

文章编号: 1001-0920(2001)04-0420-05

不稳定对象及非最小相位对象的 自抗扰控制仿真研究

刘翔, 李东海, 姜学智, 胡雪蛟
(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要: 针对倒立摆、水轮机调速器、鱼雷定深、飞机高度及直升机俯仰角的控制, 分别设计了自抗扰控制器(ADRC), 给出其数值仿真结果, 并与其它控制方案的仿真结果进行比较。仿真研究发现, 只要对控制器的设计略加改造, ADRC 对上述对象都具有满意的控制性能, 从而显示出 ADRC 在不稳定对象和非最小相位对象控制中的应用前景。

关键词: 自抗扰控制; 不稳定系统; 非最小相位系统

中图分类号: TP 13 **文献标识码:** A

Simulation Study on Auto-disturbance-rejection Control for Unstable Systems and Non-minimum Phase Systems

L I U X iang, L I D ong-hai, J IAN G X ue-zhi, H U X ue-jiao

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Auto-disturbance-rejection controllers (ADRC) are designed respectively to control inverted pendulum, hydro-governor, the depth of torpedo, the height of airplane and the pitch angle of helicopter. Simulation results are given and compared with those of other control strategies. It is demonstrated that ADRC is effective and thus has a promising future in the control for unstable systems and non-minimum phase systems.

Key words: auto-disturbance-rejection controller (ADRC); unstable systems; non-minimum phase systems

1 引言

自抗扰控制器(ADRC)是中科院系统所韩京清研究员近年提出的一种非线性控制律。该技术采用简单的非线性元件和算法, 对非线性系统进行直接控制, 其控制器的设计不依赖于对象具体的数学模型。文献[1~3]提出了自抗扰控制器的结构并给出

其在时变系统、最小相位系统、多变量系统及大时滞系统中的仿真实例。文献[4,5]分别将ADRC应用于直流输电附加控制和异步电机的控制, 仿真结果均表明ADRC具有良好的控制性能。但ADRC是否适用于不稳定对象以及非最小相位对象的控制还有待研究。本文使用实例仿真的方法, 对这一问题进行了探讨。

收稿日期: 2000-05-19; 修回日期: 2000-07-24

作者简介: 刘翔(1975—), 女, 四川威远人, 硕士生, 从事非线性控制、热工过程控制的研究; 姜学智(1946—), 男, 山东莱州人, 教授, 从事热工测量、控制与仿真的研究。

2 自抗扰控制器简介

设有受未知外扰 $w(t)$ 作用的非线性不确定对象

$$y^{(n)} = f(y, y^{(1)}, \dots, y^{(n-1)}, w(t)) + b(t)u(t) \quad (1)$$

其中 f, w 和 b 均为不确定函数。针对该对象的 ADRC 由跟踪微分器 TD、扩张状态观测器 ESO、非线性组合 NLC 三个非线性环节组成, 具体原理及结构参见文献[1~ 3, 6]。

3 不稳定对象控制仿真

倒立摆是一个典型的不稳定强非线性受控对象, 其数学模型^[7] 表达如下

$$\ddot{\theta} = \frac{m_p g \sin\theta - \cos\theta(F + m_p l \dot{\theta}^2 \sin\theta)}{(4/3)m l - m_p l \cos^2\theta} = \frac{(m_p l \dot{\theta}^2 \cos\theta - m_p g) \sin\theta + \cos\theta F}{m_p l \cos^2\theta - (4/3)m l} \quad (2)$$

其中, θ 为杆与垂线的夹角 ($^\circ$), $\dot{\theta}$ 为角速度 ($^\circ/s$), $\ddot{\theta}$ 为角加速度 ($^\circ/s^2$), F 为作用力 ($|F| \leq 10N$), 杆的质量 $m_p = 0.1kg$, 小车质量 $m_c = 1kg$, 杆和小车的总质量 $m = 1.1kg$, 半杆长 $l = 0.5m$, 重力加速度 $g = 9.8m/s^2$ 。

