

Research on Intelligent Operation and Maintenance Management of Urban Underground Utility Tunnel based on BIM+

Yifei Lai¹, Jialing Tang¹, Xiaoyong Hu²

1. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province

2. Yangtze River Coastal Railway Group Co., Wuhan 430061, Hubei Province

Email: lyf37319@163.com; tjlaiclose@163.com

Abstract

The urban underground utility tunnel serves as a vital lifeline for ensuring the normal operation of cities, and it directly impacts the daily lives of the general public and the stability of society. The pursuit of smooth and efficient operation of these tunnels has become a widely recognized concern across various sectors of society. The management of utility tunnel operation and maintenance involves numerous entities and stakeholders. The traditional manual supervision-based maintenance approach is characterized by low efficiency, inadequate accuracy, and compromised safety assurance. Therefore, this paper proposes a new perspective on intelligent operation and maintenance management of urban underground utility tunnel utilizing BIM+ technology, aiming to achieve standardized and regulated management of these tunnels, improve management efficiency, and reduce management costs. The paper is divided into five sections, including an introduction, conclusion, and three main parts. Firstly, it introduces the research background, significance, and the research methodology. Secondly, it elucidates the current situation and issues of traditional operation and maintenance management models for utility tunnel. Subsequently, it presents the fundamental objectives of integrated utility tunnel operation and maintenance management, and endeavors to construct an intelligent operation and maintenance management system for urban underground utility tunnel based on BIM+ technology. Eventually, the paper concludes by summarizing the findings and suggesting further research directions.

Keywords: BIM+; Urban Underground Utility Tunnel; Intelligent Operation and Maintenance Management

基于 BIM+技术的城市地下综合管廊智能运维管理研究

赖一飞¹, 唐嘉伶¹, 胡小勇²

1. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北省 武汉市 430072

2. 长江沿岸铁路集团股份有限公司, 湖北省 武汉市 430061

摘要: 城市地下综合管廊是保障城市正常运转的“生命线”, 关系着广大民众的日常生活和社会的稳定, 如何使其平稳、高效运行已成为社会各界广为重视的问题。综合管廊运维管理涉及的主客体众多, 以人工监管方式为主的传统运维方式效率低、准确率不足、安全性难以保障, 因此, 本文基于 BIM+技术视角, 为城市地下综合管廊的智能运维管理提供一种新思路, 以期实现综合管廊管理的标准化、规范化, 提高管理效率、降低管理成本。本文包括引言与结语共分为五个部分。首先, 介绍本文的研究背景、意义, 以及研究思路。其次, 阐述综合管廊传统运维管理模式的现状及存在问题。然后, 提出综合管廊运维管理的基本目标, 并基于 BIM+技术, 尝试构建城市地下综合管廊的智能运维管理系统。最后, 对文章进行总结并提出展望。

关键词: BIM+技术; 城市地下综合管廊; 智能运维

引言

随着我国城镇化持续推进,“马路拉链”“城市看海”等社会现象日益严重,综合管廊具有充分利用地下空间、实现市政管线高度集约化等优势,逐渐受到我国政府的认同和倡导^[1]。2015年8月,国务院办公厅下发《关于推进城市地下综合管廊建设的指导意见》,意见明确,到2020年,应建成一批具有国际先进水平的地下综合管廊并投入运营。据新华社统计,截至2022年6月底,我国累计开工建设管廊项目共计1647个,计划建设长度5902km,已形成廊体3997km。

地下综合管廊是指将两种及两种以上的管网集中布置在同一个隧道空间,可容纳电力、通信、燃气、供热、给排水等各种管线,是城市的重要基础设施,被视为城市的“生命线”^[2]。地下综合管廊的设计和建设旨在解决传统管线散乱、维护困难等问题,将多个功能和服务集中在一个统一的地下通道中,便于管理、维护和升级。与此同时,综合管廊管线高度集约化的特性也意味着管廊内管线敷设复杂程度高,涉及多个专业间的配合,且信息数据众多,需要实时更新,运维管理难度大。然而,我国综合管廊的运维管理目前仍多采取传统的人工监测检测方式,尚未形成较完整的运维体系,解决故障的效率低、准确率不足,且处理故障中的人员安全不能得到很好地保障。因此,我国城市地下综合管廊的运维管理迫切需要标准化、规范化,迫切需要引入新技术、新方法以提升管理效率、准确性与安全性。BIM技术具有可视化、协同性、可模拟性、可持续性等特点,与GIS、MR、物联网、云计算等技术能够实现集成应用,理论上能够实现项目的全生命周期管理,且其在我国建设项目设计、施工方面的应用已趋于成熟,能够为运维阶段提供数据支撑。由此,本文期望基于BIM+技术构建城市地下综合管廊的智能运维管理系统,实现综合管廊的科学化、规范化、高效率的安全运维管理。

