专题——装备环境工程管理

基于产品功能的装备环境工程管理思考

赵保平，王刚，孙兰
（北京机电工程研究所，北京 100074）

摘要：首先详细分析了目前装备环境工程实施的现状，指出环境工程管理在其中的核心地位，提出了环境工程管理的三大任务，即保障设计的正确性、保障装备实现过程中各项技术活动与设计的一致性、以及保障后续装备的持续改进完善和升级。在环境适应性设计方面，结合具体工程案例，强调了关注产品顶层环境设计分析、总体与各部分的环境匹配性、全寿命周期环境集合的完备性、环境响应特性调查试验，以及数字仿真的重要性。可为装备环境工程的持续改进和提高提供新思路。

关键词：环境工程管理；环境适应性；环境仿真；环境试验
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2017.11.001
中图分类号：TJ01；E92 **文献标识码**：A
文章编号：1672-9242(2017)11-0001-06

Consideration of Materiel Environmental Engineering Management Based on Functional Equipment

ZHAO Bao-ping, *WANG Gang*, *SUN Lan*
(Beijing Mechanical-electronic Engineering Institute, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: In this paper, current implementation of materiel environmental engineering was analyzed. Essential roles of environmental engineering management were stressed. Three important tasks of environmental engineering management were presented to ensure correctness of design, coincidence of design and other technical activities in manufacture, test and employment, to ensure continuous improvement and upgrade of materiel. In design of environmental worthiness, some specific engineering cases were provided. The importance of design and analysis of overall environment of materiel, environmental matching of the whole and parts of materiel, completeness of life cycle environmental profile, environmental response characteristic test and digital simulation test was emphasized. It could provide new ideas for the continual improvement of materiel environmental engineering.

KEY WORDS: environmental engineering management; environmental worthiness; environmental simulation; environmental test

从专业发展的角度分析[1]环境工程相关的四大标准：MIL-STD-810 环境工程考虑和实验室试验、DEF-STAN 00-35 国防装备环境手册、NATO STANG 4370 环境试验、以及 GJB 4239 装备环境工程通用要求。可以看到，环境工程从“规定的环境试验方法”到逐步增加环境试验基本原理、根据需要进行剪裁、根据实测数据确定设计和试验用的环境量值、用分析代替真实的硬件试验等。环境工程的发展从单纯的环境试验走向了涵盖面广、多学科多专业交叉融合的系统工程。

国内环境工程，自 GJB 4239[2]发布以来，在装备研制过程中也取得了可喜的成绩，除开展环境试验外，还普遍建立了相应的工程师队伍、制定了相应的环境管理计划、使用保管环境条件和环境适应性保证

收稿日期：2017-09-01；**修订日期**：2017-10-08
作者简介：赵保平（1962—），男，河北石家庄人，硕士，研究员，主要研究方向我产品环境工程、环境试验和可靠性试验技术。

大纲，规定了环境试验项目，但研制和使用过程中不断暴露出的质量问题反映了装备环境适应性方面仍存在相应的差距。

新的装备为实现战技指标，大量使用了新材料，如复合材料、隐身材料、热防护材料等，这些新材料的使用对装备的环境适应性提出了新的挑战。文献[3]表明，实际装备的服役条件都很恶劣，尤其是舰船装备，以及沿海部署的装备，对材料的腐蚀研究工作要从装备设计时开始。文献[4]以数据说明了环境对于材料的腐蚀和老化作用十分明显，可见材料环境适应性是装备环境适应性的重要基础。目前材料的环境适应性研究还很零散、不系统，且试验数据保留在各军工单位内部，共享程度有限。更进一步地，不同材料结合形成的典型构件的环境适应性研究更加薄弱。

从集成的功能产品的角度，一方面由于技术的发展，装备研制的相关技术要求和性能指标要求越来越高，产品功能密度大幅度提高，涌现了大量新现象。如热环境问题、力学环境恶化等，需要一个不断深入认识的技术逼近过程。另一方面，已经相对成熟的装备技术不断拓展新的使用方法、范围和平台，整个系统和研制过程关系复杂，存在疏忽错漏等现象造成质量问题。

