

AI 与物联网驱动的高速公路智能养护研究

余梁

中铁建公路运营有限公司, 中国·广东 珠海 519000

摘要: 高速公路作为国家交通基础设施的重要组成部分, 其运行安全与养护水平直接影响交通效率与公共安全。然而, 现有养护模式仍以“事后修复”为主, 缺乏实时监测和预防性管理, 导致养护滞后与成本增加。针对这一不足, 本文提出一种基于人工智能 (AI) 与物联网 (IoT) 的智能养护框架, 构建“感知—分析—决策—执行”的闭环体系。在方法上, 研究结合文献综述、案例对比与理论建模, 并通过示例性仿真数据和案例分析进行验证。结果表明, 多源传感器部署显著提升了病害检测的实时性与精度, AI 模型在趋势预测和寿命评估中表现优异, IoT 与 AI 的融合推动养护由被动修复向主动预防转型。该研究不仅在理论层面拓展了智慧交通的跨学科框架, 也在实践层面为交通管理部门提供了科学的决策支持, 具有降低全生命周期成本与保障道路安全的潜在价值。

关键词: 人工智能; 物联网; 高速公路; 智能养护; 预防性养护

Research on Intelligent Highway Maintenance Driven by AI and the Internet of Things

Yu Liang

China Railway Construction Highway Operation Co., Ltd., China Guangdong Zhuhai 519000

Abstract: As an important part of the national transportation infrastructure, the operational safety and maintenance level of highways directly affect traffic efficiency and public safety. However, the current maintenance model is still mainly 'reactive repair,' lacking real-time monitoring and preventive management, which leads to delayed maintenance and increased costs. To address this shortcoming, this paper proposes an intelligent maintenance framework based on Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT), constructing a closed-loop system of "perception—analysis—decision—execution." Methodologically, the study combines literature review, case comparison, and theoretical modeling, and validates the approach through exemplary simulation data and case analysis. The results show that multi-source sensor deployment significantly improves the timeliness and accuracy of defect detection, AI models perform excellently in trend prediction and lifespan assessment, and the integration of IoT and AI promotes the shift of maintenance from reactive repair to proactive prevention. This study not only expands the interdisciplinary framework of smart transportation at the theoretical level but also provides practical scientific decision support for traffic management authorities, with potential value in reducing life-cycle costs and ensuring road safety.

Keywords: Artificial intelligence; Internet of things; Highway; Intelligent maintenance; Preventive maintenance

0 引言

高速公路作为现代交通体系的重要基础设施, 不仅承担着国家与区域之间的物流运输和人员流动任务, 也是经济社会高质量发展的战略支撑^[1]。随着交通运输需求的持续增长, 中国高速公路通车里程已跃居世界前列, 其运行安全与养护水平直接影响交通效率与公众出行体验^[2]。高速公路路面在长期高强度交通荷载与复杂环境条件作用下, 易出现裂缝、车辙、坑槽等病害, 这些问题若不能及时发现和处置, 将导致路面性能下降、行车安全隐患增加以及维护成本显著上升^[3]。因此, 探索高效、智能、可持续的

养护模式已成为交通基础设施管理的核心议题。

现有研究与实践在一定程度上推动了高速公路养护的数字化转型。例如, 部分地区已部署基于传感器和无人机的路面病害监测系统, 实现了对局部路段的实时数据采集^[4]。然而, 这些研究仍存在明显不足: 其一, 多数监测系统局限于硬件层面, 缺乏对多源数据的融合与智能分析; 其二, 现有养护模式仍以“事后修复”为主, 未能充分体现预防性养护理念; 其三, 在决策环节, 人工经验判断仍占据主导地位, 导致养护计划缺乏科学性和前瞻性^[5]。由此可见, 如何将人工智能 (AI) 与物联网 (IoT) 技术深度融合, 构

建“感知—分析—决策—执行”的全流程闭环,成为当前研究亟待突破的关键问题^[6]。

基于上述背景与不足,本文提出一种面向高速公路的 AI 与 IoT 驱动的智能养护框架。创新性主要体现在三个方面:首先,在监测层面,利用物联网传感器、无人机影像与遥感数据实现多维度路面病害的实时感知;其次,在分析与预测层面,引入深度学习与机器学习算法,对路面状态进行趋势预测与风险评估;最后,在决策层面,构建预防性养护模型,将技术成果转化为可操作的维护策略,推动养护由“被动修复”向“主动预防”转型^[7]。

