

文章编号: 1000-8152(2003)05-0797-04

## 灰色预测参数模型新模式及其在电气绝缘故障预测中的应用

孙才新, 毕为民, 周 谔, 廖瑞金, 陈伟根  
(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 以灰色系统理论为基础, 研究电气绝缘故障诊断的灰色预测模型新模式及其应用. 建立了适用于电气设备绝缘故障诊断的一次拟合参数灰色预测的新模型, 并给出了新模式的建模过程, 提出将原始数据经弱化算子作用后进行一次指数平滑运算并对背景值进行改造的方法, 并以实例进行了检验, 结果表明该方法的可行性和有效性.

**关键词:** 灰色预测; 模型; 故障; 预测

**中图分类号:** TM411, TM401 **文献标识码:** A

### New gray prediction parameter model and its application in electrical insulation fault prediction

SUN Cai-xin, BI Wei-min, ZHOU Quan, LIAO Rui-jin, CHEN Wei-gen

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology,  
Chongqing University, Ministry of Education, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Based upon the gray system theory, the new mode of gray forecasting model for electrical insulation fault diagnosis and its application were studied. Firstly the new mode of gray forecasting with first-order fitting parameter suited for electrical insulation fault diagnosis was established. And then the modeling process for the new mode was presented. Finally the method was presented which was processing original data by means of the effect of weakening operator and the first-order exponent flatness operation, and then re-constructing background value, and according to the field example examination, the result shows that such method is feasibility and validity.

**Key words:** gray prediction; model; fault; prediction

#### 1 引言(Introduction)

在电力及工业企业中, 电气设备绝缘故障诊断都是以离线检测或在线监测到的反映故障的特征量数据来进行识别. 虽然以在线监测数据为基础的故障诊断可以及时发现各种潜伏性故障, 但国内外对预测潜伏性故障发展趋势或何时发展成故障或可能发生何种类型故障等运行部门十分关注的问题研究却甚少<sup>[1, 2]</sup>.

灰色系统理论是以“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象. 实际上反映电气绝缘潜伏性故障的特征量与故障之间相互依赖及相互影响的关系, 有些是已知的, 有些是未知的, 具有不确立性和灰色性<sup>[3-5, 7]</sup>, 因此, 电气设备绝缘故障信息与特征量之间是一个典型的灰色系统. 本文以灰色系统理论为基础, 研究电

气绝缘故障诊断的灰色预测模型新模式及其应用.

#### 2 一次拟合参数灰色预测模型的新模式 (New gray forecast model with one order fitness parameter)

##### 2.1 GM(1, 1)模型的建模思路 (Modeling idea of GM(1, 1))

灰色预测模型中最基本的是一次拟合参数模型, 即 GM(1, 1)<sup>[3, 4]</sup>. 它是通过对原始数据进行累加生成后, 得到规律性较强的序列, 再用指数曲线去拟合得到预测值, 即属指数增长型. 其 GM(1, 1)的建模思路可概括为图 1.

令  $X^{(0)}$  为  $n$  元序,

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)).$$

$X^{(1)}$  为  $X^{(0)}$  的累加生成,  $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k =$

1, 2, \dots, n,

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)),$$

则微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b. \tag{1}$$

解微分方程得时间响应为

$$x^{(1)}(t) = (x^{(1)}(0) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a},$$

其  $X^{(1)}$  的灰色预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(1)}(0) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k=1, 2, \dots, n). \tag{2}$$

从而得到原始数据序列  $\hat{X}^{(0)}$  的灰色预测模型

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1-e^a)(x^{(1)}(0) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k=1, 2, \dots, n). \tag{3}$$

GM(1,1) 响应式中的指数  $-a$  称为发展系数,  $b$  称为灰作用量.

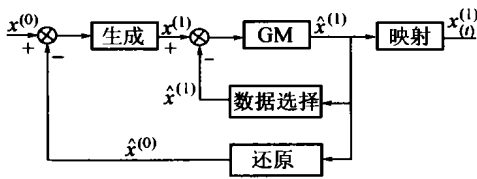


图1 灰色系统建模思路  
Fig 1 Modeling idea of gray system

2.2 非指数增长序列生成指数递增序列的方法  
(Method of creating exponential increasing sequence from non-exponential increasing sequence)

一次拟合参数的灰色预测模型 GM(1,1) 是一种指数增长型. 由于电气设备绝缘发生故障的原因是多种多样的, 可能是单一故障, 也可能是多种故障的组合, 具有不确定性和随机性, 导致反映故障发展的特征量信息数据并不是严格按指数增长规律变化, 因此, 若用一次拟合参数模型 GM(1,1) 进行故障预测, 其预测准确度就会变低, 预测误差也会显著变大. 为此我们把时间序列的 1 次指数平滑公式引入到 GM(1,1) 中, 将监测到的原始序列数据构造出一个新序列, 这样就可以把已有起伏性的原始数据序列变换成规律性增强的呈指数递增变化的序列, 从而可以大大提高预测精度.

