

某导弹振动夹具设计及测试分析

赵鑫, 郑兴帅, 李博, 杜超群, 朱辉

(中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: **目的** 设计符合某导弹振动试验要求的夹具。**方法** 采用 SolidWorks 和 Workbench 两种软件协同分析的方法, 对振动夹具进行设计。首先使用 SolidWorks 建立导弹振动夹具的实体模型, 之后在 Workbench 中采用有限元方法对夹具进行模态分析。根据模态分析结果, 在对夹具进行多次的结构修改和分析计算后, 得到满足设计要求的夹具。将设计合格的夹具加工制作后, 在振动台进行传递特性分析, 以验证设计和分析结果。**结果** 根据振动夹具模态振型的变化趋势, 可以通过增加夹具的底板和立板的厚度来提高夹具的固有频率。通过计算, 将夹具底板和立板的厚度均增加到 30.0 mm 时, 夹具的固有频率达到了 311.68 Hz。将加工好的夹具按照实际试验方式固定在振动台, 并进行动态响应测试, 得到夹具一阶频率为 410.0 Hz。**结论** 设计方法达到了振动夹具的基频大于被试品 3~4 倍的目标, 满足了导弹振动夹具的动力学特性要求。

关键词: 夹具设计; 有限元方法; 模态分析; 振动测试

中图分类号: TJ760

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0016-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.003

Design and Test Analysis of Vibration Fixture for a Missile

ZHAO Xin, ZHENG Xing-shuai, LI Bo, DU Chao-qun, ZHU Hui

(63870 Unit of The Chinese People's Liberation Army, Huayin 714200, China)

ABSTRACT: A fixture is designed to meet the vibration test requirement of the missile. The vibration fixture was designed using the collaborative analysis method of both SolidWorks and Workbench software. Firstly, SolidWorks was used to build the solid model of the missile vibration fixture, and then the modal analysis of the fixture was performed in Workbench using the finite element method. According to the modal analysis results, a fixture that meets the design requirements is obtained after several structural modifications and analytical calculations of the fixture. After machining and fabricating the designed fixture, The transfer characteristic analysis of the fixture is carried out on the shaker to verify the results of the analysis and design after the fixture is manufactured. According to the variation trend of the modal shapes, the inherent frequencies can be increased by enhancing the thickness of the bottom plate and vertical plate of the fixture. The first-order inherent frequency reaches 311.68 Hz by increasing the thickness of the bottom plate and vertical plate to 30.0 mm. The manufactured fixture is fixed on the shaker according to the practical test method, and the inherent frequency of the fixture is obtained with 410.0 Hz after the dynamic response test for the fixture. The objective is attained for the fundamental frequency of the fixture is greater than the tested object, and the dynamic characteristic requirement of the fixture is satisfied.

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-07-17

Received: 2021-05-27; Revised: 2021-07-17

作者简介: 赵鑫 (1977—), 男, 博士, 主要研究方向为力学环境试验。

Biography: ZHAO Xin(1977—), Male, Doctor, Research focus: mechanical environmental test.

引文格式: 赵鑫, 郑兴帅, 李博, 等. 某导弹振动夹具设计及测试分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 016-020.

ZHAO Xin, ZHENG Xing-shuai, LI Bo, et al. Design and test analysis of vibration fixture for a missile[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 016-020.

KEY WORDS: fixture design; finite element method; modal analysis; vibration test

夹具设计是振动试验中一个很重要的环节, 试验的成功与否、试验结果的可信程度与试验夹具设计、制作息息相关。如果夹具设计不合理, 将会引起振动试验的过试验或欠试验, 甚至导致试验中断, 都达不到振动环境适应性考核的目的。由于振动传递的复杂性和被试品的多样性, 使得夹具的设计标准很难完全规范, 但夹具的要求应该有一个量的概念。为此, 美国桑地亚公司提出了 3 项主要的指标, 包括试验频段内夹具的传递特性, 试验频段内主振动方向和其他方向的运动比, 不同频段内的振动偏差。在实际试验中, 要根据被试品结构、振动台指标、试验流程等多种情况来设计和评价夹具的性能。但受各种因素限制, 很难完全满足理论上对夹具参数的全部要求。因此, 一般要求振动夹具的基频大于被试品基频的 3~4 倍即可满足实际的使用要求^[1-3]。

