

基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法应用

王震

安徽省新路建设工程集团有限责任公司 安徽 阜阳 236000

【摘要】：公路在役桥梁长期受重型车辆轴重循环作用、冻融侵蚀及混凝土碳化等因素影响，承载性能持续劣化。若承载能力评定偏差，轻则导致养护资源错配，重则引发结构开裂、交通中断，精准评定成为交通运维关键。传统理论计算因简化支座约束、忽略桥面铺装参与受力等现场参数，与实际工况存在偏差。而荷载试验通过分级施加模拟荷载，结合应变传感网络、高精度位移监测设备，实时捕捉主梁关键截面应力、跨中挠度动态响应，直观反映结构真实受力性能，有效填补理论评估短板。基于此，本文简要分析了基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法，并针对基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法应用意义与困境进行了深入探究，提出了基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法应用策略，以期提升评定精度、科学制定运维方案，保障桥梁安全稳定运行。

【关键词】：荷载试验；在役桥梁；承载能力；评定

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.080

引言

公路作为交通基础设施核心，其桥梁承载能力直接关乎路网通行效率与安全。近年货运重载车辆占比提升，叠加部分在役桥梁设计资料缺失，导致养护加固缺乏依据，且超载加速结构损伤衰退，易诱发隐患。传统理论计算因简化材料参数、忽略服役损耗，难匹配实际工况。而荷载试验通过布设应变传感网络、激光位移计采集数据，可精准反演公路桥梁真实承载状态，为资料缺失桥梁的养护、改扩建提供技术支撑，有效控制病害发展，保障公路交通线路稳定运营。

1 基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法概述

基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定，是公路桥梁运维的核心技术，通过模拟货运车辆 100-120kN 轴载，或按 JTJ/T279 规范施加定制化试验荷载，结合多传感监测捕捉结构响应，规避理论计算中简化支座刚度（如忽略橡胶支座老化刚度损失）、省略材料疲劳损伤参数导致的偏差。

实施时先结合桥梁服役年限（超 20 年桥需加密监测点）、结构类型（简支梁/连续梁）及病害记录（裂缝宽度 $>0.3\text{mm}$ 需重点监测），按规范设计方案：计算荷载效率系数 $\eta_q=0.8-1.05$ ，确定加载位置（主梁跨中、1/4 截面等控制截面），布设静态应变仪（精度 $\pm 1\mu\epsilon$ ，采样频率 100Hz）监测应力、激光位移计（精度 0.01mm）测挠度，大跨桥额外用加速度传感器（量程 $\pm 5\text{g}$ ）采集自振频率。

试验中通过温湿度传感器（ $-40\sim 85^\circ\text{C}$ 量程）实时采集数据，采用 $\epsilon_{\text{修正}}=\epsilon_{\text{实测}}-\alpha\Delta T$ 公式消除温度影响，控制加载速率 $\leq 0.5\text{kN/s}$ 防二次损伤。数据处理阶段，

将实测值与 JTJ D62-2004 规范限值、Midas Civil 模拟值对比，计算刚度衰减系数（ $K_{\text{实测}}/K_{\text{设计}}$ ）、强度储备（ $1-\sigma_{\text{实测}}/\sigma_{\text{允许}}$ ），判断内部空洞（应力突变 $>15\%$ 需警惕）等隐患。

该方法尤其适用于灾损、改扩建公路桥，可为粘贴碳纤维布加固提供数据支撑，是保障路网安全的关键技术。

2 基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法应用意义

2.1 筑牢桥梁运营安全防线，规避重大安全风险

公路在役桥梁长期受货运车辆轴重循环、冻融碳化侵蚀，易产生主梁微裂缝、支座脱空等隐性病害，仅靠理论计算评定时，因简化支座刚度、忽略材料老化参数，易遗漏真实隐患。

荷载试验按 JTJ/T279 规范模拟实际交通荷载（如公路 55t 重载），用应变片、激光位移计监测关键截面应力与跨中挠度，精准识别腹板应力集中等问题，避免因评定偏差导致超载垮塌。

