

典型锥形结构两点响应控制试验研究

周桐, 胡杰, 欧阳智江, 赵怀耘

(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** 研究小长径比结构进行两点振动响应控制时的可行性, 提升地面振动模拟真实性。**方法** 针对一长径比约 3:1 的短圆锥结构, 首先以圆锥表面气动载荷为振动输入载荷, 通过数值仿真获得结构在自由状态下内部两点的加速度功率谱密度曲线, 再采用激励杆和激励板的形式进行两点激励加载, 控制要求的两点加速度响应。将真实响应的控制结果与常用梯形谱的控制结果进行对比, 分析控制的有效性及其结果的合理性。**结果** 通过对比不同的两点激励加载部位, 发现振动控制效果会存在明显差异, 以仿真的结构响应作为振动控制谱, 具有良好的振动控制效果, 实际控制的功率谱密度曲线只在局部“谷”的地方和低频段出现超差, 实际均方根值与要求均方根值差异较小。**结论** 以仿真得到的结构内部响应作为振动控制谱, 可以提高结构地面振动考核的真实性。当振动激励部位选择合适时, 对于小长径比结构, 也可以得到良好的控制效果。

关键词: 两点激励; 两点响应; 随机振动控制; 短圆锥结构

中图分类号: TJ011; V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)03-0092-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.03.016

Experimental Study on Two Points Response Control Technology for Typical Conical Structures

ZHOU Tong, HU Jie, OUYANG Zhi-jiang, ZHAO Huai-yun

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

ABSTRACT: The multi-exciter vibration test method is suitable for the vibration loading of large and slender structures. The position of the control points are usually located near the excitation points and the control condition is a ladder spectrum obtained by the envelope method. This method may lead to an obvious difference between the response of test and the real response. Aiming at a short conical structure, this paper proposes a new experimental design method to control different responses of two points in the test structure. The acceleration power spectrum density of two points in the structure is obtained by numerical simulation. A two points excitation is used to control the two points response by using the excitation bar and the excitation plate. The test results show that the responses of the control points have reasonable correlation and the excitation position is reasonable. Therefore, the control effect is very well when the two points response control is carried out.

KEY WORDS: dual-exciter; dual-response; random vibration control; short conical structure

收稿日期: 2021-02-04; 修订日期: 2021-02-16

Received: 2021-02-04; Revised: 2021-02-16

基金项目: 中国工程物理研究院 TA05 基金

Fund: Supported by the "TA05" Program of CAEP

作者简介: 周桐 (1975—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为综合环境试验技术、多激励试验技术。

Biography: ZHOU Tong (1975—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: combined environment technology.

引文格式: 周桐, 胡杰, 欧阳智江, 等. 典型锥形结构两点响应控制试验研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 092-096.

ZHOU Tong, HU Jie, OUYANG Zhi-jiang, et al. Experimental study on two points response control technology for typical conical structures [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(3): 092-096.

在航空、航天及众多地面装备产品研制过程中，振动试验发挥了无可替代的作用，但传统振动试验是以条件覆盖为主导思想，将试验件通过夹具连接在一个独立的振动台上，受夹具自身特性和振动控制方式的影响，这种试验方法有时会导致响应与真实状态偏差较大，甚至试验无法实施。为了提高地面模拟的真实性，多激励试验方法受到了广泛的关注^[1-3]，并被逐步规范化。在 MIL-STD-810G^[4]中，主要分单轴多激励和多轴多激励两大类。GJB 8547—2015^[5]《军用装备多激励器振动试验方法》也对此类试验的实施提出了具体要求。

有很多文献报道过进行单轴两点激励试验，但其试验件共同的特点是均为细长结构^[6-8]，长径比都超过 10。此时两个激励点的相关性较弱，易于振动控制。虽然有些试验^[9-10]采用的试件稍短，长径比仍接近 7，且试验上限频率较低，仅为 500 Hz，高频的响应差异并未表现出来。这些文献的另一个共同点是，不同控制点的功率谱密度曲线是相同或相似的阶梯形谱，而真实结构在受激励时表现出来的响应必定是复杂的锯齿形响应。这样制定振动环境条件更主要是达到“覆盖”的目的，并不完全追求响应的真实性，会导致明显的过试验。地面振动试验时常用多点响应平均控制方法^[11]，其本质是控制一个虚拟点的响应，并无法和试验件上真实的响应点对应，是一种便于实施的控制策略，也是一种基于包络和平均思想的控制方法。

