一种自抗扰控制器参数的学习算法

武 雷 [1,2] 保 宏 [1] 杜敬利 [1] 王从思 [1]

摘 要 针对自抗扰控制器 (Automatic disturbance rejection controller, ADRC) 参数多且耦合性强, 参数难于被确定的问题, 提出了一种 ADRC 参数的自动调整算法. 该算法以构造的控制性能函数为学习目标, 根据参数对性能指标的影响, 通过惩罚函数在线不断更新参数在有界区间内的概率密度分布, 使得控制参数最优值的概率密度值最大. 通过开环不稳定系统算例和对工业机电驱动器单元 (Industrial mechatronic drives unit, IMDU) 的控制实验, 仿真和实验结果证明了该算法的有效性.

关键词 自抗扰控制器, 自动调整, 控制参数, 工业机电驱动器单元

引用格式 武雷, 保宏, 杜敬利, 王从思. 一种自抗扰控制器参数的学习算法. 自动化学报, 2014, **40**(3): 556−560

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00556

A Learning Algorithm for Parameters of Automatic Disturbances Rejection Controller

WU Lei[1,2] BAO Hong[1] DU Jing-Li[1]
WANG Cong-Si[1]

Abstract Considering the special characteristics of the automatic disturbance rejection controller (ADRC), with emphasis on the parameters and strong coupling among them, an algorithm is presented in this paper for tuning the parameters of the ADRC automatically. Aiming at the minimization of the control performance function, the algorithm learns an optimal set of controller parameter values of the ADRC by cost function, updating each parameter of the controller within a bounded interval probability density distribution constantly and making the probability density of the optimal control parameter maximum. The algorithm is applied to an open-loop unstable system and the industrial mechatronic drives unit (IMDU), the results of simulation and experiment show its validity.

Key words Automatic disturbance rejection controller (ADRC), tuning automatically, control parameter, industrial mechatronic drives unit (IMDU)

Citation Wu Lei, Bao Hong, Du Jing-Li, Wang Cong-Si. A learning algorithm for parameters of automatic disturbances rejection controller. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(3): 556−560

经典线性控制算法中, PID 控制器在工业控制中占有重要的地位, 随着应用的广泛性增加及现代工业对控制性能要求的不断提高, 其存在的缺点也不断地凸显出来, 为了克服 PID 控制器的缺点, 韩京清提出了一种非线性 PID 控制器 (Nonlinear PID, NLPID), 该控制器具有更强的误差衰减能力和抗干扰能力[1], 并经过一般化处理后, 设计了独立于对象数学描述的状态误差反馈控制律[2], 最终, 在文献 [3] 中, 提出了自抗扰控制器 (Automatic disturbance rejection controller, ADRC) 的基本概念. 文献 [4] 详细阐述了从经典 PID 到自抗扰控制器的推导过程. 由于该算法控制精度高、自抗扰能力强, ADRC 也不断被学者在实践中进行应用. 例如, NLPID 被应用在电加热炉集散控制系统中, 实时控制结果证明, NLPID 具有控制精度高、调节时间短和抗干扰能力强的优点[5]. Hou 等将 ADRC 应用到卷纸机控制系统中, 克服了因系统模型动态变化对控制性能的影响[6]; Wu 等将其应用于非圆车削中刀架伺服系统, 提高刀架跟踪速度和抗干扰性[7]. 然而, 在实际应用中[5−12], ADRC 相对于 PID 有更多参数需要调整, 且这些参数互相影响, 使得 ADRC 的应用受到了很大的限制. 为此, 文献 [4] 给出了部分参数取值原则, 但是该方法是针对特定系统, 适应范围小. Sun 和 Gao 针对线性化的 ADRC 参数, 提出了基于频率方法的 ADRC 参数自调整算法[12−13], 但是线性化使得 ADRC 的鲁棒性降低, 降低了算法的优势. 文献 [14] 给出了基于混沌粒子群算法 (Chaos particle swarm optimization, CPSO) 的 ADRC 参数自适应, 降低了基本粒子群算法易陷入局部最优解的可能性, 并保持了该算法的优势, 但是这种算法耗费时间长, 不利于实际应用. 可见, 有效地解决 ADRC 参数的调整问题, 能够推动 ADRC 的实际应用.

