

文章编号: 1005-0523(2025)03-0048-09



山地城市商圈环道信号协同控制方法

陈洋¹, 薛凯轩², 李子木¹, 蔡晓禹³, 褚文博⁴

(1. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074; 2. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051;
3. 重庆交通大学智慧城市学院, 重庆 400074; 4. 西部科学城智能网联汽车创新中心, 重庆 400039)

摘要: 山地城市商圈环道因交叉口多、流量波动等特征易发生拥堵。为缓解拥堵问题, 提出商圈环道出入口信号协同控制方法。基于高空视频、卡口数据及互联网数据提取道路与交通特性; 以商圈环道通过的车辆数最大、各进环通道车辆排队长度最小、各出环通道下游交叉口车辆排队长度最小为控制目标, 以信号控制参数、进出环通道排队长度以及环道整体路段密度等为约束条件, 构建基于多目标优化的山地城市商圈环道出入口信号协同控制优化模型。从操作算子、种群规模配置两方面改进NSGA-II算法, 并搭建MATLAB-VISSIM平台开展联合仿真。以重庆市观音桥商圈环道为例, 验证结果表明: 优化方案使早高峰环道通行能力提升8.9%, 进环通道总排队长度减少31.7%, 出环通道总排队长度减少15.0%。该方法兼顾商圈环道整体协同效益, 为高峰时段缓解区域路网拥堵提供指导。

关键词: 交通工程; 信号协同控制; 多目标优化; 山地城市商圈环道; NSGA-II算法

中图分类号: U491.4

文献标志码: A

本文引用格式: 陈洋, 薛凯轩, 李子木, 等. 山地城市商圈环道信号协同控制方法[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(3): 48-56.

Signal Collaborative Control Method for Ring Roads in Business District of Mountainous City

Chen Yang¹, Xue Kaixuan², Li Zimu¹, Cai Xiaoyu³, Zhu Wenbo⁴

(1. School of Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Yunnan Institute of Highway Science and Technology, Kunming 650051, China; 3. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Western China Science City Innovation Center of Intelligent and Connected Vehicles, Chongqing 400039, China)

Abstract: The ring roads in mountainous city business districts are prone to congestion due to numerous intersections and fluctuating traffic flows. To address this, a cooperative signal control method for managing ring roads entrances and exits is proposed. Road and traffic characteristics were extracted using high-altitude video, check-point data, and Internet-based datasets. The control objectives include maximizing vehicle throughput, minimizing entrance queue lengths, and reducing downstream congestion at exit intersections. The optimization model is constrained by signal control parameters, queue lengths, and overall ring roads density. The standard NSGA-II algorithm was improved in operator design and population size configuration. A MATLAB-VISSIM simulation platform was developed for joint simulation. A case study of the Guanyinqiao business district ring roads in Chongqing was conducted. Results show that, compared to the original scheme, the optimized strategy increases

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372377); 国家重点研发计划(2022YFB2503205); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0104); 重庆市高等教育教学改革研究项目(182028)

ring roads capacity by 8.9% during peak hours, reduces entrance lane queue length by 31.7%, and decreases exit lane queue length by 15.0%. These findings validate the effectiveness of the proposed multi-objective optimization and cooperative signal control method. By enhancing coordination among multiple intersections, this approach provides valuable guidance for alleviating regional traffic congestion during peak hours.

Key words: traffic engineering; signal cooperative control; multi-objective optimization; ring roads in business districts of mountainous city; NSGA-II algorithm

Citation format: CHEN Y, XUE K X, LI Z M, et al. Signal collaborative control method for ring roads in business district of mountainous city[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(3): 48–56.

山地城市商圈集商业、商务、住宅于一体,人流车流密集。针对环道出入口交通特性实施信号协同控制,以提升路网通行能力,已成为研究热点。在信号控制场景下,要达到整体路网运行效率的提高需对多交叉口进行信号协同控制^[1-3]。龙琼等^[4]提出一种融合交通管理策略的多交叉口信号协同控制优化模型及其算法。Wang等^[5]提出一种自适应道路交叉口信号协同控制模型,实现了对多个交叉口交通流的高效调控。马成元等^[6]等提出一种兼顾多交叉口协同效益和单交叉口控制优化的路网信号配时设计方法。Huo等^[7]等针对多交叉通信号的协同控制问题,建立了一种新型的端到端学习模型。

对于环道这种特殊场景下的信号控制,蒋贤才等^[8]建立了环道交通信号与进口道交通信号协调控制的环形交叉口信号控制方法。陈晓利等^[9]针对城市环道交通信号控制问题,提出环道交叉口协调控制方法。Stupin等^[10]针对环道及环道内交通信号灯,提出协同控制策略,改善流量同时最大化环道路口交通量来优化环道系统容量。

