

浅谈军用飞机外挂系统机械环境 适应性设计鉴定流程

卢丽金, 沈祖辉

(航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 为了建立外挂系统机械环境适应性设计及鉴定流程, 通过梳理外挂系统在使用寿命周期中预期会遇到的机械环境约束条件, 确定外挂系统设计需要研究完成的内容, 包括技术要求制定、验证/分析方法、试验/评估结果评定等。详细阐述了机械环境适应性设计必要性, 正向定量/定性设计方法以及机械环境鉴定试验流程需要考虑的内容。形成了外挂系统机械环境设计及鉴定流程。以某外挂系统机械环境适应性设计鉴定为例, 验证了流程的有效性及其经济性。

关键词: 外挂系统; 机械环境; 研制流程

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.033

中图分类号: V216 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)09-0194-06

Appraisal Procedure for Mechanical Environment Adaptability Design External Hanging System of Military Aircraft

LU Li-jin, SHEN Zu-hui

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

ABSTRACT: The paper aims to develop mechanical environment adaptability design and validation procedures of external hanging system. By sorting out the mechanical environment constraints expected to be encountered in the service life cycle of the external hanging system, the contents to be completed in the design of the external hanging system were determined, including the formulation of technical requirements, verification/analysis methods, evaluation of test/evaluation results, etc. The necessity of mechanical environment adaptability design, the forward quantitative/qualitative design method and the contents to be considered in the process of mechanical environment validation test were expounded in detail. The mechanical environmental design and validation procedure of external hanging system for mechanical environment is built. Finally, the effectiveness and economical efficiency of the procedure is verified by the mechanical environment adaptability design and validation procedure of an external hanging system.

KEY WORDS: external hanging system; mechanical environment; validation procedure

外挂系统是当今作战飞机的主要武器之一, 随着飞机平台性能的不不断提升和外挂武器系统的不断升级

以及作战能力的迅速发展, 现阶段采用的外挂系统的环境适应性研制流程已经无法满足现代化战争的需

收稿日期: 2020-07-06; 修订日期: 2020-07-13

Received: 2020-07-06; Revised: 2020-07-13

作者简介: 卢丽金(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向结构动力学、环境试验技术。

Biography: LU Li-jin (1976—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: structural dynamics and environmental testing technique.

要。从某种意义上讲，外挂系统的环境适应性设计成功与否，成为了决定战争成败的一个重要的胜负手。

环境适应性要求包括：外挂系统对其寿命期预期遇到的自然和诱发环境的环境适应性要求和其内部产品对其所处的微环境或平台环境的环境适应性要求^[1-4]。诱发环境主要包括振动、冲击、恒加速度、噪声振动、炮振等机械环境^[5]；因此，外挂系统为了满足载机平台寿命剖面内的诱发环境使用要求，在设计时需考虑所在区域的机械环境设计要求，保证其经受机械环境条件的适应性以及评价其结构的完好性。

外挂系统的环境适应性工作应包括从方案、研制、设计定型、生产交付以及外场使用阶段等全寿命周期内的一系列设计、分析和试验工作。早期外挂系统的研制往往是研制厂家独立进行，未与主机所进行研制技术条件协调。由于分析与试验设计过程涉及的因素较多，如分析时边界的模拟、载荷的选取、模型的简化等关系着仿真分析结果的有效性，试验设计过程中对规范的解读、试验谱制定、试验控制技术、试验夹具设计等相关技术，研制单位无法在前期开展有效的分析和验证工作^[6-8]，所以在研制后期（甚至是挂装放飞前）才考虑机械环境适应性是否满足技术要求，往往由于上述相关环节设计不合理（甚至未考虑）致使项目不满足技术要求而延期，更甚者不能挂装。因此，有必要形成一套完整规范的载机/外挂系统机械环境适应性设计鉴定流程（如图 1 所示），合理、正确地指导外挂系统挂机论证、设计及装机。

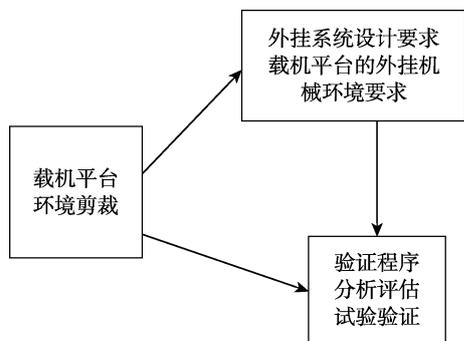


图 1 环境适应性要求的设计流程

Fig.1 Design process for environmental adaptation requirements

1 外挂系统机械环境适应性设计流程

1.1 研制现状

规范合理的外挂系统机械环境适应性设计流程是提高外挂系统设计效率和设计质量的重要指导性文件，是外挂系统与载机平台相容性设计的必要工作。机械环境适应性设计是基于工程分析和试验验证相结合的一种研制形式，任何一个设计环节的缺失都将直接影响环境适应性分析结果。

