

# 上海市崇启大桥南引桥结构健康监测系统设计

罗东伟

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘要:** 为保障上海市崇启大桥南引桥运营安全,提升桥梁养护管理数字化水平,结合该桥结构特点、滨海高盐雾服役环境及相关政策要求,对其开展结构健康监测系统设计。首先,在综合考虑基础上,选择该桥第7联左幅桥、第8联左幅桥、第8联右幅桥、第9联左幅桥作为代表性桥跨;然后针对环境、作用、结构响应和结构变化4类监测项目,配套采用光纤光栅传感器、动态称重仪、机器视觉等设备,成功构建了由传感器模块、数据采集及传输模块、数据处理及管理模块、数据分析应用模块组成的系统架构。该系统可实现结构状态实时感知、数据智能处理、超限预警和健康度综合评估,为桥梁损伤识别、安全预警、养护决策及全生命周期管理提供支撑,可为滨海环境下大跨度连续梁桥健康监测系统设计提供参考。

**关键词:** 崇启大桥南引桥;结构健康监测系统;测点布置;健康度评估

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0244-06

## Design of Structural Health Monitoring System for South Approach Bridge of Chongqi Bridge in Shanghai

LUO Dongwei

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

**Abstract:** To ensure the operational safety of the south approach bridge of Chongqi Bridge in Shanghai and improve the digitalization level of bridge maintenance management, combined with the structural characteristics, coastal high salt fog service environment and relevant policy requirements of the bridge, its structural health monitoring system is designed. Firstly, on the basis of comprehensive consideration, the left span of the 7th span, the left span of the 8th span, the right span of the 8th span and the left span of the 9th span of this bridge are selected as representative spans. And then for on four types of monitoring items such as environment, action, structural response and structural variation, the fiber Bragg grating sensors, dynamic weighing instruments, machine vision and other devices are equipped to successfully build the system framework consisting of sensor module, data acquisition and transmission module, data processing and management module, and data analysis and application module. The system can realize the real-time perception of structural state, intelligent data processing, over-limit early warning and comprehensive health assessment, providing support for bridge damage identification, safety early warning, maintenance decision-making and life-cycle management, which can offer a reference for the design of structural health monitoring systems for long-span continuous beam bridges in coastal environments.

**Keywords:** south approach bridge of Chongqi Bridge; structural health monitoring system; arrangement of monitoring points; health assessment

## 0 引言

桥梁在长期运营过程中,受气候环境和汽车荷载的综合作用,结构损伤将逐步累积并引发各类病害,不仅会降低桥梁的使用性能,严重时还会对结构整体安全构成直接威胁。因此,实时获取并掌握运营状态下桥梁结构安全指标的动态演化特征,已成

为桥梁安全管控的核心需求。当前,既有桥梁养护数据的数字化与标准化程度较低,不同时期所获取的检测成果缺乏系统性整合,难以实现全生命周期维度的纵向对比、统计分析和安全评估;同时,各类检测数据与桥梁具体构件难以实现精准关联,无法构建以构件为核心的精细化管理体系,严重制约了桥梁关键构件全生命周期健康状态的数字化分析和智能化管理。

桥梁健康监测技术是融合现代传感技术、数据处理技术、结构诊断技术和传统人工检测方法的综

收稿日期: 2026-04-01

作者简介: 罗东伟(1987—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

合性工程技术,其核心功能在于通过对桥梁结构状态的实时监测和数据分析,保障桥梁结构的运营安全与使用功能<sup>[1-3]</sup>。随着桥梁结构形式日趋复杂、交通荷载量级持续攀升,桥梁健康监测的工程价值愈发凸显。相较于传统人工检测手段,结构健康监测技术在突发损伤快速识别、累积损伤趋势预测、隐蔽构件病害探测、异常工况实时预警及设计参数验证优化等方面具备显著优势<sup>[4]</sup>。通过健康监测系统对结构安全关键指标进行长期监测和对比分析,可建立桥梁各构件的全生命周期健康档案,全面掌握构件安全状态及其演化规律;结合桥梁养护技术规范,可科学界定定期检测的实施方案、检测频率和数据管理要求,为人工巡检和养护决策提供理论依据和技术支撑,推动桥梁养护工作向规范化、精细化、数字化、参数化方向发展,有效提升养护管理的效率与水平<sup>[5]</sup>。本文结合上海市崇启大桥南引桥的结构特性和服役环境,开展结构健康监测系统设计,旨在为该桥运营期的结构安全保障和养护管理科学化提供技术支撑。

