

# 信号交叉口左转非机动车膨胀特性研究

陈学武 王友善 陈景旭 江航 李志斌

**【摘要】**机动车与非机动车组成的混合交通是我国城市道路交通的显著特征。信号交叉口通常是造成我国城市高峰时期混合交通拥堵的瓶颈问题之一。本文主要研究我国城市典型四相位信号交叉口在左转专用信号相位下非机动车膨胀特征。建立了广义回归模型研究左转非机动车膨胀特性，得出了最大膨胀宽度受到红灯期间到达非机动车数量，方向不均匀系数和电动车比例的影响。通过非机动车膨胀扩散影响分析，得出左转非机动车对同向行驶的左转机动车的影响，以南京市4个信号控制交叉口实际调查数据，分析左转非机动车膨胀特性、左转机动车受非机动车膨胀影响下的延误、通行能力，能有效指导城市交通设施的配置、设计与建设。

**【关键字】**非机动车；信号交叉口；膨胀；延误；通行能力

## 1. 引言

近年来，随着城市化进程的不断推进，城市人均出行距离变长，机动车数量持续增长，非机动车的出行方式分担率在逐渐下降。但上世纪我国是自行车生产和使用大国，由自行车和电动自行车组成的非机动车依然是居民出行的主要方式之一。机动车与非机动车组成的混合交通是当前我国城市道路交通的显著特征。信号交叉口通常是造成我国城市高峰时期混合交通拥堵的瓶颈问题之一。目前国内许多城市主要是考虑以机动车交通为主的交通规划与设施设计，与非机动交通相关的研究很多，然而有关非机动车通过信号交叉口的膨胀特征及其对机动车的影响的研究较少。非机动车具有节能环保、方便灵活的特点，国外城市随着环保意识的增强，欧美等发达国家逐渐重视与引导发展自行车与电动自行车。当前国内外有关非机动车交通特性的研究主要集中在交通到达特性、行驶舒适满意度、混合交通接受间隙特性及交通设计理论等方面<sup>[1-8]</sup>。

本文旨在通过研究信号控制交叉口左转非机动车交通膨胀特性，分析左转非机动车流的膨胀扩散特性对交叉口左转机动交通在延误与通行能力方面产生的影响，能够为高峰时期城市信号交叉口设施的配置、设计与建设提供指导。

## 2. 左转非机动车膨胀特征分析

### 2.1 左转非机动车最大膨胀宽度的定义

本文所研究的左转自行车最大膨胀宽度是指当南北（东西）左转专用相位放行时，南北（东西）左转自行车同时开始驶入交叉口，从中寻找出最大并排行驶的自行车的数量作为最大膨胀宽度，如图1所示。

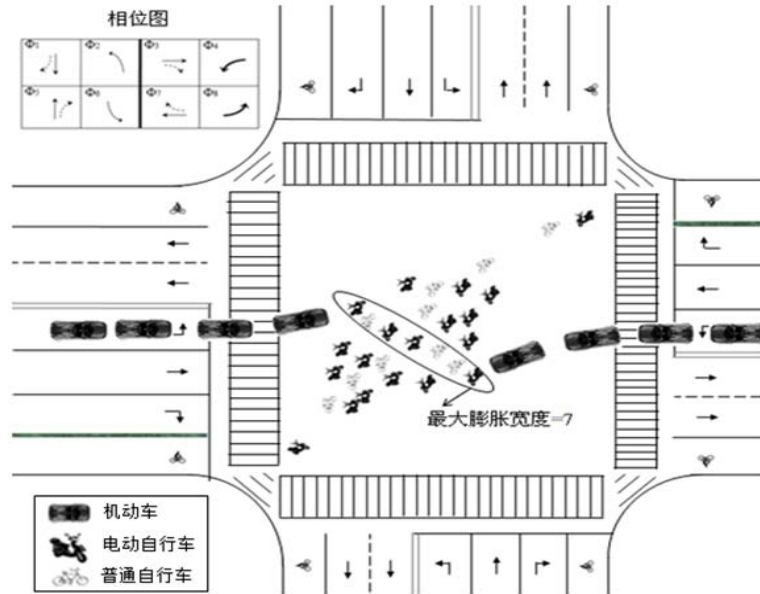


图1 左转自行车最大膨胀宽度示意图

## 2.2 分析模型

广义线性回归分析是利用线性回归分析原理和方差分析原理相结合的一种线性回归分析方法，它相对于线性回归分析的优势在于模型的自变量可以是任意类型的变量。左转自行车最大膨胀宽度是非负离散型变量，可以用建立广义线性回归模型来拟合最大膨胀宽度与一系列自变量的关系。泊松回归模型是最常用的广义线性回归模型，是基于事件的计数变量建立的回归模型。泊松回归模型中的概率密度函数为：

