

應用於高加速壽命的電磁鎚振動試驗技術

吳鴻材¹ 王俊傑¹ 李昆達² 施俊名² 林中雄²
¹工研院 機械所 ²金頓科技(股)公司

E-mail: rich.lin@kdi.tw

摘要

振動試驗做為高加速壽命試驗 (highly accelerated life test, HALT) 最有效的手段之一，主要是使產品經歷一連串可控制的高強度振動測試，希望能以較短的時間引發潛在的問題，以供產品的改良設計。目前市面上常見的振動試驗機，多數使用氣壓鎚來作為激振來源，然而氣壓鎚所能產生的振動訊號有著強度不一的問題，且往復頻率及強度會隨著輸入壓力的增加而同步提高。與氣壓鎚相比，電磁鎚擁有振動訊號再現性高、頻率及強度可控性高等優點。本文除介紹此兩種不同技術外，並會從時域及頻域上加以分析，以數據佐證電磁鎚之優點。

Vibration testing is one of the most effective methods to implement highly accelerated life test (HALT), as it has the advantage of triggering the potential failure modes of the products in a short time period. Most of the existing vibration tester utilizes pneumatically powered hammers as the exciting source of the test platform. However, pneumatic hammers were found to have magnitude variations under a series of continuous impacts. Moreover, both the impact frequencies and forces increase with the raise of the supplied air pressure. Conversely, the newly developed electro-dynamic hammer (ED hammer) can not only offer high vibration reproducibility, but also capable of controlling the impact frequencies and forces individually. This study compares the features of both pneumatic hammer and ED hammer through time-domain and frequency-domain analysis, and validates the ED hammer by the analysis results.

1. 前言

許多電子及各式工業產品，在其運輸及使用過程中，常易受到振動、溫溼度改變、不當操作等環境應力影響而劣化。為觀察及預測產品在遭受各種程度之環境應力下，其基本功能、結構等是否有損壞情形，以做為未來改良的依據，可靠度測試 (reliability test) 現今已是產品設計與生產的標準流程之一。所謂的可靠度，其定義是產品在規定的條件下和規定的時間內完成規定功能的機率。因此，產品可靠度的評估與改善，對製造商及使用者來說都是至關重要。而為能快速掌握測試結果，縮短產品自開發至上市之時程以因應市場需求的快速變化，目前最常被採用的可靠度測試方法有高加速壽命試驗 (highly accelerated life test, HALT)、高加速應力篩選 (highly accelerated stress screening, HASS) 等技術⁰。其中高加速壽命試驗的宗旨是在環境或時間上，應用較嚴苛的條件來加強產品的劣化，進而以較短的時間觸發產品失效，藉此推定產品在正常使用條件下的壽命及可靠度變化。與傳統的可靠度測試方法相比，高加速壽命試驗之整體流程通常可在數天甚至數小時內即可完成。

一般而言，製造商若能在設計階段即發現產品未來可能出現的缺失，則進行修正所需的成本會較少；反之，若在量產後才發現並進行缺陷修正，其成本相對較高，如表 1 所示。因此，高加速壽命試驗通常在新產品處於開發階段時即會開始使用，目的在於找出設計及製程中的脆弱環節，並推估產品的操作及破壞極限，以做為後續研發的參考依據。此外，生產流程後期常用的高加速應力篩選過程亦需依據此產品操作極限來設計，以期能有效剔除因工藝不良、零件選用不當

與製程良率等問題所產生的瑕疵品，卻又不損及產品之正常使用壽命。綜上所述，對產業而言，高加速壽命試驗可帶來如下許多應用效益：快速找出產品製程瑕疵、加速設計及製程成熟、加速產品上市、延長產品平均故障間隔(mean time between failures, MTBF)、減少保固成本等。

表 1 於產品各階段進行缺失修正之成本節省比例[1]

成本節省比例	產品階段
--------	------

19,712	設計時
3,898	原料採購前
1,875	製造前
41	出貨前
1	客戶端使用時

高加速壽命試驗通常會使用如振動/衝擊應力步階、快速冷熱循環、複合式環境應力(振動與冷熱)等不同測試應力種類，並以漸進提升方式將應力施加於產品試件。而在各式應力中，又以高

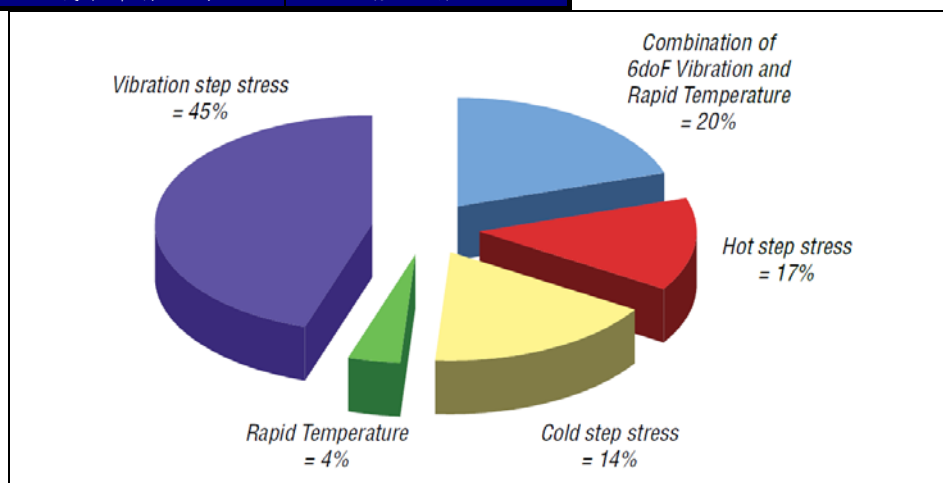


圖 1
各種測試應力下產品缺陷被觸發的比例[2]

