

城市交叉口三左转车道流量均衡性及影响因素

李立^{1,2}, 常云涛^{1,2}, 彭仲仁^{3,4}, 杨文臣⁵

- (1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804;
3. 佛罗里达大学 城市与区域规划系, 盖恩斯维尔 115706; 4. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
5. 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650041)

摘要: 根据多车道流量分布与驾驶员车道选择行为之间的关系, 提出多车道设施流量均衡性的建模与分析方法. 以城市道路信号控制交叉口三左转车道为例, 使用成分数据结构组织各左转车道流量, 选取可能对车道流量分布具有潜在影响的 7 个因素. 在单形中建立以三左转车道流量成分数据为因变量、所选影响因素为自变量且满足车道流量占比约束的成分方差分析模型, 设计单形操作法进行模型估计. 研究结果表明, 模型可识别对左转车流分布具有显著性影响的因素, 并定量估计各因素对每条左转车道流量占比的影响程度. 信号周期长度、交叉口内转弯曲线长度、展宽车道的设置、上游路段长度、上游左转车道标志标线位置和其他流向车道数等因素可在特定设置条件下使车流分布接近均衡.

关键词: 车道; 流量均衡性; 三左转车道; 车道选择; 流量占比约束; 成分方差分析

中图分类号: U491.2⁺6

文献标志码: A

Balance of Triple Left-turn Lane Volumes at Urban Intersection and Its Influential Factors

LI Li^{1,2}, CHANG Yuntao^{1,2}, PENG Zhongren^{3,4}, YANG Wenchen⁵

- (1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Department of Urban and Regional Planning, University of Florida 115706, USA; 4. School of Naval Architecture, Oceanic & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University 200240, China; 5. National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650041, China)

Abstract: A method to model and analyze balance of multiple lane volumes was proposed based on the relationship between multilane traffic distribution and driver's lane choosing

behavior. The triple left-turn lanes at urban signalized intersection were taken as case study. The collected left-turn lane volumes were organized as compositional data, and seven factors were taken into account as they could influence traffic distribution on triple left-turn lanes. A compositional analysis of variance model was formulated in the simplex to satisfy the constraint of the lane volume ratios. The dependent and independent variables are triple left-turn lane volume composition and selected influential factors respectively. The stay in the simplex approach was designed to estimate the model. Results show that the model can identify the factors with significant influence on the left-turn traffic distribution and quantify the influence degree of a factor on the ratio of each lane volume with respect to total left-turn traffic. Specific setting of the length of signal cycle, the length of vehicle turning curve inside the intersection, the setting of shadowed left-turn lane, the length of upstream segment, the location of the first left-turn sign or pavement marking at upstream, or the number of through and right-turn lanes could make the traffic distribution on triple left-turn lanes achieve relative balance.

Key words: lane; volume balance; triple left-turn lanes; lane choice; the constraint of lane volume ratios; compositional variance of analysis

在城市道路上设置多车道设施的主要目的是提高特定交通流向的通行能力, 但现实中多车道通行能力却经常得不到充分利用. 造成这种现象的一个重要原因是多车道共同服务的特定方向车流不均衡地分布在各条车道上, 量化地表现为一定时段内各车道流量互不相等. 定量解析多车道流量分布不均

收稿日期: 2016-03-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2014BAG01B02); 上海市自然科学基金(17ZR1431800)

第一作者: 李立(1985—), 男, 工学博士, 主要研究方向为驾驶行为分析与建模、智能交通. E-mail: limao2401040236@126.com

通讯作者: 常云涛(1974—), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通信息工程及控制.

E-mail: changyuntao@tongji.edu.cn

衡现象及其成因,对于提高多车道通行能力利用率、科学指导城市道路交通精细化设计与管理具有重要意义。

为反映车道流量分布不均衡的影响,美国道路通行能力手册^[1]采用车道利用率(lane utilization)系数对多车道理论通行能力进行修正. 车道利用率为各车道的平均流量与最大车道流量的比值. Ring 等^[2]、Sando 等^[3]和 Lee 等^[4]通过分析引起车道利用率系数变化情况研究道路几何设计和交通控制设施对多车道流量分布的影响. 然而,作为衡量多车道流量整体分布均衡性的指标,车道利用率系数无法反映每条车道流量在多车道总流量中的占比及其与占比均衡值之间的偏差. 例如,如果使用 2 组多车道流量数据计算出的车道利用率系数相等,但是最大流量却分属不同车道,则这 2 组数据反映的多车道流量分布情况迥异. 从微观角度来看,某一车道流量是在一定时间内通过多车道设施特定断面的所有车辆中一部分车辆驾驶员选择此车道的结果,但是他们决策的代价是需要放弃选择同一流向的其他车道. 这种驾驶员车道选择行为“非此即彼”的排他性特征直接导致此车道流量占比与其他车道流量占比之和存在严格的负相关关系. 由于车道利用率系数无法反映这种负相关性,所以此指标无法用于衡量驾驶员对特定车道的偏好及其引发的多车道流量分布不均衡的现象. 离散选择模型常被用来研究微观驾驶员车道选择行为及其影响因素^[5-6],个体选择行为的排他性体现在模型建立、估计和结果解释的全过程. 反观现有研究多车道流量分布均衡性的文献^[7],在确定对车流分布有影响的外界因素时,车道流量比例间的严格负相关关系并未得到应有的重视.

