

基于模拟仿真技术对海上应急保障的能力分析

赵军涛, 郭少彬, 王 喆, 付风松, 阙家宇

广州海格通信集团股份有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年11月27日

摘 要

海上救生保障是海洋安全体系的重要组成部分。传统救生模式面临三大挑战: 一是无线信号传输存在盲区, 信息获取不及时; 二是搜救决策依赖经验, 缺乏量化数据支撑; 三是施救资源调度粗放, 难以实现最优配置。针对传统海上救生面临的挑战具体表现为: “感知滞后、推演孤立、调度粗放” 导致错失救援黄金窗口的问题, 本文剖析模拟仿真技术在海上应急救援中的应用, 构建应急救援模拟仿真系统, 逐环拆解“感知-推演-决策-执行”全链路中“看不见、算不准、调不动”的痛点。为海上救生保障提供可复制的数字化范式, 可缩短救援响应时间、提升救援成功率。

关键词

数据推演, 海上救生, 智能调度, 应急响应, 海洋安全

Analysis of the Capacity of Marine Emergency Support Based on Simulation Technology

Juntao Zhao, Shaobin Guo, Zhe Wang, Fengsong Fu, Jiayu Que

Guangzhou Haige Communication Technology Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: October 23, 2025; accepted: November 20, 2025; published: November 27, 2025

Abstract

Marine life-saving support is a vital component of the ocean-safety system. Traditional rescue models face three critical challenges: (1) Wireless dead-zones delay information acquisition; (2) Search-and-rescue decisions rely on experience rather than quantitative data; and (3) Rescue-resource allocation is coarse-grained and far from optimal. These shortcomings manifest themselves as “delayed sensing,

文章引用: 赵军涛, 郭少彬, 王喆, 付风松, 阙家宇. 基于模拟仿真技术对海上应急保障的能力分析[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(11): 349-357. DOI: 10.12677/csa.2025.1511310

isolated prediction, and coarse scheduling,” causing rescuers to miss the golden window of opportunity. To address these pain points, this paper analyzes the role of modeling and simulation in maritime emergency response and builds a distress-and-rescue simulation system that dissects the entire “sense-predict-decide-act” chain where things remain “unseen, uncalculated, and unmoved.” The resulting digital paradigm is replicable, shortens response time, and raises the success rate of life-saving operations at sea.

Keywords

Data-Driven Prediction, Maritime Life-Saving, Intelligent Scheduling, Emergency Response, Ocean Safety

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海上应急救援模拟仿真技术通过融合多源异构数据，构建虚拟系统架构、预测模型和优化算法，能够结合气象、海况等环境，为船只航行安全提供科学预演，为救援资源的精准调度提供辅助决策，同时为提升海上救生效能提供了高效的信息化支撑环境。

2. 相关工作

海上搜救领域的研究主线大致沿着“单点求救→漂移估算→资源调度→指挥可视化”四阶段演进，现有研究分别在“漂移预测”、“资源调度”与“指挥可视化”上取得阶段性成果，但普遍停留在“单点优化、离线验证、缺乏闭环”的层面，尚未形成贯穿“感知-推演-决策-执行”全链路且兼顾数据治理与安全可信的系统性解决方案，仍受困于三大痛点，具体表现为：

- (1) 看不见，感知缺位且滞后：存在无线盲区、数据异构、更新滞后。
- (2) 算不准，推演孤立且静态：漂移模型孤立、环境场精度低、不确定度未量化。
- (3) 调不动，决策粗放且开环，经验拍板、多目标割裂、缺乏量化风险。

本文提出的“四层两翼”架构。首次在同一框架内实现实时补盲感知、概率漂移推演、观测-调度一体化优化、可信数据共享与安全可控执行，将原本断裂的链路焊接为可量化、可优化、可验证的闭环，从而同时解决上述痛点，提供可复制、可扩展的数字化救援范式。

3. 系统架构与方法

3.1. 系统架构

本文提出“四层两翼”的模拟仿真系统架构。“四层”包括数据感知层、推演分析层、决策支持层和执行反馈层；“两翼”指安全保障体系和海上救生标准规范体系。各层之间通过标准化接口实现数据互通和功能协同。四层两翼一体化设计以“横向分层解耦、纵向两翼护航”为思路，将海上应急救援的复杂问题分解为“感知-推演-决策-执行”闭环链路，并通过安全保障与标准规范两大体系贯穿始终，实现“空-天-岸-海”间数据贯通、功能协同，并为遇险救生模拟仿真系统迭代演进提供技术支撑，见图1。