文中针对一短圆锥飞行结构，从提升地面振动试验模拟真实性的目的出发，提出直接控制结构内部多个核心点响应的试验条件制定方法，并进行多点激励多点响应控制的试验加载方法，初步说明新方法的可行性，预期将会对导弹武器装备飞行环境的适应性评估产生新的影响。

1 研究背景

为了提升飞行器的可靠性，在地面进行充分的环境试验模拟是非常重要的，振动试验是暴露问题的有效手段。如果振动条件制定得过严酷，则会增大产品研制的难度；如果制定得偏低，则可能存在考核不足的风险。GJB 150.16A^[11]是目前国内最常用的振动标准，其中给出的飞行器振动控制谱，也多为类似阶梯的形状，这样的结果必然会在较宽的频段对真实响应明显加严。

某典型短圆锥飞行结构在进行地面环境试验时，传统做法是在外壳关键部位选取多个点，利用这多个点在飞行时的加速度响应制订地面振动试验的控制谱（梯形谱），然后在试验室进行横向振动试验时，用包带形式的夹具约束试验件（见图 1），采用多点响应平均方法控制。

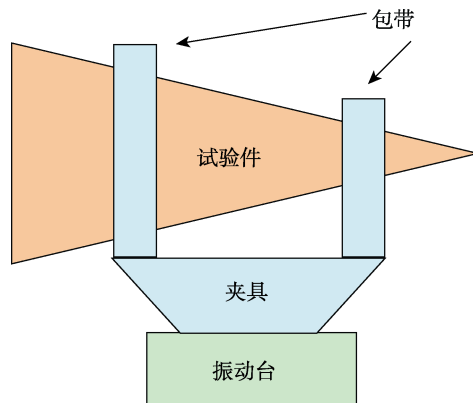


图 1 传统试验件安装方式

Fig.1 Traditional method of fixing a test article

这种试验方式的问题在于，由于试验件的真实状态是在空中作自由飞行，受到的激励来自于表面的气流；而试验室内却用一刚性较强的夹具对试验件进行约束，激励通过夹具传递给试验件，实际控制的又是一个虚拟点的响应满足梯形谱的要求。这时试验件上的测点响应必然与实际飞行时存在显著差异。

为了实现结构在地面试验模拟时的振动响应能够与实际飞行时的相近，文中提出采用结构上真实的响应作为控制条件，进行多点激励多点响应控制的思路，并进行了两点激励、两点响应控制的试验验证。

2 试验设计

在实验室开展自由飞行结构多激励多点响应控制试验时，建议按照如下思路设计试验：

1) 建立准确的飞行结构动力学有限元模型。为了获得准确的动力学模型，需要以模态试验的结果为依据，再结合一定量级随机振动试验的结果进行模型修正。单纯模态试验的激励能量太小，可能会导致辨识出的结构特性存在偏差。

2) 采用数值模拟方法（必要时结合风洞试验结果和经验公式），获得气动载荷作用下结构中 N 个核心点在飞行时的振动加速度响应，并将其转换为振动控制谱。对于马赫数 6 以下的飞行结构，可以通过数值模拟的方法获得比较准确的气动载荷结果。当飞行速度进一步提升，热-力的耦合效应显著增加，就需要结合风洞试验的结果进行修正。高速风洞只能进行缩比模型的试验，这对试验的精确度也造成一定影响。飞行速度更高时就得依赖飞行实测和经验公式来获得载荷的特征。我国 JF12 风洞目前可以模拟最大马赫数为 9 的风速，在研新型风洞可模拟马赫数为 10~25。

