

乡村振兴战略下农村公路智慧养护技术研究

文 / 申 冰 亳州市县乡公路管理服务中心

摘要：为了提升乡村振兴战略背景下农村公路的可持续运营能力，本文通过分析路网运行特征与城乡融合发展目标，确立了具有弹性、韧性与前瞻性的养护目标体系。在管理层面，构建了由数据驱动支持、区块链技术保障、多主体协作支撑的养护组织模式，并引入反馈修正机制形成动态优化闭环。结果表明，该智慧养护体系能有效提升道路养护响应效率、精准性与管理透明度，推动农村基础设施养护由被动响应向主动感知转变，助力农村公路在复杂运行环境下实现效能稳态与治理结构重构。

关键词：乡村振兴；农村公路；智慧养护；数据驱动；决策优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.113

引言

农村公路作为乡村振兴的重要基础支撑，其运行质量直接关系到区域物流畅通、农业增效与人口流动结构重塑。面对路网广布、管理分散、维护能力薄弱的结构性矛盾，传统养护方式在信息获取、资源调配与响应机制方面逐渐失效，亟需向智慧化、数字化、集成化方向转型。在技术变革与治理逻辑演化交汇的背景下，智慧养护理念逐步成为提升农村公路管理效能与系统韧性的核心路径。智慧养护不仅是感知设备的简单堆叠，更要求技术体系与养护策略在动态场景中实现闭环联动。本文基于数据驱动、智能识别与弹性治理逻辑，构建农村公路智慧养护的多维框架，从理论架构、技术路径、组织机制与效能评价四个维度出发，探索面向乡村振兴目标的智慧基础设施管理模式重构路径。

一、农村公路智慧养护的多维理论架构

（一）路网全寿命周期养护的协同管理理论

在农村公路建设完成后，需要做好养护工作。公路养护是保障公路正常使用的重要措施，有助于及时识别公路建设中的质量问题，延长农村公路的使用寿命^[1]。农村公路作为区域基础交通单元，其运行状态并非孤立事件，而是一个包含建设、使用、退化、修复与再利用等多阶段交织演进的动态系统。在此背景下，全寿命周期养护理念逐步取代碎片化修复思维，成为智慧养护管理理论的基本支点。协同管理作为该体系内核，需打破部门分割与技术孤岛，建立多角色数据共享、信息联动与反馈共识机制，使设计端、施工端、监测端与决策端形成联动反馈结构。该理论结构要求多学科知识嵌入治理流程，从工程材料衰变模型、环境载荷演化曲线，到运营行为对路网的长期扰动效应进行系统性建模。管理行为由周期性被动反应向状态驱动式主动调整迁移，形成对各类道路生命周期状态的数字化感知与动态干预策略矩阵，实现养护方案的适时性、结构性与前瞻性协同统一。例如，在农村公路建设养护工作中，要做好地区公路调研，分析出现路面病害的原因，结合不同路面病害选择适当的养护技术、养护设备，并制订具有针对性

的农村公路养护施工方案，从而提升农村公路建设养护效果。

（二）数据驱动决策的智能养护技术经济分析

随着感知技术的普及与数据基础设施能力跃升，数据已不再作为静态记录的附属物，而成为驱动智能养护决策的核心变量。传统的技术经济分析模式以静态指标为主，无法捕捉路况演变的非线性波动与微观结构变化，在多维数据冲击下显现出结构响应迟滞与参数僵化等问题。在智慧养护体系中，数据驱动不仅提供了更高精度的状态认知能力，还重构了养护策略与经济效益之间的量化映射关系。通过构建多维数据指标矩阵、引入机器学习回归算法与动态多目标优化方法，可将养护技术路径与投入成本、风险等级、绩效预期进行实时耦合运算，生成策略选择空间与效益反馈通道。

