

DOI: 10.19666/j.rlfed.202211171

# 灵活运行空冷机组频域自适应 背压控制与优化

曾世权<sup>1</sup>, 开平安<sup>2</sup>, 庄志宝<sup>3</sup>, 黄晓宇<sup>4</sup>, 邓慧<sup>1</sup>

(1.暨南大学能源电力研究中心, 广东 珠海 519070; 2.国家发展和改革委员会能源研究所, 北京 100055;  
3.吉林电力股份有限公司白城发电公司, 吉林 白城 137000;  
4.湖北宇宿新能源科技有限公司, 湖北 宜昌 443000)

**[摘要]** 在“双碳”目标驱动能源转型背景下, 针对灵活运行空冷火电机组变工况频繁导致的汽轮机背压调节品质问题, 提出一种频域自适应PID控制算法。考虑变工况模型的实用性与精确性, 基于机组现场运行数据, 采用改进粒子群算法对空冷机组多工况进行动态系统辨识, 然后基于多工况运行被控对象的标称模型, 采用传递函数组态方式自适应方法, 实时计算PID控制器的优化参数, 以适应灵活运行下被控对象模型参数的变化, 克服了PID控制器结构以及参数固定导致的控制品质问题。仿真结果表明, 频域自适应PID控制器可以很好地跟踪负荷不同工况点下模型参数的变化, 使得背压控制一直保持良好的控制品质。

**[关键词]** 灵活运行; 系统辨识; 传递函数组态; 背压控制系统; 频域自适应

**[引用本文格式]** 曾世权, 开平安, 庄志宝, 等. 灵活运行空冷机组频域自适应背压控制与优化[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 115-121. ZENG Shiquan, KAI Ping'an, ZHUANG Zhibao, et al. Adaptive back pressure control and optimization in frequency domain for flexible operation air cooling unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 115-121.

## Adaptive back pressure control and optimization in frequency domain for flexible operation air cooling unit

ZENG Shiquan<sup>1</sup>, KAI Ping'an<sup>2</sup>, ZHUANG Zhibao<sup>3</sup>, HUANG Xiaoyu<sup>4</sup>, DENG Hui<sup>1</sup>

(1. Energy and Electric Power Research Center, Jinan University, Zhuhai 519070, China;  
2. Institute of Energy Research, National Development and Reform Commission, Beijing 100055, China;  
3. Baicheng Power Generation Company, Jilin Power Share Co., Ltd., Baicheng 137000, China;  
4. Hubei Yusu New Energy Technology Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** In the context of energy transition driven by “carbon peak and carbon neutrality”, an adaptive PID control algorithm in frequency domain is proposed to solve the quality problem of steam turbine back pressure regulation caused by frequent change of operating conditions in flexible air-cooled thermal power units. Considering the practicality and accuracy of the variable working condition model, on the basis of the site operation data, the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to identify the dynamic system of multiple working conditions of the air cooling unit. Then, based on the nominal model of the controlled object operated under multiple working conditions, the transfer function configuration mode adaptive method is employed to calculate and optimize the parameters of PID controller in real time, thus to adapt to the change of model parameters of the controlled object under flexible operation and overcome the control quality problems caused by PID controller structure and fixed parameters. The simulation results show that, the adaptive PID controller in frequency domain can well track the variation of model parameters under different load conditions, which makes the back pressure control keep good control quality.

**Key words:** flexible operation; system identification; transfer function configuration; back pressure control system; adaptive in frequency domain

收稿日期: 2022-11-14 网络首发日期: 2023-01-12

基金项目: 吉林电力股份有限公司科技项目 (410011JX20200024)

Supported by: Technology Project of Jilin Power Share Co., Ltd. (410011JX20200024)

第一作者简介: 曾世权 (1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火电机组复杂过程控制, 3464959330@qq.com.

通信作者简介: 邓慧 (1979), 男, 副教授, 主要研究方向为先进控制理论及其工程应用, dengh@jnu.edu.cn.

空冷火电机组因为节水性能好,在我国富煤缺水的“三北”地区获得大规模的推广性应用<sup>[1]</sup>。空冷技术改变了我国以往“以水定电”的火电源点布局,优化了基础能源生产结构。但由于空冷凝汽器露天布置,环境温度与自然风对空气入口热动力场影响很大。同时,我国正处于能源转型阶段,为消纳规模日益增长的可再生能源,火电机组参与电网调峰已成常态,在调峰过程中,发电机组负荷波动频繁<sup>[2-5]</sup>,空冷凝汽器冷热工质入口侧的能流扰动,使得凝结过程复杂多变。在随机与非线性扰动下,如何保证凝汽压力及背压的控制品质,对于发电机组冷端设备经济安全运行,以及汽轮机组整机热效提升,具有重要的研究价值和现实意义<sup>[6]</sup>。

