

联合循环电站在线性能计算及分析诊断

肖 睿¹, 唐胜利¹, 曹 宏²

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044; 2. 华能重庆燃机电厂, 重庆 400044)

摘 要: 采用理论分析与历史运行数据相结合的方法进行联合循环电站的变工况性能计算, 根据计算结果判断各系统性能是否下降, 并在分级故障的基础上利用基于 BP 算法的灵敏度分析法对引起性能下降的原因进行在线诊断, 以积累联合循环电站的运行经验和提高管理水平。

关 键 词: 联合循环; 变工况; BP 算法

中图分类号: TM611.31 文献标识码: A

1 引 言

燃气—蒸汽联合循环电站因其热效率高、启动快、以及建设周期短、污染小等优点近年来在国内外得到了快速发展。华能重庆燃机电厂是 1988 年从英国 JBE 公司成套引进的燃气—蒸汽联合循环电厂, 其设备主要由两台 PG 6541 燃气轮机发电机组及一台 37 MW 汽轮发电机组组成, 采用 BBL 公司的 Network 3 000 网络系统进行全厂实时监控, 其总装机容量为 108.25 MW (见图 1)。经过 10 多年的运行, 已积累了大量经验。

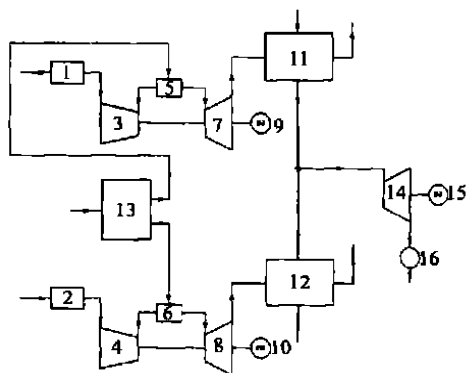
随着机组运行时间的增加, 机组的老化以及所用天然气被污染等多种原因, 使机组运行效率下降, 导致排烟温度增加, 低压蒸发器和低压汽包的工作环境恶化。由于在我国联合循环电站数目较少, 可供借鉴的优化运行解决方案相对缺乏。如何在已有经验的基础上提高经济效益、降低发电成本就成为当前急需解决的重要课题。

2 联合循环性能计算

2.1 性能分析的基本思路

目前对联合循环系统性能进行全面评估时常采用 TFA^[1] 方法。本文拟通过实时性能计算模型对现场采集的各类数据进行计算和分析, 得到机组当前工况下各运行参数及热耗率、能耗率和单位时间能耗等热经济指标, 并将这些指标同该工况下的基准值(应达值)进行比较, 确定出各系统当前的热经济

性状况。当某一系统经济性下降, 则启动对应的故障诊断模块对下降的原因进行诊断, 运行人员根据诊断报告来调整机组的运行参数及运行方式, 使其达到最优运行。



1、2-滤网; 3、4-压气机; 5、6-燃烧室; 7、8-透平; 13-增压站; 9、10、15-发电机; 11、12-余热锅炉; 14-蒸汽轮机; 16-凝汽器

图 1 燃机电厂基本结构

2.2 变工况计算实现基准值的确定

由于燃气—蒸汽联合循环电站在发电行业的特殊地位及自身的结构特点决定了机组经常处于变工况运行, 因此分析热经济性就必须研究其不同工况下各参数的变化规律。在额定工况(设计工况)下, 机组的各稳态参量都有一定的数值, 并且和稳态前后的状态变化历程无关, 这些参量的获取有以下几种方式: 通过数学模型求解、现场测取和用数理统计的方法从历史记录中获取。当机组从设计工况下的稳态过渡到非设计工况下的稳态时, 这些参量都会发生相应的变化而达到新的稳态值。华能重庆燃机电厂已有十余年的运行历史, 期间记录了大量不同工况下的运行数据, 可以用数据拟合的方法对这些数据加以处理。由于神经网络具有高度非线性映射特点, 并且具有较好的内插能力, 比较适合数据拟合, 所以本次计算采用具有自适应学习率的 BP 网络^[2] 将各参数在不同工况下的基准值作为训练样本进行训练, 然后将训练好的网络模型编

