

信号交叉口动态直右车道相位转变清空车道控制方法研究

黄子芸, 张熠南, 龙睿*, 何文禹舜, 梁士栋

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年8月5日; 录用日期: 2024年9月2日; 发布日期: 2024年9月9日

摘要

动态车道可以很好地解决交通上时空分配不均的问题, 以减少交通拥堵, 提高交叉口通行效率和时空资源利用率。但在动态车道相位转变时存在有一部分车辆还未驶离车道的情况, 会对下一相位行驶的车辆造成延误。本文以动态直右车道车辆延误最小为目标, 研究主、预信号同相位启亮时间差对车辆延误的影响, 考虑道路状况、车流量、车速、车辆选择等因素, 建立动态直右车道与主预交通信号协同优化模型。通过多个算例计算, 以验证模型的合理性。最终可根据实时交通需求情况生成动态车道的信号优化方案。借助SUMO对优化方案进行仿真验证, 将本文优化方法与定时信号配时方法在相同的假设条件下进行对比, 实验结果表明, 本文模型能更好地降低交叉口平均延误, 实现时空利用率最大化。

关键词

直右动态车道, 信号控制, 延误, 信号交叉口

Study of Signal Control Methods for Dynamic Straight Right Lane Phase Transition Clearing Lanes at Signalized Intersections

Ziyun Huang, Yanan Zhang, Rui Long*, Wenyushun He, Shidong Liang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 5th, 2024; accepted: Sep. 2nd, 2024; published: Sep. 9th, 2024

Abstract

Dynamic lanes can effectively address the issue of uneven spatial and temporal distribution in

*通讯作者。

文章引用: 黄子芸, 张熠南, 龙睿, 何文禹舜, 梁士栋. 信号交叉口动态直右车道相位转变清空车道控制方法研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5202-5214. DOI: 10.12677/mos.2024.135471

traffic, thereby reducing congestion and improving the efficiency of intersections and the utilization of spatial and temporal resources. However, during phase transitions of dynamic lanes, some vehicles may not have cleared the lane, causing delays for vehicles in the subsequent phase. This paper aims to minimize the delay of vehicles on straight-right dynamic lanes by studying the impact of the time difference between the main and pre-signal phase activation on vehicle delay. Considering factors such as road conditions, traffic flow, vehicle speed, and vehicle selection, a collaborative optimization model of straight-right dynamic lanes and main-pre-signal coordination is established. Several case studies are calculated to verify the rationality of the model. Based on real-time traffic demand, a signal optimization scheme for dynamic lanes can be generated. Simulation verification using SUMO is conducted to compare the proposed optimization method with the fixed-time signal timing method under the same assumptions. The experimental results indicate that the proposed model can better reduce average intersection delays and maximize spatial and temporal utilization.

Keywords

Straight-Right Dynamic Lane, Signal Control, Delay, Signalized Intersection

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

随着城市化进程的加速和机动车数量的快速增长，交通拥堵已经成为不可忽视的社会问题。在努力寻找解决方案以提高道路容量和减少交通拥堵的过程中，可变车道、动态车道的设计提供了很好的思路。这种交通管理策略通过在高峰时段将一条或多条车道的行车方向进行改变，以适应交通流量的变化，为城市交通拥堵问题提供了新的解决途径。李璐[1]提出面向网络韧性提升的城市路网可变车道设计方法，验证了可变车道数目设计模型对于路网韧性提升的可行性和有效性，为降低突发扰动对城市道路网络的负面影响提供了新的解决方案。梁士栋等[2]人提出的对直右动态车道的优化设计，可以降低进口道以及整个交叉口的车均延误。

在研究动态车道管理方面，Dhouib 等人[3]专注于无人驾驶车辆环境中的动态车道分配，他们使用了混合整数线性规划模型，该模型证明了动态车道分配能够有效改善道路交通效率。另一个相关研究由 Li 等人[4]提出，他们考虑了收费站的堵塞问题，并制定了一个动态车道优化模型来处理这个问题。而 Chen 等人[5]研究了在单点交叉口中如何进行预信号配时优化，他们特别注意到各种转弯机动的影响。赵晨[6]对不同车道渠化条件下的预信号控制方法进行研究，通过分析不同车道渠化方式下的主、预信号处的到达与离开过程建立车辆延误模型。黄德青[7]针对列车群系统在扰动情况下的延误问题，以加权平均延迟期望时间的最小化为目标，在总冗余时间一定的情况下，通过数学分析提出一种多车站延误情况下冗余时间再分配模型。杨林玉[8]对第一辆车到达时间特征展开分析，拟合了第一辆车到达时间的分布。分析该特征并拟合其分布。利用正交试验法和 VISSIM 软件仿真，全面分析了影响首车到达时间的各因素，其影响程度由大到小依次为：饱和度、车辆到达类型、绿信比、饱和流量、大车率、交叉口间距。在以降低车辆延误为目标的研究中，Wang 等人[9]开发了一个交叉口动态信号配时模型，该模型致力于最小化车辆延误。Yang 等人[10]提出了一个网络信号控制模型，这个模型的目标是减少交通拥塞和次优解，从而最终达到降低车辆延误的目标。

