

基于速度控制的有轨电车信号优先系统

张 强 吴元森 赵翊辰

(四川交通职业技术学院信息工程系,611130,成都//第一作者,讲师)

摘 要 有轨电车信号主动优先策略仍存在旅行速度与运营效率较低的问题。针对运行在城市主干道上的路中式有轨电车线路,从站台位置布设、干线协调控制、建议速度计算、系统设计与实现等方面进行研究;通过控制有轨电车速度来保证绿波带的实现;采用离线速度计算方法,生成时刻-速度表,通过查询方式代替速度实时计算,降低了信号优先系统的复杂度,提高了实时性。采集实际数据,利用 VISSIM 软件进行仿真试验。试验结果表明:基于速度控制的信号优先系统可显著提高有轨电车的旅行速度。

关键词 有轨电车;信号优先;干线协调;速度控制

中图分类号 U491.2⁺32;U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.08.018

Research on Signal Priority System of Modern Tram Based on Speed Control

ZHANG Qiang, WU Yuansen, ZHAO Yichen

Abstract Although most of modern tram lines built in China implement signal priority, there are still problems in low traveling speed and operational efficiency. Focusing on tram line running in the middle urban trunk road, the station location layout, trunk coordination control, recommended speed calculation, system design and implementation are mainly researched. Through controlling the tram speed, the green wave band is realized, by adopting the offline speed calculation, the time-speed table is generated, and by using the query method to replace the speed real-time calculation, the system complexity is reduced and the real-time performance is improved. On this basis, a simulation test is conducted by using the practical data and VISSIM software. The result shows that the signal priority based on speed control could increase the tram travel speed obviously.

Key words modern tram; signal priority; trunk coordination; speed control

Author's address Department of Information Engineering, Sichuan Traffic Vocational and Technical College, 611130, Chengdu, China

0 引言

截止到 2017 年 12 月 31 日,我国上海、沈阳、苏州、广州及深圳等 14 座城市开通运营了 20 条有轨电车线路,运营总里程达 232.7 km,车站 340 座。其中,2017 年新增线路 5 条,新增里程 55.23 km,增速为 31%。部分城市的有轨电车线路运营数据如表 1 所示。据统计,已开通的现代有轨电车线路均采用了半独立路权,且在交叉口实行有条件的优先通行策略,以此保证有轨电车处于较高的旅行速度。然而实际上,乘客均反映有轨电车行驶缓慢,旅行速度普遍低于 20 km/h,信号优先的实施效益低,因此,有轨电车信号优先仍是一个亟待解决的问题。

表 1 部分城市的有轨电车线路运营数据

城市	线路名称	长度/ km	旅行 速度/ (km/h)	高峰发车 间隔/min	平峰发车 间隔/min
沈阳	浑南 1 号线	18.9	20~24	8	16
淮安	淮安 1 号线	20.1	24	6	10
武汉	光谷 L1 路	11.9	22	8	10
深圳	龙华 1 号线	8.6	22	5	10

目前,信号优先策略主要分为主动优先和被动优先。主动优先策略采用提前切换绿灯模式和延长绿灯时间等方式,具有操作简单、易于实施、优先效果突出等特点,但在交通流量较大的交叉路口,会给非优先相位的车辆带来较大的延误^[1-3]。被动优先策略通过干线协调,采用固定的信号配时,在不影响非优先相位车辆的情况下,可为有轨电车提供优先通行^[4-5]。被动优先策略不仅能使交叉口总延误时间减少,整体效果明显,而且成本相对低廉,易于实施。

我国现阶段建设运营的有轨电车线路主要运用于城区,其每个交叉路口的流量均较大。如果都采用主动优先策略,过分保证有轨电车的优先通行权利,将大量增加非优先相位车辆的延误时间,易于产生拥堵。因此,本文采用被动优先策略,提出