学者多采用多目标优化方法解决城市道路交通信号协同控制问题^[11]。Kim等^[12]在深入研究基于Webster提出的最小化延误的停止补偿系数时,构建了双目标信号配时模型。郑喆等^[13]考虑了进出口车道数、主预信号绿灯时长、排序区长度等约束条件建立了多目标信号控制协同优化模型。Zhang等^[14]考虑交叉口的通行能力、延误和废气排放指标作为约束条件,建立了信号配时的多目标优化模

型。Ma等^[15]以过饱和相位数和平均车辆延迟分别作为主要目标和次要目标,构建了一种层次化多目标优化模型。在多目标优化算法求解方面。陈小红等^[16]运用遗传算法求解建立的交叉口信号配时多目标优化模型。Jovanović等^[17]利用超启发式蜂群优化算法(BCO)求解多目标优化模型。Pang等^[18]修改NSGA-II中的目标值来补救显性抗解的负面影响,实验结果表明,改进的NSGA-II在多目标测试问题上效果很好。综上所述,现有信号协同控制多目标优化研究主要针对一般城市场景,而山地城市商圈环道因地形复杂、流量动态性强及交叉口交互复杂,现有方法适用性受限。此外,现有模型对目标权重分析不足,限制了控制效果和实际应用。本文针对山地商圈环道,提出山地城市商圈环道多目标信号协同优化模型,采用改进NSGA-II算法,并通过MATLAB-VISSIM仿真验证,弥补现有研究的不足。

1 数据采集与处理

1.1 高空视频数据

提取重庆市观音桥环道区域路网2021年11月—12月的高空视频数据,主要包括高空球机监控与高空全景监控。

1.2 视频卡口数据

提取2021年11月—12月观音桥环道视频卡口数据,共22个卡口,实现环道主要进出口全覆盖,全面监测机动车流量。表1为处理后卡口数据示例。

表1 处理后卡口数据示例

Tab.1 Example of processed bayonet data

车牌号码	过车时间	抓拍地点	过车车道	车辆类型
XXXXXXX3	2021-12-12 17:36	建新西路家乐福往金源路_1	车道1	客车

1.3 互联网数据

从高德智慧交通公共服务平台获取2021年11月—12月,以10 min为间隔的拥堵延时指数与路段平均速度数据。

2 特性分析

2.1 山地城市商圈环道道路特性分析

1) 环道路网特征分析。

环状路网主干道较长,具备高效中转能力,但次级道路占比低,易在交汇节点形成瓶颈,影响交通疏散,成为潜在拥堵点。

2) 商圈环道出入口特征性分析。

① 环道各出入口间距小。受地形限制,环道出入口间距紧凑,有利于商圈内外交通高效流动。

② 道路等级不均衡。部分出入口连接主干道,部分连接次级道路,导致环道部分路段拥堵、部分畅通,整体负载分布不均。

2.2 山地城市商圈环道交通运行特性分析

1) 环道出入口交通特性分析。

交通流量方面,早晚高峰环道流量较高,晚高峰略高于早高峰,平峰时段虽下降但差异不大。OD方面,环道流量较大的OD对沿环道行驶方向分布,出口流量主要来源于上游相邻入口。

2) 环道断面交通运行特性分析。

根据环道出入口位置将环道分为7个区段,具体区段分布如图1所示。

环道出入口特性与进出流量差异较大,导致负载不均衡,部分区段拥堵严重,部分区段通行顺畅。

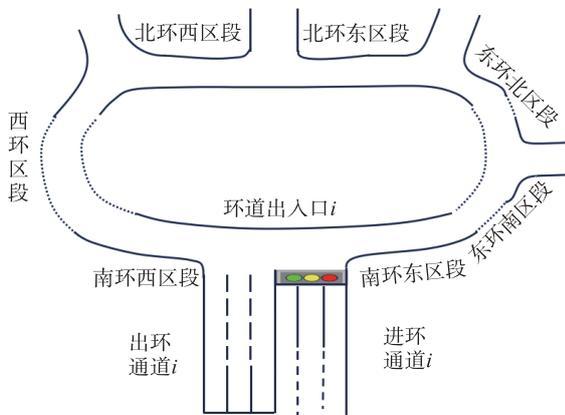


图1 环道区段分布示意图
Fig. 1 Distribution of ring roads section

以高德拥堵延时指数 TPI 为自变量,时刻在网车 N 为因变量,基于观音桥商圈环道历史数据,采用趋势线拟合建立量化模型。多种拟合分布中,对数拟合精度最高(决定系数 R^2 最大),具体模型见式(1),拟合情况见表2。

$$N = a \times \ln(TPI) + b \quad (1)$$

式中: N 为时刻在网车; a 、 b 为固定参数(与选定的路网特性有关)。

表2 观音桥环道各区段拥堵指数-时刻在网车辆数拟合函数表

Tab.2 Fitting function of congestion index of each section in Guanyinqiao ring roads and the number of vehicles on roads

