

现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力分析

罗文 唐光华

(广州有轨电车有限责任公司, 510030, 广州//工程师)

摘要 分析了影响现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力的关键因素, 主要包括非机动车交通、平交道口车道数、信号相位控制及现代有轨电车开行对数等。采用停车线法建立现代有轨电车平交道口在无信号优先、相对信号优先和绝对信号优先情况下的常规道路交通流通过能力模型。基于广州现代有轨电车试验段新港东路口的交通调查数据, 计算出平均车头时距, 并基于模型得出固定信号控制及绝对信号优先下的常规道路交通流通过能力。研究结果对现代有轨电车的规划、设计和管理, 以及提高路网运行效率具有指导意义。

关键词 现代有轨电车; 平交道口; 交通流; 通过能力

中图分类号 U292.5⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.08.028

Analysis of Modern Tram Traffic Flow Capacity at Level Crossings

LUO Wen, TANG Guanghua

Abstract The key influencing factors on traffic flow capacity at modern tram level crossing are analyzed, including non-motorized traffic, lane number at level crossing, signal phase control and number of running trams. Based on this, the parking line method is used to establish a traffic flow capacity model at tram level crossing in 3 conditions: no signal priority, relative signal priority and absolute signal priority. Taking the Xingang East intersection on Guangzhou modern tram test section as an example, the average headway time interval is calculated based on a traffic survey, and the traffic flow passing abilities in conditions of fixed signal control and absolute signal priority are obtained according to the traffic flow capacity model. The research results provide a guidance for the planning, design and management of trams, and will improve the efficiency of road network operation.

Key words modern tram; level crossing; traffic flow; traffic capacity

Author's address Guangzhou Tram Co., Ltd., 510030, Guangzhou, China

避免地会与道路上的常规道路交通流发生冲突。尤其是在平交道口, 常规道路交通流状况更为复杂, 直接影响平交道口的通过能力。但国内目前仍缺乏对现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力研究, 没有较好的、能够有效应用的平交道口常规道路交通流通过能力模型。本文对影响现代有轨电车平交道口通过能力的关键因素进行分析, 并在此基础上建立了平交道口常规道路交通流通过能力模型, 以期促进现代有轨电车的合理规划和发展, 并提高平交道口的通行效率。

1 现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力的关键影响因素分析

影响现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力的关键因素主要包括非机动车交通、平交道口车道数、信号相位控制及现代有轨电车开行对数等。

1) 非机动车交通的影响: 非机动车交通以行人、单车、三轮车等慢行交通为主。该种交通方式的参与者具有不确定性和无规则性的特点, 容易使平交道口处的常规道路交通流速度减低、堵塞, 甚至中断, 导致平交道口常规道路交通流通过能力降低。

2) 平交道口车道数的影响: 通常情况下, 平交道口的车道数越多, 其常规道路交通流通过能力就越强。因此, 普遍采用压缩已有车道、增加短车道的方式来提高平交道口常规道路交通流的通过能力。

3) 现代有轨电车的影响: 现代有轨电车线路穿越平交道口, 一方面增加了现代有轨电车与其他道路交通的冲突点, 影响平交道口常规道路交通流的通过能力; 另一方面现代有轨电车线路采用路面敷设, 造成路面凹凸不平, 常规道路交通一般都会减速通过, 因此会影响平交道口常规道路交通流的通过能力。

采用混合路权的现代有轨电车, 在运营中不可

以广州现代有轨电车试验段新港东路口T字型的平交道口为例,在路面上铺设现代有轨电车轨道后,平交道口的冲突点由2个增加至了4个(如图1所示),这明显加重了平交道口的冲突性;而且冲突点越多,影响越大,平交道口常规道路交通流通过能力折减也越多。

