DOI:10.7641/CTA.2014.40084

线性自抗扰控制的抗饱和补偿措施

周 宏, 谭 文†

(华北电力大学 控制与计算机工程学院,北京 102206)

摘要:控制输入约束是实际工业过程中普遍存在的现象,然而控制器设计中通常都假设执行机构动态是线性的,因此当执行机构存在约束时,执行机构输出信号与控制器输出信号不一致,使系统的动态性能降低,甚至导致系统不稳定.本文针对线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)执行机构的约束问题,提出两种抗饱和补偿方案,利用LADRC扩张状态观测器估计控制器状态或者控制器输出与执行器输出的误差,从而使LADRC能快速消除饱和.将这两种方法用到含执行机构饱和的一阶惯性加迟延被控对象进行仿真研究,结果表明两种补偿措施下线性自抗扰控制器能得到较好的控制性能.随后本文将LADRC抗饱和思想推广到负荷频率控制系统(load frequency control, LFC)中,仿真表明基于误差补偿的抗饱和方案对于LFC系统更为有效.

关键词:线性自抗扰控制;控制输入约束;抗饱和;负荷频率控制;扩张状态观测器

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Anti-windup schemes for linear active disturbance rejection control

ZHOU Hong, TAN Wen[†]

(School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Control input constraints are very common in industrial process, however, conventional controller design methods usually assume that the actuator dynamics is linear. Therefore, when there are constraints in the actuator, the output signal of the actuator is not consistent with the output signal of the controller, which leads to reduced control performance, even system instability. Two anti-windup schemes are proposed in this paper for linear active disturbance rejection controller (LADRC) when there are constraints in the actuator. The schemes utilize the extended state observer (ESO) to estimate the states of the controller or the error between the controller output and actuator output, so LADRC can eliminate the error quickly. Simulation study is carried out for a first order plus dead time process with actuator constraints. The results show that both schemes can achieve good anti-windup performance. Then the idea is extended to the load frequency control (LFC) system using LADRC. Simulation shows that the error-compensation-based anti-windup scheme is more effective in LFC.

Key words: linear active disturbance rejection control; control input constraints; anti-windup; load frequency control; extended state observer

1 引言(Introduction)

在实际控制系统中,控制对象通常不由控制器直 接控制,而是通过执行机构进行驱动.执行机构由于 自身物理构造的限制使得其输出值不能够任意增加. 例如,电机由于物理上的限制只能达到有限转速;阀 门的开度受到一定的范围限制;运算放大器的输出一 般不超过其电源电压;动力系统由于现实条件无法提 供足够大的动力等.在对控制系统进行设计时,假使 不考虑控制输入受限的情况,可能会导致系统动态性 能变差,如调节时间增长、超调量增大、引起系统滞后 和振荡加剧等,严重的还会导致系统不稳定^[1]. 鉴于执行机构约束对控制系统所带来的不利影响, 研究人员提出了各种各样的设计方法.这些方法基本 可以归为两大类:直接设计法和抗饱和补偿法^[2].

直接设计法思想是将执行机构约束信息直接考虑 在系统的控制器设计当中,使系统达到期望的控制效 果,该方法的典型代表是模型预测控制^[3].模型预测 控制采用滚动优化的方法,在每个采样周期都可以将 控制输入约束加在优化问题中,因而成为最有效的处 理执行机构约束的方法.直接设计法虽然处理输入约 束非常有效,但是最大问题是算法复杂,对计算机处 理速度的要求较高,而且依赖于约束的具体信息.当

收稿日期: 2014-02-09; 录用日期: 2014-07-11.

[†]通信作者. E-mail: wtan@ncepu.edu.cn; Tel.: +86 10-61772107.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174096);北京市自然科学基金资助项目(4122075).

约束变化时,控制算法有时需要重新计算,不够灵活.

抗饱和补偿法是在控制器设计时忽略执行器约束,即将执行机构视为线性系统,设计能够满足系统要求的控制器,之后再考虑执行机构约束问题.这种设计方法的特点是,当执行机构工作在线性工作区域时,补偿环节的输入信号不起作用,控制系统实现正常的性能.当执行机构进入约束区时,补偿环节开始作用,控制器通过对补偿信号的处理,使系统达到抗饱和的控制效果.抗饱和法在实际中应用较为广泛.工业控制中的PID控制器都有抗饱和措施^[1].该思想也可以推广到一般的高阶控制器^[4-5],但是如何设计补偿环节还需要进一步研究^[6].

