

城市系统工程

URBAN SYSTEMS ENGINEERING

地址：香港油尖旺區大角咀通州街 111 號雲之端 509 室

邮编：999077

电话：00852 2742 8981

电子邮箱：zgzxscb@163.com

城市系统工程

城市系统工程

URBAN SYSTEMS ENGINEERING

2025 年 1 月 第 1 卷 第 1 期

2025 年 1 月 第 1 卷 第 1 期

ISSN 1672-500X



9 771672 500259

0.1 >

主办单位 中國紫荊學術出版社有限公司

城市系统工程

URBAN SYSTEMS ENGINEERING

2025年1月第1卷第1期(月刊)

主办单位: 中國紫荊學術出版社有限公司

主 编: 吴春茂

副 主 编: 黄智钦

编 务: 盘能文 秦雪梅 师 征 杨文峰

编辑出版: 《城市系统工程》编辑部

电子邮箱: zgjxscb@163.com

稿件查询: 00852 2742 8981

出版日期: 每月 25 日

联系地址: 香港油尖旺區大角咀通州街 111 號

雲之端 509 室

邮 编: 999077

Sponsored by China Bauhinia Academic Publishing

House Co., Limited

Editor in Chief WU Chunmao

Deputy Editor in Chief HUANG Zhiqin

Editors PAN Nengwen QIN Xuemei SHI Zheng YANG Wenfeng

Edited and Published by Urban Systems Engineering

editorial department

Email zgjxscb@163.com

Telephone 00852 2742 8981

Publication Date The 25th of each month

Address RM 509, 5/F THE CLOUD 111 TUNG CHAU ST TAI

KOK TSUI HONG KONG

Postal Code 999077

编辑委员会

Editorial Committee

学术顾问: 李烈军

主 任: 高汝楠

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈学文 韩冬楠 金海明

李 硕 胡继华 封加军

Academic Consultant LI Liejun

Director GAO Runan

Members(Sorted by alphabetical order of sumame in Pinyin)

CHEN Xuewen HAN Dongnan JIN Haiming

LI Shuo HU Jihua FENG Jiajun

科技引领世界，照亮未来



行业前沿

城市复杂系统建模的新理论	李梓轩	1
系统动力学与多智能体仿真的算法改进	张逸飞 刘景铄	9
城市网络分析	陈宇澄	19
城市韧性评估的新指标体系	杨梓晨 黄嘉佑 吴启铭	27
数字孪生城市的理论框架	徐俊辉 孙浩宇	35

工程应用

5G 技术在智能交通中的应用与挑战	冯逸晨 曾宇轩	40
人工智能驱动的智慧城市基础设施建设	程嘉豪	48
公共交通线路规划与调度	蔡宇澄	58
突发事件模拟与应急预案制订	刘 辉	63
基于多智能体仿真的土地利用评估	刘 锋	68
基于 BP 神经网络和 LSTM 网络模型的软土地基沉降预测分析	刘亚辉	71
基于 BIM 技术的预应力混凝土桥梁转体系统施工技术研究	赵树锋	74

项目实践

上海临港新片区智能交通基础设施建设案例分析	袁嘉佑 80
新加坡智慧城市建设中的数字基础设施实践	于启铭 97
某特大城市“城市大脑”建设与运营的系统工程分析	彭逸飞 潘梓晨 105
某新区基于 CIM 平台的协同规划实践	林飞飞 115
某城市地铁网络化运营的系统优化案例	陈小学 123

人才培养

城市系统工程建设领域的人才需求与培养模式	杨雅莹 130
高校在数字基础设施人才培养中的实践与探索	黄静宜 138
职业教育在智能交通人才培养中的作用	吴思瑶 周婉晴 147

可持续发展

韧性城市规划	杨 雅 158
碳足迹追踪与减排策略	黄 静 165
气候变化适应性评估	吴思用 周晴婉 175
数据中心的绿色节能技术与实践	余靖泽 叶俊辉 苏 逸 183
5G 基站的低碳建设与运营策略	林 羽 186
新能源在新型基础设施中的应用与挑战	陈 煦 190

URBAN SYSTEMS ENGINEERING

Volume 1 Issue 1 (Total Issue 1) January 2025

Contents

Industry Frontier

New Theories for Urban Complex System Modeling	LI Zixuan	1
Algorithmic Improvement in System Dynamics and Multi-Agent Simulation	ZHANG Yifei, LIU Jingshuo	9
Urban Network Analysis	CHEN Yucheng	19
New Index System for Urban Resilience Assessment	YANG Zichen, HUANG Jiayou, WU Qiming	27
Theoretical Framework for Digital Twin Cities	XU Junhui, SUN Haoyu	35

Engineering Application

Application and Challenges of 5G Technology in Intelligent Transportation	FENG Yichen, ZENG Yuxuan	40
Artificial Intelligence-Driven Smart City Infrastructure Construction	CHENG Jiahao	48
Public Transit Route Planning and Scheduling	CAI Yucheng	58
Emergency Incident Simulation and Emergency Plan Formulation	LIU Hui	63
Land-Use Assessment Based on Multi-Agent Simulation	LIU Feng	68
Prediction Analysis of Soft Soil Foundation Settlement Based on BP Neural Network and LSTM Network Model	LIU Yahui	71
Research on Construction Technology for Prestressed Concrete Bridge Swivel System Based on BIM Technology	ZHAO Shufeng	74

Optimization and Application of Smart Operation and Maintenance Management Platform for Road Tunnels

WENG Kaixiang 77

Project Practice

Case Analysis of Intelligent Transportation Infrastructure Construction in Shanghai's Lingang New Area YUAN Jiayou 80

