

分类号: U491.1

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110146



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 车路协同环境下的城市道路交叉口
信号灯配时优化研究

论 文 作 者 夏春婷
校 内 导 师 王建平 (研究员)
校 外 导 师 陈锋
专业学位类别 机械
研究方向 (领域) 智能驾驶

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：U491.1

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110146

车路协同环境下的城市道路交叉口信号灯
配时优化研究

Research on Signal Timing Optimization at Urban Road Intersections
in a Vehicle-Road Collaborative Environment

学生姓名：夏春婷

校内导师：王建平（研究员）

校外导师：陈锋（高级工程师）

专业类别：机械

研究方向：智能驾驶

论文答辩日期：2025 年 5 月 10 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☐。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

车路协同环境下的城市道路交叉口信号灯配时优化研究

摘要

随着城市化进程的加速和汽车保有量的急剧增长，交通拥堵已成为全球各大城市面临的严峻挑战。交叉路口作为城市交通网络的关键节点，其运行效率直接影响整个交通系统的性能。传统的交叉路口信号控制主要依赖于固定的配时方案，无法根据实时交通流量的变化进行动态调整，导致交通拥堵加剧、延误增加和能源浪费。本研究基于车路协同技术，提出了一种交叉路口信号实时配时优化方法，旨在提高交叉路口的通行能力和运行效率。具体工作如下：

（1）针对传统车流量检测精度不足和固定相位设计缺乏灵活性的问题，采用 YOLOv5 目标检测与 Deep SORT 跟踪算法相结合的方法，实现了交叉路口车流量的精确检测，并基于此提出了自适应相位组合模型，有效适应交通流动态变化，提高交叉路口资源利用率，为多目标配时模型提供准确的交通数据输入和相位组合方案。

（2）针对传统信号配时方法难以适应交通流动态变化的问题，构建了综合考虑车辆延误、停车次数和通行能力的多目标优化模型。该模型引入了层次分析法确定不同交通状况下各指标的权重系数，确保在优化过程中能够平衡不同目标之间的冲突，并提出了一种改进的粒子群算法(ALPSO)。该算法为多目标配时优化模型提供了高效求解工具，满足了交叉路口信号配时方案依据实时交通进行动态优化的需求。

(3) 以芜湖市弋江路-赭山东路交叉口为案例, 采用 VISSIM 交通仿真软件构建路网模型, 并通过 COM 接口实现 VISSIM-MATLAB 协同仿真。仿真结果表明, 本文提出的自适应相位相序设计及多目标配时方法在减少车辆延误、降低停车次数和提高通行能力方面均优于交叉路口原有配时法, 服务水平从 E 级提升至 D 级或 C 级, 有效缓解了交叉路口拥堵问题。

关键词: 信号配时优化, 车路协同, 车流量检测, 自适应相位设计, VISSIM 仿真

Research on Signal Timing Optimization at Urban Road Intersections in a Vehicle-Road Collaborative Environment

ABSTRACT

With the acceleration of urbanization and the rapid increase in vehicle ownership, traffic congestion has become a severe challenge faced by major cities worldwide. As critical nodes in urban traffic networks, the operational efficiency of intersections directly impacts the performance of the entire transportation system. Traditional intersection signal control primarily relies on fixed timing schemes, which cannot dynamically adjust to real-time traffic flow changes, leading to aggravated congestion, increased delays, and energy waste. Based on vehicle-road collaboration technology, this study proposes a real-time signal timing optimization method for intersections, aiming to enhance their traffic capacity and operational efficiency. The specific work is as follows:

(1) In response to the issues of insufficient accuracy in traditional traffic volume detection and the lack of flexibility in fixed-phase design, a method combining YOLOv5 object detection and Deep SORT tracking algorithms has been employed to achieve precise detection of traffic flow at intersections. Building on this, an adaptive phase combination model has been proposed, which effectively accommodates dynamic changes in traffic flow and enhances the utilization efficiency of intersection resources.

This approach provides accurate traffic data input and phase combination schemes for multi-objective timing models.

(2) To address the issue that traditional signal timing methods struggle to adapt to dynamic changes in traffic flow, a multi-objective optimization model has been constructed, taking into account vehicle delay, number of stops, and traffic capacity. This model incorporates the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine the weight coefficients of each indicator under different traffic conditions, ensuring that conflicts between different objectives can be balanced during the optimization process. Additionally, an improved Particle Swarm Optimization algorithm (ALPSO) has been proposed. This algorithm provides an efficient solution tool for the multi-objective timing optimization model, meeting the need for dynamic optimization of intersection signal timing schemes based on real-time traffic conditions.

(3) Taking the intersection of Yijiang Road and Zheshan East Road in Wuhu City as a case study, a road network model was constructed using VISSIM traffic simulation software, and co-simulation between VISSIM and MATLAB was achieved through the COM interface. The simulation results demonstrate that the adaptive phase sequence design and multi-objective timing method proposed in this study outperform the original timing method of the intersection in terms of reducing vehicle delay, decreasing the number of stops, and improving traffic capacity. The level

of service was upgraded from E to D or C, effectively alleviating congestion issues at the intersection.

KEY WORDS: signal timing optimization, vehicle-road coordination, traffic flow detection, adaptive phase design, VISSIM simulation

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 车路协同技术研究现状	4
1.2.2 交叉路口相位相序设计研究现状	5
1.2.3 交叉路口信号配时优化研究现状	6
1.2.4 研究现状总结与分析	7
1.3 研究目的及研究内容	8
1.3.1 研究目的	8
1.3.2 研究内容	8
第 2 章 交叉路口基础理论与关键技术分析.....	10
2.1 车路协同体系.....	10
2.1.1 车路协同交叉路口交通调度架构	10
2.1.2 车路协同关键技术	12
2.2 交通控制基本理论.....	14
2.2.1 交通信号基本参数	14
2.2.2 交通性能评价指标	16
2.3 交通信号控制方式.....	17
2.3.1 按控制方法分类	17
2.3.2 按控制区域分类	18
2.4 本章小节.....	18
第 3 章 交叉路口车流量检测及自适应相位设计.....	19
3.1 单点交叉路口车流量检测.....	19
3.1.1 YOLOv5 目标检测算法	20
3.1.2 Deep SORT 目标跟踪算法.....	25
3.2 实验结果与讨论.....	28
3.2.1 实验环境配置	28
3.2.2 实验数据集	29
3.2.3 评价指标	29
3.2.4 实验结果与分析	30
3.3 自适应相位组合模型设计.....	32
3.3.1 交叉路口相位相序设计原则	33
3.3.2 交叉路口各相位间的冲突关系	33

3.3.3 交叉路口实时相位相序设计	35
3.4 本章小结	37
第 4 章 城市单点交叉路口多目标模型优化研究	38
4.1 交通信号灯配时方法	38
4.1.1 Webster 配时法	38
4.1.2 ARRB 配时法	40
4.1.3 HCM 配时法	41
4.2 交叉路口多目标配时优化	42
4.2.1 多目标交通配时指标选取	43
4.2.2 约束条件的建立	45
4.2.3 多目标函数的建立	46
4.2.4 模型权重系数求解	47
4.2.5 多目标优化模型建立	48
4.3 基于改进的粒子群算法求解	49
4.3.1 标准粒子群算法原理	49
4.3.2 改进粒子群算法(ALPSO 算法)	51
4.3.3 改进粒子群算法性能测试	54
4.4 本章小节	58
第 5 章 多目标配时优化模型仿真验证	59
5.1 交叉路口概况	59
5.2 交通仿真模型建立	59
5.2.1 交通仿真软件 VISSIM 介绍	59
5.2.2 交叉路口仿真模型建立步骤	59
5.2.3 弋江路-赭山东路仿真模型	61
5.2.4 COM 接口	62
5.3 自适应相位相序设计仿真分析	62
5.4 自适应周期信号控制仿真分析	66
5.5 本章小结	70
第 6 章 总结与展望	71
6.1 总结	71
6.2 展望	72
参考文献	73
攻读硕士期间发表的学术成果	79
致谢	80

插图清单

图 1-1 2006-2024 年全国汽车保有量	1
图 1-2 2024 年交叉路口事故类型统计图	2
图 2-1 车路协同系统	10
图 2-2 基础数据感知模块	11
图 2-3 智能交叉路口控制系统架构	12
图 2-4 V2X 通信服务图	13
图 2-5 四相位信号控制图	14
图 3-1 单点交叉路口车流量跟踪检测流程图	20
图 3-2 YOLOv5 流程图	21
图 3-3 CBS 模块结构	22
图 3-4 C3 模块结构	22
图 3-5 SPPF 模块结构	23
图 3-6 FPN+PAN 结构图	23
图 3-7 DeepSort 算法流程图	25
图 3-8 模型 P-R 曲线图	30
图 3-9 模型训练结果图	31
图 3-10 统计计数结果视频截图	31
图 3-11 相位相序设计方案	36
图 4-1 Webster 配时法流程图	40
图 4-2 标准粒子群算法流程图	51
图 4-3 改进粒子群算法流程图	54
图 4-4 Sphere Model 函数示意图	55
图 4-5 Rastrigin 函数示意图	55
图 4-6 Rosenbrock 函数示意图	56
图 4-7 Ackley 函数示意图	56
图 4-8 粒子群算法优化结果图	57
图 5-1 VISSIM 仿真流程图	60

图 5-2 弋江路-赭山东路交叉口仿真路网图.....	61
图 5-3 弋江路-赭山东路交叉口 2D、3D 仿真运行图	61
图 5-4 VISSIM-MATLAB 协同仿真流程图	62
图 5-5 弋江路-赭山东路交叉口固定四相位配时方案.....	63
图 5-6 弋江路-赭山东路交叉口自适应相位配时方案.....	64
图 5-7 弋江路-赭山东路交叉口自适应相位设计方案.....	65
图 5-8 弋江路-赭山东路交叉口相位相序优化前后对比.....	66
图 5-9 弋江路与赭山东路交叉口平峰期最佳信号周期	67
图 5-10 弋江路与赭山东路交叉口平峰期相位设计方案	68
图 5-11 弋江路与赭山东路交叉口平峰期配时方案.....	68
图 5-12 弋江路-赭山东路交叉口信号控制优化前后对比.....	69

插表清单

表 2-1 高精度感知设备特性及优缺点对比表	12
表 2-2 饱和度等级划分表	15
表 3-1 DeepSORT 算法外观特征提取网络各层运算内容表	27
表 3-2 实验环境配置	28
表 3-3 实验参数设置	29
表 3-4 V2X-OBUE 通信模块参数	32
表 3-5 路侧 RSU 设备参数	33
表 3-6 《城市道路工程设计规范（CJJ37-2012）》规定的车辆折算系数	36
表 3-7 交叉路口交通流量	36
表 4-1 函数测试结果	57
表 5-1 路径决策相关参数	60
表 5-2 弋江路—赭山东路交叉路口早高峰交通流量	63
表 5-3 弋江路-赭山东路交叉路口固定相位通行效率汇总表	63
表 5-4 弋江路-赭山东路交叉路口固定相位尾气排放汇总表	64
表 5-5 美国 HCM 信号交叉路口的服务水平	64
表 5-6 弋江路-赭山东路交叉路口自适应相位通行效率汇总表	65
表 5-7 弋江路-赭山东路交叉路口优化后尾气排放汇总表	65
表 5-8 弋江路—赭山东路交叉路口平峰期交通流量	67
表 5-9 ALPSO 算法参数	67
表 5-10 弋江路-赭山东路交叉路口固定周期通行效率汇总表	68
表 5-11 弋江路-赭山东路交叉路口自适应周期通行效率汇总表	69

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着城市化进程的飞速推进以及经济的持续增长，城镇化进程不断加速，机动车保有量快速增长^[1]。在这一背景下，城市交通拥堵问题日益严重，交通事故频发，成为制约城市可持续发展的重要原因^[2]。根据公安部交通管理局发布的数据，截至 2024 年底，全国民用汽车保有量达到 4.53 亿辆，较 2023 年增长了 4.14%，其中传统汽车保有量为 3.53 亿辆，新能源汽车保有量已突破 3000 万辆。与此同时，2024 年全国新注册登记的机动车数量为 3593 万辆，较 2023 年增加了 104 万辆，增幅为 2.98%，其中新注册登记的汽车数量为 2690 万辆，比 2023 年增加了 234 万辆，增幅达到 9.53%^[3]。2006-2024 年全国汽车保有量如图 1-1 所示。

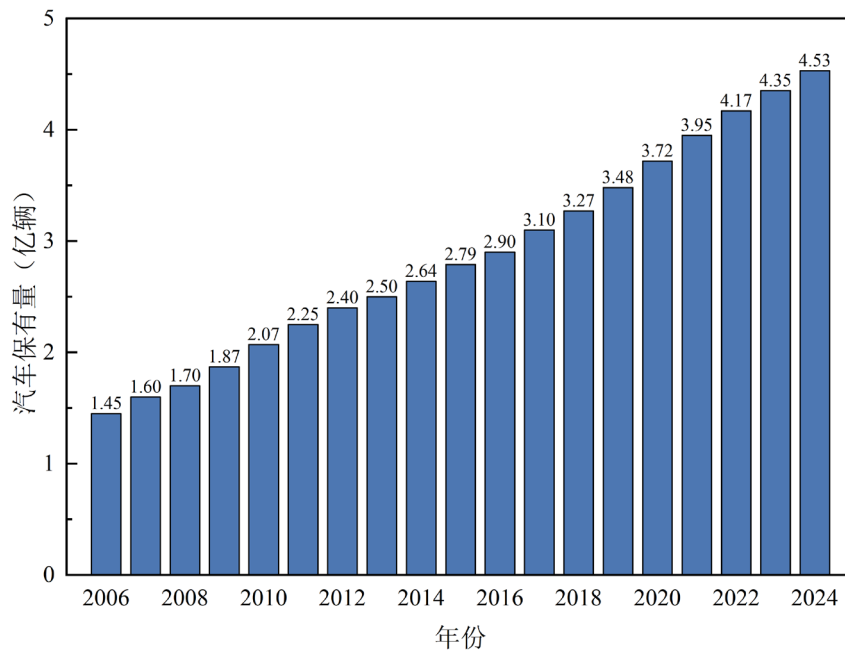


图 1-1 2006-2024 年全国汽车保有量

交叉路口作为城市交通网络的关键节点，其运行效率直接影响着整个交通系统的性能。根据《中国城市道路交叉路口效能报告》可知，在研究所选的 50 座城市人车出行热度核心区中，E 级交叉路口（车辆运行的延误为 55-80 秒/辆的交叉路口）平均占比约 10%，所有 E 级交叉路口的车均高峰小时延误为 73 秒；F 级交叉路口（车辆运行的延误超过 80 秒/辆的交叉路口）平均占比约 2.9%，所

有 F 级交叉路口的车均高峰小时延误为 106 秒，表明这些城市大量交叉路口的服务水平亟待提升^[4]。

根据本报告研究结果，一个 F 级交叉路口一天中分布占比为 50%（即全天约有一半的时间处于 F 级服务水平）时，低服务水平所带来的延误时间经济损失每交叉路口约 4.4 万元/天，约 1094 万元/年；另外，同样的 F 级交叉路口由于能耗和碳排放造成的经济损失每交叉路口约 1 万元/天，约 254 万元/年。

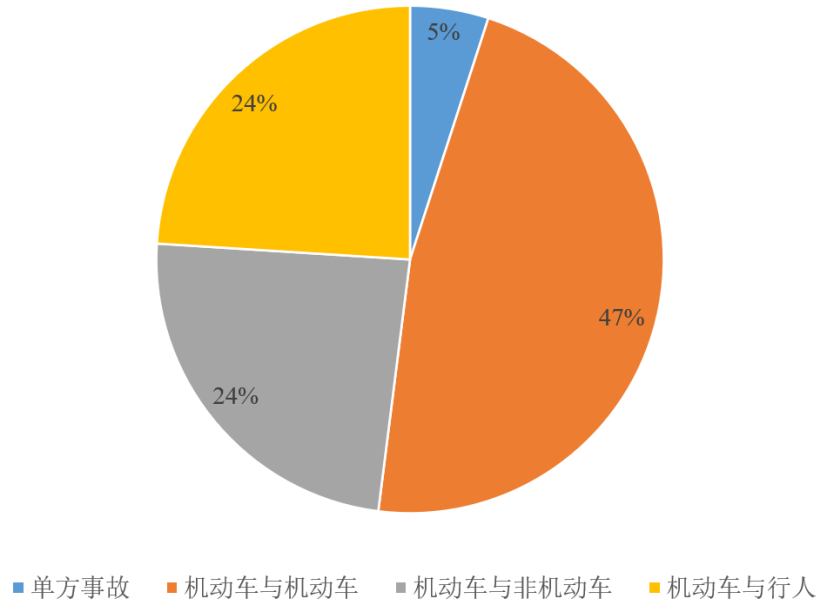


图 1-2 2024 年交叉路口事故类型统计图

在交通拥堵这一复杂的城市交通难题中，交叉路口扮演着关键角色，是交通拥堵的“重灾区”，存在着以下诸多严重问题：

（1）交通流量不均衡导致的冲突

在早晚高峰时段，一些主要道路方向的车流量巨大，而与之相交的支路车流量相对较小，这种不均衡使得在信号灯控制下各方向车辆通行需求难以协调。在很多交叉路口存在主干道直行车辆连续不断，而左转车辆等待时间过长，导致左转车道车辆积压甚至会溢出到相邻车道的现象，影响其他方向车辆的正常通行，严重降低了交叉路口的整体通行效率。

（2）车辆排队过长与蔓延问题

由于交叉路口的通行能力有限，在高峰时段车辆常常需要在路口等待多个信号灯周期才能通过。以某些大型交叉路口为例，高峰时车辆排队长度可达数公里，这种过长的排队不仅会使本就拥堵的路口交通瘫痪，还会蔓延到周边道

路。车辆在排队过程中频繁启停，进一步加剧了能源消耗和尾气排放，同时也增加了驾驶员的烦躁情绪，可能导致交通事故的发生。2024 年交叉路口事故类型如图 1-2 所示。

（3）信号灯配时不合理的影响

传统的信号灯配时多是基于历史交通流量数据设定的固定模式，难以适应实时的交通变化。在工作日的早晚高峰与周末或节假日的交通流量有很大不同，但信号灯配时却未及时调整，一些路口的信号灯也没有充分考虑行人与非机动车的通行需求^[6]。在学校、商业区附近的交叉路口，上下学或购物高峰时段，行人与非机动车流量大增，如果信号灯配时不能合理分配时间就会导致行人与非机动车和机动车相互干扰，进一步降低路口的通行效率。

（4）路口设计与交通需求不匹配

部分交叉路口的设计在早期规划时没有充分考虑到城市发展带来的交通流量增长，一些路口车道数不足、转弯半径不合理、缺乏专用的右转车道或左转待转区等。在一些老城区的交叉路口，由于空间限制无法增加车道数量，导致车辆在路口汇聚时通行困难,而且随着大型车辆数量的增加，一些路口的转弯空间无法满足其需求，进一步加剧了交通拥堵。

综上所述可知交叉路口的这些问题相互交织，共同导致了交通拥堵的加剧，严重影响了城市交通的正常运行，急需通过先进的技术手段来解决现已存在的问题。车路协同技术作为智能交通领域的重大突破，近年来得到了迅猛的发展，车路协同系统通过先进的传感器技术、无线通信技术和大数据处理技术，实现信息实时交互。在车路协同环境下，车辆可以实时获取道路状况、交通信号、周边车辆信息等，道路基础设施也可以感知车辆的位置、速度、行驶方向等状态，从而为交叉路口信号实时配时优化提供了新的机遇。

智能交通系统(ITS)的发展目标是提高交通效率、减少交通事故、降低环境污染，以实现交通的可持续发展,为了达到这一目标对交叉路口信号控制进行优化至关重要^[7]。车路协同环境下的交叉路口信号实时配时优化方法可以充分利用车路协同技术提供的实时交通信息，根据交通流量和车辆状态的变化，动态调整信号配时方案，提高交叉路口的通行能力和效率，减少交通拥堵和延误。利用车路协同系统可以实时了解交叉路口各个方向的车辆排队长度、车辆行驶

速度等信息,根据这些信息及时调整信号灯的时长,优化交通流的分配,提高交叉路口的通行效率。据模拟研究显示如果能够实现精准的实时配时优化,交叉路口的通行能力有望提高 30%-50%,这将极大地缓解城市交通拥堵状况,减少居民的出行时间和延误。从能源与环境方面考虑,优化后的信号配时能够减少车辆在交叉路口的怠速和频繁启停,从而降低燃油消耗,合理的信号配时可以使车辆在交叉路口的燃油消耗降低 20%-30%,相应地尾气排放量也会大幅减少,这对于改善城市空气质量、实现城市的可持续发展具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 车路协同技术研究现状

车路协同技术(Vehicle-Infrastructure Cooperation, VIC)作为智能交通系统的核心组成部分^[8],近年来受到广泛关注。它通过车辆与道路基础设施之间的信息交互,实现交通参与者之间的协同感知、决策和控制,从而提升交通效率、安全性和环保性。

早在 20 世纪末,美国就启动了自动公路系统(AHS)项目^[9]和智能车辆倡议(Intelligent Vehicle Initiative, IVI)项目^[10],旨在通过先进的技术提升道路交通的安全性和效率。1998 年,美国在 IVI 项目的基础上启动了 VII 项目,该项目利用车载 GPS 设备和无线通信技术,实现了车辆之间以及车辆与道路基础设施之间的实时信息交互,为车路协同技术的发展奠定了基础^[11]。2009 年, VII 项目被美国交通部更名为 IntelliDriveSM,并在其基础上进一步深化了车路协同技术的研究^[12]。2015 年,美国发布了《ITS 战略计划:2015-2019》,明确将车联网技术、车路协同技术以及自动驾驶技术列为智能交通系统领域的核心发展方向,进一步巩固了美国在全球智能交通领域的领先地位^[13]。

2004 年,欧洲启动了 ITS 整体体系框架研究项目,制定了车联网“三纵四横”的战略发展框架,为车路协同技术的进一步发展奠定了基础^[14]。2013 年,荷兰、德国和意大利联合测试了基于车路协同技术的智能安全系统,并签署了欧洲联合 ITS 走廊(Cooperative ITS Corridor)部署协议,这标志着车路协同技术在欧洲的实际应用迈出了重要一步^[15]。欧洲在车路协同技术的应用方面已经取得了显著进展,交通安全服务逐步进入实际应用阶段,为全球智能交通技术的发展提供了重要参考。

2010 年上海世博会期间，开展了基于车路协同技术的智能交通系统示范应用。2018 年工业和信息化部、公安部、交通运输部联合发布《车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》，推动车路协同技术的产业化。2020 年国家发改委、工信部等部委联合发布《智能汽车创新发展战略》，将车路协同技术列为重点发展方向。2020 年北京、上海、重庆等城市开展车路协同技术示范应用，并取得显著成效。

1.2.2 交叉路口相位相序设计研究现状

国内外交叉路口相位相序研究致力于通过多种方法和技术，不断探索更科学、高效、安全且适应不同交通状况的交叉路口相位相序设计方案，以提升交叉路口的通行能力、减少延误和冲突，适应日益复杂的交通需求。

Wang 等^[16]研究了一种车联网环境下车辆编队与干线信号协调的联合控制模型，旨在通过协同控制车辆编队和优化交通信号配时，提升交通效率、减少拥堵和延误。Jaun 等^[17]研究了应用强化学习方法优化多交叉路口的交通信号控制系统，能够同时协调多个交叉路口的信号灯配时，以减少车辆等待时间和交通拥堵。Hyunjin 等^[18]提出了一种基于深度强化学习的方法来优化交通信号控制，该方法能够根据实时交通状况动态调整信号灯相位时长和顺序。Arsava 等^[19]提出了一种同时考虑交通流量起讫点分布和网络拓扑结构的信号协调方法，该方法将 OD 需求矩阵整合到网络绿波带设计中，通过混合整数线性规划模型优化信号时序和相位差，以最大化多路径上的绿波带宽度。Yan 等^[20]研究了一种基于车辆轨迹数据的网络级多波段信号协调方案，通过利用车辆轨迹数据来优化复杂路网中的多波段绿波带。Lu 等^[21]提出了一种分相位模式下的网络绿波协调控制优化模型，构建了一个混合整数规划模型，考虑了网络中的多路径绿波带优化，通过同时优化周期、相位差和绿波带宽度来最大化路网绿波带效率。

程爱文等^[22]分析了不同相位相序组合对交通流影响，建立了基于延误最小化的配时优化模型，旨在减少车辆延误和停车次数。闫东方^[23]分析了相位相序对绿波带宽的影响，提出了一种综合考虑相位组合和相序调整的干线协调控制优化方法。张弛^[24]提出了一种基于相位相序调整的双向绿波设置方法，该方法通过调整交叉路口的相位相序，同时考虑各方向交通需求和道路特性，实现了双向绿波的优化设置，提高了干线交通效率。陈小红等^[25]提出了一种单口放行

下混合交通相位相序多属性决策模型,该模型考虑行人、非机动车和机动车多种交通方式的特点,通过多属性决策方法优化相位相序。聂磊等^[26]提出了信号控制交叉路口相位相序自动生成和优化模型,该模型能够根据交叉路口交通流特征自动生成合理的相位相序方案,并通过优化算法选择最佳方案,提高了信号控制的智能化水平。张浩亮等^[27]通过引入重叠相位概念提出了一种基于重叠相位的双向绿波优化方法,该方法在保证安全的前提下增加了相位组合的灵活性。李硕等^[28]对干道信号控制交叉路口提出了一种相位相序优化模型,该模型基于车辆延误最小化目标,分析了相位相序对交叉路口通行能力的影响,并通过算法求解最优相位相序组合,提高了干道交通效率。贾彦峰等^[29]提出了一种基于相位相序优化的双向绿波协调控制模型,该模型综合考虑干线交通需求和交叉路口通行效率,通过优化相位相序实现了更大的双向绿波带宽,改善了干线协调控制效果。王浩等^[30]研究分析了相位相序对区域交通协调控制的影响,提出了一种适应交通流动态变化的相位相序优化方法,提高了城市区域交通控制系统的整体效率。

