

# 基于 TSEA 的航天复杂结构冲击响应预示\*

王 珺<sup>1</sup>, 艾鹏飞<sup>2</sup>, 薛 杰<sup>1</sup>, 谢石林<sup>2</sup>

(1. 液体火箭发动机技术重点实验室 西安, 710100)

(2. 西安交通大学航天航空学院 西安, 710049)

**摘要** 航天复杂结构工作过程中受到冲击载荷的作用,需要建立准确的结构冲击响应预示方法以开展结构的安全评估。针对此问题,提出基于瞬态统计能量分析(transient statistical energy analysis,简称 TSEA)理论的航天复杂结构冲击响应预示方法。首先,通过试验建立了复杂结构的 TSEA 模型,识别得到模型中各子系统的内损耗因子和耦合损耗因子;其次,针对环境试验中的冲击台激励方式,提出一种冲击激励输入功率的计算方法,并通过对 TSEA 的功率流平衡方程求解以及对各频率下的时历包络进行叠加和转化,获得结构的冲击响应谱;最后,进行了冲击响应分析与冲击试验。结果表明,航天复杂结构关注子系统的实测冲击响应谱与基于 TSEA 理论的预示结果在中高频率范围内的误差均小于 $\pm 5$  dB,提出的响应预示方法具有良好的冲击响应预示精度。

**关键词** 瞬态统计能量分析;航天复杂结构;响应预示;冲击台激励

**中图分类号** TH113

## 引 言

航天复杂结构是飞行器的重要分系统之一,由底板、贮箱、气瓶、贮箱架、气瓶架及各类管路阀门等组件构成,结构组成及材料组成均十分复杂。在工作飞行状态下,航天复杂结构常受到冲击载荷的作用(如火工品冲击、发动机启动等工况)。因此,开展冲击响应预示研究对结构优化设计和安全运行评估具有重要的意义。由于冲击载荷频带宽,高频激励能量大,引起的复杂结构动态响应具有高幅值、宽频带的特性,因此为了获得航天复杂结构准确的冲击响应分析结果,必须考虑结构的宽频带动力学特性。

目前,冲击响应预示方法主要有数据外推法、有限元法、虚拟模态综合法和瞬态统计能量法<sup>[1-2]</sup>等。针对冲击载荷,美国国家航空航天局在大量试验数据的基础上,总结出了数据外推公式,并写入相关标准,但该方法依赖大量试验数据以及动力模型的相似性,使用范围受限<sup>[3]</sup>。用于冲击响应求解的有限元法主要包括瞬态分析法、响应谱分析法、正弦传递法和等效准静态法等。文献[4]将以上 4 种方法运用于在日轨道航天器中的超热电子与质子设备进行有限元分析,并与冲击试验结果进行对比,分析了 4 种方法的优劣势。有限元法中的显式分析方法在冲

击波传递方面精度较高,且能够直接获得时域响应结果<sup>[2]</sup>,但有限元法进行高频响应求解时,模型网格要求过密,需要消耗大量的计算资源和计算时间。Dalton 等<sup>[5]</sup>提出了虚拟模态综合法(virtual mode synthesis and simulation,简称 VMSS)。目前,统计能量分析的商业软件中,VMSS 的运用多结合统计能量分析(statistics energy analysis,简称 SEA),如 VA one 中的 Shock 模块<sup>[6]</sup>。SEA-VMSS 通过稳态统计能量分析结果获取 VMSS 所需的频响函数曲线,但该方法在计算受激励子系统的响应时普遍高于试验数值<sup>[7]</sup>。

经典的统计能量分析(classical statistical energy analysis,简称 CSEA)仅适用于稳态激励下的耦合系统。针对该情况,Lai 等<sup>[8-9]</sup>提出了瞬态统计能量分析理论,将 CSEA 中稳态激励假设拓展到了瞬态激励。Mao 等<sup>[10]</sup>基于 TSEA,提出了一种冲击载荷识别的新方法。宋海洋等<sup>[11]</sup>利用差分法开展了 TSEA 中参数误差对子系统响应能量的影响,并给出了参数误差与所导致能量误差的关系。李明奇<sup>[7]</sup>基于 TSEA 对潜艇主要结构部件进行了冲击环境预示,同时也基于 VMSS 运用 VA one 中的 Shock 模块进行了冲击环境预示,并将 2 种方法与试验结果进行了对比,发现 TSEA 能够在高频分析中得到更

