引文格式:彭认灿,丁飞,曹文闻.船舶航行海洋地理信息三态融合保障问题研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(9):1918-1925.DOI:10.13203/j.whugis20260251

Citation: PENG Rencan, DING Fei, CAO Wenwen. Three-State Fusion Support Problem of Marine Geographic Information for Ship Navigation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(9): 1918-1925. DOI: 10.13203/j.whugis20260251

船舶航行海洋地理信息三态融合保障问题研究

彭认灿[1] 丁 飞[1] 曹文闻[2]

1 浙江清华长三角研究院,浙江 嘉兴,314050

2 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京,100083

摘 要:近几十年来,雷达、全球导航卫星系统和电子海图显示与信息系统等先进导航装备已在船舶航行中得到广泛应用,并显著提升航行安全性。然而,船舶碰撞、触礁或搁浅等重大事故仍时有发生,这类事故的部分原因与船舶航行所依赖的海洋地理信息保障不到位有关。因此,在简要分析当前船舶航行海洋地理信息保障现状及存在问题的基础上,首先提出基态、新态、瞬态(简称三态)海洋地理信息及其保障产品的概念;然后,分析三态保障产品的特点及其在船舶航行保障中的地位与作用;最后,重点围绕如何实现三态融合保障方式,从融合保障方案、过程、效果及需解决的关键问题等4个方面展开深入分析。研究成果可有效解决现行船舶航行海洋地理信息保障中内容现势性不够高的瓶颈,为进一步提升船舶航行安全性提供参考。

关键词:船舶航行;安全保障;海洋地理信息;三态融合保障

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-06-13

DOI:10.13203/j.whugis20260251 **文章编号**:1671-8860(2026)09-1918-08

Three-State Fusion Support Problem of Marine Geographic Information for Ship Navigation

PENG Rencan[1] *DING Fei*[1] *CAO Wenwen*[2]

1 Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Zhejiang, Jiaxing 314050, China

2 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: In recent decades, advanced navigation equipment such as radar, global navigation satellite systems, and electronic chart display and information systems have been widely used in ship navigation, significantly improving navigation safety. However, major accidents such as ship collisions, groundings, or strandings still occur frequently. Analysis indicate that some of these accidents are related to inadequate marine geographic information support for ship navigation. To address this problem, based on a brief analysis of the current status and existing problems of marine geographic information support for ship navigation, we first propose the concepts of base-state, new-state, and transient-state marine geographic information and their support products.Second, we analyze the characteristics of the three-state support products and their roles and functions in ship navigation support. Finally, with a focus on how to realize the three-state fusion support mode, an in-depth analysis is conducted from four aspects, including the fusion support scheme, process, effectiveness, and key issues to be resolved. The research findings can provide a reference for addressing the bottleneck of insufficient data currency in the existing marine geographic information support and further enhancing navigational safety.

Key words: ship navigation; security assurance; marine geographic information; three-state fusion support of base-state, new-state, and transient-state

---

基金项目:国防科技创新特区培育项目(20-163-00-TS-013-002-10)。

第一作者:彭认灿,博士,教授,主要从事海图制图理论与方法研究。pengrencan63@163.com

近几十年来,雷达、全球导航卫星系统和电子海图显示与信息系统等导航技术的飞速发展,极大提升了船舶航行的安全性与效率,但船舶航行重大事故仍时有发生。21世纪以来,全球海域发生多起典型船舶碰撞、触礁或搁浅事故:2000-09-26,载有500多人的希腊渡轮萨米纳特号在爱琴海的帕罗斯岛附近触礁沉没,造成80人死亡,酿成希腊35年来最严重的海难事故[1];2008-03-27凌晨,从宁波舟山港驶往天津的勤丰128号因使用的海图未及时更新而与金塘大桥发生触碰,造成60 m长、3 000 t重的桥面箱梁塌陷,勤丰128号艏桅断裂,雷达桅倒塌,驾驶台严重变形,4名船员死亡[2];2009-02-05,美国海军波特罗亚尔号巡洋舰在夏威夷火奴鲁鲁机场南侧珊瑚礁浅滩触礁搁浅,卡在珊瑚礁上3天,修复费多达2 500万美元,并对珊瑚礁造成了严重破坏[3];2013-01-18,美国海军护卫者号扫雷舰,因使用的电子航海图(electronic navigational chart,ENC)的一座珊瑚礁位置有误,导致其在菲律宾苏禄海严重搁浅,后被分割解体运回美国[4];2025-05-25,利比里亚籍MSC Elsa 3号集装箱船在印度喀拉拉邦海岸触礁倾覆[5]。

