

养护作业影响下的路段交通流特性

袁龙红,刘惠,郑益锋,岳小泉*,王宇航,孙晓楠

福建农林大学交通与土木工程学院,福建 福州 350108

摘要:为缓解城市道路养护作业造成的交通拥堵,提高养护作业期间受影响路段的通行效率,选取福州市两处典型城市道路养护作业控制区(单车道封闭作业和双车道封闭作业)作为研究对象,基于视频图像识别技术,采集养护作业控制区的车辆运行数据,通过软件 Tracker 提取车辆行驶轨迹,结合软件 MATLAB 和 SPSS 进行数据处理与分析,探究在养护作业场景下车辆的时空分布特性和速度特性,分析养护作业控制区布设对交通流的影响。结果表明:养护作业控制区的交通量在平峰与高峰期差异显著,车辆进入警告区后,车流由封闭车道向通行车道转移,高峰期通行效率明显下降;车辆在养护作业控制区内的行驶速度随车流方向逐渐减小,其中作业区的车速最低,车头时距最大;在强制换道行为中,目标车道后车速度是影响换道决策的关键因素,两处养护作业控制区中,换道车辆速度大于目标车道后车速度的车辆数占比分别为 65% 和 71%;高峰期换道起点更靠近警告区下游,且换道起点距作业区越近,换道持续时间越长。

关键词:养护作业控制区;强制换道行为;交通流特性;通行效率

中图分类号:U491.1⁺12

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0009-10

引用格式:袁龙红,刘惠,郑益锋,等. 养护作业影响下的路段交通流特性[J]. 山东交通学院学报,2025,33(4):9-18.

YUAN Longhong, LIU Hui, ZHENG Yifeng, et al. Traffic flow characteristics of road section affected by maintenance operation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4): 9-18.

0 引言

在城市道路施工养护作业控制区内,车辆需在作业区合流点前完成强制换道,此区域车辆换道行为频繁,通行秩序较差,通行能力下降,且极易引发交通事故。研究城市道路养护作业控制区的交通流特征,对帮助交通管理部门制定合理的交通管理策略,减少交通拥堵和交通事故发生概率具有重要的现实意义。

Zheng 等^[1]分析车辆轨迹,发现换道行为引起的局部交通流的震荡逐渐扩大为整体交通流的震荡;Sun 等^[2]考虑换道过程中的横纵向运动,提出两阶段优化的协同换道方法;Yu 等^[3]考虑换道行为对交通事故及交通延误的影响,采用深度确定性策略梯度法建立换道模型;Li 等^[4]考虑舒适性及横向碰撞危险性优化车辆换道轨迹;Wang 等^[5]采用机器学习方法,建立自适应预测模型,以适应不同道路环境车辆的换道决策;Sharma 等^[6]以高速公路为研究对象,基于两层递阶结构,提出换道行为预测模型;王梓杰等^[7]采用不同换道规则模拟不同区域中车辆的换道行为;邓建华等^[8]针对多车道换道行为,考虑驾驶员换道特性,提出车辆状态更新的随机多车道换道模型;姬浩等^[9]考虑事故车辆影响下,多车道城市道路车辆主

收稿日期:2024-04-13

基金项目:福建省高速公路工程重点实验室开放课题项目(BKY00-20231098)

第一作者简介:袁龙红(2000—),女,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理,E-mail:2796204178@qq.com。

*通信作者简介:岳小泉(1979—),女,福建长汀人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为交通规划,E-mail:yuexiaoquan@fafu.edu.cn。

动抢道及被动抢道的换道行为对道路交通流影响;吉文超^[10]从驾驶员性格出发,建立基于模糊控制理论的驾驶员主观换道模型和强制换道模型,分析不同交通状态下交通通行效率及安全性;聂琳真等^[11]提出一种基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络的驾驶员换道意图产生模型,并将该模型与基于最小安全距离的换道可行性判断模型结合,构建换道行为决策模型,仿真结果表明所提出的模型模拟准确率较高,可较好地模拟驾驶员在高速公路上的换道决策行为;鲍琼等^[12]基于换道阶段试验数据,对比单、双车试验中两车驾驶员的交互行为特征和差异,采用多元 Logistic 回归模型,分析不同因素对换道交互决策的影响。

在养护作业控制区的交通风险和安全管理研究方面,左樑等^[13]系统分析高速公路夜间应急养护作业控制区的交通风险,通过事故数据分析及实地调研,明确夜间养护作业的主要风险来源,针对风险提出综合性管理策略;孙冬等^[14]通过分析公路养护作业过程中存在的交通安全问题,从人、车、路、管理等多方面提出提高作业安全性的措施;田丰铭^[15]针对山区高速公路夜间养护作业控制区的特点,基于软件 VISSIM 仿真探讨合流区控制段长度对冲突风险特征的影响规律,提出合流区最优长度设置方案,减少合流区的交通冲突风险。

