

出國報告（出國類別：實習）

研習氣渦輪機葉片之腐蝕放電及 車銑加工技術

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：鐘震洲；機械研究專員

派赴國家：日本

出國期間：104年8月16日至8月25日

報告日期：104年10月7日

出國報告審核表

出國報告名稱：研習氣渦輪機葉片之腐蝕放電及車銑加工技術

出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
鐘震洲	機械研究專員	台灣電力公司 綜合研究所
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他 _____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽)	

出國期間：104年8月16日至104年8月25日 報告繳交日期：104年10月7日

出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.內容充實完備.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5..建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6..送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7..送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8..退回補正,原因:
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(7) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9..本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表:
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) .其他
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式:

報告人：  單位：  主管處：  總經理： _____
 說明： _____ 副總經理： _____

一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
 二、審核作業應於報告提出後二個月內完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務報告資訊網為原則」。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：研習氣渦輪機葉片之腐蝕放電及車銑加工技術

頁數 24 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電 人資處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

鐘震洲/台灣電力公司/綜合研究所/機械研究專員/(02)8078-2219

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：104 年 8 月 16 日至 8 月 25 日 出國地區：日本

報告日期：104 年 10 月 7 日

分類號/目

關鍵詞：ECM、腐蝕放電、電解加工、車銑複合、CNC

內容摘要：(二百至三百字)

ECM (Electrochemical machining) 是一種非接觸式之先進加工技術，其系統組成包含電解液系統、電源供應系統、機構運動系統等。在腐蝕放電加工過程中，前後模具與素材之間以電流密度、電場強度回饋及 CNC 控制保持一極小間隙，素材靠近模具的表面原子會被大量電解解離，而形成與模具形狀反像的形狀。當前後模具移動至最終位置時，即完成 ECM 成型加工。

車銑複合加工機顧名思義是加工機帶有車削及銑削功能，是以車削功能為主並兼備銑削功能的加工形式。鎳基超合金因硬度高、導熱性差、高溫機械性質強等因素，其切削加工性差，故在加工領域被視為"難切削材"。如何運用車銑複合加工機加工鎳基超合金材質之渦輪機葉片，在本次實習報告中有提及建議事項。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

目 錄

出國報告審核表.....	I
出國報告提要.....	II
目錄.....	III
一、 出國緣由、行程及主要任務.....	1
二、 腐蝕放電加工技術實習.....	3
三、 車銑加工技術實習.....	10
四、 心得與建議.....	24
五、 參考文獻.....	25

一、出國緣由、行程及主要任務

出國緣由：

近年來國外葉片製造公司或研究中心，迅速發展腐蝕放電及車銑加工技術，並應用於氣渦輪機葉片或航太組件之舊品再生及新品製造。本所正進行氣渦輪機動靜葉片等組件之先進維修再生與新製研發工作，希望經由此次出國了解國外先進腐蝕放電及車銑加工技術之發展，並學習相關技術，藉以提昇本所葉片再生技術及葉片新品製作之品質。此次出國研習之重點如下：

一、至日本 ECM 製造廠了解國外先進腐蝕放電(ECM)之技術發展，

藉由國外之技術與經驗交流，了解 ECM 技術對於渦輪機葉片再生及製造之競爭力。

二、至日本 CNC 製造廠學習五軸車銑複合之加工技術，包含難切削

材(鎳基合金或鈦合金等)之加工經驗，收集並吸取國外專家之相關經驗技術，以提升本所於 CNC 領域之技術能力。

本次出國案件係應用 104 年度出國計畫第 9 號，出國核定書為 EE104108 號，電人字第 1048067257 號函。

出國行程及主要任務：

本次出國期間自 104 年 8 月 16 日至 8 月 25 日，主要的任務為了解國外先進腐蝕放電及車銑加工技術之發展，以應用於日後本公司氣渦輪機動靜葉片等組件之先進維修再生與新製研發工作。主要任務內容概要說明於下表：

項次	前往機構	工作內容概況
1	KYU SHU INTERNATIONAL	超合金葉片之腐蝕放電加工(ECM)及相關技術應用研習
2	MAZAK	學習先進之車銑複合加工技術，並與專家進行渦輪機葉片車銑加工之相關技術應用研習。

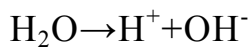
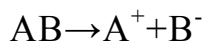
二、腐蝕放電加工技術實習

(一) ECM 加工原理及優缺點

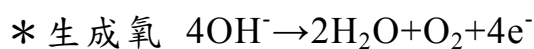
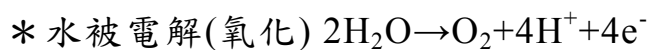
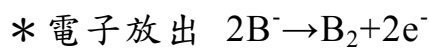
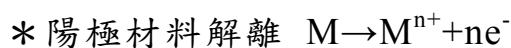
ECM (Electrochemical machining)，為利用電解液進行電解/電鍍加工，陽極金屬(被加工工件)在電解液中解離並於陰極(形狀工具)產生氣體(H₂)或水，其加工(去除或附著)的單位為原子。

圖 1-1 為鐵基合金為陽極之電解加工原理示意圖，電解液(Electrolyte)、陽極(Anode)與陰極(Cathode)之反應式說明如下：

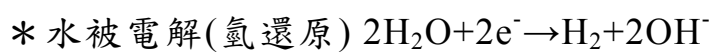
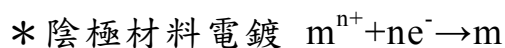
1. Electrolyte：



