文章编号：1000-8152(2003)05-0793-04

基于脉冲响应的输出误差模型的辨识

黄祖毅[1]，陈建清[2]

(1.清华大学 热能工程系，北京 100084；2.清华大学 自动化系，北京 100084)

摘要：基于系统脉冲响应参数，利用相关分析方法，提出了一种辨识输出误差模型参数的方法．该方法是利用有限脉冲响应模型逼近输出误差模型，通过依次递增脉冲响应参数的数目 N 来提高逼近精度．理论分析表明，只要 N 足够大，模型的辨识精度可以满足实际要求．提出的辨识方法可以在假设阶次 $N=1$ 的条件下，依次递增计算 N 较大时的脉冲响应参数和目标函数值，从而根据脉冲响应确定系统的参数．仿真试验说明提出的方法估计输出误差模型的参数是有效的．

关键词：辨识；参数估计；最小二乘

中图分类号：TP273　　**文献标识码**：A

Identification of output error models based on impulse response

HUANG Zu-yi[1], CHEN Jian-qing[2]

(1. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on system impulse response, identification problem of the systems described by output error model was studied using correlation analysis, and its basic idea was to use a finite impulse response parameter model to approach the system model, and the model approximation precision was enhanced with the number N of the number of the impulse response parameters increasing. The theory analysis indicated that the model approximation could meet the requirements in Engineering as long as N is large enough. The proposed method could recursively compute the impulse response parameters and objective function by increasing N in turn from $N=1$, and estimated the system model parameters by the impulse response parameters. The simulation example shows that the proposed algorithm is effective for estimating the parameters of output error models.

Key words: identification; parameter estimation; least squares

1 引言(Introduction)

从 1967 年国际自动控制联合会(IFAC)每三年组织一次“辨识与系统参数估计”专题讨论会以来，系统参数估计方法和各种辨识应用软件工具得到长足发展，辨识方法的(有界)收敛性、收敛速率、估计误差上界的研究也取得了丰富的成果[1~5]．但是，诞生新辨识方法的确不多，可见新辨识方法的提出极为困难．近年来，丁锋等提出了辅助模型辨识方法[6]，递阶辨识方法[7]，多新息辨识方法[8]，系统参数和状态联合辨识方法[9]等．但是以上方法大都是假设系统阶次已知的递推辨识，当系统阶次变化了，就必须重新进行递推计算，计算量大．本文提出一种基于脉冲响应序列辨识的输出误差模型的参数确定方法，其基本思路是：脉冲响应序列的辨识是依阶次 N 递增，利用相关函数递推计算的，在估计出脉冲响应序列后，可以计算出各阶次下输出误差模型的参数．

本文首先把输出误差模型化为等价的脉冲响应序列模型，再利用相关分析方法，导出脉冲响应参数依阶次 N 递增的递推计算式，最后通过脉冲响应参数确定输出误差模型的参数．

2 问题陈述(Problem formulation)

考虑下列系统的辨识问题

$$y(t)=\frac{B(z)}{A(z)}u(t)+v(t)=$$
$$\frac{b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\cdots+b_nz^{-n}}{1+a_1z^{-1}+\cdots+a_nz^{-n}}u(t)+v(t).\quad(1)$$

其中 $u(t)$ 和 $y(t)$ 为系统的输入输出变量，$v(t)$ 为零均值不相关随机噪声，z^{-1} 是单位后移算子．

收稿日期：2002-06-15；收修改稿日期：2003-03-12．

基金项目：国家自然科学基金(60074029)；国家自然科学基金重点项目(69934010)；清华大学信息学院创新基金(985 信息-50-基金-50)资助项目．

假设系统是平稳的,式(1)可化为

$$y(t)=(c_1z^{-1}+c_2z^{-2}+\cdots+c_iz^{-i}+\cdots)u(t)+v(t), \tag{2}$$

且 $i\to\infty$ 时,$c_i\to 0$. 式(2)可以用一个有限脉冲响应模型近似为

$$y(t)=(c_1z^{-1}+c_2z^{-2}+\cdots+c_Nz^{-N})u(t)+v(t). \tag{3}$$

因此,只要 N 足够大,式(3)可以任意精度逼近式(2).式(3)是方程误差模型,故递推最小二乘法可以获得一致无偏参数估计,但是递推最小二乘无法实现依阶次递增的递推计算.式(3)逼近式(2)的精度取决于 N 的大小,N 的选择又依赖与系统的快速性,因此寻找一种依 N 递增的辨识方法,从而确定系统(1)的参数已成为必然.本文的目标是:通过相关分析,利用系统的输入输出数据 $\{y(t),u(t)\}$,设计一种依阶次 N 递增的计算系统脉冲响应序列 $\{c_i\}$,从而辨识系统(1)的参数.

