

装备环境适应性闭环管控方法研究

李炳蔚, 牛智玲, 张子骏, 余慕春, 丁晨

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 通过加强对装备环境适应性的闭环管控, 避免设计方案反复, 提高研制效率和装备环境适应性。在系统工程方法基础上, 建立装备环境适应性闭环管控工作体系, 提出闭环管控方法, 包括基于流程前置的环境工程工作计划, 面向流程闭环的环境适应性工作过程控制, 以及全寿命周期环境适应性信息管理等内容。装备工程实践结果表明, 提出的环境适应性闭环管控方法是可行的, 环境适应性问题早在方案设计阶段即得到了有效解决, 使环境适应性工作变被动为主动, 在提高装备研制效率的同时, 提升了产品的环境适应性。该方法可以有效提高装备环境适应性和研制效率, 对于运载火箭、航天器、工业设备等其他类型产品的研发也有一定的借鉴意义。

关键词: 装备; 环境适应性; 闭环管控; 环境工程; 系统工程

中图分类号: E920

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0024-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.005

Research on the Closed-loop Control Method of Equipment Environmental Adaptability

LI Bing-wei, NIU Zhi-ling, ZHANG Zi-jun, YU Mu-chun, DING Chen

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Through strengthening the closed-loop management and control of equipment environmental adaptability, repeated design schemes are avoided, and the development efficiency and equipment environmental adaptability are improved. Based on the system engineering method, the closed-loop control system of equipment environmental adaptability is established. The closed-loop control method is proposed, including the environmental engineering work plan based on the pre-process, the environmental adaptive work process control oriented to the process closed loop, and the life cycle environmental adaptability information management. The results of equipment engineering practices show that the environmental adaptability closed-loop control method proposed in this paper is feasible. The environmental adaptability problems are effectively solved as early as the stage of scheme design, and the environmental adaptability work becomes an active process instead of a passive one. The closed-loop control method improves the environmental adaptability and the efficiency of equipment development. And this method can be referred to for the research and development of other types of products such as launch vehicles, spacecrafts, industrial equipment, etc.

收稿日期: 2021-04-05; 修订日期: 2021-05-11

Received: 2021-04-05; Revised: 2021-05-11

基金项目: 国家自然科学基金 (11972377, 11902364)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (11972377, 11902364)

作者简介: 李炳蔚 (1984—) 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器环境工程和结构动力学。

Biography: LI Bing-wei (1984—), Male, Ph.D., Researcher, Research focus: aircraft environmental engineering and structural dynamics.

引文格式: 李炳蔚, 牛智玲, 张子骏, 等. 装备环境适应性闭环管控方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 024-028.

LI Bing-wei, NIU Zhi-ling, ZHANG Zi-jun, et al. Research on the closed-loop control method of equipment environmental adaptability[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 024-028.

KEY WORDS: equipment; environmental adaptability; closed-loop control; environment engineering; system engineering

“环境适应性”与“可靠性、安全性、测试性、维修性、保障性”等并列，是一项重要的装备通用质量特性。装备的环境适应性水平，是决定了装备在实战条件下是否强壮的“先天基因”，一定程度直接决定了装备能否在战场中发挥应有的战斗力，相关技术受到工业界和学术界越来越多的关注。

装备环境适应性是设计出来的，也是管理出来的，是通过系统严格的试验鉴定出来的。目前，装备环境适应性工作主要遵循相关标准进行实施和管控^[1-4]。然而，在实际的工程实践中，环境适应性工作往往处于“开环”状态，过程的闭环管控和工作成效有待提升^[5-10]。近年来，多位学者在环境适应性设计方面进行了思考，结合具体产品的工程实践，提出了适用于装备研制的、细化的环境适应性工作流程^[11-16]，但是目前还缺乏对装备环境适应性管控的系统性研究。为此，提出了一种环境适应性闭环管控方法，为装备环境适应性工作的有效开展提供方法支撑。

