

项目合同编号：25-66X

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究

承担单位：陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司

项目负责人：陈志弈

通讯邮编、地址：710075、陕西省西安市唐延路 6 号

传真、电话：029-87832666、029-87832174

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

①复杂枢纽立交核心场景梳理与数据体系构建：针对改扩建后西吴枢纽立交多车道、多分合流、节假日交通量激增等特征，梳理分合流密集区、恶劣天气（雨雾、夜间、低能见度）、交通拥堵排队、突发事件（事故/抛锚/施工）及匝道通行等核心场景；定义目标级、车道级、路段级、事件级多维度数据域，明确交通流参数、安全与效率评估指标体系。

②多模态融合交通感知技术研发：基于毫米波雷达与视频监控设备，开展车辆目标检测、单/跨摄像机多目标跟踪及雷视数据时空融合技术研究；优化深度学习检测模型与轨迹跟踪算法，提升恶劣环境下目标识别、流量提取的稳定性与精度，实现宏观交通流态势监测与微观交通行为识别的统一。

③智能预警与路侧诱导系统构建：建立基于 TTC、PET、DRAC 等指标的交通冲突分析与判别模型，实现分合流区等高风险场景的实时安全评估与分级预警；研发智慧引导终端、拥堵指示牌、定向广播等设备协同的路侧诱导系统，制定交通拥堵、超速、连续变道、突发事件等场景下的动态诱导策略，保障预警信息低时延、精准触达。

④技术成果验证与推广适配：在西吴枢纽立交开展实地测试与系统调试，验证多模态融合感知、智能预警、动态诱导等技术的有效性与稳定性；总结可复制的技术方案与管理经验，编制交通拥堵

优化标准/方案，为全省改扩建立交智能化管理提供技术示范。

2. 技术关键

①复杂枢纽立交多场景精准感知技术：突破雨雾、夜间等恶劣环境下毫米波雷达与视频数据的时空融合瓶颈，解决多车道、多分合流场景中目标识别与轨迹跟踪的精度和稳定性问题。

②交通冲突与风险的实时智能判别技术：构建适配枢纽立交特征的交通冲突评估指标体系，优化基于多维度参数的风险判别模型，实现高风险场景的精准识别与分级预警，保障预警响应的时效性与可靠性。

③多设备协同的动态路侧诱导技术：攻克智慧路桩、拥堵指示牌等多设备协同联动难题，建立基于实时交通态势的动态诱导策略优化机制，实现预警信息与诱导指令的精准、低时延触达。

④标准化部署与多系统集成适配技术：制定适配不同立交设施条件的设备部署标准工法，解决路侧感知设备、预警诱导系统与现有交通管理平台的数据互通与集成适配问题，保障系统整体运行的兼容性与稳定性。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托西兴高速公路改扩建工程开展相关研究与技术应用验证工作。该工程是西安-咸阳一体化发展十大示范性工程，路线起于三桥收费站东侧，向西沿既有道路改扩建，经西安市西咸新区沣东新城、沣西新城及咸阳市秦都区、高新区、兴平市，止于西吴（枢纽）立交，与 G30 连霍高速、G3021 临兴高速相连，全长 24.443 公

里，投资概算 43.07 亿元，建设工期 36 个月。

工程全线采用 120 公里/小时高速公路建设标准，起点至帽耳刘枢纽段为双向六车道，帽耳刘枢纽至终点段为双向八车道，设特大桥 1 座、收费站 5 座、互通立交 6 处，立交平均间距 4.65 公里，是连接区域重要高速路网的关键通道，也是关中平原地区高速公路网的重要组成部分。

西吴枢纽立交作为多次分流与合流的复杂交通流枢纽场景，存在车道数增加、交通密度加大、分合流频繁等特征，且节假日交通量激增，西吴枢纽前后分合流处为全线突出拥堵瓶颈，高峰时段排队长度大、通行效率低，面临“幽灵堵车”、车速差异引发的碰撞风险等问题，与本项目研究的复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术高度契合。

依托该工程的建设条件与运营需求，可提供真实的交通流数据、复杂的枢纽场景环境及必要的现场试验条件，保障多模态感知设备部署、智能预警与诱导系统调试、安全评估模型验证等研究工作的顺利开展，同时为研究成果的工程化应用与推广提供直接载体。

二、考核指标

1.预期目标

①攻克复杂枢纽立交多模态融合感知、交通风险动态判别、低时延智能诱导等关键技术,形成适配改扩建高速公路枢纽场景的“感知—评估—决策—诱导”技术体系,提升雨雾、夜间等恶劣环境下目标识别精度与诱导策略适配性。

②通过研究成果应用,有效缓解西吴枢纽立交分合流区拥堵问题,大幅道路利用率;减少因分合流不当、车速差异引发的交通事故风险,为改扩建高速公路枢纽区域行车安全提供技术支撑。

2.主要技术经济指标(具体的技术经济参数)

①车辆目标识别准确率 $\geq 90\%$,跨设备数据拼接一致;

②交通事件端到端响应时延 $\leq 200\text{ms}$,预警准确率 $\geq 90\%$,误报率、漏报率各 $\leq 5\%$;

③西吴枢纽立交道路利用率提升 $\geq 20\%$,高峰时段通行延误降低 $\geq 15\%$ 。

3.经济和社会效益

①经济效益:通过优化交通诱导策略、提升道路利用率,减少拥堵导致的时间损耗与燃油浪费,降低运输成本;标准化技术方案与设备部署工法,可减少同类工程智能化改造与运维投入,形成可复用的技术成果,降低重复研发成本。

②社会效益:通过精准感知与实时预警,减少分合流区交通事故风险,保障驾乘人员生命财产安全;缓解枢纽立交拥堵,提升区

域路网通行效率，改善出行体验；技术成果可在全省乃至全国类似改扩建立交工程推广，为智慧交通建设提供示范，助力交通强国与数字交通战略落地。

4.成果提供形式

- ①《复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究报告》1份；
- ②枢纽立交会车警示与路侧诱导系统1套；
- ③发表核心期刊学术论文2篇及以上；
- ④申请知识产权2项及以上。

5.其他考核指标

- ①开展的媒体宣传报道大于等于3次；
- ②技术交流大于等于1次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 3 月 -2026 年 5 月	1. 系统搜集整理有关文献，总结国内外相关研究的现状趋势和存在的问题； 2. 细化研究的技术路线，完成调研报告和数据采集； 3. 研究多源传感器自适应融合算法，开展多维度交通运行数字化感知网络的研发和测试； 4. 安装 AI 智能摄像机和毫米波雷达，开展车路协同控制方法研究。
2026 年 6 月 -2026 年 8 月	1. 研究多源传感器自适应融合算法，开展多维度交通运行数字化感知网络的研发和测试； 2. 派遣项目组成员参加相关国际高水平会议以及邀请国外知名学者前来进行相关学术交流。

2026 年 9 月 -2026 年 11 月	开展车辆目标检测、多路视频多目标跟踪方法研究。
2026 年 12 月 -2027 年 2 月	1. 开展实际道路测试; 2. 开展交通异常态势推演与预警; 3. 申请软件著作权 1 份。
2027 年 3 月 -2027 年 5 月	1. 开展地磁感应阵列和视频感知阵列完成多元信息融合研究; 2. 实现系统检测每条车道交通环境与交通流量数据、车道级交通事件检测和车道级行车状况场景还原等功能。

2027 年 6 月 -2027 年 8 月	1. 路侧单元和车载单元测试; 2. 车路协同感知行车风险管控系统测试。
2027 年 9 月 -2027 年 11 月	1. 开展研究成果现场部署、调试和效果评价; 2. 申请软件著作权 1 份。
2027 年 12 月 -2028 年 2 月	1. 项目结题验收资料整理完善; 2. 开展项目评审专家会; 3. 提交项目成果。

四、项目经费

项目总经费：160 万元
 交通运输厅补助：19.83 万元
 自筹资金：140.17 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	140	16
1. 设备费	60	7
(1) 购置设备费	50	5
(2) 试制设备费	6	1
(3) 设备改造与租赁费	4	1
2. 业务费	55	6
(4) 材料支出	25	2
(5) 测试化验实验加工支出	5	1
(6) 燃料及动力支出	5	1
(7) 差旅支出	4	1
(8) 会议支出	4	1
(9) 国际合作与交流支出	2	0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	7	0
(11) 其他支出	3	0
3. 劳务费	25	3
(12) 劳务性支出	17	2
(13) 咨询专家支出	8	1
(二) 间接费用	20	3.83
4. 管理费	12	2.5
5. 绩效支出	8	1.33
合 计	160	19.83

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	1
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	2
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	2
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	2
		2. 培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	4
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司负责项目的总体协调、项目的资助、项目相关成果考核、项目实施计划方案的论证、基础资料与实践条件的提供、室内和现场试验研究及后续工程应用的推广工作。

陕西高速公路工程试验检测有限公司负责项目具体实施,陕西交通电子工程科技有限公司和陕西交控交通工程有限公司负责项目相关技术研究和开发。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司						
参与单位（排序）：陕西高速公路工程试验检测公司，西安公路研究院有限公司，陕西交通电子工程科技有限公司，陕西交控交通工程有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	陈志奔	1972-02	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	副高级	公路工程	项目总体负责
主要研究人员						
2	高晓军	1976-09	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	副高级	公路工程	依托工程负责
3	邵永军	1977-03	陕西高速公路工程试验检测有限公司	正高级	公路工程	项目协调

4	张鹏	1981-10	陕西交通控股集团有限副高级 公司建设管理分公司	公路工程	项目研判	张鹏
5	程鹏	1977-07	陕西交通控股集团有限副高级 公司西兴高速公路改扩 建管理处	公路工程	项目协调	
6	刘波	1987-11	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	信息工程	监测设备研究	刘波
7	赵杉盟	1993-09	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	交通信息工 程及控制	框架设计	赵杉盟
8	李焕科	1969-05	陕西交通控股集团有限 公司西宝分公司	信息管理与 信息系统	理论研究	李焕科
9	邓江峰	1984-10	咸阳市公安局交通警察 支队高速公路交警大队	自动化	理论研究	邓江峰
10	席栋	1993-10	西安公路研究院有限公 司	地质工程	项目设计	席栋
11	刘凯涛	1975-10	咸阳市公安局交通警察 支队高速公路交警大队	信号与信息 处理	软件开发	刘凯涛
12	贺鹏举	1988-10	陕西交通控股集团有限 公司建设管理分公司	公路工程	软件开发	贺鹏举

13	方鹏	1974-08	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	副高级	公路工程	理论研究	方鹏
14	同俊峰	1976-09	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	初级工程师	公路与桥梁工程	设备调试与运维	同俊峰
15	张伟	1989-10	陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司	工程师	公路工程	设备调试与运维	张伟
16	贾江波	1988-10	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	工程师	公路工程	系统研究	贾江波
17	毛新越	2001-02	陕西高速公路工程试验检测有限公司	初级工程师	通信工程	软件开发	毛新越
18	马杰	1995-10	陕西交控交通工程有限公司	初级工程师	交通工程	理论研究	马杰
19	张伦	1973-10	陕西交通控股集团有限公司西宝分公司	中级	信息管理与信息系统	软件开发	张伦
20	张言	1987-06	陕西交通控股集团有限公司西宝分公司	中级	电子信息	软件开发	张言

21	李森	1986-08	陕西交通电子工程科技 有限公司	中级	机电工程	设备调试与运维	李森
22	姚立	1987-12	陕西交通控股集团有限 公司 西兴高速公路改扩 建管理处	初级工程师	公路工程	设备调试与运维	姚立
23	贺子豪	1993-07	陕西交通控股集团有限 公司 西兴高速公路改扩 建管理处	工程师	公路工程	设备调试与运维	贺子豪

八、信息表

项目合同编号	25-66X	密级	/	A: 机密 B: 秘密 C: 内部					
项目名称	复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究								
项目实施所在地	陕西西安	起止年限	2026 年 3 月至 2028 年 3 月						
总 经 费	160 万元	厅 拨	19.83 万元						
第一承担单位	单位名称	陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司							
	所在地	陕西省西安市					代码	/	
	通讯地址	陕西省西安市唐延路 6 号					邮编	710086	
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	3	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	陕西高速公路工程试验检测有限公司							
	2	西安公路研究院有限公司							
	3	陕西交通电子工程科技有限公司							
	4	陕西交控交通工程有限公司							
项目负责人	姓 名	陈志弈	性 别 (1) 1.男 2.女			出生年份	1972		
	学 历	(3) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他							
	职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他							
	联系电话	13991986929		电子邮箱					
项目联系人	姓名	贾江波		性 别		男			
	联系电话	18391959289		电子邮箱		741831333@qq.com			
项目组人数	23	高级	6	中级	11	初级	6	其他	0
主要研究内容 (100 字以内)	本项目引入毫米波雷达、视频分析、声光诱导,运用多源传感器融合、车路协同、交通行车安全评估等前沿技术,解决高速公路改扩建工程痛点。旨在提升路段运营安全性,降低施工事故发生率,同时优化交通流,实现车路智能协同与实时诱导,缓解拥堵、提高道路资源利用效率。								
成果属性	D	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	BD	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式拾份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

负责人：（签字）

李



陕西省交通运输厅

2026年3月2日

联系人：（签字）

张

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司

单位负责人：（签字）

石



2026年3月30日

项目负责人：（签字）

刘

（公章）

电 话：

财务负责人：（签字）

金

账 户 名：陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司

开户银行：中国建设银行股份有限公司西安南大街支行

账 号：61050186250000001895

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办
法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位：(盖章)

项目负责人

年 月 日

项目编号：25-66X

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导
技术研究

申请单位：（盖章）

陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司

陕西高速公路工程试验检测有限公司

西安公路研究院有限公司

陕西交通电子工程科技有限公司

陕西交控交通工程有限公司

联系人：贾江波

电 话：18391959289

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目录

一、项目研究的背景和必要性.....	1
1.1 项目背景	1
1.2 研究目的及意义.....	3
二、前期科研及工作基础.....	6
2.1 国内研究现状	6
2.2 国外研究现状	9
2.3 项目现有工作条件	12
2.4 参考文献	16
三、实施方案.....	21
3.1 拟解决的关键问题.....	21
3.2 主要研究内容及实施方案.....	22
3.2.1 主要研究内容.....	22
3.2.2 实施方案.....	23
3.3 技术路线.....	26
3.3.1 标准化部署工法.....	27
3.3.2 基于雷达、图像等多模态数据融合的交通融合感知	30
3.3.3 行车安全性评估体系.....	33
3.3.4 分合流区智能预警与安全管控系统.....	35
3.3.5 高速公路突发事件应急管理体系	48
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接.....	50
3.5 有关技术经济指标.....	51
四、项目承担单位及参加单位概况.....	51
4.1 单位概况.....	51
4.2 技术力量及人员构成.....	54
4.3 各自承担的主要工作.....	55
4.4 项目主要负责人情况.....	56
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件.....	57
5.1 依托工程（工作）概况.....	57

5.2 投资来源.....	58
5.3 工程进度与项目科研进度的配合.....	58
5.4 组织管理形式.....	59
六、项目经费估算及资金筹措情况.....	61
七、项目绩效指标.....	62
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益.....	64
8.1 项目预期目标（项目的考核目标）.....	64
8.2 提交的研究成果及其形式.....	64
8.3 经济、社会、环境效益分析.....	64
九、其它需要说明的问题.....	65
十、申请单位意见.....	65

