

# Digital Twin Empowers the Intelligent Transformation of National and Provincial Roads: Practices and Insights from Quzhou's National Highway 315

Hanzhong Lin Yajie Wu Chunhua Zhu Xiang Lin Wei Li

Quzhou Traffic Design Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

## Abstract

With the deepening implementation of the strategy to build a strong transportation nation, the intelligent transformation of national and provincial roads has become a key path to improving the efficiency of road networks and ensuring traffic safety. This paper takes the intelligent reconstruction project of National Highway 315 in Quzhou City, Zhejiang Province, as the research subject, systematically illustrating the practical application of digital twin technology in the project. The paper first constructs a road digital twin system covering a four-layer architecture of 'physical entities, data resources, model services, and application interactions,' and then focuses on analyzing the implementation path and effectiveness of this system in two core scenarios: full-lifecycle maintenance of road infrastructure and intelligent traffic operation management. Empirical evidence from National Highway 315 in Quzhou shows that digital twin technology can achieve real-time perception of road conditions, precise diagnosis of road defects, simulation optimization of traffic flow, and predictive testing of control strategies, providing scientific decision support for highway asset management. Finally, the paper summarizes the experiences and challenges encountered in practice and discusses the prospects for the large-scale application of digital twin technology in general national and provincial road networks, aiming to provide reference for similar projects.

## Keywords

digital twin; smart highway; national and provincial road transformation; maintenance decision-making; traffic management

## 数字孪生赋能国省道智慧化转型：衢州 315 国道的实践与启示

林汉忠 吴亚杰 祝春华 林祥 李炜

衢州市交通设计有限公司，中国·浙江 衢州 324000

## 摘要

随着交通强国战略的深入推进，国省道的智慧化转型成为提升路网效能、保障交通安全的关键路径。本文以浙江省衢州市 315 国道智慧化改造项目为研究对象，系统阐述数字孪生技术在该项目中的实践应用。论文首先构建了涵盖“物理实体、数据资源、模型服务、应用交互”四层架构的道路数字孪生体系，进而重点分析了该体系在道路基础设施全生命周期养护与交通运营智能化管控两大核心场景中的实施路径与效能。通过衢州 315 国道的实证表明，数字孪生技术能够实现道路状态的实时感知、病害的精准诊断、交通流的仿真优化与管控策略的模拟推演，为公路资产管理提供了科学的决策支持。最后，本文总结了实践中的经验与挑战，并对数字孪生技术在普通国省道网络的规模化应用前景进行了展望，以期同类项目的建设提供参考。

## 关键词

数字孪生；智慧公路；国省道转型；养护决策；交通管控

## 1 引言

随着交通强国战略的深入实施和数字交通“十四五”规划的全面推进，交通基础设施的智慧化转型已成为提升路网运行效能、保障交通安全的关键路径。普通国省道作为我

国公路网的重要组成部分，具有路网规模大、服务范围广、交通构成复杂等特点，但长期面临管养资金紧张、管理手段落后、决策科学性不足等问题。传统的“人工巡查+经验决策”管理模式已难以适应现代化治理需求，亟需运用新一代信息技术实现精细化管理与智能化运营。数字孪生技术作为物理世界与数字世界融合的关键技术，通过构建物理实体的高保真虚拟映射，实现对物理对象的实时监测、仿真分析与优化决策，为破解国省道管理难题提供了新思路。然而，现有研

【作者简介】林汉忠（1979-），本科，高级工程师，主要从事路桥工程，智慧交通工程的设计与研究工作。

究多聚焦于高速公路或城市道路，针对普通国省道的系统性实践案例相对匮乏，其数字孪生体系的构建路径、核心应用场景及实施效果尚需深入探索。浙江省衢州市 315 国道智慧化改造项目作为国省道数字孪生技术应用的先行探索，通过构建“物理实体-数据资源-模型服务-应用交互”四层架构体系，在道路养护决策与交通运营管控等关键场景取得了显著成效。

## 2 衢州 315 国道数字孪生体系构建

衢州 315 国道智慧化项目的数字孪生体系采用“物理实体—数据资源—模型服务—应用交互”四层架构设计，实现物理道路与虚拟道路的实时映射与协同。

物理实体层包括道路本体（路面、路基、边坡、排水系统）、交通设施（标志标线、护栏、信号灯）以及新建的智能感知设备。项目在关键路段部署了高清摄像头、毫米波雷达、路面状态传感器、气象监测站等物联网设备，构建起覆盖全线的感知网络，实现对路面状态、交通流量、气象条件等多维信息的实时采集。

数据资源层负责对多源异构数据进行统一汇聚、清洗与存储。该层整合了设计图纸、竣工资料、养护记录等静态数据，以及传感器实时采集的动态数据，建立了标准化的道路资产数据库。通过数据融合技术，将 BIM 模型数据、GIS 地理信息数据、实时监测数据进行关联，形成了时空一体化的数据底座。

