

钢管混凝土系杆拱桥健康监测系统设计

——以大连前关桥健康监测系统为例

赵媛智, 田石柱

(苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 以大连前关桥为工程背景分析下承式钢管混凝土系杆拱桥的结构特点和受力情况, 并设计该桥的健康监测系统方案。着重阐述该系统的架构设计及其主要监测内容所使用的传感器类型。基于 Midas Civil 对该桥进行有限元分析, 结合相关规范确定桥梁监测系统的测点布置。考虑到传统人工巡检主观性强, 整体性差, 现场需要耗费大量的人力、物力、财力, 甚至影响交通运行, 对此, 基于 BIM(建筑信息模型)在云端开发一个集现场实时采集、稳定高效传输、海量数据快速分析、人机交互及模型、数据可视化于一体的智能化桥梁健康监测平台, 自动触发预警后通过多种方式通知相关人员, 实现早发现、早预警、早处置, 为最终实现智慧桥梁管理养护提供有力支持。

关键词: 钢管混凝土系杆拱桥; 健康监测系统; 有限元模型; 测点布置

中图分类号: U446 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0099-08

下承式钢管混凝土系杆拱桥在运营期因自然灾害、设计缺陷、车辆超载等会经历老化、疲劳和开裂等过程, 这些现象导致其抗力逐渐减弱, 并累积损伤。近年来, 国内外桥梁领域的前沿课题和研究热点集中在如何通过实时监控桥梁使用状态的变化, 为桥梁的养护决策提供支持, 旨在通过预诊断桥梁病害来延长其使用寿命。马式纪等^[1]设计的 BDS/GPS(Beidou navigation satellite system/global positioning system, 北斗卫星导航系统/全球定位系统)双星定位的无线网络传输桥梁健康监测系统能够准确获取桥址环境参数、结构响应参数等信息。湛桢文和常军^[2]将 RR-SARIMA(ridge regression-seasonal autoregressive integrated moving average, 岭回归-季节性差分自回归滑动平均方法)用于紫金大桥的健康监测数据中验证模型在传感器数据填补和桥梁状态预测的能力。Desjardins 和 Lau^[3]在联邦大桥上持续收集一个月的数据信息, 提出一种利用回归模态模型的残差进行损伤检测的新方法。Ayaho 等^[4]提出了一种基于 ICT(information and communication technologies, 信息与通信技术)的桥梁远程监控系统, 并将其应用在 2 跨连续斜拉桥模型上调整索力以控制其结构性能能

力, 该系统可以在地震和台风等极端事件期间进行实时监测和控制。

本文结合大连前关桥对桥梁健康监测系统的设计, 通过将云平台技术与 BIM(building information modeling, 建筑信息模型)技术相结合, 搭建包含桥梁的几何信息、材料属性、施工过程、历史维护记录等多方面信息的桥梁三维信息模型。BIM 具有强大的模拟功能、可视化、参数化和协同性, 为桥梁运维人员提供了一个信息交互和共享的平台^[5]。该平台在工程实用性方面提供了一种新型管养手段, 弥补了人工巡检的不足, 具有实时性、高效性、创新性与自动化; 具备自我诊断和实时预警功能, 能对桥梁的潜在问题发出警报; 对采集到的海量数据进行深入分析和处理, 提取出有价值的信息, 基于这些数据进行损伤识别和安全评估; 对一个区域内的多座桥梁进行统一监测和远程监控管理, 实时查看桥梁状态, 大大降低了运维成本, 提高了管理效率, 制定科学管养计划, 推动桥梁监测的智慧化、数字化和信息化发展。

1 工程概况

前关桥(图 1)全长 73.35 m, 计算跨度为 71.5 m, 为跨沈大高速公路的下承式钢管混凝土简

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 苏州市科技计划(基础研究)项目(SJC2023002)

作者简介: 赵媛智(2000—), 女, 河南固始人, 硕士研究生, 研究方向为桥梁健康监测与抗震; 通信作者田石柱(1962—), 男, 河北黄骅人, 博士, 教授, 研究方向为结构健康监测。