強度振動之測試效果最為顯著，如圖 1 由國外高加速壽命試驗設備商 Envirotronics [2] 所統計的結果顯示，使用振動應力共可觸發 65% 的產品缺陷。此外，由於在執行高強度的振動試驗時，常需透過外在的衝擊鉗產生連續衝擊以做為振動試驗機的激振來源，因此本文將以振動試驗為出發點，介紹並比較兩種用於高加速壽命試驗、但採用不同衝擊鉗的振動試驗機：基於氣壓鉗(pneumatic hammer)的氣鉗式(Air HALT)及基於電磁鉗(electro-dynamic hammer)的電磁式高加速連續振動試驗機(ED-HALT)。於本文接下來的章節中，將依序介紹振動試驗的程序與條件，接著敘述相關標準及應用現況，最後則會針對氣壓鉗及電磁鉗之作動原理及特性做綜合比較。

2. 基於振動應力的高加速壽命試驗

可靠度測試的結果除會影響到產品保固條件的訂定，亦可做為產品後續改善設計的依據，例如可透過導角降低應力集中問題，或於產品上加入橡膠材料以增加耐振能力等。目前國內外皆已有針對振動/衝擊試驗而訂立的標準，提供製造商/振動試驗設備商在檢驗流程上的參考，或明列出產品在販售前需符合的規範。

2.1 振動試驗程序及條件簡介

振動試驗的目的是在實驗室中對產品試件做一連串可控制的高強度振動模擬，並針對找出的不良品執行失效分析，藉以改善產品的設計以提高可靠度。一般典型的振動試驗機之結構如圖 2 所示，主要構造包含振動平台及其底部的衝擊鉗，其中振動平台可依需求設計為圓形或方形，而衝擊鉗之數量端

視台面大小、負載重量、所需振動強度而定。在現行設計上，每根衝擊錘與平台之夾角常設定為 45 度，而衝擊錘之間可互為正交或有不同角度。另外，為降低機台支架對系統的影響，平台與支架間會由彈簧隔離，使平台可自由震盪。於試驗過程中，振動平台在受

到衝擊錘之衝擊波的作用後，會將動能經由夾治具間接傳至產品試件上，激發試件的應變變化。為了使振動能量盡可能的傳遞到試件上，夾治具必須使用高剛性材料及構造，通常會選用鋁材、硬質塑膠、硬質木材等。而在執行試驗前，試件的數量

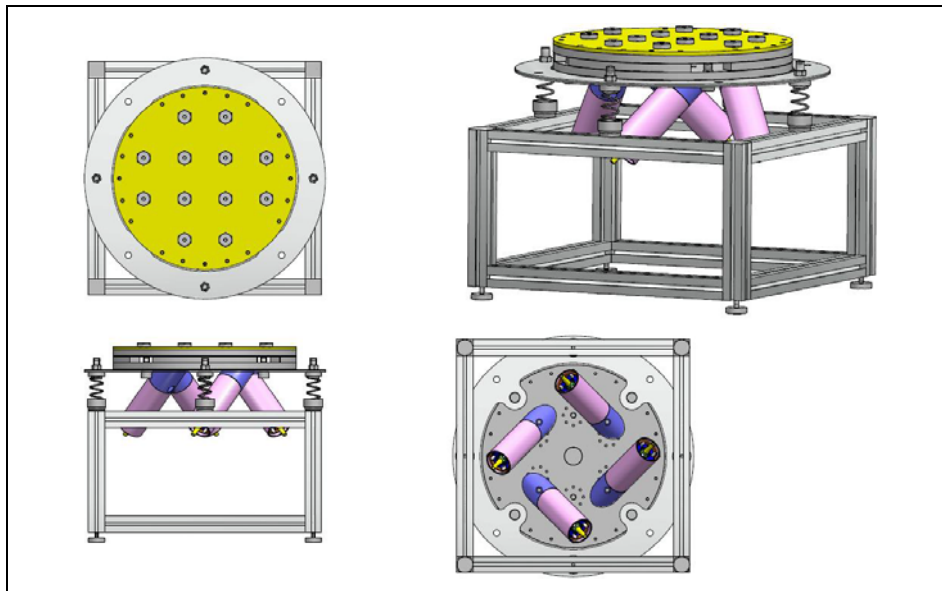


圖 2
常見振動試驗機之
3D 結構示意圖

表 2 試件數量與試驗信賴水準之關係

試件數量	1	3	5	10	15	20	25	30
試驗信賴水準(%)	50.0	79.3	87.0	93.3	95.4	96.5	97.2	97.7

資料來源：金頓科技[3]

及取樣方式也是需要考慮的重點：如表 2 所示，試件數量過少會導致試驗信賴水準偏低；另外，試件的取樣需平均落在不同產線及時間上，以避免取樣技術的誤差導致試驗結果失去參考價值。