据此, 本文结合连续动作强化学习器 (Continuous action reinforcement learning automata, CARLA) 的架构[15−17], 提出了一种 ADRC 参数自学习算法 – CARLA-ADRC. 该方法依据构造性能目标函数, 更新 ADRC 参数取值空间的概率密度函数, 确定出满足性能要求的 ADRC 参数. 针对 ADRC 参数难于整定的问题, 该方法的最大优点是在保持 ADRC 优势的情况下, 快速自动确定其参数.

1 自抗扰控制器

以二阶系统为例, 图 1 给出了自抗扰控制器的原理框图, 图中虚线部分为自抗扰控制器 (ADRC), 主要由非线性跟踪 – 微分器 (Tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器 (Extended state observer, ESO)、非线性误差反馈律 (Nonlinear PD, NPD) 和扰动补偿过程所组成. 其完整表达式为:

1) 以 v 为设定输入的 TD 表达式

$$\begin{cases} v_1 = v_1 + h \times v_2 \\ v_2 = v_2 + h \times fhan(v_1 - v, v_2, r_0, \delta_0) \end{cases} \tag{1}$$

2) 以系统输出 y 和输入 u 来估计系统状态和总扰动的 ESO

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ fe = fal(e, \alpha_1, \delta_1) \\ fe1 = fal(e, \alpha_2, \delta_1) \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01} e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02} fe + b_0 u) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_{03} fe1) \end{cases} \tag{2}$$

3) 非线性误差反馈律 (NPD) 和扰动补偿过程

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_3, \delta_2) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_4, \delta_2) \\ u = u_0 - \dfrac{z3}{b_0} \end{cases} \tag{3}$$

其中, β_{01}, β_{02}, β_{03}, β_1, β_2 为可调参数, h 为系统采样周期, 非线性函数 $fhan$ 和 fal 的具体表达式及其参数在文献 [4]

收稿日期 2012-08-22 录用日期 2013-03-04
Manuscript received August 22, 2013; accepted March 4, 2013
国家自然科学基金 (50775170, 51105290, 51035006, 50805111, 51175398) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (50775170, 51105290, 51035006, 50805111, 51175398)
本文责任编委 王聪
Recommended by Associate Editor WANG Cong
1. 西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室 西安 710071 2. 中国电子科技集团第十四研究所 南京 210039
1. Electronic Equipment Structure Key Laboratory of Education Ministry, Xidian University, Xi′an 710071 2. 14th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039

中被详细地描述出来. 由式 (1) ∼ (3) 可以看出该方法共有 14 个参数需要调整, 且这些参数相互耦合, 如何针对控制系统给出合理的参数, 成为阻碍 ADRC 在实际中应用的关键.

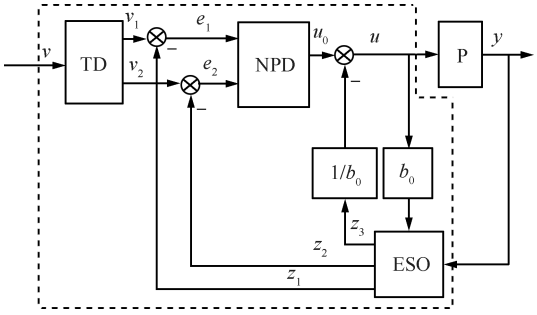


图 1　ADRC 原理框图

Fig. 1　Schematic diagram of ADRC

2　CARLA-ADRC 算法

在 CARLA-ADRC 算法中, 依据 CARLA 强化学习算法中的更新机制[15−17], 对于 ADRC 的第 i 参数, 定义一个相应的学习区间 $X_i = \{x_i \mid x_{i\min} \le x_i \le x_{i\max}\}$ 和第 k 次学习迭代的概率密度分布函数 $f_i(x_i, k)$, 对于该区间的选区, 可根据文献 [4] 提出的方法先初步确定一组参数, 根据这些参数扩展出一个学习区间. 区间的 $x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别表示参数可取的最大值和最小值. 初始情况下, 其概率密度分布函数服从于均匀分布为:

$$f_i(x_i, 1) = \begin{cases} \dfrac{1}{x_{i\max} - x_{i\min}}, & x_i \in X_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

每次进行学习时, 都需要从参数区间中确定出一组参数, CARLA-ADRC 采用随机的方式来提取每次学习迭代所使用的参数:

$$\int_{x_{i\min}}^{x_i(k)} f_i(x_i, k)\mathrm{d}x_i = z_i(k) \tag{5}$$

式中, $z_i(k)$ 属于区间 [0, 1] 的随机数, $x_i(k)$ 为 ADRC 第 k 次学习时第 i 个参数值. 随机的方式能够保证 ADRC 参数得到足够的学习机会, 避免了 CARLA-ADRC 学习的参数陷于局部最优解.