自抗扰控制由中科院韩京清教授提出^[7],其思想 是采用一个扩张状态观测器来估计系统的扰动,然后 使用简单控制进行抑制.该思想类似于反馈线性化, 但是在结构上更简单且适应于各种非线性系统.非线 性自抗扰控制需要调节多个参数,因此在实际应用中 受到限制.为了克服这个困难,文献[8]考虑了自抗扰 控制的"线性"版本.线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)最终只需调节 两个参数,从而大大简化了自抗扰控制的整定过程, 使得其在工业中应用得到可能^[9-12].

显然, LADRC作为一种一般性控制结构, 当输入存在约束时, 可以采用传统的高阶控制器抗饱和策略^[4-5], 但是这样需将LADRC转化成一般的高阶控制器, 破坏其固有的控制结构, 有可能丧失其主动抗扰的特性. 为此, 本文将研究如何利用LADRC特殊的控制结构, 提出保持LADRC自身结构的抗饱和补偿措施.

2 线性自抗扰控制(Linear active disturbance rejection controller)

自抗扰控制不需要知道被控对象和扰动的完全模型,通常假设被控系统具有如下模型:

$$y^{(p)}(t) = bu(t) + f(y(t), u(t), d(t)), \qquad (1)$$

其中: *p*及*b*为被控系统2个已知参数, *f*(*y*, *u*, *d*)是系 统未知动态以及外部扰动的组合, 在LADRC设计中 假设为未知的, 称为广义扰动.

自抗扰控制方法基本思想是利用一个扩张状态观测器(extended state observer, ESO)来估计未知的广义扰动. 令

$$z_1 = y, z_2 = \dot{y}, \cdots, z_p = y^{(p-1)},$$

$$z_{p+1} = f(y, u, d),$$
(2)

设f(y, u, d)可微分且f(y, u, d) = h(t). 则系统模型 (1)可写成

$$\begin{cases} \dot{z} = A_{o}z + B_{o}u + E_{o}h, \\ y = C_{o}z, \end{cases}$$
(3)

$$\begin{split} \begin{split} \label{eq:product} \label{eq:product} \end{split} \\ \label{eq:product} \label{eq:product} \begin{split} \label{eq:product} \label{eq:product} \end{split} \\ \label{eq:product} \label{eq:product} \label{eq:product} \end{split} \\ \label{eq:product} \label{eq:product} \label{eq:product} \label{eq:product} \end{split} \\ \label{eq:product} \label{eq:pro$$

对该系统设计全阶Luenberger观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = A_{\rm o}\hat{z} + B_{\rm o}u + L_{\rm o}(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = C_{\rm o}\hat{z}, \end{cases}$$
(5)

其中L。为观测器增益,

$$L_{\rm o} = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_p & \beta_{p+1} \end{bmatrix}^{\rm T}.$$
 (6)

当 $A_{o} - L_{o}C_{o}$ 新近稳定时,在广义扰动f(y, u, d)有界 假设下, $\hat{z}_{1}(t), \dots, \hat{z}_{p}(t)$ 趋近于输出y(t)及其各阶导 数(直至p - 1阶),并且 $\hat{z}_{p+1}(t)$ 趋近于f(y, u, d). 这意 味着可以利用这个扰动估计进行控制,从而使其得到 更快地抑制.

取如下控制率

$$u(t) = \frac{-\hat{z}_{p+1}(t) + u_{o}(t)}{b},$$
(7)

其中u_o(t)待定. 此时被控系统(1)变为

$$y^{(p)}(t) = f(y, u, d) - \hat{z}_{p+1}(t) + u_{o}(t),$$
 (8)

当ESO设计适当时,即有 $\hat{z}_{p+1} \approx f(y, u, d)$,从而系统 变成一个p重积分系统

$$y^{(p)}(t) \approx u_{\rm o}(t). \tag{9}$$

该系统可以采用如下状态反馈控制率控制

$$u_{o}(t) = k_{1}(r(t) - y(t)) + k_{2}(\dot{r}(t) - \dot{y}(t)) + \dots + k_{p}(r^{(p-1)}(t) - y^{(p-1)}(t)),$$
(10)

