

文章编号: 1001-0920(2002)03-0315-05

基于混合逻辑动态模型的混杂系统预测控制

李秀改, 高东杰, 王宇红

(中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

摘 要: 针对过程工业控制对象的混杂特性, 采用基于混合逻辑动态模型的预测控制策略。给出混杂系统的建模方法, 并对其稳定性进行分析。仿真结果表明基于混合逻辑动态模型的预测控制能使混杂系统跟踪设定值并满足操作约束, 为研究新一代复杂工业控制系统提供了新的思路。

关键词: 混杂系统; 混合逻辑动态模型; 预测控制; 混合整数二次规划

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Predictive control for hybrid system based on mixed logic dynamic model

L I X iu-g ai, G A O D ong-jie, W A N G Yu-hong

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Aiming at hybrid properties of industry process, predictive control based on mixed logic dynamic (MLD) model is researched. Detailed modelling structure is obtained and MLD's stability is also discussed. Simulation results demonstrate that the predictive control scheme is able to stabilize a hybrid system on the desired output while meeting the operating constraints, which provides the complex industry process a new idea for the next generation.

Key words: hybrid system; mixed logic dynamic model; predictive control; mixed integer quadratic programming

1 引 言

近几年发展起来的混杂系统(HS)控制是一个十分活跃、倍受重视的研究领域,为复杂过程工业研究开发新的控制技术带来了机遇和挑战^[1]。混杂系统的研究综合了控制工程、数学和计算机科学方面的理论和方法。以化工过程控制为例^[2,3],系统中既有连续控制器又有逻辑控制器。连续控制器在上层进行调节和监督控制;逻辑控制器执行过程装置的启停操作,控制离散输入量或根据过程的状态在不

同的连续控制器之间进行切换。

本文针对工业过程中混杂系统的特点,采用混合逻辑动态(MLD)模型来描述系统所具有的物理规律、逻辑法则和操作约束,并采用具有处理操作约束能力的预测控制策略对混杂系统进行控制和优化。通过对具体对象的建模和仿真研究,表明了基于MLD模型的预测控制算法应用于混杂系统研究的有效性,为研究复杂工业过程新型控制算法提供了新的思路。

收稿日期: 2001-04-16; 修回日期: 2001-06-26

基金项目: 中国科学院自动化研究所 2001 创新基金项目

作者简介: 李秀改(1974—),女,陕西咸阳人,博士生,从事复杂工业过程的新型控制算法、混杂系统的预测控制研究;高东杰(1943—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,从事多变量预测控制、系统辨识等研究。

2 混合逻辑动态系统的建模

混合逻辑动态模型是由相互依赖的物理规律、逻辑法则和操作约束所描述的系统,充分考虑了系统的定性知识和专家经验。首先对控制对象的定性知识建立相应的命题,用大写字母(如 P)表示命题,命题的真假用二进制变量 p 的1和0来表示^[4]。通过逻辑连接符 $\neg, \wedge, \vee, \oplus$ 等,可将简单命题转化为复合命题,命题之间的关系可转化为整数线性不等式的形式

$$\begin{aligned}
 &P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_r \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } y_1 + y_2 + \dots + y_r = 1 \\
 &P_1 \vee P_2 \vee \dots \vee P_r \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } y_1 = 1, y_2 = 1, \dots, y_r = 1 \\
 &P_1 \oplus P_2 \oplus \dots \oplus P_r \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } y_1 + y_2 + \dots + y_r = 1 \quad (1)
 \end{aligned}$$

逻辑变量与逻辑变量、逻辑变量与实形变量的乘积可转化成相应的整数不等式形式

$$\begin{aligned}
 \delta = \delta_1 \delta_2 &\Leftrightarrow \begin{cases} -\delta_1 + \delta = 0 \\ -\delta_2 + \delta = 0 \\ \delta_1 + \delta_2 - \delta = 1 \end{cases} \\
 y = \delta f(x) &\Leftrightarrow \begin{cases} y = M\delta \\ y = m\delta \\ y = f(x) - m(1 - \delta) \\ y = f(x) - M(1 - \delta) \\ M = \max_x f(x), m = \min_x f(x) \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