在試驗條件方面，依施加於試件的振動型態，一般振動試驗機所提供的測試功能可概分成正弦振動與隨機振動測試。正弦振動主要是施加正弦波振動於試件，常用於確認產品經過簡諧運動激振後是否發生損壞，其試驗嚴苛度以加速度值 g 表示；而依試驗目的不同，正弦振動可進一步細分成正弦掃描、共振尋找、共振駐留等試驗[3]。至於隨機振動，主要是施加一特定頻域範圍、特定強度之雜訊形態振動；由於其可模擬實際遭遇的環境條件，因此也較常被採用。隨機

振動的試驗嚴苛度主要有三種表示方式，包含衝擊響應譜(shock response spectrum, SRS)、疲勞破壞譜(fatigue damage spectrum, FDS)、功率頻譜密度(power spectral density, PSD)，其物理意義則分別在於不同系統受到同一個衝擊應力激勵下的結果、不同頻率下的疲勞失效強度、以及各頻率下的能量強度值，其中又以功率頻譜密度最受重視。

2.2 振動試驗標準

振動試驗做為產品可靠度測試最重要也最有效的手段之一，其發展是源自於二次世界大戰期間，許多武器設備常在送抵戰場後才發現早已於運輸過程中損壞，此後政府及業界才注意到振動

表 3 主要振動試驗標準列表

協會/規格名稱	主題類別	標準編號範例
國際電工委員會 (IEC)	電子元件	IEC-60068
	軌道列車設備	IEC-61373
國際標準化組織 (ISO)	車輛電子設備	ISO-DIS16750-3: 2001
美國軍用規格 (MIL)	軍事設備	MIL-STD-810G
聯合電子裝置工程協會 (JEDEC)	電子半導體產品	JESD22-B103B
經濟部標準檢驗局 (CNS)	運輸載具設備	CNS 3629 C6016
	工具機	CNS 4565 B7102

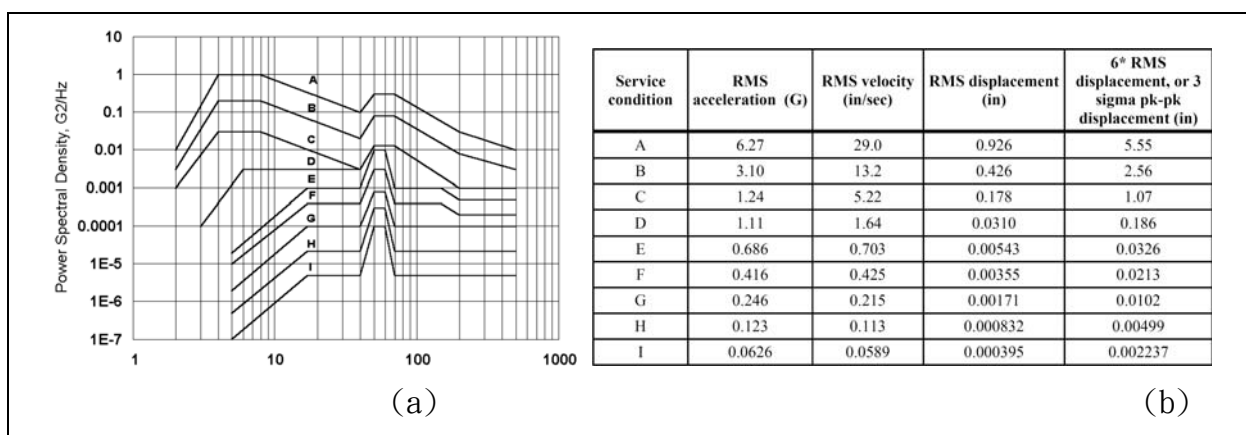


圖 3 (a)JESD22-B103B 規範；(b)規範設定值[4]

試驗的重要性，也逐步建立起相關的測試標準。而由於不同產品於失效後所引發的問題輕重不一，如航太零組件產品與消費性電子產品相比，前者之失效帶來的將是對生命財產的威脅，因此目前各製造業大國或產業委員會，皆已針對不同產品類別分別訂定不同的振動試驗標準，如表 3 所示。一般來說，各標準均會闡述對適用範圍、試驗條件、驗收程序等項目的規範。以聯合電子裝置工程協會(JEDEC)之 JESD22-B103B 標準[4]為例，其主要是針對電子零組件因各種因素的振動/衝擊，使得產品可能產生反覆應力所帶來的破壞而制定的振動可靠度測試。圖 3 是該規範中針對振動試驗所提供共九種不同模擬狀況的功率頻譜密度輸入設定，其中 D~I 是其建議電子零組件在使用時最有可能遭遇的狀況。對製造商而言，在執行振動試驗前

除需確認其產品應遵循的標準，亦須了解振動試驗之規格及流程，方能正確的選用振動試驗機或服務提供者，進而快速並準確的完成測試。

2.3 應用現況

振動試驗在國內外業界已行之有年，且幾乎各式製造業之產品皆能從中獲益。以國際上振動試驗機的領導廠商 Qualmark [5]為例，其服務領域及成功案例已遍及航空電子業、消費性電子產業、國防產業等，合作客戶亦不乏 Honeywell 及 Samsung 等知名企業。至於國內之現況，雖有數間法人機構或民營之測試實驗室具有振動測試之服務，亦有電子公司本身配備有振動試驗機台，然而多數相關設備皆由 Qualmark、Envirotronics 等國外大廠進口，而這些廠商的主力機種幾

乎皆是由氣壓鉗所驅動。但由下一章節的說明可知，電磁鉗在使用上與氣壓鉗相較會有許多優勢。以自主研發的角度而言，近年來國內廠商已累積一定的研發能量，並已在電磁鉗之開發上取得初步成果，目前僅需測試經驗及資料的累積以驗證及優化其整體測試流程。