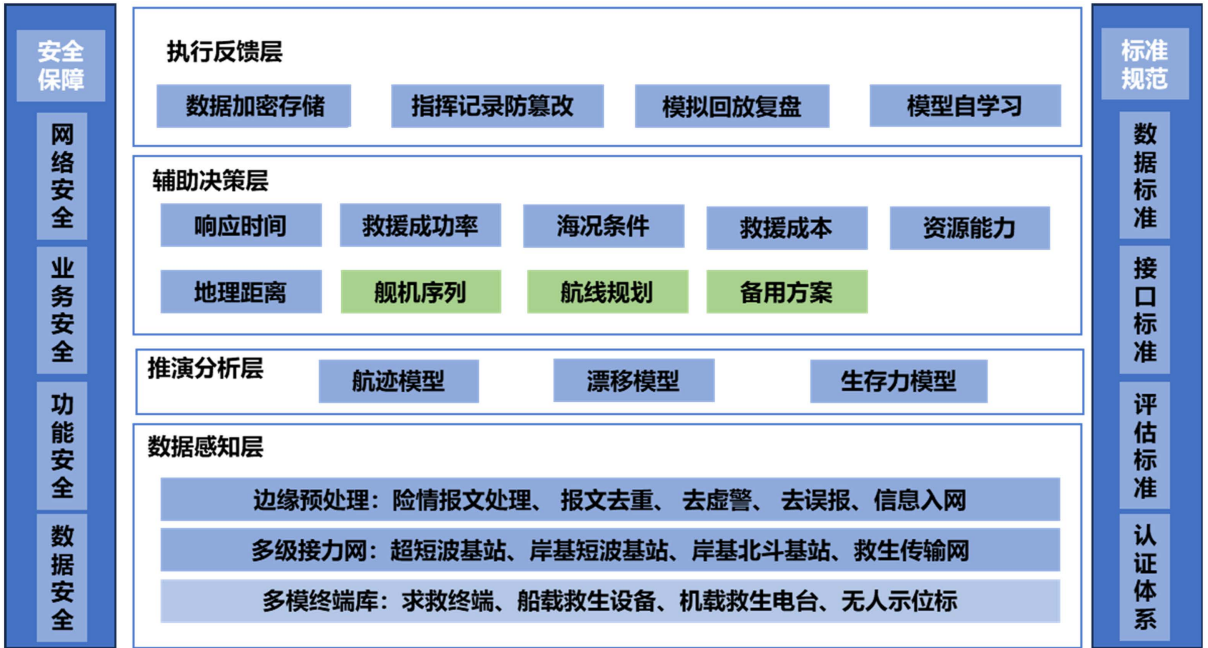


Figure 1. Architecture of the distress rescue simulation system
图 1. 遇险救生模拟仿真系统架构

3.1.1. 四层结构——纵向业务闭环

- (1) 数据感知层：
- “数据感知层”将救生终端进行数字化建模，模拟应急通信网络岸基多级链路架构，仿真基站边缘完成去重、去虚警、真伪校验、上报过程，完成“物理遇险事件-可用数字信号”的转化。
- (a) 构建多模终端库：建立多形态终端仿真模型，主要包括个人求救终端船载救生设备、机载救生电台、无人示位标，形成“人-船-机”全模型库；
- (b) 多级接力网：仿真各类应急通信网络传输环境，包括岸基超短波基站(40 km)、岸基短波基站(800 km)、岸基北斗基站(全球)、海上救生传输网等；
- (c) 边缘预处理：模拟救生险情处理机制，仿真各类基站侧完成险情报文处理、报文去重、去虚警、去误报、信息入网流程。
- (2) 推演分析层：
- 基于险情感知数据，通过内建模型，生成“船舶行驶轨迹、漂移概率分布图、剩余可耐受时间”的动态推演图，为指挥员提供可量化决策依据。完成模拟“原始险情数据”转化为“可预测救援任务”的转化。
- (a) 航迹模型：基于船舶航线规划、实时跟踪船舶船位、更新船舶轨迹，根据船只遇险报警手段，模拟生成各类通信手段的覆盖范围，推演岸基救援力量可达性。
- (b) 漂移模型：基于海洋动力学原理，建立船舶漂移数学模型，生成漂移概率分布图。当船只或飞机遇险时，根据失联前发送的遇险信息，结合船舶参数、环境数据、初始位置等，模拟仿真未来 72 小时内船舶位置并生成概率分布图。
- (c) 生存力模型：综合考虑热平衡、脱水函数，水温、海况、人员体征等因素，建立生存概率曲线，并按时间形成倒计时色阶。
- (3) 辅助决策层：

