

# 再入飞行振动环境试验等效性探讨

苏波, 张高楠, 石先杰

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** **目的** 提高再入体实验室模拟再入飞行振动环境的等效性, 确保地面环境试验结果的可靠性。**方法** 首先分析再入飞行过程中受脉动压力等因素影响诱发的振动环境载荷特征。其次, 基于飞行实测数据, 分析再入飞行振动响应的空间分布规律和频域能量分布特征。最后, 将飞行试验实测数据与传统实验室振动模拟试验结果进行对比, 从载荷传递规律、空间分布规律、频谱特征等方面对主要关注区域“天地”响应存在的差异进行探讨, 研究实验室等效模拟再入飞行振动环境的因素。**结果** 针对特定的再入体结构, 设置有限等效响应目标点, 通过对试验系统动态特性分析、夹具优化设计、试验控制方式、振动台激振模式等多方面综合研究, 可以提升再入飞行振动环境模拟等效性。**结论** 提出了以“天地一致性”为目标的工程可行措施和实验室振动试验等效原则, 为再入飞行振动环境的实验室等效模拟提供了支撑。

**关键词:** 再入飞行振动环境; 实验室振动试验; 等效原则

中图分类号: TJ011; V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)03-0086-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.03.015

## The Equivalence of Re-entry Flight Ground Vibration Test

SU Bo, ZHANG Gao-nan, SHI Xian-jie

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**ABSTRACT:** This paper is to improve the equivalence of simulated re-entry flight vibration environment in re-entry body laboratories to ensure the reliability of the ground environment tests results. Firstly, re-entry vibration environment load characteristic induced by the fluctuating pressure and other factors in flight is analyzed. Secondly, the spatial distribution discipline and energy distribution characteristics in frequency domain of re-entry flight vibration response is investigated on the basis of measured flight test data. Finally, the measured flight vibration data are compared and analyzed with the traditional laboratory vibration simulation test results. The main focus area differences between ground tests and its re-entry flight missions are discussed from load transfer law, spatial distribution discipline frequency spectrum characteristics, and so on. Also the factors of laboratory equivalent simulation re-entry flight vibration environment are studied. For a specific re-entry structure, a finite equivalent response target point is set so as to promote the equivalence of vibration environment simulation of re-entry flight by studying the dynamic characteristics of the test system, optimization design of fixtures, test control methods and excitation modes of vibration table. The feasible engineering measures that can guarantee the consistency of vibration response of re-entry

收稿日期: 2021-02-04; 修订日期: 2021-02-05

Received: 2021-02-04; Revised: 2021-02-05

作者简介: 苏波(1974—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为武器环境工程。

**Biography:** SU Bo (1974—), Male, Master, Engineer, Research focus: weapon environmental engineering.

通讯作者: 石先杰(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为装备结构动力学。

**Corresponding author:** SHI Xian-jie (1985—), Male, Ph. D, Senior engineer, Research focus: structural dynamics for weapon.

引文格式: 苏波, 张高楠, 石先杰. 再入飞行振动环境试验等效性探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 086-091.

SU Bo, ZHANG Gao-nan, SHI Xian-jie. The equivalence of re-entry flight ground vibration test[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(3): 086-091.

body between ground tests and its re-entry flight mission is presented and the laboratory vibration equivalent principle is proposed, which can provide support for improving the equivalence of ground environment test for re-entry flight vibration.

**KEY WORDS:** re-entry flight vibration environment; laboratory vibration test; equivalence principle

再入体再入飞行过程中将经历气动热、过载、噪声、振动等多种环境载荷综合作用。其中，由空气脉动压力诱发的振动环境作为最严酷的再入环境之一，可导致再入体结构件断裂、电子产品功能失效，从而使再入体无法在规定的时刻实现其完整功能<sup>[1-5]</sup>。相关统计结果也表明，振动环境导致产品的故障占所有失效问题的 70%<sup>[6]</sup>。因此，再入体开展飞行试验前，必须首先在地面开展模拟再入飞行振动环境的实验室试验，以保证产品能够适应再入过程中的振动环境。