将选择出的 ADRC 参数应用到被控制系统中, 求出与之相对应的目标函数值 $J(k)$, 将 $J(k)$ 与先前目标函数值的最小值 $J_{\min}$ 和均值 J_{mean} 进行比较, 便可以对该组参数进行性能评估, 即

$$\beta(k) = \min\left\{\max\left\{0, \frac{J_{\mathrm{mean}} - J(k)}{J_{\mathrm{mean}} - J_{\min}}\right\}, 1\right\} \tag{6}$$

这里, $\beta(k)$ 为惩罚函数. 若本次学习目标值小于以前最小值则给予奖励, 若本次学习的消耗值大于均值, 则给予惩罚值为 0.

计算出 $\beta(k)$ 后, ADRC 的每个参数的概率密度分布函数则进行相互独立的更新:

$$f_i(x_i, k+1) = \begin{cases} \alpha(k)\left[f_i(x_i, k) + \beta(k)H(x_i, r)\right], & x_i \in X_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中, $H(x, r)$ 是以本次学习每个参数值 $r = x_i(k)$ 为中心的高斯分布函数, 其具体表达式为

$$H(x, r) = \frac{g_h}{x_{\max} - x_{\min}} \exp\left(-\frac{(x-r)^2}{2(g_w(x_{\max} - x_{\min}))^2}\right) \tag{8}$$

式中, g_h 和 g_w 分别决定了算法学习 ADRC 参数的速度和分辨能力. 为了保证 ADRC 每个参数的概率密度分布函数在其区间积分为 1, 式 (7) 中定义了归一化因子, 其计算表达式为

$$\alpha(k) = \frac{1}{\displaystyle\int_{x_{i\min}}^{x_{i\max}} \left[f_i(x_i, k) + \beta(k)H(x_i, r)\right]\mathrm{d}x_i} \tag{9}$$

图 2 给出了算法总体流程图. 算法结束条件为迭代到一定次数或目标函数均值 J_{mean} 收敛到一个特定值. 随着系统学习的进行, 每个 ADRC 参数的概率密度分布不断被以能提高系统控制性能的参数值为中心的高斯函数所更新, 最终, ADRC 的每个参数的概率密度分布将收敛到以最优值为中心的高斯分布.

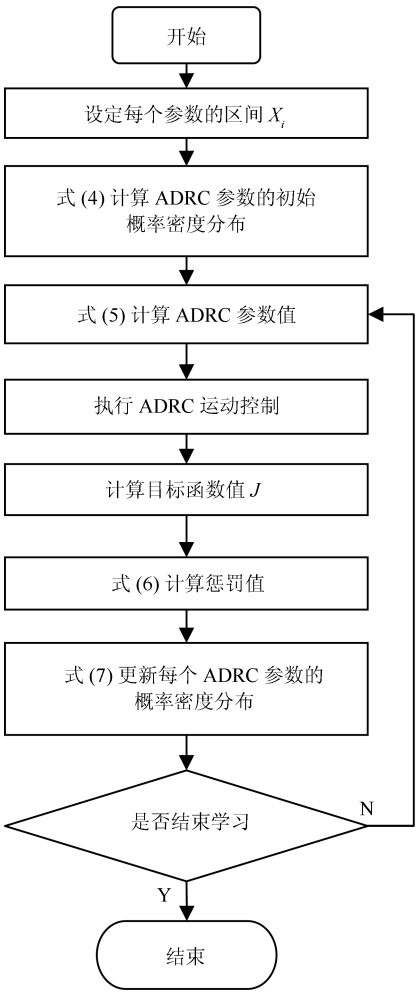


图 2　CARLA-ADRC 算法流程图

Fig. 2　Flow chat of CARLA-ADRC

3　仿真与实验

3.1　仿真

对于式 (10) 所示开环不稳定系统, 该系统含有符号非线

性项, 因此, 此系统相当于线性系统加入一个周期为 4π 的跳动干扰.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_1 + x_2 + \mathrm{sgn}\left(\sin\left(\dfrac{t}{2}\right)\right) + u \\ y = x_1 \end{cases} \tag{10}$$

