

岩溶区隧道BIM设计及其应用技术研究

许 勇^{1,2}, 丁 琦^{2,3}, 秦龙飞^{1,2}, 王 涛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莱芜交通发展集团有限公司, 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25日; 录用日期: 2025年3月17日; 发布日期: 2025年3月27日

摘 要

随着岩溶区隧道建设环境愈发复杂, 传统依靠平面图和经验方案的设计方式已难以满足高精度与多领域协作的需求。本文探讨了BIM技术在隧道设计阶段的应用, 通过构建统一的数据规范和参数化构件库, 实现了地质信息与结构要素的高效集成和更新。在数据预处理方面, 采用小波变换降噪和主成分分析优化地质数据质量, 并结合反距离加权插值方法填补空白区域, 从而构建了能够精确还原复杂地下条件的三维地质模型。此外, 通过优化信息交换机制实现了跨平台数据共享, 为不同专业团队之间的协作提供了有力支撑。以济南轨道交通7号线科创中心至济北站地铁项目为实证案例, 展示了BIM技术在实际工程中的具体应用效果。该方案可一定程度上提升设计准确度, 为未来智能化隧道建设提供一些参考。

关键词

BIM模型, 岩溶环境, 参数化建模, 数据整合

Research on BIM Design and Application Technology for Tunnels in Karst Areas

Yong Xu^{1,2}, Qi Ding^{2,3}, Longfei Qin^{1,2}, Tao Wang⁴, Yushuai Zhao⁴

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

²Innovation Base for Underground Space Exploration, Development and Utilization in Northern Karst Cities of the Geological Society of China, Jinan Shandong

³Laiwu Transportation Development Group Co., Ltd., Jinan Shandong

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

Received: Feb. 25th, 2025; accepted: Mar. 17th, 2025; published: Mar. 27th, 2025

文章引用: 许勇, 丁琦, 秦龙飞, 王涛, 赵玉帅. 岩溶区隧道 BIM 设计及其应用技术研究[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 511-517. DOI: 10.12677/hjce.2025.143056

Abstract

With increasingly complex environments in karst tunnel construction, traditional methods based on plan views and empirical guidelines are insufficient to meet demands for high precision and multi-field collaboration. This paper explores BIM technology's application during tunnel design, using unified data standards and parameterized component libraries to achieve efficient integration and updating of geological information and structural elements. In data preprocessing, wavelet denoising and principal component analysis optimize geological data quality, complemented by inverse distance weighted interpolation to fill gaps and construct a 3D geological model accurately reproducing complex underground conditions. Additionally, optimizing information exchange mechanisms enables cross-platform data sharing, supporting collaboration among diverse professional teams. A case study of the Metro Project from the Sci-Tech Center to JiBei Station on Line 7 of Jinan's Urban Rail Transit illustrates BIM's practical application effects in real projects. This approach enhances design accuracy and provides references for future intelligent tunnel construction.

Keywords

BIM Model, Karst Environment, Parametric Modeling, Data Integration

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

岩溶地貌的复杂性对隧道设计提出了更高的技术要求，传统方法已难以满足现代工程需求。岩溶区隧道工程因其复杂的地质条件，如溶洞、裂隙、暗河等，给设计带来严峻挑战。传统设计方法主要依赖二维图纸和经验判断，存在协同性差、设计精度不足及信息流失等问题，难以有效应对复杂的岩溶地貌。BIM 技术凭借三维可视化建模、多专业协同设计和动态模拟分析，为隧道工程提供了更精准、高效的解决方案，能够直观呈现地质结构，提高设计精度。

本研究基于 BIM 技术，构建了岩溶区隧道 BIM 模型的数据族库体系，以提升信息集成度与协同性。通过统一的数据标准，实现地质、结构等多专业数据的整合。重点研究三维工程地质模型的构建，使用多源数据不确定性量化方法处理地质勘探数据，结合参数化设计呈现复杂地质特征，为岩溶区隧道工程的数字化、智能化发展提供一定参考。

