

## 改进蒲公英算法的交叉口信号配时优化研究

王萌<sup>1</sup>, 陈秀锋<sup>1,\*</sup>, 杨金顺<sup>1</sup>, 单冬梅<sup>2</sup>, 郭玉彤<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 高密市公安局交警大队, 潍坊 261500)

**摘要:** 为提升信号控制交叉口的通行效率, 构建平均车辆延误和平均停车次数最小的多目标配时优化模型, 并改进蒲公英算法对模型求解。在改进算法中引入免疫函数, 避免非支配解变异, 提高计算效率和精度; 采用 TOPSIS 法进行非支配解排序, 得到模型最优解。选取青岛市常州路-扬州路信号交叉口实际工程案例, 用 VISSIM 建模道路交叉口运行环境, 仿真对比分析 Webster 法、传统的多目标蒲公英优化算法 (MDOA) 和本文算法配时优化方案的运行效果。结果表明: 本文算法设计方案优化效果明显, 相比传统 MDOA 算法, 高峰时段平均车辆延误和平均停车次数分别降低了 11.63%、12.50%, 平峰时段分别降低了 5.70%、9.78%, 可有效提升交叉口的信号控制效果。

**关键词:** 信号配时; 改进蒲公英算法; 多目标优化; Vissim 建模

**中图分类号:** U491.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)05-0136-07

## Research on intersection signal timing optimization based on advanced dandelion algorithm

WANG Meng<sup>1</sup>, CHEN Xiufeng<sup>1,\*</sup>, YANG Jinshun<sup>1</sup>, SHAN Dongmei<sup>2</sup>, GUO Yutong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Gaomi City Public Security Bureau Traffic Police Brigade, Weifang 261500, China)

**Abstract:** In order to improve the traffic efficiency of signalized intersections, a multi-objective timing optimization model with the minimum average vehicle delay and the minimum average number of stops is constructed, and an advanced dandelion algorithm is proposed to solve the model. An immune function is introduced into the advanced algorithm to avoid the mutation of non-dominated solutions and improve the computational efficiency and accuracy. TOPSIS method is used to sort the non-dominated solutions and the optimal timing scheme is obtained. Qingdao Changzhou Road-Yangzhou Road signalized intersection is selected as an engineering case. Vissim is used to model the operating environment of the road intersection. The operation effects of timing optimization schemes designed by Webster method, traditional MDOA and the algorithm proposed in this study are simulated and comparatively analyzed. The results show that the optimization effect of the scheme designed by the algorithm proposed in this study is obvious. Compared with the traditional MDOA algorithm,

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2023MG058)

作者简介: 王萌 (1999—), 女, 山东临沂人。硕士, 研究方向为交通系统分析与控制优化。E-mail: vmeng1212@163.com。

\* 通信作者: 陈秀锋 (1977—), 男, 山东济南人。博士, 副教授, 主要从事城市交通控制方面的研究。

E-mail: chenxiufeng@qut.edu.cn。

this scheme can reduce the average vehicle delay and average number of stops by 11.63 % and 12.50 % in peak hours and by 5.70 % and 9.78 % in off-peak hours, thus effectively improving the control effect of signals at intersections.

**Key words:** signal timing; advanced dandelion algorithm; multi-objective optimization; Vissim modeling

城市交叉口信号配时优化可有效降低平均车辆延误,提升交通流运行效率,缓解信号控制交叉口的拥堵问题。国内外学者考虑平均车辆延误、排队长度、通行能力等影响因素,提出了一系列满足交叉口车流运行特性的多目标信号配时优化模型<sup>[1-3]</sup>。刘伟等<sup>[4]</sup>以逆向可变车道交叉口为研究对象,建立延误时间最小、通行能力最大的双目标配时优化模型,并提出 NSGA-II 算法求解模型。任其亮等<sup>[5]</sup>构建通行能力和车辆延误计算模型,提出考虑通行能力和平均延误的信号配时多目标优化模型,并验证其在逆向可变车道交叉口的应用效果。张小雨等<sup>[6]</sup>综合考虑延误、停车次数、车辆尾气排放量等参数指标,构建多目标配时优化模型,以解决城乡接合部道路交叉口控制优化问题。成卫等<sup>[7]</sup>建立延误与安全的综合成本模型,提出交叉口相位设计与配时综合优化方法。刘东波等<sup>[8]</sup>以多目标雷达交通流数据特征为基础,提出考虑交通流密度和排队长度的两阶段单点信号控制策略。郑保力等<sup>[9]</sup>以车辆释放大量为上层优化目标、车辆释放效率最大为下层优化目标,建立交叉口自适应双层规划模型,模型在不同交通状态下均具有较好优越性。

