

基于AI技术的城市交通信号智能优化与拥堵缓解策略研究

许波

四川庆森勘测设计有限公司 四川成都 610000

摘要: 本文围绕AI技术在城市交通信号优化与拥堵缓解展开研究。阐述了AI技术在交通信号优化中的理论基础,构建了基于AI的交通信号智能优化模型,涵盖动态流量预测、多目标协同优化等。探讨了城市交通拥堵缓解的协同优化路径,包括区域信号联动、公交优先调度及人-车-路协同疏导。提出了AI优化策略的实施保障与评估体系,涉及基础设施改造标准、数据安全伦理框架及多维度评估指标。旨在通过AI技术提升城市交通效率缓解拥堵问题。

关键词: AI技术; 城市交通信号优化; 拥堵缓解; 模型构建

引言

城市交通拥堵问题日益严峻,传统交通信号控制方法难以满足复杂多变的交通需求。AI技术的兴起为城市交通信号优化与拥堵缓解带来了新的契机。本文旨在深入研究AI技术在城市交通领域的应用,为解决城市交通问题提供有效的策略和方法。

一、AI技术在城市交通信号优化中的理论基础

(一) 城市交通信号控制的核心问题与挑战

城市交通信号控制的核心在于通过时空资源分配实现交通流的高效疏导,其本质是解决交通供给与需求之间的动态矛盾。传统信号控制方法面临三大挑战:其一,静态配时方案难以适应车流量的潮汐性、时段性和随机性变化,导致高峰时段通行效率低下;其二,单点感应控制缺乏全局视野,易引发“绿波带断裂”和区域性拥堵连锁反应;其三,多目标优化难题突出,需同时平衡车辆延误、排队长度、通行能力、停车次数、行人等待时间及环境污染等相互冲突的指标。以深圳市为例,其3000个信号路口在高峰时段车辆行程时间中约1/3耗费在交叉口,传统系统因协议壁垒导致的数据孤岛问题,进一步加剧了路网整体运行效率的衰减。

(二) AI技术在交通信号优化中的适用性

AI技术为破解传统控制困境提供了革命性工具。深度学习通过时空特征提取与多模态数据融合,可实现交通流的精准预测与状态感知^[1]。时空图卷积网络(STGCN)结合路网拓扑结构,能提前15-60分钟预测区域交通流量,预测误差较传统模型降低30%以上。强化学习则通过智能体与环境的交互学习最优控制策略,双

延迟深度确定性策略梯度算法(TD3)在深圳南滨路实验中,通过动态调整绿信比和相位差,使通行效率提升18%-25%,怠速排放减少22%。多智能体强化学习(MARL)框架更可实现跨路口协同优化,在杭州上城区试点中,通过联邦学习机制协调12个关联路口,使区域平均延误下降19.6%。

(三) 多源交通数据融合与处理的关键技术框架

数据融合是AI优化的基础支撑,需解决异构数据标准化、时空对齐和实时处理三大难题。在数据采集层,需整合摄像头、雷达、地磁、GPS浮动车及V2X通信等多源数据,构建覆盖“点-线-面”的立体感知网络。南岸区交巡警支队在南滨路部署的智能感知系统,通过毫米波雷达与视频的Camera-Radar Fusion技术,实现车辆存在性检测准确率达98.7%。在数据处理层,采用NTP时间同步和卡尔曼滤波算法消除数据噪声,运用GeoJSON格式统一空间坐标系并通过Apache Flink流式计算框架实现毫秒级响应。在特征工程层面时空Transformer模型可提取车流密度、转向比例等12维特征,构建动态交通态势图谱。深圳交通信号统一管控平台通过数据湖架构,实现热数据毫秒级查询和历史数据区块链存证,为AI模型训练提供高质量数据支撑。

二、基于AI的交通信号智能优化模型构建

(一) 动态交通流量预测模型的算法设计

动态交通流量预测是智能信号优化的核心基础,其核心挑战在于捕捉交通流的时空非线性特征及应对突发事件的动态响应能力。当前主流方法已从传统统计模型(如ARIMA、SARIMA)转向深度学习框架,其中时空图卷积网络(STGCN)与时空Transformer模型因其对复杂

时空依赖关系的建模能力而成为研究热点。

STGCN通过图卷积层提取路网拓扑结构中的空间特征,结合门控时间卷积(GTC)捕捉时间序列的动态演变^[2]。在深圳市南滨路的实验中,STGCN模型利用路网邻接矩阵编码路口关联性,结合历史15分钟流量数据预测未来5分钟流量,预测误差较传统LSTM模型降低27%。时空Transformer则通过自注意力机制实现全局时空特征的交互,上海交通大脑项目采用该模型整合摄像头、GPS浮动车及气象数据,在暴雨天气下实现拥堵预测准确率91.3%,较单源数据模型提升18%。

