

基于BIM技术的地铁隧道结构监测系统应用研究

刘建华¹, 樊振阳¹, 陈子俊¹, 林晋铿², 胡弘毅³, 符铨砂³

(1.广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510290; 2.广东星层建筑科技股份有限公司, 广东 广州 510000;

3.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要:地铁隧道工程施工和运营过程中的实时可视化状态监管是提升地铁隧道工程安全管理水平的关键。该文基于BIM技术搭建地铁监测管理系统,通过现场监测设备实时监测控制结构的倾角、应力、位移等参数,通过数据库技术关联监测数据与轻量化BIM模型,实时显示隧道各结构构件力学响应状态,从而实现海量监测数据可视化,并通过设置预警阈值,对隧道的结构安全进行预警。该系统应用于广州市新白云机场第二高速公路项目的地铁隧道结构监测中,结果表明:基于BIM技术的智能地铁监测系统,能够实现地铁隧道安全状况的实时可视化监测,及时对隧道结构存在的安全隐患进行预警,较传统人工定时巡检检测而言,效率大大提高,对隧道施工与运营安全具有重要意义。

关键词:隧道工程;BIM技术;监测系统;信息化管理

中图分类号:U456

文献标志码:A

0 引言

近年来,中国地铁隧道建设数量与规模不断提高,施工和运营管理过程的监测技术发展非常迅速。但由于缺少对施工和运营管理中监测收集到的信息化数据的系统管理平台,许多公路建设项目仍采用传统的建设与管理方式,无法从海量监测数据中有效查阅提取相关信息,现存数据管理模式难以满足新时期国家和行业对公路等基础建设项目“可持续与集约化发展”“全生命周期、精细化管理”等宏观要求。

建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术近年在土木行业的各个领域迅速发展。BIM模型具有信息化和三维可视化的特点,因此BIM技术作为提升中国公路设计、建设与管理综合技术水平的重要工具,被广泛应用于公路行业。许多研究者展开对BIM技术的研究,开发一系列可视化信息管理系统。李红学等^[1]、夏子立等^[2]将BIM引入桥梁工程中,基于桥梁BIM模型对施工方案与施工管理进行优化,减少返工提高施工效率;徐萍飞

等^[3]、朱兵洁等^[4]对桥梁信息智能管理系统进行研究,通过开发基于Web的信息集成管理系统整合了BIM模型数据与监测数据,便于不同职能部门对数据进行提取应用。针对隧道工程勘察与监测问题,黄廷等^[5]基于BIM技术针对公路隧道设计开发了一套运维管理系统,为隧道运维管理提供直观便捷的方法;黄忠财等^[6]、高建新等^[7]基于BIM技术提出岩溶隧道的建模方法,为施工处置方案提供支持;廖峻等^[8]利用BIM建模软件构建金门特长隧道三维可视化模型,并整合了勘察设计信息,方便工程人员快速查找结构信息。现阶段各方研究主要集中在提取整合设计阶段信息数据,建立基于BIM模型的可视化信息化平台,三维模型的优势在于信息的快速查找与精准定位,为设计与施工提供可视化交流平台,但是在施工监测方面BIM模型的使用具有局限性,现在的建模方法仅存储设计阶段的模型信息,无法实时提供隧道结构的受力状况。本文在构建地铁隧道三维模型的基础上,通过传感器实时采集实际隧道工程构件的受力状况,并关联到BIM模型,实现隧道结构状态的实时可视化监测。

本文结合广州市新白云机场第二高速公路项

收稿日期:2023-03-02

基金项目:广州新白云国际机场第二高速公路项目(编号:JG-GCKY-01-004)

作者简介:刘建华,男,博士.E-mail:51259878@qq.com

目,研究开发了地铁隧道监测系统。通过施工现场及运营过程中在隧道结构构件中埋置的传感设备收集构件应力应变数据、土压力数据、结构整体形变和偏移数据等,建立施工运营数据库,并关联数据库信息与隧道BIM模型构件,实现施工运营数据可视化与实时化,为地铁隧道的施工监控提供一种可行方案。