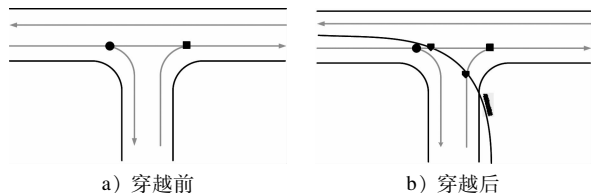


图1 新港东路口现代有轨电车线路穿越平交道口前后冲突点示意图

4) 信号相位控制的影响:平交道口信号相位控制包括信号周期、相位数量、相位顺序,以及相位的红、绿、黄灯时间等部分。每一部分的变动都能改变平交道口常规道路交通流的通过能力,如:绿灯时长直接决定该相位内车流的通过数量;黄灯时长则影响周期时长,进而影响车流通行时间的损失。

5) 现代有轨电车开行对数的影响:单位时间内现代有轨电车的开行对数,直接影响现代有轨电车在平交道口的通行频率。现代有轨电车的通行频率越高,对常规道路交通的影响就越大,平交道口常规道路交通流通过能力也就越低。

2 现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力模型

现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力是指单位时间内各个交通信号相位中通过该平交道口的最大车辆数(pcu/h)之和。主要受平交道口大小、形状、车道数,以及车辆走行方式、现代有轨电车路权形式、交通信号控制方式等影响。最主要的影响因素为信号相位控制方式及车头时距。

平交道口车道数的多少决定了常规道路交通流通过能力的大小。在不同的车道间,相同功能的车道其通过能力相同;不同功能的车道其通过能力的计算方法不同。本文采用单个车道作为最小单元进行计算。

在现代有轨电车平交道口,由于轨道穿越其中,影响常规道路交通流正常通过,因此导致车头时距变长,常规道路交通流通过能力降低。因此,在功能相同车道中需分别计算穿越轨道与非穿越

轨道的常规道路交通流通过能力。

2.1 通过能力计算的典型方法

国内外计算平交道口常规道路交通流通过能力的方法主要有停车线法、规范法、冲突点法及HCM(公路通行能力手册)法4种,如图2所示。本文采用停车线法计算现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力。

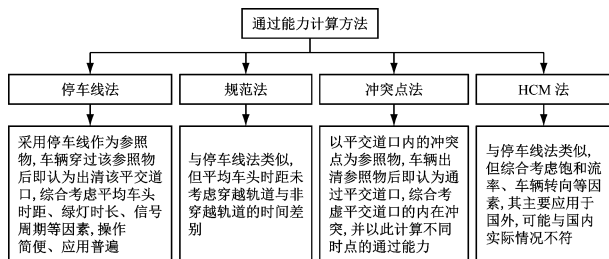


图2 平交道口通过能力计算方法

2.2 单车道通过能力计算模型

本文只讨论车辆在直行、左转及右转情况下的单车道通过能力,其余不在讨论范围。对于现代有轨电车平交道口,虽然分为穿越轨道和非穿越轨道,但相同功能的单个车道的通过能力计算方法一致。

2.2.1 直行(左转)车道通过能力

$$C_s = \frac{3\,600}{T_c} \frac{t_g - t_0}{t_i} \quad (1)$$

式中:

C_s ——单条直行(左转)车道的通过能力,pcu/h;

T_c ——交通信号周期,s;

t_g ——绿灯时长,s;

t_0 ——启动损失时间,s;

t_i ——平均车头时距,s。

$$t_0 = v/2a \quad (2)$$

式中:

v ——车辆运行速度,m/s;

a ——车辆平均加速度,m/s²。

2.2.2 右转车道通过能力

右转车道在有右转信号灯控制时,计算方式与直行(左转)车道通过能力一样;在无信号灯控制时,则可随时右转,其计算方式如下:

$$C_R = \frac{3\,600}{t_i} \quad (3)$$

式中:

C_R ——单条右转车道通过能力,pcu/h;

t_i ——平均车头时距, s。

2.3 不同信号控制方式下平交道口通过能力

2.3.1 无信号优先下平交道口通过能力

$$C_k = \sum_{j=1}^n C_j \quad (4)$$

$$C_0 = \sum_{k=1}^m C_k \quad (5)$$

m ——相位数量;

n ——相位车道数;

C_j ——车道通过能力, pcu/h;

C_k ——相位通过能力, pcu/h;

k ——相位顺序;

