

2022 届研究生硕士学位论文

分类号: \_\_\_\_\_

学校代码: 10269

密 级: \_\_\_\_\_

学 号: 51194501026



华东师范大学

East China Normal University

硕士学位论文  
MASTER'S DISSERTATION

论文题目: 面向应急车辆优先通行的  
交通信号灯智能控制方法

院 系: 软件工程学院

专 业: 软件工程

研究方向: 智慧城市

指导教师: 陈仪香 教授

学位申请人: 钟力

2022 年 5 月

Dissertation for master degree in 2022

University Code: 10269

Student ID: 51194501026

EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY

**INTELLIGENT CONTROL METHOD OF  
TRAFFIC SIGNAL FOR EMERGENCY  
VEHICLE PRIORITY PASSAGE**

Department:	School of Software Engineering
Major:	Software Engineering
Research direction:	Smart City
Supervisor:	Prof. Yixiang Chen
Candidate:	Li Zhong

2022.05

## 华东师范大学学位论文原创性声明

郑重声明：本人呈交的学位论文《面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法》，是在华东师范大学攻读硕士/博士（请勾选）学位期间，在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明并表示谢意。

作者签名:\_\_\_\_\_

日期: 年 月 日

## 华东师范大学学位论文著作权使用声明

《面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法》系本人在华东师范大学攻读学位期间在导师指导下完成的硕士/博士（请勾选）学位论文，本论文的研究成果归华东师范大学所有。本人同意华东师范大学根据相关规定保留和使用此学位论文，并向主管部门和相关机构如国家图书馆、中信所和“知网”送交学位论文的印刷版和电子版；允许学位论文进入华东师范大学图书馆及数据库被查阅、借阅；同意学校将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于（请勾选）

- ( ) 1. 经华东师范大学相关部门审查核定的“内部”或“涉密”学位论文\*，于年 月 日解密，解密后适用上述授权。  
( ) 2. 不保密，适用上述授权。

导师签名:\_\_\_\_\_

本人签名:\_\_\_\_\_

年 月 日

\* “涉密”学位论文应是已经华东师范大学学位评定委员会办公室或保密委员会审定过的学位论文（需附获批的《华东师范大学研究生申请学位论文“涉密”审批表》方为有效），未经上述部门审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权）。

## 钟力 硕士学位论文答辩委员会成员名单

姓名	职称	单位	备注
李德敏	教授	东华大学	
马艳芳	教授	常州工学院	
卜天明	副教授	华东师范大学	

## 摘 要

智慧交通是智慧城市的一个重要研究领域，而面向应急车辆的信号控制方法是智慧交通的一个研究热点，其研究成果能够推动缩短应急车辆的救援时间，对挽救生命和减少财产损失至关重要。传统实现应急车辆快速通行的方法大多是通过传感器或人工控制的方式为应急车辆提供绿灯信号，使得应急车辆顺利通过交叉路口而无需停车。随着汽车保有量的增加，分布式交通信号控制方法成为了智慧交通的新兴技术。本文提出了一种面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法，基于分布式智能交通灯实现应急车辆不停车快速地通过交通灯路口，为应急车辆提供一条能够高速行驶的一路畅通的“绿波带”。本文主要从一下三个方面进行了研究：

首先，构建面向应急车辆优先通行的最快路径“绿波带”模型，在此基础上，构建面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制系统架构，并设计了交通信号灯智能控制算法，使得交通信号灯在未请求阶段、降低道路饱和度阶段、信号抢占阶段以及恢复交通流阶段过渡。

其次，设计面向应急车辆优先的交通信号灯智能控制方法。第一步通过调整交通信号灯绿灯时间，降低应急车辆行驶路径上的道路饱和度，使得应急车辆前方的其他车辆有空间为应急车辆让行，从而应急车辆能够高速行驶。第二步通过非侵入式抢占与侵入式抢占相结合的信号抢占方法为应急车辆提供绿灯信号，使得应急车辆在绿灯状态下快速通过交通灯路口。第三步通过线性规划方法恢复交叉口各方向交通流，以降低应急车辆优先通行对整个交通造成的影响。在第二步和第三步中，本文实时考虑了所有应急车辆经过的路口，预测其排队车辆数目。

最后，本文在城市交通模拟器 SUMO 中对面向应急车辆优先通行的交通信号

灯智能控制方法的可行性及先进性进行了一系列实验。结果表明，与固定时长信号控制方法（fixed-time control method，简称 FTCM）相比，本文方法能够有效缩短应急车辆旅行时间的 62.85%；与弹性型号抢占方法（flexible signal preemption method，简称 FSPM）相比，本文方法能够有效缩短应急车辆旅行时间的 50.85%；与应急车辆信号抢占方法（emergency vehicle signal pre-emption，简称 EVSP）相比，本文方法能够有效缩短应急车辆旅行时间的 11.62%。此外，实验结果表明本文方法不会对交通路网造成明显影响。

**关键词：**智慧交通系统，交通信号控制，应急车辆，信号抢占，信号配时

# ABSTRACT

Smart transportation is an important research area of smart cities, and the signal control method for emergency vehicles (EV) is a research hotspot of smart transportation, and its research results can promote shortening the rescue time of EVs, which is crucial to save lives and reduce property damage. Traditionally, most of the methods to achieve fast passage of EVs are to provide green light signals for EVs using sensors or manual control, so that EVs can cross the intersection smoothly without stopping. With the increase of car ownership, distributed traffic signal control methods have become an emerging technology for smart transportation. In this paper, we propose an intelligent traffic signal control method for EVs to pass through the traffic light intersection without stopping, and provide a "green belt" for EVs to drive smoothly at high speed. In this paper, three main aspects are studied.

Firstly, we construct the fastest path "green belt" model. On this basis, we construct the corresponding distributed intelligent agent model and the intelligent traffic signal control system architecture for EV priority passage. We design the traffic signal intelligent control algorithm, so that the traffic signal transitions in the no-request stage, saturation-reduction stage, signal-preemption stage and restoration stage.

Next, the intelligent traffic signal configuration method is designed for EV priority. The first step reduces the road saturation on the path of EVs by adjusting the traffic signal green time, so that other vehicles in front of the EV have space to give way to the EV, thus enabling the EV to drive at high speed. The second step is to provide the green signal for EVs through a combination of non-intrusive preemption and intrusive preemption so that EVs can quickly pass through the traffic light intersection in the green light duration.

The third step restores the traffic flow in all directions at the intersection through a linear planning method to reduce the disturbance caused by EVs' priority traffic to the whole traffic. In the second and third steps, this paper considers the intersections passed by the EV in real-time and predicts the number of queued vehicles.

Finally, we conduct a series of experiments on the feasibility and advancement of an intelligent control method of traffic signals for EV priority passage in the traffic simulator SUMO. The results show that, compared with the fixed-time control method (FTCM), Min's flexible signal preemption method (FSPM), and Qin's EV signal pre-emption method (EVSP), our method can optimize travel time by up to 62.85%, 50.83%, and 11.62%, respectively. In addition, the experimental results show that this method does not cause a significant impact on the traffic network.

**Keywords:** *Intelligent Transportation Systems, Traffic Signal Control, Emergency Vehicles, Signal Preemption, Signal Timing*

# 目录

<b>第一章 绪 论 . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景及意义 . . . . .	1
1.2 国内外研究现状 . . . . .	3
1.3 本文工作及主要贡献 . . . . .	6
1.4 文章组织框架 . . . . .	6
<b>第二章 预备知识 . . . . .</b>	<b>8</b>
2.1 交通工程相关理论 . . . . .	8
2.1.1 饱和流量与饱和流率 . . . . .	8
2.1.2 信号相位 . . . . .	8
2.1.3 绿波带 . . . . .	11
2.2 K 均值聚类算法 . . . . .	12
2.3 二次规划 . . . . .	13
2.4 本章小结 . . . . .	14
<b>第三章 面向应急车辆的“绿波带”模型 . . . . .</b>	<b>15</b>
3.1 “绿波带”模型 . . . . .	15
3.2 系统架构 . . . . .	17
3.3 算法描述 . . . . .	19
3.4 本章小结 . . . . .	23
<b>第四章 交通信号灯智能控制方法 . . . . .</b>	<b>24</b>
4.1 按需降低道路饱和度及普通车辆让行 . . . . .	24
4.1.1 降低道路饱和度的目的 . . . . .	24

4.1.2	降低道路饱和度模型构建 . . . . .	28
4.1.3	面向应急车辆的降低道路饱和度方法 . . . . .	30
4.2	信号抢占方法 . . . . .	31
4.2.1	非侵入式信号抢占方法 . . . . .	31
4.2.2	侵入式信号抢占方法 . . . . .	35
4.3	恢复交通流 . . . . .	37
4.4	本章小结 . . . . .	40
<b>第五章</b>	<b>基于 SUMO 平台的实验评估与分析 . . . . .</b>	<b>41</b>
5.1	实验目的 . . . . .	41
5.2	实验设计 . . . . .	41
5.3	实验环境及参数设置 . . . . .	47
5.4	实验结果分析 . . . . .	49
5.4.1	应急车辆速度平稳性分析 . . . . .	49
5.4.2	应急车辆旅行时间分析 . . . . .	52
5.4.3	应急车辆优先对路网的影响分析 . . . . .	57
5.5	实验分析与总结 . . . . .	61
5.6	本章小结 . . . . .	62
<b>第六章</b>	<b>总结和展望 . . . . .</b>	<b>63</b>
6.1	总结 . . . . .	63
6.2	展望 . . . . .	64
<b>参考文献</b>	<b>. . . . .</b>	<b>64</b>
<b>附录</b>	<b>. . . . .</b>	<b>72</b>
<b>致谢</b>	<b>. . . . .</b>	<b>80</b>
<b>发表论文和科研情况</b>	<b>. . . . .</b>	<b>82</b>

# 插图

1.1 普陀区中心医院附近救护车救援道路实况图 . . . . .	2
1.2 金沙江路附近救护车救援道路实况图 . . . . .	3
2.1 十字交叉路口样例 . . . . .	9
2.2 十字路口交通灯信号相位 . . . . .	10
2.3 T型路口交通灯信号相位 . . . . .	11
2.4 信号相位绿灯方向的放行车流率与时间的关系 . . . . .	11
2.5 绿波带示意图 . . . . .	12
3.1 由连续节点表示的“绿波带”模型 . . . . .	15
3.2 路口与智能体对应关系 . . . . .	16
3.3 系统架构 . . . . .	17
3.4 系统各部分工作流 . . . . .	18
3.5 未请求阶段和降低道路饱和度阶段的信号控制流程图 . . . . .	20
3.6 信号抢占阶段信号控制流程图 . . . . .	21
4.1 道路饱和度较高，普通车辆无法让行 . . . . .	24
4.2 道路饱和度降低，普通车辆让行 . . . . .	25
4.3 不采取降低道路饱和度信号控制算法，应急车辆到达交叉口时道路情形图 . . . . .	25
4.4 不采取降低道路饱和度信号控制算法，应急车辆通过交叉口后道路情形图 . . . . .	26

4.5 采取降低道路饱和度信号控制算法，应急车辆到达交叉口时道路情形图	26
4.6 采取降低道路饱和度信号控制算法，应急车辆通过交叉口后道路情形图	27
4.7 非侵入式信号抢占方法	32
4.8 侵入式信号抢占方法	35
4.9 信号跳转的时刻	37
4.10 交叉口样例	38
 5.1 上海市消防局附近的道路环境	42
5.2 交通路网	43
5.3 路线 1	44
5.4 路线 2	44
5.5 路线 3	45
5.6 路线 4	45
5.7 路线 5	46
5.8 道路畅通时速度标准差结果对比图	50
5.9 道路相对拥堵时速度标准差结果对比图	50
5.10 道路中度拥堵时速度标准差结果对比图	51
5.11 道路严重拥堵时速度标准差结果对比图	51
5.12 道路畅通时旅行时间比较	53
5.13 道路比较拥堵时旅行时间比较	53
5.14 道路中度拥堵时旅行时间比较	54
5.15 道路严重拥堵时旅行时间比较	55
5.16 不同交通规模下平均旅行时间比较	57
5.17 道路畅通时平均等待时间比较	58
5.18 道路比较拥堵时平均等待时间比较	59
5.19 道路中度拥堵时平均等待时间比较	59
5.20 道路严重拥堵时平均等待时间比较	60

5.21 不同交通规模下平均等待时间的比较 . . . . . 61

B1 调查问卷二维码 . . . . . 78

# 表格

4.1	突发事件应急响应等级 . . . . .	28
4.2	针对应急车辆的城市路段平均速度与路段拥堵等级的关系 . . . . .	29
4.3	预计到达时间与时间紧迫等级的关系 . . . . .	29
4.4	关于 ERL、CLRS 和 TUL 的正互反矩阵 . . . . .	30
4.5	目标相位延长时间参照表 . . . . .	31
5.1	路线及其距离 . . . . .	43
5.2	实验环境配置 . . . . .	48
5.3	实验参数配置 . . . . .	48
5.4	本文方法与 FTCM 相比旅行时间的优化结果 . . . . .	55
5.5	本文方法与 FSPM 相比旅行时间的优化结果 . . . . .	56
5.6	本文方法与 EVSP 相比旅行时间的优化结果 . . . . .	56
A1	缩写速查表 . . . . .	73
A2	符号速查表 . . . . .	73
A3	目标相位延长时间速查表 . . . . .	75
B1	Santy1-9 标度方法 . . . . .	78

# 第一章 緒論

本章首先介绍了面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法的研究背景及意义，接着阐述了国内相关科研状况，然后阐述了论文的研究内容及其学术贡献。最后提出了文章的组织架构。

## 1.1 研究背景及意义

在实际场景中，应急车辆是执行紧急任务的救护车、消防车或者警车等特种车辆，相比于其他车辆，它们具备更高的优先通行权以及具备更高的通行效率。根据国务院办公厅印发的文件，在充分保障交通安全的条件下，应急机动车不仅不受信号灯约束，而且不受行驶路线、方位、车速的约束，道路交通中其他机动车和行人必须给应急机动车让行 [1]。应急车辆优先通行是智慧交通的一个研究热点 [2-3]，其研究成果会推动缩短应急车辆的旅行时间，对挽救生命以及减少财产损失至关重要。随着物联网与智慧信息系统的发展，如今越来越多的人利用物联网技术，获取车辆信息以及交通灯信息 [4-5]，通过 V2V 以及 V2I 技术实现车与车以及车与基础设施之间的通信 [6-8]，也有人利用信息物理融合技术 CPS (Cyber-Physical Systems) 提出交通灯信号控制的建议 [9]。随着城市规模的增加，集中式交通方式也将遇到计算和通信上的困难，通过获取全局状态的集中式交通控制方法往往无法为应急车辆提供即时且可靠的信号控制策略，因此有人提出了分布式交通信号灯控制方案 [10]。

图 1.1 和图1.2分别显示了普陀区中心医院附近和金沙江路救护车被前方其他车辆阻碍，无法继续向前行驶的道路实况。图1.1由于道路狭窄，车辆密度大，导致道路拥挤，应急车辆只能缓慢向前行驶，这使得应急车辆到达目的地所需的旅

行时间延长。图1.2中其他车辆前方为十字交叉路口，且前方为红灯，因此救护车必须排队等候前方排队车辆清空后，才能通过交叉路口，该交叉口最高可导致救护车的旅行时间延长 150 秒，这严重威胁了病患人员的生命安全。



图 1.1: 普陀区中心医院附近救护车救援道路实况图

随着城市交通规模的不断扩大，城市居民持有汽车总数不断飙升。据 [11] 显示，2020 年年末，全中国拥有的公路营运汽车已经达到了 1171.54 万辆。人民日益增长的道路交通要求和不均衡不完善的路面设施之间的冲突造成了路面饱和度不断增加。道路饱和度上升不仅带来了日常交通拥堵，而且还会导致应急车辆在执行任务的过程中，其他车辆没有空间为应急车辆让行，阻碍应急车辆快速行驶，延长救援时间。应急车辆经过红绿灯路口时，大量且聚集的排队车辆会严重阻碍应急车辆的行进。提前清空红绿灯路口应急车辆之前的所有其他车辆，能够有效缩短应急车辆的旅行时间。有研究表明，在道路交通流量大的情况下，一个交叉口的



图 1.2: 金沙江路附近救护车救援道路实况图

信号抢占行为能够为应急车辆节省高达 45s 的时间 [12]。

缩短应急车辆的旅行时间对挽救生命和减少财产损失至关重要，在紧急情况下，几分钟的延迟就可能意味着生命的结束和巨额的财产损失。因此，全球各国政府都制定了应急救援时间目标，英国国家卫生服务系统（NHS）为大多数的严重医疗呼救设定了 8 分钟的目标 [13]；美国纽约规定紧急呼叫的应急救援时间为 10 分钟 [14]；在新加坡有 87.1% 的应急车辆能够在 11 分钟内到达目标位置 [15]。随着中国城市化进程的加快，政府对缩短应急救援时间的需求也在不断上升。

## 1.2 国内外研究现状

不同的国家以及研究人员都在不断尝试将新兴科技应用于智慧交通当中，这极大地促进了应急车辆优先通行的研究进程。美国 [16]、加拿大、澳大利亚、日本

等国家都拥有自己的多车优先系统：日本的 FAST 系统为应急车辆提供最佳路径，并在交通灯路口为应急车辆提供优先通行权，当装有红外信标的应急车辆通过检测器时，交通灯就转为绿灯 [17]。目前针对应急车辆优先通行的信号控制系统已经被广泛研究，并取得了不错的成果 [18]。与应急车辆优先通行的关键问题包括信号检测 [19-21]、信号抢占以及应急车辆优先通行对整个交通流的影响。

随着物联网与智慧信息系统的发展，专用短程通信技术（DSRC）使得应急车辆能够与基础设施通信，从而提高了检测的准确性，与此同时，应急车辆配备 GPS 系统，能够发送实时位置信息。Ashish 等人利用 V2I 动态暂停交通流的常规移动，为包含紧急车辆的进场提供绿灯，与此同时利用 V2V 通信使前面的车辆为紧急车辆让路 [22]。Ebizuka 等人提出了评估应急车辆声源检测和识别的方法 [23]。Ismail 等人利用 arduino 和蓝牙传感器，当紧急车辆接近红灯和排长队的红绿灯时，蓝牙传感器将向 arduino 发出信号以改变绿灯。目前将交叉口信号灯抽象为智能体已成为热门趋势，通过感知周围环境以控制交通灯信号周期 [24-25]，如徐杨等人在 [10] 中给出了每一条交通灯路口采用一种非集中式的协同智能体来监控的信号控制方式。夏元清等人 [26] 提出了一个智慧交通系统信息的物理融合云系统方案，包括了智慧交通系统的边缘控制技术。Shrivastava 等人提供了一个开创性且实用的以服务器为中心的模型，使用全球定位系统 (GPS) 和调节交通信号的微控制器的基本手机应用程序实现抢占 [27]。Masoud 等人提出了一种利用无电池无线传感器网络 (WSN) 来提高应急车辆的安全性和机动性的新方法 [28]。Peng 等人提出了一种基于协同车辆基础设施系统 (CVIS) 的车队变道引导方法，使得其他车辆避开应急车辆 [29]。

目前的信号抢占策略丰富多样。Qin 等人 [30] 提出了一种信号控制策略，当传感器检测到应急车辆时，自动将交通灯设置为紧急抢占 EVSP (emergency vehicle signal pre-emption) 模式，在应急车辆通过交通灯路口后，恢复到正常模式。Noori 等人 [31] 提出了一种基于连接车辆的控制策略，在为应急车辆提供绿灯的同时能够清空应急车辆前方的排队车辆。闵万里等人 [32] 提出了弹性信号抢占，通过重

新规划相位周期时间使得应急车辆到达交叉口时刚好遇到绿灯。Kang 等人 [33] 提出了紧急车辆信号协调方法 EVSC (Emergency Vehicle Signal Coordination)，通过修改相位偏移为应急车辆提供“绿波”效应，保证应急车辆在一片区域内一路绿灯通行。Petrica 等人提出了基于车辆类型、路口等待队列长度和多路口通信的优先分配红绿灯算法 [34]。Obrusnik 等人提出了应用于十字路口的信号抢占方法，能够使得抢占时间尽可能短 [35]。Shaaban 等人还提供了一个用于最优路线选取和应急车辆抢占的联合策略，所建议的方法在所有应急车离开其原点之前为其选定最佳路线，然后在适当的时机激活对每个路口的抢占，使其在应急车辆到达之前清除路口 [36]。Cao 等人提出了一种以应急车辆为中心的交通信号控制，它关注应急车辆的性能，同时最大限度地减少冲突方向对交通的负面影响 [37]。Mu 等人设计了一个由监控子系统、相位时间确定子系统和相位切换控制子系统组成的应急车辆抢占优化控制系统 [38]。

为了降低应急车辆优先通行对整个交通流造成的影响，很多研究者通过改进信号抢占方法，减少对其他车辆的影响。如 Wang 等人 [12] 提出了多层次模糊模型，综合考虑应急车辆抢占需求强度以及应急车辆优先对其他车辆的影响程度。邵明莉等人 [39] 通过深度强化学习方法，对应急车辆与其他车辆赋予不同的优先级，提出了针对应急车辆的降低道路饱和度的算法，缩短了应急车辆的旅行时间。Qin 等人 [30] 设计的信号恢复策略在应急车辆通过交通灯路口后恢复交通流能够一定程度上弥补应急车辆优先对整个交通造成的影响。闫飞等人 [40] 为使得交叉口各方向趋于均衡，使用了迭代学习控制方法。Hajiebrahimi 等人提出了一种基于模糊规则的交通信号计时系统 (STC)，用于解决应急车辆的行程延误问题。Paruchuri 等人提出了一种自适应交通抢占系统 (APT)，利用对交通网络中当前交通状况的了解，自适应地抢占应急车辆路径上信号灯，以最小化应急车辆的停车延误，同时最大限度地减少系统中非应急车辆的延误。

### 1.3 本文工作及主要贡献

为了缩短应急救援时间，并减少应急车辆优先对整个交通流造成的影响。本文构建面向应急车辆优先通行的最快路径“绿波带”模型和面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制系统架构，并设计了交通信号灯智能控制算法。该算法包含提前降低道路饱和度、为应急车辆提供信号抢占以及恢复整个交通流三个阶段保障应急车辆一路快速绿灯通行。

1. 提前降低道路饱和度：根据应急响应等级、路段拥堵等级以及时间紧迫等级得出降低道路饱和度的迫切程度值，再根据降低道路饱和度迫切程度值合理地延长目标相位绿灯时间；
2. 信号抢占：为应急车辆提供了非侵入式抢占与侵入式抢占相结合的信号控制方法，一种是基于二次规划的非侵入式信号抢占方法，通过改变信号周期与相位时间使得应急车辆到达交通灯路口时刚好遇到绿灯，即应急车辆到达路口时，交通灯刚好处于目标相位，当第一种方法无法得出最优解时，本文中第二种信号抢占方法侵入式信号抢占方法将作为补充，以确保应急车辆到达交通灯路口时前方无排队车辆，且交通灯处于目标相位；
3. 恢复交通流：通过线性规划方法，重新规划信号周期与交通灯路口各相位绿灯时间，在最短的时间内使得路口各方向排队车辆数小于等于没有应急车辆优先通行情况下的平均排队车辆数。

为了验证本文方法的有效性，我们在城市交通模拟器 SUMO[41] 中对路网中的多个十字路口与 T 型路口进行实验，结果表明本方法能够有效降低应急车辆的旅行时间，并有效缓解应急车辆优先对整个交通流造成的干扰。

### 1.4 文章组织框架

第一章绪论，介绍了研究背景及意义、国内外研究现状以及本文工作及主要贡献。

第二章预备知识，介绍了饱和流量、饱和流率、信号相位和“绿波带”等交通工程相关知识，以及 K-Means 均值聚类算法和二次规划算法。

第三章面向应急车辆的“绿波带”模型，介绍了本文方法的整体框架及工作流程，包括了路网建模、信号控制各阶段的工作契机，以及降低道路饱和度、信号抢占以及恢复交通流各阶段的转换。

第四章交通信号灯控制方法，介绍了降低道路饱和度、信号抢占以及恢复交通流各阶段的工作原理及算法。首先提出了根据应急响应等级、路段拥堵等级以及时段紧迫等级确定降低道路饱和度等级以确保非应急车辆能够为应急车辆让行。然后提出了非侵入式抢占与侵入式抢占相结合的信号抢占方法，保证应急车辆直接通过交叉口无需停车。最后通过线性规划方法将交叉口各方向交通流恢复到信号抢占之前的状态。

第五章基于 SUMO 平台的实验评估与分析，对本文方法进行了实验评估与分析，在城市交通模拟平台 SUMO 中对本文方法与已有的方法进行对比，验证了本方法能够为应急车辆提供一路绿灯的快速通行方案，缩短了应急车辆的旅行时间，并能够实现应急车辆优先对整个交通流的影响得到修复。

第六章总结和展望，对本文工作做出总结并给出了未来的工作展望。

## 第二章 预备知识

本章将要介绍的预备知识包括饱和流量、饱和流率、信号相位以及绿“波带灯”。接着介绍 K 均值聚类均值聚类算法和二次规划算法。

### 2.1 交通工程相关理论

#### 2.1.1 饱和流量与饱和流率

饱和流量，指的是在单元时间内车辆经过十字路口停车线的最大流量 [42]。饱和流率指当信号灯转为绿灯状态后，放行车流率逐渐达到稳定值，此时的放行车流率即为饱和流率 [43]。

影响车道饱和流量的各种因素大致包括路面条件、车流情况以及配时方法三种。路面条件主要和车道的宽窄、坡度相关；车流状况主要与大车混入率、转弯车流比和车道预设功能有关 [44]；配时方案主要与道路交叉口信号相位设置有关 [45]。针对已达到使用状况并有实际车流量的路口，通过在路口处实际观察可以计算出饱和流量值。但是在某些无法实地观测的场景下，例如在全新道路交叉口的设计阶段，无法通过实地观测统计出饱和流量值，此时需要选用合适的理论方法近似估算道路的饱和流量值 [46]。常用的估算饱和流量值的算法有曲线法 [47]、冲突点法 [48]、韦伯斯特法 [49] 等。

#### 2.1.2 信号相位

通过给不同方向的交通流按时间片分配通行权的方式，可以有效避免以二维交叉口为主的在空间上相交的道路存在的各向交通流之间的冲突。在交通信号系统中，不同国家对交通信号相位的基本概念定义不尽相同。美国的《通行能力手

