

混合交通流时间序列的去趋势波动分析*

吴建军^{1)†} 徐尚义²⁾ 孙会君²⁾

1) (轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044)

2) (城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京交通大学, 北京 100044)

(2010年3月15日收到; 2010年4月13日收到修改稿)

应用去趋势波动分析法研究交通流时间序列的复杂性, 探讨了混合交通流时间序列演变行为的标度指数. 根据标度指数的变化特征, 进而揭示交通流时间序列所具有的长程相关性和短程相关性. 通过分析发现, 存在一密度 ρ , 当 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 时, 交通流时间序列具有长程相关性; 而当 $\rho < \rho_1$ 或 $\rho > \rho_2$ 时, 交通流时间序列具有短程相关性, 即密度的变化影响着标度指数的变化. 另外分析了在不同慢车比率条件下时间序列的标度指数, 发现慢车比率的变化对标度指数有一定的影响.

关键词: 混合交通流, 去趋势波动分析, 时间序列, 长程相关

PACS: 95.75.Wx, 45.70.Vn

1. 引言

数以万计的各种交通工具在道路网上运动构成的交通系统, 是一个时变的、开放的复杂巨系统, 其组成要素间存在着复杂的非线性关系, 从理论上讲, 必然会产生一些混沌分形现象. 如道路上车辆的走走停停、交通事件引起的交通阻塞和消散, 道路上交通流在稀少、密度加大、拥挤、饱和、堵塞等状态间不断地从有序到无序再到有序反复转化. 交通流通常显现出不规则性和复杂性^[1-8], 当进入或离开交通阻塞时间段时, 会有突然的变化. 进一步分析发现从有序到无序是由于系统受到系统内部的时变与外部各种不确定因素扰动的影响, 而从无序到有序是由于交通流的自组织特性与正确的交通管控作用而形成的. 若能及时发现、预测交通流中的混沌分形现象并加以疏导, 可避免系统本身进一步向无序方向发展.

1994年, 根据DNA(脱氧核糖核酸)机理提出的一种去趋势波动分析方法(detrended fluctuation analysis, DFA), 已被应用于分析非平稳时间序列的分形特征, 可用于计算时间序列的标度指数, 能够

有效克服重标极差分析方法(rescaled range analysis, R/S法)在计算时间序列度指数中存在的缺点^[9], 适合分析时间序列的标度不变性和长程相关性^[10,11]. 在1976年, Mush和Highchi发现实测的交通流数据存在 $1/f$ 的波动理论^[12]. 此后, 有很多学者研究交通流的波动理论, 他们尝试解释Mush和Highchi的结果的同时也发现了其他的交通流波动理论^[13-17]. 1995年, Vojak等人就开始尝试运用多重分形进行交通流数据的短期预测^[18]. 1996年Torok和Kertesz开始正式将分形引入交通流理论^[19]. 由于交通流实际情况的复杂性, 获得的数据大多是非平稳的、是很有限的, 并经常伴有很强的噪声. 为此, 以趋势消除分析(DFA)为基础的多重分形消除趋势(MF-DFA)方法^[20]被用于非平稳时间序列去除噪声. Wu等人^[21]利用DFA方法对Kerner-Klenov-Wolf元胞自动机模型的时间序列进行分析, 得到在不同的交通流状态(自由流, 同步流, 运动堵塞)对应于不同的标度指数.

由于现实中车道上行驶的车辆是由不同的车(货车, 轿车等)组成, 同时车道间存在一定的换道行为. 故本文在对上述研究的基础上, 将DFA法应用于双车道交通流时间序列, 考虑混合交通流以及

* 国家973计划项目(批准号:2006CB705500), 国家自然科学基金(批准号:70871009), 北京市自然科学基金(批准号:8102029), 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-09-0208)以及中央高校基本科研业务费专项基金(批准号:2009JBM137)资助的课题.

