

基于调节/观测时间的自抗扰控制器参数整定

葛立明, 李宗刚[†], 王世伟, 杜亚江

(兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 受带宽自抗扰控制器(ADRC)参数整定方法启发,给出一种基于系统调节时间/观测时间的ADRC参数整定方法.利用调节时间与控制器带宽之间的关系,给出基于调节时间整定非线性控制器参数 k_p 及 k_d 的方法;同时,利用所定义的观测时间概念,给出一种扩张状态观测器(ESO)参数整定策略.这两种ADRC参数整定方法简化了基于带宽方法的参数整定过程,拓展了其应用范围.仿真结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 自抗扰控制器; 参数整定; 控制器/观测器带宽; 调节时间; 观测时间

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Parameter-tuning of active disturbance rejection control based on settling/observing time

GE Li-ming, LI Zong-gang[†], WANG Shi-wei, DU Ya-jiang

(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Inspired by the bandwidth-based active-disturbance-rejection-controller(ADRC) tuning method, a novel ADRC parameter tuning-method based on settling/observing time is proposed. A method for tuning parameters k_p and k_d of nonlinear controller is given based on settling time by establishing the relations between settling time and controller bandwidth. Then a parameter tuning scheme is presented for extended state observer(ESO) by introducing the conception of observing time. The proposed parameter tuning methods for ADRC not only simplify the process of the bandwidth-based method, but also extend its application. The results of simulation show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: active-disturbance-rejection-controller; parameter tuning; controller/observer bandwidth; settling time; observing time

0 引 言

自抗扰控制(ADRC)技术是韩京清研究员针对PID控制中存在的问题而提出的一种非线性控制方法,得到了广泛关注和研究^[1-7].它采用跟踪微分器安排过渡过程并产生其微分信号,通过将系统未建模动态和未知外部干扰作为系统的“总扰动”,利用扩张状态观测器对扰动及系统状态进行估计,结合非线性组合产生所需控制信号.该方法不依赖于精确数学模型,具有算法简单、鲁棒性强、响应速度快且无超调等优点,在时滞系统、航天器姿态控制、柔性关节机器人轨迹跟踪等领域得到广泛应用^[8-12].在ADRC控制器设计中,参数整定的好坏直接影响其控制效果的优劣,因此参数整定方法始终是该领域研究的重点和难点问题之一.针对此问题国内外学者相继

提出了经验试凑法、优化法、时间尺度法等整定方法^[13-20].史永丽等采用粒子群优化算法,对ADRC参数进行整定,效果较好,但易陷入局部最优解^[13].康忠健等提出了一种改进的自适应混沌遗传算法,通过建立控制效果目标评价函数,对ADRC参数进行寻优整定^[14].张文革采用单纯形法和时间尺度法实现了ADRC的参数整定,所提出方法具有一般性^[15].李述清等研究了基于受控系统时间尺度的参数整定方法^[16].李海生等综合两者,研究了基于时间尺度模型识别和浮点遗传算法的ADRC参数自整定及优化方法,整定效果较好^[17].不同于上述方法,Gao等将带宽引入ADRC参数整定过程,分析了线性ADRC中带宽与参数整定间的关系,使其参数整定简化为基于控制器带宽和观测器带宽的整定,与其他方法相比,该方

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61064008, 61663020); 教育部重点科研基金项目(211185); 甘肃省自然科学基金项目(1208RJZA166).

作者简介: 葛立明(1977—),男,讲师,从事仿生机器人、自抗扰控制等研究; 李宗刚(1975—),男,教授,从事多智能体系统合作控制、仿生机器人等研究.

[†]通讯作者. E-mail: lizongg@126.com

法简单易用,效果良好^[20].

本文在文献[20]的基础上,进一步分析非线性控制器带宽与参数之间的关系,研究利用调节时间确定控制器带宽的方法,进而研究利用扩张状态观测器响应时间整定其参数的方法,以期实现对文献[20]结果的推广.