入变工况性能计算模型之中,这样模型就能根据机组的状态信息快速计算出对应状态下各系统性能参数基准值。

本系统主要的变工况性能曲线有:压气机变工况特性曲线、燃气涡轮变工况特性曲线、汽机本体变工况曲线和发电机变工况特性曲线。下面以压气机变工况特性曲线的处理方法为例来说明采用 BP 网络对变工况基准曲线的处理方法。压气机变工况特性曲线如图 2。

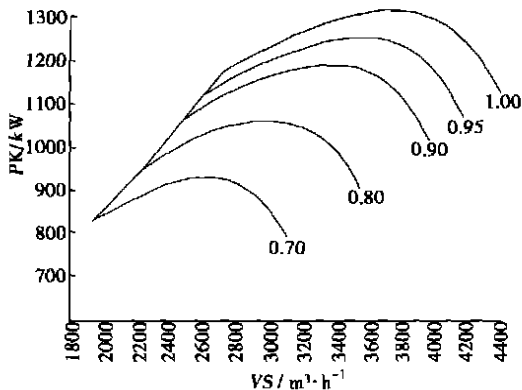


图 2 压气机特性曲线

BP 网络拟合数据步骤:

(1) 构建压气机输入功率计算 BP 模型。在一定的入口条件下,由于压气机输入功率随流量和转速而变化,因此选择流量和相对转速作为网络的输入,将压气机输入率作为网络输出。BP 结构为四层网络,输入层节点 2 个,第一隐层节点 8 个,第二隐层节点 5 个,输出层节点 1 个。

(2) 训练样本的组织。通过对历史运行数据的统计,得到了如图 2 所示的压气机输入功率特性曲线,同时利用特性曲线上对应的数据点(选取了 1 500 组)作为训练样本。

(3) BP 网络的训练。用编制好的 BP 算法程序对这样本数据进行训练,并取网络收敛误差为 0.007。经过 12854 次的运算得到了稳定的网络。

表 1 验证数据比较

入口流量	相对转速	计算功率	实际功率	误差
2 950.852	0.700	906.372	900.250	-6.122
3 400.463	0.800	1 027.029	1 030.186	3.157
3 890.635	0.900	1 108.866	1 100.325	-8.541
3 600.723	0.950	1 280.532	1 280.532	0
3 500.564	1.000	1 330.627	1 328.570	-2.057

表 1 是其中选取的 5 个点的实际值与网络计算值的比较。从该表中可以看出网络计算误差在 1%

以内,证明网络训练是成功的,能保证计算的精度。

2.3 模型简介

通过对华能重庆燃机电厂的系统进行分析,采用面向对象技术构建了以下系统:燃气轮机系统(GT)、余热锅炉系统(B)和蒸汽轮机系统(ST)。其中燃气轮机系统包括压气机、燃烧室、燃气透平及其附属设备;余热锅炉系统包括:低压汽包、低压蒸发器、高压省煤器、高压汽包、高压蒸发器、两级高压过热器及一级喷水减温器。由于是两台余热锅炉共用一台低压汽包和一台除氧器,低压汽包的蒸汽全部引向除氧器,因此建立了一个低压汽包的数学模型,其他设备的数学模型则是两台余热锅炉共用。蒸汽轮机部分主要建立汽轮机本体的数学模型和凝汽器部分的数学模型。各系统热经济指标主要有燃气轮机效率、余热锅炉热效率、汽机相对内效率及绝对电效率、热耗率、汽耗率、联合循环热效率、联合循环热耗率及天然气耗率。结合文献[3]的分析,整个联合循环的热效率由下式计算得到:

$$\eta_{CC} = \frac{\frac{P_{GT1}}{\eta_{Gt1} \times \eta_{Mgt1}} + \frac{P_{GT2}}{\eta_{Gt2} \times \eta_{Mgt2}} + \frac{P_{ST}}{\eta_{St} \times \eta_{Mst}}}{Q_{d1} + Q_{f1} + Q_{d2} + Q_{f2}}$$

式中: P_{GT1} 、 P_{GT2} 分别为 1、2 号燃气轮机轴端的作功功率, η_{Gt1} 、 η_{Gt2} 分别为 1、2 号发电机效率, η_{Mgt1} 、 η_{Mgt2} 分别为 1、2 号燃气轮机机械传动效率, P_{ST} 蒸汽轮机轴端的作功功率, η_{Mst} 、 η_{St} 分别为汽轮机部分的机械传动效率和发电机效率, Q_{d1} 、 Q_{d2} 为燃料的低位发热量, Q_{f1} 、 Q_{f2} 为燃料的物理显热。

