

一种可调加速度放大率装置的结构与仿真设计*

李 丹, 王琼皎, 令狐世锋, 彭 鑫, 白 云

(中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100)

摘要:为了在产品的随机振动过程中实现加速度放大率可调节,从材料力学、振动理论等知识出发,设计出一种加速度放大率可调装置,理论放大率调节范围为2.2~5.4,并通过数值仿真和振动试验对其放大效果进行了验证。结果表明,文中提出的加速度放大率理论计算公式准确可靠,此装置加速度放大效果良好且装置结构简单,适用性好。此理论公式与装置可推广至对振动试验加速度响应有变化需求的场合,有较好的工程借鉴作用。

关键词:随机振动试验;加速度放大率;可调节装置

中图分类号:TB53 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2022)02-0038-04

Structure and Simulation Design of an Acceleration Amplification Adjustable Device

LI Dan, WANG Qiongjiao, LINGHU Shifeng, PENG Xin, BAI Yun

(The Xi'an Branch of the Chinese Academy of Space, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to achieve adjustable acceleration amplification in the process of random vibration of products, this paper designs an acceleration amplification adjustable device from the knowledge of material mechanics and vibration theory, with a theoretical amplification range of 2.2 ~ 5.4, and verifies its amplification effect through numerical simulation and vibration test. The results show that the theoretical acceleration amplification formula proposed in this paper is accurate and reliable, the device has a good acceleration amplification effect and a simple structure and good applicability. The theoretical formula and the device can be extended to all the applications where the acceleration response of the vibration test needs to be varied, which is a good engineering reference.

Key words: random vibration test; acceleration amplification; adjustable device

引 言

航天电子产品存在地面搬运、地面运输、航天器发射、空间在轨运行、返回阶段等力学环境,需要对其进行地面力学环境试验,包括声、振动、冲击、加速度试验。其中,振动环境主要分为正弦振动和随机振动。在振动试验中,产品加速度响应会发生放大,这种放大效应往往与产品的结构相关,而加速度放大会使产品内部元器件存在失效风险,因此,很多学者通过结构布局优化、增加隔振/减振装置来实现加速度的放大控制,以保证元器件的可靠性,效果良好^[1-3]。

目前的结构设计流程是进行结构设计和仿真分析,得到元器件放大响应,判断其是否满足可靠性要求,若不满足则进行结构优化并再次进行仿真分析判断其可靠性,直至满足可靠性要求。此设计过程往往需要数次迭代,时间成本高,设计效率低。因此需要对

产品结构与加速度放大率之间的关系进行理论研究,以在结构设计前期得到设计目标,简化产品设计流程,提高设计效率。

本文从材料力学、振动理论等知识出发,提出了产品谐振频率与加速度放大率之间的理论计算公式,可根据需要对产品进行有目标的结构设计,减少设计迭代;并针对某工艺鉴定中对加速度放大率的需求,根据理论公式设计出一种加速度放大率可调的试验装置,通过数值仿真和试验验证对其放大效果进行了考核。此装置结构简单,效果良好,具有较好的工程借鉴作用。

1 理论设计

1.1 理论公式

振动是自然界的一种普遍现象,随机振动是利用统计学方法对许多样本进行研究。在随机振动控制曲

* 收稿日期:2021-07-25

线中,功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)表示振动各频率成分在频域上的含量,即能量在频域上的分布情况,单位为 g^2/Hz 。均方根加速度指的是随机振动曲线下包围面积的开方,通过积分随机振动曲线可以求得,单位为 g 。包围面积 A 为:

$$A = G^2 = \int_{f_1}^{f_2} P df \quad (1)$$

式中: P 为功率谱密度; G 为均方根加速度; f 为频率; f_1 为随机振动曲线初始频率; f_2 为结束频率。对随机振动系统^[4-7],传递率 Q 为:

$$Q = \sqrt{\frac{P_{out}}{P_{in}}} \quad (2)$$

式中: P_{out} 为最大响应功率谱密度; P_{in} 为最大输入功率谱密度。对有阻尼的强迫振动,其传递率方程为:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2 r^2}} \quad (3)$$

