



產線製程診斷及優化技術

Machining Process Diagnosis and Optimization for Production Line

¹梁碩芃 / ²許志源 / ²曾郁安 / ²張鈺翎 / ²王國維 / ²張永聖

¹工研院智慧機械科技中心 智慧製造技術組 智能化機器技術部 經理

²工研院智慧機械科技中心 智慧製造技術組 智能化機器技術部

摘要：工研院所開發 SPEEDPro 製程優化軟體，結合切削動力學與最佳化方法，可協助人們更精確地駕馭工具機。SPEEDPro 會根據不同工件的材質、形狀，計算出加工路徑上每點的刀具與工件受力狀況，規劃出最佳化的製程參數，達到保護高價零組件及發揮製造設備最大產能的目的。

Abstract : ITRI's SPEEDPro machining optimization software combines cutting dynamics and optimization methods to help users control the machine tool more accurately. Taking into account the workpiece's material and geometric features, SPEEDPro can calculate the cutting force along each point of the tool path, thereby providing an optimum machining process. This helps ensure the safety of expensive components and also maximizes the machine's productivity.

關鍵詞：優化策略模組、離線解譯模組、整線製程資訊擷取及優化機制

Keywords : Module of Optimized Strategy, Module of Off-Line Interpreter, Machining Process Information Mining and Optimization for Production Line

前言

航空工業對能夠預測性能之措施，如切削力、主軸扭矩和功率需求的虛擬模擬器之需求與日俱增。有許多幾何特徵之精密零件製程，造成加工過程中對刀具/主軸負載參數影響，並需要動態參數的自動調整，以充分利用工具機能力。所有工具機之商業模擬都聚焦於刀具路徑之幾何檢驗，以消除衝突和局部過切問題。儘管這些檢查是重要的，但僅保證刀具路徑的幾何正確性，而非加工過程之安全保證。在航空市場，材料和零部件價格昂貴，且數量較少，沒有零件報廢或刀具過載等錯誤之餘地。有了智慧工具機，可預測加工安全性和提高性能，盡可能消除代價高昂之錯誤浪費並提升生產效率。

SPEEDPro 軟體介紹

1. SPEEDPro 開發原由

加工時間及加工成本為金屬加工業的競爭力關鍵因子，如何選取適合的加工參數降低時間、成本為其重要議題。切削進給率優化技術雖發展已久，市面上也有相關應用軟體，但台灣廠商導入並不普遍，除學習困難外，廠商舊有的 CAD/CAM 系統亦存在無法支援現有的應用軟體，如圖 1。因此，工研院智慧機械中心開發的 SPEEDPro，與 CNC 控制器緊密結合，解決刀具路徑支援不足的問題，並加入優化建議，大幅降低導入的難度。

