# 组合类产品筛选试验通用工装设计

董智远，李飞飞，李建伍

（航天科工防御技术研究试验中心，北京 100854）

**摘要：目的** 提高组合类产品在进行环境应力筛选随机振动试验时的试验效率，规范无工装产品的安装固定方式及试验方法，降低试验人员的体力消耗，保障试验的安全和质量。**方法** 通过设计通用工装，并对工装进行仿真分析和试验验证，保证工装具备通用性的同时，满足振动控制曲线允差符合相关标准的要求。**结果** 经过试验验证，通用工装满足尺寸小于 600 mm×500 mm×800 mm、外形规则样品的安装需求。振动控制曲线功率谱密度允差不大于±3 dB，均方根加速度不大于±1.5 dB，且工装整体的均匀度良好，每台样品与压板刚性连接处的均方根加速度与控制曲线均方根加速度的偏差不大于±1.5 dB。**结论** 使用通用工装进行环境应力筛选试验，试验方法符合 GJB 1032—90《电子产品环境应力筛选方法》中的要求。

**关键词：**环境应力筛选；随机振动；通用工装

**中图分类号：**V216.5　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672-9242(2022)03-0064-08

**DOI：**10.7643/ issn.1672-9242.2022.03.010

## Design of General Tool for Screening Test of Combined Products

*DONG Zhi-yuan, LI Fei-fei, LI Jian-wu*

(Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854)

**ABSTRACT:** This paper aims to improve the test efficiency of combined products in random vibration test of environmental stress screening, standardize the installation and test methods of products without tooling, reduce the physical consumption of test personnel, and ensure the safety and quality of the test. Through the design of general tooling, simulation analysis and test verification of the tool are carried out to ensure that vibration control curve tolerance meets the requirements of relevant standards. The test results show that the general tooling can meet the installation requirements of samples with size less than 600 mm× 500 mm× 800 mm and regular shape. The tolerance of PSD of the vibration control curve is not more than ± 3 dB, RMS is not more than ± 1.5 dB, and the overall uniformity of tooling is good. The deviation between RMS of a rigid connection between each sample and pressing plate and RMS of control curve is not more than ± 1.5 dB. The environmental stress screening test is carried out with general tooling, and the test method met the requirements of the GJB 1032—90 “Environmental Stress Screening Method for Electronic”.

**KEY WORDS:** environmental stress-screening process; random vibration; general tool

环境应力筛选（Environmental Stress-Screening Process 简称 ESS）是在电子产品上施加随机振动应

**收稿日期：**2020-08-12；**修订日期：**2020-10-10

**Received：**2020-08-12；**Revised：**2020-10-10

**作者简介：**董智远（1987—），男，工程师，主要研究方向为环境与可靠性试验技术。

**Biography：**DONG Zhi-yuan (1987—), Male, Engineer, Research focus: environment and reliability test technology.

**引文格式：**董智远，李飞飞，李健五. 组合类产品筛选试验通用工装设计[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 064-071.

DONG Zhi-yuan, LI Fei-fei, LI Jian-wu. Design of General Tool for Screening Test of Combined Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 064-071.

力和温度循环应力，以鉴别和剔除由产品工艺和元件引起的早期故障的一种工序和方法，适用于各类电子产品，尤其是军工产品，在研制和批生产阶段，100%要进行应力筛选[1-2]。一般的组合类产品的质量在 30 kg 左右，电源类产品的质量超过 50 kg。试验时，需要试验人员将样品搬运到振动台台面上，然后用压板固定，试验结束后，拆除压板，将样品搬运下来。大量的搬运工作，对试验人员的体力消耗很大，另外通过楼梯上下转运也存在一定的安全、质量风险。

通用工装设计的出发点就是要解决上述问题，通过设计工装，保证 50 kN 推力振动台一次安装 2 台产品，100 kN 推力以上的振动台一次可安装 4 台产品。使用时，试验人员在地面通过快速装卡装置，将产品安装在工装上（装卡装置位置可调，以适应不同尺寸的样品），然后通过天车或者叉车将工装吊装到振动台台面上，通过工装底部安装孔，将工装固定在台面上。这种方式能大大提高试验效率，降低试验人员体力消耗，保障试验的安全和质量。

