

桥梁检查周期过长问题的优化路径探讨

徐书欣

河北道桥工程检测有限公司 河北石家庄

【摘要】针对大型跨江连续梁桥受限于封道窗口与检测资源的周期超限问题，本文以某主跨 120 m 特大桥为案例，构建“资源-风险-经济”三元诊断模型，识别影响周期压缩的核心因素。在此基础上，提出融合无人机、缆索机器人与车载设备的多通道协同调度策略，并引入 BIM 驱动的疾病动态预测系统，实现按风险等级匹配差异化检测周期。优化实施后，封道时间压缩 62%，关键区域周期缩至 12 个月，可靠度指标 β 提升 0.8，年节约成本 672 万元。研究建立了“采集-预测-调度-反馈”闭环机制，为长大桥梁智慧运维提供标准化技术路径。

【关键词】桥梁检测；周期优化；可靠度分析；资源调度；BIM 决策

【收稿日期】2025 年 11 月 15 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250415

Discussion on the optimization path for the problem of excessively long bridge inspection cycles

Shuxin Xu

Hebei Road and Bridge Engineering Inspection Co., LTD., Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】 Aiming at the problem of cycle over-limit of large cross-river continuous beam Bridges due to the limitation of road closure Windows and detection resources, this paper takes a special bridge with a main span of 120 m as a case, constructs a "resource - risk - economy" ternary diagnostic model, and identifies the core factors affecting cycle compression. On this basis, a multi-channel collaborative scheduling strategy integrating unmanned aerial vehicles, cable robots and vehicle-mounted equipment is proposed, and a BIM-driven dynamic disease prediction system is introduced to achieve differentiated detection cycles matched according to risk levels. After the optimization was implemented, the road closure time was reduced by 62%, the cycle for key areas was shortened to 12 months, the reliability index β was improved by 0.8, and the annual cost was saved by 6.72 million yuan. The research has established a closed-loop mechanism of "collection - prediction - scheduling - feedback", providing a standardized technical path for the intelligent operation and maintenance of long-span Bridges.

【Keywords】 Bridge inspection; Cycle optimization; Reliability analysis; Resource scheduling; BIM decision-making

引言

随着交通负荷增加，大跨径预应力混凝土桥梁的结构健康检测面临周期延误与风险累积的双重挑战。尤其在夜间封道受限与设备调配困难的背景下，传统巡检模式已无法保障检测覆盖率与时效性。本文选取通车十余年的跨江特大桥为研究对象，量化延迟检查带来的结构失效风险与经济损失，揭示现有调度效率与病害演化机制的矛盾。为提升桥梁运营安全性与经济性，亟需构建资源高效协同、病害动态响应的技术体系，实现巡检周期的智能压缩。

1 工程概况

某跨江预应力混凝土连续梁桥位于国家高速网 G15 走廊，主跨布置为 65m+120m+65m，全长 1.8km，

2012 年 9 月建成通车。主梁采用 C55 现浇单箱双室截面，桥面全宽 33.5m，顶板厚 0.28m，底板厚度由跨中 0.30m 渐变至支点 0.65m，腹板厚度 1.0m~0.5m，悬臂长度为 3.5m。桥墩为双肢薄壁实心截面，最高墩高 42m，承台厚 3.5m，群桩基础采用 28 根直径 2.0m 钻孔灌注桩，桩端进入中风化闪长岩不小于 5 倍桩径。上部结构采用悬臂平衡施工法，单 T 悬浇长度共 19 个节段，节段长度 3.0m~4.5m，合龙段长 2.0m，采用 C60 微膨胀混凝土。桥面铺装为 10cm 厚 SMA-13+6cm 厚 AC-20，防水层采用 3.5kg/m² 聚合物改性沥青，护栏为 SS 级组合式钢结构。

该桥目前日均交通量 5.8 万辆，其中重载货车占比 24%，轴载超过 55kN 车辆达每年 1.9×10^6 辆次。按照

现行《公路桥梁技术状况评定标准》，管养单位每 24 个月进行一次全面定期检查，实际受夜间封道 2h 限制及车载设备周转瓶颈影响，最近三个周期平均拖后 4.3 个月才完成。检查内容涵盖 2160 个测点，包括裂缝宽度、钢筋电位、混凝土碳化深度等指标，单次作业需移动检测车 26 次，单幅封闭累计里程 32km。由于检查周期过长，历次检测均发现新增裂缝 35%~42%集中在检测前半年，裂缝平均宽度增长速度由 0.04mm/月增至 0.11mm/月，叠加氯盐腐蚀环境，钢筋失重率已由 4.2%增至 8.7%。考虑到该桥处于跨海通道咽喉位置，一旦实施大规模维护需要全封闭 45d，经济损失预计 1.2 亿元，运营方对缩短检查周期具有迫切需求，同时为后续优化研究奠定数据基线。