了基于速度控制的有轨电车信号优先系统方案。

1 有轨电车站台布设形式的选择

本文主要针对半独立路权、断面形式为路中布设的现代有轨电车系统进行研究。有轨电车站台的位置及布设形式对有轨电车的运行效率有很大影响,因此从信号优先方案设计的角度,选择合适的站台布设形式十分必要。

为了便于换乘以及减小对道路交通造成的影响,有轨电车线路一般选择在交叉口进口道或出口道附近设站^[6]。目前,站台的布置形式主要有以下四种:对称侧式站台、错位侧式站台、标准岛式站台和错位内侧式站台。鉴于对称侧式站台与标准岛式站台占用道路资源多,且会导致有轨电车在交叉口二次停车问题,故本文选取错位侧式站台或错位内侧式站台作为交叉口站台的形式,并以此作为方案设计的前提条件。这两种站台布置方式(如图1及图2所示),能有效利用交叉口的红灯时间与人行道资源进行乘客的集散与乘降,可降低建设成本、提升运营效率。

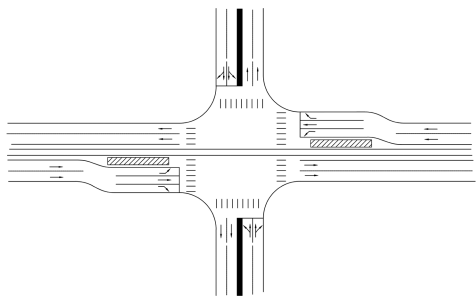


图1 错位侧式站台

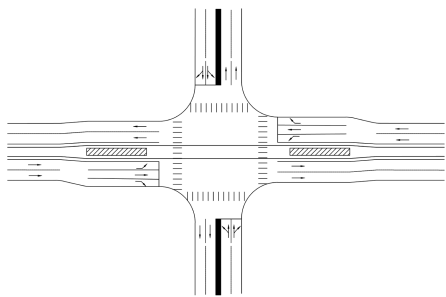


图2 错位内侧式站台

2 信号优先系统方案

2.1 干线协调信号的配时设计

本文采用 MULTIBAND 干线协调控制算法进行设计:考虑到有轨电车运行的实际情况,增加了

停站时间约束;为防止有轨电车与左转车流冲突,在有轨电车方向设置了专用的左转相位。因此,去除有轨电车的左转相序优化,修改部分如下:

$$(w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) + (x_i T_i z + \bar{x}_i \bar{T}_i z) + (r_i - r_{i+1}) - (\bar{\tau}_i + \tau_{i+1}) = m_i; i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (1)$$

式中:

$w_i(\bar{w}_i)$ ——第 i 个交叉口的干扰变量;

$t_i(\bar{t}_i)$ ——交叉口 i 到 $i+1$ ($i+1$ 到 i) 的区间行驶时间;

$T_i(\bar{T}_i)$ ——停站时间;

$x_i(\bar{x}_i)$ ——0-1 变量;当 i 路段设置车站时 $x_i = 1$, 否则 $x_i = 0$;

z ——信号频率;

$\tau_i(\bar{\tau}_i)$ ——交叉口 i 上行(下行)排队清空时间;

$r_i(\bar{r}_i)$ ——交叉口 i 上行(下行)红灯时间;等于周期时期时长的倒数;

m_i ——整数变量。

基于 MULTIBAND 的干线协调配时设计流程如图3所示。

2.2 建议速度的计算

在完成干线协调配时设计后,可以求得各交叉口间的理想绿波速度及行程时间等关键参数。由于有轨电车在交叉口处的行驶速度低于绿波速度,且存在延误,如果有轨电车继续按照绿波速度行驶,则将很难顺利通过交叉口。因此,解决的核心思路为选择合适的速度控制点。只要有轨电车按照计算得出的建议速度行驶,便可提高其在交叉口的通过率。

