

引用格式: 朱炜, 陈炜, 冯洋. 水面舰船雷达波隐身技术与总体设计[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(3): 1-6, 56.

ZHU Wei, CHEN Wei, FENG Yang. Radar stealth technology of surface combatant ships and overall system design[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(3): 1-6, 56.

水面舰船雷达波隐身技术与总体设计

朱炜, 陈炜, 冯洋

中国舰船研究设计中心, 上海 201108

摘要: 具有优良雷达波隐身性能的现代化水面舰船是各海军强国舰艇平台技术研究的重要发展趋势, 以往国内舰艇的雷达波隐身技术虽已有初步应用, 但层次还较低, 舰船的隐身性设计未能形成自顶而下的组织管理体系, 总体设计未能充分牵引系统、设备单位的雷达波隐身技术的研究。简要介绍国内、外雷达波隐身技术发展概况, 通过对国内护卫舰雷达波隐身技术应用情况的分析, 讨论雷达隐身技术措施对总体设计的影响以及存在的有关问题, 提出水面舰船雷达波隐身设计体系和流程, 以及雷达波隐身设计和控制程序, 并以此指导某型舰的总体设计, 可为今后水面舰船开展雷达波隐身设计提供参考。

关键词: 隐身技术; 水面舰船; 总体设计; 雷达散射截面(RCS)

中图分类号: U663.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.03.001

Radar stealth technology of surface combatant ships and overall system design

ZHU Wei, CHEN Wei, FENG Yang

Shanghai Division, China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China

Abstract: The demand of higher warship performance has become increasingly intense nowadays, with the radar stealth performance being the major focus. In the past, the radar stealth technique had a preliminary application in the domestic warship design, but only with a low level. As a result, the design of warships fails to correspond to the organization management system from top to bottom, and the overall design does not fully guide the research of the sub systems and the units in the aspect of radar stealth. This article introduces the development of radar stealth technology of surface combatant ships, analyses the radar technology application in the design of our frigates, discusses the influence of radar stealth technology on the overall system design of surface combatant ships, and reveals the relevant problems encountered. As a part of this discussion, the author puts forward a system of radar stealth design of surface combatant ships and a detailed radar stealth design procedure, which has been used to guide the overall design of a certain type of frigates; meanwhile, this paper may serve as a reference for the subsequent surface combatant ship research.

Key words: stealth technology; surface combatant ship; overall system design; Radar Cross Section(RCS)

0 引言

随着探测技术和导弹技术的发展, 舰船的自身防御变得越来越困难, 为提高其生存能力, 降低舰船自身信号特征成为一项具有重大意义的应对策略。

舰船雷达波隐身技术的研究和应用越来越受到各国海军的重视。国外海军强国在舰船雷达波隐身技术上投入巨大, 在基础理论、实验技术及工程应用上都取得了大量成果。新一代水面战舰的设计, 将雷达波隐身技术的应用提升到了更高的层次和地位。从世界先进国家海军的发展趋势来

收稿日期: 2014-07-15

网络出版时间: 2015-5-26 8:50:00

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 朱炜, 男, 1971年生, 研究员。研究方向: 舰船总体研究与设计

冯洋(通信作者), 男, 1983年生, 工程师。研究方向: 舰船总体研究与设计。E-mail: w701sh@mail.online.sh.cn

看,雷达波隐身已由从属于舰船总体外形设计逐步发展到主导总体外形设计,已成为舰船的主要战技指标之一。舰船雷达波隐身采取的方法主要有外形隐身和隐身材料应用,此外,在上层建筑的设计和建造中,国外已经开展了综合隐身桅杆的研究、试验和应用,以及新型隐身结构材料的实船应用^[1],舰船雷达波隐身及相关技术的研究得到了极高程度的投入和重视。

