

环境及其效应

基于 PSD 法的船载雷达随机振动响应分析

朱红发, 赵明利, 程热

(安徽四创电子股份有限公司, 合肥 230088)

摘要: **目的** 优化以经验为主的船载雷达结构设计流程, 缩短设计周期, 提高设计的准确性。**方法** 提出基于模态分析和 PSD 法的新的设计流程, 利用 ANSYS 软件对雷达天线和转台结构进行系统的随机振动分析, 得到其模态、应力分布、位移云图及响应谱曲线, 验证设计的准确性、合理性。**结果** 得到雷达系统在 1σ 下的最大应力值和最大变形量分别为 14.847 MPa 和 0.367 mm。**结论** 新的设计流程可以得到可靠性更高的产品, 能有效缩短产品的设计周期, 具有重要的借鉴意义。

关键词: 船载雷达; 模态; PSD; 随机振动

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.018

中图分类号: TP39 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0118-06

Random Vibration Response of Shipborne Radar Based on PSD Method

ZHU Hong-fa, ZHAO Ming-li, CHENG Re

(Anhui Sun Create Electronics Co., Ltd, Hefei 230088, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the traditional experience-based shipborne radar structure design process, shorten the design cycle and improve the design accuracy. A new design process based on modal analysis and PSD method was proposed. Radar antennas and turntable structures were analyzed by ANSYS software for systematic random vibration analysis. The modal cloud map, stress distribution cloud map, displacement cloud map and response spectrum curve were obtained to verify the design accuracy and reasonableness. The maximum stress value and maximum deformation of the radar system at 1σ were 14.847Mpa and 0.367mm, respectively. The new design process can get more reliable products. It can effectively shorten the product design cycle and has important reference significance.

KEY WORDS: shipborne radar; modal; PSD; random vibration

随机振动现象广泛存在于自然界和工程中, 如海浪波动对舰船的冲击、大气湍流对飞机的影响、地震等。这些振动环境对设备的正常工作影响很大, 通过对振动环境的模拟, 可在设备正式应用前对其可靠性和疲劳寿命进行考察, 提前预防可能出现的失效问题^[1-2]。修瑞仙等^[3]根据得到的加速度功率谱在 ANSYS 中对车体二系簧座进行激励加载, 利用模态叠加法对车体进行随机振动分析, 得到客车车

体的 1σ 应力分布。郇光周等^[4]通过加载 PSD 功率谱进行舱段螺栓联接的轴向随机振动分析, 得到了导弹关键舱段联接螺栓关键节点的 PSD 响应, 并探讨了螺栓预紧力大小的变化对导弹舱段结构频率的影响。

舰船在海上航行时, 船载雷达会经历严酷的随机振动环境, 需要承受多种振动和冲击, 这些振动和冲击轻则会造成船载雷达结构变形, 重则会破坏雷达结

收稿日期: 2020-02-25; 修订日期: 2020-03-19

Received: 2020-02-25; Revised: 2020-03-19

作者简介: 朱红发 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达结构总体设计。

Biography: ZHU Hong-fa (1982—), Male, Master, Engineer, Research focus: overall design of radar structures.

构,进而影响雷达的电性能和探测性能,且该影响是不能够被忽略的^[5-7]。针对该问题,文中提出一种基于模态分析和 PSD 法的船载雷达系统随机振动模拟分析设计流程,以探究舰船在航行时船载雷达的振动情况,分析该产品设计的可靠性程度。

1 SCR-CPD 雷达总体特征和振动环境

1.1 SCR-CPD 雷达系统总体特征

文中分析的对象为船载多普勒天气雷达系统(以下简称 SCR-CPD 雷达),其安装在舰船雷达桅顶部,主要由天线、转台、接收机系统、发射系统和馈线等几部分组成。能够完成周围 400 km 范围内天气目标的发生、发展,以及强度和位置的实时监测,及时获取 150 km 范围内云、雨等天气目标的回波信息及反演产品,实现天气目标的自动识别、跟踪和分析,极大提高气象保障能力。

