

石油化工运输船舶防碰撞智能系统的精确决策策略与风险管理研究

陈黎旭 程文杰（中海辉固地学服务（深圳）有限公司，广东 深圳 518052）

摘要：高危化学品由海洋油船载运，一旦发生碰撞极易引发爆炸火灾以及污染情况，在恶劣海况低能见度或者面对弱反射目标时，传统雷达 AIS 以及人工瞭望存在感知不足决策滞后的情况，构建分层报警以及数据驱动的辅助决策模型，本文提出以厘米级实时测距作为核心，基于激光雷达与视频融合的智能防碰撞系统，形成“感知 - 决策 - 控制 - 管理”的闭环策略，配套技术 - 管理 - 应急三维风险管控体系。系统为海洋石油化工运输提供可靠智能的安全解决方案，实船测试表明其显著提升感知精度，缩短响应时间降低人为失误和碰撞风险。

关键词：油船防碰撞；智能系统；精确决策；风险管理

中图分类号：U674.13 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)033-0139-03

Research on Precision Decision-Making Strategy and Risk Control of an Intelligent Anti-Collision System for Petrochemical Tankers

Chen Lixu, Cheng Wenjie (China Offshore Fugro Geosolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518052, China)

Abstract: Marine oil tankers transport highly hazardous chemicals; once a collision occurs, it can easily lead to fire, explosion, and pollution. Traditional radar, AIS, and manual lookout are inadequate in harsh sea conditions, low visibility, or for weak-reflection targets, resulting in insufficient perception and delayed decision-making. This paper proposes an intelligent anti-collision system based on the fusion of LiDAR and video, with centimeter-level real-time ranging as its core. It builds a layered alarm and data-driven assisted decision-making model, forming a closed-loop strategy of “perception – decision – control – management,” and establishes a three-dimensional risk control system encompassing technology, management, and emergency response. Real-ship tests show that the system significantly improves perception accuracy, shortens response time, and reduces human error and collision risk, providing a reliable and intelligent safety solution for offshore petrochemical transportation.

Keywords: tanker anti-collision; intelligent system; precision decision-making; risk control

作为海洋能源供应链里的关键移动载体石油化工运输船舶（以下简称“油船”），其航行以及靠泊作业的安全性是一个关乎国家能源安全海洋生态环境保护，和人民生命财产安全的重大课题，油船与普通货船相比一旦发生碰撞事故，不但可能致使船舶结构出现损伤造成人员伤亡，而且更易于引发原油泄漏火灾爆炸等灾难性二次事故，带来难以估量的经济损失以及产生深远的社会环境影响。实现实时精确且三维立体化环境感知的智能防碰撞系统研发出来，并且在此基础上构建一套科学的精确决策策略以及系统化风险管理体系已然成为行业发展的迫切需求，旨在通过技术融合与模式创新，本研究基于这一需求为石油化工运输船舶从源头和过程上遏制碰撞事故的发生，构建一道坚实可靠的数字安全防线。

1 系统架构与技术基础

智能防碰撞系统若要实现高效可靠强大的环境感知能力，以及稳健的数据处理能力是其根基所在，构建了一个协同工作架构，此架构由感知传输处理应用

四层组成，本系统采用模块化设计思想。

1.1 系统组成与功能

感知层：多源异构传感器的协同布阵，系统的“眼睛”是感知层其关键是凭借不同原理传感器优势互补，达成全距离、全天候、多维度的环境信息捕捉，激光雷达（LiDAR）按需于驾驶室顶部的前后左右，安装4-6套进而构成主机阵列，负责高精度三维建模与测距工作范围，限定在半径150m以内。它发射激光束随后接收回波，以此生成周围环境的密集点云数据，凭借这些数据它可以精确描绘出平台结构小型浮体码头设施等障碍物的细微轮廓，而且测距精度能够达到厘米级，可见光相机传感器：协同激光雷达安装给出高分辨率彩色视频影像，在于对通过点云识别出的目标开展“身份核实”工作，以及进行视觉辅助判断像区分漂浮着的木质渔船和集装箱，让系统给出的报警信息更直观且可信。

处理层：本地化部署的智能计算中枢，在船载加固服务器里部署着的处理层，堪称系统的“大脑”，

其核心任务是运行三大算法引擎：①点云处理引擎：对海量激光雷达采集的点云开展去噪、分割、聚类以及特征提取工作，及时将周围环境的三维模型重建出来，②目标识别与跟踪引擎：各类障碍物（如平台、船舶、浮标）可通过融合点云与视频数据来精确识别出，且对其运动轨迹展开跟踪。③报警逻辑判断引擎：实时基于预设的相对速度安全航向以及距离阈值，对碰撞风险予以计算进而触发分级报警，本系统的关键设计在于本地化部署，其保证了所有核心处理流程无需依赖外部网络，即使处于无网弱网的环境也能够全功能稳定运行，切实满足了船舶作业的实战需求。

