

文章编号:1671-6833(2019)03-0073-06

信号交叉口第一辆车到达分布及影响因素分析

张惠玲, 杨林玉, 敖谷昌

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘 要: 信号交叉口延误是进行交叉口的设计及服务水平评价等的重要参数依据,而红灯期间第一辆车的到达影响因素有助于更好地分析信号交叉口延误.首先提取了红灯期间第一辆车的到达时间与红灯启亮时间的差值,分析了第一辆车的到达特征.综合各种可能影响车辆到达的因素,使用正交试验进行了组合方案设计优化;以标定后的重庆市学府大道某信号交叉口进口道的一条直行车道作为平台,使用 VISSIM 软件对各试验进行了仿真分析,得出了信号交叉口影响红灯期间第一辆车到达的因素程度依次为饱和度、车辆到达类型、交叉口间距、绿信比、饱和流量、大车率.最后考虑到饱和流量和饱和度存在交互影响,对饱和流量和饱和度使用交互分析,得到结果为:在饱和流量为 1650 pcu·h⁻¹,且饱和度小于 0.25 时,对车辆到达的影响程度最高.

关键词: 交通工程;第一辆车到达;正交试验;信号交叉口;微观仿真

中图分类号: U491.2+64 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.009

0 引言

交叉口是道路交通的咽喉,据统计,车辆通过信号控制交叉口时受信号灯影响被耽误的时间约占总行程时间的 31%^[1].而交叉口延误可以作为交叉口设施设置与信号配时改善的评价参数,也可以反映驾驶员在交叉口的受阻、耗费等情况.但由于各种因素限制,至今无法实时直接地获取信号交叉口的延误值.因此,国内外研究者对信号交叉口延误参数的获取展开了一系列研究.前期主要对延误推导的模型进行了分析^[2-3],目前,国内外一些学者开始对交叉口的延误分布展开探索,Noroozi 等^[4]对延误分布与高峰小时流量以及 HCM 计算式的关系进行了分析,Chen 等^[5]分析了单个车辆以及车均控制延误的分布情况,并定义了延误不确定性系数,对 600 s 间隔下的参数情况进行了分析.

然而,由于延误参数影响因素的随机性和交叉口环境的复杂性,模型获取的方法对随机性的因素考虑不足,而实时的人工观测则存在不连续等特点,设置先进的检测设施一方面存在设备设置费用较高的特点,另一方面设施设置的要求也较高.

信号交叉口摄像头的普遍设置为信号交叉口提取前几辆车的延误提供了契机.本文研究以信号交叉口红灯期间第一辆车辆到达分布特性为分析对象,以建立的仿真平台为基础,以正交试验设计为实验优化方法,对各种影响因素下的车辆到达特征进行了研究,本文研究成果为实时准确地获取红灯期间第一辆车的到达-离去时间差值及相关研究提供了基础,进一步为分析交叉口进口道的延误提供了一种思路,对实现信号交叉口配时方案设计与优化及交叉口服务水平评价等提供了一种更可靠的方案.

1 数据采集

本研究以安装有摄像头的信号交叉口为研究背景,由前期以及其他学者的研究可知,车辆进入进口道后,可以得到前几辆车的到达及离开时间^[6].考虑到第一辆车的停车及启动时间与进口道延误有较紧密的关系,结合摄像头安装背景下的车辆信息获取情况,笔者以每个信号周期第一辆停止在停车线前的车为研究对象,以信号交叉口红灯启亮时刻作为信号周期开始的时间,则第一辆车到达时间界定为红灯启亮

与第一辆车进入进口道并在停车线前停止的时间差值。

综合考虑可观测地点的选取和可用的观测方法,笔者对于数据的获取通过人工提取的方式得到,即通过现场设置摄像机拍摄视频,视频同时拍摄到车辆到达及信号灯的灯色情况,后期通过人工对视频进行逐帧观测提取了车辆到达及信号灯转变时间等需要的参数.考虑到架设的摄像机需要同时拍摄到红灯启亮的时间以及第一辆车的停车时间等信息,通过筛选初步选定地点后,最终通过现场核实选择了重庆市南岸区学府大道与重庆交通大学三号门前的信号交叉口(称为第 1 信号交叉口)以及重庆市南岸区渝南分流道与民主新街交叉口(称为第 2 信号交叉口)作为视频拍摄及参数提取的观测地点。

