

基于改进 NSGA-II 的交叉口信号配时多目标优化

陈秀锋, 王瑞聪, 陈咨羽, 高梦圆, 郭玉彤

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要:针对城市交叉口信号配时多目标优化的求解效率问题,设计了一种基于改进 NSGA-II 的城市交叉口信号配时优化方案。该方法采纳车辆延误、停车次数、通行能力 3 个评价指标设计了多目标信号配时优化模型,并提出了改进的 NSGA-II (NSGA-II-DE)对配时模型进行求解。NSGA-II-DE 采用 DE/Rand/1 的全局变异策略对 NSGA-II 算法选择策略进行改进,并设计了种群动态更新算法,提高了算法的收敛速度和求解精度。结果表明改进算法获得了较好的 Pareto 最优解,通过典型交叉口仿真验证,相对于 NSGA-II 算法,NSGA-II-DE 方法设计配时方案平均车辆延误优化提升 13.42%,排队长度优化提升 16.73%,平均停车次数优化提升 15.50%,能够实现城市交叉口的最优化控制。

关键词:交通工程;信号配时;多目标优化;T 形交叉口;城市交通;相位;NSGA-II-DE 算法;全局变异

中图分类号:U491.2

文献标志码:A

文章编号:1673-4602(2024)01-0111-07

Multi-objective optimization of intersection signal timing based on improved NSGA-II algorithm

CHEN Xiufeng, WANG Ruicong, CHEN Ziyu, GAO Mengyuan, GUO Yutong

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: A method for optimizing signal timing at urban intersections based on the improved NSGA-II algorithm is proposed in this study to address the efficiency problem of multi-objective optimization of signal timing at urban intersections. The method first builds a multi-objective signal timing optimization model by using the three performance indicators of vehicle delay, number of stops and capacity, and then proposes an improved NSGA-II (NSGA-II-DE) algorithm to solve the timing model. The NSGA-II-DE modifies the NSGA-II algorithm selection strategy by using the global variation strategy of DE/Rand/1, and increases the convergence speed and solution accuracy of the algorithm by designing the population dynamic update algorithm. The results show that the improved algorithm obtains a better Pareto optimal solution. Through the simulation verification of typical intersections, it is found that compared with the NSGA-II algorithm, the average vehicle delay optimization of the timing scheme of this method is improved by 14.04%, the queue length optimization is improved by 18.39%, and the average stop number optimization is improved by 18.22%. The optimization method proposed in this study can realize the optimal control of

收稿日期:2022-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62003182);山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MG012;ZR2020MG021);山东省重点研发计划(2019GGX101038)

作者简介:陈秀锋(1977-),男,山东莱芜人。博士,副教授,主要从事交通控制研究。E-mail:chenhill7765@163.com。

urban intersections.

Key words: traffic engineering; signal timing; multi-objective optimization; T-shaped intersection; urban traffic; phase; NSGA-II-DE algorithm; global variance

