

舰船环境适应性设计方法探索与实践

蔡芬, 王涛, 徐静, 刘强

(中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

摘要: 探索舰船环境适应性的设计方法, 以提高舰船在各种复杂环境下的适应能力。分析了舰船环境适应性设计中面临的若干问题和改进提高方向, 参考借鉴国内外航空航天、电子等行业成功经验, 提出了指导舰船环境适应性设计的主要设计原则和工作内容。围绕改善环境条件、加强耐环境能力设计这 2 个方面, 提出了 3 种环境适应性设计方法, 包括基于规范的设计方法、基于环境仿真的设计方法、基于预使用验证的设计方法。根据舰船风浪环境适应性设计的特点和要求, 选择采用环境仿真和模型试验技术开展了应用研究。基于分析结果, 提出了增加水线面系数、调整浮心、优化线型等多项改进措施建议。采用环境仿真和模型试验相结合的方式, 可有效支撑舰船风浪环境适应性设计和评估, 这一方法具有较高的工程推广应用价值。另外, 未来应加大环境仿真技术的研究和应用力度, 尝试开展多因素综合环境仿真, 以进一步提高舰船的环境适应性。

关键词: 环境适应性; 舰船; 环境仿真; 模型试验; 风浪环境; 设计评估

中图分类号: U662.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)05-0057-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.05.007

Exploration and Practice of Environmental Worthiness Design of Warships

CAI Fen, WANG Tao, XU Jing, LIU Qiang

(China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

ABSTRACT: The work aims to explore environment worthiness design methods of warships, in order to improve the adaptability of warships in various complex environments. Current shortages and improvement directions in environment worthiness design of warships were analyzed. With reference to the experience of domestic and foreign aerospace and electronics industries, the main principles, work contents and design methods to guide the environment worthiness design of warships were put forward. Focusing on improving environmental conditions and strengthening environmental resistance design, three environmental worthiness design methods were proposed, including design method based on specifications, design method based on environmental simulation and design method based on peruse verification. According to the characteristics and requirements of warships' environment worthiness design, environment simulation and model test techniques were selected to carry out application research. Based on the analysis results, several improvement measures and suggestions were put forward, such as increasing the water-plane coefficient, adjusting the buoyant center and optimizing the hull form. Combination of environmental simulation and model test can better support the design and evaluation of warships' wind and wave environment worthiness, and is worthy

收稿日期: 2024-04-10; 修订日期: 2024-05-14

Received: 2024-04-10; Revised: 2024-05-14

基金项目: 军科委基础加强计划重点基础研究项目 (2020-JCJQ-ZD-224-00)

Fund: Key Basic Research Projects of the Basic Strengthening Plan of the Military Science and Technology Commission (2020-JCJQ-ZD-224-00)

引文格式: 蔡芬, 王涛, 徐静, 等. 舰船环境适应性设计方法探索与实践[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 57-65.

CAI Fen, WANG Tao, XU Jing, et al. Exploration and Practice of Environmental Worthiness Design of Warship[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 57-65.

of further engineered popularization and application. In terms of technical means, we should vigorously promote the research and application of environmental simulation. In terms of environmental test, we should carry out multi-factor comprehensive environmental simulation to further improve the environmental adaptability of warships.

KEY WORDS: environmental worthiness; warship; environmental simulation; model test; wind and wave environment; design and evaluation

近年来,设计师们开始逐渐重视舰船环境适应性设计工作,在舰船环境防护设计、环境适应性验证、环境适应性评估等方面开展了一些研究,取得了一定的科研成果,也为舰船环境工程实践提供了案例。其中,孙畅等^[1]针对舰船海洋自然环境及平台诱发电磁环境,提出了表面防护、抗磁场、电磁兼容设计、静电防护等一系列防护措施,以提高电子控制系统工作的稳定性和可靠性。吴昊等^[2]设计了一款船用新型薄膜扭矩传感器,并在装舰前预先开展了高低温、湿热、霉菌、盐雾等一系列环境适应性验证试验,确保其设计方案满足船用环境要求。汤文军等^[3]则充分考虑电动船舶海上航行时早晚温差大、相对湿度高、盐雾大等特点,对所设计的锂电池管理系统开展了一系列船用工况适应性试验,确保系统在各典型船用工况下均能正常、可靠地使用,这也为舰船开展系统层级的环境适应性试验提供了新思路。焦甲龙等^[4]应用多级模糊综合评价模型建立了一套水面舰船风浪环境适应性评价指标体系,并尝试在船型方案优选、船级评定等方面进行应用,最终得到的风浪环境适应性评价结果能以单一量化的综合评价值进行体现,并能较好地符合实际情况。由此可见,国内在舰船环境适应性设计-试验-评估等方面,目前确实已经开展了一些工作,积累了一些工程经验,但放在舰船环境适应性设计的整个设计流程中看,这些研究内容都只是舰船环境工程中的一部分,难以指导舰船环境工程的具体实施。另外,上述研究工作大多以后期的环境适应性试验验证和评估工作为主,而在前期主动开展环境分析、环境适应性设计的工作相对较少,导致舰船设计中环境适应性设计工作整体基础不牢,待到后面的试验环节才暴露出种种缺陷,不得不采取被动的补救措施,而这必定不会是最优的设计方案。现代战争的突发性和战场的不确定性必然要求舰船具有较好的环境适应性,能够在各种复杂多变的海洋环境中充分发挥其功能和性能,因此切实提高舰船环境适应性、将环境适应性设计融入贯穿型号研制全过程,提高装备的环境适应能力,已成为舰船装备研制的当务之需。

1 存在问题及改进方向

1) 环境工程规范体系尚未形成。指导武器装备环境工程设计的标准——GJB 4239《装备环境工程通用要求》^[5]已广为各行业所采用,在该标准中,已经明确将环境适应性作为产品的质量特性,规定把环境

