

基于智能积分的电站锅炉主汽温 PID 控制

李晶晶¹, 赵瑞菊², 张晓东¹, 闫水保¹

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 分析了 PID 控制算法与热工被控对象数学模型的关系, 指出误差及导数结果中包含关于热工对象的丰富信息, 加强对这些信息的分析可以提高 PID 控制器的性能。闭环系统在阶跃扰动下的动态过程可分为两个阶段: 第一个阶段是处于远离热力学平衡态的非平衡定态。在较长的时间内围绕其某个固有频率维持高阶振荡。第二个阶段是闭环系统进入了线性非平衡热力学范围, PID 调节器退化为积分调节器。以系统自由能耗散率为参数, 提出了基于智能积分的 PID 控制算法, 能动态改变比例增益和积分作用, 有效地提高系统快速性和稳定性。通过某锅炉主汽温对象的仿真实验表明, 其性能优于常规 PID 控制器。

关键词: 热工自动控制; 智能积分; PID 控制; 锅炉; 主汽温

中图分类号: TK121 文献标识码: A

引 言

在火电站中, 由于提高锅炉运行的安全性和经济性的需要, 要求对主汽温实施精确控制, 比如要求暂态偏差不能超过 $\pm 8^\circ\text{C}$, 稳态偏差不能超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 等。主汽温热工对象惯性大、阶次高, 且模型参数随工况变化大, 常规 PID (比例积分微分) 控制方法难以取得理想的控制效果, 需要采用一些先进的控制方法, 比如变参数控制、模糊控制、预测控制、神经网络、智能控制方法等^[1-8]。但是, 由于这些先进控制方法的复杂性, 往往难于直接应用于现场 DCS (分散控制系统) 中, 难于发挥实际效果。所以仍有必要研究基于 PID 控制思想的主汽温控制算法。

PID 控制算法具有组态方便和易于应用的特点, 若能根据控制系统状态变量的变化及时灵活的设定比例、微分和积分作用, PID 控制算法仍可以发挥很好的控制效果。问题是根据何种参数以及如何来设定这三种控制作用。本研究试图通过引入新的状态变量, 根据新变量动态设定比例、微分和积分作用, 提出基于智能积分的控制算法, 并将其应用于电站主汽温控制中, 从而提高锅炉运行的安全性和经济性。

1 热工对象数学模型与 PID 控制器数学模型的关系

由于在控制系统动态过程中需要改变 PID 中的参数, 控制系统表现的行为已经具有非线性特征, 这时已无法使用传递函数理论, 所以本研究对热工对象的数学模型采用微分方程表示为:

$$a_n y^{(n)}(t) + \dots + a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = u(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $\ddot{y}(t)$ 、 $y^{(n)}(t)$ —被调节量、被调节量一阶导数、二阶导数和高阶导数; $u(t)$ —调节量; $\varepsilon(t)$ —扰动; a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_n —模型各阶系数。

PID 控制器数学模型可用微分方程表示为:

$$b_2 \ddot{e}(t) + b_1 \dot{e}(t) + b_0 e(t) = \dot{u}(t) \quad (2)$$

式中: $e(t) = r(t) - y(t)$ 为误差; $\dot{e}(t)$ 、 $\ddot{e}(t)$ —误差的一阶导数和二阶导数; b_0 、 b_1 、 b_2 —调节器系数; $\dot{u}(t)$ —调节量一阶导数; $r(t)$ —设定值。

通常设定值变化很慢, 可长时间不变, 故, 式 (1) 可改写为:

$$a_n e^{(n)}(t) + \dots + a_2 \ddot{e}(t) + a_1 \dot{e}(t) + a_0 e(t) = -u(t) - \varepsilon(t) \quad (3)$$