应用雷达波隐身技术可以降低和控制舰船的雷达散射截面(RCS)值,从而降低敌方雷达对我舰的探测距离以及敌反舰导弹的“烧穿”距离,同时,我舰较小的RCS还能提高电子战的效果。采用隐身技术后,水面舰船突袭的隐蔽性和成功率将大幅提高,突防能力明显增加。在当今各国新研制的舰船中,不仅驱逐舰和护卫舰逐步采用了隐身技术,航母上也采取了一些行之有效的隐身措施。

未来战争是隐身兵器的大比拼,舰船必须适应未来战场的要求,实现隐身化,提高生命力和战斗力。海军新型舰船的发展应将雷达波隐身作为重点突破口和关键技术来抓,在舰船的雷达波隐身技术上力争取得较大的突破,应对日益严峻的未来海战环境。

舰船隐身性是一项系统工程,应建立自上而下的组织管理体系,以隐身技术为牵引,带动舰船设计、装备研发、舰船建造等各个领域的同步协调发展。在隐身技术的发展中,应以总体设计单位为龙头,吸收雷达波隐身专门研究单位共同参加,在舰总体设计层面上,实现舰船雷达波隐身机理、设计和综合控制技术的突破,带动试验技术和测试技术的同步发展。

1 国内外发展概况

1.1 国外雷达波隐身技术发展概况

隐身技术是当今陆、海、空、天、电磁五位一体的立体化战争中最重要、最有效的突防战术技术措施之一,美国在隐身技术研究领域处于世界领先地位,其发展历程比较有代表性。

早在20世纪60年代以前,美国就开始进行隐身技术的探索,并在SR-71“曙光”高空侦察机上采用了雷达波隐身技术;在60~70年代隐身技术全面发展时期,美国对该技术进行了有计划、有步骤的试验与研究,基本完成了隐身技术的基础研究和先期开发工作。为增加武器系统的突防能力,美国在新设计的各种武器系统上广泛采用隐

身技术,并将目标特征控制(隐身技术)列入关键技术。美国海军从1995年开始研究全封闭式桅杆/传感器系统,该系统完全脱离了传统的桅杆概念,并装备在“斯普鲁恩斯”级驱逐舰“阿瑟·雷德福”号(DDG-968)上进行了评估试验。

法国、英国、瑞典等国海军对隐身舰船也进行了多年不懈的探索和研究,应用多种隐身技术的舰船陆续问世。迈入21世纪,水面舰船将综合运用各种隐身技术^[2],外形更加简洁,综合作战能力和生存能力得到进一步提升。

1.2 国内雷达波隐身技术发展

我国开展雷达波隐身技术的研究较晚,在海军强烈需求的牵引之下,于20世纪80年代逐步开展了这方面的研究工作,并取得了一定的成绩,特别是在工程型号舰船研制中已大量采用隐身技术,舰船的隐身性能有了较大幅度的提高。

但国内雷达波隐身技术在理论研究、实验测试及舰船设计水平上都与发达国家海军存在差距,舰船雷达波隐身技术虽已有初步应用,但总体来说层次还较低。在研究设计领域,舰船RCS计算、控制和评估方法及体系有待完善;舰船总体的隐身性设计还未能有效地规范和制约各装舰系统、设备的隐身性工作,舰载武器、电子设备及船用机械等在雷达波隐身性方面的研制考核机制有待加强;隐身材料在吸波性能和装舰适应性方面尚需改进。为使我国舰船雷达波隐身性能达到甚至超越发达国家水平,还需开展大量的研究工作。

2 舰船雷达波隐身技术应用情况

2.1 雷达波隐身技术应用

水面舰船的雷达波隐身是一个系统工程。首先,减小舰船雷达波散射特征的各项技术都是综合性的;其次,从舰船设计的角度来看,隐身设计涉及总体、系统和设备3个层次,缺一不可。即使在总体设计层次上,也需众多专业的协同,从而达到综合平衡的效果。舰船的隐身性牵涉面广,以我国当前的技术基础、经济承受能力以及舰船自身条件的限制,短期内实现全面隐身的代价较大,只能立足在现有条件的基础上,控制和减少舰船的RCS,提高雷达波隐身性能。

