文章编号：1671-8496-(2026)-04-0026-06

基于高精度三维仿真的高速公路运行模拟研究

张于平[1]，马林[1]，张玉娇[2]
（1. 广东省公路建设有限公司，广东 广州 510699；2. 广东交通职业技术学院，广东 广州 510650）

摘　要：随着高速公路改扩建方案愈加复杂，方案论证对定量化、精细化及可视化的要求更高。本文探索融合倾斜摄影、BIM、Transmodeler交通仿真等多元技术的方案评估方法，提升高速公路运行状态模拟的精度及可视化效果，以克服单一技术在高速公路项目中应用的不足。以广深高速公路改扩建工程为例，通过相关技术的融合，整合倾斜摄影数据、设计方案BIM数据、车辆行驶仿真数据，构建高精度三维仿真模型，为工程方案的可靠性评估及精细化展示提供支撑。

关键词：交通仿真；BIM；Transmodeler；倾斜摄影；高速公路；内外分幅交通组织
中图分类号：U491.14　　**文献标识码**：A

Research on the Simulation of Expressway Operation Based on High-Precision 3D Simulation

ZHANG Yuping[1], MA Lin[1], ZHANG Yujiao[2]
(1. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510699, Guangdong, China;
2. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: With the increasing complexity of expressway renovation and expansion plans, the requirements for quantification, refinement, and visualization in scheme demonstration have become more stringent. This paper explores a multi-technology fusion approach integrating oblique photography, BIM, and Transmodeler traffic simulation to evaluate expressway renovation schemes, aiming to improve the accuracy and visualization effect of expressway operation status simulation, thereby overcoming the limitations of single-technology applications in expressway projects. Taking the Guangzhou-Shenzhen Expressway renovation and expansion project as a case study, this research integrates surrounding background oblique photography data, design scheme BIM data, and vehicle trajectory simulation data to construct a high-precision 3D simulation model, providing effective support for reliability evaluation and refined display of engineering schemes.

Key words: traffic simulation; BIM; Transmodeler; oblique photography; expressway; inner and outer carriageways traffic organization

1 引言

高速公路是综合交通运输网络的重要组成部分，具有安全、高效及舒适等特征，随着人民群众对高质量出行要求的提升，高速公路出行需求日益旺盛，导致城镇化地区高速公路出行日益拥堵。为实现交通供给与需求匹配，各地区逐步开展高速公路改扩建及拥堵治理等工作。如何评估改造方案的合理性是方案研究的重要工作之一，但基于单一技术的工程方案评估手段已经越来越难以满足新的发展需求，因此基于倾斜摄影、BIM（building information modeling）及交通仿真等多元技术融合的运行状态模拟及评估，是高速公路方案研究高质量发展的重要抓手。

收稿日期：2025-12-05
作者简介：张于平，高级工程师，硕士，研究方向为道路设计及工程管理等

近年来，BIM 与交通仿真技术的融合应用逐渐成为道路交通工程领域的研究热点。罗桑等[1]提出了一种基于 BIM 与 Vissim 微观仿真的双向交通导改模拟方法。王欣南等[2]开发了基于 BIM 的道路驾驶模拟环境建立方法。黄颖铭等[3]依托 BIM 及 Vissim 对厦门鹭江道市政项目改扩建方案进行了评估比选。邓博等[4]基于 BIM 交通仿真技术对城市交通疏堵工程进行评价研究。姜荣斌等[5]基于 BIM 及 Vissim 等多元技术的融合，优化了京沪高速罗庄互通的交通组织方案。同时倾斜摄影与 BIM 的融合建模技术已在城市三维重建中得到广泛应用[6]，但在此场景下未与交通微观仿真进行深度集成。李谦等[7]在 Unity3D 引擎增加仿真交通流，结合 Vissim 交通仿真数据展示交通组织方案对交通流的影响。

现有研究主要集中在中小规模道路场景，对于长距离干线通道（50 km 以上）的研究相对不足。受限于仿真 OD 数据获取难度大及三维精度难以保障等难点，在多技术深度融合及三维可视化仿真效果的研究应用较为匮乏。同时，BIM + 交通仿真的应用主要集中在 BIM 与 Vissim 的技术融合，对于 BIM 与 TransModeler 仿真软件的融合技术应用研究较少。本研究以广州至深圳高速公路改扩建工程为例，通过建立 BIM、倾斜摄影与 TransModeler 交通仿真的技术融合路径，开展高精度大规模路网运行模拟应用研究，并以广深高速公路“2 + 3”内外分幅交通组织方案为例，构建适用于长距离特殊交通组织方案的高精度三维仿真。