Digital Infrastructure Practice in Singapore's Smart City Construction YU Qiming 97

Analysis of System Engineering for a Super-Large City's "City Brain" Construction and Operation
PENG Yifei, PAN Zichen 105

Collaborative Planning Practice Based on CIM Platform in a New District LIN Feifei 115

System Optimization Case for Metro Network Operation in a City CHEN Xiaoxue 123

Talent Training

Talent Demand and Training Mode in the Field of Urban System Engineering Construction YANG Yaxuan 130

Practice and Exploration of Colleges and Universities in Digital Infrastructure Talent Training HUANG Jingyi 138

Role of Vocational Education in Intelligent Transportation Talent Training WU Siyao, ZHOU Wanqing 147

Sustainable Development

Resilient City Planning YANG Ya 158

Carbon Footprint Tracking and Emission Reduction Strategies HUANG Jing 165

Climate Change Adaptation Assessment WU Siyong, ZHOU Qingwan 175

Green Energy-Saving Technology and Practice for Data Centers YU Jingze, YE Junhui, SU Yi 183

Low-Carbon Construction and Operation Strategies for 5G Base Stations LIN Yu 186

Application and Challenges of New Energy in New Infrastructure CHEN Xu 190

基于 BP 神经网络和 LSTM 网络模型的 软土地基沉降预测分析

Prediction Analysis of Soft Soil Foundation Settlement Based on BP Neural Network and LSTM Network Model

刘亚辉

LIU Yahui

广州港工程管理有限公司, 广东 广州 510700

Guangzhou Port Engineering Management Co., Ltd., Guangzhou 510700, Guangdong, China

摘要: 为探究厦门某机场工程中软土地基大面积堆载造成的地表沉降问题, 文章基于厦门某机场工程自动化监测项目, 辅以人工监测进行对比, 分析偏差的成因, 同时利用神经网络 (back propagation, BP) 和长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 模型分别对典型区域表层沉降监测点的累计沉降量进行预测分析及精度对比, 发现 LSTM 网络预测模型精度更高, 整体预测效果优于 BP 神经网络模型, 预测效果也更符合实际情况, 能为计算工后沉降、评判处理效果、核实工程量等提供一定的参考依据。

关键词: 自动化监测; 软土地基沉降; BP 神经网络; LSTM 网络模型

Abstract: In order to explore the surface settlement caused by large-scale stacking of soft soil foundation in an airport project in Xiamen, based on an airport engineering automatic monitoring project in Xiamen, supplemented by manual monitoring for comparison, this paper analyzes the causes of deviation. At the same time, the Back Propagation (BP) and Long Short-Term Memory (LSTM) models are used to predict and analyze the cumulative settlement of surface settlement monitoring points in typical areas and compare the accuracy. It is found that the LSTM network prediction model has higher accuracy, the overall prediction effect is better than that of BP neural network model, and the prediction effect is more in line with the actual situation, which can provide some reference for calculating

post-construction settlement, judging treatment effect and verifying engineering quantity.

Keywords: automatic monitoring; soft soil foundation settlement; BP neural network; LSTM network model

中图分类号: TU447; TU433

1 研究背景

厦门沿海地区大面积软土地基处理常采用塑料排水板堆载预压的方法, 监测以传统的水准测量为主, 无法实时反映地表沉降情况, 这就需要大力推广自动化监测技术, 以提高监测工作的效率和预判的准确度。文章基于厦门某机场工程大规模自动化监测项目, 辅以人工监测数据进行对比校核, 分析偏差的成因, 同时使用 BP 神经网络和 LSTM 网络模型分别对典型区域表层沉降监测点的累计沉降量进行预测分析, 将预测得到的沉降值与该测点的实际监测沉降值进行对比, 判断哪种模型的预测效果更符合实际情况, 以期能为计算工后沉降、评判处理效果、核实工程量等提供准确的参考依据。

2 工程概况

该项目位于厦门本岛东侧大嶼岛, 造地区域存在大面积软土分布, 不宜作为持力层, 因而需对此类软土进行处理。软土采用插板排水堆载预压的方式进行地基处理, 地基预压阶段设置了自动化沉降监测, 并定期采用电子水准仪对沉降板进行人工监测。

作者简介: 刘亚辉, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为港口航道工程的监测检测。

表层沉降自动化监测采用基于磁致伸缩位移传感器的自动化沉降仪,包括磁致伸缩位移传感器、测杆和带有磁环的沉降板^[1]。安装后,测杆埋设至稳定不动土层中,沉降传感器与测杆连接,沉降板固定有磁环,磁环将产生永定磁场,同时沉降板套在传感器外部,当土体发生沉降时,会带动沉降板连同沉降磁环一起下降,因为传感器固定不动,所以沉降磁环与传感器之间产生的相对位移量即为土体的沉降量^[2]。

3 变形预测理论与模型研究

3.1 BP神经网络预测模型

BP神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络^[3]。文章预测模型处理的数据是只考虑时间影响的地表沉降数据,因此是基于时间序列影响的神经网络预测模型。BP模型主要建模过程如下:读取待拟合的监测数据,自回归阶数设定为2;将监测得到的前20期数据作为训练集,后5期的沉降监测数据作为测试集,进行数据分析处理;设定输入节点数为2、输出节点数为1、单隐含层节点数为2、最大迭代次数为1000、学习率为0.01;进行反复迭代训练和测试;最后进行误差分析,满足设置的误差限值,得到最终的预测结果。

