

基于信号交叉口动态直右车道的应急物流车辆优先通行优化策略研究

陈 阳, 梁士栋

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月17日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年4月18日

摘 要

在城市交通中, 应急物流车辆的通行效率和响应速度对于紧急情况的处理至关重要。尽管应急车辆享有优先通行权, 但在车道较少的信号交叉口处, 红灯排队的车辆常常无法及时避让应急车辆, 严重影响其通行效率和应急响应速度。针对这一问题, 本文提出了一种融合动态直右车道设计的优化策略, 旨在通过实时调整信号相位, 确保应急物流车辆能够无延迟地通过动态直右车道进入交叉口。该策略深入分析了动态直右车道设计的局限性, 并在此基础上设计了一种实时调整信号相位的方法。具体而言, 本研究明确了基于应急物流车辆预计到达交叉口时间和右转车道消散情况的信号相位动态调整机制, 建立了车辆延误计算模型, 以确保应急物流车辆能够快速通过交叉口。为了验证该策略的可行性和有效性, 采用了理论分析与SUMO仿真验证相结合的方法。通过对比分析优化前后的通行效率, 不仅证实本文提出方法的可行性, 还展示了其在实际交通环境中的良好应用效果。本研究为城市交通管理和应急物流提供了新的理论和实践指导, 有助于提高交通应急响应和通行效率。

关键词

应急物流车辆, 信号交叉口, 可变车道, 控制策略, 车辆延误

Research on Emergency Logistics Vehicle Priority Optimization Strategy Based on Signalized Intersection Dynamic Straight-Right Lane

Yang Chen, Shidong Liang

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

Received: Mar. 17th, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

文章引用: 陈阳, 梁士栋. 基于信号交叉口动态直右车道的应急物流车辆优先通行优化策略研究[J]. 运筹与模糊学, 2025, 15(2): 677-692. DOI: 10.12677/orf.2025.152116

Abstract

In urban traffic systems, the traffic efficiency and response speed of emergency logistics vehicles are crucial for handling emergencies. However, despite emergency vehicles having the right of way, in areas with fewer lanes, vehicles queuing at red lights often fail to yield promptly to emergency vehicles, severely affecting their traffic efficiency and emergency response speed. To address this issue, this paper proposes an optimization strategy that integrates the design of dynamic straight-right lanes, aiming to ensure that emergency logistics vehicles can transition without delay from right-turn lanes to dynamic straight-right lanes for priority passage through real-time signal phase adjustment. The strategy thoroughly analyzes the limitations of dynamic straight-right lane design and, based on this, devises a method for real-time signal phase adjustment. Specifically, this study elaborates on a dynamic signal phase adjustment mechanism based on the expected arrival time of emergency logistics vehicles at intersections and the dissipation conditions of right-turn lanes, ensuring that emergency logistics vehicles can pass through intersections quickly when needed. To verify the feasibility and effectiveness of this strategy, a combination of theoretical analysis and SUMO simulation validation was employed. By comparing the traffic efficiency before and after optimization, this study not only confirms the feasibility of the proposed scheme but also demonstrates its good application effects in real traffic environments. This research provides new theoretical and practical references for urban traffic management and the field of emergency logistics, helping to enhance the emergency response capabilities and overall traffic efficiency of urban traffic.

Keywords

Emergency Logistics Vehicles, Signalized Intersections, Variable Lanes, Control Strategies, Vehicle Delays

Copyright © 2025 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

近年来, 随着全球气候变化和地缘政治冲突的加剧, 灾害频发已成为新常态。在这种背景下, 应急物流的重要性日益凸显, 它不仅关系到突发事件的快速响应, 更是保护人民生命财产安全的关键。应急物流的高效运作能够在灾害发生时迅速提供救援物资和人员, 减少灾害带来的损失。例如, 在 2020 年初新冠疫情突发时, 中国通过应急物流有效保障了重点人群的防护服、口罩等医疗物资供应, 有力支撑了武汉方舱医院建设等, 凸显了应急物流在应急响应情况下的重要性。

然而, 在实际城市交通环境中, 尽管应急物流车辆拥有法定的优先通行权, 但在城市环境狭窄或拥堵的路况下, 社会车辆往往无法提供足够的避让空间, 导致应急物流车辆的通行受阻。这不仅影响了应急响应的时效性, 也可能对事件的处理带来不利影响。而传统交通工程设计中的右转车道通常具有固定功能, 由于道路尺寸和道路边界线的限制, 现有的城市道路信号交叉口不能拓宽, 其通行能力受限, 难以满足应急车辆的特殊需求。随着交通智能化、信息化和动态化的发展, 动态直右车道作为提高交叉口通行能力的方法而提出, 通过灵活调整直右车道的划分和使用, 有效提高了交叉口的通行效率和安全性。因此, 如何在保障社会车辆正常通行的同时, 确保应急物流车辆的优先通行, 成为交通工程领域亟待解

决的重要问题。

现有文献对动态直右车道的设计、控制策略及其优化效果进行了广泛研究。Liang 等[1]提出了一种基于动态直右车道(DSRL)的设计方案,通过时空分离直行和右转车辆,有效减少了直行车辆的延误,并显著提高了右转车辆的通行效率。他们利用元胞自动机模型对 DSRL 设计进行了量化分析,并通过 MATLAB 模拟验证了其在实际交叉口的应用效果。此外,梁士栋等人[2]探讨了预信号控制和可变车道理论在提高交通效率方面的作用,如通过调整信号相位和时长,优化交通流的组织形式,减少车辆在交叉口的延误。类似地,Ning 等人[3]的研究也聚焦于直右车道的动态管理,通过对比不同设计方案下的延误情况,提出了优化的直右车道组织形式。陈群等人[4]在车联网环境下对车辆上匝道过程进行了元胞自动机仿真模拟,提出了协同换道规则和改进的强制换道规则,建立了考虑安全距离和互联性的元胞自动机模型。

在信号控制和车道管理方面,杜胜品[5]基于车联网环境下的车辆换道特点,提出了一种应急车辆协同换道模型。分析了应急车辆与冲突车辆的交互关系,并构建了换道收益模型,引导应急车辆的换道决策。祁坤[6]提出了一种交通信号控制策略,旨在平衡应急车辆通行的迫切性和社会车辆通行效率。通过预测应急车辆到达交叉口的时间,根据实时交通情况进行信号配时调整。付燕青[7]利用动态应急车道作为实现应急车辆优先的空间层面措施,并设计了单点交叉口应急车辆信号优先控制方法。结合动态应急车道提出了车道清空模型。黄辉等人[8]构建了基于车辆分配公平性和应急配送及时性的“分配-运输”集成决策模型。他们的研究通过改进的 NSGA-II 算法进行求解,找到了应急救援过程中的最佳军、地车辆比例。

在应急物流车辆通行优化策略方面,龙科军等人[9]提出了一种应急车辆借用逆向左转车道与交叉口信号协同优化模型。通过路段上应急车辆速度引导与逆向左转车道预信号配时协同控制,优化应急车辆路段行驶速度,增设应急相位。郝正博等人[10]则提出了考虑时空协同优先的两阶段应急车辆救援路径动态优化方法,通过增加路径安全风险约束与可靠性约束,构建了带有安全可靠约束的动态 K 最短路径精确算法。黄敏等人[11]通过构建双层规划模型,考虑了应急车辆时效性和交通系统运行效率;而肖宇舟等人[12]则基于交通波理论,研究了应急车辆在单点交叉口的优先控制方法,有效减少了应急车辆的延误。孙华丽、曹文倩等人[13]针对自然灾害对路网造成的破坏性和受灾点物资需求量的不确定性,考虑应急物流路径风险和物资分配的时间公平性,建立双目标多物资定位-路径优化模型。