册》[50] 将相位定义为分配给在一个或多个时间间隔内，获得通行权的任何交通流组合的部分信号周期。联邦公路管理局将信号相位定义为分配给独立或组合交通流循环中的绿灯通行、黄灯改变和红灯等待。在中国，《交通管理与控制》[51] 认为，在信号控制十字路口，每一个信号状态，即交叉口各个方向上所呈现的各种灯色组合，形成了一种信号相位。根据国家标准 [52] 规定：信号相位是同时获得通行权的一股或多股交通流对应信号组的显示状态。

一个周期内的相位数量太少，则道路上容易发生混乱，而如果相位数量太多，道路上交通次序的可靠性获得了提高，但是相位切换的时间变多，反而降低了通行能力 [53]。目前我国普遍采用的是两相位到四相位控制 [54]。以我国最常见的十字路口为例（如图2.1），十字路口分为东、西、南、北四个方向，每个方向都有三个入口车道，分别为左转、直行和右拐。其间最左边的车辆道为左转，中间的车辆道为直行，最右边的车辆道则为右拐，因此每个路口需要  $3 \times 4 = 12$  个交通信号灯。

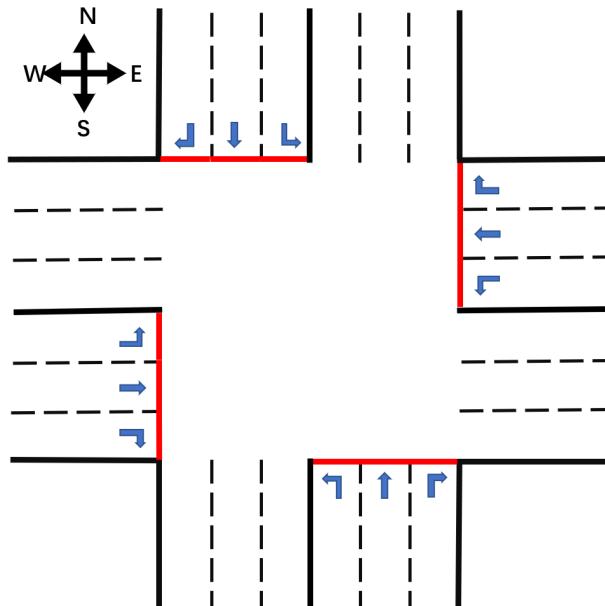


图 2.1: 十字交叉路口样例

交叉路口各入口车道不同方向交通灯所显示的红黄绿三种灯色组合构成不同

的信号相位。该十字路口存在四种互不冲突的信号相位，分别是：(1) 东西方向直行及右转；(2) 东西方向左转；(3) 南北方向直行及右转；(4) 南北方向左转。十字路口交通灯信号相位如图2.2所示。

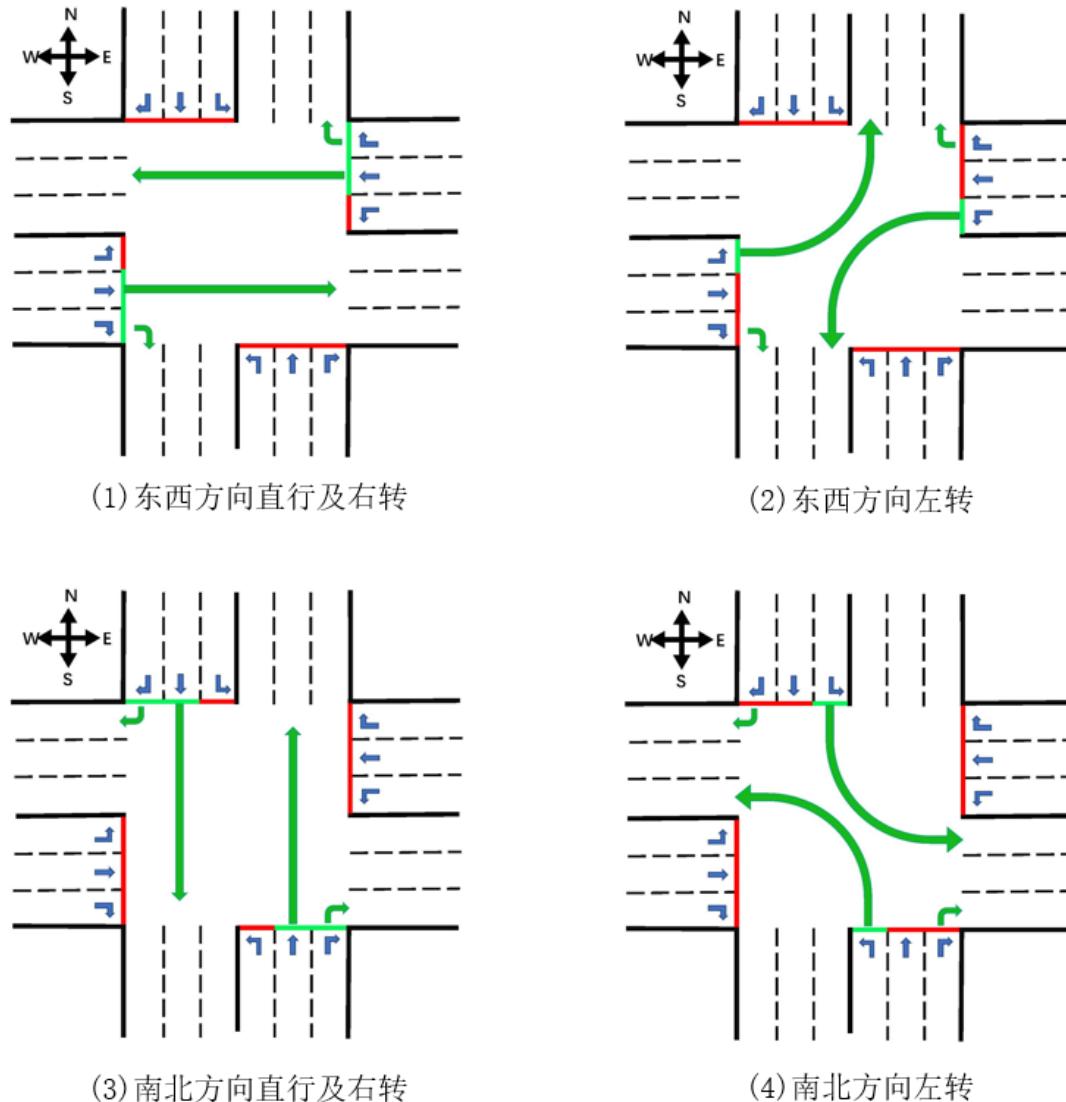


图 2.2: 十字路口交通灯信号相位

T型交叉路口通常使用两相位组成信号相位，信号相位图如2.3所示。

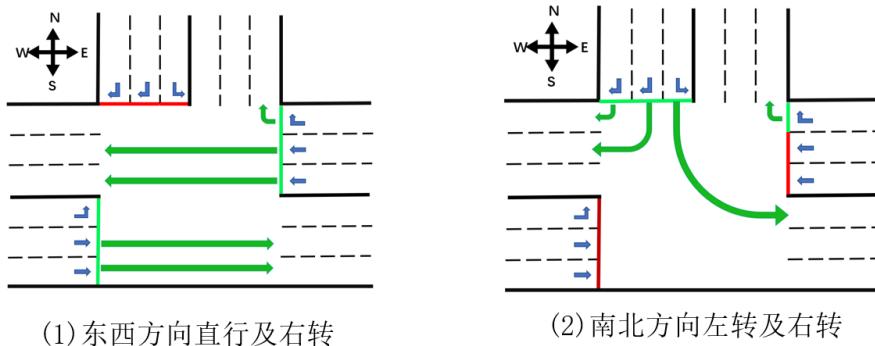


图 2.3: T 型路口交通灯信号相位

如图2.4所示，信号相位绿灯方向的放行车流率与时间的关系。图中  $t_0$  对应绿灯启亮时刻，绿灯启亮后，放行车流率不断上升，至  $t_1$  时刻到达饱和车流率，随后放行车流维持饱和车流率通行，直到  $t_2$  时刻绿灯周期结束，黄灯启亮，此时放行车流率不断下降，在  $t_3$  时刻红灯启亮之前降低为零。

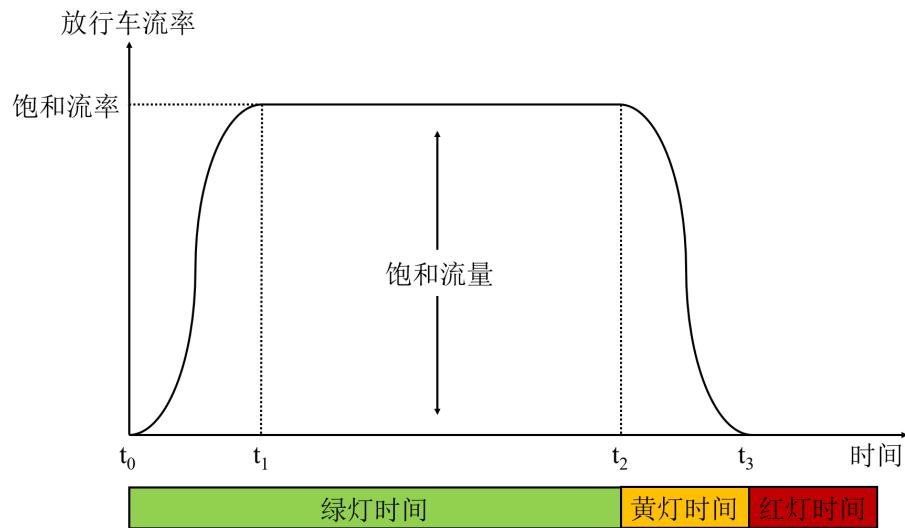


图 2.4: 信号相位绿灯方向的放行车流率与时间的关系

### 2.1.3 绿波带

绿波带是指当车流维持在特定的速度范围内且行驶在特定的交通路线上，每当到行驶到道路交叉口时，恰好遇到的都是绿灯，保证车流一路畅通无阻 [55-56]。

如图2.5所示，绿波带通常设在没有行人或非机动车横穿，且交通秩序良好的城市主干道上。只有维持在绿波速度范围内的车流，才能实现一路畅行且不停车的绿波效应。

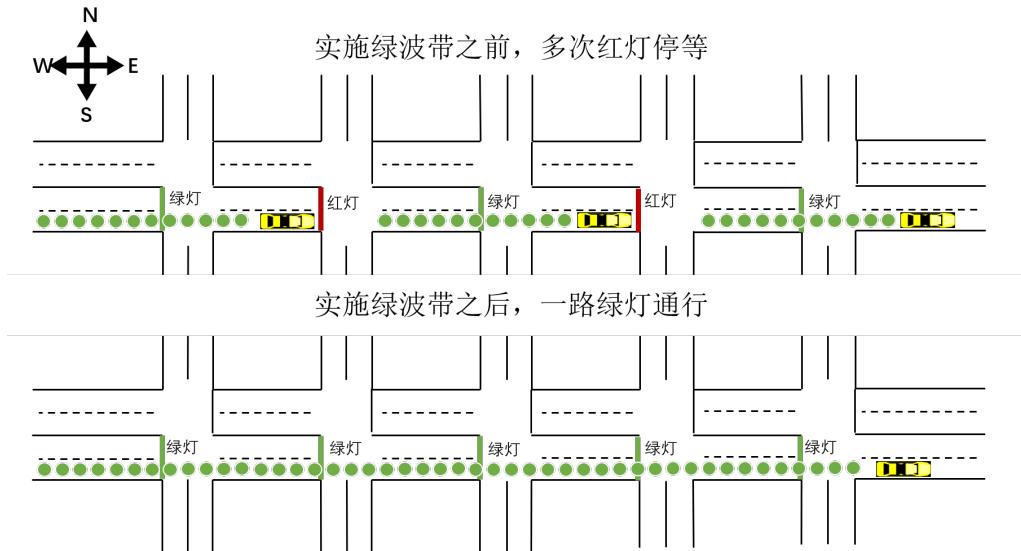


图 2.5: 绿波带示意图

## 2.2 K 均值聚类算法

K 均值聚类算法 [57] 用于把样本集分割成  $k$  个簇，并要求簇内元素尽量密集，簇间元素尽量无关。

输入：训练数据集

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (2.1)$$

其中，包含了  $n$  个样本，每个样本都是  $d$  维数据点，有  $x_i \in R^d$ 。

输出：数据集划分得到的  $k$  个簇

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\} \quad (2.2)$$

有  $C = c_1, c_2, \dots, c_k$ ，每个簇都有对应的质心，表示簇  $c_i$  的均值向量，质心的值为簇内样本均值，质心定义为

$$\mu_i = \frac{1}{|c_i|} \sum_{x \in c_i} x \quad (2.3)$$

聚类目标是使得各簇总的平方误差  $E$  最小，平方误差  $E$  定义为

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in c_i} \|x - \mu_i\|_2^2 \quad (2.4)$$

K 均值聚类算法流程如下：

1. 在确定了需要生成的样本集个数  $k$  后，在数据集中，随机地选择  $k$  个样本作为初始质心： $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ 。
2. 初始化  $k$  个簇，有  $C_t = \phi, t = 1, 2, \dots, k$ ，按照样本与  $k$  个质心之间的欧式距离，把他们分配给距离最近的质心所代表的簇。样本  $x_i$  和各个质心向量  $\mu_j$  的欧式距离定义为
 
$$d_{ij} = \|x_i - \mu_j\|_2^2 \quad (2.5)$$
3. 对于  $j = 1, 2, \dots, k$ ，对所有簇  $C_j$  重新计算新的质心，假设每个质心都不变，那么可以转入步骤 4，否则转到步骤 2。
4. 聚类结束。

为防止 K 均值聚类算法在局部的最小值点上收敛，将反复运算 K 均值聚类算法，并且每次初始化的质心都不同。

### 2.3 二次规划

二次规划是非线性规划中的一种特殊形式，带有二次目标函以及线性约束条件，在实际生活中得到了广泛的应用，它可用于时间调度、规模经济学、工程设计以及控制领域、设施分配、选址问题、二次分配问题以及微观经济学等很多领域中。二次规划 1956 年被提出，到 1986 年 Garcia 等人 [58] 利用二次规划解决动态矩阵问题，1995 年 Boggs 等人 [59] 对二次规划进行了梳理，2005 年 Gill 等人 [60]

提出了一种用于大规模约束优化算法，在2006年Nocedal等人[61]发表了序列二次规划，二次规划被数学家们广泛研究，且在不断地进步。二次规划的标准形式为

$$\min_x \frac{1}{2}x^T Hx + f^T x \quad (2.6)$$

$$s.t. \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (2.7)$$

其中2.6为目标函数，需要找到满足式2.7的约束条件的最小值。二次规划的输出为 $x$ ，代表在满足所有边界和线性约束的条件下对 $\frac{1}{2}x^T Hx + f^T x$ 进行最小化的向量。式2.6中， $H$ 为二次目标项，是 $n \times n$ 的对称矩阵，需要注意的是当 $H$ 为正定矩阵时，可以在多项式时间内求解出二次规划问题，否则，二次规划问题就成为了一个NP难问题。 $f$ 为线性目标项。式2.7中， $A$ 为线性等式约束的实矩阵， $b$ 为线性等式约束的实数向量。 $Aeq$ 为线性不等式约束的实矩阵， $beq$ 为线性不等式约束的实数向量。 $lb$ 为下界，指定为实数向量或实数数组， $ub$ 为上界，指定为实数向量或实数数组。

## 2.4 本章小结

本章介绍了文章中所涉及的预备知识，首先介绍了饱和流量和饱和流率、信号相位和“绿波带”等交通工程相关知识，然后介绍了K均值聚类算法和二次规划以及它们的解法。

### 第三章 面向应急车辆的“绿波带”模型

本章将要介绍面向应急车辆优先通行的“绿波带”模型、本文信号控制方法的系统架构、系统各部分工作流以及整体思路算法。

#### 3.1 “绿波带”模型

本文将整个路网建模为由交叉口和路段所构成的有向图  $G(I, E)$ ，路口抽象为图的顶点，路段抽象为图的边，其中  $I$  表示顶点集和，即交叉口以及起点和终点的集和。 $E$  表示边集和，即路段集和，边由相邻顶点构成，如  $e_1 = (I_1, I_2)$ ，代表  $e_1$  的起点为  $I_1$  终点为  $I_2$ 。应急车辆接收到任务后获取到最快路径，本文将最快路径构建为“绿波带”模型，“绿波带”模型表示为  $p = I_0 \rightarrow I_1 \rightarrow \dots \rightarrow I_n$ ，其中  $(I_i, I_{i+1}) \in E, \forall i \in 1, 2, \dots, n-1$ ，如图3.1所示，应急车辆预计到达路口  $I_i$  的时间记为  $t_i$ ，其中  $I_0$  和  $I_n$  分别代表起点和终点，因此  $t_0 = 0$ ，为应急车辆出发的时刻。 $t_n$  为应急车辆到达目的地的时刻，即旅行时间。

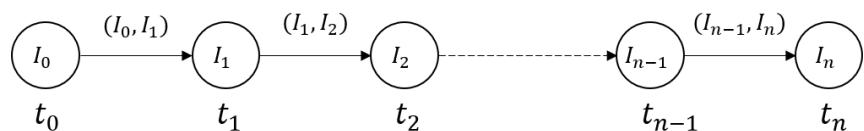


图 3.1: 由连续节点表示的“绿波带”模型

本文中交通路口  $I_i$  的智能交通灯由一个非集中式的智能体  $AGT_i$  控制，定义  $AGT = \{AGT_1, AGT_2, \dots, AGT_i, \dots, AGT_{n-1}\}$ ，每个智能体  $AGT_i$  控制着交通路口  $I_i$  的所有交通灯，因此智能体  $AGT_i$  与交通路口  $I_i$  一一对应，应急车辆最快路径上的智能体模型如图3.2所示。

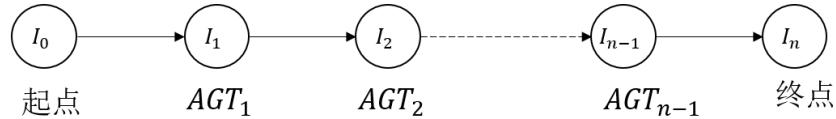


图 3.2: 路口与智能体对应关系

应急车辆预计到达交通灯路口  $I_i$  的时间  $t_i$  至关重要，它在第四章起着关键性的作用。本文中，应急车辆在行驶的过程中，由于道路饱和度的降低以及信号抢占策略，应急车辆能够快速且平稳地行驶，且不会在交通灯路口停止，因此预计到达时间  $t_i$  不考虑在路口停留时间，只跟应急车辆的速度和应急车辆与路口  $I_i$  的距离有关。为了贴近实际物理场景，本文中应急车辆的速度在  $[v - \delta_{spd}, v + \delta_{spd}]$  范围内变化，其中  $v$  为应急车辆在一段行驶时间内的平均速度，由于应急车辆不受道路限速的影响，且应急车辆应以尽可能快的速度行驶，本文设置  $v$  的最大值为道路限速的 1.5 倍， $\delta_{spd}$  表示应急车辆在行驶过程中速度的偏差，取值为  $v$  的 0.2 倍。我们用  $s_i^t$  表示当前时刻  $t$  应急车辆到达前方交通灯路口  $I_i$  的距离，应急车辆到达交通灯路口  $I_i$  的预计到达时间为

$$t_i = t + \frac{s_i^t}{v} \quad (3.1)$$

由于应急车辆受到周围环境的影响，其速度不是固定值，因此预计到达时间不应该为固定值，本文根据 [32] 中的方法，采用预计到达时间范围来表示应急车辆到达的时间范围，使预计到达时间在  $[t_i - \delta_i, t_i + \delta_i]$  之间，其中  $\delta_i$  为应急车辆预计到达路口  $I_i$  的时间偏差， $\delta_i$  的值与应急车辆速度变化范围以及时刻  $t$  应急车辆与交通灯路口  $I_i$  的距离  $s_i^t$  有关， $t_i - \delta_i$  为最快到达时刻， $t_i + \delta_i$  为最慢到达时刻。 $\delta_i$  表示为

$$\delta_i = \frac{\frac{s_i^t}{v-\delta_{spd}} - \frac{s_i^t}{v+\delta_{spd}}}{2} = \frac{s_i^t \times \delta_{spd}}{v^2 - \delta_{spd}^2} \quad (3.2)$$

式中  $\delta_{spd}$  表示应急车辆在行驶过程中速度的偏差， $\mu_t - \delta_{spd}$  为应急车辆在行驶过程中的最小速度， $v + \delta_{spd}$  为应急车辆在行驶过程中的最大速度。当预计到达时

间确定之后，就不需要重复计算，因为预计到达时间一定在  $[t_i - \delta_i, t_i + \delta_i]$  范围内。

### 3.2 系统架构

面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法的系统架构如图3.3所示，当应急车辆接收到紧急任务后，首先获取最快路径，然后获取最快路径上的交叉口，并与所有的交叉口智能体进行通信。途径的交叉口  $I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow \dots \rightarrow I_n$  构成了最快路径，每一个交叉口  $I_i$  有与之对应的智能体  $AGT_i$ 。应急车辆实时地与最快路径上的所有交叉口智能体通信。智能体控制该交叉口的所有交通信号灯，交通信号灯在智能体的控制下进入降低道路饱和度、信号抢占以及恢复交通流阶段。应急车辆与最快路径上的所有智能体并行通信，直到应急车辆通过该智能体对应的交叉口之后才终止通信。

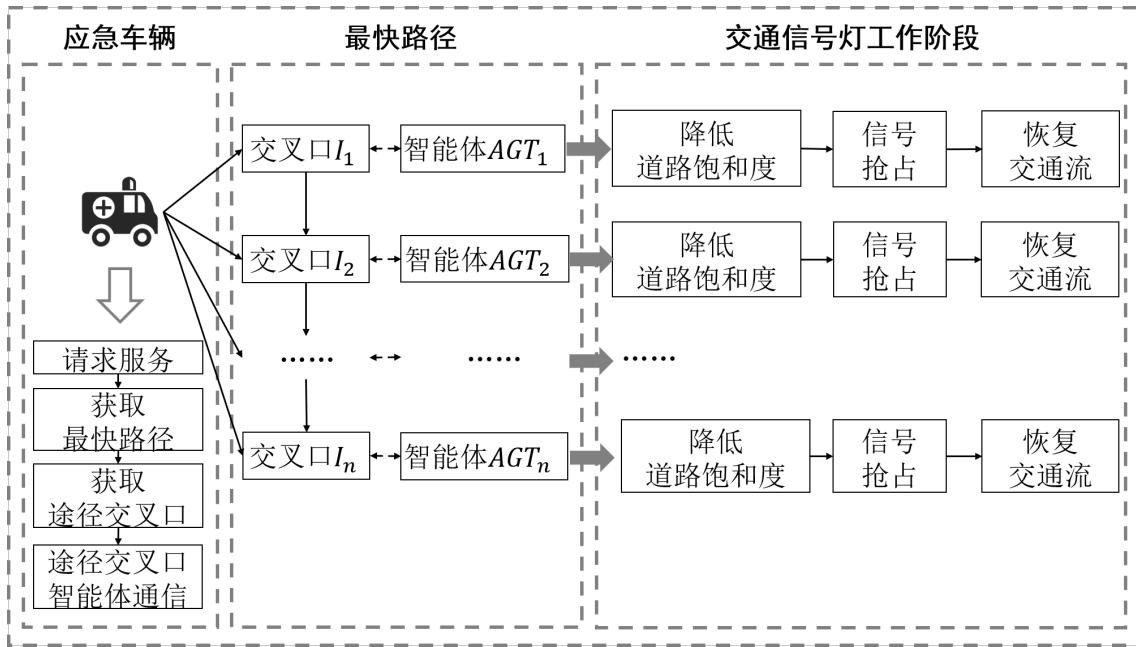


图 3.3: 系统架构

应急车辆、交叉口智能体以及交通信号灯的工作流如图3.4所示。应急车辆接收到紧急任务后，获取最快路径，并向最快路径上所有交通路口智能体发送应急车辆的速度  $v$ 、速度偏差  $\delta_{spd}$ 、应急响应等级 (Emergency Response Level, 简称 ERL) 以及 GPS，并在接下来的行程中，保持与智能体的联系，直至通过智能体所在交叉

口。交叉口智能体通过降低道路饱和度算法、非侵入式信号抢占算法、侵入式信号抢占算法，使得交通信号灯在未请求阶段、降低道路饱和度阶段、信号抢占阶段以及恢复交通流阶段之间过渡。交通信号灯在智能体的控制在以下四个阶段之间过渡：

1. 未请求阶段：没有应急车辆请求条件下的阶段；
2. 降低道路饱和度阶段：在应急车辆请求条件下，为应急车辆的到来降低目标相位对应车道饱和度的阶段；
3. 信号抢占阶段：为应急车辆提供绿灯指引的阶段；
4. 恢复交通流阶段：为降低应急车辆优先对整个交通流造成的负面影响以及过渡到未请求阶段。