3.2 LSTM网络预测模型

LSTM网络模型是循环神经网络(recurrent neural network, RNN)的改良模型,具有细胞单元记忆、保存和遗忘信息的功能,表达方式采用门形式进行输入、遗忘和输出,起到长期记忆的作用^[4]。建模过程和BP神经网络类似,设置输入层数为2、单隐含层数为37、全连接层节点数为1,训练迭代次数设定为1000、初始学习率设定为0.005、优化算法按照Adam函数,进行权值不断迭代,直至达到设置的最小误差限值和训练次数限值^[5]。

3.3 模型精度评价方法

通过计算绝对误差、相对误差、均方根误差和平均绝对误差来评价模型的预测精度,其中均方根误差RMSE和平均绝对误差MAE的计算公式,分别如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_t^p - y_t^s)^2}{n}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t^p - y_t^s| \quad (2)$$

式中: n 为测试集的个数; y_t^p 为对应时刻的形变预测值; y_t^s 为对应时刻的实际值。

4 监测结果和差异性分析

4.1 沉降监测结果分析

文章选取淤泥层较厚的某陆域分区为研究对象,自动化监测系统在堆载预压过程中均正常运行,历时12个月,堆载为分级堆载,堆载高度为10m,取其中3个典型表层沉降观测点,分别设置为1#、2#、3#。对3个沉降观测点的监测数据进行差异性分析和线性拟合,得到各观测点的累计沉降量分析数据,如表1所示。

表1 各观测点的累计沉降量分析数据

Observation point number	linear relationship	Relevance
1#	$y=0.9856x+(-4.4969)$	0.9981
2#	$y=0.9998x+(-3.5112)$	0.9991
3#	$y=0.9961x+(-17.7115)$	0.9991

由表1可知,两种监测技术的线性关系较强,相关度均在0.99以上,两者的沉降量在数值上具有较高一致性,因此证明自动化监测结果是相对可靠的,可以参考线性关系公式对自动化监测数据进行修正。按线性关系公式,斜率和截距的平均值分别取0.9972和-8.5732,即 $y=0.9972x+(-8.5732)$ 。由分析可知,产生差异的时间主要在前期,即吹填堆载过程中,堆载过程的扰动、测杆倾斜是造成地表沉降自动化监测和人工监测发生差异的主要原因。

4.2 预测结果分析

文章通过对典型区域的3个表层沉降监测点的25期沉降监测数据进行训练分析建模,将每个监测点的表层沉降监测数据前20期作为训练集,来预测后5期表层沉降监测数据,对比分析两种预测模型的差异和精度,拟合和预测结果如图1所示,其数值变化趋势一致,由此说明两种预测模型都能得到较好的预测结果。

4.3 精度评价

对两种模型的精度评价指标进行计算,对比其绝对误差、相对误差、均方根误差RMSE和平均绝对误差MAE结果,如表2所示。

由表2可知,BP神经网络预测结果最大绝对误差为65.5mm,最大相对误差为7.84%;LSTM网络模型预测结果最大绝对误差为17.3mm,最大相对误差为

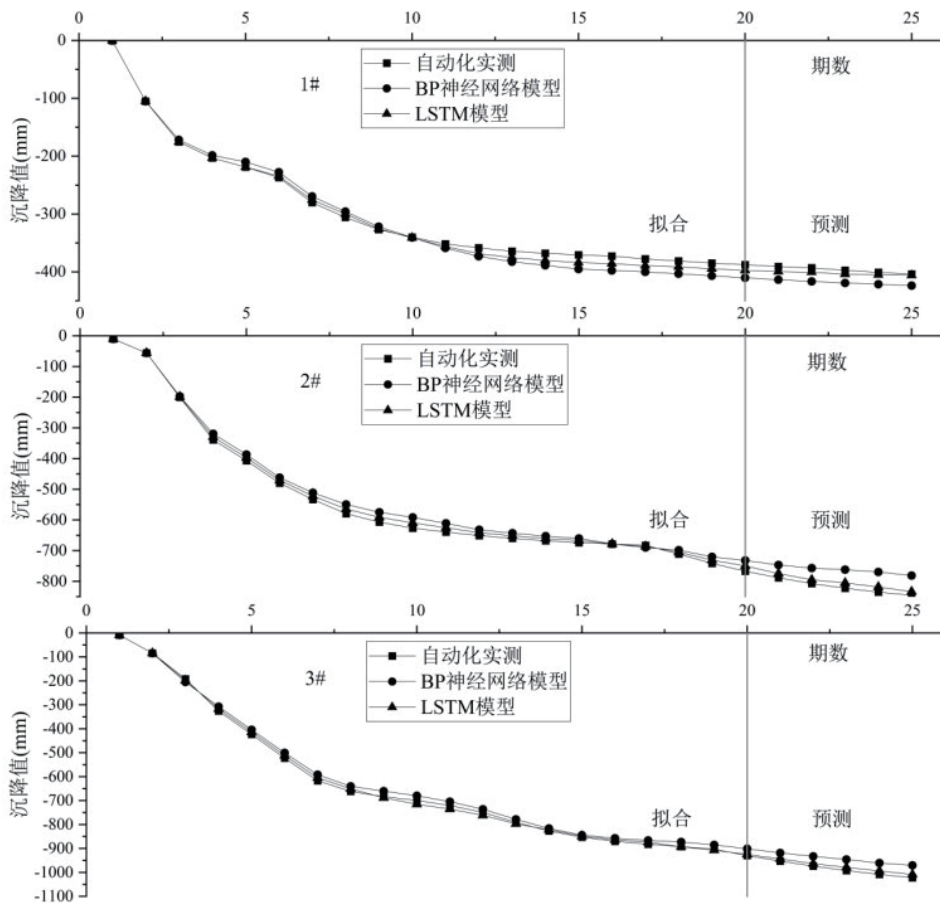


图1 测点沉降模型拟合和预测结果图

2.21%。由此可见，LSTM 网络模型预测结果更加理想，在趋势和数值上与真实情况一致性更高；经精度评价指标计算，LSTM 网络模型 3 个测点的均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE 指标值明显较低，其中 RMSE 分别减少了 15.5mm、42.7 mm、32.0mm，MAE 分别减少了 15.9mm、42.1mm、31.7mm。

