

基于BIM的岩溶区隧道动态反馈与信息化施工技术研究

韩 刚^{1,2}, 张建伟^{2,3}, 刘泓邑^{1,2}, 王 帅⁴, 赵玉帅⁴

¹山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南

²中国地质学会北方岩溶城市地下空间探测与开发利用创新基地, 山东 济南

³济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南

⁴中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2025年2月21日; 录用日期: 2025年3月13日; 发布日期: 2025年3月25日

摘 要

本文研究了基于BIM (建筑信息模型)的岩溶区隧道动态反馈与信息化施工技术。研究首先概述了BIM技术在隧道施工领域的应用现状, 并详细分析了岩溶区隧道施工的特殊性及其带来的挑战。接着, 论文深入探讨了基于IFC标准的隧道动态施工信息分析及反馈机制, 建立了隧道施工信息模型(TCIM), 实现了施工信息的快速提取和准确分析。此外, 研究还进行了隧道动态施工多源数据信息的研究, 包括数据的采集、预处理、融合与集成, 以及这些数据在隧道施工中的应用分析。最终, 基于上述研究成果, 搭建了一个高效率、准确的隧道动态施工信息分析及反馈系统, 该系统具备实时数据分析、预警与反馈、用户界面与交互等功能, 为隧道施工提供了全面的信息化支持。

关键词

BIM技术, 岩溶区隧道施工, IFC标准, 动态反馈系统

Research on BIM Based Tunnel Dynamic Feedback and Information Construction Technology in Karst Area

Gang Han^{1,2}, Jianwei Zhang^{2,3}, Hongyi Liu^{1,3}, Shuai Wang⁴, Yushuai Zhao⁴

¹Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., LTD., Jinan Shandong

²Innovation Base of Underground Space Exploration, Development and Utilization of Karst City in North China, Geological Society of China, Jinan Shandong

³Jinan Rail Transit Group Co., LTD., Jinan Shandong

⁴School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Feb. 21st, 2025; accepted: Mar. 13th, 2025; published: Mar. 25th, 2025

文章引用: 韩刚, 张建伟, 刘泓邑, 王帅, 赵玉帅. 基于BIM的岩溶区隧道动态反馈与信息化施工技术研究[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(2): 479-486. DOI: 10.12677/mse.2025.142052

Abstract

This paper studies the dynamic feedback and information construction technology of tunnel in karst area based on BIM (Building information model). Firstly, this paper summarizes the application status of BIM technology in the field of tunnel construction, and analyzes the particularity and challenges of tunnel construction in karst area in detail. Then, the paper deeply discusses the analysis and feedback mechanism of tunnel dynamic construction information based on IFC standard, establishes tunnel construction information model (TCIM), and realizes the rapid extraction and accurate analysis of construction information. In addition, the research also carries on the research of tunnel dynamic construction multi-source data information, including data acquisition, pre-processing, fusion and integration, and the application analysis of these data in tunnel construction. Finally, based on the above research results, a highly efficient and accurate tunnel dynamic construction information analysis and feedback system is built, which has functions such as real-time data analysis, early warning and feedback, user interface and interaction, and provides comprehensive information support for tunnel construction.

Keywords

BIM Technology, Tunnel Construction in Karst Area, IFC Standard, Dynamic Feedback System

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着基础设施建设的快速发展,岩溶地区隧道工程面临复杂地质条件和地下水丰富等挑战,传统施工技术难以应对,导致效率低下、成本超支及安全风险增加。因此,探索基于建筑信息模型(BIM)的岩溶区隧道动态反馈与信息化施工技术显得尤为重要。BIM 技术以其强大的信息集成和可视化能力,为隧道施工提供了全新管理模式,能全面模拟和动态监控施工过程,及时发现并处理风险,尤其在模拟复杂地质条件和预测地质变化方面展现优势。近年来,国内外学者研究了 BIM 技术在隧道中的各种应用。欧美国家在 BIM 技术的标准化、信息化和智能化方面取得显著进展,而我国随着“互联网+”和“智慧城市”概念的提出,BIM 技术也日益广泛应用于隧道施工,如王超等[1]建立 BIM 相关模型并在隧道实际工程中成功应用。然而,针对岩溶区隧道施工的特殊性,BIM 技术的应用仍面临地质信息获取、施工过程动态监控等挑战。

