

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.027

基于相位补偿的过热汽温自抗扰控制

范永胜^{1,2}, 陈卓², 郝勇生², 苏志刚², 魏洪轩², 赵刚²

(1. 国家能源集团江苏电力有限公司, 江苏 南京 210036;

2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着可再生能源接入电网比例的逐步增大, 热力发电厂需要应对更加频繁、更大范围的负荷变化, 给电厂的高阶大惯性过热汽温过程的控制带来严峻的挑战。为此, 文中针对一类高阶大惯性过热汽温过程, 提出一种基于相位补偿的自抗扰控制(phase compensation based active disturbance rejection control, PC-ADRC)方法。首先, 阐述过热汽温系统的工作原理和控制难点。然后, 采用低频近似法详细推导相位补偿(phase compensation, PC)网络模型, 提出采用PC网络对模型动态特性进行补偿, 得到等效降阶模型的简化思路。为便于工程应用, 给出PC-ADRC系统的简单实现方法和等效模型分析。最后, 对PC-ADRC系统的稳定性和鲁棒性进行研究。理论分析和仿真结果表明, 所提出的PC-ADRC系统能有效提升高阶过程控制系统的鲁棒性和快速响应能力。

关键词:过热汽温; 火力发电; 基于相位补偿的自抗扰控制(PC-ADRC); 高阶过程; 低频近似; 鲁棒性

中图分类号: TM62

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)03-0254-08

0 引言

近年来, 由于可再生能源的清洁和可持续利用优势, 其在电网中应用程度显著提高。然而, 可再生能源, 如风能和太阳能固有的不确定性和间歇性, 对电网的电力平衡构成严峻挑战。因此, 通过提高传统火电机组的调频能力, 实时平衡电网功率偏差已成为一种新的能源系统发展趋势^[1-2]。过热汽温系统参数作为火电机组工质的峰值温度和重要过程参数, 对机组运行的安全性和经济性有着重要影响。通常过热汽温的控制偏差要求在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]。过高的过热汽温会导致金属受损甚至机组异常停机^[4], 而较低的汽温会降低机组循环效率, 增加机组耗煤^[5]。一般来说, 大范围的负荷变化会导致过大的过热汽温偏差^[6]。因此, 在机组宽负荷灵活运行的背景下, 过热汽温系统的控制性能需要进一步提高。

然而, 过热汽温过程是一个典型的高阶大惯性过程, 这也是许多工业过程共同具有的特点, 如再热汽温^[7]和脱硫系统^[8]。这个特点使得过热汽温的控制性能在工程实践中难以提高。为此, 研究者提出许多先进的控制方法, 如模糊控制^[9]、分数阶比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制^[10]和模糊模型预测控制(model predictive control, MPC)^[11]。然而, 这些先进的控制方法过多依赖精确的数学模型或计算复杂度较高, 使得其在实

际应用中还存在一定的限制。

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法具有处理模型不确定性、非线性和外部扰动的强大能力^[12], 因此在控制界引起广泛关注^[13]。ADRC继承PID的许多优点, 如建模要求低、结构简单等, 因此在工程实践中得到许多应用, 如工业过程控制^[5]、飞行器控制等^[14]。一些现场应用中存在的实际问题也得到有效解决, 如无扰切换、抗积分饱和^[15]以及基于传递函数的离散实现^[16]等。

然而, 一般ADRC器中阶次和模型的阶次严格相关, 一般ADRC器中阶次高于模型阶次一阶^[17]。因此, 对于高阶过程, 会得到高阶的复杂控制器, 不利于实际应用。在这种情况下, 降阶ADRC器和低阶ADRC器成为有前景的研究方向, 并得到广泛的研究。文献[18]证明低阶ADRC器可以有效镇定高阶开环稳定对象。文献[19]从考虑控制器的相位裕度和增益裕度的角度出发, 为降阶自抗扰器开发基于编程的软件调参方法。文献[20]细致研究了低阶ADRC器控制高阶过程时的鲁棒调参问题。针对高阶系统, 研究人员也提出一些改进的ADRC器。文献[21]通过增加输入通道补偿, 降低主控制器阶数。文献[22]提出在一阶ADRC器中加入一个微分环节以提高高阶系统对输入信号的响应速度。然而, 这些改进的控制器几乎不可避免地会导致新的问题, 例如参数重调。事实上, 从相位滞后系统中获得更多实时准确信息是提高控制质量的关键^[23-24]。

收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52076037)

为此,文中提出一种基于相位补偿的 ADRC (phase compensation based ADRC, PC-ADRC) 器,该控制器适用于高阶大惯性过热汽温系统。文中从过程模型动态补偿的角度推导相位补偿 (phase compensation, PC) 网络模型,给出控制器参数定量整定方法。在 PC-ADRC 的控制系统稳定性和鲁棒性分析基础上,通过仿真验证所提出方法的有效性。

