

Signal Control Strategies of Tramcar Priority at Intersections

Chunhui Zheng¹, Xiaoning Zhang², Wei Mao³, Jianliang Han³

¹School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai

²School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

³Suzhou New District Tramway Company Limited, Suzhou

Email: 578786672@qq.com

Received: Oct. 4th, 2014; revised: Nov. 3rd, 2014; accepted: Nov. 12th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the tramcar system of line one in the Gaoxin region of Suzhou city, the signal control strategies of tramcar system is investigated in the paper. Considering the operational characteristics of modern tramcars, the control strategies of early starting of green time, prolonging of green time etc. have been proposed for the sake of prior passing of tramcars. By providing the control strategies of tramcar priority, the new travel mode of tramcar is merged into the urban transportation system. Meanwhile the control strategies can also be viewed as a reference of tramcar system in other cities.

Keywords

Tramcar, Road Intersection, Signal Priority, Control Strategy

平交路口有轨电车信号优先控制策略研究

郑春晖¹, 张小宁², 毛伟³, 韩建良³

¹同济大学交通运输工程学院, 上海

²同济大学经济与管理学院, 上海

³苏州高新有轨电车有限公司, 苏州

Email: 578786672@qq.com

收稿日期：2014年10月4日；修回日期：2014年11月3日；录用日期：2014年11月12日

摘要

结合苏州市高新区有轨电车1号线的系统建设，分析适用于我国交通现状的有轨电车平面交叉口信号优先控制方案。根据现代有轨电车的车辆运行特性，通过采取绿灯启亮时刻提前、绿灯时间延长等措施，达到其优先通行的目的。并提出信号优先的控制策略，将现代有轨电车这一新兴的交通方式融入到城市交通系统中，为今后现代有轨电车的相关研究提供参考借鉴。

关键词

有轨电车，平面交叉口，信号优先，控制策略

1. 引言

现代有轨电车是一种坚持可持续发展路线的绿色公共交通方式，具有载客量大、舒适性好、能耗低、污染少等优点，目前欧洲和北美已经开始了现代有轨电车的大量应用，斯特拉斯堡、日内瓦、巴塞罗那等地的现代有轨电车已经得到了长足的发展，并且与其他公共交通系统进行了很好的融合。而我国的上海、大连、长春、苏州等城市也已经开始了现代有轨电车的研究及使用。

随着苏州高新区城市化、现代化进程的不断加快，城市发展空间不断拓展，交通需求的快速增长所带来的挑战日益严重。优先发展公共交通，特别是大容量的快速公交成为解决城市交通问题的必然选择。现代有轨电车的发展应用符合苏州高新区“科技、人文、生态、高效”的发展主题，并且可以弥补高新区在轨道交通与常规公交运能之间的空档，从而成为高新区的骨干公交网络组成部分。

苏州市高新区有轨电车1号线(见图1)是苏州市内现代有轨电车的第一条线路。有轨电车1号线贯穿整个高新区，可在终点站苏州乐园站与轨道交通1、3号线相互换乘，线路全长18.19公里，全线设车辆段1座，控制中心1座，有轨电车的最高运行速度可达70 km/h，总投资约为31.49亿人民币，于2012年9月11日开工，预计2014年下半年建成运营。1号线共设站点22个，其中初期设立11个站点，分别为：苏州乐园站、新区公园站、外企生活服务区站、白马澜生态园站、马澜路站、大阳山森林公园站、高新区管委会站、科技城站、龙山路站、嘉陵江路站以及龙安路站[1]。

2. 研究内容

现代有轨电车是一种介于地铁与公共汽车之间的新型轨道交通方式，其运行组织会受到道路交叉口信号控制的限制，路口交通信号灯的相位、周期等设计指标将直接影响着有轨电车的运营效率。在德国，在有轨电车线路密集的区域会单独设立一套有轨电车的通行信号灯，该信号灯与路口车辆的信号灯相分立，两套系统相互协调控制，以保证给予有轨电车信号优先。而欧洲其他的一些国家则采用了有轨电车运营时刻表与路口信号灯相互协调的方式，使得有轨电车能在大部分交叉口绿灯启亮的时间内通过，从而保证其行车效率[2]。

