

## 環境振動試驗規格設計與可靠度分析

張偉倫, 林根源, 薛欽鐸, 張榮明  
財團法人車輛研究測試中心

### 摘 要

本研究主要目的為利用頻率域響應譜之概念，建立由動態環境下加速度時域轉換到實驗室之頻域振動試驗規格，並探討此試驗規格於市場使用環境下之可靠度分析。文中以汽車頭燈為例，利用試車場(Proving Ground)之入力訊號及等效疲勞損傷(Fatigue Damage Equivalence)等理論來建立實驗室 8 小時振動試驗等效於市場 5 年 100,000 公里之使用壽命，對於試驗規格設計中所需之材料疲勞參數則採用不同振動位準計算方式求得，此方法之優點為對於一般複雜之複合塑膠結構件可快速求出材料參數。本研究合理的將市場 100,000 公里之時域歷程壓縮至 8 小時的實驗室試驗規格；最後，由此試驗規格利用 8 組頭燈執行壽命試驗，並利用 Weibull 理論計算與預測任意試驗規格位準下頭燈之可靠度水準，由試驗結果，頭燈於 8 個小時的振動試驗後，相當於市場 100,000 公里之可靠度水準為 99.25%。

**關鍵詞**：振動試驗規格(Vibration Specification)、試車場(Proving Ground)、等效疲勞損傷(Fatigue Damage Equivalence)、Weibull 可靠度分析(Weibull Reliability Analysis)

## Environmental Vibration Specification Design and Reliability Analysis

Wei-Lun Chang, Ken-Yuan Lin, Chin-Duo Hsueh, Jung-Ming Chang  
Automotive Research & Testing Center

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to apply the concept of frequency response, establish the accelerated vibration specification, and investigate the specification under field usage with reliability analysis. An automotive headlamp is used in our research. The input signal from Proving Ground was converted into an eight-hour bench test that is equivalent to a five-year/100,000 km field usage through the theory of Fatigue Damage Equivalence. The fatigue parameters of materials were then estimated from various vibration results. The benefits of this approach are that we could obtain the material parameters much faster of a complex structure made of composite plastics. Our research compressed the 100,000 km time domain history into an eight-hour laboratory bench test specification. At the end, a life test of eight pieces of headlamps was conducted and Weibull distribution was used to perform reliability analysis. The results showed that the reliability is about 99.25% after the eight-hour bench test (or equivalently after 100,000 km field usage). At 90% confidence level, that reliability becomes about 90%.

**Keywords** : Vibration Specification, Proving Ground, Fatigue Damage Equivalence, Weibull Reliability Analysis

## 1.前言

一般車輛零組件或是車電產品在使用、運輸中，容易受到溫度、溼度、振動、衝擊等環境下影響而劣化，因此，環境試驗的重要性與日俱增。在產品開發初期時利用環境試驗可以提高產品的可靠度(reliability)，產品的可靠度定義為在正常使用條件下、特定時間內，產品可正常運作的機率，所以產品可靠度的評估與改善，對製造者或使用者皆是非常重要的。要評估與改善產品的可靠度，通常需要藉由產品壽命試驗得到，而要如何快速得到產品壽命則可利用加速壽命試驗(Accelerated Life Testing, ALT)，加速壽命試驗是指在環境或時間上，應用較嚴苛的條件加強產品的劣化，以較短的時間進行實驗，並推定產品在正常使用條件下的壽命及可靠度變化。

在車輛領域上，一般零組件、結構件或車電產品等為了能滿足市場之壽命使用狀況，所以加速試驗包含市場使用狀況的試驗加速與環境試驗加速，前者為藉由市場調查分析來找出市場與實驗室測試的相關性；後者為實驗室對試驗加速的一種方法，在市場相關性部分，2007年Salman Haq及Yung-Li Lee[1]等人利用雨流法及最佳化方法，使用5種不同的路面組合將實車100英里模擬等效到市場150,000英里去探討汽車懸吊及底盤的損傷狀況，2007年David Ensor及Chris Cook[2]利用試車場(Proving Ground)路面入力資料(Road Load Data)結合CAE分析來設計符合中東市場95%使用者的相關性，而車輛研究測試中心(ARTC)92年在經濟部科專計畫執行下，已針對駕駛市場輪廓研究，並有初步之市場及試車場特殊路面時間域之入力資料庫[3,4]；在環境加速試驗方面，除了壽命分析外，近年來針對產品試驗規格亦有研究與探討，2006年Su[5]使用快速傅利葉轉換(FFT)技巧將測得之時域路面入力資料轉換成頻域資料，然後使用等效損傷(Damage Equivalence)的概念建立引擎室及車體部位隨機及正弦振動規格，縮短試驗時間，2006年Halfpenny[6]利用響應譜的觀念計算疲勞損傷譜(Fatigue Damage Spectrum, FDS)並進一步的計算振動試驗規格，國內中科院[7]亦對此方面作深入的研究，而這些方法都能有效的縮短測試時間並節省成本。

通常車輛零組件、結構件或車電產品試驗規格是由車廠(OEM)所提供，而此部分皆屬車廠機密，資料

取得較不易，而在國內車廠長期受制於國外技術母廠之技術限制下，仍只能依據規範進行驗證，而其驗證規格設計是否適用國內及其是否合理，是無從得知的，另外，對於一般零組件製造廠而言，要如何設計出符合市場之試驗規格是一項極為困難之問題，所以要如何訂定一適合產品之試驗規格實為最根本且重要之議題。