本文从多车道流量分布不均衡现象背后的行为机理出发,以城市道路信号控制交叉口的三左转车道为例,将左转车道流量组织为成分数据(compositional data),用左转总流量与各左转车道流量间的比例关系反映测量时段内各车道被驾驶员选中的概率,使用成分数据特有的定和约束(the constant-sum constrain)来体现驾驶员车道选择行为的排他性,并在模型建立、估计和结果解释过程中遵守此约束,选取可能影响左转车流分布的 7 种外界影响因素,采用成分方差分析模型(compositional analysis of variance model)对三左转车道流量数据进行成分回归分析,并引入单形操作法(staying in the simplex)对模型进行求解.

1 数据采集

选取上海市 4 个布设于城市主干路信号控制交叉口的三左转车道为研究地点,各交叉口限速 $60\text{km}^{-1} \cdot \text{h}$,均采用配有专用左转相位的定时信号控制. 按照与道路中心线的距离,将图 1 中的 3 条左转车道从内至外分别命名为内侧、中间和外侧左转车道(车道①、②和③),“A”、“B”和“C”分别为三左转车道所在进口道、相交道路进口道和同一路段反向交通出口道,图中其他字母含义见表 1. 需要获得的数据包括各个外界影响因素的现场测量值和三左转车道流量.

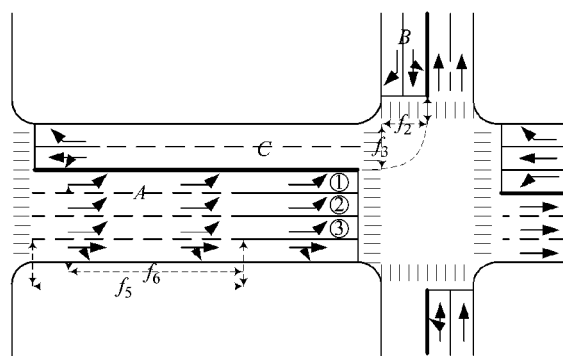


图 1 信号控制交叉口三左转车道

Fig. 1 Triple left-turn lanes at signalized intersection

1.1 影响因素

选取 7 个可能影响驾驶员左转车道选择的几何设计和交通控制因素(见表 1),可分为信号周期长度、车辆转弯曲线和驾驶员换道机会等三大类,考察它们对三左转车道流量分布的影响. 图 1 显示了部分因素的现场测量方法,表 2 中为各因素的测量值. 在统计分析中,除 f_4 为无序分类变量外,其他影响因素均为有序分类变量. 表 2 中以(1)、(2)、(3)或(4)区分各因素水平,相邻水平满足以下条件: ① $f_1 \geq 10 \text{ s}$; ② f_2 、 f_3 和 f_7 : 一条车道; ③ f_5 (或 f_6) $\geq 20 \text{ m}$.

(1) f_1 与左转总流量有关,即 f_1 与一定时段内三左转车道被驾驶员选中的频数有关. 另外红灯相位会随 f_1 增加而延长,导致三左转车道上排队长度增加,从而提高排队消散耗时在绿灯相位时段内的占比. 由于各车道排队长度可能影响驾驶员车道选择,因此需要考虑 f_1 对驾驶员决策的影响.

(2) 各条左转车道对应的交叉口内车辆转弯曲

线长度不同,内侧车道转弯半径最小,转弯曲线最短,但是内侧车道驾驶员所受向心力最大,驾乘体验较差,因此不同车道对应的转弯曲线可能会影响驾驶员车道选择.由于交叉口进口道上左转驾驶员视距条件受限,所以将其对转弯曲线的估计分解为 f_2 和 f_3 两部分,它们分别对应于完成转弯所需跨越对向道路的宽度和相交道路进口道的宽度.驾驶员在驶近交叉口的过程中可估计出 f_3 ,在满足相交道路的观察视距时可估计出 f_2 .

(3)左转驾驶员可采取换道动作在交叉口上游路段或进口道内选择目标车道,下列 4 个因素均与驾驶员的换道机会有关. f_4 在靠近交叉口的位置为驾驶员提供了额外换道机会. f_5 决定了左转驾驶员通过换道提前进入或者靠近目标车道的可用空间.设置在交叉口上游的三左转车道标志、标线为驾驶员提供前方左转车道布局, f_6 可反映此信息对驾驶员的影响.另外,如果 f_7 较少,则驾驶员无需或经过少量换道即可进入目标左转车道.

表 1 潜在影响因素

Tab. 1 Potential influential factors

因素类别	影响因素	单位	因素解释或测量方法
信号配时	信号周期长度(f_1)	s	人工观测
转弯曲线	纵向移动距离(f_2)	车道数	为完成左转所需行驶的纵向距离
	横向移动距离(f_3)	车道数	为完成左转所需行驶的横向距离
换道机会	左转展宽车道(f_4)		是否设置有展宽车道;0 表示“是”,1 表示“否”
	上游路段长度(f_5)	m	三左转车道白实线末端至上游交叉口出口道
	左转车道标识距离(f_6)	m	白实线末端至距离上游交叉口最近的左转标志
	其他流向车道数(f_7)	车道数	三左转车道所在进口道直行和右转流向车道总数

表 2 影响因素的测量值

Tab. 2 Measurements of influential factors

调查地点	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
恒丰路天目西路北口	219(2)	6(3)	4(2)	是(2)	142(1)	94(1)	3(2)
浦东南路浦建路东口	104(1)	5(2)	3(1)	否(1)	172(2)	157(2)	2(1)
延安路石门一路西口	242(4)	3(1)	4(2)	否(1)	195(3)	180(3)	2(1)
周家嘴路内环路东口	230(3)	5(2)	4(2)	是(2)	300(4)	200(3)	4(3)

注:括号中为各因素水平.

