

基于间歇反馈多维泰勒网的 动力学模型

周博^{1,2} 严洪森^{1,2}

摘要 具有羊群效应的系统, 因为结构复杂, 内部要素互相影响, 参与其中的人类行为难以预测而不易建立整体模型. 本文提出建立间歇反馈多维泰勒网动力学模型方法, 通过叠加的死区函数模拟了羊群效应中从众心理对系统产生的间歇反馈, 结合多维泰勒网建立了适合普遍系统的一般动力学方程. 该方法区别于以往羊群效应的以个体研究为出发点, 通过系统对外表征的数据波动建立了含有羊群效应的整体模型. 实例结果表明, 这种基于间歇反馈多维泰勒网的动力学建模方法是可行和有效的.

关键词 间歇反馈, 死区函数, 多维泰勒网, 动力学模型, 系统辨识

引用格式 周博, 严洪森. 基于间歇反馈多维泰勒网的动力学模型. 自动化学报, 2014, 40(7): 1517–1521

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01517

A Dynamics Model Based on Intermittent Feedback Multi-dimensional Taylor Network

ZHOU Bo^{1,2} YAN Hong-Sen^{1,2}

Abstract An integrated model of a dynamic system with herd behavior is difficult to be established because of its complex system structure, internal factors which influence each other, and involved human behaviors that are hard to predict. In this paper, a dynamics model based on intermittent feedback multi-dimensional Taylor network is proposed. According to the superposition of dead zone functions, the intermittent feedback caused by the crowd psychology of herd behavior is modeled, and the general dynamic equation suitable for common systems is established by combing the multi-dimensional Taylor network. The proposed method differs from the previous methods which start from individual studies of herd behavior, and establishes the integrated model containing herd behavior in terms of the data fluctuation which is externally characterized by the system. An example shows that the dynamics modeling method based on intermittent feedback multi-dimensional Taylor network is feasible and effective.

Key words Intermittent feedback, dead zone function, multi-dimensional Taylor network, dynamics model, system identification

Citation Zhou Bo, Yan Hong-Sen. A dynamics model based on intermittent feedback multi-dimensional Taylor network. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(7): 1517–1521

收稿日期 2013-08-19 录用日期 2013-11-01
Manuscript received August 19, 2013; accepted November 1, 2013
国家自然科学基金 (50875046, 60934008) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (50875046, 60934008)

本文责任编辑 曾志刚
Recommended by Associate Editor ZENG Zhi-Gang
1. 东南大学自动化学院 南京 210096 2. 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室 南京 210096

1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096
2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096

随着人类社会的建设发展, 越来越多的包含人类行为的系统成为被研究的热点. 在这一类系统中, 由于个体的差异性与独立性, 以及人类行为的自发性与随机性, 往往难以像对待有确定结构的物理系统那样去进行机理研究. 但是, 当把一定数量的个体集结成整体来考虑问题, 就会发现一些系统的变化趋势. 羊群效应就是这样一类趋势, 它原指羊群中领头羊往哪儿走, 后面的群羊就往哪儿走, 现在被广泛描述一类由人参与其中的系统常会出现的波动趋势. 例如: 金融市场的投资追买和追卖, 突发灾害或某一事件后人群的反应 (如抢购食盐、抢购矿泉水), 社会或网络舆论的热点波动, 交通系统中某些道路间歇性拥堵与空闲等. 研究这些现象, 有效引导其中的正面因素和疏导负面因素对于社会发展有重要的意义. 国内外有许多学者研究了如交通调度^[1]、博彩业^[2]、金融投资^[3]、紧急情况发生时^[4–5] 等不同领域或情形的羊群效应. 许多文献从不同角度对羊群效应机理作出分析或建立机理模型. 文献 [6] 研究了基于动态演化博弈论的舆论传播羊群效应; 文献 [7] 讨论了金融市场繁荣与恐慌的羊群效应机制; 文献 [8] 总结了股票交易中羊群效应非对称和非线性的特点; 文献 [9] 提出了一种新的模式可以解释带有羊群效应的人类社会文化集群; 文献 [10] 建立了一种基于网络结构的代理人概率羊群效应模型. 这些模型与研究合理地分析了个体间产生相互作用以致形成羊群效应的机理, 模拟和总结了羊群效应产生过程和规律.