模型服务层是数字孪生的核心，包含三维可视化模型、路面性能预测模型、交通流仿真模型等。基于激光点云扫描与倾斜摄影技术，项目构建了精度达厘米级的道路三维实景模型。路面性能预测模型采用机器学习算法，通过历史养护数据训练，可预测未来 3-5 年内路面性能指数（PCI）的衰减趋势。交通流仿真模型则基于微观交通仿真软件，能够模拟不同管控方案下的交通运行状态。

应用交互层面向养护、路政、交管等不同业务部门，开发了可视化决策支持平台。平台提供病害智能识别、养护方案优化、交通态势研判、应急指挥调度等功能模块，通过直观的三维界面实现人机交互。

## 3 数字孪生在道路养护决策中的应用与实践

传统的道路养护模式依赖人工巡查与经验判断，存在效率低、滞后性强、决策主观等弊端。数字孪生技术的引入为预防性养护提供了科学依据。

在衢州 315 国道项目中，部署在路面的压电传感器与图像采集设备能够实时监测路面裂缝、车辙、坑槽等病害信息。系统采用深度学习的图像识别算法，自动识别病害类型与严重程度，识别准确率达 92% 以上。当检测到病害指标超过阈值时，系统自动触发预警，并在三维模型上精准定位病害位置，生成包含病害类型、面积、严重程度的电子工单，推送至养护人员移动终端。

更重要的是，系统基于历史养护数据与路面性能衰减模型，能够预测未来路段的养护需求。通过输入交通荷载、气候条件、材料参数等影响因素，模型可计算出每个路段的 PCI 预测曲线。养护管理部门据此制定年度养护计划，将有限的养护资金优先投入到性能衰减快、交通量大的关键路段，实现从“被动抢修”向“主动预防”的转变。

项目实施后的数据显示，与传统巡查模式相比，病害发现时间缩短了 65%，巡查人力成本降低了 40%。通过科学的养护决策，路面优良率从 82% 提升至 91%，全生命周期养护成本预计降低 18%。

## 4 数字孪生在交通运营管控中的应用与实践

交通拥堵与事故频发是国省道运营管理的突出痛点。衢州 315 国道穿越城区路段，有多个平面交叉口，高峰时段交通压力大。数字孪生技术在交通管控中的应用主要体现在仿真推演与优化决策两方面。

首先，项目构建了关键路口的数字孪生模型，包括路口几何参数、信号相位、车道功能等详细信息。通过雷达与视频检测器，系统实时采集各流向的交通流量、速度、排队长度等数据，并在虚拟模型中动态呈现。管理人员可通过三维界面直观观察路口运行状态，及时发现拥堵点。

其次，在信号配时优化方面，系统利用交通流仿真模型进行方案推演。传统的信号配时调整往往需要实地试验，存在风险高、成本大的问题。而数字孪生平台可在虚拟环境中模拟不同配时方案的效果，评估各方案下的平均延误、排队长度、通行能力等指标。管理人员通过多方案对比，选择最优配时方案后再下发至实际路口执行，大幅降低了调整试错成本。

在应急管理场景中，当发生交通事故或道路施工时，系统可快速模拟不同交通组织方案的影响范围与绕行路线效果，为应急指挥提供决策支持。例如，某次道路维修需占用一条车道，系统通过仿真发现该方案将导致上游路段拥堵蔓延 2 公里，管理部门据此调整了施工时段与交通疏导方案，有效避免了大范围拥堵。

实施数字孪生交通管控后，项目关键路口的平均通行时间缩短了 22%，高峰期拥堵时长减少了 35%，应急事件响应时间从平均 25 分钟降至 12 分钟。

## 5 实践成效、挑战与启示

### 5.1 实践成效分析

衢州 315 国道数字孪生项目的实施取得了显著成效。量化指标方面：养护巡查成本降低 40%；路面病害发现与处置效率提升 65%；关键路口平均通行时间缩短 22%；应急事件响应时间减少 52%；路面优良率从 82% 提升至 91%。定性效益方面：管理决策由经验驱动转向数据驱动，科学性与前瞻性显著提升；实现了道路资产的全生命周期数字化管理，资产账目清晰可查；跨部门信息共享机制初步建立，协

同效率提高。

## 5.2 面临的挑战与思考

尽管衢州 315 国道数字孪生项目取得了显著成效，但在具体实施过程中，仍遭遇了诸多亟待解决的挑战。首当其冲的是初始投入成本居高不下。在项目推进时，传感器的大规模部署、精细三维建模以及综合性平台开发等环节，都需要巨额的一次性资金投入。经测算，这部分成本约为传统方案的 1.8 倍。对于预算本就紧张的国省道项目而言，如此高昂的成本无疑带来了沉重的资金压力，限制了项目的快速铺开与深度拓展。数据质量与标准化问题也不容忽视。项目涉及的多源异构数据来源广泛、类型多样，数据格式难以统一，质量更是良莠不齐。这种混乱的数据状况，严重影响了数字孪生体的可靠性与稳定性，使得基于这些数据构建的模型和应用难以精准运行。因此，建立一套统一、完善的数据标准与严格的质量管控机制迫在眉睫。模型精度方面也存在提升空间。路面性能预测、交通流仿真等关键模型，需要依靠大量真实的运营数据进行持续训练和校准。然而在项目初期，由于可用的真实数据有限，模型的精度难以达到理想水平，这在一定程度上影响了项目决策的科学性和精准性。

