

基于随机性特征与组合仿真模型的有轨电车运行指标分析方法

张海雷 屈 龙 崔姗姗

(佛山市城市规划设计研究院, 528010, 佛山//第一作者, 高级工程师)

摘 要 考虑到有轨电车运行指标比一般的轨道交通更具随机性,提出将轨道交通列车牵引计算引入道路交通仿真环境,将有轨电车在线路运行过程与道路交叉口信号优先控制形成实时相互反馈的分析方法。采用该分析方法对不同规划和运营方案进行仿真分析,即可得到有轨电车全线和局部运行指标的分布特征及总体评价。具体案例的计算结果表明,在规划设计阶段,根据线路的布局方案及列车运行计划规划,采用该分析方法仿真计算有轨电车的运行指标,能有效评价道路随机性影响程度,为有轨电车规划设计方案的评估与决策提供依据。

关键词 有轨电车; 线路运行指标; 组合仿真

中图分类号 U482.109

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.028

Tram Operation Indicator Analysis Method Based on Randomness Feature and Combined Simulation Model

ZHANG Hailei, QU Long, CUI Shanshan

Abstract Considering that tram operation indicators are more random than those of common rail transit, an analysis method is proposed, where rail transit train traction calculation is introduced to road traffic simulation environment, and a real-time inter-feedback is formed between tram operation process on route and road intersection signal control priority. The analysis method is used on simulation analysis of different plannings and operation schemes, the distribution characteristics and overall evaluation of general and partial tram route indicators are obtained. Calculation results of practical case show that, at the planning and design stage, according to line layout scheme and train operation planning, the adoption of this analysis method to simulate and calculate tram operation indicators can effectively evaluate road randomness influence level, providing evaluation and decision-making reference for tram planning and design scheme.

Key words tram; line operation indicator; combined simulation

Author's address Foshan Urban Planning & Design Institute, 528010, Foshan, China

有轨电车兼具轨道交通和道路交通的特征。从轨道交通的角度来看,其线路运行时间等轨道交通运行指标相对较稳定。从道路交通的角度来看,大部分有轨电车在高发车密度条件下,经过平交路口时仍无法做到绝对的信号优先,其运行还是会受到道路交通控制的影响,从而产生类似道路交通运行时间的随机性特征。

线路运行时间指标作为有轨电车规划设计阶段的核心参数,对规划方案和运营方案的决策实施有着重要的影响。规划设计方案的评估和比选涉及不同的线路走向及路口通过形式等场景,也涉及到发车间隔、车辆选型、站点位置等参数。此外,在采用混合路权有轨电车的道路交叉口规划设计中,对有轨电车与城市道路的相交方式及路权形式存在较多争议。

由此可见,在有轨电车项目的规划设计阶段,需要基于多场景和随机特征来分析道路交叉口对线路运行指标的随机性影响,进而合理分析有轨电车的运行指标,为规划设计提供科学的决策基础。

1 有轨电车运行指标特征和计算要求

1.1 有轨电车线路运行的随机性来源

有轨电车的规划设计一般通过计算车辆动力性能和线路线型得到线路运行的基本时间特征。由此可知,道路交通控制方案和有轨电车的发车密度两个因素对线路运行指标的稳定性有重要影响。道路交通信号控制方案决定了有轨电车通过的能力和延误概率;线路的发车密度决定了有轨电车对道路交通信号控制的需求强度,以及对社会交通的影响程度。结合有轨电车的线路布局特征,归纳两

个因素组合给线路运行指标随机性带来的影响,可分为4类:

1) 来自上下游信号平交路口的时间不同步。由于有轨电车线路较长,要经过多个道路交叉口。这些道路交叉口中,平交路口的信号周期及信号优先控制逻辑存在差异,且信号控制机的时钟也不一定保持同步,因此有轨电车通过平交路口的绿灯信号存在一定的随机扰动。

