

环境适应性设计与分析

基于时序的导弹武器系统环境适应性分析方法

李炳蔚, 祝学军, 林德健, 南宫自军, 张子俊

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 目前导弹武器系统的环境适应性分析方法主要是基于剖面分析的定性分析, 分析结果比较依赖个人经验, 某些情况下可能无法全面识别风险, 并且出现反复发作的环境适应性问题。基于此, 文中开展了相关研究, 全面、合理地分析导弹武器系统的环境适应性, 提升装备质量特性水平。提出了基于时序的武器装备环境适应性分析方法, 给出了基于时序的环境要素分析方法、产品要素分析方法和基于研制流程的工程实施方法。将该方法应用于某战术导弹, 发现了63项环境适应性风险, 其中有3项影响成败, 通过采取针对性改进措施确保了首飞和后续多发飞行试验任务连续成功。该方法可以充分暴露武器系统环境适应性风险, 并且可以作为一种风险识别方法应用到试验充分性分析和测试覆盖性分析中, 具有重要的工程应用和推广价值。

关键词: 时序; 导弹武器系统; 环境适应性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.013

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)11-0070-05

Analysis Method for Environmental Adaptability of Missile Weapon System Based on Time Sequence

LI Bing-wei, ZHU Xue-jun, LIN De-jian, NAN-GONG Zi-jun, ZHANG Zi-jun
(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The present analysis method of environment adaptability of missile weapon system is mainly qualitative and is based on the environmental profile analysis. The traditional method, which relies on personal experience, may not identify all of the flight risks, and induces recurrent problems. Therefore, the related study was carried out to analyze the environmental adaptability of the missile weapon system fully and reasonably, as well as improve the general quality of weapons. Analysis method of environmental adaptability missile weapon system based on time sequence was proposed. Analysis methods of environment factor and product factor were given throughout the time sequence, and the engineering implementation process was proposed. The method was applied to a tactical missile. Sixty-three environmental related risks were found, including 3 vital risks. The first flight finally succeeded, via targeted measures, followed by several successful missions. The method presented could expose environment adaptability risks fully, and can be applied in the analysis of experiment sufficiency and test coverage as a risk identification method. Therefore, the method has important significance in engineering application and popularization.

KEY WORDS: time sequence; missile weapon system; environmental adaptability

收稿日期: 2018-04-25; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11602306)

作者简介: 李炳蔚(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器环境工程。

武器装备环境适应性是指其在寿命期预计可能遇到的各种环境作用下能实现其所有预定功能、性能和（或）不被破坏的能力^[1]，是武器装备系统重要的质量特性，也是武器系统作战性能的重要组成部分，直接影响部队战斗力的生成、保持和提高。美国国防部对武器装备损坏情况进行了统计，发现环境造成的损坏占整个使用过程的 50% 以上，库存期环境导致的损坏占有所有损坏的 60%^[2]。开展武器装备的环境适应性研究工作是非常重要的，也是非常急需的，研究针对武器系统的环境适应性的分析方法具有重要意义。

目前我国导弹武器环境适应性分析工作主要参考 GJB 4239《装备环境工程通用要求》，通常按照环境分析、环境适应性设计、环境适应性试验及评价的顺序开展工作，其中的环境分析偏重于环境的分析和环境条件的制定^[1,3]。在环境适应性设计期间，应进行环境适应性分析，对装备和产品的环境适应性进行预计，找出产品的耐环境水平和薄弱环节，然后改进设计，从而减少实物试验的数量，提高研制效率，节省研制成本^[3-5]。王冬等对舰载武器环境工程的实施进行了研究，提出了在方案设计阶段对环境适应性进行预先评价的重要性，提出了通过比较产品的使用环境和产品耐受环境极限对环境适应性进行工程评估的方法^[6]。朱蕾等提出了采用仿真分析方法对装备

的环境适应性进行预估，并指出该方法的困难在于缺乏足够的先验模型数据、失效规律复杂等^[7]。段楠楠等对武器装备系统的力学、自然、电磁环境适应性进行了分析^[8-14]。李涛等对材料、元器件和单机级产品的环境适应性进行了分析^[15-18]。上述分析方法主要是结合各类环境效应的环境适应性的定性分析。

