

# 有轨电车交叉口交通组织及控制方案优化

焦占普

(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** 有轨电车在运行过程中, 易在交叉口处产生瓶颈, 导致有轨电车通行速度降低、乘客舒适度下降。从有轨电车交叉口信号优先控制、现状交叉口交通管理与控制优化、公共交通组织优化、慢行交通组织优化 4 个方面提出了相应的优化措施。以武汉市有轨电车作为实例, 提出了一系列改善措施, 并利用 VISSIM 软件仿真模拟了实施效果, 仿真结果验证了优化方案的科学性和有效性。

**关键词** 有轨电车; 交叉路口; 信号优先; 交通管理与控制

**中图分类号** U491.2+32; U482.1

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.005

## Research on Traffic Organization and Control Scheme Optimization of Modern Tram Intersection

JIAO Zhanpu

**Abstract** During the operation of modern tram, bottlenecks at intersections may occur frequently, resulting in the reduction of tram speed and passenger comfort. Corresponding optimization measures are proposed from four aspects: tram signal priority control at intersections, traffic management and control optimization at current intersections, optimization of public traffic organization and slow transport organization. Taking the tram in Wuhan as an example, a series of improvement measures are proposed, and the implementation effect is simulated by VISSIM, which verifies the science and effectiveness of the optimization scheme.

**Key words** tram; crossroads; signal priority; traffic management and control

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

有轨电车具有安全、绿色、快速、舒适、造价低等特点, 成为诸多城市的选择。敷设于地面的有轨电车在路段运行时受其他交通流的干扰较小, 运行速度较快; 但在通过道路交叉口时, 必须与社会车辆共享路权, 需要通过信号控制的方式依次放行, 从而会产生较大延误。因此, 如要提升有轨电车运行效率, 则应重点关注交叉口交通组织及控制方案优化。

有轨电车交叉口优先控制分为空间优先和时间优先。空间优先指在交叉口通过高架、下穿隧道等方式与社会车辆分离。当有轨电车与社会车辆在交叉口共享路权时, 考虑给予有轨电车时间优先, 即信号优先。信号优先情况下, 进行有轨电车信号相位配时需考虑最小绿灯时间及绿灯延长时间等配时要素。

有轨电车交叉口通行优先不能以大幅度增大社会车辆和行人的延误作为代价, 因此, 还需要进行现状交叉口的交通管理与控制优化、公共交通组织优化、慢行交通组织优化, 以达到系统最优的目的。

## 1 有轨电车交叉口信号优先控制方法及参数界定

### 1.1 控制方法

与道路公交信号优先控制策略相类似, 有轨电车道口信号优先也可分为被动优先、主动优先与实时优先。主动优先是根据有轨电车轨道中埋设的检测器探测并计算有轨电车到达交叉口的时间信息, 系统判断实施相应的优先控制方案, 并结合交叉口交通信号时间给予其一定的通行优先权。根据优先条件, 主动优先又可分为绝对优先与相对优先。

### 1.2 参数界定

1) 检测器埋设位置。有轨电车轨道按路中式敷设时, 交叉口位置设置有有轨电车的信号机, 在交叉口上下游埋设有相应的检测器, 信号机根据检测器检测到的有轨电车到达和离开的信息判断是否切换相位。检测器与交叉口停车线之间距离  $l_1$  可根据式(1)和式(2)计算。

(1) 当有轨电车匀速通过交叉口时:

$$l_1 = v_0 t \quad (1)$$

式中:

$v_0$ ——有轨电车运行速度;

$t$ ——交叉口信号灯黄灯时间。

(2) 当有轨电车需采取紧急制动时:

$$l_1 \geq v_0 t - \frac{1}{2} a t^2 \quad (2)$$

式中:

$a$ ——有轨电车紧急制动时的减速度。

结合公式(1)和公式(2)特点,最终结果可以直接取公式(1)的计算结果。

2) 相对优先绿灯时间阈值。在有轨电车即将到达交叉口时,若当前相位有轨电车无法通行,且当前相位剩余绿灯时间较短,则切断当前相位,插入有轨电车相位。对于“当前相位剩余绿灯时间较短”的界定宜为当前相位剩余的绿灯时间小于总绿灯时间的  $1/4 \sim 1/2$ 。