但是现有研究都是针对特定的具体系统进行, 所建立的模型主要用来解释或模拟羊群效应是如何逐步形成、检测系统中是否存在羊群效应、羊群效应所呈现的特点、羊群效应发生时机等. 现实生活中人参与其中的系统往往十分复杂, 中间互相影响的因素千头万绪. 即使对于一个机理已知的系统, 如果单从机理入手, 也没有办法覆盖到系统的每一个状态, 没法追踪每一个人的想法与决定. 何况大多数系统运作机理并非清晰可辨. 因此仅从机理入手很难建立系统整体模型. 羊群效应最明显的特征是其整体对外表征的数据间歇起伏波动性. 现有数据建模方法^[11–13] 大多没有考虑羊群效应. 本文通过研究含有羊群效应的系统对外数据表征, 建立了基于间歇反馈多维泰勒网的动力学模型. 它用叠加的死区函数模拟了羊群效应中从众心理对系统产生的间歇反馈, 结合多维泰勒网建立了适合普遍系统的一般动力学方程. 实例仿真验证了本文方法的有效性.

1 模型的建立

1.1 多维泰勒网

多维泰勒网 (Multi-dimensional Taylor network, MTN) 是一种动力学模型建模方法. 它适合动力学一般系统的建模, 并且不依据系统的内在机理, 而是基于系统对外的数据表征. 通过对多维状态向量自身的数据挖掘, 建立网状结构模拟整个系统, 最终达到建立模型的目的. 国内一些学者正在对该方法在经济控制、建筑施工安全性监测、军事等领域应用进行研究.

系统动力学方程的一般形式如式 (1) 所示.

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(k), k) \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 是系统状态向量, \mathbf{y} 是系统输出向量. 非线性函数 \mathbf{f} 等效了 \mathbf{x} 的动力学映射关系. 函数 \mathbf{g} 表示状态-输出的映射关系. 基于多元泰勒公式展开的原理, 可以构造多维泰勒网模

型框图如图 1 所示. 其中 $w_j = \{w_{j,1}, w_{j,2}, \dots, w_{j,N(n,m)}\}$ 为连接线上的权值集合, $j = 1, 2, \dots, n$.

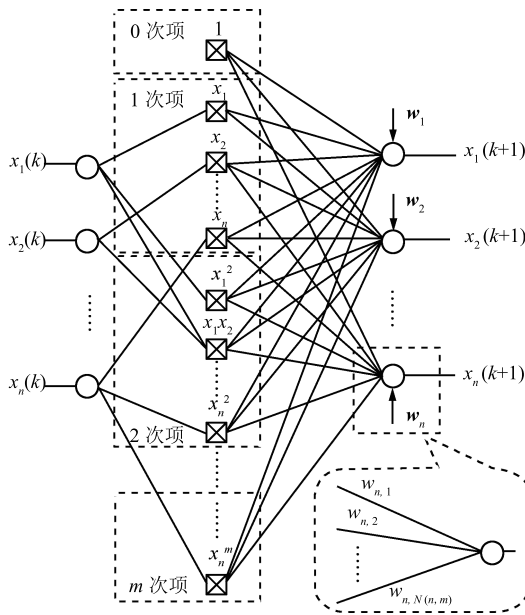


图 1 多维泰勒网模型图
Fig. 1 Multi-dimensional Taylor network

式 (1) 中系统状态方程可以写成如下多维泰勒网模型标准形式方程:

$$x_j(k+1) = \sum_{t=1}^{N(n,m)} w_{j,t} \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{t,i}}(k) + R_{j,m}(x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)) \quad (2)$$

其中, $R_{j,m}$ 为状态变量乘积项中各变量的幂次之和大于 m 的余项, $w_{j,t}$ 为第 t 个变量乘积项之前的权值, $N(n,m)$ 为该展开式的总项数, $\lambda_{t,i}$ 为第 t 个变量乘积项中变量 x_i 的幂次, 其满足

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{t,i} \leq m \quad (3)$$

即式 (1) 中向量函数 f 的各分量函数 f_j 是由各状态变量的幂次之和小于等于 m 的变量乘积项加权之和与其变量乘积项中各变量的幂次之和大于 m 的余项组成.

