

懸臂式光學系統主結構最佳設計之探討

Optimal Design for the Cantilever Main Structure of an Optic System Using Taguchi Method

陳瑞彬、蔡瑞鴻、黃鼎名

Jui-Pin Chen, Ruei-Hung Tsai, Ting-Ming Huang

本文探討一懸臂式光學系統主結構的設計方式及公差設定對於組裝後姿態的影響，目標在於確定何種設計對於主結構組裝後，鏡片夾持元件的相對光軸軸心偏移量 (decenter) 與傾斜偏移量 (tilt) 能在光學鏡片組裝的可調範圍內，並確定組裝輔助機構設計之適當性。主結構的參數設計最佳化採用田口品質工程法，進行要因分析並評估控制因素對組裝誤差的影響，以推導最佳化的參數組合。本研究考量實驗成本，採用實際尺寸的二分之一模型進行實驗分析，其餘各項設計條件，如材料、組裝流程等皆維持不變，以此分析結果，提供懸臂式主結構最佳設計參數。

This article discusses the influences of the design parameters for the cantilever main structure of optic systems. The object is to find out the optimal design to control the decenter and tilt of the main structure after gluing. Taguchi method is used to analyze the influence of each parameter, and optimum parameters have been obtained. To minimize the required budget, half size of structure has been adopted in the experiments while keeping the other parameters, e.g. materials and the assembly processes, the same in order to extend the results to the original case.

一、前言

常見反射式望遠鏡光路設計⁽¹⁾ 如圖 1，採用此設計有機會使用較大鏡片收光並減少主結構距離，但其視角不會太大，特徵值約 3 度左右。此類光學系統結構設計有許多種方式，如鏡筒式、腳架式、衍架式及懸臂式⁽²⁾ 等，如圖 2。鏡筒式結構是用一

鏡筒包覆光學系統的鏡片組，常見於觀星用之天文望遠鏡，腳架式結構是利用多支腳桿 (通常使用三支腳，稱為 tripod) 支撐次鏡，衍架式結構則利用一組衍架結構支撐光學系統，腳架式與衍架式結構皆為實驗室及大型天文望遠鏡常採用的型式，懸臂式結構由主次鏡的支撐件及一根連結管所構成，選擇設計時需視使用場合及製造者之組裝經驗而定。

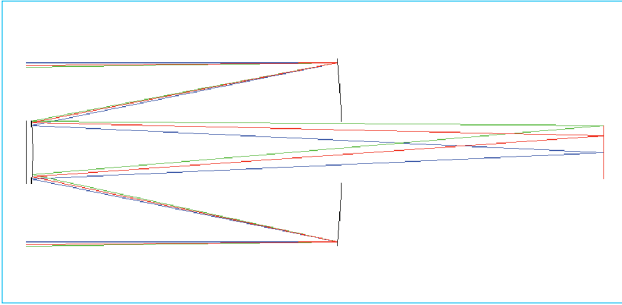


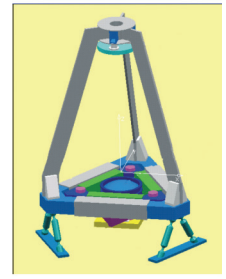
圖 1. 反射式望遠鏡光路設計圖。

儀器科技研究中心 (前國科會精密儀器發展中心) 將光電遙測系統研製列為重點發展方向, 本文探討的光學系統使用於目前研製中的光電遙測系統中。此光學系統主結構採懸臂式設計, 採用此主結構設計的原因在於其結構簡單, 且組裝時各元件安裝較不易被結構阻擋。由於此系統要求高精度的定位與對準, 除要求主結構能提供必要的支撐與固定外, 對於光學元件夾持機構精度的要求也相對嚴謹, 方能使主鏡與次鏡擁有更精確的定位對準。

本結構以膠合方式固定, 因此主結構設計製造上有一些參數必須考量, 例如夾持元件與主結構管件的軸孔間隙、膠合的接觸表面積與膠合的形式等參數皆直接影響主結構組裝品質的優劣, 考量本系統使用環境的限制, 膠料採用特定硬膠, 因此硬化時間與灌膠速度維持固定。軟體分析無法實際模擬上述製造與組裝因素對系統偏離的影響, 故針對本光電遙測系統的主結構, 以實際的實驗過程進行參數最佳化設計, 設計目標需同時滿足鏡片夾持孔位