适应性要求纳入武器装备的整个研制过程,其要求范围涵盖环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境适应性试验与评估等方面,从顶层牵引武器装备的环境适应性设计工作。然而,该标准是针对所有装备环境工程的顶层标准,在具体落实到舰船行业时,依然面临诸多挑战。首先,在环境工程的管理与实施中,由于总体所、系统设备责任单位、供应商等各方的职责往往不够明确,使得环境适应性要求落实和验证工作出现不少阻力。其次,环境分析的3个工作项目有交叉重叠,使用环境试验与自然环境试验的关系及试验顺序不明等问题,导致总体、系统及设备开展环境工作的设计深度不一,试验验证可信度不一。鉴于此,为规范舰船装备环境工程工作,需要着手规划和编制针对舰船环境工程的专项标准和规范。

初步构想的舰船环境工程标准和规范体系主要围绕环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境适应性试验与评估等4个主要任务进行梳理,对应从管理、技术要求、设计、试验与评价4个层面进行构建,确保每一项环境工作的开展都有明确的指导原则和操作要求。舰船环境工程标准和规范体系与环境工程任务之间的支撑关系见图1,由此构建的舰船环境工程标准和体系见图2。

2) 型号环境工程主管单位不明确。在舰船型号设计过程中,由于未明确型号环境工程主管单位,导致环境工作开展存在较大的随意性,如何结合现有的舰船型号研制工作模式,组织各系统设备单位有序、自主地开展环境适应性工作,形成环境适应性设计合力,也是当前型号设计中急需解决的问题。目前国内航空航天、电子行业在此已积累了不少经验,值得舰船行业进行借鉴,根据有关资料^[6-8],航空航天、电子行业采取的解决措施主要有2点:一是明确专门的环境工程主管单位,该单位的主要职责包括,在方案论证阶段,负责收集相关环境资料,并结合型号战术技术要求,对舰船环境适应性进行分析;在技术设计阶段,对装舰系统设备提出合理的环境适应性设计要求,并在技术规格书中明确定性、定量的环境要求;在型号工程研制阶段,负责跟踪新研改进系统设备的环境适应性设计,并协调解决环境适应性设计及指标达标等方面可能出现的问题;组织开展环境适应性试验和环境鉴定试验。二是大力培养环境分析工程师、环境适应性设计师和环境试验操作人员,将型号环境工程的各项工作具体落实到科研、研制、生产及试验等环节。

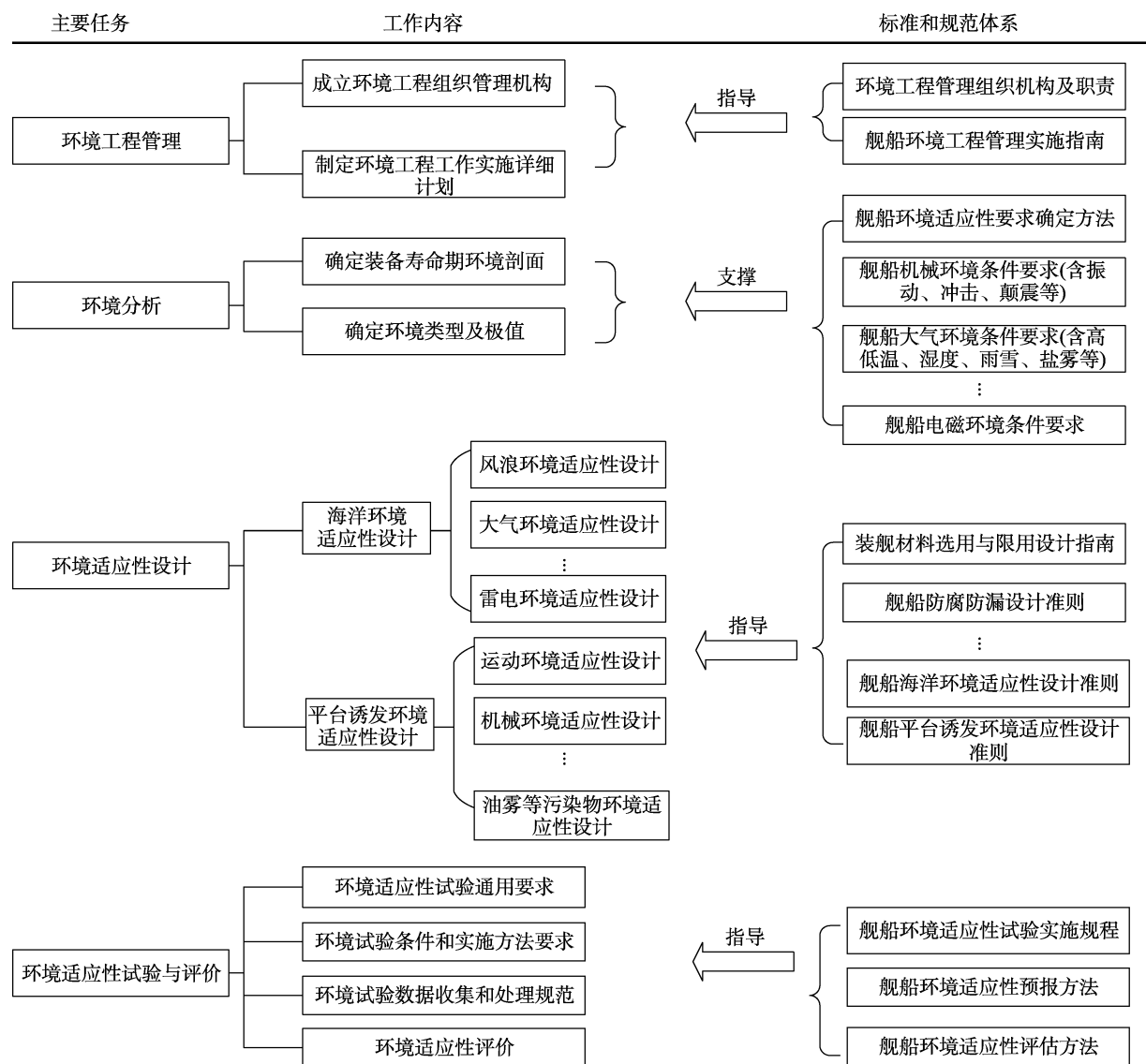


图 1 舰船环境工程标准和规范体系与环境工程任务的支撑关系

Fig.1 Supporting relationship between warship environmental engineering specification system and environmental engineering task