区段名称	拟合函数	决定系数 R^2
南环东区段	$N=72.65 \times \ln(TPI) + 20.34$	0.952
东环南区段	$N=26.51 \times \ln(TPI) + 23.04$	0.943
东环北区段	$N=36.51 \times \ln(TPI) + 18.66$	0.965
北环东区段	$N=80.09 \times \ln(TPI) + 23.67$	0.968
北环西区段	$N=38.98 \times \ln(TPI) + 23.62$	0.973
西环区段	$N=78.68 \times \ln(TPI) + 30.35$	0.961
南环西区段	$N=75.49 \times \ln(TPI) + 22.72$	0.938

3 商圈环道多目标信号协同控制优化模型构建

3.1 商圈环道总体信号控制策略

根据环道内的时刻在网车辆数、进环通道的排队长度以及出环通道下游交叉口的排队长度,设计了一种考虑环道入口车辆排队长度与环道出口下游交叉口车辆排队长度的多目标信号协同控制策略。信号协同控制原理如图2所示。

3.2 信号协同控制多目标优化模型构建

基于商圈环道通过的车辆数最大、各进环通道排队长度最小、各出环通道下游交叉口排队长度最小的目标,构建多目标的函数模型。

3.2.1 控制目标

1) 商圈环道通过的车辆数最大。

时段内环道通过的车辆数最大化作为优化目标之一,时段内环道通过的车辆数计算如下

$$\text{MAX}(Q_i) = Q_i + \sum_{i=1}^n qe_i^t = Q_i + \sum_{i=1}^n S_i \left(\frac{g_i}{C_i} \right) \times f_i \quad (2)$$

式中: Q_i 为 λ 时段环道通过的车辆数; t 时刻为 λ 统计时段的初始时刻; Q_i 为 t 时刻环道时刻在网车辆数; qe_i^t 为 λ 时段环道入口 i 的进环车辆数; S_i 为

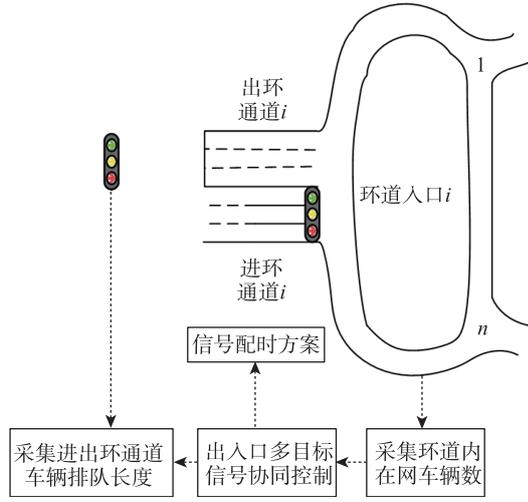


图2 环道信号协同控制策略原理图
Fig. 2 Schematic diagram of signal cooperative control strategy for ring roads

环道入口 i 的饱和流率; g_i 为一个周期内环道入口 i 处信号灯的有效绿灯时长; C_i 为入口 i 的信号周期时长; f_i 为入口 i 实际进环流量的折减系数; n 为环道入口个数, 此处取 7。

2) 环道各进环通道车辆排队长度最小。

结合实际运行情况建立进环通道排队模型预测车辆排队长度, 并优化信号配时。

环道各进环通道车辆排队长度计算公式如下

$$\text{MIN}(LP_{t+\lambda}) = \sum_{i=1}^n lp_{t+\lambda}^i = \sum_{i=1}^n (lp_t^i - qe_\lambda^i + qr_\lambda^i) \quad (3)$$

$$qe_\lambda^i = S_i \times \left(\frac{g_i}{C_i} \right) \times f_i \quad (4)$$

$$qr_\lambda^i = \lambda \times qa_i \quad (5)$$

式中: $LP_{t+\lambda}$ 为 $t+\lambda$ 时刻环道各进环通道排队车辆数之和; $lp_{t+\lambda}^i$ 为 $t+\lambda$ 时刻进环通道 i 的排队车辆数; lp_t^i 为 t 时刻进环通道 i 的排队车辆数; qr_λ^i 为 λ 时段到达环道入口 i 上游的车辆数; qa_i 为环道入口 i 上游的车辆到达率。

3) 环道各出环通道下游交叉口车辆排队长度最小。

考虑各出环通道的实际运行情况, 建立各出环通道的排队模型来预估出环通道下游交叉口的实际车辆排队长度, 并根据该排队模型对各出环通道下游交叉口的绿信比进行优化。

出环通道下游交叉口车辆排队长度的计算公式如下

$$\text{MIN}(LO_{t+\lambda}) = \sum_{i=1}^n lo_{t+\lambda}^i = \sum_{i=1}^n (lo_t^i - ql_\lambda^i + qo_\lambda^i) \quad (6)$$

$$ql_\lambda^i = c_i \times \gamma_i \times F_i \quad (7)$$

$$qo_\lambda^i = \lambda \times \varepsilon_i \times qw_\lambda^i \quad (8)$$

$$qw_\lambda^i = \rho_i^i \times v_\lambda^i = \frac{N_t^i}{l_i} \times v_\lambda^i \quad (9)$$