随着城市化进程的进一步的加快和车辆占有率的增加,居民出行的需求也日益增加,平面交叉口堵塞问题已成为世界众多城市交通面临的主要问题之一。交通信号配时是改善城市道路拥堵、优化道路通行效率的重要策略^[1]。目前,利用多目标优化措施解决信号交叉口配时优化问题逐渐成为热点。刘畅等^[2]以交叉口延误、一氧化碳排放为优化指标,建立多目标信号配时优化模型,通过优化的粒子群算法求解模型;牟亮等^[3]提出了车辆延误-尾气排放联合优化目标模型,将车辆延误和尾气排放放到同一量级进行比较,通过 Vissim 仿真证实了模型的优越性;CHEN 等^[4]以延误、停车和通行能力作为性能指标,约束条件为饱和度,根据交叉口特点赋予权重,通过遗传算法进行信号配时。牟海维等^[5]以车辆延误、行人延误、停车率、通行能力、尾气排放作为性能指标,采用粒子群优化算法求解,仿真结果表明:相对于经典方法,极大地减少了交叉口的总延误时间以及停车率,增加了路段通行效率;张小雨等^[6]以延误、通行能力、停车次数、汽油车排放及柴油车排放等 5 个目标建立多目标规划模型,运用遗传算法求解,通过实际交叉口验证获得了较好的控制效果;JIA 等^[7]提出了一个新颖的多目标配时模型,以人均延误、汽车排放和交叉口饱和和流量为目标,经过一种启发式算法证实了模型的优越性;ZHANG 等^[8]以交通流为基本数据,结合交通流描述理论和尾气排放估算规则,建立了一个信号配时问题的多目标模型,通过混合约束策略和 NSGA-II 框架相结合的方法,有效增加了多目标模型的求解质量和效率。但是,现有研究成果普遍将多个优化目标加权组合成一个综合目标^[9-11],或者通过转约束法将其他控制目标包含在约束条件中,从优化理论的角度看,这仍属于单目标优化模型^[12],不能够让多个目标一起获得最优解;另外,一些进化算法,如非支配排序的遗传算法(NSGA-II),存在多目标求解耗时、收敛精度差和难以获得最优解的问题^[13-14]。为此,本文设计了车辆延误、停车次数、通行能力为评价指标的信号配时多目标优化模型,并提出了改进的 NSGA-II 算法(NSGA-II-DE)对模型进行求解,有效提升信号配时多目标优化算法的收敛速度和求解精度。

1 信号配时多目标优化模型

1.1 多目标函数

利用车辆平均延误、平均停车次数和通行能力 3 个评价目标,来设计信号配时多目标优化模型。为了更好地比较指标的优化程度,采用比值法进行无量纲化处理,多目标函数表达式为

$$F_i(\theta) = \min \left\{ \frac{\bar{D}}{\bar{D}_0}, \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}, \frac{Q_0}{Q} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $F_i(\theta)$ 为 n 个目标函数, θ 为参数; \bar{D}, \bar{H}, Q 分别为周期车辆平均延误、平均停车次数以及通行能力; $\bar{D}_0, \bar{H}_0, Q_0$ 分别为现状周期车辆平均延误、平均停车次数以及通行能力,是常数; i 为信号周期相位数。

1.1.1 车辆平均延误

通过 Webster 公式中的延误计算^[15],车辆平均延误的组成可以分为 2 部分,分别为正常相位延误、随机延误,相位车辆平均延误模型为

$$d_i = \frac{C(1-\lambda_i)}{2(1-\lambda_i x_i)} + \frac{x_i^2}{2q_i(1-x_i)} - 0.65 \left(\frac{C}{q_i} \right)^{\frac{1}{3}} x_i^{(2+5\lambda_i)} \quad (2)$$

式中: d_i 为第 i 相位的车辆平均延误; C 为信号周期; λ_i 为相位绿信比; x_i 为饱和度,即到达交通量与通行能力的比值; q_i 为进口道车流量。

随机延误相对较小,在实际计算中常忽略不计,本文采用式(2)前 2 项,得出相位车辆平均延误为

$$d_i = \frac{C(1-\lambda_i)}{2(1-\lambda_i x_i)} + \frac{x_i^2}{2q_i(1-x_i)} \quad (3)$$

相位车辆平均延误加权得出周期车辆平均延误:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (4)$$

1.1.2 平均停车次数

根据 Webster 相关理论,车辆在交叉口的停车次数为

$$h_i = 0.9 \times \frac{C(1-\lambda_i)}{1-y_i} \quad (5)$$

式中: h_i 为相位平均停车次数; y_i 为进口道车辆到达率和饱和流量之比的比值。

得到加权相位平均停车次数周期平均停车次数为

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (6)$$

1.1.3 通行能力

依据停车线原理^[16],周期内通行能力计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n S_i \lambda_i \quad (7)$$

