

基于精准病害数据与多目标优化的路面养护 决策一体化方案研究

邓文军 段旭东

(云南华怡道桥技术工程公司 云南 昆明 650011)

摘要 我国公路路网已进入“全面养护”新阶段，传统路面病害养护决策存在病害测量不准、决策不够科学、资金分配不合理等实际问题。深度学习技术能精准获取路面病害数据，为养护决策提供可靠支撑，而优化决策模型是提升养护科学性的核心。本文以YOLO系列模型获取的精准病害数据为前提，梳理路面病害养护决策的研究现状，分析现有决策模型的优势与不足，提出“精准数据输入-深度学习预测-多目标协同决策”一体化改进方案，涵盖数据预处理与标准化、机器学习驱动的性能预测、多目标优化养护决策三大核心模块。通过具体工程案例验证方案有效性，改进后的决策模型能让养护资金使用效益提升11.11%，养护等级与方式的决策精准度比传统方法提升60%，性能较差的路段占比从4.2%降至1.8%。这套“数据-预测-决策”的闭环体系，为路面病害养护决策的科学化、精准化提供了实用参考。

关键词 机器学习；路面病害；养护决策；性能预测；多目标优化

文章编号 056-2026-3683

Research on an Integrated Decision-Making Scheme for Pavement Maintenance Based on Accurate Distress Data and Multi-Objective Optimization

Wenjun Deng, Xudong Duan

(Yunnan Huayi Road Bridge Engineering Company, Kunming 650011, China)

Abstract The highway network of China's has entered a new stage of comprehensive maintenance. Traditional decision-making for pavement distress treatment suffers from practical issues such as inaccurate distress detection, unscientific decision-making, and irrational fund allocation. Deep learning technologies enable the accurate acquisition of pavement distress data, providing reliable support for maintenance decision-making, while optimized decision models represent the core to improving the scientificity of maintenance. To obtain a key accurate distress data by YOLO-series models as a prerequisite is feasible, this paper reviews the research status of pavement distress maintenance decision-making, analyzes the strengths and weaknesses of existing decision models, and proposes an integrated improvement scheme featuring "accurate data input – deep learning prediction – multi-objective collaborative decision-making". The scheme covers three core modules: data preprocessing and standardization, machine learning-driven performance prediction, and

收稿日期：2025-12-10 录用日期：2026-02-23

通讯作者：邓文军 段旭东；单位：云南华怡道桥技术工程公司 云南 昆明

multi-objective optimized maintenance decision-making. The effectiveness of the proposed scheme is verified through practical engineering cases. The improved decision model increases the efficiency of maintenance fund utilization by 11.11%, raises the decision accuracy of maintenance levels and methods by 60% compared with traditional approaches, and reduces the proportion of poor-performance road segments from 4.2% to 1.8%. This closed-loop system of "data-prediction-decision-making" provides a practical reference for the scientific and precise development of pavement distress maintenance decision-making.

Keywords: Machine learning; Pavement distress; Maintenance decision-making; Performance prediction; Multi-objective optimization

1 研究背景及意义

我国公路建设发展迅速，截至 2023 年底，全国公路总里程已突破 543.68 万公里，其中沥青路面占比超过 85%，国省道和农村公路里程分别达到 38.40 万公里和 459.86 万公里。随着路网规模不断扩大、道路使用年限逐渐增长，路面在车辆行驶压力和自然环境影响的双重作用下，难免出现裂缝、坑槽、车辙等病害。

据行业统计，我国每年用于路面病害养护的资金超过 3000 亿元，但其中约 20% 因决策不当被浪费，还有 15% 的路段因为养护不及时导致病害加重，甚至引发交通安全隐患。传统的路面养护决策主要依靠人工巡查和经验判断，存在明显短板：人工巡查很难精准测量裂缝宽度、坑槽面积等关键数据，不同检测人员对病害严重程度的判断一致性只有 68%；决策时大多只看单一指标，没有充分考虑交通量、气候、道路使用年限等多种因素，导致养护等级与实际需求不匹配；资金分配缺乏科学方法，存在重视干线公路、轻视支线公路，重视大修、轻视预防性养护的情况，比如某省国省道在传统养护模式下，养护资金利用率仅 79%，性能较差的路段占比达 4.2%。