不管是新情况的出现还是老问题的重复，都暴露出装备环境工程的实施过程中还存在一定的问题。GJB 4239 中虽然规定了装备环境工程包括的四部分：环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价，但由于基础较弱，开展的环境工程工作系统性不强，更多地局限于环境试验的应用，其他环境工程工作如全寿命周期环境的分析、环境适应性指标的确定、环境对装备的影响机理、环境适应性设计与工艺措施等技术工作开展得还不够充分。环境工程管理机制不健全，环境工程基础数据缺乏等，严重制约了装备环境适应性能力的提高。从环境适应性要求提出到实现还没有建立一套可操作的科学方法，是当前装备研制、生产及管理部门面临的重要问题[5]。

环境工程的范围广、技术基础弱，短时间内解决这些问题难度很大，因此，不少文献研究了解决问题的方法。文献[6]提出装备在环境的综合作用下，发生腐蚀、老化、脆断、开裂、膨胀变形、生霉长雾、虫蛀变质等变化是自发的、不可逆的，重要的是将这种变化控制在可接受的速率和范围内。产品耐环境能力与设计、选材、防护措施及生产质量控制等密切相关，强调了装备的全寿命周期管理。文献[7]指出目前存在的问题是对试验过程中产生的大量数据没有有效反馈到环境设计中形成闭环，装备承制方难以提出有效的改进措施和方案，不利于装备环境适应性水平的逐步提高，建议建立具有我国特色的飞机平台环境数据库和环境故障模式数据库。文献[8]建议“抓两头，带中间”，即强调“建立环境适应性指标体系”和“健全环境试验与评价方法”。这些文献研究指明了目前环境工程面临的问题，建议的解决措施也合理有效。

部分军工单位在装备研制中进行了环境工程实施探讨，文献[9]研究了舰用装备环境工程的实施，并制订了相关的环境适应性设计准则，包括高温环境、低温环境、湿热环境、盐雾环境、霉菌环境、振动和冲击环境、其他环境防护等。这些工作都有力地推动了装备环境工程的实施。文献[10]对装备环境工程提出了更高的要求，提出了“环境影响评估”定量化的概念，要求在研制装备硬件的同时，研制一套定量评估环境影响装备实战性能的软件系统。环境适应性必须在环境影响定量化基础上给出实战性能随环境参数的变化，能够进行环境影响辅助决策。这些探索为装备环境工程指明了发展方向。

综上所述，自 GJB 4239 发布以来，各军工单位按照 GJB 4239 的要求开展了相关的装备环境工程工作，取得了一定的成绩，但还存在诸多不足。各文献对于目前环境工程实施过程中的问题认识清楚，并努力付诸实践，但如何有效地贯彻实施装备环境工程仍值得深思。

1 环境工程管理的核心地位

GJB 4239 对环境工程管理的定义为完成环境工程工作的一系列活动，包括规划、组织等内容，其中环境工程是为实现装备环境适应性而运用各种科学与工程技术的一门工程学科[2]。由于装备的复杂性，环境工程工作具有很强的技术性，环境工程管理中的每一项活动的规定都应基于装备的功能特点和实现技术途径，确保装备环境工程工作按照既定方式和时间周期实现预期的环境适应性目标[11]。

1.1 强化思想认识

环境适应性是产品重要的质量特性之一，也是相关各部门的基本共识。对于将环境工程作为一项系统工程纳入装备全寿命周期，以提高装备环境适应性，以及如何将环境工程纳入装备全寿命周期管理等问题上，认识还不深入、不充分、不全面，导致装备的环境工作系统性不够，提高产品环境适应性手段不足。

提高装备的环境适应性，不是单靠哪一方（某个单位、某个部门、某个专业）的努力就能完成的，必须加强环境工程相关各方的通力合作并进行有效的组织管理，将环境工程的各项具体措施落到实处。目前环境工程在装备研制生产中还处于初级阶段，加强环境工程相关标准的宣贯和培训及配套标准的建立，提高装备研制生产各方对环境工程工作的认识，明确环境工程工作在装备研制生产中的作用和地位，才能

真正地发挥环境工程对装备环境适应性的保证作用。

1.2　环境工程管理的任务

环境工程管理中规定了四个工作项目：制定环境工程工作计划、装备环境工程工作评审、环境信息管理、对转承制方和供应方的监督和控制。存在以下几个问题：工作计划应列入那些内容，评审哪些内容，收集哪些信息并如何使用，对外方监督控制什么。

在研制初期，根据产品功能特点的仿真分析不足，缺乏有针对性的环境工程管理，环境工作要求往往机械照搬并依赖已有的试验项目、经验和标准，使得全寿命周期环境仿真分析、适应性设计和试验评价等工作存在项目设置、包络覆盖性和充分性不尽合理，存在过设计过试验和欠设计欠试验等情况。