连续输入量转化为逻辑变量(相当于 A/D 过程):

$$\begin{aligned}
 &1) \text{ 对于 } f(x) = 0 \text{ 的情况} \\
 &[f(x) = 0] \Leftrightarrow [\delta = 1] \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } f(x) = \epsilon + (m - \epsilon)\delta \\
 &[f(x) = 0] \Leftrightarrow [\delta = 1] \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } \begin{cases} f(x) = M(1 - \delta) \\ f(x) = \epsilon + (m - \epsilon)\delta \end{cases} \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &2) \text{ 对于 } g(x) = 0 \text{ 的情况} \\
 &[g(x) = 0] \Leftrightarrow [\delta = 1] \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } g(x) = \epsilon + (M + \epsilon)\delta \\
 &[g(x) = 0] \Leftrightarrow [\delta = 1] \text{ is true} \\
 &\text{if and only if } \begin{cases} g(x) = m(1 - \delta) \\ g(x) = \epsilon + (M + \epsilon)\delta \end{cases} \quad (4)
 \end{aligned}$$

3) 对于 $H(x) = 0$ 的情况,可认为 $H(x) = 0$ 和 $H(x) = 0$ 的交集,引入二进制变量 δ_1 表示 $H(x) = 0, \delta_2$ 表示 $H(x) = 0, \delta_3$ 表示 $H(x) = 0$,则引出以下不等式约束

$$\begin{aligned}
 &[h[x] = 0] \Leftrightarrow [\delta_1 = 1] \text{ is true} \\
 &\text{if and only if} \\
 &\epsilon + (m - \epsilon)\delta_1 = h(x) = M(1 - \delta_1) \\
 &[h[x] = 0] \Leftrightarrow [\delta_2 = 1] \text{ is true} \\
 &\text{if and only if} \\
 &m(1 - \delta_2) = h(x) = \epsilon + (M + \epsilon)\delta_2 \\
 &\delta_3 = \delta_1 \delta_2 \\
 &\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 = 1, \delta_1 = \delta_3, \delta_2 = \delta_3 \quad (5)
 \end{aligned}$$

4) 逻辑量转化为连续量(相当于 D/A 过程)
if δ then $z = f_1(x)$ else $z = f_2(x)$

引入辅助变量

$$\begin{aligned}
 Z &= \delta f_1(x) + (1 - \delta)f_2(x) \\
 \begin{cases} (m_2 - M_1)\delta + Z = f_2(x) \\ (m_1 - M_2)\delta - Z = f_2(x) \\ (m_1 - M_2)(1 - \delta) + Z = f_1(x) \\ (m_2 - M_1)(1 - \delta) - Z = f_1(x) \end{cases} \quad (6) \\
 M_i &= \max f_i(x) \\
 m_i &= \min f_i(x), \quad i = 1, 2
 \end{aligned}$$

逻辑表达式转化为相应的线性不等式常用的方法有替代法(SM)和合取规范化形式(CNF)的方法^[5]。SM对逻辑表达式的形式不做特殊的要求,但引入了附加的二进制变量,增加了变量的个数,给优化带来了不便。CNF的布尔表达式如下

$$D_1 \wedge D_2 \wedge \dots \wedge D_n, D_i = \bigwedge_{j \in I_i} P_j \quad (7)$$

命题之间的各种关系可通过取反、分配律、结合律、摩根律等规则转化为合取规范化的形式,而且CNF根据不等式(1)很容易转化为不等式约束的形式。因此,将命题逻辑转化为不等式时CNF更值得推广。

通过以上转换,这些不等式组可作为系统的约束条件,同时在系统的状态方程中引入逻辑变量和辅助变量,使整个系统的描述成为混合逻辑动态模型的形式

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ Ax(k) + B_1u(k) + B_2\delta(k) + B_3z(k) \\ y(k) = Cx(k) + D_1u(k) + D_2\delta(k) + D_3z(k) \\ E_2\delta(k) + E_3z(k) = E_1u(k) + E_4x(k) + E_5 \end{cases} \quad (8)$$

