

## 火工衝擊模擬試驗機暫態結構響應之研究

葛揚雄<sup>1\*</sup> 何思宜<sup>2</sup> 葉日洋<sup>2</sup> 葉早發<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國防大學理工學院動力及系統工程學系

<sup>2</sup>國防部軍備局中山科學研究院

<sup>3</sup>國防大學理工學院化學及材料工程學系

### 摘 要

火工件在武器系統如飛彈或爆炸自動推進武器上執行特定的功能作動時會產生高頻響應環境，嚴重影響電子裝置及脆弱材料的結構。本研究藉由火工衝擊模擬試驗機進行試驗，經改變撞擊用砲彈的材質、類型或輸出氣體壓力等參數，模擬出與參考標準近似的衝擊響應頻譜。實驗結果顯示，火工衝擊模擬試驗機已成功模擬參考標準的火工衝擊響應頻譜，能夠不斷地重複表現任一需求的頻譜，將可以大幅降低火工衝擊試驗的成本，有助於國軍在爆炸衝擊環境模擬技術上的提升。

**關鍵詞：**火工件，高頻響應，火工衝擊

## A Study on the Transition Structure Response at a Pyroshock Simulation Test Machine

Yang-Hsiung Ko<sup>1\*</sup>, Szu-Yi He<sup>2</sup>, Jih-Yang Yeh<sup>2</sup>, and Tsao-Fa Yeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Power Vehicle and Systems Engineering, CCIT, National Defense University

<sup>2</sup>Chung-Shan Institute of Science and Technology, Armaments Bureau

<sup>3</sup>Department of Chemical and Materials Engineering, CCIT, National Defense University

### ABSTRACT

Missiles or exploding projectiles all use pyrotechnic devices to execute particular functions. However, the pyrotechnic device action will produce a concurrent high frequency response environment that disrupts electronic components or brittle structural materials. This study simulates the output gaseous pressure from artillery projectiles using a pyroshock simulation test machine. We imitate the shock response spectrum approximated to the reference standard. The test results show that the pyroshock simulation test machine can simulate the pyroshock response reference standard spectrum successfully. These results will substantially reduce the cost of pyrotechnic shock tests and promote the pyroshock simulation technique for explosion environments.

**Keywords:** pyrotechnic device, high frequency response, pyroshock

## 一、前言

火工衝擊(Pyroshock)是指火工裝置爆炸所引發之高強度、高頻率的暫態機械響應，通常與爆炸源的型態以及爆炸源與響應點中間的結構特性有關係；而火工衝擊可能造成的問題包括[1]：(1)微電子晶片結構完整性的破壞；(2)繼電器顫動；(3)電路卡故障、損傷及電子接頭失效，有時更可能引起短路的電路卡污染物，在火工衝擊之下形成移位；(4)晶體、陶瓷、樹脂或玻璃外罩等裂縫及斷裂。這些問題將導致嚴重的軍品失效，從而延遲任務的遂行甚至危及人員性命，有鑑於此，國外已進行多年火工衝擊研究，並建立完整的規範，如MIL-STD-810F、NASA-HDBK-7005及NASA Technical Memorandum 110172等。

執行火工衝擊試驗主要目的為[2]：(1)提供軍品裝備在結構及能力上可承受結構形態內之火工裝置爆炸所產生之衝擊效應的信賴程度；(2)利用試驗來估計軍品裝備相對於火工衝擊之脆弱性程度，以便採取降低衝擊的步驟，以保護軍品結構及功能的完整性。火工衝擊通常意指火工裝置所引致之衝擊，其頻率範圍約介於100 Hz至1 MHz之間，而作用時間則為50 $\mu$ s至20 ms，加速度響應振幅範圍可達300 g至300,000 g之間，其加速度響應在時間歷程上一般呈現劇烈振盪，且具有一個接近10 $\mu$ s的快速爬升時間[2]如圖1[3]。

目前模擬火工衝擊環境的方法主要有三類[4]：(1)火工品爆炸方式；(2)機械撞擊方式；(3)振動機台模擬方式。結合此三類模擬方式及區域特性，所得到的特性比較如表1[5]。利用衝擊機台進行機械衝擊方式，藉由調整適當參數來表現古典衝擊波形，以求實現對火工衝擊環境的模擬；而以火工品作為爆炸源來模擬火工衝擊環境，最大的優點是能有效模擬出真實情況，重現時域特性，缺點是較危險且所需

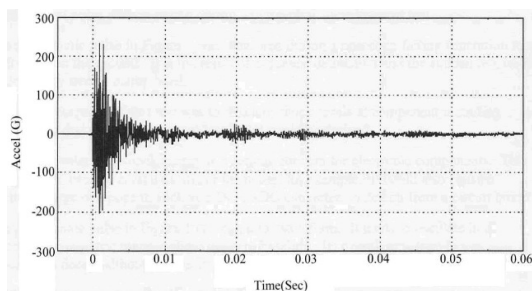


圖 1. 典型火箭系統火工衝擊時域圖

表 1. 火工衝擊模擬裝置表

	近域 直接由爆炸源藉應力波傳遞	中域 結合應力與波傳遞結構共振	遠域 結構共振響應	優點
振動機台	無法達到	無法達到	可達到 (<3k Hz)	1.安全 2.可重複性 3.可控制性
衝擊機台	無法達到	可達到	可達到	1.安全 2.可重複性
真實火工品爆炸	可達到	可達到	可達到	高強度

經費龐大，同時對於衝擊響應頻譜也較難以掌握。

僅觀察衝擊波形，無法判定結構的響應程度，為了廣泛定義衝擊的破壞力，因此發展出衝擊響應頻譜(Shock Response Spectrum, SRS)的理論。衝擊響應頻譜通常以系統的加速度響應的觀點來定義火工衝擊環境，此觀念由 Biot 提出，他為了評估建築物對地震的耐震程度，認為與其研究地震波複雜的外形，不如瞭解它可能造成的影響，完整的分析模型如圖 2 所示[6]。當激振作用輸入系統後，各個獨立的單自由度均會有不同的響應，以每間隔一個倍頻(Octave)的倒數之指數的頻率來獲得各單自由度中的最大響應；以自然頻率為橫軸，最大響應為縱軸就構成了衝擊響應頻譜，如圖 3[7]。