3) 绝对优先的补偿绿灯时间阈值。分析过程与相对优先绿灯时间阈值的分析相类似,对于“若被切断的相位剩余绿灯时间较长”的界定宜为当前相位剩余的绿灯时间大于总绿灯时间的  $1/2 \sim 3/4$ 。

## 2 交叉口交通控制及组织优化

### 2.1 现状交叉口交通管理与控制优化

对交叉口而言,交通管理主要侧重的是交通组织管理,即综合运用交通规划、交通设计和行政管理等措施,对交叉口范围内运行的交通流实施疏导、指挥等工作的总称<sup>[6]</sup>。交叉口的交通控制主要是指交叉口的控制方式。对于涉及到有轨电车的交叉口而言,主要是指信号控制交叉口的信号配时方案的设计,包括信号周期时长、相位划分、相位顺序等。

### 2.2 公共交通组织优化

1) 道路公交站台的位置及布置形式。道路公交站台不宜设置在距离交叉口进口道及出口道过近的位置。站台停靠的道路公交线路越多,距离交叉口应越远。道路公交车站宜采用港湾式车站,尽可能减小公交车上下客对主线交通流的干扰。

2) 换乘距离。应充分考虑道路公交车站与有轨电车站的衔接,同向换乘距离建议不大于 50 m,异向换乘距离建议不大于 200 m,有条件的可以用风雨连廊连接。

3) 道路公交专用道。若道路断面条件以及道路公交线路数量满足要求,可考虑在高峰时期设置道路公交专用道。

### 2.3 慢行交通组织优化

建议采取非机动车与行人交通一体化设计,即非机动车过街方式与行人相同,均通过人行横道完成,左转也采取二次过街的形式完成。在这种设计思

想下,应做好人行路线上的无障碍设施和相关配套设施完善工作,确保与路面无缝衔接,保证非机动车的通行体验和安全。比如:人行道在各种道路交叉口、出入口位置必须设置缘石坡道;人行横道两端必须设置缘石坡道,并且坡度应缓于 1:20,坡道下口必须与路面齐平,并与人行横道等宽;等等。

## 3 案例分析

### 3.1 现状资料

武汉光谷现代有轨电车 L1 路起于光谷步行街珞雄路站,止于光谷大道光谷芯中心站,全长 15.8 km,设站 23 座,途经城市主干道关山大道,具有较强的代表性。本文选取关山大道—关南园路交叉口作为案例分析对象。关山大道(南北向)为城市主干路,路段部分为双向 8 车道,南进口在交叉口处拓宽为 7 车道,车道布置为“2 左转+4 直行+1 右转”;关南园路为城市次干路,路段部分为双向 4 车道,路口部分无拓宽;有轨电车在关山大道东侧路侧布置,轨道为路侧式(同侧)设计,在交叉口的上下游设有软件园路站。现状有轨电车采用传统的固定周期配时而不使用任何的感应优先控制,有轨电车道口信号与关山大道南北直行相位同步开放或关闭。在该种信号方式控制下,有轨电车在道口将会停等较长时间,无法体现轨道交通的快速性与便捷性。

### 3.2 有轨电车交叉口信号优先控制

现状有轨电车在交叉口附近速度  $v_0 = 15 \text{ km/h}$ ,黄灯时间  $t = 3 \text{ s}$ ,根据式(1)则有  $l_1 = 12.5 \text{ m}$ 。考虑需要保留一部分安全距离,则宜在距离交叉口停止线 15 m 处设置检测器。当有轨电车经过时,视当前相位做出相应决策。

鉴于现状居民对有轨电车的接受程度还不够高,未完全养成穿越有轨电车轨道之前观察道口信号灯的习俗,还需要交管部门安排专人值班。建议近期采用相对优先的控制方式,即当有轨电车即将到达交叉口时,若当前相位有轨电车无法通行,且当前相位剩余绿灯时间小于总绿灯时间的  $1/3$  时,则切断当前相位,插入有轨电车相位;反之,道口信号机保持显示红灯,待当前相位结束后再处理有轨电车通过请求。这样既能体现出有轨电车的优先,又不会与现状情况改变太大,导致居民难以接受。

