

搜寻者优化算法在锅炉主汽压控制系统中的应用

程加堂, 艾莉, 熊燕
(红河学院 工学院, 云南 蒙自 661199)

摘要: 针对电厂锅炉主汽压的控制问题, 提出了一种基于 SOA(搜寻者算法)优化 PID 控制器参数的控制方法。在该算法中, 以主汽压系统输出的误差绝对值时间积分性能指标作为 SOA 算法的适应度函数, 以得到一组 PID 控制器的优化参数, 并用于锅炉主汽压的控制系统中。仿真结果表明, 与粒子群算法及遗传算法相比, SOA 优化算法具有较佳的寻优能力及优化效率, 进而改善了主汽压控制系统的动态性能。

关键词: 锅炉; 主汽压; 搜寻者优化算法; PID 参数优化
中图分类号: TP272 **文献标识码:** B
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.06.013

引言

锅炉主蒸汽压力(主汽压)不仅是一个影响电厂锅炉安全运行的重要参数,而且还反映了燃烧过程中能量的供求关系^[1]。在目前见诸文献的主汽压系统控制方案中,以应用传统 PID 控制、智能控制或两者相结合的居多。如文献[2]根据锅炉主汽压阶跃响应曲线的几何特性,通过求解曲线所包含的面积来获得 PID 控制器的参数,弥补了传统整定方法的不足;文献[3]针对主汽压控制系统存在非线性、大惯性等特点,采用混合灵敏度控制方法设计了鲁棒控制器。并对所选择的加权函数,给出其奇异值曲线;文献[4]将自抗扰控制(ADRC)技术应用到主汽压控制系统中,取得了较好的控制效果;文献[5]通过将燃料—汽压被控对象的数学模型转化为状态方程后,采用一种基于动态面的控制方法,克服了传统反演方法中的“微分爆炸”现象。

作为一种参数优化问题, PID 控制器设计是在解空间中寻找最优值,从而达到跟踪误差最小的目的。因此,如何进行参数寻优,已成为 PID 控制器

设计和应用的一个热点方向。随着人工智能技术的发展,相关研究人员提出了一系列优化 PID 控制器参数的方法,如遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)以及蚁群算法(ACO)等^[6~9];但是遗传算法需要进行复制、交叉以及变异操作,且易产生早熟收敛现象^[10]。而蚁群算法的编程相对较复杂,通用性不高,限制其应用范围。尽管粒子群算法实现过程简单,但其存在难以搜索到全局最优解等缺陷。

搜寻者优化算法(SOA)是在确定搜索方向和步长的基础上^[11],通过搜寻者位置的更新来实现最优解的搜索,避免了遗传算法所存在的交叉、变异等繁琐操作。SOA 算法主要利用人类所特有的不确定推理行为,较粒子群优化算法更具智能性。因此,本文采用搜寻者算法来优化 PID 控制器参数,随之用于电厂锅炉主汽压的控制系统中。并通过与粒子群算法和遗传算法的优化结果进行对比分析,以验证该方法的有效性。

1 锅炉主汽压控制系统

以某电厂锅炉为例,其主汽压控制系统如图 1 所示。



图 1 锅炉主汽压控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of boiler main steam pressure control system

主汽压调整方案简述为:当系统受到内扰或负荷扰动时,主汽压偏离了设定值,这时通过调节给煤机的控制电流从而改变给煤量,使磨煤机输出的煤

收稿日期: 2015-07-28; 修订日期: 2015-09-11
基金项目: 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2012Y450)
作者简介: 程加堂(1976-),男,河南固始人,红河学院副教授。

