

# 桥梁健康监测多源传感技术集成综述

黄泽鑫 黄修文 林雁贝 吴志勇 陈钰培

1. 广州市城投新三桥管理建设有限公司 广东广州 510220; 2. 广东诚泰交通科技发展有限公司 广东广州 510000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18506

**[摘要]** 多源传感技术集成是桥梁健康监测的重要发展方向。系统综述了多源传感技术的分类、性能特征与适用性,阐述了集成架构设计、数据采集传输、数据融合处理与系统功能集成等关键技术。以琶洲大桥为例,分析了多源传感技术集成在工程中的应用实践。指出当前技术集成面临传感器长期可靠性不足、异构数据标准化程度低与环境干扰抑制能力有限等挑战。提出未来应发展智能材料传感器、边缘智能计算与数字孪生等前沿技术,推动监测系统向智能化与预测化方向发展,为桥梁安全管理提供技术支持。

**[关键词]** 桥梁健康监测; 多源传感技术; 集成系统; 数据融合; 智能识别

## 1. 引言

桥梁作为交通基础设施的关键节点,其安全运营直接关系到国民经济发展与公共安全。《交通强国建设纲要》明确提出要加强交通基础设施养护,提升设施耐久性与可靠性;《数字交通“十四五”发展规划》强调推动交通基础设施数字化与智能化转型。多源传感技术集成通过融合光纤传感、振弦式传感、加速度传感与GNSS等异构传感器,实现对桥梁结构状态的协同监测,成为桥梁健康监测技术发展的必然趋势。

国内外学者在多源传感技术集成方面开展了大量研究。郑熹红(2025)采用光学、声学、电学与机械类传感器组合构造三维监测网络,有效降低了维修成本<sup>[1]</sup>。黄文业(2025)整合物联网感知网络、数据传输、智能处理及人工智能诊断算法,构建覆盖“感知、传输、分析、决策”全链条的监测体系<sup>[2]</sup>。Singh等(2025)利用机器学习技术对钢桥振动传感数据进行分类,随机森林算法识别准确率达97.86%<sup>[3]</sup>。Sun等(2025)系统综述了传感器优化布置方法,评估了模态保证准则与有效独立法等优化策略<sup>[4]</sup>。然而,当前技术集成仍面临多源数据兼容性差、协同监测效率低与数据标准不统一等痛点,制约了工程应用。

本文聚焦多源传感技术的分类、集成架构、工程应用及发展趋势,以琶洲大桥健康监测系统为案例,系统综述多源传感技术集成的理论方法与实践经验,最后探讨技术挑战与发展方向,为同类工程提供参考。

## 2. 桥梁健康监测多源传感技术分类及特性

### 2.1 多源传感技术分类与监测原理

桥梁健康监测多源传感技术按照监测对象能够分为结构变形监测、应力应变监测、振动响应监测以及环境荷载监测这四大类,结构变形监测采用GNSS、全站仪与倾角传感器等设备,依靠卫星定位、光学测距与姿态感知等原理来获取桥梁位移、挠度与转角等参数,应力应变监测运用振弦式应变计与光纤光栅传感器等装置,基于振动频率变化与光波长漂移等机理去测量结构应力分布。Latha等(2024)集成加速度传感器、荷载传感器与湿度传感器等多种装置,持续监测桥梁振动与应变及环境条件<sup>[5]</sup>。Song(2025)设计了基于物联网与MEMS传感器的监测系统,通过感知层采集数据、网络层低功耗传输与应用层云端分析的三层架构实现数据处理<sup>[6]</sup>。

### 2.2 各类传感技术性能对比与适用性分析

各类传感技术在精度响应速度等性能指标上存在显著差异,具体情况如表1所示,GNSS系统监测精度能达到毫米级适用于大跨径桥梁整体变形监测,但会受卫星信号遮挡影响,振弦式应变计稳定性好且抗干扰能力强适合长期应力监测,但安装过程复杂且为单点测量,光纤光栅传感器具备分布式监测能力可实现准分布式应变测量,但系统所需成本比较高,加速度传感器响应速度快并且灵敏度高适用于动力响应采集,但对温度漂移较为敏感。Chakali等(2024)提出传感器优化配置框架,开发目标函数以降低不确定性并提高监测系统定位结构退化的准确性<sup>[7]</sup>。巢守兰(2025)建立兼顾监测准确性与经济性的多目标优化模型,通过科学优化传感器布置方案改善损伤识别能力<sup>[8]</sup>。

表1 桥梁健康监测主要传感技术性能对比

传感器类型	监测精度	响应速度	耐久性	抗干扰性	成本	主要适用场景
-------	------	------	-----	------	----	--------