2. Anode：(去除加工)



3. Cathode：(附著加工)



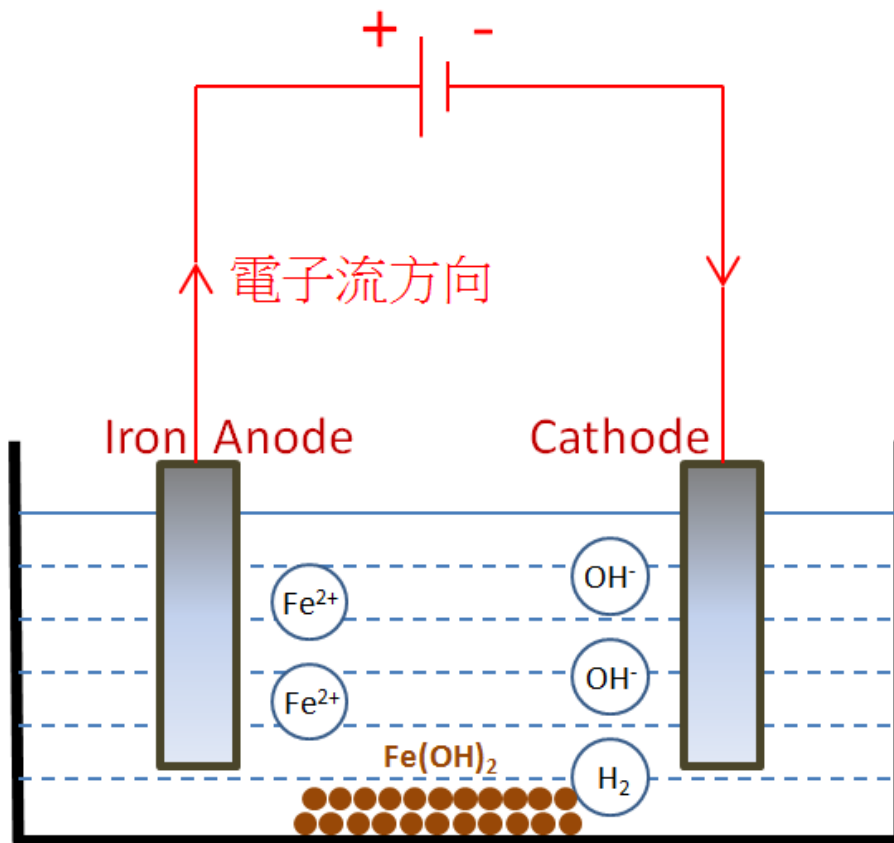


圖 1-1 鐵基合金為陽極之電解加工原理示意圖

一般而言，ECM 製程常應用於電解加工模式，常見的加工模式有去毛邊(Deburring)、鑽孔(Reduction / drilling)、成型加工(Countersink)。如圖 1-2 從塊材經 ECM 加工為動葉片成品之成型加工示意圖，其中透明部位為當作陰極之前後模具，中間部位為塊狀素材。在腐蝕放電加工過程中，前後模具與素材之間以電流密度、電場強度回饋及 CNC 控制保持一極小間隙，素材靠近模具的表面原子會被大量電解解離，而形成與模具形狀反像的形狀。當前後模具移動至最終位置時，即完成 ECM 成型加工。

使用 ECM 技術製作工件，理論上會有以下之優點：

1. 因為 ECM 屬非接觸加工(Non-contact machining)，對工件無熱應力及殘留應力之影響。
2. 刀具(陰極)不與工件接觸，故無刀具損耗之成本。
3. 對於薄型工件(ex.葉片)，若使用傳統接觸式銑削加工，則易因加工過程材料彈性變形而使成品尺寸失真。
4. 加工後工件表面精度提高，依材質、電解液和加工條件決定，一般而言鎳基、鈷基合金和不鏽鋼較佳(約 $0.15\sim 0.40\ \mu\text{m}$)，鐵基合金稍差(約 $0.7\sim 1.6\ \mu\text{m}$)。因表面精度提高，不會造成傳統加工法所發生的不佳表面效應而有更佳的抗磨耗和抗腐蝕特性。

