

飞行器环境适应性设计方法研究与实践

高贵福, 王刚, 孙建亮, 任杰安, 王圣刚, 周春燕, 赵保平

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: **目的** 针对飞行器环境适应性设计不足的现状提出对策。**方法** 分析飞行器环境适应性设计的特点和当前存在的不足, 以某电气设备为对象开展应用研究。**结果** 提出环境适应性设计工作内容、工作流程、设计原则和技术手段等方面的对策。环境适应性设计应采用环境仿真和验证试验相结合的手段, 并逐步形成环境适应性设计准则。**结论** 飞行器环境适应性设计应采用系统工程的思路, 覆盖产品层级、环境因素和研制阶段。技术手段方面应大力推进环境仿真研究和应用, 建立产品环境适应性设计规范。

关键词: 飞行器; 环境适应性设计; 诱发环境

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.06.011

中图分类号: TJ07; TG147

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)06-0049-06

Research and Practice of Environmental Worthiness Design of Flying Object

GAO Gui-fu, WANG Gang, SUN Jian-liang, REN Jie-an, WANG Sheng-gang, ZHOU Chun-yan, ZHAO Bao-ping
(Beijing Mechanical-electronic Engineering Institute, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: Objective To propose countermeasures for insufficient environmental worthiness design of flying object. **Methods** Certain electrical equipment was researched based on features and current shortages in environmental worthiness design of flying object. **Results** Countermeasures on work contents, procedures, principles and means of environmental worthiness design were given, and the work was performed by means of environmental simulation integrated with environmental test. And the design criterions were carried out gradually. **Conclusion** Environmental worthiness design of flying object must be performed in the thought of system engineering, and it must be involved in different product levels, environmental factors and development phases. With regard to technical means, great efforts must be made on environmental simulation study and application. And the design standards for environmental worthiness design should be made.

KEY WORDS: flying object; environmental worthiness design; induced environmental

飞行器各项技战术指标越来越高, 飞行环境也越来越恶劣, 面临的诱发环境问题更为突出。另一方面, 随着飞行器使用地理范围的扩大, 自然环境越来越广泛, 环境适应性指标的要求不断提高。环境适应性是飞行器功能、性能指标以及其他通用质量特性实现的基础, 关系到飞行器在全寿命周期内生存和完成任务的能力。在设计阶段, 设计人员针对环境指标的实现

开展了研究和设计工作, 但是一般系统性不强、不够规范化, 在飞行试验以及装备使用中仍然暴露出不少与环境有关的问题。若由于设计不足在系统级地面环境试验才暴露重大环境适应性问题, 往往造成设计反复、损失巨大。飞行器产品层级多、环境因素多、设计手段有限等因素给型号系统地开展环境适应性设计带来了很大难度。

1 飞行器环境适应性设计概述

1.1 环境适应性设计特点分析

装备(产品)的环境工程是将各种科学技术和工程实践用于减缓各种环境对装备(或产品)效能或提高装备耐环境能力的一门工程学科,包括工程管理、环境分析、环境适应性设计和环境适应性试验与评价^[1-2]。在 GJB 9001B—2009《质量管理体系要求》被列为产品“六性”之一,环境适应性有以下特点。

1) 基础性。环境适应性是产品功能、性质以及其他质量特性实现的基础。飞行器武器只有具备良好的环境适应性,才能正常发挥其作战效能。在飞行试验以及使用环境中遇到的部分可靠性问题,实际上属于环境适应性问题。

2) 层级性。飞行器研制中产品层级可分为系统级、组件/设备级、元器件级等,每一层级产品都存在环境适应性问题,而且环境互相影响。多层次之间的影响关系可以用图 1 所示的模型来描述。

3) 耦合性。各层级产品的环境存在复杂的耦合关系。按照系统理论观点,系统是指互相关联的、互相制约、互相作用的一些部分组织成的具有某种特定功能的综合体。系统都是处于一定的环境中,没有孤立存在的系统。