3. 氣壓鉗與電磁鉗之作動原理及特性比較

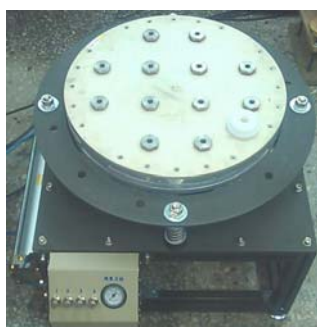
目前市面上用於高加速壽命試驗的振動試驗機，多數皆使用氣壓鉗來產生連續衝擊訊號，主因在於早期學界及業界均認為氣壓鉗所能提供的連續衝擊，其部份特性與隨機振動雷同，可模擬真實的環境應力[6]。然而，氣壓鉗雖有能在短時間內連續產生高強度振動之優點，但其頻譜響應之分佈並不均勻，且振動強度的控制較為困難[7]；相較之下，電磁鉗之頻譜響應分佈較均勻，且在振動之強度及時間間隔上可控性高，能準確、準時的產生預期的振動力量，便於觸發產品試件的失效模式。

3.1 氣壓鉗作動原理簡介

衝擊鉗是振動試驗機中最關鍵的部份，也是近年來學界及業界的研發重點[8]。現今常見由氣壓鉗驅動的振動試驗機如圖 4 所示，另外通常會在機台旁安置一個穩壓缸，並在

氣壓鉗上安裝氣閥開關，以避免輸入氣壓鉗的壓力起伏太大。以下簡單說明氣壓鉗內部的作動原理：氣壓鉗主要由活塞及其前後兩端的氣室所組成，而由於氣室間有壓力差，此壓力差將對活塞產生推力，造成活塞往前移動，並撞及氣鉗前端之緩衝材料而產生衝擊波。另外，在活塞往前移動的過程中，前方氣室內的氣體將被壓縮，形成一個類彈簧阻尼系統，因而累積了將活塞回彈的力量；但也因為前方氣室的阻力，當活塞的衝量不夠時，會無法到達緩衝材料並產生衝擊，因此活塞後方之氣室壓力必須夠大，通常需大於 0.1 MPa，方能使活塞有足夠的能量來抵抗前方氣室的阻力。如圖 5 所示，當輸入壓力為 0.08 MPa 時，由於衝量不足以支持活塞撞擊緩衝材料，但會使活塞在氣壓鉗內部往復運動，因此會使整體輸出呈現一種低加速度值的振動狀態。

基於氣壓鉗的振動試驗機，其在作動的過程中僅靠輸入壓力來控制輸出衝擊之加速度均方根值(grms)大小，當輸入壓力變大，活塞往復撞擊的頻率及強度將同步提高，grms 也將隨之改變；然而因氣體的可壓縮性相當高，因此壓力通常較難控制，也導致衝擊力道的不穩定。如圖 6 之範例所示，輸入壓力為 0.1 MPa 或 0.3 MPa 時，後者之輸出衝擊強度雖明顯較高，但兩者皆無法維持固定的衝擊強度；另外，兩者之衝擊過程皆伴隨著振動訊號，對試件是否產生額外影響尚需評估。



(a)



(b)

圖 4

(a)由氣壓鉗所驅動的振動試驗機；
(b)氣壓鉗之實際安置圖；
(c)氣壓鉗結構圖[3]

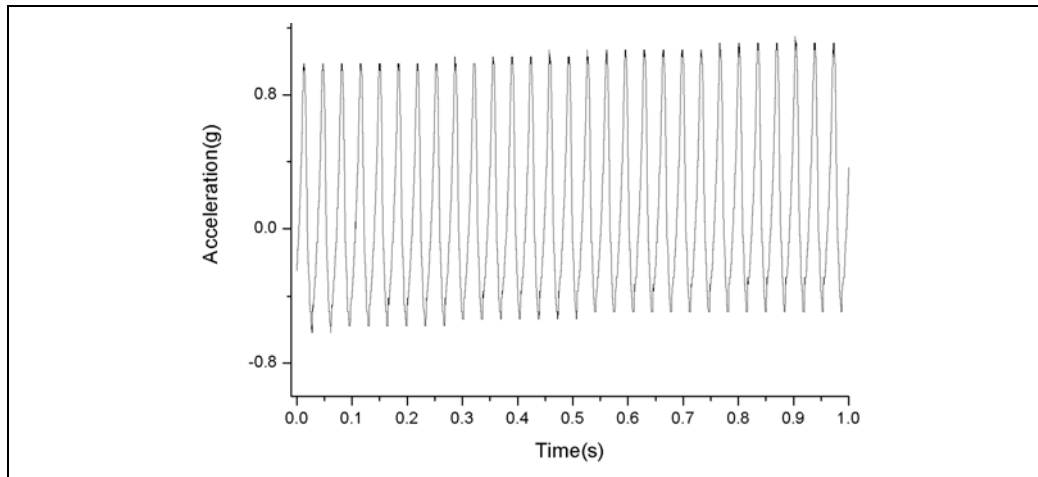
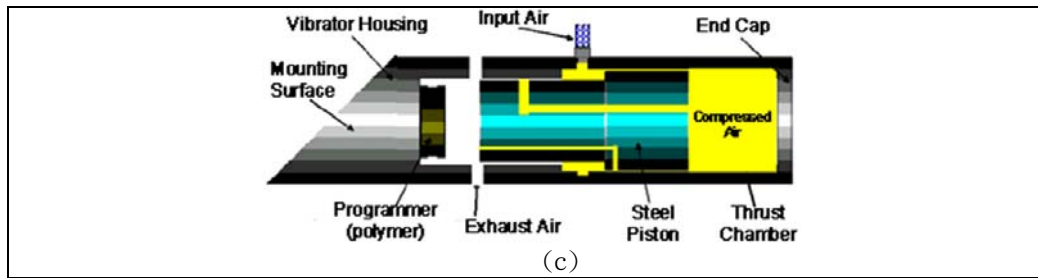


