

文章编号: 2097-1974(2024)01-0101-06

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240118

正弦扫描振动模拟瞬态振动环境等效性研究

王 帅, 马泽鹏, 周 畅, 张明明, 荣克林
(北京强度环境研究所, 北京, 100076)

摘要: 使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境是航天工业的一种传统试验方法, 其对环境考核可能同时存在欠试验和过试验。首先对两者等效性进行分析, 进而采用冲击响应谱、最大响应谱等相关理论, 对等效正弦扫描振动试验条件制定中的扫描速率、阻尼系数进行了研究, 并给出参数选择建议。最终提出了制定正弦扫描振动环境试验条件的步骤, 为采用正弦扫描试验进行低频瞬态环境适应性考核提供借鉴。

关键词: 瞬态振动; 正弦扫描试验; 冲击响应谱; 最大响应谱; 条件制定

中图分类号: O324; V19

文献标识码: A

Equivalence Study on Simulating Transient Vibration Environment Using Sinusoidal Scanning Vibration

WANG Shuai, MA Zepeng, ZHOU Chang, ZHANG Mingming, RONG Kelin
(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing, 100076)

Abstract: The use of sinusoidal scanning vibration to simulate low-frequency transient vibration environment is a traditional testing method in the aerospace industry, and its environmental assessment of products may have both under testing and over testing simultaneously. Firstly, the equivalence between the two is analyzed, and then relevant theories such as impact response spectrum and maximum response spectrum are used to study the scanning rate and damping coefficient in the formulation of equivalent sinusoidal scanning vibration test conditions, and parameter selection suggestions are provided. Finally, steps are proposed to establish the testing conditions for sinusoidal scanning vibration environment, providing reference for the low-frequency transient environment adaptability assessment using sinusoidal scanning testing.

Keywords: transient vibration; sinusoidal scanning test; shock response spectrum; maximum response spectrum; condition formulation

0 引言

航天器产品寿命周期力学环境包含很多低频瞬态激励事件, 典型的如火箭发动机的点火过压、起飞释放、发动机推力瞬变等。因此, 通过地面试验验证产品瞬态振动环境适应性是航天型号设计过程中不可或缺的一环。

对于低频瞬态振动环境的描述方式主要有两种: 一是使用有限持续时间的瞬态加速度时间历程; 二是使用冲击响应谱。使用瞬态加速度时间历程描述时, 由于瞬态加速度时间历程无法进行统计包络, 仅能够通过乘以一个安全系数来考虑瞬态振动环境的随机性和易变性, 往往难以考虑不同过程中频率分量的易变

性。冲击响应谱描述方法的优势在于能够通过统计包络方法得到一个区域内的最大期望振动环境, 并且可以考虑不同过程之间的瞬态振动时间历程的易变性。因此, 在产品的瞬态振动环境设计和试验中, 可以使用单一的冲击响应谱规定设计和试验条件。

对于冲击响应谱描述的瞬态振动环境, 当使用振动环境试验手段进行模拟时, 可采用下列方式之一进行振动激励模拟:

a) 利用不同频率、不同阻尼、不同幅值的瞬态波形(称为子波)的加权组合拟合规定的冲击响应谱, 重构一个瞬态加速度时间历程^[1-5], 然后在振动台上复现瞬态加速度时间历程的波形。

b) 使用冲击响应谱导出一个正弦扫描振动试验条件, 然后在振动台上通过正弦扫描振动等效模拟瞬态振动环境。

使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境是航天工业的一种传统试验方法^[6-10], 这种方法是一种基于经验的处理方式, 对产品的考核可能同时存在欠试验和过试验。欠试验的原因是正弦扫描试验过程中在一个时刻只能激发产品的某一阶模态响应, 而不像瞬态激励能够同时激发产品的多阶模态响应, 这可能导致试验件的振动响应峰值偏低, 没有再现有关这些模态同时被激励的潜在失效机理。然而, 如果在试验频率范围内试验件的结构振动模态为稀疏状态, 则对振动响应峰值的影响相对较小。过试验的原因是与瞬态激励相比, 正弦扫描激励在大部分固有频率上使产品经历更多的应力循环次数, 可能导致试验件产生瞬态振动环境作用下不会出现的峰值失效。通过提高正弦扫描振动的扫描速率, 可减少产品经历的应力循环次数, 从而降低过试验程度。然而合理的扫描速率通常是根据经验得到的。

