广西科学 Guangxi Sciences 2016,23(3):216～222

网络优先数字出版时间:2016-07-13　　**【DOI】10.13656/j.cnki.gxkx.20160713.005**

网络优先数字出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1206.G3.20160713.0857.010.html

交通瓶颈处局域密度时间序列的长程相关性*

Long-range Correlation Analysis of Time Series at Traffic Bottleneck

贾丽斯[1,2],盘　薇[3],陈　栋[4],薛　郁[1**]

JIA Lisi[1,2],PAN Wei[3],CHEN Dong[4],XUE Yu[1]

(1.广西大学物理科学与工程技术学院,广西南宁　530004;2.广西大学行健文理学院,广西南宁 530005;3.香港城市大学建筑学及土木工程学系,香港;4.重庆大学自动化学院,重庆　400044)

(1.College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004,China; 2.Xingjian College of Science and Liberal Arts,Guangxi University,Nanning, Guangxi,530005,China; 3.Department of Architectural and Civil Engineering,City University of Hong Kong, Hong Kong, China; 4. College of Automation, Chongqing University, Chongqing,400044,China)

摘要:【目的】为研究交通相的相关特性,对交通瓶颈处的交通数据作长程相关性分析。**【方法】**利用元胞自动机建立含有局部缩减道路的三相交通流 KKW 模型,对交通瓶颈处 3 个交通相的流量、速度及密度的时间序列进行研究:分别应用 R/S 分析方法和去趋势涨落分析(DFA)方法对交通瓶颈附近局域密度的时间序列作长程相关性分析,并与交通流元胞自动机 NaSch 模型的长程相关性分析结果进行比较。**【结果】**交通同步流的局域密度具有长程相关性,在自由流和宽运动堵塞时对应的局域密度时间序列具有长程反相关。而 NaSch 模型模拟的局域密度序列无论是自由流还是交通拥堵都呈现长程反相关。**【结论】**交通瓶颈处呈现交通同步流,且交通同步流具有长程相关性。

关键词:交通瓶颈　三相交通流　R/S 分析　去趋势涨落分析(DFA)　长程相关性

中图分类号:U491　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1005-9164(2016)03-0216-07

Abstract:【Objective】The different phases of traffic are identified via performing the long-range correlation for traffic time series at traffic bottleneck.**【Methods】**Based on the Kerner-Klenov-Wolf (KKW) cellular automaton traffic model,a two-lane traffic model with partial reduced lane is proposed. The rescaled range analysis (R/S) method and detrended fluctuation analysis (DFA) method were performed for analyzing local density time series at traffic bottleneck. Moreover,NaSch traffic model was used to carry out similarity discussions.**【Results】**It is found that traffic synchronized flow emerges at a traffic bottleneck and has long-rang correlated characteristics,where free-flow and wide moving jam have long-rang anti-correlation by simulation. The free-flow and wide moving jam reproduced by NaSch model have the long-rang anti-correlation characteristic, compared with the KKW model.**【Conclusion】**The traffic synchronized flow caused by traffic bottleneck has long-rang correlated characteristics.

Key words: traffic bottleneck,three phase traffic flow, R/S analysis,DFA analysis,correlation analysis

收稿日期:2016-03-15

修回日期:2016-05-10

作者简介:贾丽斯(1987－),女,助教,主要从事计算物理与交通流动力学研究。

*国家自然科学基金项目(11262003),广西自然科学基金项目(20140593),广西研究生创新项目(YCSZ2012013)和广西大学行健文理学院基金项目(2015ZKLX04)资助。