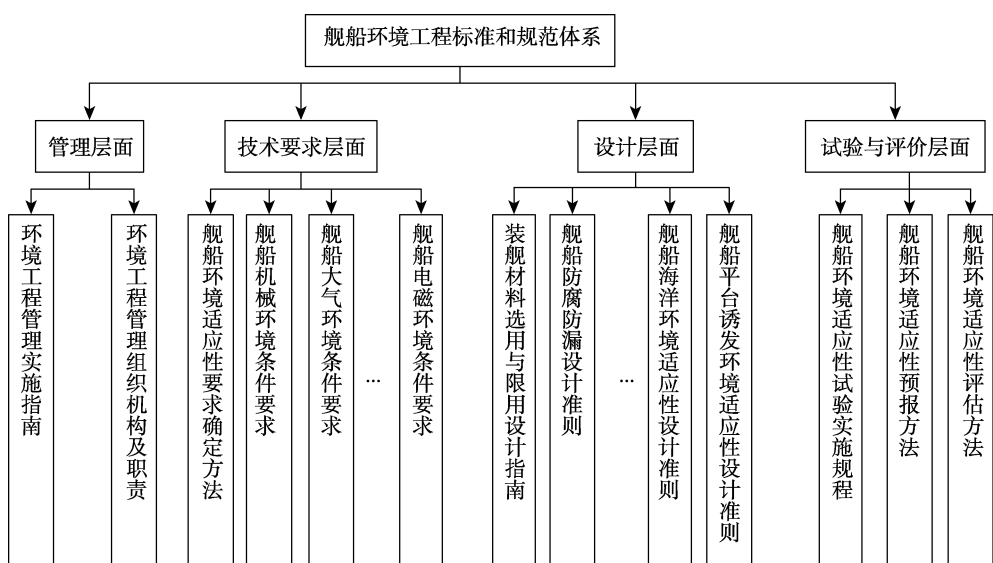


图 2 舰船环境工程标准和规范体系

Fig.2 Specification system of warship environmental engineering

3) 环境技术研究和应用投入不足。在舰船行业中,许多人将环境技术简化为环境试验技术,这实际上是一种误解。环境技术是一个复杂且多面的综合学科,它不仅涵盖了环境试验技术,还包括环境工程管理、数据收集、适应性设计、影响分析和评价等多个关键领域^[6]。当前,舰船型号设计面临盐雾、腐蚀、振动冲击、高温高湿等多种环境适应性挑战,这些问题的解决需要在环境基础技术方面加大研究投入,不断深化认识。同时,在综合环境试验方面,基础尚显薄弱,环境参数检测技术的不足、性能检测设备过度依赖进口、缺乏成熟的多因素综合环境实验室等问题^[9-13],都制约了我国对综合环境试验机理与影响效应的研究进度。为了解决这些问题,需要全面提升行业的技术能力和创新水平,推动环境技术的深入发展。

4) 环境仿真及验证技术成熟度不高。环境仿真及验证技术,也称为“虚拟环境试验”“环境数字仿真”,它是一种以计算机信息数字处理技术为基础的设计手段,可分析、评估和预测装备在实际环境中产生的环境效应及其对装备性能的影响。这种技术具有成本低、效率高、信息反馈全面、不依赖实物等优势^[14]。但目前国内环境仿真技术成熟度不高,工程应用也不广,仅在温度、振动、电磁辐射等方面有所普及,没有充分发挥其作为环境适应性设计手段的作用。与国内情况不同的是,美国早在20世纪60年代,就认识到环境仿真技术的作用。20世纪90年代以后,由于高技术装备研发与使用环境试验经费的增加,美国更加重视环境仿真研究,如今仿真设计技术已被纳入美国国防部的设计要求指导文件^[15-17]。在装备的研制过程中,全数字化仿真、半数字化仿真、模拟试验仿真已经得到广泛应用,成为不同研制阶段中评价装备环境适应性、预测装备服役寿命时必须进行的辅助设计手段^[18-20]。由此可见,国内的环境仿真及验证技术还存在较大的发展空间,待其技术成熟后,也会有更广泛的应用前景。

5) 环境基础数据库有待补充。环境基础数据库是开展环境分析、确定环境适应性要求、进行环境适应性试验与评价的重要基础,为了有效支撑环境工程相关工作,环境基础数据库应至少包括:自然环境数据库、舰船平台环境数据库、典型失效行为案例及分析库、设备/材料/零部件环境适应性评估数据库。在自然环境数据库方面,目前国内部分标准,如GJB 1172《军用设备气候极值》^[21]、GJB 1060《舰船环境条件要求》^[22]规定了舰船高低温、海况、盐雾等自然极端气候环境条件参数,但这2个标准已有近30年未更新,难以准确、合理描述当前我国甚至全球的复杂极端环境。至于舰船平台环境数据库方面,目前积累数据非常有限,后续还需要加强数据采集、整理和分析。另外,典型失效行为案例及分析库可以帮助设计师在之前的母型和设计基线上,更好地分析和解决

