新时期道路桥梁病害检测与加固维修技术研究

邓佳音

张家口市交通运输综合行政执法支队　河北　张家口　075000

摘　要：为解决长期服役道路桥梁的各类病害，保障交通基础设施安全稳定运行，把路面、主体结构及附属设施的常见病害类型理了一遍，从外部荷载、自然环境、施工设计等角度分析了病害成因。对比了传统检测方法的局限，重点看了无人机、激光雷达、智能监测这些新型检测技术，把常规的和新出来的加固维修工艺也过了一遍，实际案例也检验过了，给道路桥梁运维提质增效提供参考。

关键词：新时期道路桥梁；病害检测；加固维修技术

引言：交通运输行业发展快，路网规模一直在扩大，大量基础设施已经进入高负荷服役阶段。车超载、自然侵蚀、施工运维跟不上，这些因素叠在一起，桥面开裂、结构老化、构件破损这些病害越来越多，通行安全和设施使用寿命都受到影响。传统检测维修手段效率不高、精度也有限，已经应付不了当下的运维需求。围绕病害检测和加固维修技术做了一些梳理，希望能给道路桥梁工程的长效安全运行提供点参考。

1 新时期道路桥梁常见病害类型及成因分析

1.1 道路桥梁常见病害分类

（1）路面病害主要有裂缝、沉陷、车辙、坑槽和面层剥落。横向裂缝多数是温度应力引起的，也有的是反射裂缝；纵向裂缝跟路基不均匀沉降有关。沉陷一般是路基压实度不够或承载力下降造成的。车辙说明沥青混合料在高温下稳定性不行。坑槽和剥落直接影响路面平整度和使用性能，对行车安全也是个隐患。（2）桥梁结构病害集中在梁体开裂、支座老化、桥墩破损、桥面铺装损坏和伸缩缝失效这几个方面。梁体裂缝要是发展超限，结构安全就悬了；支座老化了受力传递路径会变；桥墩破损削弱基础承载能力；桥面铺装和伸缩缝坏了，行车冲击和疲劳损伤都会加重[1]。（3）附属设施病害包括护栏破损、排水系统堵塞和护坡冲刷损坏。这些附属设施要是功能不行，主体结构劣化会加快。排水堵了，桥面积水往下渗；护坡被冲蚀，桥头路基就不稳了。

1.2 病害产生的外部诱因

（1）交通荷载方面，重载车越来越多，交通流量也超出了当初的设计预期，道路桥梁一直超负荷跑。反复荷载下，结构内部的微裂纹不断冒出来、扩展，累积损伤很明显，路面永久变形和桥梁疲劳劣化都出来了。（2）自然环境方面，温度周期性变化让材料胀缩，干湿交替又加剧表面开裂。雨水渗进去削弱了结构层间的粘结，冻融循环让孔隙水反复冻胀，混凝土剥落和钢筋锈蚀也加速了。紫外线辐射让沥青老化变脆，地基不均匀沉降还会改变结构的受力边界条件。（3）人为运维方面，日常巡检和预防性养护不到位，小毛病拖成了大问题。违规施工和超载通行管得不严，也加重了结构损伤，缩短了设施的使用寿命。

1.3 病害产生的内部结构因素

（1）施工工艺缺陷方面，混凝土浇筑振捣不密实，内部孔隙率就高；铺装层跟基层粘结不好，容易出现推移剥离；构件拼接精度偏差了，结构受力就跟设计假定对不上。这些施工质量问题是早期病害的源头。（2）材料性能衰减方面，混凝土碳化深度大了，钢筋的钝化膜就破了；氯离子侵蚀会让钢筋锈胀开裂。防水材料老化了，结构抗渗能力就下降；沥青胶结料氧化变硬，抗裂性能也跟着变差。材料老化这个规律决定了病害迟早要来。（3）结构设计短板方面，早期桥梁的设计荷载标准偏低，应付不了现在重载交通的需求。结构受力体系选择跟地形地质条件不匹配，局部应力集中区域又没做针对性的补强设计。这些设计上的局限，让结构在复杂服役环境下更容易出毛病。

2 新时期道路桥梁病害检测关键技术研究

2.1 传统病害检测技术及应用局限

目视检测和尺量检测是传统手段。目视检测就是靠人眼近距离观察结构表面，用裂缝对比卡比一比，拿锤子敲一敲听声音来判断。尺量检测就简单了，钢尺、游标卡尺直接量裂缝宽度和变形尺寸。这种方法操作简单、成本低，适合桥面、护栏、支座这些够得着的地方