在快速路合流区大型车的换道时空特征及风险研究方面,温惠英等^[16]基于无人机拍摄与图像识别技术采集数据,分析大型车在合流区的换道特性及与前车的碰撞风险,为制定大型车交通管理措施提供依据;李斌^[17]分析高速公路日常养护作业的施工特点及主要风险因素,从前期预防、现场管理和施工过程等方面制定安全风险防控措施,科学评估影响因素,提高风险处理效果,确保持续作业高效安全开展。相较于高速公路场景下多种换道模型的研究与应用,城市多车道道路特征的换道行为研究相对较少。对特定场景的研究主要集中于匝道路段车辆的换道特性及突发事故影响下车辆换道特性,对养护作业控制区的车辆换道行为研究较少,车辆在时空状态约束及周围交通环境动态变化影响下差异化换道策略的研究较少。

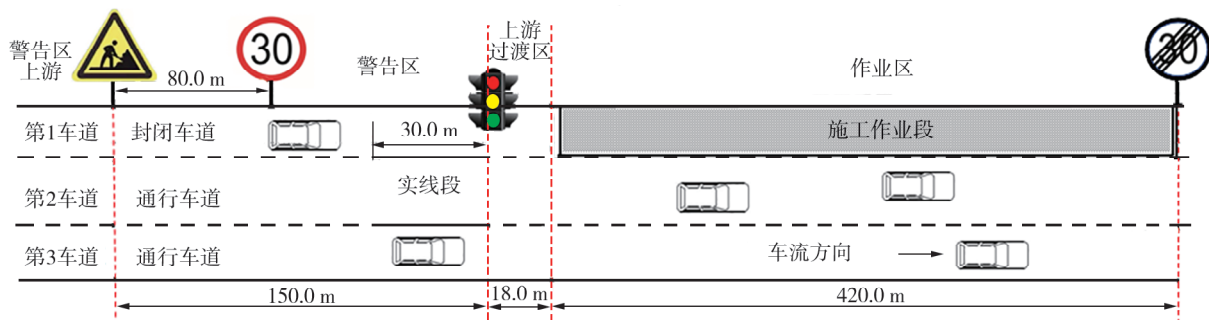
为探究城市养护作业对交通流的影响及养护作业控制区内车辆的换道特性,选取福州市两处典型城市道路养护控制区(单车道封闭作业和双车道封闭作业)作为研究对象,基于无人机采集的实测数据,定量分析路段交通量的时空分布特性和车辆行驶速度特性,通过分析车辆强制换道行为的特点,识别养护作业控制区车辆强制换道的关键影响因素,为制定有效的交通管理方案、缓解交通拥堵、降低交通事故风险等提供数据支撑与决策依据。

1 研究区域与数据采集

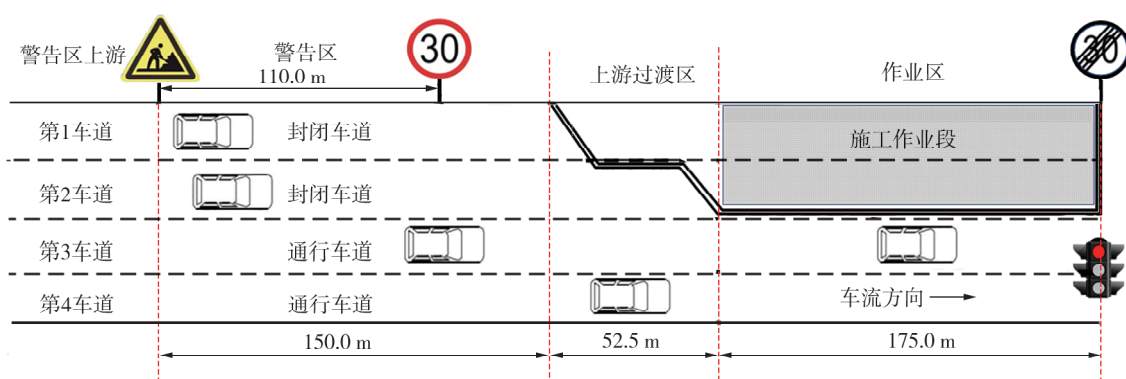
1.1 研究区域

选取福州市两处典型城市道路养护作业控制区为研究对象:福三路与洪山园路段为控制区 1,单车道封闭作业;洪山园路至杨桥中路段为控制区 2,双车道封闭作业。

两处养护作业控制区示意图如图 1 所示。



a) 养护作业控制区 1



b) 养护作业控制区 2

图1 两处养护作业控制区示意图

1.2 数据采集

采用高空航拍与路面勘测相结合的方式采集数据,数据采集设备如图2所示。采用无人机(见图2a))分时段航拍,获取养护作业控制区车辆的行驶轨迹,每台无人机配备4块电池,单块电池可支持连续拍摄15 min。为覆盖交通潮汐变化并完整记录养护作业控制区内车辆的换道行为,配备便携式电源(见图2b))实现连续供电与拍摄。为满足车辆轨迹数据清晰度的要求,养护作业控制区路段采用激光测速仪(见图2c))精确测量车速。通过滚轮式测距仪(见图2d))实地测量道路几何参数及养护作业控制区布设围挡、分段情况。



a) 无人机



b) 便携式电源



c) 激光测速仪



d) 滚轮式测距仪

图2 数据采集设备

结合路段特征及仪器设备条件,主要采集3类数据:1)养护作业控制区布局及道路几何参数,包括养护作业控制区的警告区、上游过渡区及作业区的长度,占用车道情况及道路宽度;2)交通流参数,包括交通量、交通流速度及车辆类型;3)车辆行驶轨迹数据,包括平峰期与高峰期不同养护作业控制区的车辆速度、强制换道车辆的位置等。

