

文章编号: 1009-6744 (2010) 02-0106-06

基于混沌理论对北京二环路进行短时 交通流量预测的研究

郭敏^{*1}, 蓝金辉², 肖翔², 卢海锋²

(1.北京市公安局 公安交通管理局, 北京 100037;

2.北京科技大学 信息工程学院测控系, 北京 100083)

摘要: 随着机动车保有量的增加, 交通拥堵变成迫切需要解决的问题。道路交通流预测可以使交通管理部门提前制订相关政策, 面对即将出现的交通问题提前采取管控措施, 从而可以在一定程度上缓解交通压力。道路交通流预测预报是智能交通系统关键技术之一, 短时预测是交通控制、车辆导航的技术基础。本文在对交通系统具有耗散系统特性分析的基础上, 认为交通状态中存在混沌。本文运用混沌与分形理论恢复交通流量序列的动力学系统, 并用多元局域预测法对时间序列进行预测, 并实地采集数据运用模型进行分析校验。通过分析不同时间间隔的时间序列的评价指标, 比较得出此法在2至5分钟内有较高的预测精度。

关键词: 城市交通; 交通流; 预测; 混沌理论; 耗散系统; 多元局域预测法

中图分类号: U491

文献标识码: A

Forecasting Short-time Traffic Flow for Beijing 2nd Ring Road Using Chaos Theory

GUO Min¹, LAN Jin-hui², XIAO Xiang², LU Hai-feng²

(1. Beijing Traffic Management Bureau, Beijing 100037, China;

2. School of Information Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: With the ever-increasing motor vehicle population, traffic congestion is a severe problem of urban traffic. Traffic flow forecasting may help the traffic management branch to formulate relevant policies, optimize traffic management and solve the traffic problem, at last release the traffic pressure in a certain extent. It is one of the important issues of intelligent transportation systems. Short-time traffic flow forecasting is the main technology of traffic control and vehicle-based navigation. This paper points out that transportation system is a dissipative system and the chaos exists in traffic status. It restores dynamical systems with chaos and fractal theory and predicts the traffic flow using multivariate time series of local prediction method. The basic traffic data are collected to test the effectiveness of the model, and the evaluation index of different time interval of the traffic flow series is analyzed. The proposed method has high prediction accuracy within 2 or 5 minutes level.

Key words: urban traffic; traffic flow; forecasting; chaos theory; dissipative system; multivariate local method

CLC number: U491

Document code: A

收稿日期: 2010-01-17 修回日期: 2010-03-11 录用日期: 2010-04-02

基金项目: 北京市自然科学基金(4102038); 北京市科技计划(D07020601400704)。

作者简介: 郭敏(1966-), 女, 辽宁沈阳市人, 高级工程师, 博士。

* 通讯作者: Sophia_g@163.com

1 引言

据北京交管局统计数字表明:2009年7月,北京机动车保有量已达371万辆,机动车驾驶员达537万人.北京用48年的时间拥有100万辆汽车,但只用了12年时间增长了271万辆.机动车拥有量还将直线增长,但城市道路面积增长空间有限,交通拥堵、空气和噪音污染、能源紧缺、用地紧张正在城市蔓延.交通拥堵变成迫切需要解决的问题,而预测可以使政府提前制订相关政策,使交管部门提前采取管控措施,从而在一定程度上缓解交通压力.

城市道路交通系统是耗散系统.1969年,比利时科学家普里戈金(I. Prigogine)在《结构、耗散和生命》里正式提出了“耗散结构理论”^[1].普里戈金认为耗散结构应具备^[2]:

- (1) 开放系统,能靠外界不断供应能量或物质来维持.
- (2) 远离平衡态.
- (3) 对称性自发破缺.
- (4) 稳定态的非势力学分支.

城市快速路交通系统中符合耗散结构应具备的特性,交通系统出行者的数量在不断变化,交通流在单个用户均衡条件下运行只维持短暂时间,交通流处于一种混沌的非线性状态.用户出行都要消耗能源、物质和时间,当出现事故或限行等时,可通过自组织机制使系统复原.陈涛,陈森发^[3]在城市道路交通系统耗散结构特性的研究中详细证明了交通系统具有耗散结构的特性.

城市道路交通系统是耗散系统,耗散系统中的混沌与低维系统有着密切的关系.耗散使自由度归并,高维系统可以降为低维系统来研究.将交通特性参数序列根据混沌的自组织特性还原系统的动力学形态,从构建的动力系统中找寻奇怪吸引子,吸引子在宏观上是针对整个系统在状态空间中无穷长轨道的平均值,表现了系统状态变化的趋向,在小范围内稳定,由此可以对交通特性参数进行短时的预测.

