振动台进行冲击响应谱试验控制参数优化方法

晏廷飞,李晔,朱子宏

(北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

摘要:冲击响应谱(SRS)试验已经成为大多数航天产品必做的力学环境试验项目之一,而利用电动振动台进行模拟试验已成为常用方法。在试验实施过程中如果控制策略、参数设置不合理,经常导致控制过试验/欠试验,或者持续时间过长等问题。文中利用小波合成冲击响应谱原理,结合SD2560控制系统,通过调试和试验确定如何较好地利用振动台开展冲击响应谱试验,给出了小波各参数的确定及优化方法。

关键词:振动台;冲击响应谱;控制参数 中图分类号:TB534⁺.2 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2012)03-0033-04

Optimization Method of Control Parameters in SRS Test by Shaker

YAN Ting-fei, LI Ye, ZHU Zi-hong

(Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: SRS test has become one of the required dynamics tests of most spacecraft products. Simulation test with electric shaker has become a common method. The problems of over test, under test, and too long duration often exist due to improper application of control strategy and parameter setting. The methods of parameter determination and optimization using the theory of wavelets synthesis for SRS were put forward. The ways to carry correct SRS test by shaker as well as the SD2560 control system were discussed through examinations and tests.

Key words: shaker; SRS; control parameter

随着航天技术的发展,对冲击环境的地面模拟 日益受到重视。实际测量数据表明,航天器研制过 程中遇到的冲击环境大多以复杂的振荡波形出现, 且每次遇到的冲击过程本质上是不可重复的,因此 无法采用经典冲击从时域上准确描述冲击载荷,标 准规定进行冲击响应谱(SRS)试验已经成为大多数 航天器产品必做的力学环境试验项目之一¹¹。 由于受各种条件如模拟设备、试验工装、试验实施方法选择等条件限制,目前冲击响应谱试验存在不同的问题,如试验方法选择、控制参数设置不合理,导致受试产品过试验、欠试验、持续时间过长等。文中通过小波合成冲击响应谱原理,给出如何利用电动振动台较好地开展冲击响应谱试验,并给出小波各参数的确定原则及优化方法。

收稿日期: 2012-02-14

作者简介: 晏廷飞(1975—),男,云南宣威人,高级工程师,主要从事航天器动力学环境试验模拟研究。

1 冲击环境及规范要求

航天产品在发射阶段主要经历的冲击环境为爆 炸冲击,是一种确定性非周期性的瞬态振动,其特点 为高幅值振荡波形,持续时间短,一般在20ms内衰 减到0,典型冲击时域谱如图1所示。试验规范给出 的谱型要求如图2所示,持续时间要求小于20ms。



图1 典型冲击时域谱

Fig. 1 Time domain spectrum of typical shock



图 2 冲击响应谱试验规范 Fig. 2 SRS test standard

2 电动振动台模拟冲击响应谱适用范围

目前冲击响应谱主要有3种模拟方式:电动振 动台模拟、机械撞击式、火工品爆炸方式。

电动振动台模拟在载荷的重复性、试验可控性和规范性方面具有优势。由于受振动台冲击加速度幅值的限制,主要用于低量级(在500g以下)、频率范围较窄(低于4kHz)的复杂冲击环境模拟。

对于大于800g的冲击响应谱模拟,通常用机 械撞击模拟方式。目前常用的大型谐振板可进行 1500g以下量级的冲击谱模拟试验^[2]。 火工品爆炸方式可产生与真实爆炸冲击环境特征相似的模拟结果,但由于反复调试工作量比较大, 安全性差,试验结果重复性差¹³,试验成本比较高。 此方法多用于航天器系统产品的冲击环境考核,一 般不用于部件产品冲击环境考核。

考虑到普遍情况,进行冲击试验的部件产品一 般都进行振动试验,因此多数情况下用振动台来完 成相应的冲击响应谱试验。文中主要讨论利用振动 台如何有效地开展冲击响应谱模拟试验,以便给出 控制参数优化方法。

3 利用振动台进行冲击响应谱控制参数的设置及优化方法

以SD公司的SD2560系统为例,其冲击软件模块 提供小波合成及衰减正弦两种基波,采用自动化或半 自动化参数优化方法,但往往得到的时域谱并不能形 成较好的试验结果,还需要根据振动台、夹具等特性, 合理地设置相关参数才能得到理想的试验效果。

3.1 滤波器设置

冲击响应谱试验对高频噪声更为敏感,因此通常选用低通滤波器,为避免波形失真,对截止频率有相应要求,实际试验时可直接将振动台的频率上限设置为滤波器的截止频率fmax。

