

AI检测技术在公路水运工程中的应用与展望

傅 静

(上海市交通建设工程管理中心, 上海市 200065)

摘 要: 系统研究AI检测技术在公路水运工程领域的应用价值与经济效益实现路径。梳理AI检测从初步探索到全生命周期管理的三阶段演进历程,分析其在施工质量管控、运营结构监测、安全风险预警三大核心场景的技术应用方案。构建“直接成本节约-间接风险规避-长期战略价值”三维经济效益分析框架,验证了AI检测技术可有效提升施工效率,降低返工率,降低全生命周期成本。同时通过剖析复杂环境适配、高初始投入等应用挑战,提出技术融合、模式创新等优化策略,为行业规模化应用提供实践指引。

关键词: AI检测技术;公路水运工程;经济效益;工程质量检测

中图分类号: U495

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0409-05

Application and Prospects of AI Detection Technology in Highway and Waterway Engineering

FU Jing

(Shanghai Communications Construction Engineering Management Center, Shanghai, 200065)

Abstract: This paper systematically examines the application value and pathways to realizing economic benefits of AI inspection technology in highway and waterway engineering. It traces the three-stage evolution of AI inspection from initial exploration to full lifecycle management, and analyzes its technical application solutions across three core scenarios: construction quality control, operational structural monitoring, and safety risk early warning. A three-dimensional economic benefit analysis framework is developed, structured around "direct cost savings - indirect risk mitigation - long-term strategic value". Validated through typical cases, AI inspection is shown to enhance construction efficiency, reduce rework rates, and cut down overall lifecycle costs. The paper also examines application challenges such as adaptation to complex environments and high initial investment costs, and proposes optimization strategies including technology integration and model innovation, providing practical guidance for large-scale industry adoption.

Keywords: AI detection technology; highway and waterway engineering; economic benefit enhancement; Engineering quality inspection

0 引 言

公路水运工程作为国家基础设施建设的核心支柱,其质量安全直接关系社会经济运行效率与公众生命财产安全。2025年全国公路水运固定资产投资突破3.6万亿元,工程建设规模持续扩张与传统检测模式效率低下、成本高昂的矛盾日益凸显。AI检测技术凭借高效数据处理与精准分析能力,成为破解行业痛点、推动质量监管模式革新的关键路径。本文聚焦AI检测在公路水运工程的实践应用,深入剖析其经济效益提升逻辑与实现路径,为行业数字化转型提供参考。

收稿日期: 2026-01-23

作者简介: 傅静(1979—),女,学士,经济师,工程师,从事交通建设工程监督管理工作。

1 AI检测在公路水运工程领域的应用概述

1.1 公路水运工程质量检测的行业背景与痛点

传统工程质量检测长期依赖人工操作与经验判断,形成效率低下、成本高昂、主观性突出的行业痛点。数据显示,人工抽检模式下公路工程返工率高达12%~15%,水运工程隐蔽工程缺陷漏检率超过8%,直接导致年均数千亿元的无效成本支出^[1]。检测过程中,单人日均检测里程不足0.5 km,沥青路面压实度等关键指标的人工评定误差可达±5%^[2]。某省级交通质监部门统计显示,传统检测模式中人工成本占比达检测总费用的62%,且存在约23%的人为干预风险^[3]。这些问题不仅制约工程建设进度,更成为影响基础设施耐久性与安全性的潜在隐患。

1.2 AI检测技术的发展历程与应用现状

AI检测技术在工程领域的应用历经3个阶段演进:2015—2018年的初步探索期,以简单图像识别算法实现裂缝等表观缺陷检测,准确率维持在75%~85%;2019—2021年的技术融合期,深度学习模型与激光雷达、超声波等多传感数据结合,使混凝土强度等内在指标检测精度提升至90%以上;2022年至今的深度应用期,数字孪生技术与实时监测系统融合,实现从单点检测到全生命周期管理的跨越。目前,AI检测技术在公路水运工程领域的应用普及率约为35%,其中高速公路施工环节应用率达58%,主要集中在路面病害识别、结构尺寸测量、施工安全监控三大技术方向,部分头部企业已实现检测效率300%的提升。通过具体工程场景的应用实践,AI检测技术的经济效益得到了量化验证。不同工程类型因其技术特点与管理需求的差异,展现出各具特色的效益实现路径,为行业推广提供了可复制的实践经验。

