

# 卫星产品多轴随机振动试验条件制定方法初探

刘沫<sup>2</sup>, 冯咬齐<sup>1,2</sup>, 何玲<sup>1,2</sup>

(1. 可靠性与环境工程技术重点实验室; 2. 北京卫星环境工程研究所: 北京 100094)

**摘要:** 卫星产品多轴随机振动试验技术的难点之一是试验条件的制定。文章分析了多轴随机振动试验条件制定的理论基础, 并就多轴随机振动试验条件的工程处理方法从模型使用、简化处理、互谱设计、时域信号等4个方面进行了探讨, 最后从简化处理、遥测数据分析、仿真计算和现有试验数据分析对比4个角度对卫星产品多轴随机振动试验条件的制定思路提出了建议。

**关键词:** 卫星产品; 多轴随机振动; 试验条件; 相干函数; 功率谱密度

中图分类号: 416.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)02-0155-05

DOI: 10.2969/j.issn.1673-1379.2013.02.009

## 0 引言

现阶段卫星产品的随机振动试验主要是单轴的, 即一次试验只做一个轴向。而在振动环境模拟试验领域, 多轴振动试验是重要的试验研究内容, 因为由多个振动台同时激励并使试验件在多个轴向上同时产生运动的试验, 能更真实地反映试件的实际受力状态。目前欧洲、美国、日本等地区和国家几个军工行业试验中心已装备了多轴振动试验系统, 用于做各种机载和车载武器的可靠性试验<sup>[1-2]</sup>。将多轴随机振动试验技术应用到卫星产品上, 能大大提高试验环境的真实性, 可以给卫星产品的研制提供更好的结构性能考核方法。

多轴振动试验条件的制定是多轴振动试验技术的关键。与单轴振动试验相比, 多轴振动试验在条件制定方面要更为复杂。以多轴随机振动试验为例, 其试验条件除需要规定多个控制点的参考自谱外, 还需要规定各个控制点之间的相干系数和相位角, 也就是参考互谱<sup>[1]</sup>。目前, 行业内关于卫星产品多轴随机振动试验条件的制定缺乏相应规范, 本文拟就此开展初步探讨。

## 1 多轴随机振动试验条件制定的理论基础

在多轴振动试验中, 每个振动台与控制响应传

感器之间都存在相互作用, 各个控制点的响应是多个振动台共同作用的结果。假定“多振动台-试件安装平台-试件结构”组成的耦合系统的输入输出符合线性关系, 则多轴振动试验系统在频域中的数学表达式为

$$Y(f) = H(f)X(f), \quad (1)$$

式中:  $Y(f)$  是振动系统响应矢量;  $H(f)$  是传递函数矩阵;  $X(f)$  是振动控制系统驱动信号矢量。在频域内, 以三轴随机振动试验为例, 给出要求的系统响应谱矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

产生的随机驱动信号矢量  $X(f)$  应使系统相应的响应矢量  $Y(f)$  具有与  $S$  相符合的谱矩阵。其中, 对于多轴随机振动试验控制, 其驱动信号为

$$X(f) = H(f)^{-1}K(f)S(f), \quad (3)$$

式中:  $K(f)$  是对响应谱矩阵  $S$  进行 Cholesky 分解产生的下三角矩阵;  $S(f)$  是谱密度为 1 的独立白噪声谱矩阵<sup>[3-4]</sup>。

多轴随机振动试验条件, 以三轴为例, 按上述矩阵  $S$  的方式定义, 称之为参考谱矩阵。对每一个

收稿日期: 2012-11-08; 修回日期: 2012-11-23

基金项目: 国家 973 项目 (编号: 613133), CAST 创新基金项目

作者简介: 刘沫 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为动力学环境工程; E-mail: mo-liu@hotmail.com。冯咬齐 (1963—), 男, 博士学位, 研究员, 研究方向为航天器力学环境工程。

