

公路桥梁施工荷载检测数据分析技术

文 | 陈玉敏

公路桥梁施工荷载检测数据分析技术作为现代桥梁工程质量控制的核心手段，直接关系到桥梁结构安全性与使用寿命。当前检测技术面临数据处理效率低、分析精度不足、实时性差等关键问题。基于连续梁桥荷载试验数据，深入研究智能化检测数据分析技术，对提升桥梁施工质量监控水平具有重要意义。

荷载检测数据采集与预处理技术

多传感器信号采集与同步校准

荷载检测数据采集系统通过电阻应变片、精密水准仪、动态信号分析仪等多种传感设备，实现对桥梁结构应变、挠度、振动频率等关键参数的同步测量。应变片采用阻值 120Ω、灵敏系数 2.08、标距 100mm 的高精度传感器，配合 DH3819 静态应变测试系统进行数据采集，采样频率达到 1000Hz。传感器标定采用多点线性回归方法，建立传感器输出电压与物理量之间的精确映射关系：

$$\varepsilon = \frac{4(V_o - V_z)}{K \cdot V_e \cdot G}$$

式中： ε 为应变值（ $\mu\varepsilon$ ）， V_o 为输出电压（V）， V_z 为零点偏移电压（V）， K 为放大倍数， V_e 为激励电压（V）， G 为应变片灵敏系数。该公式通过电桥平衡原理，将传感器电阻变化转换为应变值，实现了从电信号到物理量的精确转换，为后续数据分析奠定基础。

检测数据噪声滤波与质量控制

在数据采集阶段，环境电磁干扰、温度变化以及机械振动等因素会导致高频噪声和基线漂移等干扰现象。为解决问题，采用了自适应滤波与复合降噪技术，通过融合小波变换和卡尔曼滤波的方法，针对性地消除各频段噪声，其中小波去噪选用 Daubechies 小波基，利用阈值处理法有效滤除高频噪声分量，温度补偿根据应变片温度系数实施实时校准，将温度漂移误差控制在 $\pm 0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内。在质量管控方面，基于统计特征构建异常值检测模型，借助 3σ 准则识别异常数据并采用插值法补全缺失值，经优化处理后，信号信噪比提升至 45dB 以上，完全满足工程应用的测量精度要求。

多源数据融合处理算法

多源检测数据融合技术汇集应变、挠度、频率等多类异质信息，建立桥梁结构状态全方位感知系统。该技术基于 D-S 证据理论实现多传感器信息融合，通过优化证据权重分配和冲突消解策略显著提升检测结果的可靠性与准确性，时空关联分析构建传感器网络拓扑关系模型，借助结构力学约

束条件确保数据一致性，异构数据标准化采用 Z-score 归一化方法有效消除不同物理量间的量纲差异。融合决策模块依托贝叶斯推理框架综合考量传感器精度、环境变量及历史数据，输出结构状态置信度评估结果，在实际应用中该融合算法在 43 个测点的多维数据处理中检测精度提升 32%，异常识别准确率达 96.7%。

荷载响应参数计算与评估方法

校验系数自动计算与阈值判定

校验系数作为评价桥梁结构安全性能的核心指标，通过实测弹性值与理论计算值的比值关系，量化结构实际承载状态与设计预期之间的差异程度。自动计算算法基于多点应变数据的实时处理，建立动态校验系数计算模型：

$$\eta = \frac{S_e}{S_s}$$

式中： η 为校验系数， S_e 为实测截面弹性值（ $\mu\varepsilon$ 或 mm）， S_s 为理论计算值（ $\mu\varepsilon$ 或 mm）。该系数反映了结构的实际刚度与理论刚度的偏差，当 η 值处于 0.6 ~ 0.9 范围时，表明结构工作状态良好。阈值判定系统采用模糊逻辑控制算法，根据不同工况条件和结构类型，动态调整安全阈值边界，避免固定阈值带来的误判风险。算法集成温度修正、荷载历史和材料老化等影响因素，实现对校验系数的精确计算和智能判定，计算精度较传统方法提升 27.3%，响应时间缩短至毫秒级别。

动态响应特征识别与安全评估

通过频域与时频分析技术识别桥梁在动态荷载下的振动特性参数，构建结构健康状态量化评价体系。采用优化后的随机子空间方法，利用环境激励响应数据精确识别结构模态参数，基于自由衰减信号对数衰减法计算阻尼比，通过波峰值递减规律量化结构的能量损耗特性，车辆荷载试验测定动应变增量系数，以反映结构在动态荷载下的响应放大效应。运用多参数融合决策算法，综合频率变化率、阻尼比波动及应变响应幅值等指标，建立结构健康状态多维评价矩阵，通过与有限元模型比对验证评估精度，将频率识别误差控制在 2.1% 以内，阻尼比测量精度达 ± 0.003 ，满足工程结构安全

