千錘百鍊之間...
車輛電子裝置環境動態試驗規格建立

財團法人車輛研究測試中心 張偉倫

一、前 言

絕大部份的用車人可能無法想像，就算是一個小小不起眼的車門把手其實也是需要經過耐久、溫度等試驗才能安裝到實車上，更別說其它如：避震器、排氣管、座椅、胎壓感測器(TPMS)、行車記錄器、車燈等各式零件，每一件都需經過許多非常嚴苛的環境試驗，如：溫溼度、振動、疲勞耐久等試驗後，才能組成一台汽車。因此要如何才能維持產品的高可靠度是極爲重要的議題。同樣，對製造者而言，在產品開發時要如何快速的掌握其壽命規格，並經由測試驗證來增加產品可靠度，以保障消費者的行車安全及權益，也是產品研發時所面臨最首要且必須克服的挑戰。

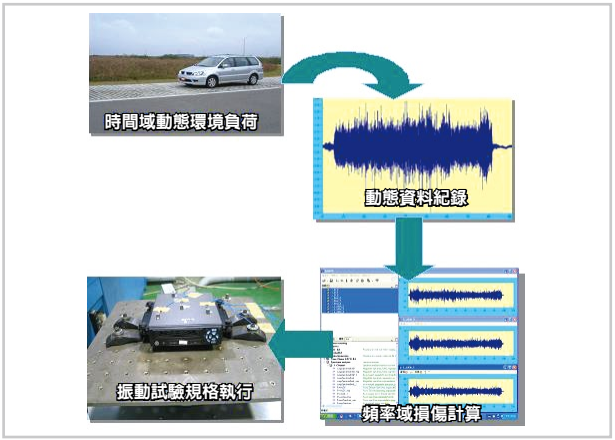
以振動試驗規格而言，這些試驗負載規格通常是由車廠所提供，一般而言，主要以實驗室 8 ~ 22 小時的測試模擬5年10萬公里或10年20萬公里之里程數，來確保車輛零組件或電子產品之可靠度。由於此規格原始數據及流程屬各廠機密，而國內車廠亦多半依據國外技術母廠之規範進行驗證，但其驗證規格設計是否適用國內及是否合理實無從得知。因此，以符合國內環境之規格爲前題，而本文介紹之目的即在於探討如何建立產品在測試驗證時所需之規格條件，其初步概念流程如圖1所示。

提到規格，首先要介紹的是「等效疲勞損傷理論(Fatigue Damage Equivalence) 」：即將產品在時域(Time Domain)下所承受之損傷轉換到頻率域(Frequency Domain)之損傷，藉由試驗時間壓縮的方式來快速驗證產品之規格，此方法將可縮短業者開發的時間，並達到加速試驗的效果，以解決業者不知如何訂定產品驗證規格的困擾，並可對產品可靠性預先作進一步的提升。

頻率域損傷的概念在最近幾年經常被探討，2006年Su[1]提出一項規格設計工程程序，以裝置於引擎室及車體部位之機械結構件在試車場(Proving Ground, PG)量測路面負載資料。首先使用快速傅利葉轉換(FFT)技巧將測得之時域負載轉換成頻域資料，再根據等效損傷技巧，建立隨機及正弦振動規格，縮短實驗室振動機(Shaker)測試時間。例如：2004年David等[2]以雨刷馬達定位器利用CAE的FEA技巧，在提高耐久測試負載與測試速率動態模擬分析下，結合等效疲勞損傷及可靠度觀念，隨耐久試驗時間由460小時有效縮短至6小時，以節省測試成本。

對於產品之市場規格，車輛研究測試中心（以下簡稱ARTC），已針對駕駛市場輪廓著手研究，

並建立市場及PG特殊路面時間域之入力資料庫[4,5]，因此，本研究將利用ARTC試車場路面來訂定產品在市場5年10萬公里之使用規格，計算出時域下之疲勞損傷，並用以判定壽命，以下將說明如何利用頻率域的觀點來計算其損傷，從而建立車輛零組件或電子產品頻率域加速振動試驗規格。

