

大连湾海底隧道维保作业安全管理研究

杜文康

(中交一航局安装工程有限公司)

摘 要: 大连湾海底隧道是北方首条海底隧道,也是大连市一项重大民生工程,为了保障大连湾海底隧道运营体系高效安全运行,需要解决其运营期的安全管理面临的封闭空间风险高、设备维护复杂、动态交通流干扰等问题。文章结合建设期积累的安全管理经验,采用以“本质安全”为核心,融合信息化技术、分级管控机制和应急响应体系的综合管理策略,通过案例分析验证其有效性。维保作业实际操作验证了该管理方式有效可靠,可为海底隧道运营维保提供更好的安全理论和实践指导。

关键词: 海底隧道;运营安全;维保作业;本质安全;信息化管理

0 引言

随着我国交通基础设施的快速发展,隧道作为公路、铁路网络的重要组成部分,其运营安全与维护管理愈发重要。截至 2020 年底,我国铁路与公路隧道总运营里程已突破 3.4 万 km,预计未来将持续增长。然而,在隧道规模扩大的同时,传统“重建设、轻维护”的理念导致病害率居高不下,突发事件增多。国外研究形成了较成熟的理论体系。例如,日本通过引入“健全度评估”与专家系统,实现了结构剩余寿命的量化分析;美国则以“损伤度”模型评估结构劣化程度。这些研究聚焦于维修管理模式、变异现象分类及防治措施,但多针对传统山岭隧道,对海底隧道特殊环境的适应性不足。我国隧道维保研究仍处于追赶阶段,存在三大短板:1) 理论应用滞后,多依赖事后处理而非预防性管理;2) 检测技术标准化程度低,早期隐患难以及时发现;3) 缺乏针对复杂环境(如海底高压、盐蚀环境)的专项维保方案^[1]。

本文以大连湾海底隧道为研究对象,旨在突破传统维保框架,通过整合国际经验与本土实践,构建适应海底隧道特殊需求的动态安全管理体系。系统地研究海底隧道在运营期面临的复合型风险(如封闭空间作业、交通扰流),填补海底隧道维保安全管理的理论空白。

1 大连湾海底隧道项目概述

大连湾海底隧道位于中国辽宁省大连市,是一项具有重要交通意义的基础交通工程。主体结构使用年限 100 a。工程主线全长 5.1 km,隧道为跨海预制安装沉管结构,沉管段由 18 节预制管节组成,沉管最大重量约 6 万 t。机电工程主要建设内容包括隧道供电照明工程、通风、消防、给排水、弱电控制工程及市政基础设施管网工程、交通工程及交通监控中心等,其中包含 4 座变电所,9 处地理变电所,2 个隧道内监控平台,2 座消防泵房,3 个废水泵房,5 个雨水泵房,2 个风塔,给排水及消防管道约 5.7 万 m,电缆约 8.6 万 m,轴流、射流风机 203 台^[2]。

2 运营期维保作业的安全管理难点

2.1 环境封闭性风险

大连湾海底隧道作为我国北方首条跨海沉管隧道,该隧道全长 5.1 km,远超普通城市隧道 2~3 km 的常规长度,其中南岸设置 3 条分岔支线,总延伸长度达 2.3 km,形成复杂的“Y”形立体交叉结构(图 1)。超长线性工程特性导致维保作业需覆盖的单元数量较普通隧道增加 47%,且支线交汇处存在 12 处特殊节点结构,增加了设施巡检的复杂程度。

在通风系统设计方面,项目创新采用纵向通

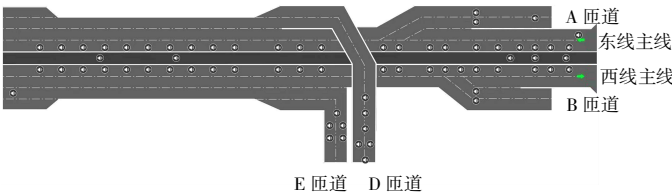


图 1 隧道平面布置图

风与4座岸上通风塔组合模式,但受制于海底段埋深的特殊工况,预测数据显示其换气效率为普通山岭隧道的67%。运营监测表明,隧道内CO浓度波动值达30~50 ppm,是市政道路隧道标准值的1.5倍,尤其在交通高峰时段,有害气体积聚速率较设计预期提升22%。这种特殊环境使火灾排烟效率降低至 $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。

