

# 装备环境适应性设计思想变革与实践

熊长武

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

**摘要:** **目的** 推行装备现代环境适应性设计思想, 构建环境适应性设计技术与能力体系, 提升装备环境适应性设计水平。**方法** 通过对比传统与现代环境适应性设计思想的优缺点, 阐明环境适应性设计思想变革的必要性, 通过梳理、建设环境适应性设计技术与能力体系, 并在装备研制过程中推广应用, 促进现代环境适应性设计思想实践。**结果** 工程设计分析与试验结果表明, 高低温与振动工作极限指标提升20%~30%, 基本可靠性提升57%, 装备环境适应能力明显超出研制要求。**结论** 现代环境适应性设计思想及其技术与能力体系在装备研制工作中将发挥巨大作用。

**关键词:** 电子装备; 环境适应性; 设计思想; 技术体系; 能力体系; 变革与实践

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2014.02.005

**中图分类号:** E911 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)02-0020-06

## Transformation and Practice of Equipment Environmental Adaptability Design Ideas

XIONG Chang-wu

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**ABSTRACT: Objective** To implement modern equipment environmental adaptability design ideas, establish environment adaptability design technology and capability system, and enhance the level of equipment environment adaptability design. **Methods** By comparing the traditional and modern environmental adaptability design ideas, the necessity of environmental adaptability design ideas transformation was illustrated. By summarizing, developing and applying the environment adaptability design technology and capability system in the equipment development process, environmental adaptability design ideas practice was promoted. **Results** The engineering design, analysis and test results showed that the limit index of low temperature, high temperature and vibration were increased by 20% ~ 30%, and the basic reliability was improved by 57%. The equipment environmental adaptability exceeded the design requirements

收稿日期: 2013-11-01; 修订日期: 2013-12-16

Received: 2013-11-01; Revised: 2013-12-16

作者简介: 熊长武(1975-), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航空电子装备结构设计。

**Biography:** XIONG Chang-wu(1975-), Male, from Chongqing, Master, Senior engineer, Research focus: aviation electronic equipment structure and environment adaptability design.

obviously. **Conclusion** The modern environmental adaptability design ideas, technology and capability system will play a huge role in equipment development.

**KEY WORDS:** electronic equipment; environmental adaptability; design ideas; technology system; capability system; transformation and practice.

环境适应性是装备在其寿命期内可能遇到的各种环境条件作用下能实现其所有预定功能和性能而不被破坏的能力,是装备的重要质量特性之一<sup>[1]</sup>。装备环境适应性设计是确保装备在可能的使用环境中发挥应有效能的重要环节,已经上升到与装备性能设计同等重要的地位。GJB 4239—2001《装备环境工程通用要求》中明确指出,承制方应根据规定的环境适应性要求,在装备研制过程中开展环境适应性设计。GJB150A—2009《军用装备试验室环境试验方法》也明确要求,应在装备论证、研制、生产和使用过程中开展装备环境工程工作,确定合理的环境适应性要求,并以合理的费用确保装备满足规定的环境适应性要求。

环境适应性设计一般从两方面着手:采取改善环境或减缓环境影响的措施;选用耐环境能力强的结构、材料、元器件和工艺<sup>[2]</sup>。随着使用平台与环境的不断发展,军用电子装备面临的环境条件越发严酷复杂和多样化。传统的环境适应性设计、验证技术面临巨大的瓶颈和挑战,环境适应性设计已成为影响电子装备研制成败的关键专题技术之一。如新一代军用机载电子设备所需要承受的振动量级由5~10 g(RMS)上升到15~30 g(RMS),面临95℃以上的高温考验,必需具备高山、沙漠、海洋、航空等全域恶劣环境适应能力,同时要求装备总质量和尺寸减小50%以上,寿命期从传统的500~1200飞行小时提高到5000~8000飞行小时。可以说贯彻装备环境工程工作要求,解决热、振、电磁兼容与自然环境防护等环境适应性设计瓶颈问题的能力高低,直接决定了装备研制技术水平。长期的工程实践证明,转变环境适应性设计思想,从环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价等多方面进行设计思想变革,发展独立的装备环境适应性设计与能力体系,建立装备环境适应性技术研发中心,培养环境适应性设计队伍,在产品设计中贯彻环境适应性“三化”思想,是提升装备环境适应性设计综合能力的有效途径。