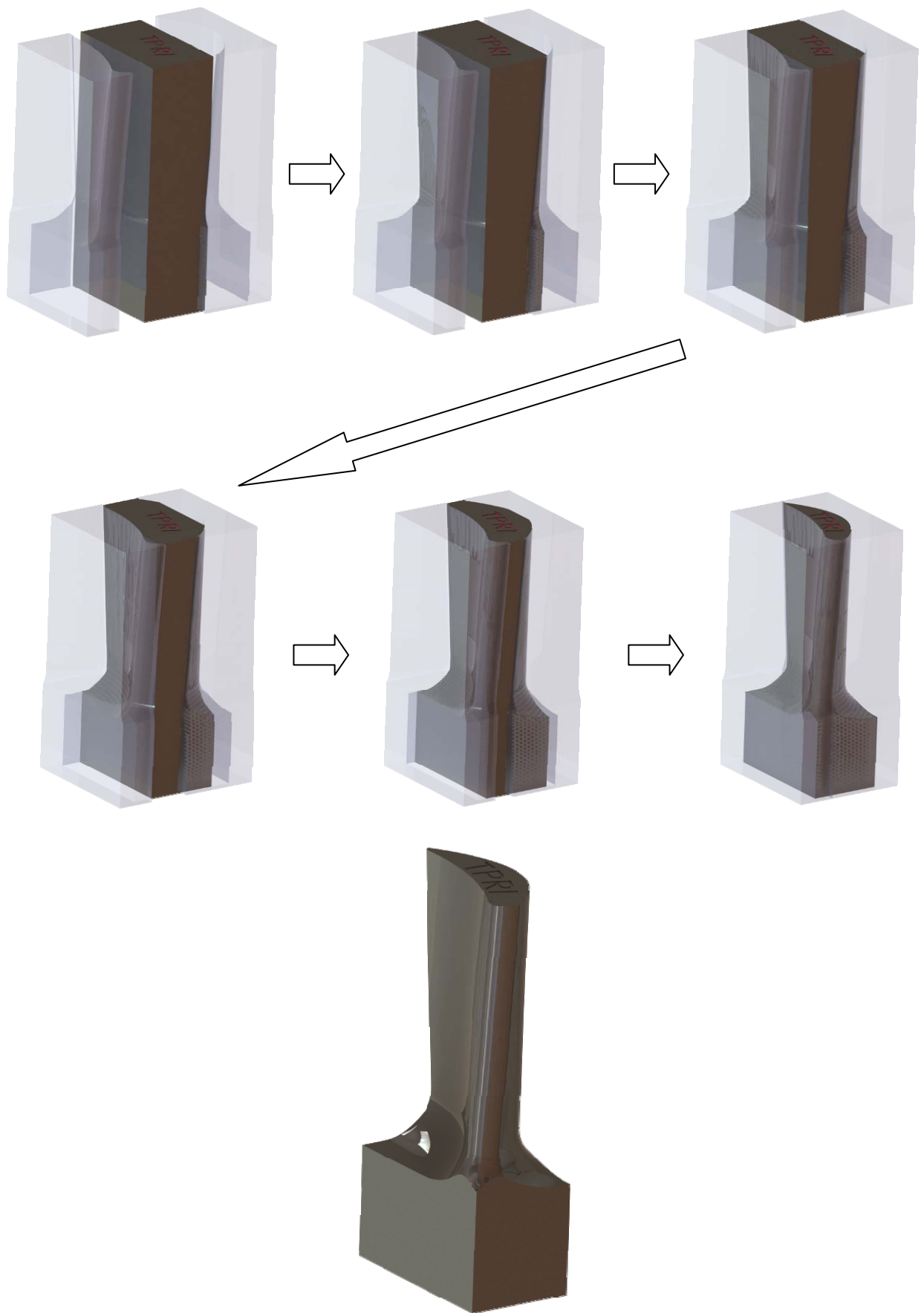


圖 1-2 塊材使用 ECM 製成動葉片之成型加工過程示意圖。

5. 對於複雜 3D 形狀與特殊合金有較高的金屬移除率(MRR; Metal Removal Rate)。

6. 搭配精密的 CNC 機台及夾治具設計，可一次加工多件工件，以大幅縮短加工時間。

使用 ECM 技術製作工件，理論上會有以下之缺點：

1. 工件的疲勞強度約會降低 10~25%，因此須要進行熱處理以回復機械性質。

2. 工件在有小圓角的地方，若電流密度與電解液流動不均勻則易造成擴大圓角。

(二) ECM 加工設備規格

精密 ECM 加工設備的組成包含電解液系統、電源供應系統、機構運動系統等，簡單介紹如下：

1. 電解液系統：常見的電解液種類有 NaCl、NaNO₃ 等，在選用電解液時須考量導電性、價格、取得容易否、毒性、使用安全及盡可能無腐蝕性等因素。在 ECM 連續加工過程中，若電解液的溫度與濃度能被穩定控制，則電解液的電阻係數得以穩定。此外，電解液於加工過程會有加工生成物(譬如氫氧化物)及外來物質(譬如工件油漬或粉塵)的累積沉澱，必須有過濾、壓污泥的機械系統才能保持電解液的品質及符合環保處

理的規定。一套好的電解液系統應有自動酸鹼滴定、溫度自動控制、過濾精度 $<0.5\mu\text{m}$ 的過濾系統、高價鉻還原控制等系統。

2. 電源供應系統：ECM 加工所需的工作電壓約為 DC 5~20V，工作電流約為 100~40,000 A。一個好的電源供應系統應該包含可精確微調的電壓控制系統、即時檢測及預測電弧產生之系統、抑制電弧產生之控制系統。

3. 機構運動系統：由於電解液的關係，ECM 加工機所處的環境是高鹽份的環境，故不管是機殼、電源與控制線路、控制器、馬達、軸承、線軌等都須有高度防蝕或易更換的設計。此外，ECM 加工機的工作電流可高達幾萬安培，機體本身的絕緣、接地等用電安全須做到最高要求，以避免工安事件發生。圖 1-3 為 ECM 加工機之電解液循環、電路迴路之示意圖。