1 自抗扰控制技术

自抗扰控制技术不仅继承了经典PID简单、实用、有效的优点,而且融合了现代控制理论、非线性控制理论的思想精华,据此设计的控制器由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)以及扰动补偿4部分组成.考虑到实际工程应用中,具有二阶系统特性的受控对象较多,考虑如下二阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, w, t) + bu, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: u 为系统输入, x_i 为状态变量, y 为系统输出, w 为外部扰动, $f(x_1, x_2, w, t)$ 为系统扰动部分,其中包含了系统内部不确定部分和外部扰动.其对应的二阶ADRC控制器结构如图1所示.

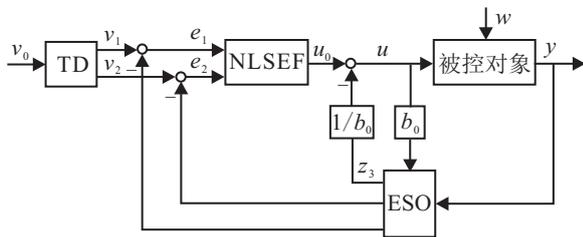


图1 二阶ADRC结构图

ADRC具体算法^[21-22]如下:

1) 非线性跟踪微分器(NTD).

$$\begin{cases} e = v_1 - v_0, \\ fh = fhan(e, v_2, r, h_0), \\ v_1 = v_1 + hv_2, \\ v_2 = v_2 + h \cdot fh. \end{cases} \quad (2)$$

其中: r 为决定跟踪速度的速度因子, h 为积分步长, h_0 为起滤波作用的滤波因子,非线性函数 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 定义为

$$fhan(x_1, x_2, r, h) = -r \left(\frac{a}{d} \right) fsg(a, d) - r \text{sign}(a)(1 - fsg(a, d)). \quad (3)$$

其中 $\text{sign}(a)$ 为符号函数,记

$$fsg(x, d) = \frac{(\text{sign}(x + d) - \text{sign}(x - d))}{2}. \quad (4)$$

则 a, d 由下式给出:

$$\begin{cases} d = rh^2, \\ a_0 = hx_2, \\ y = x_1 + a_0, \\ a_1 = \sqrt{d^2 + 8d|y|}, \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2, \\ a = (a_0 + y)fsg(y, d) + a_2(1 - fsg(y, d)). \end{cases} \quad (5)$$

由此可知,NTD中待定参数为 r, h, h_0 .

2) 扩张状态观测器(ESO)离散形式.

$$\begin{cases} e = z_1 - y, \\ fe = \text{fal}(e, 0.5, \delta), \\ fe_1 = \text{fal}(e, 0.25, \delta), \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01}e), \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02}fe + b_0u), \\ z_3 = z_3 - h\beta_{03}fe_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta; \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta. \end{cases} \quad (7)$$

$\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 和 b_0 为系统待定参数, δ 为非线性函数 fal 位于零点附近线性区间宽度,其值根据系统的误差范围确定,一般取为 $\delta = 0.1$.

3) 非线性PD.

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, \\ e_2 = v_2 - z_2, \\ u_0 = k_p \text{fal}(e_1, \alpha_{01}, \delta_0) + k_d \text{fal}(e_2, \alpha_{02}, \delta_0). \end{cases} \quad (8)$$

其中: $0 \leq \alpha_{01} \leq 1 \leq \alpha_{02}$,通常取 $\alpha_{01} = 0.25, \alpha_{02} = 1.5$;参数 δ_0 是与被控量的量程和控制精度相关的参数,一般取 $\delta_0 = 0.02$ ^[22].因此NPD需要整定参数为 k_p 和 k_d .

4) 扰动补偿.

$$u = u_0 - z_3(k)/b_0, \quad (9)$$

其中 b_0 为待定参数.

综上,在ADRC控制器设计中需要整定的参数共有9个,分别为NTD参数 r, h, h_0 ;控制器参数 k_p, k_d ;观测器参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 和补偿参数 b_0 .

2 自抗扰控制器参数整定

在经典控制理论中,超调量与调节时间是度量系统性能的两个重要指标.自抗扰控制器在保证系统快速性的前提下,使得系统响应的超调量大幅降低甚至消除.由于调节时间是反映系统响应速度和阻尼程度的综合性指标,以之作为参数整定的依据,使得在工程实现中可以根据调节时间要求确定控制器,显然具有理论及实际意义.同样地,扩张状态观测器的响应时间也是影响闭环系统快速性的一个因素,因

此有必要研究基于其响应时间的观测器参数整定方法. 本节基于文献[20]中所提出的基于带宽的参数整定方法, 对上述问题进行研究.