实际上，所有管理工作都是围绕研制开展的，而从装备需求开始到验证交付使用的整个链条中，设计是将需求转化为指标要求并实现产品化的关键，而且环境工程中的仿真分析、试验验证等活动都是为设计正确性服务的。仿真分析、试验验证等又与各个相关专业、相关资源互相错综勾连，关系复杂，因此设计处于所有关系的中心位置。由此可知，环境工程管理中应特别关注以下几个管理活动作为重点，才会有效保证装备环境适应性的顺利实现，避免出现大的反复：保证设计的正确性，不管装备是新情况还是老套路，应该从设计出发，把设计思想转化成分阶段分步骤实施的具体项目，并采用相应的活动加以管理；保证产品实现过程中的各项活动与设计的一致性，并在实现过程中涉及到的人、机、料、法、环各个方面能够综合做到多快好省；保证产品后续使用和改进完善能够拥有充分的数据等资源可以使用，同时，要对装备在使用中暴露和反馈回来的热点问题纳入到研制、维护、保障等管理活动中，如当前比较突出的热、力、海洋腐蚀及其综合效应问题。

2　设计是实现产品环境适应性的关键

装备环境工程管理的首要任务是保障设计的正确性。装备往往是复杂系统，功能多、要求高，为了实现其功能要求所采用的材料、器件、结构、设备、软件复杂多样，实现工艺和集成等过程特性各异，往往会涌现新的功能。一方面成就装备的功能，同时也造成一些有害的影响。设计就是保证保留需要的功能过程、消除或者降低有害功能过程的活动。由于装备不同，其功能各异，设计活动也不完全相同，相应的结构、系统要求差异更大。也正是如此，尽管 GJB 4239 给出了三个环境适应性设计工作项目，但相对环境分析与环境试验部分的内容丰富性就显得明显不足，可操作性不强。具体到型号环境适应性大纲等文件中，环境适应性设计部分也比较简单，这也正是我国装备环境适应性工作相对重视试验、依赖试验，属于“产品功能设计——环境试验验证”的秋后算账模式[12]。因此，设计部分应该成为环境工程管理关注的重点之一，在活动安排、工作项目、计划阶段性活动、评审、评估以及人员安排培训等管理活动安排中，应该关注总体上是否考虑了动力学、传热等特性的合理性，是否关注了总体与部分之间、部分与部分之间的关系，是否进行了有害以及风险性分析等内容，保证设计不偏离既定目标、不发生颠覆性问题。

一般来讲，产品环境适应性设计主要是要处理好产品目标功能与环境激励源、传递路径和响应之间的关系。功能单元特有的功能可能成为干扰其他单元的环境激励源，传递路径中存在的问题可能诱发和变异出新的环境，造成不恰当的环境响应。与功能连接相关的材料、结构、功能单元等必然存在相应的功能指标，只要各部分设计指标满足自身的要求则必然满足整体要求，而相应的试验也应按照应力传递的三个环节进行验证。目前由于产品的复杂性，都是按照功能设计生产，再实物试验验证的工作模式，对保障目标功能的材料、结构和单元的环境适应性分解指标感到困难，故因没有过程指标控制而出现周期反复问题，因此管理过程应加强围绕产品功能而开展的过程指标分解工作。在所有指标中，动力学、热力学设计难度极大，应规定各部分频率范围控制、整体动力学特性、结构传递特性、热力学特性等指标要求[13]。在上述工作的基础上开展基于产品功能的环境适应性设计技术，包括气候环境适应性设计技术、力学环境适应性设计技术、核环境、生化环境和其他环境适应性设计技术等。

2.1　顶层环境设计分析

目前由于产品功能密度和指标的提高，研制过程中出现了一些反复，过去认为不是问题的问题显现了出来，如动力学响应的不均匀问题、热分布合理性问题、电磁兼容性问题等，这就是装备系统复杂性提高后的涌现。总结归纳发现，主要是在设计的源头上按照历史的惯性，没有关注产品特性的变化带来的影响，而放弃了一些分析与设计步骤和工作项目，影响了设计的正确性。因此，应将产品总体方案中的动力学响应分布、传热散热及其分布的合理性等环境适应性因素优先予以考虑，其工作的结果直接关系到设计中器件、设备功率大小及分布和结构形式及材料等选择的合理性，否则将会为环境适应性的实现带来先天不足甚至失败。例如，某型号大功率发热产品借用另一个成熟型号产品，总体方案设计时没有注意到该产品安装位置的不同所引起的热环境效应的巨大差异，导致该型号大功率发热产品在整个工作过程中不断

