

# 智能化连续刚构桥梁健康监测系统设计及工程应用

李鲁恒

中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088

**摘要 :** 智能化桥梁健康监测系统是通过桥梁服役期的代表性的环境外部参数、交通动态荷载、结构响应、局部结构内损伤等信息进行实时监测和分析, 在特殊运营条件以及桥梁结构状况异常时发布预警信号, 并对桥梁管理、养护与维修提供建议。针对大型连续刚构桥梁结构健康监测具有传感器类型众多、信号信噪比小及运行环境复杂等特点, 研究了智能化桥梁结构健康监测系统设计方法。首先, 针对传感器的输出信号特征、分布特点, 设计了系统总体架构和网络拓扑结构; 在此基础上阐述了数据实时显示预警、结构状态识别、数据特征分析评估等各功能的软件架构; 最后, 在云南新庄大桥上进行了该系统工程应用。系统运行结果表明设计的智能化结构健康监测系统能够满足工程应用要求, 具有高精度和可靠性。

**关键词 :** 桥梁健康监测; 智能化; 网络拓扑; 软件架构; 统计分析

## Design and Engineering Applications of the Intelligent continuous rigid frame bridge Health Monitoring System

Li Luheng

CCCC HIGHWAY CONSULTANTS CO.,LTD. Beijing 100088

**Abstract :** By implementing the monitoring and analysis of representative environmental loads, dynamic traffic loads, structural response and partial damage, the intelligent bridge health monitoring system can provide warning signals and a scientific basis for its management, conservation and maintenance when the bridge is in complex traffic environment, special climatic conditions and structural abnormalities, etc. In this paper, data collection subsystem and automation software management subsystem of the intelligent bridge structural health monitoring system are designed, and applied on the Xin Zhuang Bridge of Yunnan province. The operating results show that the designed system can reach the engineering requirements with high accuracy and reliability.

**Keywords :** bridge health monitoring; intelligent systems; network topology; software architecture; statistical analysis

## 一、引言

大型桥梁基础设施运营及服役周期较长、投资规模大, 在整体寿命期运营工作期内, 大桥受各种不利因素作用以及它们的耦合共同作用难免地要发生功能衰减和退化性病害。健康监测系统可以较全面地科学掌握桥梁结构建造与运营在役全过程的受力与损伤演变规律, 是保障大型桥梁的运营安全服役的有效措施<sup>[1-2][7]</sup>。桥梁健康监测这项国内外桥梁界和工程界研究热点得到了快速工程化发展应用, 并在此基础上逐步形成了以定期监测和连续监测为主的桥梁健康监测通行方法。桥梁结构健康监测是集结构感知、系统模式辨别和结构态势评估于一体的综合监测系统。Housner 等人将结构健康监测系统定义为: 一种从运营过程的结构中获取并处理数据, 评估结构的主要性能指标(如安全性、可靠性、耐久性等)的有效方法<sup>[3]</sup>。它结合了无损测试(NDD)和结构特性如响应感知分析, 目的是为了诊断结构体中是否有损伤出现, 判断大致位置、估计损伤的程度以及影响。

本文对现有的桥梁结构健康监测系统的功能需求、结构形式、构成和功能进行了详细深入探讨, 进一步分析了桥梁健康监测系统各个功能子系统和网络拓扑架构模块化式设计, 提出了一种整合性强、可靠性高的智能化连续刚构桥梁健康监测系统<sup>[4]</sup>。该系统主要包括以下功能子系统: 由传感感知模块、数据采集模块和数据控制与处理模块等构成自动化结构监测子系统; 根据结构系统和代表性构件的监测数据进行获取、数值统计、分析和预警, 并根据历史监测的数据编制定期报表的结构预警评估子系统以及辅助的软件子系统: 中心数据库子系统和用户界面子系统。最后, 为了验证该智能化桥梁健康监测系统的实用性与可行性, 在云南新庄大桥上进行了系统的工程实施和应用。