1 桥梁概况

崇启大桥南引桥位于上海市崇明区 G40 沪陕高速公路上,2011 年运营通车,从苏沪界线开始,接江苏省南引桥跨长江规划大堤、随塘河和四通港大堤至桥台结束,总长 2 294 m;双向 6 车道加紧急停车道,设计速度 100 km/h,桥面总宽 33 m,分上下行 2 幅桥,单幅桥宽 16 m。桥梁总体布置见表 1。

表 1 桥梁总体布置

| 区段                | 跨径布置/m                      | 梁型         | 施工方案     |
|-------------------|-----------------------------|------------|----------|
| 起坡段<br>(第 1、2 联)  | 4×30~5×30                   | 等高 PC 连续箱梁 | 支架现浇     |
| 跨四通港大堤<br>(第 3 联) | 左幅:42+52+50;<br>右幅:50+52+42 | 等高 PC 连续箱梁 | 支架现浇     |
| 浅滩段<br>(第 4~7 联)  | 4×(7×50)                    | 等高 PC 连续箱梁 | 移动模架逐孔现浇 |
| 跨规划大堤<br>(第 8 联)  | 90+150+90                   | 变高 PC 连续箱梁 | 挂篮悬臂浇筑   |
| 江中段<br>(第 9 联)    | 3×50                        | 等高 PC 连续箱梁 | 节段预制拼装   |

该桥地处长江入海口区域,属典型滨海恶劣服役环境。桥位江面开阔、无遮挡,易受台风影响而形成高速大风;江海水汽丰沛,常伴随平流海雾,雾日频发、浓度较高,易导致能见度急剧下降;加之海水倒灌形成高盐雾环境,氯离子持续渗透与干湿循环交替作用,对桥梁混凝土结构产生长期强腐蚀作用。

2 桥梁结构监测范围与内容

2.1 监测桥跨

第 7 联桥属于浅滩段桥,是跨径布置为 7×50 m 的等高度 PC 连续箱梁桥;此类型桥全桥共 4 联,总长度占比 61%,梁端温变位移大,采用移动模架逐孔现浇施工。第 8 联桥即跨规划大堤桥,是跨径布置为 90 m+150 m+90 m 的变高度 PC 连续箱梁桥,跨径大,采用挂篮悬臂浇筑施工,并位于《交通运输部公路局关于印发在役公路桥梁隧道结构监测系统 2024—2025 年建设清单的函》(交公便字[2024]271 号)附件 1“2024—2025 年在役长大桥梁结构监测系统建设清单”之中。第 9 联桥即江中段桥,是跨径布置为 3×50 m 的等高度 PC 连续箱梁桥,处于长江江中段,采用体外预应力节段预制拼装施工。综合考虑政策要求、桥梁结构类型、施工工艺、桥梁跨径、桥梁长度占比以及造价经济性,选择第 7 联左幅桥、第 8 联左幅桥、第 8 联右幅桥、第 9 联左幅桥作为代表性桥跨进行结构健康监测。

2.2 监测项目、测点布置及传感器选择

公路桥梁结构健康监测项目应根据《公路桥梁结构监测技术规范》(JT/T 1037—2022)要求,并结合定期检测报告、桥梁自身结构特点、桥址处环境状况等因素综合确定。监测项目分为环境、作用、结构响应和结构变化 4 部分,测点布置应能够反映桥梁所处环境、外部作用、结构响应特征及结构状态变化的实际规律。传感器的选型需满足相应测量技术指标,同时兼顾长期稳定性、环境适应性和安装维护便利性。