其中r(t)为要跟踪的参考信号.因为 $\hat{z}_1(t), \dots, \hat{z}_p(t)$ 趋近 $y(t), \dots, y^{(p-1)}(t)$,因此最终控制率可以逼近为 $u(t) = \frac{k_1(r(t) - \hat{z}_1(t)) + \dots + k_p(r^{(p-1)}(t) - \hat{z}_p(t))}{h}$ -

$$\frac{z_{p+1}(t)}{b} =: K_{\rm o}(\hat{r}(t) - \hat{z}(t)), \tag{11}$$

其中*r*(*t*)为广义参考信号(由参考信号及其各阶导数 组成的向量):

$$\hat{r}(t) = [r(t) \ \dot{r}(t) \ \cdots \ r^{(p-1)}(t) \ 0]^{\mathrm{T}},$$
 (12)

而状态反馈增益K。定义为

$$K_{\rm o} = [k_1 \ k_2 \ \cdots \ k_p \ 1] \frac{1}{b}.$$
 (13)

综合上述,线性自抗扰控制器结构如图1所示.



可以看到:

1) 线性自抗扰控制器具有如下状态空间实现:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = A_{\rm o}\hat{z} + B_{\rm o}u + L_{\rm o}(y - C_{\rm o}\hat{z}) = \\ (A_{\rm o} - L_{\rm o}C_{\rm o})\hat{z} + B_{\rm o}u + L_{\rm o}y, \\ u = K_{\rm o}(\hat{r} - \hat{z}). \end{cases}$$
(14)

2) 一个线性自抗扰控制需要设计两组参数: ESO观测器增益*L*_o以及*p*重积分系统的状态反馈控制 增益*K*_o. 文献[8]提出将这两组增益的整定转化为两 个参数的整定:即控制器带宽ω_c及观测器带宽ω_o,从 而大大减少了自抗扰控制的参数整定,为其实际工业 应用奠定了基础.

3 线性自抗扰控制器抗饱和措施(Anti-windup scheme for LADRC)

与很多控制方法类似,线性自抗扰控制本身并没 有将控制约束考虑在设计中,因此当执行器存在约束 时,控制系统的性能也会恶化.这个现象可以从下面 例子中得到验证.

例1 考虑一个简单的一阶加迟延对象^[13]
$$G_{\rm p}(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.2s}, \tag{15}$$

执行器动态为

$$G_{\rm a}(s) = \frac{1}{0.2s+1} {\rm e}^{-0.1s},$$
 (16)

用二阶自抗扰控制结构进行控制,参数取为

 $b = 20, \ \omega_{\rm c} = 3.5, \ \omega_{\rm o} = 30.$ (17)

为验证LADRC的性能,在t = 1 s时加入阶跃参考 信号,闭环系统响应如图2实线所示.可以看到,闭环 系统阶跃响应超调小于20%,上升和调节时间很快, 具有较好的控制性能.

当执行器存在限幅时,闭环系统响应变得振荡,不同限幅下闭环系统的输出如图2所示.可以看到,由于输出饱和,系统在很长时间内不能回到设定值,调节时间增大,控制品质恶化.



图 2 线性自抗扰控制在执行器不同限幅下的 阶跃响应:无抗饱和措施



为了克服执行机构的约束,本文提出两种方案.

3.1 基于观测器的抗饱和方案(Observer-based antiwindup scheme)

注意到LADRC(14)具有基于观测器的状态反馈结构. 控制器饱和现象是由于执行器饱和而导致的控制器状态不能准确估计,因此如果能准确估计控制器状态,就能够避免控制器饱和^[14]. 注意到存在执行器饱和时ESO的输入u(即控制器输出)已经不是真正的被控对象的输入,这是ESO产生状态估计不准确的原因.因此,可以将观测器ESO输入u用执行器输出û代替,从而解决因执行器非线性而带来的ESO状态估计不准确的问题,进而解决控制器饱和现象.此时,LADRC具有如下状态空间实现:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = (A_{\rm o} - L_{\rm o}C_{\rm o})\hat{z} + B_{\rm o}\hat{u} + L_{\rm o}y, \\ u = K_{\rm o}(\hat{r} - \hat{z}), \\ \hat{u} = N(u), \end{cases}$$
(18)

其中N(·)是执行器非线性动态. 该方案如图3所示.