分析表明,造成上述船舶碰撞、触礁或搁浅事故的部分原因显然与海洋地理信息保障不到位有关。为此,本文在简要分析相关研究背景、船舶航行海洋地理信息保障现状及存在问题的基础上,提出基态、新态、瞬态(简称三态)海洋地理信息及三态保障产品的概念,分析三态保障产品的特点及其在船舶航行保障中的地位与作用,给出三态融合保障方案及其需要解决的问题,并结合多年来对该领域的深耕和持续迭代思考,提出相应的认识与观点,以期为进一步提升船舶航行安全性提供可行思路。

1　船舶航行海洋地理信息保障现状及存在问题

1.1　保障现状

船舶航行海洋地理信息保障主要由官方海洋测绘部门负责的海洋测量(早期多称为海道测量)、海图制图和由船舶在其航行过程中开展的自主探测等3部分组成。

1)海洋测量现状。以水面船舶为主,辅以航空、航天工具和水下潜器等作业平台,利用单波束、多波束、侧扫声呐等现代海洋测量装备,在海洋及其邻近区域开展海洋大地测量、水深测量、海底地形测量、海洋工程测量、海洋重力测量、海洋磁力测量,以及其他专题要素勘测及数据处理工作,获取海洋地理环境测量成果数据,为海图制图部门开展海洋地理信息保障产品(如各种航海图书)编制、生产与更新提供测量成果数据支持[6-13]。

2)海图制图现状。以计算机、数字化仪、扫描仪、绘图仪及海图制图软件等现代制图软硬件为技术手段,利用海洋测量获得的海洋地理环境测量成果数据作为主要资料,开展航海图书的编制、出版发布及更新工作,为船舶航行提供数字海图、纸质海图、航海通告/改正文件(如ENC修订(ENC revision,ER)文档)等多样化海洋地理信息保障产品[14-23]。

3)自主探测现状。目前,仅远洋科考船等少量大型船舶加装了可对航路前方约200 m较小范围水下地理环境进行自主探测的前视多波束系统,绝大多数船舶通常只能利用船载雷达扫描获取水面以上物标的信息,无法自主探测水下地形、水深和碍航物等海洋地理要素。而大型船舶上标配的测深仪只能实时测量龙骨以下水深,无法用来探测航路前方一定范围水域的水深和碍航物[6,24-25]。

1.2　存在问题

1.2.1　海洋测量的主要问题

1)高精度实测覆盖范围小。截至2026年4月,全球海底已利用多波束系统等高质量实测部分的面积占比不足29%,而未实测部分面积占比超过71%(主要靠卫星反演/插值估算)。图1为全球各海域未实测占比情况。从以上实际进展看,原定于2030年前完成全球海底高分辨率测量的愿景恐难实现[26-27]。

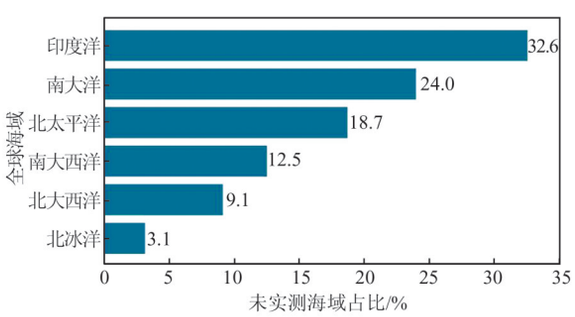


图1　全球各海域未实测占比情况

Fig. 1　Proportions of Unsurveyed Areas in Each Global Ocean Basin

2)测量效率低、成本高。以多波束系统水深测量为例,主要原因有:(1)扫测覆盖范围受限。

有效扫宽约为水深的1.5～2倍,在深海5 000 m水域,单航带宽度仅为7 500～10 000 m;船舶经济航速为4～6节,单日有效扫测面积有限。(2)扫测作业率低。受海浪、洋流、船舶摇摆、声速突变、昼夜轮班作业等因素影响,每日有效作业时长仅为4～6 h,实际有效作业率不足40%,大面积海域勘测周期极长。(3)船舶基础成本高。专业海洋测量船日运营成本达数万至十数万元,长期远洋作业经费消耗巨大。(4)装备与人力成本高。多波束、惯导、声速仪等精密装备造价高昂;船员及测量技术人员需多人班组值守,人工运维成本持续增加[6,28-29]。

1.2.2 海图制图的主要问题

1)编制生产效率低。海图编制生产过程比较复杂,存在制图资料分析与评价、制图综合和质量检查与验收等诸多颇为耗时、低效的处理和作业环节[30-31]。从世界各海洋国家的实际情况看,即使利用先进的计算机数字制图技术,其周期也较长:在有现势数据的情况下,通常每幅海图编制生产耗时约为6～12个月[32-34]。

