

降雨天气下基于饱和流率识别的信号控制研究

潘杰

(南京市城市与交通规划设计研究院股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为优化降雨天气下交通信号控制的配时精度, 引入降雨导致的修正系数识别饱和流率, 建立面向实时交通信号控制的优化模型; 结合实测高精度视频数据, 应用视频分析软件获取正常天气及降雨天气下信号交叉口可持续最小车头时距特征, 应用统计回归分析方法建立基于降雨等级的饱和流率识别模型, 结合实时降雨条件下摩擦系数和能见度建立饱和流率动态识别模型, 基于 VISSIM 仿真环境分析优化饱和流率对信号配时的影响。结果表明, 饱和流率随着降雨强度增大逐渐降低, 在小雨、中雨、大到暴雨环境下分别降低 12.41%、19.12%、27.79%; 根据降雨等级的饱和流率优化及实时优化均可有效适应降雨的影响。

关键词: 城市交通; 饱和流率; 降雨天气; 信号控制交叉口

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0036-07

雨雪等恶劣天气下, 道路交通流运行特性将发生显著变化, 当信号配时算法未能对变化的交通流特性实时响应时, 交叉口会呈现绿灯空放、排队溢流等负面效应。单点交叉口信号配时方案主要受损失时间、交通流量及饱和流率等因素影响, 其中损失时间及交通流量可动态获取, 但饱和流率多采用固定值。在恶劣天气环境下, 驾驶员行为及载运工具的运行会受外界环境影响, 呈现比正常天气下更大的车头时距, 造成饱和流率产生变化, 进而影响交通控制效果。道路附着条件及视距条件是降雨天气作用于饱和流率的主要因素。雨天驾驶员辨识距离随降雨强度增加而降低, 路面积水的反射现象会影响驾驶员辨识标志标线, 残留在挡风玻璃上的水滴也会影响驾驶员视觉并对其心理、生理产生不利影响。雨水会同路面上灰尘形成湿滑水膜, 会降低路面与轮胎的摩擦系数, 轮胎与道路间接触面积也显著降低。上述因素增加了雨天驾驶的复杂程度。目前关于不良天气对交通流影响的研究多关注通行能力、启动损失时间、平均车速等可直接获取的参数, 对雨天饱和流率的研究成果未能直接用于交通信号配时。不同降雨强度会对交通流产生不同影响, 小雨时通行能力折减 6%~8%, 中雨时折减 10%~11%, 大雨时折减 13%~15%, 恶劣天气下交叉口车辆的饱和流率降低 20%、平均速度降低 30%、启动损失时间增加 23%~50%。工程实践中饱和流率常由理论饱和流率乘以相应修正系数获得, 类似于规划类通行能力计算, 无法动态反映实际交通流

运行情况并满足在线交通信号控制需求, 常用于新建道路等无实际观测值的区域。饱和流率受外界环境条件、车辆尺寸和性能、驾驶员水平、地域特性等因素影响, 应尽可能根据实际调查情况推算。该文基于实际观测数据建立降雨天气下信号控制交叉口饱和流率识别模型, 根据降雨天气下道路附着系数及驾驶员视距对饱和流率的影响建立面向实时交通信号控制的饱和流率识别模型, 并验证所识别饱和流率对优化降雨环境下交通信号配时的适应性。

1 数据采集与处理

如式(1)所示, 饱和流率为可持续最小车头时距的倒数, 可通过观测高精度监控视频获取。选取 2018—2019 年西安市若干交叉口的精度监控视频分析不同降雨强度下饱和流率特性。调查地点选取原则: 1) 交通量大的城市主、次干路, 具有机非隔离带, 路面平直, 行车视线好; 2) 调查位置选择交叉口进口道的机动车道, 观测距离覆盖停车线至进口道上游 20~30 m; 3) 收集全部降雨及路段有积水时段的数据, 晴好天气主要选择较拥堵的高峰时段数据。为避免车道宽度、车辆构成及左右转混行等因素的影响, 仅选取各进口道车道宽度相同的直行车道进行分析, 且剔除大型车的影响。