2 技术融合研究

2.1 基础技术

无人机倾斜摄影技术是指在无人机上搭载多镜头的倾斜相机，对指定区域进行全方位的影像获取及处理，进而获得指定区域地物表面丰富的纹理数据。其中，利用镜头垂直拍摄得到的像片称为垂直影像，与地面成不同角度拍摄得到的像片称为倾斜影像，基于全方位的纹理数据，经处理后建立逼真倾斜摄影三维模型[6]。

BIM 技术是一种以建筑工程项目的各项相关信息数据为基础，建立建筑模型的数字化工具，具有较好的可视化效果[8]。BIM 技术已经广泛应用在高速公路设计、施工等阶段，通过提升沟通效率有效加快项目进度；同时，它还提高了工程方案计算的准确性，实现了对项目规模精细化把控。

交通仿真是以静态路网模型、交通管控措施等为基础，通过驾驶行为模型模拟真实场景下车辆在路网中的交互作用和行驶轨迹[9]。其底层模型主要包括车辆产生模型、车辆跟驰模型和换道模型等。常用的交通仿真软件有 Vissim、TransModeler、Paramics 等。

2.2 交通仿真软件选取

本研究主要面向的是长距离路网、特殊交通组织方案和复杂交通运行数据，选用的仿真软件应适用于长距离路网构建，同时需要对接宏观模型的复杂 OD 数据，故选择 Transmodeler 作为交通仿真软件，其在复杂交通数据承载、大规模路网仿真效率及特殊交通组织模式（如内外分幅交织模式）具有显著优势，仿真软件的主要应用场景及优势对比如表 1 所示。

表 1　仿真软件应用场景及优势对比

微观仿真软件	主要应用场景	优势
Vissim	1. 路段、交叉口交通改善评价、交通影响分析 2. 交叉口信号设计和优化 3. 公交优先方案分析检验	1. 具有多模式的交通出行方式仿真功能 2. 驾驶模型设置得较为完善 3. 对多种信号控制的模拟功能较为成熟 4. 提供与外部交通控制策略的接口
Paramics	1. 交通管理与控制 2. 交通控制中心的仿真 3. 为出行信息提供预测和智能化导航	1. 实时动态的三维可视化用户界面 2. 对单一车辆进行微观处理的能力 3. 功能强大的应用程序接口
TransModeler	1. 从高速公路到城市中心街道各类路网的交通规划 2. 交通管理和控制方案、信号控制的影响分析 3. 公共交通管理方案评估 4. 交通事故影响评估	1. 与 GIS 技术有机结合，可以实现宏观/中观/微观混合仿真，适用于路网里程长、建模范围大的项目 2. 与 TransCAD 无缝衔接，将规划的成果直接转换到微观仿真模型 3. 可便捷设置标线内外分幅等特殊交通组织模式 4. 直观重现真实世界的交通运行状况，在全世界范围内被广泛应用，市场反馈好

2.3 关键技术

2.3.1 宏中微观交通流数据的一体贯通

本研究面向立交互通多且复杂的长距离干线

通道，对于数据精度要求较高，因此首先基于Transcad构建宏观路网模型，预测未来区域出行OD及路网流量分配结果，再将宏观区域OD转换为路段级OD，依赖TransCAD和TransModeler软件的无缝衔接，实现数据传递的一体化贯通，支撑精细化、便捷化的中观及微观的交通仿真，数据贯通流程如图1所示。