圖 5
輸入壓力為
0.08 MPa 時的
時域訊號[3]

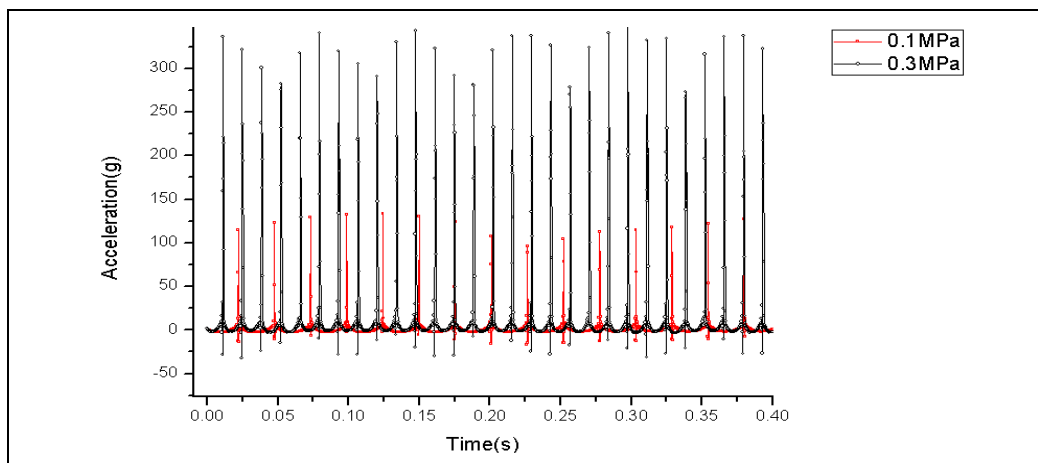


圖 6
氣壓鉗於不同
輸入壓力下的
衝擊強度比較
[3]

3.2 電磁鉗作動原理簡介

由電磁鉗所驅動的振動試驗機，其設置與系統作動流程大致與使用氣壓鉗時相同，僅衝擊產生方式有異，如圖 7 所示。相較於氣壓鉗透過高壓氣體驅動活塞，電磁鉗是利用電磁線圈來吸引活塞移動；在尚未作動前，活塞始終置於電磁鉗之底部，而當線圈通入直流電產生磁力後，活塞將被吸引，產生向前移動的動量。根據電流磁效應及牛頓運動定律可知，線圈產生的磁力會使活塞產生加速運動：

$$V_{bf} = V_i + a_{ED} \cdot t,$$

其中 V_i 及 V_{bf} 分別為活塞於初始位置及撞擊前的速度， a_{ED} 為活塞所受的加速度， dt 為磁力作用於活塞的時間；再搭配衝量方程式

$$J_{ED} = m_{ED} \times (V_{bf} - V_i)$$

其中 J_{ED} 與 m_{ED} 分別是活塞之衝量與質量。

由以上兩式可知，線圈的通電時間越長，活塞的加速時間就越長，衝量也越大，因此

所產生的衝擊強度越強。電磁鎚之特性即是在於利用此線性的轉換關係，調整線圈的通電時間來準確控制衝擊力量的大小。如圖 8 所示，在同樣通電時間(亦即同樣能量)下的連續衝擊，其強度是非常一致的。另外，藉著控制通電時間的間隔，電磁鎚也能控制衝

擊之間的時間，也就是能控制活塞的往復頻率，如圖 8(b)所示。值得注意的是，電磁鎚內活塞是靠磁力的吸引而往前運動，過程中並會推擠前方的復歸彈簧(regression spring)，在撞擊