目前, 机械设计和有限元 (FEM) 技术已广泛应用于夹具的结构设计和计算分析上。采用机械设计软件可以构建振动夹具的三维结构模型, 有限元软件可以直接对机械设计建立的模型进行模态分析, 得到振动夹具的固有频率、振型、阻尼等模态参数, 进而对夹具结构进行动态特性评估, 为其结构的修改提供技术依据^[4-12]。同时, 将设计和加工好的夹具置于振动台上进行现场试验测试也被大量地应用到实际的振动试验中, 以此来得到夹具的动态响应结果, 从实践角度来验证夹具的设计是否合格^[13-18]。

文中采用 SolidWorks 和 Workbench 协同分析的方法, 对某导弹振动试验用夹具进行了设计和计算验证, 通过分析结果改进夹具的结构, 使其符合夹具的设计要求。将设计好的夹具制作完成后, 在振动台上进行了传递响应测试, 得到了夹具的动力学特性, 验证了夹具的优化设计结果, 为夹具的结构设计提供了有效方法。

1 振动试验夹具的模态分析和改进设计

1.1 模态分析流程

用 SolidWorks 软件进行振动夹具结构建模, 此模型可以通过接口文件导入 Workbench 软件中进行有限元分析。若分析结果不满足要求, 可重新在 SolidWorks 中对模型进行修改, 再导入 Workbench 中分析, 直至取得满意的结果。SolidWorks 与 Workbench 协同分析具体流程如图 1 所示。

1.2 模型的建立和前处理

一个 N 自由度的线性定常系统, 其运动微分方程为:

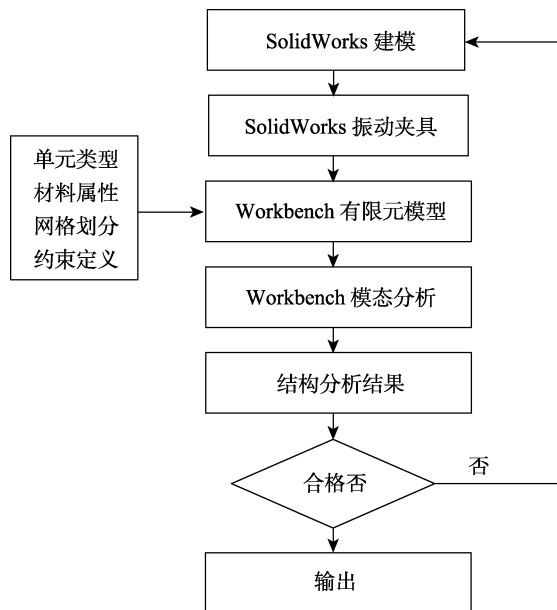


图 1 SolidWorks 与 Workbench 协同分析流程

Fig.1 Flow chart of cooperating analysis for SolidWorks and Workbench

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中: 质量、阻尼、刚度矩阵 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 均为实对称矩阵; $\{f(t)\}$ 为激励力; $\{x(t)\}$ 为各输出响应, 其可以是位移、速度或加速度。如果输入激励一定, 其他参数不变, 输出响应的位移与刚度成反比, 速度与阻尼成反比, 加速度与质量成反比。因此, 增大夹具的质量、阻尼、刚度, 均可提高产品的抗振性能^[19-20]。

夹具的设计方案确定后, 采用 SolidWorks 软件建立了某导弹整弹振动试验夹具的模型, 如图 2 所示。模型包括底板、前后立板、加强肋、卡环。材料选用 6061 铝合金, 弹性模量 $E=7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\mu=0.33$, 密度 $\rho=2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

