

专题——特种车辆环境适应性设计和试验技术

环境工程在特种车辆研制中的应用

苏倩, 张保军, 高琳, 刘振廷, 李爽

(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 根据特种车辆的使用要求、环境研究工作现状及现存的问题, 结合 GJB 4239—2001《装备环境工程通用要求》在特种车辆研制和试验中的经验总结, 系统性地从环境工程管理、环境分析、环境试验及评价等方面探讨了特种车辆环境工程工作项目、开展时机、实现方式等内容, 包括建立环境工程工作机制、建设气候环境信息数据库、环境效应定量化分析、分层级细化气候环境适应性指标和开展复杂综合气候环境试验考核等。此外, 提出了在特种车辆研制过程中, 把气候环境适应性相关工作前置, 并贯穿于全寿命周期的建议, 为在特种车辆研制与生产中开展环境工程技术研究工作提供了可借鉴的思路, 支撑发挥环境工程对特种车辆气候环境适应性的保障作用, 有效提升特种车辆的气候环境适应性。

关键词: 环境工程; 特种车辆; 环境适应性; 环境分析; 环境试验; 环境评价

中图分类号: TJ811

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)06-0001-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.06.001

Application of Environmental Engineering in Development of Special Vehicles

SU Qian, ZHANG Baojun, GAO Lin, LIU Zhenting, LI Shuang

(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: Based on the use requirements of special vehicles, the current status and existing problems of environmental research work, combined with the experience summary of GJB 4239—2001 “General Requirements for Equipment Environmental Engineering” in the development and testing of special vehicles, the work items, occasions, and implementation methods in the development stage of special vehicles were systematically explored from the aspects of environmental engineering management, environmental analysis, environmental test and evaluation, in response to the current situation of special vehicle environmental research. This included establishing environmental engineering mechanisms, constructing environmental information database, quantitatively analyzing environmental effects, refining environmental worthiness indicators at different levels, and conducting complex comprehensive environmental tests. In addition, a suggestion to prioritize and conduct the environmental worthiness work throughout the entire life cycle of special vehicles was put forward. It provides a reference for conducting environmental engineering research in development and production of special vehicles, ensures the environmental worthiness of special vehicles by application of environmental engineering, and effectively enhances the environmental worthiness of special vehicles.

KEY WORDS: environmental engineering; special vehicle; environmental worthiness; environmental analysis; environmental test; environmental evaluation

收稿日期: 2024-04-29; 修订日期: 2024-05-31

Received: 2024-04-29; Revised: 2024-05-31

引文格式: 苏倩, 张保军, 高琳, 等. 环境工程在特种车辆研制中的应用[J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 1-7.

SU Qian, ZHANG Baojun, GAO Lin, et al. Application of Environmental Engineering in Development of Special Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 1-7.

特种车辆结构复杂、种类繁多^[1],面向多元化的使用发展需求,特种车辆面临更加严峻的气候环境适应性挑战。作为重要的通用质量特性之一,环境适应性是在其寿命期内预计可能遇到的各种环境因素的作用下,依然可以实现所有预定功能、性能和不被破坏的能力^[2]。环境适应性是特种车辆功能、性能指标以及其他通用质量特性实现的基础,直接影响其在全寿命周期内的效能发挥。然而,当前对特种车辆气候环境适应性工作的重视程度存在不足,大多主要关注结构设计和功能实现等方面,在气候环境影响分析、设计及改进措施等方面开展的工作较少,这种开环的气候环境适应性工作现状使得特种车辆在环境试验中,以及使用阶段暴露出诸多气候环境适应性问题。

随着环境工作的发展,人们逐渐认识到开展装备环境工程工作是提升环境适应性的主要途径之一^[3]。目前,特种车辆行业对于开展系统性的环境工程工作存在不足,主要关注材料和部组件的环境试验研究^[4],对于整车系统的气候环境适应性设计和试验方法研究偏少,大多只是参考相关标准^[5-6]要求开展气候环境试验,并未充分考虑特种车辆在复杂综合恶劣气候条件及使用场景中的效能底数等重要问题。研究表明^[7],可以通过环境试验考核检验车辆的气候环境适应性,但不能消除或降低环境对车辆造成的影响。为了提升特种车辆的气候环境适应性,急需把气候环境适应性工作前置,落实装备环境工程工作,并贯穿全寿命周期,通过科学论证和气候环境分析,提出合理的气候环境适应性要求,作为设计输入,通过环境试验考核和验证耐环境设计信息,为改进优化提供支撑,从而改变当前仅靠环境试验验证对装备使用要求满足性的现状。

