



# 精密加工製程參數最佳化設計

高雄應用科技大學／蔡彥柔、周至宏·工研院智慧微系統科技中心／李耀輝



## 一、前言

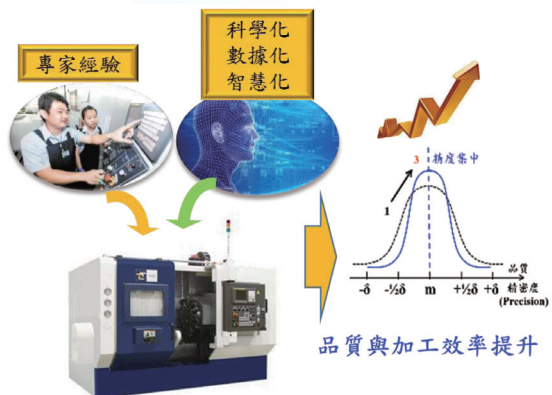
虛實整合是工業4.0中相當重要的一個核心項目，過去許多傳統產業較擅長於生產製造，對於硬體的開發與應用較為熟悉，適當的發展並運用虛實整合技術將會大幅提高企業競爭力[1]。

我國精密加工業者9成以上為中小企業，因此經常面臨到訂單型式是屬於少量多樣化的需求，在未來邁向工業4.0的時代，在轉型客製化的製造業服務化的趨勢下，意謂著加工產線會需要頻繁地進行換模換線生產以因應客戶的訂單需求。因此對於快速首件、高品質產品的產出及維持機台的高製程能力的需求日益擴大。然而現有的生產方式，品質的掌控均仰賴現場老師傅的經驗，若經驗出現斷層，品質將大受影響，如圖1所示。因此若能在製造現場導入虛實整合的精神，將能大幅提高生產效能。



▲ 圖1 依老師傅的經驗調校出最佳參數

在產業上，一套有系統化且靈活的建模系統是非常重要的，而且透過這種建模的方法，最重要的是可以將現場老師傅的經驗透過科學實驗方法進行量化並製作數位模型化，可因應市場少量多樣化的客製化需求，針對不同樣態加工件的品質進行線上品質模擬，以得到最佳加工參數，縮短首件製造時間，如圖2所示。



▲ 圖2 加工與品質參數數據化，提升品質

在本文中採用了由方開泰和王元所提出的均勻設計方法，因水準數等於實驗次數，適合範圍大且多因子多水準實驗。使用均勻設計法解決粗加工機台參數調整的耗時和成本的問題，均勻設計可合理性安排實驗進行分析，解決參數調整的問題。

## 二、均勻設計

王元和方開泰[2][3]提出均勻實驗設計，其實驗方法和正交實驗相似，正交實驗使用方便，為普遍實驗設計方法之一。正交實驗方法具有兩種特性：一是整齊可比性，對任意兩

因子必須是全面實驗，每個因子的各水平必須有重複，因此為了達到整齊可比性，實驗點就必須比較多；二是均勻分散性，實驗點在實驗範圍內散佈均勻，使每個實驗點具有代表性。並且進行部分實驗基本上就可得到反映全面情況的實驗結果，但對於多因子和多水準的實驗，其實驗次數至少為水準數的平方倍，如5因子5水準，用正交表就需要安排 $5^2=25$ 次實驗。對於週期長或成本高的實驗就不適合使用此方法。這時，可以選用均勻設計法，僅用5次實驗就可能得到能滿足需要的結果。

均勻設計為數論和多元統計結合，最早於1978年由王元和方開泰所提出，主要是在正交設計基礎上，捨棄正交實驗的整齊可比性，只考慮均勻分散性，使每個實驗點具有更好的代表性，創造一種適合用於多因子多水準的實驗設計方法。