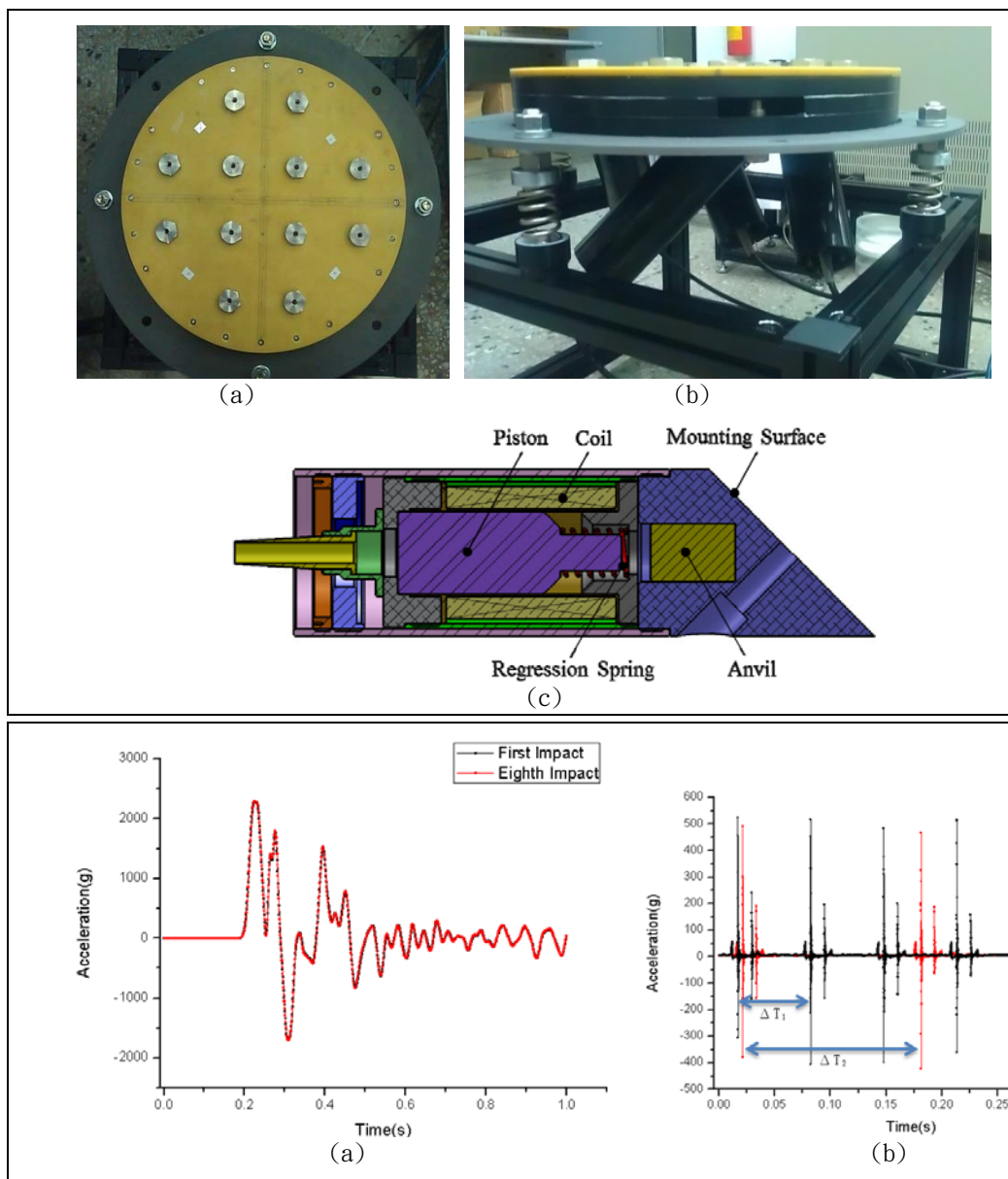


圖 7
(a)由電磁鎚所驅動的振動試驗機；
(b)電磁鎚之實際安置圖；
(c)電磁鎚結構圖[3]

圖 8 (a)電磁鎚於同樣能量下不同衝擊次序(第 1 與第 8 次)的強度比較；(b)電磁鎚於不同往復頻率下的連續衝擊訊號[3]

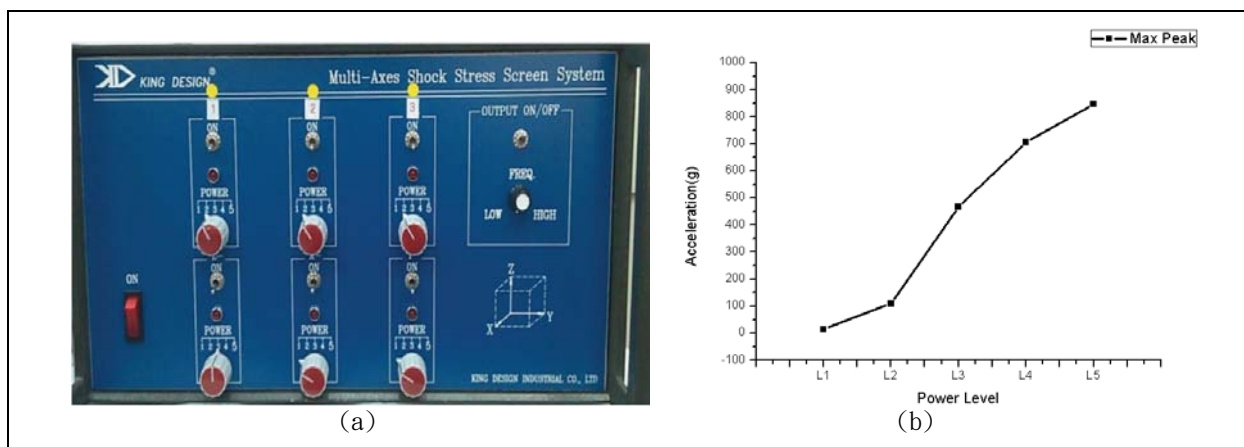


圖 9 (a)電磁鉗之控制器；(b)電磁鉗輸入與輸出強度關係圖[3]

緩衝材料後，會由復歸彈簧給與活塞往回運動的反力。但由於彈簧的回彈速度有限，因此活塞的往復頻率亦有限，通常不大於 20 Hz。然而因活塞大部分的移動參數都在控制之中，因此只要往復頻率不要設定的過高，電磁鉗所產生衝擊的力量與時序就能有效的被控制。圖 9(a)為一電磁鉗控制器之範例，其中紅色旋鈕部份用於控制衝擊力量，主要有五種力量大小可供選擇，如圖 9(b)所示，白色旋鈕則用於控制往復頻率。

