

文章编号:1671-1637(2012)03-0073-07

阻塞流状态下城市快速路交通流时空特性

董春娇^{1,2}, 邵春福², 马壮林³, 诸葛承祥², 李阳阳³

(1. 田纳西大学 交通研究中心, 田纳西 诺克斯维尔 37996; 2. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要:根据时间序列中的自相关函数法,判断交通流量、时间占有率与平均速度的时间序列的平稳性。根据混沌分析中的G-P算法,将非平稳的交通流参数时间序列转化为平稳的交通流参数时间序列。引入了互相关系数的概念,在阻塞流状态下,计算了上游断面对观测断面以及观测断面对下游断面的互相关系数,并应用K-S检验判断阻塞流状态下城市快速路进出口匝道的车辆到达特性。研究表明:交通流量和时间占有率属于非平稳时间序列,平均速度属于平稳时间序列;当时间延迟分别取2、3、5 min时,在阻塞流状态下,重构的交通流量相空间嵌入维数为4;观测断面的交通流参数不仅受相邻上游断面交通流参数传递的影响,而且也受相邻下游断面交通流参数回溯的影响;在阻塞流状态下,城市快速路进出口匝道车辆到达特性符合负二项分布。

关键词:交通工程;城市快速路;阻塞流;时间特性;空间特性;自相关函数;互相关系数;G-P算法
中图分类号:U491.265 **文献标志码:**A

Temporal-spatial characteristic of urban expressway under jam flow condition

DONG Chun-jiao^{1,2}, SHAO Chun-fu², MA Zhuang-lin³, ZHUGE Cheng-xiang², LI Yang-yang³

(1. Center for Transportation Research, The University of Tennessee, Knoxville 37996, Tennessee, USA;
2. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Automobile,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the auto-correlation function method of time sequence, the stationarities of time sequences for traffic flow, time occupancy and average speed were judged. Based on the G-P algorithm of chaos analysis, the non-stationary time sequence of traffic flow parameter was transformed to the stationary time sequence of traffic flow parameter. The concept of cross-correlation coefficient was introduced. Under jam flow condition, the cross-correlation coefficients of upstream section on observation section and observation section on downstream section were calculated, and K-S test were used to determine the characteristics of vehicle arrival at import and export ramps on urban expressway. Research result shows that traffic flow and time occupancy belong to non-stationary time sequence, but average speed belongs to stationary time sequence. When time lags are 2, 3 and 5 min respectively, the embedding dimension of reconstruction phase space is 4 under jam flow condition. The traffic flow parameters of observation section is not only influenced by the traffic flow parameters transmission of adjacent

收稿日期:2011-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51178032);北京交通大学优秀博士生科技创新基金项目(141082522);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC112, CHD2011JC156, CHD2012JC062)

作者简介:董春娇(1982-),女,辽宁大石桥人,田纳西大学博士后助理研究员,工学博士,从事道路交通安全研究。

upstream section, but also influenced by the traffic flow parameters backtrack of adjacent downstream section. Under jam flow condition, the characteristics of vehicle arrival at import and export ramps on urban expressway are accordance with the negative binomial distribution. 4 tabs, 13 figs, 13 refs.

Key words: traffic engineering; urban expressway; jam flow; temporal characteristic; spatial characteristic; auto-correlation function; cross-correlation coefficient; G-P algorithm

Author resume: DONG Chun-jiao (1982-), female, assistant researcher, PhD, + 865-441-6015, dongchj2006@163.com.

