

文章编号: 1001-0920(2006)02-0229-04

Terminal 滑模自适应控制实现一类不确定混沌系统的同步

吴立刚, 王常虹, 曾庆双

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 应用 Terminal 滑模控制技术和选择指数趋近律来综合滑模控制器, 实现一类混沌系统的状态同步. 在控制器中引入一类简单的自适应律, 用以在线估计界参数. 该设计方案消除了滑模控制的到达阶段, 状态始终保持在滑模面上, 并能在有限时间内趋近于原点. 与一般滑模控制同步实现相比, 具有更小的同步时间和鲁棒性. 通过对 Duffing-Holmes 系统的同步仿真, 验证了该方法的可行性.

关键词: 混沌同步; Terminal 滑模控制; 自适应控制; 鲁棒性

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

Synchronization of Chaotic Systems with Parametric Uncertainty Using Terminal Sliding Mode Adaptive Control

WU Li-gang, WANG Chang-hong, ZENG Qing-shuang

(Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Correspondent: WU Li-gang, E-mail: ligangwu@hit.edu.cn

Abstract By applying terminal sliding mode control technique and selecting exponential reaching law, a terminal sliding mode controller is synthesized, and then applied to synchronization of a class of chaotic systems with mismatched parametric uncertainties. Furthermore, a simple adaptive law is introduced to on-line estimate the parameter bounds. This design scheme eliminates the reaching phase of sliding mode control, and the synchronization system states stay on the sliding surface all the time. Therefore, the time of synchronization is shorter comparing with the ordinary sliding mode control. The simulation of Duffing-Holmes system is presented to show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Chaos synchronization; Terminal sliding mode control; Adaptive control; Robustness

1 引 言

混沌系统具有对初始条件和系统参数极其敏感的特性. 这使得任何两条相邻轨道都要以指数律相互分离, 直至变得完全互不相关. 自从 Pecora 和 Carroll 提出一个非常简单的混沌驱动同步模型以来^[1], 混沌同步的研究受到了广泛关注. 特别是近年来, 由于混沌系统在信息处理特别是安全通信方面展示出良好的应用前景, 使得混沌同步化成为一个非常活跃的研究方向^[2].

从当前的文献看, 混沌同步的方法主要有: 观测器同步法^[2]、自适应同步法^[3]、 H 控制同步

法^[4]、滑模变结构同步法^[5,6]等. 以上研究中, 大都没有考虑系统的参数不确定性, 或假设不确定性满足所谓的匹配条件^[6], 导致得到的结果很难应用于实际. 另一方面, 同步速度是检验同步性能的一个关键指标. 以前的同步研究均指渐近同步, 从理论上讲, 是在时间趋于无穷大时的同步. 这也使得混沌同步在实际中的应用受到限制.

本文应用 Terminal 滑模控制的思想^[7], 通过设计 Terminal 滑模面 and 选择指数趋近律来综合滑模控制器, 从而实现一类非匹配不确定混沌系统在有限时间内同步, 且同步时间可以预先设定. 该控制策

收稿日期: 2004-12-17; 修回日期: 2005-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(69874008).

作者简介: 吴立刚(1977—), 男, 江西宜黄人, 博士生, 从事时滞系统、鲁棒控制等研究; 王常虹(1961—), 男, 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、鲁棒控制等研究.

略使得系统的初始状态处于滑模面上,消除了滑模控制的达到阶段,从而确保了闭环系统的全局鲁棒性和稳定性.另外,考虑到系统存在非匹配的参数摄动和外部扰动,且其上界未知,因此引入一类简单的自适应律,用以在线估计界参数.本文以Duffing-Holmes混沌系统为例,给出了同步仿真,结果验证了所提出方法的有效性.

2 系统描述

考虑以下两个 n 维混沌系统:

驱动系统

$$\begin{cases} \dot{x}_j = x_{j+1}, 1 \leq j \leq n-1, \\ \dot{x}_n = f(x, t), x \in R^n; \end{cases} \quad (1)$$

响应系统

$$\begin{cases} \dot{y}_j = y_{j+1}, y \in R^n, 1 \leq j \leq n-1, \\ \dot{y}_n = f(y, t) + \Delta f(y) + d(t) + u(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $u(t) \in R$ 为控制输入; $f(\bullet)$ 为 t, x 或 y 的非线性函数; $\Delta f(\bullet)$ 为不确定项,代表系统参数摄动和/或未建模动态; $d(t)$ 代表外部扰动.

