

振动加速因子试验方法研究*

李奇志^{1,2,3}, 陈国平^{1,2}, 王明旭⁴, 姚华军⁵

(1. 南京航空航天大学振动工程研究所 南京, 210016)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016) (3. 南京电子技术研究所 南京, 210039)

(4. 河南工业大学机电工程学院 郑州, 450007) (5. 杭州航天电子有限公司 杭州, 310015)

摘要 为了快速获得准确的加速因子, 在对 Palmgren-Miner 疲劳累积损伤原理和随机振动宽、窄带应力作用下累积损伤分布特点研究的基础上, 推导出随机振动应力作用下的加速因子计算方程, 以此作为加速寿命方程同时结合加速寿命试验理论, 设计并实施了样件的加速寿命试验。通过对试验数据的 weillbull 模型验证和最小二乘数据处理, 获得了样件材料的振动加速因子。该试验方法为其他材料的加速因子的试验获取和环境振动试验条件的制定提供实践和理论指导。

关键词 加速因子; 随机振动; 疲劳失效; 样件加速振动寿命试验

中图分类号 TB534+.3; TV32+3; V216.2+1

引言

振动环境下产品的破坏模式通常分为两类^[1-2]: 振动疲劳破坏和振动峰值破坏。振动疲劳破坏是振动量值累积量到某一期望值时结构发生破坏, 正常环境应力作用下短期内难以显现。振动峰值破坏是由于响应位移或响应包络线超过某一值从而导致产品结构破坏, 只要超过某一值的振动量值存在, 破坏状态短期内容易显现。

振动环境试验是检验武器装备(产品)的耐振动可靠性的主要方式之一。随着科学技术的发展和设计、制造工业水平的大幅度提高, 产品耐振动疲劳破坏能力相应增强, 一些新产品在现有规定量级下短期内难以达到理想的试验效果, 很难验证产品耐振动环境的适应能力。如果增加试验时间, 则增加了试验成本。通过加大振动量级缩短试验时间的加速振动方法是解决此问题的常用方法。加速振动试验的关键是确定时间与振动量级的等效计算关系的加速因子。虽然有关文献对振动加速因子有一定的推荐, 但范围较宽为 3~26^[3], 目前试验过程中常取的 MIL-STD810F 推荐值为 8, 显然, 对所有材料都取此值是不合理的。

现有的文献对加速振动方面的研究主要集中在

加速因子计算方程推导^[1]、寻找、改善产品的薄弱环节和提高产品可靠性方面^[4]。要想试验获得可用的加速因子, 需要推导出随机振动应力作用下的加速因子计算方程和表达的物理意义, 然后设计样件加速寿命试验及对试验数据进行相应验证和处理, 从而求得该样件材料的振动加速因子。

1 振动加速因子试验获取研究的理论依据

1.1 疲劳累积损伤原理

金属构件的大多数疲劳数据是从等应力幅疲劳试验中获得的^[5-6], 由此建立 $S-N$ 关系, 其中: S 为应力幅; N 为以循环次数(周数)表示的疲劳寿命。这种关系可表示为

$$S^b N_s = A \quad (1)$$

其中: b, A 为材料常数。

按照线性疲劳累积损伤 Palmgren-Miner 假设, 在连续载荷作用下总的累积损伤为

$$D = \int_{s=0}^{\infty} \frac{n_s}{N_s} ds \quad (2)$$

其中: n_s 为应力作用次数; N_s 为达到破坏时的平均破坏均破坏循环次数。

* 南京航空航天大学基本科研业务费专项资助项目(NJ2010009, NS2012015); 江苏省优势学科资助项目
收稿日期: 2012-03-30; 修改稿收到日期: 2012-06-05

1.2 随机应力作用下的损伤累积

1.2.1 窄带应力作用的损伤累积

当应力为严重的共振系统的响应时,应力 $S(t)$ 是中心频率为产品固有频率的窄带过程^[6]。在一段时间 T 内导致的累积损伤为 $D(T)$, 在某一个时间点内当 $D(T) \geq 1$, 产品发生失效。当应力幅值为 s 时, n_s 的循环次数为

