

城市地下综合管廊发展演进与运维风险管理的文献综述

丁梦祎

北京建筑大学城市经济与管理学院, 中国·北京 100044

摘要: 城市地下综合管廊作为保障城市运行的生命线工程, 其发展模式已从大规模的“建设期”逐步迈入以安全与效率为核心的“运维期”。本文基于精选的10篇国内外核心文献, 从综合管廊的治理范式演进、运维风险因素的识别与关联机理、风险评估方法论的深化与创新, 以及典型灾害场景的风险演化与靶向防控四个维度展开系统综述。研究表明, 管廊治理呈现从单一工程管理向多元协同治理转变的趋势; 风险识别由线性因果向复杂网络与事故图谱演进; 风险评估方法则经历了从静态主观赋权向动态概率推理与数据驱动的跨越。本文旨在厘清综合管廊安全运维领域的理论脉络与技术前沿, 指出当前研究在跨灾种耦合机理、多源数据融合及系统韧性评估等方面的局限性, 并为未来的智慧化、精细化管理发展提供理论参考。

关键词: 综合管廊; 运维管理; 风险评估; 贝叶斯网络; 事故演化; 数据驱动

Development, Evolution, and Operation and Maintenance Risk Management of Urban Underground Utility Tunnels: A Literature Review

Ding Mengyi

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

Abstract: As lifeline projects ensuring urban operations, urban underground utility tunnels (UUUTs) have seen their development paradigm gradually shift from a large-scale "construction period" to an "operation and maintenance (O&M) period" centered on safety and efficiency. Based on a curated selection of 10 core domestic and international literature pieces, this paper conducts a systematic review from four dimensions: the evolution of governance paradigms for utility tunnels, the identification and correlation mechanisms of O&M risk factors, the deepening and innovation of risk assessment methodologies, and the risk evolution and targeted prevention and control in typical disaster scenarios. The research indicates that tunnel governance exhibits a trend of transitioning from single engineering management to diversified collaborative governance; risk identification has evolved from linear causality to complex networks and accident knowledge graphs; and risk assessment methods have undergone a leap from static subjective weighting to dynamic probabilistic reasoning and data-driven approaches. This paper aims to clarify the theoretical context and technological frontiers in the field of UUUT safety O&M, point out the limitations of current research regarding cross-disaster coupling mechanisms, multi-source data fusion, and system resilience assessment, and provide theoretical references for the future intelligent and refined development of utility tunnels.

Keywords: Urban utility tunnels; (O&M) management; Risk assessment; Bayesian network; Accident evolution; Data-driven

0 引言

随着全球城市化进程的加速及城市空间资源的日益紧缺, 城市地下综合管廊已成为现代市政基础设施建设的核心载体。它通过将电力、通信、燃气、供热、给排水等各类管线集于一体, 有效破解了“马路拉链”与“空中蜘蛛网”等城市治理顽疾。然而, 综合管廊作为一个典型的半

封闭、多管线共存、受多种内外部环境交织影响的复杂地下空间系统, 其运维阶段面临着极高的安全风险。一旦发生燃气泄漏、积水内涝或电缆火灾等事故, 极易引发链发性衍生灾害, 造成严重的经济损失与社会影响。

近年来, 学术界对综合管廊的研究重心已明显由前期的规划选址、结构设计向中后期的运营维护与风险管控转

移。为了系统把握这一研究领域的演进脉络,本文依据研究视角的代表性、方法的先进性以及场景的典型性,筛选出10篇核心文献。这些文献涵盖了从宏观治理架构到微观致因机理,从传统数学模型到前沿人工智能算法的多元维度。本文试图通过深度解构这些文献,绘制一幅综合管廊发展及其安全运维风险管理的全景知识图谱。

1 综合管廊治理与规划范式的演进

综合管廊的良性发展不仅依赖于工程技术层面的突破,更受制于顶层治理架构的合理性。早期的研究往往将管廊视为单纯的土木工程实体,而近年来的学术共识已将其重新定义为涉及多方利益相关者的复杂公共治理问题。

Canto-Perello等(2013)在探讨城市 utility tunnels 的治理问题时指出,管廊的可持续运营面临着产权界定模糊、入廊费机制不畅、多头管理导致的责任推诿等深层次制度困境^[1]。该研究跳出纯技术视角,构建了涵盖法律、经济、体制和技术四个维度的治理评估框架,强调了制度设计对管廊物理安全的基础性决定作用。这一宏观视角的引入,为理解管廊运维风险的根源提供了制度经济学层面的解释——许多微观层面的操作风险,实质上是宏观治理失灵的映射。