**通讯作者:薛　郁(1963－),男,博士生导师,教授,主要从事交通流动力学研究,E-mail:yuxuegxu@gxu.edu.cn。

0 引言

【研究意义】随着机动车辆的快速增加,交通拥堵已成为社会的一大难题,制约了社会经济的发展。道路交通瓶颈是导致交通拥堵的一个重要因素,严重影响道路的通行能力。【前人研究进展】交通实测表明,在交通拥堵消除过程中可以观测到许多非平衡、非线性现象,例如交通相变、交通激波、同步流和走走停停交通等现象[1-4]。Kerner 等[5-8]提出三相交通流理论,认为高速公路交通存在可观察到的 3 类非平衡交通相:畅行相、同步流和宽幅运动阻塞相以及发生的交通相变:畅行相⇔同步流⇔运动阻塞。然而,各个交通相之间的相变目前还没有严格的划分标准。Neubert 等[9]用相关函数方法来识别交通同步流。贺国光等[10-11]运用 R/S 分析方法计算 Hurst 指数,得到交通流时间序列的变化周期。Wu 等[12-13]利用去趋势涨落分析(DFA)方法,辨析周期性边界条件下,无交通瓶颈单车道的交通流元胞自动机KKW-1模型产生的 3 个相:自由流相,同步流相,宽运动阻塞相,发现密度时间序列呈现长程相关特性。【本研究切入点】然而,许多复杂交通拥堵模式一般是由交通瓶颈引起,交通同步流往往出现在多车道交通瓶颈附近,而这方面的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】分别应用 R/S 方法和 DFA 方法研究双车道局部道路缩减附近的交通拥堵,从标度不变性的角度对交通流时间序列进行分析,分别计算交通流局域密度时间序列的 Hurst 指数 H 和标度指数 α,以探讨交通相的相关特性;还分别研究周期边界条件和开放性边界条件下,瓶颈长度对指数的影响,并与 NaSch 模型的相关性结果进行比较。

1 模型及分析方法

1.1 模型

KKW 模型[8]是一个典型元胞自动机模型,它能够模拟出三相交通流现象。基于对称的双车道模型(KKW-1),在右车道上加入一段长为 L_r 的局部缩减路段,建立一个含有道路局部缩减道路的双车道模型,其中局部缩减段从 x_1 处开始到 x_2 长为 L_r。道路结构如图 1 所示。

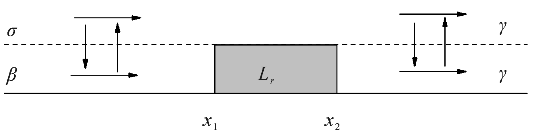

图 1 局部道路缩减的双车道模型结构

Fig. 1 Sketch of two-lane model with partial reduced lane and illustration of the lane changing

KKW 模型[8]演化更新规则如下:

(1)确定性更新($t < t_1 < t+1$):

$D_n \leftarrow D_0 + kv_n(t)$,

$$\Delta = \begin{cases} -a, v_n(t) > v_{n+1}(t), \\ a, v_n(t) < v_{n+1}(t), \\ 0, v_n(t) = v_{n+1}(t), \end{cases}$$

$$v_{des}(t+1) = \begin{cases} v_n(t) + a, v_{s,n}(t) > D_n(t+1) - d_n, \\ v_n(t) + \Delta, v_{s,n}(t) \leqslant D_n(t+1) - d_n, \end{cases}$$

$v_n(t_1) = \max\{0, \min\{v_{max}, v_{s,n}(t), v_{des}(t)\}\}$。

(2)随机更新:

$$\eta_n = \begin{cases} -1, rand < p_b, \\ 1, p_b < rand < p_b + p_a, \\ 0, otherwise, \end{cases}$$

$$p_a(v_n) = \begin{cases} p_{a1}, v_n < v_p, \\ p_{a2}, v_n \geqslant v_p, \end{cases}$$

$$p_b(v_n) = \begin{cases} p_0, v_n = 0, \\ p, v_n > 0, \end{cases}$$

$v_{n+1} = \max\{0, \min\{v_n(t_1) + \alpha\tau\eta_n, v_n(t_1) + \alpha\tau, v_{max}, v_{s,n}(t)\}\}$。

(3)位置更新:$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t)$,

其中 v_{des} 为期望速度,$D_n(t)$ 为同步距离。

利用 Rickert 等[14]在双车道的 NaSch 模型提出的换道规则。车辆换道必须满足 2 个条件:1)是换道动机;2)是安全条件。在该模型中,车辆如果满足以下的 3 个条件车辆即可以换道:

换道动机:(Ⅰ)$gap(i) < \min(v+1, v_{max})$,

安全条件:(Ⅱ)$gap(i) < gap_{other}(i)$,

(Ⅲ)$gap_{back}(i) > gap_{safe}(i)$,

(Ⅳ)$rand() < p_{change}$。

式中 $gap(i)$ 表示当前车道上的第 i 辆车与其同车道且最近邻前车之间的空元胞数,$gap_{other}(i)$ 表示当前车道的第 i 辆车与其目标车道上最近邻前车之间的空元胞数,$gap_{back}(i)$ 表示当前车道上第 i 辆车与目标车道上相邻后车间的空元胞数。

1.2 时间序列 *R/S* 方法

R/S 分析法[15]分为以下步骤:

假设给定一个时间序列 $x(t), t=1,2,\cdots,N$。

步骤 1 构造新的时间序列:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{t} x(t), t=1,2,\cdots,N。$$