式中: $LO_{t+\lambda}$ 为 $t+\lambda$ 时刻环道各出环通道下游交叉口排队车辆数之和; $lo_{t+\lambda}^i$ 为 $t+\lambda$ 时刻环道出口 i 下游交叉口的排队车辆数; lo_t^i 为 t 时刻环道出口 i 下游交叉口的排队车辆数; ql_λ^i 为 λ 时段从出环通道 i 下游交叉口沿出环方向离开的车辆数; qo_λ^i 为 λ 时段环道出口 i 的出环车辆数; c_i 为出环通道 i 下游交叉口沿出环方向的通行能力; γ_i 为出环通道 i 下游交叉口沿出环方向的绿信比; F_i 为出口 i 下游交叉口沿出环方向实际流率的折减系数; ε_i 为从环道出口 i 衔接上游交织区驶向 i 出口的车辆数占该交织段通过车辆数的比例; qw_λ^i 为 λ 时段内出口 i 衔接上游交织区通过车辆数; ρ_i^i 为 t 时刻出口 i 衔接上游交织区的车流密度; v_λ^i 为 λ 时段出口 i 衔接上游交织区内车辆的平均运行速度; N_t^i 为 t 时刻出口 i 衔接上游交织区的时刻在网车辆数; l_i 为出口 i 衔接上游交织区段的道路长度。

3.2.2 约束条件

为制定最优的信号配时方案, 需针对环道入口及下游交叉口的实际交通状况设定约束条件。

1) 信号控制参数约束。

① 信号周期。多目标优化模型中一个完整的信号周期限定条件如下

$$C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max} \quad (10)$$

式中: C_{\min} 为环道出入口信号灯的最小周期时间, s; C_{\max} 为环道出入口信号灯的最大周期时间, s。

② 绿灯时长。各进环入口绿灯时间的限定条件如下

$$g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max} \quad (11)$$

式中: $g_{i,\min}$ 为环道第 i 入口信号灯的最少绿灯时间, s; $g_{i,\max}$ 为环道第 i 入口信号灯的最多绿灯时间, s。

2) 进出环通道排队空间约束。

多目标优化模型关于进出环通道的车辆排队长度约束条件如下

$$l_i \leq l_{i,\max} \quad (12)$$

$$L_i \leq L_{i,\max} \quad (13)$$

式中: l_i 为进环通道 i 的车辆排队长度; L_i 为出环通道 i 的车辆排队长度; $l_{i,\max}$ 为进环通道 i 的最大

允许接受车辆排队长度,根据道路实际情况而定; $L_{i,\max}$ 为出环通道*i*的最大允许接受车辆排队长度,道路实际情况而定。

3) 环道整体区段密度约束。

通过以环道区段密度为约束调节入口车流量,使其逼近最佳临界密度,从而提升通行效率。环道整体区段密度的计算公式如下

$$K_t = \frac{\sum_{j=1}^7 N_t^j}{l} = \frac{\sum_{j=1}^7 [a_j \times \ln(TPI_t^j) + b_j]}{l} \quad (14)$$

式中: K_t 为*t*时刻环道整体区段的密度; N_t^j 为*t*时刻环道整体区段的时刻在网车辆数; TPI_t^j 为*t*时刻交织区*j*的拥堵延时指数; l 为整个环道的长度; a_j, b_j 为环道*j*交织区段时刻在网车辆数与拥堵延时指数对数拟合的参数。

关于环道整体区段密度约束的计算公式如下

$$K_t \leq K_{t,\max} \quad (15)$$

3.3 数值求解方法

从新的初始化种群、动态调整种群规模、概率选择算子、自适应交叉算子等方面对标准NSGA-II算法进行改进完成模型的求解。

本文采用模糊集合理论^[19]对上述NSGA-II改进算法所得到的Pareto解进行选优。定义隶属度函数和支配函数见式(16)、式(17)。

$$S_x^y = \begin{cases} 1, & f_x^y \leq f_x^{\min} \\ \frac{f_x^{\max} - f_x^y}{f_x^{\max} - f_x^{\min}}, & f_x^{\min} < f_x^y < f_x^{\max} \\ 0, & f_x^y \geq f_x^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

$$\Psi_a = \sum_{x=1}^3 S_x^a / \left(\sum_{y=1}^3 \sum_{x=1}^3 S_x^y \right) \quad (17)$$

式中: f_x^{\min} 为解集中第*x*目标的最小值; f_x^{\max} 为解集中第*x*目标的最大值; f_x^y 为第*y*个解中第*x*个目标的当前值; S_x^y 为第*y*个解中第*x*个目标的隶属度值; Ψ_a 为第*a*个解的支配值; l 为解集中解的个数,由模型的优化结果得到。

改进NSGA-II算法求解商圈环道多目标信号协同控制优化模型详细步骤如下所示。

Step 1: 输入初始数据,包括各进出环流量、初始进出环通道排队长度等数据。

Step 2: 参数设置,设置最大迭代次数*T*,所有个体数目为*N*, P_0 的规模为 $N_0 = 1.5N \sim 2N$,概率选

择算子的 η 。

Step 3: 随机产生 N_0 个个体作为父代种群 P_0 ,令当前进化代数 $t=0$,对 P_0 进行概率选择和混合交叉,然后对其进行变异,生成 Q_0 。