深度学习结合机器学习为解决养护决策问题提供了新的解决思路，但目前的研究仍有不足：一是决策模型没有充分利用这些精准数据，对多种影响因素的综合考虑不够；二是预测模型在不

同地区、不同路况下的适用性不强；三是决策时大多只关注成本和性能两个目标，对长期使用成本、环境影响等方面考虑不足。因此，基于精准病害数据优化的养护决策模型，成为公路养护领域的迫切需求。

本文在现有研究的基础上提出了新的优化思路，提出了以“数据 - 预测 - 决策”为流程体系的一体化改进方案，完善了多种因素协同决策的理论框架，通过构建科学的预测模型和多目标优化决策模型，为后续相关研究提供了实用思路；同时，跨区域数据协同机制的建立，为解决养护数据分散、难以共享的问题提供了新方向，进而推动养护决策从“经验驱动”向“数据驱动”的转变。此改进方案可直接应用于实际养护工程，能显著提升决策的精准性和经济性，在深度学习提供精准数据的前提下，该预测模型可提前 1-3 年预判路面性能变化，从而选择最佳的养护时机；多目标优化决策模型能在资金有限的情况下，在养护效果、成本与耐久性之间寻求最优平衡，实际工程应用表明，该方案能使养护资金使用效益提升 11.11%，使路面寿命延长 3 年以上，有效缓解养护需求增长与资金短缺之间的矛盾，为公路养护行业的高质量发展提供技术支持。

2 研究现状与存在不足

随着当今科技的发展，深度学习技术越来越

越成熟,目前已经能够实现路面病害数据的精准获取,其为养护决策提供了坚实基础。以YOLO系列模型为代表的检测技术,可快速识别裂缝、坑槽、龟裂等多类病害,并量化核心参数:基于路面病害专用数据集训练后,YOLOv5模型对常见病害的识别准确率达85.3%,横纵裂缝宽度量化误差 $\leq 0.1\text{mm}$,坑槽面积量化误差 $\leq 5\%$;Du等基于YOLO网络实现了路面病害检测与分类,进一步验证了该技术的有效性,再结合语义分割技术,可进一步提升病害区域定位的精确性。

目前,基于深度学习的病害数据获取已形成标准化流程:通过车载检测设备、无人机巡检等方式采集路面图像,经YOLO等模型处理后,输出病害类型、位置、量化参数及路面破损率(DR),为养护决策提供客观、准确的数据支撑。使用深度学习技术所获得的数据较传统的人工巡检数据相比,在精准度、完整性、时效性上均实现质的提升,为后续决策模型输出精确结果奠定了数据基础。

路面性能预测是养护决策的前提,核心是通过历史数据与影响因素,预判未来路面状况指数(PCI)等关键指标的衰减趋势。传统预测模型以经验公式、线性回归为主,预测精度较为有限,平均相对误差多在5%以上。深度学习与机器学习技术的结合应用显著提升了预测精度:Wang等基于BP神经网络构建预测模型,通过训练样本数据实现对PCI的预测,平均相对误差降至4.8%;Li选择构建贝叶斯优化随机森林模型,以累计降水量、累计温度、累计交通量、路龄及病害量化参数等信息为输入特征,使PCI的预测相对误差降低到2%,较传统随机森林模型提升3.2%,且泛化性显著优于单一神经网络模型。

养护决策优化的核心是在资金、工期等条件的多重约束下,实现养护效果的最大化,现有研究主要聚焦多目标优化与资金分配机制:Zhang

等提出“资金-目标”双优化法,结合线性规划模型,在以满足路面性能提升为目标的前提下,实现养护资金的合理分配,较传统平均分配方式可节约资金约12%;Dong等引入了交互式多目标优化的方法,基于决策偏好模型来处理“性能提升、成本节约、工期缩短”等多目标问题,显著提升了决策结果主观性与合理性的匹配度;Li则将遗传算法与深度学习预测模型结合,构建起了多目标养护决策模型,以“养护后PCI均值最大化”、“养护成本最小化”等为目标,在资金约束下生成帕累托最优解集合,为路网级养护决策提供更加灵活的选择。