目前, 一种观点认为应淘汰使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境的试验方式, 直接采用瞬态加速度时间历程复现方式(波形再现)进行瞬态振动环境试验。然而作为一种传统的方法, 目前在工程中仍然有广泛的应用^[6-10], 如在航天领域中分系统级和系统级产品的鉴定、验收振动环境试验等。可见使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境仍可以达到产品考核的目的。此外, 对于尺寸和质量较大的产品, 由于正弦扫描振动试验采用闭环实时控制方法, 可以采用力限、加速度响应控制等带谷控制手段来处理由于试验条件统计包络所导致的产品共振频率附近的过试验问题。而瞬态时间历程复现振动试验采用的是开环控制方法, 无法解决上述过试验问题。

1 等效准则

在工程应用中, 通常基于产品的低频瞬态振动环境规范制定正弦扫描振动环境试验条件。低频瞬态振动环境规范一般采用产品瞬态振动输入加速度的冲击响应谱规定, 其中, 冲击响应谱计算所使用的单自由度系统阻尼比 ζ 应接近产品的模态阻尼比。如果适用, 低频瞬态振动环境规范的冲击响应谱应基于实测或预示的平台结构瞬态振动加速度响应数据的统计包络导出, 其代表了预期作用于产品连接界面最严酷的低频瞬态振动输入加速度。对于产品的低频瞬态振动环境

试验, 取决于试验目的, 试验条件可能需要在低频瞬态振动环境规范的冲击响应谱的基础上增加适当裕量。

一般情况下, 基于实测或预示数据的统计包络导出的最大期望低频瞬态振动的冲击响应谱往往是复杂的曲线形式, 为了简化产品的振动环境设计和试验, 在制定低频瞬态振动环境规范时, 通常对其进行频域平滑处理(规格化), 即在双对数坐标系中, 采用一组直线段构成的折线方式表示平滑的冲击响应谱, 其中, 直线段的斜率一般选取为 0 dB/Oct 、 $\pm 6 \text{ dB/Oct}$ 或 $\pm 9 \text{ dB/Oct}$ 。

由于冲击响应谱的区域统计包络和频域平滑处理, 即使存在适用的实测瞬态振动加速度时间历程数据, 其通过简单的比例变换通常也难以满足低频瞬态振动环境试验条件规定的冲击响应谱。因此, 在低频瞬态振动环境试验中, 重构一个满足规定的冲击响应谱的振动加速度时间历程是必要的。应指出的是, 冲击响应谱所对应的振动加速度时间历程并非唯一, 不同的振动加速度时间历程的量级和持续时间往往存在着显著的差异。如果低频瞬态振动环境试验仅考虑冲击响应谱等效, 通常可以选择实验室振动环境试验中最容易实现的振动加速度时间历程作为试验件的瞬态振动输入, 使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境就是基于这样的考虑。然而在实际应用中, 这种选择存在相当大的局限性, 往往仅适用于某些特定的情况, 对于特定的产品, 通常需要基于工程经验判断所选择的振动加速度时间历程是否有效。

在低频瞬态振动环境作用下, 产品的典型失效模式为一次通过破坏, 即当产品的振动响应量级达到某一阈值时, 产品立即发生失效。如果在所关心的频率范围内, 产品中各个关键零部件的瞬态振动响应可以表示为单自由度线性系统在基础运动激励下的响应, 可以采用产品瞬态振动输入加速度的冲击响应谱评估产品的一次通过破坏。在这种情况下, 实验室振动环境试验的等效准则可以选择为振动输入加速度的冲击响应谱相等, 从而可能使用正弦扫描振动等效模拟预期使用过程的瞬态振动环境。在许多情况下, 对于具有相同冲击响应谱的不同的瞬态振动输入加速度时间历程, 产品瞬态振动响应的峰值存在显著的差异。例如, 产品具有密集振动模态的情况或产品具有非线性特性的情况, 这意味着仅实现冲击响应谱相等并不能保证实验室振动环境试验的等效性, 需要引入其他的等效条件。