频率, 矩阵包括9个元素, 其中对角元素为3个方向的自功率谱密度, 非对角元素为方向间的互功率谱密度; 自功率谱密度(以下简称自谱)是个实数, 可单轴随机振动的方法用预示、遥测、包络等方法得到; 互功率谱密度(以下简称互谱)是复数, 难以用例行方法得到。

一般情况下, 互谱由下面两种方法给出:

1) 由实测谱矩阵来定出互谱, 实测值可能来自于典型载荷条件下的真实试验。这样做的好处在于, 参考谱矩阵物理可实现。从数学角度, 可以证明这样的参考谱矩阵是半正定的。

2) 通过确定相干系数和相位来确定互谱。互谱可以由自谱、相干系数和相位定出。例如, 在 $x$ 、 $y$ 方向间的互谱 $s_{xy}$ 为

$$s_{xy} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 s_{xx} s_{yy}} e^{j\varphi_{xy}}, \quad (4)$$

式中:  $\gamma_{xy}^2$  是 $x$ 、 $y$ 方向间相干系数;  $s_{xx}$  和  $s_{yy}$  分别是 $x$ 、 $y$ 方向的自谱密度;  $\varphi_{xy}$  是 $x$ 、 $y$ 间的相位角。 $y$ 、 $z$ 方向的互谱和 $z$ 、 $x$ 方向的互谱可以用相同的方法定义。

通过式(4)确定参考谱矩阵的缺点是不能保证设置的参考谱矩阵是物理可实现的。如下设置相干系数会导致参考谱矩阵不能物理实现, 即

$$\gamma_{xy}^2 = 1, \quad \gamma_{yz}^2 = 1, \quad \gamma_{zx}^2 = 0. \quad (5)$$

如果 $x$ 、 $y$ 存在线性关系( $\gamma_{xy}^2 = 1$ ),  $y$ 、 $z$ 存在线性关系( $\gamma_{yz}^2 = 1$ ), 那么 $x$ 、 $z$ 必然存在线性关系。因此,  $x$ 、 $z$ 相干系数设置为0显然不合理, 应该为1。对于一般情况, 参考谱矩阵设置的合理性主要用其正定性考察。

以三轴随机振动试验为例, 其功率谱密度矩阵  $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{3 \times 3}$  为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} & s_{xz} \\ s_{yx} & s_{yy} & s_{yz} \\ s_{zx} & s_{zy} & s_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} & s_{xz}^* \\ s_{xy}^* & s_{yy} & s_{yz} \\ s_{xz} & s_{yz}^* & s_{zz} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, \*表示共轭。

如果该功率谱密度矩阵物理可实现, 那么矩阵应该是半正定的, 则

$$\det(\mathbf{S}) \geq 0 \Leftrightarrow s_{xx}(s_{yy}s_{zz} - s_{yz}s_{yz}^*) - s_{xy}^*(s_{xy}s_{zz} - s_{zx}^*s_{yz}^*) + s_{zx}(s_{xy}s_{yz} - s_{zx}^*s_{yy}) \geq 0. \quad (7)$$

其中:

$$s_{xy} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 s_{xx} s_{yy}} e^{j\varphi_{xy}}; \quad (8)$$

$$s_{yz} = \sqrt{\gamma_{yz}^2 s_{yy} s_{zz}} e^{j\varphi_{yz}}; \quad (9)$$

$$s_{zx} = \sqrt{\gamma_{zx}^2 s_{xx} s_{zz}} e^{j\varphi_{zx}}. \quad (10)$$

将式(8)~式(10)代入式(7), 则有不等式

$$1 - \gamma_{xy}^2 - \gamma_{yz}^2 - \gamma_{zx}^2 + 2 \cos(\varphi_{xy} + \varphi_{yz} + \varphi_{zx}) \cdot \sqrt{\gamma_{xy}^2 \gamma_{yz}^2 \gamma_{zx}^2} \geq 0. \quad (11)$$