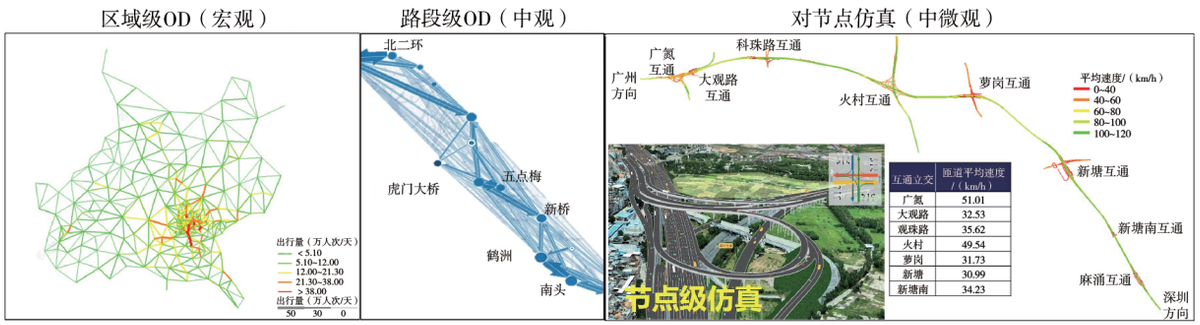


图1　出行数据一体化贯通融合

2.3.2 技术融合路径及算法

（1）技术流程：高精度仿真模型的构建，首先需依托无人机进行倾斜摄影，获取项目周边地形地貌、周边建筑等信息，构建倾斜摄影三维模型；然后根据设计纬地数据和二维图纸，搭建项目BIM工程模型，将BIM模型和倾斜摄影实景模型共同导入三维电子沙盘，输入TransModeler仿真车辆轨迹，对生成的车辆进行自动匹配，保证车辆模型和三维模型空间上的吻合，通过三维电子沙盘展示高精度仿真，技术路线如图2所示。

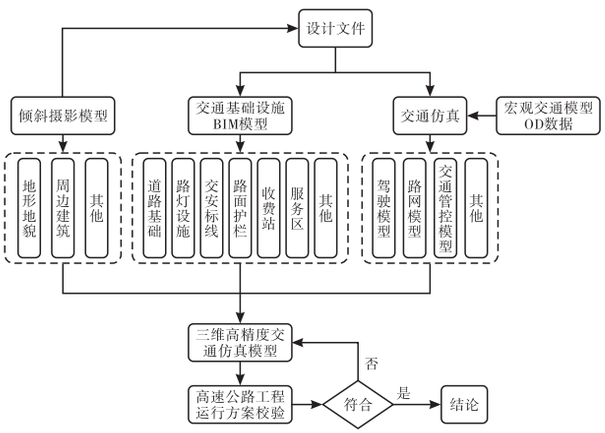


图2　技术融合路径图

（2）数据融合模型：相较于二维交通仿真模型，多源数据融合是重要工作之一，本研究基于七参数布尔莎模型，实现各类数据在空间上的精准匹配，具体实现工具是自研融合处理平台BimMaster，模型算法原理如下，BimMaster操作界面如图3所示。

①空间融合模型：将倾斜摄影模型坐标系、BIM模型坐标系与交通仿真坐标系统一至CGCS2000国家大地坐标系。设倾斜摄影点集为$P_{\text{photo}} = \{P_1, P_2, \cdots P_m\}$，BIM模型点集为$Q_{\text{bim}} = \{q_1, q_2, \cdots q_n\}$，仿真轨迹点集为$R_{\text{sim}} = \{r_1, r_2, \cdots r_k\}$，通过七参数布尔莎模型实现坐标转换，具体如公式（1）所示。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{target}} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+m) \cdot \boldsymbol{R} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{source}} \tag{1}$$

其中，ΔX，ΔY，ΔZ为平移参数，m为尺度因子，$\boldsymbol{R}$为旋转矩阵。

②时间对齐要求：仿真轨迹数据以0.1 s为时间步长输出，倾斜摄影与BIM为静态模型，采用时间戳同步机制进行匹配。

③融合误差控制要求：将融合误差控制在0.05 m内以满足高精度仿真要求。



图3　BimMaster软件界面

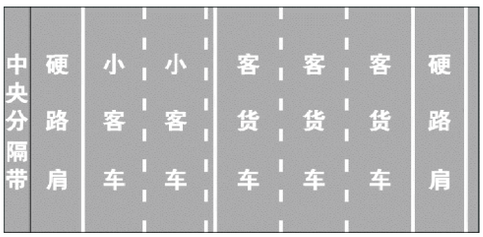
3 应用案例

3.1 工程概况

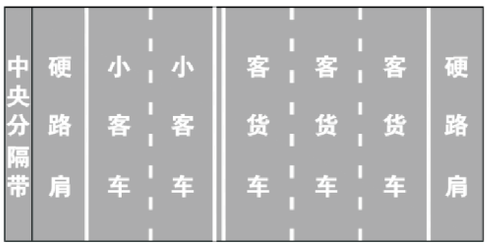
京港澳高速公路广州至深圳段全长118.2 km，其中广州至东莞段全长71.126 km，以6车道为