基于BIM+技术对城市地下综合管廊智能运维管理进行研究,具有深刻的理论及实践意义。第一,拓展BIM技术的研究深度及应用领域。传统BIM应用主要集中在建筑设计和施工阶段,而本文将BIM技术扩展到城市地下综合管廊的智能运维管理领域,为BIM技术在基础设施管理领域的拓展提供了理论支持和实践经验。第二,有助于相关参与方增强对城市基础设施的整体性认识。BIM+技术的应用可以实现综合管廊信息的集成,以数字化的方式表达和展示城市地下管廊的整体状况。这有助于提高城市规划者、决策者以及相关专业人员对城市基础设施的全面认识,从而为城市的可持续发展提供理论指导。第三,有利于提升城市地下综合管廊的运维效率和管理水平。通过智能运维系统,实现对管廊设施的实时监测和分析,优化资源利用并减少浪费,能够及时发现故障、隐患并提供实时响应和处置措施,在保证城市及人员安全的前提下提高运维效率和管理水平,减少运维工作的延误和成本。第四,推动智慧城市发展。本文提出的基于BIM+技术的智能运维管理系统可以与其他城市管理系统和数据平台进行集成,形成智慧城市的综合管理体系。通过智慧城市的数据共享和对接,优化城市资源配置,最终实现城市居民的生活质量和城市竞争力的提升。

1 研究思路

首先,介绍本文的研究背景,以及研究意义。其次,阐述综合管廊传统运维管理模式的现状及存在问题。然后,提出综合管廊运维管理的基本目标,并基于BIM+技术,尝试构建城市地下综合管廊的智能运维管理系统。最后,对文章进行总结并提出展望。

研究技术路线图如图1所示。

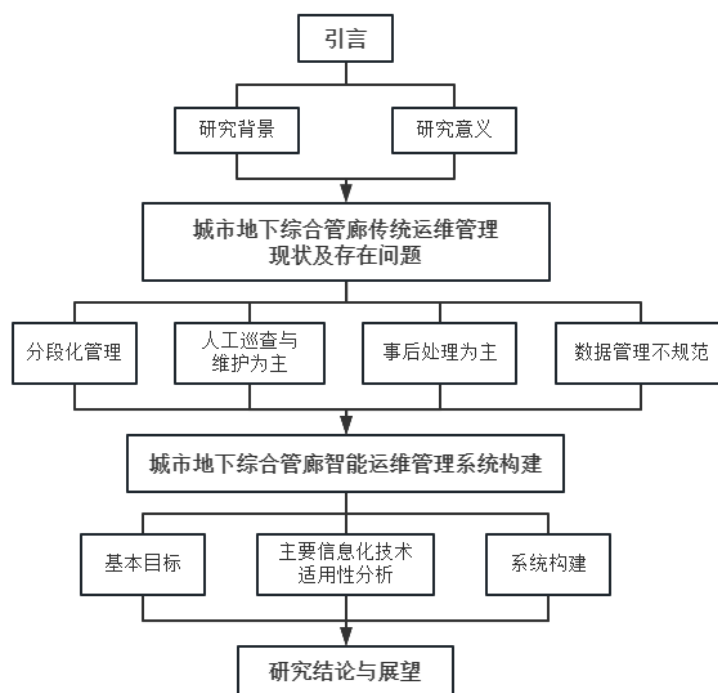


图 1 基于 BIM+技术的城市地下综合管廊智能运维管理研究技术路线图

2 城市地下综合管廊传统运维管理现状及存在问题

2.1 分段化管理^[3]

在我国城市地下综合管廊的传统运维管理模式中，综合管廊的管理责任通常分散给不同的管理部门或单位，由每个部门或单位对管廊系统的一段或多段、一类或多类进行运维工作。诚然，这种管理模式在一定程度上能够使各个部门更专注于管廊设施的维护和管理，但同时也带来了两方面问题。

一方面，分段化管理限制了信息和数据的交流共享。每个部门或单位对于其管理的管廊设施的实时状态和维护记录都有自己的记录和数据库，而不同单位间的记录、监管形式可能并未统一，数据间难以互通，最终造成了信息孤岛和数据割裂。不同管理部门之间很难获取全面准确的管廊信息，也很难实现信息和数据的共享与流动，影响了对综合管廊设施整体状况的全面了解，限制了综合管理决策的制定。

另一方面，分段化管理带来了协调和合作的困难。在综合管廊运维过程中，不同部门或单位之间时常需要通过合作来完成各自负责范围内的工作。然而，在分段化管理下，各部门间缺乏统一的管理平台、有效的协作机制和沟通渠道，导致协调和合作效率低下，不利于管廊内资源的综合配置与管理。

2.2 以人工巡查与维护为主^[4]，缺乏智能化技术支持

在我国城市地下综合管廊的传统运维管理模式中，对于地下管廊的巡查和维护主要依靠人工的方式进行，而这种方式存在三个主要的问题。

首先，人工无法实时遍及综合管廊的全部范围，巡查和维护的效率较低。一方面，由于人力资源和时间的限制，工作人员无法对整个管廊进行频繁和全面的巡查，这可能导致部分隐蔽问题无法及时发现、突发事件无法及时处理，从而产生安全隐患；另一方面，人工巡查需要耗费大量的人力物力，对于发现的问题需要进一步跟踪和处理，运维成本较高。

其次，人工巡查存在主观性。人工巡查主要依赖于工作人员的主观判断和经验，存在个体差异性和主观偏差，巡查的频率和效果很大程度上取决于工作人员的工作态度和水平。一些问题可能因为巡查人员的疏忽或对管廊设施的不熟悉而未被发现，从而延误了维护的时机，甚至可能引发更严重的问题。

最后，发生事故时管廊内部的人员安全难以保障。城市地下综合管廊空间相对密封，在不能及时有效发出报警通知的情况下，管廊内工作人员撤离逃生的时间将变得十分有限^[5]，工作人员的生命安全将遭受巨大的威胁。

