

# 城市地下综合管廊运维安全风险评价研究

张志成<sup>1</sup>, 邱凤夏<sup>2</sup>

(1. 嘉兴职业技术学院, 浙江 嘉兴 314036;

2. 中元建设集团股份有限公司, 浙江 嘉兴 314036)

**摘要** 随着城市高质量建设与发展, 地下综合管廊建设具有广阔的应用前景, 其在整合市政工程管线、提升城市基础设施品质方面作用显著, 但运营面临火灾、气体泄漏、水灾、爆炸等安全风险, 造成经济损失的同时, 也给城市带来了安全危险。本文从城市地下综合管廊运维安全风险评价入手, 着力构建城市地下综合管廊运维安全风险指标体系, 剖析多维度潜在风险因素, 引入能实现定量分析与预测诊断的模糊贝叶斯网络模型, 以期对保障管廊运行、推动城市高质量发展有所裨益。

**关键词** 地下综合管廊; 运维安全风险; 指标体系; 模糊贝叶斯网络

**基金项目:** 2023年度高校国内访问工程师校企合作项目“城市地下综合管廊运维安全风险研究”(FG2023281)。

**中图分类号:** TU990.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.03.002

## 0 引言

我国大部分一二线城市正在不断强化城市现代化综合治理体系建设, 而城市基础设施建设是其中重要的一环, 提升改造包括市政设施在内的城市基础设施是关乎民生、惠及民生的事情, 具有显著的社会及环境效益。在城市基础设施中, 将电力、通信, 燃气、供热、给排水等诸多城市市政工程管线汇聚一起的地下综合管廊就是提升城市品质的重要基础设施之一。相比于传统的城市地下直埋管线, 城市地下综合管廊具有更大的防灾抗灾、节约土地、城市美化等方面优势, 是现代化城市建设中的重要基础设施形式, 具有广阔的应用前景。地下综合管廊具有众多优点, 同时也难以避免在运营阶段的安全风险, 包括水灾、气体泄漏爆炸、火灾等多种类型的灾害, 并且污水管道对环境(包括空气、土壤和水)的污染是较为严重的次生危害。城市地下综合管廊运维安全风险研究是目前国内外专家学者聚焦的研究热点之一, 很多研究取得了较好的成果。如Whitaker等<sup>[1]</sup>开发了一个合流下水道系统的风险评估模型, 并通过估计下水道管道的故障引入了风险缓解措施; Curriel-Esparza J等<sup>[2]</sup>对城市地下综合管廊室内的空气危害进行了有效辨识; 夏微等<sup>[3]</sup>以数值模拟方式研究管廊内燃气舱燃气爆炸冲击波的传播特征; 米红甫等<sup>[4]</sup>基于火灾动力学软件研究地下综合管廊发生火灾时烟气优化的控制模式。王文和等<sup>[5]</sup>基于DEMATEL-ISM研究城市地下综合管廊火灾事故影响因素。涂圣文等<sup>[6]</sup>利用组合赋权一后悔理论来构建城市地下综合管廊运维总体风险的评估模型; 崔袁丁

等<sup>[7]</sup>等建立基于熵权—Vague集的城市地下综合管廊运营风险的综合评价方法。这些专家学者从综合管廊运营指标体系、综合风险评价方法、单类型运营风险事故识别与控制等方面展开研究, 取得很大的进展。当然, 针对城市地下综合管廊运维安全风险因素识别与指标体系构建还需不断更新推进现有管廊的运维。

## 1 地下综合管廊运维安全风险指标体系

地下综合管廊作为城市地下基础设施的关键组成部分, 其运维安全至关重要, 而合理且完善的运维安全风险指标体系能够为管廊的正常运行提供有力保障, 一旦管廊出现安全问题, 不仅会影响城市的正常运转, 甚至可能会造成重大的安全事故和经济损失。通过查阅有关文献和资料, 研究分析相关管廊运维安全事件的原因, 可以建立如图1所示的地下综合管廊运维安全风险指标体系。