1 环境适应性闭环管控工作体系

装备环境工程面向复杂的装备系统，并且涵盖项目管理、工程技术的大量学科，遵循系统工程的科学方法。系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的方法^[17]。系统工程方法得到钱学森先生等学者的大力推动，在我国航空航天等国家重大工程的研发中发挥了重大作用^[17-19]，并沿用至今，是环境适应性闭环管控的方法基础。系统工程的一项重要思想是通过“总体设计部”将用户需求转换为满足要求的、优化的总体方案，然后将总体方案分解为若干系统的技术要求，再经由总体-系统-分系统-单机的多级配套协作，实现产品的研发和集成。基于此，相关标准要求设立涵盖环境工程项目经理、专家组和设计师队伍组成的专业组织架构，以确保装备环境工程有效落地^[1-2]。GJB 4239—2001 规定的装备环境工程工作主要包括环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境适应性试验与评价 4 部分工作。其中，环境工程管理工作的主要内容有制定环境工程工作计划、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等内容，见表 1。

文中在现有环境工程工作标准体系的基础上，结合航天工程中的具体实践，提出了环境适应性闭环管控工作体系，如图 1 所示。该工作体系由环境适应性总体抓总牵头，牵引各系统、单机单位开展武器装备的环境工程管理工作的落实，开展的主要工作包括基于流程前置的环境工程工作计划、面向流程闭环的环境适应性工作过程控制，以及全寿命周期环境适应性

信息管理等内容。

表 1 装备环境工程工作项目
Tab.1 Working items of closed-loop control of equipment environmental adaptability

序号	工作项目	完成形式
1	制定环境工程工作计划	环境适应性工作计划
2	环境工程工作评审	评审报告
3	环境信息管理	环境信息
4	对转承制方和供应方的监督和控制	合同条款、监督和控 制报告

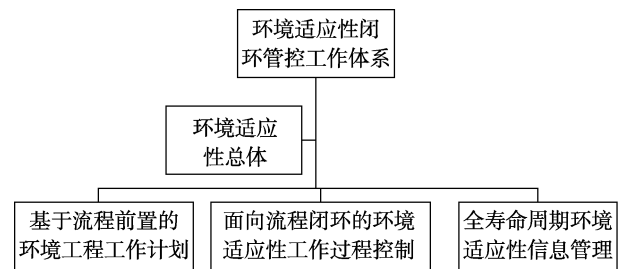


图 1 环境适应性闭环管控工作体系
Fig.1 Closed loop control system of environmental adaptability

设立专门的环境适应性总体的岗位或角色，是从系统工程实施的角度，可以更好地对环境工程工作进行抓总，推进各项工作的实施和落地。可以在总体设计部设立环境适应性总体岗位，作为六性专业之一。环境适应性专业可以作为实施环境工程的主体，对装备系统环境工程管理和共性技术工作负责，通过运用各种管理和技术手段，提高武器装备的环境适应性。环境适应性专业是环境和产品的纽带，开展环境工程管理工作顶层的策划、分解、监督、管控和评价，提出并开展共性基础课题研究，负责相关标准的制定，研发并应用环境适应性工作平台，确保装备环境适应性的先天品质优良。笔者单位作为装备的总体设计部，设立了六性工程研究室，下设环境适应性总体设计工程组，设置环境适应性总体岗位，对环境工程工作抓总。通过 3 年的运行，不但牵头圆满完成了多个型号的环境工程管理工作，而且建立了环境适应性标准体系，攻克了多项环境适应性共性技术，开发了环境适应性信息化工作平台，形成制定了完善的环境适应性工作体系，运行的整体效果良好，提升了环境工程工作的效率，对于确保装备飞行试验成功、提升装备环境适应性水平提供了重要支撑，可以作为其他单位开展环境工程工作的参考。

文中提出的装备环境适应性闭环管控工作涵盖表 1 中列出的所有传统工作项目，并且在此基础上，主要针对目前存在的环境适应性工作“开环”、效果不明显等突出问题，提出了一套闭环管控方法。该方法