2.3 事后处理为主

在我国城市地下综合管廊的传统运维管理模式中，通常是设备发生问题或故障后才采取应急维修和事后处理的方式来应对，缺乏主动预防和提前干预的策略。这样的运维管理模式也存在三个方面的问题。

首先，可能导致设备故障对城市运行产生影响。当设备故障发生时，可能会导致管廊设施的瘫痪或无法正常运行，进而影响城市的供水、供电、通信等基础设施的正常运行，造成城市的经济损失。

其次，事后处理为主意味着维修和处理工作主要集中在检修和抢修阶段，对设备进行临时性的维修和修复。这种补救性措施通常是应急性的，可能没有对引起问题的根本原因进行深入调查，并未真正解决故障，容易导致问题的再次发生。

最后，事后处理为主的管理模式可能增加运维成本。例如，在紧急情况下，可能需要支付高昂的维修费用和人员加班费用。此外，事后处理可能导致其他设备的连锁反应故障，从而引起运维成本的增加。

2.4 数据管理不规范

由于传统运维的分段式管理，以及缺乏统一的数据管理标准、数据意识和能力欠缺、技术设施和信息化水平不足等原因，我国城市地下综合管廊的相关数据管理并不规范。综合管廊设施的相关数据被分散储存在不同的部门、单位或个人手中，而其对于管廊运维相关数据的收集、存储、整理和管理缺乏规范化的流程和标准。

首先，数据管理不规范使得数据质量难以得到保证。我国传统综合管廊的运维管理中普遍缺乏明确的数据管理标准和流程，对于数据存在重复、缺失、错误等问题尚未给出较为高效的处理方式，这将影响数据的准确性和可靠性，进而影响管理决策的制定和管廊设施运维的安全性。

其次，数据管理不规范导致数据共享和应用困难。不规范的数据管理将导致数据存储的混乱和碎片化，使得数据难以共享和利用。各个管理部门或单位的数据无法进行有效的整合和共享，也因此无法对管廊设施整体状况进行全面把握和综合管理。

此外，数据管理不规范将会增加管理成本和工作负担。城市地下综合管廊涉及管线众多，相应数据繁杂，其数据收集、存储和整理需要耗费大量的时间和人力物力，数据管理标准及流程的缺失导致类似的工作重复进行，增加了不必要的成本和工作压力。

3 城市地下综合管廊智能运维管理系统构建

3.1 基本目标

基于第二节中涉及的传统运维管理现状及存在问题，加之综合管廊管线的复杂性及地下隐蔽性，有必要引入先进的信息化技术，从根本上改善城市地下综合管廊的运维管理水平。以实现综合管廊的智能化管理为导向，城市地下综合管廊智能运维管理系统需要实现以下三项基本目标。

(1) 智能化监控系统

城市地下综合管廊属于地下隐蔽工程，对其管理的有效性取决于监控系统的有效性。^[错误!未定义书签。]综合管廊智能运维管理系统应具备实时监测管廊设备的能力，包括传感器数据采集、设备状态监控、远程控制等功能。在管廊运营过程中，通过在管廊设施中部署各种传感器，如温度、湿度、振动传感器等，利用物联网(IOT)技术将传感器和设备与互联网连接后，可实现管廊设施工作状态的实时感知与及时预警，工作人员也可通过移动设备等快速识别、定位、跟踪、监控数据异常的部位。

(2) 智能化数据分析

综合管廊智能运维管理系统应能够实时、准确地收集、存储和分析管廊设施的运行数据，通过数据挖掘和分析，提供对设备状态、维护记录、能耗等方面的全面的数据分析报告。综合管廊寿命期长，规模大，纵向及横向数据庞杂，包括管廊 BIM 模型数据、GIS 地理信息系统数据、监控系统数据、维修数据等，利用 BIM 技术可将综合管廊各阶段、各参与方的数据集中规范存储。而云计算技术强大的存储能力、可扩展性、弹性计算能力及并行处理和分布式计算，以及完善的数据安全措施和隐私保护机制使其能轻松处理庞大的数据量，在确保数据安全的前提下为 BIM 技术助力。通过 BIM 技术联合云计算技术可以为综合管廊的运维管理提供更高效、准确的数据分析，从而更好地为各参与方提供服务。

(3) 智能化决策支持

基于智能化监控系统及数据分析，综合管廊应能够实现智能化决策支持的目标。利用 BIM 技术及 GIS 技术，联合 IOT 技术，可提供直观的综合管廊可视化数据，帮助管理人员全面掌握管廊设施工作状态。利用 BIM 技术对管廊设施的运行状况进行模拟，对设备的风险状况进行管控、预警并提供应急预案^[6]，转事后处理为事前处理；联合混合现实（MR）技术，工作人员可以通过头戴显示器或智能手机等设备实现沉浸式交互体验，直观地查看管廊设施的实时数据、设备状态并采取相应的维护和预防措施，提高设备的可靠性和运行效率，减少停机时间和维修成本。