所调查的第 1 信号交叉口的进口道与上游交叉口的间距接近 1 000 m,观测时段所涉及的进口道饱和度范围为 0.43~0.8,大车率为 8%~13%;而观测的第 2 信号交叉口与上游交叉口的间距也超过了 1 000 m,所调查的进口道饱和度范围为 0.27~0.85,大车率为 11%~25%。

后期通过人工观测对第一辆车的到达时间进行了提取.得到第 1 信号交叉口的第一辆车到达时间的有效周期为 260 个.第 2 信号交叉口的第一辆车到达时间的有效周期为 45 个.第 1 信号交叉口观测相位的红灯时长为 30 s,经统计,该交叉口红灯期间第一辆车到达的时间分布均值为 14.17 s,到达时间最大值为 30 s,最小值为 0 s,即平均到达时间为接近红灯一半的时间,最大到达时间为红灯即将结束的时间车辆刚好到达停车线并停车,而最小的时间对应的场景为红灯启亮的瞬间.第 2 信号交叉口观测相位的红灯时长为 70 s,经统计,该交叉口红灯期间第一辆车到达时间的均值为 11.89 s,到达时间最大值为 37 s,最小值为 1 s。

2 车辆到达分布拟合

对第一辆车到达的时间情况进行了拟合,拟合效果图如图 1 和图 2 所示。

由图 1 和图 2 可以看出,每个周期的第一辆车到达时间分布服从泊松分布,且分布模型可以拟合为:

$$f(x) = 1 - \exp(-x/b).$$
 (1)

式中: $f(x)$ 指红灯启亮与第一辆车到达时间的差

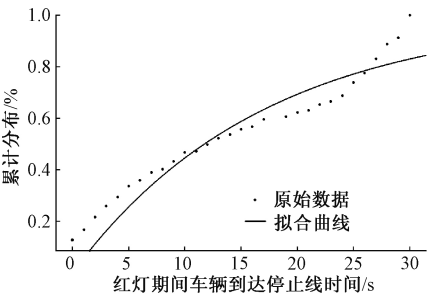


图 1 第 1 信号交叉口第一辆车到达时间拟合结果
Fig.1 Fitting result of the time difference between red time and the first vehicle's arriving time at the No. 1 intersection

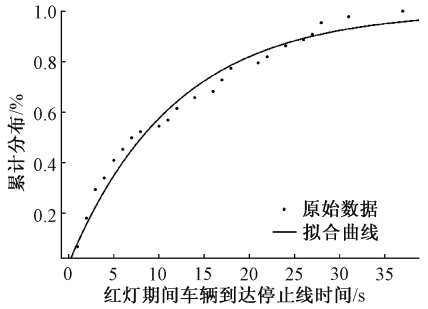


图 2 第 2 信号交叉口第一辆车到达时间拟合结果
Fig.2 Fitting result of the time difference between red time and the first vehicle's arriving time at the No. 2 intersection

值小于等于 x 的概率; b 为待估参数。

由上述提取的数据进行拟合,得到第 1 信号交叉口系数 b 的拟合结果为 16.89,95%置信区间 (15.39, 18.38),拟合优度结果为 0.072 72, R^2 为 0.891 7,表明拟合效果好.第 2 信号交叉口系数 b 拟合结果为 12.14,95%置信区间 (11.36, 12.91),拟合优度结果为 0.042 85, R^2 为 0.972 2。

3 正交试验设计

通过对调查的两个交叉口车辆到达时间进行分析,得到在饱和度较低的情况下,第一辆车的到达时间相对较长,而在饱和度相对较高的情况下,第一辆车的到达时间相对较短.结合现场的观测及车辆在上下游交叉口间行驶特征的分析,参考相关指南文献[7]等,信号交叉口与上游交叉口是否采用协调控制以及上下游交叉口间车辆行驶的速度主要对信号交叉口不同信号期间的车辆到达类型等产生影响;而上游交叉口的形式等其他因素的影响可以化解为下游进口道的饱和度、车辆到达类型等因素.考虑到上游及其他方向大车混入情况、交叉口距离等均可能会对第一辆车的到达时间产生影响,因

此本部分对可能影响第一辆车到达的因素进行分析,并对试验进行了设计.综合上述分析,论文主要考虑了车辆到达类型、交叉口间距、进口道饱和度、饱和流量、绿信比以及大车比例等因素对第一辆车到达分布的影响.具体因素的设置情况为:

(1) 车辆到达类型.对于车辆到达类型,参考文献[7],车辆的到达类型可以分为五类,分别为:超过 80% 的车辆在红灯期间到达;有 40% ~ 80% 的车辆在红灯期间到达;随机到达,即该交叉口受其他交叉口影响较小;有 40% ~ 80% 的车辆在绿灯期间到达;有超过 80% 的车辆在绿灯期间到达^[8].本次分析也选取这 5 类作为车辆到达类型的分析水平.