## 1 传统环境适应性设计思想

传统的环境适应性设计思想仅为按特定平台及使用环境要求设计、试验和验收产品,即一旦产品在使用平台上的主要诱发环境(包括环境类型和量值)确定之后,便将其作为环境条件纳入研制合同或成品技术协议的环境要求条款中,以此作为产品研制环境适应性设计和各种环境试验的依据,同时也是产品设计定型和生产验收过程中判断环境适应性和符合性的依据<sup>[3]</sup>。

首先,这是一种被动式的环境适应性设计思想,承制单位只会按照研制合同或成品技术协议的要求设计产品,订购方或使用方将按同样的要求验收产品,只要研制产品通过环境适应性试验则表明环境适应性设计满足要求。在这种被动式设计思想指导下研制产品,必然会存在设计人员对输入条件及试验方法理解不到位,对产品质量观念认识不足,经验能力欠缺,以及受经费、进度等客观因素限制的弊端。当环境适应性验证一旦达到或勉强达到要求后,环境适应性设计工作即告结束,不会主动将环境适应性水平进一步提高或留有一定余量。其次,这是一种经验式的环境适应性设计思想,因为传统的环境适应性设计能否达标以最终是否通过试验为判断,不需要通过详细的环境适应性设计分析、环境响应特性调查、环境适应性预示与评估等过程以知道产品的真实环境适应能力,因此没有严格的设计流程,往往根据设计师的经验开展环境适应性设计工作。当设计出现偏差,试验出现问题时,已经无法进行方案性改动,只有采取各种各样的弥补措施,或者寻找经费、进度、样机不足等种种理由要求减少环境鉴定试验的项目或降低试验中的环境条件。最后,这是一种单一式的环境适应性设计思想,由于没有考虑平台发展趋势,没有在装备环境适应方面进行型谱规划,没有贯彻通用化、系列化、模块化等“三化”设计要求,装备环境适应能力受到限制,当平台

发生变化(如新增型号或改进型号)时,诱发环境也会发生改变,因而必须针对新的诱发环境重新设计产品,或对原产品的设计作较大更改,同时还要按新的环境条件进行环境鉴定试验。

总之,传统的环境适应性设计思想是典型的被动式、经验式、单一式的设计思想,这种环境适应性设计思想的后果是增加武器装备研制经费,延长新型号装备研制周期,同时不利于产品环境适应性能力提升,造成装备现场环境故障频繁,后勤保障费用增加,甚至影响装备作战任务的完成。

## 2 环境适应性设计思想变革

现代环境适应性设计思想较传统环境适应性设计思想发生了很大的变革。现代环境适应性设计思想要求按最高、最广、通用化、系列化的环境适应能力设计产品。这种设计思想会对产品现在及未来装载平台、使用及应用环境中可能遇到的环境因素进行调查分析,在市场允许的情况下应用当前的最新材料、器件、设计、工艺和制造水平,将产品的环境适应能力提高到目前可能达到的最高水平。针对不同等级的装载平台和应用环境在方案设计阶段就对装备环境适应性进行型谱规划,也就是在装备环境适应性设计领域引入通用化、系列化、模块化等“三化”设计思想。这种环境适应性设计思想重视研制试验与使用验证,强调试验本身是一种观测,而不是考核手段,通过模拟激化试验暴露潜在问题,提升产品健壮性,要求在产品研制过程中开展大量的装备环境工程工作,强调技术突破和观念转变,通过分析与试验对装备环境适应能力进行精确的预示与评估。20世纪90年代以来,这种设计思想开始被以美国波音公司为代表的国外民用工业界大力推行,通过这种设计思想获得的产品,由于其全域环境适应性能力很强,因此可以在相对较长的一段时间内供多装载平台、多应用环境作为一种货架选用,避免重复研制或反复改进。这种方法显然可以节省研制、试验经费,提高装备或平台的更新换代速度,提高市场竞争能力。

