

集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命管理系统研究

林晓东^{1,2}, 李晓军^{1,2}, 林浩^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为解决在盾构隧道工程中, 地理信息系统(GIS)标准缺失和建筑信息模型(BIM)分析功能薄弱的问题, 在分析 GIS 的数据管理和 BIM 的数据标准基础上, 建立集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命期管理系统。首先, 概括总结系统采用的技术路线; 其次, 基于 IFC 标准扩展统一的盾构隧道信息模型, 涵盖盾构隧道地质、结构、线路、施工、监测和病害等数据; 然后, 介绍系统信息的关联, 包括隧道编码、GIS 和 BIM 的集成方案; 最后, 以上海地铁盾构隧道为依托, 描述系统在工程全寿命期的应用, 包括隧道地质勘察、结构设计、运营监测和养护维护等阶段。该系统制定了统一信息模型, 方便数据交换和管理, 在信息模型基础上实现了信息可视化与不同分析功能, 提高了盾构隧道的全寿命数字化管理水平。

关键词: 盾构隧道; 信息技术; 地理信息系统; 建筑信息模型; IFC; 全寿命管理系统

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2018.06.011

中图分类号: U 45

文献标志码: A

文章编号: 2096-4498(2018)06-0963-08

A GIS/BIM-Integrated Lifecycle Management System for Shield Tunnel

LIN Xiaodong^{1,2}, LI Xiaojun^{1,2}, LIN Hao^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to solve the problem of the lack of data standard in geographic information system (GIS) and the analysis function in building information model (BIM), a GIS/BIM integrated lifecycle management system for shield tunnel is built based on the analysis of the data management in GIS and data standards in BIM. Firstly, the technical route of the system is summarized. And then the shield tunnel information model is extended based on the IFC standard, including the information of geology, structure, alignment, construction, monitoring and disease; and an introduction to the information association is presented, including code format of shield tunnel and the integration of GIS and BIM. Finally, the application of lifecycle management of the system is described relied on the Shanghai metro shield tunnel, including geological survey, structural design, operation monitoring and maintenance. The system designs a unified information model to facilitate the data exchange and management efficiency. The functions of the information model visualization and analysis is also developed to improve the digital lifecycle management of shield tunnel.

Keywords: shield tunnel; information technique; geographic information system (GIS); building information model (BIM); IFC; lifecycle management system

0 引言

盾构隧道是城市轨道交通的重要组成部分,截至 2017 年初,国内共有 28 个城市开通轨道交通运营,总计 114 条线路通车,运营线路总长度达 3 746 km^[1]。大规模盾构隧道建设产生的海量历史数据的存储、共享、分析等问题,给工程勘察、设计、施工、监测、维护等全寿命管理带来挑战。

数字化技术是改善工程管理的重要手段,国内外在盾构隧道的数字化技术应用方面已开展了大量研究。在地理信息系统(GIS)方面,Baffour 等^[2]利用 GIS 建立了地下基础设施管理系统,绘制出地下设施平面图,为今后新增地下基础设施提供定位服务,保证施工安全并节约工程开支;Yoo 等^[3]在 WebGIS 平台基础上开发了管理工程地质信息和钻探孔信息的应

收稿日期: 2017-10-30; 修回日期: 2018-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478341)

第一作者简介: 林晓东(1990—),男,广东陆丰人,同济大学地下建筑与工程系在读博士,研究方向为数字化地下工程。E-mail: linxdn@foxmail.com。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

用,对地质数据进行统一管理;Li 等^[4]开发了盾构隧道 WebGIS 应用平台,实现对盾构隧道施工数据的管理、可视化和分析;朱合华等^[5]利用 GIS 建立了盾构隧道建养一体化数字化平台,包括数据采集、处理、表达和分析等功能。GIS 适合地理数据的分析与管理,但是对于非地理数据(如盾构隧道数据),只能作为属性信息管理,这将导致非地理数据的管理变得复杂。

建筑信息模型(BIM)的核心是建立统一的建筑全寿命信息模型。早期针对地面建筑提出,目前已经逐步在隧道工程运维管理中得到应用。Hegemann 等^[6]通过 BIM 的数据标准扩展,提出适用于盾构的信息模型,将 BIM 应用在盾构隧道工程;黄廷等^[7]建立了基于 BIM 的隧道管理平台,实现可视化的隧道运维管理;胡珉等^[8]针对隧道运维管理对象众多、信息分散和时空特性复杂等问题,在 BIM 模型基础上建立隧道可视化智能决策系统。目前 BIM 主要应用于可视化、造价分析、碰撞检测和施工仿真等方面,但缺乏地理空间分析能力,而且在模型体量较大时,BIM 模型的加载、渲染性能会快速下降。