例2 针对例1中的对象、执行器以及线性自抗 扰控制器,当执行器输出存在限幅sat = 1.1时,利用 基于观测器的抗饱和方案,闭环系统响应如图4所 示(在t = 1 s加入阶跃参考信号).与无抗饱和措施响 应相比,控制输入在t = 4 s左右已经脱离饱和状态, 从而使闭环系统超调减小,调节时间大大缩短,说明 基于观测器抗饱和方案确实有效.



图 4 线性自抗扰控制在执行器限幅1.1下的阶跃响应 Fig. 4 Step responses of the closed-loop system under LADRC with sat = 1.1

对比图4中基于观测器抗饱和方案的系统输入输出曲线和无抗饱和措施的系统输入输出曲线,可以发现其在初始阶段响应较慢,其原因在于执行器存在线性动态,该动态的惯性使得LADRC观测器响应变慢.为了加快系统的响应,可以把执行器线性动态分离出来,只把非线性部分反馈到ESO中,采用如图5所示的改进的基于观测器抗饱和方案.图中 Ŷ 仅包含执行器静态非线性.



图 5 线性自抗扰控制器改进的基于观测器抗饱和方案 Fig. 5 Modified observer-based anti-windup scheme for LADRC

对于例1中的对象、执行器以及线性自抗扰控制器,当执行器输出存在限幅sat = 1.1时,利用这一改进的抗饱和方案,系统响应如图4所示.可以看到,这种方案下系统的输入输出曲线在未进入饱和阶段与无饱和措施的系统输入输出响应十分接近,从而执行器惯性和迟延对系统的影响得到减弱.

3.2 基于误差补偿的抗饱和方案(Error-compensation-based anti-windup scheme)

基于观测器的抗饱和方案实现简单,只需将ESO 的输入用执行器输出代替LADRC控制器输出即可. 但是,该方案缺少一些自由度,抗饱和性能不能根据 需要调节.为此,本文对LADRC提出另外一种抗饱和 方案,如图6所示.该方案将控制器输出与执行器输出 之误差反馈回ESO,这样可以利用ESO进行估计,从 而达到抗饱和效果.基于误差补偿的LADRC抗饱和 结构具有如下状态空间实现:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = (A_{\rm o} - L_{\rm o}C_{\rm o})\hat{z} + B_{\rm o}u + L_{\rm o}y - B_{\rm o}k_{\rm c}(u - \hat{u}), \\ u = K_{\rm o}(\hat{r} - \hat{z}), \\ \hat{u} = N(u), \end{cases}$$
(19)

方案中参数k_c是个可调节静态补偿系数,增加k_c可以 使得误差得到更快的补偿,但是有可能引起ESO的不 稳定.因此该参数需要手动调节成合适的值.





例3 针对例1中的对象、执行器以及线性自抗 扰控制器,当执行器输出存在限幅sat = 1.1时,利用 基于误差补偿的抗饱和方案,系统响应如图7所示(在 *t* = 1 s加入阶跃参考信号).可以看到基于误差补偿的 抗饱和方案确实有效.随着误差补偿反馈*k*_c的增大, 控制输入更快地脱离饱和状态.当*k*_c增大到一定值, 补偿效果变化不大.对于本例来说, k_c从0.3增大到0.4, 抗饱和效果已经相差不多.



图 7 线性自抗扰控制在执行器限幅1.1下的阶跃响应: 基于 误差补偿的抗饱和方案

Fig. 7 Step responses of the closed-loop system under LADRC with sat = 1.1: Error-compensationbased anti-windup scheme

上述各种方案抗饱和效果对比如图8所示. 可以看 到:

1) 基于观测器的抗饱和方案实施起来十分简便, 只需将ESO的输入替换成执行器实际输出即可.

 2) 当执行器包含线性惯性和延迟时,可以采用改进的基于观测器抗饱和方案,提高系统响应速度,但 是此时需要知道执行器静态非线性具体形式和参数.

3) 基于观测器的抗饱和方案一个缺陷是没有可 调节参数,不能随意调节抗饱和效果.此时如果需要, 可以采用基于误差补偿的抗饱和方案.该方案将执行 器实际输出与控制器理论输出的误差引入ESO,借 助ESO的估计能力,消除该误差,达到抗饱和的效果.

