

城市道路交通流的复杂度研究

张美坤 黄晓明 徐志红

东南大学，交通学院，南京 210096

摘要：为了定量描述交通流系统的复杂度，本文在介绍统计复杂度及其性质的基础上，将其引入路段交通流的复杂度量化分析，并以南京3条典型路段上的交通流为样本，通过比较分析不同路段上的交通流复杂度与交通冲突率的关系，以期得出交通冲突率与路段交通流的复杂度的回归模型。结果表明：特征量复杂度能够有效测度系统的随机性和非线性，且交通流复杂度与非严重交通冲突率的相关性比较好，适于实测交通流的复杂性测度分析，可为研究交通系统的复杂度研究提供新的思路。

关键词：交通流复杂度；交通冲突率；统计复杂度；回归分析

中图分类号：U491.1*12

文献标识码：A

文章编号：1672-4747(2009)03-0102-05

Study on the Complexity of Traffic Flow on Urban Road

ZHANG Mei-kun HUANG Xiao-ming XU Zhi-hong

School of Transportation, Southeast University,

Nanjing 210096, China

Abstract: In order to quantitatively describe the complexity of traffic flow system, the paper analyzed the traffic flow complexity on road based on introducing the statistical complexity and its property. Taking the traffic flow on three typical road sections in Nanjing as a sample, and by comparing and analyzing the relation between the traffic flow complexity and traffic conflict rate on the different sections, the paper drew out a regression model of the traffic flow complexity and traffic conflict rate. The results showed that: the characteristic complexity is an effective measure for the random and non-linear systems, and the relevance between traffic flow complexity and non-serious traffic conflict rate is better enough for measuring and analyzing the traffic flow complexity, which supports a new idea on studying the complexity of transport system.

收稿日期：2008-11-19.

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划（2006BAJ18B07）。

作者简介：张美坤（1985年）男，江苏泗洪人，东南大学交通学院硕士研究生，研究方向：道路工程。

Key words: Traffic flow complexity, traffic conflict rate, statistical complexity, regression analysis

0 引言

交通系统是一个开放的复杂大系统，同时又是一个动态的非线性复合系统。在城市尤其是在城市中心，交通系统特性往往呈现出复杂性和非线性^[1]。作为交通系统要素之一的交通流也随之表现为非平稳性、复杂性和非线性，因此非线性分析方法可能有助于更好地揭示其特性和机理。近年，随着 Lempel-Ziv 算法的发展，借助于近似熵和统计复杂度的方法量化交通工程复杂度成为可能^[2]。

统计复杂度最先由 Lopez-ruiz^[3]等于 1995 年提出，本文在介绍统计复杂度及其性质的基础上，将其引入路段交通流的复杂度量化分析，并以南京 3 条典型路段上的交通流为样本，通过比较分析不同路段的复杂度与交通冲突率的关系，以期得出交通冲突率对路段交通流复杂度的影响，其目的是为研究交通系统复杂度提供新的思路。

1 统计复杂度

目前对交通流系统复杂性的刻画，一般采用分维、李雅普诺夫指数和测度熵等特征量^{[4],[5]}。这些特征量可以在一定程度上实现对系统复杂性的刻画，但在应用中却面临两个难题：①计算这些特征量需要较长的时间序列，实测数据计算难以满足其要求；②这些方法只能实现复杂性判据，而无法实现不同地点、不同时段交通流系统复杂度的比较，即只解决了是否复杂的问题，而没有解决复杂到何种程度的问题。因此，实现交通流系统复杂性测度的可比化十分必要。基于此，本文引入非线性动力学理论中近年提出的统计复杂度对实测交通流进行复杂性测度。

统计复杂度的基础为信息论，主要用于研究连续扩大的子系统的 Shannon 熵如何收敛于整个系统的熵密度，是对系统规律性成分的测度。

假设离散的随机变量 Y 具有 N 个状态 Y ，令 $P(Y)$ 为随机变量 Y 取值为 y 时的概率，那么统计复杂度

C 为：

$$C(Y) = H(Y)D(Y) \quad (1)$$

$$H(Y) = -\sum P(Y)\log_2 P(Y) \quad (2)$$

$$D(Y) = \sum 2 \left[P(Y) - \frac{1}{N} \right] \quad (3)$$

式中： H 为信息熵； D 为非平衡项，表示概率 $P(Y)$ 与均匀分布的离散度。

C 的表达式中综合考虑了随机性和无序性对统计复杂度的贡献，但 $H(Y)$ 与 N 相关，而 $D(Y)$ 与 N 无关，二者的贡献方式不同，所以统计复杂度用式 (1) 计算不尽合理。