2 混沌与分形理论

著名物理学家Ford^[4]认为混沌是20世纪物理学第三次大革命,它构建了确定性与随机性系统之间的桥梁.在自然界中混沌是比有序更为普遍的现象,如同无理数之于有理数.在测度理论中,有理数的测度为0,即在实数中随机选取到有理数的

概率为0.同样,自然界中的混沌现象无处不在,大气运动、股价涨落、生物种群遗传、人口增长、经济交换等都是混沌运动.混沌科学的主要研究对象是非线性系统,近年来学者们将混沌科学用于生命科学、经济学、地球科学、天文学等各领域.诺贝尔经济学奖得主K.J. Arrow和G. Debreu教授用混沌理论中的不动点定理对有限纯经济交换行为的均衡状态进行研究^[5].洛伦兹在模拟天气变化时提出了经典的“蝴蝶效应”.许多文献资料根据混沌理论从地震信息、大气气流信息中提取非线性时间序列,从中找出可能蕴藏着参与未来系统突变的痕迹,应用混沌与分形理论定量描述地震、天气、分子等活动的时空复杂性,从而对系统的未来状态进行预测.

分形是描述混沌现象的合适的几何语言,交通分形是交通流自组织特性研究的重要内容,组织与自组织的交互作用贯穿了交通流系统始终^[6].混沌系统具有分维性,其在相空间中构成的具有无穷层次的自相似结构,可以用分形维数来描述.

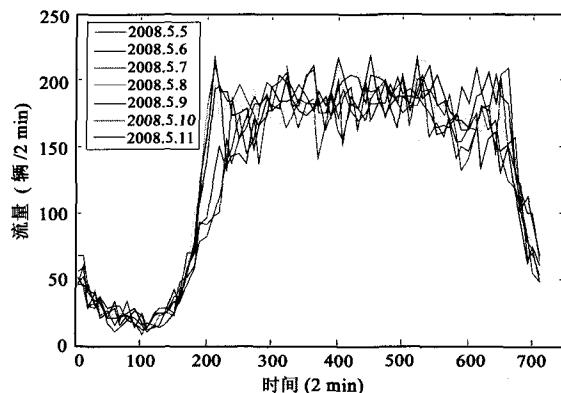


图1 交通流周变化特性

Fig.1 Weekly traffic pattern

混沌态是整体稳定性和局部不稳定性的统一^[12].图1为采自复兴门桥的交通流量数据,从图1中可看出城市快速路交通参数的周变化呈现周期相似性、整体变化相对稳定.而交通流在随时间变化过程中,道路上车辆的行驶受到天气情况、路面状况、驾驶员特性、其他交通参与者特性等的影响,表现出强烈的时变性与随机性,这是局部不稳定性,如图2所示.混沌普遍存在于交通现象中,无论是微观的跟驰行为还是宏观的交通特性参数变化都存在混沌.将混沌从随机中离析出来并对交通流进行预测,改善了预测效果.

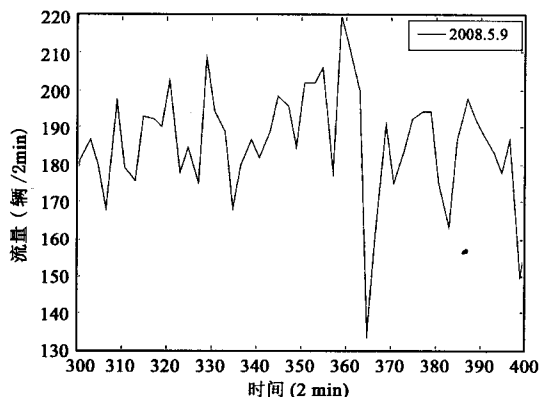


图2 交通流局部变化

Fig.2 Local traffic pattern

北京市二环路是北京第一条城市快速路,其车流相对稳定,由交通信号变化导致的非正常干扰对交通特性参数的影响较小,其混沌现象产生的根源在系统自身的非线性,表现为交通参与者的无序性.交通系统通过耗散维持并发展自己的组织程度,从而提高自己的有序性,但同时存在着近乎“混乱”的结构.由于复杂系统的层次性,某一层次的混沌与系统的整体有序性并不矛盾,是复杂系统演化发展的必要条件.