† E-mail: jjwu1@bjtu.edu.cn

换道行为对标度指数的影响,从标度不变性的角度对交通流时间序列进行分析,通过计算交通流时间序列的标度指数探讨交通流时间序列的长程相关性和短程相关性及其内在规律. 本文将交通流时空演化复杂性转化为对时间序列相关特性的研究,有助于理解交通系统之所以复杂这一科学论断,也为研究交通流时空演化复杂性提供了一种研究方法. 通过分析时间序列的复杂性,有利于深入理解各种交通状态之间的演化关系及其内在规律. 结论对于揭示交通流时空演化复杂性具有重要的理论意义,同时也为工程技术人员进行交通流管理、控制与预测提供了一种研究方法.

2. DFA 的基本原理

DFA 是一种计算长程相关性的方法,被应用于许多领域,如生理学、股票市场、金融时间序列、物理学、水文径流和气候研究等方面. DFA 能定量描述时间序列标度不变性的存在,可用于非静态、非平稳的数据分析. 与 R/S 方法相比,DFA 分析法的最大优势在于它消除了序列的局部趋势,避免了将时间序列的短程相关、非平稳性虚假地检测为长程相关性^[22-24].

DFA 能较好地估计标度指数,通过标度不变性来刻画时间序列的长程相关特性,即时间序列变化的均方差服从幂律关系

$$F(s) \propto s^a, \quad (1)$$

式中 $F(s)$ 是时间序列波动的标准差, s 是时间增量, a 是标度指数.

2.1. DFA 算法

对于一个非平稳时间序列 $\{x_t, t = 1, 2, \dots, N\}$, 应用 DFA 方法分析的主要步骤如下^[22-24]:

1) 计算时间序列 $\{x_t, t = 1, 2, \dots, N\}$ 的累积离差

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}), \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

2) 把 $Y(i)$ 等分成 N_s 个不重叠的等时间长度 s 的区间,其中 $N_s = [N/s]$ (即取整数). 由于序列长度并不总是时间长度 s 的倍数,使得有小部分序列数据未被利用. 因此,对 $Y(i)$ 的逆序进行同样操作,这样共有 $2N_s$ 个等长度的区间.

3) 对每个区间 v , 用最小二乘法拟合数据,得到

局部趋势. 滤去该趋势后的时间序列记为 $Y_s(i)$, 表示原序列与拟合值之差,即

$$Y_s(i) = Y(i) - P_v(i), i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中, $P_v(i)$ 是第 v 个区间的拟合多项式.

如果拟合多项式采用线性、二次、三次,甚至是更高阶 m 的多项式,则分别记为 DFA (DFA_1), $DFA_2, DFA_3, \dots, DFA_m$ 等. 显然 m 阶的 DFA 滤去了累积离差中的 m 阶趋势成分以及原始序列中的 $m-1$ 阶趋势成分.

4) 计算每个区间滤去趋势后的方差.

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_s^2[(v-1)s + i],$$

$$v = 1, 2, \dots, N_s,$$

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_s^2[N - (v - N_s)s + i],$$

$$v = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s. \quad (4)$$

5) 对所有等长度区间求平均并开方,计算标准 DFA 的波动函数,

$$F(s) = \sqrt{\frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F^2(v, s)}. \quad (5)$$

如果 $\{x_t\}$ 是长程幂律相关的,则 $F(s)$ 与 s 成幂律关系,即(1)式. 下面对(1)式两边取对数得,有

$$\log_{10} F(s) \propto a \log_{10} s. \quad (6)$$

在双对数坐标系 $(s, F(s))$ 中绘制 $a \log_{10} s - \log_{10} F(s)$ 函数关系的散点图,可考察 DFA 波动函数的标度行为.

2.2. 标度指数的含义

a 存在于一定标度区间,可用于表征序列的相关性,能将时间序列区分为随机序列与非随机序列. 对于一个时间序列^[22-24]:

当 $a = 0.5$ 时,说明序列具有标度不变性,意味着该时间序列为一个独立的随机过程.