$$s = 3\ 600 / \bar{h}_{\min} \quad (1)$$

式中: s 为交叉口所选取进口道的饱和流率(辆/单位绿灯时间); \bar{h}_{\min} 为每周周期稳定状态下可持续的最

小车头时距(s)。

高精度监控视频的帧率为 25 f/s,即车头时距精度为 0.04 s,满足精度要求。采用 SIMI Motion9.2.1 软件对监控视频进行处理,通过图像矫正、特征点追踪等,获取指定观测范围内各车辆间的车头间距、速度、加速度等参数的时变特性。降水采用西安泾河气象站及长安气象站的观测信息,以泾河气象站信

息为主,长安气象站信息为辅,获取内容为单位时间内降雨量即降雨强度。国家气象局按每小时降雨强度将降雨量划分为小雨(0~2.5 mm/h)、中雨(2.6~8.0 mm/h)、大雨(8.1~15.9 mm/h)、暴雨(≥ 16.0 mm/h)5个等级,因大雨及暴雨观测样本量较少,且对交通流影响类似,在观测数据中合并这两类天气为大到暴雨。各调查地点的调查信息见表1。

表1 实地观测信息及统计分析

观测路段	车道宽度 L/m	不同降雨强度 r (mm/h)下观测样本数 N				合计
		无降水	小雨(0,2.5]	中雨[2.6,8.0]	大到暴雨[8.1,+∞)	
雁塔路—建设路南进口	3.5	325	111	90	78	604
长安路—友谊路东进口	3.5	384	153	102	89	728
长安路—小寨路西进口	3.5	361	128	77	83	649
翠华路—小寨路南进口	3.5	286	89	60	42	477
雁塔路—友谊路西进口	3.5	302	103	74	69	548
样本观测数合计		1 658	584	403	361	3 006
样本车头时距均值/s		2.751	3.39	3.645	4.415	
车头时距标准差/s		0.696	0.771	0.906	1.591	
车头时距标准偏差/s		0.833	0.874	0.946	1.252	

2 降雨天气对饱和和流率的影响分析

2.1 研究框架

为分析降雨对饱和和流率的影响,并应用于在线交通信号控制优化,对降雨影响的分析应注重时间的影响。如图1所示首先通过对不同降雨强度下饱和和车头时距数据进行预处理,剔除奇异数据。再应用 Wilcoxon 符号秩检验分析不同强度降雨对饱和

流率影响的显著性,应用数理统计方法获取不同降雨强度下饱和和流率修正系数。因修正系数采用每小时降雨强度信息进行标定,存在一定滞后性,应用道路摩擦系数及能见度2个影响降雨天气交通行为的关键参数获取实时降雨修正系数模型。最后通过标定后 VISSIM SCAPI(Signal Control Application Programming Interface)验证采用修正系数修正信号配时参数的可行性。

