

振動試驗機垂直輔助平台之性能評估

王栢村¹ 陳志成² 李昆達³

國立屏東科技大學機械工程學系 教授¹ 研究生²

金頓科技股份有限公司 研發處處長³

國科會計畫編號：NSC-93-2622-E-020-003-CC3

摘要

本文主要針對垂直輔助平台在基座激振的實際操作狀態下，發展一平坦度評估模式來預測平台測試面在具有回授控制條件時的平坦度，並且同時定義可確定平坦度良劣的性能指標，以便助於等效分析模型進行控制加速度計的最佳安裝位置預測以及作為未來藉由田口方法以探討平台結構參數對測試面平坦度的影響之依據，從而得到最佳化結構設計。

關鍵字：基座激振、平坦度、性能指標

1. 前言

垂直輔助平台 (Head Expander, 以下簡稱平台) 為振動試驗機主要組件之一。通常為了擴大可供測試面積，期能進行大型或多個測試物振動測試之要求，因此可以在直徑較小的激振器音圈加上垂直輔助平台，待測物(Device Under Test, DUT)則可置於垂直輔助平台上，然後通過平台將激振器的運動做為一種模擬環境傳遞到待測物上。而這樣透過平台進行激振訊號的傳輸，其考慮事項應包括：平台之自然頻率、傳輸比，並確保在測試頻率範圍避免共振，以及使得平台表面有平坦的傳輸比，以確保平台各區域有等量之振動頻譜輸入，也有利於頻譜控制，其他則需注意控制加速度計安裝位置、夾具製作方式以符合前述需求 [1]。

由於此型式平台自由邊界的模型驗證[2]已得一收斂完成之有限元素模型，亦已透過線性彈簧元素勁度值的設定來模擬平台鎖固於音圈的夾持邊界，同時綜合比較了三種不同的設定方式後得到以使用兩種不同勁度值彈簧元素 (此時勁度值分別為 $K2 = 500$ N/m, $K3 = 1 \times 10^8$ N/m) 的分析模型(Model C)其模態分析結果與實驗數據最為接近[3]。

另一方面，同樣在分析模型(Model C)進行基座激振的簡諧響應分析之後，觀察其在測試面的操作變形振型(Operational Deflection Shape, ODS)，與操作模態

分析 (Operational Modal Analysis, OMA) 實驗所求得的操作變形振型是有一致的情形，並確認了分析模型在模擬平台實際操作狀態的正確性和工程分析方法的適用性[4]。

後續本研究將藉由先前操作模態分析(OMA)實驗的頻率響應函數套入發展的平坦度評估模式來預測平台測試面的平坦度，並且透過實際實驗來進行驗證。另一方面，也同時比較代入理論分析頻率響應函數與代入操作模態實驗的頻率響應函數，兩者所預測之測試面平坦度是否吻合。

2. 平坦度評估模式

考慮一平台結構，圖 1 為平台受基座激振示意圖，當基座有 $Z(t)$ 的簡諧位移輸入時，則傳輸比系統方塊圖如圖 2。

若 i 為平台測試面任意位置， k 為興趣頻率範圍， i_{cs} 為控制加速度計在平台測試面上的安裝位置，而 A_{input} 為控制器設定的白噪音激振位準(Level)，則定義測試面平坦度 $\varepsilon_i(f_k)$ 為：

$$\varepsilon_i(f_k) = \frac{\bar{A}_i(f_k) - \bar{A}_{ics}(f_k)}{\bar{A}_{ics}(f_k)} = \frac{\bar{A}_i(f_k) - A_{input}}{A_{input}} \quad (1)$$

假設平台測試面有 N_s 個量測位置，興趣頻率範圍內有 N_f 個頻率解析度，即 $i=1,2,\dots,N_s$ ， $k=1,2,\dots,N_f$ ，則定義第一個平坦度指標 PI_{avg} ，寫成：

$$PI_{avg} = \varepsilon_{avg,ics} = \frac{\sum_{k=1}^{N_f} \sum_{i=1}^{N_s} [\varepsilon_i(f_k)]}{N_s \cdot N_f} \quad (2)$$

若 ε_{max} 為整個 ε_i^f 中的最大值，而 ε_{min} 為整個 ε_i^f 中的最小值，分別定義如下：

$$\varepsilon_{max} = \max [\varepsilon_i^f] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{min} = \min [\varepsilon_i^f] \quad (4)$$