3 故障诊断

现代电站是由大量的零部件按一定的方式和功能目标组合而成的,所以可以将整个大系统划分为不同的子系统,各子系统又可以进一步划分成若干下级子系统,直到零部件,这就构成了电站在结构上的层次性。当某一零部件发生故障时,必然会影响到上一级系统的运行,使其也表现出一定的故障征兆;反之,当某一系统发生故障时必然是由其子系统引起的,因而故障具有层次性。为了给运行人员提供更好的指导,有必要对故障进行分级,这不仅可以提高诊断的效率,更有利于故障的准确定位。此外,故障与征兆之间还存在非线性映射特性,即某一征兆可能对应多个故障,一个故障也可能对应多个征兆。因此采用建立在原理性模型基础之上的常规方法(如热偏差法和等效焓降法)分析定位故障时就存在一

定的困难。而 BP 算法^[4]为解决这类问题提供了很好的解决方案,它具有极强的并行运算能力、高度的自适应性、极强的容错性和鲁棒性,能通过对样本知识的学习将故障和样本之间的模糊关系映射到网络中,存贮在节点的权值和阈值之中。本系统在故障分级的基础上采用了基于 BP 网络的灵敏度分析方法对经济性故障进行分离定位。BP 网络的构建过程如下:将影响热经济性的故障及状态信息作为网络的输入量,将经济指标作为网络的输出,通过样本训练建立起各影响因素同经济指标间的非线性关系式,再分析输出量对输入量的灵敏度来判断影响热经济指标的主要原因。分级诊断流程如图 3。

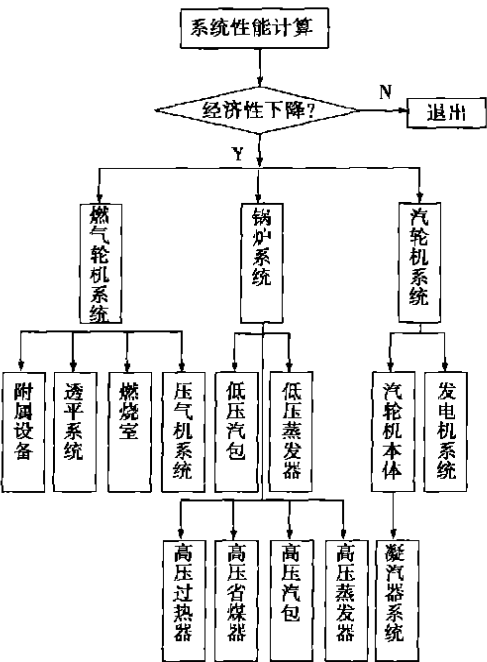


图 3 系统分析诊断流程

实例分析:以该电厂一次压气机积垢故障发生后记录的历史数据为基础来说明本诊断系统的工作过程。该燃气轮机诊断系统的征兆集为:压气机压比的相对变化量($\Delta\pi_c$)、压气机出口温度相对变化量(ΔT_2)、燃气轮机出口温度相对变化量(ΔT_4)和天然气流量的相对变化量(ΔQ),相对变化量均用百分数表示;故障集为:1 压气机叶片磨损;2 压气机积垢;3 压气机叶片损伤;4 涡轮喷嘴腐蚀;5 涡轮叶片结垢;6 涡轮叶片磨损;7 涡轮叶片损伤;8 燃烧室扭曲变形。将性能分析系统运行在该故障工况下,发现联合循环效率下降了 1.12%,此时由 BP 网络模型进行的灵敏度分析表明燃气轮机系统效率的变化为 3.0%,大于锅炉系统和汽轮机系统的变化量,同时也大于燃气轮机系统的阈值设定,因此

燃气轮机诊断子系统启动,其中的特征输入量 $\Delta\pi_c = -3.867\%$; $\Delta T_2 = 0.258\%$; $\Delta T_4 = 4.95\%$; $\Delta Q = 0.875\%$;网络诊断输出值如表 2。从表中可看出,压气机已经积垢。

