

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002949

单交叉口多目标联合优化的信号配时研究

牟海维 戚先锋 刘彦昌 孙明港 祁妍嫣

(东北石油大学 电子科学学院 大庆 163318)

摘要:传统的交叉口信号配时大多只从提高车辆的通行效率这一角度出发,未考虑交叉口处的行人因素以及车辆尾气排放,容易造成交通事故,加剧环境污染。从车辆和行人的交通效益以及环保角度出发,在改进的 Webster 延误模型基础上提出了以车辆延误、行人延误、停车率、通行能力、尾气排放为优化指标的多目标函数,利用改进的粒子群优化算法(PSO)对所建立的多目标函数求出最佳信号周期;再利用流量比计算公式求出各个相位的红绿灯时间。使用这种配时方案,在交通流量高峰期,可以使车辆的延误降低 18.7%,停车率降低 15.9%,行人延误降低 17.8%,尾气排放降低 38%;在交通流量低峰期时,可以使车辆的延误降低 11.6%,停车率降低 6.9%,通行能力提高 8%,行人延误降低 28.6%,尾气排放降低 5.6%。使用这种配时方案在一定程度上可以提高道路通行能力、减少交通事故、减少尾气排放、降低道路拥堵。

关键词: Webster 延误模型;改进 PSO 算法;信号配时;多目标函数

中图分类号: TN911;U491.5+4

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.8010

Research on signal timing of multi-objective joint optimization at single intersection

Mu Haiwei Qi Xianfeng Liu Yanchang Sun Minggang Qi Yanyan

(College of Electronic Science, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: The purpose of the most traditional intersection signal is to improve the traffic efficiency of vehicles, without considering the pedestrian factors at the intersection and vehicle exhaust emissions, it is easy to cause traffic accidents and aggravate environmental pollution. On the basis of the improved Webster delay model, proposing a multi-objective function with vehicle delay, pedestrian delay, parking rate, traffic capacity and exhaust emission as the optimization index. Using the improved PSO algorithm to find the optimal signal period for the established multi-objective function, and then using the flow ratio calculation formula to find the red and green phases Light time. The use of this timing scheme can reduce vehicle delays by 18.7%, parking rate by 15.9%, pedestrian delays by 17.8% and exhaust emissions by 38% during peak periods of traffic flow. At peak periods, vehicle delays can be reduced by 11.6%, parking rate by 6.9%, capacity by 8%, pedestrian delays by 28.6% and exhaust emissions by 5.6%. Using this timing scheme of this subject can improve road capacity, reduce traffic accidents, reduce exhaust emissions and reduce road congestion to a certain extent.

Keywords: Webster delay model; improved PSO algorithm; signal timing; multi-objective function

0 引言

单个交叉口信号控制是研究城市道路控制的基础,因此单个交叉路口信号配时方案的好坏很大程度上影响着城市的通行效率。当前国内外对于交叉口配时的研究大部分都是采用 Webster^[1]延误模型配时法对单个指标进行优化的,常用的优化指标有车辆停车率、通行能力、

延误时间、排队长度、饱和度、尾气排放、油耗、行人延误等^[2]。由文献[3]可以知道,在一定的道路情况下,车辆平均延误、停车率、通行能力、行人延误、尾气排放与各相位绿信比以及周期时长的关联度都比较高,因此可以采用这几项指标对交叉口进行评价。对于单个交叉口信号配时方法主要有 Webster 配时方法、HCM^[4]配时法、TRRL^[5]配时法、ARRB^[6]配时法等。其中 TRRL 法、ARRB 法不适用于饱和度接近或者>1 时的情况;而 HCM

法计算公式较为复杂且计算时难度较大,因此本文采用 Akcelik 改进的 Webster 延误计算公式,它不受饱和度限制,更加符合实际情况^[7]。其中梁骁等^[8]采用 Webster 延误模型,利用模糊控制方法对平均延误这一指标进行优化,取得了一定的成果,但是只考虑平均延误这一指标不能很好的反应交叉口交通参与者的实际情况。张萌萌等^[9]在定时信号控制的基础上,同时考虑了交叉口的通行效率和定时控制的鲁棒性,建立了双层目标函数模型,并且采用了改进的 Webster 延误模型,但是没有考虑行人出行效益。段敬琳将停车次数、通行能力、延误最小、排队长度作为多目标联合优化指标,取得了较好的效果,但是并未考虑到行人因素以及车辆的尾气排放^[10]。