步骤 2 将新的时间序列 $u(t)$ 分割成 N_s 个时间长度为 s 的等距区间。在时间 N 内,时间序列 $u_v(i)$ 的平均值为

$$\bar{u}_v(t)=\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{N_s}u_v(i),v=1,2,\cdots,N_s。$$

步骤 3　计算每个区间 v，时间序列 $u_v(i)$ 相对于其平均值 $\bar{u}_v$ 累积偏差 $X(v,s)$，

$$X(v,s)=\sum_{i=1}^{s}(u_v(i)-\bar{u}_v),1\leqslant i\leqslant s。$$

把同一个 s 所对应的累积偏差最大值和最小值的差值称为极差：

$$R(v,s)=\max_{0\leqslant i\leqslant s}\{X(v,s)\}-\min_{0\leqslant i\leqslant s}\{X(v,s)\}。$$

步骤 4　引入时间序列的标准偏差 $S(v,s)$，

$$S(v,s)=\sqrt{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{N_s}u_v^2(i)}。$$

对极差 R 进行重新标度，得到重标极差 $R(v,s)/S(v,s)$，当 $s=1$ 时，$R=S=0$，因而 $R/S=0$ 无意义。当 $s=2$ 时，$R/S=2$ 为定值。因此一般要求 $s\geqslant 3$。如果时间序列在时间上相关，则样本重标极差 $R(v,s)/S(v,s)$ 的平均值与样本长度 s 之间存在标度关系：

$$\langle R(v,s)/S(v,s)\rangle\infty\ s^H,$$

其中 H 为 Hurst 指数：

（Ⅰ）$0<H<0.5$，时间序列反持续性，H 越接近 0 反持续性越强；

（Ⅱ）$0.5<H<1$，持续性，H 越接近 1 持续性越强；

（Ⅲ）$H=0.5$，无持续性。

1.3　去趋势涨落分析(DFA)方法

DFA 算法[16]包含以下步骤：

设所考察的时间序列 $\{x(t)\},t=1,2,\cdots T$。

步骤 1　将时间序列 $\{x(t)\}$ 构造成新的时间序列：

$$y(t)=\sum_{i=1}^{t}[x(t)-\langle x\rangle],$$

其中 $\langle x\rangle=T^{-1}\sum_{i=1}^{T}x(t)$ 为样本的平均值。

步骤 2　将获得的时间序列 $y(t)$ 分割成 n 个长度为 l 的不重叠的子序列，每个子序列的长度都为 l。

步骤 3　在每个子序列内，用函数 $\bar{y}_m$ 对时间序列 $y(t)$ 做最小二乘法拟合，得到拟合曲线 $\bar{y}_m(t)$。

步骤 4　计算每个子序列去趋势相后得到的剩余序列 $y_l(t)=y(t)-\bar{y}_m(t)$。

步骤 5　计算样本在整个时间序列上去趋势涨落的均方根 $F(l)=\sqrt{T^{-1}\sum_{i=1}^{T}y_l^2(t)}$。

步骤 6　在坐标上取$(\lg F(l),\lg(l))$并作双对数坐标图，再用最小二乘法对$(\lg F(l),\lg(l))$对应的点进行拟合得到直线的斜率（标度指数 α 的估计值）。趋势波动的均方根 $F(l)$ 和时间间隔 l 存在幂律关系：$F(l)\sim l^{\alpha}$。其中，

（Ⅰ）$0<\alpha<0.5$ 时，$\{x(t)\}$ 时间序列具有长程反相关性。

（Ⅱ）$\alpha=0.5$ 时，$\{x(t)\}$ 具有标度不变性，意味着该时间序列为短程相关或者时间序列不相关。

（Ⅲ）$0.5<\alpha<1$ 时，$\{x(t)\}$ 具有长程相关性，α 值越大长程相关性越强。

2　模拟和结果分析

在数值模拟中，每个元胞对应的实际长度为 0.5 m，系统道路的长度为 $L=30\ 000$ 个元胞，相当于实际长度 15 km，道路缩减的长度为 $L_r=10\ 000$ 个元胞，车长 $d=15$ 个元胞，对应实际长度为 7.5 m，最大速度为 $v_{\max}=108$ km/h$=60$ 个元胞/s，其中模型具体参数与文献[15]相同，$D_0=60,k=2.55,a=1,P_{a1}=0.2,P_{a2}=0.052,P_0=0.425,p=0.04,d_{\text{safe}}=v_{\max}=60$。每个时步对应的实际时间为 1 s，为了消除暂态的影响数据从 $t_0=10^5$ 步后开始统计，只对后面 $T=10^5$ 个时步的结果进行统计。其中 σ,β,γ 分别为开放边界条件下，进车概率 σ 和 β 以及出车概率 γ。