这些结构性特征与运营数据的耦合作用,使大连湾隧道维保安全风险呈现显著特殊性:超长线性结构延长应急响应时间基准值至15 min(普通隧道8 min),受限空间导致设备故障率提升至2.3次/万工时,较行业平均水平高出40%。数据建模显示,在同等维保强度下,隧道综合安全风险指数较常规隧道高出1.8个等级,突显其安全管控体系的特殊要求。

2.2 设备维护复杂性

大连湾海底隧道是中国寒冷海域沉管隧道建设的开山之作,其设备维保体系面临三重特殊环境考验。实测数据显示,隧道所处海域年均温差达 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冬季 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至夏季 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$),极端温度波动导致设备金属构件热胀冷缩形变量达 2.3 mm/m ,较温带地区隧道提升40%。这种周期性应力使设备连接件松动率提升至 $3.2\text{ 次}/(\text{km}\cdot\text{a})$,远超普通隧道 $1.5\text{ 次}/(\text{km}\cdot\text{a})$ 的基础水平。

针对海底渗漏防控难题,隧道采用“刚性+柔性”复合防水体系,沉管对接端采用与标准段沉管隧道管节接头相同的GINA止水带、OMEGA止水带组成的防水系统,这2种止水带均为柔性防水材料,拉伸强度高、延伸率大,起到防水、防腐双重作用。配套排水系统配置40余台大功率潜水泵,较常规隧道提升60%的排水能力。但设备增多后,雨季需每日开展3次以上设备巡检。

2.3 动态交通流干扰

大连湾海底隧道有效破解了大连“C”字形空间结构形成的交通瓶颈,其动态交通流干扰对维保作业的挑战具有显著地域特性。运营数据显示,隧道日均通行量达6.2万辆,最高单日通行8.1万辆。尤其在南岸3条主线、4条匝道构成的复合交通节点,高峰时段形成12处车流交织区,单日变道频次超26万次,是常规双向四车道隧道的2.3倍。

多维交通压力下,维保作业面临双重制约:

1) 在5.1 km主线段实施封闭作业时,车道缩减

导致通行能力陡降42%,引发 1.6 km/h 的极端低速流(较正常车速下降74%);2) 7个匝道控制点形成动态瓶颈效应,作业期间匝道通行延误激增至8~12 min(非作业期3 min),引发区域路网拥堵指数上升2.8级。2023年运维记录显示,常规养护作业引发次生交通事故概率达0.37次/万车次,是城市普通隧道的1.9倍。

3 安全管理策略与实践

3.1 “本质安全”管理体系

本质安全是指设备、设施或技术工艺含有内在的能够从根本上防止事故发生的功能。本质安全体系在大连湾海底隧道的应用,可以体现出从被动防御向主动免疫的转变:通过技术优化将风险阈值降低至常规标准的1.3~1.8倍,使年事故概率降至0.05次/km(行业均值0.12次/km),可为超长海底隧道的安全运营提供标准的解决方案。通过构建“本质安全”管理体系实现这一目的,可以从技术优化和工艺改进两大方面着手。1) 技术优化。需在安全管理期间引入先进的技术方法,对维保作业过程进行监督。如运用BIM+GIS三维可视化平台,实时监控设备运行状态与作业人员位置,实现风险预警。2) 可采用无人机巡检替代高危人工检查,减少人员暴露风险,推广非侵入式检测技术(如红外热成像监测电缆温度)。注重现代技术方法的应用,以便为维保作业的安全运行带来技术上的支持。加强作业人员系统培训,提高应急响应能力,在遇到突发状况时从容应对。定期对所构建的本质安全管理体系落实情况加以评估,以便及时加以改进,从而通过不断的优化和调整,保障海底隧道运营期间内的维保作业安全管理有序实施。