主，为提升广深高速公路的运行效率，广深高速公路拟扩建为双向 10 车道，并设置左侧硬路肩，项目标准断面宽度为 52.5 m，局部路段采用分离式断面。

由于改扩建方案为 10 车道的多车道超宽断面，车辆换道将对整体的运行安全及效率产生较大的影响，为减少运行交织，拟采用“2 + 3”的交通组织模式，即采用标线设置实现内幅 2 车道与外幅 3 车道的软隔离，根据不同路段特征，可采用的方案有：外幅 3 车道限制进入内幅 2 车道、外幅车道与内幅车道不互通、内幅 2 车道限制进入外幅 3 车道等，部分方案如图 4 所示。



（a）外幅 3 车道限制进入内幅 2 车道交组方案



（b）外幅车道与内幅车道不互通交组方案

图 4　交通组织模式示意方案

3.2 高精度三维模型搭建

依托无人机搭载多镜头的倾斜相机，对广深高速公路沿线进行数据采集，获取广深高速周边建筑及地形等相关倾斜影像数据，建立倾斜摄影三维数据；基于工程设计方案，依托三维引擎控件（OpenGL）[10]，通过解析路线设计信息，构造三维交通设施模型，实现二维文件向三维 BIM 文件的转换。

3.3 交通仿真模型搭建

仿真路网模型搭建：为有效提升仿真路网的准确性，同时保障交通仿真数据与倾斜摄影数据及 BIM 数据的高匹配性，基于自主研发的三维引擎控件，直接将纬地设计文件转换为仿真软件可读取的路网，数据转换前后情况如图 5 所示。

仿真车流模型搭建：首先基于宏观路网模型，生成路段级 OD 矩阵（路段级 OD 如图 6 所示），输入 TransModeler，精准完整还原车流行驶路径；其次结合交通组织方案，设定广深高速主线路段、出入口匝道、互通立交以及部分重点相交道路的交通运行措施，包含换道限制、限速、收费站通过时间等内容。



（a）CAD 设计线位示意图



（b）仿真路网示意图

图 5　设计路线转仿真路网

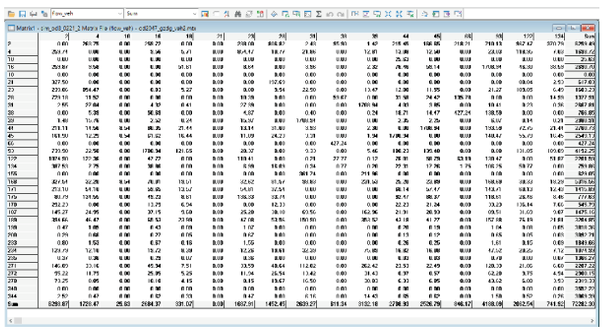


图 6　路段级车辆运行 OD 数据

3.4 高精度三维交通仿真模型融合

依托 BimMaster，对交通基础设施 BIM 模型、倾斜摄影实景模型和交通仿真的轨迹数据进行自动空间校核，保证数据匹配精度，最后利用三维电子沙盘进行成果展示，得到最终交通仿真效果如图 7 所示。



图 7　仿真效果示意图

3.5 仿真结果分析

根据交通仿真结果，在限速为120 km/h的情况下，改扩建后项目广州方向内幅平均速度为108.6 km/h，外幅平均速度为88.94 km/h；东莞方向内幅平均速度为109.6 km/h，外幅平均速度为88.5 km/h，项目平均密度为15.08 pcu/km/ln，整体服务水平为C级，具体见表2。在“2+3”的交通组织模式下，项目总体运行效果良好，但存在局部内外幅转换段的使用率过高或过低的问题，如表3所示，因此建议进一步优化局部路段内外幅转换段的设置。