IFC 标准作为 BIM 技术的核心之一,在建筑领域应用成熟,但在隧道施工中尚处于起步阶段。本研究旨在基于 IFC 标准,探索其在隧道动态施工信息分析中的应用,建立隧道施工信息模型,实现信息快速提取和准确分析,并研究施工反馈机制。同时,整合地质勘察、施工监测和施工日志等多源数据信息,为施工决策提供全面支持。最终,搭建高效率、准确的隧道动态施工信息分析及反馈系统,具备实时数据分析、预警反馈和用户交互等功能,为岩溶区隧道施工提供信息化解决方案。

2. BIM 技术在隧道施工中的应用

在隧道施工领域,BIM 技术正逐步推广深化,涵盖设计优化、动态监控及运维管理。设计优化方面,BIM 技术通过三维模拟分析,能发现潜在设计问题并优化方案,Yue Z 等[2]建立隧道 BIM 模型进行详细设计,优化了施工方案。施工过程中,BIM 技术实时监测隧道变形、应力等参数,关联监测数据与模型,

实现可视化监控。施工完成后, BIM 技术便于查询隧道结构、设备信息, 支持运维管理。

尽管 BIM 技术在隧道施工中取得一定成果, 但仍面临挑战, 尤其在岩溶区隧道施工更具难度。岩溶区地质复杂, 溶洞、暗河频发, 地下水丰富且与地表水相连, 易引发涌水、突泥等地质灾害, Li L 等[3]分析土水案例即指出突水引发的灾害。复杂地质和地下水影响导致施工难度大, 需特殊方法和措施。同时, 岩溶区隧道施工安全风险高, 易发生坍塌、冒顶事故, 严重威胁人员设备安全。

因此, 岩溶区隧道施工需充分考虑地质复杂性和施工难度, 采用先进技术和管理方法确保安全效率。BIM 技术作为信息化施工技术, 为岩溶区隧道施工提供新解决方案, 有助于降低风险、提高效率和质量。

3. 基于 IFC 标准的隧道动态施工信息分析及反馈研究

3.1. IFC 标准在隧道施工信息模型中的应用

在隧道施工中, IFC 标准的应用促进了信息的集成与交换。基于 IFC 标准的隧道施工信息模型(TCIM)能够全面管理和高效利用隧道施工过程中的各种信息。利用 IFC 标准中的实体和属性定义, 可以构建包括隧道结构、地质条件、施工设备等在内的三维模型。通过 IFC 标准, 设计数据、施工监测数据、地质勘察数据等来自不同来源的信息能够集成到一个统一的信息模型中。姜谔男等[4]分析基于 IFC 标准的隧道模型, 成功建立了信息集成模型。此外, IFC 标准提供了统一的数据交换格式和协议, 便于不同软件系统和项目参与方之间的信息共享和交换。基于这一模型, 可以进行施工模拟、地质风险评估、施工进度管理等多种信息分析。

3.2. 隧道动态施工信息分析流程

隧道动态施工信息分析基于 IFC 标准的隧道施工信息模型进行, 旨在全面监控和动态调整施工过程。通过传感器、监测设备等手段, 实时收集变形监测数据、应力监测数据、施工日志等隧道施工过程中的各种信息。这些信息经过整理, 去除冗余和错误信息, 确保准确性和完整性后, 被映射到基于 IFC 标准的隧道施工信息模型中, 实现三维可视化和关联分析。利用专业分析软件和算法, 对模型中的信息进行分析, 如地质风险评估、施工进度预测等, 并以图表、报告等形式输出分析结果, 为施工决策提供支持。