1.2.3 交叉路口信号配时优化研究现状

众多学者在交叉路口信号配时优化领域开展了广泛且深入的研究,取得了一系列具有影响力的成果,为该领域的发展奠定了坚实基础并引领着研究方向。Goodall 等^[31]提出了一种基于滚动时域优化的信号控制算法,通过利用网联车辆实时传输的位置和速度信息预测短期交通状况,实现了信号配时的动态调整。Feng 等^[32]提出了一种面向高度自动化交通环境的时空交叉路口控制方法。该研究基于网联自动驾驶车辆技术,开发了一种创新的交叉路口控制框架,能够在时间和空间两个维度进行精细化管理。Liao^[33]提出了一种以燃油消耗为优化目标的信号控制模型。该模型基于车辆动力学和燃油消耗模型,开发了一种能够最小化交叉路口区域车辆燃油总消耗的信号配时优化方法。Jin 等^[34]提出了一种基于多智能体控制的智能交通信号系统,该模型采用分布式框架,将每个交叉路口视为一个具有决策能力的智能体,通过局部和全局信息交互实现多目标优化。Gong 等^[35]提出了一种基于多目标强化学习的自适应交通信号控制方法,该方法创新性地将安全性指标与传统交通效率指标结合为强化学习的多重奖励函数,通过智能体学习最优信号配时策略来同时减少车辆冲突点和交通延误。Li

等^[36]提出了一种混合整数线性规划模型，能够同时优化信号相位、相序和绿灯时间，并将车辆轨迹规划纳入考量。

招晨等^[37]提出了一种结合车道分配和信号配时的综合优化方法，通过动态调整同向车道的使用方式并匹配最佳信号配时方案，适用于交通需求波动较大的情况。谭行等^[38]对传统 ARRB 模型在实际应用中存在的局限性进行了调整，提出了更贴合实际交通流特性的改进模型，通过优化信号相位和周期时间，有效减少了车辆延误和排队长度。黄文满等^[39]利用 Synchro 交通仿真软件建立了交叉路口模型，通过分析不同信号配时方案的效果，找出能最大程度减少延误和停车次数的优化方案。王译德等^[40]通过建立多智能体交通仿真模型，模拟分析了不同交通流量和配时方案下的交叉路口运行状况，提出了基于仿真评估的信号配时优化方法。巴天星等^[41]基于 Webster 延误最小化原理，结合实际交通调查数据，提出了一套实用的交叉路口信号周期和绿信比计算方法。宋浪等^[42]对平行流交叉路口的特殊结构，建立了车道使用与信号配时的联合优化模型。李昆耀^[43]等提出了一种在网联环境下交叉路口信号配时与车辆轨迹联合优化的方法，利用车路协同技术实现了信号控制系统与智能网联车辆的信息交互。陈紫月等^[44]基于 VISSIM 交通仿真软件对交叉路口信号配时进行了优化研究。梁春岩等^[45]针对环形交叉路口交通流特点，引入模糊控制理论处理交通信息的不确定性，构建了一套适应性强的信号配时优化模型，提高了环形交叉路口在复杂交通条件下的运行效率。

1.2.4 研究现状总结与分析

国内外对交叉路口信号配时优化的研究呈现多目标、多方法、多层面的特点，不断结合先进技术与理论，致力于提高交叉路口的通行效率、降低延误和停车次数、改善交通环境，但仍面临数据准确性与实时性欠佳、多目标优化权衡困难、算法效率与收敛性有局限等以下诸多挑战。

（1）交通数据方面

获取准确、完整的交通数据是进行信号配时优化的基础，但实际情况下检测器的精度、故障以及数据传输等问题可能导致数据不准确或缺失。交通状况是动态变化的，而现有的数据采集和处理系统可能无法及时获取最新的交通信息，导致历史数据进行的信号配时优化方案不能很好地适应实时交通变化。

（2）模型与算法方面

现有的信号配时优化模型大多是基于理想的交通条件和假设建立的，与实际复杂的交通环境存在一定差距，导致模型的适应性不足。虽然很多研究都在追求多目标优化，但在实际应用中如何确定各目标之间的权重仍然是一个难题，不同地区、不同时段交通需求和重点关注的目标可能不同，目前缺乏一种通用的、科学的方法来确定权重。

（3）协调与统筹方面

对于城市道路网络中的多个交叉路口，目前的信号配时优化往往是孤立地进行的，缺乏对交叉路口之间的协调考虑，可能导致车辆在行驶过程中频繁遇到红灯，降低了道路的通行效率。

1.3 研究目的及研究内容

1.3.1 研究目的

本论文旨在解决城市交叉路口交通拥堵问题，通过构建车路协同环境下的智能交通调控系统，实现交叉路口信号实时优化。研究首先利用深度学习技术进行车流量实时检测，基于检测结果设计自适应相位相序模型，然后构建以车辆延误、停车次数和通行能力为优化目标的多目标配时模型，并通过改进的粒子群算法求解。针对芜湖市弋江路-赭山东路交叉路口进行仿真验证，实验结果表明该方法能显著提高交叉路口通行效率，减少车辆延误时间和停车次数，降低尾气排放，为智能交通管理提供了有效解决方案。

1.3.2 研究内容

基于以上分析，论文主要针对于车路协同环境下单点交叉路口的通行效率问题进行研究，论文研究的核心内容如下：

第 1 章：绪论。本章阐述了本文选题的背景，探讨了基于车路协同环境下信号灯配时优化的重要性，综述了国内外在该领域的研究进展，并概述了本文的主要研究内容及各章节的结构安排。

第 2 章：交叉路口基础理论与关键技术分析。本章首先阐述了车路协同系统的整体架构及其核心技术，随后对交通信号控制的分类、关键参数以及常用的评价指标进行了详细介绍。

第 3 章：交叉路口车流量检测及自适应相位设计。为解决传统车流量检测

存在的局限性，本章研究采用 YOLOv5 目标检测算法与 Deep SORT 跟踪算法相结合的方法完成车流量检测。YOLOv5 以其高效的网络结构精准识别车辆目标，Deep SORT 则通过卡尔曼滤波和外观特征提取实现对车辆的持续追踪，解决了遮挡、光照变化等复杂场景下的检测问题。基于实时车流量检测结果，提出了自适应相位相序设计方法，通过构建相位冲突矩阵并不断寻找剩余流量最大的方向及其兼容方向进行组合，形成动态相位设计。

第 4 章：城市单点交叉路口多目标模型优化研究。针对传统配时方法无法适应交通流动态变化的问题，构建了以车辆延误、停车次数和通行能力为目标的多目标优化模型，并通过层次分析法确定不同交通状况下各指标的权重系数。为有效求解该复杂优化问题，提出了改进的粒子群算法（ALPSO），通过自适应参数调整、引入压缩因子及局部搜索机制，显著提升了算法的全局搜索能力、求解精度和收敛速度。通过 SphereModel、Rastrigin、Rosenbrock、Ackley 四种测试函数验证，改进算法在处理复杂优化问题时表现出色，求解精度显著提高。

第 5 章：基于 VISSIM 仿真软件的交叉路口模型验证与分析。通过仿真验证了本文提出的交叉路口优化方法的可行性：以芜湖市弋江路-赭山东路交叉路口为实际案例，利用 VISSIM 交通仿真软件构建了仿真模型，通过 COM 接口实现 VISSIM-MATLAB 协同仿真。该章节分别验证了自适应相位相序设计和自适应周期信号控制两种优化方案的有效性，与传统固定配时方案进行了对比分析。

第 6 章：总结与展望。概括全文研究成果，分析研究不足，并提出后续研究方向建议。

第2章 交叉路口基础理论与关键技术分析

2.1 车路协同体系

车路协同系统是一种先进的智能交通系统，它将车辆和道路基础设施紧密结合，通过多种通信技术和数据处理手段，实现车辆与车辆(V2V)、车辆与道路(V2I)、车辆与行人(V2P)、车辆与网络(V2N)之间的高效信息交互，以此提升交通系统的整体性能^[46]，车路协同系统如图 2-1 所示。

车路协同系统主要由感知层（包括车辆端和路侧端的各类传感器）、通信层（V2V、V2I、V2P、V2N 通信技术）、数据处理与决策层（利用大数据和机器学习处理数据并用于交通管理决策）和应用层（涵盖交通安全、交通效率、自动驾驶等应用）这四部分组成。感知层负责采集车辆自身及周边交通环境、道路基础设施状况等多源数据；通信层承担车辆与车辆、道路、行人及网络间信息的交互传输；数据处理与决策层运用大数据与机器学习算法处理数据并制定交通管理相关决策；应用层聚焦于实现交通安全保障、交通效率提升以及自动驾驶推进等具体功能与服务。

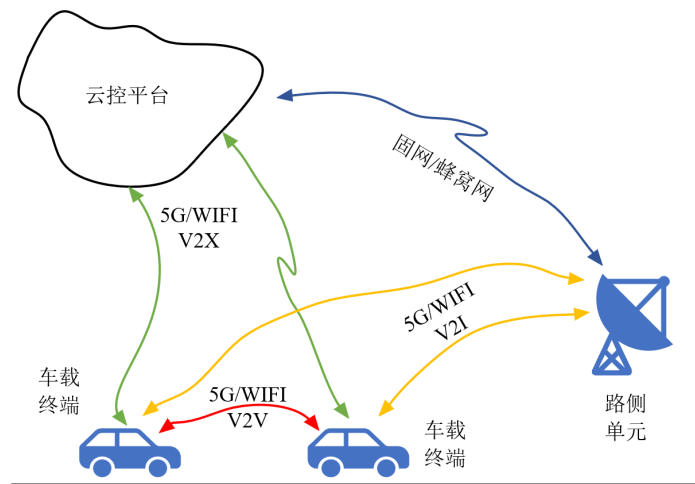


图 2-1 车路协同系统

2.1.1 车路协同交叉路口交通调度架构

本文构建的智能交叉路口控制系统主要借助车路交互及车辆间通信，通过路侧感知设备采集数据并传输至处理中心进行分析。基于分析结果，系统制定策略以动态调控信号灯配时并指挥车辆，从而实现交叉路口交通流的智能精细化调度，提升安全性与运行效率。

车路协同感知层作为车路协同系统的信息采集前端，由车辆端和路侧端的多种传感器构成，如图 2-2 所示。车辆端依靠摄像头、毫米波雷达、激光雷达等精准捕捉车辆自身状态信息以及周围车辆、行人与环境详情；路侧端借助交通流量传感器、气象传感器、路面状况传感器等全面监测道路的车流量、天气变化、路面状况等要素，二者协同作业，为整个车路协同系统提供丰富、精准且实时的基础数据源泉。

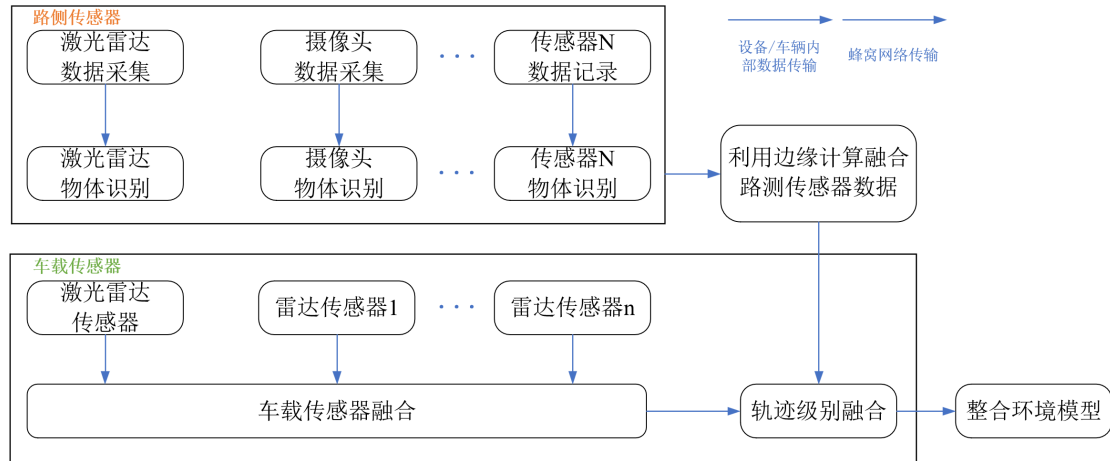


图 2-2 基础数据感知模块

车路协同网络层是车路协同系统的信息传输纽带。V2V 使车辆间能迅速交换行驶数据实现协同驾驶；V2I 让车辆与道路设施交互，获取交通信号灯等信息并反馈交通流数据助力信号调控；V2P 保障车辆感知行人动态确保安全；V2N 借助蜂窝网络使车辆与云端互联，实现数据的上传下达以支持远程管控等功能，该模块凭借高效稳定的通信能力确保系统数据流畅交互，推动车路协同系统有效运转。

如 2-3 交叉路口交通调度架构图所示，车路协同数据处理与决策层接收感知层通过各类车辆传感器及道路传感器所采集到的多源、异构的原始交通数据，以及网络层传递的车辆间、车辆与道路、车辆与人、车辆与网络交互信息，运用大数据处理技术对这些海量数据进行整合、特征提取等操作，同时借助机器学习算法开展数据关联分析、交通模式识别与交通场景建模等工作，以此精准掌握实时交通状况。在此基础上，综合考量交通流量、道路通行能力、车辆行驶状态等多方面因素，通过智能交通管理系统等手段制定交通信号配时优化方案、规划车辆合理路径、高效应对紧急交通事件等交通管理决策，为实现交通系统的高效运行、安全保障以及智能化管理提供坚实的决策支持。

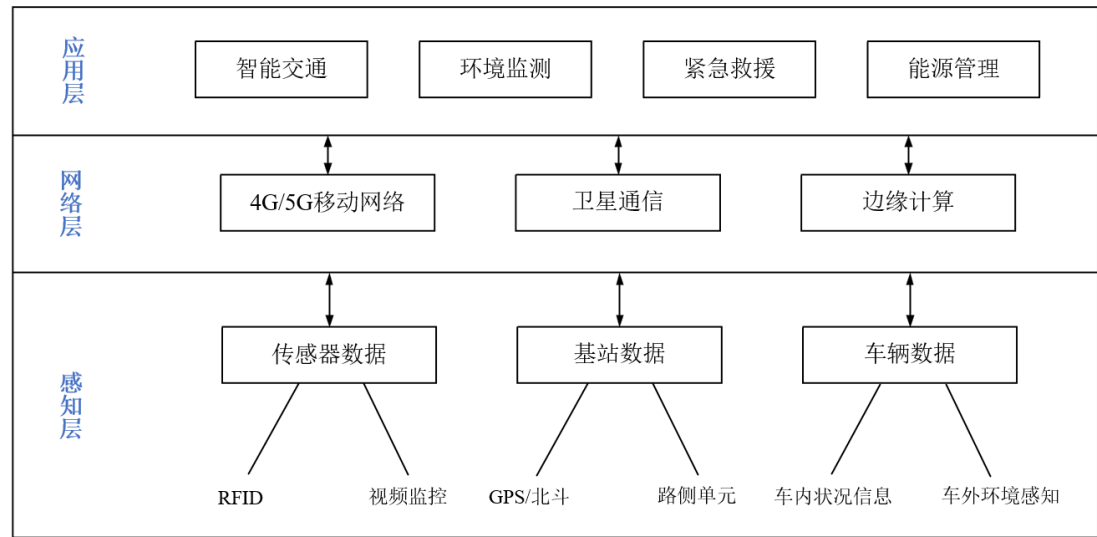


图 2-3 智能交叉路口控制系统架构

2.1.2 车路协同关键技术

车路协同交叉路口智能控制系统应用中的关键技术包括：高精度感知技术、V2X 通信技术、边缘计算与云计算技术、智能信号控制算法、人工智能与大数据分析以及高精度定位技术，这些技术共同作用，实现交叉路口的智能化管理与安全高效通行。

(1) 感知技术

感知技术通过车辆与路侧多类传感器采集信息。于车辆端而言摄像头可以为车辆的智能决策提供直观且丰富的视觉信息源；毫米波雷达有效保障车辆对周边动态环境的实时掌控；激光雷达为车辆的精准操控提供了关键支持。常见高精度感知设备如表 2-1 所示。

表 2-1 高精度感知设备特性及优缺点对比表

感知设备	特性	优点	缺点
摄像头	基于视觉图像，可识别颜色、纹理、形状等	成本较低，信息丰富	受光照、天气影响大
激光雷达 (LiDAR)	通过激光束测量距离，生成高精度 3D 点云地图	精度高，抗干扰能力强	成本高，数据量大
毫米波雷达	利用毫米波探测目标，测量距离、速度和方位	适用于远距离探测	分辨率较低，难以识别细节
超声波传感器	利用超声波进行短距离探测	适用于近距离障碍物检测	易受环境噪声干扰
惯性测量单元 (IMU)	通过加速度计和陀螺仪测量运动状态	提供实时运动数据	需与其他传感器结合使用
GNSS	通过卫星信号提供地理位置信息	全球覆盖，定位范围广	信号易受遮挡，精度有限
多传感器融合	结合多种传感器数据，通过算法提升感知精度和鲁棒性	弥补单一传感器的不足	算法复杂，计算资源需求高

在路侧端交通流量传感器通过环形线圈感应车辆磁场变化或微波反射检测等方式，精确统计各车道的车流量数据，并实时监测车速；路面状况传感器则专注于路面物理状态的检测，当路面出现异常状况时，及时向车辆发送预警信息，提醒驾驶员谨慎驾驶，有效降低因路面问题引发的交通事故风险，全方位的感知技术从多维度为车路协同系统的高效运行奠定了坚实的数据基石。

(2) 通信技术

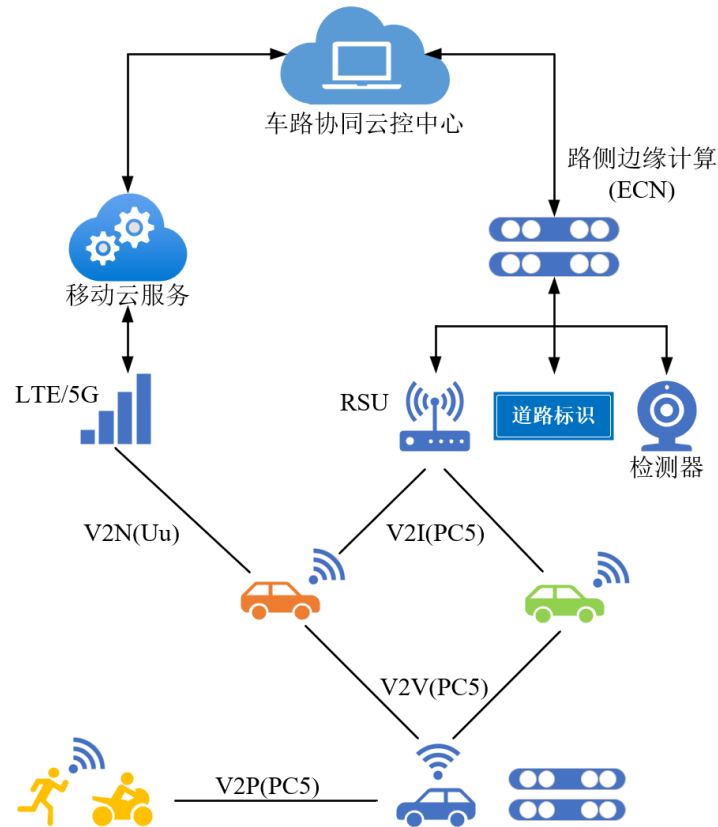


图 2-4 V2X 通信服务图

在车与车通信层面，通过专用短程通信(DSRC)或者蜂窝车联网(C-V2X)中的直连通信模式，车辆能够实时且精准地相互交换诸如速度、加速度、制动状态、行驶方向以及驾驶意图等重要信息，这在车辆编队行驶场景中可确保后车依据前车状态精确调整自身速度与间距，有效避免碰撞事故。V2X 通信技术融合了 DSRC 技术的高效短距通信特性以及 C-V2X 技术的广覆盖、低延迟优势等关键技术要素，广泛应用于交通安全保障领域，提前预警危险状况；在交通流量优化方面，通过信息共享合理规划行车路线与信号灯配时；于智能导航应用中，依据实时变化动态调整导航策略；在自动驾驶辅助场景下，为车辆提供丰富信息以辅助精准决策等诸多场景。V2X 通信技术框架如图 2-4 所示。

2.2 交通控制基本理论

2.2.1 交通信号基本参数

(1) 信号周期

信号周期是指交通信号灯完成一次完整的红、黄、绿信号显示所需要的时间，单位通常是秒^[47]。它是交通信号控制的基本时间单位，反映了信号灯循环变化的周期特性。

信号周期的设置对路口的通行效率和车辆的延误有着直接的影响。周期过长会导致车辆等待时间过长，特别是在交通流量较小的方向，容易造成资源浪费；周期过短则可能使车辆频繁启停，增加车辆的延误和能耗，而且可能导致交通流不稳定。

(2) 信号相位

相位是指在一个信号周期内，同时获得通行权的一组交通流，是根据交叉路口不同方向、不同类型交通流的运行需求和冲突关系，将信号周期时间划分成的若干个独立的时间片段。相序是指这些相位在时间上的先后排列顺序。对于常见的十字交叉路口，其相位设置通常为四相位，如图 2-5 所示。

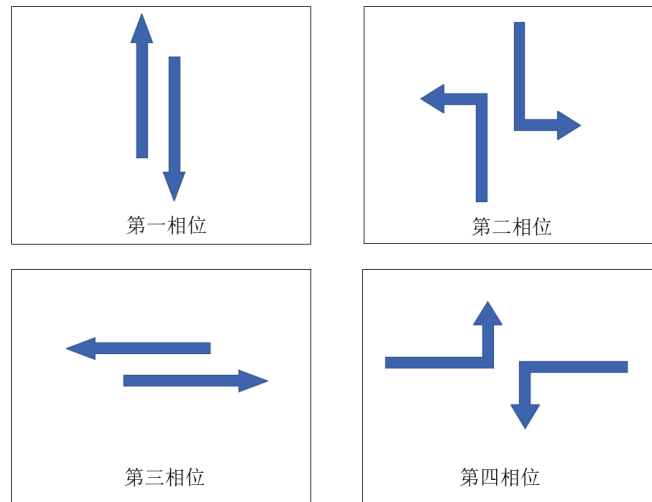


图 2-5 四相位信号控制图

(3) 相位绿信比

绿信比是指一个信号周期内绿灯时间与信号周期的比值，范围在 0 - 1 之间。常用字母 λ 表示。

$$\lambda = \frac{g_e}{C} \quad (2-1)$$

式中, λ —相位绿信比;

C —相位周期时间, 单位为 s;

g_e —有效绿灯时间, 单位为 s。

绿信比主要用于分配不同方向交通流的通行时间,合理的绿信比设置可以根据交通流量的实际需求,使各方向的车辆能够在有效的时间内通过路口。

(4) 相位饱和流量

相位饱和流量是指在特定道路和交通条件下,一个信号相位所能通过的最大稳定交通流量。常用字母 S 表示,单位为 pcu/h。

(5) 相位流量比

指在一个信号周期内某一相位的实际交通流量与该相位饱和流量的比值,常用字母 y 表示^[48]。

$$y = \frac{q}{S} \quad (2-2)$$

式中, y —相位流量比;

q —相位实际流量, 单位为 pcu/h;

S —相位饱和流量, 单位为 pcu/h。

(6) 相位饱和度

相位饱和度是指某一信号相位中实际交通流量与该相位通行能力的比值,用于衡量该相位的交通负荷程度,通行能力等于进口车道的饱和流量与绿信比的乘积,常用字母 x 表示^[49]。

$$x = \frac{q}{\lambda S} = \frac{y}{\lambda} \quad (2-3)$$

式中, x —相位饱和度。

表 2-2 饱和度等级划分表

$x < 1$	$x = 1$	$x > 1$
供给大于需求 不饱和	供给等于需求 临界饱和	供给小于需求 过饱和

饱和度用于评估交叉路口各进口车道的利用程度和交通拥堵的潜在风险,当饱和度接近或超过 1 时,说明该车道的交通负荷较重,容易出现拥堵;饱和度小于 1 表示车道还有剩余的通行能力,交通流较为顺畅,绿灯时间足以让到达的车辆通过。相位饱和度可分为三个等级,如上表 2-2 所示。

（7）绿灯间隔时间

绿灯间隔时间是指在同一交叉路口中，一个相位的绿灯结束到下一个相位的绿灯开始之间的时间间隔，通常包括黄灯时间和全红时间^[50]，常用字母 I 表示。黄灯时间通常为 3-5 秒，全红时间一般在 1-3 秒。

绿灯间隔时间的设置是为了保证在不同相位交通流切换时，路口内有足够的时间清空车辆，防止车辆冲突。如果间隔时间过短，可能导致车辆冲突；如果过长，则可能降低交叉路口的通行效率。

（8）损失时间

损失时间是指在一个信号周期内，由于信号切换、车辆启动延迟等原因而不能有效利用于车辆通行的时间。它包括每个相位的启动损失时间和绿灯间隔时间内的部分时间。启动损失时间一般是指绿灯刚亮起时，车辆从静止加速到正常行驶速度所需的时间，通常每个相位的启动损失时间约为 2-3 秒。