2.1 NTD参数整定

NTD中需要整定的参数为 r, h, h_0 , 主要利用经验试凑法确定. 其中, 速度因子 r 的值越大跟踪速度越快, 但过大会导致输出微分信号的高频噪声, 因此在满足性能要求的前提下, r 的取值越小越好, 通常取 $r = 0.0001/h^2$, 系数值可根据对象承受能力大小适当改变; 滤波因子 h_0 值越大滤波效果越好, 而过大会导致跟踪信号的相位滞后越大, 其值过小滤波效果不好, 故要综合考虑NTD的性能要求, 对 r 和 h_0 进行参数整定, 一般满足 $h_0 = 20h$.

2.2 基于调节时间的非线性控制律参数整定

设参数 b 的估计值为 b_0 , 则系统(1)可简化为

$$\ddot{y} = f + b_0 u, \tag{10}$$

其中 $f = f(x_1, x_2, w, t) + (b - b_0)u$ 是包含未建模动态与外部干扰 w 的总扰动. 当ESO设计合理时, 估计出的状态 $z_1 \approx y, z_2 \approx \dot{y}, z_3 \approx f$, 则经补偿后的控制器输入为

$$u = u_0 - z_3/b_0. \tag{11}$$

将式(11)代入(10), 可得 $\ddot{y} = f + (u_0 - z_3)$, 则系统可简化为两个积分串联环节

$$\ddot{y} = (f - z_3) + u_0 \approx u_0, \tag{12}$$

从而非线性误差反馈控制律可表示为

$$u_0 = k_p \text{fal}(e_1, 0.25, 0.02) + k_d \text{fal}(e_2, 1.5, 0.02), \tag{13}$$

则系统(12)可写为

$$\ddot{y} = k_p \text{fal}(e_1, 0.25, 0.02) + k_d \text{fal}(e_2, 1.5, 0.02). \tag{14}$$

由式(7)可知, 若

$$|e| \leq \delta, \tag{15}$$

则

$$\ddot{y} = k_{p1} e_1 + k_{d1} e_2. \tag{16}$$

其中 $e_1 = v_1 - y, e_2 = v_2 - \dot{y}, k_{p1} = k_p/0.0532, k_{d1} = k_d/7.0721$. 若

$$|e| > \delta, \tag{17}$$

则

$$\ddot{y} = k_p |e_1|^{0.25} \text{sign}(e_1) + k_d |e_2|^{1.5} \text{sign}(e_2). \tag{18}$$

式(18)中无论 k_p, k_d 如何配置, 误差总以指数形式快速减小到0.02以内.

根据文献[20]给出的基于控制器带宽 w_c 所整定的 k_p 和 k_d 可得

$$k_{p1} = w_c^2, k_{d1} = 2w_c. \tag{19}$$

下面给出基于调节时间的NTD参数整定方法. 设二阶系统的传递函数为

$$G_p(s) = w_n^2 / (s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2), \tag{20}$$

其对期望系统输出量为

$$C(s) = w_c^2 / (s(s + w_c)^2), \tag{21}$$

其中系统时间常数 T_1 和 T_2 分别为

$$T_1 = \frac{1}{w_c(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})}, T_2 = \frac{1}{w_c(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})}. \tag{22}$$

由时域分析可知, 在过阻尼和临界阻尼响应中, 临界阻尼响应具有最短的上升时间, 响应速度最快. 易知临界阻尼下二阶系统的单位阶跃响应为

$$c(t) = 1 - e^{-w_c t} (1 + w_c t), t \geq 0. \tag{23}$$

其变化率为

$$dc(t)/dt = w_c^2 t e^{-w_c t}, \tag{24}$$

调节时间为

$$t_s = 4.75T_1, \tag{25}$$

结合式(22), 可得

$$t_s = 4.75/w_c. \tag{26}$$

将式(26)和(16)代入(19)可得

$$k_p = 424.1071/t_s^2, k_d = 1.3433/t_s. \tag{27}$$

依据式(27), 即可利用调节时间对NTD的参数进行整定.

