

# 一种电站热工流体系统故障诊断的方法

晏水平, 黄树红, 高 伟

(华中科技大学 动力系, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 提出了对复杂系统进行故障诊断的系统划分策略, 并以电站中的凝结水系统为例, 介绍了系统仿真的方法及模型, 探讨了使用实时系统仿真模型与故障模型来进行故障判断及诊断的方法。本方法不仅可以对系统中的部分常见故障(如管道的泄漏与堵塞)进行诊断, 而且解决了复杂系统中剩余量生成困难的问题, 为实时的、自主型的故障诊断系统在电站中的应用打下了基础。

**关 键 词:** 故障诊断; 仿真模型; 电站系统

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A

## 1 前言

由于火电厂中设备与设备之间相互耦合, 系统庞大而复杂, 决定了火电厂是一个高故障率的生产场所。为了减少因故障停机等事件而造成重大经济损失, 有关电站设备和系统的状态监测和故障诊断系统的研制历来都受到了人们的很大重视。经过长期的努力, 国内外有很多这样的系统已投入实际应用。但是, 这些系统绝大多数功能比较单一, 例如, 有的仅对机械振动类故障进行了诊断, 有的则仅对锅炉管道泄漏故障进行了诊断, 没有形成对整个电站系统的综合诊断系统。另外, 目前开发出来的这些诊断系统, 大多数是在人工参与下进行的辅助诊断系统, 其诊断过程需要人员的参与和照料, 属于一种非自主型的系统, 使其应用范围受到了很大的限制。本文的研究正是针对这种情况提出的。

## 2 系统划分

将一个复杂的诊断系统分成多个相对简单、独立的子系统, 对不同的子系统分别进行诊断, 是一种比较实际的工程方法。这样, 不仅可以简化诊断过程, 使子系统之间的影响减少, 不会因为某个子系统不能诊断而影响其它的子系统, 也可以充分利用现有的诊断方法和技术, 根据实际情况来进行阶段性的开发和维护。

由于火电厂系统复杂, 涉及到很多设备及子系统, 使用某种单一的故障诊断方法来完成对这样系统的实时动态诊断几乎是不可能的。对于管道泄漏故障来说, 由于系统中存在的管道分支众多, 系统的操作方式也很复杂, 需要仔细了解系统的管道分布情况及其当时的操作方式, 才能区分是管道的正常操作还是发生了泄漏故障, 如果这时仅使用神经网络等基于知识的故障诊断方法, 很难全面获得有关系统在各种操作方式下的知识, 因而使得诊断结果难以准确。这时, 采用基于模型的故障诊断方法则比较合适, 虽然有关系统的精确数学模型难以获得, 但可以采用简化了的数学模型来反应系统的大致变化, 如文献[1~2]中的定性仿真模型。对于汽轮发电机组的一些振动故障来说, 由于无法得到其数学模型, 采用基于模型的故障诊断方法是不合适的, 而采用基于知识的故障诊断方法则比较有利<sup>[3]</sup>。因此, 一个复杂的诊断系统可以使用不同的诊断方法, 并且需要根据所使用的不同方法对系统进行划分。

另外, 复杂系统中各部分之间的相互联系、相互影响的程度是不同的, 根据这些差别将其分为不同的子系统。例如, 对于汽轮发电机组轴承与其润滑油系统, 虽然轴承的温度与轴系及轴承的振动情况有关, 但更主要是直接受其润滑油流量、进口温度的影响, 这时, 将轴承的温度与其润滑油系统测量参数放在一起形成一个子系统, 而将轴承的振动与轴系的振动参数组成另外一个子系统。又如, 对于凝结水系统与给水系统, 它们之间通过除氧器联系, 在很多的运行情况下, 除氧器的压力、温度、水位保持恒定, 这样, 两个系统之间的联系关系也就相对减弱, 虽然这两个系统在某种程度上相似(对于管道堵塞、泄漏等故障来说), 可以使用相同的诊断方法, 也应该将它们分成两个子系统。这是进行子系统划分的第二个层次。