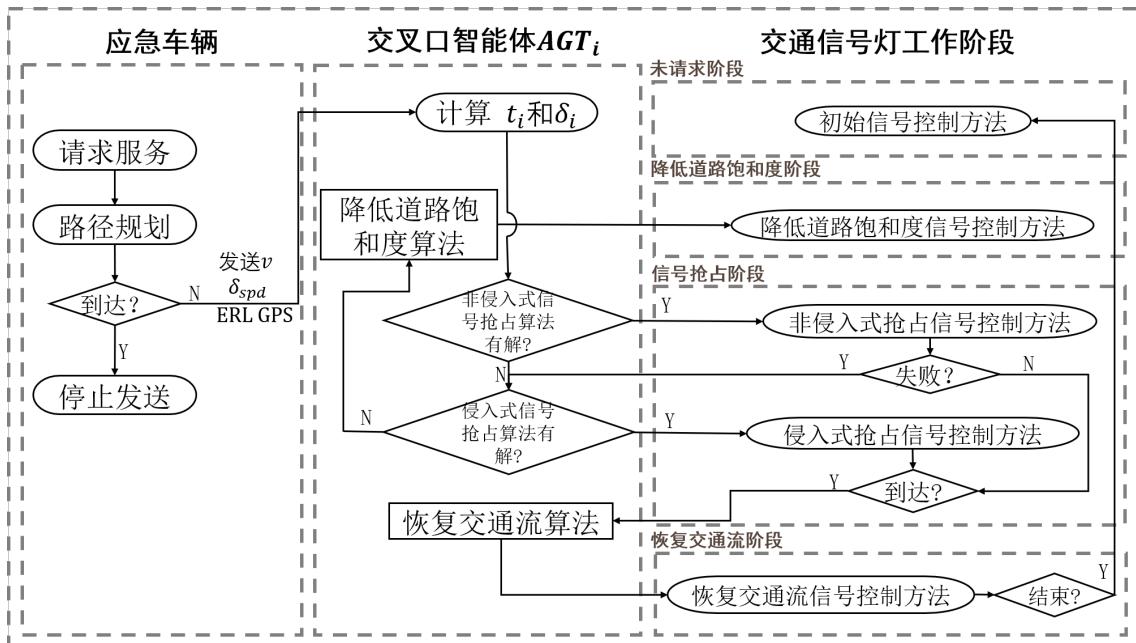


图 3.4: 系统各部分工作流

交叉口智能体  $AGT_i$  的工作流如图3.4所示。交叉路口智能体  $AGT_i$  接收到应急车辆的请求后，根据接收到的  $v$ 、速度偏差  $\delta_{spd}$  以及 GPS 信息计算出应急车辆到达交叉口  $I_i$  的预计到达时间  $t_i$  以及时间偏差  $\delta_i$ 。智能体  $AGT_i$  首先计算非侵入

式信号抢占算法是否有可行解，若不存在可行解，智能体  $AGT_i$  计算侵入式信号抢占算法是否有可行解，若依然不存在可行解，则智能体  $AGT_i$  通过降低道路饱和度算法计算出降低道路饱和度的信号控制方案，使得该路口交通信号灯从使用初始信号控制方法的未请求阶段过渡到降低道路饱和度阶段，采用降低道路饱和度的信号控制方法。当非侵入式信号抢占算法或者侵入式信号抢占算法有可行解时，则使得交通信号灯从原来的阶段过渡到信号抢占阶段，若非侵入式信号抢占算法有可行解，则优先采用非侵入式信号抢占方法，侵入式信号抢占方法作为兜底措施，保证应急车辆快速通过交叉路口而无需停车和降速。当应急车辆通过交叉路口后，智能体通过恢复交通流算法，计算出恢复交通流阶段的各信号相位时长，恢复交通流阶段的信号控制方案能够使得交通流在最快的时间内恢复。交通灯从信号抢占阶段过渡到恢复交通流阶段。当恢复交通流阶段的信号周期执行结束，交通信号灯回到未请求阶段，采用初始的信号控制方法。

### 3.3 算法描述

算法的输入为  $v$ ,  $\delta_{spd}$ , ERL, GPS。输出为交通信号灯采取的信号控制方法，包含了初始信号控制方法、降低道路饱和度信号控制方法、非侵入式抢占信号控制方法、侵入式抢占信号控制方法以及恢复交通流信号控制方法。当交叉口智能体  $AGT_i$  接收到应急车辆的请求后，根据交通信号灯所在的阶段执行不同的算法。

1. 当交通信号灯处于未请求阶段或者降低道路饱和度阶段。流程图如3.5所示。  
运算非侵入式抢占算法，若有可行解，则交通信号灯过渡到信号抢占阶段，并输出非侵入式抢占控制方法。若没有可行解，运算侵入式抢占算法，如果当前时刻需要进行侵入式信号抢占，则交通信号灯过渡到信号抢占阶段，并输出侵入式抢占信号控制方法。若还没有到达侵入式抢占信号跳转时刻，则运算降低饱和度算法，输出降低道路饱和度信号控制方法。

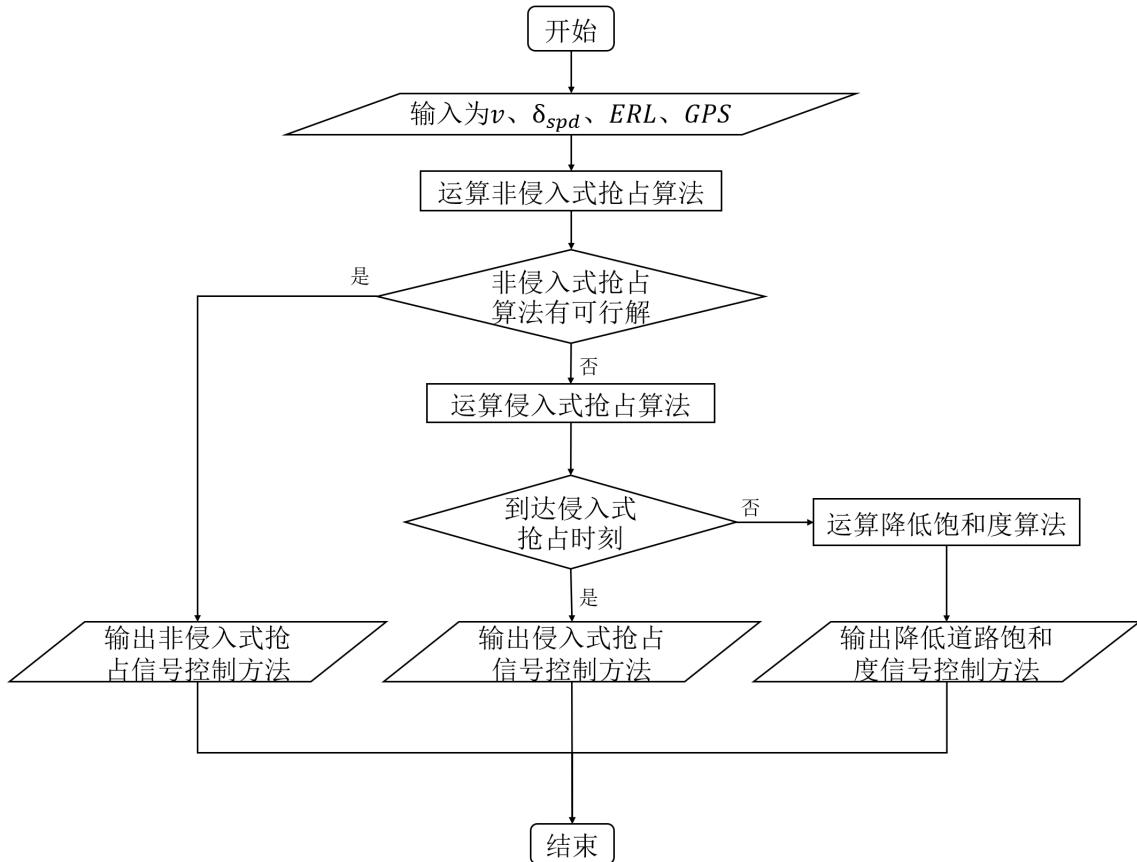


图 3.5: 未请求阶段和降低道路饱和度阶段的信号控制流程图

2. 当交通信号灯处于信号抢占阶段。首先判断应急车辆是否已经通过交叉路口，若应急车辆已经通过交叉路口，则交通信号灯过渡到恢复交通流阶段，运算恢复交通流算法，并输出恢复交通流信号控制方法。若应急车辆没有通过交叉路口，且交通信号灯正在采用非侵入式抢占信号控制方法，当检测到非侵入式抢占失败时，则需要重新运算非侵入式抢占算法，若有可行解，则更新非侵入式抢占信号控制方法的信号配时。若没有可行解，运算侵入式抢占算法，如果当前时刻需要进行侵入式信号抢占，输出侵入式抢占信号控制方法。若还没有到达侵入式抢占信号跳转时刻，则交通灯过渡到降低道路饱和度阶段，运算降低饱和度算法，输出降低道路饱和度信号控制方法。

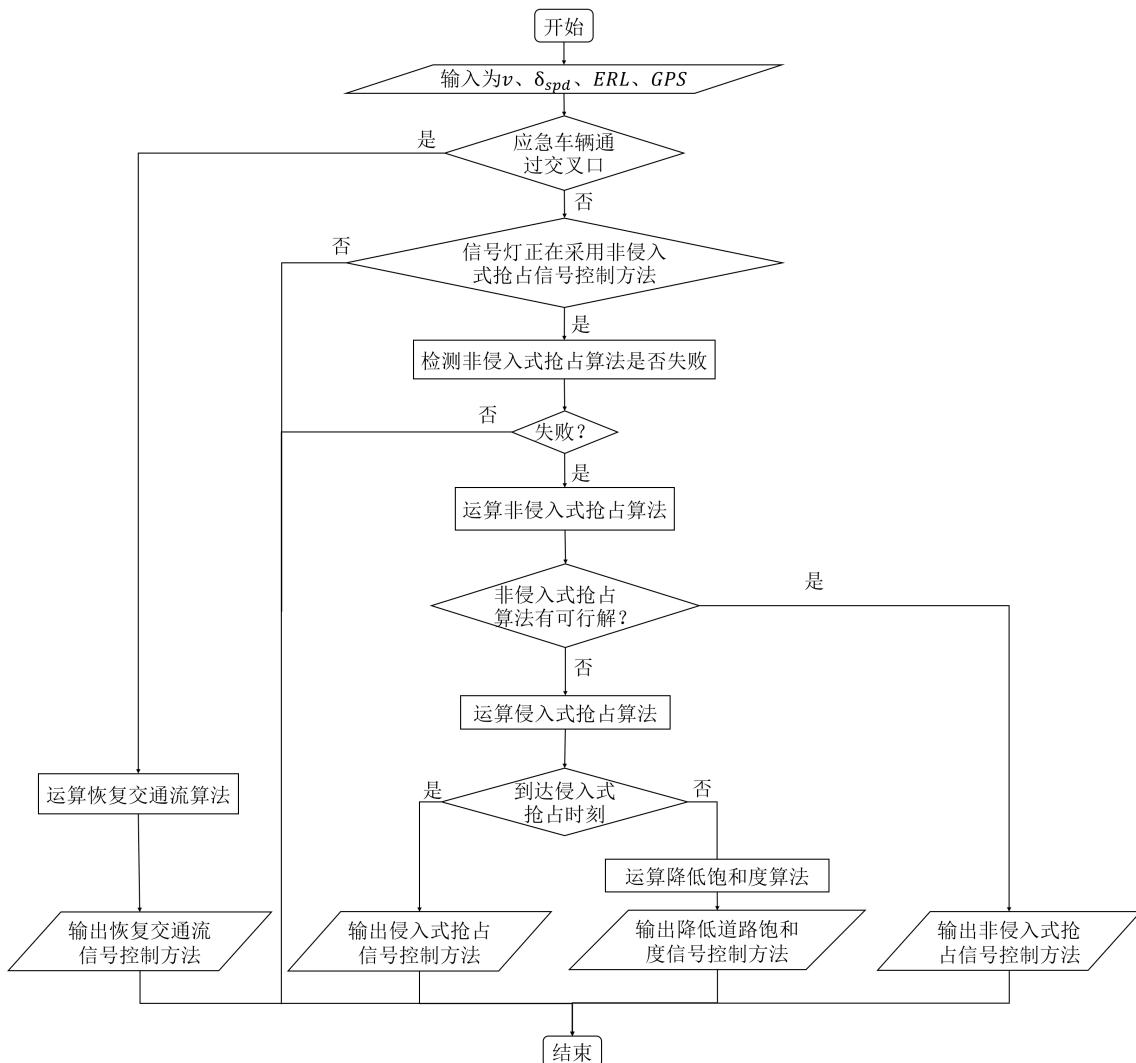


图 3.6: 信号抢占阶段信号控制流程图

3. 当交通信号灯处于恢复交通流阶段。如果当前恢复周期执行结束，过渡到未请求阶段，输出初始信号控制方法。

伪代码如1所示。

---

**Algorithm 1** 信号控制算法
 

---

**输入:**  $v, \delta_{spd}, ERL, GPS$

**输出:** 交通信号灯采取的信号控制方法

- 1: **while** 接受到应急车辆的请求 **do**
- 2: 计算  $t_i$  和  $\delta_i$ , 根据式3.1和3.2
- 3: **if** 交通信号灯处于未请求阶段或者降低道路饱和度阶段 **then**

```
4:     运算非侵入式抢占算法
5:     if 非侵入式抢占算法有可行解 then
6:         交通信号灯进入信号抢占阶段
7:         return 非侵入式抢占信号控制方法
8:     else
9:         运算侵入式抢占算法
10:        if 到达侵入式抢占时刻 then
11:            交通信号灯进入信号抢占阶段
12:            return 侵入式抢占信号控制方法
13:        else
14:            if 交通信号灯处于未请求阶段 then
15:                交通信号灯进入道路饱和度阶段
16:            end if
17:            return 降低道路饱和度信号控制方法
18:        end if
19:    end if
20:    else if 交通信号灯处于信号抢占阶段 then
21:        if 应急车辆通过交叉口 then
22:            交通信号灯进入恢复交通流阶段
23:            return 恢复交通流信号控制方法
24:        else
25:            if 交通信号灯正在采用非侵入式抢占信号控制方法 then
26:                if 非侵入式抢占信号控制方法失败 then
27:                    运算非侵入式抢占算法
28:                    if 非侵入式抢占算法有可行解 then
29:                        return 更新非侵入式抢占信号控制方法
30:                    else
31:                        运算侵入式抢占算法
32:                        if 到达侵入式抢占时刻 then
33:                            return 侵入式抢占信号控制方法
34:                        else
35:                            运算降低饱和度算法
36:                            交通信号灯进入降低道路饱和度阶段
37:                            return 降低道路饱和度信号控制方法
38:                        end if
39:                    end if
40:                end if
```

```
41:      end if
42:      end if
43: else
44:     if 恢复周期执行结束 then
45:       交通信号灯进入未请求阶段
46:       return 初始信号控制方法
47:     end if
48:   end if
49: end while
```

---

### 3.4 本章小结

本章构建了面向应急车辆优先通行的“绿波带”模型，将交叉口视为结点，路段视为边，每个交叉口都有与之对应的智能体。路网建模完成之后，本文设计了计算到达交叉口预计到达时间的算法，并根据应急车辆速度的动态性将预计到达时间的时间偏差考虑在内。本章还构建了包含应急车辆模块、最快路径模块以及交通信号灯模块的系统架构，并设计了应急车辆、交叉口智能体以及交通信号灯的工作流程。最后本章设计了面向应急车辆优先通信的交通信号灯智能控制方法整体思路算法。

## 第四章 交通信号灯智能控制方法

本章将要介绍降低道路饱和度信号控制方法、信号抢占方法、恢复交通流方法。

### 4.1 按需降低道路饱和度及普通车辆让行

#### 4.1.1 降低道路饱和度的目的

为了使得应急车辆在道路上行驶的过程中受普通车辆的影响尽可能小，本文通过降低道路饱和度的方式使得普通车辆有空间为应急车辆让行，如图4.1所示，当道路饱和度较高时，普通车辆无法为应急车辆让行，因此普通车辆限制了应急车辆的行驶，使得应急车辆无法以更快的速度行驶，进而间接性地延长了应急车辆的旅行时间。

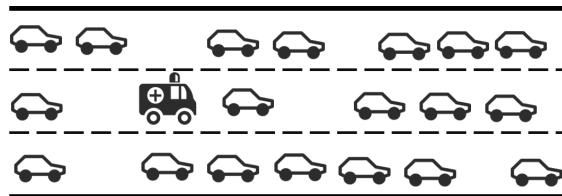


图 4.1: 道路饱和度较高，普通车辆无法让行

本文希望通过降低饱和度，使得应急车辆有空间为应急车辆让行，如图4.2所示，道路饱和度相对较低，普通车辆向道路两旁让行，应急车辆前方无其他车辆，这为应急车辆创造了卓越的道路条件，因此应急车辆可以以更快地速度行驶，进而缩短旅行时间。

在交叉口层面，当道路饱和度较高时，交叉口在应急车辆前进方向的入口道上聚集了大量的社会车辆。本文希望在应急车辆到达交叉口之前，尽量减少应急

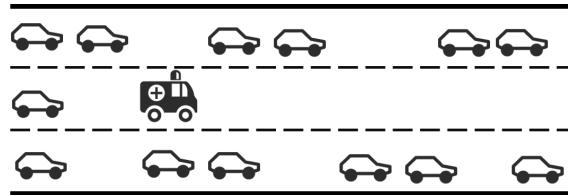


图 4.2: 道路饱和度降低, 普通车辆让行

车辆入口车道的排队车辆数, 并且在应急车辆通过路口后, 前方的排队车辆也可以及时地给紧急车辆让行, 这将体现在下一节的信号抢占部分。

为了更好地解释降低道路饱和度在交叉口层面的作用, 用图4.3和4.4表示没有使用降低道路饱和度信号控制算法, 应急车辆在到达交叉口之前与到达交叉口时入口车道上的交通情况。图4.5和4.6表示使用降低道路饱和度信号控制算法, 应急车辆在到达交叉口之前与到达交叉口时入口车道上的交通情况。图中仅画出应急车辆所在车道的车辆, 其余车辆暂不考虑。

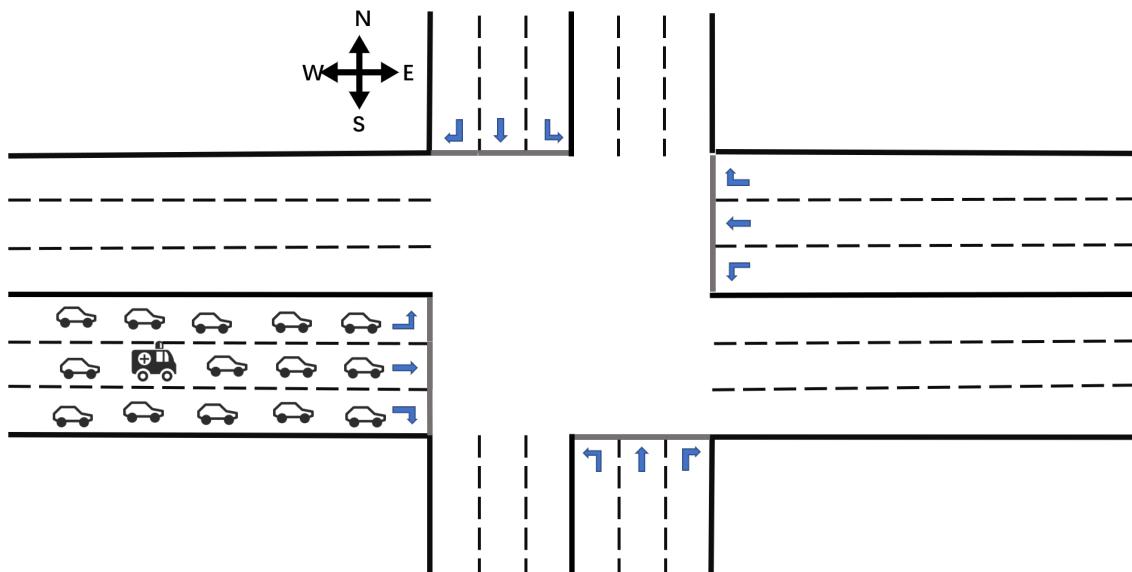


图 4.3: 不采取降低道路饱和度信号控制算法, 应急车辆到达交叉口时道路情形图

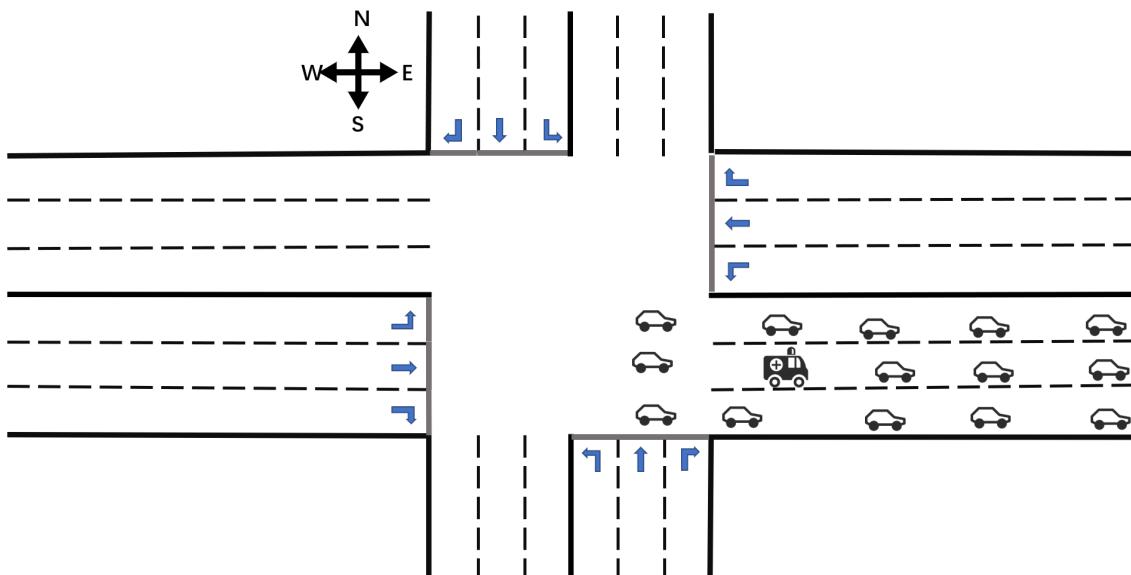


图 4.4: 不采取降低道路饱和度信号控制算法, 应急车辆通过交叉口后道路情形图

图4.3表示在不实施降低道路饱和度信号控制算法的情况下, 由于应急车到达路口时的前面排队车辆较多, 因此必须等到前面的排队车辆全部清空后方可通过路口。图4.4的情况下, 应急车辆通过交叉口后, 前方有普通车辆阻碍了应急车辆的前进, 使得应急车辆无法以更快的速度行驶。

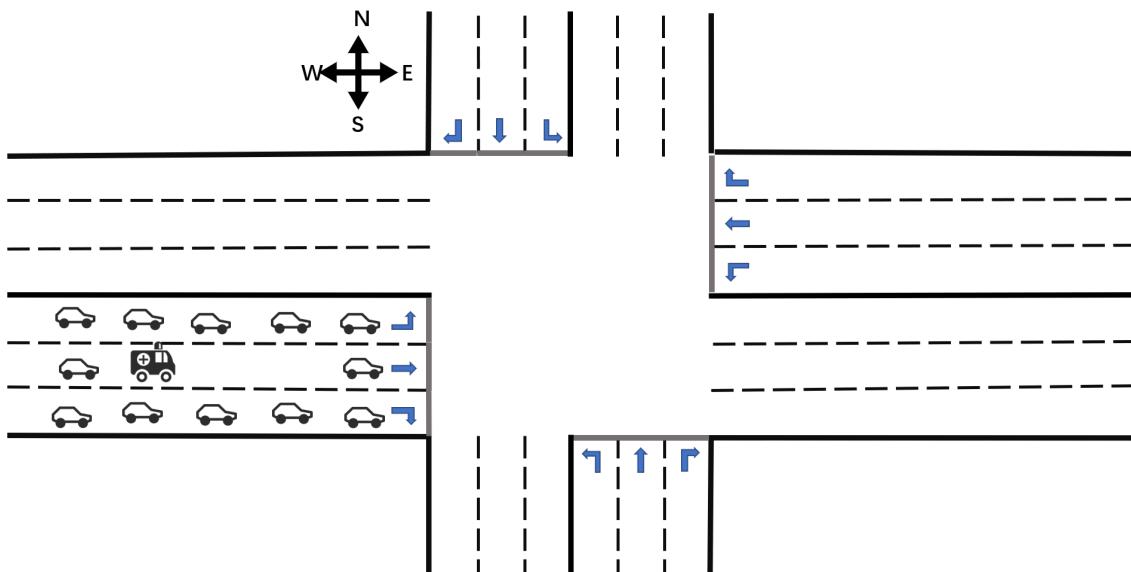


图 4.5: 采取降低道路饱和度信号控制算法, 应急车辆到达交叉口时道路情形图

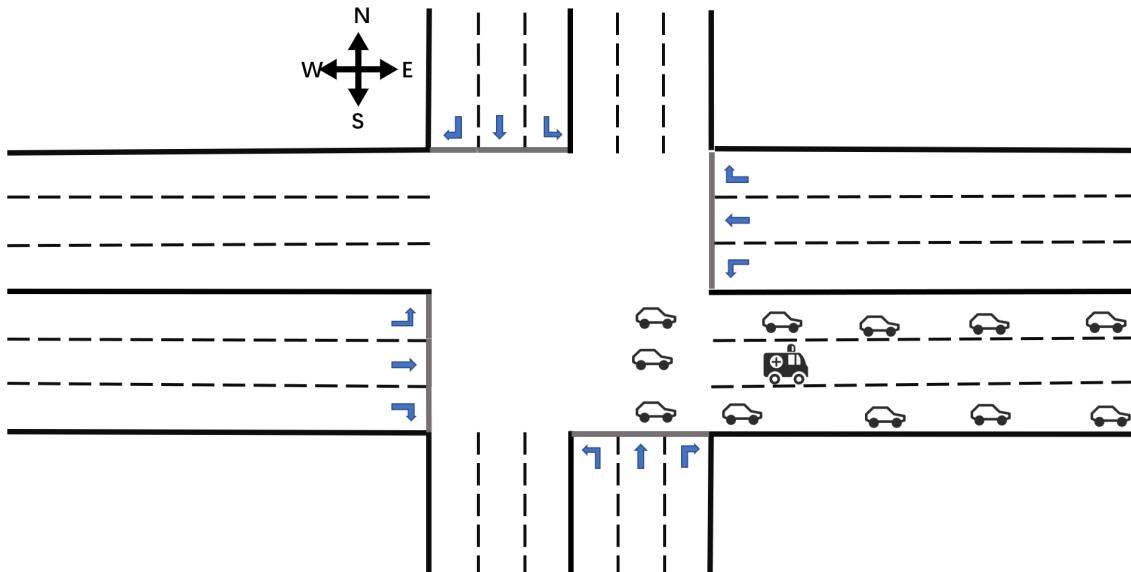


图 4.6: 采取降低道路饱和度信号控制算法, 应急车辆通过交叉口后道路情形图

图4.5表示在采取降低道路饱和度信号控制算法的情况下, 应急车辆到达交叉口时的前方排队车辆与图4.4相对减少, 需要等待前方排队车辆清空的时间也会相对地减少。图4.6表示在采取降低道路饱和度信号控制算法的情况下, 应急车辆通过交叉口后, 前方没有普通车辆阻碍应急车辆的前进, 使得应急车辆能够以更快的速度行驶。