2. 研究现状

当前 BIM 技术在隧道工程中的创新应用已形成较完整的技术体系。安宏斌[1]、段谦等[2]研究者针对复杂隧道项目的低效 3D 建模问题，均提出了基于 BIM 技术的参数化建模方法，并利用 Revit 软件和 Dynamo 视觉编程功能优化建模步骤，提高了建模效率。宋庆军[3]在研究中重点讨论了 BIM 技术在隧道设计领域的模拟分析和风险评估功能。Fuan Lan 等[4]在研究中提出了一套统一的隧道工程 BIM 标准理论框架，并建立了成熟度模型。通过分类编码和初步研究，构建了完整的 BIM 技术标准体系。陈杰[5]利用 BIM 技术构建 3D 模型，直观、准确地再现隧道与地质构造、附属结构的空间关系，避免了常规二维设计的差错漏碰现象，并初步实现了 BIM 与 GIS 系统结合。

然而，目前的研究没有针对岩溶区做出特别设计，首先，现有模型库缺乏与溶洞相关的构件库，其次，地质 BIM 模型与隧道模型的数据耦合机制不完善，这些局限性凸显出现有 BIM 标准在岩溶地质表达方面的系统性缺陷，亟待构建具有溶洞特征库的动态耦合建模体系。

3. 隧道 BIM 模型数据标准构建

3.1. 参数化建模与标准构件库

针对现有研究的不足，构建适应岩溶区的 BIM 数据标准体系成为关键。基于 BIM 的高速公路隧道设计、施工和维护管理平台为隧道工程带来了革命性的改变[6]，隧道参数化建模技术是 BIM 在隧道工程中的核心应用之一，通过建立可调节的参数，实现对不同地质条件和工程需求的适应性建模。首先，在几何参数化建模方面，基于隧道轴线、断面尺寸、衬砌厚度等关键参数，利用 Grasshopper (GH)、Dynamo 等 BIM 软件构建可调整的隧道初步模型。其次，在地质参数建模上，结合三维地质勘察数据，构建包含岩溶分布、节理裂隙、地下水流向等信息的地质模型，并与隧道模型进行关联，以提高地质适应性分析的精准度。最后，还可以结合 GIS 系统，获取更多地质信息，包括地表面信息、及地表面建筑信息等，更精确地模拟地表情况，图 1 基于 GIS 的参数化模型展示了 GIS 系统在应用于 BIM 地质模型的基本流程。通过构建参数化隧道 BIM 模型，提高设计效率和精度，提升隧道工程的整体信息化水平。

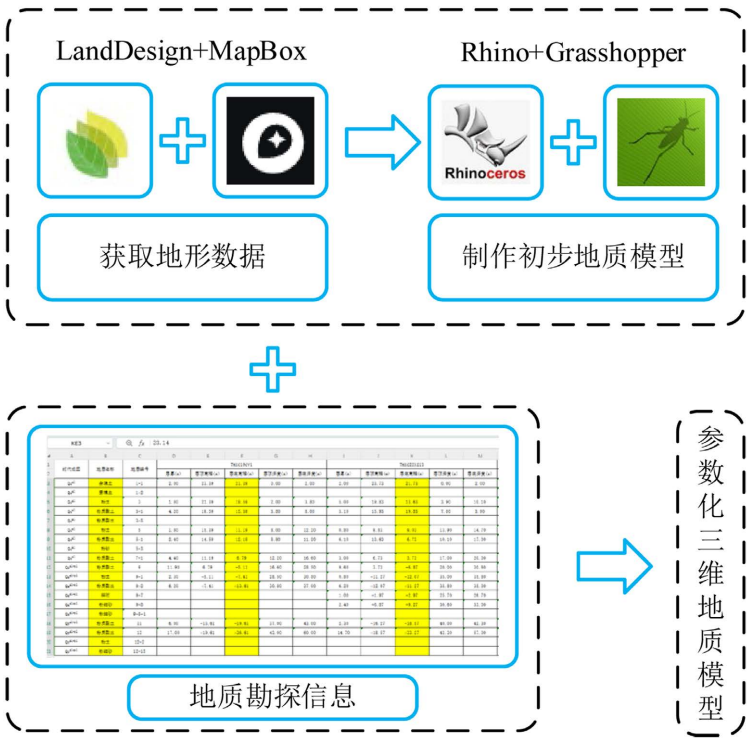


Figure 1. Workflow for GIS-Based parametric modeling
图 1. 基于 GIS 的参数化模型建模流程

标准构件库的建立是 BIM 技术在隧道工程应用中的关键环节，它通过构件分类、编码体系和数据共享，提高建模效率和标准化程度。首先，构件分类依据隧道组成部分，可分为主体结构构件、支护体系构件、防排水构件、机电设施等，确保不同专业间的数据统一管理。其次，在编码体系方面，基于《建筑信息模型分类与编码标准》(GB/T 51269-2017)，采用层级编码方式，例如“TS-001”代表隧道衬砌结构，