## 二、智能化健康监测系统设计

系统总体架构如图1所示, 采用分层模块化设计思想, 主要由物理感知层、数据链路层、管理控制层和应用界面层等组成。

作者简介: 李鲁恒, 男, 本科, 主要从事桥梁结构监测、管养信息化系统开发及运维。

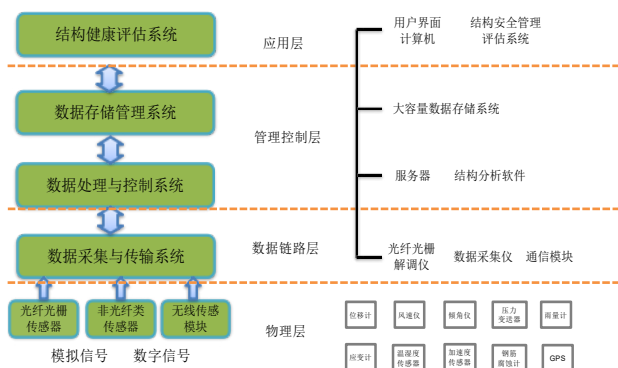


图1 智能化桥梁结构健康系统总体构成图

### (一) 物理层和数据链路层

智能监测系统物理由各种传感器模块组成，负责大桥结构和环境荷载的原始物理数据的有效感知。监测内容主要包括荷载源、结构静动力响应两大部分。传感器部分包括加速度计、应变计、倾斜仪、位移计、温湿度仪、风速仪等，对应监测内容见表1所示。

数据链路层由数据采集仪、光纤光栅解调仪和无线通信设备组成，负责对不同类型数据信号的实时采集和预处理，保证原始数据准确无误地传递给中心数据库系统。为了保证数据传输链路的高可靠性和数据质量的高保真，系统的骨干传输网络采用了光纤环网拓扑结构方式，如图2所示。

表1 传感器类型与对应监测项目

序号	监测项目	传感器类型
1	风荷载	风速仪
2	环境温湿度	温湿度仪
3	地震动	三向加速度计
4	墩、梁等空间变位	倾斜仪
5	梁体纵向位移	位移计
6	主梁结构应力	应变计
		温度补偿计
7	梁结构动力及振动	单向加速度计
		双向加速度计

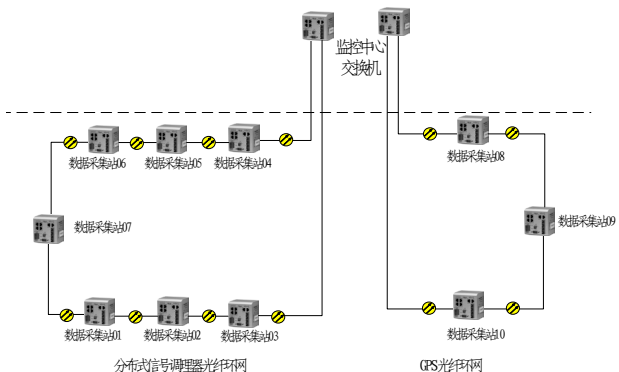


图2 光纤环网拓扑结构图

现场应用了不同的数据采集模块设备，针对不同的数据感知监测对象，包括加速度信号采集器、通用数字信号采集器和应变智能采集器等。各数据消费端使用一致的接头标准和软件结构，

使得上位机能通过一个接口与采集终端交互命令、状态与数据，方便内部数据交换共享使用。提升采集控制用户软件端调试与应用的便利和规范性。

### (二) 中心数据库子系统

大桥结构健康监测系统的中心数据库主要分为设计施工期以及通车运营期两大阶段的资料数据的信息管理。基于桥梁全寿命期档案管理原则，通车运营后的数据的存储及管理主要包括结构内（外）部环境监测数据、结构响应、变化指标监测数据、结构边界条件及载荷感知数据、结构分析和各种养护评估状态预测标准等。

中心数据库子系统总体框架如图3所示，要求能够保障数据储存过程的可靠，系统能在无需人工干涉的情况下不间断连续长期稳定工作，能够同时处理传统的可结构化及其他非结构化数据集，能够支撑数据的快速查询及视图的迅速生成，支持分布式数据网络管理，支持 WEB MQTT 数据连接访问，满足开放式数据库连接标准等。中心数据库子系统的主要设计内容包括：基础数据库管理语言工具的选择、数据库逻辑设计、数据库备份与灾难恢复策略等。

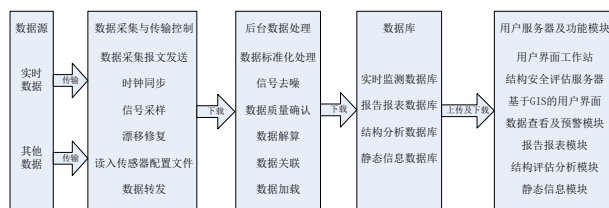


图3 中心数据库子系统总体框架

### (三) 结构预警评估子系统

结构预警评估系统包括预警模块和安全评估模块，预警方法主要有结构对基于振动参数整体测试的损伤判断预警方法等。结构预警体系的主要功能作用是基于结构长时间连续实时监测过程中对发生的可能威胁到桥梁构件运营，导致风险的可变荷载（如突然的风场变动、超重超载车等）以及结构对其的应激变化指标（主梁应力、整体及局部变形等）进行预测警示，提供桥梁在特殊交通条件下、异常气候或桥梁运营突发异常状况时所触发的预警信号，提醒桥梁养管人员重视。

