

# 现代有轨电车主动信号优先模型研究

罗 聪

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,430063,武汉//工程师)

**摘 要** 为了提高现代有轨电车运行效率,在道路平交路口处实施信号优先是应用最为普遍的方法。对现代有轨电车通过交叉口时形成的离散交通流,提出了其特定的延误公式,构建了以人总延误的减小量为参考指标的主动优先效益模型,并通过判断效益模型的结果是否为正来决定能否采取主动优先控制策略。以武汉市东湖高新区的现代有轨电车T1线为例,对模型进行仿真分析与验证。结果表明,与常规信号控制策略相比,主动信号优先具备更好的控制效果;与绿灯提前控制策略相比,绿灯延长策略的效果更加显著。

**关键词** 现代有轨电车;交叉口;主动信号优先

**中图分类号** U491.2\*32

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.04.014

## Research on the Active Signal Priority Model for Modern Tram

LUO Cong

**Abstract** Signal priority at intersection is the most commonly adopted method to improve the efficiency of modern trams. Aiming at the discrete traffic flow when the modern tram passing through intersections, a specific delay formula is put forward and an active priority benefit model is built based on the reference index of total delay reduction, and the adoption of active priority control strategy is decided according to the results of the model performance. Taking the modern tram T1 Line in the East Lake High-tech Zone of Wuhan City as a reference, the model is simulated and verified. The result shows that the active signal priority has better control effect compared with conventional signal control strategies, but is less effective compared with the green light advance control strategy.

**Key words** modern tram; intersection; active signal priority

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

为了提高现代有轨电车在道路平交路口(即“交叉口”)的运行效率,减少停车延误,实施信号优先是最为普遍采用的方法。优先方法主要有被动优先、主动优先和自适应优先<sup>[1]</sup>。

国外对有轨电车的建设和研究较早,如文献[2-4]对现代有轨电车信号控制优先的定性理论和定量模型算法均进行了研究。国内相关建设和研究起步较晚,如文献[5-7]涉及了现代有轨电车系统信号控制优先的理论研究,而对信号控制优先的定量模型算法和具体实施技术,国内研究较为缺乏。

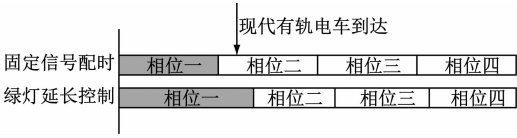
由于现代有轨电车发车频率较低,其通过交叉口按离散交通流计算,且平均载客量远大于社会车辆,因此,其延误的计算方法与社会车辆不同。传统的交叉口信号优先模型主要考虑车均延误,本文为了体现现代有轨电车优先,考虑人均延误的影响因素,以交叉口人总延误为参考标准,构建现代有轨电车主动信号优先模型。

## 1 现代有轨电车主动信号优先控制

主动信号优先是指检测列车的到达信息,采取绿灯延长、绿灯提前等策略来改变信号参数,以实现列车快速通过路口的目标。本文主要研究绿灯延长和绿灯提前控制策略。

### 1.1 绿灯延长策略

绿灯延长是指:在现代有轨电车绿灯相位快要结束时,延长该绿灯相位,以保证列车能够顺利通过交叉口;当列车通过交叉口后,信号配时恢复原配时方案。绿灯延长策略示意图如图1所示。

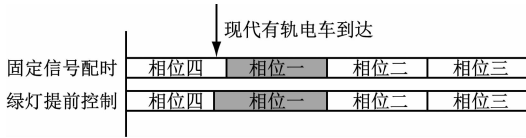


注:相位一为现代有轨电车绿灯相位

图1 绿灯延长策略示意图

### 1.2 绿灯提前策略

绿灯提前是指:在现代有轨电车绿灯相位还没开始却快要开始时,缩短当前相位绿灯时间,提前进入现代有轨电车绿灯相位,以保证其能够顺利通过交叉口(如图2所示)。



注：相位一为现代有轨电车绿灯相位

图2 绿灯提前示意图

## 2 现代有轨电车主动信号优先效益计算

### 2.1 主动信号优先的效益

主动信号优先可使列车不停车直接通过交叉口,以减小延误,但会增大社会车辆在交叉口处的延误,造成负面影响。

因现代有轨电车的载客量远大于社会车辆,本文以主动信号优先所引起的人总延误的变化作为交叉口的效益指标。主动信号优先效益  $E_i$  应包括三部分:优先相位现代有轨电车人总延误时间的减少量( $\Delta t_{p,p}$ ),优先相位社会车辆人总延误时间的减少量( $\Delta t_{p,s}$ )和非优先相位社会车辆人总延误时间的增加量( $\Delta t_{p,n}$ ),其计算式如下:

$$E_i = \Delta t_{p,p} + \Delta t_{p,s} - \Delta t_{p,n} \quad (1)$$

#### 2.1.1 绿灯延长效益计算

##### 2.1.1.1 $\Delta t_{p,p}$ 的计算

如需对绿灯相位延长才能使现代有轨电车顺利通过交叉口,则采取绿灯延长策略后,现代有轨电车延误减少的时间包括到达时刻距下一周期绿灯相位的时间和绿初损失时间,其计算式如下:

$$\begin{aligned} \Delta t_{D,p} &= T - \Delta t_e - t_{g,s} + t_{l,f} \\ t_{g,s} &= t_g + t_l - t_A \\ t_{l,f} &= t_r + \frac{v_i}{2a_a} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:

$\Delta t_{D,p}$ ——现代有轨电车延误减小的时间;

$T$ ——周期时长;

$\Delta t_e$ ——绿灯延长时间;

$t_{g,s}$ ——现代有轨电车相位显示绿灯时间;

$t_{l,f}$ ——绿初损失时间;

$t_g$ ——现代有轨电车有效绿灯时间;

$t_l$ ——现代有轨电车起动损失时间;

$t_A$ ——现代有轨电车黄灯时间;

$t_r$ ——司机反应时间;

$v_i$ ——现代有轨电车通过交叉口的最大速度;

$a_a$ ——现代有轨电车的平均加速度。

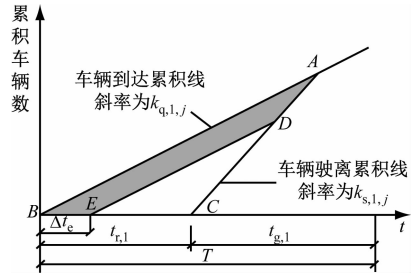
每列现代有轨电车的平均载客数取  $P_t$ ,则:

$$\Delta t_{p,p} = \Delta t_{D,p} P_t =$$

$$\left[ T - \Delta t_e - (t_g + t_l - t_A) + (t_r + \frac{v_i}{2a_a}) \right] P_t \quad (3)$$

#### 2.1.1.2 $\Delta t_{p,s}$ 的计算

假设社会车辆均匀到达交叉口,优先相位为第1相位,则其延误分析图如图3所示。



注: $t_{r,1}$ 为优先相位红灯时间; $t_{g,1}$ 为优先相位有效绿灯时间; $k_{q,1,j}$ 表示优先相位第  $j$  流向社会车辆的到达率; $k_{s,1,j}$ 为优先相位第  $j$  流向社会车辆驶离交叉口的饱和和流率

图3 绿灯延长时优先相位延误减小示意图

优先相位第  $j$  流向社会车辆的延误时间减少量即为图3中四边形  $ABED$  的面积  $S_1$ 。

$$S_1 = \frac{k_{q,1,j} k_{s,1,j} \Delta t_e (2t_{r,1} - \Delta t_e)}{2(k_{s,1,j} - k_{q,1,j})} \quad (4)$$

每辆社会车辆的平均载客数取  $P_s$ ,则:

$$\begin{aligned} \Delta t_{p,s} &= \sum_{j=1}^m S_1 P_s = \\ &= \sum_{j=1}^m \frac{k_{q,1,j} k_{s,1,j} \Delta t_e (2t_{r,1} - \Delta t_e)}{2(k_{s,1,j} - k_{q,1,j})} P_s \end{aligned} \quad (5)$$

#### 2.1.1.3 $\Delta t_{p,n}$ 的计算

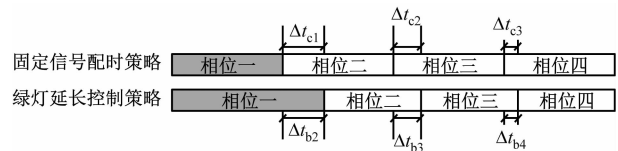
由于  $T$  固定不变,若优先相位  $\Delta t_e$  存在,则非优先相位绿灯时间缩短  $\Delta t_e$ 。若后续有多个相位,则这些相位共同承担缩短的时间。即:

$$\Delta t_e = \sum_{i=2}^n \Delta t_i \quad (6)$$

式中:

$\Delta t_i$ ——第  $i$  相位绿灯压缩时间。

多个相位共同承担缩短时间的示意图如图4所示。相应计算见式(7)。



注: $\Delta t_{b,i}$ ——第  $i$  相位绿灯推后开启的时间; $\Delta t_{c,i}$ ——第  $i$  相位绿灯推后结束的时间;相位——为现代有轨电车绿灯相位

图4 绿灯延长时非优先相位压缩时间示意图

$$\Delta t_{c,1} = \Delta t_e$$

$$\begin{aligned}\Delta t_{b,i} &= \Delta t_{c,(i-1)} \\ \Delta t_{c,i} &= \Delta t_{b,i} - \Delta t_i\end{aligned}\quad (7)$$

非优先相位的延误改变有两部分:一为绿灯推后开启引起的延误时间增加  $\Delta t_{b,i}$ ,二为绿灯推后结束引起的延误时间减少。第一部分延误分析图如图 5 所示,第二部分延误分析图如图 6 所示。

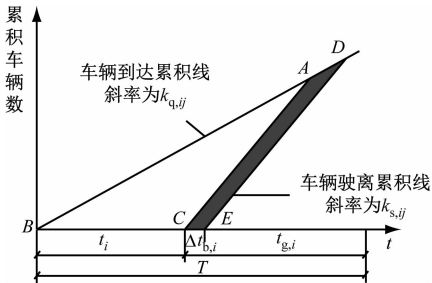


图 5 绿灯延长时非优先相位延误增加示意图

由图 5 可知,第  $i$  相位第  $j$  流向社会车辆的延误时间增加量即为四边形  $ACED$  的面积  $S_2$ 。

$$S_2 = \frac{k_{q,ij} s_{ij} \Delta t_{bi} (2t_{r,i} + \Delta t_{bi})}{2(k_{s,ij} - k_{q,ij})} \quad (8)$$

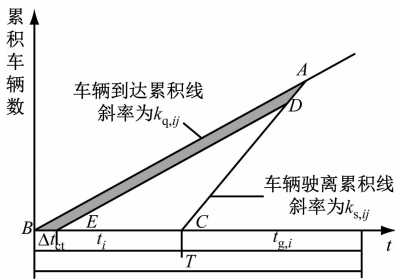


图 6 绿灯延长时非优先相位延误减小示意图

第  $i$  相位第  $j$  流向社会车辆的延误时间减小量即为四边形  $ABED$  的面积  $S_3$ 。

$$S_3 = \frac{k_{q,ij} k_{s,ij} \Delta t_{ci} (2t_{r,i} - \Delta t_{ci})}{2(k_{s,ij} - k_{q,ij})} \quad (9)$$

式(8)与式(9)之差即为第  $i$  相位第  $j$  流向社会车辆的延误增加量:

$$\begin{aligned}\Delta t_{n,ij} &= \frac{k_{q,ij} k_{s,ij} \Delta t_{bi} (2t_{r,i} + \Delta t_{bi})}{2(k_{s,ij} - k_{q,ij})} - \\ &\quad \frac{k_{q,ij} k_{s,ij} \Delta t_{ci} (2t_{r,i} - \Delta t_{ci})}{2(k_{s,ij} - k_{q,ij})}\end{aligned}\quad (10)$$

因此,有:

$$\begin{aligned}\Delta t_{p,n} &= \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \Delta t_{n,ij} P_s = \\ &\quad \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \left[ \frac{k_{q,ij} k_{s,ij} \Delta t_{bi} (2t_{r,i} + \Delta t_{bi})}{2(k_{s,ij} - k_{q,ij})} - \right.\end{aligned}$$

$$\left. \frac{k_{q,ij} k_{s,ij} \Delta t_{ci} (2t_{r,i} - \Delta t_{ci})}{2(k_{s,ij} - k_{q,ij})} \right] P_s \quad (11)$$