另定義第二個平坦度指標 PI_{diff} 為 ϵ_{max} 及 ϵ_{min} 兩者之間的絕對差異量，寫成：

$$PI_{diff} = |\epsilon_{max} - \epsilon_{min}| \quad (5)$$

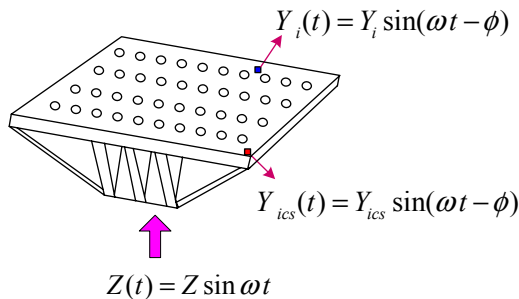


圖 1 平台基座激振示意圖

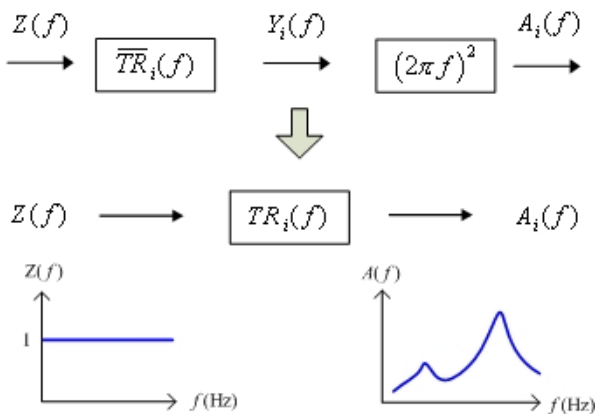


圖 2 傳輸比系統方塊圖

圖 3 中說明了 ϵ_{70}^f 為在 #70 量測位置 N_f 個解析頻率加速度振幅誤差百分比總和的實際意義。同圖 3， $\epsilon(f_{200})$ 則是在第 200 條解析頻率位置所有 N_s 個量測位置加速度振幅誤差百分比的總和。圖 4 為兩個平坦度性能指標之示意圖，圖中曲面為取 ϵ_1^f 到 ϵ_{100}^f 對應平台測試面量測位置的組合。透過這兩個平坦度性能指標即可確定某平坦度狀態的良劣。

3. 有限元素分析

由夾持邊界平台的模型驗證已得一可代表實際安裝狀態之等效分析模型 (Model C)[3]。但這樣具有較多元素及節點數量的分析模型，當運用商用軟體進行結構簡諧響應分析時，卻會遭遇到電腦計算時間冗長及大量硬碟空間需求等問題，屈於現實情況下為了能夠在應用有限資源，並能得到此平台在分析頻寬 2000 Hz 內具較佳解析程度下來觀察平台測試面平坦度，所以有必要對目前的等效分析模型進行簡化。

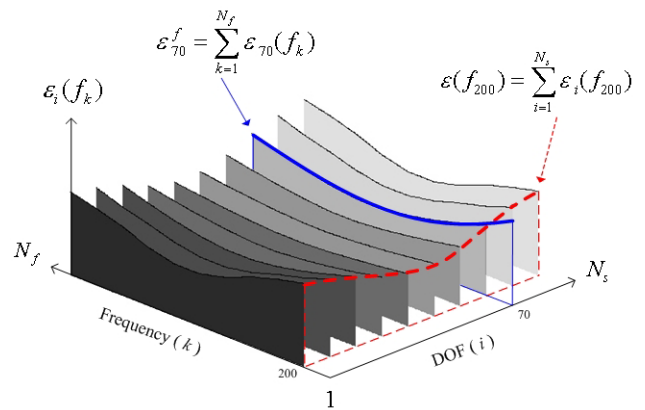


圖 3 平台測試面 $\epsilon_i(f_k)$ 示意圖

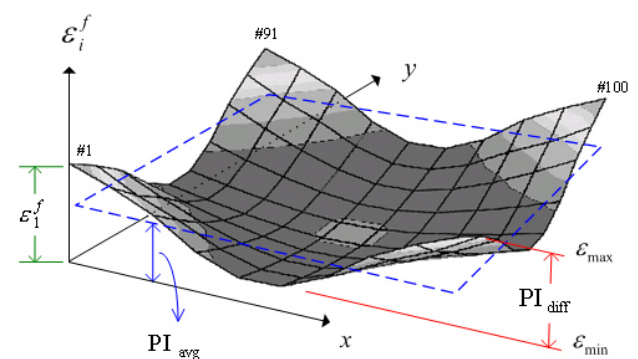


圖 4 平坦度性能指標示意圖

簡化的方式是在平台結構上省略了所有螺栓孔，並重新進行元素分割及夾持邊界的模擬，如圖 5 (a)、(b)，而得到一個簡化後之分析模型。本研究將使用此簡化後之分析模型，仍採用基座激振方式來模擬操作狀態下的平台，以預測平台測試面的平坦度。