2)资料现势性不高。除了测量周期长之外,每幅海图几乎都要利用多种不同时期的测量和制图资料进行编制,其资料现势性不高的问题比较突出[30-34]。

3)内容更新滞后。目前,各海洋国家主要以定期发布航海通告和ER文档的方式为纸质海图和ENC提供内容更新信息,其周期通常为每周1期[31-34]。

为便于叙述,下文将改正信息和更新信息统称为改正信息。相应地,将改正和更新统称为改正。

1.2.3 自主探测的主要问题

1)缺乏专用探测装置。如前所述,尽管目前在远洋科考船等少量大型船舶上加装的前视多波束系统可用来探测其前方水下地理环境,但通常只能在距船艏约200 m的距离内以较高分辨率和精度进行探测,无法满足大型船舶以正常航速航行时对最小探测距离的要求,该要求主要依据船舶的旋回半径设定,大型船舶通常在1 000 m以上。水下激光雷达虽具备较高的分辨率和精度,但其扫测深度有限,即使在清澈水域也只能达到数十米;一旦遇到浊度大于4的浑浊海域,便会迅速衰减至20 m以内,同样无法完全满足自主探测的需要[35-38]。

2)缺乏实时处理软件。长期以来,由于海洋测量数据处理过程非常复杂,使得海洋测量只能首先通过外业测量获得原始测量数据,然后通过内业处理得到符合海图制图使用要求的测量成果数据[6-9]。这种作业方式显然无法满足船舶自主探测对测量数据处理的实时性要求。

2 三态保障产品在船舶航行中的地位与作用

2.1 基态保障产品

2.1.1 概念及特点

基态海洋地理信息保障产品是指海图制图部门利用各类海洋测量成果数据及其他相关制图资料编制生产,但未按要求进行后续改正的各种航海图书产品,例如未利用航海通告或ER文档将其改正至最新的纸质海图和ENC等。相应地,此类保障产品上所表示的信息即为基态海洋地理信息。

基态海洋地理信息保障产品由海洋测绘部门负责编制生产,其过程严格执行相关国际、国内标准及质量保证体系,但普遍存在编制生产周期较长、部分产品内容陈旧等问题。由于此类产品未按要求改正到最新状态,其内容现势性差的问题比较突出。

2.1.2 地位与作用

国际海事组织和各国航海保障部门明确规定,未经有效改正的基态海洋地理信息保障产品(如未按要求及时进行改正的纸质海图和ENC)不能作为船舶法定的有效航行保障产品。

基态保障产品只能作为船舶航行的参考资料,例如在没有新态保障产品的情况下,可通过未改正的小比例尺海图了解整个航行海域的形势及航行任务的执行情况等,无法为船舶航行提供充分、可靠的安全保障。

2.2 新态保障产品

2.2.1 概念及特点

新态海洋地理信息保障产品是指按要求改正至最新的各种航海图书产品,例如利用航海通告或ER文档将其改正至最新的纸质海图和ENC等。相应地,此类保障产品上所表示的信息即为新态海洋地理信息。

新态海洋地理信息保障产品的编制生产及改正均须严格执行相关国际、国内标准及质量保证体系。虽然此类产品同样存在编制生产周期较长、部分内容陈旧等问题,但由于影响船舶航行安全的有关要素已按要求改正至最新状态,其

内容现势性较好。

2.2.2　地位与作用

《国际海上人命安全公约》明确规定,对基态海洋地理信息保障产品进行有效改正后得到的新态海洋地理信息保障产品,是船舶法定使用的有效航行保障产品,例如按要求利用航海通告或ER文档实施改正的纸质海图和ENC等[39]。

长期以来,新态海洋地理信息保障产品在船舶航行的各个环节中发挥了不可替代的作用,一般可较好满足船舶航行安全的需要。但以下情况除外,船舶在未经实测或精测的陌生水域或受战争、地震、台风等极端因素影响的易变水域和其他复杂水域航行。

2.3　瞬态保障数据

2.3.1　概念及特点

瞬态海洋地理信息保障数据是指船舶在航行时,通过对其周围一定范围海域的海洋地理环境进行自主探测与处理所获得的海洋地理信息数据。相应地,此类保障数据上所表示的信息即为瞬态海洋地理信息。

瞬态海洋地理信息保障数据所载负的信息是船舶周围较小海域范围内水下地理环境的一种快照,具有客观、真实、可靠和现势性高等特点。但其获取手段、处理过程、数据形式和应用方式等尚处于初步探索和形成阶段。