利用 PROE 软件建立 SCR-CPD 雷达天馈系统模型,由于设计中存在的圆角、倒角和螺纹孔等一些工艺特征,会严重影响到划分的网格质量,并且会浪费一定的计算资源^[8-9]。因此在分析前根据实际情况对模型进行了简化,然后将其导入到 ANSYS Workbench 软件中,考察其振动强度、振动模态以及船体作为激励源所产生的随机振动情况,简化后的模型如图 1 所示。

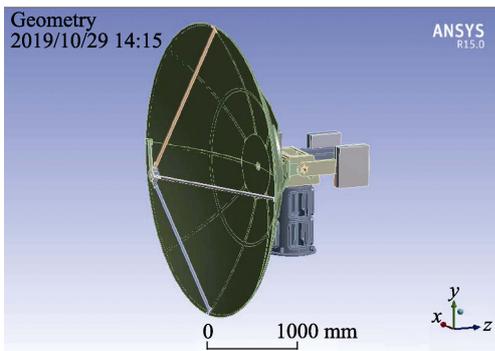


图 1 SCR-CPD 雷达天馈系统模型简化示意
Fig.1 Simplified schematic diagram of SCR-CPD radar antenna feed system model

1.2 SCR-CPD 雷达系统振动环境

船载雷达的振动环境十分复杂,其主要包括涡轮发动机诱发的正弦部分和海水冲击下的随机振动部分,因此振动环境可模拟为以上两部分的叠加之和,其中涡轮发动机诱发的正弦部分振动实验值见表 1。海水冲击下的随机部分和激励值见图 2 和表 2。

表 1 船上桅杆区安装设备的振动实验值^[10]
Tab.1 Vibration experimental values of equipment installed in the ship's mast area^[10]

频率/Hz	位移/mm	加速度/(m·s ⁻²)
2~10	2.5	
10~16	1.0	
16~50		10

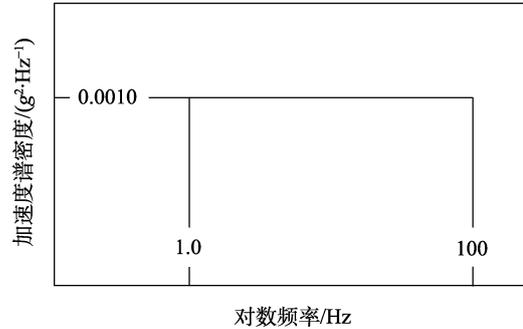


图 2 船随机振动环境^[10]
Fig.2 Random vibration environment of ship^[10]

表 2 安装在舰船上设备的功率谱密度
Tab.2 Power spectral density of equipment installed on ships

频率/Hz	加速度谱密度/(g ² ·Hz ⁻¹)
1~15	0.001
15~16	0.063
16~48	0.001
48~54	0.021
54~100	0.001

1.3 SCR-CPD 雷达系统有限元模型

建立的 SCR-CPD 雷达天馈系统的结构材料采用铝合金和 45 号钢。在进行网格划分时,天线采用 Triangles (三角形网格)划分,其余部分采用四面体或六面体进行网格划分。模型共有 96 868 个单元,193 459 个节点,SCR-CPD 雷达天馈系统有限元模型如图 3 所示。

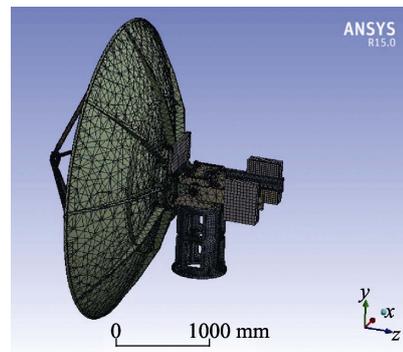


图 3 SCR-CPD 雷达天馈系统有限元模型
Fig.3 Finite element model of SCR-CPD radar antenna feed system

2 SCR-CPD 雷达系统模态分析

由于随机振动响应分析是一种频域分析,因此在分析前首先要对结构进行模态分析^[11-13]。因转台底座与雷达桅顶部安装平面或稳定平台安装平面通过螺

栓连接,故在分析时对转台底座施加固定约束。针对固有频率和阵型,规范建议重点关注前3阶阵型。计算时模态分析取前6阶模态,得到模态云图如图4所示,通过模态云图可以得到前6阶固有频率和阵型,其固有频率见表3。