现阶段，由于研制单位的研制能力和水平参差不齐，研制管理和技术团队还未意识到环境适应性设计研制工作的重要性，在研制过程中投入的人力精力和财力均有限，还远远谈不上能够开展外挂系统的环境适应性正向设计工作。因此，目前开展环境适应性工作的主要流程如下。

1) 在方案阶段，主机所根据型号研制总要求及国军标、航标等相关标准规范的要求，确定外挂在寿命期内的环境剖面，并根据环境剖面，编制外挂装备的环境适应性设计要求顶层设计文件。

2) 在设计定型阶段，装备研制单位根据主机所编制的环境适应性设计要求文件，开展外挂的环境鉴定试验工作。在完成鉴定试验工作的基础上，开展外挂的鉴定工作。如无法满足环境鉴定试验工作的考核，则需要开展外挂的设计改进，重新开展外挂的设计鉴定工作。只有外挂通过环境鉴定试验验证，才最终完成外挂的环境鉴定工作。

上述现有的机械环境适应研制流程，容易使研制项目延期甚至搁置，造成经济损失以及政治影响等。

1.2 正向设计流程

要使现代化外挂系统能够适应各种复杂和恶劣的诱发环境，需在研制各阶段依据载机平台环境要求，真正把环境适应性作为一个质量特性认真对待，与其他工作一起并行，纳入研制各个阶段工作计划中，进行科学的管理和控制。机械环境适应性正向设计及鉴定流程如图 2 所示，具体内容如下。

1) 方案阶段，主机所依据型号研制总要求和外挂的寿命期环境剖面，编制机械环境要求文件。研制设计单位按照 GJB 4239—2001 的要求，进行环境信息的管理，制定环境适应性工作计划、适应性设计准则、环境设计要求协议书以及环境试验及评价计划。

2) 工程研制初步设计阶段，依据载机制定的初步外挂系统的机械环境要求，进行定性的环境适应性预计、分析及评估工作。

3) 工程研制详细设计阶段，依据载机制定的明确外挂系统的机械环境要求，开展定量的环境适应性预计分析。

4) 设计定型阶段，依据载机最终的机械环境要求，完善环境适应性预计工作，开展鉴定试验，确定环境适应性是否满足设计要求。

由以上设计流程可以看出，在全寿命周期内，需要开展的环境适应性工作重点集中在工程研制阶段及设计定型阶段。主要是因为方案阶段，需要开展环境适应性的模型和环境条件缺失，仅能开展一些指导环境适应性设计的相应的工作内容；而在生产定型阶段，外挂已经经过鉴定试验考核，无需开展环境适应性预计分析工作。除非在外场使用过程中出现了由于地面试验模拟不到的环境适应性所导致的破坏故

