

文章编号:1005-0523(2014)03-0042-08

基于累积能耗的信号交叉口优化配时方法

张卫华¹,李强强¹,张胜凯²

(1.合肥工业大学交通运输工程学院,安徽 合肥 230009;2.石家庄市规划设计院,河北 石家庄 050011)

摘要:为了减少车辆在城市道路系统中的能源消耗,从降低信号交叉口能耗的角度出发,对交叉口进行基于累积能耗的优化配时方法研究。在累积延误分析的基础上研究机动车怠速能耗、减速能耗和加速能耗的规律,由此推导出信号交叉口累积能耗模型,在该模型的基础上建立基于累积能耗与延误综合指标最小的交叉口信号配时优化模型。利用实际交叉口的 vis-sim 仿真,对比分析现状配时、韦伯斯特法配时和基于累积能耗方法配时的交叉口累积能耗和延误,结果表明,基于累积能耗的优化配时方法可以有效降低累积能耗和延误。

关键词:配时方法;累积能耗;配时优化模型;交通仿真

中图分类号:U491.5

文献标志码:A

在城市道路交通系统中,机动车的能耗与机动车的行驶工况密切相关。机动车的运行过程一般包括匀速、加速、减速和怠速等几种工况,一般车辆处于加速行驶工况时的单位里程能耗要比匀速工况下高很多^[1]。由于交叉口的存在,使得车流在行驶过程中产生间断。车辆在通过信号交叉口时,一般都会产生一个减速、怠速和加速的过程,这使得车辆在交叉口处产生一定的延误,在这个过程中,一方面延误会使得车辆的行驶时间延长,另一个方面,车辆在交叉口的加减速过程会使得汽车行驶工况发生变化,这些都会使得车辆在交叉口处产生的能耗比在正常路段行驶所产生的能耗要多很多^[2-3]。车辆在城市道路网络中产生的能耗,大部分是在交叉口产生的^[4]。

国内外的研究成果多数关注微观层面,研究的是单车能耗规律,较少在宏观层面研究道路交通状况与机动车能源消耗之间的相互关系;又或者集中在研究公路车辆能源消耗,较少涉及城市道路交通系统能耗方面的研究^[5-6]。如 Akcelik 和 Post^[7-8]等学者根据车辆的质量、行驶状态等因素建立单车瞬态油耗物理模型, Eva Ericsson^[9]等专家研究了驾驶支持工具在出行路径选择优化方面对于燃油消耗的影响。现有模型中较少涉及机动车行驶工况与其能源消耗的关系研究,更缺乏直接体现交叉口控制方式等对机动车能源消耗的影响,如东南大学的王伟,项乔君教授^[5]等人从宏观上分析了机动车行驶里程、行驶时间对其燃油消耗的影响,在速度影响因素的基础上提出了燃油消耗预测模型。如何把握车辆在交叉口产生能源消耗的机理,制定相应的交叉口控制策略,优化信号交叉口配时方案,对减少车辆在交叉口的能源消耗、提高单位能耗下的城市交通效率具有重要意义。

1 信号交叉口累积能耗模型

1.1 信号交叉口累积延误模型

延误是指由于交通摩擦与交通管制引起的行驶时间损失。

通常用车辆在信号交叉口的行驶轨迹图推导信号交叉口的累积延误模型^[10-12]。其假设条件如下:

收稿日期:2014-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51178158,51308176)

作者简介:张卫华(1967—),男,教授,博士,研究方向为区域及城市交通系统规划。

- 1) 交叉口信号配时为固定配时,且红灯初始时刻车辆排队长度为0。
- 2) 车辆以泊松分布(Poisson)随机到达,到达率 q 均一,车头时距 h 服从负指数分布。
- 3) 所研究的进口道断面的通行能力为常数。
- 4) 在绿灯开始时间内,在交叉口排队的车辆相继以饱和流率 S 离开交叉口。等车队消散完全后,后续到达的以到达率离开。
- 5) 车辆在路段的行驶速度相同,且进入交叉口前和离开交叉口后的速度相同。
- 6) 交叉口各进口道处于未饱和状态。