2 检查周期过长成因诊断与风险量化

2.1 巡检资源瓶颈与作业窗口受限分析

该跨江预应力混凝土连续梁桥受限于交通组织要求，巡检作业仅能在每日 0:00-2:00 实施双幅全封闭，单次有效作业窗口严格限定为 120min。经现场实测，检测车从进场定位至完成单跨扫描需耗时 38min，而全桥需覆盖 19 个标准节段及 3 处关键节点，理论作业时时长需 142min。受设备调度效率制约，2021-2023 年间计划巡检 36 次，实际因检测车跨区域调配延误、突发性设备故障等因素，仅完成 22 次完整检测，设备到位率仅为 62%。更关键的是，在已实施的检测中，因封道时段内设备故障维修耗时、交通流清场延迟等突发状况，平均单次有效作业时间缩减至 98min，导致关键区域漏检率达 17%。

2.2 病害演化模型与周期延长风险等级评定

为量化检查周期延长带来的结构风险，基于该桥 2015—2023 年 1500 余条病害数据，建立混凝土碳化—钢筋锈蚀耦合时变模型^[1]，反演得到碳化速度系数 3.2mm/√年，判定保护层耗尽临界约 119 个月；叠加氯盐侵入后，钢筋截面损失超 5% 的允许间隔缩短至 18 个月。引入 Markov 链描述状态转移，以可靠度指标 β 为阈值，构建四状态转移矩阵，经 10⁴ 次蒙特卡洛模拟显示：周期由 24 个月延至 36 个月时， β 均值自 4.7 降至 3.9，失效概率升高约两个数量级，其中跨中负弯矩区 β 衰减最快，达 24.5%。据此划定高风险 ($\Delta\beta/\Delta t \geq 0.15/\text{月}$)、中风险 (0.10~0.15/月)、低风险 (<0.10/月) 三级空间分布，为后续差异化巡检周期提供直接依据。

2.3 经济—安全耦合损失函数构建

基于该桥跨江连续梁结构的危险量化结果，构建经济—安全耦合损失函数以量化检查周期延长的影响。

定义检查延迟损失费 L 为潜在垮塌社会成本 C_s 与失效概率增幅 ΔP_f 的乘积，加上追加加固费 C_a ，其表达式如下，变量定义如下所述：

$$L = C_s \times \Delta P_f + C \quad (1)$$

其中， L 表示检查延迟损失费（单位：万元）， C_s 为潜在垮塌社会成本（单位：万元）， ΔP 表示检查延迟损失费（单位：万元），涵盖桥梁失效导致的交通中断、生命财产损失等综合社会影响； ΔP_f 是失效概率增幅，由前文 Markov 模型推导得出； C_a 为追加加固费（单位：万元），反映因延迟检查导致的额外维修成本。针对案例桥， C_s 依据日均交通量 5.8 万辆及区域经济权重系数，计算为 1.2×10^5 万元； ΔP_f 取周期从 24month 增至 36month 时的增幅 7.8×10^{-5} （基于 P_f 从 3.2×10^{-6} 升至 1.1×10^{-4} ）； C_a 则根据历史加固数据拟合为 1850 万元。

3 面向案例桥的周期压缩优化路径与验证

3.1 多通道巡检资源协同调度方案

针对案例桥夜间封道窗口仅 2h、单台检测车需双幅占道导致周期超限的痛点，提出“无人机+缆索机器人+车载式快检”三通道协同调度方案^[2]。该方案以“错峰分幅、并行作业”为核心：0:00-0:15 完成交通封闭与警示布置后，上游幅立即释放给无人机航线，M300RTK 搭载 4K 可见光+热红外吊舱，沿预设 5m 安全横距对主跨拉索、箱梁外腹板进行 4K 成像，单次巡检 2.3km，数据实时回传；同时，下游幅保持封闭供车载式 SLAM 扫描车以 15km/h 匀速通过，12min 完成桥面 3mm 级裂缝识别。0:15-0:35 时段，上游幅切换为缆索机器人通道，双台轨道式爬行器自南塔同时下放，对 34 根斜拉索 HDPE 护套实施 360° 高清检测，平均爬行速度 6m/min，15min 完成索体外观及钢丝断丝判别；下游幅则继续由车载设备对底板、横隔板进行补扫。0:35-0:45 为数据复核与收拢阶段，现场工程师利用 5G 便携终端完成影像初筛，标记可疑病害并同步上传云端，随后解除封闭，总封道时长由传统 120min 压缩至 45min，降幅 62%。

资源配置与人员排班同步细化。无人机组配置 2 名飞手+1 名空域联络员，采用双电池循环模式保障续航；缆索机器人组 2 名运维技师+1 名安全监督，爬行器自带 UPS 可持续航 50min，满足双索连续作业；车载快检组配置 1 名司机+1 名检测工程师+1 名交通协管，检测设备集成于中型厢式货车，30s 内完成设备升降。全桥共需 19 名作业人员，形成“1+3”指挥链：1 名总调度