本文建立的指标体系涵盖三个层级的风险因素。例如, 在第二层级的运维管理风险( $P_1$ )方面, 包含管理运营服务水平( $P_{11}$ )、救援与应急管理水平和智慧运维水平( $P_{13}$ )第三层级风险因素。良好的地下综合管廊管理运营服务水平能确保管廊日常操作的规范和高效, 在突发事件发生时救援与应急管理水平的至关重要, 能够极大地减少损失。同时, 基于现代信息技术的智慧运维可以实现对管廊状态的实时监测和精准管理。管廊廊体风险( $P_3$ )是管廊安全的自身因素, 其中廊体施工质量缺陷( $P_{31}$ )、不均匀沉降( $P_{32}$ )等因素直接关系到管廊的结构安全, 施工中的质量缺陷和使用中的不均匀沉降, 均可能导致管廊的变形和

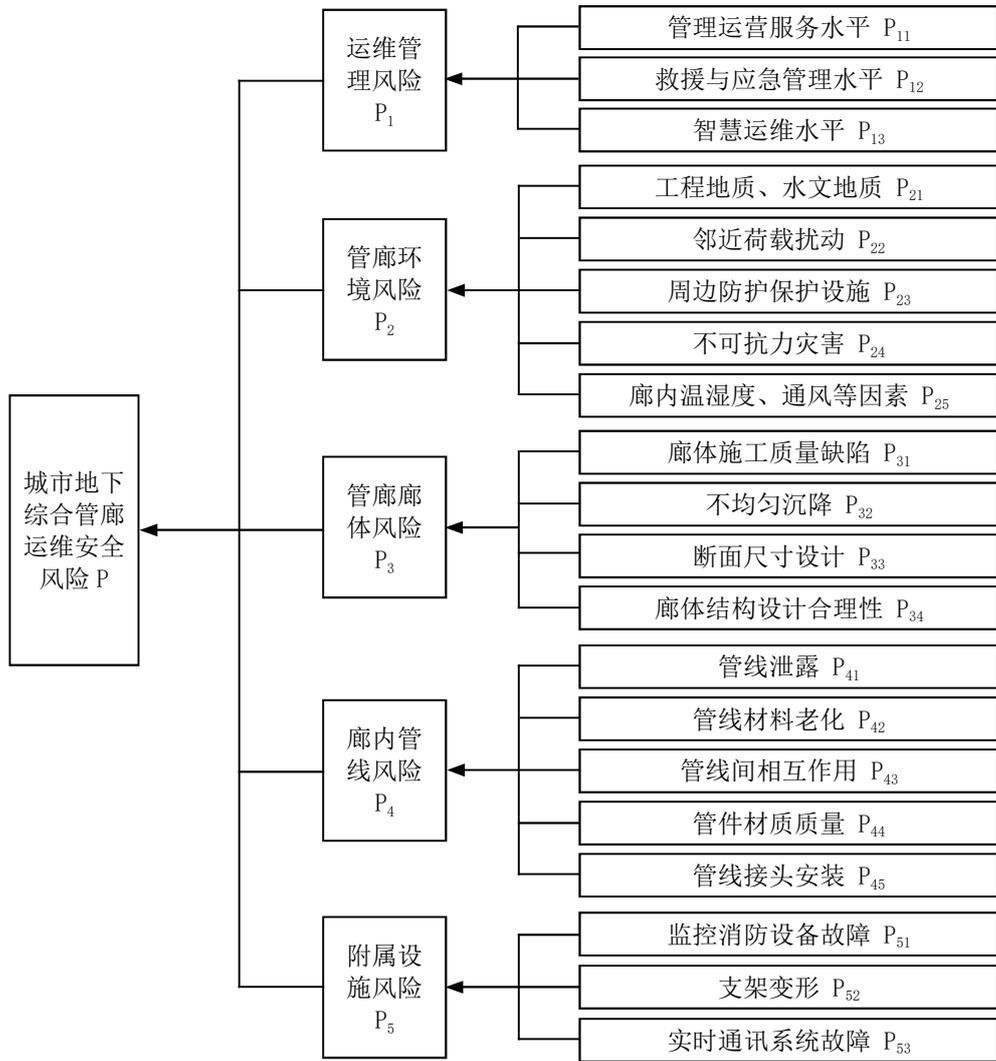


图 1 城市地下综合管廊运维安全风险指标体系

开裂，进而威胁到内部管线的安全。

该指标体系分为三层结构，城市地下综合管廊运维安全风险 P 下分一级  $P_i$  指标、二级  $P_{ij}$  指标。在准则层中，除了上述提到的运维管理风险和管廊廊体风险外，还包括管廊环境风险 ( $P_2$ )、廊内管线风险 ( $P_4$ ) 和附属设施风险 ( $P_5$ )。管廊环境风险 ( $P_2$ ) 考虑工程地质、水文地质 ( $P_{21}$ )、邻近荷载扰动 ( $P_{22}$ ) 等因素影响。周边的地质条件和可能受到的外部荷载影响对管廊的稳定性也会产生很大影响。例如，不良的地质条件可能导致地下水渗漏，对管廊造成侵蚀，而邻近的建筑施工等荷载扰动可能引发管廊的位移。廊内管线风险 ( $P_4$ ) 涉及管线材料老化 ( $P_{42}$ )、管线间相互作用 ( $P_{43}$ ) 等内容。随着时间的推移，管线材料会逐渐老化，性能下降，同时不同管线之间可能存在相互作用，如热力管线对相邻冷水管线的影响等，这些都需

要在运维过程中加以关注。附属设施风险 ( $P_5$ ) 包含监控消防设备故障 ( $P_{51}$ )、支架变形 ( $P_{52}$ ) 等。监控和消防设备是保障管廊安全的重要设施，一旦出现故障，可能无法及时发现和处理火灾等安全隐患；支架变形则可能影响管线的支撑和排布，导致管线损坏。