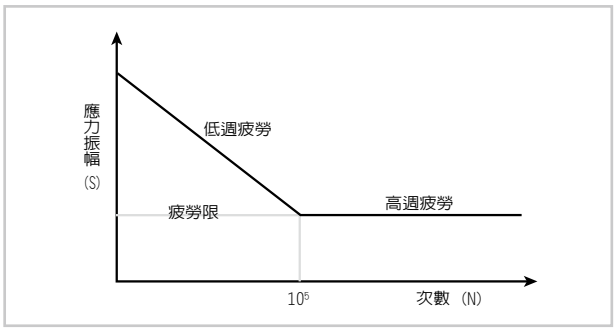


▲ 圖1. 規格轉換概念流程

二、等效疲勞損傷基本理論

(一) 疲勞破壞介紹

材料在承受負荷時，因受到交替應力及應力頻率的影響，經過一段時間後，在反覆應力作用下會致使內部產生滑移現象，最後導致破壞。疲勞在工程應用上是很重要的失效模式，於1850年代左右，德國鐵路工程師Wohler在實驗室進行車軸疲勞試驗，提出S-N曲線與疲勞極限(Fatigue Limit)的觀念可視爲最具代表性，一般常見之S-N曲線圖如圖2，圖形中呈水平部分表示在此應力下材料無論反覆多少次數皆不至於產生疲勞破壞，即稱爲疲勞限(Fatigue Limit)或耐久限 (Endurance Limit)。



▲ 圖2. 典型S-N曲線圖

在探討損傷所引起失效之數學模式，一般會採用Palmgren-Miner法則，亦即：

$$D = D_1 + D_2 + \ldots D_n = \sum D_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i}{N_i} \quad \text{.....(1)}$$

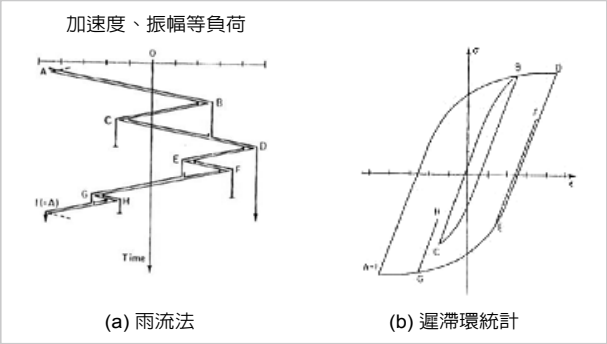
其中，S_i 爲第 i 組應力位準，N_i 爲 S_i 應力之失效週數，n_i 爲 S_i 應力之實際作用週數，當損壞指標 D >1 時，表示壽命耗盡。

(二) 循環計數法 (Cycle Counting Method)

在車輛入力訊號擷取上，若設定在5,000 Hz的取樣頻率下，通常會造成龐大的資料點數，爲了有效量化且簡化分析時間與負荷之歷程，計算每個負荷之完整循環次數，已陸續發展數十種計數方法，如尖峰計數法（Peak Counting Method）、範圍計數法（Range Counting Method）、疲勞計數法（Fatigue-meter Counting Method）及雨流計數法（Rainflow Counting Method）等；其中，又以雨流計數法最爲廣泛使用。然而，在本文所量測之動態環境的時域資料下，則採用雨流計數法，來估算負荷作用循環及其次數。

何謂雨流計數法？其概念是以時間爲垂直軸向下，將負載歷程想像爲寺塔屋頂（Pagoda roofs），

如圖3(a)所示。雨流自每個轉折點順勢流下後，向波峰(波谷)的外側流動，然後形成各自封閉之遲滯環，如圖3(b)：

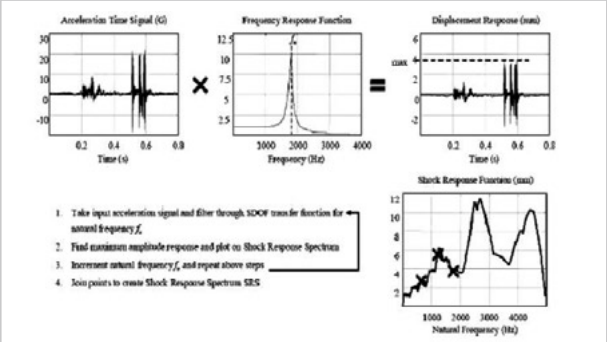


▲ 圖3. 雨流法(a)及遲滯環統計(b)