\* 国家自然科学基金资助项目(11872290)

收稿日期:2023-04-21;修回日期:2023-09-25

加准确的结果。Chen等<sup>[12]</sup>将仿射算法和子区间技术引入到TSEA中,对考虑区间不确定性的两板耦合结构和板腔结构开展数值模拟,并用蒙特卡洛法进行验证,结果表明,引入仿射算法和子区间技术后的TSEA的分析精度显著提高,且相比于蒙特卡洛法,TSEA方法的计算时间有显著优势。Langley等<sup>[13]</sup>类比了非平稳随机过程的Priestley描述,以一种新的方式推导了TSEA的功率流平衡方程,并用耦合板对其进行验证,对比了TSEA预示结果、有限元预示结果和实验结果,验证了TSEA方法的有效性。

综上所述,TSEA法在结构冲击响应分析中具有较高的分析精度及计算效率。为了满足航天复杂结构对于冲击环境下结构安全评估的要求,笔者基于TSEA理论开展了航天复杂结构的TSEA理论与试验建模研究,提出了一种冲击台激励输入功率的计算方法,在此基础上对结构的冲击响应谱(shock response spectrum,简称SRS)进行了预示,并结合冲击试验对预示结果进行了试验验证。

## 1 基于TSEA理论的冲击响应谱计算方法

对于由 $n$ 个子系统组成的耦合动力学系统,在瞬态激励条件下,其瞬态动力学特性可由一组能量流平衡方程表示为

$$\bar{E}_{i,\text{in}} = 2\omega\eta_i\bar{\varepsilon}_{ki} + 2\omega \sum_{j=1, i \neq j}^N (\eta_{ij}\bar{\varepsilon}_{ki} - \eta_{ji}\bar{\varepsilon}_{kj}) \quad (1)$$

其中: $\bar{E}_{i,\text{in}}$ 为外界对子系统 $i$ 的平均输入能量; $\bar{\varepsilon}_{ki}$ 为子系统 $i$ 的平均动能; $\eta_i$ 为子系统 $i$ 的内损耗因子; $\eta_{ij}$ 为子系统 $i$ 到 $j$ 的耦合损耗因子; $\omega$ 为圆频率; $N$ 为子系统个数。

与CSEA的功率流平衡方程类似,TSEA也可用功率流平衡方程来表示系统的响应。CSEA的功率流平衡方程为

$$P_{\text{in}}(\omega) = A(\omega)E(\omega) \quad (2)$$

考虑子系统能量对时间的变化量,可得瞬态统计能量分析的功率流平衡方程为

$$P_{\text{in}}(\omega, t) = \frac{\partial E(\omega, t)}{\partial t} + A(\omega)E(\omega, t) \quad (3)$$

其中: $P_{\text{in}} = \{P_{\text{in},1}, P_{\text{in},2}, \dots, P_{\text{in},n}\}^T$ ,为输入功率向量; $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}^T$ ,为子系统的能量向量; $A$ 为系数矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} \eta_1 + \sum_{i=2}^N \eta_{1i} & -\eta_{21} & \cdots & -\eta_{N1} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \sum_{i=1, i \neq 2}^N \eta_{2i} & \cdots & -\eta_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{1N} & -\eta_{2N} & \cdots & \eta_n + \sum_{i=1}^{N-1} \eta_{ni} \end{bmatrix}$$

矩阵 $A$ 由中心频率 $\omega$ 、内损耗因子 $\eta_i$ 以及耦合损耗因子 $\eta_{ij}$ 组成。

根据式(3)可以获取各子系统的能量 $E(\omega, t)$ ,而子系统的空间平均加速度计算公式为

$$\langle \overline{a_i^2} \rangle = \frac{E_i \omega^2}{M_i} \quad (4)$$

其中: $M_i$ 为子系统 $i$ 的质量。

子系统空间平均加速度时间历程可通过叠加方法获取<sup>[7]</sup>,即

$$a(t) = \sum_{k=1}^n f(\omega_k) a_{\omega_k}(t) \quad (5)$$

$$a_{\omega_k}(t) = \hat{a}_{\omega_k}(t) \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (6)$$