通过视频格式工厂对无人机采集的视频进行格式优化处理后,采用软件 Tracker 提取车辆的行驶轨迹坐标数据,再通过软件 MATLAB 和 SPSS 进行后续数据处理与分析。

2 交通流特性分析

2.1 交通量特性

2.1.1 时间分布特性

交通量是表征交通流特性的关键参数之一,指在选定时间段内通过道路某一断面或某车道的标准车辆当量数。在城市道路养护作业控制区内,交通量呈显著的时间分布特征,工作日的早高峰期、晚高峰期及平峰期特征明显。每隔30 min 统计两处养护作业控制区的合流区早高峰期(7:30—8:30)和平峰期(10:30—11:30)的交通量,结果如表1所示。

由表 1 可知:养护作业控制区的高峰期与平峰期的交通量差异显著。养护作业控制区 1、2 均位于城市主干道,受通勤需求影响,高峰期交通量明显增大,养护作业控制区占用部分通行车道,影响路段通行效率。

2.1.2 空间分布特性

采用截面法统计两处养护作业控制区的警告区上游、警告区、作业区的断面交通流率,结果如表 2、3 所示。

表 2 养护作业控制区 1 的断面交通流率

车道 编号	断面交通流率/(pcu·h ⁻¹)					
	警告区上游		警告区		作业区	
	平峰 期	高峰 期	平峰 期	高峰 期	平峰 期	高峰 期
1	301	398	204	235		
2	394	573	429	647	460	693
3	247	379	309	468	387	525
总计	942	1 350	942	1 350	847	1 218

表 1 两处养护作业控制区的交通量

养护作业 控制区	交通量/(pcu·h ⁻¹)			
	高峰期		平峰期	
	7:30—8:00	>8:00—8:30	>10:30—11:00	>11:00—11:30
1	1 054	1 646	938	946
2	1 010	1 824	928	1 126

表 3 养护作业控制区 2 的断面交通流率

车道 编号	断面交通流率/(pcu·h ⁻¹)					
	警告区上游		警告区		作业区	
	平峰期	高峰期	平峰期	高峰期	平峰期	高峰期
1	297	363	23	51		
2	392	564	95	157		
3	249	397	565	644	549	746
4	89	93	344	565	399	671
总计	1 027	1 417	1 027	1 417	948	1 417

由表 2、3 可知:车辆进入警告区后,车流由封闭车道持续向通行车道转移,通行车道断面交通流率递增,说明车辆受警告区标志提示,逐渐由封闭车道向通行车道强制换道,以保障正常通行。

2.2 车辆行驶速度特性

为分析养护作业控制区布设对交通流的影响,统计两处养护作业控制区的警告区上游、警告区、作业区的断面车辆平均速度,结果如表 4 所示。

由表 4 可知:两处养护作业控制区内各区段的平峰期断面车辆平均速度均略高于高峰期;作业区平峰期与高峰期的断面车辆平均速度差较小,警告区平峰期与高峰期的断面车辆平均速度差较大;两处养护作业控制区内各区段的断面车辆平均速度变化趋势基本一致,速度由大到小依次为警告区上游、警告区、作业区。在警告区,封闭车道车辆需向通行车道强制换道,换道行为频繁发生,道路交通的横向与纵向干扰增强,路段交通流的稳定性降低。

2.3 车辆跟驰特性

车头时距指同一车道行驶的车辆队列中,连续两辆车的头部端通过同一断面的时间间隔,是反映道路通行能力及稳定性的重要指标之一。统计两处养护作业控制区的警告区上游、警告区、作业区的平均车头时距,结果如表 5 所示。

由表 5 可知:两处养护控制区的平均车头时距均为作业区最大,警告区次之,警告区上游最小,主要原因为随车流前进方向,封闭车道车辆因养护作业区布设向通行车道强制换道,换道行为导致横向干扰与纵向扰动加剧,通行车道密度增大,车头时距随之增大;养护作业控制区各区段的

表 4 两处养护作业控制区的断面车辆平均速度

养护 作业 控制区	断面车辆平均速度/(km·h ⁻¹)					
	警告区上游		警告区		作业区	
	平峰期	高峰期	平峰期	高峰期	平峰期	高峰期
1	43.40	42.26	37.16	35.86	27.39	26.82
2	42.05	40.08	31.48	29.14	26.09	23.86

