

分类号: U491.1

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110137



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于车路协同的交叉路口盲区

监测与预警研究

论 文 作 者 唐 杨

校 内 导 师 王建平（研究员）

校 外 导 师 陈锋（高级工程师）

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 10 日

分类号：U491.1

学校代码：10363

密级：公开

学号：2220110137

基于车路协同的交叉路口盲区监测与预警研究
**Research on blind area monitoring and early warning of
intersection based on vehicle-road cooperation**

安徽工程大学硕士学位论文

学 生 姓 名： 唐 杨

校 内 导 师： 王建平（研究员）

校 外 导 师： 陈锋（高级工程师）

专 业： 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： 2025 年 5 月 10 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

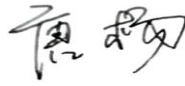
学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

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：2025 年 5 月 10 日

日期：2025 年 5 月 10 日

基于车路协同的交叉路口盲区监测与预警研究

摘 要

随着城市化的迅速发展，道路的复杂性日益增加，在每年的交通事故统计数据中，交叉路口的事故发生率都占有较高比例。由于交叉路口盲区的存在，驾驶员往往不能对道路进行全方位的观察，提高了发生交通事故的概率。因此，对交叉路口的盲区进行监测及预警研究，具有重要的现实意义和应用价值。本文围绕交叉路口的盲区展开研究，构建一种基于车路协同的智能监测预警系统，能够实时共享路网和车辆的状态信息，提高驾驶员对盲区的危险应变能力，降低交叉路口事故发生的概率。主要研究内容如下：

（1）通过研究交叉路口的交通运行规则，比较城市与乡镇无信号交叉路口处的类型与特点，对交叉路口盲区冲突的原因进行分析，并提出解决盲区冲突的措施，针对各措施的不足之处给出改进方法，通过对比得出，本文在运用车路协同技术解决交叉路口盲区冲突方面更加有效。

（2）针对交叉路口环境下交通参与目标种类多、难以精准识别等问题，设计了一种改进 YOLOv5s 目标检测算法，通过替换损失函数、添加特征融合模块、引入目标检测框架 OTA，实现了对交叉路口多个目标的高精度检测，通过加入动态目标追踪算法，实现了交叉路口多个目标的实时监测与距离预警。

(3) 利用 PreScan 仿真软件搭建了交叉路口的盲区场景，精确模拟了在不同路况与冲突对象条件下车辆在交叉路口的交互情况。基于该仿真平台，设计了避撞预警算法，提出了碰撞判据和避撞策略，通过联合 PreScan 与 Simulink 的避撞仿真实验，验证了避撞预警算法的有效性。

(4) 搭建了交叉路口盲区监测预警验证平台，选取校园某停车场交叉路口为验证场景，利用搭载激光雷达和单目相机的智能网联车、路侧设备、云平台组成的系统进行实验。通过实验证明，该系统可以对交叉路口的盲区状况进行有效的监测，能够针对不同的障碍物，及时向车辆发送相应的警告信息，对碰撞风险进行实时预警，并通过云平台远程查看监测信息与车辆状态。

关键词：车路协同，交叉路口盲区，监测预警，智能网联汽车，YOLOv5s

RESEARCH ON BLIND AREA MONITORING AND EARLY WARNING OF INTERSECTION BASED ON VEHICLE- ROAD COOPERATION

ABSTRACT

With the rapid development of urbanization, the complexity of roads is increasing day by day. In the annual traffic accident statistics, the accident rate of intersections occupies a high proportion. Due to the existence of blind areas at intersections, drivers often cannot observe the road in all directions, which increases the probability of traffic accidents. Therefore, it is of great practical significance and application value to study the blind area monitoring and early warning. This paper focuses on the blind area of intersections, and constructs an intelligent monitoring and early warning system based on vehicle-road cooperation, which can share the status information of the road network and vehicles in real time, improve the driver's ability to respond to the danger in the blind area, and reduce the probability of intersection accidents. The main research contents are as follows:

(1) By studying the traffic operation rules of intersections, comparing the types and characteristics of unsignalized intersections between cities and towns, this paper analyzes the causes of the conflict in the blind area

of intersections, and puts forward measures to solve the conflict in the blind area, and gives improvement methods according to the shortcomings of each measure, Through comparison, this paper is more effective in using vehicle-road cooperation technology to solve the conflict in the blind area of the intersection.

(2) Aiming at the problems such as multiple types of traffic participation targets in intersection environment and difficulty in accurate identification, an improved YOLOv5s target detection algorithm is designed. By replacing loss function, adding feature fusion module, and introducing OTA of target detection framework, high-precision detection of multiple targets at intersection is realized. The real-time monitoring and distance warning of multiple targets at intersections are realized.

(3) PreScan simulation software was used to build the blind zone scene of the intersection, and the interaction of vehicles at the intersection under different road conditions and conflicting objects was accurately simulated. Based on the simulation platform, a collision avoidance early warning algorithm is designed, collision criteria and collision avoidance strategy are proposed, and the effectiveness of the collision avoidance early warning algorithm is verified through the collision avoidance simulation experiment combined with PreScan and Simulink.

(4) A blind area monitoring and warning verification platform was built. A parking lot intersection on campus was selected as the verification

scene, and a system consisting of intelligent networked vehicles equipped with LiDAR and monocular cameras, roadside equipment and cloud platform was used for experiments. Experiments have proved that the system can effectively monitor the blind area of the intersection, send corresponding warning information to the vehicle in time for different obstacles, conduct real-time early warning of collision risk, and remotely view the monitoring information and vehicle status through the cloud platform.

KEY WORDS: vehicle-road coordination, intersection blind area, monitoring and early warning, intelligent networked vehicles, yolov5s

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	2
1.2.1 车路协同与智能网联汽车的研究现状	2
1.2.2 交叉路口控制措施研究现状	7
1.2.3 目标检测算法研究现状	8
1.2.4 车辆避撞预警系统研究现状	10
1.3 本文研究目的与研究内容	12
1.3.1 研究目的	12
1.3.2 研究内容	12
第2章 交叉路口的交通运行规则研究	14
2.1 国内无信号交叉路口的类别划分	14
2.1.1 城区无信号交叉路口类型与特征	14
2.1.2 乡镇无信号交叉路口类型与特征	17
2.2 交叉路口冲突分类	18
2.3 交叉路口盲区冲突原因	19
2.4 交叉路口盲区冲突的解决措施	20
2.5 本章小结	23
第3章 基于改进YOLOv5s的交叉路口路端检测算法研究	24
3.1 YOLOv5目标检测算法概述	24
3.1.1 算法导论	24
3.1.2 算法原理	24
3.2 数据集的建立	25
3.2.1 准备数据集	25
3.2.2 数据集的标注	26
3.2.3 数据集的增强	26
3.3 YOLOv5改进方案	27
3.3.1 替换YOLOv5损失函数	27
3.3.2 改进YOLOv5特征融合模块	28
3.3.3 采用更优的目标检测框架OTA	29
3.4 实验训练验证	30
3.4.1 训练结果分析	30
3.4.2 实际预测对比	32
3.5 加入单目相机测距功能	34
3.6 本章小结	36

第4章 交叉路口盲区场景仿真与避撞预警算法设计	37
4.1 基于PreScan的交叉路口盲区场景搭建	37
4.1.1 PreScan软件简介	37
4.1.2 交叉路口盲区仿真场景搭建	38
4.2 交叉路口的避撞预警算法设计框架及其关键步骤	39
4.2.1 算法设计框架	40
4.2.2 算法关键步骤	40
4.2.3 算法运行流程	41
4.3 避撞框架设计	44
4.3.1 建立碰撞模型	44
4.3.2 判断能否发生碰撞	45
4.3.3 计算hv和rv达到和离开碰撞区域的时间	46
4.3.4 匀速直线运动发生碰撞的应对措施	46
4.4 PreScan与Matlab/Simulink的联合仿真实验	47
4.5 本章小结	52
第5章 基于V2X的交叉路口盲区监测与预警验证及实现	53
5.1 车路协同技术体系框架	53
5.2 实验设备介绍	54
5.2.1 智能路端系统	54
5.2.2 智能车载系统	55
5.2.3 智能云控系统	56
5.2.4 V2X通信设备	57
5.3 车-路协同与车-车通信	60
5.4 雷视融合标定	60
5.5 交叉路口盲区场景的模拟布置	61
5.6 实验结果与分析	62
5.6.1 主控机实时界面	62
5.6.2 云平台远程监控	63
5.6.3 车载端盲区信息提示	64
5.7 本章小结	65
第6章 总结与展望	66
6.1 总结	66
6.2 展望	66
参考文献	68
攻读硕士学位期间取得学术成果	75

插图清单

图1-1 中国汽车保有量变化趋势图.....	1
图1-2 各国交叉路口占总事故比例图.....	2
图1-3 车路协同信息交互示意图.....	3
图1-4 智能网联汽车系统架构图.....	6
图1-5 车辆预警车距示意图.....	10
图2-1 平面交叉路口分类图.....	15
图2-2 城市无信号交叉路口图.....	16
图2-3 乡镇无信号交叉路口图.....	17
图2-4 交叉路口冲突分类图.....	19
图2-5 BSD盲点监测示意图.....	20
图2-6 PCS监测示意图	21
图2-7 360° 全景影像系统示意图.....	21
图3-1 数据集目标分类图.....	26
图3-2 C3模块结构图	28
图3-3 C2f模块结构图.....	28
图3-4 原模型网络结构图.....	29
图3-5 改进模型网络结构图.....	29
图3-6 原模型训练精度图.....	31
图3-7 改进模型训练精度图.....	31
图3-8 原模型P-R曲线图	31
图3-9 改进模型P-R曲线图	31
图3-10 改进模型训练结果图.....	32
图3-11 原模型预测结果图.....	32
图3-12 改进模型预测结果图.....	33
图3-13 原模型预测结果图.....	33
图3-14 改进模型预测结果图.....	33
图3-15 单目相机.....	34
图3-16 标定书本示意图.....	35
图3-17 道路多目标识别与跟踪图.....	36
图4-1 交叉路口3D可视化盲区示意图.....	38

图4-2 交叉路口冲突对象示意图.....	39
图4-3 前端碰撞预警算法的运行流程图.....	41
图4-4 最小安全距离计算流程图.....	42
图4-5 两车的相对宽度示意图.....	43
图4-6 两车碰撞的判断条件示意图.....	44
图4-7 两车碰撞半径示意图.....	45
图4-8 十字交叉路口2D盲区场景图.....	48
图4-9 车辆与行人模型图.....	48
图4-10 车辆模型参数图.....	49
图4-11 传感器参数图.....	49
图4-12 V2X信号接受模块.....	49
图4-13 AEB紧急制动模型图.....	50
图4-14 联合仿真预警制动图.....	50
图4-15 联合仿真制动避撞图.....	50
图4-16 车辆与行人距离变化图.....	51
图4-17 车辆与行人速度变化图.....	51
图5-1 智能路端设备实体图.....	54
图5-2 智能网联实验车实体图.....	55
图5-3 智能云控系统监控信息图.....	56
图5-4 云平台总框图.....	57
图5-5 V2X-RSU（路侧单元）实体图.....	58
图5-6 V2X-OBU（车载单元）实体图.....	59
图5-7 RSU-OBU接线图.....	59
图5-8 RSU-OBU-云平台互联示意图.....	60
图5-9 雷视融合标定界面图.....	61
图5-10 模拟交叉路口盲区的场景布置图.....	62
图5-11 主控机实时界面图.....	62
图5-12 云平台实时界面图.....	63
图5-13 车载端盲区信息显示图.....	64
图5-14 车载端盲区预警提示图.....	65

插表清单

表2-1 交叉路口高峰小时机动车流量.....	15
表2-2 城市与乡镇交叉路口对比.....	17
表2-3 交叉路口的冲突对象.....	18
表2-4 交叉路口的障碍物类别.....	18
表3-1 超参数文件设置.....	30
表3-2 改进前后模型参数对比.....	30
表3-3 消融实验结果对比.....	34
表3-4 相机配置参数.....	34
表5-1 智能网联实验车配置参数.....	56
表5-2 V2X-RSU配置参数.....	58
表5-3 V2X-OBU配置参数.....	59

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,由于社会生产力、经济发展不断提高,国产汽车的数量也在不断增加。根据相关资料,到 2024 年年底,我国的机动车保有量将达到 3.53 亿辆。中国的汽车市场已经成为世界上最大的单体汽车市场,每年的产量和出口量分别为 26.44%、26.62%^[1],中国的机动车保有量最近几年的发展趋势显示在图 1-1 中。据有关部门的数据显示,在全国范围内,由于交通堵塞所带来的经济损失在千亿以上。

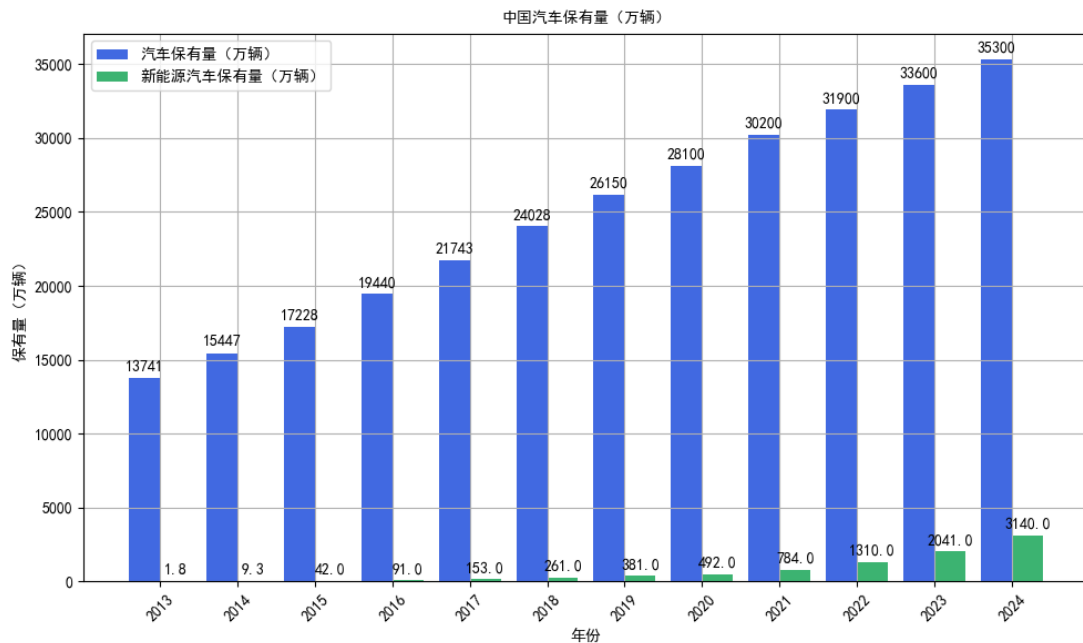


图 1-1 中国汽车保有量变化趋势图

交叉路口是城市道路交通中的一个重要节点,也是事故多发地区。统计数据表明,欧洲的交通事故中,有 43%是在交叉路口发生的,在交叉路口发生的事故中,有 70%是在城区^[2];在美国,城市公路上的交通事故占全部交通事故的 60%,而在交叉路口的交通事故中,大约有 75%是在城市公路上^[3];在中国,城市道路交叉路口处发生的交通事故占全部交通事故的 30%左右^[4],如图 1-2。驾驶员在通过交叉路口时需要做出更为复杂的判断与决策,易发生交通冲突,这极大地影响了路网的整体运营效率与安全。

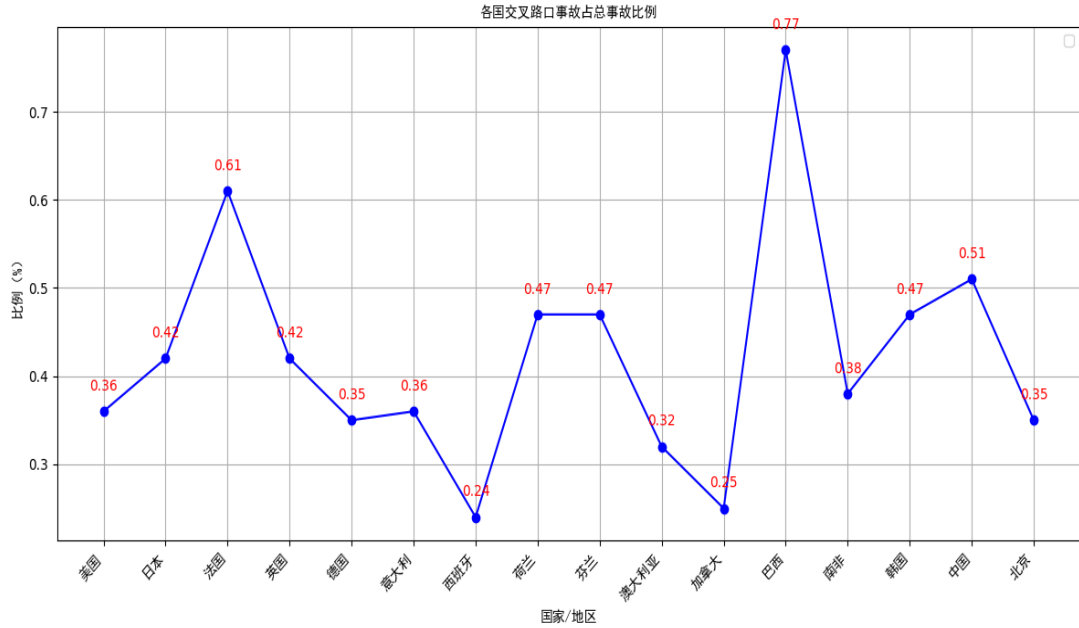


图 1-2 各国交叉路口占总事故比例图

当前，智能交通系统（ITS）^[5]已经成为各国解决交通问题的重要措施。ITS 通过对车辆、行人和道路等交通要素的高效调控，显著提升交通管理效果，其实施成效已得到广泛认可^[6]。

如何提高交叉路口的通行效率，对整个路网的通行能力有很大影响。车路协同技术（Vehicle-to-Everything）的迅速发展，为解决交叉路口交通问题提供了新的思路。在此基础上，构建一种基于智能车、路侧设备和云平台的车-路协同系统，通过路侧端和车载端可以共享当前区域的交通状况，并进行实时的数据交互^[7]。通过对车辆与道路可能存在的碰撞危险进行预测，及时疏导，可以有效地防止碰撞。

在车路协同的理论基础上，通过研究车-车、车-路之间的实时信息交互机制，提出一种交叉路口的监测预警方法。通过动态模拟交叉路口盲区场景，并结合车路协同技术对路面车辆、行人及其他障碍物的精准识别，使车辆在通过路口时能够及时获得盲区的预警信息提示，可帮助驾驶员及时对潜在冲突源做出反应，尽可能避免交通冲突的发生，从而提升车路协同环境下交叉路口交通流的控制效率和整体安全性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 车路协同与智能网联汽车的研究现状

(1) 车路协同研究现状

智能车路协同技术 (i-VICS) ^[8] 是一种有效的解决方法, 能够应对复杂的道路环境。车路协同是 i-VICS 研究的一个热点, 其技术水平也得到了不断的发展和完善, 整个体系正在进入一个全新的车—车、车—路、车—人高度协同的新时代^[9], 如图 1-3 所示。与此同时, 随着传感器检测技术、无线通信技术、计算机技术和高精度地图定位技术的发展, 也促进了车路协同技术的发展和成熟。

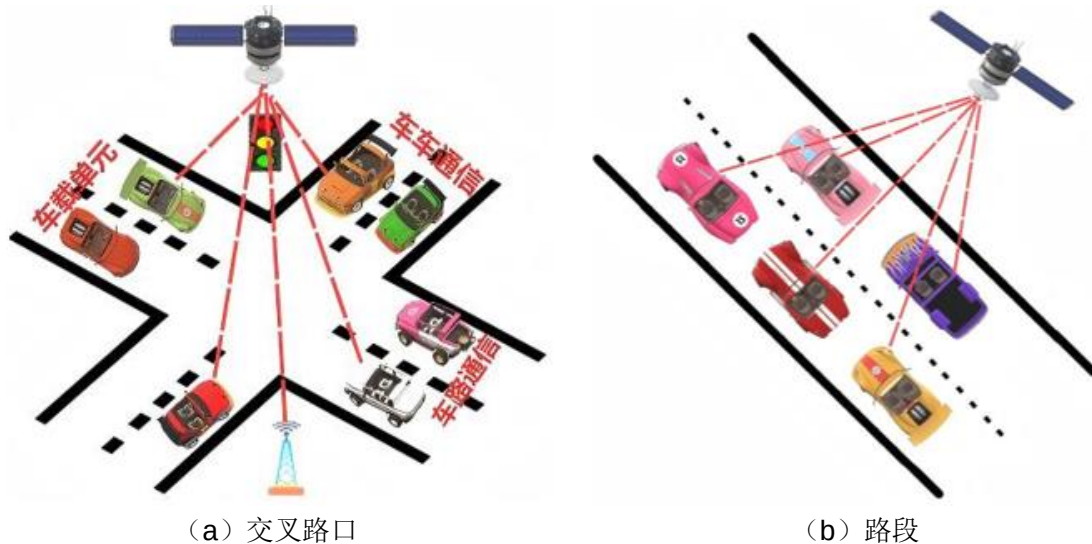


图 1-3 车路协同信息交互示意图

最新一代覆盖面较广的 5G 移动通信技术^[10], 凭借其低延时、高速率和可靠性强的显著优势, 在车路协同通信领域中有望带来颠覆性变革, 为该系统的应用提供全新机遇。为适应复杂的路况, 构建高效、安全和绿色的交通体系, 世界上很多发达国家都在对车路协同的相关技术进行研究。本文选取美国、日本、欧洲等对车路协同的研究比较深入的国家作为实例, 介绍目前车路协同的研究状况。

① 美国

美国车路协同 (C-V2X) 技术的发展经历了多个重要阶段^[11]。1999 年, 美国政府启动智能交通系统 (ITS) 计划, 联邦政府通过了“交通控制技术计划”, 开始重视交通管理和安全技术, 目的是利用信息和通信技术提高交通安全、效率和环境保护。2004 年, 美国交通部 (USDOT) 发布了《车与车通信研究计划》, 开始与汽车制造商合作, 研究车与车 (V2V) 通信技术, 目的是减少交通事故和提高道路安全。并于 2012 年展开 V2V 通信的实际测试, 进一步推动了技术的成熟。2014 年, 美国交通部发布了《车辆到基础设施 (V2I) 系统概念与设计》报告, 概述了未来智能交通系统的愿景, 包括车与基础设施的通信。2016 年, 美国

国家公路交通安全管理局（NHTSA）发布了 V2V 技术标准，规定所有新车应配备 V2V 通信设备，为未来 V2V 通信的普及铺路^[12]。

随着 5G 和 LTE 技术的进步，2017 年 C-V2X 技术开始进入商业化阶段，高通、英特尔等技术公司开始推广基于 4G/LTE 和 5G 的 C-V2X 技术。2020 年，联邦通信委员会（FCC）批准了 5.9 GHz 频段用于 C-V2X 通信的实验和部署，IEEE 发布了 IEEE 802.11p 和 C-V2X 的技术标准，为车路协同通信提供了统一的技术规范，推动了车路协同的广泛应用。2021 年，多个美国城市启动了 C-V2X 技术的试点项目及部署，多个美国城市（如密尔沃基、亚特兰大等）启动了基于 C-V2X 的智能交通项目，涵盖了从车与车、车与路到车与云的多种通信场景。到 2022 年，NHTSA 允许在美国范围内广泛部署 V2X 技术，尤其是在智能交叉路口、自动驾驶系统和交通管理系统中。2023 年多个试点项目在美国各大城市展开^[13]，涵盖了智能停车、自动驾驶车辆协同、交通灯优化等多种应用。

② 日本

自 2001 年起，日本开始重视智能交通系统（ITS）的研究^[14]，日本交通部启动了智能交通系统（ITS）战略，提出通过车路协同技术来实现交通流量的优化和事故减少。2003 年，日本交通部与汽车制造商及相关技术公司（如丰田、本田、日产等）联合开始开展 V2V 技术的研发工作，探索如何通过通信减少交通事故。于 2004 年进行初步实验，日本在东京和其他城市开展基于 V2X 的初步实验，测试交通信号与车载系统的协同工作。2007 年，日本的相关机构（如日本汽车技术会）开始制定适用于车与车、车与路通信的技术标准，并与国际标准化组织合作。