蒲公英算法(Dandelion Algorithm, DA),作为一种智能群体优化算法,以弥漫式并行搜索方式对解空间进行搜索寻求最优解,受到许多行业领域研究者的关注<sup>[10-11]</sup>。ZHU 等<sup>[12]</sup>提出了一种新的蒲公英算法用于突变播种,引入3种概率模型,基于模型选择高斯突变或 Levy 突变生成突变种子。HAN 等<sup>[13]</sup>提出基于极限学习机的改进蒲公英算法以判断种子的优劣性,选出优良种子得以生长繁殖。LIU 等<sup>[14]</sup>在蒲公英算法中引入贪婪选择策略以加快收敛速度,并将改进算法应用于核极限学习机(KELM)的参数优化来进行交通流预测。ZHAO 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于改进种子策略和混沌种群的二元蒲公英算法,在分类精度和搜索性能上有显著提高。陈秀锋等<sup>[16]</sup>构建交叉口周期总延误和延误不均衡度优化模型,并提出多目标蒲公英优化算法求解,验证了蒲公英算法在求解交叉口多目标信号配时优化模型方面的有效性。但以上算法在种群迭代中重视种子的优劣性,少有考虑对优秀基因的保护,造成劣质变异解抢占优秀解资源,降低算法效率。基于此,本文引入非支配解保护机制提升优秀基因的繁殖效率,从而保证种群迭代中优秀解资源比重,以加快算法的搜索效率和计算精度;采用 TOPSIS 法进行非支配解排序,得到优化模型最优解。

## 1 多目标信号配时优化模型

### 1.1 平均车辆延误

依据《美国道路通行能力手册》(HCM2016),信号交叉口进口道平均车辆延误分为均衡延误和增量延误,其表达式为

$$\bar{d}_{kj} = d_{kj} + d_{kj}^* = \frac{0.5C(1-\lambda)^2}{1 - \min(1, y_{kj})\lambda} + 900T \left[ (y_{kj} - 1) + \sqrt{(y_{kj} - 1)^2 + \frac{4y_{kj}}{TS_{kj}}} \right] \quad (1)$$

式中: $\bar{d}_{kj}$ 为相位 $k$ 进口道 $j$ 的平均车辆延误,s/辆; $d_{kj}$ 为相位 $k$ 进口道 $j$ 的车辆均衡延误,s/辆; $d_{kj}^*$ 为相位 $k$ 进口道 $j$ 的车辆增量延误,s/辆; $C$ 为周期时长,s; $\lambda$ 为相位 $k$ 的绿信比; $y_{kj}$ 为相位 $k$ 进口道 $j$ 的流量比; $T$ 为研究用时,h; $S_{kj}$ 为相位 $k$ 进口道 $j$ 的饱和流量,辆/h。

相位 $k$ 的平均车辆延误为

$$\bar{d}_k = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} \bar{d}_{kj} q_{kj}}{\sum_{j=1}^{n_k} q_{kj}} \quad (2)$$

式中:  $\bar{d}_k$  为相位  $k$  平均车辆延误, s/辆;  $n_k$  为相位  $k$  放行车道数, 条;  $q_{kj}$  为相位  $k$  进口道  $j$  的车辆到达率, 辆/h。

交叉口平均车辆延误:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{k=1}^n \bar{d}_k q_k}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad (3)$$

式中:  $\bar{d}$  为平均车辆延误, s/辆;  $n$  为周期相位数, 个;  $q_k$  为相位  $k$  的车辆到达率, 辆/h。

## 1.2 平均停车次数

为使车辆在交叉口处尽可能地顺畅通行, 平均停车次数为

$$\begin{cases} h_k = \frac{0.9(1-\lambda)}{1-y_k} \\ H = \frac{\sum_{k=1}^n h_k q_k}{\sum_{k=1}^n q_k} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $h_k$  为相位  $k$  的平均停车次数, 次/辆;  $y_k$  为相位  $k$  的流量比;  $H$  为周期平均停车次数, 次/辆。

