

# 循环流化床锅炉在线监测与状态诊断专家系统

陆继东, 黄义华, 沈 凯, 陈交顺

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**从循环流化床锅炉自身特性、系统要求出发,设计了一套循环流化床锅炉在线监测与状态诊断专家系统。在分析循环流化床锅炉常见故障状态与常用诊断技术的基础上,详细阐述了循环流化床锅炉在线监测与状态诊断专家系统的设计流程、软件实现、系统功能等,并经现场实践验证。

**关 键 词:**锅炉; 循环流化床; 在线监测; 状态诊断; 专家系统

中图分类号: TP182; TK229.6<sup>+</sup>6 文献标识码: A

## 1 引言

我国大容量、高参数机组的不断涌现,机组监测和控制的参数也越来越多,某些大容量机组需监测数千个参数。像这样复杂的系统,一旦发生故障,必须在一个很短的时间内对故障做出正确的反应,并采取相应处理措施,否则,有可能由于故障而造成大事故,产生灾难性后果<sup>[1]</sup>。对火力发电站来说,机组的非计划停机大部分是由于锅炉事故而引起,其时间占全年总停机时间一半以上。而对循环流化床锅炉来讲,现有的控制系统着重于蒸汽参数的监控,而从外扰动到蒸汽参数信号的响应是有相当的延迟的,如果仅从现有常规控制系统提供的参数来判断锅炉运行状态,则一旦判定故障发生,实际上已很难通过某种调整来消除了。因此,着眼于锅炉状态分析,研究有效的检测手段和诊断分析技术,对于提高机组运行的安全性和经济性就颇具现实意义。

经过 20 多年的发展,人工智能技术特别是专家系统技术已广泛应用于自然科学和社会科学的各个领域,其主要思想是:根据所能获得的设备状态参数,模拟领域专家诊断推理方式,运用专家的经验知识和各种相关的专业知识诊断设备故障,使得高水平专家系统的知识和解决问题的能力得到共享,使一般人员有可能解决复杂的问题,而不受环境因素和心理状态的影响。

本文的应用对象是我们自行设计的油改煤循环流化床锅炉,以产过热蒸汽供热和发电为主,额定蒸

汽压力为 3.82 MPa,蒸汽温度为 450 °C。锅炉燃用 0~8 mm 宽筛分燃料,分离器采用低温旋风分离,飞灰回送采用流化密封送灰器。整个锅炉设计合理、技术先进、结构紧凑。

## 2 循环流化床锅炉常见故障分析

流化床燃烧又称沸腾燃烧,它具有低温强化燃烧的特性<sup>[2]</sup>。流化床调节控制的时延及惯性较大,多个变量(风量、煤质特性、给煤量等)相互耦合影响,使系统更为复杂,随着循环流化床锅炉投运数量的增加及大型化,暴露了不少故障问题。其中有设计方面的原因,也有设备方面的故障状态以及运行中存在的问题<sup>[3]</sup>。

### 2.1 分离器和回料阀运行中的问题

当前分离器主要存在的问题是磨损严重,分离器的磨损主要是由内衬材料的耐高温和耐磨性能不够,砌筑和浇灌质量差引起,另外存在一些膨胀、密封等方面的问题,其次是后燃现象。回料阀的故障有堵灰和结渣。其原因是:设计不够合理、运行操作不当、入口飞灰温度过高等原因。

### 2.2 结焦与熄火

在流化床锅炉运行中床内结渣是较多发生的事故。其原因是:床温超过灰渣熔点,引起结渣;或是料层太薄,被风吹穿以后引起结渣;或因操作风量太小,流化质量不好,引起结渣。熄火也是较常见的流化床锅炉事故之一。当煤质突然变差,操作不当时;或排渣不注意;一次性排放太多,致使床料放空时,都会造成锅炉熄火。

### 2.3 受热面故障状态,其中以“四管爆漏”故障为主<sup>[4]</sup>

所谓“四管”,既是指锅炉的水冷壁管、过热器管、再热器管和经济器管。它们是电厂锅炉主要的受热面管子。影响“四管爆漏”的因素很多,有设计、

制造、施工、检修、运行、管理和煤种等诸多方面, 而且这些因素又错综复杂地相互作用。因此各种“爆漏”往往是好几个因素同时存在并相互作用的结果。影响水冷壁爆漏的原因主要是膨胀受阻、烟气侧管壁高温腐蚀、炉膛热强度偏高、过热器超温等。过热器是“四管”爆漏的主要部位, 主要原因是长期过热、侧包覆与侧水冷壁间的鳍片拉裂等, 引起再热器爆漏的主要原因有烟温偏差和热力偏差引起的超温爆管, 经济器的爆漏则主要是磨损和焊接质量差所引起的。