通过现有的研究可以发现,目前对于单个交叉口的交通配时侧重点在于考虑车辆的出行效益而忽略了行人的出行效益以及环保因素,这样容易造成交通事故频发、行人在交叉路口处过街时间较长以及加重环境污染。在这个以绿色发展为主题的时代,只考虑经济发展不考虑绿色发展是不健康的发展。为了尽可能的提高交通参与者在经过交叉口处的通行效率、减少车辆的尾气排放以及降低交通事故发生的频率,因此本文从车辆通过交叉路口的延误时间、行人过街的延误时间、减少尾气排放的角度出发,在现有研究的基础上将单交叉路口处的车辆延误、停车次数、通行能力、行人延误、尾气排放同时考虑进去,建立一个非线性多目标优化模型;然后使用改进的 PSO 算法对所建立的模型进行求最优值;最后利用流量比计算公式确定各个相位的红绿灯时间,从而求得单交叉口最佳的信号配时方案。

1 单交叉口信号配时模型

1.1 车辆在交叉口处的平均延误

目前对于车辆平均延误计算公式大多都是采用传统的 Webster 计算模型,但是当交叉口的饱和度接近或者 >1 时,此公式就不再适用了,因此本文采用 Akcelik 改进的 Webster 延误计算公式,它不受饱和度限制,更加符合实际情况^[6]。

车辆延误模型计算公式如下:

$$D_i = \sum_j \frac{C(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - y_{ij})} + \sum_j \frac{N_{ij}x_{ij}}{q_{ij}} \quad (1)$$

式中: D_i 是指1个周期内的第*i*相位车辆通过交叉路口的延误时间; C 是交叉口处的红绿灯循环显示1遍的周期时长; λ_i 为*i*相位的绿信比, $\lambda_i = g_i / C$; g_i 是指1个周期内车辆实际通行用到的时间,又称之为有效绿灯时间; q_{ij} 是指在1个周期内的第*i*相位*j*进口道的车辆数; x_{ij} 是指在1个周期内第*i*相位*j*进口道的最大能够通过的车辆数,又称之为道路饱和度,计算公式为 $x_{ij} = q_{ij} / c_{ij}$,其中 c_{ij} 是指

在某个交叉路口处的第*i*相位时第*j*车道允许通过的最大车辆数; y_{ij} 是指1个周期内第*i*相位第*j*车道的流量比率,其计算公式为 $y_{ij} = q_{ij} / s_{ij}$, s_{ij} 是指在1个连续的绿灯信号时间内,允许通过第*i*相位第*j*车道停止线的最大车流量; N_{ij} 是指在1个连续的绿灯信号时间内,未能通过第*i*相位第*j*个进口道停止线的滞留车辆数且:

$$N_{ij} = \begin{cases} \frac{C_{ij}}{4} [(x_{ij} - 1)] + \sqrt{(x_{ij} - 1)^2 + \frac{12(x_{ij} - x_{ij0})}{C_{ij}}}, & x_{ij} > x_{ij0} \\ 0, & x_{ij} < x_{ij0} \end{cases}$$

$$\text{式中: } x_{ij0} = 0.67 + \frac{S_{ij}g_j}{600}.$$

由此可以知道车辆在1个周期内的平均延误时间为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n D_i q_i}{q_i} \quad (2)$$

式中: q_i 是指第*i*相位的交通流量。

1.2 车辆在交叉口处的停车次数

车辆在交叉口处的平均停车次数计算公式为^[11]:

$$H_i = \sum_j \frac{0.9(C - g_i)}{1 - y_{ij}} \quad (3)$$

$$H = \frac{\sum_i h_i q_i}{\sum_i q_i} \quad (4)$$

式中: h_i 是指在1个周期内第*i*相位的车辆平均停车次数; g_i 是指在1个周期内第*i*相位的车辆通行实际利用时间; y_{ij} 是指在1个周期内第*i*相位*j*进口道的实际车流量与*j*进口道的饱和车流量之比; H 是指某个交叉口1个周期内全部车辆的平均停车次数。