3 依阶次递增辨识脉冲响应参数(Identification of impulse response parameters with order increasing)

取目标函数为

$$J_N=\mathrm{E}\,[v^2(t)]=\mathrm{E}\,\{[y(t)-c_1u(t-1)-c_2u(t-2)-\cdots-c_Nu(t-N)]^2\}.$$

上式对未知数 $c_i(i=1,2,3,\cdots,N)$ 求偏导数得到

$$\frac{\partial J_N}{\partial c_j}=\mathrm{E}\,\{2[\sum_{i=1}^{N}c_iu(t-i)-y(t)]u(t-j)\}=0, \tag{4}$$

即

$$\sum_{i=1}^{N}c_iR_u(i-j)=R_{uy}(j),\ j=1,2,3,\cdots,N. \tag{5}$$

其中相关函数定义为

$$\begin{aligned}&R_u(i)=R_u(-i)=\mathrm{E}\,[u(t)u(t+i)],\\&R_y(i)=R_y(-i)=\mathrm{E}\,[y(t)y(t+i)],\\&R_{uy}(i)=\mathrm{E}\,[u(t)y(t+i)].\end{aligned} \tag{6}$$

设

$$\begin{cases}R_N=\begin{bmatrix}R_u(0)&R_u(1)&\cdots&R_u(N-1)\\R_u(1)&R_u(0)&\cdots&R_u(N-2)\\\vdots&\vdots&&\vdots\\R_u(N-1)&R_u(N-2)&\cdots&R_u(0)\end{bmatrix},\\C_N=[c_1,c_2,\cdots,c_N]^{\mathrm T},\\R_{uy}^N=[R_{uy}(1),R_{uy}(2),\cdots,R_{uy}(N)]^{\mathrm T}.\end{cases} \tag{7}$$

式(5)是由 N 个未知数组成 N 个方程组,把它们写成矩阵形式为

$$R_NC_N=R_{uy}^N. \tag{8}$$

由于 R_N 是系统输入相关函数构成的矩阵(即相关函数阵),肯定是可逆矩阵.从上式可求解出 c_i,对应于阶次为 N 的参数估计为

$$C_N=R_N^{-1}R_{uy}^N. \tag{9}$$

而目标函数为

$$J_N=R_y(0)-\sum_{i=1}^{N}c_iR_{uy}(i). \tag{10}$$

记 $C_N^N=[c_1^N,c_2^N,\cdots,c_N^N]^{\mathrm T}$,为对于阶次为 N 时的脉冲响应序列 $c_j^N,j=1,2,3,\cdots$,它满足

$$\begin{bmatrix}R_y(0)&-(R_{uy}^N)^{\mathrm T}\\-R_{uy}^N&R_N\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\C_N^N\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}J_N\\0\end{bmatrix}. \tag{11}$$

对于阶次为 $N+1$ 时的脉冲响应参数记为 c_j^{N+1},有

$$\begin{bmatrix}R_y(0)&-(R_{uy}^{N+1})^{\mathrm T}\\-R_{uy}^{N+1}&R_{N+1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\C_{N+1}^{N+1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}J_{N+1}\\0\end{bmatrix}. \tag{12}$$

式(11)可以化为

$$\begin{bmatrix}R_y(0)&-(R_{uy}^N)^{\mathrm T}&-R_{uy}(N+1)\\-R_{uy}^N&R_N&R_u^N\\-R_{uy}(N+1)&(R_u^N)^{\mathrm T}&R_u(0)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\C_N^N\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}J_N\\0\\A_N\end{bmatrix}. \tag{13}$$