在应急物流路径风险和车辆调度决策方面,罗倩等人[14]构建了车道级应急车辆优先协调控制系统。该系统利用预信号与主信号协调配时,提出应急车辆在大型交叉口的优先通行信号控制方法。Xu 和 Yao [15]提出一种基于无线通信技术的应急车辆信号优先控制方法,分析了车辆检测器和应急车辆检测器的设置方法,并建立应急车辆通过交叉口的非延迟模型,孙华丽、王循规庆等人[16]研究了随机需求应急物流多阶段定位-路径鲁棒优化问题,将灾区物资需求量表示为区间型数据,并构建了多物资多运输车辆应急物流定位-路径优化模型。

尽管现有研究在动态直右车道的设计和信号控制策略方面取得了一定的进展,但现有文献尚未充分解决应急车辆在高峰时段城市交叉口的通行难题。特别是在车道有限的情况下,如何有效整合动态车道设计与应急车辆的优先通行需求,仍是一个未被充分探索的领域。目前研究多集中于提高普通车辆的通行效率,而对应急车辆在复杂交通环境下的通行优化策略研究不足,缺乏针对性强、可操作的解决方案。因此,本文旨在探索一种将动态直右车道设计与应急物流车辆优先通行需求相结合的新方法。通过计算应急物流车辆预计到达交叉口的时间,并根据右转车道的消散情况,实时调整信号相位,为应急物流车辆提供无延迟的通行条件。这种方法的提出,旨在提高应急物流车辆在交叉口的通行效率,减少其在交叉口的延误时间,从而确保应急响应的及时性和有效性。为交通管理和应急物流的发展提供有益参考。

2. 动态直右车道设计概述

2.1. 动态直右车道的基本结构与功能

动态直右车道(DSRL)是一种创新的交叉口设计方式,旨在通过优化车道分配和信号控制策略来提高城市交叉口的运行效率。该设计将入口车道细分为直行车道(STL)、右转车道(RTL)以及动态直右车道(DSRL),借助预信号控制方法,达成了直行与右转车辆在时间和空间上的有效分离。

DSRL 设计的核心理念在于最大化利用交叉口的时空资源。在传统的车道设计中,由于直行和右转车辆共用同一车道,红灯期间停止的直行车辆会阻碍右转车辆的通行,从而造成交通延误的增加。DSRL 通过灵活调整车道功能,减少了这种冲突,使得直行和右转车辆能够在不同的时间段内顺畅通行,显著提升了交叉口的通行能力。

通过设置动态直右车道图 1(a),交叉口的时空利用率得到了提高。在图 1(b)中,主信号为 S1,它控制着交叉口车辆的进出。信号 S2 是位于动态直右车道入口上游开口处的信号,控制直行车辆进入动态直右车道。信号 S3 是位于右转车道停车线处的信号,控制右转车辆进入动态直右车道。

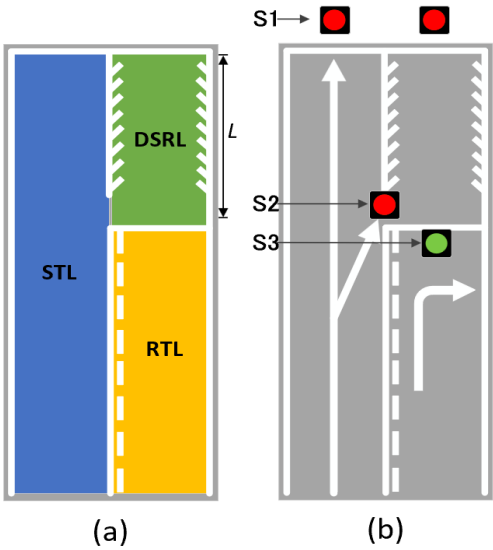


Figure 1. Dynamic straight-right lane design
图 1. 动态直右车道设计

2.2. 信号灯控制系统的设计原理与运行阶段

Table 1. Typical signal operations for DSRL
表 1. DSRL 的典型信号操作

阶段	阶段设计
第一阶段	信号 S1 和 S2 为红灯, 信号 S3 为绿灯, 直行车辆在 STL 排队, 右转车辆驶入 DSRL 通过交叉路口图(a)。
第二阶段	第二阶段信号 S1 和 S3 为红灯, 信号 S2 为绿灯, 允许直行车辆更早驶入 DSRL, 右转车辆在 RTL 排队图(b)。
第三阶段	信号 S1 和 S2 为绿灯, 信号 S3 为红灯, 直行车辆可以使用 DSRL 和 STL 交叉路口, 右转车辆仍在排队的 RTL 图(c)。
第四阶段	信号 S1 和 S3 为绿灯, 信号 S2 为红灯, 直行车辆不允许通过交叉路口进入 DSRL, 右转车辆进入 DSRL 并继续通过交叉路口图(d)。

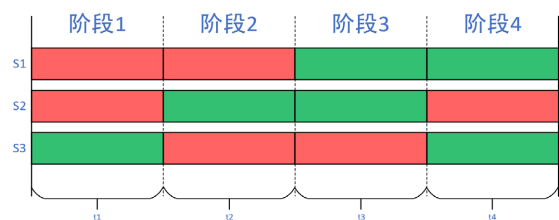


Figure 2. Typical dynamic straight-right lane signal scheme
图 2. 典型动态直右车道信号灯方案

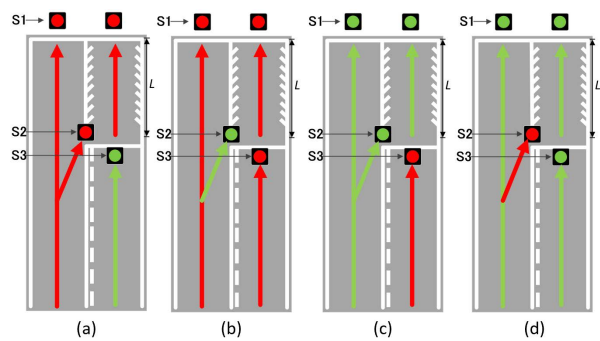


Figure 3. Dynamic straight-right lane traffic operation diagram
图 3. 动态直右车道交通运行示意图

动态直右车道的控制策略能有效降低直行车辆借道右转车道通行时对右转车辆的影响。同时，直行交通的通行效率以及交叉路口的资源利用率也得以提升。依据信号 S1、S2 和 S3 的不同组合，典型的信号控制策略案例在表 1 中有所描述。在典型案例中，交叉路口的信号灯方案主要划分为四个阶段。这四个阶段以及交通流量分别见图 2 和图 3。

3. 问题描述与假设

3.1. 问题描述

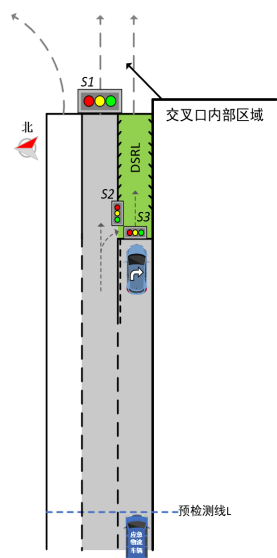


Figure 4. Design form of dynamic-straight right lane and signal control layout
图 4. 动态直右车道设计形式及信号控制布局