Step 4: 把父子代种群的所有个体组成新种群 R_t ,即 $R_t = P_t \cup Q_t$,同时对 R_t 的每个个体赋予非支配序以及拥挤距离。

Step 5: 使用精英策略生成 P_{t+1} , P_{t+1} 个体是从 R_t 中根据个体的非支配序以及拥挤距离选择出来的。

Step 6: 判断当前迭代次数*t*是否不小于最大迭代次数*T*。如果是,计算非劣解集中各解的支配值,输出支配值最大的Pareto解所对应的适应度值以及各出入口信号配时方案,算法结束;否则 $t=t+1$,并进入下一步判断。

Step 7: 当算法迭代次数达到预设的阈值*a*后,每进行一次迭代,就选取前代的最优个体。随后进行算法所处阶段的判断,若判断已达算法寻优后期,则返回Step 3继续执行,否则进入下一步。

Step 8: 随机产生*N*个种群,与父代种群 P_{t+1} 合并形成种群 P_t ,对新种群 P_t 进行快速非支配排序、精英策略,找出最优的*N*个个体,返回Step 3。

4 实例分析

4.1 实例概况

重庆市观音桥商圈环道是重庆市交通网络的重要枢纽,由8条汇集于此的主要道路以及7个环道出入口组成。建新北路、建新南路、建新东路、建新西路、建北一支路、建北二支路、小苑路、兴塔路8条道路和①建新西路—建新东路—建新南路、②建新东路—观音桥东环路、③建北一支路—观音桥东环路、④兴塔路—观音桥东环路、⑤建新北路—观音桥东环路、⑥建北二支路—观音桥东环路—观音桥西环路、⑦建新西路—小苑路—观音桥西环路等7个交叉口组成的逆时针单向环道,环道总长2.1 km,环道相邻出入口之间的间距如表3所示。

4.2 基于MATLAB-VISSIM的联合仿真平台搭建

MATLAB通过COM接口调用VISSIM运行仿真。实验参数配置:①算法参数配置。设置算法的最大迭代次数为100,种群规模定为50,概率选择算子 $\eta=0.1$ 。并且环道路网交通的部分约束数据也进

表3 环道出入口间距统计表

交叉口	距离/m
①至②	335
②至③	214
③至④	257
④至⑤	331
⑤至⑥	246
⑥至⑦	428
⑦至①	289

行统一设置: $C_{\max} = 150$ s, $C_{\min} = 60$ s, $g_{\max} = 60$ s, $g_{\min} = 20$ s。② 仿真参数配置。各个出入口的车流量选取经卡口过车数据处理的真实环道出入口早高峰、平峰、晚高峰数据,车辆路径规划、车流分配按照实际出入口OD数据进行设置,在MATLAB中为上述商圈环道出入口信号协同控制模型及其优化算法编写程序,设置仿真时长为3 600 s。

4.3 仿真结果分析

经多目标信号协同控制优化的观音桥商圈环道信号灯会在研究时段内根据运行情况产生多套信号配时方案,展示其中一组优化前后信号配时方案,如下表4所示。

4.3.1 环道路网整体交通运行效益评价

由图3、图4可知,在早晚高峰期间,协调控制

后,各进出环通道排队长度减少,通行效率提高。其中,早高峰环道通行能力提升8.9%,早高峰进环通道总排队长度减少31.7%,出环通道总排队长度减少15.0%;晚高峰进出环通道总排队长度分别减少16.9%和16.2%。结果表明,经过本文方法协同控制之后,环道以及进出环通道的通行效率均有所提高。

4.3.2 环道出入口交通运行效益评价

对两个时段环道各出入口的交通运行效益进行对比分析,主要包括各进出环通道的排队长度优化情况,图5、图6分别为早高峰、晚高峰环道各出入口交通运行效益对比图。

由图5可知,早高峰时段建新东路、建新西路、建新南路等进环通道及建新北路、建北二支路等出环通道排队较长,反映出较大交通需求。采用本文信号协同控制方法后,这些通道排队长度明显减少,交通流动性提升。例如,建新东路进环通道排队长度由最高约150 m降至80 m,优化效果显著。

由图6可知,晚高峰时段,进环通道(如建新东路、建新南路)和出环通道(如建新北路、建北二支路)的排队长度显著增加,接近环道路网设计饱和流量。本文信号协同控制方法实施后,虽优化效果不及早高峰,但排队长度仍有所减少,交通流动性得以提升。

表4 观音桥环道各点位信号协同控制优化前后信控方案

Tab.4 Signal control schemes at each point of ring roads in Guanyinqiao before and after optimization

