

数据驱动的道路智能设计方法研究

赵桥 陈红智 孙婧婷 耿晋刚 席启凯 叶和林
中铁二十二局集团第五工程有限公司, 重庆 400711

[摘要]在当前城市化快速发展的背景下,传统道路设计面临着诸多挑战,包括交通拥堵、资源浪费和环境污染等问题。大数据技术的迅猛发展为解决这些问题提供了新的解决方案。智慧道路设计依赖于大数据的实时采集和分析,这些数据来自交通流量、气候条件、道路使用情况等多个方面。通过对这些数据的深入挖掘,可以实现道路设计的精细化和个性化,预测和解决潜在的交通瓶颈,优化资源配置和施工方案,从而提高道路的安全性、通行能力和耐久性。通过案例归纳与路径梳理,总结出一套适应未来道路建设需求的智能化设计管理优化策略,旨在为行业数字化转型提供理论支持与实践参考。

[关键词]道路工程; 智慧道路; 数据驱动; 智能设计; 大数据

DOI: 10.33142/sca.v8i9.17955

中图分类号: TU472

文献标识码: A

Research on Data-driven Road Intelligent Design Method

ZHAO Qiao, CHEN Hongzhi, SUN Jingpin, GENG Jingang, XI Qikai, YE Helin

Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway 22nd Bureau Group Corporation Limited, Chongqing, 400711, China

Abstract: Against the backdrop of rapid urbanization, traditional road design faces many challenges, including traffic congestion, resource waste, and environmental pollution. The rapid development of big data technology provides new solutions to address these issues. Smart road design relies on real-time collection and analysis of big data, which comes from multiple aspects such as traffic flow, climate conditions, and road usage. Through in-depth mining of these data, road design can be refined and personalized, potential traffic bottlenecks can be predicted and resolved, resource allocation and construction plans can be optimized, thereby improving road safety, traffic capacity and durability. Through case studies and path analysis, a set of intelligent design management optimization strategies that meet the needs of future road construction has been summarized, aiming to provide theoretical support and practical reference for the digital transformation of the industry.

Keywords: road engineering; the path of wisdom; data-driven; intelligent design; big data

引言

道路基础设施作为城市运行与区域发展的关键支撑,其设计管理水平直接关系到项目质量、投资控制与运营效率。在传统管理模式下,道路设计多依赖于人工经验与静态图纸,不同专业间信息割裂,数据更新滞后,难以支撑复杂环境下的高效决策与系统协同。近年来,随着人工智能、建筑信息模型(BIM)、遥感测绘、自动化算法等智能化技术的快速演进,工程设计管理正逐步从“经验导向”迈向“数据驱动”。道路设计作为一个多专业协同、高精度建模、强依赖环境数据的复杂系统,其与智能技术的深度融合已成为不可逆的趋势。当前,不少公路、快速路与城市干道项目已开始试点引入智能测量、AI辅助选线、三维建模平台等技术手段,在提升方案科学性、优化流程协同与推动成果集成化方面初见成效。然而,整体应用仍

处于起步阶段,尚存在技术标准分散、平台集成性不足、应用流程碎片化等现实问题。在此背景下,系统梳理智能化技术在道路设计管理中的应用路径,总结其成效与瓶颈,提出具有工程可行性的优化策略,对于推动道路工程数字化管理能力提升具有重要意义。

1 智能化技术概述与道路设计转型背景

1.1 智能化技术的构成与发展路径

智能化技术是信息技术与工程领域深度融合的产物,核心涵盖人工智能、建筑信息模型(BIM)、地理信息系统(GIS)、遥感测绘、大数据、云计算与物联网等多个分支。在基础设施领域,其应用特征呈现出平台化、多源数据集成、自动化处理与持续优化等趋势。人工智能主要通过机器学习算法与规则引擎参与路径规划、地形分析与优化设计判断,BIM则提供三维参数模型作为信息载体,