当 $0 < a < 0.5$ 时,表明原时间序列具有短程相关性.

当 $0.5 < a < 1$ 时,表明原时间序列具有长程相关性(分形),是一个具有持久性的增强时间序列. 也就是说,在时刻 t 以前存在上升(或下降)趋势,隐含着时刻 t 以后总体上也存在上升(或下降)趋势,过去发生事件对未来产生影响,在跨时间尺度的事件之间存在相关性,其趋势增强行为取决于 $a > 0.5$ 的程度.

3. 双车道 Nasch 模型

基于元胞自动机 (CA) 研究交通流特性的模型是在 80 年代提出的, 90 年代得到迅猛发展的一种新的交通流动力学模型. 由于其保留了交通流这一复杂系统的非线性行为和其他物理特征, 因此可以模拟出与实际十分接近的交通流状态, 而且其计算性能也比其他模型高效^[25-27]. 1992 年, Nagel 与 Schreckenberg 提出了著名的 NaSch 模型^[28]. 该模型演化规则很简单, 却能够模拟出一些实际的交通现象, 比如幽灵塞车的形成和流量密度的关系.

本文采用的交通流模型是在 Chowdhury 等人以单车道的 NaSch 模型为基础, 通过引入一套车辆换道规则构造了一个对称的双车道元胞自动机模型^[20]. 下面首先介绍一下元胞自动机的单车道模型. 在 NaSch 模型中, 道路用一维的格子表示, 长度为 L , 每个格子可为空、或被一辆车占据, 车辆的速度 $v = 0, 1, \dots, v_{\max}$, v_{\max} 为最大速度. 车辆由左向右行驶, 取周期边界条件. 在每一个时间步 $t \rightarrow t + 1$, 系统按照下述四个规则更新:

- 1) 加速: $v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{\max})$;
- 2) 减速: $v_n \rightarrow \min(v_n, d_n)$;
- 3) 随机慢化: 以随机减速概率 p 令 $v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0)$;
- 4) 位置更新: $x_n \rightarrow x_n + v_n$.

其中 x_n, v_n 表示第 n 辆车的位置与速度; $d_n = x_{n+1} - x_n - l$ 表示第 n 辆车与第 $n + 1$ 辆车之间的车间距, 第 $n + 1$ 辆车在第 n 辆车前面行驶; l 表示车辆的长度即每辆车占据的元胞数.

上述规则控制着运动的车辆, 为了把该模型规则扩充到双车道交通中^[29-31], 必须引入换道规则来控制两车道上运动的车辆. 通常在双车道元胞自动机模型实施过程中, 一般把每个时间步划分为两个子时间步: 在第一个子步内, 车辆按照换道规则进行换道; 在第二个子步中, 车辆在两条车道上按照单车道的更新规则进行更新^[32].

对双车道交通而言, 换道规则可以是关于车道对称或非对称的^[29-31]. 在本文中, 利用了 Chowdhury 等人以单车道的 NaSch 模型为基础, 构造了对称的双车道模型^[33] (简称 STCA 模型), 并首先对由快、慢车组成的混合交通系统进行了研究, 其换道规则如下式:

1) 换道动机:

$$d_n < \min(v_n + 1, v_{\max}), d_{n, \text{other}} > d_n.$$

2) 安全条件:

$$d_{n, \text{back}} > d_{n, \text{safe}}.$$

式中, $d_{n, \text{other}}$ 是第 n 辆车与旁道上的前车之间的元胞数; $d_{n, \text{back}}$ 是第 n 辆车与旁道上的后车之间的元胞数; $d_{n, \text{safe}}$ 则是确保不会发生撞车的安全距离; $d_n < \min(v_n + 1, v_{\max})$ 表示车辆在本道上不能按照期望的速度行驶; $d_{n, \text{other}} > d_n$ 则表示旁道上的行驶条件要比本道上好.