损失时间的存在会影响路口的实际通行能力，在进行信号配时设计和交通流量分析时，需要考虑损失时间的影响，以便更准确地评估路口的运行效率和通行能力，合理安排信号周期和各相位时间，尽量减少损失时间对交通流畅性的不利影响。

2.2.2 交通性能评价指标

（1）车辆平均延误

车辆延误时间是指车辆在通过交叉路口时，由于信号控制、交通拥堵或其他因素所导致的额外等待时间。平均延误则是指在一定时间内，所有通过交叉路口的车辆延误时间的平均值，车辆平均延误越小，说明交通信号控制策略越有效，车辆能够更快速地通过交叉路口，交通流畅性越好。

（2）停车次数

停车次数是指车辆在通过交叉路口时因信号控制或交通拥堵而需要完全停止的次数^[51]。停车次数体现了交通信号控制对车流通行连贯性的影响，频繁停车不仅会增加车辆的燃油消耗和尾气排放，还会降低乘客的舒适性和交通效率。

（3）排队长度

排队长度包括最大排队长度和平均排队长度，最大排队长度是指在一个信号周期内某一进口车道上车辆排队的最大长度，通常以车辆数或排队距离来衡

量；平均排队长度是指在一定观察时间内进口车道排队长度的平均值^[52]。排队长度是衡量交通拥堵程度的重要指标，较长的排队长度可能导致车辆倒灌到上游路口，影响更广泛区域的交通秩序。

（4）通行能力

通行能力是指在既定的道路基础设施、交通状况及信号调控参数下，交叉路口于单位时间内容许通过的最大交通流量，是衡量交叉路口交通承载能力的重要指标。了解交叉路口的通行能力有助于合理规划交通流量，设计合适的交通信号控制策略，在评估交通改善措施的效果时，通行能力的变化是重要的参考依据，能够判断交叉路口是否能够更好地应对交通需求。

2.3 交通信号控制方式

2.3.1 按控制方法分类

（1）定时控制

定时控制依据事先规划设定的固定时间程序对交通信号灯予以操控，其信号周期、各相位时长以及绿信比等关键参数在整个运行阶段均保持恒定，不会因交通流量在实际运行过程中的实时波动而产生变化。信号变化规律具有高度的确定性和稳定性，驾驶员能够迅速熟悉并适应这种固定的信号节奏，从而在一定程度上保障了路口交通秩序的井然有序。

（2）感应控制

感应控制的核心在于借助车辆检测器实时捕捉交通流量信息，并依据这些信息即时调整交通信号灯的运行状态。在路口的各个进口车道或者关键部位精准安装诸如感应线圈、视频探测器等先进的车辆检测设备，一旦有车辆驶过检测区域，检测器便会迅速将车辆到达的信号传输至信号控制器。信号控制器则会依据预先设定的智能规则，对是否延长或缩短当前绿灯时间做出精准决策。这种控制方式能够极为精准地根据实际交通流量的变化情况，高效地利用绿灯时间资源，最大限度地减少车辆在路口的等待时间和不必要的停车次数，适用于那些交通流量波动剧烈、交通流呈现出明显不规律特性的路口环境。

（3）自适应控制

自适应控制不仅仅能够实时地检测交通流量的瞬时变化情况，更重要的是能够借助复杂而精密的算法对整个交通状况进行全面、深入的分析与精准预测，

进而动态地调整交通信号的各项参数。这种控制方式会综合考量多个路口之间的交通流量相互关系、车辆排队长度的动态变化、车速的实时分布等多维度因素，以此为基础对整个区域的交通流进行全方位的优化调控。

2.3.2 按控制区域分类

(1) 单点控制

单点控制仅仅针对单个独立的交叉路口实施交通信号控制，不考虑与之相邻的其他路口的交通状况。在这种控制模式下，每个路口完全依据自身的交通流量特点以及预先设定的控制方式独立自主地运行交通信号灯。

(2) 干线控制

干线控制，也常被称为绿波带控制，其核心目标是对一条城市主干道上的多个连续交叉路口进行统一协调与精准控制，从而构建起一条高效畅通的绿波带。通过对各路口的信号周期进行精细调整以及对相位差进行巧妙设置，使得行驶在主干道上的车辆能够以较为稳定的速度连续通过多个路口，并且在这个过程中最大限度地减少停车次数，实现交通流的快速、顺畅疏导。

(3) 区域控制

区域控制是对一个特定区域内的多个交叉路口实施统一、综合的交通信号控制策略的方式。它并非孤立地看待每个路口的交通状况，而是将整个区域视为一个交通网络系统，全面综合地考虑区域内的交通流量分布、交通流向变化、道路网络结构特点等多方面因素。通过运用先进的自适应控制技术或智能协调控制算法，对整个区域的交通运行进行全方位、多层次的优化调控。

2.4 本章小节

本章分析了车路协同环境下交叉路口智能控制系统的关键技术和基本理论。首先阐述了车路协同体系架构，包括感知层、通信层、数据处理与决策层及应用层的构成与功能，并详细介绍了 V2V、V2I 等通信技术在交叉路口运行中的应用及优势。随后系统梳理了交通控制基础理论，包括信号周期、相位与相序、绿信比等关键参数概念，以及延误时间、停车次数、排队长度和通行能力等评价指标。最后对比分析了定时控制、感应控制、自适应控制等不同控制方式的特点，及其在单点控制、干线控制和区域控制中的应用场景，为后续交叉路口优化研究奠定了理论基础。

第3章 交叉路口车流量检测及自适应相位设计

交通流量在一天中是动态变化的，存在明显的高峰和低谷时段，在城市交通的早晚高峰时期，交通流量会出现显著的高峰。在大城市的商业中心、学校和办公区域周边的交叉路口，车流量常常会达到平峰时期的数倍，这种情况下如果采用固定的相位相序，很容易导致交通拥堵。通过实时相位相序设计，可以根据实时跟踪监测的交通流量，动态调整各方向车辆的通行时间和顺序，可以有效避免传统设计中因固定相位设置导致部分方向车辆等待时间过长的问題。

3.1 单点交叉路口车流量检测

车流量检测在智能交通系统中起着至关重要的作用，它是交通信号控制优化、拥堵监测预警、交通规划建设以及智能交通管理服务的关键依据，能有效提升交通系统的运行效率、安全性和规划合理性。经典的车流量检测方法主要有基于感应线圈、视频检测、超声波和微波雷达的检测方法，它们分别利用电磁感应、计算机视觉、超声波反射、微波反射原理进行车流量检测，但是经典的车流量检测方法分别存在安装维护麻烦且受环境影响、受环境干扰大、精度有限且易受干扰、安装条件和检测精度受限等缺点。

由于在车流量检测中，YOLOv5 目标检测在检测精度上，存在面对车辆遮挡、光照变化及复杂场景时易出现漏检、误检，对非标准尺寸车特征提取不准，复杂路况下受干扰大等问题；在检测结果关联层面，它只能独立检测各帧图像，难以确定车辆轨迹；检测速度方面，车流量大或视频分辨率高时，难以保证实时性。而 Deep SORT 跟踪算法恰能弥补这些短板，一方面，它借助卡尔曼滤波与深度学习特征法，应对遮挡、光照变化，精准关联相邻帧目标，还原车辆轨迹，提升检测准确性；另一方面，能过滤无效检测，结合 YOLOv5 快速检测优势，实现车辆实时跟踪与计数，满足交通流量监测实时性需求。

故本研究采用 YOLOv5 目标检测算法与 Deep SORT 跟踪算法相结合的方式以实现车流量的实时检测。首先，YOLOv5 对视频的每一帧图像进行快速扫描，凭借其出色的卷积神经网络架构，精准识别出车辆目标，框定位置并提取初步特征。接着，Deep SORT 算法接手后续跟踪流程，利用卡尔曼滤波依据车辆前序状态预测当下位置，同时借助外观特征提取网络捕捉车辆独特外观，如车身

颜色、车型等。在级联匹配阶段，综合外观特征的余弦距离与运动信息的马氏距离构建代价矩阵，再运用匈牙利算法将新检测到的车辆与已有跟踪轨迹精准关联，二者协同运作，持续、准确地追踪每一辆车，实现高效车流量检测。车流量跟踪流程图如图 3-1 所示。

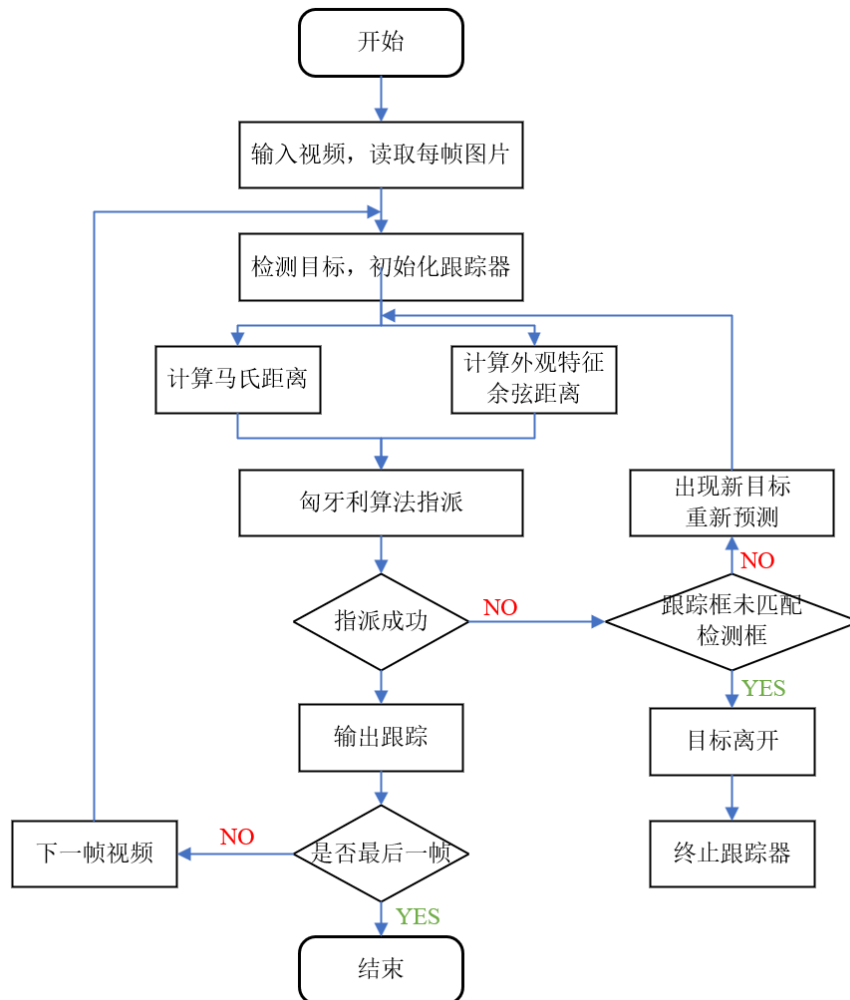


图 3-1 单点交叉路口车流量跟踪检测流程图

3.1.1 YOLOv5 目标检测算法

YOLOv5 算法是一种高效的单阶段目标检测算法，其核心思想是将目标检测任务视为回归问题，直接在图像中预测目标的边界框和类别概率^[53]。它首先将输入图像划分成多个不同尺度的网格单元，每个网格单元负责预测落在其中的目标物体信息，包括物体的类别概率以及边界框的位置与尺寸。在网络架构搭建上，采用了跨阶段局部连接网络(CSPNet)结构，能有效减少计算量、提升运算速度，同时增强特征提取能力。它还运用了焦点损失函数(Focal Loss)，让

模型在训练时聚焦于难分类样本，提高对小目标等复杂情况的检测精度。在推理阶段依据之前构建的网络模型对图像快速处理，综合各网格单元预测结果，以高速度和较高精度输出图像中物体的类别、位置等详细信息。

YOLOv5 算法主要分为输入端、骨干网络、颈部网络和预测端。输入端负责对数据进行预处理，确保输入数据的质量；骨干网络从预处理后的数据中提取关键特征；颈部网络将这些特征进行多尺度融合，以增强模型的表达能力；预测端根据融合后的特征进行目标预测，并通过优化手段提高预测精度输出目标的相关信息。YOLOv5 算法流程图如图 3-2 所示。

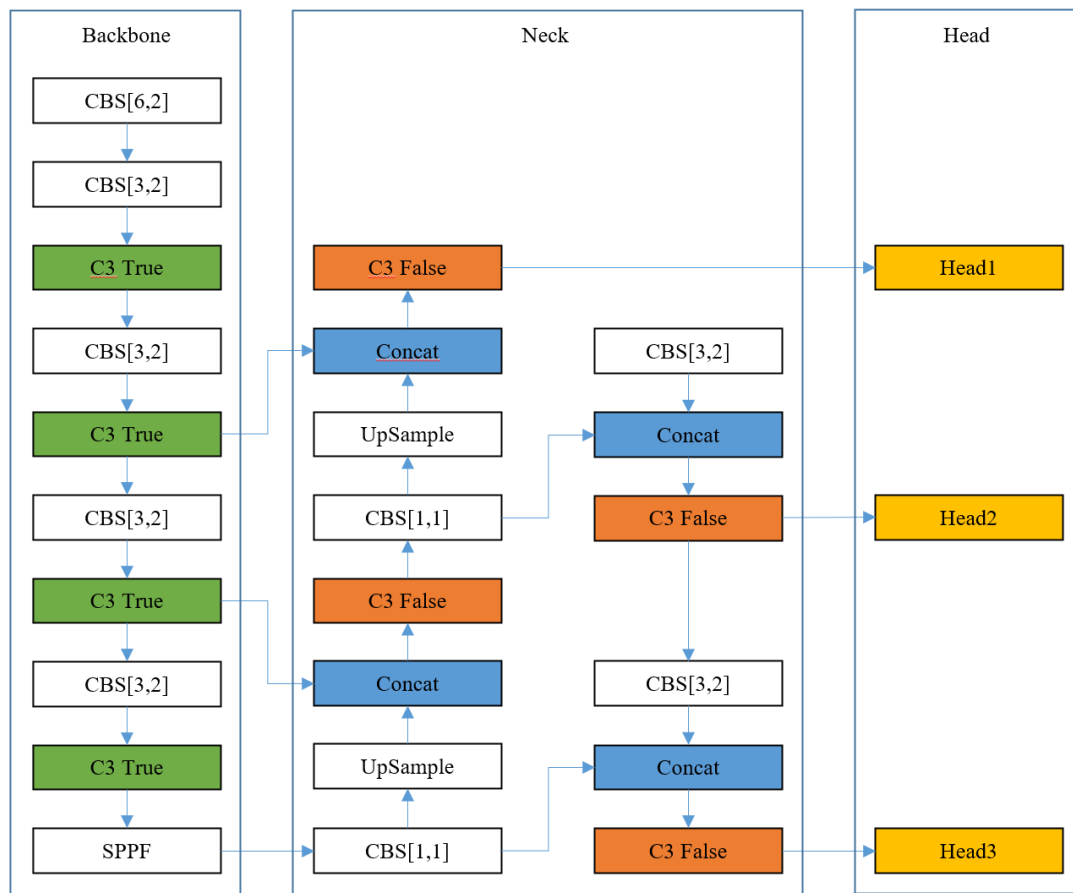


图 3-2 YOLOv5 流程图

(1) 输入端(Input)

Mosaic 数据增强：随机选择四张训练图像，以不同的比例裁剪并拼接成一张新的合成图像，调整每张图像中目标的边界框坐标以适应新的布局，这种方法不仅增加了训练数据的多样性，还模拟了目标在不同背景、尺度和位置下的分布情况，帮助模型更好地学习目标特征^[54]。

自适应锚框计算：提取训练数据中所有目标的宽度和高度信息，然后对这

些边界框的尺寸进行聚类，找到最能代表目标分布的锚框尺寸，聚类过程中采用交并比(IoU)作为距离度量，以确保生成的锚框能够更好地覆盖目标形状。最终 YOLOv5 根据聚类结果调整模型中的锚框参数，使其更适应数据集中目标的实际分布，显著提升模型对目标边界框的预测精度及检测性能^[55]。

自适应图片缩放：先根据原始图片大小以及输入到网络的图片大小计算缩放比例，再用最小缩放比例对原始图片进行缩放，最后计算黑边填充数值，将黑边填充区域分散到两边，从而在图片中填充最少的黑边，减少信息冗余，提升算法的推理速度。

(2) 骨干网络(Backbone)

CBS 模块用于特征提取与初步处理，其结构由卷积层(Conv)、批量归一化层(BN)以及 SiLU 激活函数依次组成，如图 3-3 所示。卷积层通过滑动卷积核提取输入数据的多层次特征，从局部细节到全局形状；批量归一化层对卷积输出进行标准化处理，将数据分布调整至均值为 0、方差为 1，从而加速网络收敛并提升训练稳定性；SiLU 激活函数则通过非线性变换进一步增强特征的表达能力。

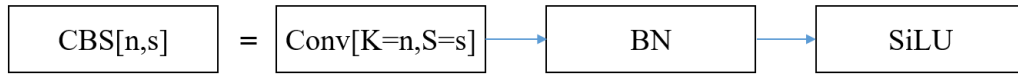


图 3-3 CBS 模块结构

C3 模块通过特殊的卷积块组合和步幅设置来增加感受野、减少计算量并有效提取特征。它借鉴了 CSP 结构的思想，将输入特征图分为两部分：一部分直接通过卷积层进行前向传播，另一部分则经过一个更为复杂的结构处理，最后将两部分特征相加，从而实现高效的特征融合^[56]，C3 模块结构如图 3-4 所示。

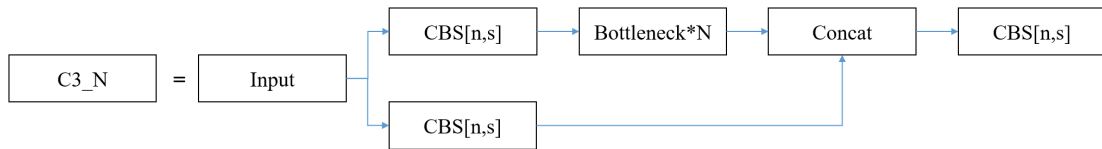


图 3-4 C3 模块结构

SPPF 模块首先对输入特征图分别使用多个不同大小的池化核进行最大池化，再将原始输入特征图与各个池化结果进行拼接形成一个融合了多尺度信息的特征图，最后通过 1×1 卷积操作对拼接后的特征图进行通道降维和特征整合，输出包含丰富上下文信息的特征图^[57]，SPPF 模块结构如图 3-5 所示。

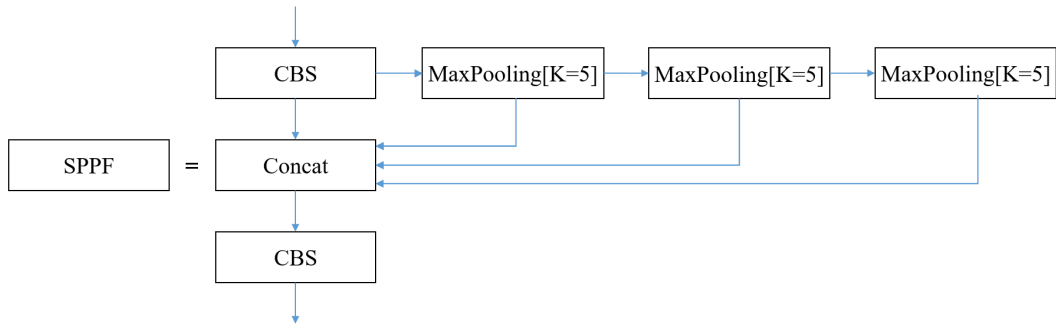


图 3-5 SPPF 模块结构

(3) 颈部网络(Neck)

YOLOv5 中 Neck 网络结构采用的是特征金字塔网络(Feature Pyramid Networks, FPN)和路径聚合网络(Path Aggregation Network, PAN)结构, 如图 3-6 所示。FPN 是自顶向下结构, 将高层特征通过上采样和低层特征做融合得到进行预测的特征图, 能够传达强语义特征, 改善低层特征传播^[58]。PAN 是自底向上结构, 传达强定位特征, 进一步加强了不同层次特征之间的融合, 通过将底层的位置信息和高层的语义信息更好地结合起来, 与 FPN 结合生成具有多尺度信息的特征金字塔, 增强特征表达能力, 更好地处理不同尺度和大小的目标^[59]。

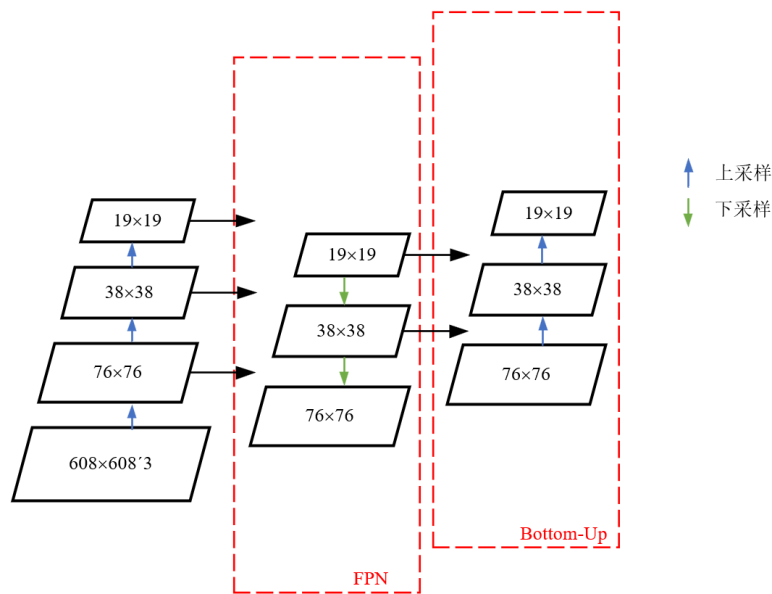


图 3-6 FPN+PAN 结构图

(4) 预测端(Prediction)

YOLOv5 的预测端依托颈部网络输出的融合特征图运作, 先是运用多尺度预测手段, 依据不同尺度特征图对目标进行预测, 小尺度负责捕捉小目标, 大尺度精准定位大目标。用类似锚框的方式在特征图各预测点生成多个边界框, 同步预测其对应的类别概率与位置信息, 网络学习过程中持续优化这些边界框

参数。在此过程中综合运用 CIOU_Loss 精准度量定位偏差，借助交叉熵计算分类损失、衡量类别预测准确度，还有置信度损失把控预测框包含目标的可信度。最后采用非极大值抑制算法清理冗余，依据置信度和重叠程度筛除重复预测框，输出精准的目标类别、位置与置信度数据，完成高效检测任务。YOLOv5 中使用的是损失函数如式 3.1 所示：

$$L_{\text{total}} = \sum_i^N (\lambda_1 L_{\text{box}} + \lambda_2 L_{\text{obj}} + \lambda_3 L_{\text{cls}}) = L_{\text{total}} = \sum_i^N (\lambda_1 L_{\text{box}} + \lambda_2 L_{\text{obj}} + \lambda_3 L_{\text{cls}}) = \sum_i^N (\lambda_1 \sum_j^{B_i} L_{\text{CIOU}_j} + \lambda_2 \sum_j^{S_i \times S_i} l_{\text{obj}_j} + \lambda_3 \sum_j^{B_i} l_{\text{cls}_j}) \sum_i^N (\lambda_1 \sum_j^{B_i} L_{\text{CIOU}_j} + \lambda_2 \sum_j^{S_i \times S_i} l_{\text{obj}_j} + \lambda_3 \sum_j^{B_i} l_{\text{cls}_j}) \quad (3-1)$$

式中， N —检测层的个数，YOLOv5 中为 3 层；

L_{box} —边界框损失；

L_{obj} —目标物体损失；

L_{cls} —分类损失；

λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为上述 3 种损失对应的权重。

CIOU 损失计算如式 3.2 所示：

$$\begin{cases} L_{\text{CIOU}} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v \\ IoU = \frac{|b \cap b^{gt}|}{|b \cup b^{gt}|} \\ v = \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \arctan \frac{w}{h} \right)^2 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， b 、 b^{gt} —预测框、标签框；

w^{gt} 、 h^{gt} —标签框的宽高；

w 、 h —预测框的宽高；

ρ —两个矩形框中心的距离；

α —权重系数；

v —修正因子。

L_{box} 、 L_{cls} 计算方式如式 (3)：

$$\begin{cases} Loss = -\frac{1}{n} \sum_i^n [y_i \cdot \log(\sigma(x_i)) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \sigma(x_i))] \\ \sigma(a) = \frac{1}{1 + \exp(-a)} \end{cases} \quad (3-3)$$

3.1.2 Deep SORT 目标跟踪算法

Deep SORT 算法原理是先利用目标检测算法检测视频帧中的目标及其信息，接着用深度神经网络提取检测目标的外观特征，通过预训练 CNN 输出特征向量来表征目标外观^[60]。然后采用卡尔曼滤波预测目标运动状态，同时综合外观特征相似度（用余弦距离衡量）和运动信息相似度（基于预测位置与新检测位置接近程度）计算关联度，再用匈牙利算法进行数据关联确定目标对应关系^[61]。最后通过跟踪管理，包括创建新跟踪对象、更新匹配目标信息和删除未匹配目标，实现目标跟踪。Deep SORT 算法流程图如图 3-7 所示。