远期居民习惯培养完成之后,再采用带时间补偿的绝对优先控制方式,即当有轨电车即将到达交叉口时,若当前相位有轨电车无法通行,则直接切断

当前相位,插入有轨电车相位,同时打开其他与有轨电车不冲突的相位;待有轨电车通过后,若被切断的相位剩余绿灯时间大于总绿灯时间的  $2/3$ ,则对其进行补偿。总之应保障有轨电车快速性和便捷性。

### 3.3 现状交叉口交通管理与控制优化

现状交叉口关南园路东进口拥堵情况极为严重,甚至会蔓延至关南园路;软件园路西进口拥堵情况较为严重;关山大道北进口偶尔发生拥堵;关山大道南进口由于拓宽为  $7\text{ m}$  进口,较为畅通。根据调查,该交叉口各方向的流量如图 1 所示。现状相位设置如图 2 所示。

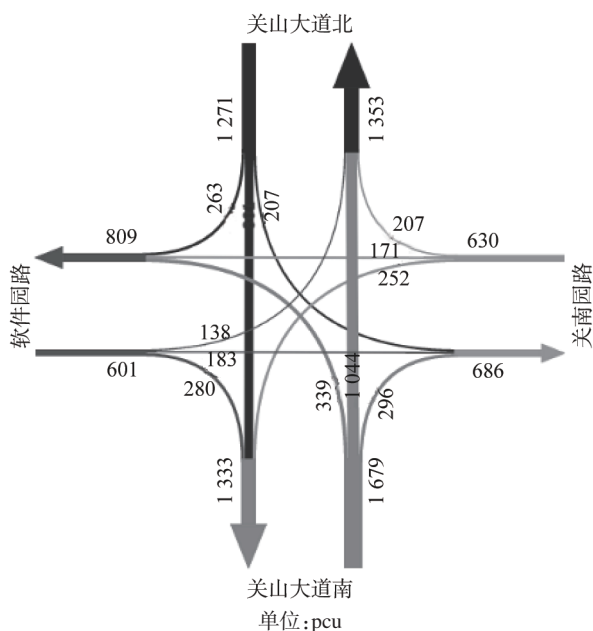


图1 关山大道—关南园路交叉口流量流向图



图2 关山大道—关南园路交叉口现状相位设置

根据现状分析和 Synchro 软件模拟,建议采取以下措施:

1) 优化现状相位。原先东西进口同时全方向放行,直行与左转冲突较大,导致交通运行缓慢,引发拥堵;同时,东西向行人过街需求较大,与左转方向车流产生冲突,存在较大的安全隐患。因此,将三相位改为四相位,减少流线冲突的同时还可以保证行人过街的安全。优化后的相位设置如图 3 所示。

2) 拓宽交叉口东西向进口。商业街道和生活服

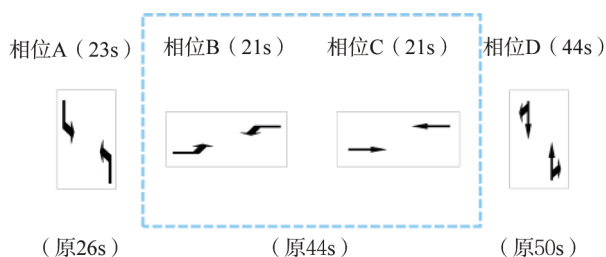


图3 关山大道—关南园路交叉口优化相位设置

务街道鼓励应用  $3\text{ m}$  宽的机动车道,路口进口道可进一步缩减到  $2.75\text{ m}$ 。上海南北高架路等路段的实践表明,车速较快的道路也可采用  $3\text{ m}$  宽的窄车道,并达到促进驾驶员谨慎驾驶的目的<sup>[7]</sup>。