在使用 SUMO 进行仿真模拟的研究中，Kayikci 等人[11]使用 SUMO 来模拟他们提出的交通流量优

化算法的效果。此外,还有一些相关研究可以作为参考。比如,Hao 等人[12]通过分析驾驶者的行为模式来预测其车辆的交通状态。另外,林志伟等人[13]提出基于线性规划的城市交通路口车流量调度模型对交通路口车流量进行优化调度,有效地提升了城市交通的管理质量。

梁士栋等[14]提出的直右动态车道固然可以减小车辆的延误,但在信号协同控制方面仍存在右转车辆延误的问题,本文在直右动态车道设置的基础上,通过建立直右动态车道与主预交通信号协同优化模型,得出最优的直右动态车道主、预信号灯之间红灯启亮时间差,即相位转变时间差,使得所有在直右动态车道上的直行车辆能够在主信号灯红灯启亮前全部驶离。本文的结果将有助于优化动态直右车道的信号控制策略,提高交通效率与车道利用率,减少通勤时间,从而改善城市的交通问题。

基于 NMPC 的二维轨迹规划控制模型:为适应交叉口环境的二维环境,本文提出的方法同时控制车辆的制动与转向,建立了基于非线性模型预测控制(NMPC)的二维轨迹规划控制模型。首先将车辆与期望终点的最小距离定义为目标函数,再建立车辆动力学模型,又依据行驶安全性、交叉口几何设计、道路交通规则、乘坐舒适度等要求,给出模型约束,最终运用 python 编写算法对模型进行求解。

2. 建立模型

2.1. 车道介绍

动态直右车道控制设计通过对交叉口时间和空间的重新设计,进一步开发了交叉口的时空资源。该设计将入口分为直通车道(STL)、右转弯车道(RTL)和右转弯车道(DSRL)三个部分(见图 1),并使用一个信号在时间和空间上区分直右车道上的直行和右转弯车辆。因此,直行交通和右转交通不会相互影响。该方法利用 RTL 中多余的时空资源,缓解了 STL 的交通压力,提高了交叉口通行能力。DSRL 设计利用检测器数据,可以及时调整控制策略。

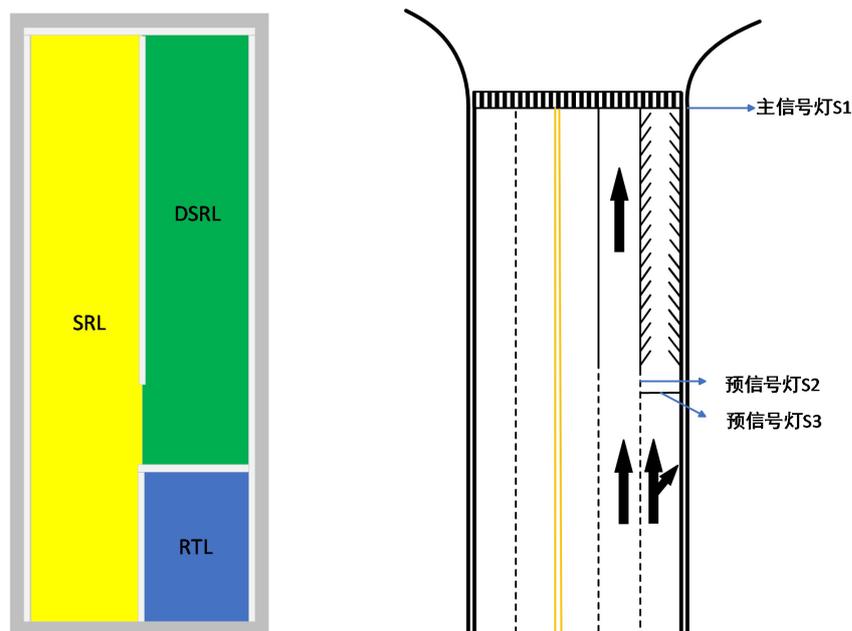


Figure 1. The schematic diagram of the dynamic right turn lane
图 1. 动态直右车道示意图

DSRL 设计的优点是:(1) 红灯时不限制右转交通,绿灯时不浪费车道资源;(2) DSRL 的变化不再以

特定时段为基础,而是与交通流量挂钩,根据交通流量情况调整 DSRL 的功能;(3) 直通车线的设计允许全天候运行,确保直通车线内的右转车辆在任何时候都不会被直通车车辆打断,造成不必要的停车。