老旧公路桥梁通行重载前，经试验验证承载极限，排除“带病服役”风险，为公路交通路网安全与公众出行提供技术保障，是防范桥梁安全事故的关键。

2.2 优化桥梁运维决策，降低全生命周期成本

公路桥梁运维易因承载能力判断模糊，出现“过度加固”或“抢修滞后”问题。荷载试验按 JTJ/T279 规范获取应力、挠度数据，结合材料疲劳损伤公式，精准计算结构强度储备与病害影响范围。对承载充足但局部有裂缝的公路桥梁，可仅做局部修补避免盲目加固；对承载接近极限的公路桥梁，依据试验数据制定限载标准（如公路限重 30t）并及时维修，减少紧

急抢修费用。同时试验数据支撑性能退化模型构建，为预测维修周期、分配养护资金提供依据，实现运维资源高效利用，降低全生命周期成本。

2.3 推动桥梁评定技术升级，助力交通行业高质量发展

随公路重载车辆增多及公路桥梁老龄化，传统理论评定难适配复杂工况。荷载试验融合 LoRa 无线传感网络实现应力/挠度远程实时监测，结合大数据分析优化加载方案，推动评定从“经验判断”向“数据驱动”转型。其积累的实测数据可反哺 JTJ/T279 规范修订，优化混凝土疲劳损伤模型，为公路新型组合梁桥设计提供依据，促进交通基建技术创新，助力交通行业向安全化、智能化、高效化高质量发展。

3 基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法应用困境

3.1 试验成本高且影响交通，应用场景受限

荷载试验需投入大量人力、设备与时间成本，同时试验期间常需封闭交通或限制车流，导致其在部分场景中难以推广。从成本构成看，大型桥梁试验需租赁重型加载车辆、部署多套高精度监测设备，单次试验费用可达数十万元；从时间周期看，方案设计、现场准备、数据采集与分析全流程需 1-2 周，对交通流量大的主干道桥梁而言，长时间交通管制易引发区域拥堵，影响公众出行。如下表所示，成本与交通影响的双重压力，使荷载试验在中小跨径桥梁、繁忙路段桥梁的常规评定中应用率较低。

困境类型	具体表现	对应用的影响
经济成本高	设备租赁、技术人员投入费用高昂	中小跨径桥梁评定性价比低
时间成本高	全流程耗时 1-2 周，周期较长	紧急运维需求下响应不及时
交通影响大	需封闭或限流，干扰正常交通秩序	繁忙路段桥梁应用受限

3.2 复杂工况下技术适配性不足，评定精度受影响

在特殊环境或复杂结构桥梁中，荷载试验的技术方案易出现适配难题，导致评定结果偏差。一方面，对于跨越江河、峡谷的大跨度桥梁，受风力、温度变化等环境因素影响，监测数据易产生波动，现有数据修正方法难以完全消除干扰。另一方面，针对异形结构（如弯桥、斜拉桥），常规加载方案无法全面模拟结构受力状态，易遗漏局部应力集中问题。此外，部分老旧桥梁存在结构损伤未知的情况，试验荷载施加若控制不当，可能诱发二次损伤，进一步限制了试验方案的灵活调整，影响评定精度。

3.3 数据共享与二次利用机制缺失，资源浪费严重

当前荷载试验数据多由单次试验团队独立管理，不同项目的试验数据格式、监测指标不统一，无法形成标准化数据库，后续同类桥梁评定时需重复开展试验，造成资源浪费。同时，试验数据中蕴含的桥梁性能退化规律、病害发展趋势等关键信息未被深入挖掘，无法为区域桥梁运维规划、规范修订提供数据支撑，不仅降低了试验数据的利用价值，也制约了荷载试验技术与理论研究的协同发展。