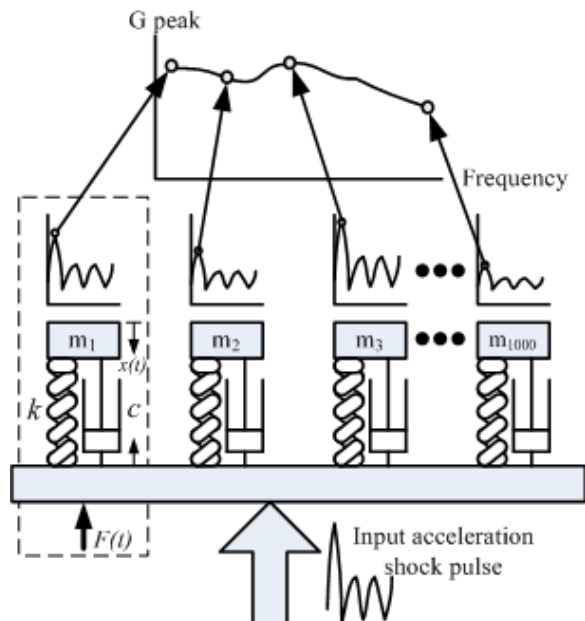


圖 2. 衝擊響應頻譜的分析模型圖

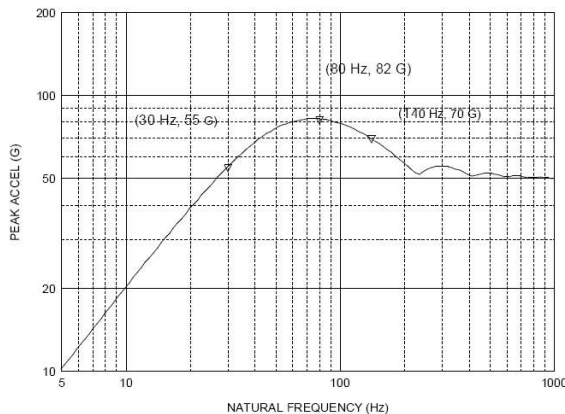


圖 3. 衝擊響應頻譜圖

MIL-STD-STD 810F Method 517 描述火工衝擊的特性為[8]：(1)導因於高材料應變率的結構內部接近爆炸源應力波傳播進入近域及更遠處；(2)高頻(100 Hz 至 1M Hz)及極寬頻的輸入；(3)高加速度(300 g 至 300,000 g)，但低結構速度及位移響應；(4)短作用時間(< 20 ms)；(5)高殘餘結構加速度響應(衝擊事件後)；(6)由爆炸裝置或推進劑激發裝置(釋放儲存應變能)直接耦合進入結構所引起；(7)相當局部的點或線源輸入；(8)極高之結構驅動點阻抗，於爆炸源處，對於高材料質點速度，材料驅動點阻抗可大為降低；(9)響應時間歷程本質上是隨機的，使得重複性不高且強烈依賴軍品型態之細節；(10)結構上各點的響應受結構不連續性的影響很大；(11)軍品及結構響應可能伴隨可觀的熱及電磁放射；(12)依火工衝擊響應特性，軍品或其元件可分類為火工裝置的近域或遠域，與響應點之衝擊強度有關，此強度為距爆炸源距離及爆炸源和響應點間之結構型態的函數。IES-RP-DTE012.1 Appendix A 探討火工衝擊量測獲得的時域信號圖中，可能發生量測誤差的原因包括零位飄移或加速儀的安裝方式等，其中造成零位飄移現象包括加速儀過飽和及訊號調節器過飽和兩方面[9]。NASA/TM-1998-206621 綜整在模擬爆炸實境試驗中，不同量測位置的衝擊響應頻譜，顯示模擬試驗的再現性佳，且模擬試驗容易觀察參數變異對試驗的影響；另此衝擊響應頻譜也可做為參考標準依據[10]。Tom Irvine 說明衝擊響應頻譜圖中，根據一定倍率的頻寬計算自然頻率，並在單自由度系統輸入半正弦波進行絕對加速度的推導[11]。盧來潔等人闡述衝擊響應頻譜規範的起源、概念，並介紹兩種單自由度響應數值計算方法為 Runge-Kutta 算法及 O'Hara 算法[12]。

國外諸多研究火工衝擊的方法，是利用飛彈或火箭的運作實境，加裝感測裝置直接獲得真實的資料，但現今國軍的研究環境，礙於龐大的經費和設備問題，無法完全利用真實火工品來進行火工衝擊試驗。本文對火工衝擊的量測技術、資料分析與數據模擬等三方面進行研究，藉由火工衝擊模擬試驗機，藉氣動式推動砲彈撞擊靶體，模擬出近似真實火工品的衝擊響應頻譜，期建立完整的模擬技術能量

## 二、理論分析

單一單自由度質塊—彈簧系統的受力分析如圖2虛線所示，當外殼受到向上 $F(t)$ 的外力時，由於慣性的緣故，質塊受到一向下的力，其中

$$X(s) = \left( \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \right) \left( \frac{F_0}{m} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right)$$

$m$ 為質塊的質量，定義質塊相對於外殼的位移為 $x(t)$ ，向下為正。

質塊的運動方程式

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

其中 $c$ ：阻尼係數、 $k$ ：彈簧的彈性係數。

$$\text{設 } \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \Rightarrow c = 2\zeta\sqrt{km}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow k = \omega_0^2 m$$

$\zeta$ ：阻尼比， $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ：該質塊—彈簧系統的自然頻率，可得 $c = 2\zeta\omega_0 m$ 。

重新整理(1)式可得

$$m\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0 m\dot{x}(t) + \omega_0^2 m x(t) = F(t) \quad (2)$$

(2)式同除以 $m$ 後

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0 \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (3)$$

假設 $F(t)$ 是個週期函數， $F(t) = F_0 \sin \omega t$ 為

強制振動 (Forced Vibration) 現象，代入(3)式，並取 Laplace Transform，假設初始條件為  $x(0)=\dot{x}(0)=0$ ，則