目前的环境适应性分析方法主要是定性评价，在工程实践中该项工作往往陷入依靠个人经验和“头脑风暴”式的工程评估，使得环境适应性分析和预计收效甚微。为此，提出了基于时序的武器装备环境适应性分析方法，以产品、时序和环境作为线索全面梳理武器系统的环境适应性薄弱环节，识别、控制和化解研制风险，提高产品的质量水平。采用该方法，可以在方案阶段提前暴露问题，避免方案反复。在工程研制阶段可以提高研制效率，节省研制成本。在型号出厂前可以识别型号风险，为任务成功奠定基础。该方法中“时序”为广义时序的概念，强调导弹全寿命周期经历环境的时序因果关系和相互影响。

1 方法概述

基于时序的导弹全寿命周期环境适应性分析方法框图见图 1，研究思路如下。

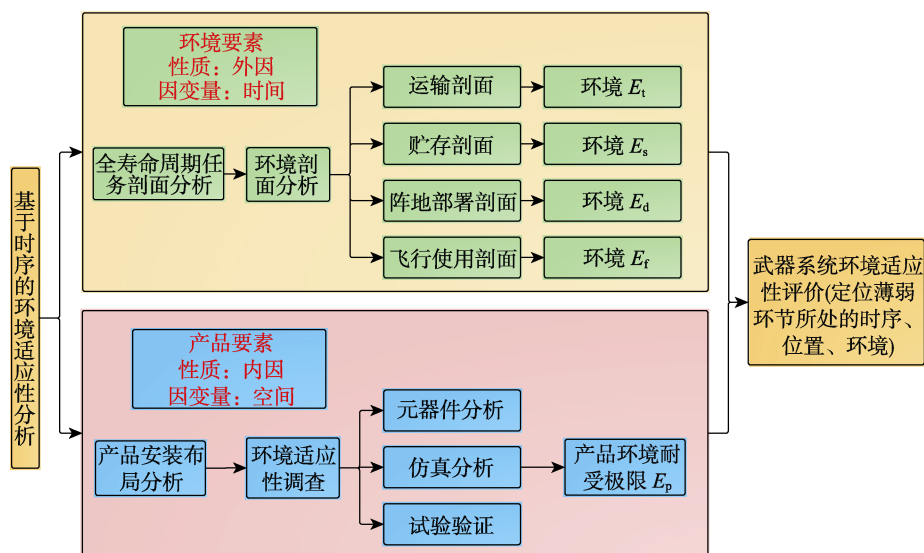


图 1 基于时序的环境适应性分析方法

1) 在型号的方案阶段或研制阶段初期开展基于时序的导弹全寿命周期环境适应性分析工作，该方法分为环境要素分析和产品要素分析两部分工作。

2) 环境要素分析：主要是对导弹在全寿命周期内遇到的所有环境剖面按照时序进行梳理分析的工作，包括外界的气象或自然环境，也包括可能的人为操作、平台发射、时序动作等产生的诱导环境。对于产品环境适应性问题，环境要素属于外因，该部分工作按照时序进行梳理，最终给出各个剖面下的环境及

量值 E_t 、 E_s 、 E_d 、 E_f 等。这些环境可以是单因素环境，也可以是多因素环境。

3) 产品要素分析：主要是对导弹武器各个部位产品的环境耐受极限进行全面梳理统计的工作。环境极值的获取方法包括元器件环境极值统计法、产品环境适应性数值仿真分析法、试验验证法等，最终得到产品耐受高低温、振动、冲击等环境的极值 E_p 。

4) 通过对比产品耐受环境量值 E_p 和外界环境因素量值 E_t 、 E_s 、 E_d 、 E_f ，可以暴露武器系统的环境适

性薄弱环节或风险点，并定位到设备、安装位置、时间段、具体环境。

5) 根据环境适应性风险点，制定针对性的措施。比如采取环境控制措施、更换元器件或其他设计改善措施。

2 环境要素分析

导弹武器装备通常从出厂到完成飞行任务的全过程可以分成若干个任务剖面，一般任务剖面可以分为运输剖面、贮存剖面和飞行使用剖面。在每个任务期中所遇到的环境因素的时间过程，称为环境剖面。每个任务环境剖面考虑的环境因素可以分为力学环境、热环境、自然环境和电磁环境等种类。以某型陆

基车载发射导弹为例，其在全寿命周期经历的环境剖面如图2所示。

2.1 贮存环境应力

贮存环境通常按照后勤装卸运输、遮蔽储存、无遮蔽储存给出环境应力，考虑的环境有：贮存期间由于后勤短途装卸运输造成的振动、冲击等运输环境，通常可以与运输环境合并考虑；贮存时的高低温、淋雨、沙尘、盐雾、太阳辐射等自然环境。