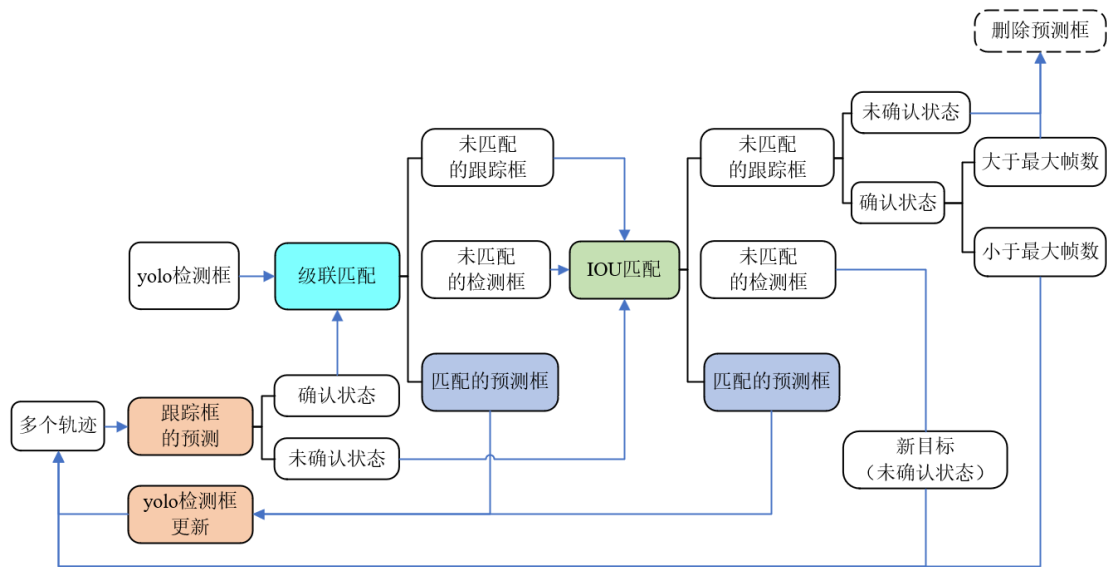


图 3-7 DeepSort 算法流程图

(1) 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波器是 Deep SORT 算法里实现精准目标跟踪的关键组件^[62]。它依据线性系统状态空间模型运行，把目标状态抽象为包含位置、速度等关键要素的向量。一方面，借助状态方程依据目标过往状态及预设的状态转移矩阵，推测其后续状态走向；另一方面，通过观测方程将内部状态转化为外界可感知的观测值。在实际跟踪流程中，分预测与更新两大步骤交替推进，预测环节利用上一时刻状态提前布局下一刻目标的大致方位及预估不确定性范围，一旦新观测数据就位，更新环节迅速响应，凭借计算卡尔曼增益巧妙权衡预测信息与新观测的可信度，精准调校目标状态估计，持续输出可靠的跟踪结果。

常规的 KF 状态方程主要用于对系统状态进行预测。它基于系统当前已知的状态和系统的动态模型，对下一时刻或未来多个时刻的状态进行预估。该线性

方程表示为：

$$X_t = A_t X_{t-1} + B_t u_t + w_t \quad (3-4)$$

式中， X_t —当前时刻系统状态向量；

X_{t-1} —上一时刻的系统状态向量；

A_t —状态转换矩阵；

B_t —控制矩阵；

u_t —当前时刻的系统输入；

w_t —过程噪声， w_t 取 0；

故 KF 预测方程可以表示为：

$$X_t = A_t X_{t-1} + B_t u_t \quad (3-5)$$

通过 KF 得到的预测值及预测阶段协方差矩阵如公式 3-6 及 3-7 所示。

$$\hat{X}_{t|t-1}^- = F_t \hat{X}_{t-1}^+ \quad (3-6)$$

$$P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t \quad (3-7)$$

式中， F_t —状态转换矩阵；

Q_t — t 时刻过程噪声；

$P_{t-1|t-1}$ — $t-1$ 时刻更新后的协方差矩阵；

$P_{t|t-1}$ — t 时刻预测后的协方差矩阵。

预测值修正后得到最终的状态估计值和更新阶段协方差矩阵如公式 3-8 及 3-9 所示。卡尔曼增益的计算过程实现了预测信息和观测信息的有效融合，计算过程如公式 3-10 所示。

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (3-8)$$

$$\hat{x}_{t|t}^+ = \hat{x}_{t|t-1}^- + K_t (Z_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}^-) \quad (3-9)$$

$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1} \quad (3-10)$$

式中， R_t — t 时刻观测噪声；

K_t — t 时刻卡尔曼增益值；

Z_t — t 时刻检测值；

(2) 外观特征提取网络

仅依靠运动信息难以精准区分外观相似车辆，尤其在复杂路况、遮挡频发时易出错，可能引发 ID-switch 问题，这种情况下由于长时间无法匹配，算法会为该车辆分配新的 ID，从而可能导致误检或“车辆丢失”现象。Deep SORT 算法在车辆跟踪中不仅利用运动信息，还结合了外观特征，如车身颜色、车型和车标等，通过神经网络从视频帧中提取目标车辆的外观信息，生成一个 128 维的特征向量来表示该车辆^[63]。通过计算当前帧与历史帧中目标车辆特征向量之间的余弦距离，评估两特征向量的相似性，并使用余弦距离作为损失函数^[64]，以此判断两车是否为同一车辆，减少因长时间遮挡导致的 ID 切换问题，进而降低车辆被多次检测的概率，余弦距离的计算如公式 3-11 所示。

$$Dist = 1 - \frac{C^T \cdot L}{C \cdot L} \quad (3-11)$$

式中， C —历史特征向量；

L —该帧中检测车辆特征向量。

在数据关联阶段，这些外观特征与运动信息协同构建代价矩阵，助力匈牙利算法匹配车辆轨迹，即便车辆短暂消失再出现，也能依据外观重识别，提升车流量跟踪监测的准确性与可靠性。外观特征提取网络运过程见表 3-1。

表 3-1 DeepSORT 算法外观特征提取网络各层运算内容表

网络层	输入通道	输出通道	卷积核	步长	输出向量大小
Input					$3 \times 128 \times 64$
Conv1	3	32	3×3	1	$32 \times 128 \times 128$
Conv2	32	32	3×3	1	$32 \times 128 \times 128$
Max Pool 3	32	32	3×3	2	$32 \times 64 \times 64$
Residual 4	32	32	3×3	1	$32 \times 64 \times 64$
Residual 5	32	32	3×3	1	$32 \times 64 \times 64$
Residual 6	32	64	3×3	2	$64 \times 32 \times 32$
Residual 7	64	64	3×3	1	$64 \times 32 \times 32$
Residual 8	64	128	3×3	2	$128 \times 16 \times 16$
Residual 9	128	128	3×3	1	$128 \times 16 \times 16$
Dense 10	128	128	3×3		128
Bath and L2 Normalization					128

(3) 级联匹配

在车流量跟踪检测中，级联匹配可以解决车辆遮挡后重新识别、区分外观相似车辆、维护车辆轨迹以及适应复杂交通场景等问题，通过综合外观特征和运动信息，按轨迹年龄分层匹配，将当前帧中检测到的目标与已有的跟踪轨迹

进行匹配，确保每个目标都能正确地关联到相应的轨迹上，从而实现对目标的持续、准确跟踪。利用余弦相似度度量方法，对轨迹与检测框之间的视觉相似性进行量化分析，即通过计算检测框的视觉特征向量与轨迹库中现有视觉特征向量之间的余弦相似度，来评估二者的一致性，计算过程如公式 3-12 所示。

$$dist_{cos}(i, j) = \min \{1 - u_j^T u_k^{(i)} | u_k^{(i)} \in \Phi\} \quad (3-12)$$

式中， $dist_{cos}(i, j)$ —第 i 个轨迹特征向量与第 j 个检测框之间的余弦距离的最小值；

u_j —第 j 个检测框的外观特征向量；

$u_j^{(i)}$ —已匹配 k 次的轨迹 i 的外观特征向量；

Φ —外观特征向量集合。

在运动信息处理模块中，采用卡尔曼滤波算法对轨迹进行预测，通过马氏距离与实际检测框进行匹配，马氏距离的计算方法如公式 3-13 所示。

$$dist_m(i, j) = (h_j - y_i)^T S_i^{-1} (h_j - y_i) \quad (3-13)$$

式中， $dist_m(i, j)$ —第 i 个轨迹与第 j 个检测框之间的马氏距离；

h_j —第 j 个检测框 的位置；

y_i —第 i 个轨迹的位置；

S_i —协方差矩阵。

将余弦距离和马氏距离两种度量方式加权综合，如公式 3-14 所示。

$$w_{i,j} = \lambda dist_m(i, j) + (1 - \lambda) dist_{cos}(i, j) \quad (3-14)$$

式中， λ —权重系数。

3.2 实验结果与讨论

3.2.1 实验环境配置

本实验所需的软件、硬件环境配置以及实验参数设置如表 3-2 和表 3-3 所示。

表 3-2 实验环境配置

环境配置	参数信息
操作系统	Ubuntu 20.04
CPU	Intel(R) Xeon(R) Platinum 8255C
内存	43G
Python	3.8
开发框架	Pytorch
CUDA	11.3

表 3-3 实验参数设置

参数名称	参数信息
Image size	640×640
Batch size	16
Epoch	300
Hyp	hyp.scratch.p5.yaml
Optimizer	SGD

3.2.2 实验数据集

为了提高单点交叉路口车流量检测的精度，本实验采用自主采集数据集的方式，数据集中含有不同的交通场景，包括十字路口、T 字路口、丁字路口等，不同的环境背景，包括白天、黑夜、晴天、多云、下雨等多种情况。所采集的数据中包含 3 个类别，其中公交车(bus)、轿车(car)、卡车(truck)。为了提高 YOLOv5 算法识别的精确度，采用了剪裁、平移、更改亮度、加噪音、旋转角度、镜像等方式对数据集进行数据增强^[65]，共得到 6990 张图组成数据集。利用 LabelImg 对图片里的目标进行标注，所生成的标签文件选用 XML 格式，并把标注好的数据集整理并转换为标准的 VOC 数据集规格，依照 8:1:1 的比例对整个数据集进行划分，其中 80% 作为训练集，用于训练算法，让算法学习到目标的特征模式；10% 当作验证集，在训练过程中辅助验证算法的有效性，及时调整参数；剩下 10% 则设定为测试集，在算法训练完成后评价算法在实际应用中的性能表现。

3.2.3 评价指标

YOLOv5 的目标检测评价指标涵盖了两大类：检测精度指标和检测速度指标。在精度方面，主要包括准确率(P)、召回率(R)、F1 分数、平均精度(AP)以及均值平均精度(mAP)；在速度方面，主要评价指标包括前传耗时、每秒帧数(FPS)以及浮点运算量(FLOPs)^[66]。其中精度相关指标可衡量模型预测的准确性、覆盖度等性能，帮助了解模型在不同类别上的检测效果，速度相关指标则可评估模型的检测效率，确定其是否满足实时性要求等。准确率是指在所有被检测为正例（即检测为目标）的样本中，真正是正例的比例^[67]，如公式 3-15 所示。

$$P = \frac{M_{TP}}{M_{TP} + M_{FP}} \quad (3-15)$$

式中， M_{TP} —真正例，即实际为目标且被准确检测出的样本数量；

M_{FP} —假正例，即实际并非目标却被错误标记为正类的样本数量。

召回率是指在所有实际为正例的样本中，被正确检测出来的比例^[68]，如公式 3-16 所示。

$$R = \frac{M_{TP}}{M_{TP} + M_{FN}} \quad (3-16)$$

式中， M_{FN} —假反例，即把目标错误地判定为非目标的样本数量。

mAP 是在多类别目标检测任务中，对所有类别 AP 的平均值，它用于衡量整个检测系统在多个类别上的综合性能，如公式 3-17 和 3-18 所示。

$$AP = \int_0^1 P(R) dR \quad (3-17)$$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AP_i \quad (3-18)$$

式中， n —类别的个数， n 为 5。

3.2.4 实验结果与分析

在模型训练过程中，输入图像的尺寸被设置为 640×640 ，批量大小为 16，初始学习率设为 0.01，动量为 0.937，权重衰减为 0.0005。训练共进行 400 个 epochs，结果如图 3-8、图 3-9 所示。

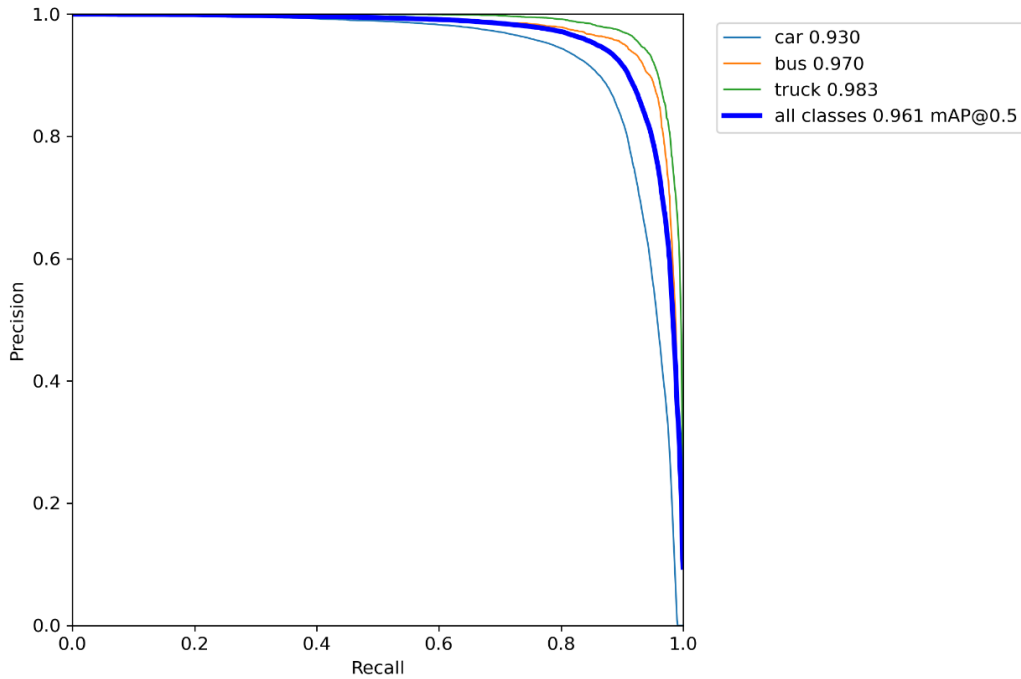


图 3-8 模型 P-R 曲线图

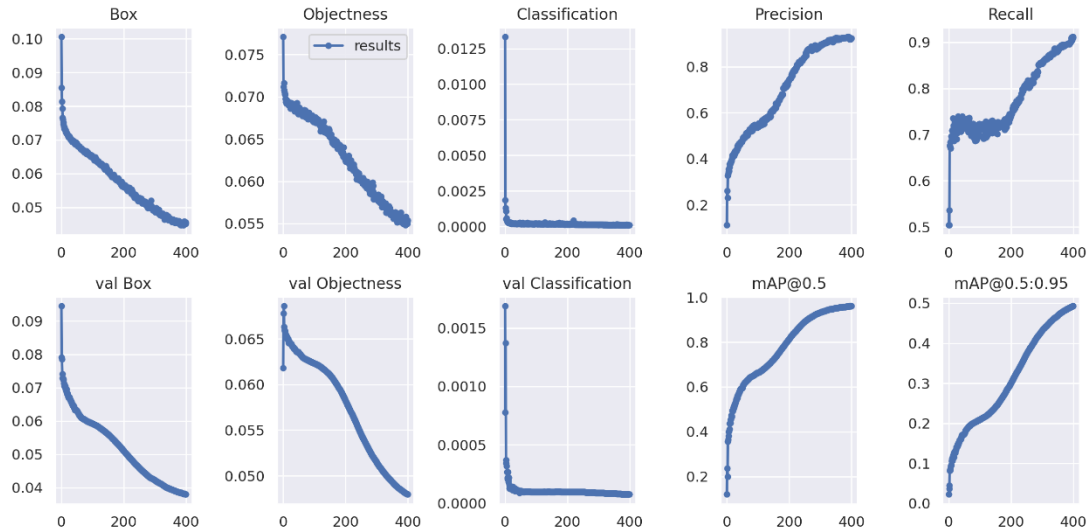


图 3-9 模型训练结果图

由上图可知在训练过程中，损失函数得到了很好的收敛，精度，召回率与 mAP 值均稳步上升然后趋于平稳，该模型满足交叉路口车流量检测的需求。通过 YOLOv5 识别车辆类别、位置、置信度及外观特征，将其作为 Deep SORT 的输入数据，从而追踪车辆轨迹，并在视频中设置检测线进行车流量的统计，通过在车道内布置垂直于行驶方向的虚拟检测线，当目标追踪框的中心轨迹与检测线交叉时，系统自动增加车流量计数并存储该点的纵坐标，检测结果如图 3-10 所示。

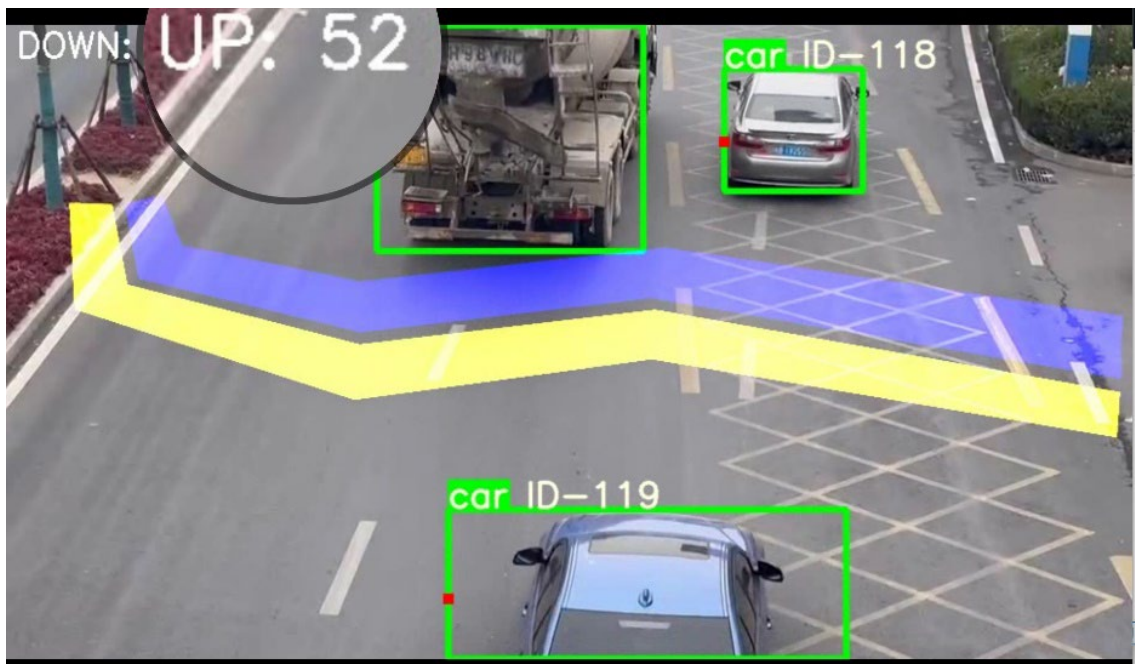


图 3-10 统计计数结果视频截图

3.3 自适应相位组合模型设计

在相位设计中，利用车路协同环境下车辆与道路基础设施之间的实时、高效信息交互，为相位设计提供精准的交通流数据，通过车辆上的传感器和路侧设备，可以实时获取交叉路口各个方向的交通流量、车速、车辆类型等详细信息。车辆传感器能够精确地探测自身的速度、位置以及周围车辆的状态，路侧设备则可以监测车道占有率等信息，这些数据会被传输到交通管理中心或者RSU，通过RSU端决策。车路端设备参数如表3-4、表3-5所示。

在实时信号配时设计中，车端主要负责数据采集与反馈，利用自身传感器收集车速、间距、加速度等交通信息传输给路端或云端，还能反馈如能否在绿灯结束前通过交叉路口之类的信息；同时接收路端或云端的信号相位信息和交通引导指令，像根据绿灯剩余时间调整车速，或执行紧急车辆优先之类的指令，路端可以根据车辆的实际行驶需求和道路状况，优化相位的时长和顺序，还能将相位变化信息传递给车辆以实现车路协同，避免交通拥堵，减少车辆等待。

车路协同系统利用V2V和V2I通信技术，将信号相位的变化信息及时传递给车辆，车辆接收到这些信息后，可以提前调整车速或者驾驶策略。

车端作用：车端主要负责数据采集与反馈，利用自身传感器收集车速、间距等交通信息传输给路端或云端，还能反馈如能否在绿灯结束前通过交叉路口之类的信息；同时接收路端或云端的信号相位信息和交通引导指令，像根据绿灯剩余时间调整车速，或执行紧急车辆优先之类的指令，保障交通秩序。

路端作用：路端起到交通数据收集与汇聚的作用，通过智能设备采集交叉路口各方向交通流量、车辆类型等数据，为相位设计提供依据；其交通信号控制器是关键，能根据数据和算法实时控制、优化信号灯相位，还能将相位变化信息传递给车辆以实现车路协同。

表 3-4 V2X-OBU 通信模块参数

通信模块参数	规格
单电源电压	2.8V-3.6V
数据传输速率	110kbit/s、850kbit/s、6.8Mbit/s
工作频率	3.5~6.5GHz
发射功率	-14dBm/-10dBm
支持数据包大小	1023 字节
通信距离	视距 300 米

表 3-5 路侧 RSU 设备参数

设备参数	规格内容
OS	RT-thread
处理器	Cortex-M4 32 位 RISC
内存	128kBytes
发射功率	-14dBm ~ -10dBm
UWB	6.8Mb/数据传输
频带范围	3.5GHz~6.5GHz

3.3.1 交叉路口相位相序设计原则

相位设计遵循相关原则旨在通过合理规划交通流的时空分配，减少冲突与延误，保障行人安全，提升交通系统的安全性、高效性、易理解性与易管理性，以促进整体交通运行的顺畅与有序。因此，相位的设计要遵循以下几个原则：

（1）流量均衡原则

在进行相位设计时，需要对交叉路口各个进口道的交通流量进行全面、细致的调查和分析，根据流量数据为每个进口道的不同交通流合理分配相位时间，使各方向交通流在不同情况下都能得到合理的通行时间，避免某个方向交通流过度积压，确保整个交叉路口的交通容量得到充分利用。

（2）冲突分离原则

识别交叉路口内诸如直行与左转车辆、车辆与行人等不同交通流间的冲突，常见的左转与对向直行车辆冲突易引发事故与拥堵，应通过合理划分相位，分离相互冲突的交通流，减少冲突点并保障安全。

（3）行人原则

在行人流量大的学校、商场、医院等附近交叉路口，要充分考虑行人过街需求，设置足够的行人相位，其绿灯时长依人行横道长度与行人步行速度确定，保障安全过街；且当行人与车辆同时通行时，要通过设置右转专用相位或让行标志等措施，确保两者同步性，保障行人安全。

（4）效率原则

相位设计旨在减少车辆与行人在交叉路口的总延误时间，可通过合理安排相位顺序与时间，利用智能交通系统根据实时流量动态调整相位时间，使交通流顺畅，降低停车与等待时间。

3.3.2 交叉路口各相位间的冲突关系

本章基于经典十字交叉路口进行分析，右转车流不设置单独的信号控制，

故不考虑右转车流以及行人和非机动车的影响。该交叉路口共有 8 个不同方向的车流流向，由北向南直行为相位 L1、由北向东左转为相位 L2、由东向西直行为相位 L3、由东向南左转为相位 L4、由南向北直行为相位 L5、由南向西左转为相位 L6、由西向东直行为相位 L7 以及由西向北左转为相位 L8。

定义交叉路口的各相位用 L 表示，则交叉路口内各相位的集合为：

$$L = \{l | l = 1, 2, 3, \dots, i, \dots, n\} \quad (3-19)$$

其中， L —各相位 l 的集合；

i, l —具体的信号相位；

n —信号相位个数，该交叉路口 $n=8$ 。

以矩阵形式呈现道路交叉路口交通信号各个相位之间关系的工具，矩阵的行和列代表不同相位，各元素表示相位间是否存在冲突、先后顺序等关系的矩阵叫做相位矩阵，如下所示。

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1i} & \cdots & W_{1l} & \cdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2i} & \cdots & W_{2l} & \cdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{i1} & W_{i2} & \cdots & W_{ii} & \cdots & W_{il} & \cdots & W_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{l1} & W_{l2} & \cdots & W_{li} & \cdots & W_{ll} & \cdots & W_{ln} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \cdots & W_{ni} & \cdots & W_{nl} & \cdots & W_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3-20)$$

不同交通信号相位在时间和空间上能够协调配合，交通流可以安全、顺畅地通过交叉路口，不存在相互干扰或碰撞的情况叫做相位兼容，而相位冲突则恰恰相反，是指不同相位的交通流在同一时间和空间上出现相互干扰、碰撞的情况。在上述相位矩阵中元素 W_{il} 表示第 i 相位第 l 车辆流向的通行状态，若 $W_{ij}=1$ 则表示第 i 相位第 l 相位处于兼容状态，两相位车辆可正常通行； $W_{ij}=0$ 表示第 i 相位第 l 相位处于冲突状态，两相位车辆无法正常通行。

$$w_{il} = 0, 1 \quad \forall i, l \in L. \quad (3-21)$$

交叉路口的相位冲突关系具有反身性和对称性。反身性意味着一个相位不会与自身发生冲突；对称性则表明，如果相位 i 与相位 j 存在冲突，那么相位 j 与相位 i 同样存在冲突。

