

基于车路协同技术的现代路面电车速度引导和信号优先控制系统

王一喆 刘洋东

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘 要: 论文主要针对对有轨电车行驶特性及国内行驶环境的分析, 研究基于车路协同技术下有轨电车速度引导和信号优先控制系统, 给予有轨电车在交叉口时间上的优先通行权以保障其服务水平, 同时考虑社会车流和交叉口整体的交通效益。论文研究的重点为有轨电车速度引导核心算法、交叉口单点在线优先控制方法以及系统软件程序的开发。在速度引导系统中根据现实交通状况中有轨电车到达交叉口的三种交通状况, 通过有轨电车与交叉口的距离和信号周期时长分布情况计算出提示速度, 使得有轨电车按照该提示速度行驶可以在绿灯相位到达交叉口。信号优先控制模块根据有轨电车到达时间窗在信号周期时常中的分布情况分为8种到达模式, 每种到达模式对应着不同的信号优先控制方法。最后本文根据速度引导和信号优先控制系统工作流程和核心算法基于C#环境进行系统软件程序的开发, 同时借VISSIM仿真软件进行系统控制结果的验证。

关键词: 现代有轨电车, 车路协同, 速度引导系统, 单点信号优先控制, 交叉口群协同控制

Abstract: This thesis studied the tram speed guidance and signal priority control systems under VII, and provided priority at the intersection to streetcar by means of traffic signal control to ensure the service level of streetcar with the consideration of the background vehicles, based on driving characteristics of streetcar and transportation condition of China. The core tram speed guidance algorithm, isolated online priority control method and system software development are the main focus of this thesis. Then, he tram speed guidance system calculate the fit speed according to the distance between a tramcar and the near intersection and the signal cycle length, corresponding to three situations that a tram car reach the near intersection in practice, to make the tramcar reach and get through the intersection during green phase without a halt. After that, signal priority control system includes the extension of green phase, the compression of red phase and the insertion of certain phase. According to the arrival time window in the distribution of a cycle length, the thesis generalized eight arrive modes that lead to different priority strategies. Finally, the thesis developed several software programs in C-sharp according to the core algorithm of speed guidance system and signal priority system. Also a simulation in VISSIM is conducted.

Key Words: modern streetcar, VII, speed guidance system, isolated signal priority, coordinated control of multiple intersections

1 背景

随着机动化水平的提高, 占有率低的私人小客车数量急剧增长, 城市交通面临着日益严重的问题: 愈加频繁的交通拥堵严重影响着出行效率, 急剧恶化的气候与环境条件降低了生活质量, 对化石燃料的高强度依赖也逐步引来能源危机。毫无疑问, 优先发展公共交通是缓解上述问题的主要对策之一,

也是全世界大多数城市可持续发展的战略选择。其中,有轨电车具有环境友好,造价低廉,舒适美观的特点,是公共交通模式中一种较好的选择。在欧洲,有轨电车的使用十分普及,到2010年已有137个城市和地区开通运营有轨电车。然而,在我国,仅有少数城市将有轨电车运用到城市交通系统当中,如何使有轨电车更好地适应我国混合交通的环境亟待解决。

在有轨电车信号控制系统方面,国内已有一部分研究成果。北京城建设计研究总院责任有限公司的喻智宏等(2013)介绍了已有的有轨电车通信信号系统。目前实际运营的有轨电车主要来自于阿尔斯通(ALSTOM)和西门子(SIEMENS),他们所制造的有轨电车具有不同的通信信号系统。北京全路通信信号研究设计院有限公司的孙吉良(2013)按路权分类,阐述了不同路权下建议采用的信号系统。当有轨电车的路权沿着其通路拥有与其他交通方式的物理隔离措施时(可以与其他交通方式有平面交叉),信号系统可采用基于数字化无绝缘轨道电路的列车超速防护(ATP)系统或点式ATP系统。武汉理工大学的张存保等(2013)分析了现有车路协同下交通信号控制方法存在的不足,引入基于时间窗的滚动预测方法,提出了改进的交叉口信号控制优化流程。杨晓光、周光伟、林瑜、杭明升、阴炳成等人对主动公交优先控制先后进行了一系列研究,并提出了一种固定周期条件下公共汽车优先感应信号的确定方法。提出了以乘客延误时间为计算指标,按照交叉口乘客总延误最小原则,确定交叉口各信号相位的初始绿灯时间的方法。目前国外对有轨电车及其优先系统的研究已较为成熟,在国内这方面的研究在理论和实际应用上相对国外研究均有一定差距。