1.2 间歇反馈

从羊群效应产生的机理可知, 以人作为个体研究, 当其打算做出决定的时候, 由于缺乏理性的分析或可靠的判断依据, 只是跟随其他人的决定做决定或盲从, 经过一定数量个体的积累产生了主流意见, 于是该决定在系统中成为主导, 并不断壮大. 从对外表征来看, 就像给系统增加了一个阶跃信号作为正反馈. 假设简化系统为只有正负两个方向的量化数值, 那么可以用死区函数表示这样的过程.

死区函数的表达式为

$$dez(\Delta x, \alpha_1, \alpha_2) = \begin{cases} 1, & \Delta x \geq \alpha_1 \\ -1, & \Delta x \leq \alpha_2 \\ 0, & \alpha_2 < \Delta x < \alpha_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, Δx 表示状态变量的变化量, 当系统状态向正方向的变化量达到阈值 α_1 , 或向负方向达到阈值 α_2 , 反馈开关打开. 其示意图如图 2 所示.

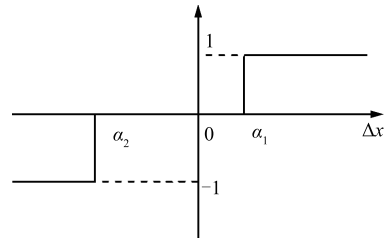


图 2 死区函数 $dez(\Delta x, \alpha_1, \alpha_2)$
Fig. 2 Dead zone function $dez(\Delta x, \alpha_1, \alpha_2)$

但是羊群效应不会一直持续, 当系统状态的变化量正或负方向达到更高的阈值 β_1, β_2 时, 羊群效应便会结束, 作用于系统的正反馈随之停止. 从物理意义上来说, 以股票市场为例, 人们为了追求利益追涨或者追跌, 产生羊群效应, 当系统因此产生的正反馈上升或下跌到一定的程度, 人们出现恐慌情绪或抄底心理选择获利了结或停止杀跌, 于是正反馈终止; 或以交通为例, 当人们都集中选择同一主流观点的便捷路径时, 当积累到一定程度造成交通不畅, 于是人们就会选择新的不同的路径, 作用于该拥堵路径的正反馈解除.

间歇反馈是指系统中因为羊群效应的存在, 使得状态变化量在不同阈值对系统自身反馈的产生与消失, 引起主导力量的间歇性聚集与消散, 导致系统对外表征呈现起伏波动状的过程. 使用两个死区函数通过相减的方式叠加可以表示这一过程. 两个死区函数叠加表达式为

$$dez(\Delta x, \alpha_1, \alpha_2) - dez(\Delta x, \beta_1, \beta_2) = \begin{cases} 1, & \alpha_1 < \Delta x < \beta_1 \\ -1, & \beta_2 < \Delta x < \alpha_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其示意图如图 3 所示.

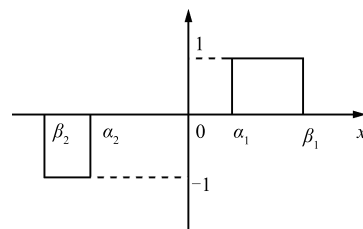


图 3 死区函数叠加
Fig. 3 Superimposed dead zone functions

1.3 间歇反馈多维泰勒网

由于很多非线性动力学系统内部状态复杂, 各种因素互相影响, 因此, 式 (1) 中用 f 将系统的自身属性和状态控制属性都涵盖在内, 没有单独区分状态控制向量 u , 如果增加控制向量, 系统模型有如下向量形式:

$$x(k+1) = x(k) + f(x(k), k) + u(x(k), k) \quad (6)$$

用间歇反馈表示系统的控制量 u , 有如下定理成立.