由上文可知, 采取降低道路饱和度算法有三个突出优势:

1. 智能体控制交通信号灯按需降低道路饱和度, 使得距离应急车辆前方一定范围内的普通车辆有空间为应急车辆让行, 应急车辆能够以更快的速度行驶, 缩短了应急车辆的旅行时间;
2. 由于饱和度降低以及普通车辆对应急车辆让行, 应急车辆能以更快且更加稳定的速度向目的地行驶, 使得速度偏差减小, 预计到达时间的计算更加精确。
3. 应急车辆在行驶的过程中, 道路状况良好, 交叉口排队车辆相对减少, 提升了信号抢占阶段抢占方法的成功率, 更容易体现面向应急车辆的“绿波带”效应;

#### 4.1.2 降低道路饱和度模型构建

本文中降低道路饱和度程度 (The demand for reducing road saturation, 简称 DRRS) 受到应急响应等级 (Emergency Response Level, 简称 ERL)、路段拥堵等级 (Congestion Level of Road Section, 简称 CLRS) 以及时间紧迫等级 (Time Urgent Level, 简称 TUL) 三方面影响。ERL 是根据国家规定 [62] 分为四级, CLRS 根据标准 [63] 分为四级, TUL 表示应急车辆到达交叉口的时间紧迫程度, 到达交叉口的时间越短, TUL 越高。ERL 越高, 路段拥堵情况越严重, 时间越紧迫, 则应急车辆请求方向上的绿灯延长时间越长。此外本文不改变信号相位顺序, 只增加相关相位的绿灯时间。

对于应急响应等级, 根据国家突发公共事件应急预案规定 [62], ERL 分为特别重大 (I 级响应)、重大 (II 级响应)、较大 (III 级响应)、一般 (IV 级响应) 四级, 如表4.1所示。

表 4.1: 突发事件应急响应等级

应急响应等级 (ERL)	严重程度
I	特别重大
II	重大
III	较大
IV	一般

根据标准 [63], 将 CLRS 分为严重拥堵 (IV 级)、中度拥堵 (III 级)、轻度拥堵 (II 级)、畅通 (I 级) 四级。本文给出了针对应急车辆的路段平均速度与交通拥堵关系, 如表4.2所示。

表 4.2: 针对应急车辆的城市路段平均速度与路段拥堵等级的关系

速度限制	平均行程车速 (km/h)			
80	$\geq 55$	[40,55)	[30,40)	[0,30)
70	$\geq 50$	[40,50)	[30,40)	[0,30)
60	$\geq 45$	[40,45)	[30,40)	[0,30)
50	$\geq 40$	[35,40)	[25,35)	[0,25)
$< 40$	$\geq 35$	[30,35)	[25,30)	[0,25)
$< 40$	[25, 限速值)	[20,25)	[10,20)	[0,10)
拥堵程度	畅通	轻度拥堵	中度拥堵	严重拥堵
路段拥堵等级 (CLRS)	IV 级	III 级	II 级	I 级

对于 TUL，根据预计到达时间分为严重紧急 (III 级)、比较紧急 (II 级)、一般紧急 (I 级) 三级，如表4.3所示。

表 4.3: 预计到达时间与时间紧迫等级的关系

$t_i(\text{min})$	时间紧迫等级 (TUL)	紧急程度
(0,5)	I	非常紧急
(5,10)	II	比较紧急
(10,30)	III	一般紧急

为了得到 ERL、CLRS 以及 TUL 对降低道路饱和度程度 (DRRS) 的影响程度，创建关于 ERL、CLRS 以及 TUL 相关的正互反矩阵，行元素  $i$  相对于列元素  $j$  的重要程度表示为  $a_i^j$ 。计算 DRRS 的目的是为了按需降低道路饱和度，当 ERL 越高，则目标相位延长的绿灯时间越长，例如遇到特大火灾，ERL 为 I 级，则应该牺牲交通成本来挽救生命和减少财产损失。道路饱和度与道路拥堵情况紧密相关，道路越拥堵，则目标相位延长的绿灯时间越长。TUL 越高，表示应急车辆预计到达时间越短，因此要尽快降低道路饱和度，反之，应急车辆还要等比较长的一段时间后才会到达交叉口，因此目标相位延长的绿灯时间可以短一些。

表 4.4: 关于 ERL、CLRS 和 TUL 的正互反矩阵

指标	应急响应等级 (ERL)	路段拥堵等级 (CLRS)	时间紧迫等级 (TUL)
应急响应等级 (ERL)	1	1/5	1/3
路段拥堵等级 (CLRS)	5	1	3
时间紧迫等级 (TUL)	3	1/3	1

各元素的权重关系可由使用本文信号控制方法所在地的实际情况进行评估，本文采用附录 B 中的调查问卷结果，得到如表4.4所示的正互反矩阵。其中 CLRS 比 ERL 明显重要，TUL 比 ERL 稍微重要，CLRS 比 TUL 稍微重要。最后经过归一化计算可得 ERL 的权重为 0.1031，道路状况的权重为 0.6053，预计到达时间的权重为 0.2915。即可得降低道路饱和度迫切程度 DRRS 的评估模型为

$$DRRS = ERL^{0.1031} \times CLRS^{0.6053} \times TUL^{0.2915} \quad (4.1)$$

#### 4.1.3 面向应急车辆的降低道路饱和度方法

依据 4 级应急响应分级、4 级路段拥堵等级和 3 级时间紧迫等级，DRRS 一共有 48 种情况，使用 K 均值聚类算法将 48 种情况分为 5 个簇。最终分类结果如附录中表 A 所示，DRRS 值越小，目标相位需要延长的时间就越长。

通过 K 均值聚类算法得出 DRRS 值所属的簇，每个簇对应不同的目标相位延长时间，如表4.5所示。但是随着时间的推移，ERL、CLRS 以及 TUL 都有可能发生变化，ERL 有可能升高也有可能降低，由于目标相位时间的延长，CLRS 可能降低，也可能出现短时间内大量车辆涌入路段中导致 CLRS 升高，TUL 随着时间升高，因此每秒钟都根据实际情况，计算 DRRS 值，如目标相位需要延长的时间发生了变化，则重新设置目标相位的时间，将目标相位的延长时间改为新的 DRRS 值所在簇对应的目标相位延长时间。例如，以 ERL 为 I 级，CLRS 为 I 级，TUL 为 II 级为例，DRRS 值离 1.2273 的欧式距离最近，属于簇  $c_1$ ，应急车辆请求方向上的绿灯时间延长 40s。经过一段时间后，ERL 变为 II 级，CLRS 降为 II 级，TUL 升为

I 级, 此时, DRRS 值离质心 1.6701 最近, 属于簇  $c_2$ , 目标相位绿灯时间延长 40s 改为延长 30s。此外, 在准备阶段的目标相位时长将一直作用到抢占状态结束。

表 4.5: 目标相位延长时间参照表

簇	质心	簇内样本 (ERL, CLRS, TUL)	目标相位延长时间 (s)
$c_1$	1.2273	(I,I,II)	40
$c_2$	1.6701	(II,II,I)	30
$c_3$	2.2333	(I,IV,I)	20
$c_4$	2.7658	(IV,III,II)	10
$c_5$	3.3414	(IV,IV,II)	0

## 4.2 信号抢占方法

本文为应急车辆提供了能够一路通行的快速通过“绿波带”方法, 应急车辆总能够快速通过交叉口。降低道路饱和度能够让应急车辆以尽可能快的速度行驶, 在接下来的文章中, 本文将描述, 怎样使得应急车辆无障碍通过路口, 使应急车辆连续通过多个路口而无需停车。

### 4.2.1 非侵入式信号抢占方法

面向应急车辆的信号抢占策略已经被广泛研究, 并且取得了不错的效果, 闵万里等人 [32] 通过修改信号周期与信号相位时长的方式让应急车辆到达时刻刚好落在目标相位, 经落地实验表明, 这种弹性信号抢占方案能够极大程度地降低应急车辆优先对整个交通造成的影响。因此, 本文在此基础上, 对他们的算法做了进一步的改进与创新, 提出了一种基于多智能体的非侵入式信号抢占方法以体现面向应急车辆的“绿波”效应。

图4.7描述了非侵入式信号抢占方法的一个例子。交叉口  $I_i$  的智能体  $AGT_i$  在  $t$  时刻接收到来自应急车辆的请求, 根据式3.1计算出应急车辆预计到达交叉口  $I_i$  的时间为  $t_i$ , 该方法尝试找到一个适用于交叉口  $I_i$  交通信号灯的新周期  $T'_i$  (原周期为  $T_i$ ) 和相位分配方案使得应急车辆到达交叉口  $I_i$  的时间范围  $[t_i - \delta_i, t_i + \delta_i]$  刚

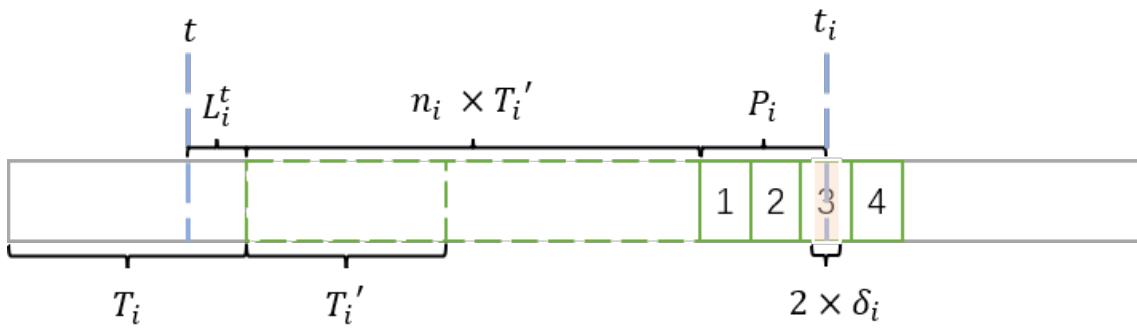


图 4.7: 非侵入式信号抢占方法

好落在目标相位中（本例中目标相位为相位 3）。图中  $L_i^t$  代表时刻  $t$  到新周期  $T_i'$  第一次开始的时间间隔， $n_i$  表示信号灯从  $t$  时刻到  $t_i$  时间范围内完整新周期  $T_i'$  的个数， $n_i$  的计算公式为

$$n_i = \left\lfloor \frac{t_i - t - L_i^t}{T_i'} \right\rfloor \quad (4.2)$$

$P_i$  代表  $n_i$  个新周期结束到  $t_i$  的时间间隔， $P_i$  的计算公式为

$$P_i = t_i - t - L_i^t - n_i \times T_i' \quad (4.3)$$

本文结合实际情况，根据交叉口的排队车辆数，与实际通行率的比值，得出清空排队车辆所需的时间。清空应急车辆入口车道方向的排队车辆所需时间  $Q_i$  计算为

$$Q_i = \frac{N_i^t}{S_i - A_i} \quad (4.4)$$

式中  $N_i^t$  代表  $t$  时刻交叉口  $I_i$  在应急车辆入口车道方向的排队车辆数目， $S_i$  则表示路口  $I_i$  应急车辆入口车道方向的通行能力，代表了单位时间车辆通过该车道交通信号灯交叉口停车线的最大流量， $A_i$  为交叉口  $I_i$  应急车辆入口车道方向的车辆到达率， $S_i$  与  $A_i$  的差值为车道的实际通行率。

本文用代价时间  $\Delta w_i$  表示交叉口清空应急车辆入口车道方向的排队车辆、确保应急车辆与普通车辆安全距离以及普通车辆为应急车辆让行需要的时间之和， $\Delta w_i$  表示为

$$\Delta w_i = \Delta_i \times (Q_i + (n_i + 1) \times T_{lost} + SIT + YT) \quad (4.5)$$

其中  $Q_i$  为上文所述清空排队车辆所需时间,  $T_{lost}$  为车辆启动损失时间, 由于每一个周期内, 应急车辆入口车道排队车辆都有启动损失时间, 因此需要计算  $n_i + 1$  次车辆启动损失时间,  $SIT$ (Safe Interval Time) 为保证该交叉口行车安全的安全时间间隔,  $YT$ (Yield Time) 为交叉口普通车辆为应急车辆让行所需的时间,  $\Delta_i$  代表在交叉口  $I_i$  的应急车辆入口车道是否存在排队车辆, 其值为

$$\Delta_i = \begin{cases} 0, & N_i^t = 0 \\ 1, & N_i^t > 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

若应急车辆入口车道不存在排队车辆, 即  $N_i^t$  的值为 0, 则  $\Delta_i$  的值 0, 若  $N_i^t$  的值大于 0,  $\Delta_i$  的值为 1。

基于文献 [32] 中 QP 二次规划问题 (Quadratic programming, 简称 QP) 来描述解决方案, 定义了四种类型的变量:

1. 输入:  $PN$  代表周期中信号相位个数、 $TP$  是目标相位、 $g_i^k$  代表交叉口  $I_i$  原本信号控制方案中第  $k$  信号相位时长、 $t$  代表当前时间、 $t_i$  为应急车辆预计到达时间、 $\delta_i$  代表应急车辆到达交叉口  $I_i$  的时间偏差、 $L_i^t$  代表应急车辆向智能体  $AGT_i$  发出请求的时刻到原周期结束时刻的时间间隔、 $YR_i$  代表交叉口  $I_i$  信号相位切换期间的黄灯时间和全红时间之和;
2. 超参数:  $\beta$  代表目标函数中平衡总周期变化与单相时长变化的参数、 $T_i^{min}$  和  $T_i^{max}$  分别代表交叉口  $I_i$  交通信号灯信号控制周期的上下界、 $\tau_i^{min}$  和  $\tau_i^{max}$  分别代表交叉口  $I_i$  单相位时长的上下界;
3. 输出:  $g_i^{1'} \dots g_i^{PN'}$  为优化后的各相位时长排列;
4. 中间变量:  $k$  代表信号相位序号,  $i$  代表交叉口序号,  $T_i$  和  $T_i'$  分别为交叉口  $I_i$  当前周期时长与优化后的新周期时长、 $n_i$  为第  $i$  交叉口应急车辆预计到达时间之前的新周期个数。

$$\min_{(T'_i, g_i^{k'})} \left( (T'_i - T_i)^2 + \beta \sum_{k=1}^{PN} (g_i^{k'} - g_i^k)^2 \right) \quad (4.7)$$

$$s.t. \begin{cases} T_i = \sum_{k=1}^{PN} (g_i^k + YR_i), T'_i = \sum_{k=1}^{PN} (g_i^{k'} + YR_i) \end{cases} \quad (4.8a)$$

$$\sum_{k=1}^{TP-1} (g_i^{k'} + YR_i) < P_i + \delta_i \leq \sum_{k=1}^{TP} (g_i^{k'} + YR_i) - YR_i \quad (4.8b)$$

$$\sum_{k=1}^{TP-1} (g_i^{k'} + YR_i) \leq P_i - \delta_i < \sum_{k=1}^{TP} (g_i^{k'} + YR_i) - YR_i \quad (4.8c)$$

$$T_i^{\min} \leq T'_i \leq T_i^{\max} \quad (4.8d)$$

$$\forall k \in PN, \tau_i^{\min} \leq g_i^{k'} \leq \tau_i^{\max} \quad (4.8e)$$

$$n_i \times g_i^{TP'} + P_i - \sum_{k=1}^{TP-1} (g_i^{k'} + YR_i) \geq \Delta w_i \quad (4.8f)$$

二次规划的目的在于在满足式 4.8a-4.8f 的情况下，获取目标函数4.7的最优解。本文希望通过二次规划方法获得使得周期与信号相位时长变化最小的信号控制方案。目标函数的解需要满足式 4.8a-4.8f 的条件。式 4.8a 为原始周期与新周期时长的计算方式，式 4.8b 和式 4.8c 确保了预计到达时间落在目标相位上。式 4.8d 和 4.8f 分别代表信号周期时长与信号相位时长的时间限制，式 4.8f 确保了应急车辆到达时前方无排队车辆，且普通车辆能够为应急车辆让行，且保证了应急车辆通过交叉口后，普通车辆与应急车辆保持安全距离，应急车辆能够以更快的速度行驶。

本文对文献 [32] 的改进如下：

1. 将相位切换期间的黄灯时间和全红时间考虑在内，使得算法更加符合实际场景；
2. 原文中排队车辆通过计算机视觉技术获取，将排队车辆长度除以清空排队车辆的速度（原文中为 5m/s）获取清空排队车辆所需时。一方面受天气影响可能导致排队车辆计算不准确，另一方面没有考虑到  $t$  到  $t_i$  时间段内到达交叉口的排队车辆，因此本文通过传感器计算排队车辆数，并将  $t$  到  $t_i$  时间段内

到达目标相位绿灯方向的排队车辆考虑在内，再结合车道通行能力与到达率更加精准地计算清空排队车辆所需的时间，本文计算清空排队车辆的方法更加科学合理；

由于信号相位时长受到  $\tau_i^{min}$  和  $\tau_i^{max}$  的限制，信号周期受到  $T^{min}$  和  $T^{max}$  限制，对于预计到达时间较短的应急车辆，例如消防站附近的交叉口，智能体来不及为应急车辆规划出可行的非侵入式信号抢占方案，故本文提出了一种侵入式信号抢占方法，以弥补该算法的不足。

#### 4.2.2 侵入式信号抢占方法

当非侵入式抢占方法无法得出可行解时，采取侵入式信号抢占方法。图4.8为侵入式抢占示意图，该方法在预计到达时间  $t_i$  之前清空应急车辆前方排队车辆，保证普通车辆能够为应急车辆让行，以及保证应急车辆与普通车辆之间保持安全距离。

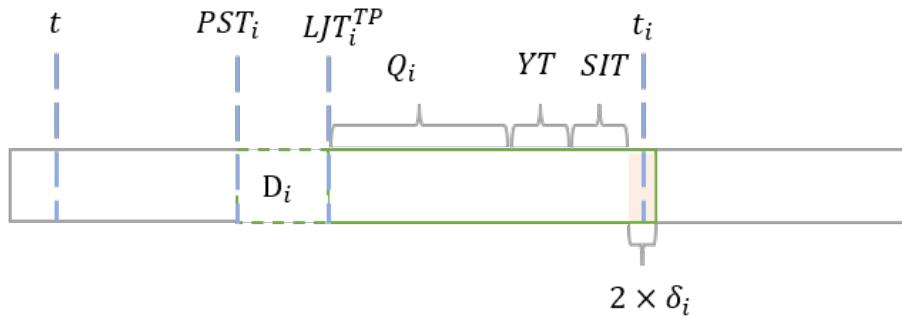


图 4.8: 侵入式信号抢占方法

图中  $LJT_i^{TP}$  表示交叉口  $I_i$  的交通信号灯最迟跳转到目标相位  $TP$  的时刻，其值为

$$LJT_i^{TP} = t_i - \delta_i - SIT - YT - Q_i \quad (4.9)$$

其中  $\delta_i$  代表应急车辆到达交叉口  $I_i$  的时间偏差，根据式3.2计算其值。 $SIT$ (Safe Interval Time) 为保证该交叉口行车安全的安全时间间隔。 $YT$ (Yield Time) 为交叉口普通车辆为应急车辆让行所需的时间。 $Q_i$  为清空应急车辆入口车道方向的排队

车辆所需时间，可根据式4.4计算。信号灯最迟在  $LJT_i^{TP}$  时刻跳转到目标相位，能够确保在预计到达时间之前能够清空排队车辆，并保证应急车辆与普通车辆之间保持安全距离，且保证了普通车辆能够为应急车辆让行。若信号灯跳转时刻大于  $LJT_i^{TP}$ ，则应急车辆入口车道的普通车辆无法为应急车辆让行，甚至无法清空排队车辆。若信号灯跳转时刻小于  $LJT_i^{TP}$ ，可能导致道路清空很长一段时间后，应急车辆才到达交叉口，这样会造成时间的浪费，并对其他方向的普通车辆造成影响。因此  $LJT_i^{TP}$  必须保证在预计到达时间之前清空排队车辆，并保证应急车辆与普通车辆之间保持安全距离，以及保证普通车辆能够为应急车辆让行。

图中  $PST_i$  为  $LJT_i^{TP}$  在原信号控制策略中所处相位开始时刻。 $D_i$  的值为

$$D_i = LJT_i^{TP} - PST_i \quad (4.10)$$

表示若信号灯在  $LJT_i^o$  时刻跳转到目标相位，被抢占相位持续的时间，其值为  $LJT_i^o$  与被抢占相位开始时刻  $PST_i^p$  的差值。

如图4.9所示，计算出  $LJT_i^{TP}$  和  $D_i$  之后，需要根据  $LJT_i^{TP}$  在原信号控制策略中所处相位是否为目标相位以及  $D_i$  判断信号灯跳转的时刻。令  $Jump_i^{TP}$  为交叉口  $I_i$  智能体  $AGT_i$  控制交通信号灯跳转到目标相位  $TP$  的时刻，若  $LJT_i^{TP}$  落在目标相位上，信号灯无需做多余的信号抢占， $Jump_i^{TP}$  的值为  $PST_i$ 。当  $LJT_i^{TP}$  不在目标相位上，则  $Jump_i^{TP}$  的值计算为

$$Jump_i^{TP} = \begin{cases} PST_i, & D_i < G_{minS} \\ LJT_i^{TP}, & D_i \geq G_{minS} \end{cases} \quad (4.11)$$

根据  $D_i$  的值确定  $Jump_i^{TP}$ ，为保证行车安全，信号相位的持续时间不得小于保证行车安全的最短绿灯时间  $G_{minS}$ ，即当  $D_i < G_{minS}$  时， $Jump_i^{TP}$  的值为  $PST_i$ ，否则  $Jump_i^{TP}$  的值为最迟跳转时间  $LJT_i^{TP}$ 。侵入式抢占算法如算法2所示。

最终，信号灯在  $Jump_i^{TP}$  跳转到目标相位，当应急车辆通过交叉口后，信号灯由信号抢占阶段进入恢复交通流阶段。

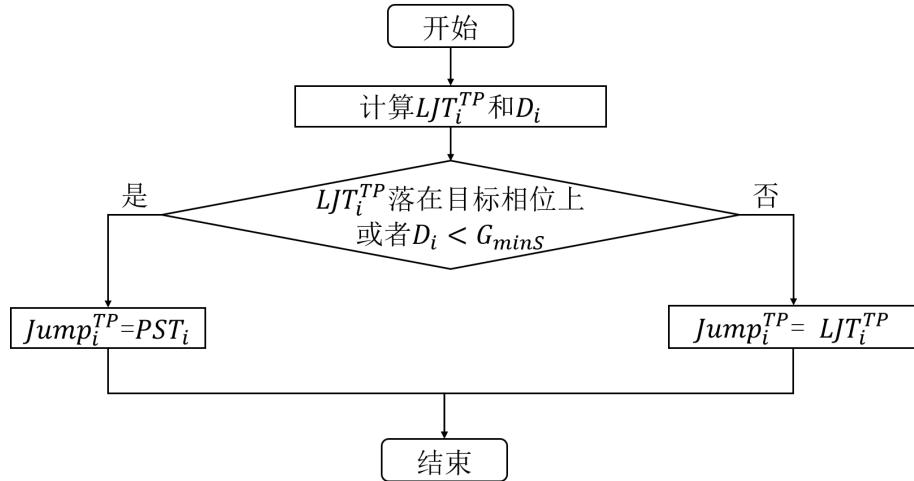


图 4.9: 信号跳转的时刻

**Algorithm 2** 侵入式信号抢占算法**Input:**  $t_i, \delta_i, SIT, YT, Q_i$ **Output:**  $Jump_i^{TP}$ 

- 1:  $LJT_i^{TP} = t_i - \delta_i - SIT - YT - Q_i$
- 2:  $D_i = LJT_i^{TP} - PST_i$
- 3: **if**  $LJT_i^{TP}$  在目标相位上 or  $D_i < G_{minS}$  **then**
- 4:      $Jump_i^{TP} = PST_i$
- 5: **else**
- 6:      $Jump_i^{TP} = LJT_i^{TP}$
- 7: **end if**

### 4.3 恢复交通流

恢复阶段起始于应急车辆通过交叉口，然后以进入未请求阶段结束。该阶段能够让交叉口各方向车道排队车辆数尽可能恢复原貌，并且能够让信号控制方法恢复到信号抢占之前的初始信号控制方法。为达到恢复交通流的目的，本文使得交叉口各方向车道车辆排队数小于等于未请求状态下的平均排队车辆数  $AVE_i^k$ 。

当交通信号灯在某一信号相位下，将消散该信号相位绿灯方向的排队车辆，以图2.2中图(1)为例，当交通信号灯处于该相位时，由西到东与由东到西两条车道上的车辆都会消散，这里以直行为例，先不考虑右转的情况。恢复交通流阶段需要将

两条车道排队车辆数都恢复到没有应急车辆请求状态下的平均排队车辆数，因此仅需要考虑排队车辆数更多的车道即可，当信号相位时长能够满足将该车道排队车辆数疏散到小于等于没有应急车辆请求的平均排队车辆数，那么排队车辆数少的车道也能实现。

以图4.10为例，假设样例中的交叉口为第1个交叉口，使得 $N_i^k$ 为恢复阶段开始时交叉口 $I_i$ 交通信号灯 $k$ 相位绿灯方向排队车辆数较大一边车道聚集的排队车辆数。例如， $N_1^1$ 表示恢复阶段开始时交叉口1的交通信号灯在第1相位，即东西方向直行及右转相位时，绿灯方向排队车辆数较大一边的排队车辆数目。由图可得，东西方向直行及右转相位需要至少清除5辆车，东西方左转相位的需要至少清除4辆车，南北方向直行及右转相位的需要至少清除2辆车，南北左转相位的需要至少清除2辆车，因此有 $N_1^1 = 5$ 、 $N_1^2 = 4$ 、 $N_1^3 = 2$ 和 $N_1^4 = 2$ 。

