

## 以田口實驗法最佳化汽缸內壁專用拋光機之研究

黎文龍<sup>1</sup>、張東權<sup>2</sup>、張敬旺<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立台北科技大學機電整合研究所 教授

<sup>2</sup> 國立台北科技大學機電整合研究所 研究生

聯絡作者：黎文龍 [wlli@ntut.edu.tw](mailto:wlli@ntut.edu.tw)

### 摘要

本研究係以設計開發一汽缸內壁專用拋光機為最終目標，整機包含變速箱、往復運動、機座與立柱、夾具、公轉運動與自動化連續生產等多個子系統。由於拋光加工需要較高的加工線速度，本文著重於傳動變速箱子系統之具體製作實體以及改良，過程中除利用創新發想之手法外，也引用田口實驗設計法驗證、改善此高轉速之變速箱原型機，目標在於求得變速箱組裝後之最佳化設計，使振動量最小。研究中以振動訊號診斷出可能之原因後，加以改良，並經反覆直交表實驗，得出最佳化之改良組合，若與第一代機相比，至少改善了 34 %，因此，本文也同時證實以田口法改良本研究所發展之拋光機變速箱原型，有效可行。

關鍵詞：創新設計、田口法、最佳化、高速轉軸。

### 1. 引言

現今工業界中，仍然存在許多待解的問題，等待工程人員設法去解決，本文乃針對實際割草機用之小型汽缸體於電鍍後之專用拋光加工問題，提出滿足工業特殊需求之專用機。

本文作者曾於 2005 年暑假實際走訪深圳台商 Steel Jack 欣格表面處理廠，了解其需求，該廠乃是針對割草機用之汽缸體內壁做表面電鍍硬鉻(Cr)層，並予以內徑拋光(polishing)加工，而本研究針對此需求，針對最大加工量：25 C.C.與 30 C.C.之汽缸體為加工對象，設計與研發一台不同大小之汽缸體拋光專用機，如圖一為 25C.C.之汽缸體，(a)為經電鍍後、未拋光加工前之汽缸體，(b)為拋光後之汽缸體內壁。



圖一 25 C.C.之汽缸體：(a)拋光前、及(b)拋光後

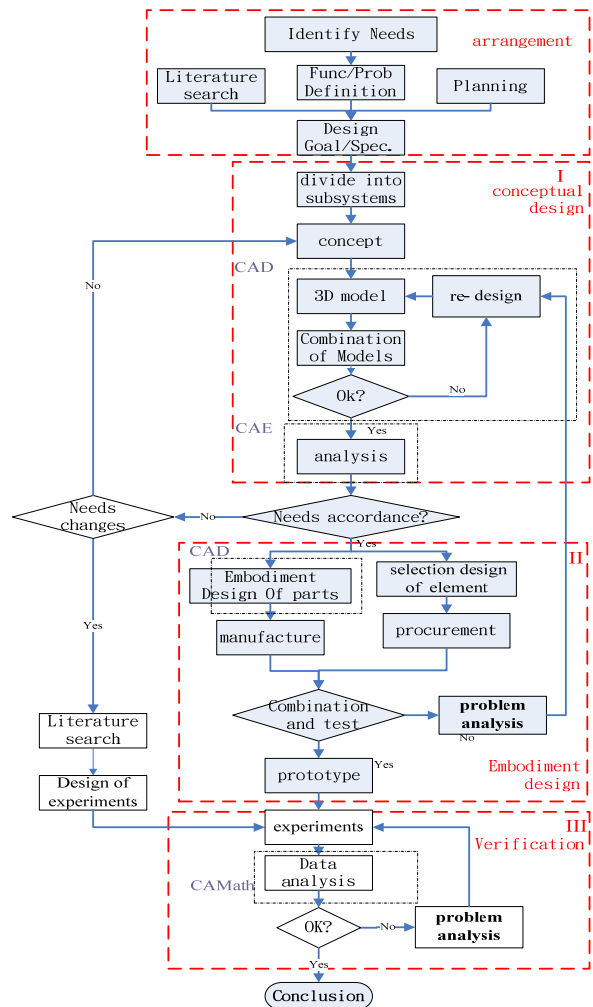
一般有關高速主軸的研究是以工具機之研發居多，因此，屬於本研究拋光專用者，實在是少數中之少數，由於汽缸壁之拋光加工需要高線速度，因而也是一種高速轉軸者。由文獻顯示[1]，理論上之拋光