定理 1. 对于自变量为 $x(k)$ 和 $dez(\Delta x(k), \alpha_1, \alpha_2) - dez(\Delta x(k), \beta_1, \beta_2)$ 的可展开成泰勒级数任意非线性向量函数, 有如下形式:

$$h_u = f_u + \text{diag}\{\varphi_u\} \times (dez(\Delta x(k), \alpha_1, \alpha_2) - dez(\Delta x(k), \beta_1, \beta_2)) \quad (7)$$

其中, $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示把向量扩展为对角元素为对应向量元素的对角矩阵.

证明. 令

$$z = dez(\Delta x(k), \alpha_1, \alpha_2) - dez(\Delta x(k), \beta_1, \beta_2)$$

则将 h_u 展开为关于 z 的泰勒级数形式, 有:

$$h_u(z) = v_0 + \text{diag}\{z\}v_1 + \text{diag}^2\{z\}v_2 + \cdots \quad (8)$$

其中, $z = (z_1, z_2, \cdots, z_n)^T$, $v_0 = (v_{0,1}, v_{0,2}, \cdots, v_{0,n})^T$, $v_1 = (v_{1,1}, v_{1,2}, \cdots, v_{1,n})^T, \cdots$.

式 (8) 的标量形式为

$$\begin{cases} h_{u,1}(z_1) = v_{0,1} + v_{1,1}z_1 + v_{2,1}z_1^2 + \cdots \\ h_{u,2}(z_2) = v_{0,2} + v_{1,2}z_2 + v_{2,2}z_2^2 + \cdots \\ \vdots \\ h_{u,n}(z_n) = v_{0,n} + v_{1,n}z_n + v_{2,n}z_n^2 + \cdots \end{cases} \quad (9)$$

因为根据死区函数特性, z_j 值只可能为 0, 1 或 -1 ($j = 1, 2, \cdots, n$), 所以对 $d = 1, 2, \cdots$, 有 $z_j^d = \pm z_j$. 将 z_j 各项分别合并, 设 $\varphi_{u,j}$ 为 $v_{j,1}, v_{j,2}, \cdots$ 的合并项, 令 $f_u = v_0$, $\varphi_u = (\varphi_{u,1}, \varphi_{u,2}, \cdots, \varphi_{u,n})^T$, 得:

$$h_u = f_u + \text{diag}\{\varphi_u\}z \quad (10)$$

□

因此可将系统自身的状态负反馈和死区函数形式的状态正反馈组成 u 的基本表达式:

$$u(x(k), k) = f_u(x(k), k) + \text{diag}\{\varphi_u\} \times (dez(\Delta x(k), \alpha_1, \alpha_2) - dez(\Delta x(k), \beta_1, \beta_2)) \quad (11)$$

其中, φ_u 为激励函数, 表示对叠加的死区函数 dez 激励强度大小的向量函数.

其标量形式为

$$u_j = f_{u,j} + \varphi_{u,j}(dez(\Delta x_j(k), \alpha_{1,j}, \alpha_{2,j}) - dez(\Delta x_j(k), \beta_{1,j}, \beta_{2,j})) \quad (12)$$

其中, 因为 $f_{u,j}$ 同样为关于 x 不同分量的函数, 因此可合并入 f_j 中, 由多维泰勒网表示. 忽略幂次之和大于 m 的余项 $R_{j,m}$, 得到间歇反馈多维泰勒网 (Intermittent feedback multi-dimensional Taylor network, IFB-MTN) 动力学模型状态方程:

$$x_j(k+1) = \sum_{t=1}^{N(n,m)} w_{j,t} \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{t,i}}(k) + \varphi_{u,j}(dez(\Delta x_j(k), \alpha_{1,j}, \alpha_{2,j}) - dez(\Delta x_j(k), \beta_{1,j}, \beta_{2,j})) \quad (13)$$

