

# 交通信号干线协调控制经典数值计算法的改进

王殿海<sup>1,2</sup>, 杨希锐<sup>1,3</sup>, 宋现敏<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 3. 中国人民解放军汽车管理学院 车辆管理系, 安徽 蚌埠 233011)

**摘要:**对干线协调控制经典数值算法进行了深入分析, 指出了经典数值算法的不足之处。提出了经过修正的绿波带宽度计算方法、交叉口信号相位差计算方法以及实际交叉口与理想交叉路口的匹配方法。分析表明, 利用改进后的数值算法能实现各实际交叉口与理想交叉路口的最佳匹配, 计算得出的绿波带宽度和各交叉口信号相位差也更加准确。

**关键词:**交通运输系统工程; 交通信号控制; 数值算法; 绿波带宽度; 信号相位差

**中图分类号:**U491.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-5497(2011)01-0029-06

## Improvement of classical numerical method for arterial road signal coordinate control

WANG Dian-hai<sup>1,2</sup>, YANG Xi-rui<sup>1,3</sup>, SONG Xian-min<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Construction, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Department of Automotive Management, College of Automotive Engineering of PLA, Bengbu 233011, China)

**Abstract:** The classical numerical method for the arterial road coordinate control was analyzed in detail, revealing the deficiency of the classical method. The improved calculating methods of the green wave bandwidth and the signal phase shift at the road intersection, and the best match method of the real and the ideal intersections were proposed. The case examples demonstrate that the improved numerical method gives more accurate widest possible green wave bandwidth and more accurate signal phase shift in the arterial road coordinate control system.

**Key words:** engineering of communications and transportation system; traffic signal control; numerical method; green wave bandwidth; signal phase offset

现代城市交叉口信号控制理论研究证明, 实现道路双向交通流的“绿波带”控制将极大地改善在高峰期的交通拥堵现象和减少交通流时间的延误<sup>[1]</sup>。而相位差的优化是实现交通流双向“绿波

带”控制的关键技术, 其中有最大绿波带和最小延误两种常用的设计思路。最大绿波带常用算法有图解法和数解法; 最小延误常用的算法有结合法和遗传算法等<sup>[2-4]</sup>。最小延误设计方法由于在多

收稿日期: 2009-07-12.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z209).

作者简介: 王殿海(1962-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 交通控制, 交通理论, 交通规划.

E-mail: wangdianhai@sohu.com

通信作者: 杨希锐(1974-), 男, 讲师, 博士研究生. 研究方向: 交通控制, 交通规划. E-mail: yangxirui@163.com

交叉口线控优化计算中涉及到大量的相关影响因素,且其相关参数标定困难,因此在实际应用中有一定的局限性<sup>[5]</sup>;而传统数解算法计算简捷、实现方便、可操作性强,特别是对于车队行驶离散性较小、转弯车辆较少的双向对称式干道,能较好地保证车队通过干道多个交叉口的连续性,在一些干线协调控制实际系统设计中<sup>[6-7]</sup>得到广泛应用,取得了令人满意的实际控制效果。然而在对传统数解算法的习惯性应用过程中,较少思考算法本身的合理性、科学性,缺乏对传统数解算法设计本身的理论研究。

本文将深入分析传统数解算法在实际应用中存在的一些问题,指出算法本身理论设计的不足之处,并提出相应的修正方法与解决思路。

### 1 传统数解算法

数解算法是确定线控系统相位差的一种方法,它通过寻找使得系统中各实际信号距理想信号的最大挪移量最小来获得最优相位差控制方案,下面通过算例 1 来说明数解法的基本过程<sup>[8-9]</sup>。

例 1 设有 A、B、…、F 共六个交叉口,它们的相邻间距见表 1,A、B 交叉口之间距离为 360 m,B、C 之间为 500 m 等,取有效数字 36、50、…。通过单点信号控制方法计算得到关键交叉口周期时长为 80 s,相应的车辆行驶速度为 12.5 m/s。