1.3 车辆在交叉口处的通行能力

根据停车线法原理,在1个周期内第*i*相位的车辆通行能力 Q_i 计算公式为^[12]:

$$Q_i = S_i \left(\frac{g_i}{C} \right) \quad (5)$$

式中: S_i 是1个周期内第*i*相位车道允许通过的最大车辆数,又称之为饱和流量, g_i 为1个周期内的第*i*相位有效绿灯时长。

1.4 行人平均延误模型

在有红绿灯控制的交叉路口行人在穿越街道时的延误分成两种,即有干扰因素和无干扰因素环境下的行人穿越街道延误。本课题使用的是文献[13]所述的无干扰因素的行人穿越街道的延误计算公式,将其换算成1个周期为标准,可以知道在1个周期内每相位行人过街的平均延误时间计算公式如下:

$$P_i = \frac{r_i C(1 - \lambda)^2}{2(r_i - p_i)} \quad (6)$$

式中： P_i 是指第 i 相位行人穿越横向街道时的平均延误时间； r_i 是指第 i 相位人行横道上允许通过的最大行人数量，又称之为行人的饱和流量， $r_i = \frac{k}{l t_{qh}}$ ； P_i 是指第 i 相位行人穿越街道时实际到达人数与该街道允许通过的最大行人数量之比，又称之为到达流率； k 是指行人穿越街道的最小横向距离； t_{qh} 是指前面行人与后面行人之间的时距； l 是指行人在穿越街道时的横向距离。

1.5 尾气排放模型

车辆在行驶过程中会排出汽车尾气，在频繁的加速、减速时会释放出更多的尾气，当车辆经过交叉路口时会由于路况复杂从而导致频繁的加速、减速，车辆在交叉路口处排放出的汽车尾气主要是由于车辆处于加速、减速或者怠速的状态导致的，车辆在交叉路口处的汽车尾气排放计算公式如下^[14]：

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \frac{1}{3\ 600} \sum_{i=1}^n (e q_i D_i) \quad (7)$$

式中： e 是指将所有车辆统一折算成标准小汽车状态下的单位怠速排放因子，为了计算方便，本文取其值为 $5\text{ g}/(\text{pch}\cdot\text{h})$ 。

1.6 各项参数权重系数的确定

本文从交叉路口的实际影响因素出发，在原有研究的基础上综合考虑车辆及行人出行时间、道路使用效率以及环境保护等因素，以周期时长、各相位有效绿灯时长作为约束条件，建立了以车辆延误时间、停车次数、通行能力、行人过街延误、尾气排放作为交叉路口信号控制目标的优化模型。在对交叉路口进行红绿灯配时时，由于交通状态是千变万化的，因此在不同的时刻需要对控制指标进行侧重考虑。如当环境污染程度为轻度、以及车流量较少时，交通信号控制的主要考虑因素是要尽量降低车辆在交叉路口的延误时间和停车次数以及降低行人延误；在车流量较大时，交通信号控制的主要考虑因素是尽可能提高车辆通过交叉口时的通行能力，当环境污染程度为重度时，需要首先考虑降低车辆的尾气排放；根据文献[9]可知，车辆延误的加权系数与车辆通行能力的加权系数的比值随着车流量的增加而减少。目前对于各项指标的权重系数已有大量的研究，本文在现有研究的基础上，对车辆以及行人延误的权重系数作了一些修改，修改之后的各项指标的权重系数为：

$$\alpha_i^1 = \frac{1 - Y}{0.9} \sqrt[7]{S_i}$$

$$\alpha_i^2 = 2(1 - Y) \sqrt[7]{S_i} \frac{y_i}{y_i + z_i}$$

$$\alpha_i^3 = 2(1 - Y) \sqrt[7]{r_i} \frac{z_i}{y_i + z_i}$$

$$\alpha_i^4 = \frac{1 - Y}{0.9} \sqrt[7]{S_i}$$

$$\alpha_i^5 = 2Y \sqrt[7]{S_i} \quad (8)$$

式中： α_i^1 为第 i 相位通行能力权重系数； α_i^2 为机动车延误权重系数； α_i^3 为行人延误的权重系数； α_i^4 为停车率的权重系数； α_i^5 为尾气排放的权重系数； Y 为交叉路口各相位的最大流量比之和； y_i 为第 i 相位机动车流量比， $y_i = \max_j \{y_{ij}\}$ ； z_i 为第 i 相位行人流量比， $z_i = \frac{P_i}{r_i}$ 。