1.2 车道流量

在 4 个调查地点各采集了 168 个周期的三左转车道流量数据.每辆重车(公交车和货车等)在流量统计中被折算为 2 辆乘用车.为保证样本具有代表性,只选取每条左转车道至少通过 8 辆车的周期作为采样时段,先前相关研究也遵循这一数据采集原则^[3-4].假设左转驾驶员在到达左转车道排队末尾或通过左转车道白实线末端时做出最终车道选择决策,因此在每个采样周期内,每辆车在上述 2 个时刻被计入流量数据.图 2 为所采集流量数据的散点图,图中 V_{in} 点代表内侧左转车道流量在左转总流量中占比为 1 的极端情况,即所有驾驶员都选择内侧车道行驶. V_{med} 点和 V_{out} 点分别表征中间和外侧左转车道占比为 1 的情况.坐标轴 v_{in-med} 、 v_{in-out} 和 $v_{med-out}$ 分别反映了任意 2 条车道流量的比例关系,3 条虚线交点为各左转车道流量的占比均衡点,即 3 条车道流量占比均为 0.333.若图 2 中某一样本点偏离均衡点而更靠近 V_{in} 点,则说明此样本中内侧左转车道流量在左转总流量中的占比大于其他 2 个车道,以此类推

可知所采集样本的分布情况.如图 2 所示,大部分样本点散布在均衡点附近且集中度不高.描述性统计结果显示内侧、中间和外侧左转车道流量占比均值分别为 0.326、0.362 和 0.312,总标准差为 0.249.这说明在左转总流量中,中间车道的流量占比最大,其次为内侧和外侧车道,各车道流量占比不仅偏离均衡值,而且与各自的平均占比也存在一定偏差.

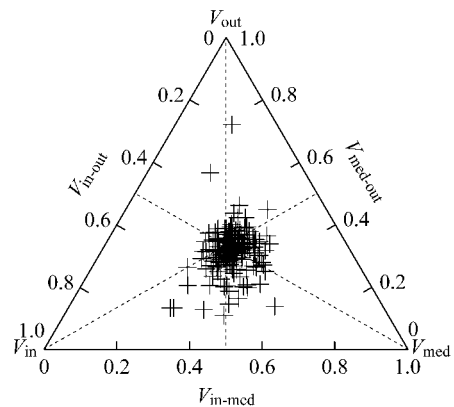


图 2 三左转车道流量散点图

Fig. 2 Scatter plot of triple left-turn lane volumes

2 成分数据建模

2.1 建模要求

三左转车道流量分布与驾驶员左转车道选择行为存在以下 2 组对应关系:①三左转车道中各车道流量在左转总流量中的占比反映了一定时段内各车道被驾驶员选中的概率;②驾驶员“非此即彼”的车道选择特性决定了各左转车道流量占比之间存在此消彼长的关系.若要在三左转车道流量数据的统计分析中保持上述对应关系,流量数据组织和建模分析应满足以下要求:

(1)数据要求.数据中要包含各车道流量及其与左转总流量的比例信息,以反映在各车道被驾驶员选择的频率和概率;要完整保留各车道流量比之间严格负相关的信息.

(2)建模要求.模型应以满足上述要求的数据为因变量,并完整保留其所蕴含的信息,以分析所选因素是否会影响左转车道流量分布;如果是,分析结果应能反映各因素影响下左转车流分布变化情况.

为了满足上述要求,采用成分数据结构来组织三左转车道流量,使用适用于成分数据特有样本空间的统计方法对研究问题进行建模和分析.

2.2 成分方差分析模型

成分数据是一个包含多个元素的数据集,每个元素反映其所代表的分量相对于总量的比值^[8].一个统计间隔内的内侧、中间和外侧左转车道流量 v_{o-in} 、 v_{o-med} 和 v_{o-out} 可组织为 3 维向量 $v_{o3} = [v_{o-in}, v_{o-med}, v_{o-out}]'$, v_{o3} 通过闭合操作(closure, $C(\cdot)$)可转换为标准 3 元成分数据 $v_3 = [v_{in}, v_{med}, v_{out}]'$, v_3 的 3 个非负分量分别为内侧、中间和外侧左转车道流量在左转总流量中的占比. v_3 满足各车道流量占比间的约束——定和约束,即对 v_3 的任何操作均不能改变 v_{in} 、 v_{med} 和 v_{out} 之和始终为 1 的特性.利用此约束可将三左转车道流量占比间的严格负相关关系与驾驶员“非此即彼”的车道选择行为特征联系起来.

