

# 自抗扰控制器对一类热工对象的控制性能研究

管志敏

(华北电力大学 动力工程系 河北 保定 071003)

摘 要: 自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)在较广泛的一大类不确定系统和系统中存在强干扰的情况下表现出很强的适应性和鲁棒性。基于 ADRC 的控制能力,研究了用二阶 ADRC 来控制一类热工高阶大延迟对象的问题。理论分析和数值仿真结果表明,二阶 ADRC 不但能够有效控制该类对象,而且控制效果也很理想,对其外扰和模型的不确定因素具有较好的适应性和鲁棒性,在一定程度上不存在所谓的模型失配问题,充分体现出非线性控制器的优点,具有一定的工程实用价值。

关 键 词: 自抗扰控制器(ADRC); 非线性; 不确定系统; 鲁棒性; 高阶大延迟系统

中图分类号: TK229; TP273 文献标识码: A

## 引 言

高阶大滞后对象的控制一直是困扰自动控制和计算机应用领域的一大难题,而这类对象又广泛存在于石油、化工、冶金等工业生产过程中,所以对该问题的研究具有重大的实际意义。

常规 PID 控制大量应用于工业过程控制,但它并不能完全适应不同场合下的工况要求。近年来随着模糊控制、智能控制、神经网络控制研究的不断深入,有些学者将它们与 Smith 预估控制、PID 控制及预测控制等相结合<sup>[1~2]</sup>,提出了针对不确定大滞后系统的新的控制方法。虽然有些控制方案效果不错,但系统的复杂程度和调试难度也随之增加,设计简单、快速、可靠的控制器,仍是一个重大课题。

自抗扰控制是近年提出的一种非线性控制律。该技术采用简单的非线性元件和算法,对非线性系统直接进行控制。据此设计的自抗扰控制器(ADRC)不依赖于被控对象精确的数学模型<sup>[3]</sup>,算法简单,已在大量的数值仿真和实物实验中取得了理想的控制效果,显示出了极大的应用前景。

文献[4]讨论的是利用高阶自抗扰控制器来控制低阶大时滞系统,为该类系统的控制提出了一个

新的途径,本研究更进一步研究用二阶 ADRC 控制二阶或高阶大时滞系统。首先介绍二阶 ADRC 结构,然后论述用二阶 ADRC 来控制高阶时滞对象,给出时滞对象的数值仿真实例。控制对象选择具有代表性的超临界主汽温系统和循环流化床床温控制系统,火电厂的热工对象基本上都是此类高阶大时滞系统。

## 1 二阶自抗扰控制器

自抗扰控制器是基于跟踪微分器(TD)安排过渡过程,扩张状态观测器(ESO)估计系统状态、模型和外扰,由非线性反馈控制律(NLSEF)来给定控制信号的一种非线性控制器。由于理论上对三阶及更高阶自抗扰控制器的研究不是很成熟,一般采用一阶或者二阶的自抗扰控制器。

二阶 ADRC 的结构如图 1 所示。

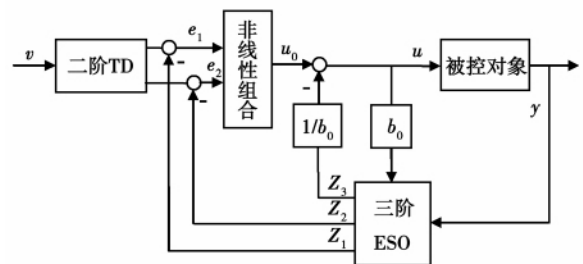


图 1 二阶自抗扰控制器的结构图

它可用于控制如下一类比较广泛的不确定对象:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, \dot{x}, n(t)) + bu(t) \\ y = x(t) \end{cases}$$