GNSS	毫米级	中	高	受信号遮挡影响	中	大跨径桥梁整体变形
振弦式应变计	高	中	很高	很强	低	长期应力监测
光纤光栅传感器	很高	高	高	很强	高	准分布式应变监测
加速度传感器	高	很高	中	温度敏感	低	动力响应采集
倾角传感器	很高	高	高	强	中	桥墩倾斜监测
位移传感器	高	中	中	中	中	支座位移监测

### 3. 多源传感技术集成体系

#### 3.1 集成架构设计

多源传感技术集成架构采用分层分布式的设计方式,它包含感知层、传输层、处理层与应用层这四层结构,感知层进行异构传感器网络的部署工作,以此实现多参数的协同采集任务,传输层借助有线与无线通信技术手段,达成数据的可靠传输目标,处理层负责完成数据预处理与融合分析以及存储管理等工作,应用层能够提供状态评估、预警决策与可视化展示等功能。谢鸿等(2025)构建了包含部省级数据平台、省级数据平台与硬件中台的整体架构,传感器系统通过数据采集单元连接桥头交换机,经监测平台完成数据预处理<sup>[9]</sup>。李映田(2025)提出构建多源异构监测数据融合平台,开发桥梁健康状态评估预警模型,完善智能监测标准规范体系<sup>[10]</sup>。分层架构设计实现了系统的模块化与可扩展性。

#### 3.2 数据采集与传输集成

数据采集与传输集成借助统一数据接口标准与通信协议,达成异构传感器数据的同步采集与高效传输,采集系统要处理不同采样频率、数据格式与通信方式的兼容问题,构建时间同步机制保障多源数据的时空一致性,传输系统运用光纤、以太网与无线传感网络等多种手段,依据数据类型与实时性要求挑选适宜的传输方案。史辉辉(2025)将传感器、数据采集与传输、数据分析与处理等技术深度融合,全面实时掌握桥梁结构性能<sup>[11]</sup>。王德英等(2025)分析了智能感知、数据传输与智能分析三大核心环节,验证了传感等技术在重大工程中的应用效果,预警准确率超过95%<sup>[12]</sup>。数据采集与传输集成为后续分析处理提供可靠数据基础。

#### 3.3 数据融合与处理集成

数据融合与处理集成运用多层次融合算法,把异构传感数据转化成结构健康状态信息,融合技术包含数据层融合、特征层融合与决策层融合这三个层次,数据层融合会对原始传感数据开展时空配准与预处理工作,特征层融合会提取多源数据的损伤特征参数,决策层融合会综合多源信息进行状态评估与预警决策。杨恩斌(2021)对经典D-S证据理论的

算法原理与决策方法进行研究,采用融合有效率指数评价融合方法有效性<sup>[13]</sup>。戴超群(2025)采用改进的LSTM-CNN深度学习算法对桥梁结构状态进行实时评估,对异常状态的识别准确率达96.8%,预警时间平均提前4.2小时<sup>[14]</sup>。多层次融合机制显著提升了监测系统的智能化水平。

#### 3.4 系统功能集成

系统功能集成达成数据采集、存储管理、分析评估、预警决策与可视化展示等功能的有机协同配合。监测系统借助功能模块化设计的方式,构建起数据管理子系统、分析评估子系统、预警决策子系统以及运维管理子系统等。各子系统依靠标准接口来实现信息共享与业务协同作业。功能集成着重突出人机交互界面的友好特性以及决策支持的智能属性,为桥梁管养人员提供全方位的技术支撑服务。韩振国等(2025)通过桥梁检测与监测获取构件局部损伤特征、结构整体响应信息与运营期荷载状况,通过信息监测判断结构特性变化,评估桥梁安全运营可靠性<sup>[15]</sup>。胡炜(2025)将传感技术、物联网技术与人工智能算法有机整合,构建全方位与实时化安全监测体系,实现数据高效传输与智能分析处理<sup>[16]</sup>。

### 4. 工程案例分析——以琶洲大桥健康监测系统为例

#### 4.1 琶洲大桥项目背景与监测需求

琶洲大桥是广州市境内一座连接天河区与海珠区的桥梁,位于珠江北河道之上,为广州市区东部城市主干道路组成部分,于2003年8月通车,全长1205米,采用V形墩连续刚构桥结构,其V型刚构桥墩高20米,V型斜肢与竖直线夹角为33度,创亚洲同类桥型之最。大桥作为广州国际会议展览中心配套工程,是连通珠江南北的重要交通走廊,日均车流量超13万辆。经过20余年时间的运营大桥面临结构老化与交通荷载持续增长等挑战,为保障桥梁运营安全并满足智慧化养护方面的需求,琶洲大桥引进健康监测系统通过多源传感技术集成实现对桥梁环境参数、结构响应与运营状态的全方位实时监测,与日常巡检与定期检测形成互补从而提升桥梁安全管理水平。