0 引 言

城市快速路是承担城市快速、大运量交通的重要干路,在运行效率、设施类型以及管理方式上与高速公路存在一些相似之处,但受城市路网和城市交通的影响,城市快速路与高速公路相比具有一些不同的交通流特性,如交通流量集中,速度较低等,因此,根据实测交通流数据确定城市快速路交通流参数的统计分布,分析交通流状态特性,可以确定快速路交通流状态基本模式,同时也可分析交通流形成机理,建立合理的交通流短时预测模型提供理论基础^[1-2]。交通流时间和空间特性分析是交通流短时预测与交通流状态判别的基础,也是交通控制与交通模拟的重要研究内容之一。May 是国外最早从事交通流理论的研究人员,他论述了交通流研究基础的基本图理论^[3];Kerner 提出了三相交通流理论,着重研究如何解释高速公路上交通拥堵转捩的物理原理与拥堵交通流的性质,并将拥堵流进一步划分为同步流和宽运动阻塞流两相^[4]。然而,无论是基本图还是三相交通流理论都是基于高速公路交通流数据进行的研究,由于中国城市道路与国外道路存在设计和规划视角不同,且高速公路和城市快速路具有不可忽视的差异,以高速公路交通流数据为基础建立的交通流参数模型难以符合城市快速路交通流运行的实际情况。近几年来,国内学者主要针对交通规划和交通流分配对交通流时空特性进行了探讨,石小法等基于 2008 年东莞市区综合交通规划交通流量调查数据,研究了交通流量的车种构成、时间分布特性、空间分布特性与现状路网特征^[5];姚荣涵等基于图论和矩阵论,从实际需求出发,建立了一套描述交通流时空特性的模型体系^[6]。上述研究成果作为城市快速路交通流短时预测理论的研究基础,都存在一定程度上的不足,本文从城市交通流的运行特征出发,以实测的快速路交通流参数为基础,通过定量分析阻塞流状态下交通流参数时

间分布特性和空间流动特征以及交通流时间与空间特性,为智能交通系统的实施与交通流短时预测的实现提供技术支持。本文首先采用时间序列分析中的自相关函数法,判断交通流量、占有率和速度时间序列的平稳性;结合混沌分析中的 G-P 算法将非平稳的交通流参数时间序列转化为平稳时间序列;分析阻塞流状态下上游断面对下游断面交通流参数传递的影响,并应用 K-S 检验判断阻塞流状态下进出口匝道车辆的到达特性。

1 阻塞流状态下交通流时间特性

在经典的交通流基本图理论^[7-8]和最新的三相交通流理论^[9-10]中,都存在着高密度、低速度的交通流状态,这种交通流状态被称为阻塞流相,这里的相定义为时空状态,本文根据交通流图上参数的分布特征及其在快速路上表征的运行状态,将其称为阻塞流状态。

阻塞流状态下的交通流量与空间占有率散点见图 1,交通流速度小于临界速度 u_0 的区域表现为阻塞流状态,此时交通流速度很低,各车道速度趋于一致,交通流量大幅下降,这也说明该速度下交通流出现了或长或短的停顿现象。

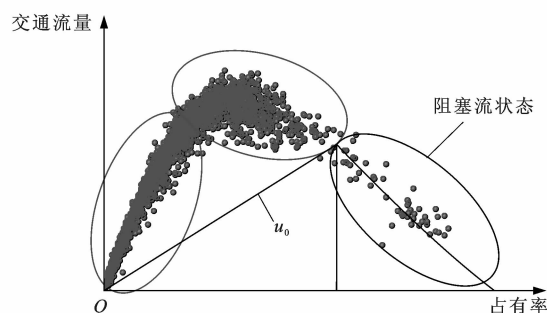


图 1 交通流量与空间占有率

Fig. 1 Traffic flow and space occupancy

实测数据表明:在阻塞流状态下,交通流量小于道路通行能力的 55%,空间占有率大于 54%,由于安全车距的存在,并不存在空间占有率为 100%的

情况,此时交通流速度小于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。表1为由实测数据统计得到的一周内阻塞流状态分布特征,从中可知,阻塞流多发生在早晚高峰时段,由于阻塞流状态表现为严重拥堵,且在阻塞流前后易发生交通流状态的改变,因此,真正意义上的阻塞流数据非常少,持续时间也较短。

表1 分布特征

Tab. 1 Distribution characteristics

| 参数 | 时段 | 时长/min |
|-----|-------------|--------|
| 星期一 | 7:00~8:00 | 14 |
| 星期四 | 17:00~18:00 | 20 |
| 星期五 | 7:00~8:00 | 6 |