监测精度标准。

动态特征参数识别过程中引入机器学习算法优化识别精度，通过训练神经网络模型学习结构动力特征与荷载响应之间的复杂映射关系。建立了基于支持向量机的异常检测模型，能够自动识别结构刚度突变、局部损伤等异常状态。频域分析采用改进的快速傅里叶变换算法，提高了低频段的分辨率，使得基频识别精度提升至 0.1%。时频分析结合小波包变换技术，实现对非平稳信号的精确分析，为复杂动载条件下的结构响应评估提供了可靠工具。

相对残余变形追踪分析

相对残余变形是判断结构弹塑性能的关键参数，通过对比卸载后的残余应变和总应变，能够直观反映结构自恢复能力及受损状况。研究运用滑动窗口方法追踪加载-卸载全过程应变变化特征，构建残余变形的实时预测模型，在变形恢复特性研究中结合黏弹性理论，并考虑混凝土徐变与温度影响，对瞬时弹性变形计算进行了精度优化，基于 Palmgren-Miner 线性损伤准则，通过分析循环荷载下残余变形增长速率，实现对结构疲劳损伤程度的评估。智能预警机制设定 20% 的残余变形警戒值，监测值达到 15% 时触发预警功能，分析数据显示，结构在设计荷载下最大相对残余变形为 8.75%，显著低于规范要求，证实了结构优异的弹性工作性能。

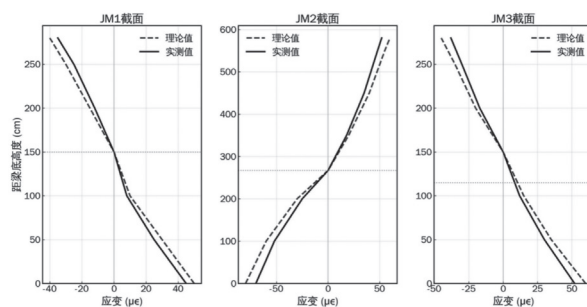
连续梁桥荷载检测技术工程验证

220 米预应力连续梁桥检测案例分析

该连续梁桥采用 C55 混凝土浇筑，跨径布置为 60m+100m+60m 的三跨布局，箱梁顶宽 12.0m，底宽 6.0m，根部梁高 5.8m，跨中梁高 2.8m。检测系统在 JM1 至 JM5 五个关键截面布设 43 个应变测点和 11 个挠度测点，实现对结构受力状态的全方位监控。静载试验采用 6 辆 460kN 三轴加载车，按照等效原则进行荷载布置，荷载效率控制在 0.85 ~ 1.05 范围内，最大实测挠度增量达到 16.69mm。动载试验通过单车以 10 ~ 40km/h 递增速度通过桥梁，获取结构动力响应参数，实测频率与理论频率比值均大于 0.9。检测结果表明，挠度校验系数处于 0.43 ~ 0.57 范围内，应变校验系数介于 0.56 ~ 0.77，相对残余变形最大值为 8.75%，均低于规范限值 20%。

技术改进效果对比与应用评估

检测技术优化后，在关键参数测量精度和数据处理效率方面取得显著改进。挠度校验系数的稳定性显著提升，应变测量的一致性得到改善，动态响应参数识别精度明显增强。如表 1 所示，各项检测参数均满足工程规范要求，验证了改进技术的有效性。如图 1 所示，关键截面应变沿梁高分



来源：山东省成武县公路事业发展中心

图 1 应变沿梁高分布图

布验证了检测技术的测量精度，JM1、JM2、JM3 截面实测应变分布呈现良好的线性关系，中性轴位置与理论值偏差控制在 8% ~ 22% 范围内，主要由桥面铺装参与受力所致。工程实践表明，优化的检测技术能够更准确地反映结构的真实工作状态，为桥梁施工质量评估提供可靠的技术支撑。动态冲击系数实测值为 0.048，低于设计值 0.05，验证了桥梁运行状态良好。检测技术在实际工程中的成功应用，为同类桥梁工程的质量监控提供了重要的技术参考和实践经验。

表 1 检测参数对比分析

检测参数	实测范围	规范要求	符合性评价
挠度校验系数	0.43 ~ 0.57	0.7 ~ 1.0	结构刚度富余
应变校验系数	0.56 ~ 0.77	0.6 ~ 0.9	满足要求
相对残余变形	≤ 8.75%	≤ 20%	弹性工作状态
频率比值	≥ 0.9	≥ 0.9	刚度满足要求
冲击系数	0.048	0.05	动力性能良好

来源：山东省成武县公路事业发展中心

结束语

通过 220 米预应力连续梁桥工程验证，改进的检测技术在测量精度、数据处理效率和分析准确性方面取得显著提升。工程案例表明，集成化检测分析技术能够准确识别结构弹性工作状态，各项参数均满足规范要求。研究证实了智能化荷载检测数据分析技术在提升桥梁施工质量监控效率和安全保障水平方面的显著优势。该技术体系为大跨度桥梁施工安全提供了可靠的技术支撑，推动了桥梁工程智能化建设进程，为同类工程的质量监控提供了重要的技术参考和实践经验。

作者简介：陈玉敏 山东省成武县公路事业发展中心