安全评估系统可以对大桥的结构和构件的代表性监测数据进行比对、分析、模型计算、推演，进行结构的整体内力状态辨识、模态加载分析、结构承受荷载分析、风场分布分析等。

## 三、工程实际应用

### (一) 工程背景

云南新庄大桥（图4）位于云南省丽江市华坪县新庄乡，是华坪至丽江高速公路的重要组成部分，桥梁跨越U型沟谷，桥面最大高度181m。桥梁跨径布置为 $6 \times 40 + (108 + 3 \times 200 + 108) + 1 \times 40 = 1096\text{m}$ （不含侧墙长），起点接攀枝花方向路段，终点顺接岩湾隧道。上部采用预应力混凝土连续刚构，路线为左右幅分离式布置。



图4 云南新庄大桥远景

## (二) 集成方案与传感器布置

采用本文设计的智能化桥梁结构健康监测系统，利用数据采集传输子系统进行传感器数据的实时采集与传输，由中心数据库系统对数据进行信息化式存储与管理，最后提取部分典型性数据进行分析、统计。

大桥监测项目主要包括主梁的空间变位，风荷载，墩、梁的结构振动和动力特性等。根据现行《公路桥梁结构监测技术规范》和结构健康监测理论中基于测点优化布置策略的传感器布设法<sup>[5]</sup>，主桥的传感器测点总体布置见图5。

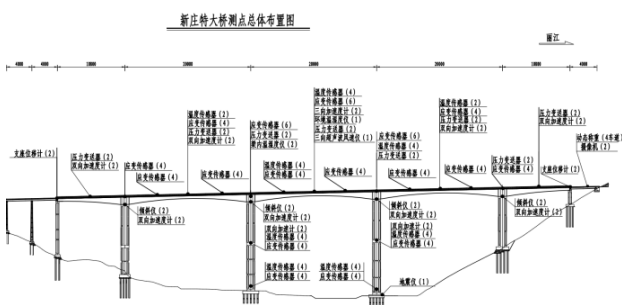


图5 主桥传感器测点总体布置

## 四、数据统计分析

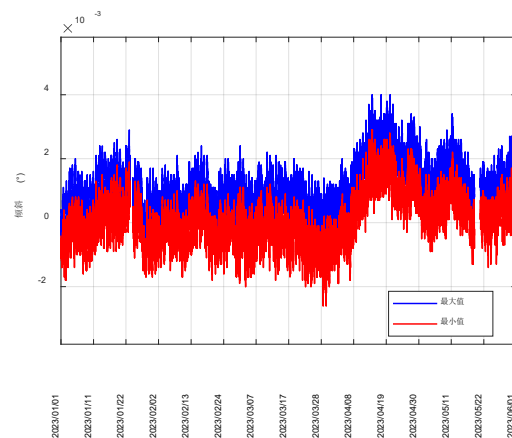
桥梁结构健康监测所获取的数据最终目的是为桥梁在运营期的养护和维修提供科学依据，对原始数据进行专项的汇总分析可得到用于进行桥梁结构验算的荷载和效应信息。桥梁的形变、加速度等数据可以与设计规范值进行实时校核，也可以作为修正模型、识别损伤以及结构安全评定等的必要信息加以应用。

传感器网络所感知到的数据序列须经过信号处理算法过滤，并提取能直接反应结构中损伤的参数，才能用于有效评估结构的状态。在本系统中，健康监测中的模式识别方法采用随机子空间识别法 - 基于环境激励，梁结构损伤识别采用应变模态法，计算程序应用数值计算语言 Python 软件编制。