这个不等式是保证参考谱矩阵半正定的必要条件。将设置的相干系数和相位代入上面的不等式可以验证设置的值是否物理可实现。如果确定了 $\gamma_{xy}$ 与 $\gamma_{yz}$ , 那么可以通过这个不等式确定 $\gamma_{zx}$ 的范围。简化起见, 令 $\varphi_{xy} = 0$ 、 $\varphi_{yz} = 0$ 、 $\varphi_{zx} = 0$ , 则不等式简化为

$$1 - \gamma_{xy}^2 - \gamma_{yz}^2 - \gamma_{zx}^2 + 2\sqrt{\gamma_{xy}^2 \gamma_{yz}^2 \gamma_{zx}^2} \geq 0. \quad (12)$$

如果 $\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 \leq 1$ , 则 $\gamma_{zx}^2$ 的上限存在, 即

$$\gamma_{zx}^2 \leq [\sqrt{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2} + \sqrt{(1 - \gamma_{xy}^2)(1 - \gamma_{yz}^2)}]^2. \quad (13)$$

如果 $\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 > 1$ , 则 $\gamma_{zx}^2$ 的上下限均存在, 即

$$\begin{aligned} & [\sqrt{\gamma_{xy}^2 \gamma_{yz}^2} - \sqrt{(1 - \gamma_{xy}^2)(1 - \gamma_{yz}^2)}]^2 \leq \gamma_{zx}^2 \\ & [\sqrt{\gamma_{xy}^2 \gamma_{yz}^2} + \sqrt{(1 - \gamma_{xy}^2)(1 - \gamma_{yz}^2)}]^2. \end{aligned} \quad (14)$$

相位角表示两个激励方向之间在给定频率下的相移, 即

$$\varphi_{xy}(f) = \varphi_y(f) - \varphi_x(f). \quad (15)$$

对于三维空间系统, 有

$$\varphi_{xy}(f) + \varphi_{yz}(f) + \varphi_{zx}(f) = 0. \quad (16)$$

因此, 选择两个统计独立且满足  $0 \sim 2\pi$  之间均匀分布的随机变化的相位角, 第3个相位角可根据式(16)关系求得<sup>[3]</sup>。

## 2 多轴随机振动试验条件工程处理方法

### 2.1 基于随机模型的多轴随机振动试验条件制定方法

多点地震运动试验原理与多轴随机振动试验类似。多点地面运动模拟的目的是根据某指定建筑物的抗震设防标准来确定该结构各支点的地震波时程。对于参考谱矩阵中自谱的确定主要依靠地震

领域的各种随机模型。

如对于一些大跨度结构, 自谱选用考虑低频分量的 Clough-Penzien 修正的白噪声模型来确定, 即

$$s(\omega) = s_0 \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2}, \quad (17)$$

式中:  $s_0$  为谱强度因子;  $\omega$  为圆频率;  $\omega_g$  和  $\zeta_g$  分别为场地的卓越频率和阻尼比;  $\omega_f$  和  $\zeta_f$  为模拟地震运动低频分量能量变化的参数。

地震运动空间变化与频率紧密相关, 随机信号处理中的频域概念“相干函数”可被看作是表述场地两点地震运动之间波形的相似度与相角变化的最好指标。相干系数的确定借助相干函数模型。从建立的方法来看, 现有地震相干函数模型大致分为两类: 经验模型和半理论半经验模型。经验模型主要有 Harichandran 和 Vanmarke 模型、Hao 模型等; 半理论半经验模型主要有 Luco 及 Wong 模型、Somerville 模型等<sup>[5]</sup>。对于一些大跨度结构, 可以选用 Hao 相干模型<sup>[5]</sup>,

$$\gamma_{jk}(\omega, d) = \exp[-(\beta_1 d)] \cdot \exp[-a_1(\omega) \sqrt{d} (\frac{\omega}{2\pi})^2], \quad (18)$$

$$a_1(\omega) = \frac{2a}{\omega} + \frac{b\omega}{2\pi} + c, \quad (19)$$

式中:  $d$  为  $j$ 、 $k$  的空间距离;  $\beta_1$ 、 $a$ 、 $b$  和  $c$  为常数。

用谐波叠加的方法生成满足相干函数和功率谱的非平稳人造地震运动。用 Cholesky 法将  $S(\omega)$  分解成下三角矩阵和上三角矩阵的形式为

$$S(\omega) = L(\omega)L(\omega)^T, \quad (20)$$

其中  $L(\omega)$  为下三角阵。 $L(\omega)$  的各个元素可以写成如下的形式:

$$L_{jk}(\omega) = |L_{jk}(\omega)| \exp[i\theta_{jk}(\omega)], \quad j > k, \quad (21)$$