$$n_s = E(\rho)T\rho(s) \quad (3)$$

其中: $E(\rho)$ 为随机响应信号峰值频率的期望; $\rho(s)$ 为幅值概率密度函数; T 为作用时间。

将式(1)和式(3)代入式(2), 可得

$$D = \frac{E(\rho)T}{A} \int_0^{\infty} S^b \rho(s) ds \quad (4)$$

窄带过程中, 其峰值(幅值)概率密度函数为 Rayleigh(瑞利)分布

$$\rho(s) = \frac{S}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

且其峰值频率与零穿越频率相近, 可以假设为

$$E(\rho) = f_0 = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4), 得到在 T 时间段内窄带应力作用下累积损伤均值为

$$\bar{D}(T) = \left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right) \left(\frac{T}{A}\right) (\sqrt{2}\sigma_s)^b \Gamma\left(\frac{b}{2} + 1\right) \quad (7)$$

其中: ω_n 为结构的固有频率; σ_s 为结构动力响应力均方根值。

1.2.2 宽带应力作用的损伤累积

当产品在宽带应力作用时, 窄带应力作用下的计算结果将不能使用, 可以通过对窄带应力作用下的计算进行修改。

记 $S_{WB}(t)$ 为均方值是 σ_s 的宽带高斯过程应力, 其期望穿零率为 $n_s^+(0)$, $S_{NB}(t)$ 为与宽带应力 $S_{WB}(t)$ 具有相同的均方根值和穿零率的窄带应力值, 则在宽带 $S_{WB}(t)$ 作用下的累积损伤为

$$D = \varphi(\epsilon; b) D_{NB} \quad (8)$$

其中: D_{NB} 为受相等的窄带随机应力 $S_{NB}(t)$ 累积损伤; ϵ 为应力响应谱的带宽参数。

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{\left[\int_0^{\infty} f^2 W_S(f) df\right]^2}{\left[\int_0^{\infty} W_S(f) df\right] \left[\int_0^{\infty} f^4 W_S(f) df\right]}} \quad (9)$$

其中: f 为振动频率; $W_S(f)$ 为频域内的应力响应功率谱密度; $\varphi(\epsilon; b)$ 为 ϵ 和 b 的函数修正因子。

Wirsching 通过模拟各种谱型和运用雨流方法测量振动幅度得到经验修正因子^[7]

$$\varphi(\epsilon; b) = K_1(b) + [1 - K_1(b)](1 - \epsilon)^{K_2(b)} \quad (10)$$

其中

$$K_1(b) = 0.926 - 0.033b \quad (11)$$

$$K_2(b) = 1.587b - 2.323 \quad (12)$$

对某单元作用宽带随机应力一段时间 T 内, 累积损伤的均值为

$$\bar{D}(T) = \varphi(\epsilon; b) n_s^+(0) \left(\frac{T}{A}\right) (\sqrt{2}\sigma_s)^b \Gamma\left(\frac{b}{2} + 1\right) \quad (13)$$

其中: $n_s^+(0)$ 为相等窄带过程期望穿零率。

$$n_s^+(0) = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 W_S(f) df}{\int_0^{\infty} W_S(f) df}} \quad (14)$$

其中: $W_S(f)$ 为结构动力响应加速度功率谱密度。

2 振动加速因子计算方程推导

2.1 加速振动试验量级的决定

加速振动模拟试验通常采用两种方法, 可使产品在短期内达到与产品使用环境相等的疲劳损伤:

- 保持振动特性不变, 只改变随机振动的频率特性, 由于产品在随机交变应力的作用下是否因损伤而导致破坏完全取决于破坏面的状态, 而破坏面是振动频率的函数, 它的状态随着频率的变化而改变, 因此改变频率特性不能达到加速试验的目的;
- 提高振动量值不改变破坏面的状态, 但量值必须控制在一定的范围内。根据线性疲劳累积损伤原理, 通常采用 c. 类方法保持其频率特性的相似性, 即振动试验条件加速度功率谱密度曲线谱型不变, 人为提高加速试验的振动量值。

2.2 加速因子计算方程的推导

根据 Palmgren-Miner 原理, 产品在相同谱型、不同的振动量级下假设为 $W_{S1}(f)$, $W_{S2}(f)$, 由式(7)可得窄带情况下的损伤累积为

$$\bar{D}_1(T) = \left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right) \left(\frac{T_1}{A}\right) (\sqrt{2}\sigma_{s1})^b \Gamma\left(\frac{b}{2} + 1\right) \quad (15)$$

$$\bar{D}_2(T) = \left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right) \left(\frac{T_2}{A}\right) (\sqrt{2}\sigma_{s2})^b \Gamma\left(\frac{b}{2} + 1\right) \quad (16)$$