## 2.1.2 绿灯提前效益计算

### 2.1.2.1 $\Delta t_{p,p}$ 计算

如只有对绿灯相位提前  $\Delta t_a$ ,才能使现代有轨电车顺利通过交叉口,则采取绿灯提前策略后,  $\Delta t_{D,p}$  包括绿灯提前时间  $\Delta t_a$  和绿灯初损时间  $t_{1,f}$ ,即:

$$\begin{aligned}\Delta t_{D,p} &= \Delta t_a + t_{1,f} \\ t_{1,f} &= t_r + \frac{v_i}{2a_a}\end{aligned}\quad (12)$$

每辆现代有轨电车的平均载客数取  $P_t$ ,则:

$$\Delta t_{p,p} = \Delta t_{D,p} P_t = \left[ \Delta t_a + \left( t_r + \frac{v_i}{2a_a} \right) \right] P_t \quad (13)$$

### 2.1.2.2 $\Delta t_{p,s}$ 计算

假设社会车辆均匀到达交叉口,假设优先相位为第 1 相位,则其延误分析图如图 7 所示。

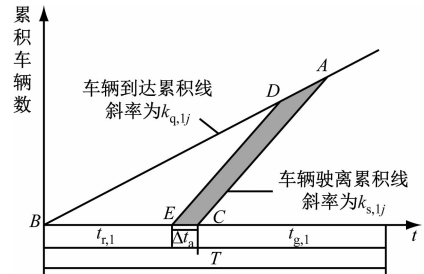


图 7 绿灯提前时优先相位延误减小示意图

优先相位第  $j$  流向社会车辆的延误减小量即为四边形  $ADEC$  的面积  $S_4$ :

$$S_4 = \frac{k_{q,1j} k_{s,1j} \Delta t_a (2t_{r,1} - \Delta t_a)}{2(k_{s,1j} - k_{q,1j})} \quad (14)$$

每辆社会车辆的平均载客数取  $P_s$ ,则:

$$\begin{aligned}\Delta t_{p,s} &= \sum_{j=1}^m S_4 P_s = \\ &\quad \sum_{j=1}^m \left[ \frac{k_{q,1j} k_{s,1j} \Delta t_a (2t_{r,1} - \Delta t_a)}{2(k_{s,1j} - k_{q,1j})} \right] P_s\end{aligned}\quad (15)$$

### 2.1.2.3 $\Delta t_{p,n}$ 计算

优先相位的  $\Delta t_a$  仅由优先相位的前一相位来承担。假设优先相位前一相位为第 0 相位,则非优先相位的延误分析图如图 8 所示。

优先相位前一相位第  $j$  流向社会车辆的延误增加量即为四边形  $ABED$  的面积  $S_5$ 。

$$S_5 = \frac{k_{q,0j} k_{s,0j} \Delta t_a (2t_{r,0} + \Delta t_a)}{2(k_{s,0j} - k_{q,0j})} \quad (16)$$

因此,有:

$$\Delta t_{p,n} = \sum_{j=1}^m S_5 P_s =$$

$$\sum_{j=1}^m \left[ \frac{k_{q,0j} k_{s,0j} \Delta t_a (2t_{r,0} + \Delta t_a)}{2(k_{s,0j} - k_{q,0j})} \right] P_s \quad (17)$$

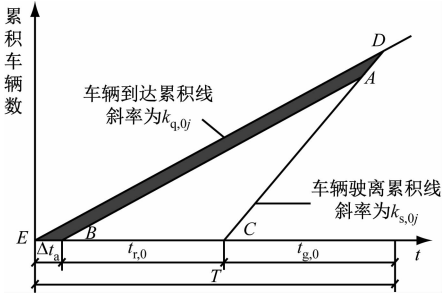


图8 绿灯提前时非优先相位延误增加示意图

## 2.2 主动信号优先策略的限制

主动信号优先策略的限制主要是非优先相位的饱和度及非优先相位的最小绿灯时间。

### 2.2.1 绿灯延长约束条件

绿灯延长时压缩非优先相位的绿灯时间由多个非优先相位共同承担。对非优先相位,第*i*个相位的饱和度为:

$$x_i = \frac{y_i T}{t_{g,i}}$$

$$y_i = \max\left(\frac{k_{q,i1}}{k_{s,i1}}, \frac{k_{q,i2}}{k_{s,i2}}, \dots\right) \quad (18)$$

式中:

- $x_i$ ——第*i*相位的饱和度;
- $y_i$ ——第*i*相位中各流向流率比的最大值。

设非优先相位临界饱和度为 $x_c$ 。若 $x_i \leq x_c$ ,则仍有富裕饱和度。采取主动优先策略后,要保证非优先相位饱和度不超过其临界饱和度,即:

$$t'_{g,i} \geq \frac{y_i T}{x_c} \quad (19)$$

各相位绿灯时间均应大于最小绿灯时间。设 $t_{g,i,min}$ 为各相位最小有效绿灯时间,故可得非优先相位可分配的最小绿灯时间为:

$$t_{g,i,a} = \max\left(t_{g,i,min}, \frac{y_i T}{x_c}\right) \quad (20)$$

因此,各非优先相位的压缩时间的限定条件为:

$$\Delta t_e = \sum_{i=2}^n \Delta t_i$$

$$0 \leq \Delta t_i \leq t_{g,i} - \max\left(t_{g,i,min}, \frac{y_i T}{x_c}\right) \quad (21)$$

### 2.2.2 绿灯提前约束条件

与绿灯延长控制策略不同,绿灯提前控制策略对非优先相位绿灯时间的压缩,仅由优先相位的前一相位承担,故绿灯压缩时间的限定条件为:

$$0 \leq \Delta t_a \leq t_{g,0} - \max\left(t_{g,0,min}, \frac{y_0 T}{x_c}\right) \quad (22)$$

## 2.3 主动信号优先策略使用条件

对上述主动信号优先效益进行求解,以交叉口人总延误的最大减小量为目标函数,有:

$$\max E_i = \Delta t_{p,p} + \Delta t_{p,s} - \Delta t_{p,n} \quad (23)$$

绿灯延长控制策略的约束条件为:

$$\text{s. t.} \begin{cases} \Delta t_e = \sum_{i=2}^n \Delta t_i \\ 0 \leq \Delta t_i \leq t_{g,i} - \max\left(t_{g,i,min}, \frac{y_i T}{x_c}\right) \end{cases} \quad (24)$$

绿灯提前控制策略的约束条件为:

$$\text{s. t.} \begin{cases} 0 \leq \Delta t_a \leq t_{g,0} - \max\left(t_{g,0,min}, \frac{y_0 T}{x_c}\right) \end{cases} \quad (25)$$

多个变量的取值均为整数,故采取枚举法进行求解,得到目标函数最大的解。之后,判断最大解 $\max E_i$ 是否大于0;若大于0,则可按求解的结果采取主动信号优先控制;若小于0,则不能采取主动信号优先控制。

## 3 主动信号优化效益验证

### 3.1 案例介绍

本文以武汉市东湖高新区的现代有轨电车 T1 线光谷一路—高新四路交叉口为例<sup>[8]</sup>,来进行验证模型的有效性。

### 3.2 主动信号优先的效益计算

根据该交叉口渠化方案,并以其通车年(2018年)交通量作为基础交通量,考虑约束条件,对不同绿灯延长时间时的效益进行计算,其结果如表1所示。

表1 不同绿灯延长时间时的效益(相位一)计算结果

绿灯延长时间 (相位一)/s	效益值/s	相位二 压缩 时间/s	相位三 压缩 时间/s	相位四 压缩 时间/s	人均延误 减少 时间/s
1	26 888	0	0	1	35.47
2	26 770	0	0	2	35.32
3	26 612	0	1	2	35.11
4	26 449	0	2	2	34.89
5	26 281	0	3	2	34.67
6	26 095	1	3	2	34.43
7	25 906	2	3	2	34.18