本文以交叉口停车线为界,将有轨电车线路划分为交叉口开放区与路段封闭区。速度控制点宜设置在交叉口出口的停车线处,则建议速度应满足:

$$t_I + t_n + t_{II} + t_c = k \times C_n \times \varphi \quad (2)$$

$$t_I = \frac{v_n - v_s}{a_I} \quad (3)$$

$$t_{II} = \frac{v_n - v_0}{a_{II}} \quad (4)$$

$$t_n = \frac{2a_I \cdot a_{II} \cdot S_n + a_{II} \cdot v_s^2 + a_I \cdot v_0^2 - (a_I + a_{II}) \cdot v_n^2}{2a_I \cdot a_{II} \cdot v_n} \quad (5)$$

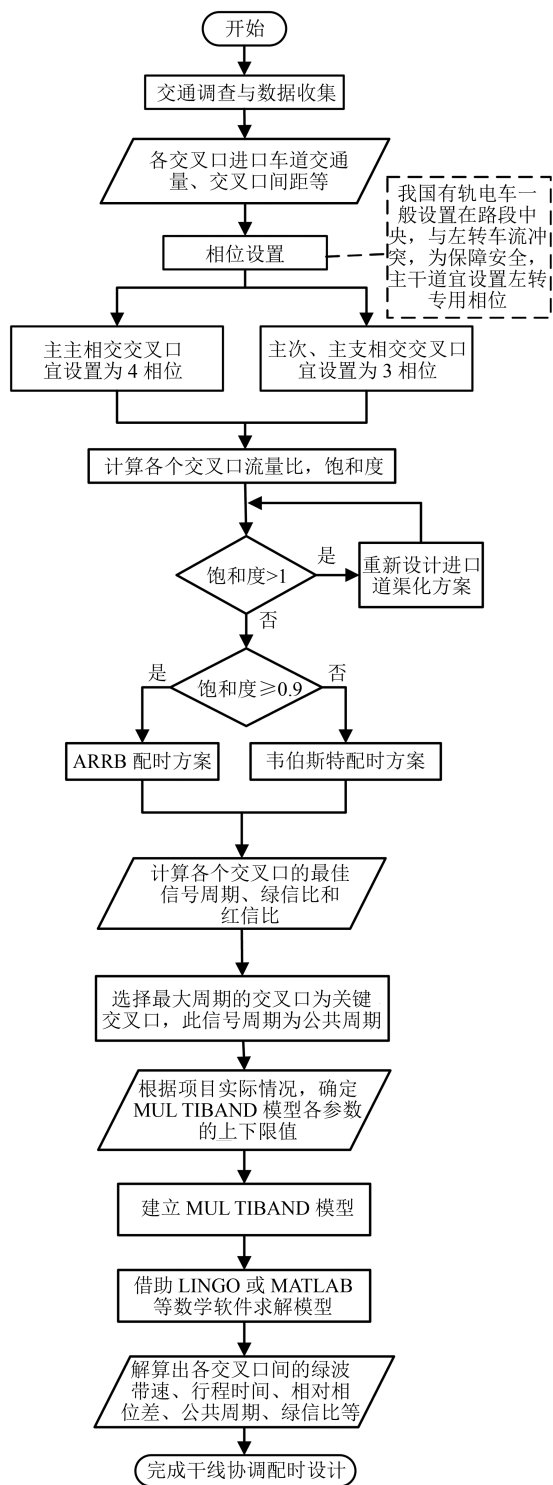


图 3 基于 MULTIBAND 的干线协调配时设计流程图

式中:

- t_1 ——以加速度 a_1 加速至速度 v_n 的行驶时间;
- t_n ——以速度 v_n 匀速行驶的时间;
- t_{II} ——以减速度 a_{II} 减速至 v_0 的行驶时间;
- t_c ——有轨电车到达控制点时,前方路口信号

灯当前运行时刻,取值范围: $[0, C_n]$;

k ——信号周期个数,正整数;