本文针对对有轨电车行驶特性及国内行驶环境的分析,研究基于车路协同技术下有轨电车速度引导和信号优先控制系统,在考虑社会车流和交叉口整体的交通效益下,给予有轨电车在交叉口时间上的优先通行权以保障其服务水平。本文研究重点为有轨电车速度引导核心算法、交叉口单点在线优先控制方法以及系统软件程序的开发。在速度引导系统中根据现实交通状况中有轨电车到达交叉口的三种交通状况,通过有轨电车与交叉口的距离和信号周期时长分布情况计算出提示速度,使得有轨电车按照该提示速度行驶可以在绿灯相位到达交叉口。信号优先控制模块根据有轨电车到达时间窗在信号周期时长中的分布情况分为8种到达模式,每种到达模式对应着不同的信号优先控制方法。最后本文根据速度引导和信号优先控制系统工作流程和核心算法基于C#环境进行系统软件程序的开发,并借助VISSIM仿真软件进行系统控制效果的验证。

2 有轨电车特征参数及行驶环境

2.1 有轨电车特征

有轨电车的车身长度一般为25-50m,车体的长度取决于铰接的车辆段数,铰接车辆段越多,则车体越长。小汽车的车身长度一般为4.5m,公共汽车的车身长度一般为12m。有轨电车较大的车身长度会影响到绿灯间隔时间、有轨电车最小绿灯时间、有轨电车绿波带宽等诸多控制因素。有轨电车一般情况下的最大瞬时加减速速度为 1.3 m/s^2 ,在不利环境下的降级操作仅为 0.5 m/s^2 ,大大低于社会车辆加减速速度,相比公交车辆也较低。有轨电车使用清洁能源——电能。可以实现在驾驶途中低污染,零排放。有轨电车在正常行驶过程中,消耗电能较少,当有轨电车频繁减速停车、加速启动时,消耗电能较多,同时,也不利于乘客的乘坐舒适性。

2.2 有轨电车行驶环境分析

在我国,有轨电车行驶环境存在三大特点。1)混合交通特征明显,交叉口非机动车流量较大。这些非机动车流量在一定程度上增加了有轨电车速度引导和优先信控的难度。2)进出口道设站非常普遍。这在一定程度上有利于对有轨电车实行信号优先控制。3)存在交叉口间距短,短连线的情况。这样的

干线交叉口不利于联动信号控制。

3 系统功能框架

3.1 系统功能

本系统功能主要分为速度引导和信号控制两大模块，在速度引导模块中会通过路侧的检测器检测出有轨电车通过时刻的行驶速度，并根据与交叉口的距离和信号分布情况给出司机的提示速度，司机按照该速度驾驶有轨电车可以在交叉口绿灯相位通过，降低人均延误。

然而速度引导会受到有轨电车行驶性能，社会车辆的影响以及司机驾驶水平的制约，难以按照提示速度行驶。当有轨电车实际行驶速度与提示速度偏差过大时，速度引导系统失效，转入信号优化控制系统。

信号控制系统分为交叉口单点信号优化和交叉口群协同控制两个方面，交叉口群协同控制是通过计算交叉口累积延误并与该交叉口允许延误值做对比，当累计延误值大于交叉口允许延误值时，转入单点信号优化，否则不进行单点信号优化，防止出现被动的“浪费式”信号优先。

交叉口单点信号优化有三种基本模式：绿灯延长，红灯早断和相位插入。通过计算到达时间窗在信号周期中的位置分为 8 中不同的到达情况，每一种到达情况对应不同的优化计算公式，并且通过优化前后交叉口整体延误的对比来决定是否进行单点优化，其目的使有轨电车在交叉口不停车通过，使得人均延误降低。本系统的逻辑框架如图 3.1 所示。