3.3. 反馈机制设计与实现

反馈机制是隧道动态施工信息分析及反馈系统的核心。根据隧道施工的安全标准和经验数据, 设定变形监测数据、应力监测数据等预警阈值, 郭永建等[5]研究隧道施工及其监测预警, 设定了围岩变形阈值, 并归纳得到围岩变形规律。通过实时监测和分析系统, 对隧道施工过程中的各种信息进行监测和分析, 一旦某个指标超过预警阈值, 立即触发预警机制。预警信息通过短信、邮件、APP 推送等方式及时通知相关人员。收到预警信息后, 相关人员根据具体情况制定处理措施, 如加强监测、调整施工方案等, 并对处理措施的执行情况进行跟踪和评估。评估结果反馈给系统, 以持续优化和改进预警机制和处理措施。通过设计和实现反馈机制, 可以全面监控和动态调整隧道施工过程, 提高施工安全性和效率, 并为施工决策提供支持。

4. 隧道动态施工多源数据信息研究

4.1. 多源数据信息的来源与分类

在隧道动态施工中, 多源数据信息是决策、监控与管理的重要依据。这些信息主要来源于地质勘察、设计、施工监测、环境监测、施工日志与影像、管理等方面。地质勘察提供地质剖面、岩层分布等关键数据, 设计数据则包括设计图纸、结构尺寸等。施工监测数据实时反映隧道变形、应力状态, 环境监测关注

周边地表沉降、地下水位等。施工日志与影像记录关键事件、人员操作等,管理数据涵盖进度规划、资源分配等。这些信息共同构成了隧道施工全面、实时的信息基础,为项目安全、高效推进提供了有力保障。

4.2. 数据信息的整合与分析

数据采集是多源数据信息研究的基础,涉及传感器部署、自动化监测系统设计、人工记录与录入等多个环节,要求高效、准确。采集后的数据需经过预处理,包括清洗、格式转换、缺失值填补、异常值检测与处理等,以确保数据质量。基于处理后的数据,可以建立隧道施工分析模型,如围岩稳定性分析模型、支护结构优化模型等,以预测和评估施工过程中的安全风险。通过实时监测数据与分析模型的结合,可以对隧道施工过程中的异常情况进行预警,及时采取措施避免事故发生。在赵龙国[6]的论文中,基于 BIM 的 IFC 标准建立了隧道施工动态分析反馈管理系统,成功整合并分析了数据,得到了相应的优化反馈。在其甄峰岭 2 号隧道工程项目中,通过整合地质勘探、施工监测、环境影响和人员与设备等多源数据信息,建立了基于 BIM (建筑信息模型)的隧道动态施工信息管理系统。对甄峰岭 2 号隧道典型区段施工过程进行实时监测与预警,通过进一步分析数据,在施工过程中及时发现并消除了潜在的安全风险,该系统还对施工方案进行优化,如调整支护参数、优化施工顺序等,有效避免事故的发生并提高了施工效率和质量。

4.3. 多源数据信息在隧道施工中的应用分析

多源数据信息的综合应用能够显著提升隧道施工的安全性和效率,在隧道施工中有着诸多应用,徐加民[7]分析并建立隧道动态设计和信息化施工体系,将信息与施工紧密结合。其中结合地质勘察数据、实时监测数据和历史经验,运用数据挖掘和机器学习算法,对隧道施工中的地质灾害风险进行预测和预警。通过分析施工日志、资源调配数据,结合项目进度计划,实时监控施工进度,预测成本超支风险,及时调整施工策略。利用监测数据和影像资料,实时监控和评估施工过程中的关键工序和成品质量,以保障施工质量满足设计标准。另外整合多源数据,运用大数据分析技术,为项目管理者提供全面的施工状况概览,辅助决策制定,如施工方案优化、应急响应计划制定等。

5. 高效率、准确的隧道动态施工信息分析及反馈系统搭建

5.1. 系统需求分析

在岩溶区隧道施工中,构建一个高效率、准确的动态施工信息分析及反馈系统至关重要,叶英等[8]指出信息化预警系统可以提高隧道施工的抗风险能力。而由于岩溶区隧道工程地质环境的复杂性、不可预见性以及勘察方法和手段的限制,设计人员必须随着施工进度对施工方案进行动态调整。该系统旨在使用 BIM 技术辅助解决当前熔岩隧道工程信息设计、建设与管理中遇到的难题。采用理论解析、实验探究、数值模拟及统计分析等综合手段,探索隧道施工中的动态反馈与信息化技术,构建岩溶区隧道的三维工程地质模型,搭建高效率、准确的隧道动态施工信息分析及反馈系统,建立岩溶区隧道施工监测智能化平台,如图 1 所示。最后实现隧道动态施工数据信息的存储及共享。

