

文章编号: 1001-0920(2007)10-1129-05

汽车交通事故混沌分析及预测方法

黄席樾, 陈 勇, 向长城, 刘 俊

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

摘 要: 提出一种新型的事故混沌理论. 利用混沌理论和故障树法分析了汽车交通事故中的混沌特性, 建立了基于事故混沌理论的汽车交通事故预测模型, 并分析了预测模型的最大可预测尺度. 该预测模型利用相空间近邻等距法对交通事故中的混沌吸引子进行预测, 从而实现了汽车交通事故的预测. 仿真结果表明事故混沌理论对分析和预测汽车交通事故是有效的.

关键词: 汽车交通事故; 事故混沌理论; 相空间重构理论; 事故预测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Chaos analysis and prediction of vehicle traffic accidents

HUANG Xi-yue, CHEN Yong, XIANG Chang-cheng, LIU Jun

(Automation College, Chongqing University, Chongqing 400030, China. Correspondent: CHEN Yong, E-mail: chensaiyang@tom.com)

Abstract: A novel accident chaos theory is proposed. The chaos characteristics in vehicle traffic accidents are analyzed by using accident chaos theory and fault tree. Then the predictive model of vehicle traffic accidents is constructed based on accident chaos theory, and the maximal predictable size of the model is analyzed. The chaos attractors in traffic accidents are predicted by using phase space neighbor-equal-distance method. The experiment results show that the accident chaos theory is effective to the analysis and prediction of vehicle traffic accidents.

Key words: Vehicle traffic accidents; Accident chaos theory; Phase space reconstruction theory; Accident prediction

1 引 言

在日常生活、生产和交通中,经常会出现安全事故. 仅就汽车交通而言,全国每年交通事故多达 60 万起左右,死亡人数多达 10 万人左右,直接经济损失高达 30 亿元左右. 从事故预防和控制的视角看,其防治理论和技术的研究进程明显滞后于经济和社会发展对安全的要求.

现阶段对事故的研究方法主要分为以下几种: 1) 根据历史统计数据来分析和预测事故. 常用的方法有回归模型法、时序序列法和灰色预测法,这些理论常结合 BP 神经网络、模糊神经网络、小波神经网络等^[1-3]. 该类方法对于研究事故发展规律和事故特性有一定的作用,但它们是依据历史统计数据进行分析,对各种外界因素的干扰缺乏考虑,因此可靠性不高. 2) 用人-机-环境系统工程的方法来分析和预测事故^[4,5]. 该方法常应用于航天、船舶、煤矿、交通

等领域,从系统的角度分析这些领域,实现系统的最优组合,达到安全、高效、经济的目标. 这种研究在减少事故方面起到了很大作用,现已形成了一门新学科,但由于现实的系统常常是非线性的,建立系统模型十分困难. 3) 采用故障树方法^[6,7]. 该方法主要研究事故发生的原因和原因间的关联,对于减少事故的发生起到了重要作用. 4) 采用故障诊断和预测方法来研究事故. 如故障诊断理论、故障模式等^[8,9]. 以上几种方法是从历史数据、系统或原因等方面研究事故的,但没有考虑事故的特性.

本文利用事故对初始条件的敏感性、事故发生的随机性、事故长期不可预测性的特点与混沌特点的相似性,提出一种新型的事故混沌理论. 利用事故混沌理论和故障树法分析汽车事故特性,再以相空间重构理论对混沌吸引子和汽车交通故障树数据进行预测,从而实现对汽车交通事故进行预测. 最后假

收稿日期: 2006-06-08; 修回日期: 2006-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(69674012); 重庆市科委自然科学基金项目(CSTC2006BA6016); 重庆市信息产业基金项目(2003035-02).

作者简介: 黄席樾(1943—),男,重庆人,教授,博士生导师,从事人工智能、专家系统等研究; 陈勇(1977—),男,四川内江人,博士生,从事智能控制、信息融合的研究.