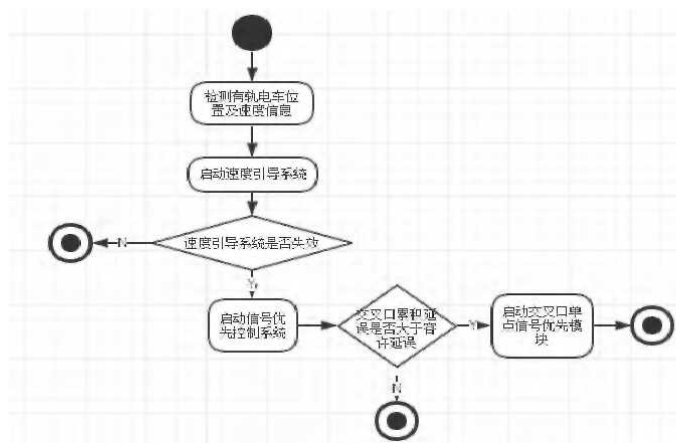


图 3.2 系统逻辑框架示意图

3.2 系统物理框架

本系统物理框架主要由车载端，检测站端，信号灯端，传输协议等部分构成。

(1) 车载端：车载端由 GPS，天线，数据接收器，数据处理器，显示屏组成。天线与 GPS 分别与数据接收器相连接，数据接收器与数据处理器相连，数据处理器与显示屏相连。

(2) 检测站端：检测站端由 GPS，数据发射器，天线组成。其中 GPS 与数据发射器相连，数据发射器与天线相连。

(3) 信号灯端：信号灯端由 GPS，数据接收器，天线，数据处理器，信号灯构成。其中信号灯与信号灯控制器相连，GPS 与数据接收器相连，数据接收器、信号灯控制器与数据处理器相连，数据处理器与数据发射器相连，数据发射器与天线相连。

(4) 传输协议: UDP 协议, UDP 协议的主要作用是将网络数据流量压缩成数据包的形式。一个典型的数据包就是一个二进制数据的传输单位。每一个数据包的前 8 个字节用来包含报头信息, 剩余字节则用来包含具体的传输数据。

4 速度引导系统

由于现实道路上, 有轨电车在从的上游行驶至下游交叉口的过程中即无法确定车辆在停靠站的停靠时间, 也无法实时获得前方交叉口的信号控制状态信息, 因此车辆驾驶员无法提前做出判断, 只能靠经验来决定驾驶车速, 造成有轨电车在停靠站下游交叉口的二次停车, 增加有轨电车的停车次数和停车时间。速度引导系统的基本原理和功能可概括为: 根据有轨电车在监测站实际行驶速度和距离停车线的长度, 以及交叉口信号时常分布, 计算出建议行驶速度, 使司机按照建议速度行驶即可在交叉口不停车通过, 降低人均延误, 提高有轨有轨电车行驶效率。

4.1 速度引导系统具体引导策略

1. 引导有轨电车避开红灯相位, 在下一个绿灯中通过
2. 引导有轨电车在该绿灯相位通过

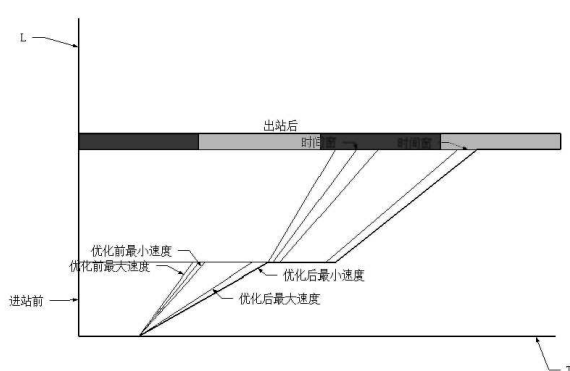


图 4.1 速度引导方式 1 示意图

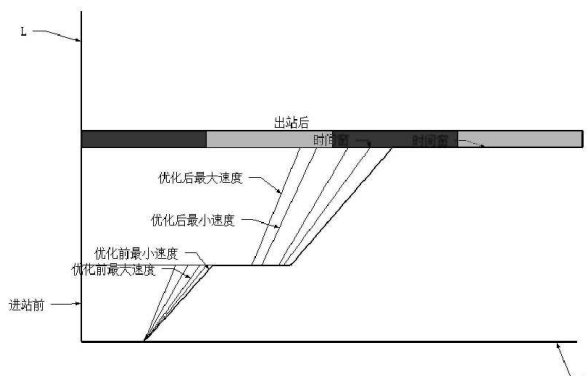


图 4.2 速度引导方式 2 示意图

4.2 引导模型

本模型的求解流程如图 4.3 所示。其中优化函数 f_1 , f_2 在下文中将详细介绍。

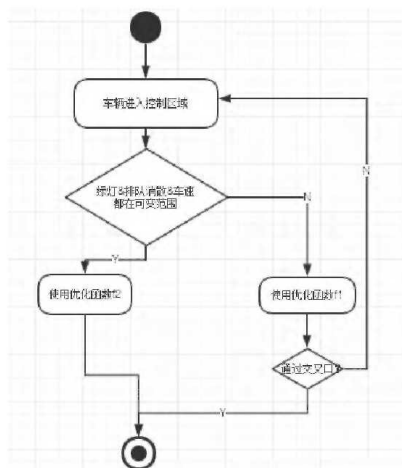


图 4.3 模型求解逻辑示意图

4.2.1 进站引导

(1) 有轨电车进入引导区域至停靠站完成停靠后启动, 行驶至交叉口停车线时, 信号灯状态为红灯。此时引导目的为使得有轨电车在停车线处停留时间最短, 即等待时间最短。