假定在时间域 $[t_0, +\infty)$ ($t_0 > 0$) 内,对于任意的初始条件 $x_0 = x(t_0)$ 和 $y_0 = y(t_0)$,系统(1)和(2)均存在唯一解^[5].

令 $e_j = y_j - x_j, j = 1, 2, \dots, n$,则由式(2)减去式(1)得到同步误差系统

$$\begin{cases} \dot{e}_j = e_{j+1}, 1 \leq j \leq n-1, \\ \dot{e}_n = g(e, t) + \Delta f(y) + d(t) + u(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中 $g(e, t) = f(e + x, t) - f(x, t)$.

在选择一定的参数下,驱动系统(1)表现为混沌状态^[5].因此本文所研究的问题可表述为:驱动系统和响应系统在不同的初始条件下开始运行,设计合适的 Terminal 滑模控制器,使得在有限时间内驱动系统与响应系统的状态同步.即存在时间 T ,使得

$$\lim_{t \rightarrow T} \|x(t) - y(t)\| = \lim_{t \rightarrow T} \|e(t)\| = 0,$$

其中 $\|\bullet\|$ 表示向量的 Euclidean 范数.

3 Terminal 滑模自适应控制器

3.1 Terminal 滑模面的设计

本文考虑的控制问题为调节问题,即设计一个控制器,使得同步误差系统(3)的状态在有限时间内趋近于原点.首先设计滑模面函数^[7]

$$s(t) = Ce(t) - w(t). \quad (4)$$

其中: $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 为 n 维行向量,且各元素均为正实常数; $e(t) = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T = [e_1, \dot{e}_1, \dots, e_1^{(n-1)}]^T$; $w(t) = CP(t)$, 令 $P(t) = [p(t), \dot{p}(t), \dots, p^{(n-1)}(t)]^T$, 并且选取 $p(t)$ 满足以下假设条件:

假设 1^[7] $p(t): R^+ \rightarrow R, p(t) \in C^n[0, \infty)$, 并且 $p(t), \dot{p}(t), \dots, p^{(n-1)}(t) \leq L$. 对于某个常数

$T^f > 0, p(t)$ 是在时间段 $[0, T^f]$ 上的有界函数,并且满足条件 $p(0) = e_1(0), \dot{p}(0) = \dot{e}_1(0), \dots, p^{(n-1)}(0) = e_1^{(n-1)}(0)$. 这里 $C^n[0, \infty)$ 表示定义在区间 $[0, \infty)$ 上的所有 n 阶可微连续函数.

本文选取函数

$$p(t) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{n-1} \left(\frac{a_{j1}}{T^{j-n+1}} e_1^{(j)}(0) \right) t^{j+n+1} + \\ \frac{1}{k!} e_1^{(k)}(0) t^k, 0 \leq t \leq T^f, \\ 0, t > T^f. \end{cases} \quad (5)$$

其中参数 a_{j1} 可根据假设 1 中的条件求得^[7].

从假设 1 和滑模面的定义不难看出,在 $t = 0$ 时, $s(0) = 0$, 即同步误差系统(3)的状态一开始便在滑模面上.下面的工作是设计一个控制器,使得系统(3)的状态继续保持,或者再次到达并保持在滑模面上,直到在有限时间后状态趋近于原点.

3.2 Terminal 滑模控制器的设计

根据滑模到达条件 $s(t)\dot{s}(t) < 0$, 应用趋近律的方法来设计滑模控制器^[8].选择以下指数趋近律:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= -\epsilon \text{sign}(s(t)) - ks^{1/3}(t), \\ \epsilon &> 0, k > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

由式(3)和(4)可求得

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \sum_{k=1}^{n-1} c_k (e_1^{(k)}(t) - p^{(k)}(t)) + c_n [g(e, t) + \\ &\Delta f(y) + d(t) + u(t) - p^{(n)}(t)]. \end{aligned} \quad (7)$$

假设 2 不确定性 $\Delta f(y)$ 和外部扰动 $d(t)$ 满足不等式

$$\Delta f(y) \leq F(y), \quad d(t) \leq D(t). \quad (8)$$

结合式(6)~(8)可求得 Terminal 滑模控制器

$$\begin{aligned} u(t) &= \\ & -c_n^{-1} \left[\sum_{k=1}^{n-1} c_k (e_1^{(k)}(t) - p^{(k)}(t)) + ks^{1/3}(t) + \right. \\ & c_n (g(e, t) - p^{(n)}(t)) + (c_n F(y) + \\ & \left. c_n D(t) + \epsilon) \text{sign}(s(t)) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

定理 1 在 Terminal 滑模控制器(9)的作用下,同步误差系统(3)的状态将始终保持在滑模面上,即 $s(t) = 0, \forall t \geq 0$, 并在有限时间 T^f 内趋近于原点.