(2) 交叉口间距.交叉口间距对上游车辆行驶的离散型有较大的影响,如车辆成队列到达或者随机到达.参考相关的研究成果^[9],研究中对于交叉口间距的选择区段分别为 < 150 ~ ≤ 300 m、< 300 ~ ≤ 450 m、< 450 ~ ≤ 600 m、< 600 ~ ≤ 800 m、大于 800 m 等 5 个等级.

(3) 进口道饱和度.进口道饱和度与交叉口延误之间有着较紧密的关系,且可能会影响第一辆车到达的情况.结合交通场景中的低饱和度、中等饱和、接近饱和以及过饱和,考虑水平的分析情况.研究中将进口道饱和度分为 5 级,分别为:饱和度小于 0.25, [0.25, 0.5), [0.5, 0.75), [0.75, 1), ≥ 1 等情况.

(4) 饱和流量.饱和流量能够反映道路的通行能力,将直接影响饱和度的大小,进而会对第一辆车的到达情况产生影响.参考相关文献[9-11],将饱和流量分为以下 5 级:1 500、1 600、1 650、1 750、1 800 pcu·h⁻¹.

(5) 绿信比.绿信比决定车辆的通行权,也会对第一辆车的到达情况产生影响.参考 Piotr 等的研究结果^[12-13],将绿信比分为以下 5 级:0.2、0.3、0.4、0.5、0.6.

(6) 大车比例.由于大车的体积较大,在行驶中所占用的空间也较大,而且大车的启动时间较长,行驶速度也较慢,所以大车对道路交通的影响较大,对第一辆车的到达情况也可能产生影响.结合目前城市道路的实际情况,对于大车率分为 ≤ 5%, < 5% ~ ≤ 10%, 10% ~ ≤ 25%, 25% ~ ≤ 40%, > 40%.

上述 6 个因素,均为 5 个水平,如果逐个情况考虑,需要 15 625 次试验,试验次数太大.另外,所

考虑的各因素之间可能存在交互影响的情况,且上述 6 个因素中,影响车辆到达的程度也不能确定.实验优化设计可以在较少的试验场景下获取较佳的效果.正交试验的试验方案是有代表性的,且能够比较全面地反映各因素水平指标影响的大致情况.因此,对各种情况下的第一辆车的到达时间进行分析,使用正交试验来优化实验方案的设置,此次共设置 25 种试验方案,详细方案设置如表 1 所示.

4 仿真分析

为了对各种因素影响下的第一辆车到达时间分布进行分析,鉴于实际数据获取的场景较难实现,研究中通过构筑仿真平台对第一辆车的到达分布影响因素进行了分析.研究以实际调查的第 1 信号交叉口调查得到的大车及小车车辆速度作为标定数据,在微观仿真软件 VISSIM 中构筑了上述 25 种实验场景.构建的部分仿真场景如图 3.

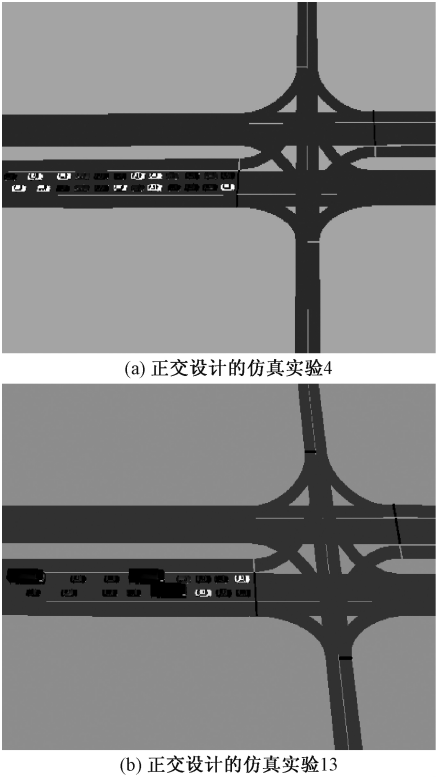


图 3 部分仿真试验场景构筑界面

Fig.3 Parts of the simulation scenar of building interface

如图 3 所示,通过构筑的仿真场景,提取车辆的运行轨迹和信号控制周期,即可得出所要分析的第一辆车的到达情况.