由于热工对象具有低通滤波特性, 对于在式 (3) 中, 误差的高阶导数项对方程的贡献较小, 阶次越高的项影响越小, 随时间衰减越快。故在动态过程的大部分时间内, 式 (3) 可改写为:

$$a_2 \ddot{e}(t) + a_1 \dot{e}(t) + a_0 e(t) = -u(t) + \varepsilon_1(t) \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_1(t)$ —闭环系统的综合扰动。

在式 (2) 和式 (4) 中令 $a_0 = Tb_0$, $a_1 = Tb_1$, $a_2 = Tb_2$, 其中 T 为积分时间常数, 则有:

$$T \dot{u}(t) + u(t) = \varepsilon_1(t) \quad (5)$$

根据式 (5) 可以计算出消除扰动 $\varepsilon_1(t)$ 所需要的控制量 $u(t)$ 。若 $\varepsilon_1(t)$ 中低频成份占主导地位, 则 $u(t)$ 能够很好的跟踪扰动 $\varepsilon_1(t)$ 并消除它。只要能正确测定误差及其一阶、二阶导数, 并且按上述方法设定控制器参数, 就能保证控制系统的稳定性。

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-11-24

作者简介: 李晶晶 (1987-), 女, 河南孟州市人, 郑州大学硕士研究生。

调整参数 T 可以改变调节的快速性及进行必要的滤波。这就是 PID 控制算法的理论根据。

2 比例、微分和积分作用分析

对式 (2) 进行对时间的积分并整理为:

$$[b_2 \dot{e}(t)/e(t) + b_1]e(t) = u(t) - b_0 \int e(t) dt \quad (6)$$

从式 (6) 可以看出, PID 控制器的控制作用可分为两个方面: 一方面等式左边是用当前时刻误差及一阶导数预测剩余的控制量, 而微分的作用等效于动态改变比例增益; 另一方面等式右边积分项的作用是向新平衡点移动控制量。

若将式 (6) 的控制思想进行拓展, 则对于一般的非线性热工对象, 其控制算法可归纳为:

$$p(e, \dot{e}, \dots) e(t) = u(t) - q(e, \dot{e}, \dots) \int e(t) dt \quad (7)$$

式 (7) 从形式上看作是一个 PI 控制器。其中 $p(e, \dot{e}, \dots)$ 是关于比例增益的算法; $q(e, \dot{e}, \dots)$ 是关于积分系数的算法。它们分别是误差及其导数的函数。为了确定这两个函数, 需要进行新控制变量的筛选。

3 阶跃变化下闭环系统动态过渡过程分析

为了筛选新控制系统变量, 先来研究阶跃变化下闭环系统的动态过程。对于像锅炉主汽温这样的热工对象, 其闭环系统存在多个自振频率, 当阶跃变化加到其闭环系统的瞬时, 相当于外部激振源的频率包含 $[0, +\infty)$ 范围的所有成份, 此后极短的时间间隔内, 与自振频率不一致的频率成份衰减完毕, 与自振频率一致的频率成份衰减得较慢, 仍存在着。

接下来的过程是与自振频率一致的频率成份的衰减过程, 较高自激振动与较低的自激振动相比需要更多的能量才能维持, 所以随着系统非平衡推动力的减少, 高阶的自激振动迅速停止, 只剩下较低阶的自激振动可以维持相对较长的时间。

振幅为了能更清楚地说明阶跃变化对闭环热工过程的影响, 不失一般性, 以某过热汽温热工对象的闭环控制系统为例, 如图 1 所示。其中, θ_1 、 θ_2 分别为过热器入口温度和出口温度 ($^{\circ}\text{C}$); $G_o(s)$ 为过热器传递函数。

