

基于非现场执法数据的公路预防性养护决策模型 与经济性研究

陈思思

东莞市凤岗公路养护所, 广东 东莞 514500

DOI:10.61369/ASDS.2025080009

摘 要： 本文系统研究了基于非现场执法数据的公路预防性养护决策模型及其经济性。首先，阐述了公路养护从传统“损坏—修复”模式向预防性养护转变的必要性，并指出非现场执法数据在精准量化路面荷载、预测性能衰变方面的重要性。其次，构建了一个数据驱动的预防性养护决策模型，通过量化路段荷载压力、识别超限车辆通行路径、预测路面性能衰变曲线，为养护决策提供科学依据。最后，利用全生命周期成本分析（LCCA）方法，对比传统养护模式与数据驱动模式的成本效益，发现后者在20年分析期内可节约约15%的全生命周期成本现值，同时带来交通干扰减少、公众出行体验提升等隐性效益。研究表明，该决策模型在技术、经济层面均具有显著优势，为公路养护管理现代化提供了新路径。

关 键 词： 非现场执法数据；预防性养护；决策模型；全生命周期成本分析（LCCA）；经济效益；路面性能预测

Research on Decision-Making Model and Economics of Highway Preventive Maintenance Based on Non-Site Enforcement Data

Chen Sisi

Fenggang Highway Maintenance Institute, Dongguan, Guangdong 514500

Abstract： This paper systematically investigates a decision-making model for highway preventive maintenance based on non-site enforcement data and its economic implications. First, it elaborates on the necessity of shifting highway maintenance from the traditional "damage-repair" mode to preventive maintenance, highlighting the importance of non-site enforcement data in accurately quantifying pavement load and predicting performance deterioration. Second, a data-driven preventive maintenance decision-making model is constructed, which supports scientific decision-making by quantifying road segment load pressure, identifying paths frequently used by overweight vehicles, and predicting pavement performance deterioration curves. Finally, using the Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) method, the cost-effectiveness of traditional maintenance modes and data-driven modes is compared. The results indicate that the latter can reduce the present value of life-cycle costs by approximately 15% over a 20-year analysis period, while also delivering implicit benefits such as reduced traffic disruptions and improved public travel experience. The study demonstrates that this decision-making model offers significant advantages both technically and economically, providing a new pathway for the modernization of highway maintenance management.

Keywords： non-site enforcement data; preventive maintenance; decision-making model; Life-Cycle Cost Analysis (LCCA); economic benefits; pavement performance prediction

引言

公路交通作为国家经济发展的动脉，其路网规模的持续扩大与运营时间的不断增长，使得养护管理已成为保障路网安全、畅通、高效运行的关键环节。截至2022年末，我国公路总里程已达550万公里上下，其中高速公路19万公里，庞大的基础设施存量意味着巨大的养护需求。然而，传统的公路养护多采用“损坏—修复”的矫正性模式，这种被动应对策略不仅导致维修成本高昂、社会交通干扰大，而且往往因处治不及时而加速路面性能衰变，造成养护资金的效益低下^[1]。在此背景下，以“早养护、少维修”为核心的预防性养护理念日益成为行业共识，其通过在路面结构强度充足但表面性能开始加速退化时，适时采取低成本的有效措施，延缓病害发展，从而显著延长路面使用寿命，提升全生命周期内的投资效益。

作者简介：陈思思，女，东莞市凤岗公路养护所，经济师，研究方向：交通工程造价的全生命周期精准化与标准化管控、成本审查与数据驱动决策研究、资金使用效率提升策略研究。

一、现公路预防性养护现状和意义

预防性养护的成功实施，高度依赖于对路面状态精准、及时的判断与预测。然而，当前我国许多地区的养护决策仍很大程度上依赖于定期的人工路况调查或简单的周期性计划，缺乏足够的数据支撑和科学的决策模型，导致养护时机选择不准、措施针对性不强，难以真正发挥预防性养护的效用^[2]。究其根源，在于未能充分利用能够直接反映道路“病因”——即交通荷载——的关键数据。研究表明，车辆荷载，尤其是违法超限超载运输，是导致路面疲劳损伤、车辙等结构性破坏的最主要因素，其影响程度与轴重的四次方成正比（即“四次方定律”）。因此，精准掌握路网中的真实交通荷载分布，是实现从“经验养护”向“科学养护”跃升的数据基石。