表 2 燃气轮机诊断系统输出

故障号	1	2	3	4	5	6	7	8
输出值	0.2	0.96	0.13	0.0	0.3	0	0	0

4 软件系统的功能及实现

本软件实现了如下功能:各系统热效率、热耗率及相关参数及电厂主要参数实时显示、实时曲线的绘制、实时棒图显示、历史曲线的绘制、历史数据的分析,以上功能的实现采用了 Delphi7 提供的 TeeChart 类。由于整个系统中计算过程工作量较大,采集的数据较多,为了提高系统性能,在编程实现上采用了多线程设计,为计算过程设计了单独的线程并具有最高优先级;故障诊断模块采用 DLL 方式,当计算过程发现某一系统效率下降时才将其调入内存参加运算,这样可以保证充分地利用系统资源,同时便于系统升级改进。

本系统主要参照了性能考核试验^[4]的数据以及电厂提供的运行数据对以下几种工况进行了离线分析:简单循环(GT1)100%基本负荷,简单循环(GT2)100%基本负荷,全联合循环 100%基本负荷,分析结果见表 3;对 GT2 的 100%、75%、50%负荷下半联合循环的分析结果见表 4。

表 3 基本负荷分析

工 况	GT1(100%)	GT2(100%)	全联合循环
效率试验值	31.0%	31.0%	46.1%
效率分析值	30.73%	31.7%	46.82%
相对误差	-0.86%	2.26%	1.54%
热耗率试验值	3.187	3.115	2.185
热耗率分析值	3.216	3.082	2.164
相对误差	-0.93%	1.06%	-1.27%

表 4 GT2 半联合循环变工况分析

工 况	100%	75%	50%
热耗率试验值	2.221	2.434	2.274
热耗率计算值	2.228	2.426	2.288
相对误差	0.30%	-0.329%	0.618%
功率试验值	47.817	41.532	32.184
功率分析值	47.840	41.504	32.211
误 差	0.023	-0.028	0.027

其中计算环境条件为:大气温度:15℃;大气压力:0.0983MPa;大气湿度:0.0063kg/kg(干空气);热耗率单位:kJ/(kW·s)。

(下转第 637 页)

按水煤浆价格 340 元/t, 热值 18.84~20.91 MJ/kg, 重油 1376 元/t, 热值 40.98 MJ/kg 计算, 可以得到两种燃料在同等热值时的用量比为 2.1 t 水煤浆比 1 t 重油。当燃尽率为 97% 时, 可以得出燃料用量产生的经济效益为 $1376 - 2.1/0.97 \times 340 = 640$ 元。

在实际运行中, 影响本次改造经济效益的主要因素还有: 改造后增加用电负荷 324.6 kW, 增加用水量 5 t/h; 为除去锅炉烟气中的 SO_2 , 设备防腐蚀增加 NaOH 用量 15 kg/h。故电的消耗为 $324.6 \times 0.45 = 146.07$ 元/h, 水的消耗为 $5 \times 3 = 15$ 元/h, NaOH 的消耗为 $15 \times 2.5 = 37.5$ 元/h, 合计为 199 元/h。此外还有掏灰人工、维修费用的增加等。但考虑到设备已经按满负荷计算, 所以这些可以忽略不计。

从而, 得出本次改造的直接经济效益, 为 $640 - 199 = 441$ 元/h。按一个供暖季节 120 天计算, 创造的经济效益为 $120 \times 24 \times 441 = 1\,270\,080$ 元。

由此可见, 燃油锅炉改烧水煤浆的经济效益十分显著, 3 个供暖季节即可收回投资, 如能进一步改善水煤浆燃烧技术, 将会产生更大的经济效益。

3.2 燃油锅炉改烧水煤浆的环保意义

燃油锅炉改烧水煤浆后, 由于水煤浆燃烧的火焰温度要比同煤种煤粉的火焰温度低 100~200 °C, 可实现低温燃烧, 低灰、低 SO_2 、低 NO_x 排放, 这样烟气环境污染的治理可以简化。经北京市环保局测试, 本次改造后锅炉烟气脱硫除尘后 SO_2 排放浓度

为 52 mg/m³, 烟尘排放浓度 29 mg/m³, 林格曼黑度 1 级, 低于北京市锅炉污染物综合排放标准中的二类指标^[3]。

4 结 语

北京燕化民用能源热力分公司星城供热站 14 MW 燃油锅炉改燃水煤浆后, 通过一个供暖季节的试运行和一个供暖季节的完善改进, 取得了满意的结果。截至 2003 年 3 月 20 日, 累计安全运行 1 407 h, 已燃水煤浆 2 155 t, 其中连续燃烧的最长时间为 192 h。改造后锅炉实际运行中燃料消耗量为 1.997 t/h, 锅炉热效率为 87.97%, 与设计值接近。计算分析表明了本次改造所产生的经济效益也是十分可观的。此外, SO_2 和烟尘排放浓度均满足国家环保要求。可见, 水煤浆技术在北京燕山石化民用能源热力分公司燃油锅炉改造中的应用是十分成功的。随着水煤浆技术的不断发展和完善, 其作为洁净的代油代气燃料应用前景亦将日益广阔。