此外,全生命周期成本分析(LCCA)也正在逐渐融入决策模型,Dong等基于LCCA对高等级公路沥青路面养护方案进行优化,因其考虑到养护措施的长期效益,从而避免短期决策偏差,使养护全周期成本降低18%。

尽管养护决策研究取得显著进展,但仍存在诸多关键问题:一是多因素协同决策机制缺失,现有模型多以PCI单一指标或少量影响因素为输入,未充分融合深度学习获取的病害量化参数、交通量、气候、路龄等多维度数据,导致养护等级判定与实际需求存在脱节现象。二是性能预测模型泛化性不足,现有模型多使用基于特定区域、特定路况所获取的数据集训练,未考虑不同气候、路面类型所存在的差异,同一训练模型在跨区域预测的误差显著增大。三是多目标优化维度单一,多数决策模型仅关注“成本-性能”双目标,未能充分融入全生命周期成本、环境影响、交通干扰等多维度目标,难以适应高质量发展需求。四是数据协同与动态决策欠缺,跨区域养护数据共享机制缺失,数据格式不统一,导致决策模型多为静态决策,未能实现实时对接新增病害数据,难以适应病害动态发展特征。五是养护方式与病害量化参数匹配不精准,现有研究多通过PCI范

围判定养护方式，未建立病害量化参数与养护措施的精准映射关系，导致养护方式选择仍存在部分主观性强的情况。

3 一体化改进方案设计

3.1 数据预处理与标准化模块

以深度学习获取的病害数据为核心，整合多个方面的影响因素，形成标准化的输入数据：一是病害核心数据，包括通过 YOLO 等模型得到的病害类型、关键参数以及病害分布情况；二是环境数据，包括累计降水量、累计温度、年均湿度、极端天气出现的次数；三是交通数据，包括累计交通量、重载车辆占比、车型分布；四是道路结构数据，包括道路使用年限、路面结构类型、基层类型、历史养护记录；五是经济数据，包括单位里程养护成本、长期使用成本相关参数、资金预算限制。

数据标准化处理采用 Z-score 标准化方法对多方面数据进行处理，消除不同数据单位带来的影响；通过 3σ 原则进行异常值检测，剔除不合理的数据，比如异常的交通量数据、误检测的病害数据；搭建省级养护数据共享中心，统一数据

存储格式（采用 JSON 格式），让不同地区的养护数据能够互通互用，提高数据的利用率。

3.2 深度学习驱动的性能预测模块

在模型架构设计方面，设计该模型由 100 棵决策树组成，通过随机抽样的方式构建训练数据集，每棵决策树随机选择部分特征进行训练，进而通过投票得出预测结果，这样的结构能有效避免模型“学偏”，适合用来处理多维度数据；采用“网格搜索 - 交叉验证”的算法进行模型关键参数的选择，比如决策树数量、最大深度等，避免人工调整参数的主观性；通过计算各输入特征的重要性，筛选出对路面状况影响最大的因素，比如路面破损比例（权重 0.32）、累计交通量（权重 0.25）、道路使用年限（权重 0.21）等，在简化模型的同时保证预测精度。

通过模型可以得到未来路面状况的变化曲线，识别出路面性能快速下降的阶段，通常是路面状况指数从 85 降至 75 的区间，判断趋势，从而确定预防性养护的最佳时机；结合病害的精准参数，还能预判病害的发展速度，为选择合适的养护方式提供依据。

该模型在多场景测试中表现出良好泛化性：

表 1. 养护体系标准划分

养护等级	PCI 范围	核心病害量化特征	使用养护措施	单位里程成本	预期寿命延长
日常养护	≥90	轻微裂缝（宽度 ≤3mm）、局部修补（面积 ≤0.5m ² ）	裂缝灌封、局部坑槽修补	10 元 /m	1-2
预防性养护	80-89	裂缝宽度 3-5mm、无结构性病害、车辙深度 ≤8mm	微表处、超薄罩面（4cm）	50 元 /m	3-4
中修	70-79	裂缝宽度 5-10mm、坑槽面积 0.5-2m ² 、车辙深度 8-15mm	挖补沥青面层、热再生整型	80 元 /m	4-5
大修	≤69	裂缝宽度 > 10mm、坑槽面积 > 2m ² 、结构性破损	面层 + 基层补强、重建	200 元 /m	6-8