在我国，多种交通方式的混合是城市交通最为显著的特征之一，各种交通流在交叉口内的交汇极易造成交通拥堵现象的发生。而现代有轨电车的发展在我国还处于起步阶段，再加上我国特殊的交通情况，照抄照搬欧洲国家对于有轨电车在平交路口的控制策略，盲目追求有轨电车的优先通行权并不明智。

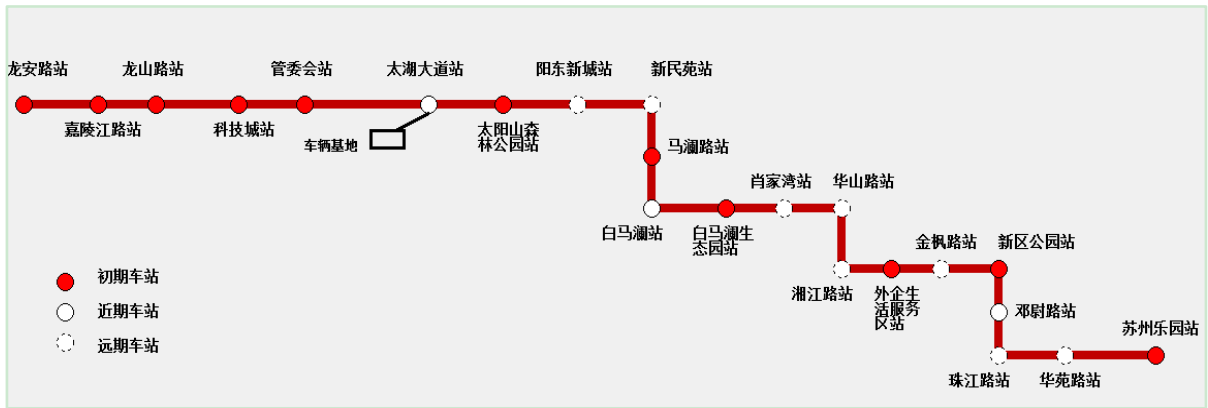


Figure 1. The schematic diagram of line one in the Gaoxin region of Suzhou City

图 1. 苏州高新区有轨电车 1 号线示意图

目前,我国在建及拟建的现代有轨电车基本上均采用半独立路权的型式,即有轨电车沿着行驶线路与其他交通方式有着物理隔离措施,但在交叉口与其他交通方式平面交织,在交叉口内部断开路缘石等物理隔离,让其他社会车辆也可通过,而在交叉口范围外,有轨电车线路则继续与机动车道相隔离[3]。

论文主要对现代有轨电车在平面交叉路口的信号优先控制进行研究,主要解决其在平交路口的信号优先问题,保证有轨电车的设计初衷。

3. 平交路口的信号控制

现代有轨电车是一种新型的快速地面公交系统,在运行时一般享有专用的路权,但与其他车道会产生平面交叉,因此现代有轨电车在通过平面交叉口时也将受到交叉口信号灯的制约。

3.1. 有轨电车信号优先控制策略

现代有轨电车的信号优先控制就是通过对平面交叉口交通信号的优化设计,给予有轨电车倾斜性的信号分配,以提高其在交叉口内的通行效率,减少现代有轨电车在交叉口排队等待的时间。以实现现代有轨电车在交叉路口的优先通行权为目标,现代有轨电车的信号优先控制策略一般可分为静态优先、动态优先和实时优先三种类型。

静态优先控制主要针对离线的方案进行优化,不考虑交叉口是否有有轨电车的到达,也没有交通流的反馈系统,并不依靠检测设备所反馈的数据来进行逻辑判断从而对信号灯的参数进行设置[3]。信号灯参数的设置一般是通过实地调查以及各种算法理论来进行的。因此静态优先控制策略在道路状况相对稳定以及交通参与者比较单一的情况下较为适用。

动态优先控制则是一种基于信息反馈系统的交通控制策略。与公交信号优先控制中的主动优先[4]相似,它是通过检测设备所采集到的有轨电车相关信息(如车辆行驶速度、载客量、发车时刻、到达时刻等)为基础,结合实际道路交通状况,按照一定的标准给予现代有轨电车有条件的信号优先。表 1 所示为动态优先控制策略。