2 AI检测技术在公路水运工程中的应用场景

AI检测技术凭借其数据处理的高效性与分析模型的精准性,已深度渗透到公路水运工程的全生命周期管理中。从施工过程的质量把控到运营阶段的结构维护,再到安全风险的动态预警,不同场景下的技术适配方案各具特色,共同构建起智能化工程管理的新范式。

2.1 施工阶段

施工阶段是工程质量形成的关键时期,AI检测技术通过多模态感知与智能分析,实现了核心工序的质量参数实时监测。在混凝土强度检测中,基于深度学习的超声回弹融合算法可将检测时间从传统28 d养护龄期压缩至2 h,且误差控制在±3 MPa以内;沥青路面施工中,AI系统整合压路机振动频率、温度场分布与北斗定位数据,构建压实度预测模型,使路面压实度达标率提升至98%以上;钢筋间距识别则采用激光扫描与图像分割技术结合的方式,实现毫米级精度测量,单榀箱梁检测耗时从人工40 min缩短至3 min^[4]。应用指标提升如表1所示。

检测流程的智能化重构同样显著,AI系统通过移动端实时采集数据,云端自动生成检测报告,异常数据即时推送整改,使传统“检测-反馈-整改”的闭环周期从72 h压缩至4 h,大幅减少施工等待时间。

2.2 运营阶段

运营阶段的结构健康监测关乎工程设施的耐久

表1 AI检测技术在公路水运工程施工阶段应用提升统计

检测指标	传统人工检测	AI智能检测	提升幅度
混凝土强度检测效率	28 d /次,人工采样3个点	2 h/次,全断面扫描	效率提升336倍
沥青压实度准确率	抽检率5%,误差±5%	全路段覆盖,误差±1.5%	准确率提升70%
钢筋间距检测成本	人均日检测10榀箱梁,成本800元/榀	设备日检测200榀箱梁,成本120元/榀	成本降低85%

性与安全性,AI技术在此领域展现出强大的数据解析能力。桥梁结构监测中,机器视觉系统通过高清摄像头捕捉桥面铺装裂缝发展,结合深度学习的裂缝语义分割算法,可识别0.1 mm宽度的微裂缝,识别速度达30帧/s;隧道渗漏水监测采用红外热成像与湿度传感融合技术,AI模型通过温度场分布特征反演渗漏路径,预警准确率达95%^[5]。

这些监测系统通过5G专网实现数据实时传输,边缘计算节点完成初步分析后,关键数据上传至云端管理平台。以某跨江大桥监测为例,AI系统每日处理超过800 GB的结构应变、位移、环境参数等多源数据,通过建立的损伤演化模型,提前6个月预测出支座老化风险,为养护决策提供科学依据。

2.3 风险预警

安全风险预警是AI检测技术保障工程建设与运营安全的重要应用场景,其核心在于构建“感知—分析—预警—处置”的全链条响应机制。施工安全隐患预警方面,通过计算机视觉识别高处作业未系安全带、临边防护缺失等违规行为,响应时间≤2 s,预警准确率92%;特种设备监控系统实时采集塔吊转角、起重量等运行参数,AI算法建立异常行为识别模型,对超载、急停等危险操作发出预警。

预警信息通过分级响应机制传递,一般隐患推送现场管理人员手机APP,重大风险同步触发应急指挥中心声光报警,配套的处置流程模板使应急响应启动时间从传统40 min缩短至15 min。某高速公路项目应用该系统后,施工安全事故率同比下降68%,间接减少经济损失超2 000万元^[6]。

3 AI检测效益分析

AI检测技术对公路水运工程领域的经济效益贡献呈现多维度辐射特征,构建科学的分析框架需从直接成本节约、间接风险规避到长期战略价值进行系统性评估。该框架以量化数据为基础,结合工程全生命周期管理视角,揭示技术创新与经济回报之

间的传导机制,为行业数字化转型提供可测算的价值参考。

3.1 经济效益

AI 检测技术通过替代人工操作、优化检测流程、减少资源浪费,产生显著的直接经济收益。人工成本方面, AI 检测系统可使现场检测人员配置减少 60%~80%,某高速公路项目应用智能检测后,单公里检测人员从 3 人降至 0.5 人,年节省人工费用超 400 万元^[7]。时间成本压缩更为突出,桥梁支座检测周期从传统 7 d 缩短至 4 h,效率提升 42 倍;港口码头结构尺寸检测实现“即测即得”,报告生成时间从 24 h 压缩至 15 min^[8]。设备损耗方面,非接触式检测方式使超声波探头等耗材使用寿命延长 3 倍,检测车辆年行驶里程减少 2 万 km,设备维护成本降低 45%^[9],效益提升指标如表 2 所示。