加工線速度約在 30 m/s 左右(或轉速約 19,000 rpm)，因此，一具良好的高轉速變速箱機構，乃為首要課題，如同主軸之研發對工具機之重要性。因此，本報告延續[2]，針對開發之拋光專用機變速機構，引用田口之實驗設計法，於研發階段，進行改良與測試評估。

### 2. 創新設計

#### 2.1 設計方法與程序

本研究開發之流程，如圖二所示，乃參考[3]所規劃者。經過前置作業、構想設計階段與組裝階段後，圖中之虛線框為對應之四個階段，同時也導入應用 CAD、CAE 與 CAMath 等電腦輔助工具。



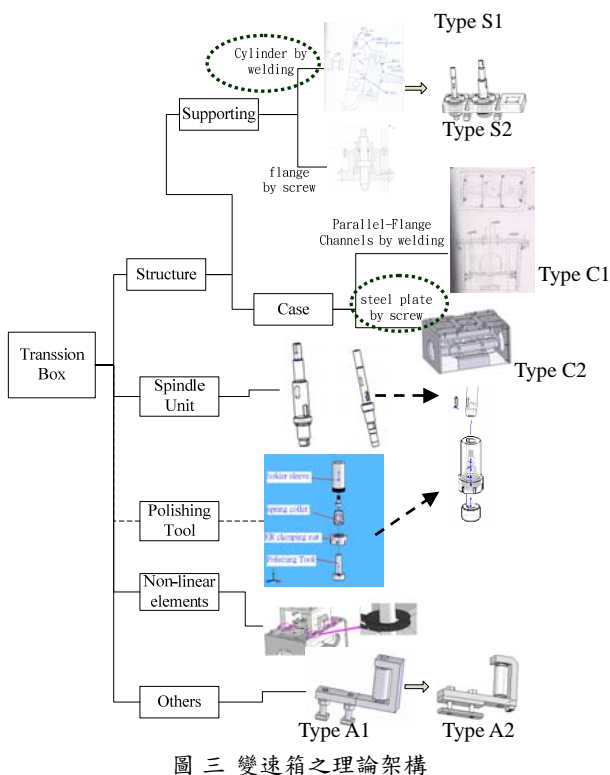
圖二 研究流程圖

參考圖二，針對本文研究流程所進行內容，簡述如下：

- (1) 準備作業：包括了解業者之需求、針對問題深入了解與分析，並訂定工程規範後，
- (2) 構想設計階段：針對整系統，先分解成多個子系統，接著針對每一子系統，利用發想工具，以創新設計方式來構想，經確認需求後進入下一階段。然而，因合作經理人辭去職務關係，因而縮小設計發展範疇，只針對變速箱子系統來產出原型。
- (3) 具體設計階段：主要為將構想出之新構想或電腦模型具體化、產出原型，而做相關準備作業，包括：標準元件之選用，以及經具體設計細節後，繪製工程圖且外包加工之元件，再將此兩類零件組裝出原型(prototype)，以及跑合測試。
- (4) 實驗驗證階段：選定實驗因子後，利用田口實驗設計法分析，經實驗與資料分析後，除得到主要因子(改善方法)與最小振動量外，也從振動診斷資訊，討論出問題所在，並予以改善後，再經直交表反覆搜尋，得到最佳化設計。

## 2.2 創新設計：設計構想與具體設計

本文之設計階段區分為構想設計與具體設計，乃對應創意 (creativity) 與創新 (innovation)[4]，創意是利用發想方法，產生新而且有用的構想，近似於「構想」或「發想」之過程，屬於的腦部思考及心理層面，過程中利用 SolidWorks，來幫助元件間之尺寸配合。