2 间歇反馈多维泰勒网模型参数求解

在实际系统中, 多维输出的情况可以看作是对应不同状态变量的分量输出叠加, 本文以系统样本数据集输出是 1 维为例, 多维输出类推. 设样本集 $T = \{(x(k), y(k+1))\}_{k=1}^d$, $x(k) \in \mathbf{R}^n$, $y(k) \in \mathbf{R}$. 因为样本集中 $y(k)$ 为 1 维输出, 设 $y(k) = x_1(k)$, 则对应该数据集的间歇反馈多维泰勒网数学模型为

$$y(k+1) = \sum_{t=1}^{N(n,m)} w_t \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{t,i}}(k) + \varphi_u(dez(\Delta x_1(k), \alpha_1, \alpha_2) - dez(\Delta x_1(k), \beta_1, \beta_2)) \quad (14)$$

间歇反馈多维泰勒网的参数辨识过程包含两部分参数的辨识, 其中多维泰勒网部分用来描述系统中稳定的部分, 从物理意义上来说, 其表示的是系统一个长期的动力学趋势与运行规律. 间歇反馈部分描述的则是系统的短期因为羊群效应而产生的波动, 可视为不稳定部分. 两个部分很难从一个系统中先清晰的区分出来, 再分别进行辨识. 本文首先辨识多维泰勒网参数 w , 然后再确定死区函数的区间参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 和激励函数 φ_u . 之所以先进行多维泰勒网参数辨识, 是因为在对样本数据进行参数辨识的时候, 多维泰勒网为使得所建立的模型更符合样本数据中体现的共性, 建立的模型会更好的模拟大多数样本数据, 即认为其为系统的稳定部分. 然后再将剩下的不稳定部分由间歇反馈来建模辨识, 最终完成整个模型的建立.

多维泰勒网 (MTN) 的参数可以通过样本学习获得, 以下给出了运用最小二乘法求解 MTN 模型参数 w 的具体方法. 先忽略式 (14) 等号右边第 2 项死区函数部分, 求解 \tilde{y} , 令

$$\tilde{y}(k+1) = \sum_{t=1}^{N(n,m)} w_t \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{t,i}}(k) \quad (15)$$

将式 (15) 代入误差平方和函数为

$$E = \sum_{k=1}^d (y(k+1) - \tilde{y}(k+1))^2 = \sum_{k=1}^d (y(k+1) - \sum_{t=1}^{N(n,m)} w_t \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{t,i}}(k))^2 \quad (16)$$

令

$$a_k = \left(\prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{1,i}}(k), \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{2,i}}(k), \cdots, \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{N(n,m),i}}(k) \right)^T$$

$$A = (a_1, a_2, \cdots, a_d)$$

$$w = (w_1, w_2, \cdots, w_{N(n,m)})^T$$

$$y = (y(2), y(3), \cdots, y(d+1))^T$$

则式 (16) 变为向量形式:

$$E = \sum_{k=1}^d (y(k+1) - w^T a_k)^2 = w^T A A^T w - 2y^T A^T w + y^T y \quad (17)$$

参数 w 的估计值 \hat{w} 可由最小二乘估计获得:

$$\hat{w} = (A A^T)^{-1} A y \quad (18)$$

其中, $\hat{w} = (\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_{N(n,m)})^T$, 由式 (15) 得输出估计值:

$$\hat{y}(k+1) = \sum_{t=1}^{N(n,m)} \hat{w}_t \prod_{i=1}^n x_i^{\lambda_{t,i}}(k) \quad (19)$$

间歇反馈模型包含的 4 个死区区间参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 可由遗传算法求解. 首先将样本数据输出部分去除由多维泰勒网计算出的输出估计值, 剩下的余量作为新样本集输出, 令 $\{\hat{y}(k) = y(k) - \tilde{y}(k)\}_{k=2}^{d+1}$, 得新样本集为 $\tilde{T} = \{(\mathbf{x}(k), \hat{y}(k+1))\}_{k=1}^d$. 接着将四个参数编码为染色体, 并使它们满足约束 $\beta_2 < \alpha_2 < 0 < \alpha_1 < \beta_1$.

