

## 过饱和状态下的单交叉口最小延误信号周期模型

徐建闽<sup>1,2</sup>, 荆彬彬<sup>1</sup>, 卢凯<sup>1,2†</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 自主系统与网络控制教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 由于现有单交叉口信号配时方法主要适用于低饱和交通状态, 本文以过饱和交通状态作为研究对象, 利用定数理论分析了信号交叉口进口道的车辆到达与驶离规律, 建立了信号周期与延误时间之间的数学模型, 推导了单交叉口最小延误的信号周期计算公式. 以某个四相位交叉口为例, 针对3组不同流量比的过饱和和交通状态, 分别获取了延误时间与信号周期之间的变化曲线, 计算了最小延误所对应的最佳信号周期, 并利用VISSIM微观交通仿真软件, 仿真得到了3组不同流量比情况下的延误时间. 仿真结果表明: 在各组流量比设置下, 延误时间的理论计算值与仿真实验值相一致, 有效验证了该模型的准确合理性, 为解决过饱和状态下的交叉口信号配时优化问题提供了理论指导依据.

**关键词:** 交通控制; 过饱和; 定数理论; 信号周期; 延误时间; 单交叉口

中图分类号: U491.5+4 文献标识码: A

## Signal cycle model for minimum delay at oversaturated isolated intersection

XU Jian-min<sup>1,2</sup>, JING Bin-bin<sup>1</sup>, LU Kai<sup>1,2†</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Key Laboratory of Autonomous Systems and Networked Control, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** The existing signal timing methods for isolated intersection are mainly suitable for low saturation traffic state. Taking oversaturated traffic state as the research object, we develop a mathematical model between the signal cycle and the delay by analyzing the arrival-departure rule of vehicles at signalized intersection entrance with the deterministic theory. Then, the signal cycle formula at isolated intersection is deduced for minimal delay. Taking a four-phase intersection for example, we plot the changing curves between the signal cycle and delay; and the optimal signal cycles are found respectively for the three oversaturated traffic conditions that have different flow ratios. Finally, the delay under each traffic flow ratios was obtained by using VISSIM micro-simulation software. The simulated result shows that the delay from theoretical calculation coincides well with that of simulation under different flow ratios, validating the accuracy and rationality of the model. This provides a theoretical basis for solving signal timing problem at oversaturated intersection.

**Key words:** traffic control; oversaturation; deterministic theory; signal cycle; delay; isolated intersection

### 1 引言(Introduction)

交通拥挤越来越制约着城市的可持续发展, 已成为许多城市的困扰. 常发性的城市交通拥挤主要发生在信号交叉口的早晚高峰时段. 究其原因: 在早晚高峰时段, 交叉口的交通供给远小于交通需求, 交叉

多处于过饱和状态, 排队车辆将不断累积, 甚至造成车队“溢流”至上游交叉口, 严重时将造成大面积的交通拥堵. 因此, 如何利用交叉口信号配时技术提高过饱和交叉口的通行效率成为解决交通拥挤的重要需求.

收稿日期: 2014-02-23; 录用日期: 2015-01-15.

†通信作者. E-mail: kailu@scut.edu.cn; Tel.: +86 13316101357.

国家自然科学基金项目(61203164, 61174184), 广东省自然科学基金项目(S2012040007998), 广州市珠江科技新星专项(2013J2200066), 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(2012LYM.0014), 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金项目(K201304)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61203164, 61174184), Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (S2012040007998), Pearl River S & T Nova Program of Guangzhou (2013J2200066), Guangdong University Innovation Outstanding Young Talents Program (2013J2200066) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2012LYM.0014) and Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University (K201304).

目前,常用的交叉口信号配时方法有Webster法<sup>[1-2]</sup>、Akcelik法<sup>[3]</sup>、HCM法<sup>[4-5]</sup>、TRRL以及修正方法<sup>[4,6]</sup>、冲突点法<sup>[7]</sup>等。但这些方法主要适用于低饱和情况,对于过饱和状态未作考虑。例如,当饱和度等于1时,利用Webster法和Akcelik法计算得到的信号周期将无穷大;当饱和度大于1时,利用Webster法、Akcelik法、HCM法、TRRL方法计算得到的信号周期甚至为负值。