1 系统模型和 ADRC 器

1.1 过热汽温控制系统

图 1 为典型燃煤机组锅炉系统结构,该系统可分为风烟系统和蒸汽系统。在烟气侧,原煤经给煤机输送至磨煤机磨成煤粉,煤粉由一次风输送至锅炉。在锅炉内,煤粉进一步与二次风混合燃烧,产生高温烟气。烟气与金属壁面进行热交换,加热其中的水或蒸汽。在蒸汽侧,给水经省煤器加热后进入汽包,在锅炉的水冷壁进一步吸热蒸发为水蒸汽。蒸汽在过热器进一步加热为主蒸汽,最后进入汽轮机膨胀做功并驱动发电机发电。

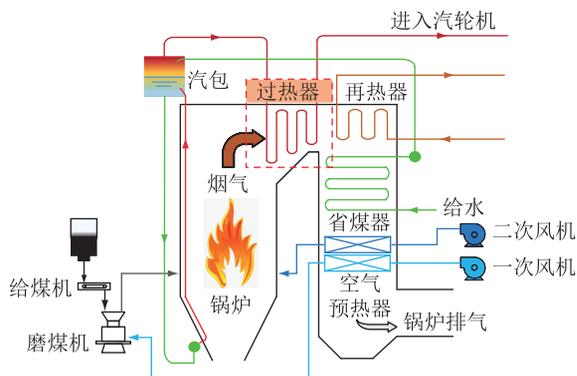


图 1 典型燃煤机组锅炉系统结构

Fig.1 Structure of a typical coal-fired unit boiler system

过热汽温控制系统结构如图 2 所示,燃煤机组通常采用减温器喷水方式来调节过热汽温。给水泵的减温喷水与高温蒸汽直接混合,可以有效降低蒸汽温度。通过过热汽温的测量和控制机构形成一个闭环控制系统,在该系统中由阀门开度来控制喷淋水的流量从而控制过热汽温。

1.2 控制难点

过热汽温控制系统是火电机组中最重要的控制系统之一,也是典型的高阶大惯性过程^[20],常采用串级控制结构。由文献[5]中研究可知串级系统的副回路可以整定为快速随动系统,因此控制系统可以等效为主控制器和过热汽温惰性区的单回路系统。文中过热汽温惰性区传递函数模型^[25]如式(1)所示。

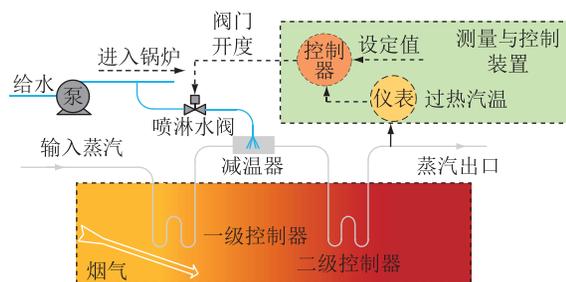


图 2 过热汽温控制系统结构

Fig.2 Structure of superheated steam temperature control system

$$G_p(s) = \frac{1.276}{(1 + 18.4s)^6} \quad (1)$$

式中: s 为传递函数模型中的拉普拉斯算子。

首先,由于过热汽温系统的复杂性,其精确的过程模型难以获取。在实际工程中,一般通过阶跃响应实验来确定其近似数学模型。其次,过热汽温系统受到负荷变化、煤质变化和燃烧不稳定性等多种扰动的影响。此外,过热汽温过程是一个典型的高阶大惯性过程。虽然减温喷水是最常用的过热汽温调节方式,但在喷水阀门开度变化后,出口温度仍需 5 min 左右才能达到稳定。因此,文中旨在提出一种实用的控制方案来处理过热汽温控制系统内部和外部的不确定性,以提高其系统的快速响应能力。

1.3 典型高阶过程 ADRC 器

一个典型 ADRC 器六阶过程模型的表示如式(2)所示。

$$G_p(s) = \frac{K}{(1 + Ts)^6} \quad (2)$$

式中: K 为增益系数; T 为时间常数。过程模型的状态空间表示如式(3)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = x_5 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = f + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 、 x_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)、 y 分别为 ADRC 器控制输出量、状态量和过程输出量; \dot{x}_i 为 x_i 的导数; b 为输入通道增益; f 为总扰动,不仅包括外部扰动,还包括未知的内部动态。

因此,基于式(3),扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 被设计为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(y - z_1) \\ \dot{z}_3 = z_4 + \beta_3(y - z_1) \\ \dot{z}_4 = z_5 + \beta_4(y - z_1) \\ \dot{z}_5 = z_6 + \beta_5(y - z_1) \\ \dot{z}_6 = z_7 + b_0 u + \beta_6(y - z_1) \\ \dot{z}_7 = \beta_7(y - z_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中： z_i 、 \dot{z}_i 分别为观测器各个状态变量的估计和其导数； z_7 、 \dot{z}_7 分别为观测器总扰动的估计值和其导数； β_1 — β_7 为观测器增益； b_0 为输入通道增益 b 的估计值。

已有文献证明当观测器增益取值合理时，各个估计值可以渐进跟踪系统状态量和总扰动^[26-27]。通过对总扰动进行前馈估计补偿，过程模型可以被近似为串联积分器。将状态反馈控制器设计为：

$$u = \frac{\bar{K}(\bar{r} - z)}{b_0} \quad (5)$$

式中： $\bar{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6 \ 1]$ ， k_i 为控制器增益； $\bar{r} = [r \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ， r 为设定值； $z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_7]^T$ 。