车流在经过信号交叉口时的行驶轨迹如图1^[13]。

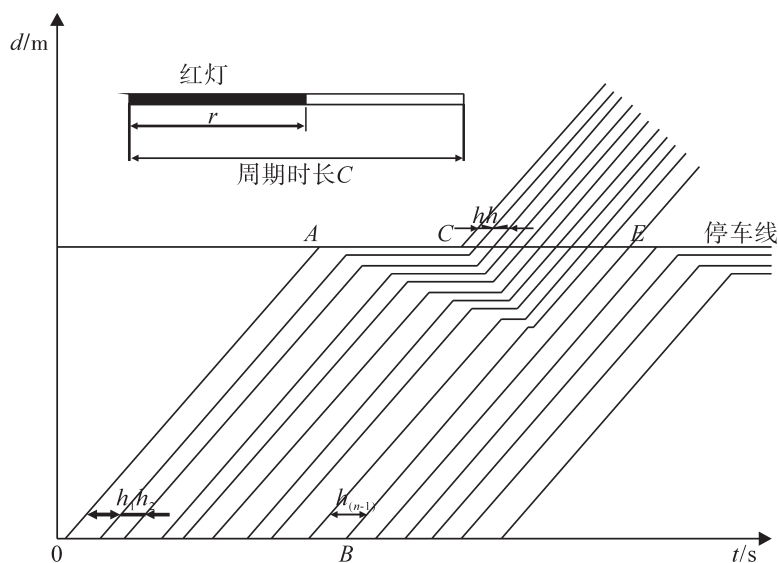


图1 信号交叉口车辆行驶轨迹示意图

Fig.1 Vehicle trajectory diagram at signal intersection

从图1中可以计算出每辆车的等待时间

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= r \\ t_2 &= t_1 - h_1 + h = r - (h_1 - h) \\ &\dots\dots \\ t_n &= t_{(n-1)} - h_{(n-1)} + h = r - h_1 + h_2 + \dots + h_{(n-1)} - n - 1h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: t_i 为第 i 辆车等待时间, h_i 为第 i 辆车车头时距, r 为红灯时间。

累积等待延误 W 为

$$W = \sum_{i=1}^n t_i = \frac{qS(r^2 - t_n^2)}{2(S - q)} \quad (2)$$

将绿灯开始后第一辆不停车通过交叉口的车辆视为最后一辆排队车辆,此时 t_n 为0,即

$$W = \frac{qSr^2}{2(S - q)} \quad (3)$$

1.2 信号交叉口累积能耗模型

1.2.1 怠速等待能源消耗模型

假设 f'_i 为图1中第 i 辆排队车辆的怠速能源消耗率,则第 i 辆排队车辆的等待能源消耗 F_i 为

$$F_i = f'_i t_i \quad (4)$$

则所有排队车辆总的能源消耗量 Q_a 为

$$Q_a = \sum f_i' t_i \quad (5)$$

假设 n 辆排队车辆中共有 k 种车型, 其中每种类型车辆的在怠速状态下的能源消耗率为 f_i 。设 1 型车辆 q_1 辆, 2 型车辆 q_2 辆, $\dots$, k 型车辆 q_k 辆, 即 $q_1 + q_2 + \dots + q_k = n$ 。 k 类车型构成的比例为 $p_1:p_2:\dots:p_k$, 且 $p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1$ 。假设每辆车的到达相互独立, 且到达车辆的类型随机出现, 则每次到达车辆是 i 类车型的概率 p_i 。第 i 辆车怠速能源消耗率的期望 $E(f_i')$ 为

$$E(f_i') = \sum_{i=1}^k f_i p_i \quad (6)$$

则

$$Q_a = \sum_{i=1}^n (\sum_{i=1}^k f_i p_i t_i) = \sum_{i=1}^k f_i p_i \sum_{i=1}^n t_i = \frac{q S r^2}{2(S-q)} \sum_{i=1}^k f_i p_i \quad (7)$$

1.2.2 减速能源消耗模型

由于车辆在交叉口的加速时间和加速距离较短, 在此忽略由于车辆性能因素和驾驶员技术因素所导致的加速度的不同, 因此假设在信号交叉口排队车辆的减速度和加速度相同, 分别为 a_1 和 a_2 , 所以在初速度 u_0 和终速度 u 相同的情况下, 车辆的加减速时间相同。