传统PID控制器对于时不变工业过程具有良好控制功能和控制品质,但对于如空冷凝汽器这样的时变对象,难以满足在不同时间工况点下的过程控制品质要求<sup>[7]</sup>。为增强PID在不确定性空冷过程上的应用性能,研究者在传统PID机理上,通过改进控制量的在线求解算法,提高闭环控制系统的实时性和鲁棒性。如白建云将遗传算法(GA)应用于PID控制器参数整定中,使得传统PID算法可以适应直接空冷机组时变的复杂动态特性<sup>[8]</sup>;王琦等基于模糊PID机理做出创新,设计出改进型Smith预估补偿模糊PID,改进后的控制品质和整体抗干扰性能有明显提升<sup>[9]</sup>。上述研究大多在常规PID控制原理中引入智能算法,增加了控制器的在线计算代价,工程实现较复杂。

本文针对火电厂空冷过程时变对象,考虑PID固定结构及固定参数下灵活性与鲁棒性缺陷<sup>[10-11]</sup>,对常规PID机理做出应用改进。基于多工况运行对象标称模型,提出一种频率域自适应控制器,用传递函数组态自适应的方式,优化PID控制器参数,以适应空冷过程对象的系统参数变化,优化过程不需要对过程进行在线辨识,避免了辨识误差,同时减小了控制器实时在线计算工作量,使得灵活运行空冷发电机组在负荷扰动下,依然保持较好的背压控制品质,提高了控制系统实时性和鲁棒性。

## 1 空冷凝汽器过程动态系统辨识

### 1.1 空冷凝汽器工作原理和常规PID控制

发电机组汽轮机将做完功的蒸汽排到空冷凝汽器中,通过流经散热翅片管冷空气的对流换热,将其冷却凝结成水,最后凝结水送回锅炉进行封闭朗肯循环<sup>[12]</sup>。为了提高冷凝效果,空冷凝汽器在翅

片管束下面安装轴流风机强制通风,以达到调节汽轮机背压的目的,而凝汽器背压是评价发电机组整机经济性能的重要指标<sup>[13]</sup>。目前对空冷发电机组的背压主要采取常规PID控制器进行控制,这一过程对象的控制系统原理如图1所示。

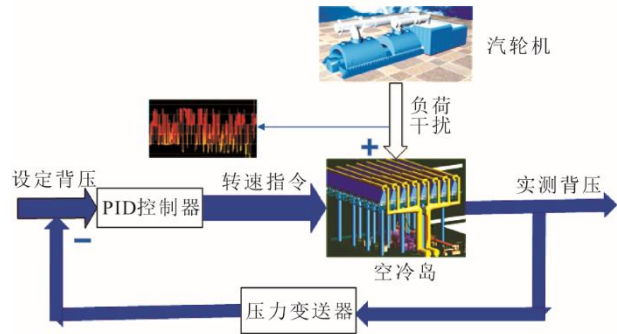


图1 空冷凝汽器背压控制系统原理  
Fig.1 Schematic diagram of the back pressure control system of air condenser

在图1中,系统扰动指汽轮机负荷波动导致的蒸汽流量变化,背压设定值一般由现场工作人员通过手动输入方式去设定,压力变送器传送的背压为汽轮机排管道的实测压力,将二者差值送入PID控制器中生成转速指令,通过空冷岛中的轴流风机对机组背压进行调节直至达到稳定状态<sup>[14]</sup>。在“双碳”目标驱动下,我国正处于构建以新能源为主体的新型电力系统关键阶段,为给“三北”地区高速发展的可再生能源创造并网条件,空冷火电机组长时间深度参与调峰已成为常态。图2为华北地区某600 MW空冷机组2016年上半年负荷曲线,由此可见空冷凝汽器长期处于变工况运行状态。

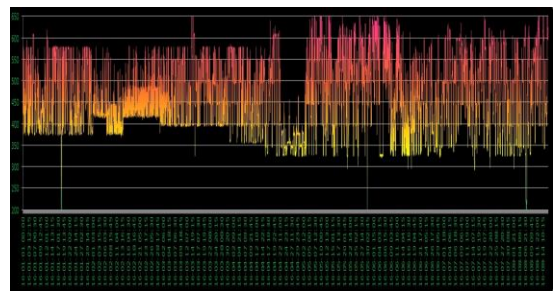


图2 华北地区某600 MW空冷机组2016年上半年负荷曲线  
Fig.2 Load curve of a 600 MW air cooling unit in North China in the first half of 2016

### 1.2 直接空冷机组背压模型数据的选取

本文数据取自东北某电厂超超临界660 MW空冷机组实际运行数据,从分散控制系统(DCS)选取2种执行器典型工况点即风机转速调节过程进行参数采集。2种工况点分别是汽轮机蒸汽流量稳定在

1 253 m<sup>3</sup>/s, 空冷轴流风机转速由 24 Hz 降低至 20 Hz 过程背压变化数据以及主蒸汽流量稳定在 1 017 m<sup>3</sup>/s, 风机转速由 14 Hz 升至 35 Hz 并逐渐降低至 13 Hz 过程的背压数据。考虑机组灵活运行, 机组负荷波动频繁, 对背压稳定性产生扰动<sup>[15-16]</sup>, 额外采集了空冷风机转速稳定在 53 Hz, 机组负荷由 453 MW 降至 359 MW 过程的背压变化数据。并在执行回路辨识后继续辨识出机组负荷扰动模型, 为直接空冷机组背压频域自适应控制策略提供模型基础。

