

## 專用機創新設計之研究 – 以汽缸內壁專用拋光機為例

黎文龍<sup>1</sup>、張東權<sup>2</sup>、王信富<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小型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、夾具、機身與自動化連續生產等多個子系統。本文主要著重於其變速箱子系統之具體設計、開發與製作實體。研發過程中，有效利用創新設計之程序，特別是“發想方法”過程，透過手繪構想草圖及3D之CAD模型等呈現構想，且確認設計構想之可行性，從而創新設計完成開發出拋光機之高速轉軸變速箱原型。最後，經跑合測試與溫度判別後，證實變速箱原型符合原預期目標與工程規範。此外，此設計使用本實驗室所發展之非線性元件，成功地隔離振動源。

關鍵詞：創新設計、設計程序、變速箱、高速傳動軸。

### 1. 引言

基於業界廠商之需求，作者曾於2005年暑假前往深圳市寶安區參訪台商 Steel Jack 欣格表面處理廠，實地了解其需求，該廠乃是針對割草機用之小型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

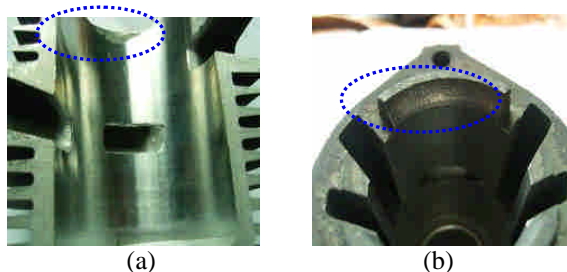
觀察設備研發，有關工作母機之文獻相當多，特別是高速主軸的研究是其中一大關鍵領域，然而，針對拋光加工專用者之文獻，仍屬少數，而針對汽缸體拋光之需求，即是一種於侷限空間內之高速的轉軸，一般拋光理論轉速約19000 rpm(或線速度30 m/s)左右[1]，因此，設計出一具高速轉軸之變速箱機構乃為首要課題，如同主軸之研發對工具機之重要性。因此，本研究將以創新設計來找出適合於汽缸體拋光之專用加工設備，以取代昂貴之機器手臂。

### 2. 需求與剖析

#### 2.1 問題分析

一般而言，鋁合金製之汽缸體製作過程中，須經歷鑄(die casting)、機械加工、電鍍以及拋光等製程，或者，例如新材料—鋁鋅合金之汽缸體，機械加工後，則直接研磨(honing)後即完成，不需電鍍與拋光，而本研究之對象為前者之流程，經電鍍、拋光以及後續之檢驗量測，加工流程如以下說明。

- (1) **電鍍鉻層**—此汽缸體主要是電鍍工業硬鉻，其主要是用來提高鍍層的抗熱性、耐磨、抗蝕和低摩擦係數，其鍍層厚度約1 μm至數mm，其硬度約為750~1050 HV [1, 2]。
- (2) **拋光**—有關「拋光」一詞，在台灣可能給人直覺以為是晶圓之「化學機械拋光」(Chemical Mechanical Polishing, CMP)。然而，本研究乃是針對電鍍鉻層後之汽缸體內壁來做拋光加工，其拋光工件為汽缸體之內圓孔徑。拋光是在工件的表面產生一種光滑且有光澤的表面光度，有關拋光所需之加工條件[2]，電鍍鉻用拋光圓周速度須30~35 m/s，將其換算成轉速約為19000 rpm，如加工速度過低，則易使磨輪磨耗，如速度過高，則拋光輪有破裂之虞。
- (3) **量測**—於拋光加工後之量測，須滿足以下條件：
  - 真圓度(Roundness)須小於15 μm內誤差
  - 真直度(Straightness)須小於10 μm誤內差
  - 鍍層厚度不得過厚(不得大於15-20 μm)
  - 拋光後不得有剝落現象



圖二 拋光加工之問題：(a)鍍層剝落、及(b)退鍍後之侵蝕孔

本研究針對目前廠內主要常發生之問題，特別是為鍍層過厚、及拋光後表面有剝落現象(如圖二 a)處理。如圖二所示者(圈選處)即為拋光後有剝落現象；及圖(b)為電鍍層厚度過厚，該廠再行退鍍，所出現之侵蝕小孔洞，此兩者皆為瑕疵之不良品。

