

板壳结构在声振联合试验下的 振动响应耦合分析

张学成¹, 阎金贞², 张保刚², 秦旭峰³, 孙晓凤⁴,
吴君辉⁴, 张国军⁴, 刘陆广²

(1.陆军装备部驻上海地区第三军事代表室, 上海 200031; 2.上海机电工程研究所, 上海 201109;
3.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 4.上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

摘要: **目的** 研究具有工程实践意义的板壳组合结构在声振联合作用下的响应预测方法。**方法** 在噪声试验、振动试验和声振联合试验响应曲线的基础上, 分析板壳组合结构在噪声和振动同时激励下的响应耦合规律, 并根据噪声试验和振动试验的响应极值包络法, 来预测在声振联合试验作用下板壳结构的响应分布。**结果** 声振联合试验响应曲线近似于噪声试验和振动试验的最大值包络线, 噪声的面激励和随机振动的基础激励在不同的频率范围内对结构响应起着主要影响。试验件的噪声试验和振动试验响应曲线在给定的频率点出现相交, 小于交越频率的声振联合试验响应与振动试验高度吻合, 高于交越频率的响应则以噪声试验为主。**结论** 在工程实际中, 可以直接利用振动试验和噪声试验的响应数据对声振联合试验的响应进行预测。由于交越频率难以事先获得, 因此响应叠加法在实践中更易于实现。

关键词: 声振联合试验; 板壳结构; 环境载荷; 交越频率; 响应预测; 极值包络法

中图分类号: V416.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)04-0091-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.011

Analysis of Response Coupling of Plate Shell Structure under Vibro-acoustic Test

ZHANG Xuecheng¹, YAN Jinzhen², ZHANG Baogang², QIN Xufeng³, SUN Xiaofeng⁴,
WU Junhui⁴, ZHANG Guojun⁴, LIU Luguang²

(1. Third Military Representative Office of Army Equipment Department in Shanghai, Shanghai 200031, China; 2. Shanghai Electro-Mechanical Institute, Shanghai 201109, China; 3. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 4. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an engineering method with practical significance to predict the response of plate shell structure under vibro-acoustic coupling. Based on the response curves of noise test, vibration test and vibro-acoustic test, the response coupling law of plate shell structure under simultaneous excitation of noise and vibration was analyzed, and the response distribution of plate shell structure under vibro-acoustic test was predicted according to the response extremum envelope method of noise test and vibration test. The response curve of vibro-acoustic test was approximately the maximum envelope line of the noise test and vibration test. The surface excitation of noise and the basic excitation of random vibration mainly impacted the

收稿日期: 2023-11-03; 修订日期: 2024-03-11

Received: 2023-11-03; Revised: 2024-03-11

引文格式: 张学成, 阎金贞, 张保刚, 等. 板壳结构在声振联合试验下的振动响应耦合分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 91-96.

ZHANG Xuecheng, YAN Jinzhen, ZHANG Baogang, et al. Analysis of Response Coupling of Plate Shell Structure under Vibro-acoustic Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 91-96.

structural response in different frequency ranges. Response curves of noise test and vibration test intersected at the given frequency point. The response of vibro-acoustic test below the crossing frequency was highly consistent with the result of vibration test, while the response above the crossing frequency was mainly similar to the noise test. Based on these results, the extremum envelope method can be used to predict the response of plate shell structure under vibro-acoustic test by the response data of noise test and vibration test in engineering practices. In addition, the response superposition method is more suitable because it is difficult to obtain the crossing frequency in advance.

KEY WORDS: vibro-acoustic test; plate shell structure; environmental load; crossing frequency; response prediction; extremum envelope method