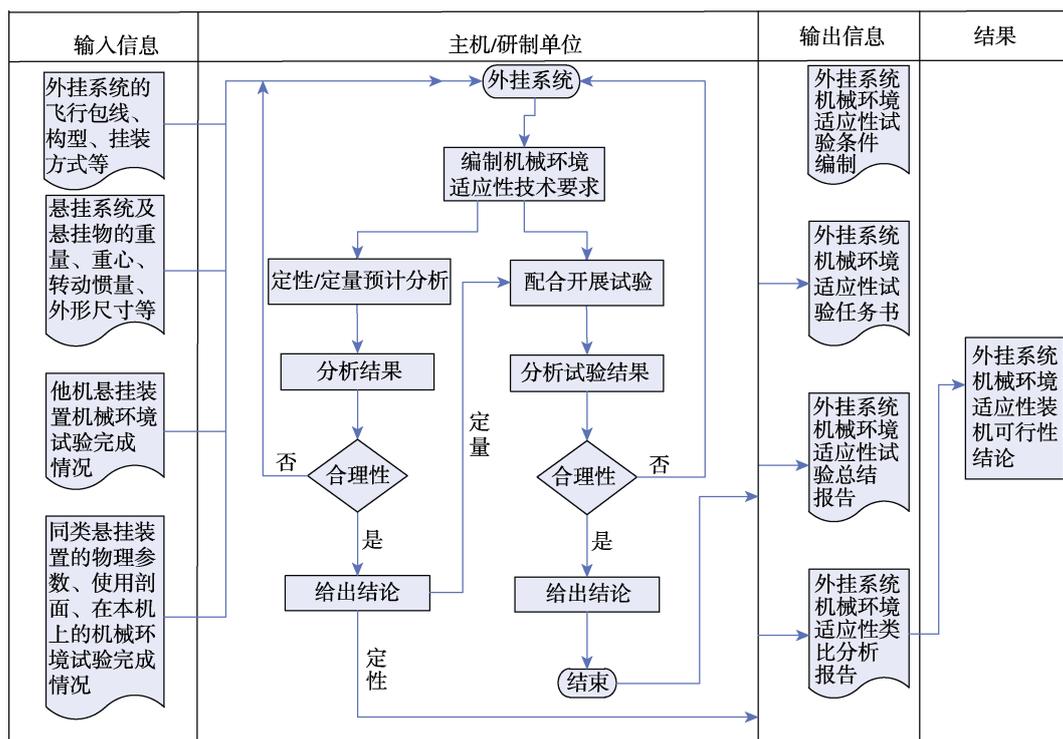


图2 机械环境适应性正向设计及鉴定流程

Fig.2 Forward design and appraisal process of mechanical environment adaptability

障，需要开展外场的排故工作，可以参考上述2)及3)条进行环境适应性分析，指导故障的分析评估，并对提出的结构改进方案进行仿真分析，为改进方案的试验验证提供理论支持。

1.3 外挂系统机械环境要求制定

主机所依据型号研制总要求和外挂的环境特点，以及寿命期环境剖面，进行外挂系统机械环境技术要求设计，以适应在使用寿命中预期会遇到的环境条件。因此在外挂系统机械环境技术要求制定中应遵循以下原则。

1) 明确外挂系统参数：依据研制要求之外挂系统（武器/吊舱）装机后的作战使用需求及任务能力要求，外挂物挂机技术要求来输出所挂载的型号、数量及质量特性，以及飞行速度-高度范围和机动能力等任务要求，作为飞机/外挂系统机械环境适应性设计的输入。

2) 明确挂载方式：主机根据主要任务要求明确飞机的外挂系统挂载方式。

3) 明确挂装位置：主机评估并明确外挂系统的排列位置及构型。

依据以上原则，进行外挂系统机械环境技术要求设计。一般情况下，除非特殊规定，加速度及冲击均可以依据载机平台的环境技术要求直接用于外挂系统设计使用，而振动、炮振或噪声由于涉及环境因素较多，需要载机根据外挂系统研制单位提供的设计参数（质量、体积、蒙皮厚度等）进行耐振动、炮振或

噪声技术要求制定。

1.4 定性预计分析

在工程研制初步设计阶段，外挂系统（包含内部产品）无法开展仿真预计与分析时，或者在研制进度紧迫、经费不足等特殊情况下，为确保外挂研制工作的顺利开展，将采用定性类比分析预计方法开展其环境适应性预计工作。通过对外挂系统（包含内部产品）或者相似产品已进行过的环境试验情况与其环境鉴定试验要求进行类比分析，以确定可借用前期环境试验结论的环境鉴定试验项目。

外挂系统（包含内部产品）基于类比分析方法的环境适应性定性预计与分析一般流程描述如下：首先，从外挂系统的设计方案及相关设计要求文件中收集LRU的组成、材料、工艺、元器件、零部件以及结构设计等信息，同时获取外挂的环境适应性设计要求信息；其次，收集相似外挂系统的实验室环境试验数据以及外场使用数据，同时获取相关材料、元器件、零部件的耐环境极值信息；第三，充分考虑相似产品在材料、工艺、元器件、零部件、结构设计和环境上的差异，结合设计技术成熟度分析，基于产品耐环境安全裕度量值，拟利用打分法对比分析相似产品与新研产品的耐环境能力，对外挂各环境因素的适应性进行预计分析；最后，综合上述分析预计内容，给出产品环境适应性预计与分析结果，并形成环境适应性预计与分析报告。

外挂系统（包含内部产品）基于类比分析方法的

借用前提、必备的条件及要求：

1) 前提。对于改进型产品，其鉴定试验规定的项目和改型前规定的项目应一致，试验条件能够被改进前装备的环境鉴定试验条件覆盖（改进前设备已鉴定）。

2) 借用类比的必备条件：结构状态（外形、内部布置）相同或相似；质量特性满足不超±10%变化，固有频率满足不超±5%变化；对于试验项目及条件以及功能性能指标要求相同或更低；能提供被借用的有效的试验报告。