2. SPEEDPro 軟體簡介

(1)基本畫面介紹

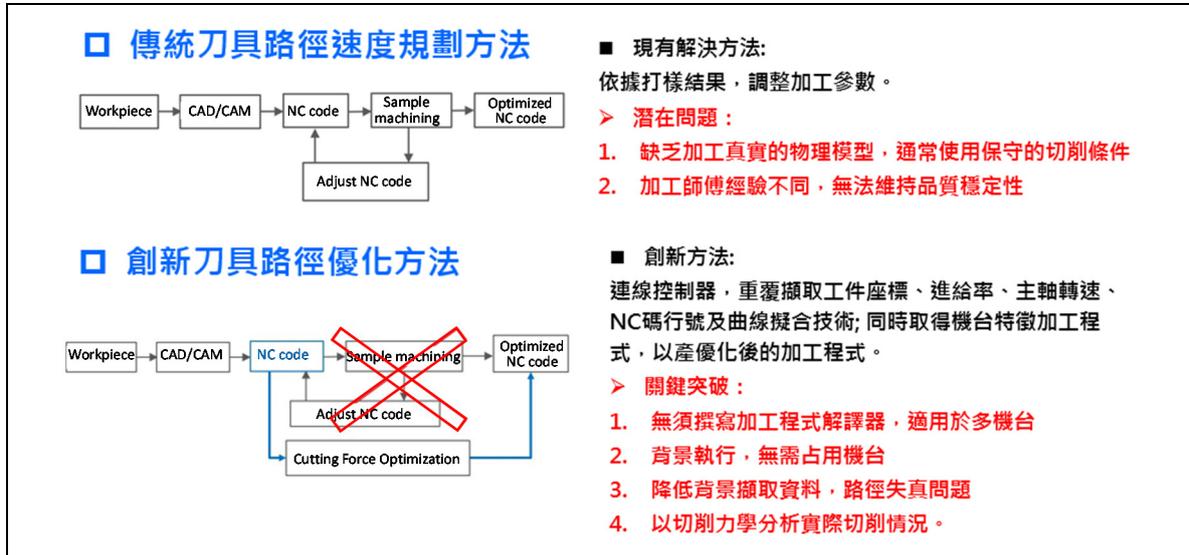


圖 1 傳統刀具路徑規劃方法

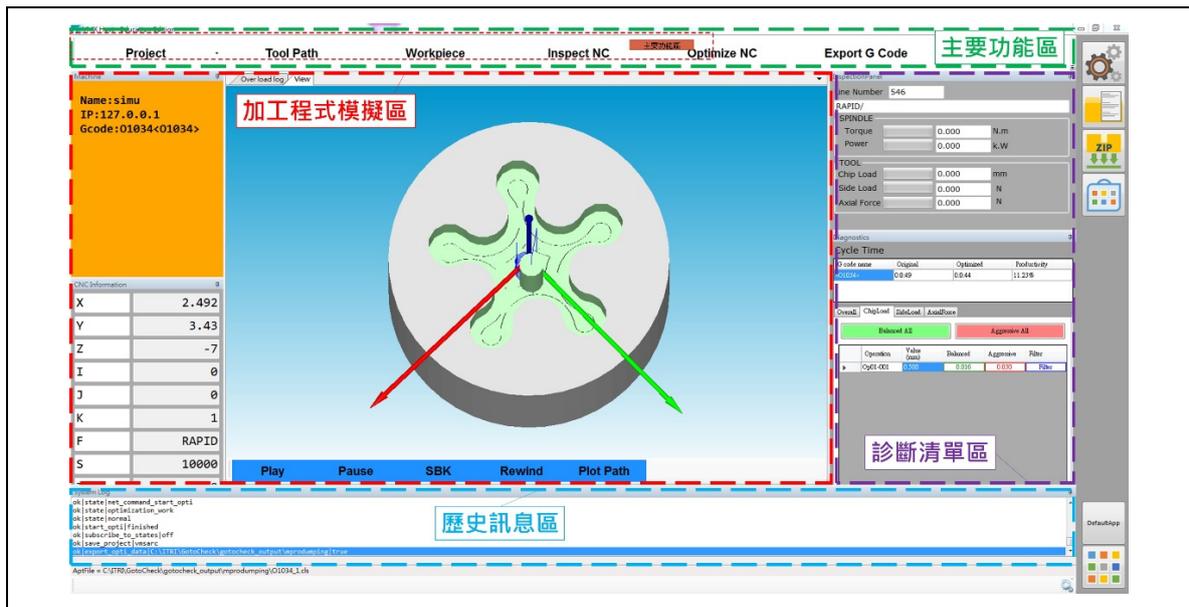


圖 2 SPEEDPro 軟體介面

SPEEDPro 是金屬加工切削效率最佳化的製程優化應用軟體，依照加工機台的動力特性及使用需求條件，調整製程程式的參數，改變加工速度，將負載過高之加工程式優化，達到保護高價零組件，不致損壞加工產品、刀具、機台；另一方面透過刀具/主軸之受力分析，決定出每段刀具路徑的最佳速率。

軟體介面訴求為簡單、易上手，主要分四大功

能區塊：主要功能區、加工程式模擬區、系統歷史訊息區、診斷清單區、加工程式模擬區，同時內建豐富的加工材料資料庫提供分析使用，如圖 2。

- 主要功能區：包含 Project、Tool Path、Workpiece、Inspect NC、Optimize NC、Export G Code 六項主要功能，分別進行專案儲存與匯入、工件資訊輸入、加工程式力學分析、優化程式、上傳檔案至控制器。