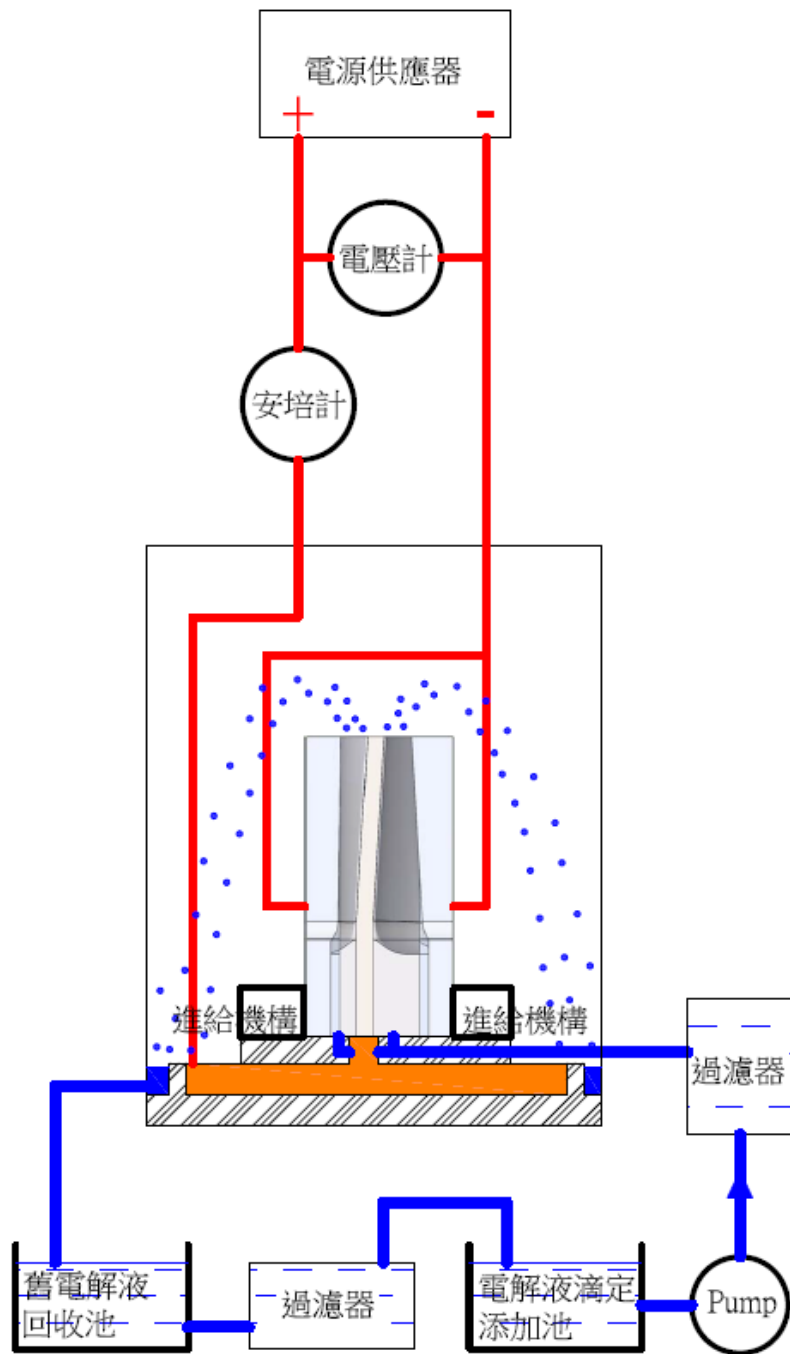


圖 1-3 ECM 加工機之電解液循環、電路迴路之示意圖。

三、車銑加工技術實習

(一) 先進 CNC 加工機的發展

工業革命前，工具機即存在人類的生活中，當時的被加工物是以木工為主。圖 2-1 為 1860 年代製造的足踏式研磨機，圖 2-2 為 1900 年左右製造的足踏旋盤式車床，係以腳踩方式為動力來源而進行加工工作。在蒸汽機的發明後，大動力源可以取代人力並穩定的輸出，如圖 2-3 所示，工廠內集中於一處的動力源藉由皮帶與齒輪的分配，將動力傳至各處的工具機，圖 2-4 為日本山崎(Yamazaki)家族於 1935 年所拍攝之工具機工作情形。

大約在 1950 年代，為了美國軍方的精密零件加工，由產業(Parsons)與學界(麻省理工學院)合作，研發出全球第一台數值控制(Numerical Control；NC)加工機。此類型的 NC 加工機是以穿孔紙帶運行，為了加速推廣此可大量節省成本的加工概念，美國陸軍購買了 120 台加工機租借給不同領域的機器製造商，以期許機器製造商能更加了解這突破性的加工概念並繼續開發新產品。

設備製造商為了自身利益或後續方便開發，初期每個設備製造商都發展各自的機器語言。直到 1960 年代，由於微電腦(Computer)的加入及標準 G 碼(G Code)的推動，使得微電腦數值控制(Computer Numical Control；CNC)加工機開始蓬勃發展。



圖 2-1 約 1860 年代生產的足踏式研磨機。

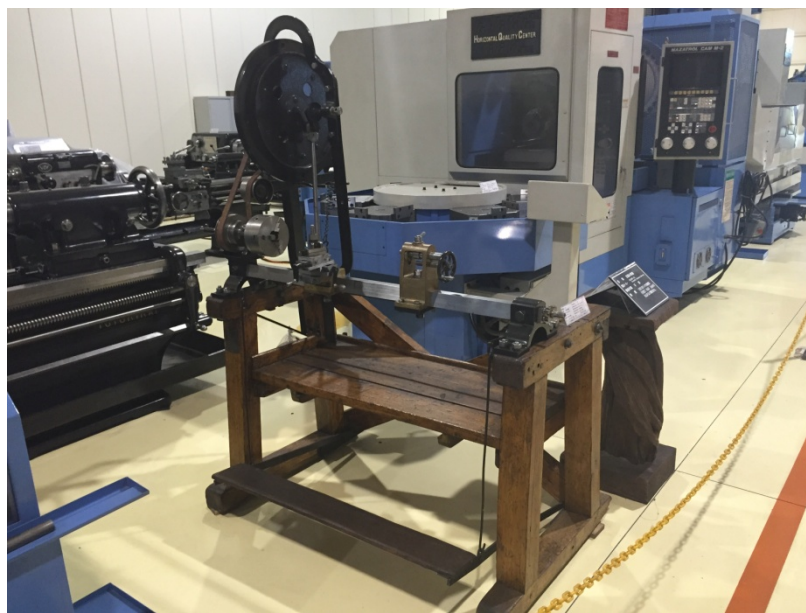


圖 2-2 約 1900 年代生產的足踏旋盤式車床。



圖 2-3 集中式動力源(如箭頭)與各式工具機之動力連結。

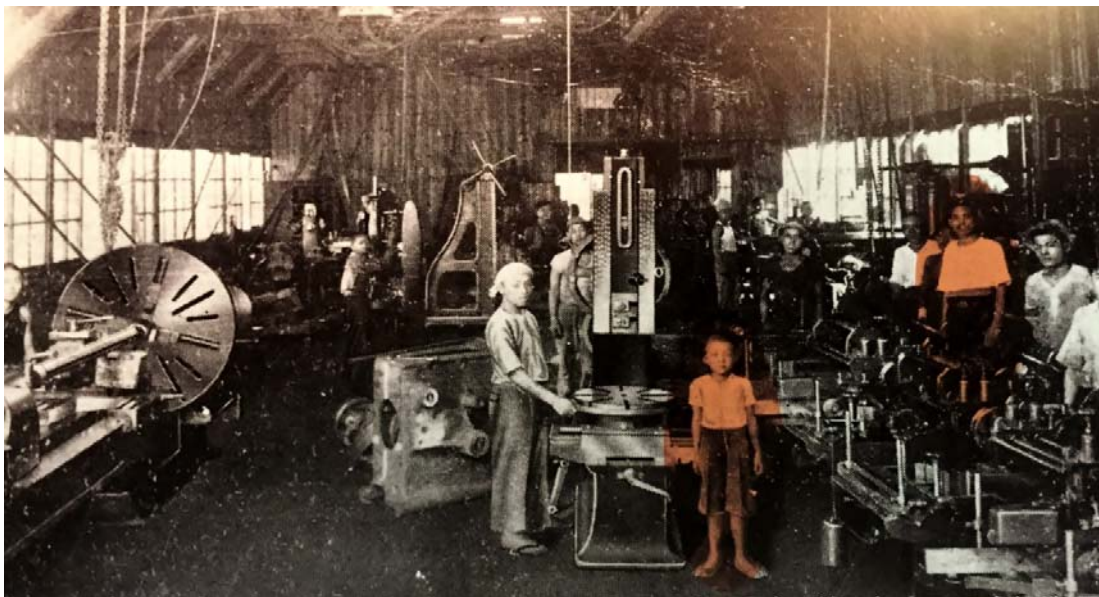


圖 2-4 日本山崎家族及其工具機於 1935 年之合照。

在 1970 年代，美國對於 CNC 產業是著重在開發高尖端產品，而德國和日本則是著眼於如何降低生產 CNC 設備的成品。所以在 1980 年代，全球 10 大銷售量之 CNC 製造商幾乎由德國和日本拿下，而美國僅剩 1 家左右。