在该省多雨地区（南部）与干旱地区（北部）分别选取 30 条路段测试，预测误差分别为 1.9% 和 1.7%。

3.3 多目标优化养护决策模块

结合《公路技术状况评定标准》(JTG 5210-2018) 和深度学习获取的病害精准参数，建立多因素养护等级划分体系，让养护方式与病害特征精准对应，具体对应如下表 1 所示：

对于多目标决策模型的构建，以“养护资金最少”、“养护后路面使用寿命最长”、“全生命周期成本最低”、“交通干扰最小”为核心目标，构建多目标优化决策模型，其中主要的公式及条件函数如下：

目标函数：养护资金最少：
$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^n S_i \times L_i$$
，其中 n 为养护路段数量， S_i 为第 i 段路的单位里程养护成本（元 /m）， L_i 为第 i 段路的长度（m）；使用寿命最长：
$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \times L_i$$
，其中 ΔT_i 为第 i 段路养护后的使用寿命延长年限（年）；全生命周期成本最低：
$$\min Z_3 = \sum_{i=1}^n LCCA_i \times L_i$$
，其中 $LCCA_i$ 为第 i 段路单位里程全生命周期成本（元 /m）；交通干扰最小：
$$\min Z_4 = \sum_{i=1}^n D_i \times L_i$$
，其中 D_i 为第 i 段路养护期间的交通干扰系数（无量纲，取值 0-1）。

约束条件：资金约束：
$$\sum_{i=1}^n S_i \times L_i \leq B$$
，其中 B 为总养护资金预算（元）；性能约束：
$$\Delta PCI_i \geq \Delta PCI_{min}$$
，其中 ΔPCI_{min} 为最小 PCI 提升阈值；路段长度约束：
$$L_i \geq L_{min}$$
 其中 L_{min} 为最小养护路段长度；干扰约束：
$$D_i \leq D_{max}$$
，其中 D_{max} 为最大交通干扰系数。

采用 NSGA-II 遗传算法求解，算法参数设置

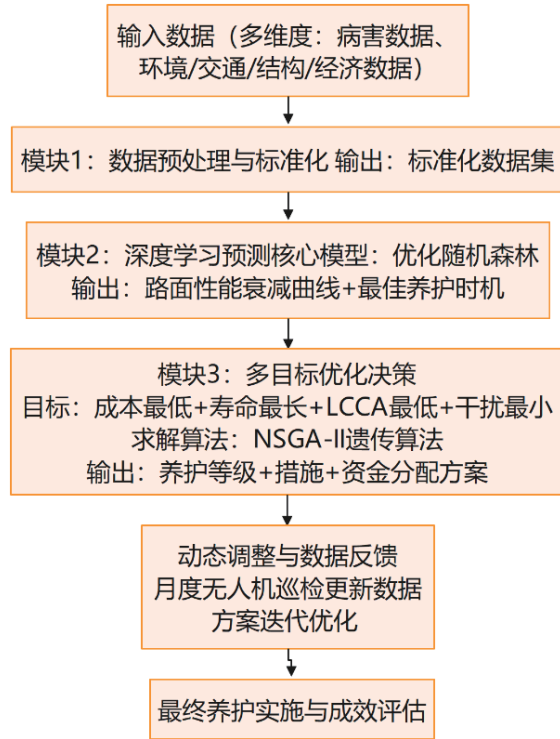


图 1. 护决策流程图

种群规模 50、最大迭代次数 100、交叉概率 0.9、变异概率 0.1；通过快速非支配排序、拥挤度计算与精英保留策略，获得帕累托最优解集合。

同时，建立动态调整机制，每月通过无人机巡检获取新增病害数据，重新运行预测和决策模型，及时调整养护计划，适应病害发展变化；构建省级养护数据共享中心，整合检测数据、预测数据、养护记录和成效数据，采用 MySQL 数据库存储，实现数据标准化管理和重复利用；通过地理信息系统地图直观展示路网病害分布、养护等级划分和资金分配方案，让决策更清晰易懂，具体执行流程图如图 1 所示。