综上所述,集成 GIS 和 BIM,一方面可利用 GIS 在地理信息方面的捕捉、储存、处理、分析、管理和表达等功能,另一方面可利用 BIM 的统一建筑信息模型对全寿命数据进行标准化管理。近年来有学者尝试集成 GIS 和 BIM,如 Irizarry 等^[9]提出了 GIS-BIM 模型,实现施工过程中工程材料、资源、供应链的可视化管理,但在盾构隧道领域的报道仍较少。本文依托上海地铁盾构隧道工程,建立集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命期管理系统,主要创新点体现在:1)扩展了盾构隧道 IFC 信息标准,形成统一信息模型;2)在系统中实现了 GIS 几何模型和 BIM 几何模型与统一信息模型的关联;3)对信息模型进行可视化和开发不同全寿命周期分析功能。

1 技术路线

本系统的目的是管理盾构隧道工程的属性信息、二维图形信息和三维图形信息,并在数据信息基础上,实现不同的分析功能应用于隧道全寿命周期阶段。本文采用的技术路线如图 1 所示,其中属性信息管理主要基于 IFC 数据标准进行扩展,并在 Revit 中附加相应的 IFC 参数,导出至 SQL Server 数据库形成统一信息模型;二维图形信息利用 ArcGIS 建模,导出对应的 GeoDatabase 二维图形文件,再由 ArcGIS Runtime 开发包加载展示;三维图形信息在 Revit 中建模,导出 FBX 三维图形文件,由 Unity3D 作为图形引擎进行可视化。

对上述数据信息进行关联,开发不同的分析功能并用于盾构隧道的全寿命周期管理。下面对其中相对重要的 IFC 数据标准、数据信息的关联和管理系统在全寿命周期的应用进行介绍。

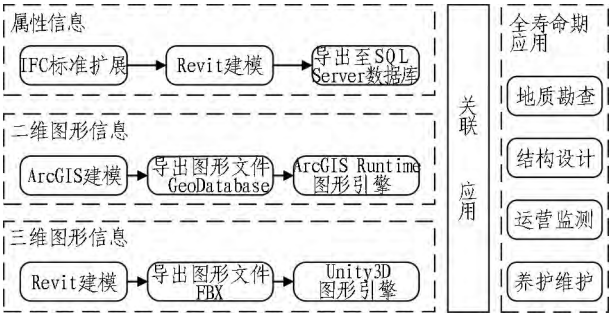


图 1 盾构隧道管理系统技术路线

Fig. 1 Technical route of shield tunnel management system

2 盾构隧道信息模型

2.1 IFC 标准扩展

盾构隧道常用的信息模型为 IFC (industry foundation class)^[10],是国际通用的 BIM 数据标准,因其涵盖领域广、可扩展性强,得到广泛应用。IFC 主要用于地面建筑全寿命周期信息的存储和交换,在盾构隧道方面的扩展工作目前仍在进行中,如 Yabuki 等^[11]在 IFC 标准基础上提出并改进了盾构隧道的数据模型,该模型在 IFC 框架内增加了盾构隧道特有的对象实体,如管片、防水材料等;Amann 等^[12]在 Yabuki^[11]等提出的信息模型基础上,添加了盾构隧道线路信息,并与结构信息进行整合。本文基于上述研究,添加了盾构隧道施工、监测和病害检查等信息,如表 1 所示。

表 1 本文信息模型与已有信息模型比较

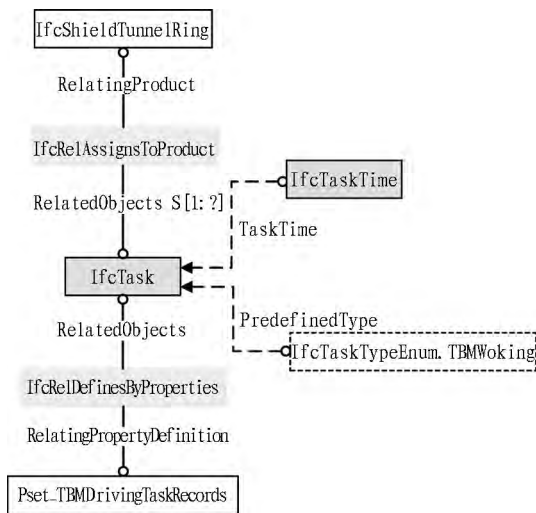
Table 1 Comparison between information model recommended and existing information models