式中:  $n(t)$ —扰动。

二阶 ADRC 的方程为:

$$\begin{aligned}
 \text{二阶 TD: } & \begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -fst(v_1, v_2, v(t), r, h_0) \end{cases} \\
 \text{三阶 ESO: } & \begin{cases} \varepsilon = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}fal(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(\varepsilon, \alpha_2, \delta_1) + b_0u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(\varepsilon, \alpha_3, \delta_1) \end{cases} \\
 \text{NLSEF: } & \begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_1fal(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2fal(e_1, \alpha_2, \delta) \\ u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \end{cases}
 \end{aligned}$$

式中:  $h_0$ —滤波因子, 非线性函数  $fst(v_1, v_2, v(t), r, h_0)$  和  $fal(\varepsilon, \alpha, \delta)$  的表达式见文献 [5]。

式中  $u$  是被控对象的输入信号;  $y$  是被控对象的输出信号, 它们都是 ESO 的输入信号; ESO 的输出信号  $z_3$  是对被控对象的模型作用(内扰)和外扰作用的估计信号, 即总干扰量的估计信号。只要合理的选取参数  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$  和  $\beta_{03}$ , ESO 就能给出满意的估计信号, 这是独立于被控对象和外扰作用的观测器。

## 2 二阶 ADRC 控制高阶大延迟对象的可能性

目前, 二阶自抗扰控制器的理论发展的最为完善, 关于其稳定性、物理意义等人们都给出了相关的理论依据和实践证明。从物理意义上讲二阶 ADRC 与 PID 相似, 二阶 TD 的输出  $v_1$  与二阶 ESO 的状态输出  $z_1$  构成误差  $e_1$ , TD 的输出  $v_2$  与 ESO 的输出  $z_2$  构成误差  $e_1$  的微分  $e_2$ ; 三阶 ESO 把含有未知扰动的非线性不确定对象化为了“积分串联型”对象; 二阶 NLSEF 形成一个控制量, 其参数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  具有较为明确的物理意义,  $\beta_1$  表示比例增益,  $\beta_2$  表示微分增益, 它们的整定同 PD 控制器中的参数 P、D 的整定; 因此整个二阶自抗扰控制器就相当于用一个 PD 控制器来控制一个“积分串联型”的对象。

文献 [6] 中提到, 自抗扰控制器可以实现跨阶控制, 只要参数调节合适, 采用低阶自抗扰控制器同样可以控制高阶都被控对象。

下面, 将讨论二阶 ADRC 控制高阶时滞对象的可能性。

### 2.1 分析两个惯性环节串联的系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -ax_1 + bx_2 \\ T_2\dot{x}_2 = -(x_2 - u) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, 第二个系统是以  $T_2$  为时间常数, 放大系数为 1 的稳定惯性环节; 第一个系统的时间常数和放大系数分别记为  $T_1 = 1/a$ ,  $K = b/a$ 。该系统的传递函数为:

$$w(s) = \frac{K}{T_1s + 1} \frac{1}{T_2s + 1} \quad (2)$$

如果时间常数  $T_2$  足够小, 那么  $x_2(t)$  很快地跟踪  $u(t)$ , 可近似看作  $x_2(t) = u(t - \tau)$ , 从而式 (2) 可简化成:

$$w(s) = \frac{K}{T_1s + 1} e^{-\tau s} = \frac{b}{s + a} e^{-\tau s} \quad (3)$$

其中, 时滞  $\tau$  与  $T_2$  的数量级相当。

### 2.2 三阶惯性环节串联组成的对象

$$G_3(s) = \frac{b_3}{(s + a_1)(s + a_2)(s + a_3)} = \frac{b_3/a_3}{(s + a_1)(s + a_2)} \frac{a_3}{(s + a_3)}$$

当  $a_3$  较大时(不妨设  $a_3 > 1$ ), 可近似为:

$$G'_2 = \frac{b'_2}{(s + a_1)(s + a_2)}$$

其中  $b'_2 = b_3/a_3 < b_3$ 。

直观地看, 只要三阶对象有一个较大的负实部稳定振型时就可以近似为二阶对象, 也就可以用二阶 ADRC 来控制。但实现自抗扰控制所需的  $b_0$  要调整, 时滞  $\tau$  越大, 所需  $b_0$  就越大。此外, 虽然在讨论三阶对象时假设对象要有一个时间常数较小的惯性环节, 但这并非意味着三阶对象必须满足上述假设条件时, 才可由二阶 ADRC 来控制。