CARLA-ADRC 算法的目标函数定义为系统误差绝对值对时间的积分:

$$J(k) = \int_0^T |e(t,k)|\,\mathrm{d}t \tag{11}$$

其中, 学习参数设为 $g_w = 0.3$ 和 $g_h = 0.02$, 存储空间为 $R = 500$. TD 模块参数可以根据控制系统性能要求而定, 本次仿真 TD 参数为 $r_0 = 50$ 和 $h_0 = 0.001$, 其余参数取值范围见表 1.

表 1 ADRC 的参数范围及最优值

Table 1 Parameter range and optimal value of ADRC

ADRC 参数	参数范围	最优值
δ_1	[0 0.01]	0.0016
α_1	[0 1.0]	0.5872
α_2	[0 1.0]	0.0869
β_{01}	[0 100]	37.8646
β_{02}	[0 10 000]	4921.3
β_{03}	[0 100 000]	66611
δ_2	[0 0.01]	0.008
α_3	[0 1.0]	0.2977
α_4	[0 1.0]	0.7023
β_1	[0 200]	25.058
β_2	[0 200]	172.091
b_0	[0 100]	5.3455

图 3 显示了平均目标函数值的变化趋势, 由图 3 可以看出, J_{mean} 在 500 次以后开始收敛, 2 000 次后, J_{mean} 下降速度减慢, 5 000 次后, J_{mean} 收敛到特定值. 图 4 (a) 为 ESO 参数 α_2 概率密度 $f(\alpha_2)$ 的变化趋势, 图 4 (b) 为 NPD 参数 α_4 概率密度 $f(\alpha_4)$ 的变化趋势, 图 4 (c) 为扰动补偿参数 b_0 概率密度 $f(b_0)$ 的变化趋势, 从图中可以看出, 由于惩罚函数的作用, 使得参数概率密度函数收敛到一个特定概率密度分布, 限于篇幅原因, 其他参数概率密度变化趋势不再给出. 选取每个参数概率密度最大对应的参数值, 即为相应 ADRC 参数最优值 (见表 1), 图 5 给出了所选取的 ADRC 参数对系统 (10) 的阶跃响应图, 由图可以看出, 学习后的 ADRC 参数使得系统 (10) 具有很好的跟踪性能.

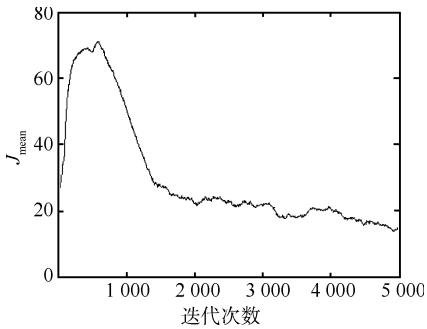
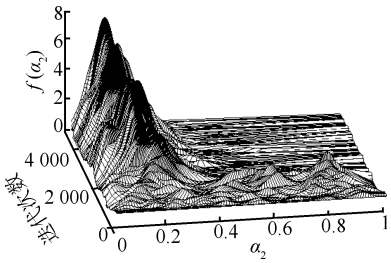
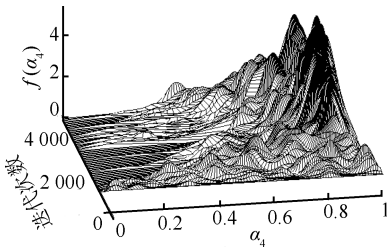


图 3 目标函数平均值的变化趋势

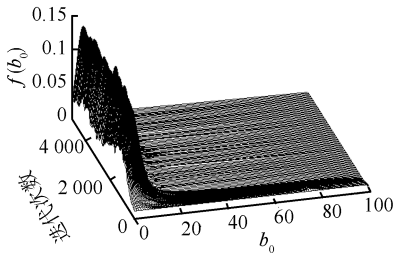
Fig. 3 Tendency of the mean of cost function



