数字化养护技术在高速公路中的应用研究

张 艺
江苏现代路桥有限责任公司，江苏 南京 210000

[摘要]高速公路养护数字化转型，由原来的引入技术工具进入到现在的数据链路是否可以形成可信闭环的考验期。从基础数据、信息协同、病害识别和养护决策这四个角度来考察，造成数字化养护效能不高的原因，并不是某项技术的成熟程度所导致的，而是采集端更新机制与标准口径相脱离、平台端业务语义相割裂、识别端受控精度与现场可用性存在差距、决策端预测能力与计划流程之间存在制度空隙。优化应该按照决策需求配置采集能力、标准先行贯通业务语义、以现场一致性验收识别能力、以性能轨迹干预替代病害清单响应的顺序进行，使数字化养护由有系统变为闭环。

[关键词]高速公路；数字化养护；数据采集；病害识别；养护决策
DOI：10.33142/sca.v9i10.20615 中图分类号：U418.4 文献标识码：A

Research on the Application of Digital Maintenance Technology in Highways

ZHANG Yi
Jiangsu Xiandai Road and Bridge Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: The digital transformation of highway maintenance has entered a testing period of whether the data link can form a trustworthy closed loop, from the original introduction of technical tools. From the perspectives of basic data, information collaboration, disease identification, and maintenance decision-making, the reason for the low efficiency of digital maintenance is not due to the maturity of a certain technology, but rather the disconnection between the update mechanism at the collection end and the standard caliber, the disconnection of business semantics at the platform end, the gap between the controlled accuracy at the recognition end and on-site availability, and the institutional gap between the predictive ability at the decision-making end and the planning process. Optimization should be carried out in the order of configuring collection capabilities according to decision requirements, integrating business semantics through standards, identifying capabilities through on-site consistency acceptance, and intervening with performance trajectories instead of responding to disease lists, so as to transform digital maintenance from a systematic system to a closed-loop system.

Keywords: highways; digital maintenance; data collection; disease identification; maintenance decision

引言

我国公路网规模位居世界前列，路网发展重心由大规模增量建设向存量提质转变，养护因此成为公路高质量发展的核心问题。养护的本质就是在性能衰减到不可接受之前施加适当的干预，由于这个特点，养护决策对于信息的时效性、精确度要求比新建工程高得多。数据滞后一步，早期干预的窗口就可能会被关上；精度不够，资金就会被投入到并不迫切的路段上。数字化技术之所以被寄予厚望，是因为它有希望把决策从经验判断推到数据驱动。但是无人机、AI 识别、三维建模等工具相继进入养护领域，却没有随之带来养护效益的同步提高。以下按照养护特点、问题成因和优化策略的顺序进行论述，主要研究数据链条各个部分的断裂以及如何弥合，而不是只列举技术手段本身。

1 高速公路养护工作特点

高速公路养护的首要特点就是预防性导向，它的主要目的并不是在病害发生之后再进行修复，而是要对性能衰减的早期趋势进行识别，并采取干预措施。该逻辑对于数据的时间分辨率有更高的要求，路面性能数据的更新周期一般以年为单位，早期干预的窗口在下一个检测周期到来之前就关闭了。第二个特征就是对象上的异质性以及空间上网络化的特征。一条管养路段上可以有沥青路面、水泥混凝土桥面、隧道衬砌、边坡、交安设施等，各个对象的劣化机理、检测方法、养护工艺存在较大差别，数字化系

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

统必须能够处理各种各样的异构数据，不能将其简单地变成统一的表格字段。第三个特征就是决策的多目标约束。养护资金有限，路面性能、行车安全、全寿命周期成本、碳排放等目标互相制约，决策不仅要回答“修什么”，还要回答“什么时候修、修到什么程度”。可持续公路维护存在性能预测和多目标优化两个问题，其根本原因是气候-交通劣化耦合效应以及全寿命周期排放缺口还没有被很好地量化。因此，数字化养护不是单纯的“上系统”问题，而是数据治理和决策建模并重的系统工程。