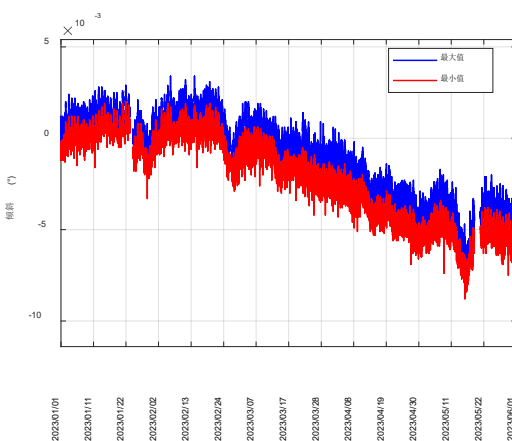
### (一) 单项统计分析

#### 1. 倾斜统计分析

本桥墩高较高，因此大桥在主墩顺桥向横桥向分别布置了一个倾斜仪，其中桥面中和主跨1/4处横桥向倾斜的时程统计曲线如图6所示，倾斜监测单元的统计数据见表2。



左幅 D01-横桥向



右幅 D03-横桥向

图6 大桥横桥向倾斜监测的时程统计曲线

由倾斜监测统计结果可知，监测点处的倾斜幅度在  $[-0.05, 0.05]^\circ$  之间，因倾斜而发生的结构风险较小。

#### 2. 主梁振动统计分析

大桥边跨中、主跨四分之一、主跨中和主跨四分之三处各在左幅布置一台竖向加速度传感器，以测试主梁在地震、车载以及风作用下的结构振动。部分加速度统计分析结果如图7所示。

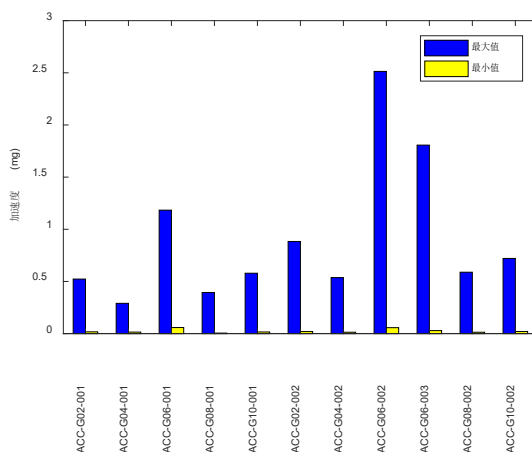


图7 桥面的加速度统计分析

由统计分析图可以看出，锚室索塔的最大加速度为  $1.2\text{mg}$ ；桥面的竖向加速度最大值较为平稳，最大值为  $2.51\text{mg}$ 。

## (二) 整体位移特性分析

新庄特大桥整体位移特性重点分析位移与温度的相关关系,结果如图8所示。对于梁端位移来说,与大桥所处的环境温度有明显的线性相关关系,其回归系数  $P1=-3.49$ ,  $P2=42.47$ 。

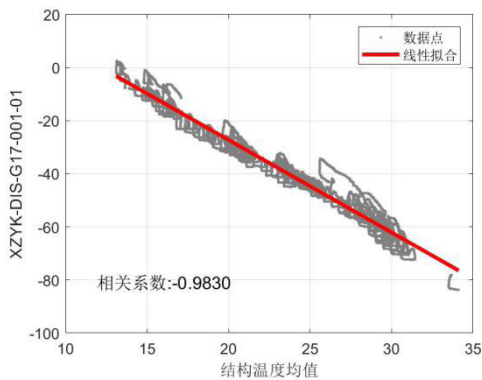


图8 主梁整体位移分析

## 五、结论

本文对大型桥梁结构健康监测系统的整体网络架构、模块化设计等进行了研究分析和开发,得到的主要结论有:

所研发的智能化刚构桥梁结构健康监测系统采用模块化的设计方法,分设不同的功能子系统,提高了系统整体的可靠性和稳定性;研发建立基于网络版 B/S 架构的桥梁监测管理子系统和采用中心数据库系统,使整个数据的存储、管理更加安全、便捷和科学化;

系统在新庄大桥工程应用结果表明本系统性能满足工程管养的精确度和可靠性要求,实用性好,具有较好的理论研究与实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 刘琦, 聂鹏, 戴华林, 等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望 [J]. 城市道桥与防洪, 2023(2):193-196,205. DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.02.049.
- [2] 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁健康监测技术研究现状及展望 [J]. 中国公路学报, 2021,34(12):25-45. DOI:10.3969/j.issn.1001-7372.2021.12.003.
- [3] Housner, G. W. Bergman, L. A. Caughey, T. k. et al. Structural control past present and future [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997 123(9).
- [4] YU Y,OU J,LI H. Design, calibration and application of wireless sensors for structural global and local monitoring of civil infrastructures [J]. Smart Structures and Systems, 2010, 6(5-6): 641-659.
- [5] 伊廷华, 李宏男, 顾明. 结构健康监测中基于多重优化策略的传感器布置方法 [J]. 建筑结构学报, 2012, 32(12): 217-223.
- [6] Döhler M, Andersen P, Mevel L. Operational modal analysis using a fast stochastic subspace identification method [M] //Topics in Modal Analysis I, Volume 5. Springer New York, 2012: 19-24.
- [7] 彭韶辉, 闫宗山, 王子斌, 等. 时钟同步技术在桥梁结构监测系统无线传感网络中的应用研究 [J]. 公路, 2015,60(5):106-111.