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目背景

近年来，随着国家《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》等系列大政方针的出台，交通行业相关技术的快速发展，以及互联网、大数据、人工智能等信息技术在交通领域的深度融合应用，我国高速公路发展步入了智慧化、数字化、网联化的新阶段。《交通强国建设纲要》明确提出：“推广应用交通装备的智能检测监测和运维技术，加速淘汰落后技术和高耗低效交通装备”“强化交通基础设施养护，加强基础设施运行监测检测，提高养护专业化、信息化水平，增强设施耐久性和可靠性”。与此同时，国家持续推进交通领域新型基础设施建设，陆续出台的《数字交通“十四五”发展规划》《交通运输领域新型基础设施建设行动方案（2021—2025年）》《公路“十四五”发展规划》等重要文件，将数字化、信息化和智慧交通作为推动交通高质量发展的重要方向。

在此背景下，智慧公路建设日益成为行业重点，智慧桥隧、智慧枢纽等关键节点的建设已迫在眉睫。为加快推进公路交通基础设施数字化转型，《关于推进公路数字化转型加快智慧公路建设发展的意见》《关于进一步推动公路桥梁隧道结构监测系统工作实施方案（2024—2030年）》《关于支持引导公路水路交通基础设施数字化转型升级的通知》等政策密集发布，强调通过数字孪生、物联网、云计算等现代数字技术赋能公路交通，实现“人—车—路—环境”多要素的深度融合，推动全业务流程数字化与智能化试点工程落地。交通运输部发

布的《公路安全韧性提升技术指南（试行）》进一步提出，要强化近远结合，注重全灾种防范与监测预警，提升公路系统的安全性、韧性与可靠性，打造安全可靠、经济适用、韧性耐久的现代化公路基础设施体系。

在国家大政方针的布局和政策引导下，结合陕西省《“十四五”综合交通运输发展规划》及全省高速公路网络结构调整、改扩建工程实施的现实需求，本项目聚焦于解决高速公路改扩建后在运营阶段面临的复杂交通流管理与安全诱导问题。随着经济社会的快速发展和交通流量持续增长，高速公路枢纽立交区域的交通组织愈加复杂，车辆分合流频繁、加减速行为显著，极易导致“幽灵堵车”与连锁拥堵现象。若交通诱导及分流策略不当，不仅会降低通行效率，更可能诱发追尾、侧碰等交通事故，严重威胁人民群众生命财产安全，造成显著的经济损失。

陕西作为关中平原城市群核心省份，其高速公路路网是连接西北与中东部的重要交通纽带，近年来省内多条高速公路陆续启动改扩建工程，枢纽立交的智能化管理需求尤为迫切。西兴高速西吴立交作为连霍高速主线与多条支线交汇的典型改扩建枢纽立交，具备多分合流、交通流密度大、节假日峰值特征显著等改扩建枢纽立交的共性特点，其交通管理痛点与行业普遍问题高度契合，是开展复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究的理想载体。基于此，本项目立足行业技术发展需求，以改扩建枢纽立交的共性技术难题为研究核心，以西吴立交为典型工程依托开展技术研发与验证，旨在形成可复制、可

推广的技术体系，为全国同类改扩建枢纽立交的智能化管理提供解决方案。

1.2 研究目的及意义

随着我国经济社会的快速发展，众多既有高速公路正步入改扩建阶段，道路改造和扩建项目逐年增加，道路改扩建工程的频繁开展对交通组织与安全管理提出了新的挑战。高速公路在早期建设过程中，受技术条件、交通需求和规划标准等因素限制，其服务水平相对较低。随着改扩建工程的推进，道路通行能力显著提高，但也带来了新的运行特征与安全风险。改扩建后道路条件发生变化，若交通组织与诱导措施不当，极易造成交通拥堵，严重时 would 诱发连环事故，既损害人民群众生命财产安全，也造成显著的经济损失。造成这一问题的主要原因包括：

（1）在改扩建后高速公路上，车道数增加、交通密度加大，交通运行状态更加复杂。当车辆行驶至枢纽立交口时，频繁的变道、并线和汇入行为容易导致“幽灵堵车”，显著提高事故率；

（2）改扩建后不同路段之间的限速差异较大，运行速度不均衡。当车速差过大时，车辆频繁加速、减速的行为将导致交通波动性增强，进一步引发拥堵与碰撞风险；

（3）目前，多车道高速公路危险状态判别理论与动态安全评估体系尚不完善，现有模型普遍缺乏可工程化的实时应用能力，难以满足复杂枢纽场景的安全监管需求；

（4）结合项目所在区域节假日交通量激增的特征，西吴枢纽前

后分合流处为西兴高速最突出的拥堵瓶颈之一，高峰时段排队长度大、通行效率低，节假日期间常出现严重拥堵与安全风险。

针对上述问题，本研究以“提升改扩建高速公路运行安全与管理智能化水平”为目标，重点分析路基路面改扩建后对交通流特征与运行安全的影响，提出面向复杂交通流枢纽立交的智能感知与诱导解决方案。研究将以突破复杂环境下的多源感知与数据融合技术瓶颈为切入点，着力提升路侧感知设备在雨雪、夜间、低能见度等环境下的稳定性与精度，从而实现宏观交通流态势监测与微观交通行为识别的统一，为交通安全事件的实时感知、智能分析与分级预警提供支撑。

同时，研究将深入探索多传感器数据融合与智能算法在复杂交通环境下的协同应用，重点攻关毫米波雷达与视频监测的融合感知机制，构建全向的多目标检测算法与诱导技术模型，提升目标识别与诱导的一致性与鲁棒性。通过建立基于雷视融合轨迹信息的交通冲突分析与判别指标体系，构建适用于多车道、多分合流场景的交通安全评估模型。

表 1-1 交通量预测结果表

单位：小客车辆/日

路段名称	2026 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年
起点~帽儿刘	58372	64298	70998	76133	80767
帽儿刘~沔河	91054	99736	109720	117500	124479
沔河~咸阳	82417	90270	99302	106338	112634
咸阳~咸阳西	59788	68205	76311	84476	91563

咸阳西~咸阳高新	51792	58456	66266	73042	78662
咸阳高新~西吴枢纽	49154	56519	64584	70948	76662
加权平均	64012	71520	79799	86869	93022

根据前期对西兴高速西吴立交的 OD 调查与表 1-1 显示，改扩建通车后，随着车道数增加，小客车断面交通日流量预计将以年增长近两千辆的速度持续攀升。

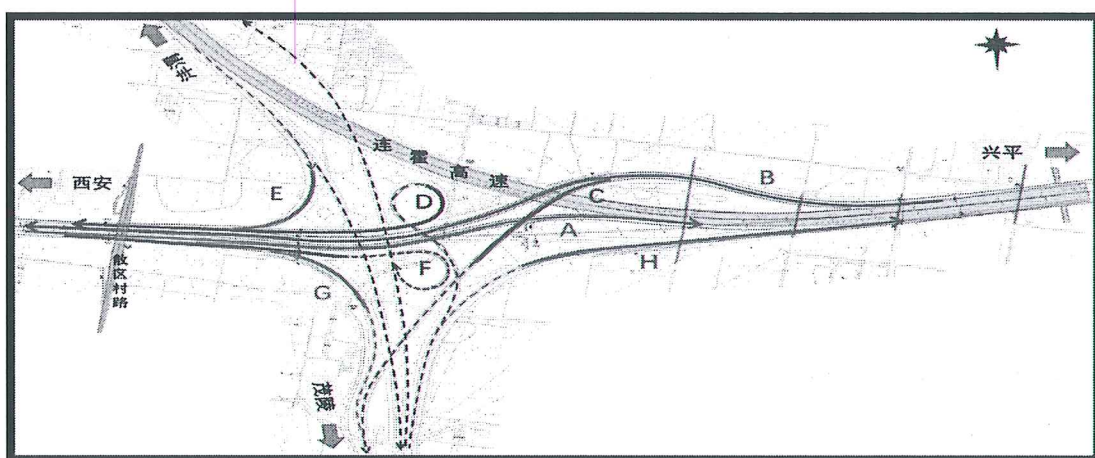


图 1-1 西吴立交改扩建项目规划图

西吴立交地处连霍高速主线与多条支线交汇位置，如图 1-1 所示，具备多次分流与合流特征，是典型的复杂交通流枢纽场景。因此，以西吴立交为研究载体，研究复杂枢纽立交下的行车感知与诱导关键技术，不仅具有典型代表性与验证价值，也可为全省乃至全国范围内的改扩建立交管理提供技术示范。

本研究以路侧智慧路桩、视频监控设备及毫米波雷达为核心设备，针对改扩建后多车道高速公路在雪天、夜间及高密度交通流场景下的目标识别与诱导技术难题，开展点云数据解析与多目标检测算法研究，建立融合感知数据的交通冲突判别模型，并在实际交通场景中进行验证。通过研究成果的落地应用，可显著提升复杂环境下目标检

测与轨迹追踪的鲁棒性与可靠性，为构建精准、高效、可扩展的车路协同系统提供技术保障。

本项目的实施将为高速公路改扩建后交通运行安全与管理智能化提供创新思路，助力智慧交通基础设施体系建设。研究成果可广泛应用于枢纽立交、服务区出入口及特长隧道等典型复杂场景，推动交通运行从“被动应对”向“主动预防”转变，对保障道路安全、提升通行效率、支撑“交通强国”和“数字交通”战略具有重要的现实意义和长远价值。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内研究现状

近年来，以大数据、人工智能、物联网和边缘计算为代表的新兴技术正全面融入交通行业，推动传统交通监测体系向“多源感知、智能分析、协同决策”的智慧交通模式演进。在国家交通强国战略与数字交通政策推动下，基于车路协同的智能车路系统（ICV-Road Infrastructure Cooperative System）成为当前研究重点[1]。该系统通过多源感知与无线通信实现“车-路-云”数据互联互通，为道路运行状态识别、交通冲突预测及智能诱导提供了重要支撑[2,3]。

在多目标检测与融合感知方面，国内研究逐步由单传感器感知向多模态融合发展。党相卫等[4]针对激光雷达在烟雾、尘霾环境中识别精度下降的问题，提出基于毫米波雷达与激光雷达的融合算法。该方法利用支持向量机（SVM）识别烟雾密度，并在点云层面进行补偿修复，实现了对复杂天气的鲁棒感知，有效提升探测准确率与环境

适应性。陈磊等[5]构建了一种基于深度神经网络的多源交通数据融合模型，将视频、微波检测器与浮动车（FCD）数据进行多层特征融合，显著提高了多车目标识别率，但受限于样本集，算法在雨雪等恶劣环境下的稳定性仍不足。王海等[6]将激光雷达点云投影为鸟瞰图（BEV），提出多任务联合学习网络，实现了车辆检测与分类的同时进行，相较于传统 R-CNN 算法，检测精度提升约 12%，推理速度提高 30%。陈子卿等[7]以激光雷达为主传感器，设计全卷积神经网络（FCN）进行车辆检测，并在数据后处理阶段采用状态估计与数据关联算法，实现了多目标的轨迹级融合跟踪，整体检测精度达到 94%。

陈俊吉[8]在毫米波雷达与激光雷达融合研究中，提出基于目标聚类与最近邻关联（NNDA）的轨迹构建方法，实现了单车在多帧时间序列下的连续跟踪，显著降低了高速环境中的目标丢失率。赵望宇等[9]将毫米波雷达与单目视觉相结合，通过空间标定与目标级融合算法进行前车识别，实验证明融合模型在阴天、雨天的检测鲁棒性比单一传感器提高约 15%。张伟等[10]提出融合 YOLOv5 与毫米波雷达的轻量化检测网络，可在嵌入式平台实时运行，并在雾天场景下保持稳定性能。杜维等[11]进一步引入 Transformer 结构构建点云-图像特征交互网络，实现跨模态全局信息建模，检测 mAP 较传统 CNN 方法提高 7.6%。王力等[12]则基于红外、雷达和视频的时空融合特征设计多分支轻量模型，在低照度夜间场景下仍能保持高识别精度。

在轨迹提取与交通冲突分析方面，研究重点逐步转向车辆行为预测与动态风险评估。吴建清等[13]系统总结了多类轨迹采集与处理方

法,提出互通式立交分合流区的冲突识别模型,基于车辆速度差、间距与角速度特征建立风险分级标准。杜豫川等[14]融合视频与雷达多源数据实现全时空车辆轨迹重构,并基于轨迹相似性指标评估数据质量,为交通冲突识别提供可靠数据支撑。郭佳[15]利用毫米波雷达采集交叉口交通信息,通过与 GPS 数据对比验证数据一致性,并提出基于雷达回波强度的目标判别方法,实现了对不同类型车辆的区分检测。王烨[16]建立了高速公路换道特性模型,采用自然驾驶数据验证驾驶员换道行为与相邻车流关系,为交通微观仿真模型提供了参数依据。王雪松等[17]通过多传感器装备车辆采集自然驾驶数据,提取纵横向动态参数,结合随机森林算法实现危险事件识别,识别准确率达 91.2%。房锐等[18]引入风险矩阵法,对弯道交通冲突严重度进行定量化评估,提出基于道路线形与交通流参数的风险预测模型。赵笑月等[19]通过视频检测提取连续多车轨迹,结合 TTC (Time to Collision) 与 PET (Post Encroachment Time) 指标识别冲突位置,实现交通风险空间分布可视化。

近年来,多项研究将替代安全指标 (Surrogate Safety Measures, SSM) 引入交通风险评估。张志刚等[20]利用 TTC 与 PET 组合构建高速分流区冲突模型,揭示车辆间相对速度变化对潜在碰撞的敏感性。刘洋等[21]提出基于改进 DRAC (Deceleration Rate to Avoid Crash) 的重型车辆减速风险分析模型,用以刻画高负荷工况下驾驶行为差异。杜晨阳等[22]融合 TTC、PET 与 DRAC 建立综合风险指数 (Integrated Safety Index, ISI),实现多场景下的冲突实时判别。张林

等[23]则从系统架构角度出发,构建“智慧基站—边缘节点—云平台”三层协同感知体系,实现多站点数据拼接与跨设备实时预警。

在交通路径诱导策略的研究方面,王文旭等[24,25]在2006年出了基于局部信息的静态局部交通路径诱导策略,静态局部交通路径诱导策略在诱导时信息包根据邻居节点度的大小选择下一旅行节点,动态混合交通路径诱导策略通过考虑邻居节点度和当前时间步的信息包累积情况进行选择。严刚等[26]2006年提出了一种基于全局信息的有效交通路径诱导策略,信息包传输的路径为始发点至目的地节点的路径中网络上节点度之和最小的那一条。

尽管国内在融合感知算法、轨迹重构与风险判别等方面已取得显著成果,但仍存在一些共性问题:其一,多传感器协同感知的工程实现仍依赖特定场景,缺乏统一的标定与数据融合标准;其二,恶劣天气和复杂地形下的感知稳定性不足,算法的泛化与实时性有待提升;其三,轨迹级冲突判别和风险量化模型大多仍停留在静态阈值层面,难以适应交通环境的动态变化。在此背景下,构建可适应多气候、多地形的“路侧—边缘—云”协同感知体系,并形成基于真实交通环境的风险评估与诱导机制,已成为推动我国智慧交通体系升级的关键方向。

2.2 国外研究现状

国外在智能交通与车路协同领域起步较早,研究体系相对成熟,尤其在融合感知、轨迹识别和替代安全指标(SSM)构建方面形成了系统成果。

在多目标检测与融合感知方向, Broughton 等[27]提出基于激光雷达与毫米波雷达的异构数据融合框架, 采用深度卷积特征对齐网络实现模态间映射校正, 在雾霾及光照不均条件下目标检测精度较单模态提高 18%。Fang 等[28]通过融合 LiDAR 与摄像头信息构建强化学习检测网络, 实现端到端车辆追踪, 实测误识率仅为 0.6%。Lee 等[29]设计基于扩展卡尔曼滤波的雷达-激光联合状态估计模型, 利用几何约束提升轨迹一致性与姿态估计精度。Qian 等[30]开发 MVDNet 检测网络, 在时间维度融合激光雷达与毫米波雷达特征, IoU 较单雷达方案提升 10%, 并首次实现大雾条件下实时检测。Bijelic 等[31]提出“Seeing Through Fog”多模态感知模型, 利用可见光与近红外数据联合训练, 在不透明雾环境中实现跨域鲁棒检测。Agrawal 等[32]设计 Infra-3DRC-FusionNet 深度网络, 将 RGB 摄像头与 3D 雷达数据进行多层特征融合, 实现道路基础设施级 (Infrastructure-Level) 的智能感知, 其在夜间与降雨环境中 F1 值保持 90%以上。