国内对水面舰船雷达波隐身技术的研究起步较晚,在上世纪90年代初研制的舰船中,仅在舰船平台上进行了一些雷达波隐身的尝试工作,如上层建筑侧壁较小角度的倾斜设计^[3],消除部分

直角反射体等。

在近几年的海军装备发展中,为迅速提升舰船的作战能力,减少物理特征,在未来海战中争取主动,普遍采用了隐身技术,某型舰船在研制中将雷达波隐身性能作为了总体设计的一项重点。将舰船雷达波隐身设计纳入系统工程范畴,通过雷达波隐身顶层设计,明确总体隐身设计目标并分配雷达波隐身指标,应用系统工程的方法将总体隐身性要求逐级分解到系统级、设备级(或子系统级、设备级),再将总体以下各级在隐身性方面的努力以及可能达到的效果逐级综合到总体层面。

为使某型舰船的雷达波隐身性较现役水面舰船有质的提高,从总体平台、上层建筑和露天甲板面上的设备等3个方面系统、全面地开展了隐身性研究工作,特别针对舰船雷达波隐身的瓶颈——舰面电子武器装备的隐身进行了重点研究。在总体设计中采取了以下一些措施:

1) 为减少雷达波反射,舰船水线以上的外型设计避免与邻近各表面相互垂直,使平面法线方向偏离威胁方向。

2) 主船体水线以上舷侧大角度外飘或内倾;上层建筑各个侧面的法线方向朝前、后、正横方向,各主要侧面内倾;上层建筑外形设计采用平面组合形式,减少角反射体的产生;主船体和上层建筑保持雷达波反射特性的连续,舷侧开口设置有效的屏蔽装置,避免产生空腔现象。

3) 桅杆采用筒型桅,大角度倾斜^[4];在满足设备使用要求的情况下减少平台、横桁等结构物。

4) 烟囱大角度倾斜,避免上层建筑和舰面设备形成角反射体;烟囱上的百叶窗开口采取隐身措施,降低因空腔产生的反射特性影响。

5) 减少散射源的数量,尽可能减少暴露在甲板上的电子武备、甲板机械、舾装件的数量,避免其相互间构成角反射体的可能性。

6) 对露天设备的外形进行隐身改进,将强散射源减弱为弱散射源,对于无法避免的强散射源,设法对其进行遮蔽。

7) 对于采用外形隐身技术难以解决的一些问题,如局部亮点、甲板面裸露的设备以及某些大平板,采用雷达吸波材料。

在开展舰总体雷达波隐身研究设计工作的同时,还进行了舰船雷达波隐身仿真计算和模型测试工作,通过全面研究和全程控制,经实船测量,某型舰船的RCS典型值较国内同类型舰船大幅度降低,取得了良好的隐身效果。

2.2 雷达波隐身技术对总体设计的影响

目前,在水面舰船雷达波隐身设计中应用较多的技术措施为外形隐身技术和吸波材料技术(RAM)。

外形隐身技术是通过改变目标的外形来降低目标的RCS,这是水面舰船设计中一种最为有效、发展最成熟的隐身技术途径。外形的改变对RCS的影响十分敏感,合理选择舰船的外形,可对舰船RCS的减小起到立竿见影的效果。

对于采用外形隐身技术难以解决的一些隐身问题,如局部亮点、甲板面裸露的设备以及某些大平板,采用雷达吸波材料是一项十分有效的措施,可以取得雷达波隐身性的最佳效费比。

但雷达波隐身技术也存在局限性。虽然改变几何外形可以改变雷达波能量散射的方向,但这种技术措施的实施常常受到水面舰船本身性能的限制。船体部分对舰船的总体性能影响较大,不能简单地采用大倾角的方法改变外形,尚需充分考虑船体形状改变对舰船航海性能的影响;考虑总体布置的要求,保证一定的甲板面积和舱容;还需考虑合理的结构形式和建造工艺的方便性。