初期的 NC 加工機是沒有內建記憶體的，當時後要編程式或除錯是一個很複雜的工作，所以只適合從事大批量的重複生產工作。當內建記憶體的 CNC 加工機蓬勃發展後，各個控制器製造商(譬如 Fanuc、Heidenhein、Siemens、Mazatrol 等)積極發展自己的程式語言，使用者可以透過迴圈邏輯、主副程式呼叫、巨集功能等去編輯加工機的工序，較適合多樣的生產工作。

隨著 CAD (Computer Aided Design) 軟體的發展，使用者可以設計更複雜的曲面造型，為了快速並精準的實現曲面造型的 CNC 加工，這二三十年間 CNC 加工機從 3 軸逐漸演變為 3+1 軸，甚至 5 軸同動，而 CAM (Computer Aided Manufacturing) 軟體規劃亦逐漸升級朝刀庫管理、素材快速除料、孔位特徵辨識等發展。使用者從 CAD 設計好的零件可以透過 CAM 規劃粗加工、精加工的刀具路徑後，再由後處理器(Post Processor)來自動譯成複雜的 G 碼語言，最後傳輸給 CNC 加工機進行複雜的加工工作。

(二) 五軸 CNC 加工機

1. 座標系統的定義

早期 XYZ 三軸的 CNC 加工機大部分是用於以上下模為主體的模穴加工，若要加工模具側邊四面，則須在翻面重新定位後加工。又例如單支動葉片的三軸加工，在加工完凸部部位後，須靠治具於翻面定位後再加工凹部部位，雖然加工成本較五軸 CNC 低廉，但會有翻面定位精度差及 trailing edge 圓角加工不良的風險(如圖 2-5)，若使用五軸 CNC 加工機則可以解決上述大部分的問題。

五軸 CNC 加工機的形式有很多種，圖 2-6 為常見到的不同軸向配置機型，以下先解釋如何定義座標系統。任何經由 NC 控制器所操控之線性(Liner)或迴旋性(Rotational)動作均可以視為"軸"(Axis)。一般而言，符合工業標準的 9 軸名稱為 X、Y、Z、u、v、w、A、B、C，其指向之相互關係如圖 2-7 所示。其中 XYZ 為相互正交的第一(主要)線性軸向，工件的夾持主軸通常定義為 Z 軸方向；ABC 分別為繞行 XYZ 軸線的旋轉軸向；uvw 為分別與 XYZ 同向的第二線性軸向。以圖 2-8 之車銑複合加工機為例，因工件的夾持主軸為水平方向，故刀具主軸頭水平移動方向為 Z 軸行程，B 軸與 C1、C2 軸分別為繞行 Y 及 Z 軸線的旋轉軸向，C2 夾持座水平移動方向為 w 軸行程。

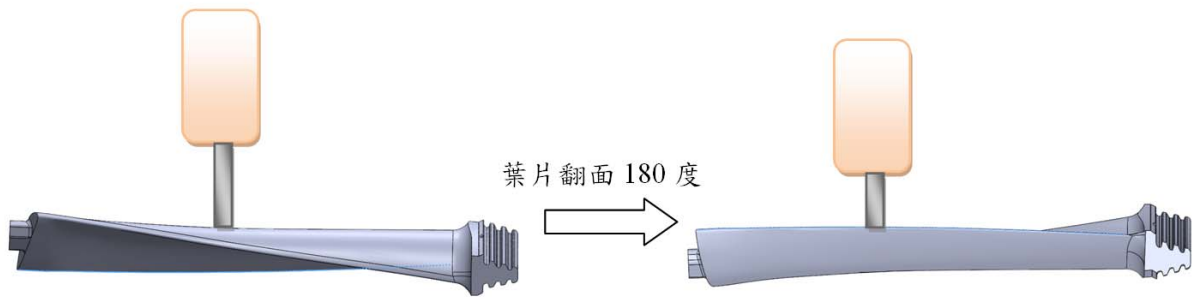


圖 2-5 單支動葉片的三軸加工方向示意圖。

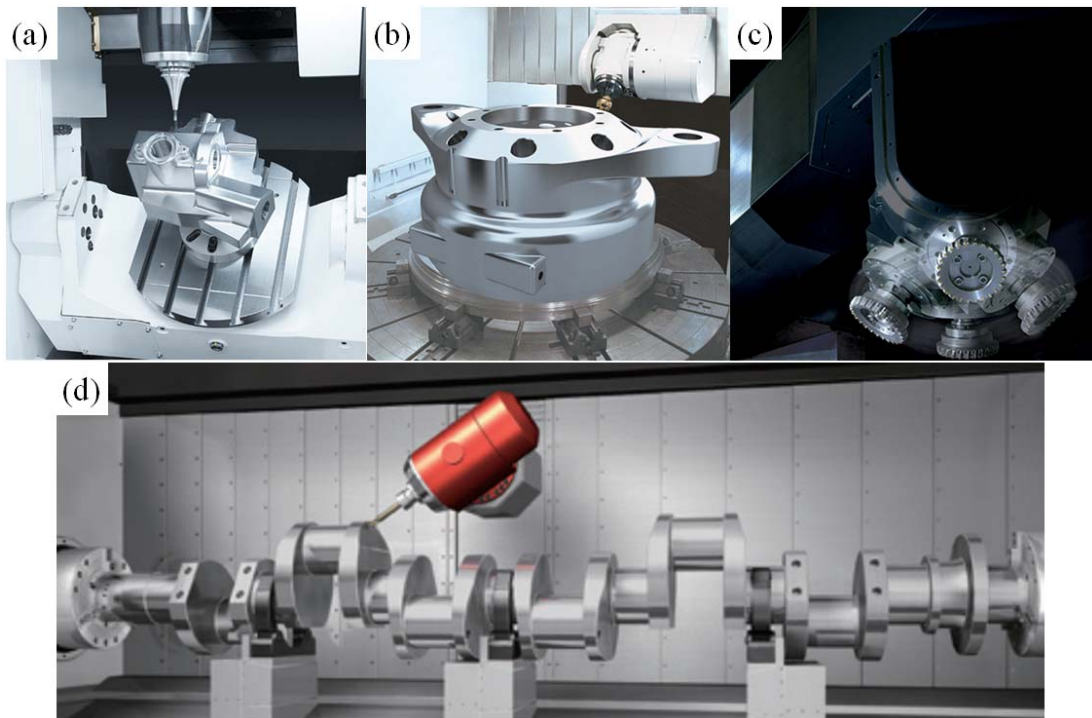


圖 2-6 五軸 CNC 之不同軸向配置機型：(a) Table / Table 五軸 CNC 加工機；(b) Head / Table 五軸 CNC 加工機；(c) Head / Head 五軸 CNC 加工機；(d) 車銑複合加工機。[來源：MAZAK、DMG]