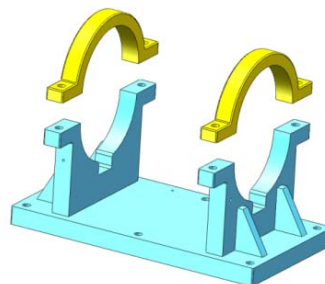


图 2 SolidWorks 中设计的夹具模型

Fig.2 Fixture model designed in SolidWorks

1.3 初始设计夹具的模态分析

将建好的夹具结构模型导入有限元分析软件 Workbench 中, 对模型进行材料属性赋值。由于实际

使用中,卡环与立板通过螺栓紧固连接,因此在有限元模型中将卡环与立板做成一体连接。网格划分采用四面体单元,单元总数为 21 120 个,节点总数为 37 788 个。夹具的有限元网格划分模型如图 3 所示。对夹具进行自由模态分析,求得夹具的前三阶固有频率,分别为 215.06、300.0、366.99 Hz。

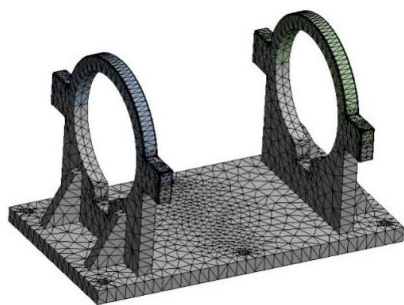
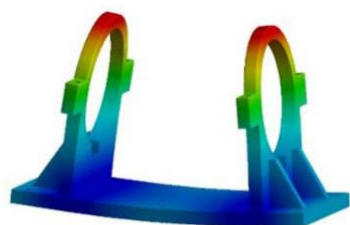
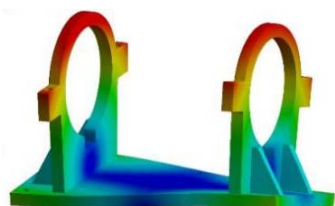


图 3 夹具有限元网格划分模型
Fig.3 Finite element mesh model of fixture

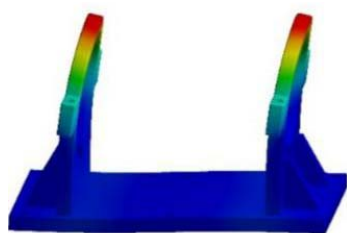
本夹具主要关心弯曲模态。分析模态振型结果:一阶模态振型为夹具整体的弯曲,如图 4a 所示;二阶模态振型为夹具整体的扭转,如图 4b 所示;三阶模态振型为立板和卡环的整体摆动,如图 4c 所示。由于夹具第一阶的固有频率为 215.06 Hz,但被试品的一阶固有频率为 100 Hz,不满足振动夹具基频大于被试品基频 3~4 倍的要求,需要改进设计。



a 一阶模态



b 二阶模态



c 三阶模态

图 4 初始夹具的前三阶模态振型

Fig.4 First three modes fixture with initial design: a) first-order mode; b) second-order mode; c) third-order mode

1.4 夹具的改进设计

由于初始设计第一阶固有频率不满足要求,需要在夹具上采取措施,以提高整体抗弯刚度。从一阶和二阶模态振型可以判断出,两个立板和底板的厚度对夹具的整体固有频率影响较为明显,考虑增加底板和立板的厚度,以增加抗弯刚度。初始设计时,底板和立板的厚度都为 20.0 mm。分 3 种情况对底板和卡环的厚度参数设置:底板厚度保持不变,立板和卡环厚度增加到 30.0 mm;底板厚度增加到 30.0 mm,立板和卡环厚度保持不变;底板厚度和立板、卡环厚度都增加到 30.0 mm。将 3 种重新设计的夹具进行建模、赋予材料属性、划分网格、计算自由模态等步骤,分别得到 3 个夹具的前三阶固有频率,见表 1。从表 1 中可以看出,对于底板厚度不变/立板厚度增加到 30.0 mm 的设计,第一阶和第二阶固有频率相比初始设计有所下降,第三阶固有频率增加;对于底板厚度增加到 30.0 mm/立板厚度不变的设计,前三阶固有频率都有较大增加,但一阶频率仍未达到 300 Hz 的要求;对于底板和立板厚度均增加到 30.0 mm 的设计,前三阶固有频率均有较大增加,一阶固有频率达到 311.68 Hz,增幅为 44.9%,达到了设计要求。