领域	已有标准 ^[11-12]	本文新增
地质信息	地层	室内试验
	地下水信息	原位测试
	挡土墙	
	地下障碍物	
结构信息	管片	
	防水材料	
	管片接头	
	工作井、二次衬砌	
线路信息	平曲线	
	竖曲线	
施工信息		盾构掘进参数 盾构姿态
监测信息		施工阶段监测 运维阶段监测
病害信息		结构病害

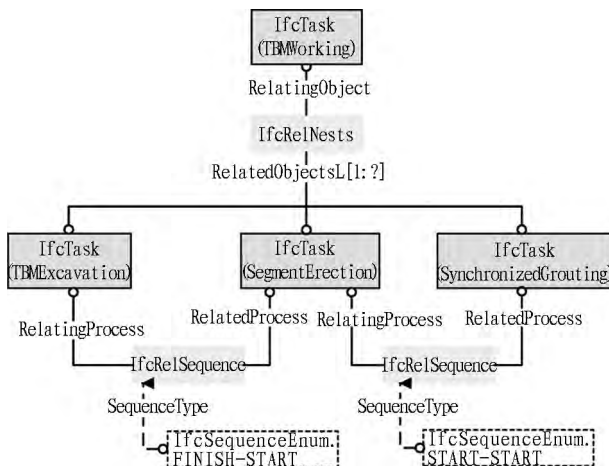
IFC 标准的扩展方法主要有^[13]: 1) 基于 IfcProxy 实体的扩展(IfcProxy 实体是 IFC 标准提供的一个自定义扩展接口); 2) 基于 IFC 实体扩展,即在 IFC 模型框架基础上增加新的实体或实体属性,这是对 IFC 标准模

型体系的扩充; 3) 基于属性集的扩展, 通过属性关系实体(IfcRelDefinesByProperties) 关联到对应实体。

下面以施工数据为例介绍本文的盾构隧道信息模型。图2示出盾构隧道信息模型的部分施工数据, 用实体 IfcTask 描述具体施工过程, 如衬砌管片所对应的盾构掘进、管片拼装和壁后注浆等施工信息。IfcTask 实体的 PredefinedType 属性通过 IfcTaskTypeEnum 枚举值表示该施工类型, IfcTask 的属性 TaskTime 为 IfcTaskTime 实体, 该实体可以完整描述施工的时间信息。一个 IfcTask 实例对应衬砌管片(IfcShieldTunnelRing) 的盾构工作过程, 两者之间通过关系实体 IfcRelAssignsToProduct 建立关联。IfcTask(TBMWorking) 表示盾构的工作过程, 其他过程如掘进过程 IfcTask(TBMEexcavation)、拼装过程 IfcTask(SegmentErection) 和同步注浆过程(SynchronizedGrouting) 通过嵌套关系实体 IfcRelNests 嵌套其内。这3个过程之间又存在先后关系, 用施工顺序关系实体 IfcSequence 来描述。



(a) 管片和施工过程关系描述



(b) 盾构隧道施工过程关系描述

图2 盾构隧道信息模型(部分)

Fig. 2 Shield tunnel information model (partial)

2.2 IFC 扩展软件的实现

本文采用 Revit 2016 对盾构隧道、钻孔、监测点等进行建模, 目前 Revit 2016 不能支持 IFC 实体扩展, 故将模型所有物理单元采用默认的 IfcBuildingElementProxy 实体表示。盾构隧道模型通过赋值 IfcBuildingElementProxy 属性集的方式添加盾构隧道信息, 由于 Revit 2016 中也不支持直接定义属性集, 可借用 IFC Export 插件^[14]将 Revit 的 IFC 参数输出为 IFC 文件中对应构件的属性集, 借用 Solibri 查看在 Revit 中创建的属性集信息, 如图3所示。最终通过 Revit 导出功能, 将所有信息存储在 SQL Server 数据库中, 作为统一信息模型供程序调用。