### 1.3 基于改进粒子群算法的模型辨识

基本粒子群算法存在寻优无法快速收敛的问题, 改进粒子群算法在基本粒子群算法中加入惯性权重系数  $\omega$ <sup>[17]</sup>。寻优速度表达式为:

$$v_{ij}(t + \Delta t) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 [X_{best,ij} - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [X_{best,ij} - x_{ij}(t)] \quad (1)$$

式中:  $i=1,2, \dots, m$ ;  $j=1,2, \dots, N$ ;  $t$  为目前粒子所处位置时刻;  $t+\Delta t$  为粒子下一步所处位置时刻;  $r_1$  和  $r_2$  均为 0~1 内的任意数;  $c_1$  和  $c_2$  均为系统寻优的加速权值;  $X_{best,ij}$  为粒子的最优位置;  $v_{ij}$  为粒子的速度。

研究表明, 惯性权重系数  $\omega$  的大小直接影响算法全局寻优和局部寻优的能力。本文自适应改变惯性权重系数  $\omega$ , 通过实时寻优的步数来调节  $\omega$ 。 $\omega$  计算表达式为:

$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min})l / L_{max} \quad (2)$$

式中:  $\omega_{max}$  为惯性权重系数的最大值;  $\omega_{min}$  为惯性权重系数的最小值, 一般是 0.8~1.2 内的任意数;  $L_{max}$  为粒子的最大前进步数;  $l$  为该粒子目前走过的步数。

辨识系统模型的精度一定程度上取决于根据系统特性初步确定的模型结构<sup>[18]</sup>。在以压力和温度为特征变量的生产过程中, 二阶惯性延迟系统可以较好地表现系统动态特性, 模型结构一般包括多阶惯性环节<sup>[19]</sup>。为更好地表征直接空冷机组凝汽器相变过程的动态特性, 设定模型为二阶纯延时惯性环节, 可表示为:

$$W(s) = \frac{b}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau s} \quad (3)$$

式中:  $b$  为待辨识系统的开环增益;  $T_1$  和  $T_2$  均为被控模型的惯性系数;  $\tau$  为系统纯时延。

以 Python 程序设计语言为模型的辨识语言, 以 pycharm 软件为实验平台, 以式(3)作为待辨识模型结构进行参数辨识寻优。在参数寻优过程中设定算

法迭代次数 MaxGen 为 1 800, 粒子群个数为 60, 寻优的加速度权值设定为 2。经过 1 800 次迭代寻优之后, 得到二阶惯性纯延时模型。为了检验寻优结果的精确性, 代入原始数据, 利用辨识出的模型进行预测, 将预测的数据与原始数据进行对比。图 3—图 4 分别为 2 种典型调节回路模型 (工况 1 和工况 2) 预测数据与原始数据对比。

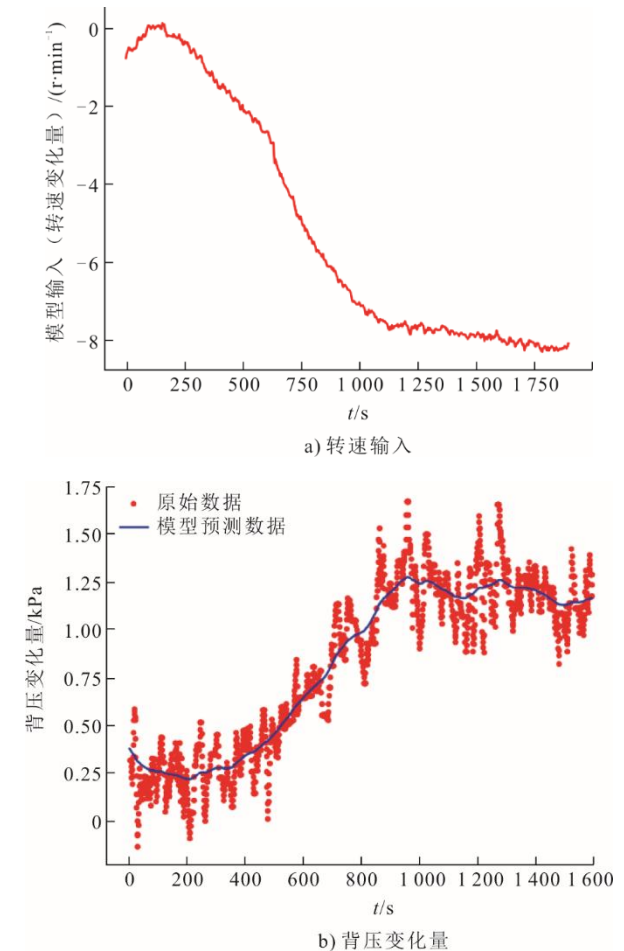
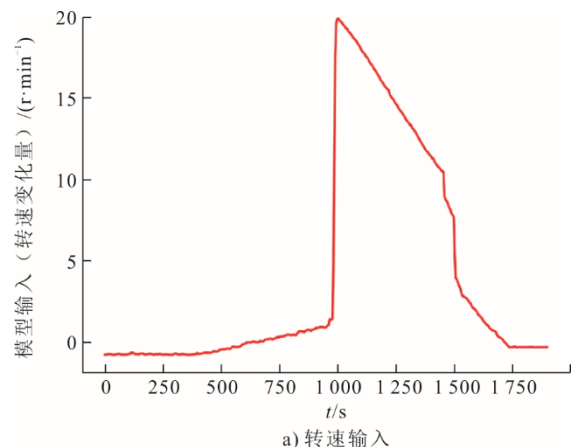