在國際規範中，1978年美國自動機工程師學會SAE J1211針對乘用車乘客室、車外等部位車輛電子產品提出北美地區隨機振動頻譜作為車輛電子設計參考；2000年美國軍規MIL-STD-810依據軍用運輸車、履帶式車輛、直升機等電子裝備的任務輪廓提出隨機及正弦振動試驗規格；2003年國際標準組織ISO16750與2006年日本自動車標準協會JASO D014皆針對12V與24V系統，車輛乘客室等5大裝置部位訂出建議之隨機及正弦振動試驗規格。

在產品的設計開發階段，若能有效的掌握環境試驗規格，必能提早改善產品的缺點且提升可靠度，因此本研究整合時域等效頻域的加速壽命分析，內容包含時域及頻域加速試驗介紹、頻率域響應譜的說明及材料性質參數之求得，並進一步建構出由時域轉換成頻域之振動試驗規格，最後，由此試驗規格進行8組頭燈壽命試驗，並利用Weibull理論分析頭燈在此規格下之可靠度水準。

## 2.時域(Time Domain)及頻率域(Frequency Domain)加速壽命試驗

### 2.1 加速壽命試驗(ALT)介紹

加速壽命試驗係指提高比正常使用狀況下之應力條件，來快速得到產品壽命的資訊，同時可以推估在正常使用狀況下之壽命及可靠度狀況。加速試驗的方法有很多種，例如：頻率加速、訊號壓縮、應力加速等方法，頻率加速是屬於對時間的加速，其作法是增多使用的反覆次數，亦即提高作動的頻率來達到一種加速的效果；訊號壓縮是把歷程訊號重新作編輯，把不必要的應變歷程刪除掉，使應變歷程大幅縮短，以加速零組件壽命評估；應力加速是加強環境應力，短時間內使零組件強制失效的方法。

通常可用來控制環境應力之參數有溫度、溼度、

電壓、加速度、應力振幅等訊號，常見之溫度加速模式有Arrhenius Model、結合溫溼度模式的有Peck's Model、電壓模式的有Kemeny Model，對於加速度、應力振幅之加速試驗方法則有反幕次模式(Inverse Power Law)[8]。本研究以反幕次模式來執行於頭燈處量測到的加速度訊號之加速壽命試驗，用於驗證時域及頻率域間存在之等效損傷關係，反幕次模式如下：

$$AF = \frac{N_{use}}{N_{test}} = \left( \frac{G_{test}}{G_{use}} \right)^\beta \quad (2.1)$$

其中， $AF$ 為加速因子、 $N_{use}$ 為正常使用下之壽命、 $N_{test}$ 為加速使用下之壽命、 $G$ 代表加速度之均方根值、 $\beta$ 為材料疲勞參數。

對於加速度訊號，可直接將振幅加大，即代表訊號的均方根值亦放大，且振幅與均方根值成等比例正比關係，如下圖1所示。

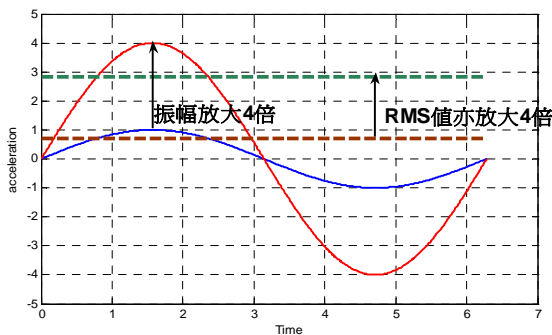


圖1. 加速度振幅與均方根值關係

對於實驗室的振動試驗，通常以振動機(Shaker)為激振來源，代表測試為頻率域下之型態，而頻率域之加速試驗，美軍軍規MIL-STD-810F[9]針對隨機振動試驗時間，提出以下經驗公式：

$$\frac{T_{use}}{T_{test}} = \left( \sqrt{\frac{W_{test}}{W_{use}}} \right)^\beta \quad (2.2)$$

其中， $T$ 為振動作用時間、 $W$ 為隨機振動為準( $g^2/Hz$ )、 $\beta$ 為材料疲勞參數。

指數 $\beta$ 之值在應用於不同標準時略有差異，如表1[7]所示，由公式(2.2)之等效關係，將可以用高位準、短時間之加速振動試驗來快速得到產品的壽命狀況。

表1. 不同標準之 $\beta$ 值[7]

使用標準	指數 $\beta$ 值
MIL-STD-810F	隨機振動 8、正弦振動 4
NASA-HDBK-7005	結構件 8、組件或配備 4
DEFSTAN 0035	5
Air 7304、7306	8

## 2.2 應力-壽命法與應變-壽命法

材料的疲勞破壞可概分為高週疲勞(High-Cycle Fatigue)與低週疲勞(Low-Cycle Fatigue)，高週疲勞為應力控制，所承受的週期負載侷限於彈性範圍內，故負載較低，須經高反覆負載次數才會造成材料破壞，一般為 $10^4 \sim 10^5$ 週期以上；低週疲勞為應變控制，每個週期會產生明顯之塑性變形，故高負載、短壽命，一般可承受的週期為 $10^4 \sim 10^5$ 週期以下，高週疲勞所用之壽命評估方法為應力-壽命法，適用於局部應變不易分析的結構，如焊接結構、傳動軸、鑄鐵等；低週疲勞則為應變-壽命法，適用於常需承受不小的機械力或熱傳造成巨大損傷之結構，如飛彈、火箭、飛機氣渦輪葉片等。