表 1 3 种改进设计的夹具固有频率

Tab.1 Inherent frequencies of fixture with improved design
Hz

模态序号	底板厚度 20.0 mm & 立板厚度 30.0 mm	底板厚度 30.0 mm & 立板厚度 20.0 mm	底板厚度 30.0 mm & 立板厚度 30.0 mm
1	203.29	295.67	311.68
2	278.71	397.93	426.96
3	441.41	459.85	526.47

改进后夹具的前三阶模态振型如图 5 所示。对比改进前的模态振型,变化并不明显,说明结构改变并没有影响到振型的变化。

2 夹具传递特性与分析

把设计好的夹具按照图纸进行机械加工。由于目前机械加工技术已经较为成熟,结合夹具结构的实际情况,采用整体机械加工的方法制作夹具,可以提高夹具的动态响应特性。将制作好的夹具按照实际试验方式固定在振动台上进行动力学响应测试,获得其频响特性,进而分析其动力学特性。

2.1 布置监控点和响应点

将夹具固定在振动台上,采用宽带随机谱对夹具在垂向、横向和纵向分别进行激励。由于测试通道数量限制,取单点作为监控点。传感器为单向传感器,

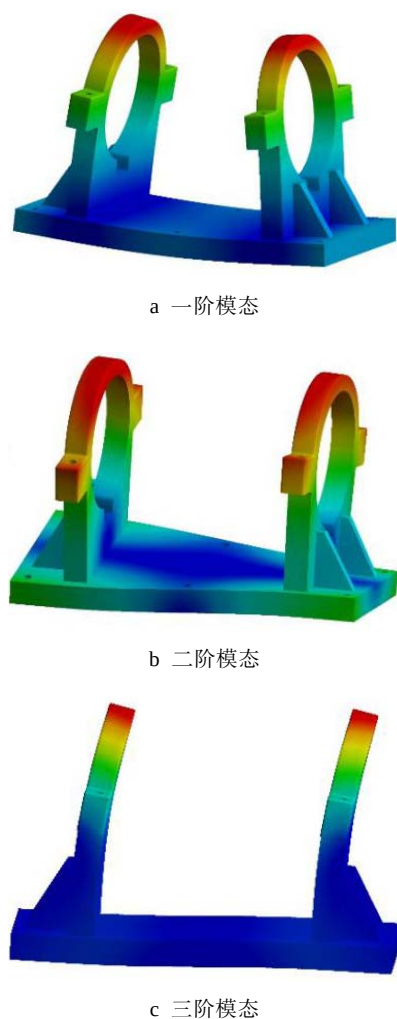


图 5 改进后夹具的前三阶模态振型

Fig.5 First three modes of fixture with improved design: a) first-order mode; b) second-order mode; c) third-order mode

需要振动台在夹具的 3 个方向分别进行激振。对试验采用加速度控制方式,在振动台台面靠近夹具位置处安装控制传感器。在夹具与试验件的安装点作为响应点安装响应传感器。

2.2 试验参数设置

由于正弦扫频造成振动台停机,因此采用了宽带随机方法激励夹具。宽带谱频率范围为 20~2000 Hz,平直谱型,功率谱密度为 $0.005 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。

2.3 响应曲线分析

夹具的响应曲线如图 6 所示。由图 6 可知,试验测试得到的夹具前五阶的固有频率分别为 410、792、825、1080、1137 Hz。该数值比有限元计算结果大。由于夹具在振动台上的连接近似于在底面施加了约束,使得夹具的固有频率增大。根据夹具的响应测试结果,满足了夹具一阶固有频率高于试验件一阶固有频率的 3~4 倍且 150 Hz 以下没有共振峰的设计要求。