从系统到单机纵向贯通,通过全流程闭环管控,提高装备的环境适应性。通过多年工程实践表明,该方法可以有效避免方案反复,提升环境适应性工作效率和工作效果。

2 基于流程前置的环境工程工作计划

在型号研制的初期,需要制定环境工程工作计划,明确环境适应性要求、环境工程组织机构及其职责,规定型号各阶段的环境工程具体项目及计划安排。环境工程工作计划一般以环境适应性大纲、环境适应性工作计划等纲领性文件的形式下发各个级次研制单位,并纳入到型号质量工作中,从顶层对环境工程工作进行指导和约束。

为确保环境适应性工作效果,应尽可能在工作中把环境适应性工作前置。传统的研制模式是在论证和方案阶段先进行环境设计、研制,然后进行试验验证,验证后再修改,整个过程是一个“试错式”的过程,可能会造成方案的反复,并且会导致较高的研制经费和较长的研制周期,影响装备的环境适应性水平的提升。为了将工作重心转移到方案设计阶段,在研制阶段重点考核产品的实现。通过环境适应性工作的前置,在方案设计阶段就要运用有限元仿真等先进的手段开展环境适应性分析、评价等相关工作,使得产品设计、分析融为一体,边设计、边改进,符合要求后再出图生产,极大地避免了后续的方案反复,大大提高了研制效率。六性工作审查在方案设计阶段启动,可以及时发现环境适应性条件理解不一致、设计不合理、环境不适应等问题。通过及时发现、及时纠错等方式,使环境适应性工作切实在设计中起到作用,把环境适应性要求落实在产品设计中。

环境适应性工作计划应突出重点和特点。制定环境适应性工作计划,做到要素全面:规定装备各阶段环境适应性工作总要求,涵盖环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验及评价等内容。在进行工作项目的细化策划时,应该有“精准思维”,应根据型号的特点,对环境适应性工作进行细化和合理剪裁。一方面,开展的环境适应性工作要有型号特点,有针对性地开展型号环境适应性工作;另一方面,合理剪裁环境适应性工作,把与型号、阶段相关的环境适应性工作作为重点工作,在进行工作计划和策划的制定时,加以重点考虑。通过精准的工作策划,可以确保每项工作都能够深入地开展,确保环境适应性工作的有效落地。

制定环境试验条件,做到条件合理:要系统分析全寿命周期环境剖面,规定装备全寿命周期遇到的环境及量值,供各系统开展环境适应性设计,环境试验条件应做到项目覆盖、量级合理、制定方法正确、满足现有标准。

除此之外,为了确保环境适应性工作计划落地,

应针对相关顶层要求制定解释和指导性文件,在方案和研制初期下发,并开展培训,具体一般应包括以下内容。

1) 给出环境适应性设计准则(包括定量、定性两类),其中定量准则是根据频率管控,给出产品等应避开的频率或应满足的频率特性范围,定性准则是通过梳理历史上天地试验环境类故障,给出针对性的环境适应性设计要求。如包含固态继电器、恒温晶振、脆性陶瓷材料、玻璃器件、陶瓷封装集成电路、薄膜电阻、微波功放模块等对冲击敏感的部件,必须100%开展冲击环境适应性设计,并采取安装减振垫等抗冲击防护措施。

2) 环境试验剪裁指南:为了防止分系统、单机实施环境试验时出现条件理解错误、边界条件不当、试验方向不正确等问题,制作环境试验条件的剪裁指南,对上述问题进行明确规定,确保环境试验有效。