應力-壽命法為施加不同的固定振幅應力於試桿上，求得各應力振幅 $S$ ，試桿破斷的週期 $N$ 。縱座標常用應力振幅或最大應力，橫座標為壽命或週期次數 $N$ ，而所構成的應力振幅對週期之曲線稱為S-N曲線(S-N Curve，又稱Wohler曲線)，其公式如下：

$$N = C \cdot S^{-b} \quad (2.3)$$

其中， $N$ ：次數、 $S$ ：應力、 $b$ ， $C$ 為材料參數。

循環應力-應變曲線基本上是條通過材料於不同應變範圍時所得之各穩態遲滯環尖端的曲線，其應變範圍 $\epsilon$ 可分為彈性應變和塑性應變兩部份。如圖2所示：

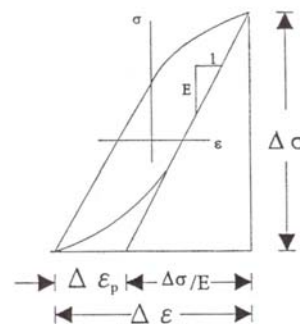


圖2. 應力-應變遲滯環

由圖 2 可知：

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + \Delta \varepsilon_p \quad (2.4)$$

其中， $\sigma$ ：應力範圍、 $E$ ：楊氏模數、 $\varepsilon_p$ ：塑性應變。

而應力振幅與塑性應變振幅之關係如下：

$$\sigma_a = K \varepsilon_{pa}^n \quad (2.5)$$

其中， $\sigma_a$ 為應力振幅、 $\varepsilon_{pa}$ 為塑性應變振幅。

所以，總應變振幅可表示為

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K}\right)^{1/n} \quad (2.6)$$

循環壽命與總應變振幅間的關連性要比與塑變振幅間來得好，尤其在接近低週疲勞領域中的較長壽命端為然；所以總應變振幅與破損循環反向數間的關係如下：

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (2.7)$$

其中， $\Delta \varepsilon_e / 2$  為總應變振幅、 $\sigma_f$  為疲勞強度係數、 $\varepsilon_f$  為疲勞延性係數、 $2N_f$  為破損循環轉折數、 $b$  為疲勞強度指數、 $c$  為疲勞延性指數。

### 2.3 循環計數法

訊號在長時間的量測下，常常會造成龐大的資料點數，為了降低及簡化循環時間歷程以利於分析而有循環計數的發展。舉凡應力、力量、應變、扭力及加速度之歷程，皆可適用於循環計數。一般來說，計數可分為兩類，分別為單參數與雙參數。前者有水平交叉法(Level Crossing Method)、尖峰計數法(Peak Counting Method)、範圍計數法(Range Counting Method)等。由於一個封閉遲滯環必須由兩個參數來定義，故雙參數法，如範圍配對法(Range Pair Counting Method)及雨流法(Rainflow Counting)，其中雨流法(Rainflow Counting)是最廣為接受的方法。

在本文所量測之動態環境的時域資料(如車輛入力訊號)下，則採用雨流計數法，來估算負荷作用循環及其次數；其中，以負荷為水平軸，時間為垂直軸，初始以發生負荷峰值處為起點，向下滴落，最後累積雨滴所行經的應力範圍。

雨流法的概念是以時間為垂直軸向下，將負載歷程想像為寺塔屋頂(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，然後依據下列規則形成各自封閉之遲滯環：

- (1)修正負載歷程之起始點與終點，使其皆為整個歷程之最大值，防止出現計數出半循環現象。
- (2)雨流從一個波峰(波谷)流向另一個波峰(波谷)時，若遇到上方流下雨流時，則停止該次計數。
- (3)依此類推，計數下所有全循環及其負載振幅，並將可把計數成果表示成如圖3(b)之遲滯環。

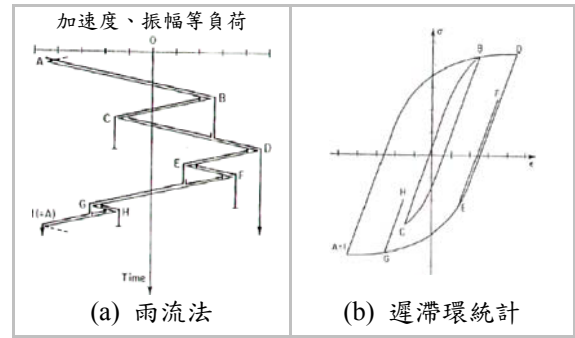


圖 3. 雨流法(a)及遲滯環統計(b)

### 2.4 損傷累積法則

疲勞破壞在車輛領域上是一個很重要的失效模式，尤其當車輛受到動態環境隨機振動下，將會有疲勞損傷累積的現象，當損傷累積至材料極限時，材料即發生破壞，因此疲勞損傷累積模式也可視為材料的極限狀態方程式。常用在評估各種位準之應力損傷疲勞的累積效應，一般會採用Palmgren-Miner法則，亦即：