2 高速公路数字化养护应用中存在的问题

2.1 基础数据采集与更新不及时

基础数据采集和更新是数字化链条的开端，也是目前最薄弱的环节。目前公路智慧养护信息化建设存在的主要问题就是系统单独建设、标准规范不一，缺少统一的数据标准体系。采集频率和决策需求之间的差距也很大，路面性能检测一般按季度或者年度进行，桥梁结构监测虽然可以实时采集但是覆盖对象较少，交安设施和边坡的状况大多依靠巡查发现而不是系统采集。数据更新不及时的直接后果就是平台上的“现状”实际上只是历史状态的快照，由此而产生的养护计划在时间上就出现了滞后现象。更深层次的问题就是标准和追溯机制，数据来源、采集时间、采集设备、质量校验记录等元数据如果不能和数据一起入库，那么以后的决策就无法判断每一条记录的可信度和时效性；不同的来源、不同的时期的数据在编码规则、语义定义上没有一致性，即使汇入同一个数据库，也无法在路段、构件、病害类型之间建立起可以追溯的联系。表 1 整理出主要数据类别在采集、更新过程中的结构缺陷。

表 1 高速公路养护基础数据采集与更新的主要短板

数据类别	主要采集方式	更新频率特征	常见问题	动态管理方向
路面技术状况	检测车、轻量化巡查	周期性检测为主	滞后于病害发展，格式不一	统一编码，检测与巡查融合更新
桥梁隧道结构	人工检查、健康监测	定期检查周期长，监测覆盖有限	多源数据未与构件编码对齐	构建结构健康档案，监测与检查关联
边坡与路基	无人机、人工巡查	事件驱动为主	覆盖不全，影像与桩号匹配粗放	三维实景与管养桩号精准匹配
交安与服务设施	巡查、视频、移动终端	上报及时性依赖人工	信息碎片化，闭环记录缺失	移动端即时采集与工单闭环

2.2 养护信息共享与协同不足

信息共享不足一般被归结为系统没有打通，但是更准确的诊断是业务语义的贯通还没有实现。现有的系统同数据标准相脱离，造成数据孤岛现象严重，影响智慧公路全生命周期协同治理和智能应用。接口虽然存在，但是接口所能够传递的只是表层字段，并不能传递病害和构件、工单和路段之间的语义关系。检测单位提交的记录不能自动转为工单候选，养护计划和交通组织信息之间没有联动，同一路段在相近时间内的多次作业难以合并安排[1]。标准层面的进展已经出现，统一数据接口规范、事件分类编码和数据质量标准，使信息采集、处理和上报环节同源同标同频，正在成为跨区域协同的基础，但是标准从发布到嵌入已有系统之间存在着很长的适配期。共享的本质不是使所有的主体都能看到一样的图，而是每次养护行为都是下一次决策的结构化输入。信息在系统之间“可见”但“不可用”，协同就只能退回到人工转录和协调。

2.3 病害识别与评估精度有待提高

病害识别是数字化养护技术更新速度最快的一环，也是精度问题最易被误读的一环。在可控的条件下，深度学习模型已经相当不错了，改进后的 YOLOv8 在高速公路上可以达到测试 mAP@0.5 为 0.790、PCI 计算误差小于 4%、14.57 公里路段的评估时间不到十分钟的效果。但是问题在于，这些指标对应的是养护现场的工况，和现场存在系统的差距。光照变化、路面纹理、阴影遮挡、雨雾天气和病害类别长尾分布都会造成模型在现场条件下精度下降。更重要的是评价口径要加以审视，分类准确率并不能代表定位的精确度，检出率不能代表严重程度的可靠程度。一条被正确识别为裂缝的病害，如果宽度、走向的量化误差太大，那么根据这些数据计算出来的 PCI 和养护等级就有可能与实际情况不符。识别能力的验收标准应该由测试集分数转变为现场一致性，即评价结论是否能被养护工程师现场判断，而不是在典型路段上重复论文中给出的指标。