值得注意的是，近年来在全国范围内快速推广的治理车辆超限超载非现场执法系统，为解决这一难题提供了前所未有的机遇。如某市治超非现场执法点建设工程，在全市关键节点布设了24个点位、189条车道，形成了覆盖市界、咽喉要道的精准监测网络。该网络7×24小时不间断地采集海量过车数据，包括但不限于车牌、轴重、总重、轴型、车速、通过时间等。这些数据不仅服务于执法处罚，更构成了一个反映全市公路荷载状况的动态、高精度大数据平台。它能够精准识别出超限车辆行驶的路线、频率及其对路面的破坏力，从而为定位养护需求最迫切的路段提供了前所未有的深度洞察^[3]。如何将这项源于“执法”的数据资源“赋能”于“养护”决策，实现跨业务领域的协同应用，已成为提升公路养护管理现代化水平的一个极具价值且迫在眉睫的研究方向。

在此背景下，本研究旨在系统探讨基于非现场执法数据的公路预防性养护决策模型及其经济性，将通过理论分析与案例模拟，量化评估这种数据驱动的新型决策模式相较于传统模式所能带来的经济效益，以期为公路养护资金的精准、高效、科学配置提供一条可行的技术路径与实践参考。

二、非现场执法数据与预防性养护的内在逻辑

预防性养护的核心精髓在于“防微杜渐”，其经济性与有效性的首要前提是对路面性能衰变趋势做出精准预判。传统的路况检测手段（如人工巡查、定期自动化检测）虽能描绘出路面的当前状态，但难以深入揭示病害发展的内在动因与速度。而非现场执法数据的引入，恰恰填补了这一空白，它将养护决策的视角从“表象”延伸至“根源”，实现了从治标向治本的深刻转变。

（一）非现场执法数据的构成与特征价值

某市治超非现场执法系统，通过动态称重、视频抓拍、车牌识别等技术手段，采集并生成了海量、多维、实时的高速数据流^[4]。其数据内涵远超单一的“超限判定”，主要包含以下核心维度：

1. 荷载数据：包括每轴轴重、车辆总重、轴型、轴距等，这是评估车辆对路面施加机械破坏力的直接依据。
2. 交通流数据：包括时间戳、车速、车流量、车道占有率、车型分类等，反映了道路的运营负荷状况。
3. 车辆身份数据：车牌号码、车牌颜色等，用于追踪特定车

辆（如高频超限车辆）的行驶路径。

4. 证据数据：高清车辆抓拍图片和视频，为数据真实性提供佐证，并可辅助车型识别。

这些数据汇聚在一起，呈现出高精度、全天候、全覆盖的显著特征。与传统交通调查采用的间歇式、抽样式采集方式相比，它能够无遗漏地记录下每一条车道的每一辆车的真实荷载，从而构建起一个全域、全时的公路荷载“数字画像”^[5]。其价值在于：它不仅回答了“路现在怎么样了”，更深刻地揭示了“路为什么会变成这样”以及“路将来会怎样变化”，为预测性养护提供了前所未有的数据基石。

（二）从数据到病害：荷载与路面性能衰变的理论关联

路面结构的损伤并非一蹴而就，而是一个累积疲劳的过程。其中，重复作用的车辆荷载是导致沥青路面产生疲劳开裂、永久性变形（车辙）等结构性破坏的最主要因素。这一关系在道路工程学界已由经典的轴载换算“四次方定律”所揭示。该定律表明，路面损伤与施加的轴重呈四次方指数关系，即：损伤程度 \propto （轴重）⁴，这意味着，一辆100kN（约10.2吨）轴重的车辆对路面的损伤程度，是一辆50kN（约5.1吨）轴重车辆的 $(100/50)^4=16$ 倍。而非现场执法数据，尤其是精准的轴重数据，使得该理论公式得以从教科书走向工程实践。通过计算所有通过车辆的当量轴次，可以定量地、精确地计算出每一路段所承受的累计标准轴载作用次数，从而科学量化其疲劳损伤程度。

超限超载车辆则是这一过程中的“指数级破坏源”。一条允许标准轴重10吨的公路，若频繁通过轴重20吨的车辆，其带来的损伤将是标准车辆的 $(20/10)^4=16$ 倍。非现场执法系统正是捕获这些“关键少数”的强大工具。通过数据分析，可以精准定位超限车辆高频通行的走廊路段，这些路段无疑是路面性能加速衰退、亟需优先关注与养护的“高风险区”。