综上所述，该交叉路口的相位集合为 $L=\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ ，冲突矩阵为：

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

3.3.3 交叉路口实时相位相序设计

传统四相位双向放流设计难以灵活应对复杂多变的交通状况，在车流量不均匀的交叉路口，如早晚高峰某些方向车流量大，这种固定的四相位设计不能根据实际情况有效分配时间，易导致部分方向车辆长时间等待而拥堵。因此本文基于 3.2 节车流量实时跟踪检测结果以及相位设计原则，以提高交叉路口通行效率为目的，进行自适应相位相序设计。具体设计步骤如下：

Step 1:创建 PairPhaseDesign 类并定义兼容性矩阵 C，该矩阵表示各方向交通流之间的组合可能性。

Step 2:在 designPairedPhases 方法中验证交通流量数据的完整性和有效性，确保数据包含 8 个方向且无负值。

Step 3:设置 remaining_flow 追踪剩余交通流量，phase_sequence 存储生成的相位序列。

Step 4:使用 while 循环持续处理剩余交通流量，直到所有方向流量清零。

Step 5:在每个循环迭代中，找出剩余流量最大的交通方向。

Step 6:基于兼容性矩阵，识别可与最大流量方向同时放行的方向。

Step 7:当无兼容方向时，为最大流量方向创建单独相位。

Step 8:选择最大流量方向和流量最大的兼容方向组成相位组合。

Step 9:根据相位组合计算并更新各方向剩余流量，确保合理分配绿灯时间。

Step 10:通过 displayPhaseSequence 方法将相位设计结果以易读格式呈现，包括每个相位的通行方向和流量疏解情况。

为验证该相位设计方案的有效性和真实性，利用 3.2 节车流量实时跟踪检测结果获取交叉路口高峰期车流量，并按照车辆换算系数都折算成标准小客车的数量，得到交叉路口车流量如表 3-7 所示。

表 3-6 《城市道路工程设计规范（CJJ37-2012）》规定的车辆折算系数

汽车代表车辆	小客车	大型客车	大型货车	铰接车
车辆折算系数	1.0	2.0	3.0	4.0

表 3-7 交叉路口交通流量

进口道	方向	实际交通量 Q(pcu/h)	合计
南进口	左转	463	686
	直行	223	
北进口	左转	232	382
	直行	150	
西进口	左转	334	467
	直行	133	
东进口	左转	216	462
	直行	246	

利用 MATLAB 软件将上述算法进行运行，结果如图 3-11 所示。

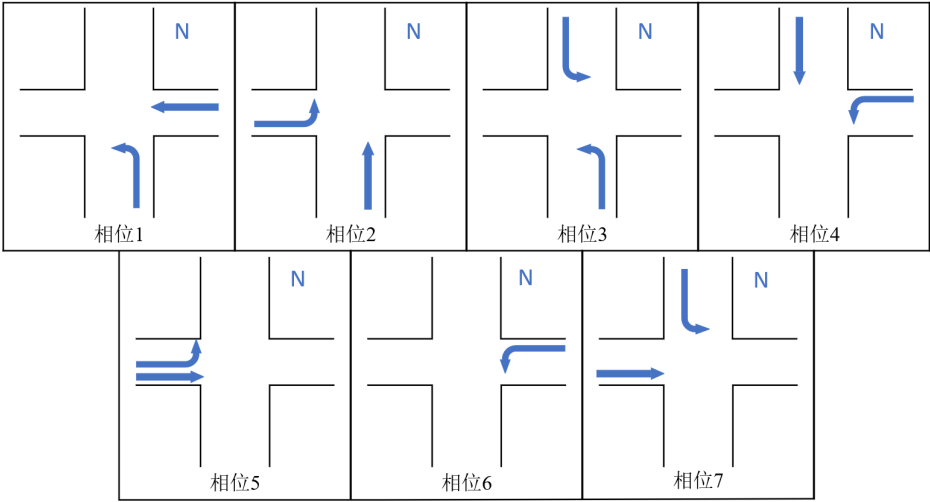


图 3-11 相位相序设计方案

对比传统相位相序设计，该自适应相位相序设计有以下优势：

- （1）通过不断寻找剩余流量最大的方向及其兼容方向进行组合，能够更充分地利用每个相位的时间，相比传统设计中可能出现的某个相位时间内道路资源闲置的情况，这种动态设计能够让更多的车辆在单位时间内通过交叉路口。
- （2）在复杂的城市交叉路口，传统相位设计往往难以应对多方向、多交通流的复杂交织情况，而该方法通过调整兼容性矩阵和交通流量输入，能够更好地适应这些复杂场景，生成更合理的相位序列，从而有效减少交通冲突和拥堵。

3.4 本章小结

针对传统车流量检测方法在复杂场景下精度不足的问题，本章基于路侧感知设备采集的交叉路口车流量视频数据，提出了一种结合 YOLOv5 目标检测算法与 Deep SORT 跟踪算法的实时车流量检测方法。该方法利用 YOLOv5 对视频帧中的车辆进行快速检测，并通过 Deep SORT 算法实现车辆的持续跟踪，有效解决了车辆遮挡、光照变化等复杂场景下的漏检和误检问题，显著提升了检测精度和实时性。基于实时检测结果，设计了自适应相位相序模型，通过构建相位冲突矩阵和动态调整相位组合，解决了传统固定相位分配导致的交通资源浪费和部分方向车辆等待时间过长的问題。

第4章 城市单点交叉路口多目标模型优化研究

信号配时的原理主要基于交通流量平衡，即根据交通流量分配绿灯时间并适应其变化，现阶段城市道路交叉路口有效绿灯时间的分配缺乏对交通流量动态变化的有效适应，固定的绿灯时间难以应对高峰时段交通拥堵和低谷时段资源浪费的情况，特殊事件发生时也无法及时调整。衡量交叉路口通行效率的高低首先是根据车辆延误时间，包括车辆在交叉路口排队等待的时间、停车次数等，这直接反映了车辆通过交叉路口的流畅程度。因此，本章基于第三章的实时相位相序设计，构建了一个以车辆延误、停车次数和通行能力为优化目标的模型，并采用改进的粒子群算法(ALPSO)对该模型进行求解。

4.1 交通信号灯配时方法

4.1.1 Webster 配时法

Webster 配时法是一种经典的交通信号配时方法，它以交叉路口的交通流量数据为基础，主要目的是减少车辆在交叉路口的平均延误时间。该方法通过计算交叉路口的最佳信号周期时长来合理分配绿灯时间，其计算过程考虑了各个进口道的交通流量比，根据流量比之和来确定一个合适的周期，使得车辆能够较为高效地通过交叉路口，同时涉及到对各相位绿灯时间的分配，在确保交通安全、避免冲突的基础上，尽可能地平衡各方向的交通需求。

在 Webster 配时法中，饱和流量定义为在单位时间内能够通过交叉路口停车线的最大车辆流量^[69]，其表达式为：

$$S = \frac{3600}{h_i} \quad (4-1)$$

式中， h_i —车头间距(s)；

S —饱和流量(pcu/h)。

相位总损失时间表达式为：

$$L = AR + nl_j \quad (4-2)$$

式中， AR —交叉路口全红的时间(s)；

n —相位总数；

l_j —各相位车辆在启动时损失的时间，一般取 3s。

各相位交通流量比表达式为：

$$y_i = \frac{q}{S} \quad (4-3)$$

$$Y = y_1 + y_2 + \cdots + y_n \quad (4-4)$$

式中， y_i —各个相位的交通流量的比例；

q —各个相位的实际交通流量(puc/h)；

S —各相位饱和流量(puc/h)；

Y —交叉路口总流量比。

最佳周期时间，表达式为：

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \quad (4-5)$$

各相位有效绿灯时间表达式为：

$$G_e = C - L \quad (4-6)$$

$$g_i = G_e \times \frac{y_i}{Y} \quad (4-7)$$

式中， G_e —交叉路口总的有效绿灯时间(s)；

g_i —各个相位的有效绿灯时间(s)。

各相位绿灯显示时间表达式为：

$$g_{ei} = g_i + l_j - A \quad (4-8)$$

式中， g_{ei} —第*i*相位绿灯的显示时长(s)；

A 代表黄灯的显示时间(s)，通常选取为 3s。

在 Webster 配时法中，车辆平均延误的计算是基于交通流理论和排队论的原理。其基本公式为：

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65\left(\frac{C}{q^2}\right) \quad (4-9)$$

式中， x —相位饱和度，其他项意义同上。

公式的第一部分 $\frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}$ 主要考虑了车辆在信号周期内由于红灯等待和绿灯不完全利用所产生的延误；第二部分 $\frac{x^2}{2q(1-x)}$ 涉及到饱和度对延误的影响，饱和度越高，车辆等待时间可能越长；第三部分 $-0.65\left(\frac{C}{q^2}\right)$ 是一个修正项，用于更精

确地调整计算结果，使其更符合实际交通情况。

Webster 配时法重点关注车辆的延误时间，通过合理的信号周期和绿灯时间分配，使车辆能够快速、高效地通过交叉路口，但 Webster 配时法是基于交通流量相对稳定的假设进行设计的，在实际交通环境中交通流量会随着时间、特殊事件等因素发生较大的变化，很难实时适应这些变化，可能导致在高峰时段绿灯时间不足，车辆拥堵严重，而在低谷时段绿灯时间过长，造成交通资源的浪费。Webster 配时法实现流程如图 4-1 所示。

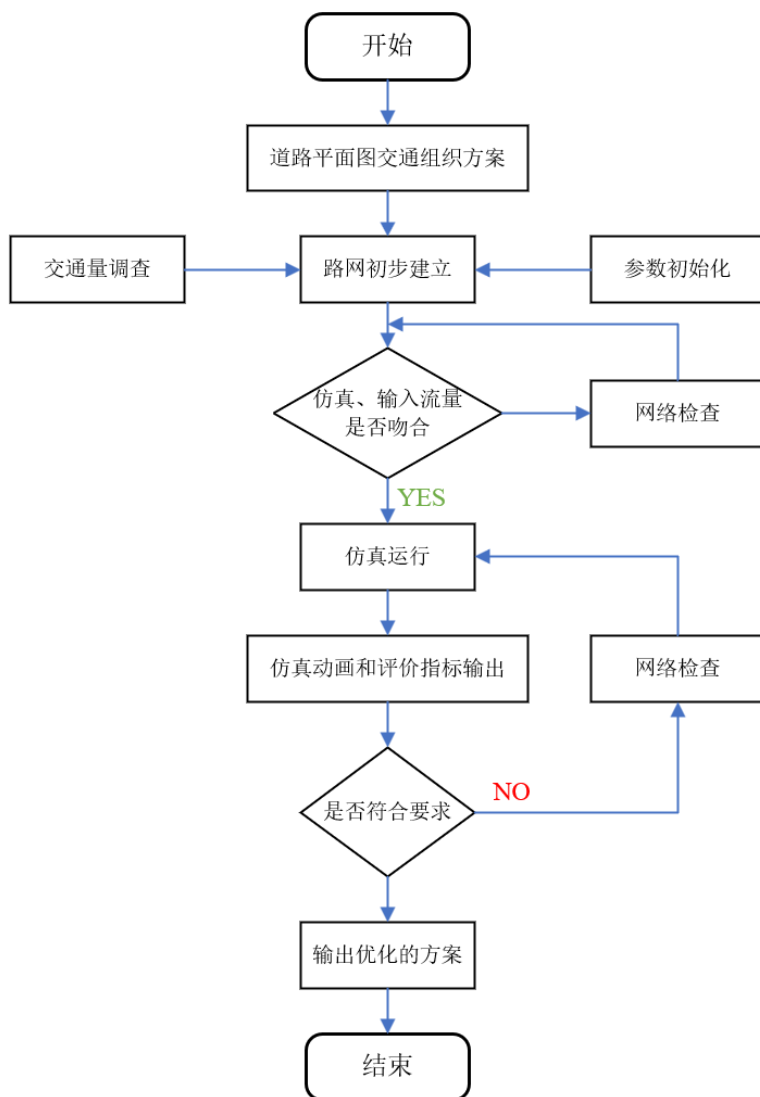


图 4-1 Webster 配时法流程图

4.1.2 ARRB 配时法

相比于 Webster 配时法 ARRB 配时法，ARRB 配时法更细致，兼顾交通流细节、交叉路口几何特征和多种交通方式，更适用于交通流量大且方式复杂的交

叉路口，能更好地协调多种交通方式，减少延误和冲突。考虑到车辆停车次数对于交通效率和驾驶体验也有重要影响，澳大利亚学者阿克塞立科引入了“停车补偿系数”，将停车次数和车辆延误时间结合起来评估信号配时方案的优化程度，该综合指标叫做“运行指标”^[70]，其表达式为：

$$PI = D + KH \quad (4-10)$$

式中， D —全部车辆总延误时间(s)；

K —停车补偿系数；

H —全部车辆总停车率。

经理论推导，使 PI 值最小的信号周期近似等于最佳信号周期 C_0 ，表达式为：

$$C_0 = \frac{(1.4 + K)L + 6}{1 - Y} \quad (4-11)$$

式中， C_0 —最佳信号周期(s)；

L —信号周期总损失时间(s)；

Y —交叉路口各相位的流量比之和。

ARRB 配时法中停车补偿系数的取值依赖于车辆类型、交通流量状况等多个因素，停车补偿系数的取值直接决定了交通信号配时的优化方向，高取值会使交通信号配时将减少停车次数作为首要目标，而低取值的停车补偿系数则会使交通信号配时更倾向于缩短车辆的平均延误时间。

4.1.3 HCM 配时法

HCM (Highway Capacity Manual, 美国《公路通行能力手册》) 配时法的原理是基于对交通流特性和道路几何条件的综合分析。通过建立交通流模型，考虑不同交通组成在道路和交叉路口的运行方式，以确定交通设施的通行能力，根据各进口道的交通需求和通行能力来分配绿灯时间，目标是使交通设施在保证交通安全的前提下达到最佳的运行效率，减少交通拥堵和延误。

最佳信号周期表达式为：

$$C_0 = \frac{L}{1 - Y} \quad (4-12)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n \max[y_i, y_i'] = \sum_{i=1}^n \max\left[\left(\frac{q_d}{S_d}\right)_i, \left(\frac{q_d}{S_d}\right)_i', \dots\right] \quad (4-13)$$

式中, C_0 —最佳信号周期(s);

L —信号周期总损失时间(s);

Y —交叉路口各相位的最大流量比之和;

n —相位总数;

y_i —第 i 相位流量比;

q_d —设计交通量(puc/h);

S_d —设计饱和流量(puc/h)。

当流量比之和大于 0.9 时, 这表明交通流量已经接近或达到交叉路口的饱和状态。首先需要重新详细评估交通状况, 包括各进口道车辆类型的具体构成、车辆排队长度的实时变化、行人及非机动车的流量等, 再进行相位设计及优化。

设计交通量表达式为:

$$q_d = 4 \times Q_{15} \quad (4-14)$$

式中, q_d —设计交通量(puc/h);

Q_{15} —高峰小时内某一时段(通常为 15 分钟)的交通量(puc/h);

无最高 15 分钟实时检测的交通流量时设计交通量的表达式为:

$$q_d = \frac{Q}{PHF} \quad (4-15)$$

式中, Q —高峰一小时的交通量(puc/h);

PHF —高峰小时系数, 用于衡量高峰小时内交通流量的变化程度。

4.2 交叉路口多目标配时优化

经典信号配时基于对交通流基本参数如车流量、车速、车头间距的分析, 能快速确定信号周期、设计合理相位并分配绿灯时间, 可操作性强, 在交通流量相对稳定、不饱和的常规交叉路口, 能有效减少车辆冲突, 提升通行效率, 降低车辆延误。但经典配时法过度依赖稳定交通流假设, 在面对交通流量突变、过饱和交叉路口或特殊事件引发的复杂交通状况时, 原有的配时方案易失效, 延误模型不再精准, 无法适应拥堵蔓延。因此本章基于第三章的实时车流量检测和自适应相位相序设计, 以平均车辆延误、停车次数和通行能力等为评价指标, 构建了交叉路口信号配时优化模型。

4.2.1 多目标交通配时指标选取

(1) 车辆延误模型

对于饱和度不能确定或饱和度过大的交叉路口，本文提出了一种基于 ARRB 配时模型的过渡函数曲线模型来计算交叉路口车辆延误，交叉路口车辆延误 d 计算过程如下所示：

$$d = d_a + d_b \quad (4-16)$$

d_a 为车辆正常延误，表达式为：

$$d_a = \begin{cases} \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\gamma)}, & x < 1 \\ \frac{C(1-\lambda)}{2}, & x \geq 1 \end{cases} \quad (4-17)$$

d_b 为随机和过饱和情况下车辆延误，表达式为：

$$d_b = \begin{cases} N_0 x, & x > x_a \\ 0, & x \leq x_a \end{cases} \quad (4-18)$$

x_a 为交叉路口各相位平均过饱和时的饱和度，表达式为：

$$x_a = 0.67 + \left(\frac{SC_0 \lambda}{600} \right) \quad (4-19)$$

N_0 为相位过饱和时车辆排队长度，其表达式为：

$$N_0 = \frac{qT_{oh}}{4x} \left[x - 1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{12(x-x_a)}{qT_{oh}}} \right] \quad (4-20)$$

故整个交叉路口车辆延误 D 表达式为：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n d_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (4-21)$$

式中， x —相位饱和度；

λ —相位绿信比。

S —相位饱和流量(puc/h)；

C_0 —交叉路口最佳信号周期(s)。

T_{oh} —分析时段，一般取值 0.25h；

n —交叉路口相位数；

d_i —第 i 相位的车辆延误时间(s);

q_i —第 i 相位的实际车流量(puc/h)。

(2) 车辆停车次数

车辆停车次数指标能够直观地反映车辆在通过交叉路口时因信号控制而被迫停车的频率，基于 ARRB 配时模型交叉路口正常车辆停车次数 h_a 的表达式为：

$$h_a = \begin{cases} \frac{1-\lambda}{1-y}, & x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (4-22)$$

随机和过饱和情况下车辆停车次数 h_b ：

$$h_b = \begin{cases} \frac{qT_{oh}}{4xSC\lambda} \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{12(x-x_a)}{qT_{oh}}} \right], & x > x_a \\ 0, & x \leq x_a \end{cases} \quad (4-23)$$

车辆停车次数 h ：

$$h = \begin{cases} 0.9 \times \left(\frac{1-\lambda}{1-y} + \frac{e^{-1.33\sqrt{Sq(1-x)}}}{2qC_0(1-x)} \right) q, & x < x_a \\ 0.9 \times (h_a + h_b), & x_a < x < 1.15 \\ 1 + \frac{(x-1)T_{oh}}{2C_0}, & x > 1.15 \end{cases} \quad (4-24)$$

故整个交叉路口车辆停车次数 H 为：

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n h_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (4-25)$$

式中， y —相位流量比，其他符号同上；

(3) 通行能力

在配时过程中，要依据车辆通行能力来合理分配绿灯时间，确保各进口道的交通流量能够高效地通过，避免出现交通拥堵。单个车道通行能力表达式为：

$$q = S\lambda \quad (4-26)$$

故整个交叉路口的通行能力 Q ：

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (4-27)$$

4.2.2 约束条件的建立

(1) 信号周期

最小周期约束能确保每个相位都有足够的时间来处理基本的交通流量，如果信号周期过短，车辆可能无法在一个周期内有效地通过交叉路口，导致交通拥堵。最小周期时长表达式为：

$$C_{\min} = \frac{L}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{S_i}} = \frac{L}{1 - \sum_{i=1}^n y_{i\max}} = \frac{L}{1 - Y} \quad (4-28)$$

式中， $C_{\min}$ —最小周期时长(s)，常见交叉路口最小周期时长一般取 60s；

$y_{i\max}$ —交叉路口 i 相位最大流量比；

Y —交叉路口各相位流量比之和。

最大周期约束可以防止周期过长，因为过长的周期会使车辆等待时间过长，使得整个交叉路口的交通效率降低，当周期过长时某个方向的车辆可能会长时间停滞，即使后续有绿灯时间，也可能由于排队过长而不能及时疏散，影响其他方向交通流的正常通行。最大周期时长表达式为：

$$C_{\max} = \frac{1}{n-1} (\sum_{i=1}^n r_{i\max} - L) \quad (4-29)$$

式中， $C_{\max}$ —最大周期时长(s)，根据交通建设规范，一般取 180s；

L —相位总损失时间(s)；

n —交叉路口相位数。

(2) 绿灯时长

最短绿灯时长可以保证每个相位有足够时间来让车辆或行人安全、有序地通过交叉路口，避免交通流中断，确保各进口道和出口道之间的交通平衡。考虑了车辆启动加速、排队消散以及行人正常过街的时间需求，是维持交通基本运行的关键。最长时长能够防止某个方向独占过长的通行时间，避免其他方向交通参与者等待过久，从而减少交通拥堵的可能性。绿灯时长约束条件为：

$$g_{i\min} < g_i < g_{i\max} \quad (4-30)$$

式中， $g_{i\min}$ —第 i 相位最短绿灯时长；

$g_{i\max}$ —第 i 相位最长绿灯时长。

其中最短绿灯时长即为行人过街的最短时间，表达式如下：

$$g_{imin} = 7 + \frac{L_p}{v_p} - I \quad (4-31)$$

式中， L_p —行人过街长度；

v_p —行人步行的速度，一般取 1.2m/s；

I —绿灯间隔时间，无全红时间，故 $I=3s$ 。

(3) 饱和度

当饱和度接近或超过 0.9 时，交通流量已经非常接近道路或交叉路口的通行能力，车辆之间的相互干扰会急剧增加，车辆频繁地启停、排队长度快速增长，导致车辆延误大幅上升，交通拥堵的风险也显著提高。将饱和度控制在 0.9 以下，能够为交通系统预留一定的弹性空间，使得交通流在面对交通流量的波动、车辆的突发情况等干扰因素时，依然可以保持相对高效和有序的运行状态，减少交通拥堵的发生几率。故对饱和度的约束条件为：

$$x \leq 0.9 \quad (4-32)$$

4.2.3 多目标函数的建立

针对单点交叉路口信号配时这一复杂问题，构建了一个综合性的多目标优化模型，该模型将上述三个优化目标进行整合，确保在优化过程中能够全面兼顾各个方面。然而由于这三个目标并非完全一致，而是存在相互冲突的情况，例如在追求最大化通行能力时，可能会导致部分车辆延误时间增加或停车次数上升，为有效解决这一难题将三个目标统一起来，在模型中引入了加权系数的方法。通过合理设置加权系数，能够根据实际交通需求和管理重点，对不同目标赋予不同的权重，从而在多个相互冲突的目标之间寻求最佳平衡，实现交叉路口交通性能的整体优化。交叉路口优化模型为：

$$\min PI(g_i, C_0) = \varepsilon_1 D + \varepsilon_2 H - \varepsilon_3 Q \quad (4-33)$$

式中， $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ —权重系数；

D —交叉路口车辆延误时间(s)；

H —交叉路口停车次数；

Q —交叉路口通行能力。

4.2.4 模型权重系数求解

本文利用将复杂的交叉路口配时优化问题分层，通过构造判断矩阵衡量不同交通性能指标（车辆延误、通行能力、停车次数）在不同交通状态下的相对重要性，经过计算权重向量、进行一致性检验后，为各指标确定合理的加权系数的层次分析法进行权重系数求解。

（1）建立层次结构模型

首先明确目标层为交叉路口配时优化，这是整个决策过程的最终目的，旨在让交叉路口交通运行达最佳状态。接着构建准则层，纳入机动车延误、通行能力与停车次数，拥堵时段通行能力对缓解拥堵起关键作用，是准则层重点，机动车延误和停车次数次之；平缓时段车辆延误时间和停车次数成为关键控制要点，权重提升，通行能力则退居次要。

（2）构造判断矩阵

在交叉路口配时优化确定加权系数构造判断矩阵时，首先要确定比较尺度，采用 1 - 9 标度法衡量机动车延误、通行能力和停车次数的相对重要性。拥堵状态下，以提高通行能力为主要目标，通行能力相对机动车延误、停车次数设为“强烈重要”，标度值取 7，机动车延误比停车次数“稍微重要”，标度值为 3，据此构建 3×3 判断矩阵。平缓时期，减小车辆延误和停车次数是关键，它们相对通行能力为“强烈重要”，标度值 7，二者彼此同等重要，标度值 1，构建相应判断矩阵。判断矩阵为：

$$\Lambda = (a_{ij}) \quad (4-34)$$

判断矩阵具有如下性质：

- ① $a_{ij} > 0$;
- ② $a_{ji} = 1/a_{ij}$;
- ③ $a_{ii} = 1$ 。

（3）层次单排序及一致性检验

通过计算判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量，并将特征向量进行归一化处理，得到各指标的初步权重向量，这一过程即为层次单排序的结果^[71]。一致性检验的目的是确保在交叉路口配时优化等决策过程中，通过层次分析法构建的判断矩阵符合逻辑合理性，避免因主观赋值导致的各因素相对重要性判

断矛盾。一致性检验的步骤如下：

① 计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (4-35)$$

② 通过查阅相关表格获取对应的平均随机一致性指标 RI

③ 计算一致性比例 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4-36)$$

如果 $CR > 0.1$ ，表明判断矩阵未能通过一致性检验，需要重新构建判断矩阵并再次求解；如果 $CR < 0.1$ ，则表明判断矩阵通过一致性检验，构建的矩阵符合逻辑合理性。