由于交通系统的复杂性、随机性和非线性,交通流参数时间序列实质是一个随机序列。随机序列可分为平稳时间序列、非平稳时间序列、方差平稳序列、弱依赖时间序列和具有趋势的时间序列。平稳时间序列是指均值、方差和自回归函数不随时间变化的时间序列,即所有时间序列观测值都具有相同的分布,并在整个时期内,任何2个相邻项之间的相关程度都相同。

为了探寻阻塞流状态下交通流参数分布的时间趋势和平稳性,本文采用自相关函数进行分析验证,自相关函数 R 为

$$R = \frac{E[(x_t - \mu_t)(x_{t+l} - \mu_{t+l})]}{\sigma^2} \quad (1)$$

式中: $E(\cdot)$ 为均值函数; σ 为样本标准差; x_t 与 x_{t+l} 分别为 t 时刻与 $t+l$ 时刻交通流参数的时间序列观测值; μ_t 与 μ_{t+l} 分别为 t 时刻与 $t+l$ 时刻交通流参数的时间序列均值。

交通流参数自相关函数关系见图2,可以看出,交通流量与时间占有率自相关函数不能快速衰减趋近于0,属于非平稳时间序列,在进一步分析时应进行平稳化处理;平均速度自相关函数能够快速衰减到0,可认为其属于平稳时间序列。

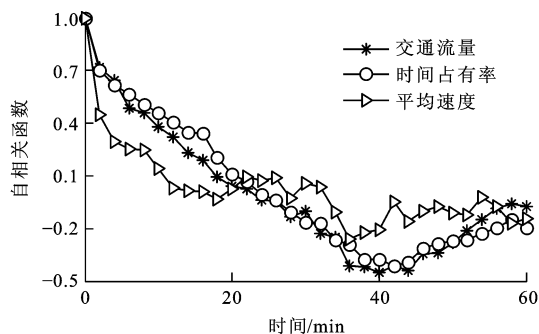


图2 交通流参数自相关函数

Fig. 2 Auto-correlation functions of traffic flow parameters

2 基于 G-P 算法的阻塞流相空间重构

2.1 相空间重构与关联维数概念

目前,关于平稳时间序列处理的理论和方法研究已比较成熟,因此,应将非平稳的交通流参数时间序列转化为平稳时间序列处理。在时间序列分析中,决定序列的可观测因素很多,而且相互作用的动力学方程往往是非线性的,甚至是混沌的。一般来说,非线性系统的相空间维数可能很高,甚至无穷大。在实际问题中,对于给定的时间序列而言,通常是将其扩展到三维甚至更高维的空间中去,以便把时间序列中蕴藏的信息充分地显露出来,这就是延迟坐标相空间重构法。本文基于 G-P 算法对非平稳的交通流参数时间序列进行相空间重构,相空间重构的目的在于在高维相空间中恢复混沌因子^[11-13]。在 n 维重构混沌动力系统中,混沌因子可表示为

$$\mathbf{Y}_t = (y_t, y_{t+\tau}, y_{t+2\tau}, \dots, y_{t+(n-1)\tau}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{Y}_t 为混沌因子; y_t 为混沌因子的时间序列观测值; τ 为时间延迟。

当向量 \mathbf{Y}_t 构建之后,需要先定义随机2个向量之间的距离,因此,以2个向量的最大分量差作为距离,并且规定凡是距离小于给定正数 r 的向量,称为有关联的向量。设重构相空间中有 K 个点,计算其中有关联的向量对数,在一切可能的 K^2 种配对中所占的比例称为关联积分,当 r 趋于0时,关联积分的极限与 r 的幂指数(关联维数)成正比。

2.2 交通流量相空间重构

基于如上分析,可以从时间间隔一定的交通流参数时间序列出发,支起一个嵌入空间。只要嵌入维度足够大,就可以在拓扑等价的意义下恢复交通流参数时间序列动力学性态,将其转化为平稳时间序列,本文以交通流量为例,应用 G-P 算法进行分析,确定交通流量相空间嵌入维数,主要步骤如下。