式中: ξ 为阻尼比; r 为频率比。根据上述公式,对随机

振动输出曲线有:

$$A = G_{out}^2 = \int_{f_1}^{f_2} P_{out} df = \int_{f_1}^{f_2} \frac{P_{in}}{(1-r^2)^2 + 4\xi^2 r^2} df \quad (4)$$

式中: G_{out} 为随机振动输出均方根加速度。积分求得:

$$G_{out}^2 = \frac{\pi f_n P}{4\xi} \quad (5)$$

式中: f_n 为系统的谐振频率; P 为谐振频率处的输入功率谱密度。加速度放大率 β 为:

$$\beta = \frac{G_{out}}{G_{in}} \quad (6)$$

式中: G_{in} 为随机振动输入均方根加速度。根据公式(5)和公式(6)可得:

$$f_n = \frac{4\xi\beta^2 G_{in}^2}{\pi P} \quad (7)$$

1.2 理论计算

本文参考《航天器电子产品软钎焊接工艺鉴定技术要求》^[8]标准对加速度放大率装置进行结构设计、仿真与验证。标准中振动试验条件如表1所示。

表1 随机振动试验条件

垂直电路板方向			平行电路板方向		
频率/Hz	量级(o-p)	总均方根加速度	频率/Hz	量级(o-p)	总均方根加速度
20 ~ 100	+6 dB/oct	28.5g	20 ~ 100	+6 dB/oct	16.1g
100 ~ 500	1 g ² /Hz		100 ~ 500	0.5 g ² /Hz	
500 ~ 2000	-6 dB/oct		500 ~ 2000	-3 dB/oct	

标准中要求被鉴定基板或元器件的加速度响应在敏感方向大于输入加速度的3倍,即加速度放大率大于3。此基本敏感方向为垂直电路板方向,因此本文参照表1中垂直电路板方向条件进行结构设计、力学仿真与试验验证。

根据1.1节定义,由表1可见, $G_{in} = 28.5g$, $\beta = 3$, $P = 1 g^2/Hz$ 。在航天电子设备中,一般取 $\xi = 0.01$,由公式(7)计算出设计装置的谐振频率 $f_n = 93 Hz$,将此频率作为结构设计的目标。

标准中的正弦振动试验频率范围为4 ~ 200 Hz。为了避免在正弦振动中出现响应放大导致产品破坏,需将频率设计为200 Hz以上。而且,从振动理论中的阻尼比、频率比和传递函数的关系曲线^[4]可以看出,当频率比 $r \geq \sqrt{2}$ 时,系统解耦,不会发生谐振,因此将此装置的谐振频率设为 $200 \times \sqrt{2} = 280 Hz$,此时产品的加速度放大率为5.2。在电子产品设计中,一般情况下产品的加速度响应不会超过5倍,因此该装置满足

最大放大率要求。

2 结构设计

试验装置结构由支撑板、底板和箱体组成,如图1所示。支撑板用于整个装置与试验台的连接,底板用于箱体与支撑板的连接,箱体用于焊接基板,实现软钎焊工艺的鉴定,材料均选用航天常用的2A12铝合金。在底板两侧沿着箱体安装方向设计开口槽,可实现箱体从位置A至位置B的调节,以实现加速度放大率的调节。