在主动段飞行过程中,导弹或卫星等面临的振动环境主要是火箭发动机的推力脉动和整流罩外表面的气动噪声^[1-2]。为了充分考核航天器振动环境下的可靠性和稳定性,工程上通常采用各类地面试验模拟飞行环境,获得特定载荷下结构的振动响应特性^[3]。其中,随机振动试验是航天装备研制生产阶段最常见的试验类型。刘青林等^[4]分析了导弹飞行环境的载荷特征,提出了多种振动试验方法,可精确地模拟导弹飞行振动环境。晁征等^[5]通过分析高超声速导弹随机振动响应特征,获得了导弹在振动激励下的危险频段和薄弱环节。此外,整流罩的薄壳结构在气动噪声激励下产生的振动会引起罩内空腔的空气振荡,进而诱发导弹或有效载荷振动^[6]。随着航天器大型化、轻量化、超声速的发展,噪声振动问题越来越无法忽视,常规的随机振动试验无法满足设计要求。为了采用仿真方法对声振响应进行预示,韩丽等^[7]提出了一种声场等效处理方法,并与试验结果进行对比,验证了方法的有效性。姚熊亮等^[8]基于波动声场理论提出了复杂结构声振响应混合方法,解决了中频声振预示问题。李青等^[9]将噪声载荷声压谱转换为脉动压力功率谱密度,进而采用模态法分析了结构在噪声载荷作用下的随机振动响应。随着试验方法和设备能力的发展,单一的振动试验或者噪声试验已无法满足航天器可靠性设计要求,声振组合环境试验成为真实模拟航天器声振环境的有效手段^[10-12]。刘青林等^[13]通过对振动-噪声复合试验控制原理和载荷特征进行分析,解决了振动-噪声复合试验中的控制问题。张群等^[14]针对小卫星开展声-振联合试验,结果表明,不同结构处基础激励和噪声激励对低频段和中高频段的振动响应具有不同的影响效果,并且二者会出现耦合作用。声振动组合环境试验过程中,振动和噪声的激励形式和响应传递机理不同,其响应之间的耦合机制较为复杂^[15-17]。郜冶等^[18]基于天上飞行试验遥测数据,对战术导弹续航发动机与弹体发生的共振现象进行了研究,认为导弹结构中多个自然频率与外部多种激励之间相互影响是引起结构耦合共振的主要原因。王珺等^[19]采用谱分析方法推导了结构在随机振动+混响声场复合环境激励下响应谱密度的计算公式,解决了声振复合环境数值模拟问题。当前,有限元与统计能

量法以及其混合分析方法也被尝试用来解决声振复合作用下的中高频耦合问题^[20-23]。

然而,受限于试验成本,工程上往往无法开展声-振联合试验,并且对于复杂的结构也难以建立可靠的有限元模型进行数值分析。因此,有必要将声振组合试验响应与单项试验响应进行对比研究,探讨声振组合试验响应与2个单项试验响应的差异性,以验证用单项试验等效替代声振组合试验的可行性。本文以板壳结构的导引头为研究对象,在噪声试验、振动试验响应曲线的基础上,采用幅值叠加法和极值包络法预测耦合响应结果,并与声振组合试验响应结果进行对比,从而获得关键组件或者电子设备在声振环境下的单机力学试验条件。

1 理论基础

1.1 声-振耦合响应方程

声振联合试验中,板壳结构承受的外激励为振动台的基础激励和噪声声源的外表面分布载荷^[13]。机械结构声振激励下的耦合系统方程为^[1]:

$$\begin{bmatrix} [K]+i\omega[C]-\omega^2[M] & [L]^T \\ \rho_0\omega^2[L] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_v\} \\ \{F_a\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\{u\}$ 为节点位移; $\{q\}$ 为节点压力跳动量; $[L]$ 为几何耦合矩阵; $[D]$ 为间接边界元影响矩阵; $\{F_v\}$ 为基础激励的随机载荷向量; $\{F_a\}$ 为面激励的噪声载荷向量。

对式(1)的阻抗矩阵求逆后,可得结构响应的频域表达式:

$$\begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{q\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [H_{uv}] & [H_{ua}] \\ [H_{qv}] & [H_{qa}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{F_v\} \\ \{F_a\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: $[H_{uv}]$ 、 $[H_{qv}]$ 、 $[H_{ua}]$ 、 $[H_{qa}]$ 为耦合系统在随机振动和噪声激励下分别对节点位移和压力脉动的频响函数矩阵。