3) 例行试验序贯原则:给出例行试验的序贯原则,给出推荐的例行试验顺序。

4) 环境试验管理要求:规定环境试验文件会签、数据管理要求,包括总体大型地面试验、分系统重要单机环境试验等。

5) 环境试验方法:给出随机振动、冲击试验、运输试验、噪声试验、高温试验等试验的方法、流程和注意事项。

6) 环境适应性仿真方法:给出环境适应性仿真的方法,如边界条件设定原则、分析方法、网格划分要求、阻尼系数确定方法等。

7) 环境适应性工作计划:给出各个阶段实施的环境适应性的具体工作项目、工作要求、责任单位、输入输出文件、时间节点等。

3 面向流程闭环的环境适应性工作过程控制

环境适应性工作要求提出后,需要进行一系列的过程控制来确保工作的闭环。闭环管控工作强调要求提出后的工作监督和审查,以工作综合审查的形式对分系统、承制方的工作效果进行及时管控,在方案设计评审、转段等时机对六性工作开展情况进行把控,对发现的问题及时纠正。通过环境适应性工作的培训,面对面交流、手把手辅导等方式,确保工作的真正闭环。

开展环境适应性过程控制,具体实施途径如下:

1) 开展环境适应性相关文件会签,总体对分系统的环境适应性工作计划、重要设备的试验大纲进行会签。

2) 开展环境适应性评审工作,加强对外协单位的把控,专家组对总体的大型地面试验策划、环境试验条件进行专项评审,总体对分系统的环境适应性工

作计划、重要设备的试验大纲、环境适应性分析进行评审, 可以结合方案设计评审、转段评审、试验大纲评审等进行。

3) 开展对转承制方和供应方的监督和控制。一方面, 要开展全级次供应商的合格供方认证管理; 另一方面, 需要在产品研制过程中对转承制方和供应方的设计、生产、工艺等进行全方位、全流程的监督和控制在。

4) 制定环境适应性评价要求, 并根据要求对产品的环境适应性进行评价, 一般结合出厂验收和评审进行。在进行环境适应性评价时, 可以采用基于时序的环境适应性分析方法^[20]。

4 全寿命周期环境适应性信息管理

按照环境适应性信息搜集要求, 对关键设备、部件的全寿命周期环境适应性数据进行汇总, 形成数据库, 并随着环境适应性工作的开展逐渐完善, 通过对环境适应性信息的管理、分析和应用, 为环境适应性分析和后续其他装备的研制工作提供支撑。

开展全寿命周期环境适应性信息管理, 主要涵盖以下内容。

1) 实施环境适应性信息管理: 发布环境适应性试验信息收集要求, 汇总、分析环境适应性信息, 包括产品技术状态变化历史、试验方案、试验数据、试验结果、故障信息; 产品数据包络, 为定型鉴定、贮存延寿等提供支撑; 借用产品环境适应性分析提供依据。

2) 环境适应性信息平台: 应建立相关信息的平台, 对装备环境信息进行统一的管理。

3) 自然环境信息: 根据使用环境要求、GJB 1172—1991 等, 确定装备系统承受的高低温、湿度、盐雾、霉菌、砂尘、太阳辐射等自然环境条件, 纳入到环境信息数据库中。

4) 诱发环境信息: 根据寿命剖面分析, 开展装备产品经历的力、热、电磁等诱发环境信息分析和收集, 纳入到诱发环境数据中。

5) 技术状态: 产品的技术状态基线和变化历史, 产品借用情况。

6) 环境履历: 产品经历过的力、热、自然、电磁环境试验的项目及条件, 包括借用型号的环境试验。

7) 频率特性: 系统、部件、产品的固有频率特性。

8) 力学特性: 产品的关键部件相对于设备安装处的振动、冲击传递特性, 以及力学环境适应性(力学环境耐受极限信息)。

9) 热特性: 产品冷\热透时间、热容、工作时发热功率、主要材料的热导率。

10) 电磁特性: 产品的电磁兼容特性。

11) 自然环境特性: 产品采取的防护手段等。

12) 历史故障: 产品或类似产品在研制、总装、

服役期间发生过全寿命周期环境适应性问题的相关信息。由于装备产品种类多样, 并且可能经历的环境涵盖力、热、电磁、自然和空间环境, 所以进行装备环境适应性仿真的难度很大。因此在开展这项工作时, 应该从小处着眼, 逐渐积累环境预示、产品建模、多物理场仿真的方法和基础数据, 以提升工作效果^[21-24]。此外, 如确有必要且条件具备, 可以开展实体样机环境试验或者原理性试验, 对产品的环境适应性仿真模型进行校验。

