

桥梁支座位移监测方法及工程应用探讨

郑 彪

山西省交通建设工程质量检测中心（有限公司） 山西 太原 030032

摘 要：桥梁支座是传递结构荷载、适配梁体变形的核心构件，其位移异常直接威胁桥梁服役安全。本文阐释不同类型支座的工作特性与位移病害机理，系统对比人工监测、自动化传感、智能化非接触三类主流监测技术的优劣与适用场景。结合实际桥梁工程监测案例，分析支座位移变化规律与典型病害成因，针对监测设备抗干扰弱、数据冗余、预警精度低等问题，提出软硬件协同优化策略，可为桥梁支座健康监测与精细化管养提供参考。

关键词：桥梁支座；位移监测方法；工程应用

引言：在公路桥梁长期服役过程中，受环境温变、车辆荷载、材料老化及施工偏差等多重因素影响，支座易产生超限、残余、偏移等异常位移，引发结构应力集中、伸缩缝破损、墩柱开裂等病害，大幅降低桥梁耐久性与安全性。传统人工监测模式时效性、精度有限，难以适配现代桥梁精细化运维需求。为此，本文依托桥梁支座位移理论与病害机理，梳理各类监测技术性能差异，结合工程实践优化监测方案，助力实现桥梁支座病害早预警、早处置。

1 桥梁支座位移理论基础与病害机理

1.1 桥梁支座类型及工作原理

（1）板式橡胶支座由橡胶与钢板叠合硫化而成，靠橡胶剪切变形适应位移，用于中小跨径简支梁桥；盆式支座利用钢盆内橡胶三向受压承载，配聚四氟乙烯滑板滑动，用于大跨连续梁；球型支座通过球面传力转动，适应多向大转角，用于曲线桥及斜拉桥。（2）位移特性：板式支座水平剪切位移按橡胶总厚 0.3~0.5 倍控制，竖向压缩 $\leq$ 总厚 15%；盆式支座顺桥向水平位移 $\pm 50 \sim \pm 150 \text{mm}$ ，转角 $\leq 0.02 \text{rad}$ ；球型支座转角 $0.04 \sim 0.06 \text{rad}$ ，水平位移与盆式相当。（3）受力与位移协调机制：支座竖向传递梁体荷载，水平方向经弹性变形或滑动面释放温度、收缩徐变等自由变形，转动能力适应梁端转角，保证上部结构受力边界与设计计算一致。

1.2 支座位移产生的核心原因

（1）环境因素中，温度升降引起梁体伸缩，年温差可达 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ ，产生周期性往复位移；日照温差导致梁体上下缘温差应变，诱发挠曲位移；干湿循环使混凝土收缩徐变持续发展，累积位移可达设计值的 20%~30%；地基不均匀沉降迫使支座产生强制位移，改变支座反力

分配。（2）车辆动荷载通过车轮传递冲击振动，引起支座瞬时弹性位移；密集车流作用下，橡胶支座累积剪切蠕变随运营年限递增；人群荷载与风荷载产生的水平力虽单次较小，但往复作用频次高，易诱发支座滑动面磨损，加剧位移量值离散性^[1]。（3）结构自身因素包括橡胶材料老化导致硬度增大、弹性模量改变，位移响应滞后于变形需求；聚四氟乙烯滑板磨损后摩擦系数上升，滑动阻力增大；长期剪切变形使橡胶产生不可恢复残余变形；施工安装偏位使支座初始位移偏离设计零点，服役后提前进入异常位移状态。

1.3 异常位移对桥梁结构的危害机理

（1）位移超限使支座约束刚度发生非线性变化，导致梁体约束边界条件偏离设计假定，引起主梁弯矩、剪力重分布，在梁端及墩顶截面形成局部应力集中区，超出混凝土或钢材屈服强度时引发结构裂缝。（2）支座偏移卡死后，伸缩缝丧失伸缩功能，缝内填料挤出或型钢扭曲破坏；桥面铺装层在梁端产生反射裂缝，桥面雨水下渗加速钢筋锈蚀；墩台顶面承受异常水平推力，导致墩柱开裂、基础偏位，严重时引发落梁风险。（3）长期异常位移使关键部位承受反复低周疲劳荷载，疲劳累积损伤降低材料剩余强度，加速支座锚固螺栓松动、焊缝疲劳开裂，缩短支座设计使用寿命，直接影响桥梁整体安全性与耐久性，增加管养维护成本。

2 桥梁支座位移主流监测方法及技术对比

2.1 传统人工监测方法

（1）钢尺量测法于支座上下座板设固定测点，用游标卡尺或钢直尺量取测点间距变化推算水平位移，适用于测点便于抵近的中小跨径简支梁桥；水准测量法利用精密水准仪测量支座顶面高程变化，通过闭合水