2.3 基于观测时间的扩张状态观测器参数整定

由式(6)可知, 扩张状态观测器中需要整定的参数包括 β_{01}, β_{02} 和 β_{03} , 这3个参数的取值决定了观测器的跟踪精度. 文献[20]基于所提出的观测器带宽 w_0 的概念, 给出了上述参数的整定值为

$$\beta_{01} = 3w_0, \beta_{02} = 3w_0^2, \beta_{03} = w_0^3, \tag{28}$$

其中 w_0 受传感器噪声、采样频率和系统模型的限制, 其值不能过大, 否则会导致系统不稳定.

易知在扩张状态观测器中, 如果总扰动的估计 z_3 能够很好地跟踪总扰动 f , 则观测器将获得期望的动态特性. 由式(6)可得, 从 z_3 到 f 的传递函数为^[15,20]

$$G_{ES} = \frac{z_3(s)}{f(s)} = \frac{\beta_{03}}{s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03}} = \frac{w_0^3}{(s + w_0)^3}. \tag{29}$$

由于扩张状态观测器中, 中、低频系数远大于高频系数^[23], 可将式(29)近似为

$$\frac{z_3(s)}{f(s)} \approx \frac{\beta_{03}}{\beta_{02}s + \beta_{03}} \approx \frac{v_{\text{eso}}}{s + v_{\text{eso}}}, \tag{30}$$

其中 $v_{\text{eso}} = \beta_{03}/\beta_{02}$, 称为观测速度. 由式(29)和(30)可得观测器带宽 $w_0 = 3v_{\text{eso}}$. 容易看出, v_{eso} 值越大ESO的观测速度越快. 换言之, v_{eso} 越大, 估计状态 z_3

跟踪 f 所需时间越短. 定义观测时间为

$$t_{\text{eso}} = c/v_{\text{eso}}, \quad (31)$$

其中 $c \geq 0$ 为加权因子. 由于调节时间 t_s 包含扩张状态观测器的响应时间, 则由式(26)和(31)可知, 应有

$$t_{\text{eso}} < t_s = 4.75/w_c, \quad (32)$$

则可得

$$v_{\text{eso}} > (c/4.75)w_c. \quad (33)$$

由分析可知, 在观测速度 v_{eso} 确定的情况下, w_0 的取值较小时也可以获得较好的观测效果. 在实际应用中, 为了确定待整定参数的值, 必须建立观测速度 v_{eso} 与控制器带宽 w_c 之间的确定性关系. 由于参数 $c > 0$ 的任意性, 利用式(34)取 $v_{\text{eso}} = (c/4.75)w_c$, 通过实验确定观测效果最好的 c 值.

下面给出基于调节/观测时间的观测器参数整定公式. 将 $w_0 = 3v_{\text{eso}}$ 代入式(28), 可得各参数整定值

$$\beta_{01} = 9v_{\text{eso}}, \beta_{02} = 27v_{\text{eso}}^2, \beta_{03} = 27v_{\text{eso}}^3. \quad (34)$$

需要指出的是, 在非线性 ESO 中, 当高频系数 $\beta_{01} = 9v_{\text{eso}}$ 时, 整定后的 ESO 观测效果不太理想, 其原因在于整定过程中利用式(30)近似计算时忽略了高频系数. 为解决此问题, 将高频系数取为 $\beta_{01} = 1/h$, 仿真结果表明跟踪效果比较理想. 据此将非线性 ESO 中各参数整定值修正为

$$\beta_{01} = 1/h, \beta_{02} = 27v_{\text{eso}}^2, \beta_{03} = 27v_{\text{eso}}^3. \quad (35)$$

式(35)给出了根据 t_{eso} 整定 ESO 参数的方法.

2.4 补偿参数 b 的整定

补偿参数 b 具有很强的物理意义, 主要依据经验确定. 一般是在其他参数整定完成后, 在实验确定的取值范围内调节其估计值 b_0 , 以获得理想的控制效果. 实际应用中, b_0 通常取较大的值, 以使系统能够容忍一些系统的相位滞后和时间延迟.