在治理理论的实践落地方面,Ramirez Chasco等(2011)以西班牙 Lezkairu utilities tunnel 为典型案例,详细剖析了具体工程项目中规划、建设与运维交接阶段的治理经验^[2]。该案例研究表明,成功的管廊项目必须在前期规划阶段就嵌入运维管理的视角,通过建立明确的维护协议、清晰的应急预案框架以及多方参与的协调委员会,来实现物理空间与管理制度的有效衔接。Lezkairu 案例的启示在于,管廊的治理不是静态的规则制定,而是贯穿于全生命周期的动态协商与权责匹配过程。

综合上述文献可见,综合管廊的发展在治理范式上正经历从“碎片化工程管理”向“整体性系统治理”的演进。这种演进要求在风险评估体系中,必须将制度缺失、协同不力等“软性”治理因素纳入考量范畴,而非仅仅局限于设备故障或环境异常等“硬性”技术指标。

2 运维风险因素的识别与关联机理

准确识别风险因素并厘清其间的交互逻辑,是构建科学风险评估体系的前置条件。综合管廊的风险因素呈现出高度的异质性、隐蔽性和耦合性特征,传统基于经验主义的线性分类方法已难以揭示其内在的复杂机理。

李芊等(2019)引入决策试验和评价实验室法(DEMATEL),对综合管廊运维管理风险因素进行了系统

解构^[3]。该研究不仅提取了人员、设备、环境与管理四大类风险指标,更重要的是通过计算原因度与中心度,量化了各因素之间的相互影响关系。研究揭示,诸如“应急预案缺失”“日常巡检不到位”等管理类因素具有极高的原因度,是驱动系统风险升高的源头;而“管线破损”“有毒气体积聚”等结果性因素则处于被支配地位。DEMATEL方法的应用,使得风险识别从“平面罗列”走向了“立体网络”,为制定阻断风险传导的针对性措施提供了数学依据。

在系统分析工具的跨领域借鉴方面,叶飞等(2024)将工业制造领域成熟的5M1E(人、机、料、法、环、测)分析法引入到复杂系统的安全风险关联推理中^[4]。虽然该文以铁路货运为背景,但其提供的系统化解构思路对管廊研究具有极强的方法论启示。管廊系统同样可以精准映射至5M1E框架:“人”对应运维与巡检人员的不安全行为;“机”对应通风、排水、照明等附属设施及入廊管线;“料”对应舱内传输的水、电、气等介质;“法”对应操作规程与应急预案;“环”对应地下水、地质条件及受限空间微环境;“测”对应传感器网络与监测系统。这种结构化的分类逻辑,能够有效避免风险识别过程中的遗漏与重叠。

随着系统复杂性理论的深入,学者们开始关注风险因素随时间的动态演化路径。宁慧涵等(2025)突破了传统的静态因子分析,基于事理图谱技术对城市地下管廊事故演化关联进行了深度挖掘^[5]。事理图谱能够以图结构的形式,清晰表达出诸如“地基沉降→管道受力变形→管道焊缝开裂→燃气泄漏→遇电气火花→爆炸”这一包含时间先验逻辑和因果递进关系的事故链。该研究发现,管廊事故往往不是单一因素突破阈值的结果,而是多个处于不同演化阶段的风险事件在时空维度上交汇叠加的产物。事理图谱的引入,标志着风险因素识别进入了以“事件链追踪”和“演化路径预测”为核心的新阶段。

3 运维风险评估方法论的深化与创新

在明确了风险因素及其关联后,如何对这些风险进行科学量化与等级划分,是综合管廊安全运维领域的核心学术议题。纵观所选文献,风险评估方法论经历了从静态主观评价向动态概率推理,再向数据驱动演进的深刻变革。

3.1 考虑有限理性的主观评价方法拓展

传统的风险评估多采用层次分析法(AHP)或模糊综合评价法,这类方法虽计算简便,但忽略了决策者在不确定性环境下的心理行为特征。涂圣文等(2020)创新性地将后悔理论引入综合管廊运维总体风险评估中,结合组合赋权法构建了评估模型^[6]。后悔理论指出,决策者在面临

风险时,不仅关注预期损失,更关注如果选择了其他方案可能带来的“后悔感”。在管廊运维决策中(如是否对某段疑似受损管线进行停运检修),管理者往往存在规避后悔的心理。该研究通过引入后悔函数修正了传统效用值,使得风险评级结果更加符合运维管理者的真实决策逻辑,提升了评估结果在实操中的可接受度。