綜合2.1與2.2節所述，值得思考的是其內容全部在時域的架構下， 然後將量測到的時域負載訊號藉由雨流法簡化其歷程，再利用Palmgren-Miner法則則可以計算出時域下之疲勞損傷，並用以判定壽限，而以下將說明如何利用頻率域的觀點來計算其損傷。

(三) 頻域響應譜與規格制定介紹

響應譜概念主要用於衝擊(Shock)之環境，其概念爲將衝擊時域資料匯入一系列的單自由度(SDOF)系統中，由其響應最大值建構衝擊響應頻譜(Shock Response Spectrum，以下簡稱SRS)，如圖4。



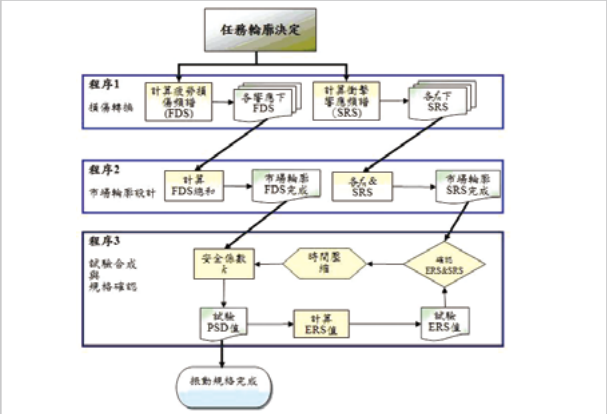
▲ 圖4. 衝擊響應頻譜

一般所構成之SRS頻譜可分爲位移、速度、加速度三種模式，而爲探討振動所引起之疲勞現象，依據NASA-HDBK-7005及Crandall、Henderson與Piersol等人之研究結果可知，振動之速度與其導致的應力成線性正比關係，所以利用速度模式下之SRS再搭配雨流法的計算則可以得到頻率域下之損傷值 (Fatigue Damage Spectrum，FDS)。

此FDS除可用於比較不同頻率之疲勞損傷潛能外，尚可用於比較不同振動條件之疲勞損傷潛能。對非平穩隨機過程而言，無法先求得振動之位準，因此，必須將基座之輸入透過SDOF系統(即直接用SRS計算方式)，計算響應之均方根值。根據Palmgren-Miner疲勞線性疊加假設，任務周期內之FDS可線性加總或等倍放大，所以由最終合成計算之FDS可推導出在實驗室試驗之試驗規格如下[6]，其建立流程如圖5所示：

$$G(f_n)=\frac{2(2\pi\cdot f_n)^3}{Q}\cdot\left[\frac{K\cdot\sum FDS(f_n)\cdot C}{K^b\cdot f_n\cdot T_{eq}\cdot\Gamma(1+b/2)}\right]^{2/b} \quad \text{..... (2)}$$

其中fn爲自然頻率，T爲振動機試驗時間，K爲單自由度系統的彈簧常數，b、C爲2.1節所述S-N曲線材料參數，$Q=10$，$G(fn)$爲PSD值，$\Gamma(\ )$爲gamma函數。



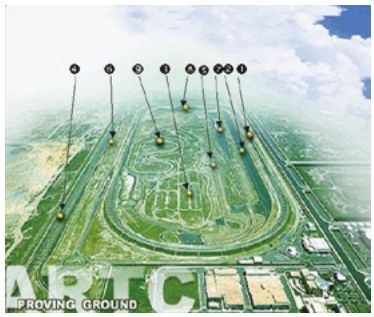
▲ 圖5. 試驗規格制定流程

三、研究與規格建立之實例

研究內容主要包含實車振動入力訊號量測、振動規格轉換等二大部分，在入力訊號量測方面包含市場資料與PG入力相關性、PG路面規劃、車輛整備與試車道量測說明；規格轉換部分主要包含隨機振動頻譜規格、實驗室振動規格制定及Matlab軟體程式撰寫的振動頻譜規格。