## 3 环境适应性设计技术与能力体系建设

要进行环境适应性设计思想变革,有效贯彻现

代环境适应性设计理念,必须要发展并建设一套完整的环境适应性设计技术体系和能力保障条件,通过产品研发实践积累工程经验。美国新一代F-22, F-35 战斗机航电设备已经实现了信息电子装备的高可靠性,其环境适应性设计技术是建立在技术突破和观念改变的基础之上的,特别是技术与能力体系建设整体布局早在20世纪80年代就已展开,并随着多学科、多层次科技的发展而全面实现<sup>[4]</sup>。如其采用的微通道液冷、环路热管等新型热控技术、高强度复合材料、减振阻尼合金应用等新型减重减振设计技术,会使新一代信息电子装备的环境适应性能力得到极大的提升,相应地,其体积、质量和工作时对能源的需求都会大幅减少。我国信息电子装备环境适应性需求和问题也随着军队现代化建设的要求而日益突出,然而装备环境工程专业的发展,相对于可靠性和维修性等其他工程专业来说还比较缓慢<sup>[5]</sup>,环境适应性设计能力水平跨越式发展的问题还不能得到解决。加快环境适应性技术与能力体系建设,从总体设计思想和方法上拓宽环境适应性设计思路,是一个迫在眉睫的任务。

### 3.1 环境适应性能力体系梳理

装备研制单位应根据研制产品特点及任务需求建设完整的环境适应性设计能力体系。特别是随着我国军用电子装备应用系统向高山、海洋、沙漠、航空、航天等全域恶劣环境平台方向发展,需要新一代电子装备具有全域恶劣环境适应性,能在无人值守的情况下进行长时、高可靠性的工作。总体来看,需要具备以下环境适应性设计能力。

1)先进的装备环境工程管理能力,能对环境适应性设计、环境信息进行科学合理的管理及综合效能评估。

2)全面的装备机械自然环境适应性设计、预示、诊断能力,样件制作、测试验证能力。

3)系统的表面防护、热、振、电磁兼容等关键技术攻关与新型环境控制技术研发能力。

4)充分的航空、航天、海洋、高山、沙漠等复杂全域环境适应性检测、试验能力。

### 3.2 环境适应性技术体系梳理

随着环境适应性设计重要性的提高,将环境适

性作为一门相对独立的学科,建立相对完善的环境适应性设计技术体系,将其与传统电子装备“五性”设计相并列,提出电子装备“六性”(可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性、环境适应性)设计,在产品设计师系统中组建环境适应性设计师队伍的呼声越来越高。环境适应性设计历来作为结构工艺设计技术的重要组成部分,其独立技术体系及研发流程尚待完善。环境适应性设计技术虽不是新兴学科,但近来其新技术却不断涌现,主要包括以下专题设计技术。

1) 热设计技术,主要包括自然散热、风冷散热、液冷散热以及相变、蒸发、热管、热电、微通道、射流等新型热控技术、热仿真分析、预示技术以及热测试与评估技术等。

2) 抗冲振设计技术,主要包括结构刚强度、减振与加固设计技术、动力学仿真分析、测试与评估技术等。

3) 电磁兼容设计技术:主要包括电磁兼容结构设计、防护与加固技术、电磁兼容仿真分析、测试与评估技术等。

4) 自然环境防护技术,主要包括三防设计、抗太阳辐射、淋雨、低气压密封、防护设计以及高频防护设计技术,自然环境防护能力分析、数据库建设、测试与评估技术等。

5) 新材料应用技术,主要是新型结构、功能材料工程化应用中的环境适应性设计技术。

### 3.3 建设环境适应性技术研发中心

要快速提高环境适应性设计能力,建立完整的环境适应性设计技术体系,一个很好的途径是以结构、工艺设计师中擅长热、振、自然环境防护技术的专题技术人员牵头,培养环境适应性专题设计技术人员,建设军用电子装备环境适应性设计技术研发中心,建设包括热、振、EMC专题以及自然环境防护专题环境适应性设计软硬件的能力支撑条件。国内华为、中兴等大型电子、通信公司已经建立了类似的环境适应性实验室,比如华为的中央研究院热设计部。台湾的军品研发机构“中科院”也建立了类似的中央研究院,从事环境适应性共性专题技术的基础研发工作。环境适应性设计技术研发中心一方面可保障在研装备的研制工作,另一方面作为技术创新

平台,可开展热、振、电磁兼容、自然环境防护等关键技术攻关与新型环境控制技术的研发工作,从而大力提升装备环境适应性设计技术水平。

## 4 环境适应性设计实践

在某大型运输机航电系统的研制过程中,结合军民两用、可靠性指标呈指数增长的要求,项目组尝试建立了专门的环境适应性设计师队伍,首次系统性地开展了装备环境适应性设计工作,贯彻环境适应性“三化”设计,经综合验证与评价,取得了明显成效。