证明 选择 Lyapunov 函数 $V = 0.5s^2(t)$, 对时间 t 的微分为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(t) \left\{ \sum_{k=1}^{n-1} c_k (e_1^{(k)}(t) - p^{(k)}(t)) + \right. \\ & \left. c_n [g(e, t) - p^{(n)}(t)] \right\} + s(t) c_n u(t) + \\ & s(t) c_n [F(y) + D(t)]. \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)代入(10),可得

$$\dot{V} = \epsilon s(t) - ks^{4/3}(t) < 0 \quad (11)$$

由 $\dot{V} = \epsilon s(t) s(t) < 0$ 知满足滑模到达条件

根据假设 1 和滑模面函数的定义, 可得 $s(0) = 0$, 因而有 $V(0) = 0$ 再由 V 正定而 \dot{V} 负定可推出 $V(t) = 0, \forall t \geq 0$. 进而可推出 $s(t) = 0, \forall t \geq 0$. 即同步误差系统 (3) 的状态始终保持在滑模面上, 从而消除了滑模控制的到达阶段, 确保了闭环系统的全局鲁棒性和稳定性

由于 $s(t) = 0, \forall t \geq 0$, 根据滑模面函数 $s(t)$ 的定义, 可得

$$\begin{aligned} s(t) &= Ce(t) - w(t) = \\ &C(e(t) - P(t)) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

由此推出

$$e(t) = P(t), \forall t \geq 0 \quad (13)$$

而 $P(t)$ 在满足假设 1 的条件下可以任意设计. 因此选择 $P(t)$ 如式 (5), 则有 $P(t) = e(t) = 0, \forall t \in T^f$. 所以在 T^f 时间内系统 (3) 的状态将趋于原点

3.3 Teminal 滑模自适应控制器的设计

在控制器 (9) 中, 不确定性 $\Delta f(e+x)$ 和外部扰动 $d(t)$ 的界实际上很难精确估计. 为此引入一个简单的自适应律, 以在线估计不确定性和外部扰动的界值

假设 3 不确定性 $\Delta f(e+x)$ 和外部扰动 $d(t)$ 满足不等式

$$\Delta f(y) + d(t) \leq l_0 + l_1 |y(t)|, \quad (14)$$

其中 l_0 和 l_1 为未知非负常数

设 $\hat{l}_0(t)$ 和 $\hat{l}_1(t)$ 分别为 l_0 和 l_1 的估计值, 则相应的估计误差可表示为

$$\tilde{l}_j(t) = l_j(t) - \hat{l}_j, j = 0, 1 \quad (15)$$

给出以下自适应律:

$$\begin{cases} \dot{\hat{l}}_0(t) = \dot{\tilde{l}}_0(t) = r_0^{-1} c_n |s(t)|, \\ \dot{\hat{l}}_1(t) = \dot{\tilde{l}}_1(t) = r_1^{-1} c_n |y(t)| - s(t). \end{cases} \quad (16)$$

其中正实常数 r_0 和 r_1 为自适应增益

基于上述给定的自适应律, 可综合得到 Teminal 滑模自适应控制器

$$\begin{aligned} u(t) &= \\ &-\hat{c}_n^{-1} \left[\sum_{k=1}^{n-1} c_k (e^{(k)}(t) - p^{(k)}(t)) + ks^{1/3}(t) + \right. \\ &c_n (g(e, t) - p^{(n)}(t)) + (\hat{c}_n \hat{l}_0(t) + \\ &\left. \hat{c}_n \hat{l}_1(t) |y(t)| + \epsilon) \text{sign}(s(t)) \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