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2x(t) = \frac{F_0}{m} \sin \omega t \quad (4)$$

(4)式取 Laplace Transform 可得

$$X(s) = \left( \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} \right) \left( \frac{F_0}{m} \cdot \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (5)$$

將(5)式右邊化成部分分式可得

$$\begin{aligned} X(s) &= \frac{F_0}{m} \left( \frac{As + B}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} + \frac{Cs + D}{s^2 + \omega^2} \right) \\ &= \frac{F_0}{m} \left[ \frac{A(s + \zeta\omega_0)}{(s^2 + \zeta\omega_0)^2 + \omega_d^2} + \frac{B - A\zeta\omega_0}{\omega_d} \right. \\ &\quad \times \frac{\omega_d}{(s^2 + \zeta\omega_0)^2 + \omega_d^2} + \frac{Cs}{s^2 + \omega^2} + \frac{D}{\omega} \\ &\quad \left. \times \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \frac{2\zeta\omega_0\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ B &= -\frac{4\zeta^2\omega_0^2\omega^3 + (\omega^2 - \omega_0^2)\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ C &= -\frac{2\zeta\omega_0\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ D &= -\frac{(\omega^2 - \omega_0^2)\omega}{4\zeta^2\omega_0^2\omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ \omega_d &= \omega_0\sqrt{1 - \zeta^2} \end{aligned}$$

再由 InverseLaplace Transform，可得

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{F_0\omega_0^2}{k} \left[ e^{-\zeta\omega_0 t} \left( A \cos \omega_d t + \frac{B - A\zeta\omega_0}{\omega_d} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \sin \omega_d t \right) + C \cos \omega t + \frac{D}{\omega} \sin \omega t \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left( 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \\ &\quad \times \left[ \frac{\left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) e^{-\zeta\omega_0 t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t - \phi_1) + \sin(\omega t - \phi_2) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

當(3)式中之  $F(t)$  為非 0 時，其解為暫態激發 (Transient Excitation) 系統之響應。假設激發函數是半正弦波，其最大值為  $P$ ，在  $t > t_0$  時，系統呈現自由振動狀態，所以  $t > t_0$  這部分的解為

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{e^{-\zeta\omega_0 t'}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \left[ x_{t_0} \cos(\omega_d t' - \phi_3) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\dot{x}_{t_0}}{\omega_0} \sin \omega_d t' \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $t' = t - t_0$ ， $x_{t_0} = x(t_0)$ ， $\dot{x}(t_0) = \dot{x}_{t_0}$ ，

設定無因次變數

$$\chi = \frac{x}{Pt_0^2}, \quad \tau = \frac{t}{t_0}, \quad \Omega = \omega_0 t_0$$

新的無因次變數使得

$$\begin{aligned} \chi(t) &= \frac{e^{-\zeta\Omega(\tau-1)}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \left\{ \chi(\tau-1) \right. \\ &\quad \left. \times \cos \left[ \Omega \sqrt{1 - \zeta^2} (\tau-1) - \phi_3 \right] \right\} \\ &\quad + \frac{\dot{\chi}(\tau-1)}{\Omega} \cdot \sin \left[ \Omega \sqrt{1 - \zeta^2} (\tau-1) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

另系統在  $0 \leq t \leq t_0$  內的響應，設  $\omega = \frac{\pi}{t_0}$  由(7)式

可得  $x(t)$  並將無因次變數代入後可得非齊次解

$$\begin{aligned} \chi(\tau) &= \frac{1}{\sqrt{\left[ 1 - \left( \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 \right]^2 + \left( 2\zeta \frac{\pi}{\Omega} \right)^2}} \\ &\quad \left[ \frac{\pi}{\Omega} e^{-\zeta\Omega\tau} \right. \\ &\quad \left. \sin(\pi\tau - \phi_2) - \frac{\Omega}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right. \\ &\quad \left. \cdot \sin \left( \Omega \sqrt{1 - \zeta^2} \tau - \phi_1 \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

為

### 三、實驗設備與方法

#### 3.1 實驗設備

- (1) 加速儀：廠牌為 ENDEVCO，型號 7270 A 系列的壓電阻式 (Piezo-Resistive) 加速儀，全試驗使用 7270A-20k (可用範圍  $\pm 20,000 G$ )、7270A-60k (可用範圍  $\pm 60,000 G$ ) 和 7270A-200k (可用範圍  $\pm 200,000 G$ ) 三種頻寬範圍；及 7255A-01 系列的 ICP 式的加速儀，可用範圍  $\pm 50,000 G$  且內建機械濾波 (Built-in Mechanical Filter) 功能。
- (2) 扭力扳手：功用為依照各種型號加速儀出廠規定，設定需求扭力磅數後旋緊加速儀於待測物上；7270A 系列設定扭力磅數為 8 lbf-in，7255A-01 系列為 30 lbf-in。
- (3) 訊號調節器：廠牌為 ENDEVCO，型號 106，含電源供應器，型號 109；功用是訊號放大、提供加速儀工作電壓、電流等。
- (4) 訊號擷取系統：廠牌為 Nicolet，型號 OD 200，輸入能力為每頻道 10 MS/s，解析度 14 bit，可以連續擷取資料，可自由選擇擷取參數 Sample Rate、Span 及 Trigger Level。
- (5) 示波器：廠牌為 Tektronix，型號 TDS 5054，最大頻寬 500 MHz，可自由選擇擷取參數 Vertical：Scale、Horizontal：Sample Rate、Duration 及 Trigger Level。
- (6) 矽油 (Silicone)：型號為 S-1000，將加速儀與待測物結合面，塗上薄薄的一層，用以增加加速儀與待測物間的貼合度。
- (7) 火工衝擊模擬器 (圖 4)：氣動方式推動砲彈撞擊靶板模式作用，細部構造為：  
a. 發射機構；b. 蓄壓機構；c. 靶體機