假定随机振动和混响声场的激励不相关时,式(2)右乘响应向量的共轭转置,可得结构的位移响应谱密度表达式^[19]:

$$S_{uu} = H_{uv} S_{F_v F_v} H_{uv}^H + H_{ua} S_{F_a F_a} H_{ua}^H \quad (3)$$

式中: $S_{F_v F_v}$ 、 $S_{F_a F_a}$ 分别为随机振动载荷和噪声载荷输入的功率谱密度。

1.2 声振耦合激励等效方法

根据式 (3) 可以明确, 在线性系统中, 可以分别计算随机振动和噪声作用下的响应, 随后将二者功率谱密度叠加, 即可获得声振复合环境下的结构响应。利用振动试验和噪声试验的实测数据来预测声振联合试验的振动响应时, 也可采取类似的方式, 这里给出幅值叠加和极值包络 2 种方法, 即:

$$\{\hat{R}(\omega)\}_1 = \{R_v(\omega)\} + \{R_a(\omega)\} \quad (4)$$

$$\{\hat{R}(\omega)\}_2 = \max\{R_v(\omega), R_a(\omega)\} \quad (5)$$

式中: $\{\hat{R}(\omega)\}$ 为声振联合试验的响应预测幅值向量; $\{R_v(\omega)\}$ 为振动试验的实测响应幅值向量; $\{R_a(\omega)\}$ 为噪声试验的实测响应幅值向量。幅值叠加法不需要额外分析, 即采用振动试验和噪声试验响应结果直接线性相加, 简单方便, 而极值包络需要首先获取响应交越点, 然后以交越点为分界, 取响应最大值进行包络, 从而获得声振耦合激励下的等效响应结果。

2 试验

2.1 试验模型

为了验证幅值叠加法和极值包络法预测声振耦合响应的有效性, 以某板、壳组合结构的导引头为试验对象 (如图 1 所示), 该导引头由平板天线、齿弧机构及封闭的圆柱壳舱体组成。试验过程中, 12 个三向加速度传感器和 9 个单向加速度传感器安装在各部件的外表面上, 用于测量板壳组合件的振动响应。部分加速度传感器的安装位置见图 1。

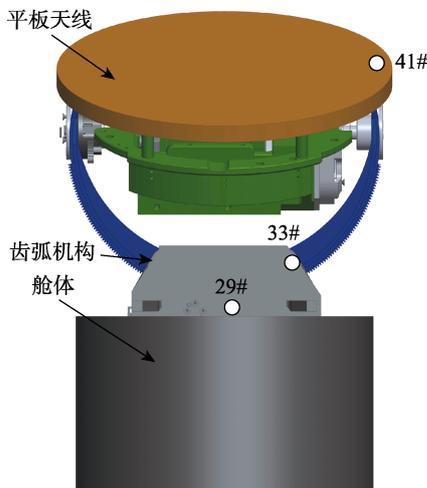


图 1 试验件示意图
Fig.1 Schematic diagram of test piece

2.2 试验方法及条件

随机振动试验通过电磁振动台完成, 导引头固定于振动台上。噪声试验则在混响室中进行, 试验件位于混响室的中心位置, 通过行波管支架进行弹性支撑。声-振联合试验将振动台放置在混响室的中心位置, 导引头通过工装固定于振动台上, 试验时, 振动台和噪声源同时施加激励。试验中, 随机振动试验载荷谱为 20~2 000 Hz 的平直谱, 各频率上的功率谱密度恒定为 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。噪声试验控制谱如图 2 所示, 为 50~8 000 Hz 的梯形谱, 其中 200~400 Hz 为平直段, 总声压级范围为 -14~-8 dB。振动试验方向为垂向 (x 向)。

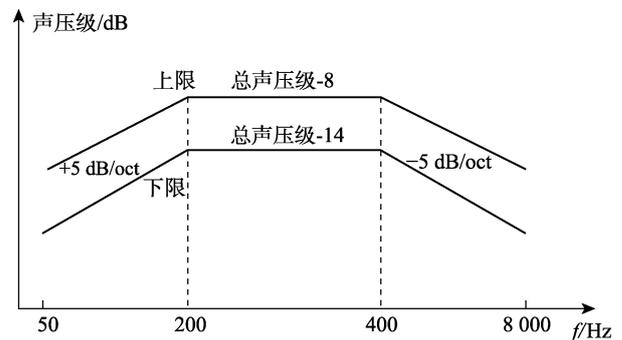


图 2 噪声试验控制曲线
Fig.2 Noise test control curve

2.3 试验结果

试验分为噪声试验、振动试验和声振联合试验 3 类。根据板壳结构特点, 取试验点分别位于平板天线、齿弧机构、舱体上盖板等 3 个部位。此外, 鉴于声场的空间相关性^[6-7,10], 为了充分考虑噪声激励与基础激励的耦合作用, 板结构的测点响应方向为法向 (x), 而壳结构的测点响应方向为径向 (r)。试验件部件在 3 种试验条件下测量得到的响应曲线见图 3。