1.2 激光雷达：厘米级三维测量的核心感知手段

在本系统里作为精确测量核心传感器的激光雷达（LiDAR），肩负着对船舶周边环境展开高精度三维建模以及实时测距的重要使命，基于飞行时间（ToF）测距技术的工作原理，它能在复杂海况下高频发射激光脉冲并接收反射信号，达成对障碍物厘米级的空间分辨率以及测距精度，激光雷达与传统雷达相比在目标边缘模糊回波衰减等方面不存在局限，反而具有点云密度高几何保真度强抗干扰能力好等突出优势。特别适用于精准识别与定位结构复杂或者反射特性弱的目标，像导管架平台小型渔船浮标等，在150m半径范围内，系统所部署的激光雷达传感器每秒可采集超过24万个三维坐标点，形成高密度点云数据，该传感器具备70.4°水平视场角与77.2°垂直视场角，系统能够实现对船舶周围环境的三维可视化重建，借助实时处理与建模这些点云，可精准还原目标的几何轮廓、空间姿态以及相对运动状态。后续的目标识别碰撞预测，以及辅助决策皆因该能力而获得了高精度的空间基准。

1.3 关键技术创新

多传感器前融合技术：在算法层面以及硬件布局上，本系统开展了深度融合设计并非简单地将数据进行并列显示，实现了点云数据与像素级图像数据的时空同步与融合判读，大幅提升了目标识别与分类的准确率，具体做法是把激光雷达与相机调整成左右并列结构，让它们的视野高度重合，动态自适应点云处理算法：研发了抖动点云重建技术，针对船舶在波浪里航行时自身姿态（横摇、纵摇）引发的点云抖动问题，该技术能够有效“稳像”确保三维模型的稳定性以及测距准确性。在保证响应速度（1s内）的情况下，算法可以依照海况复杂度来自适应地对计算资源作出调整，并且能够把测距误差控制在20cm以内。

2 精确决策策略

精确测量：智能防碰撞决策的物理基础，在船舶

防碰撞系统里，精确测量不仅是决策的基础更是感知的前提，以厘米级测距精度作为根本，本系统围绕激光雷达这一核心搭建起了一个三维空间感知框架，激光雷达通过对目标表面开展逐点扫描，可获取其真实三维坐标轮廓尺寸以及相对运动矢量，相较于传统雷达只能提供目标的大致方位和距离，这为达成高精度碰撞风险评估创造了可能。船舶在波浪里航行时会因横摇纵摇致使点云出现偏移问题，系统借助引入抖动补偿算法，以及动态坐标校正机制有效克服了该状况，保障测量数据于空间坐标系里具备一致性与稳定性。

2.1 基于精确测量的分层级报警机制

驾驶员的信任度以及应急响应效率会受到报警机制设计的直接影响，误报过于频繁会引发“狼来了”效应，而灾难可能因延迟或漏报而导致，本系统依据船舶操纵特性以及紧急程度，构建了具备科学性的分层级报警逻辑：当系统察觉到有目标踏入300m长距离感知区域且存在潜在碰撞风险之际，系统将开展温和的声光提示操作在数字大屏之上对该目标予以高亮显示。此乃一级报警（预警级|300m–150m），开始对态势展开早期评估，此阶段目的在于引起驾驶员的注意，②二级报警（警示级|150m–50m）：当目标进入核心防撞区（150m）时，风险等级有所升高，警报声会被系统以更为急促的状态发出，屏幕与此闪烁不停而该目标的精确距离数据以及实时视频画面会被自动弹出。初步的决策建议会被系统提供出来，像

“建议将航向向右微调5度”或者“建议把速度减至3节”以此辅助驾驶员来制定避碰方案，③（紧急级|<50m）三级报警：碰撞风险已近在眼前，最高级别的尖锐警报将被系统触发，其他非必要信息会被覆盖避碰界面将全屏显示，“立即停车！”或者“紧急左满舵！”这样明确强制的操作建议，会在此时由系统给出。旨在打破驾驶员的侥幸心理或迟疑，促使其立即采取果断措施的是这一级别的报警。

2.2 数据驱动的辅助决策模型

系统内置辅助决策模型以超越简单的阈值报警，此模型将实时数据，船舶操纵数学模型以及专家知识库进行了融合，实时态势评估：本船与目标物的最近会遇距离（DCPA）以及最近会遇时间（TCPA）被模型持续计算着，相较于静态距离这两个动态参数能够更精准地反映碰撞风险，方案模拟与推演：模型依据当前船速舵效以及风流影响等参数，会迅速模拟在做出不同避碰动作（变速转向）之后未来态势的演变情况。最优建议生成：将从模拟结果里把能够安全且高效扩大DCPA的行动方案筛选出来，当作辅助决策建议推送给驾驶员，在靠泊阶段模型会精准算出船舶和