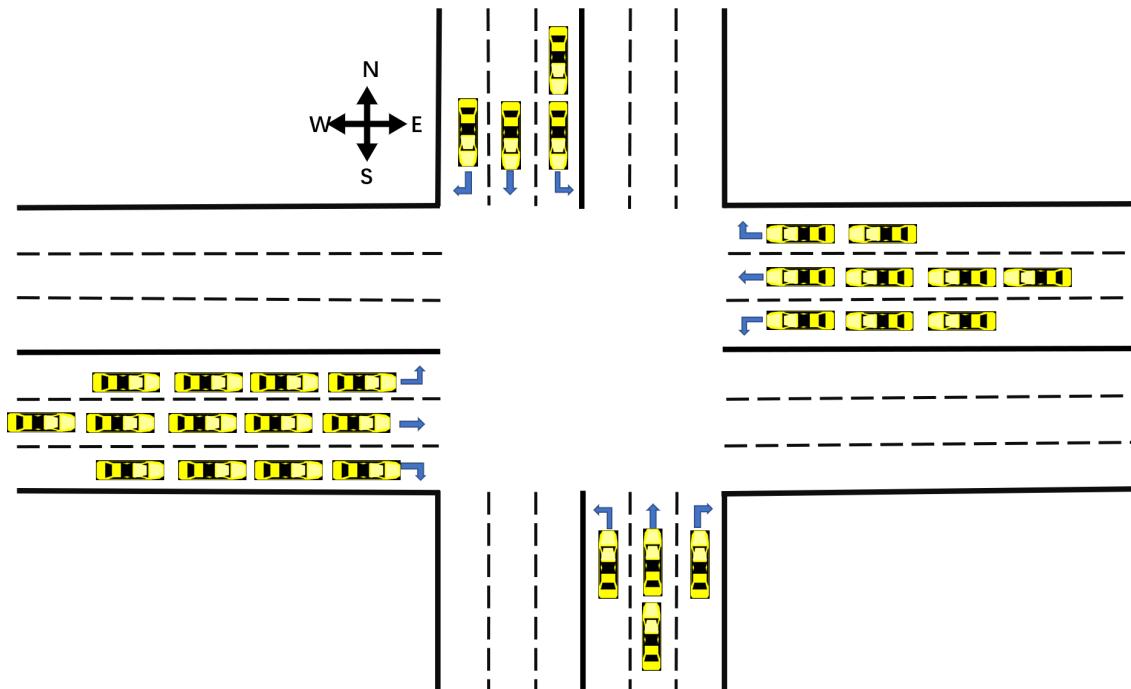


图 4.10: 交叉口样例

为使得交叉口各方向车辆排队数小于等于没有应急车辆请求状态下的平均排队车辆数。本文将该解决方案公式化为线性规划问题 (Linear Problem, 简称 LP)，表示为

$$\min_{x_i^k} \sum_{k=1}^{PN} x_i^k \quad (4.12)$$

$$s.t. \left\{ \begin{array}{l} \forall k \in PN, \quad \tau_i^{min} \leq x_i^k \leq \tau_i^{max} \end{array} \right. \quad (4.13a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \forall k \in PN, \quad EQN_i^k = N_i^k + A_i^k \times \sum_{j=1}^{PN} x_i^j \end{array} \right. \quad (4.13b)$$

$$\left. \begin{array}{l} \forall k \in PN, \quad VC_i^k = x_i^k \times S_i^k \end{array} \right. \quad (4.13c)$$

$$\left. \begin{array}{l} \forall k \in PN, \quad EQN_i^k - VC_i^k \leq AVE_i^k \end{array} \right. \quad (4.13d)$$

其中,  $x_i^k$  表示交叉口  $I_i$  的交通信号灯在恢复阶段第  $k$  相位的时长, 式 4.12 为目标函数, 目的是让过渡阶段各相位绿灯时长之和最短, 这样就能够将交通流恢复到没有应急车辆请求状态。在使得各相位绿灯时长之和最短的同时, 需要满足式 4.13a-4.13d。式 4.13a 确保了各相位绿灯时间在最小绿灯时间  $\tau_i^{min}$  和最大绿灯时间  $\tau_i^{max}$  之间。式 4.13b 中  $EQN_i^k$  表示第  $i$  个交叉口第  $k$  相位预计排队车辆数, 其值为  $N_i^k$  与恢复周期内到达的排队车辆数之和, 式中  $A_i^k$  为交叉口  $I_i$  第  $k$  相位绿灯方向车道的到达率,  $A_i^k \times \sum_{j=1}^{PN} (x_i^k + YR_i)$  为恢复阶段到达交叉口第  $k$  相位绿灯方向车道的排队车辆数。公式 4.13c 中  $VC_i^k$  表示第  $i$  个交叉口第  $k$  相位在该相位时间内能够清除的排队车辆数,  $S_i^k$  为交叉口  $I_i$  交通信号灯  $k$  相位绿灯方向车道的饱和流率,  $x_i^k \times S_i^k$  为  $x_i^k$  时间内疏通的排队车辆数。式 4.13d 中  $EQN_i^k - VC_i^k$  为恢复阶段结束时, 该车道的排队车辆数, 其值应小于等于  $AVE_i^k$ 。

当应急车辆通过交叉口后, 智能体通过恢复阶段信号控制算法设置交通信号灯各相位绿灯时长, 待各相位结束, 交通信号灯恢复到没有应急车辆请求下的信号控制方案。本文通过整个交通路网中的平均等待时间反映恢复阶段的效果。车辆等待时间一般表示车速低于或等于  $0.1m/s$  的时间, 因此在本文中车辆等待时间为车辆等红灯的时间, 以及道路拥挤或发生车祸情况下的车速低于或等于  $0.1m/s$  的时间, 整个交通路网中的平均等待时间是整个交通路网中所有车辆的等待时间的平均。平均等待时间越小, 表示本文恢复策略表现效果越好。这将在第 5 章的实验中详细分析。

#### 4.4 本章小结

本章提出了一种面向应急车辆优先的“绿波带”信号配置策略，通过提前降低道路饱和度、为应急车辆提供信号抢占以及恢复整个交通流三个阶段保障应急车辆一路快速绿灯通行。第一阶段降低道路饱和度程度 (DRRS) 根据应急响应等级 (ERL)、路段拥堵等级 (CLRS) 以及时间紧迫等级 (TUL) 得出目标相位绿灯延长时长。为确保应急车辆到达交叉口时能快速通过交叉口，第二阶段结合侵入式抢占方法与非侵入式抢占方法为应急车辆提供绿灯指引，使得应急车辆能够快速通过交叉口而不停止。第三阶段通过重新规划信号周期与交叉口各相位绿灯时间，调节交叉口各入口方向交通流量，降低应急车辆优先对整个交通造成的影响。

## 第五章 基于 SUMO 平台的实验评估与分析

为了验证本文提出的面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法的可行性与先进性，在 SUMO 平台上进行了反复多次实验。接下来将从实验目的、实验设计、实验环境及参数设置、实验结果分析这四个方面对实验过程及结果进行详细介绍。

### 5.1 实验目的

本实验的目的是验证本文提出的面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法的可用性及先进性，为了实现这一目的，将从以下几个方面设计并进行实验：

1. 在本文的信号控制方法中，应急车辆是否能够以更加平稳的速度行驶？这不仅体现了降低道路饱和度算法的可行性，还体现了信号抢占算法的可行性。
2. 本文方法是否能够缩短应急车辆的旅行时间，与现有的方法相比是否具有优越性？即使用本文方法与使用经典的信号控制方法相比，本文是否具有明显优势？
3. 使用本文方法，是否能够尽可能降低应急车辆优先对整个交通路网造成的影响？

### 5.2 实验设计

在这一节中，我们在城市交通模拟器(Simulation of Urban Mobility，简称 SUMO)中进行实验，它能够协助我们设计路网、设计交通灯信号配时方案以及完成应急

车辆的路径规划。如图5.1所示，本文提取了上海市消防局附近的道路环境，并设计如图5.2所示的交通路网，包含 10 个十字路口以及 15 个 T型路口，并对所有交叉路口以及拐弯处进行了编号。路口之间的距离根据高德地图测距设置。道路中黄色的车辆为普通车辆，用红圈标记的车辆为应急车辆。路网中，十字路口信号相位如图2.2所示，每个相位的持续时间为 45 秒，交通灯从一个相位跳转到另一个相位之间有 3 秒黄灯时间和 2 秒的全红时间。为了验证本文方法是否能够灵活应用于其他交叉路口，本文将该算法也应用到了各种 T型路口上，为了证明本文方法具有普适性，T型路口交通灯由 SUMO 随机配置。

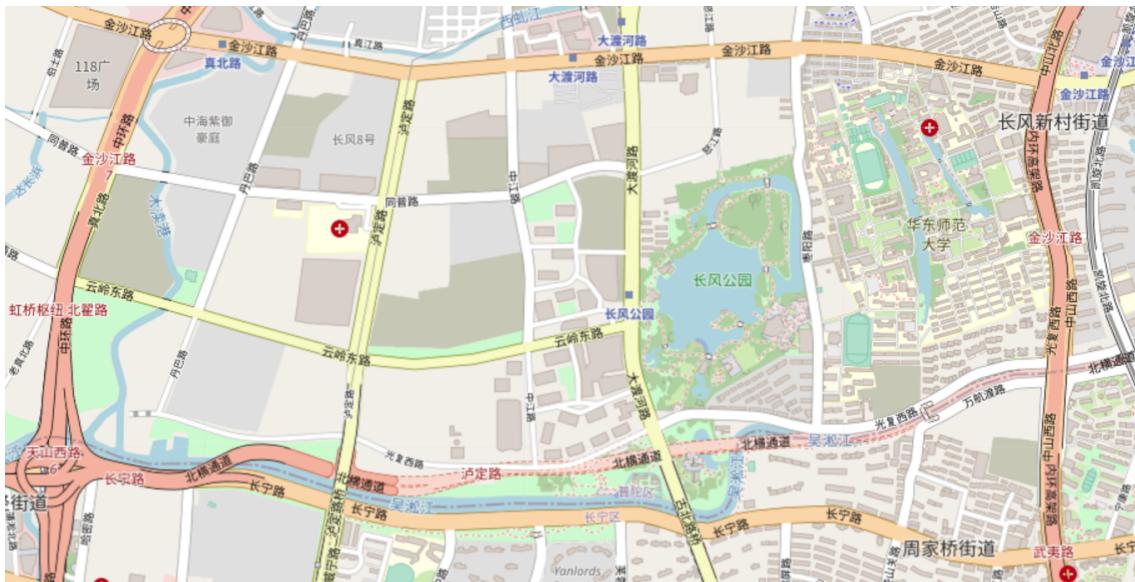


图 5.1: 上海市消防局附近的道路环境

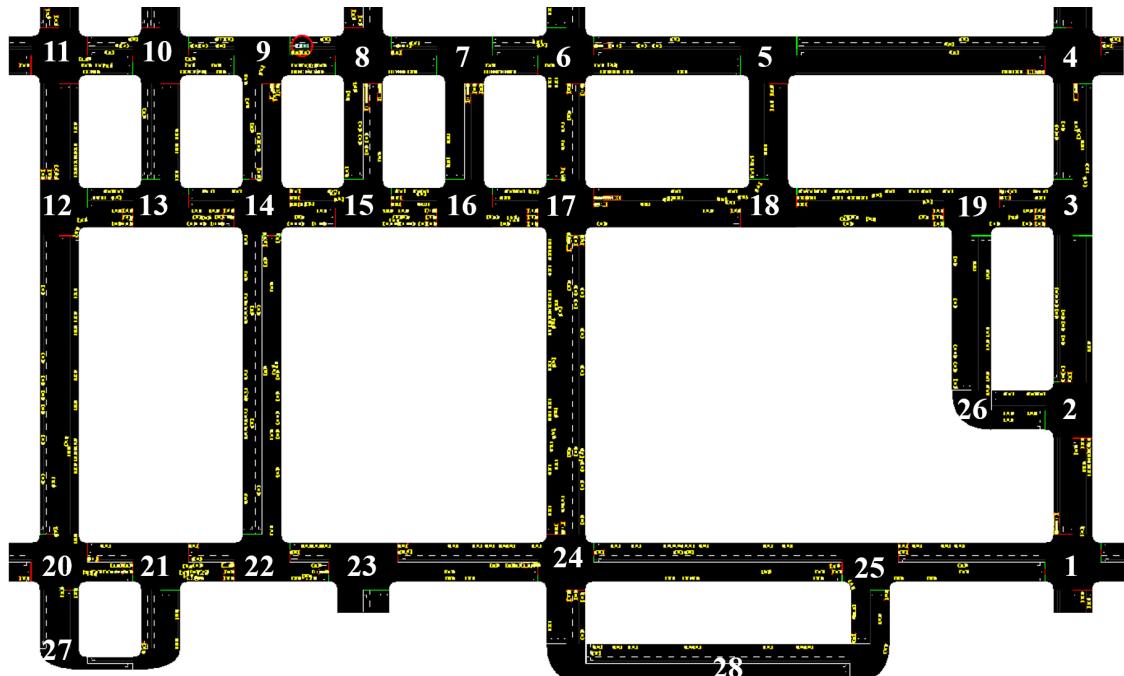


图 5.2: 交通路网

在同一路网条件下，对 5 辆应急车辆预先定义好不同的起止点，按照最短路径选定 5 条相应的应急车辆通行路线，路线编号分别为 1、2、3、4、5，5 条路线的路线距离以及路线如表 5.1 所示，其中路线为应急车辆经过交叉口以及拐弯处的编号组成。各路线如图 5.3 到图 5.7 所示。

表 5.1: 路线及其距离

路线编号	路线距离 (m)	路线
1	1256.59	1→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11
2	9372.05	1→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11→12
3	8521.16	1→2→3→4→5→6→7→8→9→14→15
4	8465.14	11→10→9→8→7→6→5→4→3→2→1
5	5938.61	20→27→21→22→14→9→8→7→6

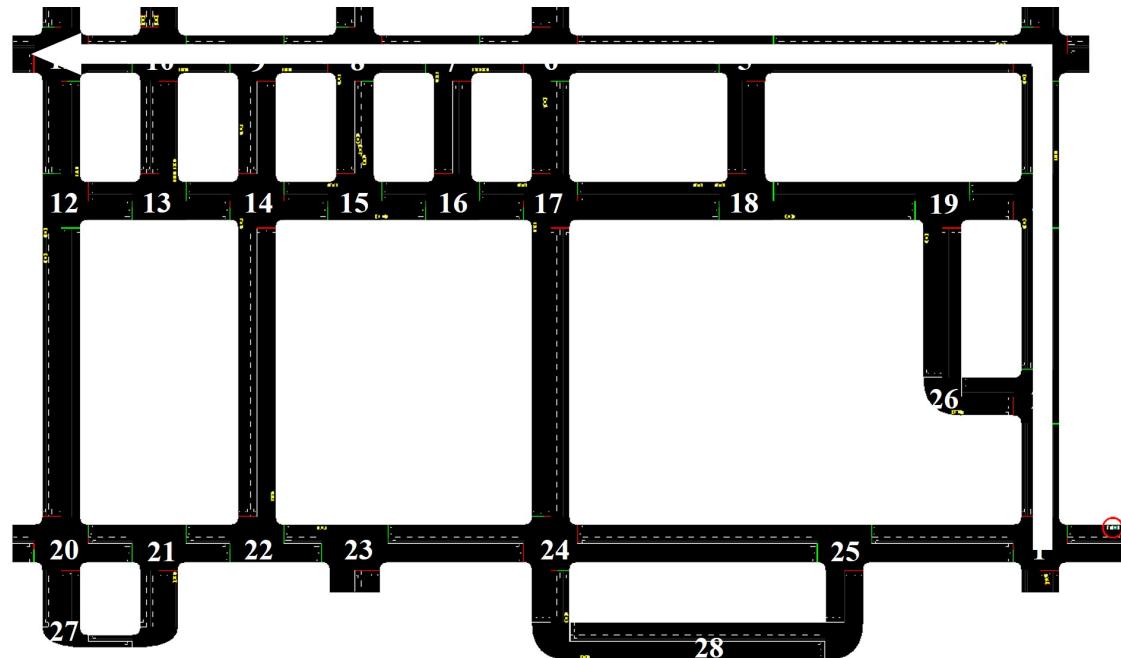


图 5.3: 路线 1

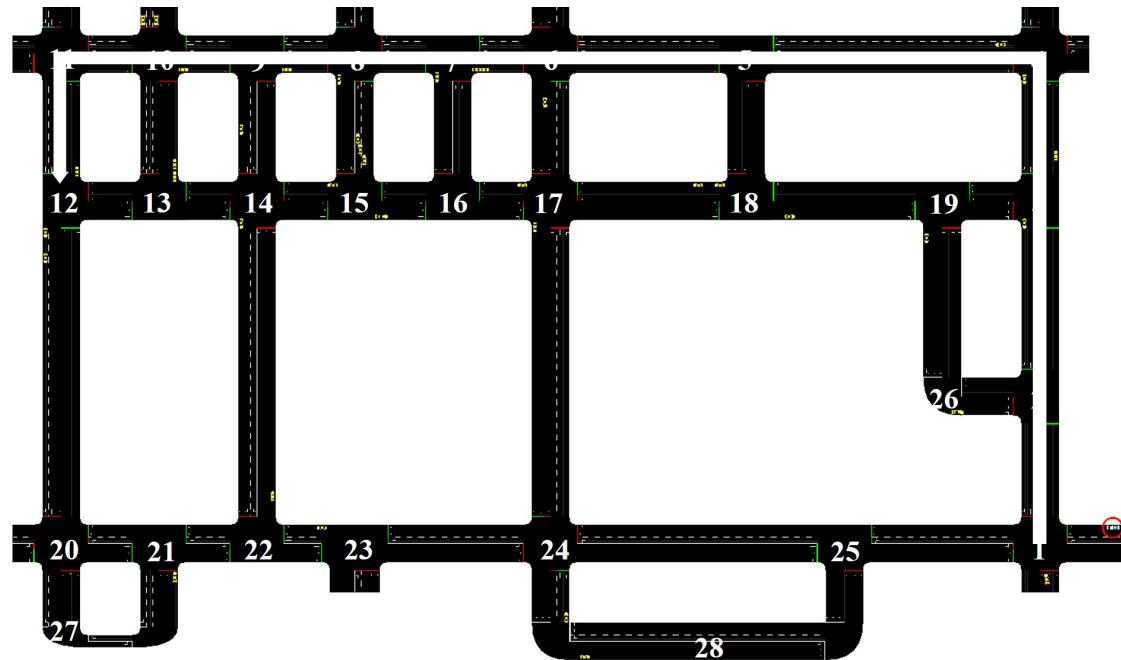


图 5.4: 路线 2

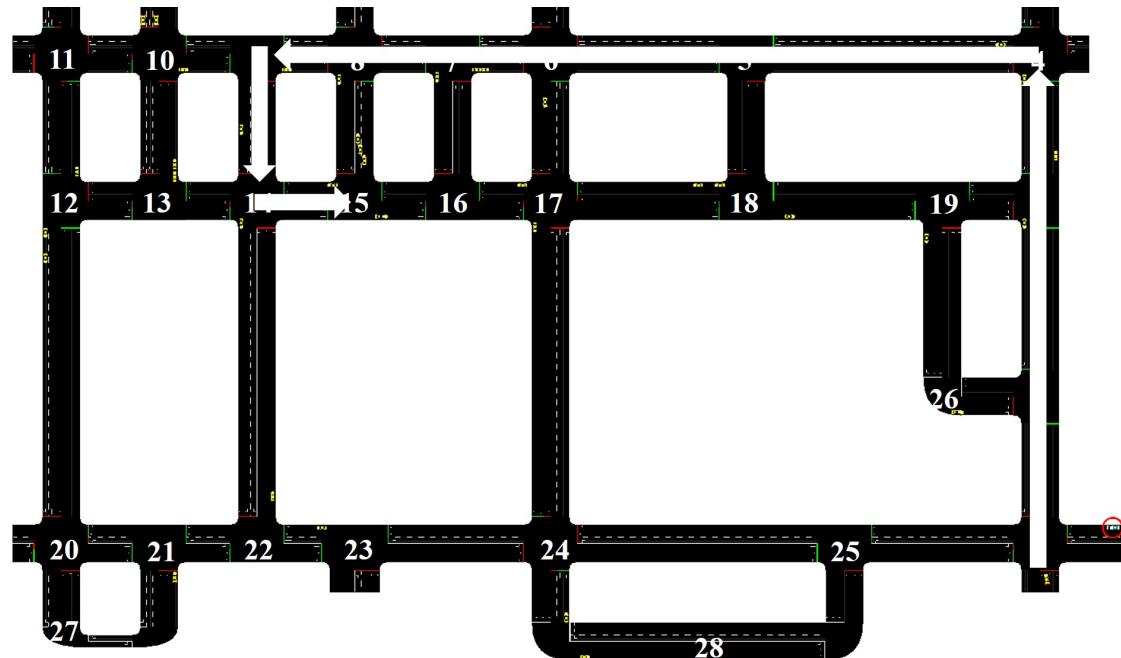


图 5.5: 路线 3

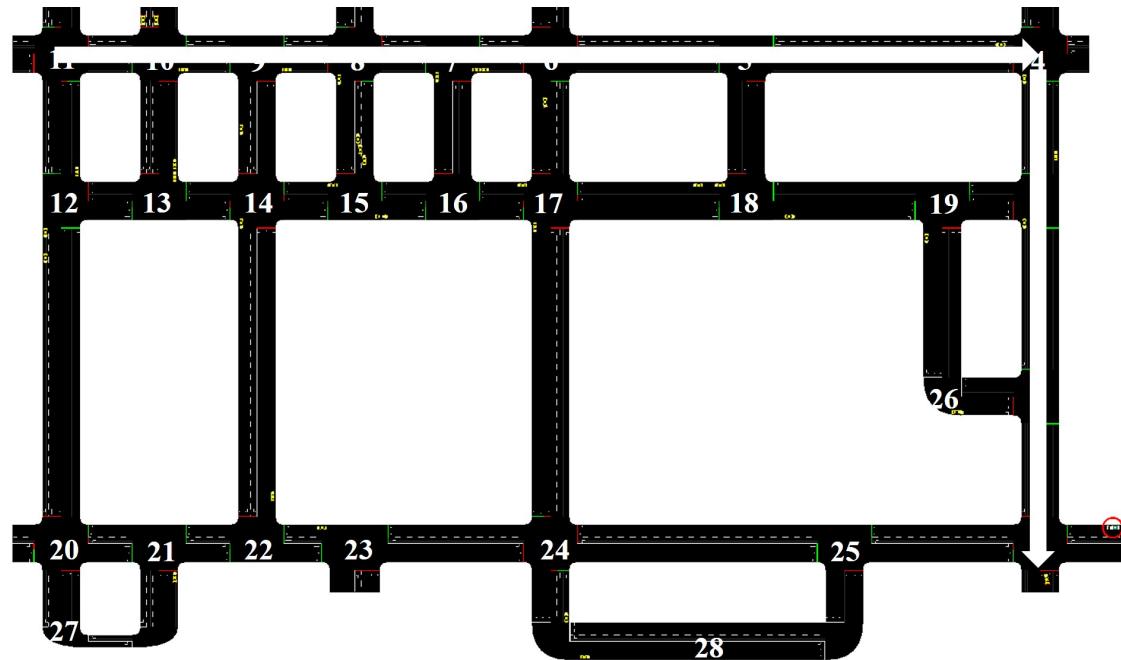


图 5.6: 路线 4

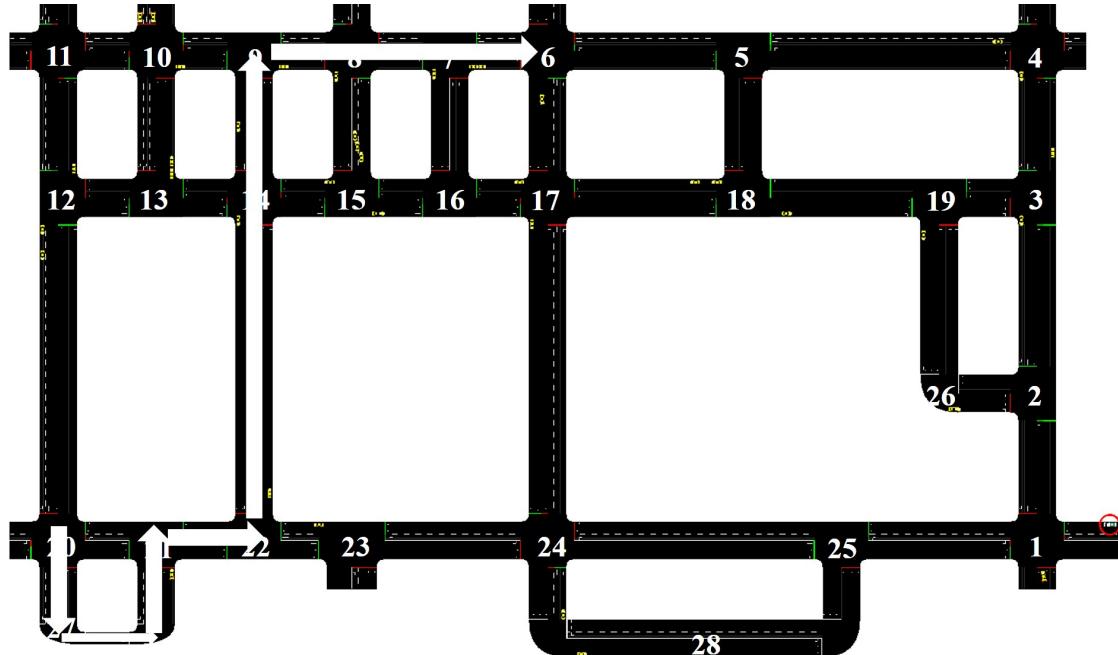


图 5.7: 路线 5

通过 SUMO 设置不同交通规模产生不同的交通流量，通过设置交通规模能够按比例放大或缩小整个交通流量，本文设置了 4 种不同的交通规模，分别为 1、2、3 和 4，表示为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵，分别代表在原本交通流量的基础上，交通流量按比例扩大到 1 倍、2 倍、3 倍和 4 倍。对于交通规模为 1 的实验，路网中有 2400 辆普通车辆，因此本文一共对 48 万条汽车数据进行了处理。

为了回答实验目的中的第一个问题，将本文方法与固定时长信号控制方法 (the fixed-time control method, FTCM) 进行对比，应急车辆的速度偏差越小，表明应急车辆行驶更平稳，也就代表了应急车辆在行驶的过程中，前方普通车辆对应急车辆的阻碍较小，因此表明普通车辆为应急车辆让行了。本文方法是在固定时长信号控制方法的基础上进行信号控制的，因此固定时长信号控制方法可作为对照组，比较使用本文方法和不使用本文方法的区别。5 辆应急车辆对应 5 条行驶路线，交通规模分为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵。本文使用本文方法和 FTCM 在交通规模分别为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以

