

基于混合整数非线性规划的SRT公交信号优先模型

马 超¹, 廖明军²

¹盐城工学院机械学院, 江苏 盐城

²盐城工学院智能交通系研究院, 江苏 盐城

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

超级虚拟轨道快运系统(Super autonomous Rail Rapid Transit, 简称SRT)作为低成本、大运量的轨道交通系统是城市公交发展的新方向, 车路协同技术为公交信号优先控制提供了技术支持。以减少交叉口内人均延误和车辆燃油消耗为目标, 建立基于混合整数非线性规划的SRT公交信号优先模型, 给出模型求解方法。结合SUMO仿真软件, 对盐城市SRT某交叉口进行实例分析, 得出该优先模型可以有效提高交叉口通行效率并降低了能耗, 具有一定经济实用性。

关键词

混合整数非线性规划, 公交优先, SRT公交, SUMO仿真

SRT Bus Signal Priority Model Based on Mixed Integer Nonlinear Programming

Chao Ma¹, Mingjun Liao²

¹School of Mechanical Engineering, Yancheng University of Technology, Yancheng Jiangsu

²Research Institute of Intelligent Transportation Department, Yancheng University of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Apr. 23rd, 2024; accepted: May. 22nd, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

Super Virtual Rail Rapid Transit System (SRT) As a low-cost and high-capacity rail transit system, it is a new direction for the development of urban public transportation, and vehicle road coordi-

nation technology provides technical support for priority control of public transportation signals. With the goal of reducing per capita delay and vehicle fuel consumption at intersections, a mixed integer nonlinear programming based SRT bus signal priority model is established, and a solution method for the model is provided. Combining sumo simulation software, an example analysis was conducted on an SRT intersection in Yancheng City, and it was found that the priority model can effectively improve the traffic efficiency of the intersection and reduce energy consumption, which has certain economic practicality.

Keywords

Mixed Integer Nonlinear Programming, Bus Signal Priority, SRT, SUMO

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超级虚拟轨道快运系统(Super autonomous Rail Rapid Transit, 简称 SRT)作为能耗低、载客量大的轨道交通系统是城市公交发展的新方向。现有的信号控制交叉口, 信号配时参数一般是固定的, 而交通流是动态变化的, 所以车辆在交叉口处产生延误, 且 SRT 公交的信号优先控制问题一直没有得到妥善处理。近年来车路协同技术发展逐渐完善, 为解决公交优先问题提供技术支持。

Naumann R 等[1]提出了车路协同系统下智能网联车信号优化策略。该策略利用车载检测模块, 收集车辆的交通流数据, 如数量、速度、与交叉口停止线距离等, 进而传输给决策中心; 然后以交叉口通行效率最高为目标函数, 赋予车辆不同的通过优先级; 从而实现车辆有序通过交叉口, 提高通行效率。Dresner K[2]等在车路协同环境下利用延长绿时和缩短红时的信号优先控制方法, 提出一种公交完全优先的信号优先策略。该优先策略适用于社会车辆较少的交叉口, 对于车流量较大的路口反而会增加其车辆延误。Mohammad N 等[3]对交叉口与公交站点距离设置远近与交叉口延误关系进行研究, 建立了交叉口多优先请求的优先控制模型。Yang 等[4]基于车路协同环境下收集的车辆实时位置信息和速度, 结合交叉口的多优先请求冲突, 提出了处理多请求冲突的优化模型, 通过实地应用验证了模型的优先效果。Garteter 等[5]利用车路协同系统提供的实时交通流数据, 以减少车辆延误为目标, 建立优化控制模型, 并利用 OPAC 算法进行模型求解, 能够有效减少车辆延误。李鹏凯等[6]利用车路协同系统搜集的智能网联车信息, 如位置信息、车速信息、交叉口排队长度信息等, 以车辆经过交叉口停止时间最短为目标, 建立了一种适用于单向主干道的车速诱导模型, 解决了交叉口信号控制存在的可靠性不足问题, 提高了交通效率。杨晓光[7]等模拟车路协同环境, 总结交通流的行驶规律, 对交叉口信号实施自适应控制, 系统性研究了交叉口处的信号控制技术。高苏[8]等基于可变信号交叉口, 在设计其信号配时方案时, 综合考虑范围内的车辆车速诱导, 假定所有车辆都按照车速诱导, 预测交叉口车辆的到达分布。杨金越等[9]基于部分车辆为智能网联车辆, 考虑非网联车辆和交叉口信号配时方案, 以降低车辆燃油消耗为目标, 实时计算网联车辆的最佳车行驶速度。

车辆通过交叉口时, 经常需要减速、停车、加速, 由此不仅使车辆产生一定的延误, 而且由于车辆行驶状况发生变化, 使得车辆在交叉口产生一个比在正常连接道路行驶时多得多的燃油消耗; 此外, 对信号配时的单一优化也未能实现对交叉口时空资源的最优利用, 缺少对车辆的行驶控制, 对驾驶员没有

相应的行驶速度建议。因此, 本文以信号配时、车辆速度动态调整为方法, 结合车路协同提供的“车-车”、“车-路”实时通讯环境, 建立了一种基于混合整数非线性规划的 SRT 公交信号优先控制优化模型。在考虑到公交车进入车路协同环境下的检测范围时的初始状态的基础上, 以人均延误和车辆能耗作为优化目标, 设计了公交信号优先算法及求解流程; 最后利用 SUMO 仿真平台的 TRACL 接口与 Python 搭建了车联网仿真平台, 在不同交通条件下对本文提出的 SRT 公交优先模型进行测试。

2. 模型搭建

本文选取交叉口车辆能耗最小化和人均延误最小化为优先目标, 构建交叉口 SRT 公交信号优先模型。以交叉口各进口道的交通量、单位时间内交叉口乘客人数及各车道的车辆饱和度作为决策变量, 约束函数包括: 道路承载能力约束、最小绿灯时间约束及 0-1 决策变量约束。决策变量包含 0-1 决策变量和连续变量, 因目标函数是非线性的, 故所建立的优先模型属于混合整数非线性规划问题。