综上，通过与典型区域监测点表层沉降的实际数据对比分析，LSTM 网络模型预测结果比 BP 神经网络模型误差更小，整体的拟合和预测效果相对更优，具有较高的准确性。

5 结论

文章将 BP 神经网络模型和 LSTM 网络模型监测结果进行对比分析，得出如下结论：

(1) 两种监测手段数据虽在前期略有差异，但基本具有较高的一致性，线性相关度均在 0.99 以上，保证了结果的相对可靠性。

(2) 两种预测模型均表现出良好的拟合和预测效果，但是 LSTM 网络模型的拟合值和预测值误差较小，

效果更理想。

(3) 经精度评价指标计算对比分析，LSTM 网络模型的预测效果更适合于时序形变数据的预测，具有更高的预测精度，预测结果也更接近实际形变值，能为推算工后沉降、评判处理效果和核实工程量等提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] 王延宁, 余健俊, 周逸伦. 基于 BIM 和 IoT 数据驱动的智慧运维管理系统开发研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 686-695.
- [2] 文武松, 毛伟琦, 陶世峰. 新时代桥梁智能建造及智慧服务体系研究[J]. 世界桥梁, 2022, 50(6): 122-127.
- [3] 王楠, 陈亚冬. 基于数字孪生的城市轨道交通智慧运维应用[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 194-202.
- [4] 安镜如, 潘盛山, 闫东, 等. 基于 BIM 的海底隧道智慧运维管理研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(3): 47-52.
- [5] 于秋波, 倪国政, 王志锐. 城轨交通接触网安全在线监测系统[J]. 中国铁路, 2024(3): 50-56.

基于 BIM 技术的预应力混凝土桥梁转体系统施工技术研究

Research on Construction Technology for Prestressed Concrete Bridge Swivel System Based on BIM Technology

赵树锋

ZHAO Shufeng

中铁二十四局集团江苏工程有限公司, 江苏 南京 210018

China Railway 24th Bureau Group Jiangsu Engineering Co., Ltd., Nanjing 210018, Jiangsu, China

摘要: 文章依据具体工程, 介绍了转体结构的组成, 分别从下转盘施工、球铰制造及安装、滑道安装、支撑脚安装、转体牵引计算、称重实验等方面着手, 研究了转体结构施工流程和技术要点。项目应用建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 技术, 对转体桥梁的转体系统进行碰撞检测及施工流程模拟, 验证了施工方案的可行性, 并对高风险作业步骤进行了改良, 为转体桥梁施工方案的有效执行提供了支持, 旨在为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: BIM 技术; 转体系统; 称重实验; 转体模拟

Abstract: Based on a specific project, this paper introduces the composition of the swivel structure and studies the construction process and key technical points of the swivel structure from several aspects, including the lower turntable construction, spherical hinge manufacturing and installation, sliding track installation, support foot installation, swivel traction calculation, weighing experiments and so on. The project applies Building Information Modeling (BIM) technology to conduct collision detection and construction process simulation for the swivel system of the swivel bridge, verifying the feasibility of the construction plan and improving high-risk operation steps. This provides support for the effective implementation of the swivel bridge construction plan and aims to offer references for similar projects.

Keywords: BIM technology; swivel system; weighing experiment; swivel simulation

作者简介: 赵树锋, 男, 本科, 工程师, 研究方向为桥梁转体系统。

中图分类号: U445.4

1 工程概况

某高速公路大桥, 主桥 (2×54) m T 型刚构采用转体施工工艺, 分左、右幅单跨跨越某双线既有铁路。转体结构为预应力 T 构混凝土桥梁, 跨径组合为 (2×54) m, 转体最大悬臂长度组合为 (2×50) m, 单幅桥宽 15.85 m, 转体质量为 6.00×10^4 kN; 球铰设计承载力为 7.20×10^4 kN, 转体桥立面如图 1 所示。

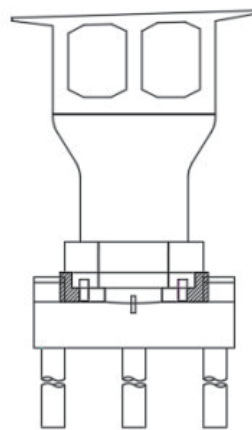


图 1 转体桥立面图

2 预应力混凝土桥梁转体系统施工技术

2.1 BIM 建模及碰撞检查

就构造而言, 下转盘的核心组成部分包括上下球

铰、环形滑道、驱动转体的千斤顶及提供反力的支座^[1]。转体系统自下而上的顺序为下承台+下球铰+滑道+支撑+上球铰+上转盘+上承台，牵引反力座和承台须同步浇筑。

2.2 球铰制造与装配

2.2.1 球铰制造

球铰作为桥梁转体构造的关键部件，其安装品质将直接影响转体构造的旋转性能。从构造要素分析，球铰由上球铰、下球铰、钢销件、聚四氟乙烯板及钢制骨架构成^[2]。在施工筹备期间，应挑选具备相应资质的工厂，遵循设计图纸进行球铰加工制造。球铰制作技术要求如表1所示，依据技术规范要求，施工单位会对进场的球铰执行严格的质量检查流程，确认其满足施工标准要求后方可验收通过^[3]。转体系统构造如图3所示，球铰系统构造如图4所示。