装备环境工程面向复杂的特种车辆系统,涵盖了环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价等方面内容^[2]。本文基于当前特种车辆气候环境适应性研究工作中面临的问题,从环境工程管理、气候环境分析、气候环境试验和适应性评价等方面探讨在特种车辆领域贯彻落实装备环境工程理念的实施思路和方法,切实支撑特种车辆气候环境适应性提升。

1 环境工程管理

环境工程管理为落实装备环境工程相关工作发挥着重要的支撑作用,包含制定环境工程工作计划、环境信息管理、环境工程工作评审和对相关方的监督等4项主要内容^[2]。目前特种车辆行业缺乏支撑开展环境工程各项工作的管理制度和考核机制,大多采用将与环境适应性相关的研制要求和工作计划等文件作为设计输入的方式对环境工程工作进行管控。作为一项与可靠性研究相似的系统性工作,环境工程工作

可以参考可靠性工作范式,建立和完善环境工程工作体系,成立环境工程专项组,负责规划、指导、管理和控制环境工程重要工作内容和关键节点,有计划地组织开展环境适应性分析、设计、试验和评估等系列工作,促使各项工作之间衔接紧密、脉络清晰。

环境信息管理是一项重要的基础环境工程管理工作,特种车辆使用过程中,面临的气候环境信息繁杂庞大,包括自然气候环境和诱发气候环境。目前气候环境适应性基础数据积累较少^[8],无法有效支撑开展环境分析、环境适应性要求确定、环境适应性设计和新环境试验方法的研究等工作^[9]。虽然目前也开展了部分数据测试、收集、分析及管理工作,但还没有形成能够支持开展特种车辆环境适应性设计的数据格式,不利于数据共享与复用^[10],与实现数据驱动设计的目标还有较大的差距。后续应积极开展特种车辆全寿命周期可能涉及的环境数据及其对应的环境效应数据的全面化采集、结构化处理、标准化存储和系统性应用等相关工作的顶层策划和实施,迭代形成环境信息数据库^[11],促进数据流转、循环和复用,实现环境信息驱动车辆环境适应性提升的目的。

2 气候环境分析

2.1 气候环境影响

气候环境分析工作主要是根据气候环境对车辆效能发挥的影响程度,进一步明确车辆气候环境适应性要求,作为开展气候环境适应性设计和试验考核的依据。我国领土辽阔,南北跨越纬度约50°,东西跨越经度约62°,自然气候环境因素丰富,主要包括气温、气压、太阳辐射、雾、雨、雪、沙尘、风等。下面汇总了各类气候因素对特种车辆的主要影响。

气温分为高温和低温,低温条件下,材料容易硬化和脆化,强度下降,抗冲击载荷能力减弱^[12],车辆履带可能断裂,直接影响机动性能的发挥。低温还会引起材料收缩变形,出现密封失效、油水渗漏等问题。此外,油水在低温条件下黏度增加,可能出现凝固、冻结或析蜡等现象,从而增加车辆起动阻力,造成起动困难^[13-14]。在严寒天气下,车载光学器件、显示界面、玻璃窗也容易出现雾化、延迟响应、结冰等故障。严寒地区地面积冰或积雪使得路面土层松滑、泥泞,不利于辨识路况,影响车辆通过速度,还容易造成陷车、侧滑、翻车事故,不同积雪深度对特种车辆行驶的影响见表1。

高温条件下,特种车辆冷却系统散热效率降低,致使发动机冷却液温度超出正常工作温度范围,引发发动机进气不足、燃料燃烧不完全、功率下降和燃料消耗率增加等一系列问题。高温会引起材料特性变化,不同材料的热膨胀系数不同,从而导致部组件之间配合间隙改变,出现卡滞或松动等现象。车辆油液