通过设置动态直右车道来提高交叉口的时空利用率,该车道将交叉口入口分为三个不同的部分: DSRL、STL 和 RTL;在图 1 中,主信号为 S1,该信号控制交叉口车辆的进出。S2 信号为 DSRL 开口处的信号,位于 DSRL 上游的开口处,控制直通车车辆进入 DSRL。S3 号信号是 RTL 上的信号,位于 RTL 的停止线上,控制右转车辆进入 DSRL。

区别于传统直右共用车道,动态直右车道突出预信号理念,将可变信息显示板及提前变道标志线设置在距离车道交叉口的一个位置,并与主信号协调联动,对交通流进行控制,这种控制模式不仅能减少右转车辆的延误,同时也提高了交叉口的通行能力。

2.2. 存在问题

由于在车道设计时的假设条件较为理想,在现实中如果在动态直右车道相位变换时,有部分直行车由于车速慢等原因来不及驶出动态车道,那么在红灯期间会造成右转车延误的情况。所以仍需要在副信号控制方面对其进行优化,以达到在主信号红灯启亮前直右动态车道上的直行车辆全部清空——最后一辆在直右动态车道上的直行车驶出车道的效果。

本文是对动态直右车道信号配时的研究,在动态直右车道的实施中,主信号灯和副信号灯的协调运作起着至关重要的作用。其中,主信号灯 S1 和副信号灯 S2 之间的红灯时间差值 Δt 对于车辆通行的影响至关重要。 Δt 取值的不恰当会导致车道上车辆的延误,如 Δt 取值过大,从直行车道进入动态直右车道上的车辆数量过多,直行车辆排队过长则无法全部驶离,排队在后的右转车辆也无法正常通行;若 Δt 的取值过小,直行车辆的通行效率可以提高,但在信号周期中留给右转车辆的可通行时间将会减少,会导致右转车辆无法全部通过,需要等待下一个周期,不利于提高车道的通行效率。

因此,为了得到动态直右车道主信号灯与副信号灯的最佳红灯时间差 Δt ,保证路口通行效率高,本文以当车辆由动态直右车道通过路口最小延误为目标求出 Δt 。本论文的目标是构建 Δt 和车辆延误期望之间的关系模型,以研究在何种 Δt 值下车辆延误期望能够最小化,并期望得到适于不同信号时长与交通流状况的通用模型。

2.3. 约束条件

为符合实际,应根据交通规则、行车规范、车辆行驶特性与构建模型约束,即模型基于以下假设:

- (1) 假设本研究中的车辆统一为标准小汽车,且驾驶员遵守交通规则,行为与设定一致。
- (2) 进口道的预信号通行能力不小于交通需求,主信号通信能力不小于预信号通行能力。
- (3) 我们规定车辆以相同的车头时距到达,即服从泊松分布到达规律。
- (4) 在车辆行驶过程中,不考虑加减速情况,设定在行驶过程中速度不变,速度分布满足正态分布。
- (5) 在设定条件下,交通流的到达与离散是完全统一的。
- (6) 预信号提前启亮期间,动态待行车道内车辆不会排队溢出。
- (7) 右转车辆不受主、预信号的控制,不考虑右转车辆的延误。
- (8) 道路行驶条件良好,不受天气,设施等条件的影响。

2.4. 参数说明

参数	含义
$E_{(rd)}$	车辆延误期望

续表

$f(ax)$	某车辆为副信号灯变红前最后进入动态直右车道的车辆的概率
ht	副信号灯绿灯时间
v_{Cx}	车辆在副信号灯变红前一刻进入动态直右车道, 刚好在主信号灯变红前一刻越过停车线的速度
D	延误常数
L	动态直右车道长度
λ	单位时间内车辆到达的次数
μ	该道路车辆速度平均值
σ	该道路车辆速度标准差
P_1	目标车辆为最后一辆车的概率
P_2	车辆由直行道变道至直右车道概率

2.5. 设计思路

梁等人[2]提出的一种新的交叉口控制策略, 通过信号 S1、S2、S3 的不同组合来实现, 典型案例如下:

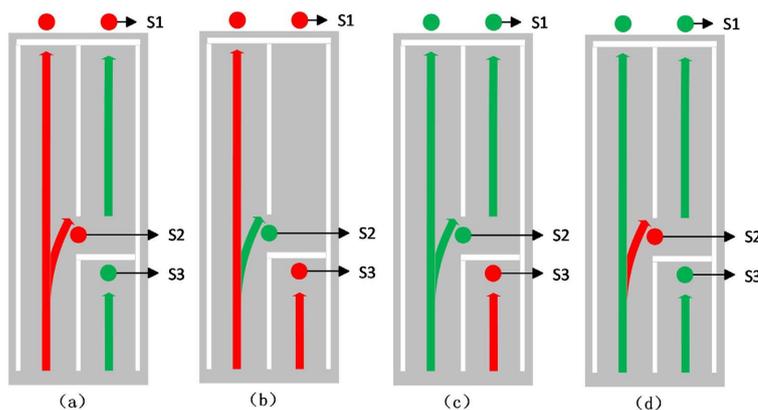


Figure 2. Signal phase diagram
图 2. 信号相位图

阶段 1: S1、S2 红灯, S3 绿灯, 直行车在 STL 排队, 右转车驶入 DSRL [图 2(a)]。

阶段 2: S1、S3 红灯, S2 绿灯, 直行车提前驶入禁行区, 右转车禁行区排队[图 2(b)]。

阶段 3: S1、S2 绿灯, S3 红灯, 直行车利用 DSRL 和 STL 通过交叉口, 右转车仍排队于 RTL [图 2(c)]。

阶段 4: S1、S3 绿灯, S2 红灯, 直行车禁止进入 DSRL, 右转车驶入 DSRL 并通过交叉口[图 2(d)]。

通过这种信号控制策略的设计, 能够有效地管理交叉口交通流, 提升交通效率。

本文主要研究的是车辆发生延误的概率期望, 研究发现, 在主信号灯变红前最后进入动态直右车道的直行车辆未能驶出车道, 则会导致后面等待的右转车辆无法正常通行, 即发生了延误。

3. 车速不确定条件下的延误计算模型

3.1. 动态车道直行车辆到达过程描述

设定车辆以车头时距到达为:

$$f1 = \frac{1}{h_i} \tag{1}$$

并服从泊松分布，故引入

$$f_2 = P(n = k) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^k}{k!} \tag{2}$$

考虑到并不是所有行驶在直行车道上的车辆都会选择换道至动态车道，故将驾驶员的换道选择概率加以考虑。经由文献查阅，换道概率选定范围为(0.6~0.8)，有： $f_3 = p_2$ ， p_2 属于(0.6~0.8)。

最后得式子：

$$f(ax) = \frac{1}{h_i} \cdot P_1(n > 0) \cdot P_1(n = 0) \cdot P_2 \tag{3}$$

$$P(n = k) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^k}{k!} \tag{4}$$

(3)式意为当该车道上有车辆且该车辆后面没有车辆的概率乘以换道选择概率。

3.2. 车辆行驶速度分布

由于车道上的行车速度与车道等级与交通流有关，并且影响着单位时间内可通过的车辆数，故将行车速度也纳入考虑。规定车辆速度服从正态分布，其中针对不同的信号时长与主预信号时间差存在会致使直行车辆无法及时通过交叉口的极限速度 v_{cx} 。当车辆低于此速度，则无法通过，产生延误(见图 3)。

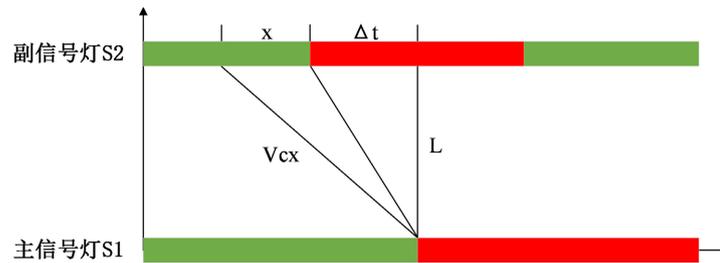


Figure 3. The relationship between signal timing diagrams and various parameters
图 3. 信号配时图与各参数关系

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{5}$$

$$v_{cx} = \frac{L}{x + \Delta t} \tag{6}$$

忽略黄灯相位，记交叉口信号周期为 c ，红灯相位时长为 r ，绿灯相位时长为 g ，头车损失时间为 a ，小时交通量为 q ，车辆饱和流率为 p ，存在延误的车辆数为 n 。