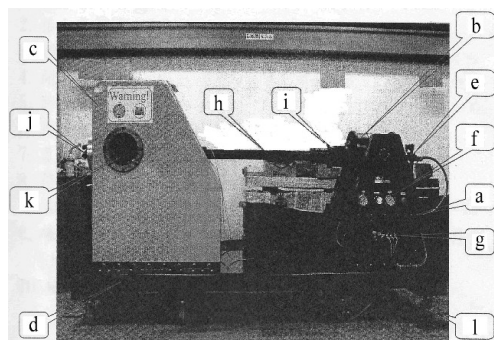


圖 4. 火工衝擊模擬器

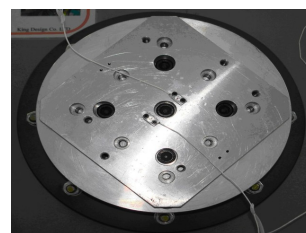


圖 5. 加速儀固定方式

構；d. 砲座；e. 氣壓電磁閥；f. 壓力錶及緊急開關；g. 訊號控制盒；h. 砲管；i. 進彈裝置；j. 靶體；k. 觀景窗；l. 移動滾輪組。

- (8) 砲彈：本試驗所使用的砲彈有兩種材質，鉛彈與鐵弗龍彈，尺寸分別為：a. 鉛彈：外徑 4.92 *cm*、重量 730 g；b. 錐形鐵弗龍彈：外徑 4.93 *cm*、重量 274 g；c. 另一種錐形鐵弗龍彈為外徑 4.98 *cm*、重量 294 g；d. 平面鐵弗龍彈：外徑 4.98 *cm*、重量 278 g。
- (9) 分析軟體：DeveTrans V1.0 Demo，凱貿科技公司，可將加速度的時域信號轉換為衝擊響應頻譜。

#### 3.2 實驗方法

加速儀安裝位置為靶體撞擊面對向的轉接面板上，將加速儀塗上薄薄一層 S-1000 矽油，以扭力扳手施加 8 *lbf-in* 鎖於轉接面板，如圖 5 所示。資料擷取系統進入備便後，將砲彈放置於進彈裝置處，開啟氮氣注入蓄壓機構至預定壓力值，啟動氣體電磁閥，按下擊發鈕，電磁閥瞬間釋放，蓄壓筒內的氣體壓力推動砲彈於砲管內運動，出砲口後撞擊靶板，確認數據是否擷取成功，存檔。

### 四、結果與討論

真實的火工衝擊為複雜且變化因素大，量測失敗的風險也就相對地提高，為了避免這樣的狀況，藉由火工衝擊模擬試驗機暫態結構響應試驗，可以調整適當參數來模擬火工衝擊環境，且能夠重複產生相同的波形，試驗再現性高。利用不同材質、型態的砲彈，採氣體推動方式，撞擊靶板後產生暫態結構響應，分析後得到的衝擊響應頻譜與真實火工品數據比對，觀察模擬狀況，其中加速儀安裝於靶體背

面的位置如圖 6，各項試驗條件整理於表 2。

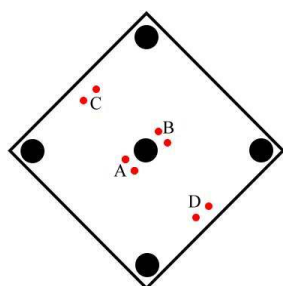


圖 6. 加速儀安裝於靶體背面位置圖

表 2 火工衝擊模擬試驗參數整理表

試驗編號	條件描述					輸出氣體壓力 ( $kg/cm^2$ )
	加速儀		砲彈			
	序號	位置	種類	外徑 (cm)	重量 (g)	
0313-2	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	B				
0313-3	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	B				
0313-4	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	C				
0313-5	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	C				
0313-6	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	C				
0313-7	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	B				
0313-9	S1	D	鉛	4.92	730	20
	S2	B				
0314-1	S1	A	鉛	4.92	730	15
	S2	D				
0314-2	S1	A	鉛	4.92	730	15
	S2	D				
0314-3	S1	A	鉛	4.92	730	15
	S2	D				
0314-4	S1	A	鉛	4.92	730	15
	S2	D				
0314-5	S1	A	鉛	4.92	730	25
	S2	D				
0314-6	S1	A	鉛	4.92	730	25
	S2	D				
0314-7	S1	A	鉛	4.92	730	25
	S2	D				
0314-8	S1	A	鉛	4.92	730	25
	S2	D				
0314-9	S1	A	鉛	4.92	730	20
	S2	D				
0314-10	S1	A	鉛	4.92	730	19
	S2	D				
0315-1	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	10
	S2	D				
0315-2	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	10
	S2	D				
0315-3	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	10
	S2	D				
0315-4	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	10
	S2	D				
0315-5	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	10
	S2	D				
0315-6	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	10
	S2	D				
0315-7	S1	A	平面	4.98	294	15

0316-1	S2	D	鐵弗龍	4.98	278	10
	S1	A	錐形 鐵弗龍			
0316-2	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	10
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
0316-3	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	15
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-4	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	15
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-5	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	20
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-6	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	20
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-7	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	20
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-8	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	20
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-9	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	25
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-10	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	25
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-11	S1	A	平面 鐵弗龍	4.98	294	25
	S2	D	平面 鐵弗龍			
0316-12	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	15
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
0316-13	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	15
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
0316-14	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	15
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
0316-15	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	18
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
0316-16	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	20
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
0316-17	S1	A	錐形 鐵弗龍	4.98	278	20
	S2	D	錐形 鐵弗龍			
備註	1. 加速儀型號 7270A-200k，序號#20514（以 S1 表示）的轉換因子為 2215 $G/V$ ，#A82AF（以 S2 表示）為 1633 $G/V$ 。 2. 靶體結構的螺栓鬆動，鎖緊後再執行試驗編號 0313-6。 3. 試驗編號 0314-10 與 0316-15 因氮氣鋼瓶氣源不足，輸出氣體壓力應為 20 $kg/cm^2$ 。 4. 試驗編號 0316-17 的加速儀 7270A-200k #A82AF，訊號線被撞擊後的砲彈破片切斷，故只有#20514 的數據。					

