

應用撓性簡化衝擊平台模型於半弦波產生器之設計分析

王栢村¹、黃宗淇²、李昆達³

¹ 國立屏東科技大學機械工程系教授

² 國立屏東科技大學機械工程系研究生

³ 金頓科技股份有限公司 研發處處長

國科會計畫編號：NSC 96-2622-E-020-003-CC3

摘要

本文發展了衝擊試驗機半正弦波產生器幾何外型、數量與位置之設計流程，並建立撓性簡化平台之有限元素模型，在有限元素分析中，半弦波產生器之衝擊特性也是其幾何設計流程的重要考量之一。本文發展方法之主要應用，當獲得規範要求之半正弦波與輸出響應時，能夠預先設計選擇半正弦波產生器之位置、數量、大小等訊息。本文採用LS-DYNA對衝擊平台與半正弦波產生器進行衝擊模擬，而各種不同設計下之半正弦波產生器進行衝擊分析的結果也進行相互比較。依據分析產生之波形結果顯示，本文之發展流程能合理的預測出半正弦波產生器之幾何尺寸、數量與位置，其中半正弦波產生器之幾何參數是影響數量與位置的重要因素。本文所發展之設計分析流程可有效的應用於選擇半正弦波產生器之幾何參數，並可擴充應用於其他衝擊波形。

關鍵字：衝擊試驗機，半弦波產生器，衝擊平台，半正弦波，LS-DYNA。

1. 前言

各種產品在製造、運送與使用過程中常遭受振動、衝擊與掉落等其他外力作用，導致產品損壞，故市面上各項產品在研發製造過程中，為確保產品具有承受環境應力之能力，皆需執行環境應力試驗，以驗證產品品質性能及承受衝擊環境之能力，而衝擊試驗為模擬產品受衝擊之影響，此試驗是環境試驗中重要且不可或缺的環節。

楊[1]說明機電產品的品質可靠度的測試，主要為振動測試(vibration test)、衝擊測試(shock test)、落下測試(shock test)，其目的為模擬環境應力以考驗產品品質。美國軍方MIL-STD-883E (1996) [2]規範為測試電子設備可能在搬運、運送及實地操作中所遭受重擊時之抗震能力，所需之衝擊試驗設備必須提供500-3000g(peak)之半正弦衝擊脈波(half sine pulse)，物品衝擊時間在0.1-1ms之間，此半正弦波僅允許20%以內之誤差，且衝擊機之測試平台必須有足夠剛性及適當邊界拘束。在衝擊試驗方面，主要以衝擊試驗機對產品進行測試，而衝擊試驗機關鍵零件包含衝擊平台及半弦波產生器。其作動流程為半弦波產生器受

到衝擊平台及測試物落下撞擊後，平台頂面上會產生衝擊波形，包含半正弦波(half sine pulse & versed sine pulse)、單邊鋸齒波(terminal peak saw-tooth pulse)及梯形方波(trapezoidal pulse)，其上述各種波形產生主要是由半弦波產生器所控制。

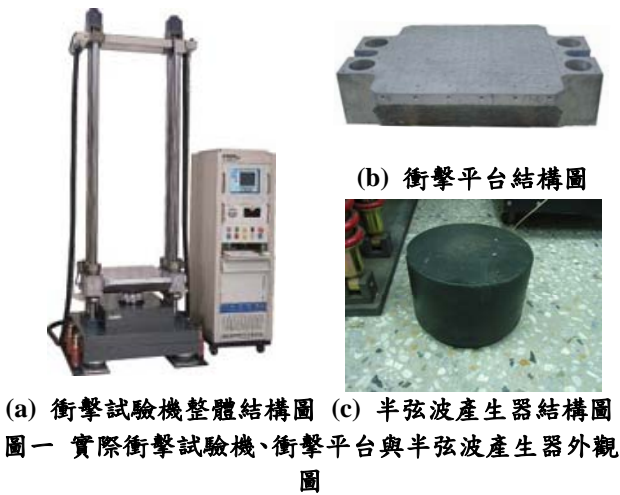
在FEA軟體應用中，Low et al. [3]為了得知mini audio底板在運送過程受衝擊之變形情況，藉由有限元素分析軟體分析得知結構破壞發生處，且說明mini audio結構內部之微小結構在FEA裡不能省略，其結構材料參數由拉伸試驗得知，由分析結果進一步改變結構之材料參數與厚度等加以設計補強，結果發現改變底板楊氏係數與變壓器質量，能有效提高結構強度。使用有限元素分析確實能分析解所多結構應力問題，且能大大縮短測試時間及成本。相關研究[4,5,6]也都運用了有限元素分析方法對結構進行靜態分析，以得到結構最佳設計。