选取道路缩减的区域从第 $x_1=10\ 000$ 个元胞到第 $x_2=20\ 000$ 个元胞，瓶颈长度 $L_r=10\ 000$ 个元胞。通过设置虚拟探测头在右车道瓶颈口前位于 4.5 km 即第 9 000 个元胞处，测得瓶颈口前测量点的 1 min 平均流量、速度及密度的时间序列数据。并对密度的时间序列数据进行时间序列分析。

2.1　基于 R/S 的交通流长程相关性分析

首先，利用原始的时间序列 $y(t)$ 识别出同步流区域，开放边界条件下进出车概率对 Hurst 指数(H)的影响。然后，运用 R/S 分析方法对探测器测得的密度时间序列进行分析。调整参数 σ 和 β，在 $\sigma=0.1$ 和 $\beta=0.34$，发现系统进入了同步流相（图 2 和 3 为包含同步流的系统斑图）。

数据处理完成后，得到 $<R(v,s)/S(v,s)>\infty s^H$ 的幂律关系（图 4）。

再用最小二乘法对模拟结果进行拟合得到直线的斜率，即 H 的估计值。从图 4 可以看出样本的重标极差 R/S 的平均值与样本长度 s 存在标度关系 $<R/S>\sim s^H$。在 $\sigma=0.1$（图 4a），当 $\beta=0.14$ 交通流处于自由流时，$H=0.4881$；当交通流处于宽运动阻塞时（$\beta=0.47$），$H=0.4407$。而当 $\beta=0.34$，

$\beta=0.46$ 交通流处于同步流时，H 分别为 0.8473 和 0.5303。当进车概率 $\sigma=0.3$ 时(图 4b)也具有相似的结果：当交通流为同步流时 H 大于 0.5，当交通流为自由流或者宽运动堵塞流时 H 小于 0.5。可以看出进车概率 β 对 H 有很大的影响。

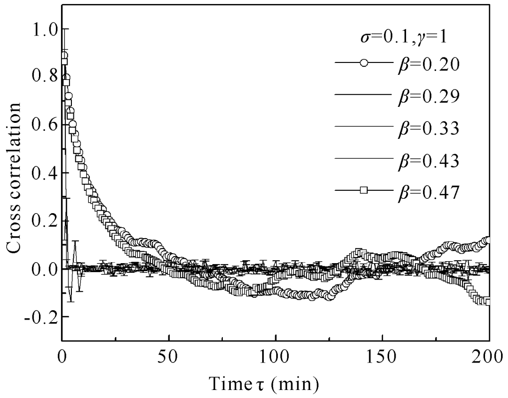

图 2　交叉关联系数

Fig. 2　Cross-correlation between density and flow

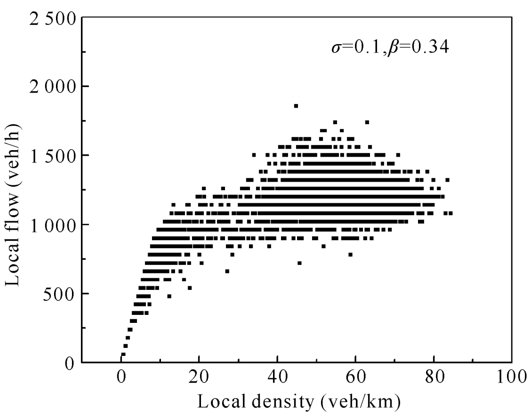

图 3　1 分钟平均流量与密度分布

Fig. 3　The 1-min average flow density diagram

从图 5 可以看出，每条曲线的趋势曲线都随着 β 增加先增加后衰减。曲线中 H 大于 0.5 的那部分曲线对应的是同步流；在低密度时，曲线中 H 小于 0.5 时对应的是自由流；在高密度时，曲线中 H 小于 0.5 时对应的是宽运动堵塞，两条曲线得到的结果与前面识别到的 3 个不同的交通态的进车概率范围一致。密度的时间序列在自由流和宽运动堵塞时都呈现出了长程反相关性，而在同步流时时间序列呈现出长程相关性。两条曲线位置随着进车概率 σ 的增加向前移动，也说明进车概率 σ 对 H 有较大影响。