可以看出，常规设计所得的 ADRC 器为复杂的高阶控制器，而低阶控制器因其结构简单、易于实现而在实际应用中更为广泛。因此，文中将设计一种 PC-ADRC 器。

2 PC-ADRC

2.1 PC

在高阶大惯性过热汽温系统的控制实践中，应先对原系统动态进行估计或补偿，进而对补偿后的简化系统设计低阶控制器，从而提升原复杂系统的控制性能，例如著名的 Smith 预估器。基于此，文中提出一种 PC-ADRC，其控制原理如图 3 所示。其中 d 为外部扰动； y' 为 PC 输出； \hat{f} 为总扰动的估计值； u_0 为状态反馈输出； k_p 、 k_d 分别为控制器比例和微分增益。

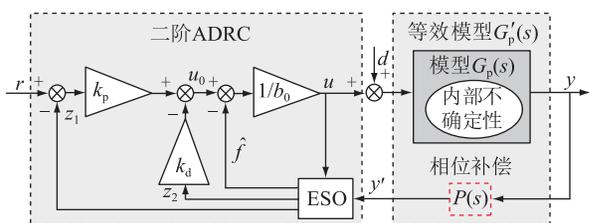


图 3 PC-ADRC 原理

Fig.3 PC-ADRC principle

该控制结构与传统的二阶 ADRC 器的主要区别在于 PC 网络,PC 网络模型可以表示为：

$$P(s) = \frac{a^2 \tau^2 s^2 + 2\xi a \tau s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\xi \tau s + 1} \quad (6)$$

式中： a 为 PC 网络的初始放大系数； ξ 为阻尼比； τ 为补偿器时间常数，是最重要的参数，与系统的阶次以及时间常数 T 相关。

PC 的主要目的是对过程动态进行补偿，即在低频段进行等效来降低系统阶次：

$$G_p(s)P(s) = \frac{K}{(1 + Ts)^n} \times \frac{a^2 \tau^2 s^2 + 2\xi a \tau s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\xi \tau s + 1} \approx_{s \rightarrow 0} \frac{K'}{(1 + T's)^{n-2}} \quad (7)$$

式中： $G'_p(s)$ 为补偿后的过程模型(等效模型)； K' 、 T' 分别为补偿后模型的增益系数和时间常数； n 为原过程模型阶次。可以在简化模型 $G'_p(s)$ 的基础上设计低阶 ADRC 器，与 1.3 节类似，二阶 ADRC 器可以设计如式(8)所示。

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} = \frac{k_p(r - z_1) - k_d z_2 - z_3}{b_0} \quad (8)$$

值得注意的是，由于精确的低频近似，二阶 ADRC 器在低频范围内可以有效控制相应阶次的模型。因此，可以有效提高系统的控制性和鲁棒性。

至此，需要整定的控制器参数包括 PC 网络参数 a 、 ξ 、 τ ，二阶 ADRC 器的观测器增益 β_1 、 β_2 、 β_3 和控制器增益 k_p 、 k_d 。在进行 ADRC 器调参前，需要先设计 PC 网络。

2.2 PC 网络设计

如 2.1 节所述,PC 网络有 3 个待设计参数 a 、 ξ 、 τ ，并且其都具有特定的物理含义。经过大量的测试， a 建议取值区间为 $[2.6, 3.5]$ ，以获得合理的放大性能与噪声，文中为推导简明， a 取 3； ξ 值越小则系统振荡越明显，因此 ξ 取 0.5，其相应的衰减率为 0.973(其他 a 和 ξ 取值并不显著影响后续推导过程)。

由式(6)、式(7)以及 $a = 3$ 、 $\xi = 0.5$ 可得：

$$\frac{K}{(1 + Ts)^n} \times \frac{a^2 \tau^2 s^2 + 2\xi a \tau s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\xi \tau s + 1} \approx \frac{K'}{(1 + T's)^{n-2}} \quad (9)$$

其静态增益为：

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{K}{(1 + Ts)^n} \times \frac{a^2 \tau^2 s^2 + 2\xi a \tau s + 1}{\tau^2 s^2 + 2\xi \tau s + 1} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K'}{(1 + T's)^{n-2}} \quad (10)$$

由式(10)可得 $K = K'$ 。进一步有：

$$\frac{(1 + T's)n - 2(9\tau^2s^2 + 3\tau s + 1)}{(1 + Ts)n(\tau^2s^2 + \tau s + 1)} \approx \quad (11)$$

考虑二阶泰勒近似可得:

$$\left[1 + (n-2)T's + \frac{(n-2)(n-3)}{2}T'^2s^2 \right] \times \frac{1}{(9\tau^2s^2 + 3\tau s + 1)} \approx \left[1 + nTs + \frac{n(n-1)}{2}T^2s^2 \right] \times (\tau^2s^2 + \tau s + 1) \quad (12)$$