3 对耗散系统进行预测

描述系统演化与运动最有力的工具是相空间和状态空间^[7].采用嵌入空间法来研究交通参数时间序列.给定一个正整数 m ,对时间序列 $X(t)$ 和时滞参数 p ,在相空间中构造一个 m 维向量:

$$y(m, p) = [x(i), x(i+p), x(i+2p), \dots, x(i+(m-1)p)] \quad (1)$$

其中 m 称嵌入维数.这样就将原动力系统转化为相空间的动力系统,只要 m 足够大,重建的系统与原系统动力学特性等价,通过计算其关联函数 $C(\epsilon)$ 来判断系统是否为混沌.同时用 Lyapunov 指数也可以判断系统是否为混沌^[10].

从重构后的系统中找寻奇怪吸引子,并找出在此吸引子域内,数据同向变化的状态与预测状态的关系,实现对未来序列的预测.流程图如图3所示.

如某些时间序列线性很强,不具备混沌序列的特性,可以采用线性预测法,即将交通流不确定因素归为外部随机输入,方法主要有历史平均法、时间序列法、Kalman 滤波法、回归法等,就不具体介绍了.

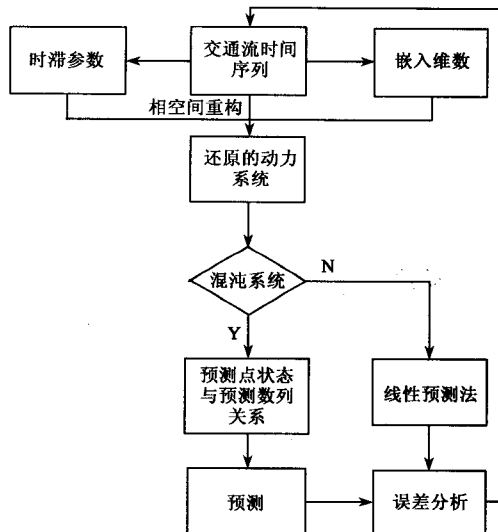


图3 交通流预测的流程图

Fig.3 Flow chart of traffic flow forecasting

(1) 时间间隔的计算.

最佳时滞参数 p 不能太大也不能太小. p 太小使延迟矢量坐标之间有很强的相关性,轨线在相空间中几乎龟缩在一条线上,无法方便伸出混沌吸引子; p 取值太大,重构矢量各坐标值之间关系几乎随机,破坏了系统的内部关系^[11].目前求取最优延迟时间法本文采用自相关系数法求取 p 值.自相关系数定义为

$$ACF = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x(i) - \bar{x})(x(i+\tau) - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2} \quad (2)$$

文献[9]根据数值实验结果给出了一个合理的经验值,当自相关系数为初始值的 $1 - 1/e$ 时,对应的 p 作为重构系统的时滞时间的值.

(2) 关联函数的计算.

Grassberger 和 Procaccia^[8]提出的通过计算关联积分从而得到关联维 D 的方法(G-P 算法)来计算近似分维.根据 Takens 定理 m 需满足 $m \geq 2D + 1$, D 为吸引子的维数,由此可以构造 m 维嵌入空间,还原原动力系统.

将长度为 n 的一维时间序列 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 按间隔 p 取数重构成 $N = n - (m-1)p$ 个 m 维时间序列.

计算关联积分函数:

$$C(\epsilon) = \frac{1}{M} C(\epsilon) = \frac{1}{M^2} \sum_{i,j=1}^M H(\epsilon - |y_i - y_j|)$$

其中

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

$$|y_i - y_j| = \left[\sum_{l=0}^{m-1} (x_{i+l_p} - x_{j+l_p})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

估计关联维数:当 ε 的选取能保证 $0 < C < 1$ 时, m 维序列的关联维数为

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \ln C(\varepsilon) / \ln \varepsilon \quad (4)$$

如 D 不随 m 的升高而改变,则系统的关联维数:

$$D_i = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} D \quad (5)$$

由此得到重构的嵌入空间:

$$y_i = (x_i, x_{i+p}, x_{i+2p}, \dots, x_{i+(m-1)p}), i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

(3) 多元局域预测法.

$$X = \begin{bmatrix} 1, x_1(T_1), \dots, x_M(T_1), \dots, x_M(T_1 - (m_M - 1)p_M) \\ 1, x_1(T_2), \dots, x_M(T_2), \dots, x_M(T_2 - (m_M - 1)p_M) \\ \vdots \\ 1, x_1(T_K), \dots, x_M(T_K), \dots, x_M(T_K - (m_M - 1)p_M) \end{bmatrix}$$

$$Y = [x_1(T_1 + u), x_1(T_2 + u), \dots, x_1(T_K + u)]^T \quad (8)$$

其中 u 为预测的时长.