式中

$$R_u^N=[R_u(N),R_u(N-1),\cdots,R_u(1)]^{\mathrm T},$$

$$A_N=-R_{uy}(N+1)+\sum_{i=1}^{N}c_iR_u(N-i+1).$$

由式(12)和式(13)可以得到

$$R_{N+1}(C_{N+1}^{N+1}-\begin{bmatrix}C_N^N\\0\end{bmatrix})=\begin{bmatrix}0\\-A_N\end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$J_{N+1}=J_N-\sum_{i=1}^{N}R_{uy}(i)(c_i^{N+1}-c_i^N)-R_{uy}(N+1)c_{N+1}^{N+1}. \tag{15}$$

由式(14)可以得到 c_i^N 到 c_i^{N+1} 的递推关系

$$C_{N+1}^{N+1}=\begin{bmatrix}C_N^N\\0\end{bmatrix}+R_{N+1}^{-1}\begin{bmatrix}0\\-A_N\end{bmatrix}. \tag{16}$$

由式(14)和式(15)可以求出目标函数 J_N 到 J_{N+1} 的递推关系

$$J_{N+1}=J_N-(R_{uy}^{N+1})^{\mathrm T}R_{N+1}^{-1}\begin{bmatrix}0\\-A_N\end{bmatrix}. \tag{17}$$

式(16),(17)中存在 R_{N+1} 求逆计算,这增加了计算量,因此须构造 R_{N+1}^{-1} 的递推计算公式,使得 R_{N+1}^{-1} 的求解可以从标量 R_1^{-1} 初值的递推计算,从而减少了

计算量.具体算法如下.

由 R_N 的结构,可以把 R_{N+1} 表示为

$$R_{N+1} = \begin{bmatrix} R_N & x_N \\ x_N^{\mathrm{T}} & p \end{bmatrix}. \tag{18}$$

式中 $x_N = [R_u(N), R_u(N-1), \cdots, R_u(1)]^{\mathrm{T}}, p = R_u(0)$,则 R_{N+1}^{-1} 和 R_N^{-1} 有如下递推关系

$$\begin{cases} T = p - x_N^{\mathrm{T}} R_N^{-1} x_N, \\ R_{N+1}^{-1} = \begin{bmatrix} R_N^{-1} + R_N^{-1} x_N T^{-1} x_N^{\mathrm{T}} R_N^{-1} & -R_N^{-1} x_N T^{-1} \\ -T^{-1} x_N^{\mathrm{T}} R_N^{-1} & T^{-1} \end{bmatrix}. \end{cases} \tag{19}$$

把 R_{N+1}^{-1} 的迭代公式代入式(14),(15),则有如下求解 C_{N+1}^{N+1}, J_{N+1} 的迭代公式

$$C_{N+1}^{N+1} = \begin{bmatrix} C_N^N + R_N^{-1} x_N T^{-1} A_N \\ -T^{-1} A_N \end{bmatrix}, \tag{20}$$

$$J_{N+1} = J_N - R_{uy}^N R_N^{-1} x_N T^{-1} A_N + R_{uy}(N+1) T^{-1} A_N. \tag{21}$$

式中的 T 是标量,R^{-1} 可以从 R_1^{-1} 方便地递推求出,$R_1^{-1} = R_u^{-1}(0)$ 也是标量.迭代求解过程为:由 $R_1^{-1} = R_u^{-1}(0), x_1 = R_u(1), p = R_u(0), J_1 = R_y(0) - \dfrac{R_{uy}^2(1)}{R_u(0)}$ 开始迭代,通过式(19),(20)可以计算出不同 N 的参数 C_N^N,通过式(6)求出 $R_{uy}(N+1)$,通过式(21)求出 J_N.

在计算出阶次为 N 时的系统参数,由式(19)～(21)可以递推计算阶次为 $N+1$ 时的系统参数,从而可以在很小的 N 值(比如 $N=1$)下,可以推算出 N 较大时的脉冲响应序列参数值 c_i^{N+K}, J_{N+K}, K 是一个正整数.

由式(21)可知 $\{J_N\}$ 是 N 的递减函数,随 N 增大不断减小,似乎 N 越大越好.但是,当 N 大到一定的程度时,J_N 就不会有明显的减少,这时可以停止计算,参数 c_i 的精度就可以满足要求[1].

