

南海东部油田海底石油管道运输立体化智能监测 与应急体系研究

王世伟 (中海石油 (中国) 有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 面对海洋油气开发向深水、远海的战略迈进, 海底管道的安全运营与环境保护已成为关乎国家能源安全与生态安全的重大课题。本文聚焦南海东部油田, 系统阐述其如何构建并实践一套融合前沿技术与精细管理的海底管道智能安全与溢油应急体系。论文深入剖析了以圣佩德罗湾泄漏事故为代表的第三方破坏教训, 以此为导向, 重点研究了船舶自动识别系统 (AIS) 的主动预警应用、以峰飞航空科技大型无人机为代表的空中智能巡查平台, 以及基于激光诱导荧光 (LIF) 等技术的海面溢油智能视频监控系统三大核心技防手段。研究表明, 通过将这些智能感知节点与卫星遥感、水下探测及人工智能决策平台深度融合, 南海东部油田正成功打造一个“空、天、海、地、潜”一体化的立体监测网络, 实现了从被动响应到主动预警、从事后处置到事前预防的根本性转变, 为全球同行业提供了可资借鉴的“中国方案”。

关键词: 海底管道; 溢油应急; AIS; 大型无人机; 智能视频监控; 立体监测; 中国海油

中图分类号: TE832; X937 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0106-03

Study on Three-dimensional Intelligent Monitoring and Emergency System of Offshore Oil Pipeline Transportation in the South East Sea Oilfield

Wang Shiwei (CNOOC China Limited, Shenzhen Branch., Shenzhen Guangdong 518054, China)

Abstract: As marine oil and gas development advances strategically into deep waters and distant seas, the safe operation of submarine pipelines and environmental protection have become major issues concerning national energy security and ecological security. This paper focuses on the eastern South China Sea oilfield, systematically explaining how it has established and implemented an intelligent safety and oil spill emergency system for submarine pipelines that integrates cutting-edge technologies with meticulous management. The paper thoroughly analyzes the lessons from third-party sabotage, represented by the San Pedro Bay leakage accident, and, guided by this, focuses on three core technical prevention measures: the proactive early warning application of the Automatic Identification System (AIS), the intelligent aerial patrol platform represented by the large drones of Fengfei Aviation Technology, and the intelligent video monitoring system for sea surface oil spills based on technologies such as Laser-Induced Fluorescence (LIF). The study shows that by deeply integrating these intelligent sensing nodes with satellite remote sensing, underwater detection, and artificial intelligence decision-making platforms, the eastern South China Sea oilfield has successfully created an integrated three-dimensional monitoring network covering “air, space, sea, land, and subsea,” achieving a fundamental shift from passive response to proactive early warning and from post-disposal to pre-emptive prevention. This provides a “China solution” for the global industry to learn from.

Keywords: submarine pipeline; oil spill emergency; AIS; large drones; intelligent video surveillance; three-dimensional monitoring; CNOOC

海底管道是海洋油气资源开发的“大动脉”。南海东部油田作为我国海上油气生产的主力军, 其运营的庞大海底管网是国家能源供应链的关键一环。然而, 这条“深蓝血脉”长期暴露于复杂的海洋环境中, 面临着内部腐蚀、地质灾害, 尤其是船舶抛锚、拖网作业等第三方活动带来的机械破坏等严峻风险。2021年美国圣佩德罗湾海底管道泄漏事故, 正是此类风险的集中爆发, 它不仅造成了严重的生态灾难, 更暴露出传统管道监护模式在实时性、精准性和覆盖度上的巨大盲区^[1]。

在此背景下, 单纯依靠制度约束和传统人力巡护

已难以为继。南海东部油田的应对之道, 是以科技创新驱动安全管理范式变革, 核心是构建一个以数据为驱动、以智能感知为触角的立体化防护体系。本论文旨在深入解析该体系中 AIS 监控、大型无人机巡查、智能视频监控三大前沿技术的具体应用、融合机制及实践成效, 展现南海东部油田如何编织一张“可感知、能预警、善处置”的智慧安全网, 筑牢海底管道的安全防线。

1 制度为基

安全体系的根基在于严谨的制度。南海东部油田严格遵循国家法规, 构建了覆盖规划、建设、运营至

废弃处置的全生命周期管理体系。南海东部油田《海底电缆管道管理程序》确保了管道在路由勘察、铺设施工阶段的合规性与科学性，从源头上规避风险。而在运营阶段，南海东部油田《原油生产运行过程管理细则》将“流动性保障”和过程参数监控制度化，构成了管道内部完整性管理的核心。例如，细则强制要求对海管登陆点温度、压力等关键参数进行每日不低于4次的监测与记录，这为基于数据异常的早期风险识别奠定了坚实基础^[2]。这一套刚性管理框架，为后续高科技手段的介入和应用提供了明确的规程与责任界面。