$$\begin{cases} C(v_{o3}) = k \cdot \left[\frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \right] = k \cdot v_3 \\ v_{in} + v_{med} + v_{out} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为 v_{o3} 中包含的车辆总数; v_i 为 v_{in} 、 v_{med} 或 v_{out} . 左转车道流量通常取自于人工观测或交通检测设备的车辆计数数据,需根据计数样本量 k 为 v_3 选择合适的成分数据类型.成分数据可为符合艾奇逊

(Aitchison) 几何的成分数据 (compositional data with Aitchison geometry) 和计数成分数据 (count compositional data)^[9] 两类.若 k 足够大,认为样本能够反映数据总体分布,则将 v_3 定义为符合艾奇逊几何的成分数据;反之,则定义为计数成分数据,以在统计推断中考虑数据采集时的抽样误差.由于交叉口每周期的左转总流量有限,因此采用计数成分数据组织原始三左转车道流量数据.在假设检验和模型估计中考虑各车道流量大小对其在总流量中占比的影响,微观上意味着考虑了各车道被选频数对其被选概率的影响.三左转车道流量成分数据 v_3 与遵守定和约束的成分数据运算 (即艾奇逊运算, Aitchison operation) 构成一个名为三元单形 (3-part simplex, S^3) 的成分数据样本空间^[8], 表示为图 3 中 2 维平面上的等边三角形 $\{V_{in}, V_{med}, V_{out}\}$.

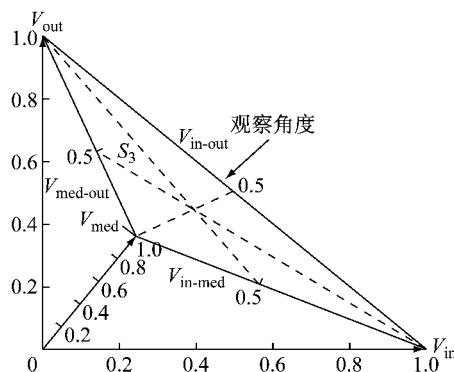


图 3 三元单形
Fig. 3 3-part simplex

为了保证“定和约束”在对三左转车道流量数据的统计分析中始终成立,在 S^3 中使用艾奇逊运算定义了以三左转车道流量成分数据 v_{i3} 为因变量的成分方差分析模型 (compositional analysis of variance model, CANOVA model), 以检验外界因子是否影响 v_{i3} 的均值 V_3 . CANOVA 模型如式(2):

$$v_{i3} = \alpha \oplus \beta_j \oplus \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中: $v_{i3} = [v_{i-in}, v_{i-med}, v_{i-out}]'$ 为第 i 个 ($i=1, \dots, I$, 其中 I 为样本总量) 三左转车道流量成分数据样本; $\alpha = [\alpha_{in}, \alpha_{med}, \alpha_{out}]'$ 的 3 个分量为对应于 v_{i-in} 、 v_{i-med} 和 v_{i-out} 的成分回归截距项; $\beta_j = [\beta_{j-in}, \beta_{j-med}, \beta_{j-out}]'$ ($j=1, \dots, J$) 的 3 个分量分别是 v_{i-in} 、 v_{i-med} 和 v_{i-out} 在分类变量 β 的第 j 个水平影响下的回归系数,其中 J 为 β 的总水平数; ε_{ij} 为服从 S^3 中正态分布的误差项^[10]. 摄动 (perturbation, \oplus) 和幂变换 (powering transformation, \odot) 的功能类似于实空间中的向量加法和乘法. v_{i3} 的均值 $V_3 = [V_{in}, V_{med}, V_{out}]'$, 其中

V_{in} 、 V_{med} 和 V_{out} 分别为内侧、中间和外侧左转车道流量在左转总流量中的平均占比,即一定时段内各车道被驾驶员选中的平均概率. CANOVA 模型的零假设为因素 β 水平变化不会影响 V_3 均值. 在估计模型参数时,假设 β 的第 1 级水平(表 2 中标记为(1))对 V_3 的均值无影响,而 V_3 在 β 的第 j 级水平($j>1$)影响下的值等于其在 β 水平为 1 的值与 β_j ($j>1$)之和.

3 模型求解

由于 CANOVA 模型在三元单形 S^3 中构建,如果要在 S^3 中进行假设检验和模型估计需单独开发算法,此项工作繁琐且无法复用,然而常用回归分析方法只在实空间中有效,无法直接应用于成分回归分析中. Mateu-Figueras 等^[10]在解决上述问题的过程中发现,对于拥有 n 个分量的成分数据 Y_n ,其样本空间 S^n 等距等效(isometrically equivalent)于 $n-1$ 维实空间 R^{n-1} , Y_n 通过等距转换可从 S^n 投影到 R^{n-1} 并获取其在 R^{n-1} 中的坐标. 基于此提出了求解成分统计模型的单形操作法(staying in the simplex). 此方法可在保证在成分数据信息无损的前提下,将定义在 S^n 中的成分统计模型投影至 R^{n-1} 中,现有统计分析方法可基于 Y_n 在 R^{n-1} 中的坐标对转换后的模型进行假设检验和参数估计,并将在 R^{n-1} 中获得的结果转换回 S^n 中解释. 本文使用单形操作法求解 CANOVA 模型,主要步骤如下.