Step 1:利用时间序列先设定一个较小的初始嵌入维数 m_0 ,对应一个重构相空间

$$\mathbf{Q}_i = (q_i, q_{i(t-\tau)}, \dots, q_{i(t-(m_0-1)\tau)}) \quad (3)$$

式中: \mathbf{Q}_i 为 t 时刻断面 i 重构的相空间; q_i 为 t 时刻断面 i 的交通流量。

Step 2:计算关联维数 D ,则有

$$D = \frac{\ln(c_1)}{\ln(r)} \quad (4)$$

$$c_1 = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \theta(r - |\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_i|) \quad (5)$$

式中： c_1 为累积分布函数，表示相空间中两点之间距离小于 r 的概率； $|Q_{ij} - Q_{il}|$ 为 j 时刻与 l 时刻断面 i 交通流量观测值的距离； N 为观测值个数； $\theta(\cdot)$ 为heaviside 单位函数。

Step 3:增加嵌入维数,当现有维数 m_1 大于 m_0 时返回 Step 2,直到相应的关联维数估计值随着维数的增大收敛于一个稳定值,此时得到的 D 即为混沌因子的关联维数;如果关联维数估计值随维数的增大而增大,并不收敛于一个稳定值,则表明该系统是一个随机时间序列。

Step 4:选取合适的嵌入维数,当合适的嵌入维数 $m \geq 2D + 1$ 时,对于单断面交通流量时间序列,重构的相空间为

$$Q_{2it} = (q_{2it}, q_{2i(t-\tau)}, \dots, q_{2i(t-(m-1)\tau}) \quad (6)$$

对于 α 个断面构成的城市快速路网交通流量时间序列,重构的相空间 Q 为

$$Q = (Q_{1t}, Q_{2t}, \dots, Q_{\alpha t})^T \quad (7)$$

本文以北京市快速路上实测的交通流量为例,基于交通控制相关维数计算和诱导需求, τ 分别为 2、3、5 min,结合实际分析需要,初始嵌入维数 m_0 从 3 开始,进行迭代计算,相关维数计算结果见图 3。从图 3 中可以看出,在阻塞流状态下,中间维数 m' 为 10 时, D 达到最大值。由此可知,如果时间延迟选择合适,能够恢复阻塞流状态下交通流量时间序列平稳性。当中间维数 m' 为 10 时, $\ln(c_1)$ 与 $\ln(r)$ 的关系曲线见图 4,从中可以看出,在各种时间延迟下,合适的嵌入维数为 4。在阻塞流状态下相空间重构嵌入维数计算结果见表 2。

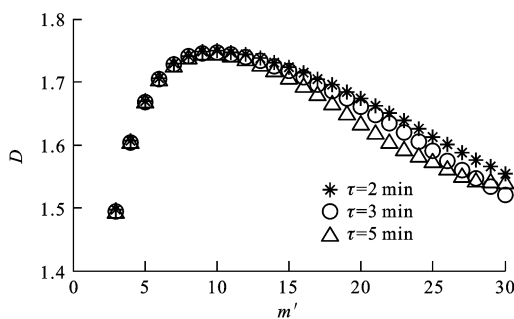


图 3 关联维数

Fig. 3 Correlation dimensions

3 阻塞流状态交通流空间特性

由车辆跟驰理论知,当车头间距在 100~125 m 以内时,车辆间存在相互影响。在阻塞流状态下,预测断面交通流参数不仅取决于相邻上游断面的交通流参数,相邻下游断面的交通流参数也会回溯影响

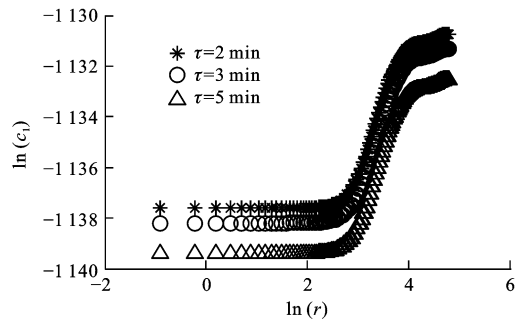


图 4 $\ln(c_1)$ 与 $\ln(r)$ 曲线

Fig. 4 Curves of $\ln(c_1)$ and $\ln(r)$

表 2 嵌入维数

Tab. 2 Embedding dimensions

| 参数 | $m' = 10$ | | |
|-------------------|-----------|-------|-------|
| τ/min | 2 | 3 | 5 |
| D | 1.749 | 1.746 | 1.742 |
| m | 4 | 4 | 4 |