C_n ——第 n 个路口信号周期时长;

φ ——有轨电车到达停车线时的有轨电车相位,第 φ 秒;

v_n ——建议速度;

v_s ——有轨电车到达控制点时速度;

v_0 ——有轨电车交叉口最大通行速度,取 30 km/h;

a_1 ——从 v_s 变速至 v_n 期间的平均加速度;

a_{II} ——有轨电车制动平均减速度;

S_n ——速度控制点到下个路口同向停车线的距离。

2.3 信号优先系统的总体方案

有轨电车信号优先系统总体方案的思路如下:首先,为了利用交叉口红灯时间进行乘客乘降、避免二次停车,应采用错位侧式站台或错位内侧式站台;其次,在考虑有轨电车合理行驶速度的基础上,进行干线协调配时;最后,在有轨电车行驶方向上没有车站的路段,按建议速度实施控制,以增加有轨电车行驶至前方交叉口时遇到绿灯的概率,在有车站的路段,则不实施速度控制。

当根据式(2)一式(5)计算 v_n 时,需要采集相关的参数与变量信息。其中, a_1 、 a_{II} 、 v_0 、 S_n 及 C_n 等是与道路基础设施以及有轨电车性能相关的参数,属于环境既定参数,不随时间而改变。实施过程中需要实时获取的变量信息为: t_c 与 v_s 。文献[7],有轨电车在交叉口的最高运行速度不大于 30 km/h。有轨电车到达速度控制点(停车线附近)时的速度接近 30 km/h,故计算时取 $v_s = 30$ km/h,可省略测速装置,减少信号优先系统的复杂度与成本。

信号优先系统主要由交叉口子系统与车载子系统两部分组成。其中,交叉口子系统主要负责控制交通信号灯、检测有轨电车位置、计算建议速度及车地通信等工作;车载子系统负责接收交叉口子系统传送的速度数据,并完成速度值的显示与语音播报、导航定位等工作。

2.4 交叉口子系统设计

交叉口子系统主要包括信号控制主机、交通信号灯、路侧单元及相互间的通信接口等,如图 5 所示。其中,路侧单元由 LEU(地面电子单元)、有源应答器、线圈位置检测器及 GPRS(通用无线分组业务)或 3G(蜂窝移动通信技术)的移动通信接口组

