

舱段结构声振响应能量传递分析

秦朝红¹, 杨执钧¹, 张明明¹, 郝子元¹, 魏龙¹, 张忠¹, 徐振亮², 高博¹

(1.北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076;
2.中国运载火箭技术研究院 研究发展中心, 北京 100076)

摘要: **目的** 分析航天飞行器结构各部分输入能量对振动的贡献量。**方法** 将基于能量的传递路径分析方法引入航天飞行器舱段结构的声振响应分析中, 通过声振响应分析获得结构的振动响应后, 进一步得到结构各部分的能量分布以及输入能量, 计算得到各部分输入能量的贡献量。**结果** 对于本文中的舱段结构, 仪器支架安装壁板的能量主要来源于外部噪声激励, 与之相连的蒙皮结构也会对其有输入能量, 但贡献量不大, 约占 10%。仪器支架底部的能量主要由安装位置处的蒙皮贡献, 相邻蒙皮贡献的能量约占 20%。仪器设备安装处的能量, 主要由仪器支架贡献。**结论** 形成的舱段结构声振响应能量传递分析方法, 可为结构的传递路径分析、结构优化设计、减振降噪设计奠定基础。

关键词: 声振环境; 能量传递; 能量分布; 贡献量分析; 统计能量法; 舱段结构

中图分类号: V423 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)12-0078-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.010

Energy Transfer Analysis of Acoustic Vibration Response of Cabin Structure

QIN Zhaohong¹, YANG Zhijun¹, ZHANG Mingming¹, HAO Ziyuan¹, WEI Long¹,
ZHANG Zhong¹, XU Zhenliang², GAO Bo¹

(1. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China; 2. Research & Development Department, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the contribution of input energy from various parts of spacecraft structure to vibration. The energy transfer path analysis method was introduced into an acoustic vibration response analysis. After obtaining the vibration response of the structure, the energy distribution and input energy of each part of the structure were further obtained, and the contribution of the input energy of each part was calculated. For the cabin structure in this paper, the energy of panels installing the instrument bracket was mainly contributed by external noise excitation, and the skin structure connected to it also had input energy, but the contribution was not significant, accounting for about 10%. The energy at the bottom of the instrument bracket was mainly contributed by the skin at the installation position, with adjacent skin contributing about 20% of the energy. The energy of structure installing the instrument equipment was mainly contributed by the instrument bracket. In conclusion, the energy transfer analysis method for acoustic and vibration response of cabin structures can provide support for the analysis of transmission paths, structural optimization design, and vibration and noise reduction design of structures.

KEY WORDS: acoustic vibration environment; energy transfer; energy distribution; contribution analysis; statistical energy

收稿日期: 2024-05-30; 修订日期: 2024-08-19

Received: 2024-05-30; Revised: 2024-08-19

引文格式: 秦朝红, 杨执钧, 张明明, 等. 舱段结构声振响应能量传递分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 78-84.

QIN Zhaohong, YANG Zhijun, ZHANG Mingming, et al. Energy Transfer Analysis of Acoustic Vibration Response of Cabin Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 78-84.

method; cabin structure

随着大推力运载火箭、可重复使用飞行器的发展,大尺寸、大推力、高飞行速度以及可重复使用等成为飞行器的特点,但轻质、薄壁结构的广泛应用,使得航天飞行器,尤其是舱段结构,受到的振动、噪声环境越来越恶劣。航天飞行器在飞行过程中,主要经受 2 种恶劣的噪声环境:起飞喷流噪声、跨音速气动噪声,如图 1 所示。可以看出,飞行器的随机振动在起飞时刻和跨音速时刻出现最大,因此飞行器的随机振动环境可认为主要由噪声环境引起的。结构的振动会向飞行器内部辐射噪声,尤其舱壁的振动环境会通过仪器支架传递给仪器设备,对内部的精密仪器设备产生影响,甚至产生噪声破坏。因此,在飞行器设计与研制阶段,需对飞行器结构,尤其舱段结构,进行声振响应预示,缩短设计与研制周期,降低设计与研制成本。另一方面,声振响应预示可以作为试验的补充手段,可提高试验效率。