## 1.3 信号配时优化模型

以平均车辆延误最小、平均停车次数最少为优化目标, 构建的多目标优化函数为

$$\begin{cases} \min \bar{d} = \min \frac{\sum_{k=1}^n d_k q_k}{\sum_{k=1}^n q_k} \\ \min H = \min \frac{\sum_{k=1}^n h_k q_k}{\sum_{k=1}^n q_k} \end{cases} \quad (5)$$

约束条件包括周期时长与有效绿灯时间。周期时长为各相位的有效绿灯时间与绿灯总损失时间之和, 需介于最大与最小值之间; 为确保通行效率与通行安全, 相位有效绿灯时间同样需介于最大与最小绿灯时间之间。约束条件为

$$\begin{cases} C = \sum_{k=1}^n g_k + L \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ g_{k\min} \leq g_k \leq g_{k\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $g_k$  为相位  $k$  有效绿灯时间, s;  $L$  为周期绿灯损失时间, s;  $C_{\min}$  为最小周期时长, s;  $C_{\max}$  为最大周期时长, s;  $g_{k\min}$  为相位  $k$  最小绿灯时间, s;  $g_{k\max}$  为相位  $k$  最大绿灯时间, s。

# 2 蒲公英算法的改进

## 2.1 蒲公英算法

设  $I^0 = \{I_1^0, I_2^0, \dots, I_l^0\}$  为初始配时方案的蒲公英初始种群;  $0$  为迭代次数,  $l$  为蒲公英编号, 每株蒲公英为一套信号配时方案。输出结果为各相位的绿灯时间, 动态种群规模如式(7)所示:

$$m^k = \begin{cases} m_{\max} \times \max \left( \frac{f_{\max}^{\tau} - f_{\text{mean}}^{\tau} + 0.003}{f_{\max}^{\tau} - f_{\min}^{\tau} + 0.003} \right), & m^{k-1} > m_{\min} \\ m_{\min}, & m^{k-1} \leq m_{\min} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $m^k$  为第  $k$  代蒲公英种群的数量; $m_{\max}$  种子数的最大值; $m_{\min}$  为种子数的最小值; $f_{\max}$  为最大蒲公英适应度值; $f_{\text{mean}}$  为平均蒲公英适应度值; $f_{\min}$  为最小蒲公英适应度值; $\tau$  取 1 代表平均车辆延误的适应度值,取 2 代表平均停车次数的适应度值。

$$R_y(k) = \begin{cases} R_{\max} - R_{\min}, & k = 1 \\ R_y(k-1) \times e^-, & k > 1, r = 1 \\ R_y(k-1) \times e^+, & k > 1, r \neq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $R_y(k)$  为第  $k$  代优秀蒲公英的飘落半径; $R_{\max}$  与  $R_{\min}$  分别为最大、最小飘落半径; $e^-$  为下降因子,取值 0.85; $e^+$  为增长因子,取值 1.21; $k$  为迭代次数; $r$  为种群适应度值的变化趋势,其表达式为

$$r = \frac{f_{\text{mean}}(k) + 0.003}{f_{\text{mean}}(k-1) + 0.003} \quad (9)$$

式中: $f_{\text{mean}}(k)$  为第  $k$  代蒲公英的平均适应度值; $f_{\text{mean}}(k-1)$  为第  $k-1$  代蒲公英的平均适应度值。

普通蒲公英的飘落半径为

$$R_p(k) = \begin{cases} R_{\max} - R_{\min}, & k = 1 \\ \epsilon \times R_p(k-1) + \max(I_y^k) - \min(I^k), & k \neq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $R_p(k)$  为普通蒲公英的飘落半径; $I_y^k$  为第  $k$  代优秀蒲公英的绿灯时间集; $I^k$  为第  $k$  代所有蒲公英的绿灯时间集; $\epsilon$  为权重,表达式为