向邻近的其他设备辐射热量，致使设备周围空气温度快速上升，邻近设备超过极限温度而失效。这是典型的顶层设计分析对系统整体热环境考虑不足引起的失效问题。等到系统全部集成后，才发现问题，事后补救非常被动，由于受多方设计限制，很多措施无法实施，造成了很严重的进度和经济上的损失。反之，如果在总体方案设计时，考虑到大功率发热产品位置改变引起的系统热环境变化，从气动布局上引入外部冷空气冷却设备周围空气，则可以以最低的成本实现最大的效益。

2.2 总体与各部分的环境匹配性

装备作为一个复杂系统，其外部环境和内部某些功能会沿着特定的路径传递，由于其复杂性，传递过程中会形成变异、转化、衰减、放大等现象，有些路径是潜藏的，有的是设计要求的，设计就是保证需要的路径不发生变异等现象，不需要的路径和现象被限制在最低影响范围，以保证产品各部分之间相互不受到影响。因此，总体上应对各部分的关系进行分析，对可能的传递路径和路径上可能的变化进行分析，确定各部分的合理指标以保证功能匹配性和环境兼容性[12]。同时，各个部分的设计同样应该按照总体的工作流程和方式进行分析设计工作，给出与其特性相匹配的要求和更下一层的要求，而非按照总体给出的数据照抄。例如，某型号装备运输试验中出现结构开裂的现象，运输过程中的动力学环境实际上是一个层层传递的关系，路况和车速对于汽车底板的振动均有影响，汽车底板的振动通过包装箱传递到某型号装备上，装备上悬挂有大质量物体。整个力学传递路径中，在某方向上出现了低频层层放大的情况，导致装备上大质量物体往复摆动，造成根部反复弯曲疲劳断裂。如果在包装箱设计的过程中，针对该装备某方向刚度较弱，进行了该方向低频晃动的抑制，完全可以避免结构开裂现象的产生。可见，在装备的研制过程中，明确设计产品所处的环境特征。例如，力学环境传递的环节，传递路径上方和下方的特点，然后再依据这些特点，进行产品功能设计是十分重要的。

目前，对产品总体环境特性与各部分环境特性指标的关系，重视程度很低，产品研制中设计人员，特别是非环境适应性设计人员对如何落实分解指标和适应性设计还比较困惑，应该在管理活动中作为重点。

2.3 全寿命周期环境集合的完备性

除前面从总体和各部分特性分析外，作为外部激励的全寿命周期环境集合的完备性应该得到关注。应对装备服役整个过程的使用方法、地点、平台、要求、保障等情况与用户进行充分沟通，获取第一手数据。同时，对在使用中可能诱发的环境进行统计并对其完备性进行分析[14-15]。

2.4 环境响应特性调查试验

GJB 4239 中规定的环境响应特性调查试验，名为试验，实为设计辅助手段，在产品设计原型初样试验阶段就应该大量开展，以掌握产品的各类特性，是产品环境适应性实现的基础。例如，某型号装备上的设备，按照该型号的使用保管环境条件完成了振动交付试验和例行试验，结构完好、性能正常。交付总装后，安装到某型号装备的支架上时，在振动环境下，出现了数倍量级的振动放大，导致设备失效。设备承制方没有进行环境响应特性调查试验，对设备的谐振频率不清楚。结构设计人员进行设备安装支架设计时，仅考虑了静强度校核，并未分析支架的动力学响应特性。如果设备承制方和支架结构设计人员在初样阶段进行了充分的环境响应特性调查试验，完全可以避免设备失效的发生，从而可以避免设备交付后的重新设计、生产带来的经济上和进度上的巨大损失。