式中: S_i 为某一相位的饱和流量。

1.2 约束条件

考虑到信号配时控制的实际情况,多目标优化模型对于目标的约束主要包含以下 3 个方面:①信号周期时长 C 介于最大周期和最小周期之间。②有效绿灯时间 g 处于最短绿灯时间和最长绿灯时间之间,并且周期长等于各相位有效绿灯长加上信号总损失时间 L 。③根据饱和度的定义,如果饱和度过小,可以采用传统的信号配时方案解决需求,没有必要应用多目标优化策略;如果饱和度过高,车辆的运行状态会因为干扰而不稳定,从而进入过饱和状态^[17],通过以上分析, x_i 一般在 0.75~0.90 之间。

综上,约束条件如下:

$$s. t. = \begin{cases} C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ g_{i\min} \leq g_i \leq g_{i\max} \\ \sum_{i=1}^m g_i = C - L \\ 0.75 < x_i < 0.9 \end{cases} \quad (8)$$

2 改进 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法是依靠遗传算法并且利用快速非支配排序及精英策略的多目标优化算法,NSGA-II 中存在模拟二进制交叉算子,这种计算会导致收敛速度较慢、移动空间不足,存在陷入局部的最优解^[18]的问题。本文采用 DE 算法的交叉变异策略改进 NSGA-II 算法的子代生成,并且动态更新种群避免 DE 算法种群多样性的不断降低,在提高算法收敛速度的同时得到全局最优解。

2.1 交叉变异策略的改进

利用 DE 算法中的 DE/Rand/1 全局变异策略^[19],对 NSGA-II 算法的变异策略进行应用改进,在解空间内快速而广泛地寻找最优解。对于第 t 代的每个向量 \mathbf{x}_t ,随机选择 3 个不同的目标向量 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$,通过变异方案生成变异个体:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \mathbf{x}_1^t + F(\mathbf{x}_2^t - \mathbf{x}_3^t) \quad (9)$$

式中: F 为变异率(差分向量的缩放因子)。

变异个体后,通过二项式分布交叉法得到实验种群:

$$u_{j,i}^{t+1} = \begin{cases} v_{j,i}^t, & \text{if } r_i \leq C_r \\ x_{j,i}^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (10)$$

式中: $x_{j,i}^t$ 为第 i 个体的 j 维分量; r_i 为随机数, $r_i \in [0, 1]$; C_r 为交叉参数, 控制交叉的速率或概率, $C_r \in [0.1, 0.8]$, 一般首选 $C_r = 0.5$ 。

2.2 种群动态更新

人为设定种群数临界值, 当种群数量下降到临界值时, 把种群适应度高于种群平均适应度的保留下来, 对适应度低于种群平均适应度的根据式(11)进行动态更新, 进一步保证种群的多样性。通过随机数产生远离当前个体的值, 若 $x_j^t \geq \bar{x}_j^t$, 则通过 x_j^t 与 x_j^{Low} 的差值产生远离当前个体的值; 若 $x_j^t < \bar{x}_j^t$, 则通过 x_j^t 与 x_j^{Up} 的差值产生远离当前个体的值。

$$\begin{cases} x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t - \text{rand}(0, 1) \times (x_j^t - x_j^{Low}) & x_j^t \geq \bar{x}_j^t \\ x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + \text{rand}(0, 1) \times (x_j^t - x_j^{Up}) & x_j^t < \bar{x}_j^t \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_j^{Up} , x_j^{Low} 分别为第 j 维向量的上下界; \bar{x}_j^t 为第 t 代所有个体 j 维向量的平均值。

种群动态更新策略有效改善了多样性降低、局部收敛的情况, 经过保留和更新, 并不破坏优化过程。

NSGA-II-DE 算法的全部算法计算过程如图 1 所示。

1) 初始化种群, 利用随机函数生成多个初始个体种群 P_t , 根据多目标优化问题的维数, 选择种群数目, 一般为 $n = 10d$, 其中 d 为问题维数。设置最大迭代次数 t_{max} , 初始化迭代次数 $t = 0$;

2) 是否达到目标条件 ($t > t_{max}$), 如果达到目标条件则终止计算过程, 得到帕累托 (Pareto) 最优解^[20], 不满足会进行下一步;

3) 将快速非支配排序策略应用到种群中, 指定每一层的适应度;

4) DE 算法交叉变异算子产生下一代, 与父代种群合并种群;

