

城市道路交叉口交通精细化智能管理研究

杨维宁, 亢小雪, 苏英平

(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为解决城市机动车保有量增长引发的道路拥堵、冲突加剧等问题, 针对城市道路交叉口这一拥堵高发节点, 以及传统交通管理存在的渠化粗放、机非干扰严重等不足, 依托西安市多条城市道路交叉口微改造工程开展研究。采用融合精细化理念与智能技术的优化思路, 通过左转逆置、车道精准诱导、非机动车路权重塑、数字孪生仿真预演等措施, 构建交叉口交通管理优化方案。工程实践显示, 实施该方案后, 典型交叉口通行效率提升50%~84.9%, 拥堵指数下降15%~45.86%, 交通秩序与安全水平显著改善。研究成果可为国内同类型城市道路交叉口治理提供参考。

关键词: 交通管理; 交叉口; 精细化; 数字孪生; 智能优化; 交通组织; 时空资源优化

中图分类号: U412.35; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0320-05

Research on Refined Intelligent Traffic Management at Urban Road Intersections

YANG Weining, KANG Xiaoxue, SU Yingping

(Xi'an Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: To solve the problems of road congestion and intensified conflicts caused by the growth of urban motor vehicle ownership, in response to the high-congestion nodes at urban road intersections, and the shortcomings of traditional traffic management, such as extensive channelization and severe interference from motor vehicles and non-motor vehicles, the research is conducted on the micro-reconstruction projects of multiple urban road intersections in Xi'an. Adopting the optimization idea integrating refined concepts and intelligent technologies, a traffic management optimization scheme for intersections is established through the measures such as left-turn reversal, precise lane guidance, reshaping of non-motor vehicle road rights, and digital twin simulation preview. The engineering practice shows that after the implementation of the scheme, the traffic efficiency of typical intersections has increased by 50% to 84.9%, the congestion index has decreased by 15% to 45.86%, and the traffic order and safety level have been significantly improved. The research results can provide a reference for the governance of similar urban road intersections in China.

Keywords: traffic management; intersection; refined; digital twin; intelligent optimization; traffic organization; space-time resource optimization

0 引言

改革开放以来中国经济水平得到了巨大的发展, 国民生活水平也发生了翻天覆地的变化, 在经济的驱动下, 各种交通问题也逐渐显露, 城市作为人口主要的承担者不可避免地遇到越来越严重的交通问题, 并因为城市用地资源十分紧张可以说是牵一发而动全身, 所以城市交通的规划更为复杂。因此, 传统的交通管理手段如渠化扩展车道等方式用地代价

较大, 在有限的空间内提出有效、科学的交通管理方式迫在眉睫。

近几年来, 政府在交通领域大力推进高架桥、地铁等大容量交通设施建设, 在一定程度上缓解了城市交通压力。但与此同时, 城市更新与新建项目持续推动交通需求增长, 各类交通工具数量不断增加, 交叉口通行效率低、冲突多、秩序乱等问题依然突出。传统平面交叉口作为城市道路交通网的咽喉部位, 交通组织管理手段较为传统, 精细化程度不足, 导致交通供需不平衡、响应滞后。因此, 针对交叉口开展精细化管理研究, 通过精细交通渠化、信号配时优化、物联网感知与数字孪生技术应用, 可有效减少交

收稿日期: 2026-03-23

作者简介: 杨维宁(1973—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政道路与交通工程设计研究工作。

通冲突、提升通行效率、改善交叉口运行状态,进而提升整个城市道路交通网运行品质。通过交通精细化管理手段提高交叉口服务水平,使交叉口使用更加安全、有序、顺畅、科学,以有效改善交通环境为核心目标。

西安市作为国家中心城市,2024 年机动车保有量突破 500 万辆,高峰拥堵指数长期位居全国前十。本文在西安南北中轴线长安路—未央路小寨商圈、西华门十字等复杂交通节点改造过程中,联合城建、交管等多部门开展“绣花式”微治理,创新应用“左转逆置”“车道精准诱导”等精细化措施,使通勤高峰拥堵排名下降 5 位,为城市交叉口治理提供了可复制、可推广的实践样本。