3.3. 车辆延误期望

考虑小时交通量为 q ，假定车辆到达均匀，则车辆平均到达间隔为 $1/q$ ，如果红灯相位不起作用，则第一辆停车的车辆将在红灯启亮后在 $[0, 1q]$ 之间的任何时段驶过停车线。假定车辆在红灯启亮后以 $1/2q$ 间隔驶出交叉口，则可得到头车的延误大小：

$$d = \gamma + \alpha - \frac{1}{2q} \tag{7}$$

对于后续延误车辆而言，其到达时间较前车晚 $1q$ ，车辆以饱和流率 p 均匀驶出停车线，则离去时间

较前车晚 $1p$ ，所以后续车辆延误实际为一个等差数列，其表达式为：

$$d_i = d_{i-1} - \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right) \geq 2 \quad (8)$$

由(6)式可知，后车延误较前车少 $\left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right)$ ，若大于上限的话就不是最后一辆延误车，则最后一辆车延误值应在 $\left[0, \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right) \right]$ 之间，假设最后一辆车延误值为 $\frac{1}{2} \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right)$ 。则第一辆车的延误也可表示为：

$$d = \frac{2n-1}{2} \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right) \quad (9)$$

合并(7) (9)，有：

$$n = \frac{r + \alpha - \frac{1}{2p}}{\left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right)} \quad (10)$$

由等差数列求和公式，可得到总延误值为：

$$Dn = \frac{n(d + d_n)}{2} = \frac{\left(r + \alpha - \frac{1}{2p} \right)^2}{2 \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{p} \right)} \quad (11)$$

考虑信号周期为 c ，则信号周期内通过车辆数为 qc ，则所有车辆平均延误为：

$$\overline{Dn} = \frac{\left(r + \alpha - \frac{1}{2p} \right)^2}{2c \left(1 - \frac{q}{p} \right)} \quad (12)$$

3.4. 目标函数模型

综上，将影响变量带入目标函数，最终函数模型为：

$$E_{(td)} = \int_0^{ht} f(ax) f(v < v_{cx}) \cdot \overline{Dn} \cdot dt \quad (13)$$

4. 实验设计

为了验证 Δt 与车辆延误期望之间的关系，本文采用设计求解方法，通过计算 Δt 与车辆延误期望的关系，验证模型是否正确。根据道路等级的不同设定车道的相关参数，包括车道长度(L)、单位时间内车辆到达的次数(λ)、车辆速度平均值(μ)、车辆速度标准差(σ)等。建立延误模型，考虑车辆到达率、绿灯时间、车辆平均速度等因素。

使用设计求解方法计算 Δt 与车辆延误期望的关系。这可以通过调整 Δt 值，利用模型计算对应 Δt 下的车辆延误期望，得到 Δt 与车辆延误期望之间的曲线关系。

4.1. 算例分析

为了进一步得到模型对于情景设置的实用性，我们通过具体设定直行车辆到达率，车道车辆的平均

速度, 速度偏差, 主信号灯与预信号灯的信号时长等影响因素的变量取值得到不同条件下的拟最优信号差, 并对数据结果进行分析比较。

4.1.1. 初始算例数据

算例设定预信号灯给直行车辆提供的绿灯时间为 30 s 至 60 s, 主信号灯采用中大型交叉口的常用绿灯信号时长范围[60, 110]的区间值 70 s, 规定延误常数为定值 20, 速度偏差范围为 10~15 km/h, 查阅资料车辆行车速度均值取定一般小汽车速度范围(6 m/s~10 m/s):

由上述数据标准取值区间进行数据的变动, 通过编程进行算例示范(见表 1~表 4)。

Table 1. Data output results for varying vehicle arrival rate

表 1. 到达率变化结果数据

h	λ	μ	σ	t	到达率/ Arrival Frequency	Δt
30	0.5	10	8	70	0.3	8.88404
30	0.5	10	8	70	0.35	8.24307
30	0.5	10	8	70	0.4	7.86367
30	0.5	10	8	70	0.45	7.6414
30	0.5	10	8	70	0.5	5.65366
30	0.5	10	8	70	0.55	5.56249
30	0.5	10	8	70	0.6	5.48664
30	0.5	10	8	70	0.65	5.34394
30	0.5	10	8	70	0.7	5.20634
30	0.5	10	8	70	0.75	5.0808
30	0.5	10	8	70	0.8	4.96486
30	0.5	10	8	70	0.85	4.85685
30	0.5	10	8	70	0.9	4.75596