## 1　通用工装的设计

### 1.1　设计要求

根据试用样品外形尺寸进行工装设计，需遵循以下原则：

1）工装上用于固定样品的装卡装置，尺寸位置可调，且具备通用性，以满足不同尺寸样品的安装需求。

2）装卡方式快捷有效，既能满足产品的试验需求，又能节省安装时间，提高试验效率。

3）顶部设有吊点，方便整体吊装，底部留有足够的安装空间，方便试验人员通过底部的安装孔位与振动台连接。

### 1.2　设计方案

工装设计图纸如图 1 所示。

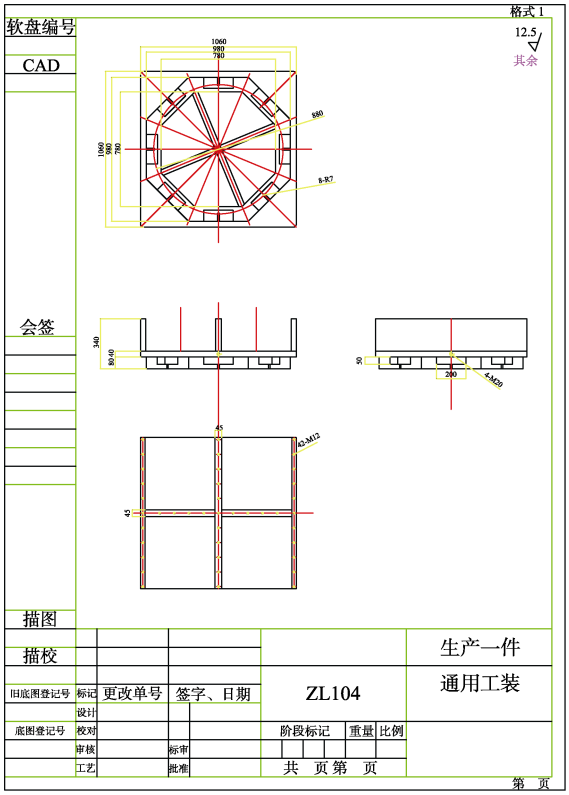



图 1　工装设计图纸

Fig.1 Tooling design drawings

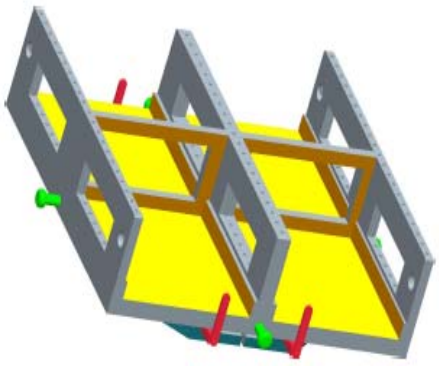


图 2　通用工装

Fig.2 General tooling diagram

## 2　工装建模仿真

### 2.1　工装模态分析

1）建模、网格划分及边界。统计相关产品的外形尺寸，根据试验条件需要，结合振动台的安装要求，设计通用试验工装结构，并进行相关优化。通用工装外形尺寸为 1.06 m×1.06 m×0.32 m，结构模型见图 2。

2）有限元模型。工装作为试验产品与振动台之间的转接连接件，在环境试验工程上有一定的要求，主要为避免试验工装与试验产品的固有频率发生共振现象，本次振动工装模型关注结构模态频率及振型[3-5]，在有限元分析中采用四面体，有限元划分网格如图 3 所示。

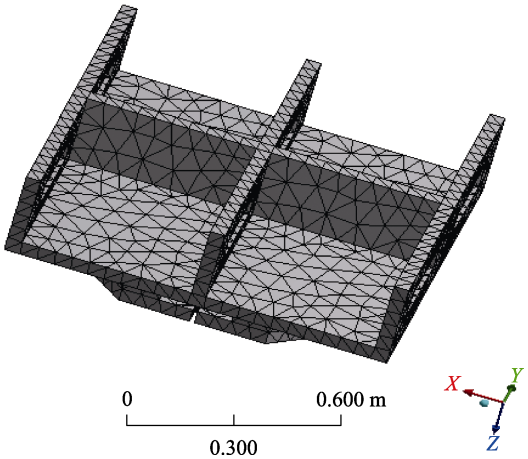



图 3　网格划分模型

Fig.3 Mesh generation model

3）材料属性。根据工程经验，材料选择铝材，牌号为 6061，全部赋给结构模型，6061 材料的性能参数见表 1。

**表 1　6061 铝合金的性能参数**

Tab.1 Performance parameters of 6061 aluminum alloy

| 弹性模量/GPa | 破坏应力/MPa | 泊松比 $\mu$ | 密度/($g\cdot cm^{-3}$) |
|---|---|---|---|
| 71 | 410 | 0.3 | 2.7 |

4）边界约束。根据工装的结构形式以及安装固定方式，考虑到振动台的接触方式，本次试验主要采用螺钉连接。有限元模拟采用固支约束的方式，底部 8 个槽型螺栓孔进行约束固定，主要限制工装 $X$、$Y$、$Z$ 3 个方向的平移，具体约束如图 4 所示。

5）模态分析结果。运用 ABAQUS 有限元软件的前处理功能，对上述条件进行处理（网格划分、赋材料属性、施加约束），从而建立起模态分析工况，得到各阶模态的频率、变形云图、变化振型等结果。经过有限元软件后处理得出工装模态分析结果[6]，前六阶的振动频率分别为 339.47、426.96、699.84、806.41、1196.47、1338.11 Hz。由于一般振动、冲击等动力学试验，工程计算取前六阶的振型作为参考，工装前六阶的振动形态如图 5 所示。每一阶模态无论弯曲模态还是扭转模态，变形量度非常小，满足结构强度要求。