(1)计算理想间距。根据系统的公用周期和车队速度,可以计算得到交叉口的理想间距是 500 m,取有效数字简写为 50。

(2)确定最合适的理想信号位置。

(3)作连续行驶通过带。把理想信号按次序列在最靠近的实际信号下面,再确定各信号在理想信号点的左右位置。因实际信号与理想信号位置不一致所造成的绿时损失以其位置挪移量除以理想信号的间距表示。

用各交叉口的绿信比减去绿时损失即为各交叉口的有效绿信比,则连续通过带的带宽为左、右两端有效绿信比最小值的平均值。

(4)求相位差。合用一个理想信号点的左、右相邻的实际信号,改用同步式协调;其他各实际信号间都用交互式协调。因此,相应于奇数理想信号的实际信号的相位差为 $(1-0.5\lambda)C$ ;相应于偶数理想信号的实际信号的相位差为 $(0.5-0.5\lambda)C$ ,其中  $C$  为周期时长; $\lambda$  为各交叉口绿信比。计

算结果见表 1。

表 1 例 1 的相位差计算结果

Table 1 Calculated results of example 1						
交叉路口	A	B	C	D	E	F
各交叉路口间距/m	0	360	500	250	400	600
理想信号编号	①	②	③	③	④	⑤
各信号位置	右	左	左	右	左	右
绿信比 $\lambda/\%$	55	60	65	65	60	65
绿灯损失/ $\%$	21	14	5	23	5	5
有效绿信比/ $\%$	34	46	60	42	55	60
相位差/ $\%$	72.5	20.0	67.5	67.5	20.0	67.5

### 2 绿波带宽度计算的修正算法

#### 2.1 传统数解法存在的问题

在传统数解算法中,通过带宽度的计算方法为:对于所有从左方靠近理想交叉口位置的交叉口,选出一个最小有效绿信比;对于所有从右方靠近理想交叉口位置的交叉口,选出另一个最小有效绿信比;将这两个最小有效绿信比取平均值,即得到通过带宽度。这种通过带宽度计算方法其实只适用于各交叉口主干道方向绿信比接近的情况,对于各交叉口主干道方向绿信比相差较大、特别是干道上存在个别瓶颈交叉口的情况,计算方法可能会失效。

例 2 将例 1 中的各交叉口主干道方向绿信比设为 70%、60%、65%、65%、35%、65%,其他参数保持不变,生成新的算例 2。

传统数解算法对算例 2 的通过带宽度计算过程如表 2 所示,计算得到的通过带宽度为 36%,大于交叉口 E 的主干道方向绿信比 35%,显然不合情理<sup>[10]</sup>。

表 2 例 2 的相位差计算结果

Table 2 Calculated results of signal offsets of example 2						
交叉路口	A	B	C	D	E	F
理想信号编号	①	②	③	③	④	⑤
各信号位置	右	左	左	右	左	右
绿信比 $\lambda/\%$	70	60	65	65	35	65
绿灯损失/ $\%$	21	14	5	23	5	5
有效绿信比/ $\%$	49	46	60	42	30	60
相位差/ $\%$	72.5	20.0	67.5	67.5	20.0	67.5

#### 2.2 理想间距条件下的绿波带宽度分析

传统数解法通过寻找使系统中各实际信号距理想信号的最大挪移量最小来获得最优相位差控

制方案,而各信号交叉口在理想信号间距条件下所形成的绿波带是分析其挪移量的基础。通过计算可以发现,当各交叉口之间的距离都是理想间距时,通过同步式协调或交互式协调控制时,其绿波带的宽度与各交叉口中绿信比最小的那一个交叉口的绿信比相等<sup>[11]</sup>。如图 1 所示,当 A、B、C 三交叉口之间的间距是理想间距时,其绿波带的宽度为各交叉口中绿信比最小的(瓶颈交叉口),即 B 交叉口的绿信比的值,而其余交叉口由于其绿信比大于 B 交叉口,故其相位差可在一定范围内进行调整(见图 1 中相位差可调量),而不会影响绿波带的宽度。为便于分析,可假定通过各交叉口的绿波带的中心线与交叉口绿灯时间的中心线重合。