針對以上問題，本研究嘗試創新，以“發想方法”之創新設計來構想設計，研發一台汽缸體拋光專用機，而不使用相似產品做改良設計，甚至更進一步，除進行拋光加工外尚可處理鍍層過厚之加工處理一磨除，來降低成本與提高加工效率。

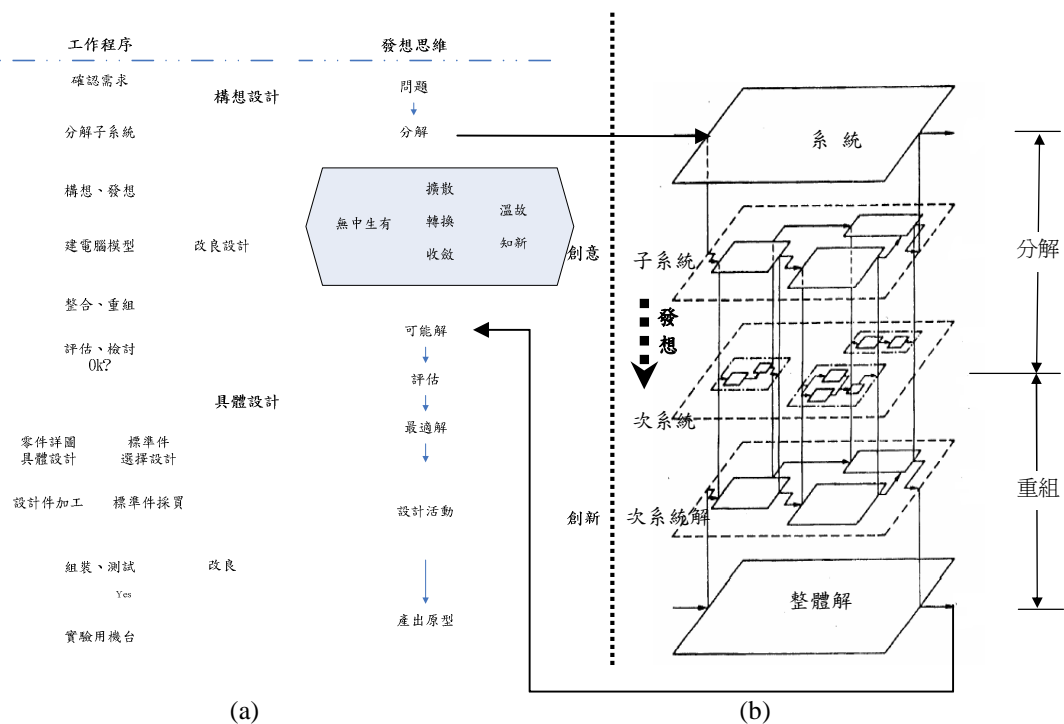
## 2.2 設定規範

根據以上需求與相關理論，本研究將汽缸體專用拋光機大致歸納欲完成目標，其運動維度包括：主軸旋轉、變速箱之上下往復運動、夾具夾持與公轉運動等四種維度之運動，而公轉運動乃是利用相對運動來提高加工之線速度。基於初次開發之保守考量，先將原型機之轉速略降低至 12000 rpm。經整理後，拋光機之主要工程規範如下：

- 拋光變速箱之主軸最高轉速須達 12000 rpm (或線速度 19 m/s)
- 模組化設計，容易拆解與組裝
- 高拋光加工效率— 可雙軸同時加工，且雙工 (拋光與磨除)，以提高汽缸體之加工效率
- 價格成本限制— 須比現有類似機台低，並盡可能使用標準元件
- 易於維修、維護及改良

另外，基於研究與實驗考量，本研究另考量，另要求設計須滿足

- 容易替換皮帶與皮帶輪搭配以達到選擇不同轉速之功能[3]。



圖三 設計方法：(a)流程與思維、(b)層級化概念

## 3. 創新設計

### 3.1 設計方法與程序

本研究為因應廠商需求，故忽略需求之可行性分析，從一開始了解需求、進行問題分析，且訂定規程範與目標後，本研究將設計區分為構想設計與具體設計，並於設計後產出原型，整體設計流程如圖三(a)所示，其中乃整合了[4, 5]之工作程序與發想思維的流程圖，圖中之左半部類似於 VDI 2221 之工作程序，圖中之右半部乃對照[4]之創意與創新之定義區分，主要呈現發想方法之思維，此流程為一有系統的設計程序。