均勻設計的優點主要有：

1. 實驗次數大幅減少。  
例如：某一加工實驗，欲找出最佳產量或其它最佳化目標條件，設有3個實驗因子，每個因子在實驗範圍內有7個水準，若採用正交法至少需做49次實驗；採用均勻設計只需做7次實驗即可。
2. 均勻設計實驗數據透過迴歸分析可得知影響此次實驗較大的因子是哪幾個。
3. 過程數位化，通過電腦對結果與因子條件進行界定與預測（如品質預測），進而控制各因子。

均勻設計在實務操作上，步驟可分為以下程序：

Step 1. 確定實驗目標。

Step 2. 選擇因子及其實驗範圍。

Step 3. 決定各個因子的水準。

Step 4. 根據水準數選擇均勻表。

Step 5. 依照選擇的均勻表搭配的使用表，將各因子的水準依序號排列，完成均勻表實驗設計。

Step 6. 依均勻表實驗設計進行實驗，並記錄結果。

Step 7. 對完成的均勻實驗與其結果數據，進行迴歸分析。

Step 8. 由迴歸方程式可透過MATLAB程式找尋最佳化。

以下的實驗方式係以機車精密零組件的中心孔徑粗加工為實驗標的，同時也可進一步說明均勻設計方法如何導入到加工製程最佳化設計的應用。

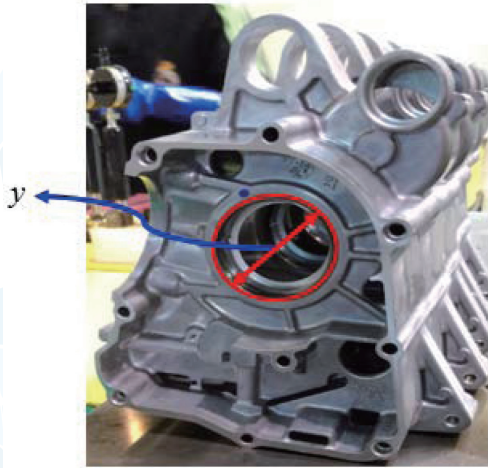
### 三、粗加工

粗加工機台可調整參數為加工徑、切削速度和進給速度，參數因子調整範圍如表1所示。

▼表1 粗加工參數範圍

參數	範圍
加工徑(mm)	$51.3 \leq x_1 \leq 51.7$
切削速度(m/min)	$80 \leq x_2 \leq 170$
進給速度(mm/rev)	$0.05 \leq x_3 \leq 0.25$

測量目標為加工件中心孔徑，期望中心孔徑和加工徑誤差越小越好，令中心孔徑測量值為y，如圖3所示。



▲ 圖3 加工元件中心孔徑測量值 $y$

#### 四、實驗設計

考慮加工調整參數的精度及可用設定將參數範圍均分成10水準，因  $x_1$  和  $x_3$  可用設定參數為5水準，因此循環重複排列，如表2。

▼表2 粗加工參數10水準

NO.	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	51.5	80	0.05
2	51.6	90	0.10
3	51.7	100	0.15
4	51.3	110	0.20
5	51.4	120	0.25
6	51.5	130	0.05
7	51.6	140	0.10
8	51.7	150	0.15
9	51.3	160	0.20
10	51.4	170	0.25

選擇均勻表  $U_{10}^*(10^8)$  進行均勻實驗設計，如表3所示，配合使用表表4，三個參數因子選擇第1、5和6行，可得到表5均勻表  $U_{10}^*(10^3)$ 。

▼表3 均勻表  $U_{10}^*(10^8)$

NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	7	9	10
2	2	4	6	8	10	3	7	9
3	3	6	9	1	4	10	5	8
4	4	8	1	5	9	6	3	7
5	5	10	4	9	3	2	1	6
6	6	1	7	2	8	9	10	5
7	7	3	10	6	2	5	8	4
8	8	5	2	10	7	1	6	3
9	9	7	5	3	1	8	4	2
10	10	9	8	7	6	4	2	1