图 1 前关桥全景图

支拱桥,拱肋采用上下叠拱,呈垂直布置,横桥向拱肋中心距 12.6 m。

拱肋作为主要的承重结构,其断面采用圆形钢管混凝土截面,直径为 1.2 m,由厚度为 20 mm 的钢板卷制而成。在拱肋内部,灌注了 C50 级的补偿收缩混凝土,这种设计既保证了结构的强度,又避免了材料的过度使用,而且施工方便、经济实用。为了增强桥梁的整体稳定性和抗震性能,上下拱管之间设置了一道横撑和两道 K 型撑(通常指交叉支撑),横撑和斜撑采用了外径分别为 850 mm 和 700 mm 的空钢管,这样的设计既保证了支撑件的强度,又减轻了结构的重量。上下拱管之间设置竖杆,均采用外径为 0.8 m、壁厚 24 mm 的钢板卷制而成。全桥共设置 11 对平行吊杆,吊杆间距为 5 m。系梁为单箱三室预应力混凝土箱梁,桥面板宽 17.2 m,底板宽 14.2 m,梁高 2.5 m。

2 有限元分析

2.1 有限元模型

基于 Midas Civil 2022 构建了前关桥的有限元模型(图 2)。该模型共包含 359 个节点和 386 个单元。在模拟过程中为了准确模拟桥梁的各个构件,设置了 7 种不同的截面类型,选用梁单元来模拟拱肋、竖杆、风撑和系梁等关键结构部件。梁单元具有较好的弯曲性能和轴向承载能力,能够真实反映这些结构在实际工作中的受力情况。桁架单元具有较大的轴向刚度和较小的弯曲刚度,适用于模拟吊杆这种主要承受轴向力的构件。该模型不仅为后续的结构分析和优化设计提供了可靠的基础,更为桥梁的安全运营和长期使用奠定了坚实的基石。

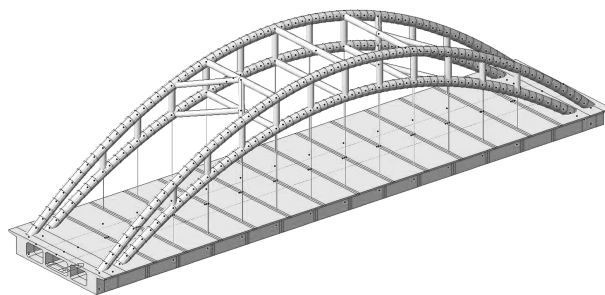


图 2 前关桥有限元模型

2.2 有限元静力、动力分析

对前关桥进行静、动力分析,分析桥梁在恒载、ZKH 活载(客货共线铁路列车设计活载)、温度作用(均匀升温、梯度升温)下关键构件的挠度、应力、索力等物理量的分布情况,根据计算结果选取变形最大、受力最不利位置布设传感器以准确反映桥梁实时运营的工作状态。

2.2.1 静力分析

着重分析桥梁在列车活载和温度作用下的变形,各种荷载作用下系梁的跨中位移都相对较大,梯度温度作用下系梁的竖向位移变形主要集中在跨中、1/4 和 3/4 截面处。

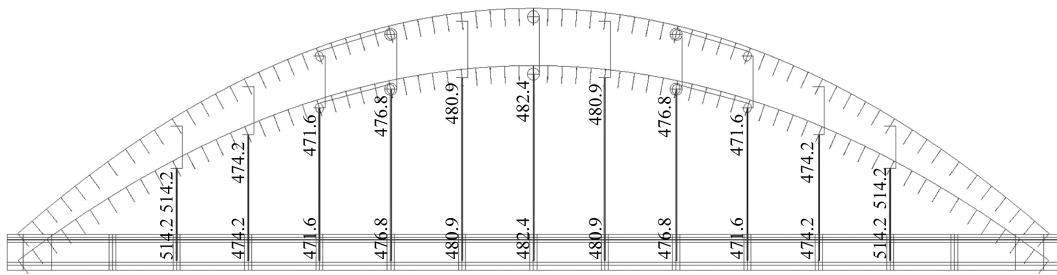
受力分析着重分析桥梁在荷载作用下的全桥弯矩、剪力、应力及吊杆内力。列车活载作用下,系梁 1/4、3/4 处弯矩值最大;在温度作用下,系梁跨中弯矩值最大。拱肋剪力主要集中在 1/4~3/4 截面处。拱肋在拱脚、吊杆对应位置处出现比较大的应力变化,整体升、降温作用下 1/4 拱肋、3/4 拱肋处应力相对较大,系梁应力分布比较均匀,考虑是由于预应力钢束和吊杆初拉力的作用。恒载与列车活载对吊杆内力影响较大,列车活载作用下边吊杆及跨中几根吊杆内力较大(图 3);温度作用下吊杆内力分布呈现出相同的变化趋势,其中边吊杆内力最大,跨中吊杆内力最小。