预测断面交通流参数。

在阻塞流状态下,检测断面布置见图 5,3 个断面交通流空间分布特性分别见图 6~8,从上游断面驶出的车队,由于其中所包含车辆行驶速度存在差异,在到达下游断面之前便逐渐拉开距离,即发生离散现象。整个流量柱状图的形状不断变化,流量峰值逐渐变得平缓,流量过程时间则逐渐加长,空间分布趋于均匀。

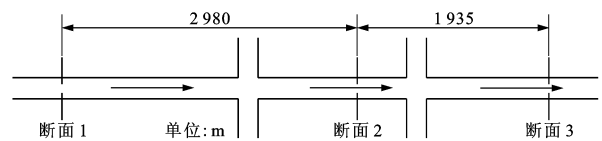


图 5 检测断面

Fig. 5 Test section

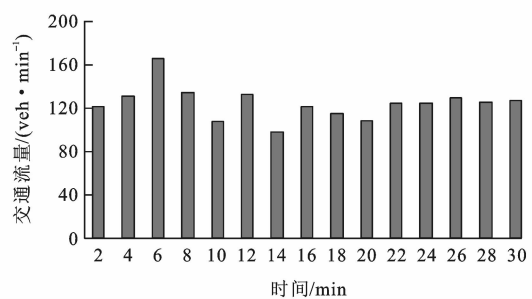


图 6 断面 1 交通流量

Fig. 6 Traffic flows of section 1

在阻塞流状态下,从空间特性分析城市快速路网拓扑结构,见图 9,图中无箭头的虚线表示 2 个断面间无交通流量,带箭头的实线与虚线为往返路线。观测断面 4 与相邻上游断面(1 为上游右转断面,2 为上游直行断面,3 为上游左转断面)和下游断面(5

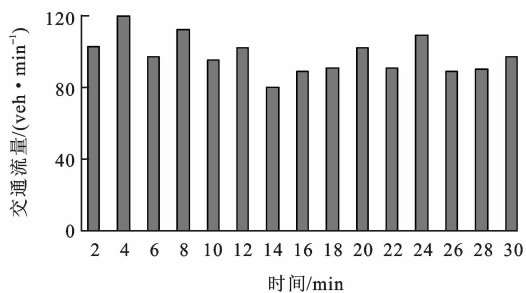


图7 断面2交通流量

Fig. 7 Traffic flows of section 2

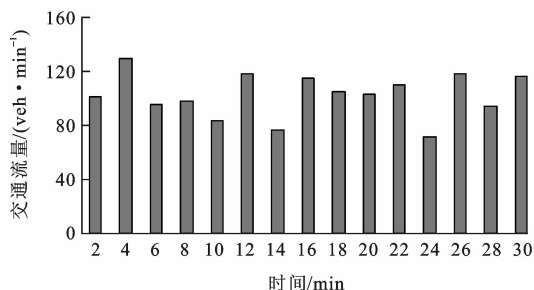


图8 断面3交通流量

Fig. 8 Traffic flows of section 3

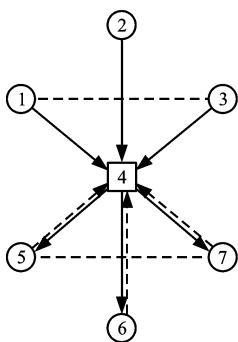


图9 路网拓扑结构

Fig. 9 Topological structure of road network

为下游右转断面,6为下游直行断面,7为下游左转断面)交通流量相关系数计算结果见表3。

表3 相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients

| | | | |
|------|-------|-------|-------|
| 相邻上游 | 断面1 | 断面2 | 断面3 |
| 相关系数 | 0.792 | 0.803 | 0.732 |
| 相邻下游 | 断面5 | 断面6 | 断面7 |
| 相关系数 | 0.177 | 0.849 | 0.796 |