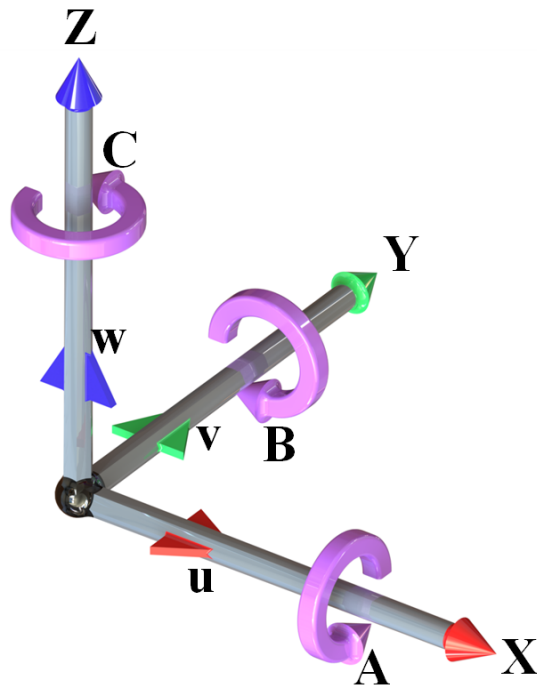


圖 2-7 符合工業標準的 9 軸名稱及指向關係。

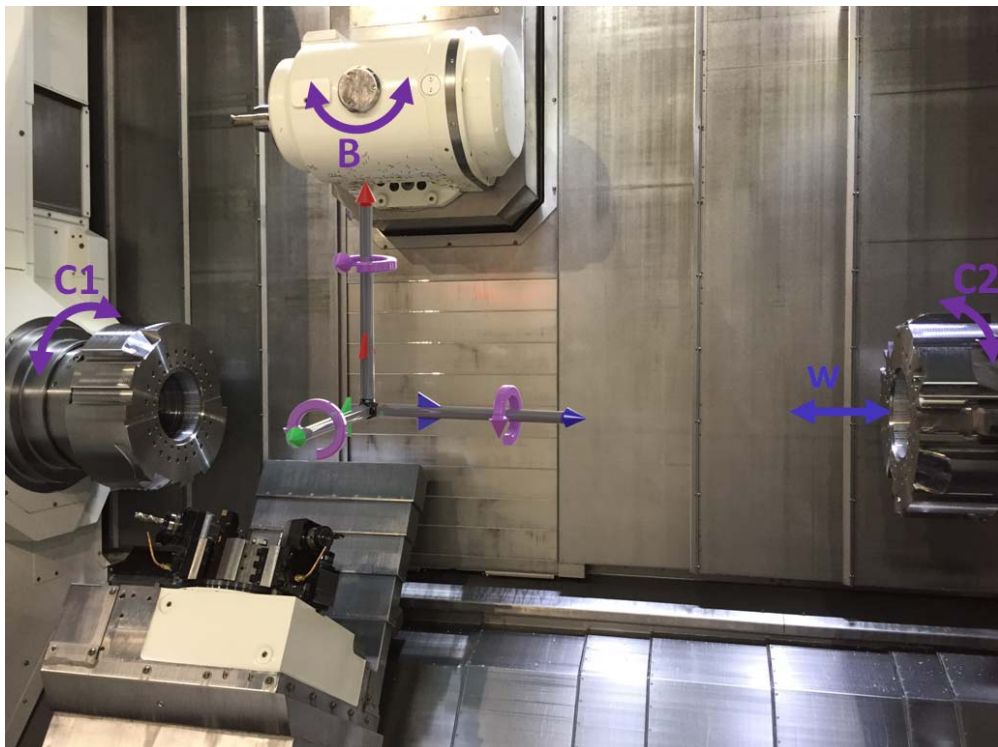


圖 2-8 車銑複合加工機之軸向關係。

2. CNC 加工之策略規劃

把相同 CAD 圖檔交由不同的工程師去規劃 CNC 加工，理論上將會有不同的加工思維去進行工件製作，其中的變數包含有工程師本身的經驗、夾治具設計、刀具的選用、不同軸數(或型式)加工機、CAM 軟體的選用、素材材料機械性質的掌控等[1]。

正常而言，工程師在使用 CAM 規劃刀具路徑前，會針對加工物件的形狀特徵、精度需求加以思考，有時候不是第一次想的就對，在經過反覆思考後，最後才決定出一個適合的刀具路徑方案。且在實際上機加工後，也常會發現之前的加工策略規畫不完善，輕微的或許還可以補救修正，嚴重的可能就只能重新再來，但這些都是經驗的累積，只要工程師能將成功或失敗的原因紀錄並加以分析，往後成功的機率就會越來越高。

根據 Karlo Apro 前輩的經驗[1]，一個有經驗的 CAD/CAM 工程師在工作過程中時常須考慮到：

- (1) 整個專案有多少零件須以 CNC 加工機製作？
- (2) 目前可運用的工時還有多少？
- (3) 各個零件的材料為何？是否有特殊的材料須提前訂製？
- (4) 哪些 CNC 加工機的可用工時是可以配合此專案的？
- (5) 欲使用的 CAD/CAM 軟體功能是否足夠，且本身對於此 CAD/CAM 軟體的操作是否熟悉？

- (6) 預計使用哪些刀具？特殊刀具是否要先確認並訂製？
- (7) 是否有現成的夾治具可以使用？或是須自己再另外設計一套？
- (8) 是否還有其他特殊的需求要先反應？