2.2.2 动力分析

利用 Lanczos 法分析前关桥的前 6 阶振型和频率,前几阶振型主要以竖向和横向振动为主,系梁的跨中、1/4 和 3/4 处有限元模型振幅发生较大变化,前 6 阶自振频率分布在 1.046~4.906 Hz,因此在这些关键位置进行传感器的布设对桥梁的动力特性的研究有重要意义。

3 钢管混凝土拱桥健康监测系统设计

桥梁健康监测通过建立桥梁健康监测系统来实现,通过运用现代传感与通信技术、云计算技术,并融入 BIM 三维可视化模型,能够实时监测桥梁在运营



单位: kN

图3 列车活载作用下的吊杆内力图

阶段的各种结构响应与行为^[6]。前端布设的传感器能不断获取反映桥梁运营状况的各种信息,借助云端的强大计算能力对采集到的海量数据进行快速处理和分析,及时发现桥梁结构中的潜在问题。BIM 三维可视化模型为管理者提供了一个直观、生动的桥梁结构展示平台,使其能够更加清晰地了解桥梁的运营状况和结构变化,及时对桥梁异常情况进行预警^[7]。

3.1 监测内容

钢管混凝土拱桥主要受力结构是拱肋,其损伤直接影响整个结构的安全,吊杆和系梁等结构的状态也影响到桥梁的安全性能和使用性能^[8]。前关桥的监测内容应结合其结构特点、地理环境、最大经济效益比以及运营期桥梁安全评估的要求,包括:①环境监测。主要是风(桥址的风压、风场特性)、环境温湿度和结构温度。②结构响应。系梁关键截面竖向位移、系梁及拱肋关键截面应力、系梁加速度、吊杆索力^[9]。③其他。桥面结冰、视频图像。

3.2 健康监测系统集成

前关桥健康监测系统(图4)主要由4部分组成,

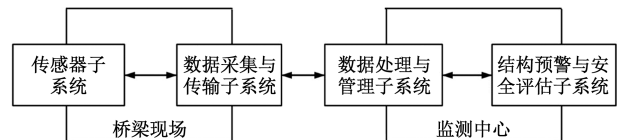


图4 前关桥健康监测系统集成

即传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据处理与管理子系统、结构预警与安全评估子系统^[10]。

3.3 传感器子系统

传感器子系统是桥梁健康监测系统的最前端,负责实时采集桥梁的工作行为和荷载变化信息。健康监测系统的功能取决于传感器子系统的设计,其使用寿命决定了整个健康监测系统的使用寿命。在满足经济性和实用性的原则下,根据监测内容选取兼容性与可扩展性好且性能稳定的传感器。基于传感器优化布设准则及方法对传感器监测数量和位置进行优化^[11]。前关桥健康监测系统传感器总体布设结合有限元分析结果进行合理布设,如图5所示。