表 1 积雪对特种车辆行驶的影响
Tab.1 Effects of snow on special vehicle marching

特种车辆 种类	积雪厚 度/cm	可能机动程度
轮式车辆	<7.5	无影响
	7.5~15	车轮需加防滑铁链
	15~45	车轮需加防滑铁链, 头车需配 备扫雪设备
	>45	需使用扫雪机械
履带车辆	<30	允许行驶时速 20~25 km/h
	30~40	允许行驶时速 10~15 km/h
	40~50	允许行驶时速 7~9 km/h
	50~60	允许行驶时速 6~8 km/h
	60~80	允许行驶时速 5 km/h
	>80	一般不能行驶

在高温条件下黏度变小, 润滑效果变差, 出现部件间摩擦加剧或者油液渗漏的问题。此外, 特种车辆门窗关闭状态下, 由太阳辐射和车辆产热部件热辐射等因素诱发的高温, 使车内温度高于人体正常生理卫生标准, 导致人体舒适性、工作效率和持续工作时间都极大程度地降低。

在雾、雨、雪、沙尘等能见度不良的气候条件下, 大气透明度差, 能见距离缩短, 便于隐藏, 但对特种车辆的行进和输送, 尤其会对编队行进和基于视觉的车辆智能跟随等使用场景产生不利影响。在能见度低的条件下, 即使使用雷达等导航设备, 车辆仍可能发生偏航或迷路等问题, 且可能严重影响激光测距和夜视器材的正常工作。

高海拔地区具有气压低、空气稀薄、太阳辐射强、昼夜温差大等特点^[15-16], 特种车辆在低气压环境下进气量不足, 导致起动困难, 降低发动机的功率输出和削弱冷却系统的散热能力, 发动机冷却液温度易超出正常工作温度范围^[17]。车辆也易出现密封外壳变形、焊缝开裂、密封组件漏气或漏液等问题。此外, 低气压环境条件下, 空气介电常数小, 空气抗电强度低, 可能出现电弧、电晕放电等现象, 引起误操作。

沙尘环境中, 沙尘颗粒会淤积在发动机进气空气滤芯外侧, 增加发动机进气阻力和减少进气量, 造成发动机进气量不足、燃料燃烧不完全、功率下降和燃料消耗率增加等问题。此外, 机械传动部件、部组件缝隙等部位易堵塞沙尘, 增大运动阻力, 活动部件磨损严重, 引发机械卡滞^[18]。沙尘颗粒与空气摩擦可能产生静电, 静电沉积导致接触电阻增大, 造成电路短路, 对通信系统、雷达等电子设备产生不利影响^[19]。

2.2 气候环境适应性要求

自然气候环境因素对车辆工作性能的影响机理能够为合理确定环境适应性要求提供技术支撑。目前特种车辆气候环境适应性要求一般只包含整车系统

级别的指标要求, 如整车贮存环境温度、整车工作环境温度、湿度和海拔高度等。除此之外, 还有一些类似能够满足某地区使用的定性要求。这些描述都较为笼统和模糊, 需要根据目标使用场景对分系统和部件的气候环境适应性要求进一步细化, 才能直接有效支撑车辆气候环境适应性设计^[4]。此外, 目前大多依据经验积累开展车辆气候环境适应性设计, 或是采用将环境试验标准中的试验条件作为环境适应性要求这种一刀切的处理方式, 这些均不利于特种车辆气候环境适应性的提高。

气候环境适应性要求包括特种车辆在其寿命期可能面临的自然和诱发气候环境对应的环境适应性要求, 以及车载部件所处的平台微环境对应的环境适应性要求^[20], 确定气候环境适应性要求需要综合考虑以下 3 点:

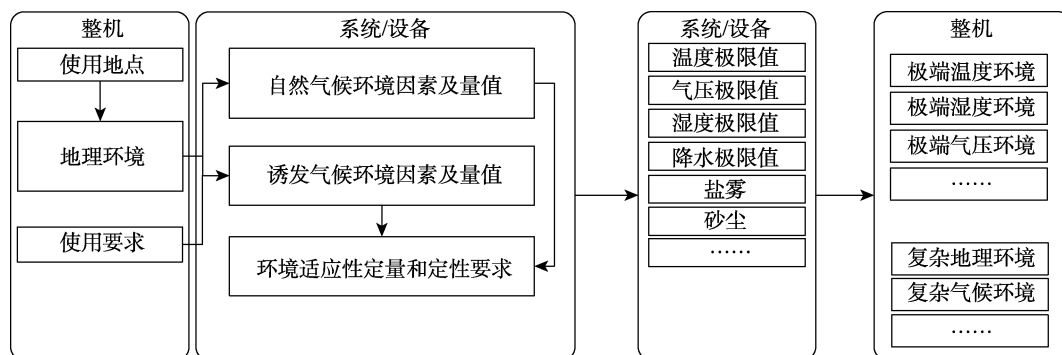
1) 特种车辆工作过程中, 由于平台微环境会受到车辆对自然环境和诱发环境的封闭转换作用、周围设备的传热影响以及车载环控系统工作的影响等^[21-22], 整车系统及各部件面临的气候环境因素及量值存在差异, 应对整车和各区域分别提出气候环境适应性要求^[20,23-24]。

2) 一般将实车测试的气候环境量值作为确定气候环境适应性要求的数据参考, 但不能直接等同。这是因为实测的气候环境量值对应的车辆运行工况未必是目标使用场景中可能出现的极限状态, 由此应在实测结果基础上, 进一步分析得出的环境量值作为气候环境适应性要求更有利于改善车辆的耐环境能力^[4]。

3) 气候环境适应性要求与特种车辆的气候环境剖面密切相关, 需结合复杂综合气候环境条件对车辆的影响, 从材料、部件、分系统乃至整车等层级定量分析和定性分析, 包括气候环境因素、影响对象、影响机理、影响后果等方面, 确定主要的气候环境因素及组合。装备气候环境适应性要求在研制周期各阶段是逐渐细化和迭代的, 傅耘等^[9]梳理了航空装备各层级产品环境适应性要求的研究思路(如图 1 所示), 为明确特种车辆气候环境适应性要求提供了可借鉴的思路。

3 气候环境适应性试验

多元化使用发展需求背景下, 特种车辆使用过程中面临的气候环境复杂多变。提高车辆实际适用性是新时代提出的新要求^[25], 需要构建贴近实际的复杂综合气候环境条件, 开展特种车辆气候适应性试验研究^[26]。伴随着环境模拟试验技术的发展和对环境适应性试验的需求, 环境模拟试验在航空、航天、航海、陆地等各大领域越来越得到重视, 同时在装备研制阶段发挥着越来越重要的作用。低气压、高低温、湿热、降水、风砂、振动、动力加载等环境模拟能力

图1 航空装备各层级的环境适应性要求明确思路^[9]Fig.1 Environment worthiness requirements for each equipment level^[9]

奠定了开展综合气候环境模拟试验方法研究的基础,为特种车辆复杂综合气候环境适应性考核验证提供了有力的试验支撑。

气候环境试验是检验特种车辆气候环境适应性是否满足设计要求的关键环节,校验适应性设计的合理性。为了全面系统地摸清车辆的气候环境适应性,在制定研制计划时,需要参照 GJB 4239^[2]规划环境适应性研制试验、环境响应调查试验、环境适应性鉴定试验和使用环境试验工作^[2,20],并根据需要加大对环境适应性研制试验和环境响应调查试验的开展力度,摒弃将鉴定环境试验作为事后把关的被动工作模式^[27],遵循“试验-分析-改进-校验”的工作思路,逐步促进特种车辆正向设计和提高环境适应性。

气候环境适应性试验设计应考虑车辆全寿命周期使用工况、整车及部件层级试验需求、气候环境因素等多个方面,基于特种车辆寿命期环境剖面,确定试验科目及其开展顺序,依据特种车辆环境适应性要求设计各项试验环境条件,包括环境应力和时间。根据特种车辆结构特点、工作原理及使用工况,设计环境试验步骤和规划气候环境适应性表征参数采集方案,收集气候环境试验有效数据,结合环境信息管理工作,积累环境数据。