### 4.1 环境工程管理

在国内以往的型号研制中,环境工程管理工作更多地依赖于研制单位及设计师系统的自觉行为<sup>[6]</sup>。如今在项目的论证、研制、生产和使用过程中全面加强环境工程管理工作,对要求开展的装备环境工程工作内容进行明确规定并纳入了型号研制计划。按要求和计划开展了装备环境工程工作评审,建立并运行了环境信息管理系统,为环境适应性设计、试验与评价等提供充分的信息支持,严格按照要求选择供应方,以保证其提供产品的环境适应性满足规定要求。

为规范项目研制各阶段环境工程技术文件的编写,环境适应性设计师队伍专门编制了环境工程系列模板文件以指导具体工作的开展,典型的有:环境工程工作计划、环境适应性要求、环境适应性工作要求、环境适应性设计准则、环境适应性设计报告、热设计和分析报告、强度与耐久性分析报告、环境适应性预计报告、环境试验与评价计划、环境响应特性调查试验大纲、环境响应特性调查试验报告、环境适应性类比分析报告、环境试验大纲、环境鉴定试验大纲、使用环境试验大纲、使用环境文件、首飞安全试验大纲、环境适应性设计评价报告等。

### 4.2 环境分析

作为新型飞机平台,系统总体及订购方通过环境分析,明确了装备寿命期环境剖面和环境适应性要求,并在装备研制技术协议中明确表述。承制方通过环境分析,进一步明确了环境条件的类型、量值和验证方法,并制定了研制各阶段代替实际产品试

验的方案。主要开展了以下工作。

1) 按要求系统地分析了各种环境对装备使用性能、安全性及可靠性等的影响, 确定振动、高低温为环境适应性关键因素。根据军民两用特点, 结合国外同类飞行器、军用运输机典型环境技术条件开展环境分析工作, 得到适用性更加广泛的环境适应性要求。同时根据设备安装集成的复杂性, 通过环境调查对平台环境条件经过设备架传递后的量值进行了载荷分解, 得到了更加准确的使用环境条件。

2) 根据环境适应性关键因素确定通过物理样机进行环境响应特性调查试验, 通过原理样机进行研制强化摸底试验, 通过类比工艺样件进行自然环境试验, 其它环境适应性项目通过设计校核予以保证, 最终通过真实样机进行环境适应性鉴定试验的综合产品研制试验, 以最大限度地降低环境适应性研制成本, 缩短研制周期, 确保研制质量。

### 4.3 环境适应性设计

根据环境工程工作要求开展详细的环境适应性设计工作, 同时将可靠性融入前期设计。主要开展了以下工作。

1) 制定环境适应性设计准则, 分别针对温度环境适应性、机械环境适应性、自然环境适应性对元器件的选用、控制和筛选、结构设计、电路设计、工艺设计作出详细规定, 以指导设计人员开展装备详细的设计工作。

2) 根据环境适应性设计准则开展详细的环境适应性设计工作, 特别是利用先进的仿真分析工具进行热应力分析与机械应力分析, 对装备的环境适应性进行分析与评估, 同时将可靠性分析融入前期设计<sup>[7]</sup>, 不断发现设计薄弱环节, 通过多次迭代实现多学科综合优化设计, 设计、分析流程如图1所示。

3) 根据装备未来可能存在的使用环境要求, 对产品进行环境适应性“三化”设计, 针对自然散热与强迫风冷散热、硬振与减振安装、民用与机载电磁兼容等级规划了系列化型谱。

### 4.4 环境试验与评价

在项目研制过程中, 按照环境工程工作计划开展了多轮环境试验与评价工作。

1) 制定了环境试验与评价计划, 对研制周期内

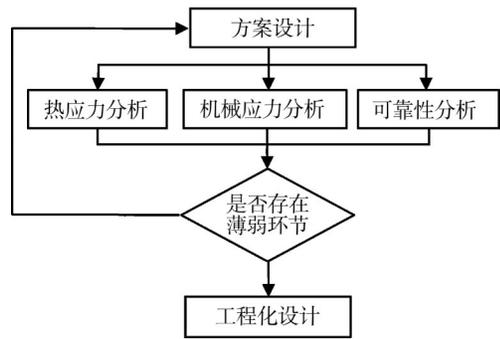


图1 环境适应性与可靠性设计流程

Fig.1 Environmental adaptability and reliability design flowchart

所需进行的环境试验与评价项目进行了充分策划, 统一安排了有关试验与评价工作, 特别是试验样件的设计制作、试验方案的确定等。

2) 开展了充分的环境适应性研制试验, 通过物理样机进行环境响应特性调查试验, 一方面验证了环境适应性仿真分析与评估工作的正确性、可靠性; 另一方面对设计缺陷和工艺缺陷进行了初步诊断, 及时采取纠正措施以改进设计, 增强装备的健壮性和环境适应性。