(a)



(b)



(c)

图 4 ADRC 部分参数的概率密度变化趋势

Fig. 4 Tendency of probability density of part of ADRC parameters

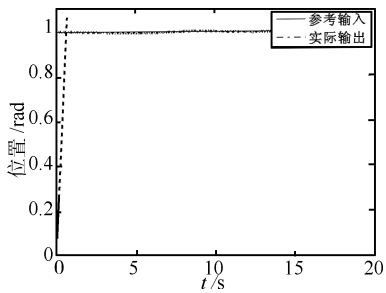


图 5 ADRC 的阶跃响应

Fig. 5 Step response of ADRC

3.2 实验

为了检验 CARLA-ADRC 算法在实际控制系统中应用, 将其应用于 IMDU 实验平台中进行半实物仿真. 如图 6 所示, IMDU 实验平台主要包括驱动电机 1, 负载电机 2, 以及摩擦模块 3. 在 IMDU 系统的被控轴上加入摩擦模块 3, 作为控制系统的内部干扰, 通过负载电机 2 可以模拟系统的外部干扰, 因此 IMDU 实验平台可以同时模拟控制系统的内外部干扰. 该实验采用 dSPACE 系统作为控制器快速生成和数据采集平台.

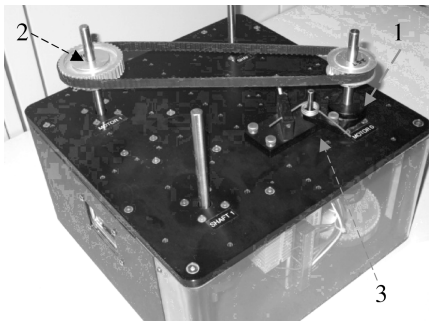


图 6　IMDU 系统

Fig. 6　Industrial mechatronic drives unit system

ADRC 的参数范围设定如表 2 所示, 设定系统采样周期为 0.001 s, 每次学习的时间为 5 s, 设定目标函数为

$$J = \sum_{k=0}^{5\,000} t_k {e_k}^2 \tag{12}$$

TD 的参数为 $r_0 = 100$ 和 $h_0 = 0.001$.

经过在线学习, 图 7 给出了目标函数均值的变化趋势, 图 8 给出了部分参数的概率 $f(\beta_{01})$, $f(\beta_2)$, $f(b_0)$ 的变化趋势. 选取 ADRC 参数概率密度最大的值 (见如表 2), 对 IMDU 系统进行控制, 图 9 给出了跟踪方波信号的控制效果, 从图中可以看出, 经 CARLA-ADRC 算法学习出的控制器, 能够无超调且快速跟踪方波信号, 并且能够消除系统中干扰对控制性能的影响. 对比文献 [14] 的方法, 该方法学习出的参数控制性能更好, 表 3 给出了相同情况下自动确定 ADRC 参数两种算法所需要的时间, 可以看出本算法具有更快的速度.

表 2　ADRC 的参数范围及最优值

Table 2　Parameter range and optimal value of ADRC

ADRC 参数	参数范围	最优值
δ_1	[0　0.001]	0.00023
α_1	[0　1.0]	0.3764
α_2	[0　1.0]	0.4315
β_{01}	[1　200]	143.3
β_{02}	[9 000　12 000]	11 469
β_{03}	[60 000　90 000]	75 163
δ_2	[0.001　0.01]	0.0049
α_3	[0　1.0]	0.5570
α_4	[0　1.0]	0.2427
β_1	[20　50]	27.8749
β_2	[5.0　15]	6.5993
b_0	[50　150]	90.8251

表 3　自动确定 ADRC 参数所需时间对比 (小时)

Table 3　Comparison of the time needed for tunning the parameters of ADRC (hour)

