

交通流突变点的无标度特征分析

张勇 李诗高

Analysis of scale-free characteristic on sharp variation point of traffic flow

Zhang Yong Li Shi-Gao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 63, 240509 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.240509

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240509>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于压缩感知的振动数据修复方法

Vibration data recovery based on compressed sensing

物理学报.2014, 63(20): 200506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200506>

用于混沌时间序列预测的组合核函数最小二乘支持向量机

Combination kernel function least squares support vector machine for chaotic time series prediction

物理学报.2014, 63(16): 160508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.160508>

基于能力区域的交通状态预测方法

Traffic state prediction based on competence region

物理学报.2014, 63(14): 140504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.140504>

一种基于相关分析的局域最小二乘支持向量机小尺度网络流量预测算法

A local least square support vector machine prediction algorithm of small scale network traffic based on correlation analysis

物理学报.2014, 63(13): 130504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.130504>

随机摄动强跟踪粒子滤波算法

Study on stochastic perturbation strong tracking particle filter

物理学报.2014, 63(11): 110505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110505>

交通流突变点的无标度特征分析*

张勇† 李诗高

(武汉轻工大学数学与计算机学院, 武汉 430024)

(2014年6月25日收到; 2014年9月10日收到修改稿)

交通流时间序列在不同时间尺度上具有不同的波动特征. 为了分析交通流的突变特征, 以一段实际的交通流量序列为研究对象进行实证研究. 采用小波变换的方法求得交通流在不同尺度上的突变点, 按照小波函数过零点数目将交通流的尺度划分为若干层次, 并分析了交通流突变的层次性. 计算表明: 以突变点数目为测度时, 在一定的尺度范围内, 交通流在突变层次上的突变点数目满足自相似性特征. 因此, 交通流的突变在不同尺度上具有无标度性.

关键词: 交通流, 突变点, 小波变换, 无标度性

PACS: 05.45.Tp

DOI: 10.7498/aps.63.240509

1 引言

交通流时间序列是交通系统最直接和最直观的反映. 由于受各种内因和外因的作用, 如时间、天气和道路布局等, 交通流时间序列具有很强的非线性、非平稳和自相似特征^[1-6]. 分析交通流序列的非线性复杂特征对交通预测、交通控制和交通行为分析都具有重要的理论意义和实际价值^[6-10]. 交通流的变化趋势包括增大和减小两种, 交通流中的突变点为两种趋势交替转化的点. 交通流的突变点一般对应着明确的物理因素^[11-20], 例如交通状态转移^[11,17]和异常交通事件^[15,16]等. 因此, 对交通流突变点的检测和分析尤为重要.

小波变换是一种重要的时频变换方法, 适合于处理非平稳信号, 采用小波变换方法可以很方便地检测到交通流序列中的突变点^[17]和辨识交通状态模式^[14,15]. 文献^[17]通过对仿真和实际交通序列的计算表明, 小波变换方法能有效地检测到交通流序列中的奇异点或突变点, 并且建议小波函数采用墨西哥帽子函数. 由小波检测方面的知识可知, 序列的波动特征与研究尺度有关^[21-24], 研究交通流

的非线性波动应该考虑到采用的时间尺度. 同理, 交通流序列在不同时间尺度上应具有不同的突变特征.

本文采用小波变换的方法, 研究交通流在不同尺度下的突变, 并定义了交通流的突变层次, 对突变层次上突变点数目和尺度之间的无标度性进行实证研究. 研究结果揭示了非平稳交通流突变的规律性特征.

2 交通流时序的小波变换

设函数 $f(x)$, 小波变换的定义^[14,18-20]为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (1)$$

其中, 参数 a , b 分别为尺度因子和时移因子. 通过改变 a 和 b 的值可以获得函数 $f(x)$ 在不同尺度 a 下, 任意位置 b 的局部信息. 函数 $\varphi(x)$ 是小波函数, 这里采用墨西哥帽子函数

$$\varphi(x) = (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad (2)$$

该函数为连续光滑的偶函数, 在 $t = 0$ 时取最大值 1, 在 $t \rightarrow \infty$ 时趋于 0.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61201452, 61179032) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ballack-13@163.com