状态变量

$$x = \begin{bmatrix} x_c \\ x_f \end{bmatrix}$$

输出变量

$$y = \begin{bmatrix} y_c \\ y_f \end{bmatrix}$$

输入变量

$$u = \begin{bmatrix} u_c \\ u_r \end{bmatrix}$$

$$x \in R^{n_c} \times \{0, 1\}^{n_l}, \quad u \in R^{m_l} \times \{0, 1\}^{m_r}$$

$$y \in R^{p_c} \times \{0, 1\}^{p_l}, \quad \delta \in \{0, 1\}^{r_l}, \quad z \in R^{r_c}$$

以往提出的基于非线性系统的多模型预测控制策略, 存在着线性模型的协调控制问题以及模型切换时引起的震荡问题^[6]。引入混合逻辑动态的建模方法, 可将系统的所有线性化模型集成在一个统一的框架里, 有利于消除模型切换时引起的抖动, 减轻震荡, 增强系统的鲁棒性。

3 基于混合逻辑动态模型的预测控制

设被控过程的离散状态空间模型描述为MLD的形式(8), 为简化起见, 这里假设整个系统采用相同预测步长 P 和控制步长 m 。模型的状态运动表达式为(其中, $\hat{x}(k+j)$, $\hat{y}(k+j)$ 分别为预测模型的状态和输出值, $j = 1, 2, \dots, p$)

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+j) = & A^j x(k) + \sum_{i=0}^{j-1} A^i [B_1 u(k+j-1-i) + \\ & B_2 \delta(k+j-1-i) + B_3 z(k+j-1-i)] \end{aligned} \quad (9)$$

预测模型的输出为

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+j) = & CA^j x(k) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^i [B_1 u(k+j-1-i) + \\ & B_2 \delta(k+j-1-i) + B_3 z(k+j-1-i)] + \\ & D_1 u(k+j) + D_2 \delta(k+j) + D_3 z(k+j) \end{aligned} \quad (10)$$

在每个采样时刻由实测输出 $y(k)$ 对预测值 $\hat{y}(k+j)$ 进行修正后的值为

$$y^c(k+j) = \hat{y}(k+j) + [y(k) - \hat{y}(k)] \quad (11)$$

设系统的给定值为 $S_p(k+j)$, 则预测偏差为

$$E = S_p(k+j) - y^c(k+j) \quad (12)$$

采用如下定义的系统二次型性能指标

$$\begin{aligned} J(u, x_0) = & \sum_{i=0}^{m-1} (u(k+i) - u(f))^2_{Q_1} + \\ & \sum_{i=0}^{m-1} (\delta(k+i, x_0, u_0) - \delta_f)^2_{Q_2} + \\ & \sum_{i=0}^{m-1} (z(k+i, x_0, u_0) - z_f)^2_{Q_3} + \\ & \sum_{j=0}^{P-1} (x(k+j, x_0, u_0) - x_f)^2_{Q_4} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & y^c(k+j) - S_p(k+j) \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{Q_5} \quad (13) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} x(P|k) = x_f \\ x(k+1|t) = Ax(k) + B_1 u(k) + \\ \quad B_2 \delta(k|t) + B_3 z(k|t) \\ y(k|t) = Cx(k|t) + D_1 u(k) + \\ \quad D_2 \delta(k|t) + D_3 z(k|t) \\ E_2 \delta(k|t) + E_3 z(k|t) \\ E_1 u(k|t) + E_4 x(k|t) + E_5 \\ u_{\min} \leq v(t+k) \leq u_{\max}, k = 0, 1, \dots, m-1 \\ x_{\min} \leq x(t+k|t) \leq x_{\max}, k = 0, 1, \dots, P \\ y_{\min} \leq y(t+k|t) \leq y_{\max}, k = 0, 1, \dots, P \end{cases} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} Q_1 = Q_1 > 0, & Q_2 = Q_2 = 0 \\ Q_3 = Q_3 = 0, & Q_4 = Q_4 > 0 \\ Q_5 = Q_5 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

