



重庆交通大学学报(自然科学版)

Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)

ISSN 1674-0696,CN 50-1190/U

## 《重庆交通大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台研究  
作者: 郑明新, 杜子真, 康蒙, 徐朋威  
收稿日期: 2020-03-30  
网络首发日期: 2021-02-18  
引用格式: 郑明新, 杜子真, 康蒙, 徐朋威. 基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台研究. 重庆交通大学学报(自然科学版).  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1190.U.20210218.1132.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.

# 基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路 智慧监测平台研究

郑明新<sup>1,2,3</sup>, 杜子真<sup>1,3</sup>, 康蒙<sup>1,3</sup>, 徐朋威<sup>1,3</sup>

(1. 华东交通大学 土木与建筑学院, 江西 南昌 330013;

2. 江西省智能交通基础设施工程研究中心, 江西 南昌 330013;

3. 华东交通大学 土木工程国家实验教学示范中心, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 在总结大量框架桥监测工程及 BIM 技术应用的基础上, 探索和研发了基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台。以福建龙岩市永定区凤城街道下坑一路框架桥下穿漳龙线铁路工程实践, 融合自动监测系统、视频安全监控系统、云端数据存储和综合预警系统, 通过发挥 BIM 技术的实时可视化、信息共享等特性, 将框架桥顶进施工监测信息通过 BIM 模型快速准确的传递给参建单位, 将监测数据采集、存储、分析、处理的自动化技术和预警系统结合, 对监测数据实时分析拟合预测变形趋势, 保证了框架桥下穿既有铁路的安全施工。

**关键词:** 桥梁工程; BIM; 智慧监测平台; 框架桥; 顶进施工

中图分类号: U446.2; U215

文献标志码: A

## Research on Intelligent Monitoring Platform of Frame Bridge Jacking Railway Based on BIM

ZHENG Mingxin<sup>1,2,3</sup>, DU Zizhen<sup>1,3</sup>, KANG Meng<sup>1,3</sup>, XU Pengwei<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Intelligent Transportation Infrastructure Engineering Research Center, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

3. National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

**Abstract:** The basis of summarizing a large number of frame bridge monitoring projects and BIM Technology engineering applications, this paper explores and develops a BIM platform based frame bridge underneath the existing railway intelligent monitoring platform, based on the construction practice of Xiakeng first road frame bridge under Fengcheng street, Yongding District, Longyan City, which integrates the automatic monitoring system, video security monitoring system, cloud data storage and integrated early warning system. By giving full play to the features of BIM platform, such as real-time visualization, information sharing, etc., the framework The bridge jacking construction monitoring information is quickly and accurately transmitted to the participating units through BIM model, which combines the automatic technology of monitoring data collection, storage, analysis and processing with the early warning system, real time analysis and fitting of monitoring data to predict deformation trend, to ensure the safe construction of the existing railway under the frame bridge.

**Key words:** bridge engineering; BIM; intelligent monitoring platform; frame bridge; jacking construction

## 0 引言

随着社会进步与经济发展, 铁路建设规模不断扩大, 铁路建设与城市发展过程中的交通交叉影响也越来越严重。顶进框架桥是一项广泛使用的下穿铁路施工技术, 其不但减小了土地占用, 保证既有线行车条件, 同时也能相应降低工程成本和减少对周围环境影响<sup>[1-2]</sup>。既有铁路的列车行车密度较大,

列车对线路平顺性要求高, 顶进过程中易引起上部路床不均匀沉降变形, 影响铁路轨道的平顺性。为避免以上严重后果, 必须加强路基变形的监控测量, 将顶进施工对铁路路基本体稳定与变形影响的动态变化信息及时反馈到施工单位, 及时调整施工参数, 实现施工过程信息化<sup>[3-5]</sup>。

建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术的出现与应用, 使得建筑行业重新思考一

收稿日期: 2020-03-30; 修订日期: 2020-05-12

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(20202ACB202005)

第一作者: 郑明新(1966—), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 492001473@qq.com

通信作者: 杜子真(1994—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: duzizhen705@qq.com