该桥测点布置见图 1 至图 4;监测项目、测点位置/数量及传感器类型见表 2。

2.2.1 环境监测

该桥位于长江入海口,雾日频发、湿度大、冬季偶有结冰现象,故环境监测项目包括环境温湿度、箱梁内温湿度、桥面结冰情况、能见度和降雨量。通过对温湿度的监测,可实时掌握环境气候状态<sup>[6]</sup>,为桥梁结构耐久性评估、材料性能变化分析及运营安全管控提供数据支撑。通过对桥面结冰情况、能见度和降雨量的监测,可及时掌握桥面通行环境状况,为交通管控、预警防范和保障行车安全提供关键依据。环境温湿度和箱梁内温湿度测点设置在第 7 联至第 9 联左幅桥的首尾端,全桥共 4 个,采用温湿度一体的电阻电容温湿度计进行监测,采样频率为 1/60 Hz。

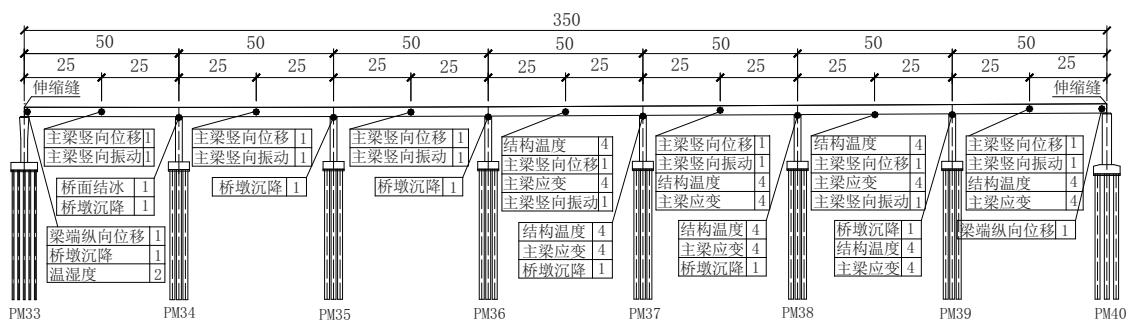


图1 第7联左幅桥测点布置图(单位:m)

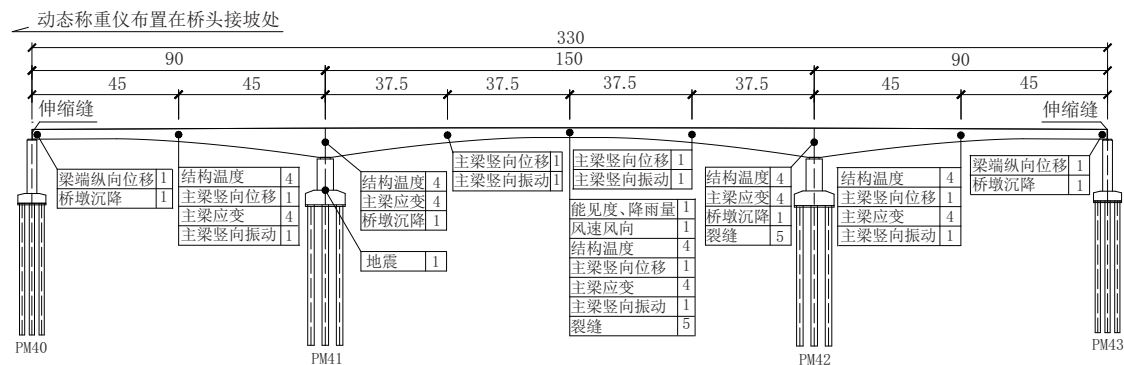


图2 第8联左幅桥测点布置图(单位:m)

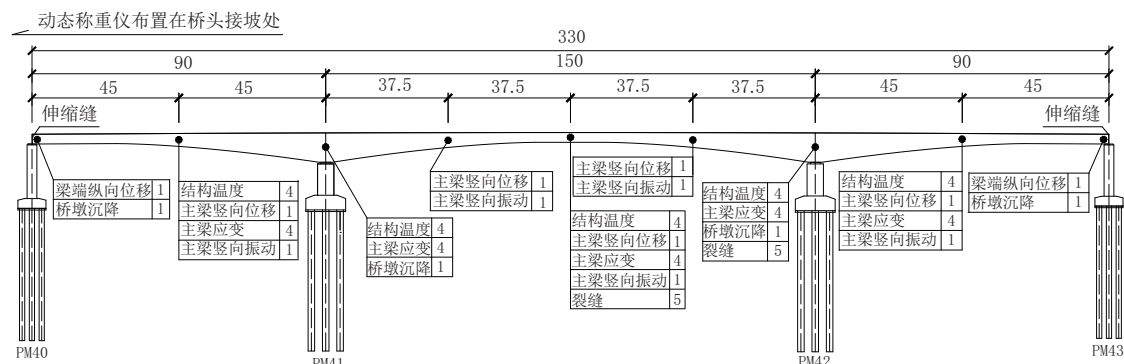


图3 第8联右幅桥测点布置图(单位:m)