本文采用指数平滑法时, 首先用加权方法改造原始数据序列, 一则可以充分利用有用信息, 二则可以大大减小随机性. 对于任意一随机序列  $\{\gamma(t)\}$ ,  $t \in [0, +\infty]$ , 构造一个新序列  $S(t)$ , 令

$$S(t) = \alpha\gamma(t) + (1-\alpha)S(t-1) \quad (0 \leq \alpha \leq 1). \tag{4}$$

设随机序列  $r(t)$  的数学期望 (均值) 为  $E[\gamma(t)] = e$ ,  $e$  代表数学期望的常数, 只要证明出新序列  $\{S(t)\}$  的随机性是弱于  $\{\gamma(t)\}$  的随机性, 就可以用新序列做进一步更精确的预测; 根据方差和标准差的定义知, 它们描述了随机变量的可能取值与均值偏差的疏密程度, 也反映了随机性的强弱. 经过严密的推理证明得知<sup>[4,6]</sup>, 新序列  $\{S(t)\}$  的方差小于原序列  $\{\gamma(t)\}$  的方差, 则新序列的随机性弱于原序列的随机性. 将式(4)引入 GM(1,1) 中, 即可得到优化的 GM(1,1) 模型. 指数平滑法中  $\alpha$  值决定模型的含义: 当  $\alpha = 0.01 \sim 0.3$  时, 此模型是“重老息”、“轻新息”; 当  $\alpha = 0.5$  时, 此模型是“重新息”, “轻老息”.

据此, 本文得出经 1 次指数平滑后的灰色预测模型的建模过程:

① 设反映电气设备绝缘故障特征量的样本序列为

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)). \tag{5}$$

上标(0)为原始数据标记, (1), (2), \dots, (n) 表示  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 例如  $x^{(0)}(1)$  即为时间  $t_1$  的原始数据;

② 对原始序列数据  $X^{(0)}$  按指数平滑公式

$$S(t) = \alpha x^{(0)}(t) + (1-\alpha)S(t-1) \tag{6}$$

改造成新的样本序列  $S^{(0)}$ , 式中  $t = 1, 2, \dots, n, 0 \leq \alpha \leq 1$ ;

③ 对于新序列样本  $S^{(0)}$  按 GM(1,1) 方法建立预测模型, 得到预测序列  $\hat{S}^{(0)}$ ;

④ 再按以下式

$$\hat{x}^{(0)}(t) = [\hat{S}^{(0)}(t) - (1-\alpha)\hat{S}^{(0)}(t-1)]/\beta. \tag{7}$$

将  $\hat{S}^{(0)}$  还原成预测值  $\hat{X}^{(0)}$ , 其中  $\alpha, \beta$  是可调变量, 在计算过程中, 根据具体要求可以先选多种误差检验方法, 用以调整控制  $\alpha, \beta$  的取值, 以控制预测结果和要求的精度.

2.3 GM(1,1) 背景值的改进方法 (Improving method of GM(1,1) background value)

在一次拟合参数的 GM(1,1) 模型中, 背景值

$$z(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (k=2, 3, \dots, n) \tag{8}$$

的出发点是出于某种平均的考虑, 但从严格的数学意义上来讲, 并不成立<sup>[3,4,6]</sup>. 现今

$$z(k) = \beta x^{(1)}(k) + (1-\beta)x^{(1)}(k-1) \quad (k=2, 3, \dots, n) \tag{9}$$

重新形成矩阵  $B$ , 计算参数  $a, b$ . 问题的关键是如何确定参数  $\beta$ , 采用一维搜索的方法,  $0 \leq \beta \leq 1$ , 取不同的值代入  $z(k)$ , 则令

$$q(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) (k = 2, 3, \dots, n),$$

$$s(\alpha) = \sum_{k=2}^n q^2(k).$$

$s(\alpha)$  代表了预测误差, 不同  $\beta$  系列对应的  $s(\beta)$  中, 取具有最小  $s$  值对应的  $\beta$  即可, 用一维迭代搜索就能实现.