5 结语

采用文中提出的环境适应性闭环管控方法, 对于电子设备力学环境适应性工作在多个装备研制过程中进行了工程实践, 结果表明:

1) 提出的环境适应性闭环管控方法是可行的, 各项工作可以在装备环境适应性工作中顺利开展。

2) 环境适应性问题早在方案设计阶段即得到了有效解决, 有效避免了在工程研制阶段常见的设备安装支架振动响应放大严重、设备与安装支架频率耦合、设备环境适应性验证试验“过试验”或者“欠试验”, 使环境适应性工作变被动为主动, 在提高装备研制效率的同时, 提升了产品的环境适应性。

环境适应性工作是装备研制永恒的话题, 也是批产交付后最影响用户体验的重要问题之一。文中结合工程实践, 提出了一种装备全流程、全要素环境适应性闭环管控方法, 可以提高装备环境适应性和研制效率, 对于提升装备实战化水平具有重要意义, 对于运载火箭、航天器、工业设备等其他类型产品的研发也有一定的借鉴意义。

后续还需要进一步开展如下工作: 继续在装备环境工程中持续完善闭环管控方法; 继续探索典型产品的环境适应性建模仿真方法, 持续完善环境适应性数据库, 这是目前比较欠缺的, 也是提升装备环境适应性水平的关键。

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] MIL-STD-810G, Environmental engineering considerations and laboratory tests[S].
- [3] 宣兆龙. 装备环境工程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015. XUAN Zhao-long. Equipment environmental engineering[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2015.
- [4] 祝耀昌, 陈光章, 张伦武, 等. 武器装备环境工程[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 3-8. ZHU Yao-chang, CHEN Guang-zhang, ZHANG Lun-wu, et al. Technical system of materiel environmental engi-