$$f_1 = \min(\max(0, T_{1gs} - T_{1ds})) \quad (1)$$

式中

f_1 ——进站引导下使用的等待时间计算函数

T_{1gs} ——无引导条件下有轨电车行驶至交叉口停车线遭遇下一个绿灯的起亮时刻;

T_{1ds} ——引导条件下有轨电车行驶至交叉口停车线的时刻。

$$T_{1ds} = T_1 + \left| \frac{V_1 - V_0}{a_{ud}} \right| + \frac{L_{stage1} + \left| \frac{V_1^2 - V_0^2}{2a_{ud}} \right|}{V_1} + \frac{V_1}{a_{sd}} + t_{hb} + \frac{V_1}{a_{su}} + \frac{L_{stage2} + \frac{V_1}{2a_{su}}}{V_1} \quad (2)$$

式中

T_1 ——有轨电车进入控制区时刻;

V_0 ——现状行驶速度;

V_1 ——本阶段有轨电车辆优化速度;

a_{sd} ——有轨电车制动平均减速度;

a_{ud} ——有轨电车行驶平均加速度;

t_{hb} ——有轨电车停靠预测时间;

L_{stage1} ——为控制线至有轨电车停靠站的距离;

L_{stage2} ——有轨电车停靠站至交叉口停车线距离。

(2) 有轨电车进入引导区域, 停靠后启动时间为绿灯且排队消散。目的为使有轨电车在绿灯结束前通过交叉口。

$$f_1 = \min(\max(0, T_{1ds} - T_{1rs})) \quad (3)$$

式中

T_{1rs} ——无引导条件下有轨电车行驶至交叉口停车线时所遭遇通行相位绿灯结束时刻。

4.2.2 出站引导

(1) 车辆进入引导区域时, 信号灯状态为红灯, 或者信号灯状态为绿灯但路口排队尚未消散。此时目的为减少排队等待时间, 即减少到达交叉口时刻与路口排队消散时刻的差值。

$$f_2 = \min(\max(0, T_{2qs} - T_{2ds})) \quad (4)$$

$$T_{2qs} = T_{2ds} + \frac{Q}{S} + t_1 \quad (5)$$

$$T_{2ds} = T_2 + \frac{V_2}{a_{su}} + \frac{L_{stage2} - \frac{V_2^2}{2a_{su}}}{V_2} \quad (6)$$

式 4, 5, 6 中

f_2 ——出站引导下使用的等待时间计算函数;

T_{2qs} ——有轨电车出站后行驶至交叉口停车线时遇到绿灯且排队消散的时刻;

T_{2ds} ——有轨电车启动出站行驶至停车线的时刻;

T_{2gs} ——有轨电车启动遭遇下一个相位绿灯时刻;

V_2 ——本阶段有轨电车优化速度;

T_2 ——有轨电车辆启动时刻;

Q ——交叉口该进口道排队车辆数;

S ——交叉口进口道饱和流率;

t_1 ——车辆启动损失时间。

(2) 有轨电车启动时为绿灯, 路口排队已经消散, 此时目的为尽量使有轨电车在绿灯结束前通过交叉口。

$$f_2 = \min(\max(0, T_{2rs} - T_{2ds})) \quad (7)$$

式中

T_{2rs} ——有轨电车出站行驶后至交叉口停车线所遭遇绿灯的结束时刻。其余参数意义相同。

此时, 对于给定红灯亮起时刻 $T_{2rs} - T_{2rs}$ 为定值, 故优化速度 V_2 也恒定不变。

4.3 速度引导限制条件

(1) 有轨电车在行驶过程中因受到车辆特性及安全性的影响, 存在一个行驶速度的阈值 (即行驶速度的上下限), 若计算的提示速度低于行驶速度的下限或高于行驶速度的上限, 即认为速度引导失效, 转入信号优化控制系统