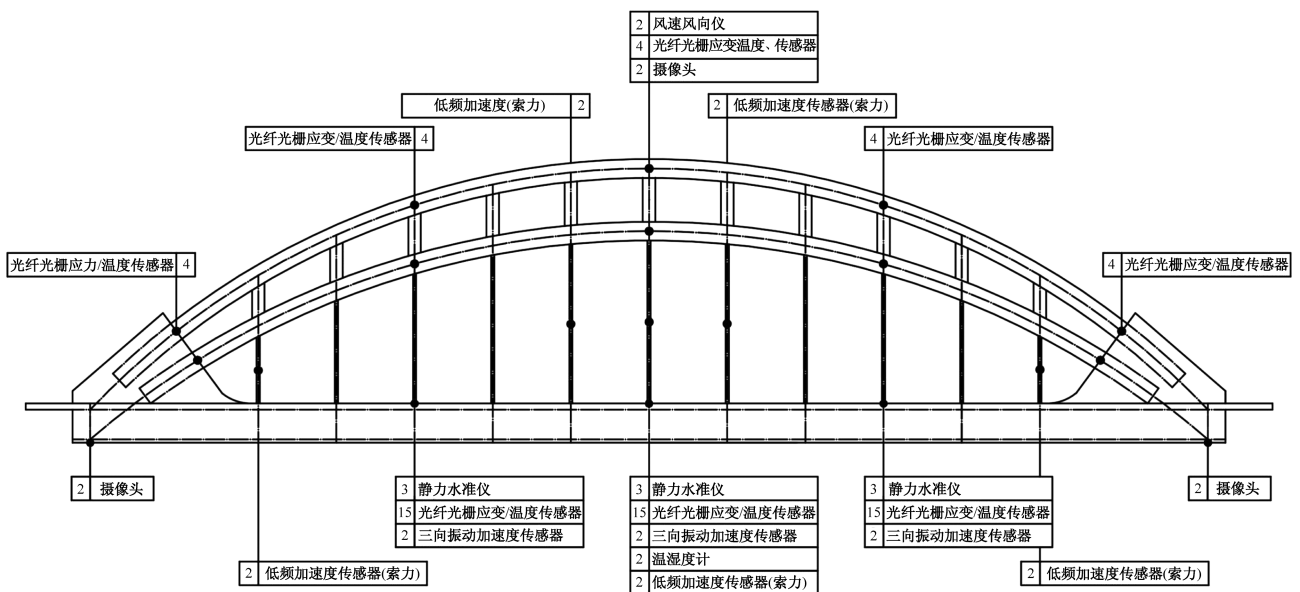


图5 前关桥健康监测系统集成传感器布置位置

(1)系梁竖向位移监测:判断桥梁的工作状态及其安全性能,掌握位移的变化规律和发展趋势。由各种荷载作用下的竖向变形图可知系梁的最大计算挠度值为顺桥向 1/2 跨处,同时梯度温度作用下系梁的 1/4、3/4 截面处的竖向位移也较大,故应在 1/2、1/4 和 3/4 跨处重点监测。

(2)系梁关键截面应变监测:通过实时监测应变可掌握各关键部位在活载、附加力和特殊荷载作用下的受力情况,评估桥梁的损伤程度及安全水平。系梁为单箱三室预应力混凝土带悬臂箱梁,应力分布情况较复杂,因此采用折面梁格法建立预应力混凝土箱梁局部精细模型(图 6),根据有限元模型分析结果确定箱型截面的应力分布。

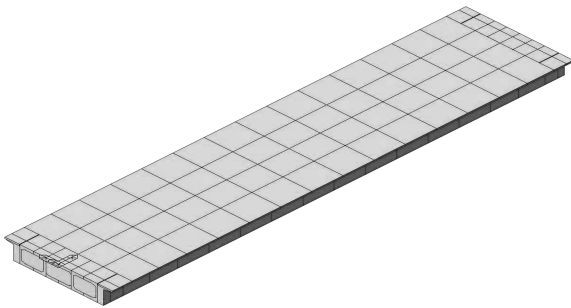


图 6 梁格法有限元模型-单箱三室预应力混凝土箱梁

通过对比发现在梯度温度和列车活载作用下的应力分布情况不具有代表性,因此重点分析在均匀温度作用下的箱梁应力分布情况,整体升温作用下系梁箱型截面顶板、底板和外侧腹板等位置都会有较大的应变产生(图 7)。因而在箱梁对应位置设置应变(温度)传感器进行监测,根据其受力情况在 1/4、1/2、3/4 位置处布设光纤光栅应变传感器,如图 8 所示。

(3)系梁动力特性监测:由前 6 阶振型分析结果可知,系梁 1/4、1/2、3/4 处的振型变化较大,因此在系梁 1/4、1/2、3/4 位置处布设加速度传感器重点监测。

(4)拱肋关键截面应变监测:由各种荷载作用下的弯矩图可知,最大弯矩值在系梁跨中;由各种荷载作用下的剪力图可知,拱肋在 1/4~3/4 剪力相对集中;由各种荷载作用下的应力图可知,拱脚处受力集中且数值较大,故在顺桥向 1/4、1/2、3/4 拱肋及拱脚处对称布设光纤光栅应变传感器。

(5)吊杆索力监测:通过可变作用下吊杆内力变化的结果发现,边吊杆处受力很大,处于高应力状态,较容易发生疲劳损伤,列车活载下跨中三根吊杆内力较大,本着经济性原则和优化原则只对跨中 6 根吊杆及两侧 4 根边吊杆采用加速度传感器进行重点监测。