（三）数据驱动的预防性养护决策机理

基于上述逻辑，非现场执法数据驱动预防性养护决策的机理变得清晰（图1所示）。其核心在于实现养护决策从“时间驱动”到“状态驱动”再到“预测驱动”的跨越。



图1：非现场执法数据驱动预防性养护决策机理图

风险识别与路段排序：系统对海量荷载数据进行挖掘分析，计算各路段的累计标准轴载作用次数，并识别出超限车辆集中通行的“重载走廊”。结合道路结构特点（如路面年龄、材料、结构层厚度），可初步筛选出荷载压力大、损伤累积快的优先养护候选路段清单。这改变了以往仅凭路龄或简单路况指标进行“一刀切”计划安排的模式^[6]。

性能衰变预测与时机研判：将计算得到的当量轴次作为关键输入参数，嵌入路面使用性能预测模型（如力学-经验法模型）。该模型能够更精准地预测特定路段在未来一段时间内的性能（如PCI）衰变曲线。从而，可以在性能曲线进入“急剧下降区”之前，科学地确定实施预防性养护的最佳经济时机，避免过早投入

造成浪费或过晚处置错失良机。

措施优化与资源精准配置：不同的荷载水平与交通组合可能导致不同类型的主导病害（如重载导致疲劳开裂，慢速重载导致车辙）^[7]。数据分析有助于判断主要病害类型，从而为不同路段“量身定制”最有效的预防性养护措施（如对疲劳裂缝多发段采用裂缝密封，对车辙段采用微表处填充等），实现养护资金和材料的精准化配置，最大化资金使用效益。

综上所述，非现场执法数据通过量化荷载这一“元凶”，为理解路面损伤机理提供了微观视角，为预测性能衰变提供了动态输入，最终为实施经济高效的预防性养护提供了科学决策依据。这一内在逻辑链条，构成了后续构建决策模型并进行经济性评价的理论基础。

三、基于非现场执法数据的预防性养护决策模型构建

理论的可行性需通过一套清晰、可操作的决策模型来实现。构建一个直观实用的分析框架，将非现场执法数据转化为直接的养护行动指南。该模型避免了复杂的数学公式，侧重于数据流向与逻辑判断，最终输出一份兼具科学性和实用性的预防性养护计划。

（一）模型总体框架：从数据到决策的流水线

本模型的核心思想是构建一条“数据流水线”，将原始数据逐步提炼为决策信息。其总体框架是一个包含四个核心模块的闭环系统，依次为：

1. 数据输入模块：负责接收多源数据，包括非现场执法数据、道路基础信息及历史路况数据。
2. 数据分析与挖掘模块：这是模型的“大脑”，负责处理数据，识别风险。
3. 决策生成模块：基于分析结果，判断养护时机并推荐措施。
4. 输出与反馈模块：形成最终计划，并根据养护后的新数据优化模型。

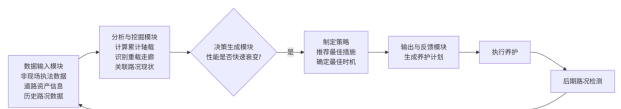


图2：预防性养护决策模型总体框架图

（二）核心分析一：精准识别养护优先级

传统方式很难回答“哪段路最该修？”的问题。本模型通过数据分析，实现从“凭经验猜测”到“用数据排名”的转变。

1. 量化荷载压力：系统自动统计各路段承受的累计标准轴载作用次数。次数越高的路段，其“疲劳度”越高，优先等级也越高。
2. 定位破坏源：模型特别关注超限车辆的比例和行驶路径，从而精准绘制出“重载交通走廊图”。这些走廊是路网中的“薄弱环节”，是养护资源需要优先倾斜的重点区域。
3. 综合排序：系统将荷载数据与当前路况（如 PCI 值）相结合，生成一份养护优先级排序清单。清单顶部是那些“当前路况尚可但正承受巨大荷载压力，即将快速衰变”的路段——这正是预防性养护需要介入的“黄金对象”。