参考文献:

- [1] 付 华, 赵继荣. 洁净的代油燃料——水煤浆[J]. 能源工程, 2000, 4: 22—24.
- [2] 赵保成. 工业采暖锅炉水煤浆代油改造技术研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- [3] 北京市质量技术监督局. 北京市地方标准锅炉污染物综合排放标准[Z]. 北京: 北京市环境保护局, 2002.

(上接第 619 页)

计算结果表明: 简单循环和联合循环的效率、热耗率的试验值和分析值均在合同要求的误差范围内, 证明该模型的精度能够满足工程的实际需要。

5 结 论

针对华能重庆燃机电厂建立了一套详细的在线性能分析及故障诊断系统, 得出了以下结论: ①对于各种变工况性能曲线, 采用 BP 网络进行数据拟合, 并将训练好的网络编入性能计算模型中; ②在分级故障的基础上运用基于 BP 算法的灵敏度分析方法对引起热经济性下降的原因进行诊断。运行分析表

明, 该模型对机组变工况性能模拟的精度能满足工程的实际需求, 能对常见热经济性故障进行实时诊断, 为运行人员提供详细的参考, 从而达到优化运行的目的。

参考文献:

- [1] AGAZZANI A. A tool for thermoeconomic analysis and optimization of gas, steam, and combined plants[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119: 885—892.
- [2] WEBBOS P J. Backpropagation through time: What it does and how to do it[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1990, 78: 1550—1560.
- [3] 焦树建. 燃气—蒸汽联合循环装置[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 曹 宏. 华能重庆燃机电厂性能考核试验[J]. 燃气轮机技术, 1994(12): 43—49.

CPL 系统的非稳态数值模拟= **Unsteady-state Numerical Simulation of a CPL (Capillary Pumped Loops) System** [刊, 汉] / QIAN Ji-yu, LI Qiang, CHEN Xiao-bo, XUAN Yi-min (Power Engineering College under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 605 ~ 609.

A one-dimensional dynamic model was set up for a CPL (capillary pumped loops) system. The model can describe a whole variety of physical quantities, such as the system temperature, pressure and flow rate, etc. In an evaporator capillary core a non-thermal equilibrium temperature model is adopted. The model has taken into account the impact of capillary force on the evaporation temperature and speed, as well as the impact of temperature fluctuations in a liquid-storage tube on the system operation. The model was employed to undertake a focus-point analysis of the CPL system start-up process, analyzing several key factors believed to have an impact on the performance of a successful start-up. Numerical calculation results have been found to be in very good agreement with experimental ones. **Key words:** capillary pumped loop, unsteady state model, temperature fluctuation in a liquid storage tank, pressure fluctuation, start-up characteristics

火电厂热力系统并联算法通用逻辑—矩阵模型= **General Logic-matrix Model of a Parallel Algorithm Used for the Thermodynamic System of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / WANG Nai-hua, HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong (College of Energy and Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), GAO Yu-chuan (Thermal Power Plant of Qixing Group Co., Zouping, China, Post Code: 256200) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 610 ~ 613, 630.

By using logic variables to express the structural characteristics of a thermodynamic system and a regenerative heater and on the basis of matrix theory an analysis is performed of the material balance and energy balance of the regenerative heater. As a result, set up was a general logic-matrix model of parallel algorithm for the thermodynamic system of the thermal power plant. The model has comprehensively taken into account the thermal efficiency of the regenerative heater and the various factors relating to auxiliary steam and water services, etc. The logic-matrix model features clarity of conception, ease of construction and suitability for universal applications, thus providing a basis for the preparation of computation programs for a general thermodynamic system. Moreover, the model can also serve as a convenient tool for real-time measurement and test, control and optimization. **Key words:** thermodynamic system, logic variable, general logic-matrix model

基于现场数据的中速磨煤机动态建模研究= **A Study of the Dynamic Modeling of a Medium Speed Pulverizer Based on On-site Data** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-tao, NI Wei-dou, LI Zheng, ZHENG Song (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 614 ~ 616, 633.