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.8)$$

其中， $N_i$  為不同應力振幅下之失效週數， $n_i$  為不同應力振幅下實際作用週數，當損壞指標  $D > 1$  時，表示壽命耗盡。

### 3.響應譜與動態環境試驗規格

衝擊響應頻譜(Shock Response Spectrum, SRS)為一種對衝擊訊號的頻域分析方法，其原理係由衝擊訊號匯入假想一系列許多單自由度(Single Degree of Freedom, SDOF)濾波器系統，如圖4所示，各濾波器皆有其特定頻率範圍、倍頻解析度、系統阻尼值，然後經由每個頻率下響應之極值所建構的曲線，即SRS頻譜，其數學模式為：

$$M\ddot{x} + C(\dot{x} - \dot{u}) + K(x - u) = 0 \quad (2.9)$$

其中， $x(t)$ 為質量 $M$ 之絕對位移、 $u(t)$ 為基座之位移、 $C$ 為阻尼係數、 $K$ 表彈性係數。

透過Laplace Transform，在 $x$ 及 $u$ 之初始條件皆為0之假設下，可得：

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.10)$$

其中 $X(S)$ 、 $U(S)$ 分表 $x(t)$ 、 $u(t)$ 之Laplace Transform， $\zeta$ 為阻尼比( $\zeta=0.05$ )， $\omega_n$ 為自然頻率。

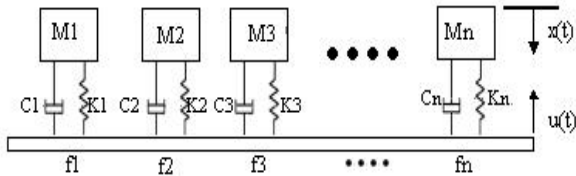


圖 4. 衝擊響應頻譜模式

當動態環境屬常態分布(Normal Distribution)時，則在SDOF系統之假設下，其最大響應值可以Rayleigh分布描述之。而要估算其極限響應頻譜(Extreme Response Spectrum, ERS)之值如下[6]：

$$ERS(f_n) = \sqrt{\pi \cdot f_n \cdot Q \cdot PSD(f_n) \cdot \ln(f_n \cdot T)} \quad (2.11)$$

其中， $f_n$ ：自然頻率、 $Q=10$ 、 $PSD$ ：功率頻譜密度( $g^2/Hz$ )、 $T$ ：振動作用時間

ERS與SRS的觀念相同，最大差別在於SRS屬於非平穩隨機過程，而ERS應用於常態平穩過程，如實驗室振動機之輸入源，所以ERS的主要角色在於防止試驗時間的過度壓縮而造成過應力破壞，因此，試驗規格所算之ERS應小於來自實際環境計算之SRS。

為探討振動所引起之疲勞現象，由[7]可知，動態環境之速度響應會與其導致之應力成線性正比關係，即

$$\sigma_s = K_1 \sigma_v \quad (2.12)$$

其中， $K_1$ 為一常數、 $\sigma_s$ 為應力均方根值、 $\sigma_v$ 為速度均方根值。

若振動環境為非平穩隨機過程，則在SDOF系統之假設下，其應力響應歷程必為窄頻之隨機歷程，而響應最大值亦可利用SRS計算並配合雨流法而獲得，亦即：

$$\sigma_s \approx K_2 SRS_{velocity}(f_n, Q) \quad (2.13)$$

為探討疲勞所引起之頻率域損傷，則有疲勞損傷頻譜(Fatigue Damage Spectrum, FDS)之概念[6]，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]：

$$G(f_n) = \frac{2(2\pi \cdot f_n)^3}{Q} \cdot \left[ \frac{\kappa \cdot \sum FDS(f_n) \cdot C}{K^b \cdot f_n \cdot T_{eq} \cdot \Gamma(1 + b/2)} \right]^{2/b} \quad (2.14)$$

其中， $f_n$ 為自然頻率、 $T$ 為振動機試驗時間、 $K$ 為單自由度系統的彈簧常數、 $b$ 、 $C$ 為公式 2.3 中的材料參數、 $Q=10$ 、 $G(f_n)$ 為 PSD 值， $\Gamma()$ 為 gamma 函數。

#### 4. Weibull 可靠度壽命分佈

對於產品或系統的可靠度，可由失效數據再配合統計分析技術，來評估產品的可靠度隨時間變化之情形。常用之壽命分佈有指數分佈、常態分佈及韋氏分佈(Weibull Distribution)，本研究利用Weibull分佈理論來評估頭燈之可靠度水準，以下將簡單說明韋伯理論。

韋氏分佈應用非常廣泛，常用於電子設備及材料疲勞之問題，由於其形狀參數具有多變性，且能夠適用於描述產品的失效率，所以在可靠度的領域上被廣泛的應用。

若時間 $t$ 屬於三參數韋氏分佈的隨機變數，則其累積分佈函數為：

$$F(t; \theta, \beta, \gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta-\gamma}\right)^\beta}, t \geq 0 \quad (2.15)$$

式中  $F$  為失效率函數， $\theta$  稱為尺度參數(Scale Parameter)或特徵壽命(Characteristic Life)， $\beta$  稱為形狀參數(Shape Parameter)或韋氏斜率(Slope)， $\gamma$  稱為位置參數(Location Parameter)，若當位置參數等於零時，即成為兩個參數的韋氏分佈。