3.2 主要信息化技术适用性分析

(1) BIM 技术

建筑信息模型（BIM）技术是一种基于三维模型的数字化技术，通过整合建筑项目各个方面的信息，实现全生命周期的协同和管理。在城市地下综合管廊智能运维管理中，BIM 技术具有广泛的适用性。首先，BIM 技术可以集成和管理地下管廊的设计、施工和运维信息，提供综合、统一的数据平台，且我国对于 BIM 技术在设计和施工阶段的应用以较为成熟，管廊前期数据的收集存储有较强保证。其次，BIM 技术可以通过可视化和模拟技术，帮助管理人员了解管廊的布局和设施情况，预防碰撞和优化运维方案。此外，BIM 技术还可以记录和管理管廊的维护信息，设置维护提醒和保养计划，实现对维护工作的全面管理。另外，BIM 技术还可以利用实时监测和数据分析，预测、检测和预警故障，提升管廊的维护响应能力。最后，BIM 技术可以促进数据共享与协同工作，提高团队间的合作效率，避免信息的重复录入和不一致。

(2) GIS 技术

地理信息系统（GIS）技术是一种基于空间数据的信息技术，将地理空间数据与属性数据相结合，实现对地理现象和空间关系的获取、管理和分析。GIS 技术与 BIM 技术在功能上相似，但侧重点有所差异。BIM 技术一般聚焦于对设备设施的内部物理特征和功能特性信息的数字化承载和可视化表达，而 GIS 技术主要用于表达数据结构、空间分析和显示宏观地理空间信息。^[7]BIM 技术与 GIS 技术的融合应用可实现宏微观信息的深度集成^[8]，对综合管廊的智能运维管理有重要效益。

(3) IOT 技术

物联网（IOT）技术是一种通过连接物理设备和传感器，使其能够相互通信和交换数据的技术。通过物联网，各种设备和传感器可以互联互通，并通过云平台集中管理和分析数据。在城市地下综合管廊智能运维管理中，IOT 技术同样具有广泛的适用性。首先，通过在地下管廊设备中部署无线射频识别（RFID）、红外传感器、定位系统等传感器和物联网设备，可以实时监测关键参数以及设备的运行状态，帮助运维人员及时发现问题、预测设备故障，并采取相应的维修措施。其次，IOT 技术可实现设备的远程监控和控制。运维人

员可以通过物联网平台远程管理管廊设备，及时获取设备信息、下达命令、进行故障诊断等。通过远程操作，能提高工作效率、减少运维成本，同时加强了对设备的监督和保障。此外，IOT 技术还可结合大数据分析和人工智能应用，对物联网数据进行分析和挖掘，从而实现故障预测、性能优化和维护计划的制定。

(4) MR 技术

混合现实 (MR) 技术是一种融合了虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR) 的技术，通过将虚拟世界与现实世界进行融合，使用户能够用与现实世界中相同的方式与数字信息或对象进行实时互动。运维人员通过佩戴 MR 头戴显示器，可以在现实环境中看到管廊的三维模型和相关数据信息，这样的可视化展示有助于管理人员直观地了解管廊的结构和细节，并能更准确地判断管廊设备的运行状态。此外，MR 技术还可以与 BIM、IOT 技术等智能技术进行集成，实现对管廊设备的智能化分析和管理工作。通过将 MR 技术与实时数据、传感器信息等结合，方便运维人员在现实环境中实时获取设备状态、故障警报等关键信息，提高故障诊断和维修效率。

(5) 云计算技术

云计算技术是一种基于互联网的计算机模式，通过将计算资源、数据存储和应用程序提供给用户，以按需、弹性和可扩展的形式交付服务。云计算借助虚拟化技术，将底层的物理资源进行抽象、汇总和管理，使用户可以通过网络访问和利用云服务提供商的共享资源。

在城市地下综合管廊智能运维管理中，首先，云计算技术能够为地下综合管廊提供强大的计算和存储能力。运维人员可以将管廊设备的数据、监测信息等存储在云端，减少对本地计算资源的依赖。同时，云计算还可以提供灵活可变的计算资源，根据需求进行扩展或缩减，实现对管廊运维管理的高效、动态支持。其次，云计算技术能够实现地下管廊信息的集中管理和共享。通过云计算平台，多个运维人员可以在不同地点、不同设备上实时访问和共享管廊信息。此外，云计算技术还可以结合人工智能和大数据分析，实现对管廊数据的智能化处理和预测。通过云端的大数据分析和人工智能算法，可以提取有价值的信息，识别设备故障和异常行为，并提供预测性的维护建议，为管廊的安全和可靠性提供支持。

(6) 5G 技术

5G 技术指第五代移动通信技术，具有大带宽、低延迟和高可靠性的特点。它能够提供更快的下载和上传速度，支持更多的设备连接，以及更稳定的网络连接。在城市地下综合管廊智能运维管理中，5G 技术为上述各项技术的应用提供了高速、稳定的网络连接基础。管廊中的大量传感器、监测设备和智能终端可以通过 5G 网络实现实时数据传输，从而实现对管廊设备状态的实时监测和管理。与传统网络相比，5G 技术具备更高的带宽和更低的延迟，可以满足对大规模数据传输和实时响应的需求。

3.3 城市地下综合管廊智能运维管理系统构建

参考郑立宁等人 (2016) [8]，唐超等人 (2017) [9]，孟柯等人 (2018) [10]，罗钢等人 (2020) [11]，郭钦和刘奥 (2021) [12]，丁小强 (2021) [13]，臧钊 (2022) [14]，张举等人 (2022) [15]，杨巍等人 (2023) [16]，进行城市地下综合管廊智能运维管理系统的构建。