图 3 工况 1 转速模型预测数据与原始数据对比  
Fig.3 Comparison between the model prediction data and the original data under working condition 1



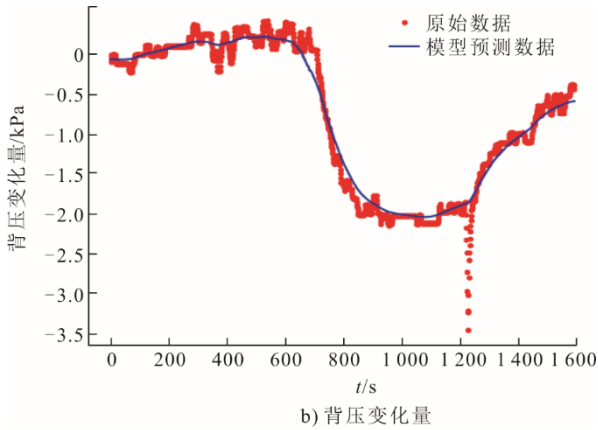


图4 工况2转速模型预测数据与原始数据对比  
Fig.4 Comparison between the speed model prediction data and the original data under working condition 2

图5为扰动回路模型预测数据与原始数据对比。由图3—图5可以发现，基于改进粒子群算法进行辨识的直接空冷机组模型预测的背压数据很好地跟踪了现场采集的原始数据，表明建立直接空冷机组背压模型是真实可靠的，在后续控制策略研究以及仿真过程中可以采用此模型。直接空冷机组典型工况辨识结果见表1。

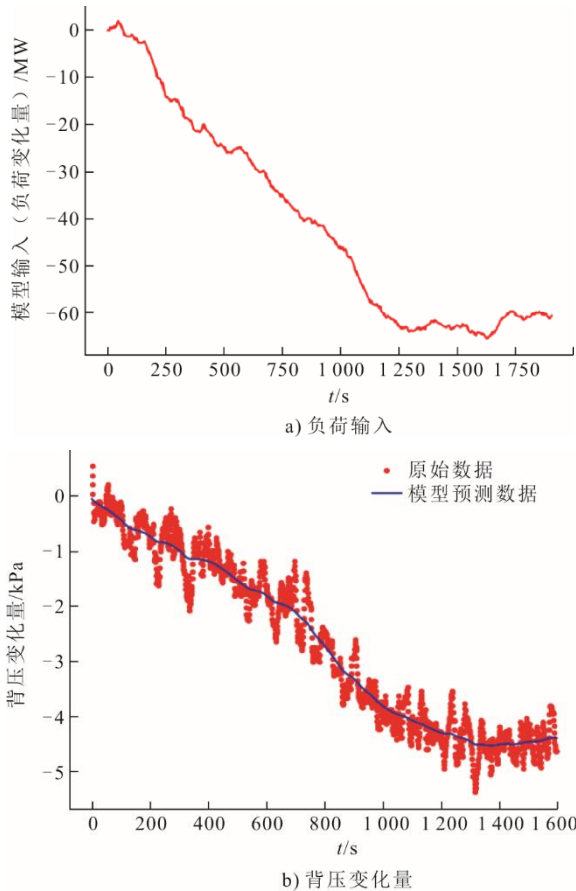


图5 负荷干扰模型预测数据/原始数据对比  
Fig.5 Comparison between the load interference model prediction data and the original data

表1 直接空冷机组典型工况辨识结果  
Tab.1 Identification results of typical working conditions for direct air cooling units

典型工况	转速模型	负荷干扰模型
工况1	$\frac{-2.39e^{-50s}}{(3s+1)(26s+1)}$	$\frac{0.083e^{-100s}}{(15s+1)(407s+1)}$
工况2	$\frac{-0.192e^{-35s}}{(30s+1)(204s+1)}$	