由前 2 项系数相等推导可得:

$$\begin{cases} 3\tau + (n-2)T' = \tau + nT \\ 9\tau^2 + \frac{(n-2)(n-3)}{2}T'^2 + 3\tau(n-2)T' = \tau^2 + \frac{n(n-1)}{2}T^2 + n\tau T \end{cases} \quad (13)$$

求解 τ 、 T' 可得:

$$\begin{cases} \tau = \frac{T}{2(2n-5)} [\sqrt{5n(n-2)} - n] \\ T' = \frac{nT - 2\tau}{n-2} \end{cases} \quad (14)$$

2.3 PC 网络实现

文中固定式(6)所示 PC 模型的一个重要原因是其可以通过组态软件轻松实现,具有可移植性和广泛适用性。2.2 节中得到的 PC 网络可以通过简单的增益块和积分块来实现和封装。

PC 网络如图 4 所示, K_i 为 PC 网络增益系数; T_1 、 T_2 为积分器的时间常数; $E_{in}(s)$ 为输入; $E_{out}(s)$ 为输出; $E_1(s)$ 、 $E_2(s)$ 均为中间变量。

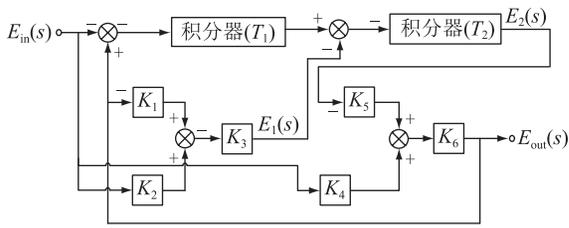


图 4 PC 网络

Fig.4 PC network

由图 4 可得:

$$\begin{cases} E_1(s) = K_1K_3E_{out}(s) - K_2K_3E_{in}(s) \\ E_2(s) = E_{out}(s) \left(\frac{1}{T_1T_2s^2} + \frac{K_1K_3}{T_2s} \right) - E_{in}(s) \left(\frac{1}{T_1T_2s^2} + \frac{K_2K_3}{T_2s} \right) \\ E_{out}(s) = K_4K_6E_{in}(s) - K_5K_6E_2(s) \end{cases} \quad (15)$$

进一步可得:

$$P(s) = \frac{E_{out}(s)}{E_{in}(s)} = \frac{\frac{K_4}{K_5}T_1T_2s^2 + K_2K_3T_1s + 1}{\frac{1}{K_5K_6}T_1T_2s^2 + K_1K_3T_1s + 1} \quad (16)$$

取 $\frac{K_4}{K_5} = 9$ 、 $K_5K_6 = 1$ 、 $K_2K_3 = 3$ 、 $K_1K_3 = 1$ 、 $T_1 = T_2 = \tau$, 可得 $a = 3$ 、 $\xi = 0.5$ 时的 PC 模型。

3 鲁棒性分析与参数整定

3.1 鲁棒性分析

PC-ADRC 的等效二自由度结构如图 5 所示,图中, $G_c(s)$ 为等效反馈控制器模型; $r(s)$ 、 $e(s)$ 、 $d(s)$ 、 $u(s)$ 、 $y(s)$ 分别为参考信号 r 、误差信号 e 、扰动信号 d 、输出信号 u 、被控变量 y 的拉普拉斯变换; $G_f(s)$ 为等效前馈控制器传递函数。控制系统的开环传递函数 $G_{op}(s)$ 应为:

$$G_{op}(s) = G_c(s)G_p(s)P(s) = \frac{(k_p\beta_1 + k_d\beta_2 + \beta_3)s^2 + (k_p\beta_2 + k_d\beta_3)s + k_p\beta_3}{b_0[s^3 + (k_d + \beta_1)s^2 + (k_p + \beta_2 + k_d\beta_1)s]} \times \frac{K}{(1 + Ts)^6} \times \frac{9\tau^2s^2 + 3\tau s + 1}{\tau^2s^2 + \tau s + 1} \quad (17)$$

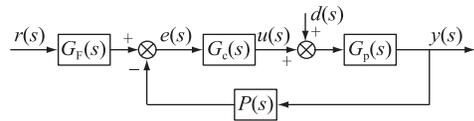


图 5 PC-ADRC 的等效二自由度结构

Fig.5 The equivalent two-degree freedom structure of PC-ADRC

可得闭环控制系统的灵敏度函数 $S(s)$ 和互补灵敏度函数 $T(s)$:

$$\begin{cases} S(s) = 1/(1 + G_{op}(s)) \\ T(s) = G_{op}(s)/(1 + G_{op}(s)) \end{cases} \quad (18)$$

为便于使用,选取灵敏度函数和互补灵敏度函数的峰值函数 M_s 、 M_T 作为鲁棒性指标^[28]。

$$\begin{cases} M_s = \max |S(s)| \\ M_T = \max |T(s)| \end{cases} \quad (19)$$

3.2 控制器参数整定

文中采用带宽参数法^[29]以进一步减少控制器调参数量:

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_0 \\ \beta_2 = 3\omega_0^2 \\ \beta_3 = \omega_0^3 \\ k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\xi_c\omega_c \end{cases} \quad (20)$$