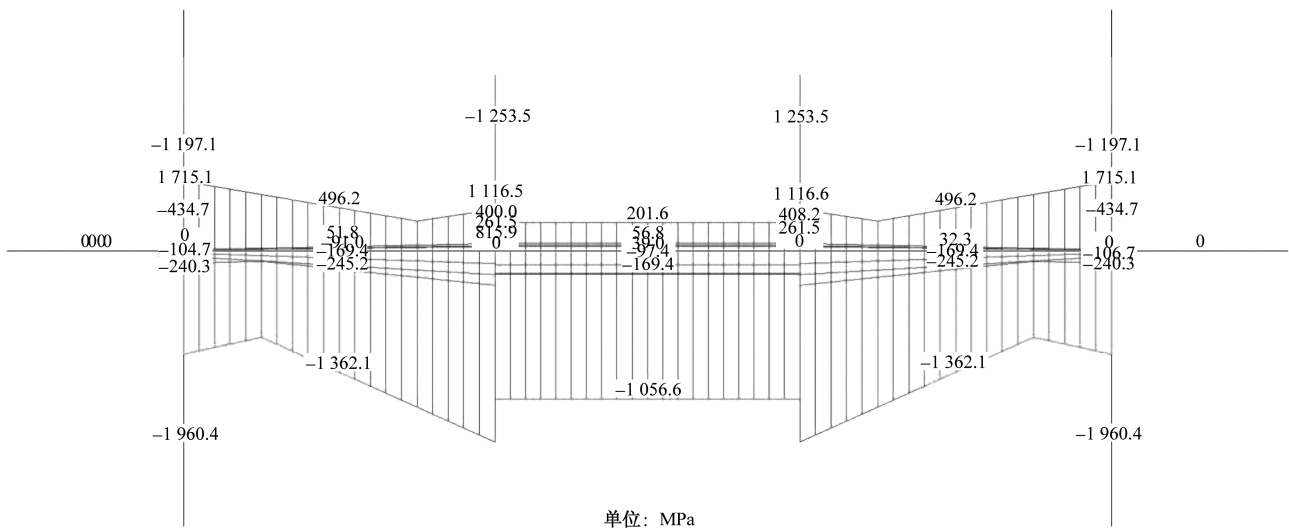


图 7 整体升温作用下的箱梁应力分布

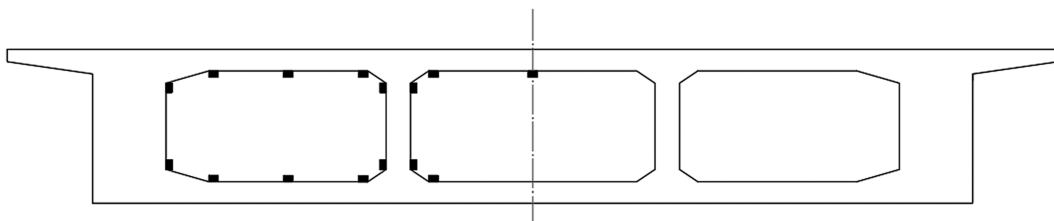


图 8 箱型截面应变测点布设

3.4 数据采集与传输子系统

数据采集与传输子系统是健康监测系统的首要条件,通过采集仪对传感器采集的信号进行数字化转换以便计算机识别和处理,将处理完的数据传输至云端并储存到数据管理系统。对于前关桥的数据采集与传输子系统而言,硬件由各种传感设备、采集仪、传输线缆、光纤光栅解调仪及计算机等设备组成。

该系统采用分布式的数据采集方式,对现场传感器采用区域分块的方式进行采集。数据传输系统采用有线和无线传输相结合的方式,现场传感器与采集仪之间及采集仪与计算机之间通过专用线缆连接;计算机再通过无线传输网络将采集数据传送到云端,数据传输协议采用 TCP/IP (transmission control protocol/internet protocol, 传输控制协议/网际协议)^[12]。

3.5 数据处理与管理子系统

数据处理与管理子系统是健康监测系统的核心,包括数据处理(预处理、二次处理)、数据库管理与查询等。数据的预处理主要对挠度、应力、加速度等监测数据进行数理统计分析(设定时段内的最值、均值、方差、标准差等)。数据二次处理将滤波、去噪的数据远程传输到中心数据库管理系统进行时域、频域、傅里叶分析等,以便判别监测数据的发展趋势及变化特征(图 9)。数据管理系统对获取的桥梁运营状态数据进行存储、管理、转换、维护,能跨平台,具有图形及字符界面^[13]。数据管理系统的核心为数据库系统,管理桥梁基本信息、传感器信息、采集信息和分析结果等全部数据,可对数据库中已有的数据进行增加、删除、修改等操作。