表 1 正交试验场景下的时间差值及直观分析

Tab.1 time difference and intuitive analysis of the orthogonal experiment simulation

因素	大车率/%	饱和流量/ (pcu·h ⁻¹)	车辆到达 类型	交叉口间 距/m	饱和度	绿信比	正交试验 的结果/s
实验 1	≤5	1 500	1	<150~≤300	<0.25	0.2	15.533
实验 2	≤5	1 600	2	<300~≤450	≤0.25~<0.5	0.3	10.313
实验 3	≤5	1 650	3	<450~≤600	≤0.5~<0.75	0.4	5.973
实验 4	≤5	1 750	4	<600~≤800	≤0.75~<1	0.5	7.171
实验 5	≤5	1 800	5	>800	≥1	0.6	8.300
实验 6	<5~≤10	1 500	2	<450~≤600	≤0.75~<1	0.6	6.421
实验 7	<5~≤10	1 600	3	<600~≤800	≥1	0.2	4.200
实验 8	<5~≤10	1 650	4	>800	<0.25	0.3	21.333
实验 9	<5~≤10	1 750	5	<150~≤300	≤0.25~<0.5	0.4	14.761
实验 10	<5~≤10	1 800	1	<300~≤450	≤0.5~<0.75	0.5	6.386
实验 11	<10~≤25	1 500	3	>800	≤0.25~<0.5	0.5	9.665
实验 12	<10~≤25	1 600	4	<150~≤300	≤0.5~<0.75	0.6	6.931
实验 13	<10~≤25	1 650	5	<300~≤450	≤0.75~1	0.2	8.417
实验 14	<10~≤25	1 750	1	<450~≤600	≥1	0.3	7.160
实验 15	<10~≤25	1 800	2	<600~≤800	<0.25	0.4	15.407
实验 16	<25~≤40	1 500	4	<300~≤450	≥1	0.4	5.692
实验 17	<25~≤40	1 600	5	<450~≤600	<0.25	0.5	18.637
实验 18	<25~≤40	1 650	1	<600~≤800	≤0.25~<0.5	0.6	8.027
实验 19	<25~≤40	1 750	2	>800	≤0.5~<0.75	0.2	8.567
实验 20	<25~≤40	1 800	3	<150~≤300	≤0.75~<1	0.4	6.979
实验 21	>40	1 500	5	<600~≤800	≤0.5~<0.75	0.3	6.089
实验 22	>40	1 600	1	>800	≤0.75~<1	0.4	10.320
实验 23	>40	1 650	2	<150~≤300	≥1	0.5	6.917
实验 24	>40	1 750	3	<300~≤450	<0.25	0.6	11.469
实验 25	>40	1 800	4	<450~≤600	≤0.25~0.5	0.2	19.860
均值 1/ s	9.458	8.680	9.485	10.224	16.476	11.315	—
均值 2/ s	10.620	10.080	9.525	8.455	12.525	11.224	—
均值 3/ s	9.516	10.133	7.657	11.610	6.789	9.855	—
均值 4/ s	9.580	9.826	12.197	8.179	7.862	9.755	—
均值 5/ s	10.931	11.386	11.241	11.637	6.454	8.230	—
极差/ s	1.473	2.706	4.540	3.485	10.022	3.085	—

将仿真场景得到的各种试验下的第一辆车平均到达时间使用正交试验的方法进行分析,得出各试验场景下的分布参数.

正交试验分析过程如下:假设 K_{ij} 为第 j 列因素第 i 水平下所有试验结果之和,如 $K_{12}=Y_1+Y_5+Y_9+Y_{13}$ (Y_i 表示试验号为 i 的试验结果, $i=1, 2, \cdots, 16$); ω_{ij} 为第 j 列因素第 i 水平的试验指标的平均值,即 $\omega_{ij}=K_{ij}/4$; R_j 为极差,即 ω_{ij} 中的最大值减去最小值, $R_j=(\omega_{ij})_{\max}-(\omega_{ij})_{\min}$ [14].

所得到的 25 种试验场景下红灯期间到达信号交叉口第一辆车的到达时间及不同影响因素在各水平下的第一辆车的到达时间的结果分析如表 1 所示.

由表 1 最后一行可以看出,各因素中极值大

小的分布为: $R_{\text{饱和度}} > R_{\text{车辆到达类型}} > R_{\text{交叉口间距}} > R_{\text{绿信比}} > R_{\text{饱和流量}} > R_{\text{大车率}}$,表明饱和度对交叉口车辆到达的影响最大,大车率对交叉口车辆到达的影响最小.各因素对交叉口车辆到达的影响程度由大到小依次为:饱和度>车辆到达类型>交叉口间距>绿信比>饱和流量>大车率.