表 2 AI 检测技术应用对公路水运工程经济效益提升统计

效益类型	量化指标	传统模式	AI 检测模式	效益提升
人工成本	检测人员配置	5 人/km	0.2 人/km	降低 96%
时间成本	单项目检测周期	15 个工作日	2 个工作日	缩短 87%
设备成本	检测设备年维护费用	28 万元	15 万元	减少 46%
耗材成本	传感器探头更换频率	1 次/月	1 次/季度	降低 67%

AI 检测技术通过提升工程质量精度、降低安全事故发生率、延长基础设施使用寿命,产生可观的间接经济价值。质量改进方面, AI 系统将混凝土强度检测误差控制在 ± 2 MPa 内,使施工返工率从 12% 降至 3.5%,某特大桥项目因此减少返工成本 1 200 万元;沥青路面平整度检测精度达 0.1 mm,使通车后的养护周期延长 2 年^[10]。安全风险规避上,实时监测系统提前预警高处坠落等安全隐患,某省级交通工程应用后,事故发生率下降 75%,年均减少事故赔偿支出超 800 万元。结构寿命延长方面, AI 辅助的预防性养护方案使桥梁设计寿命从 50 年提升至 65 年,航道疏浚周期从 1 年延长至 1.5 年,全生命周期成本降低 22%^[11]。

行业数据显示,工程质量问题导致的额外成本占总造价的 8%~15%, AI 检测技术通过质量管控可降低该比例至 3% 以下。某沿海港口项目应用结构健康监测系统后,发现并修复潜在结构缺陷 17 处,避免可能的结构失稳事故,间接挽回经济损失超 2 亿元。这些效益虽不直接体现为当期成本节约,却对工程全生命周期经济性产生深远影响。

3.2 其他效益

AI 检测技术带来的长期战略价值远超直接经济收益,它推动工程管理模式变革、促进行业技术标准升级、增强企业核心竞争力,为行业可持续发展注入新动能。管理模式方面,检测数据的数字化存储与智能分析,使工程质量追溯从“纸质档案”转向“数字孪生”,某央企建立的 AI 检测云平台实现 1 000+项目数据互联互通,管理效率提升 60%。行业标准层面, AI 检测积累的海量数据推动建立更精准的工程质量评价体系,如基于大数据的沥青路面性能预测模型,使设计参数优化准确率提升 35%,引领行业技术标准升级。

企业竞争力增强表现在技术壁垒构建与市场拓展优势,率先应用 AI 检测的企业在招投标中中标率提升 40%,利润率提高 8~12 个百分点。某工程检测公司通过 AI 技术研发,三年内市场份额从 5% 扩大至 18%,成为行业技术标杆^[12]。对行业发展而言, AI 检测推动的数字化转型,使工程建设碳排放量降低 15%,符合“双碳”战略要求,同时又培养了一批复合型技术人才,为交通强国建设提供智力支持。这些长期效益虽难以即时量化,却决定着行业未来发展格局与竞争态势。

4 AI 检测应用的挑战与经济效益优化路径

尽管 AI 检测技术在公路水运工程领域展现出显著价值,但其规模化应用仍面临多重现实挑战,这些挑战直接制约着经济效益的充分释放。同时,针对不同维度的瓶颈问题,行业已开始探索多元化的优化路径,通过技术创新与模式变革推动 AI 检测技术的落地应用。

4.1 AI 检测技术应用的主要挑战

4.1.1 技术层面

复杂工程环境往往对检测精度构成严峻考验。露天作业场景中,光照变化(如强光、阴影)可使图像识别准确率下降 20%~30%;恶劣天气(雨、雾、扬尘)导致传感器数据噪声增加,混凝土强度检测误差扩大至 ± 5 MPa 以上。结构表面的复杂纹理(如沥青路面的不规则集料分布)常造成裂缝识别的误检率超过 15%,而水下结构检测面临的光线衰减与水流干扰,使航道淤积监测精度降低至 85% 以下。

4.1.2 成本层面

初始投入门槛较高制约了 AI 检测技术在中小企业中的应用。一套完整的 AI 检测系统(含硬件设

备、算法授权、数据服务)初始投资在200万元~500万元,相当于传统检测设备成本的3~5倍。模型训练与系统维护的年度费用占初始投资的15%~20%,且需要专业技术人员进行操作,人力成本增加10%~15%。对利润率普遍维持在5%~8%的工程检测企业而言,投资回报周期长达3—5年。