系统的平衡状态对为 (x_f, u_f) , 引入辅助变量的平衡对 (δ_f, z_f) , $x(k)$ 为当前状态, P 为预测时域, m 为控制时域。考虑约束条件中的逻辑变量的出现, 带约束问题的预测控制没有解析形式的最优解, 可通过求解对应的混合整数二次规划(MIQP)^[8], 得到数值形式的解

$$\begin{aligned} J = \min_U & \frac{1}{2} U^T H U + 2f^T U \\ \text{s.t.} & GU = W + Sx(k) \end{aligned} \quad (16)$$

将式(9)和(10)代入性能指标(14), 并设 $U = [u, \delta, z]$, $u = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+P-1)]$, $\delta = [\delta(k), \delta(k+1), \dots, \delta(k+P-1)]$, $z = [z(k), z(k+1), \dots, z(k+P-1)]$, 可得到 H, f, G, W, S 的表达式。求解MIQP问题, 得到 k 时刻的最优控制序列为 $\{[u(k+i)^*, \delta(k+i)^*, z(k+i)^*]\}_{i=0,1,\dots,P-1}$, 根据滚动优化策略, 只取 $U(k)^* = [u(k)^*, \delta(k)^*, z(k)^*]$ 。在 $k = k+1$ 时刻, 重复上述步骤。采用 1 范数、范数性能指标的形式与上式相似, 滚动优化时求解混合整数线性规划(MILP)。

4 系统的稳定性分析

混杂系统既有连续变量又有逻辑变量, 且均处于有界集中, 对它的稳定性分析仍采取李亚普诺夫意义下的稳定性判别定理。

定理 1 设 (x_e, u_e) 为系统的平衡对, (δ, z_c) 为引入的逻辑变量与辅助变量的平衡状态, $x(0)$ 为性能指标在 $t = 0$ 时刻的初始状态。则当满足式(15)中所有条件时, 预测控制策略能使系统稳定在平衡

点并同时满足操作约束。

证明 k 时刻的最优控制序列为 $U^*(k)$, 有

$$u^* = \{U^*(k), \dots, U^*(k + T - 1)\}$$

$$V(t) = J(U^*, x(k))$$

令 $u_1 = \{u^*(k + 1), \dots, u^*(k + T - 1), u_e\}$

$$\delta_1 = \{\delta^*(k + 1), \dots, \delta^*(k + T - 1), \delta_e\}$$

$$Z_1 = \{Z^*(k + 1), \dots, Z^*(k + T - 1), Z_e\}$$

可知 u_1 在 $K + 1$ 时刻为可行的, 并且设对于任何的初始条件, 在第 1 个采样时刻的性能指标总是有界的。即 $J_1 < \infty$ 。则有

$$\begin{aligned} J(k) - J(k + 1) = & \\ & x(k) - x_e \frac{2}{Q_4} + u(k) - u_e \frac{2}{Q_1} + \\ & \delta(k) - \delta_e \frac{2}{Q_2} + z(k) - z_e \frac{2}{Q_3} + \\ & y(k) - y_e \frac{2}{Q_5} \end{aligned}$$

由此可递推得

$$\begin{aligned} J(k + 1) + \sum_{i=1}^{m-1} (x(k + i) - x_e \frac{2}{Q_4} + \\ u(k + i) - u_e \frac{2}{Q_1} + \delta(k + i) - \delta_e \frac{2}{Q_2} + \\ z(k + i) - z_e \frac{2}{Q_3} + y(k + i) - y_e \frac{2}{Q_5}) \\ J(1) < \end{aligned}$$

设 $J^*(k + 1)$ 为在 $k + 1$ 时刻的最优解, 则 $J^*(k + 1) \leq J(k + 1)$, 可知

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{m-1} (x(k + i) - x_e \frac{2}{Q_4} + u(k + i) - u_e \frac{2}{Q_1} + \\ \delta(k + i) - \delta_e \frac{2}{Q_2} + z(k + i) - z_e \frac{2}{Q_3} + \\ y(k + i) - y_e \frac{2}{Q_5}) \leq J(1) - J^*(k + 1) \end{aligned}$$