3.1 正交基构建与坐标投影

对于三左转车道流量成分数据 v_3 来说,其所对应的二维正交基可认为是一套定义在二维实空间 R^2 中的坐标系,此坐标系用来测量 v_3 中各个成分分量对数比关系,其中每条坐标轴度量 v_3 中某 2 组特定分量的对数比关系. 为保证每条坐标轴的测量值均具有物理意义,采用 v_3 的 3 个分量 v_{in} 、 v_{med} 和 v_{out} 构建二维正交基. 为了确保坐标轴的正交性,采用序列二元分割法(sequential binary partition, SBP)指定各坐标轴所度量的左转车道流量成分间的对数比关系. 使用 SBP 方法可为 v_3 计算其 2 组成分分量间的对数比关系,每一步为一个坐标轴分配其所测量的 2 组成分分量的对数比^[11]. 通过 2 次投影,可以获得 v_3 在正交基中的 2 个坐标. v_3 在坐标轴 j 上的坐标 θ_j 为

$$\theta_j = K \ln \frac{\left(\prod_{r=1}^{n_r} v_r\right)^{-n_r}}{\left(\prod_{s=1}^{n_s} v_s\right)^{-n_s}} = \sum_{i=1}^n \delta_{ij} \ln v_i \quad (3)$$

式中: K 为归一化系数; v_r 和 v_s 为分入 r 组和 s 组中的成分分量 v_i ; n_r 和 n_s 为分入 r 组和 s 组中 v_i 的数量; δ_{ij} 为 v_i 在坐标轴 j 上的投影系数.

3.2 等距对数比转换和反转换

基于 3.1 节定义的二维正交基,采用等距对数比转换(isometric logratio transformation, ILR)^[11],将定义在 S^3 中的 CANOVA 模型转换为 R^2 中二维正交基上成立的多元方差分析模型,如下:

$$v_{i3-ILR} = \alpha_{iILR} + \beta_{j-ILR} + \varepsilon_{ij-ILR} \quad (4)$$

式中: v_{i3-ILR} 、 β_{j-ILR} 和 ε_{ij-ILR} 分别为经过等距对数比转换的、定义在 R^2 中的 v_{i3} 、 β_j 和 ε_{ij} . 转换后式(4)所示模型可使用标准统计方法求解. 由于模型求解在 R^2 中进行,因此回归系数反映因素 β 对特定 2 组左转车道流量对数比的影响,不便于结果解释和理解. 可通过反等距对数比转换(inverse ILR)将回归系数转换回 S^3 中,使其重新满足定和约束并与 V_3 的各个分量逐一对应,这样更有利于观察 β 对 V_3 的影响.

4 显著性检验与模型估计结果

使用 R 软件包“composition”^[9]建立和求解 CANOVA 模型. 表 3 中的假设检验结果显示,表 1 中所有因素均对三左转车道流量成分数据的样本均值 V_3 具有显著性影响. 表 4 中为模型参数估计结果,最左列显示了各影响因素编号,括号中为各因素水平数. 表中分行列出了因素 f_i 在 S^3 中满足定和约束的回归系数以及 f_i 影响下 V_3 的值. 第 1 行按照 f_i 的水平由低至高列出 f_i 从水平 1 提升到更高层次时的回归系数,这些系数反映了 f_i 水平提升对 V_3 的影响施加到其各分量 V_{in} 、 V_{med} 和 V_{out} 上的比例. f_i 的影响均衡分布时, V_{in} 、 V_{med} 和 V_{out} 的回归系数均为 0.333,若某一分量回归系数大于 0.333,则说明 f_i 对其影响偏大,反之亦然. V_3 行列出 f_i 不同水平影响下 V_{in} 、 V_{med} 和 V_{out} 的值,计算方法见 2.2 节. 最后一行是 f_i 相邻 2 次水平提升影响下 V_3 各分量上升或下降的趋势,分别表示为“↗”或“↘”.

以 f_1 对 V_3 的影响为例说明表 4 中成分回归分析结果的解读方法. f_1 有 4 个水平,标注为 f_1 旁的“(4)”. 当 f_1 从水平 1 提升至水平 2、水平 3 或水平 4 时, f_1 对 V_3 的影响有 24.5%、22.2% 或 27.6% (f_1 第 1 行 V_{in} 列的回归系数:0.245、0.222 和 0.276)施加在内侧车道流量占比 V_{in} 上,低于 f_1 每次水平提升所造成影响的平均值(0.333). 这导致 V_{in} 的值从水平 1 时的 0.398 分别降至水平 2 时的 0.306、水平 3 时的 0.279 或水平 4 时的 0.341. 相应的,当中间

和外侧车道流量占比 V_{med} 和 V_{out} 所承受 f_1 高于平均值的影 响时,其值会大于其在 f_1 水平 1 时的表现,反之亦然. 例如, f_1 从水平 1 提升至水平 3 时, V_{med} 和 V_{out} 均受到较多影响 (f_1 第 1 行 V_{med} 列: $0.343 > 0.333$, V_{out} 列: $0.435 > 0.333$), 则二者相较于其在

f_1 水平 1 时的值均有所提升 (f_1 第 3 行 V_{med} 列: $0.382 > 0.354$, V_{out} 列: $0.339 > 0.248$). 使用类似的方法,可解析各因素水平变化对 V_{in} 、 V_{med} 和 V_{out} 的影响,从而间接获知它们对驾驶员左转车道选择概率的影响.