2011 年，日本举办了国际智能交通系统大会，展示车与基础设施、车与车之间的信息交换技术，进一步推动车路协同技术的全球认知^[15]。2015 年，日本丰田公司开始测试基于 V2X 的车载通信系统，特别是在城市交叉路口和高速公路上进行的试点。2017 年，日本的主要汽车厂商与通信公司（如 NTT DoCoMo）开始联合开展 5G 车路协同技术的测试，尤其是在自动驾驶场景下进行的实验。2018 年，日本在一些城市（如富士山周边的城市）开始进行自动驾驶巴士的测试，这些巴士通过车与基础设施的通信来实现自动驾驶和优化路线规划。2020 年，日本政府发布了《关于未来交通的智能化战略》，计划在 2025 年之前将车路协

同技术应用于全国范围的高速公路和城市道路，并支持各地的智能交通试点。2021 年，日本开始在东京、大阪等城市部署 5G 车路协同网络，推动商用化进程。

③ 欧洲

2001 年，欧盟发布了《欧洲智能交通系统计划》，提出通过车路协同技术提升交通安全和效率。2005 年，欧盟成员国和汽车制造商联合开展 C-ITS 项目，推动车与车、车与基础设施之间的协同工作。2008 年，欧盟推出 eSafety 计划，该计划推动了车路协同技术（特别是 V2X 技术）在车辆中的应用，包括碰撞预警系统、道路状况信息等智能安全功能的开发^[16]。2010 年，欧盟发布《欧洲智能交通系统行动计划》，计划中明确了车与基础设施之间信息交换的具体路径，包括基于车载设备与交通信号系统的协同工作^[17]。2014 年，荷兰、德国、法国等国家开展了多个车路协同的试验项目，推动 C-ITS 和自动驾驶技术的测试与部署。2015 年，欧盟发布 C-ITS 通信协议，明确了车与车、车与基础设施之间的通信规范。2016 年，欧洲委员会发布了智能交通政策，政策明确了在欧盟范围内推广 C-ITS 技术的路线图。2017 年，欧盟将车路协同技术纳入智慧城市框架，支持各城市的试点项目。2020 年，欧盟推动车路协同技术的商业化应用，特别是在高速公路和城市交通管理中。2021 年，5G 车路协同实验在多个城市启动，推动了 5G 基础设施的建设。2022 年，多个欧盟国家开始全面部署车路协同网络，特别是在自动驾驶和智能交通方面。

④ 中国

相比之下，我国对车路协同技术的研究起步较晚，2000 年起，中国开始关注智能交通系统（ITS）的建设。在 2009 年，中国国家标准化管理委员会（SAC）组织了智能交通标准化技术委员会，开始制定与车路协同相关的技术标准^[18]。2012 年，多个省市（如北京、上海、深圳等）开始进行智能交通的试点项目，涵盖了交通管理、车辆控制和信号优化等方面。2014 年，交通运输部发布《智能交通产业发展规划》，该规划强调了车路协同技术的研发与应用。2016 年，《车联网发展战略规划》发布，文件提出了车联网技术的多项政策支持^[19]。

2017 年，中国的通信运营商（如中国移动、中国电信）与汽车制造商（如上汽集团、长安汽车等）开始在多个城市和高速公路上进行 C-V2X 的技术测试。2018 年，《智能汽车创新发展战略》发布，战略中明确了未来车路协同的技术路

线，支持车联网与自动驾驶的技术研究与实验。2019 年，中国发布了《5G 车联网发展白皮书》，白皮书中详细介绍了车路协同的应用场景，包括交通管理、自动驾驶、智能停车等。2021 年，中国发布了《车联网（V2X）通信技术标准》和《智能交通系统车路协同技术要求》，推动了车路协同的技术统一与应用普及。2022 年，C-V2X 技术在多个城市进行商用部署，开始建设基于 C-V2X 的车路协同网络。

目前，我国在多个一线和二线城市设立了车路协同技术的示范区^[20]，上海、广州、杭州等城市在这一领域的探索和建设已取得显著成效，成为全国推广的标杆。国内主要科技公司与传统汽车制造商充分发挥各自的创新优势和技术积累，积极推动车路协同技术的研发与应用。

（2）智能网联汽车研究现状

智能网联汽车（ICV）是当今汽车行业的重要研究方向之一^[21]。它在传统汽车的基础上，增添了先进的车载技术，具备强大的数据采集、处理和分析能力，并搭载高效的车内及车间专用高速通信网络，能够实现车辆与人、车、路、云等各方之间的智能数据共享和协作。ICV 可以精确感知周围复杂的交通环境，并通过集成的信息进行智能决策，控制车辆的行驶。在技术发展到一定阶段时，ICV 还可实现与车间通信系统和协作型智能交通系统（ITS）结合的全自动驾驶，确保无事故运行。如图 1-4 所示，展现了智能网联汽车的系统架构。

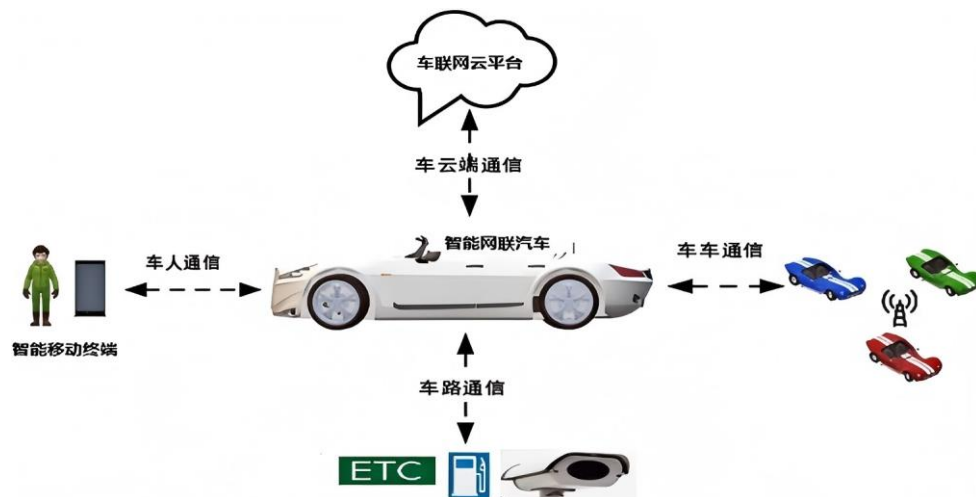


图 1-4 智能网联汽车系统架构图

智能化驾驶的分类标准由美国汽车工程师学会（SAE）在 2014 年提出，依据自动驾驶的自动化程度，将自动驾驶分成 6 个级别，从 Level 0 到 Level 5^[22]：

Level 0：完全手动驾驶。驾驶员需要完全控制所有驾驶任务，系统仅提供辅

助功能（如警告）。

Level 1: 驾驶辅助。系统可以执行某些单一的任务，如自适应巡航控制(ACC)或车道保持辅助，但驾驶员仍需随时掌控车辆。

Level 2: 部分自动化。系统可以同时控制转向和加减速（如特斯拉的Autopilot），但驾驶员仍需保持注意并准备接管控制。

Level 3: 有条件自动化。系统能够在特定环境下（如高速公路）完全控制车辆，驾驶员可以暂时不干预，但在系统要求时必须接管。

Level 4: 高度自动化。系统可以在特定场景（如限定区域或特定条件下）完成所有驾驶任务，驾驶员不需要干预，但在非特定场景下可能需要干预。

Level 5: 完全自动化。车辆能够在所有环境和情境下自动驾驶，不需要人类驾驶员参与任何操作。

中国政府发布了《智能网联汽车创新发展战略》（2016 年）等一系列政策文件，明确提出要推动智能网联汽车技术的创新和应用。中国在车路协同技术、自动驾驶技术、5G 与车联网结合等方面取得了显著进展，特别是在 L3-L4 级自动驾驶技术上，国内的几家企业如滴滴、华为、蔚来等，已经在自动驾驶的技术研发和路测方面走在世界前列。

多个城市已经开始了智能网联汽车的示范试点^[23]，如上海、广州、深圳等，推动了智能网联汽车在实际场景中的应用。同时，国内的传统汽车制造商（如比亚迪、吉利、奇瑞等）和科技公司（如百度、腾讯、阿里巴巴）积极参与智能网联汽车的研发。小米、理想、小鹏等新兴电动汽车制造商在智能网联汽车领域也取得了显著的进展。

1.2.2 交叉路口控制措施研究现状

随着车路协同技术的迅速发展，世界上各个国家都认识到车路协同在解决道路交通问题上所具有的显著优势，因而对其进行深入的研究。

Azadi Farzaneh^[24]等提出了一种称为组合交替方向车道分配和基于预留的交叉路口控制（CADLARIC）的概念，用于在互联和自动驾驶汽车（CAV）环境中更好地管理方向不受限制的交通流量。在 CADLARIC 中，车辆必须在到达下游交叉路口之前将自己定位在适当的车道上，这样可以解决交叉路口之间以及传统上交叉路口箱内的车辆冲突。Bonela Someswara Rao^[25]等研究考察了车辆类型对

RTCC 的影响。使用碰撞时间 (TTC) 在印度三个不同城市的五个无信号灯 T 形十字路口观察 RTCC, 使用 Python 软件开发了广义泊松回归模型。

Cardaliaguet Pierre^[26]等研究了如何最优的通过仅作用于路口的减速或交通信号灯来控制通过路口的交通流量。Azadi Farzaneh^[27]等提出了一种称为联合交替方向车道分配和基于预留的交叉路口控制 (CADLARIC) 的概念, 用于管理城市环境中方向不受限制的交通流量。Ramadan Ibrahim M. I^[28]等研究了交叉点, 包括信号灯、环形交叉路口和双向停车控制。

在国内, 交叉路口控制措施的研究包括信号灯, 车辆控制, 算法优化等。刘斌^[29]等提出一种车路协同下无信号交叉路口车辆的通行策略。建立了车路协同场景, 划分了动态冲突区域和静态冲突区域, 定义了模型输入参数, 构建了车辆通行顺序模型和车辆运动状态控制模型, 并利用 SIMULINK 对所建模型进行仿真模拟, 验证了其有效性。赵树恩^[30]及其团队研发了一种以经济性为核心目标的交叉路口自动驾驶汽车生态驾驶控制器, 通过仿真表明, 提出的控制策略确实可以在某种程度上保证安全性与舒适性的双重需求。但是具体如何取得这样的平衡, 还需要进一步研究与探讨。

季鹏昊^[31]等针对无信号交叉路口的场景, 同时考虑路面附着情况的防碰撞系统控制策略进行研究。任娅^[32]等着手并探索了一个具备显著可靠性和良好稳定性的预警信息管理系统, 该系统不仅强调了低耦合度的设计还展示了某种程度上的扩展可能性。同时, 在移动端研发了一款应用于 Android 系统的手机程序, 这个 App 用于获取信标车辆的位置数据以及显示转向提示和相关警报内容。通过精心设计, 他们呈现了地图显示与路径引导界面, 并且达成了将车路协同程序顺利安置到实验的车辆中的目标, 这个 App 已被投入使用并进行实地测试, 试验地点设定在中国汽车研究所园区的道路上。赵帅豪^[33]等关注了关于单个交叉路口在信号灯定时系统中的低效通行的问题, 他们提出了一种新的基于深度强化学习的智能化控制策略, 通过动态检测和收集数据, 对交通信号灯进行智能化的调整与控制。牛剑^[34]等探讨了未来车联网环境交叉路口的情况, 而且他们集中对自动驾驶车辆编队的通行进行了更深层面的控制研究。

1.2.3 目标检测算法研究现状

目标检测算法^[35]近年来得到了显著发展, 尤其是深度学习方法的应用。经典

的基于 Haar 特征和 HOG 特征的方法逐渐被卷积神经网络 (CNN)^[36]驱动的 R-CNN 系列、YOLO、SSD 和 RetinaNet 等算法所取代, 这些方法大大提高了检测精度和效率。最近, 基于 Transformer^[37]的 DETR 等新兴方法也开始受到关注, 尽管计算负载较大, 但提供了更高的精度。此外, 跨模态目标检测、小物体和密集目标的检测、实时性要求及边缘计算等问题仍是当前研究的热点和挑战。

(1) 基于深度学习的目标检测方法

依据深度神经网络的目标识别方法主要分为两大类: 基于候选区域的检测方法 (如 R-CNN 系列) 和一阶段的检测方法 (如 YOLO、SSD)。其中, YOLO 系列和 SSD 在速度和实时性上表现优异, 适合应用于实时目标检测任务; 而 Faster R-CNN 和 DETR 等方法则在精度上占有优势, 适合高精度要求的场景。

Ramavhale Murendeni^[38]等提出了 YOLOv4 深度学习算法的 3D 对象检测, 解决了自动驾驶汽车 (AV) 系统中的一个关键挑战: 实时准确感知周围环境的三维信息。Isha Padhy^[39]等提出了 Hybrid-COD, 这是一种使用带有增强感受野 (ERF) 模块和跨尺度特征融合 (CSFF) 过程的 Swin Transformer 架构进行伪装目标检测的新方法。Allabaksh Shaik^[40]等介绍了一种基于最佳 DL 的行人和异常识别目标检测 (ODLOD-PAR) 技术。ODLOD-PAR 技术的目的是使用 DL 模型检测和分类行人和异常的存在。

在研究低光照环境下检测问题的过程中, 王满利^[41]等基于已知的数据特性, 意识到该领域的某种复杂特殊性, 他们对目标检测算法 YOLOv8 进行了系统性的改进, 提出了一种新的算法 YOLO-RSG。其目的在于提高在不理想光照条件下进行目标定位与识别时所体现出的可靠性水平。在车辆识别方面, 徐慧智^[42]等使用了一种以深度学习为基础的方式来进行车辆目标的检测与距离测量, 选择了 YOLOX-S 算法作为一个框架, 并进行了某些程度上的优化修改。蔡仁昊^[43]等将注意力集中于一种特定的复杂场景, 即小尺寸红外车辆目标, 基于 YOLOv5 算法对此进行了一系列处理, 试图探索模型结构简化的途径, 以此提高模型的实时性能。宋爽^[44]等的研究涉及到一种高性能轻量化网络模型, 表现在将 Stem 模块与 ShuffleNet V2 进行了复杂的整合, 从而提高这种融合网络在特征提取能力上方面的表现。在理论层面, 研究可能推动了新型网络模型设计, 但实证验证还需持续关注如部署效能及实际运作状况下的影响。

（2）基于 Transformer 的目标检测方法

基于 Transformer 的目标检测方法，如 DETR 及其改进版本（如 Deformable DETR），通过端到端的全局特征学习和自注意力机制显著提升了目标检测的精度，尤其在复杂场景和长距离依赖问题上表现优秀。然而，Transformer 的计算开销较大，推理速度相对较慢，这限制了其在实时应用中的表现。为了解决这些问题，研究者提出了如 Deformable DETR^[45]和多尺度 Transformer^[46]等优化方案，进一步提高了计算效率和检测性能。

金字锋^[47]等以 Transformer 技术为基础，设计了 Transformer 双域融合特征区域建议模块、负责增强特征信息的深度补全机制，以及用于多模态交叉注意力的相应模块。李丽芬^[48]等基于传统 YOLOv4 架构，在若干数据尺度上进行优化，着眼于浅层特征信息的全面利用。蔡腾^[49]等设计了一种名为 DarkYOLOv8 的低光照度环境下目标检测轻量模型，并引入了 Transformer 注意力模型来提取图像的综合信息。刘明阳^[50]等引入了针对 3D 点云数据的目标检测方案，基于 Transformer 框架，提出空间调制的改善方案与热图初始化的训练加速方法。

1.2.4 车辆避撞预警系统研究现状

车辆避撞预警系统从 20 世纪 80 年代的简单停车辅助系统起步，逐步发展为主动安全系统，随着传感器技术、计算机视觉和深度学习的进步，逐渐实现了从警报到自动干预的功能，如图 1-5 所示。2000 年代初，自动紧急制动（AEB）和自适应巡航控制（ACC）系统开始出现，并结合摄像头、雷达、激光雷达等传感器提高感知能力。如自动紧急制动（AEB）、自适应巡航控制（ACC）和车道保持辅助（LKA）等先进驾驶辅助系统已被广泛应用于提升行车安全。

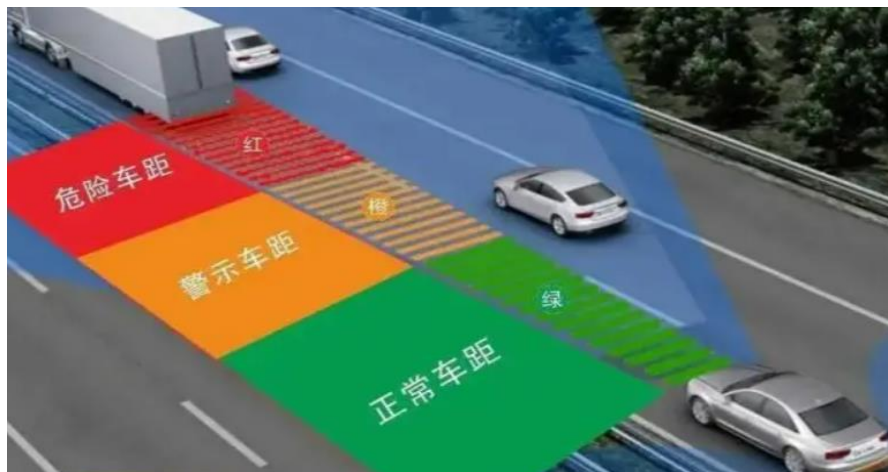


图 1-5 车辆预警车距示意图

车辆碰撞预警系统的研发工作主要由美国、德国、日本和中国等国家的汽车制造商和科技公司牵头推进。美国的特斯拉、Waymo 和 Mobileye, 德国的宝马、奔驰和奥迪, 日本的丰田、本田, 中国的百度、蔚来、小鹏等公司都在该领域进行积极研发, 推动自动驾驶技术和车辆安全系统的进步。

美国的车辆碰撞预警系统发展始于 20 世纪 90 年代, 当时主要依赖于简单的雷达和停车辅助系统。2000 年代初, 福特和通用等公司开始研发自动紧急制动 (AEB) 系统, 随着雷达和传感器技术的发展, 系统逐渐具备碰撞预警功能。进入 2010 年代, 特斯拉的 Autopilot 系统代表了美国在自动驾驶和避撞技术的研究方面处于世界前沿, 结合摄像头、雷达和超声波传感器, 实现了智能化的自动紧急制动与碰撞预警。

德国在开发车辆碰撞预警系统方面处于世界领先地位。20 世纪 90 年代, 奔驰和宝马开始引入主动安全技术, 推动了碰撞预警和自动制动系统的应用。进入 2000 年代, 德国汽车制造商推出了结合雷达和摄像头的高效预碰撞系统, 并不断优化系统以提高复杂场景下的安全性。到 2020 年代, 德国车企通过更精确的多传感器融合技术和深度学习应用, 使得避撞预警系统在各种复杂交通环境中表现更为精准。

日本的丰田和本田从 1990 年代开始就积极研发车辆碰撞预警技术, 丰田在 2000 年代推出了预碰撞安全系统 (PCS), 融合雷达和激光传感器实现预碰撞预警和自动紧急制动。2010 年代, 随着技术的进步, 丰田和本田进一步增强了系统的智能化, 加入了行人检测和自适应制动等功能。到 2020 年代, 日本车企利用深度学习和图像识别技术, 进一步提升了系统的目标识别能力, 使其在复杂交通场景下的表现更加出色。

中国在车辆碰撞预警系统的研究始于 2000 年代初^[51], 早期的研发集中在基本的碰撞预警和自动制动系统, 主要由中国企业如长安汽车和吉利汽车推动。自 2010 年代起, 随着智能驾驶与自动驾驶技术的快速发展, 中国的技术公司如百度和汽车制造商如蔚来、小鹏等开始加大在车辆安全和避撞预警技术上的投入, 尤其在自动驾驶平台的研发中, 结合雷达、激光雷达、摄像头等多种传感器, 推动系统的精确性和智能化。2020 年代, 随着深度学习和数据融合技术的成熟, 中国的避撞预警系统开始逐渐具备更强的环境适应性, 在复杂的城市交通环境中,

该系统能够实现更加精准的预警碰撞并自动执行干预。

在研究方法方面,马浩越^[52]等采取了一种特定设计,以试图应用于结构化道路条件中的车载系统,即所谓的 GigE Vision 实时前方车辆防撞预警系统,利用千兆以太网工业相机,提供图像的分辨率。王登贵^[53]等设计了全新的车辆纵向安全距离算法,并且把安全距离进一步细化为提醒安全距离以及警戒安全距离。刘玉蓉^[54]等观察到 V2X 通信技术的广泛应用,提出了一种新型的车辆防撞预警系统。提出传统 TTC(时间碰撞预计)预警算法所存在的若干不足之处。孙婷婷^[55]等设计了一种利用车辆间信息交换技术(称为 V2V)获取周围车辆动态数据的系统,采用了 Zig Bee 科技作为车对车通信的通讯模块,通过使用复杂的卡尔曼滤波算法对车辆之间的安全距离进行严密计算与解析,并进而构建出最小安全距离模型。钟静连^[56]等设计了一套基于单目视觉的车辆防撞预警系统,在白天检测车辆、夜晚识别车辆及车辆连续跟踪这三大技术领域进行了各种研究成果的比较分析,对于实际场景出现的问题,还制定了相应的改良方案。

1.3 本文研究目的与研究内容

1.3.1 研究目的

本文以交叉路口的盲区作为研究对象,鉴于交叉路口交通流量大、交织复杂且盲区的存在,容易导致交通事故,为解决这一问题,本研究设计一种基于车路协同的交叉路口盲区监测与预警方法,利用先进的车路协同技术和目标检测算法,构建一个高效、精准、实时的盲区监测与预警系统,从而提高交叉路口的交通安全性,减少交通事故发生率。

1.3.2 研究内容

本文内容分为六个章节,具体安排如下:

第 1 章:绪论。简要概述车路协同技术对于解决交叉路口盲区问题的重要性,并论述了国内外相关领域的研究现状,对本文的主要研究内容进行总结概括。

第 2 章:交叉路口交通运行规则与优化研究。研究交叉路口盲区的特性与影响,通过分析交叉路口的交通流动规律、车辆冲突类型及盲区产生的原因,深入理解盲区对交通安全带来的潜在威胁。通过对城市和乡镇道路无信号交叉路口的类型与特点进行分类研究,为后续的盲区监测和预警提供理论基础。

第 3 章:基于改进 YOLOv5s 的交叉路口道路目标检测算法与跟踪研究。本

章针对交叉路口复杂环境下的目标检测问题，设计了基于改进 YOLOv5s 的目标检测算法，改进目标检测框架中的特征融合模块和损失函数，以提升多目标检测的准确性，提高了对盲区内目标车辆和行人的识别能力，增强识别目标的精度和实时性，并加入了单目相机测距功能，实现了对动态目标的实时追踪。

第 4 章：交叉路口的盲区场景仿真与避撞预警算法设计。利用 PreScan 软件创建了一个具有典型盲区的交叉路口环境。设计了一种避撞预警算法，通过构建碰撞的场景与半径示意图，判断是否会发生碰撞，在发生碰撞的情况下，对车辆采取加速还是减速措施进行了分析。最后，利用 PreScan 与 Simulink 进行联合仿真，实现了对交叉路口盲区场景下的横排行人的预警与避撞。

第 5 章：车路协同在交叉路口盲区监测中的实验验证。通过构建车路协同系统，集成了路侧通信装置、智能网联汽车、智能云控平台等实验设备，结合 V2X 通信技术，实现车辆、道路以及云端之间的信息共享和实时交互，强化盲区监测与预警系统的协同作业。通过实验表明该系统在交叉路口对盲区的监测具有实时性与有效性，成功的对交叉路口盲区内的危险目标做出预警。