由于控制量 F 与状态变量 θ 间存在耦合, 倒立摆与 ADRC 所适用的标准对象(1) 并不相符。因此令中间控制量

$$u(t) = \frac{\cos\theta}{m_p l \cos^2\theta - (4/3)m l} F(t) \quad (3)$$

由 ADRC 直接给出, 再通过式(6) 换算得最终控制量 $F(t)$ 。假设 $u-F$ 的形式已通过建模获得, 但其参数可发生 $\pm 20\%$ 的摄动。在标称参数下, 有

$$F(t) = [0.05 \cos\theta - (2.2/3) \sec\theta] u(t) \quad (4)$$

这是一个零输入响应, 因此在 ADRC 设计中略去了

TD。

图 1(a) 给出了倒立摆从初态 $\theta = 30^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$ 达平衡态 $\theta = 0^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$ 的过渡过程曲线。调节时间 $t_s = 0.7s$, 系统输出 $\theta(t)$ 无超调。

为考察 ADRC 的适应性和鲁棒性, 现保持 ADRC 参数不变, 将对象做如下变更:

- 1) 初态不变, 杆质量变为 $m_p = 0.5kg$;
- 2) 初态不变, 在第 2 秒时给控制量 F 加入幅值为 $+10N$ 宽度为 $0.01s$ 的脉冲扰动;
- 3) 初态变为 $\theta = 42.5^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$;
- 4) 式(7) 参数发生 $+20\%$ 的摄动, 即 $F = (0.06 \cos\theta - 0.88 \sec\theta) u$
- 5) 式(7) 参数发生 -20% 的摄动, 即 $F = [0.04 \cos\theta - (1.76/3) \sec\theta] u$

变更情形 1) 的过渡过程曲线如图 1(b) 所示, 其余情形的曲线略。若略加调整 ADRC 参数, 控制性能还会有所改善。

保持上述 ADRC 参数不变, 进一步仿真发现: 倒立摆保持标称参数, 初始状态在 $|\theta| \leq 42.5^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$, 或 $\theta = 0^\circ; -181.5^\circ/s \leq \dot{\theta} \leq 602^\circ/s$ 范围内; 或者倒立摆保持初始状态在 $\theta = 30^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$, 模型参数在 $m_p = 0.76kg, m_c = 1kg, l = 0.5m$, 或 $m_p = 0.1kg, m_c = 1.66kg, l = 0.5m$, 或 $m_p = 0.1kg, m_c = 1kg, l = 1m$ 范围内; ADRC 均能使倒立摆最终达到平衡态 $\theta = 0^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$ 。

文献[8] 采用基于神经网络的模糊自适应方案对同样的倒立摆进行仿真控制, 系统输出 $\theta(t)$ 无超调, 调节时间 $t_s = 1.2s$, 系统稳定域为 $|\theta| \leq 42^\circ; \dot{\theta} = 0^\circ/s$, 或 $\theta = 0^\circ; |\dot{\theta}| \leq 150^\circ/s$ 。显然, ADRC 的调节时间更短, 系统稳定域更宽, 且控制器结构较为简

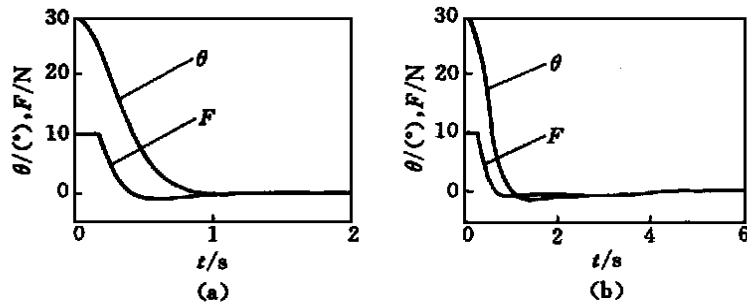


图 1 倒立摆控制仿真结果 (a) 标称参数 (b) 杆质量变化

单, 参数容易整定。由此可见,ADRC 对非线性和不稳定对象具有良好的控制性能, 对其外扰及对象模型参数的变化具有良好的适应性和鲁棒性。

4 非最小相位对象控制仿真

非最小相位对象是指具有右半复平面零、极点或延时的线性对象。以下将ADRC应用于右半复平面只有一个零点的典型非最小相位系统, 其微分方程并不符合ADRC所适用对象的标准形式(1)。本文通过大量仿真和分析发现, 将控制量 $u(t)$ 和输出 $y(t)$ 送入扩张状态观测器ESO, 而将 $u^{(1)}(t)$ 作为外扰进行补偿, 即 $z_{n+1}(t)$ 跟踪对象未知部分的实时作用量 $a(t) = f(y, y^{(1)}, \dots, y^{(n-1)}) + (b(t) - b_0)u(t) + b_1u^{(1)}(t)$, 同样可以实现反馈线性化, 达到对非最小相位对象的有效控制。