## 3 仿真试验研究

大纯滞后的存在, 使得开环系统相位滞后增大, 幅值裕度和相位裕度减小, 结果使系统的稳定性降低、动态质量下降<sup>[7]</sup>。试验对象采用具有大延迟的循环流化床床温系统和高阶非线性的主汽温系统。

### 3.1 循环流化床床温试验

CFB 锅炉负荷变化时, 由于其床内热容量大, 因此 CFB 锅炉温度的变化比煤粉炉具有更长的延迟时间。并且由于加入燃料的初温比炉内温度低, 在给煤加入后, 床温会有一定程度的下降。

在给煤量阶跃扰动下, 现场辨识得到的对床温的传递函数<sup>[8]</sup>, 即:

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

式中:  $k_p$ 、 $T_p$ 、 $\tau$  是随锅炉运行工况不同而变化的参数。采用线性近似法可以得到在 3 个典型负荷下温度对燃料量的传递函数模型。25% 负荷下的对象参数:  $k_p = 5$ ,  $T_p = 100$ ,  $\tau = 30$ ; 65% 负荷下的对象参数:  $k_p = 7.5$ ,  $T_p = 150$ ,  $\tau = 45$ ; 100% 负荷下的对象参数:  $k_p = 10$ ,  $T_p = 200$ ,  $\tau = 60$ 。  $\alpha$  值在 12 左右, 基本保持不变。

可以发现, 当负荷较大时, 控制对象的延迟也就相应较大, 到达稳态需要的时间比较长, 控制难度也相应的增加。

### 3.1.1 阶跃试验

以 65% 负荷时的工况为例, 床层温度对设定值的阶跃响应曲线如图 2 所示, 图中横坐标为时间  $t$  (千秒); 纵坐标  $y$  是阶跃输入为 1 时的输出值(以下图同)。

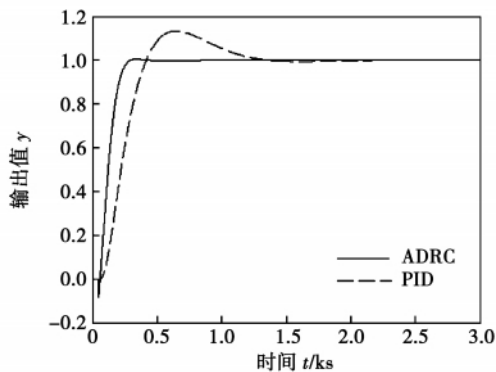


图 2 65% 负荷处的阶跃响应曲线

与采用 PID 控制 CFB 锅炉床温系统相比较, 采用自抗扰控制所产生的超调量小于常规 PID 系统控制, 整个过渡过程显得更为平稳, 过程控制时间短。

### 3.1.2 鲁棒性试验

仍以 65% 负荷时的工况为例, 对 ADRC 控制系统的模型匹配与不匹配的情况下进行给定值单位阶跃响应测试, 如图 3 所示。ADRC 控制器的参数采用 65% 负荷时整定好的参数不变, 被控对象分别采用 25%、65% 和 100% 负荷下的对象参数。从图中可以看出 ADRC 控制器具有很好的鲁棒性。

