

流化床锅炉预测指导系统研究

王鑫鑫, 徐向东

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对流化床锅炉控制系统的特点和运行管理中存在的问题, 研究了解耦广义预测控制和多变量参数估计原理, 选择预测控制理论来设计流化床预测指导系统, 并对预测指导系统进行了仿真研究。通过仿真研究, 获得了该系统的参数选择机制。同时, 把研究结果应用到工程实践中, 为莱西某厂设计了流化床预测指导系统, 对工人的操作进行指导以及培训, 取得了很好的效果。由于该系统设计方法是通用的, 可以应用到其它类似的系统中。

关 键 词: 流化床; 预测指导系统; 解耦广义预测控制

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

1 引言

流化床锅炉是 20 世纪 60 年代发展起来的一种新炉型, 具有燃烧区域大、燃料适应性广、热效率高和低污染等优点。

同时, 流化床锅炉是个分布参数、非线性、时变、大滞后、多变量紧密耦合的控制对象, 由于其燃烧的复杂性, 使得建立锅炉燃烧的数学模型非常不易, 对一般锅炉和其它过程控制行之有效的常规控制方案在流化床锅炉自动控制中难以实现, 特别是燃烧控制系统和负荷控制系统, 由于流化床锅炉的主蒸汽压力和炉床温度均受给煤量和一次风量的影响, 两者成为强耦合量, 常规的 PID 调节系统不能保证控制质量。

通过研究流化床锅炉控制系统的特点, 结合对预测控制基本理论的研究, 选择多变量解耦广义预测控制、配合多变量线性系统辨识作为理论基础, 设计出适合流化床锅炉的控制方案, 在此基础上, 建立了实用的循环流化床锅炉的监控与预测指导系统。通过在莱西某厂 35 t/h 循环流化床的实际运行, 对工人的操作进行指导以及培训, 提高了锅炉运行管理水平、运行效率, 取得了很好的效果。

2 预测指导系统研究

收稿日期: 2000-11-24; 修订日期: 2001-03-06

基金项目: 国家攀登计划基金资助项目(B85-35)

作者简介: 王鑫鑫(1974-)男, 辽宁大连人, 清华大学博士研究生

2.1 预测指导系统原理及结构

本文选定多变量解耦广义预测控制配合多变量线性系统辨识作为理论基础, 针对循环流化床锅炉的燃烧控制系统和负荷控制系统之间的强耦合性, 设计了如图 1 所示的预测指导系统的仿真研究结构图。在仿真研究中, 选择循环流化床锅炉作为对象。被控量是流化床炉床温度 T_b 和主蒸汽压力 P_s ; 控制量分别是给煤量和一次风量。

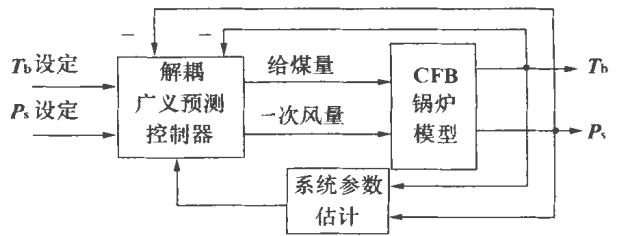


图 1 预测指导系统仿真结构图

预测指导系统需要实时计算出当前时刻工人应当加入的控制量, 给工人以正确指示, 使系统正确运行, 这与一般的广义预测控制不同。也就是说, 预测指导系统运行下的控制量的加入是不连续的, 在两次控制量的加入之间有一段比较长的时间间隔。因此, 从工人加入某次控制量起, 到工人按照预测指导系统的指示加入下一次控制量止, 工人在后一时刻加入的控制增量是两次之间所有采样周期预测计算增量的和。因此, 预测指导系统中的控制量是按照阶梯形状变化的, 也就是用一条阶梯状的曲线代替连续预测控制系统中的连续曲线。

2.2 预测指导系统仿真

在预测指导系统的仿真研究中, 首先需要研究两次加入控制量的时间间隔 d 的长短对控制效果的影响, 其次是研究连续广义预测控制中的控制参数——预测时域 p 、控制时域 m 和增量控制系数 λ ——在时间间隔 d 的影响下对预测效果的影响。