(4) 层次总排序及一致性检验

层次总排序是在层次单排序基础上，根据准则层对目标层的权重向量和各准则下方案层对准则层的权重向量，计算方案层对目标层的组合权重向量。一致性检验则是计算总排序一致性比率，用各准则层的一致性指标与对应的权重乘积之和除以各准则层的平均随机一致性指标与对应权重乘积之和，当该比率小于 0.1 时通过检验^[72]。

4.2.5 多目标优化模型建立

本文的核心任务聚焦于构建多目标优化模型，旨在全方位提升交叉路口通行效率、减少不必要的延误以及降低车辆停车次数，基于此确立了三个具体的优化方向：将延误时间降至最低、使通行能力达到最大以及最小化停车次数。延误时间作为衡量交通运行效率的关键指标，其时间长短直接反映了交通流畅程度；通行能力则直接关乎交叉路口能够承载和处理的交通流量规模，是保障交通高效运转的基础；减少停车次数不仅能显著提升驾驶体验，还对降低燃油消耗、减少环境污染具有重要意义。综上所述，建立的多目标优化模型为：

$$\min PI(g_i, C_0) = \varepsilon_1 D + \varepsilon_2 H - \varepsilon_3 Q$$

$$s.t. \begin{cases} C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ g_{i\min} \leq g_i \leq 60 \\ \sum_{i=1}^4 g_i + L = C_0 \\ x \leq 0.9 \\ \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 1 \end{cases} \quad (4-37)$$

4.3 基于改进的粒子群算法求解

4.3.1 标准粒子群算法原理

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于群体智能理论的随机优化算法,它的诞生源于对自然界中鸟群、鱼群等生物群体行为的深入观察与研究^[73]。粒子群算法正是借鉴了这种生物群体通过信息共享和协作实现最优行动的智慧。在算法中将待求解问题的每个可能解抽象为搜索空间中的一个“粒子”,众多粒子共同构成一个群体,每个粒子都具有位置和速度这两个关键属性,其中位置代表着问题的一个潜在解决方案,而速度则决定了粒子在搜索空间中的移动方向和距离。每个粒子都会记录自身搜索过程中的个体最优位置(pbest),即该粒子找到的最优解位置。整个粒子群存在一个全局最优位置(gbest),它是所有粒子个体最优位置中适应度最佳的那个位置。粒子在每次迭代时,会依据自身速度以及与个体最优和全局最优位置的差距来更新速度和位置,通过不断迭代,粒子群逐步向最优解或近似最优解区域靠近。

在一个 D 维的搜索空间中,种群由 N 个粒子组成,其中第 i 个粒子可以表示为一个 D 维的向量。

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, \dots, x_{iD}), i = 1, 2, 3, 4, \dots, N \quad (4-38)$$

种群中第 i 个粒子的运动速度记为:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4}, \dots, v_{iD}), i = 1, 2, 3, 4, \dots, N \quad (4-39)$$

种群中第 i 个粒子目前已找到的最佳位置称为个体极值记为:

$$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}, \dots, p_{iD}), i = 1, 2, 3, 4, \dots, N \quad (4-40)$$

整个粒子群在运动中寻求的最优解为全局最优解记为:

$$P_g = (p_{g1}, p_{g2}, p_{g3}, p_{g4}, \dots, p_{gD}) \quad (4-41)$$

粒子的速度和位置更新公式为:

$$v_{id}^{t+1} = wv_{id}^t + c_1r_1(p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2r_2(p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (4-42)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (4-43)$$

粒子的速度更新公式由三部分组成，第一部分为惯性部分 wv_{id}^t ，其中 w 是惯性权重， v_{id}^t 是粒子 i 在第 d 维空间中第 t 次迭代的速度。惯性部分使得粒子能够保持之前的运动趋势让粒子不会因为新的信息而立刻改变运动方向，而是在一定程度上保留原来的运动状态，从而能够跨越较大的搜索空间范围，避免过早地局限在局部区域。第二部分为认知部分 $c_1r_1(p_{id}^t - x_{id}^t)$ ，这部分体现了粒子对自身经验的认知，其中 c_1 为学习因子，表示粒子对自身经验的学习程度； r_1 为[0,1]区间内均匀分布的随机数； $(p_{id}^t - x_{id}^t)$ 表示粒子当前位置与个体最优位置之间的距离差，通过乘以学习因子 c_1 和随机数 r_1 来调整这个距离差对速度更新的影响。认知部分引导粒子向自身历史最优位置靠近反映了粒子对自己曾经找到的最优解的“记忆”和“向往”，使粒子有机会在自身经验的基础上进行局部搜索，挖掘自身最优位置周围可能存在的更优解。第三部分 $c_2r_2(p_{gd}^t - x_{id}^t)$ 为社会部分，代表了粒子对群体经验的认知，其中 c_2 为学习因子，表示粒子对群体经验的学习程度； r_2 为[0,1]区间内均匀分布的随机数； $(p_{gd}^t - x_{id}^t)$ 表示粒子当前位置与全局最优位置之间的距离差，通过乘以学习因子 c_2 和随机数 r_2 来调整这个距离差对速度更新的影响。粒子群算法的实现流程如下：

Step 1:初始化 PSO 的参数，包括目标函数、搜索维度、种群大小、最大迭代次数、搜索范围的下界和上界、惯性权重 w 、个体学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 ，初始化粒子的位置 x_i 和速度 v_i ；

Step 2:计算每个粒子的个体位置和适应度值，以及全局位置和适应度值。初始化两个列表用于记录每次迭代的全局最优适应度值和平均适应度值；

Step 3:生成两个随机数组 r_1 和 r_2 ，根据速度更新公式更新粒子的速度 v_i ，根据位置更新公式更新粒子的位置 x_i ，对粒子的位置进行边界处理，确保粒子位置在搜索范围内；

Step 4: 对每个粒子的适应度值进行重新计算，同时更新其个体最优位置和适应度值，并进一步更新全局最优位置和适应度值；

Step 5: 如果计算符合终止要求，则提供全局最优解；否则继续迭代至最大迭代次数。

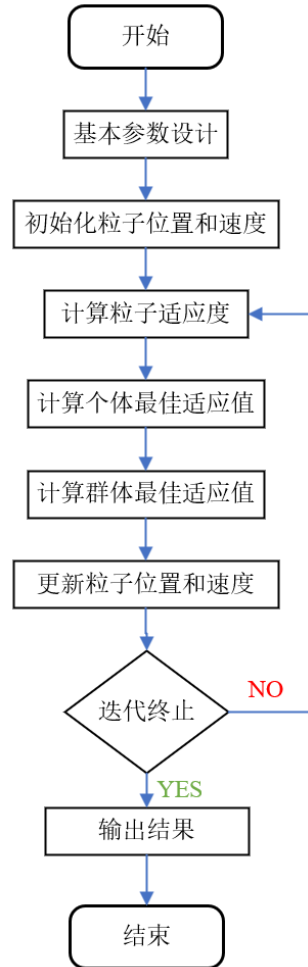


图 4-2 标准粒子群算法流程图

4.3.2 改进粒子群算法(ALPSO 算法)

粒子群算法相较于其他算法更容易陷入局部最优解，因为粒子在搜索过程中可能过度依赖个体最优和全局最优位置的引导，导致在复杂搜索空间中无法跳出局部最优区域。对算法参数敏感，不同的惯性权重、学习因子等参数设置会对结果产生较大影响，在高维复杂问题中，粒子群算法的搜索效率会下降，随着维度增加，搜索空间急剧增大，粒子难以有效探索整个空间。因此本节在粒子群算法的基础上以增强全局搜索能力、避免陷入局部最优，提高收敛精度和速度为目的进行改进。

(1) 自适应参数调整

在标准粒子群算法中，惯性权重通常是固定的，这可能导致算法在搜索过程中难以有效平衡全局搜索和局部搜索。当惯性权重较大时，全局搜索能力增强，粒子在更新速度时更依赖其历史速度，有助于避免过早陷入局部最优，但可能导致收敛速度变慢，因为粒子会在搜索空间中广泛探索，需要更多迭代次

数才能收敛；而当惯性权重较小时，局部搜索能力增强，粒子更倾向于向个体最优和全局最优位置靠近，有利于精细搜索，但也容易因过度依赖这些最优位置而陷入局部最优，错过全局最优解。通过自适应调整惯性权重，可以根据算法的迭代进程动态调整粒子的运动特性，从而更好地平衡全局和局部搜索能力。综上所述，本文自适应惯性权重公式 w 如下所示：

$$w(t) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \frac{t}{\max_iter} \quad (4-44)$$

式中， $w(t)$ —在第 t 次迭代时的惯性权重；

$w_{\max}$ —惯性权重的最大值；

$w_{\min}$ —惯性权重的最小值；

t —当前的迭代次数；

$\max_iter$ —最大迭代次数。

在算法迭代的初期，设置较大的惯性权重，使粒子能够在更广阔的搜索空间内移动从而增强全局搜索能力。随着迭代次数的增加，逐步减小惯性权重，使粒子更加专注于局部区域的精细搜索以提高解的精度。

学习因子同样影响粒子对自身经验和群体经验的学习程度。较大的 c_1 使粒子更倾向于自身最优位置，利于局部搜索，能更精细地探索局部最优，但可能陷入局部最优而错过全局最优；较大的 c_2 让粒子更依赖全局最优位置，可加快收敛速度，但可能导致早熟收敛；自适应学习因子可以根据粒子的状态动态调整其对两种经验的学习倾向。本文自适应学习因子 c_1 、 c_2 公式如下所示：

$$c_1(t) = c_{1-\max} - (c_{1-\max} - c_{1-\min}) \frac{t}{\max_iter} \quad (4-45)$$

$$c_2(t) = c_{2-\min} - (c_{1-\max} - c_{1-\min}) \frac{t}{\max_iter} \quad (4-46)$$

式中， $c_1(t)$ —在第 t 次迭代时的个体学习因子

$c_{1-\max}$ —个体学习因子的最大值。

$c_{1-\min}$ —个体学习因子的最小值。

$c_2(t)$ —在第 t 次迭代时的社会学习因子。

$c_{2-\max}$ —社会学习因子的最大值。

c_{2_min} —社会学习因子的最小值。

在算法开始时, c_1 较大, c_2 较小, 使粒子更依赖自身经验进行局部搜索。随着迭代的进行, c_1 逐渐减小, c_2 逐渐增大, 引导粒子逐渐依赖群体经验进行全局搜索。

(2) 引入压缩因子

粒子速度更新公式中的参数的选择较为复杂, 不同的取值组合会极大地影响算法的性能, 若取值不当可能导致粒子的速度更新不稳定, 使得粒子在搜索空间中可能出现速度过快或过慢的情况, 进而导致算法难以收敛或收敛速度过慢。这种速度更新方式可能会使粒子在搜索过程中难以平衡全局搜索和局部搜索, 容易使粒子群过早地收敛到局部最优解, 而错过全局最优解。引入压缩因子, 通过对速度更新结果进行缩放, 可以解决这些问题, 它能保证粒子速度更新的稳定性, 使粒子的运动更有规律, 同时在一定程度上平衡了粒子对自身历史最优位置和群体最优位置的依赖, 避免了不合理的速度变化, 提高了算法的收敛性。引入压缩因子 ρ 后粒子更新速度为:

$$v_{id}^{t+1} = \rho \left(wv_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \right) \quad (4-47)$$

$$\rho = \frac{2}{|2 - c_1 - c_2 - \sqrt{(c_1 + c_2)^2 - 4(c_1 + c_2)}|} \quad (4-48)$$

在算法的早期阶段, 粒子仍会受到自身最优位置和全局最优位置的影响, 但这种影响会被压缩因子 ρ 合理控制, 让粒子在整个搜索空间内进行更充分的探索。随着迭代的进行, 粒子的速度调整会根据个体最优和全局最优位置的引导, 以一种更稳定的方式进行, 有助于在搜索后期对潜在的最优解区域进行精细搜索。

(3) 局部搜索机制

在粒子群算法中, 粒子主要根据自身的速度和位置更新公式进行全局搜索以寻找最优解, 然而这种全局搜索可能导致粒子群过早收敛到局部最优解, 尤其在复杂的多峰函数或高维搜索空间中。局部搜索机制的引入旨在增强算法在局部区域的搜索能力, 使得粒子群在找到潜在的较优区域后, 能够对该区域进行更深入的探索, 从而有可能跳出局部最优解, 找到更优的全局最优解。实现步骤如下:

Step 1:定义一个局部搜索的概率，定义局部搜索的半径；

Step 2:使用 rand 函数生成一个在[0,1]之间的随机数，如果该随机数小于 local_p，则执行局部搜索操作。这是一种随机化的策略，确保只有部分粒子会进行局部搜索，以平衡全局搜索和局部搜索；

Step 3:生成局部搜索点，将当前位置加上搜索半径乘以一个随机偏移量，生成一个新的搜索位置；

Step 4:边界处理，确保生成的局部搜索位置在搜索空间的上下界范围内；

Step 5:评估新位置，计算新生成的搜索位置的适应度值，计算第 i 个粒子当前位置的适应度值；

Step 6:更新位置，若新位置的适应度值小于当前位置的适应度值，说明新位置更优。将第 i 个粒子的位置更新为新的搜索位置，以实现局部最优的探索。



图 4-3 改进粒子群算法流程图

4.3.3 改进粒子群算法性能测试

本文将采用以下 4 个函数对改进的粒子群算法进行性能测试：

(1) Sphere Model 函数

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (4-49)$$

Sphere Model 函数是单峰函数，全局最小值在 $x=(0,0,\cdots,0)$ 处，其函数值为 0。常用于测试优化算法的基本收敛能力，因为其梯度信息容易计算，可用于验证算法是否可以快速收敛到最优解。

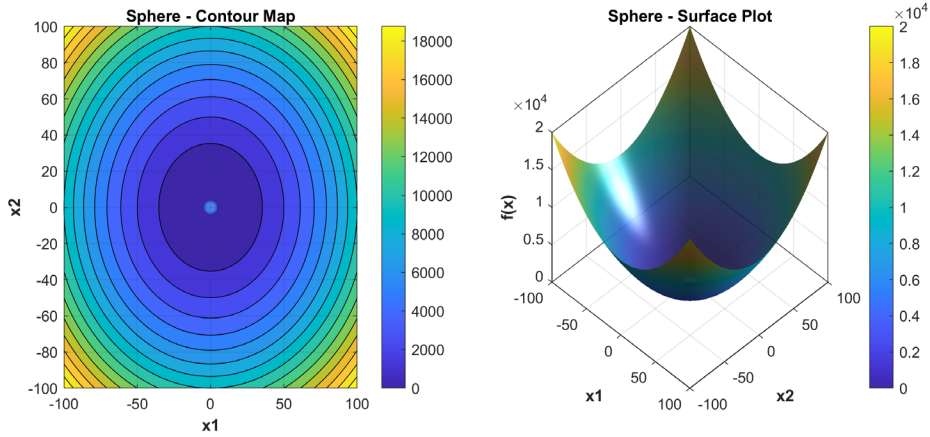


图 4-4 Sphere Model 函数示意图

(2) Rastrigin 函数

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)) \quad (4-50)$$

Rastrigin 函数是多峰函数，由于余弦函数的周期性使得函数表面出现许多周期性的低谷，存在大量的局部极小值，全局最小值在 $x=(0,0,\dots,0)$ 处，其函数值为 0。该函数常用于测试优化算法在存在众多局部极小值情况下的全局搜索能力，检验算法是否能够克服局部最优解的干扰，持续向全局最优解收敛，是评估算法性能的重要函数之一。

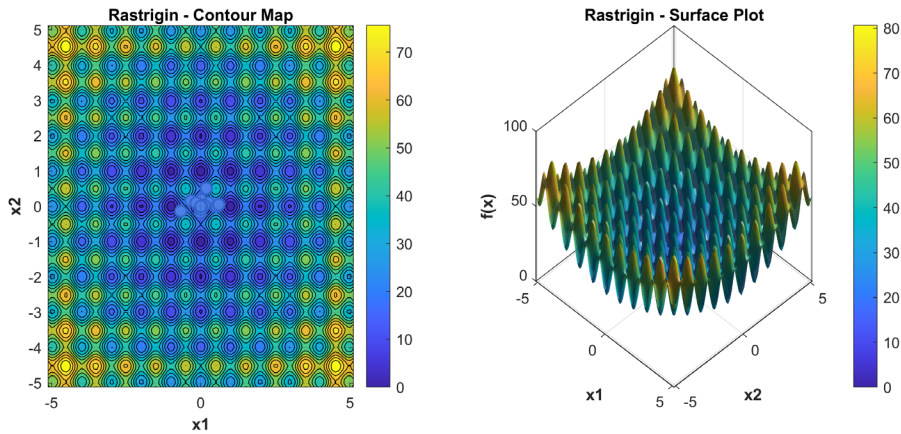


图 4-5 Rastrigin 函数示意图

(3) Rosenbrock 函数

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2] \quad (4-51)$$

Rosenbrock 函数是峡谷型函数，全局最小值在 $x=(1,1,\dots,1)$ 处，其函数值为 0。该函数在算法测试中用于评估优化算法处理具有狭长、复杂搜索空间问题的性能，检验算法的全局搜索、局部搜索和跳出局部最优的能力。

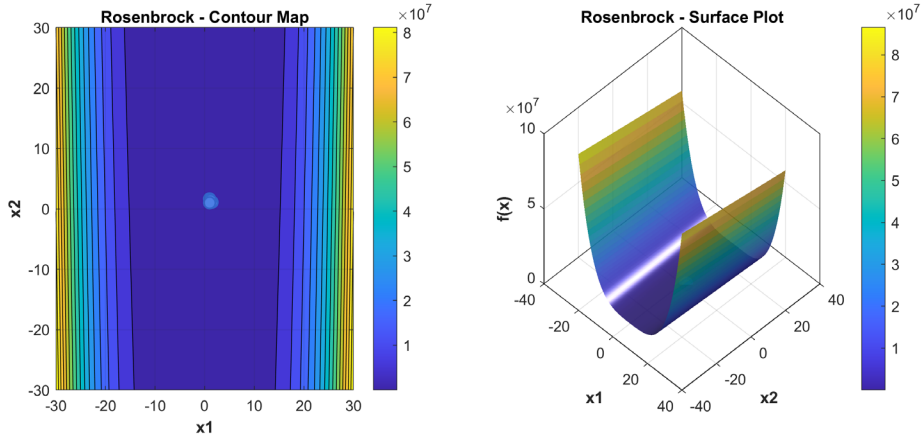


图 4-6 Rosenbrock 函数示意图

(4) Ackley 函数

$$f(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e \quad (4-52)$$

Ackley 函数是多峰函数，有多个局部极小值，全局最小值在 $x=(0,0,\dots,0)$ 处，其函数值为 0。该函数可以很好地测试算法在多峰环境下的全局搜索能力，看算法能否跳出局部最优找到全局最优。

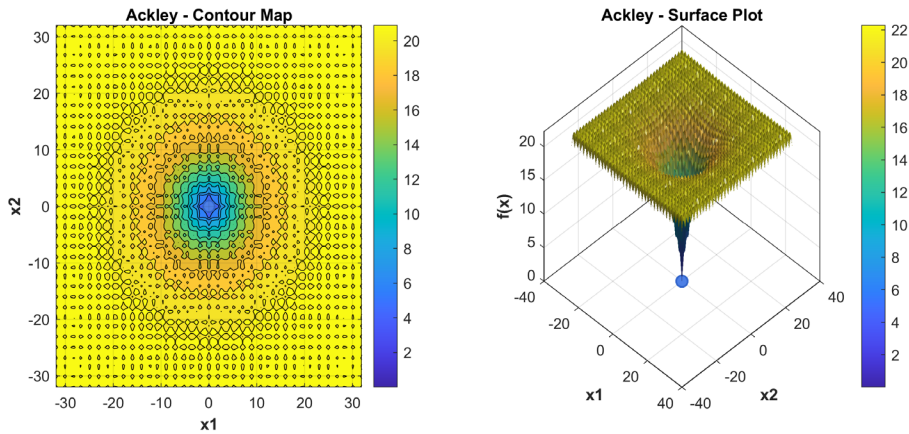


图 4-7 Ackley 函数示意图

本文从优化精度、改进效果、收敛性能和稳健性四个方面将标准粒子群算法和改进粒子群算法进行对比试验，设置 SphereModel、Rastrigin、Rosenbrock、Ackley 函数的维度值为 30，种群大小 $N=50$ ，最大迭代次数为 1000，独立运行

30 次，函数自变量 x 的取值范围分别为 $[-100, 100]$ 、 $[-5.12, 5.12]$ 、 $[-30, 30]$ 以及 $[-32, 32]$ ，算法改进后惯性权重范围 $w_{\max}=0.9$ 、 $w_{\min}=0.4$ ，个体学习因子 $c1_{\max}=2.5$ 、 $c1_{\min}=0.5$ ，社会学习因子 $c2_{\max}=2.5$ 、 $c2_{\min}=0.5$ ，局部搜索概率设为 0.1，局部搜索半径设为 0.1，对比试验结果如图 4-8 所示。

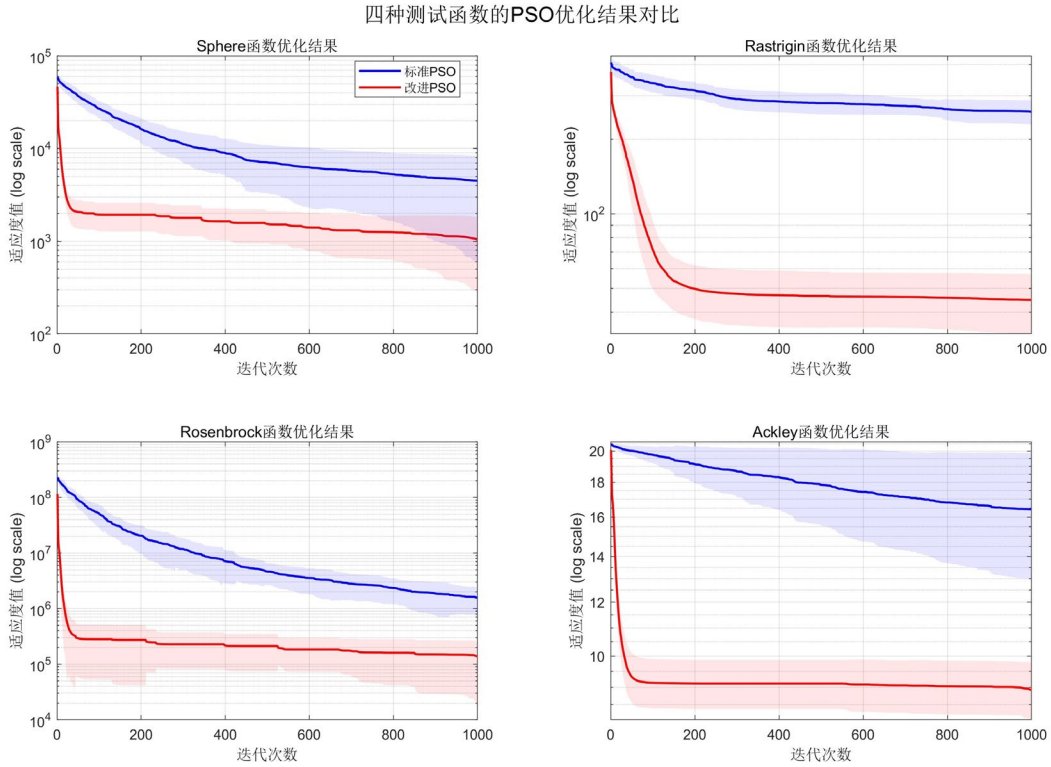


图 4-8 粒子群算法优化结果图

从实验结果可以得出以下结论：（1）改进 PSO 收敛速度显著提升，比标准粒子群算法更快趋近最优解；（2）提高了求解精度，在不同函数测试里得到更接近理论最优值的结果且稳定性有所增强，结果的标准差更小，整体性能更优，能更好应对复杂优化问题；（3）增强了全局搜索能力，有效避免陷入局部最优，在 Rastrigin 这类多局部极值函数测试中表现出色。测试结果如表 4-1 所示。

表 4-1 函数测试结果

测试函数	算法	平均适应度值	标准差	性能提升
Sphere 函数	PSO	4490	3900	76.65%
	ALPSO	1050	762	
Rastrigin 函数	PSO	258	29.3	82.62%
	ALPSO	44.9	12.1	
Rosenbrock 函数	PSO	1580000	839000	91.26%
	ALPSO	138000	122000	
Ackley 函数	PSO	16.4	3.44	45.65%
	ALPSO	8.93	0.861	

4.4 本章小节

本章针对交叉路口固定信号配时无法适应交通流量动态变化的问题，对现有经典配时模型进行了分析与总结。基于车流量实时跟踪检测和交叉路口相位相序的研究，设计了一种综合考虑车辆平均延误时间、停车次数和通行能力等多因素的交叉路口多目标信号配时优化模型，并采用层次分析法求解模型中的权重系数。同时介绍了标准粒子群算法的原理及实现过程，并针对 PSO 容易陷入局部最优解的问题，通过自适应参数调整、引入压缩因子、增加局部搜索机制以及停滞处理等方法对算法进行改进。通过 Sphere Model、Rastrigin、Rosenbrock 和 Ackley 四种测试函数的性能验证，改进后的 ALPSO 算法在全局搜索能力、求解精度和收敛速度上均有显著提升，为多目标优化配时模型提供了高效的求解工具。

第5章 多目标配时优化模型仿真验证

本章以芜湖市弋江路-赭山东路交叉路口为实际案例，采用改进的粒子群算法对交叉路口多目标配时优化模型进行求解，得到相应的相位设计和优化配时方案。利用交通仿真软件 VISSIM 进行仿真验证，将本文提出的多目标配时方法与交叉路口原有配时方案进行对比分析。