大量运用外形隐身技术在总体设计上必然会付出一定的代价。外表面大角度的倾斜会使全舰舱容的利用率降低,隐身封闭式上层建筑会使全舰的排水量和受风面积增加,重心升高,给总体设计带来巨大的压力。

1) 舱容影响。

在常规舰船的设计中,上层建筑大量由平板等构成,运用外形隐身技术后,从消除角反射体和清理与海平面成直角的平面考虑,上层建筑采用倾斜多面体形式不仅会减少舱室容积,还降低了舱容的利用率。

2) 排水量和重心影响。

选取同样采用长桥楼船型的舰船进行比较,从上层建筑结构重量与主船体结构重量关系的分析比较来看,采用外形隐身技术的舰船,其上层建筑重量有较大幅度的增加,船体部分的重量占正常排水量的比例明显高于以往的舰船,船体结构重量的增加对排水量产生直接影响,并导致全舰的重心明显升高。

雷达吸波材料的比重较大,敷设位置较高,对舰船的排水量和重心也会产生一定影响。

3) 受风面积、横摇周期影响。

采用隐身船型后,隐身封闭使上层建筑较以

往的水面舰船要庞大,致使受风面积增加较大;其与船体水下面积的比值增大,对横摇周期也会产生一定的影响。

4) 操作使用影响。

舰船外形隐身要求主船体与上层建筑保持雷达反射特性的连续,舷侧尽量避免有开口的存在以消除空腔现象。隐身封闭给舰员的常规拖带、停靠码头带来了一些使用上的不便,需配备一些辅助操作工具,同时对一些操作口还需附加门或盖。

2.3 存在的有关问题

从目前水面舰船雷达波隐身技术的应用情况来看,尚存在以下一些问题:

1) 国内水面舰船雷达波隐身设计的相关标准和规范有待完善,舰船 RCS 计算、控制和评估的体系与方法有待提高。

2) 水面舰船雷达波隐身设计是一个系统工程。现阶段,舰船雷达波隐身研究工作主要集中在总体设计方面,在系统和设备这方面的研究较少,电子设备及船舶机械等在雷达波隐身性设计方面还有待加强。

3) 现在开展的雷达波隐身研究和对实船的测试考核中,雷达波反射的威胁频段均以部分波段为主,且考虑的威胁是小入射余角,雷达频段和空域范围较窄。

4) 理论计算由于受计算时空复杂性的限制,尚不能很好地处理耦合等计算复杂程度高的问题,理论计算在总体设计中的指导性有待提高。

5) 缩比模型测量在特殊的微波暗室中进行,以此推算出实际目标的电磁散射特性。但在模型缩比较大、实际频段较高的情况下,由于受测试信号源频率的限制,经常不能满足全相似条件,致使模型测量存在一定的局限性。

3 水面舰船雷达波隐身设计

在总结舰船雷达波隐身技术研究和雷达波隐身设计工作的基础上,形成了初步的水面舰船雷达波隐身设计体系和流程,以及雷达波隐身设计程序和控制指南,同时借助计算机仿真技术,在总体设计阶段对雷达波隐身方案进行验证和评估,为雷达波隐身方案提供设计参考,指导某型舰船的总体设计,也为今后水面舰船开展雷达波隐身设计工作提供参考。