上式成立则有

$$\begin{aligned} \lim_k x(t) - x_e(Q_4 > 0) \\ \lim_k u(t) - u_e(Q_1 > 0) \\ \lim_k \delta(t) - \delta_e(Q_2 = 0) \\ \lim_k z(t) - z_e(Q_3 = 0) \\ \lim_k y(t) - y_e(Q_5 = 0) \end{aligned}$$

可知基于MLD模型的预测控制策略能使系统稳定在平衡点, 并满足操作约束。

5 仿真实例

通过一个例子研究MLD的建模和预测控制算法。系统模型为

$$\begin{cases} x(k + 1) = 0.6 \begin{bmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \\ y(k) = [1 \ 0]x(k) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} t = \begin{cases} \pi/3, & [1 \ 0]x(k) \geq 0 \\ -\pi/3, & [1 \ 0]x(k) < 0 \end{cases} \\ x(k) \in [-10, 10] \times [-10, 10] \\ u(k) \in [-1, 1] \end{aligned} \quad (17)$$

引入逻辑变量 $\delta[\delta(t) = 1] \leftrightarrow [1 \ 0]x(k) \geq 0$, 辅助变量 $Z = [Z_1, Z_2, Z_3, Z_4]$, 系统的状态方程可表示为

$$\begin{aligned} x(k + 1) = (A_{1x}(k) + B u(k))\delta + \\ (A_{2x}(k) + B u(k))(1 - \delta) \end{aligned} \quad (18)$$

A_1 和 A_2 分别表示为 $\pi/3$ 和 $-\pi/3$ 时的 A 值。

$$x(k + 1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} Z(k)$$

$$\begin{aligned} y(k) &= [1 \ 0]x(k) \\ Z_{1,3} &= (A_{1x}(t) + B u(t))\delta \\ Z_{2,4} &= (A_{2x}(t) + B u(t))(1 - \delta) \end{aligned} \quad (19)$$

由以上各式和系统的状态约束、输入输出约束可得以下线性不等式约束条件

$$\begin{aligned} -M_x \delta - x_1 - m_x \\ - (M_x + \epsilon)\delta - x - \epsilon \\ M\delta + Z_{1,2} - A_{1x}(t) + B u(t) + M \\ - M\delta + Z_{3,4} - A_{2x}(t) + B u(t) \\ - M\delta + Z_{1,2} \leq 0 \\ - M\delta - Z_{1,2} \geq 0 \\ - M\delta - Z_{3,4} - A_{2x}(t) - B u(t) \\ - M\delta - Z_{1,2} - A_{1x}(t) - B u(t) + M \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

系统基于MLD模型(19)的形式并带有(20)的约束, 采用预测控制的仿真曲线如图1和图2所示。其中 $T_s = 2$, 控制时域 $M = 1$, 预测时域 $P = 3$, $Q_1 = 1$, $Q_2 = 1, Q_3 = 0.1, Q_4 = (1e - 8)I_2, Q_5 = 1.77$ 。