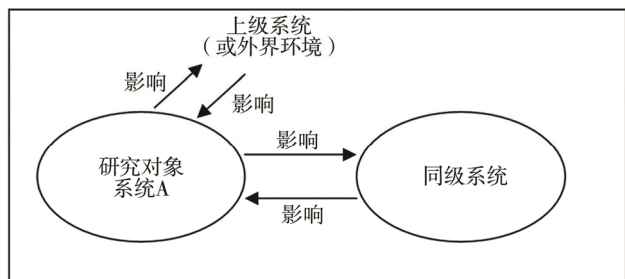


图 1 环境耦合关系模型

如图 1 所示的模型,描述了研究对象系统 A 的环境与上级系统(或外界环境)、其他同级系统的关系。从系统 A 环境适应性设计角度,需关注以下四个方面问题:研究对象 A 应承受上级系统(或外界环境)的环境影响;研究对象 A 能承受自身诱发的环境影响;研究对象 A 对其他同级系统产生影响且不使其破坏;研究对象 A 对上级系统产生影响且不使其破坏。

4) 多学科性。飞行器装备/产品在生命周期内遇到环境因素众多,环境适应性设计涉及的学科领域很广。例如飞机、航天器寿命周期内面临的环境因素包括振动、温度、湿度、加速度、沙尘、霉菌、盐雾等十几种之多。振动环境分析和设计中用到信号处理、

结构动力学、流体力学领域知识;湿度、沙尘、湿度等环境因素则属于气候学范畴;热环境方面则重点需要流体、热物理方面的专业基础。因此环境适应性设计工作,尤其对于系统级产品的环境适应性设计,通常依靠多专业协同工作来完成。

1.2 环境适应性设计不足现状分析

当前阶段,飞行器型号研制中环境适应性设计存在不足,主要体现在以下几个方面。

1) 型号工作中暴露出的环境适应性设计质量问题突出。有一项统计表明,把某类飞行器地面环境中暴露出质量问题按照问题原因分为“设计、工艺、元器件、软件、操作、管理、其他”等几类,其中“设计”类问题占比在 20%以上,连续 5 年持续占据首位。环境适应性设计问题较突出,这与前些年我国型号研制重点放在功能和性能指标的实现方面,对环境适应性重视程度不足有关。

2) 环境工程体系中缺少环境适应性设计类规范。2001 年,我国首次颁布了装备环境工程顶层标准 GJB 4239《装备环境工程通用要求》,但是在这之后,底层标准编制没有持续开展。普遍缺少针对性强的产品环境适应性设计准则,部分产品的环境适应性设计准则包含在“可靠性设计准则”中。目前国内有少部分单位开始研究和编制环境设计准则或规范。某项针对航天产品环境工程使用标准使用状况的统计显示,环境试验类占统计标准总量的 54%,环境工程管理标准占 34%,环境分析标准占 12%,环境适应性设计以及环境适应性评价的标准则为空白。

3) 环境仿真技术面临应用瓶颈。环境仿真技术(也称为“虚拟环境试验”、“环境数字仿真”)是基于数字仿真技术,对装备在实际环境中产生的环境效应及装备性能影响进行分析、评估和预测技术。作为新型的以计算机信息数字处理技术为基础的设计手段,环境仿真有着巨大优势,有成本低、效率高、状态全、不依赖实物等优点,但是目前环境仿真技术成熟度不高,工程应用不广,没有充分发挥其作为环境适应性设计手段的作用。

4) 不同层级、不同专业协同设计不足。对于航天产品这样复杂系统的环境适应性设计,是在多层次(系统级、设备级和元器件级等)、多专业等不同维度上协同实现的,需要多方人员动态、迭代式的设计,直至设计闭环、验证闭环。目前环境适应性设计工作往往相对孤立的开展,甚至存在与型号工作相脱节的现象。多专业协同的环境适应性设计,需要多方面基础作为支撑,例如合理的环境适应性设计流程、必要的技术手段和专业配置等,这方面目前存在不同程度欠缺。