将软件园路车道布置为进口道  $3.25\text{ m} \times 3$  + 出口道  $3.25\text{ m} \times 2$ ;关南园路车道布置为进口道  $3\text{ m} \times 3$  + 出口道  $3\text{ m} \times 2$  (需硬化南侧  $1\text{ m}$  宽度的绿化带),提高进口道的通行能力。

### 3.4 公共交通组织优化

现状关山大道关南小区公共汽车站位于交叉口南出口处,该站共有 15 条公共汽车线路,高峰时期停车上下客的公共汽车排队较长,降低了南出口的通行能力,甚至会干扰到西进口的车辆进入交叉口,车辆拥堵情况严重。建议将该站往南迁移  $40\text{ m}$ 。

### 3.5 慢行交通组织优化

高峰时期行人数量较大,东西向行人过街与东西进口的左转位于同一相位,高峰时期使得左转车辆滞留交叉口,产生拥堵,同时存在较大安全隐患。同时,现状行人穿越有轨电车轨道较为随意,经常不自觉踏入轨道范围内,没有养成观察有轨电车的习惯,全部依靠协警指挥,现场秩序较为混乱,存在较大安全隐患。建议采取以下措施:

1) 东西进口新增左转相位,保障行人过街安全;

2) 在道口一侧增加语音播报系统,有轨电车即将驶入道口前播放提示语音或者警报声;

3) 在道口设置有轨电车信号灯,同时在侧面设置行人信号灯,指示行人能否通过道口;

4) 探索设置行人闯红灯抓拍曝光系统,建议同步建立交通出行信用体系,将个人交通违法、交通事故等都纳入个人征信体系,增加个人交通违法成本,规范行人过街。

### 3.6 仿真模拟

基于交叉口基础现状在 VISSIM 软件里建立仿真模型,并在东西南北 4 个进口道设置行程时间检测器、排队计数器和数据收集器,在有轨电车路径上



设置行程时间检测器和检测器。本次仿真发车间隔取为 3 600 s, 记录各进口道分方向的行程时间、平均排队长度、最大排队长度、平均停车次数、有轨电车的行程时间和延误。仿真效果图如图 4 所示。

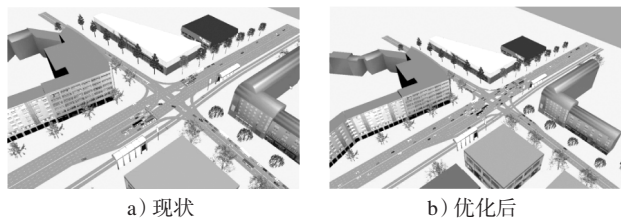
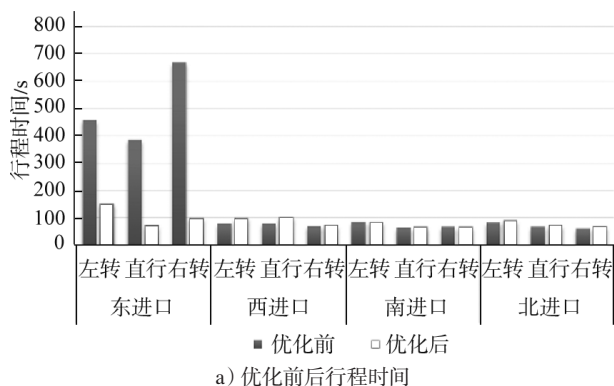


图 4 现状及采取措施后的道路交叉口仿真效果图

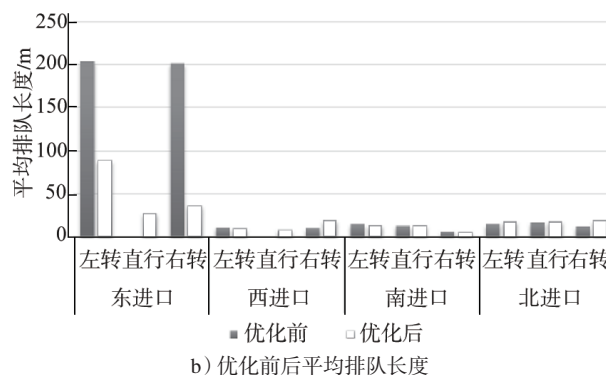
基于上文提出的对交叉口的交通管理与控制、对公共交通的优化策略和对慢性交通的优化策略建