5) 定量评价种群多样性, 得到种群多样性;

6) 若多样性大于设定值, 执行下一步, 否则根据公式(11)进行更新再执行下一步;

7) 在拥挤度距离的设计中, 利用精英策略选择 N 个个体成为新的父代种群 P_{t+1} ;

8) $t = t + 1$, 返回第 2) 步。

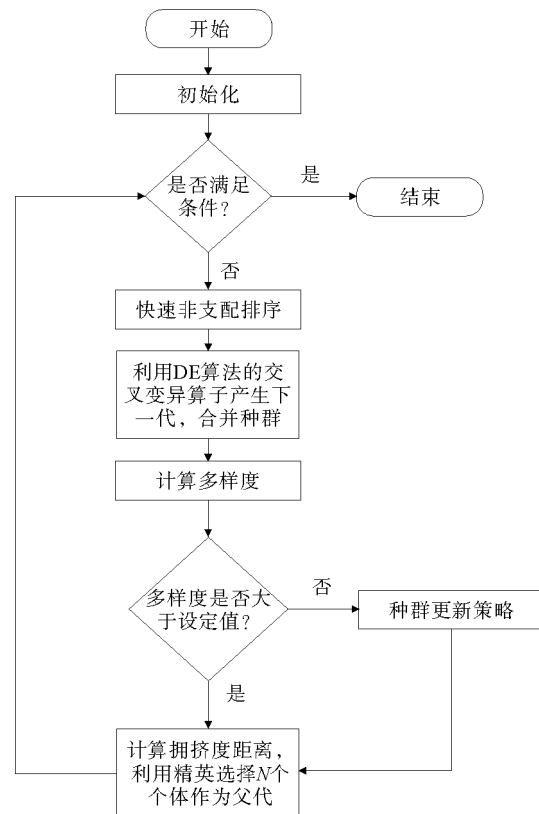


图 1 NSGA-II-DE 算法流程

3 实例分析

3.1 交叉口数据采集

T 形交叉口作为沿海景区常见的交叉口, 高峰时段容易发生堵塞, 为解决景区交通拥堵, 选择青岛市崂山区某 T 形交叉口进行实证分析, 该交叉口三相位控制。交叉口现状渠化及相位相序见图 2 所示, 表 1 为早高峰和晚高峰各进口道小时流量。

3.2 信号配时优化

为了更好地比较 NSGA-II-DE 算法的优越性, 本文选取 NSGA-II 算法和本文研究方法针对同一配时

问题进行求解。令 $F_1 = \min\left(\frac{D}{D_0}\right), F_2 = \min\left(\frac{H}{H_0}\right), F_3 = \max\left(\frac{Q}{Q_0}\right)$ 。

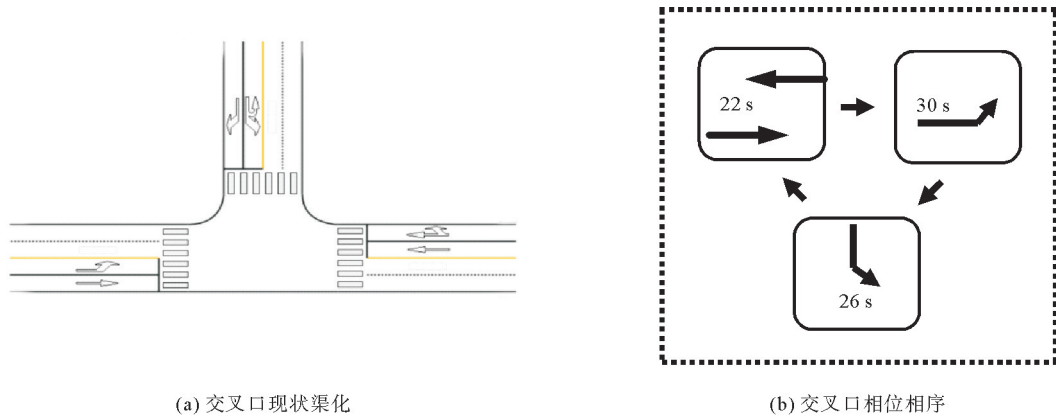


图 2 交叉口渠化及信号相位现状

表 1 早高峰和晚高峰时段小时流量

进口方向	直行流量		左转流量		右转流量	
	早高峰	晚高峰	早高峰	晚高峰	早高峰	晚高峰
东进口道	651	552	0	0	66	144
西进口道	660	672	570	462	0	0
北进口道	0	0	168	192	306	252