$$p(Y_i = y_i) = p(y_i) = \frac{\lambda_i^{y_i} e^{-\lambda_i}}{y_i!}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中  $\lambda_i$  是左转自行车最大膨胀宽度的期望值，可以根据一系列自变量估计得到。 $\lambda_i$  与这些自变量的结构方程可以是线性或对数线性的形式，分别为  $\lambda_i = \exp(\theta_0 + \theta_1 x_{i1} + \dots + \theta_k x_{ik})$  和  $\lambda_i = \theta_0 \theta_1^{x_{i1}} \dots \theta_k^{x_{ik}}$ 。其中  $\theta$  和  $x$  分别代表的是系数和参数，系数求解是基于极大似然估计。

泊松回归模型有一个基本的假设，就是均值等于方差，当均值大于或小于方差时，初始的泊松回归模型就不再适用，需要对模型做一定的修正。引入广义泊松回归模型，其概率密度函数为：

$$p(Y_i = y_i) = p(y_i) = \frac{\lambda_i (\lambda_i + \delta y_i)^{y_i-1} e^{-\lambda_i - \delta y_i}}{y_i!}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

其中  $\max(-1, -\lambda_i/4) < \delta < 1$ ，文献[9]展示了广义泊松回归模型详细的求解过程。

## 2.3 模型变量提取

本文模型中使用的数据来源于南京市 4 个信号交叉口，总共采集的样本量为 2768 辆电动自行车和 1758 辆自行车。经过逐步多元回归进行变量筛选，对左转自行车最大膨胀宽度产生影响的变量总共有 3 个，分别是南北向（东西向）左转红等相位到达的电动自行车和自行车的数量、方向不均匀系数，模型检验结果如表 1 所示。方向不均匀系数指的是一个信号周期内南北向（东西向）到达非机动车数量最大值与两个方向总共到达非机动车数量之比。泊松回归模型得出的方程为：

$$Y = 1.93 \times (X_1)^{0.39} \times (X_2)^{0.29} \times \exp(-0.66X_3) \quad (3)$$

式中  $X_1$  和  $X_2$  分别为南北向（东西向）左转红等相位时间内到达的电动自行车和自行车的数量； $X_3$  为方向不均匀系数。

表 1 泊松回归模型检验结果

变量	系数	标准误	$\chi^2$	$p > \chi^2$
常数项	0.66	0.342	3.73	0.053
红灯到达电动自行车数量的对数值	0.39	0.085	21.05	<0.001
红灯到达普通自行车数量的对数值	0.29	0.069	18.09	<0.001
方向不均匀系数	-0.66	0.369	3.18	0.074

若用  $N$  表示南北向（东西向）左转红等相位时间内到达的非机动车总量，即  $N=X_1+X_2$ ，方程（3）可调整表示为：

$$\begin{aligned} Y &= 1.93 \times (N)^{0.39+0.29} \times \left(\frac{X_1}{N}\right)^{0.39} \left(\frac{X_2}{N}\right)^{0.29} \times \exp(-0.66X_3) \\ &= 1.93 \times (N)^{0.68} \times (X_4)^{0.39} (1 - X_4)^{0.29} \times \exp(-0.66X_3) \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $X_4$  表示电动自行车比例。

#### 2.4 左转非机动车最大膨胀宽度特性

图 2 更为直观的展示了左转自行车最大膨胀宽度与 4 个变量的关系：

图 2-1、2-2 可以看出最大膨胀宽度随红灯期间电动自行车与普通自行车数量的增加而增加，电动自行车对膨胀宽度的影响更大。

图 2-3 膨胀宽度与方向不均匀系数存在着负相关关系，当南北向（东西向）车数量相近时，膨胀更为明显；当两个方向到达非机动车数量差异较大时，非机动车造成膨胀较小。

图 2-4 显示非机动车最大膨胀宽度与电动车比例存在着非线性的关系，膨胀宽度随着电动车比例的增加呈现出一个先增加后减小的趋势。当电动车比例较小或较大时，非机动车车辆间差异性较小，车辆间会有序的行驶；当一个周期内到达电动车数量与自行车数量相近时，由于两种类型非机动车性能差异较大，电动车经常会试图超越前方的自行车，这对最大膨胀宽度就会产生影响，由图 2-4 可以看出当电动车比例接近 60% 时，对非机动车膨胀宽度影响最大。