在轨迹提取与交通冲突分析方面, Zhao 等[33]率先提出利用路侧激光雷达采集车联网车辆的高精度轨迹数据, 形成世界首个“车联网现场实验室”, 验证了路侧感知在提升整体交通感知覆盖率方面的优势。Wu 等[34]采用无人机视频结合深度学习实现车辆检测与轨迹生成, 通过交并比识别丢失目标, 显著提升遮挡场景下的检测连续性。Yang 等[35]将多车辆轨迹数据输入深度神经网络, 实现事故分类与冲突预测模型的联合优化。Sheng 等[36]提出基于 TTC、PET 与改进 TAdv 的行人-车辆冲突识别方法, 构建多维风险区间判别模型, 在混合交

通场景下识别准确率超过 92%。Ding 等[37]基于交通流动力学理论与实测轨迹数据,揭示车辆间时距与速度波动对冲突概率的耦合关系,提出从宏观交通流特性预测微观冲突的新思路。Zheng 等[38]综合 TTC、MTTC、PET 和 DRAC 指标,利用双变量极值模型实现事故概率估计,模型预测准确率较单指标模型提升 20%以上。

在基础设施智能感知与 V2X 协同方面,Yao 等[39]提出基于路侧传感器的三维检测网络(RS-Det3D),可在 200 米范围内实现多角度高精度目标识别。Zhang 等[40]进一步构建无标定路侧 BEV 感知模型,利用 V2X 通信融合多 RSU 数据,形成跨设备一致的全局环境图。Yusuf 等[41]系统评述 V2X 通信在自动驾驶与交通安全中的应用,认为 RSU 将成为实现车路云一体化的关键节点。Aslam 等[42]提出基于 PC5/Uu 混合链路的 V2X 消息级融合架构,通过双通道传输提升 RSU 间通信稳定性与时延性能。

在交通路径诱导策略的研究方面,Echenique 等[43]2004 年提出了一种基于全局信息的混合交通路径诱导策略,其通行能力显著高于传统的最短路径路交通路径诱导策略。Chen 等[44]2006 年对 Echenique 等人提出的交通路径诱导策略进行了改进,使网络的传输效率得到了进一步提升。Ling[45]等 2009 年提出了一种基于“信息素”的局部信息交通诱导策略,该路径策略与基于节点度的局域信息交通诱导策略和基于最短路径的交通诱导策略相比,在通行效率和通行能力方面都优于前述策略。Ling 等[46]2010 年提出了一种基于网络系统节点队列长度信息的全局动态交通诱导策略,该策略利用更新节点队

列长度和相应路径的时间延迟,使得系统的通行能力不变,传输的时间缩短。Yang 等[47]2014 年提出了一种考虑移动节点网络局部交通信息的自适应路径策略。

尽管人们提出了许多路径策略来提高网络流量容量,但大多数研究都集中在孤立网络上。随着复杂网络研究的深入,研究者发现,多层网络可以更好地描述交通系统,特别是现代都市圈的多式联运系统[48,49],多层网络上的流量动态与单层网络有显著不同[50-54]。Zhuo 等[55]用最短路径策略研究了四种双层网络的流量动态,发现均匀的物理拓扑可以实现更高的流量容量。Ma 等[56]提出了一种基于节点间中心性的全局感知路径策略,该策略的性能比最短路径路由协议显著提高。Gao 等[54]提出了一种有效的多层网络流量分配策略,考虑了节点局部结构的作用和每层传输速度的不同。

总体来看,国外在感知算法体系化、融合架构工程化、替代安全指标定量化以及复杂天气下鲁棒检测等方面取得领先成果,但多数研究仍以理想实验或仿真验证为主,缺乏在复杂地形和极端环境下的长期运行验证。本项目结合我国复杂气候与枢纽立交实际运行环境,研究具有高度的应用价值与创新意义。

2.3 项目现有工作条件

(1) 课题组已完成国内外智能交通、多源感知融合、交通诱导策略等相关领域最新研究资料的系统收集、整理与比对分析,形成了较为完善的技术调研成果与研究框架,为后续详细研究方案制定与实验验证奠定坚实基础。同时,针对本项目研究核心,已完成复杂交通

流枢纽立交行车感知与诱导软件系统的整体规划与初步实现：完成了涵盖感知层、分析层、决策层、诱导层的软件系统全流程架构设计，明确了多模态数据融合、行车安全评估、智能预警诱导、突发事件管理等核心功能模块的开发方案与技术指标。

（2）陕西高速公路工程试验检测有限公司

陕西高速公路工程试验检测有限公司是陕西交控集团下属的高新技术企业。公司前身系1987年组建于陕西三原的西安至三原一级公路监理工程师中心试验室，是我国第一家按FIDIC模式设立的公路工程试验室。2004年1月，正式注册成立具有独立法人资格的有限公司，注册资本5000万元。公司现有员工800+人，其中：交通运输部及省级各类专家10余人，各类专业技术人员380余人。公司有秦创原科学家+工程师队伍1支，博士团队2支，获批交通运输部卫星技术行业应用研发中心（参建）、陕西省企业技术中心、陕西省智慧交通产业中试基地、西安市交通土建结构安全监测技术中心、道路桥隧智慧监测省级高校工程研究中心（参建），入选陕西省省属重点科技型企业、陕西省DCMM数据管理成熟度贯标试点企业，获评陕西省“专精特新”中小企业。公司主营业务包括公路、铁路、建筑、市政和水利工程试验检测、监测及评估；智能监测感知设备研发生产，基础设施数字化及监测系统集成；公路新材料、新技术、新工艺研发、生产和应用。公司拥有交通部公路工程综合甲级、桥隧专项和机电专项试验检测机构资质、中国合格评定国家认可委员会颁发的实验室认可证书，以及市政工程和铁路行业的相关资质），公路养护安全运维

新技术(包括结构与设施设备监测,环境监测及修复等),智慧交通(包括基础设施信息数字化方向、卫星技术在交通行业应用方向)建设。

公司组建了多个行业领先的创新团队,建有国内领先的数千平各类型标准实验室,并通过了 CNAS、CMA 等专业机构的资格认证。公司拥有交通运输部公路工程综合甲级、桥梁隧道工程专项、交通工程专项资质;建设工程质量检测机构资质;铁路工程质量监督检测机构资质;环保工程专业承包二级资质;环境工程设计证书;建设项目环境保护设施施工证书;污水处理设施运维服务能力评价书等认证资质,用专业为用户提供多元化的优质服务。

主营业务涵盖公路、机电、市政、铁路和环境工程试验检测、监测及评估;交通智能监测感知设备研发、生产,交通基础设施数字化及监测系统集成,新基建在交通行业研发推广;公路新材料、新技术、新工艺研发、生产和应用;环境影响评价和咨询等服务,环保整治工程的设计、施工、运维及环保设备销售;技术咨询及培训等。

公司企业技术中心已建成省级企业技术中心和市级工程技术中心,参与交通运输部行业应用研发中心。企业技术中心下设西安市交通土建结构安全监测工程技术中心、部卫星在交通行业应用研究中心、交通环境工程技术中心、公路建养新技术工程技术中心、技术咨询部等。

公司与长安大学、西安建筑科技大学、西安科技大学、西安工业大学和陕西交通职业技术学院开展科研创新合作,共建“研究生实践基地”、“人才培养基地”和“校企合作基地”。

近3年,公司在研科研项目16项其中1项科研成果进入交通运输部重点科技成果推广库;公司获得国家科技进步二等奖1项,陕西省科技进步二等奖1项;陕西交通运输科学技术二等奖和三等奖各1项;取得软件著作权17项、新型实用专利6项,7项发明专利正在实审公示阶段;主持编写陕西省地方标准(规范)4项,涵盖公路、桥梁、隧道的项目建设及运营养护管理,填补了国家和行业规范的空白。公司申请获批了陕西省级企业技术中心,西安市工程技术研发中心。

本项目研究团队在智能交通、交通大数据分析、新型交通传感器研制和应用等领域具有多年的研究经验,具有深厚的研究基础和研究能力。在智慧高速建设、路侧感知设备应用方面具有丰富的实践经验,在高速公路通行效率与安全领域取得了丰硕的研究成果。

(3) 技术装备条件

陕西高速公路工程试验检测有限公司历经多年钻研,拥有丰富的产品储备,已与西汉高速打造基于一流设施的秦岭隧道安全防控体系。公司在西汉高速秦岭隧道群西安方向I、II号隧道及服务区部署了国内先进的激光雷达设备、毫米波雷达设备,陕西高速高速星展科技有限公司通过视频融合识别技术、空间同步技术等,全方位感知公路隧道行驶车辆多维时空信息,精准识别车辆车型、车牌、车速、加速度、车距等,实现空间定位精度优于35厘米的交通流三维全息实时仿真,主动开展风险预判预警,并通过可变情报板、定向音喇叭等进行提醒告知。

公司精心打造“一流设施、一流技术、一流管理、一流服务”的

交通强国秦岭隧道群安全防控体系建设试点工程不仅仅局限于隧道安全运营管理,其所应用的各项自主研发设备、先进技术、管理理念、服务能力具备极高的推广价值,落地前景。能够有效的在高速公路桥、隧、路坡等领域复制推广,为智能交通建设做出巨大贡献。

2.4 参考文献

- [1]吴建清,宋修广.智慧公路关键技术发展综述[J].山东大学学报(工学版), 2020, 50(4):52-69.
- [2]吴建清,宋修广.同步定位与建图技术发展综述[J].山东大学学报(工学版), 2021, 51(5):16-31.
- [3]徐志刚,李金龙,赵祥模等.智能公路发展现状与关键技术[J].中国公路学报, 2019, 32(08):1-24.
- [4]党相卫,秦斐,卜祥玺等.面向智能驾驶的毫米波雷达与激光雷达融合感知算法[J].雷达学报, 2021, 10(04):622-631.
- [5]陈磊,王江锋,谷远利等.基于神经网络的多源交通数据融合算法[J].吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3):705-713.
- [6]王海,刘明亮,蔡英凤等.基于激光雷达与毫米波雷达融合的车辆检测算法[J].江苏大学学报, 2021, 42(04):389-394.
- [7]陈子卿.高速公路环境的车辆检测与跟踪方法研究[D].上海交通大学, 2019.
- [8]陈俊吉.基于毫米波雷达与激光雷达融合的智能车主动避障技术研究[D].南京理工大学, 2020.
- [9]赵望宇,李必军,单云霄等.融合毫米波雷达与视觉的前车检测

与跟踪[J].武汉大学学报, 2019, 44(12):1832-1840.

[10]张伟,李晨等.基于 YOLO 与毫米波雷达的高速多模态目标检测[J].公路交通科技, 2022, 39(5):91-100.

[11]杜维,赵锋.基于 Transformer 的点云-图像融合感知模型[J].中国图象图形学报, 2023, 28(6):1221-1234.

[12]王力,李楠.面向多传感器协同的时空融合检测算法[J].系统仿真学报, 2024, 36(3):581-592.

[13]吴建清,王其峰,厉周缘等.互通式立交风险冲突识别与预警综述[J].山东大学学报, 2022, 52(06):1-13.

[14]杜豫川,都州扬,师钰鹏等.路侧感知车辆轨迹数据质量智能评估[J].中国公路学报, 2021, 34(07):164-176.

[15]郭佳.基于交通雷达数据的交通状态判别方法研究[D].西安电子科技大学, 2020.

[16]王烨.高速公路换道特性与换道模型研究[D].长安大学, 2020.

[17]王雪松,徐晓妍.基于自然驾驶数据的危险事件识别方法[J].同济大学学报, 2020, 48(01):51-59.

[18]房锐,张琪,胡澄宇等.基于风险矩阵的干线公路交通冲突评估模型[J].交通运输系统工程与信息, 2021, 21(02):166-172.

[19]赵笑月,汪攀,朱顺应等.基于视频识别的合流区交通冲突空间分布[J].公路交通科技, 2021, 38(05):90-99.

[20]张志刚,刘智等.基于 TTC-PET 指标的高速公路冲突检测模型[J].中国安全科学学报, 2023, 33(4):92-102.

- [21]刘洋,王小波.改进 DRAC 指标在重型车辆安全评估中的应用[J].交通运输工程学报, 2022, 22(5):143-152.
- [22]杜晨阳,李庆.多指标融合的高速公路交通冲突风险识别[J].公路与汽运, 2024, 41(3):27-34.
- [23]张林, 陈军等. 基于 RSU-边缘-云协同的多源感知系统[J]. 智慧交通技术, 2024, 5(2):64-75.
- [24] Wang W X, Yin C Y, Yan G, et al. Integrating local static and dynamic information for routing traffic[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2006, 74(1): 016101.
- [25] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2006, 73(2): 026111.
- [26] Yan G, Zhou T, Hu B, et al. Efficient routing on complex networks[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2006, 73(4): 046108.
- [27] Broughton G., Majer F. et al. Learning to see through the haze: Multi-sensor fusion in fog[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 136:103687.
- [28] Fang Y., Zhao H., Zha H. et al. Camera and LiDAR fusion for on-road tracking[C]. IEEE IV, 2019:1723-1730.
- [29] Lee H., Chae H., Yi K. A geometric model-based 2D LiDAR/radar fusion[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(8):130-135.

- [30] Qian K., Zhu S., Zhang X. Robust multimodal detection in fog[C]. CVPR, 2021:444-453.
- [31] Bijelic M. et al. Seeing Through Fog Without Seeing Fog[C]. CVPR, 2020.
- [32] Agrawal S. et al. Infra-3DRC-FusionNet[J]. Sensors, 2025, 25(11):3422.
- [33] Zhao J. et al. Detection and tracking using roadside LiDAR[J]. Transportation Research Part C, 2019, 100:68-87.
- [34] Wu Y., Abdel-Aty M. Automated safety diagnosis based on UAV video[J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(8):350-359.
- [35] Yang D. et al. Freeway accident detection via multi-trajectory deep learning[J]. Transportation Research Part C, 2021, 130:103303.
- [36] Sheng L. et al. Pedestrian-Vehicle Conflict Identification Using TTC and PET[J]. Advances in Transportation Research, 2025.
- [37] Ding S. et al. Insights into vehicle conflicts based on traffic flow dynamics[J]. Scientific Reports, 2024.
- [38] Zheng L. et al. Comparison of Traffic Conflict Indicators[J]. Transportation Research Record, 2019.
- [39] Yao J. et al. Infrastructure-assisted 3D detection networks[J]. Neurocomputing, 2024.
- [40] Zhang W. et al. Calibration-Free Roadside BEV Perception with V2X, 2025.

[41] Yusuf S. A. et al. Vehicle-to-Everything (V2X) in Autonomous Driving[J]. J. King Saud Univ.-Comp. Info. Sci., 2024.

[42] Aslam S. et al. RSU-Assisted V2X Message-Level Fusion via Hybrid Links[J]. Vehicular Communications, 2025.

[43] Echenique P, Gómez-Gardeñes J, Moreno Y. Improved routing strategies for Internet traffic delivery[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 70(5): 056105.

[44] Chen Z Y, Wang X F. Effects of network structure and routing strategy on network capacity[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2006, 73(3): 036107.

[45] Ling X, Hu M B, Jiang R, et al. Pheromone routing protocol on a scale-free network[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2009, 80(6): 066110.