3) 采用数值模拟方法^[12]，获得使 N 个核心点响应满足要求、可行的激励加载区域。可控核心点越多，则地面试验时结构的整体响应与真实飞行状态越相似。理论上要控制 N 个点的响应，只需要对 M 个点

($M \geq N$) 进行激励。但工程应用时只可能在结构刚度相对较好并有足够空间的部位施加振动激励,而且激励的加载能力是有限的,不一定能够达到理论计算要求。因此实施时只能先确定若干可能的加载部位,再通过仿真评估在这些加载部位所需的加载能力。当空间和加载能力均可实现时,该加载部位才是可行的加载部位。对于文中研究的短圆锥结构, $M=2$ 或 $M=3$ 尚可实施, $M>3$ 后则会由于激振器的布局问题导致难以加载。

4) 将被试结构用柔性悬挂的方式进行约束,并对其采用多点激励的方式进行振动加载,运用 MIMO (多输入多输出) 振动控制器控制核心点的响应。GJB 150.16A^[11] 中建议“外挂、悬挂设备及结构支撑架的组合刚体模态频率应在 5~20 Hz 之间”,但这样可能会与试验的频率下限发生重叠,存在共振的风险。文中认为对于自由飞行结构,悬挂频率应在保证试验系统稳定性的情况下尽量低。MIMO 的控制效果与控制算法密切相关,这方面在文献[8,13-14]中有较多研究。

3 试验实施的关键点

3.1 试验件设计

本次试验设计了一个长径比约 3 : 1 的短圆锥结构,图 2 中①、②、③是 3 个可用激励点,可对被试结构进行横向激励加载, A、B 是结构内部设计的 2 个核心响应点,作为试验的控制点。结构的横向一阶振动频率远高于悬挂系统的频率。

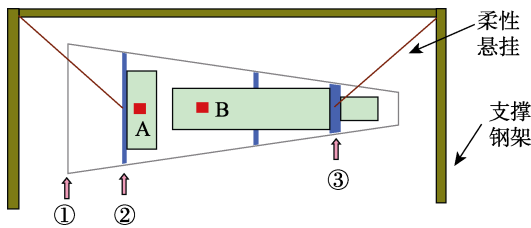


图 2 试验件悬挂和激励方式
Fig.2 Suspension and excitation method

3.2 载荷设计

首先假定飞行状态锥体外表面受到的是一个均布宽频域面载荷,通过数值模拟得到内部核心点 A、B 的加速度响应谱,频率范围为 10~2000 Hz。再进行可行域分析,认为同时控制 A、B 两点响应时,①、②或①、③点激励均可取得较好的控制效果,具有可行性。

3.3 约束设计

试验件在飞行时处于自由状态,但地面试验时只能采用柔性悬挂的方式。本次试验采用钢弹簧将试验

件整体悬挂(见图 2),使其轴线处于水平状态,4 个悬挂点位于试验件轴线所在水平面内。系统的垂向共振频率约 4 Hz,避免与振动加载频率重叠。

3.4 激振器和振动控制器选择

根据数值模拟结果,当激励点选择在图 2 中激励点①(或②)和激励点③的位置时,激励点③将是主要的载荷传力部位,因此该处的激振器选择为一小型 8 t 电动振动台,激励点①(或②)是辅助传力部位,该处激振器选择为一小型 50 kg 激振器。小激振器安装在振动台配备的滑台上,理论上振动台、小激振器、滑台、试验件的轴线在同一平面内。试验时滑台供油,这样可尽量减少试验系统的硬连接(见图 3)。

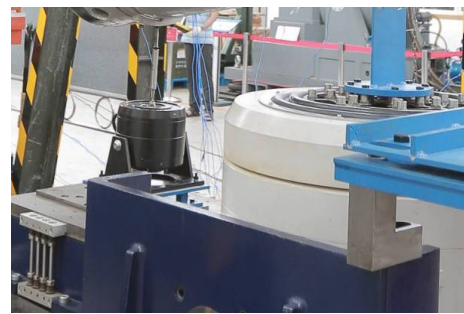


图 3 激振器布局位置
Fig.3 Configuration of exciters

控制器选择为某公司的 MIMO 振动控制器,试验时输入所需的核心响应点的自功率谱密度曲线,控制矩阵中非对角元素取 0,相干系数取 0。这样设置的目的是主要是考虑到多控制点的互谱无法准确给出,从工程应用的角度采用简化处理的方式^[15]。