## 2 频域自适应 PID 控制器设计

设传递函数的一般表达式为：

$$G(s) = be^{-st} / (a_2s^2 + a_1s + 1) \quad (4)$$

PID 控制器传递函数一般描述为：

$$G_{PID}(s) = k_i(k_p + k_i / s + k_d s / (t_d s + 1)) \quad (5)$$

式(5)参数是在标称工况下基于优化指标确定，优化指标包括<sup>[20-23]</sup>：

$$IAE: S = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

$$ISE: S = \int_0^{\infty} |e(t)|^2 dt \quad (6)$$

$$ITAE: S = \int_0^{\infty} t |e| dt$$

$$ITSE: S = \int_0^{\infty} te^2 dt$$

设标称运行工况的传递函数表达式为：

$$G_p(s) = b_p e^{-s\tau_p} / (a_{p2}s^2 + a_{p1}s + 1) \quad (7)$$

设控制周期为  $t_s$ ，根据式(6)中优化指标设置标称模型 PID 控制器的参数为  $k=[k_p, k_i, k_d, t_d]$ ，其中：

$$k_p = a_{p1} / (\gamma b_p \tau_p)$$

$$k_i = k_p / a_{p1}$$

$$k_d = (a_{p2} / a_{p1}) k_p$$

$$t_d = (2 \sim 5)t_s \quad (8)$$

当传递函数发生变化，由标称模型  $G_p$  变成其他工况点模型  $G_i$ ，会引起输出响应发生较大的波动，即  $y_i = G_i(s)u(s) \neq G_p(s)u(s) = y_p$ 。在标称工况传递函数  $G_p(s)$  模型中整定的 PID 控制器参数在优化指标式(6)中是最优的，但不能保证在其他工况  $G_i(s)$ ， $i=0,1, \dots, n$  中也是最优的<sup>[24]</sup>，需要对 PID 控制器参数进行在线修正以适应被控对象的变化。由于  $G(s)$  的变化  $\Delta G(s)$ ，引起  $y$  的变化  $\Delta y = \Delta G(s)u(s)$ 。传递函数变化可描述为：

$$y_i = y_p + \Delta y = G_p(s)u(s) + \Delta G(s)u(s) \quad (9)$$

其中传递函数的变化量  $\Delta G(s)$  可由对式(4)的全微分得到，计算公式为：

$$\Delta G(s) = (\partial G(s) / \partial b) \Delta b + (\partial G(s) / \partial a_2) \Delta a_2 + (\partial G(s) / \partial a_1) \Delta a_1 + (\partial G(s) / \partial \tau) \Delta \tau \quad (10)$$

在式(10)中4个参数的变化量  $\Delta b$ 、 $\Delta a_2$ 、 $\Delta a_1$  和

$\Delta\tau$  由其他工况点模型参数和标称模型参数差值计算得到。当系统是多工况运行时计算公式为：

$$\begin{aligned} \Delta b &= \max(b_i) - b_p \\ \Delta a_2 &= \max(a_{i2}) - a_{p2} \\ \Delta a_1 &= \max(a_{i1}) - a_{p1} \\ \Delta\tau &= \max(\tau_i) - \tau_p \end{aligned} \quad (11)$$

当参数  $b$  发生变化时，输出变化量为：

$$\begin{aligned} \Delta y_{\Delta b} &= (\partial G(s) / \partial b) \Delta b u(s) = \\ \Delta b u(s) e^{-\tau s} / (a_1 s^2 + a_2 s + 1) = \\ (1/b) \Delta b G(s) u(s) &= y(s) \Delta b / b \end{aligned} \quad (12)$$

当参数  $a_2$  发生变化时，输出变化量为：

$$\begin{aligned} \Delta y_{\Delta a_2} &= (\partial G(s) / \partial a_2) \Delta a_2 u(s) = \\ -(s^2 \Delta a_2 u(s) b e^{-\tau s} / (a_2 s^2 + a_1 s + 1)^2) = \\ -(s^2 \Delta a_2 / (a_2 s^2 + a_1 s + 1)) G(s) u(s) = \\ -s^2 y(s) \Delta a_2 / (a_2 s^2 + a_1 s + 1) \end{aligned} \quad (13)$$

当参数  $a_1$  发生变化时输出变化量为：

$$\begin{aligned} \Delta y_{\Delta a_1} &= (\partial G(s) / \partial a_1) \Delta a_1 u(s) = \\ -(s \Delta a_1 u(s) b e^{-\tau s} / (a_2 s^2 + a_1 s + 1)^2) = \\ -(s \Delta a_1 / (a_2 s^2 + a_1 s + 1)) G(s) u(s) = \\ -s y(s) \Delta a_1 / (a_2 s^2 + a_1 s + 1) \end{aligned} \quad (14)$$

当参数  $\tau$  发生变化时，输出变化量为：

$$\begin{aligned} \Delta y_{\Delta\tau} &= (\partial G(s) / \partial \tau) \Delta \tau u(s) = \\ -s y(s) \Delta \tau = -s y(s) \Delta \tau / (n t_s + 1), \quad n = (2 \sim 5) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{故： } \Delta y = \Delta y_{\Delta b} + \Delta y_{\Delta a_2} + \Delta y_{\Delta a_1} + \Delta y_{\Delta\tau} \quad (16)$$

在本文中，应用  $\Delta y$  补偿变化的  $\Delta G(s)$ ，应用式(12)一式(15)计算 PID 控制器参数的在线修正值  $(1+\Delta k_p)$ 、 $(1+\Delta k_i)$ 和 $(1+\Delta k_d)$ 。其中：

$$\begin{aligned} \Delta k_p &= h_p \Delta y_{\Delta a_1} / (2.5 \Delta y_{\Delta b} \Delta y_{\Delta\tau}) \\ \Delta k_i &= h_i \Delta k_p / \Delta y_{\Delta a_1} \\ \Delta k_d &= h_d (\Delta y_{a_2} / \Delta y_{\Delta a_1}) \\ t_d &= (2 \sim 5) t_s \end{aligned} \quad (17)$$