假定试验条件规定的冲击响应谱为 $SRS(f_n)$ ，(通常为绝对加速度冲击响应谱)， ζ 为冲击响应谱计算所采用的单自由度系统的阻尼比。工程上，等效的正弦输入加速度幅值谱 $ESI(f)$ 一般由下式近似确定：

$$ESI(f) = SRS(f_n, \zeta)/Q \quad (1)$$

式中 Q 为单自由度系统的放大因子， $Q = 1/(2\zeta)$ ； f_n 为单自由度系统的固有频率。

实际上，等效正弦输入的精确表达式可在使用简谐运动作用于单自由度系统的基础上得到，并且对于单自由度系统，正弦扫描振动的最大加速度响应与扫描速率和方向有关，因此式 (1) 仅在一定的扫描速率范围内具有适当的精度。在工程应用中，由式 (1) 所得到的等效正弦输入加速度幅值谱 $ESI(f)$ 通常称为正弦扫描振动环境试验条件，除了规定的 $ESI(f)$ 以外，还应同时规定扫描速率和方向。

2 相关参数的影响

2.1 对数扫描速率的影响

实际上，对于规定的冲击响应谱，所对应的正弦扫描振动的加速度时间历程并非唯一。在工程应用中，通常使用对数扫描的正弦扫描振动等效模拟规定的冲击响应谱。对数正弦扫描加速度的时域表达式为

$$x(t) = X_m \sin \left[2\pi f_1 \left(\frac{\exp [Rt] - 1}{R} \right) \right] \quad (2)$$

式中 f_1 为扫描起始频率； t 为扫描时刻； X_m 为加速度幅值； R 为扫描速率，用以描述扫描频率的特性。

$$R = \frac{\ln (f_2/f_1)}{T} \quad (3)$$

式中 f_2 为终止频率， T 为扫描持续时间。

通常也用倍频程扫描速率 R_N 描述扫描频率的特性：

$$R = (R_N \ln 2)/60 \quad (4)$$

当对数扫描的正弦扫描振动作用于一个基础运动激励的单自由度线性系统（无阻尼固有频率 f_n 、阻尼比 ζ ）时，单自由度线性系统的半功率带宽 Δf 为

$$\Delta f = f_n/Q \quad (5)$$

对应半功率带宽 Δf 的扫描持续时间 Δt 和振动循环次数 ΔN 分别为

$$\Delta t = 1/(QR) = 60/(QR_N \ln 2) \quad (6)$$

$$\Delta N = f_n \Delta t = 60f_n/(QR_N \ln 2) \quad (7)$$

通常，采用如下参数 η 来量化分析扫描速率的影响^[6]：

$$\eta = \frac{Q^2}{f_n^2} (df/dt)_{f=f_n} \quad (8)$$

对于对数扫描：

$$|\eta| = \frac{Q^2 R}{f_n} = \frac{Q^2 R_N \ln 2}{60f_n} \quad (9)$$

对数扫描激励下的单自由度系统的规格化响应峰值可使用下列近似公式计算：

$$G(\eta) = \begin{cases} 1 - \exp [-2.55\eta^{0.39}] - 0.0025\eta^{0.79} & \eta > 0 \\ 1 - \exp [-3.18|\eta|^{0.38}] & \eta < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $G(\eta)$ 为对数扫描与稳态正弦激励下的响应峰值之比。

对数扫描正弦振动激励下的响应峰值参数 $G(\eta)$ 与扫描参数 η 之间的关系如图 1 所示。随着扫描速率的增加，单自由度系统的响应峰值降低，同时振动循环次数也减少。