第 6 章：总结与展望。总结了本文研究的各项内容，并对研究中的不足进行分析，为未来的研究指明了方向。

第2章 交叉路口的交通运行规则研究

随着中国城镇化进程的加速和大都市扩展效应的推动,交通系统的复杂性不断增加,尤其是在交叉路口处。交叉路口作为交通网络的重要节点,承载着大量的车辆流动,成为交通事故高发的区域。特别是在未设置信号灯的交叉路口,车辆、行人与非机动车之间发生碰撞的风险明显上升。由于交通流量和路况的多样性,交叉路口的安全性面临着严峻挑战,尤其是在视线受限的情况下。

本章将深入探讨城市和乡镇无信号交叉路口的运行规则和特点,尤其是对于常见的平面交叉路口和立体交叉路口类型进行分析。通过对交通流量、道路设计、视野受限等因素的研究,旨在揭示交叉路口中存在的主要安全隐患,分析交通冲突的种类与原因,提出针对交叉路口盲点冲突的解决措施,尤其是如何通过技术手段和智能交通系统,如车路协同系统(V2X),可以增强交叉路口的安全性,同时提高交通流量的效率。

2.1 国内无信号交叉路口的类别划分

2.1.1 城区无信号交叉路口类型与特征

作为主要的交通交汇点,城市公路系统往往承载着最高的车流密度和复杂的路线组合^[57]。然而,随着城市节点数量的急剧增加,交通事故风险也随之上升,尤其是在没有信号灯控制的交叉路口。在大多数情况下,交叉路口都会安装信号灯,车辆依照信号的指示进行有序行驶。因此,深入研究如何减少无信号交叉路口处的交通事故发生,对于降低整体交通安全隐患至关重要。交叉路口大致可分为平面交叉路口和立体交叉路口两种基本形式:

(1) 平面交叉路口

平面交叉路口是指两条道路位于同一水平面上,依据其几何形状特征,可将其划分为十字形交叉路口、T字形交叉路口、Y字形交叉路口、X型交叉路口等多种类型^[58],如图2-1所示为各类型的具体划分。

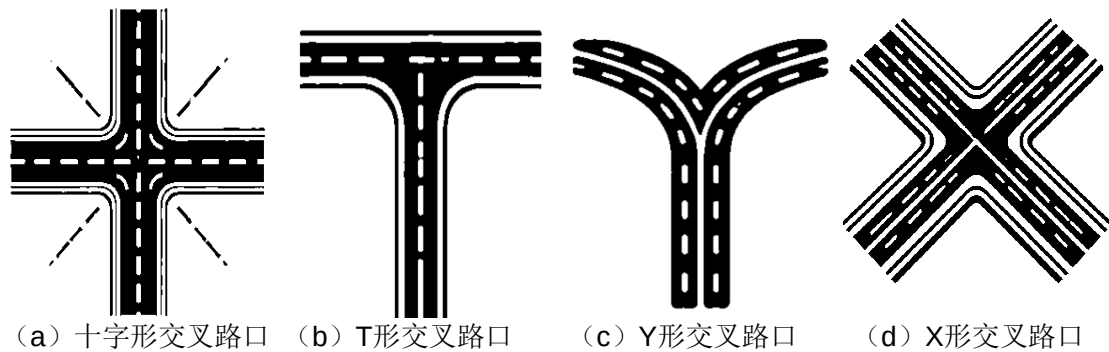


图2-1 平面交叉路口分类图

(2) 立体交叉路口

当两条道路不在同一平面上时，这种交叉路口称为立体交叉路口，其主要包含立交桥、引导路和上下坡道三个组成部分。

除了上述提到的交叉路口类型，城市道路交通系统中还存在其他形式的交叉路口。其中，环形交叉路口是一个流量较大的大型交通枢纽，通常配备有先进的信号控制设备。车辆在环形交叉路口行驶时，通常视线不会受到明显干扰，因此本文不对环形交叉路口进行详细探讨，重点研究无信号交叉路口中最典型的十字形交叉路口类型。鉴于无信号交叉路口一般规模较小，拥有较少的车道，本研究的重点放在双向四车道的交叉路口上。

按照《道路交通信号灯设置与安装规范》(GB 14886-2016)的要求^[59]，当交叉路口机动车在高峰时段的流量超出表 2-1 中所列标准时，应当配置信号灯。

表 2-1 交叉路口高峰小时机动车流量

主要道路 车道数/条	次要道路 车道数/条	主要道路高峰小时 流量/(PCU/h)	次要道路高峰小时 流量/(PCU/h)
1	1	750	300
		900	230
		1200	140
1	≥2	750	400
		900	340
		1200	220
≥2	1	900	340
		1050	280
		1400	160

续表 2-1 交叉路口高峰小时机动车流量

主要道路 车道数/条	次要道路 车道数/条	主要道路高峰小时 流量/(PCU/h)	次要道路高峰小时 流量/(PCU/h)
		900	420
≥ 2	≥ 2	1050	350
		1400	200

根据表格 2-1 中的数据,对于那些无法满足交通流量要求的城市交叉路口,安装信号灯似乎并不现实。例如,在芜湖市鸠江区的云梦路,该地位于区域中心,虽然该区域交通流量不大,但由于道路穿插于小区之间,路口区域内存在许多随意停放的车辆,同时有绿化带分隔机动车道和非机动车道。车辆在路口右转弯时,会受到随意停放车辆造成的视野盲区,如图 2-2(a)所示,与交叉车道的机动车,非机动车或者行人存在冲突风险。机动车在右转弯时,视野会被绿化带遮挡,导致因视野不清晰而引发与非机动车或行人的碰撞事故,如图 2-2(b)所示。



图2-2 城市无信号交叉路口图

根据对上述无信号交叉路口特点的提取,并结合相关文献研究,可以对城市道路无信号交叉路口的主要特点进行分类总结如下:

- ① 道路通常为双向两车道。
- ② 交叉路口周围受车辆及建筑物的遮挡,视野范围有限。
- ③ 道路多为平面交叉路口,较少出现坡度。
- ④ 交叉路口处的车辆行驶速度通常较低。
- ⑤ 城市交叉路口的道路表面多数使用混凝土或沥青材料铺设。

2.1.2 乡镇无信号交叉路口类型与特征

在中国，除了一系列连接城镇与乡村的道路网络外，还有大量的交通路线，包括国家级、省级以及县级道路，通往各主要城市和社区^[60]。这些道路通常穿过多个村庄和小镇，并通过与主干道的连接，构成了乡镇地区的无信号交叉路网。以马鞍山市含山县清溪镇的乡村路口为例，该公路为 T 形路口，路面大多为柏油路面，部分交叉路口的路面则为铺设沙土的道路或灰渣捣实的路面。该路口设有凸透镜，但已损坏，路口安全问题仍然需要解决，中国还有很多类似交叉路口，如图 2-3 所示。



图2-3 乡镇无信号交叉路口图

乡镇公路交叉路口的特点如下^[61]：

- ① 主干道的车道宽广，车流量较大，而支路则较为狭窄，车流量较少。
- ② 交叉路口附近有树木和广告牌等障碍物，造成了视野受阻。
- ③ 乡镇交叉路口的路面类型大多为沙土路面或柏油马路。
- ④ 主路上的车辆速度行驶较快，而支路上的车辆行驶速度较慢。
- ⑥ 主路上的车辆主要为机动车，而支路上的车辆则包含机动车与农用车辆。

表2-2 城区与乡镇交叉路口对比

	城市交叉路口	乡镇交叉路口
交通流量	较大，高峰时段交通压力大。	较小，交通流量较低。
路口设计	多为立体交叉或大型交叉口。	多为平面交叉，车道较少。
交通设施	多有交通信号灯，设施完备。	较少设施，信号灯少。

续表2-2 城区与乡镇交叉路口对比

	城区交叉路口	乡镇交叉路口
交通法规执行	执法严格，交通秩序较规范。	执法宽松，部分地方有交通乱象。
车辆种类	机动车，非机动车，行人等。	农用车和小轿车为主，速度较慢。
环境复杂性	环境复杂，集商业区、办公区和住宅区于一体。	周围环境多为农业用地，住宅区较少，商业和人口密度较低。

2.2 交叉路口冲突分类

（1）交叉路口的交通参与者中，冲突对象可分为机动车与机动车、机动车与非机动车、机动车与行人、机动车与障碍物，对象之间皆有冲突风险，如表 2-3。

表2-3 交叉路口的冲突对象

冲突对象	冲突类型
机动车与机动车	追尾碰撞、侧面碰撞、并线冲突、转弯冲突、直行冲突。
机动车与非机动车	非机动车道侵入冲突、超速冲突、碰撞事故。
机动车与行人	行人横穿马路、行人盲区冲突如“鬼探头”。
机动车与障碍物	撞击路缘石、围挡、建筑物、交通设施。

（2）交叉路口环境中可能造成盲区的障碍物可分为动态和静态的物体，树木、房屋、停车的车辆等，如表 2-4。

表2-4 交叉路口的障碍物类别

障碍物类别	冲突类型	描述
树木	视线遮挡冲突	大树或灌木遮挡视线，司机在接近交叉路口时无法清楚看到其他车辆或行人，容易发生碰撞。
建筑物/房屋	视线遮挡冲突、侧面碰撞	建筑物靠近路口，限制了司机的视线范围，容易导致与其他车辆的侧面碰撞，特别是在转弯时。
停车车辆	车辆变道冲突、侧面碰撞、追尾碰撞	停放在交叉路口附近的车辆影响了正常行驶的车道，可能导致司机判断失误，发生变道或追尾。
行人/非机动车	行人冲突、非机动车道侵入冲突	当行人或非机动车在没有人行道的交叉路口通行时，容易引发与机动车的碰撞事故。
施工障碍物	视线遮挡、变道冲突、施工期间事故	施工区域中设置的围挡或障碍物可能妨碍交通流畅，导致司机误判断，发生刮擦或碰撞事故。

（3）按行驶轨迹分类

在车辆通过十字路口时，由于转向方式的差异，会形成不同的行驶路径。因车辆行进方向和驾驶员操作差异，可能引发多种交通冲突，主要包括交叉冲突、合流冲突和对向冲突^[62]，如图 2-4。

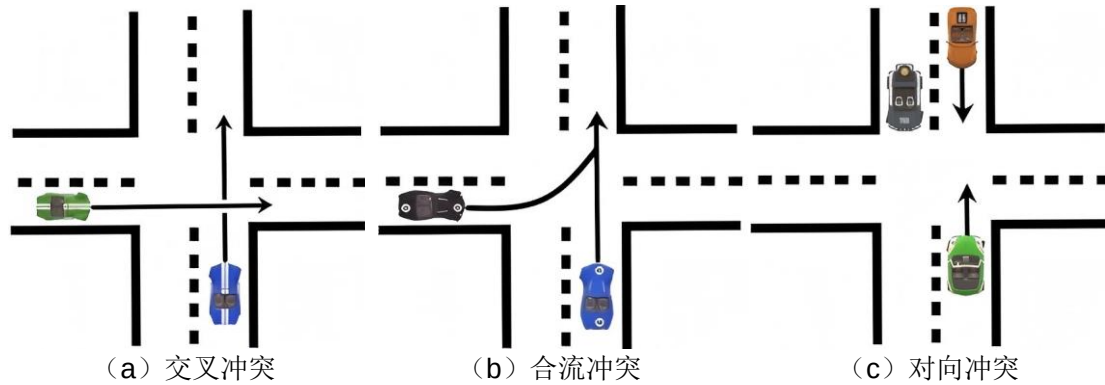


图2-4 交叉路口冲突分类图

2.3 交叉路口盲区冲突原因

交叉路口的视线阻挡是交通事故的重要诱因之一，尤其是在缺乏信号灯管理或交通环境较为复杂的路口^[63]。以下是这些盲点冲突的主要原因分类：

（1）视野受限

周边的建筑物、广告牌和树木等遮挡物可能会妨碍驾驶员的视线，导致无法及时发现其他车辆或行人；大型车辆（如货车、公交车）在路口内的遮挡作用，使得小型车辆或行人处于盲区中，增加了冲突的风险；恶劣天气条件，如雨、雾、雪或强光反射，也会显著限制驾驶员的视野，进一步加大交通事故的发生可能。

（2）驾驶员注意力不足

交通事故的发生往往与驾驶员的操作密切相关。例如，驾驶员未能按照规定全面观察路口的其他来车方向，导致判断失误；注意力分散也是一个重要因素，驾驶员可能因为使用手机、与乘客交谈或其他干扰因素而未能集中注意力；当驾驶员以较高速度行驶时，由于反应时间不足，他们可能忽略盲点，从而增加了发生冲突的风险。

（3）车辆结构盲区

车辆本身不可避免的设计缺陷，如 A 柱和后视镜的盲区，往往会遮挡驾驶员的视线，增加盲点风险；若驾驶员未能正确调整后视镜，也会导致部分区域处

于盲点范围，从而影响驾驶员的判断和反应能力。

（4）交通流量复杂

混合交通流，指非机动车、行人、摩托车等不同交通参与者混杂在一起，这增加了盲点冲突的可能性。同时，交叉车流不明确也是一个问题，缺乏明确的优先通行权标识或信号灯，容易导致车辆互相遮挡，从而发生冲突。

（5）不良路况

没有设置清晰的交通标志或车道标线容易导致驾驶员误判；路口设计不合理，如急转弯、狭窄路段或坡道口，则容易形成视野盲点；而夜间道路照明不足使得驾驶员在光线昏暗的情况下，难以及时发现潜在的冲突风险。

（6）其他原因

行人和非机动车主体的不规范行为，以及车辆保养不到位，都可能提升交通事故的发生几率。行人、自行车、电动车等若在路口突然闯入或横穿马路，很容易处于驾驶员视线盲区，引发事故风险。

2.4 交叉路口盲区冲突的解决措施

为有效解决交叉路口的盲点冲突问题，可以从技术、设计和管理三个方面进行综合改进：

（1）技术手段改进

盲点监测系统（BSD）通过传感器和摄像头实时监测车辆周围的盲区，并向驾驶员发出警告，如图 2-5 所示。然而，该系统的普及率较低，并非所有车辆都配备此技术。在雨雪天气或能见度较低的环境中，系统的监测效果可能会降低。驾驶员过度依赖技术也可能导致判断失误，从而产生松懈的风险。



图 2-5 BSD 盲点监测示意图

预碰撞系统(PCS)通过雷达或激光探测监测车辆与其他交通参与者的距离,预测碰撞风险,并在必要时主动采取制动或发出警报,如图 2-6 所示。然而,该系统的成本较高,可能难以在经济型车辆中普及。此外,在复杂路况下,系统可能会误判或漏判,尤其是在非机动车突然出现的情况下。



图 2-6 PCS 监测示意图

360°全景影像系统能够实时呈现车辆周围环境的画面,帮助驾驶员更好地观察盲区,如图 2-7 所示。然而,该系统需要驾驶员时刻关注屏幕,可能会分散其注意力。此外,在视线被遮挡或遇到恶劣天气时,影像的清晰度可能会受到影响。



图 2-7 360°全景影像系统示意图

(2) 道路设计优化

改善路口几何设计可以通过清理路口周围的障碍物(如树木、广告牌、建筑物等)来增大视野范围,从而确保驾驶员和行人能够更清楚地观察交叉路口的交通情况。然而,这种方法可能受到城市空间不足的限制,在人口密集地区还可能

面临较高的建筑或设施拆迁成本。

优化标志和标线可以通过在无信号灯路口增加明显的地面标识，如“减速让行”或“停车让行”标志，帮助驾驶员提前判断通行优先权。然而，这些标识可能因积雪、雨水或道路磨损而被覆盖，影响其效果，在高流量路口，标识的提醒作用也可能被驾驶员忽视。

安装高反光交通标志可以在夜间或低能见度条件下提高驾驶员对路口情况的辨识度。然而，这种标志在白天光线充足时效果有限，而且主要改善了驾驶员的视觉感知，对非机动车和行人提供的帮助较少。

在视线受限的路段安装凸面镜，可以帮助驾驶员扩大观察范围，减少盲区。然而，凸面镜容易损坏且视角受限，角度不当时容易形成新的视觉盲区；在夜间或恶劣天气条件下（如雨雾），镜面的效果会显著减弱，影响其实际作用。

（3）驾驶行为规范

通过无信号灯的交叉路口前设置减速带，可以强制车辆减速，提高通行安全性。然而，减速带可能会降低车辆的通行效率，尤其在高峰时段可能造成交通的拥堵，而且长期反复经过减速带可能对车辆的底盘和悬架系统造成一定的损害。

在交叉路口合理设置限速标志，可以有效提醒驾驶员减速行驶，但其效果可能存在一定局限性，部分驾驶员可能不会遵守，在夜间或恶劣天气时，限速标志的可见性会降低，影响其实际效果。

本文研究的车路协同系统(V2X)是一种智能交通技术,通过车辆(Vehicle)与路侧单元(Roadside Units, RSUs)的通信,实现实时信息共享。这种技术在解决交叉路口盲点冲突问题方面具有显著优势, 以下是其优点的详细分析^[64]:

（1）实时信息共享，减少盲点事故

V2X 系统通过路侧单元实时监测路口内的车辆、行人和非机动车的动态，及时发现盲区内的潜在危险。例如，在盲区内有行人或非机动车靠近时，该系统会向驾驶员发出警报提示。同时，系统还能根据车辆速度和方向等信息判断潜在的碰撞风险，并通过声音或视觉信号提前提醒驾驶员采取避让措施，增强安全保障。

（2）支持多模式协作，优化交通流

V2X 系统通过智能信号灯控制，与路口信号灯联动动态调整信号灯时长，优化不同方向的车流通行效率，有效减少因盲区导致的冲突。与此同时，车辆间通

信（V2V）可实时共享前方车辆的减速、紧急刹车或转弯意图，大幅降低事故风险。此外，车与行人通信（V2P）通过监测行人携带的手机或其他终端设备，及时向车辆发出提醒，确保驾驶员关注盲区内的行人动态，从而进一步降低冲突概率，提升整体交通安全性。

（3）提高交通安全与效率

V2X 系统通过精准的盲区检测和风险预警，能够显著降低交叉路口的碰撞事故，尤其是在视线受限或复杂的路口环境中。对于高事故率的路段，V2X 系统能够有效提升通行安全性。同时，系统优化信号灯控制和车流分配，减少因盲区冲突所导致的刹车、减速及车辆滞留，从而提高路口的通行效率，缓解交通拥堵。

（4）环保效益

通过优化交通流量，减少刹车和怠速时间，V2X 技术能够提高车辆的行驶效率，从而有效降低油耗和排放。

2.5 本章小结

本章主要探讨了无信号交叉路口的交通运行规则及其特点，首先，对城市无信号交叉路口进行分类，可以分为平面交叉路口和立体交叉路口两大类型。讨论乡镇交叉路口的特点时强调主路与支路之间的交通流量差异及可能的安全隐患。其次，详细讨论了交叉路口的交通冲突类型，按冲突物种类、障碍物类别以及行驶轨迹分类。针对盲区冲突原因的分析，提出了一系列技术、设计及管理层面的改进措施，如使用辅助驾驶技术、改进道路设计、优化交通标志等。本章还介绍了车路协同系统（V2X）在解决交叉路口盲点冲突中的应用。V2X 系统通过实时信息共享和多模式协作，提高驾驶员的决策效率，优化交通流，提升交通安全与效率。

第3章 基于改进YOLOv5s的交叉路口路端检测算法研究

现有的目标检测算法虽然在一定程度上能够满足基本需求,但在复杂路况下^[65],尤其是在多目标、多尺度和目标遮挡等挑战面前,仍然存在一定的局限性。YOLOv5 (You Only Look Once version 5)^[66]作为一款高效的物体检测模型,在速度和精度之间找到了良好的平衡点,使之适用于多种目标检测任务中。然而,由于其在小目标检测和远距离目标检测上的表现仍有所欠缺,因此,在交叉路口这种动态复杂的道路环境中,YOLOv5 的原始模型在高精度目标检测方面尚未完全达到理想效果。

本章基于改进的 YOLOv5s 模型,设计一种交叉路口的路端目标检测与跟踪算法,通过深入优化目标检测的精度,并专门针对道路中多个小目标检测进行加强,以此来显著提升其在复杂交叉路口场景下的检测与跟踪效果。通过替换损失函数为 EIou (Enhanced Intersection over Union)、引入 YOLOv8 中的 C2f 特征融合模块,以及采用更优的目标检测框匹配算法 OTA (Optimal Transport Assignment),改进后的算法不仅提高了模型的精度,还扩展了其适用范围,使其能够更好地应对多目标的检测任务。实验还结合单目相机测距算法,使得系统能够实时评估目标与摄像头的距离,检测的信息实时反映在车端上,从而为驾驶员提供及时的危险预警。

3.1 YOLOv5 目标检测算法概述

3.1.1 算法导论

YOLOv5(You Only Look Once version 5) 是一种能够直接从原始图像数据中实现对目标的检测和定位的端到端式深度学习模型,该方法利用卷积神经网络对图像中的对象进行特征学习,采用多尺度预测与栅格划分相结合的方法对目标进行检测与定位。YOLOv5 的优点在于其高速运行,并且能够在不同图像分辨率下表现出色。这种特性使得它在处理多种图像输入时更加高效和灵活。它是 YOLO(You Only Look Once)算法中鲁棒性较好且普遍适用的版本,基于 YOLOv4,在速度和准确性方面都有很大的提高。

3.1.2 算法原理

在 YOLOv5 的官方代码库中，预置了四种规模不同的目标检测模型，具体包括 YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l 和 YOLOv5x。这四种模型彼此之间的主要差异在于模型的深度和宽度参数，而它们的网络结构则保持一致。在 YOLOv5 系列的各项指标比较中，YOLOv5s 拥有最浅的网络结构和最小的特征图。其它三个都是在这个基础上进一步深化和拓宽的，所以其具有特有的配置优势。因此，本研究工作是基于 YOLOv5s 模型为基础的。YOLOv5 的整体架构包括从输入端开始到输出端结束的几个关键部分，依次是：输入端（Input）、骨干网络（Backbone）、颈部网络（Neck）以及头部网络（Head）：

（1）在数据输入阶段，对图像数据进行多方面的增强处理^[67]，随后执行自适应锚框计算和自适应定标操作，从而实现数据的多样化和锚框的最优化配置，共同提升整体检测效率。

（2）骨干网络（BackBone）主要用于特征提取，包括 Focus 结构、CSP^[68] 结构：① Focus 结构，即对原来的图像进行分片运算，得到特征映射，然后进行卷积运算，得到特征图。②在 YOLOv5 网络中，引入了两种 CSP 结构。以 YOLOv5s 为例，CSP1_X 模块应用于主干网络 Backbone，CSP2_X 模块则部署在颈部网络 Neck。通过这种双重 CSP 结构设计，不仅提升了网络的学习能力，还有效降低了计算瓶颈和存储消耗，进一步优化模型性能。

（3）颈部网络（Neck）为进一步提升特征抽取性能，提出了 FPN+ PAN 相结合的方法，处理并融合多尺度的特征信息。

（4）输出部分（Head），也就是利用 3 种不同的输出 Head 用于网络的输出，进行多尺度预测。

3.2 数据集的建立

3.2.1 准备数据集

实验开始阶段采用 TT100K 交通标志数据集，发现目标较少且清晰度较低，于是针对自动驾驶道路的多目标场景，自行建立新的数据集；数据集共 2998 张图片，九个类别，分别为小汽车（car）、出租车（taxi）、卡车（truck），公交车（bus）、交通指示牌（sign）、信号灯（light）、行人（people）、骑行者（rider）、面包车（microbus），如图 3-1，以上类别包含了自动驾驶道路场景中的大部分目标，可以很好的应用于实际。



图3-1 数据集目标分类图

3.2.2 数据集的标注

采用 Labelimg 开源数据标注工具，对整理好的 2998 张数据集进行逐张标注，标注完的文件为 xml 格式，在进行 YOLOv5 的训练之前，需要先将标注文件从 xml 格式转换为 txt 格式；通过执行相应的转换脚本，将 xml 文件转化为 YOLOv5 所支持的 txt 格式。随后，处理后的数据集被划分为训练集（包含 2098 张图片）和验证集（包含 900 张图片）。