一般实验室试验过程中，再入体产品通过试验夹具约束边界，并与振动台连接，通过振动台施加振动载荷，载荷再由夹具传递至再入体产品上，激发产品振动响应。实际飞行过程中，再入体为自由状态，振动载荷由脉动压力激励再入体表面产生，进而传递至产品内部。两种情况下，再入体的约束状态、载荷的作用方式等均不相同，导致再入体在实验室试验中的振动响应与真实飞行过程中的振动响应存在较大差异<sup>[7-13]</sup>。如何在实验室中有效模拟再入体飞行过程中的真实响应，不对产品造成严重“过试验”，避免给产品引入不应有的失效模式，是环境工程技术人员追求的终极目标。

文中主要以再入体飞行试验实测数据为基础，分析了其再入飞行过程中的振动环境特性。同时与传统试验方法下实验室振动环境试验结果进行对比，分析了现有实验室振动试验方式在载荷空间分布、传递规律、频谱特征等效模拟方面存在的不足。针对这一现象，探讨了实验室如何进一步提高再入飞行振动环境模拟的等效性，并结合已开展的相关研究工作对实验室模拟的等效原则等提出了建议。

### 1 再入飞行振动环境特性

某再入体开展了多轮次的飞行试验，包括不同状态飞行试验，其典型空间区域划分如图 1 所示。上述飞行试验中开展了环境参数测量，获取了相对完整的飞行振动环境数据。

从时间历程上看，再入飞行过程中，再入体飞行高度快速下降，大气密度增加，导致飞行动压增加，从而脉动压力变大，如式 (1) 所示<sup>[14-17]</sup>。

$$P_{rms} = \frac{C_q q}{1 + 0.14Ma^2} \quad (1)$$

式中： $C_q$  为与动压和马赫数有关的系数； $q$  为动压，Pa； $Ma$  为马赫数； $P_{rms}$  为均方根脉动压力，Pa。

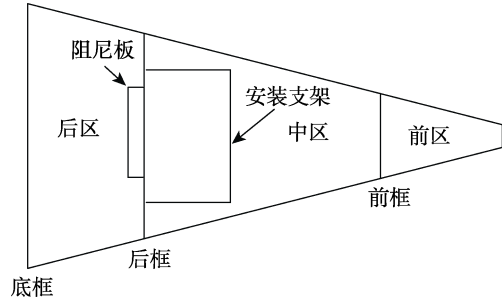


图 1 再入体结构  
Fig.1 Sketch for re-entry body

由于脉动压力是再入体振动载荷的直接诱发因素，因此再入体振动环境也将随着飞行高度的降低，逐渐变得更加严酷。一般在动压、飞行过载最大值附近，振动也将达到最大值。典型的再入体飞行再入后期，主要框上的振动载荷响应与动压随时间的变化规律如图 2 所示，振动载荷响应与过载随时间的变化规律如图 3 所示。一般而言，对于特定再入体而言，其再入飞行规律特性基本与图 2、图 3 一致。

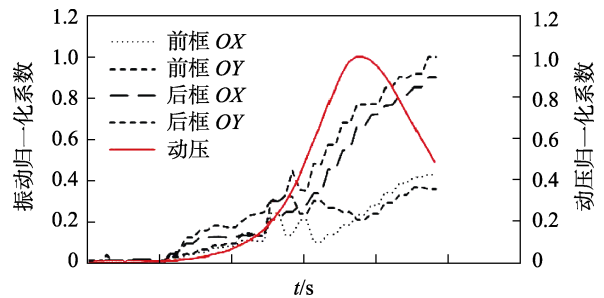


图 2 再入体飞行试验实测振动及预示动压变化规律  
Fig.2 Variation law of measured vibration and predicted dynamic pressure in re-entry flight test

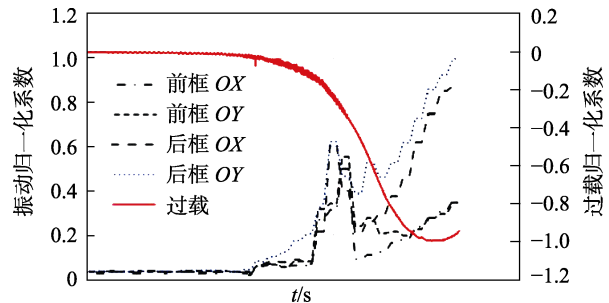


图 3 再入体飞行试验实测振动及过载变化规律  
Fig.3 Variation law of measured vibration and overload change in re-entry flight test