4) 基于误差补偿的抗饱和方案需要调节一个静态补偿系数,增加可以使得误差得到更快的补偿,但 是有可能引起ESO的不稳定.因此该参数需要手动调 节成合适的值.

4 在负荷频率控制系统中的应用(Application in load frequency control systems)

频率稳定是电力系统电能质量的一个重要指标. 负荷的任意突然变化都有可能导致系统间联络线交 换功率的偏差及系统频率的波动.因此,为保证电能 质量,需要一个负荷频率控制(load frequency control, LFC)系统,该系统的目的是将系统频率维持在标称值 并且尽可能使控制区域之间的未计划的联络线交换 功率最小^[15].



Fig. 8 Comparison of anti-windup schemes for LADRC

目前已有很多控制方法被应用到负荷频率控制系统中.最近,线性自抗扰控制在负荷频率控制问题中得到重视^[16].但是,该文没有考虑发电机组实际发电约束问题.文献[17]提出一种能够处理发电速率约束(generation rate constraint, GRC)的策略,利用了基于误差补偿抗饱和思想.本节进一步研究自抗扰控制抗饱和方案在负荷频率控制系统的应用.

单区域负荷频率控制系统在某个操作点附近线性 化模型如图9所示^[18].



图中
$$\frac{1}{R}$$
为机组下降特性,而
• $G_{g}(s)$ 为调节阀动态: $G_{g}(s) = \frac{1}{T_{G}s + 1}$;

•
$$G_{t}(s)$$
为汽轮机动态: $G_{t}(s) = \frac{1}{T_{T}s + 1};$

•
$$G_{p}(s)$$
为负荷及电机动态: $G_{p}(s) = \frac{K_{P}}{T_{P}s+1}$.

实际系统中,汽轮机调节阀存在限幅、限速、以及 死区、迟滞等非线性特性,而汽轮机则受到发电速率 约束,这些非线性可能恶化系统的性能.采用本文提 出的针对LADRC的抗饱和方案,可以大大减小这些 非线性特性对系统控制性能的影响.

LADRC基于观测器的抗饱和方案可以很容易推 广到LFC系统中,此时输入到ESO的信号用汽轮机实 际输出 $\Delta P_{\rm G}$ 代替控制器输出 $\Delta P_{\rm c}$ 就行,很容易实现. 但是由于从ΔP_c到ΔP_G经过了调节阀动态和汽轮机 动态,因此ESO可能不能及时估计到调节阀和汽轮机 的实际状态,减弱了其抗饱和效果.而改进的基于观 测器抗饱和方案需要知道调节阀和汽轮机准确的静 态非线性,实际中很难获得.

因此, 对于LFC, 较为实际且有效的抗饱和方案应 该是基于误差补偿方案, 如图10所示. 该方案将汽轮 机实际输出ΔP_G和理论输出(机组指令通过调节阀线 性动态和汽轮机线性动态后的信号)误差作为外部扰 动, 加入ESO中进行估计. 可以预期, 只要补偿参 数k_c调节适当, 该方案可以达到较好的抗饱和补偿效 果.





 $K_{\rm P} = 120, \ T_{\rm P} = 20, \ T_{\rm T} = 0.3, \ T_{\rm G} = 0.08, \ R = 2.4.$ (20)

根据文献[17],可以用3阶LADRC进行控制,参数选取为

$$b = 250, \omega_{\rm c} = 4, \omega_{\rm o} = 30, \tag{21}$$

当GRC为0.0017 p.u./s时,系统出现饱和,变得不稳定.在两种抗饱和补偿方案下LADRC控制系统的响应如图11所示,其中基于误差补偿方案中取 k_c = 0.5.







可以看到,两种方案都有效,但是基于误差补偿的方案可以取得更好的抗饱和性能.

当调节阀也存在约束时,基于观测器的抗饱和 方案可能失效.例如,当调节阀速率限制在0.01,幅 值限制在0-1.2时,基于观测器的抗饱和方案下系 统不稳定,而基于误差补偿的方案仍然有效,并且 可以增大k_c的值提高抗饱和性能(如图12).但是, 当k_c增大到一定值(本例中为1.2),系统变得不稳定.