式中: ω_0 、 ω_c 分别为观测器和闭环系统带宽; ξ_c 为

系统阻尼比,常取 1。至此,PC-ADRC 的待调参数减少为 3 个,即 ω_0 、 ω_c 、 b_0 。

ω_c 的选择应结合过程信息,如系统阶次和时间常数。参考文献[30-31],文中 ω_c 取值为:

$$\omega_c = \frac{10}{\sigma n' T'} \quad (21)$$

式中: σ 为期望的设定值跟踪时间因子,对于高阶过程,常取 1~4^[20]; n' 为补偿后的系统阶次。

观测器带宽 ω_0 决定了被观测和补偿的总扰动速度。因此,从控制性能提升角度而言,较大的 ω_0 值更好。但在实际过程中 ω_0 的取值是受限的,如受采样率的限制。采用经典的比例关系,文中 ω_0 的取值为:

$$\omega_0 = 10\omega_c \quad (22)$$

如前所述,对于 ADRC 器, b_0 是一个重要参数,尤其在采用低阶 ADRC 高阶过程时, b_0 过小会导致控制系统不稳定,而 b_0 太大又会使得控制性能下降^[31]。文献[20]针对 $K/(1+Ts)^n$ 型高阶过程 ADRC 器提出关于 b_0 的参数调整方法。但是,由于新引入的 PC 网络,这种定量关系不能直接使用。文中将使用鲁棒回路成形法确定 b_0 。

由图 3 可知,PC-ADRC 系统的闭环传递函数可以近似为:

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} \approx \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \times \frac{\tau^2 s^2 + \tau s + 1}{9\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi_c \omega_c s + \omega_c^2} \times \left(\frac{1}{9} s^2 + \frac{1}{9\tau} s + \frac{1}{9\tau^2} \right) \div \left(s^2 + \frac{1}{3\tau} s + \frac{1}{9\tau^2} \right) \quad (23)$$

式中: $R(s)$ 、 $Y(s)$ 分别为设定值和闭环输出。可见,最终等式中的第二项完全由 PC 网络决定。因此,可以通过选择 ω_c 、 ξ_c 来调节闭环系统响应。例如,当 ω_c 和 $1/(3\tau)$ 比较接近时,可以选择较大的阻尼比 ξ_c ,而当 ω_c 为主导极点时,第二项的动态影响很小,可以忽略不计。

4 仿真试验及结果分析

文中将通过仿真验证过热汽温系统低频近似的准确性。等效模型 $G_p(s)P(s)$ 和理想模型 $G'_p(s)$ 频率响应见图 6,可以看出,等效模型和理想模型在低频段的响应高度一致,即很好地反映其低频动态。

通过过热汽温系统控制仿真验证文中所提出方法的有效性,仿真中与以下 3 种不同的控制器进行设定值跟踪和负荷扰动仿真对比,分别是:

- (1) 基于鲁棒调参方法的二阶 ADRC 器^[20];

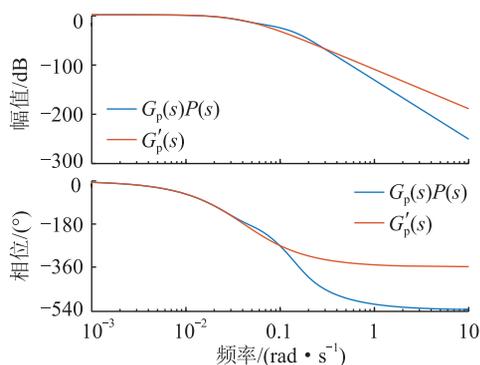


图 6 等效模型和理想模型频率响应比较

Fig.6 Frequency response comparison between the equivalent model and the ideal model

- (2) 简单内模控制-比例积分 (simple internal model control-proportion integral, SIMC-PI)^[32] 控制器;

- (3) PC-比例积分 (proportion integral, PI), 即 PC-PI 控制器,即在 SIMC-PI 控制器中加入 PC,以验证 PC 网络的适用性。

仿真中,在 150 s 和 1 500 s 分别加入设定值单位阶跃扰动和阶跃负载扰动。

为对比公平,PC-ADRC、ADRC 和 SIMC-PI 采用相同的鲁棒性约束,具体控制器参数和 M_s 、 M_T 指标见表 1,其中, K_p 、 K_I 分别为 PI 控制器的比例和积分增益。而 PC-PI 则是在 SIMC-PI 控制系统输出通道直接加入 PC 以验证其适用性。PC-ADRC 中 ξ_c 取值为 1.1, b_0 由图 7 所示的鲁棒回路成形方法确定。

表 1 控制器参数与鲁棒性指标

Table 1 Controller parameters and robustness metrics

控制器	控制器参数	M_s	M_T
PC-ADRC	$b_0 = -0.015$ 、 $\omega_0 = 0.365$ 、 $\omega_c = 0.0365$ 、 $\xi_c = 1.1$	1.30	1
ADRC	$b_0 = -0.045$ 、 $\omega_0 = 0.423$ 、 $\omega_c = 0.0423$	1.31	1
PC-PI	$K_p = -0.1306$ 、 $K_I = -0.0047$	1.50	1
SIMC-PI	$K_p = -0.1306$ 、 $K_I = -0.0047$	1.37	1