Info	
Object. 0. 4	
<div> <div>AC-Pset_RenovationAndPhasing</div> <div>Pset_ShieldTunnelCircleTypeSegment</div> </div>	
Identification	Location
Quantities	Relations
Classification	Hyperlinks
Pset_ShieldTunnelConcreteCircleSegmentMaterialProperties	
Pset_ShieldTunnelCircleSegmentCommon	
Property	Value
AverageWidth	1 200.00 m
CentralAngle	3 724
ConcreteStrengthCode	C50
InnerArcLength	768.00 m
InnerDiameter	5 500.00 m
IsKeySegment	False
OuterArcLength	865.00 m
OuterDiameter	6 200.00 m
SegmentCode	ML1
SegmentMaterialDescription	混凝土
SegmentType	标准块
Thickness	350.00 m

图3 Solibri 查看衬砌属性集信息

Fig. 3 Property set information of segment lining in Solibri

3 信息关联

3.1 隧道编码

为了对系统构件进行统一管理, 规定一套完整的编码规则十分重要。从唯一性和易读性角度考虑, 采用表2所示的格式对隧道周围环境、地质、结构和监测点等进行编码。编码由字母和数字组成, 最多包括3级信息和1组ID识别号, 编码涵盖了地面建(构)筑物、地下建(构)筑物、地下管线、道路、钻孔、轴线、联络通道、衬砌环、隧道、通风井、车站结构和各类监测点等, 如某一钻孔编码可写为 GEO-BHL-ID。

3.2 集成 GIS/BIM

集成 GIS 和 BIM 的关键在于实现 GIS 模型与 BIM 模型之间的数据共享, 以及 GIS 2D 图形与 BIM 3D 图形之间的关联。GIS 和 BIM 的集成方案如图4所示。

对于属性数据, 采用盾构隧道 IFC 信息模型作为数据共享的数据标准, 利用 Revit 可将所有 IFC 属性数据导出到 SQL Server 数据库, 为查询和分析功能服务。

表2 盾构隧道编码格式
Table 2 Coding format of shield tunnel

一级信息	二级信息	三级信息
	BLD	PLY: 线状地面建筑; PLG: 面状地面建筑
ENV	UDG	PLY: 线状地下建筑; PYG: 面状地下建筑 PPL: 地下管线; ROD: 道路
GEO	BHL	钻孔
DES	AXL	AXH: 轴线平曲线; AXV: 轴线纵轴线; AXM: 轴线合成 PAS: 联络通道; RIN: 衬砌环; TUN: 隧道; ASF: 通风井; STA: 车站结构
	STR	DFM1: 内部收敛; DFM2: 沉降; DFM3: 三维位移; DFM4: 接缝张开; EXF1: 外侧水土压力; EXF2: 外侧水压力; INF1: 轴向力、弯矩; INF2: 螺栓锚固力、管片接缝法向接触力
MON	GRD	SET1: 地表沉降; SET2: 土体沉降; SET3: 盾构底部土体回弹; HDP1: 地表水平位移; HDP2: 土体深层水平位移; WSP1: 水土压力(侧、前面); WSP2: 地下水位; WSP3: 孔隙水压
	ENV	BLD1: 沉降; BLD2: 水平位移; BLD3: 倾斜; BLD4: 建(构)筑物裂缝

对于几何模型,利用 ArcMap 二维建模,并对二维单元附加编码信息,导出 GeoDatabase 文件,采用 ArcGIS Runtime SDK for .NET 作为 GIS 模型的二维图形引擎;利用 Revit 三维建模,同样也对三维单元附加编码信息,导出 FBX 文件,采用 Unity3D 作为 BIM 模型的图形引擎。最终,采用 C#的 WPF 开发语言,在系统中加载数据库、GIS 和 BIM 模型 2D、3D 图形与统一数据模型(数据库数据记录)通过盾构隧道唯一编码进行关联。

4 工程应用

在实际工程中,GIS 系统的空间分析能力可用于盾构隧道工程的常规分析,如确定隧道周边基坑开挖影响范围、某段隧道所处地层和隧道埋深等。在此基础上,可结合已有隧道数据,建立荷载结构和地层结构的数值模型,实现实时分析。利用 BIM 统一 IFC 信息模型,实现数据标准化,其优势体现在工程信息传递、信息存储和信息共享,能为盾构隧道数据分析提供标准化管理方法。