2.4 给水系统故障状态, 其中又以汽包故障为主  
保持汽包水位是机组正常安全运行的重要保证。汽包水位过高, 蒸汽空间缩小, 将会增加蒸汽带水, 使蒸汽品质恶化, 容易造成过热器、汽轮机通流部位结盐垢; 汽包水位过低, 会使控制循环锅炉炉水循环泵进口汽化, 引起锅炉水循环破坏, 水冷壁管超温过热, 当严重缺水而又处理不当时, 会造成大面积爆管。

2.5 辅机系统故障  
主要指锅炉运行过程中有关的各种辅机, 如一次风机故障、引风机故障等。

### 3 循环流化床锅炉状态诊断过程中常用物理诊断技术

#### 3.1 红外测温诊断技术

红外测温技术在工业上主要应用在电力、冶金、化工、建筑、电子等方面的故障状态检查和工艺流程中的测温等。红外测温技术应用于循环流化床锅炉状态诊断是一个全新的课题, 具体应用范围有锅炉火焰和燃烧状态进行辨别与控制、热力设备疲劳损伤、热力设备热机械学特征规律、热力系统漏热及保温进行诊断与评价、转动机械轴系(磨煤机、风机等)过热故障的诊断、储煤自燃隐患的诊断、锅炉堵灰的红外监测与控制、锅炉热污染控制等。

#### 3.2 超声波诊断方法

超声波诊断技术作为一种非接触式高温测量方法, 在煤粉锅炉燃烧检测与诊断中越来越受到重视<sup>[3]</sup>, 它可用于监视炉膛上部区域的烟器温度, 决定何时进行吹灰操作, 维持锅炉良好的运行性能; 可用于监视炉膛各个燃烧器区域附近烟器温度, 有助于识别和清除燃烧器故障导致的燃烧工况异常; 同时可加入到对污染物生成有重要印象的温度的优化控制, 实现清洁燃烧。

#### 3.3 无损检测技术

无损检测<sup>[6]</sup> (NDT, Nondestructive Testing)是指对材料、部件进行的非破坏检测, 以期发现表面和内部缺陷的一项专门技术。无损检测技术还有: 渗透探伤法, 磁粉探伤法, 涡流探伤法, 射线探伤法, 光学探伤法等。

### 4 锅炉在线监测与状态诊断专家系统设计 与实现

循环流化床锅炉状态诊断专家系统以状态监测、诊断为主, 可以实时显示如下信息与状态: 采集硬件、仪器仪表、锅炉设备、运行状态、故障查询、人事信息等。采集硬件显示窗口可以显示采集硬件的状态与相关信息(硬件地址、硬件型号、设备代号、功能描述等); 仪器仪表显示窗口可以显示一次仪表、