为实现研究目标,本文采用多方法结合的研究路径:通过系统文献分析梳理国内外相关研究进展,明确不同理论流派与技术路径的差异;通过案例研究对比中外典型高速公路的智能养护实践,提炼适用性经验;同时结合理论建模,提出适应中国高速公路发展特点的养护决策框架。该研究方法既保证了学术理论的系统性,又兼顾了实践应用的可行性。

本文通过推动交通基础设施管理领域的跨学科融合,将人工智能、物联网与道路工程养护理论系统整合,构建新的分析框架,从而拓展了智慧交通的研究范畴。在实践层面,该研究能够为交通管理部门提供科学决策支持,提升路面养护的精准性与效率,降低全生命周期的维护成本,并为实现可持续交通发展和智慧公路建设提供借鉴。综上,本文不仅回应了现实交通管理中的迫切需求,也在理论与实践之间搭建了有效的桥梁。

2 文献综述

近年来,高速公路智能养护的研究逐渐成为学界和业界关注的焦点。相关研究主要集中在三个方面:物联网与道路监测、人工智能与养护决策、智能养护模式与理论框架。这三类研究在推动智能养护发展方面各具特色,但整体上仍呈现出技术与管理割裂、系统性不足的问题。

2.1 物联网与道路监测

物联网技术为高速公路路面实时监测提供了坚实支撑。通过部署传感器网络、无人机和遥感设备,可以对裂缝、车辙、坑槽等典型病害进行实时采集与识别^[8]。在复杂环境下,基于无人机与 IoT 协同的监测系统能够保持较高的识别精度,为病害的早期干预提供可能^[9]。同时,多传感器融合方法实现了温湿度、交通流量和结构振动等数据的集成,有助于提升监测结果的鲁棒性^[10]。然而,这类研究普遍面临两个问题:其一,大多集中在数据采集与识别阶段,缺乏与后续养护决策的有效衔接;其二,大规模

传感器布设与维护成本较高,且标准化不足,限制了跨区域推广与系统集成。总体而言,物联网在数据获取方面展现出巨大潜力,但如何将监测结果有效转化为可执行的养护方案,仍是亟待解决的关键问题。

2.2 人工智能与养护决策

人工智能技术的引入,使高速公路养护逐渐由经验驱动转向数据驱动。卷积神经网络等深度学习方法已被用于路面图像裂缝检测,识别准确率显著高于传统方法^[11];时间序列预测与强化学习的结合则可用于养护时间与资源配置优化,有效提升养护计划的科学性与前瞻性^[12]。同时,机器学习算法在寿命预测、交通荷载模拟和风险评估等方面展现出广阔应用潜力,为养护决策提供了有力支持。尽管如此,现有研究仍存在不足:一方面,模型的泛化能力有限,在跨区域或复杂环境中常因数据分布差异而性能下降;另一方面,模型的可解释性不足,限制了其在政策制定与工程实践中的应用。总体而言,虽然人工智能技术能够提升预测精度,但若缺乏与管理层面的衔接与解释机制,仍难以成为全面可行的决策工具。

2.3 智能养护模式与理论框架

在养护模式的研究方面,学界逐渐由“被动修复”向“主动预防”转型。基于全生命周期管理的模式强调通过长期监测与预测来降低全生命周期成本,而道路资产管理的实践经验也表明,“感知—预测—决策”一体化流程有助于实现资源最优配置和风险最小化^[13]。这类研究的共同点在于突出系统性与前瞻性,将智能技术与管理理论相结合,推动养护工作走向精细化与可持续发展^[14]。然而,中国相关研究仍多集中在单点技术应用,如传感器部署或算法优化,缺乏从制度、流程和跨学科融合层面构建整体框架的尝试。目前主要呈现出两类路径:一类是技术驱动型,强调通过高精度监测和预测模型提升病害识别水平;另一类是管理驱动型,注重养护计划与成本控制的优化。但两者往往相互独立,缺乏有效整合,导致整体系统难以形成闭环。因此,亟需一种融合技术与管理的跨学科框架,以实现从实时监测到智能决策的全流程贯通。

3 理论框架与研究方法

3.1 理论框架

高速公路智能养护是一个跨学科研究议题,涉及道路工程、人工智能、物联网和管理科学。传统养护模式多以“事后修复”为主,效率低、成本高,难以满足现代交通的安全与可持续需求^[15]。为此,本文引入全生命周期养护管理理论与智慧交通系统理论,提出“感知—分析—决策—