假设在信号交叉口绿灯期间, 只有遇到前方有排队时车辆才有减速和加速的过程。各种类型的机动车在减速状态的单位实际能源消耗率与怠速时的能源消耗率一样, 均为 f_i 。第 i 辆车加速状态下能源消耗率设为 f_i'' , 那么第 i 辆车减速时的能源消耗 F_{bi} 为

$$F_{bi} = f_i'' t_b \quad (8)$$

其中: t_b 表示车辆减速行驶的时间

$$t_b = \frac{|u - u_0|}{a_1} \quad (9)$$

则减速状态下总的能源消耗 Q_b 为

$$Q_b = \sum_{i=1}^n f_i'' t_b = \sum_{i=1}^n (\sum_{i=1}^k f_i p_i t_b) = \frac{S q r}{S - q} \sum_{i=1}^k f_i p_i t_b \quad (10)$$

1.2.3 加速能源消耗模型

各种车型单车加速状态下能源消耗率设为 f_{ci} , 第 i 辆车加速状态下能源消耗率设为 f_i''' , 那么第 i 辆车加速时的能源消耗 F_{ci} 为

$$F_{ci} = f_i''' t_c \quad (11)$$

其中: t_c 表示车辆加速行驶的时间

$$t_c = \frac{|u - u_0|}{a_2} \quad (12)$$

则加速状态下总的能源消耗 Q_c 为

$$Q_c = \sum_{i=1}^n f_i''' t_c = \sum_{i=1}^n (\sum_{i=1}^k f_{ci} p_i t_c) = \frac{S q r}{S - q} \sum_{i=1}^k f_{ci} p_i t_c \quad (13)$$

1.2.4 信号交叉口总能源消耗

信号交叉口单个相位的能源消耗量 Q 为

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = \frac{S q r}{S - q} \left(\frac{r}{2} \sum_{i=1}^k f_i p_i + \sum_{i=1}^k f_i p_i t_b + \sum_{i=1}^k f_{ci} p_i t_c \right) \quad (14)$$

信号交叉口总的能源消耗量 $Q_{\text{总}}$ 为各相位能源消耗之和

$$Q_{\text{总}} = \sum Q_j \quad (15)$$

其中: Q_j 为第 j 相位的能源消耗量。

2 基于能耗与延误综合指标的信号交叉口优化配时方法

传统的信号配时方法主要考虑交叉口的通行效率和通行能力,较少考虑机动车在交叉口的能源消耗,以车辆在交叉口的能耗和延误为综合目标函数,研究信号交叉口的配时方法。

2.1 参数选择

交叉口车辆累积能源消耗是指车辆在交叉口由于受到信号灯和前方排队车辆的干扰而消耗的能源,如果车辆正常行驶,则其能源消耗不计算在内。交叉口车辆累积能源消耗主要包括等待能源消耗、加速能源消耗和减速能源消耗。

$$Q_{\text{总}} = \sum_{j=1}^n \frac{S_j q_j (c - g_j)}{S_j - q_j} \left(\frac{c - g_j}{2} \sum_{i=1}^k f_i p_{ji} + \sum_{i=1}^k f_i p_{ji} t_b + \sum_{i=1}^k f_{ci} p_{ji} t_c \right) \quad (16)$$

式中: S_j 为第 j 相位的饱和流率; q_j 为第 j 相位的到达率; c 为信号周期时长; g_j 为第 j 相位的绿灯时长; f_i 为第 i 车型在怠速状态下的能源消耗率; p_{ji} 为第 j 相位 i 种车型所占的比例; t_b 为减速时间; t_c 为加速时间。

交叉口延误模型采用经典的韦伯斯特延误模型^[14],同时为了和累积能源消耗保持一致,将平均延误模型扩大为交叉口总延误:

$$D_{\text{总}} = \sum_{j=1}^n \left[\frac{q_j (c - g_j)^2}{2 \left(1 - \frac{q_j}{S_j} \right)} + \frac{c x_j^2}{2 (1 - x_j)} - 0.65 q_j^{\frac{1}{3}} c^{\frac{4}{3}} x_j^{2+5g_j/c} \right] \quad (17)$$

式中: S_j 为第 j 相位的饱和流率; q_j 为第 j 相位的到达率; c 为信号周期时长; g_j 为第 j 相位的绿灯时长; x_j 为第 j 相位的饱和度。