[46] Ling X, Hu M B, Jiang R, et al. Global dynamic routing for scale-free networks[J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2010, 81(1): 016113.

[47] Yang H X, Tang M. Adaptive routing strategy on networks of mobile nodes[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 402: 1-7.

[48] Morris R G, Barthelemy M. Transport on coupled spatial networks[J]. Physical review letters, 2012, 109(12): 128703.

[49] Kivelä M, Arenas A, Barthelemy M, et al. Multilayer

networks[J]. Journal of complex networks, 2014, 2(3): 203-271.

[50] Li M, Hu M B, Wang B H. Transportation dynamics on coupled networks with limited bandwidth[J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 39175.

[51] Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. Physics reports, 2014, 544(1): 1-122.

[52] Lin H, Xia Y, Liang Y. Efficient routing for spatial networks[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2022, 32(5).

[53] Zeng C, Lu L, Liu H, et al. Multiplex network disintegration strategy inference based on deep network representation learning[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2022, 32(5).

[54] Gao L, Shu P, Tang M, et al. Effective traffic-flow assignment strategy on multilayer networks[J]. Physical Review E, 2019, 100(1): 012310.

[55] Zhuo Y, Peng Y, Liu C, et al. Traffic dynamics on layered complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(12): 2401-2407.

[56] Ma J, Han W, Guo Q, et al. Improved efficient routing strategy on two-layer complex networks[J]. International Journal of Modern Physics C, 2016, 27(04): 1650044.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

针对改扩建后枢纽立交“多车道—多分合流—多策略”的复杂交

通特征，现有系统普遍存在：车道级目标与轨迹感知不足、夜间/雨雾等恶劣环境鲁棒性欠佳；跨设备/跨路段数据不同步、信息孤岛突出，难以形成“感知—评估—诱导”的闭环；冲突判别与安全评估指标体系不统一、阈值缺乏场景自适应；事件发现到驾驶员触达链路长、时延大，诱导策略难以动态优化。为此，本课题提出面向“感知—计算—决策—诱导—评估”的系统化、标准化技术路线，构建“雷达+视频”的多模态融合车路云协同体系，聚焦分合流场景的车道级高精度轨迹生成与冲突快速评估，形成低时延、可复制、可推广的复杂枢纽立交行车感知与诱导解决方案。涉及的关键技术攻关主要包括：

- (1) 标准化部署工法与方案适配
- (2) 多模态融合交通感知与智能安全预警
- (3) 建立枢纽立交会车警示与路侧诱导系统
- (4) 高速公路突发事件应急管理体系

3.2 主要研究内容及实施方案

3.2.1 主要研究内容

围绕改扩建后枢纽立交“多车道—多分合流—多策略”的复杂交通特征，本项目以“感知—计算—决策—诱导—评估”闭环为牵引，构建系统化技术体系，明确四大核心研究内容：

- (1) 核心研究场景与数据体系构建：梳理西吴立交 5 类典型核心场景；定义四级数据域，制定全流程数据采集、清洗、标准化规范。
- (2) 安全与效率量化指标体系研究：确立核心评价指标及量化阈值，安全指标包含 TTC、PET、DRAC、最小时距等，效率指标包

含平均延误、95th/50th 旅行时间可靠性等，触达与时延指标明确为检测→融合→判别→下发端到端 $P95 \leq 200\text{ms}$ （常态 $\leq 150\text{ms}$ ）、关键事件触达成功率 $\geq 99\%$ 、误报/漏报率各 $\leq 5\%$ 。。

（3）核心技术研发与模型构建：开展多模态融合交通感知技术、分合流区智能预警算法、行车安全动态评估模型、突发事件应急联动机制五大核心技术研发，重点突破雷视融合轨迹信息的交通冲突分析、低时延诱导指令下发等关键技术。

（4）系统集成与标准化研究：研发枢纽立交会车警示与路侧诱导系统，制定感知设备部署、数据通信、系统运维的标准化规范，验证技术成果在西兴立交的适用性，形成可在全省乃至全国同类改扩建立交推广的技术体系。

3.2.2 实施方案

（一）论证复杂交通流枢纽立交智能感知与诱导需求

随着高速公路改扩建工程的持续推进，枢纽立交“多车道、多分合流、多策略”的复杂交通特征日益突出。传统的单源感知与诱导方式已难以适应高密度交通流环境，存在感知盲区、响应迟滞、预警精度不足等问题。为实现对西兴改扩建后西兴枢纽立交的智能化、精细化管理，需要从交通运行监测、车辆行为感知、行车安全诱导与应急联动等方面构建全流程闭环的“感知—决策—诱导—评估”体系。

综合分析交通管理需求与运行安全现状，本项目在复杂交通流枢纽立交的智能化建设中，需要重点解决以下六项问题：

（1）感知精准化。通过部署雷达、视频监控设备等，实现对多

车道、多分合流区域的车辆检测、识别及跟踪，构建全天候、全要素的路侧感知网络，解决恶劣天气、夜间等环境下的感知缺失问题。

（2）通信低时延化。构建融合路侧智慧基站的车路通信网络，实现车辆与路侧系统之间的高可靠、低时延信息交互，确保突发事件预警、车速引导等信息在 500ms 内触达驾驶员。

（3）诱导智能化。建立智能诱导与分流策略库，根据交通流状态实时优化指令推送方式，实现动态分流、限速与路径诱导，缓解高峰期交通拥堵。

（4）安全评估体系化。构建基于 TTC 等指标的动态交通冲突分析模型，对车辆换道、汇入、并行行为进行实时评估，形成量化的安全预警规则。

（5）应急响应一体化。建立联动的交通事件监测与应急管理机制，实现事故发生、预警发布、应急处置的闭环响应，提升突发事件处置效率。

（6）部署标准化与可复制化。形成标准化的雷视融合单元安装规范及通信协议标准，确保系统在不同枢纽立交的推广部署中可复制、易维护。

（二）打造枢纽立交智能感知与诱导系统体系

本项目以“构建高精度感知—智能诱导—安全评估一体化系统”为核心，通过建立多模态融合交通感知体系和综合诱导管理平台，形成“数据汇聚、智能分析、即时诱导、反馈评估”的一体化智能系统，实现交通状态精准掌控与安全管控的闭环运行。

（1）多模态交通融合感知体系

在立交主线、分合流区域及闸道口布设雷达、视频监控设备等多源传感器，通过智慧基站完成数据采集与融合处理，实现全天候多目标检测与轨迹跟踪。系统采用 YOLO 深度检测模型与 Kalman 滤波算法进行目标识别与跟踪，确保在夜间、雨雾天气下的鲁棒性。

（2）智能诱导与安全管控系统

通过智慧引导终端、警示屏及定向广播设备，实现交通信息的智能发布与动态引导。系统可根据交通拥堵、恶劣天气或交通事故情况自动切换提示模式，引导车辆分流、限速或减速慢行，提升行车安全与通行效率。

（3）行车安全评估与预警体系

基于感知层采集的车辆运行数据，构建以 TTC、PET、DRAC 等指标为核心的交通冲突分析模型，实现对车辆汇入、换道等高风险行为的实时判别。结合行车速度、密度等因素，动态生成安全等级与警示阈值，通过 LED、语音等多模态方式进行实时预警提示。

（4）突发事件应急管理体系

构建统一的事件检测、信息发布与处置调度平台，实现事故自动识别、预警推送、应急联动与事件复盘。通过与路网监测指挥中心、交警部门信息互联，确保多部门协同处置，形成“发现—响应—处置—评估”的应急闭环。

（三）构建枢纽立交智能运行与安全管控机制

本项目拟通过试点工程建设，探索并建立一套可迁移、可复制的

复杂交通流枢纽立交智能感知与诱导运行管理机制，形成“系统化设计—分层管理—闭环运行”的实施模式，打造“全阶段适配、数据驱动、动态优化”的智能化管控机制。

（1）系统化设计。通过统一的数据接口标准和通信协议规范，实现感知设备、通信设备、诱导设备的互联互通，形成统一的系统架构与数据格式标准。

（2）分层管理。建立“路侧智能单元—融合智能站—云平台中心”三级管理架构，实现设备层自治、站级融合与平台级分析，确保系统运行的稳定与可维护性。

（3）闭环运行。形成“实时感知—智能分析—精准诱导—动态评估”的循环管理机制，持续优化诱导策略、更新风险模型，提升立交交通运行效率与安全水平。

通过上述体系建设，本项目将实现改扩建后枢纽立交的交通运行可视化、事件响应智能化、诱导策略动态化、运行管理精细化，为复杂交通场景下的智慧公路建设提供可复制、可推广的技术示范。

3.3 技术路线

本项目技术路线围绕“感知—评估—决策—诱导—应急”的核心业务流展开，构建了“前期准备、核心感知、分析评估、决策诱导、应急处置、迭代优化”六大环节的闭环技术体系。该路线以数据驱动为核心，旨在实现对枢纽立交复杂交通态势的精准感知、智能评估与高效管控。



图 3-1 技术路线图

3.3.1 标准化部署工法

根据道路设施条件不同,对枢纽立交主干道及闸道车道内车辆交通行为检测有以下三种部署方案:

(1) “之”字型部署

在路两侧侧杆部署,上下行方向呈“之”字型,单边点位间隔不大于 1km。每个侧杆上安装 2 套雷视融合智慧基站、1 套拓展服务智慧基站;雷视融合智慧基站背靠背安装,拓展服务智慧基站正对行车方向安装。设备安装高度为 10 米。

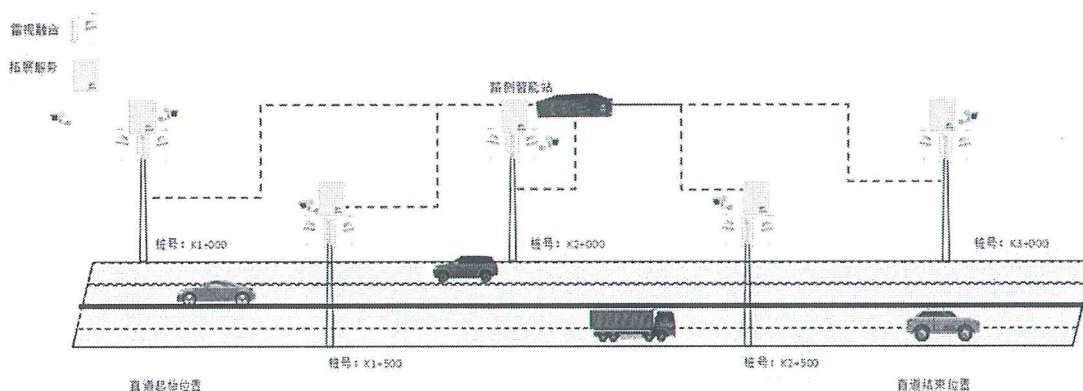


图 3-2 “之”字型部署示意图

(2) 中央隔离带部署

在中间区域间距不大于 1km 部署 T 型杆,保证无盲区全覆盖。

每个 T 型杆上安装 2 套雷视融合智慧基站、2 套拓展服务智慧基站。雷视融合智慧基站在横臂上以背靠背方式安装, 拓展服务智慧基站在横臂上以正对行车方向安装。设备安装高度为 10 米。

在网络汇聚点完成融合路侧智能站 (RSF) 部署。车流数字化路侧智能站实现对常规路段车辆的多杆间的轨迹管理, 拓展服务路侧智能站实现对车辆跨杆、跨域的移动性管理, 包含注册、鉴权等。考虑对交通事件下发的实时性需求, 为了更快更便捷的向车主提供常规路段的交通事件、增值服务信息, 车流数字化路侧智能站与拓展服务智能站应合并为一个网元建设。

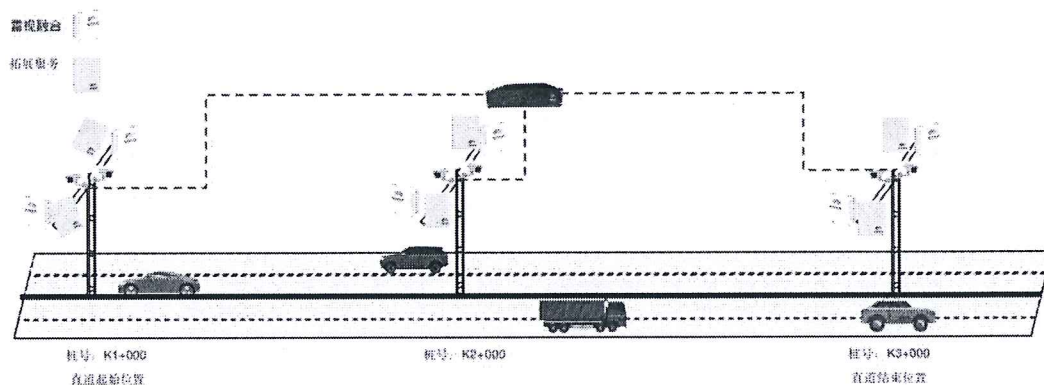


图 3-3 中央隔离带部署示意图

(3) 闸道部署

收费站匝道平直处部署侧杆, 侧杆上部署 1 台雷视融合智慧基站, 实现车辆位置、身份识别。拓展服务智慧基站根据匝道车道数进行部署, 每车道部署一台, 完成车路通信。

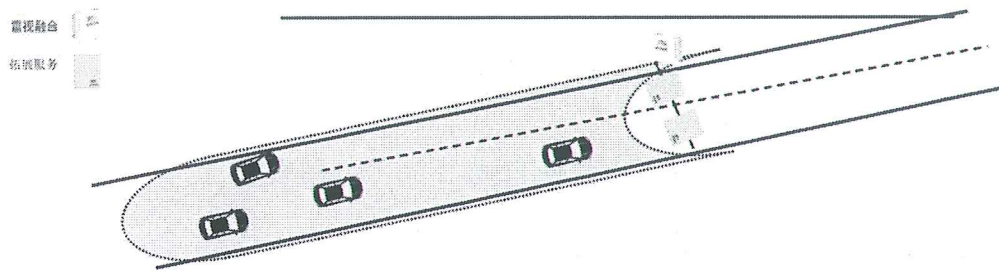


图 3-4 匝道部署示意图

在匝道与主干道衔接处部署一个侧杆，侧杆上部署 1 台雷视融合智慧基站，一台拓展服务智慧基站，实现对匝道进入主干道车辆的感知与通信。以不大于 150 米间距部署侧杆，实现枢纽立交无盲区全覆盖。

在枢纽立交匝道完成融合路侧智能站（RSF）部署。路侧智能站通过收费站光纤网络实现对匝道所有雷视融合天线设备接入，完成对车辆匝道全域跟踪、车辆信息推送。

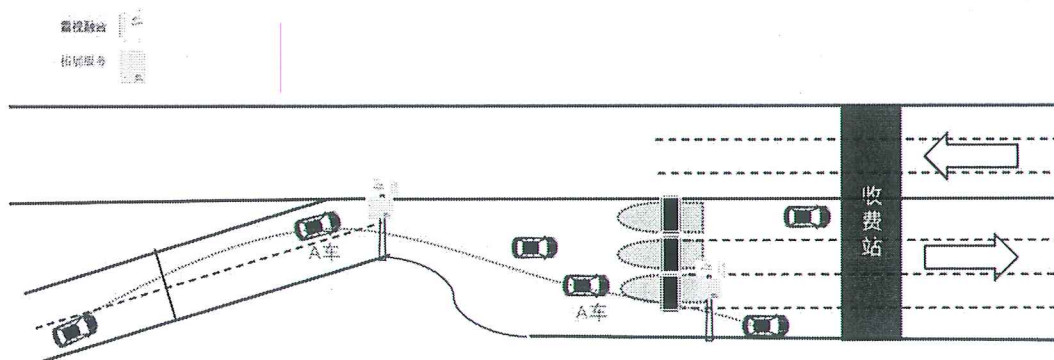


图 3-5 路侧智能站感知示意图

标准化部署工法

①几何与光纤/供电：安装高度 10m、俯仰角与横向跨距按车道数自适应；相邻点位重叠覆盖 $\geq 20\%$ 防盲区；主链路光纤，5G/卫星为备链；太阳能+市电冗余，防雷/防凝露/防盐雾等级满足长期户外。