1 地铁隧道BIM的构建

地铁隧道BIM模型作为地铁监测系统数据可视化的基础,其准确性和精度非常重要。由于隧道工程具有构件繁多、环境复杂的特点,使隧道建模过程繁琐复杂,费时费力,效率低。为了实现隧道BIM模型的快速构建,本文通过从二维设计图纸中分类整理和提取隧道各个构件的尺寸数据和设计参数,构建隧道BIM数据库,采用参数化建模的方法,直接调用隧道数据库中相关的隧道构件数据,实现精准高效的隧道BIM建模。

1.1 BIM建模平台

BIM技术由Autodesk公司于2002年提出。Autodesk公司开发了广泛应用于土木工程的BIM建模软件Revit,基于Revit构建的BIM模型数据能方便地在Autodesk系列软件共享,同时基于Revit开发的建模插件Dynamo为桥梁BIM快速构建提供一种可靠的工具。因此本研究采用Autodesk Revit作为建模工具。

1.2 构件编码与隧道BIM数据库

基于Revit构建的隧道BIM模型的数据来源是二维设计图纸,模型可导出为xml文件格式,共享至Naviswork软件中进行渲染或漫游展示。在地铁监测系统中导入的隧道BIM模型是压缩后的xml文件。为建立有序简洁的BIM数据库,实现隧道BIM模型的快速构建,需要先对隧道BIM各构件进行分类与数据整合。

BIM构件编码是实现快速建模与数据关联的基础,是隧道BIM数据库的重要组成部分。系统将隧道BIM划分为“总体信息”“隧道围岩”“洞门结构”“洞身结构”“附属结构”“施工方案”等模块,根据二维设计图纸信息,再细化至结构构件分类,如洞门结构根据洞门截面形式分类,分类细则如表1所示。细化分类隧道BIM构件的目的一方面是分类整理构件

设计信息,整合为Excel数据库后通过Revit平台导入数据库数据实现隧道BIM自适应快速拼接^[5];另一方面是便于将BIM模型各构件的监测点进行分类编码,与监测设备对应关联,实现监测系统与BIM模型耦合,快速定位构件,查询构件实时监测数据。监测点编码方式根据实际工程需要,以字母数字组合代表具体构件分类属性与位置,组合顺序为“桥梁缩写+轴号+地铁走向+断面编号+标识符+点序号”。其中,标识符A、B分别标识紧邻桥梁桩基的断面、远离桩基的断面;根据城市轨道交通工程监测技术规范^[9]对既有隧道结构的竖向位移、水平位移与净空收敛进行检测,监测断面间距为10 m,各隧道断面布设监测点包括:隧道拱脚、侧墙中点以及隧道结构顶部,如图1所示。

表1 隧道BIM构件分类

数据库子类	数据内容	数据类型
公路隧道数据库	总体信息	隧道长度
		桩号坐标
	隧道围岩	各层围岩类型
		各层围岩厚度
		洞门形式
	隧道洞门结构	洞门材质
		洞门尺寸
		洞门支护
		衬砌结构材质
	隧道洞身结构	洞身尺寸
		洞身支护
	隧道附属结构	通风系统
		照明系统

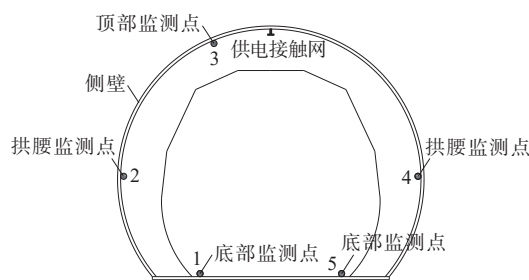


图1 监测断面点位示意图

根据编码方式,如G30YA5,表示某国道G高架桥第30轴对应地铁隧道右线紧邻桩基的断面第5号测点。根据广州市新白云机场第二高速公路项目需要,该项目地铁隧道临近桥梁有2座,“G”表示国道G106。

对隧道BIM各构件完成分类,监测点位编码后,需要整合各构件设计数据,构建Excel隧道数据库。每一种构件的数据类型有3类,首先是空间位置数据,提取方法有从逐桩坐标表和纵断面设计图读取,或从CAD设计文件直接获取构件的X、Y、Z坐标信息;第2类数据是几何尺寸数据,由设计详图读取,以