其中在刀具選用的規劃方案中，最好要非常熟悉現有機台有哪些不同的刀具(ex.直徑、長度、材質、刀具形式)？並在圖檔中確認此加工零件的最小導圓角為何？在相鄰特徵(Feature)中有多大空間可以容納多大直徑或多長長度之刀具在裡面加工？目前先進的CAM 軟體(ex. hyperMILL、PowerMILL 等)都已經建有完善的刀具資料庫功能，只要事先於刀具資料庫設定好每把刀具各種資料，將可以簡化後續的加工路徑規畫流程並減少失誤發生。

3. 加工注意事項

在規畫使用四軸或五軸加工機加工複雜工件時，要特別注意因刀具位置錯誤所引起的不良效應，譬如鳩尾效應(Dovetail Effect)。圖 2-9 為平行壁的螺桿造型，正確的下刀位置要考慮刀徑及壁厚作平移補償，再進行螺旋路徑加工。若刀具像圖 2-10 直接由工件剖面圓形之中心線插入，則加工後將得到類似鳩尾的剖面形狀。

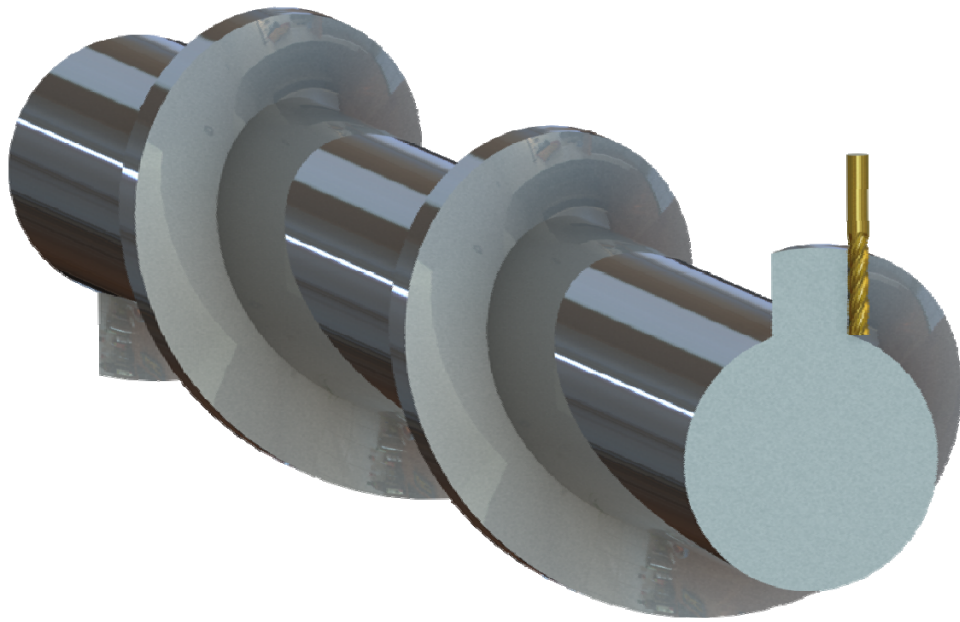


圖 2-9 平行壁的螺桿造型及其刀具加工位置。

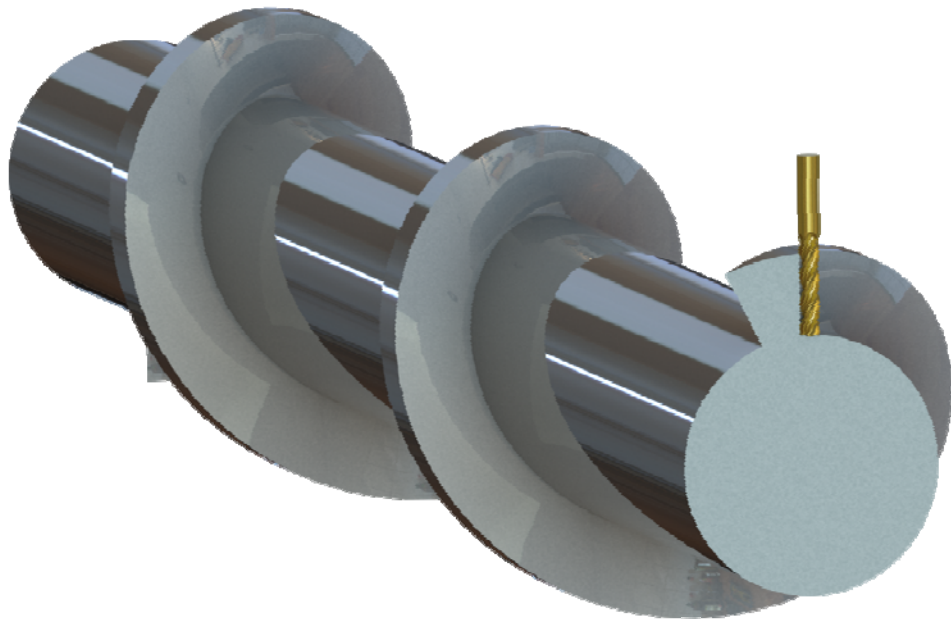


圖 2-10 因刀具由中心線下刀而引起之鳩尾效應。

(三) 高性能車銑複合加工機

車銑複合加工機顧名思義是加工機帶有車削及銑削功能，是以車削功能為主並兼備銑削功能的加工形式。目前量產的機型已進化到 CNC 車削+五軸同動銑削功能，故至少有 3 個線性伺服軸與 2 個迴轉伺服軸。依主結構的不同大致可分為斜背式與正交式機床，斜背式機床如圖 2-11，其 X 與 Y 軸之夾角並非 90 度，因車刀主軸安裝於斜背機座上，可大幅降低立柱重心，而達到機台輕量化的目的，因此類型機台之加工精度取決於斜背製作及安裝精度，故主要以中小型車銑複合加工機為主。而正交式機床如圖 2-12，其 X、Y、Z 軸方向互為直角，此類型機台在製作過程中因精度較容易控制，故較適合應用於 Z 軸長行程之車銑複合加工機[2]。

目前高階車銑複合加工機之刀具旋轉軸最高轉速可達 12000 rpm，銑削模式中主軸(C 軸)同步迴轉速度約在 250 rpm 左右，針對工件的形狀需求(譬如渦輪葉片)則可提高設計至 300~500 rpm 以上。而車削模式中 C 軸迴轉速度會因夾頭尺寸不同而異，大約分佈在 3000~5000 rpm。在主軸與 B 軸分度的規格上，目前已經進步至 0.0001°分割，可大幅提升加工精度。影響加工精度的最主要的因素除了機台剛性外，如何降低或補償加工過程中產生之熱對於刀具、主軸之影響、如何降低機台顫震(chatter)等問題都是設備製造商持續努力的目標。