2 飞行器环境适应性设计对策研究

2.1 环境适应性设计内容

开展环境适应性工作，首先应明确工作内容，避免设计疏漏。根据系统工程理论“霍尔三维结构”分析方法^[3]，三维空间的点表示环境适应性设计工作内容，如图 2 所示。

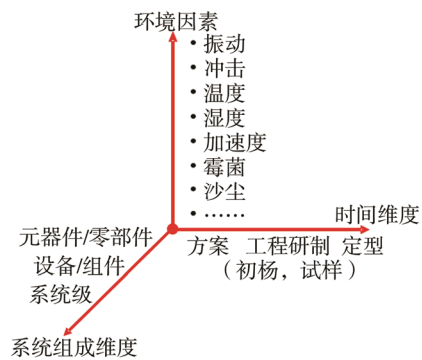


图 2 环境适应性设计工作内容的三维结构

对每个维度内涵解释如下。

- 1) 时间维度。型号研制中的方案阶段、工程研制阶段、定型阶段等每个研制阶段都要开展工作，各阶段工作重点和方法不同，通过不断迭代最终实现环境指标。
- 2) 系统组成维度。系统级、设备/组件级、元器件级每层级都要开展环境适应性工作。系统级的环境指标在设计中要分解到每个层级。各层级之间环境指标相互影响和制约，通过“系统-子系统-底层系统-子系统-系统”的多轮迭代，最终实现系统级指标。
- 3) 环境因素维度。针对装备（产品）寿命周期内遇到所有环境因素，包括自然因素和诱发的环境因素，都要开展设计工作。若耦合的环境因素会加剧单一因素环境的破坏效应，则需要针对多因素耦合环境开展设计，如热振动、热噪声、声振环境。

2.2 环境适应性设计流程

环境适应性设计工作必须融合在产品设计中，对于某一产品的环境适应性设计工作，通用工作流程如图 3 所示。

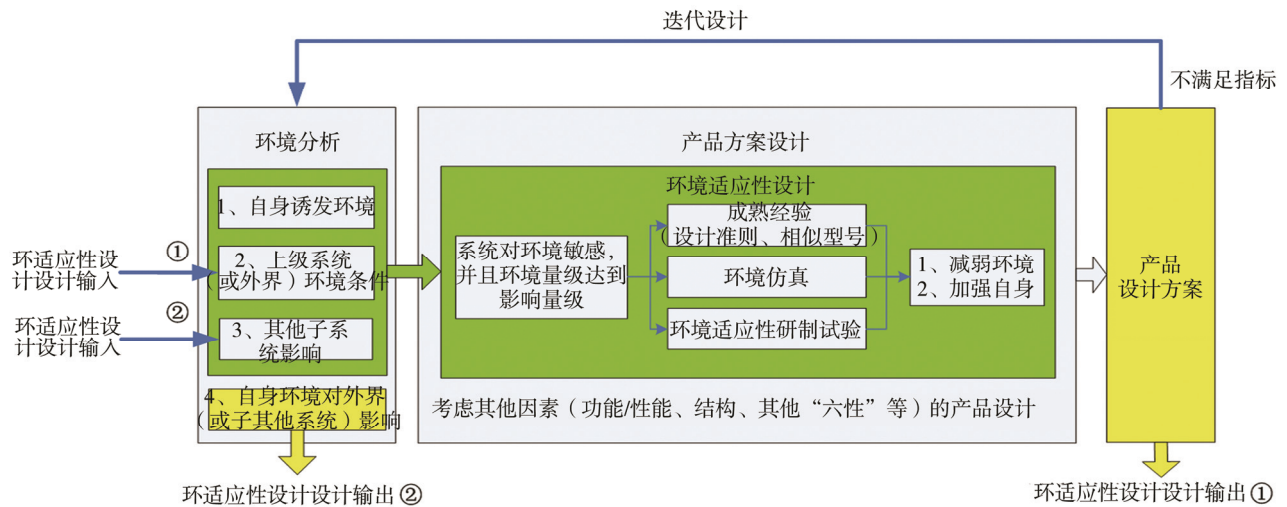


图 3 环境适应性设计工作流程

对完整设计过程的说明如下所述。

- 1) 界定任务范围：确定研究对象，某设备。
- 2) 任务分析：任务是根据功能、性能、结构以及“七性”输入要求，完成设备方案设计。在环境适应性方面设计输入、输出见图 3。
- 3) 系统功能分析：从功能/性能要求出发，分析、设计产品内部的功能模块，确定子系统功能、特性和指标，此阶段可以得到“自身诱发环境”、“自身环境对上级系统或其他同级子系统”的环境影响情况。
- 4) 系统综合：针对功能/性能、结构以及“七性”要求进行综合分析和设计，得到系统综合后的设计要求。
- 5) 系统权衡优化：采取标准规范、设计准则、