洞身结构为例,需要整理如洞身宽度、高度、中墙厚度等尺寸数据;最后是材质数据,材质数据属于文本数据,根据构造物材料类型选择相应材质输入,所有数据按编码分类整合至Excel数据表,后续可通过Revit直接调用Excel数据库数据。隧道洞身结构数据库部分如表2所示。

表2 洞身结构数据库部分数据

桩号	i/%	底板			垫层	中墙		顶板	
		底板左半宽/m	底板右半宽/m	底板厚度/m	垫层距隧道面高差/m	厚度/m	净高/m	隧道高度/m	厚度/m
475	-4	17.35	17.35	1.2	2.35	0.8	5.4	6.65	1.2
495	-4	17.35	17.35	1.2	2.35	0.8	5.4	6.65	1.2
515	-4	17.35	17.35	1.2	2.35	0.8	5.4	6.65	1.2

1.3 基于Revit的隧道BIM构建过程

考虑到隧道结构是空间连续曲面结构,同时也是一种带状结构,其结构上的变化主要体现在横断面上。根据设计图纸选择部分有代表性的隧道横断面,以这些横断面为依据在Revit平台里创建一系列的截面族模型。然后利用Dynamo编写的可视化程序,导入Excel隧道数据库数据,修改截面几何尺寸和材质信息,并将截面族放置到设计位置。最后通过Revit根据代表截面自动插值得到特定截面之间的其余截面的尺寸,并创建这些截面间的三维实体模型^[10-12]。基于Revit及Dynamo自动化程序将极大地提高建模效率和隧道BIM模型的精度,构建流程与效果如图2、3所示。

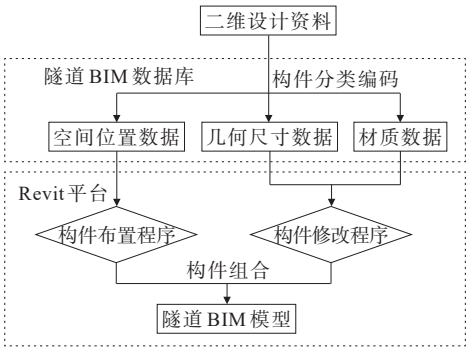


图2 隧道BIM构建过程

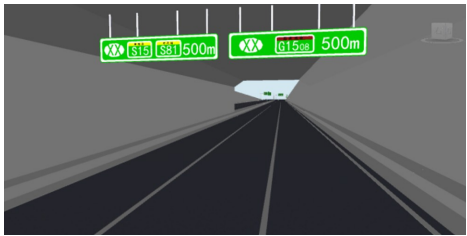


图3 隧道BIM模型效果图

2 基于隧道BIM模型的地铁监测系统
设计

2.1 系统平台与硬件设备

(1) BIM模型:根据前文BIM模型构建方法,在Revit软件中将隧道工程中的主要结构构件编码设置为参数化族类型,其中包括围岩、衬砌、隧道洞门、通风管道与照明系统等。将这些族文件导入Naviswork软件中进行整合与渲染,即可完成构件导入,且模型的各个构件均保留空间编码信息、位置信息以及材料信息等参数,BIM模型是监测系统数据可视化的基础。

(2) 数据库:采用MySQL数据库直接存储监测数据,该数据库还具有良好的扩展性,可以方便地对数据进行操作与调用。

(3) Web系统:利用ASP.NET作为系统开发语言,ASP.NET提供多种实用控件与接口,便于开发拓展系统功能。

(4) 传感器与数据传输设备:根据监测项目安装各类传感器设备实现数据实时采集,监测项目与相应传感器设备如表3所示。数据采集后传输到无线采集终端设备,利用光纤或无线网络将隧道实时监测数据传送至系统Web数据库平台,与BIM模型关联后实时输出监测数据报表,工程人员即可登录数据库平台实时查看数据。

2.2 系统设计与构建

2.2.1 系统功能模块

隧道监测系统采用Web网站系统,系统基本功

表 3 监测项目及设备

监测模块	监测项目	涉及监测设备
高支模	倾角、应力、位移(水平、竖向)	水准仪、轴力计、测斜仪等
基坑	倾角、应力、沉降位移	水准仪、轴力计、测斜仪等
隧道	围岩变形、衬砌混凝土应力 应变、锚杆轴力等	水准仪、轴力计、测斜仪、 测距仪、应变计等