如图 4 所示, 在交叉口路段上设置了动态直右车道及相应的信号控制系统。动态直右车道的设计初衷是确保应急物流车辆在到达交叉口之前便能够实现无延误的通行, 这种无延误特性依赖于合理的车道规划和信号控制策略。然而, 随着应急车辆的到达, 信号配时的动态调整可能对社会车辆的正常通行造成一定影响。因此, 本文研究的核心问题在于: 在动态直右车道的设计已满足应急车辆无延误通过的基础上, 如何进一步优化信号灯的四个阶段时间, 既保障应急物流车辆无延迟通行, 又将这种信号调整对社会车辆的通行影响降至最低, 从而实现整体交通效益的最大化。

3.2. 条件假设

应急物流车辆在其所属区域内应严格按照规定的固定速度行驶。

应急物流车辆路径上的交叉口原信号控制方式为定时相位配时, 至少存在一条独立的直行车道, 以确保车辆能够在信号相位调整过程中顺利通行。

本研究仅关注应急物流车辆进入交叉口前的通行过程, 不考虑进入交叉口后可能与其他方向车辆的冲突情况。依据相关法规, 其他车辆在应急车辆进入交叉口时须主动避让。

3.3. 右转车道和直行车道的延误模型

右转车辆延误

图 5 中横坐标为时间轴 t , 纵坐标表示排队车辆到交叉口的距离。在动态直右车道的设计中, 右转排队车辆在 S3 红灯开始时刻 Pr1 后开始累积, 设信号 S3 在周期的第 t_j 秒变为红色, Pr2 则是 S3 的绿灯开始时刻, 右转排队车辆在 Pr2 这一时刻开始消散, 右转待转车道 RTL 内车辆的延误情况与 S3 红灯持续时间有关, 设 S3 红灯的持续时间为 t_{rr} 。假设直通式车辆到达线为直线 l_{ra} , 信号 S3 在周期的第 j 秒为红色, 此时 RTL 内的车辆开始产生延误, 线 l_{ra} 与 x 轴的交点坐标为 $p_r^1(t_j, 0)$ 。利用流体力学类比理论, 交通波的波速为: $(q_r - 0)/(k_j - 0)$, 等于排队车辆的增长率, 即 l_{ra} 的斜率。由此可以得到直线 l_{ra} 的表达式为 $l_{ra} = (q_r/k_j) * (t - t_j)$, 设 RTL 内车辆的耗散曲线为直线 l_{rw} , 当 S3 信号为绿色时, RTL 内排队车辆开始散去, l_{rw} 线 with x 轴交点坐标为 $p_r^2(t_j + t_{rr}, 0)$ 。利用流体力学类比理论, 交通波的波速为: $(Q - 0)/(k_j - 0)$, 等于排队车辆的减速速度, 即 l_{rw} 的斜率。由此可得直线 l_{rw} 的表达式为: $l_{rw} = (Q/k_j) * (t - t_j - t_{rr})$ 。 l_{ra} 和 l_{rw} 相交于点 $p_r^3(T_{rm}, L_{rm})$, 在这一点上排队车辆的最远距离等于消散车辆的长度, 表示后续通过车辆不存在延误。因而当 $l_{ra} = l_{rw}$ 时: 设直通车到达线为直线 l_{sa}^1 。第一阶段开始时, 直通车车辆在直行车道中开始排队, 当 S1 信号变为红色时, 使得 l_{sa}^1 线经过原点 O。根据流体力学类比理论, 交通波的波速为: $(q_s - 0)/(k_j - 0)$, 等于排队车辆的增长率, 即直线 l_{sa}^1 的斜率。由此可得直线 l_{sa}^1 的表达式为: $l_{sa}^1 = (q_s/k_j) * t$, 其中时间 t 为自变量, 排队长度 l 为因变量。在点 $p_s^5(T^*, L)$, STL 内排队长度达到 L , $T^* = (L * k_j)/q_s$ 。第一辆直通车车辆借用 DSRL 到达停车线时, S1 信号变为绿色。S2 信号无法开始变绿, 直通车车辆继续在 STL 内排队。在点 $p_s^5(T_1, L)$, 信号 S2 变为绿色, 使得第一辆进入 DSRL 的直通车车辆无延误地通过停车线。当信号灯 S1 变为绿色时, 表示阶段 2 的开始, 阶段 2 的长度为: $T_2 = L/V_f$, 阶段 1 的长度为: $T_1 = T_2 - L/V_f$ 。

当 S2 信号变绿时, 直行车辆队列在离停车线 L 处开始消散; 如图 6 所示, 设此时的耗散线为 l_{sw}^1 , 设点 $p_s^2(T_1, L)$ 为 l_{sw}^1 线的起点。由于直行车道内的车辆以饱和流量 Q 进行耗散, 利用流体力学理论, 交通波的波速为: $(Q - 0)/(k_j - 0)$, 并将排队车辆增长速度作为直线 l_{sw}^1 的斜率, 得到直线 l_{sw}^1 的表达式为: $l_{sw}^1 = (Q/k_j) * (t - t_1) + L$ 。可求得 l_{sa}^1 交 l_{sw}^1 于点 p_s^1 , 横坐标为 $k_j * L_{vs}/q_s + k_j * V_f$, 纵坐标为 $k_j * L_{vs} * q_s/k_j * (q_s + k_j * V_f)$ 。

信号 S1 在 $p_6(t_2, 0)$ 点开始变绿, 第三阶段开始, 直行车道内距离停车线 L 处的车辆队列开始消散,

消散线为 l_{sw}^3 。点 p_6 为直线 l_{sw}^3 的起点, 交通波的波速为: $(Q-0)/(k_j-0)$, 其是直线 l_{sw}^3 的斜率, 故直线 l_{sw}^3 的表达式为: $l_{sw}^3 = (Q/k_j) \times (t-t_2)$ 。当直行车辆排队队列的最远长度为 L 时, 需要耗散时间 $t_{sw} = (L \times k_j)/Q$, 因此 T_3 的长度为 t_{sw} 。 T_4 的长度为 $S1$ 的绿灯时长 t_g 减去 t_{sw} 。点 $p_s^3(T_3, L)$ 表示 $S2$ 信号灯变红, 此时直行车道(距离停车线为 L)内的车辆队列已经消失, 后续到达的直通式车辆不需要使用 $DSRL$ 仍无延误时。在 p_s^1 点, 直行车道内中排队车辆距离停止线最远的距离长度等于总耗散长度。