2.2.1 时间间隔 d

系统仿真的参数为: $p = 20, m = 5, \lambda = 50\ 000$,

床控制系统的采样周期在 $0.5 \sim 1\text{ s}$, 因此在指导系统设计时取 $d = 30 \sim 60$ 即可。需要注意的是, d 的取值

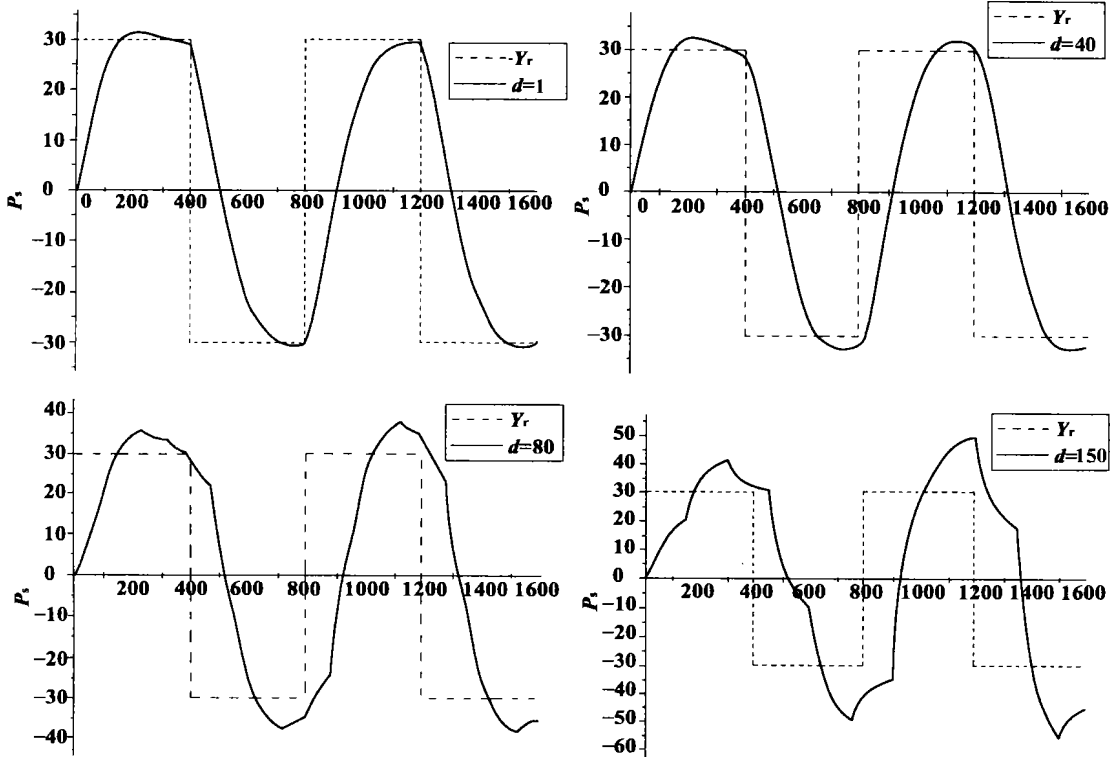


图2 时间间隔 d 对预测指导系统的影响

不要过大, 尤其是对于非线性、大滞后的系统, 如果在负荷发生变化后长时间不对控制量进行调节, 会增加调节的难度, 这也与实际控制中迟迟不采取动作的后果是一样的。

对 $d = 1$ (即连续控制)、 $d = 40$ 、 $d = 80$ 、 $d = 150$ 四种情况进行了仿真, 得到的结果如图2所示。

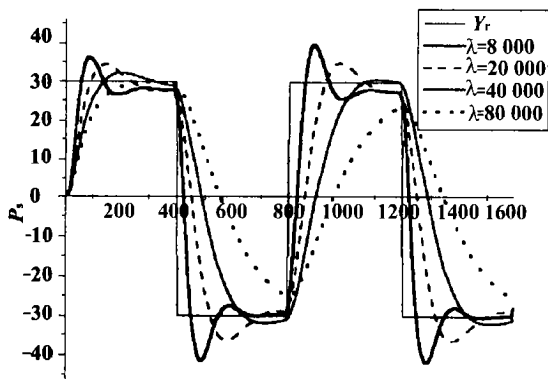


图3 不同 λ 下的仿真结果图

从仿真结果可以看出, $d = 40$ 时的控制效果与 $d = 1$ (即连续控制) 的控制效果相差无几。当 d 比较大后, 随着 d 的增大, 控制效果逐渐变坏, 这是由于控制增量滞后时间的增大, 导致预测指导系统的跟踪性能变差。