根据设计规划，应用 BIM 技术进行动态碰撞检测，识别出多个关键设计与施工环节中的钢筋潜在碰撞问题，重点集中在转盘碰撞检查方面。通过 BIM 碰撞检查，有效避免了 N5 钢筋和球铰角钢支撑架可能出现的冲突问题。通过 BIM 建模进行施工模拟与工艺说明，精确再现转盘体与转体施工流程，有助于显著提升施工品质。

2.2.2 球铰装配

球铰进场后，根据球铰制作技术要求进行验收，经检验合格后，可进行组装，球铰装配步骤如下：

(1) 现场施工人员确保面层平整，随后精确测量放样在面层上，以标定钢骨架的预定安装位置，检查完全正确后，再进行钢骨架安装施工^[4]。

(2) 下球铰需借助吊车吊到指定高度，吊起来以后再缓慢放下去。在工作人员的协助下，对球铰的位置进行精确校验，与指定位置相吻合后，将其牢牢固定在定位钢骨架上。随后安排好钢筋与模板，并立即着手进行下球铰骨架混凝土的现场浇筑施工。

(3) 混凝土养护时间至少为 7 d，拆模后应将下球铰表面的杂物清理干净，随后将一根直径为 400 mm 的转动定位钢销插入下转盘的预埋管道中。使用高压空气清洁下球铰球面，保证其表面干净无异物，随后在其球面及滑动片表面均匀涂上黄油，以确保具备良好的润滑性，随后装上聚四氟乙烯材料的滑动片。

(4) 安装上球铰，要确保上球铰与下球铰密封好。将上下球铰的融合部分用密封胶带封住，以加强密封效果，防止杂质进入。

(5) 安装球铰后，还需要根据相关规定严格检查安装质量。

2.3 滑道安装碰撞模拟检测

对于转体构造中的滑道，其中心半径设定为 3 200 mm，钢板厚 25 mm，宽 1 000 mm。施工前进行 BIM 建模，模拟滑道安装施工及进行预埋筋碰撞检查，BIM 模拟滑道安装施工及碰撞检查如图 5 所示。根据碰撞检查结果，微调设计钢筋 N5a 的位置后，可顺利安装滑道。

环形滑道设置在撑脚下，其各组成部件均在工厂预先制造，随后在现场进行拼接与固定。拼接完成后，须确保滑道顶面的整体高度差 ≤ 1 mm。注浆孔要预留在滑道顶面，为初次浇筑混凝土做准备。针对发现的局部气孔问题，可通过注浆孔进行混凝土补充灌注，以确保滑道混凝土的密实度符合要求^[5]。

2.4 支撑脚装配

在转体结构旋转期间，会受到多种不平衡力的影响，稳定性靠转体下方的撑脚来保持。撑脚施工质量是转体能否成功的决定性影响因素，是施工管理的重要环节。将 8 个双撑脚结构配置在上转盘上，向下悬挂，其中心线形成了一个直径为 6.40 m 的圆形阵列。撑脚的外围由直径为 0.58 m 的钢管包裹，在其内部灌注 C50 等级的微膨胀混凝土。完成上球铰安装后，须通过现场测量与放样来确定撑脚的准确安装位置。随后将 10 mm 厚的钢板铺设在环形滑道上，以保证撑脚底部与滑道顶面间约有 10 mm 的间隔。在箱梁施工的后续步骤中，该间隙会被钢垫板或砂垫层填满。当需要进行转体操作时，钢垫板会被移除，同时会将黄油重新涂在滑道顶面。

2.5 BIM 模拟支架搭设与钢筋碰撞检查

从结构上看，上转盘是一个直径为 7 400 mm 的圆盘，其外侧绑定了两条强度达 1 860 MPa 的牵引索钢绞线，内部与上球铰实现连接。在现浇上转盘混凝土之前，须安装好定型钢模板，并用螺栓紧固，以确保混凝土浇筑过程中无浆液泄漏的现象发生。将定型钢模板牢固安装在预设地点后，依照相同距离预埋牵引索。牵引索的固定端至少要伸入转盘 4 m 深，须保证一对牵引索的锚固端在圆心呈对称分布。在转盘表面布置好牵引索之后，进行混凝土浇筑，从而完成上转盘的整体施工步骤。BIM 模拟支架搭设与钢筋碰撞检查如图 6 所示，碰撞结果显示无碰撞。

对于上转盘混凝土施工,侧模采用定型钢模板,底模采用木模板,底模支架采用盘扣式脚手架,纵横间距为60 cm,主梁采用I10工字钢,次梁采用尺寸为100 mm×100 mm的方木,间距为20 cm。由于支架高度过小,可调顶托伸出顶层水平杆的距离应 ≤ 250 mm,且丝杆外露长度应 ≤ 200 mm,可调顶托插入立杆的长度应 ≥ 150 mm,竖向钢筋从底模穿出,预留封固长度,水平钢筋不做预留。

3 桥梁转体结构施工控制措施

在施工技术监管中,监管重点在于测量转体的牵引力及其摩擦阻力系数。通过理论计算,在最不利情况下,牵引设备也能完成转体施工,试转前须完成称重实验。

3.1 牵引系统设备组成及牵引力计算验证

式中: R^2 为定位销轴轴孔洞半径。

经计算, $M_1=1\ 746.0\text{ kN}\cdot\text{m}$,球铰力矩 $M_2=5\ 563.5\text{ kN}\cdot\text{m}$,总力矩 $M=7\ 309.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