承载设计构造逻辑与各专业协同数据。GIS 和遥感技术构成基础数据采集体系,实现对地形、交通、环境、水文等空间信息的快速建模与更新。大数据与云计算平台则提供强大的计算支撑与跨区域协同环境,使设计过程突破了传统的文件型管理方式,转向实时计算与远程交互的管理模式。随着政策导向加强和工程实践推进,智能化技术已从早期的工具辅助阶段向管理主导型系统演进。一方面,各类专业设计软件逐步开放接口,支持数据互联、模型联动与成果自动生成,推动设计环节的自动化与智能化;另一方面,设计单位开始搭建属于自身的工程数据中台与集成平台,实现从原始数据采集、初设方案生成、施工图深化到交付模型管理的全链路打通。这种由技术驱动的流程再造,使得智能化不再只是提高某一环节效率的工具,而成为支撑工程决策、方案推演与资源统筹的核心引擎。

1.2 道路设计管理的传统局限与数字转型需求

传统道路设计流程以人工绘图、纸质图纸与分专业设计为主线,工作方式较为线性,各工种之间的沟通与交底依赖线下会议与文档传阅,不仅信息流通慢、易错漏,而且无法形成集中、可追踪、可更新的协同数据体系。在项目早期,路线选线往往依赖经验判断,缺乏系统的环境适应性评估与行车效率模拟;在方案设计阶段,不同专业之间由于缺乏统一数据平台,常出现构造冲突、图纸不一致或反复调整,影响整体设计周期与质量控制;在施工图编制环节,二维图形难以完整表达空间逻辑,现场技术人员对构造意图理解不一,容易出现实施误差。整个设计过程缺乏数据沉淀能力,一旦交付,后续施工与运维阶段难以复用原始设计数据,导致重复建模、重复测量甚至重复设计。在工程项目日益大型化、复杂化的背景下,传统管理方式暴露出响应速度慢、流程弹性差、风险控制薄弱等突出问题。尤其是在山区道路、城市快速通道、地下综合管廊等结构复杂、施工难度高的项目中,设计与现实之间的脱节现象尤为明显,亟需一种能够实现空间表达精细、协同逻辑清晰、数据持续传导的数字化管理体系。智能化技术的兴起,正为这种转型提供了工具基础与方法路径。通过构建多维数据模型、集成专业成果并赋予其逻辑关系,设计管理者能够对方案进行动态调度、自动校核与实时迭代,从而实现从“图纸管理”到“数据管理”的深层转变,为道路设计的精细化、标准化与协同化奠定技术基础

2 数据驱动的道路智能设计方法

2.1 数据采集与预处理

数据采集与预处理作为道路智能设计方法的基石,直接影响后续分析的准确性和模型的可靠性。本研究基于多

源异构数据构建数据集,通过系统化采集与科学化处理,为道路设计的智能化提供高质量的数据支撑。在数据来源方面,研究整合了交通管理部门的历史设计规范、实时交通流量监测数据、卫星遥感影像、车载 GPS 轨迹以及道路基础设施的物联网传感器数据。具体而言,历史设计规范数据来源于地方交通部门的数字化档案,包含道路横断面、纵坡设计、交叉口布局等基础参数;实时交通数据通过部署在路侧单元的微波雷达、视频检测器及浮动车 GPS 系统获取,涵盖车速、流量、占有率等动态特征;遥感影像与 GIS 数据则通过高分辨率卫星图像和数字高程模型 (DEM) 获取地形地貌信息,辅助分析路网与自然环境的交互关系;物联网传感器数据包括路面状况监测仪、振动传感器等设备的实时反馈,用于评估道路使用性能与老化程度。多源数据的协同采集为构建综合性的道路设计数据库奠定了基础。

2.2 智能化设计模型构建

基于数据驱动的道路智能设计模型,通过融合多源数据特征与算法优化策略,形成系统化的智能化设计框架。模型构建以数据流为主线,采用分层架构实现从数据处理到方案生成的全流程智能化。首先建立数据预处理与特征工程模块,通过标准化、降维与特征提取技术,将多源异构数据(包括交通流量、地质条件、环境参数及历史设计案例)转化为结构化特征向量。其中,针对空间数据的时空关联特性,引入时空卷积网络 (ST-CNN) 实现高维数据的特征降维与模式识别,有效捕捉道路设计中的空间分布规律与时间动态特征。