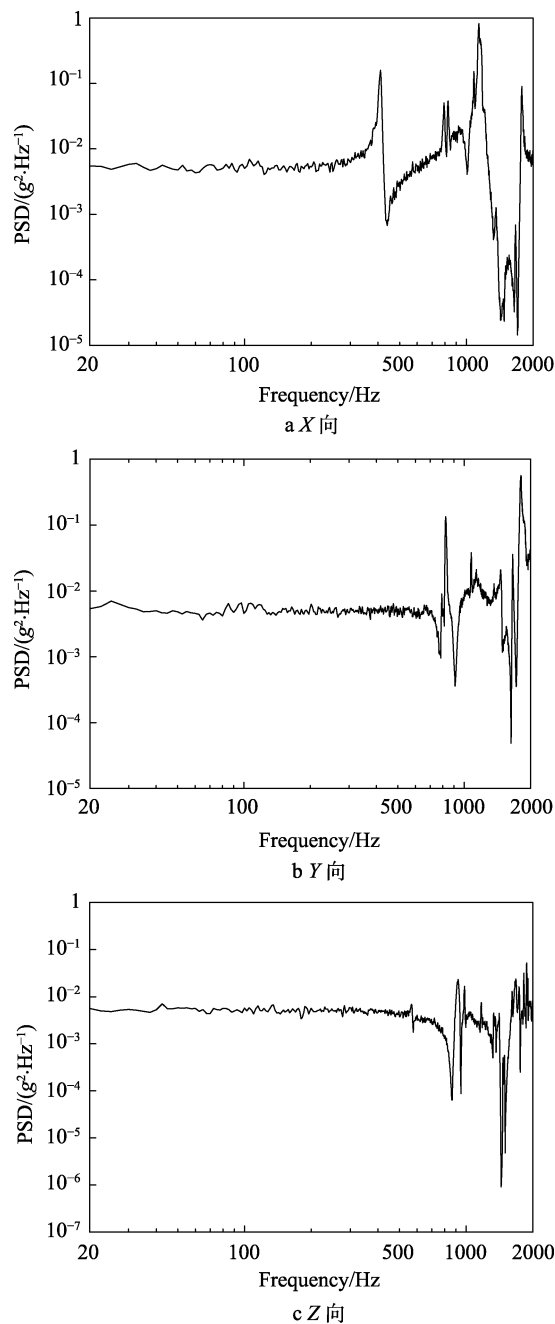


图 6 夹具的振动响应曲线

Fig.6 Fixture vibration response curve: a) X direction; b) Y direction; c) Z direction

3 结语

采用 SolidWorks 和 Workbench 协同分析的方法,对某导弹的振动试验夹具进行了结构建模和有限元模态计算。根据模态振型的变化趋势和固有频率的计算结果,对夹具结构进行了改进设计,使其达到了设计要求。对制作好的夹具进行了振动试验测试,获得了夹具的传递响应曲线,验证了夹具的设计方案是合理的。研究可为后续的夹具设计和测试提供参考。

参考文献:

- [1] 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: 255-256.
Editorial Board of Mechanics Environment Test Technique. Mechanics environment test technique[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2003: 255-256.
- [2] WARREN C F. 振动试验中的等效技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
WARREN C F. Equivalent techniques in vibration tests[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [3] 钟继根, 王东升, 任万发, 等. 某导弹发动机振动试验夹具设计[J]. 振动工程学报, 2004, 17(z2): 728-730.
ZHONG Ji-gen, WANG Dong-sheng, REN Wan-fa, et al. Design of vibration test fixture for a missile engine[J]. Journal of vibration engineering, 2004, 17(z2): 728-730.
- [4] 毛成龙, 陈俊, 王晓辉. 某机载雷达舱外设备振动冲击试验夹具设计[J]. 环境技术, 2010, 31(6): 14-18.
MAO Cheng-long, CHEN Jun, WANG Xiao-hui. The shock and vibration test fixture design of airborne radar equipment[J]. Environmental technology, 2010, 31(6): 14-18.
- [5] 周金林, 付晨晖, 刘旭琳. 振动试验夹具设计方法研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 135-139.
ZHOU Jin-lin, FU Chen-hui, LIU Xu-lin. Research on design method of fixture for vibration test[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(6): 135-139.
- [6] 高立业, 李光远, 王永东. 适用于单振动台的细长体结构振动夹具设计方法[J]. 环境技术, 2019, 37(4): 137-140.
GAO Li-ye, LI Guang-yuan, WANG Yong-dong. A design method of slender body structure for single shaker[J]. Environmental technology, 2019, 37(4): 137-140.
- [7] 于韶明, 卫国, 杨峰, 等. 振动试验夹具设计与实践[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 81-86.
YU Shao-ming, WEI Guo, YANG Feng, et al. Fixture design and practice for vibration test[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(2): 81-86.
- [8] 熊伟华, 郭春雷, 徐俊杰. 振动台对夹具固有频率测试的影响分析[J]. 环境技术, 2019, 37(1): 115-119.
XIONG Wei-hua, GUO Chun-lei, XU Jun-jie. Research on influence of vibration table on fixture natural frequency test[J]. Environmental technology, 2019, 37(1): 115-119.
- [9] 李科源, 李俊龙. 某武器放线装置振动夹具的设计[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 67-70.
LI Ke-yuan, LI Jun-long. Design of vibration clamp of wire releasing equipment for some weapon[J]. Equipment environmental engineering, 2007, 4(1): 67-70.
- [10] 刘晓晨, 陈坚, 崔巍, 等. 固体火箭发动机振动夹具设计及动态特性分析[J]. 强度与环境, 2020, 47(2): 56-63.
LIU Xiao-chen, CHEN Jian, CUI Wei, et al. Design and analysis of dynamic characteristics of vibration fixture with solid propellant rocket engine[J]. Structure & environment engineering, 2020, 47(2): 56-63.
- [11] 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.
- [12] 闫勇, 姚劲松. 光学小卫星振动夹具设计及动特性分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 43-48.
YAN Yong, YAO Jin-song. Design and analysis of dynamic characteristics of the optical satellite vibration fixture[J]. Infrared and laser engineering, 2014, 43(S1): 43-48.
- [13] 马征, 李东强, 顾阳, 等. 某异型结构振动夹具的设计及试验验证[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 90-94.
MA Zheng, LI Dong-qiang, GU Yang, et al. Design and experimental verification of a special shaped vibration fixture structure[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(3): 90-94.
- [14] 吴刚. 基于实测的振动夹具动态特性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(3): 58-63.
WU Gang. Dynamic characteristic analysis of vibration fixture based on actual measurement[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2019, 37(3): 58-63.
- [15] 俞秋惠. 汽车电器振动可靠性试验夹具系统的优化设计与实验分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
YU Qiu-hui. The optimization design and experimental analysis of auto electric vibration reliability test fixture[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [16] 张晓光. 轴流压气机叶片振动特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHANG Xiao-guang. Experimental study on vibration characteristics of axial compressor blade[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [17] 牛宏伟, 郭海东, 张永峰. 推进式螺旋桨振动应力特性飞行试验与分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7507-7515.
NIU Hong-wei, GUO Hai-dong, ZHANG Yong-feng. Flight test and analysis on the vibratory stress characteristics of a pusher propeller[J]. Science technology and engineering, 2020, 20(18): 7507-7515.
- [18] 孙晔, 陆海桃, 张海英, 等. 振动试验夹具结构动态设计及试验验证[J]. 机械强度, 2017, 39(5): 1210-1214.
SUN Ye, LU Hai-tao, ZHANG Hai-ying, et al. Structural dynamic design and test validation of vibration test fixtures[J]. Journal of mechanical strength, 2017, 39(5): 1210-1214.
- [19] 尚村, 李响. 某产品振动夹具的设计及结构优化[J]. 装备制造技术, 2014(11): 62-64.
SHANG Cun, LI Shang. The design and optimization for the structure of the certain productions vibration clamp[J]. Equipment manufacturing technology, 2014(11): 62-64.
- [20] 杭焱, 张磊, 陈春飞, 等. 电子设备机柜振动试验夹具设计[J]. 电子机械工程, 2011, 27(2): 31-32.
HANG Yi, ZHANG Lei, CHEN Chun-fei, et al. Vibration test fixture design for electronics cabinet[J]. Electro-mechanical engineering, 2011, 27(2): 31-32.