本文主要探討半正弦波半弦波產生器對平台頂面之輸出衝擊波形影響，如何設計選擇半弦波產生器之形狀尺寸，以適應不同的測試物重量及不同之測試規範之要求為其目標。儘管已有參考半弦波產生器形式，作為各種典型衝擊測試之需，然而由於測試物之變異性，故如何快速選擇半弦波產生器，包含特定形狀與大小之半弦波產生器，及半弦波產生器放置位置與半弦波產生器數量等，有必要建立其分析方法，使能快速提供半弦波產生器選用之參考，以便能更快速、更精確的符合規範及客戶要求，增加競爭力。且此方法能套用於爾後相關半弦波產生器設計，以精確且快速的達到變更設計的目的。

2. 撓性簡化平台理論解析

衝擊試驗機、衝擊平台與半弦波產生器如圖一所示，衝擊試驗機作動流程為衝擊平台上放置測試物及夾具，衝擊平台自由落體方式撞擊半弦波產生器，藉由撞擊座過程中，量測平台頂面上測試物之衝擊波型，此波型即為衝擊試驗規範所規定之衝擊波形。

圖二為撓性簡化平台之半弦波產生器幾何設計分析流程圖，首先由規範獲得半弦波時間域加速度峰值 A ，將此加速度經由快速傅立葉轉換至頻率域，再由有限元素簡諧分析求得包含位置效應之頻率響應函數，由規範獲得之半弦波頻率域加速度峰值 A 與簡

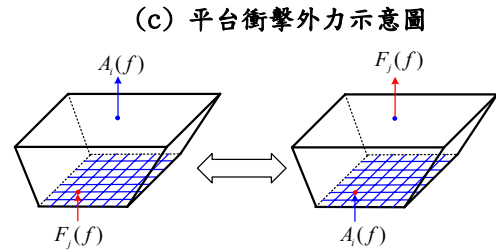
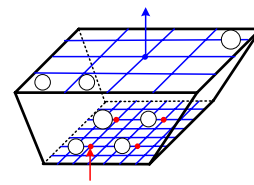
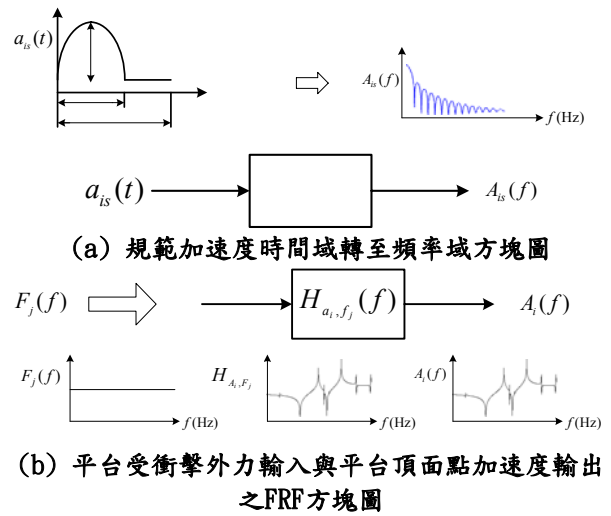
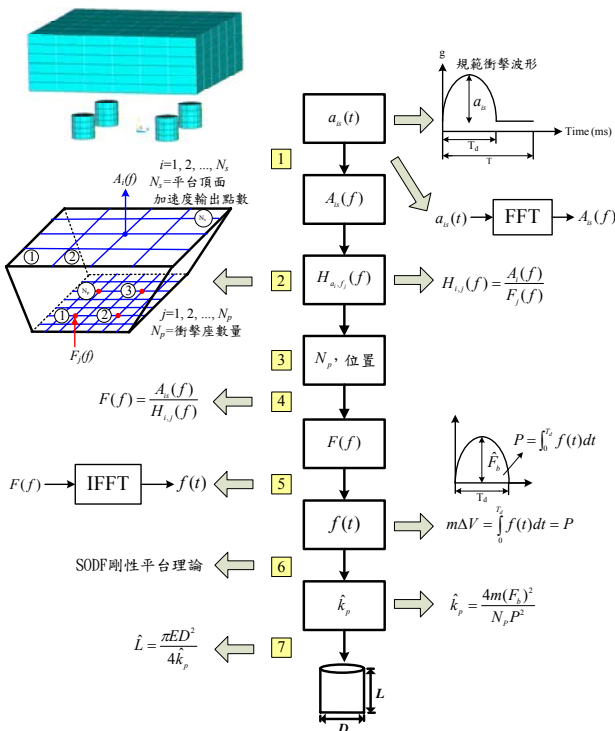