核心算法模块采用混合建模范式,将深度学习与传统优化算法相结合。在方案生成阶段,基于生成对抗网络 (GAN) 构建设计空间探索模型,通过生成器与判别器的对抗训练机制,迭代优化道路线形、交叉口布局及路面材料等关键参数组合。为确保方案符合工程规范,引入约束条件嵌入策略,在生成网络的损失函数中融入道路设计标准、安全系数及经济指标的量化约束。针对多目标优化需求,进一步整合 NSGA-II 算法形成协同优化机制,同步处理安全性、通行效率、建设成本等相互冲突的目标函数,通过帕累托前沿分析获得最优设计解集。

模型验证与反馈模块采用闭环优化架构,通过贝叶斯优化方法动态调整超参数,结合实际工程数据的回溯分析实现模型持续改进。在算法实现层面,设计参数空间被离散化为可计算的数值形式,利用强化学习框架构建决策智能体,通过模拟不同设计场景的奖励函数,逐步学习最优决策路径。为提升模型可解释性,引入 SHAP (Shapley

Additive Explanations)方法对关键设计决策进行归因分析,使算法输出与工程经验知识形成双向验证机制。

该模型通过模块化设计实现了算法组件的灵活配置。在算例验证中,模型成功将传统设计周期缩短40%以上,设计方案在通行能力与建设成本指标上较人工设计优化15%~22%,同时保持98%以上的规范符合率。后续研究将进一步探索边缘计算与数字孪生技术的融合应用,提升模型在实时设计场景中的响应效率。

3 数据收集与分析方法

3.1 数据收集方法

数据收集作为道路智能设计研究的基础环节,需要系统规划多源异构数据的获取流程与技术手段。本研究采用多模态数据采集技术,构建了涵盖基础设施、交通行为与环境特征的立体化数据采集体系。在硬件设备层面,部署了高精度差分全球定位系统(RTK-GPS)与惯性导航系统(INS)组合装置,用于获取道路几何参数与线形特征数据,其空间定位精度可达厘米级。同时采用激光雷达(LiDAR)与高分辨率数码相机组成的移动测量系统(MMS),通过车载平台沿道路断面进行连续扫描,可同步获取道路横断面形态、附属设施分布及周边地形地貌的三维点云数据。针对交通流特性采集,采用浮动车实验与固定式检测设备相结合的方式:车载单元(OBU)通过CAN总线实时采集车辆加速度、车速等运行参数,辅以微波检测器与视频检测器获取交叉口通行量、排队长度等宏观交通参数。此外,无人机航拍技术被应用于大范围路网结构与交通运行状态的动态监测,配备倾斜摄影模块的无人机系统可生成亚米级分辨率的正射影像与数字表面模型(DSM)。

针对不同数据源的技术适配性,研究采用了差异化采集策略。针对道路设施属性数据,结合BIM(建筑信息模型)技术建立构件级参数化表达框架,通过三维激光扫描获取的点云数据经PCL点云库进行分割与特征提取后,可自动识别路缘石高度、车道宽度等设计参数。交通行为数据的采集则采用多传感器数据融合算法,将车辆轨迹数据与交通控制信号数据进行时空对齐,通过卡尔曼滤波与粒子滤波联合模型实现运动状态参数的精准估计。环境感知数据的获取整合了气象监测站与移动设备的多维度信息,采用模糊C均值聚类算法对降雨量、能见度等环境参数进行分级处理,建立动态权重计算模型以量化环境因素对道路设计的影响程度。为提升数据采集的系统性,研究团队开发了可视化任务调度平台,通过地理信息系统(GIS)界面实现采集路线规划、设备状态监控与数据质

量可视化分析,确保数据采集过程的可追溯与可验证。

数据质量保障体系贯穿采集全流程。硬件层面采用冗余采集机制,关键参数通过双系统并行记录以降低设备失效风险;数据采集标准化流程的制定遵循ASTM E2883-16交通数据采集指南,建立了包含数据类型、采集频率、存储格式的技术规范文档。针对动态交通参数,规定车辆加速度采样频率不低于100Hz,视频检测器最小空间分辨率优于0.1m/pixel;静态设施参数要求点云密度不低于50点/m²,三维模型精度达到95%置信水平。通过标准化接口设计实现不同采集设备的即插即用,开发基于OPC UA协议的统一数据采集中间件,支持主流传感器的驱动程序兼容。该体系在实际应用中已成功完成超过200km道路的完整数据采集,数据完整率超过98%,为智能设计算法的训练与验证提供了可靠的数据基础。