②时钟与坐标统一：全域 PTP/NTP 授时；以里程桩/UTM 坐标统

一坐标系，保障跨设备轨迹拼接精度。

③RSF（融合路侧智能站）：主线与匝道均设 RSF，承担“多源融合→轨迹管理→事件判别→本地策略下发”，与拓展服务 RSF 合并部署，支撑跨杆/跨域移动性管理（注册、鉴权、黑名单）。

④施工运维 SOP：上塔作业、外参标定、离线巡检周期、固件灰度升级、备件池与响应时限（关键故障 MTTR $\leq 4h$ ）。

3.3.2 基于雷达、图像等多模态数据融合的交通融合感知

通过布设覆盖全路段的视频摄像机、毫米波雷达及各类传感器，组成多维度交通运行数字化感知网络。基于视频与雷达多模融合的交通状态感知技术包含四个部分：车辆目标检测、单摄像机多目标跟踪、跨摄像机多目标跟踪和雷达与视频数据融合。

①车辆目标检测

目标检测即从视频帧中检测车辆目标的存在、车辆位置以及车辆类型信息。研究拟采用基于深度学习的目标检测方法 YOLO。该方法将检测问题作为回归问题处理，用一个网络输出目标位置和类别，流程简单、精度高、速度快。YOLO 系列方法检测精度高，同时，检测速度可达 140 帧/秒，可满足工程实际目标检测需求。

②单相机多目标跟踪

使用单摄像机连续图像，跟踪检测出的多个目标车辆。跟踪过程使用 KF（Kalman Filter）算法和 KM（Kuhn-Munkres）算法。其中，KF 算法是一种高效的自回归滤波器，能在诸多不确定性情况的组合信息中估计动态系统的状态。KM 算法是一种二分图最佳匹配算法，

用于将检测目标与存在轨迹信息进行匹配。两种方法结合使用，可实现单相机多目标跟踪。

③多路视频多目标跟踪

目标车辆跨摄像机关联匹配计算拟分为两个部分：目标运动相似度和目标外观相似度。目标运动相似度根据摄像机间距与目标行驶方向与速度，估计车辆在下一摄像机出现的位置和时间，以目标估计与检测结果的差异计算目标的相似性。目标外观相似度则使用图像特征判断当前摄像机检测目标与上一摄像机目标池中所有目标的相似性，综合目标的运动与外观相似性，再利用 KM 算法，计算得到下一摄像机出现目标与上一摄像机存在目标的匹配关系。最终得到摄像机全程跟踪结果。

目标运动相似性利用建立摄像机阵列的拓扑关系，对单摄像机中跟踪的车辆目标进行线性运动估计，然后计算对应时刻检测数据与估计位置的距离，并用高斯函数进行映射，最终求得的平均值作为二者的运动相似度。

目标外观相似性研究拟采用基于深度学习的目标重识别方法，对不同摄像机下待匹配目标池内的目标进行外观相似性计算。模型以两个摄像机下检测到的车辆目标图像为输入，通过卷积神经网络提取图像外观的高层语义信息，再通过全连接层判别器，输出两个图像在外观上的相似性。

④雷达与视频数据融合

雷达与视频数据融合主要分为两步：假设产生和假设验证。通过

雷达传感器检测的数据在图像上划分出可能为车辆的区域，即感兴趣区域；再利用视频检测对感兴趣区域进行验证，判断该区域是否为车辆目标。雷达传感器和摄像机传感器在车辆检测中的互补，降低对单一传感器的依赖性，提高检测的准确性。雷达与摄像机传感器数据融合模型分为两部分：空间融合、时间融合。

雷达和视频数据在时间上同步即为多传感器数据时间融合。由于每个传感器有自己的时钟基准，所以不同传感器的采样频率各不相同。若雷达扫描频率与视频帧率保持一致，则可使两种传感器的信号时间相对应，从而达到时间同步。融合算法框架主要分为本车运动状态估计、雷达目标跟踪算法、视觉和雷达的时间同步和空间对准、视觉和雷达信息融合四部分。在视频检测输出前有背景建模过程，因此，雷达数据与视频数据的融合数据与视频检测数据需要在时间、空间上进行同步。时间同步和空间对准模块可以将视觉和雷达输出的目标运动状态信息进行时间同步和空间位置对准，使用将当前时刻与历史时刻轨迹联系在一起的序贯轨迹数据关联算法实现对目标车辆的稳定跟踪。

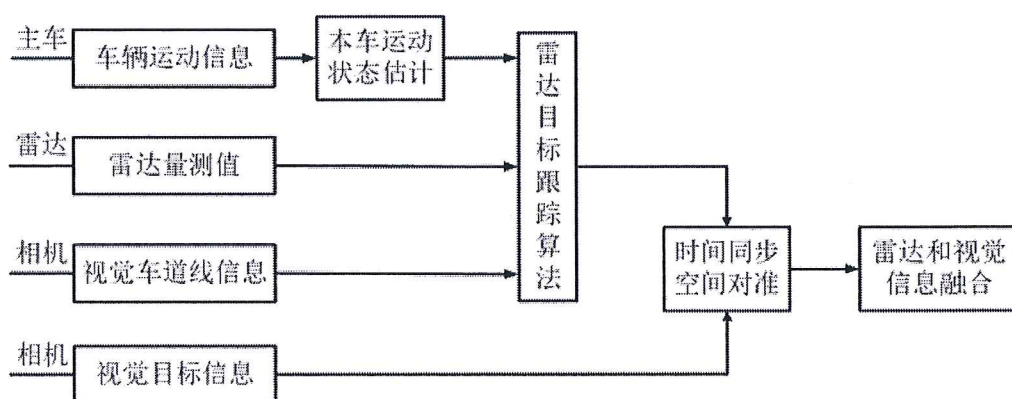


图 3-6 雷视融合数据流转图

⑤多源融合数据增值加工

作为多模态融合交通感知技术的核心价值延伸环节,依托毫米波雷达、视频图像等雷视融合感知数据及其他交通设备感知数据,构建全阶段统一的多源融合数据增值加工体系,实现从原始融合数据到交通管控决策依据的精准转化,核心包含四个步骤:

数据清洗与标准化:对毫米波雷达、视频图像雷视融合数据及车辆轨迹、速度、密度等原始数据进行去噪、补全、异常值剔除,按照全阶段统一的格式标准进行规范化处理,确保数据质量。

交通流特征提取:基于清洗后的标准化数据,提取运营期复杂枢纽场景的宏观交通流特征与微观车辆行为特征。

风险关联建模:通过机器学习算法构建交通流特征与交通风险的关联模型,挖掘不同特征与追尾、侧碰、拥堵等风险的内在规律,确定风险判别关键特征与阈值范围。

策略匹配建模:基于风险关联模型的输出结果,构建风险等级与诱导策略的匹配模型,明确不同风险等级、不同场景下对应的诱导策略类型与执行参数,为后续智能诱导策略的生成提供直接依据,实现感知数据向管控策略的精准转化。

3.3.3 行车安全性评估体系

加速车道车辆汇入主干道的过程类似于换道过程,因此其安全性评估借鉴当前车载主动安全设备换道预警系统中广泛采用的TTC,将其作为本系统安全性评估的重要指标。 $TTC = gap / relative\ speed$,其中gap为本车与目标车辆的相对距离,Relative speed为本车与目标车辆

相对速度。TTC 值反映了本车与目标车辆发生危险碰撞潜在可能性大小，同时反映了交通冲突的剧烈程度。当本车与目标车辆的相对速度越小时，或者速度非常接近时，TTC 值无限大,表明如果两车均按照当前运动趋势行驶，则发生碰撞的可能性几乎为 0，也就是说两车基本不可能发生碰撞。具体安全性等级和对应的 TTC 值之间的关系图如表 3-1 所示。

表 3-1 TTC 值和相应报警形式之间的关系

危险等级	很危险	一般危险	安全
TTC 值	$\leq 3S$	$3 < TTC < 5.5$	≥ 5.5
报警形式	LED 灯和蜂鸣器	LED 灯亮	不报警

根据表中对应的安全等级、TTC 值以及对应的报警形式，系统根据传感器采集到的数据和 TTC 的计算公式，实时计算出 TTC 值，并对计算得到的 TTC 值和安全等级进行比较。在 TTC 值基础上，加入速度因素，搭建安全性评价规则。安全性评价规则根据大量的实车实验数据统计分析得到。分别将自车速度分成 40~60km/h、60~80km/h、80~100km/h、>100km/h 四个等级，得到的安全性提示阈值如表 3-2 所示。

表 3-2 四个安全等级

	车速(KM/h)	40~60	60~80	80~100	>100	TTC	安全性
纵向 距离	上限	19	19	20	20	<3s	安全
	下限	4	4	5	5	>3s	不安全

当系统处理出的结果，即 TTC 值小于 3s 时，系统安全性评价是

安全的,此时车辆从加速车道汇入主干道时安全的,若系统输出 TTC 值是大于 3s 的,则系统认为此时从加速车道汇入主干道不安全,系统将该结果发送到匝道车辆汇入主干道区域的预警提示屏上,通过预警提示屏字体和语音提示驾驶员此时不要进行汇入主干道操作。

3.3.4 分合流区智能预警与安全管控系统

通过部署智慧引导终端和智慧警示屏,实现对高速公路交通拥堵、恶劣天气等情况的实时监测与智能预警,引导车辆安全有序行驶,降低事故发生率,提高道路通行效率,为司乘人员提供更加安全、便捷的出行体验,同时提升公路管理部门的智能化管理能力。

3.3.4.1 设备介绍

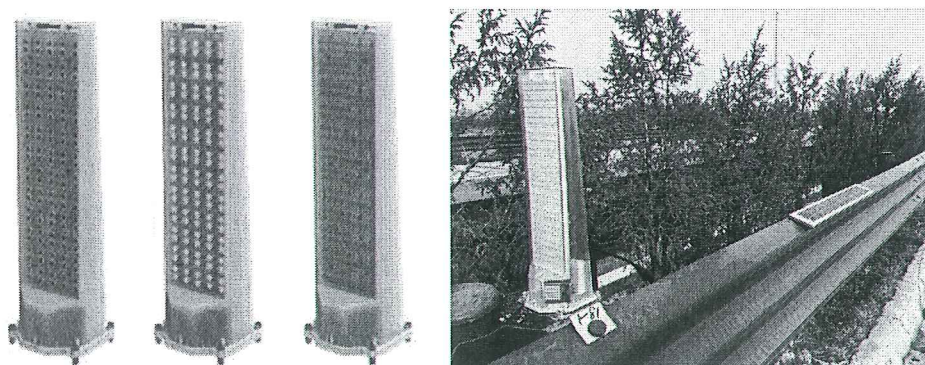


图 3-7 智慧引导终端及安装示意图

智慧引导终端具备多种实用功能,能显示红、黄、蓝、绿四种 LED 颜色,可根据不同场景需求切换颜色状态以传递警示信息。该设备配备雷达,具有二类交调水平,能够精准测速,实时获取车辆行驶速度数据。同时,设备支持将采集到的数据上传到后台管理端,便于管理部门实时掌握道路交通状况。在安装方式上,智慧引导终端安装在道路路侧波形护栏上,间隔 50m/台,采用太阳能供电方式,无需额外铺设供电线路,安装灵活且节能环保。



图 3-8 智慧警示屏

智慧警示屏能够清晰显示文字信息，可根据不同预警场景实时更新显示内容，向司乘人员传递直观的警示提示。设备具有大功率雷达系统，能够检测车速、连续变道等，设备自带定向高音喇叭，能够发出清晰、洪亮的语音提示，确保司乘人员在嘈杂环境下也能准确接收预警信息。此外，智慧警示屏同样支持将相关数据上传到后台管理端，实现数据的实时交互与管理。其安装在道路路侧，采用太阳能供电，适应公路沿线的复杂环境，保障设备稳定运行。

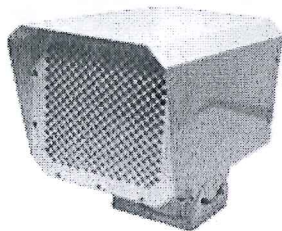


图 3-9 定向强声广播

定向强声广播配备先进的 DSP 音频处理算法，并结合成熟的 SIP 高清广播技术，实现了远距离指向性传播，声音穿透力显著增强，从根本上解决了高速公路上广播声音不清的问题，确保广播信息能够定向、精准、清晰地传达给司乘人员。

3.3.4.2 交通拥堵智能管控

(1) 主路拥堵

① 出口匝道主路拥堵

智慧引导终端布设在出口匝道两侧以及匝道主路前 1km 和后 4km 的道路两侧，智慧警示屏布设在出口匝道前 600m 的主路路侧。

当主路沿途的智慧引导终端雷达在一段时间内检测到主路车速低于 25km/h（可设置）时，系统判定为主路拥堵。此时，主路的智慧引导终端将进行红闪，匝道智慧引导终端进行绿闪，以警示主路车辆前方拥堵和引导车辆进入匝道；此时系统会进行如下引导：

匝道前 600m 的智慧警示屏幕将显示“主路拥堵，请下高速”等字样，高音喇叭同步提示“主路拥堵，请就近下高速”并鸣笛 5 秒，直至拥堵状况消失，所有设备恢复正常状态。

② 入口匝道主路拥堵

智慧引导终端布设在入口匝道两侧以及匝道主路前 1km 和后 4km 的道路两侧，智慧警示屏布设在入口匝道起点。

当主路沿途的智慧引导终端设备雷达在一段时间内检测到主路车速低于 25km/h（可设置）时，系统判定为主路拥堵。此时，主路和匝道的智慧引导终端将进行红闪，以警示车辆前方拥堵；此时系统会进行如下引导：

匝道入口处的智慧警示屏幕将显示“主路拥堵，请勿上高速”等字样，高音喇叭同步提示“主路拥堵，请勿上高速”并鸣笛 5 秒，直至拥堵状况消失，所有设备恢复正常状态。

(2) 出口匝道拥堵

智慧引导终端布设在出口匝道两侧以及匝道主路前 1km 和后 4km 的道路两侧，智慧警示屏布设在出口匝道前 600m 的主路路侧。

当出口匝道路侧的智慧引导终端检测到匝道车速低于 10km/h (可设置) 时，系统判定为出口匝道拥堵。此时，出口匝道的智慧引导终端设备将进行红闪，警示匝道内车辆；主路的智慧引导终端进行绿闪，提醒主路准备出匝道的车辆；将进行如下引导：

出匝道前 600m 的主路路侧的智慧警示屏幕显示“匝道拥堵，请继续前行”，高音喇叭提示“匝道拥堵，请前往下一个出口”并鸣笛 5 秒，直至出口匝道拥堵消失，设备恢复正常。

(3) 施工期临时分合流区/施工占道拥堵管控

智慧引导终端布设在施工期临时分合流区两侧、施工占道周边前 500 米后 300 米范围，施工期临时警示屏布设在施工占道前 300 米主路路侧，移动便携式定向广播布设于施工区核心管控点。

当施工期终端检测到施工区车速低于 15km/h 时，系统结合数据增值加工的施工区车辆密度、排队长度数据判定为施工期拥堵；此时施工区周边的引导终端全红闪，施工占道前的临时警示屏显示“施工区拥堵 减速慢行”，移动定向广播循环提示“施工区车辆缓行 请勿加塞”并短鸣笛 3 秒；若判定为重度拥堵（排队长度超过 200m），则联动施工区作业人员进行现场疏导，同时在施工区前 1km 的运营期智慧引导终端进行黄闪预警，提前引导车辆提前变道。