#### 4.2 多源传感技术集成实践与运行效果

琶洲大桥健康监测系统运用多源传感技术集成方案,部署桥址区和主梁内环境温湿度监测、混凝土构件温度监测、桥墩顶部加速度监测、主梁竖向和梁端纵向位移以及高墩墩顶位移监测、主梁关键截面应变监测、主梁竖向振动加速度监测、使用温湿度传感器监测环境参数,采用振弦式应变计对结构应力应变进行监测,利用加速度传感器采集振动响应相关数据,系统借助分布式数据采集单元达成多源数据同步采集,经过桥头交换机传输到后台监测平台开展智能分析处理,系统与日常巡检与定期检测形成互补构建“智能监测+人工巡检+定期检测”三位一体养护模式,提升桥梁安全管理智能化水平为桥梁全生命周期安全运营提供技术支撑。

### 5. 多源传感技术集成面临的挑战与发展趋势

多源传感技术集成在桥梁健康监测领域已取得显著进展,不过依然面临传感器长期可靠性不足、异构数据标准化程度低、环境干扰抑制能力有限以及系统维护成本高昂等技术挑战,传感器在恶劣环境下的稳定性问题、不同厂商设备间的兼容性问题、海量数据的存储与处理效率问题都制约着集成技术的深入应用。未来发展趋势主要体现在:研发自供能与自诊断的智能传感器,提升设备长期稳定性;发展边缘智能计算技术,实现数据的实时处理与高效传输;构建数字孪生驱动的全生命周期管理平台,推动监测系统从被动响应向主动预测转变;建立统一的数据标准与接口规范,促进系统互联互通;加强人工智能与监测技术的深度融合,提升智能化水平,为交通强国建设提供技术支撑。

### 6. 结论

多源传感技术集成现在已经成为桥梁健康监测核心发展方向,通过整合光纤传感、振弦式传感、加速度传感与GNSS等异构传感器,再结合先进的数据融合算法以及人工智能技术,显著提升损伤识别精度与预警时效性,琶洲大桥等工程实践验证集成技术可行性与实用性,不过传感器长期可靠性、异构数据标准化与环境干扰抑制等问题仍需深化研究,未来要重点发展智能材料传感器、边缘智能计算与数字孪生等前沿技术,构建全生命周期管理平台推动监测系统向智能化与预测化方向发展,为桥梁安全管理提供可靠技术保障。

### [参考文献]

[1]郑熹红. 多源协同传感机制与数据融合驱动的桥梁结构诊断系统研究[J]. 科技视界, 2025, 15 (15): 54-56.  
[2]黄文业. 智能化技术在桥梁结构健康自动监测系统中的应用[J]. 张江科技评论, 2025, (06): 93-95.

[3]Singh A, Kaloni S. Leveraging vibration sensor data and machine learning for effective structural health monitoring of the KW51 bridge[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2025, 10 (12): 539-539.

[4]Sun Z, Mahmoodian M, Sidiq A, et al. Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2025, 14 (2): 22-22.

[5]Latha AK, Navya A, Raju PR, et al. Multipurpose Smart Bridge Health Monitoring System Using Arduino Based Sensors[J]. Applied Mechanics and Materials, 2024, 92491-100.

[6]Xianrui S. Design of building structure health monitoring model based on IoT and MEMS sensors[J]. Sustainable Buildings, 2025, 84-4.

[7]Chakali D, Pollayi H, Rao P. IoT based structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2024, (prepublish): 1-10.

[8]巢守兰. 桥梁结构健康监测传感器优化布置研究[J]. 时代汽车, 2025, (19): 165-167.

[9]谢鸿, 邓红卫, 刘尧. 基于大数据分析的公路桥梁结构健康监测系统设计[J]. 产品可靠性报告, 2025, (08): 192-194.

[10]李映田. 新一代信息技术在桥梁智能监测系统中的应用研究[J]. 张江科技评论, 2025, (05): 78-80.

[11]史辉辉. 构建智能化公路大型桥梁健康监测系统[J]. 智慧中国, 2025, (10): 116-117.

[12]王德英, 庞彪. 桥梁健康监测技术发展现状与前景分析[J]. 西部交通科技, 2025, (10): 150-153.

[13]杨恩斌. 桥梁监测的多源异构信息分析与数据融合研究[D]. 云南大学, 2021.

[14]戴超群. 基于大数据的桥梁结构健康监测方法研究[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21 (29): 62-63+66.

[15]韩振国, 冯莹. 基于健康监测数据的桥梁预警及安全评估应用研究[J]. 江苏建材, 2025, (05): 139-142.

[16]胡炜. 公路桥梁健康安全监测技术的集成研究[J]. 汽车周刊, 2025, (12): 45-47.