同样的方法, 对其它负荷点下的对象, 也做了仿真研究, 仿真结果表明 ADRC 具有同样效果。

### 3.1.3 扰动试验

仍以 65% 负荷时的工况为例, 假设对象受  $n(t)$  方波扰动, 如图 4 所示。仿真时间为 5 ks, 在 3 ks 时

受到幅值为 0.1 的方波  $n(t)$  扰动信号, 扰动时间为 3 000 ~ 3 500 s。

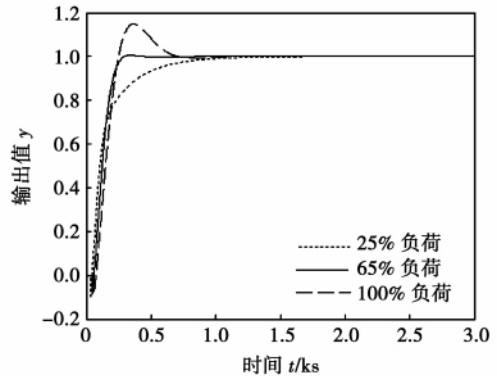


图 3 ADRC 的 3 个负荷阶跃响应曲线

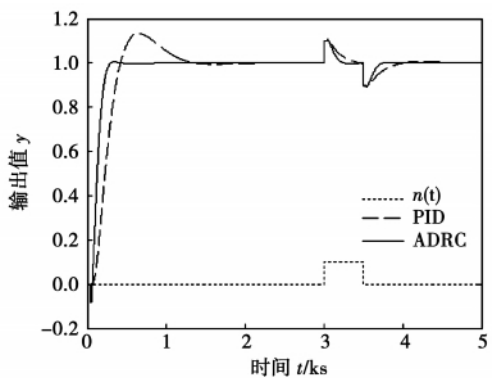


图 4  $n(t)$  扰动下床温的阶跃响应曲线

与 PID 控制结果相比, 体现了 ADRC 系统具有很强的抗干扰能力。

大量仿真试验表明, ADRC 控制器对不确定大延迟系统具有良好的鲁棒性、适应性和抗干扰能力。

## 3.2 某超临界机组主汽温系统

对于过热汽温对象, 影响模型最严重的是负荷变化, 而且由热工动力学可知, 汽温过程模型的参数与机组负荷的变化密切相关<sup>[9]</sup>。当负荷上升时, 由于过热蒸汽流速和流量增大, 相对于同等变化的减温水流量, 模型静态增益和时间常数将随之单调变化, 反之亦然。本研究选取某超临界 600 MW 直流锅炉的过热汽温系统 4 个典型负荷下时现场测得的动态特性, 如表 1 所示(模型引自文献[10])。

### 3.2.1 鲁棒性试验

以 75% 负荷时的工况为例, 对 ADRC 控制系统进行给定值阶跃响应测试, 如图 5 所示。ADRC 控制器的参数采用 75% 负荷时的参数不变, 被控对象分别采用 50%、75% 和 100% 负荷下的对象参数。

从图中可以看出 ADRC 控制器具有很好的鲁棒性。

表 1 汽温对喷水量扰动的动态特性

负荷 / %	导前区 / $^{\circ}\text{C} \cdot (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$	惰性区 / $^{\circ}\text{C} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
37	$\frac{-5.072}{(28s+1)^2}$	$\frac{1.048}{(56.6s+1)^8}$
50	$\frac{-3.067}{(25s+1)^2}$	$\frac{1.119}{(42.1s+1)^7}$
75	$\frac{-1.657}{(20s+1)^2}$	$\frac{1.202}{(27.1s+1)^7}$
100	$\frac{-8.815}{(18s+1)^2}$	$\frac{1.276}{(18.4s+1)^6}$

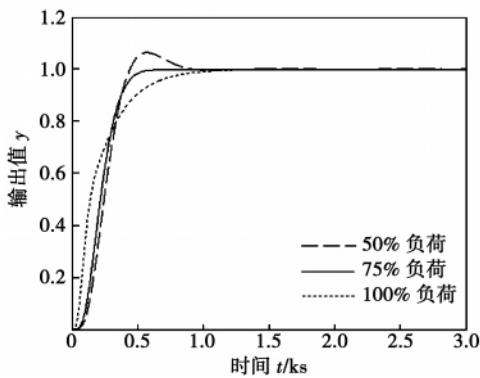


图 5 ADRC 的 3 个负荷阶跃响应曲线

### 3.2.2 扰动试验

仍以 75% 负荷时的工况为例 ,假设对象受  $n(t)$  方波扰动 ,如图 6 所示。仿真时间为 5 ks ,在 3 ks 时受到幅值为 0.1 的方波  $n(t)$  扰动信号 ,扰动时间为 3 000 ~ 3 500 s。