表 3 各影响因素的显著性检验结果

Tab. 3 Significance test results for each influential factor

分析结果	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
自由度	3	2	1	1	3	2	2
F 值	17.737	4.015	41.012	42.613	17.737	16.487	19.940
显著性水平	$<0.001^a$	0.003^b	$<0.001^a$	$<0.001^a$	$<0.001^a$	$<0.001^a$	$<0.001^a$
拒绝原假设	是	是	是	是	是	是	是

注:上标 a 表示 $p < 0.001$; 上标 b 表示 $p < 0.050$.

表 4 各影响因素不同水平下的回归系数及 V_3

Tab. 4 Regression coefficients of each influential factor and V_3

因素	结果项	V_{in}	V_{med}	V_{out}
$f_1(4)$	回归系数	0.245, 0.222, 0.276	0.334, 0.343, 0.312	0.421, 0.435, 0.412
	回归系数均值	0.248	0.330	0.422
	V_3	0.398, 0.306, 0.279, 0.341	0.354, 0.360, 0.382, 0.343	0.248, 0.334, 0.339, 0.316
	V_3 变化趋势	↘↘↗	↗↗↘	↗↗↘
$f_2(3)$	回归系数	0.337, 0.299	0.362, 0.349	0.321, 0.351
	回归系数均值	0.313	0.356	0.331
	V_3	0.331, 0.333, 0.306	0.343, 0.372, 0.360	0.307, 0.295, 0.334
	V_3 变化趋势	↗↘	↗↘	↘↗
$f_3(2)$	回归系数	0.246	0.337	0.417
	V_3	0.398, 0.307	0.354, 0.362	0.248, 0.331
	V_3 变化趋势	↘	↗	↗
$f_4(2)$	回归系数	0.261	0.346	0.393
	V_3	0.369, 0.295	0.350, 0.369	0.281, 0.336
	V_3 变化趋势	↘	↗	↗
$f_5(4)$	回归系数	0.430, 0.369, 0.304	0.325, 0.316, 0.356	0.245, 0.315, 0.340
	回归系数均值	0.367	0.333	0.300
	V_3	0.306, 0.398, 0.341, 0.279	0.360, 0.354, 0.343, 0.382	0.334, 0.248, 0.317, 0.340
	V_3 变化趋势	↗↘↘	↘↘↗	↘↘↗
$f_6(3)$	回归系数	0.430, 0.334	0.325, 0.337	0.245, 0.329
	回归系数均值	0.382	0.331	0.287
	V_3	0.306, 0.398, 0.307	0.360, 0.354, 0.364	0.334, 0.248, 0.329
	V_3 变化趋势	↗↘	↘↗	↘↗
$f_7(3)$	回归系数	0.272, 0.247	0.338, 0.358	0.390, 0.395
	回归系数均值	0.259	0.348	0.393
	V_3	0.369, 0.306, 0.289	0.350, 0.360, 0.372	0.281, 0.334, 0.339
	V_3 变化趋势	↘↘	↗↗	↗↗

5 结果和讨论

5.1 信号周期长度

研究结果显示, f_1 对外侧车道流量占比均值 V_{out} 的影响始终大于平均水平 (f_1 第 1 行 V_{out} 列: $0.421, 0.435, 0.412$ 均大于 0.333), 帮助 V_{out} 从在 f_1 水平 1 时偏离流量均衡分布的状态 (f_1 第 3 行 V_{out} 列: $0.248 < 0.333$) 恢复并稳定在理论均衡值 (0.333) 附近 (f_1 第 3 行 V_{out} 列: $0.334, 0.339$ 和

0.316). 这说明驾驶员选择外侧左转车道的概率随着周期长度的增加而逐渐增大. 相应的, 驾驶员选择内侧车道的概率逐渐降低 (f_1 第 3 行 V_{in} 列: $0.306, 0.279, 0.341$ 均小于 0.398). 驾驶员选择中间车道的概率相对稳定并始终维持在均衡值以上 (f_1 第 3 行 V_{med} 列: $0.354, 0.360, 0.382, 0.343$ 均大于 0.333). 由于中间车道处于内外侧车道之间且被选概率相对稳定, 因此随着周期长度增加, 可能出现由于原先选择内侧车道的驾驶员转为选择中间车道, 增加了中间车道拥挤程度, 导致原先选择中间车道

的驾驶员转向外侧车道的情况. 从总趋势上来看, 三左车道流量分布的均衡状态可能在 f_1 水平 3 和水平 4 之间出现, 这意味着左转车流容易在较长信号周期内达到相对均衡分布, 因而三左车道整体通行能力的利用率相对较高. 若绿信比不变, 信号周期长度增加会延长红灯相位时间, 从而增加左车道排队长度. 因此, 上述结果的微观含义是, 如果红灯相位时段内有更多驾驶员到达交叉口进口道并参与左车道选择, 则 3 条车道被选概率接近相等, 以往研究中也有类似现象^[12]. 然而, 信号周期过长会增加交叉口延误, 使用此方法提高车流分布均衡性可能得不偿失, 有条件的情况下可采用其他调节手段.