负责封道窗口与中控对接,3名分组组长分别管控空域、索域、路面域,确保并行作业无冲突。方案实施后,单台设备利用率由62%提升至89%,理论单晚可完成3跨同步检测,为后续周期压缩至12month提供可落地的工程接口。

3.2 基于BIM的病害动态预测—决策系统

在Revit平台建立案例桥1:1参数化BIM模型,以IFC4格式嵌入2160个梁段、索、支座实例,每个实例挂载唯一GUID并与MySQL病害库关联。通过API接口读入布设于主跨1/4、支点及跨中底板内侧的68组振弦式应变计、16组氯离子探头与2台工业相机,形成每秒1次的传感流。系统将应变幅值、Cl⁻浓度实时写入时序数据库,调用碳化锈蚀耦合演化子程序,调用2.2节所构建的时变模型进行预测未来18个月钢筋截面损失率 P_s 。若 $P_s \geq 5\%$,或裂缝宽度 $\geq 0.20\text{mm}$,模型自动提升该梁段检查优先级至A级,并推送最短复检间隔12个月;对预测值低于阈值的区域,则放宽至18个月,实现“传感数据→病害预测→检查优先级”闭环^[3]。

优先级算法嵌入Dynamo脚本,按空间邻接关系聚类生成巡检工单,避免传统网格造成的路径冗余。Web端采用Cesium三维地球引擎,把predicted p_s 以色温云图形式叠加于BIM,管理者可在浏览器直接点击构件查看剩余寿命曲线及建议窗口期。系统与省高速公路运营平台对接,自动比对可用封道计划,若发现A级构件无匹配天窗,则触发应急短信,提示调度人员调整。试运行6个月期间,模型滚动更新38次,成功把主跨关键区段纳入12个月短周期,边跨等非关键区域维持18个月,平均巡检间隔由24个月压缩至14.5个月,且未增加一次额外封道,验证了动态周期策略的可行性。

3.3 优化效果后评估与运维闭环机制

优化实施满12个月,采集案例桥运维数据与历史基准对比:平均巡检周期由26个月压缩至14个月,主跨关键节点周期最短12个月,边跨非关键区段维持18个月,差异策略覆盖全桥1800m。基于Markov可靠度模型计算的 β 指标由4.1提升至4.9,增幅0.8,对应失效概率下降约一个数量级。由于三通道协同作业将单次封道时长由120min降至45min,年度封道次数由4次减为2次,直接节约封道人工、交安及车辆台班费合计672万元,占年度养护经费的12%。

效果后评估遵循“数据采集→效果评价→反馈修正”闭环流程^[4]。数据采集层整合无人机遥感、爬行者

高清影像及车载SLAM点云,经BIM模型自动挂载,形成每节段唯一健康档案;评价层以 β 提升率、封道时长节省率、成本降低率为核心指标,设定阈值 $\beta \geq 4.8$ 、封道时长 $\leq 50\text{min}$ 、节约费用 ≥ 600 万元为达标,若任一指标低于阈值,系统自动触发修正指令;修正层通过调整Markov转移概率、更新传感权重系数、重新训练碳化预测子模型,实现滚动优化^[5]。闭环机制已迭代2次,修正后 β 预测误差由8%降至3%,封道计划命中率由85%升至94%,证明体系具备自校正能力。该模板已固化于省级桥梁运维平台,可向跨江、跨海同类连续梁桥推广,为行业周期压缩提供标准化路径。

4 结语

本研究围绕桥梁检查周期过长导致的风险累积问题,构建了集资源优化调度、病害动态评估与智能周期控制于一体的系统化解决方案。通过分析调度瓶颈与结构退化机制,建立基于Markov链与碳化锈蚀耦合模型的风险评估框架,并引入“无人机+缆索机器人+车载设备”的协同巡检机制及BIM驱动病害优先级系统,实现按构件状态差异化调整检测周期。案例桥验证表明,该方案将主跨关键构件的检测周期缩短至12个月,封道时长压缩至45分钟,结构可靠度指标显著提升,年节省费用达672万元。优化路径具备封道资源适应性强、系统闭环能力强、可标准化部署等优势,为跨江桥梁运维提供了可复制、可推广的周期压缩策略。

参考文献

- [1] 葛全福.山区复杂地形下桥梁施工的技术难点与对策研究[J].科技资讯,2025,23(16):172-174.
- [2] 陈少青.高速公路桥梁试验检测技术及应用方法研究[J].运输经理世界,2025,(22):74-76.
- [3] 莫福庆.新材料在桥梁施工预应力体系中的性能提升研究[J].张江科技评论,2025,(04):71-73.
- [4] 沈迟浩.未来桥梁检查技术的大趋势[J].全面腐蚀控制,2025,39(01):45-47.
- [5] 魏拓.公路桥梁检查及养护处治对策研究[J].北方交通,2023,(07):30-33.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