立仿真模型。同时对有轨电车的优化采用完全优先的感应控制。设置好信号控制机后运行仿真, 仿真时间取为 3 600 s。记录各进口道分方向的行程时间、平均排队长度、最大排队长度、平均停车次数、有轨电车的行程时间和延误。

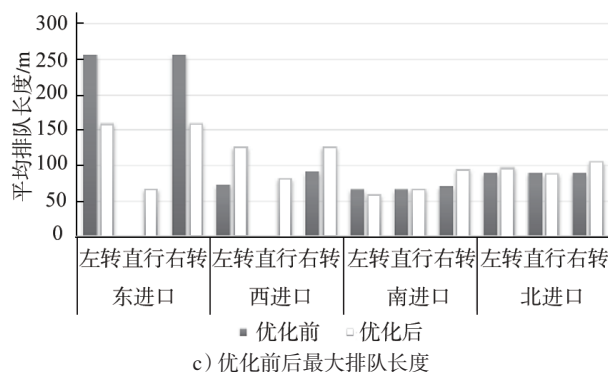
从优化前后行程时间、平均排队长度、最大排队长度、停车次数 4 个方面评价措施对于道路交通的影响。仿真结果如图 5 所示。由图 5 可见, 优化前后, 东进口的行程时间、排队长度、最大排队长度、停车次数均大幅下降, 西进口的数据略有上升, 但不明显。其余方向因为绿灯时间稍有减少, 因此结果呈现略微增加的状态。整体看来, 优化效果是非常明显的。



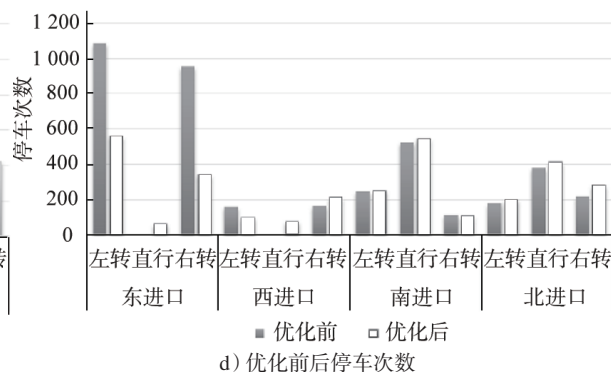
a) 优化前后行程时间



b) 优化前后平均排队长度



c) 优化前后最大排队长度



d) 优化前后停车次数

图 5 优化措施对道路交通影响效果仿真结果

优化之前, 有轨电车通过交叉口的平均行程时间为 92 s, 延误为 20.48 s; 优化之后平均行程时间为 81 s, 延误降为 9.12 s, 延误下降了 55.3%。由此可见, 采取了优先控制措施之后, 有轨电车的延误大幅下降; 同时其他方向的交通流延误也并没有明显增大, 效果较为理想。

#### 4 结语

从有轨电车交叉口信号优先控制、现状交叉口

交通管理与控制优化、公共交通组织优化、慢行交通组织优化 4 个方面对交叉口的运行效率提出了相应的改善思路。以武汉市有轨电车作为实例, 通过实地调查、摸排问题, 有针对性地提出了一系列的改善措施。仿真模拟结果表明, 采取相应措施之后有轨电车的通行效率得到了较大的提高, 同时以小汽车为代表的道路交通也未受明显影响。

(下转第 30 页)