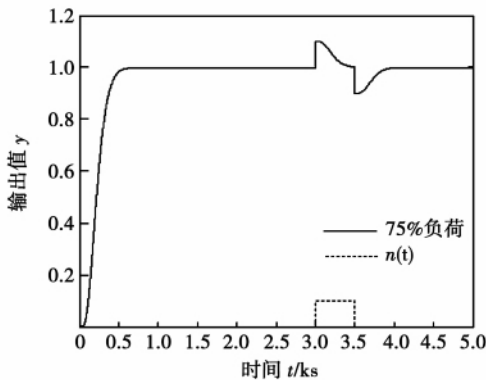


图 6  $n(t)$  扰动下床温的阶跃响应曲线

以上仿真可以看出 ,ADRC 控制器对于高阶非线性系统同样具有很好的控制效果。

## 4 结 论

为将 ADRC 推广到高阶系统的控制中 ,针对一类高阶、非线性、大延迟对象进行了大量实例仿真 ,仿真结果表明:

(1) 二阶 ADRC 能够很有效地控制一阶、二阶和高阶非线性对象 ,表现出很强的鲁棒性和适应性 ,充分体现了非线性控制器的优点。本研究给出的仿真实例表明 ,自抗扰控制器不仅对控制一般的不确定对象有效 ,而且对控制不确定大时滞对象也是简单而有效的;

(2) ADRC 在控制存在强干扰且不确定(无法建模)系统时尤其有效 ,这是常规 PID 调节器无法比拟的优点;

(3) 从大量的仿真研究中发现 ,控制器的参数与对象的时间常数有一定关系 ,但这些关系是相当宽松的 ,一旦进入使闭环稳定的参数范围 ,调整起来还是比较容易的。如何通过实例仿真和理论证明来进一步修正 ADRC 的参数整定规则 ,使其适用于范围更广的对象 ,这是尚待研究的问题;

(4) ADRC 系统的设计、调试对过程模型精度要求很低 ,特定情况下甚至只需要粗略定性了解对象特性即可。这给现场应用带来了很大方便 ,有良好的工业应用前景。

### 参考文献:

- [1] 金以慧. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [2] 陈善本, 吴林, 张铨, 等. 具有时滞的不确定性系统神经网络模糊自学习控制[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(3): 347-355.
- [3] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [4] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 354-358.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] HUANG HUANPAO, HAN JINGQING. Nonlinear PID controller and its applications in power plant//IEEE 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings [C]. Kunming: 2002. 13-17.
- [7] 要晓梅, 王庆林, 韩京清. 大滞后纯积分对象的二阶自抗扰控制[J]. 控制工程, 2002, 9(6): 7-10.
- [8] 牛培峰. 大型国产循环流化床锅炉燃烧过程智能控制系统应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 62-71.
- [9] 樊泉桂. 1 000 MW 超超临界锅炉中间点温度和汽温控制[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 332-335.
- [10] 范永胜, 徐治皋. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23-28.

types of coal. The research results show that the model based on the support vector machine is more precise when predicting the ash melting points of a single coal and blended one. **Key words:** ash melting point , support vector machine , BP ( back propagation) neural network , prediction

**基于退火支持向量的燃煤锅炉结渣特性预测 = Prediction of the Slagging Characteristics of a Coal-fired Boiler Based on an Annealing Support Vector** [刊,汉] XU Zhi-ming , ZHAO Yong-ping , WEN Xiao-qiang ( College of Energy Source and Power Engineering , Northeast University of Electric Power , Jilin , China , Post Code: 132012) , MENG Shuo ( Harbin City Boiler and Pressure Vessel Inspection Research Institute , Harbin , China , Post Code: 150006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 26( 4) . - 440 ~ 444