1 城市道路交叉口管理存在的问题

1.1 慢行交通与右转冲突

目前多数信号控制交叉口对右转车辆不实施单独信号控制,慢行交通(行人、非机动车)在绿灯放行时,易与右转机动车流产生交织冲突,形成明显安全隐患。在本次调查的多个交叉口内,此类现象普遍存在。慢行交通与右转车辆冲突不仅提高事故概率,还常导致慢行交通无法在绿灯时段内全部通过,降低过街效率与安全性,并可能因抢行影响下一相位车辆正常通行。高峰时段交叉口内慢行交通与右转机动车冲突尤为突出。根据项目组 2024 年 3 月—5 月对西安市 10 个核心交叉口的早高峰(8:00—9:00)实地调查数据调查显示,西华门、凤城五路等人流密集交叉口,行人与非机动车干扰导致主路右转车流受阻率达 27%~38%。

1.2 机动车与非机动车冲突

机动车与非机动车在同一相位绿灯下放行时,常出现非机动车与直行车、非机动车与直行及左转车、非机动车与左转车三类交织冲突。交叉口内非机动车停车线不清晰、等待区域混乱,直接影响不同方向的直行车辆通行;部分非机动车侵入人行横道,既干扰行人过街,也大幅增加右转车辆通行难度,形成多点冲突与秩序混乱。

1.3 左转交通排队较长

不同交通流对交叉口运行影响差异明显,左转车流冲突点多、干扰范围大,会显著降低其他车流的行驶速度与安全性。本次西安市道路微改造实地调查发现,部分交叉口因左转流量大设置了专用左转相位,但仍存在排队过长问题,大量左转车辆在黄灯

期间仍强行通过,安全风险突出。基于 2024 年 3 月西安市交警支队提供的卡口数据与项目组现场补充调查,问题较为突出的西华门十字在改造前左转延误指数达 38.5,排队长度 150 ~ 200 m,黄灯期间违规通过率超 40%,此类问题在城市道路交叉口普遍存在。

2 城市道路交叉口交通精细化管理对策研究

2.1 精细化设置导流线

在交通组织的精细化管理中,交叉口的核心任务是对各类交通流进行清晰、细致的通行空间划分,冲突区是交通渠化的重点控制对象。因此,导流线设计需明确区分不同类型、流量、流向的交通流,实现路径规范、冲突减少和秩序提升。

本文分析西安市主干路微改造实际工程结果表明合理设置导流线可使路口内部形成稳定有序的车流运行状态,降低事故风险,提升整体服务水平。导流线虽在一定程度上限制车辆行驶自由度,但能有效削减机动车之间的冲突点,规范行驶路径,在流量较大的交叉口具有显著优势与必要性。

当前导流线主要分为 4 类:第 1 类为左转引导导流线;第 2 类为右转引导导流线;第 3 类为直行规范导流线;第 4 类为禁止穿越区导流线。

2.1.1 案例 1:南三环—子午大道交叉口“左转逆置”改造

南三环与子午大道交叉口受绕城高速桥墩分割,路口内部空间破碎、左转车流交织冲突严重,高峰期拥堵常态化。本次改造采用左转逆置新型交通组织,通过导流线重新梳理进口道布局,将南北向左转车道提前内移,配合信号配时优化,彻底消除冲突点,提升路口通行效率(见图 1)。

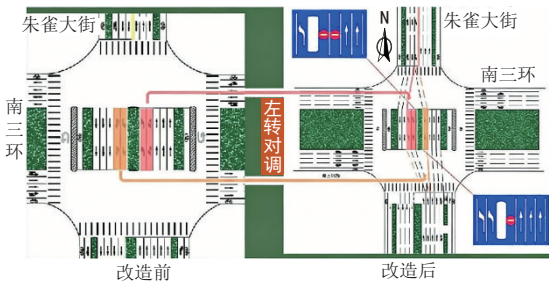


图 1 南三环-子午大道交叉口左转逆置改造示意图

改造后,南三环与子午大道交叉口通行秩序明显改善,通行效率显著提升,平均速度由 12.03 km/h 提升至 22.24 km/h,提升 84.9%;拥堵指数由 4.23 降至 2.29,下降 45.86%;交叉口服务水平由严重拥堵