可见，在研制之初，必须充分地强调环境响应特性调查试验的重要性，这些都必须通过环境工程管理落实到装备研发的过程中。

2.5 数字仿真与实物试验验证并重

仿真分析与试验验证是产品研制的两条腿，缺一不可。一般的流程应该是在早期阶段优先选用数字仿真分析，逐步采取实物进行试验验证。由于装备系统的复杂性，数字仿真往往需要大量的简化，仿真结果与型号要求期望的差异比较大，造成型号设计研制人员对试验更为重视。在管理中，应对这一现象加以纠正。仿真作为一种设计辅助手段，其意义在于掌握特性、把握方向、寻找规律、分解指标、发现潜在问题，是设计正确性的基础，也是试验验证的基础。试验是对设计指标的验证，而非对产品使用中的真实情况的复现。因此，设计前期的仿真分析是一个去伪存真、关注关键并转化为关键指标的过程，只有各部分指标得到正确分解，后续试验验证才会得到有针对性的结果。因此，管理活动中需要审查是否进行了仿真分析并将指标分解到了各部分和各专业，相应的试验项目是否与设计分解指标对应。

此外，部分试验由于各种限制，难以开展实物试验，研究仿真试验技术以替代用实际硬件直接进行的试验是未来的发展方向之一。仿真试验的实施必须在掌握正确的平台环境数据和受试产品特有的环境影响机理和故障模式的基础上才能实现。例如，研究装备的贮存寿命和延寿问题时，难以进行长时间的实物自然环境试验，需借助数字仿真，寻找自然环境试验和实验室试验的相关性，得出相关模型或试验倍率，

这些需要进行大量的预研和试验工作，在环境工程管理中也需要及早策划、及早安排。

3　严密的管理活动策划

装备环境工程管理的第二项主要任务是保障装备实现过程中各项技术活动与设计的一致性。在产品实现过程中，涉及了人、机、料、法、环等各个环节，在保证设计正确性前提下，相应技术活动步骤中要求每个环节与相应的设计保持一致，才能保证产品符合预期的功能目标，其解决的是状态符合性和质量一致性。因此，人、机、料、法、环各个环节的控制要经过十分严密的策划。

1）设计人员的构成和职责。实现产品的环境适应性不仅仅是环境专业人员，主要是产品功能设计人员应具备相应的环境意识。每个专业不能仅仅考虑各自专业功能而已，必须考虑与其他专业的关系。在各种设计专业活动中，各个专业必须密切合作相互补充才能实现环境适应性目标。因此，管理过程中的设计人员组成和设计工作项目应包含各类专业人员。

2）合理运用已有的设计和试验工具。由于产品实现过程复杂，涉及面大，某些环节的不当可能造成周期与成本的大幅度增加。因此，应对实现过程中影响环境适应性各种因素加以分析，采用正交设计等工具予以优化，做到产品实现的多快好省。GJB 4239 中规定的 7 种试验类型中，环境鉴定试验、批生产装备（产品）环境（验收和例行）试验应用比较广泛，其余试验，尤其是环境响应特性调查试验、自然环境试验和使用环境试验，进行得比较少，需要在环境工程管理活动中加以强调。

3）要重视制造和加工过程中的工艺。设计师应及早与工艺师充分沟通材料选用、工艺方案等有关产品制造的关键环节，提高工艺和产品质量，确保设计方案的可实现性，以及不能发生有害于装备环境适应性的工艺因素。

此外，要对相关人员进行培训，特别是一些专业标准的培训，实际工作中，尽管都遵循同样的标准，但由于专业范围、岗位、经验等方面的局限性，往往理解差距很大，需要通过课程培训，特别是进行实操培训。

设计过程是一个逐步逼近目标值的渐进过程，按照研制双 W 模式，专业、分析、仿真、试验、工艺、外协、不同层次等过程与阶段性工作都存在一个循环与闭环过程，管理需要对过程中的不断完善特别关注。

4　装备研发的基础数据积累与可持续性

装备环境工程管理的第三项任务是保障后续装备的持续改进完善和升级，保障企业经济与社会效益的最大化。环境是装备研制的基础，研制中积累下来的相关数据、条件、模型、标准、方法与相应的功能、指标和所有专业以及通用质量特性相关性很强，对后续装备研制中相似产品相似功能的实现具有非常重要的借鉴意义，做好积累工作，形成社会资源成果，实现型号共享，社会共享，让后人和后来的产品站在前人的肩膀上。

首先，产品交付用户并不等于环境适应性就完全满足使用要求，也不是设计任务的终结。一方面，需要制定装备服役过程中维护装备环境适应性的操作与防护规范。另一方面，在使用中，由于使用范围、环境、方法、人员、平台等方面的变化以及产品材料器件等指标分散性，使用中经历的环境往往会存在与设计不一致的情况，存在出现故障并进行维修的情况，在管理中应关注对这些情况的考虑。应对使用中的维修保障影响有预先措施，对使用不一致性环境数据进行检测和收集，建立 FRANCS 系统，为维护保障和后续改进型号服务。