粉量随之变化。粗粉经过分离器后,将细度合格的煤粉送入炉膛燃烧,从而实现了主蒸汽压力的调节。

由图 1 可知,当控制电流改变时,中间需要经过给煤机、磨煤机、分离器等多个环节,才能实现主汽压的校正,致使输入与输出之间呈现非线性。通过辨识试验及拟合计算,所获得的控制电流—主汽压控制系统的数学模型为^[12]:

$$W(s) = \frac{P_s(s)}{I_c(s)} = \frac{1.5}{(80s + 1)^3} \quad (1)$$

式中: I_c —控制电流, μA ; P_s —主汽压, MPa 。

$W(s)$ 可等效为 $G(s)$:

$$G(s) = \frac{k_p}{(T_p s + 1)} e^{-\tau s} \quad (2)$$

对式(1)求单位阶跃响应曲线,得出被控对象的等效传递函数为:

$$G(s) = \frac{P_s(s)}{I_c(s)} = \frac{1.5}{289s + 1} e^{-83s} \quad (3)$$

2 搜寻者优化算法

搜寻者优化算法是对人的随机搜索行为进行分析,并以此应用于对优化问题解的搜索。它通过研究人类在随机搜索时所采用的交流、记忆和推理等智能行为,结合搜索和进化思想,以搜寻队伍为种群,以搜寻者位置为优化问题的解。通过模拟人类搜索的经验梯度和不确定推理,在分别确定搜索方向和步长后,完成搜寻者位置的更新,最终实现了解的优化。

将搜寻者算法用于 PID 控制器的参数优化中,主要由以下 5 部分组成。

2.1 参数的编码

令种群 P 中的搜寻者个体数为 M , 每个个体的位置矢量由 PID 控制器的 3 个控制参数组成,即个体位置矢量的维数 $D = 3$ 。该种群可以用一个 $M \times D$ 的矩阵来表示:

$$P(M, D) = \begin{bmatrix} K_p^1 & K_i^1 & K_d^1 \\ K_p^2 & K_i^2 & K_d^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ K_p^M & K_i^M & K_d^M \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 适应度函数的选取

为了获得满意的过渡过程动态特性,采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标

函数。为了防止控制能量过大,在目标函数中加入控制输入的平方项。目标函数表示如下:

$$F = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t)) dt \quad (5)$$

式中: $e(t)$ —系统误差; $u(t)$ —控制器输出; ω_1 和 ω_2 —权重。

为避免系统出现超调,可采用惩罚控制的方式给予实现。即一旦产生超调,将超调量作为目标函数的一项。此时式(5)描述为:

$$\text{if } e(t) < 0, F = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_3 |e(t)|) dt \quad (6)$$

式中: ω_3 —权重,且 $\omega_3 \gg \omega_1$; 通常 $\omega_1 = 0.999$; $\omega_2 = 0.001$; $\omega_3 = 100$ 。

2.3 搜索步长的确定

鉴于 SOA 算法是以模糊系统的逼近能力来模拟人的搜索行为,它通过建立目标函数与搜索步长之间的关系来实现最优解的优化,其模糊规则描述为:如果目标函数值小,则搜索步长短。步长的模糊变量可用 Gaussian 隶属函数 $u_A(x) = e^{-(x-\mu)^2/2\delta^2}$ 表示。经计算, $u_A(3\delta) = 0.0111$ 。对于区间 $[u - 3\delta, \mu + 3\delta]$ 外的输入变量,其隶属度小于 0.0111,故而将该值设定为最小隶属度^[13]。

为了简化计算,可采用线性隶属函数,使隶属度直接与函数值成正比。即在最佳位置有 $u_{\max} = 1$, 最差位置有 $u_{\min} = 0.0111$ 。此时隶属函数可表示为:

$$u_i = \mu_{\max} - (s - I_i) / (s - 1) (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \quad (7)$$

$$u_{ij} = \text{rand}(u_i, 1) \quad (8)$$

式中: I_i —函数值按降序排列后 $x_i(t)$ 的序列编号; u_{ij} —第 j 维目标函数 i 的隶属度, $j = 1, 2, \dots, D$; D —空间维数; 函数 $\text{rand}(u_i, 1)$ 用来生成 $[\mu_i, 1]$ 上的均匀随机数,以模拟搜寻者搜寻行为的随机性。