“TD-002”表示隧道纵向排水管，使构件信息在设计、施工及运维阶段均可被高效检索与调用，图 2 模型命名规则展示了一个模型命名的基本框架。此外，构件复用机制通过族库管理，使标准构件在不同项目中重复使用，提高模型搭建的效率，并确保数据的一致性。结合 BIM 云平台 and 协同设计系统，标准构件库能优化隧道 BIM 建模流程，实现隧道工程设计的参数化、信息化。

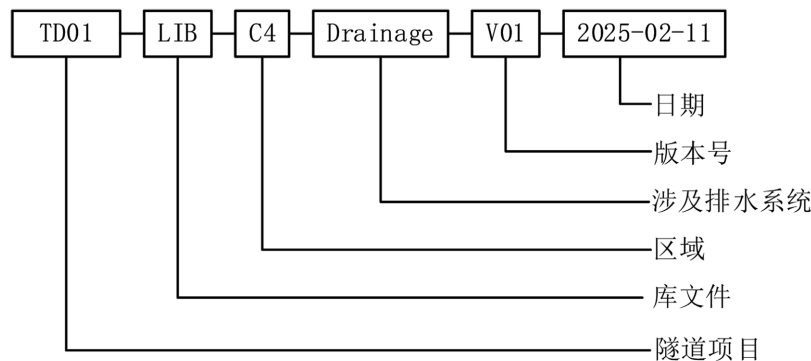


Figure 2. Model nomenclature
图 2. 模型命名规则

3.2. BIM 数据标准与信息交互

IFC 标准是 BIM 数据交换的核心格式，因其良好的公开性、数据描述的全面性已迅速成为各大 BIM 软件厂商之间实现数据交换的应用标准[7]。然而，传统 IFC 标准主要针对房建工程，在隧道工程中的应用存在适配性不足的问题，例如缺乏专门的隧道构件定义、地质数据表达能力有限等。因此，为提升 IFC 标准在隧道 BIM 应用中的适配性，需要进行优化和扩展。首先，可以结合 IFC 4.3 版本中新引入的线性基础设施扩展，包括：IFC Alignment、IFC Bridge 等，补充隧道衬砌、支护结构、排水系统等专属构件类别。其次，通过自定义属性集，增加岩溶地质信息、围岩等级、施工方法等数据，使 BIM 模型能够完整表达隧道工程的地质特征。此外，针对隧道的线性结构特性，可优化数据组织方式，如利用 IFC 实体 “IfcTunnel” 扩展隧道段落、施工环等层级结构，提高模型数据的可读性和适用性。通过 IFC 标准的优化，隧道 BIM 模型可实现更高效的信息共享和跨软件协同。

在隧道工程 BIM 应用中，多平台数据交互是实现协同工作的关键。由于隧道工程涉及地质、结构、机电等多个专业，通常需要使用不同的 BIM 软件，如 Revit、Civil 3D、Rhino + GH 等，因此需要建立高效的数据交互机制。首先，采用 IFC 标准作为基础数据格式，确保不同 BIM 平台间的模型兼容性，同时结合 API 接口实现数据映射与转换。其次，在数据协同方面，可引入 BIM 云平台，实现多方远程协作，提高数据共享效率。通过优化多平台 BIM 数据交互与协同机制，可提升隧道工程的整体数字化水平，实现各阶段的信息无缝衔接，提高工程效率与质量。这些标准为后续三维地质建模奠定了基础，其具体实施路径将在第四章展开。

4. 隧道三维工程地质模型研究

4.1. 多源数据融合与不确定性分析

在建立数据标准的基础上，三维地质建模成为技术落地的核心环节。隧道三维工程地质建模的核心挑战在于多源数据的有效融合与不确定性管理。由于地质本身的复杂性与多样性、数据的不确定性、人的认识水平、软件能力等条件，3D 地质模型的不确定性是必然存在的[8]。地质勘探数据通常包含钻孔、