3.1 水面舰船雷达波隐身设计体系和流程

不同的水面舰船担负着不同的使命任务,因而对其作战功能要求和自身的防护要求不尽相同。对于一艘明确使命任务的舰船来说,其雷达波隐身性能达到什么样的程度,应在舰船立项论证阶段对其作战需求和相关装备的配置进行充分论证,以提出该舰雷达波隐身明确的指标和要求。在总体设计阶段系统地开展雷达波隐身设计,同时要 and 舰船总体的相关性能综合权衡,既要在舰体外形、舰面设备布局、吸波材料应用等方面尽量缩减 RCS,又必须充分考虑舱容的有效利用、机械设备和电子武器的使用和性能发挥、建造工艺上的可行性以及经济性等诸多因素,才能保证综合性能兼优。

降低雷达波信号特征的工作在水面舰船总体设计的初期就应开展,在设计之初做好顶层规划,确定总体雷达波隐身的控制指标,将其纳入全舰主要战技指标考核体系中,并制定全舰雷达波隐身实施方案和控制措施。

在开始进行总体设计时就进行系统的均衡设计与控制,将总体雷达波隐身指标进行逐级分解,将隐身指标要求分配到有关系统和设备中。

在有关系统和设备的研制中开展雷达波隐身研究,确定系统和设备的雷达波隐身指标,并在系统、设备的技术规格书中予以明确,作为出厂检验的一项考核指标。

将雷达波隐身设计落实到设计和建造的各个阶段与舰船总体设计的各个方面,从船舶性能、总体布置、船体结构、舰面甲板机械设备、电子装备等各个方面系统地控制全舰的雷达波隐身水平。

水面舰船雷达波隐身设计体系和流程一般过程如图 1 所示。

3.2 雷达波隐身设计和控制程序

水面舰船雷达波隐身性涉及到舰船的船型、主尺度、排水量、总体布置、船体结构、舰面的机械设备和电子武器装备以及建造工艺等诸多方面,因此,舰船的雷达波隐身性设计应与舰船总体方案紧密结合,同步进行。在总体方案中,应体现雷达波隐身设计的要求,将降低雷达波散射截面积的措施融入到总体方案及各个阶段的设计中,形成总体性能和雷达波隐身性能兼优的总体技术方案。

水面舰船雷达波隐身设计一般应经历以下几个阶段^[5],如图 2 所示。

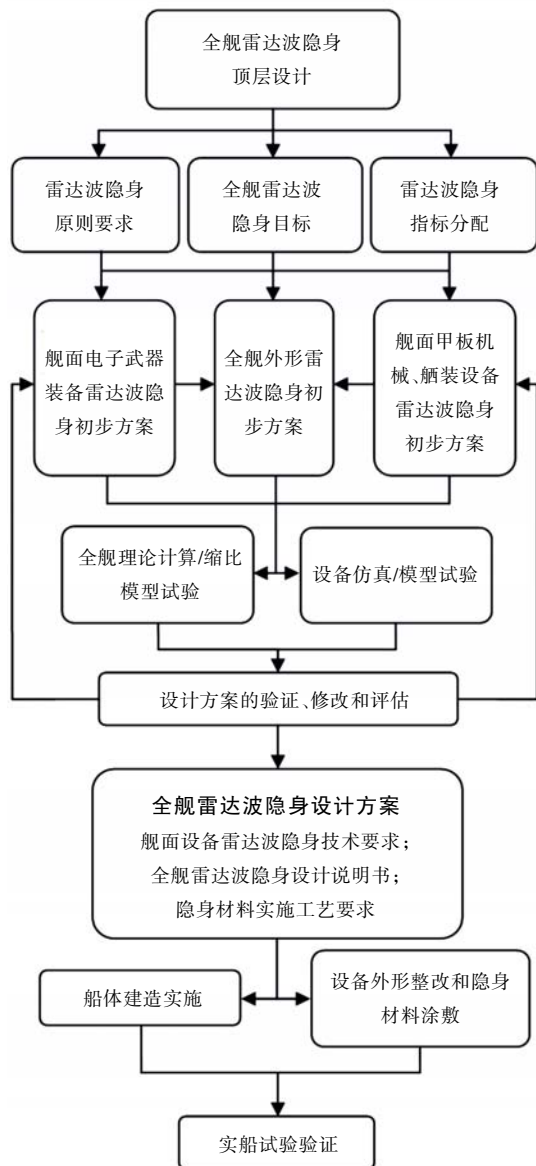


图1 水面舰船雷达波隐身设计体系和流程图
Fig.1 Flow chart of radar stealth design for surface combatant ships