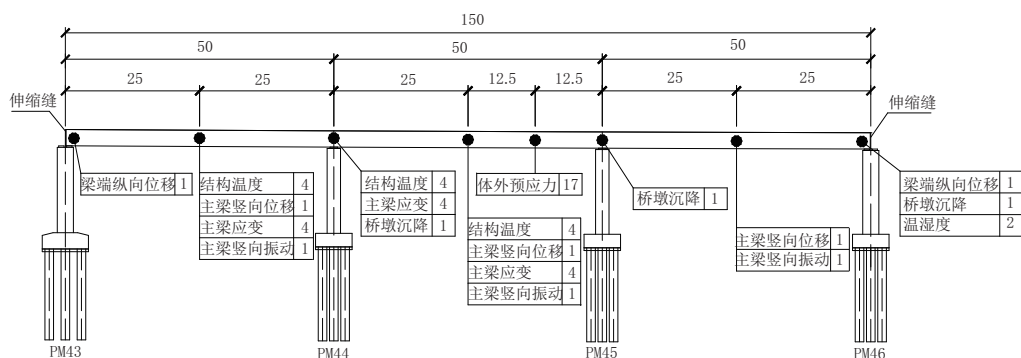


图4 第9联左幅桥测点布置图(单位:m)

桥面能见度和降雨量测点设置在第8联左幅桥的跨中桥面,全桥共1个,采用多功能气象仪进行监测,采样频率为1/60 Hz。桥面结冰测点设置在第7联左幅桥的桥面凹形竖曲线的最低点,全桥共1个,采用非接触式路面结冰状况传感器进行监测,采样频率为1/60 Hz。

### 2.2.2 作用监测

作用监测项目包括车辆荷载、风速风向、结构温度和地震。车辆荷载作为作用于桥梁结构的关键外部荷载,通过对车辆荷载的监测,可实时掌握桥梁实际通行的车辆荷载信息,既可用于检验设计所采用荷载参数的合理程度,也可作为桥梁整体承载能力验

表 2 监测项目、测点位置/数量和传感器类型

| 类别   | 监测项目      | 测点位置/数量                    |                            |                            |                            | 传感器类型         |
|------|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
|      |           | 第 7 联左幅桥                   | 第 8 联左幅桥                   | 第 8 联右幅桥                   | 第 9 联左幅桥                   |               |
| 环境   | 环境温湿度     | 首端桥面/1                     |                            |                            | 尾端桥面/1                     | 电阻电容温湿度计      |
|      | 箱梁内温湿度    | 首端梁内/1                     |                            |                            | 尾端梁内/1                     | 电阻电容温湿度计      |
|      | 能见度、降雨量   |                            | 跨中桥面/1                     |                            |                            | 多功能气象仪        |
|      | 桥面结冰      | 桥面最低点/1                    |                            |                            |                            | 非接触式路面结冰状况传感器 |
| 作用   | 车辆荷载      |                            | 桥头道路接坡/3                   | 桥头道路接坡/3                   |                            | 动态称重仪         |
|      | 风速风向      |                            | 跨中桥面/1                     |                            |                            | 三向超声风速仪       |
|      | 结构温度      | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/28 | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/20 | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/20 | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/12 | 光纤光栅温度计       |
|      | 地震        |                            | 中墩承台顶面/1                   |                            |                            | 三向力平衡式加速度传感器  |
|      |           |                            |                            |                            |                            |               |
| 结构响应 | 主梁竖向位移    | 各跨跨中桥面外侧防撞护栏/7             | 边跨跨中和中跨四分区桥面外侧防撞护栏/5       | 边跨跨中和中跨四分区桥面外侧防撞护栏/5       | 各跨跨中桥面外侧防撞护栏/3             | 机器视觉系统        |
|      | 梁端纵向位移    | 主梁首尾两端/2                   | 主梁首尾两端/2                   | 主梁首尾两端/2                   | 主梁首尾两端/2                   | 光纤光栅拉线式位移传感器  |
|      | 主梁关键截面应变  | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/28 | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/20 | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/20 | 跨中和中墩墩顶截面的主梁箱室顶板下缘和底板上缘/12 | 光纤光栅应变计       |
|      | 主梁竖向振动加速度 | 各跨跨中桥面外侧防撞护栏/7             | 边跨跨中和中跨四分区桥面外侧防撞护栏/5       | 边跨跨中和中跨四分区桥面外侧防撞护栏/5       | 各跨跨中桥面外侧防撞护栏/3             | 力平衡式加速度传感器    |
| 结构变化 | 桥墩不均匀沉降   | 各墩墩顶/7                     | 各墩墩顶/4                     | 各墩墩顶/4                     | 各墩墩顶/3                     | 静力水准仪         |
|      | 混凝土结构裂缝   |                            | 顶底板典型裂缝处/10                | 顶底板典型裂缝处/10                |                            | 光纤光栅裂缝计       |
|      | 体外预应力     |                            |                            |                            | 体外预应力处/17                  | 磁通量传感器        |