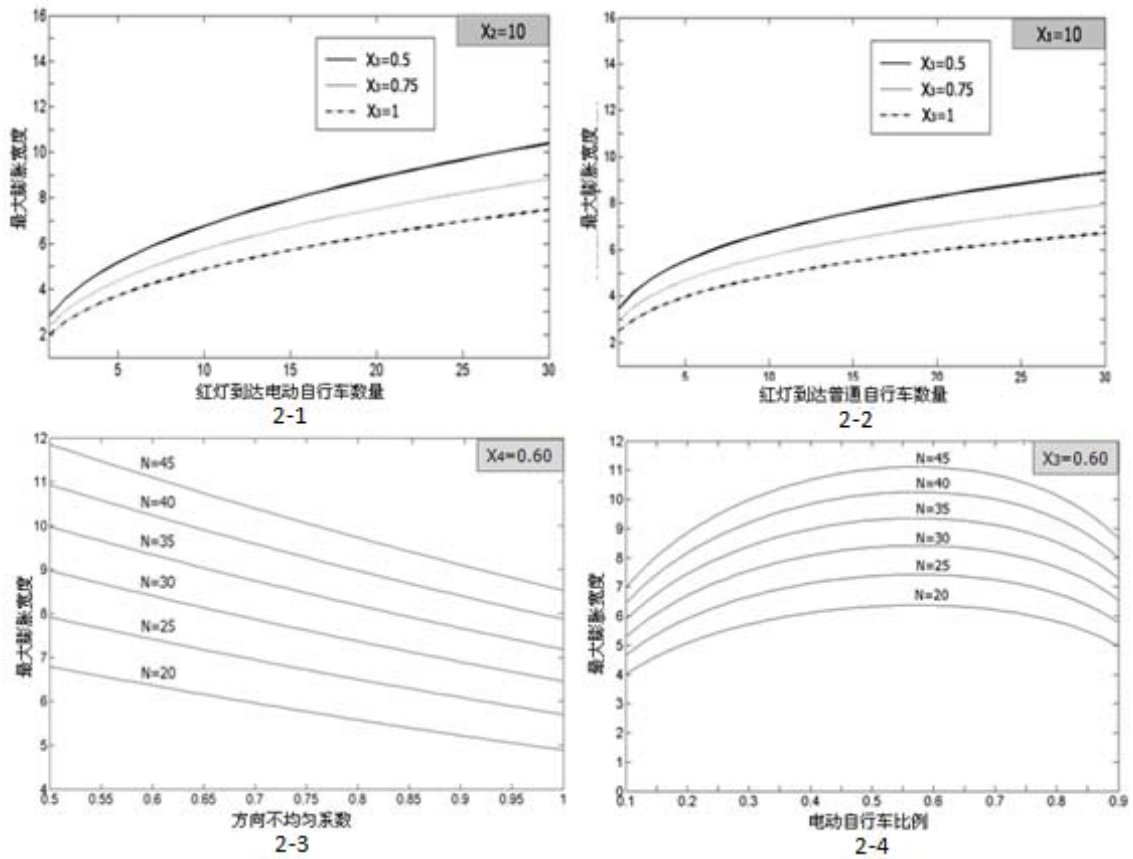


图 2 左转自行车最大膨胀宽度与 4 个变量关系

如上文所述，造成最大膨胀宽度差异的原因是电动自行车和自行车性能差异较大，电动自行车经常会从外侧试图超越前方的自行车。对每个周期内，左转自行车膨胀宽度的最外侧电动自行车比例与实际到达的电动自行车比例做配对样本 t 检验，观察两者是否存在显著性差异，以证明电动自行车是否确实存在超越行为，而这行为不是由于本身到达的电动自行车比例造成的。表 2 显示了两个电动自行车比例的统计数据 and 配对样本 t 检验结果：

表 2 配对样本 t 检验结果

电动自行车比例	均值	方差	标准误	t 值	置信水平
到达	0.61	0.10	0.01		
外侧	0.78	0.42	0.03		
到达-外侧	-0.17	0.42	0.03	-5.77	0.00