定理 2 在 Teminal 滑模自适应控制器 (17) 的作用下, 同步误差系统 (3) 的状态将在有限时间内到达滑模面上, 并在有限时间内趋近于原点

证明 选择 Lyapunov 函数

$$V_1 = 0.5[s^2(t) + r_0 \tilde{l}_0^2(t) + r_1 \tilde{l}_1^2(t)], \quad (18)$$

取 V 沿系统 (3) 的解对时间 t 的微分, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \\ &s(t) \left\{ \sum_{k=1}^{n-1} c_k (e^{(k)}(t) - p^{(k)}(t)) + c_n [g(e, t) - \right. \\ &\left. p^{(n)}(t)] \right\} + s(t) c_n (l_0 + l_1 |y(t)|) + \\ &s(t) c_n u(t) + r_0 \tilde{l}_0(t) \dot{\tilde{l}}_0(t) + r_1 \tilde{l}_1(t) \dot{\tilde{l}}_1(t). \end{aligned} \quad (19)$$

式 (14) ~ (17) 代入 (19), 得

$$\dot{V}_1 = \epsilon s(t) - ks^{4/3}(t) < 0 \quad (20)$$

由式 (17) 知 $\tilde{l}_j(t) = \hat{l}_j(t) > 0 (j = 0, 1)$, 因此存在时间 $t_j (j = 0, 1)$, 分别对应于 $\dot{\tilde{l}}_j(t) = \tilde{l}_j(t)$, 使得 $t > t_j$ 时分别有 $\tilde{l}_j(t) = l_j(t) - \hat{l}_j > 0$ 故 $t > t^* = \max\{t_1, t_2\}$, 有

$$r_j \tilde{l}_j(t) \dot{\tilde{l}}_j(t) = 0, j = 0, 1 \quad (21)$$

结合式 (19) 和 (21) 可知, 当 $t > t^*$ 时有

$$s(t) \dot{s}(t) = \epsilon s(t) - ks^{4/3}(t), \quad (22)$$

由此推出

$$\dot{s}(t) = \epsilon + k |s(t)|^{1/3} - k |s(t)|^{4/3}. \quad (23)$$

从式 (23) 可求出 $s(t) = 0$ 的时间

$$t^s = 3 |s(t^*)|^{2/3} / 2k$$

因此 $s(t)$ 在经过 $t^* + t^s$ 时间后到达并始终保持在滑模面上

这里即使令 $s(0) = 0$, 在时间段 $(0, t^* + t^s)$ 上, $s(t)$ 也不一定保持在滑模面上. 因此采用 Teminal 滑模自适应控制 (17) 时, 不必满足假设 1 的条件. 滑模面趋近时间为 $t^* + t^s$. 由 $s(t) = 0, \forall t \geq t^* + t^s$, 再根据式 (12) 有

$$s(t) = Ce(t) - w(t) = C(e(t) - P(t)) = 0,$$

由此推出

$$e(t) = P(t), \forall t \geq t^* + t^s. \quad (24)$$

同 3.2 节的分析, 设计 $P(t)$ 函数在 $t \in T^f, t > t^* + t^s$ 时, $P(t) = e(t) = 0, \forall t \in T^f$. 这样在经过 T^f 后, 同步误差系统 (3) 的状态将趋近于原点

比较以上两种控制方案, 在假设 1 和假设 2 满足的条件下, 应用 Teminal 滑模控制器 (9) 来实现混沌同步, 同步误差系统状态自始至终保持在滑模面上, 消除了常规滑模控制的到达阶段; 再通过设计 $P(t)$ 函数, 使得状态在有限时间 T^f 内趋近于原点. 在假设 3 满足的条件下, 选择带有自适应律的 Teminal 滑模控制器 (17) 实现同步, 滑模面的到达时间为 $t^* + t^s$; 其后同样通过设计 $P(t)$ 函数, 也使同步误差状态在有限时间 T^s 内趋近于原点

4 数值实例

下面通过实例来说明第 2 种控制方法实现混沌

同步的可行性. 考虑如下 Duffing-Holmes 系统:

驱动系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = -a_1 x_1(t) - a x_2(t) - x_1^3(t) + b \cos(\omega t); \end{cases} \quad (25)$$

响应系统

$$\begin{cases} \dot{y}_1(t) = y_2(t), \\ \dot{y}_2(t) = -a_1 y_1(t) - a y_2(t) - y_1^3(t) + b \cos(\omega t) + \Delta f(y) + d(t) + u(t). \end{cases} \quad (26)$$