3.3.4.3 带缓冲容量限制的局部信息路径诱导策略研究

A. 网络模型及交通流模型

网络模型：本小节采用的网络模型为静态网络模型，即网络结构是稳定的，每个节点的邻居是固定不变的，由于无标度网络的网络结构特性在现实世界中是普遍存在的，其度分布服从幂率分布，具有存在少量的超级节点、节点之间平均距离小、簇系数大等特点。这里将基于无标度网络模型，使用计算机模拟和理论分析方法，重现网络交通动力学过程，通过分析网络交通流特点，探索基于局部信息的路径诱导策略。这里约定 N 为网络节点数、 $\langle k \rangle$ 为网络节点的平均连接度、 C 为节点的信息包发送能力、 B 为节点的缓冲容量。

在本文的网络模型中，设置 B_i 为节点 i 的缓冲容量大小，反映了节点 i 中可存储的最大信息包数，节点 i 的缓冲容量 B_i 可定义为如下两种形式，第一种和节点度相关： $B_i = \beta k_i$ ，其中 k_i 为节点 i 的度， β 是衡量节点缓冲容量大小的缓冲系数；第二种为平均分配： $B_i = B / N = \text{const}$ ，其中 B 为网络中节点缓冲容量的总量：

$$B = \beta \sum_{i=1}^N k_i$$

式中 N 为网络中的节点数，所以在第二种情况中所有节点都有相同的缓冲容量，在本小节中，主要研究第一种分配方式。

交通流模型：本小节所有涉及到的交通流模型均基于局部信息条件下，即在静态网络中每个节点只能获取与该节点存在连边的邻居节点信息。由于考虑到网络中每个节点的缓冲容量有限，所以当信息包需要传输至邻居节点时，若该邻居节点的信息包排队长度达到该节点

缓冲容量上限时,分为两种情况考虑,一种是信息包不发送至该邻居,继续待在原节点,另一种情况是,该信息包发送至该邻居点后,将被该邻居节点删除或称为丢包。基于这两种情况,这里提出了两种交通流模型进行仿真实验分析,一种是带丢包的交通流模型,另一种为非丢包的交通流模型,具体模型描述如下:

交通流模型一(非丢包交通流模型): 对于该交通流模型,初始阶段,在网络中加入 N_p 个信息包,这 N_p 个信息包随机地选择出发点 (O) 和目的地点 (D), 每个时间步,节点中信息包采用某种路径诱导策略进行传输,每个节点可向其邻居节点最多发送 C 个信息包,若某个节点中信息包数目达到该节点所能容纳的最大信息包排队长度时,将不再接收其他信息包传入该节点。当某个信息包达到目的地节点时,该信息包重新选择目的地点继续传输,即网络中信息包数目不发生变化,信息包的总数始终保持为 N_p 。其中,信息包在节点的排队规则均按照先进先出 (FIFO) 规则。

如上所述,由于节点缓冲容量的限制,当节点的队列长度小于其缓冲容量时,节点可以接收信息包,否则节点不接收信息包,节点 i 在 t 时刻产生的净流量 $R_i(t)$ 为:

$$R_i(t) = I_i(t) - O_i(t)$$

其中, $I_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的输入速率, $O_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的传出速率,传出速率 $O_i(t)$ 与节点 i 的发送能力 C_i 有关,即 $O_i(t) \leq C_i$,可以得到节点 i 的队列长度 $q_i(t)$ 将根据以下规则更新:

$$q_i(t+1) \begin{cases} 0 & q_i(t) + R_i(t) \leq 0 \\ q_i(t) + R_i(t) & 0 < q_i(t) + R_i(t) < B_i \\ B_i & B_i \leq q_i(t) + R_i(t) \end{cases}$$

交通流模型二（丢包交通流模型）：不失一般性，在网络交通流量加载上，仍沿用之前学者所使用的规则，即每个时间步，网络中有 R 个信息包需要进行 OD 传输，其中源点（ O ）和目的地点（ D ）随机地选择，每个时间步内，信息包只能传递到邻居节点，当某个信息包到达目的地节点后，该信息包将被移除系统，信息包在节点的排队规则均按照先进先出（FIFO）规则。基于节点缓冲容量的限制，当信息包的队列长度小于其缓冲容量时，节点可以接收信息包，当某个节点中信息包的队列长度达到其缓冲容量最大值时，传人的信息包将被直接删除，所以可以得到节点 i 在 t 时刻产生的净流量表示为 $R_i^D(t)$ ，为了与模型一区分，这里用 $R_i^D(t)$ 代表丢包交通流模型的净流量）：

$$R_i^D(t) = I_i(t) + \delta I_i(t) - O_i(t) - \delta O_i(t)$$

其中， $I_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的输入速率， $O_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的传出速率， $\delta I_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻新加入该节点的信息包生成速率， $\delta O_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻信息包的删除率。基于以上可以得到节点 i 的队列长度 $q_i^D(t)$ 的规则更新规则与模型一相同，即：

$$q_i^D(t+1) \begin{cases} 0 & q_i^D(t) + R_i^D(t) \leq 0 \\ q_i^D(t) + R_i^D(t) & 0 < q_i^D(t) + R_i^D(t) < B_i \\ B_i & B_i \leq q_i^D(t) + R_i^D(t) \end{cases}$$

B. 路径诱导策略设计

复杂网络交通动力学研究一直是复杂网络领域的热点，其中网络的交通传输功能是现实世界中各种网络存在的必要原因，甚至是唯一

原因。如何提升网络的交通传输性能，是复杂网络交通动力学研究的重要内容之一，其中包括优化交通资源，网络结构的优化，交通流的优化配置，探索有效的路径诱导策略等，本小节的研究聚焦在如何设计高效的路径诱导策略来实现提升网络交通传输性能。

本小节以节点局部信息以及节点缓冲容量有限为约束条件，来设计路径诱导策略。一种设计思路与传统设计相同，通过邻居节点的权重来设计概率型路径诱导策略，如王文旭[24]等设计的局部路径诱导策略。这里概率型指的是，基于邻居节点的权重计算出每个邻居节点的传输概率，节点中的信息包基于邻居节点传输概率来进行信息包传递：这里将这类路径诱导策略称为概率型路径诱导策略。第二种路径诱导策略的设计思路与第一种不同，不再基于节点权重计算出的概率来选择下一个传输节点，而是基于节点权重的大小，以权重最大或权重最小来确定选择的下一个传输节点，我们称该类型的路径诱导策略为确定型路径诱导策略。这两种类型的路径诱导策略的关键点在于如何合理的设置节点的权重。两种策略中均采用局部搜索机制，即在传输过程中，首先在邻居节点中搜索是否存在目的地节点，如存在，信息包直接发送至该邻居节点，若不存在则采用上述两种策略中的一种来进行传输。基于前人的研究，确定型路径诱导策略应用在全局信息中能获得较好的交通传输性能，而在基于局部信息的情况下，效果一般，甚至不及随机游走路径策略。

概率型路径诱导策略设计：令 w 为节点的权重，如果信息包所在节点的邻居中不存在目的地节点，则将信息包以正比于如下概率传输

到一个邻居节点:

$$\Pi_i = \frac{\omega_i^\alpha}{\sum_j^k \omega_i^\alpha}$$

其中, ω_i 是节点 i 的权重, α 是可调参数, 称为路径序参量, k 为节点 i 的度, 求和范围为所有邻居节点。接下来是如何确定 ω_i 的取值, 本小节将采用三个变量来确定 ω_i 的值, 基于这三个变量, 分别设计三种路径诱导策略:

策略一: 节点权重取值为: $\omega_i = k_i$, 即节点的权重等于节点的度;

策略二: 节点权重取值为: $\omega_i = \rho_i$, 即节点权重为信息包密度 ρ_i , $\rho_i = n_i / B_i$, 其中 n_i 为节点 i 中信息包数目, B_i 为节点 i 的缓冲容量;

策略三: 在非丢包交通流模型中, 节点权重和与该节点是否成功接收信息包相关, 在初始状态中, 将每个节点的权重设置为 1, 即 $\omega_i = 1$, 在每个时间步中, 若某个节点中的信息包排队长度达到节点缓冲容量的最大值, 该节点拒收了 n 个传入的信息包, 那么, 该节点的权重增加 $n \cdot \Delta\omega$, 其中 $\Delta\omega = 0.001$; 在丢包交通流模型中, 在初始状态中, 将每个节点的权重设置为 1, 即 $\omega_i = 1$, 在每个时间步中, 若某个节点中的信息包排队长度达到节点缓冲容量的最大值, 该节点删除(丢包)了 n 个传入的信息包, 那么, 该节点的权重增加 $n \cdot \Delta\omega$, 其中 $\Delta\omega = 0.001$; 这里需要注意, 在更新节点权重时, 不包含因信息包到达目的地节点而被系统删除的数目。

由上述三种策略的定义可以看出, 策略一是三种策略中计算速度最快的, 其节点权重采用节点度衡量, 因为在静态网络中节点度是固定不变的, 每个节点的传输概率 Π_i 也是固定的, 所以在模拟过程中只

需计算一次。其他两种策略,节点的权重分别采用信息包密度和丢包信息,每个节点的传输概率 Π_i 是动态的:会随着时间步的变化而变化,所以每个时间步都需要更新计算节点的权重。

C. 路径诱导策略性能评价指标

网络系统交通性能具有重要意义的一个性质是整个网络对于信息包的处理和递送能力。影响交通性能的因素有很多,其中路径诱导策略是重要的一个因素,它直接影响了网络信息包的传输效率。值得一提的是网络的交通传输能力并不等同于某一个结点的传输能力,节点的传输能力通常设为一个常数,如何评价整个网络的交通性能,则需要构建有效交通性能评价指标体系,另外在不同交通模型中,评价指标各不相同,在本文的研究中,使用了两种交通流模型,因此需要对两种交通流模型分别建立评价指标体系。

非丢包交通流模型交通性能评价指标:在该交通流模型中,交通流的加载方式是一次性加入所有信息包,当某个信息包到达目的地后,重新选择新的目的地继续传输,网络中总的信息包数目保持恒定,因此可以基于交通基本图(流量密度图)来刻画网络交通流情况,可以将交通性能的评价指标可以分为如下几类:

1、网络最大交通流量(Max Flow):网络流量指的是每个时间步平均到达目的地的信息包数量,到达数量越多,网络流量越大,所以可以通过网络最大交通流量来对比不同的路径诱导策略的性能;

2、网络最大承载密度(ρ_{max}):在模拟中发现,当网络信息包密度达到某一数值时,网络交通流会发生全局或局部“锁死”情况,这

时，网络交通流量会急剧下降，甚至下降到 0，当发生“锁死”时的信息包密度定义为网络的最大承载密度，一个高效的路径诱导策略不仅能实现较高的交通流量，而且还应实现较高的网络最大承载密度；

3、平均旅行时间 (T)：指的是一个信息包从源点到目的地点所花费的时间步，信息包平均旅行时间包括节点间传输时间和节点排队等待时间。

丢包交通流模型交通性能评价指标：在该交通流模型中，交通流的加载方式，为每个时间步往系统加入恒定数量 (R) 的信息包，当信息包到达目的地时，信息包将被系统删除。另外，在本文研究中，考虑了节点缓冲容量有限，即当某个节点信息包数量达到节点的缓冲容量时，传入的信息包将被删除，这与前人的研究不同，前人研究种节点信息包排队长度可以无限大。

以往的研究中是通过临界信息包生成率来衡量整个网络的交通性能，即网络加载信息包数量达到临界信息包生成率时，系统将发生从自由交通态到拥挤交通态的连续相变，自由交通态是指在同一时间步内所产生的信息包数目可以与被去除的信息包数目相抵消，而当系统进入拥挤态时，不断加载的信息包中仅有一小部分信息包可以到达目的地而从系统中去除，而大部分信息包将在系统中不断滞留和积累，最终导致系统的全局交通堵塞甚至瘫痪。这里可以用如下的序参量精确刻画相变点的位置：

$$H = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C}{R} \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t}$$

其中，R 为每个时间步加入的信息包数，C 为节点发送能力，N(t)

为 t 时刻网络中的信息包总数。

上述公式在没有发生丢包的情况下适用，在缓冲容量有限条件下，上述公式则失效，因为式中主要通过网络中信息包的累积量来衡量网络的拥堵程度，但是在发生丢包情况下，通过仿真实验发现，系统中信息包总数会稳定在某一数值，即 H 值保持为0，因此，需另辟新路进行分析。通过分析发现，使用系统丢包数来代替系统总包数是可行的，如公式所示：

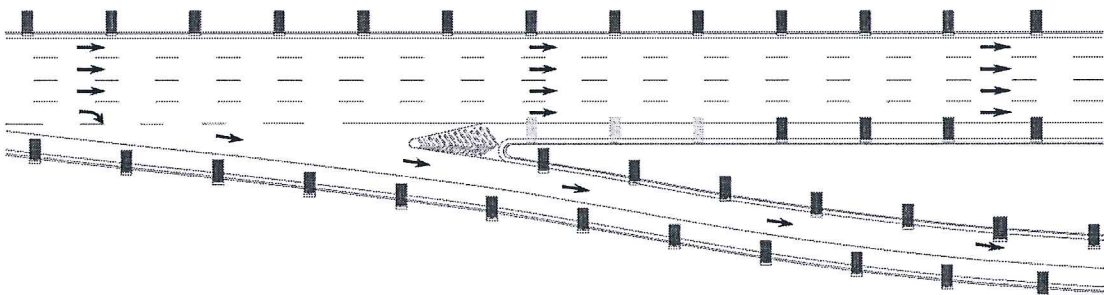
$$\eta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C}{R} \frac{N_d(t+\Delta t) - N_d(t)}{\Delta t}$$

式中 $N_d(t)$ 为 t 时刻网络中累积丢包总数，注意这里的丢包数指的是节点信息包排队长度达到节点缓冲容量值时发生的丢包数，不包含信息包到达目的地而被系统删除数。

3.3.4.4 异常事件应急处理

① 匝道合流区停车

蓝色智慧引导终端配有AI相机，可通过雷达、AI相机识别停靠在此区域的违停、倒车等车辆，该区域智慧引导终端配备高音定向喇叭，若有车辆违停在此，可通过喇叭及时提醒、驱离。



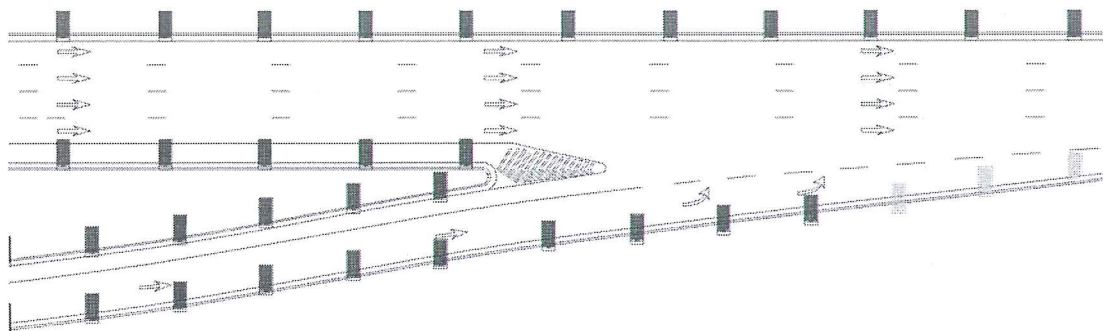


图 3-10 匝道合流区停车事件应急处理示意图

② 护栏撞击预警

智慧引导终端具备护栏撞击预警功能，当有车辆撞击到护栏时，系统将迅速响应。撞击部位的前后 3 台范围内的智慧引导终端将切换为红蓝闪烁状态，警示附近车辆；上游 1km 的智慧引导终端进行红闪，提前向远处车辆预警；上游的智慧警示屏幕显示“前方事故，请小心驾驶”，高音喇叭提示“前方事故，请小心驾驶”并警报 5 秒，直至事故处理完毕，设备恢复正常。