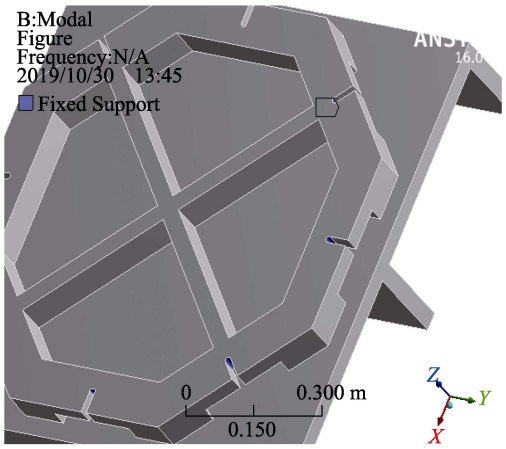
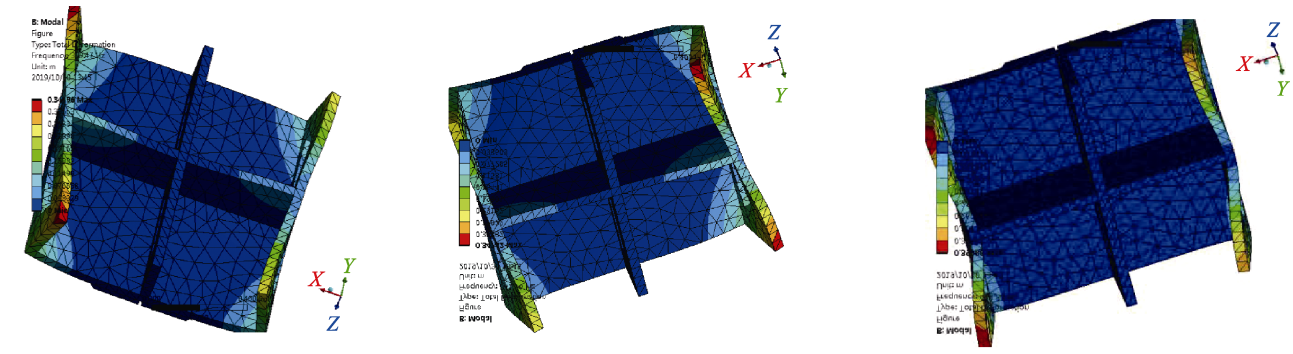
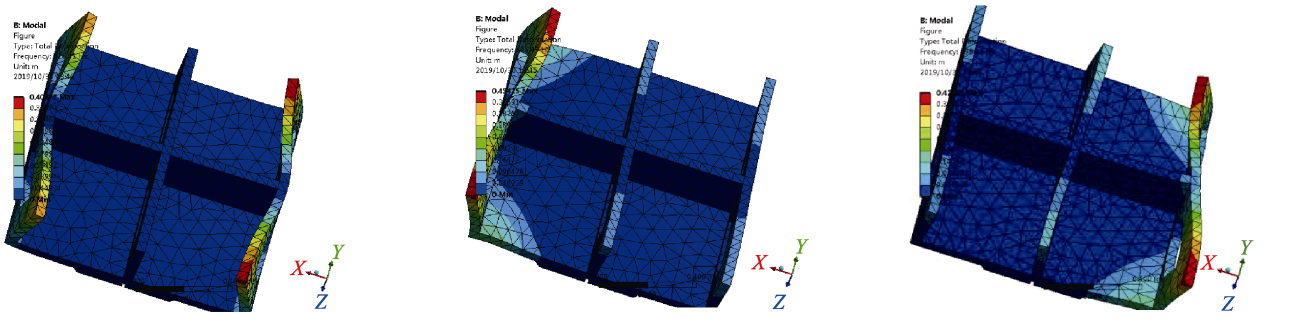



图 4　通用工装底面约束

Fig.4 Constraint diagram of general tooling bottom surface



a 一阶　　b 二阶　　c 三阶



d 四阶　　e 五阶　　f 六阶

图 5　前六阶振动形态

Fig. 5 First six order vibration form: a) first order; b) second order; c) third order; d) fourth order; e) fifth order; f) sixth order