3.2 采样频率及采样点数设置

依据奈奎斯特抽样定理,采样频率f_s一般应大于 试验最高频率f_{max}的2.5倍。实际上考虑到振动台的 工作频率范围,通常令f_s≥2.5f_{max}。

3.3 阻尼及步长设置

做冲击响应谱试验时一般不考虑阻尼的影响, 因为系统在出现最大变形前,阻尼还来不及发挥消 耗能量的作用;其次,忽略阻尼的影响,能简化计算, 提高安全系数。一般情况下,阻尼较大时取ζ=0.05 (*Q*=10),阻尼较小时取ζ=0.01(*Q*=50)。步长通常 取1/(6 oct),步长越小,小波基波数目越多。

3.4 时域波形优化

由于受到振动台最大加速度幅值的限制,进行

时域波形优化计算时需要同时满足以下条件:

 1)时域波形峰值小于振动台的最大加速度值, 正负峰值应基本相等;

2) 时域波形的持续时间应满足规范要求;

3)该时域波形计算得到的SRS值应满足试验规 范要求。

要满足以上条件,小波变换中可供修正的参数 有3个⁽⁴⁾:基波幅值A_i及其正、负极性基波延迟时间 (相对于0时刻)t_a和基波数目N_i。具体调整时依据 以下原则:

1) A_i的取值按经验公式见式(1):

$$A_i = \frac{A_{\text{SRS}(i)}}{N_i} \times \Delta \tag{1}$$

式中:Asrs(i)为分析频率点对应的冲击谱规范值; *4*为修正系数,与振动台及夹具阻尼特性相关,初始 设置取1.0。

在参数设置时发现,当A_i极性均取正值时,合成 的时域波形正向峰值远比负向峰值大,不能满足上 述条件,这是由于当基波幅值均取正时,各基波的峰 值均为正向峰值,且均在*T_i*/2处取得。各基波的周 期*T_i*均接近*T*₀,使各波叠加峰值偏大,通过调整效果 *t_i*甚微。为此,可将幅值参数*A_i*采用正负交替ⁱ⁵,即:

$$A_i = \frac{(-1)^i}{N_i} A_{\text{SRS}(i)} \tag{2}$$

迭代计算后,合成波形关于时间轴有较好的对称性,且正、负峰值均较小。

2) t_a值的确定要保证各分析频率点的波形成分 彼此叠加,且总时间不超过规定时间范围。设规范 规定持续时间为T₀,对于每个分析频率点都要满足 T_i≤T₀,可由下式计算:

$$T_i = \frac{N_i}{2f_i} \tag{3}$$

首先确定第1个分析频率点的延迟时间*t*_{a0},以后 各分析频率点的延迟时间的确定依据下列公式:

$$t_{d0} < t_{di} + T_i < t_{d0} + T_0 \tag{4}$$

3) N_i的取值可用式(3)计算,在实际选取N_i值时 应保证实际的分析点小于计算点数。

利用振动台进行冲击响应谱试验,首先要在控制系统中进行参数设置,根据前面所述的方法对参数进行合理调整,以得到理想而又实用的谱型,使冲击试验达到最佳效果。

4 试验验证及参数优化

下面以常用冲击响应谱试验条件为例。

试验规范:100~500 Hz,+6 dB/oct

 $500 \sim 4\ 000\ \text{Hz}, 400g$

试验持续时间:≤20 ms

容差:±6dB,Q=10

1)在SD2560控制系统中输入上述试验条件,采 用自动计算方法得到SRS和时域谱如图3所示。





从图3可以看出,自动计算出的频谱基本满足 要求,但对应的时域谱显然与图1的冲击时域谱有 明显差异,需要调整。

2) 时域谱型应满足能量集中、快速衰减、没有 过高的尖峰等基本要求,同时应满足最大幅值的限 制。可供调整的小波参数主要有:幅值Ai、幅值正负 极性、延迟时间t_{di}、半正弦波数Ni。由于调整延迟时 间t_{di} 只影响时域谱,首先调整t_{di},用脉冲生成法 (Generate New Pulse)计算新的谱型。必要时应修改 对应的半正弦波数Ni,以使二者满足式(2)及(3)的 关系。经过不断调整,时域谱型正向尖峰明显降低, 脉冲形状基本符合要求,如图4所示。



图4 调整过程中时域谱及SRS的变化

Fig. 4 Variation of SRS and time domain spectrum during amending

3) 经过上面调整,时域谱基本满足要求,但由 于同时调整 N_i, t_i使小波幅值 A_i可能出现较大波动 (如图4所示),SRS已不满足规范要求,采用幅值收 敛法(Amplitude Convergence)进行调整。经验证,幅 值收敛法只调整幅值 A_i,对小波频率点、延迟时间、 半正弦波数、幅值正负极性等没有影响,因此时域谱 基本没有变化。逐步调整对应频率点的幅值就可获 得满足规范要求的 SRS,如图5所示。

4)参数调整好后,连接振动台进行空台冲击响 应谱试验,试验时发现控制曲线 SRS 高频段会随着 振动台特性的不同而有局部变化,这是因为在振动 台共振频率处会产生冲击能量放大。为避免该频率 点过试验,在控制参数设置时用主动下凹的方法降 低频谱上台体共振峰的输入量级,这样在实际冲击 试验时,就可以得到相对平滑的 SRS。