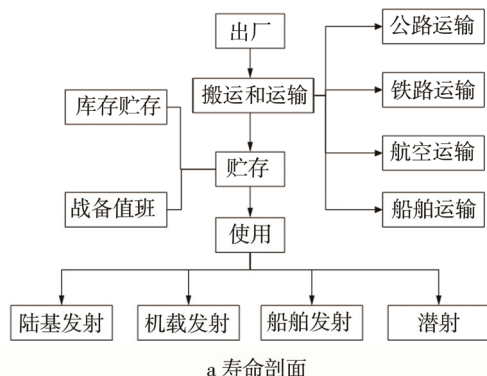
- 相似型号研制经验、仿真计算和验证试验等技术手段，进行多方案产品设计，并优选方案。
 - 6) 系统决策：方案评估，确定方案。
 - 7) 系统实施：提交产品方案至上级系统，进入后续研制。
- 比较容易忽略之处是图 3 中的设计输入①和设计输出②。对于系统级产品而言，就是装备与平台之间的相互影响，例如舰船及舰船上装备的电磁环境；对于设备而言，就是设备间的诱发环境影响，如设备发热、振动或者物质挥发对附近设备的影响。设计者既要考虑自身受到的影响及设计对策，同时更重要的是要提出自身对外界的影响，用于其他设备或系统级环境适应性设计的输入，型号经验表明，

这方面容易疏漏。

2.3 环境适应性设计原则

每个层级的产品在开展环境适应性工作时,应遵循下面的原则。

1) 层级覆盖。环境适应设计工作在系统级、设备/组件级、元器件级层级都要开展。若某一层级的工作开展不充分,不仅影响产品自身,而且会影响到系统级或其他子系统。越是底层的产品,越应该进行



充分的分析,加以重视^[4]。

2) 环境因素剪裁原则。覆盖性:环境因素包括产品全寿命周期的自然环境因素和任务剖面的诱发环境,典型的寿命剖面 and 任务剖面见图4。对于设备级产品,特别注意环境因素应该覆盖图3“环境分析”中的四方面内容。避免过设计:环境适应性设计的环境因素须满足剖面中存在该环境、系统功能对环境敏感、环境因素量值达到足以影响系统功能的一定量值等三个必要条件^[5]。

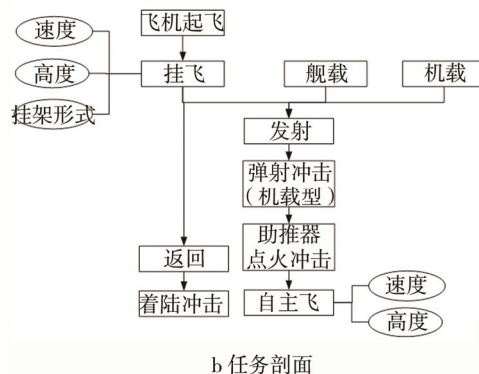


图4 飞行器环境分析

3) 阶段覆盖。环境适应性设计应覆盖产品方案、工程研制、定型各阶段。方案阶段重点梳理环境剖面、环境因素和量值,重点研究系统级的环境适应性设计方案。工程研制阶段,针对系统级、子系统开展设计,迭代完善系统级设计,形成闭合的、完整的详细方案。定型阶段则应根据研制试验中暴露出的问题完善设计。

4) 关注系统间耦合。关注系统与子系统、子系统之间对环境因素间的耦合和传递关系,避免设计疏漏。如设备工作发热源、发动机振动、热防护结构相变挥发、电磁辐射、安装结构对振动的放大效应等。另外,应该注重系统级环境适应性设计实现整体最优,若设备级产品设计代价太大或难以实现,则可在上级系统采取措施,如设备热环境问题可在舱段级采取冷却措施。