2.2 运输环境应力

导弹武器系统在进行机动时处于运输状态，通常机动方式有公路运输、铁路运输、航空运输和水路运输，考虑的环境如下。

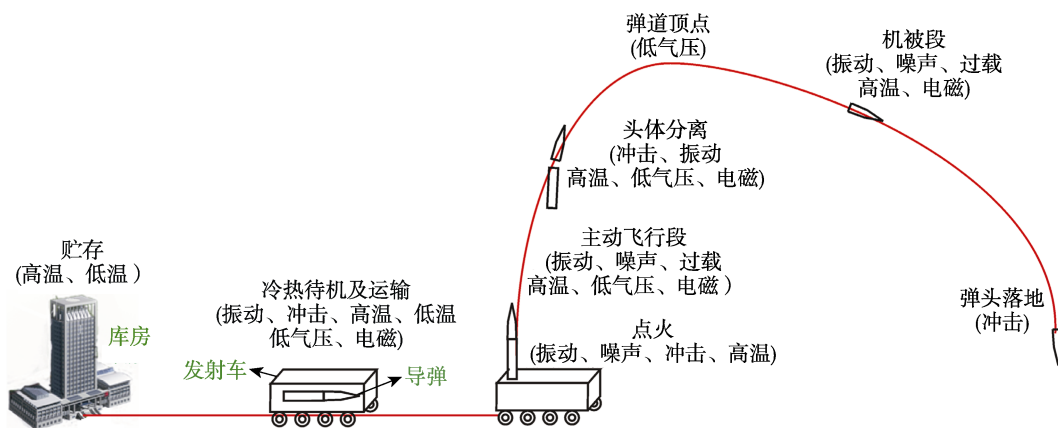


图2 某车载发射导弹环境剖面

1) 公路运输环境：公路运输的振动环境是运输车或发射车在路面行驶时，由于路面起伏不平 and 车辆发动机激励引起的。冲击环境是由运输车或发射车经过凹凸路面颠簸，以及搬运、吊装过程中的跌落和碰撞等引起的。

2) 铁路运输：一般铁路运输按照 10 : 1 的里程比例折算到公路运输加以考虑。

3) 海上运输：振动环境是由波浪激励、机械设备工作振动等引起的；冲击环境是由其他武器发射、搬运、吊装过程中的跌落和碰撞等引起的。

4) 挂机飞行的振动环境主要是气动噪声引起的，挂机飞行的冲击环境是由搬运、吊装、着陆过程中的跌落和碰撞等引起的。

5) 运输自然环境：包括温度、湿度、低气压、沙尘、盐雾等环境。

2.3 飞行使用环境应力

导弹从点火发射到命中目标期间经历的环境为飞行环境，主要的飞行环境应力如下。

1) 飞行振动环境：飞行振动环境主要是由发射、发动机喷流噪声、发动机推力脉动、气动噪声引起。

2) 加速度环境：加速度环境主要与导弹的飞行

弹道过载相关。

3) 噪声环境：噪声环境是由发射、发动机喷流噪声和气动噪声引起的，气动噪声由动压和脉动压力系数决定。

4) 冲击环境：飞行冲击环境主要是由发射、级间分离、头体分离、抛罩等引起的，分离冲击环境取决于分离方式、火工品种类和导弹舱段结构形式。

5) 自然环境：飞行过程中的自然环境包括温度、温度冲击、湿度、低气压、淋雨等，这些环境主要与飞行弹道模式相关度较高。

3 产品要素分析

首先梳理武器系统组成，将各个系统的结构、设备组成进行分析，重点了解各系统产品的结构、材料、元器件组成。随后，分析产品的环境效应，确定其耐受环境极限。

环境作用于武器装备，会使武器装备性能降低、可靠性降低、使用寿命缩短、研制成本提高。对于单项环境对武器装备的影响已有较多研究。

1) 高温：高温可使材料产生膨胀、软化、老化，发生变形、强度降低，从而导致功能下降和丧失。具

体现在结构粘合、卡死、松动，机电部件过热导致导热绝缘性能改变，有机材料褪色开裂，热失配效应导致涂层局部脱粘鼓包，密封件失效，电路稳定性发生变化，继电器开关范围改变，含能材料燃烧加速，润滑油脂性能降低等。

2) 低温：低温会影响材料的力学性能、电气性能、热性能，导致装备性能下降、失效甚至损毁。体现在材料硬化脆化导致抗冲击性能降低、配合间隙变化，影响构件性能，湿气冷凝结霜结冰导致光学仪器性能下降，元器件可靠性降低，固体炸药产生裂纹，固体燃料燃速降低等，润滑性能下降。