③ 超速预警

当主路智慧引导终端和智慧警示屏检测到车辆速度高于 120km/h 时，系统判定为车辆超速。此时，超速车辆下游相近的智慧警示屏将立即显示“危险驾驶，请减速”，高音喇叭同步提示“您已超速，请注意车速”并警报 5 秒，及时提醒超速车辆驾驶员减速慢行，保障行车安全。

④ 连续变道预警

智慧警示屏的雷达可追踪 150 米外的车辆是否连续变道，若车辆出现连续变道行为，智慧警示屏提示“禁止连续变道”，同时高音喇叭提醒“禁止连续变道”并警报 5 秒。

⑤事故手动预警

当车道出现事故时，后台管理人员可通过后台管理端手动操作，将事故相关车道的智慧引导终端变换成红蓝闪烁状态，以强烈的视觉警示提醒过往车辆。同时，相应车道上游的智慧警示屏幕将显示“前方事故，小心驾驶”，高音喇叭提示“前方事故，请小心驾驶”并警报5秒，直至事故处理完毕，后台管理人员操作设备恢复正常状态。

3.3.4.5 异常恶劣天气联动处理

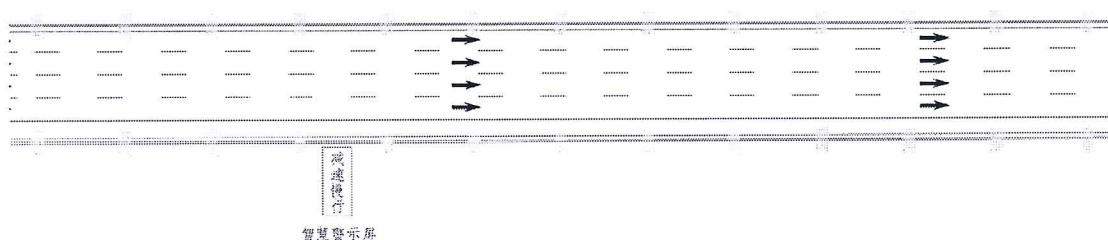


图 3-11 异常恶劣天气联动处理

本系统可与气象精灵联动，气象精灵能够实时检测雨、雾、雪、积水、结冰等影响驾驶的天气状况。当检测到道路出现上述恶劣天气时，系统将联动智慧引导终端进行道路轮廓显示。例如，当出现浓雾时，智慧引导终端开始黄色闪烁，清晰勾勒道路轮廓，引导车辆行驶；同时，路侧的智慧警示屏幕显示“雨雾天气，减速慢行”，高音喇叭提示“雨雾天气，小心驾驶”，直至天气转好，设备恢复正常运行。

3.3.5 高速公路突发事件应急管理体系

高速公路应急管理不应该仅仅局限于事件发生后的救人和抢险行动，而应当对高速公路突发事件全过程进行管理，事件前期有计划、预防；事件中期有控制、解决；事件后期有恢复、评价。根据应急管理四阶段基本原理——预防、准备、响应、恢复，把高速公路应急管

理的内容划分为应急规划、监测预防、应急响应、恢复总结四环节，如图 3-12 所示。

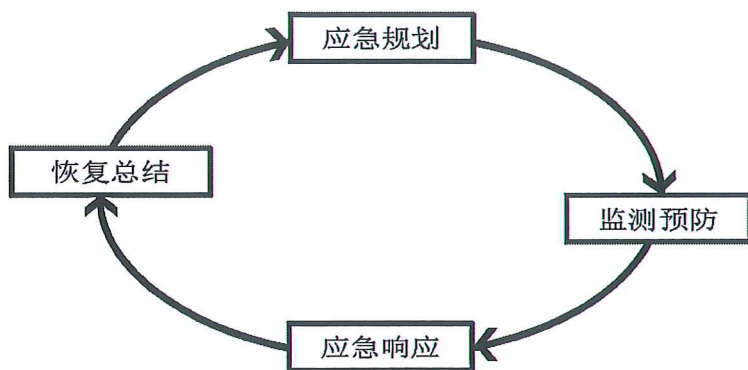


图 3-12 高速公路应急管理过程图

①应急规划

应急规划是突发事件发生前期的一项基础活动，它主要包括应急机构的建立和职能确定、应急预案的编制和修改以及应急队伍的培训和练习。应急规划是一个动态变化的过程，一般随着突发事件的演变而演变。一个优秀的应急规划方案应当能发挥每一个机构、每一个体的工作效率，最大限度的减少事件处理过程中的冲突和混乱，减少和避免无效的工作量。

②监测预防

高速公路突发事件的应急预防是指对突发事件发现和运行状况的监控，及时发现和预测事故监测的内容一般包括：交通流信息，如交通拥堵状况、交通量、车速、密度等；基础设施状况，如桥梁、边坡、路面的结构安全性；环境状况，如气象状况、路面状况等；异常事件，如车辆抛锚、碰撞、侧翻等。

③应急响应

应急响应包括范围较广，一般有事故的接警、交通管理、人员的疏散、信息汇集与传递、医疗救援、工程抢险、资源调度、指挥决策等一系列活动。

出色完成这一任务，关键在于处理方案要灵活而专业。处理方案的灵活性与决策者掌握信息量大小、决策者的经验智慧高低以及部门之间的协调能力息息相关；处理水平的专业性与人员的专业素质、仪器设备的先进程度、信息通畅性密切相关。

④恢复总结

恢复总结是高速公应急管理不可缺少的任务，主要是指恢复道路交通的正常运营，对突发事件的处理效果进行评价，同时检验各部门的协作能力；对应急预案修改与补充；视实际情况调整应急处置流程等，以更好地实现应急管理的优化升级。

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目构建的“路侧智能单元—融合智能站—云平台中心”三级架构具备模块化、标准化和可扩展特征，已预留统一的数据接口与通信协议，为后续技术升级和规模化应用奠定基础。项目研发的雷视融合智慧基站、拓展服务智慧基站及融合智能站（RSF）均采用开放式设计，支持多类型传感器接入和远程算法升级，可在新建或改扩建立交中实现快速部署与灵活扩展。系统形成的交通冲突分析模型与智能诱导策略库具备通用性和可复制性，可与现有路网监测指挥中心、应急调度平台及数字孪生系统实现数据互联和业务协同。未来，该成果

可作为智慧公路建设与枢纽群改造的基础模块推广应用，为后续技术改造和基础设施建设提供持续支撑。

3.5 有关技术经济指标

(1) 车辆目标识别准确率 $\geq 90\%$ ，跨设备数据拼接一致。

(2) 交通事件端到端响应时延 $\leq 200\text{ms}$ ，预警准确率 $\geq 90\%$ ，误报率、漏报率各 $\leq 5\%$ 。

(3) 西吴枢纽立交道路利用率提升 $\geq 20\%$ ，高峰时段通行延误降低 $\geq 15\%$ 。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司（简称建设管理公司）成立于 2021 年 3 月，是陕西交通控股集团有限公司权属二级单位。建设管理公司对集团公司授权的新建、改扩建、特许经营等交通基础设施工程项目实施全面管理。

建设管理公司内设综合管理部、党群工作部、建设管理部、财务审计部、科技质量部（安委办）、市场开发部 6 个部门，目前共管理 12 个在建项目、8 个未竣工验收项目、4 个经营性公司及 9 个区域市场开发中心、1 个技术咨询委员会、1 个项目收尾中心。现有职工 463 人，其中博士 8 人、硕士 151 人；中级以上职称占总数 78.5%，其中正高级职称 21 人、高级职称 198 人。交通运输部青年科技英才 2 人、入库专家 1 人，陕西省中青年科技创新领军人才 1 人；获评全国五一劳动奖章 2 人、省五一劳动奖章和省级劳模 6 人。

多年来，先后投资建设 50 余条高速公路，建成高速公路里程超过 5600 公里，修建了陕西第一条高等级公路西三一级公路、西部地区第一条高速公路西临高速公路和第一条沙漠高速公路榆靖高速公路，建成了 18.02 公里长的规模世界领先的秦岭终南山特长隧道、工程规模世界第一的秦岭天台山双向六车道公路隧道群、桥梁高度国内领先的三水河特大桥（183 米）等一批典型工程。获得国家优质工程奖 18 项、中国建设工程鲁班奖 3 项、中国土木工程詹天佑奖 3 项、公路交通优质工程奖 4 项、陕西省建设工程长安杯奖 19 项、全国公路水运建设“平安工程”冠名项目 9 个。坚持创新驱动和交通强国战略，开展原创性、前沿性科技攻关，固化形成一批成套关键技术成果。已发布实施交通运输部行业标准 2 项、陕西省地方标准 35 项，取得国家知识产权局专利证书 47 项，计算机软件著作权登记证书 25 项。获得国家科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 3 项，陕西省科技进步一等奖 3 项、二等奖 25 项、三等奖 33 项，中国公路学会特等奖 3 项。

陕西高速公路工程试验检测有限公司 2004 年 1 月正式注册成立，注册资本 5000 万元。布局质量安全服务、“智慧+”、养护新材料新技术三大板块，深度聚焦公路、铁路、市政、水利等基础设施领域，提供“健康体检—检测诊断—数字监测—修复养护”的一站式“工程医院”解决方案。公司主营业包括公路、铁路、建筑、市政、机电和环境工程试验检测、监测及评估；智能监测感知设备研发生产，基础设施数字化及监测系统集成；公路新材料、新技术、新工艺研发、生产和应用；环境影响评价和咨询。公司主要业务已覆盖陕西、海南、福

建、青海、广东、山东等 31 个省、市、自治区，并建立了大湾区、四川 2 个省外市场开发中心。公司秉承“创新驱动、产研结合”发展理念，组建 1 支科学家+工程师队伍、2 支博士团队、1 个科技创新创业人才、4 支专业技术团队。科研成果丰硕，推进了公司多元化发展。近五年获得了国家进步二等奖、陕西省科学技术进步二等奖等 15 项成果荣誉，认定重点新产品开发项目 11 项，获得知识产权 97 项。

公司组建了多个行业领先的创新团队，建有国内领先的数千平各类型标准实验室，并通过了 CNAS、CMA 等专业机构的资格认证。公司拥有交通运输部公路工程综合甲级、桥梁隧道工程专项、交通工程专项资质；建设工程质量检测机构资质；铁路工程质量监督检测机构资质；环保工程专业承包二级资质；环境工程设计证书；建设项目环境保护设施施工证书；污水处理设施运维服务能力评价书等认证资质，用专业为用户提供多元化的优质服务。主营业务涵盖公路、机电、市政、铁路和环境工程试验检测、监测及评估；交通智能监测感知设备研发、生产，交通基础设施数字化及监测系统集成，新基建在交通行业研发推广；公路新材料、新技术、新工艺研发、生产和应用；环境影响评价和咨询等服务，环保整治工程的设计、施工、运维及环保设备销售；技术咨询及培训等。

公司与长安大学、西安建筑科技大学、西安科技大学、西安工业大学和陕西交通职业技术学院开展科研创新合作，共建“研究生实践基地”、“人才培养基地”和“校企合作基地”。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担任 具体工作
陈志弈	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	52	副高级	公路工程	项目总体负责
高晓军	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	48	副高级	公路工程	依托工程负责
邵永军	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	47	正高级	公路工程	项目协调
张鹏	陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司	男	43	副高级	公路工程	项目研判
程鹏	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	47	副高级	公路工程	项目协调
刘波	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	36	工程师	信息工程	监测设备研究
赵杉盟	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	31	工程师	交通信息工程及控制	框架设计
李焕科	陕西交通控股集团有限公司西宝分公司	男	55	经济师 中级	信息管理与信息系统	理论研究
邓江峰	咸阳市公安局交通警察支队高速公路交警大队	男	40	初级工程师	自动化	理论研究
席栋	西安公路研究院有限公司	男	31	工程师	地质工程	项目设计
刘凯涛	咸阳市公安局交通警察支队高速公路交警大队	男	49	初级工程师	信号与信息处理	软件开发
贺鹏举	陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司	男	36	工程师	公路工程	软件开发

方鹏	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	49	副高级	公路工程	理论研究
同俊峰	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	48	初级工程师	公路与桥梁工程	设备调试与运维
张伟	陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司	男	35	工程师	公路工程	设备调试与运维
贾江波	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	36	工程师	公路工程	系统研究
毛新越	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	25	初级工程师	通信工程	软件开发
马杰	陕西交控交通工程有限公司	男	29	初级工程师	交通工程	理论研究
张伦	陕西交通控股集团有限公司西宝分公司	男	51	政工师 中级	信息管理与信息系统	软件开发
张言	陕西交通控股集团有限公司西宝分公司	男	37	中级	电子信息	软件开发
李森	陕西交通电子工程科技有限公司	男	38	中级	机电工程	设备调试与运维
姚立	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	37	初级工程师	公路工程	设备调试与运维
贺子豪	陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处	男	31	工程师	公路工程	设备调试与运维

4.3 各自承担的主要工作

陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处和陕西交通控股集团有限公司建设管理分公司负责项目的总体协调、项目的资助、项目相关成果考核、项目实施计划方案的论证、基础资料与实

践条件的提供、室内和现场试验研究及后续工程应用的推广工作。

陕西高速公路工程试验检测有限公司负责项目具体实施,陕西交通电子工程科技有限公司和陕西交控交通工程有限公司负责项目相关技术研究和开发。

4.4 项目主要负责人情况

陈志奔,男,中共党员,正高级工程师,现任陕西交通控股集团有限公司西兴改扩建管理处副处长,陕西省发改委综合评标专家。主要从事公路桥梁专业管理、科研与技术咨询等工作。主持或参与完成多条高速公路工程建设项目。曾获得陕西省交通厅和省劳动竞赛委员会劳动竞赛先进个人,陕西高速集团和交控集团、建设管理分公司优秀共产党员和先进工作者。多次参与陕西省发改委综合评标专家库组织的公路、地铁等方面的评标工作。

邵永军,1977年3月生,2003年7月毕业于西安科技大学结构工程专业,硕士研究生,正高级职称。2003年入职陕西省高速公路建设集团公司,数十年如一日,潜心公路工程试验检测相关工作研究,主要从事公路工程检测、监测,技术管理和科研创新工作,现任高速集团试验检测公司董事长。并担任中国公路学会养护与管理分会理事,西安工业大学研究生外聘导师,省交通运输厅、省科技厅、西安市科技局的科研项目评审专专家。主持参与省国资委、交通厅省级科研项目4项、高速集团公司科研项目9项;主持完成省地方标准1项,参与2项,正在参与编制行业标准1项,团体标准1项;获得省科学技术进步二等奖、全国交通企业管理现代化创新成果一等奖、省

交通运输科学技术二等奖、三等奖各 1 项；获得“陕西交通运输科技创新青年英才”、陕西省“五一劳动奖章”等荣誉。主导完成了陕西高速星展科技公司组建，将科研成果产业化，是交通行业信息化的积极践行者。带领团队申请并获批西安市级工程技术研究中心、陕西省级企业技术中心各 1 个，参建部行业研发中心各 1 个，在科研平台建设和管理方面成就突出。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

西兴高速公路改扩建项目由陕西交控集团投资建设。西兴高速公路改扩建项目被咸阳市列为西安-咸阳一体化发展十大示范性工程，该项目路线起于三桥收费站东侧，与城市道路相接，向西沿既有道路改扩建，经西安市西咸新区沣东新城、沣西新城，咸阳市秦都区、高新区、兴平市，止于西吴（枢纽）立交，与 G30 连霍高速、G3021 临兴高速相连。路线全长 24.443 公里，投资概算 43.07 亿元，建设工期 36 个月。