- neering[J]. Equipment environmental engineering, 2006, 3(3): 3-8.
- [5] 王满玉, 殷世龙. 环境工程在武器装备研制、生产中的地位和作用[J]. 航空标准化与质量, 1998(3): 35-38.
WANG Man-yu, YIN Shi-long. The position and function of environmental engineering in the development and production of weapon equipment[J]. Aeronautic standardization & quality, 1998(3): 35-38.
- [6] 赵保平, 王刚, 孙兰. 基于产品功能的装备环境工程管理思考[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 1-6.
ZHAO Bao-ping, WANG Gang, SUN Lan. Consideration of materiel environmental engineering management based on functional equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(11): 1-6.
- [7] 庄治国. 基于装备环境适应性的装备环境工程管理策略[J]. 绿色科技, 2017(10): 101-102.
ZHUANG Zhi-guo. Management strategy of equipment environmental engineering based on adaptability of equipment environment[J]. Journal of green science and technology, 2017(10): 101-102.
- [8] 张铮, 黄瑞毅. 加强环境工程管理是提高装备环境适应性的有效途径[C]//第四届电子产品防护技术研讨会. 安庆: [出版者不详], 2004.
ZHANG Zheng, HUANG Rui-yi. Strengthening of environmental engineering management is an effective way to improve the environmental adaptability of equipment[C]//The 4th symposium on electronic product protection technology. Anqing: [s. n.], 2004.
- [9] 张磊. 装备环境工程及其管理体系的探讨[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3): 22-26.
ZHANG Lei. Discussion on materiel environmental engineering and its management system[J]. Equipment environmental engineering, 2004, 1(3): 22-26.
- [10] 熊长武. 装备环境适应性设计思想变革与实践[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 20-25.
XIONG Chang-wu. Transformation and practice of equipment environmental adaptability design ideas[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(2): 20-25.
- [11] 高贵福, 王刚, 孙建亮, 等. 飞行器环境适应性设计方法研究与实践[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 49-54.
GAO Gui-fu, WANG Gang, SUN Jian-liang, et al. Research and practice of environmental worthiness design of flying object[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(6): 49-54.
- [12] 马丽娥. 舰船武器装备环境适应性研究与分析[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(2): 42-44.
MA Lie. Research and analysis of ship weapon equipment suitability of environment[J]. Ship science and technology, 2006, 28(2): 42-44.
- [13] 王冬, 刘艳, 孙立敏, 等. 舰用武器装备环境工程实施探讨[J]. 装备环境工程, 2006, 3(5): 1-6.
WANG Dong, LIU Yan, SUN Li-min, et al. Discussion on implementation of environmental engineering for carrier based materiel[J]. Equipment environmental engineering, 2006, 3(5): 1-6.
- [14] 吴红光, 董洪远, 齐强, 等. 舰载武器装备海洋环境适应性研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(1): 161-165.
WU Hong-guang, DONG Hong-yuan, QI Qiang, et al. Research on the ocean environment suitability of Ship-borne weapon equipment[J]. Journal of naval aeronautical engineering institute, 2007, 22(1): 161-165.
- [15] 王琦, 王洁. 舰载装备环境适应性协同设计方法研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(1): 64-67.
WANG Qi, WANG Jie. Research on collaborative design method of environmental worthiness of ship-borne equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(1): 64-67.
- [16] 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.
WANG Yun-hui, YANG Yu-xing, WANG Zhong, et al. Discussion on implementation of environmental engineering for electronic equipment[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2008, 26(3): 1-5.
- [17] 钱学森. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
QIAN Xue-sen. On system engineering[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1982.
- [18] 徐明钊, 刘靖东, 唐昭, 等. 系统工程方法在航天行业发展中的应用[J]. 科技经济导刊, 2018, 26(19): 3-5.
XU Ming-zhao, LIU Jing-dong, TANG Zhao, et al. Application of system engineering method in the development of aerospace industry[J]. Technology and economic guide, 2018, 26(19): 3-5.
- [19] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 520-525.
QIAN Xue-sen, XU Guo-zhi, WANG Shou-yun. Technology of organization management—System engineering[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(6): 520-525.
- [20] 李炳蔚, 祝学军, 林德健, 等. 基于时序的导弹武器系统环境适应性分析方法[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 70-74.
LI Bing-wei, ZHU Xue-jun, LIN De-jian, et al. Analysis method for environmental adaptability of missile weapon system based on time sequence[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(11): 70-74.
- [21] 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.
ZHU Lei, WANG Lian-jie, XU Ming, et al. Consideration for the development of environmental worthiness simulation technology[J]. Equipment environmental engineering, 2007, 4(3): 91-97.
- [22] 陈典斌, 柯宏发, 韩东霏. 仿真技术在装备环境适应性试验与评价中的应用[J]. 中国设备工程, 2017(22): 102-104.
CHEN Dian-bin, KE Hong-fa, HAN Dong-fei. Application of simulation technology in equipment environment adaptability test and evaluation[J]. China plant engineering, 2017(22): 102-104.
- [23] 罗成, 徐文正, 曾晨晖. 用于环境适应性分析的航电产品应力仿真技术[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 10-14.
LUO Cheng, XU Wen-zheng, ZENG Chen-hui. Stress simulation technology for aviation electronics environmental worthiness analysis[J]. Equipment environmental engineering, 2011, 8(1): 10-14.
- [24] 肖凯宇, 贾立印, 雷斌, 等. 武器装备电磁环境适应性分析方法研究[J]. 通信对抗, 2010(2): 48-52.
XIAO Kai-ning, JIA Li-yin, LEI Bin, et al. Research on weaponry electromagnetic environmental effects analysis[J]. Communication countermeasures, 2010(2): 48-52.