关于适应度函数的设计: 设 ND_1 为样本数据集中满足 $\alpha_1 < \Delta x(k) < \beta_1$ 时, $\hat{y}(k+1) > 0$ 的样本总个数; ND_2 为样本数据集中满足 $\beta_2 < \Delta x(k) < \alpha_2$ 时, $\hat{y}(k+1) < 0$ 的样本总个数; ND_3 为 $\Delta x(k)$ 不在叠加死区区间, 且 $|\hat{y}(k+1)| < \xi$ 的样本总个数, 其中 ξ 为阀门开关, 表示当 $\Delta x(k)$ 不在激励区间时, 下一时刻状态低于该阀门数值为有效样本, 应当计入有效样本总个数. 将有效样本总个数设定为适应度函数:

$$fit = ND_1 + ND_2 + ND_3 \quad (20)$$

有效样本总个数越大表示该对应区间越有效. 最后通过遗传算法若干代交叉变异得到最优适应度函数对应的模型估计值 $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$.

在对每一代每条染色体进行适应度计算统计 ND_1 和 ND_2 值的时候, 同时将样本集 \tilde{T} 中符合 $\Delta x(k)$ 落在 $[\alpha_1, \beta_1] \cup [\beta_2, \alpha_2]$ 区间对应的 $\hat{y}(k+1)$ 计入集合 T_φ . 设最后得到的全局最优适应度函数值所对应的集合 $T_\varphi = \{y_{\varphi,j}\}_{j=1}^{ND_1+ND_2}$. 取激励函数 φ_u 的估计函数 $\hat{\varphi}_u$ 为

$$\hat{\varphi}_u = \frac{1}{ND_1 + ND_2} \sum_{j=1}^{ND_1+ND_2} |y_{\varphi,j}| \quad (21)$$

3 应用实例

文献 [14] 验证了中国股市中存在着明显的羊群效应. 因此本文以中国股票市场为例, 建立间歇反馈多维泰勒网动力学模型. 取上证指数 (1A0001) 2009 年 10 月 20 日至 2011 年 1 月 10 日 300 个日收盘数据, 其中前 270 个作为样本数据, 后 30 个作为测试验证数据. 利用 Matlab 7.7 编制间歇反馈多维泰勒网模型 (IFB-MTN) 程序, 运行环境为 Core 2 Quad CPU Q8400、主频 2.66 GHz、内存 2 G 的微机. 程序设定的初始值: MTN 模型规模参数 $n = 3, m = 3$, 参数 w 维数 $N(n, m)$; 间歇反馈阀门参数 $\xi = 25$; 遗传算法仿真代数 1 000, 群体规模 250, 染色体变异概率 0.05, 染色体交叉概率 80%. 30 个测试数据实际值, 单步预测值及相对误差见表 1.

为了比较 IFB-MTN 模型的预测能力, 选取自回归移动平均 (Autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型、BP 神经网络 (Back propagation neural network, BPNN) 模型、没有加入状态控制的多维泰勒网模型 (MTN) 对同样数据集进行建模和预测. 其中 ARIMA 模型参数选取 (3, 1, 3); BPNN 模型网络层数为 3, 结点数为 (3, 3, 1), 迭代次数 1 000, 停止阈值 $1E-4$; MTN 模型基本参数设置与 IFB-MTN 模型相同. 对各个模型的预测结果进行误差指标分析, 指标均方根误差 (Root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE) 和平均绝对百

分比误差 (Mean absolute percentage error, MAPE) 用来评价预测的精度. 对于每一种指标所求得之数值越低, 表示其预测绩效越高. 结果如表 2 所示.