▼表4 均勻表  $U_{10}^*(10^8)$  使用表

因子數	行號				
2	1	6			
3	1	5	6		
4	1	3	4	5	
5	1	3	4	5	7
6	1	2	3	5	6

▼表5 均勻表  $U_{10}^*(10^3)$

NO.	1	5	6
1	1	5	7
2	2	10	3
3	3	4	10
4	4	9	6
5	5	3	2
6	6	8	9
7	7	2	5
8	8	7	1
9	9	1	8
10	10	6	4

將表2水準依序號填入表5，每筆數據進行3次實驗得到測量孔徑  $y_1$ 、 $y_2$  和  $y_3$ ，如表6所示。

▼表6 粗加工均勻實驗配置與測量孔徑

NO.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	51.5	120	0.10	51.50	51.50	51.49
2	51.6	170	0.15	51.59	51.58	51.59
3	51.7	110	0.25	51.73	51.74	51.74
4	51.3	160	0.05	51.33	51.33	51.33
5	51.4	100	0.10	51.39	51.39	51.39
6	51.5	150	0.20	51.48	51.48	51.48
7	51.6	90	0.25	51.60	51.60	51.61
8	51.7	140	0.05	51.74	51.74	51.74
9	51.3	80	0.15	51.33	51.33	51.34
10	51.4	130	0.20	51.36	51.37	51.37

並使用性能指標計算其性能比(Signal-to-noise ratio, SNR)[5], SNR值記為  $\eta_c$ , 公式計算如下式:

$$\eta_c = -10 \log \left[ \frac{(\bar{y}_i - m)^2}{\max_i (\bar{y}_i - m)^2} + \frac{\bar{\sigma}_i^2}{\max_i \bar{\sigma}_i^2} \right] \quad (1)$$

其中  $y_i$  為第  $i$  筆數據  $y$  的平均值,  $m$  為期望目標值,  $\bar{\sigma}_i$  為變異數,  $\eta_c$  為望大。

粗加工測量孔徑值計算的SNR值如表7所示。

▼表7 粗加工測量孔徑值計算的SNR值

NO.	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\eta_c$
1	51.50	51.50	51.49	-0.08955
2	51.59	51.58	51.59	-0.51153
3	51.73	51.74	51.74	-2.68149
4	51.33	51.33	51.33	2.49877
5	51.39	51.39	51.39	12.04120
6	51.48	51.48	51.48	6.02060
7	51.60	51.60	51.61	-0.08955
8	51.74	51.74	51.74	0.00000
9	51.33	51.33	51.34	-2.32573
10	51.36	51.37	51.37	-2.32573

使用MATLAB逐步迴歸指令對數據進行迴歸分析, 如表8所示。

由表8可得知迴歸方程式為:

$$\hat{y} = -3992.2 + 138.67x_2 - 5822.2x_3 - 1.7067x_2^2 + 73568x_3^2 + 0.0091654x_2^3 - 359150x_3^3 - 181490x_2^4 + 592430x_3^4 \quad (2)$$