从表3可以看出,由于断面5处于自由流状态,与观测断面表现出不相关性。除此之外,观测断面与相邻上下游断面交通流参数之间均具有较强的相关性。

为了研究上游断面和下游断面交通流量的空间相似性,引入互相关系数对其进行分析。互相关系数 Γ 为

$$\Gamma = \sum \phi_{t_1} \phi_{t_1+\lambda} \quad (9)$$

式中: ϕ_{t_1} 为 t_1 时刻断面流量的时间序列观测值; $\phi_{t_1+\lambda}$ 为 $t_1+\lambda$ 时刻断面流量的时间序列的观测值。

根据式(9),分别计算相邻上游断面与观测断面、观测断面与相邻下游断面的互相关系数,结果分别见图10、11。

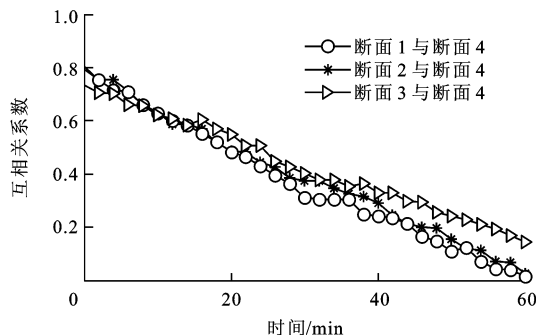


图10 上游断面与观测断面互相关系数

Fig. 10 Cross-correlation coefficients between upstream sections and observation section

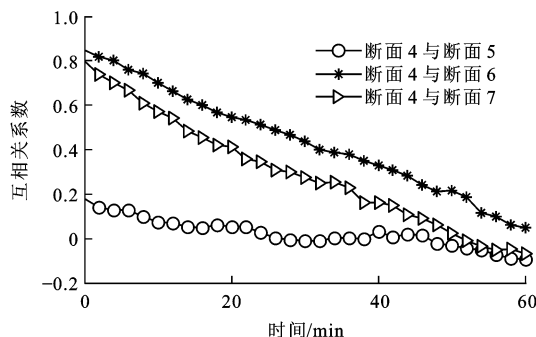


图11 观测断面与下游断面互相关系数

Fig. 11 Cross-correlation coefficients between observation section and downstream sections

从图10可以看出,相邻上游断面交通流参数经过一段时间后与观测断面之间的互相关系数会达到一个极大值,即上游断面交通流参数经过一段时间后会传递到观测断面。

从图11可以看出,相邻下游断面交通流参数经过一段时间后与观测断面之间的互相关系数也会达到一个极大值,即下游断面交通流参数经过一段时间后会回溯影响观测断面。

4 阻塞流状态下进出口匝道交通流特性

4.1 K-S 检验

城市快速路上大量的进出口匝道对快速路的运行具有相当大的影响。进出口匝道车辆的到达在某种程度上具有随机性,描述这种随机分布规律的方法有2种:第1种是以概率论中描述可数事件统计

特性的离散型分布函数为工具,考察在一段时间或距离内到达某场所的交通数量的波动性;第 2 种是以连续型分布函数为工具,研究车速、可穿越空当等交通流参数的统计分布特性。本文根据实测交通流数据,采用 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验方法分析阻塞流状态下城市快速路进出口匝道交通流到达特性。

K-S 检验方法是一种根据样本数据推断其来自的总体是否服从某一特定理论分布,也是一种拟合优度检验方法。相比于卡方拟合优度检验需要将样本空间分成不相交的子集,分组方法不同有时会导致检验结论不同或者检验方法失效的情况,K-S 检验将样本的累积分布函数与确定的理论分布函数相比较,根据差值的大小确定样本是否来自于给定的总体,因此,K-S 检验方法在一定程度上克服了卡方检验的缺点,是比卡方检验更精确的一种非参数检验方法。K-S 检验按照绝对值计算 2 个分布函数之间的最大差异构造检验统计量,假设样本来自于给定分布的总体,在大样本条件下,检验统计量近似服从正态分布,通过计算检验统计量的概率,并根据概率是否小于或大于显著性水平(一般取 0.05)决定是否接受或拒绝原先假设。