5)由于振动台完成冲击响应谱试验能力有限, 因此在实际试验时,如有条件还应设计满量级频带 共振特性较好的工装以获得较好的放大系数,以此



图 5 满足规范要求的SRS及时域谱

Fig. 5 SRS and time domain spectrum in accordance with standard

降低振动台推力,提高试验量级。

最后需要说明的是,利用振动台进行冲击响应 谱试验,在试验前,一般通过不断调试使工装上测点 的冲击谱型满足要求,再安装产品进行正式试验。

4 结论

采用小波原理进行冲击响应谱模拟,小波分量的基本参数为小波频率、幅值、半正弦波数、延迟时间、幅值正负极性等。通过对SD2560控制系统冲击响应谱软件模块的设置分析发现,这些参数的优化对试验影响各不相同,结论如下。

1)频率f::对于规范要求的SRS,如果步长确定,则频率参数是固定的,不用调整;2)幅值A::小波幅 值增大,则对应频段的SRS幅值会增大;3)半正弦波 数N::小波数增加或减少,对应该小波频率冲击能量 及SRS能量的增加或减少;4)延迟时间ta:改变延迟 时间对SRS没有影响,但将影响时域波形;5)幅值正 负极性:改变极性影响合成的时域波形,对SRS没有 (下转第65页) corrosion test



Fig. 7 Surface condition of No.18 specimen before and after

的白色斑点最少,这与表3中的腐蚀深度统计结果 相吻合。



图8 不同防护体系试件腐蚀宏观形貌

Fig. 8 Corrosion macromorphology of specimen with different protection system

借助三维视频显微镜 KH-7700 放大350 倍,对5, 6,7 号试件腐蚀损伤进行微观观察,微观形貌如图9 所示。从图9中可以看出16号和18号试件腐蚀损伤 程度比15号和17号的大,这与图8的宏观观测结果 一致。15,16,18号试件多处微弧氧化膜腐蚀破损,露 出的基体被腐蚀,相同面积区域内的腐蚀坑的数目 多,17号试件微弧氧化膜腐蚀破损的数目相对较少。

4 结论

根据对比试验和分析可知,对于该型铸铝合金 T7热处理状态防腐蚀能力强于T5;微弧氧化后的铸 铝合金腐蚀深度随微弧氧化膜的厚度变化不明显,但

(上接第36页)

影响;6)参数优化时还应同时考虑振动台特性、试验夹具等影响因素,以得到更为平滑的SRS。

参考文献:

[1] GJB 1027A—2005,运载器、上面级和航天器试验要求[S]. [2] 李含忠,王招霞.谐振板式大型试件冲击谱模拟技术研



图9 不同防护体系试件腐蚀微观形貌



在相同面积区域内,腐蚀坑的数目明显不同。综合腐 蚀损伤的深度、分布密度和腐蚀形貌状态可知,17号 试件的表面处理工艺(微弧氧化,厚度为50~70μm) 防腐蚀性能较好,微弧氧化膜的厚度有一极限值,大 于极限值,防腐蚀性能降低。

参考文献:

- [1] 段关文,高晓菊,满红,等. 微弧氧化研究进展[J]. 兵器材 料科学与工程,2010,33(5):102—106.
- [2] 陈跃良,徐丽.LY12CZ材料微弧氧化后抗腐蚀及抗疲劳 性能研究[J].新技术新工艺,2006(11):60-62.
- [3] QUESNAY D L, UNDERHILL P R. Fatigue Crack Growth from Corrosion Damage in 7075–T6511 Aluminum Alloy under Aircraft Loading[J]. International Journal of Fatigue, 2003,25(3):371–377.
- [4] SANKARAN K K, WEAVER G E. Corrosion Pit to Crack Transition, AFRL-VA-WP-TR-2003-3010[R]. 2002. (余 不详)
- [5] 张有宏.飞机结构的腐蚀损伤及其对寿命的影响[D]. 西安:西北工业大学,2007:35—39.
- [6] 史强,沈承金,胡光伟.聚乙二醇分散的锌铝铬涂层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为及防腐蚀机理[J].表面技 术,2010(6):15—19.
- [7] 汪定江,郭必新.飞机铝合金结构件腐蚀的原位修复工 艺研究[J].表面技术,2012(1):53—54.

究[J]. 航天器环境工程,2008(2):159—162.

- [3] 穆瑞忠,张建华,皮本楼. 航天器的冲击谱模拟试验方法[J].强度与环境,2008(3):32—37.
- [4] 刘洪英,马爱军,冯雪梅.冲击响应谱控制系统仿真研究[J]. 航天器环境工程,2002(4):38-43.
- [5] 陈小慧,闫兵,李华超.冲击响应谱时域合成算法研究[J]. 环境技术,2007,25(1):10—13.