2 以案为鉴

圣佩德罗湾事故如同一面镜子，照出了海底管道安全的关键短板：对密集航道区第三方破坏风险的动态监控不足，以及对微小泄漏的早期发现能力缺失。事故调查指向船舶锚击，这警示我们，防护必须延伸至管道上方的海面活动。

基于此深刻教训，防护策略必须实现多维升级：

工程防护前置：在管道设计建设期，对穿越航道的管段采取增加壁厚、提高防腐等级、确保埋深低于最大冲刷线等强化措施。

管理措施强化：严格执行管道保护区内禁止抛锚、拖锚等规定，并利用AIS、雷达等手段进行监控执法。同时，向渔业、航运等社群进行精准的管道保护宣传。

技术监控赋能：这正是南海东部油田发力的重点。必须融合无人机巡护、智能视频监控、AIS/雷达融合预警等多种技术，实现对管道路由海域船舶动态和海面状态的7×24h不间断监控，并对异常事件（如船舶滞留、疑似溢油）进行自动识别与预警，特别需关注大风天气下船舶走锚的风险。同时，应定期开展海底路由后调查，掌握管道埋深、悬空及周边地貌变化，并在海图及电子海图上明确标识管道位置，设置虚拟航标^[3-4]。

3 核心支柱

为应对上述挑战，中国海油着力构建的立体监测体系，其最具革命性的进步体现在以下三个紧密联动、互为补充的技术引擎上。

3.1 AIS与雷达融合监控：海面动态的“智能哨兵”与主动预警器

针对第三方船舶破坏这一最大风险源，中国海油在重点管道路由区部署了AIS与雷达融合监控系统。该系统并非简单接收信号，而是构成了一个主动防御闭环：

智能感知与融合：系统同步接收船舶AIS播发的身份、航向、航速信息，并结合雷达对海面所有目标

的轮廓探测能力。通过算法融合，可精确掌握每一艘船舶（无论是否开启AIS）的实时位置与动态。

电子围栏与自动预警：在数字海图上沿管道划定虚拟的“电子防护区”。一旦有船舶侵入或在该区域内异常徘徊、低速航行（疑似准备抛锚），系统立即自动触发三级警报。更为先进的是，系统可自动通过甚高频（VHF）无线电，向该船舶播发中文语音警告，告知其已进入海底管道保护区并要求立即驶离，实现了“发现-识别-预警-驱离”的秒级自动化响应^[5-7]。

大风走锚专项监控：针对用户特别提及的大风天气船舶走锚风险，系统可集成气象数据，当预报风力超过阈值时，自动加强对锚泊船舶的监控密度，一旦发现其位移轨迹可能威胁管道，即刻向海上平台和应急指挥中心发出高级别警报。

3.2 峰飞航空科技大型无人机：灵活高效的“空中巡检官”

传统直升机巡线成本高、受天气和视程影响大。以峰飞航空科技为代表的国产大型电动垂直起降飞行器（eVTOL），如“大白鲨”系列，凭借长航时、大载荷、高自主性的特点，正在重塑海管空中巡护模式。2025年峰飞航空科技大型eVTOL航空器V2000CG凯瑞鸥从深圳大鹏-惠州193平台运输飞行成功：实现全球首次大型eVTOL航空器（2t级）在海洋石油平台的无人化运输应用；填补行业空白：全球无大型纯电垂直起降航空器海上作业先例。绿色低碳：纯电力，零碳排放，契合中海油绿色发展战略，正是低空经济最佳切入点！智能高效：全无人自动驾驶，降低人为操作风险及人力成本。运维革新：噪音是传统直升机的百分之一，维护成本较传统直升机下降很多。

常态化精细巡查：无人机可预制航线，自动对管道路由进行定期扫描。其搭载的高清光学变焦相机和红外热像仪，不仅能宏观巡查海面有无异常油膜、漂浮物，还能精准识别管道标识、海岸侵蚀情况以及周边可疑施工活动。

应急快速响应与专家鉴定：当AIS系统报警或平台报告疑似泄漏时，无人机可迅速飞赴现场，将实时高清画面、红外热图回传指挥中心，帮助指挥人员第一时间判断事态性质。更重要的是，可搭载激光诱导荧光（LIF）探测模块的无人机，能从空中向海面发射特定波长激光，通过分析海面物质激发的荧光光谱，在油膜肉眼尚不可见时（ppm级）就准确鉴别是否为原油泄漏，实现“亚视觉”精准诊断，极大缩短了确认时间。

特殊环境作业：在台风过境后或恶劣海况下，有人船舶和直升机难以立即出动，大型无人机可率先对

管道区域进行灾后安全评估，为后续复工作业提供决策依据。

3.3 海面溢油智能视频监控：永不疲倦的“海岸守望者”