## 2.2　随机振动响应分析

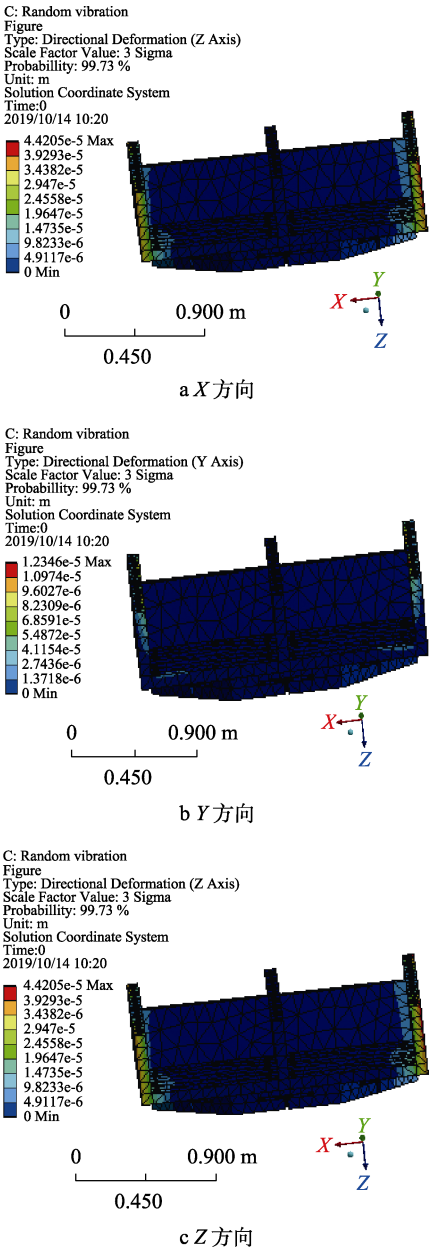
在模态分析的基础上，进行随机振动响应分析。模态分析主要提取被激活的频率和振型，提取出来的频谱应该位于 PSD 曲线频率范围内。在实际的筛选试验中，通过通用工装安装产品，完成产品垂直方向试验条件的施加[7-8]。在随机振动分析中，载荷谱按照筛选试验条件，施加筛选载荷谱，见表 2。仿真分析时，试验条件施加在所有约束位置处，施加载荷方向由底部向上（实际产品筛选试验也是从工装底

部施加随机振动条件）。随机响应仿真分析展现出主振方向以及另外 2 个方向的横振响应应变云图，主振方向应变云图的最大值只有 0.04 mm，其他横振方向应变就更小，可忽略不计。随机振动响应结果如图 6 所示。由随机响应振动分析可知，通用试验工装结构满足筛选试验要求[9-10]。

**表 2　载荷谱**

Tab.2 Load spectrum

| $f$/Hz | PSD/($g^2$·Hz$^{-1}$) |
|---|---|
| 20 | 0.01 |
| 80 | 0.04 |
| 350 | 0.04 |
| 2000 | 0.01 |




a $X$ 方向

b $Y$ 方向

c $Z$ 方向

图 6　变形云图

Fig.6 Deformation nephogram: a) $X$ direction; b) $Y$ direction; c) $Z$ direction

## 3　试验验证

### 3.1　工装空载扫频试验

通过工装底部的 8 个安装槽，使用 T 型螺栓将工装固定在振动台台面上，台面上粘贴控制传感器，工装上部 3 个典型位置粘贴测量传感器（粘贴位置如图 7 所示）进行扫频试验，获取工装上的响应特性[11]。控制曲线见图 8，各监测点曲线见图 9。

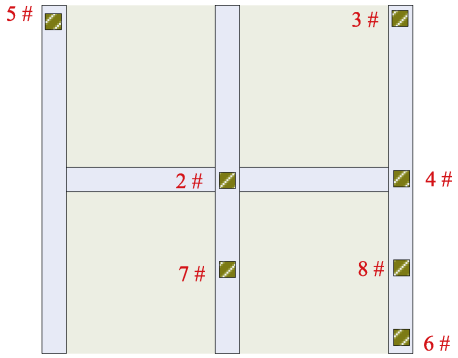



图 7　工装扫频试验测量传感器粘贴位置

Fig.7 The position of measuring sensor for sweep frequency test

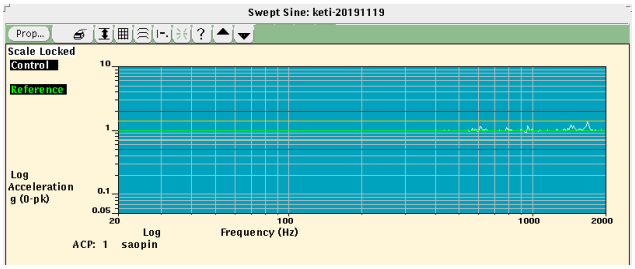


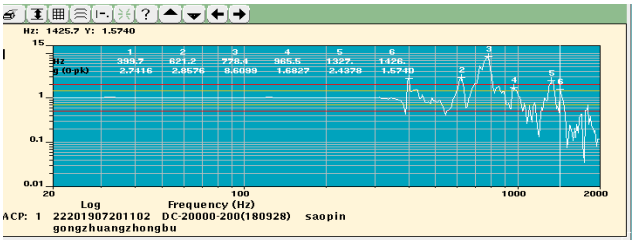

图 8　扫频试验控制曲线

Fig.8 Control curve of frequency sweep test

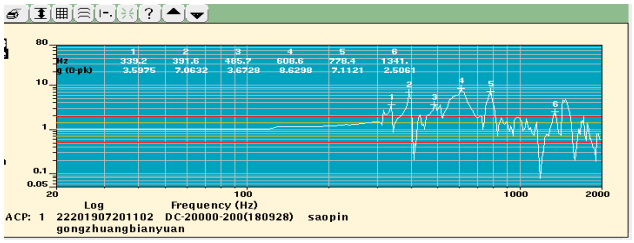
由图 8 和图 9 可以看出，工装整体的均匀度较好，前六阶模态基本与仿真数据一致。350 Hz 以下，工装的传递特性良好，无明显的衰减和放大。放大较大的位置集中在 7#、8#传感器粘贴的位置。在 1426 Hz 处，放大系数最大，超过了 15。由于筛选谱型从 350 Hz 处以 3 dB/Oct 的斜率下降，振动过程中高频的激励较小。同时，该位置是样品与工装的刚性固定点，试验时会在此处粘贴控制传感器，因此只要振动过程中的控制谱线在容差范围内，样品就不会出现过试验的情况[12-13]。