2.1. 模型的目标函数

在车路协同环境下, 车辆通过交叉口, 需要减速、停车、加速, 由此不仅产生一定的延误, 而且由于行驶状况发生变化, 使其在交叉口产生一个比在正常连接道路行驶时多得多的燃油消耗; 而 SRT 公交因为载客量大的特点, 降低 SRT 车辆延误就是降低交叉口的人均延误。

因此, 本文选取车辆通过交叉口产生的能耗 Q 和人均延误 D 为优先模型的目标函数, 交叉口能耗计算公式为式(1) [10]。

$$\begin{aligned} \text{减速油耗量 } Q_d &= \int_0^{t_0} F_d dt = qt_d f_d g \\ \text{怠速油耗量 } Q_b &= \int_0^{t_0} F_b dt = \left(N_0 t_0 + qrt_0 + \frac{1}{2} qt_0^2 - \frac{1}{2} st_0^2 \right) f_b \\ \text{加速油耗量 } Q_a &= \int_0^{t_0} F_a dt = qt_a f_a t_0 \\ Q &= Q_a + Q_b + Q_d \end{aligned} \quad (1)$$

式中, q 为交叉口一个车道的车辆到达率, pch/h; F_d 为车辆减速的瞬时油耗, ml/s; f_d 为车辆减速的燃油消耗率, ml/s; t_d 为车辆减速时间。

人均延误需要研究 SRT 车辆延误和社会车辆的延误, 根据信号优先控制方案不同, 延误也不同。在采用绿灯延长控制方案时, SRT 延误是减少的, SRT 延误公式如式(2)。

$$SDS^{G,i} = C - g^i + l \quad (2)$$

式中, $SDS^{G,i}$ 为 SRT 车辆在第 i 相位因为绿灯延长策略造成的延误。

同相位的社会车辆延误减少, 非优先相位的社会车辆延误增加, 如图 1 中阴影部分所示。具体计算公式如式(3)和(4)所示。

$$SVTTS^{G,i} = \frac{\partial q^{A,i} \cdot q^{D,i}}{2 \cdot (q^{D,i} - \partial q^{A,i})} \cdot \left(2 \cdot (C - g^i) \cdot \partial^{G,i} - (\partial^{G,i})^2 \right) \quad (3)$$

$$SVTDS^{G,i} = \frac{\partial q^{A,i+1} \cdot q^{D,i}}{2 \cdot (q^{D,i+1} - \partial q^{A,i+1})} \cdot \left(2 \cdot (C - g^{i+1}) \cdot \partial^{G,i} - (\partial^{G,i})^2 \right) \quad (4)$$

式中, $SVTTS^{G,i}$ 为第 i 相位的社会车辆在第 i 相位因为绿灯延长策略造成的延误; $SVTDS^{G,i}$ 为非优先相位的社会车辆在第 i 相位因为绿灯延长策略造成的延误。

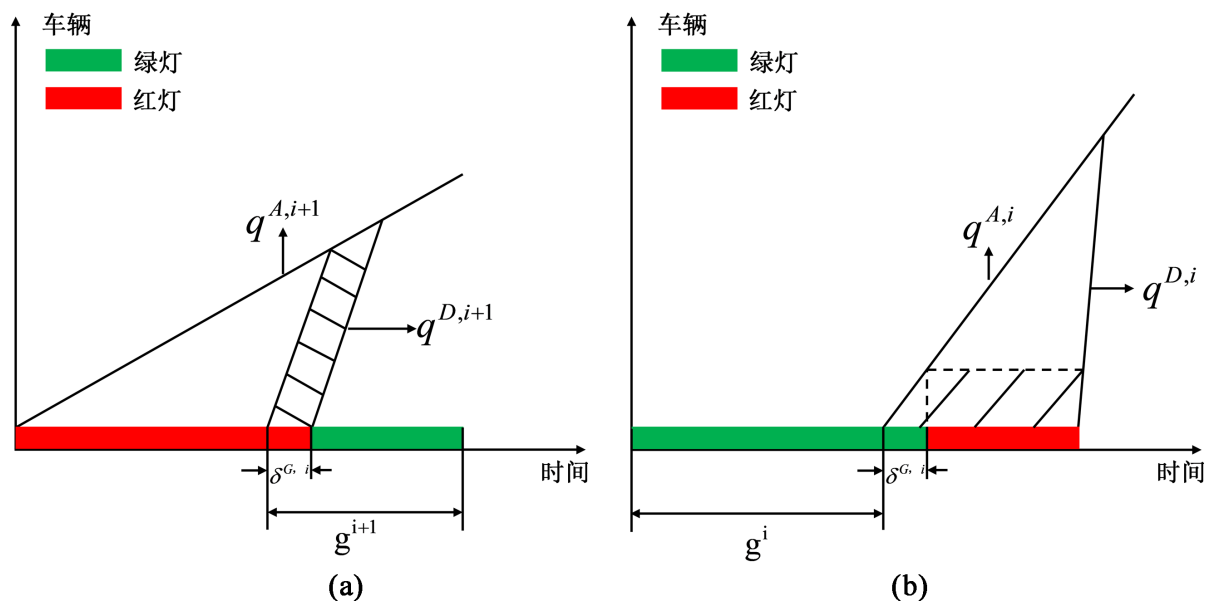


Figure 1. Schematic diagram of social vehicle delay changes under the green light extension strategy. (a) Social vehicle total time savings graph; (b) Total delay graph of increased social vehicles