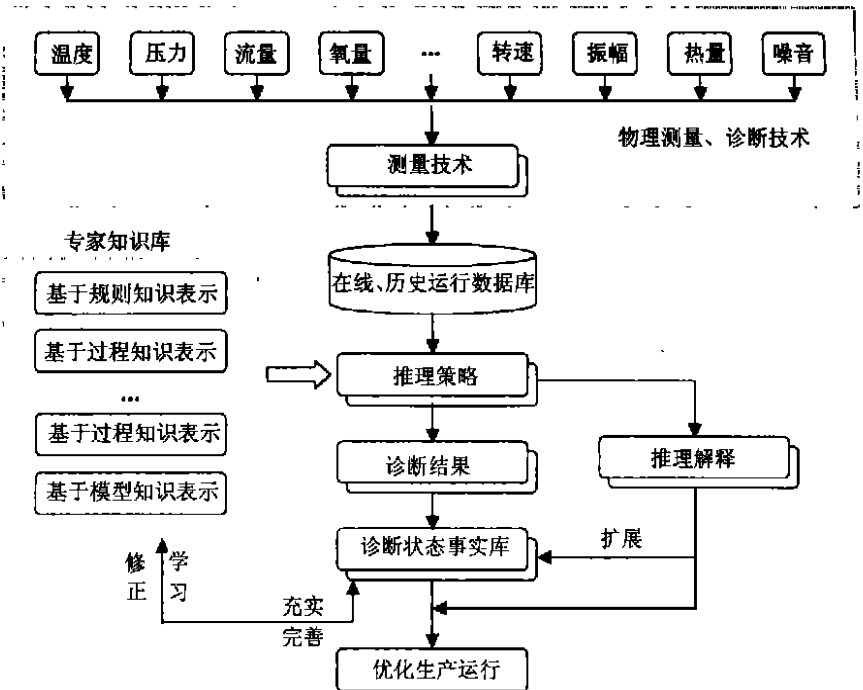


图 1 锅炉状态诊断专家系统设计流程图

二次仪表的状态与相关信息(设备型号、设备代号、设备量程、功能描述等);锅炉设备显示窗口可以显示锅炉部分设备的状态(运行状态、磨损程度、寿命预测、振动状况等)与设备信息(设备型号、设备材料、设备结构、功能描述等);运行状态可以对锅炉运行状态进行动态诊断和故障追忆。系统设计流程见图1,系统主界面见图2。



图2 系统主界面

#### 4.1 开发工具与运行平台

Inprise 公司推出的 Delphi 是一个基于构件的应用程序开发环境<sup>[7]</sup>,它可以快速开发出一个 Windows 应用程序。Delphi 的数据库工具可支持开发强大的桌面或 C/S 结构的数据库应用程序和报表。

#### 4.2 软件系统的综合结构

动态诊断操作维护中又由规则库管理、征兆/故障集、词典维护、推理测试、推理解释等五个模块组成。下面分别详细介绍各个模块的功能。

##### 4.2.1 规则库管理

规则库管理窗口(如图3)分为两栏,左栏显示每一条规则的前提,右栏显示每一条规则的结论,每一条规则用目录树结构进行管理。规则库的操作包括:添加规则、删除规则、修改规则等操作。规则编辑窗口包括:规则名序号、规则置信度、规则的前提部分(前提名称、前提置信度、前提充分性、前提必要性)、规则的结论部分(结论名称、结论置信度、结论充分性、结论必要性),对一个建好的规则库应该作一致性检查和完备性检查,尤其是对造成推理过程陷入无限循环的循环规则链的检查。

##### 4.2.2 征兆/故障集

它是用来建立征兆集合与故障集合的工具。其操作与规则编辑类似,即也包括添加、删除和保存一个事实库的操作,对一个打开的事实库可以进行添

加、修改和删除,由于其数据结构比规则库简单,因而其设计实现和运行操作都要简单一些。

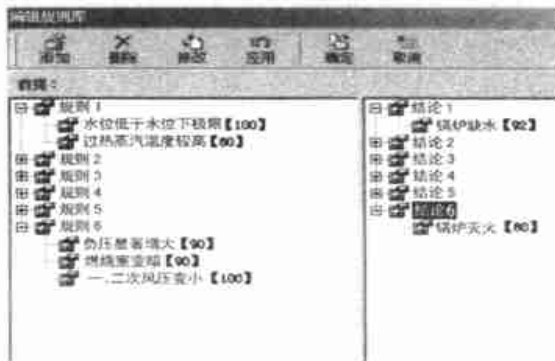


图3 规则库维护界面

##### 4.2.3 词典编辑

机器推理过程中使用的规则和事实都是基于简化的英文代码的。词典是联结机器内部推理与结果输出的一个桥梁。对推理解释更是必不可少的。词典作为规则和事实所用词汇与代码的对应集合,为提高其搜索效率,词典中的词汇采取按字母索引分组的方式来组织。翻译过程中,只检查一个英文代码的第一个字母与词典中某组词汇的开头字母是否一致,如果一致则对该组内的单词进行搜索匹配。假如某一个组内单词数量太多,还可以在该组内继续建立分组,以进一步提高搜索效率,词典编辑的操作也与上面介绍的规则编辑类似。