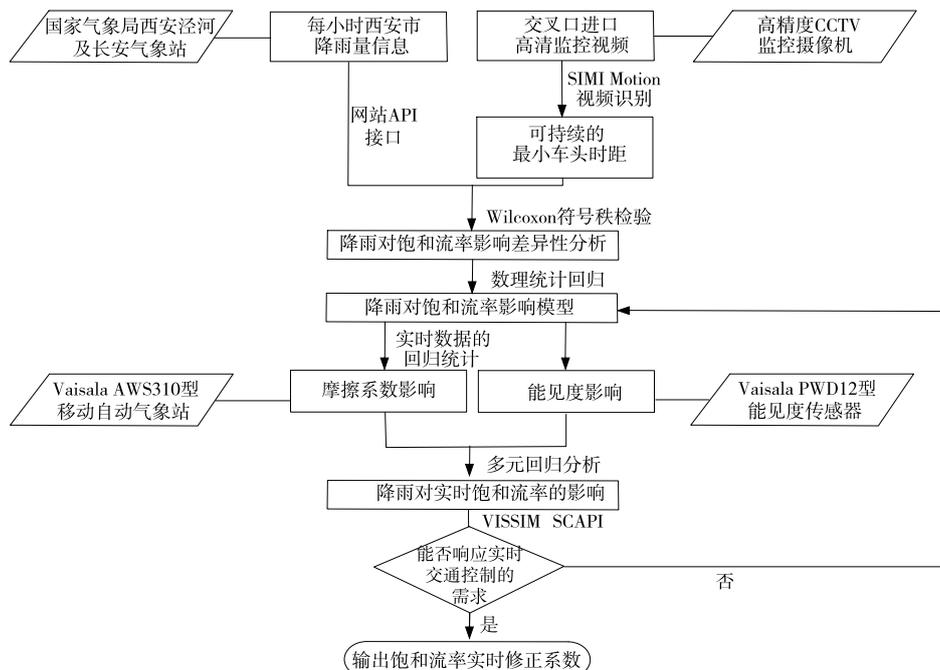


图1 降雨天气对饱和和流率影响的研究框架

2.2 降雨强度对饱和流率的显著性分析

采用单因素方差分析方法验证不同降雨强度对路段自由流速度影响的显著性区别。考虑到各条件下样本量总数不匹配,采用 Wilcoxon 符号秩检验分析各降雨强度下饱和流率的差异。显著性水平取

0.05,假设两样本服从相同的分布,并具有相同的均值方差,采用 R 软件分别对无降水天气及各降雨强度下饱和流率两两进行假设检验。Wilcoxon 符号秩检验结果见表 2,检验 P 值均小于 0.05,需拒绝原假设,说明不同降雨强度下饱和流率存在显著差异。

表 2 Wilcoxon 符号秩检验结果

降雨等级	不同降雨等级下检验 P 值			
	无降雨	小雨	中雨	大到暴雨
无降雨	—	1.357×10^{-6}	2.096×10^{-8}	2.532×10^{-9}
小雨	1.357×10^{-6}	—	0.037 230	0.001 779
中雨	2.096×10^{-8}	0.037 230	—	0.012 570
大到暴雨	2.532×10^{-9}	0.001 779	0.012 570	—

2.3 模型建立

如图 2(a)所示,信号控制交叉口的可持续最小车头时距随降雨强度增加而上升,在不同降雨等级下,车头时距近似呈线性增长趋势;不同降雨等级对车头时距的影响存在突变,这是 Wilcoxon 符号秩检验显示各降雨等级下车头时距存在显著差异的原因。为明确各降雨强度对可持续最小车头时距的影响,绘制图 2(b)所示各降雨等级下车头时距分布。根据车头时距均值,小雨天气对饱和流率影响不大;

随降雨强度加强,降雨对饱和流率的影响增大。在降雨强度为 8 mm/h 左右即中雨到大雨转换时,受视距及道路摩擦系数的影响,降雨对饱和流率影响的离散性变大。

引入降雨影响修正系数 f_r 修正交叉口饱和流率,建立交叉口车道饱和流率计算模型[见式(2)]。降雨等级划分如下:小雨(0~2.5 mm/h),路面潮湿或有少量积水;中雨(2.6~8.0 mm/h),路面明显积水;大雨到暴雨(≥ 8.1 mm/h),路面有大量积水。各降雨等级下 f_r 的计算见式(3)。

$$s_r = s_0 f_r \quad (2)$$

式中: s_r 为雨天下的饱和流率; s_0 为正常天气下的饱和流率; f_r 为饱和流率的降雨修正系数。

$$f_r = \begin{cases} 1, & r=0 \\ -0.056r+0.935, & r \in (0, 2.5] \\ -0.021r+0.894, & r \in (2.5, 8] \\ -0.009r+0.857, & r \geq 8.1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为降雨强度。

根据车头时距由式(1)计算交叉口各降雨等级下饱和流率,选取与实测得到的饱和流率偏差最小的值按式(3)计算该降雨等级的修正系数。在无需对饱和流率进行精确修正时,可采用式(4)所示饱和流率修正值对相应天气下交通信号配时进行优化。

$$f_r = \begin{cases} 1, & \text{无降雨} \\ 0.88, & \text{小雨} \\ 0.81, & \text{中雨} \\ 0.75, & \text{大到暴雨} \end{cases} \quad (4)$$

