

综合管廊智能化运维管理技术研究进展

黄思婷

北京建筑大学城市经济与管理学院, 中国·北京 100044

摘要: 随着城市地下综合管廊建设规模的不断扩大, 其运维管理的复杂性也日益增加, 运营效能不佳已成为制约综合管廊发展的关键因素之一。得益于物联网、大数据、人工智能及机器人技术的迅猛发展, 管廊运维正经历一场深刻的智能化变革。传统的、依赖人工定期巡检和被动响应的模式, 已逐步被“实时感知、智能预警、协同处置、精益管理”的智慧运维新范式所取代。本文基于近期理论与实践, 从技术实施层面, 系统梳理当前综合管廊运维技术的发展现状。

关键词: 综合管廊; 智能化; 运维管理技术

Research Progress in Intelligent Operation and Maintenance Management Technologies for Utility Tunnels

Huang Siting

School of Urban Economics and Management, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, China Beijing 100044

Abstract: With the continuous expansion of urban underground utility tunnel construction, the complexity of their operation and maintenance management has increasingly grown. Inefficient operational performance has become one of the key factors restricting the development of utility tunnels. Benefiting from the rapid advancement of technologies such as the Internet of Things, big data, artificial intelligence, and robotics, the operation and maintenance of utility tunnels are undergoing a profound intelligent transformation. The traditional model, which relied on periodic manual inspections and passive responses, is gradually being replaced by a new paradigm of smart operation and maintenance characterized by "real-time perception, intelligent warning, coordinated response, and refined management." Based on recent theoretical and practical developments, this article systematically reviews the current state of utility tunnel operation and maintenance technologies from a technical implementation perspective.

Keywords: Utility tunnel; Intelligent; Operation and maintenance management technology

0 引言

随着国家新型城镇化战略的深入推进, 我国正大力推进新型城市基础设施建设升级, 积极构建韧性城市。在此背景下, 综合管廊作为统筹利用地下空间资源、保障城市安全稳定运行的“地下生命线”, 其战略地位日益凸显。

我国的城市综合管廊建设始于 1958 年, 第一条管廊在北京天安门广场下建成。自 2015 年起, 国内城市综合管廊建设迎来井喷式发展。截至 2024 年底, 我国管廊工程竣工长度已突破 10 000 km, 形成了全球规模最大的综合管廊网络。我国的综合管廊发展已经跨过了萌芽发展期, 实现了规模扩张, 其运维管理的复杂性随之增加。当前, 我国综合管廊发展总体建设长度虽然已全球领先, 但其建设密度与国外仍有较大差距, 且暴露出明显的东西部梯度差(西部增速最快, 但存量仍未超过东部)、重建设轻运营(竣工量大、入廊率低)、资金缺口持续扩大等深

层次矛盾^[1]。

提高运营效能, 实现从重建设到优运营的结构跃迁, 关键在于提高综合管廊的智能化运营水平。近几年, 国内外学者对综合管廊的智能化运维展开了不少研究。然而, 现有研究多针对综合管廊各监控子系统智能化技术开展深入探究, 但各系统之间相互独立, 相关技术方法缺乏联动和统一, 难以统筹管理。笔者结合综合管廊智能化运维相关文献, 从技术实施层面, 系统梳理当前综合管廊运维技术的发展现状, 旨在为形成统一的可靠的综合管廊智能化运维技术提供参考。

1 综合管廊运维及智能化

1.1 综合管廊

综合管廊形式通常为: 一个巨大的圆形或矩形隧道, 内部有专门的管道舱(自来水、雨水、污水等管线设施, 电力、燃气和集中供热管线设施, 电信、移动等通信电缆

设施)、人行通道(供巡检和维修)、吊装口(用于送入设备和管线)、通风口、消防系统、照明系统、监控中心等。综合管廊剖面图一般如图1所示。



图1 综合管廊剖面图

1.2 综合管廊运维

综合管廊运维,简单来说,就是对城市地下“管线集体宿舍”进行全面的“管家式”服务,包括日常的保养、安全检查、故障维修、环境控制以及智能监控等,确保这座生命线设施安全、稳定、高效地运行。

“运维”是“运营”和“维护”的合称。运营是指日常的、持续的管理工作,确保系统正常运行。维护是指预防性的保养和故障发生时的修理工作。

综合管廊运维是一项极为复杂的系统工程,涵盖结构、环境、管线及安全等多个核心领域的工作。在结构本体维护方面,需要定期巡检与监测管廊主体,检查是否存在裂缝、沉降或渗漏等隐患,并及时清理内部杂物和积水,确保结构内部干燥整洁。内部环境的监控与保障则涉及多个系统:通风系统负责保持空气流通,排出有害气体和余热;排水系统需定期维护排水泵,防范内涝风险;照明系统保障巡检与作业的视线需求;而消防系统作为重中之重,必须确保火灾报警与各类灭火装置始终处于有效状态。