5) 工艺影响。工艺因素会带来环境适应性问题。如结构安装配合差异造成振动特性变化、热防护层加工误差影响防护效果。设计中要梳理可能的工艺影响,并给出解决措施,必要时可通过筛选方式保证设计有效。

6) 规避原则^[5]。设计中要考虑经济性和可实现性,设计成本过高则应考虑采用规避策略。例如对于战场环境、高电磁武器、特别恶劣天气可采取规避措施。

2.4 环境适应性设计手段

环境适应设计的技术手段及其特点见表1,应该将三类技术手段组合使用。目前型号研制普遍使用手

段见表2。

表1 环境适应性设计技术手段比较

序号	技术手段	优点	不足
1	标准规范、相似型号	效率高; 低成本。	继承性差的产品不适用。
2	环境仿真	不依赖实物; 模拟状态多; 可重复; 成本低。	建模难度大; 只适用于振动、温度等部分环境因素; 存在仿真精度和验证可信性的不确定性。
3	试验验证	验证真实性强; 可信度高。	成本(人力、经费、周期)高; 状态覆盖性受限。研制早期不适用。

表2 不同环境因素适应性设计应用

环境因素	标准规范相似型号	环境仿真	试验验证
振动	●	●	●
冲击	●		●
温度	●	●	●
电磁	●	●	●
湿度	●		●
低气压	●		●
盐雾	●		●
霉菌	●		●
沙尘	●		●
湿热	●		●
淋雨	●		●

环境仿真技术在方案阶段，可以进行环境预示。研制阶段，在产品数字模拟的基础上，根据环境指标和进行仿真分析，响应预测和环境影响评估，进行多方案比较，也可进行环境试验的辅助设计和试验效果预测。振动、温度仿真应注重产品模型库和产品特性数据的积累。环境仿真具有成本低、效率高、不依赖

实物等优点，便于早期设计应用，应作为后续研究和发展的重点^[6-7]。

环境适应性设计准则编制方面，我国在航空航天领域经历几十年的型号研制工作，已经从仿制过渡到自主创新阶段，已经基本具备了编制相关规范和标准的基础。如图 5 所示，给出了飞行器环境工程规范体系建议。

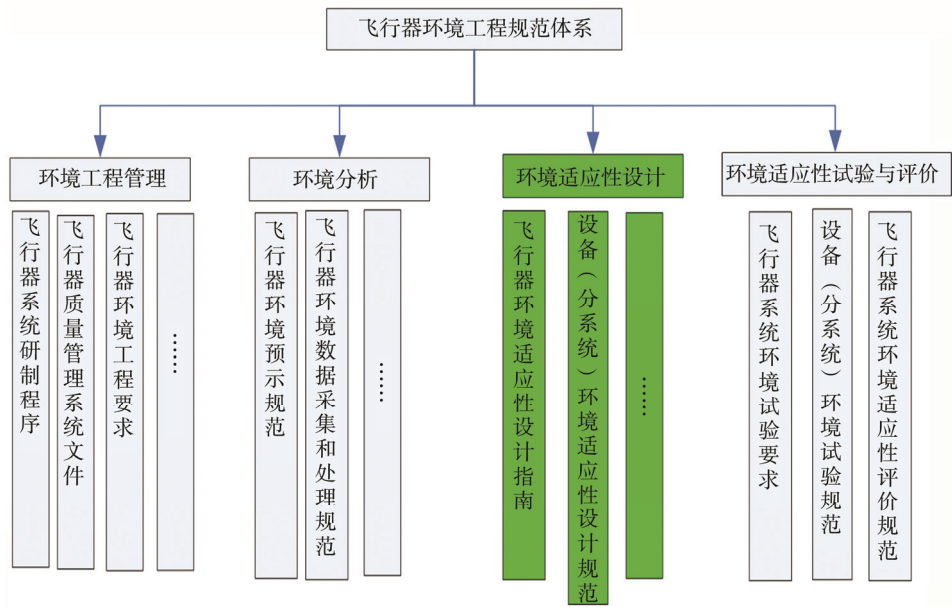


图 5 飞行器环境工程规范体系

3 环境适应性设计应用案例

某飞行器电气设备处于封闭的舱内，自身工作热量大，面临的振动环境恶劣，自身为电磁辐射源。该设备处于工程研制初样阶段，已经具有首轮样机。采用环境仿真和验证试验相结合的方式，针对振动、温度和电磁