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (8)$$

式中 $V_{\min} = 10\text{km/h}$, $V_{\max} = 90\text{km/h}$ 。

(2) 为了保证有轨电车行驶过程中的平稳性和乘客的舒适性, 加减速速度不能过大, 因此需要保证提示车速变化在驾驶员可接受范围内, 规定在每 100m 范围内车速变化不超过现状 40%, 即

$$0.6V \leq V \leq 1.4V \quad (9)$$

(3) 由于有轨电车在行驶过程中会受到社会车辆, 突发状况的干扰以及驾驶员水平的制约, 因此不能保证有轨电车按照提示速度运行, 当在交叉口附近检测到有轨电车实际行驶速度与计算提示车速之差大于 ε (常数, 可根据不同交叉口取不同的值) 时, 认为速度引导系统失效, 开启信号优先控制系统。

5 有轨电车交叉口单点信号优先控制系统

由于有轨电车在速度引导过程中会受行驶过程中偶然因素的干扰, 其到达停车线的时刻并不会像预计到达的时刻一样, 而是会处于周期中的不同位置。当有轨电车运行晚点时, 应在保障交叉口总体交通效益的基础上, 对有轨电车进行适当的优先。有轨电车作为使用电能、加减速速度较低的公共交通工具, 在交叉口频繁停车、启动不利于节能以及乘客的舒适性, 因此, 部分运行没有晚点的有轨电车也可在交叉口给予其优先控制。有轨电车单点交叉口在线优先控制逻辑见图 5.1。

得知有轨电车预测到达时间段在周期中的定位及所属相位后, 可将其到达模式分为 8 种情况, 每一种情况时间段的下界、中值、上界均处于不同的相位, 相应的有轨电车优先控制方案也有所不同。有轨电车的 8 种预测到达模式如下图所示:

下文针对 8 种预测到达模式分别予以相应的解释:

(1) 到达模式①

有轨电车预测到达时段下界位于有轨电车上—红灯相位末期, 中值及上界位于有轨电车绿灯相位。

此时红灯缩短时常为 $\Delta t_{red} = \min[\sigma, r - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + I_i) - g_{n\min}]$

(2) 到达模式②

有轨电车预测到达时段的下界、中值、上界均位于有轨电车绿灯相位。此时保持原有控制方案不变。

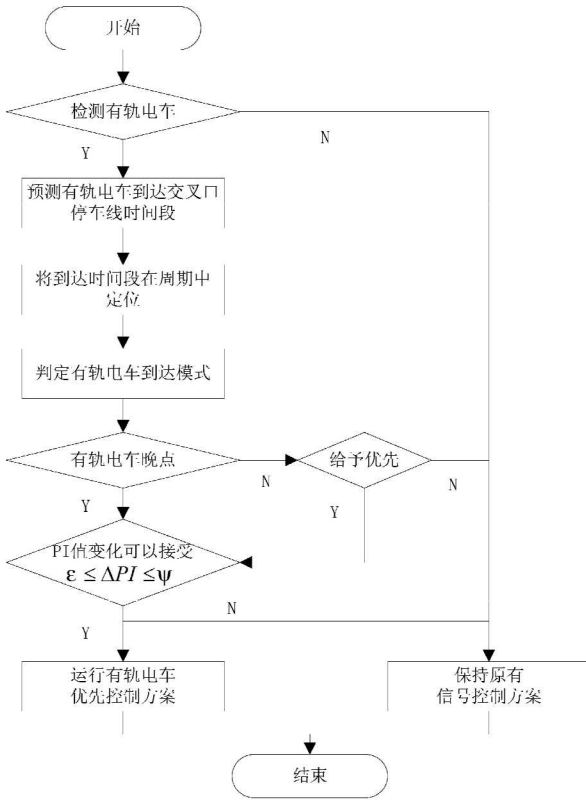


图 5.1 有轨电车单点交叉口在线优先控制逻辑流程

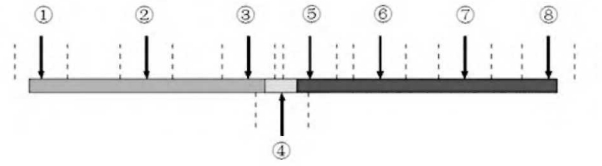


图 5.2 有轨电车 8 种预测模式

(3) 到达模式③

有轨电车预测到达时段下界及中值位于有轨电车绿灯相位，预测到达时段上界位于有轨电车黄灯相位。此时绿灯延长时间为 $\Delta t_{gre} = \min[\sigma, g_{tmax} - g_t]$