平台导管架之间的最小间距，给出最佳靠拢速度以及角度方面的建议。

2.3 闭环决策流程

系统的决策支持是一个动态、闭环的过程：风险评估与融合识别→报警与建议推送→数据采集→驾驶员确认/执行→效果反馈与模型优化。系统会记录驾驶员的操作反馈，用于不断优化算法与决策逻辑，让系统在使用中愈发“智能”，且越来越契合该船的实际操纵特性。

3 风险管控体系

要确保智能系统长期稳定可靠地发挥作用，仅靠自身引入这一技术保障是不够的，还必须建立一套与之匹配的系统化的风险管控体系，该体系涵盖管理、应急以及技术这三个层面，构建起一个完整的PDCA（Plan-Do-Check-Act）闭环。

3.1 系统性风险识别

在全生命周期的系统里，我们分辨出下面这几类关键风险：①技术性风险：因海水盐雾腐蚀振动等状况，传感器出现性能下降或者失效的问题，服务器在恶劣海洋环境中死机，软件算法存在未被发现的边界条件Bug；②操作性与人为风险：驾驶员对系统过度依赖或完全不信任，未经培训的人员误操作界面；在紧急情况下忽略系统报警；③环境与外部风险：极端恶劣的天气像台风超出了传感器的设计极限，遭遇非常规障碍物（如大量渔网），外部电磁干扰。

3.2 多层次管控措施

①冗余设计：采用双套备份的关键传感器（首部激光雷达），网络传输双链路并行，电源供应接入船舶应急电源；②健康状态自诊断：各传感器服务器以及链路的工作状态会被系统定时检测，因其具备自检功能，一旦检测到异常情况，系统会立刻向驾驶员报告指导切换至备份单元；③定期校准与测试：确保激光雷达的测距精度始终处在设计指标内，需建立严格的周期校准制度；④人员培训与资质认证：编制系统专用操作手册和故障处置预案，必须所有驾驶员经过理论培训以及实操考核，在取得该系统的“操作资格”之后方可上岗。

3.3 管控效果量化评估

在实船测试阶段为科学评估本系统及其风险管控体系的实际效果，我们开展了长达3个月的对比数据收集工作，具体情况如表1和表2所示。

在实战里各类关键风险事件的发生频率被该系统显著降低，数据表明它不仅在技术性能方面达到了设计要求，这证实了其与风险管控体系相结合后的综合有效性。

表1 系统核心性能实测数据表

测试场景	探测距离有效范围(m)	平均响应时间(s)	平均测距误差(cm)	目标识别与报警准确率(%)
晴天、平静海况靠泊	150	0.8	15	98.5
夜间、能见度一般航行	120	1.0	18	97.2
薄雾、轻浪作业	100	1.2	22	95.8
浪高2m中浪航行	90	1.4	24	94.5

注：响应时间指从目标进入探测范围到系统发出相应报警信号的总延迟。

表2 系统实施前后年度关键风险指标对比表

风险指标	实施前(年均发生次数)	实施后(年均发生次数)	降幅(%)
近距离(<100m)碰撞险情	12	3	75.0%
系统误报警(由环境杂波等引起)	25	6	76.0%
确认由人为操作失误引发的安全事件	8	2	75.0%
因系统硬件/软件故障导致的功能中断	5	1	80.0%

4 结语

一套针对石油化工运输船舶的智能防碰撞系统，及其配套的精确决策策略与风险管控体系在本研究中被成功研发并验证，通过多源融合感知激光雷达与视频信息，该系统达成了对航行环境三维立体厘米级精度的实时监测，通过数据驱动的辅助决策模型，以及科学的分层级报警机制为驾驶员给予了可信及时清晰的决策支持，把人从高度紧张且易疲劳的持续判断里有效部分解放出来；构建覆盖技术管理和应急的全方位风险管控体系，保障智能系统本身能长期稳定且可靠运行，达成“技防”“人防”“管防”的有机统一，该综合解决方案可大幅降低碰撞险情以及人为失误的发生率，这有充分实证数据表明其为提升石油化工水上运输本质安全水平提供了坚实的技术路径与管理范式。

参考文献：

- [1] 陈军. 船舶在海洋石油工程领域绿色数智发展探讨 [J]. 中国海事, 2025(07):14-16.
- [2] 薛军. 海洋石油船舶中心卸油及污液管道安全隐患分析及对策研究 [J]. 石化技术, 2025, 32(05):96-97.
- [3] 徐瑞翔, 孟祥钊. 海洋石油工程建设船舶安全管理要点研究 [J]. 石油化工安全环保技术, 2025, 41(01):17-20+6.
- [4] 张建民, 陈小忠, 刘博, 等. 海洋石油工程船舶总监制管理 [J]. 化工管理, 2024(11):7-9.

作者简介：

陈黎旭(1991-)男,汉族,四川德阳人,本科,工程师,研究方向:卫星定位、声学测量、多波束测量及海洋测绘。