2.3.2　地位与作用

由瞬态海洋地理信息保障数据的概念和特点可以看出,它将作为一种基态和新态保障产品的重要补充,在保障船舶航行安全中发挥重要作用。

瞬态海洋地理信息保障数据可充分满足船舶航行对其周围局部海域高现势性海洋地理信息的需求,但其有效覆盖范围十分有限,无法在脱离基态尤其是新态海洋地理信息保障产品的情况下,独立、完整地胜任船舶航行海洋地理信息保障任务。例如,无法仅依靠瞬态海洋地理信息保障数据完成航行任务规划、计划航线设计以及船舶航行总体形势分析等工作[40-41]。

3　三态融合保障及需解决的问题

3.1　三态融合保障

理论上,可能的融合方式包括基态与新态融合、基态与瞬态融合、新态与瞬态融合,但由于基态与新态融合无法达到提升信息质量的目的,例如未改正至最新的海图与改正至最新的海图。因此船舶航行海洋地理信息三态融合保障实际上仅指基态与瞬态融合保障及新态与瞬态融合保障。

3.1.1　基态与瞬态融合保障

1)保障方案。以主要来源于覆盖整个航行海区、未改正至最新海图的基态海洋地理信息为基础,实时融合船舶沿计划航线航行过程中自主探测获得的其周围一定范围海域的瞬态海洋地理信息,从而形成的一种船舶航行动态海洋地理信息保障模式。基态与瞬态融合保障的过程和效果如图2所示,其中计划航线SE,起点为S,终点为E。

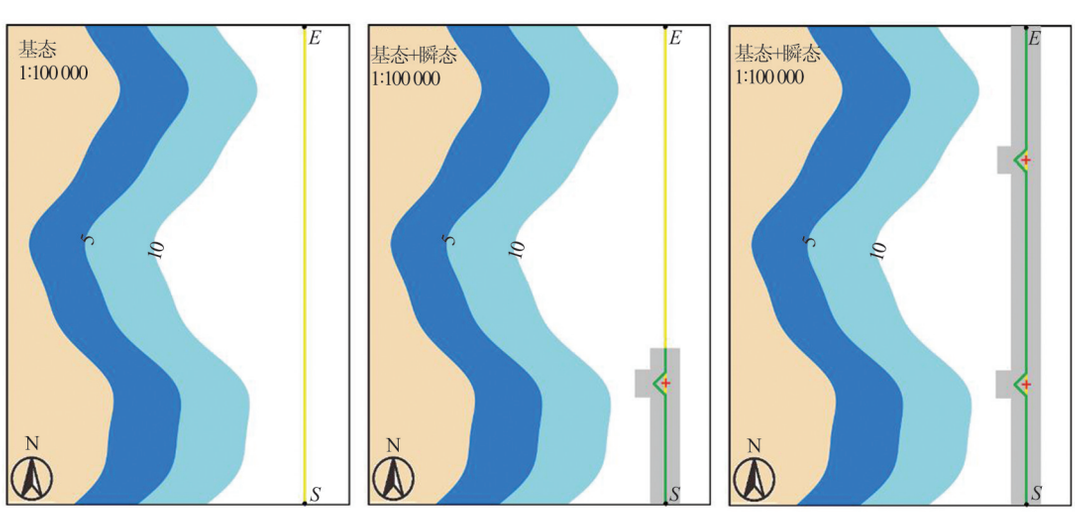


图2　基态与瞬态融合保障示意图

Fig. 2　Schematic Diagram of Base State and Transient State Fusion Support

2)保障过程。船舶按照未改正至最新海图上所制定的计划航线SE,从起点S出发,由瞬态海洋地理环境专用探测装置(其主要由遥控小型无人船和短距专用多波束系统组成)在距离船艏一定位置(如前所述,大型船舶通常在1 000 m以上的距离)沿计划航线向前扫描探测,获取瞬态信息并引导其安全航行,直到到达终点E为止。在航行过程中,一旦探测到计划航线上存在海图上未标示的碍航物,为了能使船舶安全绕开碍航物并快速回到计划航线上完成剩余航程,需根据基态与瞬态信息融合后得到的碍航物周围水域航行条件,视情况采取“先左上方、后右上方”或“先右上方、后左上方”的避障方案进行绕行。

3)保障效果。分析表明,将实时获取的局部瞬态信息与基态信息进行融合处理,能够在缺乏新态保障产品的情况下,有效解决因船舶周围海域海洋地理信息现势性不足而难以完全满足航行安全需求的问题。尽管在基态信息上所设计的计划航线并不存在碍航物(图2(a)),但船舶在航行过程中通过自主探测获得的瞬态海洋地理信息先后发现计划航线上有两处基态信息中未标示的碍航物,并按照“先左上方、后右上方”的避障方案进行了绕行(图2(b)、2(c))。