点位名称	原信控方案	优化后信控方案
①	无信号控制	无信号控制
②	内车道绿灯25 s,外车道绿灯25 s,周期75 s	内车道绿灯30 s,外车道绿灯25 s,周期75 s
② 出环通道下游交叉口	直行常绿,左转绿灯27 s,周期100 s	直行常绿,左转绿灯35 s,周期90 s
③	右转绿灯39 s,周期85 s	右转绿灯45 s,周期90 s
③ 出环通道下游交叉口	左转绿灯22 s,右转绿灯65 s,周期93 s	左转绿灯30 s,右转绿灯60 s,周期90 s
④	无信号控制	无信号控制
④ 出环通道下游交叉口	右转绿灯47 s,周期68 s	右转绿灯40 s,周期68 s
⑤	无信号控制	无信号控制
⑤ 出环通道下游交叉口	左车道常绿,中间车道绿灯时间38 s,右车道绿灯时间37 s,周期81 s	左车道常绿,中间车道绿灯时间42 s,右车道绿灯时间40 s,周期90 s
⑥	无信号控制	无信号控制
⑥ 出环通道下游交叉口	直行与左转绿灯时间93 s,周期120 s	直行与左转绿灯时间90 s,周期120 s
⑦	内侧车道绿灯37 s,外侧车道绿灯37 s,周期90 s	内侧车道绿灯40 s,外侧车道绿灯30 s,周期85 s
⑦ 出环通道下游交叉口	直行绿灯时间57 s,周期80 s	直行绿灯时间50 s,周期80 s
小苑路入口	直行绿灯42 s,右转绿灯60 s,周期102 s	直行绿灯52 s,右转绿灯52 s,周期95 s
浪漫金街断面	直行绿灯60 s,周期84 s	直行绿灯46 s,周期75 s
北城艺术大厦断面	直行绿灯40 s,周期68 s	直行绿灯44 s,周期72 s

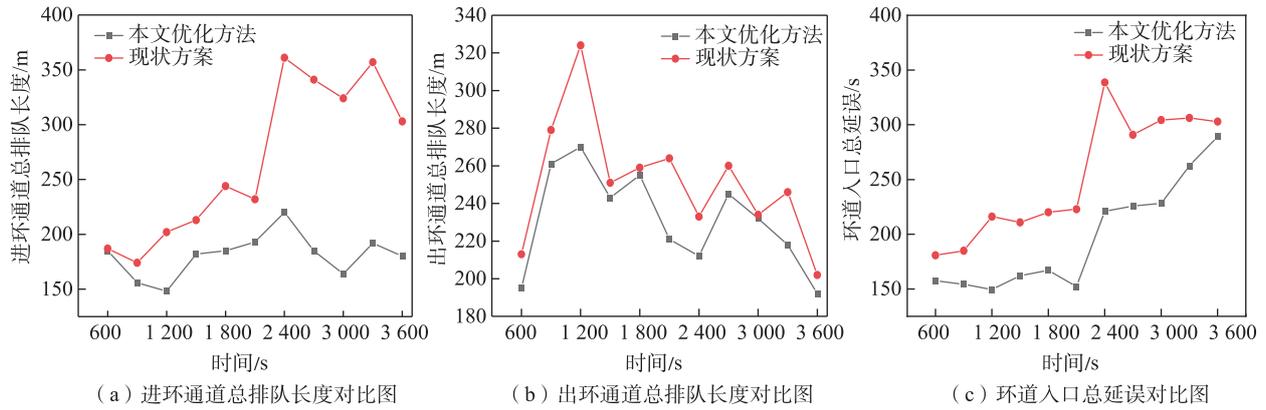


图3 早高峰环道整体交通运行效益对比图

Fig. 3 Comparison of overall traffic operation benefit of ring roads in morning peak

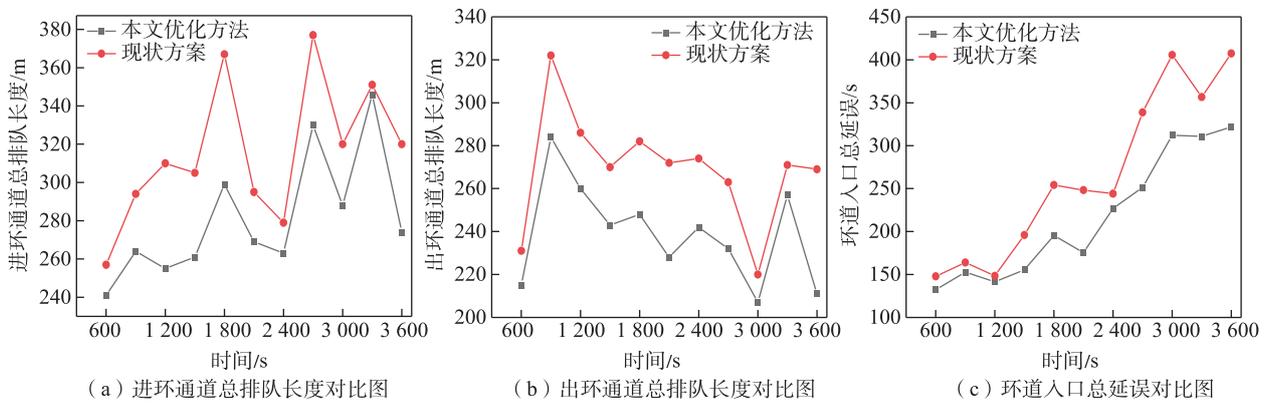


图4 晚高峰环道整体交通运行效益对比图

Fig. 4 Comparison of overall traffic operation benefit of ring roads in evening peak