此外, 在对象阶数 $n \geq 3$ 的情况下, 用最优控制理论来设计TD十分困难和繁琐^[6]。由于TD的主要作用在于安排预期动力学特性并柔化参考输入信号的变化, 因此完全可用某些结构简单的柔化环节来实现, 最简单的可将TD设计为线性惯性环节。在此, 借鉴文献[10]推荐的非线性控制逆系统方法中预期动力学方程的选取, 将TD的传递函数设计为

$$\Phi(s) = V(s)/R(s) = \left[\frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \right] \left[\frac{\alpha\omega(n-2)}{s + \alpha\omega(n-2)} \right]^{n-2} \quad (5)$$

其中, $R(s)$ 和 $V(s)$ 分别为TD的输入 $r(t)$ 和第一个输出 $v(t)$ 的拉氏变换函数, n 为被控对象阶数。若选系数 $\alpha = 5$, 则TD阶跃响应与其第一因子二阶环节的阶跃响应接近。阻尼系数 ξ 决定过渡曲线的形状, 角频率 ω 决定其速度, 从而决定了TD的跟踪性能和柔化作用。 ω 越大, TD的跟踪能力越强, 相位滞后越小, 控制系统的调节速度加快; 但TD对参考输入的柔化作用相应减少, 控制器的鲁棒性减弱。因此, ω

的取值应根据对控制系统调节速度和鲁棒性的要求, 通过仿真实验调试决定。TD的时域表达式为

$$v^{(n)} + k_1v^{(n-1)} + k_2v^{(n-2)} + \dots + k_{n-1}v^{(1)} + k_nv = kr(t) \quad (6)$$

与式(5)比较, 可计算出其系数 k 和 $k_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。TD设计的简化为ADRC应用于非最小相位系统创造了条件。

4.1 水轮机调速系统

水轮发电机组的传递函数为^[11]

$$G(s) = \frac{5(1 - 0.8s)}{(1 + 0.4s)(1 + 4.8s)} \quad (7)$$

若控制器采用PI, 用单纯形法寻优使 $\int_0^{\infty} |e(t)| dt$ 最小, 则得PD控制器

$$C(s) = \frac{(1 + 0.24s)(1 + 4.7s)}{6.5s} \quad (8)$$

控制器采用ADRC, TD参数取 $n = 2, \alpha = 5, \xi = 0.7, \omega = 1.5$ 。仿真结果如图2(a)所示, 其中虚线为ADRC中TD安排的预期过渡过程。可见, 与PD控制系统相比, ADRC控制系统不仅没有超调, 而且调节时间更短, 负响应峰值更小, 过渡过程更为平稳。

水轮机组集水、机、电为一体, 难以精确建模, 这就需要控制器对模型的不确定因素具有良好的鲁棒性。在此保持最优PD和ADRC参数不变, 对象模型(10)做如下变更:

1) 机组放大系数增大

$$G(s) = \frac{7.5(1 - 0.8s)}{(1 + 0.4s)(1 + 4.8s)}$$

2) 机组模型参数均发生变化

$$G(s) = \frac{5.5(1 - 0.96s)}{(1 + 0.48s)(1 + 3.8s)}$$

仿真结果分别如图2(b)和(c)所示。可见, PD控制系统动态性能显著恶化, 超调和负响应峰值急剧增

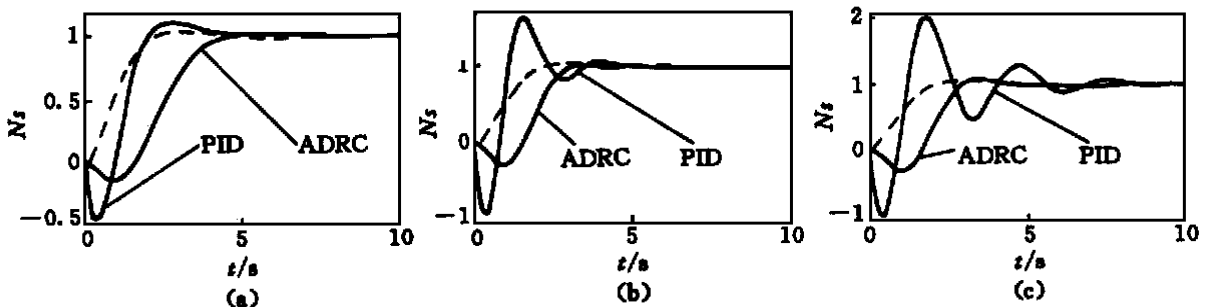


图2 水轮机调速控制仿真结果

(a) 标称参数 (b) 机组放大系数增大 (c) 机组模型参数变化

表 1 ADRC, PD 和 N 对水轮机调速控制的性能比较

控制器	(a) 标称参数			(b) 机组放大系数增大			(c) 机组模型参数变化		
	$\sigma(\%)$	t_s/s	δ	$\sigma(\%)$	t_s/s	δ	$\sigma(\%)$	t_s/s	δ
PD	13	4	0.45	65	4.5	0.9	100	8	1.05
ADRC	0	3.8	0.1	6	4.5	0.2	10	4.1	0.3
N	0	20	0	0	24	0	0	25	0

大, 而 ADRC 控制效果仍能保持满意。

文献[11]用增量式神经元(N)对同样的水轮机模型进行仿真控制。表 1 列出 ADRC, PD 和 N 在图 2 所示 3 种情况下的控制性能, 其中 σ 为超调量, δ 为负响应峰值, t_s 为调节时间。由表 1 可见, 虽然 N 控制系统的过渡过程也很平稳, 并具有较好的鲁棒性和适应性, 但由于存在自学习过程, 因此响应太慢, 调节时间过长, 且控制器的设计比较复杂。

4.2 鱼雷定深控制系统

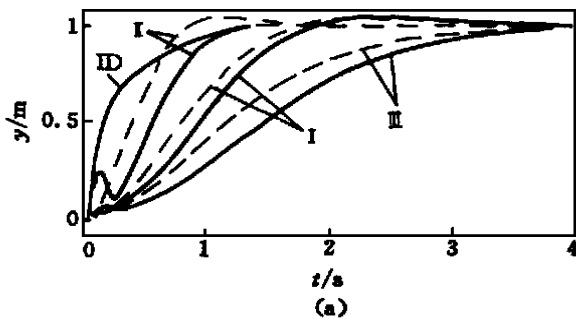
设鱼雷运行初态的传递函数^[12]为

$$G(s) = y(s)/\delta(s) = \frac{-138.67(s/2.5 + 1)(-s/50 + 1)}{s^2(s/1.15 + 1)(s/8.33 + 1)} \quad (9)$$

其中, δ 为控制舵偏角, y 为鱼雷深度。控制系统设计要求响应快速且超调小, 以防止鱼雷攻水、跳水或沉底。

控制器采用 ADRC, TD 参数取 $n = 4, \alpha = 5, \xi = 0.7, \omega = 2$ 。仿真结果如图 3(a) 中曲线簇 I 所示, 输出超调量 $\sigma = 4\%$, 调节时间 $t_s = 1.7s$ 。曲线簇 II 和 III 分别为 TD 参数取 $\xi = 0.7, \omega = 4$ 和 $\xi = 0.9, \omega = 1.5$ 时调试所得的仿真结果, 输出均无超调, t_s 分别为 1.2s 和 3.2s。虚线均为 TD 安排的预期过渡过程曲线。可见, 随着预期过渡过程的加快, 系统调节时间减小。

通过比较发现, 只要预期过渡过程足够快, ADRC 控制系统的调节速度可与 D 控制系统相当,



而比 PD 控制系统^[10] ($t_s = (4 \sim 6)s$) 快几倍, 但此时其过渡过程初期的动态性能变差, 出现较大回调。因此, 当 ADRC 应用于非最小相位系统时, 不宜将其预期过渡过程安排得太快。

鱼雷在航行过程中质心位置和速度的变化都会导致传递函数的摄动, 这要求其控制器具有较好的鲁棒性。现将鱼雷传递函数变更如下

$$G(s) = y(s)/\delta(s) = \frac{-150(s/2 + 1)(-s/30 + 1)}{s^2(s + 1)(s/8 + 1)} \quad (10)$$