4.1 工程概述

以上海某区间地铁盾构隧道为例,介绍本系统在工程中的应用。该区间隧道于 2013 年底投入运营,内径为 5.5 m,外径为 6.2 m,环宽 1.2 m,区间长度为 1 450.9 m。隧道旁有一基坑开挖,总面积约 1 000 m²,与隧道最近水平距离约 10.3 m。

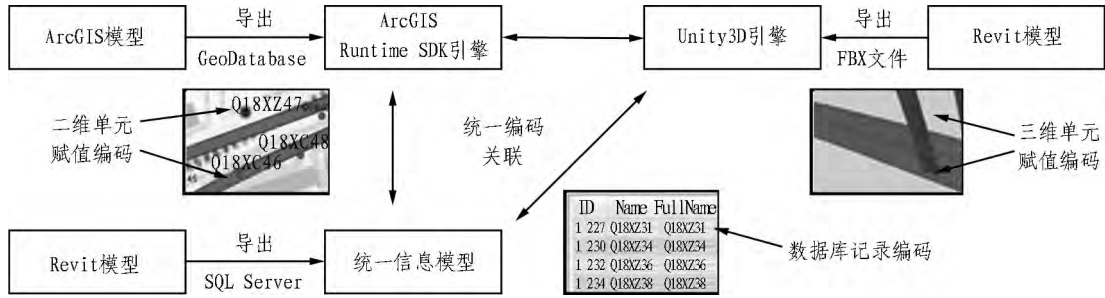


图4 GIS和BIM集成方案
Fig. 4 Integration solution of GIS and BIM

地铁区间在集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命管理系统界面如图 5 所示,包括工程平面图(GIS 几何模型,左窗口)、三维视图(BIM 几何模型,右窗口)和统一信息模型数据(IFC 属性数据导出数据库,下窗口)。图 5 示出几何模型与数据根据统一编码关联的结果,在 GIS 和 BIM 的几何建模过程中,对构件赋予了唯一编码,可与统一数据模型关联。例如当在系统选中编码为 GEO-BHL-1243 的钻孔时,所有窗口都能同时高亮显示该钻孔。该平台可用于盾构隧道地质勘察、结构设计、运营监测和养护维护等阶段的盾构隧道全寿命期管理。

4.2 地质勘察信息

从统一信息模型中可获取钻孔深度、地层分布、土性描述和地层各项物理力学特性统计指标等信

息;从几何模型中可得到钻孔的坐标、空间相对位置等信息。如在系统中可高效获取编码为 GEO-BHL-1218、名字为 Q18XC22 的钻孔的土层信息,即 2.26~0.86 m 为灰黄色粉质黏土,0.86~-9.04 m 为灰色黏质粉土,-9.04~-13.49 m 为灰色淤泥质黏土,-13.49~-19.94 m 为灰色黏土,-19.94~-24.44 m 为灰色粉质黏土,-24.44~-40.54 m 为灰色砂质粉土夹粉质黏土。图 6 示出开挖基坑周围的地层钻孔空间位置(中间窗口)、钻孔数据的统一数据模型(下边窗口)和根据地质信息绘制的选中的钻孔图(右边窗口)。

用户可选择感兴趣的隧道区段周围的钻孔,并定义地层的剖切面,系统将选中的钻孔垂直投影至剖切面上,并根据相邻钻孔的土层信息对钻孔之间地层进

行插值计算,通过 ArcGIS Runtime 图形接口生成二维地层,最终由每个钻孔土层分布数据和钻孔空间位置可分析得到地质剖面图(图6左边窗口),在隧道勘察阶段可利用系统对隧道周围地质情况进行充分了解。与传统的沿某些特定切面的地质剖面图相比,该系统

可动态地生成用户自定义的剖面图,在此基础上利用空间分析获取隧道埋深、衬砌上覆水土压力等。对于复杂的三维地层,未来系统可集成地层不确定分析、克里金插值等算法,并通过 Unity3D 图形接口实现三维地层可视化。