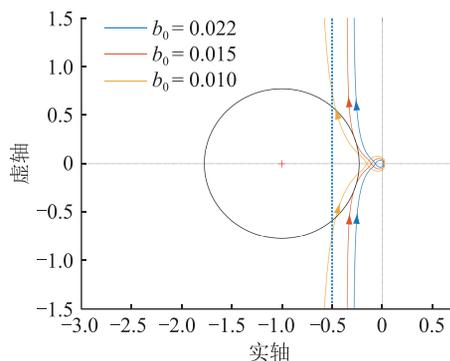


图 7 鲁棒回路成形法整定 b_0 示意

Fig.7 Robustness loop shaping method for tuning b_0

仿真结果如图 8 所示,其中,被控输出为过热汽温;控制信号为阀门开度;Set-point 为参考信号。结果表明 PC-ADRC 与 SIMC-PI 有相近的跟踪性能。单位阶跃扰动跟踪过程的误差绝对值积分(integral absolute error,IAE)如表 2 所示(IAE1),与其他 3 种控制器相比,PC-ADRC 器显著提高控制系统的抗扰性能。阶跃负载扰动过程的 IAE2 指标也如表 2 所示,这也表明 PC 可以有效地补偿过热汽温系统的大惯性动态。为进一步验证所提出的控制方法对一般扰动的有效性,考虑加入斜率为 0.01 斜坡形式和周期为 50 s 正弦形式的扰动,如图 9 所示,仿真结果如图 10 所示。可以看出,PC-ADRC 器对这 2 类扰动也表现出很好的抗扰性能,如更快的响应和更小的扰动偏差峰值。斜坡和正弦扰动过程的 IAE 指标如表 2 所示(IAE3 和 IAE4)。

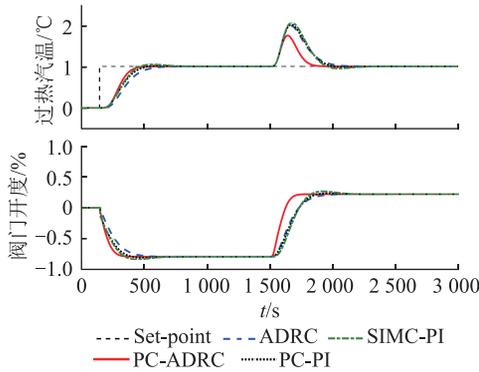


图 8 不同控制器控制效果对比

Fig.8 Control effect comparison of different controllers

表 2 扰动过程 IAE 指标对比

Table 2 IAE indicators comparison of disturbance process

控制器	IAE1	IAE2	IAE3	IAE4
PC-ADRC	162.02	113.21	113.21	297.35
ADRC	215.52	214.67	214.66	315.15
PC-PI	184.64	217.38	216.95	313.91
SIMC-PI	183.09	230.07	228.72	324.98

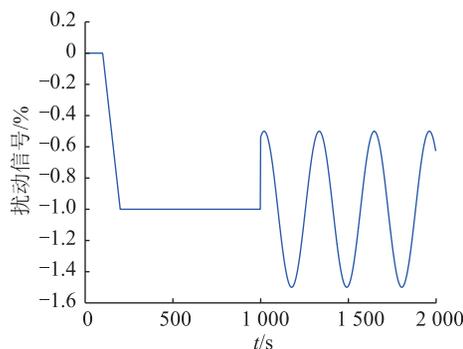


图 9 斜坡和正弦扰动示意

Fig.9 Slope and sinusoidal disturbance schematic

相同参数下 PC-ADRC 与 ADRC 鲁棒性指标对比

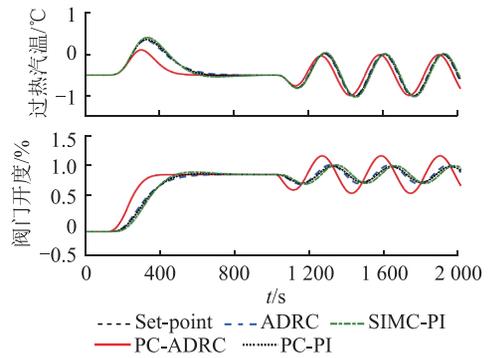


图 10 斜坡和正弦扰动控制效果对比

Fig.10 Control effect comparison of slope and sinusoidal disturbance

比如图 11 所示,其中 $G_{m,PC-ADRC}$ 、 $G_{m,ADRC}$ 分别为 PC-ADRC 器和 ADRC 器的幅值裕度绝对值; $P_{m,PC-ADRC}$ 、 $P_{m,ADRC}$ 分别为 PC-ADRC 器和 ADRC 器的相位裕度绝对值。当采用同阶 ADRC 器和相同的控制器参数时($b_0 = -0.045$ 、 $\omega_0 = 0.423$ 、 $\omega_c = 0.0423$),PC-ADRC 器有着更好的鲁棒性。这说明 PC 可以直接加入到原 ADRC 系统中,作为控制器补丁,而不会使控制器不稳定。