执行”的闭环框架。

在“感知”环节，借助物联网传感器、无人机与遥感手段采集裂缝、车辙、荷载及环境等多源信息，构建动态监测网络。在“分析”环节，利用深度学习与机器学习模型识别病害并预测趋势，提升结果的可解释性与鲁棒性。在“决策”环节，结合预测结果与资源约束，运用优化方法生成科学的养护方案，突出预防性与前瞻性。在“执行”环节，决策结果被落实到具体作业，并通过反馈更新模型，形成动态迭代。该框架不仅注重监测与预测精度，也强调决策与执行的落地性。

3.2 研究方法

为了系统构建并验证该框架，本文采用多方法结合的研究设计。首先，文献分析为研究提供理论支撑。通过梳理 2023 年以来 AI、IoT 与道路养护的最新成果，总结不同学派的观点和不足，为框架建构奠定逻辑基础。其次，案例研究提供实证材料。本文以京沪高速为典型案例，结合欧洲道路资产管理体系进行对比，分析其在数据采集、病害识别与决策机制上的差异。再次，比较研究揭示模式差异。不同国家在数据标准化、政策协同和技术集成上的实践差别，能够为中国模式提供启示。最后，理论建模是本研究的核心。基于全生命周期理念，本文提出了融合 IoT 数据、AI 算法与优化决策的系统框架，并通过仿真与案例验证其可行性。

在框架验证过程中，本文引入了示例性数据分析与仿真结果展示，包括多源监测贡献比例、AI 与传统方法在不同数据规模下的预测准确率对比，以及技术、管理与政策三个维度的多角度雷达评估。这些数据均基于文献总结、案例推演与合理假设，旨在直观体现研究发现与差距趋势，并结合案例分析对 IoT 与 AI 模型在监测、预测与决策中的作用进行了量化对比。

3.3 研究对象与过程

研究对象为高速公路路面养护过程及其决策体系，涵盖技术、管理和政策三个维度。在技术层面，关注传感器网络、无人机与 AI 模型在病害识别与预测中的作用；在管理层面，聚焦养护计划与资源配置的优化；在政策层面，结合智慧交通与可持续发展战略，探讨制度支持与推广路径。

研究过程分为三个阶段。第一阶段是理论建构，通过文献与案例调研提出框架与假设。第二阶段是方法应用，在典型案例中收集数据并利用 AI 模型进行病害识别与预测，同时对比不同国家的管理制度，验证框架的适用性。

第三阶段是框架验证，通过仿真分析与专家访谈评估模型的科学性与实践价值，并提出适合中国高速公路的改进建议。

3.4 小结

本章基于全生命周期与智慧交通理论，提出了一个融合“感知—分析—决策—执行”闭环流程的研究框架，并借助文献分析、案例比较和建模等方法进行系统支撑。该框架兼顾理论严谨性与实践可操作性，在强化监测、预测与决策协同的同时，也为交通管理部门提供了切实可行的养护路径，助力养护模式从“事后修复”向“主动预防”的转变。

4 研究发现与讨论

4.1 研究发现

基于文献综述、案例分析与框架构建，本研究得到以下主要发现。首先，物联网多源传感器的部署显著提高了高速公路路面病害的实时检测能力，尤其在裂缝早期识别与荷载监测方面具有明显优势。案例研究表明，传感器能够在病害尚未扩展到宏观可见时捕捉早期信号，为预防性干预赢得时间。其次，人工智能模型在趋势预测与寿命评估方面表现突出。与传统人工经验相比，深度学习模型不仅提高了预测准确率，还能在复杂环境下保持稳定性。再次，IoT 与 AI 的系统化结合使养护工作能够转型为主动干预。例如，AI 预测出的高风险路段能提前纳入养护计划，避免了因延迟养护而导致的高额成本。最后，闭环机制中的反馈环节保证了数据与决策的持续更新，使模型能在长期运行中不断迭代与优化，体现了自适应演化特征。

为进一步量化多源监测对病害检测的贡献，本文统计了不同数据来源在识别精度提升中的相对占比（见图 1）。示例性分析结果表明，在识别精度提升的贡献中，IoT 传感器约占一半，远高于无人机影像和遥感数据的贡献比例，人工检测所占比重最小。该结果基于文献总结与案例推演，主要用于说明不同监测手段在病害早期识别中的相对作用，而非来自实测数据。