3) 借用的要求：需提交完整准确的类比分析报告。类比分析报告应根据被借用对象的机械环境要求逐条进行对比分析，并提交鉴定会专家审查。

1.5 定量预计分析

在外挂系统研制过程中，特别是在研制前期，及时开展装备的机械环境适应性预计^[9-12]，有助于提前发现外挂系统的设计薄弱环节，通过优化设计，改进设计缺陷，确保外挂能够满足环境适应性，为外挂的顺利定型鉴定打下良好的基础。

1.5.1 预计方法

通过建立仿真有限元模型开展环境适应性预计，在建模过程中，应详细对坐标系、网格划分、单元简化、所用材料属性（包括弹性模量、泊松比、密度、强度极限等）、边界约束等情况进行详细描述。建模时应模拟结构、设备的质量特性，要真实模拟机上的实际边界约束情况。根据载机环境设计要求确定载荷环境条件，采用相应计算方法进行仿真计算。计算结果应至少包含位移和应力，对仿真分析结构的最大的位移和应力进行刚度和强度评估，并给出评估结论。

评定准则

1) 对于加速度，应力计算结果，采用式（1）所示的安全裕度来表征。

$$MS = \frac{[\sigma]}{k \cdot \sigma} - 1 \quad (1)$$

式中： $[\sigma]$ 为许用应力； σ 为工作应力； k 为特殊系数，如接头系数或支承系数。

2) 对于冲击引起的结构变形，其合格判据指标为满足结构的刚度设计指标，避免大变形和发生干涉等。对应冲击应力的计算结果，主要采用式（2）的剩余强度系统评估方法进行，要求 $\eta > 1$ ，反之，则不满足设计要求，其中 σ_s 为材料屈服极限。

$$\eta = \frac{\sigma_s}{\sigma_{\max}} \quad (2)$$

3) 对于随机振动、炮振，确定最大应力的传统方法是采用所谓的 $3\sigma_{\text{RMS}}$ 法则，采用式（3）所示的公式剩余强度系数评估强度安全。

$$\eta = \frac{\sigma_s}{3\sigma_{\text{RMS}}} \quad (3)$$

4) 对于噪声，如有要求，在设计阶段仅能对结构声响应进行分析，判断准则同 3)，最终必须通过试验对外挂设备的耐噪声环境适应性进行考核。

1.5.2 预计结果分析

在设计阶段仅对外挂结构刚度和强度进行分析，对仿真分析结果进行评估。若不满足环境适应性要求，则优化设计模型，开展新一轮的仿真分析。由于目前尚无法利用分析手段模拟外挂的功能和性能，因此分析结果不能代替试验，最终必须通过试验进行鉴定。

2 外挂系统机械环境试验鉴定流程

为了验证外挂系统满足所需功能、性能以及机械环境适应性要求，需要进行试验鉴定。下面就鉴定试验可行有效密切相关内容（试验方案、试验工装、试验激振力预估及试验方法等）进行详细阐述。

2.1 确定试验方案

在进行外挂系统机械环境适应性试验方案策划时，应把外挂系统和载机悬挂装置组合状态作为整体进行构思，通过对比分析选择试验状态。可借鉴 GJB 150A 中提到的当外挂的细长比大于 4 时，外挂系统试验方向可以只开展垂向和侧向。为了更加真实地考核，需要对载机的边界进行模拟，且对于复杂外挂系统，应通过仿真分析对试验构型进行筛选。例如某副油箱地面振动鉴定试验，为确定其振动、冲击试验状态，开展了副油箱满油、2/3 油以及半油等状态的晃振、振动和冲击分析，确定出在振动、冲击作用时，副油箱满油可以涵盖其他状态，由此确定了副油箱挂机振动、冲击试验方案。

2.2 试验工装设计

根据 GJB 150A 的要求，外挂系统不能直接刚性安装在振动台台面上，需要考虑外挂系统在飞机上真实的安装形式，这就需要设计一套工装来模拟外挂系统的安装边界。在设计工装夹具时，应考虑产品实际的装机状态以及工装的质量、重心及刚度的影响，不合理的工装会导致附加的质量、弯矩、谐振等因素，使产品在进行环境试验时出现欠考核或过考核。