环境开展设计。提出结构、减震、电磁屏蔽等多项设计改进建议；同时明确其热环境方面、电磁方面对外界的影响，提出其下一级产品（板级）的振动环境条件。研究该电子产品的环境适应性设计准则，编制环境适应性设计规范，为后续产品的环境适应性设计提供技术支撑。其工作流程见图 6，环境仿真和试验验证结果见图 7。

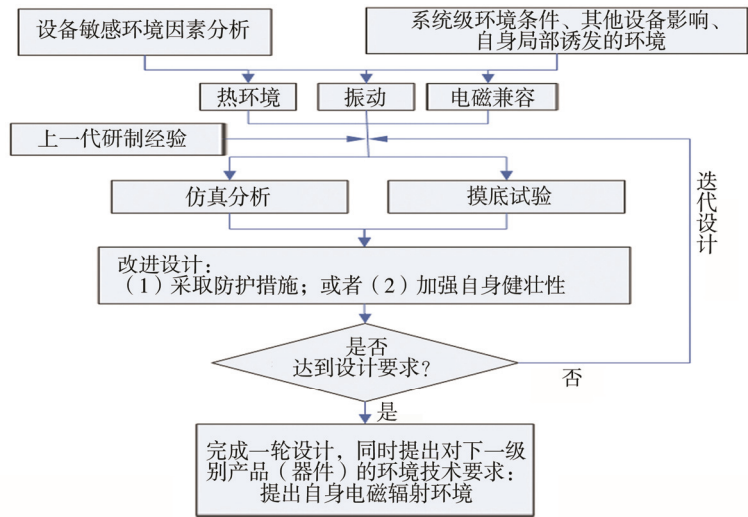
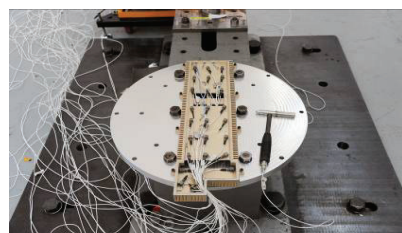
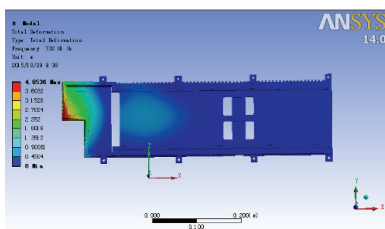


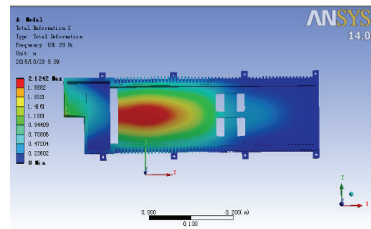
图 6 某电气设备环境适应性设计流程



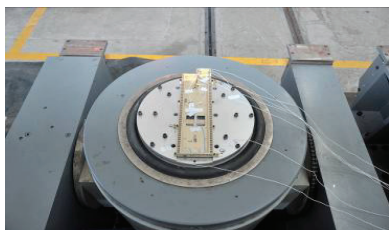
a 模态试验现场(壳体)



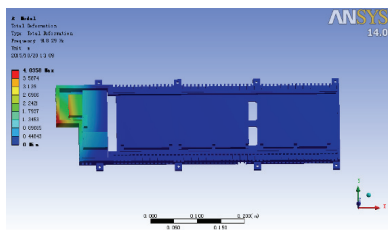
b 模态分析(壳体一阶)



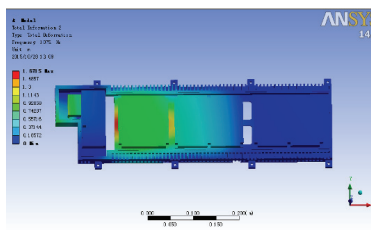
c 壳体模态分析(壳体二阶)