地球物理探测、遥感影像及历史工程记录等异构数据源，其时空分辨率、精度及覆盖范围存在差异。为实现数据融合，需采用空间插值算法对多源数据进行标准化处理，同时通过特征提取消除冗余信息。然而，数据融合过程中存在显著的不确定性，包括测量误差、空间插值偏差以及地质体边界的模糊性等。为此，可引入蒙特卡洛模拟或贝叶斯网络方法，以量化不同数据源的不确定性对模型输出的影响。例如，可利用概率密度函数刻画岩层厚度的分布特征，假设某区域的岩层厚度符合正态分布：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

其中：

μ ——均值。

σ ——标准差；

x ——岩层厚度；

可根据正态分布的累积分布函数计算特定厚度范围内的出现概率，从而更精确地评估地质条件的不确定性。研究显示，不确定性分析可提升模型的可信度，其结果还可一定程度上模拟风险敏感区域，并为隧道设计提供概率化支持。

地质勘探数据的整合与优化是构建高精度三维地质模型的基础。针对隧道工程中常见的岩溶地质问题，需通过多尺度数据融合技术整合钻孔岩芯、跨孔 CT、地面地质雷达等勘探数据。首先，采用小波变换与主成分分析对原始数据进行降噪与特征增强，消除仪器误差与人为干扰；其次，基于三维网格剖分技术建立空间拓扑关系，通过反距离加权或径向基函数插值填补数据空白区。例如，假设岩层厚度满足反距离加权插值公式：

$$Z(x) = \frac{\sum \frac{Z_i}{d(x, x_i)^2}}{\sum \frac{1}{d(x, x_i)^2}}$$

其中：

Z_i ——第 i 个数据点的值；

$d(x, x_i)$ ——目标点与第 i 个数据点之间的距离。

可据此计算空白区域的岩层厚度估计值，提高地质模型的完整度。

4.2. 隧道 BIM 模型建模技术

隧道 BIM 建模技术的核心在于通过参数化设计与三维地质模型的深度融合。基于济南轨道交通 7 号线科创科创中心至济北站地铁项目，对本文所提及的应用方法进行验证。在建模上，首先结合 GIS 系统，建立地表面模型，如图 3 地表面模型所示，然后，基于 3.1 节的方法，对地质勘察数据进行处理，并以此为依据构建三维地质模型，模拟地层分布、岩性特征及构造信息，图 4 地质三维模型展示了部分地质模型；同时，采用 BIM 软件建立隧道主体结构模型，包括支护体系、衬砌、排水系统等构件，如图 5 部分隧道结构模型所示。

地质模型与隧道模型的协同需解决数据格式差异与模型精度匹配问题，通过统一的数据接口实现地质模型与结构模型的动态关联。本案例中通过使用 Rhino Inside Revit (RIR) 插件达到这一目的，RIR 将 Rhino 和 GH 集成到 Autodesk Revit® 中，整合了两者的 API 接口，可快速实现模型数据互通，例如，GH 地质模型中岩层参数可实时映射至 BIM 模型，优化隧道支护设计。此外，更进一步的数据协同还体现在

施工阶段的实时数据交互，如通过激光扫描或监测传感器获取的现场数据反馈至 BIM 平台，支持模型动态更新。这一过程中，需建立多专业协同机制，确保地质、结构、施工等团队基于同一模型平台进行数据共享与决策优化。