种全新的建筑施工方式<sup>[6-7]</sup>。BIM 技术具有可视化、协调性、模拟性、优化性、可出图性、可预测性和可控制性等特点。桥梁结构施工中普遍将 BIM 技术与监测技术相结合，为桥梁管理养护部门提供一条可视化、信息化的桥梁健康信息监测方案<sup>[8-11]</sup>。李小玲等<sup>[12]</sup>提出基于 BIM 的结构健康监测，提高了监测数据管理效率及监测信息与模型的交互性。

对于框架桥下穿既有铁路施工而言，利用 BIM 技术构建包含监测系统、视频安全监控系统、云端数据存储和综合预警系统的智能监测平台，不但可使监测数据及时有效的传达给参建各个单位，同时也使得监测数据能可视化、图表化显示。通过建立综合预警系统，能对天气因素、列车临近信息及监测数据进行实时反馈，一旦监测数据出现异常，则能利用云端全方位的传递报警信息。通过利用 BIM 技术的可视性和模拟性，能帮助决策者快速确定发生异常的部位并进行合理决策，保证框架桥下穿既有铁路顺利施工，也有利于既有线路运营安全。

笔者基于框架桥工程及 BIM 技术，以福建龙岩市永定区凤城街道下坑一路框架桥下穿漳龙线铁路工程为例，研发了基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台。该平台融合监测数据采集、存储、分析、处理的自动化技术和预警系统，发挥 BIM 技术的实时可视化、信息共享等优势，实现监测信息与模型的交互性。

## 1 BIM 技术在施工中的优势

对框架桥下穿既有线路工程而言，对既有有线有着破坏性影响，存在诸多方面的风险源。框架桥下穿顶进工程失败主要的原因有：①路基边坡坍塌；②框架桥偏移：框架桥扎头、框架桥抬头和框架桥水平偏移；③钢轨偏移。

针对这上述风险因素，有必要对框架桥下穿的整个施工过程进行监测。然而，目前大部分施工单位仍采用纸质数据反馈监测结果，缺乏对现场情况的直观感受及信息处理的及时性，存在效率低、实时性滞后、准确性差和不够直观等问题。BIM 监测平台的搭建能实现信息数据的及时传输，很好地起到预警作用，为框架桥顶进施工安全保驾护航。鉴于此，有必要深入研究基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台。

## 2 工程概况及智慧监测系统平台

### 2.1 工程概况

该项目位于福建龙岩市永定区凤城街道境内。下坑一路为南山凤凰城小区的主要进出通道，总体

呈西南走向；漳龙线铁路在下坑片区呈东南走向，该道路与漳龙线铁路呈立体交叉。为解决小区出入通道问题，下坑一路至南山凤凰城小区道路拟在漳龙线铁路 K127+080 处采用框架桥顶进方式下穿。

该段铁路路基土以第四系全新统人工填土及冲积层、第四系上更新统残坡积层为主，下为风化全风化花岗岩，遇水易于软化、地基承载力低，框架桥结构设计采用 1-10.0×4.0m，净宽 10m，框架桥长 11m，采用顶进法施工，最大设计顶力为 1103.8T。拟建框架桥与漳龙铁路平面交叉关系具体见图 1。

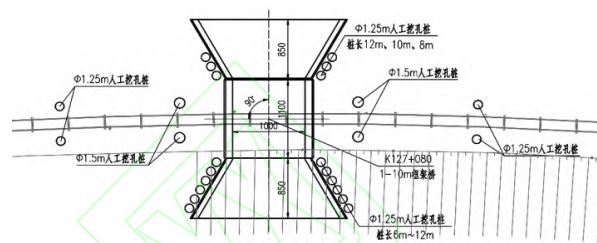


图 1 拟建框架桥与漳龙铁路平面交叉关系

Fig. 1 Plane crossing relationship between the proposed frame bridge and Zhanglong railway

### 2.2 智慧监测系统平台

框架桥下穿智慧监测系统平台是基于 BIM 技术下的管理平台，该平台能存储框架桥施工期内的所有信息。通过构建 BIM 模型，实现了覆盖工程全建设周期的信息共享和管理的一体化监测。