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[L_{jk}(\omega)]}{\text{Re}[L_{jk}(\omega)]} \right\}, \quad (22)$$

其中  $\theta_{jk}$  为幅角。则  $n$  个不同地点的地面地震运动可以由下式得到:

$$\mathbf{g}_j(t) = \sqrt{2} \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^N |L_{jm}(\omega_l)| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_l t - \theta_{jm}(\omega_l) + \varphi_{ml}], \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad n \rightarrow \infty. \quad (23)$$

通过采用不同的随机相位角  $\varphi_{ml}$ , 可以生成平稳随机矢量过程  $\mathbf{g}_j(t)$  的第  $i$  个样本  $\mathbf{g}_j^{(i)}(t)$ ,  $j=1, 2, \dots, n$ 。相应的非平稳过程的第  $i$  个样本  $\mathbf{f}_j^{(i)}(t)$  可以由  $\mathbf{g}_j^{(i)}(t)$  乘以调制函数  $A_j(t)$  而得到, 即

$$\mathbf{f}_j^{(i)}(t) = A_j(t) \mathbf{g}_j^{(i)}(t), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (24)$$

这样就得到了一组满足上述功率谱密度函数以及相干函数的空间变化地震运动。

## 2.2 多轴随机振动试验条件制定的简化方法

可采用制定类似单轴随机振动试验条件的一般方法, 制定多轴随机振动试验条件。简便起见, 不考虑各自由度之间的互谱密度函数, 因此矩阵中非对角线元素可设置为 0。对角线元素可分别表示 3 个方向的自功率谱密度, 按照单轴随机振动试验条件的制定方法, 通过相似产品外推或者计算分析的方法得到。

以三轴随机振动试验为例, 试验条件由以下功率谱密度矩阵定义:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & s_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & s_{zz} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

试验中的控制容差要求参照相应标准中对单轴振动试验控制容差的要求执行。一些测试人体生理指标在振动环境中变化的试验 (如有人参与的汽车、飞机座椅的试验) 常常采用这种方法, 以 3 个方向设定的强度比输入相应的自谱模拟多维振动环境<sup>[6]</sup>。

## 2.3 考虑互谱的多轴随机振动试验条件制定方法

多轴随机振动试验条件制定的难点在互谱。互谱中的相干系数和相位随时间变化而变化, 因此要完全按照实际的振动环境谱规定试验条件是不现实的, 必须进行适当的简化。

着眼于工程实际, 如果能获得实测数据矩阵, 那么可以从中初步确定相干系数和相位关系, 以此作为制定相似产品多轴随机振动试验条件的依据。这样制定的试验条件 (参考谱) 有一个能否物理实现的问题, 如果不能实现, 则要作出修订。也可以做一些补充试验专门制定合适条件, 就是说, 如果不能获得实测数据矩阵, 可以做一些试验或是依靠工程经验评估相干系数以及相位关系的大致范围, 给出试验条件。

## 2.4 基于时域信号的多轴随机振动试验条件制定方法

在对火箭和导弹的部组件等进行多轴随机振动试验时,也有人提出以产品遥测振动时域信号为基础的多轴随机振动试验条件制定方法<sup>[7]</sup>。但是,如果以类似单轴随机振动试验条件制定中的遥测数据频域包络后直线化处理作为参考自谱,人为规定相干系数和相位角,就可能造成参考谱矩阵非正定,最终无法实现多轴随机振动试验。