然而,尽管该方案能满足船舶航行安全需要,但由于其不符合《国际海上人命安全公约》关于船舶航行必须使用改正至最新海图的要求,预计短期内难以成为法定的船舶航行海洋地理信息保障措施[39]。

3.1.2 新态与瞬态融合保障

1)保障方案。以主要来源于覆盖整个航行海区、已改正至最新海图的新态海洋地理信息为基础,实时融合船舶沿计划航线航行过程中自主探测获得的其周围一定范围海域的瞬态海洋地理信息,从而形成的一种船舶航行动态海洋地理信息保障模式。新态与瞬态融合保障过程和效果如图3所示,其中较图2增加了3处新发现的碍航物。

2)保障过程。如图3所示,除计划航线利用改正至最新的海图制定和碍航物周围水域的航行条件由新态与瞬态信息融合得到之外,其余部分与基态与瞬态融合保障过程相同,在此不赘述。

3)保障效果。该方案可在新态保障产品的基础上,进一步弥补船舶周围局部海洋地理信息现势性不足的问题,从而更好地满足船舶航行安全需要,尤其是在未经实测或受战争、地震、台风等极端因素影响的海域。如图3(b)、3(c)所示,在瞬态海洋地理信息支持下,船舶仅需按“先左上方、后右上方”的避障方案对新发现的一处碍航物进行绕行。相比于图2所示的基态与瞬态融合保障,由于新态与瞬态融合保障方案在设计计划航线时已避开了新态保障产品上标示的碍航物(图3(a)),因此其效果更好。

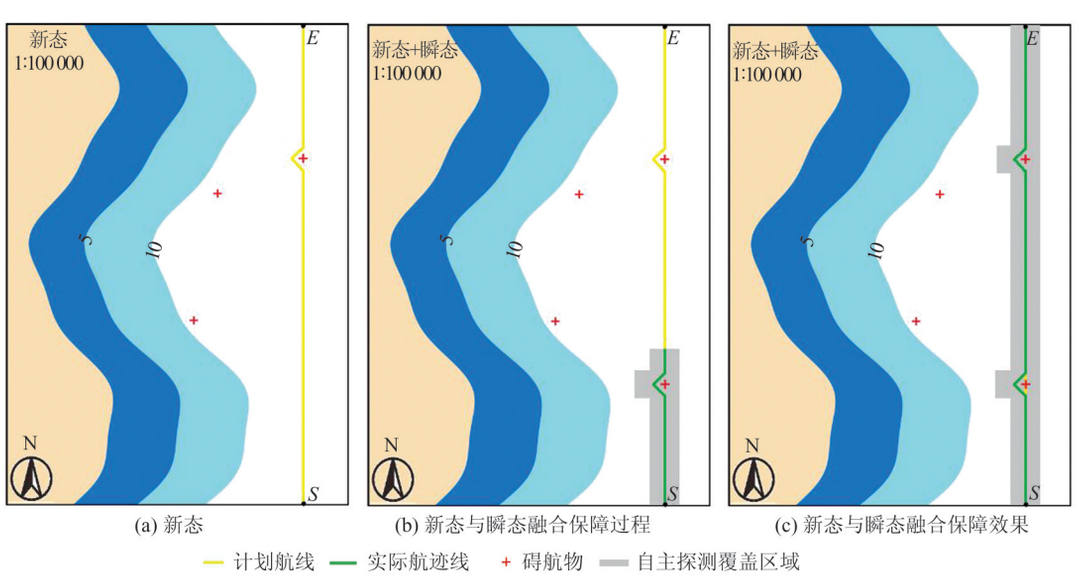


图3 新态与瞬态融合保障示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of New State and Transient State Fusion Support

该方案能充分满足船舶航行安全需要,且符合《国际海上人命安全公约》关于船舶航行必须使用改正至最新海图的要求,预计将来会成为法定的船舶航行海洋地理信息保障措施[39]。但该方案目前仍面临以下现实问题:(1)缺乏适用于船舶瞬态海洋地理环境自主探测的专用装置;(2)新态与瞬