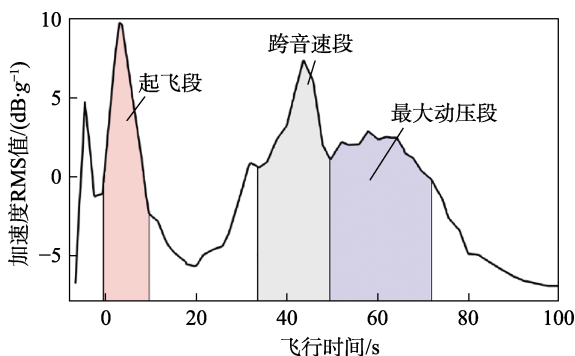


图 1 不同飞行时刻振动环境

Fig.1 Vibration environment at different flight times

声振响应分析方法很多,有低频分析方法(有限元^[1]、有限元-有限元、有限元-边界元^[2-4])、高频分析方法(统计能量分析^[5-11])、中频分析方法(有限元-统计能量混合方法^[12-15]、能量有限元^[16-19]等方法)等。其中,有限元法是把一个连续结构离散成有限数目的单元集合体,通过各单元之间的位移协调以及力平衡条件,建立线性方程组,得到单元及节点的位移和应力。声场与结构振动的耦合分析是在有限元分析方法的基础上发展起来的,主要有有限元法-有限元法和有限元-边界元法,边界元法只要求对结构的表面或边界进行离散,避免了在整个域内划分网格,降低了问题的维数。以上方法一般适用于声振低频问题。

对于高频声振响应分析,一般采用统计能量分析方法,从能量角度分析结构在外载荷作用下的响应,适用于宽频随机激励下的复杂结构高频动力响应问题。对于中频声振分析问题,一般采用有限元-统计能量混合方法,根据结构振动波长的大小,把模态密度低的结构(确定性子系统)建为有限元模型,把模

态密度高的结构(统计性子系统)建为统计能量模型,进行声振响应分析。

能量有限元法是近年来研究的一种求解结构中高频振动响应的方法。能量有限元法以有限元离散结构,以节点能量密度为基本变量建立动力学方程,能量以波动形式在结构中传递。它是统计能量分析和有限元方法的有效结合,既可以提高计算效率,又能得到局部关键位置处的响应。

以上方法主要获得结构的振动响应和声腔的声压。目前在车辆和船舶行业,还开展传递路径分析(Transfer Path Analysis, TPA),通过传递路径上的能量贡献量分析,研究系统的振动、噪声传递特性。TPA 方法已广泛应用于车辆、船舶等结构振动、噪声源的识别及贡献量分析,为其传递路径上的减振、降噪优化设计提供科学依据^[20]。对于汽车、高速列车的舒适性问题,以及水下航行器的隐身问题,TPA 方法研究有重要的工程应用价值。

以 TPA 理论为基础,采用“频响函数”对结构进行传递路径分析时,不能全面反映传递能量的分布。从能量角度描述系统内的振动传递路径,揭示能量传递路径、变化和衰减规律,能够为结构优化提供更为直接有效的参考^[21-23]。国内外目前主要在汽车行业的 NVH 问题方面应用比较多,基于传递路径分析进行各声源贡献量计算,为结构优化设计提供支撑。

本文将基于能量的传递路径分析方法引入航天飞行器舱段结构的声振响应分析中,在获得结构的振动响应后,进一步得到结构各部分的能量分布以及输入能量,从而分析各部分输入能量的贡献量,为结构的传递路径分析、结构优化设计、减振降噪设计奠定基础。

1 统计能量基本理论

对于 N 个保守子系统,弱耦合组成的结构,在稳态激励作用下,由能量守恒定律得第 i 个子系统的功率流平衡方程为:

$$P_{i,\text{in}} = P_{i,\text{d}} + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{ij} \quad (1)$$