(4) 到达模式④

有轨电车预测到达时段下界位于有轨电车绿灯相位，预测到达时段中值及上界分别位于有轨电车黄灯相位及红灯相位。此时绿灯延长时间为 $\Delta t_{gre} = \min[2\sigma, g_{max} - g]$

(5) 到达模式⑤

有轨电车预测到达时段下界位于有轨电车黄灯相位，预测到达时段中值及上界位于有轨电车红灯相位。此时绿灯延长时间为 $\Delta t_{gre} = \min[2\sigma, g_{max} - g]$

(6) 到达模式⑥

有轨电车预测到达时段的下界、中值、上界均位于第 m 个相位（非有轨电车上一相位）的绿灯期间。相位插入的时刻为 $t_{ins} = \max[t_{TTA} - \sigma, \sum_{i=1}^{m-1} (g_i + y_i) + g_{mmin}]$

(7) 到达模式⑦

有轨电车预测到达时段位于有轨电车绿灯相位前一相位的绿灯期间。此时红灯缩短时常为 $\Delta t_{red} = \min[r - (t_{TTA} - \sigma), r - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + I_i) - g_{nmin}]$

(8) 到达模式⑧

有轨电车预测到达时段下界及中值位于有轨电车绿灯相位前一相位的绿灯期间，上界位于有轨电车绿灯相位期间。此时红灯缩短的时常为 $\Delta t_{red} = \min[2\sigma, r - \sum_{i=1}^{n-1} (g_i + I_i) - g_{nmin}]$

以上各式中参数含义如下:

- Δt_{red} —— 有轨电车红灯缩短的时长, 单位 s;
- σ —— 有轨电车到达时段下界与中值的偏移, 单位 s;
- r —— 有轨电车相位红灯时长, 单位 s;
- n —— 除有轨电车相位外的相位总数;
- g_i —— 有轨电车绿灯相位之外其它相位的原方案绿灯时长, 单位 s;
- I_i —— 有轨电车绿灯相位之外其它相位的绿灯间隔时间, 单位 s;
- g_{nmin} —— 有轨电车绿灯相位前一相位的最小绿灯时间, 单位 s;
- Δt_{gre} —— 有轨电车绿灯相位绿灯延长的时长, 单位 s;
- g_{imax} —— 有轨电车绿灯相位最大绿灯时间, 单位 s;
- g_i —— 有轨电车绿灯相位原方案时长, 单位 s;
- t_{ins} —— 有轨电车绿灯相位插入时刻, 单位 s;
- m —— 有轨电车到达时段下界位于的相位;
- g_{min} —— 第 m 相位的最小绿灯时间, 单位 s。

6 在线有轨电车交叉口群协同控制模型

三条路径虽然采用的优先策略不同, 但车辆通过三个交叉口的总延误却完全相同(如图, 总延误都为 68s), 显然, 在这一情况下, 考虑对社会车辆的影响最小, 各交叉口均不优先反而是最佳策略。为了避免在交叉口出现被动的无谓优先, 因此对于有轨电车线路上交叉口群协同控制是有研究意义的。

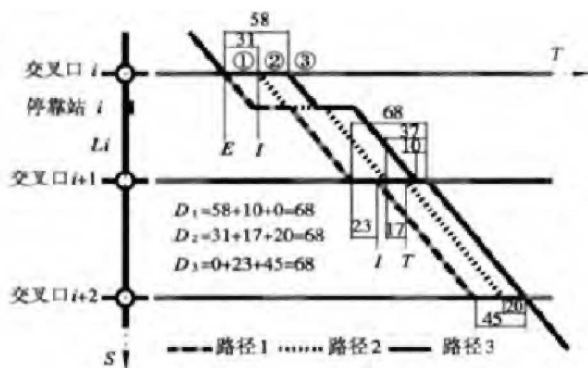


图 6.1 三种控制策略运行示意图

公交车辆在交叉口的延误 d_{bi} 由两部分组成, 其一为红灯延误 d_{bis} , 其二为车辆加减速延误 d_{bia} 。本文假定忽略车辆加减速延误, 则车辆在交叉口 i 的延误为:

$$d_{bi} = \begin{cases} 0 & 0 < K_i \leq g_{i,1} \\ T - K_i & g_{i,1} < K_i \leq T \end{cases} \quad (10)$$