的过大冲击。选取仿真的参数为: $p = 20, m = 5, d = 10$, 对 $\lambda = 8\ 000, \lambda = 20\ 000, \lambda = 40\ 000, \lambda = 80\ 000$ 进行了仿真, 得到的结果如图3所示。

从图3可以看出: 如果 λ 取得较小, 控制的超调增大, 但系统的快速性变好; 如果 λ 取得太小, 超调过大甚至会引起振荡; 如果 λ 取得较大, 控制的超调减小, 但系统的快速性变差, λ 取得太大 (如 $80\ 000$), 控制的效果也很差。

另外, 还对不同时间间隔 d 下 λ 对系统的影响进行了仿真。选取仿真的参数为: $p = 20, m = 5, \lambda = 10\ 000$, 对 $d = 10$ 和 $d = 40$ 两种情况进行了仿真, 得到的结果如图4所示。

由图4可以看到: 在相同的 λ 下, 时间间隔 d 大的超调也大, 易造成系统的不稳定。因此在预测指导系统设计中应当首先选择一个大一些的 λ , 保证系统的稳定, 然后再逐渐减少, 逐步提高系统的快速性。最后选择一个控制的快速性和超调都比较满意的 λ 作为预测指导中控制增量的控制参数。

因此在预测指导系统的设计中, 考虑到一般流化

2.2.3 控制时域 m

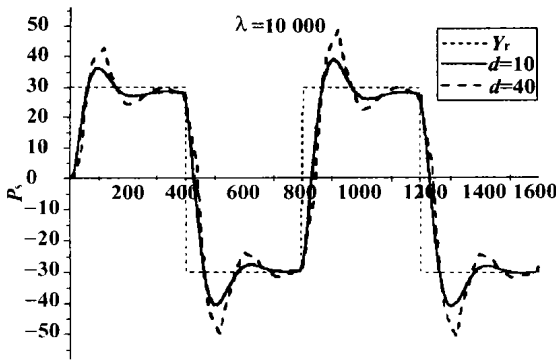


图 4 相同的 λ , 不同的 d 下的仿真结果

一般来说, 控制时域 m 的大小决定了系统的跟踪性能, m 越小, 预测指导系统的跟踪性能越差。但随着 m 的增大, 虽然系统的跟踪性能变好, 但矩阵的维数增加, 计算量也会大大增加, 使指导系统的实时性变差。

为了检验控制时域 m 对控制效果的影响, 选取系统仿真的参数为: $p = 20, \lambda = 50\,000, d = 40$, 对 $m = 1, 5, 10, 15, 20$ 五种情况进行了仿真, 得到的结果如图 5 所示。

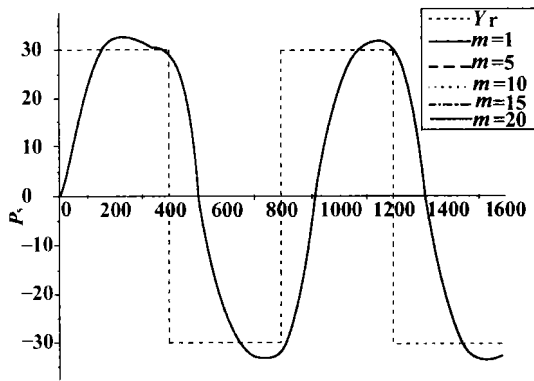


图 5 不同 m 下的仿真结果

从图中看到: 不同的控制时域 m 下的控制效果几乎相同。也就是说, 在其它参数相同的情况下, 控制时域的选择对预测指导系统的控制效果的影响不大, 而 m 越小, 计算量也越小, 有利于系统的快速性和实时性。因此, 在预测指导系统的设计中, 一般选择 $m = 1$ 即可。在不影响系统的实时性的情况下可以选择 m 稍大一些。

2.2.4 预测时域 p

按照连续预测控制系统的设计原则, 为了使滚动优化真正有意义, 应该使预测时域 p 包括被控对象的真实动态部分, 也就是说应当把 p 取得稍大一

些, 以把影响控制的所有响应都包括在内。在实际的应用中, 一般取 p 的值大于系统时滞与上升段的和。

p 的取值关系到系统的稳定性和鲁棒性。 p 较小, 矩阵的维数小, 快速性好, 但稳定性和鲁棒性差; p 较大, 稳定性和鲁棒性变好, 但计算量变大, 系统的实时性差, 动态响应慢。