(一) 實車振動入力訊號量測

ARTC目前已有市場與試車場之入力資料庫[4,5]，在市場資料部分，車輛標的以1.6~2.0公升為主，蒐集之資訊共分為三大方向：(1)道路種類使用分佈比例，(2)車輛載重分佈比例及(3)駕駛特性等。將所蒐集之資料作統計分析，即可根據分析結果做為市場目標量測路線比例，目前ARTC已完成全台灣27,765 km入力資料庫，其中北部區域11,917 km、中部12,973 km、南部1,307 km、東部1,568 km。在試車場路面規劃方面，目前ARTC所擁有之主要路面共有9條，如圖6，本文主要利用ARTC之標準不良路來做為加速疲勞之依據，主要目標為模擬產品在市場使用10萬公里的情況，規劃之情形如表1所示，標準不良路總長為1001 m，路寬4 m，路面為鋪以隨機高低起伏之花崗岩塊構成，順時鐘行駛之入力狀態分為前段中低入力狀態，速率可維持定速40 km/hr以上，後段面為高入力狀態，速率僅可維持定速40 km/hr（含）以下，速率越快，所累積之疲勞損傷即相對增加。



▲ 圖6. ARTC試車場路面

▼ 表1. 試車場路面規劃

路面種類	標準不良路 (Belgium road)
量測里程	1,000 m
單趟時間	約89 s
循環數	2,500 循環
市場里程	100,000 km
市場加數比	20~40
行駛方向	順時鐘
行駛速率	前段60km/hr、後段40km/hr

本研究之入力資料擷取部位為左前方轉向節臂部位，如圖7(a)及圖7(b)所示，作為底盤裝置量取入力狀況之參考點，此次分析數據主要以量測部位之垂直方向(Z軸)入力加速度為主要參數，其他軸向(如X、Y軸)則作為次要參數；所使用之加速規為PCB三軸向加速規，資料擷取系統採用imc CRONOS PL，規格如表2，可即時將時域訊號儲存；整體系統安裝如圖8，實車標準不良路量測情形如圖9。

(a) 左前方轉向節臂部位　(b) 安裝部位近圖

▲ 圖7. 加速規安裝部位圖

▼ 表2. imc CRONOS PL資料擷取系統規格

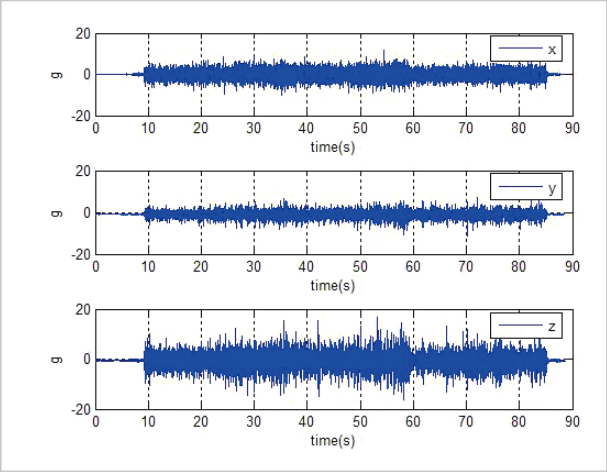
取樣速率	400 KHz以上
頻道數	32 Channel
解析度	16 bit以上
抗震力	30 g-peak over 3ms
操作環境溫度	-10 ~ 55 ℃
體積(長×寬×高)	300×350×180 mm