基于此，Feldman 等^[6]利用非平衡分布 $P(Y)$ 与平衡分布 $P(\hat{Y})$ 的信息距离代替式 (1) 中的非平衡项 $D(Y)$ ，给出一个修正公式：

$$DFC(Y) = \sum P(Y)\log_2 \frac{P(Y)}{P(\hat{Y})} = \sum P(Y)\log_2 [NP(Y)] \quad (4)$$

式中， DFC 为广延量。

于是，统计复杂度被修正为：

$$C(Y) = H(Y)DFC(Y) \quad (5)$$

对于完全规则有序的系统，有 $H(Y) = 0, C(Y) = 0$ ；

对于完全的白噪声，有 $P(Y) = \frac{1}{N}, DFC(Y) = 0, C(Y) = 0$ 。式 (5) 的优点在于：满足有序和随机的边界条件，可以明确度量混沌等既非完全有序又非完全随机的系统，对系统复杂性的刻画比较科学，所需数据量较少。但它也存在 2 个方面的不足：①计算二维数组复杂性时需要首先转化为高维数组，计算比较复杂并且存在过度细化问题；②测度建立在统计意义之上，不可避免地也会对系统的一些细微结构的复杂性造成忽略。

刘锋涛等人根据模型检验提出样本量取 400 ~ 1 000 之间^[2]，得到的复杂度趋于稳定，且白噪声系统和周期系统的统计复杂度值都非常小，与混沌区域 Logistic 和 Henon 系统的统计复杂度差距很大，

说明统计复杂度满足有序-随机的边界条件，可以较好地表示非线性结构的复杂性。

2 实测交通流的复杂性测度

利用车头时距计算交通流的复杂性，是因为车头时距可以反应出交通量、车速及车流密度等大量信息，且易调查。

2.1 交通流数据的采集

调查地点为南京太平北路 (R₁)、北京东路 (R₂) 及珠江路 (R₃)，调查时间为周三的 8:00-9:00 (早高峰 MP)、10:00-11:00 (早平峰 MN)、12:00-13:00 (中高峰 NP)、15:00-16:00 (中平峰 NN)、18:00-19:00 (晚高峰 EP) 和 20:00-21:00 (晚平峰 EN)，得到 18 个车头时距的时间序列，样本量取 500。在调查车头时距的同时也调查相应的交通冲突。图 1 为 R₁ 路段 MP 时段采到的车头时距。

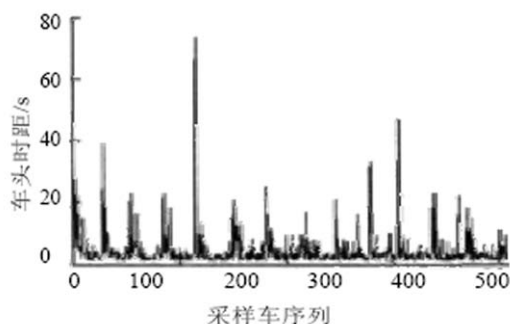


图 1 采样车的车头时距变化

Fig.1 Variation of tractor time-distance of the sampling vehicle

2.2 基于统计复杂度的测度

结合调查得到的 30 个交通流序列，应用统计复杂度的方法对其进行测度，结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出：