2) 平交路口信号策略受有轨电车信号优先策略影响后的恢复能力差异。在较大的发车间隔条件下,平交路口信号系统执行信号优先策略后,可在1个周期后恢复并保持正常状态,但在较小的发车间隔条件下,特别是与平交路口周期接近的发车间隔条件下,平交路口信号系统执行信号优先策略之后,还未恢复正常状态就会又收到新的有轨电车信号优先请求,从而难以保持信号系统的稳定性。

3) 收到不同方向有轨电车信号优先请求后,平交路口信号系统的稳定性受到影响。有轨电车线路一般是双向运行。即便是在较大的发车间隔条件下,同一个信号系统控制的平交路口也有一定概率在较短的时间间隔内收到2个方向的有轨电车信号优先请求。这不仅会导致信号优先控制逻辑变得复杂,也会降低信号控制恢复能力,从而对信号控制的稳定性带来扰动。特别是在有轨电车并非直行,而是转向通过平交路口时,对向的信号优先策略无法充分共用信号相位的绿灯时间,信号系统的稳定性将变得更差。

4) 同向运行有轨电车的追踪影响。由于受到其他随机因素的影响,在有轨电车发车密度较高或多交路共线运营的条件下,容易出现有轨电车列车间距过近而导致列车低速运行甚至停车的情况。这时有轨电车的运行特征除了受到动力特征和线路因素影响之外,还产生了类似道路交通车辆的追踪特征。这也是有轨电车有别于地铁及铁路的随机性的重要来源。

综上可知,有轨电车通过平交路口时,如果信号系统采用交互式的信号优先控制策略,则整条线路中的道路信号变化将很容易呈现出较强的随机性。这将使得有轨电车的运行随之呈现出随机的波动特征。在较密的发车间隔条件下,这种波动性的累积容易产生列车追踪现象。因此,在方案规划设计阶段,就需考虑这些随机波动对运行指标的影响程度。

当然,有轨电车的运行还受到天气、客流、驾驶员等其他因素的影响。为了简化分析,本文暂时不考虑这些影响因素。

1.2 有轨电车运行指标计算考虑因素

1.2.1 不同仿真模型的差异

有轨电车运行仿真多采用道路交通仿真模型和城市轨道交通列车仿真模型。

道路交通仿真模型着重考虑车辆之间的相互影响。以跟驰模型为例,车辆的行驶速度主要由与前车的距离及速度差决定。此外,车辆的运行轨迹受路径的影响,随着周边交通环境的变化而实时变化,存在变道、超车及制动等行为,具有很强的随机性。可见,道路交通仿真结果受到车辆到达规律变化及随机扰动的影响较大。因此,一般道路交通仿真模型都需要设置不同的随机种子,在多次运行仿真后取计算结果的平均值作为指标。在道路网络中,局部节点的交通需求也受到上下游流量变化和控制动态变化的影响。这也是道路交通需求随机性产生的重要原因。因此,道路交通仿真模型一般用于局部节点和区域的详细设计和信号控制分析。

城市轨道交通列车仿真模型着重考虑轨道交通列车的动力特征,即采用牵引力计算模型,兼顾线路的几何特征、站点布局及其他限制条件。在车辆、线路及站位等条件确定的情况下,列车运行的仿真结果具有较强的稳定性,可直接作为规划设计的确定性参考指标。此外,有轨电车线路规划需要对全线路的整体运行指标进行评估,并以此作为分析车辆配置、运行计划及运营成本的估算基础。因此,有轨电车的列车仿真评估一般都基于整条线路,甚至整个线网。

1.2.2 列车运行指标分析因素

有轨电车运行指标受线路与列车本身特征、道路交通信号控制策略,以及列车适应道路交通控制参数等影响。

首先,列车的动力性能和编组特征对线路设计和运营能力有决定性影响,且列车费用在项目投资和后期运营维护成本中占有较大比重,因此列车的牵引计算成为运行指标计算的核心。牵引计算主要考虑的参数包括车辆的几何数据、质量、最大速度及加减速度等动力数据。这些参数也会涉及车辆选型。