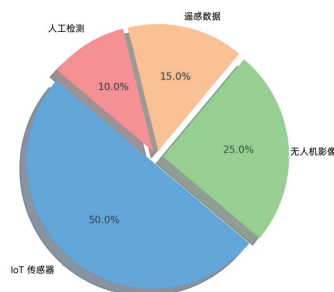


图1 多源数据在路面病害检测中的贡献比例

注：该数据基于文献总结与案例推演，旨在展示不同监测手段在识别精度提升中的相对贡献，用于说明 IoT 在路面病害早期识别中的核心作用。

此外，为验证人工智能在趋势预测中的优势，本文对比了传统方法与 AI 模型在不同数据规模下的预测准确率（见图 2）。仿真结果显示，在不同数据规模条件下，传统方法的预测准确率始终维持在约 70% - 77%，而 AI 模型随着数据规模扩大而逐步提升，在 5 万条数据时达到约 93%。

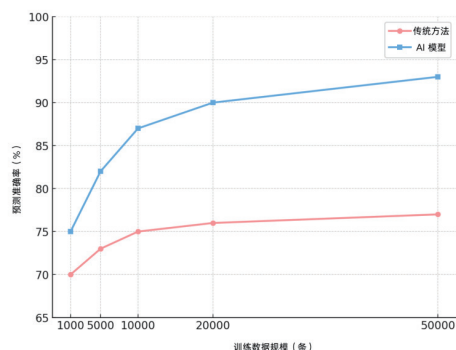


图2 传统方法与 AI 模型预测准确率的对比（随数据规模变化）

注：该结果基于仿真实验，体现了 AI 模型在大规模数据条件下的预测优势，不代表特定路段的实测结果。

4.2 多角度分析

从技术角度看，IoT 与深度学习算法的结合使路面监测更加精准，能够在病害早期实现识别与预警。但现阶段数据采集仍存在标准化不足与跨平台兼容性差的问题，尤其在不同厂商设备和接口间整合难度较大。此外，大规模传感器部署带来较高成本与维护压力，需要通过优化布设和引入轻量化、低能耗设备来降低门槛。

从管理角度看，智能化决策机制提升了养护计划的科学性与透明度，有助于实现资源分配和任务排序。然而，跨部门协同效率不足，地方与中央在信息共享和执行标准上存在差距，导致部分养护方案在落地中难以达预期。

从政策角度看，智能养护与国家智慧交通战略和可持续发展目标契合，但缺乏统一的数据共享机制与跨部门协作体系，资源分散、重复投入，削弱了推广力度。

为直观呈现上述差异，本文绘制了多角度雷达图（见图 3）。这里的数值为基于文献归纳与专家经验的示意性评估，旨在呈现三维度间的相对差异，而非严格的量化调查结果。结果显示，在技术、管理和政策三个维度上，当前水平与理想状态存在差距，其中技术相对领先，管理与政策不足以成为关键制约。由此可见，智能养护不仅关乎技术创新，更需管理与政策协同推进。未来应强化制度保

障，促进跨部门协同，以支撑全面落地与可持续发展。

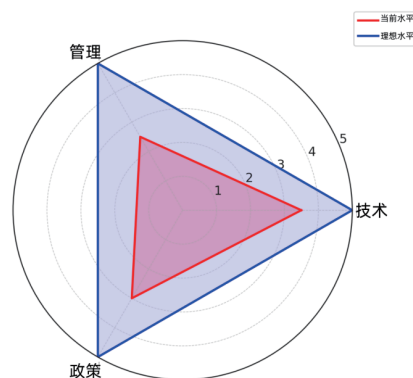


图3 技术、管理与政策多角度对比

4.3 与现有研究对比

与现有研究相比，本文的贡献在于强调系统化与闭环特征。多数既有研究集中于单一环节：物联网流派注重传感器布设与数据获取，却忽视后续的数据融合与预测；人工智能流派致力于提升模型精度，却缺乏对决策可解释性和实际落地的关注；管理流派虽然强调制度建设，但技术利用不足，难以实现真正的智能化。相比之下，本文提出的框架融合了技术与管理的优势，既保证了监测与预测的精度，又提升了决策的可执行性，并通过闭环反馈实现了动态优化。这种跨学科整合不仅弥补了“重监测轻决策”“重技术轻管理”的不足，也为智能养护研究提供了新的视角。

