

特种产品运输振动加速模拟试验条件的研究

姚国年^{1,2}, 卫军胡¹, 王丽娟², 孙国基¹

(1. 西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安; 2. 中国人民解放军 63878 部队, 714200, 陕西华阴)

摘要: 为了正确确定特种产品定加速运输振动模拟试验的条件, 利用概率论与数理统计的方法, 在线性疲劳累积损伤假设的基础上, 以相同的结构疲劳损伤作为加速模拟的等效准则, 确定了特种产品加速模拟振动试验所要求的振动量值和试验时间. 通过在不运输、跑车试验和加速模拟振动的对比试验证明, 将提高振动量值、缩短试验时间的加速试验方法应用于特种产品加速运输模拟试验是切实可行的, 它可以节约人力、物力和财力, 提高试验效率, 也可以作为特种产品或包装箱设计及考核的标准.

关键词: 特种产品; 运输振动; 疲劳损伤; 对比试验

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0074-04

Experimental Conditions of the Accelerated Vibration Simulation for Special Product Transportation

YAO Guonian^{1,2}, WEI Junhu¹, WANG Lijuan², SUN Guoji¹

(1. Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The 63878 Unit of PLA, Huayin, Shaanxi 714200, China)

Abstract: To determine correctly the accelerated transportation vibration experiment conditions of special products, the vibration intensity and lasting time of the simulated vibration are evaluated with the fatigue damage equivalent principle based on the probability theory, mathematical statistical methods and the theory of linear accumulated fatigue damage. A set of comparative experiments including lack of transportation, real road transportation and vibrator are conducted for a type of special products. The results show that the strategy, i. e., increasing the vibration intensity and shortening the lasting time of the simulated vibration, is feasible to apply to accelerated transportation simulation experiment to save manpower, material resource, financial resource and improve the experiments efficiency, and provide a criterion to design and examine the special products and packing case.

Keywords: special product; transportation vibration; fatigue damage; comparative experiment

在特种产品定型试验中, 为了考核产品在实际运输振动环境作用下的适应性和可靠性, 一般必须进行运输试验. 由于客观条件的限制, 所以特种产品的公路运输试验一般只能采用实地跑车试验, 但跑车试验不仅非常昂贵, 而且费时费力、安全隐患较大, 不利于保密. 随着科学技术的迅速发展, 目前人们已经开始在试验室中利用振动设备来代替跑车也进行模拟运输试验.

多年来, 在没有实测数据的情况下, 通常依据 GJB150 或 GJB3493—98 进行试验, 然而 GJB150 或 GJB3493—98 规定的试验量值、谱形均参考美军标准 MIL-STD-810 制定的. 由于我军的运载工具不同于美军, 如果完全照搬标准中的试验谱形和量值进行试验, 可能与特种产品运输的实际环境相差甚远, 甚至出现过试验或欠试验的现象, 因此这 2 个标准均明确规定了优先选用实测数据^[1-3]. 另外, 将这

2个标准中给定的振动环境条件应用到试验室作为试验考核要求,它们却没有给出具体的试验时间.因为振动环境条件不等同于试验要求,所以必须进行一定的数据转换,但这项工作一直没有得到很好的解决.

本文针对这些问题,利用概率论与数理统计方法,在线性疲劳累积损伤假设的基础上,以特种产品相同结构的疲劳损伤作为加速模拟的等效准则,确定了模拟振动试验所要求的振动量值和试验时间,为特种产品加速模拟试验奠定了技术基础.

1 疲劳累积损伤原理

线性疲劳累积损伤的 Palmgren-Miner 原理认为,当产品承受振动作用时,其结构中产生应力,每一次应力循环都要在结构上产生一定量的损伤,当损伤量达到一定值时,构件将产生裂纹,从而导致破坏,而这种疲劳损伤的累积基于线性的这一假设,即不同量级的载荷使产品的增量损伤可以线性相加.疲劳损伤的程度与产品吸收的能量成比例,且损伤与加载顺序无关.线性疲劳累积损伤原理可用下列公式表示,即总的疲劳损伤为

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

$$S^\alpha N = C \quad (2)$$

式中: d_i 是第 i 级载荷产生的疲劳损伤增量; n_i 是第 i 级载荷的循环次数; N_i 是第 i 级载荷对应的疲劳破坏的循环次数; C 是由试验确定的常数; α (3~25) 是产品的固有值,对于特种产品, α 取 3.75 或 4. 应力 S 与破坏循环次数 N 之间的关系如图 1 所示.