圖 2-11 斜背式車銑複合加工機。[來源：OKUMA]

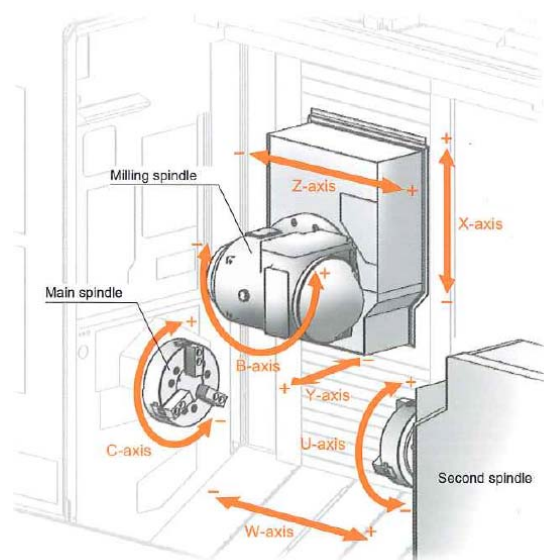


圖 2-12 正交式車銑複合加工機示意圖。[來源：MAZAK]

(四) 鎳基超合金材料之銑削加工

鎳基超合金因硬度高、導熱性差、高溫機械性質強等因素，其切削加工性差，故在加工領域被視為"難切削材"。其切削過程有以下特性：

1. 切削力大：一般鋼材在正常切削溫度時(約 400~800°C)，強度較室溫減弱很多，但鎳基超合金在高溫的機械強度降幅不大，以 Inconel 738 為例，常溫的抗拉強度為 1100 MPa，在 760°C 的抗拉強度為 965 MPa [3]，僅降為 87.7%。故在進行鎳基超合金切削加工時之切削力遠高於一般鋼材，一般約為 2~3 倍。
2. 切削溫度高：切削力的大小與產生的熱能呈現正相關，又因鎳基超合金的導熱係數低，可使切削溫度升高，最高可接近 1000°C 左右，若以相同條件切削 S45C 中碳鋼的切削溫度約在 600~700°C 左右[4]。
3. 刀具磨損嚴重：刀具磨耗的形式有很多種，一般而言分為(1)黏附性(Adhesion)磨耗：①在某高溫範圍及高應力的影響下，刀具和工件摩擦接觸的尖點銲在一起。②在低轉速產生刀口積屑(BUE)時更容易產生此磨耗。(2)磨削性(Abrasion)磨耗：①切屑表面的硬顆粒在通過刀面時有磨耗行為。②硬顆粒來自於 BUE 或刀具因 adhesion 而引起刀具硬顆粒剝落。(3)擴散性(Diffusion)磨耗：①原子在高溫時容易從高濃度擴散至低濃度

區域，譬如鑽石刀具在高溫時，碳會擴散至鋼鐵金屬。②此擴散磨耗在高溫時會特別明顯。

為順利加工鎳基超合金材質之渦輪機葉片，於車銑複合加工機作業時建議注意以下事項：

1. 挑選**高扭力**之刀具主軸及工件主軸加工機，以克服高切削阻力。
2. 工件主軸最好為雙夾頭設計，加工葉片時同時夾持葉片前後端，並可兩端同部驅動迴轉，以避免扭曲葉片。
3. 工件主軸若為雙夾頭設計，可根據加工後葉片變形的程度，規畫在開始加工前利用雙夾頭對葉片進行反向之預拉預扭，以期加工後放開夾頭時葉片能變形回標準形狀。
4. 刀具軸要有中心出水功能，壓力最好能在 60 bar 以上以降低切削溫度，可延長刀具壽命及提升加工精度。
5. 工件主軸於銑削時之轉速要夠快，當使用連續翻轉功能銑削葉面時，可讓刀具快速通過葉片的 leading edge 和 trailing edge，以避免蓄熱積在 leading edge 和 trailing edge 而產生不良影響。

四、心得與建議

電化學腐蝕放電加工技術對於葉片的形狀加工有其特殊的優勢，譬如可以用來加工薄型葉片並提高表面精度。對於單支葉片或動葉輪葉根槽複雜的形狀，理論上也可以透過精密電極造型及特殊機構運動來進行 ECM 加工。因為電極與運動機構設計不易且不同工件無法共用，這類加工法比較適合用於大量生產之工件，有點類似專用機之概念。另外，由於製程須用到大量的電解液，須有一個大型空間來針對電解液的濃度、回收及汙泥進行控制與處置，若廢棄物處理不當則會有環境污染的問題，未來如果有類似此加工法的需求，建議可注意以上的特性。

在撰寫出國報告的同時，亦曾經參觀過公司附近的 CNC 加工廠，該工廠有台製也有日製的 CNC 加工機，有立式五軸 CNC 銑床也有臥式五軸車銑複合加工機。老闆自己熟悉軟硬體的操作，以他自己的經驗，要有穩定的加工品質，機台剛性好與優異的主軸冷卻(溫控)系統是主要的關鍵。另外，老闆也提到小型加工廠對於 CNC 人才養成的困境，小型加工廠的員工流動性較高，熟悉了軟硬體操作且有了足夠經驗後，就很容易跳槽或是自行創業。因此他認為這幾年配合機械手臂及視覺系統進行上下料的工作會逐漸成形，這點在日本 CNC 工廠實習時有親眼看到，即所謂的無人化工廠。未來公司如果推展 CNC 加工成熟後，亦可考慮納入機械手臂的連線控制。

五、參考文獻

1. Karlo Apro, "Secrets of 5-Axis Machining", Industrial Press Inc., 2008
2. 李坤穎, "車銑複合化工具機設計", 工業技術研究院, 2014
3. Anurag Thakur, "Microstructural responses of a nickel base cast IN-738 superalloy to a variety of pre-weld heat-treatments", A thesis, University of Manitoba, 1997
4. 鄭文虎, "難切削材料加工技術", 國防工業出版社, 2008