与(1)式对应的离散小波变换方程为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=1}^N f(n\Delta x) \cdot \varphi\left(\frac{n\Delta x - b}{a}\right), \quad (3)$$

其中 Δx 为连续函数 $f(x)$ 离散化的时间间隔. 将(3)式应用到对交通流时序 $q(n) (n = 1, 2, \dots, N)$ 的分析中, 得到

$$W_q(a, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=1}^N q(n) \cdot \varphi\left(\frac{n-t}{a}\right), \quad (4)$$

其中, a 和 t 是以 $q(n)$ 的采用样间隔 Δn 为单位. 该函数可以看成是采用小波函数(2)式对序列 $q(n)$ 在时刻 t 以尺度 a 进行平滑后的结果^[19]. 由(4)式通过尺度 a 的缩放可以分析交通流序列 $q(n)$ 在任意时间尺度 a 上的局部特征.

一般来讲, 序列值总可以分为高和低两种状态, 其变化趋势也可以分为增大和减小. 为了说明交通流在不同时间尺度上具有不同的波动特征, 本文以图1的一段交通流量时间序列进行实证分析. 该数据采集地点为北京市二环路外环复兴门桥南的某断面, 数据采集时间为2006-7-24—2006-7-30, 为一周的周一到周日, 统计间隔为 $\Delta n = 10 \text{ min}$, 序列长度为 $N = 1080$. 分别计算该序列在尺度 $a = 50, 10, 5$ 下的小波变换结果 $W_f(a, t)$, 如图2所示, 仅列出了周二, 即 $145 \leq t \leq 288$ 部分.

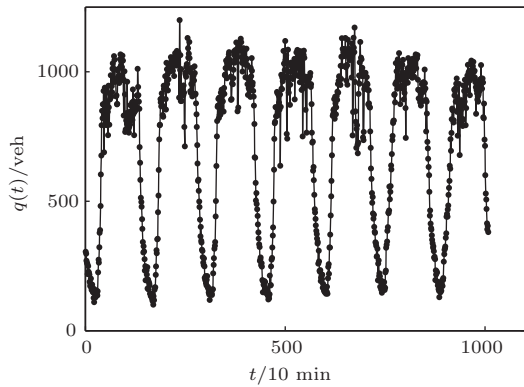


图1 交通流量时间序列

由图2可见, 这段交通流时序在较大的尺度 $a = 50$ 上的变化较为缓慢, 变化趋势为增大然后减小. 随着尺度 a 的减小, $W_f(a, t)$ 对该交通流序列的描述更加细致, 曲线显得更加复杂, 表现出更为频繁的增大和减小两种趋势的交替. 如在 $250 \leq t \leq 288$ 时段, 在 $a = 50$ 尺度上, 序列为减小的趋势, $W_f(a, t)$ 存在一个过零点; 但在 $a = 10$ 尺度上, 序列表现为先增加后减小, $W_f(a, t)$ 存在两

个过零点; 当 $a = 5$ 时, 序列波动为增加、减小、增加再减小, $W_f(a, t)$ 存在三个过零点. 因此, 相同的交通流在不同时间尺度上表现出来的波动形式是不同的, 且采用的分析尺度越小, 小波函数的过零点越多. 小波变换就是通过这种对观测尺度的调整来分析信号在各尺度上的表现特征, 本文主要是分析交通流在不同尺度上的突变特征及相应的突变规律性.