交叉口通行能力为各相位通行能力之和。单个相位通行能力 C_j 为

$$C_j = S_j \frac{g_j}{c} \quad (18)$$

交叉口通行能力 C 为

$$C = \sum_j C_j \quad (19)$$

2.2 信号配时优化模型

以交叉口的累积能耗和延误最小为目标函数,同时赋予能耗和延误不同的权重值来表达其重要程度。为了统一纲量,目标函数中单位能源消耗(gal)的费用为 P_1 ,单位延误(s)的费用为 P_2 。目标优化函数如下

$$\min Z = \alpha Q_{\text{总}} P_1 + \beta D_{\text{总}} P_2 \quad (20)$$

式中: α 为交叉口累积能耗的权重系数($0 \leq \alpha \leq 1$); β 为交叉口总延误的权重系数($0 \leq \beta \leq 1, \alpha + \beta = 1$)。

模型的约束条件为

$$\begin{cases} g_j \geq \frac{q_j c}{S_j} \\ c = \sum g_j + L \\ e_j \leq g_j \\ c_{\min} \leq c \leq 180_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: L 为信号总损失时间; e_j 为第 j 相位最短绿灯时间,保证行人安全过街。

2.3 优化模型算法

通过层次分析法^[15]确定目标函数的权重系数。首先将交叉口的累积能耗和延误最小作为层次分析的目标层,把要考虑的到达率、饱和度等影响因素作为层次分析的准则层,将累积能耗和延误作为层次分析的方案。具体层次分析法结构示意图如图2。层次结构建立以后,按上一层次某一准则将该层要素进行两两比较,用判断矩阵表示其比较结果。对于两两比较的重要性程度按照表1来确定,在次基础上构造比较矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 & 4 \\ 1/7 & 1 & 3 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

表1 标度及其描述

Tab.1 Scaling and its description

标度值	表示含义
1	两个因素同等重要
3	两两比较,一个因素稍微重要
5	两两比较,一个因素明显重要
7	两两比较,一个因素非常重要
9	两两比较,一个因素极为重要
2,4,6,8	表示以上判断的中指
倒数	含义与上相反

采用“粒子群算法”通过matlab编程求解优化模型^[16-17],计算信号配时周期时长及各个相位绿灯时长。粒子群算法的流程图如图3。

粒子群优化算法先要在可行域范围内对所有种群粒子进行随机初始化,包括其位置和速度,假设其可行搜索空间是一个 d 维空间,规模为 s ,则群体中每个粒子 i ($1 \leq i \leq s$)有如下属性:第 i 个粒子的位置可以表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$,其速度可以表示为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。在每次的迭代过程中,粒子通过追踪两个极值在不断更新自己的位置和速度,两个极值分别为种群全局最优位置($gbest$)和当前个体局部最优位置($pbest$),令当前第 i 个粒子的个体最优位置为 $pbest_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 。当追踪到两个极值后,粒子按下式更新自己的位置和速度。

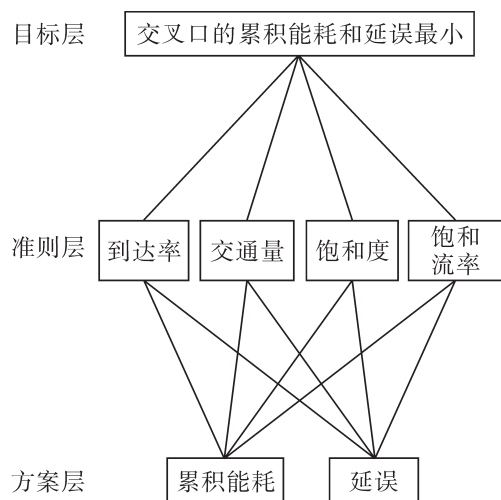


图2 层次分析法结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the analytic hierarchy process

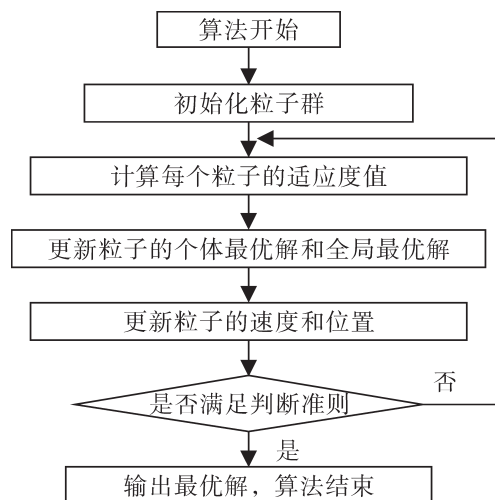


图3 粒子群算法流程图

Fig.3 Flow diagram of PSO algorithm

$$V_{ij}(t+1) = \omega V_{ij}(t) + c_1 \times r_1 \times [pbest_{ij} - x_{ij}(t)] + c_2 \times r_2 \times [gbest_{ij} - x_{ij}(t)] \quad (23)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \quad (24)$$