及道路严重拥堵的环境下进行多次实验，对应急车辆的速度偏差进行对比分析。

为了回答实验目的中的第二个问题，将本文的信号控制方法与固定时长信号控制方法（fixed-time control method，简称 FTCM）、Min 等人 [32] 提出的弹性信号抢占方法（flexible signal preemption method，简称 FSPM）以及 Qin 等人 [30] 提出的应急车辆信号抢占方法（emergency vehicle signal pre-emption，简称 EVSP）相比较。固定时长信号控制方法保持信号相位时长不变。Min 提出的弹性信号抢占方法是非侵入式抢占的代表。Qin 等人提出的方法为侵入式抢占的代表。与实验一类似，5 辆应急车辆对应 5 条行驶路线，交通规模分为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵。本文使用本文方法、FTCM、FSPM 和 EVSP 在交通规模分别为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵的环境下进行多次实验，对应急车辆的旅行时间进行对比分析。

为了回答实验目的中的第三个问题，将本文方法与固定时长信号控制方法进行对比。本文使用平均等待时间来反映应急车辆优先通行对整个路网的影响。如果本文方法平均等待时间小于或等于固定时长信号控制方法的平均等待时间，则表明本文方法不会对整个路网造成明显影响。5 辆应急车辆对应 5 条行驶路线，交通规模分为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵。使用本文方法和 FTCM 在交通规模分别为道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵的环境下进行多次实验，对应急车辆的平均等待时间进行对比分析。

### 5.3 实验环境及参数设置

实验环境配置如表 5.2 所示，实验使用的 CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i7-10710U，操作系统为 Windows 10，内存为 16GB，使用的仿真平台为 SUMO 1.8.0，Python 版本为 3.8。实验参数设置如表 5.3 所示，其中  $\beta$  值为 0.5，经过多次重复实验，发现  $\beta$  的值对实验结果影响不明显，其值主要取决于应用场景，因此本文使得其值为 0.5，与文献 [32] 保持一致。

表 5.2: 实验环境配置

CPU	Intel(R) Core(TM) i7-10710U
操作系统	Windows 10
内存	16GB
Python 版本	3.8
SUMO 版本	1.8.0

表 5.3: 实验参数配置

参数	值
$\beta$	0.5
$T_i$	对于十字路口, $T_i$ 为 200s, 对于 T 型路口 $T_i$ 为 90s
$PN$	对于十字路口, $T_i$ 为 4, 对于 T 型路口 $T_i$ 为 2
$g_i^k$	对于十字路口, $T_i$ 为 45s, 对于 T 型路口 $T_i$ 为 42s
$T_{lost}$	5s
$SIT$	5s
$YR$	对于十字路口, $T_i$ 为 5s, 对于 T 型路口 $T_i$ 为 3s
$YT$	5s
$\tau_i^{min}$	7s
$\tau_i^{max}$	200s
$T_i^{min}$	对于十字路口, $T_i$ 为 60s, 对于 T 型路口 $T_i$ 为 20s
$T_i^{max}$	对于十字路口, $T_i$ 为 820s, 对于 T 型路口 $T_i$ 为 406s
$G_{minS}$	7s
$AVE_i^k$	5 辆

此外, 实验中使用解决凸优化问题的 Python 嵌入式建模语言 CVXPY 实现二次规划算法和线性规划算法 [64-65]。在实验中, 二次规划算法与线性规划算法均能够在 1 秒时间内返回结果, 因此在一定程度上保障了本文方法的时效性。在实际生活中, 二次规划算法和线性规划算法已经得到了广泛的应用, 根据弹性信号抢占方法 [32] 中实地实验结果表明, 现实生活中, 二次规划在非侵入式抢占时表现良好。

## 5.4 实验结果分析

### 5.4.1 应急车辆速度平稳性分析

本文使用应急车辆的速度标准差来反应急车辆从起点到终点行驶过程中速度的浮动程度，应急车辆速度标准差的计算方式如下所示：

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{t_0}^{t_n} (v - \bar{v})^2 dt}}{t_n} \quad (5.1)$$

$\sigma$  为实时速度标准差，其值为应急车辆从出发时刻  $t_0$  到应急车辆到达目的地时刻  $t_n$  期间实时速度  $v$  的标准差，反映了应急车辆在行驶的过程中停车与慢速行驶的频率，标准差越小，反映了应急车辆的行驶速度越稳定。

本文测试了应急车辆在不同交通规模下，应急车辆的速度标准差在本文方法与固定时长信号控制方法（FTCM）的对比。为了使实验效果更加明显，首先假设应急车辆的应急救援等级为特别重大（I 级），即应急车辆执行的任务。然后对 5 辆应急车辆分别在道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵四种交通规模下进行实验，对应急车辆的速度偏差进行对比分析。

图5.8、5.9、5.10、5.11分别对应 5 辆应急车辆在道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵的应急车辆速度标准差，从图中可以看出，使用本文方法能够明显提升应急车辆在行驶过程中速度的稳定性，本文的信号控制方法能够使得应急车辆以更快且更稳定的速度行驶。实验表明本文方法使应急车辆保持高匀速行驶优势明显。

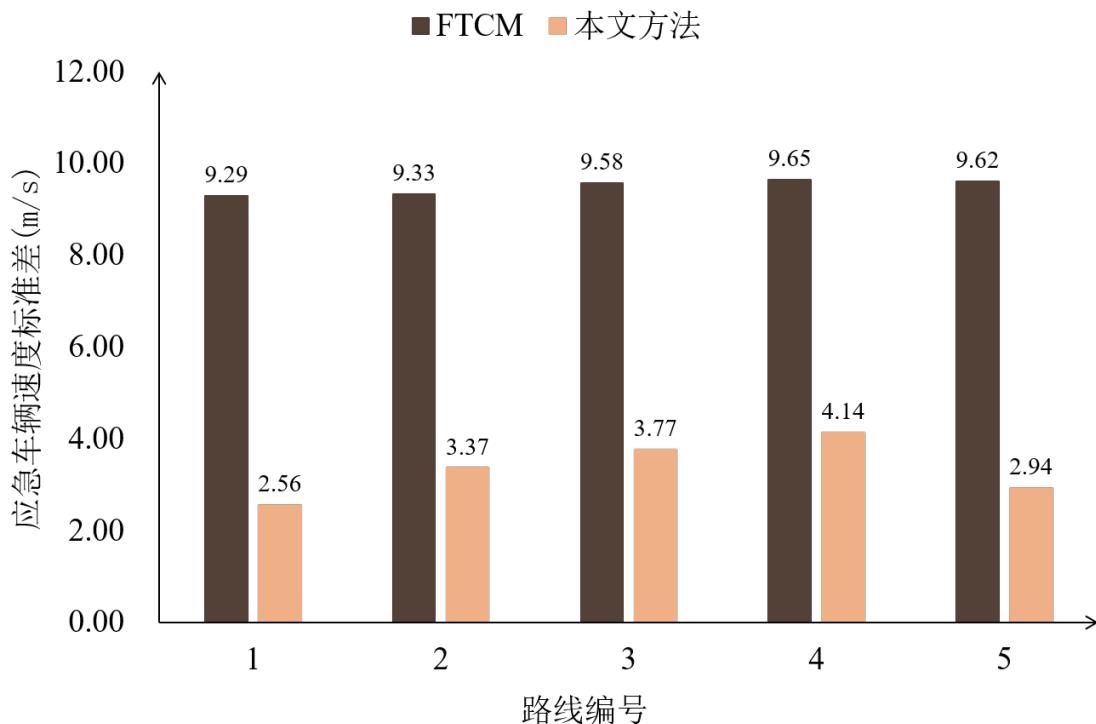


图 5.8: 道路畅通时速度标准差结果对比图

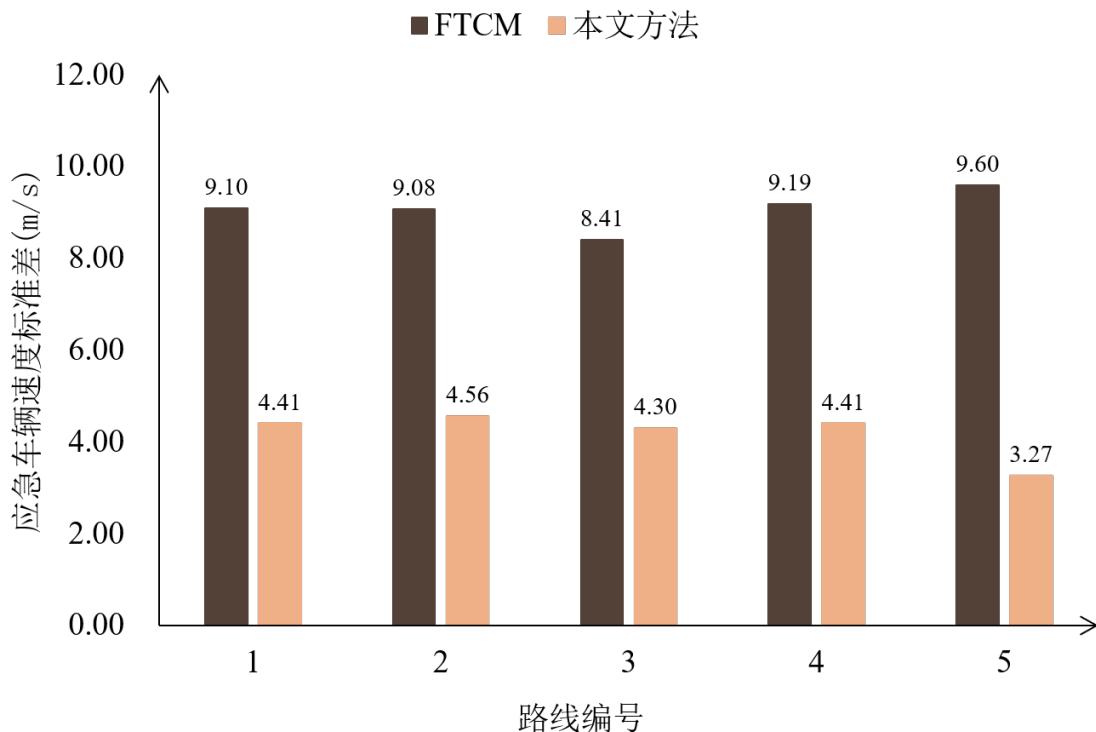


图 5.9: 道路相对拥堵时速度标准差结果对比图

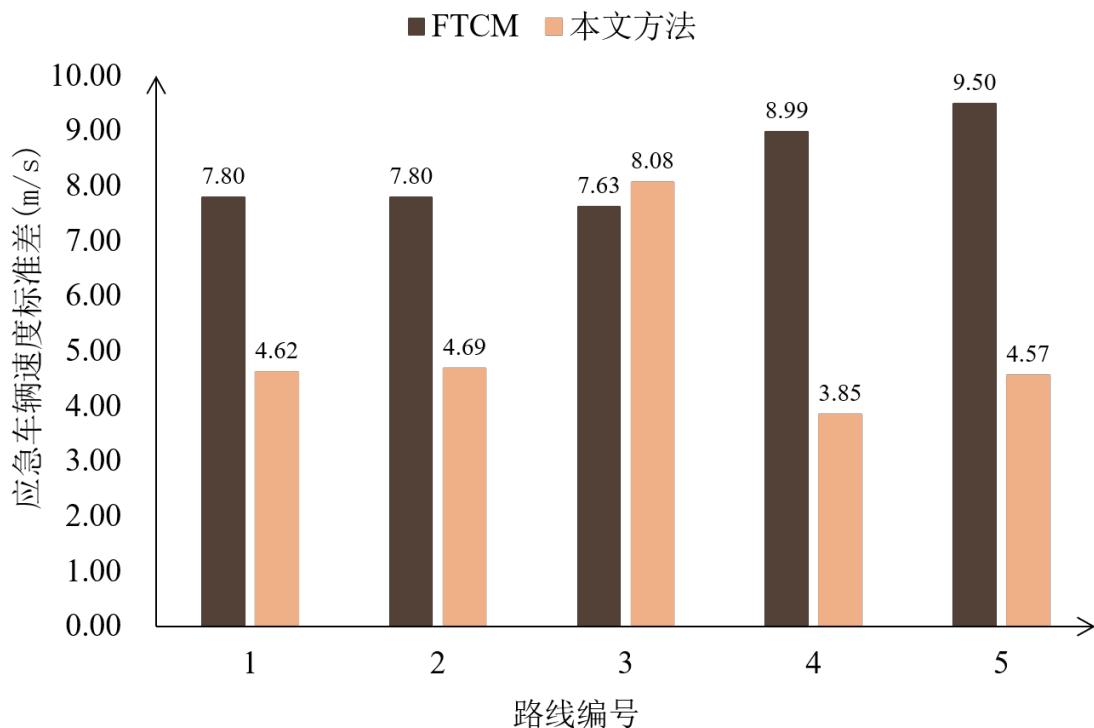


图 5.10: 道路中度拥堵时速度标准差结果对比图

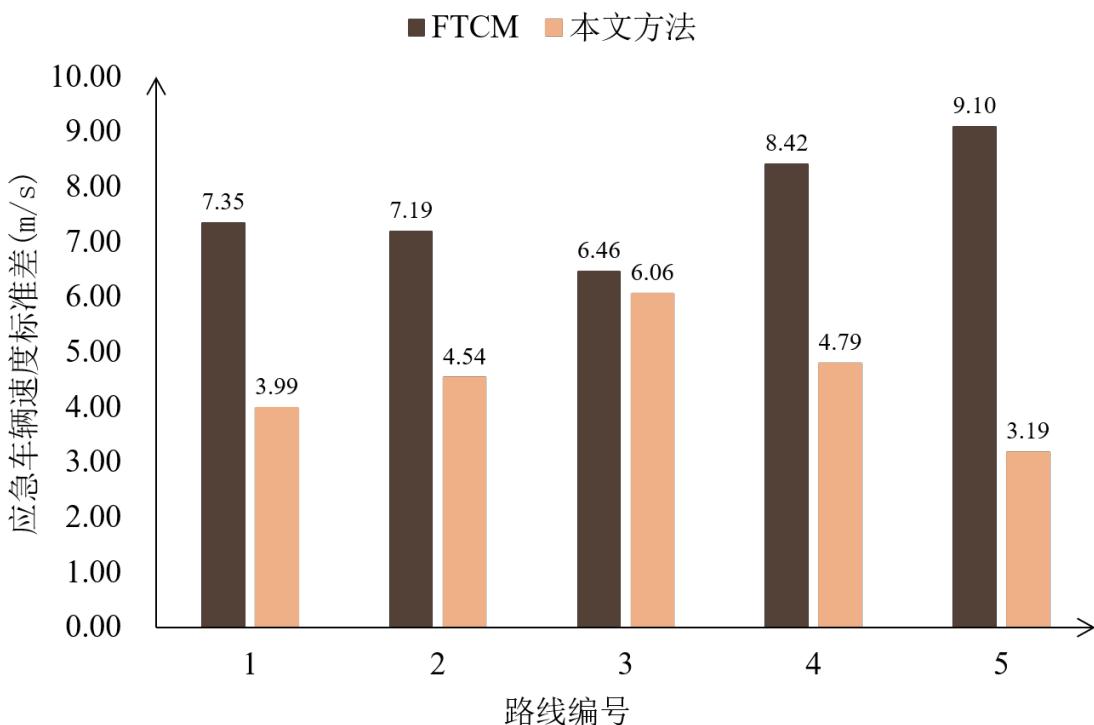


图 5.11: 道路严重拥堵时速度标准差结果对比图

### 5.4.2 应急车辆旅行时间分析

本文测试了应急车辆在不同交通拥堵情况下，应急车辆的旅行时间在本文方法与 FTCM、FSPM 以及 EVSP 对比。首先假设应急车辆的应急救援等级为特别重大（I 级），即应急车辆执行的任务非常紧急，然后让 5 辆应急车辆分别在道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵四种交通规模下进行反复多次实验。

如图5.12表示在道路畅通情况下，5 辆应急车辆分别采用 FTCM、FSPM、EVSP 以及本文方法在路线 1 至 5 上的旅行时间。图中横坐标为 5 辆应急车辆的路线编号，纵坐标为应急车辆的旅行时间。由图可知，本文方法相比于其他三种方法，具有明显优势。图5.13表示在道路较为拥堵情况下，5 辆应急车辆分别采用 FTCM、FSPM、EVSP 以及本文方法在路线 1 至 5 上的旅行时间。图片表明，本文方法相比于其他三种方法，在道路较为拥堵的情况下仍然具有明显优势。图5.14表示在道路中度拥堵情况下，5 辆应急车辆分别采用 FTCM、FSPM、EVSP 以及本文方法在路线 1 至 5 上的旅行时间。图片表明，本文方法相比于其他三种方法，在道路中度拥堵的情况下仍然具有明显优势。图5.15表示在道路严重拥堵情况下，5 辆应急车辆分别采用 FTCM、FSPM、EVSP 以及本文方法在路线 1 至 5 上的旅行时间。图片表明，本文方法相比于其他三种方法，在道路严重拥堵的情况下仍然具有明显优势。由此可知，绝大部分情况下本文方法能够有效缩短应急车辆的旅行时间，并且效果非常明显。即使在发生车祸的路段，也能够大幅度缩短应急车辆的旅行时间。

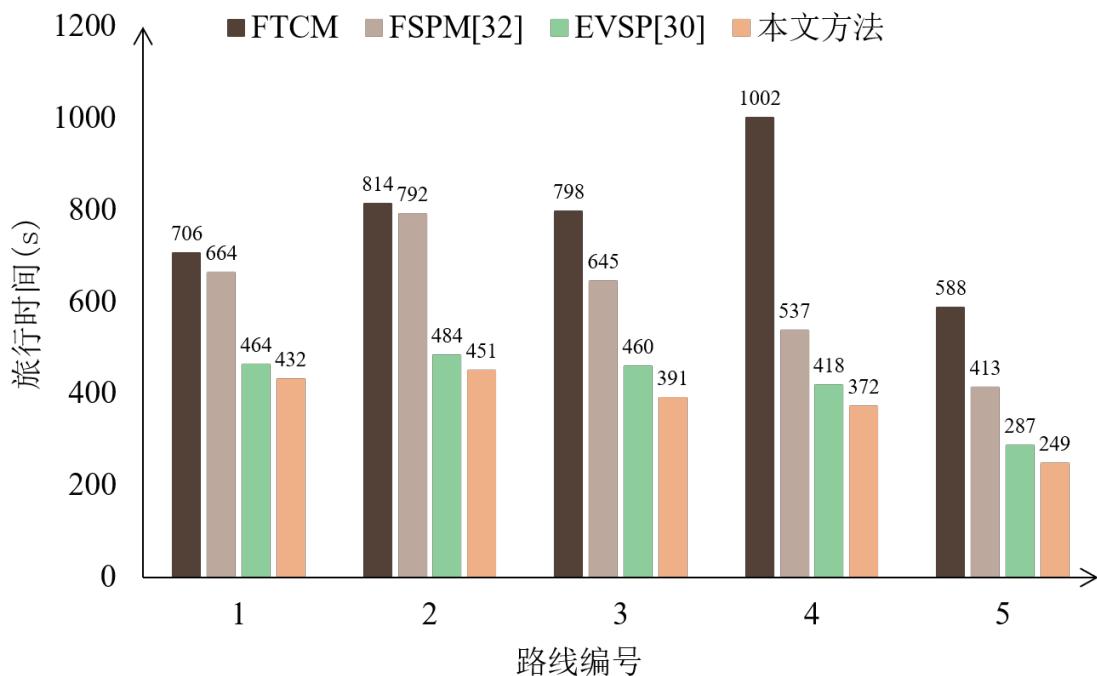


图 5.12: 道路畅通时旅行时间比较

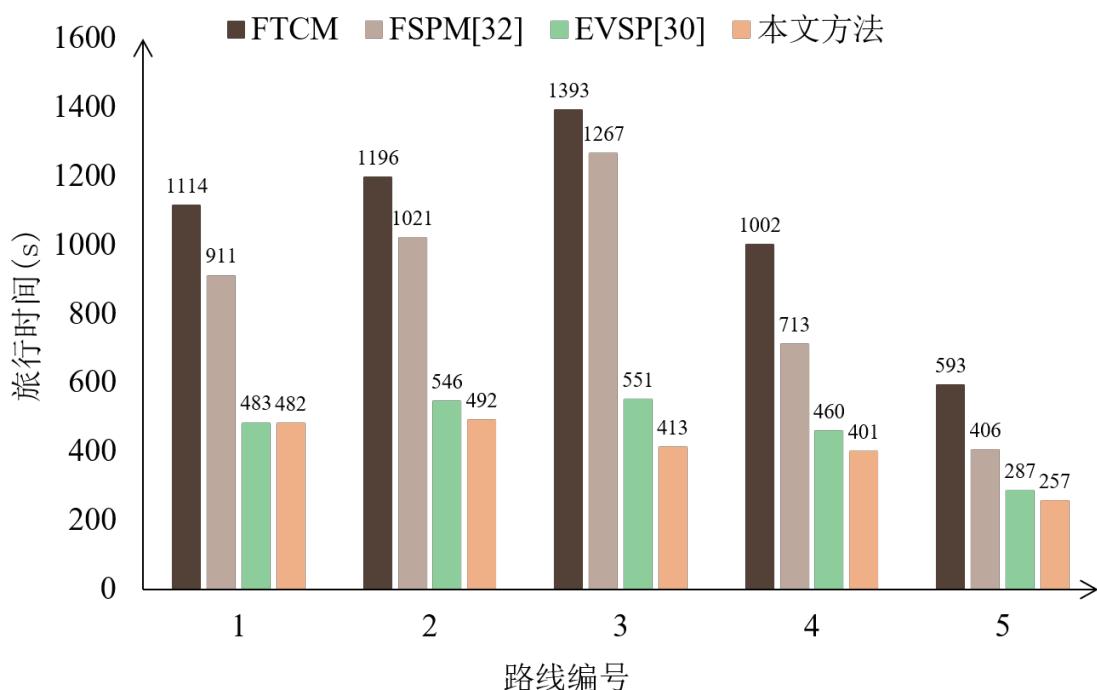


图 5.13: 道路比较拥堵时旅行时间比较

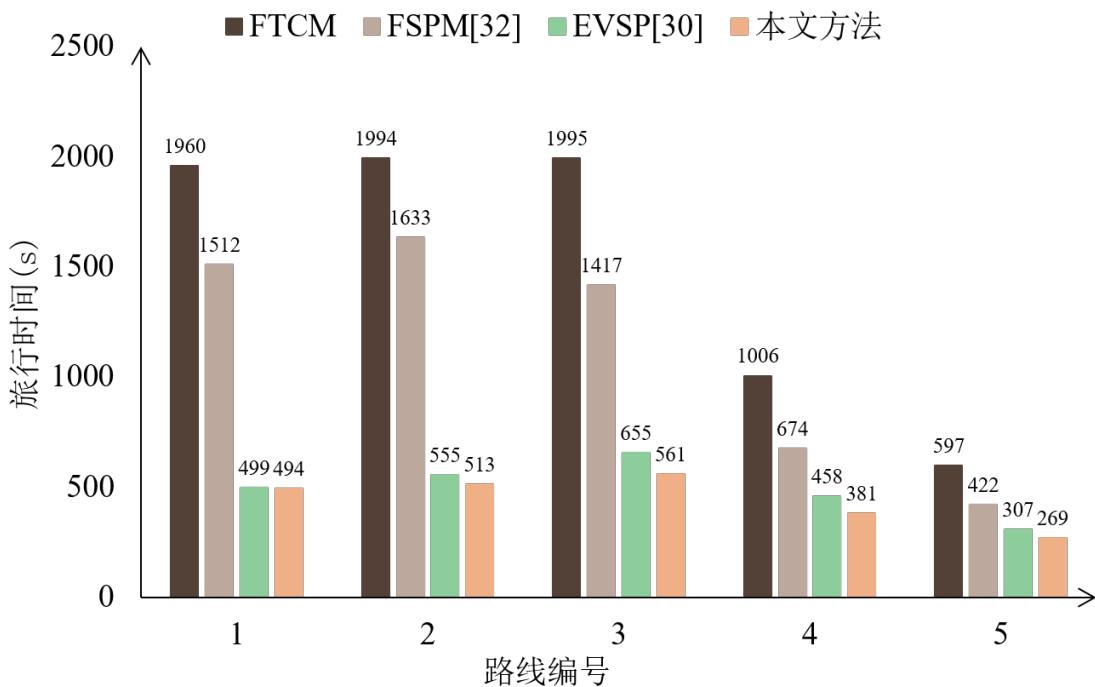


图 5.14: 道路中度拥堵时旅行时间比较

如表5.4所示，在不同交通规模下测试了 FTCM 与本文方法中应急车辆所需的旅行时间，本文方法旅行时间均值为当前交通规模下，5 辆应急车辆在本文方法中旅行时间的平均值，FTCM 旅行时间均值为当前交通规模下，5 辆应急车辆在 FTCM 中旅行时间的平均值。实验结果表示，在道路畅通的情况下，本文方法能够优化 50.98% 左右。在道路较为拥堵的情况下，本文方法能够优化 60.52% 左右。在道路中度拥堵情况下，本文方法能够优化 67.18%。在道路严重拥堵的情况下，本文方法能够优化 72.71% 左右。最终与 FTCM 相比，本文能够有效缩短应急车辆 62.85% 左右的旅行时间。