准路线计算竖向沉降,多用于桥梁定期普查及竣工验收阶段。(2)人工监测优势在于设备构成简单,无需外接电源及采集终端;单次成本低廉,一套水准仪和钢尺即可覆盖全桥数十个测点;操作便捷,经基础培训即可开展,尤其适用于无供电条件的偏远中小桥梁日常巡检。(3)人工监测局限性同样突出,钢尺估读精度仅0.1~0.5mm,水准测量受视距及标尺竖立偏差影响,系统误差难消除;巡检频次为季度或年度,无法捕捉温度骤变、超载等瞬态位移;隐蔽部位难以抵近测量;人工抄录易错,不同人员读数习惯差异导致数据序列连续性差,难以支撑趋势分析。

2.2 自动化传感监测方法

(1)拉线式传感器通过钢丝绳连接移动端与固定端,编码器将线缆伸缩量转换为电信号,安装需保证钢丝绳走向与位移方向一致;激光传感器基于三角反射原理,根据光斑偏移计算位移,适用于洁净环境;光纤传感器利用光栅波长变化感知应变,实现多点分布式测量,安装需注意光纤熔接保护与弯曲半径控制。(2)倾角传感器测量支座上下座板或梁体转角变化,结合结构几何关系拟合推算水平与竖向位移,双轴倾角仪可同步感知顺桥向与横桥向倾斜,适用于球型支座及大转角盆式支座位移场重构,安装需确保倾角仪底座与测点表面紧密贴合以消除初始零漂^[2]。(3)自动化传感监测分辨率达0.01mm,采样频率最高1kHz,可完整记录车辆荷载下动态位移响应,实现全天候连续监测并无线回传。短板在于安装需布线供电,施工组织难度大;激光与光纤传感器受雨雾、粉尘干扰显著,长期户外存在镜头污染、光衰增大等问题,维护成本逐年攀升。

2.3 智能化非接触监测方法

(1)机器视觉技术在支座及相邻梁体表面布设高对比度靶标,采用高清摄像机连续采集图像序列,借助亚像素边缘检测、模板匹配及光流追踪等算法解算靶标中心坐标变化获取二维或三维位移量,适用于桥梁密集区域多目标同步监测。(2)GNSS技术利用载波相位差分定位原理,在墩顶布设流动站接收机,与基准站同步观测卫星信号,通过实时动态差分获取毫米级三维坐标变化,适用于大跨径悬索桥、斜拉桥等支座整体位移及墩台沉降的大范围监测,但受桥塔遮挡及多路径效应影响,需在开阔天域条件下布设。(3)激光扫描技术采用地面三维激光扫描仪发射脉冲扫描测支座位移及墩台结构,获取高密度点云数据,通过多期配准与去噪比较提取X、Y、Z三向位移变形量,精度达亚毫米级,适用于复杂异形支座及支座群整体变形的精密监测^[3]。

2.4 各类监测方法综合性能对比

(1)精度方面,光纤传感与机器视觉可达0.01~0.05mm,激光传感器约0.1mm,GNSS静态解算为1~3mm,钢尺法仅0.1~0.5mm;响应速度上,自动化传感达毫秒级,视觉与激光为秒级至分钟级,GNSS为小时级,人工为天级;环境适应性上,拉线式与倾角传感器对雨雾不敏感,激光与视觉受光照及大气湍流影响,GNSS受卫星可见数与电磁干扰制约;施工难度人工最低,非接触法需架设平台,自动化传感布线供电难度最大。(2)经济成本层面,人工法设备投入最低但长期人力成本可观;自动化传感单点造价约5000~20000元;视觉系统约3~10万元,GNSS设备约5~20万元,激光扫描仪数十万元且需专业人员操作。运维方面,光纤与激光维护窗口短、清洁频繁;拉线式钢丝绳易磨损;GNSS与视觉设备相对稳定。数据可靠性上,自动化传感与GNSS连续性佳,视觉受光照变化影响,人工可信度最低^[4]。(3)适配原则:中小跨径常规桥梁选用人工巡检结合拉线式传感器;大跨径连续梁桥及斜拉桥采用光纤光栅与倾角传感器组网;曲线桥、宽幅桥等位移模式复杂的桥梁优先选用机器视觉或三维激光扫描获取全场位移信息;跨海大桥及峡谷高墩桥梁增配GNSS实现整体与局部位移协同监测,形成覆盖全面、冗余有效的综合监测方案。

3 工程应用实例与技术优化

3.1 工程项目概况

(1)某三跨预应力混凝土连续梁桥,跨径组合为(75+120+75)m,主梁采用单箱单室截面,支座选用GPZ系列盆式橡胶支座,其中固定支座设置于中间墩顶,纵向活动支座与多向活动支座分别布置于边墩及过渡墩处,桥梁已服役12年,日均交通量约3.2万辆。(2)桥梁地处华东湿热季风气候区,年均温差约32℃,且紧邻工业园区,重载车辆通行比例达18%。定期检查发现支座出现聚四氟乙烯滑板挤出、上下座板锈蚀、锚固螺栓松动等病害,个别支座实测水平位移已接近设计限值的85%,亟须建立长期位移监测体系,实时掌握支座服役状态并预警位移超限风险。(3)监测方案依据《公路桥梁结构健康监测系统技术要求》(T/CECSG:Q70-01)、《建筑与桥梁结构监测技术规范》(GB50982)及原设计文件制定,明确监测精度、采样频率及数据存储等核心技术指标。