在获得隶属度 u_{ij} 后,利用式(9)计算步长。

$$\alpha_{ij} = \delta_{ij} \sqrt{-\ln(u_{ij})} \quad (9)$$

式中: α_{ij} —第 j 维搜索空间的搜索步长; δ_{ij} —高斯隶属函数参数,其值按下式确定:

$$\delta_{ij} = \omega \cdot |x_{\min} - x_{\max}| \quad (10)$$

$$\omega = (iter_{\max} - iter) / iter_{\max} \quad (11)$$

式中: x_{\max} 与 x_{\min} —搜寻者所在子种群中具有最大和最小函数值的位置; ω —惯性权值,并从 0.9 线性递减至 0.1; $iter$ 和 $iter_{\max}$ —当前迭代次数及最大

迭代次数。

2.4 搜索方向的确定

搜寻者优化算法是通过评价自身和他人历史位置变化情况所获得的经验梯度来决定搜索方向^[14]，并按照式(12)来确定：

$$d_{ij}(t) = sign(\omega d_{ij,pro} + \varphi_1 d_{ij,ego} + \varphi_2 d_{ij,alt}) \tag{12}$$

式中： $d_{i,ego}$ —利己方向， $d_{i,ego}(t) = p_{i,best} - x_i(t)$ ； $d_{i,alt}$ —利他方向， $d_{i,alt}(t) = g_{i,best} - x_i(t)$ ； $d_{i,pro}$ —预动方向， $d_{i,pro}(t) = x_i(t_1) - x_i(t_2)$ ； $x_i(t_1)$ 和 $x_i(t_2)$ — $\{x_i(t-2), x_i(t-1), x_i(t)\}$ 中的最佳位置和最差位置； $g_{i,best}$ —第*i*个搜寻个体所在邻域的全局最佳位置； $p_{i,best}$ —第*i*个搜寻个体的最佳位置； $sign()$ —符号函数； φ_1 和 φ_2 —区间 $[0, 1]$ 内的常数。

2.5 个体位置的更新

在确定搜索方向和步长后，SOA 算法按照式(13)、式(14)进行个体的位置更新。

$$\Delta x_{ij}(t+1) = \alpha_{ij}(t) d_{ij}(t) \tag{13}$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + \Delta x_{ij}(t+1) \tag{14}$$

2.6 算法实现步骤

SOA 优化 PID 控制器参数的算法实现步骤如下^[15]：

- (1) 初始化搜寻者个体的位置，随机产生一个 $M \times D$ 的位置矩阵；
- (2) 根据式(5)、式(6)计算搜寻者个体的适应度；
- (3) 对每个搜寻者个体的位置与其历史最佳位置进行比较，如果现在位置优，则将现在的位置记录为个体历史最佳位置；
- (4) 对每个搜寻者个体的位置与其种群历史最佳位置进行比较，如果现在位置优，则将现在的位置记录为种群历史最佳位置；
- (5) 根据式(13)、式(14)进行位置更新；
- (6) 如果达到结束条件，则搜索结束，否则返回步骤2。

3 系统仿真

对电厂锅炉主汽压被控对象的传递函数式(3)采用搜寻者优化 PID 方案进行控制系统设计，并与粒子群算法、遗传算法的优化结果进行对比分

析。仿真实验时，SOA 算法的参数设置为：搜寻者规模 20，迭代次数 100，隶属度 $\mu_{max} = 0.95$ 、 $\mu_{min} = 0.0111$ ，惯性权值 $\omega_{max} = 0.9$ 、 $\omega_{min} = 0.1$ ，最小适应值 0.1。PSO 算法的参数设置为：种群规模 30，迭代次数 100，速度因子 $c_1 = c_2 = 2$ ，惯性权重从 0.9 线性递减到 0.4，粒子速度限制在区间 $[-1, 1]$ 内。GA 算法的参数设置为：种群规模 30，迭代次数 100，交叉率 $p_c = 0.9$ ，变异率 $p_m = 0.1 - 0.01 \times [1: 30]/30$ 。在 MATLAB 中运行仿真程序，得出 SOA 优化 PID 控制器参数的过程变化曲线以及文中 3 种算法的适应度函数变化曲线分别如图 2、图 3 所示。表 1 中给出了基于 SOA、PSO 和 GA 3 种算法的 PID 控制器参数优化结果以及最佳适应度函数值的比较。