成。信号控制主机主要完成交通信号灯的配时与控制、建议速度的计算、与路侧单元的时钟同步等业务。

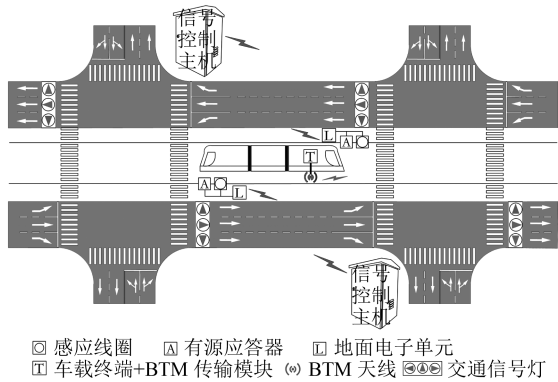


图 4 信号优先系统方案的组成示意图

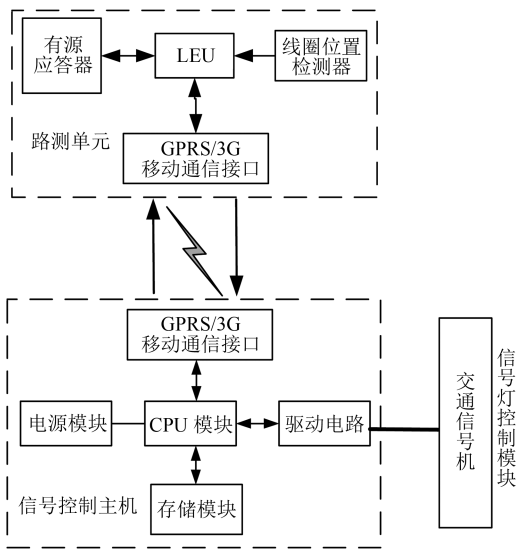


图 5 交叉口子系统结构图

特别说明的是:因为式(1)中的各参数值固定, v_n 只与 t_c 有关,为避免重复计算占用过多时间、增加计算复杂度,故采用离线方式计算 v_n 。由主机模块预先计算好信号周期内各时刻对应的 v_n ,并保存为时刻-速度表,再经过 GPRS/3G 移动通信接口将时刻-速度表发送给路侧单元。如果之后的相关参数发生改变,则再重新计算时刻-速度表即可。这种离线计算方式的关键是要做好路侧单元与交叉口控制主机的时钟同步,保证路侧单元的周期时刻值与主机模块相同,其同步周期可设置为 1 d。路侧单元主要通过感应线圈检测有轨电车到达信息,由 LEU 查询时刻-速度表,并将对应的 v_n 发送给有源应答器,再由有源应答器传递给有轨电车。

2.5 车载子系统设计

如图 6 所示,车载子系统主要包括 CPU(中央处理器)模块、存储模块、人机交互界面、GPS(全球定位系统)模块、3G/4G 移动通信模块、CAN(控制器局域网)通信接口模块、BTM(应答器传输模块)及天线等构成。车载子系统通过 BTM 与路侧单元通信,接收 v_n 信息,通过人机交互界面将有轨电车实时速度、位置及 v_n 等信息直接显示在司机眼前,以辅助司机判断及操作。GPS 模块结合车载终端中的地图数据,既可用于有轨电车定位和导航,又可将采集到的有轨电车位置、速度等信息实时发送给有轨电车运营调度管理系统,进行有轨电车的调度与监管。BTM 天线安装时应垂直于水平轨道面,安装于车底。当有轨电车通过应答器,且天线垂直于应答器时,传输 v_n 信息。

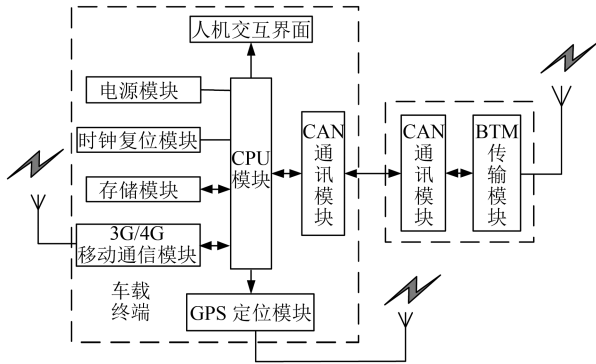


图 6 车载子系统结构图

3 仿真试验验证

为验证方案实施效果,本文选取成都有轨电车 2 号线红展东路站—晨光站路段进行验证。该路段全长 2.75 km,含 6 个信号控制交叉口和 4 座车站。基于 LINGO 平台编程实现改进后的 MULTIBAND 干线协调算法,求解出公共周期、绿波速度与相位差等数据,采用 VISSIM 软件进行交通建模。最后,选取发车间隔为 5 min,对线路进行 1 h 仿真。仿真验证结果如图 7 所示。

选择行程时间、旅行速度、延误时间,社会车辆选择交叉口平均延误作为评价指标,有轨电车信号控制策略优化前后的效果对比如表 2 及表 3 所示。

根据实地调研的交通数据进行仿真计算,得出的有轨电车旅行速度为 16 km/h。这一结果与有轨电车的实际运行情况较为符合。采用基于速度控制的有轨电车信号优先系统后,有轨电车旅行速度