4. 模拟结果

STCA 模型中 v_{\max}^f 和 v_{\max}^s 分别为快车和慢车的最大速度, ρ 为车道上车辆的密度, R 为慢车所占的比率. 其中参数选取为 $v_{\max}^f = 5, v_{\max}^s = 3, p = 0.3, d_{\text{safe}} = 5$, 每个元胞 1.5 m, 每辆车长 7.5 m, 占 5 个元胞, 系统长度 $L = 2000$. 为了更好的来分析数据, 使系统达到平衡, 把前面的 70000 个时间步丢掉.

由于在 STCA 模型中当车辆换道后仍然按照单车道的规则进行更新, 故当密度小于临界密度时, 车流为自由流, 其典型的时空图如图 1(a) 所示; 当密度大于临界密度时, 车流为拥挤流, 其典型的时空图如图 1(b) 所示. 在拥挤流中会出现自发的堵塞, 系统是堵塞和自由流共存, 宏观上体现为时走时停交通. 随着密度的增大, 堵塞会越来越严重, 如图 1(c).

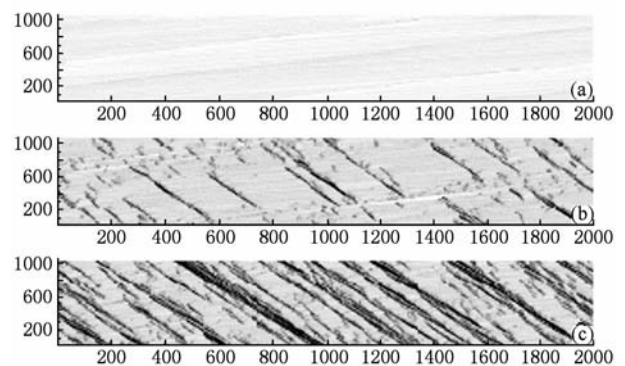


图 1 STCA 模型的典型时空图 (a) $\rho = 0.05$; (b) $\rho = 0.15$; (c) $\rho = 0.25$. 此时的慢车比率为 0.1. 慢化概率 $p = 0.3$. 车流从左向右行驶, 竖直向上为时间演化方向

图 2 中的时间序列对应于图 1 中不同密度下的车辆平均速度. 在同一慢车比率下, 当随着车辆密

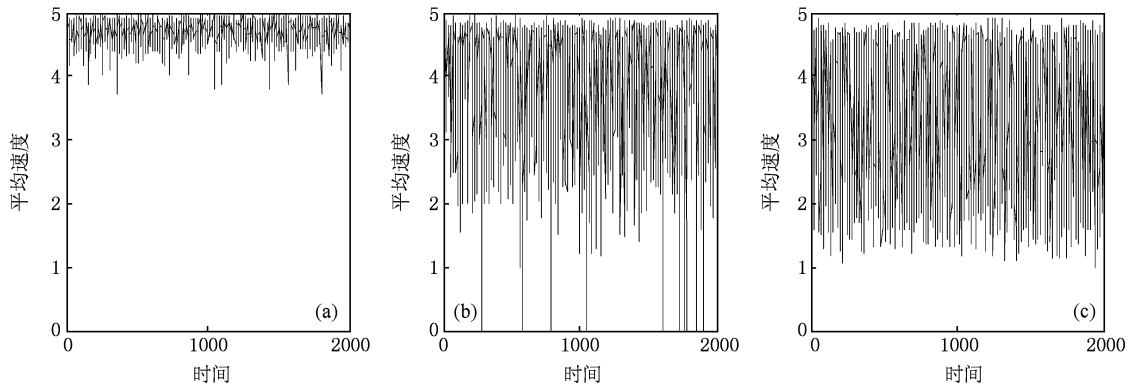


图2 当慢车比率为0.01时不同密度下的车辆平均速度(从(a)一(c)车辆密度依次为 $\rho = 0.05, 0.15, 0.25$)

度的增加,可以明显的从图2中看出平均速度变化逐渐增大.