图 6 为自适应 PID 控制结构组态。图 6 中  $e$  为调节器的偏差信号， $u$  为控制信号。利用上文计算的参数修正值自适应调整 PID 参数变化以适应新的模型。其中式(17)中 3 个修正值的权重系数  $h_p$ 、 $h_i$  和  $h_d$  需要根据实际工况试验设置。

### 3 仿真验证

#### 3.1 无干扰的背压系统仿真实验

根据实际工程机组数据，测得  $h_p=0.000\ 65$ ，

$h_i=0.000\ 83$ ， $h_d=0.009\ 00$ ，采样时间  $t_s=0.2\ s$ ，输入信号为幅值为 1 的阶跃信号。基于工况 1 模型的传递函数参数整定，普通 PID 的参数为：

$$\begin{aligned} k &= [k_p, k_i, k_d, t_d] = \\ &[-0.974, -0.128\ 2, -0.769\ 2, 0.4] \end{aligned} \quad (18)$$

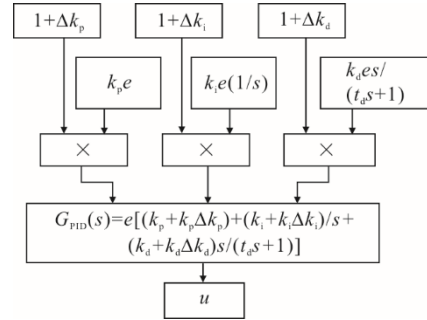


图 6 自适应 PID 控制结构组态  
Fig.6 Configuration diagram of the adaptive PID control structure

图 7 和图 8 为 2 种典型工况模型在不加干扰的情况下的仿真结果。为了凸显频域自适应 PID 的自适应特性，PID 优化参数根据工况 1 模型参数整定。

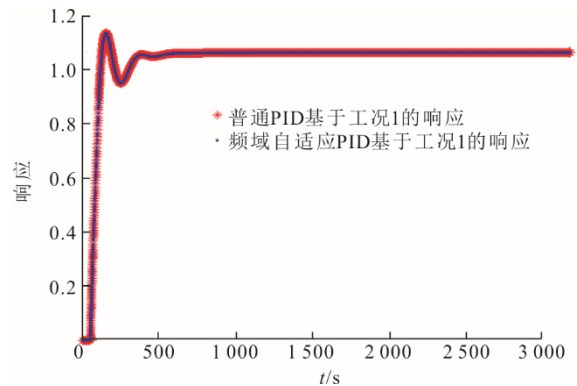


图 7 工况 1 基于 2 种控制器的响应（无干扰）  
Fig.7 The response based on two controllers under condition 1 (no interference)

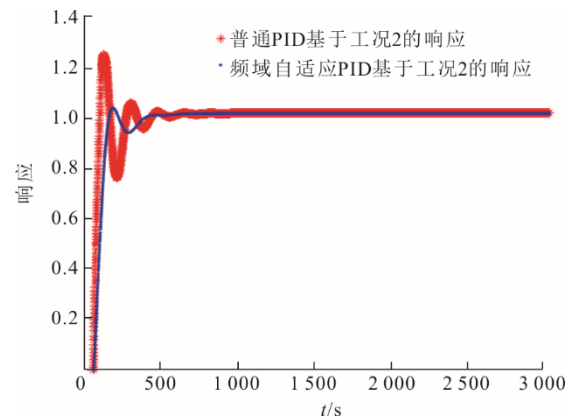


图 8 工况 2 基于 2 种控制器的响应（无干扰）  
Fig.8 The response based on two controllers under condition 2 (no interference)

由图7—图8可以看出,工况1在不加干扰情况下普通PID和频域自适应PID控制效果相同,证明基于工况1设计的普通PID参数在一定程度上达到了最优。但是当运行工况发生变化,由工况1切换到工况2时,由于普通PID的参数无法适应新的工况模型参数,控制效果会产生较大影响,系统会出现震荡,超调量以及调节时间等动态性也变差。而频域自适应PID参数则可以很好跟踪新的工况模型参数进行改变,使得控制器在新的工况点也可以具有较好的控制品质。

### 3.2 带扰动的背压系统仿真实验

在直接空冷机组实际运行中,会存在很多干扰因素,去干扰模型并不能客观地反映直接空冷系统的运行特性<sup>[25]</sup>。为了更符合实际运行工况,在2种典型工况模型中加入相同的负荷干扰形成实验对照组。负荷扰动模型为采集实际机组DCS历史工况点数据辨识出的动态响应模型。