则公交车辆通过整个系统发生的总信号控制延误为:

$$D_j = \sum_{i=1}^N d_{bi} \quad (11)$$

车辆通过整个系统的停靠延误为:

$$D_s = \sum_{i=1}^N d_{si} \quad (12)$$

由于信号控制延误计算已经考虑了停靠带来的影响,因而计算总延误时可以将两者直接相加。所以车辆通过整个系统发生的总延误为:

$$D_b = D_j + D_s = \sum_{i=1}^N d_{bi} + \sum_{i=1}^N d_{si} \quad (13)$$

优先控制算法须能够准确地根据车辆运行状况和预先设定的目标判别是否给予某一特定的公交车辆以优先。在本研究中,如前所述,将公交延误的偏移值最小为是否启用优先策略的判别依据,并预先设定许可的偏移范围。将根据上述模型预测的延误值与预先设定的容许延误值进行比较,如果预测延误值超出许可偏移范围,则将该辆公交车纳入优先申请集合中;否则,不进行优先计算。同时,优先申请生成时还考虑车辆在通过上游交叉口群时的延误偏移值,将其纳入本交叉口群优先判别的进程中。设 D_{bp} 为车辆在上游交叉口群的延误偏移值; D_{bs} 为本交叉口群容许延误; D_{brange} 为预先设定的延误偏移许可阈值; $D_{decision}$ 为二元变量,当其值为 1 时,生成优先申请,当其值为 0 时,则不生成优先申请。 $P_{decision}$ 可以通过下述不等式计算:

$$P_{decision} = \begin{cases} 0 & (D_b + D_{bp} - D_{bs}) \leq D_{brange} \\ 1 & (D_b + D_{bp} - D_{bs}) > D_{brange} \end{cases} \quad (14)$$

7 速度引导与优先信控的软件实现研究

为实现公交优先控制理论的应用,必然需要将其软件实现。实时交通控制软件的实现十分复杂,本章的研究仅是对信号优先控制应用软件优化计算模块的初步探索,试图建立有轨电车优先控制优化计算模块的数据结构和逻辑流程图,并实现控制理论中的主要模型和算法。有轨电车优先控制需要作为城市交通控制系统的一部分来运行,优先控制软件的实现在考虑了总体控制系统软件的架构后才具有实际意义。基于此,本文选用 C# 语言开发能在 windows XP 平台上操作的有轨电车速度引导和优先控制软件,并利用 VISSIM 交通仿真软件对优先信号控制效果进行仿真检验。

有轨电车优先控制软件的模块设计如下图所示:

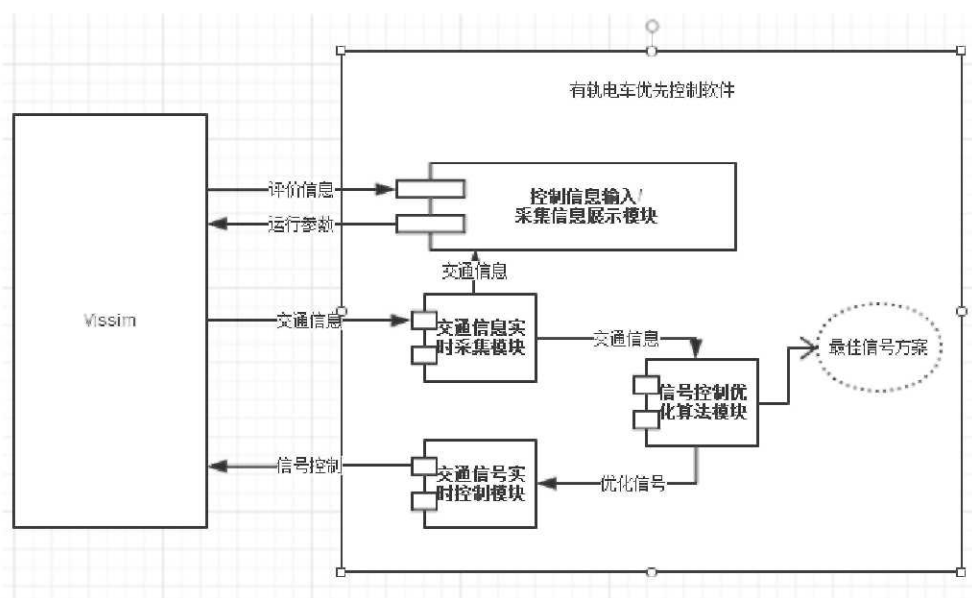
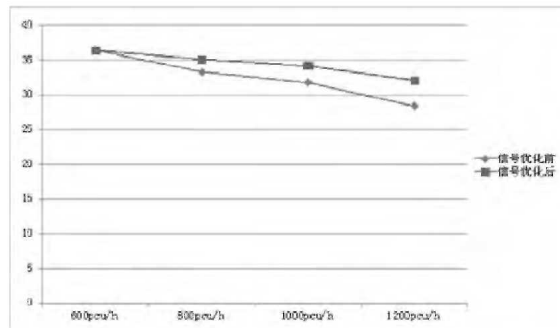
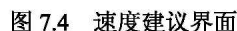
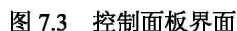