3) 高湿：高湿会在装备表面形成水膜，造成材料腐蚀变质直至失效，引起光学仪器表面起雾，水汽促进微生物生长加速密封件失效，电子设备和精密器件受潮会引起电气性能下降，炸药和推进剂受潮性能下降，润滑性能下降。

4) 沙尘：对装备产生磨损、沉积、堵塞等多种形式，造成装备磨损加速，活动部件卡死，增大接触电阻，电路短路，沙尘与空气摩擦产生高压静电（高达 3000 V）对通信和雷达设备有破坏作用。

5) 振动冲击：振动冲击等力学环境会使设备产生变形、疲劳、损伤、断裂，引起设备发生机械故障，引发功能失效，对人员和设备造成间接伤害。比如装备结构产生裂纹和破坏失效、连接件/紧固件发生松动，结构发生塑性变形，电子产品的绝缘强度改变，管路焊缝破坏引起串火，元器件针脚脱粘引起设备失效，电路板/电接头/电热丝损坏，密封件失效等。

当有多个环境交互作用时，环境因素的综合作用可能会加剧对产品的影响，比如温度、湿度综合环境会使霉菌加速生长，加剧对产品的腐蚀，湿度和沙尘结合可使装备材料加剧腐蚀失效。

获取产品耐受环境量值常用的方法如下：通过环境摸底试验、可靠性强化试验等试验获取产品的环境耐受极限；通过环境虚拟试验或者仿真，采用工程软件对产品在各种环境下的响应的应力进行仿真，根据元器件的耐受极限预估产品的环境耐受极限；根据元器件能够耐受的环境极限确定产品的耐受极限，尤其对于高低温，元器件耐受极限往往可以很好的代表产品的耐受极限；根据类似产品以往经历过的试验量级预估产品的耐受极限。

4 实施方法

4.1 分析流程

基于时序的环境适应性分析流程如图 3 所示，该方法的分析流程如下所述。

1) 首先根据任务剖面编制导弹武器系统的环境剖面。

2) 针对特定的时序，开展环境因素的分析，对时序和环境分别进行编号 i, j ，第 i 个时序第 j 项环境为 E_{ij} 。这里的环境指的是设计环境，已在使用环境基础上考虑了，该项工作由总体设计部门负责。

3) 分析导弹武器系统的组成，对产品进行编号，对第 k 个产品进行环境效应分析。通过试验、仿真和

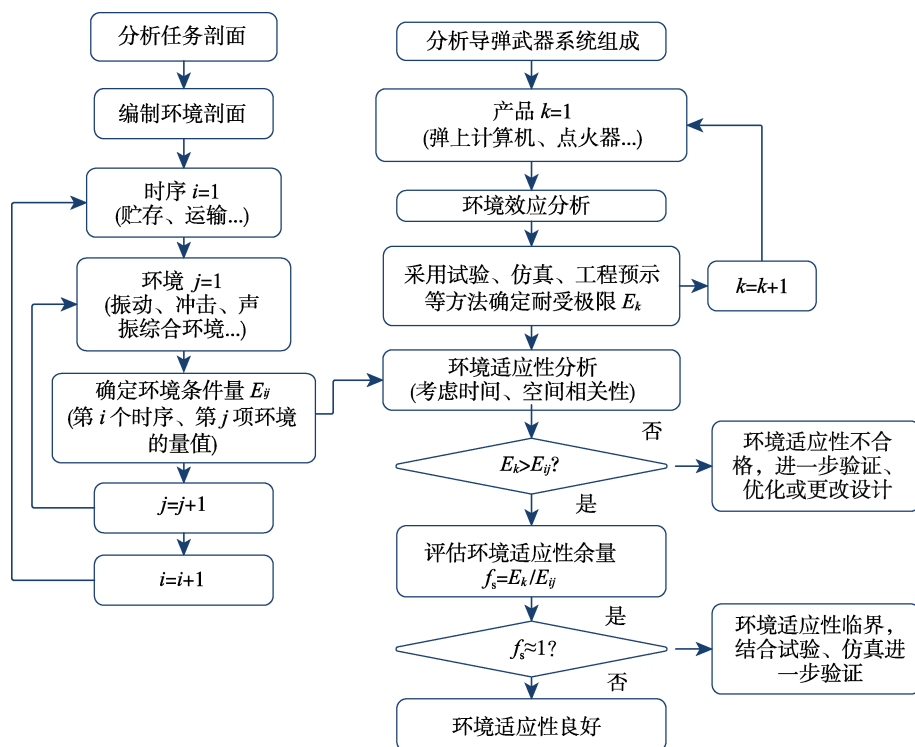


图 3 导弹武器环境适应性分析流程

工程预示的方法得到其环境耐受极限为 E_k 。该项工作由武器系统总体设计部门分解,由产品设计单位负责开展。

4) 根据环境条件和产品耐受环境信息,开展环境适应性分析。分析时考虑不同时序环境的时间相关性(比如时间累计效应、之前时序动作对后续时序的影响)和空间相关性(比如产品工作对其他部位产品环境的影响),该项工作由总体设计部门负责。