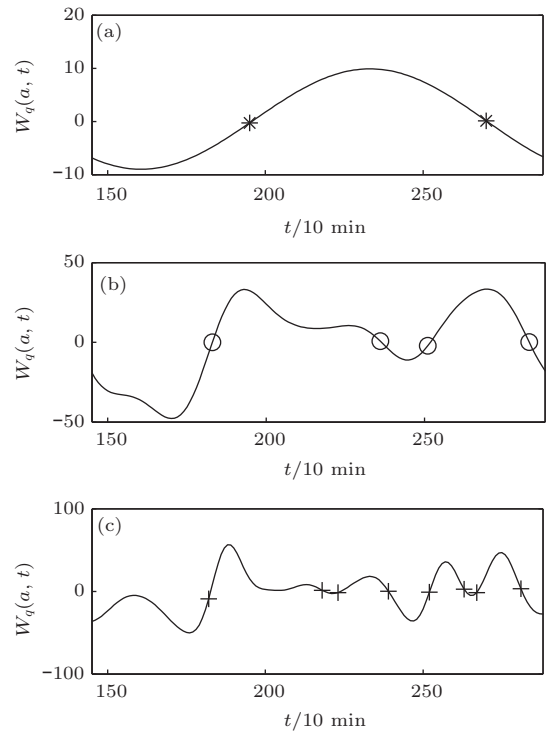


图2 交通流时序的小波变换 (a) $a = 50$; (b) $a = 10$; (c) $a = 5$

3 交通流时序的突变

由上节分析, 交通流在不同的观测尺度上具有不同的波动形式, 也应该具有不同的突变特征. 交通流突变点为序列增大和减小两种变化趋势的交替点, 即序列的拐点. 按照小波理论, 该突变点可以由小波变换检测得到. 下面简要描述突变点的检测原理和方法. 由于小波函数(2)式为高斯平滑函数的二阶导数

$$\varphi(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}, \quad (5)$$

其中, $\theta(t)$ 为高斯平滑函数,

$$\theta(t) = -e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (6)$$

由(4)式, $W_q(a, t)$ 为 $q(n)$ 与 $\frac{1}{\sqrt{a}}\varphi\left(\frac{n}{a}\right)$ 在时刻

t 的卷积和, 根据卷积的性质, 有

$$\begin{aligned}
 W_q(a, t) &= \frac{1}{\sqrt{a}} q(n) * \varphi\left(\frac{t-n}{a}\right) \\
 &= a^{\frac{3}{2}} q(n) * \frac{d^2\theta\left(\frac{t-n}{a}\right)}{dt^2} \\
 &= a^{\frac{3}{2}} \frac{d^2\left(q(n) * \theta\left(\frac{t-n}{a}\right)\right)}{dt^2}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

由(7)式, $W_q(a, t)$ 的过零点即为 $q(n) * \theta\left(\frac{t-n}{a}\right)$ 的拐点, 或突变点. 而 $q(n) * \theta\left(\frac{t-n}{a}\right)$ 为序列 $q(n)$ 经高斯函数(6)式在 t 时刻, 按尺度 a 平滑的结果, 在 $t = n$ 处保留了 $q(n)$ 的性质, 且 $q(n) * \theta\left(\frac{t-n}{a}\right) = q(n)$. 因此, $W_q(a, t)$ 的过零点可以认为是 $q(n)$ 的突变点^[19]. 对某一尺度 a , 其突变点判断方法为, 如果

$$W_q(a, t)W_q(a, t+1) < 0, \quad (8)$$

则认为 t 时刻发生了突变.

如图2, $q(n)$ 在三种尺度 $a = 50, 10, 5$ 下, $W_q(a, t)$ 分别具有 2, 4 和 8 个过零点. 其对应的突变时间分别标注在图3的交通流时序上. 由图3(a)可见, 在尺度 $a = 50$ 时, 存在突变时间 8:30 和 21:00, 在 8:30—21:00 时段, 交通流处于白天的较大流量, 而其余时段为夜晚的较低流量时间. 在图3(b)中, 取尺度 $a = 10$ 时, 突变时间点为 6:00, 15:20, 17:50 和 23:50, 4 个突变点将一天的交通流量划分为 00:00—6:00 和 23:50—24:00 的晚低峰; 6:00—15:20 的白天高峰, 流量持续增大; 15:20—17:50 的白天低峰, 流量呈下降趋势; 17:50—23:50 为晚高峰, 流量先增加然后逐步衰减. 当采用更小的尺度 $a = 5$ 进行小波变换时, 此时小波分辨率更高, 检测结果更加细致, 突变点增多, 交通流在小的尺度下突变比较频繁, 如图3(c)所示. 由以上分析, 交通流在不同时间尺度上的突变点是不同的, 且突变时间前后的交通流表现出不同的性态. 因此, 在对交通流进行分析时, 应该考虑到研究尺度.