通过上述模拟我们可以得到交通流的时间序列.接下来,我们主要运用去趋势波动分析方法对时间序列进行分析以便更好的理解交通流的复杂特性.

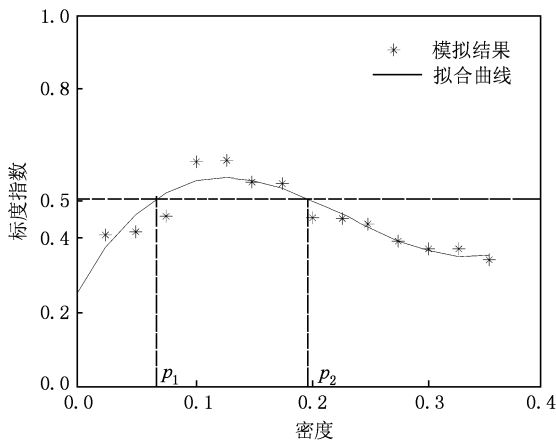


图3 慢车比率为0.01时标度指数与车辆密度关系图

采用DFA方法对交通流时间序列的标度指数进行计算后,得到标度指数与车辆密度关系图,同时运用最小二乘法对模拟结果进行拟合,并得到其对应的拟合曲线,如图3所示.通过图3可以发现,存在一密度 ρ ,当 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 时,标度指数 $0.5 < a < 1$,表明交通流时间序列具有长程相关性,是一个具有持久性增强的时间序列.即车辆在道路上行驶不是一个随机过程,而是一个有偏随机过程,上一个交通流的状态将影响到现在和未来交通流状态的变化,存在着“记忆效应”,亦即交通流时间序列未来变化趋势与其历史变化趋势成正相关,标度指数越大,这种正相关性越强.当密度 $\rho < \rho_1$ 或 $\rho > \rho_2$

时,标度指数 $0 < a < 0.5$,表明在此密度下的交通流时间序列具有短程相关性.当密度处于临界值 ρ_1 和 ρ_2 时,标度指数 $a = 0.5$,说明交通流时间序列具有标度不变性,意味着该时间序列为一个独立的随机过程.在现实交通中,当车辆密度很小的时候车辆之间的行驶是不会相互影响的,此时交通流时间序列就会表现出短程相关性.但是随着车辆密度的不断增大,车辆之间的相关性越来越大,其中任何一辆车速度的变化都会影响整个车道的车辆速度,即在密度 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 时交通流时间序列具有长程相关性.但当密度增大到一定的程度后,即 $\rho > \rho_2$ 时交通流已处于阻塞状态,车辆间的相互影响已经不是很明显,交通流时间序列表现出短程相关性.

同时利用最小二乘法对标度指数和密度之间的模拟数据进行拟合可以得到以下的关系式:

$$a = 0.24941 + 5.7168 \times \rho - 31.352 \times \rho^2 + 45.302 \times \rho^3.$$

由上面的关系式我们可以计算出在不同密度下的标度指数,通过标度指数可以更好的理解交通流时间序列的长程相关性及其内在规律.

通过上述分析,我们知道在不同的密度下交通流时间序列有不同的标度指数即其是否具有长程相关性或短程相关性.下面考虑在不同的慢车比率下标度指数随着密度的变化有何不一样.通过图3和图4可以看出,当慢车比率增大时,标度指数与 $R = 0.01$ 时的有一定变化.从图4可以看出,存在一密度 ρ ,当 $\rho < \rho'$ 时,标度指数 $0.5 < a < 1$,此时的交通流时间序列具有长程相关性,反之则具有短程相关性.可见当慢车比率增大且车辆密度在 $\rho < \rho'$ 的范围内时,道路上慢车逐渐增多导致车道上车辆