表 1 预测值与实际值比较

Table 1 Predicted value and the actual value comparison

序号	实际值	预测值	相对误差 (%)
1	2 820.18	2 848.84	-1.016 4
2	2 823.45	2 816.69	0.239 5
3	2 843.61	2 833.18	0.366 7
4	2 842.43	2 843.88	-0.050 9
5	2 857.18	2 835.86	0.746 1
6	2 875.86	2 857.90	0.624 5
7	2 848.55	2 873.70	-0.883 0
8	2 810.95	2 817.01	-0.215 6
9	2 841.04	2 792.15	1.720 9
10	2 922.95	2 851.86	2.432 2
11	2 927.08	2 933.11	-0.206 2
12	2 911.41	2 922.95	-0.396 4
13	2 898.14	2 885.39	0.440 1
14	2 893.74	2 877.47	0.562 2
15	2 852.92	2 872.97	-0.702 6
16	2 904.11	2 849.86	1.867 9
17	2 877.90	2 941.45	-2.208 0
18	2 855.22	2 842.60	0.442 1
19	2 835.16	2 836.88	-0.060 6
20	2 781.40	2 815.57	-1.228 5
21	2 732.99	2 782.29	-1.803 9
22	2 751.53	2 743.63	0.287 0
23	2 759.57	2 761.54	-0.071 5
24	2 808.08	2 753.56	1.941 6
25	2 852.65	2 834.50	0.636 1
26	2 838.59	2 848.27	-0.341 0
27	2 824.20	2 803.88	0.719 4
28	2 838.80	2 802.24	1.287 8
29	2 791.81	2 842.59	-1.819 0
30	2 804.05	2 781.79	0.793 9

表 2 四种模型的预测指标统计

Table 2 Statistical predictors of four models

	RMSE	MAE	MAPE (%)
ARIMA	33.69	28.32	0.9978
BPNN	33.00	27.12	0.9554
MTN	32.63	25.89	0.9125
IFB-MTN	31.53	24.73	0.8701

从表 2 可以看出 IFB-MTN 模型各项指标均好于其他模型. 这是因为其他三种模型均是将系统中所有稳定或不稳定部分混合在一起进行建模, 而 IFB-MTN 模型特别针对了系

统中不稳定的部分通过模拟其羊群效应的对外表征, 在模型中增加了间歇反馈, 从而增强了模型的辨识准确度.

在 IFB-MTN 模型中, 参数值 ξ 也影响着模型建立的准确度. 如果 ξ 设定过小或过大, 都会造成样本数据中有效信息被遗漏或无效信息被错选. 本文以样本集 \tilde{T} 中所有 \hat{y} 值的绝对均值 \hat{y}_{abs} 作为基准数值, 令 $\xi = \kappa \hat{y}_{\text{abs}}$, 取 κ 范围从 10% 至 100%, 每两个值间隔 5%, 生成预测指标 MAPE 曲线如图 4 所示. 因此 ξ 取基准数值的 75%~85% 为宜.

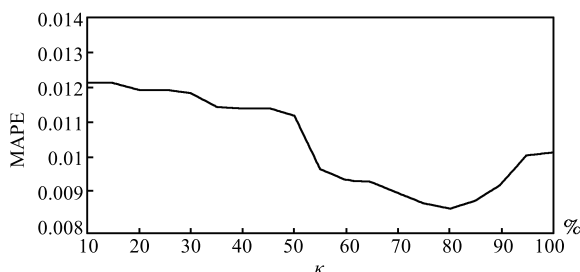


图 4 参数 κ 的取值与指标 MAPE 对应曲线

Fig. 4 Corresponding curve of κ and MAPE

4 结束语

本文的间歇反馈多维泰勒网建模法, 通过从全局角度模拟非线性动力学系统中的羊群效应, 建立了系统的等效模型. 以往的方法更注重从个体角度入手, 目的是研究个体间交互、系统演化、羊群效应产生过程, 而本文的建模思路与方法主要着眼于系统因羊群效应而对外表征的数据波动, 不同于以往的以机理研究为出发点, 同时研究目的侧重于系统对外表征和输出的预测. 因此本文方法更适用于系统的全局模型建立. 同时相比于传统数据建模方法, 本文增强了模型的辨识针对性和准确度.