- 加工程式模擬區：顯示加工程式名稱、刀具座標位置、加工動畫預覽
- 系統歷史訊息區：顯示所有系統歷史訊息。
- 診斷清單區：顯示加工程式的診斷結果。Inspection Panel 可監測優化參數的變化，包括主軸扭矩 (torque)、切削厚度、主軸的負載和切削力等；Diagnostics 顯示優化前後的加工時間，以及超過優化參數限制值的路徑碼。
- 加工程式模擬區：以動畫方式模擬加工程式切削路徑，於右上方顯示加工程式負載變化。

(2)所需的硬體設備

SPEEDPro 硬體設備僅需電腦、網路線，即可透過 Ethernet 與各廠牌工具機進行通訊，進而診斷線上加工程式。

(3)切削力學診斷

圖 3 為切削力學診斷流程，首先取得刀具路徑檔，接著輸入刀具幾何、工件幾何及工件材料，完成後即可顯示分析結果。

由於大部分的 CAD/CAM 系統無法提供刀具路徑檔，故 SPEEDPro 透過連線控制器即可自動產

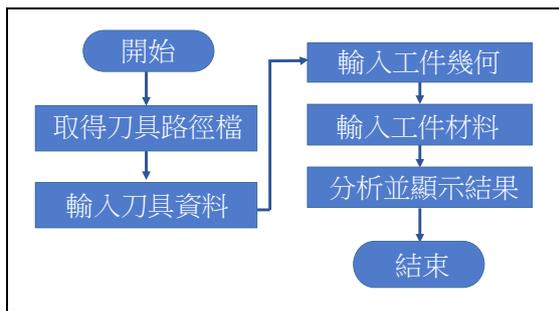


圖 3 切削力學診斷流程

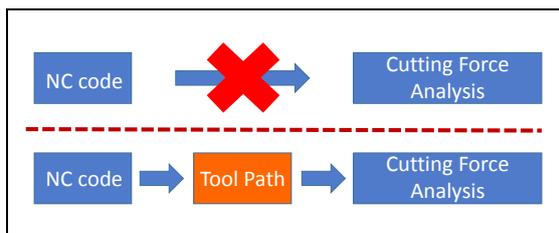


圖 4 使用 G Code 無法直接進行切削力分析

生現行加工程式(G code)之刀具路徑檔，解決刀具路徑檔不易取得的問題，如圖 4。

目前提供三種模式：

- 1.精確模式：此模式需佔用機台。使用者觸發擷取刀具路徑後，SPEEDPro 將主動控制控制器空跑加工程式，取得完整的刀具路徑。
- 2.背景模式：此模式無需佔用機台，使用者觸發擷取刀具路徑後，SPEEDPro 將背景偵測加工狀態，取得刀具路徑。由於 SPEEDPro 不控制機台，若通訊品質不佳，將影響刀具路徑的完整性。
- 3.解譯器模式：使用觸發取得加工程式，SPEEDPro 會將加工程式解譯成刀具路徑檔。(後面詳談)

切削力學診斷要精確，除切削幾何外，材料特性也是重要因子，SPEEDPro 的一大特點即內建豐富的材料庫，材料庫提供 12 種標準的分類(DIN-nr, W.-nr., BS, EN, SAE, AISI, SS, AFNOR, UNI, JIS, UNF, CMC)，各標準內建常用的材料如圖 5。