做定期检查，日常巡检一直在用。超声波和回弹法是比较常见的无损检测方法。超声波通过声波传播速度和回波特征来判断混凝土密实度和裂缝深度，测之前要把表面打磨一下才能保证耦合效果。回弹法是测表面硬度反推抗压强度的，得选足够多的测区，还得避开钢筋密集的地方，结果需要钻芯取样来修正才能保证准确[2]。传统检测技术效率不高、精度也有限，漏检的情况不少。人眼看太依赖经验，主观性很强；高空、狭窄的地方或者车流量大的路段根本没法全面覆盖；常规无损检测受温度、湿度、表面状态影响，数据不太稳定；而且检测结果都是离散的点，没法反映结构性能的连续分布，早期病害征兆很容易被漏掉。

2.2 新时期智能化病害检测技术

无人机航拍检测这几年用得多了。无人机搭载高清相机和图像传输模块，按预设航线对桥梁各部位做低空全景扫描，把结构表面的影像资料拍全了。再结合图像拼接和 GIS 空间定位技术，给病害做坐标标记。把不同时间拍的航拍图放一起比对，可以追踪病害怎么发展的，特别适合高墩、大跨桥梁这种人不好上去的地方。激光雷达检测技术也挺厉害。发射激光脉冲获取结构表面的三维点云数据，经过滤波处理和模型重建，毫米级的形变和位移都能识别出来。裂缝检测精度能到亚毫米级别，还能反映裂缝的真实深度和走向。建出来的 BIM 三维实景模型给结构状态评估和运维决策提供了很好的数据基础。红外热成像检测利用太阳光照射或主动热激励条件下结构表面温度分布差异来反映内部介质传热特性。桥面铺装层间脱空、混凝土内部空洞、防水层失效、渗漏路径这些隐蔽病害都能看出来，而且是非接触的，大面积快速筛查很有优势[3]。

2.3 动态监测与实时检测技术

传感器在线监测就是在关键部位布设应变计、位移计、加速度计、静力水准仪这些设备，搭起一个分布式现场监测网络。应力水平、结构形变、振动特性、墩台沉降这些数据连续采集，采样频率根据结构特性和监测需求来定，给结构状态跟踪提供持续的数据支撑。大数据和 AI 智能识别技术现在也跟上了。把大量检测图像和传感器数据做清洗、标注、融合，用深度学习卷积神经网络实现裂缝、剥落、锈胀这些病害的自动识别和分类。再基于历史数据和统计模型建一个病害风险等级智能判定算法，从数据采集到状态评估整个流程就自动化了。长期动态监测体系的搭建遵循“顶层设计、分步实施”的原则。先明确监测对象和指标，再确定测点布设密度和采集频率。数据运维用云平台集中管理和边缘计算相结合的模式，建立数据质控、异常报警和趋势预测机制，保证监测系统长期稳定运行、持续产出数据。

2.4 检测技术综合选型与质量控制

技术选型要遵循针对性、互补性、经济性的原则。表观裂缝可以优先用无人机航拍或激光雷达做面状筛查，内部空洞和脱空病害用红外热成像或地质雷达探测比较合适。混凝土强度评估把回弹法和超声波检测结合起来用，钢结构焊缝检测选磁粉或相控阵超声。大跨径桥梁适合建结构健康监测系统，中小桥梁用周期检测加重点抽检的方式就行了，技术方案和检测目标得匹配上。智能化检测作业流程包括五个阶段：现场踏勘与方案设计、设备校准与参数设置、数据采集与质量初筛、数据分析与病害识别、成果输出与报告编制[4]。精度控制方面，检测前要用标准块校准设备、修正环境参数；采集过程中通过交叉覆盖和重复采样保证数据冗余；数据处理阶段用多源数据交叉验证，把系统误差和噪点干扰消除掉，保证检测结果可靠、能追溯。

3 新时期道路桥梁加固维修技术及工程应用

3.1 常规病害维修处置技术

（1）路面病害修补技术：裂缝灌缝先开槽清缝，再灌入改性沥青或聚氨酯密封胶，把缝填实；坑槽填补按“圆洞方补、浅洞深补”的路子来，用热拌沥青混合料分层填、分层压实；车辙铣刨重铺要把车辙段整体铣掉一定厚度，重新铺上抗车辙性能好的改性沥青混合料，摊铺温度和压实工艺参数要盯紧。（2）桥梁表层病害修复：混凝土修补针对剥落、蜂窝、麻面这些毛病，先把松散的混凝土凿掉，把界面处理好，再用高性能修补砂浆分层抹压或浇筑成型；钢筋防锈先清掉锈蚀产物，刷上阻锈剂，锈得厉害的该换就换，保护层厚度也要加上去；桥面铺装翻新要把破损层清干净，防水粘结层做好再重新浇筑或摊铺。（3）附属设施维修更换技术要点与施工规范：护栏维修要线形顺直、基础锚固到位；伸缩缝更换要控制好安装间隙和标高；排水系统改造得保证纵横向坡度满足泄水要求。各工序验收按施工技术规范的质量检验标准来。