而保持 ADRC 参数 I 不变。仿真结果如图 3(b) 所示, ADRC 系统输出超调略有增大。可见, ADRC 对鱼雷模型参数的变化具有一定的适应性和鲁棒性。

4.3 飞机高度调节系统

设被控对象传递函数^[9]为

$$G(s) = h(s)/\epsilon(s) = \frac{4.324 \cdot 145(-s/14.93 + 1)(s/18.78 + 1)}{s^2(s^2/4.81^2 + 1.398s/4.81 + 1)} \quad (11)$$

其中, ϵ 为升降舵的偏角, h 为飞机的高度。控制器采用 ADRC, TD 参数取 $n = 4, \alpha = 5, \xi = 0.7, \omega = 3$ 。仿真结果如图 4(a) 所示, $\sigma = 5\%$, $t_s = 1.1s$, 控制性能比较满意。图中还给出了 D 控制系统^[9]的仿真结果, $\sigma = 5\%$, $t_s = 0.7s$, 只比 ADRC 系统的调节速度稍快。

为检验 ADRC 的鲁棒性, 现保持其参数不变, 将传递函数变更如下

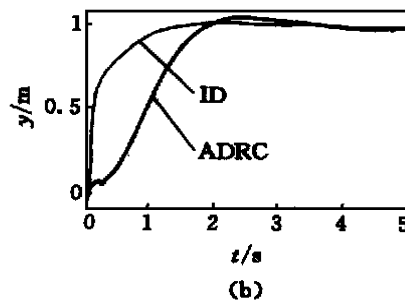


图 3 鱼雷定深控制仿真结果

(a) 标称参数 (b) 参数摄动

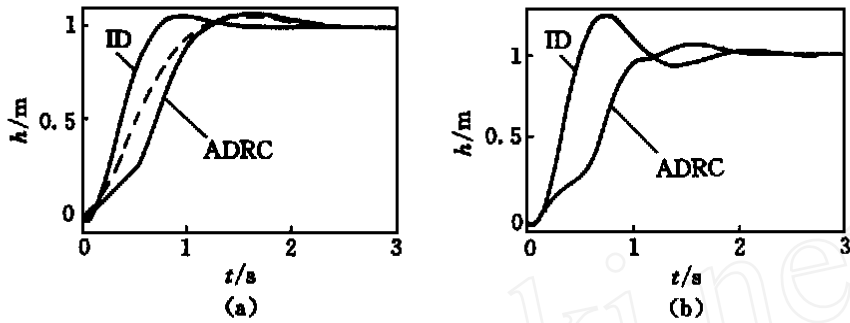


图4 飞机高度控制仿真结果

(a) 标称参数 (b) 参数摄动

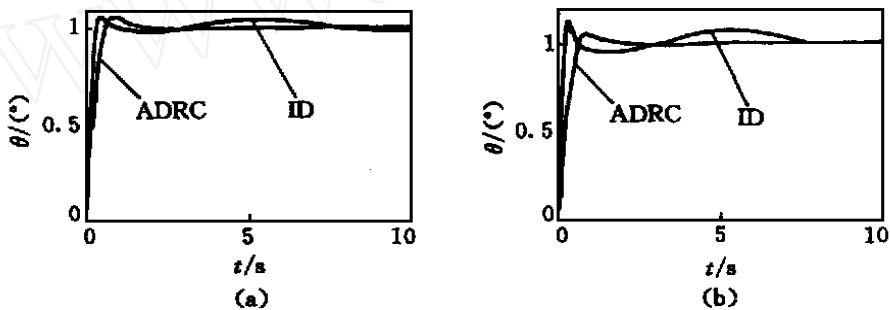


图5 直升机俯仰控制仿真结果

(a) 标称参数 (b) 参数摄动

$$G(s) = h(s)/\epsilon(s) = \frac{6.000(-s/14+1)(s/18+1)}{s^2(s^2/20+0.3s+1)} \quad (12)$$

仿真结果如图4(b)所示,ADRC系统输出超调略有增大,而D控制系统输出超调已达25%。可见,ADRC对模型参数的变化具有较好的适应性和鲁棒性。

4.4 直升机俯仰控制系统

直升机与飞机相比,在低速运动时其姿态控制较为困难,这是由于被控对象是不稳定的。其传递函数^[9]为

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{\delta(s)} = \frac{0.1413 \times (s/0.002451+1)}{(s/0.6808+1)(s^2/0.3997^2 - 0.6154s/0.3997+1)} \quad (13)$$