2.2　基于 DFA 的交通流长程相关性分析

首先研究在周期边界条件下瓶颈长度对标度指数 α 的影响。利用原始的时间序列 $y(t)$ 识别出同步流区域，通过调整参数道路密度 ρ，且在 ρ 处于0.19～0.32 时，发现系统进入了同步流相。

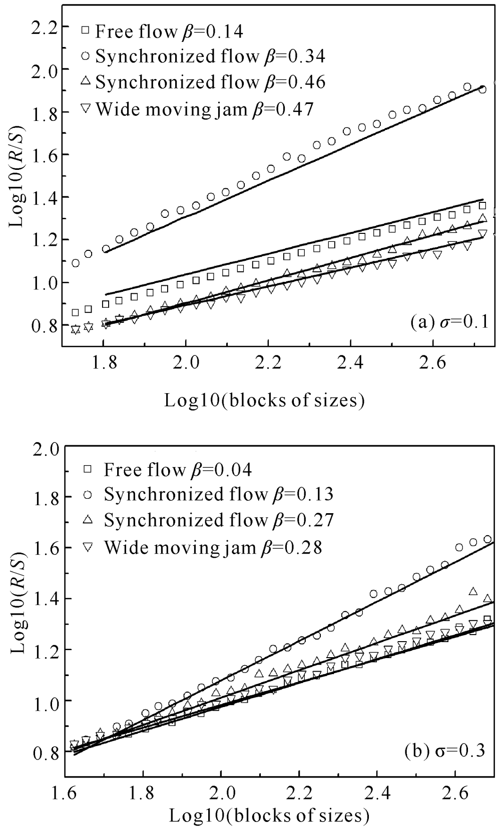

图 4　样本重标极差 R/S 的平均值与样本长度 s 的关系

Fig. 4　Log-log plot and fitting lines for the long-range correlation

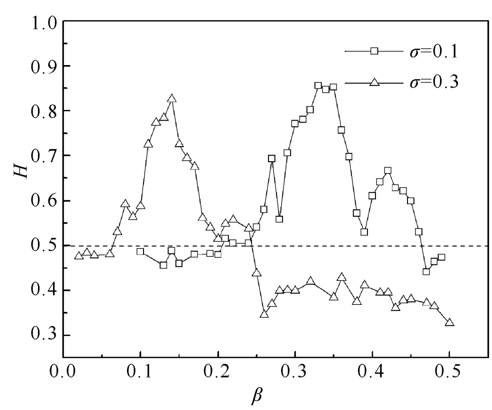

图 5　H 与进车概率 β 的关系

Fig. 5　The Hurst's exponent H against injection β in different injection

图 6 给出当瓶颈长度 $L_r=10\ 000$ 个元胞时，不同密度下的流量与密度的交叉关联函数。当密度 $\rho<0.18$ 和 $\rho>0.33$ 时，交叉关联函数值随着时间周期性变化但并不趋向于 0。在 $0.19<\rho<0.33$ 时，交叉关联函数值随着时间增大趋向于 0，图 7 也给出密度 $\rho=0.27$ 时的基本图，可以看出利用交叉关联函数方法可识别瓶颈口附近出现的同步流。