當形狀參數等於1時，失效率函數成爲一常數，也就是常見的指數分佈，當形狀參數值約為3~4時，其特徵將接近於常態分佈，而通常大於1時大多屬於疲勞破壞。

要計算雙參數之韋氏分佈的參數值，可藉由線性化求出一直線方程式求解，首先，將公式(2.15)兩邊取雙對數可得：

$$\ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\theta) \quad (2.16)$$

$$\text{假設 } Y = \ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right], X = \ln(t)$$

將(2.16)式重寫則可得一直線方程式為：

$$Y = \beta X - \beta \cdot \ln(\theta) \quad (2.17)$$

所以由失效數據配合(2.17)式作曲線擬合則可求出 $\beta$ 、 $\theta$ 值，並進一步建立產品可靠度曲線。



## 5.研究與實例應用

本章節主要應用汽車頭燈的實例來說明如何由環境的負荷資料轉換到實驗室振動試驗規格流程,及由所制定之規格計算其可靠度水準。在規格轉換部分,利用加速壽命方法驗證時域及頻率域存在等效損傷之關係,並利用公式(2.2)計算頭燈整體的材料性質;其次為建立市場100,000公里轉換成實驗室8小時之振動試驗規格,內容包含市場資料與試車場入力相關性、試車場路面規劃、車輛整備與訊號量測說明,並將量得之時域訊號轉換成8小時的試驗規格。在可靠度分析部份,利用應力壽命法評估頭燈的壽命,於試驗部分則利用加速試驗方法並反推規格下之壽命狀況,藉由失效數據資料,利用Weibull理論建立頭燈的可靠度水準並計算其特徵壽命。

### 5.1 時域及頻域損傷等效

國際標準 SAE J575[10]主要是針對汽車頭燈相關試驗的規範,本研究參考其內容,使用 1.81g 的能量來執行頻率域的振動試驗,而在加速壽命試驗則提高振動位準至 4.81g 執行,試驗結果如表 2,藉由表 2 的資料,並利用公式(2.2)可求出複合塑膠材質的材料性質,算出  $\beta = 7.56$ ,對於一般複雜的結構件,利用此方法的優點為可以快速的求出其材料參數,且可以省去建立 S-N 曲線的測試時間。

表2 加速壽命試驗

試驗 PSD 值	試驗破壞時間	破壞模式
1.81g	161 hr	上鎖附點破裂,如圖 4 (a)
4.81g	4 hr	上鎖附點破裂,如圖 4 (b)



圖 5. 加速壽命試驗照片

為了比較時域與頻域的破壞模式及壽命是否相同,在時域部份則利用油壓缸來進行振動試驗,而訊號使用貼在實車頭燈處量到的Z軸加速度訊號,如圖10,此訊號時間長度約為89秒,RMS值為1.09g。在時域的加速壽命試驗部分,則利用2.1節所述應力加大的觀念將加速度RMS值放大至3.5g來執行時域振動試驗。理論上,藉由公式(2.2)及  $\beta = 7.56$ 可以推估出壽命約為13.3小時;在實際試驗上,其約在12.84小時反射板上鎖附點產生破壞,破壞模式與頻域相同,架設照片與破壞處如圖6。

綜合以上試驗結果,可以發現到使用入力量測到的時域訊號所執行的振動試驗其壽命與頻域相近(12.84hr/13.3hr),可說明一般實車之零組件或車電產品在受到路面之振動入力訊號,基於疲勞等效之理論基礎上,可轉換為由頻率域振動機所給予之入力負荷,而以下將說明如何由時域訊號計算等效於頻域之疲勞損傷(FDS)並轉換為振動機之試驗規格。

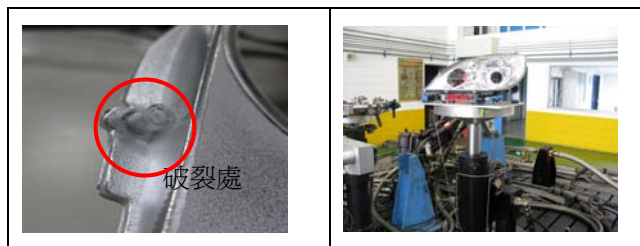


圖6. 時域振動試驗

### 5.2 實車振動入力訊號量測及市場相關性

本節主要依據車輛中心(ARTC)在市場實車量測與試車場入力相關性作法[3,4],來作為本論文選用試車場道路一標準不良路作為參考之依據,主要目的用於擬訂產品的市場使用規格並提供實驗室振動規格訂定之所需。

其在市場的量測部分,所使用的車輛標的以1.6~2.0公升之用戶為主,共分為三大方向作資訊蒐集:(1)道路種類使用分佈比例,(2)車輛載重分佈比例,(3)駕駛特性等。將所蒐集之數據做統計分析,即可根據分析結果做為市場目標量測路線比例[3,4],目前車輛中心(ARTC)已完成全台灣27,765km入力資料庫,其中北部區域11,917km、中部12,973km、南部1,307km、東部1,568km。

市場相關性分析部分,主要是由市場與試車場標準不良路所量測之時域訊號,利用雨流計數法,將同一範圍之所有計數資料加在一起,再將市場與試車場

雨流(Rainflow)資料做比較，調整試車場之倍率，此即為加速比，調整後之市場與標準不良路相關性曲線如圖7所示：

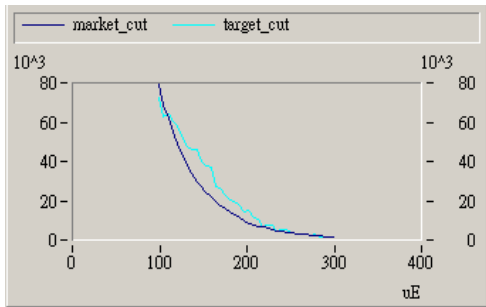


圖7. 市場與標準不良路相關性曲線[3,4]