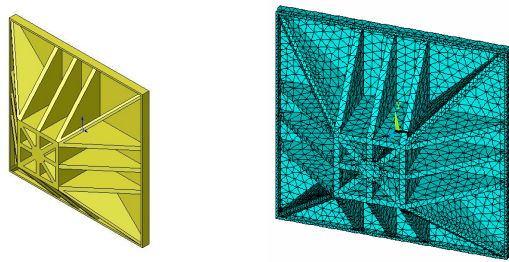
而在簡諧響應分析的設定上對照實際的實驗量測參數，同樣取興趣頻率範圍 2000 Hz，但只設定解析條數為 200 條亦即頻率解析度為 10 Hz，以及阻尼比 (damping ratio) 為 0.01 來進行運算求解。

4. 實驗模態分析

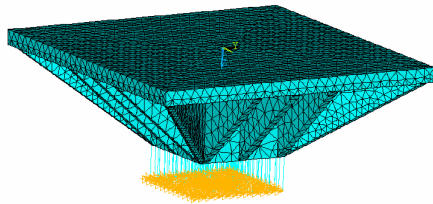
本實驗旨在求得控制感測器安裝在平台測試面某參考位置 i_{cs} 進行回授控制時的測試面平坦度之實驗評估。另一目的為驗證藉由操作模態分析(OMA)實驗的頻率響應函數套入平坦度評估模式所預測出之測試面平坦度。

(1) 量測點規劃

在平台的測試面上進行量測點規劃，等同於操作模態實驗中的量測點分佈[4]，如圖 6(a)。



(a) 結構幾何及有限元素模型



(b) 邊界模擬

圖 5 簡化後的分析模型

(2) 參考點位置選擇

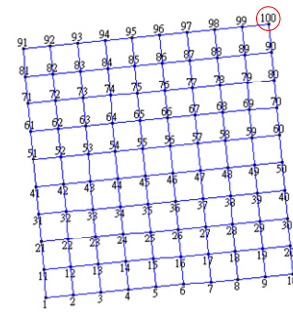
參考點的自由度是所有量測點自由度的因子，因此在選擇上須審慎考慮。一般以選擇最大反應點為參考點，以確保最佳量測之訊噪比(Signal to Noise Ratio)[5-6]。本研究經觀察後選定#100 量測點，即為平台角落位置為參考點。

(3) 實驗儀器及加速度計佈置

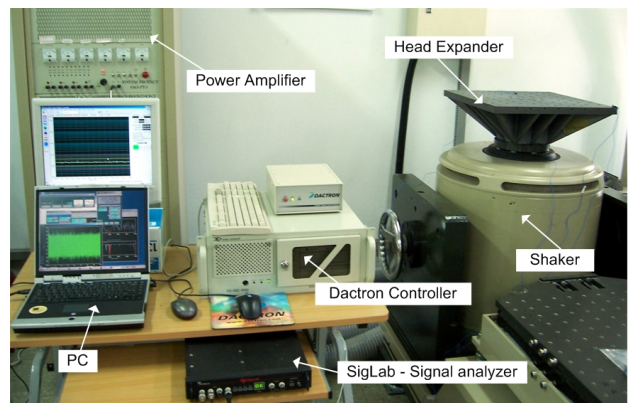
圖 6(b)、(c)為實驗佈置方式，所有使用的實驗儀器及量測參數設定也等同於操作模態實驗。本實驗共使用三個單軸向加速度計，其功能及接線情形如下：