設計發想階段，發想之主軸思維，為「層級化概念」與「發想方法之思維」兩中心理念，以層級化概念將整系統分解，再針對「分解」後之小系統，利用

發想工具，以創新思維方式進行發想，得到可能解，並嘗試新的組合，亦即「重組」，得到設計之新構想，並先以草圖呈現、繼以 CAD 軟體 SolidWorks 建立 3D 模型，以確認功能、尺寸與模型組裝，最後「評估」並實現，必要時，加入 CAE 進行應力分析。

所謂“發想方法”乃為「溫故知新」[4]與「無中生有」，前者乃是了解現有技術後，從中再創新構想；而「無中生有」則是全新、前所未有之設計，創新設計意味較重，其另一涵義為將構想(無形)產出原型(有形)，或者說，其經歷如圖三(a)之六邊形所示之三階段思維程序：首先為「擴散」，利用各種點子來產生構想，並經「轉換」步驟，再從中選取出適合解，以準備進行具體設計為所謂「收斂」；所謂層級化概念，如圖三(b)，說明層級化概念：將整系統分解展開成子

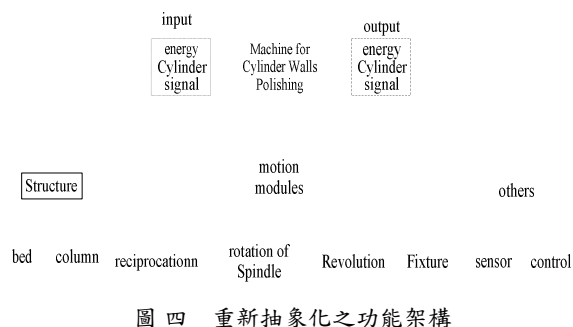
系統，再由子系統分解展開次系統，以此類推，針對次系統以發想方法產生新構想，發想後，再重組嘗試整合出 total solution。於後續將舉例說明此一創新設計之發想方式。

具體設計階段，須將發想出之新構想或電腦模型等具體化，而做相關產出原型之準備作業，包括：標準元件之選用與採買，以及經具體設計細節，且繪製工程圖後，外包加工之設計零件，再將此兩類零件組裝出原型機(prototype)，以及跑合測試，並提出改良方案。

### 3.2 設計構想

#### (1) 構想設計與創意

本研究屬於創新設計，產生新構想後，須產出其實體來提升構想設計之價值，而構想設計所指乃是對應[6]中其修改 Hall 之 Creativity 定義為：產生新而且有用的構想，比較近似於「創思」、「創意」或「發想」之過程，屬於的腦部思考及心理層面。



圖四 重新抽象化之功能架構

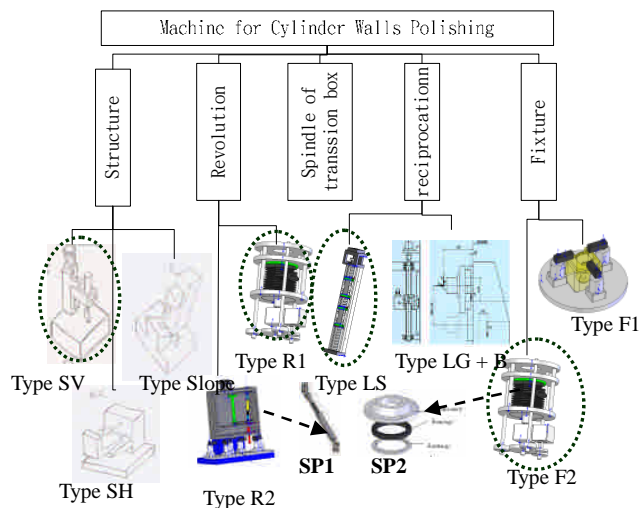
進行構想設計時，本研究將汽缸體拋光專用機分解為多個子系統，再針對每一子系統分別進行發想，而進行子系統設計前，先給予簡單之整體設計構想，以便作為爾後之「收斂」步驟之整合而鋪路，同時也概略將範疇定義清楚。發想時，將拋光機之組成運動重新抽象化為如圖四之功能架構(functional structure)所示，將拋光機抽象描述成具有往復、主軸旋轉、公轉與夾持四種運動之機器，圖中虛線表示公轉單元於構想階段尚未決定於哪一單元去實現。所謂功能架構是將設計的輸入條件與輸出功能(需求目標)間，以方塊圖表現，為某種想法，有了功能架構，再針對這些動作去發想，並繪製作動理論架構(working structure)以滿足其功能。此外，理論架構更進一步地將抽象之功能架構，以具體之方式表現，以及檢視可行性，是將某種想法以草圖或 CAD 等方式呈現。