环境设计缺陷,避免类似问题的再度重现^[23],而设备/材料/零部件环境适应性评估数据库则有助于设计师在了解环境要求后快速完成设计选型^[24]。如今,国内外越来越多的行业已开展建立各种环境试验数据库和专家系统,并借助这些数据库更好地开展环境设计。如美国国家标准与技术研究院(NIST)和美国腐蚀工程师协会(NACE)合作建立的腐蚀数据库和专家系统为设计人员提供了重要的参考,帮助他们合理选材并解决设备腐蚀问题。

2 设计原则及主要工作

在开展舰船环境适应性设计工作时,应遵循以下原则:

1) 覆盖全层级、贯穿各阶段。对于组成层级多、系统构成复杂的舰船装备,环境适应性要求本身就是一个十分复杂的战技指标。为保证总体环境适应性指标的实现,必须按“总体—系统—分系统—设备”的层级进行逐级分解,充分考虑舰船使用环境的复杂性,系统设备自身复杂的结构和多种类材料的复杂性,系统设备在不同环境条件下的失效模式和变化规律,装备失效与环境应力的组合以及环境因子变化时序等。在此基础上,针对各层级的系统设备提出相应的环境适应性要求。

2) 以突出环境问题为研究重点。舰船长期在海洋环境中运行,涉及的环境因子多达20多种^[25],如果针对每个环境因子都开展环境防护设计,在工程上既不现实也无必要。国外有资料显示^[23],超过50%的舰载武器装备失效是由环境因素引起的,而其中主要的影响源自海洋环境的高盐度、高温高湿、海洋生物附着、振动和辐射等环境因素。因此,舰船环境适应性设计应以解决上述突出环境问题为重点,有意识、有侧重地开展环境适应性设计。

3) 综合的定量定性环境要求。舰船装备环境适应性要求根据各环境因子的特性确定,可以是定量要求,也可以是定性要求。如对于温度、振动等,可用表征应力强度的参数及其量值来表示,量化要求包括极限贮存温度、最高工作温度、振动谱型及其量值等。对于霉菌和海生物等,目前还无法定量表征其环境应力强度,则可用定性或半定性的要求规定在这些环境因素中允许受到影响或损坏的程度,如长霉到几级、表面受腐蚀面积和深度等。

4) 关注多环境因素综合效应。实际环境中,气候、介质、力学、生物等多种环境因素往往是同时存在的,这些综合环境因素因时序和量值的不同,对装备造成的环境影响也不同,而且多种环境因素的综合影响往往更加复杂,出现新的环境失效现象^[12],而该现象在单一的环境实验室条件下很难复现和测定,需要引起设计师的重视。目前舰船上比较常见的综合环

境因素影响包括温度-湿度-振动、温度-湿度-盐雾、温度-湿度-雨淋-太阳辐射、振动-噪声-温度等,但目前能在实验室环境中进行试验的仅有温度-湿度-振动、振动-噪声-温度等少数综合环境。

5) 考虑工程效费比和可实现性。设计中要考虑工程的效费比和可实现性,包括进度、成本、使用维护需求等^[25]。当技术上虽然可行、但实施难度极大或工程成本过高时,则应该在装备使用上采取规避策略。如 9 级高海况环境、复杂核生化战场环境等极端恶劣环境下的系统、设备及人员作业等。

按照 GJB 4239《装备环境工程通用要求》^[5]的相关要求,结合舰船环境适应性设计原则,确定环境适应性设计的主要工作容包括:进行舰船环境分析、确定定量及定性的环境要求、提出环境适应性设计方案、开展环境适应性预计。

1) 进行舰船环境分析。对舰船全寿命周期内的使用环境条件进行分析,目前工程上可行的方法主要有 2 种:一是收集与在研装备(产品)基本相似的装备(产品)使用环境数据,“基本相似”是指装备(产品)在任务需求、使用地域或所处平台、工作性能等方面都基本类似;二是通过实测得到所需的使用环境数据,但环境数据实测过程和环境数据的处理需要满足 GJB 4239《装备环境工程通用要求》^[5]的相关要求。

2) 确定定量及定性的环境要求。环境要求包括环境适应性要求和环境适应性验证要求 2 个方面。环境适应性要求应细化为一个可以考核和评估的技术指标,为了合理确定该要求,需要先系统地分析各种环境对装备性能、安全性及可靠性等的影响,筛选确定出关键环境,再结合已获取的装备(产品)使用环境数据和 GJB 1172《军用设备气候极值》^[21]、GJB 1060《舰船环境条件》^[22],针对各环境类型明确具体的环境参数量值。环境适应性验证要求则是一种试验验证或分析要求,作为下一阶段开展环境适应性验证和评估的输入。

3) 提出环境适应性设计方案。环境适应性设计应与其他总体设计同步开展,环境适应性设计方案应纳入总体方案设计的研究内容之一,并随总体设计方案一并送审。在此过程中,应充分利用各种先进的设计理念和方法,针对筛选确定出的关键环境,有意识地加强产品耐温度、抗腐蚀、耐振、防爆以及电磁兼容性等的设计,在材料、工艺、结构等各方面采取抗环境的防护措施,把环境影响控制在允许范围内。同时,在舰船总体资源可承受的条件下,也可以借助舰船平台现有的舱室环境控制系统,为某些特殊设备创造一个微环境。舰船微环境的创造虽然在一定程度上降低了对系统设备的环境要求,但同时必然消耗总体的舱室、质量、能量等资源,增加了舰船总体的设计负担,因此必须权衡利弊,合理确定。

4) 开展环境适应性预计。采取计算、仿真、样件试验等技术手段,验证环境适应性设计方案的合理

性、工程可实现性,发现产品设计、工艺、材料和元器件选型方面可能存在的缺陷,如存在,则需要通过改进技术方案进一步提高产品的环境适应能力。

3 环境适应性设计方法

舰船环境适应性设计的具体实施途径主要有 2 类:一类通过改善所处的环境条件,减弱环境的影响;另一类通过各类防护设计,加强自身耐环境的能力。围绕这 2 个方面,主要采用的设计方法有如下几种。