4 气候环境适应性评价

环境适应性是衡量特种车辆耐环境能力高低的重要标志之一,环境适应性评价是一个对车辆耐环境能力是否满足环境适应性要求的判断过程^[28-29]。一般特种车辆气候环境适应性评价包括确定评价对象、评价内容、评价准则、评价方法、数据来源等内容。评价对象包括部件、分系统、整车系统等,评价内容主要是分析评价对象对温度、湿度、气压、雾、雨、雪、砂尘等因素的适应能力。试验过程中,测试采集的气候环境数据和暴露的故障问题是评价数据的来源,评价准则是各项气候环境适应性定量或定性指标要求。特种车辆气候环境适应性评价的基本流程如图2所示。

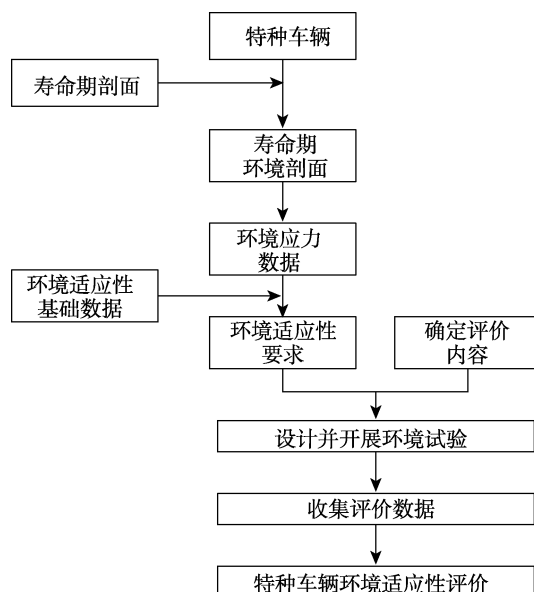


图2 环境适应性评价的基本程序

Fig.2 Basic process of environmental worthiness evaluation

环境适应性评价应关注连续性、关联性和量化,连续性指评价过程要贯穿于车辆寿命周期的各个阶段^[30],且需要在上一阶段基础上,根据新的进展状态和要求进行新的评价,及时发现当前阶段存在的环境适应性缺陷,并提出改进措施。由此可知,特种车辆全寿命周期的气候环境适应性评价工作是一个动态迭代过程。关联性是指气候环境适应性评价要结合环境工程中提倡的环境适应性研制试验、环境响应调查试验、鉴定试验和使用环境试验等各类试验同步进行,同时将部件级环境试验与整车系统环境试验相结合进行综合评价。量化是指对环境效应进行量化分析,由此得出特种车辆工作性能随气候环境量值的变化规律,支撑开展环境应力驱动环境适应性设计研究^[31]。

5 结语

环境适应性是设计赋予特种车辆的一个重要质量特性,也是影响车辆效能发挥的重要因素之一。在

特种车辆行业推行落实环境工程工作任务艰巨,建议采用双管齐下的方法,以管理和技术两方面为抓手,有效支撑特种车辆环境适应性的提升,具体内容主要包括以下4点:

1) 环境工程是一项与可靠性工作类似的系统性工程,可以参考可靠性工作模式^[32],在特种车辆领域逐渐建立和完善环境工程工作机制^[33-34],成立环境工程专项组,负责规划并开展环境工程管理和技术支持工作。同时,加强宣贯装备环境工程要求、原则和理念,将环境适应性工作纳入特种车辆研制流程,并制定计划和进行工作部署,确保与车辆功能、性能、可靠性等工作并行开展。

2) 以某型车辆作为试点,套用 GJB 4239 提倡的环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价等方面内容,实施过程中促进跨学科跨部门协作研究,将气候环境适应性通过“设计-试验-改进”的工作模式纳入特种车辆^[35]。由此,探索环境工程与车辆研制、生产和管控过程的接口关系,积累经验,完善要求,形成模式。

3) 根据特种车辆环境工程特点,以 GJB 4239 为顶层指导,制定相关的环境工程项目剪裁标准等系列配套标准,推广至其他车辆研制工作中。

4) 构建贴近实际的复杂综合气候环境条件,进行特种车辆气候适应性试验研究,利用特种车辆设计、试验、评审等有利资源,开展环境适应性基础数据采集、收集、分析、管理和入库等全流程工作,以积累的环境效应数据及改进措施经验为指导,有效支撑正向设计及试验考核。

参考文献:

- [1] 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.
KANG R L, FENG X Y, HE E S. Development Requirements of Weapon Materiel Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 56-58.
- [2] 中国人民解放军总装备部.装备环境工程通用要求:GJB 4239—2022[S].北京:总装备部军标出版发行部,2022.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. General Requirements for Materiel Environmental Engineering: GJB 4239—2022[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department, 2022.
- [3] 张燕,李颖,杨晓然.国内外装备环境工程标准化比较研究[J].装备环境工程,2009,6(3):56-59.
ZHANG Y, LI Y, YANG X R. Comparative Study of Standardization of Materiel Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(3): 56-59.
- [4] 张忠,张帆.浅谈装甲车辆研制中的环境工程[J].装备环境工程,2010,7(3):49-55.
ZHANG Z, ZHANG F. On Environmental Engineering in Armored Vehicle Development[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 49-55.
- [5] 国防科学技术工业委员会.装甲车辆试验规程 起动性能试验:GJB 59.3—87[S].北京:国防工委军标出版发行部,1987.
Committee of Science, Technology and Industry National Defense. Test Operations Procedure for Armoured Vehicles Starting Performance Test: GJB 59.3—87[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the National Defense Industry Commission, 1987.
- [6] 中国人民解放军总装备部.军用装备实验室环境试验方法 第4部分:低温试验:GJB 150.4A—2009[S].北京:总装备部军标出版发行部,2009.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel Part 4: Low Temperature Test: GJB 150.4A—2009[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department, 2009.
- [7] 丁杰,陈圣斌,郝宗敏.GJB 4239《装备环境工程通用要求》在直升机研制中的应用研究[J].装备环境工程,2017,14(11):20-26.
DING J, CHEN S B, HAO Z M. Application of GJB 4239 “General Requirements for Equipment Environmental Engineering” in Helicopter Development[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 20-26.
- [8] 唐平,黄晓霞.环境试验数据资源建设的思考[J].装备环境工程,2014,11(6):140-147.
TANG P, HUANG X X. Consideration of Environment Test Data Resource Construction[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 140-147.
- [9] 傅耘,史左敏,李敏伟.新体制下装备环境适应性试验鉴定的思考[J].装备环境工程,2023,20(5):1-5.
FU Y, SHI Z M, LI M W. Thoughts on Materiel Environmental Worthiness Test and Evaluation in New System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 1-5.
- [10] 周堃,文邦伟,罗天元.进一步促进“环境试验与观测”专业服务型号的设想[J].装备环境工程,2008,5(6):11-14.
ZHOU K, WEN B W, LUO T Y. Considerations on Improving Service Functions of “Environment Test and Observation” Specialty for Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 11-14.
- [11] 祝耀昌,李敏伟,游亚飞.GJB 4239的作用和存在问题分析[J].装备环境工程,2008,5(6):1-6.
ZHU Y C, LI M W, YOU Y F. Analysis on the Roles and