- **加速度計 1(Acc1)**：安裝位置為平台測試面#100 量測點，以導線接到 SigLab 四頻道頻譜分析儀之輸入頻道#1，用作參考(Reference)位置響應訊號的擷取。
- **加速度計 2(Acc2)**：在平台測試面#1~#100 量測點移動，以導線接到 SigLab 四頻道頻譜分析儀之輸入頻道#2，當作平台 100 個量測(Roving)位置的響應訊號擷取。
- **加速度計 3(Acc3)**：安裝位置同為平台測試面#100 量測點，以導線接到 Dactron 控制器的輸入模組(Input)# 1，擷取平台測試面之響應訊號作為控制器回授控制使用。

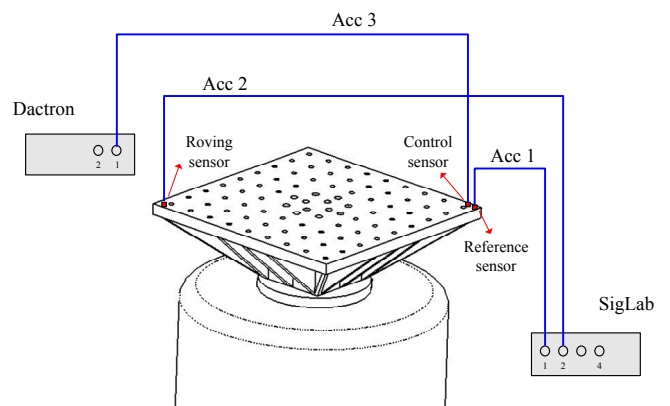
本實驗是利用 SigLab 頻譜分析儀之批次量測方式 [7-8]，分 100 次來獲得所有在測試面量測點的響



(a) 測試面量測點規劃



(b) 實驗照片



(c) 加速度計佈置及接線情形

圖 6 傳輸比(Transmissibility)量測實驗

應。然後將每一次實驗中所記錄下來的時間域資料進行快速傅立葉轉換(FFT)之後，得到每個響應訊號的功率頻譜密度函數(Power Spectrum Density, PSD)，此時再取參考點響應(Reference response)當作輸入而移動點響應(Roving response)當作輸出直接在 SigLab 頻譜分析儀進行傳輸比(Transmissibility)計算，故總共可得到 100 筆傳輸比。

5. 結果與討論

在操作模態分析(OMA)實驗中，已求取了平台測試面各量測點相對基座具有白噪音激振頻譜輸入時的頻率響應函數(傳輸比)[4]。另一方面，在實際針對平台的傳輸比量測實驗中，也可得到控制感測器位於測試面#100量測點時平台測試面平坦度情況。

另外，也對有限元素分析模型進行基座激振的簡諧響應分析，可得到對應的頻率響應函數(傳輸比)，同樣使用平坦度評估模式也可預測當平台具有回授控制效應的測試面平坦度及性能指標。

若先可確定平坦度評估模式代入 OMA 實驗頻率響應函數，可成功的預測控制感測器在平台測試面#100量測點位置進行回授控制時的平坦度，而另一方面，若將平坦度評估模式代入理論分析的頻率響應函數，也和代入 OMA 實驗頻率響應函數所預測之測試面平坦度有一致的情況，則代表此等效分析模型在測試面平坦度的預測上與實際實驗結果相當。

5.1 平坦度理論模式之實驗驗證

表 1 展示了控制感測器位於#100量測位置，以平坦度評估模式代入操作模態分析(OMA)實驗所得之頻率響應函數預測的測試面平坦度及平坦度性能指標，另外透過實際實驗量測之傳輸比(Transmissibility)所擷取到的相同數據也同表中所示，討論如下：

- (1) OMA 實驗預測及傳輸比實驗的平坦度型態都顯示了平台測試面在四角落位置大約呈現零誤差的激振訊號傳輸情形，但中間區域則呈現激振訊號的傳輸下降了 40%。
- (2) 對平坦度性能指標及相關參數，包括 PI_{avg} 、 ϵ_{max} 、 ϵ_{min} 及 PI_{diff} 的觀察，發現兩者的數據都相當接近。
- (3) 根據結果顯示，故可確定平坦度評估模式代入操作模態分析之實驗所得之頻率響應函數預測平台測試面平坦度，與透過實驗方式量測之傳輸比所取得的測試面平坦度是一致的。

同表 1，也同時觀察透過平坦度評估模式代入理論分析求得之頻率響應函數所預測之測試面平坦度。除整體測試面激振訊號傳輸平坦度誤差較實驗更低約 8%外，分析模型(FEA)是能有效地預測平台測試面#100量測點位置進行回授控制時的平坦度。