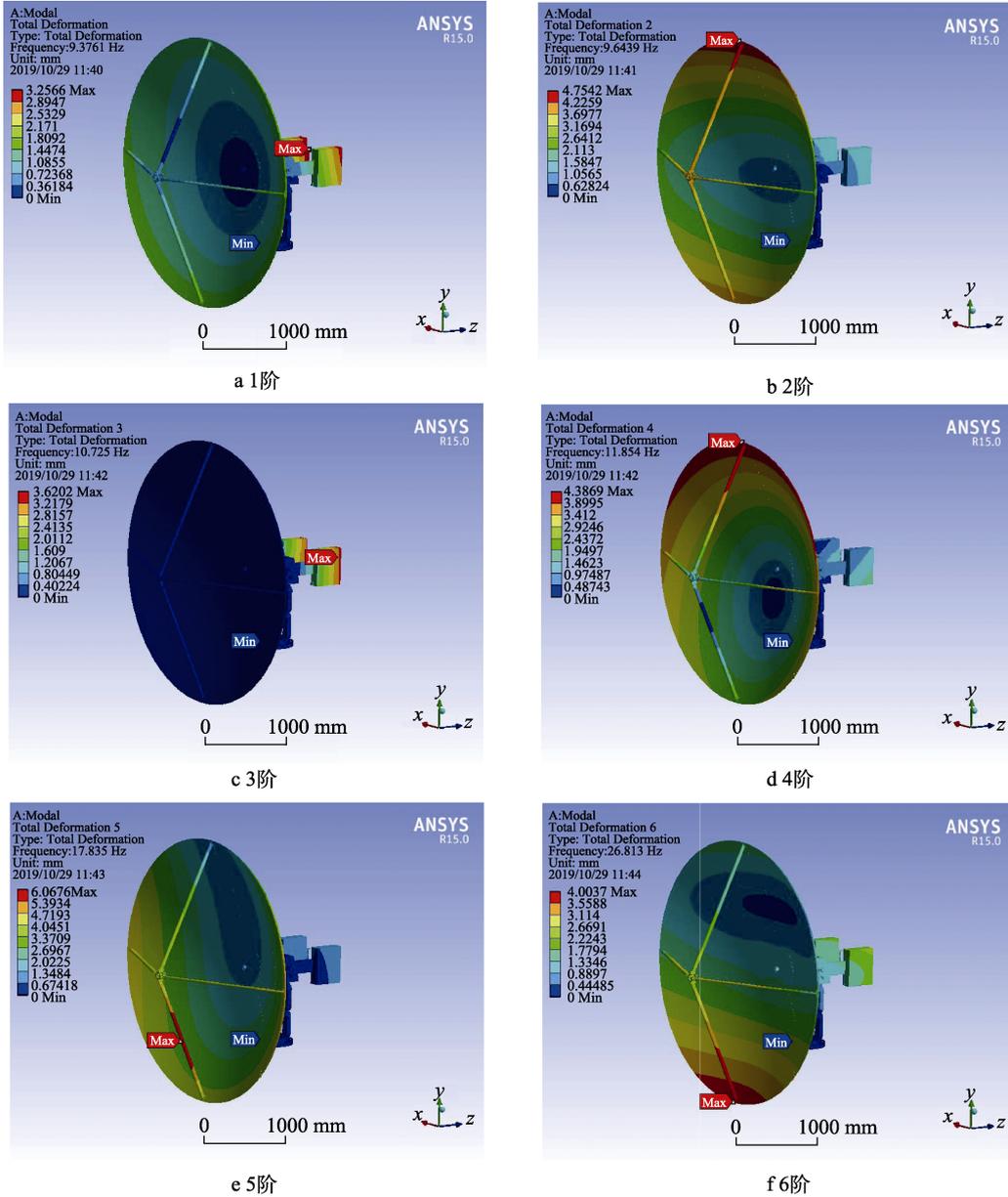


图4 SCR-CPD 雷达天馈系统前6阶模态分布云图

Fig.4 The first 6 order modal distribution clouds of the SCR-CPD radar antenna feed system.