根据以上原则, 电站热工系统可大致分为凝结水系统、给水系统、循环水系统、冷却系统、润滑油系

统、过热蒸汽系统、再热蒸汽系统、烟风系统等。

### 3 实时仿真与故障诊断系统

系统仿真通常是模拟现场设备、系统及其环境等,它一般不与实际的设备系统发生数据交换。而诊断系统需要在线监测实际系统的参数及其变化,以确定系统中是否有故障发生及故障的程度、类型等。如果要使用系统仿真技术进行故障诊断,就需要利用实际系统的采集数据对其进行实时仿真及故障判断,图1描述了对某个子系统进行实时仿真和故障诊断的总体方案,在进行仿真计算的过程中,使用部分实时采集数据(如系统中泵和阀门的状态等)作为实际设备仿真模型的输入,将仿真结果与相应的采集数据(如系统中的流量、压力、温度等)比较,判断系统中是否存在故障,如果存在故障,则进入诊断系统。在故障诊断及定位的过程中,可以根据实际情况而采取不同的方法判断故障的状态(该故障是否存在以及故障的类型、程度、位置等)。

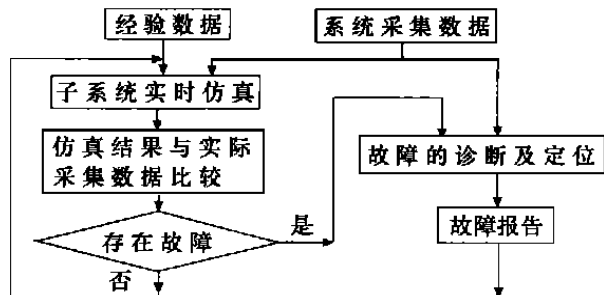


图1 实时仿真与故障诊断系统的总体方案

系统故障诊断的方法有很多,而上述的诊断方法是一种基于仿真模型和故障模型的方法,诊断过程中作如下两点假设:

(1) 在一个采样周期内,子系统中只有单个故障发生,不存在多个故障同时发生的情况。

(2) 子系统可能发生的故障,都可以用相应的故障模型来描述,诊断系统只能诊断这些故障类型。

对实际系统来说,这种假设在绝大多数情形下是合理的,由于采样周期很短,多个故障几乎同时发

生的概率很小。另外,系统的故障模型是根据经验总结得到的,系统发生新型故障的可能性也是很小的。

### 4 凝结水系统的仿真与诊断

文中以火电厂600MW机组的凝结水系统为例来说明使用仿真技术对电站热工系统进行故障诊断的方法、模型和计算过程等。600MW机组的凝结水系统主要由两台凝结水泵、除盐装置、两台凝结水升压泵、轴封加热器、凝结水再循环、四个低压加热器及各路低压减温水组成。除盐装置和各加热器均有旁路,在泵的出口处布置有压力测点,各加热器的出口处布置有温度测点,此外,凝结水泵及凝结水控制阀出口处有流量测点。

#### 4.1 仿真简化

对一个实际系统的仿真,通常由逻辑仿真和动态仿真两部分组成。逻辑仿真是对系统设备的开启顺序、控制过程等的仿真,这种仿真可以根据实际系统逻辑方面的设计资料,对系统进行完整的仿真,不需要对系统作一些假设和简化处理,它可以完全真实地反映实际系统,限于篇幅,本文对这种情况不作具体介绍。动态仿真是对系统中压力、流量、温度等动态变化参数的仿真,由于实际系统的复杂性,这种仿真没有精确的数学模型,往往要在一定假设的基础上对系统进行简化,以满足模型及计算的需要。