3.2 标准化引流模式

制定符合交通部门要求的占道作业标准,能有效缓解交通拥堵,在早晚高峰时段(工作日6:30—8:30, 16:30—19:00)、节假日期间避免占道作业。其他时段如遇道路拥堵,需停止作业,做好避让。占道作业必须设置符合交通部门要求的安全警示标识牌,主要有:警示旋转灯、前方施工标识牌、限速 40 km/h 标识、变道指示箭头、导向牌、施工区域设置警示锥桶、变道指示标识牌、解除限速指示牌。

通过在关键节点设置专人值守或者运用交通监控系统专业的监控设备,实时监测交通情况,

以便及时调度和调整交通，不仅能降低车辆交叉风险，保障过往车辆安全通过维保路段，也能降低对正常交通运作的影响。

车道封闭示意图如图 2 所示。

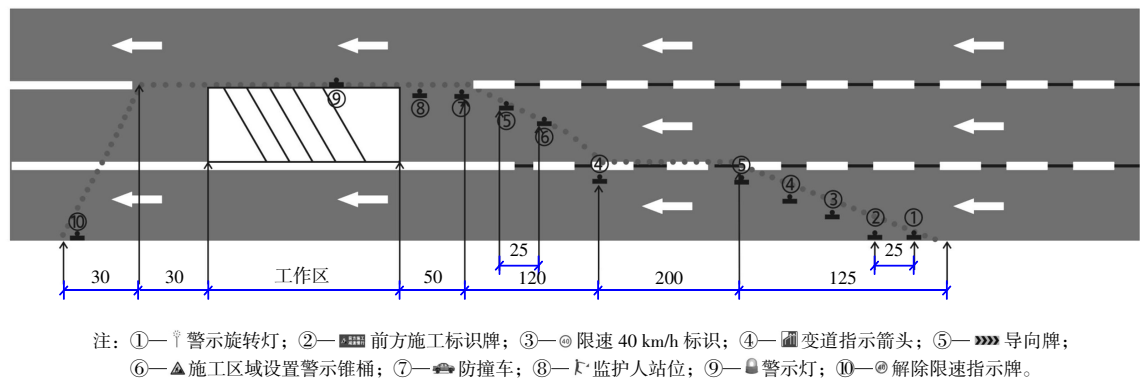


图 2 车道封闭示意图(m)

3.3 分级管控与人员培训

为推动海底隧道运营期间的维保作业安全管理工作顺利实施，还应关注分级管控与人员培训。

- 1) 风险分级，依据 GB 6441—1986《企业职工伤亡事故分类标准》^[9]，将作业风险分为红、橙、黄、蓝四级管控权限。
- 2) 可延续建设期“安全积分超市”模式，将违章行为与积分奖惩挂钩，提升作业人员主动性。
- 3) 专项培训作业人员，提升安全素养和安全技能。人员培训可通过设置虚拟现实(VR)安全体验馆，模拟火灾、渗漏场景等多种举措，强化人员应急处置能力，即便在遇到突发情况时，也能运用所掌握的知识和技术妥善解决，从而降低风险，提高海底隧道维保安全管理效率和质量^[4]。

3.4 应急响应机制优化

为进一步提高海底隧道维保作业应急响应，需不断优化应急响应机制。参考建设期与海事局的协同模式，建立运营期“交警-消防-医疗”一键联动系统，确保 5 min 内响应。及时更新预案动态，通过应急指挥中心服务于海底隧道维保安全管理工作。该中心应具备先进的信息技术设备，选用清晰度高、稳定性好的摄像头产品，通过技术手段优化视频的传输和显示功能，能够动态查看隧道内应急事件地点的实时画面，第一时间了解事件的真实情况，为隧道的安全运营提供技术支持。