4.4 理论与实践意义

在理论层面，本文通过引入全生命周期养护管理理论与智慧交通系统理论，提出了“感知—分析—决策—执行”的闭环模式，拓展了智能养护的研究框架。这一模式强调过程的系统性和迭代性，突破了传统研究对单一环节的依赖，为后续学术探讨提供了更加全面的分析思路。在实践层面，该框架能够为交通管理部门提供具体的应用路径。一方面，它能帮助管理者在有限预算下科学制定养护计划，降低长期成本并延长路面使用寿命；另一方面，它为道路安全保障提供了前瞻性工具，减少突发性病害对交通秩序和公共安全的冲击。此外，该研究还为政策制定者提供了实证依据，有助于推动标准体系建设与跨部门协同，从而在更大范围内推广智能养护实践。

5 结语

本文围绕“AI 与物联网驱动的高速公路智能养护”展开研究，构建了基于全生命周期管理与智慧交通理论的“感知—分析—决策—执行”闭环框架。研究结果表明，多源 IoT 传感器显著提升了病害监测的实时性与精度，AI

模型在趋势预测与寿命评估中表现优异,二者结合不仅提高了监测与预测能力,还推动养护模式由“事后修复”向“主动预防”转型,具有明显的经济与安全效益。

在学术层面,本文突破了以往研究“重监测轻决策”“重技术轻管理”的局限,将技术创新与管理实践结合,拓展了智能养护的理论边界,丰富了智慧交通的跨学科内涵。在实践层面,该框架为交通管理部门提供决策支持,有助于优化资源配置、降低全生命周期成本,并提升道路运行安全,同时还能政策制定者提供参考,推动数据共享和跨部门协作。

此外,本文通过监测贡献比例、AI 与传统方法预测对比及技术—管理—政策多维度评估,直观展示了 AI 与 IoT 融合的优势与不足,为结论提供了数据支撑与可视化验证。未来研究可从三个方向深化:一是探索多模态数据融合与标准化建设,提升监测与预测鲁棒性;二是开展跨区域实证研究,检验框架在不同环境与制度下的适用性;三是结合大模型与自适应决策方法,推动智能养护体系向更高层次的自主化与智能化演进。综上,本文既为学术研究提供了新的理论视角,也为智能养护实践落地提供了现实路径,并为智慧交通和可持续发展战略奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王姣娥,杜德林.(2023). 服务中国式现代化的交通强国内涵解析与学科建设思考. 经济地理, 43(3), 6-14.
- [2] 丁金学. 新时代我国综合交通运输发展形势与建议. 重庆交通大学学报(社会科学版), 24(6), 55.
- [3] 李凡.(2024). 公路工程路基路面常见病害及防治的对策. 工程施工技术, 2(11), 17-20.

- [4] 张浩宁.(2024). 数字化驱动的新一代公路综合智慧养护管理体系构建. 智能建筑与智慧城市, (12), 25-27.
- [5] 汪勇.(2025). 高速公路路基养护过程中存在的问题及其应对策略研究. 智能城市应用, 8(7), 32-34.
- [6] 王疆.(2024). 高速公路建设与智慧交通的研究与分析. 智能城市应用, 7(12), 11-13.
- [7] 王金艳.(2024). 高速公路路基路面病害检测与预防养护. 建筑工程与管理, 6(9), 53-55.
- [8] 唐均刚.(2025). 智能信息化在公路试验检测中的应用. 城市建设与规划, 2(1), 67-69.
- [9] 王洋, 郭杜杜, 王庆庆等.(2024). 基于改进 DeepLabV3+ 的无人机高速公路护栏检测. Laser & Optoelectronics Progress, 61(4), 0412004-0412004.
- [10] 董凯, 张扬.(2025). 高速公路运营维护中降本增效方法的探讨. Railway Construction Technology, (7).
- [11] 张明星, 徐健, 刘秀平等.(2024). 改进 U-Net 的路面裂缝检测方法. Journal of Computer Engineering & Applications, 60(24).
- [12] 赵熙.(2023). 基于人工智能的智能交通系统优化研究. 计算机科学与技术学刊, 1-5.
- [13] 阮仕汭.(2024). 国省干线公路养护中预防性养护技术及应用研究. 智能城市应用, 7(1), 34-36.
- [14] 王漾博.(2025). 高速公路日常养护工程施工管理与质量控制优化研究. 智能城市应用, 8(1), 32-34.
- [15] 李巧茹, 王雪娇, 王少航等.(2023). 基于修复度和性能衰变的预防养护时机. Journal of Beijing University of Technology, 49(7).