对于流体网络系统的动态仿真,采用节点支路模型来计算各种阀门、泵操作方式下压力和流量变

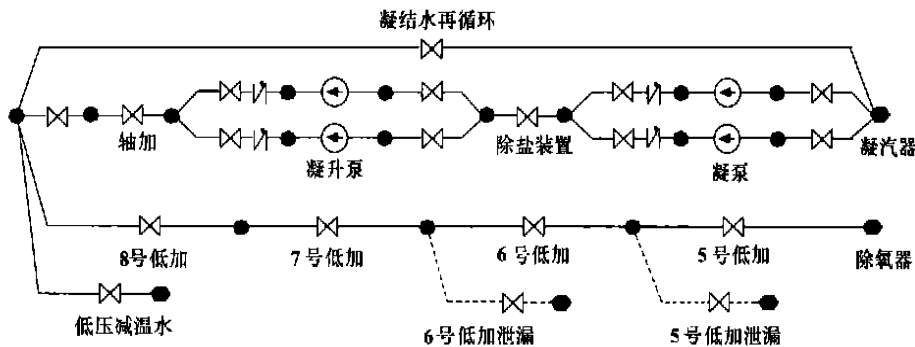


图2 凝结水系统仿真图

化规律,其基本假设有两点:(1)流体与外界的质量交换仅发生在节点处;(2)支路仅作为阻力元件,用于连接节点。根据这种假设,可以将实际的系统流

程图转化为仿真流程图, 如图 2 为凝结水系统的仿真流程图。

#### 4.2 仿真模型

对于带阀门的管路, 可以根据不可压流体的伯努力方程得到其压力和流量的关系, 若认为管道的截面积与其阀门的开度成正比关系, 可得到如下的形式:

$$f = k_{adm} v_p \sqrt{p_1 - p_2} \quad (1)$$

式中  $f$  为质量流量,  $k_{adm}$  为管路的流动特性系数,  $v_f$  为阀门的开度 ( $0 \sim 1$ ),  $p_1, p_2$  分别为管路上游、下游的压力。对于不可压流体, 可以用此公式计算管道压力和流量的稳态及瞬态变化关系; 对于可压流体, 用此公式分段计算其稳态情形, 在稳态的基础上再叠加一个惯性环节来计算其瞬态。

为了方便计算, 将并联及串联阀门管路进行等效简化为单一的阀门管路, 并联等效后的阀位为各支路阀位之和, 串联等效阀位为各支路阀位之积。

对于离心泵所在的管路, 其进出口压力  $p_2, p_1$  与流量  $f$ 、转速  $n$  的关系可表示为

$$p_2 - p_1 = k_1 f^2 + k_2 f n + k_3 n^2 \quad (2)$$

式中  $k_1, k_2, k_3$  为泵的特性系数, 可以由泵的特性曲线近似拟合得到。

对于每个节点, 根据质量平衡, 建立节点进出口流量之间的关系,

$$c_i \frac{dp_i}{dt} = \sum_{j=1}^n f_j \quad (3)$$

式中,  $c_i$  表示节点的流体可压缩能力, 对不可压流体,  $c_i$  为零;  $f_j$  表示具有方向性的流量, 可以规定为流入节点为正, 流出为负。

根据能量平衡, 可以建立节点和管道的温度计算模型,

$$M_i \frac{dh_i}{dt} = \sum_{j=1}^n f_j h_j + Q_i \quad (4)$$

式中  $M_i, h_i$  表示节点或管道  $i$  的流体质量、焓,  $Q_i$  表示与外界的换热量。其中, 换热量可以由传热方程求解, 对于加热器所在的管道、凝汽器及除氧器所在的节点, 它包括与蒸汽、饱和水、未饱和水及环境的换热, 其余管道和节点只与环境换热。

在获得了压力平衡、动量守恒及能量平衡方程后, 可以对这些方程进行联立求解, 获得有关流体网络的压力、流量、温度参数。为了求解方便, 需要将支路的非线性方程线性化(式(2)), 形成流体网络的大型线性方程组, 采用迭代法及稀疏矩阵的双因子

分解法求解。由于阀门和泵的状态均反映在方程中, 这种方法能求解系统在各种操作方式下的变化规律。

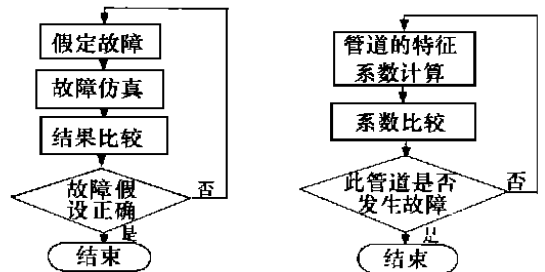
#### 4.3 仿真模型的修正

由于系统的动态参数仿真采用的是近似模型, 为了使得仿真过程有更好的精度, 常常需要根据经验数据对模型进行某种程度上的修正。当阀门的流量与其阀位不是线性关系时, 不能直接采用式(1), 这时可以根据经验数据整理出管道通流系数与阀位的插值关系表, 先插值求系数, 再使用式(1)进行计算。对于加热器、除氧器及凝汽器, 由于其换热过程十分复杂, 很难获得蒸汽、水与管道内流体及环境的换热系数, 这时, 可以从现场收集各种工况下的数据, 再根据模型推导出换热系数。