3.1 基于规范的设计方法

在舰船设计中,总体所负责开展环境分析,确定各层级系统设备的环境要求,包括气候环境适应性、机械环境适应性、电磁环境适应性等定量和定性的环境要求。同时,编制并下发环境适应性设计准则,对舰船设备及元器件的选用、控制和筛选、结构、电路、工艺设计等做出详细规定,以指导设计人员开展装备详细的设计工作。各下级系统、设备研制单位根据总体所下发的环境适应性设计准则,开展详细的环境适应性设计工作,同时融入前期设计经验,发现薄弱环节,并改善设计,通过迭代优化,提高舰船在各种复杂环境下的适应能力。

3.2 基于环境仿真的设计方法

由于自然环境试验数据的积累周期较长,实验室环境试验又有一定的局限性,不能完全满足装备研制和试验验证要求,而虚拟仿真试验技术因为其灵活、快捷、低成本及可视性等优点,近年来在武器装备环境适应性设计中得到了较广泛的应用。装备环境适应性仿真设计的主要工程流程如图 3 所示。

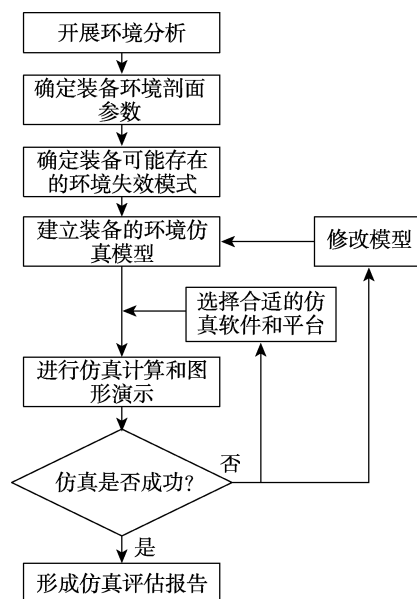


图 3 装备环境适应性仿真流程

Fig.3 Simulation process of equipment environment adaptability

3.3 基于预使用验证的设计方法

为了设计出环境适应性高、通用化、系列化、模块化的产品,引入现代环境适应性设计思想,并基于该思想提出了基于预使用验证的环境适应性设计方法。该方法尤其重视研制试验与使用验证,强调试验本身是一种观测手段,而非仅仅是考核手段^[26],具体的实施过程如下:在初步设计阶段,针对不同等级的装载平台和应用环境,对装备环境适应性进行型谱规划;在详细设计阶段,在工程条件允许的情况下,应用当前的新材料、器件、设计、工艺和制造水平,尽可能使产品的环境适应能力提高到目前可能达到的

高水平;预先开展大量的仿真分析和模拟激化试验,暴露装备(产品)潜在问题,提高产品的健壮性,对装备(产品)的环境适应能力进行精确的预示与评估。目前,这种设计方法在国外工业界得到广泛推广,以波音公司为代表^[26],通过这种设计方法使得产品具有更全面、更出色的环境适应性能力,能够在相对较长时间内应用于多个装载平台和多类应用环境,极大避免了重复研制或频繁改进的情况。

3.4 3种设计方法比较

综合上述3种典型的环境适应性设计方法,比较其优缺点,见表1。

表1 环境适应性设计方法对比

Tab.1 Comparison of environmental adaptability design methods

序号	设计方法	主要优点	主要不足
1	基于规范的设计方法	低成本	继承性不高,可能存在设计反复;不能预先评估
2	基于环境仿真的设计方法	可预先评估、不依赖实物、可重复、成本低	受仿真软件能力限制,应用有限;仿真精度及可信度存在不确定性
3	基于预使用验证的设计方法	可预先评估、结果可行度高、避免设计反复	需要大量样件、研制成本高且周期长

4 舰船风浪环境适应性设计应用案例

如上所述,舰船环境适应性设计涉及环境因素多,涵盖技术领域广,本文只选择舰船环境适应性设计中非常重要,同时也非常具有代表性的一项——舰船风浪环境适应性设计进行举例说明。舰船风浪环境适应性是指舰船在风浪、水流、水温、盐度、气候等外界海洋环境条件下,不仅能够被动地保持其原有的功能和性能,甚至可以主动利用外界海洋环境提高自身性能。舰船的风浪环境适应性之所以非常重要,是因为其直接影响舰船耐波性、快速性、操纵性及稳性等总体性能指标,关系舰船在实际海浪环境中的综合作战效能。非常有代表性则是因为其在适应性设计上兼具主动利用和被动防护2种技术途径,同时在仿真预报和试验评估方面技术成熟度也较高,工程应用可信度高。在某产品研制过程中,项目组尝试了环境仿真与预使用试验验证相结合的方法,开展了该型舰船风浪环境适应性的提升工作,取得了明显成效。

4.1 环境工程管理

为了规范本项目环境工程的实施,组建了专门的设计师队伍,确定了舰船风浪环境适应性工作思路及设计流程,并编制了一系列环境工程管理文件,以指导具体工作的开展,主要包括:环境适应性工作要求、环境适应性工作计划、风浪环境适应性设计准则(包括耐波性设计准则、操纵性设计准则、稳性设计准则等)、耐波性等航行性能数值预报方法、波浪载荷模型试验方法等。舰船风浪环境适应性设计流程如图4所示。