表3 SCR-CPD 雷达天馈系统前6阶模态固有频率
Tab.3 Natural frequencies of the first 6 modes of the SCR-CPD radar antenna feed system

振型	1	2	3	4	5	6
固有频率/Hz	9.376	9.644	10.725	11.854	17.835	26.813

从模态分析的结果可以看出,当SCR-CPD雷达系统结构的前3阶固有频率均有效避开了工作环境的激振区域,船载平台环境下振动的表现主要体现在

天线体和电子设备处,此时会对馈源位置产生一定的影响,进而影响雷达探测精度。为了分析舰船在海上航行时对SCR-CPD雷达振动的影响,因此需要对雷达天馈系统进行随机响应分析计算。

3 SCR-CPD 雷达系统随机振动分析

随机振动分析是一种基于概率统计学理论的谱分析技术,因此也被称为功率谱密度分析^[14-19]。由于

舰船在海上航行时每次受到的振动及冲击载荷都有所不同，具有一定的随机性，因此在对振动进行分析时不能选择瞬态分析的方式进行模拟计算。文中从概率统计学的角度出发，将时间历程的振动和冲击转变为功率谱密度（Power Spectral Density, PSD）函数，通过 PSD 反应随机激励的输入特征，进而进行随机振动分析^[20-21]。

当随机激励施加到系统时，其激励和响应并不是一种确定的时间函数，因此时间历程并不能够用某一种确定的函数来表示^[22]。假设存在一个平稳的随机过程，其单个输入函数 $x(t)$ 、输出函数 $y(t)$ 的谱密度分别为 $S_x(\omega)$ 和 $S_y(\omega)$ ，则存在如下关系^[23]：

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 S_x(\omega) \quad (1)$$

式中： $H(\omega)$ 为频率响应函数。

当存在 n 个输入函数时，式（1）则变为：

$$S_y(\omega) = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n H_r^*(\omega) H_s(\omega) S_{x_r x_s}(\omega) \quad (2)$$

假如系统的响应谱密度 $S_y(\omega)$ 已知，则可求得其均方值为：

$$E[y^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_y(\omega) d\omega \quad (3)$$

3.1 载荷条件

文中对船载雷达结构进行了随机振动分析，功率谱密度类型为加速度功率谱密度。依据船载雷达的振动环境是涡轮发动机诱发的正弦部分和海水冲击下的随机部分的叠加之和，对模型底部安装平面施加基础激励，其激励方向为 Y 向。在 ANSYS Workbench 中显示的激励谱如图 5 所示。

3.2 结果与分析

通过 PSD G Acceleration 命令对模型添加动态力载荷，根据表 2 中的加速度谱密度载荷，经计算可得出天馈系统在 1σ 下的应力和变形分布云图，如图 6 所示。