态海洋地理信息快速融合处理技术尚不成熟等。

3.2　需解决的问题

3.2.1　探测装置研制

由上述分析可知,根据目前国内海洋地理环境探测装备研制的技术水平,具备较小波束角、较高分辨率和支持更高测船速度及更长连续探测时间等性能指标的短距专用多波束系统,应是一种有待研制的较为理想的瞬态海洋地理环境专用探测装置。然而,若采取直接在船艏加装的方式,仍会存在因扫测距离太短、波束角太大和分辨率太低,无法满足船舶紧急制动或调整航向对周围足够范围瞬态海洋地理信息需要的问题。但由船舶遥控小型无人船和短距专用多波束系统组成瞬态海洋地理环境专用探测装置,则可有效克服这些问题。

目前,国内遥控小型无人船技术已比较成熟,基本属于可直采的货架商品,如云洲 CS40P 和华测华微 4 号无人船等。但短距专用多波束系统属于一种不同于普通海洋测量使用的多波束装备,是研制瞬态海洋地理环境专用探测装置的重点和难点,需根据船舶航行对瞬态海洋地理信息保障的特殊要求开展相应的研制工作。

3.2.2　融合软件开发

主要围绕如何在船舶航行过程中快速实现瞬态海洋地理环境探测原始数据预处理、碍航物识别与提取,以及基于三态融合海洋地理信息的船舶航行辅助决策等功能进行软件开发。其中,瞬态海洋地理环境探测原始数据预处理,其主要目标是通过持续快速实现对探测获得的海量海洋地理环境原始数据的降噪、滤波、改正和抽稀处理,得到瞬态海洋地理环境探测数据;碍航物识别与提取,其主要目标是利用人工智能、模式识别等技术,从瞬态海洋地理环境探测数据中快速实现对浅滩、沉船、水雷等各种水下碍航物的识别与提取,得到瞬态海洋地理信息数据;基于三态融合海洋地理信息的船舶航行辅助决策,其主要目标是通过利用新态海洋地理信息保障产品(如改正至最新的 ENC)与瞬态海洋地理信息数据的融合显示、分析与应用,为船舶在未经实测、精测的陌生水域或受战争、地震、台风等极端因素影响的易变水域和其他复杂水域航行安全提供技术和数据支持。

4　结　语

本文提出了一种船舶航行海洋地理信三态融合保障方案,旨在通过瞬态信息与基态信息尤其是瞬态信息与新态信息的实时融合,有效解决现行保障方案中存在的内容现势性不够高这一瓶颈问题,为进一步提高船舶航行安全性提供一种新思路。

通过研究,本文得出以下结论:(1)船舶航行海洋地理信息保障目前仍存在高精度实测(精测)覆盖范围小、测量效率低、成本高;产品制作生产效率低,资料现势性不高,内容更新滞后;瞬态海洋地理信息实时探测、处理能力不足等问题。(2)现行法定的以新态海洋地理信息为主的航行保障手段无法提供瞬态海洋地理信息,船舶在未经实测、精测的陌生水域或受战争、地震、台风等极端因素影响的易变水域,以及其他复杂水域航行,仍无法完全避免碰撞、触礁或搁浅等重大安全事故。(3)三态融合保障包括基态与瞬态融合保障和新态与瞬态融合保障,两种方案均能充分满足船舶在各种复杂海域航行安全的需要,而新态与瞬态融合保障方案与现行法定要求一致,是一种更为理想的保障方案。(4)研制适用于船舶自主探测的瞬态海洋地理环境探测装备,开发三态融合及船舶航行辅助决策软件,是实现船舶航行海洋地理信息三态融合保障的基础与前提,这也是下一阶段深化研究的重点。

虽然论文未涉及潜艇航行安全海洋地理信息保障的内容,但考虑到两者存在一定的共同点,因此文中所提的思路和观点也是部分适用或基本适用的,同样可为有效提升潜艇航行海洋地理信息保障水平和能力提供参考。

参　考　文　献

[1] People's Daily. Rescue Efforts for Ferry Accident Victims Continue in Greece[N/OL]. People's Daily, (2000-09-29)[2025-06.12]. https://en. people.cn/english/200009/29/print20000929_51515. html.

[2] 张军. 由金塘大桥碰撞事故谈海图改正与航线设计管控[J]. 航海技术,2019(3):78-81.
ZHANG Jun. Discussion on Nautical Chart Correction and Route Design Control Based on Jintang Bridge Collision Accident[J]. *Navigation Technology*, 2019(3):78-81.

[3] Star-Bulletin Honolulu. Navy Divers Work on Repairing Coral Reef[N/OL]. Star-Bulletin Honolulu, (2009-05-21)[2025-03-14]. https://archives.starbulletin. com/content/20090517_navy_divers.