## 2 地下综合管廊运维安全风险模糊贝叶斯网络模型

贝叶斯网络是广泛运用于风险定量分析与决策的有效工具，在诸如塌方、瓦斯爆炸、地质灾害等风险事件中都有应用。其本质是通过构建一种有向无环图<sup>[8]</sup>，其中具有父节点和子节点这两种类型的节点，依靠有向链接相互联系，且每个节点都有条件概率表。叶斯网络以贝叶斯理论为基础，其关键在于条件概率计算，可用以下公式进行计算。

$$p(X|Y) = \frac{p(Y|X)p(X)}{p(Y)} \quad (1)$$

$$p(Y|g) = \frac{p(g|Y)p(Y)}{p(g)} = \frac{p(g|Y)p(Y)}{\sum_{i=1}^n p(g|Y_i)p(Y_i)} \quad (2)$$

公式(1)中,事件 $X$ 、 $Y$ 的概率分别用 $p(X)$ 、 $p(Y)$ 表示, $X$ 发生时 $Y$ 的概率、 $Y$ 发生时 $X$ 的概率分别用 $p(Y|X)$ 、 $p(X|Y)$ 表示。公式(2)中,事件 $Y$ 的先验概率用 $p(Y)$ 表示,在给定证据 $G$ 下的情况下的后验概率用 $p(Y|g)$ 表示。当 $p(g|Y)$ 表示为事件 $Y$ 发生下 $g$ 的概率,则证据 $G$ 的联合概率分布用 $\Sigma = \sum_{i=1}^n p(g|Y_i)p(Y_i)$ 来表示。

模糊集理论<sup>[9]</sup>中,在任意给定论域 $N$ ,对 $y \in N$ ,均有 $Q(y) \in [0, 1]$ ,则称 $Q$ 是 $N$ 上的模糊集, $Q(y)$ 是 $y$ 对 $G$ 的隶属度。在实际应用中,底事件发生概率用梯形模糊数来表示,即 $Q = (e, f, g, h)$ ,而隶属度函数如下式(3)所示。通过专家经验转化为模糊数,用以评价管廊运维的安全故障情况,确定专家评价自然语言与梯形模糊数的一一对应关系。关于专家评价运算以及去模糊一般经历计算模糊评级一致性程度、计算平均一致性、计算相对一致性、进行共识系数预测、计算综合评价模糊数、去模糊化、评价结果归一化这些过程。

$$Q(y) = \begin{cases} \frac{y-e}{f-e} & e \leq y < f \\ 1 & f \leq y < g \\ \frac{h-y}{h-g} & g \leq y < h \\ 0 & y < e \text{ 或 } y > h \end{cases} \quad (3)$$