3 仿真例子

考虑如下二阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, t) + w(t) + bu, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (36)$$

其中: $f(x_1, x_2, t) = \cos(0.6t)x_1 + \cos(0.7t)x_2 + w(t)$, 外部扰动 $w(t) = 0.5\text{sign}(\sin t)$, 系统设定值 $v_0 = -\text{sign}(t - 10)$.

首先, 利用经验试凑法对系统(36)的控制器参数进行整定, 可得 ADRC 控制器参数整定值分别为

$$r_0 = 3, h = 0.01, h_0 = 0.2, k_d = 0.48, k_p = 128, b_0 = 1.5, \beta_{01} = 100, \beta_{02} = 300, \beta_{03} = 1000.$$

系统响应曲线如图2所示, 由图可见, 系统响应有较多振荡, 响应速度较慢.

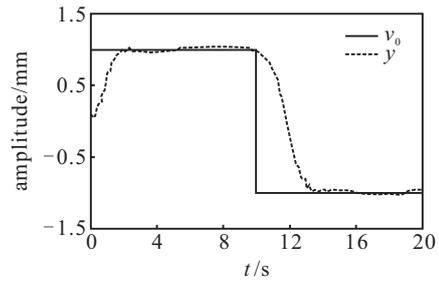


图2 基于经典方法的闭环系统跟踪曲线

其次, 利用所提出方法对系统(36)的控制器参数进行整定, 其中取系统期望调节时间 $t_s = 2\text{s}$. 由图3可知, 当 $c/4.75 = 1.5$ 时观测效果最优, 即有 $v_{\text{eso}} = 1.5w_c$, 相应的 $t_{\text{eso}} = 0.48\text{s}$, 各参数整定值分别为

$$r_0 = 3, h = 0.01, h_0 = 0.2, k_d = 0.67, k_p = 106, b_0 = 1.6, \beta_{01} = 100, \beta_{02} = 350, \beta_{03} = 1260.$$

对应的系统响应曲线如图4所示. 与图2相比较, 在系统上升沿部分, 响应振荡较少, 响应速度明显提高; 在系统下降沿部分, 响应振荡同样较少, 跟踪精度有较大提升.

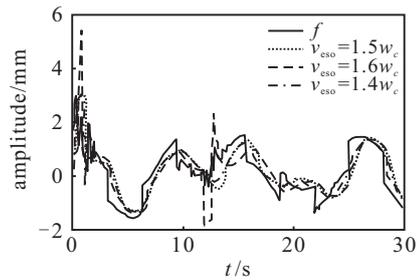


图3 不同观测速度与控制器带宽关系下的扰动估计效果

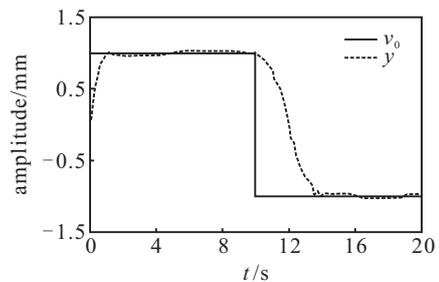


图4 基于调节/观测时间方法的闭环系统跟踪曲线

4 结论

本文基于控制器及观测器带宽的 ADRC 控制器参数整定方法, 提出了一种基于调节/观测时间的 ADRC 控制器参数整定方法. 该方法简化了原方法的整定过程, 降低了 ESO 中传感器噪声和采样时延等因素对参数整定性能的影响, 提高了闭环系统的响应速度.

参考文献(References)

[1] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24-31.
(Han J Q. Active disturbance rejection control