其次,道路交通信号需要平衡道路车辆的交通需求和有轨电车的信号优先请求。在道路交通需

求较大的区域,尤其是在城市中心区,道路交通需求和有轨电车信号优先需求会对道路信号控制形成双重压力。这也会反过来影响有轨电车线路的通过能力,对规划设计阶段的有轨电车路权形式和线路走向方案有较强的影响。

最后,列车车身长度,以及列车起动和制动速度特征会影响信号控制时间参数,进而对道路交通信号控制造成特殊影响。在平交路口前后有车站、或遇到红灯停车再起动时,由于列车稳定性对加减速度变化的需求较高,故列车通过平交路口所需要的清空时间较长。在规划设计阶段,需结合车站位置布局考虑这一因素的影响。特别是线路的车站和平交路口的相对位置会给列车的运行特征带来很大影响,需要对规划设计方案做进一步比选分析。

1.2.3 规划设计方案的比选流程

由上述分析可知,根据线路的运行指标,有轨电车的规划设计方案比选流程如下:首先,从整体上,有轨电车运行指标分析需要同时体现整条线路的线形特征、列车的动力特征及道路交通控制的影响;然后,在整条线路分析计算的背景下,对前后列车之间、对向列车之间、上下游平交路口之间、平交路口和车站之间等不同情况进行局部分析,获取影响整条线路运行指标的关键问题和关键区段;最后,发车密度、信号控制策略、路权形式三者的关系是相互影响的,需通过组合的方式形成不同场景方案,再进行随机仿真,并给予指标平均值和分布特征对方案进行综合比选。

2 组合仿真模型

采用组合模型来仿真有轨电车在道路交通环境中的运行。即建立轨道和道路交通的运行环境模型,将有轨电车作为特殊车辆形式,在该环境参数条件下,采用牵引计算模型来模拟有轨电车在固定线路上的运行,从而实现道路交通和轨道交通的组合仿真。

2.1 组合仿真模型的基本原理

由于有轨电车为司机目视驾驶,故将平交路口信号控制策略和前方列车追踪的随机影响考虑到实时的牵引计算参数中。组合仿真模型包括道路交通仿真环境、有轨电车牵引计算模块及有轨电车的轨道运行环境三部分。

2.1.1 道路交通仿真环境

为了反映道路交通运行的随机性及道路交通

信号控制特征,需要建立道路交通仿真模型,为有轨电车运行提供背景车流和道路信号控制环境。该环境与有轨电车运行的交互体现在两方面:

1) 有轨电车从道路环境中获取平交路口信号控制信息;根据信号控制逻辑,以及仿真系统中虚拟检测器实时测得的列车数据,道路交通仿真环境中的信号控制机进行实时计算,即可得到平交路口的信号控制状态。

2) 根据列车牵引计算结果,将列车的几何特征和线路坐标实时映射到道路交通仿真环境中,并触发道路交通仿真环境中的检测器,即可得到有轨电车经过的实时信息。

2.1.2 有轨电车牵引计算模块

有轨电车受道路交通控制,以及前后列车追踪的影响,一般采用目视驾驶的方式。其牵引计算模块的计算方法略有特殊性。牵引计算主要受到以下几方面因素的影响:① 列车动力性能,包括质量、牵引力、制动力、速度和加减速特征等;② 几何特征,主要指车身长度对平交路口信号控制参数和检测器参数产生影响;③ 线路几何特征和速度限制特征,主要是平纵曲线、线路限速值等;④ 道路交通信号控制,即司机目视驾驶时,在一定距离范围内需对道路信号给出相应的驾驶行为反馈;⑤ 前方列车追踪,司机目视驾驶时,应根据运行速度,与前方列车保持适当的安全距离。