### 2 再入振动实验室试验方式

传统的再入体实验室振动环境试验，一般通过夹

具将再入体主要连接框位置螺栓连接或包夹紧固，再将夹具通过螺栓与振动台台面刚性连接。振动激励载荷通过台面-夹具-再入体主要连接或包夹位置这一传递路径传递给再入体，并通过安装板传递至再入体内部结构。

通常以再入体的主要连接框为加载控制基准点，并采用四点平均控制方法。同时，根据再入体飞行试验中获取的其他位置载荷响应情况，选择重要产品安装框位置作为实验室试验模拟真实飞行环境的等效目标，一般以覆盖目标点的振动均方根加速度作为等效目标。

对于试验控制点的加载条件，主要通过再入体相关飞行实测振动环境数据进行统计分析，并依据相应规范标准制定，归一化统计结果及加载量值如图4所示。

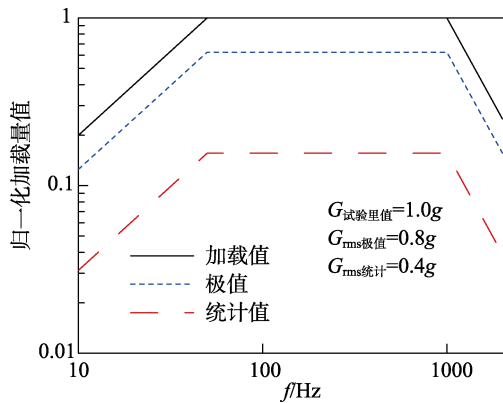


图4 再入体飞行振动数据统计结果与地面试验量值归一化比较

Fig.4 Normalized comparisons of re-entry flight vibration statistical results and ground test value

传统加载条件是在实测数据统计值基础上考虑不确定性，获得统计极值。在统计极值基础上，考虑一定裕量，获得试验加载条件。与飞行实测数据比较来看，传统加载试验条件通常是实测飞行环境量值的2倍。

### 3 飞行实测振动环境与地面振动响应差异分析

为分析实际飞行环境与地面模拟试验结果的差异，主要针对再入体飞行实测数据和实验室振动数据进行对比分析，对测点响应特性的差异进行研究。

#### 3.1 再入体飞行试验实测数据分析

载荷传递规律方面，再入体结构将载荷由连接框传递至内部安装支架，再到阻尼板上，基本呈现衰减特性，且阻尼板衰减更加明显。再入体试验弹飞行试验数据归一化结果见表1。

表1 再入体飞行不同位置响应数据比较

Tab.1 Comparisons of response data for various loacations in a re-entry flight test

后框		安装支架		阻尼板	
轴向	横向	轴向	横向	轴向	横向
1	0.81	0.62	0.55	0.33	0.39

频谱特征方面，再入体飞行过程中，无论是轴向，还是横向，高频载荷在传递过程中基本无放大，并有一定程度的衰减，如图5和图6所示。

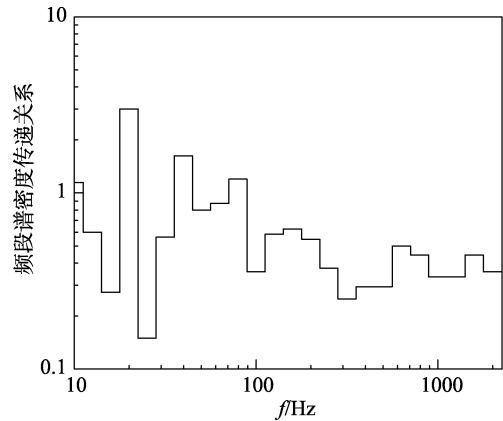


图5 自由飞行状态下安装支架与后框轴向振动传递关系  
Fig.5 Vibrational transfer relationship between mounting bracket and rear frame in free flight (axial direction)