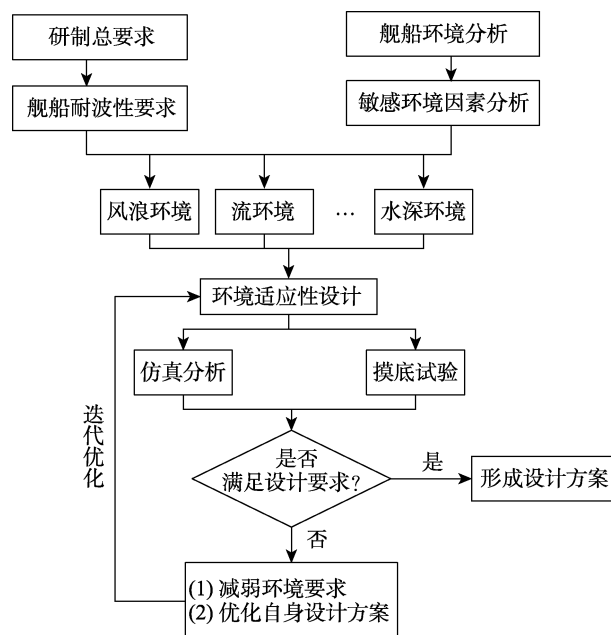


图4 舰船风浪环境适应性设计流程

Fig.4 Design process of warship wind and wave environment worthiness

4.2 环境分析

结合本产品的使命任务和使用海域,收集该产品所处的海洋环境。从广义上来说,海洋环境包括风、浪、流、海水温度、盐度、气候等多个环境因素,而根据以往设计经验,这些环境因素中,主要是风、浪、流对舰船航行性能影响较大,因此重点构建风、浪、流模拟环境。在收集典型远洋海域的相关数据后,通

过风浪流涌特征分析与波浪演化模拟技术, 建立非线性、多峰、方向扩散的海浪环境。根据风剖面模拟, 建立风场模拟环境; 集成海水温度与黏性、密度等关联数据, 构建出不同海域的海洋环境模拟器。

4.3 环境适应性设计优化

分析风、浪、流敏感环境因素对耐波性、快速性、操纵性和稳性的影响, 基于风浪环境适应性设计准则, 开展了舰船风浪环境适应性设计工作, 提出了舰船初始设计方案。采用仿真计算, 对初步设计方案下的快速性、耐波性、操纵性和稳性进行了分析, 基于分析结果提出了增加水线面系数、调整浮心纵向坐标、优化艏艉线型等多项优化建议, 并再次通过仿真分析、水池试验等进行设计验证和指标预报。部分方案的风浪环境适应性仿真和试验验证如图 5~7 所示。

4.4 环境适应性试验与评价

为评价该产品的风浪环境适应性, 构建了评价指标体系。鉴于该产品研制要求中对安全航行、高海况下自防御作业和飞机起降作业等的要求较高, 因此评价指标体系中主要选取了能表征该能力的总体性能指标, 即将快速性、耐波性、稳性作为评价指标的第一层级, 将单位排水量总阻力、作业率、抗风能力作为评价指标的第二层级, 将纵摇响应、横摇响应、重点部位垂向加速度响应作为评价指标的第三层级, 其评价指标体系如图 8 所示。

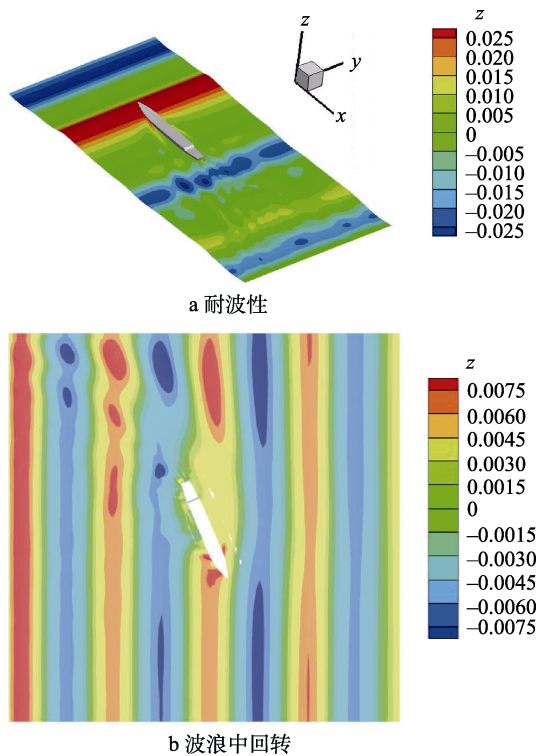


图 5 舰船风浪环境适应性仿真
Fig.5 Simulation diagram of warship's worthiness to wind and waves: a) seakeeping; b) turning in waves

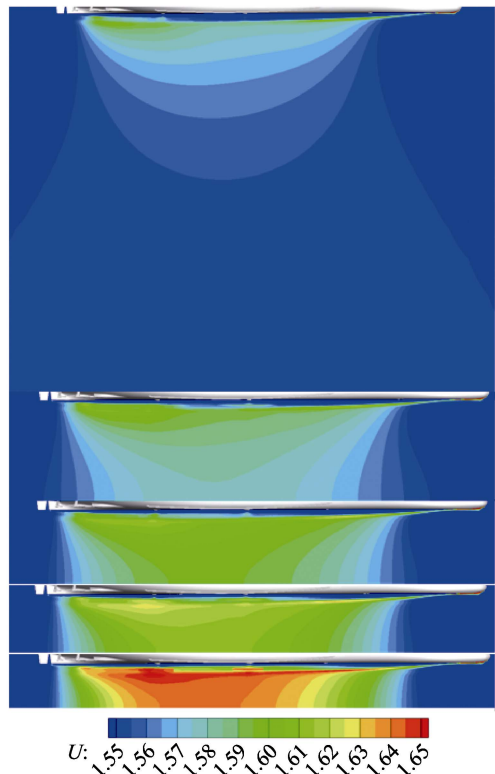


图 6 舰船浅水仿真 (波浪中回转)
Fig.6 Simulation diagram of warship in shallow water (turning in waves)