当采用绿灯提前启亮的方案时,平均每辆有轨电车在路口减少的延误可用以下公式计算[5]-[7]:

$$\Delta d = \frac{T(2r_i - T)}{2C(1 - \rho_i)} \quad (1)$$

式中: T 为正常信号配时方案中的绿灯信号起点与采用绿灯启亮提前方案中的绿灯信号起点之差,即通

Table 1. Dynamic priority of control strategy
表 1. 动态优先控制策略

优先方案	方法
绿灯延长	当检测到有轨电车在绿灯末期到达，且在正常信号下无法通过交叉口时，延长该方向绿灯信号时间
绿灯启亮提前	当检测到有轨电车在红灯相位到达时，提前结束冲突方向的绿灯信号
相位插入	当检测到有轨电车在红灯相位到达时，在当前相位插入绿灯，保证有轨电车通行
有轨电车相位	为有轨电车提供专用相位，最大限度满足有轨电车的优先通行。有轨电车通过时，执行该相位；无有轨电车时，该相位时间分摊到其他相位中

过压缩冲突相位的绿灯时间而获得的绿灯信号提前时间； C 为信号周期； t 为有轨电车优先相位； r_t 为红灯时间； ρ_t 为饱和度， $\rho_t = \varphi_t / S_t$ ； φ_t 为电车到达率； S_t 为饱和流率。

在这种情况下，对与有轨电车优先相位相冲突的社会车辆所造成的延误主要由绿灯被中断期间初始车队的平均延误 $\Delta_1 D$ 和红灯延长期间增加的延误 $\Delta_2 D$ 两部分组成：

$$\Delta_1 D = \frac{S_s^2 [r_s - (C - T)(1 - \rho_s)]^2}{2\varphi_s (1 - \rho_s)} \quad (2)$$

$$\Delta_2 D = \frac{\varphi_s T (2r_s + T)}{2(1 - \rho_s)} + S \left[\frac{r_s}{1 - \rho_s} - (C - T) \right] (r_s + T) \quad (3)$$

因此，平均每辆车增加的延误为：

$$\Delta D = \frac{\Delta_1 D + \Delta_2 D}{\varphi_s C} \quad (4)$$

当采用绿灯延长方案时，每辆有轨电车在路口减少的平均延误时间计算公式为：

$$\Delta d = \frac{2Tr_t - T^2(1 - \rho_t)}{2(C + T)} \quad (5)$$

此时，社会车辆的延误仅为红灯延长期间增加的延误，故对与有轨电车优先相位相冲突的社会车辆造成的延误就为：

$$\Delta D = \frac{\Delta_2 D}{\varphi_s C} \quad (6)$$

因此，由表 1 及式(1)~(6)可以看出，在动态优先控制策略中，绿灯延长及绿灯提前启亮的控制方式在给予有轨电车信号优先的同时对社会交通的不利影响也较小，其总体效果最好；采用相位插入的方式，对于现代有轨电车的优先通行效果最好，但同时对社会车辆的影响也最大，尤其是社会交通车流量较大的交叉口；而在一些小的交叉口，与现代有轨电车相冲突的相位车流量很小，则可以考虑采用相位插入的方式。苏州高新区有轨电车 1 号线的信号控制与其他方式交通共用一套信号系统，因此在初期为了提高有轨电车的运行效率，建议采用路灯延长及绿灯启亮时间提前的方式以满足信号优先的目的。

实时优先控制，是一种基于通过实时检测到的数据来提供信号优先的同时，以某一项控制指标为目标的优化方案。在公交优先的实时控制当中，将公交车辆与其他社会车辆分开，对其目标函数赋予一定的权重，实时对其控制参数进行调整从而实现公交车的信号优先控制。同样的，在有条件的情况下也可将这种方法应用到现代有轨电车上[8]。

3.2. 有轨电车信号优先控制模式

现代有轨电车的运行特征类似于地铁，在运行模式上类似于 BRT，因此借鉴两者的控制模式，结合高新区有轨电车 1 号线的实际情况，对于有轨电车的信号优先控制模式大致上可分为本地优先控制、交管中心监视下的本地优先控制以及区域协调优先控制三种。