其中: $\hat{a}_{\omega_k}(t)$ 为子系统在中心频率 $\omega_k$ 处的加速度时历曲线,可基于式(3)和式(4)计算所得的子系统空间平均加速度计算得到; $\varphi_k$ 为 $\omega_k$ 对应的相位角,若所分析的系统的阻尼较小,可取相位角 $\varphi_k = 0$ ;  $f$ 为加权系数。

$$f(\omega_k) = \frac{(a_{\omega_k})_{\text{max}}}{\sqrt{(a_{\omega_1})_{\text{max}}^2 + (a_{\omega_2})_{\text{max}}^2 + \dots + (a_{\omega_n})_{\text{max}}^2}} \quad (7)$$

其中: $n$ 为分析频段内中心频率的个数。

通过以上方法可根据瞬态统计能量分析计算出各子系统的加速度时历曲线,并根据时历曲线获取结构的最大冲击响应谱。

## 2 瞬态统计能量分析模型参数试验辨识

对于由 $n$ 个子系统组成的复杂结构系统,对每个子系统分别施加冲击激励,当仅对子系统 $i$ 施加瞬态激励时,根据式(2)<sup>[14]</sup>可得

$$[\bar{\varepsilon}_1^{(i)} B_1, \bar{\varepsilon}_2^{(i)} B_2, \dots, \bar{\varepsilon}_N^{(i)} B_N]_{N \times N^2} \eta_{N^2 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \frac{\bar{E}_{i,\text{in}}}{2\omega} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (8)$$

其中： $\bar{\epsilon}_j^{(i)}$ 为激励子系统*i*时子系统*j*的平均动能； $\eta_{N^2 \times 1}$ 为内损耗因子和耦合损耗因子组成的向量； $B_i$ 为系数矩阵。

$$\eta_{N^2 \times 1} = [\eta_1, \dots, \eta_{1N}, \eta_{21}, \dots, \eta_{2N}, \dots, \eta_{N1}, \dots, \eta_N]^T$$

$$B_i = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

综合*N*次独立试验,可得

$$\bar{B}_{N^2 \times N^2} \eta_{N^2 \times 1} = E_{N^2 \times 1} \quad (9)$$

其中:

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{\epsilon}_1^{(1)} B_1 & \bar{\epsilon}_2^{(1)} B_2 & \dots & \bar{\epsilon}_N^{(1)} B_N \\ \bar{\epsilon}_1^{(2)} B_1 & \bar{\epsilon}_2^{(2)} B_2 & \dots & \bar{\epsilon}_N^{(2)} B_N \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{\epsilon}_1^{(N)} B_1 & \bar{\epsilon}_2^{(N)} B_2 & \dots & \bar{\epsilon}_N^{(N)} B_N \end{bmatrix}_{N^2 \times N^2};$$

$$E_{N^2 \times 1} = \left[ \frac{\bar{E}_{1, \text{in}}}{2\omega}, 0, \dots, 0, \dots, 0, 0, \dots, \frac{\bar{E}_{N, \text{in}}}{2\omega} \right]_{1 \times N^2}^T$$

根据式(9)可知,只要测得每次独立试验中各子系统的输入能量以及各子系统的动能,就可求解损耗因子向量 $\eta_{N^2 \times 1}$ ,即各子系统的内损耗因子 $\eta_i$ 和各子系统间的耦合损耗因子 $\eta_{ij}$ 。