在将仿真模型用于故障诊断之前, 需要根据现场数据来对这些模型进行调整, 使得仿真模型能准确反映系统的真实运行情况。

#### 4.4 故障仿真

在系统仿真的过程中, 需要反映一些常见故障发生时的系统状态。通常, 我们根据类似系统或系统以前的运行经验来确定系统中的常见故障, 以此来建立各种故障模型, 将这些模型插入到系统模型中进行仿真。在热工流体网络系统中, 对于滤网、管道或阀门的堵塞故障, 可以用阀门模型来仿真, 以阀门的开度来表示堵塞程度的大小, 阀门所处的位置表示堵塞故障发生的位置。对于管道的泄漏故障, 用节点—管道—节点模型来仿真, 以第一个压力节点来表示泄漏发生的位置, 第二个压力节点表示泄漏的环境, 管道上的阀门开度表示故障的程度大小。对于系统中的逻辑故障, 如泵的故障跳闸、阀门的误动作等, 可以在系统逻辑仿真模型中插入。



(a) 泄漏及逻辑型故障的诊断过程 (b) 堵塞故障的诊断过程

图 3 典型故障的诊断过程

(下转第 443 页)

## 4 WDR系列电热锅炉的优点及不足

使用证明,WDR系列电热锅炉主要具有以下优点:

(1) 电热管直接与介质接触,电能利用率高,可达97%以上;技术先进,自动化程度高,不需专人操作,运行安全可靠。

(2) 制造简单,结构紧凑,占地少,无燃料、灰渣运输及储存场地要求,不需专门厂房,可放于地下室或楼顶,能有效利用空间或单位空余地方,基建投资费用低。

(3) 启停速度快,易于操作;辅助设备少,无噪音,无污染,为绿色环保产品。

(4) 故障率低,维修费用低,可通过法兰盘的装卸来更换电热管而不需装卸锅炉本体,使维修更方便。

(5) 出力足,供热快,水温稳定;可自动调节锅炉出力和压力。

(6) 易与蓄热器及热水箱配套,可满足不同容量要求,系列化方便,可利用用电优惠政策,分时用电,使运行费用更低。

但是,WDR系列电热锅炉也有以下不足:

(1) 承压锅炉要求受压部件在额定工作压力下有足够的强度,而该系列电热锅炉采用电热管分两层由锅炉两侧沿非径向水平插入锅筒,因此筒体须采用非径向开孔,由于出现非径向孔,导致筒体壁厚增加,使金属耗量增加,成本增大。

(2) 对水质要求较高,否则易造成电热管结垢腐蚀,影响传热效果和使用寿命。

(3) 对供电稳定性要求较高,受用电政策的影响较大,特别适用于用电政策优惠、电价较低和环保要求较高的地区使用。

### 参考文献:

- [1] GB/T16508—1996 锅壳锅炉受压元件强度计算[S].

(渠源 编辑)

(上接第433页)

### 4.5 故障诊断

在对凝结水系统故障进行诊断时,针对不同的故障类型而采用不同的方法,如图3所示。对于泵或阀门跳闸等没有程度区分的逻辑型故障,可以采用故障仿真的方法来逐个搜索;对于管道堵塞或阀门卡涩等故障,由于故障程度难以假定,采用管道特征系数校核来进行诊断;对于管道的泄漏故障,也可以用故障逐个搜索的方法确定系统中泄漏发生的范围,由于测点条件的限制,具体泄漏位置需要运行检修人员来判断。使用这种方法进行诊断时,不需要复杂的故障规则库及推理过程,只需用故障描述表输出诊断结果。

## 5 结论

在复杂系统的实时故障诊断过程中,按不同的

方法及联系紧密程度进行系统划分是必要的。在对电站的凝结水系统的热工系统进行实时故障诊断的过程中,可以使用系统仿真模型及故障模型进行故障的判断及诊断,完成对系统的实时、自主型诊断。