根据图 3 可知, 声振联合试验响应曲线近似于噪声试验和振动试验的最大值包络线, 噪声的面激励和随机振动的基础激励在不同的频率范围内对结构响应起着主要影响。试验件的噪声试验和振动试验响应曲线在给定的频率点出现相交 (称之为交越频率), 小于交越频率的声振联合试验响应与振动试验高度吻合, 高于交越频率的响应则以噪声试验为主。齿弧机构和舱体的交越频率为 205 Hz, 而平板天线的交越频率为 151.3 Hz。以交越频率为分割点, 将试验频率范围划分为低频段和中高频段, 试验件在 3 类试验下的振动响应对比情况如表 1 所示。

根据表 1 可知, 声振联合试验的响应规律主要有以下几点: 1) 振动与噪声载荷作用在结构上会产生复合效应^[10], 声振联合试验的响应并不是噪声试验和振动试验的响应叠加。当振动与噪声耦合时, 低频振动产生的变形对结构形成的应力, 在一定程度上抑制了局部高频响应的极值, 从而使得声振联合试验的响

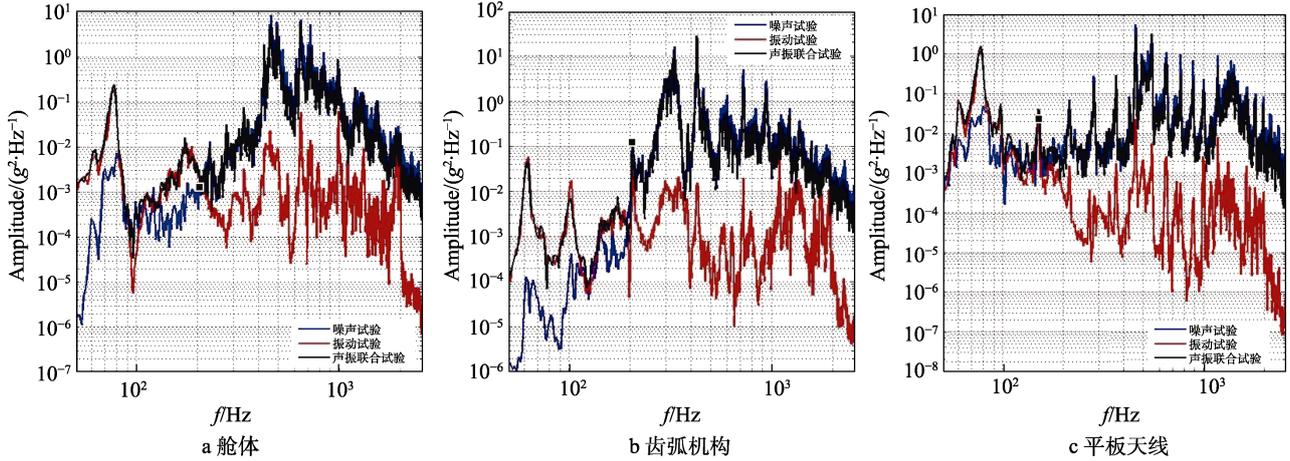


图3 声振联合试验与噪声试验和振动试验的响应曲线对比

Fig.3 Comparison of response curves between vibro-acoustic test, noise test, and vibration test: a) cabin; b) tooth arc mechanism; c) flat antenna

表1 声振联合试验与噪声试验和振动试验的响应对比

Tab.1 Comparison of response between vibro-acoustic test, noise test, and vibration test

部位	测点	均方根值/g								
		总均方根值/g			小于交越频率			大于交越频率		
		噪声试验	振动试验	声振试验	噪声试验	振动试验	声振试验	噪声试验	振动试验	声振试验
舱体上盖板	29x	21.067 1	2.155 4	16.811 6	0.347 9	1.177 7	1.251 7	21.064 2	1.792 7	16.763 4
齿弧机构	33r	24.279 5	2.363 5	22.139 9	0.570 4	0.679 5	0.759 9	24.272 8	2.263 2	22.126 8
平板天线	41r	13.713 5	2.738 4	22.139 9	0.855 6	2.622 0	2.850 9	13.686 7	0.741 9	10.689 8

应略小于噪声试验响应；2) 低频和中高频激励对结构响应的影响在交越频率前后有着明显的规律性，即交越频率之前，振动试验的响应接近于声振联合试验的响应，而一旦越过交越频率，噪声试验的影响显著增加，振动试验的响应快速衰减。