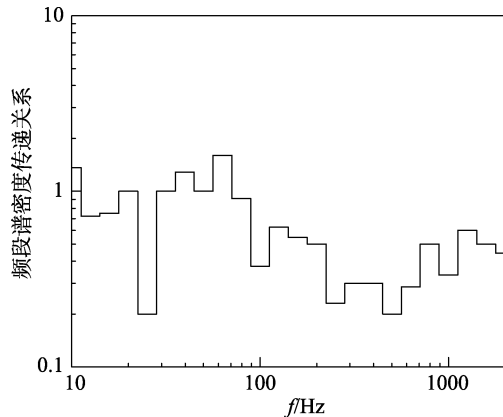


图6 自由飞行状态下安装支架与后框横向振动传递关系  
Fig.6 Vibrational transfer relationship between mounting bracket and rear frame in free flight (laterally direction)

#### 3.2 再入体实验室试验数据分析

实验室试验过程中，载荷的传递规律和频谱规律与实际飞行过程存在较大的差异。

安装支架位置相对振动载荷主要输入框，虽然在1000 Hz之前未出现明显放大，但是在1000 Hz以后的高频段出现严重的振动放大，如图7和图8中点划线曲线所示。其中图7为轴向试验结果，图8为横向试验结果。这与实际飞行过程中的载荷传递规律是相反的。对于阻尼板而言，由于刚性较小，实验室振动

台激励载荷作用下，在 70 Hz 频段附近出现了实际飞行过程中没有的放大现象。而在 100 Hz 以后，由于阻尼作用，出现了相对输入框明显的衰减现象。衰减现象也比实际飞行过程中的衰减现象更加明显，如图 7 和图 8 中的虚线所示。

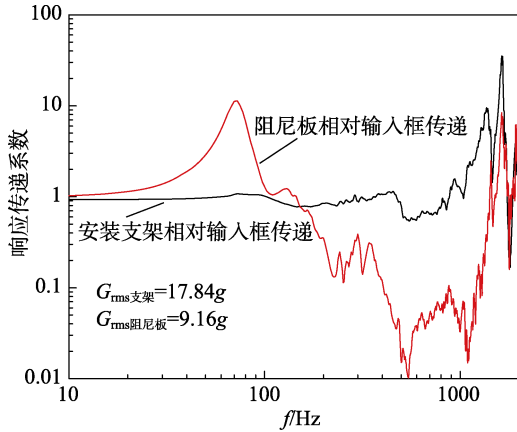


图 7 安装支架及阻尼板相对输入框传递关系（轴向）  
Fig.7 Transitive relation between mounting bracket and damping plate relative to input frame (axial direction)

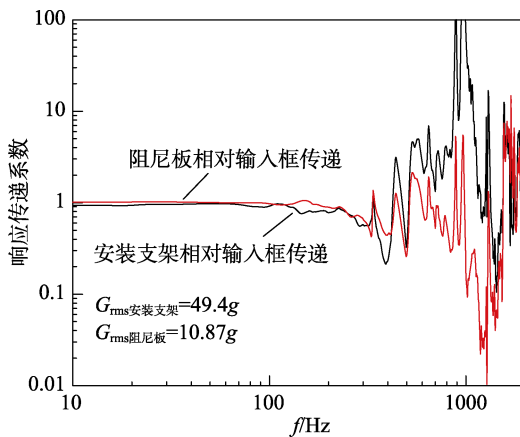


图 8 安装支架及阻尼板相对输入框传递关系（横向）  
Fig.8 Transitive relation between mounting bracket and damping plate relative to input frame (laterally direction)

上述地面振动环境试验结果明显表现出安装支架放大，阻尼板衰减的现象，在其他飞行器研制中也存在相同情况，即地面振动环境试验时主要连接框输入大，刚性支架响应大，阻尼减振板响应相对较小。

上述分析结果表明，在刚性连接或包夹紧固约束、四点平均控制等试验实施策略下，再入体实验室振动环境试验中产品响应特性与其实际飞行状态（自由体、面载荷等）下的响应存在一定差异。因此应进一步分析再入体飞行过程中的真实载荷空间分布规律、频谱特征，提出实验室振动试验模拟实际飞行振动环境的等效目标或原则，作为开展实验室振动试验夹具优化、试验方法改进的前提<sup>[18-21]</sup>。