式中: $P_{i,\text{in}}$ 、 $P_{i,\text{d}}$ 分别为第 i 个子系统的输入功率、损耗功率; P_{ij} 为第 i 个子系统到第 j 个子系统的功率流,结合功率流分析,式(1)可写为:

$$P_{i,\text{in}} = \omega \eta_i E_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N (\omega \eta_{ij} E_i - \omega \eta_{ji} E_j) \quad (2)$$

式中: ω 为频率, E_i 、 η_i 分别为第 i 个子系统的能量和内损耗因子; η_{ij} 为第 i 个子系统到第 j 个子系统的耦合损耗因子。

此时,整个系统方程可写为:

$$\omega \begin{bmatrix} \left(\eta_1 + \sum_{j=2}^N \eta_{1j} \right) n_1 & -\eta_{12} n_1 & \cdots & -\eta_{1N} n_N \\ -\eta_{21} n_2 & \left(\eta_2 + \sum_{j=1, j \neq 2}^N \eta_{2j} \right) n_2 & \cdots & -\eta_{2N} n_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{N1} n_N & -\eta_{N2} n_N & \cdots & \left(\eta_N + \sum_{j=1}^{N-1} \eta_{Nj} \right) n_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_1}{n_1} \\ \frac{E_2}{n_2} \\ \vdots \\ \frac{E_N}{n_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,in} \\ P_{2,in} \\ \vdots \\ P_{N,in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： n_i 为第*i*个子系统的模态密度。

由方程组(3)可知，如果已知输入功率以及模态密度、内损耗因子、耦合损耗因子，就可以得到子系统的平均响应能量。

2 声振响应分析统计能量模型

舱段结构主要由舱壁、口盖、仪器支架、仪器、口盖和上下盖板组成，其中包括纵向加筋，如图2所示。舱段整体结构的材料为铝，上下盖板分别为木板。对结构和声腔分别建立统计能量模型，其中舱壁、口盖主要建为统计能量壳模型，仪器支架和上下盖板建为统计能量板模型，如图3所示。加筋采用梁模型进行模拟，仪器设备质量分布在线连接上，如图4所示。结构与结构之间采用点、线连接，结构与声腔采用面连接(如图5所示)，进行能量传递。

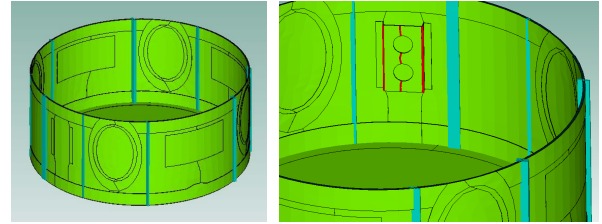
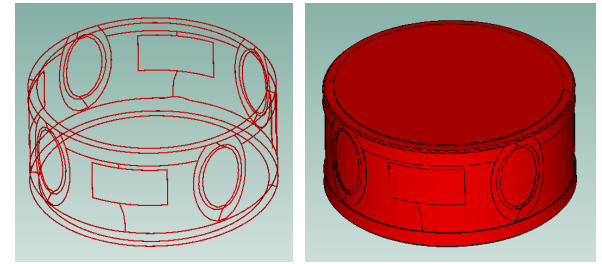


图4 加筋及仪器设备模型

Fig.4 Reinforcement and instrument equipment model



a 结构与结构点线连接

b 声腔与结构面连接

图5 统计能量连接关系

Fig.5 Connection relationship of SEA model: a) structure connected to structural points and lines; b) sound cavity connected to structural surfaces