3.2.3 数据集的增强

在深度学习领域，样本数量的增加通常会提升模型的性能表现。然而，实际应用中常常面临两个主要挑战：样本数目不够、样本质量差。对于这两个难题，通常的做法是：尽可能获得大量高质量的数据；在现有数据基础上，通过数据增强等技术进行扩展和优化。这种数据增强技术在一定程度上能够提升模型的鲁棒性和泛化能力，进而增强模型的整体性能表现。

由于道路环境的复杂，所要检测的对象也会包含多种场景，考虑到物体在图像中可能出现的姿态、位置和尺寸等变化，因此采用几何变换的数据增强方法来增加训练样本多样性。在这种情况下，通过对输入图像实施剪裁、尺度调整、旋转、镜像反转等几何变换操作，可以有效地扩展训练数据量。这样做可以在测试时获得更加精确的模型。

数据增强前共 2998 张图片，其中训练集（2098 张图片），验证集（900 张

图片)；数据增强后共 8612 张图片，其中训练集 (5924 张图片)，验证集 (2688 张图片)。

3.3 YOLOv5 改进方案

3.3.1 替换YOLOv5损失函数

YOLOv5 中可自主采用的损失函数有 IoU：目标框的平均位置和最小值的差；DIoU：通过计算边界框与其周围的各个像素点之间的欧氏距离，并取其平均值来衡量。CIoU 是 DIoU 的改进版，它在 DIoU (目标框回归损失) 的基础上加入长宽比的计算，该方法提高了目标框的收敛性，避免 IoU 和 GIoU 在训练过程中可能出现的不稳定或发散问题。CIoU Loss 公式：

$$L_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v \quad (3-1)$$

式中，b—预测框的中心位置；

b^{gt} —真实框的中心位置；

ρ —两中心点之间的欧氏距离；

c—包围预测框和真实框的最小闭合区域；

α —权重函数；

v—预测框和真实框的宽高比差异。

CIoU 损失函数综合考虑了重叠区域的比例、目标中心点之间的距离以及高宽比的差异等因素。然而，由于其公式中的 v 值所体现的是长宽比的不同，而非宽度和高度之间的真正差别，因此，在实际应用中往往会妨碍模型的高效优化。为此，一些学者基于 CIoU，对长宽比进行拆分，提出了 EIoU Loss，并引入焦点对焦质量的锚定框架。EIoU 损失函数公式如下：

$$\begin{aligned} L_{EIoU} &= L_{IoU} + L_{dis} + L_{asp} \\ &= 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \frac{\rho^2(w, w^{gt})}{C_w^2} + \frac{\rho^2(h, h^{gt})}{C_h^2} \end{aligned} \quad (3-2)$$

式中， C_w^2 —预测框可视最小矩形的宽度；

C_h^2 —GT 框可视最小矩形的高度；

L_{EIoU} —预测框与实际框之间的交叠损失；

L_{dis} —衡量预测框与实际框中心点之间的距离损失；

L_{asp} —预测框与实际框在宽度和高度比例上的差异损失。

EIoU 前两部分损失沿用 CIoU 中的方法，通过直接最小化预测框与实际框在宽度和高度上的差异，加速算法的收敛过程。

3.3.2 改进YOLOv5特征融合模块

通过实验发现，在数据集多次训练后的结果中，小目标的精度提升不明显，为了提高小目标的精度，采用 YOLOv8 中的 C2f 融合模块取代 YOLOv5 的 C3 模块，并根据不同尺度的模型调整各自的通道数量。

针对 C3 模块，设计了 C3 Block，该模块借鉴了 CSPNet 的分流理念，并融合了残差结构的设计思想。在 CSP 主分支中，采用 BottleNeck 模块作为梯度模块，且模块的堆叠数量由参数 n 控制。如图 3-2。

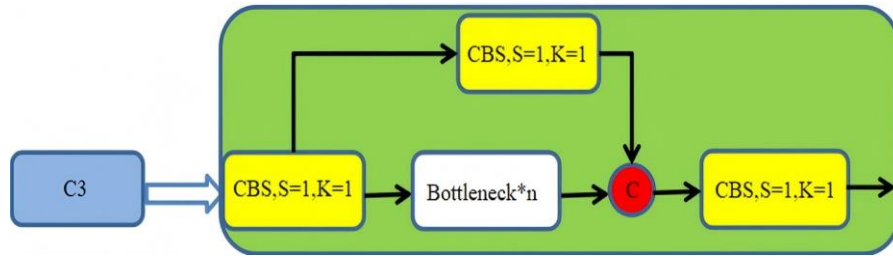


图3-2 C3模块结构图

C2f 模块是 YOLOv8 中引入的一种新的特征融合模块。该算法通过对各个层次上的特征图进行卷积，上采样，通道连接等运算，使得模型可以同时获得更多的上下文信息和高分辨率信息。这种特征融合方式可以促进模型对小物体、低对比度目标的检测，提高模型的检测精度和泛化能力。如图 3-3。

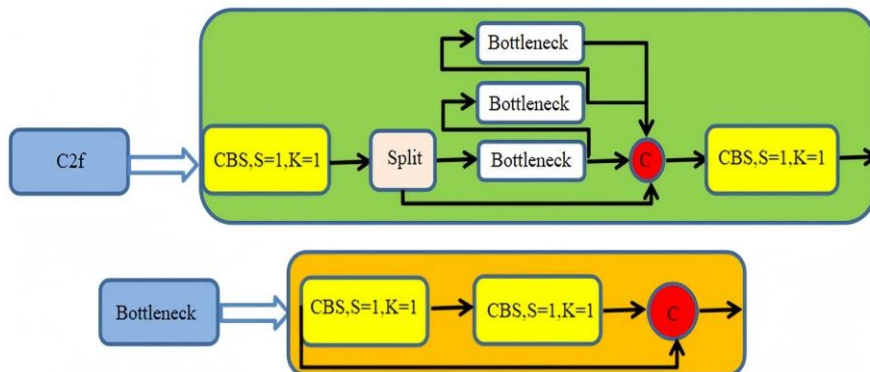


图3-3 C2f模块结构图

C2f 模块参考了 C3 和 ELAN 的设计理念，旨在使 YOLOv8 在保持轻量化的同时，获取更为丰富的梯度流信息。下面是改进前与改进后的网络结构图对比：

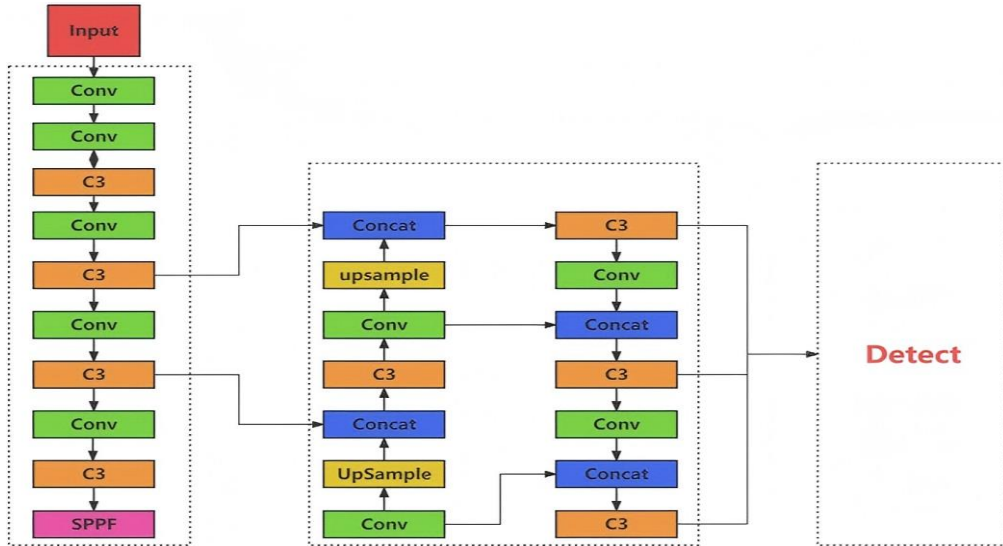


图3-4 原模型网络结构图

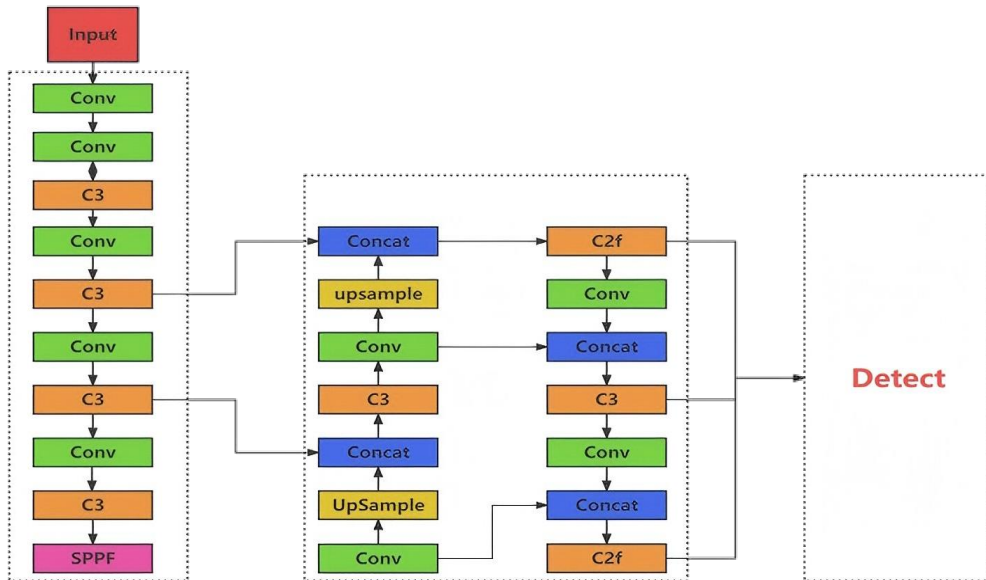


图3-5 改进模型网络结构图

3.3.3 采用更优的目标检测框架 OTA

在传统的物体检测方法中，一般都是使用匈牙利算法来对物体和检测框进行匹配。该方法虽可求出最佳匹配，但因其运算量较大，常造成检测速度较慢。

由于采用了一种新的距离度量方法，OTA 算法^[69]能够更快地完成对检测框的匹配，而无需额外的计算量。具体而言，OTA 算法将目标与检测框之间的距离转换为一个概率分布，然后通过最小化两者的 Wasserstein 距离的方法进行匹配。这一方法通过减少 Wasserstein 距离的计算量，从而提升检测速度，同时降低了对设备的需求。

3.4 实验训练验证

3.4.1 训练结果分析

本实验过程采用的 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU @ 2.30GHz ,4GB 显存，Windows 10，64 位操作系统，1TB 固态硬盘，编程语言为 python，基于 Pytorch 深度学习框架，YOLOv5 的版本为 6.1，训练权重为官方 YOLOv5s.pt，数据集中图像的输入尺寸为 640×640，批处理张数设置为 8，训练轮数均为 300 轮。由于设备条件不允许用 GPU 训练，故本实验均采用 CPU 进行训练。

实验开始前，合适的超参数设置能根据设备条件达到更好的实验效果。YOLOv5 官方提供的三个超参数设置为 hyp.scratch-low.yaml、hyp.scratch-med.yaml、hyp.scratch-high.yaml，考虑到设备条件限制与数据集的大小，选用 hyp.scratch-low.yaml 超参数文件用于本实验，具体设置如表 3-1。

表3-1 超参数文件设置

超参数					
初始学习率	0.01	预热学习动量	0.8	置信度损失权重	1.0
最终学习率	0.01	预热初始学习率	0.1	损失正样本权重	1.0
参数动量	0.937	目标边框系数	0.05	损失阈值	0.2
权重衰减系数	0.0005	分类损失系数	0.5	翻转概率	0.5
预热学习率	3.0	正样本权重	1.0		

然而实验目标在提高精度的同时，要保证参数量的变化率，参数增加的太多带来好的实验效果并不实用，也会给设备带来更多的运行负担，可以认定为改进无效。所以在改进模型结构提高精度的基础上，同时关注了原模型与改进后模型的参数量对比，如表 3-2。

表3-2 改进前后模型参数对比

	层数	参数	浮点运算数
改进前	270	7043902	16.0
改进后	266	7699262	16.5

YOLOv5s 官方参数量约为 720 万，由表 3-2 信息可知，模型改进前后参数差距不大，最终推理速度相近，由此可以得到该改进方法可以在保证运算速度和参数量的同时提高精度。

对原模型与改进后模型采用相同的环境，设备条件以及参数设置分别训练 300 轮，观察训练结果如下图所示。

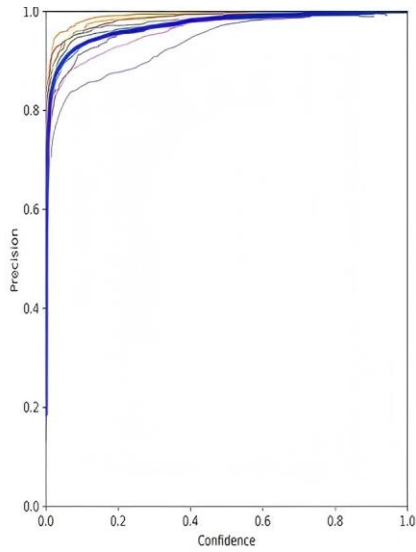


图 3-6 原模型训练精度图

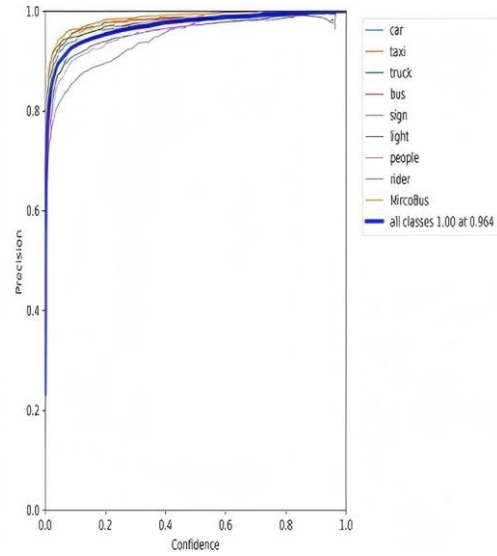


图 3-7 改进模型训练精度图

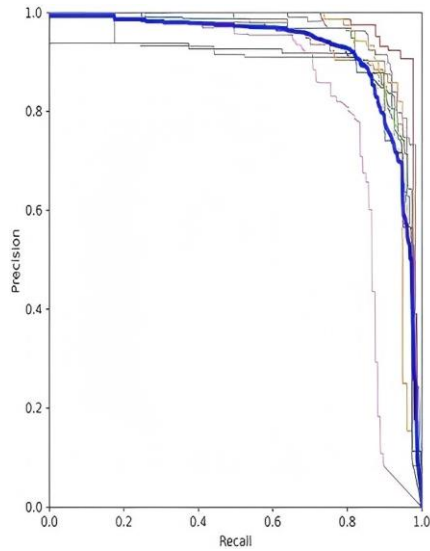


图3-8 原模型P-R曲线图

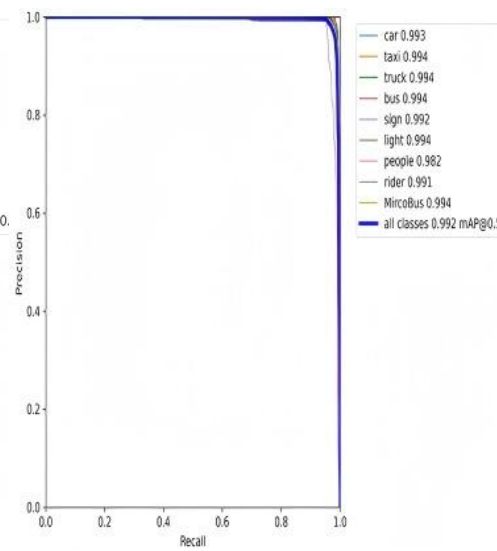


图3-9 改进模型P-R曲线图

由图3-6和图3-7可以看出改进后模型比原模型整体精度提高2%；由图3-8和图3-9可以看出原模型和改进后模型的P-R曲线均能很好的包裹住矩形框，改进后的模型各目标训练精度与召回率的概率均达到98%以上。

改进后模型的训练结果，在训练过程中，损失函数得到很好的收敛，精度，召回率与 map 值均稳步上升然后趋于平稳，如图 3-10 所示。

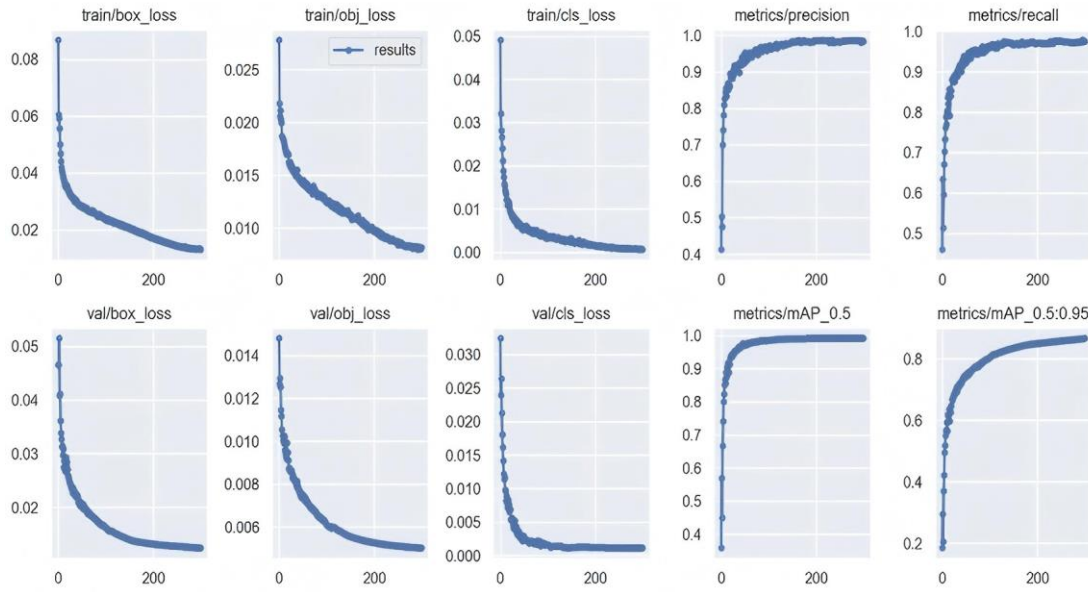


图3-10 改进模型训练结果图

由上述实验结果的比较可知，改进后的模型在精度方面有所提高，并且在召回正样本方面与原模型相近，在训练过程中曲线平稳且达到很高的精度，由此预测可以在实际场景中达到很好的检测效果。

3.4.2 实际预测对比

在原模型与改进模型训练结束后，分别将得到的权重 `best.pt` 用来预测，用于模拟实际道路场景中的目标检测。首先准备好符合自动驾驶第一视角场景的道路多目标图和视频，然后将 `best.pt` 文件路径放在 `detect.py` 文件中，保证其余参数设置的一致性，得到以下预测结果。

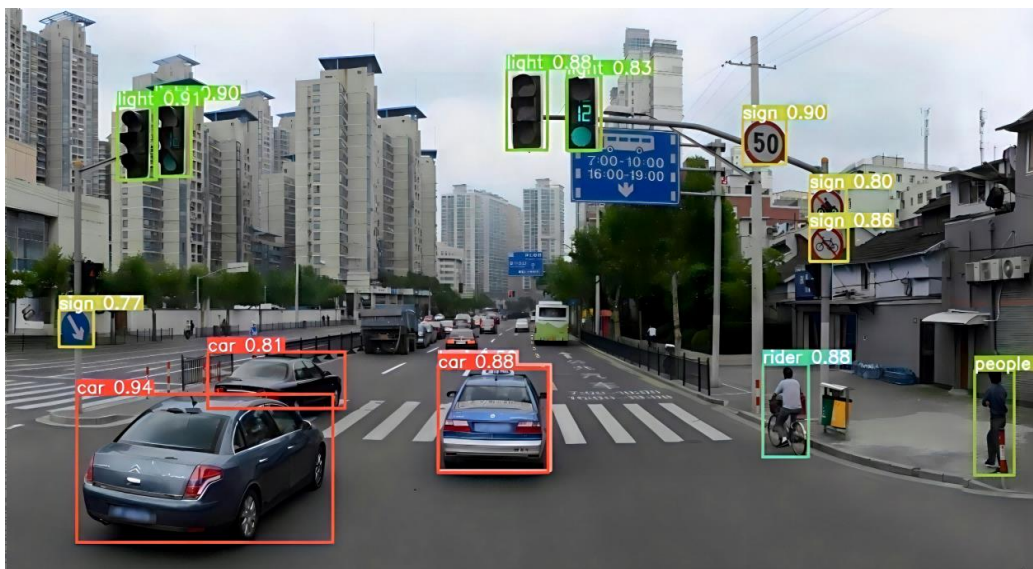


图3-11 原模型预测结果图

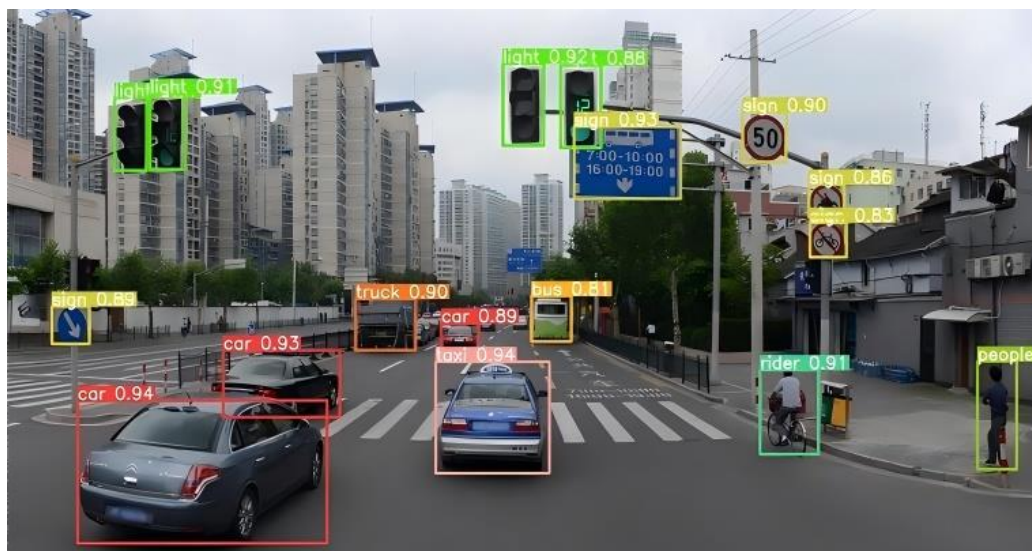


图3-12 改进模型预测结果图

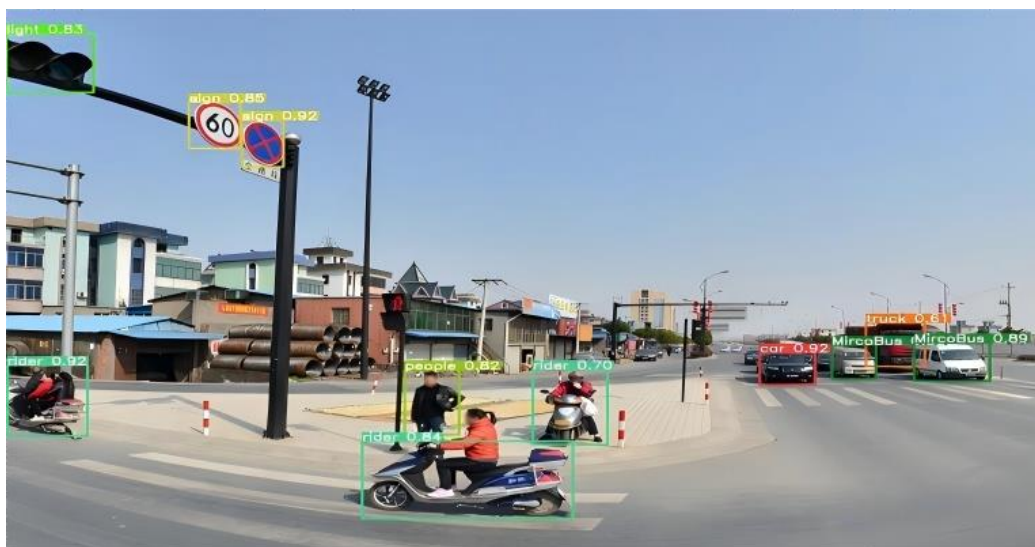


图3-13 原模型预测结果图



图3-14 改进模型预测结果图

由上图可知，在道路场景目标检测中，改进后的模型比原模型推理效果更好，其中改进模型的检测目标更丰富全面，精度更高，在日常实际中更加有效。

为了验证所设计的算法在某些方面优于传统算法。更有优势，在实验环境相同的情况下，分别采用 Faster R-cnn 算法^[70]和 YOLOv3 算法^[71]对相同的数据集进行训练，消融实验结果对比如表 3-3 所示。