1) 在方案论证阶段,开展舰船总体顶层研究,确定全舰雷达波隐身性能指标。

全舰雷达波隐身性指标主要根据水面舰船的主要作战使用性能、母型船的雷达波隐身性能以及新的雷达波隐身技术的运用情况统筹考虑确定。

2) 在方案设计阶段,制定全舰的雷达波隐身控制方案;进行控制指标分解和分配。

结合方案设计阶段的总体布置情况及全舰的总体性能制定全舰雷达波隐身控制方案,并根据舰上的雷达波散射源特点,进行雷达波隐身指标的分配。

3) 在技术设计阶段,进行雷达波隐身控制设备及有关专题研究,固化全舰雷达波隐身的技术状态。

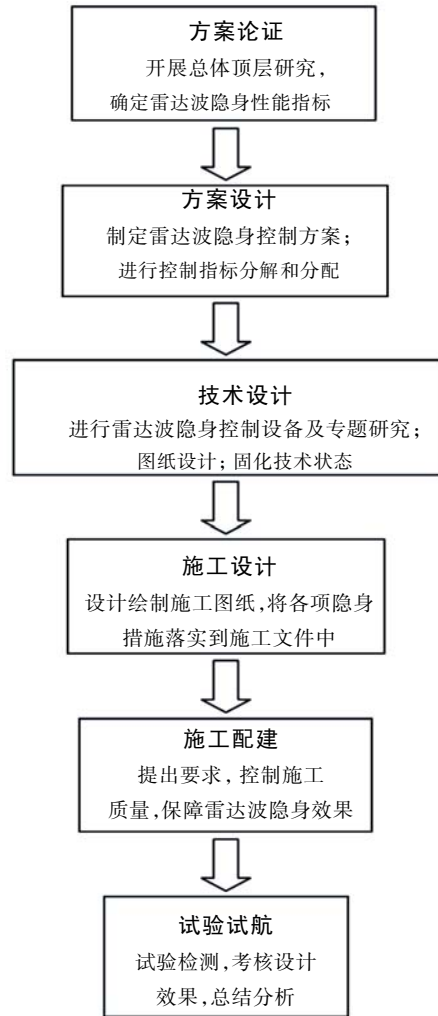


图2 水面舰艇雷达波隐身设计和控制流程图
Fig.2 Flow chart of radar stealth design and control of surface combatant ships

重点利用计算机仿真和缩比模型测试等手段对全舰雷达波隐身设计初步方案进行验证和评估,通过不断优化调整初步方案,最终形成全舰雷达波隐身设计方案并达到雷达波隐身性能指标要求。完成舰面设备雷达波隐身技术要求的制定,并落实到舰面设备的设计与制造环节。

4) 在施工设计阶段,编制相应的施工图纸、文件,将各项隐身措施落实到施工文件中。

5) 在施工配建阶段,提出有关隐身控制要求,控制施工质量,保障雷达波隐身效果。

主要针对船厂的施工建造提出雷达波隐身实施工艺要求,确保雷达波隐身设计中的各种措施、手段体现在船厂的施工建造中。

6) 在试验试航阶段,开展航行试验检测,考核设计效果,进行技术总结分析。

3.3 计算机仿真

随着计算机技术的发展,特别是计算机运算

速率的不断提高,运用计算机对大型目标的雷达波性能进行 RCS 仿真计算得以实现。水面舰船 RCS 计算机仿真作为获取目标 RCS 特性数据、预报设计方案可行性的重要工具,是舰船总体雷达波隐身设计的主要技术手段之一。根据水面舰船的散射机理和极大电尺度的特点,结合目前水面舰船雷达波隐身主要是考虑高频区雷达波,因而计算机仿真通常采用高频法进行计算。