A support vector machine-based algorithm was used to establish a mathematical model for predicting the slagging characteristics of a coal-fired boiler. The simulation annealing algorithm was employed to optimize the parameters of the model in question. Finally , an optimal parameter combination was obtained. With the demineralization temperature  $t_{st}$  , silicon/aluminum ratio  $w(\text{SiO}_2) / w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  , alkali/acid ratio J and silicon ratio G of the coal as well as the non-dimensional tangential circle diameter  $\Phi_t$  and the actual non-dimensional tangential circle diameter  $\Phi_d$  of the boiler serving as the input variables and the slagging degree as the output in the model , the test data were used to check the model and optimize its parameters. Then , the optimized model was employed to predict and judge the slagging characteristics of 15 boilers. 14 boilers were correctly predicted with the judgement correctness rate being 93.33% , showing that the method is rational and effective. In the meanwhile , to coordinate with the model in question , an advanced language was used to design a program to develop a corresponding prediction and judgement system. **Key words:** support vector machine , annealing algorithm , coal-fired boiler , slagging

**自抗扰控制器对一类热工对象的控制性能研究 = Study of the Control Performance of First Category Thermotechnical Objects by Making Use of an Active Disturbance Rejection Controller** [刊,汉] GUAN Zhi-min ( Department of Power Engineering , North China University of Electric Power , Baoding , China , 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26( 4) . - 445 ~ 448

Active disturbance rejection controllers exhibit a very strong adaptability and robustness in a majority of uncertainty systems and in the presence of a strong disturbance in the systems. Based on the control ability of the ARDC , the problems to employ second order active disturbance rejection controllers to control the first category thermotechnical objects with a high order large time delay were studied. The theoretical analysis and numerical simulation results show that the second order ARDC can effectively control the objects of the kind and the control effectiveness is also very ideal , displaying a relatively good adaptability and robustness to the disturbance from the outside and uncertain

factors of the model. To a certain extent, there existed no so-called mismatch problems of the model, fully displaying the merits of non-linear controllers and providing a definite practical value for engineering projects. **Key words:** ARDC (active disturbance rejection controller), non-linear, uncertainty system, robustness, high order large time-delay system

模糊自适应内模控制在电加热锅炉温度控制中的应用研究 = **Study of the Application of the Fuzzy Self-adaptive Inner Model-based Control in the Temperature Control of an Electrically-heated Boiler** [刊, 汉] GUO Qi, REN Fang (College of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004), YANG Tian-feng, LIU Zhen-yong (Qinhuangdao Tonglian Industry Co. Ltd., Qinhuangdao, China, Post Code: 066102) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 449 ~ 452

In the light of such specific features of the temperature control in the clamping sleeve of an electrically-heated boiler as non-linear, time lagging and disturbance-susceptible etc., presented was a fuzzy self-adaptive inner model-based control method in the JX-300X DCS system. Through establishing an inner model, the fuzzy principles were utilized to make an on-line adjustment of the time constant  $T_f$  of the filter inside the inner model controller. The SCX language was adopted to design a program by using the fuzzy self-adaptive inner model-based control algorithm and a control test was conducted on a DCS (distributed control system) platform. The test results show that the performance of the fuzzy self-adaptive inner model-based control is enhanced greatly when compared with the conventional PID (proportional, integral and differential) control, featuring a quick response, a near-to-zero overshoot, a short regulation time duration, a high stabilization precision, a strong disturbance-resistant capacity and robustness. **Key words:** distributed control system, fuzzy self-adaptive inner-model-based control, PID (proportional, integral and differential) control

流化床  $O_2/CO_2$  燃烧( I )-高氧浓度下的燃烧实验 =  **$O_2/CO_2$  Combustion on a Fluidized Bed ( I )-Combustion Experiment at a High Oxygen Concentration** [刊, 汉] ZHAO Ke, LU Qing-gang (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190), DUAN Cui-jiu (Postgraduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 453 ~ 456

To provide reference for the combustion at a high oxygen concentration in a large-sized circulating fluidized bed  $O_2/CO_2$  combustion systems, experimentally studied were the combustion and temperature distribution characteristics of three types of coal at a high oxygen concentration in the  $O_2/N_2$  atmosphere in a circulating fluidized bed-based com-