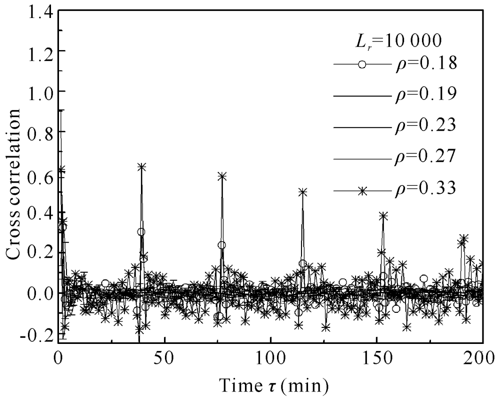

图 6　交叉关联系数

Fig. 6　Cross-correlation between density and flow

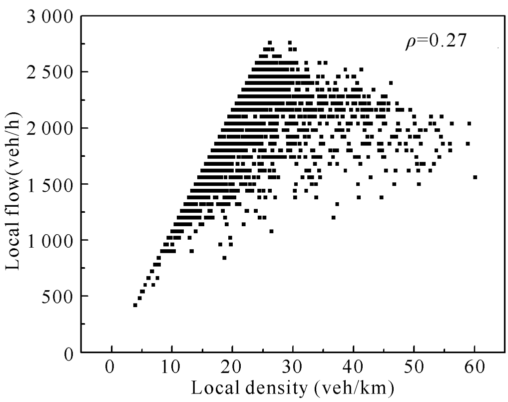

图 7　1 分钟平均流量与密度分布

Fig. 7　The 1-min average flow density diagram

对数据处理完成后，得到 $F(\eta) \sim \eta^{\gamma}$ 的幂律关系。从图 8 可以看出，去趋势波动的均方根 $F(l)$ 和时间增量 l 存在幂律关系 $F(l) \sim l^{\alpha}$。当道路密度 ρ=0.19 和 0.32 时，系统处于同步流标度指数 α 分别为 0.6183 和 0.5279。当系统处于自由流和宽运动堵塞时标度指数 α 均小于 0.5。DFA 分析的结果与图 6 中交叉关联函数分析的结果一致，能识别出在道路交通瓶颈附近存在同步流以及同步流状态下的时间序列具有较强的长程相关性。由图 9 可知，密度为 0.18～0.28 时，标度指数大于 0.5，而且瓶颈长度越长，标度指数就越大于 0.5，表明交通瓶颈附近车辆密度具有较强的长程相关性。

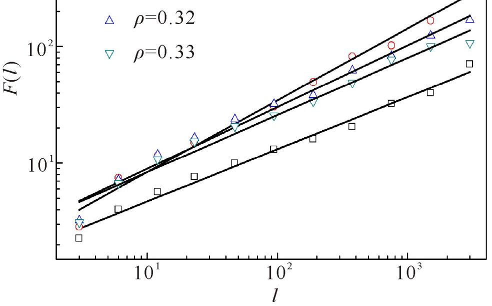

图 8　去趋势波动的均方根 $F(l)$ 和时间增量 l 的标度关系

Fig. 8　Log-log plot of fitting lines between $F(l)$ and l

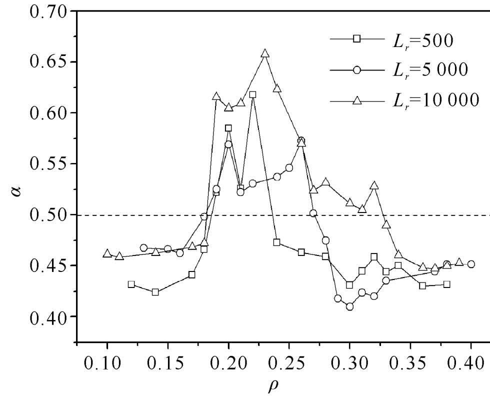

图 9　不同瓶颈长度下标度指数与道路密度的关系

Fig. 9　The scaling exponent α in different L_r

由图 10 可以看出 NaSch 模型在任何密度下，标度指数 α 都小于 0.5，即无论是在自由流还是在拥挤流，时间序列都呈现长程反相关性。而在三相交通流 KKW 模型中，当同步流的道路密度范围内标度指数 α 大于 0.5，时间序列呈现长程相关性。而在自由流和宽运动堵塞中，标度指数 α 小于 0.5，时间序列呈现长程反相关。

对比图 10 和图 11 发现，在 NaSch 模型中的 H 都小于 0.5。从而证明 DFA 方法能够较好的识别系统的长程相关性。

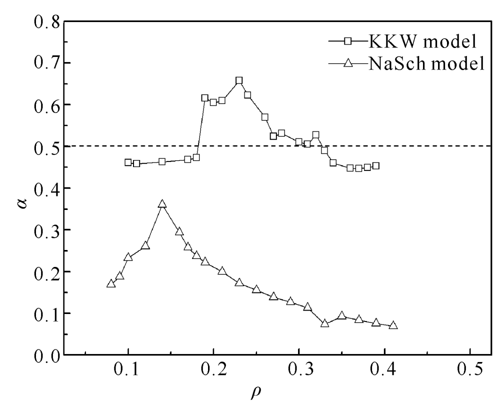

图 10　在 KKW 模型和 NaSch 模型下，标度指数 α 与道路密度的关系

Fig. 10　The profile of the scaling exponent α obtained by KKW model and NaSch model

图 12a 和图 12b 分别为进车概率 $\sigma=0.1$ 和 $\sigma=0.3$ 时，去趋势波动的均方根 $F(l)$ 和时间增量 l 的标度关系。在 $\sigma=0.1$，而 $\beta=0.14$ 交通流处于自由流时，标度指数 $\alpha=0.4577$；当交通流处于宽运动阻塞时（$\beta=0.47$），标度指数 $\alpha=0.3913$。而当 $\beta=0.34$，$\beta=0.46$ 交通流处于同步流时，标度指数 α 分别为 0.8637 和 0.5118。从表 1 也可以看出进车概