表3-3 消融实验结果对比

算法名称	P/%	mAP@0.5/%	GFLOPs
Faster R-cnn	82.6	86.9	183.4
YOLOv3	86.1	89.2	154.7
YOLOv5	94.4	92.0	16.0
改进YOLOv5	96.4	99.2	16.5

由表 3-3 可知，改进 YOLOv5 算法比原 YOLOv5 算法精度提高 2%，mAP@0.5 提高 7.2%，浮点运算数提高 0.5；改进 YOLOv5 算法相较于传统的 Faster R-cnn 算法和 YOLOv3 算法均有大幅提高，可以看出改进的算法鲁棒性更高，有着更大优势。

3.5 加入单目相机测距功能

为了使实验更加真实，更加符合现实，在改进模型的基础上加入单目相机的测距算法，以模拟交叉路口道路目标检测时的路端第一视角，从而能够主观的对所监测路况进行分析，帮助驾驶员对危险的道路目标及时做出反应。



图3-15 单目相机

表3-4 相机配置参数

配置	参数
传感器类型	1/2.7" Progressive Scan CMOS
镜头尺寸接口	2.8/4/6 mm： M12 8 mm： M16

续表3-4 相机配置参数

配置	参数
最大光圈数	F1.0
景深范围	2.8 mm: 1.7 m~∞
补光距离	最远可达 30 m
最大图像尺寸	1920 × 1080
日夜转换模式	白天夜晚自动定时切换

在保持目标识别精度的同时，实现对检测目标的距离测量；通过推理框的颜色（红色代表危险，绿色代表安全）给驾驶员提示危险信息。单目相机测距公式：

$$D = \frac{F \cdot W}{P} \quad (3-3)$$

式中，D—目标到摄像机的距离；

F—摄像机焦距；

W—目标的宽度或高度；

P—目标在图像中所占的像素。

首先在交叉路口角度对实时路况拍摄一段视频，采用张正友标定法^[72]，对提前拍摄的书本视频获取相机的焦距，接着调整焦距使距离接近拍摄时与书本的距离，如图 3-16 所示。最后将相机焦距写进测距代码 `distance.py` 文件里并对路况视频进行预测。

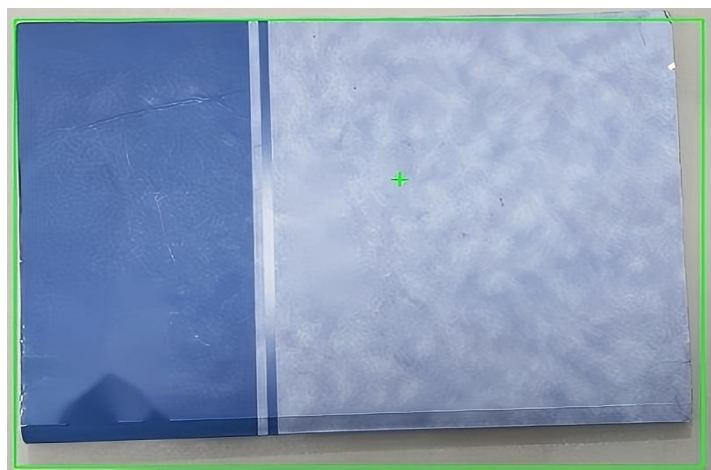


图3-16 标定书本示意图

如图 3-17，是在预测结束的路况视频中截取的某一帧，在保证改进模型精度的同时，增加了单目相机第一视角与前方目标的距离实时检测，并对距离三米以内的目标设置为红色目标框，驾驶员通过实时的检测信息判断路端设备与其他道路目标的距离，从而帮助驾驶员及时的对危险做出反应。

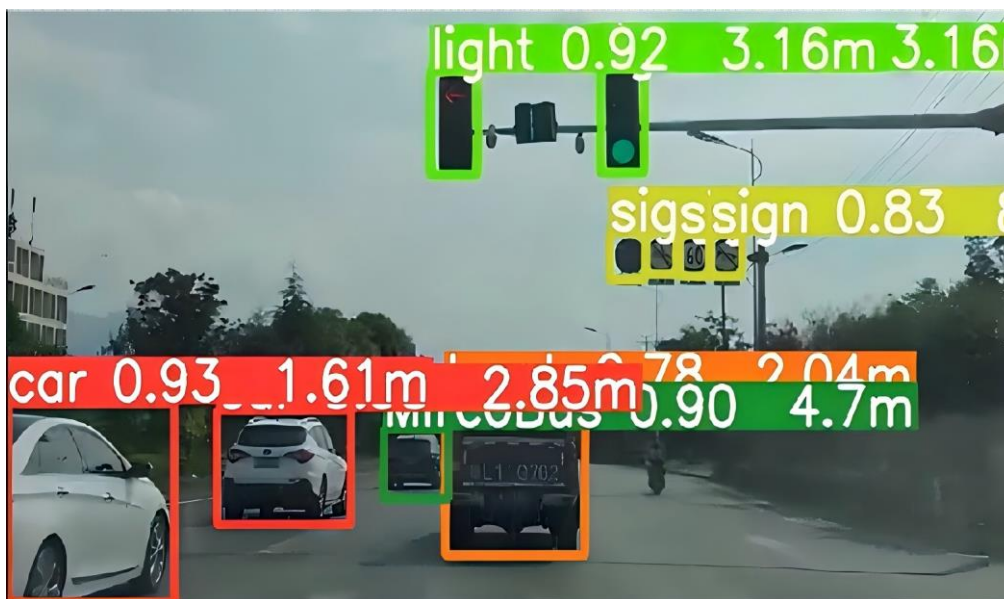


图3-17 道路多目标识别与跟踪图

3.6 本章小结

本章从 YOLOv5 目标检测算法的概述开始，详细介绍了 YOLOv5 的网络结构与工作原理，在 YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l 和 YOLOv5x 四种算法模型比较中选择了 YOLOv5s 模型，并重点探讨数据集的构建与处理过程，涵盖数据标注、数据增强技术及数据格式转换等关键步骤。为提高模型的检测精度，提出针对 YOLOv5 的改进方案，包括替换损失函数、优化特征融合模块、采用更优的目标检测框架（OTA 算法）三种方法。

实验部分详细展示了改进 YOLOv5s 模型的训练与验证过程。通过与原始 YOLOv5s 模型的对比分析，改进后的模型在检测精度和召回率等指标上取得了明显提升，同时保持了较低的计算负担。此外，本章还对改进模型在实际道路场景中的应用性能进行进一步验证，对比传统算法（如 Faster R-CNN 和 YOLOv3），改进后的 YOLOv5s 模型在检测精度和运行效率方面表现更加出色，为智能交通系统中的安全监控和自动驾驶提供了强有力的支持^[73]，为后续章节的研究奠定基础。

第4章 交叉路口盲区场景仿真与避撞预警算法设计

在现代交通系统中，交叉路口作为最常见的交通设施之一，其安全性直接影响交通事故的发生率。尤其是在没有信号控制的交叉路口，驾驶员的盲区和视距受限，常常是导致事故的关键因素之一。随着自动驾驶技术的不断发展，如何通过智能化手段预警和避免交叉路口的碰撞事故，成为智能交通研究中的重要课题。

本章主要聚焦于交叉路口盲区的仿真构建与避撞预警算法的研究。首先，通过 PreScan 仿真软件，搭建了一个具有典型盲区的交叉路口场景。通过精准模拟不同环境因素对驾驶员视线的影响，能够深入分析在不同场景下可能导致碰撞的关键因素，如车速、驾驶员注意力、天气状况等。接着，本章设计了一种基于该仿真环境的避撞预警算法框架，采用多源数据融合与运动模型，能够识别潜在的碰撞风险并在危险发生前发出准确预警。通过 PreScan 和 Simulink 的协同仿真，设计了车辆与行人的模型，加入 V2X 信号接收模块和 AEB 紧急制动系统，成功实现了对交叉路口盲区场景中横排行人的预警与避撞。

4.1 基于 PreScan 的交叉路口盲区场景搭建

4.1.1 PreScan软件简介

PreScan 是由西门子公司开发的一款功能强大且灵活性高的仿真工具，在汽车工业和交通工程领域得到广泛应用。PreScan 有着高精度仿真，模块化设计，符合行业标准，可扩展性强等多个优势，主要应用领域包括：在 ADAS 和自动驾驶中，仿真各种驾驶场景，以测试传感器和算法的性能；在车路协同（V2X）方面，模拟车辆与路侧单元（RSU）及其他交通参与者之间的通信^[74]，验证 V2X 应用的可靠性；在传感器开发过程中，支持对摄像头、雷达、激光雷达、超声波传感器等多种环境感知设备的仿真；在交通场景研究方面，设计并测试复杂的交通场景，供交通工程和安全研究使用。

鉴于城市和乡村道路的无信号交叉路口有着相似性和独特性，对驾驶员视线产生影响的因素也各不相同，所以在构建模拟道路环境时，需要兼顾到城市道路和乡镇公路的特性。

通过对本文 2.2 和 2.3 节的深度剖析后，需要在仿真环境中进行真实再现，

以便更准确地评估和改善道路安全性能。可以提取影响交通事故发生的关键因素如下：

①车速原因：驾驶员通过无信号交叉路口时未能进行提前减速，导致车速较高，进而发生事故。

②驾驶员原因：由于驾驶员未能在路口仔细观察两侧的车辆，导致无法立即采取紧急行动，从而引发碰撞事故。

③天气和道路环境原因：天气变化会使驾驶员的有效观察视距降低，同时道路附着情况会因为不同道路材质和雨雪天气因素进行变化，影响制动时的理想减速度输出，进而导致碰撞事故的发生。

4.1.2 交叉路口盲区仿真场景搭建

汽车在城市无信号交叉路口的行驶速度通常较低，然而司机的视角会受到障碍物造成的盲区的限制。与此相反，乡镇的交叉路口由于其较高的行车速度和缺乏明显的主次车道区分，使得情况变得复杂。基于上述分析，构建一种具有双侧行车道并设有阻碍驾驶员视线的高层建筑物作为障碍物的新型无红绿灯交叉路口，在路口处设置了高楼，房屋等障碍物，模拟驾驶员在经过类似路口时所碰到的障碍物盲区场景^[75]。

如图 4-1 所示，车辆在由西向东行驶，在交叉路口向北转弯，路口处受到高楼障碍物的视野阻挡产生了盲区，3D 可视化路口视图详细展示了布局细节。



(a) 城区交叉路口

(b) 乡镇交叉路口

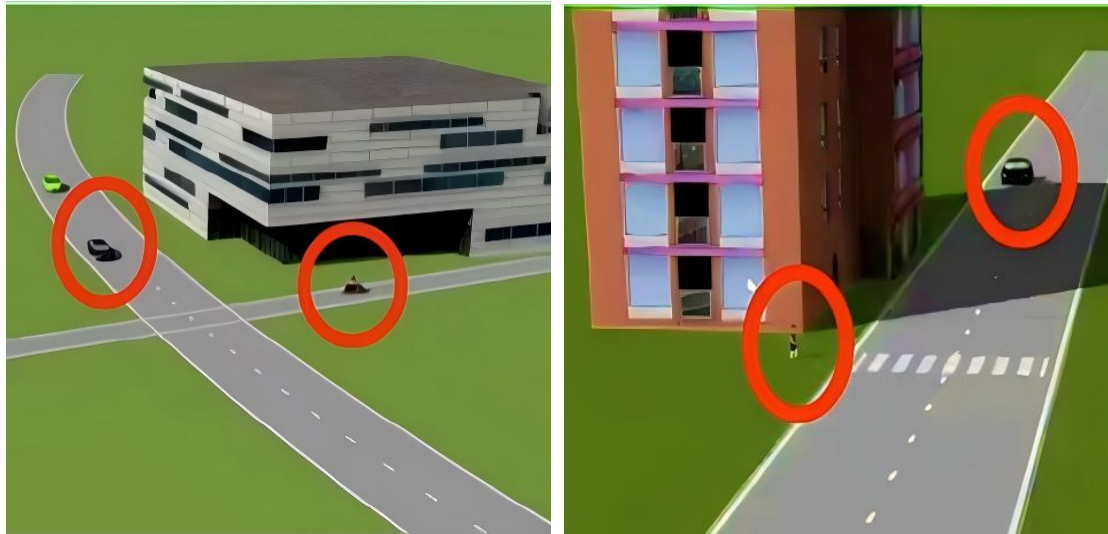
图4-1 交叉路口3D可视化盲区示意图

具体参数包括:

①东西方向为主道路,道路总长为 500 米,宽度为 12 米的双向四车道,由西向东 320 米处设有无信号交叉路口,道路两旁的人行道宽度为 2 米。

②次道路沿南北向布置,总长 360 米,宽度 8 米,为双向四车道道路。距南端 200 米处设置一个无信号交叉路口,道路两侧各有宽 2 米的人行道。

为完善车辆在经过交叉路口可能遇到的盲区场景,增加了非机动车和行人的通过情形,如图 4-2 所示,在有障碍物遮挡场景下,车辆无法及时观察到其他车道的非机动车或行人,极易发生冲突,解决交叉路口的盲区危险冲突迫在眉睫。



(a) 机动车与非机动车冲突

(b) 机动车与行人冲突

图4-2 交叉路口冲突对象示意图

在构建无信号交叉路口的过程中,整合了各种可能影响事故发生的因素,包括道路设计、障碍物类别、冲突对象等,从而为深入研究交叉路口的防碰撞控制算法提供了有力的前提保障^[76]。

4.2 交叉路口的避撞预警算法设计框架及其关键步骤

交叉路口的避撞预警算法是实现智能交通系统的重要组成部分,通过车辆间的数据交互,获取并分析位置、速度等信息,评估安全距离的最小值,判定是否存在碰撞的风险,并对驾驶员发出警报。算法涉及航向角比较、相对宽度计算及最小安全距离的确定,旨在提升道路行车安全^[77]。以下是交叉路口的避撞预警算法设计框架及其关键步骤。

4.2.1 算法设计框架

输入数据包括车辆的状态信息，如速度、位置、加速度、方向和车道信息（通过 GPS、车载传感器或 V2X 通信获取）；行人的位置、移动方向和速度（通过摄像头或传感器感知）；以及交通基础设施的信息，如信号灯状态、路口几何结构和车道优先权。

系统将输出不同程度的碰撞风险等级，包括低、中、高三个级别，并通过声音、图像或震动等方式向驾驶员提供预警信息。在自动驾驶场景下，系统还可以直接执行制动或避让操作^[78]。

4.2.2 算法关键步骤

（1）数据融合与预处理：将来自不同传感器和通信模块的多源数据进行融合，以保证数据的统一性和可靠性。通过卡尔曼滤波或粒子滤波等算法对噪声进行处理，从而提升数据的准确性。

（2）路口动态环境建模：首先是车辆运动模型，它通过车辆动力学方程，用于预测车辆未来一段时间的运动轨迹。例如：

匀速模型：

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v \cdot \cos(\theta) \cdot \Delta t \quad (4-1)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta t \quad (4-2)$$

然后是行人运动模型，采用简单的线性模型或基于历史轨迹的机器学习模型预测行人轨迹。最后是冲突点检测，它是利用轨迹交叉点计算潜在碰撞位置。

（3）碰撞风险评估：根据车辆和行人的运动轨迹，评估两者是否会在时间和空间上发生冲突。常用方法包括：

①最小接近时间（TTC, Time to Collision），定义为车辆或行人与潜在冲突点之间的时间间隔。当碰撞时间（TTC）低于设定的阈值时，则存在潜在的碰撞风险。

$$TTC = \frac{d}{v} \quad (4-3)$$

式中，d—当前位置到冲突点的距离；

V—相对速度。

②碰撞避让空间不足（DRAC，即 Deceleration Rate to Avoid Collision）是用于评估是否具备充足的距离和时间以进行有效避让。当所需减速度超过车辆的最

大减速度时，碰撞风险相对较高：

$$DRAC = \frac{v^2}{2d} \quad (4-4)$$

式中， d —当前位置到冲突点的距离；

V —当前速度。

③碰撞概率（Collision Probability, CP），定义为基于轨迹预测，使用统计或机器学习模型计算发生碰撞的概率。

（4）决策与预警：根据风险评估结果，采取相应措施，在低风险时提醒驾驶员注意潜在危险（灯光、声音提示）；中风险时强化警报（声音、图像或方向盘震动）；高风险时自动触发制动或转向避让（在自动驾驶场景中）。

4.2.3 算法运行流程

为了研究 V2X 前端碰撞预警的算法，首先需要设计一套前端碰撞预警算法的运行流程，如图 4-3 所示。

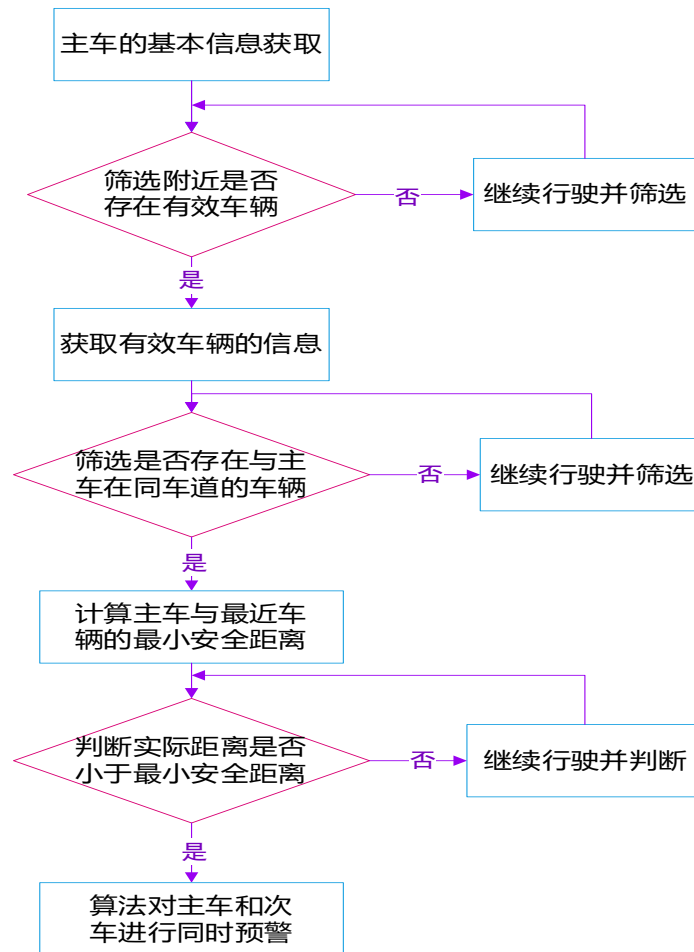


图4-3 前端碰撞预警算法的运行流程图

技术实现要素：

(1) 主车能够采集自身的相关信息，包括位置、航向角和速度等，并通过广播将这些信息传输给周围的其他车辆。

(2) 筛选出附件有效车辆，并获取其他车辆的基本信息。

(3) 判断附件有效车辆的航向角是否与本车相同，同时也要判断出两车的横向距离差(两车距离的相对宽度)。行驶方向相同,相对宽度控制在一定范围内，即可视为在同一车道上。

(4) 筛选出与主车在同一车道的并且距离最近的车辆。

(5) 根据本车基本信息以及有效车辆的基本信息进行最小安全距离的计算，计算流程如图 4-4 所示。



图4-4 最小安全距离计算流程图

这五个阶段所产生的距离总和为最小安全距离。

(6) 比较最小安全车距与两车的实际距离，评估是否满足安全要求。

(7) 满足预警条件，评估两车的相对运动状态和位置关系，发出预警信号。

判断方向角是否为同向可以采取控制两车的航向角差值控制在某一范围内，例如 A 车的航向角为 65 度，B 车的航向角为 70 度，两车的航向角差值的绝对值 ≤ 5 ，则认为这两辆车的航向角相同，即行驶方向相同。

如何计算两车的相对宽度，前提是两辆车的航向角相同，如图 4-5 所示。

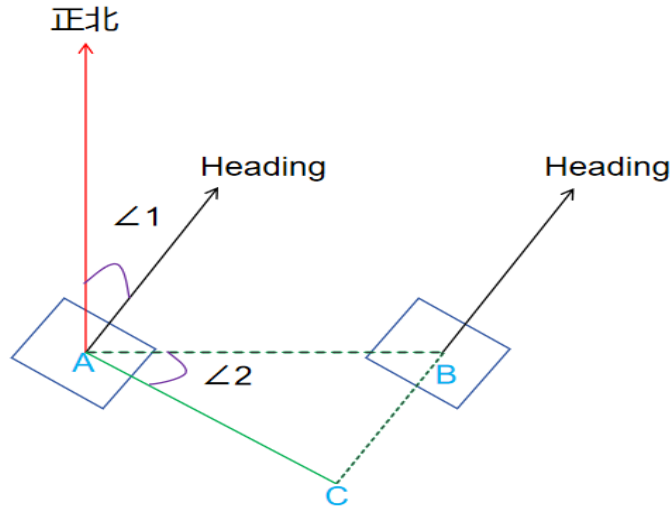


图4-5 两车的相对宽度示意图

假设车辆 A 和车辆 B 为行驶方向相同的车辆，想要得到两车位置的相对宽度，如图 AC 的距离，只需要以下 3 步：

(1) 计算车 A 与车 B 之间的直线距离，也就是虚线 AB 的长度。通过车 A 和车 B 的经度与纬度信息，可以很容易地计算出两辆车辆的直线距离。

(2) 确定 ∠2 的大小，在图中不难发现，∠1 和 ∠2 为同一个角的余角，所以 ∠1 和 ∠2 相等，又因为 ∠1 为航向角 Heading，所以 ∠2 也为 Heading。

(3) 确定 AC 的长度由图很容易得出 $AC = AB \cdot \cos \angle 2 = AB \cdot \cos \angle 1$ 。

当车辆 A 和车辆 B 的航向角一致，并且它们之间的横向间距为 2 米时，可以判定两车处于同一车道上，从而满足发生碰撞的基本条件。

在计算最小安全距离时，考虑驾驶员的反应时间 T、制动协调时间 t_1 以及减速增长时间 t_2 ，并结合汽车静止时的安全距离 d，依据汽车制动动力学理论，最小安全距离的计算公式可表示为：

$$S = (V_S - V_F)(T + t_1 + \frac{1}{2}t_2) + \frac{(V_S - V_F)^2}{2a} + d \quad (4-5)$$

式中， V_S —主车的车速；

V_F —远车的车速；

a—车辆制动安全的加速度。

计算出车辆的最小安全距离，然后和车辆的实际距离进行比较，如果最小安全距离大于车辆的实际距离，前向碰撞预警将会触发。

当主车与远车位于同一车道上行驶时，需满足的判断条件如下：主车的航向

角与远车的航向角偏差在一定范围内，并且车辆的相对宽度小于一定的距离^[79]。检查主车的速度是否高于远车，并且确认主车的位置在远车的后方。通过算法计算出的最小安全距离 S 大于主车和远车的实际距离，算法将会对主车进行预警；如果主车的行驶速度低于远车的行驶速度，并且主车的相对方位为远车的前方，当最小安全距离 S 超过主车与远车之间的实际距离时，算法将触发预警机制，提醒主车驾驶员注意潜在的碰撞风险。