3) 开展了环境适应性强化摸底试验, 通过给原理样机逐级施加温度和振动等主要环境载荷直至摸清装备环境应力临界值(如图2所示), 为后续试验的控制和实施以及订购方使用装备提供基本信息。

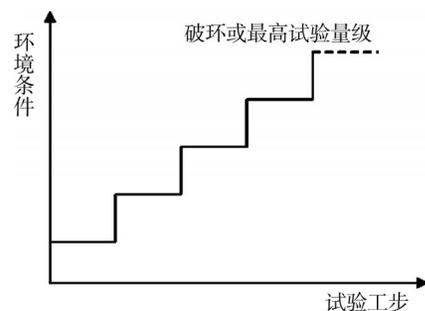


图2 强化摸底试验流程

Fig.2 Enhancement of diagnostic testing flowchart

### 4.5 设计结果

通过多方面全方位的环境适应性试验表明, 受试设备整体抗高温工作能力强, 低温工作极限可达-60℃, 破坏极限可达-70℃, 高温工作极限可达85℃, 破坏极限可达95℃, 振动工作极限可达10g,

破坏极限可达 18 g, 高低温与振动工作极限指标提升 20% ~ 30%, 远高于研制要求。可靠性仿真试验表明, 受试设备整体热设计较为合理, 在平台供风冷却条件下, 平台环境 70 °C 时机箱表面的平均温度为 47 °C, 比平台环境温度低 23 °C, 设备中无高温模块, 最高局部温度为 58.3 °C。机箱骨架及电源、信道、终端、功放等主要功能模块一阶谐振频率均达到 427.2 Hz 以上, 且不符合倍频程规则, 具有良好的结构刚度。受试设备平均首发故障时间评估值为 7940 h, 超出 5060 h 的基本可靠性 (MTBF) 设计指标 57%, 远高于设计定型 3010 h、成熟期 4300 h 的基本研制要求。

## 5 结语

装备环境适应性设计是一个既传统又时新的话题, 如何有效地进行装备环境适应性设计思想变革与实践, 将很大程度上决定下一代综合化军用信息电子装备的研制水平。就现状分析, 在装备环境适应性设计方面还没有形成完备的技术与能力体系, 而建设环境适应性技术研发中心应该是迅速弥补短板的有效途径。通过工程实践表明, 贯彻现代环境适应性设计思想, 完善环境适应性设计技术与能力体系, 在装备研制过程中加强环境适应性设计工作, 必将事半功倍地提高装备技战术水平, 同时在平台适用性、通用性、经济性方面带来显著的效果。

### 参考文献:

- [1] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].  
GJB 4239—2001, General Requirements for Equipment

- Environmental Engineering[S].
- [2] 王奎占. 产品在研制生产过程中的环境试验研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(3): 46—49.  
WANG Kui-zhan. Consideration of the Environmental Test in Product Development and Production [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(3): 46—49.
- [3] 祝耀昌. 环境适应性设计与高加速寿命试验[J]. 航空标准化与质量, 2002(1): 37—42.  
ZHU Yao-chang. Environmental Adaptability Design and Highly Accelerated Life Test [J]. Aviation Standardization and Quality, 2002(1): 37—42.
- [4] 邓林. 信息电子装备高可靠性设计方法思考[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 146—149.  
DENG Lin. Consideration on High Reliability Design Method of Electronic Information Equipment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 146—149.
- [5] 祝耀昌. 装备环境工程技术及应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 1—9.  
ZHU Yao-chang. Materiel Environmental Engineering Technology and Its Application [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 1—9.
- [6] 田笑. 某型号推进环境适应性设计工作中的五项措施及其分析[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 15—19.  
TIAN Xiao. Analysis on Five Measures of Improving Environmental Worthiness Design of Aircraft [J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 15—19.
- [7] 胡云. 基于可靠性优化的机载显控设备结构设计[J]. 电子机械工程, 2012, 28(2): 41—45.  
HU Yun. Structure Design of Cockpit Display and Control Device Based on Reliability Optimization [J]. Electro Mechanical Engineering, 2012, 28(2): 41—45.