4.2 阻塞流状态下进出口匝道交通流特性

在阻塞流状态下,交通流量小,车辆行驶速度较低,车辆之间相互制约强,所测数据具有较大的方差,此时应用负二项分布能较好地拟合实测数据。图 12 为依据调查数据绘制的阻塞流状态下进口匝道交通流量密度曲线与负二项分布密度曲线,图 13 为阻塞流状态下进口匝道交通流量经验分布和负二项分布曲线,从中可以看出,阻塞流状态下交通流量近似于负二项分布。

应用 K-S 检验对阻塞流状态下交通流量是否符合负二项分布进行检验,首先估计负二项分布的

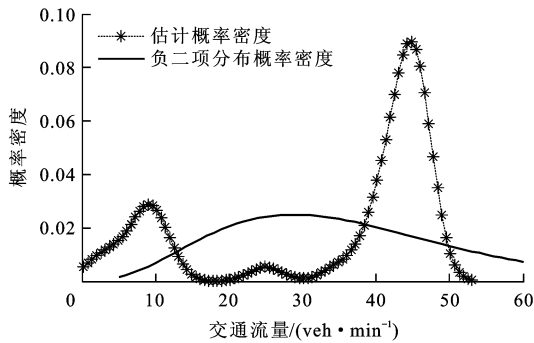


图 12 概率密度

Fig. 12 Probability densities

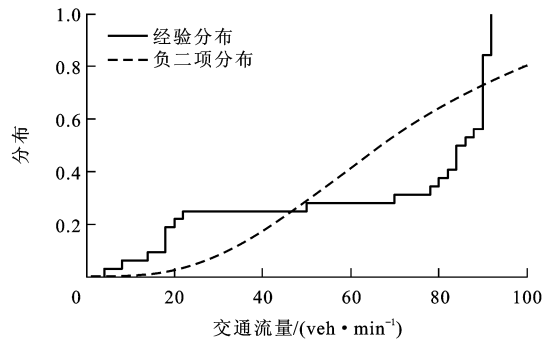


图 13 交通流量分布

Fig. 13 Traffic flow distributions

交通流参数。负二项分布概率 P 为

$$P = C_{k+\beta-1}^{k-1} p^\beta (1-p)^k \quad k \in \mathbf{N} \quad (10)$$

式中: p, β 为负二项分布参数, $0 < p < 1, \beta$ 为正整数; k 为单位时间到达的车辆数量。

由概率论可知,负二项分布的均值为

$$M = \beta(1-p)/p$$

方差为

$$V = \beta(1-p)/p^2$$

当用负二项分布拟合实测数据时,利用 p, β 与均值、方差的关系式,用样本的均值 μ 、方差 S^2 代替 M, V, p, β ,则有

$$p = \mu/S^2 \quad (11)$$

$$\beta = \mu^2/(S^2 - \mu) \quad (12)$$

$$\mu = \frac{\sum_{\gamma=1}^g k_\gamma f_\gamma}{\sum_{\gamma=1}^g f_\gamma} = \frac{\sum_{\gamma=1}^g k_\gamma f_\gamma}{G} \quad (13)$$

$$S^2 = \frac{1}{G-1} \sum_{\gamma=1}^g (k_\gamma - \mu)^2 \quad (14)$$

式中: g 为最大分组数量; k_γ 为第 γ 组到达的车辆数量; f_γ 为第 γ 组发生的次数; G 为实测的分组总数。

依据实测数据,计算阻塞流状态下进出口匝道交通流量基本统计量,结果见表 4。

表 4 基本统计量

Tab. 4 Basic statistics

| 匝道 | G | 最小值 | 最大值 | 中位数 | μ | S^2 | p | β |
|----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------|---------|
| 进口 | 30 | 2 | 46 | 42 | 33.2 | 265.6 | 0.12 | 5 |
| 出口 | 30 | 5 | 30 | 27 | 25.3 | 46.5 | 0.53 | 30 |