图 7.1 软件模块设计示意图



本仿真运行通过保持有轨电车发车频率和发车数不变的情况下,不断增加社会车辆流量从而增加交通总流量,在不同交通总流量情况下对比信号优化前后的仿真结果。从以上结果可以看出在不同流量下经过系统优化后车均延误(单位,s)降低,车辆平均行驶速度提高,证明了系统的可靠性。

8 总结与展望

本文针对有轨电车行驶特性与国内行驶环境分析。分析其对有轨电车信号(优先)控制的影响,提炼其影响到的信号控制思想及相关的参数,为后文的研究打下基础。本文充分考虑了系统的综合性,首次将速度引导系统和信号优先控制系统结合开发,首先通过速度引导系统给出有轨电车建议行驶速度,当速度引导系统失效后,转入信号优先控制系统,确保最大程度的降低有轨电车在交叉口的信号优先对背景交通流造成的影响。其次,本文以交叉口总体人均效益最大化为目标,兼顾有轨电车晚点情况、能耗与乘坐舒适性、背景车流交通效益等因素,根据到达时间窗分为8中不同到达模式,为有轨电车提供单点实时条件优先控制。再次,本文引入交叉口群累积延误的概念,并与交叉口允许延误值作对比决定是否进行单点信号优化,防止出现被动的“浪费式”优先。最后通过C#环境下可视化界面的设计,使得系统输出值更加直观易懂,增强系统引导过程中的可操作性和人机友好特性。

本文也存在诸多值得讨论之处,需要未来做更深入的研究。首先是相位设计优化问题,相位差优化是离线公交优先控制方法中比较重要的思路,本文主要以基于车路协同技术的在线优先控制为主,并未与离线优化模型相结合。其次为多优先申请下的有轨电车信号优先控制方法研究。本文提出的有轨电车交叉口单点在线优先控制方法是基于单方向存在有轨电车优先申请的情况,实际运行中,有可能出现两个相位有轨电车均提出优先申请的情况,在今后的研究中应在文中模型的基础上进行优化与改善,使其可以满足多优先申请下的有轨电车优先控制。最后,则是将该系统推广到更多的车型上。本文所提出的有轨电车速度引导和信号优先控制系统是针对有轨电车这一车型而言的,未来可以改进并推广到BRT,公交专用道上行驶的公交车等。进而适用于全部的车型,使整个城市交通系统高效运转。

参考文献

- [1] 薛美根,杨立峰,程杰. 现代有轨电车主要特征与国内外发展研究[J]. 城市交通,2008,06:88-91+96.
- [2] 薛洪峰. 现代有轨电车信号控制关键技术研究[D]. 北京交通大学,2013.
- [3] 瞿海波,过秀成,杨洁. 现代有轨电车应用模式及地区适用性研究[J]. 城市轨道交通研究,2009,02:46-49.
- [4] 马万经,吴志周,杨晓光. 基于交叉口群公交优先协调控制方法研究[J]. 土木工程学报,2009,02:105-111.
- [5] 马万经,杨晓光. 公交信号优先控制策略研究综述[J]. 城市交通,2010,06:70-78+16.
- [6] 张存保,陈超,严新平. 基于车路协同的单点信号控制优化方法和模型[J]. 武汉理工大学学报,2012,10:74-79.
- [7] 马万经,吴明敏,韩宝新,刘好德,吴洪洋. 考虑可变速度调节的单点交叉口公交信号优先控制方法[J]. 中国公路学报,2013,02:127-133.
- [8] 李凯,毛励良,张会,王子雷. 现代有轨电车交叉口信号配时方案研究[J]. 都市快轨交通,2013,02:104-107.
- [9] 苗彩霞. 现代有轨电车系统特点及应用前景[J]. 都市快轨交通,2013,03:9-12.
- [10] 喻智宏,孙吉良,申大川. 有轨电车通信信号技术与智能交通系统[J]. 城市交通,2013,04:44-51.
- [11] 吴伟,马万经,杨晓光. 车路协同环境下基于路径的信号协调优化模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,02:343-351.