在試車場路面規劃，本論文選用標準不良路單一路面來作為擬定市場100,000公里的產品規格，車輛中心(ARTC)標準不良路總長為1,001公尺，路寬4公尺，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40km/hr以上，後段路面為高入力狀態，速率僅可維持定速40km/hr(含)以下，速率越快，所累積之疲勞損傷即相對增加。本研究依據車輛中心(ARTC)於92年科專計劃所擬定耐久測試程序之成果，規劃如表3，作為本研究擬定實驗室頻域振動規格依據。

表3. 試車道路面規劃

路面種類	標準不良路(Belgium Road)
量測里程	1,001 公尺
單趟時間	約 89 秒
循環數	2,500 循環
市場里程	100,000 公里
市場加速比	40
行駛方向	順時鐘
行駛速率	前段 60km/hr、後段 40km/hr

本研究之車輛入力訊號量測點為車輛頭燈部位，如圖 8 所示，所使用之加速規為 PCB 三軸向加速規，資料擷取系統採用德國 imc CRONOS-PL 記錄器，整體系統安裝及實車標準不良路量測情形如圖 9，安裝於頭燈處所量測到的三個方向之加速度訊號如圖 10。

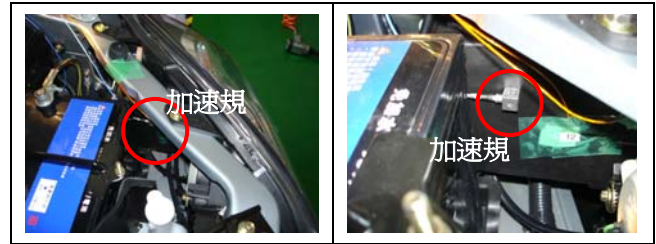


圖8. 加速規安裝處



圖9. 實車量測情形

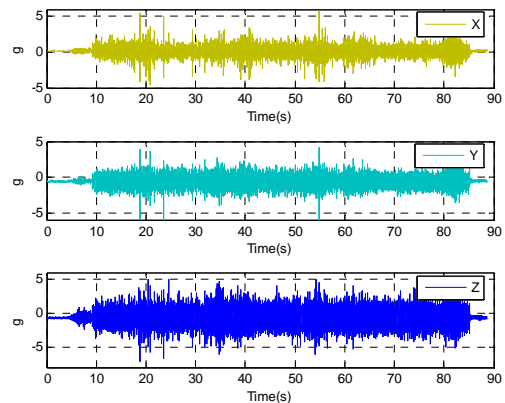


圖10. 頭燈處加速度訊號

### 5.3 振動試驗規格轉換

由所量測之時域訊號，利用前述響應譜概念，再搭配雨流法計算，則可計算頻域下之損傷，由市場規劃之加速比得知，市場100,000公里需標準不良路約執行2,500趟，由疲勞線性疊加，可將一趟的損傷乘上2,500則為總體損傷，計算結果如圖11所示：

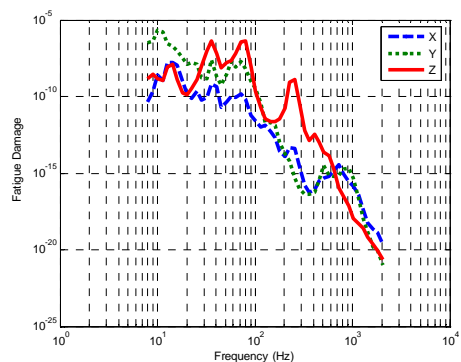


圖11. 疲勞損傷頻譜(FDS)

為了模擬實車服務壽命測試時間，在等效疲勞損傷基礎上，須以加速方式進行；因此，實驗室試驗時間需縮短，所以，利用公式(2.14)，並輸入5.1節所計算之材料疲勞參數( $\beta=7.56$ )，則可以設計出實驗室8小時測試的振動試驗規格，結果如圖12所示。

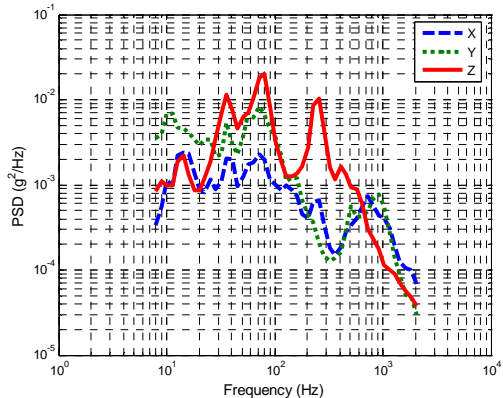


圖12. 振動試驗規格

而針對Z軸所設計之振動規格，其平滑化如圖13、表4所示，由表4即可做為實驗室模擬市場100,000公里之試驗規格資料。

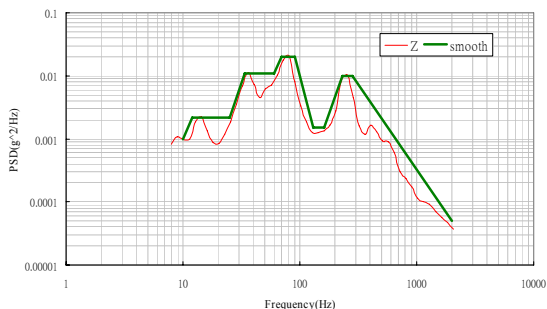


圖13. 平滑化之試驗規格

表4. 振動規格PSD值

Frequency(Hz)	PSD	試驗時間
10	0.001	8 hr
12	0.0025	
25	0.0025	
34	0.013	
60	0.013	
70	0.02	
90	0.02	
130	0.0015	
160	0.0015	
230	0.012	
280	0.012	
2000	0.00005	
$g_{rms}$		