3.3 氣壓鉗與電磁鉗之綜合比較

經由上述分析，已可初步歸納出氣壓鉗及電磁鉗之主要特性：

1. 電磁鉗內活塞往復撞擊的頻率及強度可分別控制，但對氣壓鉗而言往復撞擊頻率及強度會隨著輸入壓力而同時改變。
2. 氣壓鉗每次產生的衝擊強度不一，電磁鉗之衝擊則有較高的再現性 (reproducibility)。
3. 氣壓鉗之最大衝擊強度常受限於輸入壓力，電磁鉗則普遍可產生強度較高的衝擊。
4. 電磁鉗之往復頻率較低。
5. 氣壓鉗的衝擊過程會伴隨振動訊號。

由以上幾點可看出電磁鉗之可控性明顯優於氣壓鉗，有助於加速振動試驗的進行。然而，上述之分析皆是基於時域訊號，但振動試驗的相關標準也常會著重於頻域訊號的探討。因此，本節將進一步比較氣壓鉗及電磁鉗於頻譜上的表現。

如圖 10 所示，本文以兩台具有圓形振動台面、分別由氣壓鉗及電磁鉗驅動的振動試

驗機作為頻譜量測標的。在訊號擷取方面，每個台面會安裝 9 個 B&K 4371 加速規[9]，每個加速規僅會對應到 X、Y、Z 其中一個軸向，安裝位置如圖 10 所示，後端則連接 Endevco 電荷放大器[10]及 Synergy 訊號擷取系統[11]。完成擷取訊號後，本文選擇呈現各測試標準中最常使用的功率頻譜密度 (PSD)，結果則如圖 11 所示。圖中不同顏色的曲線代表不同加速規量測之結果。首先可發現在同樣設定、不同次量測下，電磁鉗所產生的功率頻譜密度一致性較高，證明電磁鉗之衝擊的確具有較高的再現性。進一步觀察頻譜分佈情形，可發現氣壓鉗之功率頻譜密度在頻譜上有上下震盪的情形，波峰與波谷之差異甚至可達 100 倍，而電磁鉗則呈現相對平穩的趨勢，因此更易於精準調控振動強度。此外，電磁鉗之功率頻譜密度分佈主要集中在低於 1000 Hz 的有效疲勞損害區域[3]，因此較氣壓鉗更適合用於觸發試件劣化及失效。

4. 結論

衝擊鉗是振動試驗機中最關鍵的部份，其設計方式可對機台本身及試驗流程之效率產生重大影響。市面上常用的氣壓鉗主要是透過高壓氣體來驅動內部的活塞進行往復運動，而電磁鉗則是利用電磁線圈來吸引活塞移動。藉由本文之分析可知，與氣壓鉗相比，電磁鉗擁有振動訊號再現性高、振動強度

高、振動頻率及強度可控性高、頻譜響應均勻且集中在有效疲勞損害區域等優

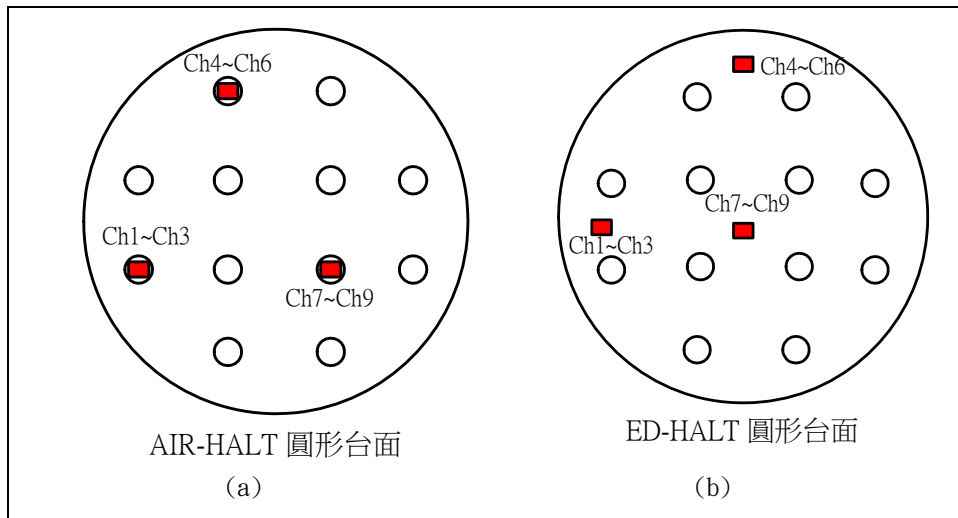


圖 10
加速規的安裝位置，
(a)由氣壓鏈驅動的振動台面；(b)由電磁鏈驅動的振動台面[3]