## 4 再入飞行振动环境等效因素探讨

根据再入体飞行振动环境特性及传统地面振动环境试验数据的分析结果可知，为在地面振动环境试验中高保真地模拟实际飞行振动环境载荷及效应，需综合考虑以下几方面因素。

### 4.1 载荷空间分布规律

实测振动环境数据表明，再入体再入飞行过程中，振动环境沿轴线方向由小端到大端逐步增大。这在大量飞行试验实测环境中均有体现，再入体实测数据统计归一化结果见表 2。

表 2 再入体飞行实测数据统计结果  
Tab.2 Statistical results of measured re-entry flight data

位置	轴向			横向		
	前框	后框	底框	前框	后框	底框
比例	1	1.5	3	1	2	4

因此，在地面振动环境试验实施时，应尽量控制再入体振动载荷沿轴线的空间分布规律与实际飞行试验传递特性保持一致。

综上所述，在试验可实施的情况下，地面振动环境试验需考虑以下因素：

- 1) 根据实测数据情况，尽量沿着再入体轴线方向选择多个位置作为控制激励或等效目标，如在再入体前、中、后段各选择 1 个位置点。
- 2) 在保证各点的振动均方根加速度均可覆盖的前提下，尽量使实验室试验中各位置点的振动传递特性与实际飞行过程中的比例关系一致。

### 4.2 频域分布特性

就安装支架及阻尼板上的振动频域载荷而言，传统地面实验室试验中，关键仪器设备敏感频段的频谱放大特性与实际飞行中环境载荷特征也存在较大差异。因此，地面振动试验时，需要在再入体输入边界上进行响应频谱峰值控制，避免关键产品出现在部分频段上响应放大等“过试验”现象，也是实验室模拟飞行振动的一个重要目标。

## 5 结论

综合上述相关探讨和分析，为在实验室实现再入飞行振动环境的等效模拟，应考虑以下原则。

- 1) 尽量选择多个目标点。沿再入体特定轴线，选取有限个典型位置点作为振动等效目标点，例如再入体前、中、后段内各 1 点。
- 2) 目标点振动均方根加速度应满足覆盖性要求。为保证实验室试验验证的充分性，目标点上的振动总