设某个或某几个因素发生变化,导致事故发生概率变化,以验证汽车交通事故混沌分析及预测方法是有效的,并具有普遍性和实用性。

2 事故混沌理论概念

“蝴蝶效应”是混沌理论中的一个重要概念,是系统对初始条件敏感性的一种依赖现象。即输入端微小的差别会被迅速放大到输出端,引发严重的后果。在事故预防与控制研究领域,一个微小的误差会在整个变化过程中成倍放大,最后引起难以预测的灾难性的后果。事故的演变过程是一个混沌系统,具有对初始条件的敏感依赖性。在事故中,也会因为某个因素导致混沌现象,造成事故的发生,而事故的发生具有长期不可预测性和不确定性。

结合上述分析,作者设想把混沌理论应用于各种事故,结合其他智能算法来分析事故,提出一种新型的事故混沌理论。事故混沌理论的提出,为预测和控制事故的发生提供了理论基础,为交通、矿井、航天等领域提供了技术保障。本文以汽车交通事故为例进行分析。

3 汽车交通事故分析

3.1 汽车交通事故模糊故障树分析

基于故障树分析法的结构函数定义如下:设故障树(FT)中有 n 个底事件 $f_1, f_2, \dots, f_n, C = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 为某些底事件的集合,当其中的全部底事件都发生时,顶事件必然发生,则称 C 为故障树的一个割集。若 C 是一个割集,且任意去掉其中一个底事件后便不再是割集,则称 C 为最小割集。

若 FT 有 k 个最小割集,只要有一个最小割集 $C_j (j = 1, 2, \dots, k)$ 中的全部底事件 F_h 均发生,则事故必定发生, C_j 可表示为 $C_j(F) = \bigwedge_{h=1}^n F_h$ 。在 k 个最小割集中,只要有一个发生,顶事件就发生,因此 FT 的结构函数可表示为

$$(F) = \bigvee_{j=1}^k C_j(F) = \bigvee_{j=1}^k \bigwedge_{h=1}^n F_h. \quad (1)$$

下面采用人-机-环境系统方法对汽车交通事故进行分析,建立其故障树。人:驾驶员,包括驾驶员的操作熟练度、疲劳度等;机:汽车,包括汽车的制动系统、转向系统、加减速系统、发动机、轮胎状况、当前行驶速度等;环境:包括温度、路面附着系数、能见度等。

导致汽车交通事故的因素很多,如果把所有因素都考虑进去,建立的事故树会异常复杂,计算量大得惊人。事实上,只要考虑主要因素,忽略次要因素,会使工作大为简化,这样的研究结果同样是有说服力的。图 1 中事故树的基本条件是从大量的事故

统计数据中精选而来,车辆事故的发生约有 95% 以上是这些因素导致的。

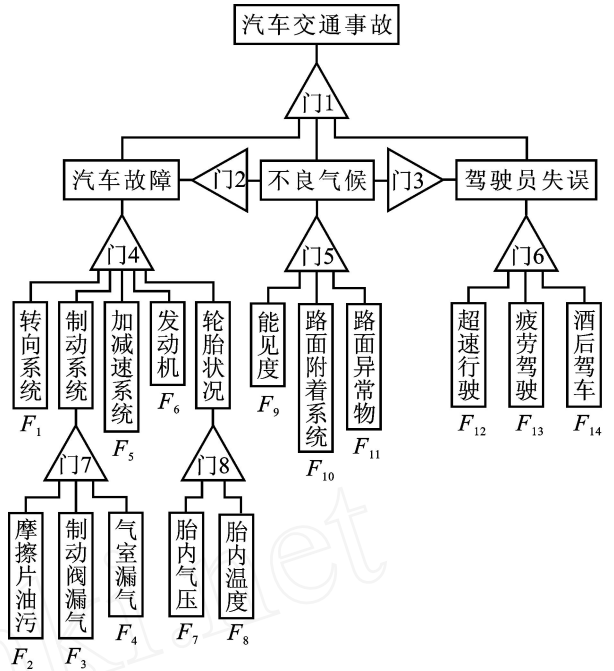


图 1 汽车交通事故的模糊故障树

汽车交通事故的故障树由一系列 IF-THEN 模糊规则组成,是一种万能逼近器,可以描述事件间的联系,从而构成汽车交通事故的模糊故障树。结合前期人-机-环境系统在汽车交通事故中的统计,可以得到规则:如果 z_1 为 S_1 且 z_2 为 S_2 且 ..., 则 Y 为 Y_1 。其中 $z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_j]^T$ 为条件变量, $S_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为模糊集。设模糊集的隶属函数为 s_j , 则模糊门的输出为

$$Y = \bigwedge_{j=1}^m s_j(z_j) Y = \bigwedge_{j=1}^m (z) Y. \quad (2)$$

其中

$$\bigwedge_{j=1}^m (z) = 1, \quad \bigwedge_{j=1}^m (z) = \min_{j=1}^m (z) / \max_{j=1}^m (z),$$

$$0 \leq \bigwedge_{j=1}^m (z) \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