5.2. 平台研究内容

为研究数字化平台,首先需进行岩溶区隧道 BIM 设计技术研究,包括数据标准与三维工程地质模型研究。接着,基于 BIM 开展动态反馈与信息化施工技术研究,涵盖 IFC 标准的信息分析、多源数据整合及高效反馈系统搭建。此外,平台致力于监测智慧化,聚焦于盾构施工的结构与环境影响分析、实时监测及基坑施工自动化监测。创新点包括激光扫描检测、图像识别高精度病害检测、全生命周期健康诊断模型与预警技术,最终构建隧道健康服务的数字化保障体系。技术路线如图 2 所示。

图 1. 岩溶区隧道施工监测智慧化平台

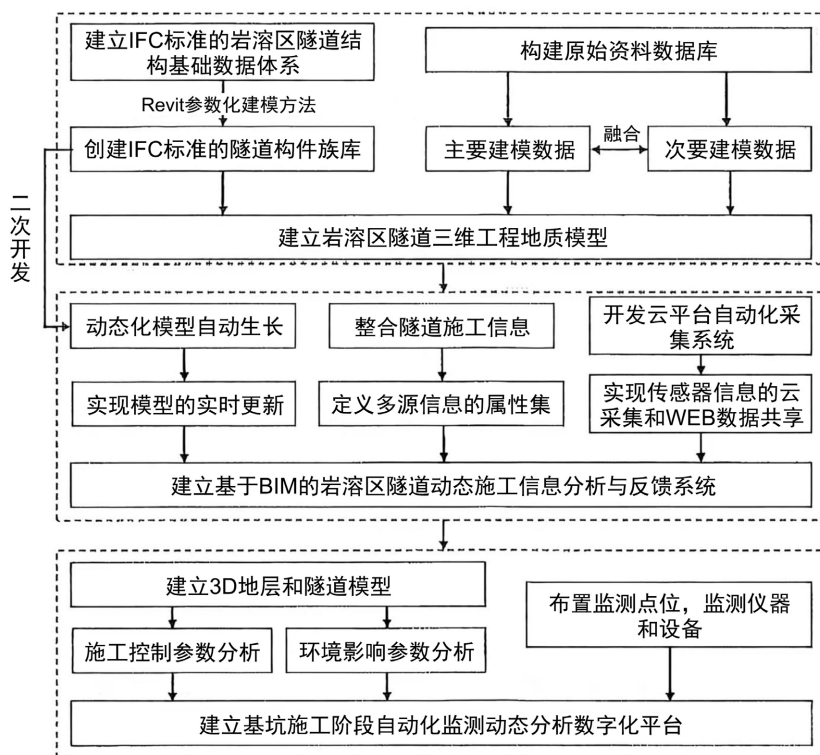


图 2. 平台技术路线

5.3. 系统架构与功能模块

系统架构上，采用 5 层结构，分别对应用层、支撑层、数据层、网络层、感知层进行设计，并将安全管理中包括用户、权限等以及系统管理和日志管理等贯穿整个架构组织。其中应用层则可在总体上进行定时调度；支撑层实现日志监控；数据层对数据资源进行监控；网络层则进行通知和报警；感知层接收感知信息，并对其进行监控以提前预警。架构图如图 3 所示。