图 4 的曲线表示各影响因素在上述五个水平下的试验指标第一辆车的到达时间的平均值.由图 4 中各曲线的上升及转折情况可以看出,大车率从 5% 增加到 <5%~≤10% 的时候时间差有所增加;从 <5%~≤10% 增加到 <10%~≤25% 的时候时间差减少;从 <10%~≤25% 到 <25%~≤40% 时,时间差基本一致;从 <25%~≤40% 增加到

40%以上时,时间差减少;饱和和流量从 $1\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至 $1\,600\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,时间差有所增加,在 $<1\,600\sim\leq 1\,750\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 处,时间差基本一致;车辆到达类型为随机到达时时间差最小,车辆到达类型为 40%~80%的车辆在绿灯期间到达交叉口时,时间差最大;交叉口间距对时间差影响较为显

著,但是没有一定规律;饱和度从 $\leq 0.25\sim<0.5$ 时,时间差明显减少,从 $\leq 0.5\sim<0.75$ 时,时间差稍稍增加,从 $\leq 0.75\sim<1$ 增加到 1 及以上时,时间差减少,可以看出饱和度对车辆到达类型有显著影响;绿信比从 0.2 增加到 0.6 时,时间差呈递减状.

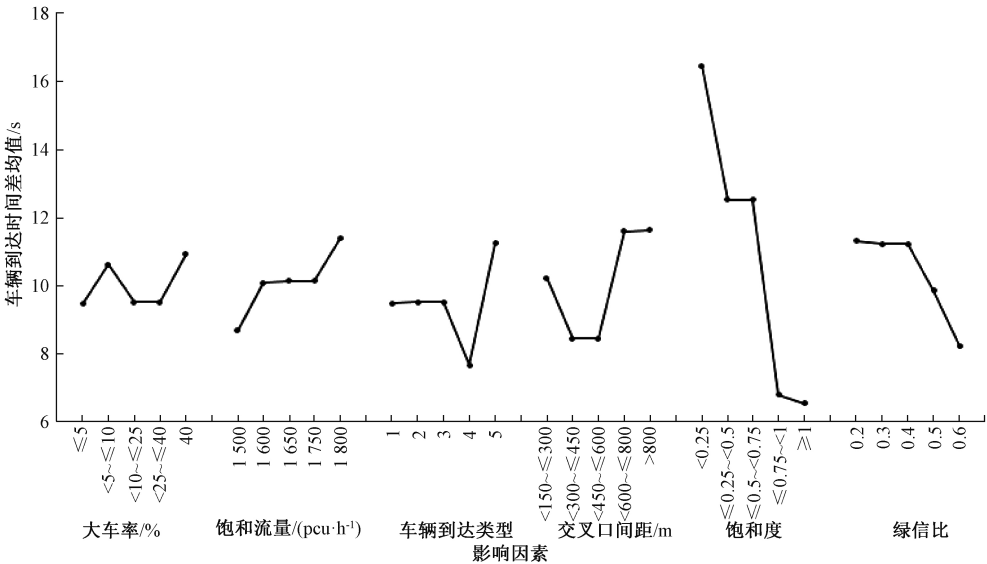


图 4 正交试验效应曲线

Fig.4 The response curve of the orthogonal experiment simulation

由于饱和流量和饱和度会对时间差产生交互作用,使用交互作用表进行分析,交互作用的数值根据表 1 对应的饱和流量和饱和度下的第一辆车到达时间的正交试验结果得到.如当饱和度 <0.25 、饱和流量为 $1\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,表 1 对应的第一辆车到达时间的正交试验结果为 15.333 s ,即为表 2 中饱和度 <0.25 、饱和流量为 $1\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的交互作用数值.详细交互作用如表 2 所示.

表 2 饱和流量和饱和度交互作用

饱和度	饱和流量/($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)				
	1 500	1 600	1 650	1 750	1 800
<0.25	15.533	18.637	21.333	11.469	15.407
$\leq 0.25\sim<0.5$	9.665	10.313	8.027	14.761	19.860
$\leq 0.5\sim<0.75$	6.089	6.931	5.973	8.567	6.386
$\leq 0.75\sim<1$	6.421	10.320	8.417	7.171	6.979
≥ 1	5.692	4.200	6.917	7.160	8.300

由表 2 可以看出,在饱和流量为 $1\,650\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,且饱和度 <0.25 时,该交互作用的值达到最大,为 21.333 s ,说明在该交互作用下,对车辆到达的影响程度最高.