3 实时饱和流率降雨修正模型

3.1 降雨对交通状态的影响机理

降雨天气饱和流率修正系数 f_r 主要受道路摩

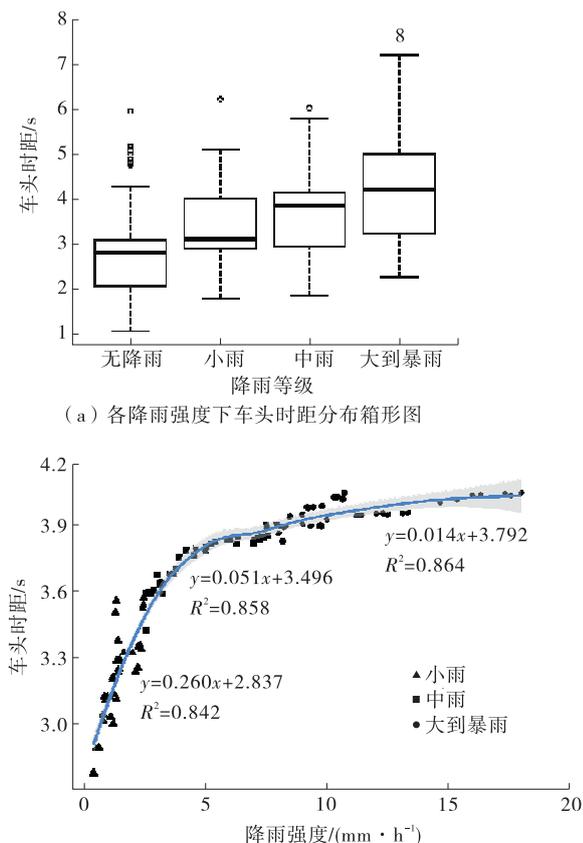


图 2 不同降雨强度下车头时距分布

擦系数 μ 及能见度 v 的影响。道路摩擦系数越高, 修正系数越大; 能见度越好, 修正系数越大。2 种因素对车辆及驾驶员的影响见表 3。

如表 4 所示, 应用 Vaisala AWS310 型移动自动气象站中 PSD 310 型路况巡检系统及 PWD12 型能见度传感器采集各降雨环境下测试地点的降雨强度、路面摩擦系数及气象能见度。PWD12 型能见度

传感器所采集的气象能见度为视力正常人在当时天气条件下能从天空背景中看到和辨认出目标物(黑色、大小适度)的最大水平距离, 其与驾驶员可视距离近似服从式(5)所示线性关系。检测结果说明道路摩擦系数及能见度对饱和流率的降雨修正系数有显著影响, 且均与降雨强度密切相关。降雨强度、路面摩擦系数及能见度等信息均可通过光学系统实时

表 3 不同降雨强度下摩擦系数与能见度的影响

降雨等级	降雨强度 $r/(mm \cdot h^{-1})$	对摩擦系数的影响	对能见度的影响
无降雨	$r=0$	无影响	无影响
小雨	$0 < r \leq 2.5$	摩擦系数略降低, 影响不大	影响较小
中雨	$2.6 \leq r \leq 8.0$	摩擦系数降低, 出现滑水现象	有一定影响
大雨	$8.1 \leq r \leq 15.9$	车轮打滑, 摩擦系数明显降低	影响显著
暴雨	$r \geq 16.0$	车辆行驶困难, 摩擦系数较低	严重影响出行

获取, 可根据实时检测值对饱和流率降雨修正系数进行实时估计。

$$v = 1.387v_d + 3.568 \quad (5)$$

式中: v 为气象能见度(m); v_d 为驾驶员在车辆中的能见距离(m)。

表 4 各降雨强度下路面摩擦系数及气象能见度

降雨强度/ ($mm \cdot h^{-1}$)	降雨等级	路面摩 擦系数	能见度/km
0.87	小雨	0.63	0.921
1.23	小雨	0.62	0.902
1.54	小雨	0.61	0.853
2.34	小雨	0.60	0.834
3.22	中雨	0.57	0.751
4.48	中雨	0.58	0.612
6.32	中雨	0.57	0.534
8.73	大雨	0.55	0.502
9.12	大雨	0.52	0.464
11.23	大雨	0.50	0.414
16.12	暴雨	0.48	0.394
17.21	暴雨	0.45	0.364