▲ 圖8. 資料擷取系統安裝

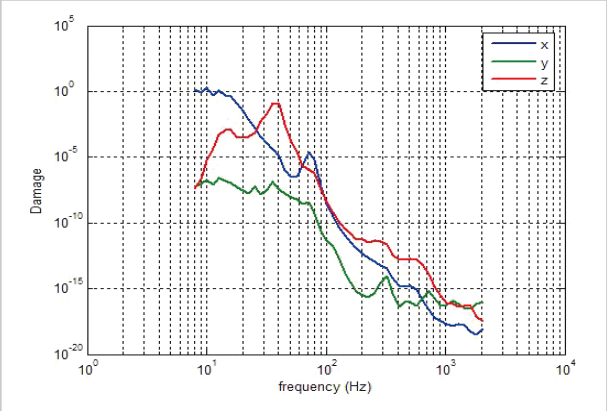
▲ 圖9. 標準不良路量測情形

(二) 振動規格轉換

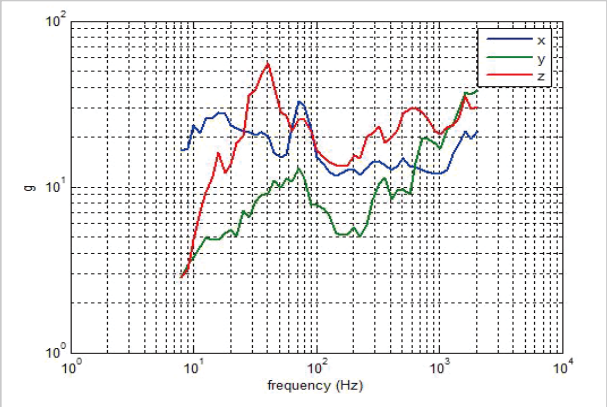
本節將利用前面所述之理論方法來實現實驗室振動機所需之試驗規格，首先，先將試車場標準不良路所量測到之轉向節臂處時域加速度訊號(如圖10)輸入到撰寫規格轉換之程式中，輸入取樣頻率爲5,000 Hz，設定振動試驗時間28,800秒(8小時)並開始進行運算；此階段處理包含二個部份，一爲將速度響應頻譜(SRSvelocity)以雨流計數法計算FDS值，其二爲SRS之計算，計算之結果如圖11、12所示，最後再將所計算之FDS根據2.3節所述之公式(2)轉換成PSD以得到振動機頻譜圖，並依據三軸向之頻譜圖外型加以平滑化後（如圖13），最後即可依此作爲實驗室振動機執行8小時的規格，如表3所示。



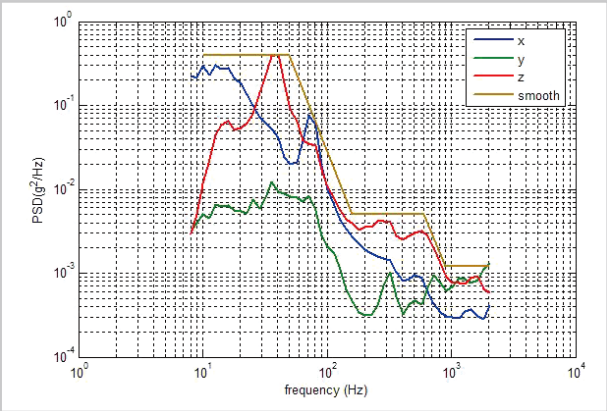
▲ 圖10. 標準不良路時域訊號



▲ 圖11. 各軸之疲勞損傷頻譜(FDS)值



▲ 圖12. 各軸之衝擊響應頻譜(SRS)值



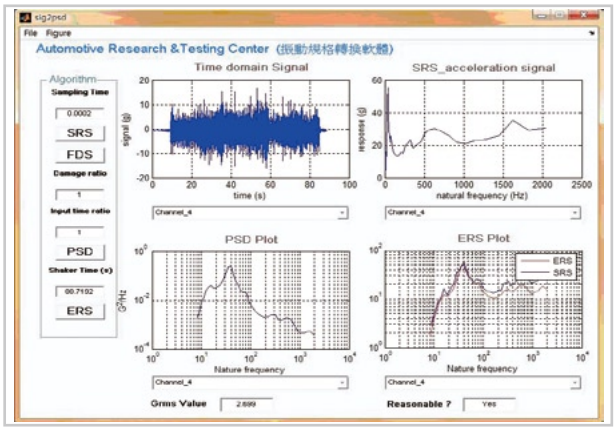
▲ 圖13. 振動試驗規格平滑化

▼ 表3. 隨機振動規格

Frequency (Hz)	Power Spectrum Density (PSD)	試驗軸向	試驗時間
10	0.4	X / Y / Z	8 HR
28	0.4		
32	0.4		
45	0.4		
50	0.4		
160	0.005		
600	0.005		
900	0.0012		
2000	0.0012		
g_{RMS}		5.22	