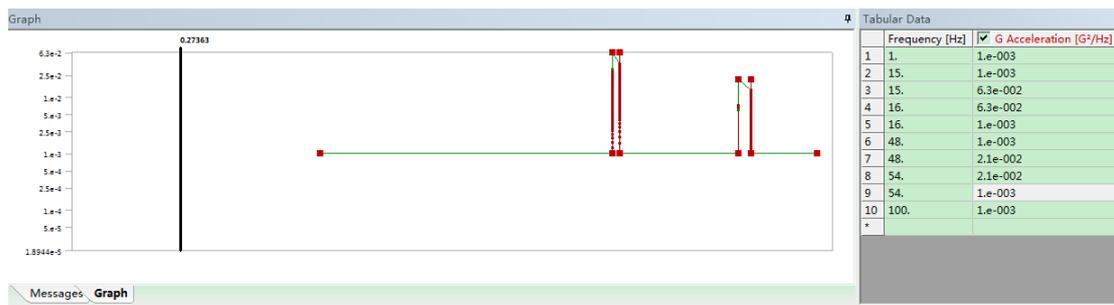


图 5 ANSYS Workbench 中输入的激励谱
Fig.5 Excitation spectrum input in ANSYS Workbench

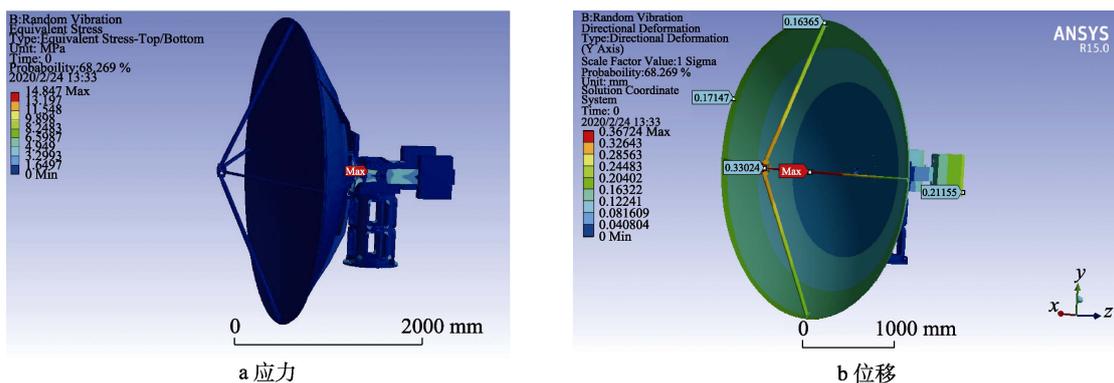


图 6 1σ 下的应力和变形分布云图
Fig.6 Cloud diagram of (a) stress distribution and (b) displacement distribution at 1σ

图 6a 为雷达系统的应力分布图，其 1σ 应力最大值为 14.847 MPa， 3σ 应力最大值为 44.541 MPa。应力较大的地方位于天线与转台连接的过渡支架处，此处的材料为铝合金材质，远低于材料的抗拉强度 315 MPa，因此该结构满足强度要求。实际上，雷达的天线与转台之间通过过渡支架连接，雷达天线及配重等的质量都由过渡支架承担，因此会对过渡支架造

成应力集中的现象。

从图 6b 中可以看出，最大变形位置位于天线的馈源套筒处，且呈现出越靠近天线根部变形量越小的特点。为了能够对雷达结构的振动情况进行更加详细的检测，在天线的馈源套筒、天线边缘、支撑杆根部和电子设备安装处分别取测点 A、B、C、D。则测点 A、B、C、D 点的 Y 向位移分别为 0.33、0.17、0.16、

0.21 mm。由此可知,该雷达系统的变形较小,满足结构的刚度要求。

检测点 A 是安装天线馈源处,其变形或损坏支架影响雷达的探测精度,因此计算它的加速度响应 PSDs,并输出响应谱曲线,如图 7 所示。从天馈系统 PSD 分布图和检测点 A 峰值时的应力、应变表(表 4)可以看出,在频率为 26.8 Hz 时,应力值最大,最大值为 0.1971 MPa。在频率为 11.8 Hz 时,应变值最大,最大值为 0.055 mm,均满足设计指标要求。目前该船载雷达已投入使用某科考船,如图 8 所示,其工作稳定可靠,满足使用要求。

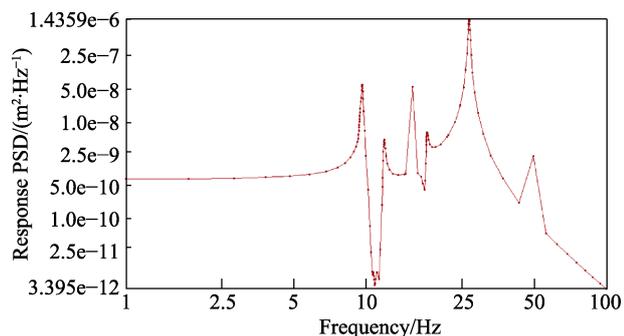


图 7 天馈系统 PSD 分布

Fig.7 PSD distribution of antenna feed system

表 4 检测点的频率与峰值时应力、应变

Tab.4 Frequency and peak stress and strain at detection points

序号	频率/Hz	应力/MPa	频率/Hz	应变/mm
1	9.6263	0.0176	9.3867	0.0179
2	15.592	0.0338	11.854	0.055
3	26.813	0.1971	15.592	0.0406
4	49.669	0.0102	17.815	0.0363