基于 BIM 技术框架桥下穿智慧监测系统平台应用 3D 模型技术(BIM 模型)、采用先进的 ASP.NET MVC4 架构，利用全天候自动化监测设备，通过远程数据传输和云端大数据存储技术，使用人工智能数据处理和分析评估技术等，同时配套大屏幕、视频监控等硬件设施和相关配套的多平台(手机 APP、网页端、PC 端)软件设施，构建了在 BIM 技术上的实时动态监测信息共享解决方案，该平台的基本架构如图 2、3。

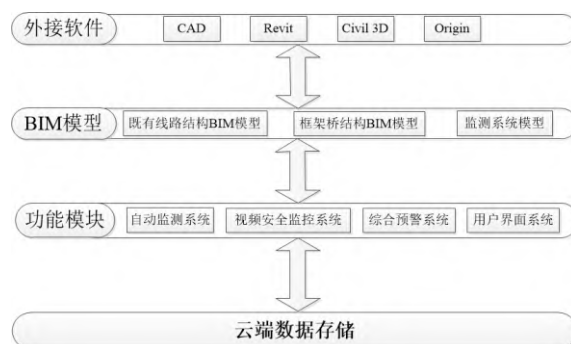


图 2 框架桥下穿智慧监测平台架构

Fig. 2 Framework of intelligent monitoring platform under frame bridge

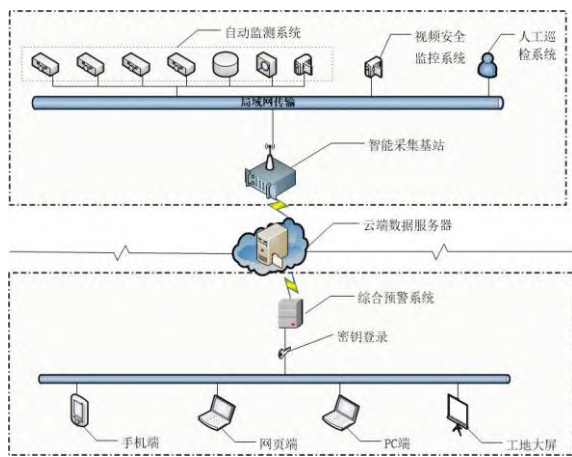


图3 框架桥下穿智慧监测平台硬件组织架构

Fig. 3 Hardware organization chart of intelligent monitoring platform under frame bridge

### 3 智慧监测平台的构建

#### 3.1 智慧监测平台实施方案

框架桥下穿智慧监测系统 BIM 技术能融合框架桥下穿施工期的众多信息。其中最关键、最主要的方面是：对框架桥下穿既有线路监测数据的收集、处理、分析评估和预警决策。

##### 3.1.1 BIM 模型建立

利用 Revit 等建模软件构建出包括既有线路结构、框架桥和监测系统的 BIM 模型，如图 4。既有线路结构和框架桥结构的 BIM 模型必须是按照设计信息、施工信息所建造的 BIM 模型，反映真实的铁路基结构初始状态。

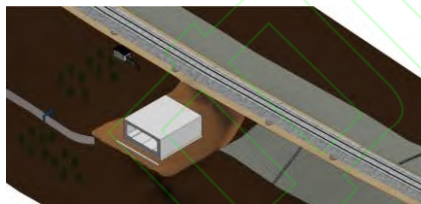


图4 BIM模型

Fig. 4 BIM model

##### 3.1.2 视频安全监控系统建立

框架桥顶进施工对既有线路具有破坏性，不仅现场施工管理人员需要了解现场实时的施工情况，铁路管理单位也需要对现场施工情况进行监督、监管；故现场视频安全监控系统是必不可少的。同时，在顶进时对结构关键部位的观测也可通过视频安全采集系统进行观测，能有效确保施工安全。

视频安全监控系统对应的监控设备需在 BIM 模型中一一对应，用户点击相应监控部位能直接查看对应探头所拍摄画面。远程视频安全采集监控系统通过摄像头对工地、施工情况进行实时监督，是监测工作重要补充。

#### 3.1.3 自动监测系统建立

针对框架桥顶进的特殊风险源分析，确定所监测内容。监测内容及监测仪器见表 1。

表 1 框架桥顶进施工监测内容及所需仪器

Table 1 Monitoring contents and required instruments for jacking construction of frame bridge