针对这种情况,基于时域信号的多轴随机振动试验条件的制定方法是,对遥测信号先在时域内进行包络,之后再行谱分析,并且完成谱分析后在频域内不作直线化处理。这样在分析带宽内的不同离散频率处可一同确定上述5个参数。时域数据的包络方式可按时间采样点对时域信号进行离散化,每个时间采样点上不同方向的信号可采用多个不同测点相应方向的数据来包络;对于只有一个测点的遥测数据,可采用对每一个时间采样点上相应方向上信号统一乘以某个系数来处理;或综合采用上述两种方法来对遥测数据进行时域包络。上述“时域包络”也适用于单轴随机振动试验条件的制定。

## 3 卫星产品多轴随机振动试验条件制定思路

### 3.1 简化处理

单轴随机振动试验是控制试验件某一点的功率谱密度(PSD)函数按照确定的谱形进行的。现阶段卫星产品随机振动试验以单轴随机振动试验为主,其功率谱密度函数一般取自适当的试验标准和规范<sup>[8]</sup>。

对于结构简单对称的卫星产品,可以考虑将互谱设为0,只考虑参考谱矩阵中自谱设定的简化处理方法,按照单轴随机振动试验条件的制定方法,通过相似产品外推或者计算分析的方法得到3个轴向的自功率谱密度<sup>[9-10]</sup>,这样制定出的多轴随机振动试验条件要注意过试验的问题。

### 3.2 对遥测数据分析处理

利用飞行遥测数据,对遥测数据进行处理。假定各方向振动彼此独立,按选定的3个正交方向分别进行功率谱密度分析。考虑到环境的差异,按照卫星产品相应标准进行包络后得到试验要求的3

个轴向的自谱,试验时间一般基于该振动量级下期望的使用寿命来确定<sup>[11]</sup>。

互谱中不同方向间的相位和相干系数可以通过遥测时域数据分析得到;也可以尝试对遥测信号在时域内进行包络之后再行谱分析,然后可在分析带宽内的不同离散频率处同时确定自谱、互谱、相位及相干系数;利用这些参数来制定卫星产品多轴随机振动试验条件。至于时域内数据包络方式,可按照时间采样点对时域信号进行离散化,每一个时间采样点上不同方向的信号可以采用多个不同测点相应方向的数据来包络。

### 3.3 仿真分析

借助计算机仿真技术可以为制定卫星产品多轴随机振动试验条件提供帮助。首先需要建立研究系统的正确的有限元数学模型,然后定义边界条件、相关载荷,进行动力学响应分析。

对于卫星产品而言,在建立仿真模型的基础上,通过星箭耦合分析,可以得到星箭界面处的响应。在整星主频处预先下凹,先给出整星的随机振动试验条件;然后结合虚拟试验技术做整星随机振动试验,得到卫星部组件产品安装点及关键点响应;再按照选定的3个方向对响应值进行包络,并结合工程经验和以往卫星随机振动数据对试验条件进行适当下凹,这样可以得到卫星部组件产品多轴随机振动试验条件。

### 3.4 卫星部组件与整星试验数据对比分析

由于试验对象复杂、技术难度大和研制成本较高等原因,国内还没有关于卫星部组件多轴随机振动试验的规范和标准。

目前,卫星部组件的多轴随机振动试验还没有类似地震领域的经验、半经验模型可以借鉴。对于卫星部组件而言,单轴随机振动试验积累了大量数据。基于这些数据,可以比照单轴随机振动试验的方法,按照上述简化方法的形式先给出自谱。由于卫星部组件在整星噪声试验或单轴随机振动试验中,其所处的振动环境近似是多维的,所以可借助整星的数据得到相位与相干信息,将卫星部组件单轴随机振动试验数据与卫星部组件所处整星区域处的噪声试验或单轴随机振动数据加以对比;然后按照简化方法给出的自谱进行修订,借助得到的