$$\epsilon = 1 - \frac{n^y}{n_{\max}^y} \quad (11)$$

式中: $n^y$  为某一株蒲公英被选定为优秀蒲公英的次数; $n_{\max}^y$  为被选定的最大次数。

一株蒲公英代表信号控制的一套配时方案,种群繁殖过程中优秀蒲公英在播种时产生变异,变异配时方案的绿灯、周期时长表达式为

$$g_v = g_y \cdot (1 + V) \quad (12)$$

$$C_v = C_y \cdot (1 + V) \quad (13)$$

式中: $g_v$  为变异方案的绿灯时长, $s$ ;  $C_v$  为变异方案的周期时长, $s$ ;  $g_y$  为父代优秀蒲公英的绿灯时长, $s$ ;  $C_y$  为父代优秀蒲公英的周期时长, $s$ ;  $V$  为随机数,取值正态分布 $[0, 1]$ 。

## 2.2 蒲公英算法的改进

### 2.2.1 非支配解保护机制

随着蒲公英的生长繁殖,部分非支配解发生变异,在有限的生存空间下,变异产生的劣质解所占比例不断增大,抢占了其他非支配解的生存资源,降低了最优解的计算效率。本文提出一种非支配解保护机制以提高蒲公英算法搜索速度和精度,引入免疫函数,设计非支配解对子代变异的免疫概率,淘汰小于免疫概率的非支配解变异种子,降低变异劣质解的数量。免疫概率的表达式为

$$P_i = \frac{\sum_{j=3}^i r_{\max,j}^+ + \sum_{j=3}^i r_{\max,j}^- - \sum_{j=3}^i r_{\min,j}^+ - \sum_{j=3}^i r_{\min,j}^-}{\sum_{j=3}^i r_{i,j}^+ + \sum_{j=3}^i r_{i,j}^- - \sum_{j=3}^i r_{\min,j}^+ - \sum_{j=3}^i r_{\min,j}^-} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $P_i$  为非支配解  $i$  的免疫概率; $r_{\max,j}^+$  为适应度  $j$  的种群最高上拥挤度; $r_{\max,j}^-$  为适应度  $j$  的种群最高下拥挤度; $r_{\min,j}^+$  为适应度  $j$  的种群最低上拥挤度; $r_{\min,j}^-$  为适应度  $j$  的种群最低下拥挤度; $r_{i,j}^+$  为非支配解  $i$ 、适应度  $j$  的种群上拥挤度; $r_{i,j}^-$  为非支配解  $i$ 、适应度  $j$  的种群下拥挤度。

### 2.2.2 TOPSIS 法寻优

逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)是一种多目标决策分析方法,通过检测配时方案与最优解、最劣解的距离进行排序,使最佳配时方案的指标都达到最优值。将信号交叉口平均车辆延误、平均停车次数作为评价指标,无量纲化处理,计算评价指标到正负理想解的距离,并对所有非支配解排序,综合评价指标表达式为

$$F_l = \delta_l^+ / (\delta_l^+ + \delta_l^-) \quad (15)$$

式中： $F_l$  为综合评价指标， $F_l$  越大则表示解越优； $\delta_l^+$  为配时方案  $l$  到正理想解的距离； $\delta_l^-$  为配时方案  $l$  到负理想解的距离。