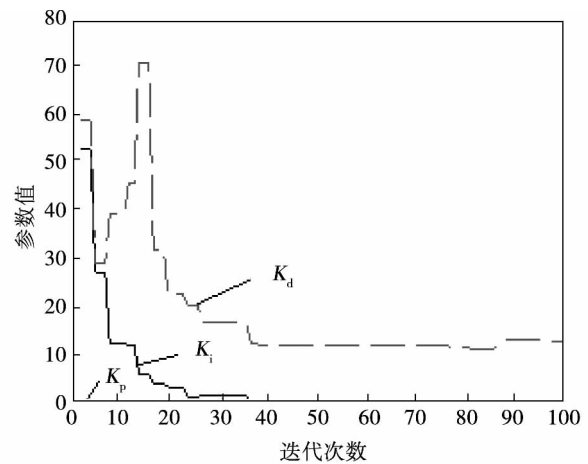


图 2 SOA 优化 PID 参数变化曲线
Fig. 2 Process of SOA optimization PID parameters

表 1 参数比较

Tab. 1 Parameters comparison

算法	参数			适应度值
	K_p	K_i	K_d	
SOA	0.149 3	0	12.994 8	101.994 2
PSO	0.002 1	0	39.20 31	102.002 1
GA	0.320 4	4.669 4	33.925 0	102.011 8

从图 2、图 3 以及表 1 中可以看出，基于 SOA 算法优化 PID 控制器的 3 个参数 K_p 、 K_i 与 K_d 在经过多次迭代后，分别稳定在 0.149 3、0 和 12.994 8；寻优过程中，在迭代 18 次左右时，SOA 算法的适应度值收敛于 101.994 2，小于 PSO 算法的 26 次迭代次

数,且适应度值最小。而 GA 算法的收敛速度最慢,适应度值需要 65 次迭代才收敛于 102.011 8;另外,鉴于本研究采用误差绝对值时间积分性能指标作为适应度函数,适应度值越小意味着误差越小。由此说明,SOA 优化算法具有较快的收敛速度及较佳的收敛精度。

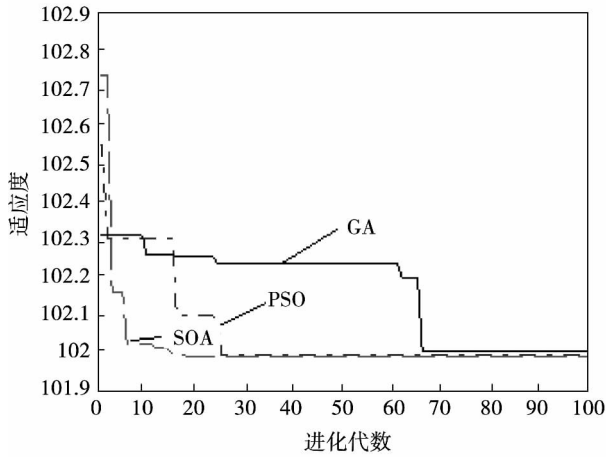


图 3 适应度函数变化曲线

Fig. 3 Fitness function curves

为进一步说明 SOA 算法的优越性,将 SOA、PSO 与 GA 优化 PID 控制器参数的优化结果送入到电厂锅炉主汽压控制程序中,得出 3 种算法的系统输出曲线及误差变化曲线分别如图 4、图 5 所示。在这里,假设主汽压的设定值为单位阶跃信号 r_{in} ,采样时间为 0.01 s。