4 系统参数的辨识(System model parameter identification)

按照文献[10,11]模型等价的思想,可以由脉冲响应参数计算出输出误差模型描述的系统参数.具体方法如下:根据式(1)和(2)的等价性,可以得到方程

$$(c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \cdots + c_i z^{-i} + \cdots) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \cdots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n}}.$$

比较上式两边 z^{-1} 的系数,可得 $2n$ 个方程,把它们写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n & Q_b \\ 0 & Q_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_b \\ c_a \end{bmatrix}. \tag{22}$$

式中

$a = [a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1]^{\mathrm{T}},\ b = [b_1, b_2, \cdots, b_n]^{\mathrm{T}}$,

$c_a = [c_1, c_2, \cdots, c_n]^{\mathrm{T}},\ c_b = [c_{n+1}, c_{n+2}, \cdots, c_{2n}]^{\mathrm{T}}$,

$$Q_b = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & -c_0 \\ 0 & \cdots & -c_0 & -c_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ -c_0 & \cdots & -c_{n-2} & -c_{n-1} \end{bmatrix},$$

$$Q_a = \begin{bmatrix} -c_1 & \cdots & -c_{n-1} & -c_n \\ -c_2 & \cdots & -c_n & -c_{n+1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ -c_n & \cdots & -c_{2n-2} & -c_{2n-1} \end{bmatrix},\ c_0 = 0.$$

当 n 不同时,由上式可以求出不同阶次下的模型参数.对于式(22)的迭代算法作者还在研究,这样以便进一步减少计算量和提高方法的简便性.

5 仿真结果(Simulation result)

考虑下列仿真对象

$$y(t) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}} u(t) + v(t).$$

式中:$a_1 = -0.4500, a_2 = -0.8050, a_3 = 0.1950, a_4 = 0.1800; b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = 1$.

仿真时输入 $\{u(t)\}$ 采用零均值单位方差可测随机信号序列,$\{v(t)\}$ 采用零均值方差为 $\sigma^2 = 1$ 不相关随机噪声序列.参数估计误差相对范数定义为 $\delta = \|\hat{\theta}(t) - \theta\| / \|\theta\|$.为了方便计算,当 L 足够大,式(6)可用下式计算:

$$\begin{cases} R_u(i) = \dfrac{1}{L} \sum\limits_{t=1}^{L} u(t) u(t+i), \\ R_y(i) = \dfrac{1}{L} \sum\limits_{t=1}^{L} y(t) y(t+i), \\ R_{uy}(i) = \dfrac{1}{L} \sum\limits_{t=1}^{L} u(t) y(t+i). \end{cases} \tag{23}$$

对于 $t = 4000, N = 1, 2, \cdots$,使用式(19)～(21),(23)进行递推,分别求出参数 c_i^N, a_i^N, b_i^N,目标函数 J_N,如表1～3所示.从表1、表3可以看出:随着 N 的增加,c_i^N 越来越靠近真值,而目标函数 J_N 逐步减小,也就是随着 N 的增加,参数基本趋于稳定,目标函数 J_N 也逐步接近最优值.由于 J_N, c_i^N 在 $N=18$ 附近没有明显的变化,故递推计算可结束.为了检验本方法的效果,表2对 $A(z), B(z)$ 都假设为4阶,但对于未知系统 $A(z), B(z)$ 的阶次可以适当的设为更高的值.

表 1 随 N 递增 c_i^N 的估计值($t = 4000$ 时)

Table 1 Estimates of c_i^N with N increasing ($t = 4000$)

N	c_1^N	c_2^N	c_3^N	c_4^N	c_5^n	c_6^N	c_7^N	c_8^N	c_9^N	c_{10}^N	$\delta/(\%)$
1	1.1130										11.3000
2	1.1085	1.5914									10.1200
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
16	0.9612	1.4205	2.4395	3.0429	2.8932	3.0461	2.6981	2.5784	2.2043	…	2.0787
17	0.9669	1.4342	2.4424	3.0407	2.9071	3.0390	2.6843	2.5809	2.2117	…	2.0203
18	0.9798	1.4389	2.4536	3.0427	2.9051	3.0502	2.6784	2.5697	2.2140	…	1.8901
真值	1.0000	1.4500	2.4575	3.0781	2.9007	3.0430	2.6618	2.5277	2.1647	…	