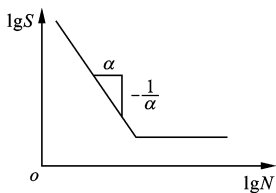


图1 产品的应力与破坏循环次数曲线

2 加速振动模拟试验条件的确定

加速振动模拟试验通常采用 2 种方法,可使特种产品在较短时间内达到与跑车试验相等的疲劳损伤^[4-5]:①保持振动特性不变,只改变随机振动的频率特性,由于特种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;②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.因此,根据线性疲劳累积损伤原理,采用实测得到的振动谱型并增大振动量值,即利用实际测得的随机振动加速度功率谱密度曲线,保持其频率特性的相似性,人为地提高加速模拟试验的振动量值,使产品在加速运输模拟试验中受到的损伤与汽车在实际运输中受到的损伤从统计上一致,从而缩短了试验时间.

2.1 振动试验量值的确定

对于实测数据,从理论上讲,应利用包络法选取特种产品在整个运输过程中各频率点所遇到的最大振动量值作为振动试验条件的量值,或是在一定置信度下含一定数据比例的极限值.由于实测数据样本的种类和数量有限,因此必须对数据来源、试验样品情况等综合考虑.根据 GJB/Z 126-99 中提出的方法,在对振动谱数据进行统计归纳时,首先要对所有测量通道和所有状态下的数据进行检验,将属于同一集合的通道和状态进行合并,从而形成区域集和状态集,也就是对统计的功率谱密度数据分别进行区间估计,划分适当的区域,并对测量数据进行包括区间估计、载荷分散系数估计、安全系数和试验量值因子的估计等统计处理,从而得到第 n 区域的最大振动功率谱密度 $W_{\max}(n)$. 在实测数据足够多并且包含产品所有状态的情况下,用以下方法^[6]确定第 n 区域的振动试验值

$$W(n) = ZAbW_{\max}(n) \quad (3)$$

式中: Z 是载荷系数; A 是安全系数,一般取 1~1.5; b 是试验值因子,一般取 1 (单件试验时) 或 1.395 6 (小批量试验时).

由式(3)的方法可以得到特种产品在整个频率范围内的振动试验值,根据特种产品运输的实际特点,试验使用的输入谱应尽可能地采用实测谱的量值,例如专用试验路面实测谱.如果无实测数据,则采用 GJB3498-98 中提供的功率谱密度值加 1 倍的标准偏差,或采用 MIL-STD-810F 规定的功率谱密度平均值加 1 倍的标准偏差.

2.2 振动时间的选择

等效加速试验的关键在于求得缩短试验时间的倍数^[7-10],根据数理统计方法,可得到具体的推导公式.分析多次实测得到的时间历程和频谱,可以发现公路运输中振动应力分布函数多为正态分布或威布尔分布,因此设实际公路运输振动加速度峰值 X_i 为 $N(\bar{X}, \sigma)$ 正态变量,对应于 X 和 $X + X$ 之间的 X_i 的概率为 P_i ,则所有峰值加速度出现的总循环次数为

$$n = \sum_{i=1}^K n_i = n_1 + n_2 + \cdots + n_K = n(P_1 + P_2 + \cdots + P_K)$$

式中： $P_1, P_2, \cdots, P_K$ 分别是各量级峰值加速度分别出现的概率. 将其代入式(1)得

$$D = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} = n \sum_{i=1}^K \frac{P_i}{N_i} \tag{4}$$