4 基于荷载试验的在役桥梁承载能力评定方法应用策略

4.1 推行“分级分类试验”模式，降低成本并减少交通影响

针对公路在役桥梁跨径差异（如 20m 以内中小跨径与 50m 以上大跨径）及日均交通量（如干线公路 5000pcu/d 以上繁忙路段），制定差异化荷载试验方案。

对中小跨径繁忙桥梁，采用“轻量化轴载模拟”技术——以 2-3 轴电液伺服加载设备（加载精度 $\pm 0.5\%FS$ ），结合 Midas Civil 前处理模块进行受力分析，筛选主梁 1/4 截面、支座边缘等 3-5 个关键监测断面，布设 ZigBee 无线应变传感器（采样频率 100Hz）缩短布线工时，试验周期压缩至 1-3 天；同步联合交通管理部门采用 VISSIM 软件模拟“单车道交替通行”管控方案，选取夜间 22:00-次日 6:00 非高峰时段实施，减少路网延误。

对大跨径枢纽桥梁（如图 1 所示），按 JTJ/T279 规范开展“静力+动力”组合试验，静力加载采用分级递增模式（每级荷载稳定时间 $\geq 15min$ ），通过激光位移计（精度 0.01mm）监测跨中挠度；动力试验采用环境随机激励法，结合加速度传感器（量程 $\pm 5g$ ）采集结构自振频率，同时利用 BIM 模型预演交通疏导路线，提前 48 小时发布电子导航绕行提示，在保障评定精度（应力监测误差 $\leq 5\%$ ）的同时，降低重型加载设备租赁成本与交通管制社会影响。



图 1 大跨径、重要枢纽桥梁，按规范开展完整荷载试验

4.2 融合新型监测技术，提升复杂工况下的技术适配性

引入无线传感、无人机监测、BIM 技术等新型手段，可破解复杂工况下荷载试验的技术难题。跨江河大跨桥试验中，部署 LoRa 无线传感节点构建抗电磁干扰网络，同步接入温湿度、风速传感器，采用卡尔曼滤波算法消除环境噪声对应力数据的干扰，保障数据准确性。对弯桥等异形结构，依托 BIM 建立含支座约束、桥面坡度的三维力学模型，通过 ABAQUS 仿真模拟 5 种加载工况下的应力云图，精准定位腹板、墩梁连接处等应力集中区，优化加载点与荷载分级方案。检测老旧桥梁时，先以无人机搭载毫米波雷达扫描表面裂缝，结合地质雷达探测内部空洞，再根据病害分布采用“分级慢速加载”模式，通过 BIM 模型与现场应变数据实时比对，动态调整加载速率，避免诱发二次损伤，提升复杂工况评定精度。

4.3 构建区域化数据共享平台，推动试验数据二次利用

围绕公路区域桥梁运维需求，需搭建符合 JT/T1399-2021 标准的荷载试验数据共享平台，采用 MySQL 数据库存储桥梁基础信息（结构类型、服役年限、设计荷载等级）、试验数据（应力/位移原始曲线、加载记录）、评定报告（承载能力检算系数、病害处置建议），通过 RESTful API 接口（响应时间 $\leq 1s$ ）实现试验机构、运维单位、监管部门数据互通。平台嵌入基于随机森林算法（模型准确率 $\geq 92\%$ ）的数据挖掘模块，对区域内 5 年以上历史数据进行分析，提取简支梁、连续梁等桥型的性能退化参数（混凝土弹性模量年衰减率 0.5%~1%、刚度损失比例与服役年限拟合曲线），建立“桥型-荷载等级-损伤程度”关联数据库。试验方案设计阶段，调用平台内同跨径、同服役年限桥梁的监测点位数据（如主梁跨中、支座处应变片布置密度）、加载参数（等效荷载换算系数），缩短方案编制周期 30% 以上；运维单位通过平台查询桥梁历年试验数据，结合结构健康监测系统（SHM）实时数据，制定“一桥一策”养护计划（如对承载能力检算系数 < 0.9 的桥梁优先安排加固）；监管部门利用平台数据生成区域桥梁承载能力热力图，为路网限载政策（如干线公路限重 55t）制定提供数据支撑，实现试验数据从“单次使用”向“循环复用”转型。