图 1. 绿灯延长策略的社会车辆延误变化示意图。(a) 社会车辆总节省时间图; (b) 社会车辆增加总延误图

在采用红灯缩短控制方案时, 减少了 SRT 排队时间, 所以 SRT 延误也是减少的。

$$SDS^{R,i} = \begin{cases} g^{E,i} - PAT^i + l & \delta^{R,i} > QDT^i \\ \delta^{R,i} \delta^{R,i} & \delta^{R,i} \leq QDT^i \end{cases} \quad (5)$$

式中, $SDS^{R,i}$ 为 SRT 车辆在第 i 相位因为红灯缩短策略造成的延误。

同相位的社会车辆延误减少和非优先相位的社会车辆延误增加, 如图 2 中阴影部分所示, 具体计算公式如式(6)和(7)所示。

$$SVTTS^{R,i} = \frac{\partial q^{A,i} \cdot q^{D,i}}{2 \cdot (q^{D,i} - \partial q^{A,i})} \cdot (2 \cdot (C - g^i) \cdot \partial^{R,i} - (\partial^{R,i})^2) \quad (6)$$

$$SVTDS^{R,i} = \frac{\partial q^{A,i-1} \cdot q^{D,i-1}}{2 \cdot (q^{D,i-1} - \partial q^{A,i-1})} \cdot (2 \cdot (C - g^{i-1}) \cdot \partial^{R,i} + (\partial^{R,i})^2) \quad (7)$$

式中, $SVTTS^{R,i}$ 为第 i 相位的社会车辆在第 i 相位因为红灯缩短策略造成的延误; $SVTDS^{R,i}$ 为非优先相位的社会车辆在第 i 相位因为红灯缩短策略造成的延误。

在非饱和状态下, 信号控制的交叉口的延误可根据 HCM 延误公式确定, 故交叉口的人均延误为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n SDS^i + SVTB^i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} \phi_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b \phi'_{ij}} \quad (8)$$

式中, ϕ_{ij} 为第 i 相位 j 车道的社会车辆到达率, pcu/h; ϕ'_{ij} 为第 i 相位 j 车道的 SRT 车辆到达率, pcu/h。

2.2. 优化目标

以车辆通过交叉口产生的能耗 Q 和人均延误 D 最小为优化目标, 建立交叉口 SRT 信号优先优化模型如下。

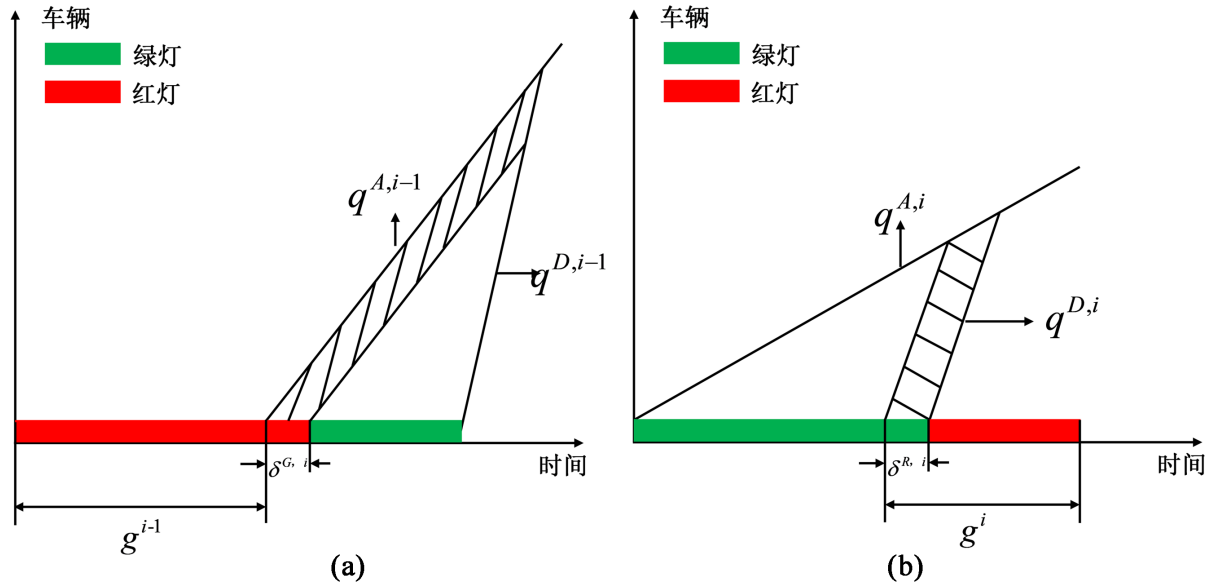


Figure 2. Schematic diagram of social vehicle delay changes under the red light early cut-off strategy. (a) Total time saved by social vehicles; (b) Total delay in increasing social vehicles

图 2. 红灯早断策略的社会车辆延误变化示意图。(a) 社会车辆总节省时间; (b) 社会车辆增加总延误

$$\begin{aligned} \min Z_1 &= Q \\ \min Z_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n SDS^i + SVTB^i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} \varphi_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^b \varphi'_{ij}} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3. 模型的约束条件

2.3.1. 最大车速约束

在确定采取车速诱导时, SRT 车辆的车速应小于最大安全车速, 本文取 60 km/h。

$$\begin{aligned} AAT^i &> ETA^i \\ (-1)^{\theta+1} \cdot AAT^i &> \theta \cdot g^{E,i} + (0-1) \cdot g^{S,i} \\ g^i &> \frac{9L}{100} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, AAT 表示 SRT 车辆到达交叉口的时间, ETA 表示根据现有速度预估 SRT 车辆到达交叉口的时间。 g^i 为绿灯剩余时间。