#### (2) 構想設計之整合

將上述滿足理論架構之可能解進一步以功能架構表示，而考慮本報告之篇幅，於此只列出比較可行之方案，省略構想過程，詳細過程可參考[4]，而整機之理論架構如圖五所示，圖中圈選處為評估決策後，所收斂選擇之適合解，以圖中之可能解來滿足圖四之功能架構，實現拋光機。

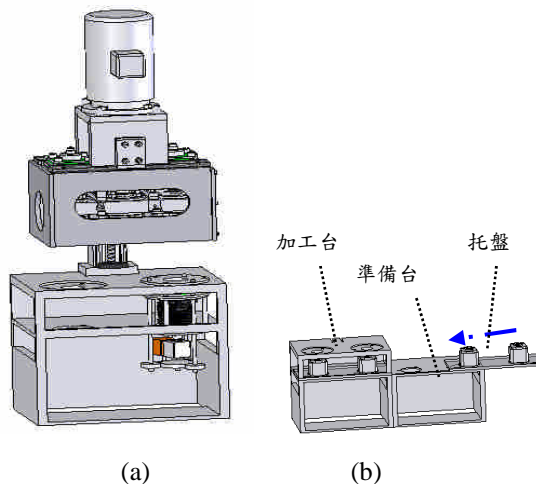
經上述發想之整體構想結果如圖六(a)所示，基本

上，實現專用拋光功能之整個系統，其包括有四個運動、機身和自動化連續生產等多個子系統，其中變速箱子系統為本文著重實現具體設計之部分，此子系統功能為實現主軸旋轉之運動，也為加工運作核心之一部份，主軸轉速須高達 12000 rpm，並且有變速之機制，以及可以安裝加工工具於其軸上，且其可以替換拋光與磨除兩種加工工具。



圖五 拋光機之理論架構

圖六(b)乃為自動化之規劃構想，圖左邊所示者為加工台之機座，主要進行加工與量測，右邊為準備台之機座，主要用以連續生產之上料準備，圖中之箭頭所示為放置汽缸體之托盤的動線。