(F级)提升至缓行(D级)。

2.1.2 案例2:小寨商圈交叉口“可变车道+Z字形斑马线”

在南北轴线微改造中,小寨商圈交叉口采用导流线配合可变车道、Z字形斑马线、非机动车专用信号灯等组合措施,明确人车分离、机非分离,减少冲突点,路口通行效率提升约40%,行人过街安全性显著提高,见图2。

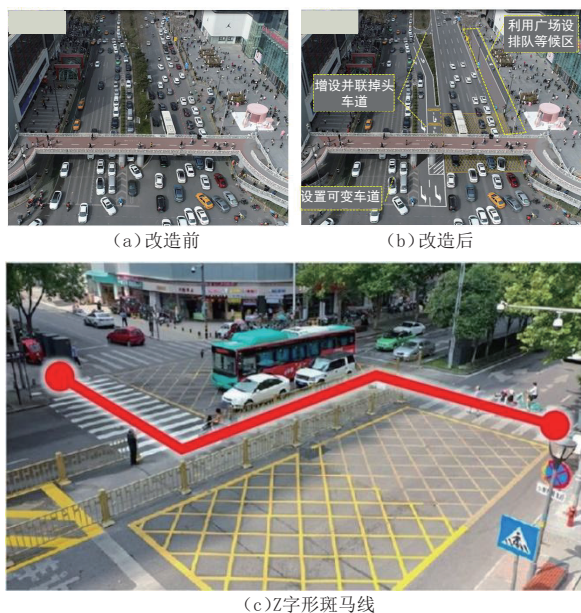


图2 可变车道、Z字形斑马线

结合实例可知,不同类型交叉口应采用差异化导流线布设方式,以最大化路网效能。导流线使用需注意3点:一是定期检查修整,保持清晰可辨;二是合理确定长度,结合实际动态调整;三是设计简洁清晰,避免因识别困难引发交通事故。

2.2 精细化设置非机动车交通

调查范围内交叉口普遍存在非机动车与行人通行混乱无序问题,提升慢行交通组织精细化水平,可有效降低机非冲突风险,保障各方向车流按路权有序通行。

针对路口右侧车流量较大的特点,可将非机动车停车线与高架下部结构对齐布置,优化非机动车等待空间。为保障非机动车在信号周期内顺畅通过,应对左转交通组织方案及关键参数进行合理调整。交叉口内非机动车与机动车等待区采用错位布置,机动车等待区设于非机动车等待区后方,实现分区管控、有序等待。

行人过街设施可结合实际合理布设过街通道。非机动车灵活性更高,绿灯启亮时响应更快,可实现更早进入交叉口,在放行初期与机动车流同步启动,

减少相互干扰。精细化设计非机动车等待区,可提升交叉口整体通行效率,优化机非运行秩序。通过合理划分车道宽度、规范行驶路径,保障行人与非机动车安全有序通行。同时应加强交通安全宣传教育,强化执法管理,规范骑行与停放行为,营造安全有序的慢行交通环境。

案例3为长乐东路—华阳城/城东客运站慢行系统改造。

西安市长乐东路华阳城/城东客运站枢纽叠加客运、商业、居住、地铁通勤多重需求,改造前存在非机动车乱停乱放、人行道阻断、慢行流线不畅等问题,严重影响接驳疏散功能。

改造中结合空间布局,优化绿化设置,恢复人行道,迁移非机动车道,增设彩色铺装,明确行人与非机动车路权;增设非机动车停放区,规范停车秩序;在地铁站F/G口南侧设置13处即停即走车位,实现机动车与地铁高效换乘。

改造后的区域慢行系统更完善,行人与非机动车通行体验大幅提升,公共交通接驳更便捷,慢行交通分担率提升约10%,区域拥堵指数下降15%,缓堵治乱效果显著,有效解决人、非、机冲突、路权不明、秩序混乱等问题。通过工程微改造针解决人、非、机冲突问题,秩序混乱、拥堵频发、路权不明等问题迎刃而解,见图3、图4。