表 5 两处养护作业控制区的平均车头时距

养护 作业 控制区	平均车头时距/s					
	警告区上游		警告区		作业区	
	平峰期	高峰期	平峰期	高峰期	平峰期	高峰期
1	3.92	4.31	6.03	6.42	9.91	9.76
2	4.27	5.19	6.78	8.42	11.62	12.38

高峰车头时距整体大于平峰车头时距;养护作业控制区1的车头时距比养护作业控制区2小,路段整体稳定性和通行效率更高。

两处养护作业控制区的车头时距与断面车辆平均速度的关系如图3所示。

由图3可知:两处养护作业控制区中车头时距随车辆行驶速度减小而增大,该变化趋势在高峰期更明显。主要原因是封闭车道车辆向通行车道强制换道,加剧交通流横向干扰,降低路段稳定性及车辆行驶速度,高峰期交通量大,车辆换道行为更频繁,车头时距增大幅度更大;作业区因施工占用车道导致通行空间减少,车辆行驶速度减小,车头时距增大。

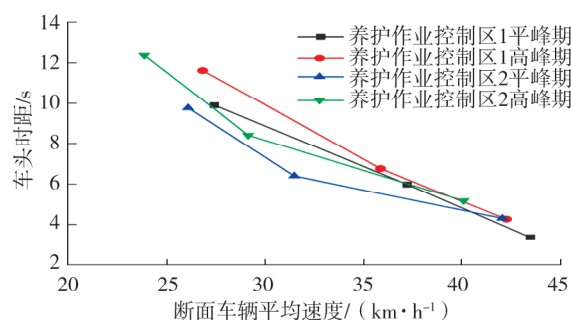
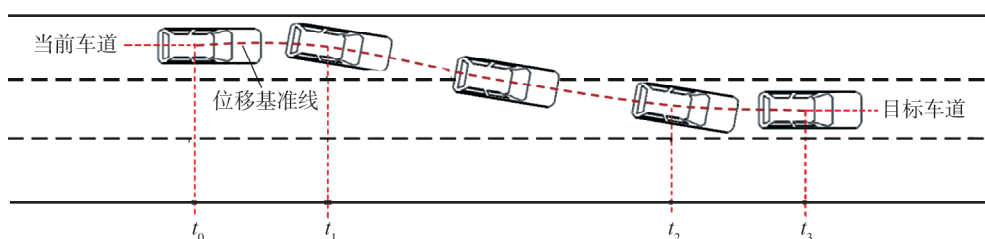


图3 车头时距与断面车辆平均速度的关系

2.4 车辆换道特性

养护作业控制区的车辆强制换道行为会显著改变交通流的时空分布特征,影响车辆速度分布及交通流稳定性。换道行为可分为换道前决策阶段、换道中的实施阶段和换道后的影响阶段。考虑视频轨迹提取精度,基于横向位移变化阈值的判定规则,以当前车道中心线为位移基准线(以车流方向向右为正,向左为负),定义换道过程的关键节点:换道起始时刻为左换道时车辆的横向位移首次不大于或右换道时不小于前0.2 s的横向位移的时刻,记为 t_1 ,换道结束时刻为左换道时车辆的横向位移首次不小于或右换道时不大于前0.2 s的横向位移的时刻,记为 t_2 ,换道起止点示意图如图4所示。



注: t_0 为驾驶员初始动作的理论起始时刻; t_1 为基于位移变化阈值可识别的换道起始时刻; t_2 为基于位移变化阈值可识别的换道结束时刻; t_3 为车辆完成横向调整并稳定的理论结束时刻。

图4 换道起止点示意图

2.4.1 换道持续时间

依据提取的轨迹数据,基于软件MATLAB检测车辆车道编号的变化识别换道行为,再定位该车辆换道起始时刻 t_1 及换道结束时刻 t_2 。车辆换道行为集中在警告区,统计两处养护作业控制区中警告区的车辆强制换道持续时间($t_2 - t_1$),结果如表6所示。

表6 两处养护作业控制区中警告区的车辆换道持续时间

养护作业 控制区	车辆强制换道持续时间/s							
	高峰期				平峰期			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
1	2.60	10.40	5.84	2.43	2.40	8.60	4.39	1.33
2	2.40	10.20	6.03	2.35	2.20	9.00	4.81	2.40

由表6可知:两处养护作业控制区的车辆强制换道持续时间不同,养护作业控制区1警告区的车辆强制换道持续时间最大为10.40 s,最小为2.40 s,换道持续时间集中在4.00~7.00 s;养护作业控制区2警告区的车辆强制换道持续时间最大为10.20 s,最小为2.20 s,换道持续时间集中在4.00~9.00 s;高峰

期的平均车辆强制换道持续时间大于平峰期,平峰期交通流密度相对较小,车辆换道过程中受周围车辆的干扰较小,换道效率相对较高;高峰期交通流密度增大,车辆间的相互影响作用增大,换道持续时间延长。