3.5 夹具设计

本次试验的夹具分为前、后两部分,后端(激励点①或②)由于传力较小,设计为杆状结构(见图 4a),前端(激励点③)传力较大,设计为立板结构(见图 4b),板面垂直于试验件的轴线。夹具与试验件之间均通过螺栓连接。

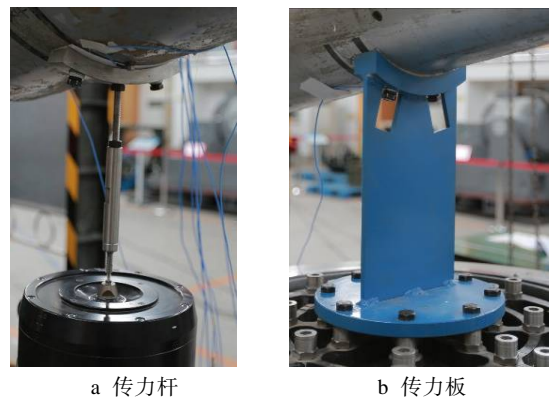


图 4 夹具设计
Fig.4 Fixture design: a) dowel bar; b) dowel plate

4 试验结果

4.1 加载位置影响

梯形谱是较常用的一种控制谱，本次试验中，如果在前述约束和激励方式下，要求核心点 A、B 的响应均为梯形谱，则实际的控制效果如图 5（激励①、③）、图 6 所示（激励②、③）。可以看出，在进行多激励控制时，并不一定是两激励点间的距离越远越好，也不一定是控制器的算法不够先进，在恰当的位置激励才会有最好的控制效果。