3.2 模型建立

为明确摩擦系数及能见度对饱和流率降雨修正系数的影响, 使用回归分析方法建模:

$$f_r = \theta + \alpha \cdot f(\mu) + \beta \cdot g(v) + \epsilon \quad (6)$$

式中: α, β, θ 为系数; $f(\mu)$ 为摩擦系数对实时降雨修正系数的函数; $g(v)$ 为能见度对降雨修正系数的函数; ϵ 为随机误差。

应用前述方法确定表 4 所示各环境下实时饱和流率降雨修正系数, 并将其作为因变量, 分别将实时摩擦系数和能见度作为自变量, 应用回归分析方法获取两影响因素对实时修正系数的模型, 计算回归方程中变量的偏回归平方和, 在给定的 F 检验水平下进行显著性检验。将两参数的最优回归模型带入式(6), 根据已有数据应用多元回归方法建立根据实时检测参数确定饱和流率修正系数的识别模型。

在 SPSS 软件中分别应用线性模型、对数模型、倒数模型、二次模型、三次模型、复合函数模型、幂函数模型、指数模型对摩擦系数和能见度与实时修正系数的关系进行估计, 拟合结果见表 5。

表 5 摩擦系数和能见度与实时修正系数的关系拟合结果

回归参数	统计参数	R^2	显著性	拟合曲线
摩擦 系数	线性模型	0.907	< 0.001	$f_r = 0.662\mu + 0.446$
	对数模型	0.889	< 0.001	$f_r = 0.354 \ln \mu + 1.024$
	倒数模型	0.868	< 0.001	$f_r = 1.155 - 0.187/\mu$
	二次模型	0.945	< 0.001	$f_r = 2.726\mu^2 - 2.306\mu + 1.024$
	三次模型	0.949	< 0.001	$f_r = 2.739\mu^3 - 1.688\mu^2 + 0.847$
	复合函数模型	0.917	< 0.001	$f_r = 0.517 \times 2.257^\mu$
	幂函数模型	0.901	< 0.001	$f_r = 1.053\mu^{0.436}$
	指数模型	0.917	< 0.001	$f_r = 0.517e^{0.814\mu}$

续表 5

回归参数	统计参数	R^2	显著性	拟合曲线
能见度	线性模型	0.939	<0.001	$f_r = 0.183v + 0.701$
	对数模型	0.934	<0.001	$f_r = 0.112\ln v + 0.874$
	倒数模型	0.914	<0.001	$f_r = 0.928 - 0.063/v$
	二次模型	0.939	<0.001	$f_r = 0.014v^2 + 0.165v + 0.706$
	三次模型	0.940	<0.001	$f_r = 0.022v^3 + 0.154v + 0.712$
	复合函数模型	0.937	<0.001	$f_r = 0.708 \times 1.25^v$
	幂函数模型	0.937	<0.001	$f_r = 0.875v^{0.137}$
	指数模型	0.937	<0.001	$f_r = 0.708e^{0.223v}$

由表 5 可知:大多数模型能对两者关系进行较好的描述。结合曲线趋势,两参数均选用决定系数 R^2 最高的三次模型作为函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 带入式(6)进行拟合,获得根据实时摩擦系数及能见度信息估计的饱和流率降雨修正系数模型[见式(7)],应用表 4 数据拟合所得拟合优度为 88.2%。降雨天气下饱和流率修正系数与摩擦系数和能见度的关系见图 3。