3 噪声作用下声振响应分析

对结构施加如图6所示的3点平均外噪声激励，并采用半无限大流场模拟结构的声辐射，如图7所示。对图8所示的测点位置处的响应进行预示。

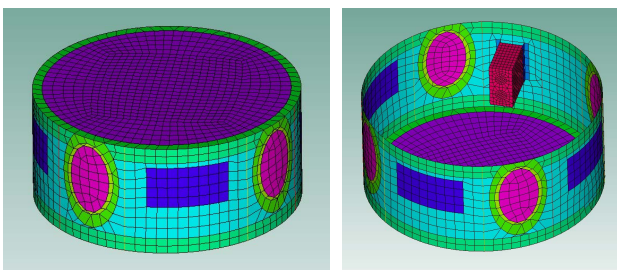


图2 舱段结构

Fig.2 Cabin structure

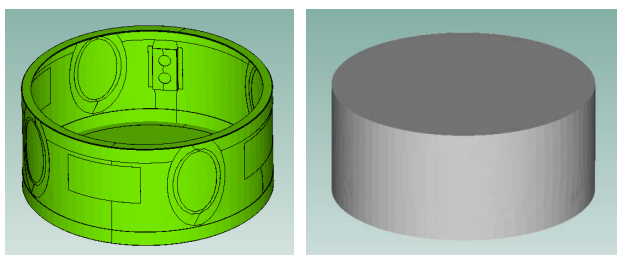


图3 舱段结构及声腔统计能量模型

Fig.3 SEA model of cabin structure and acoustic cavity SEA model

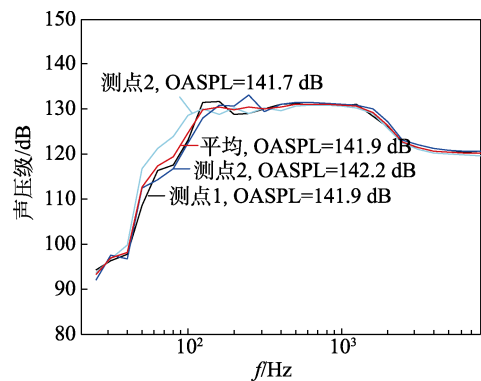


图6 3个噪声激励点及其平均声压谱

Fig.6 Sound pressure spectra of 3 excitation points and their average

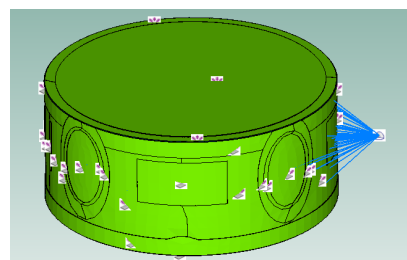


图7 声辐射模拟

Fig.7 Sound radiation simulation

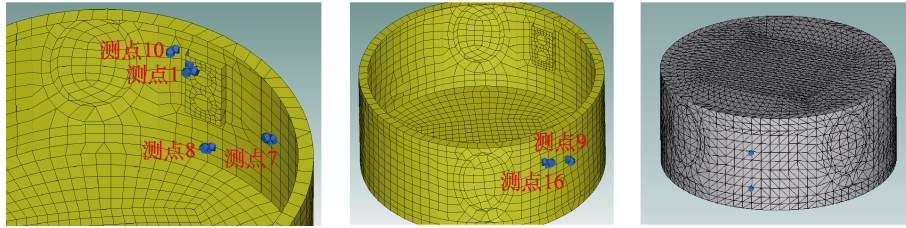


图 8 响应测点布置

Fig.8 Layout of response measuring points

统计能量模型的声振计算结果反映的是子系统响应的空间平均。从图 9 可以看出, 蒙皮法向 (R 向) 响应基本在 20g 左右, 其中蒙皮测点 8 离下端框较近, 响应为 6.26g。从图 10 可以看出, 内声场响应为 127.9dB。

4 舱段结构声振响应能量分布

针对舱段结构统计能量模型, 获得了不同频率下

的能量分布, 如图 11 所示。可以看出, 250 Hz 上下盖板以及圆形口盖的输入能量较多, 盖板振动能量较大, 口盖次之; 630 Hz 圆形口盖的振动能量较高; 4 000 Hz 舱段蒙皮的振动能量较高。因舱段结构较为简单, 除了仪器支架外, 舱段蒙皮、口盖等结构的主要振动是由外部噪声激励引起的, 子系统与子系统之间传递的能量不大。针对仪器支架及其连接蒙皮结构的输入能量贡献量进行了分析, 其中各部分结构的