2.4.2 换道速度

为分析养护作业控制区内车辆强制换道行为的影响因素,基于无人机航拍的车辆轨迹数据,分析车辆强制换道的交通特征。

仅考虑养护作业控制区车辆由封闭车道向通行车道进行的强制换道行为。两处养护作业控制区不同车辆换道前、后的速度(记作 v_1 、 v_2)对比如图 5 所示。

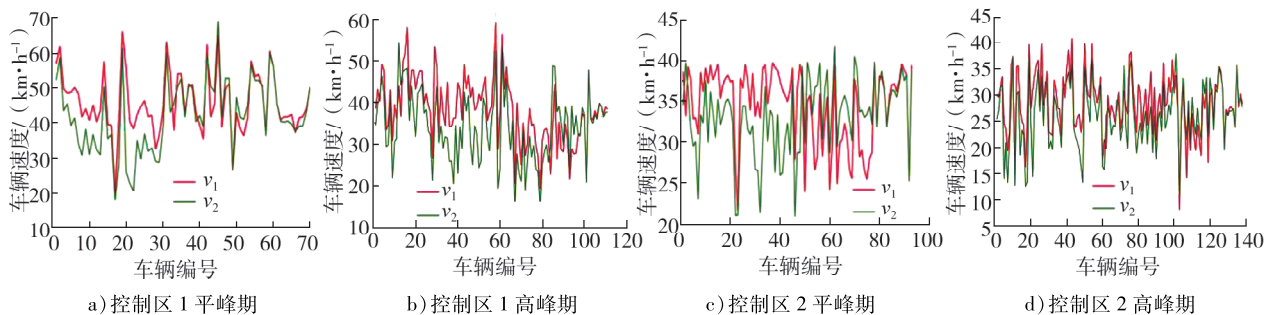


图 5 两处养护作业控制区不同车辆换道前、后的速度对比

由图 5 可知:车辆换道前、后速度变化较小,表明养护作业控制区内的强制换道行为不以提高车速为换道目标;平峰期车辆换道前、后速度差大于高峰期,平峰期交通流干扰较少,部分车辆可通过换道提高速度,而高峰期的车流密度大,车辆难以通过换道提高速度。

在养护作业控制区,车辆换道决策受多种因素影响,其中车头时距和周围车辆速度是关键影响因素。分析换道车辆与周围车辆的速度关系及其对换道行为的影响。

以强制换道车辆速度与周围车辆速度之比作为速度关系系数 α , $\alpha < 1$ 、 $\alpha = 1$ 、 $\alpha > 1$ 分别为强制换道车辆速度小于、等于、大于周围车辆速度, $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 为强制换道车辆的速度分别与当前车道前车速度、当前车道后车速度、目标车道前车速度、目标车道后车速度之比。

两处养护作业控制区强制换道车辆速度与周围车辆速度关系如表 7 所示。

表 7 两处养护作业控制区强制换道车辆速度与周围车辆速度的关系

养护作业 控制区	满足条件的车辆数占比/%											
	$\alpha_1 > 1$	$\alpha_1 = 1$	$\alpha_1 < 1$	$\alpha_2 > 1$	$\alpha_2 = 1$	$\alpha_2 < 1$	$\alpha_3 > 1$	$\alpha_3 = 1$	$\alpha_3 < 1$	$\alpha_4 > 1$	$\alpha_4 = 1$	$\alpha_4 < 1$
1	41	25	34	33	38	29	25	29	46	65	17	18
2	29	37	34	21	41	37	26	23	51	71	13	16

由表 7 可知:车辆强制换道行为与目标车道车辆的速度相关性较高,与当前车道车辆的速度相关性较低,被前车阻挡换道并不是养护作业控制区车辆换道的主要影响因素,而是受警告区段的影响,具有明显的强制性特征。养护作业控制区 1、2 中换道车辆速度小于目标车道前车速度的车辆数占比分别为 46% 和 51%,换道车辆速度大于目标车道后车的车辆数占比分别为 65% 和 71%,目标车道后车速度是影响强制换道决策的关键因素。

2.4.3 换道起点

分析车辆强制换道轨迹,发现车辆的换道行为集中发生在警告区。在距养护作业控制区 1 停止线前 150 m 处放置警示牌,将该位置作为换道路段起点,换道路段终点设在车道分隔线实线段位置,换道路段长 120 m。