(1) 系统技术路线

城市地下综合管廊的 BIM 模型包含丰富的几何信息、属性数据和关联关系，模型文件庞大、处理速度缓慢，不利于在智能运维管理系统中实时使用和处理。因此，在综合管廊智能运维管理系统开发的过程中，首先需要对 BIM 模型进行轻量化处理。一种常见的实践方法是在建模过程中采用几何简化软件、数据压缩工具等可视化优化工具，对模型进行轻量化处理，从而提高系统的性能、减少数据传输和处理的负担，同时保证

系统在智能运维管理中的实用性和可行性。

在对 BIM 模型进行轻量化处理后，将综合管廊设计、施工阶段的静态信息和运维阶段通过 IOT 技术实时采集到的动态信息，以及通过 GIS 技术采集到的管廊内部及周围环境的宏观信息集成到模型上，形成综合管廊运维阶段的可视化数据模型。

此后，在 5G 技术的支持下，利用云计算技术结合 MR 技术、人工智能及大数据分析，实现对管廊数据的智能化处理，实现对综合管廊进行实时监控、场景漫游、数据可视化管理及数据分析预警的功能。

具体的系统技术路线图如图 2 所示。

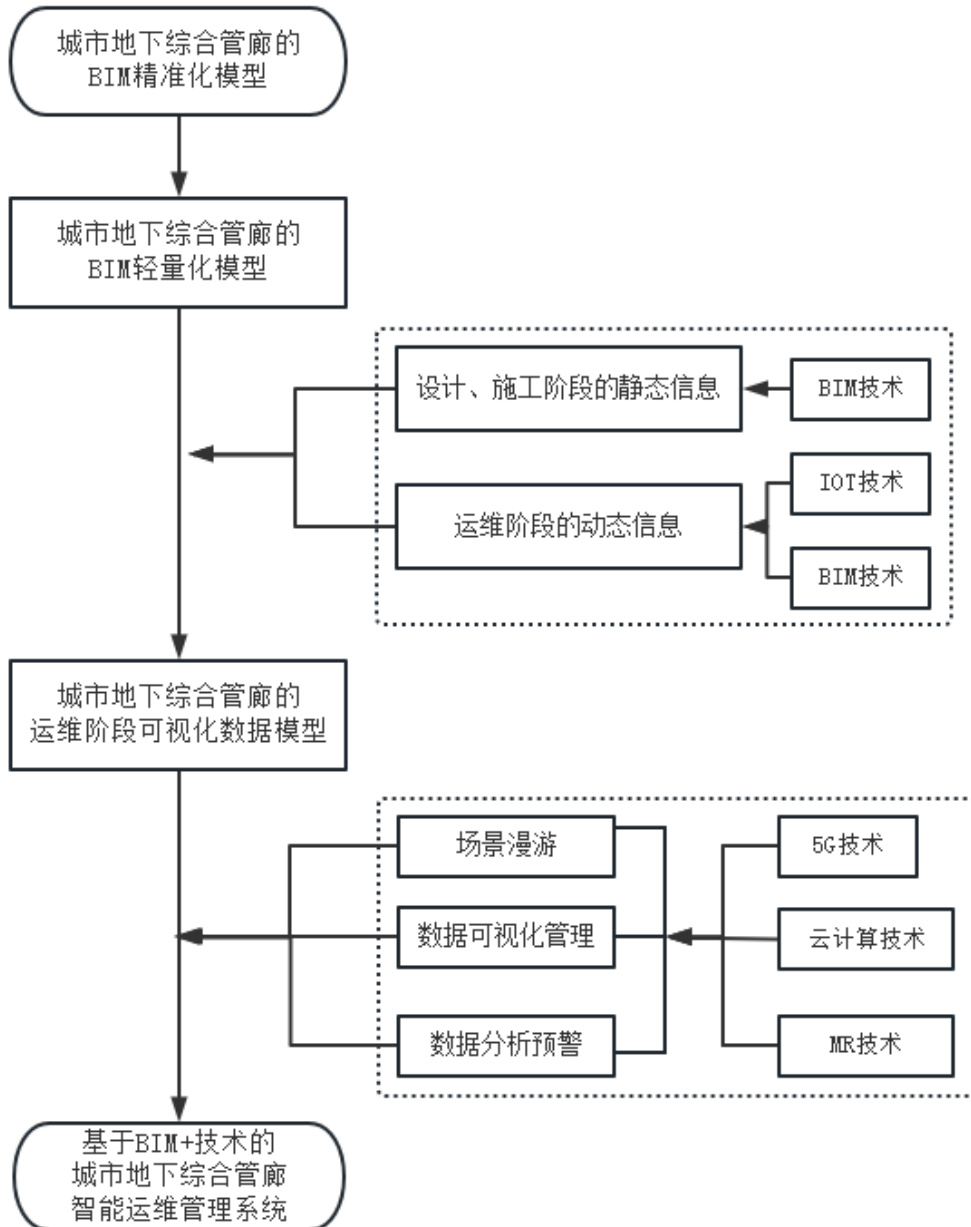


图 2 基于 BIM+ 技术的城市地下综合管廊智能运维管理系统技术路线图

(2) 系统总体架构

本文构建的城市地下综合管廊智能运维管理系统以 BIM+ 技术为基础，对综合管廊运营过程中的数据进行采集、传输、存储、分析和应用。整个系统分为感知层、网络层、数据层、应用层和展示层共 5 层，具体系统架构如图 3 所示。