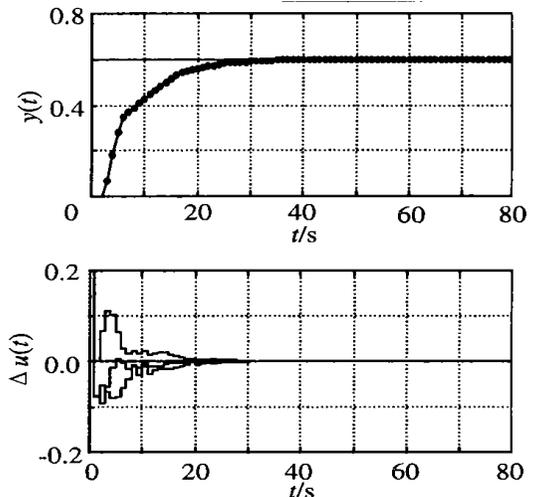


图1 跟踪设定值的输出响应

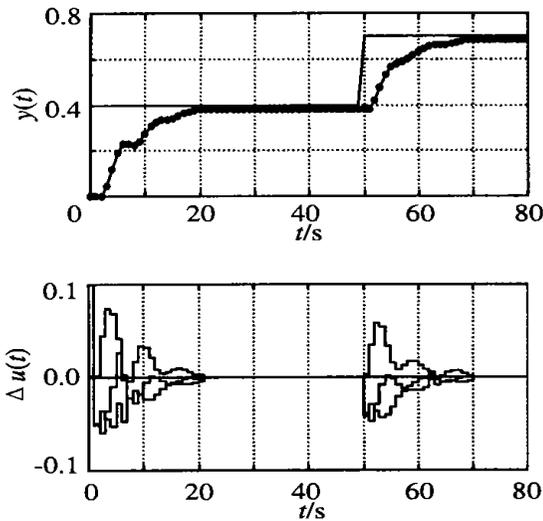


图 2 跟踪可变输入时的响应

6 结 论

本文针对过程工业中控制对象所具有的混杂动态特性, 采用集成控制对象的定性知识、逻辑规则和连续动态过程的MLD建模方法, 在深入分析混合逻辑动态建模方法的基础上, 提出采用预测控制策略对系统进行控制和优化。

通过对一实例进行的仿真研究, 结果表明这种基于混合逻辑动态模型的预测控制能使系统稳定在设定点并满足约束。

参考文献(References):

- [1] Kakimoto, N sannomiya, N iahkawas, et al An optimal gas supply for a power plant using a mixed integer programming model [J]. Automatic, 1991, 27(3): 513-518
- [2] Sebastian Engell, Stefan Kowaleski, Christian Schulz. Continuous-discrete interactions in chemical processing plants[J]. Proc of the IEEE, 2000, 88(7): 1050-1068
- [3] Lemmon M D, K H He, I M arkovsky. Supervisory hybrid systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(4): 42-55
- [4] Tom M Cavalier, Panos M Pardalos. Modeling and integer programming techniques applied to propositional calculus[J]. Computers Operations Research, 1990, 17(6): 561-570
- [5] R Raman, I E Grossman. Relation between MLP modeling and logical inference for chemical process synthesis [J]. Computer Chemical Engineering, 1991, 15(2): 73-84
- [6] Michael S Branichy. Hybrid dynamic systems, or HDS: The ultimate switching experience [A]. Control Using Logic Based Switching, Lecture Notes in Control and Information Sciences [C]. Springer-Verlag, 1996 1-11.
- [7] Albert Bemporad, A M Morari. Control of systems integrating logic, dynamics and constraints [J]. Automatic, 1999, 35(3): 407-427.
- [8] Rafael L azimy. Mixed-integer quadratic programming [J]. Mathematical Programming, 1982, 22: 332-349

下 期 要 目

- 基于观测器非线性不确定系统的自适应控制 佟绍成
- 基于动态神经网络的一类非线性不确定系统的自适应观测器 杨晋勇, 贾英民
- 含有模糊和随机参数的混合机会约束规划模型..... 丁晓东, 等
- 基于方案达成度和综合度的交互式多属性决策法 徐泽水
- 工业过程稳态优化进程中的噪声平滑型迭代学习规划 阮小娥, 万百五
- 复杂系统可靠性多级综合的熵法第二近似限 孙有朝
- 基于在线优化的切换多模型自适应控制..... 刘鲁源, 等
- 基于遗传进化的最近邻聚类算法及其应用..... 陈真勇, 等
- 串联系统的多前馈-反馈广义预测控制 李奇安, 等
- 延迟反馈引导混沌系统到周期解..... 蔡朝洪, 等
- 具有前置滤波特性的非单点模糊逻辑系统..... 祖家奎, 等
- 一种基于改进双通道继电测试的闭环辨识方法研究 王学雷, 邵惠鹤