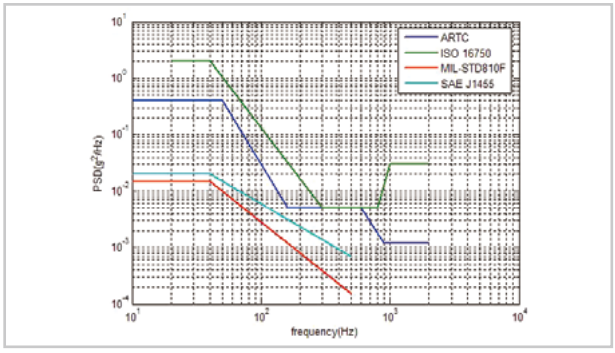
四、結果與討論

目前ARTC針對此技術理論已利用Matlab軟體建立一視窗介面 (如圖14)，由3.2節所述與表3之結果可以很清楚的了解到此試驗規格可以用來模擬安裝於轉向節臂處附近之電子產品 (如：胎壓感測器) 之10年市場使用規格，可使車廠原本需要花費10年之測試時間，縮短至只需要8個小時的試驗即可以知道結果，這對於國內業者在開發產品時，除了可以縮短其試驗時間，提升其產品市場競爭力之外，並可以快速的掌握其產品之可靠性，更可降低其測試驗證之費用，此技術對於國內廠商提供了莫大的幫助。



▲ 圖14. 振動規格轉換軟體介面

在國際標準中，目前以ISO 16750及JASO D014爲最新車電環境應力標準，圖15所示的各項國際標準適用於車輛底盤部位之裝置，就本文針對底盤部位裝置制定之規格在所調查含隨機振動規格之四項標準中(ISO 16750、JASO D014、MIL-STD810F及SAE J1455)，能量與ISO及JASO較爲接近，可算爲比較嚴苛之等級。綜合以上結果，基於等效疲勞損傷基礎下，並結合合理的振動試驗時間壓縮，本研究可將時域之物理訊號轉換成實驗室振動機所需之頻域訊號，而所得結果再藉由平滑化程序則可作爲提供業界擬定相關底盤部位裝置驗證規格參考。



▲ 圖15. 國際標準比較

本研究針對車輛底盤部位裝置做驗證規格制定，從實車訊號量測，再經由所撰寫的程式做時域與頻域轉換，到最後實驗室振動機規格之實現都具有完整流程，而此技術不僅適用於底盤部位裝置，更可以擴展應用在裝載於各部位之車電產品，本文研究僅針對ARTC標準不良路做爲入力疲勞依據，然而，此路面特性爲穩態(staionary)；因此，後續可再針對任務輪廓(Mission Profiles)之選擇上選擇較具有衝擊、非穩態(Non-staionary)之路面做組合，更可提高模擬產品眞實受到環境負載之狀況。

六、參考文獻

[1] Su,H., "Vibration Test Specification for Automotive Products Based on Mesured Vehicle Load Data", SAE Paper No.2006-01-0729.

[2] David Olson, "Accelerated Tests of Wiper Motor Retainers Using CAE Durability and Reliability Techniques", SAE world congress,January 2004.

[3] Joel,Su H., "Road Load Analysis and Vibration Specification for Visteon FES Products,based on Measured PG Data", Visteon Internal Tech Reoprt, D457_01-155,2001.

[4] 吳易名、陳建次，「小型車之試車場耐久測試程序規劃報告」，民91，經濟部技術處技術報告，CB-91-0043。

[5] 陳建次，「應用車輛入力量測技術建立模擬台灣市場與大陸市場路況疲勞效應之時車耐久測試程序」，27th全國力學會議。

[6] Dr.A Halfpenny,Mr.F.Kihm, "Misson Profile and Testing Synthesis Based Fatigue Damage Spectrum",9thInternational Fatigue Congress USA, 2006.