(1) 本地优先的控制模式。即离线的优先控制模式，在该控制模式下，交叉口信号机不与交管中心的控制系统相连接，它在接收到有轨电车的优先申请信息后，按照自身提前设置好的优先程序来操作，从而给予有轨电车优先通行权。

(2) 在交管中心监视下的本地优先控制模式。即将交叉口的信号机与交管中心的控制系统相连接，信号机在接收到有轨电车优先申请后，根据事先设置好的程序来执行对电车的优先控制。在这种控制模式下，各种决策由交叉口信号机自行执行，但是交管中心拥有远程监控的能力，两者之间可相互通信，以及时观测到各个路口的实时交通状况，防止突发交通事件。

(3) 区域协调优先控制模式。交叉口的信号机与交管中心的控制系统相连接，信号机在接收到有轨电车的优先申请后，将该申请信息发送给中心系统，再由中心系统通过优化配时运算后向信号机发送控制命令或执行方案，从而给予有轨电车一定的优先通行权[9]。该模式统筹考虑了线路区域内的交通状况，对于实现系统最优具有良好的效果。

上述控制模式当中，本地优先控制能够最快速的回应有轨电车的优先申请并及时给予其优先通行权，但是不利于区域内的系统信号优先控制，是一种单点信号优先的控制模式，且缺乏对突发状况的应对措施。区域协调优先控制综合考虑了整个区域内的信号最优，但是对于单个交叉口的优先效果而言要低于本地优先的控制模式，且实施起来的难度相对很大。

因此，在现代有轨电车建成初期，重点考虑到线路系统的运行效率，建议采用交管中心监视下的本地优先控制模式，以尽量实现现代有轨电车在交叉口的优先通行；而在后期随着系统运行稳定性的逐渐提高，线网流量也基本稳定，则建议实行区域协调的优先控制模式，以减小对沿线其他交通方式的不利影响。由于高新区有轨电车尚未投入到实际运营当中，道路网在刚刚建成时，线网流量不稳定且缺乏准确观测值，对于道路交通的影响还不能做到准确分析，因此高新区有轨电车 1 号线拟采用在交管中心监视下的本地优先控制模式，通过与高新区交警大队控制中心的紧密联系，按照实际的道路情况给予有轨电车优先通行权。

3.3. 有轨电车信号优先方案设计原则

对于现代有轨电车在交叉口的信号优先控制方案的设计，结合高新区有轨电车 1 号线在进行信号系统建设当中遇到的一些问题，提出以下几个方面的设计原则：(1) 要能够实现在不同的条件下实行不同优先级别的信号优先，如在高峰期与非高峰期、在准点时及晚点时分别给予现代有轨电车不同的优先级别等，这样可尽量减小有轨电车对社会车辆所造成的不利影响[10]；(2) 尽量避免采用跳过当前相位以及直接插入相位的方式使到达交叉口的有轨电车优先通行，信号灯的突然转换极易造成交通事故的发生；(3) 可通过缩短非有轨电车方向相位的绿灯时间来补偿有轨电车相位方向的绿灯时间的方式以满足有轨电车的信号优先[11]；(4) 如果交叉口安装有倒数计时器的装置，则当倒计时已经开始时，不能缩短倒计时的时间，以防止交通事故的发生，通常建议采用 10 秒钟倒计时的方式[12]。以上设计原则的制定主要是为了在实现有轨电车优先通行目的的同时尽量减少对于其他社会车辆所带来的不利影响，同时保证各种车辆能够在交叉口安全、有序的通行。

