

# 基于效率最优的有轨电车信号优先控制方法<sup>\*</sup>

杨晓宇

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

**摘要** 为提高有轨电车在平交路口的通行效率,提出一种有轨电车实时信号优先控制方法。根据有轨电车到达时刻所处相位情况划分4种工况;结合信号相位相序与有效绿灯时间,提出电车相位早启与延长控制策略;根据非电车相位压缩约束限制,建立电车相位实时绿灯时间模型。最后,应用南京市江东中路-奥体大街平交路口实测交通数据,建立Vissim交通仿真环境,对所提方法的实施效果进行检验。验证结果表明,基于运行效率最优的有轨电车信号优先控制方法能有效提高有轨电车在平交路口处的通行效率。

**关键词** 有轨电车;信号控制;运行效率最优

**中图分类号** U482.109

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2022.08.031

## Tram Signal Priority Control Method Based on Optimal Operating Efficiency

YANG Xiaoyu

**Abstract** In order to improve the passing efficiency of tram at intersections, a tram real-time signal priority control method is proposed. According to the signal phase when tram arrives at the intersection, 4 working conditions are drawn. According to the signal phase order and effective green-light time, advanced and extended control strategy of tram phase is proposed. According to the non-tram phase constraints, the tram phase real-time green-light time model is established. At last, the data collected from the intersection of Jiangdong Middle Road and Olympic Street in Nanjing is applied to construct Vissim traffic simulation environment, and the effectiveness of the proposed method in implementation is verified. Result shows that the tram signal priority control method based on optimal operation efficiency can effectively improve tram passing efficiency at intersections.

**Key words** tram; signal control; efficiency priority

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

点。同其它地面交通工具相比,有轨电车的车辆性能、行驶特征及运营模式存在较大差异,故常规平交路口优先控制方法难以有效提高有轨电车的通行效率。本文以有轨电车的运行特征与道路设施为依据,构建了有轨电车平交路口信号优先控制方法。

## 1 信号优先控制方法

在平交路口采用空间优先控制方法和时间优先控制方法能提高有轨电车通行效率。空间优先控制方法包括路权形式选择和车道布设方式等<sup>[1]</sup>。有轨电车拥有独立车道路权和平交路口专用进口道,其空间需求能优先得到保障。在采用时间优先控制方法的模型中,应用较广的MAXBAND(最大频带)模型和AM-BAND(不对称多频带)模型<sup>[2]</sup>,通过调节干道上各信号平交路口之间的相位差、公共信号周期时长等参数,可以使电车获得尽可能不停顿的通行权<sup>[3-5]</sup>。随着定位检测技术的发展,当前主流研究是将人均延误和车均延误作为目标函数,利用绿灯延长、红灯早断和插入相位等实现有轨电车实时优先控制<sup>[6-7]</sup>。然而,现有的实时优先控制方法多以延误作为优化指标<sup>[8]</sup>,而延误发生多为车辆排队以及行人与冲突车流干扰。有轨电车拥有空间优先路权,基于车均延误的实时信号优先控制方法,并不能较好体现有轨电车系统特性。

本文在有轨车站间绿波控制的基础上,根据有轨电车到达时刻所处相位位置,以及平交路口相位、相序和有效绿灯时间,提出有轨电车到达时刻的工况分类,进而提出相位优先控制方法;结合非电车相位压缩约束限制,计算电车相位实时绿灯时间,提出一种有轨电车实时信号优先控制方法。

### 1.1 有轨电车到达工况

平交路口1个信号周期中电车相位为 $s$ 。相关

道路平交路口是有轨电车运行延时的主要节

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金青年基金项目(51908060);中铁第四勘察设计院集团有限公司科研课题(2013k51)