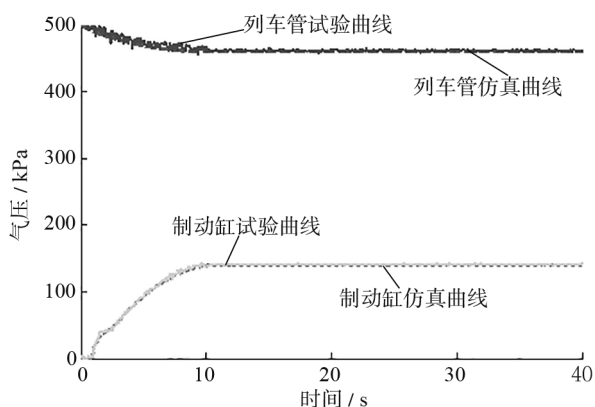


图8 150辆编组列车第1辆车制动过程的气压-时间曲线

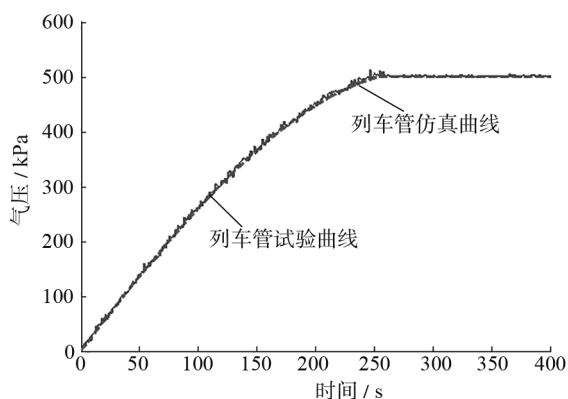


图9 150辆编组列车第1辆车缓解过程的气压-时间曲线

端的气压作为下一辆车列车制动风管初始充气的初气压,由此可以循环试验,得出不同编组的列车在不同位置车辆的制动控制全过程。

## 4 结语

为保证长大货物列车制动时的安全性与稳定

性,需要对不同车辆编组列车的制动过程进行试验,并对所得各种性能曲线进行推导,从而得出各个车辆较为准确的实际制动动态效果,为评估不同编组列车制动时的纵向动力学性能提供依据。因此,本文提出了基于车辆滚动制动试验台的货物列车动态制动试验仿真装置,其主要作用有:①可以在滚动制动试验台上实现任意编组中任意辆车的实际制动,通过模型和制动试验得出不同车辆的制动变化曲线;②通过滚动台和模拟制动惯量,将原来静止制动转化为动态制动过程,以真实考察不同编组车辆在不同制动条件下的制动过程,为分析长大编组货物列车各个车辆相互之间的纵向动力作用,提供了试验手段。

通过仿真与试验手段,对二者的结果进行比较,可得出该仿真试验装置使用的可行性,可以用于测试长大货物列车的制动性能,从而确保列车在制动过程中的安全性与稳定性。

## 参考文献

- [1] 王凤洲,李培署,李国平.长大货物列车制动控制方案探讨[J].铁道车辆,2014(10):31.
- [2] 刘新,曹志礼,李立东,等.铁路货车滚动制动试验台的研制[J].铁道车辆,2017(11):17.
- [3] 张波.重载组合列车牵引及制动系统的试验与仿真研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2009.
- [4] 张旺狮.车辆制动装置[M].北京:中国铁道出版社,2007:152.
- [5] 应之丁,高伟航,顾灵燕.基于气动系统流体方程的货车制动性能分析[J].铁道学报,2017(11):59.
- [6] 杨丽红.容器放气过程的数值模拟及热力学模型研究[D].上海:上海交通大学,2007:6.

(收稿日期:2019-05-08)

(上接第25页)

## 参考文献

- [1] 彭丰.半独立路权条件下现代有轨电车交叉口信号控制仿真优化研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [2] 王舒祺.现代有轨电车交叉路口优先控制管理方法研究综述[J].城市轨道交通研究,2014(6):17.
- [3] ALEXANDER Skabardonis. Control Strategies for Transit Priority[DB/CD]. Washington DC:TRB,National Research Council, 2000.

- [4] 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].都市轨道交通,2013(2):104.
- [5] 马万经.公交专用道信号优先控制理论研究[D].上海:同济大学,2007.
- [6] 宁乐然.道路交通安全通论[M].北京:中国人民公安大学出版社,2006.
- [7] 上海市规划和国土资源管理局.上海市街道设计导则[M].上海:同济大学出版社,2016:54-55.

(收稿日期:2020-02-12)