2.4 养护决策的智能化水平不足

养护决策的智能化程度不高，第一，表现在决策颗粒度同资金调配精确度之间存在不匹配状况。传统的决策大多只停留在路段级或者公里级，养护资金的效益一般是由百米级的差异化处理来决定的。已有研究把决策颗粒度细化到百米单元，时空约束的 Transformer 模型在十年历史性能数据上得到测试 R^2 为 0.85 的养护响应预测精度，多目标粒子群优化在经济策略下可以达到 52.8%的成本节约，生态约束场景下排放降低 72.5%。由此可以看出精细决策的技术可行性是存在的，但是它的实现需要前三个环节即数据、平台、识别的共同支持，而大部分管养单位还

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

没有达到这样的条件。第二，目前养护计划缺少对将来趋势的预测能力以及面向目标的施工方案生成能力，决策模型对于气候—交通耦合劣化刻画还停留在统计拟合层面，对于养护措施效果的反事实估计还没有成熟。第三，决策的智能化很容易被窄化为算法的选择，而忽略输出和年度计划、预算科目、工单排程之间的制度衔接[2]。一个可以产生优化方案的模型，如果它的输出不能嵌入养护计划的编制流程和资金约束框架中，那么它就只是一份技术报告，而不是决策工具。

3 数字化养护技术在高速公路中的应用策略

3.1 完善基础数据采集与动态管理

数据采集的改进要由原来的“提升采集频率”变成“根据决策需求来决定采集能力”。路面病害的发展是以月为单位，桥梁结构的突变是以秒为单位，交安设施的状态变化和事件高度耦合。因此路面检测可以形成一个周期性的框架，但是应该用轻量化的巡查高频数据来补充，在检测间隔内捕捉病害的加速迹象；桥梁监测应先覆盖重要结构，并且要和定期检查在构件层面关联起来；边坡可以用无人机和三维实景相结合的方式，使影像证据直接对应到养护单元上。动态管理的关键就是形成数据和养护对象之间的稳定映射。元数据管理上确定全周期元数据单元划分规则，创建勘察设计、施工建设、养护管理、运营管理等全周期数据传递交互机制，这是实现不同时间、不同来源数据在同一个构件标识下叠加的前提。更新方式应该由原来的“全量重采”变为现在的“差异更新”，即只对发生变化的构件进行更新，不变的构件保留记录并标注时效状态，在保证数据新鲜度的同时降低采集成本。采集能力的配置要和管养单位实际检测资源相匹配，不能用高频采集的名义造成大量低质量数据的堆积。

3.2 建立养护信息共享平台

共享平台的创建要将标准先行作为技术路线的一部分，而不能等到系统建成之后再进行标准化的改造。创建集成化的数字底座以及统一的数据标准，成了解决行业瓶颈的主要途径。标准接口所包含的内容必须有病害分类、构件编码、工单状态、处置结果等业务语义，不能只是传输协议。平台功能设计要以发现、派单、处置、复核、归档的闭环为主线，使检测记录可以产生工单候选、工单执行状态可以回写到路段养护历史中，每一次养护行为都是下一次决策的结构化输入。共享的价值不是各个主体看到同一个界面，而是使协同由“人工转录”变为可以衡量的目标，即检测报告中哪些字段可以直接进入工单而不需要二次录入，养护历史中哪些记录可以在下一个检测周期被自动调用，这些指标比系统是否“互联”更能体现共享的实际水平[3]。平台架构应采用云模式，把数据治理同业务应用分开，给各个来源的系统赋予可扩展的接入能力，并且依靠权限分级来保证跨主体的数据交换安全边界。