图3 行人、非机动车道流线顺畅连续示意图

2.3 精细化设置左转交通

左转交通冲突是城市道路交叉口最主要的矛盾



图4 公交、地铁、停车、行人有序接驳示意图

点,本文结合导流线设置已对左转优化进行阐述,本节针对左转车流与其他车流冲突突出、高峰拥堵严重等问题开展专项研究。

交叉口常规左转组织方式包括:左转许可相位、左转保护相位、左转待行区、可变车道、禁止左转等。针对左转流量大的交叉口,宜优先采用左转待行区提升通行能力。利用交叉口平面空间,将左转车道向内延伸,扩大蓄车量,提升左转通行效率,减少整体延误,提高交叉口服务水平。

案例4为西华门十字左转待行区+信号优化。

西华门十字为西安市核心商圈交叉口,改造前左转排队长度达150~200 m,左转延误指数38.5,黄灯违规率超40%。本次改造增设左转待行区,配套专用左转信号灯,将左转相位置于直行相位之后,并通过数字孪生仿真优化配时。

改造后,左转排队长度缩短60%以上,通行效率提升约50%,路口整体秩序明显好转。

左转待行区需配套设置专用左转信号灯,直行绿灯时左转车辆进入待行区等待,左转绿灯时集中放行。设有专用左转相位的交叉口,宜将左转相位置于直行相位之后。左转车道向内延伸长度应结合路口规模和直行车流运行轨迹合理确定,避免干扰其他车流。

西安市在本次道路微改造中引入数字孪生预演技术,通过数字孪生交通数据构建交叉口三维模型,模拟不同相位配时方案,使信号优化效率提升70%以上。该数字孪生模型的技术框架主要包括四个层级:感知层,通过在交叉口部署雷达、地磁、视频等多源传感器,实时采集车流量、车速、排队长度、占有率等微观交通参数;数据层,利用边缘计算节点对原始数据进行清洗、融合与存储,形成标准化的时空轨迹数据集;模型层,基于SUMO(simulation of urban mobility)开源仿真平台构建交叉口高精度三维几何模型和交通流模型,通过卡尔曼滤波算法实现交通

状态的动态校准与更新;应用层,在虚拟环境中对信号配时、车道功能、交通组织等方案进行快速迭代仿真与多目标评价,输出最优控制策略。该模型可实现分钟级的交通状态预测和方案预演,为方案比选与实时调控提供决策支持。

在信号配时优化方面,本次改造采用基于强化学习的自适应信号控制算法。具体技术流程如下(见图5):首先,基于数字孪生模型输出的实时交通状态(各进口道流量、排队长度、车头时距等),构建交叉口状态空间;其次,以最小化车辆平均延误、排队长度和停车次数为多目标,设计奖励函数;然后,采用Deep Q-Network(DQN)算法在仿真环境中进行离线训练,生成初始配时策略;最后,将训练好的策略部署至实际信号机,并设置滚动时间窗(每5 min)进行在线微调。

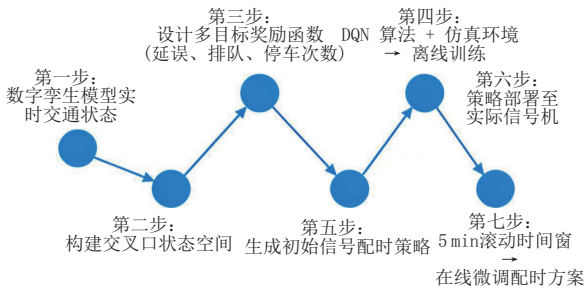


图5 智能交通信号配时优化流程图

以西华门十字为例,优化后信号周期由原来的120 s调整为动态变化的100~140 s,各相位绿灯时间根据实时车流比例自动分配,东西向左转相位时长由固定22 s变为18~28 s动态调整。经实测,该算法较传统定时控制方案,在高峰时段可额外降低延误12%~18%。