由疲劳曲线方程式(2)得

$$N_i = N_r \left(\frac{X_i}{X_r} \right)^{-\alpha}$$

式中： N_r 是参考峰值加速度 X_r 所对应的疲劳破坏的循环次数. 将 $P_1, P_2, \cdots, P_K$ 和 $N_1, N_2, \cdots, N_K$ 同时代入式(4), 得到实际公路运输的振动峰值加速度为 X_{iR} 时的总疲劳累积损伤为

$$D_1 = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_R}{N_r} \sum_{i=1}^K \left(\frac{X_{iR}}{X_r} \right)^{\alpha} P_i \tag{5}$$

在加速运输模拟试验中, 如果把振动值提高 m 倍, 则 $X_{iA} = mX_{iR}, \sigma_A = m\sigma_R, \bar{X}_A = m\bar{X}_R$, 总疲劳累积损伤为

$$D_2 = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_A}{N_r} m^{\alpha} \sum_{i=1}^K \left(\frac{X_{iR}}{X_r} \right)^{\alpha} P_i \tag{6}$$

如果 2 次作用造成的总疲劳损伤相同, 即 $D_1 = D_2$, 由式(5)和式(6)得

$$m^{\alpha} = \frac{n_R}{n_A} \tag{7}$$

将缩短试验的时间比定义为 $\tau = T_R/T_A$, 由于在实际运输过程中应力不易直接测定, 通常用与 S 成一定比例关系的加速度值 G 来代替应力, 因此可推导出

$$\tau = \frac{T_R}{T_A} = \frac{n_R}{n_A} = m^{\alpha} = \left[\frac{G_{rmsA}}{G_{rmsR}} \right]^{\alpha} \tag{8}$$

式中： T_R 是实际公路运输所需时间； T_A 是加速运输模拟试验的时间； G_{rmsR} 是实际运输试验测得的最大均方根加速度值； G_{rmsA} 是在加速试验条件下的总均方根加速度值. 一般情况下, m 不得超过实际公路运输峰值的 1.25 倍.

3 应用实例

由于特种产品运输里程为 500 km, 假设有 65% 的粗糙路面(325 km), 平均速度为 16 km/h, 因此若要求模拟试验疲劳损伤等价于实际环境的疲劳损伤, 则实际运输时间为 20 h, 按照上述公式可得试验室的等效考核时间为 2 h.

根据疲劳累积损伤原理制定的加速运输模拟等效方案, 利用一台小型 3 向 6 自由度的液压振动试验台, 对小型弹丸产品进行了运输振动试验. 试验条件为: 振动谱(如图 2 所示)采用 GJB3498-98 中提供的加速度谱密度 a_{SD} , 振动量采用规定的功率谱密度平均值加 1 倍的标准偏差, 试验时间为 2 h. 试验方法是将某一批次药温、装药量、装药型号、质量等完全相同的弹丸, 经过随机抽样的方式选取 18 发弹丸, 分为 3 组, 每组 6 发, 第 1 组不进行运输试验, 第 2 组进行实际的道路跑车运输试验, 第 3 组通过振动台模拟试验. 当各组试验结束后, 首先通过外观检查得出各组的损坏情况, 然后在完全相同的发射、测试条件下进行实弹射击, 通过相对应的膛压、初速等性能对比, 分别得出该批次弹丸的考核结果. 在某型号弹丸定型试验中, 分别进行了上述试验, 结果是运输后弹丸的表面损坏情况与振动试验后的情况大致相同. 未运输弹丸的平均初速为 1 593.02 m/s, 方差为 5.207 m/s, 膛压的平均值为 4 607.17 MPa, 方差为 33.394 MPa; 运输后弹丸的平均初速为 1 597.15 m/s, 方差为 2.222 m/s, 膛压平均值为 4 635.33 MPa, 方差为 37.792 MPa; 通过振动台振动后弹丸的平均初速为 1 598.83 m/s, 方差为 3.463 m/s, 膛压的平均值为 4 642.73 MPa, 方差为 35.864 MPa. 由试验可以看出, 经过运输前后和振动试验后, 弹药的弹道一致性很好, 考核的结果基本一致, 说明运输和振动对该产品没有太大影响.