諧分析所求得之頻率響應函數，經由頻率響應函數定義可推算出頻率域衝擊力 $F(f)$ 響應，最後將頻率域衝擊力 $F(f)$ 經逆傅立葉轉換，即可得知時間域之衝擊力 $f(t)$ 。得到時間域衝擊力 $f(t)$ 帶入已發展之剛性平台所發展理論，便能獲得考慮位置效應之撓性簡化平台理論。

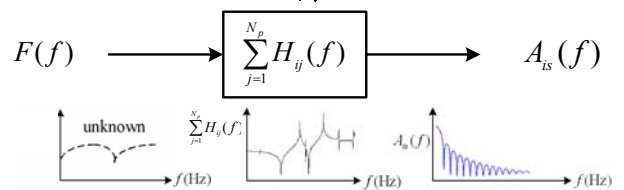
圖三為撓性簡化平台理論解析流程：

1. 步驟1：將規範半弦波時域加速度經由快速傅立葉轉換至頻率域

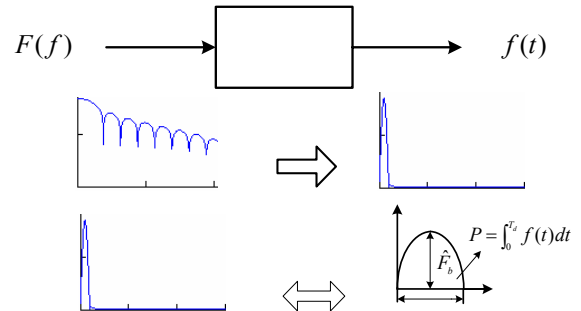
首先定義規範半弦波之加速度為 $a_{is}(t)$ ，圖三(a)為快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT) 示意



(d) 衝擊外力與加速度頻率響應函數之互換性示意圖



(e) 推算平台所受衝擊外力頻率域方塊圖



(f) 平台衝擊外力頻率域轉換至時間域方塊圖
圖三 求取考慮位置之未知衝擊力流程圖

圖二 撓性簡化平台之半弦波產生器幾何設計分析流程

圖三 求取考慮位置之未知衝擊力流程圖

圖，其理念是將時域 $a_{is}(t)$ 響應經FFT轉換為頻率域的 $A_{is}(f)$ 響應，其中 $A_{is}(f)$ 為目標波形的傅立葉頻譜 (Fourier spectrum)。

2. 步驟2：應用有限元素法對平台結構進行簡諧響應分析

此步驟對平台進行簡諧響應分析，考慮平台頂面中心區域響應較確實，故在有限元素分析中以平台中心點作為衝擊波型輸出之參考點。由於時域衝擊外力是未知的，因此將其假設衝擊外力為單位外力輸入，即在頻率域下為白噪音 (white noise) 外力響應，如圖三(b)方塊圖所示，依上述之假設衝擊外力於頻率域下為白噪音的理念，便可運用有限元素分析軟體ANSYS進行簡諧響應分析如圖三(c)之示意圖，求得平台所受衝擊外力輸入 $F_j(f)$ 與平台頂面加速度輸出 $A_i(f)$ 之頻率響應函數 H_{a_i, f_j} 。而有限元素模型建構方面，平台採用三維線性立體元素SLOID45，平台中心點採用三維線性質量元素MASS21模擬測試物質量。

進行簡諧響應分析時，衝擊外力是由平台底面輸入，進而得到其頻率響應函數 (FRF)，但是當衝擊外力位置及數量不同時，則需重覆進行簡諧響應分析，才能分別得知平台之FRF，相當耗時，考慮只關心平台頂面之中心點加速度響應，而需得知平台底面所有區域衝擊外力響應，故應用頻率響應函數之互換性，如圖三(d)所示，因平台底面衝擊力輸入 $F_j(f)$ 與加速度輸出相同，而平台頂面加速度輸出也與衝擊力輸入相同，故可將原本頻率響應函數轉換，轉換後只需執行一次簡諧分析，即可得知平台底面所有區域衝擊外力與平台頂面中心點之加速度頻率響應函數 H_{a_i, f_j} 如下：

$$H_{a_i, f_j}(f) = \frac{A_j(f)}{F_i(f)}, \quad j=1, 2, \dots, N_p \quad (1)$$

3. 步驟3：選擇衝擊外力數量及位置

實際進行衝擊試驗時會採用單個或多個半弦波產生器，如圖三(c)所示，假設只有單個半弦波產生器，則只有一個未知外力 $F_j(f)$ 輸入平台底部，如有多個半弦波產生器，則有多個半弦波產生器未知外力輸入平台底部，故定義 N_p 為半弦波產生器數量。當選定半弦波產生器數量後，也必須選擇半弦波產生器放置位置，以供爾後分析使用。