$$T_{rm} = \frac{Q * (t_j + t_{rr}) - q_r * t_j}{Q - q_r} \quad (1)$$

$$L_{rm} = \frac{q_r}{k_j} * \frac{Q * t_{rr}}{Q - q_r} \quad (2)$$

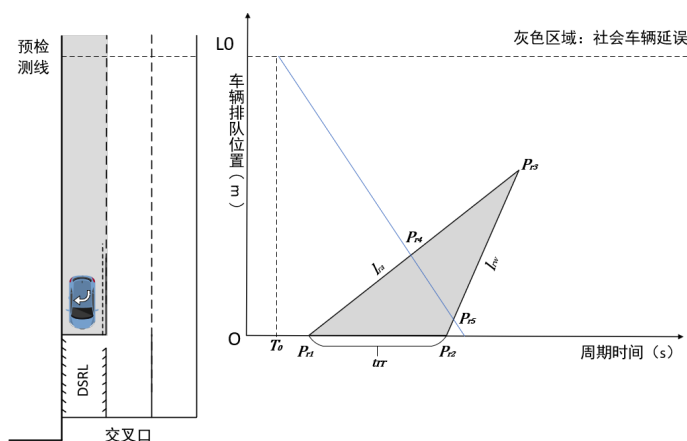


Figure 5. Traffic delays in the right turn lane

图 5. 右转车道车辆延误

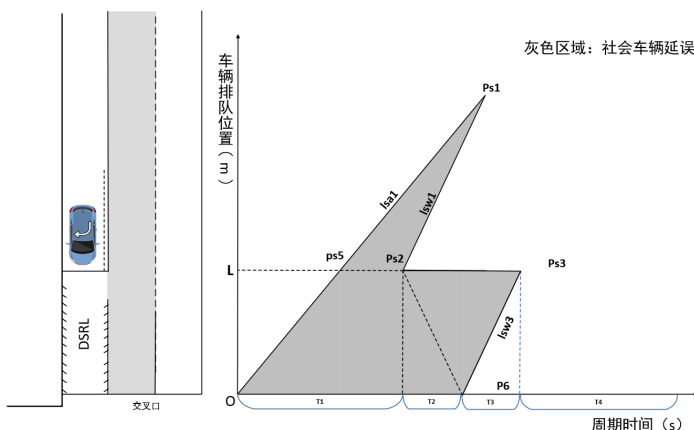


Figure 6. Queue delay of vehicles in the straight lane

图 6. 直行车道车辆排队延误

4. 控制方法与策略

4.1. 应急物流车辆检测与信号控制方案

4.1.1. 优先控制理论方案

结合动态直右车道到应急物流车辆通行中, 当控制中心接收到应急指令后, 根据交叉口车流预计消

散情况, 调整路口信号相位, 保证应急物流车辆无延迟地进入动态直右车道, 从而无延迟通过交叉口, 实现应急物流车辆的优先通行。

4.1.2. 实现流程

优先控制方案具体实现流程见图 7。

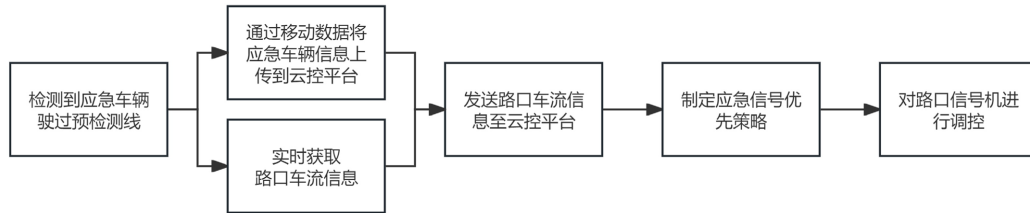


Figure 7. Process of vehicle priority strategy in emergency logistics

图 7. 应急物流车辆优先策略流程

4.2. 应急物流车辆检测与信号控制策略

应急物流车辆通过上游交叉口出口道检测线 L_0 时, 根据应急物流车辆平均行驶速度 V_f , 计算得到应急物流车辆预计到达交叉口的时刻 t_0 , 再根据应急物流车辆到达检测线时的时刻 t_0 不同, 得到应急物流车辆到达线为 $L_{yj} = V_f * (t_0 - t) + L_0$ 。

当应急物流车辆到达时, 若遇右转车辆开始排队, 即 L_{yj} 交于 Pr1 时, t_0 的时刻为 $t_0 = t_j - L_0/V_f$; 当应急物流车辆预计到达时, 若遇排队车辆开始消散, 即 L_{yj} 交于 Pr2 时, t_0 的时刻为 $t_0 = t_j + t_{rr} - L_0/V_f$; 当应急物流车辆到达时, 若遇消散完毕的右转排队车流时, 即 L_{yj} 交与 Pr3 时, t_0 的时刻为 $t_0 = T_{rm} + (L_{rm} - L_0)/V_f$; 因而, 应急物流车辆可能遭遇右转车流排队的时间区间, 始于车流开始排队, 终于车流完全消散, 即:

$$T_0 \in \left(t_j - \frac{L_0}{V_f}, T_{rm} + \frac{L_{rm} - L_0}{V_f} \right) \quad (3)$$

根据应急物流车辆是否与右转排队车辆到达线存在相交情况, 可判定在原场景下应急物流车辆是否遭遇了排队延误现象。

4.2.1. 应急物流车辆未遭遇排队延误

若应急物流车辆预计到达交叉口时刻, 车流状态不满足式(3), 则应急物流车辆没有遭遇右转车辆排队, 可以无延误地通过右转车道进入 DSRL, 具体控制策略保持原 DSRL 相位方案不变。

4.2.2. 应急物流车辆遭遇排队延误

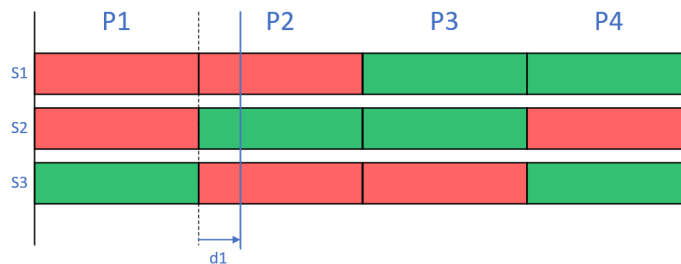


Figure 8. Timing scheme of Pr1 right shift signal lamp

图 8. Pr1 右移信号灯配时方案

若应急物流车辆预计到达交叉口时刻, 车流状态满足式(3), 则右转车辆排队且无法及时消散, 为了让应急物流车辆能够无延迟地通过 S3, 如下给出两种方案:

将 Pr1 右移一段距离 d_1 , 如图 8 所示。

根据应急物流车辆的到达时刻不同, 当预计应急物流车辆到达时, 右转车辆还未开始消散, 即 $t_0 \in (t_j - L_0/V_f, t_j + t_{rr} - L_0/V_f)$ 时, 如图 9 所示, 表示应急物流车辆到达线 L 落在 Pr1 和 Pr2 中间时, 落点为 $Pr1''(t_0 + L_0/V_f, 0)$, 自 $Pr1''$ 向上作 l_{ra}'' , l_{ra}'' 的斜率同 l_{ra} 为 $(q_r - 0)/(k_j - 0)$, 可得 $l_{ra}'' = q_r/k_j * (t - t_0 + L_0/V_f)$ 。 l_{ra}'' 交 l_{rw} 于点 Pr6, 可得点 $Pr6[(q_r * t_0 - Q * t_j - Q * t_{rr} - L * q_r/V_f)/(q_r - Q), (Q/k_j) * (X_{pr6} - t_j - t_{rr})]$ 。这一调整导致 S3 的绿灯时长 t_j 在周期内有所增长, 进而推迟了 S3 的红灯时间 t_{rr} 。这样的变化为右转区域的待转车辆提供了更长的释放时间, 更多地释放右转排队车辆。设 Pr1 移动距离为 d_1 , 则 $d_1 = X_{pr1''} - X_{pr1} = t_0 + L_0/V_f - t_j$ 。如图 9 所示, 对比原场景下的延误明显降低, 应急物流车流在右转排队车流队尾无延迟地通过。右转车道车辆延误为 Pr1''、Pr2 和 Pr6 构成的三角形的面积, 根据三角形的面积公式, 其面积为:

$$S_{1a} = \frac{1}{2} * (X_{pr2} - X_{pr1''}) * Y_{pr6} \quad (4)$$

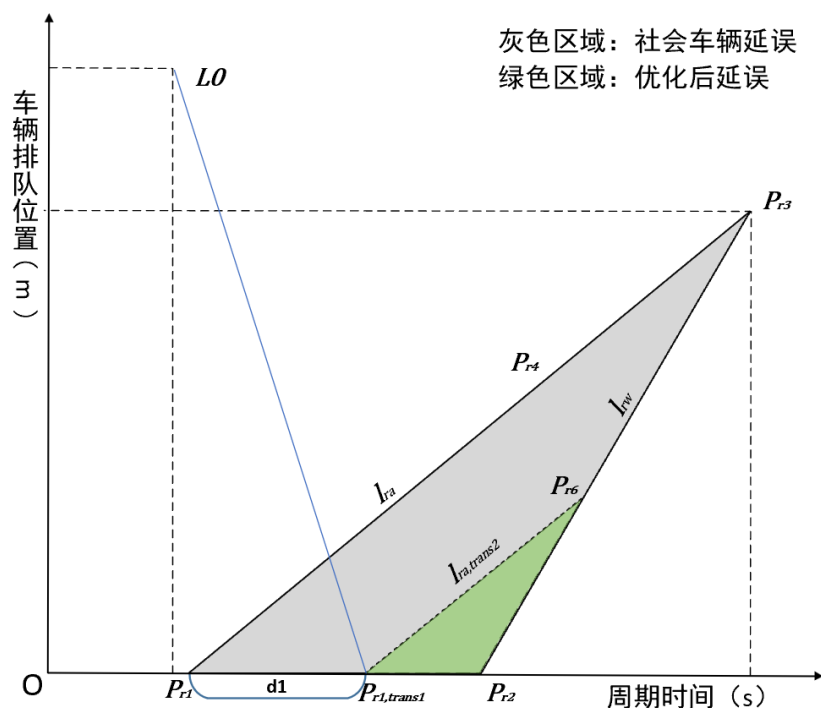


Figure 9. Pr1 right-shift right-turn lane vehicle delay (a)

图 9. Pr1 右移右转车道车辆延误(a)

当预计应急物流车辆到达时, 右转车辆已开始消散, 当 $t_0 \in (t_j + t_{rr} - L_0/V_f, T_{rm} + (L_{rm} - L_0)/V_f)$ 时, 经过调整, 我们延长了 p1 阶段的时间长度。应急物流车辆到达线 L 与右转排队车辆的消散线 l_{rw} 相交于点 Pr5, 设立调整后排队车辆到达线为 l_{ra}' , l_{ra}' 的斜率同 l_{ra} 为 $(q_r - 0)/(k_j - 0)$, 可得 l_{ra}' 为 $l_{ra}' - Y_{pr5} = q_r/k_j * (t - X_{pr5})$ 。 l_{ra}' 交 x 轴于 pr_1' , 可得 pr_1' 的坐标为 $pr_1'(X_{pr5} - Y_{pr5} * k_j/q_r, 0)$ 。这一调整同样导致 S3 的绿灯时长 t_j 在周期内的增长, 推迟了 S3 的红灯时间 t_{rr} 。为右转区域的待转车辆提供了更长的释放时间, 更多地释放右转排队车辆。设 Pr1 移动距离为 d_1 , 则 $d_1 = X_{pr1'} - t_j$ 。

如图 10 所示, 对比原场景下的延误明显降低, 应急物流车流在右转排队车流队尾无延误地通过。右转车道车辆延误为 $Pr1$ 、 $Pr2$ 和 $Pr5$ 构成的三角形的面积, 根据三角形的面积公式, 其面积为:

$$S_{1b} = \frac{1}{2} * (X_{pr2} - X_{pr1}) * Y_{pr5} \quad (5)$$

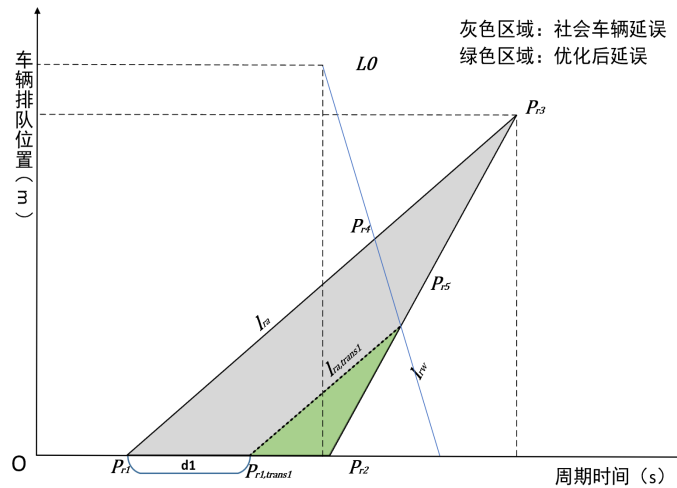


Figure 10. Pr1 right-shift right-turn lane vehicle delay (b)

图 10. Pr1 右移右转车道车辆延误(b)

相应地, S2 的绿灯时长被缩短, 这可能导致直行车辆进入 DSRL 的数量减少, 进而减少了直行车辆的释放效率, 增加了直行排队车辆的总延误。如图 11 所示, 延长了 $p1$ 阶段的时间长度, 使得 $Ps2$ 向后移动到 $Ps2'$, S2 的绿灯更晚地开始, 导致直行车辆更晚通过。由 $Ps2'$ 开始作 L_{sw}^2 , 根据流体力学类比理论, 交通波的波速为: $(q_s - 0)/(k_j - 0)$, 等于排队车辆的增长率, 即直线 L_{sw}^2 的斜率。再根据 $Pr1$ 移动距离 d_1 , 求得以 P_{sm1} 、 $Ps1$ 、 $Ps2$ 、 $Ps2'$ 为顶点的四边形的面积, 即 $Pr1$ 右移后所增加的直行车辆的延误为:

$$S_2 = d_1 * (Y_{ps1} - Y_{ps3}) + \frac{1}{2} * d_1 * (Y_{ps1'} - Y_{ps1}) \quad (6)$$

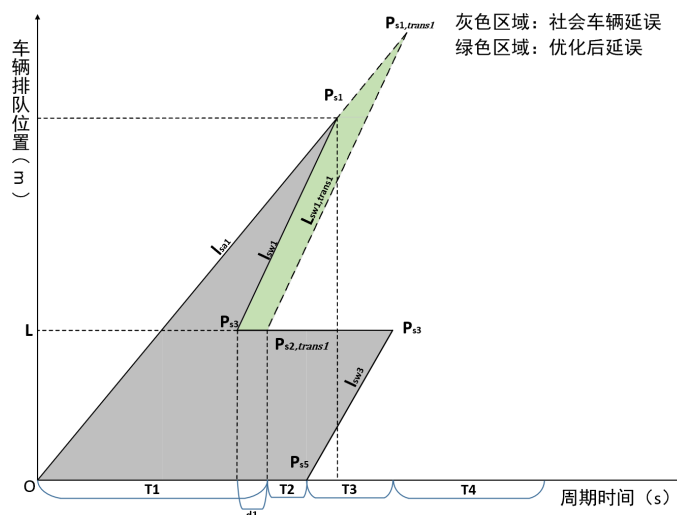


Figure 11. Delay change of vehicles in Pr1 right-moving oncoming lane

图 11. Pr1 右移直行车道车辆延误变化

将 Pr2 左移一段距离 d_2 , 如图 12 所示。

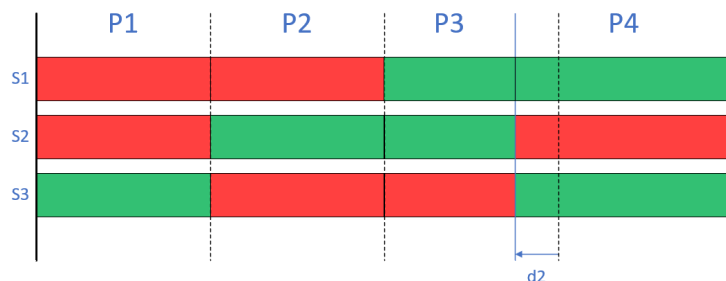


Figure 12. Timing scheme of Pr1 right-shift signal lamp

图 12. Pr1 右移信号灯配时方案

经过调整, p_4 阶段的时间长度得以延长。应急物流车辆到达线 L 与右转排队车辆的到达线 l_{ra} 相交于点 Pr_4 , 设立调整后排队车辆到达线为 l_{rw} , l_{rw} 的斜率同 l_{rw} 为 $(Q-0)/(k_j-0)$, 可得 l_{rw} 为 $l_{rw} = Q/k_j * (t - X_{pr4}) + Y_{pr4}$ 。 l_{rw} 交 x 轴于 Pr_2' , 可得 $p_r^2(X_{pr4} - Y_{pr4} * k_j / Q, 0)$ 。 Pr_2-Pr_2' 表示 Pr_2 向左移动的距离 d_2 , $d_2 = (t_j + t_{rr}) - (x_{pr4} - Y_{pr4} * k_j / Q)$ 。