令 $e_1(t) = y_1(t) - x_1(t)$, $e_2(t) = y_2(t) - x_2(t)$. 式(26) 减去(25) 得到同步误差系统

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = e_2(t), \\ \dot{e}_2(t) = -a_1 e_1(t) - a e_2(t) - y_1^3(t) + x_1^3(t) + \Delta f(y) + d(t) + u(t). \end{cases} \quad (27)$$

当选择 $a_1 = -1$, $a = 0.25$, $b = 0.3$, $\omega = 1.0$ 时, 驱动系统(25) 表现出混沌状态^[5]. 已知初始状态 $x_1(0) = 0.1$, $x_2(0) = 0.2$, $y_1(0) = -0.5$, $y_2(0) = 0.5$, $\Delta f(y)$ 和 $d(t)$ 满足假设 3, 即 $\Delta f(y) + d(t) = l_0 + l_1 y(t)$. 用 Teminal 滑模自适应控制(17) 实现系统(25) 和(26) 的状态同步. 令滑模面系数 $C = [c_1 \ c_2] = [4 \ 1]$, 则滑模面函数为

$$s(t) = \dot{e}_1(t) + 4e_1(t) - \dot{p}(t) - 4p(t),$$

其中 $p(t)$ 可根据式(5) ($n = 2$) 和假设 1 求得

由已知初始状态可求得 $e_1(0) = -0.6$, $\dot{e}_1(0) = e_2(0) = 0.3$, $\dot{e}_2(0) = \dot{e}_2(0) = -0.55$. 设 $T^f = 12$ s, 可求得式(9) 的 Teminal 滑模控制器

$$u(t) = -[4(\dot{e}_1(t) - \dot{p}(t)) + (e_1(t) - 0.25e_2(t) - y_1^3(t) + x_1^3(t) - \dot{p}(t) + ks^{1/3}(t) + (l_0 + l_1 y(t) + \epsilon) \text{sign}(s(t))]$$

选择 $k = 6$, $\epsilon = 10$, $r_0 = r_1 = 2$, 采样时间 $t = 0.01$ s, 仿真结果如图 1 和图 2 所示. 可以看出, 驱动系统的状态 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 从 $t = 12$ s 时刻起, 分别

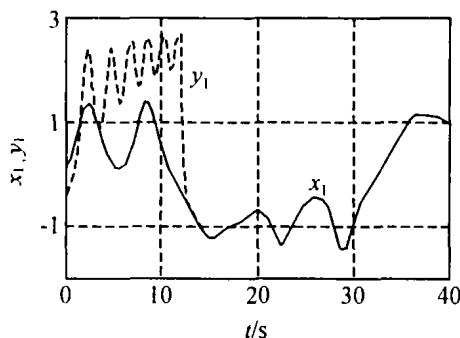


图 1 状态 $x_1(t)$ 和 $y_1(t)$ 的同步曲线

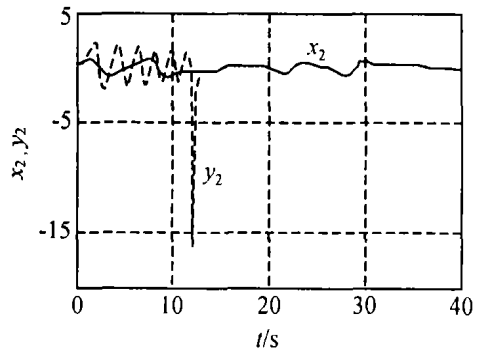


图 2 状态 $x_2(t)$ 和 $y_2(t)$ 的同步曲线

与响应系统的状态 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 完全同步, 达到预期的目的

5 结 论

本文采用 Teminal 滑模控制技术, 针对系统中存在参数不确定性和外部扰动两种不同情况, 分别综合出两种适合的 Teminal 滑模控制器, 用于混沌系统的同步实现. 控制机制保证了混沌系统状态在有限时间内同步, 且同步时间可以预先设定. 以 Duffing-Holmes 混沌系统为实例, 仿真结果显示出较好的同步效果. 本文提出的方法还可用于实现超混沌系统的同步.