针对上述问题,国内外学者<sup>[8-9]</sup>建立了基于定数理论的延误模型;曹倩霞等<sup>[10]</sup>研究了如何在一定周期范围内寻找总延误最小的最佳信号周期;李凤<sup>[11]</sup>根据实际车辆到达的分布规律,进一步修正了延误模型;Chang等<sup>[12]</sup>研究了交叉口通行能力与信号周期的关系,并建议将最大信号周期设定为160s;裴玉龙等<sup>[13]</sup>以绿信比为优化变量,提出了一种根据通行需求大小分配绿信比的方法;王殿海等<sup>[14]</sup>以排队长度最短为优化目标,建立了排队长度与信号周期之间的数学模型;卢凯等<sup>[15-16]</sup>给出了过饱和状态下单交叉口信号周期与延误时间之间的关系式,并建立了相应的协调控制延误模型。

为了防止排队车辆溢流与缩短排队拥堵时间,上述信号配时设计方法主要以排队长度最短或通行能力最大作为优化目标,而很少考虑实现延误时间最小。但事实上,当交叉口过饱和状态持续时间较短(例如15min之内)且相邻交叉口间距较长(排队车辆不会出现溢流)时,以延误时间最小作为优化目标可以更好地提高信号交叉口的服务水平。

因此,本文将利用定数理论建立短时过饱和情况下的进口道延误模型,根据信号周期与延误时间之间的数学关系式,推导基于关键车流总延误最小的最佳信号周期公式,并通过算例与仿真分析验证延误模型与周期公式的正确性,为短时过饱和交叉口的信号配时提供一种新方法。

## 2 交叉口车辆延误模型(Vehicle delay model at intersection)

过饱和交通状态对进口道延误的影响实际上将一直延续到进口道滞留排队车辆全部消失,而并非截止于饱和度开始持续小于1的时刻。因此,在研究过饱和交通状态下的延误模型时,整个研究时间段应从初始排队车辆数为零并出现过饱和和状态的时刻开始,一直持续到滞留排队车辆完全消失。为简化推导过饱和状态下的交叉口延误模型,在此假设:

- 1) 过饱和状态下的车辆到达率 $q_1$ 与未饱和状态下的车辆到达率 $q_2$ 以及进口道通行能力 $Q$ 在研究时间段内稳定不变。
- 2) 起始时刻的初始排队车辆数为0。
- 3) 忽略黄灯时间与绿灯前损失时间的影响。

分析过饱和状态下交叉口进口道的车辆延误情况,如图1所示。在图1中:处于过饱和状态的信号周期数为 $n_1$ ,处于未饱和状态的信号周期数为 $n_2$ ;左斜线区域反映前 $n_1$ 个信号周期内到达车辆的延误情况,网格线区域反映前 $n_1$ 个信号周期结束时滞留车队消散的延误情况,右斜线区域反映后 $n_2$ 个信号周期内到达车辆的延误情况。

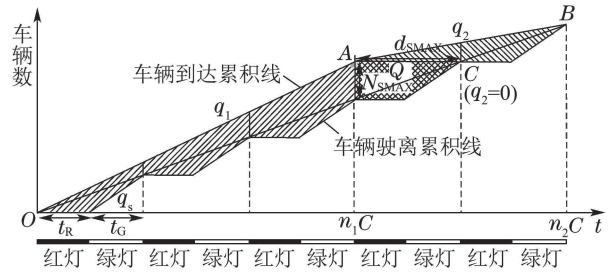


图1 过饱和交叉口进口道车辆延误分析

Fig. 1 Analysis of vehicle delay at oversaturated intersection approach

利用图形中线段与面积的可叠加性,可将延误时间划分由基准延误项与过饱和延误项两部分组成。其中,基准延误项将反映饱和度为1时交通信号对到达车辆产生的正常延误,对应图1中直线 $OCB$ 以下的延误三角形;过饱和延误项则反映超出通行能力的那部分到达车辆所产生的附加延误,对应图1中的延误三角形 $\triangle OAB$ <sup>[16]</sup>。

$$\begin{aligned}
 d &= d_E + d_S = \\
 &= \frac{1}{2}t_R + \frac{1}{2}d_{S\text{MAX}} = \\
 &= \frac{1}{2}t_R + \frac{1}{2}\frac{N_{S\text{MAX}}}{Q} = \\
 &= \frac{1}{2}t_R + \frac{1}{2}\frac{(q_1 - Q)n_1 C}{Q} = \\
 &= \frac{1}{2}t_R + \frac{1}{2}\frac{(q_1 - Q)T_1}{Q}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中:  $d$ 为总的平均延误时间;  $d_E$ 为基准平均延误时间;  $d_S$ 为过饱和平均延误时间;  $t_R$ 为红灯时间;  $d_{S\text{MAX}}$ 为最长滞留车队尾车延误时间;  $N_{S\text{MAX}}$ 为最长滞留车队车辆数;  $T_1$ 为过饱和持续时间,等于 $n_1 C$ 。