这一调整导致 S_3 提前结束了红灯, 缩短了 S_3 的红灯时间 t_{rr} 。这样的变化使得右转区域的待转车辆更早地开始通行, 给右转车辆更长的通行时间。如图 13 所示, 对比原场景下的右转车辆的延误明显降低, 应急物流车流在右转排队车流队尾无延误地通过。右转车辆排队延误为 Pr_1 、 Pr_2' 和 Pr_4 构成的三角形的面积, 根据三角形的面积公式, 其面积为:

$$S_3 = \frac{1}{2} * (X_{pr2'} - t_j) * Y_{pr4} \quad (7)$$

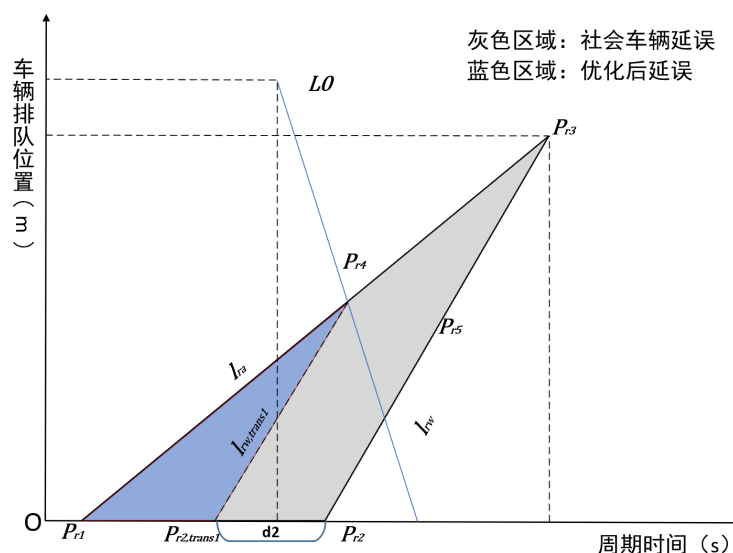


Figure 13. Delay change of vehicles in the left shift and right turning lanes of Pr2

图 13. Pr2 左移右转车道车辆延误变化

然而, 这一调整也导致 S_2 的绿灯相位提前结束, 使得进入 DSRL 的直行车辆数量减少, 进而减少了直行车辆的释放效率, 增加了直行排队车辆的总延误。如图 14 所示, 缩短了 p_3 阶段的时间长度, 使得 $p_s^3(t_3, L)$ 向前移动到 $p_s^3(t_3 - d_2, L)$, S_2 的绿灯更早结束, 导致直行车辆自 p_s^3 起不能进入 DSRL, 从 p_s^3

开始作 l_{sa}^2 , 根据流体力学类比理论, 交通波的波速为: $(q_s - 0)/(k_j - 0)$, 等于排队车辆的增长率, 即直线 l_{sa}^2 的斜率, 由此 l_{sa}^2 的表达式为: $l_{sa}^2 = q_s/k_j \times (t + t_3 - d_2) + L$ 。再由 l_{sw}^3 延长交 l_{sa}^2 于点 Ps4, 可得点 Ps4 $((Q * t_2 + q_s * t_3 - q_s * d_2 + L * k_j)/(Q - q_s), q_s/k_j * (X_{ps4} - t_j - t_{rr} + d_2) + L)$ 。根据 Pr2 移动距离 d_2 , 求得以 Psm4、Ps3、Ps3' 为顶点的三角形的面积, 即 Pr2 左移后所增加的直行车辆的延误为:

$$S_4 = \frac{1}{2} * d_2 * (Y_{ps4} - L) \quad (8)$$

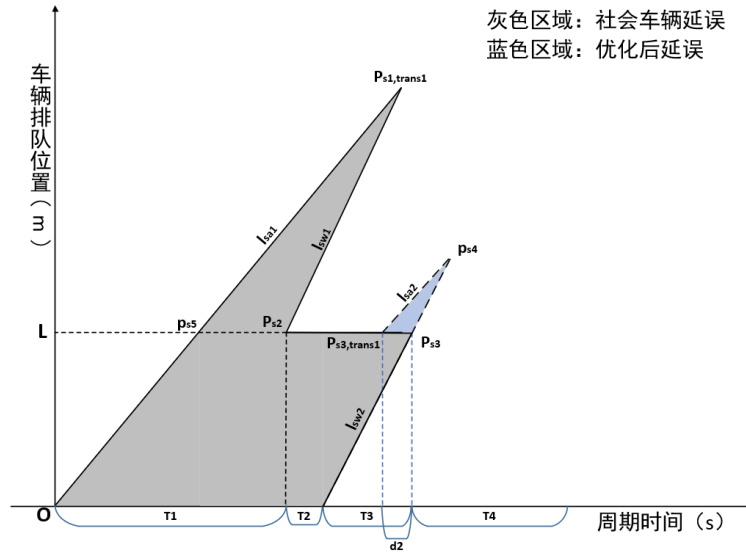


Figure 14. Delay change of vehicles in Pr2 moving to the left oncoming lane
图 14. Pr2 左移直行车道车辆延误变化

在本研究中, 针对应急物流车辆优先通行与社会车辆延误之间的矛盾, 提出了两种优化方案, 并基于动态直右车道信号控制策略实现应急物流车辆的无延误通过, 同时最小化对社会车辆的影响。方案(一)通过调整信号的绿灯持续时间, 延长右转车道的车辆释放时间, 以加速右转排队车辆的消散, 确保应急物流车辆无延误地通过右转车道进入动态直右车道。方案(一)优化目标为:

$$\min S_{1a} + S_{1b} + S_2 \quad (9)$$

方案(二)通过提前结束信号 S3 的红灯时间, 使右转车辆更早开始释放, 从而为应急物流车辆的无延误通行创造条件。方案(二)优化目标为:

$$\min S_3 + S_4 \quad (10)$$

通过这两种方案的对比研究, 本文旨在寻找一种信号调整策略, 既能保障应急物流车辆无延误优先通行, 又能最大限度地降低对社会车辆的负面影响, 从而实现整体交通效益的优化。

5. 案例分析

5.1. 仿真实验

5.1.1. 实验环境搭建

为了评估建议设计的性能, 在 SUMO 仿真环境下搭建双向六车道的交叉口模型, 交叉口初始相位情况见图。设立检测线检测应急车辆到达, 并使用 Python 联合 Traci 二次开发, 编写车辆的路径变更等算法, 在 SUMO 中实现动态直右车道对于应急物流车辆的信号调整。DSRL 长度 50 m; 单车道饱和流率 Q

= 1800 veh/h; 车辆自由流速度 $V_f = 13.89$ m/s; 拥堵密度 $k_j = 125$ veh/km; 信号周期持续时间 $T = 80$ s; 信号红灯持续时间 $t_{rr} = 40$ s; $t_2 = L/V_f = 3.6$ s, 对不同设计下的交叉口总延迟进行了研究。