从表 2 可以看出，每个周期内膨胀宽度的最外侧电动自行车比例要比实际到达的电动自行车比例高 17%，检验的统计量 t 值为-5.77，对应的检验概率小于 0.05，说明两个比例存在显著性差异，这也说明了左转电动自行车确实存在超车的行为，这也是造成左转自行车膨胀宽度变大的一个原因。

### 3. 左转非机动车对机动车的影响分析

信号交叉口，当左转专用信号相位启动时，左转机动车和非机动车同时放行。当非机动

车较少时，非机动车对机动车的影响几乎可以忽略。但随着非机动车数量的逐渐增加，非机动车膨胀宽度的不断增大，会逐渐占用机动车在交叉口的道路资源，迫使机动车减速行驶，造成了延误，降低了左转机动车的通行能力。

### 3.1 左转非机动车影响机动车通过时间差异性检验

从视频中观察发现，当最大膨胀宽度是 3 时，左转非机动车对机动车没有干扰。本节中选取了山西路和中山路相交的交叉口的机动车北进口道为例，机动车通过时间指的是左转信号灯亮起时，前 4 辆排队等候的机动车通过交叉口的时间。利用基于 Bonferroni 方法的多重对比检验，观察不同左转自行车最大膨胀宽度下的机动车通过交叉口的时间是否与膨胀宽度为 3 的通过时间存在显著性差异，检验结果如表 3 所示。

表 3 机动车通过时间的多重对比检验结果

左转自行车最大膨胀宽度		均值差 (I-J)	标准误	检验概率
I	J			
3	4	0.48	0.73	1.000
	5	-0.22	0.6	1.000
	6	-1.87	0.58	0.064
	7	-2.39	0.59	0.004
	8	-2.26	0.63	0.021
	9	-3.02	0.62	0.000
	10	-4.23	0.73	0.000
	11	-6.84	0.89	0.000

表 3 显示最大膨胀宽度为 3、4 和 5 时机动车通过时间在置信区间为 90%，不存在显著性差异，可以求出这三个膨胀宽度下机动车的平均通过时间为 11.88s。其他膨胀宽度的机动车通过时间减去膨胀宽度为 3、4 和 5 的平均通过时间作为左转非机动车对左转机动车产生的延误。

### 3.2 左转机动车延误回归分析

使用线性回归得出延误与实际最大膨胀宽度、泊松回归模型求解出的最大膨胀宽度以及每个周期到达的非机动车数量的关系，如图 3 所示。

图 3 显示，最大膨胀宽度能更好的解释左转非机动车对左转机动车产生的延误，说明左转机动车延误不仅仅是受到到达的非机动车数量的影响，而且还受到电动自行车比例、非机动车方向不均匀系数等因素的影响，这些影响都可以从左转自行车最大膨胀宽度中反映出来。