误差及其一阶、二阶导数变化情况如图 2 所示。在图 2 中已对纵坐标进行了变换, 从而使这三个参数能在同一图中表示出来 (以下同), 便于比较随时间变化的特征。

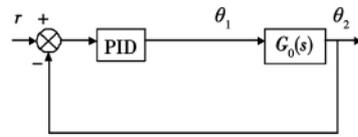


图 1 控制系统回路方框图

Fig. 1 Block Diagram of the Loop of the Control System

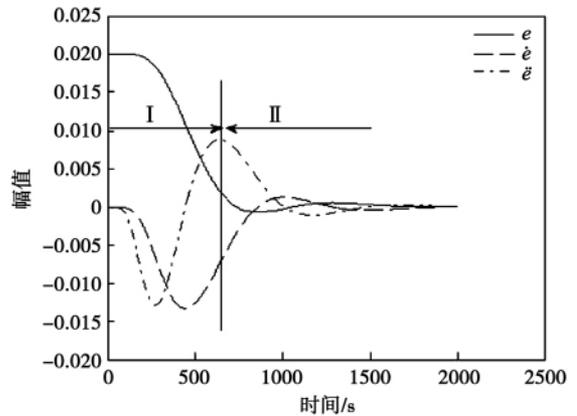


图 2 闭环系统误差及其导数的变化

Fig. 2 Change of the errors and derivatives of a closed loop system

从图 2 可以看出: 虽然误差的变化是不振荡的, 但误差的一、二阶导数的变化却在相当长时间内是振荡的。因此, 可将动态过程分为两个区域: 在 I 区部分, 曲线形状可用如下函数形式近似表示为:

$$\ddot{e} = -a \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$\dot{e} = b [\cos(\omega t) - 1] \quad (9)$$

$$e = c \sin(\omega t) - bt + f \quad (10)$$

由式 (8) 可以近似反推为:

$$e^{(4)} + d^2 \dot{e} = 0 \quad (11)$$

在该区域内, 误差的高阶导数是振荡的。当闭环系统受到外界阶跃变化的激励时, 其原有的定态稳定条件被破坏, 相当于瞬间将自由能量加入到了系统中, 系统在非平衡推动力的作用下将向新的定态运动。在动态过程的 I 区内, 由阶跃变化引入系统的自由能量 (由误差及其导数来表征) 大于系统耗散能量, 占统治地位, 所以系统表现为高阶自激振动, 系统处于远离平衡态的非线性热力学范围。

在 II 区, 误差及其一阶、二阶导数的变化曲线的形状可用如下函数形式近似表示:

$$e = m [1 - \exp(-t/T)] \quad (12)$$

$$\dot{e} = -n [1 - \exp(-t/T)] \quad (13)$$

$$\ddot{e} = p [1 - \exp(-t/T)] \quad (14)$$

根据式(12) ~ 式(14)反推误差及其导数之间的关系为:

$$\dot{e} = -\frac{n}{m}e \tag{15}$$

$$\ddot{e} = -\frac{n}{p}\dot{e} \tag{16}$$

在该区域内,误差及其导数是按指数规律衰减的。在该区域内,系统的自由能已无法维持高阶自激振动,这时系统将跨越临界点,进入线性非平衡态热力学范围,最终在新的定态稳定下来。在该区内PID调节器退化为积分调节器。只要系统进入了线性非平衡热力学范围,根据热力学原理,在线性非平衡热力学内,不会出现稳定的有序结构,系统必定会在定态稳定下来。控制系统在定态具有最小的自由能量。

从上面的分析可知:尽管误差的衰减是不振荡的,但其高阶导数却表现为较复杂的时空行为,其中包含了关于系统动力特性的信息,若能将这此信息用于控制系统的算法设计中,则可提高控制算法的适应性。判定闭环控制系统是否稳定条件是:能否将闭环系统从非线性热力学范围引导到线性非平衡热力学范围,并不需要等到闭环系统误差变为零时再来判断,这就为设计新的控制算法提供了方法论。