本文聚焦于提升应急车辆通过城市交叉口的效率, 特别设计了两种应急通行方案(方案 1 与方案 2)。实验模拟了应急车辆自西进口道进入并穿越交叉口的场景, 设定其期望速度为 50 km/h, 以确保快速响应能力。

为精确评估不同策略下的交通影响, 构建了一个包含 150 米长入口路段与 50 米长专用右转车道 (DSRL) 的交叉口模型。实验中, 车辆以随机方式进入交叉口, 以模拟实际交通流的动态变化。为了验证所提出优化策略的有效性, 设计了两组环境参数完全相同的实验环境, 分别应用于方案一与方案二, 并在每个信号周期的第 50 秒时释放应急车辆, 以模拟突发事件的紧急响应。

5.1.2. 仿真实验与策略有效性分析

实验采用重复实验法, 每种方案均进行 50 次独立运行, 以充分捕捉交通系统的随机性与变异性。核心评价指标聚焦于直行社会车辆与右转社会车辆的延误情况, 在每种方案下, 分别运行了多次仿真实验, 并收集了交叉口延误: 包括所有类型车辆的等待时间和行驶时间延迟。结果见表 2。

Table 2. Simulation verification
表 2. 仿真验证

评价指标	仿真方案一	仿真方案二	模型方案一	模型方案二
直行车辆平均总延误(s)	12,141	3615	12,502	4056
右转车辆平均总延误(s)	1039	1014	942	866

仿真结果验证了所提出的动态直右车道优化策略的有效性。方案二通过更精细的信号控制策略, 显著减少了直行车辆的延误, 同时也在一定程度上减少了右转车辆的延误。这表明, 通过动态调整信号相位, 可以有效地提升应急物流车辆的通行效率, 同时对其他社会车辆的影响较小。

5.2. 对比实验

为了深入分析和对比两种信号调整方案对车辆排队延误的影响, 将应急物流车辆预计到达交叉口的时刻所可能遭遇的右转车辆排队时区细分为一百个等份的时间点。在每个时间点计算了右转车辆的延误情况, 然后引入了这两种方案, 并依据每个细分的时刻直观地展现两种信号调整方案对右转车辆排队延误产生的不同影响。此处设立案例参数取值见表 3。

Table 3. Case parameter values
表 3. 案例参数取值

参数	取值	参数	取值
右转车辆流量 q_r	540 (veh/h)	S3 第一阶段绿灯时间 t_j	20 (s)
单车道实际通行能力 Q	1800 (veh/h)	S3 红灯长度 t_{rr}	40 (s)
最大流量密度 k_j	125 (veh/h)	车辆自由流速度 V_f	13.89 (m/s)
直通式车辆流量 q_s	1260 (veh/h)	DSRL 长度	50 (m)

本文分别计算了在两种策略下, 右转车辆和直行车辆延误的不同, 如图 15 所示。 t_0 的取值范围是(16, 86)。在右转车流延误中, 由于在方法 1 策略中, 根据应急物流车流到达线在 Pr2 的两侧的不同情况, 分类为两种策略, 因而在方法 1 场景下, 右转车辆起初随着时刻变化逐渐降低, 在 48 s~56 s 的区间中达到

无延误, 而后随着时刻的增加呈现正比例增长; 而在方法 2 场景下, 随着应急车辆到达时刻的增长, 社会右转车流延误时间呈现缓慢的正比例增长, 方法 2 对比方法 1 而言较为稳定, 但是在 40 s~80 s 的区间内, 方法 2 场景下的右转的延误略低于方法 1。

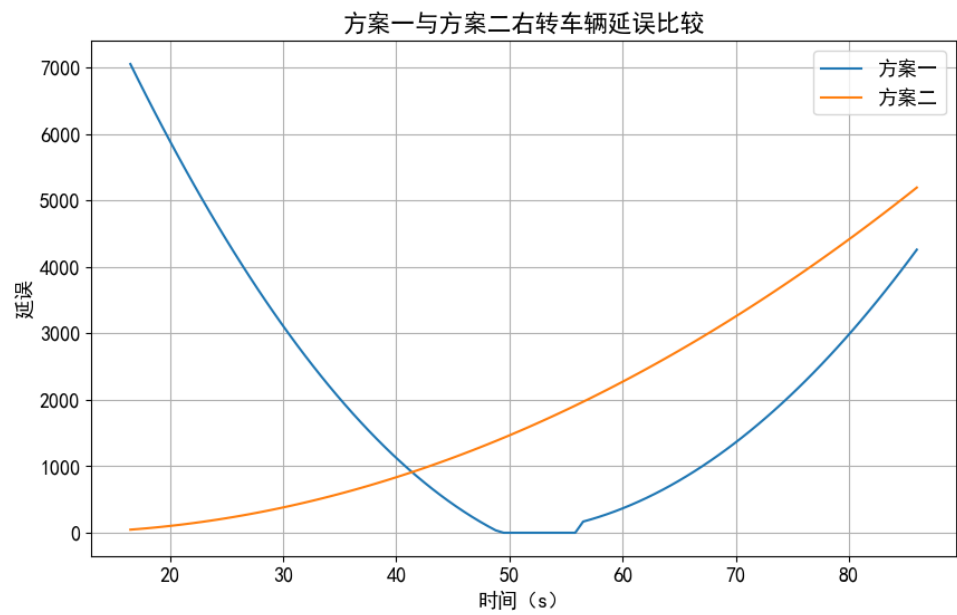


Figure 15. Comparison of delays for right-turning vehicles
图 15. 右转车辆延误比较

随着方法 1 和方法 2 策略变动导致的 d_1 和 d_2 变化同时影响直行车流延误, 根据图 16 可知, 在周期内方法 2 导致的直行延误变化全面低于方法 1。方法 1 场景下, 直行车辆延误先随着时刻增加而正比例增加, 在 56 s 左右快速降低, 而后直行车流延误随着时刻增加不断降低。

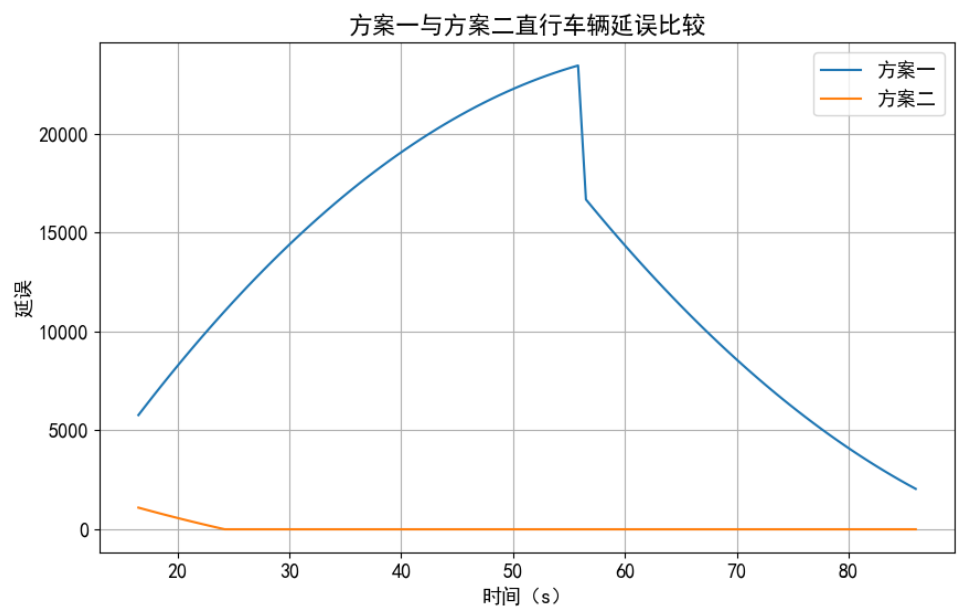


Figure 16. Comparison of changes in delays of vehicles going straight
图 16. 直行车辆延误变化比较