在 K 阶矩阵中对多元相空间轨迹进行拟合, $Y = A + BX$. 拟合求得 A, B , 从而得到输入与输出矩阵的关系,从而求得预测值.

4 实验结果及分析

实验采用 2009 年 6 月 19 日至 6 月 26 日在二环鼓楼桥西约 200 m 处采集的交通流量数据对模型进行验证. 为分析模型对不同的时间间隔的适用性,将视频所拍的图像用视频处理软件按 2 min, 5 min, 15 min, 60 min 进行分隔,由于所拍的车流存在频繁超车变道等问题,以车流方向为单位数出流量值,夜间(23:00-5:30)数据根据百度、谷歌地图显示估计得出. 得到原始数据如图 4 所示,对时间序列进行相空间重构,可知当时间间隔为 60 min 时,时间序列无法重构,这是由于在小时流量的尺度,交通流已趋于稳定,可以采用线性预测法进行预测.

选取 6 月 19 日至 26 日的流量数据构造 M 维时间序列,选取的时间序列应包括早晚高峰时段与

目前有关局域预测模型基本针对单变量序列. 由交通流具有周相似性,本文考虑选取一周的散点数据进行模型训练,构造多元混沌时间序列来进行预测.

构造 M 维多元时间序列 $\{x_a, a = 1, 2, \dots, M\}$, 其中, $x_a = [x_a(1), x_a(2), \dots, x_a(N)]^T$

求取每一维时间序列的时滞时间及嵌入维数,分别对各时间序列进行相空间重构.

设时刻 T 状态向量为 X_T , 计算相空间中的 X_T 与各元重构向量的欧式距离,得到与 X_T 最近领域点:

$$X_{T_k} = [X_1(T_k), X_2(T_k), \dots, X_M(T_k)]^T$$

$$(k = 1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

得预测模型的输入、输出矩阵:

平峰时段,本实验构造 2 维时间序列.

得出的预测的曲线与绝对误差如图 5 所示.

针对训练数据模型对实测数据的模拟,引入 3 个性能指标对预测的准确性评价:平均绝对误差 MAE,均方误差 MSE,最小平方预测误差 MSPE,结果如表 1 所示.

表 1 不同训练模型预测误差性能指标比较

Table 1 Evaluation index of different forecasting models

训练模型时间间隔 - 预测的时间间隔	MAE	MSE	MSPE
2 min - 2 min	1.476 2	0.242 0	0.001 2
2 min - 5 min	4.986 5	0.746 0	0.001 2
2 min - 15 min	11.324 3	1.769 5	0.001 2
5 min - 2 min	0.489 8	0.079 8	0.000 4
5 min - 5 min	3.869 0	0.568 8	0.001 0
5 min - 15 min	10.911 5	1.753 9	0.001 2
15 min - 2 min	0.588 7	0.083 3	0.000 4
15 min - 5 min	0.971 7	0.154 2	0.000 3
15 min - 15 min	4.194 1	0.690 4	0.000 5

由此知目前基于混沌理论的交通流预测在预测 2-5 分钟的交通流数据时有较高的精度,用小间隔数据训练模型来预测大间隔的流量时,会产生较大误差.