4 工程应用案例

选取某省国省道沥青路面智慧养护决策工程，该项目覆盖该省 1.4 万公里国道，总体的路网密度达 113.84 公里 /100 平方公里，路面类型以沥青混凝土为主。项目实施前，传统养护模式存在明显问题：人工巡查无法精准获取裂缝宽度、坑槽面积等参数；养护资金分配不均，不同路段单位里程养护成本差异达 30%；从检测到制定养护方案需要 3 个月，周期过长。项目采用本文提出的改进方案，以 YOLO 模型获取的精准病害数据为基础，通过改进决策模型实现养护智能化升级，总养护资金预算 3.78 亿元。

数据获取与标准化阶段：采用多功能路况快速检测车搭载 YOLOv5 模型，以 80 公里 / 小时的速度采集路面图像，累计采集 14.6 万张，识别出 13 类路面病害，输出裂缝宽度、坑槽面积等量化参数，路面破损比例的测量误差不超过 3%；收集 2018-2023 年的累计降水量（平均 1450 毫米）、累计温度（平均 18.5℃）、累计交通量（平均 1200 辆 / 天）、道路使用年限（平均 8 年）等数据，采用 Z-score 方法进行标准化处理，剔除异常数据 326 条；搭建省级养护数据共享中心，统一数据格式为 JSON，实现检测数据与历史养护记录的互联互通。

性能预测阶段：用覆盖不同气候（该省南部多雨区、北部干旱区）、不同路面类型（沥青路面、水泥路面）的 320 条路段历史数据训练预测模型，用 60 条国省道路段数据测试，模型预测误差仅 1.8%；通过模型预测未来 3 年路面状况变化，当前路面状况指数均值为 85.9，其中 12% 的路段指数将降至 70 以下，需优先安排大修；8% 的路段处于性能快速衰减阶段（PCI 85-75），需实施预防性养护。

该项目实施后成效显著，一是养护精准性提升，针对性养护措施覆盖率从 68% 提升至

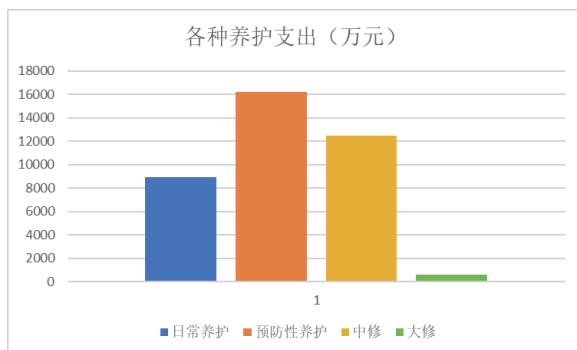
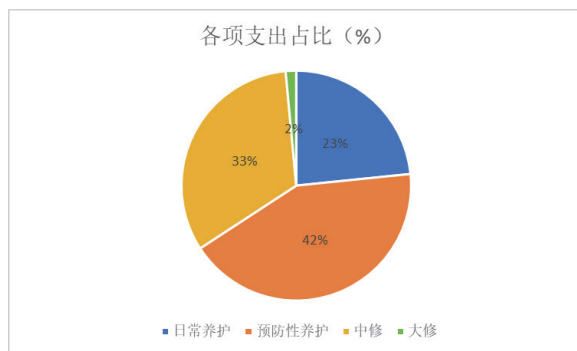