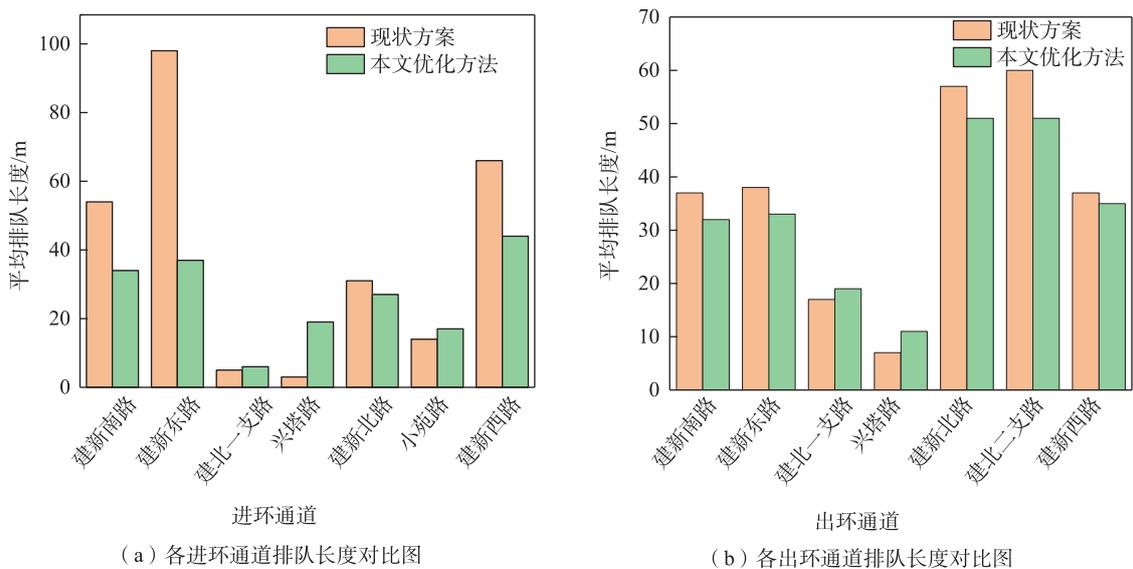


图5 早高峰环道各出入口交通运行效益对比图

Fig. 5 Comparison of traffic operation benefit at each entrance and exit of the ring roads in morning peak

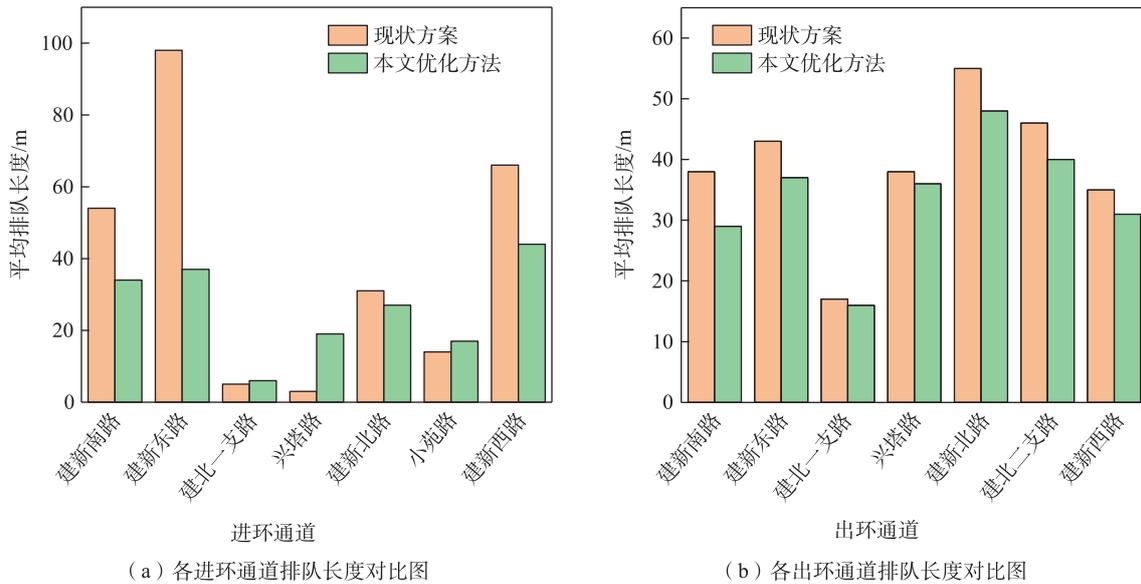


图6 晚高峰环道各出入口交通运行效益对比图

Fig. 6 Comparison of traffic operation benefits at each entrance and exit of ring roads in evening peak