### 3.2　工装空载随机振动试验

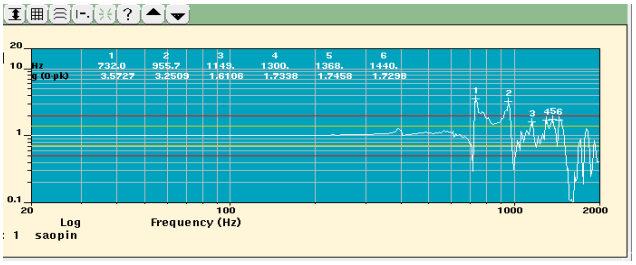
对工装进行空载随机振动（筛选谱型，总均方根加速度为 6.06$g$）试验，安装方式同扫频试验，采用四点平均值控制。控制传感器粘贴位置如图 10 所示，各控制点的曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出，工装完全满足筛选试验的控制要求，各控制点的均方根加速度值与参考谱相比，偏差在±1.5 dB 范围内。



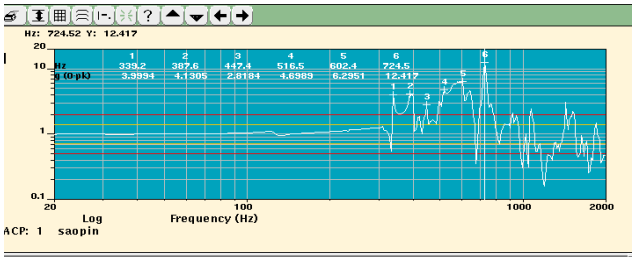

a 2#



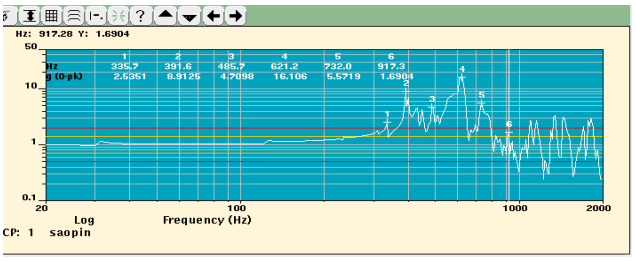

b 3#



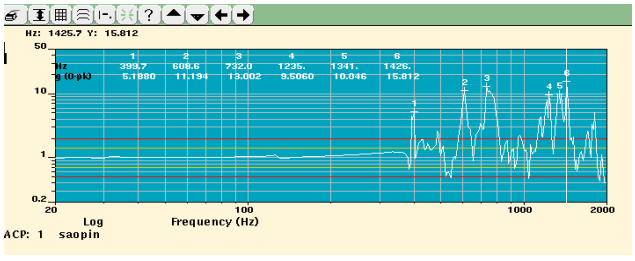

c 4#



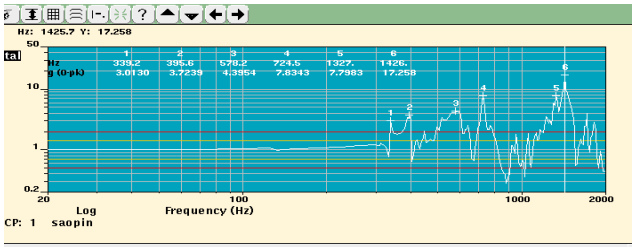

d 5#




e 6#




f 7#




g 8#

图 9 传感器曲线

Fig.9 Sensor curve

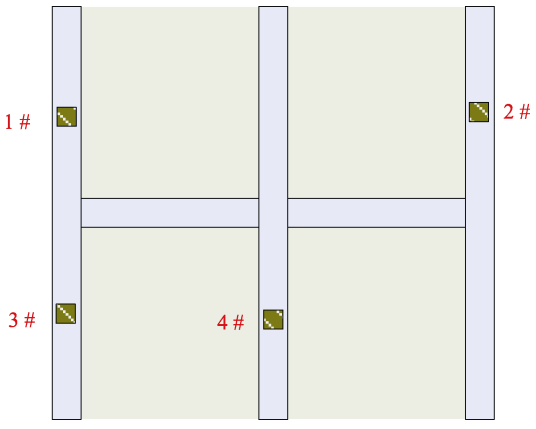



图 10 空载振动控制传感器位置

Fig.10 Control sensor position of no load vibration

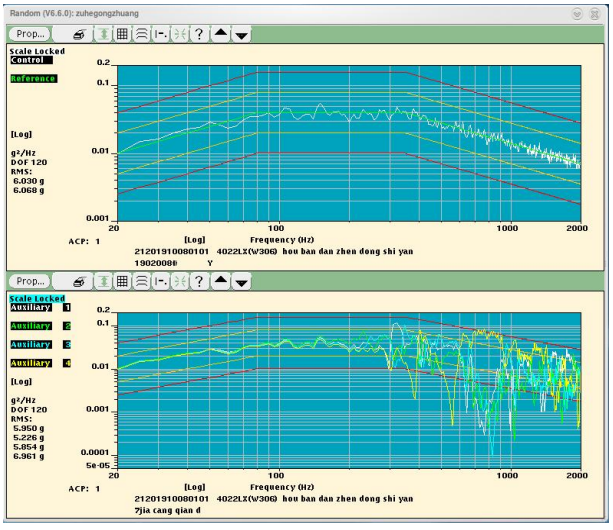



图 11 空载振动控制曲线

Fig.11 No load vibration control curve