2.4 等效方法预测结果与声振联合试验对比

当获得噪声试验和振动试验的响应数据后，可利用幅值叠加和极值包络的方法预测声振联合试验的响应曲线。板壳结构外表面的振动响应实测曲线与预

测曲线对比结果如图4所示。

根据图4可知，振动试验和噪声试验的响应叠加法和极值包络法都能够较好地与声振联合试验的响应曲线高度重合。由于振动试验使得结构在低频范围内产生较大的变形，与噪声试验的激励耦合时，相当于板壳结构在施加预应力的情况下再进行噪声激励。由于预应力会导致板壳结构刚度提升，因此声振联合试验的实测响应在高频范围内小于噪声试验的响应值。声振联合试验的实测响应与2种响应预测值的对比情况见表2。

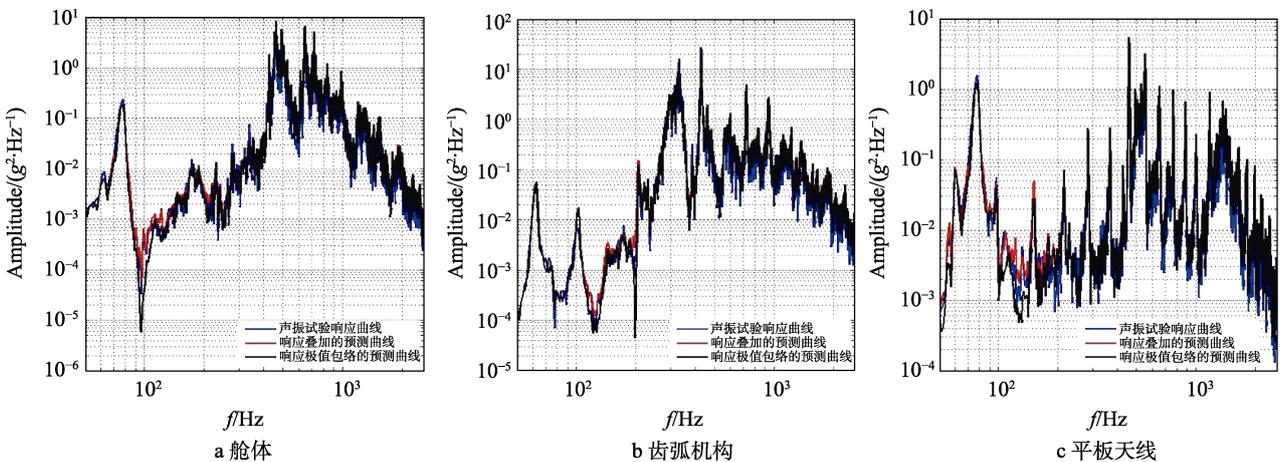


图4 试验响应曲线与预测响应曲线的对比

Fig.4 Comparison between test and predicted response curves: a) cabin; b) tooth arc mechanism; c) flat antenna

表 2 结构振动响应实测值与预测值的对比
Tab.2 Comparison between measured and predicted values of structural vibration response

部位	测点	实测响应的 均方根值/g	响应叠加法		极值包络法	
			均方根值/g	相对误差/%	均方根值/g	相对误差/%
舱体上盖板	29x	16.811 6	21.177	26.0	21.098 2	25.5
齿弧机构	33r	22.139 9	124.394 2	10.2	24.284 8	9.7
平板天线	41r	11.067 2	13.984 2	26.4	13.938 1	25.9

根据表 2 可知,2 种响应预测方法的特点主要有: 1) 2 种方法的预测值都大于实测值, 极值包络法相对更接近于实测值; 2) 2 种预测法对于齿弧机构更为有效, 其均方根值的相对误差在 10% 左右, 而壳结构响应预测值的均方根值相对误差大于 25%。误差的存在是由于式 (3) 是在“假定随机振动和混响声场激励互不相干^[19]”的基础上提出的, 尽管现有资料^[24-25]证明这种假设简化在工程上是允许的, 但实际上仍然存在一定可接受的误差。此外, 式 (3) 是针对简单的圆柱壳结构提出的, 对于这种简单的线性结构, 叠加算法具有较高的精度, 但是本试验对象为具有复杂结构的导引头, 因此存在偏差比较明显的问题。尽管如此, 当工程上不具备开展声振联合试验条件时, 仍然可以采用这 2 种方式达到快速考核的目的。