### 参考文献:

- [1] GAUTAM BISWAS, RAVI KAPADIA, XUDONG W YU. Combined qualitative-quantitative steady-state diagnosis of continuous-valued systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans* 1997, 27(2): 167—185.
- [2] HAK-YEONG CHUNG, ZEUNGNAM BIEN, JOO-HYUN PARK, et al. Incipient multiple fault diagnosis in real time with application to large-scale systems[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, 41(4): 1692—1703.
- [3] TIMO SORSA, HEIKKI N KOIVO, HANNU KOIVISTO. Neural networks in process fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 1991, 21(4): 815—825.

(孙显辉 编辑)

cillation method

边缘检测小波对信号奇异性的检测在汽液两相流动中的应用 = **The Use of Edge Detection of Wavelets for Signal Singularity Detection in a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 汉] / SHANG Zhi, GUO Yu-jun, SU Guang-hui, et al (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 421 ~ 424

Currently, function (signal) singularity detection method is mainly realized through the use of wavelet transformation. As the dissociation of wavelets is characterized by a fairly good localized feature of space and frequency domain, the wavelet transformation can delineate the variation law of signals and perform the detection and analysis of various singular properties of singular points in signals. It is also possible to analyze a gas-liquid two-phase flow condition through an edge detection of wavelet transformation and detect thermodynamic data in a gas-liquid two-phase flow. The edge detection of pressure curves of a gas-liquid two-phase uniform-phase flow model shows that the edge detection of wavelets can be fully utilized to perform the edge detection of the gas-liquid two-phase flow conditions. **Key words:** wavelet transformation, edge detection, gas-liquid two-phase flow

减振算法研究及其在轴流压缩机叶片中应用 = **A Study of Vibration Damping Algorithm and Its Application on Compressor Blades** [刊, 汉] / XUE Guo-xin, XIAO Li-chuan (Jiangsu Provincial Petrochemical Institute, Changzhou, Jiangsu Province, China, Post Code: 213016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 425 ~ 427

The use of viscous-elastic materials has been considered as one of the effective means for coping with vibrations in major mechanical devices of power engineering units. The calculation of vibration eigenvalues, though rather complicated, is of crucial importance. In view of the possibility of a wide-range variation of damping characteristics of mechanical devices the authors have proposed a high-order perturbation model. The latter has a unified calculation scheme and can be employed to perform a reliable analysis of the eigenvalues of the relevant devices. A study of its use on compressor blades has shown that the model gives reliable results, lends itself to be easily programmed by a computer and can be readily popularized for general use. **Key words:** vibration damping, analysis of eigenvalues, perturbation method, compressor blade

汽轮机循环水系统的稳态仿真数学建模 = **Mathematical Modeling for the Simulation of the Circulating Water System of a Steam Turbine** [刊, 汉] / LIU Hai-feng, SHI Xiao-ping, YAO Yu (Simulation Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 428 ~ 430

The circulating water system of a steam turbine represents a heat exchange system of cooling water and high-temperature steam. The mathematical model based on the mechanism of the cooling water and water pressure is very complicated and not suited for a computer-based real-time simulation system. By the use of the measured data of a power plant and with the help of a hyper-curvature fitting method set up was a mathematical model for the simulation of the water temperature and water pressure of the circulating water system. The recommended model involves a relatively small computation load and features a high precision as certified by the simulation results. **Key words:** mathematical modeling, simulation, super-curvature fitting

一种电站热工流体系统故障诊断的方法 = **A Fault Diagnosis Method for the Thermodynamic Fluid System of a Power plant** [刊, 汉] / YAN Shui-ping, HUANG Shu-hong, GAO Wei (Power Engineering Department, Central China University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 431 ~ 433, 443