根据以上分析,提出原假设为在阻塞流状态下,进口匝道的交通流量符合 p 为 0.12, β 为 5 的负二项分布;出口匝道交通流量符合 p 为 0.53, β 为 30 的负二项分布。利用 K-S 检验,得到概率分别为 0.014、0.024,均小于 0.05,所以不能拒绝原假设,

即认为阻塞流状态下进出口匝道交通流量符合负二项分布。

5 结 语

阻塞流状态是交通流3种状态中的重要形态,本文通过自相关函数、G-P算法、互相关系数和K-S检验分析了城市快速路上阻塞流状态下交通流参数时间和空间分布特性,主要结论如下。

(1)交通流参数自相关函数分析表明,在阻塞流状态下,交通流速度属于平稳时间序列,交通流量和时间占有率属于非平稳时间序列。

(2)为了将非平稳的交通流参数近似化为平稳的时间序列,采用G-P算法进行相空间重构,当时时间延迟分别取2、3、5 min时,确定交通流量相空间重构的嵌入维数为4。

(3)互相关系数分析表明,观测断面的交通流参数受相邻上游断面交通流参数传递的影响,也受相邻下游断面交通流参数回溯的影响。

(4)应用K-S检验,验证了阻塞流状态下城市快速路进出口匝道车辆到达特性符合负二项分布。

本文研究成果可作为交通流短时预测与状态分析的基础,也可以为描述交通流在时空域上的演化规律和分析车辆排队的网络效应奠定理论基础,为交通网络优化、设计等提供参考。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 董春娇.多状态下城市快速路网交通流短时预测理论与方法研究[D].北京:北京交通大学,2011.
DONG Chun-jiao. Theoretical research for short-term traffic flow prediction in multi traffic states on urban expressway network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [2] WANG Yi-bing, PAPAGEORGIOU M. Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a general approach[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(2): 141-167.
- [3] 董春娇,邵春福,诸葛承祥.混合状态下城市快速路交通流短时预测[J].物理学报,2012,61(1):1-9.
DONG Chun-jiao, SHAO Chun-fu, ZHUGE Cheng-xiang. Short-term traffic flow prediction for multi traffic states on urban expressway network[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 1-9. (in Chinese)
- [4] KERNER B S. Three-phase traffic theory and highway capacity[J]. Physica A, 2004, 333(0): 379-440.
- [5] 石小法,喻军皓.快速城市化地区中等城市交通特性[J].交通运输工程学报,2010,10(2):88-94.
SHI Xiao-fa, YU Jun-hao. Traffic characteristics of medium city in fast urbanization area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2): 88-94. (in Chinese)
- [6] 姚荣涵,王殿海.交通流时空描述模型[J].公路交通科技,2008,25(10):111-116.
YAO Rong-han, WANG Dian-hai. Time-space description model of traffic flow[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(10): 111-116. (in Chinese)
- [7] DONG Chun-jiao, SHAO Chun-fu, ZHAO Dan, et al. Short-term traffic flow forecasting based on periodicity similarity[C]//IEEE. Proceeding of the 2011 First IRAST International Conference on Data Engineering and Internet Technology. Bali: IEEE, 2011: 148-151.
- [8] CHIABAUT N, BUISSON C, LECKERCQ L. Fundamental diagram estimation through passing rate measurements in congestion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(2): 355-359.
- [9] HELBING D. Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow[J]. The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems, 2009, 70(2): 229-241.
- [10] KERNER B S, KLENOV S L, HILLER A. Empirical test of a microscopic three-phase traffic theory [J]. Nonlinear Dynamics, 2007, 49(4): 525-553.
- [11] DONG Chun-jiao, SHAO Chun-fu, LI Xia. Short-term traffic flow forecasting of road network based on spatial-temporal characteristics of traffic flow[C]//IEEE. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. Los Angeles: IEEE, 2009: 645-650.
- [12] HEIBING D. Traffic and related self-driven many-particle systems[J]. Reviews of Modern Physics, 2001, 73(4): 1067-1141.
- [13] GOMES G, HOROWITZ R. Optimal freeway ramp metering using the asymmetric cell transmission model[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2006, 14(4): 244-262.