全线采用 120 公里/小时的高速公路建设标准，其中起点至帽耳刘枢纽段为双向六车道，路基宽 34.5 米；帽耳刘枢纽至终点段为双向八车道，路基宽 42 米；新建桥梁荷载采用公路-I 级，利用桥涵维持原有荷载等级（汽车-超 20、挂车-120）。全线设特大桥 1 座（渭河特大桥），收费站 5 座，互通立交 6 处，其中沣河立交、咸阳高新立交为新增，咸阳立交为移位重建，咸阳西、帽耳刘枢纽及西吴枢纽立交为改建，立交平均间距 4.65 公里。

西安至兴平高速公路是连接 G3002 西安绕城高速、G30 连霍高速及 G3021 临兴高速的重要通道，也是关中平原地区高速公路网的重要组成部分。该项目的建设，对改善区域交通运输条件，提升路网服务水平，增强西安都市圈及国家中心城市的辐射能力，加快推进关中平原城市群、西安-咸阳一体化发展等具有重要意义。

5.2 投资来源

项目建设总投资预计两方面来源，一是省交通运输厅补助，二是工程配套研究经费，计划申请省交通运输厅补助 19.83 万元，工程配套研究经费 140.17 万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

1. 2026 年 3 月 ~ 2026 年 5 月：系统搜集整理有关文献，总结国内外相关研究的现状趋势和存在的问题；细化研究的技术路线，完成调研报告和数据采集；研究多源传感器自适应融合算法，开展多维度交通运行数字化感知网络的研发和测试；安装 AI 智能摄像机和毫米波雷达，开展车路协同控制方法研究。

2. 2026 年 6 月 ~ 2026 年 8 月：研究多源传感器自适应融合算法，开展多维度交通运行数字化感知网络的研发和测试；派遣项目组成员参加相关国际高水平会议以及邀请国外知名学者前来进行相关学术交流。

3. 2026 年 9 月 ~ 2026 年 11 月：开展车辆目标检测、多路视频多目标跟踪方法研究。

4. 2026 年 12 月 ~ 2027 年 2 月：开展实际道路测试；开展交通异

常态势推演与预警；软件著作权 1 份。

5. 2027 年 3 月 ~ 2027 年 5 月：开展地磁感应阵列和视频感知阵列完成多元信息融合研究；继续上述工作；实现系统检测每条车道交通环境与交通流量数据、车道级交通事件检测和车道级行车状况场景还原等功能。

6. 2027 年 6 月 ~ 2027 年 8 月：路侧单元和车载单元测试；车路协同感知行车风险管控系统测试。

7. 2027 年 9 月 ~ 2027 年 11 月：开展研究成果现场部署、调试和效果评价；软件著作权 1 份。

8. 2027 年 12 月 ~ 2028 年 2 月：项目结题验收资料整理完善、开展项目评审专家会、提交项目成果。

5.4 组织管理形式

项目由陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处牵头组建项目团队，开展国内外资料调研及工程调查，编制可行性研究大纲和实施细则，开展各项工作，建设成果分阶段分批次验收。

陕西交通控股集团有限公司西兴高速公路改扩建管理处作为第一承担单位，负责项目的总体协调、项目的资助、项目相关成果考核、项目实施计划方案的论证、基础资料与实践条件的提供、室内和现场试验研究及后续工程应用的推广工作。

目前，项目组已经搜集了大量相关技术资料，明确了课题研究内容、技术关键、技术路线，人员组织已经到位，并初步开展了研究与实施工作。

主要措施:

- 1) 本项目的组织管理严格按研究内容和建设计划要求组织实施;
- 2) 项目由第一负责人全面负责管理, 各方的分工协作、经费拨付、考核目标 and 责任要求等具体内容将以合同形式进一步明确;
- 3) 定期召开项目工作会议, 检查前阶段的具体工作、研究进展和 implement 深度, 讨论解决研究过程中的各项技术问题和其他事宜, 布置后阶段的工作重点和具体要求, 对不能按时、保质完成研究任务的人员及时予以更换;
- 4) 陕西高速公路工程试验检测有限公司保障项目自筹经费及时到位, 项目经费专款专用。
- 5) 对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促, 以确保项目总体研究目标的实现。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.83	合 计	160.0	19.83	140.17
工程配套研究经费	140.17	1.设备费	60.0	7.0	53.0
单位自筹	0.0	（1）购置设备费	50.0	5.0	45.0
其他经费	0.0	（2）设备改造与租赁费	10.0	2.0	8.0
		2.业务费	55.0	6.0	49.0
		（1）材料费	25.0	2.0	23.0
		（2）测试化验实验加工费	5.0	1.0	4.0
		（3）燃料动力费	5.0	1.0	4.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	10.0	2.0	8.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	7.0	0	7.0
		（6）其他费用	3.0	0	3.0
		3.劳务费	25.0	3.0	22.0
		（1）专家咨询费	8.0	1.0	7.0
		（2）聘用人员劳务费	13.0	2.0	11.0
		（3）其他劳务费	4.0	0	4.0
		（二）间接费用	20.0	3.83	16.17
		4.管理费	12.0	2.5	9.5
		5.绩效支出	8.0	1.33	6.67

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	1
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	2
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1、填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2、获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3、其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1、引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	2
		2、培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	4
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 项目预期目标（项目的考核目标）

（1）攻克复杂枢纽立交多模态融合感知、交通风险动态判别、低时延智能诱导等关键技术，形成适配改扩建高速公路枢纽场景的“感知—评估—决策—诱导”技术体系，提升雨雾、夜间等恶劣环境下目标识别精度与诱导策略适配性。

（2）通过研究成果应用，有效缓解西吴枢纽立交分合流区拥堵问题，大幅道路利用率；减少因分合流不当、车速差异引发的交通事故风险，为改扩建高速公路枢纽区域行车安全提供技术支撑。

8.2 提交的研究成果及其形式

通过对项目的研究，可望取得如下成果：

（1）开发枢纽立交会车警示与路侧诱导系统 1 套；车辆感知算法及部署说明书 1 套。

（2）发表核心期刊学术论文 2 篇及以上。

（3）申请知识产权 2 项及以上。

（4）《复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究》报告一份。

8.3 经济、社会、环境效益分析

本项目研究成果可根据不同类型高速公路道路改扩建设计及交通运行特点，通过合理设置路侧感知设备和使用车路协同的交通控制方法，建立全时段信息获取与信息发布，及时诱导道路交叉口车辆行车方向及速度，有效保障车辆驾驶员及乘客的人身安全，实现道路交通安全水平提升和道路资源优化利用的目标。另外，通过车路间的信

息实时交互对道路通行车辆的速度调控，有助于确保车辆平稳运行，减少车辆频繁地加减速，从而降低汽车燃油消耗及有害气体排放，减轻对生态环境的影响。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见



单位负责人：(签字)

石志军

2026年3月30日

复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究 大纲评审意见

2026年3月23日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究”（项目编号：25-66X）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容比较完善，研究目标较为明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果基本覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架基本契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1.进一步对拟解决的关键问题、主要研究内容及实施方案进行梳理、聚焦与丰富；

2.加强项目研究背景和必要性分析，完善技术路线图、技术经济指标与项目绩效指标等内容。

主任委员：王建宇

2026年3月23日

专家审查意见表

项目名称	复杂交通枢纽立交行车感知与诱导技术研究				
专家姓名	王建宇	职务/职称	教授	专业	交通工程
专家单位	长安大学			联系电话	1370952206

评审意见

1. 进一步对拟解决的关键问题、主要研究内容等实施步骤进行梳理及聚焦；
2. 完善技术路线图；
3. 结合研究成果对项目绩效指标进行完善；
4. 加强项目研究背景和必要性分析。

评审专家（签字）：王建宇

2016年3月23日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究				
专家姓名	苗建宝	职务/职称	正高工	专 业	土木工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	15249205285

评 审 意 见

本项目紧扣交通强国、数字交通与陕西省智慧高速建设政策导向，依托西兴高速改扩建工程与西吴枢纽立交典型复杂场景，聚焦改扩建施工期 + 运营期交通流感知、安全评估与智能诱导核心痛点，研究方向贴合行业需求、工程依托扎实、牵头与参与单位产业链完整、实施基础条件较好，具备较高研究价值与推广前景。意见如下：

一、总体情况：

1、韧性提升与基础设施智能监测与结构相关，与本项目行车感知与诱导技术研究关系较小，建议考虑是否保留，聚焦行车感知与诱导技术的研究，突出重点。

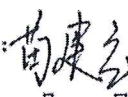
2、本项目以雷视融合为基础进行感知，建议超声波传感器等多种交通感知设备结合，降低综合造价。

二、技术方面建议设备、算法增加精度、延迟、覆盖率、误报率等指标。

三、建议补充单套系统的造价情况，费用情况对于项目的可推广具有重要的意义。

四、财务方面建议合理规划便于课题结题财务报告的编制。

五、未明确具体试点路段，科研成果如何与依托工程结合应用，同时工程进度与项目科研进度的配合要体现如何与依托工程实施的结合。

评审专家（签字）：
年 月 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究				
专家姓名	唐海牧	职务/职称	正高工	专 业	道路工程
专家单位	中交第一公路勘察设计研究院有限公司			联系电话	18192640597

评 审 意 见

一、总体意见：

该专家对复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术展开研究，研究目标明确，内容全面，技术路线可行，人员组织合理，依托工程落实，同意研究大纲通过评审。

二、建议

1. 结合关键技术问题进一步梳理研究内容；
2. 进一步优化工技术路线；
3. 修改厅拨经费，优化经费支出。

评审专家（签字）：唐海牧

2026 年 3 月 23 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究				
专家姓名	赵池航	职务/职称	教授、博导	专 业	交通运输工程
专家单位	东南大学			联系电话	13951922763
评 审 意 见 该项目开展复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术的研究工作，主要包括复杂交通流枢纽立交智能感知与诱导需求、枢纽立交智能感知与诱导系统体系、枢纽立交智能运行与安全管控机制等。该项目研究大纲的研究内容较具体，研究目标及拟解决的问题明确，技术架构与技术路线较可行；达到了项目研究大纲的评审要求。 修改建议如下： （1）在“前期科研及工作基础”中增加本研究团队支持该项目开展研究的研究基础及已取得研究成果； （2）进一步梳理细化项目的具体研究内容； （3）在“技术方案”中增加详细的技术路线图，以增加技术路线的可行性。 评审专家（签字）： 赵池航 2026 年 3 月 23 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家审查意见表

项目名称	复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究				
专家姓名	伍朝辉	职务/职称	副研究员	专 业	交通数字化
专家单位	交通运输部科学研究院			联系电话	15210832821
评 审 意 见					
同意通过研究大纲评审。 建议： （1）提炼好研究内容：主要研究内容部分没有提炼出来要研究的内容，只有 P26 主要建设内容，这部分跟研究内容之间是关系，没有说清楚；实施方案写得有点像研究内容，但也大而空； （2）补充技术路线图：一上来就讲细节、讲算法，不知道是要干啥，不要来做科普，还是要有一条主线； （3）定量与定性结合优化预期目标：第 3 条不太像目标，“判别云模型、云模型风险判别智能算法”的表述都很突兀，建议重新梳理预期目标； （4）整体从“问题—现状—目标—内容—技术路线—考核指标—创新点”的逻辑还没有串通。 评审专家（签字）： 伍朝辉 2026 年 3 月 22 日					

复杂交通流枢纽立交行车感知与诱导技术研究 (项目编号: 25-66X)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	王建军	长安大学	交通运输工程	交通运输工程	教授	王建军
2	委员	苗建宝	西安公路研究院有限公司	土木工程	土木工程	正高工	苗建宝
3	委员	曹海波	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	公路工程	公路工程	正高工	曹海波
4	委员	赵池航	东南大学	交通运输工程	智慧交通系统	教授	赵池航
5	委员	伍朝辉	交通运输部公路科学研究院	计算机应用专业	交通数字化	正高工	伍朝辉

专家意见处理表

项目名称：复杂交通枢纽立交行车感知与诱导技术研究（项目编号：25-66X）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
1	王建军	- 进一步对拟解决的关键问题、主要研究内容及实施方案进行梳理及聚焦; - 完善技术路线图 - 结合研究成果对项目绩效指标进行完善; - 加强项目研究背景和必要性分析。	- 已修改。重新梳理了第三章中的主要研究内容、实施方案及技术路线。 - 已修改。在 3.3 开头添加了技术路线图。 - 已修改。对第七章项目绩效指标依据研究成果进行了完善。 - 已修改。加强了 1.1 中项目背景和必要性分析。
2	苗建宝	- 韧性提升与基础设施智能监测与结构相关, 与本项目行车感知与诱导技术研究关系较小, 建议考虑是否保留, 聚焦行车感知与诱导技术的研究, 突出重点。 - 本项目以雷达融合为基础进行感知, 建议超声波传感器等多种交通感知设备结合, 降低综合造价。 - 技术方面建议设备、算法增加精度、延迟、覆盖率、误报率等指标。 - 建议补充单套系统的造价情况, 费用情况对于项目的可推广具有重要的意义。 - 财务方面建议合理规划便于课题结题财务报告编制。 - 未明确具体试点路段, 科研成果如何与依托	- 已修改。项目整体研究内容更加聚焦, 删除了大纲中关于韧性提升的表述。 - 已修改。在 3.3.2 中增加了雷达融合设备与毫米波雷达的感知结合。 - 已修改。在 3.2.1 中增加了设备、算法精度、延迟、覆盖率、误报率等指标。 - 系统系自研, 单套设备的造价情况会在后续补充。 - 已修改。对第六章项目经费估算及资金筹措情况做了进一步合理的规划。 - 已修改。在 5.3 中补充了科研成果和进度与依托工程的结合应用。

		工程结合应用,同时工程进度与项目科研进度的配合要体现如何与依托工程实施的结合。	
3	曹海波	1. 结合关键技术问题进一步梳理研究内容; 2. 进一步优化技术路线; 3. 核实厅拨经费,优化经费支出。	1. 已修改。根据拟解决的关键问题重新梳理了 3.2.1 主要研究内容。 2. 已修改。根据主要研究内容优化了 3.3 技术路线。 3. 已修改。在第六章中核实了厅拨经费,优化了经费支出。
4	赵池航	1. 在“前期科研及工作基础”中增加本研究团队支持该项目开展研究的研究基础及已取得研究成果; 2. 进一步梳理细化项目的具体研究内容; 3. 在“技术方案”中增加详细的技术路线图,以增加技术路线的可行性。	1. 已修改。在 2.3 中补充了研究团队已取得的研究成果。 2. 已修改。根据拟解决的关键问题重新梳理了 3.2.1 主要研究内容。 3. 已修改。在 3.3 开头添加了技术路线图。
5	伍朝辉	1. 提炼好研究内容:主要研究内容部分没有提炼出来要研究的内容,只有 P26 主要建设内容,这部分跟研究内容之间是关系,没有说清楚;实施方案写得有点像研究内容,但也大而空; 2. 补充技术路线图:一上来就讲细节、讲算法,不知道是要干啥,不要来做科普,还是要有一条主线; 3. 定量与定性结合优化预期目标:第 3 条不太像目标,“判别云模型、云模型风险判别智能算法”的表述都很突兀,建议重新梳理预期目标; 4. 整体从“问题—现状—目标—内容—技术路线—考核指标—创新点”的逻辑还没有串通。	1. 已修改。根据拟解决的关键问题重新梳理了 3.2.1 主要研究内容。 2. 已修改。在 3.3 开头添加了技术路线图。 3. 已修改。在 8.1 中重新梳理了预期目标。 4. 已修改。提升了大纲整体逻辑水平,串通“问题—现状—目标—内容—技术路线—考核指标—创新点”。

大纲评审委员会专家（签字）：王建华

项目负责人（签字）：

李奇