2.1.3 有轨电车的轨道运行环境

有轨电车的轨道运行环境主要包括车站在线路中的位置、停站时间、道路信号灯位置及道岔位置等,见图1。

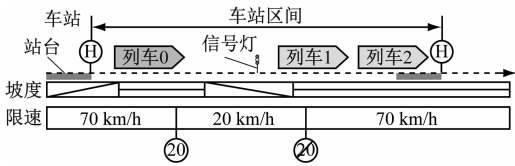


图1 有轨电车的轨道运行环境

Fig.1 Tram operation environment on track

2.2 仿真的随机性设计

有轨电车的运行会受到很多随机因素的影响。尤其在高发车密度条件下,列车运行指标在一定范围内出现随机现象的概率非常高。为了在仿真中对这种随机性进行评估,需要对仿真方案进行设计。

传统的道路交通仿真一般采用随机数的方法

来生成指定流率的机动车交通量,并通过指定多个随机数重复仿真获取均值来避免偶发性事件对结果的影响。而有轨电车运行仿真,不仅要尽量获取运行过程中由列车到达平交路口的密度和时间点不同而产生的影响,还要考虑上下游平交路口及车站对列车运行间隔的影响。

本研究在指定发车密度下,假定线路首末站采用连续发车形式,以获取有轨电车运行的随机性指标。即以发车间隔为参数,从线路两端的首末站不间断地生成列车,并使列车在线路中运行,进而获取每列车的全线路运行指标。

2.3 仿真环境的搭建

道路交通仿真环境采用成熟的主流交通微观仿真软件 PTV VISSIM 来模拟。轨道牵引计算和轨道线路环境采用 Easy Tram 软件来模拟。通过 COM 接口(串行通信接口)在 VISSIM 软件和 Easy Tram 软件之间建立静态和动态映射,以完成仿真环境的搭建。

静态映射主要包括轨道线路环境和交通仿真模型环境的映射,以及道路交通信号位置到轨道线路环境的映射。动态映射主要包括道路交通控制信号灯状态到轨道运行环境的映射(主要反映有轨电车对道路交通信号控制的反馈),有轨电车列车运行位置到道路交通环境的映射(主要反映通过平交路口的过程和触发检测器的过程),见图 2。列车运行仿真通过统一时钟对步长来进行实时同步,即统一道路交通仿真、实时牵引计算及信号控制设施的步长。

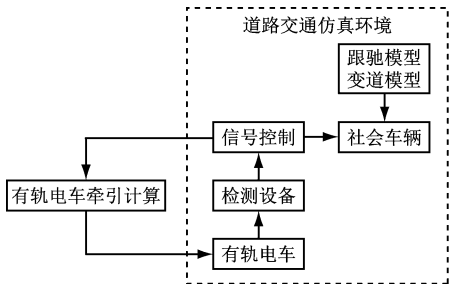


图 2 道路交通和轨道交通混合仿真过程
Fig.2 Process of mixed simulation of road traffic and rail transit

3 案例应用

本文以佛山南海区有轨电车里水示范段为例,应用组合仿真模型,计算并分析线路运行指标。

3.1 案例概况

如图 3 所示,佛山南海区有轨电车里水示范段全长约 9.9 km,共设 14 座车站(其中有 3 座与地铁换乘的车站),1 个车辆段。全线平均站间距为 0.8 km,最大站间距为 1.3 km,最小站间距为 0.5 km。



图 3 佛山南海区有轨电车里水示范段
Fig.3 Lishui tram line demonstration section in Foshan Nanhai District

3.2 背景条件的设置

3.2.1 平交路口渠化和交通量

由于目前项目尚处于前期阶段,没有道路平交路口和路段的详细车道设计方案。本研究根据平交路口形式及交通量,初步布局平交路口的进出口车道数量。根据道路规划和平交路口进出口车道数量布局,确定路段和平交路口几何参数,并根据实际需要进行适当调整。