监测内容		所需仪器
铁路路基及边坡	水平位移	双轴倾斜仪、位移计
	沉降	静力水准仪
铁轨	轨距	数显轨距尺
	水平位移	双轴倾斜仪、位移计
D 型便梁	沉降	静力水准仪
	顶进轴线水平方向	激光水准测点
框架桥	高程位移	静力水准仪
	侧壁和底板受力	土压力传感器
		钢筋应变片
	进度位置	GPS+BDS
后备桩	水平位移	双轴倾斜仪、位移计
	沉降	静力水准仪
监测数据采集及传输		智能采集基站

监测系统模型主要包括：监测系统参数、传感器位置、采购信息、维护信息等；传感器主要包括：双轴倾斜仪、位移计、静力水准仪、激光水准测点、温度计、GPS+BDS 和摄像机等。这些监测设备和所构建的 BIM 模型一一对应绑定，确保监测数据可正确、真实的在对应模型位置显示。监测信息通过智能采集基站实现自动化采集数据并实时传输到监测平台中去，通过综合预警系统对监测数据进行处理，生成表格和折线图，实现全天候、全时间段自动化监测和数据处理。用户可在 BIM 模型中实时查看对应的监测数据，实现了监测可视化显示。

##### 3.1.4 综合预警系统建立

综合预警系统包括统计分析模块和综合预警模块。

###### 1) 统计分析模块

统计分析模块的功能是对监测仪器工作状态进行分析处理及对采集传输回的监测数据进行统计处理。主要作用是自动生成监测数据表格和折线图。同时监测设备状态在 BIM 模型上依靠参数化控制，以不同图形、颜色实现动态化、可视化表达。管理人员通过各显示模式就可知道当前构件所处的工作状态。统计分析模块监测数据曲线某段时间内的波动若出现异常，则会被放入综合预警模块中。

## 2) 综合预警模块

综合预警模块的功能是将异常数据与预先设置的预警值进行比较,并在 BIM 模型中通过不同模型图形或颜色进行显示。若监测数据介于最小阈值与预警值之间,说明监测数据正常,则在监测仪器的 BIM 模型显示为绿色;若监测 BIM 模型仪器模型显示为黄色,表明此刻此处达到预警值,若要保证施工正常运行则要立刻采取措施,避免出现安全事故;若监测仪器模型显示为红色,表明所采集的数据大于设定的报警值数据,则智慧监测平台会向预设手机号码发送报警短信,及时通知相应的管理人员,此刻管理人员可精准定位故障发生位置,采取对应措施进行抢救性修补,同时查明原因,采取纠偏预案。其流程见图 5。

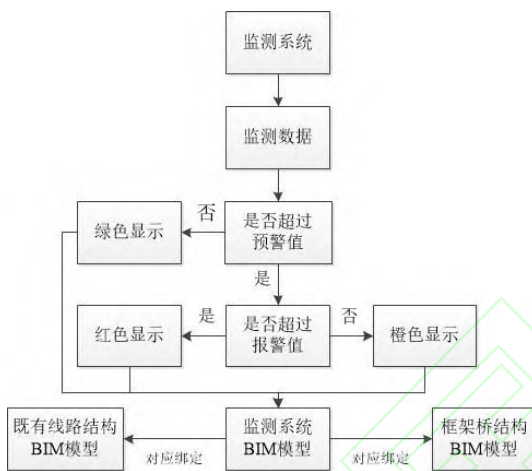


图 5 监测数据报警流程

Fig. 5 Monitoring data alarm process

### 3.1.5 用户界面系统建立

用户界面系统主要包括 PC 端、手机端和网页端。同时包括报表生成管理模块、数据显示与维护模块和交互式录入与查询模块。用户界面系统可实现数据录入、显示和管理,自动化生成监测数据图表,根据上传模板生成监测日报、周报和月报,大大减轻了在此项目上的投入的人力及精力;同时也实现了监测数据的实时反馈,实时监控,避免传统监测时数据处理出现错误等问题,为项目施工安全提供了可靠信息。其软件界面示意图 6。