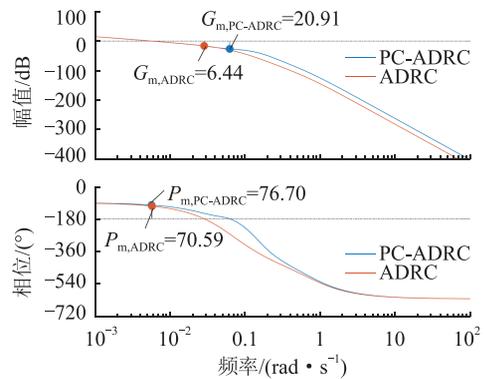


图 11 相同参数下 PC-ADRC 与 ADRC 鲁棒性指标对比

Fig.11 Robustness indicators comparison for the PC-ADRC and ADRC under the same parameters

5 结论

文中针对高阶大惯性过热汽温过程,提出一种 PC-ADRC 策略,可显著提高控制系统的抗扰性能。在介绍过热汽温系统的基础上,阐述模型不确定性、外部扰动和高阶大惯性是过热汽温系统的控制难点所在。

为提高控制性能,从理论上推导 PC 模型,分析 PC 后控制系统的动态特性,并给出其参数的整定方法。通过仿真实验验证所提出控制方法的有效性。结果表明,PC-ADRC 器相较传统 PI 控制器和 ADRC 器有更好的控制性能。具体而言,在相近的鲁棒性约束下,相较于 SIMC-PI 器,所提出的控制方

法在单位阶跃扰动值、阶跃负载扰动、斜坡负载扰动和正弦扰动下的 IAE1—IAE4 性能指标分别提升 12%、51%、51% 和 8.5%，表明其具有更好的设定值跟踪和扰动抑制性能。

进一步地，仿真中通过直接在原 PI 控制器回路中加入 PC 模块，可以有效提升控制系统的抗扰性能，相较于 SIMC-PC 控制器，其在阶跃负载扰动、斜坡负载扰动和正弦扰动下 IAE2—IAE4 性能指标分别提升 5.5%、5.1% 和 3.4%。表明 PC 模型不仅适用于文中的 ADRC 器，而且适用于其他基于误差的控制器，如 PID 控制器。

参考文献：

- [1] 李卫华. 提高燃煤机组调频调峰性能的综合控制技术[J]. 热力发电, 2014, 43(11): 6-11, 23.
LI Weihua. Integrated control technology for improving PFC and AGC performance of coal-fired units: research and application [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(11): 6-11, 23.
- [2] 陈作舟, 余浩, 王盼盼, 等. 海上风电集群与火电打捆外送系统短路比定义及影响因素分析[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 207-217.
CHEN Zuozhou, YU Hao, WANG Panpan, et al. Definition and influencing factors of short-circuit ratio between offshore wind power cluster and thermal power bundling system [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 207-217.
- [3] MAZALAN N A, MALEK A A, WAHID M A, et al. Review of control strategies employing neural network for main steam temperature control in thermal power plant [J]. Jurnal Teknologi, 2014, 66(2): 73-76.
- [4] LIU J Z, YAN S, ZENG D L, et al. A dynamic model used for controller design of a coal fired once-through boiler-turbine unit [J]. Energy, 2015, 93: 2069-2078.
- [5] SUN L, HUA Q S, SHEN J, et al. Multi-objective optimization for advanced superheater steam temperature control in a 300 MW power plant [J]. Applied Energy, 2017, 208: 592-606.
- [6] CHAN K H, DOZAL-MEJORADA E J, CHENG X, et al. Predictive control with adaptive model maintenance: application to power plants [J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 70: 91-103.
- [7] 孙明, 董泽. 二次再热机组汽温系统的串级自抗扰预测控制 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5415-5423, 5589.
SUN Ming, DONG Ze. Cascade active disturbance rejection predictive control for superheated steam temperature of ultra-super-critical double-reheat unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5415-5423, 5589.
- [8] YI H, SU Z G, WANG P H. Closed-loop shaping-based active disturbance rejection control with delay robustness and application to wet desulfurization process [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 6117-6127.
- [9] 杨新民. 智能控制技术在火电厂应用研究现状与展望 [J]. 热力发电, 2018, 47(7): 1-9.
YANG Xinmin. Application status and prospect of intelligent control technology in thermal power plants [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 1-9.
- [10] 郭伟, 程晓冲. FOPID-GPC 算法在电厂过热蒸汽温度控制中的应用 [J]. 热力发电, 2012, 41(3): 37-41.
GUO Wei, CHENG Xiaochong. Application of fractional-order PID type generalized predictive control algorithm in superheated steam control system of power plant [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(3): 37-41.
- [11] WU X, SHEN J, LI Y G, et al. Fuzzy modeling and predictive control of superheater steam temperature for power plant [J]. ISA Transactions, 2015, 56: 241-251.
- [12] XUE W C, HUANG Y. Performance analysis of active disturbance rejection tracking control for a class of uncertain LTI systems [J]. ISA Transactions, 2015, 58: 133-154.
- [13] 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.
HAN Jingqing. Active disturbance rejection control technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [14] 付京博, 邵会兵, 詹韬. 基于深度强化学习的飞行器自抗扰控制技术 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(10): 54-59.
FU Jingbo, SHAO Huibing, ZHAN Tao. Aircraft active disturbance rejection control technology based on deep reinforcement learning [J]. Computer Simulation, 2022, 39(10): 54-59.
- [15] SUN L, LI D H, HU K T, et al. On tuning and practical implementation of active disturbance rejection controller: a case study from a regenerative heater in a 1 000 MW power plant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(23): 6686-6695.
- [16] HERBST G. Transfer function analysis and implementation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Technology, 2021, 19(1): 19-34.
- [17] XUE W C, HUANG Y. On performance analysis of ADRC for nonlinear uncertain systems with unknown dynamics and discontinuous disturbances [C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China. IEEE, 2013: 1102-1107.
- [18] ZHAO C Z, HUANG Y. Design ADRC for two special kinds of systems [C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, China. IEEE, 2011: 229-234.
- [19] NOWAK P, CZECZOT J, KLOPOT T. Robust tuning of a first order reduced active disturbance rejection controller [J]. Control Engineering Practice, 2018, 74: 44-57.
- [20] HE T, WU Z L, LI D H, et al. A tuning method of active disturbance rejection control for a class of high-order processes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 3191-3201.
- [21] WU Z L, HE T, LI D H, et al. Superheated steam temperature control based on modified active disturbance rejection control [J]. Control Engineering Practice, 2019, 83: 83-97.
- [22] WU Z L, LI D H, HE T, et al. A comparison study of a high order system with different ADRC control strategies [C]//2018