表2 “2+3”交通组织模式总体运行指标

路段区间	往广州方向速度（km/h）		往东莞方向速度（km/h）		平均密度（pcu/km/ln）	服务等级
	内幅	外幅	内幅	外幅		
科珠路—火村	107.72	92.46	108.26	91.86	15.45	C
火村—萝岗	108.16	89.71	107.81	87.83	14.52	C
……	……	……	……	……	……	
太平—五点梅	106.42	85.97	108.50	81.94	13.43	C
五点梅—长安	106.13	89.49	110.27	87.91	15.73	C
平均值	108.60	88.94	109.06	88.53	15.08	C

表3 “2+3”交通组织模式内外幅转换交通量情况

行驶方向为广州			行驶方向为东莞		
换道区间	换道方向	（外幅转入比例/内幅转出比例）/%	换道区间	换道方向	（外幅转入比例/内幅转出比例）/%
萝岗—新塘	外转内	15.5	新塘—萝岗	外转内	24.5
萝岗—新塘	内转外	53.2	新塘—萝岗	内转外	36.4
望牛墩—麻涌	外转内	13.6	麻涌—望牛墩	外转内	11.1
望牛墩—麻涌	内转外	29.7	麻涌—望牛墩	内转外	54.1
……	……	……	……	……	……
新联互通	内转外	48.1	太平互通	外转内	16.4
太平互通	外转内	36.0	太平—五点梅	内转外	46.9
五点梅—太平	内转外	58.1	五点梅—长安	内转外	41.4

注：外幅转入比例为转出外幅交通量与外幅总交通量之比，内幅转出比例为内幅转出交通量与内幅总交通量之比。

通过与常规的5车道混行模式进行仿真对比，“2+3”分幅交通组织模式的平均运行速度提升11.6%，单向平均断面通行能力提升6.4%，车辆走完全程的平均延误下降9%，因此“2+3”交通组织模式通过减少车辆之间的交织冲突，有效提升了道路运行效率，具体对比如表4所示。

表4 常规5车道混行模式与“2+3”分幅交通组织模式的仿真结果对比

仿真结果	平均速度（km/h）	平均密度（pcu/km/ln）	单向平均断面通行能力（pcu/h）	全程平均延误时间（秒/车）
5车道混行模式	83.8	16.21	9 068	714
“2+3”分幅交通组织模型	93.5	15.08	9 644	650
提升比例	11.58%	−6.97%	6.35%	−8.96%

3.6 本方法与二维仿真的对比

本方法与二维仿真对比，主要有以下优势：首先道路设施的空间误差显著下降，控制在0.05 m以内；其次可视化效果明显提升，不仅提高了业主对于方案的认可度，还大幅缩短了相关人员对于方案的理解时间；基于TransCAD和TransModeler软件的无缝衔接，实现了复杂OD数据的快速贯通，仿真OD车流数据准确率显著提升，具体指标如表5所示。

表5 本方法与传统二维仿真的对比

方法	空间误差/m	业主认可度（1~10分）	方案理解时间/（min/立交）	导入OD车流数据准确率/%
传统二维仿真	0.1以上	6	20	90（存在不可控误差）
本方法（三维融合仿真）	0.05	9	8	99

4 结论

本文通过研究打通倾斜摄影、BIM及TransModeler交通仿真等技术的融合路径，为高速公路复杂交通组织方案评估提供高精度的模拟技术手段，同时以广深高速公路广州及东莞段改扩建工程为例，验证了实施路径的可行性，主要结论：基于设计文件转换的仿真路网，可有效提升交通仿真的精度和模型可信度；基于

TransCAD 和 TransModeler 的 OD 数据一体化贯通，可有效提升运行数据输入的准确性；多元技术融合的高精度三维仿真，对于提升复杂方案的专业性、汇报的可理解性具有重要作用，可有效提升相关参与方对项目的认可度，进而对整个设计方案的推动具有积极的作用。

本研究仍存在以下不足：驾驶行为模型的标定基于现状数据，需进一步验证改扩建后的驾驶行为标定；实现高精度三维仿真，依赖多套软件协同，需多次数据的导出及融合。在今后的研究中，需进一步标定复杂交通组织模式下车辆运行特征和自动驾驶车辆特征参数，进一步优化交通驾驶行为模型；同时推动轻量化三维渲染技术的应用，降低硬件门槛并提升交互性；交通仿真评估中需构建适宜内外幅交通组织方案的安全性评价指标。