Table 2. Data output results under different green signal duration

表 2. 绿灯时长变化结果数据

h	λ	μ	σ	t	到达率/ Arrival Frequency	Δt
20	0.5	10	8	70	0.6	25.4117
25	0.5	10	8	70	0.6	20.06284
30	0.5	10	8	70	0.6	19.52601
35	0.5	10	8	70	0.6	18.82532
40	0.5	10	8	70	0.6	18.27518
45	0.5	10	8	70	0.6	17.82722
50	0.5	10	8	70	0.6	17.3387
55	0.5	10	8	70	0.6	16.56952
60	0.5	10	8	70	0.6	15.91545
65	0.5	10	8	70	0.6	15.35355
70	0.5	10	8	70	0.6	14.86612

Table 3. Data output results under different average speed

表 3. 速度平均值变化结果数据

h	λ	μ	σ	t	到达率/ Arrival Frequency	Δt
30	0.5	10	8	70	0.6	5.65366
30	0.5	10.5	8	70	0.6	5.61416
30	0.5	11	8	70	0.6	5.5688

续表

30	0.5	11.5	8	70	0.6	5.51902
30	0.5	12	8	70	0.6	5.45556
30	0.5	12.5	8	70	0.6	5.3266
30	0.5	13	8	70	0.6	5.19462
30	0.5	13.5	8	70	0.6	5.06173
30	0.5	14	8	70	0.6	4.93002
30	0.5	14.5	8	70	0.6	4.80082
30	0.5	15	8	70	0.6	4.67563
30	0.5	15.5	8	70	0.6	4.55535

Table 4. Data output results for different speed standard deviations

表 4. 速度标准差变化结果数据

h	λ	μ	σ	t	到达率/ Arrival Frequency	Δt
30	0.5	10	8	70	0.6	5.65366
30	0.5	10	8.5	70	0.6	5.54253
30	0.5	10	9	70	0.6	5.38298
30	0.5	10	9.5	70	0.6	5.16423
30	0.5	10	10	70	0.6	4.97022
30	0.5	10	10.5	70	0.6	4.79911
30	0.5	10	11	70	0.6	4.64905
30	0.5	10	11.5	70	0.6	4.51725
30	0.5	10	12	70	0.6	4.04173
30	0.5	10	12.5	70	0.6	3.71727
30	0.5	10	13	70	0.6	3.60381
30	0.5	10	13.5	70	0.6	3.50407
30	0.5	10	14	70	0.6	3.4162

4.1.2. 参数对比分析

结合上述算例数据，设定在其他参数设置不变的情况下，变动某一参数并对结果进行记录分析发现：预信号灯的绿灯时长对最佳信号时间差的影响如图 4 所示：

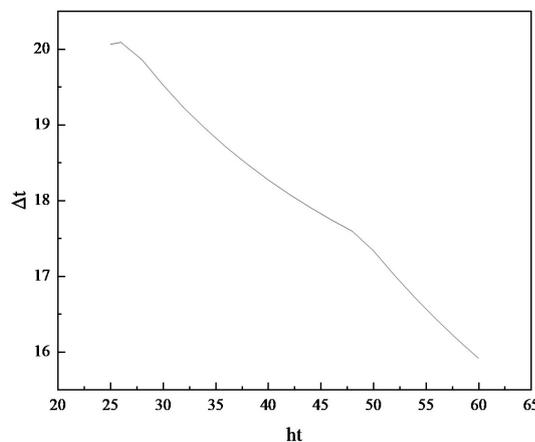


Figure 4. The relationship between the green light duration of a pre-signal and the optimal signal timing offset

图 4. 预信号灯的绿灯时长与最佳信号时间差的关系

如图所示，随着预信号绿灯时长的递增，主信号与预信号之间的时间间隔呈现出递减的趋势。这一现象的产生源于绿灯时长的增加使得更多的直行车辆得以进入动态直右车道。为确保车道的通行效率，需确保直行车辆全部驶离，避免对右转待行车辆造成干扰。因此，主信号需为直行车辆提供更长的绿灯时间，进而使得预信号变红的时间点相应延后。

直行车辆到达率对最佳信号时间差的影响如图 5 所示：

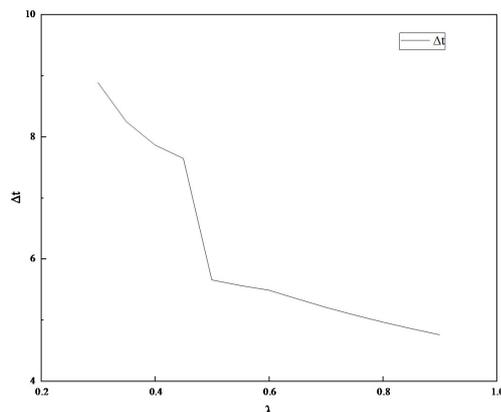


Figure 5. The relationship between the arrival rate of straight-moving vehicles and the optimal signal timing offset