考虑约束条件,对不同绿灯提前时间时的效益进行计算。计算结果如表2所示。

由表1~2可知,在约束条件范围内,所有绿灯延长时间和绿灯提前时间所得的效益均大于0,故可采取主动信号优先控制。其效益值之所以较大,

是因为现代有轨电车的载客量远大于社会车辆,而研究考虑的是人均延误。

表 2 不同绿灯提前时间时的效益计算结果		
绿灯提前时间/s	效益值/s	人均延误减少时间/s
1	2 290	3.02
2	2 777	3.66

此外,绿灯延长策略引起的人均延误时间的减小要远大于绿灯提前策略。这说明在实际应用中,绿灯延长策略的效果要远好于绿灯提前策略。

### 3.3 主动信号优先效益的模拟验证

在 VISSIM 软件中,根据交叉口渠化方案底图画交叉口进口道图,并在光谷一路中央设置现代有轨电车专用道,然后输入交叉口流量。

分别考虑现代有轨电车不同到达时刻,对需要绿灯延长或提前的情况进行模拟仿真,即可对交叉口的社会车辆进行评价,并得出其车均延误时间。仿真评价结果见表 3。

表 3 社会车辆评价结果表							
策略	绿灯需延长或提前的时间/s	固定信号配时 (未采用主动信号 优先策略)			主动信号优先 (采取绿灯 延长或提前策略)		
		车均 延误 时间/s	服务 水平 评价	1 个周期 交通量/ 辆	车均 延误 时间/s	服务 水平 评价	1 个周期 交通量/ 辆
绿灯 延长	1	29.4	C	165	30.4	C	166
	2	29.5	C	166	29.8	C	166
	3	29.5	C	165	29.6	C	166
	4	29.3	C	165	29.3	C	163
	5	29.6	C	164	29.7	C	162
	6	29.5	C	165	29.5	C	163
	7	29.3	C	165	29.8	C	161
绿灯 提前	1	29.5	C	164	30.4	C	166
	2	29.5	C	165	29.7	C	166

从表 3 中可以看出,在采取主动信号优先控制方法后,社会车辆的车均延误时间均有小幅度的上升。通过上述社会车辆的车均延误时间可计算社会车辆的人总延误时间,并加上有轨电车的人总延误时间,即可计算出交叉口在 1 个周期内的人均延误时间。相应结果如表 4 所示。

由表 3~4 可知,在采取主动信号优先控制后,在 1 个周期内的人均延误时间均有所下降,证明了现代有轨电车主动信号优先设计的合理性。此外,实施绿灯延长控制策略的效果明显优于绿灯提前控制策略。

## 4 结语

为了提高现代有轨电车运行效率,减少其停车

表 4 交叉口人均延误计算结果表

策略	绿灯提前或延长的时间/s	固定信号配时 (未采用主动 优先策略)		主动信号优先 (采取绿灯 延长或提前策略)	
		车均延误 时间/s	人均延误 时间/s	车均延误 时间/s	人均延误 时间/s
绿灯 延长	1	29.4	51.9	30.4	19.0
	2	29.5	51.5	29.8	18.6
	3	29.5	51.2	29.6	18.5
	4	29.3	50.7	29.3	18.2
	5	29.6	50.6	29.7	18.4
	6	29.5	50.1	29.5	18.3
	7	29.3	49.6	29.8	18.4
绿灯 提前	1	29.5	21.0	30.4	19.0
	2	29.5	21.4	29.7	18.5

延误时间,在交叉口处实施信号优先是应用最为普遍的方法。本文对现代有轨电车主动信号优先控制进行了研究,针对绿灯延长和绿灯提前策略,提出了主动信号优先的效益计算方法,并通过实例验证其有效性。根据验证结果,有如下结论:

(1)与常规信号控制相比,对现代有轨电车采取主动信号优先所得效益较大,主动信号优先具备良好的控制效果。

(2)对于绿灯延长和绿灯提前两种控制策略,绿灯延长策略所得效益更加显著,是更好的一种主动信号优先控制策略。

## 参考文献

[1] SHALABY A, LEE J, GREENOUGH J, et al. Development, Evaluation, and Selection of Advanced Transit Signal Priority Concept Directions[J]. Journal of Public Transportation, 2006, 9(5): 97.

[2] MCGINLEY F J, STOLZ D R. The design of tram priority at traffic signals[J]. Journal of Advanced Transportation, 1985, 19(2): 133.

[3] LING K, SHALABY A. A reinforcement learning approach to streetcar bunching control[J]. Intelligent Transportation Systems Journal, 2005, 9(2): 59.

[4] SERMPIS D, PAPADAKOS P, FOUSEKIS K. Tram priority at signal-controlled junctions[J]. Transport, 2012, 165(2): 87.

[5] 李盛,杨晓光. 现代有轨电车与道路交通的协调控制方法[J]. 城市轨道交通研究, 2005(4): 43.

[6] 孙吉良. 现代有轨电车信号系统及技术关键的研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2013(4): 55.

[7] 李凯,毛励良,张会,等. 现代有轨电车交叉口信号配时方案研究[J]. 都市快轨交通, 2013(2): 104.

[8] 陈玉江,王敏,罗聪. 有轨电车优先的固定信号配时优化模型[J]. 交通运输研究, 2016(2): 8.

(收稿日期:2017-05-31)