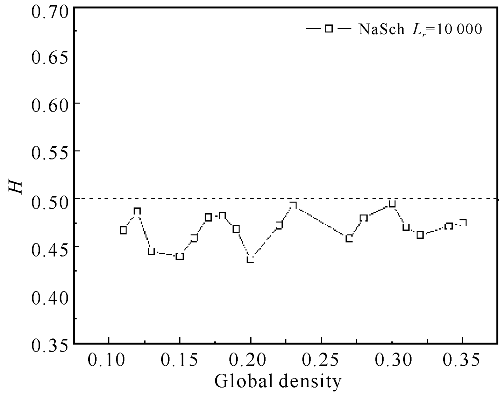

图 11　在 NaSch 模型下 H 与道路密度的关系

Fig. 11　The profile of the exponent H obtained by NaSch model

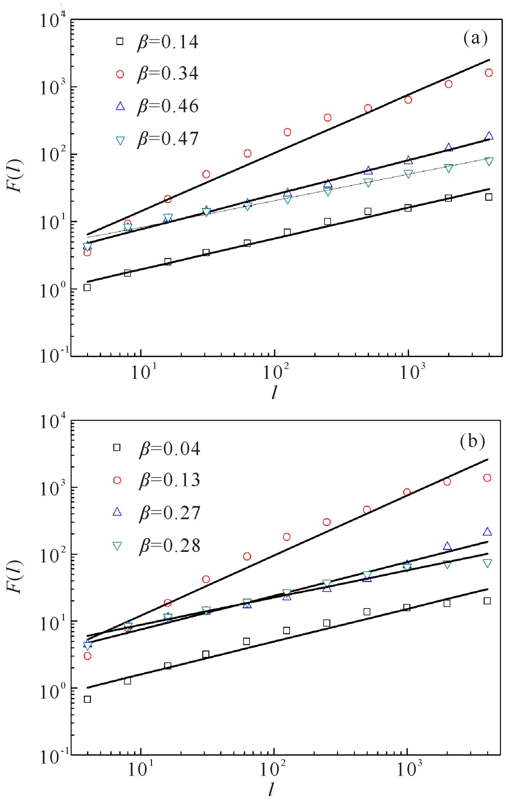

图 12　去趋势波动的均方根 $F(l)$ 和时间增量 l 的标度关系

Fig. 12　Log-log plot of fitting lines between $F(l)$ and l

率 β 对标度指数 α 的值有很大的影响。为了更好的理解进车概率 σ 和 β 对标度指数 α 的影响，研究不同进车概率 σ 下得到的标度指数 α 和进车概率 β 的关系（图 13）。图 13 中每一条曲线都是随着 β 增加先增加后减小，当 $\sigma=0.1$，β 小于 0.29 时车流处于自由流，曲线对应的 α 值小于 0.5，说明自由流的密度时间序列呈现长程反相关性；当 $0.29<\beta<0.46$ 时车流处于同步流，曲线对应的 α 值大于 0.5，说明同步流的密度时间序列呈现长程相关性；当 β 大于 0.46 时产生宽运动堵塞曲线，对应的 α 值衰减到小于 0.5，说明宽运动堵塞的密度时间序列呈现长程反相关性。比较 $\sigma=0.1$ 和 $\sigma=0.3$ 时的两条曲线，发现当 $\sigma=0.3$ 时，标度指数 α 随着进车概率 β 的变化与和 $\sigma=0.1$ 时的结果相似，即密度的时间序列在自由流和宽运动堵塞时都呈现出长程反相关性，而在同步流时时间序列呈现出长程相关性。与图 12 中 $\sigma=0.1$ 的曲线比较，可以看出 $\sigma=0.3$ 时，曲线位置随着进车概率 σ 的增加向前移动，也说明进车概率 σ 对标度指数 α 有较大影响。

表 1　进车概率 β 对 DFA 标度指数 α 的影响

Table 1　Influence of injection β on DFA scaling exponent α

σ	β	α
0.1	0.14	0.4577
0.1	0.34	0.8637
0.1	0.46	0.5118
0.1	0.47	0.3913
0.3	0.04	0.4897
0.3	0.13	0.8962
0.3	0.27	0.5042
0.3	0.28	0.4084