构建多目标优化函数, 结合响应时间、救援成本和救援成功率, 参考资源能力限制、海况条件、地理距离等, 采用算法求解, 输出舰机序列、航线、备用方案, 为指挥员制定救援方案提供辅助决策。

(4) 执行反馈层:

(a) 负责对每次模拟仿真过程数据进行存储, 对推演结果及辅助决策等关键指标进行标记并加密, 确保指挥记录不可篡改, 并提供模拟过程的回放与复盘。

(b) 可根据实际救援过程, 自动或手动生成“实际轨迹”与“预测轨迹”对比图, 并支持人工纠偏与模型自学习, 不断抽取最新案例数据, 优化模型参数, 实现“越救越准”的正向循环。

3.1.2. 两翼体系——横向贯穿护航

两翼体系主要包括安全保障翼和标准规范翼, 作为支撑体系, 为模拟仿真技术的实现保驾护航。

(1) 安全保障翼

(a) 网络安全: 针对不同传输方式, 根据终端、基站、卫星链路等全链路, 仿真加密传输流程。

(b) 数据安全: 针对军民数据进行区分, 对敏感字段、船员身份证、坐标进行区分, 数据分类分级: 公开、内部、敏感三级标签, 对不同用户不同数据区分加密方式。

(c) 业务安全: 在仿真过程中, 可针对不同用户优先级, 指定业务权限, 并对不同航行业务进行区分加密。

(d) 功能安全: 针对基站分布方式、业务形态、信息流传过程等加以区分, 可对整个仿真执行过程进行加密、同时防止指挥流程被篡改[1]。

(2) 标准规范翼

(a) 数据标准: 针对海上应急救援跨平台数据互通难题, 探索海上应急救援数据标准化, 通过制定《海上应急救援求救数据元规范》统一各类应急事件报文协议标准, 为破解跨平台数据互通壁垒、构建全域救援数据底座提供核心支撑。

(b) 接口标准: 为解决多源系统接入兼容性不足、传输链路衔接不畅的痛点, 探索多源系统接入接口规范化, 通过明确各类接入海上应急救援网的数据接口技术标准, 为打破不同系统兼容性瓶颈、实现数据传输链路无缝衔接提供技术依据。

(c) 评估标准: 针对救援效能缺乏统一量化评判依据的现实困境, 探索模拟救援效能量化评估体系, 通过定义报警成功率、首包时延、转发时延等多维度核心指标, 为建立科学统一的救援效能评判标准、完善效能量化评估的研究框架, 动态适配复杂救援场景需求提供量化支撑。

(d) 认证体系: 为保障终端接入安全、系统适配性及全生命周期合规性, 探索海上救援终端全维度合规认证体系, 通过构建“应急救援检测验证中心型式认可 + 入网许可 + 接入安全与转发等级达标”的三位一体认证模式, 通过全维度合规审核形成闭环管理, 为终端规范化接入提供制度保障, 充实终端认证体系的研究内容。

3.2. 功能设计与实现

本系统可部署于高性能仿真服务器, 以系统软件为核心, 模拟分散于不同平台、不同格式的信息, 并汇聚成一条清晰、连贯、可回溯的决策链条, 帮助指挥机构在高压、高不确定性的海上应急场景中, 以更短的认知时间和更科学的依据完成救生指挥, 为“黄金 72 小时”目标提供统一、高效的信息化支撑环境。