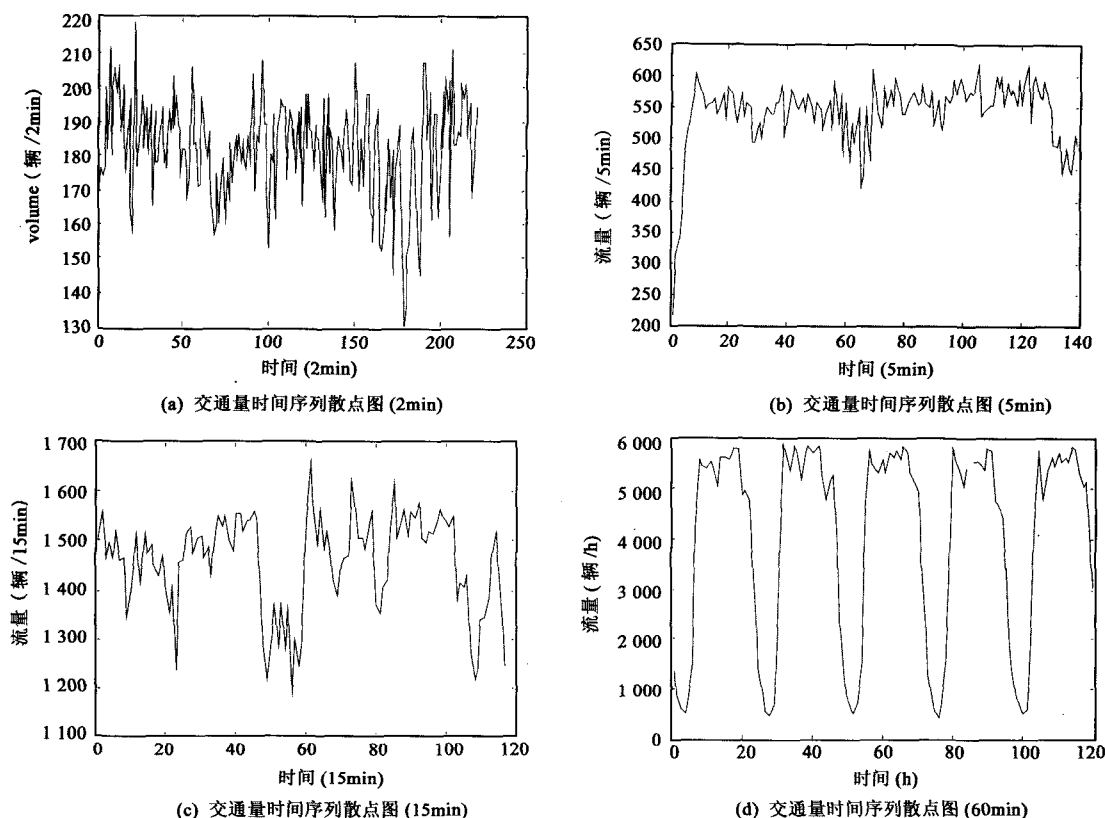


图4 不同时间间隔的时间序列

Fig.4 Traffic flow series of different time interval

表2 多元局域预测法与其它方法的比较

Table 2 Absolute error of multivariate local method and other methods

	MAE	MSE
多元局域预测法	3.869 0	0.568 8
局域预测法	4.231 6	0.598 9
自回归模型(线性模型)	6.125 3	0.550 0

如表2所示,选用了线性模型的自回归模型作比较,可看出多元局域预测法比普通局域预测法精度高,且优于一般的线性模型。

5 研究结论

本文通过分析城市快速路交通系统的耗散特性,得出快速路系统存在混沌态,运用混沌与分形理论时间序列升维还原动力系统,运用多元局域预测法对短时交通流进行预测,得出以下结论:

(1) 交通系统是耗散系统,耗散使自由度归并,高维系统可以降为低维系统来研究。从构建的动力系统中找寻奇怪吸引子,得到系统状态变化的趋向,吸

引子在小范围内稳定,从而可以进行短时预测。

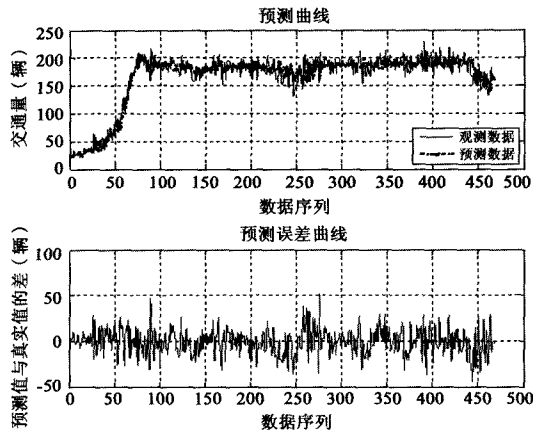
(2) 采用多元局域预测法比普通局域预测法精度有所提高,本文采用常规方法计算时滞时间与嵌入维数,相空间重构参数的优化选择有待于继续研究。

(3) 目前基于混沌理论的交通流预测在预测2-5分钟的交通流数据时有较高的精度,在15分钟范围内可预测。

(4) 混沌是一门新兴的学科,将混沌用于长期预测还需要更多的研究。在短期预测中提高预测的速度和普适性也有待进一步研究。

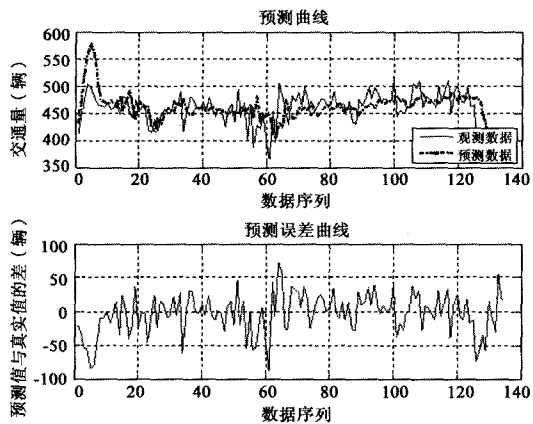
参考文献:

- [1] Nicolis G, Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems: form dissipative structures to order through fluctuations[M]. New York: John Wiley and Sons, 1977: 132-136.
- [2] Ilya Prigogine. Introduction to thermodynamics of irreversibility processes[M]. New York: John Wiley & Sons Inc (3rd edition), 1967: 78-83.



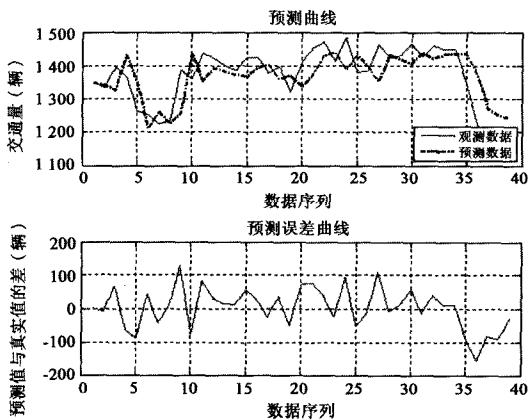
(a) 2分钟尺度的预测曲线及绝对误差

(a) Forecasting curve and absolute error of 2 minutes interval



(b) 5分钟尺度的预测曲线及绝对误差

(b) Forecasting curve and absolute error of 5 minutes interval



(c) 15分钟尺度的预测曲线及绝对误差

(c) Forecasting curve and absolute error of

15 minutes interval

图5 不同预测时间的预测曲线及绝对误差

Fig.5 Forecasting curve and absolute error
of different time interval

- [3] 陈涛,陈森发. 城市道路交通系统耗散结构特性的研究[J]. 土木工程学报, 2004(01): 74-77. [CHEN T, CHEN S F. Study on characteristics of dissipative structure in urban traffic system[J]. China Civil Engineering Journal, 2004(01): 74-77.]
- [4] 郝柏林. 从抛物线谈起-混沌动力学引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1997. [HAO B L. Starting from a parabola-an introduction on chaotic dynamics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 1997.]
- [5] 中国科学技术协会编. 2007-2008 物理学学科发展报告[R]. 中国科学技术出版社出版, 2008: 20-32. [CAST. 2007-2008 Development report of physical sciences [R]. China Science and Technology Press, 2008: 20-32.]
- [6] 黄贤通,傅惠,刘建生. 负整数阶变参数复迭代系统的吸引子及其分形图[J]. 数学理论与应用, 2002,22(3): 69-74. [HUANG X T, FU H, LIU J S. The attractors and fractal in the complex iterated function systems with variable parameter for negative integer index number[J]. Mathematical Theory and Application, 2002,22(3): 69-74.]
- [7] 刘建生,吴伟晖,傅惠. 一类迭代系统的混沌序列生成及其性能分析[J]. 计算机与现代化, 2004(11): 33-39. [LIU J S, WU W H, FU H. Generation and study of chaotic sequence by a kind of iteration system[J]. Computer and Modernization, 2004(11): 33-39.]
- [8] Grassberger P, Procaccia J. Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach[J]. Journal of Physics D, Applied Physics, 1984(13): 34-54.
- [9] Hao B L. Elementary symbolic dynamics and chaos in dissipative systems[M]. World Scientific Press, 1989: 97-99.
- [10] 黄鸥,陈森发,周振国,等. 城市交通流量的非线性混沌预测模型研究[J]. 东南大学学报(英文版), 2003(1): 410-412. [HUANG K, CHEN S F, ZHOU Z G, et al. Research on a non-linear chaotic prediction model for urban traffic flow[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2003(1): 410-412.]
- [11] 宗春光,宋靖雁,任江涛,等. 基于相空间重构的短时交通流预测研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(4): 71-75. [ZONG C G, SONG J Y, REN J T, et al. Short-term traffic flow forecasting research based on phase space reconstruction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 71-75.]
- [12] 吴祥兴,陈忠,等. 混沌学导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1996: 157. [WU X X, CHEN Z, et al. Introduction to chaos[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1996: 157.]