此外，跨部门协同障碍也是项目推进的一大难题。养护、路政、交管等部门的业务系统相对独立，数据难以实现有效共享，业务协同更是困难重重，导致项目在整个推进过程中效率低下，无法形成强大的工作合力。

## 5.3 对普通国省道智慧化转型的深刻启示

衢州 315 国道在智慧化建设方面的成功实践，犹如一盏明灯，为众多同类项目照亮了前行的道路，带来了极为宝贵的启示。其一，做好顶层设计是关键前提。在项目启动建设之前，必须精准明确业务需求与目标。智慧化建设绝不能陷入为技术而技术的误区，要让数字孪生等先进技术紧密围绕实际业务痛点发力，真正做到有的放矢，为解决实际问题服务。其二，实施过程应循序渐进、分步推进。不必追求一步到位，可从关键路段、核心问题切入，优先搭建基础框架。待基础稳固后，再依据实际需求逐步丰富应用场景。如此一来，既能有效降低一次性投资带来的巨大压力，又能确保项目稳步推进。其三，重视标准与数据的基础性作用。数据标准和数据治理工作不容忽视，它们是智慧化建设的基石。只有制定科学合理的数据标准，并做好数据治理，才能保证数据的质量，为后续的智慧化应用提供可靠支撑。其四，推动业务与技术的深度融合。技术团队不能闭门造车，必须深入理解公路业务逻辑，与业务部门紧密协作。只有双方携手共进，才能开发出贴合实际需求、真正实用的应用。其五，注重全生命周期经济性评估。尽管智慧化建设初期投资较大，但从长远来看，通过降低养护成本、延长路面使用寿命、提

升运营效率等方式，能够带来良好的经济效益，实现可持续发展。

## 6 结语

本文以衢州 315 国道工程实践为依据，得出核心结论：数字孪生技术是驱动普通国省道达成“感知—诊断—预测—决策”闭环管理、实现智慧化转型的有效路径，可突破传统管养模式局限，为道路基础设施科学决策提供有力技术支撑。展望未来，该技术在国省道的应用将迈向更深层次，一方面会与成熟的车路协同（V2X）及自动驾驶技术结合，实现车路协同精准感知与智能决策；另一方面，随着人工智能技术发展，系统自主学习与决策能力将增强，从辅助决策迈向自主优化。此外，从“一条路”的数字孪生拓展至“一张网”的数字孪生，构建区域级、网络化的公路数字孪生体系，实现路网协同管控与资源优化配置，将成为未来智慧公路发展的重要方向。

## 参考文献

- [1] 陶飞,刘蔚然,刘检华,刘晓军,刘强,屈挺,胡天亮,张执南,向峰,徐文君,王军强,张映锋,刘振宇,李浩,程江峰,戚庆林,张萌,张贺,隋芳媛,何立荣,易旺民,程辉.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [2] 数字交通“十四五”发展规划出炉[J].河南科技,2021,40(36):1-1.
- [3] 张玉玲,浦亮,阮丽雅,王会.高速公路养护期收费制度的思考[J].中国公路,2024(4):14-17.
- [4] 沈国焱,周栓科,尹光明,刘武,吕若丹,张茜.基于BIM+GIS的高速公路基础设施数字化基础平台研究[J].价值工程,2025,44(1):46-49.
- [5] 黄杰.公路管养数字孪生系统设计与关键技术研究[J].建筑机械,2023(6):28-34.
- [6] 刘永奎,杨康,脱奔奔,潘亚铎,王欣宇,王一涵,龚永乾,张霖,王力群,林廷宇,訾斌,李元,游玮,徐旬.数字孪生工业机器人:概念框架、关键技术与案例研究[J].系统仿真学报,2025,37(7):1723-1752.
- [7] 卢俊宏,袁万里.基于点云和全景影像的道路全要素模型构建技术研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(1):173-175+179.
- [8] 翟越,赵腾,雷尚学,王会峰,杨永明,张韵生.融合数字孪生技术的桥梁结构安全风险监测与预测方法[J].安全与环境学报,2025,25(8):3069-3079.
- [9] 郑飞,邓庆龙,李芷,王培瑞,靳陆,焦玉勇.分段黏结非连续变形分析方法及其在砂岩破裂分析中的应用[J].煤炭学报,2023,48(9):3372-3383.
- [10] 林东,郑俊杰,薛鹏鹏,李子骞,彭荣华.基于贝叶斯方法的软土深基坑不确定性位移反演分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):52-60.