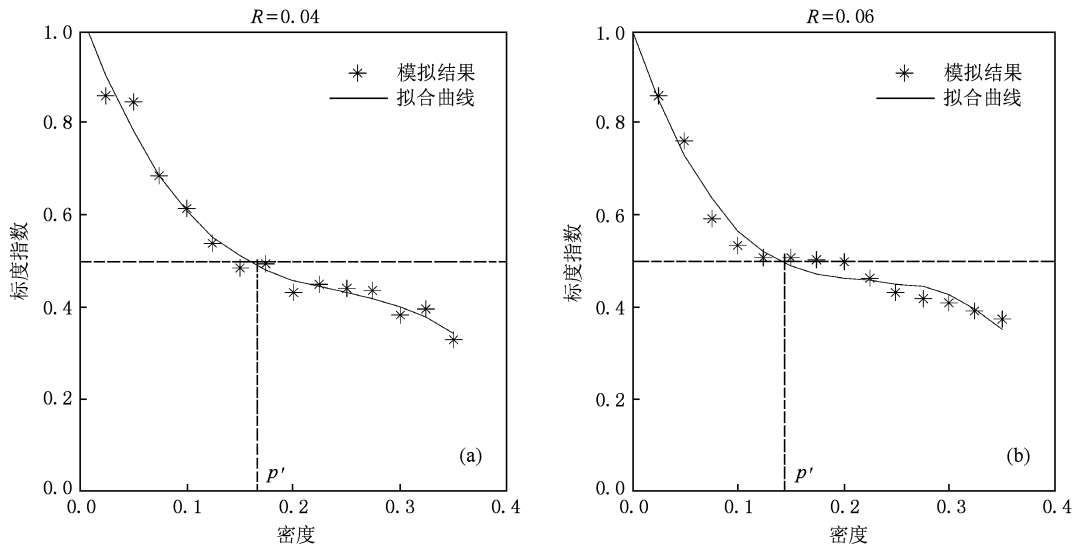


图4 不同慢车比率时标度指数与车辆密度关系图

之间的相互干扰会增大,其中任何一辆车速度的变化都会影响到整个车道上车辆的行驶,导致此时的时间序列具有长程相关性.但当密度达到一定的程度后,车道上的车辆比较多且慢车达到了一定的数量,车道上行驶的车辆之间的影响会逐渐降低导致此时的时间序列具有短程相关性.

另外利用最小二乘法对模拟结果的数据进行拟合,可以得到如下的关系式,当慢车比率 $R = 0.04$ 时,标度指数与密度的关系式为

$$a = 1.0534 - 6.5691 \times \rho + 24.634 \times \rho^2 - 33.346 \times \rho^3.$$

当慢车比率 $R = 0.06$ 时,拟合曲线的关系式为

$$a = 1.0088 - 6.9889 \times \rho + 30.095 \times \rho^2 - 44.275 \times \rho^3.$$

上述分析主要考虑了在不同慢车比率下,标度指数是如何变化的.下面对非对称换道下交通流时间序列的标度指数进行分析.通过图5可以看出,存在一密度 ρ , 当 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 时,标度指数 $0.5 < a < 1$, 表明交通流时间序列具有长程相关性,是一个具有持久性增强的时间序列;反之则表明该时间序列具有短程相关性.此外通过图5与图3的比较发现标度指数随着密度变化的整体趋势没有明显的变化,即非对称换道对标度指数的变化影响很小.另外,可以从图5看出虽然是非对称换道但左右车道