3.2 概率图模型与不确定性推理的应用

面对管廊系统中大量的随机性与模糊性信息,贝叶斯网络(BN)因其强大的不确定性推理能力和双向因果推断特性,成为近年来该领域的主流方法。陈雍君等(2018)较早地将静态贝叶斯网络应用于综合管廊运维灾害风险分析中^[9]。该研究通过构建根节点(如设备老化、第三方破坏)、中间节点(如燃气泄漏)与叶节点(如人员伤亡、财产损失)的网络拓扑,结合专家经验设定条件概率表,实现了对各类灾害发生概率的后验计算。

然而,静态贝叶斯网络无法刻画风险因素随时间推移的动态变化。张继信等(2022)针对这一局限,构建了基于动态贝叶斯网络(DBN)的城市综合管廊燃气泄漏动态风险评价模型^[6]。DBN通过引入时间切片,将前一时刻的节点状态作为后一时刻的父节点,实现了风险概率的时间维度演化计算。例如,随着时间的推移,“燃气泄漏量”节点状态会根据“通风系统启动延迟时间”和“气体扩散速率”动态更新。该研究证明,在引入时间维度后,风险评级的预警提前量得到了显著增加,为实施动态干预争取了宝贵时间。

3.3 概率图模型与不确定性推理的应用

事理尽管以BN为代表的模型在理论推导上较为严密,但其条件概率的获取高度依赖专家打分,主观性依然较强。随着物联网技术在管廊中的普及,海量多源监测数据(如温湿度、可燃气体浓度、液位、视频图像等)为风险评估的数据驱动转型奠定了基础。

龙丹冰等(2022)敏锐地捕捉到了这一趋势,提出了一种以监测报警数据驱动的综合管廊运维动态风险评价方法^[10]。该研究彻底摆脱了对专家先验知识的依赖,直接从SCADA(数据采集与监视控制系统)和物联网平台提取实时与历史数据。通过分析传感器报警频率、报警持续时间、多传感器报警空间聚集度等特征指标,构建了数据到风险的直接映射函数。这种方法不仅大幅降低了评估的主观偏差,还实现了从“周期性离线评估”向“实时在线评估”的跨越,代表了智慧管廊风险管理的未来发展方向。

4 典型灾害场景的风险演化与靶向防控

综合管廊内管线种类繁多,其中燃气管道的入廊虽然优化了城市地下空间布局,但也给管廊系统引入了最危险的不确定性因素。燃气泄漏引发的爆炸,往往具有破坏力大、波及范围广的特点,因此成为学术界聚焦的典型灾害场景。

在灾害物理机理研究方面,王述春等(2021)关注了综合管廊多灾种耦合风险评估问题^[7]。管廊内部空间狭小,各类管线并行或交叉敷设,这使得不同灾害之间极易产生耦合效应。例如,燃气泄漏不仅可能直接导致火灾爆炸,还可能与电力电缆故障产生的热辐射或电气火花发生交叉耦合;同时,供水管道破裂导致的大量积水,可能改变燃气的扩散轨迹,甚至引发次生地质灾害。该研究强调,传统的单灾种风险评估严重低估了管廊的实际危险程度,必须建立耦合效应矩阵,量化分析多重灾害叠加下的系统脆弱性。

针对燃气泄漏这一具体场景,张继信等(2022)的研究不仅在方法论上使用了动态贝叶斯网络,在物理过程分析上也深度融合了气体扩散动力学规律^[6]。研究指出,管廊的受限空间特性、通风口的布置位置与风速、舱室内的障碍物(如电缆桥架)等,都会显著影响燃气云团的聚集形态与浓度场分布。将这种基于流体力学(CFD)的微观物理规律,作为先验知识嵌入到宏观的DBN风险评估框架中,实现了“机理模型”与“数据模型”的深度融合。

进一步地,宁慧涵等(2025)基于事理图谱的研究,从“事件链”的角度为燃气灾害的靶向防控提供了新思路^[5]。图谱分析表明,切断事故演化链条上的“关键节点”(如迅速启动应急排风系统阻断燃气积聚、联动切断燃气阀门等),其防控效率远优于在各个独立风险因素上平均投入资源。这种基于拓扑结构重要性排序的靶向防控策略,为管廊应急资源的优化配置提供了科学的决策支持。

5 现有研究的局限与未来展望

通过对上述10篇文献的系统梳理,可以看出当前关于综合管廊运维风险管理的研究已取得了丰硕成果,形成了从制度分析到微观机理,从静态评价到动态演化的完整知识体系。然而,本着严谨求实的学术态度审视现有研究,仍可发现以下几个方面的局限与亟待突破的空白地带:

第一,多灾种耦合的量化建模仍显不足。尽管文献^[7]提出了多灾种耦合的概念,但目前的评估模型大多停留在定性描述或简单的权重叠加层面。不同灾害(如水灾与火灾、爆炸与结构坍塌)之间的物理化学耦合机理极其复杂,

如何将耦合效应以数学形式精确表达并融入现有的风险评价模型（如改进贝叶斯网络的条件概率表构建），是未来需要攻克的难点。

第二，“人因”风险的深度量化亟待加强。现有文献（如^[3]）虽然将“人”纳入了风险指标体系，但多将其视为同设备、环境等同质的静态指标。管廊运维作业中的人因失误（如误操作、违章动火、巡检盲区）具有强烈的心理与生理动因。未来研究应引入认知可靠性分析（HRA）和人机工程学方法，建立管廊特定情境下的人因失误概率数据库。

第三，数据驱动模型的泛化能力与可解释性存在矛盾。文献^[10]代表的纯数据驱动方法虽然实现了实时评估，但面临着“黑盒”问题。在安全要求极高的管廊领域，仅给出一个风险分数而无法解释其致因路径，难以被管理者采纳。同时，基于单一管廊数据训练的模型在其他地质条件或结构类型的管廊中泛化能力较弱。未来的趋势应是发展“物理机理约束下的机器学习”模型，即利用知识图谱或偏微分方程约束神经网络的训练过程，实现高精度与强可解释性的统一。

第四，从“脆弱性评估”向“系统韧性提升”的范式跃升。当前绝大部分研究聚焦于“防范风险”，即评估系统发生事故的概率和后果，这本质上是一种脆弱性分析。然而，在极端天气频发和城市面临多重不确定冲击的背景下，管廊系统不仅需要“抗冲击”，更需要具备在灾害中维持基本功能并在灾后快速恢复的“韧性”。未来研究应引入韧性理论，构建涵盖抵抗、吸收、适应和恢复四个维度的综合管廊韧性评估与优化框架。

6 结语

城市地下综合管廊的发展演进，是一部从粗放式建设向精细化、智慧化运维转型的历史。本文通过综述 10 篇核心文献发现，在治理层面，制度协同与权责对等是管廊安全运行的基石；在风险识别层面，DEMATEL、5M1E 及事理图谱等工具的引入，使得人们对风险网络复杂性的认知达到了前所未有的高度；在风险评估层面，后悔理论修正了人的非理性决策假设，动态贝叶斯网络赋予了模型时间维度的推演能力，而监测数据驱动则彻底革新了评估的时效性与客观性。

总体而言，综合管廊运维安全管理正在经历由“经验驱动”向“数据与模型双轮驱动”、由“单一要素控制”向“系统网络治理”的深刻变革。面对未来更加复杂的城市运行环境，学术界与工程界应打破学科壁垒，深度融合土木工程、安全科学、数据科学与公共管理学的前沿理论，着力攻克多灾种耦合定量建模与人机协同智能防控等瓶颈问题。唯有如此，方能真正筑牢城市地下生命线的安全防线，为现代城市的高质量与可持续发展提供坚实保障。

参考文献：

- [1] Canto-Perello J, Curiel-Esparza J. Assessing governance issues of urban utility tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33:82-90.
- [2] Ramirez Chasco F D A, Seco Meneses A, Prieto Cobo E. Lezkairu utilities tunnel [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2011, 16 (2):73-78.
- [3] 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, 2019,39 (1):31-39.
- [4] 叶飞, 刘启钢, 石磊等. 基于 5M1E 的铁路货运作业安全风险关联推理研究 [J]. 铁道学报, 2024,46 (1):34-41.
- [5] 宁慧涵, 郭宇, 李诗轩. 基于事理图谱的城市地下管廊事故演化关联分析 [J]. 安全与环境学报, 2025,25 (2):1-9.
- [6] 张继信, 黄东阳, 尤秋菊等. 基于动态贝叶斯网络的城市综合管廊燃气泄漏动态风险评估 [J]. 安全与环境学报, 2022,22 (6):1-11.
- [7] 王述春, 柴康. 综合管廊多灾种耦合风险评估方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021,41 (2):266-273.
- [8] 涂圣文, 赵振华, 邓梦雪等. 基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估 [J]. 安全与环境工程, 2020, 27(6): 160-167.
- [9] 陈雍君, 李宏远, 汪雯娟等. 基于贝叶斯网络的综合管廊运维灾害风险分析 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2109-2114.
- [10] 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.