作了對應的設定後，即可取得切削力學診斷結果如圖 6，利用動態模擬，查看切削力異常在哪個

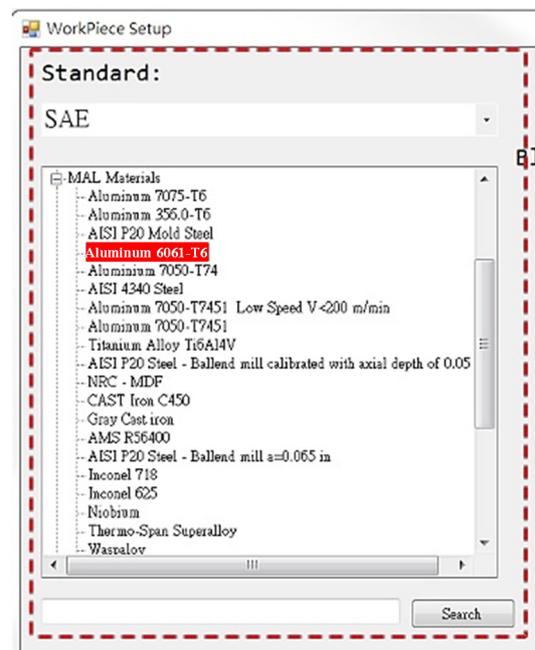


圖 5 材料庫

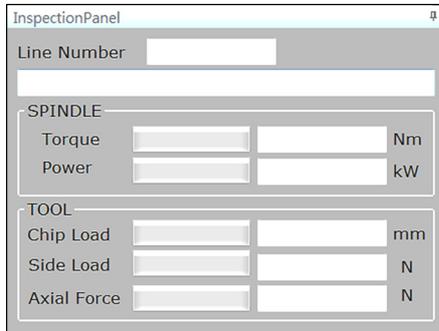


圖 6 診斷結果顯示

Over load log		View
N	ChipLoad	
24	0.050018118235...	
26	0.050017990997...	
28	0.050018083553...	
29	0.050017930652...	
29	0.050018122481...	
30	0.050017473240...	
30	0.050018114331...	
30	0.050018121719...	
31	0.050018091677...	
31	0.050018120713...	

圖 7 過負載行號顯示

加工區段，或使用 Over load log 查詢超過設定值的 G code 行號如圖 7。

(4) 優化條件的建議

有了切削力學的診斷，使用者最大困難點在於該如何設定優化條件，因此 SPEEDPro 在模擬完成後自動給出優化建議，使用者可調整建議值進行加工程式優化如圖 8。

目前提供：

- 1.保守模式(balanced)：採用目前 G code 診斷資料中，較為安全的值進行修正。
- 2.激進模式(aggressive)：採用目前 G code 診斷資料中，較為危險但速度較快的值進行修正。

SPEEDPro 提供的優化建議值，可節省大量參



圖 8 切削力建議值

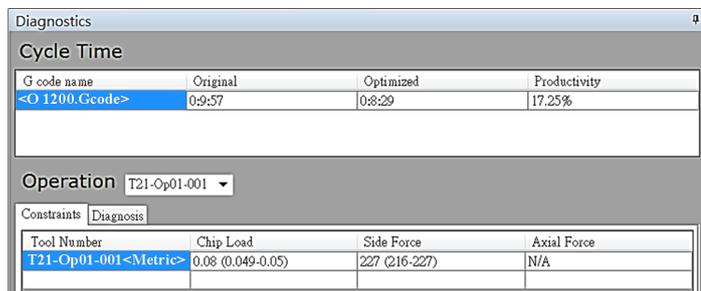


圖 9 診斷畫面

數調整所需時間。

調好優化條件後，使用者即可使用優化按鈕進行優化，結果可從診斷畫面中得到，會顯示原始加工時間及優化後的加工時間如圖 9。

Cycle Time 顯示優化前後估算的加工程式執行時間，及使用此優化條件所增加的效能，Constraints 則顯示各工序的優化建議值。

(5) 優化程式碼的產生

當使用者模擬出理想的優化結果，使用 SPEEDPro 加工程式碼產生的功能，即可在不改變加工路徑條件下，借由調整加工速度(F)，達到穩定切削條件並提供加工效率之目標。因此，使用 SPEEDPro 不會有傳統優化改變加工路徑的問題，又可達到針對路徑的优化的功效，最後藉由上傳程式碼的功能。

刀具路徑擷取功能

欲進行切削力分析需要刀具路徑檔 (automatically programmed tool, APT)，目前 FANUC 控制器有提供 FOCAS 函式庫，可以實現資料快速

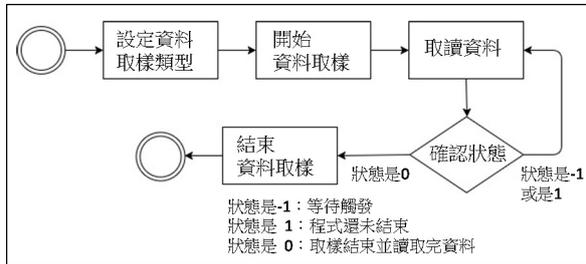


圖 10 取樣流程

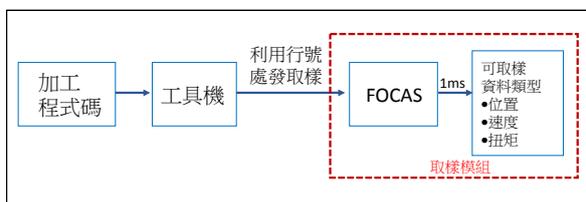


圖 11 快速取樣模組

擷取如圖 10。與工具機連線後可以在不影響機台加工的情況下取得現在正在執行加工程式碼之刀具路徑，其取樣週期可以達到 1 毫秒，透過更密集的路徑資料可以增加切削力負載的準確性如圖 11。