其次，由于装备技术指标和功能要求的提高，需要采用大量新型材料以适应功能密度大、结构特性要求高等特点，如采用轻质结构材料、复合材料、隐身材料、火化工材料、先进功能材料、器件等，特别是非金属材料的采用，其相应的环境效应数据需要从方案开始或之前必须同步开展测试获取，相应构件则需要同步开展腐蚀、老化、退化以及环境影响特性曲线、加速退化模型、传递特性等试验和研究，尤其是相应的寿命数据除需要加速试验外，还要进行长期的自然环境试验工作，以支撑产品的设计工作。因此，在管理上要考虑已有自然环境试验数据的充分利用和新材料新工艺环境效应数据获取途径。由于其积累需要的时间长、代价大，是短时间内难以立竿见影的工程，需在顶层环境工程管理中统一规划、统一部署。在自然和平台环境数据的实测基础上，规范试验数据分析和处理方法，积累材料和装备受环境影响的规律和故障数据，建立相应的数据库，并在装备研制过程中共享，为装备环境适应性提供基础数据。避免当前产品设计注重产品功能实现，而材料、器件、工艺等的环境适应性问题考虑较少，导致部分产品交付后出现腐蚀、断裂等问题；避免产品贮存寿命估计不准；避免环境数据有实测但分析不足且没有有效反馈到设计中形成闭环等问题，造成设计改进措施难以到位，环境适应性持续改进不足的局面。

第三，制定和完善环境工程相关标准是保障后续装备持续改进完善的一种重要途径。通过顶层标准、试验标准和基础标准等的制订和配套，以规范和指导环境工程工作的有序开展，并通过标准的宣贯、普及和修订将装备研制过程中的经验教训固化积累下来，

实现后续装备的持续改进完善和升级。目前我国已制订了环境工程顶层标准 GJB 4239，总装备部技术基础管理中心已经完成了以环境工程为基础的《装备环境工程标准体系》的制订工作[16]，大部分标准都欠缺，需要比较长时间的技术积累，需要逐步建设并完善相应的数据库、知识库、模型库、规则库、标准库等信息化数据系统，形成相应的仿真分析系统，为后续装备和相似基本功能单元的设计提供借鉴，提高环境适应性知识的社会效益。

5　结语

随着科学技术的发展和装备要求的不断提高，还会出现更多的环境适应性问题，特别是动力学特性设计、热力学特性设计问题比较突出。不管如何发展，掌握装备环境特性，掌握使用环境是实现环境适应性最基本的功课，相应的管理活动基本都是围绕特性与环境展开的，管理活动应该重点审视是否包含了这些内容。

参考文献：

[1] 张伦武, 何新洲, 杨万均. 环境对装备的影响及装备环境工程标准分析[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 28-33.

[2] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].

[3] 柯伟, 王振尧, 韩薇. 大气腐蚀与装备环境工程[J]. 装备环境工程, 2004, 1(4): 1-6.

[4] 王光雍, 李晓刚, 董超芳. 材料腐蚀与装备环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 1-6.

[5] 康蓉莉, 冯雪艳, 何恩山. 兵器装备环境工程发展需求[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 56-58.

[6] 秦晓洲. 环境工程及其在装备发展中的地位与作用[J]. 四川兵工学报, 2003, 24(6): 7-11.

[7] 孙锦阳, 徐黎明. 机载电子装备若干环境工程问题研究[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 39-43.

[8] 王蕴辉, 杨玉兴, 王忠, 等. 实施电子装备环境工程的探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2008, 26(3): 1-5.

[9] 王冬, 刘艳, 孙立敏, 等. 舰用装备环境工程实施探讨[J]. 装备环境工程, 2006, 3(5): 1-6.

[10] 董双林. 装备环境工程的发展、深化和综合[J]. 装备环境工程, 2007, 4(4): 48-55.

[11] 祝耀昌, 孙建勇. GJB 4239《装备环境工程通用要求》及其应用分析(一)[J]. 航空标准化与质量, 2006(5): 32-37.

[12] 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.

[13] 宋光明. 基于设备功能的动力学环境预示技术研究[D]. 北京: 北京机电工程研究所, 2013.

[14] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究（一）[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 51-57.

[15] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究（二）[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 42-48.

[16] 祝耀昌, 常文君, 傅耘. 装备环境适应性与环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 14-19.