## 3.3　模拟样品试装与试验验证

选择外形尺寸为 500 mm×480 mm×400 mm、300 mm×380 mm×150 mm 的组合类产品和外形尺寸 400 mm×480 mm×350 mm 的包装箱进行试装。经过实际试装确认，通用工装不仅适用于组合类产品，还适用于包装箱类的产品，原则上尺寸小于 600 mm×500 mm×800 mm、质量小于 100 kg、外形尺寸规则、刚度分布均匀的样品都能使用该工装，工装具有较强的通用性[14-15]。

使用模拟件进行筛选谱随机振动试验，该机箱与实际产品外形尺寸、结构形式完全一致。控制点选择则工装上放大较大处与样品刚性连接处的压板上，同时为了保证整体的均匀性，在工装的中部粘贴 1 个控制传感器，传感器粘贴位置如图 12 所示。采用 4 点平均值控制，振动控制曲线如图 13 所示。由控制曲线可以看出，控制曲线满足标准对容差的要求，各压板上控制点的均方根加速度值与参考谱相比，偏差在 ±1.5 dB 范围内。

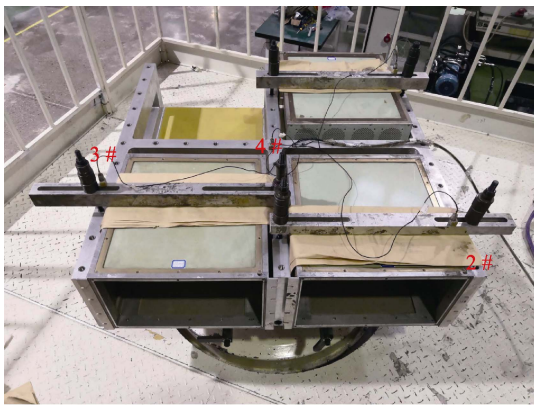



图 12　模拟样品安装方式及控制传感器位置

Fig.12 Installation mode of simulated sample and position of control sensor

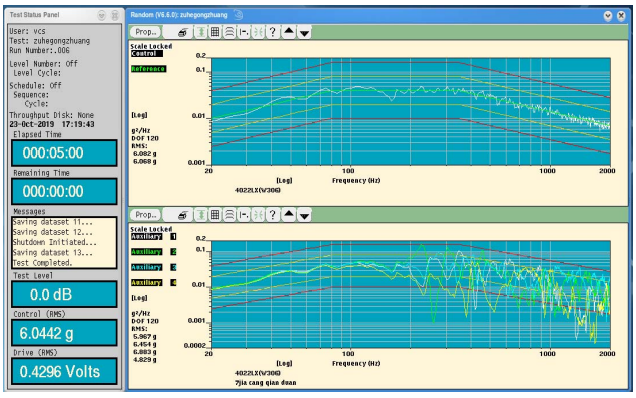



图 13　模拟样品振动控制曲线

Fig.13 Vibration control curve of simulated sample

在固定 1#样品的压板上与控制点对称的位置粘贴 1 个监测传感器，监测压板上的响应。传感器粘贴位置如图 14 所示，试验曲线如图 15 所示。

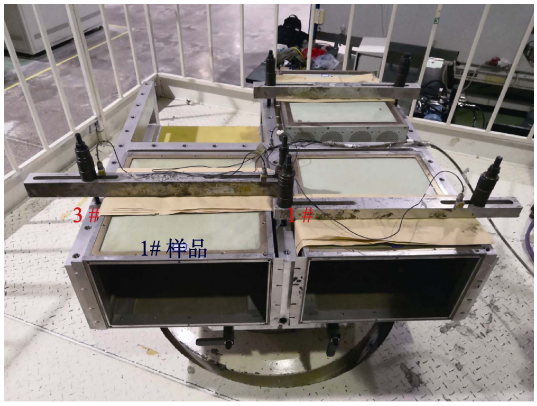



图 14　样品安装及振动控制点粘贴位置（一点控制，一点监测）

Fig.14 Installation mode and position of sensor(one control, one monitoring)