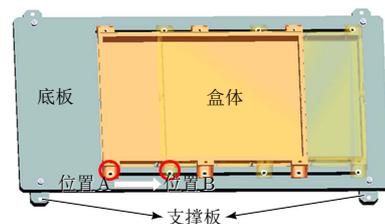


图1 试验装置结构示意图

选择箱体在位置A处的状态进行理论计算,将此结构简化为两端固支、中间负有质量块的结构,简易视图见图2。

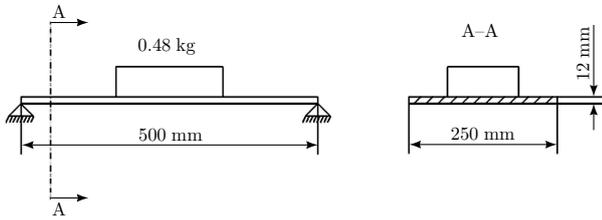


图2 结构简化模型

谐振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad (8)$$

式中, δ_{st} 为结构静变形, 其计算式为:

$$\delta_{st} = \frac{Wl^3}{48EI} \quad (9)$$

式中: W 为质量块重力; l 为结构长度; E 为结构材料弹性模量; I 为截面惯矩。对矩形截面, I 的计算式为:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (10)$$

式中: b 为截面宽度; h 为截面高度。

由以上公式可以计算出此装置的理论谐振频率为 222 Hz, 与要求的 280 Hz 接近。根据公式(7), 此装置的理论加速度放大率为 4.6, 考虑到模型简化的误差, 可认为此结构接近要求, 对其进行有限元仿真设计。

3 仿真设计

仿真设计选用 ANSYS 18.0 有限元分析软件。支撑板与底板之间螺钉连接选用 BEAM 单元, 支撑板与箱体之间螺钉连接保留真实螺钉结构。分析内容包括模态分析和随机振动分析。模态分析结果见表 2。

表 2 模态分析结果

阶数	频率值/Hz	有效质量比/%	振型
1	296	68.8	Z 向
4	1 225	92.6	Y 向
5	1 317	86.9	X 向

从分析结果可知, 谐振频率为 296 Hz, 加速度放大率为 5.3, 大于要求频率 280 Hz, 且与理论计算的 222 Hz 误差不大, 说明此理论公式具有一定的参考性, 此装置有效。296 Hz, Z 向(垂直电路板方向)的 1 阶振型如图 3 所示。

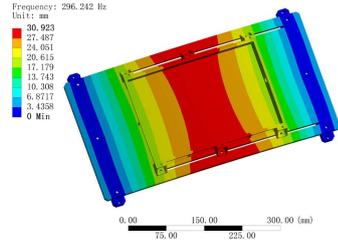


图 3 296 Hz, Z 向(垂直电路板方向)的 1 阶振型

根据要求, 本文待验证的输出加速度值为 $G_{out} = 18.5 \times 3 = 85.5g$ 。根据公式(5), $G_{out} = 85.5g$, $\xi = 0.01$, $f_n = 296$ Hz, 计算出 $P = 0.32 g^2/Hz$ 。考虑到理论计算误差, 为防止欠试验, 将输入适当变大, 设为 $0.4 g^2/Hz$, 则 $G_{out} = 18g$ 。实际随机振动试验条件见表 3。

表 3 实际随机振动试验条件

频率/Hz	量级(o-p)	总均方根加速度
20 ~ 100	+6 dB/oct	18g
100 ~ 500	0.4 g^2/Hz	
500 ~ 2 000	-6 dB/oct	

此试验装置设计有 5 块相同的待验证焊接工艺基板。从分析结果可知, 位置 A 处加速度响应为 $65g \sim 96g$, 位置 B 处加速度响应为 $40g \sim 81g$, 即此装置通过位置 A 到位置 B 的调节可实现加速度响应 $40g \sim 96g$ 范围的调节, 放大率调节范围为 2.2 ~ 5.4。图 4 为位置 A 的随机振动加速度云图, 图 5 为位置 A 测点 A1 处的 PSD 响应曲线, 图 6 为位置 B 的随机振动加速度云图。