3.3 提升道路病害识别与评估能力

识别能力的提高应该用现场可用而不是单一准确率来作为验收标准，这本身就说明了评价体系的重心应该从模型在测试集上的表现转移到模型在现场实际产出的质量上。从技术路线来看，边缘端做实时初识别来保证现场预警的即时性，云端做多源融合和二次识别来校正边缘端的误判和漏判，这样既解决了识别精度和传输带宽之间的矛盾，又使得巡检车辆在行驶过程中就可以完成病害的初步筛查和定位。轻量化模型在边缘设备上的推理延迟小于27ms/图，达到37.03FPS，车载巡检中可以立即做出判断，巡检人员不需要等数据回传就可以现场对疑似病害进行标记和复核。在评估方面，要将识别出来的输出由类别标签变为可以计算的量化描述，使宽度、面积、走向、严重程度等能够按照评定标准自动转换成养护指标，而不能在检测出来之后还要人工逐条复核严重程度，否则识别的效率优势就会被人工确认的工作量所抵消。对长尾工况下精度衰减要建立疑难样本的回流机制，把现场误判、漏判的样本加入到再训练当中去，让模型依靠实际运行中得到的反馈不断更新，而不是把一次训练的模型固定成长期的标准。最终检验标准不是测试集上的分数，而是评估结论和养护工程师现场判断之间的一致性；一致性未达到可接受水平之前，识别结果在决策链条中只能承担筛查和提示功能，不能替代人工确认，更不能直接作为养护等级评定和资金分配的依据。

3.4 优化养护决策与养护计划制定

决策优化的方向就是把养护计划由原来的“病害清单响应”变为现在的“性能轨迹干预”，这就需要模型有预测能力和多目标权衡能力。预测侧要将交通荷载、气候作用、历史养护记录放在同一个框架里，使得不同的干预时机下衰减路径可以比较，优化侧的决策变量要包含维修时机、措施类型以及资金在路段上的分配，经济性、效率和碳排放等目标要在经济密集型、效率均衡型和生态约束型场景中得到显式权衡，而不是把多目标压缩成一个加权标量。时空约束模型同多目标优化相结合之后，在百米单元里便有可能产生帕累托最优方案，但是从优化结果到计划可信还需要把施工风险、交通影响以及预算约束纳入模型[4]。决策颗粒度细化要以数据支撑能力为限，在数据基础较好的路段推进百米级决策，在薄弱路段保持路段级并

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

明确其不确定性，防止用精细的格式包装粗糙的输入。更关键的是，决策输出要同年度养护计划的编制过程以及预算科目相衔接，让优化方案得以进入到资金安排和工单排程当中去，而不能只是停留在分析报告里。决策的智能化最直接的体现就是养护行为的改变，而不是算法复杂度的提高。

4 结语

高速公路数字化养护的瓶颈，并不是缺少了无人机、AI 识别或者数字孪生这些手段，而是数据从采集到决策的链条还没有形成可信的闭环。采集端标准缺失造成平台无从获取，平台端语义割裂使信息可看不可用，识别端受控精度在实际使用中被削弱，决策端由于预测能力与制度衔接的欠缺而不能把数据转化为行为改变。优化的着力点应该放在按照决策需求配置采集能力所建立的时效和映射关系、标准先行所承载的业务语义贯通、以现场一致性验收识别能力，以及将预测和多目标优化嵌入到计划流程之中。数字化养护成熟与否，并不是看系统功能有多少，而是看养护决策是否可以依靠数据在恰当的时间对恰当的构件做出恰当的干预。

[参考文献]

[1]薛峰.数字化技术在高速公路工程施工质量与安全管理中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2026(4):113-115.
[2]司吉兵,韩磊.数字化技术在合枞高速公路工程中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(24):131-135.
[3]王磊.探究数字化技术在高速公路勘察设计中的应用[J].黑龙江交通科技,2017,40(9):70-72.
[4]汪马良.数字化技术赋能高速公路养护工区创新管理模式研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(11):167-169.

作者简介：张艺（1989—），女，江苏南京人，助理工程师，南京金陵科技学院会计学专业毕业，现就职于江苏现代路桥有限责任公司，从事高速公路施工及养护工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.