（三）城乡融合发展需求下的韧性养护目标体系

在城乡一体化战略进程持续推进的语境下，农村公路不再只是连接局部村庄的通达通行工具，而是嵌入城乡资源流动、人口迁移与产业协作网络的多功能基础设施单元。道路作为空间结构的一部分，其服务功能在城乡边界模糊化过程中不断拓展，导致其所承受的物理负荷、交通结构与社会需求呈现高度变异性。在此压力结构下，韧性养护目标体系应运而生，强调系统对异常扰动、突发灾变与负载突升等极端条件的快速恢复能力与自适应调节能力。目标体系的建构需摆脱传统性能导向模型，转向多维承载力、环境适应性与结构自愈性三位一体的能力评估框架，并嵌入城乡统筹指标体系中，融入区域空间协同与服务能级平衡目标^[2]。韧性不等同于强度叠加，而在于结构的非线性调整能力与功能弹性冗余配置，要求在目标制定过程中将动态边界纳入控制参量，引导养护行为转向弹性策略构建、恢复力布局与多路径容错机制设定，以适应城乡融合条件下不断演化的运行环境与服务需求。

二、智慧养护技术体系集成框架

（一）多源异构路况监测技术融合路径

如图1所示，农村公路网络的广域分布与环境多样

性，决定了路况数据呈现出强烈的异构特性，包括时空采集频率不一致、传感器信号结构差异、数据尺度粒度不一等复杂情境。在智慧养护体系中，信息来源不仅限于传统巡检与人工采集，还包括激光雷达、车载视觉系统、地磁检测、无人机遥感以及物联网感知节点等多维数据通道。技术路径需构建基于语义中台的融合引擎，采用数据格式转换、信号一致性重建与特征增强编码等处理手段，解决数据源间“语义脱钩”问题。在融合机制上，通过构建基于图神经网络的异构感知结构模型，将多维感知结果映射为具有动态演化属性的路况图谱，为后续识别、预测与资源配置等环节提供统一数据支撑^[3]。融合不仅意味着信息归集，更是打通“感知—理解—响应”三元耦合路径，使养护体系具备跨时空维度的信息建模能力与路径协同能力。

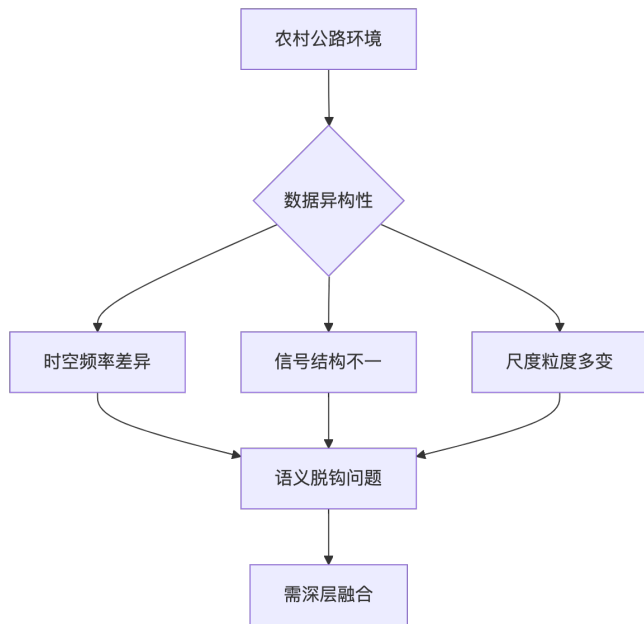


图1 异构数据特性与挑战流程图

(二) 基于深度学习的病害智能识别模型构建

在传统路况识别框架中，病害识别依赖规则模板与手工标注，效率低、误差大、泛化能力弱。在智慧养护系统中，深度学习技术通过其强表征能力与非线性建模能力，成为构建高精度病害识别模型的关键支撑。在模型构建逻辑上，需引入多尺度卷积结构与注意力机制，提升模型对边界模糊、形态复杂与光照变化病害图像的适应性。同时结合语义分割网络与目标检测网络，构建多任务学习架构，实现病害类型识别、严重程度估计与空间分布勾画的同步输出。在数据训练机制上，需融合多区域、多季节、多设备采集样本，构建具备泛化能力的多域迁移模型，解决模型过拟合与应用场景单一的问题。在推理阶段，采用边缘计算嵌入式部署方案，将识别引擎集成于车载或移动终端，实现对路面状态的边走边判、边测边决策，使识别行为从“后台诊断”转化为“前