算法	CARLA-ADRC	CPSO-ADRC
消耗时间	4.3	21

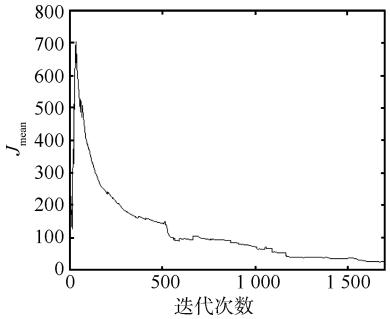


图 7　平均消耗值的变化趋势

Fig. 7　Tendency of the mean of cost function

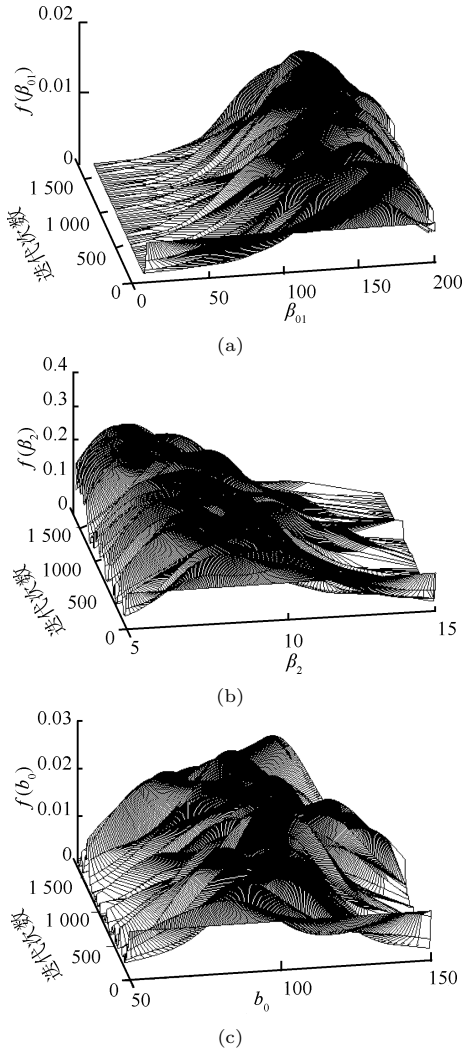


图 8　ADRC 部分参数的概率密度变化趋势

Fig. 8　Tendency of probability density of part of ADRC parameters

4　结论

为了解决 ADRC 控制器参数难于整定的问题, 本文提出了 CARLA-ADRC 算法, 该算法只需在给定系统参数范围的情况下, 可自动学习一组满足性能指标的控制参数, 通过对开环不稳定系统仿真和 IMDU 系统的实际控制, 证明了该算法的有效性. 但是如何更有效地确定 ADRC 控制器参数学习区间还需要进一步研究. 对于大于二阶的系统, ADRC 参

数数目的增加也会影响本算法的学习效率, 因此对于本算法, 还有研究的空间和必要性.

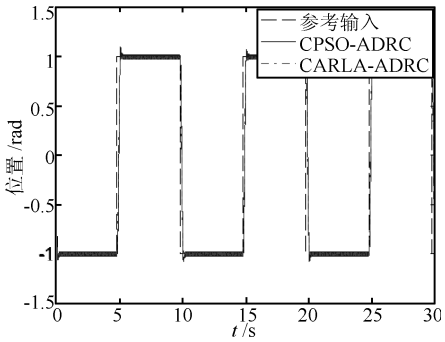


图 9 ADRC 的控制效果

Fig. 9 Control effect of ADRC

References

1 Han Jing-Qing. A new type of controller: NLPID. *Control and Decision*, 1994, **9**(6): 403−407
(韩京清. 一种新型控制器 — NLPID. 控制与决策, 1994, **9**(6): 403−407)

2 Han Jing-Qing. Nonlinear state error feedback control law — NLSEF. *Control and Decision*, 1995, **10**(3): 221−225
(韩京清. 非线性状态误差反馈控制律 — NLSEF. 控制与决策, 1995, **10**(3): 221−225)

3 Han Jing-Qing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications. *Control and Decision*, 1998, **13**(1): 19−23
(韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, **13**(1): 19−23)