算以及构件在车辆反复作用下的疲劳性能评估提供依据。该桥位于长江入海口,风速较大,通过对风速风向的监测,可实时掌握风环境数据,保障行车通行安全、防范桥梁风致风险,为交通管控和结构安全运营提供科学依据。结构温度监测的首要作用是为应变监测数据提供温度补偿修正,其次用来监测不同位置结构温度的差异。该桥设防烈度为Ⅶ度,通过对地震的实时监测,可捕捉地震动参数,为震后安全评估、应急处置和结构健康诊断提供关键数据支撑。车辆荷载测点设置在桥头接坡路基段的 6 个车道上,全桥共 6 个,采用动态称重仪进行监测,在车辆通过时触发采样。风速风向测点设置在第 8 联左幅桥的跨中桥面路灯杆上,全桥共 1 个,采用三向超声风速仪进行监测,采样频率为 10 Hz。结构温度测点和应变测点一一对应,结构温度测点全桥共 80 个,采用光纤光栅温度计<sup>[6]</sup>进行监测,采样频率为 1/60 Hz,并与结构应变传感器串接使用。地震测点设置在第 8 联左幅桥中墩承台顶面,全桥共 1 个,采用三向力平衡式加速度传感器进行监测,采样频率为 50 Hz,在触发时采集。

2.2.3 结构响应监测

结构响应监测项目包括主梁竖向位移、主梁梁端位移、主梁关键截面应变和主梁竖向振动加速度<sup>[7]</sup>。通过对结构位移的监测,可及时发现桥梁的变形情况,直观反映桥梁结构的健康状况,为结构健康评估提供核心数据。通过对应变的监测,能够直观体现桥梁结构在各类荷载作用下的应力分布状态,同时也可识别结构潜在的损伤情况。通过对主梁竖向振动的监测,可得到桥梁结构的阻尼、频率和振型等振动参数,用于判断结构的刚度退化程度和损伤程度<sup>[8-9]</sup>。该桥主梁竖向位移测点设置在第 8 联左幅桥和第 8 联右幅桥的边跨跨中、中跨四分区桥面外侧防撞护栏上,以及第 7 联左幅桥、第 9 联左幅桥的各跨跨中桥面外侧防撞护栏上,全桥共 20 个;采用机器视觉系统进行监测,采样频率为 20 Hz,测点精度可达 0.2 mm,特别适用于监测主梁在车辆荷载下的动位移。主梁梁端位移测点设置在第 7 联左幅桥、第 8 联左幅桥、第 8 联右幅桥和第 9 联左幅桥的主梁首尾两端,全桥共 8 个,采用光纤光栅拉线式位移传感器进行监测,采样频率为 1 Hz。主梁关键

截面应变测点设置在第7联左幅桥、第8联左幅桥、第8联右幅桥和第9联左幅桥的跨中及中墩墩顶截面,每个截面分别在主梁箱室顶板的下缘左右两侧、底板的上缘左右两侧各设置1个测点,全桥共80个测点,采用光纤光栅应变计进行监测,采样频率为10 Hz。主梁竖向振动加速度测点设置位置与主梁竖向位移测点位置相同,全桥共20个测点,采用力平衡式加速度传感器进行监测,采样频率为20 Hz。