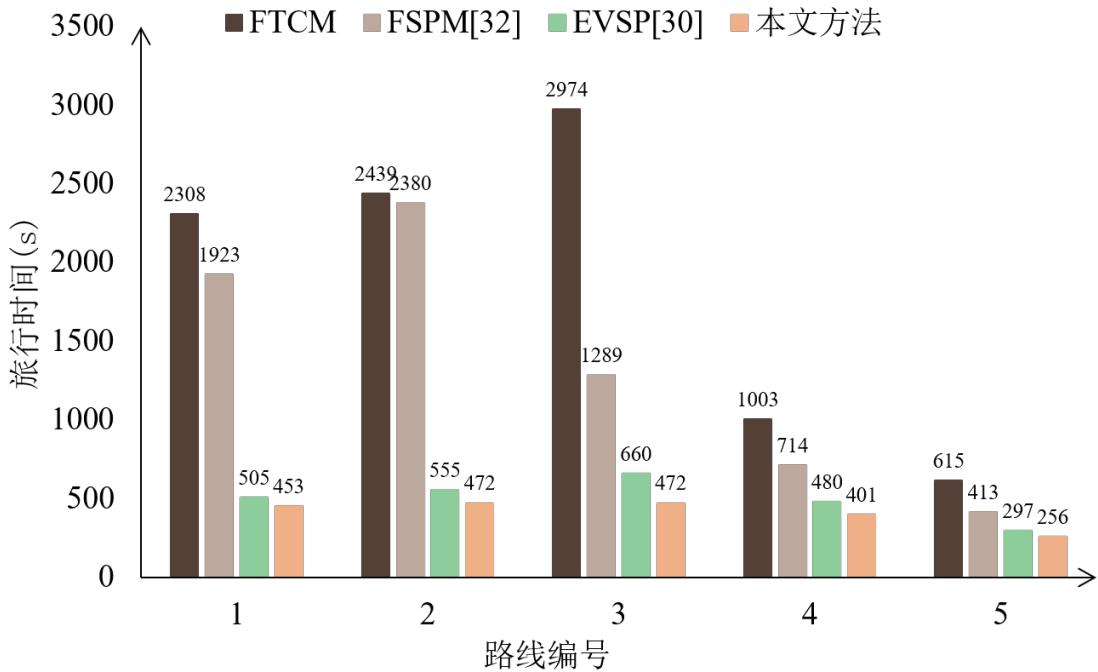


图 5.15: 道路严重拥堵时旅行时间比较

表 5.4: 本文方法与 FTCM 相比旅行时间的优化结果

交通规模	本文方法旅行时间均值	FTCM 旅行时间均值	优化百分比 (%)
畅通	397	782	50.98
比较拥堵	409	1060	60.52
中度拥堵	444	1496	67.18
严重拥堵	411	1868	72.71
			62.85 (平均)

如表5.5所示，在不同交通规模下测试了 FSPM 与本文方法中应急车辆所需的旅行时间，FSPM 旅行时间均值为当前交通规模下，5 辆应急车辆在使用 FSPM 时旅行时间的平均值。实验结果表示，在道路畅通的情况下，本文方法相比于 FSPM 能够优化 37.56% 左右。在道路较为拥堵的情况下，本文方法能够优化 50.20% 左右。在道路中度拥堵情况下，本文方法能够优化 55.21%。在道路严重拥堵的情况下，本文方法能够优化 60.37% 左右。最终与 FSPM 相比，本文能够有效缩短应急

车辆 50.84% 左右的旅行时间。

表 5.5: 本文方法与 FSPM 相比旅行时间的优化结果

交通规模	本文方法旅行时间均值	FSPM 旅行时间均值 [32]	优化百分比 (%)
畅通	397	610	37.56
比较拥堵	409	880	50.20
中度拥堵	444	1131	55.21
严重拥堵	411	1344	60.37
			50.83 (平均)

如表5.6所示，在不同交通规模下测试了 EVSP 与本文方法中应急车辆所需的旅行时间，EVSP 旅行时间均值为当前交通规模下，5 辆应急车辆在 EVSP 中旅行时间的平均值。实验结果表示，在道路畅通的情况下，本文方法相比于 EVSP 能够优化 10.59% 左右。在道路较为拥堵的情况下，本文方法能够优化 11.68% 左右。在道路中度拥堵情况下，本文方法能够优化 10.42%。在道路严重拥堵的情况下，本文方法能够优化 13.80% 左右。最终与 EVSP 相比，本文能够有效缩短应急车辆 16.80% 左右的旅行时间。

表 5.6: 本文方法与 EVSP 相比旅行时间的优化结果

交通规模	本文方法旅行时间均值	EVSP 旅行时间均值 [30]	优化百分比 (%)
畅通	397	423	10.59
比较拥堵	409	465	11.68
中度拥堵	444	495	10.42
严重拥堵	411	499	13.80
			11.62 (平均)

如图5.16所示，将表格中的数据表示在图片当中，把上表的数据用直方图显示出来，横轴是交通规模，纵轴是给定交通规模下五条路线的平均旅行时间。可以看到，在道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵的情况下，本文方法均可有效缩短旅行时间。实验结果表明，与 FTCM、FSPM 和 EVSP 相比，本文的策略具有明显的优势。

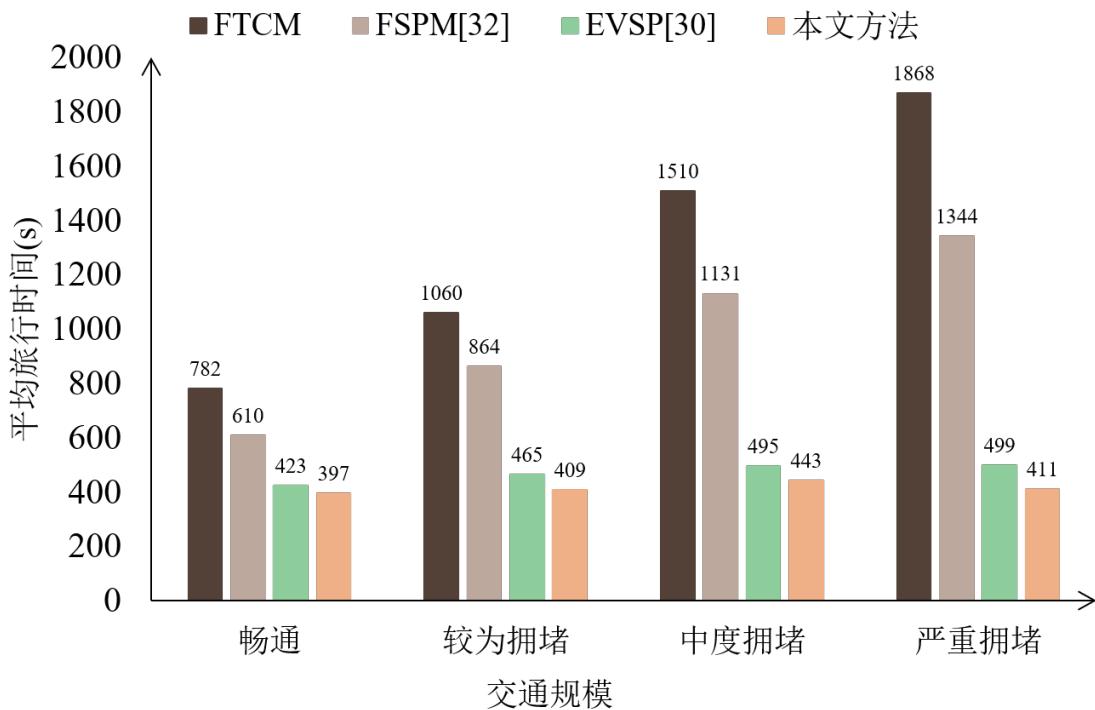


图 5.16: 不同交通规模下平均旅行时间比较

#### 5.4.3 应急车辆优先对路网的影响分析

为了验证本文方法是否会对整个交通路网造成较大影响，以及测试本文恢复阶段信号控制方案的可用性，测试了应急车辆在不同交通拥堵情况下，整个交通流平均等待时间在本文信号控制方法与固定时长信号控制方法的对比。车辆等待时间表示车速低于或等于  $0.1\text{m/s}$  的时间，交通流平均等待时间表示交通流中所有车辆等待时间的平均，交通流平均等待时间越大表示道路状况越糟糕，即本文恢复阶段信号控制方案的可用性越低，相反交通流平均等待时间越小表示道路状况越理想，即本文恢复阶段信号控制方案的可用性越高。本文对 5 辆应急车辆分别在道路畅通、道路较为拥堵、道路中度拥堵以及道路严重拥堵四种交通规模下进行实验，并设置应急响应等级为特别重大 (I 级)，再对各交通规模取 5 次实验的平均值。每一次实验，都记录了从应急车辆出发到应急车辆离开路网后 5 分钟内整个交通路网中所有车辆的平均等待时间。

由图5.17可知，在道路畅通的情况下，本文方法能够有效缩短整个交通路网的平均等待时间，本文方法不仅对路网没有影响，还意外地起到了疏散交通的作用。由图5.18可知，在道路比较拥堵的情况下，应急车辆在路线 2、路线 4 和路线 5 上的行驶时，使用本文方法能够起到疏散交通的作用，但在路线 1 和路线 3 上，本文方法分别延长了平均等待时间 7s 和 4s，这在允许范围内，可视为不对交通造成明显影响。由图5.19可知，在道路中度拥堵的情况下，应急车辆在路线 1、路线 2 和路线 3 上的行驶时，使用本文方法能够明显缩短路网的平均等待时间，能够起到疏散交通的作用，在路线 4 和路线 5 上表现为不对交通造成明显影响。由图5.20可知，在道路严重拥堵的情况下，应急车辆在路线 1 和路线 2 上行驶时，使用本文方法能够明显缩短路网的平均等待时间，能够起到疏散交通的作用。在路线 4 和路线 5 上表现为不对交通造成明显影响。在路线 3 上表现为影响了整个交通，这是由于在实验过程中，应急车辆在行驶过程中遇到了车祸，导致整个交通出现了瘫痪。

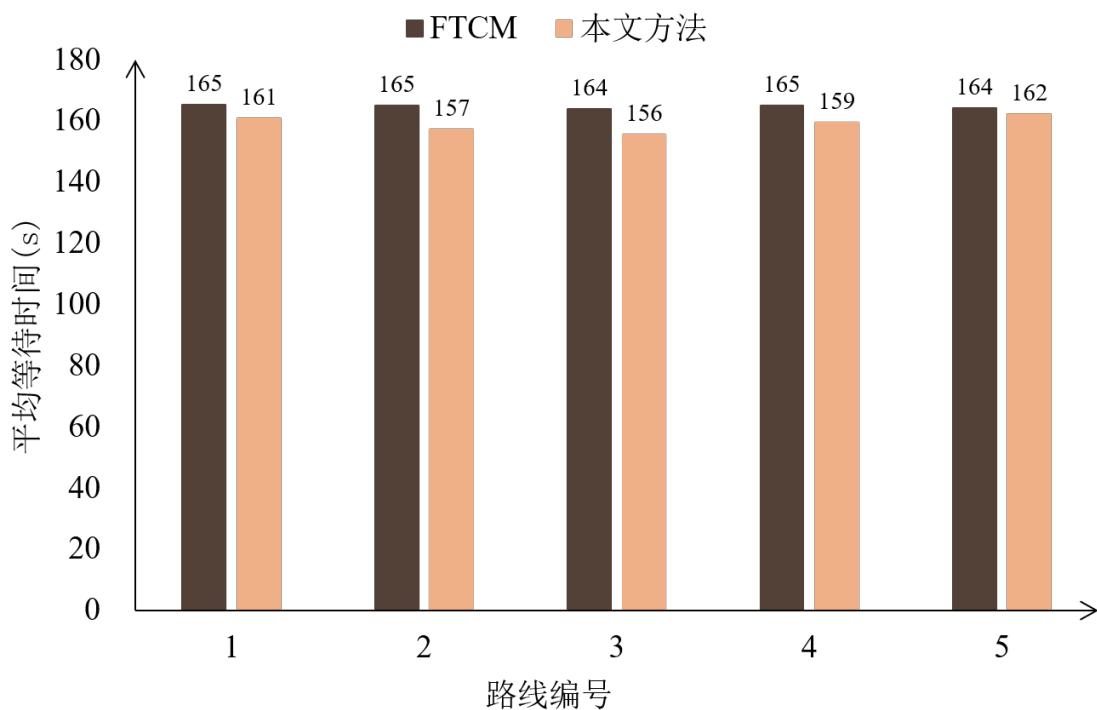


图 5.17: 道路畅通时平均等待时间比较

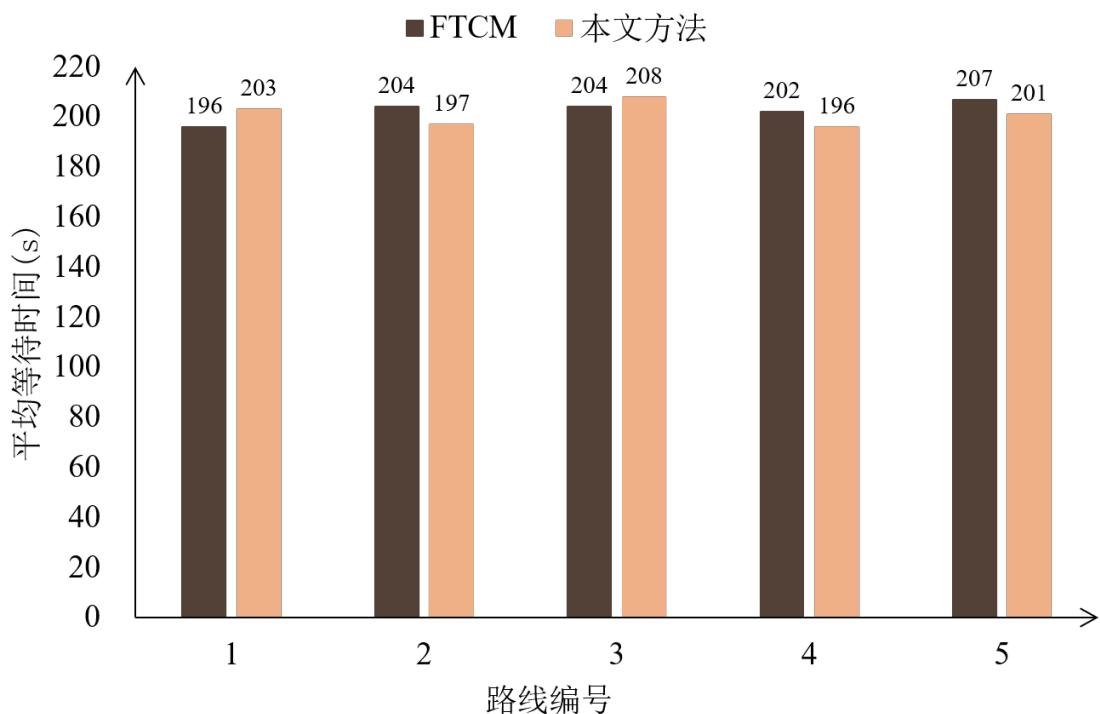


图 5.18: 道路比较拥堵时平均等待时间比较

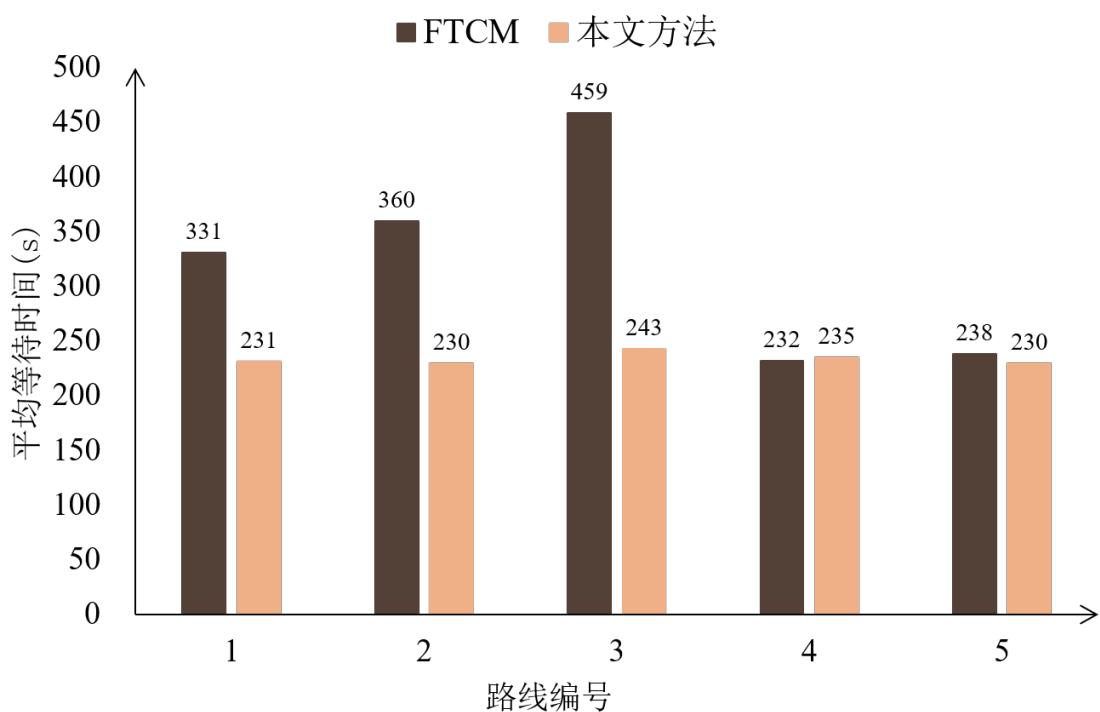


图 5.19: 道路中度拥堵时平均等待时间比较

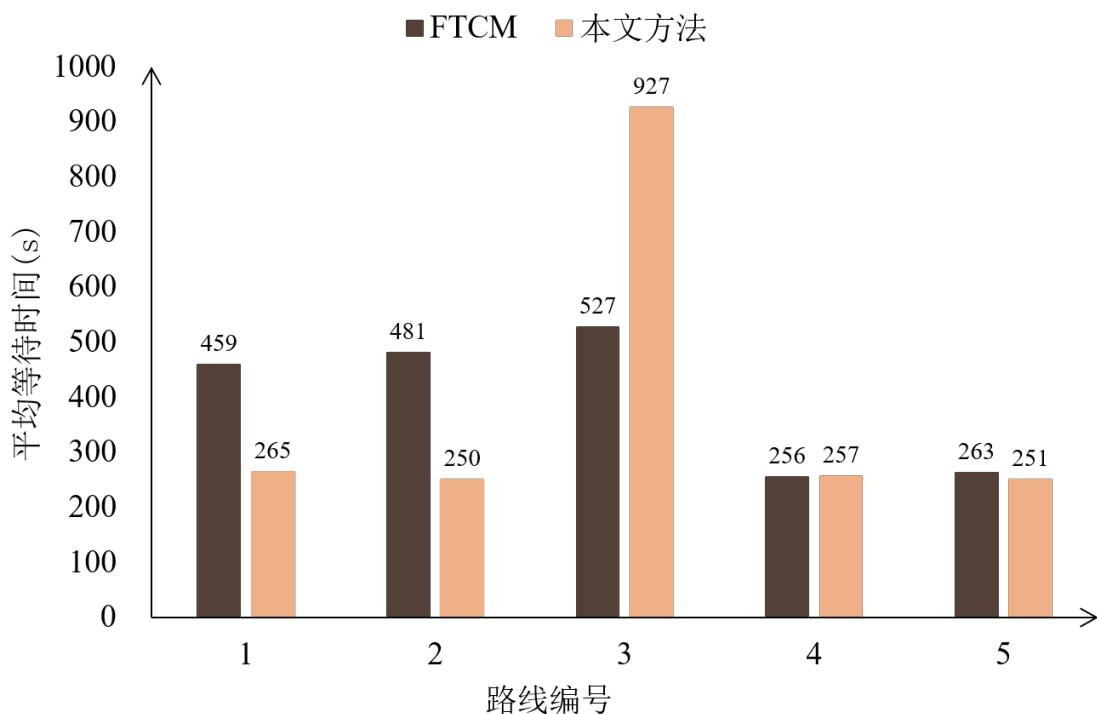


图 5.20: 道路严重拥堵时平均等待时间比较

图5.21中横坐标表示在道路畅通、道路比较拥堵、道路中度拥堵和道路严重拥堵四种交通规模下，纵坐标表示路网平均等待时间的平均。从图中可以看出，由于恢复交通流阶段信号控制方法，本文信号控制方案能够有效地降低应急车辆优先通行对整个交通流造成的影响，并且还在一定程度上对交通流起到了疏散的作用。

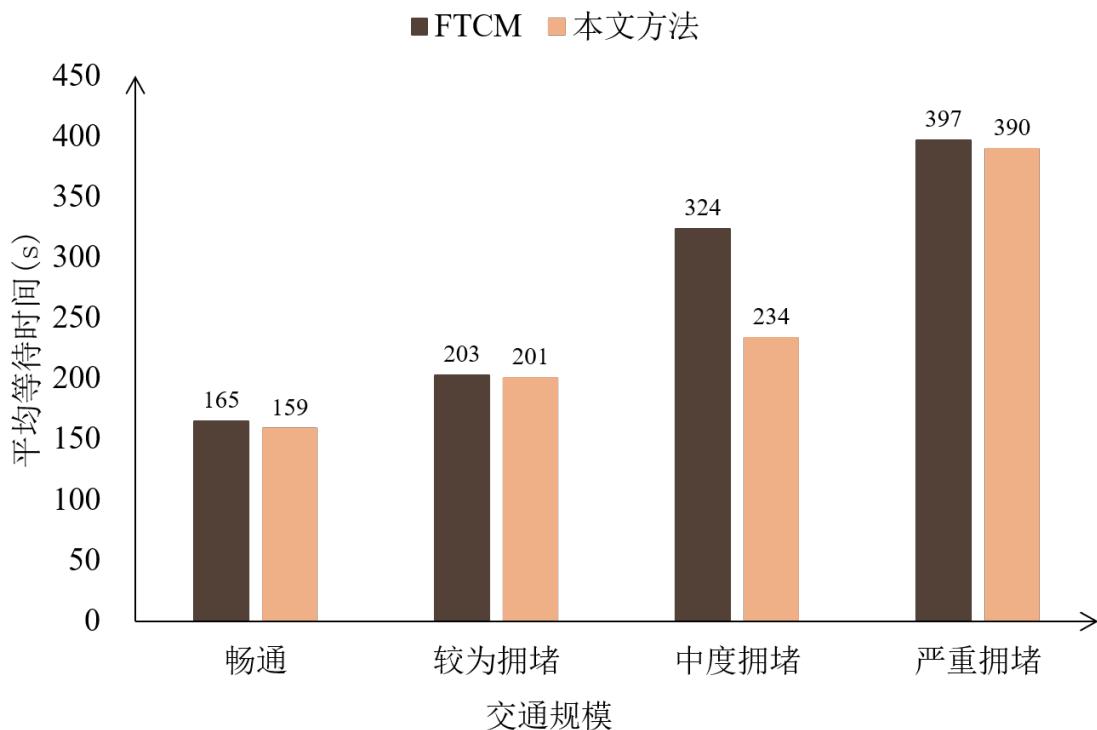


图 5.21: 不同交通规模下平均等待时间的比较

## 5.5 实验分析与总结

本文提出了一种新颖的面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法，该策略分为三个步骤：（1）按需降低道路饱和度及普通车辆让行；（2）信号抢占方法；（3）恢复交通流。第一步根据应急响应等级、路段拥堵等级以及时间紧迫等级得出降低道路饱和度的迫切程度值，交叉路口智能体控制交通灯延长应急车辆入口车道方向的绿灯时间，从而降低该方向的道路饱和度。从实验结果可以看到，应急车辆的速度方差与不采取本文方法的固定时长信号控制方法相比，有很明显的下降趋势，因此本文方法能够有效地降低应急车辆前进方向的道路饱和度；第二步分为信号抢占，当非侵入式信号抢占方法无法得出可行的信号相位配置方案时，采取侵入式信号抢占方法，以保证应急车辆不在交叉路口停车，一路畅通。从实验结果可以看到，本文方法能够明显缩短应急车辆的旅行时间，因此本文的信号抢占方法行之有效，且具有超前性；第三步恢复交通流，由于应急车辆的优先通

行，可能会对整个路网造成负面影响，因此采用本文的信号恢复策略进行了实验，实验结果表明，采取恢复交通流方法之后，能够有效地降低应急车辆优先对整个路网造成的影响，在部分交通情况下，甚至能够舒缓交通，对整个路网交通流有利。

## 5.6 本章小结

本章对本文提出一种面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法进行了实验评估与分析。首先探讨了实验的目的，然后针对本文方法进行了实验设计，并阐述了实验环境与参数设置，再对应急车辆的速度平稳性、旅行时间以及整个交通路网的平均等待时间进行了分析，最后对实验进行了分析与总结。

## 第六章 总结和展望

### 6.1 总结

本文提出了一种面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制方法，通过按需降低道路饱和度及普通车辆让行、为应急车辆提供信号抢占以及恢复交通流三个阶段保障应急车辆一路快速绿灯通行。第一阶段降低道路饱和度根据应急响应等级、路段拥堵等级以及时间紧迫等级得出目标相位绿灯延长时间。为确保应急车辆到达交通路口时能快速通过交叉口，第二阶段结合侵入式抢占方法与非侵入式抢占方法为应急车辆提供绿灯指引，使得应急车辆能够快速通过交叉路口而不停止。第三阶段通过重新规划信号周期与交通路口各相位绿灯时间，调节交叉路口各入口方向交通流量，降低应急车辆优先对整个交通造成的影响。实验结果表明，与固定时长信号控制方法、Min 等人 [32] 提出的弹性信号抢占方法和 Qin 等人 [30] 提出的应急车辆信号抢占方法相比，本文的控制方案能够帮助提升应急车辆的速度，体现应急车辆不停止的“绿波带”效应，缩短应急车辆旅行时间效果更明显。此外，本文的信号恢复策略还能够降低应急车辆优先对整个交通造成的负面影响。

本文做出的贡献如下：

1. 本文构建面向应急车辆优先通行的最快路径“绿波带”模型，和分布式智能体模型和面向应急车辆优先通行的交通信号灯智能控制系统架构，并设计了交通信号灯智能控制算法，提出了交通信号灯在未请求阶段、降低道路饱和度阶段、信号抢占阶段以及恢复交通流阶段过渡的方法。
2. 本文提出了一个新颖的交通信号灯智能控制方法。首先为应急车辆降低道路饱和度，使得普通车辆为应急车辆让行成为可能，并使得应急车辆能够以更

高的速度行驶；其次，本文将非侵入性抢占和侵入性抢占相结合，使得本文的信号控制方法既获得了非侵入式抢占的低副作用性又结合了侵入式抢占的高可靠性，与此同时，弥补了非侵入式抢占的不可靠性和降低了侵入式抢占对整个路网的影响；最后本文创新性地将线性规划方法用于恢复交通，当应急车辆通过交叉口后重新规划信号配时，使得交叉路口各方向交通流恢复到应急车辆请求之前的状态。

3. 在 SUMO 中对本文方法进行了模拟实验，结果表明本文方法能够有效降低应急车辆的旅行时间，并有效缓解应急车辆优先对整个交通流造成的干扰。

## 6.2 展望

本文未来的工作包括，但不限于：

1. 到达率预测：精确的到达率能够帮助我们更加精准地预测排队车辆的数目，从而获得更加准确的清空排队车辆所需的时间，加强本文的抢占策略；
2. 应急车辆的速度分析：应急车辆与普通车辆不同，分析应急车辆的速度有助于预测应急车辆的旅行时间，有助于提高抢占的成功率；
3. 面向多辆应急车辆的抢占请求：考虑到一些极端情况，例如在较大的公共安全事故中，多辆应急车辆同时向交叉口发出绿灯请求，此时需要设计面向多辆应急车辆的信号控制方案。
4. 延长时间优化：本文在降低道路饱和度阶段，延长的绿灯时间不够精确，有可能导致绿灯浪费或者绿灯时间不够。

## 参考文献

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于国家综合性消防救援车辆悬挂应急救援专用号牌有关事项的通知 [EB/OL]. 2018. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-12/11/content\\_5347765.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-12/11/content_5347765.htm).
- [2] LI M, LI L. Intelligent transportation system in china: The optimal evaluation period of transportation's application performance[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2020, 38(06): 6979-6990.
- [3] 吴黎兵, 聂雷, 刘冰艺, 等. 一种 VANET 环境下的智能交通信号控制方法 [J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1105-1119.
- [4] 陈虹宇, 艾红, 王晓, 等. 社会交通中的社会信号分析与感知 [J/OL]. 自动化学报, 2021, 47(06): 1256-1272. DOI: 10.16383/j.aas.c200055.
- [5] ZHONG L, CHEN Y. A novel real-time traffic signal control strategy for emergency vehicles[J]. IEEE ACCESS, 2022, 10: 19481-19492.
- [6] NGUYEN B L, NGO D T, TRAN N H, et al. Combining V2I with V2V communications for service continuity in vehicular networks[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, 2019: 201-206.
- [7] 李金洋, 陈仪香, 王振辉. 基于车速的自适应交通信号灯控制系统 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(9): 21-25.
- [8] OZA P, CHANTEM T, MURRAY-TUITE P M. A coordinated spillback-aware

- traffic optimization and recovery at multiple intersections[C/OL]//26th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, RTCSA 2020, Gangnueng, Korea (South), August 19-21, 2020. IEEE, 2020: 1-10. <https://doi.org/10.1109/RTCSA50079.2020.9203582>.
- [9] CHANG W, ROY D, ZHAO S, et al. Cps-oriented modeling and control of traffic signals using adaptive back pressure[C]//2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). IEEE, 2020: 1686-1691.
- [10] 徐杨, 张玉林, 孙婷婷, 等. 基于多智能体交通绿波效应分布式协同控制算法 [J]. 软件学报, 2012, 23(11): 2937-2945.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报 [J]. 交通财会, 2021(6): 92-97.
- [12] WANG Y, WU Z, YANG X, et al. Design and Implementation of an Emergency Vehicle Signal Preemption System Based on Cooperative Vehicle-Infrastructure Technology[J/OL]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 2013(5): 1-10. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2013/834976>.
- [13] NHS. 2017 NHS Ambulance Services[EB/OL]. 2017, Jan. 23. <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2017/01/NHS--Services.pdf>.
- [14] JAMES G. New E.M.S. Response Time[EB/OL]. 1990. <https://www.nytimes.com/1990/03/25/nyregion/new-ems-response-time.html>.
- [15] Singapore Civil Defence Force. Fire, Ambulance and Enforcement Statistics 2017[EB/OL]. 2017. <https://www.scdf.gov.sg/docs/default-source/scdf-library/publications/amb-fire-inspection-statistics/fire-ambulance-enforcementstatistics-2017.pdf>.