C_0 ——无信号优先下平交道口通过能力, pcu/h。

2.3.2 相对信号优先下平交道口通过能力

相对信号优先即通过早起或者延迟现代有轨电车相位绿灯开放时间, 提高早到或者晚到路口的现代有轨电车的通过概率。因此, 相对信号优先下平交道口通过能力的大小主要受现代有轨电车到达路口早晚点的概率、相邻信号相位车辆通过能力、现代有轨电车开行对数及其相位等因素影响。故其计算模型如下:

$$C = C_0 + 2f(\beta_1 + \beta_2)p_1 - 2f\beta_1p_2 - 2f\beta_2p_3 \quad (6)$$

式中:

β_1 ——绿灯早起的概率;

β_2 ——绿灯延迟的概率;

p_1 ——现代有轨电车相位下的其他车辆通过能力, pcu/h;

p_2 ——现代有轨电车前一相位的其他车辆通过能力, pcu/h;

p_3 ——现代有轨电车后一相位的其他车辆通过能力, pcu/h;

f ——相对有轨电车开行对数, 对/h。

2.3.3 绝对信号优先情况下平交道口通过能力模型

在绝对信号优先控制下, 现代有轨电车除享有相对信号优先控制权外, 还可通过插入现代有轨电车相位的方式提供信号优先。因此, 其计算模型如下:

$$C = C_0 + 2f(\beta_1 + \beta_2)p'_1 - 2f\beta_1p'_2 - 2f\beta_2p'_3 + 2f\beta_3(p'_1 - \frac{t_{streetcar}}{T_c} \times C_0) \quad (7)$$

式中:

p'_1 ——现代有轨电车相位下的其他车辆通过能

力, pcu/h;

p'_2 ——现代有轨电车前一相位的其他车辆通过能力, pcu/h;

p'_3 ——现代有轨电车后一相位的其他车辆通过能力, pcu/h;

β_3 ——插入相位的概率。

$t_{streetcar}$ ——现代有轨电车相位绿灯时间, s。

3 交通调查与数据分析

3.1 参数定义

车头时距(h)是指在相同车道上行驶连续 2 辆车通过某一参照物的时间差。本文以车辆前端保险杠通过平交道口停止线的时间差来计算车头时距。

$$h = t_2 - t_1 \quad (8)$$

式中:

h ——车头时距, s/Veh;

t_2 ——续行车辆通过停止线的时刻;

t_1 ——前行车辆通过停止线的时刻。

并以此计算出平均车头时距为:

$$h' = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (9)$$

式中:

h' ——平均车头时距, s/Veh;

h_i ——每辆车的车头时距, s;

n ——样本容量。

3.2 调查地点及方法

针对广州市有轨电车运营现状, 选取新港东路平交道口进行交通调查。新港东路平交道口流向示意图如图 3 所示。该路口为路中侧路型平交道口, 其中 A、B、E 为常规交通道路, C、D 为现代有轨电车线路。

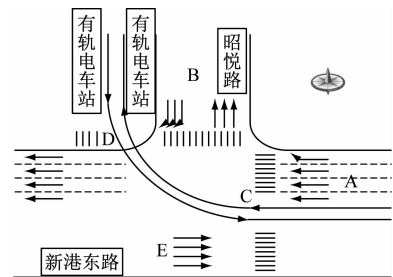


图3 新港东路平交道口流向示意图

由于新港东路口交通流量较大, 需采集的样本数量较多, 且要求精度足够高, 因此本文采用视频

法调查交通流平均车头时距状况。

3.3 数据采集与处理

3.3.1 数据采集

所谓视频法,即采用能够精确显示时间的摄像机录制视频,时间精度可达到 0.01 s,以保障所采集数据的准确性。在实际调查过程中,以停止线为基准,采集新港东路平交道口常规道路交通流数据信息。通过计算相邻 2 辆车通过停止线的时间差得出车头时距。