图9—图10分别为2种典型工况加入干扰后的输出响应。

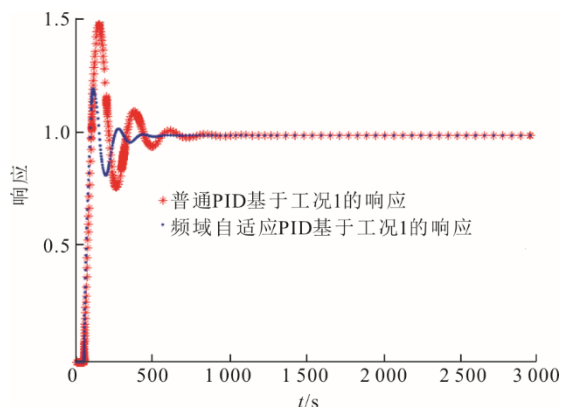


图9 工况1基于2种控制器的响应(带扰动)  
Fig.9 The response based on two controllers under condition 1 (with disturbance)

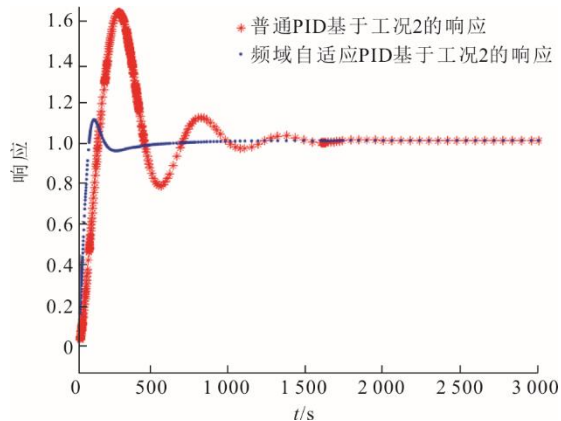


图10 工况2基于2种控制器的响应(带扰动)  
Fig.10 The response based on two controllers under condition 2 (with disturbance)

由图9—图10可见,在加入干扰之后,普通PID的控制效果有所下滑,但是频域自适应PID控制器则体现出较好的抗干扰能力。输出响应证明频域自适应PID控制器的闭环系统输出的超调量和达到稳态的时间都优于普通PID控制器。在2种带干扰的典型工况下,频域自适应PID控制器使得系统的控制品质得到改善,并且在2种带干扰的工况中,频域自适应PID控制器表现出比普通PID更强的抗干扰性以及更快的收敛速度,鲁棒性也得到较大提高。

## 4 结 语

本文基于改进粒子群算法对直接空冷机组背压的多工况模型进行辨识。在辨识模型基础上提出频域自适应PID控制算法,克服了传统PID控制器结构以及参数固定而无法适应多工况运行的缺点。仿真结果表明,在不加扰动时,频域自适应PID控制器对不同工况表现出良好的自适应特性,可以跟随工况变化自适应调整控制器参数达到最优;在加入扰动之后,在原有自适应特性上体现出较好的抗干扰特性,弥补了传统PID控制器抗干扰性能弱的特性,提高了控制系统的鲁棒性,改善控制系统的动态品质指标。

### [参 考 文 献]

- [1] 谢林. 直接空冷技术的发展和应[J]. 电力学报, 2006, 21(2): 186-189.  
XIE Lin. Development and application of the direct air-cooling technology[J]. Journal of Electric Power, 2006, 21(2): 186-189.
- [2] 郭良丹. 利用热网储热技术提高供热机组调峰能力研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1-2.  
GUO Liangdan. Thesis for the master degree study on increasing peak load capacity of heating units by using heat storage technology in heat-supply network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1-2.
- [3] 李晓莉. 供热机组调峰能力预测方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016: 15-17.  
LI Xiaoli. Study on the prediction method about peak regulation capacity of thermal power unit[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2016: 15-17.
- [4] 王硕. 基于吸收式热泵的热电联产机组调峰能力研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018: 31-33.  
WANG Shuo. Research on peak shaving capacity of cogeneration units based on absorption heat pump[D]. Jilin: Northeast Electric University, 2018: 31-33.
- [5] 解春林. 火力发电机组深度调峰下汽轮机系统特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 15-17.  
XIE Chunlin. The turbine system characteristics of research of thermal power units in deep regulation load[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013: 15-17.
- [6] 杜慧文. 直接空冷机组的运行和改进[C]//全国火电大机组(300 MW级)竞赛第36届年会论文集(上册), 2007: 335-342.