图 8 SCR-CPD 雷达应用场景

Fig.8 Application scenario of SCR-CPD radar

4 结语

文中采用有限元方法对舰船 SCR-CPD 雷达天馈系统进行了结构动力学分析。首先对雷达结构进行模态分析,计算出前 6 阶固有频率;然后以模态分析结

果为基础,充分考虑船载平台的实际振动环境,对雷达结构进行随机振动分析,得到应力 1σ 值。由此分析表明,该 SCR-CPD 雷达系统满足设计指标,由于该雷达在某科考船上工作稳定可靠,亦验证了该分析的准确性。

综上所述,通过有限元法对雷达结构进行动力学分析,不仅可以在设计阶段对结构强度进行校核,也可以为后续雷达结构的设计及优化方面提供一个方向,同时还可以为研究随机振动方面的学者提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 付波, 谢安桓, 赵春宇, 等. 电液伺服随机振动控制系统非线性建模与仿真[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(5): 491-495.
FU Bo, XIE An-heng, ZHAO Chun-yu, et al. Nonlinear Modeling and Simulation of Electro-Hydraulic Servo Random Vibration Control System[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(5): 491-495.
- [2] 朱宜生, 王超, 陈中青. 舰船设备振动试验方法的探讨[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 23-29.
ZHU Yi-sheng, WANG Chao, CHEN Zhong-qing. Discussion on Ship Equipment Vibration Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 23-29.
- [3] 修瑞仙, 肖守讷, 阳光武, 等. 基于 PSD 方法的点焊轨道客车车体随机振动疲劳寿命分析[J]. 设计与研究, 2013, 40(8): 27-31.
XIU Rui-xian, XIAO Shou-ne, YANG Guang-wu, et al. Fatigue Life Analysis of Random Welded Rail Car Body Based on PSD Method[J]. Design and Research, 2013, 40(8): 27-31.
- [4] 郇光周, 陈亚玲, 杨琪, 等. 导弹关键舱段螺栓联接的随机振动响应分析[J]. 设计·工艺, 2017, 6(3): 12-16.
XUN Guang-zhou, CHEN Ya-ling, YANG Qi, et al. Analysis of Random Vibration Response of Bolt Connections in Missile Key Sections[J]. Design & Technology, 2017, 6(3): 12-16.
- [5] 王晓红, 于坤鹏, 董好志. 某机载雷达电信号异常调制的故障分析及设计改进[J]. 电子机械工程, 2019, 35(4): 11-13.
WANG Xiao-hong, YU Kun-peng, DONG Hao-zhi. Fault Analysis and Design Improvement of Abnormal Modulation of Airborne Radar Electrical Signal[J]. Electrical Machinery Engineering, 2019, 35(4): 11-13.
- [6] SCHIPPERS H, VAN TONGEREN J H, KNOTT P, et al. Vibrating Antennas and Compensation Techniques Research in NATO/PTO/SET 087/RTG 50[C]. IEEE Aerospace Conference. NJ: IEEE Service Center, 2007.
- [7] NEWLAND D E. An introduction to random vibrations and spectral analysis[M]. London: Longman, 1984.
- [8] 范晋伟, 陶浩浩, 王鸿亮, 等. 基于 ANSYS Workbench