圖六 構想之整合：(a)拋光機整體配置構想、及(b)自動化生產配置之可能方式

#### (3) 各子系統之設計構想

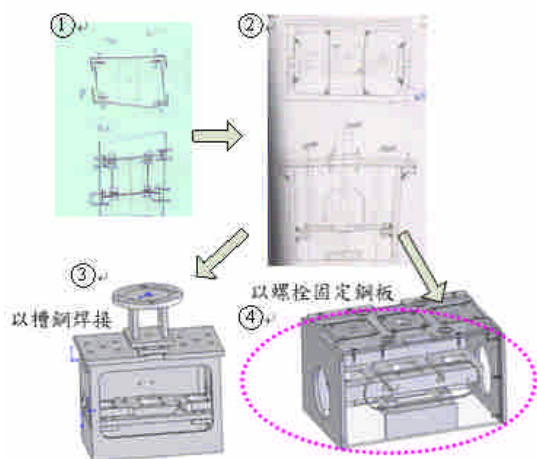
有關各子系統可能解之構想可以參考圖六，以下將針對各子系統構想略作說明：

##### A. 變速箱

本研究在具體表現作動理論架構之過程中，將變速箱子系統再分解為：外箱與軸承支撐、主軸、

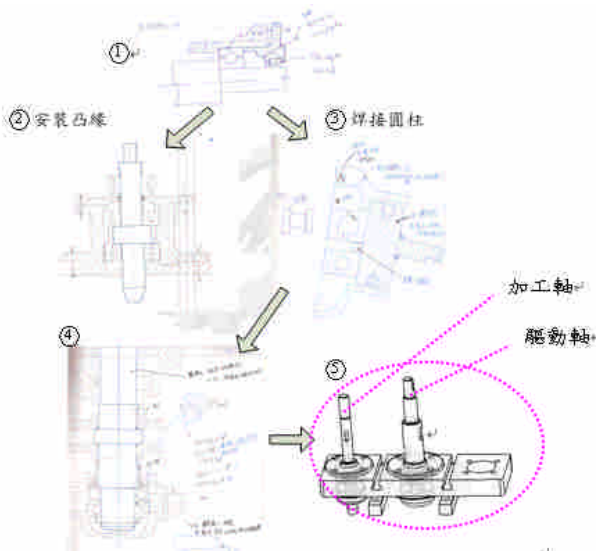


減振元件與馬達托架以及其他等四個次系統。例如，外箱之發想，如圖七為外箱之構想衍變：從一開始簡單構想其骨架草圖(①)，接續考慮其實現方式，而衍伸出以槽鋼焊接(②)、(③)與鋼板鎖固(④)方式實現，經由評估後，決定採用鋼板以螺栓固定，方便拆組以進行原型機之實驗[3]，此一過程即為「無中生有」，從構想、簡單草圖(無形)到可產出實體之實現方式(有形)。



圖七 變速箱外殼之構想演進

變速箱之軸承支承次系統，先「溫故」程序：參考一般安裝：以外蓋(housing)來支撐(①)外，配合外箱之幾何限制，初步構想以兩平板來支撐上下兩組軸承，上軸承使用軸承座，而下軸承支撐於構想設計中亦採用以外蓋理念來實現，而其形式以凸緣形式之外圓蓋安裝於平板上(②)，另一構想則於平板上焊接圓柱形鐵塊以達支撐功能(③)。最後選擇將第二種構想直接將平板加厚，於板上挖安裝軸承之孔洞(④)，且進一步規劃相對位置，將之繪製成3D模型，結果如圖八之⑤所示，乃為本研究之「知新(創新)」結果，以上過程即為本研究所謂之「溫故知新」程序。



圖八 軸承支撐系統之構想產生

## B. 其他子系統

其餘子系統包含：公轉、夾具、機台、往復運動等之構想可參考[4]，以及參考圖五，以下並略說明：

(A) **公轉**：公轉可行之構想方案有二，一為主軸實現公轉，如圖五之 type R2，亦即，變速箱有兩個運動維度，其包含一可伸縮之萬向接頭(SP1)，此構想可能之困難點為具體實現之精度與可行性及維護困難之考量；二為如圖五之 type R1，由夾具來實現公轉，其可能之困難點為夾具需另加特殊元件或動力源。若考慮高轉速下，萬向接頭無法於高轉速下使用，因此，選擇 type R1，以偏心轉盤方式來實現。

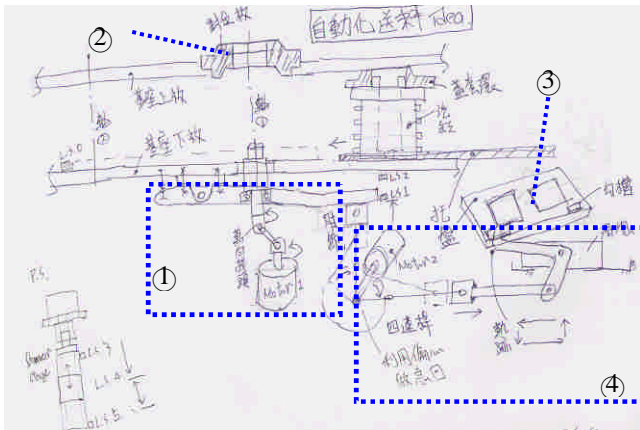
(B) **夾具**：夾具評估後使用如圖五之 type F2 之自製機構，而夾具另外一項功能是實現公轉，利用偏心轉盤與加工工具形成相對運動。而為了對準汽缸體與加工工具兩者之軸心重合，因此需要一特別定位構件，以如圖五之 type F2 之汽缸蓋套環(SP2)來實現對位機制，其包含軸承元件。

(C) **機台**：機台結構為承載與連結全部子系統單元之功能，本研究為自動化生產線設計方便，所以選擇立式 Type SV 來實現，而機座與立柱之結合使用鳩尾槽以確保垂直度，若立式情況下，變速箱重量導致需大扭矩馬達，會增加成本，可以改為傾斜立式(Type slope)，價低扭矩。