4. 步驟4：應用規範頻率域加速度與頻率響應函數得到頻率域衝擊外力

此步驟為圖三(e)的理念，由步驟4方法可求得多個衝擊外力與位置之頻率響應函數。由規範之頻率域加速度 $A_{is}(f)$ 與累加頻率響應函數，可求得頻率域衝擊外力 $F(f)$ 。

5. 步驟5：應用逆傅立葉轉換將頻率域衝擊外力轉換為時間域響應

如圖三(f)方塊圖所示，若 $F(f)$ 已知時，可應用逆快速傅立葉將頻率域衝擊外力 $F(f)$ 轉換成時間域響應，即求得時域之衝擊外力 $f(t)$ ，也可得知衝擊力之最大振幅即為：

$$\hat{F}_b = \max[f(t)] \quad (2)$$

6. 步驟6：求取半弦波產生器等效彈簧常數 \hat{k}_p

由上述所發展求取包含位置效應之時域衝擊力方法，代入到以發展之單自由度半弦波產生器幾何外型預測理論，進而獲得多個半弦波產生器與考慮位置效應之半弦波產生器幾何外型預測解析流程，將獲得之位置效應衝擊力代入動量與衝量守恆方程式可得知：

$$m\Delta\hat{V} = \int_0^{T_d} f_j(t) dt \quad (3)$$

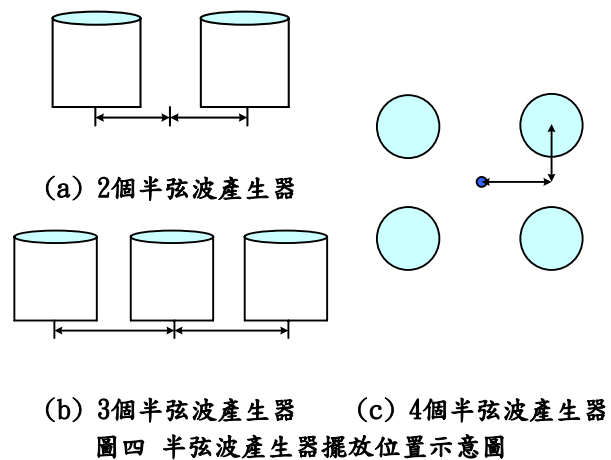
7. 步驟7：由半弦波產生器等效彈簧常數推算半弦波產生器長度

求得 k_p 代入半弦波產生器變形量 δ ，可求得半弦波產生器長度 L 為：

$$\hat{L} = \frac{\pi ED^2}{4\hat{k}_p} \quad (4)$$

3. 結果與討論

本節以撓性簡化平台理論及有限元素衝擊模擬分析結果進行探討。探討半弦波產生器數量與位置對半弦波加速度峰值 A 與衝擊時間 T_d 之影響，其中包含2個、3個及4個半弦波產生器。在SDOF剛性平台與撓性簡化平台理論方面，主要輸入相同參數包含衝擊平台、夾具及測試物總質量 $m=200\text{kg}$ ，半弦波產生器楊氏係數 $E=1.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ，半弦波產生器直徑 $D=0.08\text{m}$ 。在有限元素分析方面，則代入上述參數



圖四 半弦波產生器擺放位置示意圖

及由撓性簡化平台理論求得之平台落下高度 H 及半弦波產生器長度 L ，將上述所有參數代入LS-DYNA進行分析得知其衝擊波形，綜合討論如下。

3.1 1個半弦波產生器

令半弦波加速度峰值 A 分別為100g、150g、200g代入半弦波產生器撓性簡化平台預測理論，可分別求得半弦波產生器長度 L 、平台落下高度 H 及半弦波產生器變形量 δ 。再將所求得相關參數代入LS-DYNA軟體進行分析比較。表二(a)為半弦波在不同加速度峰值 $A=100g$ 、150g及200g，而有相同衝擊時間 $T_d=0.004s$ 條件下之SDOF剛性平台理論分析與LS-DYNA模擬分析結果之比較。