圖三 變速箱之理論架構

創新乃是由創意之產出構想更進一步創造出價值，須進一步執行或生產，因此，創新則是「創造」

或「創新」之意，是將創意產出之構想以技術、工具等進一步實現、具體化，以呈現整體之價值，故其產出應為有形之創作產品。

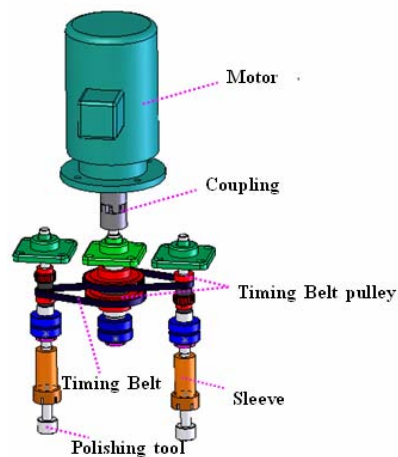
以本文為例，著重於變速箱子系統之原型製作與評估驗證，此子系統乃是實現主軸旋轉運動，為加工運作之核心，主軸轉速須高達 19,000 rpm [1]，然而，基於初次開發之保守考量，先將原型機之轉速略降低至 12,000 rpm，且基於研究與實驗考量，設計容易替換皮帶輪以達到選擇不同轉速之功能[5]。

於「發想」之過程，利用層級化概念[2]將變速箱子系統再分解為四個次系統：外箱與軸承支撐、主軸設計、減振元件與馬達托架以及其他等，如圖三為經過變速箱各次系統發想後，變速箱之功能架構，以圖右方之理論架構(可能解)，來滿足左方之功能架構(需求目標)，而理論架構可看出任何可能之解，再從中評估決定適合解，以上乃為構想設計階段，詳細創新設計之「發想方法」參考[2]。

特別值得一提的，本原型機所設計之變速箱亦引用本實驗室所發展之非線性隔振元件—碟型彈簧來隔離振動源，其創新與減振原理是利用圓錐型彈簧來取代線性彈簧，然後調整其非線性之剛性，並藉由系統剛性的改變，來轉變吸振器本身特有的自然頻率加以應用之，詳參考[6]。

具體設計時，將各次系統之適合解，進一步整合收斂且具體實現化，工作內容大致包括：

- (1) 具體設計元件— 例如，軸承支撐、主軸之進一步尺寸、公差與配合設計。或者，外箱之零件設計解析時，除一般解析：相關強度計算外，使用 CAE 軟體 COSMOS/Design STAR 來輔助應力與模態之有限元素分析等，詳參考[2]。



圖四 動力傳遞示意圖

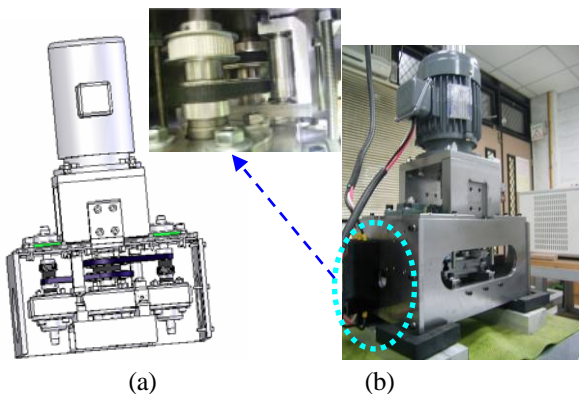
- (2) 標準元件之選用— 例如，決定動力傳遞之相關能量計算，經過解析計算後，變速箱單元之動力傳遞選用結果，如圖四所示，動力源為三相 220V 之 1/2 HP 感應馬達，開關使用無熔絲開關，連結方式經由 MTC 聯軸器傳遞動力至驅動軸，再經由 MXL 定時皮帶輪與定時皮帶傳動至兩加工軸，有兩種速度可以切換，為 140 齒傳至 40 齒，

即轉速從 3420 rpm 加速至 11,970 rpm，而另一狀態為傳至 60 齒，即從 3,420 rpm 加速至 7,980 rpm，轉換頻率分別為 57 Hz、133 Hz 與 200 Hz。