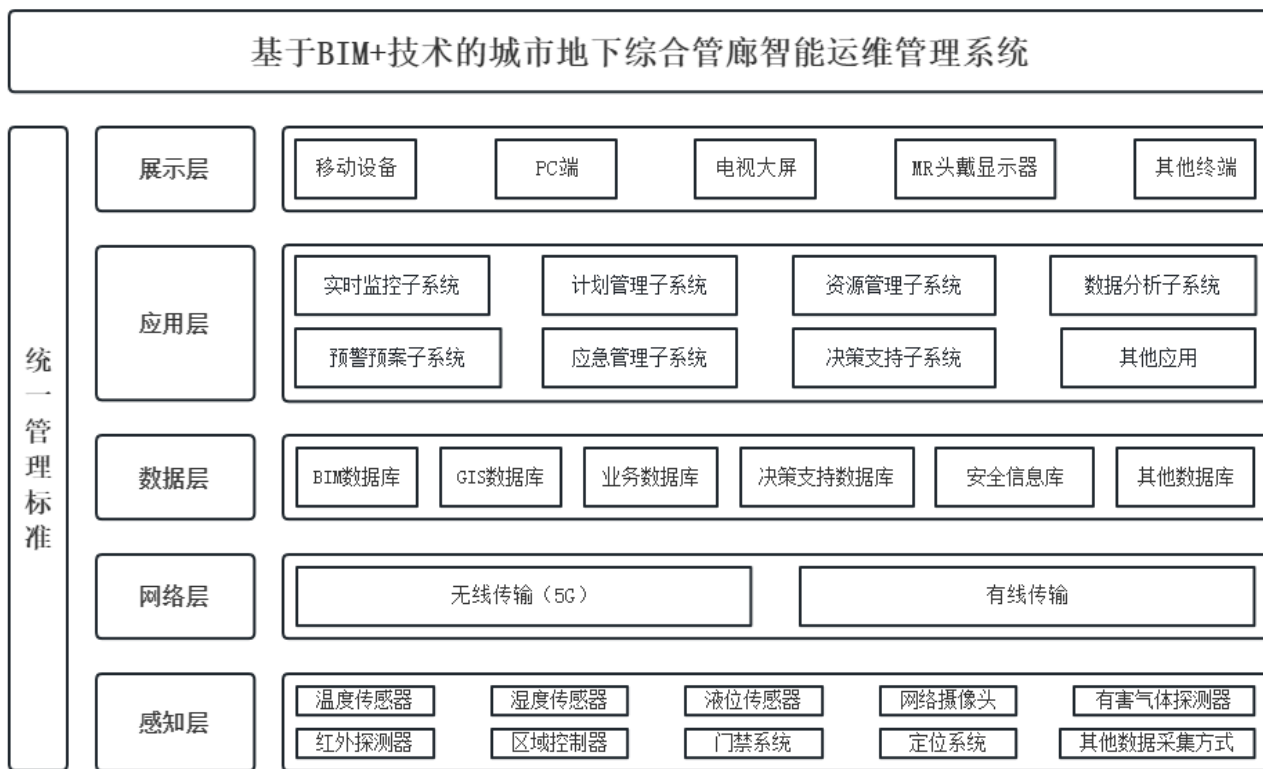


图 3 基于 BIM+技术的城市地下综合管廊智能运维管理系统总体架构

其中，感知层负责感知综合管廊运营过程中的实时数据和各类监测数据，实现对综合管廊运行状态、入廊作业人员位置等信息的实时采集；网络层利用无线传输和有线传输技术实现对综合管廊现场信息的可靠传递；数据层采用数据库技术实现综合管廊运行数据的统一存储和管理；应用层整合 BIM 技术、GIS 技术以及云计算技术等，基于数据层提供的数据对现场信息及综合管廊其他信息进行分析、判断，为综合管廊的安全运营提供决策支持；展示层负责以可视化的方式向管廊运维人员和决策者呈现地下综合管廊的实时状态、历史数据、分析结果等，以便其进行监控、预警、决策制定和报表分析。

(3) 子系统及其功能设计

针对本文构建的管廊智能运维系统，应用层共分为 7 个关键子系统，包括实时监控子系统、计划管理子系统、资源管理子系统、数据分析子系统、预警预案子系统、应急管理子系统以及决策支持子系统。各子系统之间、以及子系统与总系统之间应存在共享的数据接口及兼容的通信协议，数据一致性、完整性，系统兼容性以及交互安全性需有所保证。

1. 实时监控子系统

实时监控子系统主要基于 BIM+GIS+IOT 技术，通过集成传感器、监控设备、管廊及其外部环境模型，对综合管廊内外部环境、设备、管廊结构及专业管线等进行监控或监测。

根据不同监控/监测对象，将实时监控子系统的功能划分为四个模块，分别为环境监控模块、设备监控模块、管廊结构监测模块和专业管线监测模块。其中，环境监控模块负责实时监控和记录管廊内外的环境参数，如温度、湿度等；设备监控模块负责实时监控管廊设备的工作状态、能耗及故障情况；管廊结构监测模块负责实时监测管廊墙壁、地板、天花板等的结构状态，如是否存在位移、裂缝等变化情况，并记录相关参数的偏离程度；专业管廊管线监测模块负责实时监测管廊内的电力、给水、通信、燃气等专业管线的运行状态、流速、流量、泄漏情况等关键指标。