離線版三軸刀具路徑解譯

1. 問題探討

儘管現行版本已經可以有效的降低加工時間，但因為需要跟機台連線進行分析，需耗費少量的工件來達到路徑截取的目的，使得應用範圍侷限在大量少樣的加工條件，在面對以少量多樣客製化程度高的加工廠，這套軟體無法將其帶來的效益發揮到極致；因此，使用者希望能在不占用機台、不進行試加工的前提下進行刀具路徑分析。加工程式的解譯，便成了必要的功能。

2. 方法與實做

(1) 功能定義

雖然 NC 碼的格式有一個泛用的格式，但由於控制器的廠牌相當多樣，各控制器支援的格式仍有

一點差異，因此開發之前，必須先訂定解譯規格，如下所示：

- 快速移動 G00
- 直線切削 G01
- 圓弧切削 G02, G03
- 半徑 R
- 相對圓心 I, J, K
- 絕對圓心 I = AC(num), J = AC(num), K = AC(num)

(2) 拆解 NC 碼

在 NC 碼的解譯中，首先我們必須分類出各種有效的標籤，並把值存在對應的指令，以利接下來的解譯，舉例來說：“G01X1.5Y.5F500”，就必須把此單節解譯成一個直線加工、X=1.5、Y=0.5、F=500。

在程式開發中，拆解單節的工作交給了 StringTokenizer，拆解完的值存進自定義的 Class - NCcmd 當中，NCcmd 中包含 G 碼類別、R 值、代表座標的 Position...等指令。經過周而復始的轉換，直到程式拆解完畢，再將存滿 NCcmd 的 List 輸出成刀具路徑。拆解流程圖，如圖 12。