其中: ω 为惯性因子, c_1 、 c_2 为加速因子, r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

3 算例分析

3.1 现状调查

以合肥市某交叉口为例进行模型实例分析。在早高峰、平峰和晚高峰三个具有代表性的时段进行了实地交通量调查,采用早高峰数据进行计算。图4是折算为标准小汽车的交叉口流量流向图。

3.2 模型计算及仿真分析

3.2.1 模型计算结果

利用层次分析法计算权重系数,得到 $\alpha=0.57$ 、 $\beta=0.43$ 。取 $P_1=18 \text{元} \cdot \text{gal}^{-1}$, $P_2=0.017 \text{元} \cdot \text{s}^{-1}$ 。取粒子群维数 $d=5$, 群体个数 $s=50$, 迭代次数 1 000 次, 加速因子 $c_1=2$ 、 $c_2=2$, 根据调查的数据分别用韦伯斯特法和本文提供的方法进行计算, 得到信号配时结果如表2所示。

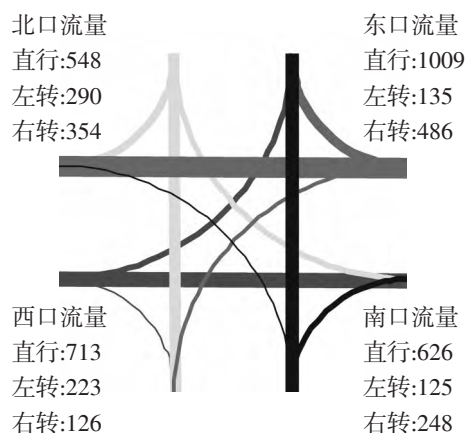


图4 交叉口流量流向示意图(单位:辆)

Fig.4 Schematic diagram of intersection traffic flow

表2 两种方法信号配时结果比较

Tab.2 Result comparison of the two signal timing methods

信号配时方法	周期时长/s	第一相位 绿灯时长/s	第二相位 绿灯时长/s	第三相位 绿灯时长/s	第四相位 绿灯时长/s	损失时间/s
现状	141	37	22	48	22	12
韦伯斯特法 ^[14]	120	18	27	43	20	12
本文的方法	110	18	22	40	18	12

3.2.2 仿真分析

利用vissim仿真软件进行仿真分析。

1) 将调查的交通量数据输入到vissim仿真模型中,分别按现状信号配时、韦伯斯特法计算的信号配时和按本文方法计算的信号配时建立三个信号控制方案。

2) 运行vissim仿真软件,对交叉口的交通运行状态进行仿真分析,3个方案的模拟仿真时间均相同。

3) 用vissim仿真软件分别对3种信号控制方案进行评价。

3.2.3 仿真结果评价与分析

能源消耗和延误是本文需要评价的重要指标。根据3个方案的评价数据,分别得到各个的能源消耗和延误数据,见表3所示。评价结果对比示意图见图5所示。

通过以上数据计算和仿真结果可以看出,现状配时周期时长比本文方法配时多31 s,但是延误却高了14.06%,能源消耗高了6.05%,综合评价指标高6.06%;韦伯斯特法计算的配时结果的周期时长相差不多,多了10 s,但延误和能源消耗分别增长了8.71%和4.15%,综合评价指标高了4.15%。通过对比,明显的可以看出按照本文的方法计算得出的信号配时,延误和能源消耗均有不同程度的降低,优于单纯的韦伯斯特方法。

表3 三种方法信号配时评价结果比较

Tab. 3 Evaluation result comparison of three signal timing methods

评价指标	配时方案		
	现状配时评价结果	韦伯斯特法配时评价结果	本文方法配时评价结果
延误(s)/费用(元)	25.6/0.442 9	24.1/0.416 9	22/0.380 6
能源消耗(gal)/费用(元)	9.59/172.62	9.4/169.20	9.01/162.18
综合评价/元	98.58	96.62	92.61

4 结语

首先在延误的基础上建立了信号交叉口累积能耗模型,并以此为基础建立了基于信号交叉口累积能耗和延误综合指标最小的信号控制优化模型,最后以合肥市某交叉口为例,通过调查与计算分析,并利用vissim仿真软件分别对现状配时、韦伯斯特法配时和本文提出的方法配时进行仿真。通过对比分析,可以看出运用本文方法可以有效降低延误和能耗。