$\bigwedge_{j=1}^m (z)$ 为模糊规则的执行度,计算如下:

$$\bigwedge_{j=1}^m (z) = \min_{j=1}^m s_j(z_j). \quad (3)$$

设基本事件 z_1, z_2, \dots, z_n 的上级事件为 Y , 则它们间的联系可由图 2 描述。

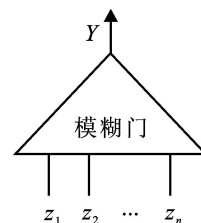


图 2 模糊门

3.2 汽车交通事故混沌特性分析

汽车交通事故对基本事件 z_i 具有敏感依赖性, 如果该基本事件不能得到控制, 将引起汽车交通事故的发生. 例如疲劳驾驶, 如果驾驶员得不到及时休息, 就会反应迟缓、判断失误, 或者引起瞌睡、误操作, 结果将原来误差变得越来越大, 最后导致车毁人亡的交通事故. 汽车交通事故的不确定性是混沌现象内在随机性的表现, 其突发性、传异性是混沌现象, 也是事故的发生对初始条件敏感依赖性的表现. 根据汽车交通事故的特性, 建立其混沌动力学模型, 该模型描述了一个复杂系统在不同条件下的各种状态及其变化.

$$\ddot{Z} + \dot{Z} - Z + Z^3 = \cos t. \quad (4)$$

其中: Z 为汽车交通安全系统的状态 (包括安全状态、混沌状态、临事故状态、事故发生状态), \dot{Z} 为汽车交通安全系统的状态变化速度, \ddot{Z} 为汽车交通安全系统的状态变化加速度, ω 为汽车性能系数, γ 为行使环境系数, μ 为驾驶员系数, t 为时间变量, α 为引发系统非稳定性变化的参数 (系统特性).

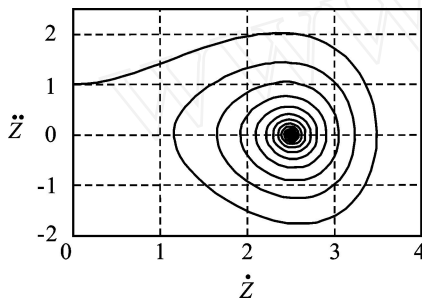


图 3 汽车交通安全系统的状态变化特性

从图 3 的状态变化特性得出, 汽车行驶中, 交通安全系统处于混沌状态, 事故的发生具有随机性和对初始条件的敏感性.

从式 (4) 可以看出, 行使环境对汽车和驾驶员都有影响, 符合人-机-环境系统理论. 解式 (4) 得

$$Z_j = Z_j|_{t=t_0} + \int_{t_0}^t \dot{Z}_j(, , ,) dt = Z_j|_{t=t_0} + f_j(Z_j(t_0), , , ,), \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

其中: $f_j(Z_j(t_0), , , ,)$ 是非线性函数, $Z_j(t_0)$ 是 Z_j 以往的值, 可预先知道. 当前的 $f_j(Z_j(t_0), , , ,)$ 实际上是变量 Z_j, \dots 的函数, 也就成为人-机-环境系统函数.

4 相空间预测^[10]

根据相空间重构理论, 设以汽车行驶时间序列 $\{Z(t)\} (t = 1, 2, \dots, n)$ 表示汽车的行驶状态, 当 $\{Z(t)\}$ 的关联维数 D 为非整数时, $\{Z(t)\}$ 为一个混沌序列, 表示汽车行驶处于混沌状态.