- (3) 經標準元件之選用與採買，與具體設計細節後繪製工程圖後外包加工，兩類零件完成後，進行組裝。
- (4) 最後一階段則是測試與改善，也是本文報告之重點。此外，本文只針對變速箱來產出原型與驗證實驗，因此，產出時會省略一些原有設計之機制，以降低成本，例如：與線性模組連接之安裝孔、與加工具連接之安裝孔。

### 2.3 組裝與測試

創新設計，必須經過「無中生有」及「溫故知新」過程[2]，而“Learning by doing”更必須經歷實際之動手組裝，而圖五為作者將之組裝後，變速箱系統之 3D 模型與產出之原型的對照圖，此原型乃是本研究之實驗對象。



圖五 變速箱系統：(a) 3D 模型、及(b)完成之原型機

其中軸承系統是攸關變速箱主軸性能之重要關鍵，而軸承在安裝完成後，運轉檢查是否安裝正確、運轉測試，本研究以跑合測試，觀察運轉之軸承溫度來判別有無異常，藉由軸承外圍的溫度變化情形來判斷軸承是否有異狀[7]。經組裝完成、跑合測試，以及測試軸承溫度與主軸轉速，測試後兩種實際轉速分別約為 11,757 rpm 與 8,108 rpm，而溫昇從室溫 27 °C 升至 60 °C 左右。

## 3. 改良實驗與評估驗證

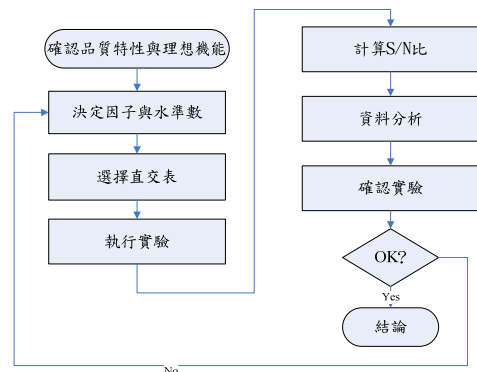
實驗目的乃是希望評估變速箱原型性能，了解不同因子造成對變速箱之影響為何，經由實驗之訊號分析，找出提升原型機性能之因子與改善方式，以求得最小振動量。

本研究使用之實驗設計法為田口法，其實驗流程，如圖六所示。

### 3.1 品質特性

實驗首要階段須清楚了解實驗問題，建立想達成之主要功能與容許範圍，且在探討最佳化的過程中，

最重要的便是找出最能適切表達品質特性的目標函數，諸如維持產品整體的平均值逼近設定值(或減小產品間的變異)，均可做為提高品質的目標函數。



圖六 本研究之田口實驗設計法之流程

田口方法[5, 8]的參數設計，將品質特性轉換為 S/N 比，其從成本-效益的方法發展而成，以品質損失函式來表示工程之實際與設計值之差異，將品質定義為產品在其生命週期內，整個社會對其付出的總代價，稱之為品質損失，所謂損失函數是指工程之實際與設計值之差異所表示成的金錢損失函數，且田口利用二次品質損失函數 (quality loss function) 來表示一產品性能偏離目標值的程度、來計量品質特性。品質損失愈少，代表較高的品質。

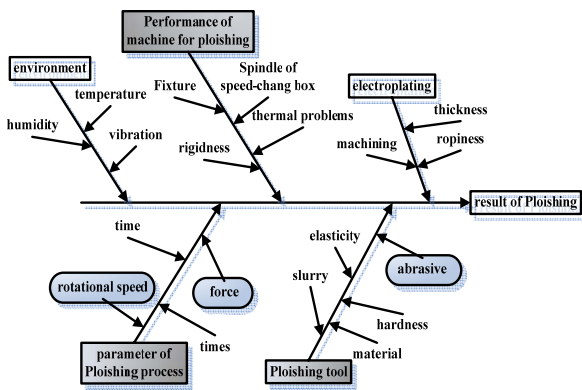
本研究所要量測之物理量為加速度，至於，理想機能為因子與品質特性的理想關係式，依然使用田口法之 S/N 比 (signal-to-noise ratio)，但嘗試使用不同指標，例如 RMS 值，其理想機能為加速度之 RMS 值(振動)越小越好，為望小特性。