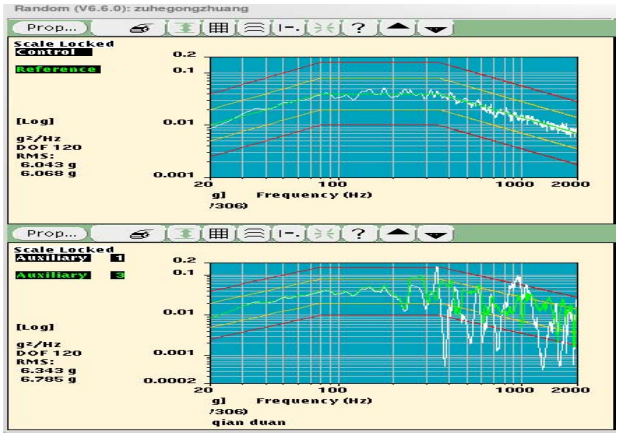



图 15　模拟样品振动控制曲线（一点控制，一点监测）

Fig.15 Vibration control curve and monitoring curve(one control, one monitoring)

图 14 中，3#通道为控制通道，1#通道为监测通道。可以看出，在 350 Hz 以内，控制曲线与监测曲线基本一致，350 Hz 以后有一定的偏差，但总均方根加速度在参考谱的±1.5 dB 以内，整体控制效果与单台样品直接用压板固定在振动台台面上的控制效果一致，完全满足应力筛选试验的需求[16-17]。

## 3.4　正式样品试验验证

使用某产品进行正式试验，单次试验安装 4 台产品，振动控制点粘贴在工装中部（1 点），压板与样品刚性连接处的压板上（4 点），采用 5 点平均值控制。样品安装和传感器粘贴位置如图 16 所示，试验曲线如图 17 所示。

由控制曲线可以看出，控制曲线满足 GJB 1032—90《电子产品环境应力筛选试验方法》中对容差的要求，各压板上控制点的均方根加速度值与参考谱相比，偏差在±1.5 dB 范围内。

通用工装完全满足组合类产品环境应力筛选随机振动试验的要求。使用过程中，只要保证工装中部和每台样品上至少有 1 个控制传感器，筛选效果与单

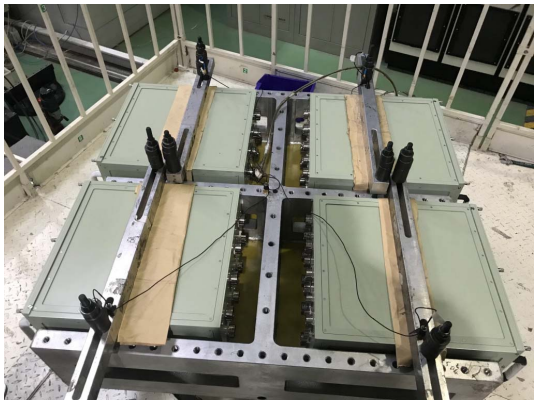


图 16　样品安装方式及控制传感器位置（正式样品）
Fig.16 Installation mode of actual sample and position of control sensor（real product）

台压板固定的方式基本一致，在满足筛选效果的同时，不会出现过试验的情况[18-19]。

## 4　结论

该工装不仅能应用于地面组合类产品，还能应用到包装箱等外形规则的产品上，原则上尺寸小于 600 mm×500 mm×800 mm、外形尺寸规则的样品都能使用该工装。可靠性试验、比测试验、鉴定试验等试验周期较长的综合应力试验，也可使用该工装同时进行多台样品的试验，在保证样品安装固定一致性的同时，还能大大降低试验周期，节约试验成本，因此该项目具备非常好的应用前景。