2. 计划管理子系统

计划管理子系统主要运用了 BIM+GIS+云计算技术，它涵盖了计划的制定、执行等各个方面，以确保管廊的高效、有序运行。

根据计划管理的不同阶段，将计划管理子系统的功能划分为四个模块，分别为计划制定模块、计划调度模块、进度追踪模块及计划报告模块。其中，计划制定模块结合负责制定管廊的维保计划、工作计划、管线计划等各类计划，并根据管廊的实际情况进行计划的优化；计划调度模块负责对计划进行调度和执行管理，它能够根据不同计划的资源可用性、任务紧急程度等指标，智能安排工作任务的执行顺序，并进行任务分配和调度；进度追踪模块负责实时跟踪计划的执行情况，在发现计划存在延迟等问题时及时采取相应的调整措施；计划报告模块负责对计划的完成情况、资源利用率等信息进行汇总，为运维人员提供决策支持和改进策略。

3. 资源管理子系统

资源管理子系统主要运用 BIM+IOT 技术对综合管廊的不同资源进行管理，包括人力资源、设备资源、物资及备件资源、信息及数据资源以及外部支持资源等，实现资源的合理配置及优化使用。

根据不同的资源类型，将资源管理子系统划分为五个模块，分别为人力资源管理模块、设备资源模块、物资及备件资源管理模块、信息及数据资源管理模块以及外部支持资源管理模块。其中，人力资源管理模块负责运维人员的工作安排等的调度与管理，它应能结合计划管理子系统，根据管廊的需求和已制定的工作计划智能匹配合适的人员资源，确保任务的及时完成和队伍的协调运作；设备资源管理模块负责综合管廊通信设备、电力设备、控制设备等设备的全面管理，管理内容主要包括设备登记、标识、台账管理、维护与维修等，联合实时监控子系统还可以实现对设备状态的监测；物资及备件资源管理模块负责管廊物资及备件的库存管理、采购、领用等，以保障管廊维护和运营的需求；信息及数据资源管理模块负责管理系统运行中记录的技术数据、监测数据，以及形成的文档资料等，可以为其他子系统提供重要的数据支持；外部支持资源管理模块负责管理合作单位、服务提供商等外部支持资源，确保合作方与管廊运维团队之间的良好协作和信息共享。

4. 数据分析子系统

数据分析子系统主要基于 BIM+云计算技术，利用先进的技术及算法对管廊运行数据进行分析，获取有价值的信息和洞见，为决策提供支持和改进方案。

联合实时监控子系统以及数据管理子系统，数据分析子系统在进行管廊数据清洗与预处理的基础上实现对数据的统计、探索与分析，其分析结果能够协助运维人员发现设备等的潜在问题及其发生概率、运维管理的优化方向等，提高管廊的可用性和维护效率。

5. 预警预案子系统

预警预案子系统主要运用 BIM+GIS+IOT+云计算技术，其可以联合数据分析子系统的输出结果（如温度传感器的正常阈值等），对综合管廊进行模拟演练，编制应急预案。当物联网传入的数据达到阈值时，自动以短信、廊内广播等方式向运维人员发送预警；当数据超过阈值时，按照应急预案引导相关人员处理事件。此外，如果运维人员在值班过程中通过主观经验判断管廊某些设备或部位可能出现故障，可以实名在系统中进行特情告警，由系统及其他相关人员进行评定，若告警合理，也优先按照预案引导相关人员处理事件。事件处理完成后，对事件处理的流程、结果进行记录，并对其进行评估打分。

6. 应急管理子系统

应急管理子系统主要运用 BIM+GIS+IOT+MR 技术，与预警预案管理都是对管廊事件进行管理的子系统，不同之处在于预警预案管理侧重事前控制，应急管理侧重事后处理，这也使得预警预案子系统存储的相关预

案在一定程度上能为应急管理子系统提供应急处理方案。

联合实时监控子系统和资源管理子系统，当突发事件和应急情况发生时，对事件特征、影响范围及风险进行评估，并根据不同的风险程度，在各展示层进行弹窗通知，将事件信息迅速传递给相关人员及部门，并组织协调应急人员、资源、和装备，指挥应急响应行动，以最快速度限制事件的恶性发展。在突发事件处置完成后，同样对事件的关键信息、处理过程及结果进行记录，对事件的应急响应过程进行总结和归档，形成该类事件的应急预案，为后续突发事件发生时的决策提供参考。

7. 决策支持子系统

决策支持子系统主要基于 BIM+云计算技术，联合上述各子系统，对系统中长期运维过程中累积的物联网数据、应急档案数据等进行综合分析，深入挖掘其中深层次信息，进行趋势判断及预测模拟，并根据管廊的运营目标、约束条件和优先级等指标，为管理人员提供最佳的决策及优化方案，并最终通过可视化技术展示出来。

一般地，数据分析与决策支持具有较高衔接性，本文将数据分析子系统与决策支持子系统作为两个独立子系统而非合并为一个子系统，主要是出于对数据分析专业性以及系统侧重性的要求。独立的数据分析子系统专注于数据的收集、处理和分析，通过数据挖掘和统计分析等技术，为其他子系统和管理人员提供准确的数据支持；独立的决策支持子系统侧重于分析结果的可视化展示，它将不同来源的数据整合并转化为决策过程中所需的信息后，为管理人员提供直观的信息和智能化的决策支持工具。将数据分析与决策支持作为两个独立的子系统，尤其需要注意子系统间的数据接口和交互设计，必须确保数据的一致性、可读性与易读性。