2.3.2. 最短绿灯时间约束

根据交通流的冲突关系, 确保交叉口车辆行驶的安全和顺畅。各相位需要满足最短绿灯时间[11], 即:

$$g_{\min} = \max \{ g_{\min}^{e,i}, \rho \cdot g_{\min}^{p,i} \} \quad (11)$$

其中, $g_{\min}^{p,i} = 7 + \frac{l_p}{v_p} - Y$ 。

式中, $g_{\min}^{e,i}$ 为车辆驾驶员驾驶车辆通过交叉口所需要的时间; $g_{\min}^{p,i}$ 为行人通过过街设施通过道路的最短绿灯时间; l_p 为行人绿灯损失时间; v_p 为行人步行速度, 一般为 1.2 m/s; p 为 0~1 变量。

2.3.3. 通行效益约束

公交信号优先会导致非优先相位社会车辆延误增加, 交叉口总的运行效率并非得到优化, 并且公交车速变化会导致车辆能耗变化。因此, 每次的优先请求执行前必须计算其通行效益, 即:

$$SDS^i + SVTB^i \tag{12}$$

2.4. 模型求解

2.4.1. 协同优化模型

考虑到SRT公交车辆的载客数较大, 最大载客容量为320人, 要着重考虑SRT公交车辆的拥堵问题, 最大限度地减少车辆的燃油消耗和人均延误, 对原优化进行简化, 即:

$$\begin{aligned} \min Z_1 &= Q \\ \min Z_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} p \cdot d_{ij} \cdot q_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} \varphi_{ij}} \end{aligned} \tag{13}$$

2.4.2. 模型重构

在目标函数中 Z_2 中, 引入变量 y , 即:

$$\begin{aligned} y &= \frac{d_{ij} \cdot q_{ij}}{\varphi_{ij}} \\ \ln y &= \ln d_{ij} + \ln q_{ij} - \ln \varphi_{ij} \end{aligned} \tag{14}$$

将其分段线性化, 即:

$$\begin{cases} f_1(y) = \ln y \\ f_2(d_{ij}) = \ln d_{ij} \\ f_3(q_{ij}) = \ln q_{ij} \\ f_4(\varphi_{ij}) = \ln \varphi_{ij} \end{cases} \tag{15}$$

则原函数 Z_2 中非线性形式被线性化为:

$$f_1(y) = f_2(d_{ij}) + f_3(q_{ij}) - f_4(\varphi_{ij}) \tag{16}$$

同理, 约束条件按照上述方法处理。

依据上述方法, 本文模型目标 Z_2 可重构为:

$$\min f_1(y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} (\ln p + \ln d_{ij} + \ln q_{ij} - \ln \varphi_{ij}) \tag{17}$$

其中, $f_1(y) = \ln(Z_2)$ 。

2.4.3. 双目标函数的转化

将模型中的双目标函数转化为单目标函数, 分为两个步骤。

Step1: 增加单位油耗 F_2 就可以把目标函数 Z_2 转化为燃油消耗(mL), 与目标函数 Z_1 的能耗(mL)量纲统一, 单位油耗可取加速、减速、怠速油耗的平均值, 转化后的目标函数 Z_2 为:

$$\min Z_2 = F_2 \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} (\ln p + \ln d_{ij} + \ln q_{ij} - \ln \varphi_{ij}) \right] \tag{18}$$

Step2: 根据优化目标各影响因素的重要程度, 分别赋予目标函数 Z_1 和 Z_2 相应的权重, 将双目标函

数转换为单目标函数。本文是以减少能耗为第一目标, 因此, 将考虑车辆能耗的目标函数 Z_1 的权重取值为 0.6, 将交叉口人均延误 Z_2 权重取值为 0.4。转化后的目标函数为:

$$\min Z = \alpha_1 Q + \alpha_2 F_2 \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_{ij}} (\ln p + \ln d_{ij} + \ln q_{ij} - \ln \phi_{ij}) \right] \quad (19)$$

式中, α_1 为目标函数 Z_1 的权重; α_2 为目标函数 Z_2 的权重。

3. 实例仿真分析

本文仿真实验采用的是 Simulation of Urban Mobility (简称 SUMO) 开源仿真软件。可以对道路交叉口信号配时进行仿真, 在优先信号控制下, 输出评价指标参数, 依据参数输出结果对优化效果进行评价。为了方便对信号输入, 使用 SUMO 的 TraCI (Traffic Control Interface) 接口, 结合 Python 语言进行仿真, 构建出不同的微观交通流仿真模型[12]。

3.1. 仿真对象及数据来源

本章以盐城 SRT 轨道交通 1 号线青年路与希望大道交叉口为研究实例, 分析验证模型的有效性, 该交叉口渠化图如图 3 所示。通过外业调查可知, SRT 有独立公交车道, 青年路与希望大道交叉口采用定周期信号配时方案, 一个周期时长为 180 s, 周期各相位信号配时方案如图 4 所示。本文假设高峰小时期间平均一辆 SRT 车辆有 50 位乘客, 平均一辆社会车辆有 2 位乘客, SRT 车辆和社会车辆的平均行驶速度均为 40 km/h, 交叉口最大安全速度为 60 km/h。本文选取高峰时刻 8:00 至 9:00 一个小时的交叉口交通数据, 数据为外业实地调查获得, 采用人工计数法, 具体数据如表 1 所示。