图 6 软件界面

Fig. 6 Software interface

## 3.2 BIM 技术实时评估预警及智慧决策

框架桥下穿智慧监测平台最终目的是利用所采集的监测数据进行实时分析、处理,从而进行智能预警,帮助人们进行决策,如图 7。

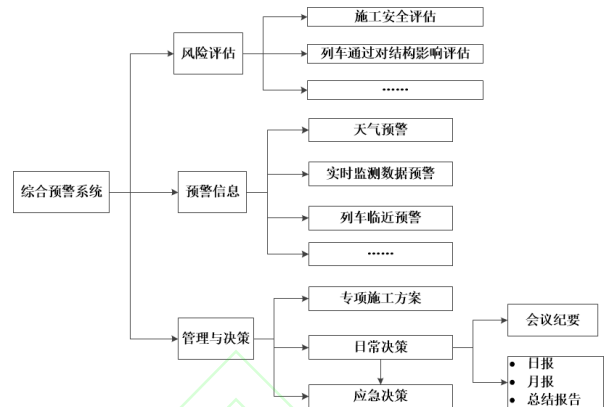


图 7 框架桥下穿智慧监测平台综合预警系统

Fig. 7 Comprehensive early warning system of intelligent monitoring platform under frame bridge

监测平台可结合 BIM 模型和有限元分析模块进行实时的力学分析,发挥 BIM 技术相对于传统健康监测监测系统所不具备的实时理论分析能力。同时,根据监测数据发生部位并储存相应的应急预案,提供合理的应急措施。

利用 BIM 技术模拟施工的特点,当箱涵顶进时出现路基边坡坍塌、框架桥偏移、钢轨偏移等不利因素时,通过 BIM 能进行模拟管理者采取的措施,可迅速准确判断该措施治理效果,进一步确保工程顺利推进。

### 3.2.1 风险评估

BIM 具有可视化、协调性、模拟性、优化性、可出图性、可预测性和可控制性等特点<sup>[13]</sup>。在施工前的准备阶段,利用 BIM 模拟技术,可使工程参与各方提前对施工过程中的重、难点进行模拟和演练,能掌握施工过程中的各项技术要点,有利于做好对工程各质量控制点的严格把控,实现了对施工的安全评估。

### 3.2.2 智慧预警

#### 1) 通过有限元计算预测

通过有限元软件进行前期数值计算,可在一定范围内对水平位移和沉降值有大致了解。通过监测重点部位,同时对计算结果较大的位置进行重点监测,当出现异常时能及时发出预警信息。其中:监测平台可结合 BIM 模型和有限元分析模块进行实时有限元计算分析,发挥 BIM 技术下监测平台相对于传统监测所具备的独特优势。

#### 2) 通过实时监测数据实时预测

对监测数据进行数据预测是一个复杂的非线性

性回归问题。现场监测数据因现场实际情况、人为观测等原因会出现数据离析，若想要得到准确的监测数据，则需要对监测数据进行统计学方法处理，这是一种常用的、有效的数据处理方法。

采用 Origin 软件对监测数据进行数据拟合，得到变形值随时间变化曲线。选用合理的非线性函数模型，使  $R$  平方(相关系数)与残差平方和并判定拟合结果： $R$  平方越接近 1 代表拟合效果越好；残差平方和越小代表拟合效果越好，从而确定最优回归函数。针对路基沉降监测数据进行数据拟合，拟合结果见表 2，拟合曲线见图 8。通过拟合函数可对之后的变形趋势进行预测，同时该数据随着检测情况变动也是不断更新的。当未来变形趋势有异常时(出现大变形等)，会及时向技术人员进行预警。其软件界面见图 9。

表 2 监测数据拟合结果

Table 2 Fitting results of monitoring data

参数	取值	参数	取值
点数	17	$R$ 平方(COD)	0.99653
自由度	10	调整后 $R$ 平方	0.99445
Reduced Chi-Sqr	0.02472	拟合状态	成功(100)
残差平方和	0.2472		