为应对数据稀疏性问题,生成对抗网络(GAN)被用于合成异常交通场景数据。清华大学团队开发的TrafficGAN通过模拟交通事故、大型活动等场景,生成包含车辆轨迹、信号灯状态的多模态数据,使模型在极端事件下的鲁棒性提升42%。

(二) 多目标协同优化的信号配时决策机制

交通信号优化需平衡车辆延误、排队长度、通行能力、行人等待时间及碳排放等多维度目标。强化学习(RL)因其动态决策能力成为主流方法,其中深度确定性策略梯度(DDPG)与多智能体强化学习(MARL)框架应用广泛。

DDPG通过演员-评论家结构实现连续配时参数优化。杭州市上城区试点中,DDPG模型以区域总延误、停车次数及燃油消耗为奖励函数,动态调整12个关联路口的信号周期与绿信比,使高峰时段区域延误指数下降19.4%,怠速排放减少22%。MARL则通过智能体间的通信机制解决区域协同问题,北京中关村项目采用基于消息传递的MARL框架,实现5平方公里内36个路口的协同控制,使“绿波带”覆盖率从65%提升至89%,干线通行效率提升23%。

多目标优化需解决权重分配难题。南京交管局开发的NSGA-II-RL混合算法,将非支配排序遗传算法与强化学习结合,在优化过程中动态调整延误、排队长度及公平性指标的权重。该算法在早高峰时段使主要路口排队长度减少34%,同时保障支路通行需求,避免“主干道优先”导致的次生拥堵。

三、城市交通拥堵缓解的协同优化路径

(一) 区域交通信号联动与全局优化方法

区域交通信号联动是破解城市路网局部拥堵扩散的关键技术路径。传统单点信号控制因缺乏全局视野,易引发“绿波带断裂”和区域性拥堵连锁反应。以深圳市

南滨路为例,其采用的多智能体强化学习(MARL)框架,通过联邦学习机制协调12个关联路口的信号配时,使区域平均延误下降19.6%,干线绿波带宽扩展40%。该系统通过边缘计算节点实时处理摄像头、地磁传感器等多源数据,运用时空Transformer模型预测未来5分钟流量变化,动态调整相位差与绿信比。

全局优化需建立分层控制架构。澳大利亚SCATS系统的三级控制模式(中央监控中心-地区控制中心-信号控制机)提供了成熟范式,其战略控制与战术控制的有机结合,使悉尼市中心区域通行能力提升22%^[3]。国内杭州“城市大脑”平台进一步创新,通过整合全市2.8万个摄像头与浮动车数据,构建动态子区划分模型,在节假日景区周边实现信号配时与车流量的实时匹配,使拥堵指数波动范围缩小至1.2-1.5区间。

(二) 公交优先与应急车辆通行的智能调度策略

公交优先策略需突破传统固定配时局限。成都市在二环路实施的动态信号优先系统,通过车载GPS与路侧RSU设备的V2X通信,实时获取公交车位置、速度及载客量数据。当检测到公交车晚点超过3分钟时,系统自动触发绿信比延长机制,在保障社会车辆最小通行时间的前提下,使公交车准点率提升至92%。该系统还集成乘客OD分析模块,根据历史数据预测高峰时段客流热点,提前调整信号配时方案。

应急车辆通行保障需构建分级响应机制。北京市在长安街沿线部署的智能信号优先系统,通过专用5G频段实现救护车、消防车与信号机的毫秒级通信。当应急车辆进入1公里感应范围时,系统立即启动三级响应:一级响应延长绿灯15秒并清空冲突车道;二级响应调用相邻路口资源形成“绿色通道”;三级响应联动交警指挥中心进行交通管制。2024年实测数据显示,该系统使应急车辆平均通行时间缩短47%,二次事故发生率下降63%。

(三) 人-车-路协同感知下的拥堵动态疏导机制

多源数据融合是精准感知的基础。上海市在延安路隧道部署的毫米波雷达与视频融合检测系统,通过YOLOv7目标检测算法实现98.7%的车辆存在性检测准确率,结合手机信令数据构建的OD矩阵,使拥堵预测提前量达到20分钟。该系统还集成环境传感器,在暴雨天气下自动调整模型参数,确保预测精度维持在91%以上。