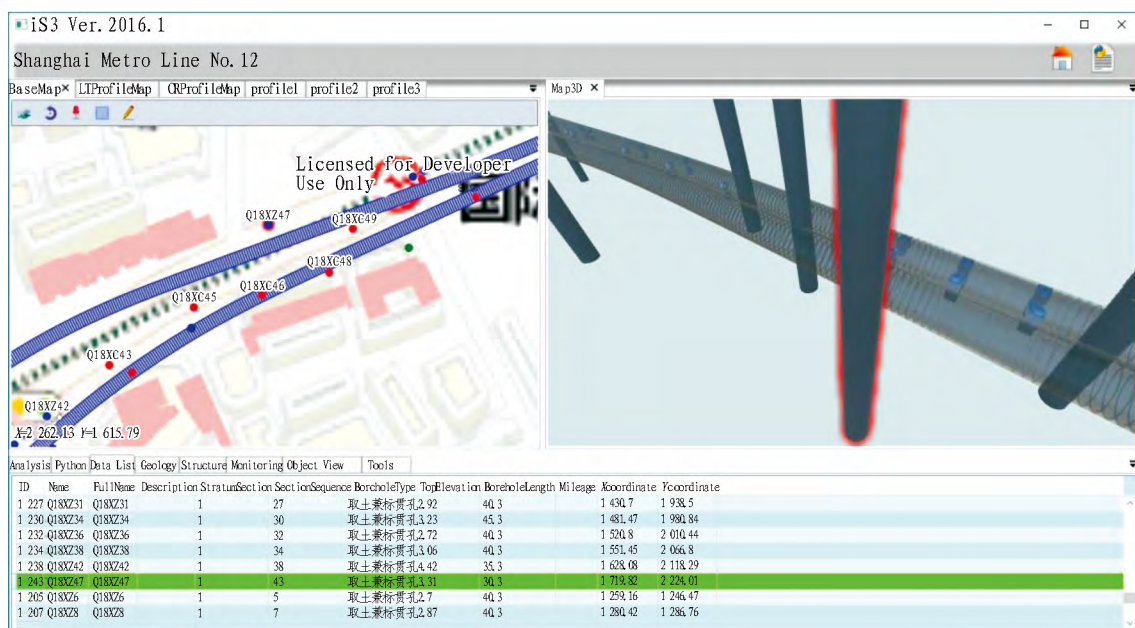


图5 盾构隧道管理系统

Fig. 5 Shield tunnel management system

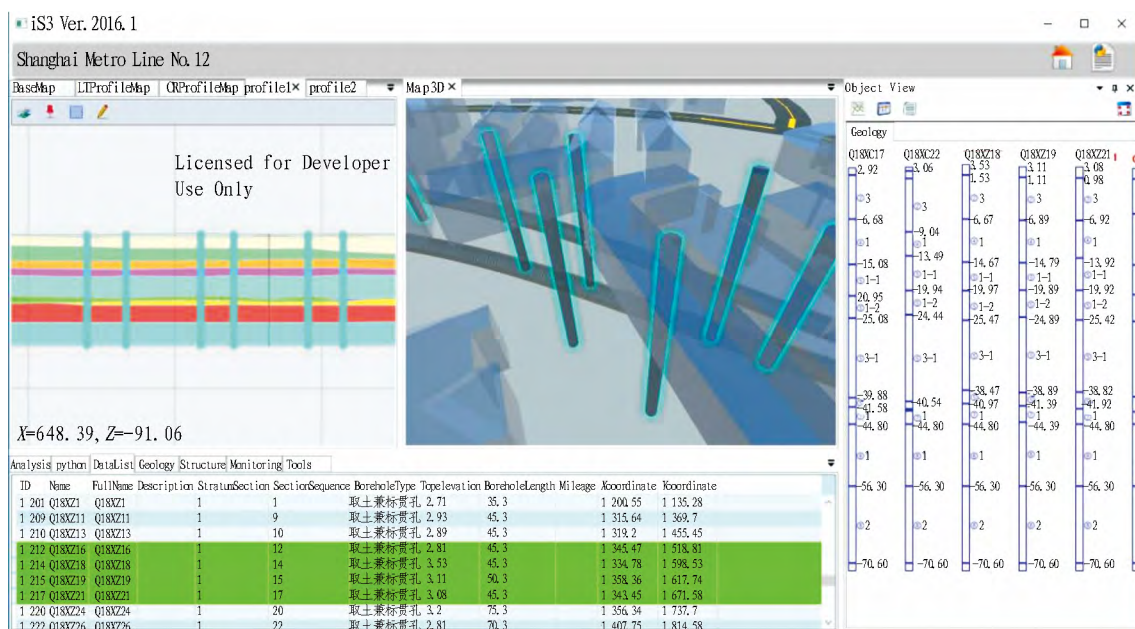


图6 地质勘察信息可视化与剖切分析

Fig. 6 Visualization and profile analysis of geological survey information

4.3 结构设计信息

统一信息模型的结构设计信息包括隧道线路的平曲线组成、竖曲线组成、轴线里程、衬砌分块情况、管片材料和物理力学参数等,由几何模型和空间分析功能组成,可提取空间上有用的信息数据,如范围查询、长