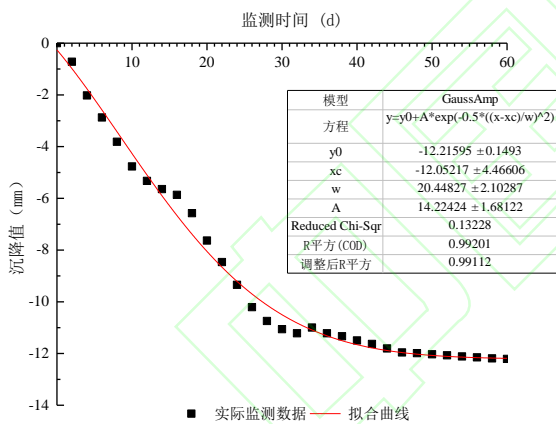


图 8 监测数据拟合曲线

Fig. 8 The monitoring data fit the curve

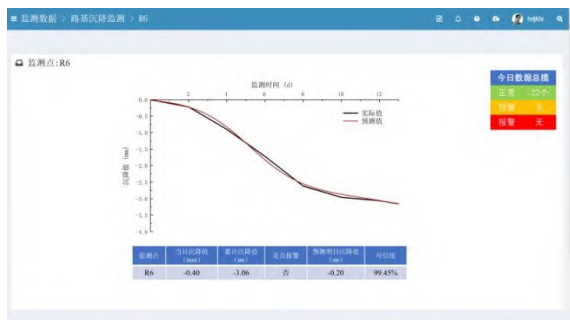


图 9 监测数据界面

Fig. 9 The monitoring data interface

### 3.2.3 预警信息

1) 天气信息通过与气象网站对接，获取工程所在地的天气情况。当出现异常时，如：雷雨，大风等，系统则会通过短信等形式及时通知管理人员。

2) 列车临近预警。当列车临近施工地点时，预警系统根据袖珍式列车接近预警器信息，将列车通过信息显示在工地大屏上，同时提醒施工人员进行防护。

3) 实时监测数据预警。实时监测数据预警是监测平台的核心，该平台将监测设备和 BIM 模型一对一绑定，当监测设备数据出现异常时可快速定位异常部位，便于快速应急决策。根据实际工程特点，管理人员设置好不同监测项目的预警和报警值，系统则可确定风险等级，将不同状态对应到 BIM 模型中相应部位。3 种颜色代表 3 种情况：绿色为安全；橙色为预警；红色为危险。通过实时监测数据预警可使项目参建方能一目了然地了解各个部位的工作状态及风险情况，做好风险预警。监测仪器采集的监测数据一旦有异常，则监测平台会向管理人员发送报警信息。

### 3.2.4 管理与决策

BIM 平台基于真实模型信息及实时监测数据进行大数据挖掘和识别分析。一个完整的 BIM 监测平台数据信息不仅是监测数据，还包括其他的施工信息。故对海量监测数据进行挖掘、处理、拟合，提取关键有效信息是非常必要的。基于关键实时监测信息可进行动态安全评估和风险预测评估，尤其是针对特定风险的识别及响应分析。

基于监测平台的开放性，参与工程各方均可使用，这样避免了监测数据造假等问题发生；依靠自动化监测设备为主，人工复测为辅的监测手段可确保监测数据的准确和可靠，便于参建各方对工程的管理。

基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台可存储施工开始时的决策信息，包括：施工方案、日常决策和应急预案等。利用上传模板自动生成日报、月报，可大大减轻参建各方的内业整理工作。监测平台能自动记录发生预警的风险等级、发生部位、发生时间等信息，实现了同平台实时监测数据浏览、计算分析及快速预警。

## 4 结论

考虑到传统框架桥顶进施工监测管理仍停留在纸质文件管理模式下，无法让参与施工各方人员有效、快速地掌握框架桥下穿既有铁路工程中各结

构的真实状态, 笔者结合 BIM 技术, 建立了基于 BIM 技术的监测平台, 得出如下结论:

1) 以基于 BIM 技术的框架桥下穿监测平台, 通过 3D 模型将监测仪器布置信息直观简洁信息化, 通过 BIM 模型中各个结构真实属性设置和与监测数据结合, 能很好地展示路基的变形情况、框架桥的顶进情况及加固结构 D 型梁的工作情况等结构状态;