两侧同时牵引时,则单端牵引力 $F=913.69\text{ kN}$,因此该桥最大牵引力计算值为913.69 kN。

当撑脚不受力时,千斤顶的安全储备系数为2.67倍;当撑脚与球铰共同受力时,千斤顶的安全储备系数为2.19倍,因此用2000 kN千斤顶满足牵引要求。

3.2 称重配重实验

称重实验设备采用两台竖向千斤顶(500 t)及配套液压系统、4个百分表(含台座)、记录表、计算器等,称重实验包括以下步骤:

(1)清除滑道和撑脚间的杂质。

(2)装配百分表,在撑脚与滑道的接触面上,分别沿桥梁的纵向与横向设置一个百分表,同时记录下每个百分表的初始读数 d_{0i} (i 为百分表的编号)。在安装过程中,须确保上下转盘之间的约束(采用工字钢进行固定)尚未解除。

(3)在割除工字钢解除上下转盘之间的固定约束后,待梁体稳定10 min后记录每个百分表的读数 d_{1i} 。计算 d_{1i} 与 d_{0i} 的差值 Δd_i ,即

(4)计算出梁体的整体下沉量 x 和偏心弯矩的偏移量 y 。设定这两个变量后,再根据纵向上1号、3号两个百分表的读数变动情况(Δd_1 与 Δd_3),用来求解。当 $\Delta d_1 > \Delta d_3$ 时,可得出方程式,即

称重数据计算原理如图7所示。

(5)对于梁体偏重的一边,要在上下转间立一个

千斤顶,通过向上施加顶升力来抵消梁体的偏心负载(消除由偏心弯矩引起的位移量 y),直至1号百分表显示 $\Delta d_1-y=x$,3号百分表显示 $\Delta d_3+y=x$,调整完成。此刻记录下顶升力值 F_i ,并据此推算出球铰所承受纵向偏心弯矩的量值,偏心弯矩 M_i 的计算公式为

式中: R_i 为千斤顶至球铰中心的距离。

(6)根据 M_i ,能够确定物体所需的配重 P_i ,即

式中: L_i 为力臂长度。

该配重的目的是达到纵向或横向的荷载均衡,随之确定作用中心至球铰中心的距离。

(7)使梁体达到平衡状态后,百分表读数的改变量代表梁体脱离支架后的整体沉降程度。

(8)在固定约束被释放后,通常 Δd_1 与 Δd_3 均 > 0 ,意味着梁体的下沉量超过了偏心弯矩造成的偏移量。若 $\Delta d_i < 0$,即梁体的下沉量小于偏心弯矩所引起的偏移量,可以采用公式算法。横向称重参考纵向称重,可以在横桥向通过移动纵向配重进行调整,配重材料选用混凝土预制块(可防止雨水影响质量)。

4 结束语

在桥梁转体施工的过程中,应从前期准备、实施及后期收尾三个环节着手,严格把控施工管理。以信息化协同管理平台为基础,运用BIM模型关联系统管理数据,实现桥梁转体体系施工过程镜像数字仿真,解决宽体大吨位桥梁转体系统施工过程中的碰撞问题,进而提前优化施工。前期要加强上下转盘、撑脚、球铰等构件的安装管理,以及牵引系统设备的配置和牵引力的计算;在中期,必须严格开展施工质量检查工作;在后期,要着重完成配重与试转工作。文章着重探讨了转体结构各组成部分的施工技术要点,并详细分析了桥梁转体结构施工控制措施,此次桥梁工程转体结构施工在各项指标上均达到了规定要求,确保了桥梁转体作业取得圆满成功。

参考文献

- [1] 韦立勇.预应力混凝土桥梁结构强度连续动态监控方法[J].西部科技,2021(8):172-173.
- [2] 于哲,郑建新,孙南昌,等.大跨预应力混凝土斜拉桥平转施工阶段主梁受力研究[J].施工技术,2021(23):6-7.
- [3] 张贵忠.沪通长江大桥BIM建设管理平台研发及应用[J].桥梁建设,2019,48(5):6-10.
- [4] 马白虎,钟荣炼,刘天成,等.平塘特大桥施工BIM信息管理系统研发及应用[J].公路,2019(9):31-35.
- [5] 巴怀强,李超,孙凯,等.基于点云模型的大吨位转体桥梁高效称重[J].科学技术与工程,2021,21(12):5105-5110.

道路隧道智慧运维管理平台优化及应用

Optimization and Application of Smart Operation and Maintenance Management Platform for Road Tunnels

翁开翔

WENG Kaixiang

深圳市路桥建设集团有限公司，广东 深圳 518024

Shenzhen Road & Bridge Group Co., Ltd., Shenzhen 518024, Guangdong, China

摘要：随着城市道路建设的持续发展，其日常维护的技术难度与安全风险也显著增加，将数字化技术应用于隧道运维管理已成为行业的普遍认知与发展趋势。基于此，文章将建筑信息模型（building information modeling, BIM）与数字孪生技术融合，建立数字孪生养护运管系统，优化智慧隧道运维管理平台，满足隧道日常安全运营和智慧化养护工作的需求。优化后的平台不仅实现了运维信息的有效共享与高效整合，还保障了数据的可靠性和完整性，显著提高了运维工作的效率，同时有效降低了管理成本，旨在为道路隧道运维管理的数字化转型提供有力支持。

关键词：智慧运维；BIM；数字孪生；隧道养护

Abstract: With the continuous development of urban road construction, the technical difficulties and safety risks in its daily maintenance have also increased significantly. The application of digital technologies in tunnel operation and maintenance management has become a common understanding and development trend of the industry. Based on this, this paper integrates Building Information Modeling (BIM) with digital twin technology to establish a digital twin maintenance and operation management system, optimize the smart tunnel operation and maintenance management platform, and meet the needs of daily safe operation and smart maintenance of tunnels. The optimized platform not only realizes the effective sharing and efficient integration of operation and maintenance information, but also guarantees the reliability and integrity of data, significantly improving the operation and maintenance efficiency and

effectively reducing the management cost, aiming to provide strong support for the digital transformation of road tunnel operation and maintenance management.