对于管道登陆点、近岸水域、平台周边等固定高风险区域，部署基于激光诱导荧光（LIF）技术的智能视频监控系统，是实现全天候、高可靠性监测的终极解决方案^[8]。

原理与优势：该系统发射调制激光照射监控海面，仅石油烃类物质会产生特定“荧光指纹”，而海水、藻类、垃圾等不会干扰。这使其克服了传统视频监控易受光照、天气影响、误报率高的缺陷，实现全天候、高灵敏度、低误报的监测。

多功能集成与联动：现代智能监控站（如 ATE5100 系列）集成了 LIF 油污传感器、高清摄像球机、气象站、5G 通信模块于一体。当检测到溢油，系统在秒级内同时完成：①发出声光报警；②自动录制并回传现场视频；③标注 GPS 位置；④记录风速、风向等环境数据。这些信息形成完整证据链，直接推送至指挥中心大屏和值班人员手机 App。

与体系的融合：固定监控点的数据与无人机移动巡查数据、AIS 船舶动态数据在后台融合。例如，当智能视频监控发现某处海面异常，平台可立即调取该区域当时的 AIS 记录，核查是否有船舶经过，并可一键派遣附近无人机前往核查，实现多源信息交叉验证与快速联动。

4 从智能感知到智慧决策：数据融合与应急响应的闭环

智能感知层获取的海量数据，最终汇入中国海油打造的“海洋设施安全智能指挥平台”。该平台利用人工智能和大数据技术，实现三大跃升：

风险预警智能化：AI 模型学习正常的海面景象、船舶行为模式与管道运行参数，能自动识别偏离常态的异常事件，实现从“人找异常”到“异常找人”的转变。

应急决策科学化：一旦确认泄漏，平台可瞬间启动溢油扩散模型，综合实时海流、风场数据，预测污染范围和方向，智能推荐最优的围油栏布设点、清污资源调度路线，将应急方案生成时间从数小时压缩至分钟级。

管理闭环高效化：形成“智能感知 - 自动预警 - 辅助决策 - 任务派发 - 行动反馈 - 效果评估”的完整管理闭环，大幅提升安全管理效率和应急响应精准度。

现场应急则遵循《A 平台海管溢油应急预案》等文件，实现快速关停、初期控制。同时，国家级专业

力量如国家海上油气应急救援海南基地的建成，配备了 3000m 级深水应急装备，为应对最极端事故提供了“兜底”保障，实现了现场处置与国家救援的无缝衔接。

5 结论与展望

中国海油通过将 AIS 融合预警、大型无人机巡查、智能视频监控三大技术引擎深度嵌入海底管道安全管理体系，实质性地推动了监护模式从“人防为主”向“技防优先、人机协同”的深刻变革。这一立体化智能监测网络，有效弥补了传统手段的盲区，显著提升了对第三方破坏风险和溢油事件的早期发现、精准预警与快速响应能力。

未来，这一体系将向更深度的“智慧化”演进：一是感知终端智能化，发展更小型、长效、集成多参数的水下原位监测传感器；二是决策模型机理化，将流体力学、地质力学模型更深融入 AI，提升预测准确性；三是协同共治平台化，推动与海事、环保、渔业等部门的数据共享与应急联动指挥平台建设，共同守护海洋能源命脉与生态环境安全。南海东部油田的实践雄辩地证明，唯有坚持技术创新与管理革新双轮驱动，才能筑牢海底管道的钢铁长城，确保蓝色国土的能源安全与生态永续。

参考文献：

- [1] 王晓梅. 海洋石油平台改造项目管道精准设计研究 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(11): 202-204.
- [2] 刘猛, 王定亚, 邓平, 等. 深海海底管道全寿命周期完整性管理技术 [J]. 油气储运, 2021, 40(5): 481-489.
- [3] 张国庆, 刘丙乙, 杨神化. 基于 AIS 数据的船舶异常行为识别研究综述 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 29-43.
- [4] 廖国祥, 廖又平, 杨翼. 海洋溢油模拟与应急决策支持系统研究进展 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 721-730.
- [5] 覃磊, 刘万超, 王健, 等. 浅谈海洋石油压力管道风险评估方法 [J]. 化工管理, 2025(05): 125-127.
- [6] 陈翔. 管道应力分析在海洋石油平台管道设计中的应用 [J]. 山东化工, 2025, 54(18): 142-145.
- [7] 赵弘, 周晶, 李昕. 基于多源信息融合的海上设施安全监测技术研究现状与展望 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 102-111.
- [8] 王祥, 李伟, 孙宝江. 深海管道第三方破坏风险评估方法研究 [J]. 船舶力学, 2020, 24(8): 1105-1114.

作者简介：

王世伟（1986-），男，汉族，山东菏泽人，本科，中级工程师，研究方向：安全管理。