以 5 m 为间隔,统计以各区间作为换道起点的车辆数占比 P ,结果如表 8 所示。由表 8 可知:平峰期

车辆集中选择在距警示牌 35~90 m 处换道,高峰期车辆集中在距警示牌 45~110 m 处换道,高峰期强制换道起点更靠近道路分隔线实线段。

表 8 养护作业控制区 1 的车辆换道起点统计结果

换道 区间/m	P/%		换道 区间/m	P/%		换道 区间/m	P/%		换道 区间/m	P/%	
	平峰期	高峰期		平峰期	高峰期		平峰期	高峰期		平峰期	高峰期
[0,5)	2.82	2.70	[30,35)	4.23	1.80	[60,65)	5.63	4.50	[90,95)	2.82	5.41
[5,10)	0	0	[35,40)	5.63	4.50	[65,70)	9.86	5.41	[95,100)	5.63	7.21
[10,15)	0	1.80	[40,45)	7.04	6.31	[70,75)	7.04	6.31	[100,105)	2.82	3.60
[15,20)	1.41	1.80	[45,50)	2.82	0.90	[75,80)	4.23	5.41	[105,110)	4.23	4.50
[20,25)	2.82	3.60	[50,55)	5.63	7.21	[80,85)	5.63	8.11	[110,115)	0	0
[25,30)	1.41	2.70	[55,60)	8.45	5.41	[85,90)	8.45	9.01	[115,120)	1.40	1.80

换道起点与换道持续时间关系如图 6 所示。

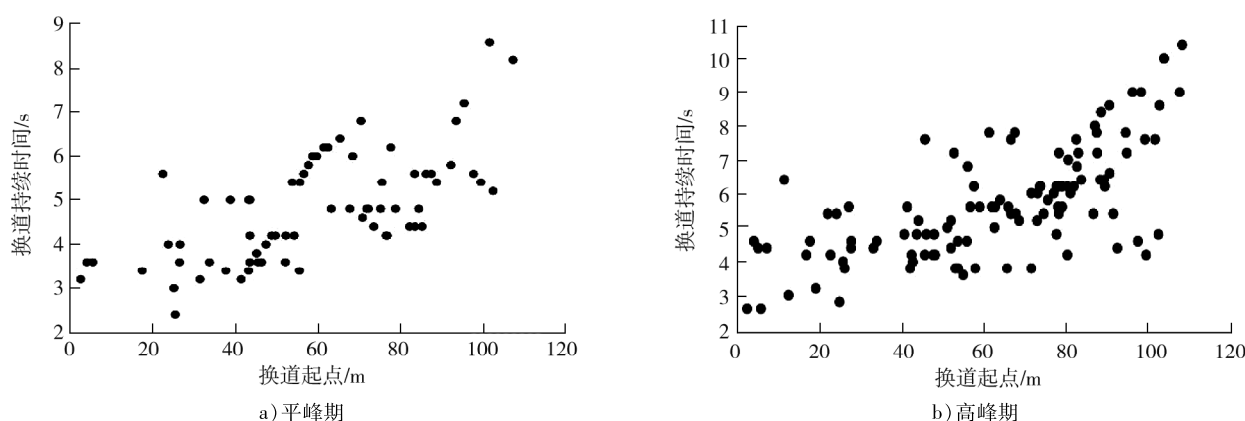


图 6 养护作业控制区 1 换道起点与换道持续时间关系

由图 6 可知:平峰期车辆的换道持续时间集中在 3.5~6.5 s,高峰期车辆的换道持续时间集中在 4.5~8.5 s;高峰期车辆换道起点分布比平峰期更集中,车流密度增大,车辆换道点选择自由度降低;换道起点越接近道路分隔线实线段位置,强制换道持续时间越长。

养护作业控制区 2 在围挡处上游 150 m 处放置警示牌,作为第 1、2 车道的车辆换道起点,其中第 1 车道以围挡位置为换道路段终点,换道路段长 150 m;第 2 车道以上游过渡区终点为换道路段终点,换道路段长 202.5 m(为统计方便,仅分析 0~195 m 区间)。以 15 m 为间隔,统计以各区间作为换道起点的车辆数占比 P ,结果如表 9 所示。

表 9 养护作业控制区 2 的车辆换道起点统计结果

换道 区间/m	P/%				换道 区间/m	P/%			
	平峰期		高峰期			平峰期		高峰期	
	第 1 车道	第 2 车道	第 1 车道	第 2 车道		第 1 车道	第 2 车道	第 1 车道	第 2 车道
[0,15)	3.23	1.08	0.72	1.45	[105,120)	6.45	8.60	7.25	10.14
[15,30)	1.08	2.15	2.17	0.72	[120,135)	1.08	6.45	3.62	8.00
[30,45)	2.15	3.23	1.45	3.62	[135,150)	0	5.68	0	4.30
[45,60)	6.50	4.30	2.90	5.07	[150,165)		2.15		2.17
[60,75)	6.45	7.53	5.80	5.07	[165,180)		2.15		2.90
[75,90)	7.53	9.68	7.97	6.52	[180,195)		0		0
[90,105)	5.38	7.53	8.70	9.42					

由表 9 可知:平峰期第 1、2 车道车辆换道起点分别集中在距警示牌 45~120 m、45~150 m 处;高峰期第 1、2 车道车辆换道起点集中在距警示牌 60~120 m、45~150 m 处,第 2 车道换道起点位置明显迟于第 1 车道。