达到了 24~26 km/h,整体提升了 50%~63%,并且社会车辆延误也有一定的减少,仿真效果达到预期。

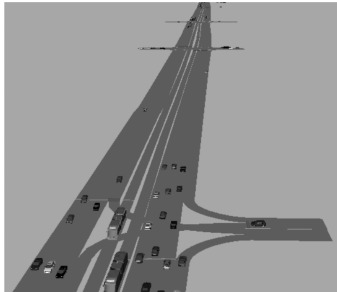


图 7 VISSIM 软件的仿真验证结果

表 2 有轨电车评价数据对比

控制策略	行程时间/s		旅行速度/(km/h)		延误/s	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行
优化前	621.5	612.5	15.9	16.1	218.3	187.7
优化后	380.7	413.6	26.0	24.0	73.8	99.5

表 3 社会车辆延误时间对比 s

控制策略	路口 1	路口 2	路口 3	路口 4	路口 5	路口 6
优化前	23.3	30.0	27.8	31.6	43.9	59.1
优化后	24.1	31.2	22.7	20.7	40.3	56.7

4 结语

目前,我国现代有轨电车线路普遍运行效率较低。针对此种情况,本文建议选择错位侧式站台或错位内侧式站台形式,充分利用交叉口红灯时间与人行道等设施进行乘客的集散与乘降,避免了二次停车。为提升干线交通的通行能力,给出了改进型的 MULTIBAND 干线协调配时方案。为保障干线协调的实施效果,在没有站台的有轨电车行驶方向,

实施速度控制,并给出了建议速度计算方法。其次,采用离线速度计算方法,生成时刻-速度表,以查询代替实时计算,降低了信号优先系统的复杂度,提高了实时性。最后,基于 LINGO 平台完成干线协调算法的编程与解算,根据实际数据,采用 VIS-SIM 软件进行仿真试验。试验结果表明:采用基于速度控制的有轨电车信号优先系统后,有轨电车旅行速度达到了 24~26 km/h,效果显著。

本文提出的信号优先系统方案为被动优先,通过控制有轨电车速度来实现通行的绿波带,不同于传统的优先策略,适用于沿线交通繁忙的现代有轨电车线路。该系统结构简单、成本低廉,具有一定的实用意义。

参考文献

[1] 周洋帆.半独立路权下有轨电车的信号优先策略及建模研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[2] 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.

[3] 陈福贵,谭小土.现代有轨电车路口优先参数研究[J].铁道工程学报,2016(8):116.

[4] 张强,张鹏,王露沁.现代有轨电车平交道口信号优先控制策略研究[J].铁道通信信号,2018(2):80.

[5] 周洋帆.半独立路权下有轨电车的信号优先策略及建模研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[6] 李凯,毛励良,张会,王子雷.基于常规城市交通的现代有轨电车线站设计[J].都市快轨交通,2013(1):19.

[7] 中国城市轨道交通协会.现代有轨电车运营管理规范:T/CA-MET07001—2018[S].北京:中国铁道出版社 2017.

(收稿日期:2018-10-25)

(上接第 74 页)

及焊修工艺。

2) 在车辆日常检查维护时,应定期检测减振器性能,及时更换性能降低的减振器,以减少支撑座所受的额外冲击。

3) 优化规程。在日常维护和架大修规程中,应进一步明确减振器和支撑座的检修内容、方法和维护要求。

参考文献

[1] 崇远,彭康.浅析客车油压减振器常见故障及防范措施[J].

铁道车辆,2014(6):43.

[2] 中车南京浦镇车辆有限公司.轴箱夹紧箍强度计算分析报告[R].南京:中车南京浦镇车辆有限公司,2015.

[3] 朱璐璐.地铁车辆转向架构架的有限元分析[D].西安:西安科技大学,2015.

[4] 丁亚琦.上海轨道交通 1 号线车辆构架裂纹产生原因探究[J].城市轨道交通研究,2017(5):97.

[5] 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司.减振器测试报告[R].常州:中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司,2018.

(收稿日期:2019-02-11)