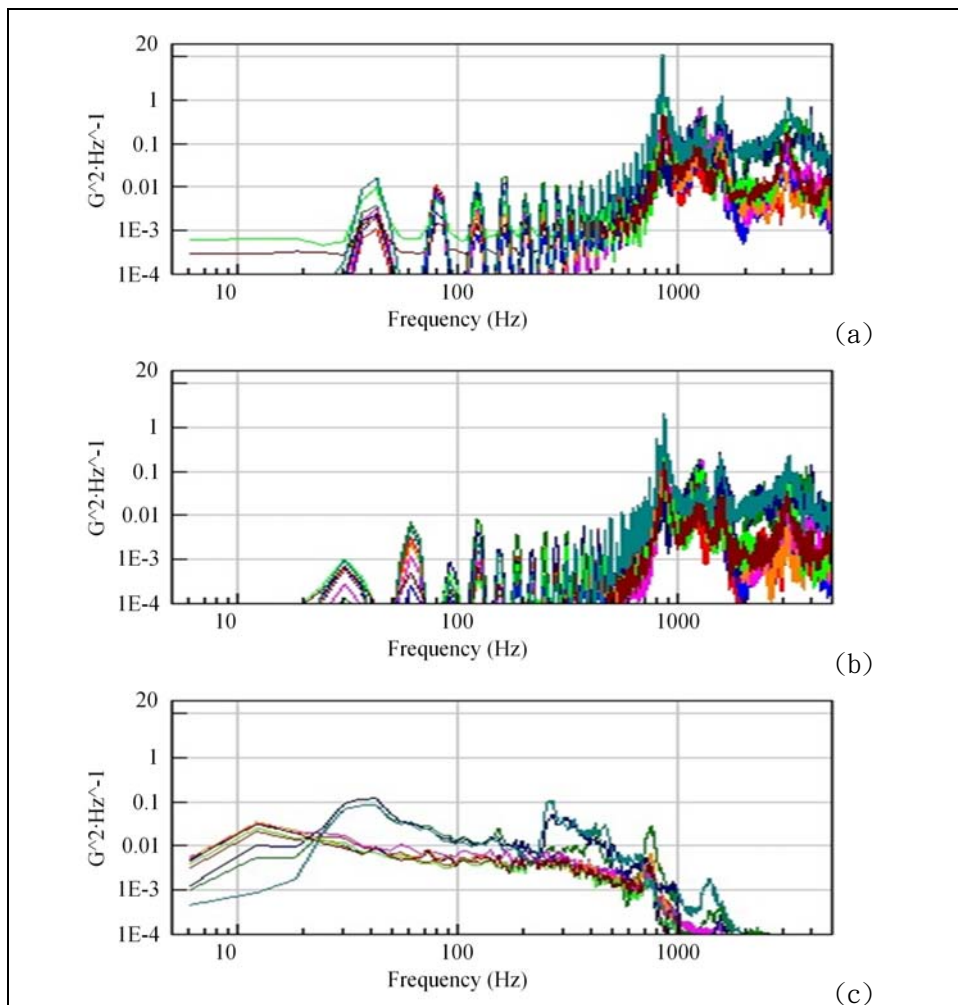
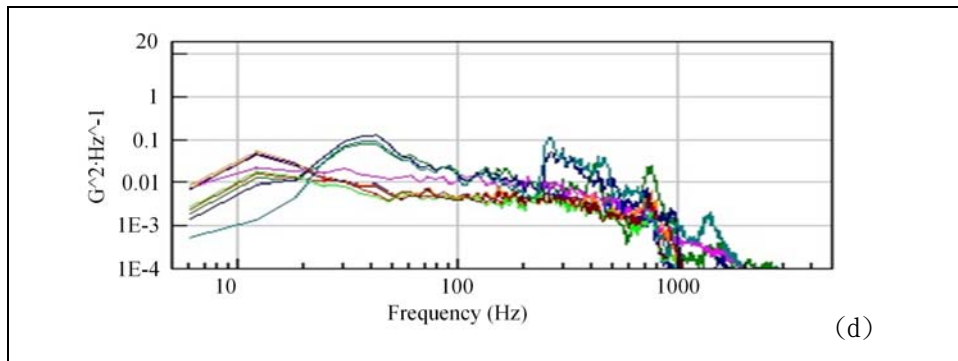


圖 11
於兩次量測下的功率頻譜密度，
(a)(b)氣壓鏈；
(c)(d)電磁鏈[3]



點。然而，本文目前僅針對振動試驗機之台面進行直接量測，後續在加入產品試件後實際執行振動試驗之結果尚需更深入的分析。至於產業應用方面，國外振動設備大廠於氣壓鎚研發的經驗及能力雖不容忽視，但國內亦已累積出電磁鎚之研發能量，若能與國內本就實力雄厚的製造業相結合，將可發揮相輔相成的效果。

誌謝

感謝工業技術研究院機械與系統研究所(計畫編號 F301AA7120)的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] G. K. Hobbs, *Accelerated Reliability Engineering : HALT and HASS*, John Wiley & Sons Ltd., Apr. 2000.
- [2] Envirotronics, <http://envirotronics.com/>
- [3] 金頓科技, <http://www.kdi.tw/>
- [4] JEDEC, JESD22-B103B: Vibration, Variable Frequency, JEDEC Solid State Technology Association, June 2006.
- [5] Qualmark, <http://www.qualmark.com/>
- [6] G. R. Henderson, and A. G. Piersol, "Evaluating vibration environments using the shock response spectrum," *Sound and Vibration*, pp.18-20, 2003.
- [7] S. Jawaid and P. Rogers, "Accelerated reliability test results: importance of input vibration spectrum and mechanical response of test article," *Reliability and Maintainability Symposium*, pp.248-253,

2000.

- [8] Y. S. Chen and L. H. Chuong, "Responses of a highly accelerated life test system to impacts from different designs of hammers," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 1-12, Aug. 2014.
- [9] Brüel & Kjær, <http://www.bksv.com/>
- [10] Endevco, <https://www.endevco.com/>
- [11] Hi-Techniques, <https://www.hi-techniques.com/products/synergy/>

■