在混沌系统中, 由关联维数 D 可以嵌入一个维数为 $d = D + 1 (l = 1, 2, \dots)$ 的相空间. 设序列 $\{Z(t)\}$ 的间隔时间为 $t_k = k \tau (k = 1, 2, \dots)$ 为延迟时间, $Y(t_i)$ 为序列 $\{Z(t)\}$ 在 d 维相空间中 t_j 时刻的一个态或相点, $\{Y(t_i)\}$ 有 d 个分量: $Z(t_j), Z(t_j - \tau), \dots, Z(t_j - (d - 1)\tau)$. 于是序列 $\{Y(t_i)\}$ 构成了 d 维相空间的一个相型, 表示汽车行驶在某一瞬间的状态.

设 $Y(t_i) - Y(t_j)$ 表示在 d 维相空间中态 $Y(t_i)$ 到态 $Y(t_j)$ 的 d 维欧氏距离. 若参考态为 $Y(t_c)$, 当其最近状态为 $Y(t_n)$ 时, 则 $Y(t_c) = \min_j (|Y(t_c) - Y(t_j)|)$.

在相空间内, 每个相点表示系统的一个状态, 因此预报问题便转化为确定下一时刻相点的位置. 设参考态 $Y(t_c)$ 经过预测时间 T 后, 演化为 $Y(t_c + T)$, 当预测时间 $T < \tau$ 时, $Y(t_c + T)$ 的 d 个分量中只有分量 $Z(t_c + T)$ 是未知的, 其余 $d - 1$ 个分量都是已知的, 即 $Z(t_c + T)$ 为预测对象.

4.1 相空间近邻等距法^[11]

考虑 $Y(t_c)$ 的最近邻态 $Y(t_n)$ 经预测时间 T 后演化为 $Y(t_n + T)$. 由最近邻态式可知, 态 $Y(t_n)$ 与 $Y(t_c)$ 相差甚小, 虽然经过演化, 但是演化时间 T 很短, 所以 $Y(t_n + T)$ 与 $Y(t_c + T)$ 相差很小, 可以认为二态近似重合.

设定

$$Y(t_n) - Y(t_c) = Y(t_n + T) - Y(t_c + T), \quad (6)$$

将向量代入式 (6), 得

$$\{ [Z(t_n) - Z(t_c)]^2 + [Z(t_n - \tau) - Z(t_c - \tau)]^2 + \dots + [Z(t_n - (d - 1)\tau) - Z(t_c - (d - 1)\tau)]^2 \}^{1/2} = \{ [Z(t_n + T) - Z(t_c + T)]^2 + [Z(t_n + T - \tau) - Z(t_c + T - \tau)]^2 + \dots + [Z(t_n + T - (d - 1)\tau) - Z(t_c + T - (d - 1)\tau)]^2 \}^{1/2}. \quad (7)$$

其中 $Z(t_n), Z(t_c)$ 等都是已知量. 因为 T 不会小于 τ , 所以除 $Z(t_n + T)$ 为待预测的值外, 其余各值均为已知量.

式 (7) 两边平方, 得

$$[Z^p(t_n + T) - Z(t_c + T)]^2 = [Z(t_n) - Z(t_c)]^2 + [Z(t_n - \tau) - Z(t_c - \tau)]^2 + \dots + [Z(t_n - (d - 1)\tau) - Z(t_c - (d - 1)\tau)]^2 - [Z(t_n + T - \tau) - Z(t_c + T - \tau)]^2 - \dots - [Z(t_n + T - (d - 1)\tau) - Z(t_c + T - (d - 1)\tau)]^2. \quad (8)$$

式中 $Z^p(t_n + T)$ 是 $Z(t_n + T)$ 的预测值.

4.2 预测尺度分析^[12]

由于混沌系统具有对初值的敏感依赖特性,使得对混沌系统的未来状态进行长期预测变得非常困难.通过相空间转化得出式(8),验证了混沌系统具有可预测性.如果把可预测性应用于汽车交通事故和其他事故,对事故进行预测,就能有效减少事故的发生,挽救人民群众的生命财产.

分析相空间预测方法,其中二态重合成立有个重要的条件,即演化时间 T 很短.这就把长期预测转化成短期预测,短期预测对于避免重大事故的发生具有重要作用.例如在汽车交通事故中,若能提前几秒告诉驾驶员事故将会发生,交通事故几乎都能避免.确定长期与短期的界限就是确定混沌系统的可预测尺度问题,它对混沌系统的预测具有重要意义.