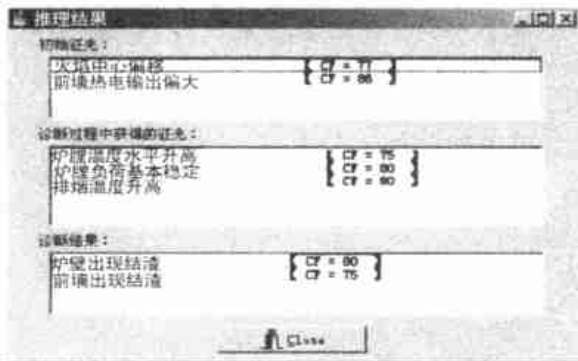


图4 推理结果显示

##### 4.2.4 推理测试

推理模块是为了测试所建知识库而设计的。这里使用了三种方式,即正向推理、反向推理、正反向混合推理,诊断推理的证据有两个来源,一个是从在线信号中自动获取的,另一个是由运行人员根据观察到的情况做出判断交互输入。作为测试系统,设

计成先由用户向事实输入对话框中输入“自动获取的初始征兆”及其置信度, 而后由用户从系统提供的供选征兆中选出“交互征兆及其置信度”, 系统接受征兆输入后即调用规则库进行推理, 并将推理结果(如图 4)显示给用户。

#### 4.2.5 解释

解释是专家系统的重要功能之一。在规则推理诊断中, 要通过回溯推理过程来帮助用户理解从证据到推论的来龙去脉。解释对话框在推理结论集列表框中列出了最近一次所有推理的结论, 点取某一故障, 如“炉墙出现结渣”, 则在右边的推理结果解释框中给解释, 包括推理过程中所使用的每条规则以及证据的来源和置信度。

## 5 结束语

结合循环流化床锅炉的实际特点和课题的需要, 开发了一套循环流化床锅炉计算机在线监测与状态诊断专家系统。该系统不仅能对锅炉的当前运

行情况进行实时显示、控制、分析, 还可对锅炉系统运行中设备的状态实行在线诊断。该系统已于 2000 年应用于油改煤循环流化床锅炉工程项目, 目前一切运行正常, 该系统为锅炉设备的安全、经济运行提供了强大的技术保障。

#### 参考文献:

- [1] 张光纯. 大型电站锅炉事故分析及预测措施[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] 林志杰, 刘德昌. 流化床燃烧锅炉[R]. 北京: 能源部农村能源及电气化司, 1992.
- [3] 刘德昌. 流化床燃烧技术的工业应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 周如曼. 300 MW 火电发电机组故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [5] MUZIO L J, ESKINAZI D, GREEN S F. Acoustic pyrometry: new boiler diagnostic tool[J]. *Power Engineering*, 1989(11): 49-52.
- [6] 黄文虎, 夏松波, 刘瑞岩. 设备故障诊断原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [7] TOM SWAN. Delphi 4 Bible[R]. IDG Books Worldwide Inc, 1999.

(复 编辑)

(上接第 614 页)

炉膛温度变化也很小, 因而燃烧的外部条件变化也不大, 但是随热负荷的增加,  $q_4$  减少的趋势还是比较明显的。且由表 2 可看出尽管纯石油焦粉难烧, 但是在炉膛热负荷强度增加 2~3 倍, 相应炉温提高了 200 °C~300 °C 条件下, 也能取得较高的燃烧效率。

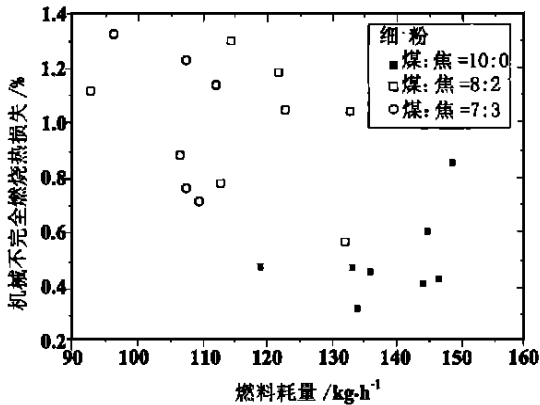


图 7

## 5 结论

在上述所讨论的试验条件下, 可知:

(1) 石油焦的热解特性似无烟煤, 燃烧特性似

贫煤。

(2) 焦煤混合粉着火性能介于纯焦粉和纯烟煤粉之间, 且随掺焦量的增加和煤粉细度的变粗, 着火性能变差, 各种煤粉流着火温度, 纯焦粉 1 000 °C~1 020 °C, 纯煤粉 820 °C~930 °C, 混合粉 860 °C~970 °C。