道路交通量以宏观及中观分析模型得到的数据为依据,可精确到交叉口的峰值小时交通量。该道路交通量可作为有轨电车仿真运行的道路交叉口信号配时方案的依据。

3.2.2 平交路口信号控制方案

基于已有的有轨电车线路方案、平交路口渠化方案及预测机动车交通流量,对有轨电车运行进行仿真。为了保证仿真对比结果的客观性,所有方案的道路交通信号控制均采用了统一的模板——在信号模板的基础上,设计各平交路口的信号优先逻辑。信号优先模式有红灯早断、绿灯延长和插入相位三种,见图 4。

3.2.3 列车牵引计算和线路相关参数

1) 仿真列车牵引计算的主要参数有:车辆宽度为 2 650 mm,高度为 3 900 mm,三模块列车长度为 36 210 mm;头车轴距为 8 265 mm,其他车辆轴距为

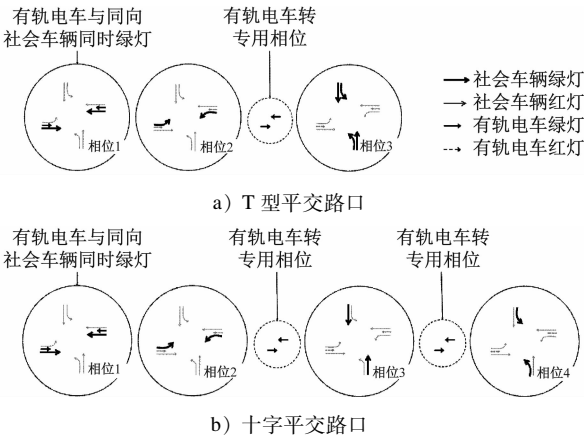


图4 T型平交路口和十字平交路口信号模板和优先设计
Fig.4 Traffic signal template and priority design for T-type and cross-type level intersections

8 490 mm;列车设计运行速度为 70 km/h;满载工况下,列车由 0 加速至 35 km/h 的最大起动加速度 $\geq 0.9\text{ m/s}^2$;列车由 70 km/h 减速至停车时,常规制动的平均制动加速度 $\leq -1.1\text{ m/s}^2$,而紧急制动加速度 $\leq -2.3\text{ m/s}^2$ 。

2) 线路相关参数:停站时间为 20 s。其他曲线段限速和线路坡度数据为仿真环境输入数据,不涉及本文研究核心,且数据量大,故本文不进一步阐述。

3.3 测试结果

3.3.1 多场景方案的线路运行指标

根据佛山里水有轨电车示范段项目需要,按不同发车间隔和列车通过交叉口的形式,建立多场景的组合仿真模型,进而得到各方案的线路运行指标,如表 1 所示。

表 1 多场景的线路仿真指标

Tab.1 Line simulation indicators in multi scenarios					
场景	发车间隔 时间/min	交叉口通 过方案	线路运行 平均时间/ min	列车平均 运行速度/ (km/h)	运行时间 标准差/s
场景一	3.5	固定配时	27.4	21.7	370.5
场景二	3.5	信号优先	27.4	21.7	222.2
场景三	3.5	局部高架	26.2	22.7	17.7
场景四	5.0	固定配时	24.5	24.2	212.0
场景五	5.0	信号优先	24.9	23.9	1.5
场景六	5.0	局部高架	24.0	24.8	1.2

注:固定配时指平交路口信号系统采用固定配时方案;信号优先,指平交路口信号系统采用有轨电车信号优先策略;局部高架指在信号优先策略基础上,有轨电车在局部路口采用高架的形式通过。