4 结语

本研究旨在探索基于 BIM+技术的城市地下综合管廊智能运维管理方法，以解决传统管理模式下面临的各种挑战和问题。基于对我国城市地下综合管廊传统运维管理现状及问题的深入理解，本文提出了基于 BIM+技术的智能运维管理系统架构。该架构利用 BIM 技术作为核心，并结合 GIS、IOT、云计算等信息化技术，实现了对综合管廊运营过程中的数据采集、传输、存储、分析和应用的全面化管理和智能化决策支持。通过感知层、网络层、数据层、应用层和展示层以及各子系统间、子系统与系统间的有机组合，本文构建的系统架构能够实现实时监测、预警处理、维护计划管理、资源调度和决策支持等的功能。

本研究碍于作者学识、专业素养、相关技术条件以及写作时间等，文中某些内容仍需进一步考量，作者研究认为目前还有以下三个方面值得后续开展继续研究：第一，本研究基于 BIM+技术构建的城市地下综合管廊智能运维管理系统作者的初步构思及尝试，后期仍需要大量的编程调试以及实践测试等，特别是针对子系统之间与子系统和总系统之间的数据接口和数据兼容性问题，需要投入大量精力进行研发。可以考虑与其它具备编程能力及综合管廊经验的校企合作，进一步完善综合管廊的智能运维系统，提高系统的稳定性与易用性。第二，城市地下综合管廊的信号通讯问题应引起足够重视。本研究尝试引入 5G 技术，与有线通讯设备一同为综合管廊的信号通讯提供保障。建议在后续研究中加强对基于 5G 技术的无线通讯技术的研发与测试，尤其是对管廊中信号不稳定的区域进行具体分析，进一步完善管廊内部信号通讯保障措施。第三，本研究提及的 MR 技术在实现现实世界与虚拟世界的交互方面具有较强的性能，然而由于技术本身的复杂性以及我国建设领域信息化程度较低等原因，MR 技术目前在我国建设项目上的应用仍处于早期阶段，其与 BIM 等技术的集成应用也存在较大问题。在后续研究中，可以加强对于 MR 技术易用性的提升研究，降低理解及操作门槛，从而推动 MR 技术在城市地下综合管廊的进一步应用。

总体而言，本研究为基于 BIM+技术的城市地下综合管廊智能运维管理提供了一种新的视角和方法。期望该研究能够为综合管廊的智能运维实践助力，实现综合管廊的智能运维管理，推动城市基础设施的可持续发展。

参考文献

- [1] 有维宝,王建波,张樵民,等. 基于 TOP SIS-UT 的城市地下综合管廊 PPP 项目风险分担[J]. 土木工程与管理学报,2019,36(2):186-194.
- [2] 涂中强,赵盈盈. 基于 BIM+MR 技术的地下综合管廊智能化运维管理[J]. 项目管理技术,2020,18(12):44-47.
- [3] 崔国静,周庆国,宋战平. 城市地下综合管廊建设与发展探析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(5):660-666.
- [4] 尹航,刘洋. 以信息技术提升地下综合管廊运维能力[J]. 电子世界,2019,0(12):58-59
- [5] 郑立宁,王建,罗春燕,等. 城市综合管廊运营管理系统构建[J]. 建筑经济,2016,37(10):92-98.
- [6] 陈苏. 基于 BIM 及物联网的城市地下综合管廊建设[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(6):1445-1451.
- [7] 赵峰. 基于 BIM+GIS 的高铁动车运用所设备设施运维管理平台[J]. 铁路技术创新,2022(1):7-13.
- [8] 王凯,林修翔,吴跃,等. BIM 技术在贵安新区综合管廊建设中的应用研究[J]. 建筑技术,2017,48(9):917-921.
- [9] 唐超,马全明,王思锴,等. 基于 GIS-BIM 的城市综合管廊智能运维管理平台研究与设计[J]. 北京测绘,2017(z2):18-23.
- [10] 孟柯,伍嘉,杜创,等. 基于 BIM 的综合管廊智能运维管理平台研究[J]. 隧道与轨道交通,2018(3).
- [11] 罗钢,邢泽众,李欣宇,等. 基于 BIM 的京杭运河枢纽港扩容提升工程绿色智能运维管理平台开发[J]. 建筑技术,2020,51(1):69-73.
- [12] 郭钦,刘奥. 基于 BIM 技术的城市轨道交通车辆基地可视化智能运维系统[J]. 现代城市轨道交通,2021(3):86-91.
- [13] 丁小强. 基于“BIM+GIS+IOT”技术的城市地下综合管廊运营维护应用研究[D].河北经贸大学,2021.
- [14] 臧钊. 基于 BIM+GIS 的京张高速铁路空地一体“数字孪生”智能化运维技术研究[J]. 铁道运输与经济,2022,44(9):139-145.
- [15] 张举,李有根,梁晓旭等.BIM 与 IoT 技术在智慧综合管廊的应用研究[J].智能建筑电气技术,2022,16(01):18-21.
- [16] 杨巍,卢士军,朱旭阳,等. 基于 BIM 技术的城市隧道智能化运维系统研究[J]. 交通世界,2023(1):298-301.
- [17] 赖一飞,胡小勇,陈文磊. 项目管理概论(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社,2017.05
- [18] 赖一飞,吴思,贾俊平. 创业项目管理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2018.9