能应包括基础信息管理与数据图表存储功能,系统功能模块如图 4 所示。

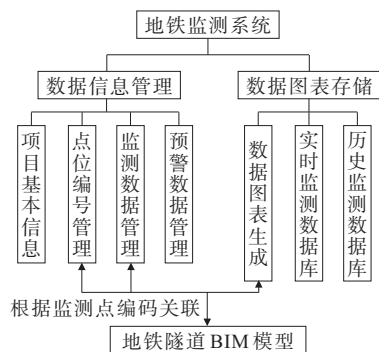


图 4 系统总体设计

数据信息管理模块对项目基本信息,传感器点位编号、传感器监测数据和预警数据进行管理,包括录入、编辑与删除等操作。数据图表存储模块可根据监测数据作分类统计、生成折线图,同时提供数据存储功能,基于实时监测数据库生成图表,判断监测数据是否达到预警阈值,基于历史监测数据库实现异常数据查找追溯,及时发现隧道安全问题。

2.2.2 系统构建方法

(1) 数据管理:监测数据分析系统采用3层架构原理建设开发,包括表示层、业务逻辑层和数据访问层。表示层主要对数据系统进行编码和转换,作为实际与用户交互的操作界面。业务逻辑层负责对业务系统进行处理和对数据访问层进行操作,主要处理系统逻辑判断问题和数据验证。数据访问层作为数据库为业务逻辑层提供数据,并提供数据操作功能,包括数据增加、删减以及查找。监测系统菜单管理界面如图 5 所示。

(2) 数据关联:利用 Naviswork 平台构建的地铁隧道 BIM 模型导出为 .nwc 文件格式后,通过平台自带的超链接功能,根据监测点编码,在 BIM 模型构件上关联调用 Web 系统数据库中的传感器采集数据。根据点击的 BIM 模型构件,Web 系统自动生成该构件监测点的沉降时间曲线、倾角时间曲线等实时监

测值,实现数据可视化,数据关联界面如图 6 所示。



图 5 监测系统菜单管理界面

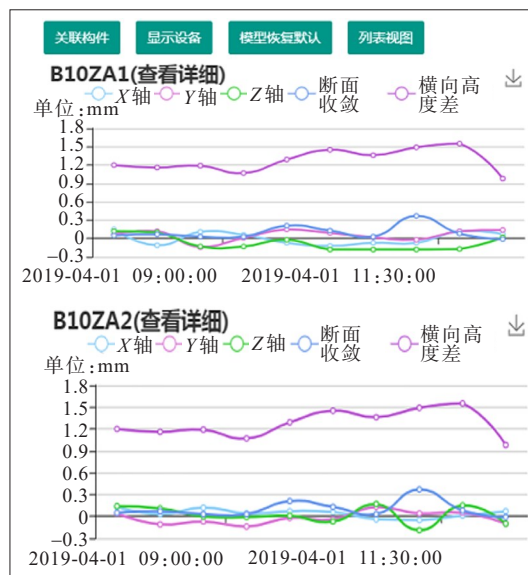


图 6 BIM 模型关联实时监测数据库

(3) 阈值预警:根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[9]要求在数据库中设置监测值的预警阈值参数。其中,水平位移累计变化值应不大于 30 mm,日变化值不大于 3 mm;竖向位移累计变化值应不大于 25 mm,日变化值不大于 3 mm;净空收敛及应力应变预警值设置参照技术规范手动设置。当系统实时测量值超过阈值时,Web 系统自动触发报警器,使用声音报警和闪光报警两种方式通

知现场人员,同时将异常数值和事件时间标记并存储至MySQL历史数据库中,便于后续问题追溯与分析。

3 系统工程应用

3.1 项目概况

广州新白云国际机场第二高速公路工程全路段位于广州市城区内,项目大致以北二环高速公路为界,划分为北段工程和南段工程,其中北段工程全长22.423 km。北段工程部分桥梁桩基紧邻地铁隧道或车站结构,在桩基础施工过程中对地铁结构设施安全有所影响。地铁线路与项目桥梁桩基交叉情况大致分为a、b两类,如图7所示。a类情况是高速公路西面桩基位于双线隧道中间,中部桩基和东面桩基位于右线隧道东侧;b类情况是高速公路架设在隧道上方,西面桩基位于左线隧道西侧,东面桩基位于右线隧道东侧。按照相关规范及管理部门要求,应在地铁外部施工过程中做好地铁安全保护监测,确保地铁线路运营安全。