5.2 控制感測器之最佳安裝位置探討

在閉迴路(close loop)控制的振動測試監控中，感測器位置的選擇通常是一個關鍵問題，一般感測器以加速度計為主。

進一步探討控制感測器置於測試面 100 個量測位置移動時測試面平坦度的變化，另外也同時觀察透過平坦度評估模式代入理論分析頻率響應函數所預測之測試面平坦度，是否在這 100 個位置上仍然與操作模態分析(OMA)實驗預測的結果相吻合，以便判別等效分析模型預測控制感測器最佳安裝位置的能力。

整體性的觀察控制感測器在平台測試面 100 個量測位置移動時，平坦度性能指標 PI_{avg} 的數據分佈，如表 2，分別以立體圖及平面等高線圖表示，並探討如下：

- (1) 就性能指標 PI_{avg} 而言，當控制感測器安置在距角落約 1/3 測試面長所形成的弧位置上可得到零值的激振訊號傳輸比平均值。因為平台結構幾何對稱的原因，所以等高線分佈也呈現對稱的現象，而感測器位置愈往測試面中間挪動，激振訊號傳輸比平均值就會越過零值然後急速的上昇。相同的情況也出現在性能指標 PI_{diff} 上。
- (2) 分析模型(FEA)分析預測結果也有一致的現象。但主要差異則發生在控制感測器在測試面中間及中間邊沿地帶。在這些位置上，分析模型所預測出的性能指標都比實驗值大。
- (3) 而造成誤差的原因，推測可能是分析模型的簡化、簡諧響應分析解析度太大以及平台耦合音圖的操作動態特性在分析模型中並未有效的模擬有關[4]。

6. 結論

本文主要針對垂直輔助平台在基座激振的實際操作狀態下，發展一平坦度評估模式來輔助分析模型預測平台測試面平坦度，並且同時定義可確定平坦度良劣的性能指標，重要結果如下：

- (1) 根據實驗結果顯示，藉由平坦度評估模式代入操作模態實驗頻率響應函數可成功的預測平台測試面在實際操作狀態的平坦度。
- (2) 當控制感測器安裝在距角落約 1/3 測試面長所形成的弧位置上可得到最佳的測試面平坦度效果。
- (3) 平台測試面平坦度的理論分析(FEA)預測和操作模態分析(OMA)實驗預測的結果是有一致的情

形，亦則代表以後在新型平台開發時，只需透過平坦度評估模式即能分析預測平台測試面傳輸比平坦狀況以及控制感測器最佳安裝位置。

本研究未來將以定義的平坦度性能指標 PI_{avg} 為依據，結合有限元素分析及田口方法導入虛擬測試之整合設計理念，探討平台結構參數對測試面平坦度之影響，從而得到最佳化結構設計。

謝誌

本研究承蒙國科會計畫與金頓科技股份有限公司經費支助，特以誌謝，國科會小產學計畫編號 NSC93-2622-E-020-003-CC3。

參考文獻

1. IEST-DTE-RP-013, "Shock and Vibration Fixturing," DRAFT, Institute of Environmental Sciences and Technology, 940E, Northwest Highway, Mount Prospect, IL 60056.
2. 王栢村, 陳志成, 振動試驗機垂直輔助平台之模型驗證, 中華民國第二十一屆機械工程研討會, 高雄, 論文編號: C0300666, 2004
3. 王栢村, 陳志成, 夾持邊界下垂直輔助平台之模型驗證, 2004 中國航太學會/中華民國航學會聯合學術研討會, 台中, 論文編號: 13-1, 2004
4. 陳志成, 振動試驗機垂直輔助平台之設計驗證與評估, 碩士論文, 國立屏東科技大學機械工程學系, 屏東, 台灣, 2005
5. Dossing, O., and Staker, C. H., "Operational Deflection Shapes: Background, Measurement and Applications," Proceedings of 5th International Modal Analysis conference, London, pp. 1372-1378, 1987.
6. 林東成, 馬志高, 45kW 直流馬達操作狀況下變形量測與探討, 中正嶺學報, 第二十八卷, 第一期, 第 111-118 頁, 1999
7. Vold, H., Schwarz, B., and Richardson, M., "Measuring Operating Deflection Shapes under Non-Stationary Conditions," International Modal analysis conf. (IMAC XVIII), February 7-10. 2000. (Vibrant Tech. Paper No.32 www.vibetech.com)
8. Schwarz, B. J. and Richardson, M. H., "Introduction to Operating Deflection Shapes," CSI Reliability