3.6 结构预警与安全评估子系统

健康监测系统必须密切结合大桥的管养要求,建立大桥异常状态预警和安全状态评估。将预警等级划分为三级,通过设置预警值的方式来实现黄、橙、红三级预警机制。预警值的确定应根据相关桥梁设计规范、桥梁实测值和以往桥梁的工程经验进行分级设定,该系统通过有限元模型计算最不利工况进行设定。当监测数据超过系统设定的阈值时,系统将自动启动报警功能,采用指示灯、声音预警、手机短信、邮箱等方式通知到大桥管理者。该系统采用变权层次分析方法,建立了大桥结构的安全运营综合评估系统^[14]。

4 桥梁健康监测平台

用户界面子系统实现各种数据实时按需向用

户展示,并且接受用户对系统的控制与输入。桥梁健康监测平台是用户与健康监测系统的交互媒介,可以为不同用户按需求展示数据,实现桥梁结构运营过程中的安全诊断、预警功能。

桥梁智能监测平台(图 10)是基于云原生架构的人机交互平台,引入 BIM 技术以桥梁三维信息模型为载体,实现模型及监测数据的可视化、传感器与监测数据的关联,还可以对模型进行平移、缩放、旋转。

5 结论

以前关桥的健康监测系统建设为工程背景,对钢管混凝土拱桥的健康监测系统进行研究,针对该桥独特的结构和环境特点,有针对性地设计了一套先进的健康监测系统。

介绍了该系统的监测内容、构成及各子系统的实现方案,通过对其荷载作用和振动特性的分析,优化布点方案,从获取环境、荷载到反应结构响应的参数,到对整桥的评估,实现了实时、高效、智能化、系统全面的监测。

桥梁健康监测平台提供了直观的人机交互界面和数据可视化功能,提高了监测结果的可理解性和可操作性;提高了桥梁运营的安全性,延长其使用寿命,减少维修和更换的成本;自动化和智能化的监测系统减少了对人工巡检的依赖,降低了人力成本,提高了管理效率;数据的集中管理和分析为决策提供了科学依据。在工程应用方面,不仅提高了桥梁监测的效率和准确性,推动了桥梁监测技术的创新和发展,具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 马式纪,牛固入,云璋瑜,等. 基于无线网络传输的桥梁健康监测系统设计[J]. 科技和产业, 2022, 22(2): 306-311.
- [2] 湛楨文,常军. 综合岭回归和 SARIMA 方法在桥梁健康监测数据分析中的应用[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8846-8853.
- [3] DESJARDINS S L, LAU D T. Enhanced operational modal analysis and change point detection for vibration-based structural health monitoring of bridges[J]. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, 2024, 3(4): 100121.
- [4] AYAHO M, AKITO Y, PETR H, et al. Feasibility study on intelligent bridge combined with smart monitoring techniques[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(7/8): 1133-1148.