下面是在选取系统仿真参数为: $m = 5, d = 40$, 对 $p = 10, \lambda = 20\,000, p = 20, \lambda = 50\,000, p = 35, \lambda = 80\,000, p = 40, \lambda = 120\,000$ 四种情况进行了仿真, 得到的结果如图 6 所示。

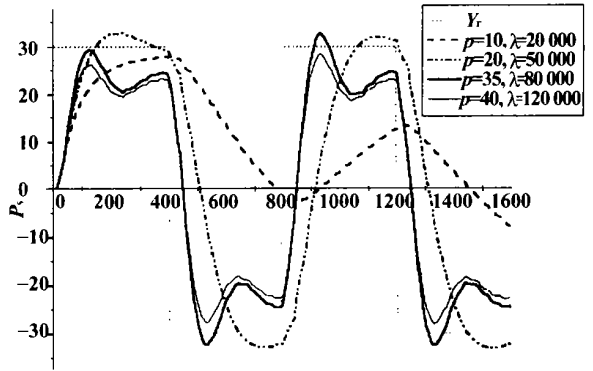


图 6 不同预测时域 p 下的仿真结果

从图中可以看出: p 取得太小, 其控制效果很差; 随着 p 的增大, 控制的效果变好, 但 p 变大必须同时增大 λ , 否则会出现振荡, 计算量也大大增加, 使得系统的实时性变差。

2.3 总结

通过上面的理论推导和仿真, 针对流化床自动控制的特点, 在流化床预测指导系统的设计中, 对其参数 d, m, λ 和 p 的选择应遵循以下原则:

由于流化床的动态过程是个慢过程, 一般其采样周期在 1 s 以上, 因此在实际的预测指导系统中, $d = 30 \sim 60$ 是可以满足要求的。也就是说, 工人两次加入控制量的时间间隔在 30 s ~ 60 s 分钟都是可以的, 再大就会影响到控制的效果;

针对流化床锅炉的燃烧控制系统, 其传递函数的阶次 n_B 在 15 ~ 20 之间, 同时考虑到指导系统计算的快速性, 选择预测时域 p 在 20 ~ 30 之间;

针对预测时域 p 的取值, λ 取在 30 000 到 60 000 之间, p 越大, λ 的取值也要相应变大, 以保证系统不出现振荡;

由于控制时域 m 的影响较小, 为保证计算的快速性, 选择 $m = 1$ 。

如果将该预测指导方法应用于其它系统,可以根据上面的原则和具体系统的特点选取这些参数。

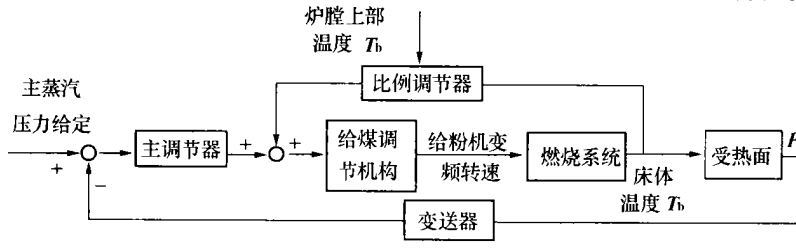


图7 主蒸汽压力控制系统

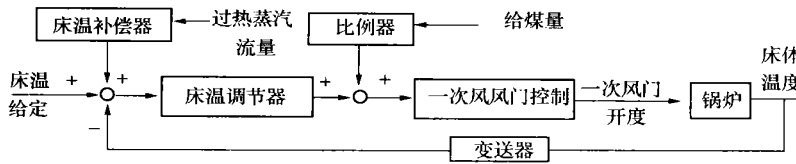


图8 床温控制系统

3 主蒸汽压力控制系统和床温控制系统

流化床锅炉是个分布参数、非线性、时变、大滞后、多变量紧密耦合的控制对象,其主蒸汽压力和炉床温度均受到给煤量和一次风量的影响,两者之间具有强耦合,常规的PID调节系统不能保证控制质量。在以上研究基础上,设计了循环流化床锅炉的监控与预测指导系统。其主蒸汽压力控制系统和床温控制系统如图7和图8所示。经过长时间运行,证明了该系统可以满足流化床锅炉安全稳定运行的要求。

3.1 主蒸汽压力控制系统

在生产过程中要求流化床锅炉主蒸汽压力保持稳定,这就要求在外界负荷变化时,主蒸汽压力要尽快恢复到设定水平。在现场是通过改变给煤机的转速调节给煤量来实现主蒸汽压力调节的。主蒸汽压力控制原理如图7所示。