一般在设计试验工装时，采用有限元仿真分析的手段进行工装设计^[13-15]，通过建立工装的有限元模型，开展工装的模态分析工作，并根据实际产品的模态和振型等数据，通过调参的手段对工装模型进行优化设计，并最终完成工装的优化设计工作。

2.3 激振力预估

为确保试验可实施性，在外挂系统开展振动和冲击试验前应进行激振力选取。依据试验量值，并考虑夹具及动圈（或水平滑台）质量，通过加速度和质量

快速估算出激振力。为了确保振动台稳定性及使用性，一般需要激振力小于振动台推力的70%。

2.4 试验方法

对于外挂系统试验，还有一个与试验息息相关的因素即试验控制方法。依据 GJB 150A 可知，对于军用飞机外挂系统，推荐多点平均加速度响应控制方法。该方法将加速度控制器多点分布于外挂系统上，能较真实地反应外挂系统传递特性。

试验中一般采用单一控制方法，但是，当遇到特殊情况时，也可以采用多种方法并行。比如当某一结构位置需求，可以用力限控制方法进行均衡，使用这种方法可以避免在结构最低共振频率上的过试验或欠试验。

2.5 试验结果分析

依据各试验状态试验报告数据，判断试验控制谱及控制波形是否符合容差要求，结构是否发生损伤或变形，功能是否正常，性能指标是否在合格范围。如

果都满足，则满足环境适应性设计要求，可以开展设计鉴定。

3 某型飞机外挂系统机械环境鉴定流程示例

下面为某型飞机挂某外挂系统机械环境试验设计鉴定方案示例。

3.1 试验要求

某外挂系统欲挂机 150 飞行小时，依据该载机已制定的机械环境技术要求，制定出振动、冲击及加速度机械环境试验条件。在方案及工程设计阶段，研制单位依据定性分析方法，借鉴已有型号数据开展评估分析，结构强度初步满足设计要求，最终需要通过试验鉴定其功能性能并验证结构强度。

以振动为例，其振动谱见表 1，需进行 0.5 h 功能振动加 46 min 耐久振动+0.5 h 功能振动，试验方向为 y、z 方向，试验构型为两级悬挂装置加外挂系统。

表 1 振动试验条件
Tab.1 Vibration test condition

| 项目 | 振动量级 | | RMS/g _{rms} | 试验方向 | 试验时间 |
|------|---------|---|----------------------|--------|-----------------------|
| | 频率范围/Hz | 功率谱密度/(g ² ·Hz ⁻¹) | | | |
| 功能试验 | 20~142 | 0.02 | 3.97 | Y Z | 1 h (耐久试验前后各做 30 min) |
| | 142~300 | +3 dB/oct | | | |
| | 300~500 | 0.042 | | | |
| 耐久试验 | 20~142 | 0.032 | 5.01 | Y Z | 46 min |
| | 142~300 | +3 dB/oct | | | |
| | 300~500 | 0.067 | | | |

3.2 试验方案及结果

试验前，首先依据外形确定试验构型。为保证试验可行性，进行试验夹具设计，通过仿真摸底并确定出加速度响应控制方式的四点平均控制开展试验，控制点分别位于一级悬挂装置前后吊点的夹具上，以及外挂产品的前后吊点专用悬挂装置上，如图 3 所示。试验平均控制谱型如图 4—5 所示。由此可见，试验控制谱满足容差要求，且试验后，外挂系统外观、功