5.2 转弯曲线

当三左车道所在路段的相交道路进口道(图 1 中进口道 B, 即 f_2) 的宽度最小时, 左车道流量分布 V_3 相对均衡(f_2 第 3 行水平 1: [0.331, 0.343, 0.307]), 而相交道路进口道宽度增加时流量分布明显失衡(f_2 第 2 行水平 2: [0.333, 0.372, 0.295]), 继续增加时分布失衡的情况稍有好转(f_2 第 3 行水平 3: [0.306, 0.360, 0.334]), 但是仍未达到均衡状态. 具体来说, 增加相交道路进口道宽度对中间车道流量占比均值 V_{med} 的影响高于其他 2 个车道流量占比均值 V_{in} 和 V_{out} (f_2 第 2 行回归系数平均值: 0.356 大于 0.331、0.313), 使得 V_{med} 总是大于 V_{in} 和 V_{out} (f_2 第 3 行水平 2: 0.372 大于 0.333、0.295, 水平 3: 0.360 大于 0.306、0.334). 这说明如果左转驾驶员在交叉口内纵向移动距离增加, 较多驾驶员会选择中间车道而非内侧或外侧车道. 另一方面, 增加反向交通车道数目(图 1 中出口道 C 的车道数, 即 f_3) 有助于提高外侧车道利用率 (f_3 第 2 行 V_{out} 列: 0.248 < 0.331), 降低内侧车道利用率 (f_3 第 2 行 V_{in} 列: 0.398 > 0.307), 从而使左转车流分布达到相对均衡 (f_3 第 2 行水平 2: [0.307, 0.362, 0.331]). 此结果的微观含义是, 左转驾驶员在反向交通车道数较少的情况下偏向于使用内侧和中间车道 (f_3 第 2 行水平 1: 0.248 小于 0.354、0.398), 而增加反向交通车道数会使得原先可能选择内侧车道的驾驶员转而选择中间和外侧车道 (f_3 第 2 行水平 2: 0.307 小于 0.362、0.331). 综合分析 f_2 和 f_3 的影响可知, 三左车道车流会在横向移动距离稍大于纵向移动距离的条件下(表 2 中 $f_2=3$ 且 $f_3=4$) 达到相对均衡的状态.

通过对比表 4 中 f_2 和 f_3 对左转车流占比的影

响可以发现, f_3 水平变化对驾驶员车道偏好的影响大于 f_2 , 此结果可从驾驶员的角度进行解释. 驾驶员在远离布设有三左车道的下游交叉口的位置难以观察到相交道路进口道的情况, 而当他们到达左车道排队末尾时, 前方车辆同样会影响其前向视距. 相对而言, 驾驶员更容易观察到同一路段反向交通的车道数 f_3 , 因此 f_3 水平变化对驾驶员的影响程度大于 f_2 .

5.3 换道机会

当三左车道中的内侧车道为展宽设计时 ($f_4=1$), 内侧车道利用率下降十分明显, 其流量占比 V_{in} 与中间和外侧车道流量占比 V_{med} 和 V_{out} 相比, 从三者中的最大值转为最小值 (f_4 第 2 行水平 1: 0.369 大于 0.350、0.281, 水平 2: 0.295 小于 0.369、0.336). 这说明相对于非展宽车道, 展宽车道所提供交叉口附近的附加换道机会对驾驶员并无特别吸引力, 反而一些驾驶员会选择不经过换道同样能够完成左转的非展宽中间或外侧车道, 因此 V_{med} 和 V_{out} 的值有所提高 (f_4 第 2 行 V_{med} 列: 0.350 < 0.369, V_{out} 列: 0.281 < 0.336). 由于 Sando 等^[3] 的研究中也有类似现象, 因此城市道路交叉口设置左转展宽车道时需仔细调查当地驾驶员对展宽车道的偏好并设置适当的引导措施, 保证展宽车道通行能力得到充分利用. 在本文案例中, 虽然左转展宽车道会改善车流分布的均衡性 (f_4 第 2 行水平 2: [0.295, 0.369, 0.336] 表现好于水平 1: [0.369, 0.350, 0.281]), 但其改善程度有限.

另外, 三左车道流量分布的均衡性会随 f_5 的增加而有所提高, 并且其在上游路段达到一定长度时实现相对均衡状态 (f_5 第 3 行水平 3: [0.341, 0.343, 0.317]). 对左转驾驶员来说, 较长的上游路段可为其进入目标车道提供充足的换道空间, 研究结果说明此设计有助于左转车流的均衡分布, 此发现证实了过往研究中的类似结论^[13]. 但是当 f_5 提升至最高水平时, 左转车流分布会偏离均衡状态 (f_5 第 3 行水平 4: [0.279, 0.382, 0.340]), 造成此现象的原因可能是, 三左车道与上游交叉口间距太远会增加上游到达车辆的离散程度, 部分驾驶员可能无法在当前周期内完成左转动作, 从而放弃选择排队长度最短的车道, 而是转向能满足其他需求的车道.