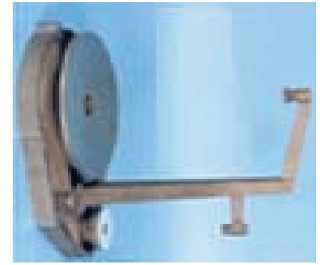
鏡筒式



腳架式



衍架式



懸臂式

圖 2. 光學系統結構設計。

之同軸度與鏡片夾持元件平行度的誤差變異最小化。

二、光電遙測系統主結構

本光電遙測系統主結構設計包含主鏡支撐元件 (main plate)、次鏡支撐元件 (M2 beam support) 及控制兩鏡片軸向距離的主結構管 (main tube)。為說明方便, 定義各方向軸如圖 3。

膠合主結構需一特別設計之輔助機構固定, 如

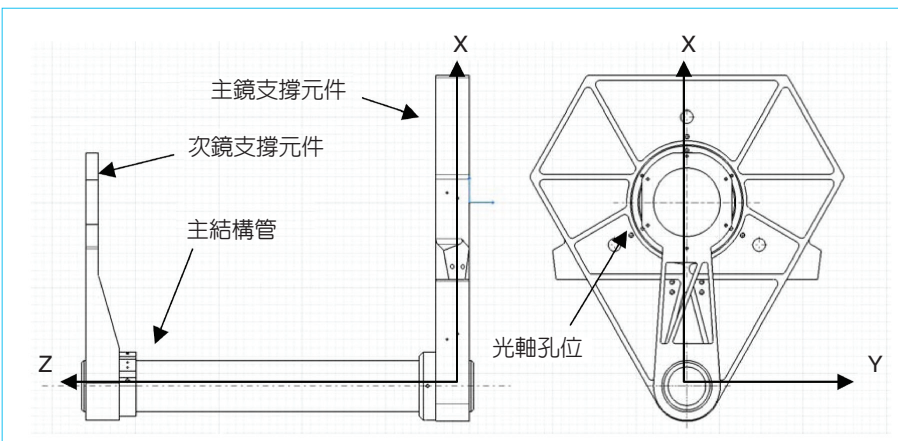


圖 3. 光電遙測系統主結構。

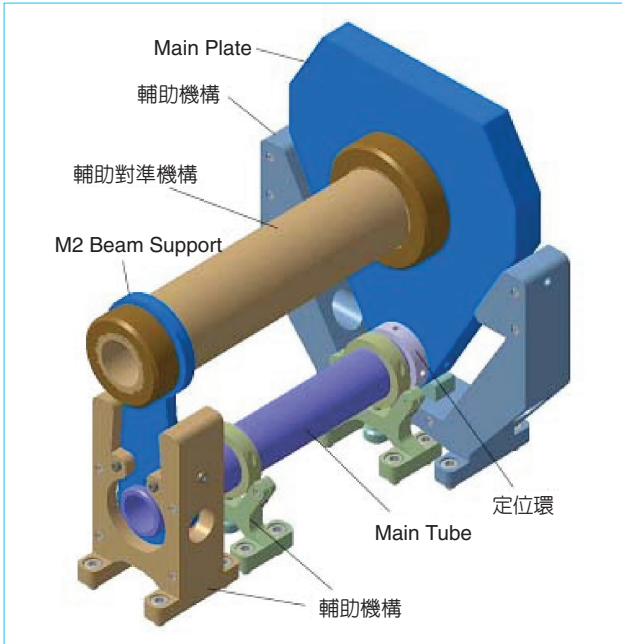


圖 4. 主結構膠合夾持定位。

圖 4，藉由此輔助機構可達到簡易的定位。為求更精準的組裝，設計上另精密加工製作一圓管，固定主鏡支撐元件與次鏡支撐元件光軸孔軸向定位。完成各元件定位後灌入硬膠，靜待膠完全固化，拆除套於光軸孔徑之圓管與輔助機構，即完成此光電遙測儀器的主結構模組。考量實驗成本，主結構模組採用實際尺寸的二分之一模型進行，其餘各項設計條件，如材料、組裝流程等皆維持不變，以期實驗分析結果可應用於實際本體上。