令半弦波衝擊時間分別為0.004s、0.006s、0.008s代入半弦波產生器撓性簡化平台預測理論，也可分別求得半弦波產生器長度 L 、平台落下高度 H 及半弦波產生器變形量 δ 。再將所求得相關參數代入LS-DYNA軟體進行分析比較。表二(b)為半弦波在不同衝擊時間 $T_d=0.004s$ 、0.006s、0.008s，而有相同加速度峰值 $A=100g$ 條件下之SDOF剛性平台理論分析與LS-DYNA模擬分析結果之比較。表二為不同半弦波加速度峰值與衝擊時間之結果比較，綜合討論如下：

- (1) 不同加速度峰值時，LS-DYNA分析所得之加速度峰值誤差為-7.5~-20.1%，而不同衝擊時間時，LS-DYNA分析所得之加速度峰值誤差為-8~-34.8%。
- (2) 不同加速度峰值時，LS-DYNA分析所得之衝擊時間誤差為17.5%，而不同衝擊時間時，LS-DYNA分析所得之衝擊時間誤差為17.5~30%。
- (3) 不同加速度峰值時，LS-DYNA分析所得之半弦波產生器變形量誤差約-9為%，而不同衝擊時間時，LS-DYNA分析所得之半弦波產生器變形量誤差為-9~0.6%。
- (4) 總體而言，撓性簡化平台理論與有限元素分析雖然誤差偏高，推測為進行有限元素之衝擊模擬分析時，半弦波產生器材料參數設定之影響，但所發展之撓性簡化平台理論有其相當之合理性，故撓性簡化平台分析方法應有其參考價值。

3.2 2個半弦波產生器

2個半弦波產生器與中心點距離 S 分別為0.1m、0.2m、0.3m代入半弦波產生器撓性簡化平台預測理論，可分別求得半弦波產生器長度 L 及平台落下高度 H 。再將上述所有參數代入LS-DYNA軟體進行分析比較。表三為2個半弦波產生器不同距離結果比較，討論如下：

- (1) 半弦波產生器與中心點距離 S 愈遠，則 \hat{H} 愈低， \hat{L} 愈高， $\hat{\delta}$ 略增，此為SDOF剛性平台理論無法預測之資訊。

表二 1個半弦波產生器

(a) 不同半弦波加速度峰值 (A) 結果比較

規範波形	撓性簡化平台理論			有限元素分析			加速度誤差 $\frac{\tilde{A}-A}{A}$ (%)	衝擊時間誤差 $\frac{\tilde{T}_d-T_d}{T_d}$ (%)	半弦波產生器變形量誤差 $\frac{\tilde{\delta}-\delta}{\delta}$ (%)	
	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	半弦波產生器變形量 $\hat{\delta}$ (m)	加速度 \tilde{A} (g)	衝擊時間 \tilde{T}_d (s)	半弦波產生器變形量 $\tilde{\delta}$ (m)				
100	0.004	0.0513	0.0792	0.00145	92	0.0047	0.00132	-8.0	17.5	-9.0
150	0.004	0.1153	0.0792	0.00218	138.8	0.0047	0.00198	-7.5	17.5	-9.2
200	0.004	0.2051	0.0792	0.00291	159.8	0.0047	0.00265	-20.1	17.5	-8.9

(b) 不同半弦波衝擊時間 (T_d) 結果比較

規範波形	撓性簡化平台理論			有限元素分析			加速度誤差 $\frac{\tilde{A}-A}{A}$ (%)	衝擊時間誤差 $\frac{\tilde{T}_d-T_d}{T_d}$ (%)	半弦波產生器變形量誤差 $\frac{\tilde{\delta}-\delta}{\delta}$ (%)	
	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	半弦波產生器變形量 $\hat{\delta}$ (m)	加速度 \tilde{A} (g)	衝擊時間 \tilde{T}_d (s)	半弦波產生器變形量 $\tilde{\delta}$ (m)				
100	0.004	0.0513	0.0792	0.00145	92	0.0047	0.00132	-8.0	17.5	-9.0
100	0.006	0.1218	0.1838	0.00341	65.2	0.0078	0.00335	-34.8	30.0	-1.8
100	0.008	0.2318	0.3431	0.00643	87.4	0.0099	0.00647	-12.6	23.8	0.6