在累积损伤相等的情况下, 即 $\bar{D}_1(T) = \bar{D}_2(T)$, 所以有

$$\left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right)\left(\frac{T_1}{A}\right)\left(\sqrt{2}\sigma_{s_1}\right)^b\Gamma\left(\frac{b}{2}+1\right) = \left(\frac{\omega_n}{2\pi}\right)\left(\frac{T_2}{A}\right)\left(\sqrt{2}\sigma_{s_2}\right)^b\Gamma\left(\frac{b}{2}+1\right) \quad (17)$$

得到
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\sigma_{s_2}}{\sigma_{s_1}}\right)^b \quad (18)$$

在宽带随机作用下同样可得到加速因子计算方程为式(18),可见在整个频率段下的振动加速因子如式(18)所示。

3 试验求取加速因子

由加速振动方程式(18)可以得到:a. 该方程表

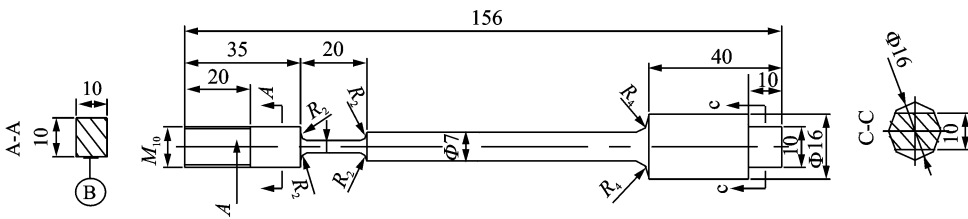


图1 试件示意图(单位:mm)

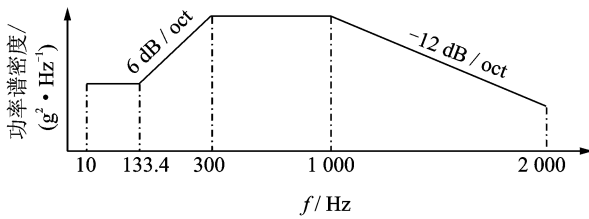


图2 振动量级谱型

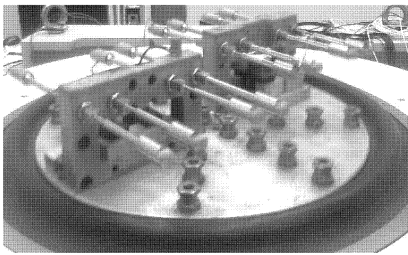


图3 试件试验安装图

述的振动作用的时间只与谱型相同的加速度均方根值有关;b. 加速因子 b 为材料的疲劳特性,它与振动量级的谱型和加速度均方根值无关,是材料的固有特性,只与材料有关。

由此可得,对样件进行加速振动寿命试验求解 b 值,所得 b 值可用于所有使用此材料装备的振动试验条件的制定。

以某设备安装架所用材料作为试验样件材料,设计试件薄弱部位 d 处为 3 mm,形状如图1所示;选定加速振动试验振动量级谱型如图2所示;振动安装方式如图3所示;制定试验方案如表1所示。

水平量级下各试件的失效时间如表2所示。

表2 各应力水平下的试件的失效时间

量级/g	试件									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	10.415	218.520	323.226	029.730	737.341	6				
15	4.1	4.7	6.4	7.2	8.7	9.7	10.311	412.614	2	
18	1.5	2.0	2.4	2.75	3.2	3.5	3.7	4.1	4.6	5.5

3.2 试件加速振动基本假定

假定1:在正常振动应力水平加速度均方根值为 σ_0 和加速应力水平 $\sigma_{s_1} < \sigma_{s_2} < \dots < \sigma_{s_k}$ 时,产品寿命 T_i ($i=1,2,\dots,k$) 服从威布尔分布,分布函数为 $F(t) = 1 - \exp[-((t-\gamma)/\eta)^m]$,其中: $m_i > 0$,为形状参数; $\eta_i > 0$,为特征寿命; γ 称做位置函数。

假定2:产品在加速应力水平下的失效机理与正常应力水平下的失效机理相同,由于威布尔分布的形状参数 m 的变化反映了产品的失效机理的变化,这一假定反映在数学上,即各个应力水平下威布尔分布的形状参数 m_i 是相同的, $m_0 = m_1 = \dots = m_k$ 。