NSGA-II 算法与 NSGA-II-DE 算法 Pareto 最优解集如图 3 所示,相对于图 3(a),图 3(b) Pareto 最优解分布较为集中,因此具备更好的分布性。收敛性在 2 种算法之间差异不大。这个解集说明了 3 个目标之间的关系,从图 3 可以看出,要想获得较好的通行能力,车辆延误与停车次数也需要控制在一定水平内。在多目标优化过程中存在一个最优的解集,即使模型达到最优。

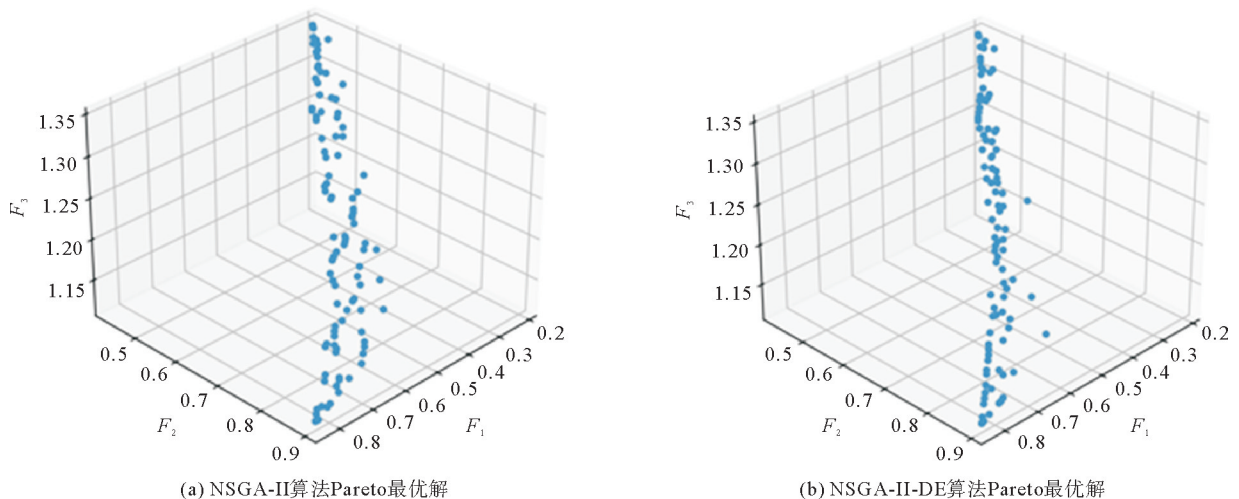


图 3 NSGA-II 和 NSGA-II-DE Pareto 最优解

利用 NSGA-II-DE 算法,得到最优信号周期时间为 106 s,东西直行相位有效绿灯时间 35 s,西进口道左转相位有效绿灯时间 40 s,北进口道左转相位有效绿灯时间 16 s,具体配时方案如图 4 所示。

3.3 仿真分析

根据表 1 的交通数据,饱和流量设定为 1650 pcu/h,通过 Vissim 软件仿真工具^[21-22]仿真交叉口,如图

5所示。为了更准确体现优化算法的优越性,对现状配时方案、NSGA-II配时方案以及本文配时方案进行对比,以平均停车延误、停车次数和排队长度作为参数,结果如表2所示。