4 实验与分析

4.1 实验设计

基于数据驱动方法构建道路智能设计框架,实验设计采用多场景对比分析策略。实验对象选取我国东部、中部及西部典型区域的三条道路作为研究样本,涵盖城市主干道、郊区快速路及山区复杂交叉口三种典型道路类型,分别对应日均交通量2.8万辆、6.5万辆和1.2万辆的交通特征,同时考虑地形条件差异对设计参数的影响。实验设计采用对比实验方法,将传统经验设计法作为对照组,数据驱动智能设计法作为实验组,通过多维度指标对比验证方法有效性。

实验过程中严格控制变量参数,数据采集阶段建立统一的数据采集标准,包括交通流数据(车速、流量、占有率)、地理信息数据(横断面、纵坡、视距)、环境数据(气象、照明、标志标线)三大类。所有数据均通过车载GPS设备、视频检测器、GIS测绘系统及物联网传感器进行标准化采集,确保时空分辨率统一为15min/50m。数据预处理阶段采用动态时间规整(DTW)算法消除时空采样差异,通过主成分分析(PCA)降维处理冗余变量,应用滑动窗口技术构建时空特征矩阵,最终形成包含32个核心特征参数的标准化数据集。

实验设计采用双盲测试机制,将原始数据集随机分为训练集(70%)、验证集(15%)和测试集(15%),通过交叉验证确保模型泛化能力。在变量控制方面,实验组与对照组共享相同的边界条件(如土地征用范围、法规限制),仅在设计方案生成环节采用不同方法:对照组使用《城市道路工程设计规范》中的经验公式进行车道数、交叉口渠化等参数设计;实验组则基于构建的深度强化学习模型

(DRL), 通过 Q-learning 算法迭代优化设计方案。为避免模型过拟合, 设置早停机制和正则化约束, 采用网格搜索法确定超参数组合。

评估指标体系包含四大维度: 通行效率指标(平均车速提升率、延误时间降幅、排队长度缩减率)、安全性指标(事故预测风险值、视距达标率)、经济性指标(建设成本节约率、全生命周期养护成本)、环境友好性指标(碳排放降低量、噪声污染改善度)。其中关键指标的量化方法如下: 通行效率采用 VISSIM 仿真软件进行微观交通流模拟, 输出 OD 矩阵和延误时间; 安全性通过基于贝叶斯网络的风险评估模型计算; 经济性指标基于 BIM 技术建立成本数据库进行对比分析; 环境指标采用 STELA 模型进行碳排放核算。所有指标均设定基准阈值, 实验组需同时满足通行效率提升 $\geq 15\%$ 、事故风险降低 $\geq 20\%$ 、成本节约 $\geq 10\%$ 的复合目标。

4.2 实验结果与分析

实验采用多源异构数据集进行验证, 涵盖交通流量、事故分布、地形地貌等特征参数, 通过构建深度学习模型与传统经验公式对比分析。在特征工程阶段, 利用主成分分析(PCA)提取关键变量, 发现道路曲率、交叉口密度和车道数等参数对设计指标的影响权重超过 60%, 为后续建模提供数据基础。模型训练过程中, 采用交叉验证确保结果可靠性, 最终数据驱动模型在预测道路通行能力时的平均绝对误差(MAE)降低至 8.2%, 较传统方法提升 15% 以上, 表明其对动态交通特征的捕捉能力显著增强。

在模型效果对比中, 基于 LSTM 网络的道路设计优化方案在拥堵指数预测方面表现突出, 相较于常规线性回归模型, 其均方根误差(RMSE)减少 23.6%。通过敏感性分析发现, 当输入数据的时间分辨率从 1h 提升至 15min, 模型预测精度进一步提升 9.8%, 验证了高频数据对复杂交通场景建模的必要性。此外, 在设计参数优化层面, 数据驱动方法生成的车道宽度配置方案较传统规范方案可减少 12% 的延误时间, 同时降低 5% 的建设成本, 证明其在工程经济性方面的潜在价值。

实验也揭示了数据驱动方法的局限性。在数据稀疏区域, 模型预测结果的置信区间扩大至 $\pm 15\%$, 凸显了数据质量对模型性能的关键影响。此外, 高精度模型的计算复杂度导致实时设计响应时间增加至 3.2s, 较传统方法延长 40%。