4 新控制变量的选择

由于非线性因素的存在,控制量与误差的关系不再满足式(3),应写为更为一般的形式,即:

$$u(t) = f(e, \dot{e}, \ddot{e}, \dots, e^{(n)}) \tag{17}$$

理论上讲,误差及各阶导数的任意组合可给出无限多个状态变量。由于热工对象具有低通滤波器特性,所以本研究从低阶组合中,对新控制变量进行筛选。考虑了 $\lambda = \frac{d(\dot{e}\ddot{e})}{dt}$ 、 $\dot{e}\ddot{e}$ 、 \ddot{e}^3 个参量,如图3所示。

从图中可以看出为3个参数的变化周期大致相同,反映出了闭环系统某种固有的振动特征,均可用为选择新参数基础。

在控制系统中,误差 e 具有热力学势差的作用,是推动控制系统变化的原因,可看作是广义的热力学势,而误差的导数 \dot{e} 即在误差势差作用下的变化率,可看作是广义的热力学流。误差与其导数的积 $-e\dot{e}$ 可看作是广义的系统自由能耗散率。由于 $-e\dot{e}$ 具有明确的物理意义,且比高阶导数有较强的抗干扰能力,所以本研究选择 λ 作为新参考变量。

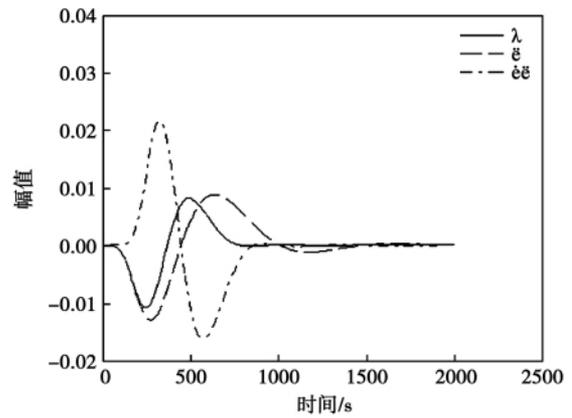


图3 误差高阶导数的变化

Fig. 3 Change of high order derivatives of the errors

新参考变量误差 e 、 $\dot{e}\ddot{e}$ 与 λ 随时间变化的关系如图4所示。

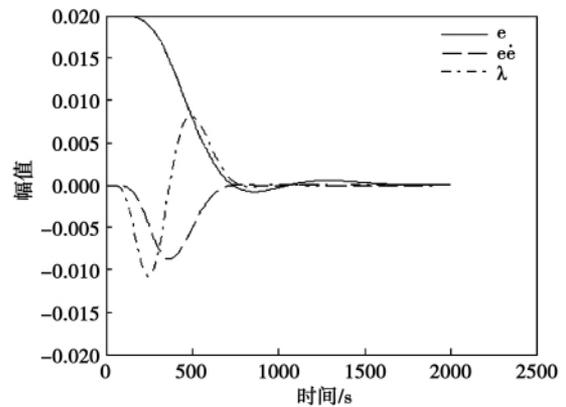


图4 误差 e 、 $\dot{e}\ddot{e}$ 与 λ 的变化

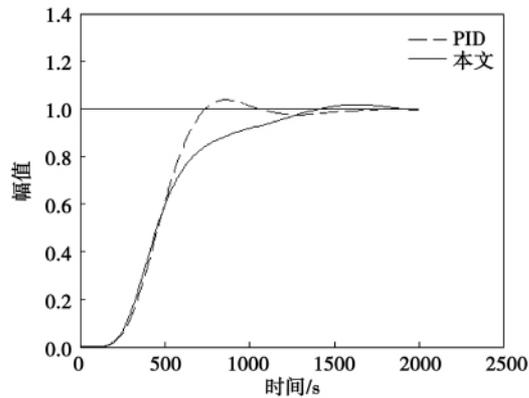
Fig. 4 Change of the error e 、 $\dot{e}\ddot{e}$ and λ