- 37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan, China. IEEE, 2018; 1-6.
- [23] 高志强. 浅谈工程控制的信息问题[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(7): 908-923.
GAO Zhiqiang. On the problem of information in engineering cybernetics[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(7): 908-923.
- [24] WEI W, ZHANG Z Y, ZUO M. Phase leading active disturbance rejection control for a nanopositioning stage[J]. ISA Transactions, 2021, 116: 218-231.
- [25] 常太华, 江清潘, 朱红路. 火电厂过热汽温系统内模控制研究[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 2077-2080.
CHANG Taihua, JIANG Qingpan, ZHU Honglu. Study of internal model control for power plant superheated steam temperature[J]. East China Electric Power, 2009, 37(12): 2077-2080.
- [26] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574-580.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. On the stability of linear active disturbance rejection control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 574-580.
- [27] WU Z H, ZHOU H C, GUO B Z, et al. Review and new theoretical perspectives on active disturbance rejection control for uncertain finite-dimensional and infinite-dimensional systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 101(2): 935-959.
- [28] SU Z G, SUN L, XUE W C, et al. A review on active disturbance rejection control of power generation systems; Fundamentals, tunings and practices[J]. Control Engineering Practice, 2023, 141: 105716.
- [29] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, CO, USA. IEEE, 2003: 4989-4996.
- [30] SUN Y G, SU Z G, SUN L, et al. Time-delay active disturbance rejection control of wet electrostatic precipitator in power plants[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(4): 2748-2760.
- [31] ZHAO C Z, LI D H. Control design for the SISO system with the unknown order and the unknown relative degree[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 858-872.
- [32] SKOGESTAD S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning[J]. Journal of Process Control, 2003, 13(4): 291-309.

作者简介:



范永胜

范永胜(1969),男,博士,高级工程师,从事火力发电厂技术研究、基建/生产技术管理工作(E-mail: 16010163@ceic.com);

陈卓(1996),男,博士在读,研究方向为热工过程建模与控制;

郝勇生(1978),男,博士,教授,研究方向为企业、园区和大型公建能源管控理论与技术开发、能源动力系统先进测控理论与技术开发。

Phase compensation based active disturbance rejection control for superheated steam temperature

FAN Yongsheng^{1,2}, CHEN Zhuo², HAO Yongsheng², SU Zhigang², WEI Hongxuan², ZHAO Gang²

(1. China Energy Jiangsu Power Co., Ltd., Nanjing 210036, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the continuous penetration of renewable energies, thermal power plants are facing more frequent and wider variable load operation. The control of high order, large inertia superheated steam temperature processes in power plants is facing a great challenge. Therefore, a phase compensation based active disturbance rejection control (PC-ADRC) strategy for a class of high-order, large-inertia processes is proposed. Firstly, the working principles and control problems of SST system are illustrated. Then, the phase compensation (PC) network model is derived carefully by low-frequency approximation. A model simplification method is presented, in which the PC is adopted to compensate process dynamics and obtain reduced-order plant equivalently. To facilitate engineering applications, its simple implementation and equivalent model analysis for the PC-ADRC system are also given. At last, the stability and robustness of the PC-ADRC control system are theoretically studied. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed controller can effectively improve the robustness and fast response ability of the high-order process control system.

Keywords: superheated steam temperature; thermal power generation; phase compensation based active disturbance rejection control (PC-ADRC); high order process; low-frequency approximation; robustness

(编辑 吴昊)