4.4 研发“荷载试验+数值模拟”耦合评定方法，弥补单一方法缺陷

将现场荷载试验与数值模拟技术结合，构建耦合评定体系，可进一步提升承载能力评定的准确性与可靠性。现场试验阶段，采用静态应变仪（精度 $\pm 1\mu\epsilon$ ）

采集主梁关键截面应变、激光位移计（量程 0~500mm）监测跨中挠度，同步通过动态信号采集仪（采样频率 1kHz）记录结构自振频率。将实测数据导入 Midas Civil 软件，采用最小二乘法（拟合度 $R^2 \geq 0.98$ ）修正混凝土弹性模量（初始值按 C50 混凝土 $2.55 \times 10^4 \text{MPa}$ 设定）、支座刚度（按橡胶支座竖向刚度公式 $K=EA/L$ 计算）、桥面铺装参与受力系数（取值 0.3~0.5），使模拟应力与实测值误差控制在 5% 以内。依托校准后的模型开展极端工况模拟：重型车辆偏载（偏载系数 1.2）、多车连续加载（车距 5~10m）、极端温差（-30~40℃）作用下的结构响应分析，输出不同荷载等级下的应力极值、挠度变化曲线；极限承载能力评定时，采用增量加载法（每级荷载增量 5% 设计荷载）模拟结构破坏过程，计算极限承载力值（与现场试验对比误差 $\leq 8\%$ ）及破坏形态（如主梁受弯破坏、支座剪切破坏），规避现场施加极限荷载的安全风险，补充极端工况评定维度。

4.5 建立专业化试验团队培育机制，提升试验实施规范性

荷载试验的精准实施依赖专业技术人员，构建系统化的团队培育机制，可保障试验流程规范、数据可靠。一方面，要联合高校交通工程专业与试验设备企业建立实训基地，课程设置涵盖 JTJ/T279 规范解读（试验程序、数据处理要求）、应变片粘贴技术（表面打磨粗糙度 $R_a \leq 6.3\mu\text{m}$ 、胶水固化时间 $\geq 24\text{h}$ ）、无线传感设备调试（信号强度 $\geq -80\text{dBm}$ 、采样频率校准）、数据异常诊断（温度漂移修正公式、设备干扰排除方法），同时利用 Midas Civil 软件开展虚拟试验（模拟不同桥型加载流程），再通过公路桥梁现场带教（参与监测点位布设、加载控制、数据采集），提升技术人员实操能力。

另一方面，需制定行业资质分级标准：初级人员需掌握应变仪、位移计操作（数据记录误差 $\leq 2\%$ ）；中级人员需具备试验方案初步设计（能完成加载量计算、监测点位布置图绘制）、数据异常处理（如剔除传感器故障导致的跳变数据）能力；高级人员需独立完成大跨径桥梁试验方案设计（含荷载效率系数计算 $\eta q = 0.8 \sim 1.05$ ）、复杂数据反演分析（如通过应变数据推算结构内力）、评定报告编制（含承载能力检算表）。每 2 年开展继续教育，更新激光位移计、无人机雷达监测、BIM 模型应用等技术内容，确保人员技术与行业发展同步，减少因操作失误（如应变片粘贴不实导致数据失真）引发的评定偏差。

总而言之，基于荷载试验的在役桥梁承载能力评

定,是保障桥梁安全运维的关键技术支持。未来,还需推动策略落地与技术迭代,进一步提升评定精准性与适用性,助力交通基础设施安全长效运营,为桥梁运维决策提供更坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 王灿.基于移动荷载试验的中小跨径桥梁承载能力快速评估[D].中南大学,2023.
- [2] 彭灿.在役桥梁可靠性评估及加固经济性分析[D].大连理工大学,2018.
- [3] 代印松.桥梁承载能力综合评定方法应用研究[D].河北工业大学,2018.
- [4] 李向月,丁瑞娜.基于数字图像的农村在役桥梁承载能力评定方法研究[J].江西建材,2016,(08):161.
- [5] 滕秀元,王晓萌,杨晋,等.基于荷载试验的在役桥梁实际承载能力的研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(07):71-73.