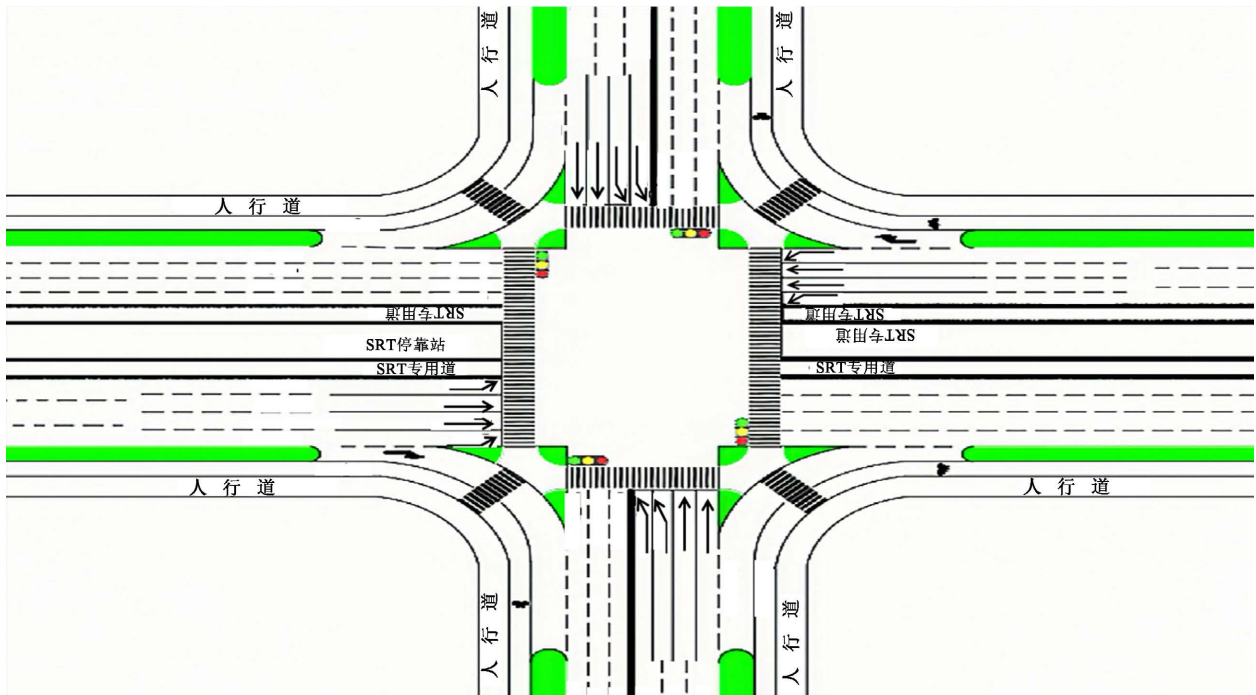


Figure 3. Channelization diagram of the intersection of Qingnian Road and Hope Avenue
图 3. 青年路与希望大道交叉口渠化图

3.2. 仿真平台的搭建

首先在 SUMO 仿真软件中构建路网模型, 对道路交叉口各参数进行设定在 Python 环境下对 SRT 信

号优先优化模型进行仿真验证。使用 OpenStreetMap 获取青年路与希望大道交叉口路网信息, 在 SUMO 中导入路网模型如图 5 所示。

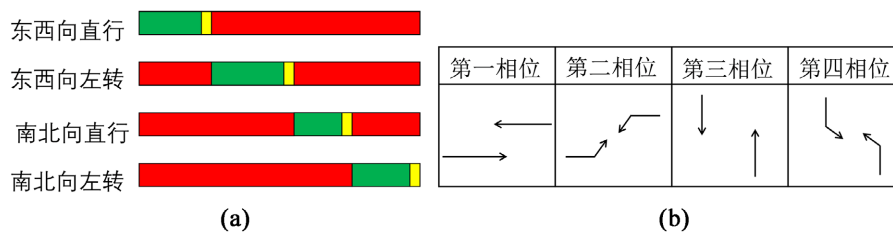


Figure 4. Signal Timing Plan for the Intersection of Qingnian Road and Hope Avenue. (a) Intersection signal timing diagram; (b) Intersection signal phase diagram

图 4. 青年路与希望大道交叉口信号配时方案。(a) 交叉口信号配时图; (b) 交叉口信号相位图

Table 1. Traffic volume statistics at the intersection of Qingnian Road and Hope Avenue

表 1. 青年路与希望大道交叉口交通量统计表

进口道方向	行驶方向	车道数	社会车辆数	SRT 车辆数
东进口	左转	2	434	0
	直行	2	453	2
	右转	1	102	0
西进口	左转	2	328	0
	直行	2	450	2
	右转	1	112	0
南进口	左转	2	316	0
	直行	2	203	
	右转	1	99	
北进口	左转	1	123	0
	直行	3	168	
	右转	1	95	

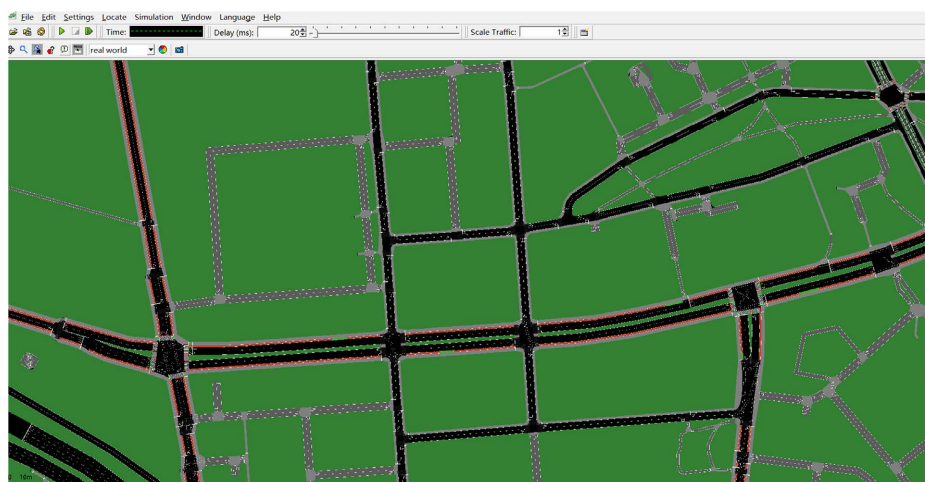


Figure 5. Road network at the intersection of Qingnian Road and Hope Avenue

图 5. 青年路与希望大道交叉口路网图

将上文收集的交叉口信号配时方案和各车道交通量输入仿真软件,东西向直行相位绿灯时长为 48 秒,车辆数为 1003 辆;东西向左转绿灯相位为 62 秒,车辆数为 862 辆;南北向直行绿灯相位时间为 28 秒,车辆数为 371 辆;南北向左转绿灯相位时间为 30 秒,车辆数为 439 辆。相位间所有黄灯时长为 3 秒。因为 SRT 车辆信号优先控制是通过控制交叉口中信号配时参数和 SRT 车辆速度,从而实现对 SRT 车辆的控制,所以仿真输入接口有两个,分别是信号配时参数和车辆速度。仿真输出包含三个变量,分别是 SRT 车均延误、社会车辆车均延误和燃油消耗。