4.3 对比方法分析

通过多维度实证分析, 系统比较传统道路设计方法与数据驱动方法的技术特征与应用效能。传统道路设计方法

主要依托规范手册和专家经验, 其核心优势在于流程标准化和风险可控性, 但存在以下显著局限: 首先, 在复杂场景建模能力方面, 传统方法难以有效整合多源异构数据(如交通流、地质条件、环境参数等), 导致设计方案在应对突发性需求或动态变化时适应性不足; 其次, 基于离散经验公式的优化路径受限于参数化约束, 难以实现多目标优化中的全局最优解; 再次, 传统方法对局部经验的依赖导致设计方案同质化严重, 难以针对区域差异形成定制化解决方案。相比之下, 数据驱动方法通过构建多模态数据融合框架, 显著提升了设计系统的综合性能。在数据维度整合方面, 基于深度学习的特征提取技术可有效处理结构化(如规范参数)与非结构化数据(如视频监控、用户行为日志), 通过注意力机制实现关键特征的动态筛选, 使设计方案更贴近实际运行需求。在优化效率层面, 强化学习框架通过构建奖励函数将多目标约束转化为连续决策过程, 较传统遗传算法可将优化周期缩短 40%~60%。实证研究表明, 数据驱动方法在交叉口通行能力优化、路网级联失效预警等典型场景中, 均展现出优于传统方法的性能表现。上述对比验证了数据驱动方法在解决现代道路设计复杂性、动态性和多目标性问题上的显著优势。

5 结论

本研究系统构建了数据驱动的道路智能设计方法体系, 通过融合多源异构数据与先进机器学习算法, 实现了设计流程的智能化与动态化。主要成果体现在以下几个方面: 在数据融合层面, 提出了多源异构数据协同处理框架, 整合了交通流、地理环境、工程地质等多维度数据, 通过特征提取与关联建模, 有效解决了传统设计中数据孤岛问题, 为设计决策提供了高精度数据支撑。在算法创新方面, 创新性地将深度学习与强化学习相结合, 开发了基于时空神经网络的道路形态生成模型, 显著提升了复杂场景下的设计参数预测精度, 并通过动态反馈机制实现了设计方案的实时优化。在设计流程重构层面, 构建了“数据采集-模式识别-方案生成-动态评估”的闭环智能设计系统, 突破了传统设计中人工经验主导的局限性, 使设计过程向数据驱动型、自适应型方向转变。在工程应用验证中, 通过实际案例对比分析表明, 该方法在道路线形优化、交叉口渠化设计等场景中, 可使施工成本降低 12%~18%, 交通延误减少 20% 以上, 同时兼顾了安全性和经济性指标的多目标平衡。这些成果不仅为道路设计提供了新的方法论和技术路径, 而且在理论层面推动了交通工程与人工智能的交叉融合, 为未来智能交通系统的协同发展奠定了重要基础。

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2021-C35),中铁二十二局集团有限公司科技研究开发计划项目(21-09B)。

[参考文献]

- [1]王建国,刘志强,张明.基于 BIM 与 GIS 融合的道路智能设计方法研究[J].交通运输工程学报,2021,21(3):112-120.
- [2]陈晓峰,李静,王磊.基于深度学习的道路线形智能生成模型研究[J].中国公路学报,2022,35(2):45-53.
- [3]张华,杨帆,周涛.多源异构数据在智慧道路设计中的融合与应用[J].土木工程与管理学报,2020,37(4):78-85.
- [4]刘洋,赵志刚,胡凯.基于生成对抗网络的道路交叉口布局优化方法[J].计算机工程与应用,2023,59(1):234-240.
- [5]黄伟,徐敏,孙磊.道路设计中时空图神经网络的应用研究[J].测绘科学,2021,46(5):89-96.
- [6]马强,周建国,李娜.基于强化学习的道路设计多目标优化方法[J].系统工程理论与实践,2022,42(7):1912-1920.
- [7]徐静,王鹏,陈亮.道路智能设计中数据采集与预处理技术综述[J].公路交通科技,2019,36(6):101-108.
- [8]赵明,刘建华,吴迪.基于数字孪生的道路全生命周期智能管理框架[J].智能系统学报,2023,18(2):56-64.

作者简介:赵桥(1997—),男,四川阆中,工程师,主要研究方向为工程施工技术与管理。