(D) **往復運動**：評估後，往復單元使用線性模組來達成直線往復功能，如圖五之 type LS，其為依照上銀科技之產品繪製，其優點為設計與安裝容易，以克服經驗不足而導致組裝精度不佳。

## (4) 連續生產之自動化規劃

自動化規劃包括線上量測與自動化上料。於此只說明自動化上料，其構想草圖，包含夾具公轉機構與上下夾持機構、對位板、拖盤與工件進級爪機構，分別如圖九中之①、②、③與④，將汽缸體放置於托盤後，由進給機構實現自動上料，而進料後，由夾持機構配合夾具之對位板實現對位，以下略作說明：



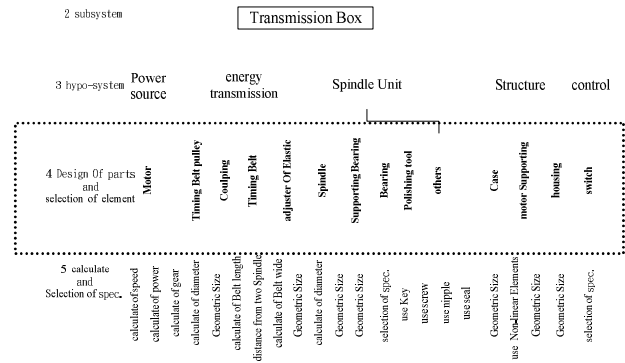
圖九 自動化連續生產之草圖

- ① 公轉與夾持機構—公轉機構利用偏心旋轉，使用一萬向接頭連接器，可以使傳遞不同軸心之旋轉，且配合上下夾持機構，此萬向接頭具有伸縮功能，而夾持機構為達成上下夾持，從[7]找到一參考解，即以桿件達成上下夾持，其桿件為搖擺運動，且其軸承夾具可以旋轉，而軸承在軸承夾具內滑動。
- ② 對位板—對位板之功能為使汽缸體與加工具兩者之軸心重合，配合汽缸蓋套環之尺寸與斜面，以確保對兩者之軸心線重合。
- ③ 拖盤—為準備上料、安置汽缸體用，為達自動進料，其需有勾槽以配合工件進給爪機構之拖拉動作。
- ④ 工件進給爪機構—此機構原理亦參考[7]，以滑塊與搖臂來達成進料動作，其支點軸與進給爪之間使用滾針軸承，使搖動之扭矩極小，其滑塊使用鳩尾槽，以襯套調整使滑動適當。

### 3.3 具體設計

#### (1) 層級化之具體設計

變速箱各次系統經過發想後，並從中評估決定本研究之適用解，於具體設計時，須進一步考慮細節，而設計之工作內容。根據[8]，整系統由層級化概念，採「由上而下(Top-down)」的層級展開不同系統層，清楚繪出變速箱之設計活動圖(Bill of Activity)，其展開後宛如金字塔般(pyramid style)，如圖十所示為變速箱子系統之設計活動圖，可清楚呈現具體設計之工作內容，於第四層之元件設計層，將設計元件分成零件之機械設計與標準件之選用設計，圖中灰底為本研究之設計零件，其餘為標準件之選用設計，以下略說明變速箱子系統之具體設計內容。



圖十 設計活動圖

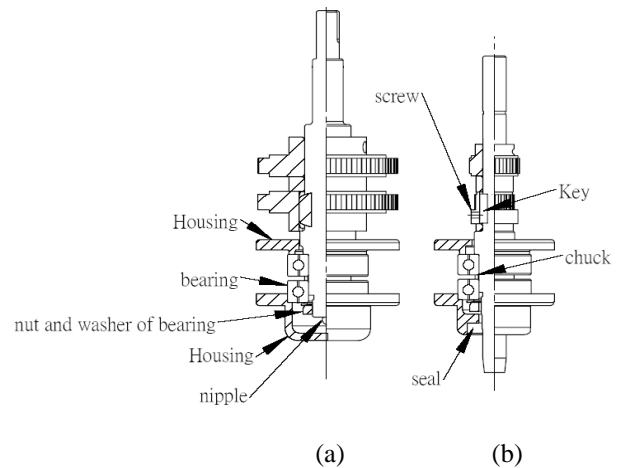
#### (2) 變速箱子系統

本節以標準品之選用設計與機械元件之細部設計兩部分來說明變速箱子系統之具體設計。

##### A. 標準品之選用設計

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：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 11970 rpm，而另一狀態為傳至 60 齒，即從 3420 rpm 加速至 7980 rpm，轉換頻率分別為 57 Hz、133 Hz 與 200 Hz。