### 3.2 實驗因子與水準數

於了解實驗目的後，接著選定之實驗可控因子與水準數，來選用適當之直交表(Orthogonal Array)。

根據其他拋光文獻探討之剖析[9, 10]，推測歸納出於整機開發後，影響拋光加工之要因魚骨圖，如圖七所示，影響拋光加工結果之因素有：環境、拋光機本身性能、汽缸體本身電鍍之結果、加工具材料與拋光加工時的條件等，將之劃分為可控與不可控因子。不可控因子包括：環境參數與汽缸體本身電鍍之結果，其餘如圖中灰底者，可視為可控因子，包含加工具材料選擇與加工條件，以及拋光機本身性能。

然而，本研究現階段以評估變速箱原型為主，因此，限定變速箱之可控因子來做因子實驗分析，分析因子對振動量之影響，其代表機器之性能，而有別於一般實驗是分析因子對工件之表面粗糙度有何影響。且圖七中橢圓框框為本研究擇定之重要可控實驗參數，待原型機開發完成後，再利用變速功能之良廠，進行實驗改善，而實際之拋光加工，另與加工具之外尺寸、離心力有關，待整機完成後，另外再對整機進行汽缸內壁之加工粗糙度之影響評估。



圖七 拋光加工之要因圖

參考圖七中變速箱之可控因子，且根據 80/20 理論，實驗因子不宜太多。本實驗所選定之實驗因子，如表一，包括：轉速、添加隔振元件與否、皮帶鬆緊度與加工軸之質量平衡配置等，本實驗另決定每個因子之水準數為二，分別定義如表一，同時選擇  $L_8(2^7)$  直交表執行田口法分析，各因子之說明如下：

- 不同轉速下—依變速箱所設計之 7,980 與 11,970 rpm 兩種轉速，為因子 A，
- 減振元件—於馬達托架與變速箱間，加入非線性隔振元件後，是否有減振效果，為因子 B，
- 使用不同皮帶之鬆緊—利用皮帶鬆緊裝置，以調整皮帶鬆緊度，為因子 C，
- 主軸之質量平衡—於加工軸之兩側，以螺絲之重量，來改變軸上質量配重，為因子 D，例如，於軸之一側鎖上 0.6 g 之螺絲，其對邊無任何螺絲，則以 “0 g, 0.6g” 來表示軸上兩側之配置重量。

表一 實驗一之因子與水準

Factor	Descriptions	Level 1	Level 2
A	rpm	11,970	7,980
B	Isolation	One	No
C	Tension of belt	Tight	Loose
D	Added mass	0.2 g, 0.2 g	0 g, 0.6 g

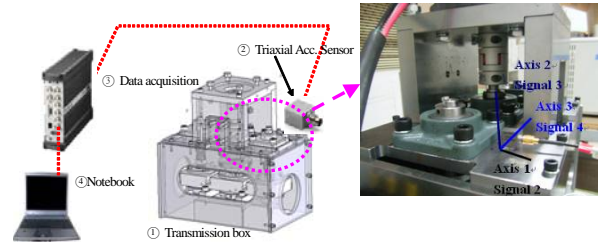
### 3.3 訊號擷取

於確認相關實驗參數設計後，便可進行實驗。本研究為了量測加速度量與頻率響應，實驗架構如圖八(a)所示，在變速箱之較高轉速之加工旋轉軸附近，裝置了三軸加速度計來當作此系統的輸出訊號，透過訊號擷取系統將輸出訊號傳送到電腦，而訊號擷取系統所搭配之軟體，可將訊號作處理後顯示出時域圖、頻率響應與反頻譜圖等，亦可儲存數據，以方便進行資料分析。

另一方面，考慮於後續之資料處理，本實驗將三軸之個別振動加速度量，轉換成以範數(norm)方式表示，其物理意義即為複合振動(加速度)量，其轉換公式如下

$$A_{com}(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)} \quad (1)$$

其中， $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$  分別為各軸之加速度量，再轉換成  $A_{com}$  儲存，做為後續之運算分析用。