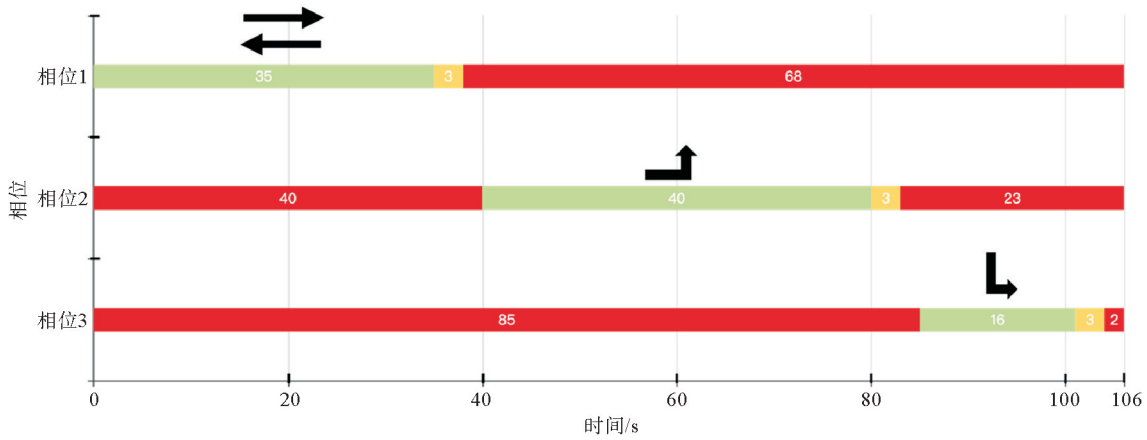
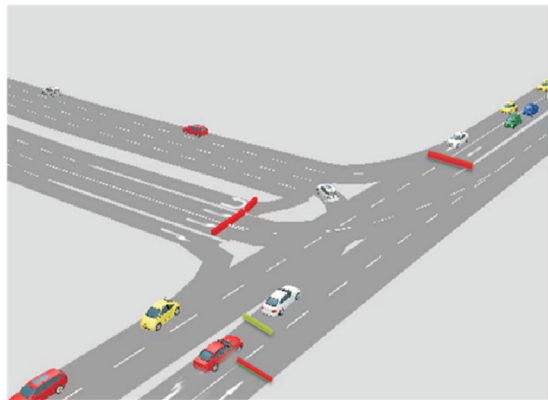


图4 优化后信号配时

■ 红灯; ■ 绿灯; ■ 黄灯



(a) 交叉口现状



(b) 交叉口仿真

图5 交叉口仿真

表2 配时方案效果对比

方案	周期/s	东至西			东至北			西至东		
		平均停车延误/s	排队长度/m	平均停车次数/次	平均停车延误/s	排队长度/m	平均停车次数/次	平均停车延误/s	排队长度/m	平均停车次数/次
现状	90	30.49	30.19	0.96	19.20	14.45	0.84	36.46	102.13	1.51
NSGA-II	121	26.95	25.36	0.81	16.97	13.16	0.72	32.23	83.04	1.25
NSGA-II-DE	106	23.12	20.51	0.71	14.27	10.60	0.61	28.96	73.41	1.01

由表2可知,相比于现状信号配时方案,NSGA-II-DE配时方案交叉口进口道的车辆平均延误分别降低了27.47%,30.89%,23.31%,排队长度分别降低了35.39%,33.56%,31.06%,平均停车次数分别降低了25.44%,31.79%,35.10%,优化效果明显。同时,比较于NSGA-II法优化方案,NSGA-II-DE配时方案交叉口进口道的车辆平均延误分别降低了14.76%,16.90%,10.47%,排队长度分别降低了19.94%,21.05%,14.17%,平均停车次数分别降低了12.27%,20.83%,21.55%。结果表明,改进的NSGA-II算法能够有效实现车辆停车延误、道路通行能力、车辆停车次数等多项性能指标的最优化控制。

4 结束语

本文将车辆延误最小、停车次数最少和通行能力最大作为评价尺度对青岛市崂山区某交叉口配时优化。鉴于传统的优化方法解决多目标问题存在缺陷,设计了一个经过改进的 NSGA-II 算法,以此用来求解配时优化模型,并获得了良好的 Pareto 最优解,最后通过 Vissim 软件模拟证明了 NSGA-II-DE 多目标优化模型的合理性和有效性。通过差分交叉变异来改进 NSGA-II 子代,算法会增强全局寻优能力,收敛特性与鲁棒性更好,而在实际的信号控制系统上,延误和停车次数均明显下降。但是本文以 T 形交叉口为例,普遍性不足,未来还需要以更为常见的十字交叉口作为验证。