在入廊管线管理方面,运维工作包括监测管线运行状态,如电缆温度与水管压力,并协调各管线单位的巡检和维修计划,避免作业冲突,同时为突发故障提供快速、安全的抢修通道与作业条件。安全与应急管理同样不可或缺,通过严格的门禁系统控制人员进出,制定涵盖火灾、淹水、地震等多种情况的应急预案,并定期组织联合演练,以提

升各方在真实事故中的协同响应能力。

综上所述,综合管廊运维远非简单的“看管道”工作,而是一项融合结构工程、机电设备、自动化控制与安全管理的黑科技、多专业综合性管理活动,是保障城市“动脉”与“神经”系统健康运行的核心所在。

1.3 智能化运维

智能化简单说就是让设备、系统或流程通过技术手段,具备类似人类的感知、分析、决策和执行能力,减少人工干预、提升效率与精准度。

智能化的核心特征:(1)感知能力,通过传感器、摄像头等设备,收集环境、数据等信息(比如管廊内的温湿度、设备运行数据);(2)分析决策:借助算法、大数据或人工智能技术,对收集到的信息进行处理,判断情况并给出最优方案;(3)自动执行:根据决策结果,自主完成操作(比如管廊内异常时自动报警、调节设备运行状态)。

2 综合管廊智能化运维管理关键技术研究现状

2.1 智能化巡检与运维执行技术的革新

运维的底层基础是对管廊本体、内部环境及入廊管线状态的全面、及时感知。当前,感知与巡检技术正朝着自动化、智能化、协同化方向深度演进。

2.1.1 智能巡检机器人的规模化与功能深化

智能巡检机器人已从早期的“移动摄像头”^[2]演变为集环境感知、AI识别、自动预警于一体的多任务智能体。其应用有效解决了人工巡检强度大、效率低、存在安全盲区(如有害气体环境、高风险舱室)的痛点。例如,南宁地下综合管廊部署的地面式与轨道式机器人,通过“天地协同”模式,实现了24h不间断巡检,可精准识别管线变形、渗漏水、主体裂缝等病害,并对人员入侵、高温等异常情况实时报警^[3]。表1所示为智能巡检机器人与传统人工巡检关键指标对比。

2.1.2 数字孪生技术赋能运维全流程可视化与模拟

数字孪生通过构建与物理管廊实时同步的虚拟模型,

表1 智能巡检机器人与传统人工巡检关键指标对比

对比维度	传统人工巡检	智能机器人巡检	效能提升/优势
巡检效率	单人单次仅2~3 km	24 h不间断,自主充电	效率提升数倍,覆盖无间断
数据客观性	依赖个人经验与记录,主观性强	标准化数据采集,视觉识别误差远低于人工读数	数据精度提升16倍
风险识别能力	难以发现气体微量泄漏等隐性风险	搭载多种气体、热成像传感器,实现超前预警	感知灵敏度提升两个数量级
安全性与适应性	存在人身安全风险,部分恶劣环境无法进入	适应有毒、缺氧、高热等恶劣环境,替代人工高风险作业	保障人员安全,拓展巡检边界
综合成本	长期人力成本高,按10 km计年均超30万元	初始投资高,但长期运维成本显著降低	长期经济效益显著

为运维提供了强大的数字底座与决策沙盘，标志着运维管理从“经验驱动”向“数据与模型混合驱动”的转变^[4]。苏州城北路管廊^[5]的数字孪生平台，利用激光扫描技术建立了厘米级精度的三维模型，实现了管廊信息的“全息可视”。该平台价值远不止于可视化：其一，它能整合各类传感器数据，在虚拟模型中实时映射管廊“心跳”，实现运行体征的动态诊断与预测性维护，将事件平均响应时间从30~40 min缩短至5 min；其二，平台可基于数学模型对火灾、泄漏等事故进行态势推演，模拟影响范围并自动生成最优疏散与救援路径，极大提升了应急决策的科学性。数字孪生平台的核心功能与运维价值如表2所示。

2.2 风险感知与预警能力的跨越式升级

风险的早期、精准识别是智慧运维的核心。当前技术发展聚焦于构建集成的风险感知网络与智能分析模型，推动风险预警从事后报警向事前预测演进。

2.2.1 多源异构数据的复合感知与融合

单一的监测系统已无法满足复杂风险辨识的需求，前沿实践致力于构建立体感知网络。李鹏飞等^[6]所研发的“运行风险复合感知预警平台”，其目标即集成温湿度、气体浓度、结构振动、视频图像、设备电流等多源异构数据，通过标准化的物联网网关进行采集与传输，为上层分析提供全面、实时、高质量的数据基础。威海市智慧管廊则通过在廊内部署数以千计的探测器，形成了密集的感知神经网络，实现了对隐患的第一时间捕捉^[7]。