3 结论

对于安装在由板壳结构组成的封闭腔内部的电子设备, 单独的振动试验和噪声试验不能代替声振组合试验, 只有声振组合试验才能实现全频段的力学环境考核, 使得薄壁结构或者电子设备出现低频振动响应与高频噪声响应的耦合, 进而在更宽的频率范围内激发薄壁结构或者电子设备的潜在故障。

在工程实践中不具备开展声振组合试验条件时, 依据本文提出的响应预测方法可以通过振动试验和噪声试验的响应数据对声振组合试验的结构响应值进行预测, 就可以提出关键组件或者电子设备的单机力学环境试验条件。根据试验的响应分析可知, 本文的响应预测法会略大于实际响应, 已具备一定的安全裕度, 可以直接作为关键组件或者电子设备的单机力学环境试验条件。因此, 本文提出的声振组合试验响应预测法不但可以大大节约试验周期, 也能够节省大量试验经费。

参考文献:

[1] 柯受全等. 导弹与航天丛书·卫星环境工程和模拟试验(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
KE S Q. Missile and Aerospace Series-Satellite Environmental Engineering and Simulation Testing (Part 2)[M]. Beijing: Aerospace Publishing House, 1996.

[2] 韩增尧, 邹元杰, 朱卫红, 等. 航天器力学环境分析与

试验技术研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(2): 6-22.

HAN Z Y, ZOU Y J, ZHU W H, et al. Evolution of the Spacecraft Mechanical Environment Prediction & Test Technology[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(2): 6-22.

[3] 王博, 郝鹏, 田阔, 等. 航空航天结构轻量化设计与实验方法研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 596-606.
WANG B, HAO P, TIAN K, et al. Advances in Lightweight Design and Experimental Methods for Aerospace Structures[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4): 596-606.

[4] 刘青林, 陈颖, 田光明, 等. 导弹飞行振动环境地面模拟试验方法[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 68-75.
LIU Q L, CHEN Y, TIAN G M, et al. Laboratory Test Methods of Vibration Environment for the Flying Missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 68-75.

[5] 晁征, 蒋书波, 张广明, 等. 高超声速导弹随机振动响应分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 50-56.
CHAO Z, JIANG S B, ZHANG G M, et al. Random Vibration Response of Hypersonic Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 50-56.

[6] 任方, 张正平, 李海波, 等. 运载火箭整流罩内声场空间相关特性研究[J]. 强度与环境, 2014, 41(6): 32-37.
REN F, ZHANG Z P, LI H B, et al. Research on Spatial Correlation Characteristics of Interior Acoustic Field of Launch Vehicle Fairing[J]. Structure & Environment Engineering, 2014, 41(6): 32-37.

[7] 韩丽, 秦朝红, 靳荣华, 等. 声振响应仿真中声场的一种等效处理方法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(Z2): 80-83.
HAN L, QIN Z H, JIN R H, et al. An Equivalent Dealing Method of Reverberant Acoustic Field in Vibro-Acoustic Responses Simulation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(Z2): 80-83.

[8] 姚熊亮, 王献忠, 孙龙泉, 等. 复杂结构中频声振问题的方法研究[J]. 振动工程学报, 2011, 24(4): 444-449.
YAO X L, WANG X Z, SUN L Q, et al. The Hybrid Method for Vibro-Acoustic Problem of the Complex Structure[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(4): 444-449.

[9] 李青, 邢立坤, 柏江, 等. 航天器噪声试验中结构振动响应预示方法研究[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 569-576.
LI Q, XING L K, BAI J, et al. Method Study on Response Prediction of Structural Vibrations in Spacecraft Acoustic