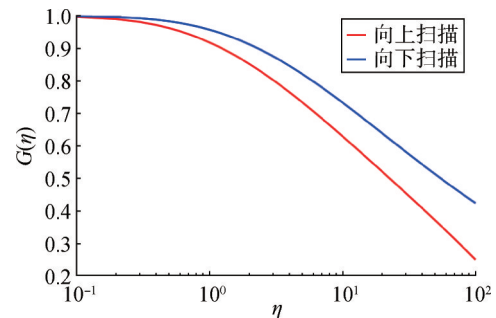


图 1 对数扫描的响应峰值参数 $G(\eta)$ 与扫描参数 η 之间的关系
Fig.1 The relationship between the response peak parameters of logarithmic scanning $G(\eta)$ and the scanning parameters η

在使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境的情况下，从峰值破坏模式角度分析，可通过正弦扫描振动的最大响应谱^[7]（极限响应谱、等效静态加速度冲击响应谱^[11]）等效试验条件规定的冲击响应谱。最大响应谱（MRS）用来表示变量 $(2\pi f_0)^2 z_m$ (z_m 为单自由度系统相对位移响应最大值) 相对于单自由度系统频率 f_0 在给定阻尼比 ζ 值时的变化曲线，其与加速度冲击响应谱具有可类比的物理量。

假定输入加速度幅值谱 $ESI(f)$ 由式 (1) 规定，对于稳态正弦激励 ($\eta = 0$)，最大响应谱 $MRS_0(f_n)$ 为

$$MRS_0(f_n) = ESI(f_n) \cdot \frac{Q}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \quad (11)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot SRS(f_n, \zeta) > SRS(f_n, \zeta)$$

对于扫描参数 η 的正弦扫描激励，最大响应谱

MRS(f_n)为

$$\text{MRS}(f_n) = G(\eta) \cdot \text{MRS}_0(f_n) = \frac{G(\eta)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \text{SRS}(f_n, \zeta) \quad (12)$$

在对数扫描的情况下,当倍频程扫描速率 R_N 大于零并且超过一定阈值时,扫描参数 $|\eta| > 0$,并且 $G(\eta) < \sqrt{1-\zeta^2}$,相应的,在试验频率范围内,最大响应谱MRS(f_n)将小于规定的冲击响应谱SRS(f_n, ζ)。由于扫描参数 η 与倍频程扫描速率 R_N 成正比、与固有频率 f_n 成反比,MRS(f_n)与SRS(f_n, ζ)之间的偏差将随着倍频程扫描速率 R_N 的增加而增大,随着固有频率 f_n 的提高而减小。

2.2 阻尼的影响

瞬态加速度时间历程的冲击响应谱分析中,如果适用,单自由度系统的阻尼比 ζ 应尽可能接近产品的阻尼特性,以使得冲击响应谱幅值尽可能接近实际产品瞬态响应的峰值。然而在进行冲击响应谱分析时,往往不知道实际产品的阻尼特性,并且实际产品的阻尼特性是随着固有频率变化的。因此,在工程应用中通常人为设定冲击响应谱分析的阻尼比 ζ (或放大因子 Q)。典型的冲击响应谱分析的阻尼比 ζ 选择范围为0.01~0.05,相应的放大因子 Q 的范围为50~10。

对于规定的瞬态加速度时间历程,如果采用不同的阻尼比 ζ (或放大因子 Q)分别计算其冲击响应谱,并且由式(1)分别得到等效正弦扫描振动输入加速度幅值谱,可以看到所得到的结果并不相同。值得特别指出的是,计算所采用的阻尼比 ζ 越大(或放大因子 Q 越小),所得到的等效正弦输入加速度幅值谱的量级越高,如图2、3所示。这意味着相应的等效正弦扫描振动输入量级越保守,因为对于瞬态加速度时间历程,冲击响应谱幅值与阻尼比 ζ (或放大因子 Q)之间并非线性的比例关系。