4. 实例分析

为了更方便的对现代有轨电车在平面交叉口的信号优先控制策略进行分析，根据苏州市高新区有轨

电车 1 号线的实际线路情况, 基于 VB 编写了一个关于有轨电车 1 号线的仿真程序。

程序主要针对高新区有轨电车 1 号线初期建立的 11 个站点进行有轨电车在整条线路上的运营调度进行模拟仿真, 在仿真程序上可以看出有轨电车的运行分布情况(如图 2 所示), 并可获取其在运行过程中的一些基本信息, 主要包括: 有轨电车在线路上总的行程时间, 有轨电车达到各站的时刻及在各站停车的时间, 电车在线路上运行时经过各个交叉口所遇到的红灯、绿灯数以及遇到红灯时在路口等待的时间, 有轨电车的平均运行速度等。如图 3 所示, 为尚未进行有轨电车信号优先控制方案调整时有轨电车的相关运行信息统计表。

两张表的统计结果来自随机选取的两列有轨电车的运行结果, 这两列电车分别从苏州乐园站和龙安路站出发, 并且线路行驶条件是基本相同的。在没有实施有轨电车信号优先控制方案时, 有轨电车在交叉口遇到红灯的概率是随机的(一列电车遇到 8 次, 另一列遇到 9 次), 虽然两列有轨电车在路口碰到的红灯数并不多, 但是两列车等待红灯时间均较长, 这对于后续有轨电车的调度是不利的, 由于其随机性使得有轨电车在运行时很难按照预先设定好的时刻表运行, 系统运行的稳定性较差。

在各个路口加入有轨电车信号优先控制措施, 即在有轨电车即将抵达交叉口时, 按照预先设置好的程序给予有轨电车优先通行权(通过采用延长绿灯时长及绿灯启亮时刻提前的方法)。在有轨电车发出优先申请后, 通过感应线圈测出有轨电车距离交叉口的距离及行驶速度, 如在绿灯即将结束前能到达停车线, 则延长当前相位的绿灯时间使得有轨电车能顺利通过交叉口; 如在红灯时间即将结束时有轨电车抵达交叉口, 此时非有轨电车方向无其他社会车辆或车流量较小, 则提前启亮有轨电车方向绿灯以给予有轨电车优先通行权。如图 4 所示为实施方案后的有轨电车运行统计结果。

由图 4 可以看出, 在交叉口实施有轨电车信号优先的控制方案后, 有轨电车在行驶线路上碰到的红灯数得到了一定控制并有所减少, 从而使得有轨电车在交叉口的等待时间也有所缩短。

同时, 为了更进一步验证控制方案的效果, 分析对有轨电车优先控制时对社会车辆等其他车辆所造成的影响, 我们选择线路中的太湖大道与龙山路交叉口作为研究对象, 运用 VISSIM 仿真软件对单个交叉口的信号优先控制方案进行分析。主要通过交叉口的车辆延误时间及进口道的车辆最大排队长度这两个指标对造成的影响进行量化评价, 来说明控制方案的可靠性。

如表 2 所示, 为交叉口加入有轨电车优先控制方案的前后对比, 由表中可以看出, 加入控制方案后



Figure 2. The line simulation of the tramcar of line one in the Gaoxin region

图 2. 高新区有轨电车 1 号线线路仿真

时刻表		其他统计		时刻表		其他统计	
站台	到站时间	遇红灯(次)		站台	到站时间	遇红灯(次)	
龙安路	09:56:17	9		龙安路	10:18:04	8	
嘉陵江路	09:58:09	7		嘉陵江路	10:16:37	8	
龙山路	09:59:51			龙山路	10:15:18		
科技城	10:00:50	红灯等待时间(s)	193	科技城	10:14:19	红灯等待时间(s)	174
管委会	10:01:57			管委会	10:13:11		
太阳山森林公园	10:04:35	车站停止时间(s)	330	太阳山森林公园	10:10:51	车站停止时间(s)	330
马澜路	10:06:20			马澜路	10:09:06		
白马澜生态园	10:09:10	总运行时间(min)	22.63	白马澜生态园	10:05:49	总运行时间(min)	22.18
外企生活服务区	10:13:37			外企生活服务区	10:01:57		
新区公园	10:15:14	行驶速度(km/h)	76.74	新区公园	09:59:55	行驶速度(km/h)	77.48
苏州乐园	10:18:55	全程平均速度(km/h)	47.19	苏州乐园	09:55:53	全程平均速度(km/h)	46.14