分别计算尺度为 $a = 1, 2, \dots, 1000$ 时, 序列的突变时刻 t , 并将结果列于图4. 图4中的点 $(t, \ln(a))$ 表示尺度为 a 时, 序列在 t 时刻发生了突变. 由图4可见, 在较大的尺度 a 上, 交通流的突变点较少, 随着尺度的减小, 突变点数目会在一定的范围内保持不变, 然后交通流的突变会沿着 a 发生分岔, 产生新的突变点.

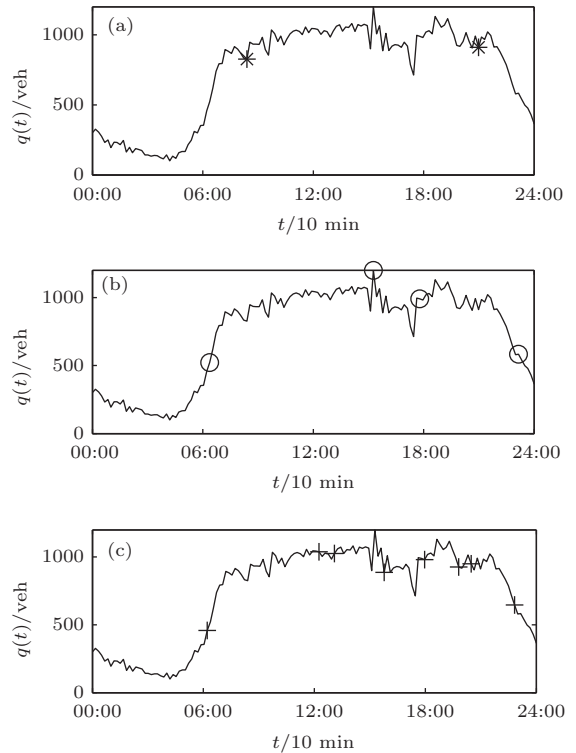


图3 交通流时序的突变点 (a) $a = 50$; (b) $a = 10$; (c) $a = 5$

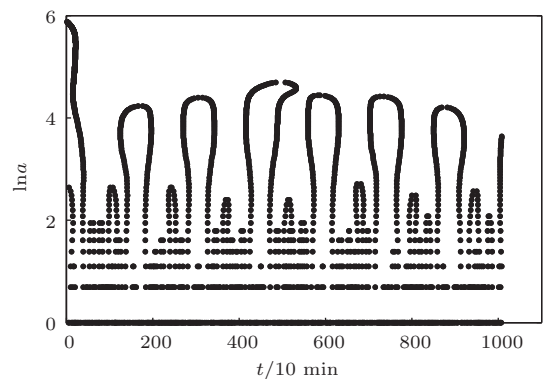


图4 交通流时序的突变

4 交通流突变的层次性和自相似性

由如上的分析可知, 交通流的波动特征是按尺度变化的, 随着分析尺度 a 的减小, 交通流时序的突变点数目呈增多趋势. 如图4所示, 随着小波尺度 a 的减小, 在某些尺度 a 下会产生新的突变点, 说明在该尺度下交通流的波动规律发生了改变. 这里主要研究产生新突变点的尺度 a 与对应突变点数目 $N(a)$ 之间对应关系.

下面以图4中 $1 \leq t \leq 144$ 时间段的突变点为例说明交通流突变的层次性, 如图5所示. 由图5可以读出产生新突变点所对应的尺度 a , 即图

中横线与纵轴的交点, 并可以得到该时间尺度下的突变点数目 $N(a)$. 由图 5 可见, 该段交通流在 8 个尺度 a 上产生了新的突变点, 而在其余的时间尺度上突变点数目不会产生新的改变, 即可以认为该段交通流的波动规律主要体现在这 8 个尺度上. 这里定义交通流的突变层次, 为 8 条线对应的 a . 在这 8 个突变层次之间, 即图 5 中相邻两条横线所对应的尺度之间, 交通流具有相似的波动特征. 因此, 交通流的突变具有层次性. 需要指出的是, 图 5 中 a 和 t 的精度为 $q(n)$ 的取样间隔 $\Delta n = 10 \text{ min}$, 突变层次 $\ln a = 0$, 即 $a = 1$ 尺度上的突变点为 $q(n)$ 在尺度 Δn 上的突变点, 因此对相同时间段内的交通流, 采样间隔越小, 则反映在图 4 和图 5 中的突变层次将划分得越多, 对交通流突变的描述会越细致.