由于给煤变化首先是影响到锅炉床体的温度,然后再影响到主汽压,而且这两个环节都有较大的滞后,为了防止锅炉床体温度和炉膛上部温度超出范围,将床温信号和炉膛上部温度信号引入作为主蒸汽压力主调节器的输出补偿信号,在这两个温度过高时减少给煤机的转速;在这两个温度过低时增加给煤机的转速。由于炉床温度只要调节在允许的范围内即可,因此比例调节器采用阈值控制,用锅炉床体温度与给定值的差乘以一个系数作为输入信号。将比例调节器的输出作为主蒸汽压力控制回路的输

出补偿。

3.2 床温控制系统

循环流化床锅炉的料床温度是流化床控制的重要参数,料床温度过高容易引起结焦,炉内脱硫效率下降,使NO_x产生量增加;料床温度过低影响了脱硫效率,容易引起熄火。一般料床温度控制在850℃~950℃范围内,这个温度范围是实现炉内脱硫的最佳温度,同时NO_x的产生量也比较小。采用一次风来调节锅炉的料床温度,并保持一定的风煤比,保证流化燃烧。床温的实际稳定运行值随负荷变化,控制系统中用负荷来修正床温给定,使床温最终稳定值与负荷对应。同时,将给煤量经过比例器作为输出补偿。床温控制系统的原理如图8所示。

由于流化床首先要保证床料的流化,在实际的运行过程中,只要保证锅炉风量在一定范围内波动即可满足要求。因此,本控制系统采用阈值控制,即床体温度在给定值范围内时不调节一次风量,当床温过高或过低时再调节一次风量。

4 应用效果及结论

针对流化床锅炉运行的非线性严重、大滞后、不确定性大等特点,研究了解耦广义预测控制和多变量参数估计原理,对预测指导系统进行了仿真研究,并将研究的结果应用到莱西某厂35t/h循环流化床锅炉的监控与预测指导系统中。从现场的应用效果来看,提高了锅炉的运行水平和锅炉的效率,证明了该系统有很好的应用前景。由于系统设计方法是通用的,可以将该预测指导系统推广到其它的滞后大、非线性严重、控制较难实现的系统上。

参考文献:

- [1] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 金晓明, 荣冈, 王树青. 基于模糊模型的多变量预测控制算法[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 332-336.
- [3] 李国勇, 谢克明. 隐式广义预测自校正控制算法的混合仿真研究[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(3): 157-160.
- [4] 席裕庚, 张峻. 广义预测控制系统性质的进一步研究[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 400-404.

(何静芳 编辑)

Ying, NIU Zhong-yi, ZHANG Zheng-yi, et al (Power Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 37 ~ 40

A combined diesel or gas turbine (CODOG) power plant underwent a technical modification. On this basis studied under various loads was the effect of different damping values, various switch-over speed differences and other factors of a SSS clutch on the dynamic characteristics of the the CODOG power plant during the switch-over process. As a result, obtained were the SSS clutch displacement curves and some meaningful conclusions. **Key words:** combined diesel or gas turbine power plants, synchronous-self-shifting clutch, displacement curve

生物质复合型煤固硫特性研究 = A Study of the Sulfur Retention Characteristics of Biomass Compound Type of Coal [刊, 汉] / HE Fang, WANG Hua, BAO Gui-rong, et al (Institute of New Technology on Environment-harmonious Energy Source under the Kunming University of Science & Technology, Kunming, Yunnan Province, China, Post Code: 650093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 40 ~ 42, 50

On the basis of analyzing the sulfur retention mechanism of the biomass compound type of coal developed by the authors an experimental study was conducted of the sulfur retention characteristics of this type of coal. The results of the study indicate that the coal under discussion enjoys a higher sulfur retention ratio than that of conventional types of coal. When Ca/S is equal to 2 and the combustion temperature lower than 900 °C the sulfur retention ratio of the biomass compound type of coal can reach in excess of 90%. This retention ratio is subject to various factors, such as combustion temperature, the amount of biomass added, Ca/S ratio, etc. Some additives, such as Fe₂O₃ can significantly enhance the sulfur retention capability. **Key words:** biomass compound coal, sulfur retention mechanism, sulfur retention characteristics

竖管内空气强迫与自然对流换热实验 = An Experiment on the Forced and Natural Convection Heat Exchange of Air in a Vertical Tube [刊, 汉] / SHI Jin-sheng (Mechanical Department, Tianjin Light Industry Institute, Tianjin, China, Post Code: 300222) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 43 ~ 46