5 新控制算法设计

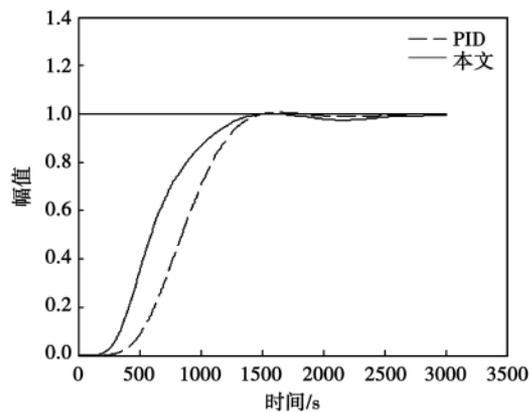
当自由能耗散率增加时,表明有更多的自由能量加入到系统中来,系统有远离平衡态的趋势,系统的变化方向将背离平衡点,这时不应投入积分作用;当自由能耗散率减少时,表明系统的动态过程主要靠消耗已有的自由能来维持,系统的变化趋势将指向平衡点,此时投入积分作用,记忆这种变化趋势。故将控制算法设计如下:

(1) 当 $\lambda \geq 0$ 投积分作用,否则不投积分作用。

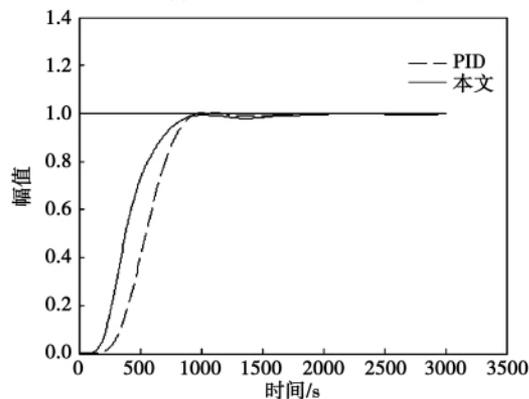
(2) 比例增益为: $k(e) [1 + g(\lambda)]$ $k(e)$ 是根据误差的允许偏差及控制量的允许变化范围,确定一个静态设计特性线,而动态部分由 $g(\lambda)$ 确定。当 $\lambda \geq 0$, $g(\lambda) = \delta$; 否则 $g(\lambda) = -\delta$ 。 δ 是一个小于1的正数,可根据具体情况设定。



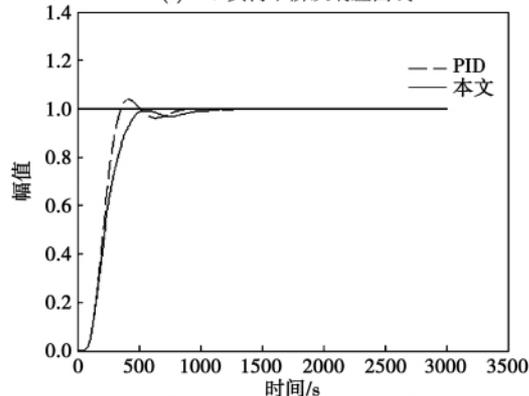
(a) 37%负荷下阶跃响应曲线



(b) 50%负荷下阶跃响应曲线



(c) 75%负荷下阶跃响应曲线



(d) 100%负荷下阶跃响应曲线

图 5 智能积分控制与常规 PID 控制的比较

Fig. 5 Comparison of the intelligent integration control with the conventional PID control

6 应用举例

根据某超临界 600 WM 机组主汽温对象在典型工况下的动态特性,对算法进行了 MATLAB 仿真实验。该锅炉过热器在典型工况下过热器出口温度对入口温度的动态特性如表 1 所示^[6]。

表 1 典型负荷下主汽温对过热器入口温度的动态特性

Tab. 1 Dynamic characteristics of the main steam temperature relative to the temperature at the inlet of the superheater at a typical load

| 负荷率 $x/\%$ | 传递函数 |
|------------|-------------------------------|
| 37 | $\frac{1.048}{(56.6s + 1)^8}$ |
| 50 | $\frac{1.119}{(42.1s + 1)^7}$ |
| 75 | $\frac{1.202}{(27.1s + 1)^7}$ |
| 100 | $\frac{1.276}{(18.4s + 1)^6}$ |