混沌系统特性有两个重要特征量:Lyapunov 指数和熵. Lyapunov 指数可以表征系统的混沌性,也可表明系统邻近轨道辐散或辐合的程度.随着时间的增长,邻近轨道的离散与否意味着初始信息的忘记与保留,这关系到可预测性问题.另一个特征量熵是信息量的度量.所以应考虑用 Lyapunov 指数或熵来研究可预测性的时间尺度问题.

系统的最大可预测尺度由最大的 Lyapunov 指数 E_{\max} 的倒数来确定,即 $T = 1/E_{\max}$.

5 汽车交通事故分析和预测

通过人-机-环境系统工程理论、模糊故障树和混沌理论分析汽车交通事故的特性,可以看出汽车交通事故发生的直接原因主要是驾驶员和汽车,环境直接影响汽车和驾驶员,而间接影响汽车交通事故的发生.据统计,驾驶员引起的交通事故约占 85%,车辆因素引起的交通事故约占 10%,其他因素引起的交通事故约占 5%.

5.1 驾驶员分析

根据统计,疲劳驾车引起的交通事故占交通事故总数的 20%,占特大事故的 40% 以上,而疲劳驾驶与驾驶员本身和环境有关.其中黄昏时分(17:00 ~ 19:00)发生的事故占交通事故总数的 25%,午夜时分(24:00 ~ 6:00)持续保持较高的交通事故发生率,交通事故发生率最高的时刻在 19:00 左右.这主要来自两方面因素:一是人本身的生物钟;二是这些时间段环境条件常引起驾驶员的错觉.国家交通法明令禁止超速行驶、酒后驾驶和超长时间连续驾驶,但上面两方面原因引起的疲劳驾驶无法管理,于是通过混沌相空间预测驾驶员的状态就有重要意义.

5.2 车辆分析

汽车故障的产生主要是由于零件之间的自然磨损或异常磨损,零件与有害物质接触造成的腐蚀,

零件在长期交变载荷下的疲劳,在外载荷及温度残余内应力下的变形,非金属零件及电器元件的老化,偶然的损伤等原因造成的.

零件的磨损规律是指两个相配合零件的磨损量与汽车行驶里程(用汽车生命周期表示)的关系,又称零件的磨损特性.零件的磨损周期可分为磨合期、正常工作期和加速磨损期.在汽车生命周期为 0 ~ 0.1 时,相配合零件处于磨合期;在汽车生命周期为 0.1 ~ 0.75 时,相配合零件的磨损特性非常平稳;在汽车生命周期为 0.75 时,相配合零件的磨损特性迅速增加.

零件是汽车的组成部分,它的磨损特性决定了汽车故障的变化规律.汽车故障的变化规律是指汽车的故障率随行驶里程(用汽车生命周期表示)的变化规律.

零件的磨损特性对汽车故障率的影响,在汽车生命周期为 0 ~ 0.1 时,汽车处于早期故障期;在汽车生命周期为 0.1 ~ 0.75 时,汽车处于随机故障期;在汽车生命周期为 0.75 时,汽车处于耗损故障期.汽车生命周期超过 0.8,汽车就可以报废.

5.3 汽车交通事故混沌预测分析

根据上面的分析,现用混沌相空间预测汽车交通事故的发生.结合式(2),(4)和(8),设汽车状态 $Z(0) = 0, \dot{Z}(0) = 0, \ddot{Z}(0) = 0$, 根据 $S \subset C_j(F)$, $C_j(F) = \prod_{h=1}^n F_h$, 假设某事故因素发生(起始点用 S 点表示)会影响汽车交通安全系统的状态,这里采用的预测尺度为 $T = 0.026$ s.

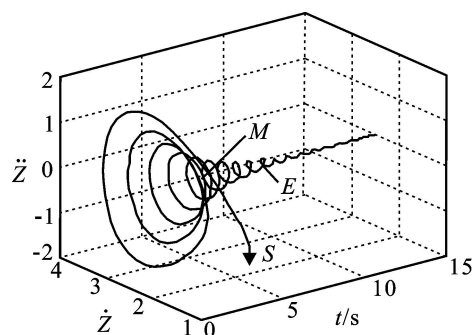


图4 汽车安全交通事故特性分析

从图4的交通事故特性可以得出,如果某事故因素发生(起始点用 S 表示)影响汽车交通安全系统的状态变化速度为正方向,则表示该事故因素必然导致交通事故的发生;如果事故因素的相互影响导致系统状态的变化加速度时正时负,则表示导致交通事故的发生还受到其他因素的影响,有的加快事故的发生,有的减缓事故的发生.在预测尺度为 0.026 s 的混沌相空间预测模型下,以 5 s 为采样时

间得到 M 点和 E 点,从 M 点和 E 点可看出汽车交通事故的发展趋势.图 4 中曲线表明汽车交通事故必定发生,若在 M 点提醒驾驶员,便可避免交通事故的发生.