(1) 各路段的交通流复杂度值峰点基本在高峰时段，但随着交通量增加到一定程度，交通流逐渐呈现有序，复杂度逐渐变小。

(2) 珠江路的复杂度值最大，北京东路与太平北路相近。这与各道路等级及其路段上的交通组成与流量

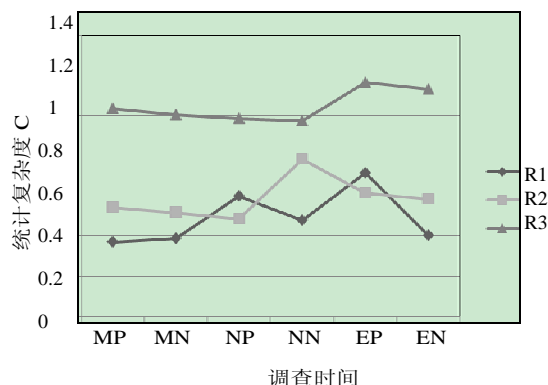


图 2 3 个路段的统计复杂度

Fig.2 Statistical complexity of three roads in Nanjing

的大小是相关的。珠江路是次干道，位于南京电子集散中心区，交通组成比较复杂，且横断面是一块板，交通流无序程度比较严重。北京东路与太平北路都是主干道，渠化设施也很完善，相对而言，复杂度比较小。

(3) 复杂度值远远大于周期系统和白噪声系统，说明交通流系统既不是周期的也不是完全随机的系统，而是带有非线性结构的动力学系统，并且这种非线性结构可以产生混沌。

3 回归分析

3.1 交通冲突率

交通冲突分为严重冲突和非严重冲突，路段上的交通冲突主要与交通量和路段长度有关，所有每个路段的不同时段的交通冲突率是不同的：

$$I = \frac{C}{Q \times H} \quad (6)$$

$$I = I' + I'' \quad (7)$$

式中： I 是交通冲突率； C 是交通冲突数； Q 是交通量； H 是路段长度； I' 是非严重交通冲突率； I'' 是严重交通冲突率。

按照交通冲突的定义，如果速度和方向不改变，则距事故发生的时间由车辆距相撞点位置所剩下的时间来定义：

$$T_A = \frac{T_S}{C_S} \quad (8)$$

式中：

T_A —— 冲突时间，s；

T_S —— 冲突距离，m；

C_S —— 冲突速度，m/s。

它们的测量点都是在制动生效的瞬间。如果冲突车辆在采取避险行为时的冲突时间 T_A 小于等于相应的临界时间，则该冲突为严重冲突，否则为非严重冲突。表 1 为南京三条路的交通冲突率。

表 1 交通冲突率

Tab.1 Traffic conflict rate of each section

	MP		MN		NP		NN		EP		EN	
	I'	I	I'	I	I'	I	I'	I	I'	I	I'	I
R_1	4.53	5.49	3.98	4.63	4.34	5.35	5.36	6.33	6.95	7.89	3.12	4.07
R_2	6.78	7.87	5.76	6.45	6.54	7.52	7.29	8.03	8.76	10.51	4.55	5.42
R_3	11.85	13.54	9.56	10.79	10.89	11.72	8.25	9.51	13.43	14.89	7.89	9.26

3.2 模型建立

利用 SPSS 软件对 3 个路段的交通流复杂度和相应路段的交通冲突率进行回归分析，经过拟合计算，路段交通流的复杂度与交通非严重冲突率的相关性比较好：

$$\left. \begin{aligned} C &= 4.891I'^2 + 0.080I' + 4.511 \\ R^2 &= 0.819 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对交通流复杂度和相应路段的严重交通冲突率进行回归分析时发现，相关性很差。一方面是由于严重冲突率的来源数据收集不如非严重冲突的数据多，在短时间内很难观测到样本量大的严重冲突，样本量的不足就很难在进行数据拟合时得出相关关系。另一方面是因为复杂度主要分析的是车流的无序性和随机性，严重冲突的产生很大程度上取决于人为因素或者道路设施方面等。图 3 为交通流复杂度与非严重交通冲突率的相关关系图。

参考文献

[1] 贺国光, 马寿峰, 冯蔚东. 对交通流分形问题的初

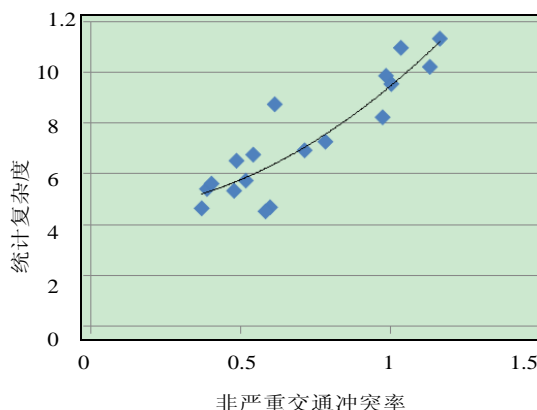


图 3 交通流复杂度与非严重交通冲突率的回归关系

Fig.3 Regression between the traffic flow complexity and non-serious traffic conflict rate