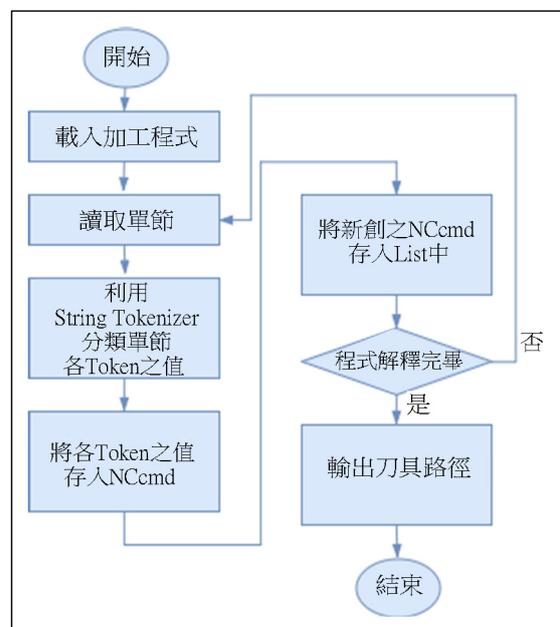


圖 12 拆解流程圖

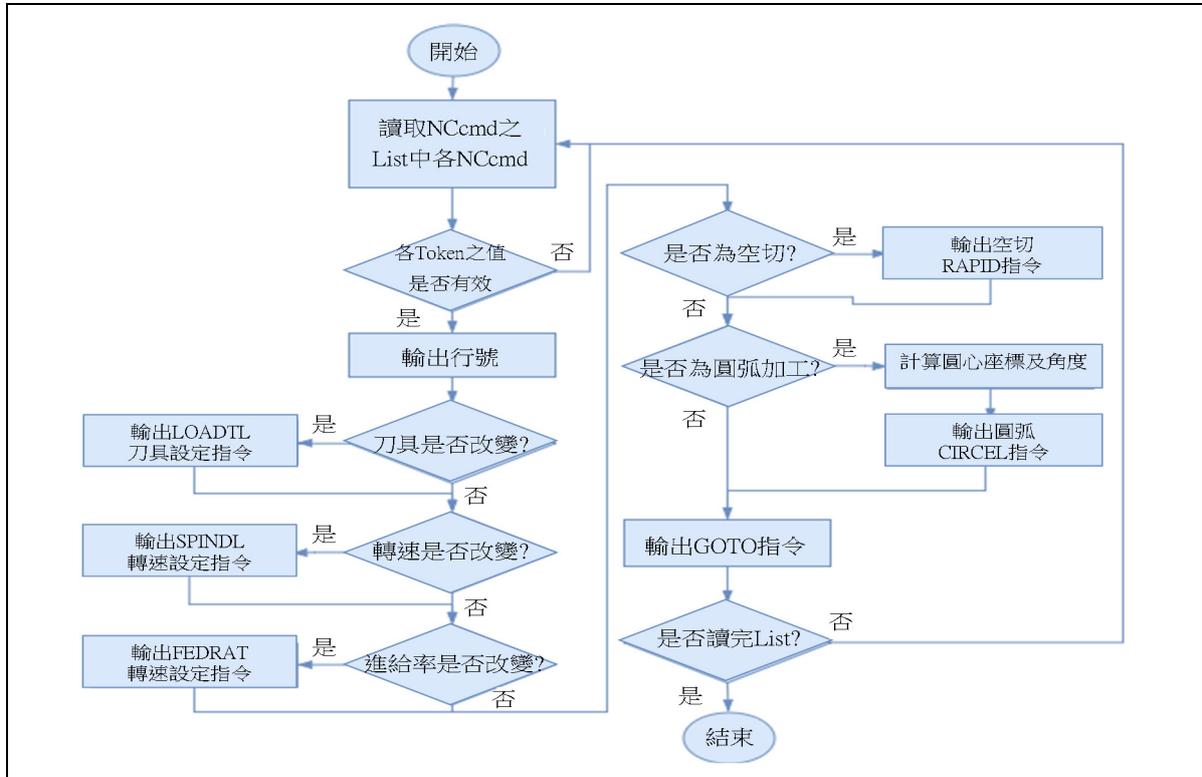


圖 13 路徑檔輸出流程圖

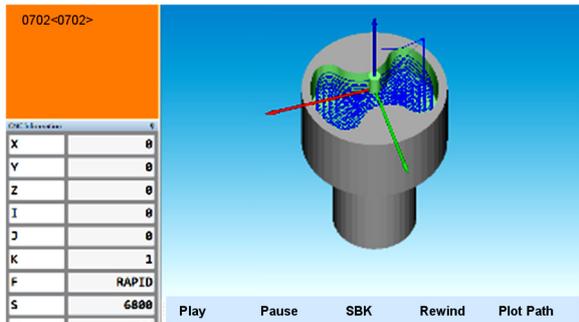


圖 14 直線切削加工碼模擬

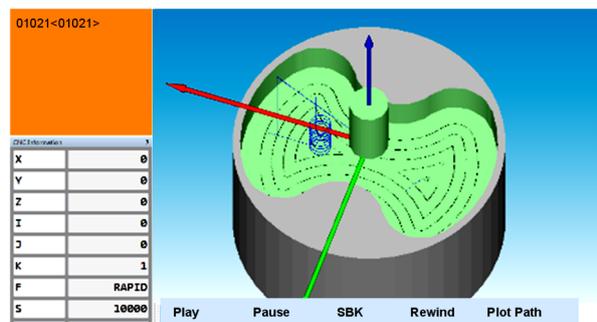


圖 15 圓弧切削(R 半徑格式)加工碼模擬

(3) 輸出路徑檔

有了拆解過後的 NCcmd，接下來進行刀具路徑的輸出，在程式的流程當中，若座標、進給率、主軸轉速為一合理值，例如：座標不為(9999,9999,9999)、轉速不為-1，或進給率不為-1 皆視為合理值，才會進行刀具路徑的輸出；另外，程式發現有些指令在單節並未出現時，應當沿用前一