- [16] GHANIM M S, KHALED S. A case study for surrogate safety assessment model in predicting real-life conflicts[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 44: 4225-4231.
- [17] SINGH T. Constrained markov decision processes for intelligent traffic[C]//2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2019: 1-7.
- [18] KOIKE N, FUKAI T. Study on Signal Priority Systems for Vehicles in Emergency Dispatch[J/OL]. IFAC Proceedings Volumes, 2003, 36(14): 197-202. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667017324199>. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)32419-9.
- [19] CHEN S, SUN D J. An improved adaptive signal control method for isolated signalized intersection based on dynamic programming[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2016, 8(4): 4-14.
- [20] KAPILESWAR N, HANCKE G P. Traffic management for emergency vehicle priority based on visual sensing[J/OL]. Sensors, 2016, 16(11): 1892. <https://doi.org/10.3390/s16111892>.
- [21] YAO Z, JIANG Y, ZHAO B, et al. A dynamic optimization method for adaptive signal control in a connected vehicle environment[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 24(2): 184-200.
- [22] ASHISH A, GANDHIRAJ R, PANDA M. V2X based emergency corridor for safe and fast passage of emergency vehicle[C/OL]//12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2021, Kharagpur, India, July 6-8, 2021. IEEE, 2021: 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT5152.2021.9580034>.

- [23] EBIZUKA Y, KATO S, ITAMI M. Detecting approach of emergency vehicles using siren sound processing[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, 2019: 4431-4436.
- [24] SO J J, KANG J, PARK S, et al. Automated emergency vehicle control strategy based on automated driving controls[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020: 1-11.
- [25] YOUNES M B, BOUKERCHE A. An efficient dynamic traffic light scheduling algorithm considering emergency vehicles for intelligent transportation systems[J/OL]. Wirel. Networks, 2018, 24(7): 2451-2463. <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1482-5>.
- [26] 夏元清, 闫策, 王笑京, 等. 智能交通信息物理融合云控制系统 [J/OL]. 自动化学报, 2019, 45(01): 132-142. DOI: 10.16383/j.aas.c180370.
- [27] SHRIVASTAVA A, RAWAT S, SINGH H K, et al. Preemption of traffic signal using global positioning system (gps)[C]//Proceedings of the Third International Conference on Microelectronics, Computing and Communication Systems. Springer, 2019: 641-648.
- [28] MASOUD M, BELKASIM S. Wsn-evp: A novel special purpose protocol for emergency vehicle preemption systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 67(4): 3695-3700.
- [29] PENG-PENG J, ZI-YU Y, WEI-QI H, et al. Lane changing guidance method for vehicle platoon to avoid emergency vehicles of CVIS[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 95.
- [30] QIN X, KHAN A M. Control strategies of traffic signal timing transition for emergency vehicle preemption[J/OL]. Transportation Research Part C: Emerging Tech-

- nologies, 2012, 25: 1-17. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X1200054X>. DOI: 10.1016/j.trc.2012.04.004.
- [31] NOORI H, FU L, SHIRAVI S. A connected vehicle based traffic signal control strategy for emergency vehicle preemption[C]//Transportation Research Board 95th Annual Meeting: 16-6763. 2016.
- [32] MIN W, YU L, CHEN P, et al. On-Demand Greenwave for Emergency Vehicles in a Time-Varying Road Network With Uncertainties[J/OL]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(7): 3056-3068. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8751138/>. DOI: 10.1109/TITS.2019.2923802.
- [33] Wenwen Kang, Gang Xiong, Yisheng Lv, et al. Traffic signal coordination for emergency vehicles[C/OL]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China: IEEE, 2014: 157-161. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6957683/>. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957683.
- [34] PETRICĂ B G, CIOBANU R I, DOBRE C. Automatic traffic light preemption for intelligent transportation systems[C]//2021 20th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC). IEEE, 2021: 1-8.
- [35] OBRUSNÍK V, HERMAN I, HURÁK Z. Queue discharge-based emergency vehicle traffic signal preemption[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 14997-15002.
- [36] SHAABAN K, KHAN M A, HAMILA R, et al. A strategy for emergency vehicle preemption and route selection[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(10): 8905-8913.
- [37] CAO M, SHUAI Q, LI V O. Emergency vehicle-centered traffic signal control in intelligent transportation systems[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). IEEE, 2019: 4525-4531.

- [38] H. M, L. L, X. L. Signal preemption control of emergency vehicles based on timed colored petri nets[J/OL]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2018, 2018(3): 2183-2188. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051583045&doi=10.1155%2f2018%2f7095485&partnerID=40&md5=e04cdbb01c97c5594f804cfb58759a8e>. DOI: 10.1155/2018/7095485.
- [39] 邵明莉, 曹鹗, 胡铭, 等. 面向优先车辆感知的交通灯优化控制方法 [J/OL]. 软件学报, 2021, 32(08): 2425-2438. DOI: 10.13328/j.cnki.jos.006191.
- [40] 闫飞, 李浦, 阎高伟, 等. 考虑交通流非线性特性的交通信号迭代学习控制策略 [J/OL]. 自动化学报, 2021, 47(9): 2238-2249. DOI: 10.16383/j.aas.c190183.
- [41] BEHRISCH M, BIEKER L, ERDMANN J, et al. Sumo—simulation of urban mobility: an overview[C]//Proceedings of SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation. ThinkMind, 2011.
- [42] 吴震, 杨晓光. 信号交叉口右转车道饱和流量研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(01): 37-41.
- [43] 刘意, 张永, 任刚. 信号交叉口直行车道饱和流率研究 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(03): 62-67.
- [44] 吴震, 杨晓光. 车道宽度、转弯半径对左转饱和流量的影响研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(05): 996-999.
- [45] 李克平, 盖松雪. 信号控制交叉口周期时长对饱和流量的影响研究 [J/OL]. 城市道桥与防洪, 2007(9): 6-8. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2007.09.003.
- [46] 邵长桥, 荣建, 赵林. 信号交叉口饱和流率及其影响因素研究 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(10): 1505-1510.

- [47] DAY C M. Platoon dispersion and saturation flow rates in cellular automata models of signal-controlled roadway traffic[J/OL]. 2018: 2583-2588. <https://doi.org/10.1093/ITSC.2018.8569769>.
- [48] 袁晶矜,袁振洲.信号交叉口通行能力计算方法的比较分析 [J].公路交通技术,2006,05(1): 123-128.
- [49] 王嘉文,邹林志,杭佳宇.考虑人车交互的两相位信号控制交叉口的配时优化方法 [J].中国水运(下半月),2020,20(01): 80-82.
- [50] MIRZAHOSEIN H, SAFARI F, HASSANNAYEBI E. Estimation of highway capacity under environmental constraints vs. conventional traffic flow criteria: A case study of tehran[J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8(5): 751-761. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209575642030146X>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.006>.
- [51] 杨佩昆.交通管理与控制 [M].人民交通出版社,2003.
- [52] GB/T 31418-2015.道路交通信号控制系统术语 [S].
- [53] 沈家军,王炜.基于交叉口通行效率的两相位与四相位控制方式临界流量研究 [J/OL].交通运输系统工程与信息,2014, 14(04): 53-58. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2014.04.013.
- [54] 张雷元,树爱兵.道路交叉口信号相位设计实用方法 [C]//第七届中国智能交通年会优秀论文集——智能交通技术. 2012: 160-169.
- [55] 赵益.城市道路干线协调控制方法综述 [C/OL]//第十五届中国智能交通年会. 2020: 257-263. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.028384.
- [56] MA C, HE R. Green wave traffic control system optimization based on adaptive

- genetic-artificial fish swarm algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(7): 2073-2083.
- [57] HARTIGAN J A, WONG M A. Statistical theory in clustering[J]. Journal of Classification, 1985, 2(01): 63-67.
- [58] GARCIA C E, MORSHEDI A M. Quadratic programming solution of dynamic matrix control (qdmc)[J]. Chemical Engineering Communications, 1986, 46: 73-87.
- [59] P.T. B, J.W. T. Sequential quadratic programming[J/OL]. Acta Numerica, 1995, 4: 1 – 51. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-44649149897&doi=10.1017%2fS0962492900002518&partnerID=40&md5=cc9b5148a47c58687f746bd3ec66695b>. DOI: 10.1017/S0962492900002518.
- [60] GILL P E, MURRAY W, SAUNDERS M A. Snopt: An sqp algorithm for large-scale constrained optimization[J]. SIAM review, 2005, 47(1): 99-131.
- [61] BOGGS P T, TOLLE J W. Sequential quadratic programming[J]. Acta numerica, 1995, 4: 1-51.
- [62] 国务院. 国家突发公共事件总体应急预案 [J]. 中国防汛抗旱, 2006, 12(01): 16-19.
- [63] GA/T 115-2020. 道路交通拥堵度评价方法 [S].
- [64] DIAMOND S, BOYD S. CVXPY: A Python-embedded modeling language for convex optimization[J]. Journal of Machine Learning Research, 2016, 17(83): 1-5.
- [65] AGRAWAL A, VERSCHUEREN R, DIAMOND S, et al. A rewriting system for convex optimization problems[J]. Journal of Control and Decision, 2018, 5(1): 42-60.

## 附录 A 速查表

表 A1: 缩写速查表

缩写	含义	英文释义
EV	应急车辆	emergency vehicle
DRRS	降低道路饱和度需求程度	demand for reducing road saturation
ERL	应急响应等级	emergency response level
CLRS	路段拥堵等级	congestion level of the road section
TUL	时间紧迫等级	time urgency level
QP	二次规划	quadratic programming
LP	线性规划	linear programming
FTCM	固定时长信号控制方法	fixed-time control method
FSPM	弹性信号抢占方法	flexible signal preemption method[32]
EVSP	应急车辆信号抢占	emergency vehicle signal pre-emption[30]

表 A2: 符号速查表

符号	含义
$I$	交叉口集和
$E$	路段集和
$AGT$	智能体集和
$I_i$	第 $i$ 个交叉口
$AGT_i$	第 $i$ 个智能体
$t_i$	预计到达第 $i$ 个交叉口的时间
$v$	应急车辆的平均速度
$s_i^t$	应急车辆到达第 $i$ 个交叉口的距离

$\delta$	时间偏差
$T_i$	初始信号周期长度
$T'_i$	新周期长度
$L_i^t$	表时刻 $t$ 到新周期 $T'_i$ 第一次开始时间的间隔
$n_i$	交叉口 $I_i$ 信号灯从 $t$ 时刻到 $t_i$ 时间范围内完整新周期 $T'_i$ 的个数
$P_i$	$n_i$ 个新周期结束到 $t_i$ 的时间间隔
$Q_i$	清空应急车辆入口车道方向的排队车辆所需时间
$N_i^t$	$t$ 时刻交叉口 $I_i$ 在应急车辆入口车道方向的排队车辆数目
$S_i$	交叉口 $I_i$ 应急车辆入口车道方向的通行能力
$A_i$	交叉口 $I_i$ 应急车辆入口车道方向的车辆到达率
$\Delta w_i$	代价时间
$T_{lost}$	车辆启动损失时间
$SIT$	保证该交叉口行车安全的安全时间间隔
$YT$	普通车辆为应急车辆让行所需的时间
$\Delta_i$	表示交叉口 $v_i$ 的应急车辆入口车道是否存在排队车辆, 若应急车辆入口车道不存在排队车辆, 其值为 0, 若存在, 值为 1
$\beta$	目标函数中平衡总周期变化与单相时长变化的参数
$PN$	代表周期中信号相位个数
$TP$	目标相位
$g_i^k$	交叉口 $I_i$ 原本周期中第 $k$ 信号相位时长
$g_i^{k'}$	交叉口 $I_i$ 新周期中第 $k$ 信号相位时长
$T_i^{max}$	交叉口 $I_i$ 交通信号灯信号控制周期的上界
$T_i^{min}$	交叉口 $I_i$ 交通信号灯信号控制周期的下界
$\tau_i^{max}$	交叉口 $I_i$ 单相位时长的上界
$\tau_i^{min}$	交叉口 $I_i$ 单相位时长的下界
$YR_i$	交叉口 $I_i$ 黄灯与全红时长

$LJT_i^{TP}$	交叉口 $I_i$ 的交通信号灯最迟跳转到目标相位 $TP$ 的时刻
$PST_i$	$LJT_i^{TP}$ 在原信号控制策略中所处相位开始时刻
$D_i$	若信号灯在 $LJT_i^o$ 时刻跳转到目标相位，被抢占相位持续的时间
$Jump_i^{TP}$	交叉口 $I_i$ 智能体控制交通信号灯跳转到目标相位 $TP$ 的时刻
$G_{minS}$	保证行车安全的最短绿灯时间
$AVE_i^k$	交叉口 $I_i$ 在第 $k$ 相位绿灯方向的平均排队车辆数
$x_i^k$	交叉口 $I_i$ 的交通信号灯在恢复阶段第 $k$ 相位的时长
$N_i^k$	恢复阶段开始时交叉口 $I_i$ 交通信号灯 $k$ 相位绿灯方向排队车辆数较大一边车道聚集的排队车辆数
$A_i^k$	交叉口 $I_i$ 第 $k$ 相位绿灯方向车道的到达率
$S_i^k$	交叉口 $I_i$ 交通信号灯 $k$ 相位绿灯方向车道的饱和流率
$EQN_i^k$	第 $i$ 个交叉口第 $k$ 相位预计排队车辆数
$VC_i^k$	第 $i$ 个交叉口第 $k$ 相位在该相位时间内能够清除的排队车辆数

表 A3: 目标相位延长时间速查表

应急救援等级 (ERL)	路段拥堵等级 (CLRS)	时间紧迫等级 (TUL)	降低道路 饱和度程度 (DRRS)	延长时间 (s)
特别重大 (I 级响应)	严重拥堵 (I)	严重紧急 (I)	1	40
特别重大 (I 级响应)	严重拥堵 (I)	比较紧急 (II)	1.223912143	40
特别重大 (I 级响应)	严重拥堵 (I)	一般紧急 (III)	1.377465866	40
特别重大 (I 级响应)	中度拥堵 (II)	严重紧急 (I)	1.521295065	30
特别重大 (I 级响应)	中度拥堵 (II)	比较紧急 (II)	1.861931503	30
特别重大 (I 级响应)	中度拥堵 (II)	一般紧急 (III)	2.095532024	20
特别重大 (I 级响应)	轻微拥堵 (III)	严重紧急 (I)	1.944471112	30

特别重大 (I 级响应)	轻微拥堵 (III)	比较紧急 (II)	2.379861806	20
特别重大 (I 级响应)	轻微拥堵 (III)	一般紧急 (III)	2.678442585	10
特别重大 (I 级响应)	畅通 (IV)	严重紧急 (I)	2.314338674	20
特别重大 (I 级响应)	畅通 (IV)	比较紧急 (II)	2.832547207	10
特别重大 (I 级响应)	畅通 (IV)	一般紧急 (III)	3.187922526	0
重大 (II 级响应)	严重拥堵 (I)	严重紧急 (I)	1.074078919	40
重大 (II 级响应)	严重拥堵 (I)	比较紧急 (II)	1.314578231	40
重大 (II 级响应)	严重拥堵 (I)	一般紧急 (III)	1.479507048	30
重大 (II 级响应)	中度拥堵 (II)	严重紧急 (I)	1.633990958	30
重大 (II 级响应)	中度拥堵 (II)	比较紧急 (II)	1.999861375	20
重大 (II 级响应)	中度拥堵 (II)	一般紧急 (III)	2.25076677	20
重大 (II 级响应)	轻微拥堵 (III)	严重紧急 (I)	2.088515429	20
重大 (II 级响应)	轻微拥堵 (III)	比较紧急 (II)	2.556159395	10
重大 (II 级响应)	轻微拥堵 (III)	一般紧急 (III)	2.876858715	10
重大 (II 级响应)	畅通 (IV)	严重紧急 (I)	2.48578238	20
重大 (II 级响应)	畅通 (IV)	比较紧急 (II)	3.042379241	10
重大 (II 级响应)	畅通 (IV)	一般紧急 (III)	3.424080379	0
较大 (III 级响应)	严重拥堵 (I)	严重紧急 (I)	1.119930833	40
较大 (III 级响应)	严重拥堵 (I)	比较紧急 (II)	1.370696946	40
较大 (III 级响应)	严重拥堵 (I)	一般紧急 (III)	1.542666495	30
较大 (III 级响应)	中度拥堵 (II)	严重紧急 (I)	1.703745249	30
较大 (III 级响应)	中度拥堵 (II)	比较紧急 (II)	2.085234499	20
较大 (III 级响应)	中度拥堵 (II)	一般紧急 (III)	2.346850925	20
较大 (III 级响应)	轻微拥堵 (III)	严重紧急 (I)	2.177673152	20
较大 (III 级响应)	轻微拥堵 (III)	比较紧急 (II)	2.665280615	10
较大 (III 级响应)	轻微拥堵 (III)	一般紧急 (III)	2.999670434	10

较大 (III 级响应)	畅通 (IV)	严重紧急 (I)	2.591899239	10
较大 (III 级响应)	畅通 (IV)	比较紧急 (II)	3.172256952	0
较大 (III 级响应)	畅通 (IV)	一般紧急 (III)	3.57025273	0
一般 (IV 级响应)	严重拥堵 (I)	严重紧急 (I)	1.153645523	40
一般 (IV 级响应)	严重拥堵 (I)	比较紧急 (II)	1.411960765	40
一般 (IV 级响应)	严重拥堵 (I)	一般紧急 (III)	1.58910733	30
一般 (IV 级响应)	中度拥堵 (II)	严重紧急 (I)	1.755035241	30
一般 (IV 级响应)	中度拥堵 (II)	比较紧急 (II)	2.148008943	20
一般 (IV 级响应)	中度拥堵 (II)	一般紧急 (III)	2.417501138	20
一般 (IV 级响应)	轻微拥堵 (III)	严重紧急 (I)	2.243230394	20
一般 (IV 级响应)	轻微拥堵 (III)	比较紧急 (II)	2.745516919	10
一般 (IV 级响应)	轻微拥堵 (III)	一般紧急 (III)	3.089973297	0
一般 (IV 级响应)	畅通 (IV)	严重紧急 (I)	2.669926451	10
一般 (IV 级响应)	畅通 (IV)	比较紧急 (II)	3.267755404	0
一般 (IV 级响应)	畅通 (IV)	一般紧急 (III)	3.677732551	0

## 附录 B 调查问卷

为了获取应急响应等级（ERL）、路段拥堵等级（CLRS）以及时间紧迫等级的权重关系（TUL），本文采用调查问卷的形式来收集各属性之间的比重。调查问卷的填写遵循 Santy 1-9 标度方法，如表B1所示。用户可以通过点击链接进行填写，链接地址为：<https://wj.qq.com/s2/10054077/2a68/>。也可以扫描如图B1所示的二维码进行填写。



图 B1: 调查问卷二维码

表 B1: Santy1-9 标度方法

标度	含义
1	表示两个因素相比，同样重要
3	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素强烈重要
9	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	$j$ 与 $i$ 比较的判断 $a_j^i = \frac{1}{a_i^j}$

下面展示收集到的一份调查问卷，被调查人从事交通方面研究 3 年，联系方式为 467171232@qq.com。

1. 题目：路段拥堵等级相对于应急响应等级？

答：5 明显重要

2. 题目：时间紧迫等级相对于应急响应等级？

答：3 稍微重要

3. 题目：路段拥堵等级相对于时间紧迫等级？

答：3 稍微重要

## 致 谢

从 2019 年 9 月进入软件学院至今，这三年的时光转瞬即逝，在华东师范大学的研究生生活无疑是我人生中宝贵的财富之一，在这三年的时间中我学会了如何去发现问题，独立思考问题，如何将所学知识活学活用，让我对自己有了更加深刻的了解，如何更好的规划未来的人生道路。在毕业论文即将完成之际，我要对每一位支持我，学习上鼓励我、教导我，生活上关心我的人表示衷心的感谢。

首先，我要感谢陈仪香教授，他是嵌入式系统、软硬件协同设计、异构计算、信息物理融合系统、实时系统、形式化、分布式系统以及人工智能方面的专家，在学术界很有名气，研究成果如雨后春笋。感谢陈老师在研究生期间对我的教导，陈老师强大的专业背景让我认识到了智慧城市的魅力之处，总能从陈老师的耐心讲解中找到正确的求解思路，感谢陈老师在研究生期间对我的信任与包容，不管是在个人成长还是学术研究上，陈老师总能给我最大的帮助，理解与关心。

我还要感谢对我论文给予帮助的盲审专家以及明审专家，明审专家有卜天明副教授和张敏教授，还要感谢答辩委员会，他们是李德敏教授、马艳芳教授以及卜天明副教授，感谢他们的辛勤付出。我还要感谢软件学院的所有老师们，老师们具有一流的科研水平以及极高科研热情，带领我们以当下最先进，最前沿的眼光来审视当下各种问题，如今华东师范大学的软件学院位列软科全国软件学院排名第二名，这来之不易的成果无一不归结于软件学院所有老师的辛勤付出与莘莘学子的艰苦意志。

其次感谢实验室陪伴我走过研究生生涯的同门，三年的时间，在这里见证了大家的喜怒哀乐，感谢许巾一博士在我刚来实验室时对我的学术指导，感谢吴玮琳、刘鹏晨、王蒙、丁立诚、任达万、刘晗、冒雯雯、叶文韬、蒋清源、石昊、唐付奇、

聂奇隆、岳泽龙、陈学毅、侯雪城、陈新宇等在实验室学习的师兄姐弟妹们，感谢嵌入式系所有的同学们。还要感谢这三年来包容我，陪伴我度过最美好的研究生生活的舍友们。我还要感谢我的朋友，感谢许鹏飞、钟鸣、陈文茜、郭利艳、罗利娟、万利、顾方舟，在我遇到困难时给我鼓励和帮助，感谢他们给我的支持与关心。

最后，感谢我的父母，他们是我背后最坚强的后盾。他们教会了我成为一个正直，善良，勤奋，有担当的人，我能在湖北恩施的一个优美小乡村健康成长，以及到上海读研，无一不是因为父亲的艰苦劳作和对我的重视。希望在将来不会辜负他们对我的期望，对得起父母的养育之恩。

钟力

二〇二二年五月

## 攻读硕士学位期间发表论文和科研情况

### ■ 已公开发表论文或其他科研成果

[1] Li Zhong, Yixiang Chen. A Novel Real-Time Traffic Signal Control Strategy for Emergency Vehicles. IEEE Access, 2022: 19481-19492.

### ■ 软件著作权

[1] 软件著作权一项，面向应急车辆优先通行的交通灯智能控制系统 V1.0（申请中）

### ■ 参加的科研项目

[1] 智慧城市信息-物理融合关键技术开发与应用，国家重点研发计划项目  
(2018YFB2101301)

### ■ 获得荣誉和奖励情况

[1] 2020 年获第十七届“华为杯”全国研究生数学建模竞赛全国三等奖