$$f_r = 1.369\mu^3 - 0.844\mu^2 + 0.011v^3 + 0.077v + 0.779 \quad (7)$$

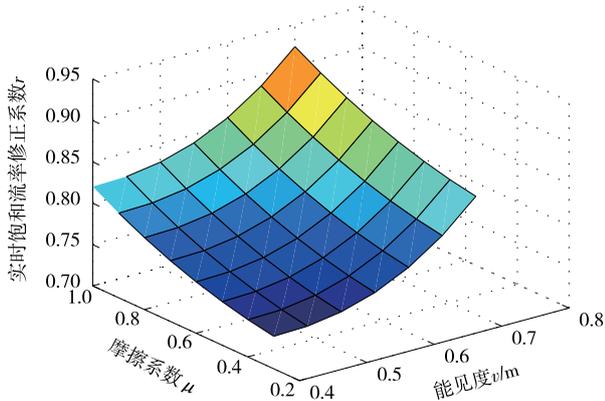


图 3 摩擦系数及能见度作用下的降雨修正系数

4 对交通信号控制的影响评价

应用 VISSIM SCAPI 评估根据实时交通信息标定的饱和流率降雨修正系数对交通信号控制的影响。SCAPI 控制器可将交通信号控制算法集成至动态链接库文件(dll 文件)中,应用 C++ 语言编写软件,实现从 VISSIM 检测器收集检测器计数、占有率等实时交通信息并反馈到算法中,同时实现由外部输入确定饱和流率、损失时间等信号配时基础参数。SCAPI 控制器在根据实时信息优化信号配时后,通过 VISSIM COM 组件将周期时长、绿信比等配时参数反馈至 VISSIM 仿真环境中,优化下一周期的信号配时。在测试雨天交叉口运行情况时,

VISSIM 车流运行行为采用相应降雨环境下实测数据进行标定,降雨控制参数标定模块根据实时降雨信息优化 SCAPI 控制器的信号配时基本参数。采集 2019 年 7 月 24 日降雨天气下西安市雁塔路一建设路交叉口南进口 3 条直行车道的信号配时、高清监控视频、降雨量、摩擦系数、能见度等信息,部分数据见表 1、表 4。应用 SIMI Motion 软件标定车流损失时间、车头时距等随时间的变化特性,VISSIM 的车流动力特征根据实测数据标定。分小雨、中雨及大到暴雨 3 种状况进行测试,每种状况仿真时长 1 h,分别测试无优化、根据降雨等级优化(优化方案一)及实时优化(优化方案二)3 种方案,各方案均测试 10 次,输出值取平均值。各方案交通需求均为 1 800 pcu/h,所测试交叉口进口道含 3 条车道,为方便测试均采用直行车道,评估各方案的拥堵时间、通过车辆数、车均延误及停车次数等指标。为保证车流到达符合实际,在进口道停车线上游 600 m 处设置信号灯。根据式(4)、式(6)获取的周期时长见图 4,交通仿真结果见表 6。

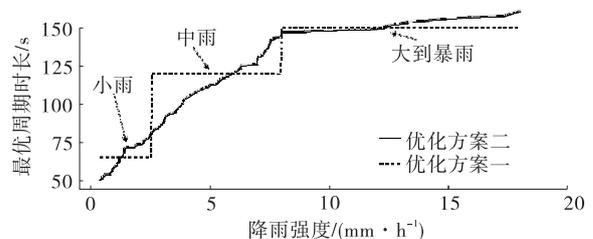


图 4 各降雨等级下最优周期时长

仿真结果表明雨天虽对交通流运行有较大影响,但因信号配时方案能适应降雨环境交通流运行特征,能有效降低车辆停车次数及车均延误,提升通行车辆数。通过避免绿灯空放及排队溢流等负面效应,可延缓降雨天气交通拥堵的形成。考虑到仿真环境采用的是单一环境下交通行为特征参数,若采用动态优化参数应可进一步提升交通控制效率。交

表6 不同降雨等级下实时仿真结果

降雨等级	不同方案下拥堵			不同方案下通过			不同方案下平均			不同方案下停车		
	时长/min			车辆数/辆			延误/(s·辆 ⁻¹)			次数/次		
	无优化	方案一	方案二	无优化	方案一	方案二	无优化	方案一	方案二	无优化	方案一	方案二
小雨	36	29	18	1 308	1 361	1 413	22	19	18	682	625	591
中雨	43	34	24	1 153	1 294	1 368	29	24	20	842	724	639
大到暴雨	52	43	32	893	1 092	1 268	33	25	21	1 027	823	713