5 结论

1) 通过多源数据分析环道交通特性,量化拥堵指数与在网车辆数关系,为信号协同控制提供依据。

2) 构建基于多目标优化的信号协同控制模型,优化环道通行能力及进出环通道排队长度,并采用改进NSGA-II算法求解。

3) 仿真结果表明,该方法相比原方案使早高峰环道通行能力提升8.9%,进环通道总排队长度减少31.7%,出环通道总排队长度减少15.0%,验证了方法的有效性。

参考文献:

- [1] NG K M, REAZ M, MOHD ALI M A. Model-based control strategy for oversaturated traffic regimes based on the LWR-IM traffic model[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(5): 896-904.
- [2] 邓明君, 胡辛瑕, 李响, 等. 基于车速引导和感应控制的干线协调优化方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1309-1321.
DENG M J, HU X X, LI X, et al. Arterial coordination optimization method based on vehicle speed guidance and inductive control[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1309-1321.
- [3] 曹悦. 面向系统最优状态的区域交通信号协同控制策

略[D]. 西安: 长安大学, 2023.

CAO Y. Regional coordinated traffic signal control strategy for system optimal state[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.

- [4] 龙琼, 胡列格, 张谨帆, 等. 考虑交通管理策略的交叉口信号控制多目标优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2503-2508.

LONG Q, HU L G, ZHANG J F, et al. Multi-objective optimization based on traffic management strategy for intersection signal controlling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2503-2508.

- [5] WANG T, CAO J H, HUSSAIN A. Adaptive traffic signal control for large-scale scenario with cooperative group-based multi-agent reinforcement learning[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 103046.

- [6] 马成元, 朱际宸, 赖金涛, 等. 基于群体决策的多交叉口协同控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(3): 152-161.

MA C Y, ZHU J C, LAI J T, et al. Multi-intersection coordinated control method based on group decision-making[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(3): 152-161.

- [7] HUO Y S, TAO Q H, HU J M. Cooperative control for multi-intersection traffic signal based on deep reinforce-

- ment learning and imitation learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 199573-199585.
- [8] 蒋贤才, 张龙洋, 高苏. 环形交叉口待行区设置与信号控制方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 143-152.
JIANG X C, ZHANG L Y, GAO S. Design and signal control method for waiting areas of round about[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 143-152.
- [9] 陈晓利, 韩锋斌. 基于多智能体的城市环道交通信号控制算法[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(1): 37-45.
CHEN X L, HAN F B. An urban ring road traffic signal control algorithm based on multi-agents[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(1): 37-45.
- [10] STUPIN A, KAZAKOVITSEV L, STUPINA A. Control of traffic congestion by improving the rings and optimizing the phase lengths of traffic lights with the help of anylogic[J]. Transportation Research Procedia, 2022, 63: 1104-1113.
- [11] ADRIANA S M, LAURENT D, MAURICIO C. Multi-objective traffic signal optimization using 3D mesoscopic simulation and evolutionary algorithms[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 86: 120-138.
- [12] KIM K O, RILETT L R. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings, August 25-29, 2001[C]. Oakland: IEEE, 2001.
- [13] 郑喆, 袁见, 安琨, 等. 排阵式交叉口车道功能-信号控制协同优化及效益分析[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 238-250.
ZHENG Z, YUAN J, AN K, et al. Integrated optimization model of lane function and signal control for tandem intersections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 238-250.
- [14] ZHANG X H, FAN X M, YU S Y, et al. Intersection signal timing optimization: a multi-objective evolutionary algorithm[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1506.
- [15] MA W J, WAN L J, YU C H, et al. Multi-objective optimization of traffic signals based on vehicle trajectory data at isolated intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 120: 102821.
- [16] 陈小红, 钱大琳, 石冬花. 基于慢行交通的交叉口信号配时多目标优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(2): 106-111.
CHEN X H, QIAN D L, SHI D H. Multi-objective optimization of signal timing for the non-motorized transport at intersection[J]. Journal of Transportation systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(2): 106-111.
- [17] JOVANOVIĆ A, TEODOROVIĆ D. Multi-objective optimization of a single intersection[J]. Transportation Planning and Technology, 2021, 44(2): 139-159.
- [18] PANG L M, ISHIBUCHI H, SHANG K. NSGA-II with simple modification works well on a wide variety of many-objective problems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 190240-190250.
- [19] ASLANI M, MESGARI M S, WIERING M. Adaptive traffic signal control with actor-critic methods in a real-world traffic network with different traffic disruption events[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 85: 732-752.



第一作者: 陈洋(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通管理与控制。E-mail: 622220110017@mails.cqjtu.edu.cn。



通信作者: 李子木(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为交通管理与控制。E-mail: 611220110005@mails.cqjtu.edu.cn。

(责任编辑: 熊玲玲)