（三）核心分析二：判断最佳养护时机

解决了“修哪里”的问题，接下来是“何时修”。模型通过动态性能预测来研判最佳时机。系统利用历史衰变趋势和当前荷载压力，预测未来一段时间内路面性能（如 PCI 值）的变化曲线。决策者可以设定一个性能阈值（如 PCI=80）。当预测曲线即将加速下滑并跌破该阈值时，系统便会提前发出预警。

最佳时机正是在性能“陡降”的起点附近。此时介入，犹如“中医治未病”，用成本较低的预防性养护措施（如微表处、超薄罩面），即可有效延缓性能衰退，避免将来进行代价高昂的铣刨重铺。

（四）决策输出与措施推荐

最终，模型将生成一份清晰的《预防性养护决策建议报告》，其核心内容包括：

1. 行动清单：列出建议在本周期内实施养护的具体路段、桩号。
2. 措施推荐：根据主导病害类型（如荷载大、车速慢易引发车辙，则推荐抗车辙能力强的措施）、路段等级和气候条件，推荐最适宜的 1-2 种预防性养护技术。
3. 时机窗口：明确建议的实施时间范围（如 2025 年第三季度前）。
4. 经济预期：提供该措施的概算参考及预计可延长路面寿命的年限，直观展示资金效益。

通过以上步骤，一套完整的、数据驱动的决策流程得以建立，使预防性养护摆脱了盲目性和随意性，走上了精细化、科学化的管理道路。

四、预防性养护决策的经济性分析

构建模型的最终目的是为了指导实践，而任何管理实践的成功推行都必须经受住经济性的检验。这种全生命周期成本分析（Life-Cycle Cost Analysis, LCCA）方法，也需通过设定对比情景与案例模拟，定量评估基于非现场执法数据的预防性养护决策模型所能带来的经济效益，从财务角度论证其应用的优越性与必要性。

（一）全生命周期成本分析（LCCA）框架

全生命周期成本分析是一种评估项目从建成到废弃的整个生命周期内所有相关经济成本的技术经济方法。在公路养护领域，LCCA 用于比较不同养护策略在相同分析期内的总成本现值，以选出经济最优的方案。其核心计算公式为：

总成本现值（PV）= 初始成本 + \sum （未来养护成本现值 + 用户成本现值）

其中，现值通过贴现率计算，将未来发生的费用折算到当前时间点的价值。本分析将主要聚焦于机构成本（养护管理部门承担的费用），对于用户成本（如延误、油耗等）虽至关重要，但因量化复杂，在此仅作定性讨论。

（二）情景设定与成本效益界定

为清晰展示数据驱动决策的价值，本研究设计了两种对比情景。情景 A 是传统的“按计划周期养护”或“被动响应式养护”模式，通常每 8-10 年进行一次大规模铣刨重铺（中修或大修）。而情景 B 则采用了基于数据驱动的预防性养护策略，在路面性能

衰变的关键节点（如第5年、第12年）及时实施两次低成本预防性养护（如微表处），从而将大规模铣刨重铺推迟至第18年，避免在分析期内进行第二次大修。在成本方面，大规模铣刨重铺（4cm 面层）的综合造价约为120–150元 / 平方米，而预防性养护（如微表处）的综合造价约为25–40元 / 平方米。数据驱动模式的效益主要体现在成本的节约上：一是两次预防性养护的总成本远低于一次大修费用，直接节省开支；二是通过延缓巨额大修投入，利用资金的时间价值创造额外收益。

（三）案例模拟分析

案例背景：选取某市一条双向四车道的国道，全长10公里，路面宽度15米，总面积150,000平方米。该路段通过非现场执法数据被识别为“重载走廊”，模型预测其性能将在第5年后加速衰变。

1. 情景 A（传统模式）成本现值计算：
第0年：新建路面（初始状态，成本不计入比较）。
第10年：进行一次铣刨重铺，成本取135元 / m²。
第10年 成本现值 =150,000m² × 135元 / m² × (1+ 贴 现 率)⁽⁻¹⁰⁾
总成本现值 PV_A= 第10年成本现值
2. 情景 B（数据驱动模式）成本现值计算：
第0年：新建路面。
第5年：实施第一次预防性养护（微表处），成本取32元 / m²。
第12年：实施第二次预防性养护（微表处），成本取32元 / m²。
第18年：进行一次铣刨重铺，成本取135元 / m²。
第5年成本现值 =150,000m² × 32元 / m² × (1+ 贴现率)⁽⁻⁵⁾
第12年成本现值 =150,000m² × 32元 / m² × (1+ 贴现率)⁽⁻¹²⁾
第18年 成本现值 =150,000m² × 135元 / m² × (1+ 贴 现 率)⁽⁻¹⁸⁾
总成本现值 PV_B= 第5年现值 + 第12年现值 + 第18年现值