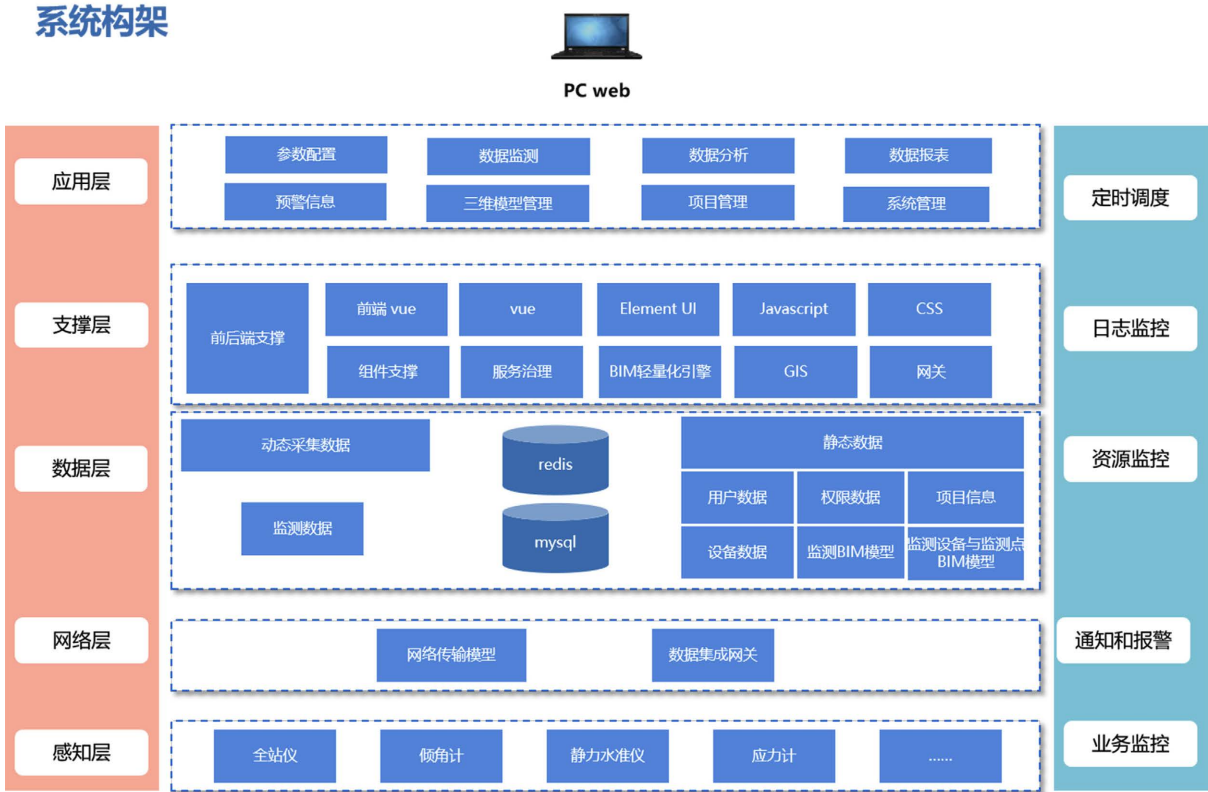


Figure 3. System architecture diagram
图 3. 系统架构图

在功能模块上，由于传统人工监测需要投入大量人力物力，并且易受环境的影响，对此系统实现了自动化监测，减少人员投入，并可 24 小时在线不间断采集数据，可实现 6 次/小时的采集频率。此外对比传统可保证强大的稳定性，不受天气影响可实时监测，并且由于后台可实现专家库科学评估，因此数据准确可靠。除实用功能外，在系统页面上也有着较为不错的使用优势。系统主页面可查看交通轨道全景图和车站详细信息，在管理界面则具备完善的系统管理功能，能维护部门信息、发布提醒公告、分配用户权限等，此外还具备完善的系统参数配制功能，能够新增/修改/删除监测点、维护地铁线路信息、维护地铁隧道的抽象概念环等。在总体监测流程中，需要进行数据的分析、监控、预警、采集、传输和处理，其中包括对监测数据进行统计分析、预警信息分析、人工监测等分析，经此可动态收集隧道结构变形信息，掌握结构变形情况，保障运营安全。

5.4. 关键技术与算法实现

构建高效准确的隧道动态施工信息分析及反馈系统，关键在于核心技术与算法的实现。实时数据分析模块采用 Apache Flink 或 Spark Streaming 等流处理技术，快速处理现场数据，集成规则引擎和机器学习

习模型,识别异常、趋势及风险,为预警提供数据基础。预警与反馈机制模块设定阈值和条件触发规则,自动触发预警信号,并通过多种方式通知相关人员,同时结合专家系统或知识库快速生成应对措施。用户界面设计简洁直观,采用响应式设计技术,支持多种交互方式,方便用户进行数据探索和可视化操作。此外,系统还支持报告生成功能,将分析结果直观呈现给相关人员或决策层,提升系统实用性和价值。这些技术和设计确保了系统在面对复杂施工环境时,能迅速智能响应,有效降低施工风险。