5.1 交叉路口概况

弋江路与赭山东路是芜湖市鸠江区主要交通干道，周边分布众多居民小区、医院、商场、政府办公楼以及轻轨站等交通吸引点。弋江路为南北走向，属于主城区高负荷路段，承载着较大的高峰通勤车流量，向南接袁泽桥，向北接芜湖站；赭山东路为东西走向，向西连接赭山中路，向东连接北京中路，主干道同时兼具交通要道和商业繁华区的特点，中心城区交通流量不均衡，承载着东西向较大的过境车流量。在高峰时段，两条主干道车流量汇集于弋江路与赭山东路路口。早高峰（7:30-8:30），北进口周期排队车辆存在二次停车等待现象；晚高峰（17:30-18:30），南进口、西进口周期排队车辆存在二次停车等待现象，尤其晚高峰的交通拥堵给人们的出行带来了很大的不方便。

5.2 交通仿真模型建立

5.2.1 交通仿真软件 VISSIM 介绍

VISSIM 是一款广泛应用于交通规划和管理微观交通仿真软件，由德国 PTV 集团开发。它能够模拟复杂的交通场景，包括车辆、行人、公共交通和信号控制系统等，通过精确的车辆行为模型和驾驶逻辑，重现真实交通流运行状态。VISSIM 支持对交通设施进行建模和优化，并提供丰富的性能指标用于评估交通方案的效果。

5.2.2 交叉路口仿真模型建立步骤

（1）收集交叉路口交通网络的详细信息，包括道路几何数据，如长度、宽度、车道数及路口形状尺寸等；统计不同时段各类车辆在各道路流量以及收集交通信号灯配时方案，为后续模型搭建提供准确的数据支撑。

（2）进行路网构建依据收集的数据创建路段，设定长度、车道数等参数，并明确车道使用规则；随后用连接工具合理连接各路段，遵循实际交通流向与

转向规则设置连接点；最后添加交通控制设施，精准设置信号灯配时，以构建出符合实际情况的交通路网。路径决策相关参数如表 5-1 所示。

表 5-1 路径决策相关参数

车辆路径决策	编号	目的地路段	目的地位置(m)	相对车流（辆）
1	1	北出口	146.089	246
1	2	东出口	186.829	216
2	1	南出口	153.946	133
2	2	西出口	266.314	334
3	1	西出口	175.311	223
3	2	北出口	127.880	463
4	1	东出口	169.625	150
4	2	南出口	165.430	238

（3）在已构建的路网上，依据实际交通流量数据，按不同时间尺度输入各路段或车道的流量，并确定不同类型车辆的比例；同时定义车辆类型及其尺寸、性能参数，选择合适的跟驰与换道行为模型并调整参数。

（4）确定仿真时间范围，依据研究场景选择合适的起止时间，同时设置恰当的仿真步长，平衡计算精度与时间成本；通过设置随机种子控制仿真中的随机因素，确保结果的稳定性与可靠性；完成参数设置后，点击运行按钮启动仿真，在运行过程中可通过图形界面观察交通流实时状态，输出车辆行程时间、延误、排队长度等多种交通运行数据。VISSIM 仿真流程图如图 5-1 所示。

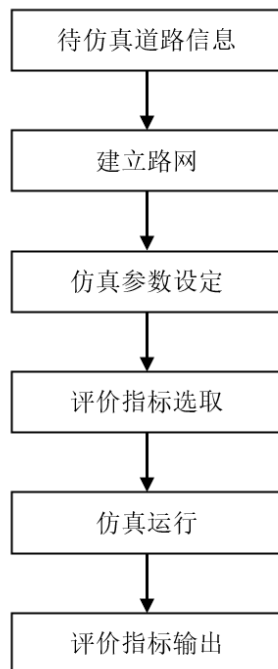


图 5-1 VISSIM 仿真流程图

5.2.3 弋江路-赭山东路仿真模型

本节根据调查得到的弋江路与赭山东路交叉口车流量数据及道路情况，运用 AutoCAD 建立交叉路口模型，并通过交通微观仿真软件 VISSIM 搭建路网，输入车流量、各相位配时、交通信号灯等相关参数。城市道路设定中，每个进出口道的宽度为 3.5m，南北方向道路长度为 448m，东西方向道路长度为 665m。每个方向仅考虑左转和直行两个方向，并设置左转待转区域和静态车辆路径决策点。在进道口处的每个车道均放置车辆检测器和数据采集器，用于统计交通数据信息。路网模型构建情况如图 5-2 所示。

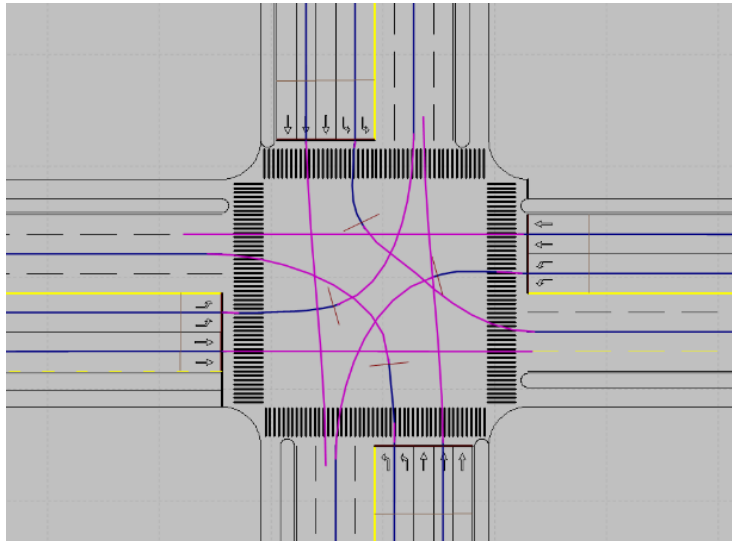


图 5-2 弋江路-赭山东路交叉口仿真路网图

选择 VISSIM 节点和排队计数器等评估功能，仿真时间设为 600s，为保证数据的实时性，在仿真 100s 后每间隔 250s 记录一次仿真结果，共进行十次仿真并取平均值进行分析，节点结果输出的各项数值中选取相应数据作为该交叉路口的评价指标。交叉路口 2D、3D 仿真运行如图 5-3 所示。

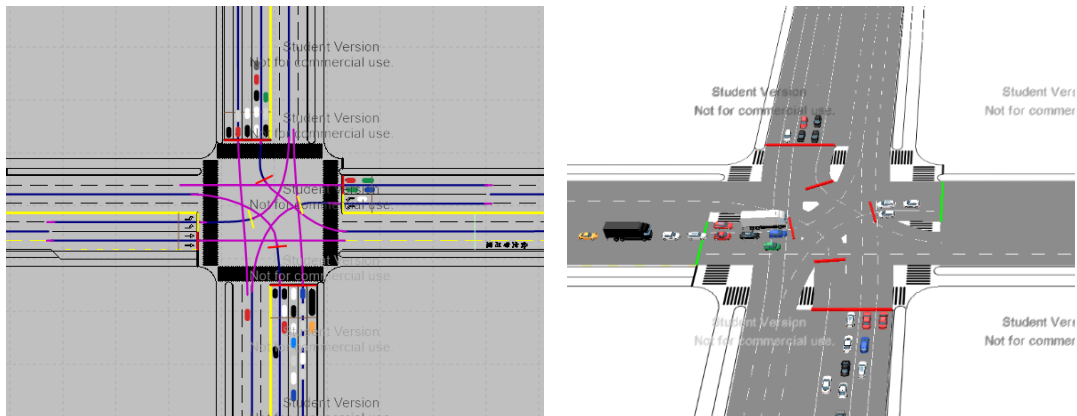


图 5-3 弋江路-赭山东路交叉口 2D、3D 仿真运行图

5.2.4 COM 接口

COM 接口实现了 MATLAB 与 VISSIM 之间的高效数据交互，让 MATLAB 获取 VISSIM 仿真中的车辆运行、交通流量等数据，并能将处理后的参数回传至 VISSIM；支持 MATLAB 对 VISSIM 仿真过程进行灵活控制，如启动、暂停和动态调整参数；还可集成 MATLAB 强大的算法与模型到 VISSIM 仿真中，用于优化交通信号控制、车辆行为模拟等。具体操作步骤如下：

Step 1:建立 COM 连接，创建 VISSIM COM 对象并进行初始化；

Step 2:加载网络文件，加载.inpx 和.layx 文件；

Step 3:验证网络加载状态，确认网络已正确加载；

Step 4:获取信号控制器，访问网络中的信号控制器和信号灯组；

Step 5:设置仿真参数，配置仿真时间、分辨率等参数；

Step 6:准备数据收集，创建数据结构用于存储仿真过程中的状态变化；

Step 7:初始化仿真，启动仿真第一步；

Step 8:主仿真循环，在循环中实时监控和修改信号配时；

Step 9:结束仿真并输出结果，停止仿真并可视化数据。

VISSIM-MATLAB 协同仿真流程图如图 5-4 所示。

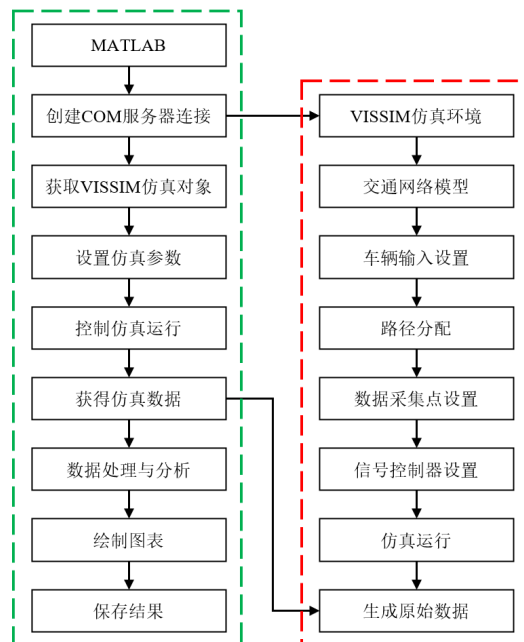


图 5-4 VISSIM-MATLAB 协同仿真流程图

5.3 自适应相位相序设计仿真分析

根据 3.1 节中 YOLOv5 目标检测算法与 Deep SORT 跟踪算法相结合的方法，

完成交叉路口晚高峰实际车流量检测，实际车流量如表 5-2 所示。

表 5-2 弋江路—赭山东路交叉路口早高峰交通流量

进口道	方向	实际交通量 Q(pcu/h)	合计
南进口	左转	509	754
	直行	245	
北进口	左转	255	420
	直行	165	
西进口	左转	367	513
	直行	146	
东进口	左转	237	507
	直行	270	

弋江路与赭山东路采用了以对向车道为组合的四相位设计，不考虑右转通行，非机动车采用与机动车相同的放行方式。第一相位为南北直行，第二相位为南北左转，第三相位为东西直行，第四相位为东西左转。

交叉路口采用固定配时周期的离线点控制法，固定周期时间为 160s，黄灯时间 3s，全红时间 0s，具体配时方案如图 5-5 所示。

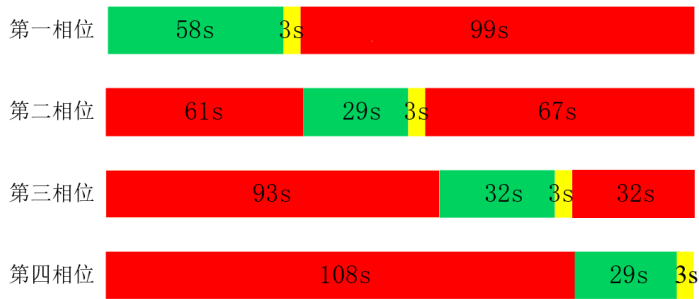


图 5-5 弋江路-赭山东路交叉路口固定四相位配时方案

仿真时间设为 600 秒，仿真运行 100 秒后开始记录数据，此后每间隔 250 秒记录一次结果。弋江路-赭山东路交叉路口以排队长度、车辆延误和尾气排放等方面作为交叉路口通行能力评价指标，仿真评估结果见表 5-3、表 5-4。

表 5-3 弋江路-赭山东路交叉路口固定相位通行效率汇总表

进口方向	转向	排队长度 (m)	最大排队长度 (m)	车辆延误 (s)	静态停车延误(s)	停车次数 (次)
南进口	直行	17.13	45.89	42.27	35.51	0.72
	左转	10.11	31.66	61.63	50.74	1.31
北进口	直行	11.78	25.00	47.58	30.91	0.63
	左转	12.00	31.00	71.57	60.42	1.50
东进口	直行	23.98	57.25	65.38	58.08	0.90
	左转	8.45	30.09	47.58	35.69	0.76
西进口	直行	11.21	39.62	54.19	47.24	0.84
	左转	20.83	46.92	62.09	49.98	1.60

表 5-4 弋江路-赭山东路交叉口固定相位尾气排放汇总表

进口方向	转向	排放物 CO(g)	排放物 Nox(g)	排放物 VOC(g)	油耗(L)
南进口	直行	54.55392	10.61421	12.64340	0.780457
	左转	32.63300	6.349196	7.563013	0.466853
北进口	直行	34.03809	6.622574	7.888655	0.486954
	左转	38.23691	7.439514	8.861774	0.547023
东进口	直行	61.27732	11.92234	14.20161	0.876643
	左转	29.25907	5.692752	6.781072	0.418585
西进口	直行	35.16602	6.842029	8.150064	0.503090
	左转	80.24239	15.61225	18.59695	1.147960

由仿真结果可知，整个交叉路口排队长度较长，车辆延误较严重。从排队长度来看，赭山东路东进口的直行和西进口的左转以及直行排队长度最长，南进口的排队长度略低于东西进口，但仍高于北进口道；从延误时间来看，西进左转和北进左转车辆延误时间较长，车辆停车次数较多。根据多项评价指标可知该交叉路口在晚高峰时间通行能力较低，交通堵塞较严重，尾气排放量较大，交通事故发生概率大大提升。造成该现象的主要原因是东西进口的交通量相较于北进口较大，但东西相位的绿信比和车流量较大的南北左转相位接近，交叉路口各方向配时不合理；该交叉路口信号周期为 160s，相比于其他进口道，车流量较大的南进口需要等待较长的红灯时间，排队长度更长。美国《道路通行能力手册》中的道路交叉路口服务水平（HCM2000）如表 5-5 所示。

表 5-5 美国 HCM 信号交叉路口的服务水平

项目	道路交叉路口服务水平					
车均延误（s/辆）	≤10	10~20	20~35	35~55	55~80	>80
服务水平等级	A	B	C	D	E	F

弋江路与赭山东路交叉口南北西进口左转和东进口直行服务水平皆为不稳定车流的四等级即 E 等级，南北西进口直行和东进口左转服务水平为接近不稳定车流的三等级即 D 等级。

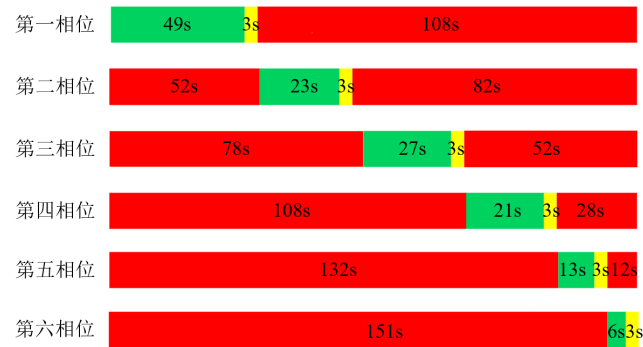


图 5-6 弋江路-赭山东路交叉口自适应相位配时方案

基于 3.3 节自适应相位设计理论，周期时间仍为 160s，黄灯时间 3s，全红时间 0s，交叉路口的配时情况及相位相序设计方案如图 5-6、图 5-7 所示。

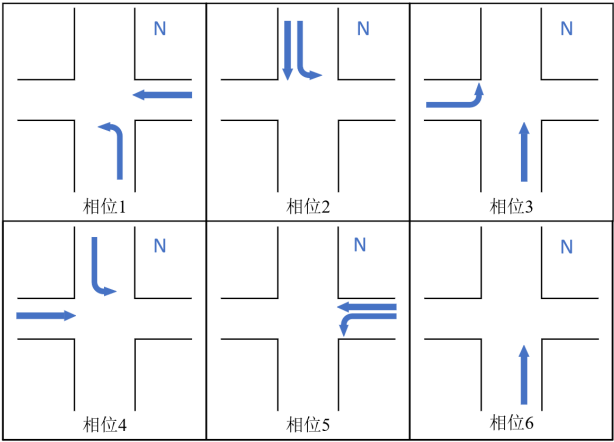


图 5-7 弋江路-赭山东路交叉口自适应相位设计方案

再次进行仿真，分别在仿真的第 250s 和第 600s 记录数据，进行十次仿真并取平均值，仿真评估结果见表 5-6、表 5-7。

表 5-6 弋江路-赭山东路交叉口自适应相位通行效率汇总表

进口方向	转向	排队长度 (m)	最大排队长度 (m)	车辆延误 (s)	静态停车 延误(s)	停车次数 (次)
南进口	直行	13.34	37.69	29.96	24.69	0.61
	左转	10.22	35.36	50.31	40.83	1.16
北进口	直行	7.77	18.52	35.23	29.51	0.58
	左转	6.58	24.65	32.89	25.52	0.90
东进口	直行	12.56	32.43	37.50	31.22	0.75
	左转	1.89	21.81	23.23	16.30	0.69
西进口	直行	7.78	20.00	23.59	19.48	0.44
	左转	11.09	36.94	46.48	35.63	1.38

表 5-7 弋江路-赭山东路交叉口优化后尾气排放汇总表

进口方向	转向	排放物 CO(g)	排放物 Nox(g)	排放物 VOC(g)	油耗(L)
南进口	直行	46.41042	9.029780	10.75606	0.663954
	左转	11.87033	2.309535	2.750164	0.169819
北进口	直行	17.75983	3.455418	4.116013	0.254075
	左转	8.270683	1.609174	1.916811	0.118322
东进口	直行	21.02429	4.090563	4.872582	0.300777
	左转	18.39216	3.578446	4.262560	0.263121
西进口	直行	11.10760	2.161134	2.574292	0.158907
	左转	46.65864	9.078076	10.81359	0.667509

根据交叉口相位相序优化前后的仿真数据可知，虽然南进口左转的最大排队长度有略微增加，但静态停车延误和停车次数等评价指标明显减小；南北方向的直行以及东西方向的直行和左转最大排队长度、静态车辆延误和停车次

数等各评价指标都大幅降低，汽车尾气的排放量明显下降。

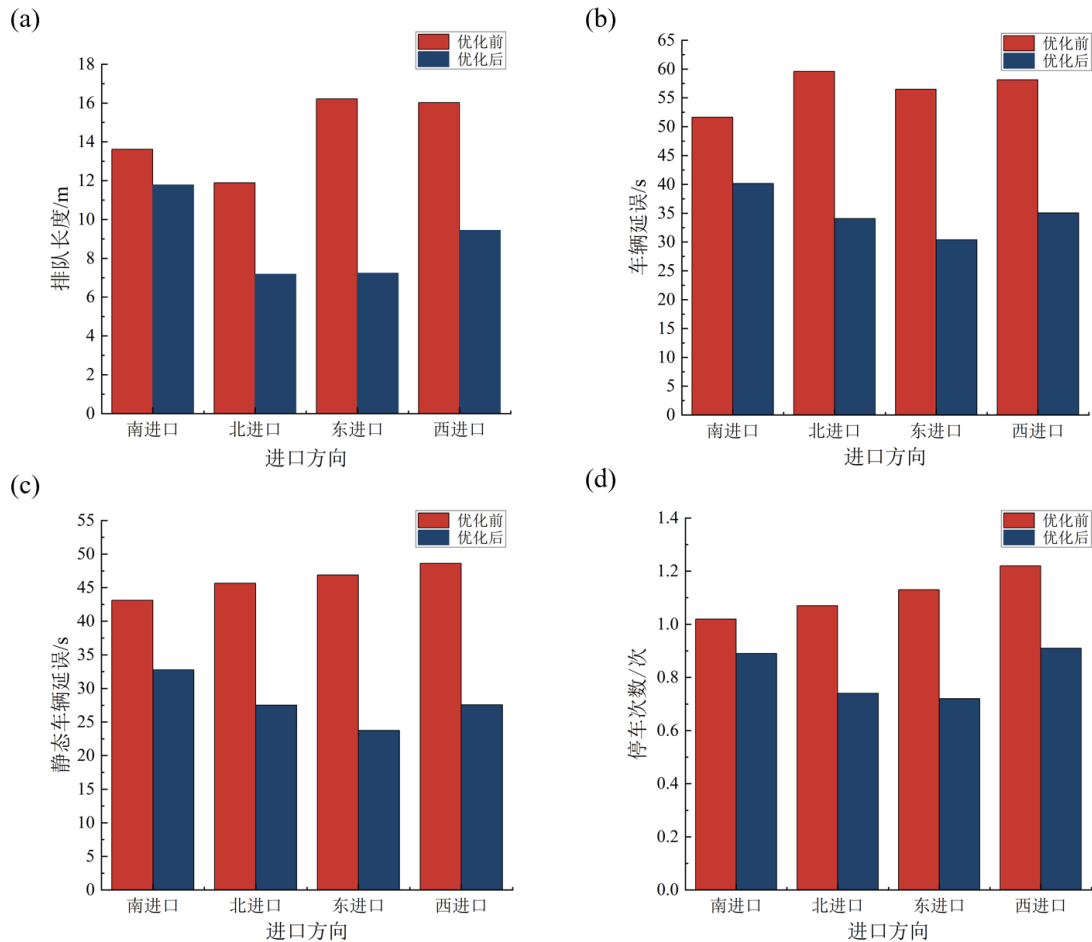


图 5-8 弋江路-赭山东路交叉口相位相序优化前后对比

由图 5-8 分析可知，相位优化后的弋江路与赭山东路交叉口南北东西四个进口道排队长度各减少了 14%、60%、45%、41%；最大排队长度各减少了 6%、23%、38%、31%；平均车辆延误各减少了 22%、43%、46%、43%；静态车辆延误各减少了 13%、31%、36%、25%；停车次数各减少了 13%、31%、36%、25%。整个交叉路口的最大排队长度减少了 32%、静态停车延误减少了 39%、停车次数减少了 27%。南进口、北进口以及西进口直行方向和东进口左转方向的服务水平从 E 级提升到了 D 级，南进口、北进口以及西进口左转方向和东进口直行方向的服务水平从 D 级提升到了 C 级。交叉路口的通行效率明显的提高，优化效果明显，在一定程度上可以缓解交叉路口晚高峰的拥堵问题。

5.4 自适应周期信号控制仿真分析

5.3 节验证了基于车流量实时检测的自适应相位相序设计方法在应对城市交叉路口晚高峰拥堵问题的有效性，本节在车流量检测以及相位相序设计的基础

上，对利用改进粒子群算法进行求解的交叉路口多目标配时优化方案进行验证，弋江路与赭山东路交叉路口平峰车流量信息如表 5-8 所示。

表 5-8 弋江路—赭山东路交叉路口平峰期交通流量

进口道	方向	实际交通量 Q(pcu/h)	合计
南进口	左转	305	452
	直行	147	
北进口	左转	153	285
	直行	132	
西进口	左转	220	337
	直行	117	
东进口	左转	142	304
	直行	162	

采用改进粒子群算法对模型进行求解，关键参数设置如表 5-9 所示。

表 5-9 ALPSO 算法参数

参数	含义	取值
N	种群大小	100
$v_{\max}$	速度限制	10
r	局部搜索半径	5
$w_{\max}$	最大惯性权重	0.9
$w_{\min}$	最小惯性权重	0.4
$\max_iter$	最大迭代次数	500
c_{1_max}	最大个体学习因子	2.5
c_{1_min}	最小个体学习因子	0.5
c_{2_max}	最大社会学习因子	2.5
c_{2_min}	最小社会学习因子	0.5