端感知”，推动智能识别由工具辅助走向策略驱动^[4]。

(三) 养护资源动态优化配置的空间匹配机制

传统养护资源配置方式多以静态计划为基础，缺乏对空间布局、任务优先级与动态突发状况的精准响应能力，导致人力、物资、设备使用效率不高。智慧养护体系中的资源配置逻辑，需以“空间—时间—任务”三重参数为控制元，在算法驱动下实现动态调度与弹性分配。匹配机制需构建以路况图谱、病害识别结果与设备位置数据为核心的高维状态空间模型，并引入多目标优化算法对资源在地理节点间进行最短路径重构、任务密度排序与效率回报加权分配。该机制不再以传统的区块式配置为基本单元，而是基于病害等级强度场、设备可达性权重图与人员调度矩阵进行动态切片，在资源紧张或突发事件场景下实现快速转移、冗余压缩与分级弹性修复。同时系统需具备策略演化功能，能够基于历史反馈数据持续优化资源分布模型与路径规划权重，推动养护作业从经验主导模式向数据驱动下的空间智能协同逻辑转型。

三、智慧养护管理模式创新路径

(一) 分级分类的预防性养护制度设计

农村公路管理体系长期受限于事后维修主导的惯性机制，存在响应滞后、资源浪费与技术路径割裂的多重结构性问题。预防性养护制度的引入，标志着公路运维管理逻辑从故障应对向风险控制范式迁移，而其真正落地的核心在于建立一套与道路等级、病害风险、环境负载相匹配的分级分类治理结构。该制度不再以单一行政层级或标准指标作为划分基础，而是在多源数据支持下引入路况等级指数、使用频次模型与气候扰动因子，构建动态演化的风险矩阵体系，对不同道路片段实施精准识别与策略分派。在策略设定上，制度设计需突破“周期化统一施养”逻辑，转向“强干—控支—守末”的精细化防控框架^[5]。具体执行中，通过将病害触发阈值转化为算法参数嵌入监测系统中，实现策略自动调取与响应触发，构成“识别—匹配—执行”三段式智能联动机制。

(二) 多方主体协同的网格化养护组织模式

传统养护组织结构普遍存在职能模糊、信息断层与协作障碍等问题，在面对路况复杂化与养护智能化要求叠加的情境下，封闭式管理架构已难以支撑高频、高密度、高精度的作业需求。多方协同下的网格化组织模式，构建的是一种扁平化、分布式、动态响应的治理网络，其逻辑基础不再依赖垂直指令链，而转向基于信息共享、任务分发与资源重构的网状互动机制。模式构建中需将路网划分为具备自治管理能力的微单元，并在每个网格内嵌入多角色功能节点，如技术诊断节点、数据采集节点、运维执行节点与社会监督节点，形成职责交错、资源共享与数据互通的复合型组织系统。信息调度不以层级传递为中介，而通过平台化接口实现多主体同步感知与协

同决策,构建即时推送与反馈回路并存的任务响应机制。在响应逻辑上引入智能合约逻辑,将任务划分、责任确认与结果验证进行自动映射,推动养护活动从指令驱动转化为需求驱动。

(三) 区块链赋能的养护质量追溯体系

在传统公路养护管理体系中,责任模糊、数据失真与质量难控问题普遍存在,追溯机制多依赖人工记录与线性存档,易出现节点缺失与路径断裂。引入区块链技术构建质量追溯体系,实质上是对“数据真实性”与“责任可溯性”的底层保障机制重构。在技术层面,通过建立多维账本结构,将每一次养护行为的关键参数,包括作业时间、操作人员、施工设备、材料批次、气候条件与监测结果,以加密形式写入链端并形成不可篡改的分布式记录。这一结构确保每个养护事件的“时间戳—位置码—任务签名”三元绑定,构成链式信息索引机制,实现质量控制的全过程可视化、可验证、可复盘。在制度运行中,通过构建多主体共识机制,将监管机构、承包单位、第三方检测与社会公众纳入节点角色系统,实现“共识写链、共享审计、协同监督”的治理形态。