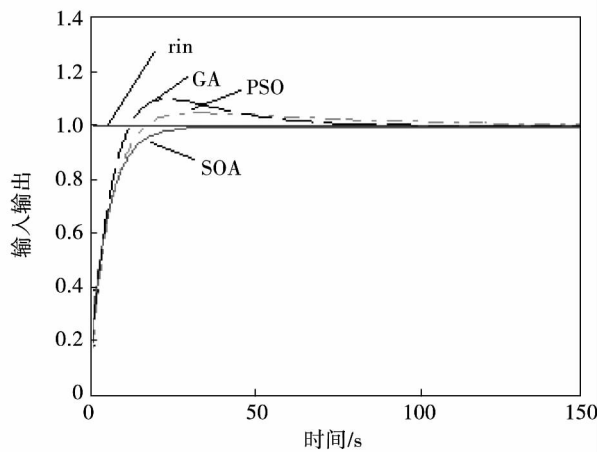


图 4 系统输出响应曲线比较

Fig. 4 Comparison of output response curves

由图 4、图 5 可见,采用基于 SOA 优化算法的控制方案,锅炉主汽压的输出在经过约 45 s 的调节时间后,系统趋向于稳定,调节时间最短且无超调。而 PSO 算法经过 130 s 左右时系统才稳定下来,此时超调量约为 5%,小于 GA 算法 10% 的超调量,从而说明了基于 SOA 算法优化 PID 控制器参数的有效性。

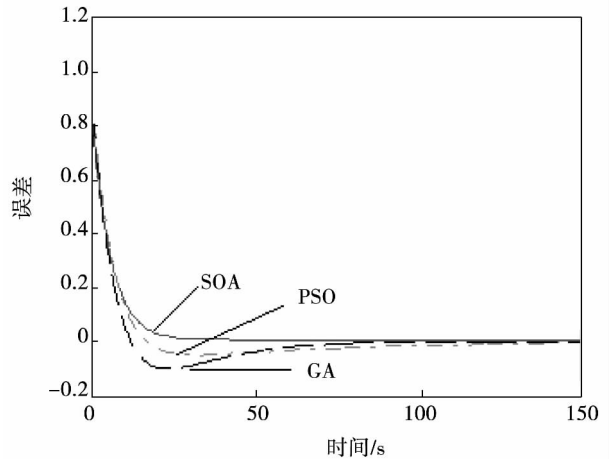


图 5 系统误差变化曲线比较

Fig. 5 Comparison of system error curves

4 结 论

利用 SOA 算法以模糊系统的逼近能力来模拟搜寻者搜索行为的特点,对 PID 控制器参数进行优化,并用于电厂锅炉燃烧系统的主汽压控制中。经仿真研究,该方法不仅解决了 PID 参数整定费时费力、控制效果不佳的问题,而且克服了粒子群算法及遗传算法参数整定时易陷入局部最优等缺陷,为 PID 控制器的参数优化问题提供了一种新的参考思路。

参考文献:

[1] 崔志强,刘吉臻,刘金琨. 基于微分器的燃料-汽压系统直接神经网络控制[J]. 动力工程学报,2012,32(6): 445 - 449,493.
CUI Zhi-qiang, LIU Ji-zhen, LIU Jin-kun. Direct neural network control for a fuel-steam pressure system based on differentiator[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering 2012, 32(6): 445