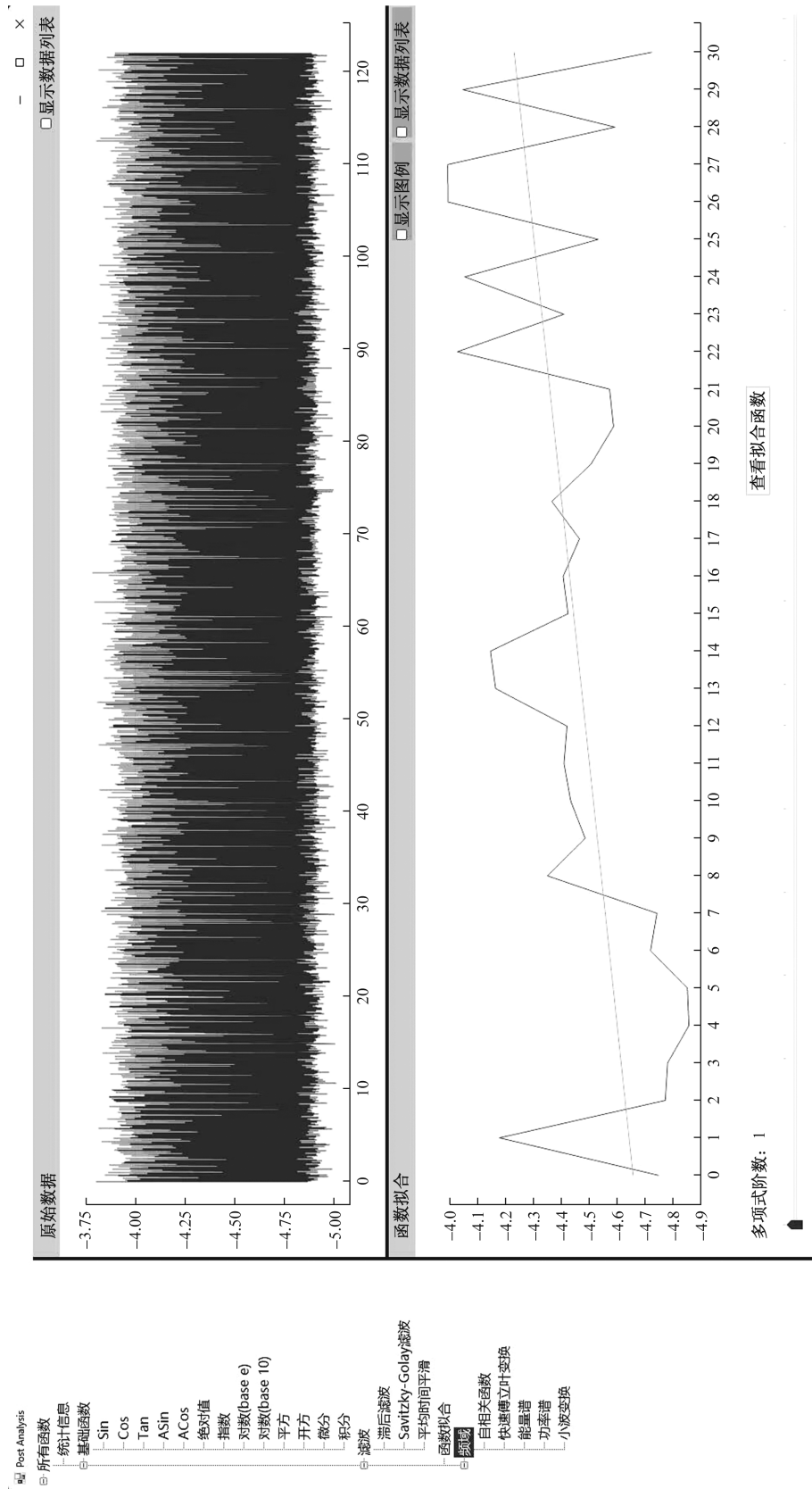


图9 数据二次处理

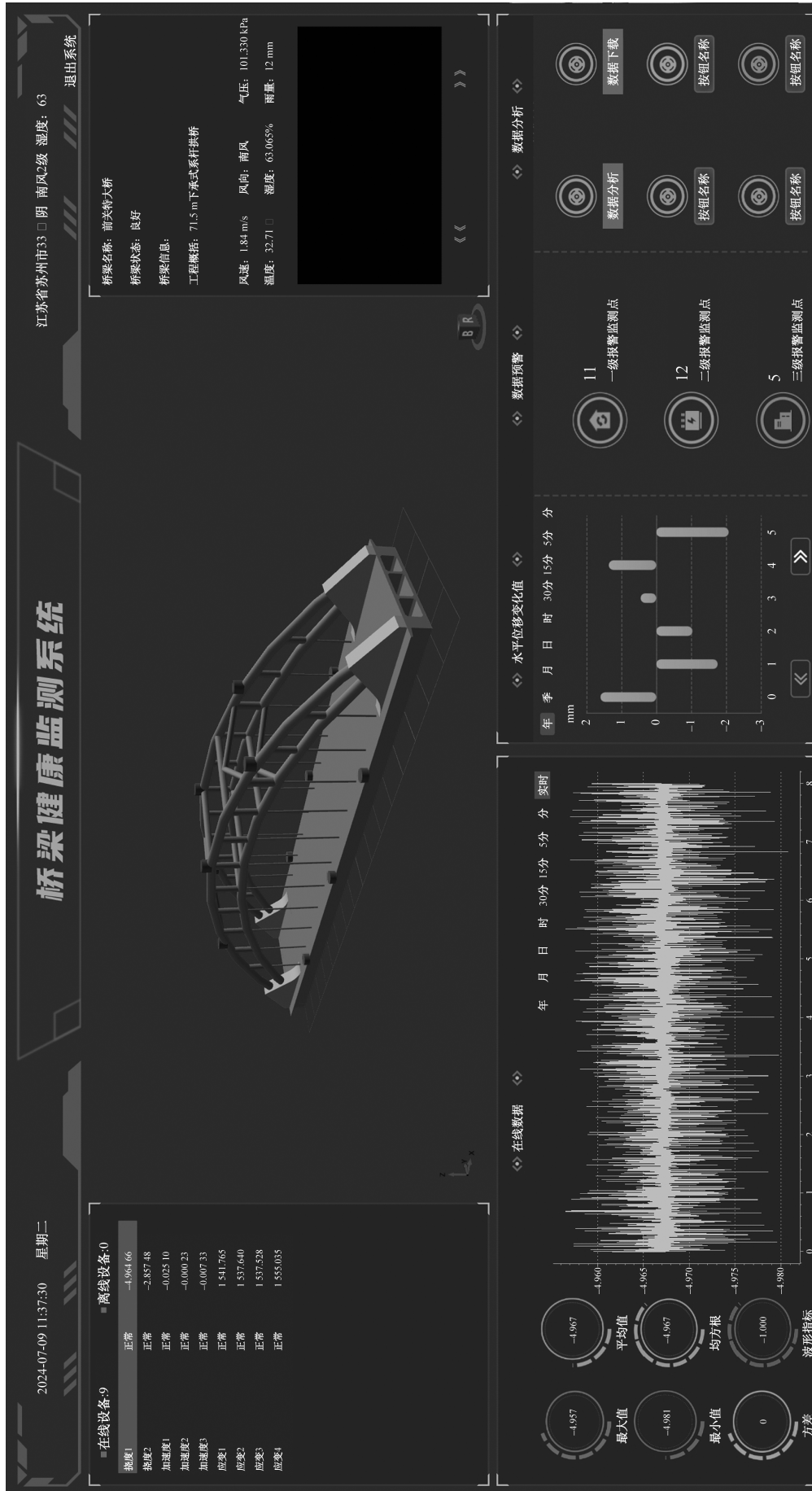


图10 前关桥智能健康监测平台

- [5] 周成龙, 向晖, 张文东, 等. BIM 技术在桥梁施工中的运用研究: 以芦沟河特大桥 192 m 超高墩为例[J]. 科技和产业, 2023, 23(6): 270-276.
- [6] 费洪刚. 基于互联网+和 BIM 的桥梁实时健康监测系统研究与应用[J]. 施工技术, 2019, 48(12): 19-22.
- [7] 韩宜轩, 巨永锋, 杜凯, 等. 基于 BIM 的桥梁健康监测系统[J]. 电子设计工程, 2019, 27(7): 42-46.
- [8] 杨勇, 陈炳聪, 李永河, 等. 飞鸟式钢管混凝土拱桥健康监测研究[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 52-56.
- [9] 王银刚, 程华强, 廖景胜, 等. 新河大桥健康监测系统设计及数据分析[J]. 结构工程师, 2022, 38(2): 145-152.
- [10] 蓝先林, 王德铭, 马生涛, 等. 基于监测数据的钢管混凝土拱桥健康安全评估[J]. 交通科技, 2023(1): 51-54, 65.
- [11] 谢开仲, 周剑希. 钢管混凝土拱桥健康监测传感器优化布置方法[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(4): 864-870.
- [12] 王代君, 周天图, 傅俊敏, 等. 大型桥梁健康监测系统多源异构数据集成研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 100-106.
- [13] 闫志刚, 岳青, 施洲. 沪通长江大桥健康监测系统设计[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 7-12.
- [14] 张远传, 苏成, 王勇辉, 等. 大跨度钢拱桥多指标综合预警体系研究[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 120-126.

Design of Health Monitoring System of Concrete-filled Steel Tubular Tied Arch Bridge: Taking Qianguan Bridge in Dalian Health Monitoring System as an Example

ZHAO Yuanzhi, TIAN Shizhu

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: Taking Qianguan Bridge in Dalian as the project background, the structural characteristics and stress conditions of the lower-supported steel pipe concrete tied arch bridge were analyzed. A health monitoring system scheme for the bridge was designed. The architecture design of the system and the types of sensors used for its main monitoring content were introduced. Finite element analysis of the bridge was conducted based on Midas Civil, and the measurement point layout of the bridge monitoring system was determined in accordance with relevant standards. Considering the strong subjectivity and poor overall nature of traditional manual inspections, which consume a lot of manpower, material resources, and financial resources on-site and even affect traffic operations, an intelligent bridge health monitoring platform was developed in the cloud based on BIM (building information modeling). This platform integrates real-time on-site data collection, stable and efficient transmission, rapid analysis of massive data, human-computer interaction, and visualization of models and data. It automatically triggers alerts and notifies relevant personnel through various means, achieving early detection, early warning, and early handling, providing strong support for the ultimate realization of smart bridge management and maintenance.

Keywords: concrete-filled steel tubular tied arch bridge; health surveillance systems; finite element model; arrangement of measuring points