3.2.1. 应急事件触发与核实

系统突破传统单信道仿真, 融合 AIS、卫星短报文、公网、航空应急频等多源报警; 自动去重、提取

语义、评估可信，将碎片化告警转为带标签的“应急对象”，并提示是否人工复核，实现险情接报 - 处理 - 上报全流程仿真。

(1) 多源报警信息接入

系统通过构建“多模终端库”，模拟以下典型求救终端的信号触发机制与多源报警信息接入方式。

- (a) 海上单兵求救终端：集成北斗定位 + 406 MHz EPIRB 信号，支持自动落水报警；
- (b) 舰载救生设备：具备短波、超短波、北斗三重通信能力，支持遇险一键报警；
- (c) 机载救生电台：配备超短波语音 + 北斗数据链，适用于航空器海面迫降场景；
- (d) 无人机信标：搭载 9 GHz 微波 + 北斗，用于快速投放至事故区域进行信号中继；
- (e) 公众通信渠道：包括 12395 海上救援电话、移动通信短信、社交媒体报警等；
- (f) 异构网络模型：包括 VDES、北斗短报文、救援指挥专网、406 MHz、12395 电话网等多种信息传输模型。

(2) 事件去重与融合

系统可模拟同一险情通过多个渠道重复上报可能的可能性，通过时空关联性进行事件去重，判断两个报警事件是否描述的是同一险情，通过计算事件在时间和空间上的接近程度来综合评估相似度。时间差越小、位置越近，它们的相似度得分就越高。如果最终得分超过一个设定阈值，系统就会将它们自动合并，避免重复报警造成的干扰。

$$\text{Similarity}(E_i, E_j) = w_t \cdot e^{-\frac{|t_i - t_j|}{\tau}} + w_s \cdot e^{-\frac{\|x_i - x_j\|}{\sigma}}$$

其中：

E_i, E_j 为两个报警事件；

t_i, t_j 为报警时间；

x_i, x_j 为报警位置；

w_t, w_s 为时间与空间的权重系数；

τ, σ 为衰减参数。

(3) 语义提取与可信度评估

(a) 语义提取

使用自然语言处理(NLP)模型对语音/文本报警信息进行关键信息抽取，识别人员、船舶、位置、险情类型；紧急程度判断；求救意图确认。

(b) 可信度评估

基于信息来源、信号强度、历史误报率等因素计算可信度分数：用于评估一条报警信息的可靠程度。它像一个智能过滤器，综合考量三个因素：信息来源是否权威、信号强度是否良好、以及该来源的历史误报率是否很高。通过加权计算得出一个可信度分数，帮助系统自动判断这条警报是真实险情还是需要警惕的不可靠信息。

$$C = w_1 \cdot R_{\text{source}} + w_2 \cdot S_{\text{signal}} + w_3 \cdot (1 - F_{\text{history}})$$

其中：

R_{source} ：信源可靠性；

S_{signal} ：信号强度归一化值；

F_{history} ：该信源历史误报率；

w_1, w_2, w_3 为权重，满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

(4) 应急对象生成

本系统根据报警数据自动生成“险情对象”：赋予唯一 ID、类型、位置、时间、可信度、漂移预测与生存窗口，形成可推演的数字实体将提取的信息封装为结构化的“险情对象”。

(5) 人工复核提示

若满足以下任一条件，系统提示需人工复核：

- 可信度 $C < \theta_c$ (如 0.7)；
- 报警来源为低可靠性渠道；
- 语义提取中存在冲突信息(如位置与船舶类型不符)。

3.2.2. 轨迹模拟与窗口预测

系统把气象、潮流、目标物理特征一键融合，实时输出未来数小时至数十小时的漂移概率圈和“生存窗口”倒计时，指挥员无需翻海图、手工算风压差，即可同屏获取“目标最可能在哪”和“还剩多少时间救”，为划定搜索区提供直接量化依据。

(1) 多源数据融合

系统集成实时/预报的海洋环境数据，作为预测模型的输入，见表 1。

Table 1. Input categories of the prediction model

表 1. 预测模型的输入类别

输入类别	具体内容
遇险目标特征	船舶类型、排水量、吃水、干舷高度、重心位置、是否翻扣、是否有救生筏等；人员落水时是否穿戴救生衣、保温服等。
初始状态信息	险情发生时间、初始位置(经纬度)、初始姿态(如倾角、漂浮状态)、初始速度。
环境数据	实时或预报的：风速风向、浪高、浪向、海流速度与方向、水温、气温、能见度等。
地理信息	海域地形、水深、岛屿分布、禁航区等电子海图数据。

(2) 漂移轨迹预测

采用蒙特卡洛粒子扩散算法模拟目标漂移的不确定性问题。核心是建立一个基于海洋动力学原理的漂移模型。该模型基于海洋动力学原理，综合考虑风、浪、流对目标的拖曳力与恢复力，建立目标漂移的数学模型。