表三 2個半弦波產生器不同距離結果比較

半弦波產生器與中心點距離 S (m)	撓性簡化平台理論			有限元素分析			加速度誤差 $\frac{\tilde{A}-A}{A}$ (%)	衝擊時間誤差 $\frac{\tilde{T}_d-T_d}{T_d}$ (%)	半弦波產生器變形量誤差 $\frac{\tilde{\delta}-\delta}{\delta}$ (%)		
	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	半弦波產生器變形量 $\hat{\delta}$ (m)	加速度 \tilde{A} (g)	衝擊時間 \tilde{T}_d (s)	半弦波產生器變形量 $\tilde{\delta}$ (m)					
0.1	100	0.004	0.04997	0.148	0.001387	63.7	0.0053	0.001258	-36.3	32.5	-9.3
0.2	100	0.004	0.04934	0.1531	0.001402	59.3	0.0053	0.0013	-40.7	32.5	-7.3
0.3	100	0.004	0.0401	0.1542	0.001402	40	0.0067	0.00146	-60.0	67.5	4.1

- (2) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， \tilde{A} 均偏低，主要因為撓性簡化平台理論 \hat{F}_b 比SDOF剛性平台理論 F_b 低所造成。
- (3) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， \tilde{T}_d 均偏高，主要因為 \hat{F}_b 比 F_b 低，而 \hat{F}_b 又與 \tilde{T}_d 成反比所造成。
- (4) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， $\tilde{\delta}$ 逐漸變大，主要因為隨著距離的增加， \hat{F}_b 隨之變大所造成。
- (5) 半弦波產生器距離平台底面中心點愈近，則半弦波加速度峰值與衝擊時間誤差愈小。
- (6) 2個半弦波產生器與中心點距離愈近，則半弦波加速度峰值與衝擊時間響應較好。

3.3 3個半弦波產生器

3個半弦波產生器與中心點距離 S 分別為0.1m、0.2m、0.3m代入半弦波產生器撓性簡化平台預測理論，可分別求得半弦波產生器長度 L 及平台落下高度 H 。再將上述所有參數代入LS-DYNA軟體進行分析比較。表四為3個半弦波產生器不同距離結果比較，討

論如下：

- (1) 半弦波產生器與中心點距離 S 愈遠，則 \hat{H} 愈低， \hat{L} 愈低， $\hat{\delta}$ 大致相同，此為SDOF剛性平台理論無法預測之資訊。
- (2) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， \tilde{A} 均偏低，主要原因為撓性簡化平台理論 \hat{F}_b 比SDOF剛性平台理論 F_b 低所造成。
- (3) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， \tilde{T}_d 均偏高，主要原因為 \hat{F}_b 比 F_b 低，而 \hat{F}_b 又與 \tilde{T}_d 成反比所造成。
- (4) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析，3個半弦波產生器愈均勻放置平台底面，則 $\tilde{\delta}$ 誤差最小。
- (5) 半弦波產生器距離平台底面中心點愈近，則 A 與 T_d 誤差愈小。
- (6) 3個半弦波產生器與中心點距離愈近，則 A 與 T_d 響應較好。

3.4 4個半弦波產生器

4個半弦波產生器與中心點距離為左右向 S_1 與前後向 S_2 分別以 0.1m、0.2m、0.3m 代入半弦波產生器撓性簡化平台預測理論，可分別求得半弦波產生器長度 L 及平台落下高度 H 。再將上述所有參數代入LS-DYNA軟體進行分析比較。表五為4個半弦波產生器不同距離結果比較，討論如下：

- (1) 半弦波產生器與中心點距離 S 愈遠，則 \hat{H} 愈低， \hat{L} 愈高， $\hat{\delta}$ 略增，此為SDOF剛性平台理論無法預測之資訊。
- (2) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， \tilde{A} 均偏高，主因為 \hat{F}_b 比 F_b 高所造成。
- (3) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， \tilde{T}_d 均偏高，主要原因為 \hat{F}_b 比 F_b 低，而 \hat{F}_b 又與 \tilde{T}_d 成反比所造成。
- (4) 撓性簡化平台理論預測之半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析， $\tilde{\delta}$ 逐漸變小，主因為隨著距離的增加， \hat{F}_b 隨之變小所造成。
- (5) 半弦波產生器距離 S_1 與 S_2 為 0.2 m 時，平台頂面中心點有較佳之半弦波加速度峰值與衝擊時間響應。主要為半弦波產生器放置位置較靠近平台對稱點。
- (6) 4個半弦波產生器如放置位置愈靠近平台對稱點上，則半弦波加速度峰值與衝擊時間響應較好。
- (7) 由表三~表五之半弦波加速度峰值與衝擊時間誤差可知，2個、3個及4個半弦波產生器之最佳放置為4個半弦波產生器之平台對稱點上。