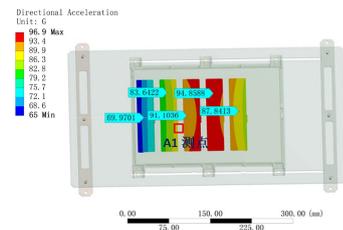


图 4 位置 A 的随机振动加速度云图

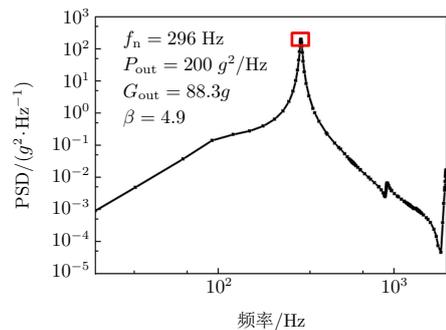


图 5 位置 A 测点 A1 处的 PSD 响应曲线

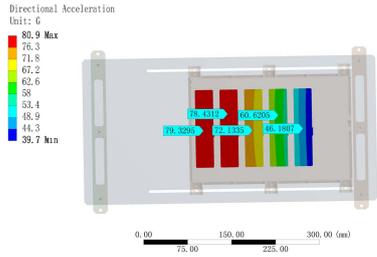


图6 位置B的随机振动加速度云图

4 试验验证

Z向振动试验过程中,控制点C1—C4均位于产品与工装对接处的工装上,监测点A1位于待验证的工艺软钎焊接基板上,控制方式采用四点平均控制。图7为控点和测点安装位置示意图,图8为测点A1的响应曲线。理论计算、数值仿真和试验结果对比见表4。

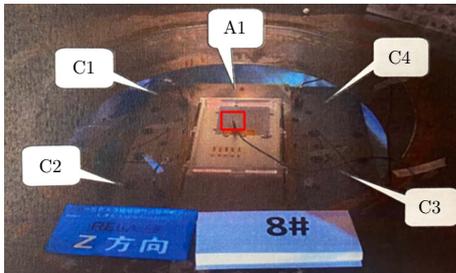


图7 控点和测点安装位置示意图



图8 测点A1响应曲线

表4 理论计算、数值仿真和试验结果对比(位置A/Z向)

项目	谐振频率/ Hz	功率谱密度/ (g ² ·Hz ⁻¹)	均方根 加速度/g	放大率
理论计算	222	222	83.5	4.6
数值仿真	296	200	88.3	4.9
试验	300	212	88.6	4.9

从试验结果可知:此装置可以达到要求的均方根加速度值 $G_{out} = 88.6g$ (近似且大于 $85.5g$), 效果好; 理论计算、数值仿真、试验结果误差较小。

5 结束语

本文提出的产品谐振频率与加速度放大率之间的

理论计算公式可靠性高,经数值仿真和试验验证,效果良好。

此可调加速度放大率装置可有效实现加速度放大率的调节,效果良好。

此公式、装置都具有较大的工程推广意义,可应用于对加速度放大率有要求的所有场合,实现结构的有效设计,节省设计时间和试验成本。

后续将在本文结论的基础上,开展谐振频率与复杂产品结构之间的理论研究,完善理论公式,进一步减少设计迭代,实现结构的有效设计。

参考文献

- [1] 杨竣博. 某星载组件的结构动态特性分析[J]. 电子机械工程. 2020, 36(3): 57-60.
- [2] 徐伟杰, 江熊, 沈巍巍. 某星载电子设备有限元分析及设计改进[J]. 电子机械工程, 2017, 33(2): 34-36, 40.
- [3] 吴文志, 程琳, 张平, 等. 某星载雷达电子设备的刚强度有限元分析[J]. 电子机械工程, 2016, 32(3): 56-59.
- [4] 方同, 薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [5] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] STEINBERG D S. Vibration Analysis for Electronic Equipment[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [7] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [8] 航天科技集团五院西安分院. Q/WSM 0021-2012-2012 航天器电子产品软钎焊接工艺鉴定技术要求[S]. 2012.

李丹女, 1984年生, 硕士, 主要从事星载有效载荷结构设计、力热设计工作。

声明

为适应我国信息化建设,扩大本刊以及作者的知识信息交流渠道,本刊已被封面上的数据库全文收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊申明,本刊将作适当处理。