再者，依使用情況，選用及配置軸上元件：軸承、鍵、油封和加油油嘴等之標準件，如圖十一為軸上使用之元件配置。



圖十一 軸上元件之配置：(a) 驅動軸、及 (b) 加工軸

##### B. 機械元件之細部設計

選定市售標準品後，再來設計機械零件，其須有整合標準品之功能，以下依四個次系統做說明，分別為圖十二(a)與(c)之 ①、②、③與 ④ 所示：

(A) 外箱與軸承支撐：外箱採用以四片鋼板用螺栓加以固，須考慮組合之對位配置、安裝手孔、鎖固設計等設計，由於外箱之結構設計須特別考慮強度與模態，本研究利用 CAE 軟體 COSMOS/

Design STAR 來輔助模態分析。

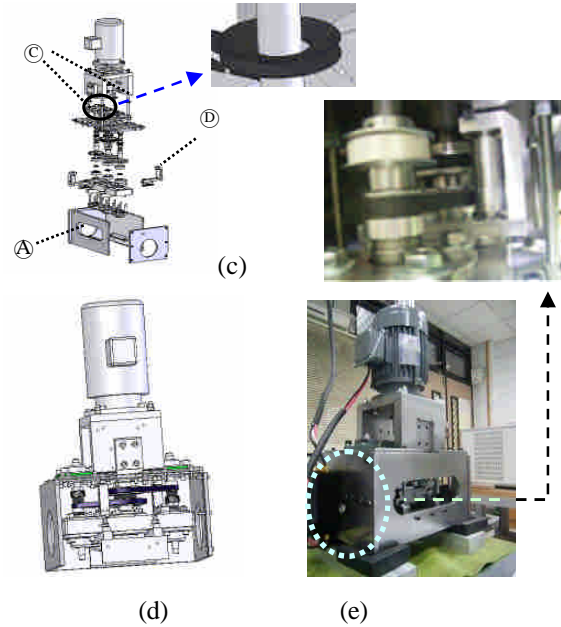
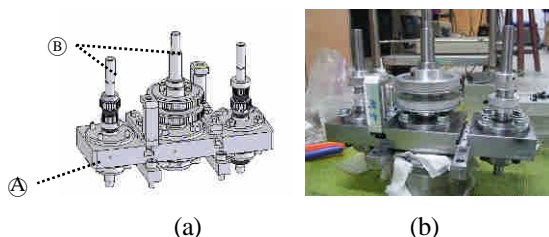
軸承支撐方面，本研究使用軸承用螺帽與墊圈 AW+AN 系列卡住軸上之凹槽來固定軸承之徑向，而軸承之軸向則利用軸肩與外蓋來定位。設計軸承之固定上、下蓋時，須考慮軸承與油封安裝面之內導角，以及其只接觸軸承之外環，使軸承之外環固定不隨內環旋轉。

- (B) **主軸設計**：本設計總共有三支旋轉主軸，兩加工軸與一驅動軸，轉軸上設計有軸環、鍵、固定螺絲、軸承用螺絲以及定時皮帶輪等元件，如圖十一所示，而主軸設計除整合軸上元件之幾何尺寸設計外，還需考慮強度之解析設計，依[9]來計算所需軸徑，且考慮軸與軸承組裝時，相關之尺寸、安裝面之公差與配合等，例如：鍵槽尺寸、安裝軸承處之配合和導角、安裝油封處之配合和導角、安裝定時皮帶輪處之配合等，皆須考量相關型錄或機械便覽來設定尺寸與公差、配合，否則會影響主軸性能。
- (C) **隔振元件與馬達托架**：由於外箱之上平板裝配有軸承座，因此，設計馬達托架時須避開軸承座，以及預留可以安裝聯軸器之空間。另外，本研究之設計引用本研究室發展之「非線性減振元件—碟型彈簧」來隔離振盪源，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[10]。
- (D) **其他**：本研究係採用定時皮帶來達成軸間之動力傳遞，故須有調整皮帶之鬆緊度裝置，其以一小滑塊上攻牙加上一般螺絲，配合下平板之 T 型槽來實現。除上述外，還有一些小零件如間隔環與定位板等之設計，詳請參考[4]。