圖八 實驗量測之設備架設

### 3.4 計算 S/N 比與分析

待實驗架設、量取訊號經轉換至複合振動量與數據收集後，便可計算 S/N 比，為一種包含平均值與標準差的指標，亦即，將品質特性與最小變異兩者轉化成單一指標。

本實驗再進一步利用田口實驗分析法，來做穩健最佳化分析。品質特性依然使用田口法之 S/N 比，不過，由於分析需要簡單的指標，本實驗嘗試使用不同指標，找尋更靈敏分析指標，以突顯訊號之靈敏度。首先，第一個回應指標值為常見之 RMS 值，針對複合振動量  $A_{com}(t)$  之計算 RMS 值為

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

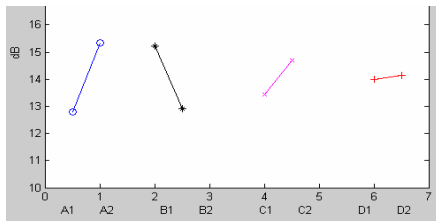
亦即，以(2)式之 RMS 指標為選定田口品質特性之基準，故變速箱之複合加速度 RMS 值，其理想機能為望小特性，且訊雜比(S/N)可表為

$$\eta_{SB} = -10 \log\left(\sum_{i=1}^N x_i^2\right) \quad (3)$$

經計算 S/N 比後，將之整理成表二之直交表內。過程中利用 CAMath 來幫助資料運算，利用 MTALAB 來運算出回應值，以及利用 Excel 來完成直交表之相關計算，分析結果之回應圖，如圖九所示。

表二 實驗一之直交表與數據

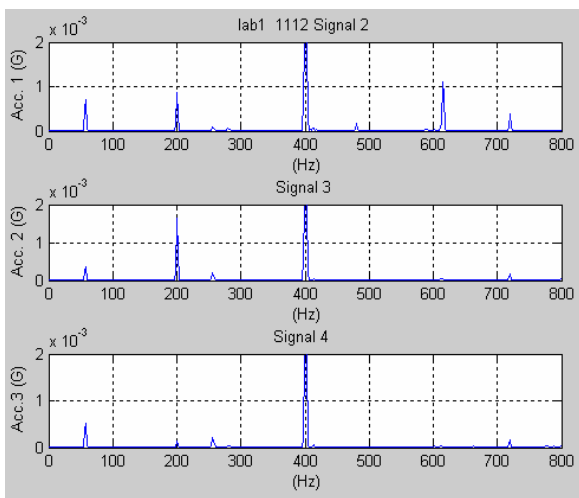
exp.	A	B	C	D	data1	data2	data3	AVE.	S/N
1	1	1	1	1	0.2050	0.1780	0.2305	0.2045	13.7
2	1	1	1	2	0.2278	0.1970	0.2497	0.2248	12.9
3	1	2	2	1	0.2456	0.2129	0.2790	0.2458	12.1
4	1	2	2	2	0.1994	0.2019	0.3046	0.2353	12.4
5	2	1	2	1	0.1522	0.1461	0.1387	0.1456	16.7
6	2	1	2	2	0.1359	0.1403	0.1217	0.1326	17.5
7	2	2	1	1	0.2328	0.2072	0.2030	0.2143	13.4
8	2	2	1	2	0.2219	0.2029	0.1901	0.2049	13.8



圖九 實驗一之 S/N 回應圖

從圖九之回應圖中，可清楚知道因子 A 最靈敏、其次為因子 B，亦即因子 A(轉速)對振動量有顯著之影響，其次為使用之非線性隔振碟片。另外，依田口法之兩階段設計 [3]，可得控制因子的最佳水準組合為 7980 rpm、使用非線性減振碟片一片、皮帶為較鬆之狀態下、上下之動平衡配置為(0, 0.6 g)時，振動 RMS 為最小。