2.2.2 基于数据驱动的动态风险评价与智能预警

在获得海量感知数据后，利用先进算法进行深度挖掘与智能分析成为关键。这些算法弥补了传统静态评价方法（如依赖专家打分）的不足^[8]。当前趋势是构建以实时监测报警数据为驱动的动态风险评价体系。例如，复合感知预警平台^[6]运用机器学习算法（如基于TensorFlow/PyTorch框架开发模型）对历史与实时数据进行挖掘，建立风险预警模型，实现从简单阈值报警到基于复杂关联关系和多指标融合的智能预警的跨越。刘伟等^[2]和宋雪等^[9]的研究也

为机器人巡检数据与三维管理系统在风险分析中的应用提供了技术路径。这种动态评价能够更真实地反映管廊运营状态的连续变化，从而实现风险的早期干预。

2.3 决策支持与应急响应体系的完善

在感知与预警之上，如何基于风险分析进行科学决策和高效响应，是运维管理的最终落脚点。当前，多种风险评估模型与智能化应急体系正在融合发展。

2.3.1 多层次风险评估模型的综合应用

为应对管廊运维中风险因素复杂、耦合性强的特点，学术界与工程界发展并应用了多种定性与定量相结合的风险评估模型。例如，韩红凯等^[10]、凌晓等^[11]、郑立宁等^[12]的研究分别应用了模糊综合评价、AHP-云模型等方法，旨在解决风险评估中的不确定性问题。陈雍君等^[13]应用的模糊贝叶斯网络，则能更好处理多因素间的因果依赖关系，进行概率推理。李芊等^[14]运用的DEMATEL方法有助于识别复杂系统中的关键致因因素。郭振超等^[15]对多灾害事故致因的分析，则为系统性的风险管控提供了理论框架。这些模型正被逐步集成到智慧运维平台中，作为后台分析引擎，将前端感知数据转化为不同维度、不同颗粒度的风险评估结果，辅助管理人员进行优先级排序和决策。

2.3.2 智能化应急响应与协同指挥

当风险预警发出后，快速、协同的应急响应至关重要。周济兵等^[16]提出的“情景-应对”型应急响应体系理念，在最新技术平台上得到实践。例如，苏州的数字孪生平台^[5]在发生预警时，不仅能自动推送信息，还能联动启动风机等环控设备，并基于三维模型提供最优的处置路径和资源调度方案，实现了预案与情景的动态匹配。威海智慧管廊^[7]的案例显示，一旦平台报警，巡检人员可第一时间抵达现场，并同步通知管线单位，形成高效的“监测-报警-处置-反馈”闭环。这标志着应急响应从各自为政的离散操作，向平台统一指挥、多方在线协同的智能化模式转变。

2.4 技术集成与系统化平台的发展趋势

单一技术的突破最终需融入一体化的系统平台，才能

表2 数字孪生平台的核心功能与运维价值

核心功能模块	技术实现简述	为运维创造的核心价值
全息可视化与资产管控	基于BIM/GIS与激光扫描的高精度三维建模，关联资产信息。	实现资产“一张图”管理，为空间规划、增容改造、维修定位提供直观依据，解决“家底不清”问题。
实时状态监测与诊断	物联网数据接入与映射，在三维模型中实时显示传感器数据（温湿度、气体浓度等）。	变“被动报警”为“主动监测”，实现运行体征的集中监控与异常趋势分析，辅助快速定位问题。
预测性维护与模拟推演	集成机理模型与数据分析算法，对设备寿命、风险事故（火灾、泄漏）进行模拟与预测。	延长设备生命周期，降低突发故障率；在应急时提供决策支持，优化处置方案，提升安全韧性。
流程优化与资源调度	基于历史运维数据与仿真，优化巡检路径、维修策略和资源分配方案。	推动运维从“计划性”向“基于状态的”转变，提升资源利用效率，降低长期运营成本。

释放最大效能。当前综合管廊运维技术发展的一个显著特征是平台化与集成化。

各地建设的智慧管廊管理平台，正成为整合上述所有技术的“智慧大脑”。这些平台通常采用微服务架构，以保障系统的灵活性、可扩展性和可维护性。其核心功能覆盖从设备监控、数据采集、处理分析到 AI 预警与应急响应的全链条。例如，十堰市新成立的“人工智能与机器人应用创新中心”^[17]，其目标正是攻坚智能巡检、数字孪生、风险预测等核心技术，并致力于构建一个“全面实时感知、超前智能预警、协同精准调控”的一体化智慧管廊系统。这反映了行业从解决单点问题向提供系统性解决方案的升级。