通常上下游交叉口间路段长度在道路规划阶段已基本确定, 后期调整难度较大, 然而本文研究发现, f_5 同样对驾驶员左转车道选择决策有所影响, 因此可以通过调整左转标识位置改善车流分布失衡

的情况.结果显示,当左转车道标识从靠近停车线的位置调整至靠近上游交叉的位置时,左转车流分布均衡性逐渐得到改善,并在 f_6 的最高水平到达相对均衡状态(f_6 第 3 行水平 3:[0.307, 0.364, 0.329]).靠近上游布设左转标识意味着,左转驾驶员可尽早获得下游交叉口车道布设信息,提前选定目标车道,从而获得更多时间和空间执行换道动作.研究结果说明,与增加上游路段长度类似,此设计同样有助于维持车道流量均衡分布.

研究发现,当进口道直行和右转车道数目较少时(f_7 水平 1), V_{in} 和 V_{med} 远高于 V_{out} (f_7 第 3 行水平 1:0.369、0.350 均大于 0.281),而随着 f_7 水平的提升, V_{med} 和 V_{out} 逐渐增高(f_7 第 3 行水平 2:0.306 小于 0.360、0.334,水平 3:0.289 小于 0.372、0.339).从驾驶员的角度来看此结果不难理解,当进口道直行和右转车道数目增加时,从上游交叉驶来的左转车辆有较大概率进入其中,这些车辆需要经过至少一次的换道动作才能驶入外侧左转车道.多次换道显然会增加驾驶员心理负担和驾驶风险,导致一些驾驶员在驶入外侧车道后不愿继续调整至更内侧的车道,因此外侧车道利用率会随 f_7 水平提升而逐渐升高.所以,当内侧左转车道利用率过高时,增加其他车道数目可以提升外侧车道利用率.在本文案例中,合理设置直行和右转车道数目有助于保持左转流量分布的均衡性(f_7 第 3 行水平 2:[0.306, 0.360, 0.334]).

6 结语

多车道设施流量是一定时段内个体驾驶员车道选择结果的宏观表现,而多车道交通流分布失衡现象的行为根源是驾驶员对特定车道的偏好.以城市交叉口三左转车道为例,研究外界因素如何通过影响驾驶员车道选择行为来改变左转车流分布.研究发现,合理设置信号周期时长、相交道路进口道宽度、同一路段反向交通的车道数、展宽车道设置、上下游交叉口间距、左转车道标识设置位置、同一进口道直行和右转车道数等因素可使三左转车道流量分布接近相对均衡状态.在工程实践中,应充分考虑上述因素在不同交叉路口条件下对驾驶员车道选择行为的影响,并将其纳入道路设施的精细化设计和交通组织优化中,提高三左转车道及交叉口整体通行能力的利用率.值得注意的是,虽然选取的一些影响因素反映了三左转车道上游路段的交通控制和几何设计条件(如 f_5 和 f_6),但是交叉口进口道与基本路

段的驾驶环境迥异,驾驶员在 2 种环境下的驾驶目的和所受外界影响也有所不同,因此 2 种环境下多车道设施利用率通常差异较大,相关研究和工程实践中应注意二者区别.尽管如此,由于引入的成分回归方法使得利用宏观车道流量数据研究微观驾驶员车道选择行为成为可能,而车道流量数据在工程实践中容易获取且包含足够车道选择样本,所以此方法可应用于包括城市道路基本段在内的其他多车道设施的车流分布研究中,以便快速准确定位影响驾驶员车道选择的外界影响因素,有针对性地改善道路设施和交通控制策略.

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010 [S/CD]. Washington D C:National Research Council,2010.
- [2] RING J, SADEK A. Predicting lane utilization and merge behavior at signalized intersections with auxiliary lanes in Buffalo, New York[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(9):1143.
- [3] SANDO T, MOSES R. Influence of intersection geometrics on the operation of triple left-turn lanes [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(5):253.
- [4] LEE J J, ROUPHAIL N, HUMMER J. Models for lane utilization prediction for lane drop intersections [J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1912(1):47.
- [5] DUBEDI A, CHAKROBORTY P, KUNDU D, *et al.* Modeling automobile drivers' toll-lane choice behavior at a toll plaza[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(11):1350.
- [6] BUGG Z, ROUPHAIL N M, SCHROEDER B. Lane choice model for signalized intersections with an auxiliary through lane[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(4):371.
- [7] YOUSIF S, AL-OBAEDI J, HENSON R. Drivers' lane utilization for United Kingdom motorways[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(5):441.
- [8] AITCHISON J. The statistical analysis of compositional data [M]. London:Chapman & Hall, 1986.
- [9] BOOGAART G, DELGADO R. Analyzing compositional data with R[M]. Berlin Heidelberg:Springer, 2013.
- [10] MATEU-FIGUERAS G, PAWLOWSKY-GLAHN V, EGOZCUE J. The principle of working on coordinates[M]. Chichester:John Wiley & Sons, 2011.
- [11] PAWLOWSKY-GLAHN V, EGOZCUE J, DELGADO R. Modeling and analysis of compositional data[M]. Chichester:John Wiley & Sons, 2015.
- [12] KIKUCHI S, KII M, CHAKROBORTY P. Lengths of double or dual left-turn lanes [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004 (1), 1881:103.
- [13] COURAGE K, STEPHENS B, GAN A, *et al.* Triple left turn lanes at signalized intersections[R]. Gainesville:University of Florida, 2007.