为了检验背景值改进后的 GM(1,1) 模型的预测精度, 用数理统计中的  $t$  检验法以预测相对误差值

$$e(k) = [x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)] / x^{(0)}(k), k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

来进行校验, 取  $e(k)$  的均值

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [e(k)].$$

检验均值  $\bar{e}$  与  $e_0$  是否有显著差异.

#### 2.4 灰色预测模型 GM(1,1) 的新模式 (New model of gray prediction model GM(1, 1))

本文综合利用上述的方法来对一次拟合参数灰色预测模型 GM(1,1) 进行改造后, 按下述步骤即可建立适用于电气设备绝缘故障预测诊断的新模式.

① 对于某种需预测诊断的电气设备, 将其反映故障的各种特征量监测数据看成是新 GM(1,1) 模型的原序列变量  $X^{(000)}$ , 其中

$$X^{(000)} = (x^{(000)}(1), x^{(000)}(2), \dots, x^{(000)}(n)).$$

② 根据下式

$$x(k)d = \frac{1}{n-k+1} [x(k) + x(k+1) + \dots + x(n)], \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

将序列  $X^{(000)}$  进行弱化处理, 得到新序列  $X^{(00)}$ , 其中

$$X^{(00)} = (x^{(00)}(1), x^{(00)}(2), \dots, x^{(00)}(n)).$$

③ 根据 2.2 部分的方法对数据序列  $X^{(00)}$  进行 1 次指数平滑运算, 得到新序列  $X^{(0)}$ . 其中

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)).$$

④ 对序列  $X^{(0)}$  作一次累加生成运算, 得新序列  $X^{(1)}$ .

⑤ 根据 2.3 部分对  $X^{(1)}$  的紧邻均值进行生成计算, 计算结果为  $Z^{(1)}$ ; 记  $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$  为 GM(1,1) 的灰色微分方程, 其白化方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b. \quad (12)$$

⑥ 对参数列  $\hat{a} = [a, b]^T$  进行最小二乘估计,

得

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y. \quad (13)$$

其中矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}.$$

⑦ 白化方程的解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(1)}(0) - b/a]e^{-ak} + b/a, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

取  $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(0)$ .

⑧ 模型的还原值为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k), \quad (15)$$

⑨ 最后对模型进行相对误差等误差检验.

⑩ 循环 1 次指数平滑公式中参数  $\alpha$  与背景值构造中参数  $\beta$  的取值, 取具有最小模型相对误差时的参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 此时的模型即为适用于电气设备绝缘故障诊断的灰色预测最佳模型.

### 3 新模式在以 DGA 为特征量预测诊断变压器故障中的应用 (Application of new model in transformer fault prediction using DGA as eigenvalue)

油中溶解气体分析(DGA)是电力系统公认对油浸电力设备绝缘故障诊断最为有效的方法, 因此, 以 DGA 为特征量, 应用上述研究出的 GM(1,1) 灰色预测模型新模式对变压器的油中溶解各气体组分进行预测, 以便及早发现变压器的潜伏性故障及其发展趋势.

以国内已收集到的从 300 多台次故障变压器检测到的油中溶解气体数据, 用本文的灰色预测模型新模式, 在 Windows 98 平台下设计的一个独立软件包进行预测诊断, 然后, 将其与被运行部门在故障发生后确认的实际故障进行对比. 结果证明采用本文的灰色预测模型新模式预测的故障类型、大致部位、严重程度及发展趋势与确认的实际故障一致<sup>[2, 5, 6]</sup>. 下面仅列出一例典型的预测结果, 并以此说明应用本文新模式进行电气设备绝缘故障预测的实际方法.

柳州来宾站 1# 主变(500 kV) B 相发生故障, 从 1993 年 8 月 15 日起到 1993 年 12 月 20 日为止, 其几乎是等时间段内共采集了 7 组色谱数据(如表 1). 故障发生后, 运行部门通过吊芯等诊断, 确认的实际故障为: 由过热故障发展到放电兼过热; 铁芯下

夹零电位连接处带绝缘螺栓引起过热放电,烧伤了螺栓绝缘和夹件绝缘;磁屏蔽板对固定卡子放电,烧伤了绝缘纸板.