5) 根据环境适应性分析结果,评价环境适应性余量 $f_s = E_k / E_{ij}$ 。如果 $f_s < 1$,表明环境适应性不合格,应进一步验证、优化或更改设计方案;如果 f_s 接近 1,说明产品的环境适应性处理临界状态,需要考虑各种不确定性,结合试验、仿真等手段进一步验证产品的环境适应性;如果 $f_s > 1$,可以认为环境适应性良好,但是 f_s 过大可能会导致较高的成本。

6) 根据产品的环境适应性分析结果,识别分系统、武器系统的环境适应性薄弱环节,指导后续的设计和试验工作,为武器系统环境适应性的提升提供关键支撑。

4.2 组织实施

基于时序的环境适应性分析可以在导弹武器的方案设计、工程研制、定型和批产等各个阶段开展,但应尽早开展,最好在方案设计和工程研制之初开展。方案阶段进行基于时序的环境适应性分析,可以定位设计薄弱环节,有效识别风险。对于地面试验、飞行试验出现故障的情况,该项工作也可以辅助 FTA 进行环境适应性分析,为故障定位、排除和验证提供重要支撑。

通常质量部门负责基于时序的环境适应性分析工作的策划、组织和管理,总体单位负责工作的技术抓总,各分系统负责按照模板反馈重要产品的环境适应性调查结果,包括产品的敏感环境、敏感元器件、环境耐受极限等信息。

5 结果及讨论

该方法目前已应用于多型战术导弹的环境适应性分析工作中,并且应用到了型号研制的各个阶段。在方案阶段,可以及时发现环境适应性设计薄弱环节,及时完善导弹总体方案;在工程研制阶段,尤其是在首飞前,可以全面发现导弹飞行环境适应性技术风险,通过试验验证、仿真分析,采取改善措施,确保飞行任务成功。环境适应性的分析工作应尽量提前开展,以避免方案和试验的反复,降低研制成本,提高研制效率。

采用基于时序的导弹武器系统环境适应性分析方法,对某型导弹武器首飞飞行力、热、电磁、自然环境适应性进行了分析,发现了 63 项潜在的环境适应性风险,其中有 3 项影响成败。通过试验、仿真、

改进设计等手段将上述风险一一化解,最终该导弹取得了多发飞行试验成功,证明了该方法的有效性。

6 结语

提出了基于时序的武器装备环境适应性分析方法,给出了基于时序的环境要素分析方法、产品要素分析方法和基于研制流程的工程实施方法。该方法已成功应用于多型导弹武器系统,可以充分暴露武器系统环境适应性风险,并且可以作为一种风险识别方法应用到试验充分性分析和测试覆盖性分析中,具有重要的工程应用和推广价值。

参考文献:

- [1] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
- [2] 宣兆龙. 装备环境工程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [3] 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.
- [4] 张培跃, 钱思宇. 航空类军工产品设计定型环境鉴定试验概述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(5): 57-60.
- [5] 王德, 祝华远, 王海东, 等. 远海条件下装设备的环境适应性要求分析[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 49-51.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 段楠楠, 赵英俊, 周豪. 地空导弹装备环境适应性研究与分析[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 88-91.
- [9] 何俊, 陶小创, 石高荣. 导弹地面装备自然环境适应性评价方法探讨[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 91-97.
- [10] 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.
- [11] 吴勋, 孟涛. 地地导弹环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 30-36.
- [12] 曲晓燕, 邓力. 舰载武器海洋环境适应性分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 138-142.
- [13] 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.
- [14] 何恩山, 李栋, 姬广振. 炮射导弹武器系统环境适应性要求与分析[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 102-104.
- [15] 李涛, 易忠, 高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 37-40.
- [16] 朱辉. 电子信息装备环境适应性评价探讨[J]. 电讯技术, 2014, 54(2): 212-217.
- [17] 沈阳, 李修和, 李勇. 雷达装备复杂电磁环境适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 1-5.
- [18] 马荣国, 范红梅, 肖军强, 等. 宇航元器件力学环境适应性评价技术研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 11(3): 1-5.