相位及相干信息, 再利用公式(4)得到互谱, 从而制定出卫星部组件的多轴随机振动试验条件。

#### 4 结束语

多轴振动试验技术是动力学环境工程发展的趋势。本文分析了多轴随机振动试验条件制定的相关理论, 总结了现阶段多轴随机振动试验条件的一些工程处理方法, 并对卫星产品多轴随机振动试验条件的制定思路进行了探讨。卫星产品多轴随机振动试验条件的制定是卫星产品多轴随机振动试验的关键技术。研究这一技术对推动多轴随机振动试验技术在航天领域的应用具有重要意义。

#### 参考文献 (References)

- [1] 吴家驹, 荣克林. 多维振动环境试验方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2003, 264(4): 27-32  
Wu Jiaju, Rong K elin. M ulti-dimentional vibration environmental t est method[J]. Mi ssiles and S pace Vehicles, 2003, 264(4): 27-32
- [2] 陈颖, 朱长春, 周德惠, 等. 多轴模拟振动试验技术发展现状[C]// 第七届全国激光科学技术青年学术交流会论文集, 2003: 221-224
- [3] 冯咬齐. 多自由度振动试验技术及其应用[C]// 中国宇航学会结构强度与环境工程专业委员会 2003 年度技术信息交流会
- [4] 樊世超, 冯咬齐. 多维动力学环境模拟试验技术研究[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(1): 23-28  
Fan S hichao, Feng Y aoqi. S tudy o n s imulation t est technology of d ynamics e nvironment of m ulti-DOF[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(1): 23-28
- [5] 刘先明. 大跨度空间网络结构多点输入反应谱理论的研究与应用[D]. 南京: 东南大学博士学位论文, 2003
- [6] Mansfield A N J, Maeda S. T he a pparent m ass of the seated hum an exposed t o s ingle-axis a nd m ulti-axis whole-body vibration[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40: 2543-2551
- [7] 陈立伟, 卫国. 多维随机振动试验条件制定方法研究[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 1-6  
Chen Liwei, Wei Guo. Methodology of design conditions for m ulti-axis r andom vi bration t est[J]. Structure and Environment Engineering, 2010, 37(6): 1-6
- [8] 王梦魁. 多维振动环境试验的实践[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 22-25  
Wang Mengkui. M ulti-dimentional vi bration practice[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 22-25
- [9] 陈颖, 朱长春, 李春枝, 等. 典型结构在单、多轴随机振动下的动力学特性对比研究[J]. 振动工程学报, 2009, 22(4): 386-390  
Chen Y ing, Z hu Cha ngchun, L i Chun zhi, e t al. Comparison of d ynamical characteristics o f a t ypical structure und er s ingle-axial a nd m ulti-axial r andom vibration loads[J]. J ournal of Vibration E ngineering, 2009, 22(4): 386-390
- [10] Gregory D, Bitsie F, Smallwood D O. Comparison of the re sponse of a s imple s tructure t o s ingle axis a nd multiple axis r andom vi bration inputs[C]// Proceedings of t he 79<sup>th</sup> Shock a nd Vibration Symposium. Orlando, FL, USA, 2008
- [11] Smallwood D O, Gregory D L. Evaluation of a 6-DOF electrodynamic s haker system[C]// Proceedings of t he 79<sup>th</sup> Shock a nd Vibration Symposium, Orlando, FL, USA, 2008

### The determination of conditions of multi-axis random vibration tests for satellite products

Liu Mo<sup>2</sup>, Feng Yaoqi<sup>1,2</sup>, He Ling<sup>1,2</sup>

- (1. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory;
2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering: Beijing 100094, China)

**Abstract:** One of the major difficulties in the multi-axis random vibration tests for satellite products is the determination of the test conditions. First, a theoretical analysis is made. Then, the currently used engineering processing methods are discussed, including the model related method, the simplification method, the cross-power spectrum design method, and the time-domain signal processing method. Finally, some suggestions for determining the conditions of multi-axis random vibration tests for satellite products are proposed from four perspectives, including the simplified processing, the telemetry data analysis, the simulation analysis, and the comparative study of the existed experimental data.

**Key words:** satellite product; multi-axis random vibration; test conditions; interference function; power spectrum density

(编辑: 许京媛)