Week, Orlando, FL, 1999. (Vibrant Tech. Paper No.29 www.vibetech.com)

Performance Evaluation for Head Expander of Vibration Test Machine

Bor-Tsuen Wang¹, Chih-Cheng Chen²
Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology

David Lee³

King Design Company

NSC-93-2622-E-020-003-CC3

Abstract

This paper develops the evaluation model to predict the flatness of head expander in operating condition for a vibration test machine. Two performance indices (PIs) are defined to identify the flatness of head expander and clarify the vibration test effectiveness. Both finite element analysis (FEA) and experimental approaches are performed to obtain PIs and compared to each others. Results show that the numerical prediction of PIs agrees with the experimental ones very well. The optimum control sensor location is also presented base on the PIs. The evaluation procedure can enable us to study the performance of different head expander designs and lead to determine the optimum operating condition in terms of the flatness of head expander.

Keywords : operating condition, flatness, performance index

表 1 控制加速度計於測試面#100 位置的 FEA 分析預測、OMA 預測及傳輸比實驗結果

	FEA	OMA	Transmissibility
PI_{avg}	-32.5300	-23.5618	-24.4857
ϵ_{max}	0.1871	5.3317	7.6728
ϵ_{min}	-50.3825	-40.7273	-41.2584
PI_{diff}	50.5696	46.0590	48.9311

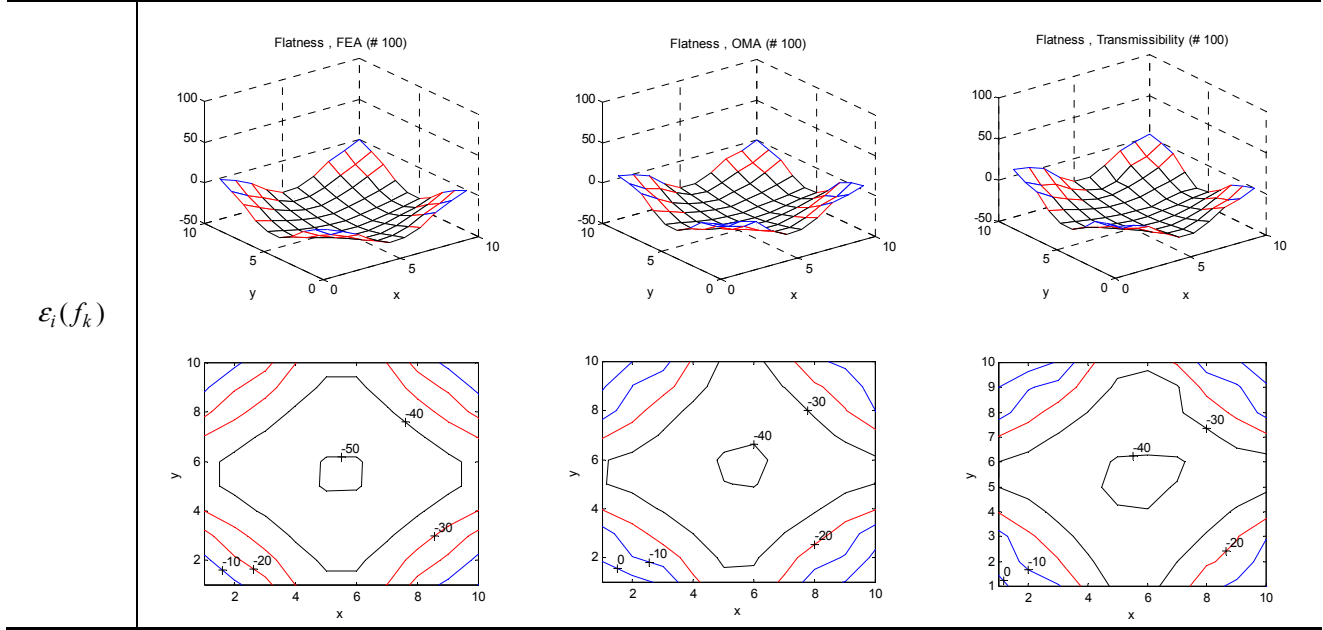


表 2 控制加速度計最佳安裝位置分佈情形