根据国外的分析,在汽车交通事故发生之前 5 s 左右提醒驾驶员采取措施,能避免 80% 的交通事故.所以这种事故混沌理论的提出,为减少事故的发生提供了理论基础.

6 结 语

本文根据事故对初始条件的敏感性和事故长期不可预测性,提出一种新型的事故混沌理论.为了验证事故混沌理论,采用人-机-环境系统工程理论、模糊故障树和混沌理论分析汽车交通事故的特性,利用预测尺度为 0.026 s 的混沌相空间预测模型来预测交通事故的发生,提前提醒驾驶员采取措施,这样可避免大量交通事故的发生.通过实验验证了事故混沌理论是有效的,具有广泛的应用价值.

这种事故混沌理论仅是一种分析方法.将它与混沌控制、混沌同步、混沌优化以及其他智能算法等相结合,可以形成一种事故混沌理论,这是需要继续研究的课题.它的实现和推广将为现有的事故预防和控制提供一种良好的理论基础,并可应用于矿井、交通、航天等领域,为人民生命安全和国家财产安全提供保障.

参考文献(References)

- [1] 袁昌明,崔晓君.事故预测模型的建立与应用[J].中国计量学院学报,2004,15(4):314-316.
(Yuan Chang-ming, Cui Xiao-jun. Establishment and application of an accident prediction model [J]. J of China Jiliang University, 2004, 15(4): 314-316.)
- [2] 周维新.交通事故灰色预测模型的研究[J].西安公路交通大学学报,2000,20(2):73-75.
(Zhou Wei-xin. Study on the forecast model of traffic accidents with grey theory [J]. J of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 73-75.)
- [3] Feng H Q, Suzuki K, Gabbar H A. Application of grey prediction model on safety target value[C]. Progress in Safety Science and Technology. Shanghai, 2005, 5: 16-20.
- [4] Noy Y I. Human factors in modern traffic systems[J]. Ergonomics, 1997, 40(10): 1016-1024.
- [5] Wang W H, Cao Q, Liu D M. Analyze and assessment of driver's operation reliability[J]. Vehicle Transportation Research, 1994, 16(4): 207-212.
- [6] Singer D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 34(2): 145-155.
- [7] Weber D P. Fuzzy fault tree analysis[C]. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Orlando, 1994, 3: 1899-1904.
- [8] Tarko A, Tracz M. Accident prediction models for signalized crosswalks[J]. Safety Science, 1995, 19(3-4): 110-118.
- [9] 王宏伟,马广富.基于模糊模型的混沌时间序列预测[J].物理学报,2004,53(10):3293-3297.
(Wang Hong-wei, Ma Guang-fu. Prediction of chaotic time series based on fuzzy model [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(10): 3293-3297.)
- [10] 张化光,王智良,黄伟.混沌系统的控制理论[M].沈阳:东北大学出版社,2003.
(Zhang Hua-guang, Wang Zhi-liang, Huang Wei. Control theory of chaos system [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003.)
- [11] Grassberger P, Procaccia J. Dimension and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach[J]. Physica D, 1984, 13(1): 189-208.
- [12] 岳毅宏,韩文秀.混沌系统可预测尺度研究[J].系统工程理论与实践,2003,23(1):91-95.
(Yue Yi-hong, Han Wen-xiu. Study on the predictable size of chaotic systems [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2003, 23(1): 91-95.)
- [9] 张友旺.基于动态递归模糊神经网络的动态系统辨识[J].中南工业大学学报,2003,34(3):277-280.
(Zhang You-wang. Identification of dynamic system based on dynamic fuzzy neural network[J]. J of Center South University Technology, 2003, 34(3): 277-280.)
- [10] Lee Ching-hung, Teng Ching-cheng. Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(4): 349-366.

(上接第 1128 页)