Presented is a strategy of system division designed to conduct fault diagnoses for a complicated system. With the condensate system of a power plant serving as an example described are the system simulation method and its related model. Explored is a method of fault identification and diagnosis through the use of a real-time system simulation model and failure model. The recommended method can not only make a diagnosis of the common faults (for example, pipe leakage and clogging) of the system but also solve the residuals-caused difficult problems in a complicated system. This has laid the foundation for the use of autonomous type of fault diagnosis system in power plants. **Key words:** fault diagnosis, system

simulation, power plant system

铸铁锅炉爆破压力的热态试验和理论分析 = **Hot-state Explosion Pressure Test of a Cast-iron Boiler and Its Theoretical Analysis** [刊, 汉] / LIU Wen-tie, HE Yu-rong, LI Zhi-hong (Energy Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), BAI Wu-yin (Shijiazhuang Baoshi Electronics Group Co., Shijiazhuang, Hebei Province, China, Post Code: 050061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 434 ~ 436

On the basis of the test results of a full-scale hot-state explosion test a calculation and analysis was conducted of the explosion pressure of the following: square-box test parts, nodular cast-iron boiler, grey cast-iron boiler and grey cast-iron boiler plates. As a result, obtained were the relevant safety factors recommended for selection. The tests and analysis indicate that the safe and reliable operation of cast-iron boilers can be assured. **Key words:** hot-state explosion test, cast-iron boiler, explosion pressure, safety factor

流化床中焚烧有机废液的热力特性分析 = **Thermodynamic Analysis of the Burning of Organic Waste Liquid in a Fluidized Bed Incinerator** [刊, 汉] / BIE Ru-shan, LI Bing-xi, LIU Wen-tie, LU Hui-lin, YANG Li-dan, ZHOU Ding (Energy Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 437 ~ 440

With coal serving as an auxiliary fuel heat balance equations were established for the burning of organic waste liquid in the dense-phase zone and rare-phase zone of a fluidized-bed incinerator. By solving for these equations determined were the following: 1. The ratio of waste liquid being incinerated in the dense-phase zone as calculated against the total incinerated quantity; 2. Characteristics curves showing the effect of the incineration temperature in the dense-phase zone, excess air factor at the furnace outlet and the preheating air temperature on the consumption of the auxiliary fuel and the furnace outlet temperature. The results of calculation indicate that with the ratio of the waste liquid incinerated in the dense-phase zone being kept at 70% of the total incinerated quantity the temperature in the dense-phase zone can be roughly maintained at the same level as that at the furnace outlet. Moreover, it is highly desirable to control the dense-phase zone temperature at 850 - 900 °C in order to reduce the consumption of auxiliary fuel and to limit the excess air factor at less than 1.7 in order to maximize the preheating air temperature. The above findings can serve as a theoretical basis for the design and operation of fluidized bed-based waste liquid incinerators. **Key words:** organic waste liquid, fluidized bed, incinerator, auxiliary fuel consumption

WDR 系列 0.35 ~ 1.4MW 电热锅炉及其设计 = **WDR Series 0.35 - 1.4 MW Electric Heating Boilers and Their Design** [刊, 汉] / CAO Xi-gong (Technology Center of Zhengzhou Boiler Works, Zhengzhou, Henan Province, China, Post Code: 450052) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 441 ~ 443

Electric heating boilers enjoy the following merits: no noise, no pollution, advanced technology, simple fabrication, compact construction, safe and high-efficiency operation, etc. A detailed account is given of the structural design and specific features of the WDR series 0.35 - 1.4 MW pressure-bearing electric heating hot-water boilers. **Key words:** electric heating, pressure-bearing hot water boiler, cylindrical body, heating surface, specific features

活性炭联合脱硫脱硝工艺 = **Activated Carbon-based Combined Desulfuration and Denitration Technology** [刊, 汉] / LUO Yong-gang, LI Da-ji, YANG Ya-ping (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 444 ~ 446

Described is a kind of new technology featuring combined desulfuration and denitration. With the use of this technology it is possible to remove such a variety of items as  $SO_x$ ,  $NO_x$  and poisonous matter in flue gas like mercury, dioxin, etc. The merits, demerits and the development trend of the above-cited technology have also been presented. The information provided may serve as major reference data for the treatment of air pollution in China. **Key words:** desulfuration, denitration, activated carbon

火力抽水—蓄能发电 = **Thermal Power and Pumped Storage-based Electric Power Generation** [刊, 汉] / SHENG Jian-lun (Computer Department, Qingdao Architectural Engineering Institute, Qingdao, Shandong Province, China,