主要是针对单个交叉口的能源消耗进行了研究分析,基于累积能源消耗的多个交叉口协调控制方法需要进一步进行研究。

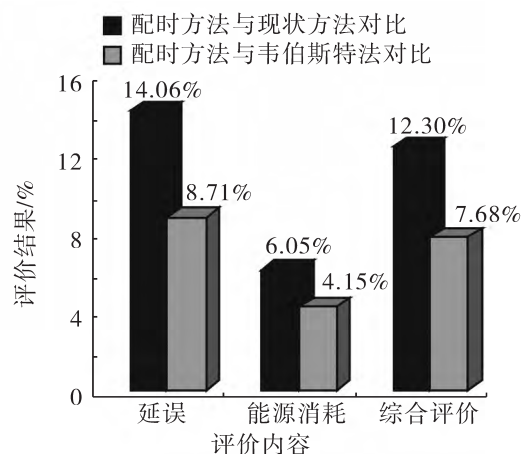


图5 交叉口评价结果对比图

Fig.5 Comparison chart of intersection evaluation results

参考文献:

- [1] MICHALSKI R, SZCZYGLAK P. Controlling vehicle fuel consumption in urban traffic[C]//Proceedings of the 12th International Conference Transport Means 2008, 2008:13-15.
- [2] 张卫华, 王伟, 胡刚. 基于低交通能源消耗的城市发展策略[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 80-84.
- [3] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 41-52.
- [4] 张健, 李小平. 城市道路交叉口处的车辆运行燃油消耗[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2000, 1(5): 457-460.
- [5] 王伟, 项乔君. 城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 11-22.
- [6] 项乔君, 王伟. 城市交通系统汽车燃油消耗宏观预测方法[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 105-107.
- [7] POST K, KENT JH, TOMLIN J, et al. Fuel consumption and emission modelling by power demand and a comparison with other models[J]. Transportation Research Part A, 1984, 18(3): 191-213.
- [8] AKCELIK R. Efficiency and drag in the power-based model of fuel consumption[J]. Transportation Research Part B, 1989, 23(5): 376-385.
- [9] EVA ERICSSON, HANNA LARSSON, KARIN BRUNDELL FREIJ. Optimizing route choice for lowest fuel consumption-Potential effects of a new driver support tool [J]. Transportation Research Part C, 2006, 14: 369-383.
- [10] 陈宽民, 严宝杰. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 10.
- [11] 邵长桥. 平面信号交叉口延误分析[D]. 北京: 北京工业大学博士学位论文, 2002.
- [12] 邵长桥, 何民, 杜晓辉. 车头时距分布模型研究[J]. 城市交通, 2003(1): 23-27.

- [13] 王殿海.交通流理论[M].北京:人民交通出版社,2002:132-138.
- [14] 杨佩昆,史其信.交通管理与控制[M].北京:人民交通出版社,2009:1.
- [15] 冯树民.交通系统工程[M].北京:知识产权出版社,2009:4.
- [16] 刘波.粒子群优化算法及其工程应用[M].北京:电子工业出版社,2010:8.
- [17] 曾毅,朱旭生,廖国勇.一种基于邻域空间的混合粒子群优化算法[J].华东交通大学学报,2013,30(3):44-49.

Optimized Timing Method of Signal Intersection Based on Cumulative Energy Consumption

Zhang Weihua¹, Li Qiangqiang¹, Zhang Shengkai²

(1.School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2.Shijiazhuang City Planning and Design Institute, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of vehicles in urban road systems, this study discusses the timing method optimization based on cumulative energy consumption of signal intersections from the perspective of energy consumption reduction. Based on the cumulative delay, it explores the rules for idling, deceleration and acceleration energy consumption of the motor vehicles, thus obtaining the cumulative energy consumption model of signal intersections. Then the optimized timing model is established based on the minimum comprehensive index of the cumulative energy and delay. Through vissim simulation of the actual intersection and the comparative analysis of the cumulative energy consumption and delay derived from the current timing method, Webster timing method and cumulative energy timing method, it finds out that the optimized timing method based on cumulative energy consumption can effectively reduce the cumulative energy consumption and delay.

Key words: timing method; the cumulative energy consumption; signal timing optimization model; traffic simulation.