5 结论

第一辆车的到达情况与延误参数之间有紧密的关联关系,主要对红灯期间第一辆车的相关特征进行了分析.研究结论主要有:

(1)通过 2 个信号交叉口的信号转换以及车辆到达进行提取和分析,拟合了第一辆车到达交叉口的函数.

(2)对可能影响车辆到达的因素进行了选取,最终选择车辆到达类型、交叉口间距、进口道饱和度、饱和流量、绿信比、大车率等作为可能影响车辆到达的因素,并通过正交试验设置了优化试验方案.

(3)通过微观仿真平台,对正交试验构筑的场景进行了分析,最终得到了影响车辆到达的因素排序依次为饱和度、车辆到达类型、交叉口间距、绿信比、饱和流量、大车率.在饱和流量为 $1\,650\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,且饱和度 <0.25 时,对车辆到达的影响程度最高.

(4)对第一辆车到达特征与其他参数的关联分析将是本项目后续研究的主要方向.

参考文献:

[1] 马天宇.信号交叉口倒计时显示屏对驾驶员行为影

- 响分析[D].长春:吉林大学交通学院,2008.
- [2] WEBSTER F V. Traffic signal settings[R]. Road Research Technical Paper No.39, Road Research Laboratory. Her Majesty Stationary Office, London, UK.1958.
- [3] AKCFLIK I, ROUPHAIL N. Overflow of queues and delays with random and platooned arrivals at signalized intersections [J]. Journal of advanced transportation, 1994, 28(3):227-251.
- [4] NOROOZI R, HELLINGA B. Distribution of delay in signalized intersections: day-to-day variability in peak-hour volumes [J]. Journal of transportation engineering, 2012, 138(9):1123-1132.
- [5] CHEN P, ZHENG F F, LU G Q, et al. Comparison of variability of individual vehicle delay and average control delay at signalized intersections [J].Transportation research record, 2016,2553:128-137.
- [6] 张惠玲,李克平,敖谷昌. 监控环境下信号交叉口控制延误的获取方法[J].北京交通大学学报,2010, 34(6):40-45.
- [7] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010 [R]. Washington D C: National Research Council, 2010.
- [8] 李志.平面交叉口间距对道路交通的影响[J].山西建筑,2014,40(26):157-159.
- [9] 吴兵,李晔.交通管理与控制[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [10] 陈锦秀,陈小鸿,林航飞.《城市道路平面交叉口规划与设计规程》基本饱和流量与大车校正系数检验研究[J].城市交通,2004,2(3):17-20.
- [11] 沈家军,王群. 基于通行效率最优的交叉口控制方式优选[J].郑州大学学报(工学版), 2016,37(3):60-63.
- [12] OLSZEWSKI P S. Modeling probability distribution of delay at signalized intersections [J]. Journal of advanced transportation, 1994,28(3):253-274.
- [13] 董海龙,汤旻安,程海鹏. 非均衡交通流五岔路口交通信号智能控制研究[J].郑州大学学报(工学版), 2017,38(1):68-73.
- [14] ADESOLA O I. Orthogonal experiments in the development of carbon-resin for chloride removal from solutions [J].Statistical methodology, 2009, 6 (2):109-119.

Analysis on the Arrival Distribution and Influencing Factors of the First Car Arrival at the Signalized Intersection

ZHANG Huiling, YANG Linyu, AO Guchang

(School of Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Signalized intersection delay was one of the core parameters in intersection design and evaluation of service level, and analyzing the first vehicle's arriving could help to analyze the intersection delay. Firstly, the features of the first vehicle were probed based on time difference between arriving time of the first vehicle and the start of the red time. Considering the factors that could impact the vehicle's arriving, the orthogonal experiment was used to optimize the experiments' combination. Using the validated through lane of the signalized intersection to simulate the orthogonal experiments, it was proved that the order of the factors impacting the first vehicle arrival during red indication was the saturation, types of vehicles arrival, intersection spacing, the split, the saturated flow, and the bus ratio. Finally, for the interaction phenomenon of saturated flow and saturation, using transactional analysis to analyze, the results was: when the saturated flow was 1650 Passenger Car Unit/Hour ($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$), and the saturation was under 0.25, there was the highest level of impact on the first vehicle's arriving.

Key words: traffic engineering; the first vehicle arrival; signalized intersection; orthogonal experiment; micro-simulation