依据瞬态统计能量分析的子系统划分原则和航天复杂结构特点,将其划分为7个子系统。图1为航天复杂结构子系统划分示意图。子系统编号见表1。

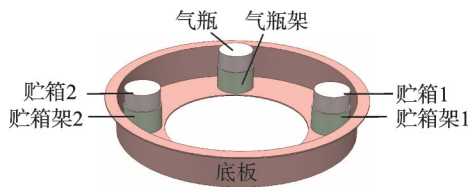


图1 航天复杂结构子系统划分示意图

Fig.1 Subsystem division of aerospace complex structure schematic

表1 子系统编号

Tab.1 Subsystem number

序号	子系统	序号	子系统
1	贮箱1	5	贮箱2
2	贮箱架1	6	贮箱架2
3	气瓶	7	底板
4	气瓶架		

根据子系统的划分结果,使用力锤对复杂结构施加瞬态激励,并按照重复激励平均、测点空间位置平均和激励点空间位置平均逐级将大量计算得到的损耗因子数值进行平均。其中:重复激励平均是对每个激励点进行5次重复激励经计算得到的损耗因子进行平均;测点空间位置平均是对子系统上均布的各测点的重复激励平均损耗因子进行平均;激励空间位置平均是对不同的激励点获取的测点空间位置平均损耗因子再次进行平均。经过多级平均之后的损耗因子随频率的变化能更准确地反映各子系统的实际特性。

试验时,系统处于自由状态(使用弹簧绳将其悬挂在龙门架上),在每个子系统上依次布置4~8个加速度传感器,并使用力锤对每个子系统上的2~3个点分别施加瞬态激励。激励施加位置均较靠近加速度传感器粘贴位置,以提高平均输入能量 $\bar{E}_{i, \text{in}}$ 的测量精度。

根据力锤试验所获取数据以及上述内损耗因子和耦合损耗因子获取方法,计算得到各子系统的内损耗因子和子系统间的耦合损耗因子。各子系统的内损耗因子如图2所示。子系统1到其他子系统的耦合损耗因子如图3所示。

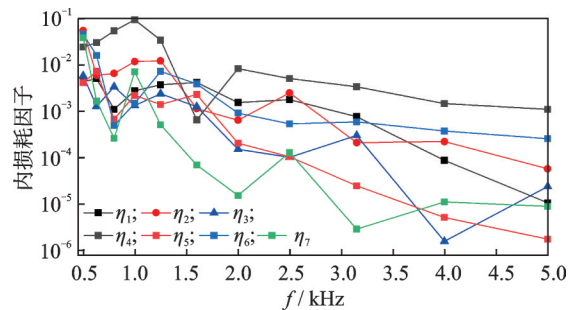


图2 各子系统的内损耗因子

Fig.2 Inner loss factor of each subsystem

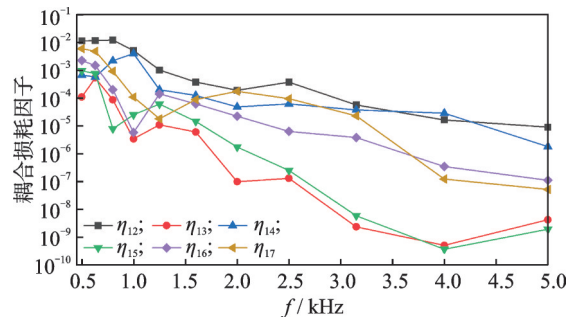


图3 子系统1到其他子系统的耦合损耗因子

Fig.3 Coupling loss factor from subsystem 1 to other subsystems

### 3 冲击台激励输入功率计算方法

航天复杂结构在运行过程中承受的冲击载荷是通过其与航天器其他结构的连接界面传递而来的,为了模拟实际冲击载荷环境,试验中采用冲击台来施加冲击激励。。由式(3)可知,为了求解各子系统的能量,需要将冲击激励转化为输入功率的形式。为获取激励的输入功率,姚德源等<sup>[14]</sup>提出了针对理想点源和面源激励输入功率的计算方法。张永杰等<sup>[15]</sup>通过施加约束载荷的方法间接获取了输入功率,并对某梁板组合开展了分析。然而,以上方法难以通过冲击台激励获得冲击台对于复杂结构的输入功率。为此,笔者提出一种基于连接界面加速度和结构间传递函数的冲击激励输入功率计算方法,其计算流程如图 4 所示。