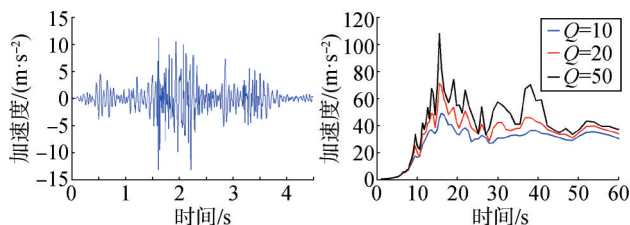


图2 瞬态加速度时间历程及其冲击响应谱

Fig.2 Instantaneous acceleration time history and its impact response spectrum

在工程应用中,冲击响应谱分析通常选择 $\zeta=0.05$ ($Q=10$)。由于产品的阻尼比很少能够超过0.05,基于

$\zeta=0.05$ ($Q=10$)所导出的等效正弦输入加速度幅值谱ESI(f)实际上是保守的。在这种情况下,选择较大的倍频程扫描速率 R_N 将降低正弦扫描振动输入的保守程度。

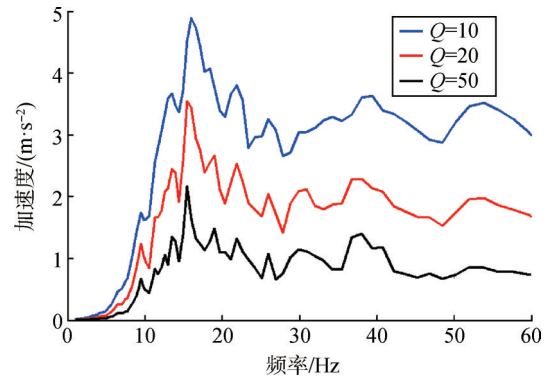


图3 等效正弦输入加速度幅值谱ESI(f)

Fig.3 Equivalent sine acceleration amplitude spectrum ESI(f)

对于航天飞行器的低频瞬态振动环境试验,阻尼比 $\zeta=0.05$ 将明显高于被试产品在试验频率范围内的模态阻尼比,冲击响应谱分析的阻尼比 ζ 选择在0.01~0.025的范围内可能更为合理^[2]。如果适用,分别选择 $\zeta=0.01$ ($Q=50$)和 $\zeta=0.025$ ($Q=20$)计算瞬态加速度时间历程的冲击响应谱,并且导出相应的等效正弦输入加速度幅值谱。通过两者的比较,可以估计所选择正弦扫描振动环境试验条件的保守程度,一般情况下,可以认为 $\zeta=0.01$ ($Q=50$)所对应的等效正弦输入加速度幅值谱并不保守。

2.3 参数选择

在采用对数扫描正弦振动激励等效模拟低频瞬态振动环境的情况下,对于给定的阻尼比 ζ 和倍频程扫描速率 R_N ,由式(1)所确定的等效正弦输入加速度幅值谱ESI(f)的最大响应谱MRS(f_n)实际上将小于规定的冲击响应谱SRS(f_n, ζ)。这并非意味着相应的对数扫描正弦振动激励一定是不保守的,原因是给定的阻尼比 ζ 往往低于产品的真实模态阻尼比,且对数扫描正弦振动激励的严酷程度是由等效正弦输入加速度幅值谱和倍频程扫描速率共同决定的,其中 R_N 越小,振动激励的严酷程度越高。

然而,基于规定的冲击响应谱SRS(f_n, ζ)并不能确定适当的 R_N ,正弦扫描振动环境试验条件的 R_N 通常基于工程经验选择。理论上,对于给定的阻尼比 ζ 、倍频程扫描速率 R_N 以及扫描方向,利用式(12),可以由最大响应谱与规定的冲击响应谱相等确定等效正弦输入加速度幅值谱,然而在工程应用中,ESI(f)通

常由式(1)确定,原因是给定的阻尼比 ζ 不同于产品的真实模态阻尼比,使得基于 $MRS(f_n)$ 等于 $SRS(f_n, \zeta)$ 所确定的 $ESI(f)$ 并不比由式(1)得到的更为合理。实际上,如果给定的阻尼比 ζ 低于产品的真实模态阻尼比,基于 $MRS(f_n)$ 等于 $SRS(f_n, \zeta)$ 所确定的 $ESI(f)$ 可能过于保守。