5.5. 平台研究现状

在对平台进行设计前先对勘察监测资料进行收集,即收集整理了3号线孟家庄-龙奥站区间岩溶发育区段从运营以来的运营监测数据及发生上浮变化后的自动化监测数据,另外还包括7号线科创中心至济北站区间的理正勘察数据库及相应的平面图以及3号线丁家东站-盛福庄站区间的理正勘察数据库,通过勘察得到的数据可建立三维地质模型。此外,完成资料收集则需依据平台的数据采集等功能对实际模型进行BIM模型的建立,包括7号线科创中心车站模型、7号线科创中心至济北站区间模型,建立得到相应模型并进行整合得到7号线科创中心站模型与区间模型整合后的BIM模型。随后进行基于IFC标准的隧道动态施工信息分析及反馈研究,并对实际工程施工过程进行分析反馈,提出相应优化措施,从而可建立基于IFC标准的隧道分析反馈集成模型研发隧道动态施工信息分析及反馈系统。为验证系统的实用性,自2023年10月起在济南轨道交通3号线礼耕路站、龙奥大厦站及相邻区间投入使用,并能够稳定运行。在运行过程中,系统已经成功捕捉到了多次微小的变形数据,并通过数据分析中台对数据进行处理,针对可能对线路运营造成影响的变形趋势进行分析和预测,从而提醒相关部门提前进行加固和维修,以避免安全隐患。在整个过程中系统通过对城市轨道交通隧道结构进行定期、动态监测用以评价城市轨道交通结构健康状态,保障城市轨道交通结构安全、运营安全,由于其功能上的特性使其不仅在城市轨道交通中发挥着巨大作用,还可在公路、机场、建筑物等领域进行应用,此外结合大数据和人工智能技术,使其市场应用前景更加广阔。

6. 结论与展望

本研究致力于探索基于BIM的岩溶区隧道动态反馈与信息化施工技术,通过深入研究IFC标准的隧道动态施工信息分析及反馈、多源数据信息整合及系统搭建,证明了IFC在隧道信息集成中的关键作用。研究有效整合了地质勘察、施工监测、设计文件等多源数据,为施工决策提供了全面准确的信息支持。成功搭建的系统能实时监控隧道施工参数,智能支持施工决策,且用户友好。尽管取得显著成果,但仍面临挑战,如深化IFC应用研究、优化数据整合分析、探索大数据和AI技术,以及完善系统功能和用户体验。未来,将推动该技术在工程中的广泛应用,加强与专家学者的交流合作,共同推动隧道施工行业的信息化和智能化进程。

基金项目

- (1) 山东省交通厅科技计划项目 2022B12;
- (2) 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 2022TSGC2117。

参考文献

- [1] 王超, 夏建平, 徐润, 等. 基于BIM+GIS隧道信息化施工技术研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(S2): 114-116+127.
- [2] Zhuo, Y., Wang, C., et al. (2021) Research on Visual Management Technology of Tunnel Construction Process Based on BIM Technology. *Advances in Civil Engineering*, 2021, Article No. 9738820. <https://doi.org/10.1155/2021/9738820>
- [3] Li, L., Tu, W., Shi, S., et al. (2016) Mechanism of Water Inrush in Tunnel Construction in Karst Area. *Geomatics*,

Natural Hazards and Risk, 7, 35-46. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1181342>

- [4] 姜谟男, 郑帅, 赵龙国, 等. 基于 IFC 的隧道施工信息集成模型及管理信息系统[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(2): 34-40.
- [5] 郭永建, 曹周阳, 姜飞. 基于围岩变形速率比值法的隧道监测预警研究[J]. 铁道建筑, 2015(11): 49-50+54.
- [6] 赵龙国. 基于 BIM 的隧道动态施工信息管理系统研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [7] 徐加民. 浅谈隧道工程的动态设计与信息化施工[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(5): 1-5.
- [8] 叶英, 孙文龙, 杨新锐, 等. 隧道施工信息化预警平台建设[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 24-29.