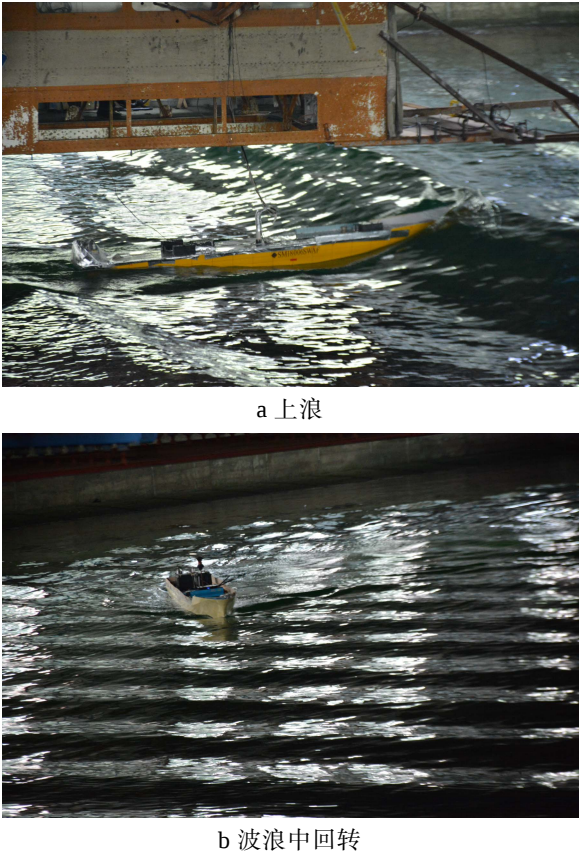


图 7 舰船风浪环境适应性模型试验
Fig.7 Model test diagram of warship's worthiness to wind and waves: a) upwelling; b) turning in waves

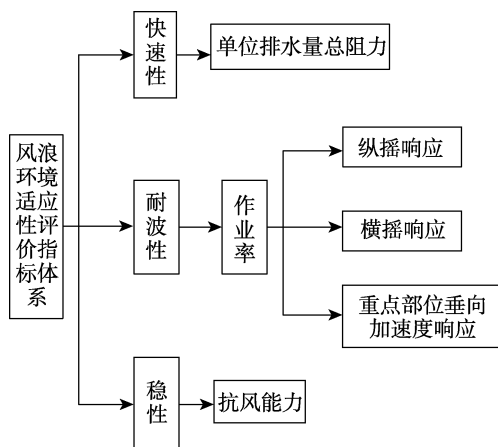


图8 环境适应性评价指标体系

Fig.8 Evaluation index system of environmental worthiness

在构建风浪环境适应性评价指标体系后，基于层次分析法和专家咨询确定各个指标权重系数。通过仿真计算或水池试验得到初始设计方案和改进后优选方案的指标值，各指标值经过无因次转化后得到单评价指标的评价值，根据权重系数加权单评价指标的评价值后，即可得到综合评价值。经计算，初始设计方案的综合评价值为 54.63，改进后优选方案的综合评价值为 87.41，即在 6 级海况下的改进后优选方案环境适应性综合评价值提高约 60%，结果见表 2。

表 2 方案综合评价对比

Tab.2 Comparison of comprehensive evaluation values of schemes

指标	权重	初步设计方案		改进后优选方案	
		指标值	评价值	指标值	评价值
单位排水量总阻力	0.558	204.91	60.0	181.20	100.0
顶浪 180°（纵摇）	0.186 7	3.22	34.5	2.23	59.0
顶浪 180°（首部垂向加速度）	0.026 7	4.97	62.4	4.27	65.3
艏斜浪 150°（纵摇）	0.061 2	3.07	40.0	2.08	59.9
艏斜浪 150°（横摇）	0.038 5	2.27	73.8	3.26	65.8
艏斜浪 150°（首部垂向加速度）	0.006 9	4.91	62.6	4.15	65.9
抗风能力	0.122	57	60.0	91	100.0
综合评价值		54.63		87.41	

5 结语

近年来，虽然设计师对舰船装备环境适应性的重要性有了较高的认识，但由于舰船环境工程规范体系尚未建立、环境基础数据不足、环境仿真及试验验证技术成熟度不高等困难，再加上对舰船装备环境工作管理和认识上的不足，使得舰船环境适应性设计工作开展不够全面、也不深入。为了支撑舰船环境工作的开展，本文提出了舰船环境工程规范体系初步框架，

并对舰船环境适应性设计的主要原则、工作内容和设计方法等进行了概述。同时，以舰船风浪环境适应性设计为例，说明了舰船环境工程在实际工程中的具体实施流程，并验证了环境仿真、预使用验证设计方法的应用效果。

通过工程实践表明，在舰船研制过程中，深入贯彻环境适应性自主改进设计思想，加强环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境适应性试验与评估等环境适应性设计工作，可以使舰船环境适应性提高至目前允许的最高水平。未来战争中，舰船部署的海域会越来越广泛，值班期间遇到的环境条件更加复杂多变，舰船的环境适应性将会成为制约装备性能发挥，甚至决定战争胜负的重要因素。因此，舰船环境适应性设计工作还“任重而道远”，后续在技术手段方面还应加大环境仿真技术的研究和应用，在环境试验方面也应开展多因素综合环境试验的尝试，为舰船环境适应性设计提升提供能力保障。