- 的凸轮轴磨床床身静态性能分析[J]. 制造技术与机床, 2016(10): 53-57.
- FAN Jin-wei, TAO Hao-hao, WANG Hong-liang, et al. Analysis of the Dynamic and Static Performance of the Camshaft Grinder Body Based on ANSYS Workbench[J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2016(10): 53-57.
- [9] 何涛, 朱健毅, 彭克立, 等. 数控高速磨床床身的有限元分析与优化[J]. 机械工程师, 2014(11): 203-204.
- HE Tao, ZHU Jian-yi, PENG Ke-li, et al. Finite Element Analysis and Optimization of CNC High Speed Grinder Bed [J]. Mechanical Engineer, 2014(11): 203-204.
- [10] GJB 150.16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第 16 部分: 振动试验[S].
- GJB 150.16A—2009, Environmental Test Methods for Military Equipment Laboratories Part 16: Vibration Test[S].
- [11] 史文忠, 王丽红, 王小军. 低温贮箱新型绝热支撑结构随机振动模拟分析[J]. 真空与低温, 2015, 21(3): 181-185.
- SHI Wen-zhong, WANG Li-hong, WANG Xiao-jun. Simulation Analysis of Random Vibration of a New Type of Adiabatic Support Structure for Low Temperature Storage Tank[J]. Vacuum & Low Temperature, 2013, 10(4): 181-185.
- [12] 刘龙涛, 李传日, 马甜, 等. 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, 2015, 21(3): 23-29.
- LIU Long-tao, LI Chuan-ri, MA Tian, et al. Application of Finite Element Simulation in Fatigue Analysis of Vibration Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 21(3): 23-29.
- [13] 黄潇. 某机载雷达电子设备随机振动分析[J]. 电子机械工程, 2016, 32(2): 10-12.
- HUANG Xiao. Analysis of Random Vibration of Airborne Radar Electronic Equipment[J]. Electrical Machinery Engineering, 2016, 32(2): 10-12.
- [14] 黄志新. ANSYS workbench 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- HUANG Zhi-xin. ANSYS Workbench 16.0 Super Study Manual[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2016.
- [15] 杨勇, 梁尚明, 贺亚博. 一种麦冬收获机车架的随机振动分析[J]. 西华大学学报, 2019, 38(6): 87-91.
- YANG Yong, LIANG Shang-ming, HE Ya-bo. Analysis of Random Vibration of the Frame of a Winter Wheat Harvester[J]. Journal of Xihua University, 2019, 38(6): 87-91.
- [16] 巫发茂, 蒋龙, 王健, 等. 基于 ANSYS Workbench 某机载电子设备随机振动响应分析[J]. 现代电子技术, 2016, 10(25): 96-99.
- WU Fa-mao, JIANG Long, WANG Jian, et al. Random Vibration Response Analysis of an Airborne Electronic Device Based on ANSYS Workbench[J]. Modern Electronic Technology, 2016, 10(25): 96-99.
- [17] 刘晓波, 顾智平, 王志华. 航空发动机双转子系统的随机激励响应分析[J]. 推进技术, 2012, 33(1): 43-46.
- LIU Xiao-bo, GU Zhi-ping, WANG Zhi-hua. Stochastic Excitation Response Analysis of Aero-engine Dual Rotor System[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(1): 43-46.
- [18] LI H, SUN Y. Random Seismic Response Analysis of Structures in Time Domain: Methodology[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25: 31-36.
- [19] LUTES L D, SARKANI S. Random Vibrations: Analysis of Structural and Mechanical Systems[M]. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [20] 崔海坡, 程恩清. 不同电子封装结构的随机振动分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 91-94.
- CUI Hai-po, CHENG En-qing. Random Vibration Analysis of Different Electronic Packaging Structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 91-94.
- [21] 刘智勇, 李晓峰, 朱冰冰, 等. 基于功率谱密度的两瓶组车载供氢系统随机振动分析[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 69-74.
- LIU Zhi-yong, LI Xiao-feng, ZHU Bing-bing, et al. Random Vibration Analysis of Two-bottle Vehicle-mounted Hydrogen Supply System Based on Power Spectral Density[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 69-74.
- [22] 钱庆, 彭迪. 某雷达有源安装板随机振动分析与试验研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(1): 12-14.
- QIAN Qing, PENG Di. Random Vibration Analysis and Experimental Research of a Radar Active Mounting Plate [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2014(1): 12-14.
- [23] 任翠锋, 牛忠文, 苏涛, 等. 基于某无人机平台的测云雷达结构动力学分析[J]. 测绘通报, 2014(s1): 94-98.
- REN Cui-feng, NIU Zhong-wen, SU Tao, et al. Structural Dynamics Analysis of Cloud Surveying Radar Based on a Drone Platform[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(s1): 94-98.