表1 油中溶解气体含量/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Content of gas dissolving in oil

日期	气体				
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
1993.08.15	35.8	61.6	27.5	95.5	0
1993.09.23	59.7	74.1	30.4	100	0
1993.10.27	116	183	69.7	307	1.47
1993.11.27	220	294	166	514	2.15
1993.12.20	292	325	196	598	3.78

先以 H<sub>2</sub> 的预测为例说明整个预测方法:

① 取 93.08.15 至 93.12.20 的 5 个数据建模, 则

$$X^{(000)}(n) = (X^{(000)}(1), x^{(000)}(2), \dots, X^{(000)}(5)) = (35.8, 59.7, 116, 220, 292).$$

② 根据式(11)中缓冲算子作用后得序列  $X^{(00)}(n)$ , 即

$$X^{(00)}(n) = X^{(00)}(1), X^{(00)}(2), \dots, X^{(00)}(5) = (142.86, 160.70, 203.75, 256.00, 292.00).$$

③ 设 1 次指数平滑运算的参数为  $\alpha$ , 背景值改造中的参数为  $\beta$ , 其  $\alpha, \beta \in [0, 1]$ , 以 2.3 节中方法进行建模. 通过对  $\alpha, \beta$  两参数的同时循环运算(步长为 0.01), 取模型具有最小相对误差时的参数为最佳参数, 则此时的模型为最理想模型.

④ 通过编程计算, 得当  $\alpha = 1.0, \beta = 0.50$  时所建模型的平均模拟相对误差最小, 即  $\bar{\Delta}_{\min 1} = 0.0043$ . 而用 GM(1,1) 模型进行建模时的相对误差为  $\bar{\Delta}_{\min 2} = 0.0574$ , GM(1,1) 模型加上背景值改造时的最小相对误差为 0.0520 (参数取  $\beta = 0.48$  时), 如表 2.

表2 H<sub>2</sub> 原始值与各种方法的模拟比较

Table 2 Comparing of H<sub>2</sub> original value with other simulating values

原始值	35.8	59.7	116	220	292
弱化算子处理值	142.86	160.70	203.75	256.00	292.00
本文方法模拟值	142.86	160.81	203.81	258.32	290.82
GM(1,1) 模拟值	35.80	69.17	123.94	222.08	297.29
GM + 背景值改造	35.80	68.69	122.68	219.10	292.81

同理对 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 分别进行预测, 如表 3~6.

表3 CH<sub>4</sub> 原始值与各种方法的模拟比较

Table 3 Comparing of CH<sub>4</sub> original value with other simulating values

原始值	61.6	74.1	116	220	292
弱化算子处理值	188.10	209.18	203.75	256.00	292.00
本文方法模拟值	188.10	209.37	203.81	258.32	290.82
GM(1,1) 模拟值	61.60	110.59	123.94	222.08	297.29
GM + 背景值改造	61.60	105.56	122.68	219.10	292.81

表4 H<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 原始值与各种方法的模拟比较

Table 4 Comparing of H<sub>2</sub>H<sub>6</sub> original value with other simulating values

原始值	27.5	30.4	69.7	166	196
弱化算子处理值	92.20	102.98	133.93	181.00	196.00
本文方法模拟值	92.20	102.98	133.90	173.85	198.09
GM(1,1) 模拟值	27.50	38.38	75.64	149.08	209.30
GM + 背景值改造	27.50	37.29	72.37	140.46	195.69

表5 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 原始值与各种方法的模拟比较

Table 5 Comparing of C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> original value with other simulating values

原始值	95.5	100	307	514	598
弱化算子处理值	324.64	362.83	471.50	556.00	598.00
本文方法模拟值	324.64	362.45	461.75	555.93	609.99
GM(1,1) 模拟值	95.50	177.65	301.09	510.30	664.34
GM + 背景值改造	95.50	168.10	279.11	463.44	597.17

表6 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 原始值与各种方法的模拟比较

Table 6 Comparing of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> original value with other simulating values

原始值	0	0	1.47	2.15	3.78
弱化算子处理值	0	0	2.753	2.965	3.780
本文方法模拟值	0	0	2.753	3.456	3.777
GM(1,1) 模拟值	0	0	1.470	3.178	3.281
GM + 背景值改造	0	0	1.470	3.188	3.227

由上述结果得出, 各油中溶解气体的 4 个预测值, 如表 7.

表7 油中溶解气体的预测值

Table 7 Prediction value of gas dissolving in oil

	一步预测	二步预测	三步预测	四步预测
H <sub>2</sub> / $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	327.41	368.61	414.98	467.19
CH <sub>4</sub> / $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	362.75	393.20	426.20	461.97
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> / $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	225.71	257.19	293.05	333.91
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> / $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	669.32	734.41	805.84	884.21
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> / $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	4.13	4.51	4.93	5.39

#### 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@ct-gpc.com.cn;

周 濂(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硕士研究生,研究兴趣为控制理论与企业信息化。