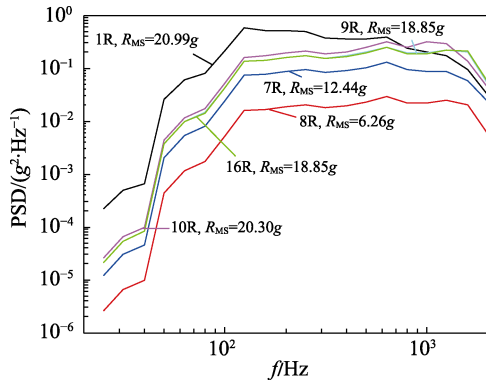


图 9 各测点加速度响应

Fig.9 Acceleration response of measuring point

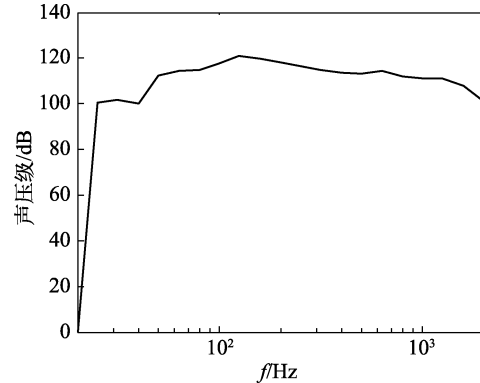


图 10 内声场测点响应

Fig.10 Response of internal sound field measuring point

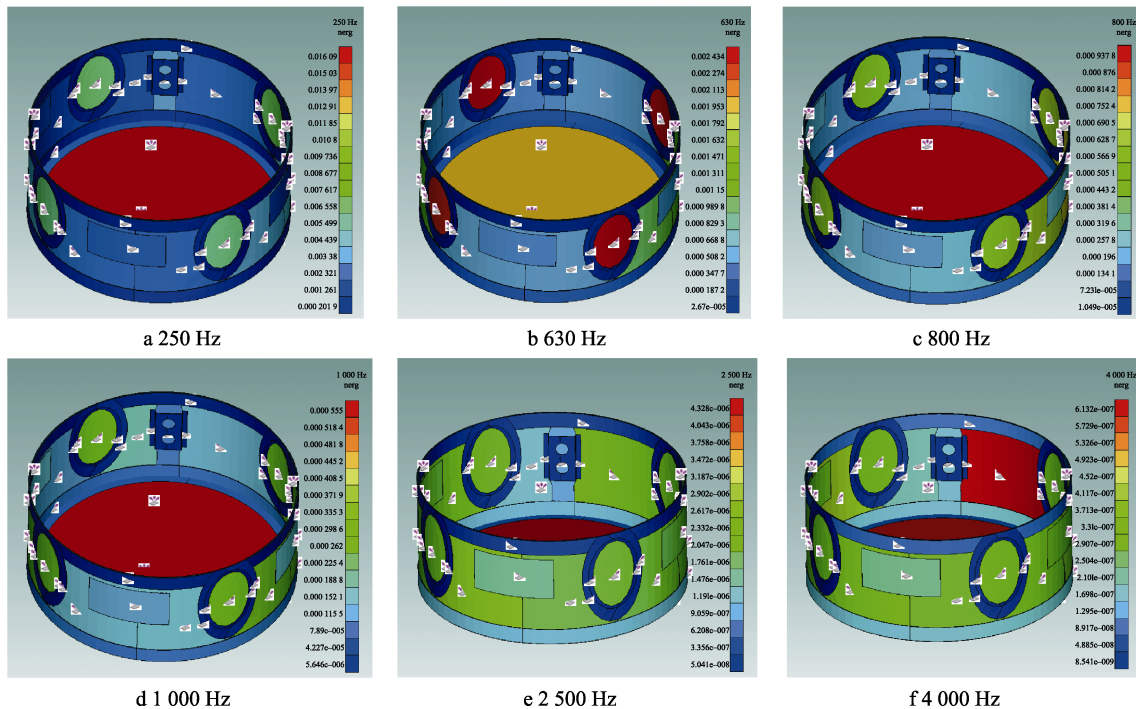


图 11 不同频率下舱段结构的能量分布

Fig.11 Energy distribution of cabin structure at different frequencies

称如图 12 所示。仪器支架及其安装蒙皮的输入能量如图 13 所示。

根据仪器支架及其安装蒙皮的各部分输入能量,按式(4)可计算得到各部分输入能量的贡献量,结果如图 14 所示。

$$\text{Input Contribution}(j, m) = \frac{W_j}{\sum W_j} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_j 为第 j 个子系统对第 m 个子系统的输入功率。可以看出,仪器支架安装壁板的能量主要来源于外部噪声激励,与之相连的蒙皮结构也会对其有输入能量,但贡献量不大,约占 10%。仪器支架底部的能量主要由安装位置处的蒙皮贡献,相邻蒙皮贡献的