改进蒲公英算法的流程如图 1 所示。

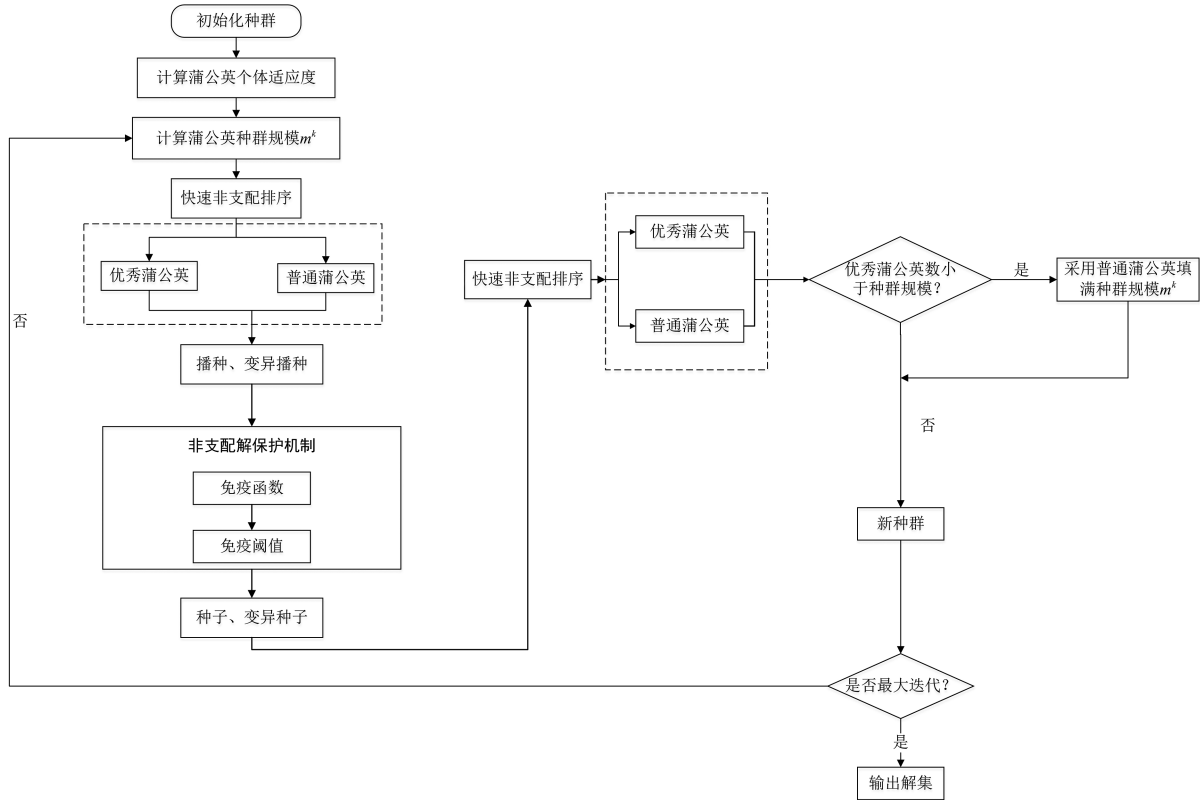


图 1 改进蒲公英算法流程

### 3 实例分析

#### 3.1 交叉口现状

为验证本文优化算法的有效性，以青岛市常州路-扬州路交叉口为实例进行分析。该交叉口为十字交叉口，交叉口渠化及高、平峰的信号配时方案如图 2 所示。表 1 和表 2 分别为常州路-扬州路交叉口早高峰时段(7:30—8:30)和平峰时段(9:30—10:30)的交通流量统计。

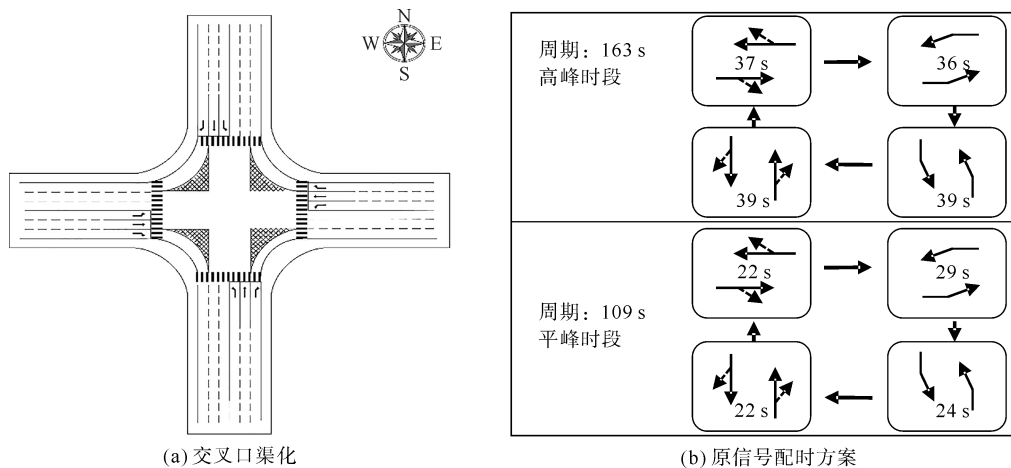


图 2 交叉口渠化与信号配时方案

进口道	左转车辆	直行车辆	右转车辆	合计
南进口	613	850	287	1750
北进口	221	781	176	1178
西进口	178	804	265	1247
东进口	198	735	110	1043