时间参数为:非电车相位  $r$  的最小绿灯时间  $t_{r,\min}$ , 指保障机动车交通需求与非机动车及行人过街需求的最短时间; 电车相位  $s$  的有效绿灯时间  $t_{s,\text{valid}}$ , 指能被有轨电车利用的时间; 电车相位的清空时间指保障有轨电车安全通过最远冲突点的时间<sup>[1]</sup>。将非电车相位  $r$  的起始时刻  $t_{r,s}$ 、非电车相位  $r$  的最小绿灯时间结束时刻、电车相位  $s$  的起始时刻  $t_{s,s}$ 、电车相位  $s$  的有效绿灯时间结束时刻、电车相位  $s$  结束时刻作为临界值, 则根据有轨电车到达平交路口时刻  $t$  所处的相位, 将有轨电车到达工况划分为四类, 如图 1 所示。

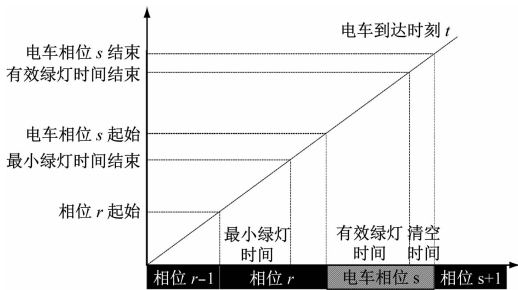


图 1 有轨电车到达工况示意图

Fig. 1 Diagram of tram arrival working condition

1) 工况一: 有轨电车在  $t_{r,\min}$  内到达平交路口。 $t_Y$  为黄灯时间, 则有:

$$t_{r,s} \leq t < t_{r,s} + t_{r,\min} + t_Y, r \in [1, s)$$

2) 工况二: 有轨电车在相位  $r$  的最小绿灯时间结束后到达平交路口。此时有:

$$t_{r,s} + t_{r,\min} + t_Y \leq t < t_{r,s} + t_{r,nor} + t_Y, r \in [1, s)$$

式中:

$t_{r,nor}$ —— $r$  相位的初始绿灯时间。

3) 工况三: 有轨电车在电车相位  $s$  的有效绿灯时间内到达。此时有:

$$t_{s,s} \leq t < t_{s,s} + t_{s,\text{valid}} + t_Y$$

4) 工况四: 有轨电车在电车相位  $s$  的清空时间内到达。 $t_{s,nor}$  为  $s$  相位的初始绿灯时间, 此时有:

$$t_{s,s} + t_{s,\text{valid}} + t_Y \leq t < t_{s,s} + t_{s,nor} + t_Y$$

## 1.2 有轨电车相位控制方法

利用有轨电车车载定位系统, 结合有轨电车行驶特征, 能精准预测  $t$ 。本文按有轨电车到达工况, 提出有轨电车相位的早启控制和延长控制方法, 可有效缩短有轨电车在路口的平均运行时间, 提高有轨电车通行效率。

### 1.2.1 相位早启控制方法

在工况一及工况二下, 有轨电车到达平交路口

的预测时刻位于电车相位  $s$  开始前, 则应缩短当前相位的绿灯时间, 使信号灯提前进入电车相位  $s$ , 以保证电车能够优先通过平交路口 (如图 2 所示)。本信号周期的电车相位  $s$  早启时间, 是电车相位  $s$  之前的非电车相位绿灯时间压缩量之和。

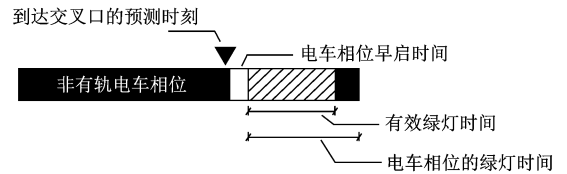


图 2 有轨电车相位早启控制方法示意图

Fig. 2 Diagram of tram phase advanced control method

### 1.2.2 相位延长控制策略

工况四下, 如果  $t$  位于电车相位  $s$  的清空时间, 则可通过延长  $s$  相位的绿灯时长, 使信号灯继续保持绿灯, 以保证有轨电车能够顺利通过平交路口 (如图 3 所示)。本信号周期的  $s$  相位延长时间, 为  $s$  相位之后的非电车相位绿灯时间压缩量之和。