Figure 3. Statistical information of the tramcar
图 3. 有轨电车运行信息统计

时刻表		其他统计		时刻表		其他统计	
站台	到站时间	遇红灯(次)		站台	到站时间	遇红灯(次)	
龙安路	10:02:15	7		龙安路	10:22:59	6	
嘉陵江路	10:04:17			嘉陵江路	10:21:32		
龙山路	10:05:24	9		龙山路	10:20:13	10	
科技城	10:06:23	红灯等待时间(s)	130	科技城	10:19:14	红灯等待时间(s)	111
管委会	10:07:30			管委会	10:18:07		
太阳山森林公园	10:10:11	车站停止时间(s)	330	太阳山森林公园	10:15:47	车站停止时间(s)	330
马澜路	10:11:56			马澜路	10:14:02		
白马澜生态园	10:14:26	总运行时间(min)	21.58	白马澜生态园	10:10:45	总运行时间(min)	21.13
外企生活服务区	10:18:33			外企生活服务区	10:07:03		
新区公园	10:20:10	行驶速度(km/h)	76.74	新区公园	10:05:26	行驶速度(km/h)	77.48
苏州乐园	10:23:50	全程平均速度(km/h)	49.48	苏州乐园	10:01:51	全程平均速度(km/h)	50.54

Figure 4. Statistical information of the tramcar in signal priority
图 4. 有轨电车信号优先运行信息统计

Table 2. Comparison of the control scheme
表 2. 控制方案对比分析

进口	延误时间/(秒)		最大排队长度/(米)	
	原方案	控制方案	原方案	控制方案
东进口	33.7	25.4	103	86
南进口	36.0	32.8	87	105
西进口	39.1	34.3	159	112
北进口	34.2	38.5	79	93

仅北进口道的车辆延误有所增加，而东、南、西三个方向的延误反而均有所降低；而在排队长度上，南北向的排队长度稍有增加，东西向的排队长度有所减少。可见，在实施优先控制方案的情况下，对交叉口车辆的延误及排队长度等造成的影响并不明显，交叉口的运行情况改变不大。

综上，通过对现代有轨电车运行特征的分析，归纳总结现代有轨电车在平面交叉口的信号优先控制，提出适用于现代有轨电车的信号优先控制策略、模式及设计原则，并结合苏州市高新区有轨电车 1 号线的实际工程案例对方案进行说明分析，为现代有轨电车在我国的发展提供参考。

参考文献 (References)

[1] 黎冬平, 等 (2006) 苏州高新区有轨电车线网规划方案与要点研究. 城市轨道交通规划, 2.

- [2] Novales, M., Orro, A. and Bugarin, M.R. (2002) The tram-train: State of the art. *Journal of Rail and Rapid Transit*, **1**, 1-13.
- [3] 金建飞 (2013) 现代有轨电车信号优先设计方案研究. *交通企业管理*, **10**, 47-49.
- [4] 季彦婕 (2013) 交叉口公共交通优先通行方法研究. 硕士学位论文, 东南大学, 南京.
- [5] 李盛, 杨晓光 (2005) 现代有轨电车与道路交通的协调控制方法. *城市轨道交通研究*, **4**, 43-46.
- [6] Doll, C. and Listl, G. (2007) Tram and bus prioritization at traffic signal systems within Green Waves. *Traffic Engineering and Control*, **1**, 21-24.
- [7] Martori, J.R. and Thorson, O. (2000) System for tramway priority at traffic. *Proceedings of the 7th International Conference on Computers in Railways*, 1205-1213.
- [8] 孙吉良 (2013) 现代有轨电车信号系统及技术关键的研究. *铁路通信信号工程技术*, **8**, 55-59.
- [9] 刘新平 (2012) 新型有轨电车信号控制方案研究. *城市轨道交通研究*, **5**, 50-60.
- [10] (2003) Transit capacity and quality of service manual. 2nd Edition (TCRP Report 100). *Transportation Research Board of the National Academies*.
- [11] 李凯, 毛励良, 张会 (2013) 现代有轨电车交叉口信号配时方案研究. *都市快轨交通*, **4**, 104-107.
- [12] 卫超 (2008) 现代有轨电车的适用性研究. 硕士学位论文, 同济大学, 上海.