#### 4.1 砲彈撞擊面積

砲彈材質為鐵弗龍，加工為外徑同為 4.98 cm，但一為完整平面、另一為錐形（斜角角度約為 4 度）如圖 7 所示，撞擊面積為平面鐵弗龍彈大於錐形鐵弗龍彈，輸出氣體壓力同為 10  $kg/cm^2$ ，加速儀安裝位置為 A，平面鐵弗龍彈組的試驗編號為 0315-1 至 0315-4，衝擊響應頻譜如圖 8；錐形鐵弗龍彈組的試驗編號為 0315-5、0315-6、0316-1 和 0316-2，衝擊響應頻譜如圖 9。觀察發現，錐形鐵弗龍彈的再現性優於平面鐵弗龍彈，且由低頻到高频都十分穩定的表現；而因為同為鐵弗龍材質，所以撞擊產生的結構響應相同，所以兩種砲彈的曲線

趨勢相似。但平面鐵弗龍彈產生的加速度值大於錐形鐵弗龍彈，如圖 10。

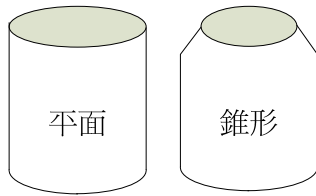
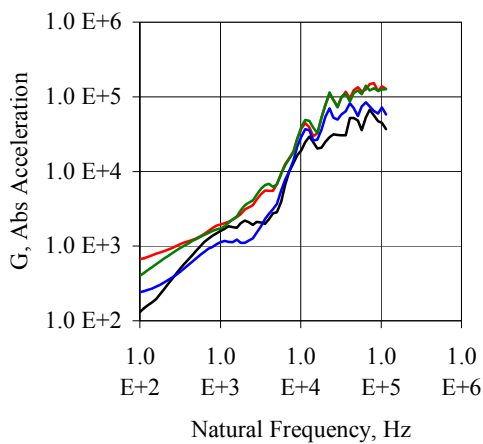
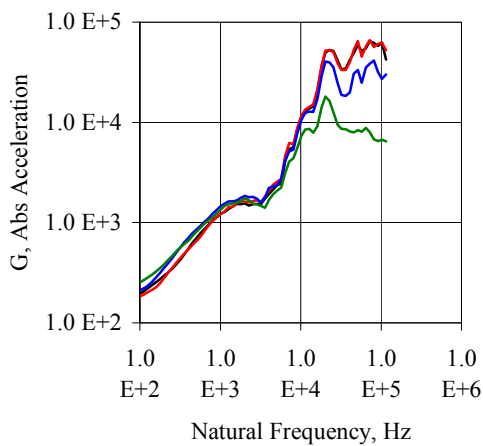


圖 7. 比較平面與錐形鐵弗龍彈的外型圖



— 00 : 0315-01    — 01 : 0315-02  
 — 02 : 0315-3    — 03 : 0315-4

圖 8. 平面鐵弗龍彈組(10 kg/cm<sup>2</sup>)的衝擊響應頻譜圖



— 00 : 0315-5    — 01 : 0315-6  
 — 02 : 0316-1    — 03 : 0316-2

圖 9. 錐形鐵弗龍彈組(10 kg/cm<sup>2</sup>)的衝擊響應頻譜圖

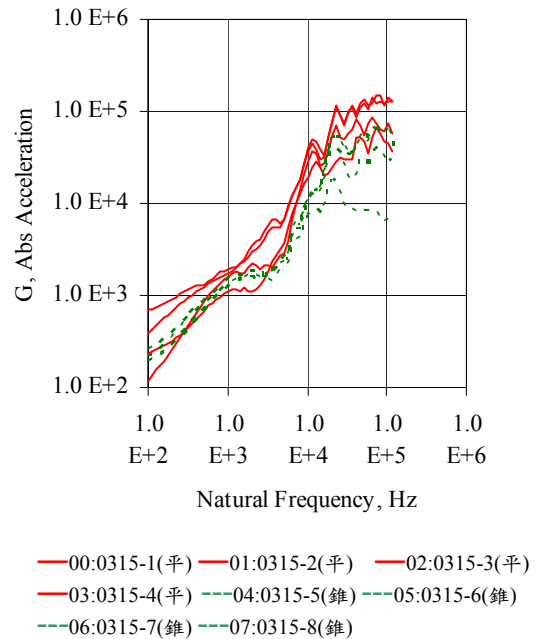


圖 10. 平面及錐形鐵弗龍彈組(10 kg/cm<sup>2</sup>)的衝擊響應頻譜比較

## 4.2 砲彈材質

砲彈材質分別為鐵弗龍(選擇再現性佳的錐形鐵弗龍)與鉛，輸出氣體壓力 15 kg/cm<sup>2</sup>，加速儀安裝於位置 A，鐵弗龍彈組試驗編號為 0316-12 至 0316-14，其衝擊響應頻譜如圖 11；鉛彈組試驗編號為 0314-1 至 0314-4，衝擊響應頻譜如圖 12。因為材質不同的砲彈在撞擊靶板後產生的結構響應頻率不同，所以曲線趨勢自然不同如圖 13，鉛彈的再現性相當好且穩定。

## 4.3 氣體輸出壓力

當砲彈材質為鉛，輸出氣體壓力分別為 15、20 和 25 kg/cm<sup>2</sup>，加速儀安裝於位置 A、15 kg/cm<sup>2</sup> 組的試驗編號為 0314-1 至 0314-4，衝擊響應頻譜如圖 14；20 kg/cm<sup>2</sup> 組的試驗編號為 0314-9 及 0314-10，衝擊響應頻譜如圖 15；25 kg/cm<sup>2</sup> 組的試驗編號為 0314-5 至 0314-8，衝擊響應頻譜如圖 16，上述鉛彈在不同的輸出氣體壓力的衝擊響應頻譜比較如圖 17，鉛彈的曲線表現其輸出的氣體壓力越大，加速度值就越大，故曲線由上至下分佈為 25、20，然後是 15 kg/cm<sup>2</sup>。