图 2. 护决策流程图

91%，性能较差的路段占比从 4.2% 降至 1.8%，路面病害增长率从 12% 降至 4.5%；二是资金效益优化，单位里程养护成本从 27 元 / 米降至 24 元 / 米，降低 11.6%，长期使用成本降低 18%；三是效率显著提升，总体检测周期大幅缩短，养护决策方案制定效率提升 60%，养护工程实施周期缩短 25%；四是长期效益显著，养护后路面平均状况指数从 85.9 提升至 92.3，使用寿命平均延长 3.2 年，减少后续养护投入约 1.2 亿元，养护费用支出占比对比如下图 2 所示。

5 结论与展望

本文针对传统路面病害养护决策存在的多因素考虑不足、预测精度有限、多目标协同失衡等问题，提出了“精准数据输入 - 深度学习预测 -

多目标协同决策”的一体化改进方案，并通过某省国道智慧养护工程案例验证了方案的可行性与有效性。其主要进步与优势总结有以下三点：第一，基于YOLO系列技术的病害数据获取和量化为养护决策提供了高质量数据支撑，检测误差可控制在5%以内。第二，构建了全流程闭环体系，数据预处理与标准化模块实现多维度数据的整合与统一；优化后的随机森林预测模型融合病害量化参数与多种影响因素，可以做到预测误差低于2%，能够精准预判路面性能变化；多目标优化决策模型通过NSGA-II遗传算法，实现“成本-寿命-长期成本-交通干扰”的协同优化，养护等级与方式的匹配精准度比传统方法提升60%。第三，改进方案能显著提升养护决策的精准性、经济性与效率，养护资金使用效益提升11.11%，性能较差的路段占比降至1.8%，验证了该方案的实际应用价值。

尽管改进方案取得了良好的工程效果，但仍有进一步优化的空间。未来的优化发展思路大致分为以下五个方面：一是融合更多来源数据与升级模型，整合无人机激光雷达数据、路面传感器实时监测数据、交通流实时数据，构建更全面的预测模型，丰富影响因素维度；二是结合自主迭代优化算法，提升模型的动态决策能力；三是拓展绿色养护决策维度，将环境影响（如养护材料碳排放、能源消耗）纳入多目标决策模型，构建“经济-性能-环境”三维优化体系，适应绿色发展需求；四是结合数字孪生技术，构建路面数字孪生体，将精准病害数据、预测结果与决策方案融入其中，实现病害发展的可视化模拟与养护方案的虚拟验证，让决策更直观、全面；五是开发轻量化模型并现场部署，由于在野外养护场景的设备限制，简化决策模型计算流程，降低设备使用要求尤为重要，进而实现在现场即可快速输出决策方案。

随着深度学习技术与决策理论的持续融合，路面病害养护决策将向“全时空感知、高精度预测、多目标协同、全生命周期优化”的方向迈进，为公路养护行业的数字化、智能化转型提供核心支撑，推动公路养护事业高质量发展。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京: 交通运输部, 2024.
- [2] 李邵华. 基于图像的沥青公路路面养护决策研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
- [3] 徐鹏, 祝轩, 姚丁, 等. 沥青路面养护智能检测与决策综述[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2099-2117.
- [4] 周乐东, 王骄. 基于路面病害修补还原换算的养护决策分析[J]. 公路与汽运, 2023, (2): 135-138.
- [5] 汪凡, 杨建喜. 基于BP神经网络的路面使用性能预测模型[J]. 中外公路, 2009, 29(1): 86-89.
- [6] 董元帅, 周绪利, 侯芸, 等. 基于寿命周期的沥青路面预养护时机决策优化[J]. 公路, 2020, 65(4): 325-331.
- [7] 周红宇, 冯晓, 周卓, 等. 基于WebGIS的道路养护可视化系统的设计与开发[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 274-278.
- [8] 交通运输部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG 5210-2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [9] 李昊昌. 考虑多目标需求的西北地区沥青路面养护决策理论和方法研究[D]. 兰州交通大学, 2024. DOI:10.27205/d.cnki.gltcc.2024.000945.
- [10] 张高伟. 公路沥青路面病害识别与养护决策研究[J]. 产业创新研究, 2024,(04):132-134.
- [11] 黄九达, 陈涛, 洪盛祥, 等. 高速公路沥青路面养护现状与决策分析[J]. 河南科技, 2021,40(36):73-76.