进口道	左转车辆	直行车辆	右转车辆	合计
南进口	493	661	262	1416
北进口	204	574	104	882
西进口	180	626	158	964
东进口	206	568	78	852

用本文算法和传统 MODA 算法对信号配时优化模型进行求解,参数设置为:初代蒲公英播种半径上限 1000、下限 0,种子数的最大值与最小值分别为 150、20,最大迭代次数为 200,最大周期时长为 300 s,最小周期时长 60 s,最大、最小绿灯时间分别为 100 和 10 s,绿灯间隔时间为 3 s。

### 3.2 算法性能分析

图 3 为两种算法的适应度进化曲线,可以看出,改进多目标蒲公英优化算法 (AMDOA) 的平均车辆延误适应度值在第 36 代已经收敛,平均车辆延误适应度值为 37 s/辆;而 MDOA 到第 50 代才收敛,适应度值达到 43 s/辆,改进算法收敛速度提高了 28.00%。对于平均停车次数适应度值,AMDOA 在第 60 代已经收敛,适应度值为 0.795 次/辆;而 MDOA 到第 89 代才收敛,适应度值达到 0.82 次/辆,改进算法收敛速度提高了 32.58%。

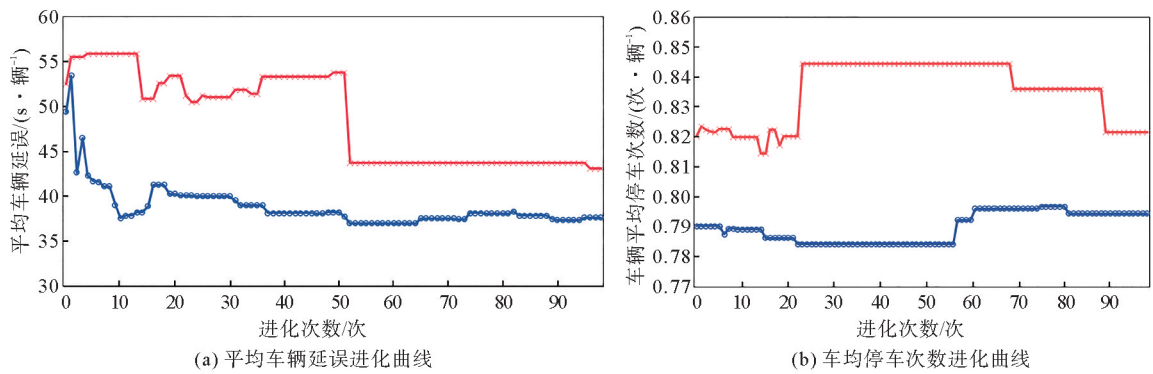


图 3 适应度进化曲线对比  
—AMDOA; —MDOA

### 3.3 配时优化效果检验

基于本文算法得到的信号配时优化方案(高、平峰 2 个时段)见图 4。

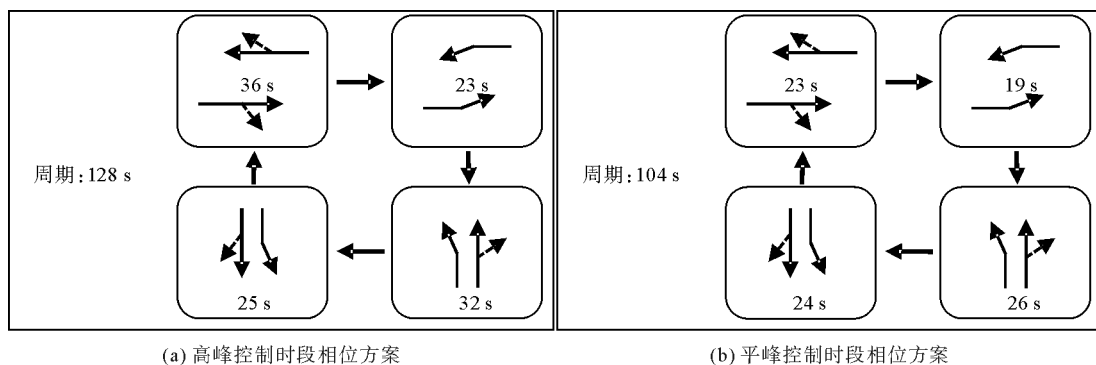


图 4 交叉口信号配时优化方案

为验证改进多目标蒲公英优化算法对于单交叉口信号配时设计的有效性,使用 VISSIM8.0 进行实例

仿真,构建 Webster 法、MDOA 和 AMDOA 算法设计方案的交通运行环境,相应方案下的交通流运行效果对比分析结果见表 3、表 4。

表 3 配时方案效果对比

算法	平均车辆延误/ (s·辆 <sup>-1</sup> )		平均停车次数/ (次·辆 <sup>-1</sup> )	
	高峰	平峰	高峰	平峰
	Webster 法	44.40	37.60	1.26
MDOA	38.36	35.10	1.04	0.92
AMDOA	33.90	33.10	0.91	0.83

表 4 增长率结果对比

算法比较	平均车辆 延误增长率/%		平均停车次数 增长率/%	
	高峰	平峰	高峰	平峰
	MDOA 较 Webster 法	-13.60	-6.65	-17.46
AMDOA 较 Webster 法	-23.65	-11.97	-27.78	-17.82
AMDOA 较 MDOA	-11.63	-5.70	-12.50	-9.78

由表 4 可以看出,相比于 Webster 法,MDOA 和 AMDOA 算法在高峰时段的信号配时优化效果更加显著,平均车辆延误分别降低了 13.60%、23.65%,平均停车次数分别降低了 17.46%、27.78%。AMDOA 算法相比于传统 MDOA 算法在两项优化指标上均具有明显的优势,高、平峰时段平均车辆延误分别降低了 11.63%、5.70%,平均停车次数分别降低了 12.50%、9.78%。

## 4 结论

本文提出一种改进蒲公英算法对信号交叉口多目标配时优化模型进行求解。迭代计算过程中,引入免疫函数设置非支配解保护机制以避免非支配解变异,从而缩短搜索最优解的时间,提高改进算法的计算效率和精度。以实际工程案例为研究对象,采用 Webster 法,传统 MDOA 与 AMDOA 法设计信号配时方案,VISSIM 仿真验证了 AMDOA 法可有效提高交叉口的信号控制效果。但本文在建模时未考虑到车辆排放量及交叉口延误不均程度等指标,未来对优化的适用条件需进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 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*, 2020, 120(1): 102821.
- [2] 吴小龙, 胡松, 成卫. 基于改进鲸鱼优化算法的多目标信号配时优化[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(1): 134-141.  