在应急事件处置时，运用数字化系统中应急事件和预案管理模块，允许动态更新应急预案信息，同时联动隧道内的传感器设备和视频监控系

统。在应对应急事件时，数字化系统能够自主触发对应的应急预案，根据预案内容生成处置方案，并通过情报板、声光报警、移动终端通知等方式有效通知维保、应急人员。同时，隧道内应急照明、通风系统、消防系统根据应急事件启动设备，确保隧道内人员及设施安全。面对突发情况也能够迅速作出决策，相应的应急物资也应准备齐全，以便应对不时之需^[9]。为快速响应，基于历史事件数据(如 2024 年黑垭口隧道自燃事件)完善预案库，每季度开展多情景演练，提高整体应急响应能力，从而在维保作业安全管理上取得新的突破。

4 案例分析

由于海底隧道运营期维保作业的复杂性，为了保障安全管理效率得到提升，可通过分析以往案例获得新的思路。2024 年 9 月 13 日，贵阳市黑垭口隧道内一辆轿车毫无征兆地突发自燃，火势在 45 s 内蔓延至全车。自燃事件表明隧道内的消防设施、紧急疏散预案等都需要进一步完善，以便更好地应对各种突发事件。

为了应对这类问题，要从多个维度着手。

- 1) 构建“本质安全”管理体系，提高自动监测系统的可靠性，及时维护保养喷淋设备，以便在出现火灾隐患时及时启动。
- 2) 加强分级管控与人员培训，利用虚拟现实(VR)安全体验馆，模拟火灾、渗漏场景等多种举措，强化人员应急处置能力，即便在遇到突发情况时，也能运用所掌握的知识和技术妥善解决，从而降低隧道风险及人员应急、运维风险。

3) 优化应急响应机制要提升应急通道利用效率,建立运营期“交警-消防-医疗”一键联动系统,确保5 min内响应。同时也要及时更新预案动态,利用精密仪器更好地掌握隧道内的情况,面对突发情况也能够迅速作出决策,应急物资也应准备齐全,从而在面临安全事件时能在最短时间内控制住形势,避免对周边人群构成威胁。

5 结语

海底隧道运营安全管控复杂,源于多维风险耦合与动态演化。本研究针对大连湾海底隧道,以全周期安全管理理论构建涵盖风险识别、智能监测与应急联动的三维治理体系,探索安全管理标准的迁移路径。研究发现需建立工程本体、技术装备与管理机制三维协同机制,提出“环境-设备-行为”耦合分析模型,揭示链式反应规律。实证表明预防性维护可降低故障概率,跨部门联勤指挥可突破信息孤岛。该研究具有提供安全治理模板,解决结构健康监测瓶颈,创新人员行为管

理模式的实践价值。但预测长期性风险精度和AI算法决策可靠性待提升。

未来,研究聚焦于技术上深化数字孪生与物理模型融合,构建预测性维护系统;管理上建立全要素知识图谱;探索AI深度探索在应急指挥中的深度应用。本研究形成的技术体系可为港珠澳大桥、深中通道等重大工程提供可复制的安全管理标准,对提升我国海底隧道运维水平具有现实意义。

参考文献:

- [1] 智研咨询. 2025—2031年中国隧道养护管理行业市场发展及投资风险评估报告[R]. 北京:智研咨询,2024.
- [2] 大连湾海底隧道有限公司. 大连湾海底隧道工程设计与施工技术规范[Z]. 2020.
- [3] GB 6441—1986,企业职工伤亡事故分类标准[S].
- [4] 李宝涛,肖传龙,韩振旭,等. 大连湾海底隧道管内作业安全管理方法探索[J]. 中国港湾建设,2024,44(4):109–112.
- [5] 刘建,谷守奎,林洁,等. 大连湾海底隧道的数字化工程建设与应用[J]. 中国港湾建设,2024,44(4):113–118.