根据右转车辆延误和直行车辆延误的变化相加，可以得到社会车流的总延误变化，由图 17 可知，方法 2 在周期内的延误全面低于方法 1，因此方法 2 较方法 1 更优。

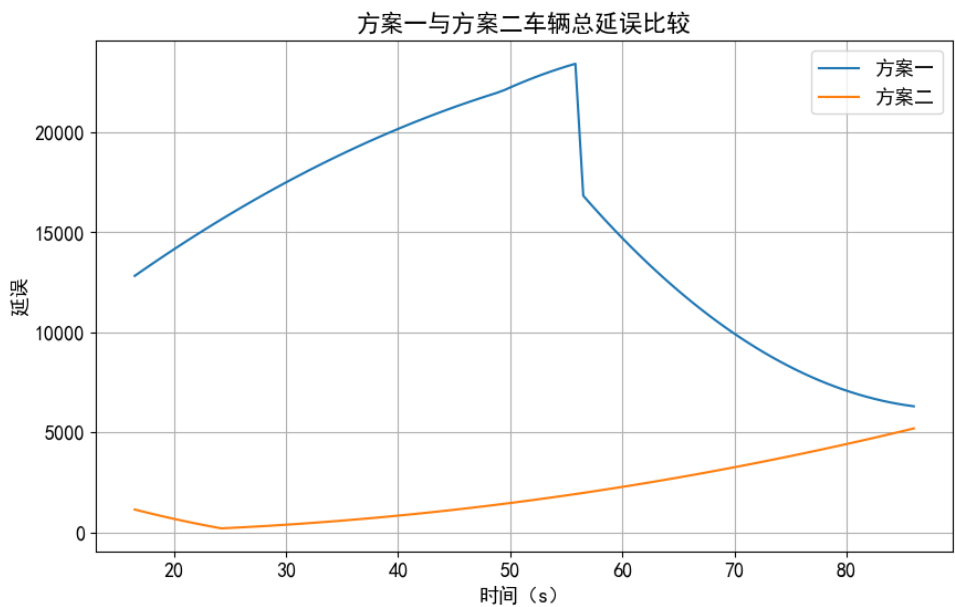


Figure 17. Comparison of total vehicle delays in society
图 17. 社会车辆总延误比较

基于案例分析，将信号周期细分为 100 个时间点，通过模拟计算，得出了方案一与方案二在不同应急车辆到达时刻下，社会车辆的总延误曲线。这些曲线展示了应急车辆到达时间对社会车辆延误的直接影响，为评估应急通行策略的优劣提供了科学依据。由数据可知，优化方案(方案二)在整体上有效减少交叉口的总延迟，表明动态信号调整策略在优先放行应急物流车辆的同时，对整体交通流的影响较小，保持了较高的通行效率。通过 SUMO 仿真实验，我们验证了动态直右车道信号调整策略在减少应急物流车辆延迟、提升应急响应速度方面的显著优势。同时，该策略对整体交通流的影响较小，保持了较高的通行效率。

6. 结论与展望

本文针对城市交通中应急物流车辆在信号交叉口的通行效率问题，提出了一种基于动态直右车道设计的优化策略。通过实时调整信号相位，确保了应急物流车辆能够无延迟地从右转车道转入动态直右车道优先通行。研究结果表明，该策略不仅显著提高了应急物流车辆的通行效率，减少了其在交叉口的延误时间，而且对整体交通流的影响较小，保持了较高的通行效率。此外，通过理论分析与 SUMO 仿真验证相结合的方法，本研究证实了策略的可行性和有效性，为城市交通管理和应急物流领域提供了新的理论与实践参考。

本研究的优化策略在不同交通场景下的适用性仍需进一步探讨。例如，在交通流量更大、交通状况更复杂的城市中心区域，或者在不同气候条件和时间段内，该策略的效果可能会有所不同。此外，本研究主要关注了交叉口的通行效率，而对于周边路网的交通影响、驾驶员行为以及交通环境的长期适应性等方面的研究还不够充分。未来的研究可以结合实际交通数据，对模型进行进一步的验证和优化，以提高模型的实用性和准确性。同时，研究的策略与先进的交通管理系统相结合，实现更智能化、自动化的交通控制，也是未来研究的重要方向。例如，通过车联网技术实现车辆与交通信号之间的实时通信，或

者利用人工智能算法对交通流进行预测和动态调整, 都可能进一步提升应急物流车辆的通行效率和城市交通的整体性能。

总之, 本研究提出的动态直右车道优化策略为解决城市交通中的应急物流车辆通行问题提供了一种有效的解决方案。未来的研究将在更广泛的应用场景中进行验证和优化, 以期为城市交通管理和应急物流提供更加科学、合理的决策支持。

参考文献

- [1] Liang, S., Zhao, T., Li, Q. and Zhao, J. (2023) Signalized Intersection Dynamic Straight-Right Lane Design and Evaluation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **620**, Article ID: 128771. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128771>
- [2] 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/jhtrecq.0000814>
- [3] Ning, B., Liang, S., Zuo, S. and Han, Y. (2023) Dynamic Straight-Right Lane Design and Signal Control at Urban Intersections. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, **149**. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.teeng-7581>
- [4] 陈群, 杨诗瑶, 薛行健. 车联网环境下车辆上匝道元胞自动机仿真模拟[J]. 运筹与管理, 2024, 33(4): 140-146.
- [5] 杜胜品, 胡辰宇. 车联网环境下应急车辆换道策略模型[J]. 物流科技, 2024, 47(9): 93-97.
- [6] 祁坤. 考虑社会车辆通行效率的应急车辆信号优先控制策略[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(10): 11-13.
- [7] 付燕青. 面向应急车辆的动态车道管理与信号优先控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [8] 黄辉, 梁星, 李梦想, 等. 应急物资联合配送决策研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(6): 48-54.
- [9] 龙科军, 张仲根, 刘洋, 等. 城市道路应急车辆借道通行与信号协同优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 194-201+226.
- [10] 郝正博, 杨晓光, 王一喆, 等. 考虑时空协同优先的城市应急车辆路径优化方法[J]. 公路交通科技, 2024, 41(3): 169-178+198.
- [11] 黄敏, 伍召举, 李焯焘, 等. 小型突发事件场景下的应急车辆优先通行策略研究[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(6): 19-26+53.
- [12] 肖宇舟, 赵欣, 鄢磊. 基于交通波理论的网联应急车辆优先控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(6): 1021-1029.
- [13] 孙华丽, 曹文倩, 薛耀锋, 等. 考虑路径风险的需求不确定应急物流定位-路径问题[J]. 运筹与管理, 2018, 27(7): 37-42.
- [14] 罗倩, 赵欣, 陈曦, 等. 基于车道级导航的应急车辆信号优先控制研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(4): 594-599.
- [15] Xu, G. and Yao, J. (2023) Signal Priority Control Method for Emergency Vehicles at Intersections Based on Wireless Communication Technology. *International Journal of Information and Communication Technology*, **22**, 213-223. <https://doi.org/10.1504/ijict.2023.129952>
- [16] 孙华丽, 王循庆, 薛耀锋. 随机需求应急物流多阶段定位-路径鲁棒优化研究[J]. 运筹与管理, 2013, 22(6): 45-51.