通过基于随机性的仿真计算,得到多场景下的线路整体运行指标。对比可以发现,案例线路上行方向的列车运行速度受信号优先、发车间隔及交叉口通过方案的影响是多维的。

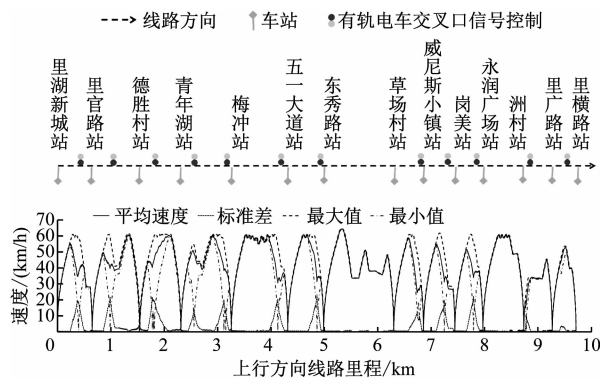
一般认为,在单一条件下,信号优先方案能提升有轨电车的运行速度。但结合本案例的仿真结果可以发现:在发车密度较高的条件下,由于受到随机性影响较大,列车的全线运行速度不稳定,信号优先策略对列车平均运行速度的影响有限;相对于运行速度平均值,增大发车间隔可降低道路交通信号控制的随机性,提高线路运行时间的稳定性;在相同的发车间隔下,与信号优先方案相比,局部高架方案下的全线列车平均运行速度提高了 1 km/h 左右;当发车间隔为 5 min 时,运行稳定性的提升不明显。这些结论为规划设计阶段的投资效益对比提供了有意义的参考。

需要说明的是,表 1 中场景五及场景六的运行时间标准差较小,与实际体验有一定差别。经分析,其主要原因为:① 数据统计采用了整条线路的总体时间,故不同区间的不稳定性会相互抵消;② 由于组合仿真模型只考虑了有轨电车自身牵引计算的运行和道路信号绝对优先的影响,未考虑客流、驾驶员、时刻表、道路交通的约束等其他因素的影响,故仿真结果有一定的误差。

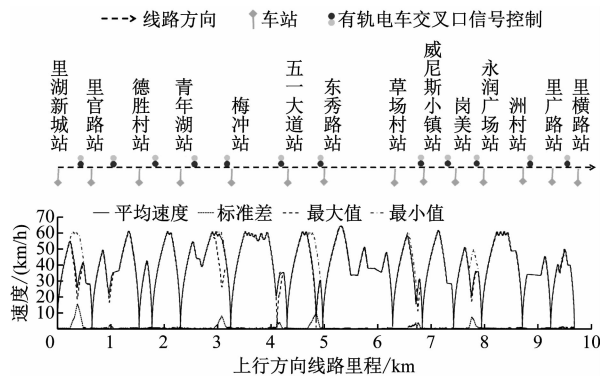
3.3.2 线路和区间的运行稳定性特征

通过基于随机性的仿真计算,获取各交路有轨电车在线路每个位置上的具体速度分布特征,以及各区间的运行时间分布特征。由于场景较多,为了便于说明分析方法,本文选取场景二及场景五,对连续随机仿真运行结果(见图 5)进行分析。

从距离-速度曲线可以发现:场景二中,有轨电车在平交路口附近的运行速度变化较大。结合仿真具体情况可以发现,由于平交路口上、下行方向在短时间内同时出现有轨电车信号优先请求,故平交路口信号状态无法恢复正常,进而导致列车运行速度变化较大。过于频繁的信号优先请求会使得有轨电车信号优先需求无法得以满足。于是,几乎每个平交路口都出现了有轨电车遇红灯停车的现象。当发车间隔为 5 min 时,大约每 3 个信号周期内就有 2 辆有轨电车到达平交路口;如果在优先相位中,上、下行有轨电车同时通过,则平交路口的信号优先的成功率明显提高,仅有 2 个平交路口出现