1.7 多目标联合优化非线性函数的建立

由于考虑的众多影响因素单位不同，它们的评价标准也不同，因此需要将其换算成同一标准下进行计算^[15]。本文采用的方法是各个指标的目标函数值与原始目标函数值的商作为优化的目标值。通过换算之后，根据式(8)的权重系数公式可以将信号控制的优化模型转变成如下形式：

$$\min f(C, g_i) = \min \sum_{i=1}^n \left[-\alpha_i^1 \frac{Q(C, g_i)}{Q_0} + \alpha_i^2 \frac{D(C, g_i)}{D_0} + \alpha_i^3 \frac{P(C, g_i)}{P_0} + \alpha_i^4 \frac{H(C, g_i)}{H_0} + \frac{E(C, g_i)}{E_0} \right]$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n g_i + L = C \\ 15n \leq C \leq 180 \\ g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中： Q_0 、 D_0 、 P_0 、 H_0 、 E_0 分别为当前该十字路口配时方案下的初始通行能力、延误时间、行人延误时间、停车率、初始尾气排放量； g_i 为第 i 相位的有效绿灯时间； L 为 1 个周期内的总损失时间； C 是信号周期； g_{\min} 为各相位的最小绿灯时间； g_{\max} 为各相位最大的绿灯时长； n 为相位个数。根据目前红绿灯信号周期设计的原则来看，首先要保证行人能够从马路一侧安全到达另一侧，因此最短周期时长应该取 30 s；其次，从司机的角度出发，红绿灯时长最长应该不超过 180 s^[16]，否则会让司机误以为信号灯故障，从而造成闯红灯现象。各相位有效绿灯时间在设计时也要考虑实际情况，比如需要考虑行人穿越横向街道所需要的最短时间，因此对于各相位有效绿灯时间要在 15~60 s。

1.8 带约束条件的非线性多目标函数模型求解算法

对于本文所建立的多目标优化模型，它是一个带有约束条件求最优值问题^[17]，目前对于这种问题常用的求解方法主要有以下几种：可行方向法、惩罚函数法、智能算法等。由于前几种方法相对于智能优化算法来说，容易陷入局部最优，从而造成所找到的最优值

实际上只是极值而非最优值。为了避免所求的解是局部最优值,因此需要考虑使用智能算法对全部解的区域进行求解。因此对于这种带约束条件求最值问题,使用智能算法更加高效、准确。本文打算先将其利用罚函数法^[18]转化为不带约束条件的单目标函数,然后使用改进的粒子群算法^[19-20](particle swarm optimization, PSO)求解。与遗传算法相比,粒子群算法操作简单、需要设置的参数少、也不需要进行复杂的交叉变异操作、不易陷入局部最优、精度高、可以同时搜索多个目标区域、PSO 算法运算时间短等优点^[21],运算次数相对遗传算法较少,因此对于本课题所建立的这种带有约束条件求最值问题,本文选择 PSO 算法对其进行求解。

2 粒子群算法步骤

1) 对整个粒子群体进行初始化,群体数量为 N ,初始化群体中每个粒子的速度 V_i 以及位置 X_i 。

2) 计算出整个群体中所有粒子的适应度值 $fitness[i]$ 。

3) 对于计算出的整个群体中各个粒子的适应度值 $Pbest[i]$,将其和计算出来的整个群体适应度值 $fitness[i]$ 进行比较。判断 $fitness[i]$ 和 $Pbest[i]$ 的大小,若 $fitness[i] < Pbest[i]$,那么就将此时的 $fitness[i]$ 替换为最新的 $Pbest[i]$ 。

4) 对整个群体中计算出的各个粒子的适应度值 $fitness[i]$ 与群体中的极值 $gbest$ 进行比较。若 $fitness[i] < gbest[i]$,那么将 $fitness[i]$ 替换为最新的 $gbest[i]$ 。

5) 对于整个群体中的所有粒子,进行速度 V_i 和位置 X_i 的更新。

6) 对于整个粒子群中的粒子,进行边界条件判断和处理。

7) 当执行完上述操作之后,对所得结果进行判断。若满足结束条件,则输出结果,粒子群算法结束;否则继续返回步骤 2),继续执行 PSO 算法。PSO 的运算流程如图 1 所示。