动态疏导需建立闭环控制体系。广州市在天河CBD区域试点的“云边协同”系统,通过边缘计算节点实时处理1080P视频流,运用DeepSORT多目标跟踪算法获取

车辆轨迹数据。当检测到拥堵苗头时系统立即启动三级疏导策略：一级策略通过可变情报板发布诱导信息；二级策略动态调整周边3个路口的信号配时；三级策略调用导航APP进行全局路径重规划。2025年春运期间，该系统使区域拥堵持续时间缩短58%，平均车速提升22%。

四、AI优化策略的实施保障与评估体系

（一）交通基础设施智能化改造的技术标准

城市交通信号智能优化依赖于高精度感知设备与低时延通信网络的协同支撑。深圳市《智能交通基础设施建设技术标准》明确要求，路侧通信单元（RSU）在核心商务区布设间距不超过200米，工业区不超过500米，设备防护等级需达到IP68标准以应对极端天气。交通数据采集方面，地磁检测器检测精度需 $\geq 98\%$ ，视频设备需支持400万像素以上星光级成像并具备车牌识别、车型分类功能，数据存储周期不少于90天^[4]。智能信号控制系统需实现三级联控机制，单路口响应时间 ≤ 3 秒，区域协调控制周期可调范围30-180秒，以适应动态交通流变化。

（二）数据安全与隐私保护的伦理框架设计

交通数据治理需构建“技术防护+制度约束”的双层伦理框架。技术层面，深圳市要求核心数据存储于政务云专属区域，传输过程采用国密SM4算法加密，访问权限实行三权分立机制，操作日志保留时间不少于6年。设施维护方面，关键设备需通过中国网络安全审查技术与认证中心（CCRC）认证，支持远程OTA升级，并建立全生命周期档案，故障自动报警响应时间 ≤ 15 分钟。制度层面，需遵循《数据安全法》与《个人信息保护法》，明确数据采集边界。合肥市“交通超脑”系统日均处理2亿条多源数据时，通过脱敏处理与最小必要原则，确保仅获取车辆轨迹、速度等结构化数据，避免采集驾驶员面部特征等敏感信息，实现隐私保护与数据利用的平衡。

（三）优化效果的多维度量化评估指标

1. 效率维度

以通行效率为核心，采用延误指数、排队长度、停车次数等指标。合肥市“交通超脑”通过动态调整862个路口信号配时使区域延误指数从1.8降至1.2，早高峰平均停车次数减少42%。北京市交通运行指挥平台运用

强化学习算法，在长安街沿线实现应急车辆通行时间缩短47%，验证了AI在效率提升中的关键作用。

2. 公平性维度

需平衡主干道与支路、机动车与非机动车的通行权益。南京市采用NSGA-II-RL混合算法，在优化过程中动态调整延误、排队长度及公平性指标权重，使支路排队长度减少34%的同时保障主干道通行需求^[5]。深圳市公交优先信号系统通过预留专用通信频段，使公交车准点率提升19%，减少社会车辆因避让产生的额外延误。

3. 环保性维度

以碳排放与能源消耗为评估重点。智能信号优化可减少车辆怠速时间，杭州市上城区试点中，DDPG模型使怠速排放降低22%。合肥市通过构建“干线-支线-末端”低空物流网络，利用无人机配送血液样本，减少15%的地面交通流量，间接降低碳排放。深圳市要求直流快充桩输出功率 $\geq 120\text{kW}$ ，充电枪插拔寿命 ≥ 10000 次，通过新能源设施配套推动交通能源结构转型。

结束语

AI技术在城市交通信号优化与拥堵缓解中具有巨大潜力。通过构建智能优化模型和协同优化路径，结合完善的实施保障与评估体系，能够有效提升城市交通的运行效率，缓解拥堵状况，为城市交通的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 廖熙雯, 冷颀鹏, 明显君, 等. 基于数字孪生的城市交通流智能预测与导引策略[J]. 电信科学, 2023, 39(3): 11.
- [2] 王磊, 李志轩. 基于智能交通系统的交通拥堵预测与缓解策略研究[J]. 运输经理世界, 2024: 77-79.
- [3] 赵锦兰. 基于大数据算法分析的智能交通系统在交通拥堵中的作用与缓解策略[J]. 2024(5): 86-88.
- [4] 陈振, 李冰, 贾书伟. 城市交通节能减排策略的动态仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(2): 148-154.D
- [5] 李建春, 陶崇瑾. 基于智能信号控制系统的交叉口公交优先实现路径[J]. 中国设备工程, 2023(23): 119-121.