四、智慧养护效能评价与动态优化

(一) 全要素养护效能评价指标体系构建

传统公路养护评价体系多集中于作业完成率、路面平整度等单一指标维度,忽略了管理过程的复杂性与技术系统的演化特征,导致养护效能评估失真、反馈闭环断裂。智慧养护情境下,评价体系的逻辑应由“结果导向”转向“过程—行为—结果”三元结构驱动,并以多维度、可量化、可追踪的全要素变量构建系统指标集。该体系不应仅囿于工程性指标,还应嵌入运维数据质量、作业执行轨迹、资源使用强度、人工调度效率与风险防控能力等行为特征类指标。在模型构建逻辑上,可通过熵权赋值与主成分聚合算法提取多元数据中关键变量,构建动态权重矩阵,并以时序样本为底层数据集形成效能评函数^[6]。

(二) 基于数字孪生的养护方案动态模拟方法

数字孪生技术的核心价值在于构建现实系统的实时镜像,通过多源感知与模型算法驱动,实现对物理对象运行逻辑的映射、预测与干预。在农村公路智慧养护系统中,该技术已从辅助可视化的阶段跃迁至动态决策引擎的主控角色。动态模拟不再停留在静态建模与方案模板推演层面,而是需构建集数据流、规则流与行为流为一体的多场景仿真系统。模型中应包含路面结构退化路径模拟、突发事件扰动因子嵌入、资源调度优劣评估与策略反馈迭代模块,并与实时监测数据进行高频同步。

(三) 反馈—修正循环驱动的持续改进机制

智慧养护体系的运行不应视为静态制度的终点状态,而应构建为具备演化能力的开放系统,其核心在于引入

反馈—修正循环驱动逻辑,实现行为—结果—认知的动态闭环。传统养护流程缺乏对执行偏差与策略失灵的识别机制,反馈通道单一,修正行为延迟,导致系统难以适应环境变异与任务扰动。在机制构建中,需将评价指标、监测数据与策略执行结果建立一一对应关系,形成多维反馈流,并通过异常检测算法识别目标偏移点,触发自动修正指令。修正机制并非依赖人工判断,而由规则引擎与自适应策略库完成策略参数的实时调优与执行策略的结构再构。

结语

文章围绕乡村振兴战略下农村公路智慧养护系统的构建需求,从理论模型、技术体系与管理机制等多个层面提出了系统性解决方案。在理论架构方面,引入全生命周期管理理念,将路网运行、养护投入与韧性响应进行协同建模,明确智慧养护不再是阶段性任务,而应转变为贯穿设计、建设与运维全过程的动态管理过程。在技术层面,文章整合了多源异构数据监测路径、深度学习病害识别模型与空间匹配下的资源配置算法,搭建了感知—分析—决策三位一体的技术支撑系统,使养护行为具备了感知深度、响应速度与优化空间。在组织机制方面,提出分级分类预防性养护制度与多元主体协同共治框架,构建覆盖网格单元的响应网络。同时引入区块链技术保障养护流程的可追溯性与责任链清晰度,解决了长期困扰农村公路管理中的监管真空与责任错位问题。在效能层面,提出基于数字孪生的动态模拟方法与反馈修正驱动下的持续优化机制,实现从经验决策向数据决策的根本转化。研究成果为农村基础设施数字化升级提供了清晰的逻辑路径,也为公共管理体系在资源受限环境下的精准治理提供了理论模板。智慧养护作为治理理念与技术形态的交叉产物,其未来演进不仅取决于技术供给能力,更有赖于体制机制创新与系统集成能力的持续增强。

参考文献

- [1] 莫勇强. 乡村振兴背景下农村公路建设管理与养护工作分析[J]. 农村科学实验, 2024, (11): 16-18.
- [2] 袁小勇. 乡村振兴背景下农村公路设计与优化研究[J]. 工程与建设, 2024, 38(04): 823-825.
- [3] 沈龙韬. 乡村振兴进程中农村公路规划探究[J]. 汽车周刊, 2024, (09): 235-237.
- [4] 张利娟. 加强农村公路建管养铺就乡村振兴大道[J]. 交通财会, 2024, (05): 19-22+35.
- [5] 张兰峰, 蒋英礼. 以乡村振兴为背景的农村公路提质改造设计研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(19): 120-123.
- [6] 丁冉, 刘璐, 王友善. 乡村振兴背景下农村公路规划建设策略研究[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(05): 144-147.