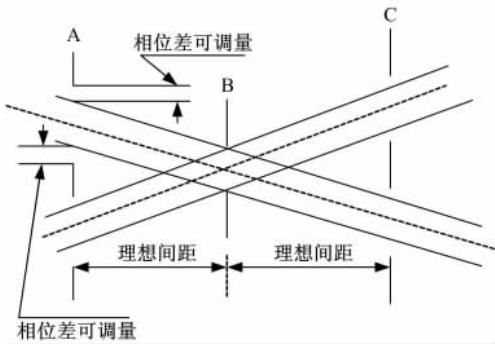


图 1 理想间距条件下绿波带的宽度

Fig. 1 Green wave bandwidth under ideal distance

2.3 实际交叉口相对理想交叉口位置偏移时对绿波带的影响

如图 2 所示,交叉口 A、B、C 之间为理想间距,其中 A 为瓶颈交叉口,当实际交叉口 B<sub>1</sub> 相对于理想位置 B 偏移距离 L<sub>1</sub> 时,由于交叉口 B 的绿信比大于瓶颈交叉口 A 的绿信比,此时偏移的距离 L<sub>1</sub> 换算成时间刚好等价于交叉口 A 相对于瓶颈交叉口 B 多余的绿信比,因此仍然保持原绿波

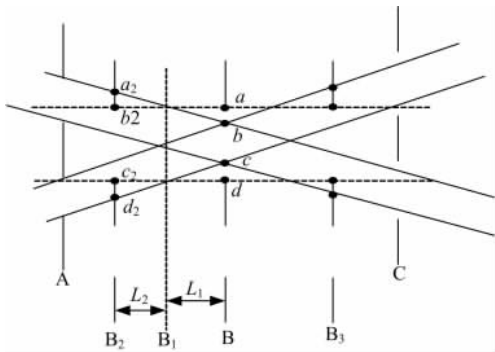


图 2 偏移理想间距的实际交叉口

Fig. 2 Inconsistent intersection for Ideal distance

带的宽度。而当 B 偏移 to 位置 B<sub>2</sub> 时,从图 2 中可以看到,由于在这里设绿波带的中心线与各交叉口的中心线重合,故其对上行与下行的绿波带的影响是对称的,即由于其相对于理想信号间距的偏移造成下行的绿波带减少的宽度为 a<sub>2</sub>b<sub>2</sub>,同样,上行的绿波带减少的宽度为 c<sub>2</sub>d<sub>2</sub>。

当实际交叉口位于理想交叉口的右侧时,如图 2 中 B<sub>3</sub>,这时其造成的绿波带的损失情况正好与左侧的 B<sub>2</sub> 相反,分别是从上行的绿波带的上方和下行绿波带的下方减少绿波带的宽度。

由于交叉口理想间距  $S = VC/2$ , 可得  $V = 2S/C$ , 又由于  $V = (L_1 + L_2)/(ab + a_2b_2)$ 。故可得当实际交叉口 B<sub>2</sub> 相对于理想交叉口 B 的距离为  $L = L_1 + L_2$  时,所造成的绿波带的损失量为

$$a_2b_2 = LC/(2S) - ab$$

式中: ab 的值为交叉口 B 绿波带绿信比与瓶颈交叉口的绿信比差值的一半。

考虑到实际交叉口位于理想交叉口左侧与右侧的不同,最终的绿波带的带宽计算方法应为

$$\omega = \lambda - \delta_1 - \delta_2$$

式中:  $\omega$  为绿波带带宽;  $\lambda$  为瓶颈交叉口的绿信比;  $\delta_1$  为位于理想交叉口左侧的交叉口造成的绿波带损失的最大值;  $\delta_2$  为位于理想交叉口右侧的交叉口造成的绿波带损失的最大值。

从而可计算出例 2 中绿波带带宽为(见表 3): 绿波带带宽 = 35 - 2.5 - 0 = 32.5。表 3 中  $\lambda_1$  表示实际交叉口与理想交叉口距离占周期的比;  $\lambda_2$  表示各交叉口相对瓶颈交叉口的可调整绿信比的一半; L 表示实际交叉口偏移理想交叉口造成的绿波带损失(用表中第 6 行减去第 5 行的值,大于 0 的取 0,小于 0 的取其绝对值)。