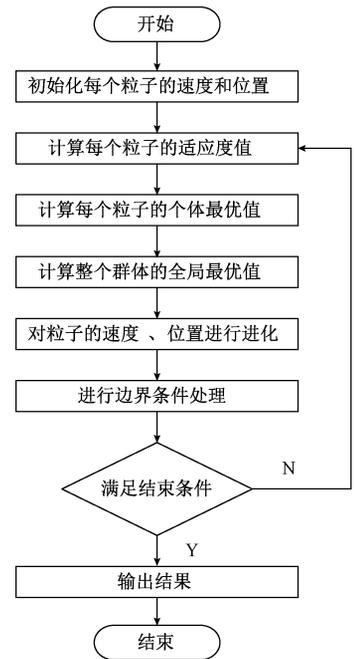


图 1 PSO 运算流程

Fig. 1 PSO operation flow chart

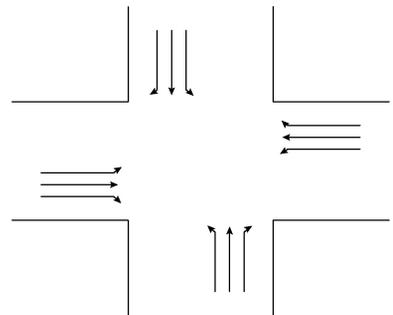


图 2 交叉口示意图

Fig. 2 Schematic diagram of intersection

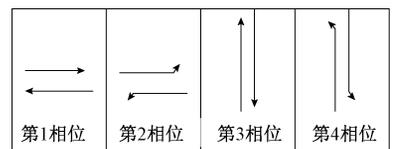


图 3 相位示意图

Fig. 3 Phase diagram

3 模型应用案例仿真分析

3.1 交叉路口交通模型

本次实验选取的对象是以秦皇岛市某十字路口为研究对象,所用数据为 2019 年 10 月 20 日实地采集的交通流量。该十字路口示意图如图 2 所示。该交叉口为典型四相位信号控制,如图 3 所示。行人相位和直行车辆相位一致。经过实地调查将采集到的该十字路口交通流量信息如表 1 所示。

通过调查发现,本文所选用的该十字交叉路口的各个车道的机动车饱和流率为 1 912 pcu/h,各个进口道的行人饱和流率为 2 ped/s,本文使用改进的 PSO 算法对所建立的多目标非线性函数进行求解,利用改进 PSO 算法可以分别求得高峰期交通流量的最佳信号周期为 106 s,以及低峰期交通流量的最佳周期为 94 s,如图 4、5 所示。

表 1 秦皇岛市某交叉路口实际交通流量

Table 1 Actual traffic flow at an intersection in Qinhuangdao

进口道	车道	高峰期通过的车辆数/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)	低峰期通过的车辆数/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)	高峰期通过的行人人数/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)	低峰期通过的行人人数/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)
北	左转	236	181	281	195
	直行	269	221		
西	左转	150	121	273	214
	直行	806	634		
南	左转	101	65	313	255
	直行	209	165		
东	左转	211	167	269	132
	直行	1037	819		

表 2 不同配时方案仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of different timing schemes

时段	配时方案	周期 C/s	车辆		通行能力/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)	行人平均 延误/ ($\text{s}\cdot\text{ped}^{-1}$)	尾气排放/ ($\text{g}\cdot\text{pcu}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
			平均 延误/s	停车率			
高峰 时段	当前方案	130	39.0	0.88	2 274	28	151
	Webster	123	34.6	0.85	2 368	26	136
	本文方案	106	31.7	0.74	2 306	23	92
低峰 时段	当前方案	112	26.0	0.72	2 298	21	71
	Webster	102	28.0	0.69	2 362	16	82
	本文方案	94	23.0	0.67	2 108	15	67

在交通流量低峰期时,使用本文提出的配时方案可以使车辆的延误时间降低 11.6%,车辆的停车率降低 6.9%,通行能力提高 8%,行人延误降低 28.6%,尾气排放降低 5.6%。

通过上述结果对比可以发现,本文提出的多目标联合优化配时方案在交通流量高峰期时可以有效降低车辆的延误时间、行人延误、停车率、尾气排放;对于交通流量低峰期时,除了能够有效降低尾气排放之外,对于其他指标的改进效果相对来说不是特别明显。