- Deficiencies of GJB 4239[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 1-6.
- [12] 翁雷, 刘岩. GJB 150A 在某通信装备低温试验中的应用研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 47-51.
WENG L, LIU Y. Application Research of GJB 150A in Low Temperature Test of some Communication Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 47-51.
- [13] 焦贵利, 禹东方, 朱学斌, 等. 重型越野车低温快速启动技术研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2023, 52(2): 1-5.
JIAO G L, YU D F, ZHU X B, et al. Research on Speedy Cold-Starting Technology of Heavy Off-Road Vehicle[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2023, 52(2): 1-5.
- [14] 孙壮. 装甲车低温启动试验的研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(6): 63-64.
SUN Z. Armored Vehicle Cold Starting Experiment Research[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(6): 63-64.
- [15] 许翔, 刘瑞林, 董素荣, 等. 车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 63-66.
XU X, LIU R L, DONG S R, et al. On Development of Vehicle Simulated Plateau Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 63-66.
- [16] 许翔, 周广猛, 郑智, 等. 高原环境对保障装备的影响及适应性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 100-103.
XU X, ZHOU G M, ZHENG Z, et al. Research on Influence of Plateau Environment on Support Equipment and Its Environmental Worthiness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(5): 100-103.
- [17] 许翔, 刘瑞林, 刘刚. 内燃叉车高原环境适应性试验与评价研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(1): 194-197.
XU X, LIU R L, LIU G. Experimental and Evaluation Study on Plateau Environmental Adaptability of Internal-Combustion Forklift[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(1): 194-197.
- [18] 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 B W, ZHU X J, LIN D J, et al. Analysis Method for Environmental Adaptability of Missile Weapon System Based on Time Sequence[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 70-74.
- [19] 王一临, 罗兰. 提高武器装备的运输环境适应性[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 54-58.
WANG Y L, LUO L. Increasing Transport Environmental Worthiness of Weapons[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(5): 54-58.
- [20] 中央军委装备发展部. 装备环境工程文件编写要求: GJB 9157—2017[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2017.
Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Compiling Requirements of Material Environmental Engineering Files: GJB 9157—2017[S]. Beijing: National Military Standard Publishing and Distribution Department, 2017.
- [21] 傅耘, 祝耀昌, 陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 46-51.
FU Y, ZHU Y C, CHEN D M. Materiel Environmental Requirements and Their Determination Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 46-51.
- [22] 史明丽, 毛剑晖. 机载导弹特殊环境分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 57-60.
SHI M L, MAO J H. Special Environment of External-Store Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 57-60.
- [23] 康蓉莉, 姬广振. 装甲车辆环境剖面分析及环境量值确定[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 68-71.
KANG R L, JI G Z. Environmental Profiles Analysis and Environment Value Determination of Armored Vehicle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 68-71.
- [24] 赵海军, 金平, 陈跃良. 飞机地面局部气候环境研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 873-876.
ZHAO H J, JIN P, CHEN Y L. Investigation of Local Climate Environment of Aircraft in Ground Service[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 873-876.
- [25] 王正青. 面向实战摸清底数——谈复杂环境与边界条件下的武器装备试验鉴定[J]. 现代防御技术, 2019, 47(5): 1-7.
WANG Z Q. Combat Oriented Base Performance Testing: Testing Identification of Weapon System in Complex Scenes and Boundary Conditions[J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(5): 1-7.
- [26] 羊军, 赵书平, 李金国, 等. 军用地面雷达装备环境工程探讨[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 95-98.
YANG J, ZHAO S P, LI J G, et al. Discussion on Environmental Engineering of Military Ground Radar[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 95-98.
- [27] 胥泽奇, 宣卫芳. 环境工程在轻武器研制生产中的应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 22-24.
XU Z Q, XUAN W F. Application of Environmental Engineering in the Developing and Manufacturing of Small Arms[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(6): 22-24.
- [28] 王宏伟, 赵云峰, 陶帅. 装备全寿命周期环境适应性评价若干问题探讨[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 70-72.
WANG H W, ZHAO Y F, TAO S. On Environmental Worthiness Evaluation during Whole Life Cycle of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering,

- 2013, 10(1): 70-72.
- [29] 李玉兰, 董素荣, 刘瑞林. 装甲车辆环境适应性研究体系[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 82-86.
- LI Y L, DONG S R, LIU R L. Research System for Environmental Adaptability of Armoured Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(4): 82-86.
- [30] 施建荣, 王晓侠, 党弦. 装备全寿命环境剖面与任务剖面[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 18-20.
- SHI J R, WANG X X, DANG X. On Environmental Profile and Mission Profile of Materiel Life Cycle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 18-20.
- [31] 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.
- DONG S L. Development, Deepening and Synthesis of Equipment Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(4): 48-55.
- [32] 孙建勇, 祝耀昌. GJB4239《装备环境工程通用要求》简介[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 110-115.
- SUN J Y, ZHU Y C. Introduction to GJB 4239? a “General Requirements for Material Environmental Engineering”[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 110-115.
- [33] 陶文圣, 黄杰. 环境工程在导弹武器系统中的应用[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2): 70-72.
- TAO W S, HUANG J. Application of Materiel Environmental Engineering in Missile System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(2): 70-72.
- [34] 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): 24-28.
- LI B W, NIU Z L, ZHANG Z J, et al. Research on the Closed-Loop Control Method of Equipment Environmental Adaptability[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(8): 24-28.
- [35] 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 B P, WANG G, SUN L. Consideration of Materiel Environmental Engineering Management Based on Functional Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 1-6.