计算机仿真能在总体设计前期以较小的成本实现对雷达波隐身设计初步方案的预测及评估,同时结合计算机辅助设计、计算机图形学等方法,能对水面舰船 RCS 局部“亮点”进行分析查找,有针对性地雷达波隐身的初步方案提供优化调整依据。

3.4 发展方向

随着现代化武器的高度发展,各国都在不断加强雷达波隐身技术的研究和隐身武器装备的研制。综合来看,雷达波隐身技术的发展有以下几个方面^[6]:

1) 隐身船型和舰貌。

研究和探索具有综合隐身性能的船型——单体船、双体船、多体船等,整体外形和上层建筑形状、局部结构形式、甲板及舷外突出物的形状以及艏艉部的结构形式等,应用外形隐身技术,水面舰船的舰貌将发生深刻的变化,如美国的“海影”、DDG 1000,英国的“海魂”等^[7]。

2) 综合集成桅杆。

对舰上的电子设备进行集成、性能优化,将各系统天线阵列布置在桅杆内,组成一体化的隐身封闭式综合集成桅杆,隐身集成优化技术将对舰船的总体设计和总体作战性能带来极为重要的影响。如美国“阿瑟·雷德福”号驱逐舰上的封闭式综合传感器桅杆、德国 FDZ 2020 的内置集成式联合孔径天线的封闭式桅杆等。

3) 隐身材料。

隐身吸波结构材料将用来制造舰船表面的某些壳体和构件,具有吸收率高、吸收频带宽、厚度薄、力学性能好和防弹性好等性能。目前使用的隐身材料是针对某种特殊用途(如雷达波、红外波等)的专用材料,欧美等先进国家正在着手研究宽频谱综合性隐身材料。

4) 新理论、新技术。

隐身技术是一门交叉性学科,欧美等先进国家正在积极研究隐身新理论和新技术,如集成化上层建筑设计技术、等离子体隐身技术、对消技

术、阻抗加载技术、仿生技术、微波传播指示技术等,水面舰船的隐身技术将是多学科的综合优化技术。

4 结 语

常规水面舰船的雷达波隐身是有限隐身,是以牺牲部分其他性能为代价。当然,在舰总体设计中应尽量减少对其他性能的影响。因此,在舰船论证初期,应按照舰船的作战需求合理确定雷达波隐身指标。首先,应做好总体顶层雷达波隐身设计,即从全舰总体角度出发,统筹规划、制定对总体设计方案的要求、降低雷达波目标信号特征的技术途径以及必须开展的专项课题研究、舰面设备的雷达波隐身控制指标、施工建造的原则工艺等方面的设计工作。

水面舰船雷达波隐身技术难度高、牵涉面广,与总体和其他各专业有着密切的联系。为使我国雷达波隐身技术有质的提高,应根据海军装备建设的需要,针对具体的舰船种类,从舰船平台和舰载系统、设备3个方面加大隐身技术研究的力度;从设计伊始就坚决贯彻隐身设计思想,进行工程全过程监督管理和控制,保证设计目标的实现。

同时,应将雷达波隐身技术与预先研究和科研生产相结合,结合各型舰船的研制,以及未来全隐身水面舰船的研究,使之主导舰船总体外形设计,并将雷达波隐身性能作为一项主要战技指标加以贯彻,实现隐身技术的突破和舰船总体设计水平的提升。

参考文献:

- [1] 张维俊. 舰船隐身面临的挑战及技术发展展望[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(6): 46-49.
ZHANG Weijun. Threats to the stealth ship and prospects of stealth technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(6): 46-49.
- [2] 钟华,李自立. 隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [3] 杨德庆,常少游. 舰艇外形雷达隐身设计方法[J]. 航海工程, 2006, 35(4): 11-14.
YANG Deqing, CHANG Shaoyou. On the shape stealthy design methods of naval vessels [J]. Ship & Ocean Engineering, 2006, 35(4): 11-14.
- [4] 杨颀,杜晓佳,洪明. 舰船封闭式桅杆雷达隐身优化分析[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(3): 390-396.
YANG Yang, DU Xiaojia, HONG Ming. Radar stealth optimization analyses of closed-wide mast of warship

(下转第56页)

roid-cylinder combination shells[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(2):170-176.

[7] 吕岩松,郭日修. 含凸、凹型加肋锥-环-柱结合壳的连接结构试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(9): 1140-1143.

LV Yansong, GUO Rixiu. Experimental research on ring-stiffened convex and concave cone-toroid-cylinder combination shell [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(9):1140-1143.

[8] 白旭. 潜艇球形壳体结构性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

[9] 郑衍双,陆正福,张定武. 均匀外压下有几何缺陷球壳的破坏压力[J]. 中国造船, 1986 (1): 48-58.

ZHENG Yanshuang, LU Zhengfu, ZHANG Dingwu. Collapse pressure of spherical shells with initial imperfection under uniform pressure [J]. Ship Building of China, 1986 (1):48-58.

[10] 陈宏湛,沈成康. 组合圆柱壳静态屈曲的几个影响因素分析[J]. 力学季刊, 2001, 22(2): 210-215.

CHEN Hongzhan, SHEN Chengkang. Analysis of several influencing factors of static buckling for com-

bined cylindrical shell [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2001, 22(2): 210-215.

[11] 王仁华,俞铭华,李良碧,等. 初始缺陷对深海载人潜水器耐压球壳塑性稳定性影响 [J]. 海洋工程, 2005, 23(4): 111-115.

WANG Renhua, YU Minghua, LI Liangbi, et al. Influence of initial deflection on plastic stability of manned deep-sea submersible's pressure sphere hull [J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(4):111-115.

[12] 孟闻远,王志良,李秀芹. 任意初始几何缺陷薄壳的非线性几何方程[J]. 水利学报, 1995 (3) : 62-69.

MENG Wenyuan, WANG Zhiliang, LI Xiuqin. The nonlinear geometrical equations for thin shell with arbitrary initial imperfections [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(3):62-69.

[13] 中国船舶工业总公司. GJB/Z 21A-2001 潜艇结构设计计算方法[S]. 北京:国防工业技术委员会, 2001.

[责任编辑:易基圣]



(上接第6页)

[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(3): 390-396.

[5] 朱英富,张国良. 舰船隐身技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003.

[6] 黄祥兵,陈霖,王志国. 舰艇雷达隐身技术研究[J]. 航海工程, 2002(2):1-4.

[7] 杨屹,程虹,王青. 高耐波隐身船型设计[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(9):3-7, 15.

YANG Yi, CHENG Hong, WANG Qing. Research on high sea-keeping and stealth of naval ships [J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(9):3-7, 15.

[责任编辑:喻 菁]



(上接第12页)

蚀噪声分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(7): 1029-1031, 1036.

GE Han, QIN Li, YAN Dayun, et al. Cavitation noise analyses based on short time Fourier transform [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(7):1029-1031, 1036.

[10] 廖迎娣,张玮, DESCHAMPS P Y. 运用SeaWiFS遥

感数据探测中国东部沿海悬浮泥沙浓度的研究 [J]. 水动力研究与进展(A辑), 2005, 20 (5) : 558-564.

LIAO Yingdi, ZHANG Wei, DESCHAMPS P Y. Remote sensing of suspended sediments in China east coastal waters from SeaWiFS data [J]. Journal of Hydrodynamics(Ser.A), 2005, 20(5): 558-564.

[责任编辑:卢圣芳]