個指令的設定值，方能轉換出正確的刀具路徑，其流程如圖 13。

3. 結果驗證

開發的工作告一段落以後，必須透過實際的案例才能驗證程式邏輯的正確性，針對直線切削以及各圓弧切削格式的加工碼進行解譯後，成果呈現如圖 14、圖 15。



優化應用案例

切削進給率優化技術可同時分析切削厚度、側向切削力、功率與扭矩等參數的變化，並針對不同工序給予適當的參數建議值。不僅可以節省加工時間，同時又可避免加工過程中過大切削負載造成之主軸損傷、刀具毀損。以下將展示三個工研院輔導的實際應用案例。

1. 筆電模具加工案例

此 3C 產業的平版加工案例由五道銑削製程所組成。業者想要縮減切削時間，但不希望耗費大量時間及材料，反覆實驗尋求最佳切削條件，於是採用 SPEEDPro 進給率優化技術優化金屬切削製程。

此加工案例胚料為鋁材(Aluminum 6061)，工件尺寸如表 1。刀具部分使用一把直徑 25 毫米的端銑刀，以及四把直徑 2 至 8 毫米之小直徑端銑刀，如表 2。SPEEDPro 分析切削厚度及側向力，並自動給予建議優化參數，如圖 16，括號內數值所示；平均值-激進值)。主要製程使用低切削厚度、低側向力的表面粗銑，優化參數如表 3 所示，同時針對切削厚度及側向力進行優化，並加入空切優化選項，提升空切區域之切削進給率(F)。

經由 SPEEDPro 優化後，預估切削時間縮短 18.56%。實際加工優化後的加工程式，時間縮短 15%，如表 4 所示。由於機台加減速設計不同造成預估值與實際切削值有所不同。業者實際執行各工序加工，切削時間比較如表 5 所示。

表 1 工件規格

材質	鋁材(Aluminum 6061)
尺寸	310×208×11
單位	毫米(mm)

表 2 刀具規格

程式名稱	刀具幾何	刃數
Op01	端銑刀 D25	3
Op02	端銑刀 D8	3
Op03	端銑刀 D5	3
Op04	端銑刀 D3	3
Op05	端銑刀 D2	3

表 3 優化參數及條件

程式名稱	空切優化	切削負載	側向力
Op01	是	0.29	351
Op02	是	0.18	340.902
Op03	是	0.109	281.1564
Op04	是	0.102	188.5653
Op05	是	0.066	114

表 4 優化前後加工時間比較

加工時間	原始	優化後	縮短時間(%)
預估時間	10 分 14 秒	8 分 37 秒	18.56 %
實際時間	15 分 29 秒	13 分 26 秒	15 %

Overall			
	ChipLoad	SideLoad	AxialForce
Operation	ChipLoad	SideLoad	AxialForce
Op01-001	0.206(0.196-0.206)	351.431(227.162-351.431)	NA
Op02-001	0.154(0.136-0.154)	276.751(144.299-276.751)	NA
Op03-001	0.106(0.067-0.106)	215.541(85.716-215.541)	NA
Op04-001	0.087(0.077-0.087)	143.138(72.896-143.138)	NA
Op05-001	0.056(0.056-0.056)	67.322(63.666-67.322)	NA

圖 16 建議切削參數值



此加工案例中各工序所使用的刀具及切削特性階不同，若使用同一優化條件，無法對症下藥，發揮進率優化技術之特長。於是 SPEEDPro 針對各工序分別設定優化條件，不緊縮加工時間，更可減少主軸磨耗、大大降低刀具斷裂風險。業者不再需要盲眼試誤法，尋找最佳切削條件，SPEEDPro 給予之建議優化參數不僅縮短尋找最佳參數的時間，也可縮短加工時間，提升生產效能，如表 5 所示。

表 5 各工序實際切削時間比較

程式名稱	原始加工時間	優化後加工時間	縮短時間 (%)
Op01	3 分 53 秒	3 分 23 秒	14.77%
Op02	4 分 25 秒	4 分 4 秒	8.6%
Op03	4 分 4 秒	3 分 32 秒	20.19%
Op04	2 分 5 秒	1 分 44 秒	20.19%
Op05	1 分 2 秒	52 秒	19.23%
總加工時間	15 分 29 秒	13 分 26 秒	15%