3 结论与展望

当前综合管廊运维技术现状呈现以下特征：在执行层，智能机器人与数字孪生技术正在重塑巡检与作业模式；在感知分析层，多源数据融合与 AI 驱动的动态风险评估成为预警能力提升的关键；在决策应用层，多种风险评估模型与智能化应急指挥平台正深度融合。技术的发展主线是从自动化替代人工，走向基于数据和模型的智能化辅助决策与管理。

然而，现状中也存在挑战与未来方向：首先，不同系统与平台间的数据标准与接口尚未完全统一，存在“数据孤岛”现象，制约了更深层次的数据价值挖掘。其次，许多先进的 AI 预警模型依赖于高质量的标注数据和具体的场景训练，其泛化能力和可靠性仍需在更复杂的实际环境中持续验证与优化。最后，智慧运维带来了运维组织架构、人员技能需求和管理流程的变革，“技管融合”的深度仍有待加强。未来，综合管廊运维技术将朝着更加自主智能、孪生融合、标准统一的方向演进，为城市基础设施的安全韧性提供坚实支撑。

参考文献：

[1] 陈志龙, 张智峰, 王海丰. 我国城市地下综合管廊建设现状与发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(9):1615.

[2] 刘伟, 王银斌, 刘国强等. 机器人智能巡检技术在城市综合管廊中的应用[J]. 给水排水, 2019,55(2):122-128.

[3] 林娟. 广西智慧城市治理有新招: 南宁管廊新型智能巡检机器人上岗[E/OL]. 广西日报, 2025-08-25[2025-11-23].<http://www.gxzf.gov.cn/gxyw/t25880931.shtml>.

[4] 陈鹏, 温荣幸, 胡解平等. 基于数字孪生的综合管廊维养平台研究[J]. 给水排水, 2024,60(12):117-123.

[5] 苏州市地下管线和道路停车管理所. 苏州城北路

地下综合管廊探索基于数字孪生的智慧运维[EB/OL]. 苏州市城市管理总局, 2023-11-10[2025-11-23]. <https://cgj.suzhou.gov.cn/srsz/zwyw/202311/4cecc89ae05b448d9acb6f72a7e5df69a.shtml>.

[6] 李鹏飞, 张哲, 刘敏等. 城市地下综合管廊运行风险复合感知预警平台研发[J]. 土木工程信息技术, 2025,17(3):100-105.

[7] 威海市住房和城乡建设局. 科技赋能筑牢城市“生命线”[EB/OL]. 2025-03-18[2025-11-23]. https://zjj.weihaigov.cn/art/2025/3/18/art_28581_5336905.html.

[8] 龙丹冰, 赵一静, 杨成. 以监测报警数据驱动的综合管廊运维动态风险评估[J]. 安全与环境学报, 2022,22(03):1154-1162.

[9] 宋雪, 吕希奎, 朱鹏辉等. 地下综合管廊三维运维管理系统设计与开发[J/OL]. 铁道标准设计, 1-10[2025-12-05].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202312290004>.

[10] 韩红凯, 李琳琳, 刘彦伟等. 滨海城市综合管廊全方位风险评估与智能化实现[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023,42(5):57-65.

[11] 凌晓, 汪霞, 郭凯. 基于 AHP-云模型的城市地下综合管廊运维风险评估[J]. 兰州理工大学学报, 2025,51(4):66-71.

[12] 郑立宁, 蒋雅君, 刘世圭. 基于模糊综合评价法的城市综合管廊结构健康评价方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022,42(S1):560-567.

[13] 陈雍君, 吴光晔, 张宇等. 基于模糊贝叶斯网络的城市地下综合管廊运维风险分析[J]. 安全与环境工程, 2021,28(4):64-70.

[14] 李芊, 段雯, 许高强. 基于 DEMATEL 的综合管廊运维管理风险因素研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019,39(1):31-39.

[15] 郭振超, 王林, 王一丁等. 综合管廊运维多灾害事故致因分析与风险管控研究[J]. 灾害学, 2025,40(3):104-110+144.

[16] 周济兵, 詹显军, 陈博. 一种基于情景-应对的综合管廊应急响应体系的研究[J]. 现代隧道技术, 2021,58(S1):108-119.

[17] 中建十堰管廊公司. 智启城市未来 AI 赋能管廊[EB/OL]. 十堰市住房和城乡建设局, 2025-11-28[2025-12-07]. http://zxj.shiyan.gov.cn/xwzx/cjdt/202511/t20251128_4861982.shtml.