2) 基于 BIM 技术的框架桥下穿监测平台多模块设立, 实现了预警信息及时传达, 便于管理人员快速确定问题发生部位, 便于管理人员快速确定应急决策;

3) 监测平台的建立实现了实时动态监测信息共享, 实现了监测数据的及时传输, 实现了监测数据动态化、图标化显示; 由于其多方实时参与及依靠自动化的监测设备为主、人工复测为辅的监测手段, 确保了监测数据的准确性与可靠性, 使施工单位依靠监测数据快速准确调整施工方案, 保证框架桥下穿既有铁路施工安全;

4) 结合实际工程进行有限元计算, 对实时监测数据进行非线性回归分析拟合, 预测变形趋势, 保障框架桥下穿施工时既有线路的运营安全。

#### 参考文献(References):

- [1] 王进. 铁路工程施工[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.  
WANG Jin. *Railway Engineering Construction*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [2] 李幼林. 顶进涵下穿铁路可行性研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(19): 269-270.  
LI Youlin. Research on the feasibility of jacking culvert underneath pass railway[J]. *Shanxi Architecture*, 2008, 34(19): 269-270.
- [3] 徐珂. 高速公路下穿既有运营铁路施工关键技术及安全控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.  
XU Ke. *Research on key Construction Technology and Safety Control of Highway Under-crossing Existing Operation Railway*[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [4] 胡国平. 框架涵下穿铁路安全监控与施工风险分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.  
HU Guoping. *Safety Monitoring and Construction Risk Analysis of Frame Culvert Underpass Railway*[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.
- [5] 铁道建筑编辑部. 铁道部重新修订《铁路营业线施工安全管理办法》[J]. 铁道建筑, 2013(2): 51-51.  
Railway Engineering Editorial Office. Ministry of railways revises management measures for construction safety of railway business line[J]. *Railway Engineering*, 2013(2): 51-51.
- [6] 沈毅. BIM 技术在项目施工管理中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
SHEN Yi. *Study on Application of BIM Technology in Project Construction*[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [7] 陈潇睿. 5D 模型在建筑管理软件中的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
CHEN Xiaorui. *Design and Implementation of BIM System Based on 5D Model*[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [8] 刘天成, 程潜, 王小宁, 等. 基于 BIM 的平塘特大桥建养多源信息融合技术及系统研发[J]. 公路, 2019(9): 12-17.  
LIU Tiancheng, CHENG Qian, WANG Xiaoning, et al. Research and development of multi-source information fusion technology and system for Pingtang bridge construction and maintenance based on BIM[J]. *Highway*, 2019(9): 12-17.
- [9] 刘天成, 程潜, 刘高, 等. 基于 BIM 平台的平塘特大桥结构健康监测信息融合技术研究[J]. 公路, 2019(9): 18-22.  
LIU Tiancheng, CHENG Qian, LIU Gao, et al. Research on information fusion technology of structural health monitoring of Pingtang super large bridge based on BIM platform[J]. *Highway*, 2019(9): 18-22.
- [10] 孙建诚, 朱双晗, 蒋浩鹏. BIM 技术在公路边坡的应用探究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 63-67.  
SUN Jiancheng, ZHU Shuanghan, JIANG Haopeng. Application of BIM technology to highway slope[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2019, 38(9): 63-67.
- [11] 孙建诚, 蒋浩鹏, 杨文伟, 等. 基于 BIM 的三维参数化桥梁标准建模方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(10): 19-24.  
SUN Jiancheng, JIANG Haopeng, YANG Wenwei, et al. Method of three-dimensional parametric bridge standard modeling based on BIM technology[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2019, 38(10): 19-24.
- [12] 李小红. 基于建筑信息模型的结构健康监测可视化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
LI Xiaoling. *Research on Visualization for Structural Health Monitoring Based on Building Information Model*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [13] 周佳悦. BIM 技术应用模式分析与适应性设计探索[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
ZHOU Jiayue. *Research on BIM Application Analysis and Adaptive Strategies of Architectural Design*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

(责任编辑: 刘 韬)