- technique[J]. *Frontier Science*, 2007, 1(1): 24-31.)
- [2] Han J Q. From PID to "Active disturbance rejection control" technology[J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13-18.
- [3] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1498-1510.
(Gao Z Q. On the foundation of active disturbance rejection control[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1498-1510.)
- [4] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(4): 485-492.
(Huang Y, Zhang W G. Development of active disturbance rejection controller[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 485-492.)
- [5] 黄一, 薛文超, 赵春哲. 自抗扰控制纵横谈[J]. *系统科学与数学*, 2011, 31(9): 1111-1129.
(Huang Y, Xue W C, Zhao C Z. Active disturbance rejection control: Methodology and theoretical analysis[J]. *J of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2011, 31(9): 1111-1129.)
- [6] Huang Y, Xue W C. Active disturbance rejection control: Methodology and theoretical analysis[J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 963-976.
- [7] 王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1521-1533.
(Wang L J, Li Q, Tong C N, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1521-1533.)
- [8] Su Y X, Zheng C H, Duan B Y. Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2005, 52(3): 814-823.
- [9] Wu D, Chen K, Wang X K. Tracking control and active disturbance rejection with application to noncircular machining[J]. *Int J of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(7): 1909-1911.
- [10] 王丽君, 童朝南, 李擎, 等. 实用自抗扰控制在大时滞厚度自抗扰监控系统中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(3): 368-374.
(Wang L J, Tong C N, Li Q, et al. Practical active disturbance rejection solution for monitoring automatic gauge control system with large time-delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 368-374.)
- [11] Zhu E L, Pang J F, Sun N. et al. Airship horizontal trajectory tracking control based on active disturbance rejection control[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 75(5): 725-734.
- [12] Noshadi A, Mailah M. Active disturbance rejection control of a parallel manipulator with self learning algorithm for a pulsating trajectory tracking task[J]. *Scientia Iranica*, 2013, 19(1): 132-141.
- [13] 史永丽, 侯朝桢, 苏海滨. 基于粒子群优化算法的自抗扰控制器设计[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(2): 433-436.
(Shi Y L, Hou C Z, Su H B. Auto-disturbance rejection controller design based on particle swarm optimization algorithm[J]. *J of System Simulation*, 2008, 20(2): 433-436.)
- [14] 康忠健, 王清伟, 黄磊, 等. 基于改进遗传算法的自抗扰控制器参数优化[J]. *信息与控制*, 2008, 37(5): 588-598.
(Kang Z J, Wang Q W, Huang L, et al. Parameter optimization of active-disturbance-rejection controller based on improved genetic algorithm[J]. *Information and Control*, 2008, 37(5): 588-598.)
- [15] 张文革. 时间尺度与自抗扰控制器[D]. 北京: 中国科学院系统科学研究所, 1999.
(Zhang W G. Time scale and ADRC[D]. Beijing: Chinese Academy of Science dissertation, 1999.)
- [16] 李述清, 张胜修, 刘毅男, 等. 根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(1): 125-129.
(Li S Q, Zhang S X, Liu Y N, et al. Parameter-tuning in active disturbance rejection controller using time scale[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(1): 125-129.)
- [17] 李海生, 朱学峰. 自抗扰控制器参数整定与优化研究[J]. *控制工程*, 2004, 11(5): 419-423.
(Li H S, Zhu X F. On parameters tuning and optimization of active disturbance rejection controller[J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(5): 419-423.)
- [18] 周游, 王庆林, 邱德慧. 性能评价方法在ADRC参数整定中的应用[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(10): 1189-1193.
(Zhou Y, Wang Q L, Qiu D H. Application of performance assessment method to ADRC parameter setting[J]. *Trans on Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(10): 1189-1193.)
- [19] 史运涛, 刘伟川, 雷振武, 等. 基于混杂优化方法的ADRC参数整定方法研究[J]. *控制工程*, 2013, 20(4): 748-752.
(Shi Y T, Liu W C, Lei Z W, et al. Research on the problem of ADRC controller parameters tuning based on hybrid optimization algorithm[J]. *Control Engineering of China*, 2013, 20(4): 748-752.)
- [20] Gao Z Q. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning[C]. *Proc of the American Control Conf.* New York, 2003: 4989-4996.
- [21] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23.
(Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its application[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.)
- [22] 韩京清. 自抗扰控制技术-估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 56-206.
(Han J Q. Active Disturbance Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 56-206.)
- [23] 王海强, 黄海. 扩张状态观测器的性能与应用[J]. *控制与决策*, 2013, 28(7): 1078-1082.
(Wang H Q, Huang H. Property and applications of extended state observer[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(7): 1078-1082.)
- (责任编辑: 孙艺红)