对交通流复杂度和相应路段的交通冲突率进行回归分析，其相关系数 $R^2 = 0.759$ ，基本可以满足使用，公式如下：

$$C = 0.002I'^2 + 0.118I' - 0.089 \quad (10)$$

由以上分析可知，非严重交通冲突率与交通流的复杂度成正比例，但增加的速度逐渐变慢。在实际应用中可以通过非严重冲突率的比较，对比交通流的不同复杂度，分析影响交通流复杂度的因素，从而根本上认识交通流的特性。

4 结论

(1) 交通流系统的复杂度与混沌系统的复杂度接近，说明交通流系统是一种随机性较强、带有非线性结构的系统，可能产生混沌。

(2) 各路段的交通流的复杂度峰值点基本在高峰时段，但随着交通量增加到一定程度，交通流逐渐呈现有序，复杂度逐渐变小。

(3) 路段交通流的复杂度与交通非严重冲突率的相关性比较好，实际应用中可以通过非严重冲突率的对比，分析不同交通流的复杂度。

步研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15 (4): 82-85.

- [2] 刘锋涛, 贺国光. 基于近似熵和统计复杂度的交通流复杂性测度[J]. 中国公路学报, 2007, 20 (4): 108-112.
- [3] Lopez-Ruiz R., Mancini H.L., Calbet X. A Statistical measure of complexity[J]. Physics Letters A, 1995, 209 (5): 321-326.
- [4] Nair A.S., Liu J.C., Rilett L., et al. Non-linear Analysis of Traffic Flow[C]// IEEE. Proceeding s of the 4th Intelligent Transportation Systems. Oakland IEEE, 2001: 681-685.
- [5] Addisonps, Lowd J. A novel Nonlinear car- following model[J]. Chaos, 1998, 8(4): 791-799.
- [6] Feldman D.P., Crutchfield J.P. Measures of statistical complexity: why[J]. Physics Letters A, 1998, 238 (3): 244-252.

(中文编辑: 刘娉婷)

上接第 91 页

- [5] 樊治平, 潘德惠. 不确定型判断矩阵权重计算的一种实用方法[J]. 系统工程, 1996, 14 (2): 57-60.
- [6] Janic M. An assessment of risk and safety in civil aviation [J]. Journal of Air Transport Management, 2000, 6 (1): 43-50.
- [7] 丁松滨, 王 飞. 空中交通管理安全预警指标体系及权重[J]. 中国民航学院学报, 2005, 23(4): 50-54.
- [8] 曾 亮. 多层次模糊评估法在民航不安全事件风险评估中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2008 (1): 131-138.
- [9] Lee W K. Risk assessment modeling in aviation safety management[J]. Journal of Air Transport Management, 2006, 12(5): 267-27.

(中文编辑: 刘娉婷)

上接第 101 页

- [4] 董长虹. Matlab神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [5] 祝付玲. 城市道路交通拥堵评价指标体系研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [6] 白 竹. 城市主干路交通异常状态自动判别方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [7] 马世勇, 郑应文, 柯栋忠. 城市交通拥堵自动判别方法研究[J]. 福建电脑, 2007, 1 (1), 7-8.
- [8] Roger P Roess. Traffic Engineering [M]. New Jersey: Pearson education, (3rd edition), 2004.
- [9] 刘占宇, 孙华生, 黄敬峰. 基于学习矢量量化神经网络的水稻白穗和正常穗的高光谱识别[J]. 中国水稻科学, 2007, 21 (6): 664-668.
- [10] 庄 斌, 杨晓光, 李克平. 道路交通拥挤事件判别准则与检测算法[J]. 中国公路学报, 2006, 19 (3): 85-87.

(中文编辑: 刘娉婷)