结论得出在前向碰撞预警算法触发时，算法将会对前车和后车进行同时预警，对前车提示预警“注意后方车辆”，对后方车辆提示预警“注意前方车辆慢速行驶”，当实际情况不满足算法触发条件后，前车、后车的预警消息将会同时消失。

4.3 避撞框架设计

4.3.1 建立碰撞模型

(1) 碰撞场景

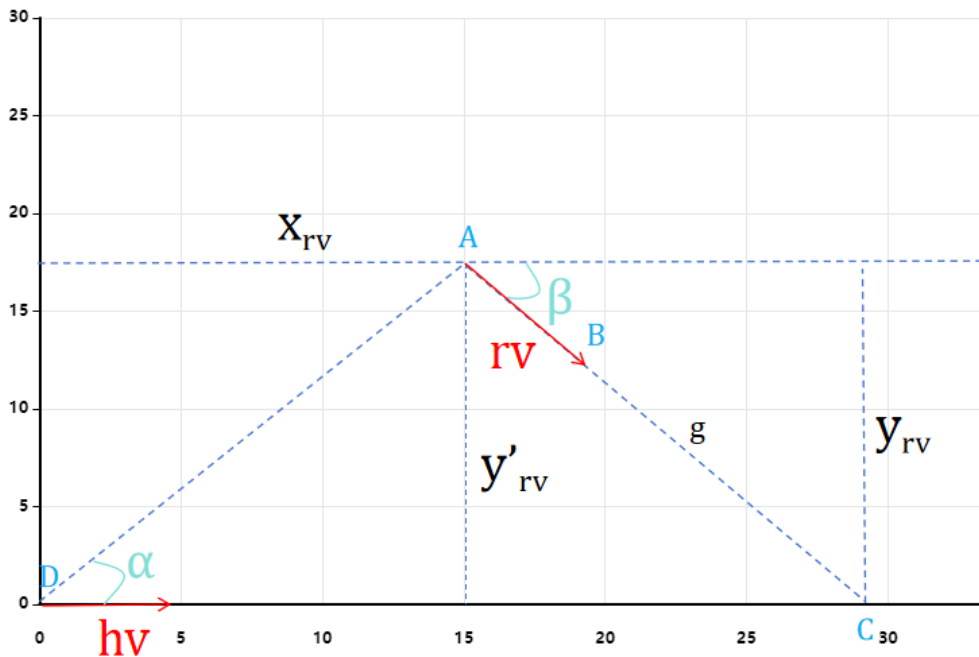


图4-6 两车碰撞的判断条件示意图

如图 4-6，A 点和 D 点分别表示 rv 和 hv 的中心质点，向量 hv 、 rv 的方向分别表示 hv 、 rv 的航向， hv 与 rv 的航向夹角为 β 。建立以 hv 点为坐标原点的载体坐标系， rv 未来的行驶轨迹在 x 轴上交于点 C，其坐标为 $(\frac{x_{rv} + y_{rv}}{\tan(\beta)}, 0)$ ， hv

和 rv 到碰撞点 C 点的距离为：

$$D_{\text{collision_hv}} = \frac{x_{rv} + y_{rv}}{\tan(\beta)} \quad (4-6)$$

$$D_{\text{collision_rv}} = \frac{y_{rv}}{\sin(\beta)} \quad (4-7)$$

若 hv 和 rv 同时到达 C 点，那么就会发生碰撞。

(2) 碰撞半径

在实际应用中，碰撞发生点 $h\nu$ 和 rv 并非单个点，而是一个占据一定面积的区域。为了简化模型，假设碰撞区域是以交点C为圆心，以半径 p 为范围的圆形区域，如图4-7所示。

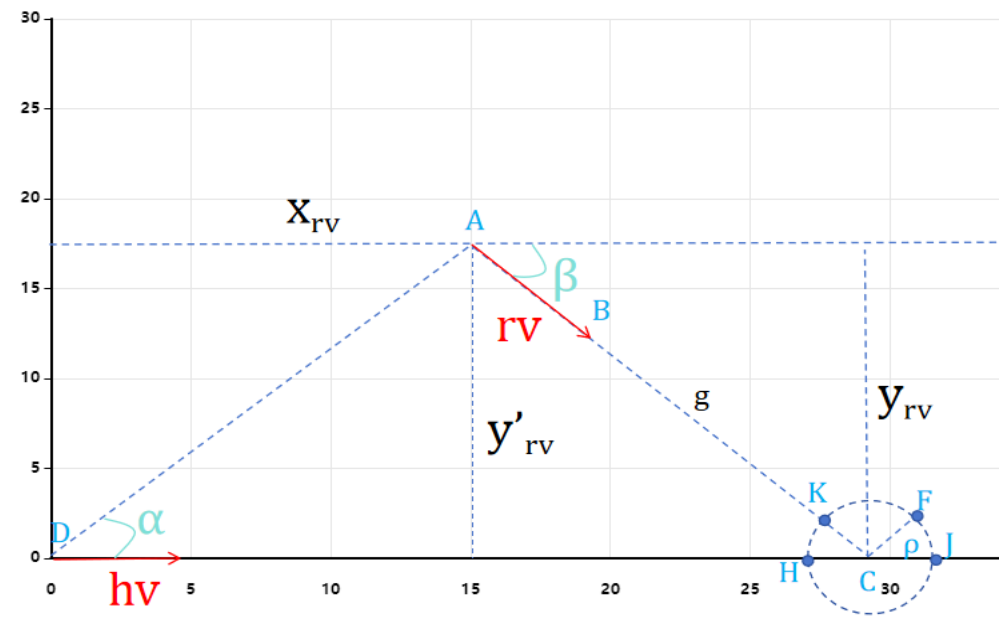


图4-7 两车碰撞半径示意图

碰撞半径 ρ 主要由主车 (hv) 和远车 (rv) 的车长及车宽决定。然而, 为了简化模型, 假设碰撞半径 ρ 固定为 5 米, 相当于一个车辆的常规长度。

4.3.2 判断能否发生碰撞

碰撞发生的条件可以通过主车和远车与碰撞区域的位置关系来描述：当主车或远车进入碰撞区域时，另一个车辆必须同时达到区域边缘或尚未离开区域。例如，当主车到达碰撞区域时，远车也必须正好到达区域边缘或仍未离开区域。同样，当远车到达碰撞区域时，主车也需要同时达到区域边缘或未离开区域。

设 hv 和 rv 达到和离开碰撞区域的时间分别为 t_{hv_in} 、 t_{hv_out} 、 t_{rv_in} 、 t_{rv_out} ，
 则若满足如下条件：

$$t_{rv_in} < t_{hv_in} < t_{rv_out} \quad (4-8)$$

或者：

$$t_{hv_in} < t_{rv_in} < t_{hv_out} \quad (4-9)$$

时，表示会发生碰撞。

4.3.3 计算hv和rv达到和离开碰撞区域的时间

如上图 4-7 所示，hv 的轨迹与碰撞区域相较于点 H 和点 J，rv 则是点 K 和点 L，则 hv、rv 达到和离开碰撞区域的距离分别是：

$$D_{hv_in} = D_{collision_hv} - \rho = \left(\frac{x_{rv} + y_{rv}}{\tan(\beta)} \right) - \rho \quad (4-10)$$

$$D_{hv_out} = D_{collision_hv} + \rho = \left(\frac{x_{rv} + y_{rv}}{\tan(\beta)} \right) + \rho \quad (4-11)$$

$$D_{rv_in} = D_{collision_rv} - \rho = \frac{y_{rv}}{\sin(\beta)} - \rho \quad (4-12)$$

$$D_{rv_out} = D_{collision_rv} + \rho = \frac{y_{rv}}{\sin(\beta)} + \rho \quad (4-13)$$

假设 hv 和 rv 都是做匀速直线运动，则他们达到和离开碰撞区域的时间分别是：

$$t_{hv_in} = \frac{D_{hv_in}}{V_{hv}} \quad (4-14)$$

$$t_{hv_out} = \frac{D_{hv_out}}{V_{hv}} \quad (4-15)$$

$$t_{rv_in} = \frac{D_{rv_in}}{V_{rv}} \quad (4-16)$$

$$t_{rv_out} = \frac{D_{rv_out}}{V_{rv}} \quad (4-17)$$

若满足公式 4-8、4-9 中的条件，则会发生碰撞。

4.3.4 匀速直线运动发生碰撞的应对措施

若根据公式 4-8、4-9 中的条件发现会发生碰撞，还应该计算加速或者减速的情况下是否可以避免碰撞^[80]。

(1) 加速计算

加速时的最小安全距离是指，当远车（rv）刚好到达碰撞区域边缘时，主车（hv）已经离开了碰撞区域。由于在公式 4-16 和 4-17 中已经计算出 rv 到达碰撞区域所需的时间 t_{rv_in} ，因此在这里将直接使用这些结果，而不再进行重复的计算。主车加速时，假设其以固定加速度 a_{hv_acce} （实践中通常取 $2.6m/s^2$ ）进行匀加速直线运动。在 t_{hv_in} 时间段内，主车 hv 的运动距离可通过匀加速运动公式计算得出：

$$S_{hv_acce} = v_{hv} t_{rv_in} + \frac{1}{2} a_{hv_acce} (t_{rv_in})^2 \quad (4-18)$$

若满足：

$$S_{hv_acce} \geq D_{hv_out} \quad (4-19)$$

则表明加速后，不会发生碰撞。如不满足，则要进行减速计算。

(2) 减速计算

减速时的最小安全距离是指，当远车 rv 已经完全离开碰撞区域时，主车 hv 尚未到达碰撞区域。由于公式 4-16 和 4-17 已经计算出了 rv 离开碰撞区域所需的时间 t_{rv_out} ，因此在这里直接引用这些结果，而不再进行重复计算。主车减速时，假设其以固定加速度 a_{hv_dec} （实际计算中通常取 $6.25m/s^2$ ）进行匀减速直线运动。在此时间段内，主车 hv 的运动距离可以通过匀减速运动公式计算得出：

$$S_{hv_dec} = v_{hv} t_{rv_out} + \frac{1}{2} a_{hv_dec} (t_{rv_out})^2 \quad (4-20)$$

若满足：

$$S_{hv_dec} \leq D_{hv_in} \quad (4-21)$$

则表明减速后，不会发生碰撞。

若公式 4-19 和 4-21 有一个满足，则不会发生碰撞，否则势必会发生碰撞。

4.4 PreScan 与 Matlab/Simulink 的联合仿真实验

在搭建交叉路口仿真场景、设计避撞算法和框架的基础上，通过 PreScan 与 Simulink 联合进行交叉路口盲区场景的避撞预警实验。Simulink 作为 Matlab 的

一个功能强大的扩展工具箱，为用户提供了基于图形化建模和仿真的解决方案，方便用户设计、模拟和分析动态系统。用户可通过各种模块、信号线和端口等方式构建系统模型，实现系统的可视化设计与仿真，无需编写代码。

首先，在 PreScan 中建立如图 4-8 所示的十字交叉路口 2D 盲区场景，在路口处存在房屋等障碍物造成的盲区。

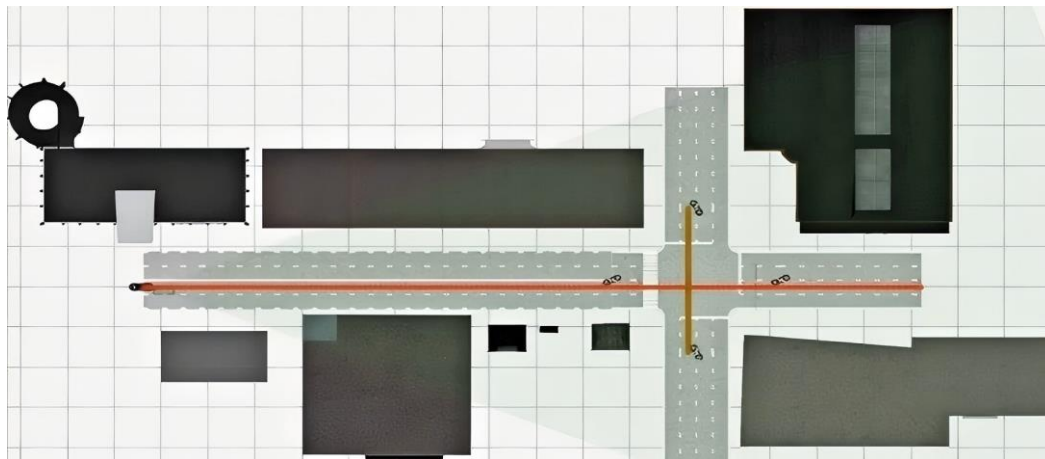


图4-8 十字交叉路口2D盲区场景图

然后，在 PreScan 中建立车辆模型为黑色小轿车，以及在十字路口处过马路的行人模型，如图 4-9 所示。

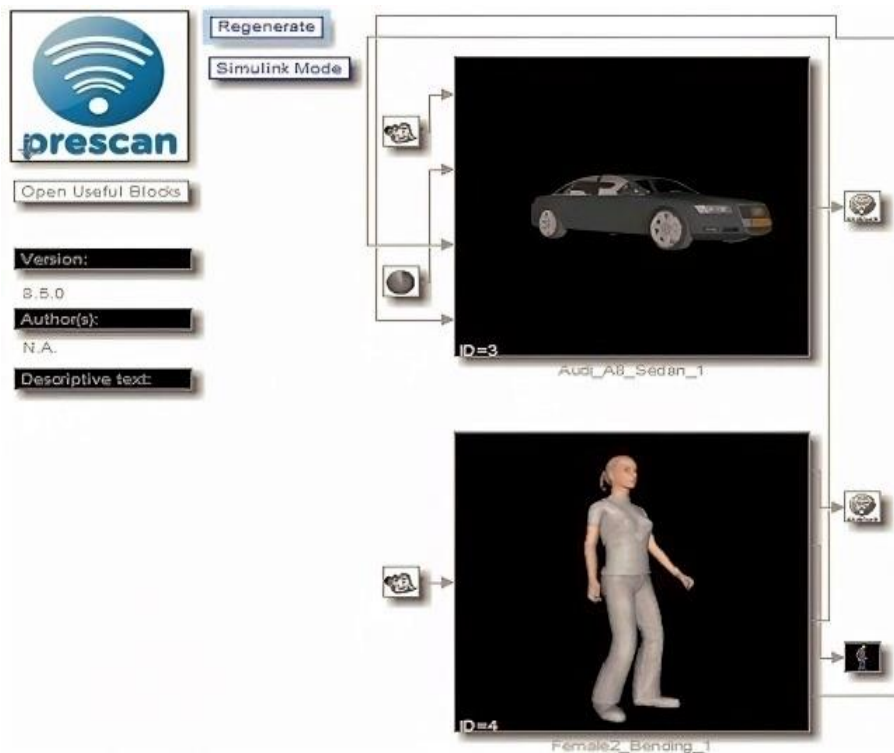


图4-9 车辆与行人模型图

Simulink 中车辆模型参数和传感器详细参数如下：

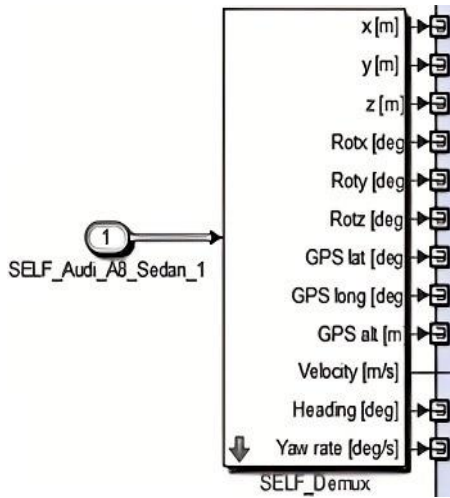


图 4-10 车辆模型参数图

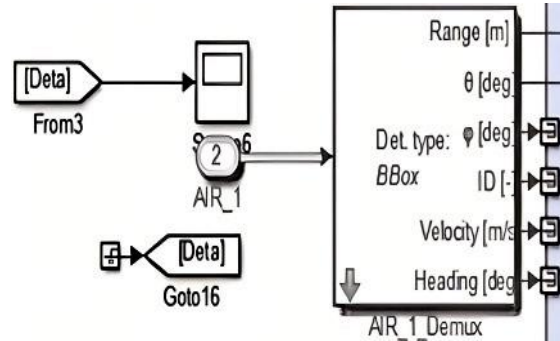


图 4-11 传感器参数图

为了实现路端对横排行人的监测与预警功能,在 Simulink 中加入 V2X 模块,如图 4-12 所示,此模块可以对仿真的交叉路口进行实时监测,并将信号发送给车端,在车端系统中收到预警信息及时采取措施避免冲突。

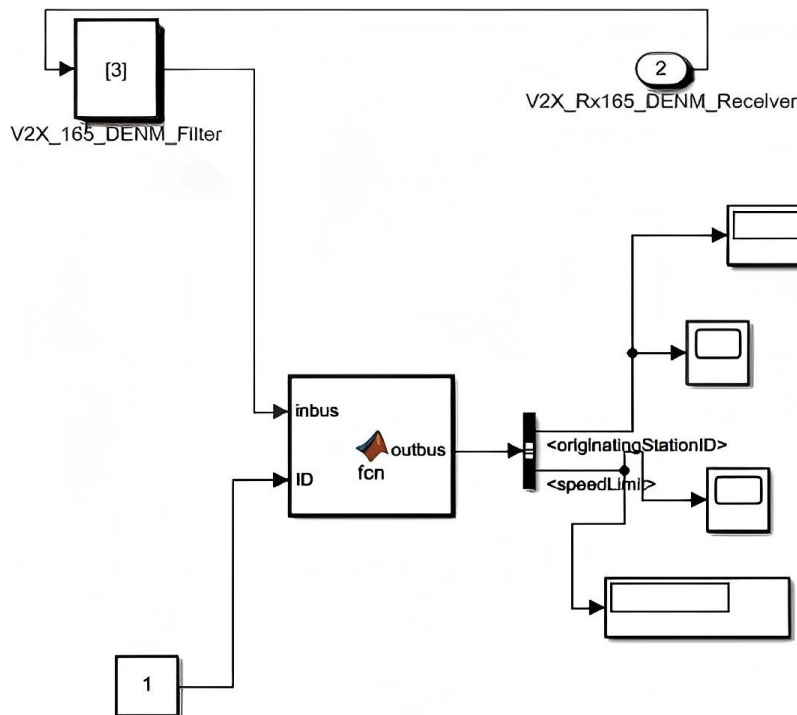


图 4-12 V2X 信号接收模块

为了做到行驶至路口的车辆成功收到预警信息并避让行人,加入 AEB 自动紧急制动系统,实现紧急制动的功能,如图 4-13 所示。

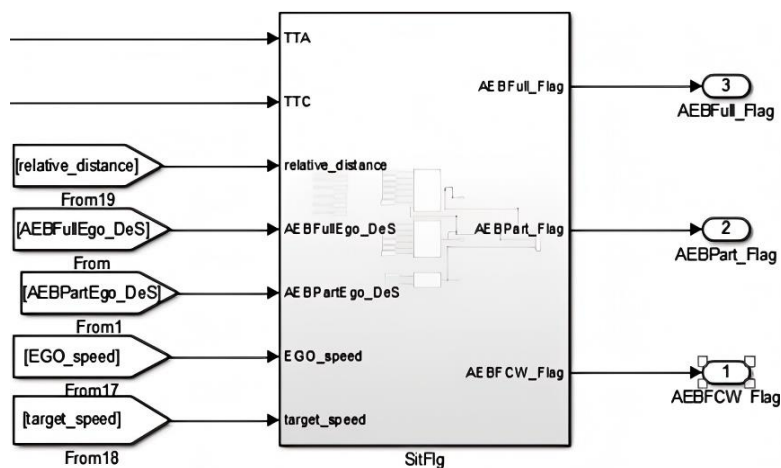


图 4-13 AEB 系统模型参数图

在完成场景搭建与避撞预警模型设计后,进行联合仿真,如图 4-14,车辆自西向东行驶,在接近存在盲区的交叉路口时,与横穿行人相遇。此时,车辆与行人相距 5 m,车辆行驶速度为 6 km/h,预警系统给出提示信息“Please Brake”。

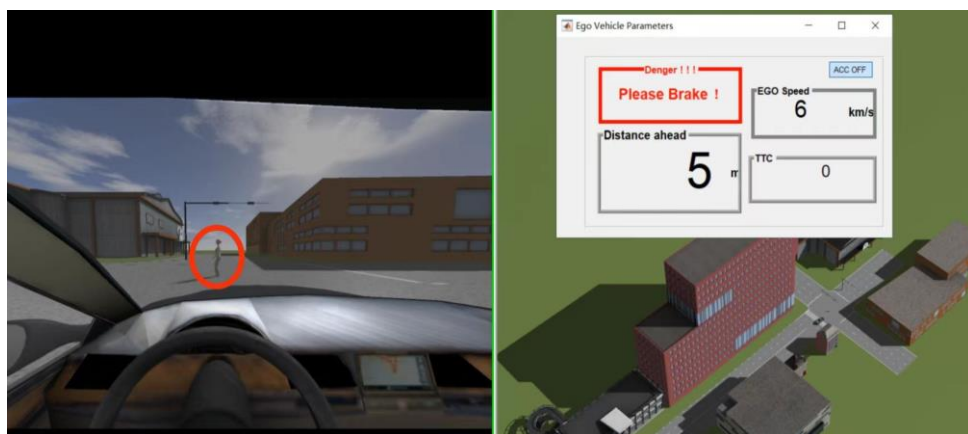


图 4-14 联合仿真预警制动图

车辆在收到报警信息后,AEB 系统开始紧急制动,如图 4-15,车辆在制动完成后与行人距离为 3 m,此时车辆速度为 0,报警信息消失,车辆成功避撞横穿行人。

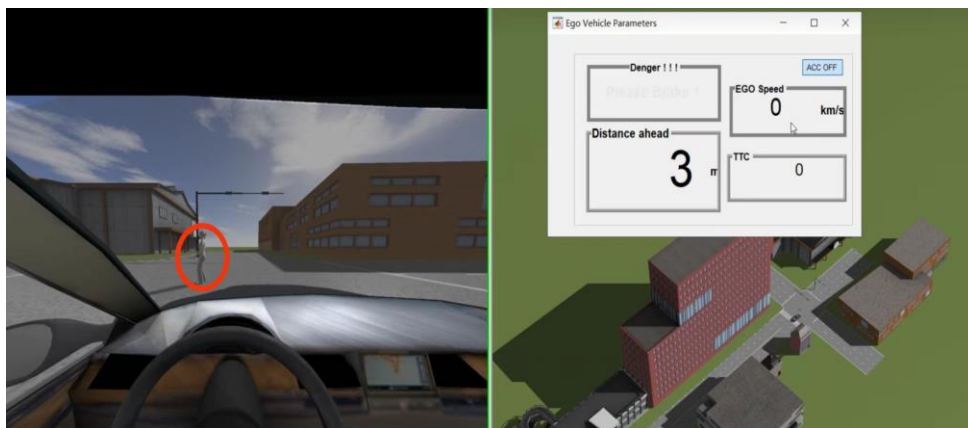


图 4-15 联合仿真制动避撞图

如图 4-16 所示, 车辆与行人开始时相距 5 m, 车辆与行人之间距离此时在匀速减少。车辆系统收到预警信号后, 驾驶员没有采取减速措施。当 t 为 2 s 时, AEB 系统开始紧急制动, 此时车辆与行人之间距离减少速度变慢; t 为 3 s 时, 紧急制动已完成, 车辆为静止状态, 此时车辆与行人距离为 3 m。