- 449-493.
- [2] 丁 虎,张健沛. PID 参数整定新方法在锅炉蒸汽压力系统中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 163-168.
DING Hu, ZHANG Jian-pei. A new method for PID parameters tuning and its application in boiler steam pressure system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 163-168.
- [3] 吴艳敏,孙君曼,黄 春,等. 生物质锅炉主汽压系统的 H_{∞} 混合灵敏度控制[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(2): 421-423-426.
WU Yan-min, SUN Jun-man, HUANG Chun, et al. H_{∞} mixed sensitivity control of biomass boiler main steam pressure system[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(2): 421-423-426.
- [4] 郑佳亮,李 昀,马元元. 自抗扰控制在循环流化床锅炉主汽压系统中的应用[J]. 锅炉技术, 2013, 44(3): 28-31.
ZHENG Jia-liang, LI Yun, MA Yuan-yuan. Application of auto disturbance rejection controller in circulating fluidized bed main steam pressure control system[J]. Boiler Technology, 2013, 44(3): 28-31.
- [5] 崔志强,刘吉臻. 燃料-汽压系统锅炉蒸汽压力动态面控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(26): 103-108.
CUI Zhi-qiang, LIU Ji-zhen. Dynamic surface control for boiler steam pressure of fuel-steam pressure system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(26): 103-108.
- [6] 孟安波,殷 豪. 基于多 Agent 的遗传算法在 PID 调速器中的优化[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 128-133.
MENG An-bo, YIN Hao. Multi-agent genetic algorithm for PID governor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 128-133.
- [7] WeiDer Chang, ShunPeng Shin. PID controller design of nonlinear systems using an improved particle swarm optimization approach[J]. Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 5(11): 3632-3639.
- [8] 郭 伟,韩丹丹,徐金成,等. 基于粒子群优化的分数阶 PID 预测函数参数整定[J]. 控制工程, 2014, 21(1): 70-73.
GUO Wei, HAN Dan-dan, XU Jin-cheng, et al. Fractional order PID predictive functional control parameter tuning Based on particle swarm optimization[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(1): 70-73.
- [9] VAROL H A, BINGUL Z. A new PID tuning technique using ant algorithm[C]. Proceedings of American Control Conference, Boston, USA: IEEE, 2004: 2154-2159.
- [10] 寇攀高,周建中,何耀耀,等. 基于菌群-粒子群算法的水轮发电机组 PID 调速器参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 101-106.
KOU Pan-gao, ZHOU Jian-zhong, HE Yao-yao, et al. Optimal PID governor tuning of hydraulic turbine generators with bacterial foraging particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 101-106.
- [11] 李 奇,陈维荣,戴朝华,等. 基于搜寻者优化算法的质子交换膜燃料电池模型优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 119-124.
LI Qi, CHEN Wei-rong, DAI Chao-hua, et al. Proton exchange membrane fuel cell model optimization based on seeker optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 119-124.
- [12] 王 杰,王 栓,王志鹏,等. 基于 SPEA2 的主蒸汽压力鲁棒控制器设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(2): 65-68.
WANG Jie, WANG Shuan, WANG Zhi-peng, et al. Robust controller design for main steam pressure based on SPEA2[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2008, 29(2): 65-68.
- [13] 杨道辉,马光文,徐瑞林. 多市场下大型流域梯级水电站群电能优化配置研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 17-23.
YANG Dao-hui, MA Guang-wen, XU Rui-lin. Study on optimal power allocation of huge cascaded plants under multi-markets[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 17-23.
- [14] 戴朝华,陈维荣,朱云芳,等. IIR 数字滤波器设计的搜寻者优化算法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 871-876.
DAI Chao-hua, CHEN Wei-rong, ZHU Yun-fang, et al. IIR digital filter design via seeker optimization algorithm[J]. Journal of Southeast Jiaotong University, 2009, 44(6): 871-876.
- [15] 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 349-352.
YU Sheng-wei. Case analysis and application of MATLAB algorithm optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 349-352.

(刘 瑶 编辑)

for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6). -66~73

To investigate the effect of NO_x inhomogeneity caused by flow and combustion in the circulating fluidized bed on SNCR denitration efficiency, this article establishes a mathematical model of dense gas-solid flow coupled with chemical reaction, to comprehensively simulate the gas-solid flow, combustion reaction, NO_x formation and denitration reaction process in the CFB boiler, aiming at the processes of furnace combustion, ammonia spraying and SNCR denitration reaction. And it focuses on the influence of different ammonia injections on the denitration efficiency and the rate of ammonia escape with the non-uniform entrance. Results show that the NO_x flux distributes inhomogeneously at outlet of horizontal flue after combustion. The denitration efficiency can be significantly increased by changing the structure and operation parameters of ammonia injection points. The efficiency reaches above 68% when using the first column to vertically spray ammonia and the mole ratio of NH_3/NO_x is 1.2. **Key words:** circulating fluidized bed, cyclone separator, selective non-catalytic reduction, denitration, numerical simulation