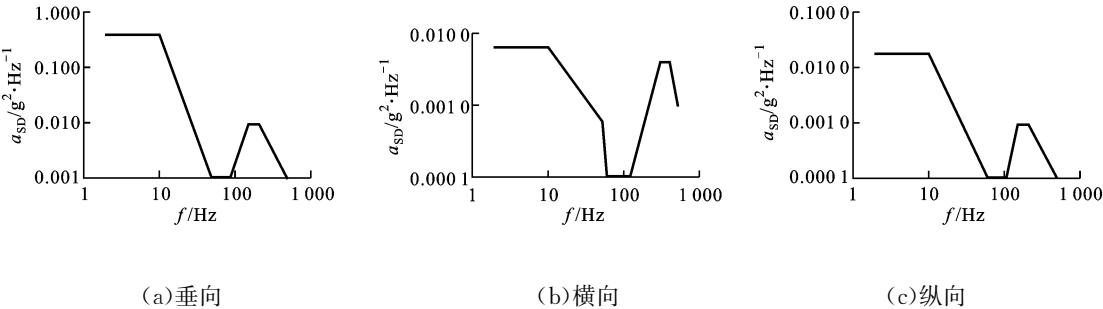


图 2 运输模拟试验的加速度谱密度曲线

通过大量试验表明:对于同一产品,经过跑车和模拟振动试验得到的性能参数、合格率基本相同,评判结论也基本一致,但是加速运输模拟试验比跑车运输试验更严格。

4 结 论

利用振动台对特种产品进行模拟加速运输试验是一项新的试验技术,也是改进传统试验方法的必然趋势。本文依据线性疲劳累积损伤理论、相同的结构疲劳损伤的等效准则,确定了加速模拟振动试验条件,通过对比试验验证,得出的结论如下。

(1)通过实测数据来确定振动试验值,可以更真实地反映特种产品的实际运输状况,避免出现欠试验或过试验的情况。

(2)通过提高振动量值、缩短试验时间的加速试验方法,可以节约人力、物力和财力,提高试验效率。

(3)将文中确定的试验条件应用于加速运输模拟试验中,不仅能够满足标准要求,达到考核产品的目的,而且还可以作为今后特种产品或包装箱的设计标准。

参考文献:

- [1] 中国航空工业第三〇一研究所. MIL-STD-810F 环境工程考虑和实验室试验 [S]. 北京:中国航空工业总公司第三〇一研究所, 2000:8.
- [2] 中国人民解放军总装备部. GJB3493—1998 军用物资运输环境条件[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 1998:11.
- [3] WILLIAM H C. The origin of the composite wheeled vehicle, two-wheeled trailer, and tracked vehicle vibration schedules in MIL-STD-810D/E [J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences, 1997, 40(2): 31-37.
- [4] 王保乾. 用数控电子-液压振动台模拟整体大件产品的公路运输试验 [J]. 环境技术, 2000, 18(2): 2-8. WANG Baoqian. Using numerical control electro-hydraulic shaker to simulate road transportation test for whole product [J]. Environmental Technology, 2000, 18(2): 2-8.
- [5] 丁楚官. 加速运输模拟中的疲劳累积损伤原理 [J]. 环境技术, 1985, 3(3): 33-39. DING Chuguan. Accumulated fatigue damage principle of simulating accelerated transport [J]. Environmental Technology, 1985, 3(3): 33-39.
- [6] 马升,徐明. 振动环境试验条件的确定 [J]. 航空标准化与质量, 2004, 37(2): 38-43. MA Sheng, XU Ming. Determination of vibration environment experiment conditions [J]. Journal of Aeronautic Standardization & Quality, 2004, 37(2): 38-43.
- [7] 胡志强,法庆衍. 随机振动试验应用技术 [M]. 北京:中国计量出版社, 1996: 12.
- [8] 朱学旺. 疲劳损伤等效在随机振动试验中的应用 [J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 11-13. ZHU Xuewang. Application of fatigue damage equivalence in random vibration test [J]. Journal of Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 11-13.
- [9] WILLIAM I K. Vibration testing equivalence — how many times of testing equals how many miles of transportation [J]. ISTA CON2000, 2000, 4(26): 303-316.
- [10] ROBERTO T. Cycle distribution and fatigue damage under broad-band random loading [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(11): 1137-1147.

(编辑 管咏梅)