通配时的改善仅能延缓降雨引发的负面效应,饱和流率的下降仍会使交叉口更容易接近通行能力,建议通过网络化交通管理与组织来缓解交通拥堵。

5 结语

降雨等恶劣天气会显著影响饱和流率等交通参数,进而使交通信号控制配时算法无法准确获取配时参数。饱和流率的降雨修正系数可通过降雨强度确定的修正系数来初步估计,也可通过实时的道路摩擦系数及能见度等参数动态识别。2种修正降雨天气饱和流率的方法均可使交通信号配时有效消除绿灯空放、排队溢流等负面效应,从而降低降雨天气对交通运行的影响。

对降雨天气饱和流率的实时识别在交通控制方面对降雨有较强的适应性,但参数较难获取,在对实时控制要求不高的场所可通过降雨强度来确定应选用的饱和流率。后续研究应深入探索降雨等恶劣天气下损失时间、饱和流率等参数变化对交通信号配时的作用机理,并对降雪、雾霾等恶劣天气下交通信号配时理论展开研究。

参考文献:

- [1] LI Y, ZHAO Z, LI P, et al. Review of traffic signal control methods under over-saturated condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 116-126.
- [2] WEBSTER F V. Traffic signal settings[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1958.
- [3] WANG F. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [4] RAKHA H, ARAFEH M. Calibrating steady-state traffic stream and car-following models using loop detector data[J]. Transportation Science, 2010, 44(2): 151-168.
- [5] URBANIK T, TANAKA A, LOZNER B, et al. Signal-timing manual (2nd edition). [S]. Transportation Research Board, Washington D C, US, 2015.
- [6] HJELKREM O A, RYENG E O. Chosen risk level during car-following in adverse weather conditions[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 95: 227-235.
- [7] ASHLEY W S, STRADER S, DZIUBLA D C, et al. Driving blind: Weather-related vision hazards and fatal motor vehicle crashes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(5): 755-778.
- [8] DE FREITAS C R. Weather and place-based human behavior: recreational preferences and sensitivity[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(1): 55-63.
- [9] BERNARDIN F, BREMOND R, LEDOUX V, et al. Measuring the effect of the rainfall on the windshield in terms of visual performance[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 63: 83-88.
- [10] SU B, HUANG H, LI Y. Integrated simulation method for waterlogging and traffic congestion under urban rainstorms[J]. Natural Hazards, 2016, 81(1): 23-40.
- [11] KOETSE M J, RIETVELD P. The impact of climate change and weather on transport: an overview of empirical findings[J]. Transportation Research Part D (Transport and Environment), 2009, 14(3): 205-221.
- [12] 许伦辉, 王祥雪. 基于尖点突变的城市快速路交通流拥堵时空演化研究[J]. 公路, 2016(12): 133-144.
- [13] 魏军. 恶劣天气条件下高速公路安全行驶速度研究[J]. 北方交通, 2016(5): 81-83.
- [14] 张存保, 万平, 梅朝辉, 等. 雨天环境下高速公路交通流特性及模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 63-67.
- [15] 杨中良, 林瑜, 高霄. 恶劣天气条件下城市快速路通行能力研究[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(1): 75-78.
- [16] THEOFILATOS A, YANNIS G. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 72: 244-256.
- [17] Transportation Research Board. Highway capacity