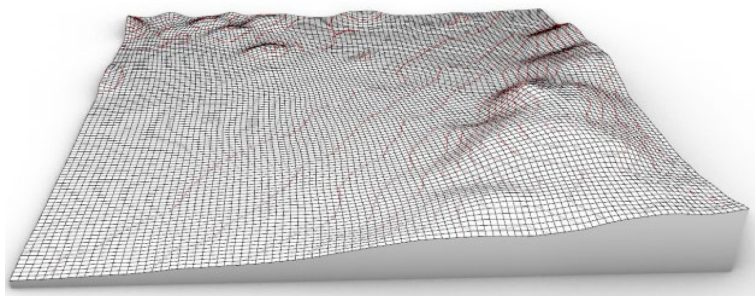


Figure 3. Ground surface model
图 3. 地表面模型

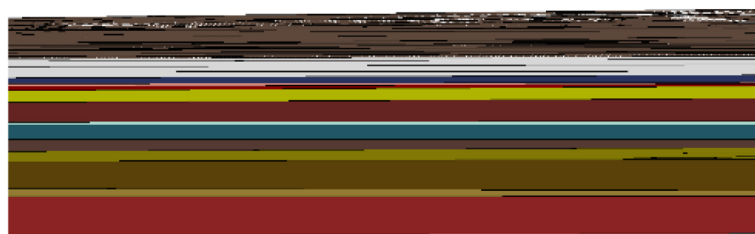


Figure 4. Geological 3D model
图 4. 地质三维模型

在信息融合过程中，采用统一的数据接口技术，实现地质模型与结构模型间的实时数据交互和同步更新，确保设计、施工及后续运营管理信息的一致性。通过多轮协同校核，对模型进行质量检验和精细化修正，最终形成一个集成了各专业信息、可更新的 BIM 数字模型，为工程设计提供一定的支持。

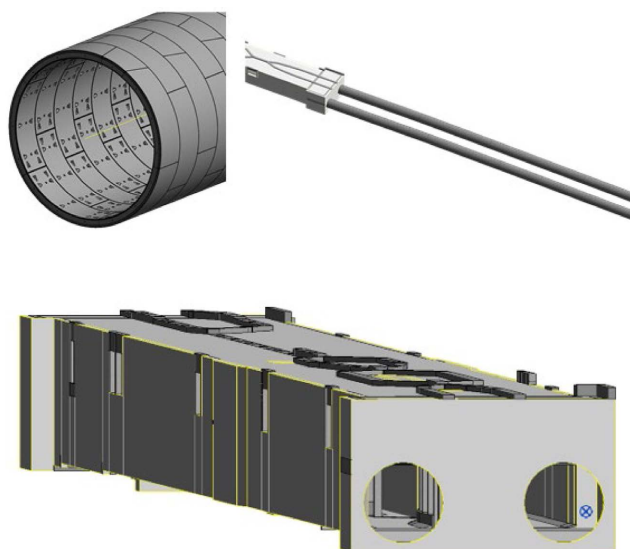


Figure 5. Partial tunnel structure model
图 5. 部分隧道结构模型

5. 结语

BIM 技术与三维地质建模的有机融合, 为岩溶区隧道工程提供了创新性解决方案。研究表明, 通过构建包含溶洞特征构件的标准化族库体系, 建立地质模型与结构设计的动态耦合机制, 并结合多源数据融合算法, 可在一定程度上提升复杂地质条件下的建模精度与协同效率。工程案例表明, 该方法在信息集成度方面较传统方法具有优势, 为岩溶区隧道工程数字化设计提供了一定参考。随着智能算法的深度介入, 未来有望实现地质参数自适应修正的智能建模体系, 推动隧道工程全生命周期的动态决策能力发展, 为特殊地质条件下的基础设施建设开辟新的技术路径。

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] 安宏斌. 基于 BIM 技术的盾构隧道参数化建模研究和应用[J]. 市政技术, 2024, 42(9): 160-168.
- [2] 段谦, 周然, 邓虎. 基于 BIM 技术的盾构隧道三维参数化建模[J]. 广东土木与, 2025, 32(1): 17-19.
- [3] 宋庆军. BIM 技术在隧道施工工程中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(28): 163-165.
- [4] Lan, F., Xu, X., Xu, L., *et al.* (2023) Research on BIM Technology Standardization and Information Management of Tunnel Engineering Based on the Maturity and Standardity Theory Framework. *Buildings*, **13**, 2373. <https://doi.org/10.3390/buildings13092373>
- [5] 陈杰. 铁路山岭隧道 BIM 设计应用研究[J]. 铁道勘测与设计, 2017(1): 20-23.
- [6] Chen, L., Lu, S., and Zhao, Q. (2019) Research on BIM-Based Highway Tunnel Design, Construction and Maintenance Management Platform. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **218**, Article 012124. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/218/1/012124>
- [7] 刘国平, 邱鑫, 吴红艳, 等. 基于 IFC 的 BIM 数据融合技术与实践[J]. 人民长江, 2024, 55(S2): 293-297.
- [8] 张佳楠. 隧道地质勘察 BIM 三维建模技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(1): 30-32+37.