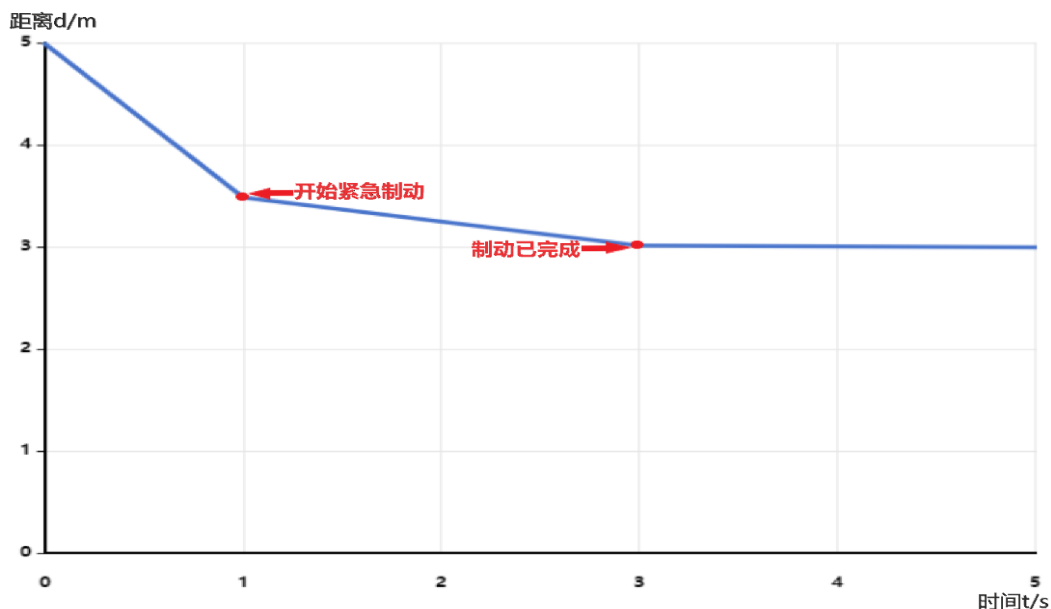


图 4-16 车辆与行人距离变化图

如图 4-17 所示, 行人一直处于 4 km/h 匀速状态行走。车辆开始时保持 6 km/h 的速度匀速行驶。当 t 为 1 s 时, 车辆收到报警信息, 开始进行缓慢减速; 当 t 为 2 s 时, AEB 系统开始紧急制动, 速度快速降低; t 为 3 s 时, 车辆速度降为 0, 避撞完成。

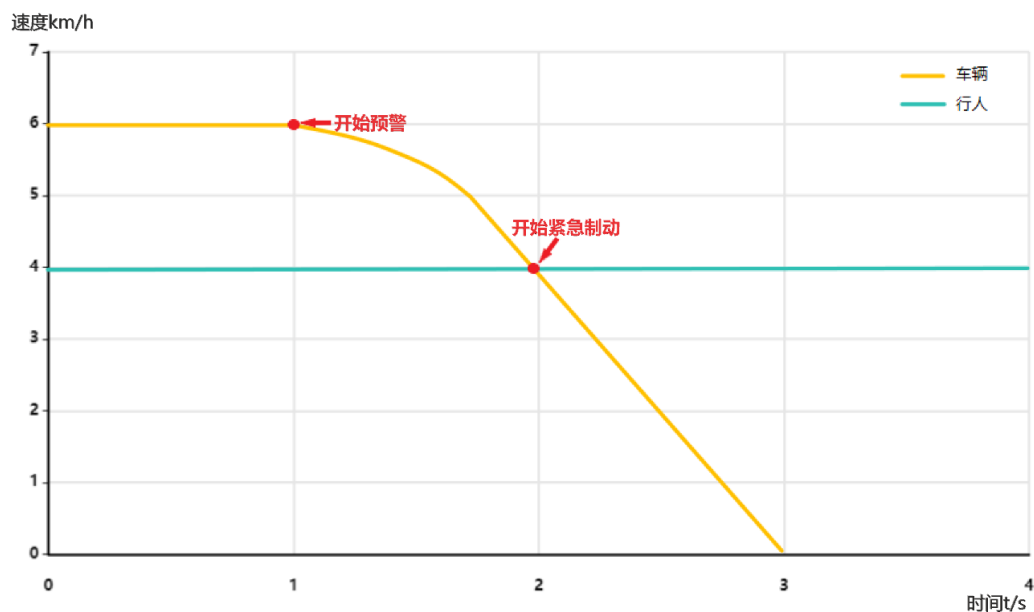


图 4-17 车辆与行人速度变化图

4.5 本章小结

本章主要研究了交叉路口盲区场景的仿真构建及避撞预警算法的设计。基于 PreScan 软件，搭建了无信号交叉路口盲区的仿真环境，模拟了城市与乡村不同道路条件下的交通场景，重点考虑建筑物遮挡、行人及非机动车混行等因素对驾驶员视野的影响。在避撞预警算法方面，通过航向角分析、最小安全距离计算、碰撞时间预测（TTC）、减速度需求（DRAC）等方法，对交叉路口的潜在碰撞风险进行量化评估，并采取相应的预警措施。通过联合 PreScan 和 Simulink 进行仿真分析，结合 V2X 的信号接收模块和 AEB 紧急制动技术，实现了在存在盲区的交叉路口场景中，对于横排行人的预警与避撞，从而进一步增强交叉路口的运行安全。

第5章 基于V2X的交叉路口盲区监测与预警验证及实现

伴随智能交通技术的日益进步，车路协同系统已成为提升交通安全与效率的重要手段。通过实现车辆、道路基础设施与云平台之间的深度协作，车路协同系统能够实时监测道路环境，动态优化交通流量，并显著降低交通事故风险。本章将详细探讨基于车路协同技术的交叉路口盲区监测与预警实验，重点研究如何通过车载传感器、路侧设备及云控平台协同工作，增强车辆在复杂交通环境中的安全性能和应急处置能力。

交叉路口是交通事故的高发区域，尤其是在视距受限的情况下，驾驶员往往难以准确判断盲区内的潜在障碍物，这增加了交通风险。为解决这一问题，实验采用了山东派蒙机电技术有限公司研发的智能网联实验车、路侧监测设备以及云控中心系统，在校园某交叉路口模拟环境中进行测试。实验通过车载与路侧系统的实时数据交换，结合激光雷达、相机等传感器，全面监测盲区内的障碍物信息，并通过车载端实时显示警告，提升驾驶员对盲区风险的感知能力。

5.1 车路协同技术体系框架

车路协同技术体系框架作为现代智能交通系统（ITS）的关键支柱，通过车、路、云的紧密结合，全面优化交通系统的安全性、运行效率及智能化水平。该框架以信息感知、传输、处理和执行为核心，覆盖车辆、基础设施和网络平台的协同运作。车路协同技术体系包含四个核心子系统：感知子系统、通信子系统、决策与计算子系统，以及应用与执行子系统。这些子系统通过纵向集成和横向交互，实现了从数据采集到智能决策的全流程闭环^[81]。

感知层作为车路协同系统的数据获取基础，主要承担实时监测和采集道路、车辆及周边环境信息的任务。其中包括车端感知：车载传感器（如雷达、摄像头、激光雷达）采集车辆自身及周边环境数据，如速度、位置、行人和障碍物信息；路端感知：道路基础设施的传感设备（如路侧单元 RSU、摄像头、红外检测器）获取交通流状态、道路事件等信息；融合感知：通过车路协同的感知融合技术，形成全局实时感知能力，消除单一设备的盲区和误差。

通信层是车路协同的核心支撑部分，负责实现数据的高效、低延迟传输。比

如 V2X 通信技术：包括车与车（V2V）、车与基础设施（V2I）、车与云平台（V2C）、车与行人（V2P）等通信方式。通信协议与标准：支持蜂窝车联网（C-V2X）、直连通信（DSRC）以及 5G/6G 等高速网络技术；实时性与安全性：通信层强调低延迟、高带宽和数据加密技术，保障信息的快速传递与安全传输。

决策与计算层该层负责数据的分析与处理，是实现车路协同智能化的关键。该层所包含算法有边缘计算：路侧单元和车载单元通过边缘计算能力，对本地数据进行实时处理，减少网络传输负担；云计算与大数据分析：云端平台整合多源数据，进行大规模的交通流优化、路径规划和安全预测等操作。人工智能与决策算法：采用机器学习、深度学习等技术，实现交通事件预测、动态信号控制和自动驾驶决策等功能。

应用与执行层将决策与计算层的输出转化为具体的执行动作，最终服务于车辆、驾驶员和交通管理系统。执行分为车端执行：实现自动驾驶、辅助驾驶功能，提供最优驾驶建议或直接操控车辆；路端执行：动态信号控制、诱导屏指引、应急预警广播等；交通管理与服务：智能交通控制中心进行全局优化，如事故快速处置、交通分流和信号优先。

5.2 实验设备介绍

本研究的实验设备均采用山东派蒙机电技术有限公司所开发和生产的智慧交通产品。设备包括智能网联实验车、路侧设备和云控中心，所有设备都经过精心配置，以确保实验过程中的数据采集与处理的高效与准确。智能网联实验车配备了先进的传感器、通信系统及处理单元，能够实时收集车辆的动态信息并与路侧设备和云控中心进行数据交互，保障系统的稳定性和信息的实时更新。

5.2.1 智能路端系统

路侧端由智慧灯杆主体、道路传感设备（摄像机、激光雷达等）、RSU 设备、交通信号灯、太阳能板、边缘计算单元、逆变器、路由器、蓄电池等部件组成，实现局部道路信息实时采集、回传、本地计算、策略判断、本地控制。根据所感知信息不同，路侧系统可将信息实时下发至车端，并通过光纤上传至云控平台，如图 5-1 所示。

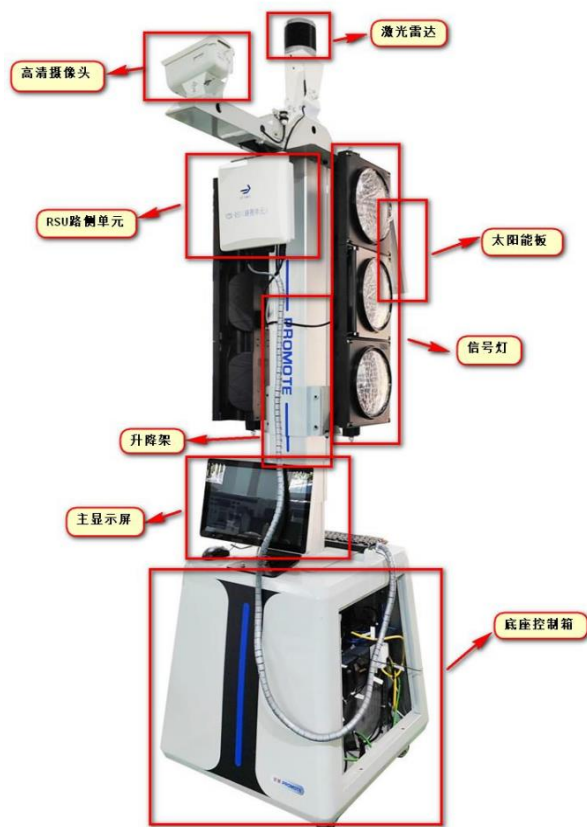


图5-1 智能路端设备实体图

5.2.2 智能车载系统

智能网联测试装调实验车是一款中型线控底盘，采用了轻量化、模块化、智能化的设计理念，具有强大载荷能力、稳定操控性能的它有广泛的应用领域。前轮阿克曼转向系统和永磁同步电机后轮驱动的搭配使得它能够在各类典型路面灵活运动，如图 5-2 所示，具体配置参数如表 5-1 所示。



图5-2 智能网联实验车实体图

表5-1 智能网联实验车配置参数

配置	参数
整车尺寸	2040×1052×1750 mm
整车重量	300kg
电机	直流无刷电机 型号：M3508 P19
电池	型号：车规级磷酸铁锂电池
车架结构	桁架式高强度车架片
最大车速	20km/h
工控机	集和诚工控机 BRAV-7521
底盘控制系统	C语言开发 主处理器：MC9S12XEP100
驱动方式	单电机后驱，遥控、线控

实验车主要由感知层、决策层和执行层等模块构成，其中感知层依靠多种传感器，对车辆周围环境进行数据采集，获取并处理道路环境信息，从而获得车辆及周围障碍物的位置信息，以及障碍物间的距离、速度等数据，为后续的控制决策提供数据支持。本研究使用的智能网联测试装调实验车具备实现自动驾驶的能力，涵盖自动路径跟踪、自动转向、紧急制动、遥控接管控制、超声波防撞和毫米波雷达监测等多种功能。

5.2.3 智能云控系统

云控系统通过接入路侧子系统，实现车辆信息监控、道路情况监控等功能。云控中心可通过 4G 和 V2X 设备下发控制车辆运行指令，通过 V2X 系统和 LAN 通信方式实时获取车辆信息和路侧单元信息，如图 5-3 所示。当海量数据采集完成后，车联网系统借助云平台集中化管理硬件和软件资源，实现数据的快速处理和实时分析，并通过实时反馈机制为车辆和道路提供及时的决策支持。



图5-3 智能云控系统监控信息图

建立的云控中心具备多项核心功能：

- (1) 实时监测智能网联汽车的各项运行参数：地图信息、车辆的具体位置、运行时速、电池剩余电量，以及各项传感器的工作状态等。
- (2) 支持对线控车辆的云端控制。
- (3) 能实时监控路侧单元信息，包括车辆位置信息、激光雷达与相机融合结果、各传感器运行状态、红绿灯信息等。
- (4) 云控中心实现了对智能网联汽车与路侧单元之间的网络化通信，通过参数化设置，可显示和调整红绿灯状态、传感器信息以及交通环境数据，并能够对路侧相关设备进行远程监控与管理。
- (5) 具备故障分析检测的功能，远端控制中心实时检测车辆状态信息，可及时快速的查找异常数据，系统能够追踪并标识故障位置，同时发出告警提示，并能支持远程进行故障处理。如车辆电池电量过低、传感器运行故障、运行位置超出道路测试范围等异常现象。

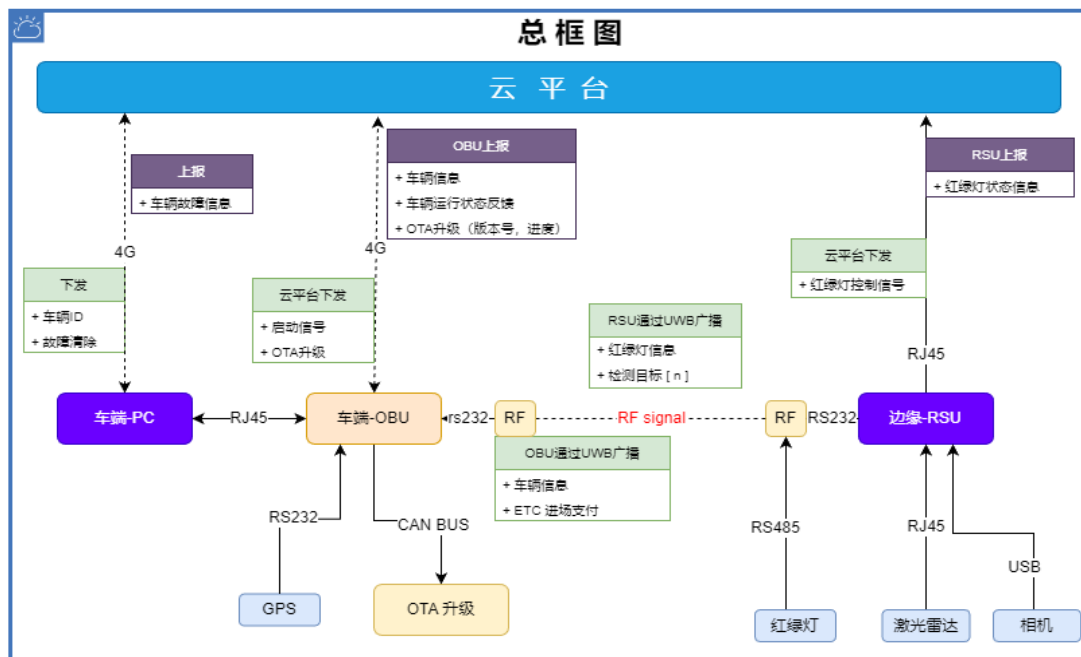


图 5-4 云平台总框图

5.2.4 V2X 通信设备

(1) 路侧 RSU 设备

V2X-RSU^[82]智能化路侧设备作为车路协同中道路基础设施数字化、智能的重要基本设施，将担负路面与车子中间通讯的重担，它的通信模组采用 Decawave 公司开发的全球第一款完全集成超带宽（UWB）低功耗的收发芯片

DW1000 芯片,工作于 3.5~6.5GHz 的 6 个射频频段,遵循 IEEE 802.15.4-2011 超带宽标准。RSU 通过采集路侧设备信息,实时获取道路状态,并通过无线射频技术将相关信息传输至车辆上的 OBU 设备,如图 5-5 所示,具体配置参数如表 5-2 所示。



图5-5 V2X-RSU（路侧单元）实体图

表5-2 V2X-RSU 配置参数

配置	参数
处理器	Cortex-M4 32 位 RISC 内核 168MHz
频带范围	3.5GHz~6.5GHz 支持 6 个射频波段
发射功率	-14dBm ~ -10dBm
天线	3.7-6.7/G 全向玻璃钢天线
通信协议	建立阿里云 mqtt 服务端
传输协议	谷歌 protobuf
UWB	6.8Mb/数据传输 外置天线

(2) 车载 OBU 设备

V2X-OBU 是一款基于 V2X 技术的车载专用设备,通信模组采用 Decawave 公司开发的全球第一款完全集成超带宽(UWB)低功耗的收发芯片 DW1000 芯片,工作于 3.5~6.5GHz 的 6 个射频频段,遵循 IEEE 802.15.4-2011 超带宽标准。它可以通过无线连接云控中心和操作维护中心。OBU 通过无线射频与 RSU 以及其他车辆实时通信,实现智能网联类应用,如图 5-6 所示。

V2X-OBU 实现了车辆之间以及车辆与交通基础设施间的实时互联互通,为多样化的互联汽车、协同智能交通系统及自动驾驶车辆提供了技术支撑。

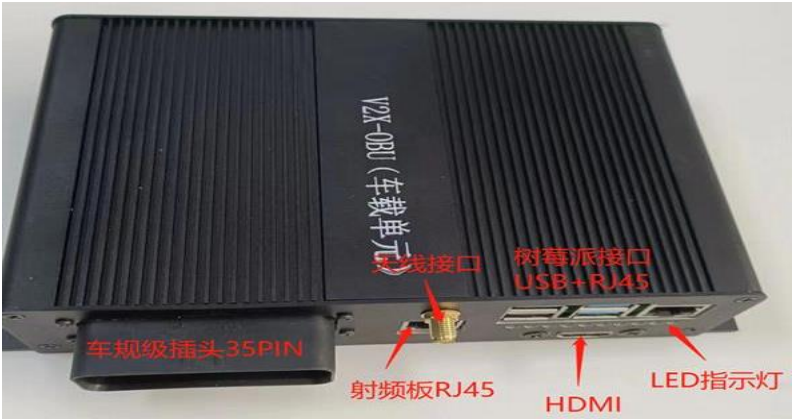


图5-6 V2X-OBU（车载单元）实体图

该设备不仅采用了 UWB 通信技术，还配备了 4G 蜂窝网络和 WIFI 等多种无线通信手段；并提供 RS232，以太网、CAN 接口等，能全面满足通信需求。

表5-3 V2X-OBU 配置参数

配置	参数
网络支持	5G SA、NSA 双模组网，5G等
网络协议	PPP、IPv4/v6
CAN	CAN2.0B，每路速率可高达 1Mbps
USB接口	2.0-host
WiFi	2.4GHz/5GHz 频段 Ua/b/g/n/ac
蓝牙	BT 4.2+EDRo
树莓派接口	USB+RJ45

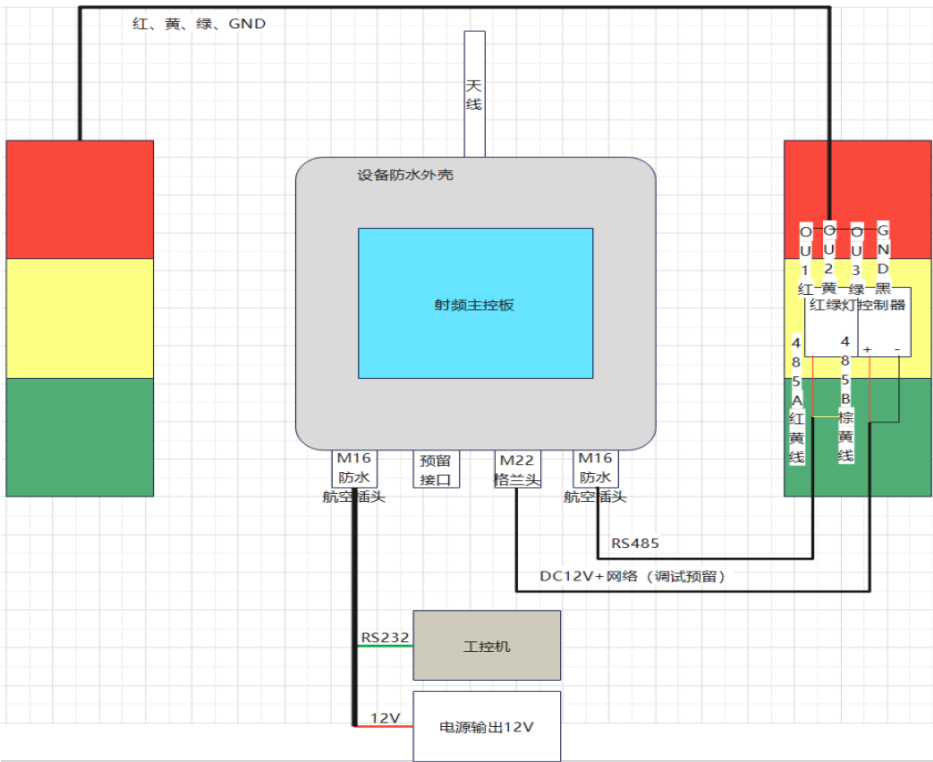


图5-7 RSU-OBU接线图

5.3 车-路协同与车-车通信

车路协同系统以路侧系统和车载系统作为其核心支撑，依托无线通信设备，实现车辆与道路之间的信息互通与资源共享^[83]。该系统的运行过程主要包括：首先是由路侧系统的传感器采集交通流、道路路面状况和一些异常事件等信息，并由路侧控制单元进行处理，然后传向路侧无线通讯设备，路侧无线通信设备进行广播，区域范围内的路侧单元同步进行数据接收，同时，区域内的车载无线通信设备接收到路侧无线通信设备发送的信息，并与车辆采集的数据进行信息交互和融合处理，将处理结果传递至自动驾驶车辆。自动驾驶车辆根据接收到的实时交通环境信息，对当前情况进行判断和分析，并做出相应的反应，如图 5-8 所示。

车辆间通信（V2V）^[84]是指车辆之间实时共享位置、速度和加速度等关键信息，支持多种智能驾驶功能，如碰撞预警、车队驾驶和紧急制动协作，这些功能有效提升了单车智能系统的安全性和可靠性。车-路协同与车-车通信相互补充，共同为智能网联交通系统的发展奠定了坚实基础。

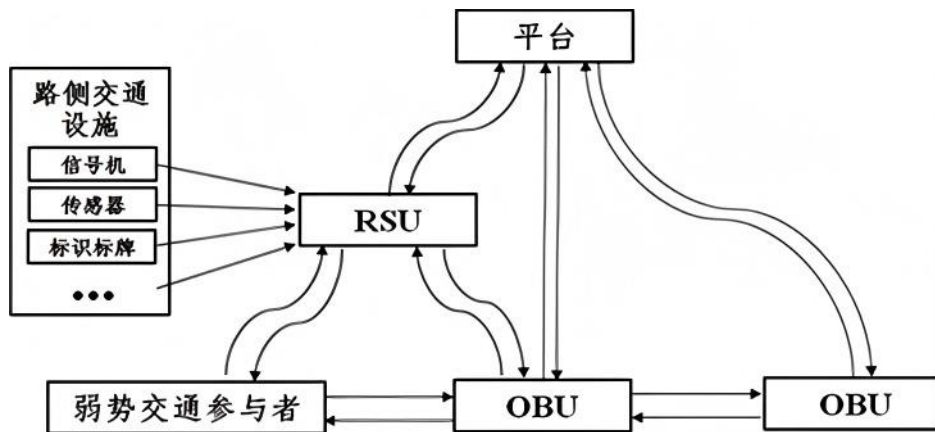


图5-8 RSU-OBU-云平台互联示意图

5.4 雷视融合标定

在实验开始之前，为确保激光雷达和相机之间的数据能够有效结合，需要对现场目标和距离进行融合标定^[85]。标定的基本原理是通过激光雷达和相机的三维坐标系中的同名点进行对应匹配，标定 procedure 包括估计外部参数变换矩阵 R_t 。这里的同名点选取是通过使用标准方正棋盘格标定板进行的，其中选取了标定板的四个角作为同名点。