对于航天飞行器,如果规定的冲击响应谱 $SRS(f_n, \zeta)$ 代表了最大期望低频瞬态振动环境的量级,在使用式(1)确定等效正弦输入加速度幅值谱 $ESI(f)$ 的情况下,正弦扫描振动环境试验条件(验收级试验条件)的倍频程扫描速率 R_N 通常选择为4~6 Oct/min^[9-10,12],其中,较高的 R_N 对应于较大的阻尼比 ζ (典型的 $\zeta=0.05$)。对于鉴定级试验条件,等效正弦输入加速度幅值谱 $ESI(f)$ 和倍频程扫描速率 R_N 均应考虑鉴定裕量,其中,倍频程扫描速率 R_N 通常选择为1~2 Oct/min^[9-10,12]。

3 等效正弦扫描振动试验条件的制定

使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境时,制定正弦扫描振动环境试验条件的主要步骤如下:

a) 对于低频瞬态振动环境的所有振动激励事件,通过实测或分析预示方法获得产品与平台连接界面的瞬态加速度时间历程。

b) 确定低频瞬态振动环境的频率范围,并且选择适当的阻尼比 ζ ,计算瞬态振动加速度时间历程的冲击响应谱。其中,阻尼比 ζ 的范围为0.01~0.05。如果适用,阻尼比 ζ 应接近产品的模态阻尼比。在缺乏产品阻尼特性数据的情况下,可以保守选择 $\zeta=0.05$ 。对于航天飞行器,更可取的方法是选择不同的阻尼比 ζ (例如, $\zeta=0.01$ 和 $\zeta=0.025$)分别计算冲击响应谱。

c) 如果存在足够数量的冲击响应谱样本,使用统计包络方法导出最大期望低频瞬态振动环境的冲击响应谱;否则,取决于适用的样本数量,对计算所得到的冲击响应谱增加3~6 dB的裕量,以考虑瞬态振动环境的随机性和易变性。当采用不同的阻尼比 ζ 分别计算冲击响应谱时,应分别导出各自的最大期望低频瞬态振动环境的冲击响应谱。如果适用,最大期望低频瞬态振动环境的冲击响应谱应进行规格化处理。

d) 在每个固有频率上,将最大期望低频瞬态振动环境的冲击响应谱除以相应的放大因子 $Q = 1/(2\zeta)$,导出验收级正弦扫描振动试验条件的加速度幅值谱

$ESI(f)$ 。当采用不同的阻尼比 ζ 分别计算冲击响应谱时,分别导出各自的加速度幅值谱 $ESI(f)$,然后进行比较,如果相差不大,选择较大的阻尼比 ζ 所对应的加速度幅值谱 $ESI(f)$ 作为验收级正弦扫描振动试验条件。

e) 对于正弦扫描振动的扫描速率选择,原则上应使正弦扫描振动在每个固有频率上产生的振动循环次数与瞬态振动环境激励在同一频率上所产生的振荡次数相一致。然而在工程实践中,根据这一原则得到合理的扫描速率并不容易,更多的是基于工程经验选择适当的扫描速率。对于航天飞行器,通常使用对数扫描方式。验收级正弦扫描振动试验条件的倍频程扫描速率 R_N 选择范围推荐为4~6 Oct/min,其中,较高的 R_N 对应于较大的阻尼比 ζ (典型的 $\zeta=0.05$)。

对于鉴定级正弦扫描振动试验条件,通常需要在最大期望瞬态振动环境所对应的加速度幅值谱的基础上增加适当的鉴定裕量,并且选择较小的倍频程扫描速率 R_N (在每个固有频率上产生的振动循环次数大致为验收级试验条件的4倍),典型的为1~2 Oct/min^[9-10,12]。

4 结束语

使用正弦扫描振动模拟低频瞬态振动环境是航天工业的一种传统试验方法。本文首先从失效模式等角度对正弦扫描振动环境和低频瞬态振动环境等效性进行了分析讨论,进而采用冲击响应谱、最大响应谱等相关理论,对等效正弦扫描振动试验条件制定中的扫描速率、阻尼系数影响进行了研究,并给出相关参数选择建议。最终,提出了制定正弦扫描振动环境试验条件的步骤,为采用正弦扫描试验进行低频瞬态环境适应性考核提供借鉴。