其中R平方為0.999,  $F = 202 > F_{(8,1)}^{0.01} = 99.374$

, 通過F檢定, 有99%信賴度。

▼表8 粗加工迴歸分析

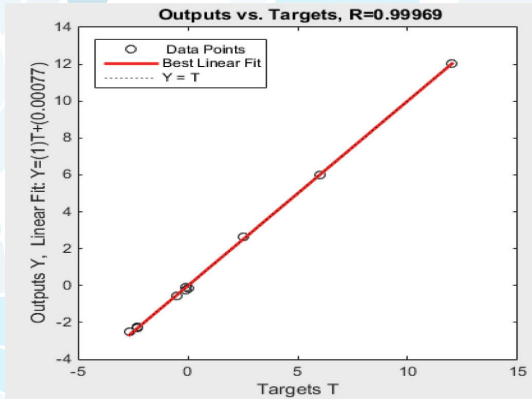
Linear regression model:				
$y \sim 1 + x_2 + x_3 + x_2^2 + x_3^2 + x_2^3 + x_3^3 + x_2^4 + x_3^4$				
Estimated Coefficients:				
	Estimate	SE	t Stat	p Value
Intercept	-3992.2	173.2	-23.05	0.027602
$x_2$	138.67	6.2755	22.098	0.02879
$x_3$	-5822.2	653.85	-8.9045	0.071196
$x_2^2$	-1.7067	0.077151	-22.122	0.028758
$x_3^2$	73568	8119.9	9.0602	0.069982
$x_2^3$	0.0091654	0.00041621	22.021	0.02899
$x_3^3$	$-3.5915e^{+05}$	39586	-9.0726	0.069887
$x_2^4$	$-1.8149e^{+05}$	-9.0726	0.069887	0.029162
$x_3^4$	$5.9243e^{+05}$	65934	8.9851	0.070563

Number of observations: 10, Error degrees of freedom: 1  
 Root Mean Squared Error: 0.342  
 R- Squared: 0.999, Adjusted R- Squared: 0.994  
 F- statistic vs. constant model: 202, p-value= 0.0543

由下列表9 和圖4可得知SNR值和迴歸方程式  $\hat{y}$  值。

▼表9 粗加工SNR值與迴歸方程式  $\hat{y}$

NO.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\eta_c$	$\hat{y}$
1	51.5	120	0.10	-0.08955	-0.0961
2	51.6	170	0.15	-0.51153	-0.58141
3	51.7	110	0.25	-2.68149	-2.5177
4	51.3	160	0.05	2.49877	2.662562
5	51.4	100	0.10	12.04120	12.04775
6	51.5	150	0.20	6.02060	6.014048
7	51.6	90	0.25	-0.08955	-0.25334
8	51.7	140	0.05	0.00000	-0.16379
9	51.3	80	0.15	-2.32573	-2.25585
10	51.4	130	0.20	-2.32573	-2.31918



▲ 圖4 粗加工SNR值與迴歸方程式  $\hat{y}$  線性關係

## 五、結語

由(2)式，可得知影響粗加工重要因子為切削速度和進給速度，使用MATLAB設定  $x_2$  及  $x_3$  在表1範圍內，間隔為0.01，帶入迴歸方程式(2)式， $\hat{y}$  值為望大，可得到故最佳  $x_2$  (切削速度) 和  $x_3$  (進幾速度) 分別是100 (m/min) 和0.15 (mm/rev)。

在傳統加工產業，缺乏穩定且有系統的方法來調整其加工參數，現今憑藉工程師經驗進

行調整參數，通常耗費多時且成本較高，使用均勻設計方法可以有系統性的安排實驗，透過迴歸分析可以找到影響加工的重要因子和最佳參數。

在加工實例，工程師花費約3天時間調整此元件粗加工的參數，才能穩定加工出件，本研究使用均勻設計方法花費約1天的時間，即可找到最佳參數，其成本更是大幅減少。

## ☒ 參考文獻

1. 周至宏，2016年，工業4.0、生產力4.0的技術與發展，國立高雄應用科技大學電機工程學系，台灣。
2. 方開泰，1994年，均勻設計與均勻設計表，科學出版社，北京。
3. 方開泰，2007年，正交與均勻試驗設計，科學出版社，北京。
4. 曾昭鈞，2005年，均勻設計及其應用，中國醫藥科技出版社，北京。
5. 周至宏，2015年，最佳化方法，國立高雄應用科技大學電機工程學系，台灣。

## 三聯科技2016(105)年12月參展訊息

參 展 名 稱	日 期	三聯科技參展主辦	聯 絡 窗 口
中國機械工程學會105年度年會暨第33屆全國學術研討會	105.12.3~4	台灣感測部	楊傑凱 (02)2708-1730
2016 AGU Fall Meeting	105.12.12~12.16	自動化事業部	陳彥俊 (07)622-9700