参考文献：

- [1] 孙畅, 韩允. 舰船电子设备环境适应性及其电磁兼容性设计[J]. 船电技术, 2010, 30(5): 53-56.
SUN C, HAN Y. Design of Warship Control System Environment Protection and EMC[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2010, 30(5): 53-56.
- [2] 吴昊, 金岫, 顾凯荣, 等. 某新型船舶扭矩传感器试验分析[J]. 机电设备, 2023, 40(4): 81-86.
WU H, JIN X, GU K R, et al. Experimental Analysis of New Type of Marine Torque Sensor[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2023, 40(4): 81-86.
- [3] 汤文军, 蒋怀贞, 高健, 等. 锂电池管理系统的船用工况环境适应性分析[J]. 船海工程, 2022, 51(3): 100-103.
TANG W J, JIANG H Z, GAO J, et al. Environmental Adaptability Analysis of Lithium Battery Management System in Marine Operating Conditions[J]. Ship & Ocean Engineering, 2022, 51(3): 100-103.
- [4] 焦甲龙, 孙树政, 任慧龙. 水面舰船风浪环境适应性模糊综合评价方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(6): 667-673.
JIAO J L, SUN S Z, REN H L. A Method of Fuzzy Comprehensive Evaluation of the Adaptability of Surface Ships in Stormy Wave Environments[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(6): 667-673.
- [5] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, General Requirements for Equipment Environmental Engineering[S].
- [6] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
ZHU Y C. Introduction to Product Environmental Engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [7] 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.

- ZHAO B P, ZHANG T, SUN J L, et al. Design of Environmental Worthiness for Aerospace Product System[J]. Structure & Environment Engineering, 2013, 40(5): 1-9.
- [8] 王刚, 张化照, 刘靖东. 航天复杂产品系统研发的组织结构特征分析[J]. 企业技术开发, 2010, 29(11): 90-92.
- WANG G, ZHANG H Z, LIU J D. Analysis on the Features of the Organization Structure of the Research and Development of Astronautic Complex Products System[J]. Technological Development of Enterprise, 2010, 29(11): 90-92.
- [9] 胡思琪, 徐刚, 张泉清, 等. 航空装备模拟天空光环境试验标准化工作现状研究[J]. 航空标准化与质量, 2024(1): 12-15, 45.
- HU S Q, XU G, ZHANG Q Q, et al. Research on Standardization of Simulated Sky Light Environment Test of Aviation Equipment[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2024(1): 12-15.
- [10] 王春晖, 陈文杰, 贺天远, 等. 我国装备开展实验室环境试验现状与发展建议[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(S1): 122-127.
- WANG C H, CHEN W J, HE T Y, et al. Present Situation and Development Suggestions of Laboratory Environmental Test for Equipment in China[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(S1): 122-127.
- [11] 康志萍. 环境试验特点及其发展方向[J]. 环境技术, 2012, 30(4): 15-18.
- KANG Z P. The Characteristic and Development Direction of Environmental Test[J]. Environmental Technology, 2012, 30(4): 15-18.
- [12] 庞传和. 综合环境试验系统及其应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 26-29.
- PANG C H. The Combined Environmental Test System and Its Application[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(3): 26-29.
- [13] 陈循, 温熙森. 环境试验技术的现状综述与集成环境应力试验分析系统[J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(6): 81-85.
- CHEN X, WEN X S. The Situation Summarization of Environment Experiment Technology and Integration Environment Stress Experiment & Analysis System[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1998, 20(6): 81-85.
- [14] 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 L, WANG L J, XU M, et al. Consideration for the Development of Environmental Worthiness Simulation Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(3): 91-97.
- [15] 刘刚, 许翔, 董素荣, 等. 美陆军装备环境适应性试验与评价机制及启示外军研究[J]. 外军研究, 2012(12): 77-79.
- LIU G, Xu X, Dong S, et al. Test and Evaluation Mechanism of Equipment Environmental Adaptability of US Army and Its Enlightenment to Foreign Military Research[J]. Foreign Military Research, 2012(12): 77-79.
- [16] 曾望, 程卫红. 美陆军装备试验与鉴定体制概述(上)[J]. 国外坦克, 2009(8): 52-56.
- ZENG W, CHENG W H. Overview of U.S. Army Equipment Test and Appraisal System (First of Two)[J]. Foreign Tank, 2009(8): 52-56.
- [17] 曾望, 程卫红. 美陆军装备试验与鉴定体制概述(下)[J]. 国外坦克, 2009(9): 52-56.
- ZENG W, CHENG W H. Overview of U.S. Army Equipment Test and Appraisal System (Last of Two)[J]. Foreign Tank, 2009(9): 52-56.
- [18] HOU L S, SUN W. Numerical Methods for Optimal Control of Impressed Cathodic Protection Systems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37(16): 2779-2796.
- [19] WANG G H, LIU Z T, ZHANG B J, et al. Numerical Simulation of the Internal Flow Field of Test Chamber at High Altitude Environment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2599(1): 012025.
- [20] SANTANA DIAZ E, ADEY R. Optimising the Location of Anodes in Cathodic Protection Systems to Smooth Potential Distribution[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(9): 591-598.
- [21] GJB 1172—1991, 军用设备气候极值[S].
- GJB 1172—1991, Climatic Extreme Value of Military Equipment[S].
- [22] GJB 1060—1991, 舰船环境条件要求[S].
- GJB 1060—1991, Requirements for environmental conditions of ships[S].
- [23] 林武强, 徐定海. 舰艇装备环境及其影响和存在问题分析[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 48-52.
- LIN W Q, XU D H. The Influence and Existing Problems of the Environment for and on Carrierbased Materiel[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(2): 48-52.
- [24] 周利敏. 军工材料环境适应性标杆数据的应用[J]. 科技风, 2019(9): 76.
- ZHOU L M. Application of Benchmarking Data for Environmental Adaptability of Military Materials[J]. Technology Wind, 2019(9): 76.
- [25] 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.
- QU X Y, DENG L. Analysis of the Environmental Worthiness of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4): 138-142.
- [26] 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 C W. Transformation and Practice of Equipment Environmental Adaptability Design Ideas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 20-25.