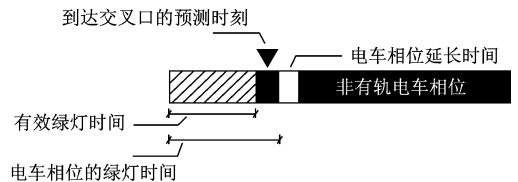


图 3 有轨电车相位延长控制方法示意图

Fig. 3 Diagram of tram phase extended control method

## 1.3 不同工况下各相位实时绿灯时间计算

### 1.3.1 工况一

在工况一下, 有轨电车在  $t_{r,\min}$  内到达, 相位  $[1, r)$  和  $(s, t]$  的绿灯时间采用初始绿灯时间  $t_{i,nor}$ , 相位  $[r, s)$  的绿灯时间采用最小绿灯时间  $t_{i,\min}$ 。此时, 电车相位  $s$  的绿灯早启时间为  $\sum_{i=r}^{s-1} (t_{i,nor} - t_{i,\min})$ , 其它非电车相位的绿灯时间为:

$$t_{i,\text{real}} = (1 - \alpha) t_{i,\min} + \alpha t_{i,nor}$$

其中,

$$\alpha = \begin{cases} 1, & i \in [1, r) \cup (s, k] \\ 0, & i \in [r, s) \end{cases}$$

$$t_{s,\text{real}} = t_{s,nor} + \sum_{i=r}^{s-1} (t_{i,nor} - t_{i,\min})$$

式中:

$t_{i,\text{real}}$ —— $i$  相位的实时绿灯时间;

$k$ ——受电车相位  $s$  绿灯延长方法影响的最大相位;

$t_{s,real}$ —— $s$  相位的实时绿灯时间。

1.3.2 工况二

在工况二下,相位 $[1,r)$ 和 $(s,k]$ 的绿灯时间采用初始绿灯时间 $t_{i,nor}$ ,相位 $r$ 的绿灯时间采用 $t-t_{r,s}$ ,相位 $(r,s)$ 的绿灯时间采用最小绿灯时间 $t_{i,min}$ 。此时,电车相位 $s$ 的绿灯早启时间为 $t_{r,nor} + \sum_{i=r+1}^{s-1} (t_{i,nor} - t_{i,min}) + t_{r,s} - t$ ,其它非电车相位的绿灯时间为:

$$t_{i,real} = (1 - \alpha)t_{i,min} + \alpha t_{i,nor}$$

其中: $\alpha$ 同前, $t_{r,real} = t - t_{r,s}$ 。

式中:

$$t_{s,real} = t_{s,nor} + t_{r,nor} + \sum_{i=r+1}^{s-1} (t_{i,nor} - t_{i,min}) + t_{r,s} - t$$

$t_{r,real}$ —— $r$ 相位的实时绿灯时间。

1.3.3 工况三

在工况三下,相位 $[1,s)$ 和 $(s,k]$ 的绿灯时间采用初始绿灯时间 $t_{i,nor}$ 。此时,电车相位的绿灯早启时间为 0,其它非电车相位的绿灯时间为:

$$t_{i,real} = t_{i,nor}, i \in [1,s) \cup (s,k]$$
$$t_{s,real} = t_{s,nor}$$

1.3.4 工况四

在工况四下,相位 $[1,s)$ 的绿灯时间采用初始绿灯时间 $t_{i,nor}$ ,相位 $(s,k]$ 的绿灯时间采用最小绿灯时间 $t_{i,min}$ 。此时,电车相位的绿灯延长时间为 $\sum_{i=s+1}^k (t_{i,nor} - t_{i,min})$ ,其它非电车相位的绿灯时间为:

$$t_{i,real} = (1 - \alpha)t_{i,min} + \alpha t_{i,nor}, \alpha = \begin{cases} 1 & i \in [1,s) \\ 0 & i \in (s,k] \end{cases}$$
$$t_{s,real} = t_{s,nor} + \sum_{i=s+1}^k (t_{i,nor} - t_{i,min})$$