#### 4. 實驗用變速箱之組裝測試

##### 4.1 組裝

創新設計，必須經過「無中生有」或「溫故知新」，而“Learning by doing”更必須經歷動手組裝，從做中學，而組裝上之一大關鍵是軸承之安裝。圖十二為動手組裝後，分別為變速箱之內部與整體之 3D 模型與產出之原型的對照圖。圖(c)為變速箱之爆炸圖，且特別顯示非線性減振元件。而圖(e)則將圓圈處亦顯示變速箱內部，可顯示兩者之相似度百分之百，不過，3D 模型可以進一步檢查內部之零件之干涉，實體照片顯然不能。



圖十二 變速箱之 3D 模型與原型比較：(a)與(b)：內部圖、(c)爆炸圖、及(d)與(e)：整體圖

#### 4.2 跑合測試與評估

軸承系統是攸關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，本研究以運轉溫度方式判別軸承有無異常，於主軸運轉中，藉由軸承外圍的溫度變化情形來判斷軸承是否有異狀，溫度是否過高。因此，於產出原型後，本研究進行軸承溫度與主軸轉速測試，利用非接觸式溫度計量取軸承座內環處之溫度，且利用轉速計量取轉速。測試結果：溫昇從室溫 27℃ 升至 60℃ 左右，亦即，相對溫昇約 30℃，平均轉速約 11757 rpm。

#### 5. 結論與建議

本研究直接對應需求，產出一台專用機器設備“汽缸體專用拋光機”，並具體開發與製作其高轉速轉軸之變速箱原型，完成「創新設計」與「原型製作」。研究過程中，除提供完整之設計構想外，也有系統地提供專用機械設計程序與發想程序、範例，從工程規範之訂定，達成所設定之規範，也適當地與過程中納入「發想」程序，從做中學，同時於動手組裝變速箱原型後所發現之問題，提出問題之改良方案，檢討治具、工程圖、組裝問題等，並予以改善。原型機成果經跑合測試後，評估符合原預期目標與工程規範。

#### 誌謝

Steel Jack 欣格表面處理廠之蘇經理協助，及建成機械公司於獎助學金之材料支助，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] 王大倫譯，實用電鍍學，徐氏，台北，1991。



- [3] 黎文龍、張東權，“以田口實驗法改良汽缸內壁專用拋光機”，第十屆全國機構與機器設計學術研討會，台中，2007。
- [4] 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。
- [5] 黎文龍，工程設計與分析，東華書局，台北，2002，第三章、第七章。
- [6] 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 Machatronics Education," *Exploring Innovation in Education and Research*, Tainan, Taiwan, 2005.
- [7] 熊谷卓著，黃博治編譯，自動化省力化機構實用圖集，新太，台北，1984。
- [8] 張建斐，工具機設計程序之研究，碩士論文，朝陽科技大學，台中，1998。
- [9] Design of transmission shafting: ANSI/ASME B106.1 M-1985, New York: ASME.
- [10] 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。

## **Innovation Design of a Polishing Machine Applying to the Inner Wall of Cylinders**

W.L. Li<sup>1</sup> and T.C. Chang<sup>2</sup> and H.F. Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Mechanical Engineering, NTUT

<sup>2</sup> Dept. of Mechanical Engineering, NTUT

### **Abstract**

The main purpose of the present study is to design a machine for polishing the inner wall of the cylinder of small volume engines. The machine includes include several subsystems, like the power transmission unit, the reciprocation of motion unit, the fixture, the structural frame, and automation. This article mainly focuses on the design and development of the power transmission unit. During the design process, the authors utilized a process that generates creative ideas for conceptual design. Meanwhile, draft sketches and 3D CAD models were used to display possible solutions and thus verify the feasibilities of those ideas. The prototype of the power transmission box for high-speed of 12,000 rpm is designed and manufactured. The final test run and the temperature measurements have validated the prototype transmission box can fulfill the initial goal and engineering specifications. In addition, the non-linear elements that developed in the NTUT lab. has also introduced to proto-unit for isolating the possible vibrations nearby.

**Keywords:** Innovation Design, Design Process, Power Transmission Box, High-speed Transmission.