4 Han Jing-Qing. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(3): 900−906

5 Wang Shun-Huang, Li Xiao-Tian, Zheng Qiu-Bao, Zheng Bao-Yuan, Deng Rui-Lan, Hu Yi-Shun. Nonlinear PID algorithm and its application in distributed system of the electronic heating furnace. *Acta Automatica Sinica*, 1995, **21**(6): 675−680
(王顺晃, 李晓天, 郑秋宝, 郑保元, 邓芮岚, 轷一顺. 非线性 PID 算法及其在电加热炉集散控制系统中的应用. 自动化学报, 1995, **21**(6): 675−680)

6 Hou Y, Gao Z Q, Jiang F, Boulter B T. Active disturbance rejection control for web tension regulation. In: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, USA: IEEE, 2001. 4974−4979

7 Wu Dan, Wang Xian-Kui, Zhao Tong, Lv Wei-Long. Application of active disturbance rejection to tracking control of a fast tool servo system. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Control Application. Toronto, Canada: IEEE, 2005. 547−552

8 Zhang Rong. An economic interpretation of ADRC. In: Proceedings of the 2011 Chinese Control and Decision Conference. Mianyang, China: IEEE, 2011. 2731−2735

9 Talole S E, Kolhe J P, Phadke S B. Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(4): 1411−1419

10 Li Xing-Hua, Chen Wen-Lei. Application of active disturbance rejection controller for high precision servo system. In: Proceedings of International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer. Jilin, China: IEEE, 2011. 2467−2470

11 Zhao Yang, Zhao Zhi-Gang, Zhao Bao-Shan, Li Wen-Bo. Active disturbance rejection control for manipulator flexible joint with dynamic friction and uncertainties compensation. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou, China: IEEE, 2011. 248−251

12 Sun Bao-Sheng, Gao Zhi-Qiang. A DSP-based active disturbance rejection control design for a 1-kW H-bridge DC-DC power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, **52**(5): 1271−1277

13 Zheng Qing, Gao L Q, Gao Zhi-Qiang. On validation of extended state observer through analysis and experimentation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2012, **134**(2): 024505.1−024505.6

14 Liu Chun-Fang, Zang Bin. Application and the parameter tuning of ADRC based on CPSO. In: Proceedings of 24th Chinese Control and Decision Conference. Taiyuan, China: IEEE, 2012. 3277−3281

15 Howell M N, Frost G P, Gordon T J, Wu Q H. Continuous action reinforcement learning applied to vehicle suspension control. *Mechatronics*, 1997, **7**(3): 263−276

16 Mohammadi S M A, Gharaveisi A A, Mashinchi M R, Rafiei S M R. New evolutionary methods for optimal design of PID controllers for AVR system. In: Proceedings of 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference. Bucharest, Romania: IEEE, 2009. 1−8

17 Gurzi P, Steenhaut K, Nowe A, Vrancx P. Learning a pricing strategy in multi-domain DWDM networks. In: Proceedings of 2011 18th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks. Chapel Hill, USA: IEEE, 2011. 1−6

武 雷 西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室硕士研究生. 主要研究方向为机器学习和非线性控制. 本文通信作者.
E-mail: leiwu_xidian@163.com
(**WU Lei** Master student at the Electronic Equipment Structure Key Laboratory of Education Ministry, Xidian University. His research interest covers machine learning and nonlinear control. Corresponding author of this paper.)

保 宏 西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室教授. 主要研究方向为天线结构的分析、优化与控制.
E-mail: baohong029@gmail.com
(**BAO Hong** Professor at the Electronic Equipment Structure Key Laboratory of Education Ministry, Xidian University. His research interest covers analysis, optimization and control of antenna driven systems and antenna structures.)

杜敬利 西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室教授. 主要研究方向为索牵引系统与索网结构的分析、优化与控制.
E-mail: jldu@mail.xidian.edu.cn
(**DU Jing-Li** Professor at the Electronic Equipment Structure Key Laboratory of Education Ministry, Xidian University. His research interest covers amechanical analysis, optimization, and control of cable-driven systems and cable network structures.)

王从思 西安电子科技大学电子装备结构教育部重点实验室教授. 主要研究方向为电子装备机电耦合, 天线机电热耦合设计.
E-mail: baohong029@gmail.com
(**WANG Cong-Si** Professor at the Electronic Equipment Structure Key Laboratory of Education Ministry, Xidian University. His research interest covers electromechanical coupling of electronic equipments with emphasis on the structural-electromagnetic-thermal coupling of antennas.)