度面积测量、缓冲区分析等。在4.2节介绍的隧道地质剖面分析的基础上,将某一环衬砌垂直投影至剖面图,并利用空间分析功能计算衬砌上覆各土层厚度,由上覆土层物理力学参数计算得到隧道周围水土荷载(图7上窗口)。

4.5 养护维护信息

将隧道状态划分为5个等级,1分代表很好,2分代表好,3分代表一般,4分代表差,5分代表很差,采用Li等^[17]提出的盾构隧道状态计算方法进行计算:

$$TSI = 0.77 + 0.16 \sqrt{S_{ave}} + s_{diff-ave} + 0.09c_{ave} + 0.08d_1 + 0.05d_c + 0.50d_s \quad (1)$$

式中: TSI 为盾构隧道状态; S_{ave} 为隧道相对沉降平均值, mm; $s_{diff-ave}$ 为差异沉降平均值, mm/m; c_{ave} 为收敛平均值; d_1 为每百环渗透水面积, μm^2 ; d_c 为每百环裂缝长度, m; d_s 为每百环剥落面积, μm^2 。

根据信息模型中的监测信息,获取该区间的沉降

为 0~9 mm,收敛变形为 0~10‰ D (D 为衬砌直径),区间总共有 19 处渗漏水、23 处裂缝和 12 处剥落。采用式(1)的盾构隧道状态计算方法,将各个指标数值代入,得出该区间的状态为 1.8~2.4,接近于“好(2.0)”状态,图 11 示出系统对地铁区间盾构隧道状态的评估结果。

与目前地铁规范和日常维护所采取的单项指标评估,以及“哪出现病害,修改哪里”的维护计划相比,本系统的综合性地铁隧道状态评估可用于指导盾构隧道的养护维护,确定不同区段的维护优先级,并定制科学维护计划。

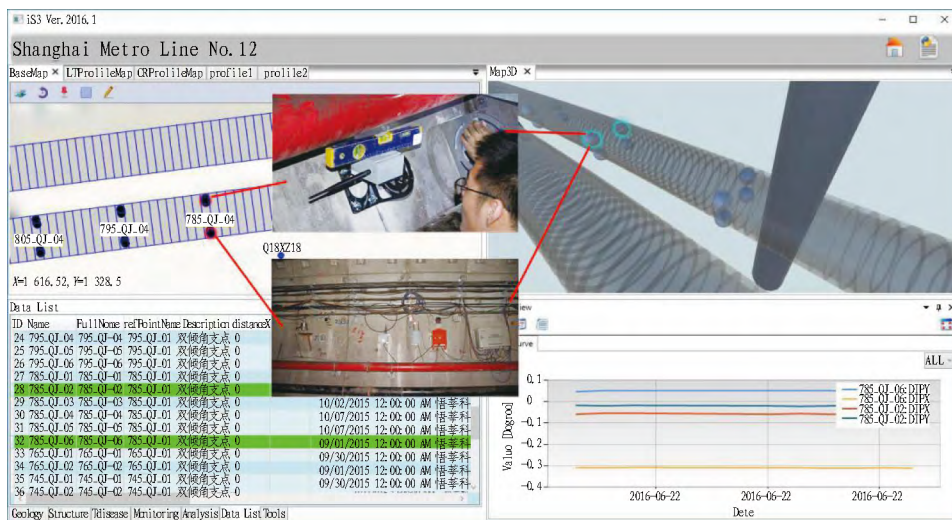


图 10 盾构隧道运营实时监测信息可视化

Fig. 10 Real-time monitoring information visualization in shield tunnel operation



图 11 盾构隧道状态评估

Fig. 11 Assessment of shield tunnel condition

5 结论与讨论

本文建立了集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命管理系统,主要结论如下。

1) 在 IFC 数据标准基础上,扩展了盾构隧道的信

息模型,主要包括地质信息、结构信息、线路信息、施工信息、监测信息和病害信息 6 个方面,该信息模型可用于数据的共享、交换和存储。

2) 介绍了该系统的设计与实现,包括隧道编码、

IFC 信息扩展、GIS 和 BIM 的集成方案,以及系统的组成框架。IFC 的属性信息最终由 Revit 导出至 SQL Server 作为统一数据模型,通过隧道唯一编码与图形引擎中的 GIS 和 BIM 几何模型关联。