3.2 现场监测方案实施

(1)设备选型与点位布置:针对盆式支座滑移特

性,对纵向活动支座采用拉线式位移传感器监测顺桥向水平位移,多向活动支座增配激光位移传感器监测横桥向位移;全桥支座统一布置倾角传感器及温度传感器,考虑日照和季节温差影响同步监测梁体温度场,共计布设传感器24个测点,数据采集站安装于墩顶检修平台。(2)设备安装流程按“底座预埋→传感器固定→初始值标定→线缆敷设→系统联调”依次推进。拉线式传感器钢丝绳经导向滑轮水平引出,避免角度偏差引入测量误差;激光传感器对心调试需确保光路无障碍且靶面清洁。调试完成后以连续采集24小时数据平均值作为各测点初始基准值,采样频率设定为50Hz。(3)数据采集采用分布式采集单元经4G无线网上传至云服务器,边缘端同步缓存原始数据以防断网丢失。服务器端采用滑动窗口滤波剔除环境随机噪声,并对缺失数据进行线性插值补全,预处理后的数据按时间戳与温度场信息关联入库,形成结构化监测数据库。

3.3 监测结果分析与工程应用

(1)连续三个月监测数据表明,支座水平位移与环境温度呈显著线性相关,日波动幅度随温差增大而增大,最大日位移变化量为7.2mm;车辆荷载引起的瞬时位移增量约为1.5~3.0mm,持续时间2~5s,荷载卸载后位移基本恢复,表明支座剪切变形处于弹性工作范围。(2)监测系统在第47天识别到3号墩纵向活动支座位移曲线出现异常漂移,日平均位移较正常工况偏移4.8mm且卸载后无法归零,经排查定位为聚四氟乙烯滑板磨损严重导致滑动面摩擦系数增大、支座回位受阻。另一处边墩横向位移超限经溯源分析为伸缩缝堵塞约束梁体横向自由变形所致^[5]。(3)根据监测分析结论,管养单位对3号墩支座安排更换,更换前根据位移-温度回归模型确定最佳施工合龙温度窗口;对堵塞伸缩缝进行清理并加装防尘罩,同时对全桥支座螺栓扭矩进行复核紧固。监测数据支撑下的精准维护较传统定期更换模式节省维修费用约35%。

3.4 监测技术存在问题与优化策略

(1)现场监测暴露的共性问题包括:激光传感器窗口在雨季易受水雾污染导致数据中断;系统每天产生约

5GB原始数据,冗余度高且无效数据占比大;现有预警机制仅基于位移绝对值阈值,缺乏考虑温度影响的自适应判定能力,误报率偏高。(2)硬件层面优化措施:为激光传感器加装自动清洁刷头与气幕防护罩,减少镜头污染频次;拉线式传感器钢丝绳改用含氟涂层高柔韧钢丝绳并加装防磨损导向套;采集站采用太阳能辅助供电与磷酸铁锂电池双冗余方案,保障连续阴雨天稳定运行。(3)软件算法优化方面,开发温度-位移基线模型,基于长期历史数据建立动态位移正常区间,识别位移异常时首先扣除温度效应后再进行阈值判定;引入小波变换与自适应卡尔曼滤波组合算法优化数据去噪效果,提升异常特征提取能力;构建四级预警体系,按位移超限程度划分蓝、黄、橙、红四色预警等级,每级对应明确处置流程与响应时限,通过短信及平台弹窗推送至运维人员,实现从数据采集到预警处置的闭环管理。

结束语

本文系统探究了桥梁支座位移病害机理与各类监测技术的工程适配性,通过实体工程验证了组合监测方案的实用性,同时明确了现有监测技术的短板并完成优化升级。支座位移监测是桥梁健康运维的关键环节,后续可结合大数据、人工智能技术深化位移趋势预测研究,完善自适应预警体系,进一步提升桥梁支座运维的智能化、精准化水平,保障桥梁长期安全稳定运营。

参考文献

- [1] 闫朝勃,赵维刚.基于线特征跟踪的铁路桥梁支座振动位移测量方法[J].铁路计算机应用,2022,31(01):115-121.
- [2] 晏班夫,朱自强,徐训.桥梁工程中非接触位移测量技术研究综述[J].交通运输工程学报,2024,24(01):122-128.
- [3] 苏子玥,杜文康.基于机器视觉的公路桥梁变形测量及安全预警[J].中外公路,2024,44(05):248-253.
- [4] 陈杰,崔燕,梁缘.基于分布式应力监测的桥梁支座转角和位移状态多级评估[J].城市道桥与防洪,2023,23(04):168-172.
- [5] 王浩,张宇轩.多传感器融合的桥梁支座位移在线监测技术及应用[J].公路工程,2025,50(02):134-139.