能量须覆盖实际飞行振动环境,是实验室振动等效的前提。

3) 建议将目标点振动均方根加速度的比例关系与实际飞行过程中的空间分布关系作为等效目标之一。

4) 在均方根加速度比例关系等效的前提下,可考虑将频谱峰值特性的一致性作为振动等效的更高等效目标。

#### 参考文献:

- [1] 徐立功, 刘振寰. 再入飞行器脉动压力环境的分析与预测[J]. 空气动力学学报, 1991, 9(4): 457-464.  
XU Li-gong, LIU Zhen-hua. Prediction of maneuvering reentry vehicles fluctuating pressure environments[J]. Acta aerodynamica sinica, 1991, 9(4): 457-464.
- [2] 陈伟芳, 张志成, 石于中, 等. 再入体表面脉动压力环境的预测[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(6): 20-23.  
CHEN Wei-fang, ZHANG Zhi-cheng, SHI Yu-zhong, et al. The prediction of fluctuating pressure on the surface of reentry vehicles[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(6): 20-23.
- [3] 黄寿康. 流体动力·弹道·载荷·环境[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 45-95.  
HUANG Shou-kang. Fluid Dynamics·Ballistics·Loads·Environment[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1991: 45-95.
- [4] LAGANELLI A L, WOLFER H F. Prediction of fluctuating pressure in attached and separated turbulent boundary-layer flow[J]. Journal of aircraft, 1993, 30(6): 962-970.
- [5] COCKBURN J A, ROBERTSTON J F. Vibration response of spacecraft shrouds to in-flight fluctuating pressures[J]. Journal of sound and vibration, 1974, 33(4): 399-425.
- [6] 马兴瑞, 于登云, 韩增尧, 等. 火箭力学环境分析与试验技术研究进展[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 323-331.  
MA Xing-rui, YU Deng-yun, HAN Zeng-yao, et al. Research evolution on the satellite rocket mechanical environment analysis & test technology[J]. Journal of astronautics, 1993, 30(6): 962-970.
- [7] 韩丽, 张正平, 陈凯, 等. 边界条件对试件振动响应影响的仿真研究[J]. 强度与环境, 2010, 37(5): 28-33.  
HAN Li, ZHANG Zheng-ping, CHEN Kai, et al. Simulation study of boundary's effect on test-piece's vibration response[J]. Structure & environment engineering, 2010, 37(5): 28-33.
- [8] 朱学旺, 刘青林. 飞行振动环境随机试验模拟的载荷等效[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 257-261.  
ZHU Xue-wang, LIU Qing-lin. Simulation of excitation in ground random vibration test with respect to flight environment[J]. Spacecraft environment engineering, 2006, 23(5): 257-261.
- [9] 刘继承, 周传荣. 机械结构边界条件动态设计方法研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(1): 46-49.  
LIU Ji-cheng, ZHOU Chuan-rong. Boundary dynamical design method research for mechanical structures[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2004, 34(1): 46-49.
- [10] 顾松年, 高跃飞, 姜节胜. 动力学边界模拟中的振型修正与模态截断[J]. 机械强度, 2004, 26(6): 609-614.  
GU Song-nian, GAO Yue-fei, JIANG Jie-sheng. Mode shape modification and truncation in the simulation of dynamic boundary conditions[J]. Journal of mechanical strength, 2004, 26(6): 609-614.
- [11] 邱吉宝, 张正平, 李海波, 等. 全尺寸航天器振动台多维振动试验的天地一致性研究(上)[J]. 强度与环境, 2015, 42(1): 1-11.  
QIU Ji-bao, ZHANG Zheng-ping, LI Hai-bo, et al. The consistency of dynamic responses of a full scale spacecraft between ground tests and its space missions(I)[J]. Structure & environment engineering, 2015, 42(1): 1-11.
- [12] 邱吉宝, 张正平, 李海波, 等. 全尺寸航天器振动台多维振动试验的天地一致性研究(下)[J]. 强度与环境, 2015, 42(2): 1-12.  
QIU Ji-bao, ZHANG Zheng-ping, LI Hai-bo, et al. The consistency of dynamic responses of a full scale spacecraft between ground tests and its space missions(II)[J]. Structure & environment engineering, 2015, 42(2): 1-12.
- [13] 朱学旺, 李健, 王东升. 夹具动态特性与振动试验控制精度的关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 547-549.  
ZHU Xue-wang, LI Jian, WANG Dongsheng. Dynamic performance of fixture and control precision of vibration test[J]. Journal of scientific instrument, 2002, 23(3): 547-549.
- [14] ROBERTSON J E. Prediction of in flight fluctuating pressure environments including protuberance induced flow[R]. Washington D C: NASA, 1971.
- [15] 苏松松. 脉动压力下飞行器结构响应及相关断裂问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
SU Song-song. On the research of the response of aircraft structure subjected to the fluctuating pressure and related fracture phenomena[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [16] 蒋华兵, 李春丽, 陈强洪. 再入飞行器脉动压力环境特性分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(3): 378-382.  
JIANG Hua-bing, LI Chun-li, CHEN Qiang-hong. The characteristics of the fluctuating pressure environment for a re-entry vehicle[J]. Spacecraft environment engineering, 2010, 27(3): 378-382.
- [17] COCKBURN J A, ROBERTSTON J F. Vibration response of spacecraft shrouds to in-flight fluctuating pres-

- tures[J]. *Journal of sound and vibration*, 1974, 33(4): 399-425.
- [18] MIL-STD-810H, Environment engineering consideration and laboratory test[S].
- [19] GJB 150A—2009, 军用设备环境试验方法[S].  
GJB 150A—2009, Laboratory environmental test methods for military material[S].
- [20] 陈怀海, 周传荣. 通过边界条件的设计控制结构固有振动特性[J]. *机械强度*, 1996, 8(1): 48-52.  
CHEN Huai-hai, ZHOU Chuan-rong. To control the dynamic characteristics of a structure by designing its boundary conditions[J]. *Journal of mechanical strength*, 1996, 18(1): 48-52.
- [21] 周桐, 胡杰, 欧阳智江, 等. 典型试件两点激励影响因素研究[C]// 第五届装备环境工程发展论坛论文集. 重庆: 重庆五九期刊社, 2018: 154-159.  
ZHOU Tong, HU Jie, OU-YANG, Zhi-jiang, et al. Experimental study on two points exciter effect factors for typical conical structure[C]// *The Fifth Equipment Environmental Engineering Development Forum*. Chongqing: Chongqing Wujiu Periodicals Press, 2018: 154-159.