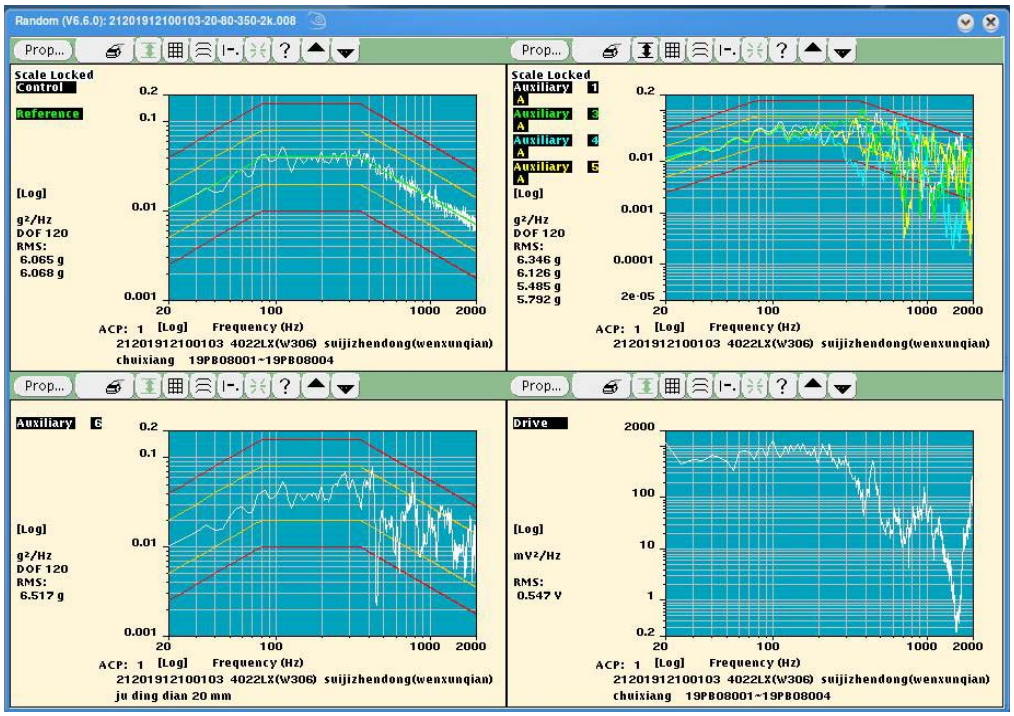



图 17　正式产品振动控制曲线
Fig.17 Vibration control curve and monitoring curve

**参考文献：**


[1] GJB 1032—90, 电子产品环境应力筛选试验方法[S].
GJB 1032—90, Environmental Stress Screening Test Method for Electronic Products[S].

[2] GJB 150A—2009, 军用装备试验环境试验方法[S].
GJB 150A — 2009, Laboratory Environmental Test Method fot Military Equipment[S].

[3] 陈晓冬, 杜向辉, 徐宁. 空空导弹发射装置组合振动试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 153-158.
CHEN Xiao-dong, DU Xiang-hui, XU Ning. Research on Combined Vibration Test Method for the Launcher Equipment of Airborne Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 153-158.

[4] 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.

[5] 沈志强, 朱子宏, 郭建龙. 改变连接特性提高振动台冲击响应谱模拟能力[J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 30-33.
SHEN Zhi-qiang, ZHU Zi-hong, GUO Jian-long. Improvement of the Shock Response Level of Shaker by Changing Linking Characteristic[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(2): 30-33.

[6] 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 Ra-

dar Equipment[J]. Environmental Technology, 2010, 31(6): 14-18.

[7] 李真, 张丽巍, 邓永芳. “沙埋型”夹具在振动试验中的运用分析[J]. 环境技术, 2014, 32(6): 14-16.
LI Zhen, ZHANG Li-wei, DENG Yong-fang. Application Analysis of Sand Fixture in Vibration Test[J]. Environmental Technology, 2014, 32(6): 14-16.

[8] 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.

[9] 朱子宏, 沈志强, 高文硕, 等. 夹具特性对振动控制精度影响效应分析[J]. 环境技术, 2016, 34(5): 14-18.
ZHU Zi-hong, SHEN Zhi-qiang, GAO Wen-shuo, et al. Analysis of Effect of Fixture Characteristics on Vibration Control Accuracy[J]. Environmental Technology, 2016, 34(5): 14-18.

[10] 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.

[11] 陈励. 正弦振动试验中的共振利用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 48-51.
CHEN Li. Application of Resonance in Sine Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 48-51.

[12] 孙玉玉, 王晓霞, 姚鼎. 电连接器可靠性试验夹具的设计方法研究[J]. 环境技术, 2012, 30(4): 28-31.
SUN Yu-yu, WANG Xiao-xia, YAO Ding. Research on the Design Method of the Fixture for Electrical Connectors Reliability Testing[J]. Environmental Technology, 2012, 30(4): 28-31.

[13] 崔松建, 彭红, 陈静. 基于高压电容器振动试验夹具材料的选用与设计[J]. 环境技术, 2010, 30(5): 27-29.
CUI Song-jian, PENG Hong, CHEN Jing. The Selection and Design of Fixture Material Based on High Voltage Capacitor Vibration Experiment[J]. Environmental Technology, 2010, 30(5): 27-29.

[14] 彭红, 崔松建, 陈静. 基于冷阴极触发管振动试验夹具的设计[J]. 环境技术, 2010, 31(6): 19-21.
PENG Hong, CUI Song-jian, CHEN Jing. The Design of Vibration Experiment Fixture Based on Cold Cathode Trigger[J]. Environmental Technology, 2010, 31(6): 19-21.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 刘加凯, 齐杏林, 崔静, 等. 基于 ANSYS 仿真的引信振动强化试验夹具设计[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 95-98.
LIU Jia-kai, QI Xing-lin, CUI Jing, et al. Design of Fuse Fixture Used in Vibration Enhancement Test Based on ANSYS Simulation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 95-98.

[18] 李朝锋, 苏可鹏, 朱琳. 振动试验中常见问题的分析[J]. 环境技术, 2012, 30(4): 11-14.
LI Chao-feng, SU Ke-peng, ZHU Lin. Analysis on Common Problems in the Vibration Test[J]. Environmental Technology, 2012, 30(4): 11-14.

[19] 孙建勇, 张建军. 飞行器拦阻着陆冲击试验分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 5-8.
SUN Jian-yong, ZHANG Jian-jun. Analysis of Shock Test for Aircraft Arrested Landing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 5-8.