References

- Gaker D, Zheng Y D, Walker J. Experimental economics in transportation: focus on social influences and provision of information. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, **2156**: 47–55
- Wever S, Aadland D. Herd behaviour and underdogs in the NFL. *Applied Economics Letters*, 2012, **19**(1): 93–97
- Tong J K, Zhu S Z. Empirical research on herd behavior in Chinese stock market based on CSAD model. In: Proceedings of the 2012 International Conference on Management Innovation and Public Policy. Chongqing, China, 2012, **1–6**: 2399–2403
- Alavizadeh F, Lucas C, Moshiri B. Adaptation of personality-based decision making to crowd behavior simulations. In: Proceedings of the 13th international conference on Artificial Intelligence: Methodology, Systems and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, **5253**: 385–389
- Yan Xiang-Nong, Xiao Guo-Qing, Li Si-Hui. Theoretical analysis and simulation study of herd behavior in fire evacuation. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, **7**(4): 46–51

(颜向农, 肖国清, 李思慧. 火灾疏散中羊群效应的理论探析与模拟研究. *中国安全生产科学技术*, 2011, **7**(4): 46–51)

- Han Shao-Chun, Liu Yun, Zhang Yan-Chao, Cheng Hui. Herd instinct of opinion based on dynamic evolutionary game theory. *Journal of Systems Engineering*, 2011, **26**(2): 275–281
(韩少春, 刘云, 张彦超, 程辉. 基于动态演化博弈论的舆论传播羊群效应. *系统工程学报*, 2011, **26**(2): 275–281)
- Fenzl T, Pelzmann L. Psychological and social forces behind aggregate financial market behavior. *Journal of Behavioral Finance*, 2012, **13**(1): 56–65
- Kapusuzoglu A. Herding in the Istanbul stock exchange (ISE): a case of behavioral finance. *African Journal of Business Management*, 2011, **5**(27): 11210–11218
- Mäs M, Flache A, Helbing D. Individualization as driving force of clustering phenomena in humans. *PLoS Computational Biology*, 2010, **6**(10): e1000959
- Alfarano S, Milaković M. Network structure and N -dependence in agent-based herding models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2009, **33**(1): 78–92
- Hu Shou-Song, Zhang Zheng-Dao. Fault prediction for nonlinear time series based on neural network. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(7): 744–748
(胡寿松, 张正道. 基于神经网络的非线性时间序列故障预报. *自动化学报*, 2007, **33**(7): 744–748)
- Wu Min, Xu Chen-Hua. An intelligent integrated predictive method based on gas temperature profile for burn-through point. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(12): 1313–1320
(吴敏, 徐辰华. 基于烟气温度场分布的烧穿点智能集成预测方法. *自动化学报*, 2007, **33**(12): 1313–1320)
- Xuan Zhao-Yan, Yang Gong-Xun. Application of EMD in the atmosphere time series prediction. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(1): 97–101
(玄兆燕, 杨公训. 经验模态分解法在大气时间序列预测中的应用. *自动化学报*, 2008, **34**(1): 97–101)
- Cheng Xi-Ming, Jiang Xue-Lei, Chen Min, Wu Guo-Fu. An empirical analysis on the portfolios herd behavior in China stock market. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2004, **24**(12): 34–38, 48
(程希明, 蒋学雷, 陈敏, 吴国富. 中国股市板块羊群效应的实证研究. *系统工程理论与实践*, 2004, **24**(12): 34–38, 48)

周博 东南大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为系统辨识、预测. 本文通信作者. E-mail: ai_haibara@126.com

(ZHOU Bo Ph.D. candidate at the School of Automation, Southeast University. His research interest covers system identification and forecasting. Corresponding author of this paper.)

严洪森 东南大学自动化学院教授. 主要研究方向为生产计划与调度、预测, 知识化制造.

E-mail: hsyang@seu.edu.cn

(YAN Hong-Sen Professor at the School of Automation, Southeast University. His research interest covers production planning and scheduling, forecasting and knowledgeable manufacturing.)