换道持续时间与换道起点关系如图 7 所示。

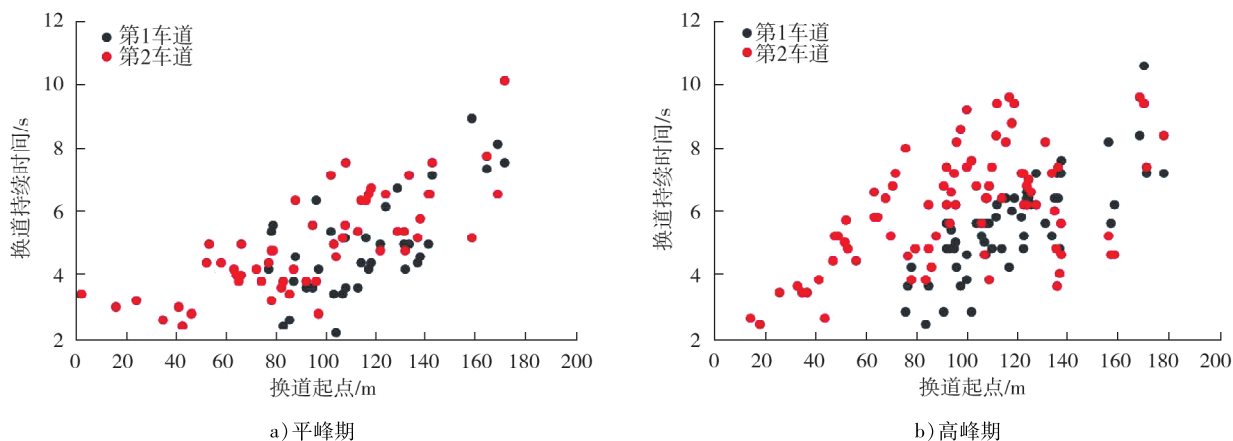


图 7 养护作业控制区 2 换道起点与换道持续时间关系

由图 7 可知:平峰期第 1、2 车道的换道持续时间分别集中在 3.5~6.5 s、3.5~8.0 s,高峰期第 1、2 车道的换道持续时间分别延长至 4.0~7.0 s、3.5~9.0 s;第 2 车道的整体换道持续时间大于第 1 车道,且换道起点分布较第 1 车道更靠后。主要原因是第 1 车道多采用分段换道策略(先换道至第 2 车道,再换至通行车道),第 2 车道车流密度较高,车辆速度降低,驾驶员需等待适宜的换道时机,车辆换道持续时间更长;受非封闭车道优先通行权的影响,封闭车道在警告区上游段获取换道机会更困难,迫使驾驶员在警告区下游段等待合适换道时机,这一现象在高峰期更明显。

养护作业控制区车辆的强制换道行为集中发生在警告区下游路段,车辆换道位置与最迟换道点的距离决定道路环境对驾驶员的换道压力,是养护作业控制区车辆强制换道决策模型的重要影响因素;平峰期强制换道行为换道起点位置比高峰期提前,换道起点分布相对松散,高峰期因受道路交通流影响,车辆换道需等待合适时机,换道起点明显向靠近作业区集中,换道持续时间更长。

3 结束语

为探究养护作业控制区的交通流特性,基于软件 Tracker 提取车辆的行驶轨迹坐标数据,并通过软件 MATLAB 和 SPSS 进行数据处理与分析,分析养护作业影响下的路段交通流特征。

1) 养护作业控制区的交通量在平峰与高峰期差异显著,高峰期交通量增大,作业区围挡直接占用部分通行车道,影响路段通行效率;警告区上游内侧车道断面交通流率大于外侧车道,但车辆进入警告区后,受内侧封闭车道影响,车辆开始向外侧通行车道转移,交通量重新分布,外侧通行车道交通流率递增。

2) 在养护作业控制区内,车辆速度沿车流前进方向降低,断面平均车辆速度由大到小依次为警告区上游、警告区、作业区,作业区车速最小且车头时距最大,表明换道行为加剧了交通流扰动,通行效率降低。

3) 在换道行为中,目标车道后车速度是影响换道决策的关键因素,两处养护作业控制区中,换道车辆速度大于目标后车速度的车辆数占比均不小于 65%。换道起点空间分布差异显著,单车道封闭养护作业中,高峰期换道起点集中区段较平峰期整体后移 10~20 m,且分布重心向车道分隔线实线段偏移;双车道封闭养护作业中,高峰期第 1 车道换道起点集中区段较平峰期后移 15 m,第 2 车道换道起点集中区段较平峰期后移 30 m。换道起点距作业区越近,换道持续时间越长。

参考文献:

- [1] ZHENG Z D, AHN S, MONSERE C M. Impact of traffic oscillations on freeway crash occurrences[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(2):626-636.
- [2] SUN K, ZHAO X M, WU X. A cooperative lane change model for connected and autonomous vehicles on two lanes highway by considering the traffic efficiency on both lanes[J]. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2021, 9:100310.
- [3] YU C X, NI A N, LUO J, et al. A novel dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles based on reinforcement learning[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022(1):8351543.
- [4] LI X Y, GUO Z Y, SU D L, et al. Time-dependent lane change trajectory optimisation considering comfort and efficiency for lateral collision avoidance[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(5):595-605.
- [5] WANG J H, ZHANG Z, LU G Q. A Bayesian inference based adaptive lane change prediction model[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 132:103363.
- [6] SHARMA O, SAHOO N C, PUHAN N B. Highway lane-changing prediction using a hierarchical software architecture based on support vector machine and continuous hidden Markov model[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2022, 20(2):519-539.
- [7] 王梓杰, 祝会兵, 叶岳定, 等. 高速公路封道施工路段交通流特性及通行能力分析:以杭州湾大桥内侧两条车道封道情形为例[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2023, 36(1):103-112.
- [8] 邓建华, 冯焕焕, 葛婷. 多车道元胞自动机换道决策模型的冲突处理策略[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(4):50-54.
- [9] 姬浩, 王永东, 李佩, 等. 事故车辆影响下的城市三车道道路交通流仿真[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(3):112-120.
- [10] 吉文超. 基于驾驶行为分析的城市道路车辆换道模型研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [11] 聂琳真, 黄灏然, 尹智帅. 基于RBF神经网络的高速公路车辆换道行为决策模型研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2019, 41(9):18-24.
- [12] 鲍琼, 刘佳琪, 沈永俊. 基于双车驾驶模拟的城市快速路驾驶人换道交互行为特征[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(1):165-173.
- [13] 左樑, 姚凯. 高速公路夜间应急养护作业区交通风险研究[J]. *交通科技与管理*, 2024, 5(23):191-194.
- [14] 孙冬, 李莽, 刘洋, 等. 浅析公路养护作业交通安全风险及防控措施[J]. *交通科技与管理*, 2024, 5(8):189-191.
- [15] 田丰铭. 山区高速公路夜间养护作业区风险特征及合流区长度设置研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.
- [16] 温惠英, 李秋灵, 赵胜. 快速路合流区大型车换道时空特征及风险研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5):11-21.
- [17] 李斌. 高速公路日常养护作业安全风险及防控措施研究[J]. *工程建设与设计*, 2024(8):234-236.

Traffic flow characteristics of road section affected by maintenance operation

YUAN Longhong, LIU Hui, ZHENG Yifeng, YUE Xiaoquan*,
WANG Yuhang, SUN Xiaonan

College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China

Abstract: To alleviate traffic congestion caused by urban road maintenance and improve traffic efficiency during maintenance operation, two typical urban road maintenance work zones in Fuzhou (single-lane closure and double-lane closure) are selected for analysis. Using video image recognition technology, vehicle operation data in the maintenance work zones are collected, and vehicle trajectories are extracted using Tracker software. Data processing and analysis is conducted with MATLAB and SPSS to examine the spatiotemporal distribution and

speed characteristics of vehicles under maintenance scenarios, as well as the impact of maintenance work zone configurations on traffic flow. The results indicate that traffic volume in maintenance work zones varies significantly between off-peak and peak hours; after entering the warning area, vehicles shift from closed lanes to open lanes, with a marked decline in traffic efficiency during peak hours; vehicle speeds gradually decrease along the direction of traffic flow within maintenance work zones, with the lowest speeds and largest time headways observed in the activity area; in mandatory lane-changing behavior, the speed of the trailing vehicle in the target lane is a key factor influencing lane-changing decisions; in the two maintenance work zones, the proportions of lane-changing vehicles with higher speeds than those of the trailing vehicle are 65% and 71%, respectively; during peak hours, lane-changing initiation points are closer to the downstream end of the warning area, and the closer the lane-changing initiation point is to the activity area, the longer the lane-changing duration is.

Keywords: maintenance work zone; mandatory lane-changing behavior; traffic flow characteristic; traffic efficiency

(责任编辑:赵玉真)

.....

(上接第 8 页)

intersections and improve the efficiency of intersection traffic flow organization, an optimization method for traffic flow organization at pre-signal controlled intersections is proposed. Based on the channelization design of intersection approach lane and the coordination of main and pre-signal phase sequences, this method aims to improve the efficiency of left-turn and through traffic flows at intersection approaches and the utilization of intersection temporal and spatial resources. Two operation modes are designed for left-turn and through phases at approaches that continuous release mode and separate release mode. Experimental validation is conducted. Results indicate that: under different traffic volumes at intersection approach lane, pre-signal controlled intersections have smaller average signal cycle times, mean vehicle delays, and rates of increase in average vehicle delay with increasing approach lane traffic volume compared to traditional single-stop-line intersections, the separate release mode of pre-signal controlled intersections performs better than the continuous release mode in terms of average signal cycle times, mean vehicle delays, and rates of increase in average vehicle delay with increasing approach lane traffic volume; under the separate release mode of pre-signal controlled intersections during traffic flow saturated or oversaturated conditions on intersection approach lane, average vehicle delay time is minimized.

Keywords: pre-signal control; intersection; traffic flow; channelization design; phase sequence

(责任编辑:边文超)