On the basis of on-site data and in conjunction with the working principle of a power plant coal-pulverizer system a state-space dynamic mathematical model has been set up of the coal pulverizer outlet temperature and pulverizer inlet-air flow rate through an analysis of the coal pulverizer control system. During the process of various off-design operating conditions with the coal-pulverizer cold air port and hot air port opening degree serving as an input a dynamic model was built for the coal-pulverizer outlet temperature and inlet air flow rate. This dynamic model features relatively high precision and can quite truly reflect the actual operating condition of the coal pulverizer. Due to a strong coupling effect of the system itself the created coal pulverizer model can lay a good foundation for the optimized configuration of the control system and for enhancing the quality of control. **Key words:** coal pulverizer, outlet temperature, inlet air flow rate, dynamic modeling

联合循环电站在线性能计算及分析诊断= **On-line Performance Calculation and Fault Diagnosis of a Combined Cycle Power Plant** [刊, 汉] / XIAO Rui, TANG Sheng-li (College of Power Engineering under the Chongqing University)

ty, Chongqing, China, Post Code: 400044), CAO Hong (Huaneng Chongqing Gas Turbine Power Plant, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 617 ~ 619, 637.

By adopting a method combining theoretical analysis with historical operating data an off-design performance calculation was conducted of a combined cycle power plant. Through an evaluation of calculation results one can ascertain whether there is a lowering in performance of any one system. Moreover, on the basis of a graded fault classification to utilize BP algorithm-based sensitivity analytical method, it is possible to perform an on-line diagnosis of the causes triggering a performance deterioration, thus accumulating the experience of combined cycle plant operation and enhancing management level. **Key words:** combined cycle, off-design operation, BP algorithm

一般传热规律下广义不可逆卡诺热机的构形优化 = **Configuration Optimization of a Generalized Irreversible Carnot heat Engine under a General Heat Transfer Law** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-hui, YANG Mo (College of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 620 ~ 623.

On the basis of a generalized irreversible Carnot heat engine model and in conjunction with a general heat transfer law the characteristics of heat engine configuration optimization under the condition of finite construction materials were obtained, namely, a new relation of quantitative allocation of optimum heat conductivity. An analysis was conducted of the impact of such factors as the internal irreversibility and heat transfer laws, etc on the characteristics of heat engine configuration optimization. It has been found that the conclusions given in some now available literature pertain to a special case of the relation obtained by the authors. The conclusion reached herein can serve as a theoretical guide for the optimized design of heat engines. **Key words:** heat engine, general heat transfer law, optimization, allocation of thermal conductivity

催化裂化余热锅炉的技术特点 = **Technical Features of Waste Heat Boilers Used in a Fluid Catalytic Cracking Unit** [刊, 汉] / SUN Kai-hong (SINOPEC Engineering Construction Corp., Beijing, China, Post Code: 100011), WANG Heng (Thermal Energy Engineering Department, Beijing University of Science & Technology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 624 ~ 627.

In comparison with conventional boilers waste heat boilers destined for catalytic cracking units have some specific features, such as a wide range of superheated steam temperature regulation and operating conditions subject to changes in step with the working conditions of a fluid catalytic cracking unit. In light of the different conditions of catalytic cracking regeneration technology and flue gases the authors have focused on such problems as the avoidance of superheater overheating and low-temperature corrosion of economizers, as well as the alleviation of ash deposits. Some measures are proposed for ensuring the stable control of feedwater regulating valves. Furthermore, in connection with the production of high-parameter steam by high-temperature waste heat from a large-sized oil refinery unit, it is recommended to realize the utilization of steam on a graded basis. **Key words:** oil refinery, catalytic cracking unit, waste heat boiler, technical features

基于 Symphony 的风粉在线监测系统的实现和应用 = **Realization and Application of a Symphony-based On-line Air and Pulverized Coal Monitoring System** [刊, 汉] / SHENG Sai-bin, LI Guo-qiang (Automation Department, Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 628 ~ 630.

An on-line air and pulverized coal monitoring system based on Symphony distributed control system is described. As compared with an independently developed monitoring system, the recommended system enjoys a marked edge in terms of safety, cost effectiveness and the visualization of operation effect. Proceeding from the system functions a concise analysis