能量约占 20%。仪器设备安装处的能量主要由仪器支架贡献。

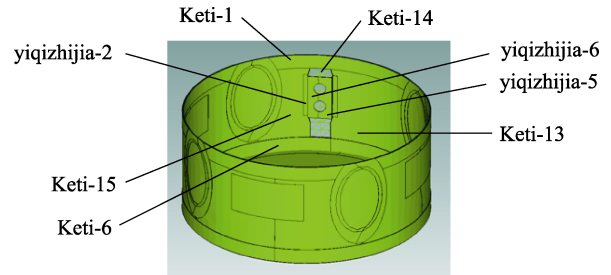


图 12 仪器支架及其关联子系统

Fig.12 Instrument bracket and its associated subsystems

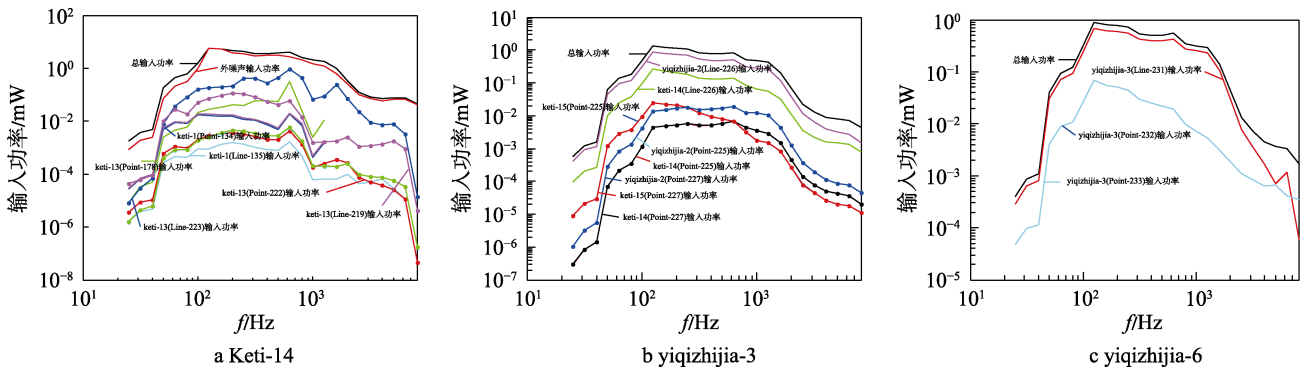


图 13 仪器支架及其安装蒙皮的输入能量

Fig.13 Input energy of instrument bracket and its mounting skin

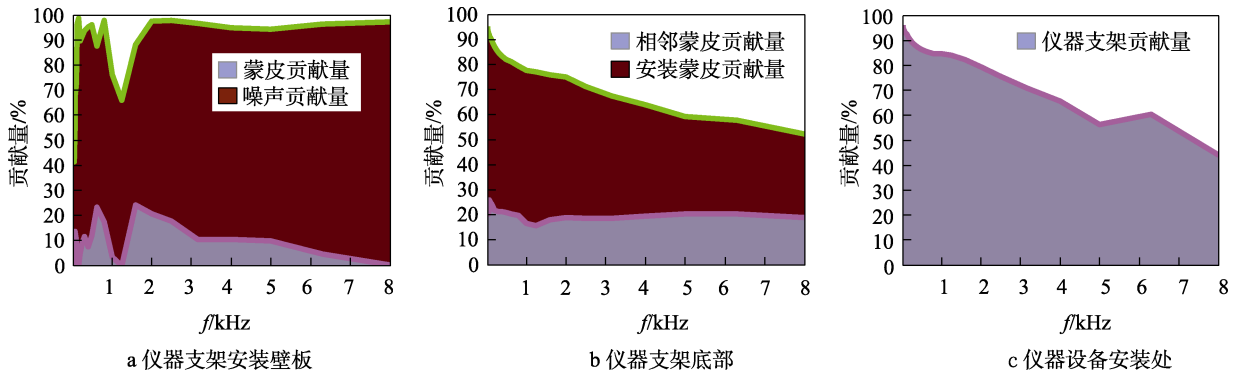


图 14 仪器支架及其安装蒙皮输入能量的贡献量

Fig.14 Contribution of input energy from instrument brackets and their mounting skins: a) installation wall panel of instrument bracket; b) bottom of instrument bracket; c) installation location of instrument equipment

5 结论

针对航天飞行器舱段结构,建立了统计能量模型,分析了蒙皮及仪器支架等结构的振动响应,获得了不同频率下各结构子系统的能量分布。针对仪器支架及其安装蒙皮获得其各部分的输入能量以及各部分输入能量的贡献量,得出以下结论:

- 1) 仪器支架安装壁板的能量主要来源于外部噪声激励,与之相连的蒙皮结构也会对其有输入能量,但贡献量不大,约占 10%。
- 2) 仪器支架底部的能量主要由安装位置处的蒙

皮贡献的,相邻蒙皮贡献的能量约占 20%。

3) 仪器设备安装处的能量,主要由仪器支架贡献的。

该分析可为结构的传递路径分析、结构优化设计、减振降噪设计奠定基础。

参考文献:

[1] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
WANG X C. Finite Element Method[M]. Beijing:

- Tsinghua University Press, 2003.
- [2] BREBBIA C A, DOMINGUEZ J. Boundary Elements: An Introductory Course[M]. Southampton: WIT press, 1996.
- [3] 冯金龙, 王宏宏, 赵营, 等. 航天器结构声振耦合问题的有限元-边界元方法数值仿真研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 37-43.
FENG J L, WANG H H, ZHAO Y, et al. Finite Element-Boundary Element Method Simulation for Acoustic-Vibration Problems of Spacecraft Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 37-43.
- [4] 胡昊文, 王中王, 徐延明, 等. 结构声学耦合随机性分析的等几何有限元-边界元法研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(12): 159-167.
HU H W, WANG Z W, XU Y M, et al. A Study on the Isogeometric Finite Element-Boundary Element Method for the Stochastic Analysis of Structural Acoustic Coupling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(12): 159-167.
- [5] LYON R H. Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems: Theory and Applications[M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1975.
- [6] 姚德源. 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.
YAO D Y. Principle and Application of Statistical Energy Analysis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [7] 王昆. 飞行器结构统计能量建模方法及声振响应分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG K. Research on Statistical Energy Modeling Method and Acoustic-Vibration Response Analysis of Aircraft Structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] 张国军, 闫云聚, 李鹏博. 基于统计能量法的飞行器结构声振响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(3): 92-96.
ZHANG G J, YAN Y J, LI P B. Analysis of Vibro-Acoustic Response of Aircrafts Based on Statistical Energy Method[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(3): 92-96.
- [9] 曾耀祥, 潘忠文, 李东. 基于统计能量分析法的火箭仪器舱声振环境预示[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(4): 27-32.
ZENG Y X, PAN Z W, LI D. Prediction for Acoustic-Vibration Environment of the Launch Vehicle Instrument Cabin Based on Statistical Energy Analysis[J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(4): 27-32.
- [10] 庄宁宁. 结构统计能量分析及疲劳寿命预报方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
ZHUANG N N. Research on Statistical Energy Analysis of Structure and Fatigue Life Prediction Method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [11] 刘小平. 用统计能量法预示导弹仪器舱的动力学环境[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(4): 52-56.
LIU X P. Predicting the Dynamic Environment of Missile Instrument Bay with the Statistical Energy Analysis Method[J]. Missiles and Space Vehicles, 2000(4): 52-56.
- [12] 高汝鑫. 组合结构与声振系统的中频振动混合分析方法及优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
GAO R X. Hybrid Analysis Method and Optimal Design of Intermediate Frequency Vibration of Composite Structure and Acoustic Vibration System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [13] 秦朝红, 任方, 王英诚, 等. 复杂结构全频段声振综合响应分析[J]. 强度与环境, 2017, 44(6): 8-14.