2. 平板模具加工案例

此案例同樣應用在 3C 加工產業，除第二道工序以外，其餘皆為低切削厚度之製程。胚料為 6061 鋁材，工件為 110 毫米 x165 毫米之平板塊材，尺寸如表 6 所示。刀具部分，除前兩道製成採用牛鼻刀以外，其餘為直徑 1 至 6 毫米之小直徑端銑刀，如表 7 所示。SPEEDPro 分析切削厚度及側向力，並自動給予建議優化參數，如圖 17 所示。

表 6 工件規格

材質	鋁材(Aluminum 6061)
尺寸	110x165x11
單位	毫米(mm)

分析此製程之切削負載及側向力，同時採用軟體建議之激進參數進行優化，如圖 17 所示，並優化空切區域之切削進給率，預估優化後加工時間有效縮減達 8.12%，如表 8 所示。

表 7 刀具規格

程式名稱	刀具幾何	刃數
Op01	圓鼻刀 D25R0.8	4
Op02	圓鼻刀 D10R0.2	4
Op03	端銑刀 D6	4
Op04	端銑刀 D3	4
Op05	端銑刀 D1.5	2
Op06	端銑刀 D1	2

3. 塑膠模具加工案例

此案由二道工序組成，其餘皆為低切削厚度之製程。採用鋁 6061 培料，工件為 139 毫米 x 135 毫米 x 204 毫米之方形塊材，尺寸如表 9 所示。刀具部分，包含一直徑 25 毫米之牛鼻刀及直徑 10 毫米之端銑刀，如表 10 所示。

表 8 優化前後加工時間比較

	原始	優化後	縮短時間 (%)
加工時間	2 分 47 秒	2 分 34 秒	8.12 %

Overall	ChipLoad	SideLoad	AxialForce
Operation	ChipLoad	SideLoad	AxialForce
Op01-001	0.16(0.159-0.16)	414.774(306.029-414.774)	NA
Op02-001	0.841(0.59-0.841)	1044.6(518.453-1044.6)	NA
Op03-001	0.161(0.109-0.161)	295.236(200.111-295.236)	NA
Op04-001	0.276(0.186-0.276)	350.35(119.829-350.35)	NA
Op05-001	0.131(0.115-0.131)	79.377(67.391-79.377)	NA
Op06-001	0.05(0.047-0.05)	64.102(58.273-64.102)	NA

圖 17 建議切削參數值



表 9 工件規格

材質	鋁材(Aluminum 6061)
尺寸	139×135×204
單位	毫米(mm)

表 10 刀具規格

程式名稱	刀具尺寸	刀數
Op01	圓鼻刀 D25 R0.8	4
Op02	端銑刀 D10	4

表 11 優化前後加工時間比較

	原始	優化後	縮短時間 (%)
加工時間	3 小時 23 分 48 秒	3 小時 2 分 23 秒	11.74 %

分析此製程之切削負載及側向力，同時採用軟體建議之激進參數進行優化，並加入空切優化選項，提升空切區域之切削進給率，可有效縮減 11.74% 的切削時間，如表 11 所示。

結論

加工製造是門藝術，產品日新月異，難度越來越高，除投入的設備成本高外，尚需有經驗的加工程式規劃師，故難跳脫打樣成本高、產能低、良率低等問題。故本中心的解決方案為把機械變聰明，快速複製每個完美。

提升切削製造技術向來是世界各國的產業發展重點，唯有強化製造業的競爭力，才能厚實國家經濟發展實力。SPEEDPro 提供產業快速整合應用的捷徑，協助產業升級，相信不久將來，臺灣加工製造業就能傲視群雄、站上新高度。

誌謝

感謝工業技術研究院智慧機械科技中心的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] Y. Altintas, “Virtual high performance machining,” *7th HPC 2016–CIRP Conference on High Performance Cutting*, Chemnitz Germany, vol. 46, pp. 372-378, 2016.
- [2] Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena, and I. Lazoglu, “Virtual process systems for part machining operations,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 63, iss. 2, pp. 585-605, 2014.
- [3] 許志源、梁碩芃、曾郁安、張鈺翎，“CNC 工具機製程診斷及優化技術”，機械工業雜誌，404 期，第 83-90 頁，105 年 11 月。
- [4] 許志源、張瑞旻、梁碩芃、羅佐良、彭達仁、王仁傑，“加工程式轉換裝置及方法”，中華民國專利 I554856，105 年 10 月 21 日。