表 3 例 2 中绿波带带宽计算结果  
Table 3 Calculated results of green wave bandwidth for example 2

交叉路口	A	B	C	D	E	F
理想信号编号	①	②	③	③	④	⑤
各信号位置	右	左	左	右	左	左
绿信比 λ/%	70	60	65	65	35	65
λ <sub>1</sub> /%	10.5	7	2.5	11.5	2.5	2.5
λ <sub>2</sub> /%	17.5	12.5	15	15	0	15
L	0	0	0	0	2.5	0
绿波带带宽/%	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5

3 各实际交叉口相位差的取值

在传统数解算法中,各交叉口相位差的设置

将根据与其所在位置距离最近的理想交叉口位置编号确定,即靠近奇数编号的理想交叉口位置的所有交叉口之间采用同步协调,靠近偶数编号的理想交叉口位置的所有交叉口之间亦采用同步协调,而靠近奇数编号的理想交叉口位置的交叉口与靠近偶数编号理想交叉口位置的交叉口之间则采用交互协调。显然这种交叉口相位差设置方法能使各交叉口的偏移绿信比适当减小,但由于单纯根据离实际交叉口最近的某个理想交叉口来计算其相位差,难以反映出交叉口相位差的优化与所有实际交叉口整体分布的关系,因此利用这种方法并不能反映出实际交叉口相位差的选择与绿波带宽度的关系,且不一定有利于干道协调控制系统获得最优的通过带宽度<sup>[12]</sup>。

这一问题的关键在于判断实际交叉口相对于其左右理想交叉口的关系,即判断实际交叉口是 以其左侧的理想交叉口为基准计算相位差,还是 以其右侧的理想交叉口为基准计算其相位差。

具体的判断步骤(以图 3 中  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  交叉口为例)如下:

(1)以各实际交叉口中瓶颈交叉口的绿信比作为理想交叉口通行绿波带  $M_0$ 。

(2)计算各实际交叉口相对于其左、右邻近理想交叉口的距离。

(3)计算各实际交叉口偏移理想交叉口造成的绿波带的损失(以周期为单位)。

(4)在图中标出各实际交叉口分别以左侧与右侧理想交叉口为基准时,所形成的绿波带的带宽损失切入点,其中以左侧理想交叉口为基准时的损失切入点在上(下)行绿波带的上(下)方(相当于从理想交叉口位置右移到实际交叉口位置,即  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ ),以右侧理想交叉口为基准时的损失切入点在上(下)行绿波带的下(上)方(相当于从理想交叉口左移到实际交叉口,即  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$ )。

(5)选择各损失切入点中绿波带损失宽度最小的点,图 3 中由于  $A_0$  交叉口下方点  $d_2$  在初始绿波带外,说明当  $A_0$  交叉口以其左侧理想交叉口为基准设置相位差时,原绿波带宽度不变。

(6)重新选择各实际交叉口绿波带损失最小的切入点,此时为图 3 中  $b_2$ ,从  $b_2$  出发,沿与图中绿波带平行的方向画一条平行线,此平行线与原绿波带的上方边界构成修正后的新的绿波带,用  $M_1$  表示。

(7)基于  $M_1$ ,重新选择各实际交叉口绿波带损失最小的切入点(对于已经选择过切入点的交叉口不再考虑),此时为图 3 中的  $a_1$ ,从  $a_1$  出发,沿与绿波带平行的方向画一条平行线,构成修正后的新的绿波带,用  $M_2$  表示。

(8)重复选择各实际交叉口绿波带损失最小的切入点,重复对原绿波带进行修正,直到所有交叉口都被选择为止,此时所得的绿波带即为数解法中各实际交叉口形成的最终的绿波带。

(9)根据形成的最终的绿波带的位置判断各实际交叉口与其基准理想交叉口的位置关系(左或右),除被最终绿波带所覆盖的各实际交叉口绿波带损失的切入点以外(如图 3 中的  $c_1$ 、 $a_2$ ),其余各切入点均可被选择(如图 3 中的  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ ),并在此基础上相应确定各交叉口相位差。