图 12 具有发电速率约束和调节阀限幅限速约束的负荷频率 控制系统响应

Fig. 12 Response of power system with GRC and rate/amplitude constraints in governor

5 结论(Conclusions)

本文针对线性自抗扰控制系统中执行机构约束 的问题,提出了两种抗饱和补偿方案.两种方案都 利用了LADRC扩张状态观测器,一种方案用来估 计控制器状态,一种用来估计控制器输出与执行器 输出的误差.对含执行机构约束的一阶惯性加迟延 被控对象进行仿真研究,结果表明两种补偿措施下 线性自抗扰控制器能得到较好的抗饱和性能.将 LADRC抗饱和思想推广到负荷频率控制系统中,仿 真表明基于误差补偿的抗饱和方案对于LFC系统更 为有效.注意到误差补偿增益系数k_c对抗饱和性能 有着一定影响,如何确定适当的值需要进一步研究.

参考文献(References):

- CAMPO P J, MORARI M. Robust control of processes subject to saturation nonlinearities [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1990, 14(4/5): 343 – 358.
- KOTHARE M V. Control of systems subject to constraints [D]. Los Angeles: California Institute of Technology, 1997.
- [3] MACIEJOWSKI J M. Predictive Control with Constraints [M]. England: Prentice Hall, 2002.
- [4] DOYLE J C, SMITH R S, ENNS D F. Control of plants with input saturation nonlinearities [C] //Proceedings of American Control Conference. Mineapolis: IEEE, 1987: 1024 – 1029.
- [5] HANUS R, KINNAERT M, HENROTTE J L. Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method [J]. Automatica, 1987, 23(6): 729 – 739.
- [6] KOTHARE M V, CAMPO P J, MORARI M, et al. A unified framework for the study of anti-windup designs [J]. *Automatica*, 1994, 30(2): 1869 – 1883.

- [7] 韩京清. 自抗扰控制及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
 (HAN Jingqing. Active disturbance rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.)
- [8] GAO Z. Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design [C] // Proceedings of American Control Conference. Piscataway: IEEE, 2006: 2399 – 2405.
- [9] 薛文超,黄朝东,黄一. 飞行制导一体化设计方法综述 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1511 1522.
 (XUE Wenchao, HUANG Chaodong, HUANG Yi. Design methods for the integrated guidance and control system [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1511 1522.)
- [10] 王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的子抗扰控制综述 [J]. 控制理 论与应用, 2013, 30(12): 1523 – 1533.
 (WANG Lijun, LI Qing, TONG Chaonan, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1523 – 1533.)
- [11] 吴丹, 赵彤, 陈恳. 快速刀具伺服系统自抗扰的研究及实践 [J]. 控制 理论与应用, 2013, 30(12): 1534 – 1542.
 (WU Dan, ZHAO Tong, CHEN Ken. Research and industrial applications of active disturbance rejection control of fast tool servos [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1534 – 1542.)
- [12] 董莉莉. 自抗扰技术在微机电换能器中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1543 – 1552.
 (DONG Lili. Application of active disturbance rejection control to micro-electro-mechanism system transducers [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1543 – 1552.)
- [13] BOHN C, ATHERTON D P. An analysis package comparing PID anti-windup strategies [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, 15(2): 34 – 40.
- [14] ASTROM K J, HAGGLUND T. Automatic Tuning of PID Controllers [M]. New York: Instrument Society of America, 1988.
- [15] TAN W. Load frequency control: problems and solutions [C] //Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai: IEEE, 2011: 6281 – 6286.
- [16] DONG L, ZHANG Y, GAO Z. A robust decentralized load frequency controller for interconnected power systems [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(3): 410 – 419.
- [17] 谭文,周宏,傅彩芬.负荷频率控制系统的线性自抗扰控制 [J].控制 理论与应用, 2013, 30(12): 1607 – 1615.
 (TAN Wen, ZHOU Hong, FU Caifen. Linear active disturbance rejection control for load frequency control of power systems [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1607 – 1615.)
- [18] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [19] TAN W. Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(1): 341 – 350.

作者简介:

周 宏 (1975--), 男, 博士研究生, 目前研究方向为过程控制, E-mail: zhou.hong@ncepu.edu.cn;

谭 文 (1969–), 男, 教授, 主要研究方向是鲁棒控制及其在工业 过程、电力系统方面的应用, E-mail: wtan@ncepu.edu.cn.