仿真结果如图 5 所示。在图 5 中,虚线为采用常规 PID 调节器调节时的曲线,实线为采用智能积分调节器调节时的曲线。

从图 5 中可以看出:智能积分控制算法在快速性和稳定性方面都优于 PID 算法。需要指出:智能算法对积分时间的选择不敏感,最佳积分时间常数与高阶振荡的固有周期有关,能够根据闭环系统的误差高阶导数的变化规律确定。智能积分控制算法能兼顾快速性和无过调这对矛盾,符合锅炉对主汽温对象的控制要求。

7 结 论

闭环系统在阶跃扰动下的动态过程分为两个阶段:第一个阶段是处于远离热力学平衡态的非平衡定态,在较长时间内维持高阶振荡,其振荡频率是闭环系统的某个固有频率;第二个阶段是闭环系统进入了线性非平衡热力学范围,此时系统趋于稳定,PID 调节器退化为积分调节器。

以系统自由能耗散率为参数,提出的基于智能积分的 PID 控制算法,能根据闭环系统的误差高阶导数的变化规律确定最佳积分时间常数。能较好地根据闭环系统的动态过程特征信息,动态控制比例增益和积分作用,有效地处理控制系统快速性和稳定性的关系,通过某锅炉主汽温对象的仿真实验表

明其性能优于常规 PID 控制器。对提高锅炉运行的安全性和经济性具有重要意义。

参考文献:

[1] 陈来九. 热工过程自动调节原理及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
CHEN Lai-jiu. Thermotechnical process automatic regulation theory and its applications[M]. Beijing: Water Conservation and Hydropower Press, 1982.

[2] 罗万金. 电厂热工过程自动调节[M]. 北京: 中国电力出版社, 1991.
LUO Wan-jin. Power plant thermotechnical process automatic regulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1991.

[3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
LIU Jin-kun. Advanced PID control and MATLAB-based simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2004.

[4] 刘志远, 吕剑虹, 陈来九. 智能 PID 控制器在电厂热工过程控制中的应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 128 - 134.
LIU Zhi-yuan, LU Jian-hong, CHEN Lai-jiu. Prospects of the application of intelligent PID controllers in thermotechnical process control of power plants[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(8): 128 -

134.

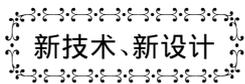
[5] 吕剑虹, 陈建勤, 刘志远, 等. 基于模糊规则的热工过程非线性模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 132 - 137.
LU Jian-hong, CHEN Jian-qin, LIU Zhi-yuan, et al. Study of fuzzy rule-based nonlinear models for thermotechnical processes[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(11): 132 - 137.

[6] 彭道刚, 杨平, 王志萍, 等. 火电厂主汽温控制系统的免疫 PID 串级控制[J]. 动力工程, 2005, 25(2): 234 - 238.
PENG Dao-gang, YANG Ping, WANG Zhi-ping, et al. Immune PID cascade control of a main steam temperature control system in a coal-fired power plant[J]. Power Engineering, 2005, 25(2): 234 - 238.

[7] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
ZHANG Chen-yue. Dynamic characteristics and mathematical model of a boiler[M]. Beijing: Water Conservation and Hydropower Press, 1990.

[8] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
LI Shi-yong. Fuzzy control, neurocontrol and intelligent cybernetics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996.