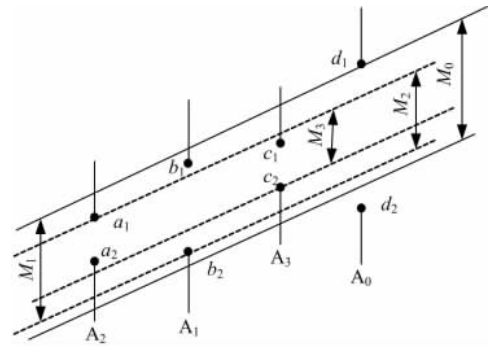


图 3 实际交叉口与理想交叉口的位置分析

Fig. 3 Comparative analysis of actual and ideal intersection

按上述步骤,对于例 2,计算出各交叉口与基准理想信号之间的关系,见表 4。表 4 中,  $\lambda_3$  表示各交叉口相对瓶颈交叉口的可调整绿信比的一半;  $\lambda_4$  表示实际交叉口与左侧理想交叉口距离占

表 4 相位差计算结果

Table 4 Calculated results of offsets

交叉路口	A	B	C	D	E	F
绿信比 $\lambda/\%$	70	60	65	65	35	65
$\lambda_3/\%$	17.5	12.5	15	15	0	15
$\lambda_4/\%$	10.5	43	47.5	11.5	47.5	47.5
$Q_1$	-7	30.5	32.5	-3.5	47.5	32.5
$\lambda_5/\%$	39.5	7	2.5	38.5	2.5	2.5
$Q_2$	22	-5.5	-12.5	23.5	2.5	-12.5
基准理想信号编号	①	①②	②③	③	④	④⑤

根据基准理想信号编号计算各交叉口相位差

周期的比; $Q_1$ 表示以左侧理想交叉口为基准时绿波带的实际调整量; $\lambda_5$ 表示实际交叉口与右侧理想交叉口距离占周期的比; $Q_2$ 表示以右侧理想交叉口为基准时绿波带的实际调整量。从表 4 中可以看到,实际交叉口的基准理想信号可能不止一个,相应计算出的相位差也不一样,但由于其不影响最终绿波带的宽度,因此可根据具体需要选择不同的相位差。

4 理想交叉口与原交叉口的匹配

传统数解算法是通过比较各理想交叉口间距的相邻挪移量之差最大值  $b$ ,依据  $b$  最大原则确定最佳理想交叉口间距的。不难理解,对于同一个理想交叉口间距  $a$ , $b$  越大则表明实际交叉口位置可以越集中地处于理想交叉口位置附近,其最大“损失绿信比”越小,通过带宽度可能越宽,因此,传统数解算法实质上是 将  $b$  视为反映理想交叉口间距与实际交叉口间距匹配程度的特征参量。考虑到理想间距的大小对于匹配关系的影响,卢凯等<sup>[10]</sup>提出将  $b/a$  作为表征理想交叉口间距与实际交叉口间距匹配程度的特征参量,通过寻求最大的  $b/a$  以确定最佳理想交叉口间距  $a$  的取值。

上述两种方法在某种程度上都是利用计算各实际交叉口相对于理想交叉口的总体距离,体现出各实际交叉口相对于理想交叉口的集中程度,从而希望得到各实际交叉口与理想交叉口的一种最优匹配,实现绿波带宽度的最大化。但由于各实际交叉口与理想交叉口的偏移距离并不能真实反映绿波带的损失程度。并且各实际交叉口与理想交叉口的匹配不是唯一解,而是存在着多个解,因此需要对传统数解法中各实际交叉口与理想交叉口的最佳匹配计算方法进行修正,修正后的计算方法如下:

- (1)根据车辆行驶速度计算出理想交叉口的间距  $a$ 。
- (2)根据各实际交叉口的间距画出其位置图(见图 4)。
- (3)从距离第一个交叉口 A 处画出第一个理想交叉口的位置(图 4 中①),并沿着干道方向以 A 为间隔画出后续的理想交叉口的位置(图 4 中②③④⑤⑥)。
- (4)根据文中第 3 部分所述方法确定各实际交叉口所对应的基准理想交叉口,并相应确定绿波带的宽度。