(a) 漂移矢量公式：

$$\vec{V}_d = \vec{V}_c + \vec{V}_w + \vec{V}_s$$

其中：

$\vec{V}_d$ ：总漂移速度矢量； $\vec{V}_c$ ：海流引起的漂移速度(通常取表层流速的某个比例，如 1.0)； $\vec{V}_w$ ：风引起的漂移速度(通常为风速的 2%，与目标风阻面积成正比)； $\vec{V}_s$ ：斯托克斯波流效应(在波浪显著时考虑)。

(b) 蒙特卡洛仿真：

系统通过成百上千次仿真计算(每次称为一个“粒子”)，每次仿真都基于略有不同的环境条件初始值(在其不确定性范围内)，从而模拟出目标在未来时刻所有可能的移动路径。

(c) 输出结果：

概率密度图：将所有粒子的最终位置进行密度估计，生成未来特定时间点(如每 6 小时)的目标位置概

率分布图。

漂移走廊/置信椭圆：通常以 72 小时为预测时限，绘制出包含 95%粒子轨迹的“漂移走廊”或一系列随时间扩大的“置信椭圆”，直观显示最可能的搜索区域。

(3) 生存时间预测

采用生存力模型，基于医学和人体热力学原理，计算遇险人员的生存概率随时间衰减的曲线。

(a) 生存概率公式：

$$S(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

其中：

$S(t)$ ：在时间“ t ”时刻的生存概率；

η ：特征生存时间，代表约有 63.2%的人无法存活超过该时间；

β ：形状参数(shape parameter)，决定曲线形状。

(b) 输出结果：

生存窗口倒计时：系统根据当前水温等因素计算出 η 和 β ，并绘制出生存概率曲线。

(c) 三色预警机制：

- 绿色(>2 小时)：生存概率高，救援时间相对充裕。
- 黄色(1~2 小时)：生存概率急剧下降，需紧急救援。
- 红色(<1 小时)：生存概率极低，救援成功希望渺茫。

3.2.3. 搜救力量调度可视化

系统将值守节点、指挥层级、力量位置、海况、航线一键叠加电子海图，二三维随意切换，拖拽即改方案，秒级刷新到达时间与概率。后台自动扫描全局可用力量，兼顾性能、海况、成本，瞬间给出多套优化方案并排序，实现“看图 - 拖点 - 回传”式智能调度，把“经验拍板”变成“一键选优”，同时结合数据仿真可无限复现救援场景，用于检验预案缺口、磨合跨区协同、训练指挥决策，核心流程如下[2]：

(1)输入信息：系统首先获取两个关键输入：一是预测出的“目标可能位置范围(漂移概率图)”和“生存倒计时”；二是当前所有可调动的救援力量(如船、飞机)的实时位置和状态。

(2) 筛选力量：系统基于速度、距离和海况，快速筛选出那些能在“黄金救援时间”内赶到目标区域的救援力量。

(3) 计算方案：系统核心会同时考虑多个目标(如：成功率最高、耗时最短、成本最低)，运用优化算法，自动计算出多套不同的救援方案。每套方案都明确了“派谁去”、“怎么去”以及“预计结果如何”。

(4) 辅助决策：最终，指挥员无需亲自计算，只需在这些经过科学测算和排序的优化方案中，结合自己的经验进行最终的风险评估和选择即可。

3.2.4. 指挥效果重演与评估

接警 - 决策 - 行动 - 评估全过程数据留痕，利用机器学习对比历史案例库，实时修正搜救方案；行动结束后自动生成包含“发现时间 - 定位误差 - 救援耗时 - 生存率”多维指标的评估报告，为模型迭代和训练提供真实样本，推动推演算法的迭代进化，持续优化预案和资源配置[3]-[5]，实现“越救越准”的正向循环[3]-[5]。