- DU Huiwen. Operation and improvement of direct air cooling unit[C]//Proceedings of the 36th Annual Meeting of National Thermal Power Large Unit (300 MW class) Competition (Volume 1), 2007: 335-342.
- [7] 王宏宇, 白焰. 电厂直接空冷系统汽轮机背压的控制方法[J]. 化工自动化及仪表, 2016, 43(6): 584-586.  
WANG Hongyu, BAI Yan. Control over steam turbine back pressure in air-cooled power plant based on predictive control[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2016, 43(6): 584-586.
- [8] 白建云, 曲燕, 李永茂, 等. 基于 GA 的自适应 PID 在直冷机组背压控制的应用[J]. 自动化与仪表, 2018, 33(2): 77-81.  
BAI Jianyun, QU Yan, LI Yongmao, et al. Application of adaptive PID based on GA in back pressure control of direct air cooling units[J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(2): 77-81.
- [9] 王琦, 王岚, 景鑫, 等. 基于改进型 Smith 模糊 PID 的直接空冷背压控制优化[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 527-532.  
WANG Qi, WANG Lan, JING Xin, et al. Optimization of direct air cooling back pressure control based on improved smith fuzzy PID[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2018, 41(3): 527-532.
- [10] 孙坚栋, 舒畅, 苏焯, 等. 基于被控对象阶跃响应模型的 PID 参数整定方法[C]//2021 中国自动化大会论文集, 2021: 783-788.  
SUN Jiandong, SHU Chang, SU Ye, et al. PID parameter tuning method based on step response model of controlled plant[C]//2021 Chinese Automation Conference Proceedings, 2021: 783-788.
- [11] 苗荣霞, 王磊, 杨靖, 等. 基于模糊自适应 PID 的定型机温度智能控制[J]. 纺织科技进展, 2022(3): 27-29.  
MIAO Rongxia, WANG Lei, YANG Jing, et al. Temperature intelligent control of setting machine based on fuzzy adaptive PID[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2022(3): 27-29.
- [12] 张轩. 关于火电厂直接空冷机组运行中的问题分析及改进措施探讨[J]. 电子测试, 2020(14): 89-90.  
ZHANG Xuan. Analysis of problems and improvement measures in operation of direct air cooling unit in thermal power plant[J]. Electronic Test, 2020(14): 89-90.
- [13] 李国庆, 徐威, 王永, 等. 直接空冷机组最佳背压计算及分析[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(4): 360-365.  
LI Guoqing, XU Wei, WANG Yong, et al. Calculation and analysis of optimum back pressure of direct air cooling unit[J]. Heilongjiang Electric Power, 2020, 42(4): 360-365.
- [14] 刘慧超. 直接空冷机组背压的闭环优化控制研究[D]. 背压的闭环优化控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.  
LIU Huichao. Research on closed-loop optimal control of back pressure of direct air cooling unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
- [15] 张珈铭, 田静菲, 吴哲, 等. 直接空冷机组凝汽器动态系统参数辨识[J]. 能源与节能, 2021(11): 89-94.  
ZHANG Jiaming, TIAN Jingfei, WU Zhe, et al. Parameter identification of condenser dynamic system of direct air cooling unit[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(11): 89-94.
- [16] 段慧. 直接空冷机组背压优化与控制分析[J]. 硅谷, 2015, 8(4): 178-182.  
DUAN Hui. Back pressure optimization and control analysis of direct air cooling unit[J]. Silicon Valley, 2015, 8(4): 178-182.
- [17] 曲燕. 直接空冷系统背压建模与控制策略优化研究[D]. 太原: 山西大学, 2019: 1.  
QU Yan. Research on back pressure modeling and control strategy optimization of direct air cooling system[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019: 1.
- [18] 丁锋, 徐玲, 籍艳, 等. 传递函数辨识(24): 线性回归系统的变间隔递阶迭代参数估计[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 1-13.  
DING Feng, XU Ling, JI Yan, et al. Transfer function identification. Part X: interval-varying hierarchical iterative parameter estimation for linear regressive models[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(1): 1-13.
- [19] 徐祝轩. 时变系统最小二乘学习辨识方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020: 1.  
ZHU Xuxuan. Study on least square learning identification method for time-varying system[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020: 1.
- [20] 梁春燕, 钟庆昌, 谢剑英. 基于模型参考的自适应 PID 控制器[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(5): 711-714.  
LIANG Chunyan, ZHONG Qingchang, XIE Jianying. Adaptive PID controller based on model reference[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(5): 711-714.
- [21] 邢建伟, 孔祥波, 白锦川, 等. PID 控制规律及参数整定在实践教学中的应用[J]. 化工管理, 2022(4): 41-44.  
XING Jianwei, KONG Xiangbo, BAI Jinchuan, et al. Application of PID control law and parameter setting in practice teaching[J]. Chemical Management, 2022(4): 41-44.
- [22] 臧春华, 张帅杰, 苏宝玉. 流程工业最优 PID 参数整定[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(6): 95-100.  
ZANG Chunhua, ZHANG Shuaijie, SU Baoyu. Optimal PID parameter tuning for process industry[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2021(6): 95-100.
- [23] 胡迪锋, 周向阳, 刘英. 一种面向无模型系统的 PID 参数整定法[J]. 控制工程, 2020, 27(11): 1962-1969.  
HU Difeng, ZHOU Xiangyang, LIU Ying. A PID parameter tuning method for model-free system[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(11): 1962-1969.
- [24] 田永民, 徐悦梅, 任开源, 等. 基于粒子群优化的电渣炉自适应控制方法[J]. 控制工程, 2020, 27(6): 1043-1048.  
TIAN Yongmin, XU Yuemei, REN Kaiyuan, et al. Adaptive control method of electro slag furnace based on particle swarm optimization[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(6): 1043-1048.
- [25] 杨立军, 杜小泽, 杨勇平, 等. 空冷凝汽器全工况运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 24-28.  
YANG Lijun, DU Xiaozhe, YANG Yongping, et al. Performance analysis of air-cooled condensers at all operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 24-28.

(责任编辑 杜亚勤)