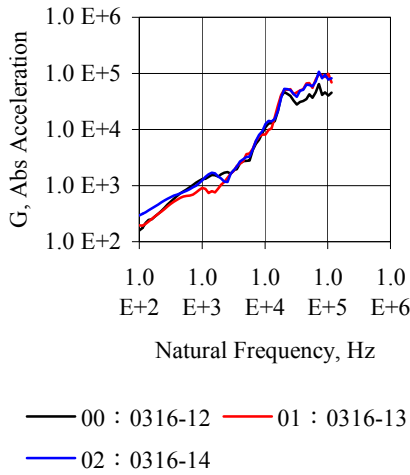


圖 11. 鐵弗龍彈組(錐形、 $15 \text{ kg/cm}^2$ )的衝擊響應頻譜圖

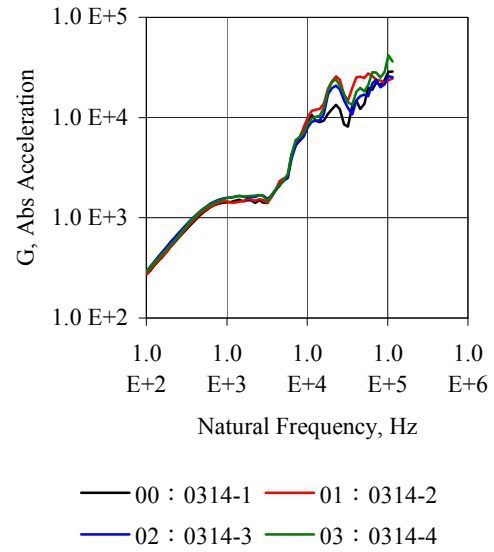


圖 14. 鉛彈組( $15 \text{ kg/cm}^2$ )的衝擊響應頻譜圖

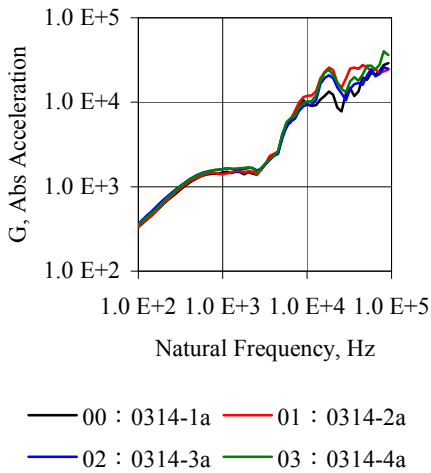


圖 12. 鉛彈組( $15 \text{ kg/cm}^2$ )的衝擊響應頻譜圖

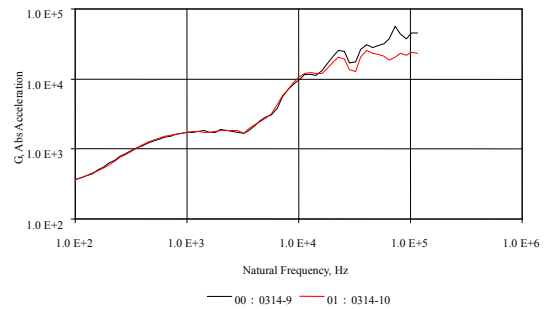


圖 15. 鉛彈組( $20 \text{ kg/cm}^2$ )的衝擊響應頻譜圖

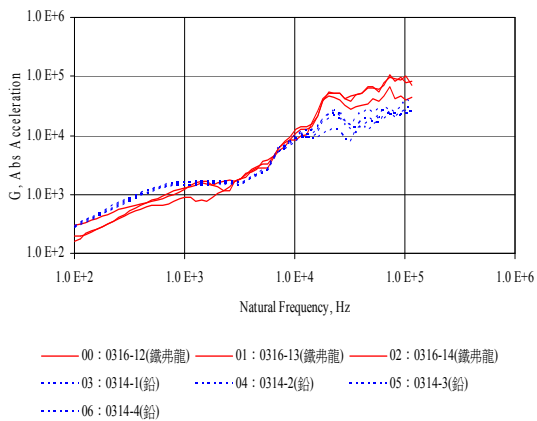


圖 13. 鐵弗龍及鉛彈組( $15 \text{ kg/cm}^2$ )的衝擊響應頻譜比較

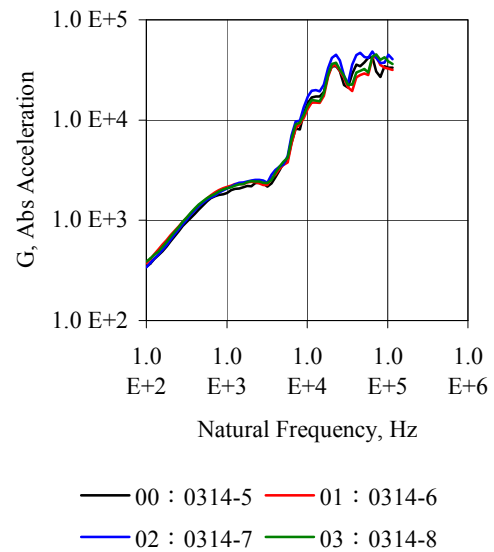


圖 16. 鉛彈組( $25 \text{ kg/cm}^2$ )的衝擊響應頻譜圖



當砲彈為平面鐵弗龍時，加速儀安裝於位置 A，輸出氣體壓力分別為 10、15、20 和 25  $kg/cm^2$ ，分別進行多組試驗後，可得平面鐵弗龍彈在不同輸出氣體壓力的衝擊響應頻譜比較如圖 18，平面鐵弗龍彈在高頻段(約 10k Hz 後)曲線走向趨於一致，且即使輸出氣體壓力增加，但加速度峰值卻沒有隨之增加，反而保持一定。

當砲彈為錐形鐵弗龍時，加速儀安裝於位置 A，輸出氣體壓力分別為 10、15 和 20  $kg/cm^2$ ，分別進行多組試驗後，可得錐形鐵弗龍彈在不同輸出氣體壓力的衝擊響應頻譜比較如圖 19，錐形鐵弗龍彈的曲線由低頻至高頻段幾乎都相當吻合，和平面鐵弗龍彈一樣當輸出壓力增加，加速度值並沒有隨著增加，研判在高頻段的表現，與鐵弗龍材質的特性有關，而低頻段可能與唯一的變因，撞擊面積有關。