在进行标定之前，首先要竖立好标定架子，并将标定板固定在支撑架上。此

时需要特别注意周围环境的清理，确保标定区域没有障碍物，以便后续能够通过坐标限制对点云数据进行过滤和筛选。标定板支架的竖立方式如图所示，板子应相对相机水平方向斜放，大约保持 45 度的角度，如图 5-9 所示，能够在实际应用中获得最理想的标定效果。



图5-9 雷视融合标定界面图

标定的目标不仅包括常见的交通工具（如机动车）和行人，还包括其他可能出现在实验环境中的障碍物。通过这种方式，可以确保激光雷达和相机系统在各种实际应用场景中的数据融合精度，从而为后续的实验和应用提供稳定可靠的基础数据。

5.5 交叉路口盲区场景的模拟布置

交叉路口作为实验场景的一部分，能够真实反映出驾驶员在此类环境下的视线盲区和潜在的交通风险。通过模拟前方盲区不仅能够观察到交叉路口的交通流动情况，还能够有效地测试车辆在复杂环境中的感知能力和应对策略。

实验的场地选择为校园内的某停车场交叉路口。该路口具有典型的交通环境，能够模拟现实中常见的交通状况和盲区障碍物，在该场景中，路端设备被安置在道路的右侧，当行驶中的车辆接近前方路口时，它将与交叉方向的来往车辆或行人发生相遇。通过设置不同类型的障碍物，重现了实际行车中的盲区情况，如图 5-10 所示。



图5-10 模拟交叉路口盲区的场景布置图

5.6 实验结果与分析

5.6.1 主控机实时界面

在此场景下，路端设备会成功的将雷视融合结果实时传输并显示在主控机上，提供对车辆行驶环境的全面感知，特别是包括机动车和行人的相关信息。通过雷视融合技术，路端设备将激光雷达和相机所采集到的数据进行有效结合，从而实现对周围环境的精准识别与跟踪。当车辆接近交叉路口时，主控机将实时显示所有目标的类型（如机动车、行人、静态障碍物等）、坐标、距离、速度等关键信息，协助驾驶员和自动驾驶系统精准感知周围交通环境，如图 5-11 所示。



图5-11 主控机实时界面图

主控机的界面将目标的类型、位置、速度等数据清晰显示，以帮助判断道路上各类物体的动态变化。通过实时显示这些信息，路端主控机不仅能够为车辆提供实时反馈，帮助驾驶员了解周围的交通状况，同时为自动驾驶系统提供更为可

靠的数据支持，从而提升驾驶的安全性和系统的应对能力。

5.6.2 云平台远程监控

为了实现云平台与路端设备之间的实时数据传输与控制，首先通过网线将两台设备进行连接，确保它们能够互相通信。在连接完成后，需要将两台设备的 IP 地址设置为同一网段，以保证网络中的数据流能够顺利传输和接收。这样一来，路端设备与云平台之间的数据交换便能够高效、稳定地进行，从而为系统提供实时的反馈与控制能力。



图5-12 云平台实时界面图

在路侧设备中，视频流采用 RTSP 协议^[86]进行传输，确保视频数据能够实时、高效地从路端设备传输到云平台。如图 5-12 所示的云平台端，用户可通过网页界面实时观看路况视频流。通过此功能，路侧的视频画面能够在网页中清晰地显示出来，用户无需直接到现场就能远程监控路况变化，获取周围交通的实时信息。

云平台不仅能实时同步显示视频流,还能实时获取并显示路况信息,包括车辆、行人、障碍物等目标的位置坐标、距离、速度等动态数据^[87]。这使得云平台能够全方位地监控和分析交通情况,同时对突发事件作出及时反应。借助于云平台的远程操作功能,工作人员还可以通过云平台远程调整路端设备的设置,进行故障排查、系统升级或其他远程控制操作,从而提升管理效率和应急反应能力。

5.6.3 车载端盲区信息提示

当车辆通过路口时,车载设备能够实时接收并分析来自路侧单元的广播信息,OBU 系统会对盲区内的潜在障碍物进行实时监测和分析,成功地将盲区内的障碍物信息展示在车载 OBU (车载单元)^[88]数据监控与交互平台中。这一过程是通过车载系统与路侧单元之间的高效通信实现的,其中路侧单元通过广播信息将周围环境的感知数据传输给车辆,车辆的 OBU 系统则负责接收、处理并展示相关信息,如图 5-13 所示。



图5-13 车载端盲区信息显示图

如果系统检测到盲区内有障碍物,且障碍物与车辆的行驶路径有可能发生冲突,或障碍物距离路口较近,车辆的 OBU 平台会立即发出警告。该警告信息会以清晰的视觉和声音提示的方式呈现给驾驶员,警告内容为:“前方盲区内存在距离较近的交通参与者,请勿危险驾驶”。通过这种警示,驾驶员能够在盲区存在潜在风险的情况下,及时调整驾驶行为,避免发生交通事故,如图 5-14 所示。



图 5-14 车载端盲区预警提示图

该系统的设计极大地提升了车辆在盲区环境中的安全性，尤其是在交叉路口等复杂交通场景中。当驾驶员无法直接观察到盲区内的交通参与者时，车载 OBU 平台能够提供准确的盲区信息，从而有效避免因视线受限而产生的潜在冲突。这不仅为驾驶员带来了实时可靠的驾驶辅助，也为自动驾驶系统的安全性测试提供了重要的支持。

5.7 本章小结

本章主要探讨了基于车路协同技术的交叉路口盲区监测与预警实验，详细介绍车路协同技术体系的框架及其在智能交通系统中的应用。首先，分析车路协同的技术架构，包括感知层、通信层、决策与计算层及应用执行层，说明通过这四个层级的协同协作，不仅提升了交通系统的智能化水平，还优化了运营效率，并确保了整体安全性。

实验使用智能网联实验车、路侧设备和云控中心，并在校园某交叉路口进行实验，模拟了实际道路中的盲区障碍物。通过雷视融合技术和 V2X 通信设备的运用，实现车辆与路端设备的高效数据交换。实验结果表明，车载端的盲区信息提示系统能够在车辆通过交叉路口时实时检测盲区内的潜在障碍物，同时通过 OBU 系统发出预警，云控中心的远程监控功能也为交通管理和应急响应提供了强大的支持，大大增强了驾驶的安全性。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文围绕降低交叉路口盲区的冲突风险展开研究，构建了基于车路协同的交叉路口盲区监测与预警系统，目的是提高交叉路口的交通安全性。以下是研究的主要总结：

(1) 通过研究城市中的平面交叉路口和立体交叉路口，以及乡镇中的无信号交叉路口，比较城市与乡镇无信号交叉路口的特征与差异。通过分析交叉路口的交通流特性、冲突类型及其原因，提出了解决盲区冲突的方法，并对各方法进行比较并设计了优化方案。

(2) 通过调整损失函数、增加特征融合模块、引入 OTA 检测算法，优化了 YOLOv5s 算法，增强了在复杂交叉路口环境下的目标识别和追踪性能。通过消融实验对比，结果表明，改进后的 YOLOv5s 算法比原算法精度提高了 2%、mAP@0.5 提高 7.2%、浮点运算数提高 0.5；各目标训练精度与召回率的概率均达到了 99%以上；相较于传统的 Faster R-cnn 和 YOLOv3 算法更加有效。通过加入单目相机测距算法，在路端能够跟踪道路目标的距离并反映给车端，驾驶员根据检测框颜色判断碰撞风险。

(3) 通过 PreScan 软件平台搭建的交叉路口盲区仿真场景，设计了避撞预警算法，建立了碰撞模型，提出了碰撞的判断条件和应对碰撞的行为策略，通过 PreScan 与 Simulink 联合仿真，结果表明，该策略有效的对交叉路口盲区处的横穿行人进行了预警并安全避撞。

(4) 通过搭建的交叉路口盲区监测预警验证平台，利用智慧交通 V2X 系统开展实验验证，结果表明该系统能够在交叉路口复杂的交通环境中有效运行，实时收集交叉路口的交通信息，判断潜在的碰撞风险，并通过智能预警系统向驾驶员发出警告，有效的提高了交叉路口的交通安全性。

6.2 展望

在本研究取得一定成果的基础上，虽然已经具备了一定的应用价值，但仍存

在一些需要进一步改进和深入探索的空间：

（1）可以进一步探索更多的传感器融合技术，例如将雷达与激光雷达相结合，有助于提升目标检测的精度和可靠性。在控制避撞研究中，通过实车实验判断车辆在无法避免冲突的情况下所需要做出的决策，包括制动或转向。从“感知风险”到“规避风险”，使监测-预警-避撞构成一个完整的链条。

（2）随着 5G 以及未来 6G 通信技术的不断成熟和广泛应用，车路协同系统能够实现信息交换速度的显著提升和延迟的进一步降低。智能交通系统的协同推进需要政府、企业与学术界的共同努力，应当加快智能交通系统在城市、乡村以及高速公路等多种环境中的应用推广。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国汽车工程学术研究综述·2017[J].中国公路学报,2017,30(06):1-197.
- [2] SIMON M, HERMITTE T, PAGE Y. Intersection Road Accident Causation: A European View[C/OL]. 2009.
- [3] Traffic Safety Facts 2020: A Compilation of Motor Vehicle Crash Data[J/OL]. 2022.
- [4] 中国统计年鉴公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2000-2022)[R].公安部交通管理局, 2001-2022.
- [5] 郭戈,许阳光,徐涛,等.网联共享车路协同智能交通系统综述[J].控制与决策,2019,34(11):2375-2389.
- [6] 吕欣.智能交通技术在智慧城市建设中的应用——评《智慧城市中的智能交通系统》[J].现代城市研究,2024,(12):135.
- [7] 《中国公路学报》编辑部.中国汽车工程学术研究综述·2023[J].中国公路学报,2023,36(11):1-192.
- [8] E. I. Konstantinidis, G. I. Patoulidis, I. N. Vandikas, et al. Development of a Collaborative Vehicle Collision Avoidance System[C]. La Jolla, CA, USA: IEEE, 2010: 1066-1071.
- [9] M. Seredynski, F. Viti. A Survey of Cooperative ITS for Next Generation Public Transport Systems[C]. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016: 1229-1234.
- [10] 工信部印发《打造“5G+工业互联网”512工程升级版实施方案》[J].现代化工,2025,45(01):12.
- [11] 刘川.新技术背后的政府治理——美国智能交通发展历程回顾与启示[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会.交通治理与空间重塑——2020年中国城市交通规划年会论文集.杭州市城市规划设计研究院,2020:11.
- [12] 易汉文.美国智能交通10年发展规划[J].国际城市规划,2009,24(S1):221-226.
- [13] 交通系统转型:美国交通部推行“智能城市”改革[J].中国战略新兴产业,2016,(19):88-89.

-
- [14] 徐华峰,夏创,孙林.日本 ITS 智能交通系统的体系和应用[J].公路,2013,(09):187-191.
 - [15] 彭永清.世界瞩目的日本智能交通系统[J].汽车维修,2012,(08):5-6.
 - [16] 董守聪.欧洲城市智能交通管理[J].城市公共交通,2008,(04):38.
 - [17] 王东柱,杨琪.欧洲合作智能交通系统发展现状及相关标准分析[J].公路交通科技,2013,30(09):128-133.
 - [18] 第五届中国智能交通年会[J].城市交通,2009,7(03):5.
 - [19] 滕学蓓,李宏海,高剑.中国智能交通系统:要走自己的路[J].中国公路,2016,(13):52-53.
 - [20] 王晗,石月.助力打造“自动驾驶之城” 湖南湘江新区智能系统测试区跑出加速度[J].汽车观察,2018,(11):144-145.
 - [21] 康诚,严欣,唐晓峰.智能网联汽车自动驾驶仿真测试技术研究综述[J].时代汽车,2022,(22):4-6.
 - [22] 敖显奎.自动驾驶等级划分及发展现状[J].大众科学,2021,(08):46-47.
 - [23] 张云顺,华国栋,李宁,等.基于车路协同的智能驾驶研究综述[J].汽车文摘,2022,(06):49-57.
 - [24] Farzaneh A,Nikola M,Z. A S.Combined flexible lane assignment and reservation-based intersection control in field-like traffic conditions[J].Transportmetrica A: Transport Science,2024,20(1):1-36.
 - [25] Rao S B,Raghuram B K.Examining the effect of vehicle type on right-turn crossing conflicts of minor road traffic at unsignalized T-intersections[J].IATSS Research,2023,47(4):545-556.
 - [26] Pierre C,E.P S.An optimal control problem of traffic flow on a junction [J].ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations,2024,30.
 - [27] Farzaneh A,Nikola M,Z.A S.Combined flexible lane assignment and reservation-based intersection control in field-like traffic conditions[J].Transportmetrica A: Transport Science,2024,20(1):1-36.
 - [28] I.MIR,S.MA,H.OA.Selection of Intersection Control Type in Urban Areas [J].Civil and Environmental Engineering,2022,18(1):164-173.

-
- [29] 刘斌,李轶群,史博,等.无信号交叉路口基于模糊调度策略的车辆控制研究[J/OL].计算机工程,1-12.
 - [30] 赵树恩,王盛.基于生态驾驶的自动驾驶汽车交叉路口控制策略研究[J].汽车技术,2024,(03):17-23.
 - [31] 季鹏昊.无信号交叉路口智能汽车防碰撞控制策略研究[D].天津职业技术师范大学,2024.
 - [32] 任娅.基于车路协同的交叉口避撞预警研究及实现[D].重庆大学,2021.
 - [33] 赵帅豪.交叉路口信号灯智能控制方法的研究[D].西安石油大学,2023.
 - [34] 牛剑.车联网环境下交叉路口自动驾驶车辆编队控制算法研究[D].合肥工业大学,2023.
 - [35] 方路平,何杭江,周国民.目标检测算法研究综述[J].计算机工程与应用,2018,54(13):11-18+33.
 - [36] 任青阳,王彦丁,施俭.卷积神经网络目标检测算法研究进展[J].科学技术与工程,2024,24(32):13665-13677.
 - [37] 张丽君.基于 Transformer 的单目标跟踪算法研究[D].中北大学,2024.
 - [38] Murendeni R,Mwanza A,Obagbuwa C I.Using a YOLO Deep Learning Algorithm to Improve the Accuracy of 3D Object Detection by Autonomous Vehicles[J].World Electric Vehicle Journal,2024,16(1):9-9.
 - [39] Padhy I,JRMCST,CHRKV, et al.Camouflaged object detection using hybrid-deep learning model[J].Multimedia Tools and Applications,2024,(prepublish):1-21.
 - [40] Shaik A,Basha M S .Optimal deep learning based object detection for pedestrian and anomaly recognition model[J].International Journal of Information Technology,2024,16(7):4721-4728.
 - [41] 王满利,张航,张长森.基于深度学习的低光照目标检测算法[J].北京邮电大学学报,2024,47(05):59-65.
 - [42] 徐慧智,蒋时森,王秀青,等.基于深度学习的车载图像车辆目标检测和测距[J/OL].吉林大学学报(工学版),1-13.
 - [43] 蔡仁昊,程宁,彭志勇,等.基于深度学习的轻量化红外弱小车辆目标检测算法

- 研究[J].红外与激光工程,2022,51(12):357-367.
- [44] 宋爽,张悦,张琳娜,等.基于深度学习的轻量化目标检测算法[J].系统工程与电子技术,2022,44(09):2716-2725.
- [45] 杨浩,陈斌,李科.基于 Deformable DETR 的域自适应目标检测模型在城市街道场景中的应用[J].计算机应用,2024,44(S1):262-267.
- [46] 祝方舟.多尺度混合 Transformer 算法及其应用[D].合肥大学,2024.
- [47] 金字锋,陶重犇.基于 Transformer 的融合信息增强 3D 目标检测算法[J].仪器仪表学报,2023,44(12):297-306.
- [48] 李丽芬,黄如.引入 Transformer 的道路小目标检测[J].计算机工程与设计,2024,45(01):95-101.
- [49] 蔡腾,陈慈发,董方敏.结合 Transformer 和动态特征融合的低照度目标检测[J].计算机工程与应用,2024,60(09):135-141.
- [50] 刘明阳,杨啟明,胡冠华,等.基于 Transformer 的 3D 点云目标检测算法[J].西北工业大学学报,2023,41(06):1190-1197.
- [51] 刘玢滢.基于 V2X 的道路交叉口车-车避撞预警算法研究[D].重庆交通大学,2018.
- [52] 马浩越,刘晶郁,杨炜.车载 GigE Vision 实时前方车辆防撞预警系统设计[J].中国科技论文,2018,13(10):1120-1126.
- [53] 王登贵,张敬东,张健,等.车辆纵向安全距离算法及其防撞预警系统研究[J].计算机测量与控制,2014,22(07):2203-2205+2222.
- [54] 刘玉蓉.基于 V2X 通信的车辆防撞预警系统的研究与实现[D].武汉理工大学,2019.
- [55] 孙婷婷,刘兆惠,吕明新.基于 V2V 通信技术的车辆防撞预警系统研究[J].山东交通科技,2016,(02):16-18.
- [56] 钟静连.基于单目视觉的车辆防撞预警系统的技术研究[D].南京理工大学,2018.
- [57] 夏朋亮.基于城市公路干线交叉口的信号控制算法研究与仿真[D].西南交通大学,2013.
- [58] 杨洋,谭屈山,李伟,等.基于车路协同的无交通信号交叉路口协调技术研究[J].

- 时代汽车,2024,(24):170-172.
- [59] 赵小龙.基于 V2I 的无信号交叉路口车辆制动预警分析[D].吉林大学,2022.
- [60] 邹铁方,陈元新.乡镇公路弯道路面条件对行车安全的影响分析[J].中国安全科学学报,2014,24(09):77-82.
- [61] 陈峰.我国乡镇公路建设存在的问题及对策思考[J].科技创新与应用,2017,(20):124-125.
- [62] 徐耀赐.《平面交叉路口的规划与设计》连载（六）第五章冲突与驾驶任务分析（一）[J].道路交通管理,2021,(02):34-37.
- [63] 李文杰,张蕊,欧阳资铭,等.应对交叉路口或弯道视野盲区的监控指示设备[J].传感器世界,2020,26(12):23-26.
- [64] 金博,胡延明.C-V2X 车联网产业发展综述与展望[J].电信科学,2020,36(03):93-99.
- [65] 彭育辉,江铭,马中原,等.汽车自动驾驶关键技术研究进展[J].福州大学学报（自然科学版）,2021,49(5):691-703.
- [66] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]// The IEEE Conference On Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016:779 - 788.
- [67] YUN S, HAN D, CHUN S, et al. CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features [C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference On Computer Vision. Seoul, Korea(South) : IEEE, 2019:659-668.
- [68] WANG CY, LIAO HYM, WU YH, et al. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN [C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference On Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. New York: IEEE, 2020:390-391.
- [69] Ge Z, Liu S, Li Z, et al. OTA: Optimal Transport Assignment for Object Detection (2021) Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 303-312.
- [70] 许宜明,李东生,杨浩.改进 Faster R-CNN 的视频 SAR 动目标检测算法[J].

- 火力与指挥控制, 2024,49 (1):124-130.
- [71] 田智慧,杨奇文,魏海涛. 基于改进的 YOLOv3 多目标小尺度车辆检测算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (12): 169-175.
- [72] 迟德霞,王洋,宁立群,等.张正友法的摄像机标定试验[J].中国农机化学报,2015,36(02):287-289+337.
- [73] 刘昌华. 复杂交通场景下自动驾驶道路目标检测[D].大连: 大连理工大学, 2021.
- [74] 崔振,赵一凡,孟祥虎.基于 PreScan 的智能网联测试环境搭建与仿真[J].物联网技术,2023,13(01):71-72+76.
- [75] 李春银.基于 PreScan 的自动驾驶测试场景生成及虚实结合测试系统构建[D].长安大学,2022.
- [76] 郭路兵,梅志千,贺勇.基于 PreScan 软件的交叉路口防碰撞控制系统仿真[J].机械与电子,2014,(02):22-26.
- [77] 葛如海,肖轩,洪亮,等.交叉路口转弯车辆对横排行人的避撞策略[J].汽车技术,2021,(02):7-11.
- [78] 刘玢滢.基于 V2X 的道路交叉口车-车避撞预警算法研究[D].重庆交通大学,2018.
- [79] 王芬芬.基于机器视觉的前向避撞预警系统算法研究[D].沈阳大学,2016.
- [80] 朱田田.汽车纵向避撞预警算法的设计与仿真实现[D].东北大学,2008.
- [81] 张毅,姚丹亚.基于车路协同的智能交通系统体系框架[M].电子工业出版社:201505.188.
- [82] 潘景剑,候春辉,张翔宇.车路协同 RSU 软件系统的设计与实现[J].计算机与网络,2022,48(02):60-63.
- [83] 方芳,兰琛,范全放,等.几种常见车路协同通信技术的比较研究[C]//中国智能交通协会.第十一届中国智能交通年会大会论文集.浙江浙大中控信息技术有限公司,;2016:6.
- [84] 郝波,冯东.基于 V2X 技术的无线车车直连通信系统研究[J].控制与信息技术,2024,(04):123-129.
- [85] 张成,杨耿,李钦,等.雷视融合自动联合标定方法研究[J].中国交通信息化,202

4,(04):117-120+124.

- [86] 龙舟.基于 RTSP 的智能视频监控系统的研究与实现[D].中南大学,2013.
- [87] 宋喆女,肖皞.一种基于 5G 的开放式智慧 V2X 云平台[J].长江信息通信,2021,34(03):198-200.
- [88] 吴彦.车联网 OBU 终端程序的改进设计与实现[D].合肥工业大学,2021.

攻读硕士学位期间取得学术成果

一、发表学术论文

[1] 发表三类学术论文 4 篇（两篇已见刊，两篇已录用）。

二、专利

[1] 实审中发明专利 1 件, 申请公布号:CN117****, 2023.

致谢

行文至此，我的硕士生涯也即将落下帷幕，二十余载求学路，我深感这一路走来属实不易，纵然有万般不舍，但也要继续向前走。回想这三年的时光，如烟花一般，绚烂而短暂。在这段充满挑战与成长的时光里，我收获了知识与经验，更收获了感恩与思考。在此，我要向所有在我学术道路和人生旅程中给予过帮助与支持的人们，致以我最诚挚的感谢。

首先，衷心感谢我的导师王建平教授。您不仅在学术上给予我悉心的指导，解答了我无数的疑惑，更在生活中给了我莫大的关怀与支持。在您的引领下，我学到了专业知识的深度和学术研究的严谨，您的教诲将永远是我前行的灯塔。

其次，我要特别感谢我的父母。是您们无私的爱与支持，让我能够无后顾之忧地投身于学术研究。在我迷茫时，您们的鼓励让我找到了方向；在我疲惫时，您们的温暖给了我力量。感谢你们一直以来对我的包容与理解。

感谢我的室友凌基，傅学斌，刘懿平。你们在我忙碌与焦虑时，给了我许多放松的时光，也让我时刻感受到友情的温暖。无论是学术讨论，还是生活琐事，你们的陪伴是我最宝贵的财富。

感谢我的师兄师弟们，大家在一起度过了无数个充满讨论和奋斗的夜晚。你们的帮助和鼓励使我在迷茫时不至于孤单，也让我在每一个前进的步伐中感受到团队的力量。

最后，我还要感谢一直努力着的自己。在这段漫长的研究生旅程中，虽然有过彷徨与疲惫，但我始终没有放弃，保持了对学术的热情和对未来的憧憬。感谢自己能够坚持不懈，勇敢前行。

所有的付出，所有的支持，都让我更加坚定信念、勇敢追求梦想。在此，我将所有的感谢献给曾经帮助、支持和陪伴过我的每一个人，感谢你们的无私奉献，愿我们在未来的日子里依旧携手并进，创造更多属于我们的精彩。

2025 年 3 月

尚德敏学 唯实惟新