- manual 2010[S]. Washington D C: National Academy of Sciences, 2010.
- [18] 许英姿, 卢玉南, 范广, 等. 降雨对广西碎屑岩地区地质灾害的影响研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 181-186.
- [19] 董晓芳, 张良勇, 王志军. 基于非均等排序集抽样的 Wilcoxon 符号秩检验[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 225-231.
- [20] 胡成雨, 张焕明, 朱家明. Cox-Stuart 及 Wilcoxon 符号秩检验在产品质检中的应用[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 80-85.
- [21] 胡文伟, 李湛. 不同融资方式下的科技企业并购绩效比较研究: 基于因子分析与 Wilcoxon 符号秩检验的实证分析[J]. 上海经济研究, 2019(11): 94-107.
- [22] BRIDGE P. Non-invasive road weather sensors[C]// The 4th Surface Transportation Weather and Snow Removal and Ice Control Technology. Indianapolis, Indiana, Transportation Research Board, 2008: 1-9.
- [23] LI Y, GUO X, YANG J, et al. Mechanism analysis and implementation framework for traffic signal control of over-saturated intersection group[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(4): 28-34.
- [24] ZHONG R X, CAI H X, XU D B, et al. Dynamic feedback control of day-to-day traffic disequilibrium process[J]. Transportation Research Part C (Emerging Technologies), 2020, 114: 297-321.
- [25] KARIMI M, RONCOLI C, ALECSANDRU C, et al. Cooperative merging control via trajectory optimization in mixed vehicular traffic[J]. Transportation Research Part C (Emerging Technologies), 2020, 116: 102663.
- [26] 卢凯明, 郭斌, 蔡晓禹, 等. 基于多源轨迹数据的信号交叉口运行评价研究[J]. 公路与汽运, 2019(3): 24-32.
- [27] 朱海峰, 刘畅, 刘彦斌, 等. 基于通行能力系数优化的道路交叉口单点动态控制研究[J]. 公路与汽运, 2019(5): 29-34.
- [28] 林高平. 考虑不同降雨量影响下信号交叉口的通行能力分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [29] 许程. 基于短时交通流预测的城市干线交通信号控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.

收稿日期: 2020-11-18

(上接第 22 页)

导的前提下, 采取有效措施, 充分挖掘现有设施潜力, 加大财政投入力度。同时建立明确的政策性补贴考核指标和测算方式, 严格划分政策性亏损和经营性亏损范围。

(3) 加快补齐基础设施设备短板。基础设施是推动公共交通优先发展的基石。根据中等城市交通现状, 合理增设公交场站及公交专用道、调整公交线网、加快路网提档升级, 全面提升公共交通吸引力。

(4) 以运营服务为中心, 提高城市公交服务质量。一是合理使用政府资金, 加快基础设施建设, 尤其是提高公交信息化水平, 建立公共交通智慧管理平台; 二是定期分析平台数据, 有效运营管理; 三是提高工作人员的服务质量。

参考文献:

- [1] 姜毅, 王路, 尹锦明. 中等城市公共交通优先发展的策略研究: 以泰州市为例[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(1): 117-121+146.
- [2] 孙静雯. 哈尔滨市主城区公交线网布局优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 姚璇宇. 城市公共交通发展水平综合评价研究[D]. 无

锡: 江南大学, 2015.

- [4] 刘丽娇. 基于五元联系数法的公交运营服务水平评价方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [5] 胡庆国, 刘丹. 基于五元联系数方法的代建制项目成本风险评价[J]. 公路与汽运, 2017(2): 175-179+181.
- [6] 厉健. 基于 AHP 的城市公共交通发展水平考核评价研究[J]. 公路与汽运, 2020(3): 32-36.
- [7] 安晶, 李香静, 刘好德, 等. 面向公交优先绩效考核的城市公交发展水平评价指标体系研究[J]. 公路与汽运, 2015(1): 57-62+63.
- [8] 杜林, 肖成吉, 杨力. 中等城市公共交通可持续发展的关键点探讨[J]. 城市公共交通, 2008(11): 32-34.
- [9] 王燕. 城市客运交通系统分析与评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [10] 谢静. 中型城市公共交通发展现状与对策研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [11] 李俊. 昆明城市公共交通发展模式研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [12] 何建军, 洪锋, 钟章建. 新型城镇化背景下的中等城市综合交通发展探讨: 以新疆昌吉市为例[J]. 交通与运输, 2013(增刊 2): 5-7.

收稿日期: 2021-02-11