表四 3個半弦波產生器不同距離結果比較

半弦波產生器與中心點距離 S (m)	規範波形		撓性簡化平台理論			有限元素分析			加速度誤差 $\frac{\tilde{A}-A}{A}$ (%)	衝擊時間誤差 $\frac{\tilde{T}_d-T_d}{T_d}$ (%)	半弦波產生器變形量誤差 $\frac{\tilde{\delta}-\delta}{\delta}$ (%)
	加速度 A (g)	衝擊時間 T_d (s)	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	半弦波產生器變形量 $\hat{\delta}$ (mm)	加速度 \tilde{A} (g)	衝擊時間 \tilde{T}_d (s)	半弦波產生器變形量 $\tilde{\delta}$ (mm)			
0.1	100	0.004	0.05102	0.228	0.00142	60.1	0.0058	0.001582	-39.9	45.0	11.4
0.2	100	0.004	0.04967	0.227	0.001397	53.9	0.0059	0.001428	-46.1	47.5	2.2
0.3	100	0.004	0.04935	0.23	0.001402	45.5	0.0061	0.001562	-54.5	52.5	11.4

表五 4個半弦波產生器不同距離結果比較

半弦波產生器與中心點距離 S_1, S_2 (m)	規範波形		撓性簡化平台理論			有限元素分析			加速度誤差 $\frac{\tilde{A}-A}{A}$ (%)	衝擊時間誤差 $\frac{\tilde{T}_d-T_d}{T_d}$ (%)	半弦波產生器變形量誤差 $\frac{\tilde{\delta}-\delta}{\delta}$ (%)
	加速度 A (g)	衝擊時間 T_d (s)	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	半弦波產生器變形量 $\hat{\delta}$ (mm)	加速度 \tilde{A} (g)	衝擊時間 \tilde{T}_d (s)	半弦波產生器變形量 $\tilde{\delta}$ (mm)			
0.1	100	0.004	0.04969	0.3021	0.001397	119	0.0043	0.00136	19.0	7.5	-2.6
0.2	100	0.004	0.04899	0.3085	0.001402	113	0.0046	0.001362	13.0	15.0	-2.9
0.3	100	0.004	0.04874	0.31	0.001402	116	0.0049	0.00136	16.0	22.5	-3.0

表六 不同半弦波產生器數量之結果比較

半弦波產生器數量	規範波形		撓性簡化平台理論			有限元素分析			加速度誤差 $\frac{\tilde{A}-A}{A}$ (%)	衝擊時間誤差 $\frac{\tilde{T}_d-T_d}{T_d}$ (%)	半弦波產生器變形量誤差 $\frac{\tilde{\delta}-\delta}{\delta}$ (%)
	加速度 A (g)	衝擊時間 T_d (s)	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	半弦波產生器變形量 $\hat{\delta}$ (mm)	加速度 \tilde{A} (g)	衝擊時間 \tilde{T}_d (s)	半弦波產生器變形量 $\tilde{\delta}$ (mm)			
1	100	0.004	0.0513	0.0792	0.00145	92	0.0047	0.00132	-8.0	17.5	-9.0
2	100	0.004	0.05102	0.228	0.00142	60.1	0.0058	0.001582	-39.9	45.0	11.4
3	100	0.004	0.04967	0.227	0.001397	53.9	0.0059	0.001582	-46.1	47.5	13.2
4	100	0.004	0.04969	0.3021	0.001397	119	0.0043	0.00136	19.0	7.5	-2.6

表七 不同半弦波產生器位置之結果比較

半弦波產生器與中心點距離 S (m)	2個半弦波產生器		3個半弦波產生器		半弦波產生器與中心點距離 S_1, S_2		4個半弦波產生器	
	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)	S_1	S_2	平台落下高度 \hat{H} (m)	半弦波產生器長度 \hat{L} (m)
0.1	0.04997	0.148	0.05102	0.228	0.1	0.1	0.04969	0.3021
0.2	0.04934	0.1531	0.04967	0.227	0.2	0.2	0.04899	0.3085
0.3	0.0401	0.1542	0.04935	0.23	0.3	0.2	0.04874	0.31

3.5 半弦波產生器數量與位置對半弦波產生器尺寸探討

本節將以撓性簡化平台理論及有限元素分析結果對半弦波產生器數量與距離進行探討，表六為不同半弦波產生器數量與位置之結果比較表，討論如下：

- (1) 半弦波產生器數量愈多，則 \hat{H} 有降低之趨勢， \hat{L} 有增高之趨勢， $\hat{\delta}$ 有降低之趨勢，此為SDOF剛性平台理論無法預測之資訊。
- (2) 撓性簡化平台理論預測之不同數量半弦波產生器幾何代入LS-DYNA之驗證分析，1個及4個半弦波產生器 \tilde{A} 、 \tilde{T}_d 及 $\tilde{\delta}$ 相對響應較佳，2個及3個半弦波產生器 \tilde{A} 相對響應較差。