对于正弦扫描振动环境试验,最可能出现的过试验是在试验件共振频率附近,主要是因为 $ESI(f)$ 所依据的冲击响应谱条件一般都经过了统计包络和平滑处理,使得产品共振频率的反作用效应被忽略。为了避免严重过试验,通常需要在试验件的共振频率附近使用分析预示所得到的试验件最大响应值进行限制,即对加速度幅值谱 $ESI(f)$ 进行下凹处理或使用带谷试验方法。

参 考 文 献

[1] SMALLWOOD D O, NORD A R. Matching shock spectra with

- sums of decaying sinusoids compensated for shaker velocity and displacement limitations[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1974(44): 43-56.
- [2] YANG R C, SAFFELL H R. Development of a waveform synthesis technique—a supplement to response spectrum as a definition of shock environment[J]. The Shock and Vibration Bull, 1972(2): 45-53.
- [3] SMALLWOOD D O, WITTE A F. The use of shaker optimized periodic transients in watching field shock spectra[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1973(43): 139-150.
- [4] SMALLWOOD D O. Shock testing by using digital control[M]. SANDIA: 85-0352J, 1985.
- [5] KERN D L, HAYES C D. Transient vibration test criteria for spacecraft hardware[J]. Sound & Vibration Bulletin, 1984, 54(3): 99-109.
- [6] ECSS-E-HB-32-26A, Space engineering spacecraft mechanical loads analysis handbook[S]. Paris: ECSS-Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, 2013.
- [7] MIL-STD-810H. Environmental engineering consideration and laboratory tests[S]. Washington D.C: Aeronautical Systems Center, 2019.
- [8] LISK R C. NASA preferred reliability-practices for design and test[C]. Las Vegas: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1992.
- [9] NIEHUES J. Discrepancies caused by common industry standard practices part 1: environment specification[J]. Journal of the IEST, 2014, 57(1): 1-28.
- [10] PERL E. Test requirements for launch, upper-stage, and space vehicles[R]. TR-2004 (8583)-1-REV-A, El Segundo, CA, 2006.
- [11] HARRIS C M, PIERSOL A G. 冲击与振动手册[M]. 5版. 刘树林, 译. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- HARRIS C M, PIERSOL A G. Shock and vibration handbook[M]. 5th Edition. LIU Shulin, Trans. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [12] ECSS-E-ST-10-03C. Testing[S]. Paris: ECSS-Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, 2012.

作者简介

- 王帅 (1980—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为结构动力学。
- 马泽鹏 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为结构动力学强度和疲劳寿命机理。
- 周畅 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为结构动力学。
- 张明明 (1986—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为结构动力学和结构静强度。
- 荣克林 (1963—), 男, 研究员, 主要研究方向为结构动力学和力学环境。

(上接第86页)

布的目标特性非常接近。仿真结果表明, 该参数自寻优方法能同时对多项控制参数寻优, 可大量节省人工调试时间, 优化人工整定的繁琐过程, 具有更高的调试效率, 能够在保证系统稳定性的同时在更广范围内找到最符合实际需求的控制参数。

参考文献

- [1] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. Perth: IEEE Int Conf on Neural Networks, 1995.
- [2] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Nagoya: 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995.
- [3] 王介生, 王金城, 王伟. 基于粒子群算法的PID控制器参数自整定[J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 73-81.
- WANG Jiasheng, WANG Jincheng, WANG Wei. Parameter self tuning of PID controller based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2005, 20(1): 73-81.

作者简介

- 杨弘彬 (1993—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为航天推力矢量控制。
- 刘山 (1970—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天推力矢量控制。
- 许文波 (1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天推力矢量控制。
- 张博 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天推力矢量控制。
- 李沛文 (1973—), 男, 特级技师, 主要研究方向为航天推力矢量控制。