4.1.3 数据层面

工程数据碎片化与质量参差不齐问题突出。不同项目的检测数据格式差异率超过40%,缺乏统一的数据标准;施工阶段产生的非结构化数据(如现场视频、手写记录)占比达65%,难以直接用于AI模型训练。数据标注质量差异导致模型泛化能力不足,在跨项目应用时准确率下降15%~25%,形成“数据孤岛”现象。

4.1.4 行业标准层面

AI检测结果的权威性与认可度有待确立。现行工程质量验收规范中,AI检测方法仅作为辅助手段,最终判定仍依赖人工复核,限制了技术效能发挥。不同厂商的算法模型缺乏统一的性能评估标准,检测结果的偏差率可达 $\pm 8\%$,导致业主单位对AI检测数据的信任度不足,影响技术推广进程。

4.2 经济效益提升的优化策略

4.2.1 技术优化

需聚焦复杂环境适应性提升,通过多模态数据融合算法研发突破精度瓶颈。将可见光图像、红外热成像、激光点云等多源数据进行特征融合,可使恶劣天气下的检测准确率维持在90%以上;开发基于注意力机制的深度学习模型,重点关注结构缺陷区域特征,将裂缝识别的误检率控制在5%以内。针对水下检测场景,研发声波—光学复合传感技术,结合水声信道补偿算法,使航道淤积监测精度提升至95%,为精准清淤提供数据支撑。

4.2.2 成本控制

可通过创新商业模式降低应用门槛,推广设备租赁与服务外包模式。检测企业可采用“硬件租赁+算法订阅”的轻资产模式,将初始投入降低60%,月均成本控制在10万~15万元。大型工程集团可建立区域共享检测中心,通过将设备利用率提升30%以上,摊薄单位成本。开发轻量化AI检测终端,将移动端检测APP与普通智能手机结合,使单点检测设备成本从50万元降至2万元以下,满足中小项目的检测需求。

4.2.3 数据治理

需构建工程检测数据共享与治理体系,推动数据价值最大化。建立国家级公路水运工程检测数据库,统一数据采集标准与接口规范,实现跨项目数据互通;采用联邦学习技术,在数据隐私保护前提下开展模型协同训练,使跨场景检测准确率提升20%。引入区块链技术建立数据溯源机制,确保检测数据的真实性与不可篡改性,增强AI检测结果的可信度,为纳入工程验收标准奠定基础。

4.2.4 政策引导与行业协作

政策引导与行业协作是推动技术落地的重要保障。建议将AI检测技术纳入交通科技研发重点支持领域,对应用企业给予30%的设备购置补贴;组织制定《公路水运工程AI检测技术规程》,明确检测方法、精度要求与验收标准;鼓励上下游企业组建产业联盟,联合开展关键技术攻关,共享数据资源与算法模型,形成“技术研发—标准制定—产业应用”的良性循环,加速AI检测技术的经济效益释放。

5 展 望

随着新一代信息技术的加速迭代,AI检测技术正从单一的质量检测工具向工程全要素智能决策系统演进。未来五年,公路水运工程领域的AI检测将呈现“感知泛在化、分析智能化、决策自主化”的发展特征,预计可使工程全生命周期经济效益再提升25%~35%。这种“感知—分析—模拟”的三层架构,使检测维度从单点静态扩展至全域动态,某特大桥梁项目的实践显示,三技术融合可使结构损伤预警提前量从7 d延长至30 d,预测精度提升至92%,为预防性养护决策提供充足时间窗口^[13]。

行业智能化转型将以标准体系建设与数据共享机制为核心突破口。预计到2028年,行业将形成涵盖数据采集、算法训练、结果评定的全流程AI检测标准体系,其中检测数据格式标准化率达90%以上,模型性能评估指标统一度提升至85%。国家级工程检测数据共享平台的建成,将实现跨区域、跨企业的检测数据互联互通,通过数据要素市场化配置,使AI模型训练成本降低40%。针对中小企业的技术普及需求,轻量化AI检测解决方案将快速渗透,移动端检测工具价格降至万元级,推动行业AI检测应用率突破60%。这种体系化变革将使工程质量事故率再降30%,全行业年均节约成本超800亿元,为交通强国建设提供坚实技术支撑^[14]。