[4] BREWIN B. How a Misplaced Reef on a Digital Chart Helped Destroy a Navy Minesweeper[EB/

OL]. (2013-08-05)[2025-08-15]. https://www.nextgov.com/digital-government/2013/08/how-mispalced placed-reef-digital-chart-destroyed-navy-minesweeper.

[5] Splash247. Kerala Sues MSC for $1.1Bn over Environmental Disaster Caused by Sinking of 28-Year-Old Boxship [N/OL]. Seasnews, (2025-07-09)[2026-01-15]. https://seasnews.net/kerala-sues-msc-for-1-1bn-over-environmental-disaster-caused-by-sinking-of-28-year-old-boxship/.

[6] 赵建虎. 现代海洋测绘[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2023.
ZHAO Jianhu. Modern Marine Surveying and Charting[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2023.

[7] 周立. 海洋测量学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
ZHOU Li. Marine Surveying[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[8] 孙和平, 李倩倩, 鲍李峰, 等. 全球海底地形精细建模进展与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1555-1567.
SUN Heping, LI Qianqian, BAO Lifeng, et al. Progress and Development Trend of Global Refined Seafloor Topography Modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1555-1567.

[9] 翟国君, 黄谟涛. 海洋测量技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1752-1759.
ZHAI Guojun, HUANG Motao. The Review of Development of Marine Surveying Technology[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1752-1759.

[10] 申家双, 葛忠孝, 陈长林. 我国海洋测绘研究进展[J]. 海洋测绘, 2018, 38(4): 1-10.
SHEN Jiashuang, GE Zhongxiao, CHEN Changlin. Research Progress of China's Hydrographic Surveying and Charting[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2018, 38(4): 1-10.

[11] YUAN S Y, LI Y, BAO F W, et al. Marine Environmental Monitoring with Unmanned Vehicle Platforms: Present Applications and Future Prospects [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159741.

[12] MAYER L. Uncrewed Surface Systems Facilitating a New Era of Global Ocean Exploration[J]. *The International Hydrographic Review*, 2023, 29(1): 42-55.

[13] HAMILTON T, REDMAYNE M. A Classification of Survey Platforms [EB/OL]. (2023-3-24)[2026-02-09]. https://www.hydro-international.com/content/article/a-classification-of-survey-platforms.

[14] 张安民, 张立华, 郭博峰, 等. 海图制图原理与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2022.
ZHANG An'min, ZHANG Lihua, GUO Bofeng, et al. Oceanic Surveying and Mapping[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2022.

[15] 陈长林, 周成虎, 杨管妍, 等. 电子海图开放式图示表达模型及其构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 325-330.
CHEN Changlin, ZHOU Chenghu, YANG Guanyan, et al. Open Portrayal Model for Electronic Chart and Its Realization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 325-330.

[16] 崔洪生, 谭冀川, 何桂敏. 一体化专题海图制图生产研究[J]. 海洋测绘, 2020, 40(4): 47-51.
CUI Hongsheng, TAN Jichuan, HE Guimin. Research on Integrative Thematic Chart Cartography and Production[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2020, 40(4): 47-51.

[17] International Hydrographic Organization. S-57&S-100 Electronic Chart Update Specification(ER Document)[R]. Monaco: International Hydrographic Organization, 2019.

[18] THOMSON K. A Case Study of the Production of An S-57 ENC with CARIS Tools[R/OL]. (2023-03-02)[2025-07-04]. https://unbscholar.lib.unb.ca/items/aa36dbc1-9949-496f-a8b3-1bc94a2ed55.

[19] ELGAR P, SAESTAD B K. The 101 on S-100: What You Need to Know About Maritime's Big Data Transformation[EB/OL]. (2023-01-13)[2025-08-15]. https://www.navtor.com/post/the-101-on-s-100-what-you-need-to-know-about-maritime-s-big-data-transformation.

[20] UK Hydrographic Office. S-101: The Next Generation of Electronic Navigational Charts [EB/OL]. (2025-02-25)[2026-02-06]. https://www.admiralty.co.uk/news/s-101-next-generation-electronic-navigational-charts-encs.

[21] Teledyne CARIS. CARIS HPD—Advanced Chart Production for Hydrographic Offices [EB/OL]. (2025-06-25) [2026-01-06]. https://www.teledynecaris.com/en/products/chart-production/hpd.

[22] Dkart. Dkart Evolution: Main Features[EB/OL]. (2026-01-24)[2026-02-05]. https://dkart.fi/articles/dkart-evolution-main-features-en.

[23] Brazilian Navy Hydrographic Center. Brazil Achieves a Milestone in Digital Nautical Cartography with the Production of Its First S-101 ENC[J/OL]. *Hydro International*, (2025-09-03)[2026-02-06].

https://www.hydro-international.com/content/article/brazil-achieves-a-milestone-in-digital-nautial-cartography-with-the-production-of-its-first-s-101-enc.