理想的主結構為主鏡支撐元件與次鏡支撐元件光軸孔在 Z 軸方向皆通過圓心，即兩元件無相對光軸軸心偏移量 (以下簡稱 decenter)，且主鏡支撐元件與次鏡支撐元件的姿態一致，即無相對傾斜偏移量 (以下簡稱 tilt)。然而實際元件製造與組裝均會產生誤差，必須確保主鏡支撐元件與次鏡支撐元件的 decenter 及 tilt 等的誤差量控制在可微調範圍內。

本研究利用移動橋架型三次元量測儀 (coordinate measurement machine, CMM) 量測主結構組裝後姿態，以求取主鏡支撐元件與次鏡支撐元件相對的 decenter 與 tilt，藉由量測結果評估主結構設計參數的優劣。該量測儀量測解析度為：

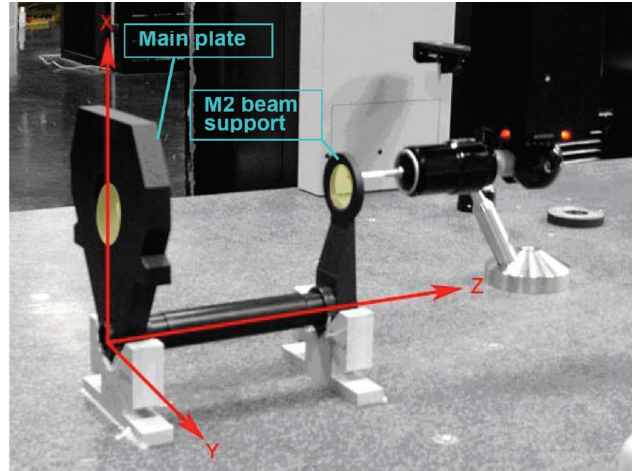


圖 5. 三次元量測儀量測 decenter 與 tilt 情形。

$$1.7 + \frac{3L}{1000} (\mu\text{m})$$

其中 L 為量測長度，單位為 mm。量測儀可在一定範圍內做三個垂直軸向移動，利用移動的感測探頭於指定軸向接觸待測件，量測儀則儲存該點方位資訊並分析計算量測值。圖 5 為主鏡與次鏡支撐元件相對 decenter 與 tilt 量測情形，以主鏡支撐元件定義量測空間 XYZ 座標系，並以此座標系為基準量測主鏡支撐元件與次鏡支撐元件面與光軸孔的點資訊，再藉由運算分析取得兩元件相對的 decenter 與 tilt 偏移量。

經量測主鏡支撐元件光軸孔點資訊可決定一圓的尺寸與圓心，量測次鏡支撐元件光軸孔亦可決定一圓與其圓心，將兩圓投影到同一 X-Y 面上，並以主鏡圓心為基準，此兩圓心於投影面上的距離，即為兩元件的相對 decenter，單位為 mm。同理在 X-Y 平面方向，量測主鏡支撐元件平面上的點資訊，可建構一平面，量測次鏡支撐元件平面的點資訊，亦可決定一平面，將兩平面投影到同一 X-Z 的平面上，並以主鏡支撐元件的量測面為基準，分析次鏡支撐元件量測面的相對傾斜量，即為兩元件的相對 tilt，單位為度。圖 6 為 decenter 與 tilt 分析示意圖。

由於機構設計僅容許組裝時小範圍的調整量，因此對於主結構的設計與組裝過程必須做更嚴謹的考量。以本系統而言，組裝後主鏡夾持元件的光軸孔徑同心度容差要求在 $\pm 200 \mu\text{m}$ 之內，兩元件傾