3.3. 仿真参数标定

对交叉口现有信号配时方案进行仿真实验,保证仿真结果与实际计算结果相符,需要标定一些仿真参数,本文标定的参数如表 2 所示。

Table 2. Simulation Parameters Table

表 2. 仿真参数表

参数名称	取值
SRT 车辆加速最大加速度(m/s ²)	1.0
SRT 车辆减速最大减速度(m/s ²)	1.5
社会车辆加速最大加速度(m/s ²)	3.0
社会车辆减速最大减速度(m/s ²)	4.0
车辆最大行驶速度(km/h)	40
普通车辆加速能耗(ml/s)	1.07
普通车辆减速能耗(ml/s)	0.84
普通车辆怠速能耗(ml/s)	0.25
直行车道饱和流率(pcu/h)	1350
左转车道饱和流率(pcu/h)	1200
直右车道饱和流率(pcu/h)	1300
直行车道饱和车头时距(s)	2.5
左转车道饱和车头时距(s)	3.0
仿真步长(s)	1

3.4. 仿真方案设计和结果分析

选取基础模型、FIFS 模型和本文提出的优先模型,分别基于这三种模型设计仿真方案,设置仿真时长为 600 s、1200 s 和 1800 s,在 SUMO 中进行仿真,对于输出的仿真评价参数进行对比分析。

方案一:使用基础模型控制方案。即无信号优先控制,采用现有固定的信号配时。SRT 车辆速度取 40 km/h, SRT 车辆加速度取 1.0 m/s², SRT 车辆减速度取 2.0 m/s², 社会车辆加速度取 3.0 m/s², 社会车辆减速度取 4.0 m/s², 社会车辆加速能耗取 1.07 ml/s, 减速度取 0.84 ml/s, SRT 能耗取社会车辆的 4 倍, 仿真时段为高峰时段, 车道为饱和状态, 单位黄灯时间为 3 s, 其余参数如表 2 所示。交叉口的信号相位无优化, 信号配时方案固定不变, 取交叉口现状的信号配时方案。设置仿真时长分别为 600 s、1200 s 和 1800 s, 输出仿真参数在不同仿真时长下的变化图如图 6 所示。

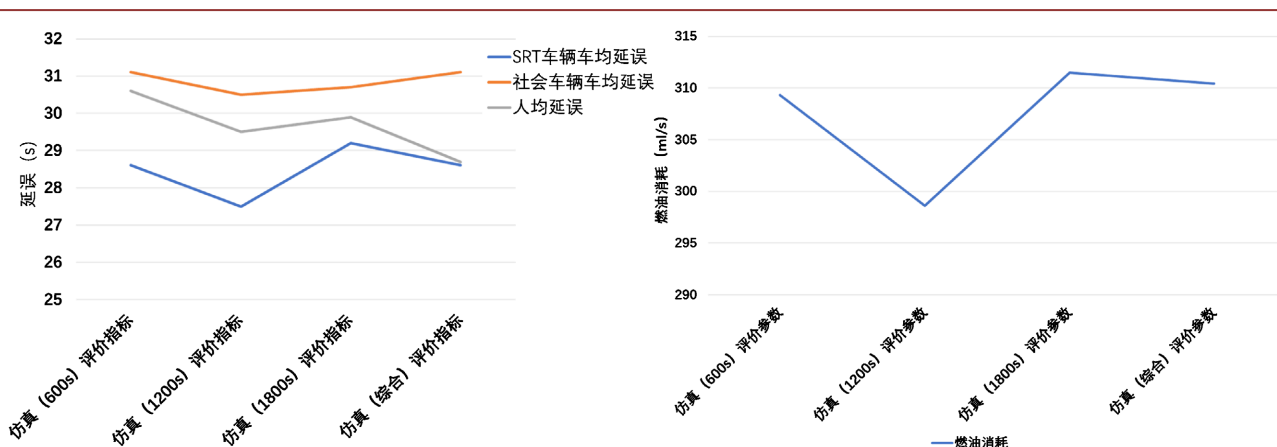


Figure 6. Changes in evaluation parameters of Scheme 1 under different simulation durations
图 6. 方案一的评价参数在不同仿真时长变化图

在交通流参数不变的情况下, 采用基础模型控制方案时, 就是按照现有的交叉口信号配时方案, 但是对 SRT 车辆进行车速诱导。从图 6 的仿真评价参数可以看出, 交通量不变的情况下, 采用基础模型比现有的固定信号配时方案, 交叉口的人均延误是下降了 1.9 s, 降低了 6%。