表 2 $t = 4000$ 时,$N = 8,9,\cdots,18$ 的参数 a_i^N, b_i^N 的估计误差

Table 2 Estimate of a_i^N, b_i^N and its error ($N = 8,9,\cdots,18$)

N	b_1	b_2	b_3	b_4	a_1	a_2	a_3	a_4	$\delta/(\%)$
8	0.9337	0.9617	1.0006	0.9687	-0.4505	-0.8532	0.1914	0.2344	4.9656
9	0.9590	0.9551	0.9694	0.9223	-0.4738	-0.8051	0.1807	0.2046	4.9480
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
16	0.9612	0.9898	1.0315	0.9780	-0.4480	-0.8028	0.1751	0.1870	2.6816
17	0.9669	1.0097	0.9940	0.9885	-0.4390	-0.8467	0.2424	0.1533	3.5450
18	0.9798	1.0266	1.0023	0.9823	-0.4208	-0.8633	0.2185	0.1827	3.5632
真值	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-0.4500	-0.8050	0.1950	0.1800	

表 3 $t = 4000$ 时 $N = 1,2,\cdots$ 的目标函数值 J_N

Table 3 Objective function J_N($t = 4000$) with $N = 1,2,\cdots$

N	目标函数
1	1685.54654
2	1672.10894
⋮	⋮
16	1602.33658
17	1601.92379
18	1601.64723

参考文献(References):

[1] GOODWIN G C, SIN K S. *Adaptive Filtering Prediction and Control* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall, 1984.

[2] DING Feng, DING Tao. Convergence of forgetting factor least square algorithms [A]. 2001 *IEEE Pacific Rim Conf on Communications, Computers and Signal Processing* (*PACRIM*'01) [C]. Victoria: Victoria University Press, 2001:433 - 436.

[3] DING Feng, DING Tao. Mean square convergence of multi-innovation forgetting gradient identification [A]. 2001 *IEEE Pacific Rim Conf on Communications, Computers and Signal Processing* (*PACRIM*'01) [C]. Victoria: Victoria University Press, 2001:437 - 440.

[4] DING Feng, DING Tao, CHEN Tongwen. Martingale Hyperconvergence Theorem and Mean Square Convergence of Forgetting Gradient Algorithm [A]. *Third Int Conf on Information, Communications and Signal Processing* [C]. [s.l.]:[s.n.], 2001.

[5] DING Feng, YANG Jiaben, DING Tao. Performance analysis of least mean square algorithm for time-varying systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(3):433 - 437.

[6] 丁锋,谢新民.多变量系统的辅助模型辨识算法[J].清华大学学报(自然科学版),1992,32(4):100 - 106.
(DING Feng, XIE Xinmin. Auxiliary model identification algorithm for multivariable systems [J]. *J of Tsinghua University*, 1992, 32(4):100 - 106.)

[7] 丁锋,杨家本.大系统的递阶辨识[J].自动化学报,1999,25(5):647 - 654.
(DING Feng, YANG Jiaben. Hierarchical identification for large-scale systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(5):647 - 654.)

[8] 丁锋,谢新民,方崇智.时变系统辨识的多新息方法[J].自动化学报,1996,22(1):85 - 91.
(DING Feng, XIE Xinmin, FANG Chongzhi. Multi-innovation identification method for time-varying systems [J]. *Acta Automatica, Sinica*, 1996,22(1):85 - 91.)

[9] 丁锋,谢新民.系统参数和状态联合估计[J].控制与决策,1994,9(3):223 - 225.
(DING Feng, XIE Xinmin. Combined estimation of system parameters and states [J]. *Control and Decision*, 1994, 9(3):223 - 225.)

[10] 丁锋,杨家本.大系统频域模型简化的两种方法[J].系统工程,1998,16(5):60 - 66.
(DING Feng, YANG Jiaben. Two methods of model simplification for large scale systems [J]. *Systems Engineering*, 1998, 16(5):60 - 66.)