完成實驗一後，作者另考慮皮帶鬆緊度(因子 C)無法具體量化，而且經檢查頻譜圖後，發現訊號有呈現倍頻峰值現象(cf. 圖十)，推測乃是由於皮帶寬度不夠，與帶輪間尚有約 1~2 mm 之間隙，可能因而造成皮帶之對心不準(Misalignment)有關。因此，為了進一步了解皮帶寬度(與帶輪間之間隙)之不同，是否可以改善該倍頻峰值，特別是在 400 Hz 與 600 Hz 處，以及其對變速箱之振動有何影響，本研究又規劃實驗二，並另選因子，如表三說明。



圖十 典型的實驗一訊號頻譜圖

簡言之，實驗二除改變因子 C 外，因子 B 也改以 2 片碟型彈簧當作隔振介質，同時，平衡質量也依據實驗一之結論，將驅動軸也加入若干之質量平衡配置。依前述之隨機實驗之順序，並增加實驗之重複次數至五次，可以得與實驗一近似之直交表、數據以及因子回應圖，詳細資料請參閱[5]。

從實驗二之結果顯示，因子 A 之轉速相較於其他三個因子，其對振動量之影響最為顯著。再者，最小振動變異之組合為：轉速因子為 7980 rpm、使用非線性減振碟片兩片、皮帶為 10 mm 寬、被動軸(加工軸)

動平衡配置為(0.2、0.2 g)，振動可達(加速度量)最小。此外，實驗二也佐證了皮帶輪與皮帶間之隙，在高速傳動之加工條件下，也是一重要之影響因子。

表三 實驗二之因子與水準

Factor	Description	Level 1	Level 2
A	rpm	11,970	7,980
B	Isolation	NO	Two
C	Belt width (Gap)	9 mm	10 mm
D	Added masses: Driven/Driving	0.2, 0.2 g/ 1.7, 1.7 g	0, 0.6 g/ 0, 1.7 g

### 3.5 實驗結果討論

本研究再將兩次田口之實驗結果，做進一步的分析與歸納：

- (1) 實驗一與二中，四個因子中，因子 A 之轉速都是最顯著，亦即對(2)式所定義之指標影響最大，其次為因子 B，但是，在實驗二中，由於另兩因子之改變，使得相較於因子 A，加入隔振元件之效果，相對地不顯著，因此，另一個面向即是：所加入之隔振元件，確實發揮作用，從而使得整體振動值下降，也突顯了因子 A(轉速)特別顯著。
- (2) 在實驗一中，各因子之最佳水準中，因子 D：動平衡配置卻為 (0, 0.6)g 時較佳，猜測由於驅動軸本身之鍵槽造成不平衡，而螺栓配重只有 0.6 g，太小而無法明顯之平衡效果。

再者，針對個別因子對振動量之影響，整理歸納可以改善變速箱之性能的方法，為：

- (1) 轉速：於文獻中，轉速對工件粗糙度為顯著影響之重要因子，由本實驗結果顯示，影響亦為最大。因此，考慮本研究之設備必須有高轉速，以發揮拋光之功能，然而，轉速愈高，振動卻也會越大，振動大之原因主要為對心不準、軸質量不平衡，故須從此兩者來改善變速箱性能。
- (2) 加入隔振元件；加入隔振元件為本實驗結果之次要可控因子，從實驗一與實驗二都顯示，加入隔振元件可以切斷振動之傳遞路徑，隔離振動源，也佐證本研究成功引用非線性隔振元件。因此，必要時可以進一步研究，搜尋加入減振元件數量之最佳狀態。
- (3) 皮帶寬度：由實驗二顯示，較寬之皮帶可傳遞較大之額定傳動功率，但必須讓皮帶輪之寬度與皮帶兩者越接近，越不容易發生皮帶對心不準之現象。
- (4) 質量平衡：實驗一中，雖動平衡配置卻為(0, 0.6 g)時較佳，但效果不彰，推測因為動平衡之配置須整體考量，才能改良不平衡量。

經以上分析後，決定改善之方式為：因子 A：轉速須從軸質量不平衡量給予改善、因子 B 加入隔振元件之更佳狀態。另外，再由頻譜圖做振動診斷[5]，推測引起峰值之主要原因在皮帶與定時皮帶輪、對心不準與軸質量不平衡，可由此著手，改善變速箱性能。