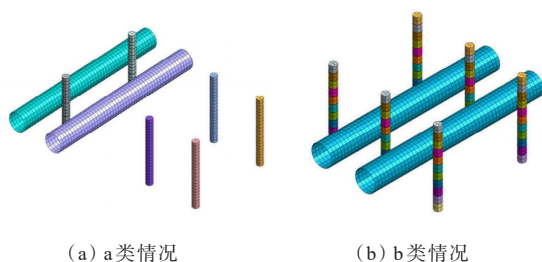


图7 桥梁桩基与地铁隧道位置关系

3.2 地铁监测系统应用

根据二维设计图纸,基于Revit和隧道数据库,根据前文阐述的隧道BIM建模方法可完成BIM模型的构建,根据数据库编码规则为BIM模型族构建对应编码,便于后续实现监测设备关联。应用项目开发的地铁监测系统导入隧道BIM模型和隧道数据库,针对监测对象进行数据显示与存储,具体过程包括模型导入、数据关联、数据显示与存储。

3.2.1 模型导入与轻量化

为了增加数据储存效率,减少计算机资源占用,需要实现BIM模型轻量化^[13-14],模型轻量化是指将BIM模型保留三维可视化特点,压缩部分数据信息,保留与传感器接收数据相关参数信息。实现BIM模

型轻量化首先需要将基于Revit创建完成的公路BIM模型进行转换。使用建模工具和轻量化插件将相关BIM模型转换成支持网页浏览的*.svf对应的压缩文件。完成模型转换后,应将轻量化BIM模型导入至地铁监测系统中。在监测平台管理界面中选择轻量化模型*.svfzip文件导入,导入后自动解压压缩文件,如图8所示。

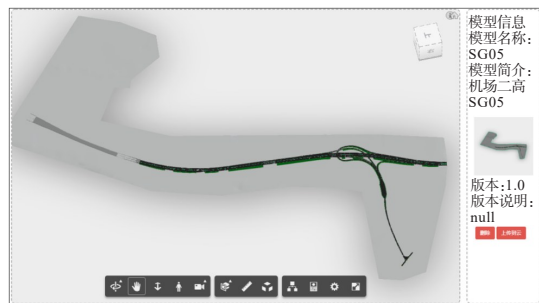


图8 轻量化隧道BIM模型导入效果

3.2.2 监测数据关联

在导入轻量化BIM模型的基础上,监测数据关联至BIM模型,实时监测工程施工状态,随时获取地铁隧道工程主体结构的健康状况。进入地铁监测系统设备管理界面,可查询已有的设备列表。关联参数需要添加传感器设备,根据隧道BIM数据库中各监测设备的分类编码输入设备名称,选择传感器类型、绑定模型等。添加完成后,可通过判断选择是否启用传感器,或者编辑传感器参数、环境信息等设备数据,设备管理界面如图9所示。通过选中相同分类编码的模型构件和监测设备项,基于地铁监测系统的关联数据功能可将监测设备关联到BIM模型。

3.2.3 数据显示与储存

基于时间范围筛选具体的数据,地铁监测系统可通过数据导出功能将监测数据导出为Excel表格或保存折线图图片,实现数据实时显示,或保存至Excel历史数据库实现数据存储,如图10所示。

4 结语

为了解决海量地铁隧道监测数据不直观、难以快速查找的问题,本文基于隧道BIM模型具有的三维可视化和信息化特点,搭建地铁隧道监测系统,通过分类编码监测设备并关联至BIM模型族构件,实现地铁隧道监测数据可视化,提高地铁隧道施工