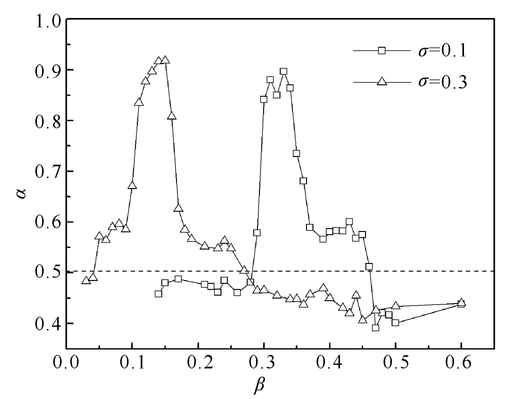

图 13　不同的左车道进车概率 σ 下标度指数与右车道进车概率 β 的关系

Fig. 13　The scaling exponent α against injection β in different injection σ

3　结论

本研究应用 R/S 和 DFA 两种时间序列分析方法对含有瓶颈的双车道交通流的密度时间序列进行分析，得出模型在 3 个不同交通态存在的幂率关系，以及交通瓶颈口附近的密度时间序列的 Hurst 指数 H 和标度指数 α 的值。结果显示，当交通流处于同步流时，时间序列呈现长程相关性，当交通流处于自由流或者宽运动堵塞时，时间序列呈现长程反相关。研究成果与 Wu 等[6-7]的结果一致。说明在周期性边界条件下，瓶颈长度对标度指数有重要影响，瓶颈长度越长，标度指数越大，即瓶颈越长对瓶颈口附近的车

辆相互作用的影响越大，易形成同步流交通。将 NaSch 模型与 KKW 模型对比发现，NaSch 模型的 DFA 标度指数均小于 0.5($\alpha < 0.5$)，表明由 NaSch 模型得出的车流状态无论是自由流还是拥堵交通都是呈现长程反相关。

参考文献：

[1] CHOWDHURY D，SANTEN L，SCHADSCHNEIDER A，et al. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems[J]. Phys Rep，2000，329：199-329.

[2] HELBING D. Traffic and related self-driven many-particle systems[J]. Rev Mod Phys，2001，73(4)：1067-1141.

[3] KERNER B S，REHBORN H. Experimental featurs of characteristics of traffic jam[J]. Phys Rev E，1996，53：1297-1330.

[4] HELBING D. Fundamentals of traffic flow[J]. Phys Rve E，1997，55：3735-3738.

[5] KERNER B S. Complexity of spatiotemporal traffic phenomena in flow of identical drivers：Explanation based on fundamental hypothesis of three-phase theory[J]. Phys Rev E，2012，85：036110-036128.

[6] KERNER B S，KLENOV S L，WOLF D E. Cellular automata approach to three-phase traffic theory[J]. J Phys A，2002，35：9971-10013.

[7] KERNER B S，KLENOV S L. Deterministic microscopic three-phase traffic flow models[J]. J Phys A，2006，39：1775-1809.

[8] KERNER B S. Complexity of synchronized flow and related problems for basic assumptions of traffic flow theories[J]. Net and Spatial Econ，2001，1：35-76.

[9] NEUBERT L，SANTEN L，SCHADSEHNEIDER A，et al. Single-vehicle data of highway traffic，a statistical analysis[J]. Phys Rev E，1999，60：6480-6490.

[10] 贺国光，冯蔚东. 基于 R/S 分析研究交通流的长程相关性[J]. 系统工程学报，2004，19(2)：166-169.
HE G G，FENG W D. Study on long-term dependence of urban traffic flow based on rescaled range analysis [J]. Journal of Systems Engineering，2004，19(2)：166-169.

[11] 贺国光，马寿峰，冯蔚东. 对交通流分形问题的初步研究[J]. 中国公路学报，2002，4：82-85.
HE G G，MA S F，FENG W D. Preliminary study of fractals of traffic flow[J]. China Journal of Highway and Transport，2002，4：82-85.

[12] WU J J，SUN H J，GAO Z Y. Long-range correlations of density fluctuations in the Kerner-Klenov-Wolf cellular automata three-phase traffic flow model[J]. Phys Rev E，2008，78：036103.

[13] WU J J，XU S Y，SUN H J. Detrended fluctuation analysis of time series in mixed traffic flow[J]，Acta Phys Sin，2011，60：019502.

[14] RICKERT M，NAGEL K，SCHRECKENBERG M. Two lane traffic simulation using cellular automata[J]. Physica A，1994，231：534-550.

[15] HURST H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers，1951，116：770-808.

[16] PENG C，BULDYREV S，HAVLIN S. Mosaic organization of DNA nucleotides[J]. Phys Rev E，1994，49：1685-1689.

（责任编辑：尹　闯）