4 结 论

本文提出了一种对多个指标同时进行优化的配时方案,这样更加符合交叉口的实际情况,为单个交叉口的配时提供了一种解决方案,但是对于交通流量较低时改进效果不是很明显,因此本文提出的这种方法对于交通流量较大时能够有较好的使用效果;此外,本文在对交叉口配时时没有考虑到非机动车(如自行车、电动车等)的出行效益以及特种车辆的出行,因此相对来说不够完善,在接下来的应用中可以考虑把非机动车、特种车辆优先出行等因素也考虑进去,以便能够更加符合交叉路口的实际情况。

参考文献

[1] 姚荣涵,刘美妮,徐洪峰. 信号控制交叉口车均延误模型适用性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(2): 390-398.
YAO R H, LIU M N, XU H F. Applicability analysis of vehicle average delay model at signalized intersection [J]. Journal of Jilin University (Engineering Science Edition), 2016, 46 (2): 390-398.

[2] 左俊中. 城市过江桥梁接入交叉口混合交通流信号控制优化方法[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
ZUO J ZH. Optimized method for mixed traffic flow signal control at urban crossing bridges at intersections [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

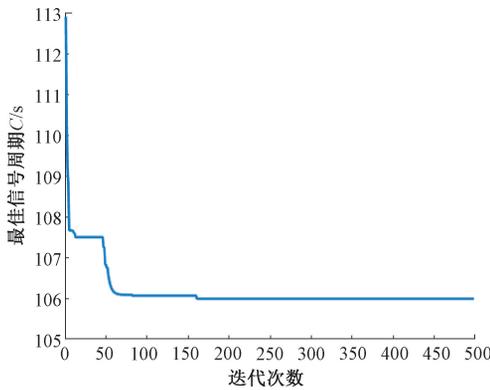


图 4 高峰期最佳信号周期 C

Fig. 4 The best signal period C in peak period

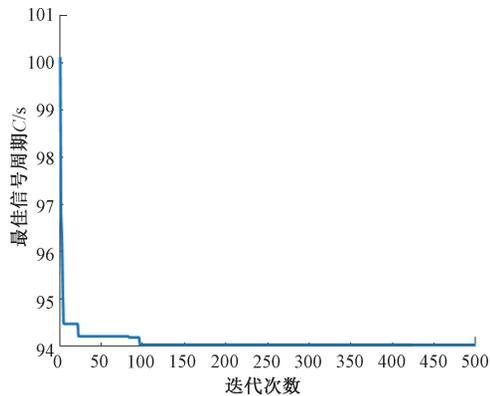


图 5 低峰期最佳周期 C

Fig. 5 The best period C in the low peak period

由表 2 可知,在交通流量高峰期时,使用本文提出的配时方案可以使车辆的延误时间降低 18.7%,车辆的停车率降低 15.9%,通行能力几乎不变,行人延误降低 17.8%,尾气排放降低 38%。