关于城市地下综合管廊运维安全风险的贝叶斯模型分析,其主要步骤如下:首先,基于管廊运维数据和专家经验,识别城市地下综合管廊运维安全风险因素,构建指标体系;继而对运维数据进行处理,确定贝叶斯网络结构,明确其中的节点、条件关系以及构建条件概率表;随后根据风险事件发生后果量化确定后果损失率,综合评价指标概率和后果损失率,确定量化风险值,并基于此建立模糊风险矩阵,从而构建隶属度函数指标体系;最后以最大隶属度原则,将风险值带入确定风险事件等级<sup>[10-11]</sup>。

### 3 结束语

本文通过构建运维安全风险指标体系,从多维度识别城市地下综合管廊运维安全潜在风险因素,涵盖管廊运维管理、管廊廊体、环境、廊内管线以及附属设施等多个关键层面,为管廊运维风险评价奠定基础。同时,通过引入贝叶斯网络和模糊集理论,建立的模糊贝叶斯网络模型为风险定量分析与决策提供了有力的工具,凭借数据优势、有效流程等方面的特点,能更高效地预测与诊断管廊运维安全风险。后续研究还

需根据管廊运维实际情况,不断优化和调整指标体系,使其与管廊运维实践紧密适配,动态反映新出现的风险特征,同时模糊贝叶斯网络模型应用需不断以数据更新提升评价精准度,唯有此,才能通过管廊运维数据样本实时输入,促进模糊贝叶斯网络模型的迭代更新,有效保障地下综合管廊的长期稳定运行,营造更加安全有序的城市环境,更多地惠及广大民众。

### 参考文献:

- [1] Whitaker D, Gonzalez R, Adderley V. Combined Sewer System Capacity Risk Assessment and Mitigation[M]// Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability, 2014.
- [2] Curiel-Esparza J, Canto-Perello J. Indoor atmosphere hazard identification in person entry urban utility tunnels[J]. Tunnelling and underground space technology, 2005,20(05):426-434.
- [3] 夏微,高魁,乔国栋.综合管廊燃气舱燃气爆炸冲击波传播特征研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(02):84-90.
- [4] 米红甫,刘亚玲,杨文璟,等.基于FDS的综合管廊电缆火灾烟气优化控制模式研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(07):100-105.
- [5] 王文和,朱正祥,米红甫,等.基于DEMATEL-ISM的城市地下综合管廊火灾事故影响因素研究[J].安全与环境学报,2020,20(03):793-800.
- [6] 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(06):160-167.
- [7] 崔袁丁,孟学雷,崔炳谋,等.基于Vague集理论的城市综合管廊运营安全研究[J].安全与环境学报,2022,22(06):2944-2953.
- [8] 朱庆,郑威鹏,吴浩宇,等.基于模糊贝叶斯网络的隧道围岩富水破碎风险三维分析方法[J/OL].西南交通大学学报, [2023-11-30]1-9.https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=94FxnJrPFCsEkhyrlizbmvSjWTTsReG1\_MBS1k45sS4UHgRmbpicJQoejsDD2Z4SbNyg-Ivyt78uhKBKNZG1fda7m5zYWjO\_ePQjFOahjSeGeSKo1P1qv\_\_AQQmT9weOaYoP1dkLjj8y\_tjXByRJuZzTTVv7Ps9MWV-evOOoTbRR6UJVfJT0MBWcby-p7cv&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [9] ZIMMERMANN H J. Fuzzy set theory[J]. Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics, 2010,02(03):317-332.
- [10] 陈雍君,李晓健,张丽,等.故障树和模糊贝叶斯网络在管廊运维风险评估中的应用研究[J].安全与环境学报,2024,24(03):857-866.
- [11] 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(04):64-70.