### 5.4 疲勞破壞壽命預估

本節利用應力壽命法計算出頭燈的壽命，此方法之優點為能在時域下直接推估出產品的壽命狀況，但必須能事先準確的將應變計黏貼在破裂處，才能正確的算出其壽命。

首先，將應變計黏貼在會破裂的上鎖附點區域，分別利用2.02g、3.5g及4.68g的能量進行振動試驗，量到的應變訊號如圖14所示。頭燈的材質主要為聚碳酸酯，參考[11]，其楊氏係數為2070MPa，應力振幅(N1,S1)=(5000,53MPa)、(N2,S2)=(100000,18MPa)，而計算出之壽命如表5所示。

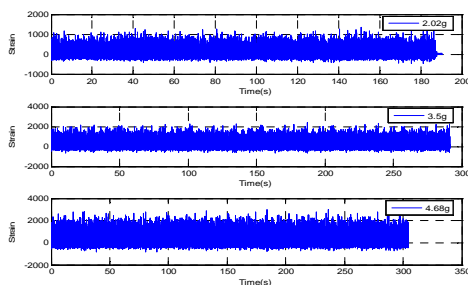


圖14. 應變訊號

表5. 應力壽命法

試驗PSD值	壽命	一個週期損傷
2.02g	40.10 hr	1.3187E-3
3.50g	18.14 hr	4.469E-3
4.68g	13.20 hr	6.397E-3

### 5.5 可靠度水準分佈

本節利用所設計之規格進行頭燈壽命試驗，用於評估在此規格下可靠度之水準。首先，將原本規格2.02g的能量分別調高至3.5g及4.68g進行加速試驗，試驗結果如表6，每顆的破壞模式皆為上鎖附點破裂，由破壞時間資料，利用Weibull理論計算其可靠度，結果如圖15、16，其中4.68g的形狀參數為3.68，特徵壽命為3.39小時；3.5g的形狀參數為1.45，特徵壽命為15.28小時。

表6. 可靠度試驗

試驗PSD		試驗PSD	
4.68 g	破壞時間	3.5 g	破壞時間
#1	3.12 hr	#1	6.77 hr
#2	3.27 hr	#2	29.4 hr
#3	1.53 hr	#3	4 hr
#4	4.27 hr	#4	15 hr
破壞模式：皆為上鎖附點破裂			



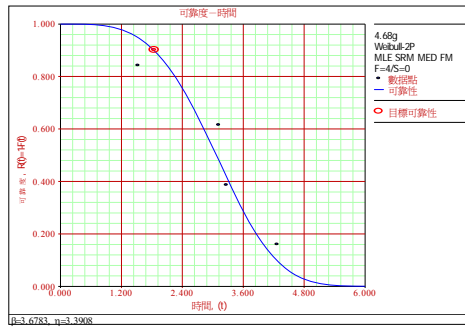
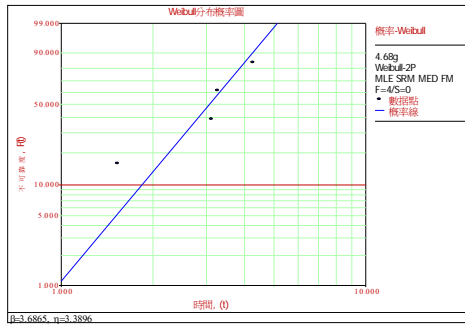


圖15. 4.68g可靠度分佈

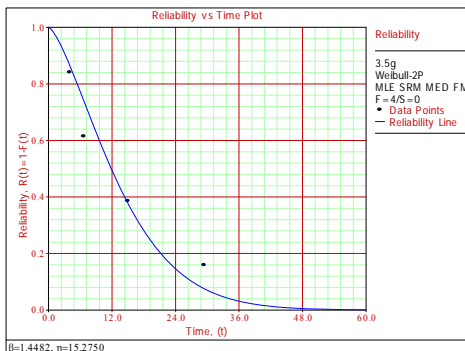
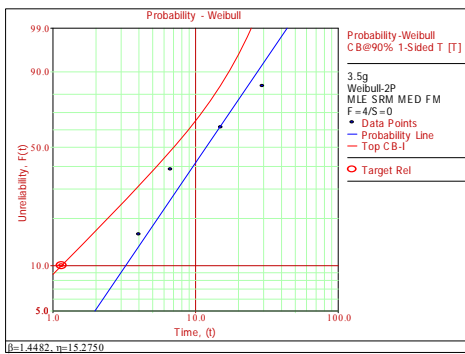