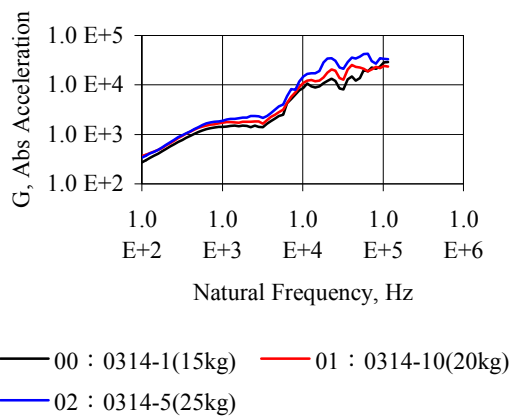


圖 17. 鉛彈在不同輸出氣體壓力的衝擊響應頻譜比較

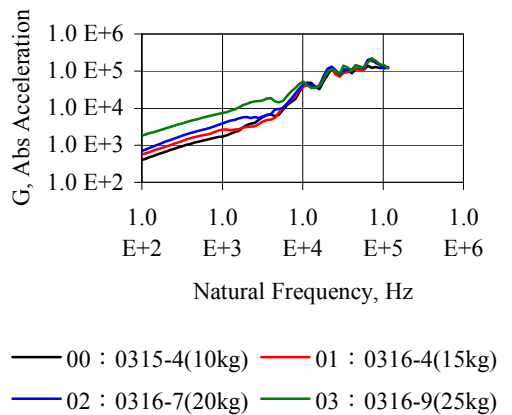


圖 18. 平面鐵弗龍彈在不同輸出氣體壓力的衝擊響應頻譜比較

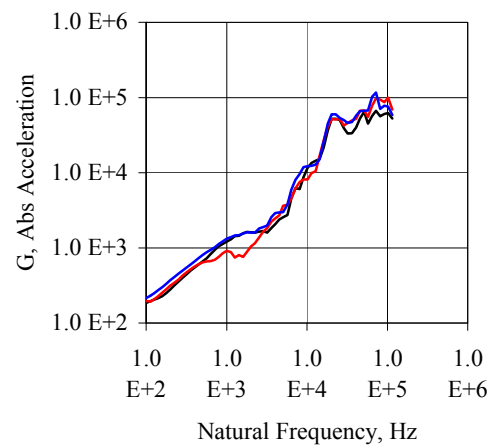


圖 19. 錐形鐵弗龍彈在不同輸出氣體壓力的衝擊響應頻譜比較

#### 4.4 比對試驗

進行火工衝擊模擬試驗機試驗時，在加速度時間歷程圖(如圖 20)中發現一量測上的問題：零點飄移(Zero Shift)，此種問題會使得對加速度進行積分後得到的速度或再積分的位移產生極大的誤差。推測可能由於，瞬間高頻應力波的輸入常導致加速儀內部感應元件的石英晶體結構變形造成電荷過飽和狀態甚至故障損壞，就會造成零點飄移(如圖 21)，另外搭配加速儀使用的放大器發生過飽和，亦會造成零點飄移[13]；一般來說，壓電阻式加速儀發生上述情形的機率較壓電式加速儀來的小，為避免再發生零點飄移情形，我們改選用含有機械濾波功能的加速儀，具有機械濾波的功能可以保護在高頻應力波作用下的加速儀，以免加速儀內部元件因過度運動而損壞[14]。我們選用的內建機械濾波功能加速儀為 Endevco 7255A-01(如圖 22[15])。利用火工衝擊模擬試驗機驗證原本使用的 7270A 系列加速儀，以及內建機械濾波性能加速儀 7255A 系列的量測情形，分別輸出氣體壓力 4、6、8 和 10  $kg/cm^2$ ，觀察是否由改變應力波的強度配合使用的兩種加速儀，獲得的時間歷程數據予以積分求得速度與位移，強度越小越可能符合文獻中提及的歸零。

真實火工品參考標準為引燃器結合 10 立方公分定容壓力測試罐量測獲得的衝擊響應

頻譜如圖 23 中試驗編號 0212-5 為參考標準，引燃器壓力在 1400 *psi* 至 2000 *psi*；以火工衝擊模擬試驗機進行模擬比對，結果發現砲彈材質為鉛彈、輸出氣體壓力為 6  $kg/cm^2$ ，其衝擊響應頻譜曲線趨勢最為接近參考標準如圖 24 所示。另一項真實火工品參考標準為某測試件進行實境試驗時將加速儀裝置於電子元件旁，結果以平面鐵弗龍彈、氣體輸出壓力 25  $kg/cm^2$ ，其衝擊響應頻譜最接近參考標準，如圖 25。故我們可以藉著調整試驗參數，如砲彈材質、輸出氣體壓力等，逐步測試符合參考標準的需求。