其中,输入 δ 是直升机水平旋翼的仰角,输出 θ 是直升机的俯仰角。控制器采用ADRC,TD设计中取 $n=3, \alpha=5, \xi=0.7, \omega=7$ 。仿真结果如图5(a)所示,超调量 $\sigma=5\%$,比D系统^[9]输出的超调略大;调节时间 $t_s=0.5s$,与D控制系统相当,控制性能

较为满意。

为检验ADRC的鲁棒性,现保持其参数不变,将传递函数变更如下

$$G(s) = \theta(s)/\delta(s) = \frac{0.35(s/0.0024+1)}{(s/0.6+1)(6s^2-1.5s+1)} \quad (14)$$

仿真结果如图5(b)所示,ADRC系统输出超调基本不变,且稳态精度高,而D控制系统输出超调已达12%,且在稳态值附近出现明显振荡。可见,ADRC对模型参数的变化具有较好的适应性和鲁棒性。

5 结 语

本文尝试将ADRC应用于不稳定对象和非最小相位对象的控制。大量仿真结果发现,只要对控制器的设计略加改造并适当整定,ADRC对上述两类对象都具有满意的控制性能,控制器设计简单,对外扰和对象的不确定因素有较好的适应性和鲁棒性。这一仿真研究工作进一步拓宽了ADRC的适用范围。

(下转第429页)

6 结 语

本文利用对策论中的激励 Stackelberg 原理, 改进了多服务网络中的价控问题已有的研究结果, 讨论了多服务网络中的价控模型。给出了一类线性激励 Stackelberg 策略, 通过激励参数来制定价控策略, 从而使管理者能将网络稳定地运行在期望的平衡点上。

参考文献:

- [1] DaSilva L A, Petr D W, Akar N. Equilibrium pricing in multi-service priority-based networks [A]. IEEE GLOBECOM 97[C]. Phoenix, 1997.
- [2] Cocchi R, Shenker S, Estrin D *et al*. Pricing in computer networks: Motivation, formulation and example [J].

- IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(6): 614-627.
- [3] Dziong Z, Mason L G. Fair-efficient call admission control policies for broadband networks——A game-theoretic framework [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1996, 4(1): 123-136.
- [4] Shenker S J. Making greed work in networks: A game-theoretic analysis of switch service disciplines [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1995, 3(6): 819-831.
- [5] Fudenberg D, Tirole J. Game theory [M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [6] Kleinrock L. Queueing systems (II): Computer applications [M]. John Wiley and Sons, 1976.
- [7] 金福德, 井元伟, K Sohraby, 等. 基于优先权的多服务网络的最优价控策略 [A]. 2001 中国控制与决策学术年会论文集 [C]. 西安, 2001. 896-901.

(上接第 424 页)

参考文献:

- [1] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律——NLSEF [J]. 控制与决策, 1999, 10(3): 221-225.
- [2] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [3] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制 [J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 354-358.
- [4] 焦连伟, 陈寿孙, 王晓丰. 电力系统自抗扰控制器 [J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 27-29.
- [5] 冯光, 黄立培, 朱东起. 异步电机的新型非线性自抗扰控制器的研究 [J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 30-33.
- [6] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器 [J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
- [7] Charles W Anderson. Learning to control an inverted

- pendulum using neural networks [J]. IEEE Contr Syst Mag, 1989, 9(3): 31-37.
- [8] Kosko B. Neural network and fuzzy systems [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1992.
- [9] 李东海. 非最小相位系统的智能设计 [R]. 北京: 清华大学, 1994.
- [10] 李东海, 姜学智, 徐忠净, 等. 一类不可逆系统的非线性控制及预期动力学方程的选取 [J]. 控制与决策, 1998, 13(6): 686-689.
- [11] 王宁, 楼晶. 水轮发电机组的增量式神经元非模型控制 [A]. 中国控制会议论文集 [C]. 北京: 国防大学出版社, 1998. 626-630.
- [12] 徐世许. X 鱼雷控制系统的研究 [R]. 北京: 清华大学, 1989.