由于在计算平交道口最大常规道路交通流通过能力时,所有车辆均需处于跟随状态。参考 HCM 法,车头时距以 5 s 为界,当车头时距超过 5 s 时,车辆不在跟随状态,视为异常数据,需人工剔除。最终将剩下的合格数据求平均值,得到平均车头时距,如表 1 所示。

表 1 新港东路平交道口样本统计结果			
项目	直行穿 轨车辆	右转穿 轨车辆	右转非穿 轨车辆
首车车头时距/s	3.03	3.53	3.14
平均车头时距/s	2.89	2.91	2.57
最大车头时距/s	4.95	4.86	4.96
最小车头时距/s	0.86	1.15	1.02
样本量/辆	1 738	881	1 631

3.3.2 模型参数标定

新港东路允许速度为 60 km/h,直行道设计速度为允许速度的 0.7 倍(42 km/h),加速度为 1.5 m/s²;转向道设计速度为允许速度的 0.5 倍(30 km/h),加速度为 1.2 m/s²。

路段行驶速度为 60 km/h,直行车道设计速度为路段行驶速度的 0.7 倍(42 km/h),转向车道设计速度为路段行驶速度的 0.5 倍。按照公式 2,计算得出新港东路口各相位车辆启动损失时间,如表 2 所示。

表 2 模型参数设定表			
项目	直行穿 轨车辆	右转穿 轨车辆	右转非穿 轨车辆
启动损失时间/s	3.89	3.47	3.47
平均车头时距/s	2.89	2.91	2.57

3.4 平交道口通过能力计算过程

新港东路平交道口的相位控制流向包括社会车辆(相位 1)、现代有轨电车(相位 2)及人行过道

(相位 3),如图 4 所示。没有现代有轨电车通过时,平交道口交通信号显示,只有社会车辆相位及人行过道相位参与周期轮换,全相位周期为 120 s;有现代轨电车通过时,则采用插入相位的方式实现绝对信号优先控制。各相位绿灯时长如图 4 所示。

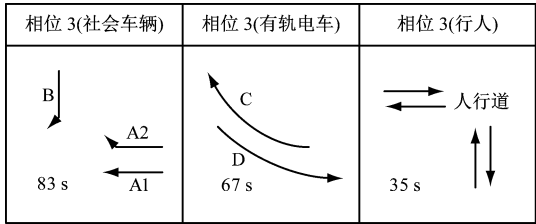


图 4 新港东路口相位示意图

3.4.1 无信号优先控制下车流通过能力

1) 直行穿越轨道通过能力:直行(3 条车道)
 $C_s = 821 \text{ cpu/h}$ 。

2) 右转穿越轨道通过能力:右转(3 条车道)
 $C_R = 820 \text{ cpu/h}$ 。

3) 右转非穿越轨道通过能力:右转(1 条车道)
 $C_R = 928 \text{ cpu/h}$ 。

因此,无信号优先控制下新港东路口通过能力
 $C_0 = 5\,860 \text{ cpu/h}$ 。

3.4.2 绝对信号优先下平交道口通过能力

绝对信号优先控制时,现代有轨电车通过插入电车相位提供优先。新港东路口通过能力计算各参数取值: $C_0 = 5\,860 \text{ cpu/h}$, $p'_1 = 0$, $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0$, $\beta_3 = 9.14\%$, $T_c = 120 \text{ s}$, $t_{\text{streetcar}} = 67 \text{ s}$, $f = 5 \text{ 对/h}$ 。

因此,由公式 7 计算得出新港东路口通过能力:
 $C = 2\,870 \text{ cpu/h}$ 。

在绝对信号优先控制下,新港东路平交道口常规道路交通流的通过能力较无信号优先的通过能力大打折扣。这主要是为了提高现代有轨电车的准点率而使用信号优先,扰乱了其他常规道路交通的通行秩序,导致平交道口通过能力降低。因此,在现代有轨电车规划、设计阶段,就应该充分考虑现代有轨电车对常规道路交通的影响,通过合理有效的措施来提高整个路网运行效率。