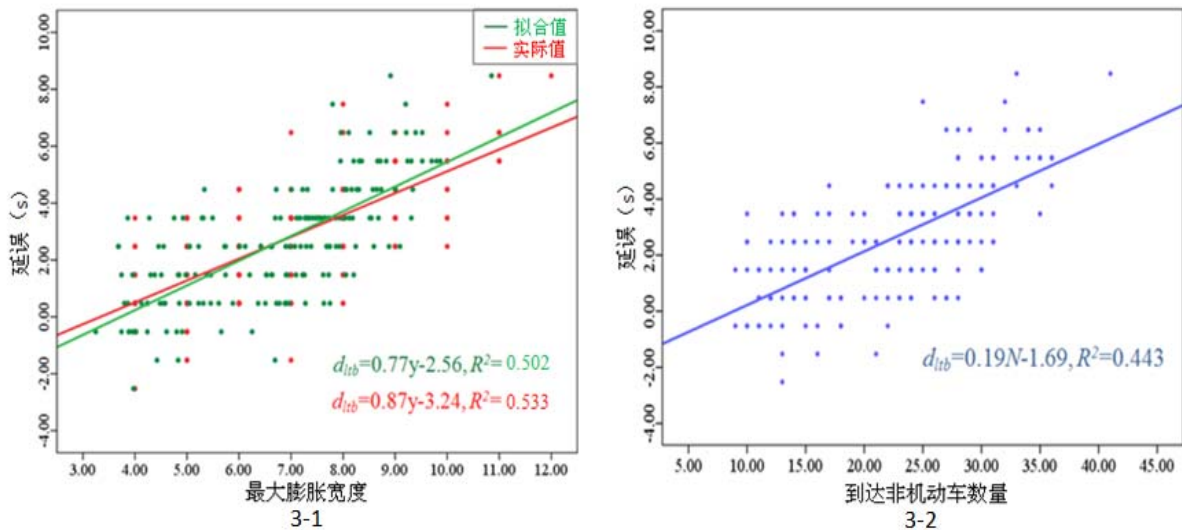


图 3 左转机动车延误回归分析结果

### 3.3 左转非机动车对机动车的影响

左转非机动车对左转机动车产生的延误会造成左转机动车通行能力的下降，本节应用 K-均值聚类对不同最大膨胀宽度下的机动车延误进行聚类分析，并求出每一类的左转非机动车调整系数，用来表征左转非机动车对左转机动车通行能力的影响。依然以山西路和中山路相交的交叉口为例，聚类结果如表 4 所示：

表 4 左转非机动车对机动车的延误聚类分析及通行能力调整系数结果

左转自行车最大膨胀宽度	平均延误(s)	调整系数(f)
≤5	-	1.00
6,7,8	2.17	0.90
9,10	3.46	0.85
≥11	6.88	0.70

调整系数可以应用于 HCM 通行能力手册中对左转机动车饱和流率、通行能力的调整。当左转非机动车膨胀宽度逐渐变宽时，对左转机动车的影响会逐渐变大，造成通行能力的下降。但由于交叉口空间限制，最大膨胀宽度的上限值是有限的，在所有观察的交叉口发现最大并排行驶的非机动车数量只有 12。在膨胀宽度达到 11 及以上时，交叉口核心区域基本会被非机动车占用。机动车只能继续在停车线等候，或以非机动车速度在其后面随行，这对机动车的通行造成很大的干扰，通行能力就会有很大下降。

左转自行车最大膨胀宽度值达到 9 及以上，主要集中在早晚高峰时期，这时可以考虑对交叉口信号设计实行优化，例如可以考虑左转非机动车提前放行，进一步降低其对左转机动车的干扰。也可以实行左转非机动车二次过街，将非机动车行驶主要分布在交叉口边缘空间，将交叉口中心区域留给机动车使用。

## 4. 结语

机动车与非机动车组成的混合交通是当前我国城市道路交通的主要特征。信号交叉口作

为城市交通的瓶颈区域,本文分析了信号交叉口左转非机动车放行时的膨胀扩散特征,引入泊松回归模型得出影响左转非机动车最大膨胀宽度的因素有红灯期间到达的自行车和电动自行车数量以及方向不均匀系数。统计检验验证了电动自行车超越自行车是造成膨胀宽度变大的一个主要因素。随后利用线性回归模型分析了左转非机动车对左转机动车产生的影响。本文揭示出的左转自行车膨胀特征能够为高峰时期城市信号交叉口设施的配置、设计与建设提供指导。

### 【参考文献】

- [1] 徐良杰,王炜.信号交叉口左转非机动车影响分析[J].中国公路学报,2006,19(1):89-92.
- [2] 杨晓光,杨静,史玉茜等.信号控制交叉口左转非机动车过街模式适用性[J].城市交通,2012,10(4):65-71.
- [3] 陈晓明,邵春福,姚智胜等.典型信号交叉口左转非机动车二次过街研究[J].土木工程学报,2008,41(7):76-81.
- [4] 曲昭伟,周立军,王殿海等.城市信号交叉口自行车及行人到达与释放规律[J].公路交通科技,2004,21(8):91-94.
- [6] 徐良杰.基于交通观测下的自行车到达模型及分析[C].//2008年国际交通技术创新与应用大会暨国际交通基础设施建设与养护技术大会论文集.2008:282-285.
- [7] 熊辉,邱建栋.信号交叉口自行车通行能力研究[J].北京理工大学学报,2008,28(2):125-128.
- [8] 徐良杰,王炜.左转自行车对直行机动车通行的影响分析模型[J].东南大学学报(自然科学版),2005,35(5):805-809.
- [9] Harris, D., Y. Zhao, and J.W. Hardin. Modeling under-dispersed count data with generalized Poisson regression. *Stata Journal*, Vol.12, No. 4, 2012, pp. 736-747.

### 【作者简介】

陈学武,女,博士,东南大学交通学院,教授,博士生导师。电子信箱:  
chenxuewu@seu.edu.cn

王友善,男,东南大学交通学院,硕士研究生

陈景旭,男,东南大学交通学院,博士研究生

江航,男,东南大学交通学院,博士研究生

李志斌,男,东南大学交通学院,博士研究生