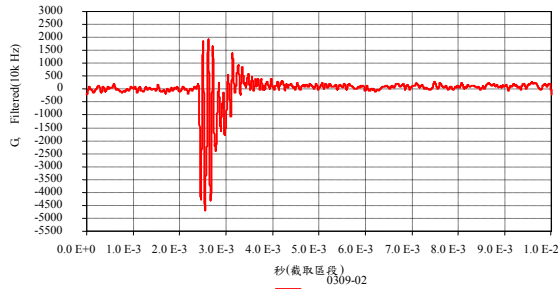


圖 20. 壓電阻式加速儀發生過飽和造成的零點飄移時域圖

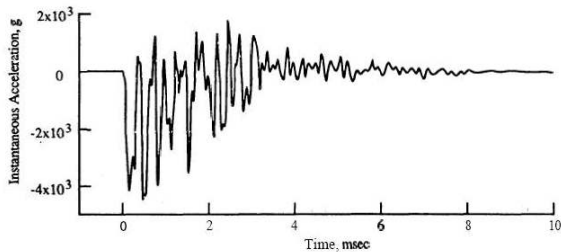


圖 21. 壓電式加速儀發生過飽和造成的零點飄移時域圖

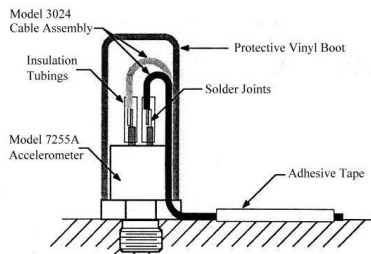
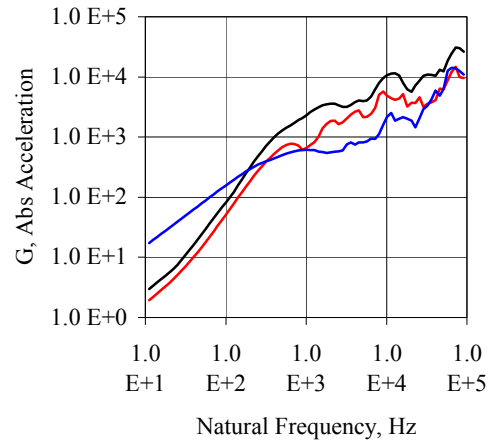
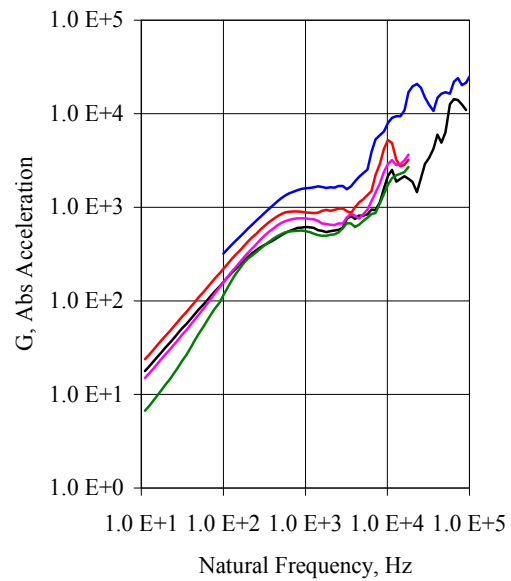


圖 22. Endevco 7255A-01 加速儀裝置示意圖



— 00 : 0212-3 — 01 : 0212-4  
— 02 : 0212-5

圖 23. 小鋁塊轉接承座方式安裝的衝擊響應頻譜圖



—00：引燃器參考標準—01：鉛彈模擬,8kg —02：鉛彈模擬,15kg —03：鉛彈模擬,4kg —04：鉛彈模擬,6kg

圖 24. 火工衝擊模擬器模擬的衝擊響應頻譜圖 (引燃器)

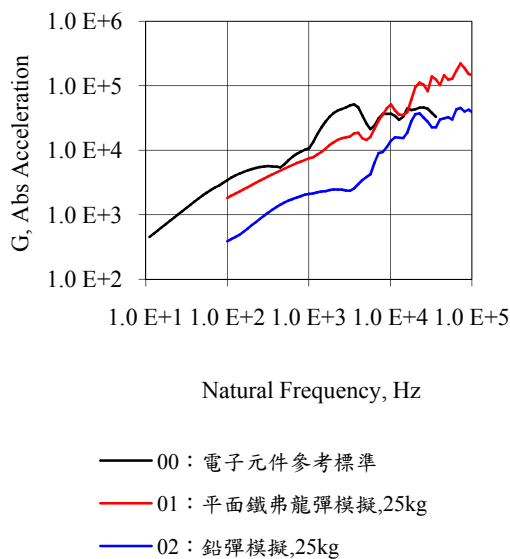


圖 25. 火工衝擊模擬器模擬的衝擊響應頻譜圖  
(電子元件)

## 五、結 論

本文成功藉由火工衝擊模擬器模擬出近似於真實火工品的衝擊響應頻譜。目前的引燃器與電子元件兩種真實火工品參考標準，都可以在控制砲彈材質、類型與輸出氣體壓力的狀況下，模擬出非常近似的暫態結構響應之衝擊響應頻譜圖。

## 參考文獻

- [1] MIL-STD-810F, p. 517-4, 2000.
- [2] MIL-STD-810F, p. 517-1, 2000.
- [3] Irvine, T., "An Introduction to the Shock Response Spectrum," p. 1, 2002.
- [4] 張建華, "航天產品的爆炸衝擊環境技術綜述", 導彈與航天運載技術, 2005 年第 3 期, 第 33 頁, 2005。
- [5] Barber, W. A., Finite Element Analysis of the Pyrotechnic Shock Test, Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Alabama, Huntsville, p. 7, 2005.
- [6] 趙玉剛, 衝擊響應分析方法及其應用, 碩士論文, 浙江大學機械與能源工程學院, 浙江, 第 10 頁, 2004。
- [7] Irvine, T., "An introduction to the shock response spectrum," p. 6, 2002.
- [8] MIL-STD-810F, pp. 517-2-3, 2000.
- [9] Himmelblau, H., Piersol, A. G., Wise, J. H., and Grundvig, M. R., IES Recommended Practice 012.1, Institute of Environmental Sciences, Northwest, pp. 262-263.
- [10] Hughes, W. O. and McNeils, A. M., "Statistical Analysis of A Large Sample Size Pyroshock Test Data Set," NASA/TM-1998-206621, pp. 5-6, 1998.
- [11] Irvine, T., "An Introduction to the Shock Response Spectrum," p. 4, pp. 7-8, 2002.
- [12] 盧來潔、馬愛軍、馮雪梅, "衝擊響應譜試驗規範述評", 振動與衝擊, 第廿一卷第 2 期, 第 18-20 頁, 2002。
- [13] Himmelblau, H., Piersol, A. G., Wise, J. H., and Grundvig, M. R., IES Recommended Practice 012.1, Institute of Environmental Sciences, Northwest, p. 262.
- [14] 廖建義, 動態結構試驗與環境分析技術研究, 中山科學研究院, 桃園, 第 67 頁, 2002。
- [15] Endevco Tech. Data A541, "Installation Instruction for Model 7255A Shock Accelerometer," p. 0692.

