2018)，台北市。
- [7] Stein, J. L., et al. "Evaluation of dc servo machine tool feed drives as force sensors." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 108.4 (1986): 279-288.

- 
- [8] 鄭呈毅，等負載銑削加工之主軸負載參考值設定流程。國立台灣大學碩士論文(2019)，台北市。
- [9] Koren, Yoram. "Adaptive control systems for machining." *1988 American Control Conference*. IEEE (1988): 1161-1167.
- [10] Coppel, Ricardo, et al. "Adaptive control optimization in micro-milling of hardened steels—evaluation of optimization approaches." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 84.9-12 (2016): 2219-2238.
- [11] Lauderbaugh, L. K., and A. G. Ulsoy. "Dynamic modeling for control of the milling process." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 110.4 (1988): 367-375.
- [12] Altıntaş, Yusuf. "Direct adaptive control of end milling process." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 34.4 (1994): 461-472.
- [13] Kim, Tae-Yong, and Jongwon Kim. "Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36.8 (1996): 925-937.
- [14] Yang, Min-Yang, and Taik-Min Lee. "Hybrid adaptive control based on the characteristics of CNC end milling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42.4 (2002): 489-499.
- [15] Kooi, S. B. L. "Robust adaptive control for nonlinear end milling process." *Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95*. Vol. 5. IEEE, 1995.

- 
- [16] Charbonnaud, P., F. J. Carrillo, and D. Ladevèze. "Monitored robust force control of a milling process." *Control Engineering Practice* 9.10 (2001): 1047-1061.
- [17] Yang, Jiangzhao, Dongjun Zhang, and Zexiang Li. "Modeling and Identification for High-Speed Milling Machines." *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. IEEE, 2007.
- [18] Spence, A., and Y. Altintas. "CAD assisted adaptive control for milling." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 113.3 (1991): 444-450.
- [19] Yang, M-Y., T-M. Lee, and J-G. Choi. "A new spindle current regulation algorithm for the CNC end milling process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 19.7 (2002): 473-481.
- [20] Fussell, B. K., and K. Srinivasan. "On-line identification of end milling process parameters." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 111.4 (1989): 322-330.
- [21] Fussell, B. K., and K. Srinivasan. "Model reference adaptive control of force in end milling operations." *1988 American Control Conference*. IEEE, 1988.
- [22] Saikumar, S., and M. S. Shunmugam. "Development of a feed rate adaption control system for high-speed rough and finish end-milling of hardened EN24 steel." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 59.9-12 (2012): 869-884.

- 
- [23] Liu, Yanming, and Chaojun Wang. "Neural network based adaptive control and optimisation in the milling process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15.11 (1999): 791-795.
- [24] Shao, H., H. L. Wang, and X. M. Zhao. "A cutting power model for tool wear monitoring in milling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44.14 (2004): 1503-1509.
- [25] Lee, B. Y. "Application of the discrete wavelet transform to the monitoring of tool failure in end milling using the spindle motor current." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15.4 (1999): 238-243.
- [26] Grosvenor, R. I., C. Johns, and P. W. Prickett. "Machine tool axis signals for condition monitoring." *Proceedings of COMADEM*. 1996.
- [27] Lee, Kang-Jae, Taik-Min Lee, and Min-Yang Yang. "Tool wear monitoring system for CNC end milling using a hybrid approach to cutting force regulation." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32.1-2 (2007): 8-17.
- [28] 邱雅琳，等切削力系統動態特性建立之研究。國立台灣大學碩士論文(2017)，台北市
- [29] Yang, Min-Yang, and Taik-Min Lee. "Hybrid adaptive control based on the characteristics of CNC end milling." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42.4 (2002): 489-499.
- [30] DeVries, Warren R. *Analysis of material removal processes*. Springer Science & Business Media, 1991.

- [31] Zahoor, Sadaf, et al. "Effect of machine tool's spindle forced vibrations on surface roughness, dimensional accuracy, and tool wear in vertical milling of AISI P20." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89.9-12 (2017): 3671-3679.