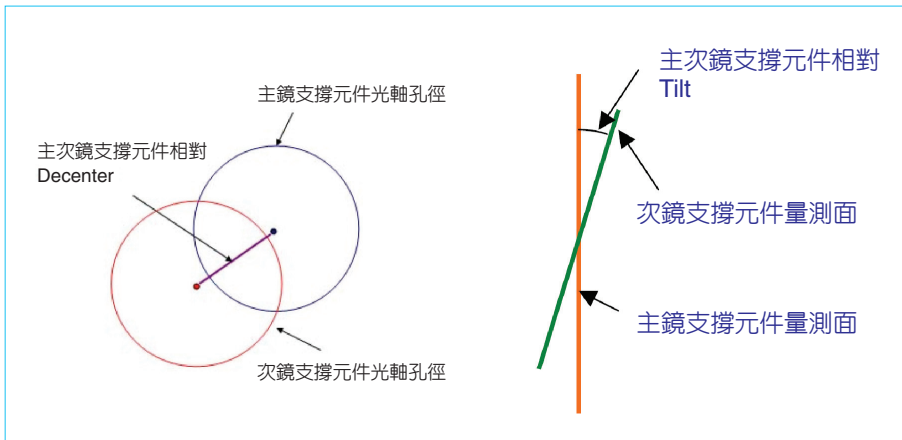


圖 6. Decenter 與 tilt 分析示意圖。

斜度要求在 0.5 度內，可達到系統對主結構容差範圍的要求，後續可利用調整使系統獲得良好的成像品質。為使主結構獲得良好的光軸軸向同心度與垂直光軸的平行度，本研究藉由田口品質工程法⁽³⁾推導 decenter 與 tilt 皆控制在最小化條件下的主結構設計參數，使得後續的光學鏡片組裝得以順利進行。

三、主結構膠合組裝導入田口最佳化實驗規劃

田口品質工程設計定義以訊噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 評估系統的變異程度，並藉由直交表的實驗規劃，以較少的實驗次數獲得可靠的控制參數效果估計量，進一步以變異數分析 (analysis of variance) 了解控制參數對系統的影響程度，藉此推導主結構組裝的最佳化設計。由於田口品質工程法通常僅針對單一目標進行實驗分析，然而本研究設計目標包含對於 decenter 與 tilt 的變異，因此在實驗過程中，必須結合多目標最佳化設計⁽⁴⁾ 概念，輔助本案例求解最佳化的控制參數。多目標最佳化設計概念如下：

1. 去除違反限制條件的參數水準。
2. 若參數水準對不同目標產生衝突，則權重高的目標，其參數水準即為最佳組合。
3. 若一參數對所有目標反應皆不顯著，則可自由選擇適當的水準作為最佳水準組合。

圖 7 為主結構主鏡支撐元件與主結構管件，以及次鏡支撐元件與主結構管膠合細部構造。主結構

的組裝均利用此兩部位的膠合固定做為支撐，因此該部分的參數設計，包含夾持元件與主結構管件間的軸孔間隙、膠合的接觸表面積與膠合的形式等 3 個設計參數，即是影響整體組裝品質優劣的關鍵。直接影響主結構組裝品質的 3 個設計參數中，考量主結構其他的設計參數 (如夾持元件厚度、輔助機構設計限制、特定膠料等)，在合理的機械加工精度條件下，本研究針對此 3 個目標設計參數個別設定 3 個水準進行田口式實驗規劃，參數水準的設定，如表 1 所示。

不同的膠合形式影響灌膠的方式。側孔及正孔灌膠是在主鏡支撐元件與次鏡支撐元件側面及正面打孔，並在膠合孔內開一膠道使硬膠均勻散佈於膠合孔內。管內灌膠則是在主結構管於膠合處鑽灌膠孔，再由管內透過灌膠孔上膠，膠合間隙即主鏡支

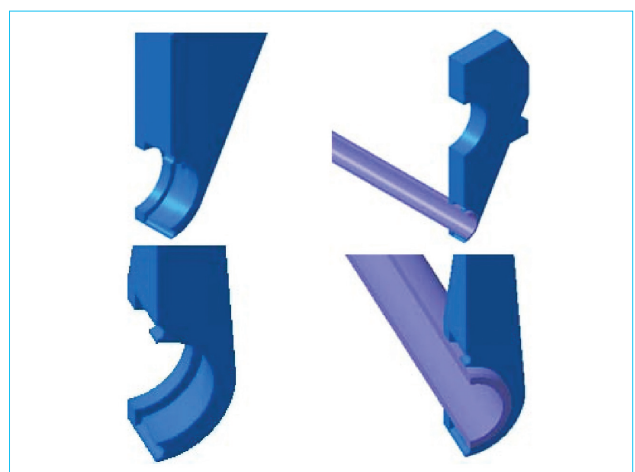


圖 7. 主結構膠合細部構造。

表 1. 主結構膠合參數水準設定表。

參數 \ 水準	水準一	水準二	水準三
膠合形式	側孔灌膠	正孔灌膠	管內灌膠
膠合間隙	0.07 mm	0.15 mm	0.22 mm
膠合面寬度	6 mm	10 mm	14 mm