图 5. 直行车辆到达率与最佳信号时间差的关系

在模型设定中，我们假设直行车辆的到达率遵循正态分布规律。在车辆到达率较低时，由于直行车流量显著超过右转车流量，为确保直行车辆的有效通行并提升车道利用率，预信号的绿灯切换时间将相应延后，以便更多直行车辆得以通过。

当车辆到达率过高时，直行车辆数量激增。为维持交叉口的通行效率，我们利用动态车道策略来辅助直行车辆在绿灯期间顺利通过。这一举措旨在减少直行车辆需要等待下一绿灯周期的概率，从而进一步提高车道利用率。因此，在这种情况下，预信号的绿灯切换时间同样会延后，以确保一定数量的直行车辆能够顺利通行。

车道行车平均速度对最佳信号时间差的影响如图 6：

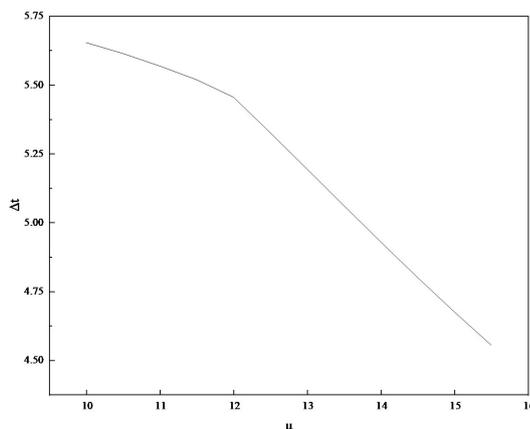


Figure 6. The relationship between the arrival rate of straight-moving vehicles and the optimal signal timing offset

图 6. 车道行车平均速度与最佳信号时间差的关系

图中显示，随着直行车辆平均车速的提升，单位时间内通过的直行车辆数量显著增多。因此，为保证直行车辆的高效通行，提升车道通行效率，并预信号的切换时间将会延后。这一调整旨在使一定量的直行车辆通过后，满足对直行车辆的供给，之后及时释放右转车道，实现交叉口交通流的优化分配。

4.2. 灵敏性分析

为了验证模型是否可行，在实验数据中随机抽取一组对模型的输出进行分析，探讨最优 Δt 值对车辆延误的影响，结果如图 7：

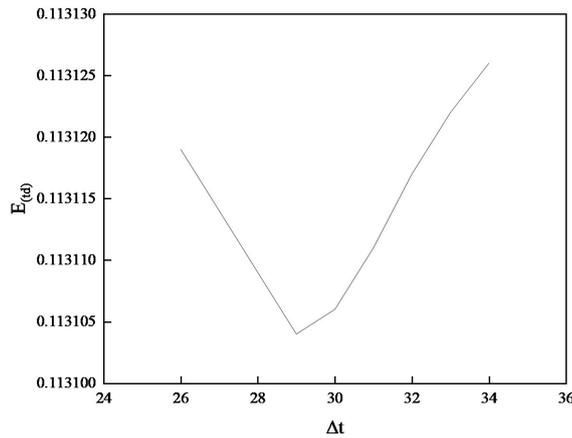


Figure 7. The relationship between the optimal signal timing offset and vehicle delay offset
图 7. 最佳信号时间差与车辆延误的关系

4.3. 仿真实验

为了对算法的有效性进行分析，鉴于实际数据获取的场景较难实现，本文中通过构筑仿真平台对计算结果进行仿真实验。

根据公式算例输入的变量： ht 为 30 s、 λ 为 0.5、 μ 为 8 m/s、 σ 为 10，在到达率变化的情况下，我们使用 SUMO 进行仿真，在运行 3600 s 后得到延误概率最小的 Δt 与模型计算得出的 Δt 进行拟合，结果如图 8 所示：