3) 以上海地铁盾构隧道为依托,展示了该系统在地质勘察、结构设计、运营监测和养护维护等全寿命周期阶段的应用,结合具体工程案例说明该系统可提高盾构隧道在全寿命期的数字化管理水平。

未来仍需完善盾构隧道信息模型,使其覆盖更大范围的工程数据;并添加更多的功能,如 Unity3D 引擎中的交互、数据挖掘、数值模型建模等。

参考文献(References):

- [1] 轨道城市. 国内各城市轨道交通运营里程及排名、车型、速度统计[EB/OL]. (2017-02-05) [2017-10-30]. <http://mini.eastday.com/mobile/170205004851069.html>. Transportation in City. Statistics of mileage and rankings in Chinese urban rail transport [EB/OL]. (2017-02-05) [2017-10-30]. <http://mini.eastday.com/mobile/170205004851069.html>.
- [2] BAFFOUR R, ABATAN A. Developing an underground infrastructure management system using GPR, GPS and GIS [C]//Proceedings of the IASTED International Conference on Information and Knowledge Sharing. Anaheim: ACTA Press, 2002: 18.
- [3] YOO C, KIM J M. Tunneling performance prediction using an integrated GIS and neural network [J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(1): 19.
- [4] LI X J, ZHU H H. Development of a web-based information system for shield tunnel construction projects [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 146.
- [5] 朱合华, 李晓军, 陈雪琴. 基础设施建养一体数字化技术(1)——理论与方法 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 99.
ZHU Hehua, LI Xiaojun, CHEN Xueqin. Digitization techniques for integrated construction and maintenance of infrastructure (Part 1): Theory and methodology [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 99.
- [6] HEGEMANN F, LEHNER K, KONIG M. IFC-based product modeling for tunnel boring machines [C]//Proceedings of the 9th European Conference on Product and Process Modeling. London: CRC Press, 2012.
- [7] 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.
HUANG Ting, CHEN Lijuan, SHI Peixin, et al. Design and development of BIM-based operation and maintenance system of highway tunnel [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(1): 48.
- [8] 胡珉, 刘攀攀, 喻钢, 等. 基于全生命周期信息和 BIM 的隧道运维决策支持系统 [J]. 隧道建设, 2017, 37(4): 394.
HU Min, LIU Panpan, YU Gang, et al. Decision support system for tunnel operation and maintenance based on BIM and tunnel whole life cycle information [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(4): 394.
- [9] IRIZARRY J, KARAN E P, JALAEI F. Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management [J]. Automation in Construction, 2013, 31: 241.
- [10] 李晓军, 刘雨芃, 汪宇. 城市地下空间数据标准化现状与发展趋势 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 287.
LI Xiaojun, LIU Yupeng, WANG Yu. Recent achievements and future trends for urban underground space data standardization [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 287.
- [11] YABUKI N, ARUGA T, FURUYA H. Development and application of a product model for shield tunnels [C]//Proceedings of the 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. New York: Curran Associates, Inc., 2013.
- [12] AMANN J, BORRMANN A, HEGEMANN F, et al. A refined product model for shield tunnels based on a generalized approach for alignment representation [C]//Proceedings of the ICCBEI. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- [13] 王勇, 张建平, 李久林. 基于 IFC 的建筑工程施工图设计信息模型描述 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2014(4): 30.
WANG Yong, ZHANG Jianping, LI Jiulin. IFC-based model description for structural working drawing [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2014(4): 30.
- [14] TANNER K. Exporting IFC-Creating user defined IFC property sets [EB/OL]. (2016-05-02) [2017-10-30]. <http://revitqi.com/creating-custom-ifc-property-sets>.
- [15] 朱合华, 张子新, 廖少明. 地下建筑结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
ZHU Hehua, ZHANG Zixin, LIAO Shaoming. Underground Building Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [16] 何斌, 纪云, 沈润杰. 地下隧道变形检测的无线倾角传感器 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1464.
HE Bin, JI Yun, SHEN Runjie. Wireless inclinometer for monitoring deformation of underground tunnel [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1464.
- [17] LI X J, LIN X D, ZHU H H, et al. Condition assessment of shield tunnel using a new indicator: The tunnel serviceability index [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 98.