3.2 主流结构加固改造技术

（1）粘贴碳纤维布加固：施工上就是基底处理 → 刷底胶 → 找平 → 涂浸渍胶 → 贴碳纤维布 → 做表面防护，一步一步来。这法子适合梁板受弯承载力不够或者抗剪薄弱的地方，好处是轻、强度高、不怕腐蚀、施工方便，还不增加结构自重，对原结构外观影响也小。（2）体外预应力加固：在梁体外侧布置预应力钢束然后张

拉，给主梁加一个反向弯矩，把受力状态调一调，挠度能降下来，裂缝也控制住了，承载能力自然就上去了。原理就是主动改变结构内力分布，让原结构卸载后跟新加的预应力体系一起受力，特别适合大跨径连续梁桥、刚构桥这类承载力下降的桥型。（3）增大截面和粘贴钢板加固：增大截面要先把原结构界面凿毛，植筋、绑钢筋，再浇新混凝土，养护好，关键是界面结合质量要把住。钢板粘贴是用结构胶把钢板粘到混凝土上，再用化学锚栓辅助锚固，流程就是表面处理 → 配胶涂胶 → 粘贴加压 → 固化检验，管控要点是胶层厚度、饱满度和固化养护条件，这些都得盯紧[5]。

3.3 新型绿色加固维修技术

（1）高性能改性材料加固技术：主要包括高韧性水泥基复合材料、高性能聚合物砂浆和纳米改性修复材料，特点是快硬早强、粘结强度高、抗裂性好、耐久性强，适合桥墩水下修补、预应力孔道压浆和混凝土薄层修复这些场景，能延长结构的维护周期。（2）快速抢修加固技术：用快凝早强混凝土、预制装配构件和常温固化结构胶这些材料和工艺，能做到桥面病害夜间施工、凌晨通车，交通中断时间大幅缩短。应急加固的话，针对突发结构损伤，采用临时支撑、体外预应力快速张拉这些措施，保证桥梁通行安全。（3）节能型养护加固技术：这类技术讲的是材料循环利用和低能耗施工，像旧料冷再生、温拌沥青这些，碳排放和能耗都能降下来，跟绿色交通的发展理念对得上，经济效益和社会效益都不错，值得推广。

3.4 工程案例技术应用与效果分析

（1）实际工程病害概况与检测方案实施：某运营期预应力混凝土连续箱梁桥，定期检测发现主跨箱梁腹板有多条斜向裂缝，最宽 0.35mm，跨中挠度比成桥状态大了 12cm，承载能力评估下来安全储备不够。用了激光雷达和红外热成像做了全桥精细化检测，结合有限元模型修正分析，问题出在预应力损失和长期超载叠在一起了。（2）针对性加固维修技术方案设计与施工实施：设计方案用体外预应力加固把主梁承载力拉回来，梁底贴碳纤维布把裂缝发展按住，腹板增厚补强把抗剪能力提上去。施工按“先卸载、后加固”的原则走，分级张拉、动态监测，加固过程结构安全有保障，同时把桥面铺装翻新和伸缩缝更换也一块做了。（3）加固后结构性能检测与应用效果评价：加固完做荷载试验和持续监测，跨中挠度比加固前降了 32%，裂缝宽度稳定在 0.12mm 以内，结构刚度和承载力都恢复到设计标准以上。长期跟踪数据看下来，加固效果稳定可靠，这套组合加固方案靠谱，同类桥梁病害处置可以参考。

结束语

全文梳理了道路桥梁的病害成因和分类，把传统检测手段和智能化技术的优劣、适用场景都掰开看了看，常规加固和绿色维修的技术体系也理了一遍，实际案例验证了组合加固是能用的。智能化检测和绿色化维修这块，确实是接下来的方向。后面可以在智能监测算法和低碳加固工艺上再挖一挖，让病害处置更精准，运维成本再压一压，把交通基建运维技术往前推一推。

参考文献

[1] 袁阳光, 刘行, 伊廷华, 等. 公路桥梁结构病害演化机理与智能运维防控研究 [J]. 中国公路学报,2025,38(11):64-80.

[2] 顾赛辉. 城市道路桥梁常见病害成因及综合加固维修技术应用 [J]. 城市道桥与防洪,2025,20(09):156-159.

[3] 罗纯坤, 姚志安, 华旭刚, 等. 基于 SAM2 的桥梁结构裂缝零样本分割检测方法 [J]. 中国公路学报,2026,39(07):94-107.

[4] 付传清, 王沈昕旸, 舒江鹏, 等. 基于无人机巡检与 BIM 模型的桥梁病害自动化定位技术 [J]. 建筑科学与工程学报,2025,42(05):112-119.

[5] 朱坤, 颜鹏飞, 谭慧, 等. 基于全寿命周期的劣化桥梁结构可靠度与维修加固优化 [J]. 中外公路,2025,45(02):133-140.