WU Xiaolong, HU Song, CHENG Wei. Multi-objective signal timing optimization based on improved whale optimization algorithm[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)*, 2021, 46(1): 134-141.
- [3] MIHAI A S, DUPONT L, CAMARGO M. Multi-objective traffic signal optimization using 3D mesoscopic simulation and evolutionary algorithms[J]. *Simulation Modelling Practice & Theory International Journal of the Federation of European Simulation Societies*, 2018, 86: 120-138.
- [4] 刘伟, 谢忠金, 陈科全. 基于 NSGA-II 算法的逆向可变车道信号配时优化[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(6): 92-97.  
LIU Wei, XIE Zhongjin, CHEN Kequan. Optimization of reversing variable lane signal timing design based on NSGA-II algorithm[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2018, 37(6): 92-97.
- [5] 任其亮, 谭礼平. 逆向可变车道交叉口信号配时优化方法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(4): 63-70.  
REN Qiliang, TAN Liping. Signal timing optimization method for reverse variable lane intersection[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(4): 63-70.
- [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] 成卫, 黄金涛, 陈昱光, 等. 考虑交通安全的交叉口信号相位与配时综合优化模型[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(4): 136-144.  
CHENG Wei, HUANG Jintao, CHEN Yuguang, et al. Integrated optimization model of intersection signal phasing and timing considering traffic safety[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 47(4): 136-144.
- [8] 刘东波, 沈莉潇, 代磊磊, 等. 基于多目标雷达数据的单点交通信号控制方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(10): 2456-2465.  
LIU Dongbo, SHEN Lixiao, DAI Leilei, et al. Traffic signal control method at isolated intersections based on multi-target radar data[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52(10): 2456-2465.