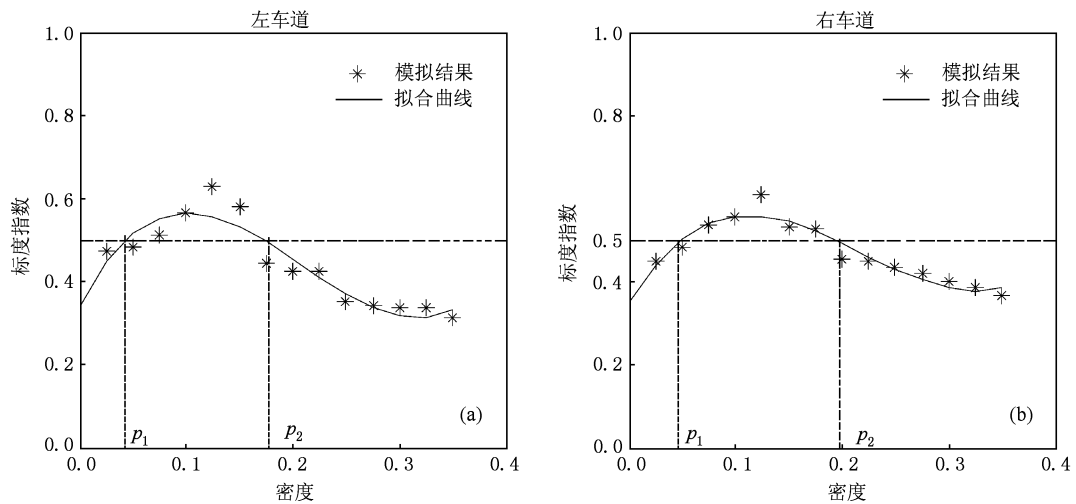


图5 非对称换道条件下慢车比率为0.01时标度指数与车辆密度关系图

时间序列的标度指数差别不是很明显,因为其中一个车道上车辆速度的变化总是会影响到另外一个车道上的车辆导致两车道之间互相影响着共同变化着.

利用最小二乘法对模拟结果的数据进行拟合,可以得到如下的关系式,左车道标度指数与密度的关系式为

$$a = 0.34387 + 4.8916 \times \rho - 31.784 \times \rho^2 + 50.639 \times \rho^3,$$

而右车道的拟合曲线关系式为

$$a = 0.35334 + 4.1081 \times \rho - 24.487 \times \rho^2 + 37.147 \times \rho^3.$$

5. 结 论

本文利用 DFA 分析法对双车道交通流时间序列的特性进行分析,得到了交通流时间序列的标度指数. 结果表明,在不同密度下,交通流时间序列呈现出非常复杂的特性. 当慢车比率 $R = 0.01$, 存在一密度 ρ , 当 $\rho_1 < \rho < \rho_2$ 时, 时间序列具有长程正相关性, 即具有长程幂律关系; 而当 $\rho < \rho_1$ 或 $\rho > \rho_2$ 时, 时间序列表现出短程相关性. 此外,我们还发现在不同的慢车比率下标度指数有着明显的变化,但非对称换道对标度指数却没有太大影响.