方案二: 使用 FIFS 模型控制方案。即有且只考虑一个优先目标车辆模型, 采用 FIFS 模型控制策略进行公交信号优先仿真。该模型在第一次收到公交信号优先请求后, 忽视后面公交优先车辆发出的请求, 不考虑相位调整对后续车辆和非优先相位车辆的影响。车辆行驶速度取 40 km/h, SRT 车辆加速度取 1.0 m/s², SRT 车辆减速度取 2.0 m/s², 社会车辆加速度取 3.0 m/s², 社会车辆减速度取 4.0 m/s², 社会车辆加速能耗取 1.07 ml/s, 减速能耗取 0.84 ml/s, SRT 能耗取社会车辆的 4 倍, 仿真时段为高峰时段, 车道为饱和状态, 单位黄灯时间为 3 s, 其余参数如表 2 所示。交叉口的信号配时方案适应交叉口 SRT 车辆的到达, 对 SRT 车辆采取信号优先控制, 不考虑非优先相位社会车辆延误变化, 设置仿真时长为 600 s、1200 s 和 1800 s, 输出仿真参数在不同仿真时长下的变化图如图 7 所示。

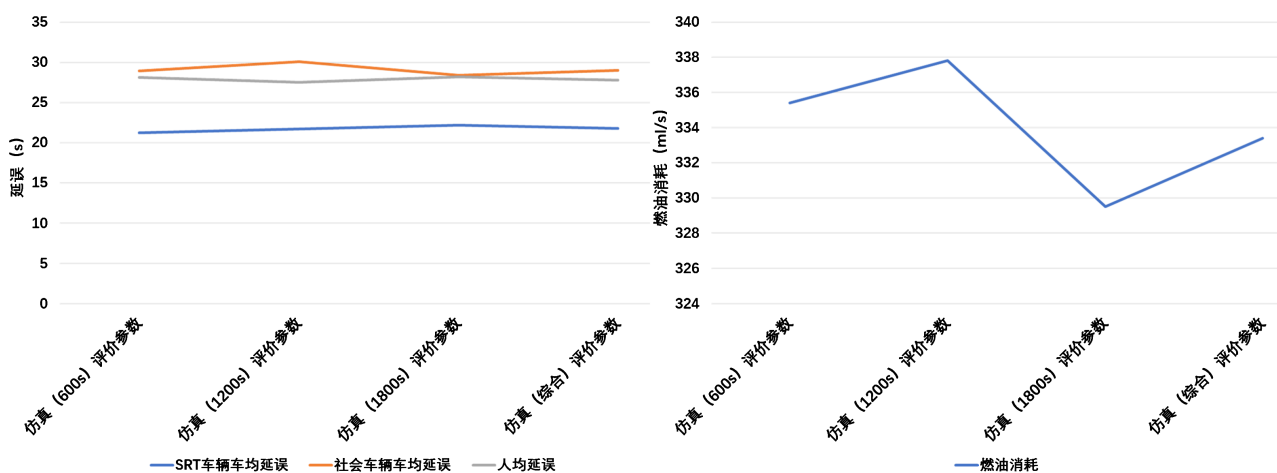


Figure 7. Changes in evaluation parameters of Scheme 2 under different simulation durations
图 7. 方案二的评价参数在不同仿真时长变化图

由图 7 可知, 在实施 FIFS 模型信号优先控制时, SRT 车辆优先请求得到批准, 继而得出各相位的信号调整方案。当前相位的车辆延误都是减少的, 非当前相位的延误是增加的。与基础模型控制方案相比,

人均延误下降了 2.8 s, 同比下降 9.4%, 车辆能耗减少了 29.9 ml, 同比下降了 8.2%。

方案三: 使用双向优化模型控制方案。即信号优先和速度诱导双向优化模型(以下简称双向优化模型)。车辆输入与上文一致, 车辆行驶速度取 40 km/h, SRT 车辆加速度取 1.0 m/s², SRT 车辆减速度取 2.0 m/s², 社会车辆加速度取 3.0 m/s², 社会车辆减速度取 4.0 m/s², 社会车辆加速能耗取 1.07 ml/s, 减速能耗取 0.84 ml/s, SRT 能耗取社会车辆的 4 倍, 仿真时段为高峰时段, 车道为饱和状态, 单位黄灯时间为 3 s, 其余参数如表 2 所示。根据通行效率判断是否进行车速诱导, 最大诱导车速取 70 km/h, 交叉口的信号配时方案会根据调整车速的 SRT 实时到达进行调整。同时考虑非优先相位社会车辆延误增加。设置仿真时长为 600 s、1200 s 和 1800 s, 输出仿真参数在不同仿真时长下的变化图如图 8 所示。

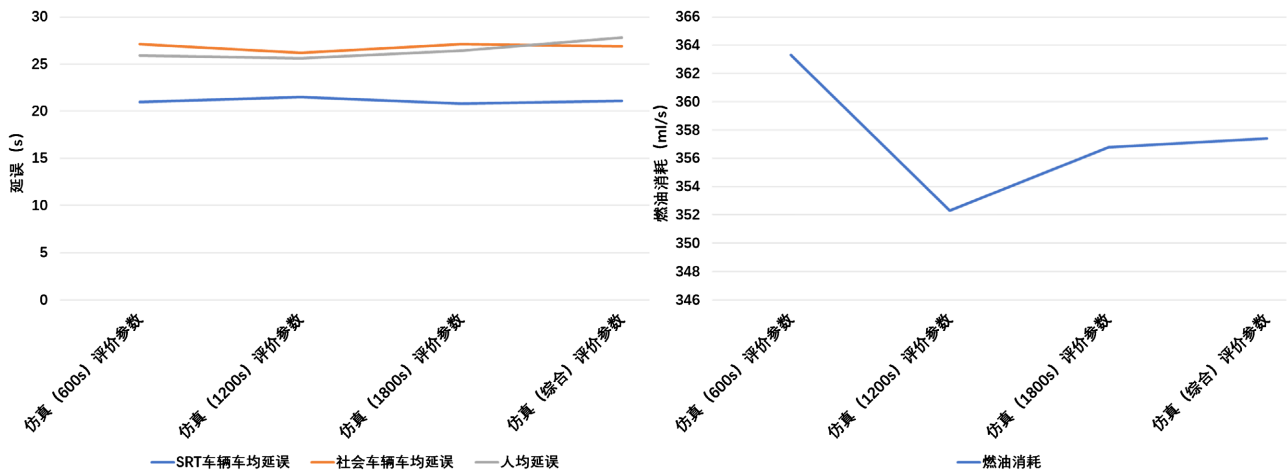


Figure 8. Changes in evaluation parameters of Scheme 3 under different simulation durations
图 8. 方案三的评价参数在不同仿真时长变化图