[24] 李海森,周天,徐超.多波束测深声纳技术研究新进展[J].声学技术,2013,32(2):73-80.
LI Haisen, ZHOU Tian, XU Chao. New Developments on the Technology of Multibeam Bathymetric Sonar [J]. *Technical Acoustics*, 2013, 32(2): 73-80.

[25] 刘昊搏,刘铁军,汪海林,等.一种基于前视声呐的目标检测与跟踪方法[J].舰船科学技术,2021,43(21):143-148.
LIU Haobo, LIU Tiejun, WANG Hailin, et al. A Target Detection and Tracking Method Based on Forward Looking Sonar[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(21): 143-148.

[26] Seabed 2030 Consortium. Global Seabed Mapping Reaches New Milestone [EB/OL]. (2026-04-20) [2026-04-27]. https://seabed2030.org.

[27] The Nippon Foundation. Global Ship Survey Track Map of Seabed 2030 [EB/OL]. (2025-06-21) [2025-10-23]. https://en.nippon-foundation.or.jp/what/projects/ocean/nf-gebco-seabed2030

[28] 欧阳永忠,陆凯,李军.深水声学探测作业约束与成本分析[J].海洋测绘,2021,41(3):1-5.
OUYANG Yongzhong, LU Kai, LI Jun. Operation Constraints and Cost Analysis of Deep-Water Acoustic Survey [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*,2021,41(3):1-5.

[29] KAZEMI A H. Cost and Efficiency Analysis of Conventional Shipborne Multibeam Hydrographic Survey [J]. *International Hydrographic Review*, 2025(2): 41-48.

[30] 彭认灿,于彩霞,董箭,等.数字海图制图[M].北京:测绘出版社,2021.
PENG Rencan, YU Caixia, DONG Jian, et al. Digital Chart Cartography[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2021.

[31] 白亭颖,桑金,卫国兵,等.中国海事航海图书的历史与发展[J].测绘地理信息,2022,47(1):36-40.
BAI Tingying, SANG Jin, WEI Guobing, et al. The History and Development of China's Maritime Nautical Books[J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(1): 36-40.

[32] 陈磊.中国航海图书资料数字发行平台关键技术研究与应用[J].中国航海,2025,48(S1):202-208.
CHEN Lei. Research and Application of Key Technology of Digital Distribution Platform for China Maritime Nautical Publications [J]. *Navigation of China*, 2025, 48(S1): 202-208.

[33] IHO. S-65: Electronic Nautical Chart Production Specification: Ed 3.1.0[S]. Monaco: International Hydrographic Organization, 2026..

[34] NOAA. Production Cycle and Update Mechanism of Admiralty Nautical Charts[R]. Washington:U.S. National Ocean Service,2024.

[35] 唐军武,朱培志,刘秉义,等.海洋剖面激光雷达探测中颗粒物偏振散射问题[J].光学学报,2022,42(12):1200001.
TANG Junwu, ZHU Peizhi, LIU Bingyi, et al. Polarized Light Scattering of Particulate Matter in Detection of Oceanographic Profiling LiDAR[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1200001.

[36] 贺岩,陶邦一,俞家勇,等.机载激光测深技术及应用[J].中国激光,2024,51(11):1101016.
HE Yan, TAO Bangyi, YU Jiayong, et al. Development of Airborne LiDAR Bathymetric Technology and Application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101016.

[37] 路晓磊,张丽婷,王芳,等.海底声学探测技术装备综述[J].海洋开发与管理,2018,35(6):91-94.
LU Xiaolei, ZHANG Liting, WANG Fang, et al. Summary of Submarine Acoustic Detection Technology and Equipment[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(6): 91-94.

[38] GALCERAN E, DJAPIC V, CARRERAS M, et al. A Real-Time Underwater Object Detection Algorithm for Multibeam Forward Looking Sonar[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(5): 306-311.

[39] IMO. SOLAS Chapter V Safety of Navigation[S]. London:International Maritime Organization,2022.

[40] 李永杰,张瑞,魏慕恒,等.船舶自主航行关键技术研究现状与展望[J].中国舰船研究,2021,16(1):32-44.
LI Yongjie, ZHANG Rui, WEI Muheng, et al. State-of-the-Art Research and Prospects of Key Technologies for Ship Autonomous Navigation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 32-44.

[41] IMO. SOLAS V/19 Carriage Requirements for Navigational Charts and Publications[S]. London: International Maritime Organization,2023.