西安市在本次道路微改造中引入数字孪生预演技术,通过数字孪生交通数据构建交叉口三维模型,模拟不同相位配时方案,使信号优化效率提升70%以上。

数字孪生交通将实时采集的交通数据纳入到建立的交通模型体系中,实现对交通体系的虚拟数字映射,通过大数据、人工智能和交通仿真技术生成交通优化方案和评价。其本质是数据闭环赋能体系,通过数据全域标识、状态精准感知、数据实时分析、模型科学决策、智能精准执行,实现交通的模拟、监控、诊断、预测和控制,解决城市交通总体规划、设计、建设、管理、服务闭环过程中的复杂性和不确定性问题,全面提高交通资源配置效率和安全运转状态。

3 工程应用效果

西安市多条交叉口微改造实践表明,交通精细化智能管理可在不大拆大建、不占用大量土地的前提下,实现通行效率与安全水平双重提升。

南三环子午大道交叉口:效率提升84.9%,拥堵指数下降45.86%;

西华门、小寨等核心节点:效率提升约50%;

长乐东路华阳城区域:拥堵指数下降15%,慢行分担率提升10%。

整体实现“少投入、快见效、高口碑”的城市交通“绣花式”治理目标。

4 结 语

本文从交叉口的实际情况出发提出针对该交叉口交通组织精细化实际有效的管理对策。交叉口处对策研究通过交通组织精细化管理的方式,通过对各交通流的渠化明确了行人、非机动车和机动车等交通出行方式的通行权,保证了各交通流在交叉口高效率、安全、舒适、有序地通行。运用传统的交通控制方案,在现有交叉口的基础上,对交叉口的时间和空间上的资源深入运用,提高交叉口的通行能力。

通过笔者参与的一系列西安市主、次干道以及微中心改造工程的实践中得出,在城市交通精细化治理过程需实现“三个融合”:

(1)空间—时间融合:通过左转待行区延伸、相位差优化挖掘时空潜力;

(2)技术—制度融合:数字孪生提供决策支持,“五共治”体系(警社、警企等联动)保障实施;

(3)人性—智能融合:在南北轴线的诸多节点方案,技术手段与周围交通参与人群共治形成管理闭环。

西安市通过数字孪生技术构建全息路口模型,结合雷达与AI实时监测,实现交通状态仿真与信号自适应调控。此类技术可为精细化智能管理提供数据支持,推动交通治理从“经验驱动”向“数据驱动”转型。明确了未来大数据以及人工智能在交通管控方面的尝试方向。

参考文献:

- [1] 张宏,于海亮,郑赞,等.基于数字孪生的道路交叉口建模与应用[J].汽车安全与节能学报,2023,14(1):55-61.
- [2] 周琪珊,杨璨,李健,等.基于轨迹方向特征的道路交叉口提取算法[J].地理空间信息,2023,21(7):7-10.
- [3] 西安市公安交警支队.2024年十大交通精细化治理案例[M].西安:智慧交通出版社,2025.
- [4] 金立生,郭柏苍,谢宪毅,等.基于行车安全场模型的交叉口车辆控制算法[J].西南交通大学学报,2022,57(4):1-8.
- [5] 王飞,郭庆胜,徐杏琳.基于轨迹数据的道路交叉口及其结构提取方法[J].测绘科学,2022,47(1):47-52.
- [6] 张琦.人工智能在交通管理中的创新实践[J].智能系统学报,2025,16(2):45-52.
- [7] 杨晓光.城市道路交通设计指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [8] 李克平,倪颖.城市道路交叉口信号控制优化方法研究[J].中国公路学报,2020,33(2):112-121.
- [9] 王殿海.交通流理论与信号控制[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
- [10] 刘冰,周溪召.城市交叉口精细化交通组织设计与实践[J].城市交通,2022,20(3):67-75.
- [11] 陈艳艳,赖见辉.大数据驱动的城市交叉口拥堵识别与治理策略[J].公路交通科技,2023,40(2):110-117.
- [12] 徐慰依.慢行优先理念下的城市道路交叉口优化设计研究[J].城市道桥与防洪,2022(6):321-324.
- [13] 马俊来,张智勇.城市道路左转逆置交通组织适用性与设计要点[J].公路,2023,68(4):156-160.
- [14] 李瑞敏.智能网联环境下交叉口信号协同控制研究进展[J].交通运输工程学报,2022,22(5):1-18.
- [15] 赵晓华,荣建.城市道路交通安全精细化管理技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2024.