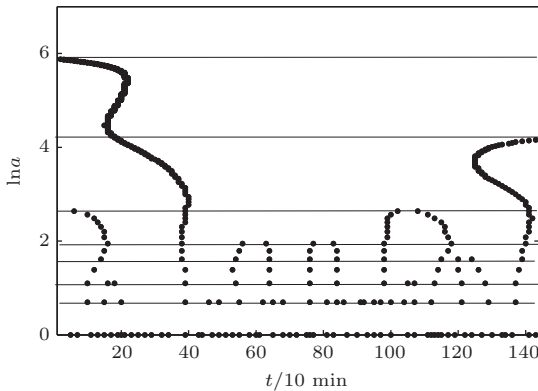


图 5 突变的层次性示意

由图 4 可以得到图 1 的流量序列所有的出现新突变点的 a 和 $N(a)$, 并将 $(\ln a, \ln N(a))$ 作图, 如图 6 所示. 在 $0 \leq \ln a \leq \ln(12)$ 时, $\ln a$ 和 $\ln N(a)$ 满足线性的关系, 通过线性拟合该部分点列得到直线

$$\ln N(a) = -1.1212 \ln a + 5.9537. \quad (9)$$

令 $N_0 = e^{5.9537}$, $\tau = -1.1212$, 则

$$N(a) = e^{5.9537} a^{-1.1212} = N_0 a^\tau. \quad (10)$$

由 (10) 式, 如果以 $N(a)$ 为测度, 当 a 减小时, 突变点数目 $N(a)$ 是增大的. 且 a 减小 $1/\lambda$ 时, 突变点数目 $N(\lambda a)$ 为

$$N(\lambda a) = N_0 (\lambda a)^\tau = N(a) \lambda^\tau, \quad (11)$$

即突变点数目增大倍数为 λ^τ .

由 (11) 式, 以 $N(a)$ 为测度时, $N(a)$ 与 $N(\lambda a)$ 是自相似的, 交通流突变点数目满足无标度特征. 当已知某一突变层次 a 上突变点数目时, 可以推出

另一突变层次上的突变点数目. 且存在一个与尺度 a 无关的量 τ , 即标度指数, 代表了随着尺度减小产生新突变点的速度, τ 越小, 则产生新的突变点越快. 需要指出的是, 交通流突变点的自相似性规律只是在一定的尺度范围内存在.

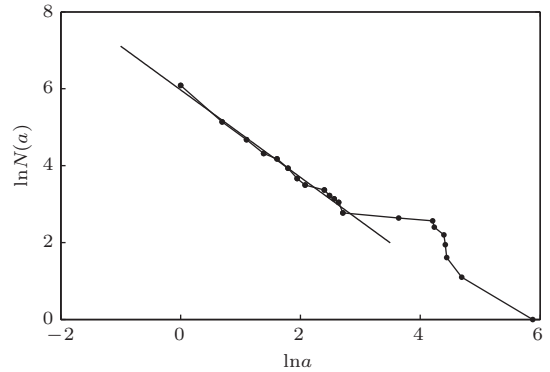


图 6 突变尺度层次和突变点数目对应关系

5 结 论

本文主要从突变的角度揭示看似规律不明显的非平稳交通流时序的部分演化特征. 通过计算和分析表明, 交通流的波动特征依赖于研究的尺度, 在对交通流进行分析时应考虑到所采用的尺度. 按照交通流在不同时间尺度上的突变点数目, 可以将交通流的突变情况划分为几个主要突变层次. 当以突变点数目为测度时, 交通流在突变层次上的突变点数目在一定范围内具有无标度特征.

通过分析不同尺度的交通流, 不光有助于揭示系统的规律性特征, 同时对解决实际交通问题具有一定的现实意义. 例如文献 [7—10] 通过在路口设置指示牌对进入各条路径的车辆进行诱导, 系统的关键是指示牌实时发布的诱导信息. 考虑到实际交通流的非平稳性和多尺度特征, 可以采用交通流在不同时间和空间突变尺度上的值作为反馈参数, 对各路径上的交通运行状况进行合理的评估和预测, 并应用到交通控制和诱导中来. 本文只是以特定的序列进行了实证研究, 有关交通流状态突变的一般性结论还需要进一步的实证分析和论证. 另外, 这里研究的是突变点日数的自相似性特征, 交通流在不同尺度上的突变时间是否具有规律性还将进一步的研究.