2 仿真验证

依托中铁第四勘察设计院集团有限公司与东南大学共同承担的科研课题,以南京市江东中路-奥体大街平交路口为案例路口,实测采集道路设施与交通运行数据,并在 Vissim 软件构建交通仿真环境,对信号优先控制方法的应用进行仿真验证。

江东中路是南京河西新城南北向主干道,双向共 14 条车道,道路宽 74 m;奥体大街是河西新城的东西向主干道,双向共 6 条车道。沿江东中路敷设 有 路 侧 直 线 式 有 轨 电 车 线 路。本 研 究 于 2015 年 4 月 6~10 日、2018 年 6 月 18~22 日(正常工作日)

的 9:00—16:00,分别实测采集了连续 5 d 的数据。

2.1 仿真环境与评价方法

实时信号控制的仿真工具采用 Vissim 仿真软件中的 VAP 模块。交通运行数据由站点停靠时间短时预测模型标定,由有轨电车到达检测器检测,并由运行效率评价检测器标定与获取。案例路口原信号控制方案采用普通四相位信号配时方案,其信号周期为 140 s,相位黄灯时间为 3 s。其中,有轨电车相位与江东中路常规地面交通直行相位共用相位 3。具体信号配时方案见图 4。





			
相位1 (东西直行)	相位2 (东西左转)	相位3 (南北直行)	相位4 (南北左转)
35 s	27 s	47 s	31 s

图 4 江东中路-奥体大街平交路口信号配时方案

Fig. 4 Traffic signal control scheme at the test intersection

根据基于效率最优的信号优先控制方法,有轨电车到达平交路口的时刻可划分为 7 个时间区间。按有轨电车到达平交路口时刻和实时绿灯时间的相关计算式,有轨电车在各个区间到达平交路口时,各相位的实时绿灯时间计算结果如表 1 所示。

表 1 有轨电车在不同时间区间到达时的实时绿灯时间

Tab.1 Real-time green time based on the different tram arriving time interval

$t$ 所处的 时间区间	$t_{1,real}/s$	$t_{2,real}/s$	$t_{3,real}/s$	$t_{4,real}/s$
$[0,22)$	22	15	72	31
$[22,35)$	$t/s$	15	$82 - t/s$	31
$[35,40)$	35	15	59	31
$[40,62)$	35	$62 - t/s$	$109 - t/s$	31
$[62,93)$	35	27	47	31
$[93,109)$	35	27	60	18
$[109,140)$	35	27	47	31

注: $t_{3,real}$ 为电车相位实时绿灯时间; $t_{1,real}$ 、 $t_{2,real}$ 、 $t_{4,real}$ 为非电车相位实时绿灯时间。

2.2 实时优先控制方法对电车通行效率的影响

为研究通行效率,本研究将包括平交路口宽度在内的 250 m 路段作为检测范围,以有轨电车在检测范围内的运行时间作为通行效率指标。由此可知,运行时间越短,通行效率越高。试验中的有轨电车到达检测器设置在平交路口停车线前 45 m 处。

在仿真计算中,将平交路口的饱和度设置为 0.3,将有轨电车的发车间隔设置为 280 s、420 s、700 s、840 s,选择有轨电车在检测路段的行程时间作为评价平交路口运行效率的指标,则得到案例路口采用基于效率最优的有轨电车信号优先控制方法前后的有轨电车路口运行时间,如图 5 所示。