## 3 最佳信号周期公式(Optimal signal cycle expression)

根据式(1),可以得到交叉口所有关键车流的平均延误时间 $\bar{d}$ 为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^m [Q_i(n_1 + n_2)C d_i]}{\sum_{i=1}^m [Q_i(n_1 + n_2)C]}, \quad (2)$$

式中:  $d_i$ 为第 $i$ 股关键车流的平均延误时间;  $Q_i$ 为第 $i$ 股关键车流所在进口道的通行能力。

联立式(1)-(2)可得:

$$\begin{aligned} \bar{d} &= \frac{\sum_{i=1}^m (d_i Q_i)}{\sum_{i=1}^m Q_i} = \\ &= \frac{0.5}{\sum_{i=1}^m Q_i} \sum_{i=1}^m [t_{R_i} Q_i + (q_{1i} - Q_i) T_1] = \\ &= \frac{0.5}{\sum_{i=1}^m (S_i \lambda_i)} \sum_{i=1}^m [(C - C \lambda_i) S_i \lambda_i + (q_{1i} - S_i \lambda_i) T_1], \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $t_{R_i}$  为第  $i$  股关键车流所遇的红灯时间;  $q_{1i}$  为第  $i$  股关键车流的过饱和和到达率;  $S_i$  为第  $i$  股关键车流所在进口道的饱和流量;  $\lambda_i$  为第  $i$  股关键车流所获得的绿信比;  $m$  为关键车流的总个数.

假设各股关键车流的绿信比按照等饱和度原则进行分配, 此时绿信比与交通流量比成正比:

$$\lambda_i = \frac{C - L y_i}{C Y}, \quad (4)$$

式中:  $L$  为关键车流的总损失时间;  $y_i$  为第  $i$  股关键车流的流量比;  $Y$  为关键车流的总流量比.

联立式(3)-(4)可得:

$$\begin{aligned} \bar{d} &= 0.5C - 0.5 \frac{\sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i}} (C - L) + \\ &= 0.5 \left( \frac{YC}{C - L} - 1 \right) T_1. \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)给出了交叉口所有关键车流平均延误时间与周期时长的表达式, 将平均延误时间  $\bar{d}$  对信号周期  $C$  求 1 阶导数, 如式(6)所示:

$$\frac{d\bar{d}}{dC} = 0.5 - \frac{0.5 \sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i}} - \frac{0.5 T_1 Y L}{(C - L)^2}. \quad (6)$$

为使所有关键车流平均延误时间最小, 令

$$\frac{d\bar{d}}{dC} = 0,$$

即

$$\begin{aligned} 0.5 - \frac{0.5 \sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i}} - \frac{0.5 T_1 Y L}{(C - L)^2} &= 0 \Rightarrow \\ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i}} &= \frac{T_1 Y L}{(C - L)^2} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i}} &= \frac{T_1 Y L}{(C - L)^2} \Rightarrow \\ (C - L)^2 &= \frac{T_1 L Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)} \Rightarrow \\ C_1 &= L + \sqrt{\frac{T_1 L Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}}, \end{aligned}$$

或者

$$C_2 = L - \sqrt{\frac{T_1 L Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (q_{1i} y_i)}} \quad (\text{舍去}).$$

舍去的原因分析如下:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{T_1 L Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (y_i q_{1i})}} / L &= \\ \sqrt{\frac{T_1 Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{L [Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (y_i q_{1i})]}} &, \end{aligned}$$

因为  $Y > 1 > 0$ ,  $T_1 > L > 0$ ,  $0 < y_i < 1$ , 所以

$$\begin{aligned} Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i} &> Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (y_i q_{1i}), \\ T_1 Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i} &> L [Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (y_i q_{1i})], \\ \sqrt{\frac{T_1 L Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (y_i q_{1i})}} / L &> 1, \\ C_2 &< 0. \end{aligned}$$

对式(5)求二阶导数结果为  $\frac{d^2 \bar{d}}{dC^2} = \frac{Y L T_1}{(C - L)^3} > 0$ .