圖16. 3.5g可靠度分佈

藉由加嚴應力可以推出在正常使用狀況下之壽命，所以由表6的資料，利用公式(2.2)則可以回推所設計之2.02g的振動規格之使用壽命，計算後，其形狀參數為1.78，特徵壽命為126.55小時，可靠度分佈曲線如圖17所示。由圖17可以看出所設計之8小時振動規格其可靠度水準為99.25%，而可靠度水準90%時的壽命為36小時。

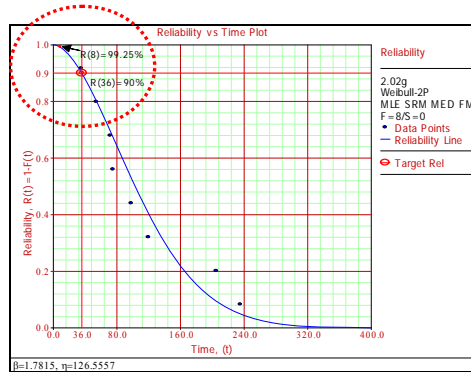
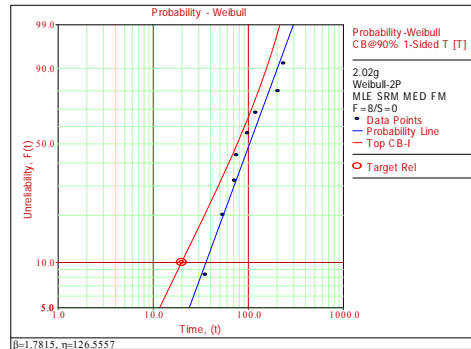


圖17. 設計之規格(2.02g)可靠度分佈

## 6. 結論

環境試驗可用於提升產品的可靠度，但對於試驗所需之規格條件大多屬於機密資料，且如何制定是無從得知的，所以本研究即要說明如何由時域下的動態負荷資料轉換成實驗室測試時所需的試驗規格。此外，藉由所設計之規格利用加速壽命試驗方法，利用Weibull理論進行可靠度分析，去評估在此規格條件下產品之可靠度狀況。

本研究以汽車頭燈為例，由市場100,000公里的使用歷程到實驗室測試8小時的振動試驗規格，及可靠度水準的預估有完整的說明。通常實驗室振動試驗規格大多屬於頻率域測試，所以5.1節主要在於驗證由時域轉換到頻率域的合理性，由結果得知，基於疲勞等效基礎上，可將時域負荷轉換至頻域損傷，並可由此損傷進一步的設計出所需要的規格。

要計算材料的疲勞壽命有許多種方法，而最直接的方法即是利用應變計貼在材料的破裂處量取應變訊號，使用應力壽命法直接計算壽命，在5.4節分別用2.02、3.5g及4.68g執行試驗，此方法可做為先期要得知產品壽命時之評估手段，以便做為執行加速試驗時試驗應力水準與破壞時間之參考。由表5之結果與表6比較，可看出計算出之壽命與實際壽命約差2~4倍的範圍內。

中華民國第八屆可靠度與維護度技術研討會論文集(民國 98 年)

在可靠度部分，本研究使用所制定之頻譜規格，提高試驗能量，共執行8組頭燈的壽命試驗，並回推正常使用下之壽命，得到所擬定之規格的可靠度分佈，如圖17，由圖可看出在8個小時的可靠度水準為99.25%，而其特徵壽命為126.55小時，意謂頭燈於8個小時的振動試驗後，代表市場100,000公里使用之可靠度水準為99.25%。由本研究可知，從規格轉換到可靠度有完整流程，可作為業者在開發新產品時不知如何制定規格之參考及提升可靠度。

## 7. 參考文獻

- [1] Salman Haq, Yung-Li Lee, “Reliability-based Test Track Schedule Development for a Vehicle Suspension System”, *SAE Paper* No.2007-01-1653.
- [2] David Ensor, Chris Cook, “Derivation of Durability Targets and Procedures Base on Real Word Usage”, *SAE Paper* No.2007-26-074.
- [3] 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。
- [4] 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」，27<sup>th</sup> 全國力學會議。
- [5] Su,H., “Vibration Test Specification for Automotive Products Based on Mesured Vehicle Load Data”, *SAE Paper* No.2006-01-0729.
- [6] Dr.A Halfpenny,Mr.F.Kihm, “Misson Profile and Testing Synthesis Based Fatigue Damage Spectrum”, 9<sup>th</sup>International Fatigue Congress USA,2006.
- [7] 廖建義，「應用響應譜分析動態環境及試驗規格」，民 97 年，中華民國第三屆可靠度與維護度實務研討會論文集。
- [8] Caruso, H.; Dasgupta, A., “A Fundamental Overview of Accelerated-Testing Analytic Models”, Reliability and Maintainability Symposium, 1998. Proceedings., Annual,19-22 Jan. 1998 Page(s):389 - 393
- [9] MIL-STD-810 Committee, “Environmental Test Methods and Engineering Guides”, MIL-STD-810F, January 2000.
- [10] SAE J575, “Surface Vehicle Recommended Practice”, Nov. 2006.

- [11] Gyu-Ho Kim, Hongbing Lu, “Accelerated fatigue life testing of polycarbonate at low frequency under isothermal condition”, *Polymer Testing* 27, September 2007.

## 8. 作者簡介

張偉倫

工作單位名稱：財團法人車輛研究測試中心

職稱：副工程師

聯絡地址：彰化縣鹿港鎮彰濱工業區鹿工南七路六號

電話：04-7811222 ext.2332

E-mail：wlchang@artc.org.tw