参考文献 (References)

- [1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in Chaotic Systems [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64 (8): 821-824.
- [2] 高铁杠, 陈增强, 袁著祉, 等. 基于观测器的混沌系统的同步研究[J]. *物理学报*, 2004, 53(5): 1305-1308 (Gao T G, Chen Z Q, Yuan Z Z, et al. Study on Synchronization of Chaotic Systems Based on Observer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(5): 1305-1308)
- [3] Wang Y, Guan Z H, Wen X. Adaptive Synchronization for Chen Chaotic System with Fully Unknown Parameters [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 19 (4): 899-903
- [4] Suykens J A, Curran P F, Vandewalle J. Robust Nonlinear Synchronization of Chaotic Lur's Systems [J]. *IEEE Trans on Circuits Systems: I*, 1997, 44(10): 891-904
- [5] Yau H T. Design of Adaptive Sliding Mode Controller for Chaos Synchronization with Uncertainties [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 22(2): 341-347.
- [6] Zhang H, Ma X K, Liu W Z. Synchronization of Chaotic Systems with Parametric Uncertainty Using Active Sliding Mode Control [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 21(5): 1249-1257.

(下转第 240 页)

参考文献(References)

- [1] Mehmed K. *Data Mining Concepts, Models, Methods and Algorithms* [M]. New York: IEEE Press, 2002
- [2] Trevor H, Robert T, Jerome F. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction* [M]. New York: Springer-Verlag Press, 2001
- [3] 邓聚龙. *灰预测与灰决策* [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
(Deng J L. *Grey Prediction and Grey Decision* [M]. Wuhan: The Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002)
- [4] Yeh M F, Chen Y J, Chang K C. ECG Signal Pattern Recognition Using Grey Relational Analysis [A]. *Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Networking, Sensing and Control* [C]. New York: IEEE Press, 2004: 725-730
- [5] Lin Z C, Lin W S. The Application of Grey Theory to the Prediction of Measurement Points for Circularity Geometric Tolerance [J]. *J of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(5): 348-360
- [6] 潘红华, 胡家升, 张圣云, 等. 基于灰色系统模型的预测函数控制方法研究 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 117-119
(Pan H H, Hu J S, Zhang S Y, et al. Study of Predictive Functional Control Algorithm Based on Grey System Models [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 117-119)
- [7] Norihito S, Osamu U, Chikara K. Introduction of Time Series Data Analysis Using Grey System Theory [A]. *Proc of the 2th Int Conf on Knowledge-based Intelligent Electronic Systems* [C]. New York: IEEE Press, 1998: 67-72
- [8] Wen K L, Chang T C, Chang W C, et al. The Study of Missing Point in GM (1, 1) Model [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. New York: IEEE Press, 2000: 3384-3387

(上接第 232 页)

- [7] 庄开宇, 张克勤, 苏宏业, 等. 高阶非线性系统的 Terminal 滑模控制 [J]. *浙江大学学报*, 2002, 36(5): 482-486
(Zhuang K Y, Zhang K Q, Su H Y, et al. Terminal Sliding Mode Control for High-order Nonlinear Dynamic Systems [J]. *J of Zhejiang University*, 2002, 36(5): 482-486)
- [8] 高为炳. *变结构控制的理论及设计方法* [M]. 北京: 科学出版社, 1996
(Gao W B. *Variable Structure Control Theory and Design Methods* [M]. Beijing: Science Press, 1996)

(上接第 235 页)

- [2] Liu S L, Shi W G. Rough Set Intelligence Diagnostic System for Valves in Reciprocating Pumps [A]. *IEEE Proc of the American Control Conf* [C]. Arlington, 2001: 353-358
- [3] Bonaldi E L, Borges S, Lamber T, et al. Using Rough Sets Techniques as a Fault Diagnosis Classifier for Induction Motors [A]. *IEEE Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Shanghai, 2002: 3383-3388
- [4] Zhao K, Wang J. A Reduction Algorithm Meeting Users' Requirements [J]. *J Computer Science and Technology*, 2002, 23(9): 578-593
- [5] Zhang X D, Marisv P, Thomasp P. Robust Fault Isolation for a Class of Non-linear Input-output Systems [J]. *Int J Control*, 2001, 74(13): 1295-1310
- [6] Karsten Spreitzer, Peter Balle. A Multimodel Approach for Detection and Isolation of Sensor and Process Faults for a Heat Exchanger [A]. *IEEE Proc of the American Control Conf* [C]. Chicago, 2000: 2720-2724
- [7] 夏超英. 转子坐标下笼型感应电动机转子的模型、辨识和自适应观测 [J]. *天津大学学报*, 1998, 31(3): 265-271.
(Xia C Y. The Model and Identification and Adaptive Observation for the Induction Motor in the Rotor Reference Frame [J]. *J of Tianjing University*, 1998, 31(3): 265-271)