假定3:产品的特征寿命 η 与应力 σ_s 满足加速振动寿命方程,即

$$\frac{\eta_i}{\eta_k} = \left(\frac{\sigma_{s_k}}{\sigma_{s_i}}\right)^b \quad (19)$$

表1 $k=3$ 时样品等分配恒定应力加速试验方案

试验水平	振动应力加速度均方根值/g	样件数
1	12	10
2	15	10
3	18	10

3.1 试验数据

按照表1试验方案对试件进行加速振动寿命试验,所有试件都发生振动疲劳失效断裂,在3个振动

3.3 模型检验

在概率纸上绘出分布直线,现取各试件的失效时间作为概率计算点,由中位秩公式 $F(t_j) = \frac{j-0.3}{n+0.4}$ 估算产品的失效概率估计值 $\hat{F}(t_j)$ 。按照表2试件的试验数据,求得各组试验应力水平下试件失效概率的估计值如表3所示。

表3 试件失效概率的估计值

序号	失效时间/h			失效概率/%
	12g	15g	18g	
1	10.4	4.1	1.5	6.73
2	15.2	4.7	2.0	16.35
3	18.5	6.4	2.4	25.96
4	20.3	7.2	2.7	35.58
5	23.2	8.7	3.2	45.19
6	26.0	9.7	3.5	54.81
7	29.7	10.3	3.7	64.42
8	30.7	11.4	4.1	74.04
9	37.3	12.6	4.6	83.65
10	41.6	14.2	5.5	93.27

根据试件的可靠性统计模型,将表3中各组试验应力下的数据 $|t_j, \hat{F}(t_j)|$ 点画到同一张威布尔概率纸上,如图4所示。可以看出,3组试验数据点的走势均为直线,且其数据点的走势大致平行,故可以认为在各振动应力下试件的寿命服从二参数威布尔分布。

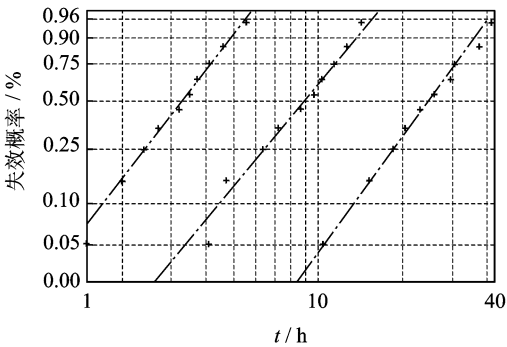


图4 威布尔概率纸上数据标图

3.4 参数估计的统计方法

根据Soman等^[8]研究认为当B在0~3的范围内最小二乘法对于weibull分布参数能得出很好的估计,因此本试验数据采用最小二乘估计(LSMR)。对于二参数的威布尔分布,其分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (t > 0) \quad (20)$$

对式(20)进行变换,有

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = m \ln t - m \ln \eta \quad (21)$$

若令 $Y = \ln \ln \frac{1}{1-F(t)}, x = \ln t, a = -m \ln \eta, c = m$, 则

$$Y = a + cx \quad (22)$$

假定在任一组试验应力水平处共有 γ_i 个试样发生失效,那么理论值 $Y = a + bx_j$ 与试验值 \hat{Y}_j 之间误差的平方和为

$$\theta = \sum_{j=1}^{r_i} [\hat{Y}_j - (a_i + c_i x_j)]^2 \rightarrow \min (j = 1, 2, \dots, 10) \quad (23)$$

将表2的数据 $|t_j, \hat{F}(t_j)|$ 代入式(23),经过编程计算求得 a_i, c_i 值,由 $a_i = -m_i \ln \eta_i, c_i = m_i$ 求得试件在振动应力水平下的分布参数估计值如表4所示。

表4 各试验点处分布参数的LSMR估计值

振动应力/g	形状参数 \hat{m}_i	尺度参数 $\hat{\eta}_i$
12	2.642 7	28.654 0
15	2.689 2	10.149 4
18	2.814 2	3.747 4