分布式能源站三联供系统优化运行策略研究 = **Optimization Strategies for the Operation of CCHP System in Distributed Energy Station** [刊, 汉] QIAN Hong, YANG Ming, CHEN Dan, CUI Cheng-gang (Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6). -74~79

The optimal operation strategy for CCHP system in distributed energy station is the key to guarantee its excellent operating. Based on a CCHP system combined with energy storage system, this paper established a model targeting the optimal operation strategy for overall output in a scheduling cycle. Improved genetic algorithms were utilized to solve the model for the best operation strategy so that energy station is operated at optimum efficiencies under different load conditions. **Key words:** CCHP, load demand at every time interval, Energy Storage, unit operation mode, optimal operation strategy

搜寻者优化算法在锅炉主汽压控制系统中的应用 = **Application of Seeker Optimization Algorithm in the Main Steam Pressure Control System for Boiler** [刊, 汉] CHENG Jia-tang, AI Li, XIONG Yan (The Engineering College of Honghe University, Mengzi, Yunnan, China, Post Code: 661199) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6). -80~84

The main stream pressure is an important parameter reflecting the state of boiler operation. For the main stream pressure control system, a method for optimizing the parameters of PID controller based on seeker optimization algorithm (SOA) was proposed. In this algorithm, the time integral of absolute error performance index is taken as the fitness function, and then a set of optimized parameters is obtained. Simulation results show that SOA has better searching

capability and optimization efficiency compared to particle swarm optimization and genetic algorithms ,and can improve the dynamic performance of main stream pressure control system. **Key words:** boiler ,main stream pressure , seeker optimization algorithm (SOA) ,PID parameter optimization

转速对三分仓回转式空气预热器热力性能的影响 = **Influence of Rotational Speed on Thermal Performance of Tri-sector Rotary Air Preheaters Based on Finite Difference Method** [刊 ,汉] CHEN Xun ,DUAN Xue-nong ,YANG Yi ,WANG Dun-dun (State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute ,Changsha ,Hunan China ,Post Code: 410007) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 ,31(6) . - 85 ~91

Based on finite difference method ,the tri-sector rotary regenerative air-preheater was spread along the rotor's circular side and mesh between the matrix elements and the fluids was generated. Then the matrix and fluid temperature fields were obtained according to the energy balance equation and using an improved Gauss-Sidel arithmetic. For a 600MW unit tri-sector rotary regenerative air-preheater a detailed analysis was carried out for the temperature field distributions of the fluid and metal and ammonium bisulfate (ABS) deposition area with different the rotational speeds. The results showed that ,1) The nonlinear characteristics of matrix temperature distribution along with the rotation angle increases while the rotational speed decreases ,which can be described by the unsteady heat transfer correction factor Π ,and for each sector the value of factor Π is different. 2) There exist relatively stable balance positions during both heating and cooling periods ,which are the intersection points of matrix temperature profile curves with different rotational speeds. 3) The effect on average outlet temperatures of primary and secondary air channels from rotor rotational speed depends on the rotor rotation direction and the sector angle division. **Key words:** tri-sector rotary air preheater ,rotational speed ,thermal performance ,finite difference method ,ammonium bisulfate ,unsteady heat transfer

混流式核主泵中压力脉动特性分析 = **The Pressure Pulsation of Mixed-flow Reactor Coolant Pump** [刊 ,汉] LI Jing-yue ,LAI Xi-de ,ZHANG Xiang ,LUO Li (School of Energy and Power Engineering ,Xihua University ,Chengdu ,Sichuan ,China ,Post Code: 610039) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 ,31(6) . - 92 ~97

The reactor coolant pump is one of the main equipments and pressure boundaries of the reactor coolant system ,and the requirements of safety and reliability are extremely high. And the complex pressure pulsation can lead to fatigue damage of flow channel. In order to improve the safety and reliability of reactor coolant pump ,the CFD method was employed to simulate numerically the transient flow field. The impeller and diffuser were taken into account ,and the characteristics of pressure pulsation in time were analyzed. The frequency domain characteristics of pressure fluctuation were obtained by using the method of FFT. The results show that pressure fluctuation at the design working