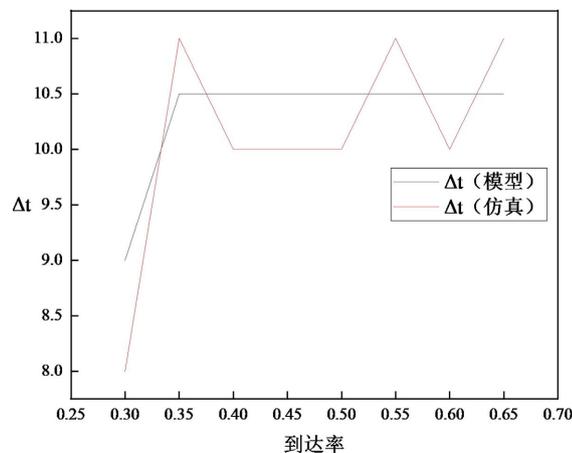


Figure 8. Simulation fitting
图 8. 仿真拟合

可以看出两者的结果基本吻合，平均标准差为 0.41。

同时，我们 Δt 取中间值 10 s 为定时信号配时的方案，在到达率变化的条件下得到的延误结果与 Δt 变化的优化方案得到的延误结果进行比对，结果如图 9：

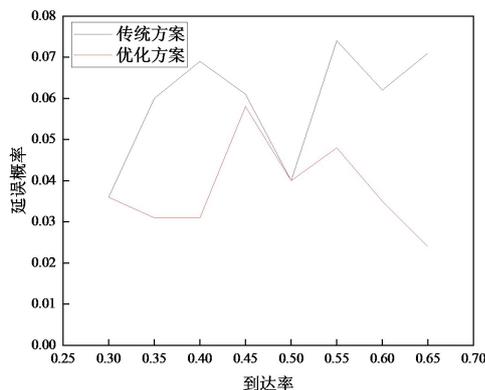


Figure 9. Comparison between optimization scheme and traditional timing plan
图 9. 优化方案与传统配时比较

经过计算，使用 Δt 变化的优化方案将延误概率平均降低了 2.1%，且在车辆到达适中时两配时方案相近。

5. 结论

本文提出的优化模型实现了减小动态直右车道上的车辆延误。通过仿真验证了模型的合理性。根据仿真结果可知，该模型不仅能够精确计算出动态直右车道的信号配时，而且在该信号配时下的车辆延误概率与在传统信号配时下平均降低了 2.1%，有效缓解交叉口拥堵，实现时空资源最大化利用。在实际应用中，该模型具备灵活性和可调整性，可根据实际交通状况的动态变化调整相关参数，使得模型更贴合目标交叉口，确保模型的有效性。

参考文献

- [1] 李璐. 面向网络韧性提升的城市路网可变车道设计方法[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2024.
- [2] 梁士栋, 陈丽娟, 王影, 等. 信号交叉口直右动态车道优化设计及评价分析[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 183-190.
- [3] Dhoub, D., Oyama, A., Rahwan, T. and Dridi, M. (2019) Optimal Lane Change Strategy for Automated Vehicles Considering Driving Behaviors. *International Journal of ITS Research*, **17**, 72-80.
- [4] Li, Y., Xu, C., Chen, F. and Hu, T. (2020) Coordinated Optimization of Signal Timing and Lane Allocation Based on Cell Transmission Model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **110**, 166-189.
- [5] Chen, R., Nie, Y., Li, Q. and Chen, X. (2017) Green Man Optimization for a Single Intersection under Mixed Traffic. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, **143**, 06017012.
- [6] 赵晨, 常玉林, 张鹏, 等. 基于预信号控制的交叉口车辆延误分析[J]. 公路, 2019, 64(6): 136-142.
- [7] 黄德青, 倪陈佳, 秦娜, 等. 考虑最小延误状态的车站冗余时间再分配研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 66-72.
- [8] 杨林玉. 基于第一辆车到达的进口道延误计算方法分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 交通大学, 2019.
- [9] Wang, Y., Yang, X., Liang, H. and Liu, Y. (2018) A Review of the Self-Adaptive Traffic Signal Control System Based on Future Traffic Environment. *Journal of Advanced Transportation*, **2018**, Article ID 1096123. <https://doi.org/10.1155/2018/1096123>

- [10] Yang, H., Yao, E., Xu, Z. and Wu, J. (2017) Network Signal Optimization Considering the Queue Spillover under Saturated Traffic Conditions. *IEEE Access*, **7**, 117135-117145.
- [11] Kayikci, Y., Lafci, B.E. and Kamaçi, H.Z. (2021) A SUMO-Based Traffic Simulation and Optimization in a Smart City Using Artificial-Intelligence-Based Traffic Controllers. *Computers, Environment and Urban Systems*, **89**, 101565.
- [12] Hao, P., Wu, Y., Song, X. and Tan, H. (2016) Investigation of Driving Behaviors and Its Impact on Fuel Consumption Based on Vehicle Trajectories. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, **49**, 111-124.
- [13] 林志伟, 杨新苗. 关于交通路口车流量优化调度仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6): 143-146.
- [14] Liang, S., Chen, L., Wang, Y., Han, Y. and Bo, B. (2022) Optimization Design and Evaluation Analysis of Dynamic Straight-Right Lane at Signalized Intersection. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, **16**, 82-91. <https://doi.org/10.1061/jhtreq.0000814>