参考文献：

[1]罗桑,姚金悦,严紫薇,等. 一种基于 BIM 与 VISSIM 微观仿真的双向交通导改模拟方法:202110339138.4[P]. 2021-07-06.
[2]王欣南,黄炎,陈中治,等. 一种基于 BIM 的道路驾驶模拟环境建立方法:202110798420.9[P]. 2022-05-20.
[3]黄颖铭,柯博欣,戴剑敏,等. BIM + 交通仿真在市政交通项目中的应用研究[J]. 武汉交通职业学院学报,2024,26(1):118-124.
[4]邓博,赵红征,沈伯昭,等. 基于 BIM 交通仿真技术的交通疏堵工程设计评价方法研究[J]. 交通工程,2023,23(4):29-34.
[5]姜荣斌,朱星. 基于 BIM 技术的公路工程交通组织设计模拟研究[J]. 江苏科技信息,2021,38(14):41-44.
[6]罗瑶,莫文波,颜紫科. 倾斜摄影测量与 BIM 三维建模集成技术的研究与应用[J]. 测绘地理信息,2020,45(4):40-45,126.
[7]李谦,周鹏光,马天奕. 基于 Unity3D 的立体枢纽交通组织仿真分析[J]. 公路,2024,69(7):26-30.
[8]江佳鑫,潘健军,陈越文,等. BIM + GIS 技术在高速公路市政化改造中的应用[J]. 施工技术(中英文),2024,53(21):33-36.
[9]李嘉,龚瑞铭,李洁,等. 基于交通仿真的高速公路桥隧结合段交通安全评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(4):82-94.
[10]朱向飞. 基于 OpenGL 的客运枢纽三维仿真子系统的设计与实现[D]. 长春:吉林大学,2018.

(上接第 18 页)

参考文献：

[1]程雪松,张雨明,张天奇,等. 软土小直径顶管隧道施工对周边环境影响研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):19-24.
[2]张奎. 邻近既有建筑深基坑开挖变形特性及支护结构优化分析[J/OL]. 施工技术(中英文),(2026-03-25)[2026-03-30]. https://link.cnki.net/urlid/10.1768.tu.20260325.1613.024.
[3]黄建华,邓宇辉,柯静雯. 滨海软土深基坑开挖对近邻地铁车站与盾构隧道影响特性研究[J/OL]. 铁道标准设计,(2025-06-13)[2026-03-30]. https://doi.org/10.13238/j.issn.1004 - 2954.202506130005.
[4]宋许根,程雪松,衣凡,等. 工程桩对软土地区窄基坑稳定性的影响研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):74-80.
[5]梁艳春. 富水软土地基深基坑开挖对周边建筑的影响及沉降监测分析[J]. 科学技术创新,2025(21):174-178.
[6]王伟,邓松峰. 深厚软土区邻近地铁深基坑工程关键技术研究[J]. 江苏建筑,2024(5):120-126.
[7]杨潇,刘波. 软土地层深基坑施工对邻近地铁车站区间的影响分析[J]. 工程技术研究,2024,9(18):12-14.
[8]王俊,邱豪磊,宋林丰,等. 软土地区邻近地下结构深基坑开挖环境效应分析[J]. 工程质量,2025,43(9):68-74.
[9]朱剑钦. 福州软土深基坑工程全过程变形特性与控制研究[J]. 福建建筑,2025(9):51-58.
[10]武玉山,畅建伟,马玉龙,等. 佛山软土地区深基坑开挖变形特性研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(11):53-57.
[11]姚志雄,方佳斌,蔡亦来,等. 滨海软土地层邻近高铁桥的深基坑支护结构力学性状及对环境的影响[J]. 城市轨道交通研究,2025,28(8):65-71.
[12]张治国,万启蒙,李骏杰,等. 流变软土地层深基坑开挖对既有车站影响与加固效应分析:以上海金桥地铁上盖项目为例[J]. 隧道建设(中英文),2025,45(S2):97-106.
[13]马建峰. 富水软土地层轨道交通车站深基坑工程施工影响分析[J]. 隧道与轨道交通,2025(4):11-15,73.
[14]林文龙. 软土地区地下五层超深地铁车站基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):169-175.
[15]罗玉强. 复杂地基软土深基坑岩土工程支护设计技术探究[J]. 现代工程科技,2024,3(23):69-72.