撐元件、次鏡支撐元件膠合孔與主結構管膠合處的餘隙配合尺寸，膠合面寬度為膠道在黏合處分布的寬度。

本研究分析 3 個參數分別包含 3 個水準值對主結構組裝的優劣。實驗規劃選用可分析 4 個參數分別包含 3 個水準值的 $L_9(3^4)$ 直交表，並以 $L_9(3^4)$ 直交表前三行的參數設定進行實驗，依據每組實驗的參數設定，依序進行主結構的膠合。本實驗的目的為評估主結構組裝後主鏡支撐元件與次鏡支撐元件兩元件之 decenter 與 tilt 的偏差量，並推導使兩者偏差量最小化的設計參數水準。主結構完成膠合後，利用三次元量測儀量測並分析主鏡支撐元件與

次鏡支撐元件之 decenter 與 tilt，獲得直交表中每組實驗的結果數據。

本案例的目標函數定義為望小特性問題設計，其函數定義為：

$$SNR = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

其中 n 為實驗數， y 為實驗量測值。

實驗完成後，分析 decenter、tilt 的訊噪比，由於訊噪比具有線性加成性 (linear superposition model)⁽⁵⁾，並設定 decenter 與 tilt 權重相等，因此將 decenter 與 tilt 求得之訊噪比相加總，分析參數水準對兩目標綜合效益，結果如表 2 所示。

利用訊噪比統計資料，分析夾持元件與主結構管間隙、膠合的接觸表面積與膠合的形式等 3 個設計參數的特性表現，藉由水準輔助表決定 3 個設計參數對於 decenter 與 tilt 偏差最小的水準值，以此推導主結構組裝的最佳化設計參數組合。圖 8 為本案例各參數水準輔助圖，顯示 decenter 與 tilt

表 2. 直交表實驗配置與訊噪比。

	Type	Gap	Area	Tilt 度	Decenter μm	Tilt SNR	Decenter SNR	綜合效益 SNR
1	側孔灌膠	0.07 mm	6 mm	0.55	81.6	6.42	18.74	25.16
2	側孔灌膠	0.15 mm	10 mm	0.44	455.9	8.27	6.82	15.09
3	側孔灌膠	0.22 mm	14 mm	0.41	267.1	8.88	11.47	20.35
4	正孔灌膠	0.07 mm	10 mm	0.35	336.7	10.23	9.46	19.69
5	正孔灌膠	0.15 mm	14 mm	0.48	169	7.54	15.44	22.98
6	正孔灌膠	0.22 mm	6 mm	0.25	413.2	13.93	7.68	21.61
7	管內灌膠	0.07 mm	14 mm	0.17	401.1	16.65	7.94	24.59
8	管內灌膠	0.15 mm	6 mm	0.14	446.7	18.19	7	25.19
9	管內灌膠	0.22 mm	10 mm	0.54	379.2	6.49	8.42	14.91

表 3. 最佳化參數組合設定與量測結果。

	膠合形式	膠合間隙	膠合面寬度	Tilt 度	Decenter μm
Tilt 最佳參數組合	管內灌膠	0.15 mm	6 mm	0.14	130.6
Decenter 最佳參數組合	側孔灌膠	0.07 mm	14 mm	0.28	93.6
綜合效益最佳參數組合	管內灌膠	0.07 mm	6 mm	0.08	28.5
綜合效益為基礎以側孔灌膠取代最佳參數組合	側孔灌膠	0.07 mm	6 mm	0.16	62.1

的最佳參數組合並不一致，因此分析兩目標綜合效益的訊噪比和。由變異數分析表 (ANOVA 表) 可知，膠合間隙對主結構組裝的影響程度為 26.2%，膠合面寬度對主結構組裝的影響程度為 69.6%，而膠合形式相對於其他因子，對主結構組裝的影響較小。

四、驗證與結果比較

經分析後規劃四組最佳化的參數組合重新進行組裝實驗，分別是以 tilt 為主要目標、以 decenter 為主要目標與兩目標的綜合效益最佳參數組合。在實驗過程發現管內灌膠之膠合形式增加膠合的困難性，經變異數分析與多目標最佳化設計概念論證，決定以綜合效益最佳參數組合為基礎，但膠合形式則以容易灌膠的側孔灌膠方式取代，成為第四組最佳化組合。各組參數設定與量測結果如表 3 所示。