表七為不同半弦波產生器之位置結果比較表，其綜合結論如下：

- (1) 隨著半弦波產生器位置相距愈遠，則2個、3個及4個半弦波產生器之 \hat{H} 皆有降低之趨勢。
- (2) 隨著半弦波產生器位置相距愈遠，2個及4個半弦波產生器 \hat{L} 有增高之趨勢，但3個半弦波產生器 \hat{L} 有降低之趨勢。
- (3) 隨著半弦波產生器位置相距愈遠，則2個、3個及4個半弦波產生器之 $\hat{\delta}$ 有降低之趨勢。

4. 結論

本文結合單自由度剛性平台理論與有限元素之簡諧分析方法，發展撓性簡化平台理論以進行多個半弦波產生器包含其位置效應之半弦波產生器設計分析，所發展之撓性簡化平台理論可改善單自由度剛性平台理論無法考慮半弦波產生器位置與數量之缺點，並以撓性簡化平台理論與有限元素分析對半弦波產生器之幾何尺寸預測設計，進行相互比較驗證，綜合結論如下：

- (1) 撓性簡化平台理論可考慮半弦波產生器位置，而預測分析衝擊力之差異在合理範圍，故可知撓性簡化平台理論之合理性。
- (2) 撓性簡化平台理論與有限元素分析比較，發現半弦波加速度峰值 A 與衝擊時間 T_d 及半弦波產生器及變形量 δ 皆有一致性誤差，可驗證撓性簡化平台理論分析有其參考價值。
- (3) 本文主要為進行逆向工程分析，半弦波產生器之數量與幾何尺寸之預測分析，固然可由LS-DYNA進行設計驗證，但不易進行半弦波產生器之逆向工程設計分析，本章發展之方法提供了半弦波產生器位置效應之設計分析流程，並可得到半弦波產生器幾何尺寸及其位置之半弦波產生器幾何尺寸參考值，將有助於實務應用。

5. 誌謝

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 NSC96-2622-E-020-003-CC3。

6. 參考文獻

1. 楊長江 (2001) 「以使用者的品質觀點談振動測試」，電子檢測與品管季刊，第四十五期，第58-59頁。
2. MIL-STD-833E, (1996) Test Method Standard Microcircuits, US Department of Defense.
3. MIL-STD-810F, (2000) Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, US Department of Defense.
4. Low, K. H., Yang, A., Hoon, K. H., Zhang, X., Lim, J. K. T., and Lim, K. L. (2001) Initial study on the

Drop-Impact Behavior of Mini Hi-Fi Audio Products. *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, pp. 683-693.

5. Wong, T. E., Reed, B. A., Cohen, H. M., and Chu, D. W. (1999) Development of BGA Solder Joint Vibration Fatigue Life Prediction Model. *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 149-154.
6. Kao, C. L., Yeh, C. L., and Lai, Y. S. (2004) Steady-State Vibration for Printed Circuit Boards of Different Package Layout. *Taiwan Ansys Conference*, Nantou, pp. 67-70.
7. Chen, Y. K., Huang, K. F., and Lin, M. H. (2006) Thermal Enhancement of LCD Module by Numerical Analysis. *Taiwan Ansys Conference*, Taipei, pp. 109-116.

Application of Simplified Flexible Shock Table to Design Analysis of Half-Sine Pulse Programmer

Bor-Tsuen Wang¹, **Tsung-Chi Huang**², David Lee³

^{1,2}Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology

³King Design Company

Abstract

This paper develops the design procedures for the half-sine pulse programmer of free-fall shock test machine. The shock table is simplified and considered as flexible body to construct its finite element model. The FE model is then employed and incorporated with the impact characteristics to establish the programmer geometry design process. When the half-sine shock pulse is defined by test criteria and as the desired output response, the geometry of programmer can be predicted via the developed algorithm. The shock table during free fall and impact on the designed programmer is also simulated by finite element code, LS-DYNA. The shock pulse response obtained from LS-DYNA is then compared with the specified pulse and evaluated for the programmer design. Results show that the developed approach can reasonable predict the geometry design of programmers according to the desired shock pulse. The effects of different numbers and locations of programmers on the design of programmer's geometry are studied and revealed the design rules for geometry selection of the programmer. The presented design analysis algorithm is useful for practical application to systematically select the programmer geometry and can also be extended to other types of impulse-wave programmers as well.

Keyword: shock test machine, pad, shock table, half-sine wave, LS-DYNA