#### 2.2.4 结构变化监测

结构变化监测项目包括桥墩不均匀沉降监测、裂缝监测和体外预应力监测。连续梁桥的桥墩不均匀沉降会引起桥梁结构的内力变化,通过对桥墩不均匀沉降的监测,可及时掌握桥梁基础沉降状态,避免主梁附加内力过大、开裂及线形失调。裂缝是混凝土桥梁结构内部损伤程度的最直观表现,通过对裂缝的实时监测,可掌握裂缝发展态势和结构内部损伤状况,为维修决策提供参考依据。该桥第9联桥主梁采用体外预应力的节段预制拼装箱梁,通过对体外预应力的监测,可实时掌握预应力变化和结构受力情况,保障桥梁承载能力和运营安全。该桥桥墩不均匀沉降测点设置在第7联左幅桥、第8联左幅桥、第8联右幅桥和第9联左幅桥的各墩墩顶,全桥共18个,采用基于连通管原理的静力水准仪进行监测,采样频率为1/3 600 Hz。裂缝测点布置在第8联左幅桥和第8联右幅桥的顶底板典型受力裂缝处,全桥共20个,采用光纤光栅裂缝计进行监测,采样频率为1/3 600 Hz。体外预应力测点布置在第9联左幅桥的17根体外预应力钢束处,全桥共17个,采用磁通量传感器进行监测,采样频率为1/3 600 Hz。

### 3 系统架构及模块设计

根据数据采集传输应用路径,该桥健康监测系統由传感器模块、数据采集及传输模块、数据处理及管理模块、数据分析应用模块4部分组成。

#### 3.1 传感器模块

传感器模块主要为前端信息感知设备,能实时捕捉桥梁在环境、作用及材料老化影响下的力学响应和形变特征,将结构变形、应力、振动等不可见的物理量变化转化为可量化、可传输的监测数据<sup>[10-12]</sup>。它是整个系统获取真实结构状态的唯一源头,直接决定着后续数据分析的可靠性和准确性。因此选择符合技术要求且长期稳定、耐久适用的传感器非常关键<sup>[13]</sup>。该桥位于长江入海口,湿度、盐度较大,因

此在选择传感器时除了关注技术要求外,对其防潮、防腐性能也是该系统重点关注的方面。

#### 3.2 数据采集及传输模块

数据采集及传输模块主要负责实现各类传感数据的获取和传输工作,其组成涵盖硬件设备、软件系统两部分。本系统在大桥外场设立4个采集工作站,分别位于第7、8、9联左幅桥和第8联右幅桥箱梁内,自动采集外场的传感器监测信号。整体数据传输网络采用双纤自愈环网架构,由1台核心交换机与4台以太网接入交换机组合搭建,网络整体基于TCP/IP协议体系,并采用动态路由协议运行。系统内各数据采集工作站通过就近线缆接入现场以太网交换机,再经由交换机汇入整体采集传输网络。各工作站与网络内其他服务器或工作站之间均具备2条独立通信链路,即便网络中某一段光纤发生中断,各工作站仍可保持稳定正常运行。部分监测设备数据图见图5、图6。