Keywords: smart operation and maintenance; BIM; digital twin; tunnel maintenance

中图分类号：U457+.4

1 研究背景

道路隧道的高效运维是保障路网畅通的核心要素。随着使用年限的增长，隧道日常安全运营和养护工作越来越困难。为解决相关问题，隧道运营单位需要加快推进智慧运维技术的深化应用。BIM技术融合隧道的设计、施工及运营阶段的各类信息，为道路隧道智慧运维管理平台提供全面、精确的三维可视化数字模型。凭借其高度的信息集成能力，运维人员能直观掌握隧道的结构细节、设备分布和运行状态，快速定位故障点，并提供具有针对性的维护方案。BIM技术通过与传感器数据的集成，可以实现对隧道实时状态的动态监测，支持智能巡检、预防性维护和应急响应等功能，提高运维效率，降低管理成本，为道路隧道的全生命周期管理提供高效支持，保障隧道安全、高效运行。数字孪生技术主要体现在实时监控、智能预警、仿真模拟、养护决策优化及应急指挥调度等方面^[1]，构建与实际隧道对应的虚拟数字模型，整合传感器收集的数据，使运维人员能及时了解隧道的实时状态。其利用数据分析和模拟功能，预测潜在故障，制订预防性维护计划，并在突发事件时辅助应急决策，并对隧道设施进行长期优化评估，提高隧道运行效率

作者简介：翁开翔，男，硕士，高级工程师，研究方向为公路与市政工程建设及城市运营管理。

和安全性。文章将 BIM 技术和数字孪生技术深度融合，建立坪盐通道马峦山隧道智慧运维管理平台，实现了隧道的智能化运维和城市交通的智慧化发展。

2 工程概况

2.1 项目背景

隧道智慧运维管理平台的搭建需要详细的项目基础数据，文章以坪盐通道马峦山隧道为例，对其现有平台进行调研分析，发现该平台目前存在以下问题：

(1) 平台开发了交通、环境、监控、消防、结构、设备等页面，但经现场与各专业系统对比核验，页面数据与实时监控数据不符。平台数据均为模拟数据，且所有视频均为静态画面。在平台的“应急”页面内，应急预案仅供展示预案文件，无法生成应急预案响应的操作步骤。

(2) 平台的三维模型仅对隧道进行建模，未对周边环境及管理用房、泵站、配电房等管养范围进行全面建模；平台三维模型的展示整体采用 C/S 架构，仅支持在马峦山隧道监控室内通过当地电脑进行操作，无法远程通过浏览器进行操作与汇报展示；平台的三维模型采用 3Dmax 软件进行建模，未对模型进行构件级的编码与拆分，无法与相关业务数据进行绑定。

(3) 平台在页面功能上存在多个控件重叠、按钮点击无效等问题，且整体运行不稳定。

针对马峦山隧道现有的问题，建立数字孪生养护运管系统，实现运维管理平台的优化。系统架构为多项目层级。客户端包括万维网和小程序。在机房的超融合服务器中，已划分了相应的节点资源，需要增补一台高性能渲染服务器物理机，以部署虚幻引擎。在坪盐通道隧管所中需要部署一台数据服务器，完成现场网数据转发和集团生产环境数据对接。在通道外场隧道中，还需将在坂银通道试点安装的雷视一体机迁移过来，完成现场安装与调试，最终通过系统的数字孪生三维场景，实现隧道内车辆行驶轨迹的动态仿真。

2.2 项目目标

该项目目标包括建设道路隧道智慧运维管理平台，实现隧道养护产业全过程数字化管理；构建一系列基于数字孪生技术的应用场景，涵盖养护业务及日常运营管理^[2]；借助坪盐通道打造智慧隧道应用示范，形成一套对内可复制可推广、对外可宣传可汇报的成果和经验；培养一支具备科学管理能力、能适应高质量发展要求的管理团队。

3 道路隧道智慧运维管理平台优化及关键技术

3.1 项目内容

(1) 完成坪盐通道的三维建模，包括双向隧道约长 16 km、市政快速路长 0.8 km、互通立交匝道桥长 1.1 km、养护所 3 500 m² 和隧道全线的高精路网数据。按照图纸材料完成 LOD 400 精度建模，对模型构件进行自定义属性编码和空间切分，并提供全专业编码清单表。

(2) 在坪盐通道马峦山隧道中安装 15 台雷视一体机设备，在隧道所机房中部署视频存储器，并完成整体系统的调试工作。前期所有准备工作就绪后，提交设备部署安装方案至业主审核，由业主提供劳务人员和机械车辆支持，项目相关人员负责配合指导安装和测试工作。