感谢北京交通大学交通运输学院的关伟教授提供的实验数据.

参考文献

- [1] Zhang H B, Sun X D, He Y L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040505 (in Chinese) [张洪宾, 孙小端, 贺玉龙 2014 物理学报 **63** 040505]
- [2] Xiang Z T, Chen Y F, Li Y J, Xiong L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 038903 (in Chinese) [向郑涛, 陈宇峰, 李昱瑾, 熊励 2014 物理学报 **63** 038903]
- [3] Shan P J, Shen J S 2007 *Chin. Phys.* **16** 365
- [4] Fang Y, Chen J Z, Peng Z Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 108902
- [5] Shen B, Gao Z Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3284
- [6] Zhang Y 2011 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [张勇 2011 博士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [7] Dong C F, Ma X, Wang B H, Sun X Y 2010 *Physica A* **389** 3274
- [8] Dong C F, Ma X, Wang G W, Sun X Y, Wang B H 2009 *Physica A* **388** 4651
- [9] Chen B K, Xie Y B, Tong W, Dong C F, Shi D M, Wang B H 2012 *Physica A* **391** 2730
- [10] Dong C F, Carol S P 2011 *Inform. Sci.* **181** 5042
- [11] Samant A, Adeli H 2000 *Comput-Aided. Civ. Inf.* **15** 251
- [12] Adeli H, Ghosh-Dastidar S 2004 *J. Transp. Eng. ASCE* **130** 94
- [13] Samanwoy G D, Adeli H 2003 *Comput-Aided. Civ. Inf.* **18** 325
- [14] Jiang X, Adeli H 2004 *Comput-Aided. Civ. Inf.* **19** 324
- [15] Karim A, Adeli H 2002 *J. Transp. Eng. ASCE* **128** 232
- [16] Karim A, Adeli H 2003 *J. Transp. Eng. ASCE* **129** 57
- [17] Zheng Z D, Washington S 2012 *Trans. Res. C* **25** 18
- [18] Zheng Z, Ahn S, Monsere C M 2010 *Accid. Anal. Prev.* **42** 626
- [19] Zheng Z, Ahn S, Chen D J, Laval J 2011 *Trans. Res. B* **45** 1378
- [20] Zheng Z, Ahn S, Chen D J, Laval J 2011 *Trans. Res. B* **45** 372
- [21] Mallat S, Hwang W L 1992 *IEEE Trans. Inform. Theory* **38** 617
- [22] Mallat S 1991 *IEEE Trans. Inform. Theory* **37** 1019
- [23] Xu Y S, Weaver J B, Healy D M, Lu J 1994 *IEEE Trans. Image. Pro.* **3** 747
- [24] Chen J Q, Zhou Y F 2008 *Physics* **37** 24 (in Chinese) [程景全, 周宇峰 2008 物理 **37** 24]

Analysis of scale-free characteristic on sharp variation point of traffic flow^{*}

Zhang Yong[†] Li Shi-Gao

(Department of Mathematics and Computer, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430024, China)

(Received 25 June 2014; revised manuscript received 10 September 2014)

Abstract

Traffic flow time series at different time scales have different fluctuation characteristics. In order to analyze the discontinuity characteristics of traffic flow, a traffic volume time series is adopted as an empiric study objective. The multi-scale sharp variation points of the sequence are obtained by using wavelet transform. The scales are divided based on the corresponding number of the zero-crossing points of wavelet transform, and the hierarchy of the scales is analyzed. The results of calculation indicate that the number of sharp variation points of the traffic flow on a mutation scale is self-similar in a certain scale if the number of the sharp variation points is used as a measure. So, sharp variations of the traffic flow in different scales are scale-free.

Keywords: traffic flow, sharp variation point, wavelet transform, scale free

PACS: 05.45.Tp

DOI: [10.7498/aps.63.240509](https://doi.org/10.7498/aps.63.240509)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61201452, 61179032).

[†] Corresponding author. E-mail: ballack-13@163.com