（四）分析结果与讨论

假定贴现率为5%，进行计算后，两种情景的成本现值对比鲜明。

表1：全生命周期成本现值对比分析表

情景	养护活动与时序	总成本现值 (PV)	节约成本现值	节约比例
情景 A	第10年：大修	约1.27亿元	(基准)	-
情景 B	第5年：预防 第12年：预防 第18年：大修	约1.08亿元	约0.19亿元	~15%

参考文献

[1] 刘宁. 高速公路沥青路面预防性养护决策支持系统优化设计 [C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集（三）. 山东惠民腾达交通工程有限公司, 2025:567–570.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.017074.
[2] 李海莲, 江晶晶, 李清华, 等. 基于云模型-改进证据理论的沥青路面预防性养护评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(06):773–781.DOI:10.13885/j.issn.0455-2059.2024.06.009.
[3] 滕玮. 基于层次分析法的高速公路沥青路面预防性养护决策模型[J]. 散装水泥, 2024, (05):50–52.
[4] 杨洋. 公路路面使用性能评价及预防性养护决策体系的研究与应用[J]. 四川水泥, 2024, (09):172–174+198.DOI:10.20198/j.cnki.scen.2024.09.011.
[5] 赵全满, 刘朝晖, 姚向发, 等. 基于层次分析法的高速公路沥青路面预防性养护决策模型[J]. 公路, 2023, 68(09):381–387.
[6] 吴建强. 公路路面养护决策与规划[J]. 交通世界, 2022, (25):82–84.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2022.25.053.
[7] 高东升. 高等级公路预防性养护综合决策方法研究[J]. 山西交通科技, 2022, (04):27–29.
[8] 唐子坤. 公路路面养护技术的现状及应用研究[J]. 运输经理世界, 2021, (04):120–121.

结果说明：以上为模拟数据，但计算逻辑和量级关系符合工程实际。

模拟结果显示，在20年分析期内，采用数据驱动的预防性养护策略（情景 B）可节省约15%的全生命周期成本现值。这一节约源于两次低成本预防性养护成功替代了一次昂贵的小修，并显著延迟了第二次大修的时间。LCCA 分析表明，“今天花小钱”比“明天花大钱”更具经济优势，将大笔资金推迟投入，可使资金用于其他投资或产生利息，进一步降低总成本。此外，该策略还带来了难以量化的隐性效益：预防性养护施工迅速、交通干扰小，减少了因长期封闭施工导致的用户延误、车辆损耗和交通事故等社会成本；始终保持路面良好服务状态，避免性能大起大落，提升了公众出行体验和物流效率；养护资金分配也从“撒胡椒面”变为“精准滴灌”，提高了公共财政资金的使用效率和透明度。综上所述，基于非现场执法数据的预防性养护决策模型不仅在技术理论上可行，更在经济上具有显著优越性，是一种实现管理效益与经济效益双赢的先进策略。

五、结束语

本研究系统阐述了如何将治超非现场执法数据创新性地应用于公路预防性养护决策。研究证实，该数据能精准量化荷载这一导致路面损坏的核心因素，为识别养护重点路段提供了前所未有的洞察力。基于此构建的“数据-分析-决策”模型，能够输出科学的养护优先级、最佳时机和措施建议，实现了从经验驱动到数据驱动的转变。全生命周期成本分析表明，该模式通过“治小病防大病”，可节约约15%的养护成本现值，并带来减少交通干扰等显著社会效益，具备显著的经济性与实用性^[8]。

然而，本研究仍存在一定局限性。模型的预测精度依赖于历史数据的积累与质量，在新建路段或数据不全区域的适用性有待进一步验证。此外，研究侧重于理论与模型构建，其大规模应用效果仍需更多工程实践来校准与优化。展望未来，研究可向两个方向深入：一是与人工智能技术深度融合，利用机器学习算法提升预测与决策的自动化、智能化水平；二是拓展多源数据融合，结合气象、无人机巡检等数据，构建更为全面的“数字孪生”道路系统，最终实现公路养护决策的精准化与智慧化。