由上述結果比較發現，最佳化參數模組對各目標的表現，皆優於 $L_9(3^4)$ 直交表規劃之參數組合，進一步求得主結構組裝的最佳化參數水準值，另一方面，也論證實驗規劃推論結果的正確性。在本案例的推論結果中，可發現綜合效益之最佳化參數組合表現最優異，對於主結構膠合後 decenter 與 tilt 之偏差量最小，滿足主結構組裝對 decenter 與 tilt 最小化的需求。而由論證實驗中也可發現，以綜合效益為基礎之側孔灌膠的參數組合，其結果表現雖不如綜合效益之最佳化參數組合，如 decenter 與 tilt 偏差量在可容許範圍內，考量灌膠之便利性，亦可考慮以此參數組合作為最佳化的參數設計。

五、結論與建議

本文以田口品質工程法推論懸臂式光學系統主結構組裝的最佳化設計參數及製造公差設定，獲得極佳且可靠的設計組合，可滿足研究期望主結構控制 decenter 與 tilt 在可容許範圍內的需求。另一方面藉由實驗中實際組裝過程，確定組裝輔助機構的設計可提供主結構元件適當的夾持與定位。使用田口品質工程法的實驗推導，亦可克服軟體無法分析

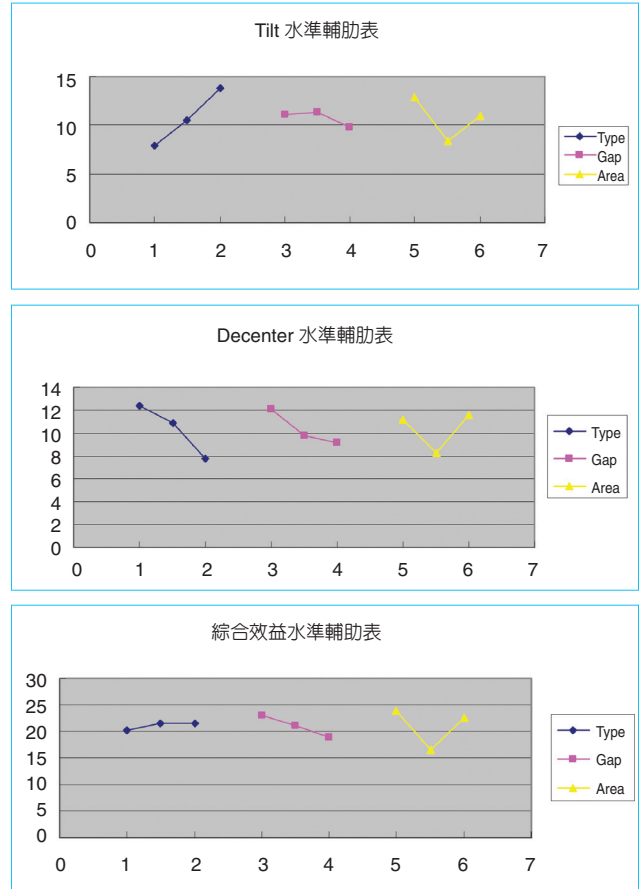


圖 8. 參數水準輔助圖。

製造與組裝偏差的問題。此外，田口品質工程法主要用於求取單一目標最佳化設計，在本案例推論過程中，嘗試以兩目標訊噪比和做為綜合效益評估，經實驗論證對於本案例之結果相當令人滿意，可做為田口品質工程法應用於多目標最佳化設計參考方法之一。

參考文獻

1. R. A. Irving, *Proceedings of SPIE*, **531**, 121 (1985).
2. P. R. Yoder, *Opto-Mechanical System Design*, Marcel Dekker, New York, 611 (1993).
3. K. Dehnad, *Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method*, The Wadsworth & Brooks, Cole Advanced Books Seris (1989).
4. A. Kunjur and S. Krishnamurty, *Mech. Mach. Theory*, **32**, 797 (1997).
5. M. S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design*, Practice-Hall, NJ, USA (1989).

-
- 陳瑞彬先生為國立成功大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 蔡瑞鴻先生為國立中山大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 黃鼎名先生為國立成功大學航太工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。
 - Jui-Pin Chen received his M.S. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied

Research Laboratories.

- Ruei-Hung Tsai received his M.S. in mechanical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Ting-Ming Huang received his Ph.D. in aeronautics and astronautics engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.