参考文献(References):

- [1] 王秋平,谭学龙,张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报,2006(2):60-64.
WANG Qiuping,TAN Xuelong,ZHANG Shengrui. Signal timing optimization of urban single-point intersections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2006(2):60-64.
- [2] 刘畅,魏丽英. 考虑人均延误和人均排放的信号配时优化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(9):83-88.
LIU Chang,WEI Liying. Signal timing optimization model considering per capita delay and per capita emissions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(9):83-88.
- [3] 牟亮,赵红,李燕,等. 基于改进 NSGA-II 的区域交通信号优化控制[J]. 复杂系统与复杂性科学,2021,18(3):80-87.
MOU Liang,ZHAO Hong,LI Yan,et al. Regional traffic signal optimal control based on improved NSGA-II [J]. Complex Systems and Complexity Science,2021,18(3):80-87.
- [4] CHEN Xiaohong,QIAN Dalin,SHI Donghua. Multi-objective optimization method of signal timing for the non-motorized transport at intersection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2011,11(2):106-111.
- [5] 牟海维,戚先锋,刘彦昌,等. 单交叉口多目标联合优化的信号配时研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(9):62-68.
MOU Haiwei,QI Xianfeng,LIU Yanchang,et al. Research on signal timing based of multi-objective joint optimization at single intersection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2020,34(9):62-68.
- [6] 张小雨,邵春福. 城乡结合部道路交叉口多目标信号配时优化模型[J]. 系统仿真学报,2020,32(4):709-717.
ZHANG Xiaoyu,SHAO Chunfu. Multi-objective signal timing optimal model for rural-urban fringe area intersection[J]. Journal of System Simulation,2020,32(4):709-717.
- [7] JIA Hongfei,LIN Yu,LUO Qingyu,et al. Multi-objective optimization of urban road intersection signal timing based on particle swarm optimization algorithm[J]. Advances in Mechanical Engineering,2019,11(4):1-9.
- [8] ZHANG Xinghui,FAN Xiumei,YU Shunyuan,et al. Intersection signal timing optimization: A multi-objective evolutionary algorithm[J]. Sustainability,2022,14(3):1506-1506.
- [9] 李娟,贾庭勇. 基于人均延误的交叉口信号配时优化[J]. 公路交通科技,2021,38(11):134-141.
LI Juan,JIA Tingyong. Signal timing optimization for intersection based on per capita delay[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(11):134-141.
- [10] 瞿高峰,陈淑燕. 粒子群优化算法在交通信号配时中的应用[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2006(4):255-258.
QU Gaofeng,CHEN Shuyan. Application of particle swarm optimization algorithm to traffic signal timing[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition),2006(4):255-258.
- [11] 张萌萌,贾磊,邹难,等. 单点交叉口鲁棒优化信号配时研究[J]. 公路交通科技,2011,28(1):107-111.
ZHANG Mengmeng,JIA Lei,ZOU Nan,et al. Robust optimal traffic signal timing of urban single-point intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(1):107-111.
- [12] 高云峰,徐立鸿,胡华,等. 交叉口定周期信号控制多目标优化方法[J]. 中国公路学报,2011,24(5):82-88.
GAO Yunfeng,XU Lihong,HU hua,et al. Multi-objective optimization method for fixed-time signal control at intersection[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(5):82-88.
- [13] RAINER Storn. On the usage of differential evolution for function optimization[C]//Proceedings of North American Fuzzy Information Processing. Berkeley CA:IEEE,1996:519-523. DOI:10.1109/NAFIPS.1996.534789.
- [14] RAINER Storn,KENNETH Price. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization,1997,11(4):341-359.
- [15] WEBSTER F V. Traffic signal settings[J]. Road Research Technical Paper,1958,39:225-255.