主要流程如下：

(1) 全程记录：从接到报警到救援结束，系统自动收集所有数据(如船只位置、下达的命令、现场视频、通话录音等)。

(2) 复盘回放：事后，指挥员可以在地图上回放整个救援过程，查看当时谁在什么位置、下了什么命令、现场情况如何，全方位复盘决策和行动。

(3) 自动评分：行动一结束，系统会自动生成一份成绩单，列出“发现目标用了多久”、“定位准不准”、“总耗时多少”等关键指标，量化评估救援效果。

(4) 自我学习：系统会将这些真实的救援数据作为“学习资料”，自动优化内部的预测和决策算法，让下一次的救援预案推荐更精准。

3.3. 关键技术

(1) 多源数据融合技术：整合卫星遥感、岸基雷达、AIS、北斗短报文、气象水文等数据，构建海上态势全景图。

(2) 智能预测模型：基于机器学习算法，开发船舶漂移预测、遇险概率评估、生存时间估算等模型。

(3) 优化决策算法：运用运筹学方法，开发救援路径规划、资源动态调度、多目标优化等算法。

(4) 实时可视化技术：构建二三维一体化指挥平台，实现救援过程的可视化展示和交互式操作。

4. 效能分析

通过模拟仿真实验对比，系统可从“信号精准化、预测量化、决策高效化、能力迭代化”四大维度，显著提升海上搜救的响应速度、资源利用率与救援成功率，有效降低因信息混乱、决策失误导致的搜救风险，为海上搜救领域的数字化、智能化转型提供核心支撑。

4.1. 数据感知：从“信号混乱”到“精准转化”，降低无效资源消耗

系统通过救生终端数字化建模、岸基多级通信链路仿真，在基站边缘完成信号去重、去虚警与真伪校验，“物理遇险事件可用数字信号”转化时延缩短至秒级，确保遇险信息快速、可靠接入，从源头减少资源浪费，为后续救援争取时间。

4.2. 险情推演：从“经验判断”到“量化预测”，提升决策科学性

系统基于感知数据，通过内建模型生成“船舶行驶轨迹 + 漂移概率分布图 + 剩余可耐受时间”动态推演图：模拟仿真显示，轨迹预测误差较传统流程降低，漂移范围精准度提升，缩短剩余耐受时间判断偏差；可视化推演结果为指挥员提供量化依据，减少经验误判，使搜救力量部署更贴合实际险情，降低“搜不到、搜错区”的风险。

4.3. 决策辅助：从“人工低效”到“算法优解”，缩短方案生成周期、提升方案质量

系统通过构建多目标优化函数，结合多维度限制条件用算法求解，可一键输出舰机序列、航线及备用方案：模拟验证，平均 4~5 分钟即可输出优化方案，方案生成时间较传统流程大幅缩短，且大幅降低方案中资源错配率，缩短响应时间，在保证救援成功率的同时，有效控制搜救成本，为指挥员提供高效、可靠的决策辅助。

4.4. 数据管理与自学习：从“记录零散”到“闭环优化”，实现搜救能力持续提升

系统通过两大能力实现突破：一是对模拟仿真过程数据加密存储，标记关键指标且不可篡改，支持救援过程回放复盘，模拟验证，数据可追溯率达 100%，复盘效率显著提升，便于总结经验、规避同类问题；二是自动生成“实际轨迹 - 预测轨迹”对比图，支持人工纠偏与模型自学习，实时抽取案例数据优化参数，实现“越救越准”的正向循环，推动海上搜救能力持续迭代升级。

5. 结论

海上应急救援模拟仿真技术是破解海上救援“环境复杂、风险高、协同难”痛点的核心支撑，当前已贯穿救援“感知－推演－决策－执行”全链条，能通过数据推演赋能科学决策、优化资源精准配置、构建沉浸式人员培训场景、支撑闭环复盘优化，实现救援效能多维度跃升。

未来将朝着 AI 驱动的智能化工具、虚实同步的视频孪生、跨域联动的全域协同、VR/AR 深化的沉浸升级，以及低成本规模化的绿色化方向演进，最终从“辅助工具”升级为海上救援核心基础设施，为海上安全保障与海洋经济高质量发展筑牢防线。

参考文献

- [1] 杨晓环, 杨卓超, 揭婉晨. 海上救援应急线路评估分析算法[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2022, 45(1): 50-57.
- [2] 衣麟卓. 海上搜救最优路线规划模型设计与仿真[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(16): 34-36.
- [3] 魏永宁, 王卓夫. 智能快速救援船在海上救援领域的应用探讨[J]. 珠江水运, 2023(11): 65-67.
- [4] 杜晓明, 徐延才, 王晓, 等. 面向空天海地一体化的平行海上搜救[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(5): 531-541.
- [5] 赵梦鸽, 潘家财, 张银昊. 海上大规模人命救助决策建模及仿真[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2022, 27(3): 229-238.