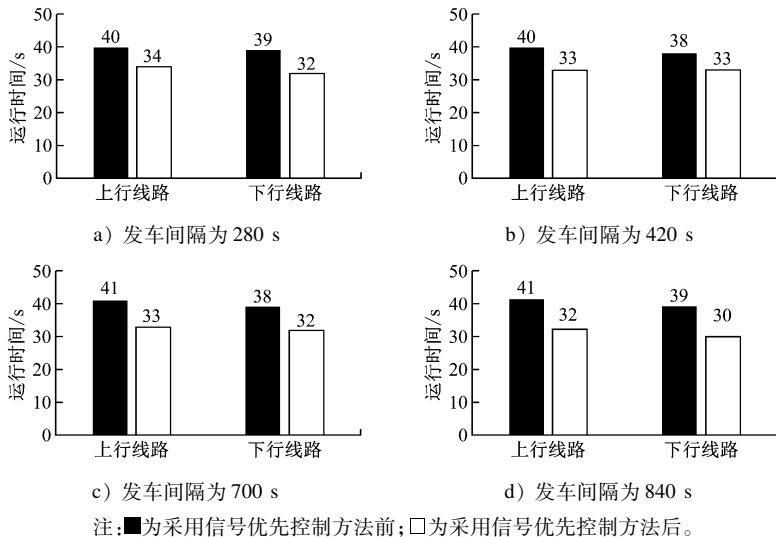


图5 有轨电车在采用信号优先控制方法前后通过案例路口的运行时间

Fig.5 Passing time of case intersection before and after the method tram adopting the signal priority control method

### 3 结语

本文提出了一种基于运行效率最优的有轨电车实时信号优先控制方法。该方法按有轨电车到达平交路口时刻划分了 4 种工况,并针对不同工况,选择非电车相位时间压缩策略,计算电车相位早启或延长时间。选取南京市江东中路-奥体大街平交路口作为案例路口,借助 Vissim 交通仿真软件对所提方法的实施效果进行仿真验证。验证结果表明,本文提出的控制方法在不同发车间隔水平下,均能降低有轨电车在平交路口的平均运行时间,有助于提高电车在平交路口处的通行效率。

### 参考文献

- [1] 王宝杰. 城市现代有轨电车站间信号优先控制方法研究[D]. 南京:东南大学, 2016.  
WANG Baojie. Segmented signal priority models for urban modern streetcar based on stations[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [2] ZHANG C, XIE Y, GARTNER N H, et al. AM-band: an asymmetrical multi-band model for arterial traffic signal coordination [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,

由图 5 可知,有轨电车上行线路在平交路口的运行时间减少了 6~10 s,下行减少了 5~9 s。说明根据有轨电车预测到达时刻所属的区间,通过压缩非电车相位的绿灯时间,对电车相位进行早启或延长控制,能显著提升有轨电车在平交路口的通行效率。

- 2015,58:515.
- [3] DAI G, WANG H, WANG W. A bandwidth approach to arterial signal optimization with bus priority [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015,11(7):579.
- [4] ZHOU Y, JIA S, MAO B, et al. An arterial signal coordination optimization model for trams based on modified AM-BAND [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016: 1.
- [5] 何慎之. 现代有轨电车信号优先控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.  
HE Shenzhi. The study on prioritizing signal strategies of modern tram [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 刘新平. 新型有轨电车信号系统方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012(5): 50.  
LIU Xinping. The research of signal scheme based on a new tram car system [J]. Urban Mass Transit, 2012(5): 50.
- [7] CURRIE G, SHALABY A. Active transit signal priority for streetcars: experience in Melbourne, Australia, and Toronto, Canada [J]. Transportation Research Record, 2008,2042: 41.
- [8] 罗聪. 现代有轨电车主动信号优先模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019(4): 56.  
LUO Cong. Research on the active signal priority model for modern tram [J]. Urban Mass Transit, 2019(4): 56.

(收稿日期:2020-06-14)