图 3 试验安装状态
Fig.3 Test installation status

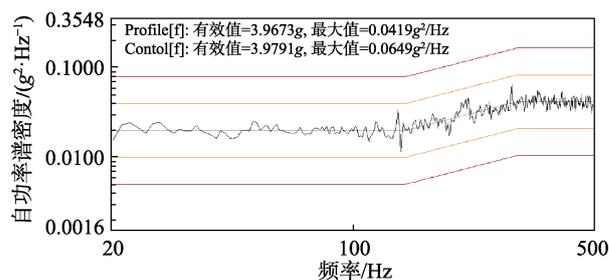


图 4 功能振动试验控制曲线
Fig.4 Functional vibration test control curve

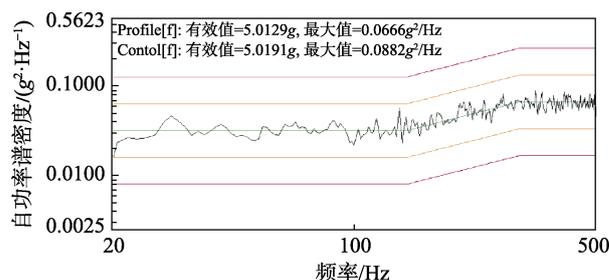


图 5 耐久振动试验控制曲线
Fig.5 Durable vibration test control curve

能和性能检测均符合要求, 试验结果通过地面鉴定要求, 完成外挂系统挂飞论证要求。

4 结语

通过梳理外挂系统挂机寿命期预期会遇到的机械环境约束条件, 制定了外挂系统满足机械环境适应性的设计鉴定研制流程, 指导外挂系统从设计开始, 依据载机平台制定相关机械环境适应性技术要求, 从方案、工程研制及设计鉴定等阶段开展机械环境预计及设计。研制单位依据该流程, 可以大大提高外挂系统设计鉴定挂机可行性, 并缩短研制经费及周期。

对于外挂系统机械环境适应性设计鉴定流程, 由于目前仿真以及试验的限制, 还存在以下方面需要进一步研究。

1) 对于寿命周期内, 外挂系统受多种机械环境因素作用, 在仿真预计分析时, 无法将相关载荷工况叠加, 仿真存在一定偏差。

2) 目前试验验证时, 由于试验条件的限制, 基本上都是单项环境因素独立开展, 有可能未验证到由于多环境因素作用耦合的某些破坏形式, 给鉴定结论带来风险。

参考文献:

- [1] GJB 4239—2001, 中国人民解放军总装备部. 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, Compiling Requirements of Materiel Environmental Engineering Files[S].
- [2] GJB 150.1—150.20—1986, 军用设备环境试验方法[S].
GJB 150.1—150.20—1986, Environment Test Methods for Military Equipments[S].
- [3] GJB 150.1A—150.20A—2009, 军用装备实验室环境试验法[S].
GJB 150.1A—150.20A—2009, Environment Test Methods for Military Equipments Laboratory[S].
- [4] MIL STD 810G, Department of Defense Test Method Standard[S].
- [5] 《力学环境试验技术》编著委员会. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
Editorial Committee of Mechanics Environment Test Technique. Mechanics Environment Test Technique[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2003.
- [6] 施荣明. 飞机结构振动设计与试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
SHI Rong-ming. Aircraft structural vibration design and testing[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [7] 张思. 振动测试与分析技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
ZHANG Shi. Vibration Measuring and Analyzing Technology[M]. Beijing: Qinghua Press, 1992.
- [8] 苏华昌, 张鹏飞, 于亮, 等. 外挂设备挂飞振动试验技术研究[J]. 强度与环境, 2017, 44(6): 23-29.
SU Hua-chang ZHANG Peng-fei YU Liang, et al. Study on Captive Flight Vibration Test Technology of External Store[J]. Structure & Environment Engineering, 2017, 44(6): 23-29.
- [9] 张玉梅, 韩增尧, 邹元杰. 随机振动环境下航天器结构强度设计方法综述[J]. 力学进展, 2012, 42(4): 464-470.
ZHANG Yu-mei, HAN Zeng-yao, ZOU Yuan-jie. An Overview of Structural Strength Design Methods for Spacecrafts in Random Vibration Environment[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(4): 464-470.
- [10] SMALLWOOD D O. Minimum Drive Requirements for a Multiple Input Multiple Output Linear System[J]. Journal of the IEST, 2013, 56(2):57-67
- [11] MARCOS A U, TONY K. Recent System Developments for Multi-actuator Vibration Control [J]. Sound and Vibration, 2001, 35(6): 16-23.
- [12] 刘龙涛, 李传日, 马甜. 有限元仿真在振动结构疲劳分析中的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 23-29.
LIU Long-tao, LI Chuan-ri, MA Tian. Application of Finite Element Simulation in Vibration Structure Fatigue Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering. 2013, 10(4): 23-29.
- [13] 朱海波, 王亚涛. 一种振动夹具结构设计[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(2): 221-224.
ZHU Hai-bo, WANG Ya-tao. Structure Design of a Fixture for Vibration Test[J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(2): 221-224
- [14] 郭荣平, 段文颖, 施军. 随机振动试验夹具设计与研究[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(1): 50-54.
GUO Rong-ping, DUAN Wen-ying, SHI Jun. Design and Test of a Fixture for Random Vibration Testing of Electronics Installed in Aircraft[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis. 1997, 17(1): 50-54.
- [15] 吴瑞轩. 振动夹具的测试方法研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 252-255.
WU Rui-xuan. Study of Testing Method of Vibration Fixture[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 252-255.