QIN Z H, REN F, WANG Y C, et al. Vibro-Acoustic Analysis of Complex Structure in Whole Frequency Band[J]. Structure & Environment Engineering, 2017, 44(6): 8-14.
- [14] 邹元杰, 张瑾, 韩增尧. 基于 FE-SEA 方法的卫星部组件随机振动条件研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 456-461.
ZOU Y J, ZHANG J, HAN Z Y. Random Vibration Specification for Spacecraft Components Based on the Hybrid FE-SEA Method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(4): 456-461.
- [15] 刘时秀. 应用 Hybrid FE-SEA 预示仪器舱动力学环境[J]. 强度与环境, 2011, 38(3): 14-18.
LIU S X. Prediction of Structure Response of Missile Instrument Cabin Based on Hybrid FE-SEA[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(3): 14-18.
- [16] 原凯, 王建民, 韩丽, 等. 能量有限元在振动与噪声预示中的研究进展[J]. 强度与环境, 2015, 42(3): 10-19.
YUAN K, WANG J M, HAN L, et al. Review on Prediction of Vibration and Noise Using Energy Finite Element Analysis[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(3): 10-19.
- [17] 王怀志, 于开平, 曾耀祥, 等. 能量有限元方法的双星整流罩中频声振环境预示[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(5): 42-49.
WANG H Z, YU K P, ZENG Y X, et al. Prediction for Vibration Environment of the Double Stars Fairing Structure Based on Energy Finite Element[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(5): 42-49.
- [18] 孙丽萍, 裴武. 能量有限元法在船舶结构中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(9): 1491-1494.
SUN L P, NIE W. Application of Energy Finite Element Method in Ship Structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(9): 1491-1494.
- [19] 徐福慧. 结构中高频响应预示的能量有限元法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
XU F H. Study on Prediction of High Frequency Response in Structures by Energy Finite Element Method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [20] 卢英英, 成玮, 陆建涛, 等. 运行工况传递路径分析方

- 法研究进展[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(4): 359-367.
- LU Y Y, CHENG W, LU J T, et al. Research Progress of Operational Transfer Path Analysis Method[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(4): 359-367.
- [21] 颜为光. 基于传递路径分析的振动预测及振源贡献量计算研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- YAN W G. Study on Vibration Prediction and Vibration Source Contribution Calculation Based on Transfer Path Analysis[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [22] 莫愁, 陈吉清, 兰凤崇. 扩展工况传递路径分析方法改进[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 129-133.
- MO C, CHEN J Q, LAN F C. Improvement of Operational-X Transfer Path Analysis Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8): 129-133.
- [23] 徐猛. 基于传递路径分析方法的车内低频结构噪声识别与控制[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- XU M. Identification and Control of Low-Frequency Structural Noise in Vehicle Based on Transfer Path Analysis Method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.