由此可知, 式(5)表示的函数曲线为凹.  $C_1$  即为使关键车流延误最小的最佳信号周期  $C_{opt}$ :

$$C_{opt} = L + \sqrt{\frac{T_1 L Y^2 \sum_{i=1}^m q_{1i}}{Y \sum_{i=1}^m q_{1i} - \sum_{i=1}^m (y_i q_{1i})}}. \quad (7)$$

### 4 算例分析与仿真验证(Numerical example analysis and simulated verification)

#### 4.1 算例设计与分析(Design and analysis of numerical example)

已知某个信号交叉口采用四相位进口单独放行方式, 每个相位均以直行车流作为关键车流. 假定每股关键车流的损失时间为4s, 进口道饱和流量 $S$ 为1800 pcu/h, 过饱和状态持续时间 $T_1$ 为900s, 每股关键车流的流量比 $y_i$ 相同. 试针对如下表1所示的3种不同流量比情形(简称情形1, 2, 3), 分别计算其最佳信号周期与最小延误时间.

表1 不同流量比情形下的已知数据

情形	$q_{1i}/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	$\sum_{i=1}^4 q_{1i}/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	$y_i$	$Y$
1	450	1800	0.250	1.0
2	495	1980	0.275	1.1
3	540	2160	0.300	1.2

根据式(5)可计算出不同流量比情形下关键车流平均延误时间与信号周期之间的关系式, 如表2所示.

表2 不同流量比情形下延误时间与信号周期的关系式

情形	延误与周期关系式
1	$d_1 = 0.375C + (450C)/(C - 16) - 448$
2	$d_2 = 0.375C + (495C)/(C - 16) - 448$
3	$d_3 = 0.375C + (540C)/(C - 16) - 448$

根据表2中不同流量比情形下关键车流平均延误时间与信号周期的关系式, 可得到平均延误与信号周期的变化曲线图, 如图2所示.

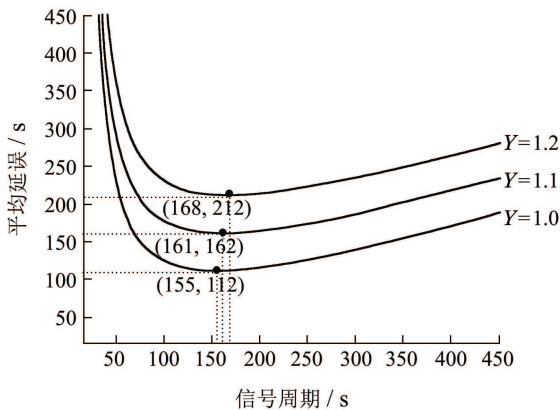


图2 平均延误与信号周期关系

Fig. 2 Relationship of average delay and signal cycle

由图2可以看出, 随着信号周期的逐渐增大, 平均延误时间的变化趋势是先迅速减小, 后缓慢增大. 因此可以推断, 当信号周期取某一数值时, 平均延误时间能够取得最小值, 此时的信号周期取值即为最佳信号周期大小.

根据表1中的已知数据以及式(5)(7)可以得到不同流量比情形下的最佳信号周期与对应最小延误时间, 如表3所示.

表3 不同流量比情形下最佳信号周期与最小延误  
Table 3 Optimal signal cycle and minimum delay in different flow ratios

情形	$C_{\text{opt}}/\text{s}$	$d_{\text{min}}/\text{s}$
1	155	112
2	161	162
3	168	212

注:  $d_{\text{min}}$ 表示最佳信号周期取值下的平均延误时间

#### 4.2 仿真实验(Simulation verification)

为验证本文模型算法的准确性, 在此利用VISSIM仿真软件对上述算例进行微观仿真分析.

##### 1) 交叉口几何条件.

交叉口的几何条件如图3所示, 东南西北各个方向的进口道均为3条车道(直左、直行、右转), 出口道均为3条车道, 每条车道的宽度均为3.5m.