An experiment was conducted of the forced and natural convection heat exchange of air in a vertical round tube. The difference between the above two types of heat exchange is shown from the aspect of the order of magnitude. Through the experiment obtained was a natural convection heat exchange expressed by Reynolds number, which is compared with the natural convection heat exchange of the existing large air space. **Key words:** forced convection, natural convection, heat exchange, comparison of the order of magnitude

强润湿性液体池沸腾传热的实验研究和机理分析 = Experimental Study and Mechanism Analysis of Pool Boiling Heat Transfer of Highly Wetted Liquid [刊, 汉] / ZHOU Ding-wei, MA Chong-fang (College of Environmental and Energy Engineering under the Beijing Polytechnic University, Beijing, China, Post Code: 100022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 47 ~ 50

With respect to the test of pool boiling heat transfer of highly wetted liquid a set of effective test procedures was proposed and an experimental study conducted of R113 pool boiling heat transfer in strict accordance with the test procedures. The study focuses on the effect of surface aging and liquid subcooling on the pool boiling heat transfer curves and incipient boiling point. Three abnormal phenomena have been observed during the test. In conclusion, from the perspective of the boiling heat transfer mechanism of highly wetted liquid a relevant explanation was given concerning the above-cited phenomenon. **Key words:** pool boiling, heat transfer, hysteresis

流化床锅炉预测指导系统研究 = A Study of the Predictive Instruction System of a Fluidized Bed Boiler [刊,

汉] WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —51 ~ 54

In connection with the features of a fluidized bed boiler control system and the existing problems in its operation and management a study was conducted of the theory of a decoupled and generalized predictive control as well as multivariable parameter evaluation. A predictive control theory was selected to design the predictive instruction system of a fluidized bed boiler along with a simulation research of the predictive instruction system. Through the simulation study obtained was the parameter selection mechanism of the above-mentioned system. Meanwhile, the study results were applied with excellent results in engineering practice, e. g. in the design of a predictive instruction system for a factory in Laixi and the provision of guidance and training for worker's operation. As the design method of the system is applicable to all cases, it has also been employed in other similar systems. **Key words:** fluidized bed, predictive instruction system, decoupled and generalized predictive control

基于 SCNN 的转子热应力场的实现研究 = A Study of the Thermal Stress Field Based on SCNN (Structure-Controllable Neural Network) [刊, 汉] / GAO Jing-bo, ZHANG Jia-zhong, XIA Song-bo, et al (Aerospace College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —55 ~ 57

Thermal stress constitutes a major parameter for monitoring the loss of steam turbine service life. To date, for the real-time calculation of thermal stresses employed in most cases is an analytical method. As the analytical method involves a simplification of the two-dimensional axial-symmetric heat conduction equation for a rotor, it will lead to some errors in evaluating the thermal stress. In view of this, by way of the intermediate calculation results of a finite element analysis for the thermal stress field the authors have utilized a SCNN (structure-controllable neural network) method to simulate the solution of an algebraic equation of integral rigidity matrix for the thermal stress field. By using the displacement of nodes thus obtained, one can identify the thermal stress field of a rotor. **Key words:** neural network, finite element, thermal stress field

利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(I)——二维投影温度场的测量 = Measurements of Flame Temperature Distribution by the Use of a Colored Array CCD (Charge-coupled Device) (I) the Measurement of a Two-dimensional Projection Temperature Field [刊, 汉] / WEI Cheng-ye (Network Technology Research Department under the Guangdong Telecommunications Science & Technology Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510630), YAN Jian-hua, SHANG Min-er, et al (Thermal Power Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —58 ~ 61

The make-up and basic principles of a flame temperature measuring system using colored array CCD (charge-coupled device) are described along with an analysis of its major error sources. To cope with these error sources, the authors have come up with respective resolution methods or correction algorithms. Finally, test measurements were made, which indicate that this measuring method is easy to use and features a relatively high precision. **Key words:** charge-coupled device, temperature measurement, calorimetric method of temperature measurement

移动颗粒层过滤除尘的数值模拟及实验对比 = Numerical Simulation and Experimental Contrast of the Dust Filtration of a Moving Granule Bed [刊, 汉] / YUAN Zhu-lin (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the southeastern University, Nanjing, China, Post code: 210096), XU Shi-sen, (Thermal Power Research Institute of National Electric Power Corporation, Xi'an, China, Post Code: 710032) //