(3) 石油焦燃烧反应慢, 混合粉燃烧特性要差于纯烟煤粉, 也是随掺焦量的增加, 影响愈趋严重。改变煤粉细度和燃烧配风可以改变其燃尽率, 但在炉膛出口氧量达到  $O_2=4\% \sim 5\%$  之后, 影响就不明显了。

(4) 炉膛热负荷强度对混合粉的燃烧有影响, 在炉温提高时, 不完全燃烧损失  $q_4$  下降。

(5) 煤粉细度对混合粉的着火和燃尽性能影响明显。

值此论文发表之际, 谨向参加本试验的全体工作人员表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 沈伯雄. 石油焦燃烧及其循环流化床燃烧的技术[J]. 石油炼制与化工, 1999, 30(3): 25-28.
- [2] 徐通模. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

(何静芳 编辑)

(Applied Physics and Thermal Energy Engineering Department, Zhongnan University, Changsha, Hunan Province, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—625 ~ 627

Based on a gas-solid two-phase theory and taking into account the pressure loss effect in the air-coal combined flow process a method was proposed for measuring the pulverized coal concentration in primary air pipe after the mixing of air and the pulverized coal. The above measurement was carried out through the use of an energy balance method. Also described are the method and procedures for conducting the on-line and real-time monitoring of the pulverized coal and air speed in the primary air pipe with the use of a dynamic link library technique. The above-cited on-line monitoring method has been found to be very effective for its intended purposes when used on-site at thermal power plants. **Key words:** two-phase flow, pulverized coal concentration, on-line monitoring, dynamic link library technique

**循环流化床锅炉在线监测与状态诊断专家系统 = An Expert System for the On-line Monitoring and Condition Diagnosis of Circulating Fluidized Bed Boilers** [刊, 汉] / LU Ji-dong, HUANG Yi-hua, SHEN Kai, CHEN Jiao-shun (National Key Lab of Coal Combustion under the Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—628 ~ 631

In the light of the special characteristics and system requirements of circulating fluidized bed boilers (CFBB) an expert system for on-line monitoring and condition diagnosis of such boilers has been designed. On the basis of analyzing commonly seen faults of CFBB and frequently used diagnostic techniques the authors expound in detail the design process, software realization and system functions of the above-mentioned expert system. The feasibility of the latter has been verified by engineering practice on site. **Key words:** boiler, circulating fluidized bed, on-line monitoring, condition diagnosis, expert system

**Visual Basic 编程语言用于热电厂在线监测与资源共享 = The Use of Programming Language Visual Basic for On-line Monitoring and Resource Sharing in Thermal Power Plants** [刊, 汉] / WANG Shi-zhong, QIU Jing-hui, YU Shi-sheng (Department of Aeronautic Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—632 ~ 634

Through the adoption of an advanced 893 network intelligent distribution type of data acquisition device IDCB the problem of millivolt voltage signal interference (analog magnitude), which has troubled a factory for years, was successfully resolved. With Windows 98 serving as an operating system and Visual Basic 6.0 as a programming language, software Heatwork.Vbp has been prepared and operated on a "Pentium 586" industrial control machine, thus realizing an on-line monitoring and resource sharing. **Key words:** thermal power plant, power generating unit, on-line monitoring, resource sharing

**压缩机中间冷却器采用不锈钢波纹管的试验研究 = Experimental Research of the Use of Stainless Steel Corrugated Tubes for a Compressor Intercooler** [刊, 汉] / CHEN Jia-xin, TAN Yu-fei (Electromechanical School under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—635 ~ 636

The modification of a compressor intercooler was conducted by replacing the straight tubes of a shell-tube heat exchanger with a new type of stainless steel corrugated tubes. Furthermore, measurements and tests were performed during the operation of the intercooler followed by a comparative analysis. It has been found that the natural gas outlet temperature of the corrugated tube heat exchanger can attain the compressor design value and even lower. The compressor enjoys a normal and stable operation with its heat exchange efficiency higher than that of an in-tube layout heat exchanger by 61%. The considerable reduction in maintenance work can contribute to a long-cycle operation of the intercooler. **Key words:** compressor intercooler, new type of stainless steel corrugated tube, high-efficiency heat exchanger, experimental research

**电站锅炉神经网络燃烧诊断系统应用研究 = Applied Research of a Neural Network-based Combustion Diagnostic System for a Utility Boiler** [刊, 汉] / YANG Hong-min, MA Wei-min, GU Fan, XU Yi-qian (Research Insti-