6 结 语

AI 检测技术以其高效性与精准性,为公路水运工程质量监管模式革新提供了核心驱动力。通过系统分析其在施工、运营、安全预警全场景的应用实践,构建了“三维度”经济效益评估框架,验证了技术在降本增效、质量管控、风险规避等方面的显著价值。尽管当前面临复杂环境适配、高初始投入等现实挑战,但通过多模态技术融合、轻资产商业模式创新、数据治理体系建设等优化路径,AI 检测的规模化应用瓶颈正逐步突破。未来,随着标准体系完善与数据共享机制成熟,AI 检测将深度融入工程全生命周期管理,推动行业向智能化、精细化、可持续化方向升级,为交通强国建设注入持续动能。

参考文献:

[1] 中国交通建设股份有限公司.公路水运工程 AI 检测技术应用白皮书[R].北京:中国交通建设股份有限公司,2024.
[2] 交通运输部公路科学研究院.公路工程智能检测评价标准(征求意见稿)[Z].北京:交通运输部公路科学研究院,2025.
[3] 国家统计局.中国统计年鉴(2024)[M].北京:中国统计出版社,2024.

[4] 中国公路学会.公路工程质量检测数据共享管理办法[Z].北京:中国公路学会,2025.
[5] 湖北省交投集团智能检测股份有限公司.湖北公路智能 AI 巡检系统技术白皮书[R].武汉:湖北省交投集团智能检测股份有限公司,2025.
[6] 中交第二公路工程局有限公司.高速公路沥青路面 AI 智能检测技术规程[Z].西安:中交第二公路工程局有限公司,2025.
[7] 山东省交通规划设计院.烟台西港 LNG 防波堤项目数字化建设报告[R].济南:山东省交通规划设计院,2025.
[8] 交通运输部路网监测与应急处置中心.全国公路网 AI 监测系统运行分析报告(2025)[R].北京:交通运输部路网监测与应急处置中心,2025.
[9] 中国交通建设监理协会.公路水运工程 AI 检测技术监理指南[Z].北京:中国交通建设监理协会,2025.
[10] 刘彦明.基于数字孪生的复杂风场下斜拉-悬索桥建造过程虚拟仿真方法[J].中国公路学报,2025,38(6):78-92.
[11] 交通运输部科学研究院.公路水运工程 AI 检测技术经济效益评估方法研究[R].北京:交通运输部科学研究院,2025.
[12] 中国水运建设行业协会.水运工程智能检测技术应用现状与发展趋势[R].北京:中国水运建设行业协会,2025.
[13] 国际道路联盟(IRF).全球公路 AI 检测技术应用现状与发展趋势[R].日内瓦:国际道路联盟,2025.
[14] 中国交通运输部科技司.公路水运工程 AI 检测技术发展蓝皮书(2025)[R].北京:中国交通运输部科技司,2025.

(上接第 352 页)

河南水利与南水北调,2025,54(5):4-6.
[10] 薛黎铭.城市景观河流生态净化与修复技术研究[J].城市道桥与防洪,2019(8):149-151.
[11] 李明,陈文龙,吴琼.广州市城市河流低水位运行生态修复理念与实践[J].中国水利,2023(9):31-35.
[12] 王宝华,黄红,邓雪原,等.广州沙河涌黑臭水体整治措施与效果评价研究[J].三峡生态环境监测,2023(4):66-74.
[13] 陈文龙,吴琼,李一平.城市河流低水位运行生态修复机制与实践效果[J].水资源保护,2024,40(2):16-22.
[14] 吴琼,陈文龙,陈军.基于低水位运行的城市河流污染底泥中微生物群落特征及影响因素[J].水资源保护,2024,40(2):126-133.
[15] 于文泽,王国强,曲丹,等.低水位运行形成的边滩湿地对南沙河水质及水生态的影响[J].皮革制作与环保科技,2022,3(7):153-156;159.
[16] 于文泽,杨丹丹,纪梦钿,等.低水位运行后沙河水库浮游生物群

落空间分布特征及富营养化评价[J].环境科学学报,2022,42(3):94-102.
[17] 程顺健.河道低水位运行管理与实践分析——以福州市白湖亭 2 号支河为例[J].能源与环境,2024(5):20-24.
[18] 姜登岭,赵昊,邬喜红,等.嘉兴城市河网区高、低水位期浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J].环境化学,2020,39(9):2540-2550.
[19] 李范竹.植物法修复污染河道底泥[J].城市道桥与防洪,2023,(8):174-177.
[20] 易雨君,丁航,叶敬吁.基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J].水资源保护,2024,40(5):1-10.
[21] 李春晖,高举,全宇,等.长江流域水生态健康评价指标体系构建初步研究[J].水利发展研究,2025,25(8):71-78;98.
[22] 丁航,银森录,易雨君.水生态健康评价中基准的确定方法探究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(1):51-60.