### 3.6 實驗指標之靈敏度

另外，在資料分析之回應值方面，本研究嘗試使用不同實驗指標來找尋更靈敏之指標，來突顯效果之靈敏度(sensitivity)，因此，除使用 RMS 值外，另也使用偏態歪度(skewness)及峰度(kurtosis)兩回應指標值[11]，基於本文之長度限制，詳請讀者參閱[5]。

## 4. 結論

本研究直接對應需求，設計一台專用機器設備“汽缸體專用拋光機”，並具體開發與製作其高轉速之變速箱原型以及評估驗證，完成「創新設計」與「實驗驗證」與對佳化之改善，成果包括：

- (1) 創新設計：除提供整機之構想設計外，並且具體設計後產出變速箱原型機，且原型成果經跑合測試後，評估符合原預期目標與工程規範。
- (2) 以實驗為最佳化之改善手段：引用田口法，經由多次實驗後，除找到主要影響因子與改善方法外，也從振動診斷資訊，分析出問題所在，並予改善後，再經覆證實，得到最佳之設計雛型機。

經設計發想、實驗改善後，本研究發展出轉速 11,970 rpm 下之最佳化組合，相較於改善前之實驗一之雛型機，改善了 35% 之振動量，確實改善了變速箱原型機之性能。

## 誌謝

本研究承 Steel Jack 欣格表面處理廠蘇經理協助，以及建成機械公司獎助學金、實驗材料支助，謹致謝忱。

## 參考文獻

- [1] 蘇癸陽編譯，*實用電鍍理論與實際*，復文，台南市，1990。
- [2] 黎文龍、張東權、王信富，“專用機創新設計之研究—以汽缸內壁專用拋光機為例”，*第十屆全國機構與機器設計學術研討會*，台中，2007。
- [3] 黎文龍，*工程設計與分析*，東華書局，台北，2002，第三章、第七章與第十章。
- [4] W.L. Li, J.J. Tsai, S. Tseng, and I.F. Young, "Generation of New Ideas for Product Functions and Engineering Innovation Practices: A Hands-on Project Model for Mechatronics Education," *Exploring Innovation in Education and Research*, Tainan, Taiwan, 2005.

- [5] 張東權，*汽缸壁拋光專用機之設計與驗證研究*，碩士論文，台北科技大學機電所，台北，2007。
- [6] 陳信宏，*頻率可調式非線性微吸振器之研究*，碩士論文，國立台北科技大學，台北，2002。
- [7] 鵬程編譯，*軸承的使用與故障對策*，全華，臺北，1999。
- [8] 張明毅，*田口方法簡介*，2003。
- [9] 劉嘉顯，*硬脆材料硬拋光與軟拋光機制分析及最佳製程參數設計：以 99% 氧化鋁為例*，碩士論文，國立高雄第一科技大學，2002。
- [10] 鄭境明，*以球擠光、電鍍與拋光製程作射出成形用鋼之表面精加工研究*，碩士，國立台灣科技大學，2003。
- [11] W.L. Li and J.J. Gau, 'The effects of selections of training signals to a BPN neural network for automatic environmental tests,' *Proc. of 11-th Automat. Conf.*, 1999.

## Optimizing a Polish Machine for Cylinder Walls by Using the Taguchi's Method

Wenlung Li, TC Chang, CW Chang  
Dept. of Mechanical Engineering  
National Taipei Univ. of Tech.

The main purpose of the present study is to optimize the machine which is designed for polishing the inner wall of cylinders of small volume engines. The machine includes several subsystems: the power transmission unit, the reciprocation of motion unit, the fixture, the structural frame, and automation. Because that polishing needs a high-speed process, this article mainly focuses on the improvement of the power transmission unit. During the experimentation process, the authors utilized a design of experiments method—the Taguchi's Method to optimize the prototype transmission box. By using the optimizing process, the machine was improved as much as 34%, in terms of vibration signals, when comparing with the first generation one. Nevertheless, the present study verifies the possibility and feasibility of optimizing a prototype machine during the early design stage.

**Keywords:** Innovative Design, Optimization, Taguchi's Method.