a) 场景二



b) 场景五

图 5 有轨电车距离-速度仿真结果

Fig. 5 Simulation result of tram travel distance-speed

了红灯停车现象,其余平交路口有轨电车均可适度减速、不停车通过。

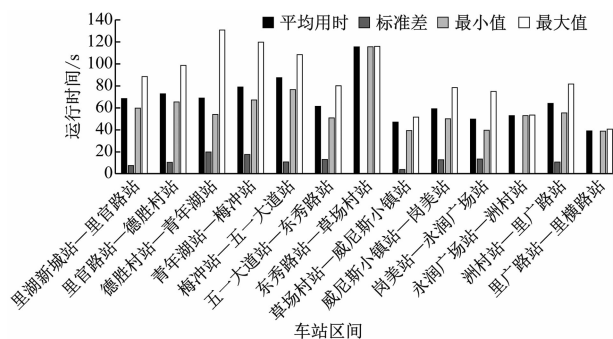
与发车间隔为 3 min 30 s 时相比,当发车间隔为 5 min 时,有轨电车的距离-速度曲线稳定性明显更高,这与表 1 中的全线运行时间方差指标结论一致。

与列车运行速度一样,区间运行时间也是有轨电车规划设计的重要指标。仿真获取的区间运行时间分布特征,如图 6 所示。由图 6 可见,德胜村站至青年湖站等区间的方差数值较大,说明区间运行时间分布不稳定。这可作为设计方案具体优化的重要依据。

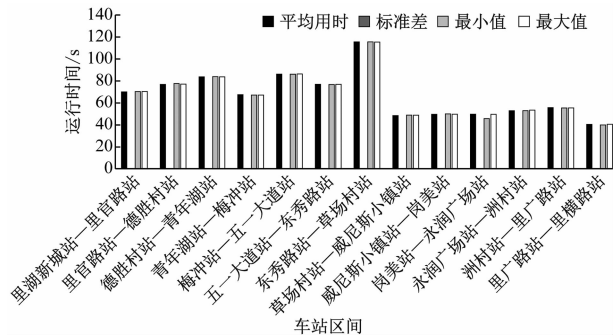
3.3.3 列车追踪同车站和平交路口的关系

通过分析有轨电车运行时空轨迹、平交路口、车站,以及其与前车之间的关系,可综合判断为有轨电车运行稳定性的因素。发车间隔为 3 min 30 s 时的有轨电车运行仿真实时空轨迹如图 7 所示。

由图 7 中的圆圈处可以看出,在德胜村站至青年湖站区间,平交路口信号优先策略的实施出现了连续成功和连续失败的现象。结合具体的信号控制方案可以发现,频繁的信号优先申请会导致平交



a) 场景二



b) 场景五

图 6 案例线路的有轨电车区间运行时间分布特征仿真结果

Fig. 6 Simulation result of case line tram interval operation time distribution characteristics

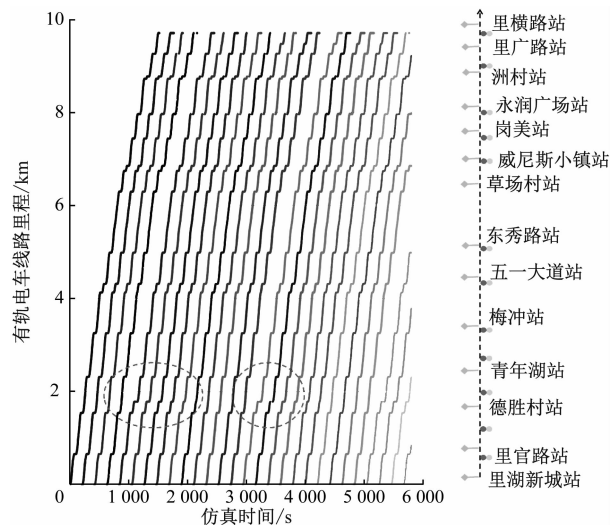


图 7 有轨电车仿真实时空曲线

Fig. 7 Temporal-spatial curve of tram simulation

路口信号控制方案的稳定性逐步下降,进而导致后续有轨电车的信号优先申请失败。

由图 7 还可看出,在高密度发车间隔下,五一大道站、威尼斯小镇站及洲村站附近的 3 个平交路口与车站距离过近,受列车加速度限制,有轨电车运行速度较低,故标准的信号优先逻辑模板不能适应