- [1] Fu Y P, Gao Z Y, Li K P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5165 (in Chinese) [付印平、高自友、李克平 2007 物理学报 **56** 5165]
- [2] Guo S L, Wei Y F, Xue Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3336 (in Chinese) [郭四玲、韦艳芳、薛郁 2006 物理学报 **55** 3336]
- [3] Lei L, Xue Y, Dai S Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷丽、薛郁、戴世强 2003 物理学报 **52** 2121]
- [4] Chowdhury D, Santen L, Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199
- [5] Helbing D 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 1067
- [6] Kerner B S 2004 *The Physics of Traffic* (New York: Springer)
- [7] van Zuylen H J, van Geenhuizen M S, Nijkampvan P 1999 *Transportation Research Record* **1685** 21
- [8] Qian Y S, Wang H L, Wang C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2115 (in Chinese) [钱勇生、王海龙、王春雷 2008 物理学报 **57** 2115]
- [9] Musha T, Higuchi H 1976 *J. Appl. Phys.* **15** 1271
- [10] Sheng P, Zhao S L, Wang J F, Tang P, Gao L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3347
- [11] Wang W H, Yu C X, Wen Y Z, Xu Y H, Ling B L, Gong X Z, Liu B H, Wan B N 2001 *Chin. Phys.* **10** 139
- [12] Peng C, Buldyrev S, Havlin S 1994 *Phys. Rev. E* **49** 1685
- [13] Lubeck S, Schreckenberg M, Usadel K. D 1998 *Phys. Rev. E* **57** 1171
- [14] Takayasu M, Takayasu H 1993 *Fractals* **1** 860
- [15] Zhang X, Hu G 1995 *Phys. Rev. E* **52** 4664
- [16] Tadaki S, Kikuchi M, Sugiyama Y, Sugiyama S 1999 *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** 3110
- [17] Neubert L, Santen L, Schadschneider A, Schreckenberg M 1999 *Phys. Rev. E* **60** 6480
- [18] Vojak Robert 1995 *Conference on Vehicle Navigation and Information Systems* (VNIS)
- [19] Török J, Kertész J 1996 *Physica A* **231** 515
- [20] Kantelhardt J W 2002 *Physica A* **316** 87
- [21] Wu J J, Sun H J, Gao Z Y 2008 *Phys. Rev. E* **78** 036103
- [22] Yang P, Ho W, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5333 (in Chinese) [杨萍、侯威、封国林 2008 物理学报 **57** 5333]
- [23] He W P, Wu Q, Zhang W, Wang Q G, Zhang Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2862 (in Chinese) [何文平、吴琼、张文、王启光、张勇 2009 物理学报 **58** 2862]
- [24] Kantelhardt J W, Bunde E K, Rego H A, Havlin S, Bunde A 2001 *Physica A* 441
- [25] Wu K F, Kong L J, Liu M R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6275 (in Chinese) [吴可非、孔令江、刘慕仁 2006 物理学报 **55** 6275]
- [26] Wang B H, Wang L, Xu B M, Hu B B 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1926 (in Chinese) [汪秉宏、王雷、许伯铭、胡斑比 2000 物理学报 **49** 1926]
- [27] Guo S L, Wei Y F, Xue Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3336 (in Chinese) [郭四玲、韦艳芳、薛郁 2006 物理学报 **55** 3336]
- [28] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys.* **12** 2221
- [29] Nagatani T 1994 *Physica A* **202** 449
- [30] Rickert M, Nagel K, Schreckenberg M, Latour A 1996 *Physica A* **231** 534
- [31] Wagner P, Nagel K, Wolf D E 1997 *Physica A* **234** 687
- [32] Nagel K, Wolf D E, Wagner P, Simon P 1998 *Phys. Rev. E* **58** 1425
- [33] Chowdhury D, Wolf D. E., Schreckenberg M 1997 *Physica A* **235** 417

Detrended fluctuation analysis of time series in mixed traffic flow *

Wu Jian-Jun^{1)†} Xu Shang-Yi²⁾ Sun Hui-Jun²⁾

1) (State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 15 March 2010; revised manuscript received 13 April 2010)

Abstract

The detrended fluctuation analysis method is applied to analyse the complexity of traffic flow time series and the scale index is obtained, which is a parameter to depict the long term evolutionary behaviour of the mixed traffic flow time series. According to the changes of the scale index, it is shown that the traffic flow time series has long-range correlation characteristics or short-range correlation characteristics. It is found that the traffic flow series shows long-range correlation when the density $\rho_1 < \rho < \rho_2$; and when $\rho < \rho_1$ or $\rho > \rho_2$, the time series displays short-range correlation. That is to say, the vehicle density plays an important role in the changes of the scale index. Additionally, we also found that the ratio of slow vehicles have influence on the changes of the scale index.

Keywords: mixed traffic flow, detrended fluctuation analysis, time series, long-range correlation

PACS: 95.75.Wx, 45.70Vn

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70871009), the Beijing Natural Science Foundation (Grant No. 8102029), the Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-09-0208) and the Foundation Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2009JBM137).

† E-mail: jjwu1@bjtu.edu.cn