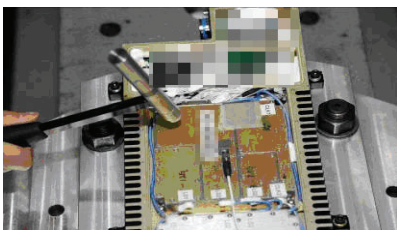
d 随机振动试验(壳体)



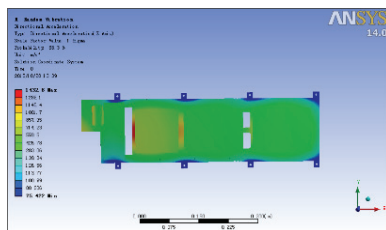
e 模态分析(壳体+模块一阶)



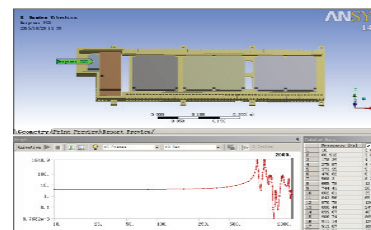
f 模态分析(壳体+模块二阶)



g 模态试验现场(壳体+模块)



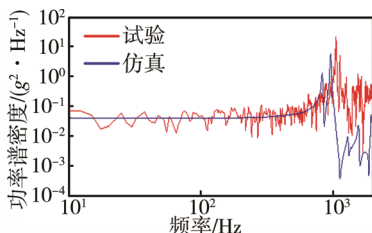
h 随机振动试验仿真



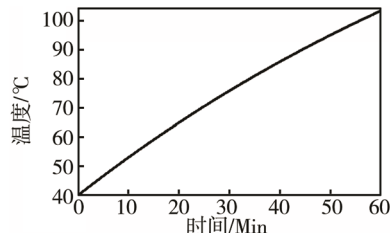
i 随机振动试验动响应曲线



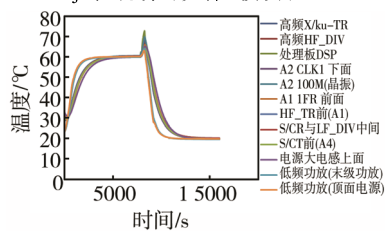
j 验现场(壳体+模块)



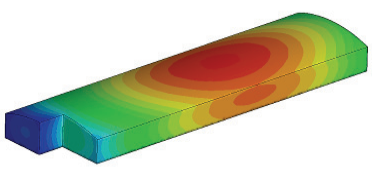
k 振动试验结果与计算结果比较



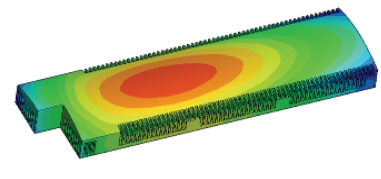
l 设备温度变化



m 高温工作试验曲线(有肋片)



n 温度试验曲线(无肋片)



o 温度仿真云图(有肋片)

图7 某电气设备环境适应性设计

4 结语

加强环境适应设计是提高飞行器环境适应性水平的根本之道,文中从系统工程角度提出了飞行器环境适应性设计的整体思路,从工作内容、工作流程、设计原则和技术手段等方面的提出了对策,并给出型号应用案例。环境适应性设计的开展宜采用环境仿真和验证试验相结合的方式,并逐步建立起产品的环境适应性设计规范(或准则)。环境适应性设计工作开展的系统性强,环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价四方面联系紧密、互为支撑。环境适应性设计水平的提升很大程度有赖于环境工程工作的全面推进。

参考文献:

- [1] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
- [2] MIL-STD- 810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [3] 赵少奎, 杨永太. 工程系统工程导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 51—57.
- [5] 赵保平, 张韬, 孙建亮, 等. 航天复杂产品研发中的环境适应性设计[J]. 强度与环境, 2013, 40(5): 1—9.
- [6] 朱蕾, 王连杰, 许明, 等. 装备环境适应性仿真技术的发展思路探讨[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 91—97.
- [7] 吴勋, 周巍. 导弹武器系统开展环境适应性研究的思考[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 81—85.