- [3] WEI L Y, LI L J, GUAN ZH. The signal timing optimal model for intersection based on grid continuous field ant colony algorithm [C]. Proceedings of 2010 International Conference on Management Science and Engineering, 2010; 1-5.
- [4] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual: 2010 [M]. Washington DC: Transportation Research Board, 2010.
- [5] Transport and road research laboratory, Crowthorne, TRRL research report 102; G. R. Watts 1987 Traffic-induced ground-borne vibrations in dwellings (20 pages, 9 figures, 6 tables, 14 references) [R]. 1989.
- [6] 吴颢,焦钰博,姚双双,等.改进 ARRB 法下考虑 $PM_{2.5}$ 排放的交叉口多目标信号控制优化 [J]. 综合运输, 2018, 40 (6): 57-63.
- WU H, JIAO Y B, YAO SH SH, et al. Multi-objective signal control optimization of intersections considering $PM_{2.5}$ emissions under improved ARRB method [J]. Composite Transportation, 2018, 40 (6): 57-63.
- [7] AKCELIK R, ROUPHAIL N M. Estimation of delays at traffic signals for variable demand conditions [J]. Transportation Research: Part B, 1993, 27 (2): 109-131.
- [8] 梁骁,殷勇辉,吴颢.单交叉口信号配时的动态优化 [J]. 公路交通技术, 2010 (2): 125-127.
- LIANG X, YIN Y H, WU Y. Dynamic optimization of signal timing at a single intersection [J]. Highway Transportation Technology, 2010 (2): 125-127.
- [9] 张萌萌,贾磊,邹难.单点定时信号配时的多目标优化模型 [J]. 计算机工程, 2011, 37 (6): 27-29.
- ZHANG M M, JIA L, ZOU N. Multi-objective optimization model for timing of single-point timing signals [J]. Computer Engineering, 2011, 37 (6): 27-29.
- [10] HAN X W. Algorithm of dynamic timing based on multi-objective optimization for urban single intersection traffic light [C]. International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering, 2015.
- [11] 伍尚昆,陈翠宜,祝胜林.基于多种群蚁群算法的交叉路口信号配时优化 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31 (5): 83-88.
- WU SH K, CHEN C Y, ZHU SH L. Optimization of signal timing at intersections based on multiple swarm ant colony algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31 (5): 83-88.
- [12] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual [M]. Washington DC: National Research Council, 2000.
- [13] 甘杨杰.混合交通流环境下交叉口多目标配时优化研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- GAN Y J. Multi-objective timing optimization of intersections under mixed traffic flow environment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [14] 周申培.考虑排放因素的城市交叉口交通信号控制策略的研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
- ZHOU SH P. Research on traffic signal control strategy of urban intersections considering emission factors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [15] 黄慧琼.多目标联合优化的信号配时方法应用与仿真 [J]. 广西科技大学学报, 2018, 29 (3): 102-107.
- HUANG H Q. Application and simulation of multi-objective joint optimization signal timing method [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2018, 29 (3): 102-107.
- [16] 曹成涛,徐建闽.单交叉口交通多目标控制方法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (16): 20-22.
- CAO CH T, XU J M. Multi-objective traffic control method at single intersection [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (16): 20-22.
- [17] 周红标.基于约束多目标骨干粒子群的污水处理过程优化控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (9): 1488-1498.
- ZHOU H B. Optimal control of wastewater treatment process based on constrained multi-target backbone particle swarm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31 (9): 1488-1498.
- [18] 蔡海鸾.惩罚函数法在约束最优化问题中的研究与应用 [D]. 上海:华东师范大学, 2015.
- CAI H L. Research and Application of Penalty Function Method in Constrained Optimization [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [19] 杨晓光,张奇松,张益民,等.基于改进混合粒子群算法的云计算任务调度问题研究 [J]. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (6): 674-678.
- YANG X G, ZHANG Q S, ZHANG Y M, et al. Research on cloud computing task scheduling problem based on improved hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science), 2019, 50 (6): 674-678.
- [20] 王智宏,陈琛,千承辉,等.基于粒子群寻优的光谱仪波长误差修正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (10): 2430-2436.
- WANG ZH H, CHEN CH, QIAN CH H, LIU J. The wavelength error correction method of spectrometer based on particle swarm optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (10): 2430-2436.
- [21] 吕太之,周武,夏平平.一种改进的粒子群优化算法 [J].

计算机应用研究, 2014, 31(8): 2303-2306.

LV T ZH, ZHOU W, XIA P P. An improved particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Application Research, 2014, 31(8): 2303-2306.

作者简介



牟海维, 1983 年于大庆石油学院获得学士学位, 1993 年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位, 2010 年于东北石油大学获得博士学位, 现为东北石油大学教授, 副校长, 主要研究方向为智能信号处理技术及仪器。

E-mail: mhwmzh@163.com

Mu Haiwei received B. Sc. from Daqing Petroleum Institute in 1983, M. Sc. from Harbin Shipbuilding College in 1993 and Ph. D. from Northeast Petroleum University in 2010, respectively. Now he is a professor and vice president of

Northeast Petroleum University. His main research interests include intelligent signal processing technology and instruments.



刘彦昌(通信作者), 2002 年于大庆石油学院获得学士学位, 2009 年于大庆石油学院获得硕士学位, 2015 年于中国石油大学(北京)获得博士学位, 现为东北石油大学副教授, 主要研究方向为测井方法、传感器和智能仪器设计。

E-mail: liuyanchang854@sohu.com

Liu Yanchang (Corresponding author) received B. Sc. from Daqing Petroleum Institute in 2002, M. Sc. from Daqing Petroleum Institute in 2009 and Ph. D. from China University of Petroleum (Beijing) in 2015, respectively. Now he is an associate professor at Northeast Petroleum University. His main research interests include design of logging methods, sensors and intelligent instruments.