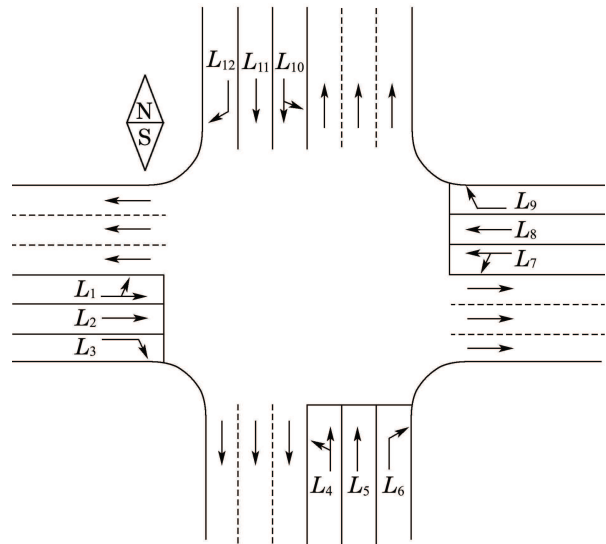


图3 交叉口几何条件

Fig. 3 Geometry conditions of intersection

##### 2) 交通流量.

过饱和时段 $T_1$ 内的交通流量 $q_1$ 与未饱和时段 $T_2$ 内的交通流量 $q_2$ 设置如表4所示.

##### 3) 信号配时方案.

结合交叉口的几何条件与交通流量, 信号配时方案采用四相位单独放行方式( $P_1, P_2, P_3, P_4$ 分别表示

东进口单放、南进口单放、西进口单放、北进口单放). 具体相位相序设置如图4所示.

表 4 交通流量

Table 4 Traffic volume and simulation parameters

情形	$q_1/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	$q_2/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$
1	450	270
2	495	297
3	540	324

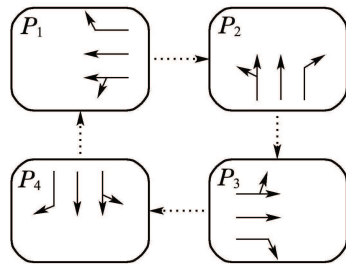


图 4 信号相位相序设置

Fig. 4 Design of signal phases and sequences

对于不同交叉口信号周期, 每股关键车流的绿灯时间可按照等饱和度原则进行分配, 即

$$t_{Gi} \approx t_{EGi} = (C - L) \cdot \frac{y_i}{Y}$$

4) 仿真参数设置.

在仿真前, 需要对VISSIM的仿真环境进行相关设置. 根据交叉口几何示意图3设置仿真路网, 根据表4与图4对交通流参数与信号控制参数进行设置. 为了模拟图1中第一辆车到达停车线时恰逢红灯启亮的情形, 可以通过VISSIM信号控制中的“偏移”参数进行控制; 为了测量仿真延误时间, 须在交叉口进口道设置行程时间检测区段进行数据采集. 在仿真中, 为了避免一次仿真带来的随机性, 在此采用不同的随机种子进行多次仿真实验, 选取平均值作为仿真结果.

5) 仿真结果.

根据交叉口的几何条件、输入流量以及信号配时方案, 利用VISSIM仿真软件的延误评价功能, 可以得到3组流量比下不同信号周期的仿真延误时间. 分别对比3组流量比下的仿真延误值与理论延误值, 如图5所示.

由图5可以看出, 随着信号周期的逐渐增大, 平均延误时间呈先减小后增大的趋势, 因此必定存在一个最优信号周期使得平均延误时间最小<sup>[16]</sup>. 同时可见, 仿真延误与理论延误随信号周期的变化规律相一致.

5 结语(Conclusions)

本文针对过饱和交通状态, 研究了交叉口关键车流延误与信号周期之间的曲线关系, 推导了基于关键车流总延误最小的最佳信号周期公式, 为短时过饱和状态下的交叉口信号配时提供了相关理论依据.

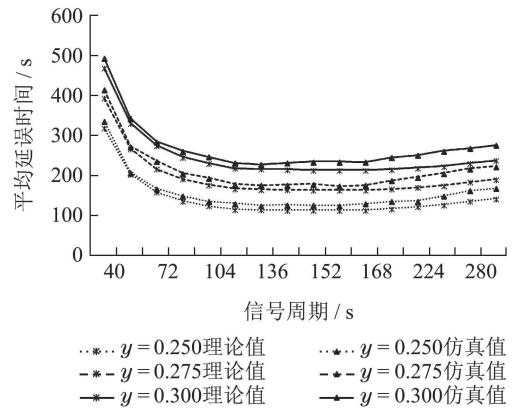


图 5 不同流量比下的仿真延误值与理论延误值对比

Fig. 5 Comparison between simulation delay and theoretical delay under different flow ratios

本文提出的配时方法主要适用于交叉口过饱和状态持续时间较短且相邻交叉口间距较长的情况. 当过饱和状态持续时间较长时, 本文方法计算得到的信号周期将偏长, 可能会超出驾驶员与行人的忍耐极限; 而当相邻交叉口间距较短时, 本文方法计算得到的信号周期可能无法控制排队溢流现象的出现. 因此, 对于过饱和交通状态下信号优化这个典型的多目标控制问题, 需要将本文方法与其他方法进行进一步的融合.