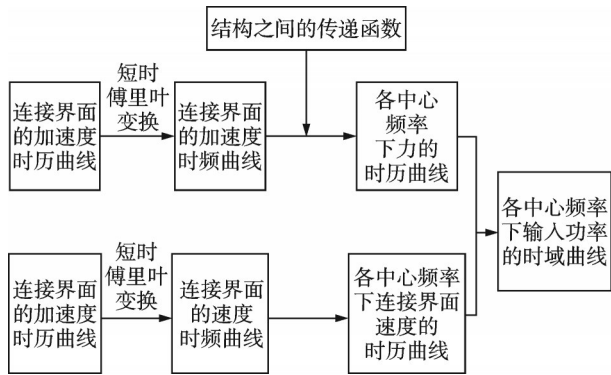


图 4 冲击台激励输入功率的计算流程

Fig.4 Flowchart for calculating the excitation input power of the impact table

由于航天复杂结构与冲击台间通过法兰链接,首先,通过不同位置的多组力锤敲击试验并求平均值来获取结构间的传递函数;其次,将连接界面加速度时间历程曲线进行短时傅里叶变换,结合结构间的传递函数即可得到对系统的激励力大小,在保证能量不变的条件下,获取各中心频率下力的时历曲线;然后,根据加速度时历曲线积分,获取速度时历曲线,在保证能量不变的条件下,得到各中心频率下速度的频率曲线;最后,假设工装控制点与系统上与工装连接的子系统速度相同,这样在各中心频率下,通过力和速度的时历曲线,即可获取各中心频率下输入功率的时域曲线。其计算公式为

$$P_{in}(\omega, t) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[F(\omega, t)V^*(\omega, t)] \quad (10)$$

### 4 冲击响应预示与试验验证

#### 4.1 冲击试验

为验证所建立的瞬态统计能量分析模型和冲击载荷输入功率计算方法的准确性,使用冲击台对航天复杂结构的 yz 方向开展冲击试验。图 5 为冲击试验中 yz 方向示意图。冲击振动试验条件见表 2。复杂结构通过工装连接在冲击台上以模拟飞行工作实际状态。首先,通过力锤试验获取结构间的传递函数;其次,在工装与复杂结构连接界面布置加速度传感器以获取界面的加速度时间历程曲线。采用本研究提出的输入功率计算方法,冲击试验中各中心频率下输入功率的时域曲线计算结果如图 6 所示。

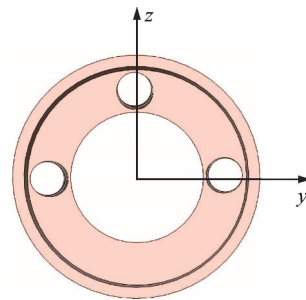


图 5 冲击试验中 yz 方向示意图

Fig5 Diagram of yz direction in shock test

表 2 冲击振动试验条件

Tab.2 Shock vibration test conditions

f/Hz	冲击响应谱/g	容差/dB
100~1 500	40~600	±6
1 500~5 000	600	

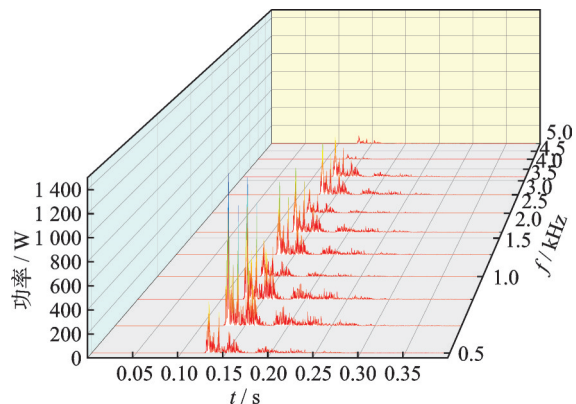


图 6 冲击试验中各中心频率下输入功率的时域曲线计算结果

Fig6 Calculated time domain curves of the input power at each center frequency in the shock test