求得弋江路与赭山东路交叉路口平峰期最佳信号周期为 99s, 如图 5-9 所示。

相位设计方案及信号配时如图 5-10、图 5-11 所示。

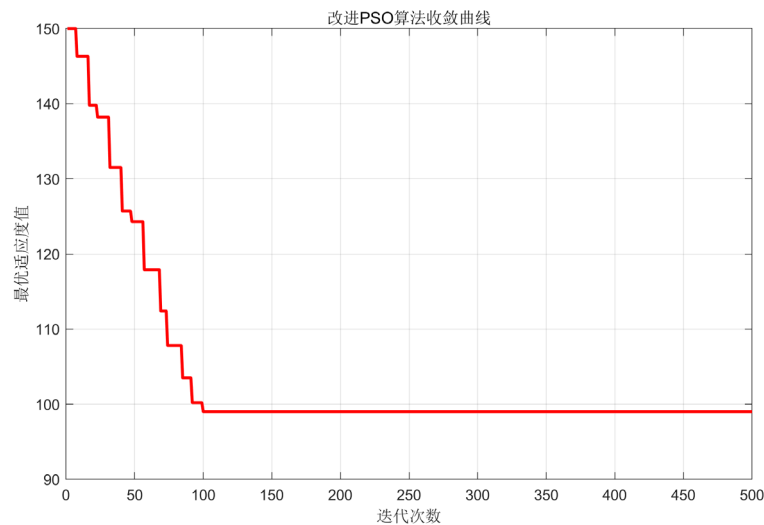


图 5-9 弋江路与赭山东路交叉路口平峰期最佳信号周期

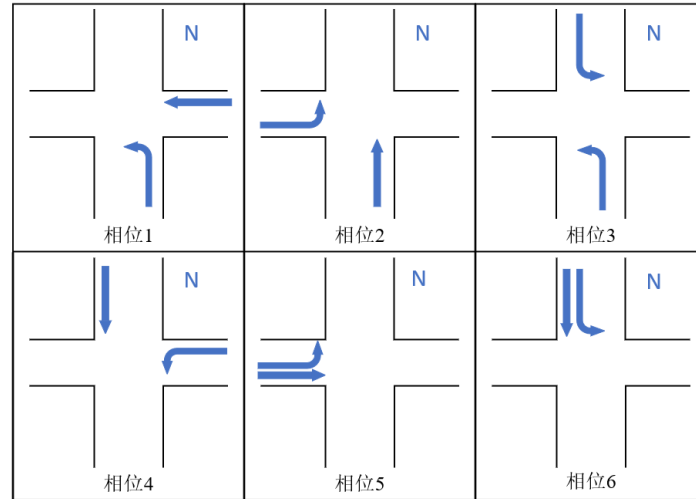


图 5-10 弋江路与赭山东路交叉口平峰期相位设计方案

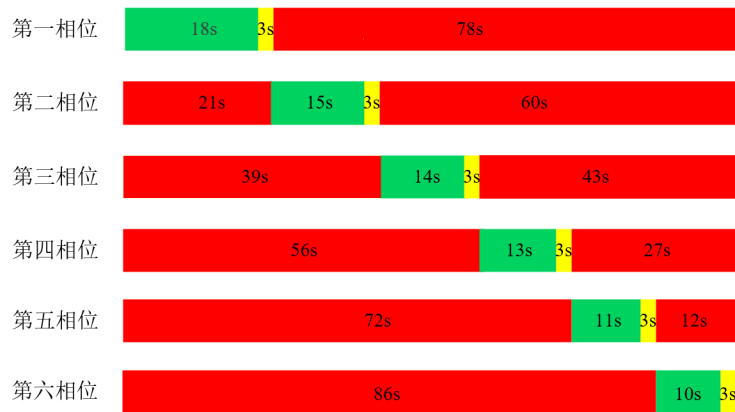


图 5-11 弋江路与赭山东路交叉口平峰期配时方案

因交叉路口选用了固定配时周期的离线点控制法，平峰期配时及相位设计方案同 5.3 节，仿真结果见表 5-10。

表 5-10 弋江路-赭山东路交叉口固定周期通行效率汇总表

进口方向	转向	排队长度 (m)	最大排队长度 (m)	车辆延误 (s)	静态停车 延误(s)	停车次数 (次)
南进口	直行	18.84	50.48	46.50	39.06	0.79
	左转	11.12	34.83	67.80	55.81	1.44
北进口	直行	12.96	27.50	52.34	34.01	0.69
	左转	13.20	34.10	78.73	66.46	1.65
东进口	直行	26.38	63.00	71.92	63.89	0.99
	左转	9.30	33.10	52.34	39.26	0.84
西进口	直行	12.33	43.58	59.61	51.96	0.92
	左转	22.91	51.61	38.30	54.97	1.76

用 ALPSO 算法求解得到的交通仿真参数再次进行仿真，分别在仿真的第 250s 和第 600s 记录数据，进行十次仿真并取平均值，仿真结果见表 5-11。

表 5-11 弋江路-赭山东路交叉路口自适应周期通行效率汇总表

进口方向	转向	排队长度 (m)	最大排队长度 (m)	车辆延误 (s)	静态停车 延误(s)	停车次数 (次)
南进口	直行	15.67	43.46	34.96	24.16	0.63
	左转	10.24	38.90	52.34	42.91	1.11
北进口	直行	8.54	21.37	37.75	29.46	0.64
	左转	8.23	26.11	39.18	32.07	0.91
东进口	直行	15.82	40.67	44.25	34.34	0.78
	左转	4.08	24.99	28.55	21.72	0.71
西进口	直行	8.56	28.99	28.95	28.42	0.44
	左转	17.20	41.63	50.13	37.19	1.32

根据以上仿真结果可知弋江路与赭山东路交叉路口在平峰期绿灯“空放”问题明显，通行效率低。弋江路与赭山东路交叉路口信号控制策略为按时间段运行固定周期和绿信比模式，路口未采用自适应协调控制，无法根据实时流量变化，自动选取路口周期和绿信比方案，导致路口周期偏大，“空放”严重，绿灯利用率下降，通行效率降低。

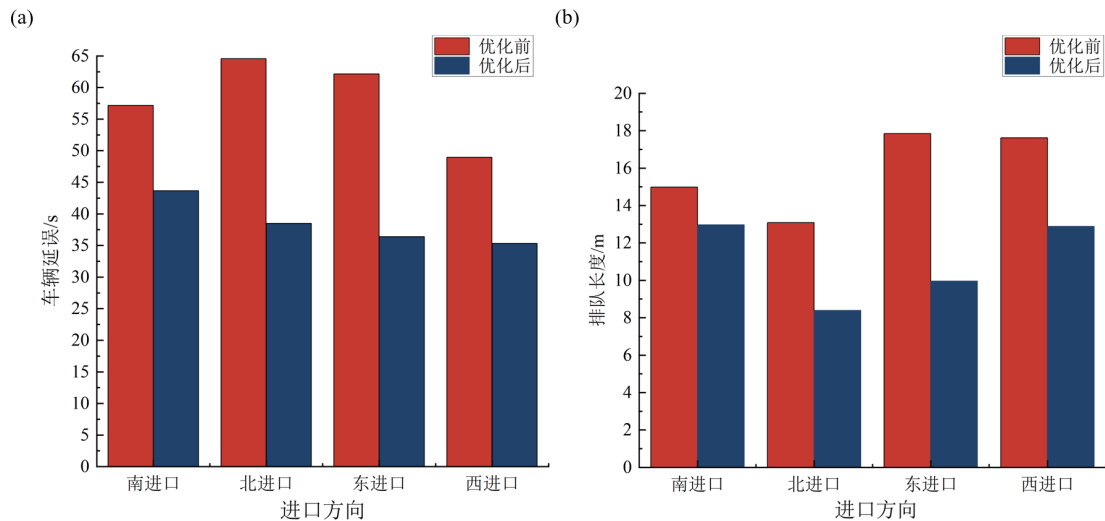


图 5-12 弋江路-赭山东路交叉路口信号控制优化前后对比

由上图 5-12 分析可知交叉路口南进口排队长度降低 13.5%，最大排队长度改善降低 3.5%，车辆延误降低 23.6%；北进口排队长度降低 35.9%，最大排队长度降低 22.9%，车辆延误降低 41.3%；东进口排队长度降低 44.2%，最大排队长度降低 31.7%，车辆延误降低 41.4%；西进口排队长度降低 26.9%，最大排队长度降低 25.8%。车辆延误降低 19.2%。整个交叉路口排队长度整体降低了 30.5%，最大排队长度整体降低了 21.3%，车辆延误时间整体降低了 32.4%，静态停车延误整体降低了 38.0%，停车次数整体降低了 27.8%。自适应周期信号控制在各项交通指标上都取得了显著优化效果，尤其在北进口和东进口方向的改

善最为明显。其中，车辆延误时间和静态停车延误的降低幅度最大，分别达到了 32.4%和 38.0%。这表明自适应信号控制能够根据实时交通需求调整信号配时，有效减少车辆等待时间，提升路口整体通行效率。

5.5 本章小结

以芜湖市弋江路-赭山东路交叉路口为案例，利用 VISSIM 构建交通微观仿真模型，通过 COM 接口实现 VISSIM-MATLAB 的协同仿真。

(1) 将基于实时车流量检测的自适应相位设计与传统固定四相位配时方案进行对比分析，结果表明优化后交叉路口晚高峰排队长度减少 32%，静态停车延误减少 39%，停车次数减少 27%，尾气排放量显著降低。交叉路口服务水平从 E 级和 D 级提升到 D 级和 C 级，通行效率明显提高。

(2) 在平峰期配时优化方面，采用改进粒子群算法求解的多目标配时方案，使交叉路口排队长度降低 30.5%，最大排队长度降低 21.3%，车辆延误降低 32.4%，静态停车延误降低 38.0%。

仿真结果证实，基于车流量实时检测的自适应相位设计与多目标配时优化模型能有效缓解城市交叉路口拥堵，提高通行效率，降低尾气排放，为智能交通信号控制提供了切实可行的解决方案。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文通过研究交叉路口信号配时优化来解决城市交通拥堵问题。首先对各进口道进行实时车流量检测，然后基于检测结果设计自适应相位相序，接着构建多目标配时优化模型，并利用改进的粒子群算法进行求解，最后通过 VISSIM 交通仿真软件进行验证。主要研究内容和成果如下：

（1）交叉路口车流量跟踪检测

采用 YOLOv5 目标检测算法与 Deep SORT 跟踪算法相结合的方法，实现了对交叉路口车流量的精准检测与跟踪。YOLOv5 精准识别车辆目标，Deep SORT 持续追踪车辆，准确关联相邻帧中的目标，重建车辆完整轨迹，过滤无效检测，即使在车辆遮挡、光照变化或复杂场景下也能有效避免漏检和误检。

（2）交叉路口自适应相位相序设计

基于实时车流量检测结果，通过构建相位冲突矩阵和动态调整相位组合，实现了交叉路口相位相序的自适应优化，弥补了固定相位设计无法灵活应对交通流量动态变化的不足。绿灯资源被更有效地分配给需求更大的方向，充分利用了路口空间资源，有效减少了车流高峰时段的车辆等待时间和排队长度，显著提高了交叉路口的通行效率。

（3）交叉路口多目标配时优化模型

构建了一个综合考虑车辆延误、停车次数和通行能力的多目标优化模型，该模型利用层次分析法确定各指标的权重系数，并能够根据实际交通需求动态调整优化重点，解决了传统信号配时方法无法兼顾不同交通需求的问题。采用改进的粒子群算法对模型进行求解，改进后的算法能够更好地平衡全局搜索和局部搜索，避免过早陷入局部最优，从而为多目标优化模型找到更精确的最优解。多目标优化与智能算法的结合，为交叉路口提供了更加灵活、高效的信号配时方案，优化了绿灯时间的分配，均衡了各方向的交通流。

（4）案例仿真验证

以芜湖市弋江路-赭山东路交叉路口为案例进行仿真分析。仿真验证分为两部分：一是晚高峰期自适应相位设计与传统固定四相位方案的对比，结果显示

优化后交叉路口最大排队长度减少 32%、静态停车延误减少 39%、停车次数减少 27%，服务水平从 E 级和 D 级提升至 D 级和 C 级；二是平峰期改进粒子群算法求解的多目标配时方案验证，结果表明交叉路口排队长度降低 30.5%、最大排队长度降低 21.3%、车辆延误降低 32.4%、静态停车延误降低 38.0%。

6.2 展望

尽管本文在交叉路口信号配时优化方面取得了一定的成果，但仍有一些问题需要进一步研究和改进：

（1）主要针对的是单点交叉路口的信号配时优化，未来可以扩展到多个交叉路口的协同优化，尤其是城市主干道上的绿波带控制，进一步提升区域交通的整体效率。

（2）优化模型主要基于常规的交通流量变化，未来可以进一步研究在特殊事件下的信号配时优化策略，增强模型在复杂交通场景中的适应性。

参考文献

- [1] 陆丽丽, 吴祖峰, 施斌峰. 宁波市中心区停车问题成因及关键对策研究[J]. 城市交通, 2019, 17(04): 85-90+16.
- [2] 罗巨翔. 基于拥堵疏解方案的某枢纽互通交通标志标线优化研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(24): 45-47.
- [3] 公安部发布 2024 年度全国机动车、驾驶人数据[J]. 道路交通管理, 2025, (01):9.
- [4] 熊睿成. 基于低渗透率车辆轨迹数据的路口排队服务时间动态估计[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [5] 汤淑明, 潘健, 王宏宾, 等. 干线公路快速通行智能控制系统应用研究[J]. 交通科技, 2010, (S2): 100-103+108.
- [6] 李明善. 车路协同下交通设施信息化建设的应用[J]. 汽车知识, 2025, 25(02): 248-250.
- [7] 宋梓楠, 胡小敏. 智能驾驶车辆与传统交通系统的协同研究[J]. 内燃机与配件, 2025, (04): 115-117.
- [8] 翟丽娜. 5G 时代基于车路协同的城市道路交通控制技术分析——评《车路协同环境下城市道路交通控制方法与建模》[J]. 现代城市研究, 2024, (12): 138.
- [9] H. R ,P. I. Vehicle Following Control Design for Automated Highway Systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2021, 41(6): 13-15.
- [10] Bishop R. A survey of intelligent vehicle applications worldwide[C]. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, 2000: 25-30.
- [11] Misener J A, Shladover S E. PATH Investigations in Vehicle-Roadside Cooperation and Safety: A Foundation for Safety and Vehicle-Infrastructure Integration Research[C]. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2006: 9-16.
- [12] Arnaou G M, Khasawneh M T, Zhang J, et al. An IntelliDrive application for reducing traffic congestions using agent-based approach[C]. IEEE Systems and

- Information Engineering Design Symposium, 2010: 221-224.
- [13] 徐勇. 赴美国学习考察智能交通系统(ITS)的思考[J]. 青海交通科技, 2016(02): 13-15+31.
- [14] 孙小红. 车联网的关键技术及应用研究[J]. 通信技术, 2013, 4:47-50.
- [15] 贾鹏, 冯明月, 张志超. 智能车路协同系统发展现状与趋势[J]. 军事交通学院学报, 2014, 16(2): 39-42.
- [16] Wang P, Jiang Y, Xiao L, et al. A joint control model for connected vehicle platoon and arterial signal coordination[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2020, 24(1): 81-92.
- [17] Jaun G, Minhyuck L, Chulmin J, et al. Traffic Signal Optimization for Multiple Intersections Based on Reinforcement Learning[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10688-10688.
- [18] Hyunjin J, Yujin L. Intelligent Traffic Signal Phase Distribution System Using Deep Q-Network[J]. Applied Sciences, 2022, 12(1): 425-425.
- [19] Arsava T, Xie Y C, Gartner N. OD-NETBAND: An Approach for Origin-Destination Based Network Progression Band Optimization[J]. Transportation Research record, 2018, 2672(18): 58-70.
- [20] Yan H, He F, Lin X, et al. Network-level multiband signal coordination scheme based on vehicle trajectory data[J]. Transportation research, 2019, 107(10): 266-286.
- [21] Lu K, Hu J, Huang J, et al. Optimisation model for network progression coordinated control under the signal design mode of split phasing[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(8): 459-466.
- [22] 程爱文, 卢顺达. 基于相位相序的交叉路口信号配时优化研究[J]. 交通与运输, 2024, 37(S1): 113-115+123.
- [23] 闫东方. 基于信号相位相序优化的干线绿波控制方法研究[J]. 上海公路, 2022, (03): 112-119+167-168.
- [24] 张驰. 基于相位相序调整的双向绿波设置方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(04): 113-118.

-
- [25] 陈小红, 陈慧. 单口放行下混合交通相位相序多属性决策模型[J]. 交通运输研究, 2020, 6(06): 20-27.
 - [26] 聂磊, 马万经. 信号控制交叉路口相位相序自动生成和优化模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(04): 1370-1379.
 - [27] 张浩亮, 吴芳, 马昌喜, 等. 基于重叠相位的双向绿波优化方法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(02): 119-123.
 - [28] 李硕, 黎强. 干道信号控制交叉路口相位相序优化模型研究[J]. 公路工程, 2018, 43(06): 157-162.
 - [29] 贾彦峰, 王进展, 王五林, 等. 基于相位相序优化的双向绿波协调控制模型[J]. 青岛理工大学学报, 2018, 39(01): 91-95.
 - [30] 王浩, 王红彩. 城市交通协调控制系统的相位相序优化设计[J]. 中国科技论文, 2017, 12(08): 941-945.
 - [31] Goodall N J, Smith B L, Park B. Traffic Signal Control with Connected Vehicles[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2381(2381): 65-72.
 - [32] Feng Y, Yu C, Liu X H. Spatiotemporal intersection control in a connected and automated vehicle environment[J]. Transportation Research Part C, 2018, 89: 364-383.
 - [33] Liao T Y. A fuel-based signal optimization model[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 23(8): 1-8.
 - [34] Jin J, Ma X. A Multi-Objective Agent-Based Control Approach With Application in Intelligent Traffic Signal System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(10): 3900-3912.
 - [35] Gong Y, Abdel-Aty M, Yuan J, et al. Multi-Objective reinforcement learning approach for improving safety at intersections with adaptive traffic signal control[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 144(1): 105655.
 - [36] Li W, Ban X. Connected Vehicles Based Traffic Signal Timing Optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018: 1-13.
 - [37] 招晨, 方天. 交叉路口同向可变车道动态控制与信号配时优化研究[J]. 交通与港航, 2024, 11(04): 76-81+91.

- [38] 谭行, 杨伟. 改进 ARRB 模型下的平面交叉路口信号配时优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(08): 166-170.
- [39] 黄文满. 基于 Synchro 系统的典型十字型交叉路口信号优化[J]. 交通与运输, 2024, 37(S1): 101-104+112.
- [40] 王译德, 郝菊香, 张剑飞. 基于 AnyLogic 仿真的交叉路口交通配时优化设计[J]. 智能城市, 2024, 10(07): 27-29.
- [41] 巴天星, 孟子悦, 于时泽. 基于 Webster 法的交叉路口配时优化方法应用研究[J]. 人民公交, 2024, (12): 49-51.
- [42] 宋浪, 王健, 杨璐, 等. 平行流交叉路口车道控制与信号配时组合优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(08): 1647-1658.
- [43] 李昆耀, 褚端峰, 胡海洋. 网联环境下的交叉路口信号配时与车辆轨迹联合优化方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(03): 427-434.
- [44] 陈紫月, 李加强, 李阳, 等. 基于 VISSIM 交叉路口仿真的信号配时优化研究[J]. 技术与市场, 2024, 31(05): 31-35.
- [45] 梁春岩, 韩策. 基于模糊控制的环形交叉路口信号配时方案优化[J]. 山东交通科技, 2024, (01): 58-61.
- [46] 曹瑀晗. 车联网环境下的轻量级认证密钥协商协议研究[J]. 物联网技术, 2024, 14(06): 57-60.
- [47] Manthirikul S, Jain U. Vehicle Delay Model for Signalized Midblock Crosswalk Under Mixed Traffic Conditions[J]. Transportation Research Record, 2024, 2678(10): 1454-1471.
- [48] 许晓. 基于频繁模式的短时交通流实时预测研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2017.
- [49] 韦漠, 韩宗源, 韦玉柳. 基于 VISSIM 的远引调头组织效果研究[J]. 大众科技, 2023, 25(04): 1-5.
- [50] 卢慕洁. 面向通行效率提升的交叉路口群信号配时优化方法研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [51] 戚钧杰, 马晓旦, 付晶燕. 考虑辅路干扰的干线协调多目标优化控制[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(11): 185-188.
- [52] Pramesh P, Abolfazl K, Jan Y W. Real-Time Queue Length Estimation for

- Signalized Intersections Using Single-Channel Advance Detector Data[J].
Transportation Research Record, 2023, 2677(7): 144-156.
- [53] 程凯伦, 胡晓兵, 陈海军, 等. 基于改进 YOLOv5s 的遥感图像目标检测方法[J].
激光与光电子学进展, 2024, 61(18): 285-291.
- [54] 阚盛琦, 方巍, 吴嘉怡, 等. 基于 YOLOv5 的轻量级布匹疵点检测模型[J]. 信息
技术, 2024, (10): 22-29.
- [55] 黎国溥, 陈升东, 王亮, 等. 基于改进 YOLOv5 的车辆端目标检测[J]. 计算机系
统应用, 2022, 31(12): 127-134.
- [56] 孙海川, 张盈, 丁毅, 等. 基于改进 YOLOV5 的头盔佩戴检测算法研究[J]. 黑
龙江工业学院学报(综合版), 2024, 24(08): 101-109.
- [57] 李庆, 田甜, 田金文. 基于 YOLOv5 架构的大幅面 SAR 图像车辆目标识别方
法[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(12): 2852-2858.
- [58] 李祥, 李昊瞳, 周敏敏. 基于 EC-CSP 和双路特征融合的红外无人机目标检测
[J]. 电脑与信息技术, 2024, 32(05): 39-43.
- [59] 陈范凯, 李士心. 改进 Yolov5 的无人机目标检测算法[J]. 计算机工程与应用,
2023, 59(18): 218-225.
- [60] 穆晓芳, 李毫, 刘嘉骥, 等. 跨域环境下特定多目标跟踪算法的改进[J]. 太原理
工大学学报, 2025, 56(01): 165-173.
- [61] 杨笑天, 谭金林, 鱼昕, 等. 基于 GAM-YOLOv8 的遥感图像舰船目标跟踪[J].
吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(01): 328-339.
- [62] 赵元龙, 单玉刚, 袁杰. 改进 YOLOv7 与 DeepSORT 的佩戴口罩行人跟踪[J].
计算机工程与应用, 2023, 59(06): 221-230.
- [63] 于强, 李文雄, 刘艺腾, 等. 基于深度学习的多车道交通流量统计方法[J]. 石家
庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(04): 117-124.
- [64] 李育强, 李林峰, 朱浩, 等. 基于深度学习的活跃 IPv6 地址预测算法[J]. 计算机
科学, 2023, 50(07): 261-269.
- [65] 王昕, 董琴, 杨国宇. 基于优化 CBAM 改进 YOLOv5 的农作物病虫害识别[J].
计算机系统应用, 2023, 32(07): 261-268.
- [66] 刘丽丽, 王智文, 王亮, 等. 基于 BiFPN 和注意力机制改进 YOLOv5s 的车辆行

- 人检测[J]. 现代电子技术, 2025, 48(03): 174-180.
- [67] 甘甜甜, 王亮, 黄世奇. 基于 ASEC 的多模态虚假新闻检测的研究[J]. 信息技术与信息化, 2024, (01): 192-196.
- [68] 王静举. 基于卷积神经网络的海上船舶检测技术[J]. 数字技术与应用, 2024, 42(08): 201-203.
- [69] Graves T, Kelly B, Cunningham C. An Assessment of Highway Capacity Manual Default Saturation Flow Rates to those in North Carolina[J]. Institute of Transportation Engineers, 2016, 86(11): 38-43.
- [70] 姚佼, 杨晓光. 车路协同环境下城市交通控制研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(04): 397-403.
- [71] 黄林, 王世君, 耿明, 等. 基于 TRIZ 理论的搅拌摩擦焊工艺装备优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(02): 48-51+56.
- [72] 汤珂, 苏雅丽, 李宏卫, 等. 自然保护区矿产资源开发的生态环境影响综合评价体系研究与应用[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(05): 239-248.
- [73] Lin X, Wang J. Simulation optimization of supply chain uncertainty factors based on support vector machines optimized with improved Jellyfish Search Algorithm[J]. Discover Computing, 2025, 28(1): 8-8.

攻读硕士期间发表的学术成果

一、发表学术论文

- [1] 基于 VISSIM 的单点交叉路口信号配时优化设计[J]. 安徽工程大学学报 (已录用)
- [2] 基于改进 YOLOv5s 的道路目标检测算法与跟踪研究[J]. 安徽工程大学学报 (已见刊)
- [3] 基于动态启发的双向 A*路径规划算法改进[J]. 安徽工程大学学报 (已录用)
- [4] 基于粒子群算法的垂直泊车路径研究[J]. 安徽工程大学学报 (已见刊)

二、专利

- [1] 一种水陆两用清理装置. (发明专利实审, 第一发明人)
申请号: CN202311150924.5
- [2] 一种水陆两用多功能车. (实用新型专利受理, 第一发明人)
申请号: CN202421066206.X

致谢

在这漫长而充实的研究生学习旅程即将画上句点之际，我怀着无比感恩的心情写下这篇致谢，回首这几年的求学历程，点滴的汗水与收获都离不开诸多良师益友的指导与帮助。

首先，我要向我的导师王建平教授表达最诚挚的谢意。感谢您在学术道路上的耐心指导与谆谆教诲，您严谨的治学态度、渊博的学识和对学术的热忱深深地影响着我。在我迷茫困惑时，是您的鼓励和启发引领我走出困境；在我取得进步时，是您的肯定给予我继续前行的信心。您不仅教会我如何做研究，更教会我如何做人，这份恩情我将铭记于心。更要感谢各位师长在课堂内外的教导，你们不仅传授给我知识，更教会我如何思考、如何探索未知的学术领域，你们的言传身教将伴随我未来的学术生涯。

其次还要感谢课题组的师兄弟们，与你们共同奋战的日日夜夜是我研究生生活中最珍贵的回忆，那些为解决问题而进行的热烈讨论，那些互帮互助的温暖瞬间，那些共同面对挑战时的坚持与鼓励，都将成为我人生中宝贵的财富。特别感谢几位朝夕相处的同门，在我实验遇到困难时伸出援手，在我论文写作时提供宝贵建议，在我低落时给予温暖的陪伴。

最后我要感谢我亲爱的家人，是你们无条件的爱、支持与守护，让我能够全身心地投入学业，你们是我坚强的后盾，让我在追求梦想的路上无所畏惧，你们的理解与牺牲是我前进的动力。

岁月如歌，感恩相伴。研究生生涯转瞬即逝，但这段经历和遇到的每一个人都已深深刻在我的记忆中。愿以此文，表达我内心最真挚的感谢，也祝愿所有曾经帮助过我的人都能获得幸福与成功。

尚德敏学 唯实惟新