- Tests[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 569-576.
- [10] 邹学锋, 郭定义, 潘凯, 等. 综合载荷环境下高超声速飞行器结构多场联合强度试验技术[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 2223-26.
- ZOU X F, GUO D W, PAN K, et al. Test Technique for Multi-Load Combined Strength of Hypersonic Vehicle Structure under Complex Loading Environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 2223-26.
- [11] 辛锋先. 复杂板壳结构声振耦合特性的理论与实验研究[J]. 固体力学学报, 2012, 33(3): 336-340.
- XIN F X. Theoretical and Experimental Study on Acoustic-Vibration Coupling Characteristics of Complex Plate and Shell Structures[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2012, 33(3): 336-340.
- [12] 沈志强, 晏廷飞, 张俊刚, 等. 卫星产品声振组合试验技术研究[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(4): 395-399.
- SHEN Z Q, YAN T F, ZHANG J G, et al. The Vibro-Acoustic Test Technology for Satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(4): 395-399.
- [13] 刘青林, 王东升, 李明海. 振动-噪声复合试验控制技术[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 97-100.
- LIU Q L, WANG D S, LI M H. The Control Techniques in the Vibro-Acoustic Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(3): 97-100.
- [14] 张群, 毕京丹, 王英诚, 等. 小卫星声-振联合试验耦合响应分析及预估[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(5): 495-499.
- ZHANG Q, BI J D, WANG Y C, et al. Analysis and Estimation of Satellite Coupling Responses in Vibro-Acoustic Test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(5): 495-499.
- [15] 刘聪, 吴臣武. 高超声速飞行器结构热-声振耦合动力学研究进展[J]. 强度与环境, 2022, 49(4): 1-8.
- LIU C, WU C W. Research Progress on Thermal-Acoustic Vibration Coupling Dynamics of Hypersonic Aircraft Structures[J]. Structure & Environment Engineering, 2022, 49(4): 1-8.
- [16] 武大江, 梅志远, 周振龙. 复合材料加筋/夹层板壳声振特性研究进展[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(4): 1-8.
- WU D J, MEI Z Y, ZHOU Z L. Advances in Vibroacoustic Research of Stiffened Composite Plates and Sandwich Composite Plates[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(4): 1-8.
- [17] 仝博, 李永清, 张振海, 等. 复合材料多层圆柱壳振动和声辐射问题研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 256-263.
- TONG B, LI Y Q, ZHANG Z H, et al. Research Advances on the Vibration and Sound Radiation of Composite Multilayer Cylindrical Shells[J]. Materials Reports, 2023, 37(2): 256-263.
- [18] 郜冶. 对大长径比战术导弹在飞行过程发生耦合共振现象的机理讨论[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(5): 655-661.
- GAO Y. Discussion on Coupling Resonance Mechanism in Flight of Tactical Missiles with Large Aspect Ratio[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(5): 655-661.
- [19] 王珺, 张景绘, 宁玮. 复合环境激励下的声振耦合分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 15-18.
- WANG J, ZHANG J H, NING W. Sound-Vibration Coupling Analysis under Combined Environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 15-18.
- [20] 崔向阳, 贺煜峰, 胡鑫. 基于新型声固耦合方法的汽车振动噪声响应分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(13): 137-146.
- CUI X Y, HE Y F, HU X. Vibro-Acoustic Response Analysis of Vehicles Based on a Novel Acoustic-Structural Coupling Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(13): 137-146.
- [21] 陈洋, 蒋刚, 梁山, 等. 典型舱段结构高频振动仿真分析方法[J]. 空天防御, 2023, 6(2): 88-94.
- CHEN Y, JIANG G, LIANG S, et al. Simulation Analysis Method for High Frequency Vibration of Typical Cabin Structures[J]. Air & Space Defense, 2023, 6(2): 88-94.
- [22] 乔扬, 陈海波, 许泽银, 等. 基于统计能量理论的飞行器壁板高频声振疲劳寿命预报及参数设计[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 230-236.
- QIAO Y, CHEN H B, XU Z Y, et al. sea-Based Fatigue Life Estimation Algorithm and Parameters Design for vehicle-Plates Excited by High Frequency Fluctuations[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9): 230-236.
- [23] 吴连军, 陈红永. 基于有限元法的随机振动与噪声复合响应数值模拟分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 34-37.
- WU L J, CHEN H Y. Numerical Analysis of Random Vibro-Acoustic Based on Finite Element Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(3): 34-37.
- [24] 晏廷飞, 方贵前, 刘沫. 结构星噪声与振动组合环境激励试验及效应研究[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(6): 131-134.
- YAN T F, FANG G Q, LIU M. Random Vibration and Acoustics Combined Testing and Effect Analysis of Satellites[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(6): 131-134.
- [25] 韦锦波. 太阳能电池板声振环境载荷等效方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- WEI J B. A Study on the Acoustic Vibration Environmental Load Equivalent Method of Solar Cell Sail Board[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.