(3) 完成数字孪生养护运管系统的建设，其功能模块包括面向项目级隧管使用的日常运营管理和企业内部业务管理，同时将坪盐通道作为试点项目，打造三维数字孪生应用场景。外部对接层面包括隧道机电综合管控平台、视频监控、车辆全球定位系统厂家、雷视一体机等。数字孪生养护运管体系以“1 个感知网络”为基础，通过“1 套中心资源”进行数据汇聚与计算，将处理好的数据送入数字底座。数字底座利用三维引擎等工具，将数据与模型结合，形成数字孪生体，然后系统通过控制层实现统一管理，最终支撑面向交通、机电、养护、应急等业务的 4 类应用场景，实现从物理隧道到数字空间的全面映射与智能管理，赋能隧道的智慧化运营。

3.2 数字孪生与 BIM 技术

数字孪生养护运管系统内置隧道结构安全专项算法，可动态分析当前隧道结构安全。该算法包括结构振动、应变分析和沉降分析，可预测是否产生超限预警，提前通知养护单位完成风险排查，降低隧道运行风险，延长使用周期，降低危害发生的概率^[3]。

BIM 技术的应用覆盖隧道设计、施工组织及运维管理等全生命周期阶段。借助 BIM 技术构建隧道精细化模型，全面掌握隧道的几何参数与物理属性。在隧道智能化运维管理中，BIM 技术通过数据采集、分析与处理，与模型实现联动，对隧道结构问题进行精准定位，进而实现潜在病害的早期识别与处理，从而保障隧道安全运营^[4]。

该系统实时采集结构监测数据，并标注在数字孪生场景中，将设备测点与BIM模型构件关联，可直观查看测点位置、空间、关联结构等信息。数字孪生底座可将结构振型结果三维可视化，与BIM模型进行结合，在三维场景下直观地观察到运维期隧道的实时状态。

4 道路隧道智慧运维管理平台的应用

4.1 隧道全设施数字化管理

道路隧道全设施数字化管理是BIM与数字孪生技术深度融合形成的先进管理模式。该模式以三维模型为空间基准框架，结合监控系统实时获取设备运行及环境状况，通过统一数据平台整合相关信息。其核心在于构建虚实交互的决策中枢，实现宏观系统管控与微观构件状态的穿透式关联分析，建立基于力学机制的灾害预演与主动干预机制，形成设施退化趋势驱动的动态资源调配策略。该模式推动了隧道运维实现从离散管理转向系统集成、从事后处置转向事前预防、从经验决策转向数据驱动的重重转型，显著增强结构安全与延长使用寿命。

4.2 机电系统智慧巡检

道路隧道机电系统智慧巡检的核心是通过“一键巡检”指令，实现设备群全局状态的快速扫描与评估。该体系覆盖通风、照明、供配电、监控、交通信号及给排水六大系统，基于机电专业图谱配置，将关键节点与实体监测设备绑定，实时获取电流、振动等运行参数。当数字巡检发现设备异常时，平台自动报警并及时通知监控中心，监控值班人员立即通知专家进行维修。实时跟踪维修过程，直至设备恢复正常运行，形成“监测-报警-处置-验证”的完整闭环管理。该模式通过标准化指令替代传统人工巡查，显著降低运维负荷，提升故障响应时效性，为隧道机电系统持续稳定运行提供技术保障，同时将积累的设备状态数据作为预测性维护的理论依据。

4.3 隧道应急处理

在面对突发事件时，依靠完善的智能化应急管理体系，可以保证在第一时间迅速采取行动，最大程度降低事故损失，并减少对交通和社会的负面影响。隧道应急模块主要包括智能化应急管控和应急抢险演练^[5]。

智能化应急管控由事件识别、事件确认、辅助决

策、一键联控及轮回检查组成。基于人工智能视觉算法，自动识别发现异常事件，生成报警数据，通知监控室人员；系统内嵌14类事件处置流程，根据事件位置等信息，可自动调用适配流程；执行一键启动预案，使隧道内的设备实现联动控制；对涉及的机电设备进行状态轮询检查，确保隧道机电系统功能完好。

应急抢险演练可借助数字孪生养护运管系统的应急事件管理、设备远程联控等，配合完成运维期内相应的应急抢险推演工作。系统识别隐患问题后立刻发出警报，隧道管理所立即向上级主管部门报告，随后启动应急预案，成立指挥部，派出应急抢险队伍赶赴现场，开展应急处置。监控员确认现场情况后，启动数字孪生养护运管系统应急处置模块，生成应急处置流程清单，根据提示逐步开展处置动作，并使用“一键联动”功能，一次性启动预设联动机电设备。

5 结束语

文章基于坪盐通道马峦山隧道项目，将BIM与数字孪生技术深度融合，构建覆盖隧道全生命周期的数字化管控体系，以数字孪生养护运管系统为核心优化智慧运维管理平台。该平台以高精度三维模型为空间基准，整合实时监测数据，依托数字孪生系统实现了隧道设施的全要素数字化管理、机电系统智能巡检与高效应急响应，有效提升了隧道运营的安全性与养护工作的智能化水平。

参考文献

- [1] 王延宁, 余健俊, 周逸伦. 基于BIM和IoT数据驱动的智慧运维管理系统开发研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024, 46(6): 686-695.
- [2] 文武松, 毛伟琦, 陶世峰. 新时代桥梁智能建造及智慧服务体系研究[J]. 世界桥梁, 2022, 50(6): 122-127.
- [3] 王楠, 陈亚冬. 基于数字孪生的城市轨道交通智慧运维应用[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 194-202.
- [4] 安镜如, 潘盛山, 闫东, 等. 基于BIM的海底隧道智慧运维管理研究[J]. 建筑经济, 2022, 43(3): 47-52.
- [5] 于秋波, 倪国政, 王志锐. 城轨交通接触网安全在线监测系统[J]. 中国铁路, 2024(3): 50-56.