这一情况。因此,有轨电车车站和平交路口的布局,以及信号控制方案需进行优化调整。

由上述分析可知:根据仿真结果,可对线路运行稳定性影响最大的节点和区段具体设计方案进行针对性优化;此外,设计优化还需考虑在有轨电车信号优先策略实施失败的情况下,如何恢复后续的信号逻辑。

4 结语

本文提出了基于随机性特征和组合仿真模型的有轨电车运行指标分析方法。其由 PTV VISSIM 道路交通仿真软件和 Easy Tram 有轨电车仿真软件,通过 COM 接口对接的形式建立映射。在有轨电车的规划设计阶段,使用该方法进行多场景的随机仿真,可有效反映有轨电车在城市道路中运行的随机性特征。经分析,在规划设计阶段,随机性主要由平交路口信号控制及前后列车追踪引起。进一步分析可知,随机性受发车间隔、平交路口和车站的布局关系、路权形式、信号优先逻辑等因素的影响。

在规划设计阶段,通过标准化模板下的组合模型,可通过多场景的随机连续仿真,更详细地分析有轨电车线路运行的指标特征、影响因素,以及这些影响因素之间的关系。

基于佛山实际案例数据的仿真研究证明,本文所提出的方法能在有轨电车规划设计阶段提供详细的运行指标及影响因素分析,为规划设计方案比选和方案优化提供有效的支持。

参考文献

- [1] 范宇杰. 国内外有轨电车交叉口优先信号控制方法初探[J]. 交通与运输(学术版),2017(2):120.
FAN Yujie. Tram signal priority control method research from both domestic and foreign sources[J]. Traffic & Transportation, 2017(2):120.
- [2] 代磊磊,何广进,刘东波,等. 基于信息实时交互的现代有轨电车信号优先控制研究[J]. 城市轨道交通研究,2018(1):87.
DAI Leilei, HE Guangjin, LIU Dongbo, et al. Research on modern tram signal priority control based on real-time information interaction[J]. Urban Mass Transit, 2018(1):87.
- [3] 虞笑晨. 德国现代有轨电车平交口信号优先[J]. 城市道桥与防洪,2015(12):33.
YU Xiaochen. Modern tram signal priority at intersections in Germany[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(12):33.
- [4] 滕靖,潘炜维,王园园,等. 现代有轨电车一体化仿真系统设计与实现[J]. 都市快轨交通,2018(3):125.
TENG Jing, PAN Weiwei, WANG Yuanyuan, et al. Integrated tram simulation system: design and implementation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018(3):125.

(收稿日期:2020-10-09)

(上接第 151 页)

- SONG Jiawen. Research on operation mode and capacity of tramways[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014(2):108.
- [3] 王国军. 车载储能供电方式有轨电车车站配线设计要点[J]. 城市轨道交通研究,2020(11):149.
WANG Guojun. Design points for on-board energy storage power supply tram stations auxiliary line[J]. Urban Mass Transit, 2020(11):149.
- [4] 彭浩,杨志成. 有轨电车折返站站台形式及折返能力分析[J]. 交通与运输,2020(4):71.
PENG Hao, YANG Zhicheng. Analysis of turn-back station form and turn-back capacity of modern tram[J]. Traffic and Transportation, 2020(4):71.

- [5] 蒋丽华. 珠海现代有轨电车 1 号线上冲站的列车折返能力测算[J]. 城市轨道交通研究,2017(4):132.
JIANG Lihua. Calculation of the turn-back ability on modern tram Line 1 in Zhuhai city[J]. Urban Mass Transit, 2017(4):132.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市有轨电车工程设计标准:CJJ/T 295—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of city tram engineering: CJJ/T 295—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

(收稿日期:2022-03-30)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