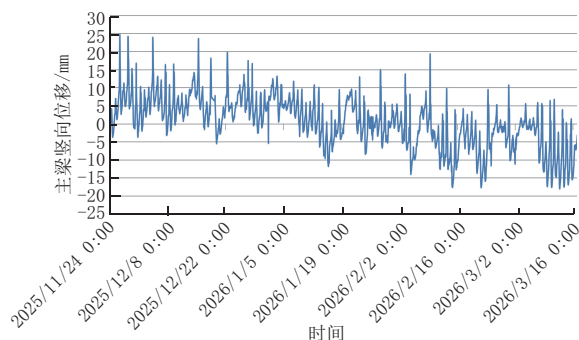


图5 第8联左幅桥跨中主梁竖向位移

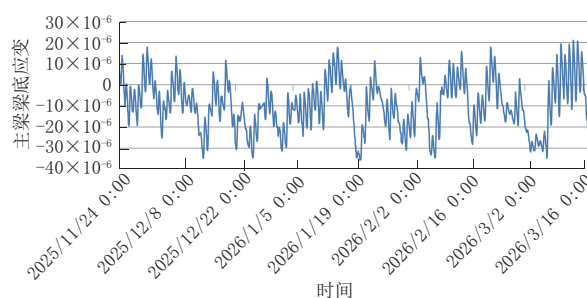


图6 第8联左幅桥跨中主梁梁底应变

#### 3.3 数据处理及管理模块

数据处理及管理模块是该桥结构健康监测系统的中枢,主要由数据预处理过滤单元、数据库存储单元、数据查询和可视化单元等软硬件构成,承担着对前端传感器采集原始数据的接收、清洗、解析、存储和管理等功能。它能够对环境噪声、异常值、缺失数据进行滤波和校正,保障数据质量;通过建立结构化数据库实现海量监测数据的长期安全存储和高效调取;同时为外接平台提供标准化接口。

### 3.4 数据分析应用模块

数据分析应用模块是该桥健康监测实现结构安全评估和智能决策的核心功能单元,主要由趋势预测单元、阈值预警单元、结构状态评价单元等构成。其核心功能是在数据处理和管理模块的基础上,对标准化监测数据进行挖掘和专业分析,结合桥梁设计参数、力学模型开展结构受力状态分析、损伤定位和程度判定、长期性能退化趋势预测,并根据规范和预警指标实现多级安全预警,最终形成结构健康状态评价结论,为养护决策、应急处置、全生命周期管理提供科学依据。其具体功能包括:超限阈值和报警、车辆通行管控建议、检查指引、健康度评估、特殊事件应急管理。目前该模块仍存在智能化程度有限、多源数据融合能力弱等不足,这也是今后桥梁健康监测系统需进一步发展的方向。

## 4 结 语

对桥梁结构实施健康监测,是当前保障桥梁长期安全运营的重要技术手段。结合桥梁自身结构特性和服役环境,搭建高效可靠的桥梁健康监测系统,是实现结构安全评估、推进桥梁管养数字化和智能化的重要基础。本文以上海市崇启大桥南引桥结构健康监测系统设计为背景,详细介绍了监测桥跨确定、监测内容、测点布置、传感器选择、系统架构及相

关模块设计,力求设计一个科学合理的健康监测系统,能为桥梁维养和结构安全评估及今后该地区同类型桥梁的健康监测系统建设提供参考和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 郑杰峰. 高速铁路连续梁拱组合桥全寿命[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- [2] 金晓龙. 武汉二七长江大桥健康监测系统设计与应用[J]. 中国水运, 2014(6): 233-237.
- [3] 辛光涛, 赵健. 大跨径桥梁结构健康监测系统设计研究[J]. 桥梁工程, 2020(10): 288-290.
- [4] 王明俊, 王湛, 陈炳聪, 等. 桥梁健康监测发展回顾[J]. 城市道桥与防洪, 2019(11): 53-56.
- [5] 赵星全. 桥梁结构的健康监测与维护技术研究[J]. 交通世界, 2024(16): 114-116.
- [6] 陈阶亮, 李松, 芮旭东. 钱江四桥结构健康监测系统及运营效能综述[J]. 城市道桥与防洪, 2010(2): 65-68.
- [7] 陈能辉, 杨纪鹏, 夏焯. 无风撑杆拱桥健康监测系统设计[J]. 城市道桥与防洪, 2021(1): 83-87.
- [8] 杨小刚, 李连友. 莫桑比克 Maputo 大桥健康监测系统的整体架构设计[J]. 中外公路, 2014(8): 220-225.
- [9] 贺瑞. 大跨桥结构监测系统的模态识别和误差分析及损伤识别[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [10] 刘芳鹏. 东营黄河大桥结构健康监测应用探究[J]. 青海交通科技, 2024(2): 141-146.
- [11] 季德钧. 哇加滩黄河特大桥结构健康监测系统设计[J]. 中外公路, 2016(10): 115-119.
- [12] 梅雪丰. 基于 DSP 的悬索桥健康监测数据采集系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [13] 彭晓彬. 鄂东长江公路大桥运营期结构监测与分析[J]. 城市道桥与防洪, 2016(1): 71-75.