4 结语

目前,现代有轨电车正在国内蓬勃发展,但对现代有轨电车合理规划和设计方面的研究还比较欠缺,尤其是采用混合路权的现代有轨电车对社会车辆造成的影响等研究更是甚少。本文旨在解决

(下转第 136 页)

表 2 不同道岔临界限速下折返能力对比

作业阶段	间隔控制条件	间隔时间/s		
		道岔临界 速度 35 km/h	道岔临界 速度 38 km/h	道岔临界 速度 40 km/h
站台 接车作业	前车出清 AC02 计轴,10 号道岔转至定位。后车由示例站下行站台接车干扰点,至站台停车。停站 30 s 后,列车由站台发车至出清 AC02 计轴	111.43	109.80	107.80
折返轨 作业	前车出清 AC08 计轴,后车办理由示例站下行站台至折返轨 3 的进路。10 号道岔转至反位,2/4 号道岔转至定位。后车由示例站下行站台至 SSP01 停车。20 s 后,列车由 SSP02 发车至出清 AC08 计轴	125.77	120.77	116.82
站台 发车作业	前车出清示例站上行站台安全防护区段,后车办理至示例站上行站台进路。13 s 后,2/4 号道岔转至反位。后车由 SSP02 经 2/4 号道岔反位、12 号道岔反位运行至示例站上行站台停车;停站 30 s 后,列车由站台发车至出清站台安全防护区段	119.50	117.86	115.89

结论:由各作业阶段分析可知,折返瓶颈为折返轨作业。在此折返瓶颈条件下,道岔临界速度为 35 km/h、38 km/h、40 km/h 时的折返能力分别为 28 对/h、29 对/h 和 30 对/h

4) 本文开展的道岔提速研究,对于既有线折返站折返能力提升而言,相比传统的土建、线路等改造方式,具有不停运、投资小、周期短等优势,并可有效提高线路高峰时段的客流运输能力。

5) 在保障安全的前提下,建议信号供货商、车辆供货商进一步协作研究 ATP(列车自动保护)顶篷速度与 ATO(列车自动运行)目标速度间速度差关系。通过缩小两者间的速度差,可在不提升道岔临界速度的基础上提高列车实际过岔速度,从而提升折返能力。

参考文献

[1] 魏玉光,张红亮,杨浩. 道岔选型对重载铁路车站通过能力影

响的研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(4):1.

[2] 上海申通地铁集团有限公司轨道交通培训中心. 城市轨道交通线路技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.

[3] 牛英明. 完善行车限速标准提升线路通过能力[J]. 城市轨道交通,2017(1):4.

[4] 上海申通地铁集团有限公司. CBTC 条件下的车站配线技术规定(暂行):沪地铁[2013]78 号[S]. 上海:上海申通地铁集团有限公司,2013.

[5] 刘循. 城市轨道交通折返能力的匹配性设计研究[J]. 现代城市轨道交通,2012(5):3.

(收稿日期:2019-03-15)

(上接第 131 页)

现代有轨电车平交道口常规道路交通流的通过能力问题,在分析影响现代有轨电车平交道口常规道路交通流通过能力关键因素的基础上,利用停车线法建立了现代有轨电车平交道口在各交通信号类型情况下的常规道路交通流通过能力模型。基于广州现代有轨电车试验段新港东路口的交通调查数据,计算出平均车头时距,并基于模型得出无信号优先及绝对信号优先下的平交道口常规道路交通流通过能力。通过上述研究,以期对现代有轨电车的规划、设计、管理,以及提高路网运行效率提供指导意见。

参考文献

[1] 刘力力. 不利天气条件下城市交叉口交通流特征参数研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.

[2] 李小帅. 城市大型平面交叉口交通组织优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.

[3] 李园园. 现代有轨电车平面交叉口通行能力分析[D]. 南京:东南大学,2016.

[4] 刘宇鹏. 信号交叉口直行车道通行能力研究[D]. 长春:吉林大学,2009.

[5] 翁小雄,谭国贤,姚树申,等. 城市交叉口交通流特征与短时预测模型[J]. 交通运输工程学报,2006,6(1):103.

(收稿日期:2019-03-22)