## 4.2 结果验证

通过冲击试验获取系统上各测点加速度的 SRS 及各子系统的空间平均 SRS,将试验得到的空间平均 SRS 和瞬态统计能量分析计算出的 SRS 进行对比。 $y$  向冲击试验贮箱 1 子系统及底板子系统的试验结果与预示结果分别如图 7、8 所示。 $z$  向冲击试验贮箱 1 子系统及底板子系统的试验结果与预示结果分别如图 9、10 所示。

由图可知,在  $y$  向和  $z$  向冲击试验中,贮箱 1 子系统和底板子系统的 SRS 值的试验结果与 TSEA 预示结果之间的误差在 600 Hz 以上的频率范围内均小于  $\pm 5$  dB,2 个不同的子系统预示结果的误差变化趋势相同,这表明通过力锤试验建立的 TSEA 模型能够准确预示更大冲击量级的冲击台试验响应。600 Hz 以下的频率范围内,航天复杂结构的模态较为稀疏,难以满足统计能量分析的假设条件,导致误差较大。当频率接近 5 kHz 时,预示误差有所增加,其原因是当频率较高时,力锤试验测试结果高频部分的信噪比降低,导致在高频的内损耗因子和耦合损耗因子辨识结果误差变大,增大了预示结果的误差,但误差仍在较小的范围内。

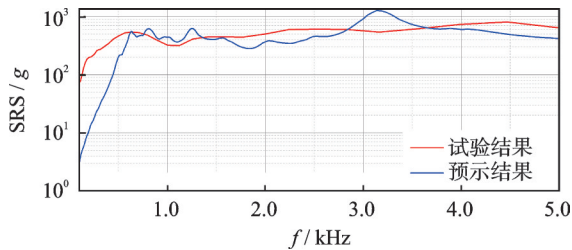


图 7  $y$  向冲击试验贮箱 1 子系统的试验结果与预示结果  
Fig.7 Test results and predicted results of  $y$ -way shock test chamber 1 subsystem

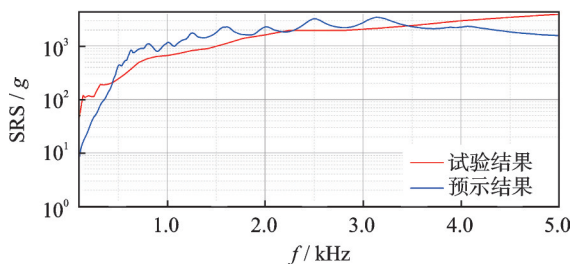


图 8  $y$  向冲击试验底板子系统的试验结果与预示结果  
Fig.8 Test results and prognosis of  $y$ -directional shock test base plate subsystem

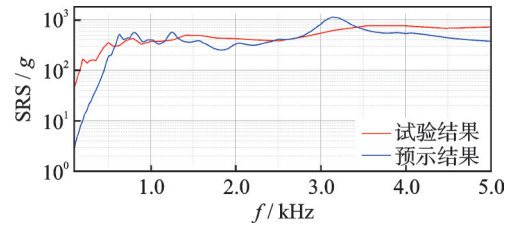


图 9  $z$  向冲击试验贮箱 1 子系统的试验结果与预示结果  
Fig.9 Test results and predicted results of  $z$ -shock test chamber 1 subsystem

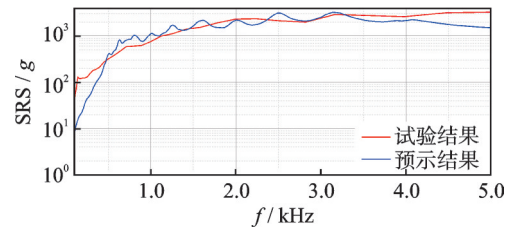


图 10  $z$  向冲击试验底板子系统的试验结果与预示结果  
Fig.10 Test results and prognosis of  $z$ -directional shock test subsystem of base plate

## 5 结论

1) 针对某航天复杂结构的冲击响应预示问题,通过试验建立了航天复杂结构的瞬态统计能量分析模型,提出一种基于连接界面加速度信息和结构传递函数的冲击台激励输入功率计算方法,并验证了模型和计算方法的准确性。