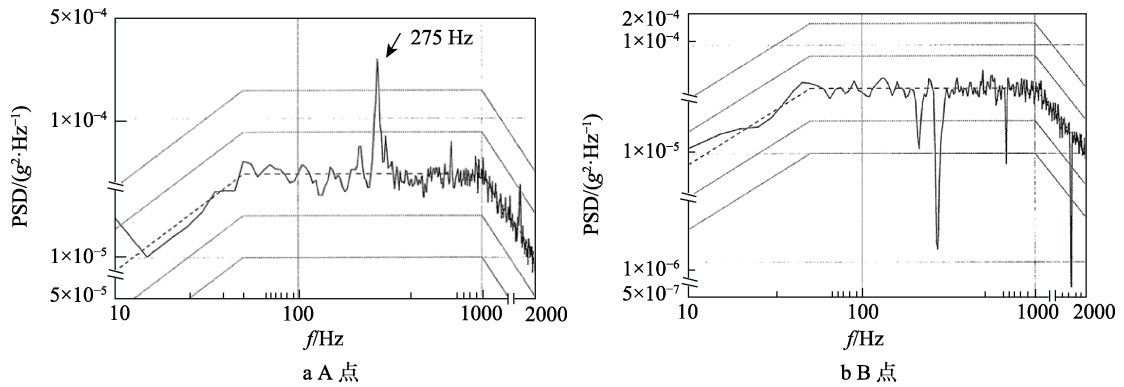


图 5 梯形谱控制效果
Fig.5 Control effect of trapeziform spectrum: a) point A; b) point B

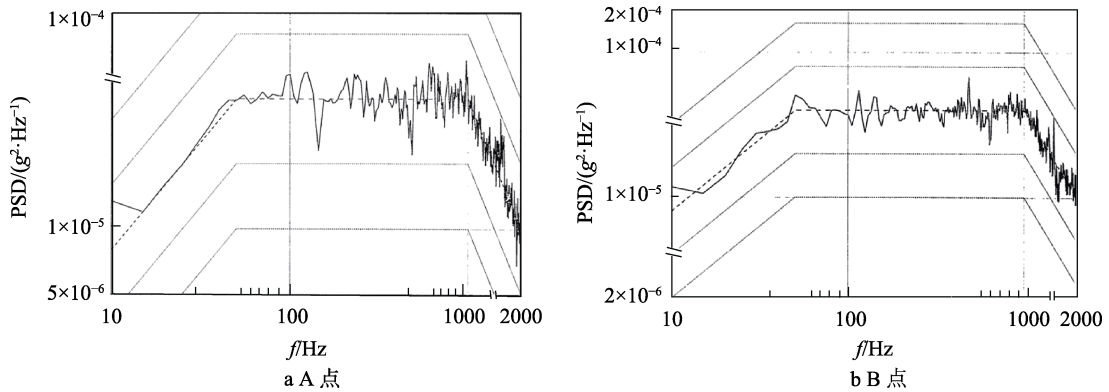


图 6 改变激励点后梯形谱控制效果
Fig.6 Control effect by changing excitation points: a) point A; b) point B

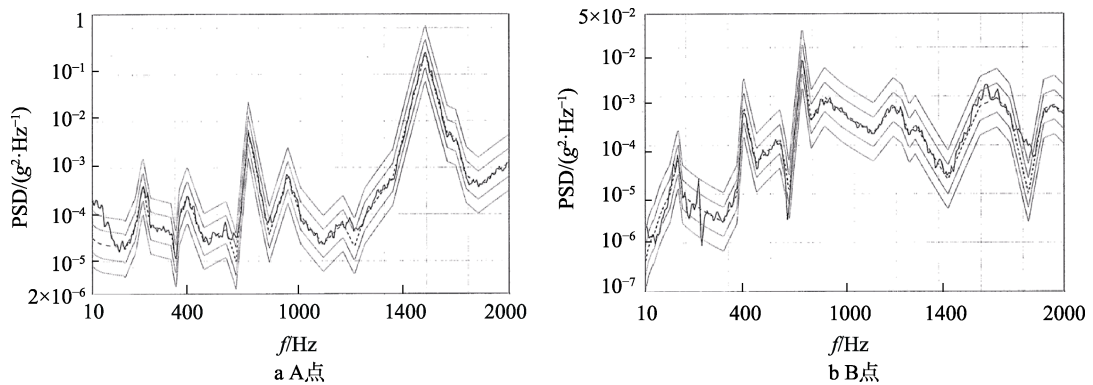


图 7 两点激励控制两点响应的控制效果
Fig.7 Control effect of dual-exciter and dual-response: a) point A; b) point B

4.2 两核心点的控制效果

采用①、③两点激励，A、B 两点响应控制时得到的实际控制效果如图 7 所示。可以看到，在 2000 Hz 范围内，虽然局部存在控制超差现象，但超差的部位主要存在于控制谱的“谷”的部位，对整体的影响非常小。A 点控制谱均方根值设定为 3.95g，实际为 4.13g，B 点设定值为 0.79g，实际为 0.82g。两个控制点加速度均方根值偏差的分贝数分别为 0.40 dB 和 0.32 dB，远小于多个振动相关标准中规定的 1.5 dB。

从图6、图7的对比也可以看出,两种控制条件下,结构的响应差异非常大。按照阶梯谱的方式进行试验件考核,则无法实现地面模拟的真实性,而且会出现非常严重的过试验,给产品研制带来极大难度。

5 结语

本文针对环境试验实施中的关键步骤,提出了对某类高速飞行的锥形结构进行地面振动试验的新思路,并对锥形模拟件开展了两点响应控制试验研究。证明了对于长径比较小的结构,当试验条件制定合理、激励位置选择恰当时,也可以实现良好的多点响应控制效果,使环境试验考核的真实性得到提高,降低过试验的风险。

参考文献:

- [1] 夏益霖. 多轴振动环境试验的技术、设备和应用[J]. 导弹与航天运载技术, 1996(6): 52-59.
XIA Yi-lin. The technology, equipment and application of multi-axis vibration environment testing[J]. Missiles and space vehicles, 1996(6): 52-59.
- [2] 王光芦, 祝耀昌, 刘达德, 等. 多轴向多激励振动技术[J]. 环境技术, 2000, 18(5): 2-6.
WANG Guang-lu, ZHU Yao-chang, LIU Da-de, et al. A review of multiaxis and multiexciter vibration technology[J]. Environmental technology, 2000, 18(5): 2-6.
- [3] 赵保平, 王刚, 高贵福. 多输入多输出振动试验应用综述[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 25-32.
ZHAO Bao-ping, WANG Gang, GAO Gui-fu. Application of multiple input and output vibration test system[J]. Equipment environmental engineering, 2006, 3(3): 25-32.
- [4] MIL-STD-810G, Environmental engineering considerations and laboratory tests[S].
- [5] GJB 8547—2015, 军用装备多激振器振动试验方法[S].
GJB 8547—2015, Multi-exciter vibration test method for military materiel[S].
- [6] 王肇喜, 王海东, 王国顺, 等. 导弹多点激励振动试验系统动力学仿真[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(2): 53-56.
WANG Zhao-xi, WANG Hai-dong, WANG Guo-shun, et al. Dynamics simulation of vibration test system for missile's multi-point excitation[J]. Noise and vibration control, 2017, 37(2): 53-56.
- [7] 孙建勇, 徐明, 魏媛, 等. 多轴向振动试验类型及试验实施技术探讨[J]. 环境技术, 2014(6): 5-10.
SUN Jian-yong, XU Ming, WEI Yuan, et al. Discussion on the test types and the technology of implementation of multi-axial vibration test[J]. Environmental technology, 2014(6): 5-10.
- [8] 王海东, 奕强利, 陈章位, 等. 多点激励功率谱再现振动试验控制研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10): 168-171.
WANG Hai-dong, LUAN Qiang-li, CHEN Zhang-wei, et al. Control designs for multi-exciter power spectral density replication vibration tests[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(10): 168-171.
- [9] 陈颖, 田光明, 钟继根. 典型细长体结构的两点激励振动试验设计[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 68-71.
CHEN Ying, TIAN Guang-ming, ZHONG Ji-gen. Dual-exciter vibration test design for a typical slender structure[J]. Spacecraft environment engineering, 2013, 30(1): 68-71.
- [10] 赵怀耘, 钟继根, 陈颖. 柔性悬挂两点激励振动试验系统设计[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2012.
ZHAO Huai-yun, ZHONG Ji-gen, CHEN Ying. Design of flexible suspension dual-exciter vibration test system[J]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, Institute of Systems Engineering, 2012.
- [11] GJB 150. 16A, 军用装备试验室环境试验方法 第16部分: 振动试验[S].
GJB 150. 16A, Laboratory environmental test methods for military materiel Part 16: Vibration test[S].
- [12] 胡杰, 冯加权. 两点激励多点响应控制的载荷优化方法研究[J]. 重庆理工大学学报. 2013, 27(9): 13-16.
HU Jie, FENG Jia-quan. Load optimization research of multi-point response control in two-point excitation vibration test[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2007, 26(5): 145-147.
- [13] 刘志华, 蔡晨光, 于梅, 等. 多点激励正弦振动的实数域控制算法研究[J]. 振动工程学报. 2016, 29(6): 1003-1010.
LIU Zhi-hua, CAI Chen-guang, YU Mei, et al. Multi-exciter sine vibration control method in the real domain[J]. Journal of vibration engineering, 2016, 29(6): 1003-1010.
- [14] 邱汉平, 冯咬齐, 樊世超. 多轴随机振动试验控制技术[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(5): 527-531.
QIU Han-ping, FENG Yao-qi, FAN Shi-chao. The multi-axis random vibration test control techniques[J]. Spacecraft environment engineering, 2015, 32(5): 527-531.
- [15] 刘沫, 冯咬齐, 何玲. 卫星产品多轴随机振动试验条件制定方法初探[J]. 航天器环境工程. 2013, 30(2): 155-159.
LIU Mo, FENG Yao-qi, HE Ling. The determination of conditions of multi-axis random vibration tests for satellite products[J]. Spacecraft environment engineering, 2013, 30(2): 155-159.