(5)以每秒车辆行驶的距离为间隔,将所有的理想交叉口的位置向右移一次,重新确定绿波带的宽度。

(6)重复进行步骤(5),直到理想交叉口①移到第一个实际交叉口右侧。

(7)比较每次移动理想交叉口的位置后所得到的绿波带的宽度,当绿波带宽度取最大值时,即为实际交叉口与理想交叉口的最优匹配。

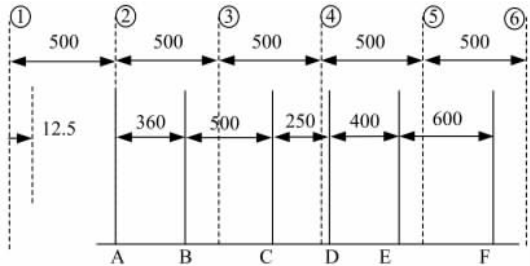


图 4 理想交叉口与实际交叉口的相对位置

Fig. 4 Relative position of actual and ideal intersection

综上所述,将实际交叉口与理想交叉口的最优匹配方法、各交叉口的相位差的取值方法、绿波带的计算方法进行整合,即可得到改进后的数解算法。从例 2 的计算结果可以看出,改进后的数解算法可以避免传统数解算法中的不足之处,得到的计算结果也更合理、更准确。

5 结束语

对传统数解算法进行了改进,得到了新的数解算法。用新数解算法可以求得使干道信号协调控制系统优化运行的各实际交叉口的相位差,从而实现某种程度上的线控优化。但本文的数解法主要是针对双向车辆速度一样(即双向带速一致)的情况,对于双向车辆速度不一样的情况下如何求解各交叉口的相位差及绿波带,尚待进一步研究。

参考文献:

[1] Chang E C P. Evaluation of interconnected arterial traffic signals[J]. Transportation Planning Journal Quarterly,1986, 15(1): 137-156.

[2] Foy M D, Benekohal R F, Goldcegr D E. Signal timing determination using genetic algorithms[J]. Transportation Research Record, 1992, 1365: 108-115.

[3] 谷远利,于雷,邵春福. 相邻交叉口相位差优化模型及仿真[J]. 吉林大学学报,工学版,2008,38(增刊): 53-58.

- Gu Yuan-li, Yu Lei, Shao Chun-fu. Phase-offset optimization model and simulation of adjacent intersection[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2008, 38(Sup. ): 53-58.
- [4] 马楠, 邵春福, 超熠. 基于双向绿波带宽最大化的交叉口信号协调控制优化[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(增刊 2): 19-24.
- Ma Nan, Shao Chun-fu, Zhao Yi. Optimized modeling of signalized intersections coordination based on two-way band width maxmization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(Sup. 2): 19-24.
- [5] 万绪军, 陆化普. 线控系统中相位差优化模型的研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(2): 99-102.
- Wan Xu-jun, Lu Hua-pu. An optimal offset model for artery traffic signal control system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 99-102.
- [6] Wang Dian-hai, Song Xian-min, Li-Feng. Research on offset optimization of signalized arterials[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Traffic and Transportation Studies, Xi'an, 2006: 584-594.
- [7] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- Li Hong-qiang. Study on optimization methods of signal timing parameters of urban traffic control [D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2004.
- [8] 杨佩昆, 张树升. 交通管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [9] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [10] 卢凯, 徐建闽, 叶瑞敏. 经典干道协调控制信号配时数解算法的改进[J]. 公路交通科技, 2009, 26(1): 120-124.
- Lu Kai, Xu Jian-min, Ye Rui-min. Improvement of classical algebraic method of signal timing for arterial road coordinate control[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(1): 120-124.
- [11] 宋现敏. 城市交叉口信号协调控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2008.
- Song Xian-ming. Research on coordinated control methods in urban signalized intersections [D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2008.
- [12] Skabardonis A, May A. Comparative analysis of computer models for arterial signal timing [J]. Transportation Research Record, 1985, 1021: 45-52.