从图 8 可知, 在实施双向模型信号优先控制方案时, 与 FIFS 模型控制方案相比, 人均延误下降了 2.3 s, 同比下降 8.3%, 车辆能耗减少了 23.0ml, 同比下降了 6.9%。

为了突出本文提出的双向优化模型的优越性, 分别与方案一的基础模型控制方案和方案二的 FIFS 模型控制方案的仿真评价参数进行对比分析, 具体数据如表 3 所示。

Table 3. Comparison of Simulation Evaluation Parameters for Three Schemes
表 3. 三种方案仿真评价参数对比表

	方案一	方案二	方案三	与方案一对比	与方案二对比
SRT 车均延误	28.6 s	21.8 s	21.1 s	26.4%	3.1%
社会车辆均延误	31.1 s	28.9 s	26.9 s	13.5%	6.9%
人均延误	30.6 s	27.8 s	25.5 s	16.7%	8.2%
燃油消耗	363.3 ml	333.4 ml	310.4 ml	14.6%	6.8%

从实验结果可知, 双向优化模型控制策略在人均延误方面比基础模型控制策略和 FIFS 控制策略呈下降趋势, 分别减少了 5.1 s、2.3 s, 同比下降了 16.7%和 8.2%。因此, 选用双向优化模型能够提高交叉口的人均通行效率。双向优化模型的另一个优化指标便是车辆的能耗损失, 双向优化模型在燃油消耗方面比起基础模型和 FIFS 模型降低不少, 分别降低了 52.9 ml 和 23 ml, 比例上分别下降了 14.6%和 6.8%。

在环保节能和节约成本上表现出优越的收益。由此可见,双向优化模型在提升交叉口通行效率的基础上,呈现出良好的经济效益。

为了验证信号优先模型所求解的准确性,将实例分析输出的延误时间与用动态分布算法求解的结果进行对比,如表4所示,得出实例分析得出的数据在动态分布算法求解结果误差范围内。所以,认定本文建立的优先控制模型是可靠的,输出结果是准确的。

Table 4. Comparative analysis results

表 4. 对比分析结果

	人均延误/s	燃油消耗/ml
仿真输出	25.5	310.4
动态分布	25.9	321.2

4. 结论

在车路协同环境下,研究 SRT 信号优先问题,得出结论如下:

(1) 现有的信号控制策略,主要依靠调整交叉口信号配时方案,对车辆控制较少。在车路协同环境下,对 SRT 车速和交叉口信号配时双向优化控制是可行的。

(2) 研究绿灯延长和红灯缩短控制策略下的各相位延误变化、车辆在交叉口范围内燃油消耗变化。选取人均延误最小和能耗最小为目标函数,建立基于混合整数非线性规划的 SRT 公交信号优先控制模型。提出必要的限制条件对 SRT 信号优先模型进行约束,对混合整数非线性模型进行二次优化,将其转化为了线性单目标模型,降低模型复杂性。

(3) 选取盐城市 SRT1 号线的青年路与希望大道交叉口为仿真案例,使用 SUMO 仿真软件选取了其两种优化控制模型,设计基于三种模型的仿真方案,进行仿真分析,仿真结果在同等数据下采用动态分布算法求解结果的误差范围内,因此本文模型是可行且有效的。

参考文献

- [1] Naumann, R., Rasche, R. and Tacke, J. (1998) Managing autonomous Vehicles At intersections. *Intelligent Systems and their Applications*, **13**, 82-86. <https://doi.org/10.1109/5254.683216>
- [2] Dresner, K. and Stone, P. (2005) Multiagent Traffic Management: An Improved Intersection Control Mechanism. *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Amsterdam, 25-29 July 2005, 471-477. <https://doi.org/10.1145/1082473.1082545>
- [3] Mohammad, N. and Hossein, P. (2009) The Effect of VII Market Penetration on Safety and Efficiency of Transportation Networks. *Proceedings of International Conference on Communications Workshops*, Dresden, 14-18 June 2009, 1-5. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5208069>
- [4] Yang, X., Wang, Y. and Yin, W. (2014) Using CVIS to Process the Concurrent Signal Priority Requirements: A Cooperative Optimization Model and Its Hardware-in-the-Loop Field Tests. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, 8-11 October 2014, 6-10. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957657>
- [5] Gartner, N.H. (1983) OPAC: A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control. *Transportation Research Record*, No. 906, 75-84.
- [6] 李鹏凯, 吴伟, 杜荣华, 杨应科. 车路协同环境下多车协同车速引导建模与仿真[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(2): 134-139+148.
- [7] 杨晓光, 林瑜, 杭明升. 信号控制交叉口公共汽车优先信号确定方法研究[J]. 中国公路学报, 2001(S1): 103-106+110.
- [8] 蒋贤才, 张龙洋, 高苏. 考虑车速诱导及车辆到达特征的交叉口信号优化控制方法[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(6): 1-8.

- [9] 吕少文, 杨立越, 金南旭, 郑春花. 智能交通环境下车辆群体速度优化控制方法研究[J]. 集成技术, 2020, 9(5): 15-26.
- [10] 韩飒. 考虑燃油消耗和排放的交叉口汽车路径规划与控制模型[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 98-104.
- [11] 姜慧夫. 网联自动驾驶环境下信号交叉口环保驾驶控制研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [12] 张腾, 黄敏, 张汉林. 精细化交叉口数据模型的建模方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1086-1089.
<https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2018.09.0763>