(下转第 801 页)

4 结束语(Conclusions)

1) 在一次拟合参数灰色预测模型 GM(1,1)的基础上,作者将原始数据经过弱化算子作用后进行1次指数平滑运算,再对背景值进行改造,从而首次建立了适用于电气设备绝缘故障诊断的灰色预测模型的新模式.

2) 在建模过程中首次提出通过1次指数平滑方法和背景值改造方法对原始数据序列重新生成的思想,从而减少了模型受冲击扰动的影响,可获得最小建模误差,并提高了预测精度.

3) 根据作者提出的新模式,以变压器油中溶解气体分析(DGA)为特征量,给出了电气设备绝缘故障诊断的灰色预测模型新模式的建模过程,并用实例进行了检验,从而为以其它特征量预测各类电气设备绝缘故障提供了新方法.

参考文献(References):

[1] 张明柳,孙才新.变压器油中气体色谱分析中以模糊综合评判进行故障诊断的研究[J].电工技术学报,1998,1(13):51-54.
(ZHANG Mingliu, SUN Caixin. Study on fault diagnosis of transformer DGA method with fuzzy multi-criteria analysis [J]. *Trans on China Electrotechnical Society*,1998,13(1):51-54.)

[2] 郑海平,孙才新,李俭,等.诊断电力变压器故障的一种灰色关联度分析模式及方法[J].中国电机工程学报,2001,21(10):106-109.
(ZHENG Haiping, SUN Caixin, LI Jian, et al. A model and method of degree of grey incidence analysis on transformer fault diagnosis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001,21(10):106-109.)

[3] 邓聚龙.灰色系统[M].北京:国防工业出版社,1985.
(DENG Julong. *Grey System* [M]. Beijing: National Defense and Industry Press,1985.)

[4] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,1999.
(LIU Sifeng, GUO Tianbang, DANG Yaoguo, et al. *Theory of Grey System and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 1999.)

[5] 孙才新,李俭,郑海平,等.基于灰色面积关联度分析的电力变压器绝缘故障诊断方法[J].电网技术,2002,26(7):24-29.
(SUN Caixin, LI Jian, ZHENG Haiping, et al. A new method of fault insulation diagnosis in power transformer based on degree of area incidence analysis [J]. *Power System Technology*,2002,26(7):24-29.)

[6] 李俭,孙才新,陈伟根,等.基于灰色聚类分析的充油电力变压器绝缘故障诊断的研究[J].电工技术学报,2002,17(4):80-83.
(LI Jian, SUN Caixin, CHEN Weigen, et al. Study on fault diagnosis of insulation of oil-immersed transformer based on grey cluster theory [J]. *Trans on China Electrotechnical Society*, 2002, 17(4):80-83.)

[7] LIU Sifeng, LIN Yi. *An Introduction to Grey System: Foundations, Methodology's and Applications* [M]. Slippery Rock: IIGSS Academic Publisher, 1998.

作者简介:

孙才新　(1944—),男,重庆大学教授,博士生导师,国务院学位委员会学科评议组成员,高电压与电工新技术教育部重点实验室主任,长期从事高电压绝缘和电气设备在线监测及故障诊断技术研究;

毕为民　(1956—),女,重庆大学博士研究生,研究方向:高电压绝缘和电气设备在线监测及故障诊断技术,E-mail:bi_weimin@ctgpc.com.cn;

周　湶(1973—),男,重庆大学博士研究生,研究方向:电气设备在线监测与故障诊断技术;

廖瑞金　(1963—),男,重庆大学教授,研究方向:高电压技术,电气设备在线监测及故障诊断技术;

陈伟根　(1967—),男,重庆大学副教授,研究方向:高电压技术,电气设备在线监测及故障诊断技术.

(上接第 796 页)

[11] 席裕庚.动态大系统方法导论[M].北京:国防工业出版社,1988.
(XI Yugeng. *Introduction on Dynamic Large-Scale Systems* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.)

作者简介:

黄祖毅　(1977—),男,2001 年清华大学热能工程系获得学士学位,现在清华大学热能工程系攻读硕士研究生,研究兴趣为热力系统非线性控制与辨识,E-mail:huangzy01@mails.tsinghua.edu.cn;

陈建清　(1977—),男,2001 年清华大学精仪系获得学士学位,现在清华大学自动化系攻读学士研究生,研究兴趣为控制理论与企业信息化.