(陈 滨 编辑)



越南服役 Gepard 级轻型护卫舰

据《Warship Technology》2011 年 5 月刊报道, 越南从俄罗斯购买的两艘 11661 型 Gepard 级轻型护卫舰中的第一艘舰 Dinh Tien Hoang 已于 2011 年 3 月 5 日供给越南海军服役。

该舰排水量 2100 t, 总长度 102.2 m, 宽约 14 m, 吃水 3.7 m, 舰员 84 人, 其中包括 8 名空军人员。

俄罗斯海军 11661K 型护卫舰是什对越南海军一些特定要求设计的。其特点是隐身的上层建筑、优化配置的直升机平台、更多先进的武器和船体构架。

CODOG(柴燃联合)装置总输出功率为 29.8 MW, 2 台乌克兰曙光-机械设计和科学生产联合体的 DO-90 可倒车燃气轮机(每台额定输出功率 11.9 MW)和 1 台 Kolomna 86B 柴油机(额定输出功率 6 MW)驱动两个固定螺距螺旋桨。

柴油机横向连接到两个燃气轮机齿轮箱, 以便得到更大的运行灵活性。柴油机可以驱动双轴用于巡航。在要求风速加速时, 1 台燃气轮机可以驱动双轴或 2 台燃气轮机驱动双轴。

燃气轮机排气口装有红外线抑制装置, 并且排气用海水冷却并在吃水线附近排出。

该舰的最大航速约为 29 节, 利用柴油机的巡航速度可达 21 节。

该型舰将取代上世纪 60 年代制造的别佳 2/3 轻型护卫舰。

(吉桂明 摘译)

used in tangentially-fired boilers. **Key words:** utility boiler on-line monitoring system acoustic wave method , aerodynamic field , industrial application

基于智能积分的电站锅炉主汽温 PID 控制 = Main Steam Temperature PID Control of an Utility Boiler Based on the Intelligent Integration [刊 汉] LI Jing-jing , ZHANG Xiao-dong , YAN Shui-bao (College of Chemical Industry and Energy Source , Zhengzhou University , Zhengzhou , China , Post Code: 450001) , ZHAO Rui-ju (Henan Electric Power Experiment Research Institute , Zhengzhou , China , Post Code: 450052) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(1) . -86 ~90

Analyzed was the relationship between the PID control algorithm and the mathematical model for thermotechnical controlled objects and pointed out were that abundant information about the thermotechnical objects is contained in the errors and derivative results. To strengthen the analysis of the foregoing information can enhance the performance of the PID controllers. The transient process of a closed loop system under a stepped disturbance can be divided into two stages: the first stage is a non-balanced stationary state away from the balance state in thermodynamics. In a relatively long time period ,the CFB boiler , flying ash , nitrogen isothermal adsorption , pore structure intrinsic frequency will maintain its high order oscillation. The second stage is that the closed loop system enters into its linear non-balanced thermodynamic range. In such a case ,the PID controllers will be degraded to integral ones. With the free energy dissipation rate of the system serving as a parameter , a PID control algorithm was proposed based on an intelligent integration. The algorithm can transiently change the proportional gain and integration action ,and effectively enhance the speediness and stability of the system. A simulation test of the main steam object of a boiler indicates that the performance of the control algorithm is superior to that of conventional PID controllers. **Key words:** thermotechnical automatic control , intelligent integration , PID control , boiler , main steam temperature

锅炉水冷壁管在含 SO_4^{2-} 溶液中的点蚀特性研究 = Study of the Pitting Characteristics of Boiler Water-wall Tube in SO_4^{2-} -contained Solution [刊 汉] XIONG Shu-hua , ZHU Zhi-ping , JING Ling-ling , ZHANG Hui (College of Chemical and Biological Engineering , Changsha University of Science and Technology , Changsha , China , Post Code: 410076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(1) . -91 ~95

To study the pitting characteristics of waterwall tube material 15CrMo in SO_4^{2-} -contained solution , through a normal temperature electrochemical test and a high temperature plate-hanging test , an analysis was performed of the normal temperature performance and high temperature corrosion characteristics of the material in question. By using a lens reflection-based metallogenic microscope SEM ,EDS and XRD ,the morphology and constituents of the surface of the test piece were represented and analyzed. The research results show that at a normal temperature ,the oxidation