由于各试验应力水平下寿命分布的直线大致平行,对于威布尔分布来讲是形状参数大致相等,其LSMR估计值 \hat{m}_1, \hat{m}_2 和 \hat{m}_3 不完全相等,是由于试验误差和分析误差造成的,与样本量大小也有关系,因此可由表4中的 $\hat{m}_i (i=1, 2, 3)$ 取加权平均得到共同的形状参数 m 的估计值为

$$\hat{m} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \hat{m}_i \quad (24)$$

得到 $\hat{m} = 2.715$, 再将 \hat{m} 代入 $a_i = -\hat{m} \ln \eta_i$, 得到加权后的尺度参数 $\hat{\eta}_i$ 如表5所示。

表5 尺度参数 $\hat{\eta}_i$ 加权估计值

振动应力	σ_{s_1}	σ_{s_2}	σ_{s_3}
形状参数 \hat{m}	2.715		
尺度参数 $\hat{\eta}_i$	28.503 2	10.130 7	3.772 9

3.5 加速因子计算

由加速振动寿命方程及基本假定可知 $\frac{\eta_i}{\eta_j} =$

$$\left(\frac{\sigma_{s_j}}{\sigma_{s_i}}\right)^{b_{i,j}},$$

得到 $b_{i,j}$ 值如表6所示。

表6 $b_{i,j}$ 计算值

$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$
4.637	4.987 3	5.417

对 $b_{i,j}$ 值取平均可得

$$b = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{i=3} b_{i,j} = 5.015 \quad (25)$$

3.6 加速因子运用

某设备安装架需要延寿至 3 000 h, 为了验证安装架的可靠性, 采用正常耐久试验的试验量级 4.67g, 每方向需要 15 h, 若把试验量级提高到 7g, 试验谱型与振动量级一样, 若按照本研究所得 b 值为 5.015, 根据公式 $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\sigma_{S_2}}{\sigma_{S_1}}\right)^b$ 可得每个方向只需要 2 h, 即可取得相同的效果。

4 结束语

首先对加速因子计算方程进行了理论推导, 在此基础上制定样件的加速振动寿命试验方案, 对试件加速振动失效数据进行图形法模型检验, 应用估计性能优良的最小二乘估计法求出试件在加速振动应力作用下的特征寿命, 通过加速振动寿命方程计算关系得到该试件的加速因子, 并将此结果运用于某装备安装架可靠性延寿验证试验中。该振动加速因子试验求取方法可为其他材料的加速因子的求取和环境振动试验条件的制定提供理论探索和实践指导。

参 考 文 献

- [1] 王冬梅, 谢劲松. 随机振动试验加速因子的计算方法[J]. 环境技术, 2010, 28(2): 47-51.
Wang Dongmei, Xie Jingsong. Acceleration factor calculation method of random vibration test[J]. Environmental Technology, 2010, 28(2): 47-51. (in Chinese)

- [2] 周敏亮, 陈忠明. 飞机结构的随机振动疲劳分析方法[J]. 飞机设计, 2008, 28(2): 46-50.
Zhou Minliang, Chen Zhongming. Vibration fatigue analysis of aircraft structure d to random loading[J]. Aircraft Design, 2008, 28(2): 46-50. (in Chinese)
- [3] Christian L. Mechanical vibration and shock IV fatigue damage volume [M]. [S. l.]: Hermes Penton Ltd, 2002: 86-88.
- [4] 周海亭, 陈光冶. 汽车燃油分配管加速振动试验研究[J]. 机械强度, 2003, 25(5): 572-575.
Zhou Haiting, Chen Guangye. Experimental research on accelerating vibration test for automotive fuel assembly[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(5): 572-575. (in Chinese)
- [5] 朱位秋. 随机振动[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 534-544.
- [6] Sun Fengbin, Kececioglu D B. Fatigue reliability evaluation and preventive maintenance policy for a structural element under random vibration[J]. The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 1996: 2166-2174.
- [7] Wrisching P H, Light M C. Digital simulation of fatigue damage in offshore structures, computational methode in offshore structures[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1980, 106(7): 177-184.
- [8] Soman K P, Misra K B. A least square estimation of three parameters of a weibull distribution[J]. Microelectronics Reliability, 1992, 32(3): 303-305.



第一作者简介: 李奇志, 男, 1977年2月生, 高级工程师。主要研究方向为环境振动试验技术和振动试验仿真分析。曾发表《随机振动环境实测数据无偏估计方法研究》(《现代雷达》2011年第33卷第2期)等论文。

E-mail: liqizi8169@163.com