2) 完成了航天复杂结构的冲击试验,通过直接测取每次冲击中各测点的冲击响应谱,并将同一子系统上的各测点进行统计平均,得到了子系统的冲击响应谱。

3) 将瞬态统计能量分析预示结果与试验结果进行比较可知,预示的各子系统冲击响应谱在频率高于 600 Hz 时与试验结果吻合良好,误差均不超过  $\pm 5$  dB。当频率接近 5 kHz 时,由于力锤试验在高频部分信噪比减小,导致高频段的内损耗因子和耦合损耗因子误差变大,增加了预示结果误差,但误差仍在较小的范围内。

## 参 考 文 献

- [1] 赵宏达,丁继锋,郝志伟,等.复杂航天器结构火工冲击环境预示方法研究[J].宇航学报,2020,41(1):35-43.  
ZHAO Hongda, DING Jifeng, HAO Zhiwei, et al. Study on prediction methods of pyroshock environment for complex spacecraft structures[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(1): 35-43. (in Chinese)

- [2] 赵宏达. 复杂卫星结构火工冲击环境预示方法及模拟技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [3] KERN D L. Status of a NASA standard and three NASA handbooks[C]//26th Aerospace Testing Seminar. Jet Propulsion Laboratory. Manhattan Beach, CA: NASA, 2011: 20120000674.
- [4] GARCÍA-PÉREZ A, SORRIBES-PALMER F, ALONSO G, et al. Overview and application of FEM methods for shock analysis in space instruments [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 80: 572-586.
- [5] DALTON E C, CHAMBERS III B S. Analysis and validation testing of impulsive load response in complex, multi-compartmented structures[C]//36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. New Orleans, LA, USA: AIAA, 1995: 759.
- [6] ESI. Visual-environment 21.0-user guide (visual-viewer cast 2025.0) [EB/OL]. [2025-12-03]. <https://myesi.esi-group.com/downloads/software-documentation/visual-viewer-developer-kits-2024.0-rc-user-guide-pdf>.
- [7] 李明奇. 潜艇结构高频冲击环境的瞬态统计能量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [8] LAI M, SOOM A. Prediction of transient vibration envelopes using statistical energy analysis techniques [J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME, 1990, 112(1): 127-137.
- [9] LAI M L, SOOM A. Statistical energy analysis for the time-integrated transient response of vibrating systems [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1990, 112(2): 206-213.
- [10] MAO B Y, XIE S L, XU M L, et al. Simulated and experimental studies on identification of impact load with the transient statistical energy analysis method [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 46(2): 307-324.
- [11] 宋海洋, 于开平, 李向阳, 等. 瞬态统计能量分析法中动态响应误差分析[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(4): 38-41.
- [12] SONG Haiyang, YU Kaiping, LI Xiangyang, et al. Analysis on dynamic response error in transient[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(4): 38-41.(in Chinese)
- [13] CHEN Q, FEI Q G, WU S, et al. Prediction of transient statistical energy response for two-subsystem models considering interval uncertainty[J]. Journal of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification, 2019, 4(2): 021004.
- [14] LANGLEY R S, HAWES D H, BUTLIN T, et al. A derivation of the transient statistical energy analysis (TSEA) equations with benchmark applications to plate systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 445: 88-102.
- [15] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 114-120.
- [16] 张永杰, 陈璐, 王喆, 等. 复杂组合结构振动试验的有限元-统计能量混合建模与分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(1): 93-96.
- [17] ZHANG Yongjie, CHEN Lu, WANG Zhe, et al. Research on hybrid FE-SEA method for vibration of complex built-up structure [J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(1): 93-96.(in Chinese)



**第一作者简介:**王珺,男,1983年7月生,博士、研究员。主要研究方向为液体火箭发动机结构强度。  
E-mail: junw83@163.com

**通信作者简介:**谢石林,男,1971年10月生,博士、教授。主要研究方向为智能材料与结构振动控制、动态载荷识别、结构损伤检测及复杂非线性系统混合建模理论。  
E-mail: slxie@mail.xjtu.edu.cn