参考文献(References):

- [1] WEBSTER F V. *Traffic Signal Settings* [M]. London: Her Majesty's Stationary Office, 1958.
- [2] 全永燊. 城市交通控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989. (QUAN Yongshen. *Urban Traffic Control* [M]. Beijing: China Communication Press, 1989.)
- [3] AKCELIK R. *Traffic signal: capacity and time analysis* [R]. Australia: Australian Road Research Board, 1981.
- [4] TRB. *Highway Capacity Manual 2000 (HCM 2000)* [M]. Washington, D.C.: National Research Council, 2000.
- [5] 蒋金勇, 云美萍, 杨佩昆. 基于HCM2000延误模型的最佳周期时长估算公式 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 1024-1028. (JIANG Jinyong, YUN Meiping, YANG Peikun. Optimal cycle length estimation equations based on delay model of HCM 2000 [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(8): 1024-1028.)
- [6] ROGER P R, PRASSAS E S, MCSHANE W R. *Traffic Engineering* [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, Pearson Education Inc. 2004.
- [7] 袁春华, 史峰. 利用冲突点的车流特点确定信号控制周期 [J]. 华东交通大学报, 2002, 19(4): 14-16. (YUAN Chunhua, SHI Feng. Using traffic stream characteristics of conflict point to determine signal cycle of signalized intersection [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2002, 19(4): 14-16.)
- [8] MAY A D. *Traffic Flow Fundamentals* [M]. Englewood, Cliff: Prentice Hall, 1990.
- [9] 王殿海. 交通流理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (WANG Dianhai. *Traffic Flow Theory* [M]. Beijing: China Communication Press, 2002.)



- [10] 曹倩霞, 王修江, 龙科军. 饱和状态交叉口信号配时优化 [J]. 系统工程, 2010, 28(7): 123 – 126.  
(CAO Qianxia, WANG Xiujiang, LONG Kejun. Signal timing optimization of saturated intersection [J]. *System Engineering*, 2010, 28(7): 123 – 126.)
- [11] 李凤. 过饱和状态下交叉口车辆延误和排队长度模型研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2006.  
(LI Feng. *Study on models of delay and queue length at oversaturated intersection* [D]. Jilin: Jilin University, 2006.)
- [12] CHANG Y L, CUI Y B, ZHANG P. Multi-phase signal setting and capacity of signalized intersection [J]. *Journal of Southeast University*, 2009, 25(1): 123 – 127.
- [13] 裴玉龙, 蒋贤才. 饱和和交通状态下的绿信比优化及其应用研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1449 – 1502.  
(PEI Yulong, JIANG Xiancai. Green ratio optimizing and application in saturated traffic flow [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(11): 1449 – 1502.)
- [14] 王殿海, 别一鸣, 宋现敏, 等. 信号交叉口最大周期时长优化方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(增刊): 148 – 151.  
(WANG Dianhai, BIE Yiming, SONG Xianmin, et al. Maximum cycle length optimization method of signalized intersection [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 40(S): 148 – 151.)
- [15] 卢凯, 徐建闽, 李林. 过饱和和交通状态下的停车延误协调控制模型 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(12): 1623 – 1630.  
(LU Kai, XU Jianmin, LI Lin. Coordinated control models for stop and delay under over-saturated traffic conditions [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(12): 1623 – 1630.)
- [16] 卢凯. 交通信号协调控制基础理论与关键技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
(LU Kai. *Research on the foundational theory and key techniques of coordinate signal control in urban traffic network* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.)

#### 作者简介:

**徐建闽** (1960–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能交通系统、控制理论与控制工程, E-mail: aujmxu@scut.edu.cn;

**荆彬彬** (1989–), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为交通信号控制, E-mail: jingbin19@126.com;

**卢凯** (1979–), 男, 副教授, 博士, 主要研究领域为交通信号控制、智能控制理论与应用, E-mail: kailu@scut.edu.cn.