设备管理					
添加		请输入要查询的设备名	请输入要查询的设备序列号	请选择类型	搜索
设备	序列号	类型	关联模型	是否启用	操作
B03YA1	B03YA1	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YA2	B03YA2	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YA3	B03YA3	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YA4	B03YA4	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YA5	B03YA5	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YB1	B03YB1	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YB2	B03YB2	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YB3	B03YB3	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YB4	B03YB4	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
B03YB5	B03YB5	地铁综合监测	地铁模型	是	编辑 删除 监测数据
10 条/页 共 314 条 < 1 > 到第 1 页 确定					

图 9 设备管理界面

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	设备序号	时间	X轴	Y轴	Z轴	断面收敛	横向高度差	状态
2	B10ZA1	2019/4/1 9:00:00	0.15	0.07	0.12	0.05	1.20	正常
3	B10ZA1	2019/4/1 9:30:00	-0.11	0.12	0.10	0.07	1.16	正常
4	B10ZA1	2019/4/1 10:00:00	0.11	-0.14	-0.13	0.03	1.19	正常
5	B10ZA1	2019/4/1 10:30:00	0.06	0.01	-0.13	0.03	1.07	正常
6	B10ZA1	2019/4/1 11:00:00	-0.07	0.15	-0.02	0.21	1.29	正常
7	B10ZA1	2019/4/1 11:30:00	-0.12	0.09	-0.18	0.13	1.45	正常
8	B10ZA1	2019/4/1 12:00:00	-0.07	0.02	-0.18	0.03	1.36	正常
9	B10ZA1	2019/4/1 12:30:00	-0.07	-0.02	-0.18	0.37	1.49	正常
10	B10ZA1	2019/4/1 13:00:00	0.12	0.12	-0.17	0.08	1.55	正常
11	B10ZA1	2019/4/1 13:30:00	0.07	0.14	0.02	-0.01	0.98	正常

图 10 监测点位移监测数据导出并存储为 xml 文件

运营过程的安全性。同时,利用云服务器储存历史数据,通过监测系统可随时查阅以往数据,追溯安全问题根源。该方法在广州新白云国际机场第二高速公路北段工程得到应用,在施工运营过程对邻近地铁隧道进行监测,结果表明系统能实时显示各隧道结构构件变形状况,及时对结构安全隐患进行预警。

参考文献:

[1] 李红学,郭红领,高岩,等.基于 BIM 的桥梁工程设计与施工优化研究[J].工程管理学报,2012,26(6):48-52.

[2] 夏子立,景强,高文博,等.基于 BIM 的桥梁技术状况评定系统研究[J].中外公路,2023,43(1):83-87.

[3] 徐萍飞,熊峰,夏伟杰,等.基于 BIM 的桥梁信息集成管理系统研究[J].施工技术,2016,45(12):119-123.

[4] 朱冰洁,刘昌镐,胡旻阳,等.基于 BIM 的高铁连续梁桥施工智能监控系统研究[J].山西建筑,2020,46(13):195-196.

[5] 黄廷,陈丽娟,史培新,等.基于 BIM 的公路隧道运维管理系统设计与开发[J].隧道建设,2017,37(1):48-55.

[6] 黄忠财,许泽琪,王磊,等.BIM 技术在公路岩溶隧道勘察设计中的应用[J].公路,2020,65(11):385-389.

[7] 高建新,姜谔男,郑帅,等.基于 BIM 的参数化隧道标准建模方法[J].中外公路,2021,41(4):236-241.

[8] 廖峻,丁浩,夏诗画.BIM 技术在金門特长隧道中的应用研究[J].公路,2020,65(4):373-377.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[10] 李晓军,田吟雪,唐立,等.山岭隧道结构 BIM 多尺度建模与自适应拼接方法及工程应用[J].中国公路学报,2019,32(2):126-134.

[11] 曹建涛,王磊,许泽琪,等.山岭隧道衬砌结构 BIM 建模方法研究与应用[J].公路,2020,65(8):386-389.

[12] 王茹,权超超.公路立交 BIM 参数化快速精确建模方法研究[J].图学学报,2019,40(4):766-770.

[13] 曹建涛.BIM 技术在公路隧道正向设计中的应用研究[D].北京:北京交通大学,2019.

[14] 赵菲.基于 WebGL 的古建筑 BIM 模型轻量化研究与应用[D].西安:西安建筑科技大学,2018.