

摘 要

针对超临界锅炉受热面污染在线监测的问题，基于改进的炉膛分区段计算方法，建立了以炉膛出口烟温和水冷壁工质温度为关键参数的炉膛污染监测模型；对超临界锅炉的动态过程进行研究，建立了对流受热面污染监测动态模型，实现了全负荷工况的污染监测；以邹县 1000MW 超超临界锅炉为对象进行实例计算，验证了炉膛和对流受热面污染监测模型的准确性。在此基础上开发了超临界锅炉受热面污染在线监测与吹灰指导系统，实现了超临界锅炉受热面积灰结渣的在线监测和吹灰的优化指导。

关键词：污染监测，超临界，电站锅炉，吹灰优化

ABSTRACT

According to the online monitoring of fouling on heating surface of supercritical boiler, monitoring model of furnace slagging was established based on the advanced furnace calculation-in-sections method with the flue temperature of furnace outlet and working fluid temperature of water wall as the key parameter, the dynamic monitoring model of convective heating surface realizing the fouling monitoring under any load condition was established based on the analysis of the dynamic process, the practical calculation was done in Zouxian 1000MW ultra supercritical boiler and the accuracy of monitoring models were verified. Based on this result, the supercritical boiler fouling monitoring system including the functions of online operation monitoring and sootblowing guiding was developed.

Ou Zong-xian (Thermal Power Engineering)

Directed by Prof. Yan Wei-ping

KEY WORDS: fouling monitoring, supercritical, utility boiler, sootblowing optimization

摘 要

针对超临界锅炉受热面污染在线监测的问题，基于改进的炉膛分区段计算方法，建立了以炉膛出口烟温和水冷壁工质温度为关键参数的炉膛污染监测模型；对超临界锅炉的动态过程进行研究，建立了对流受热面污染监测动态模型，实现了全负荷工况的污染监测；以邹县 1000MW 超超临界锅炉为对象进行实例计算，验证了炉膛和对流受热面污染监测模型的准确性。在此基础上开发了超临界锅炉受热面污染在线监测与吹灰指导系统，实现了超临界锅炉受热面积灰结渣的在线监测和吹灰的优化指导。

关键词：污染监测，超临界，电站锅炉，吹灰优化

ABSTRACT

According to the online monitoring of fouling on heating surface of supercritical boiler, monitoring model of furnace slagging was established based on the advanced furnace calculation-in-sections method with the flue temperature of furnace outlet and working fluid temperature of water wall as the key parameter, the dynamic monitoring model of convective heating surface realizing the fouling monitoring under any load condition was established based on the analysis of the dynamic process, the practical calculation was done in Zouxian 1000MW ultra supercritical boiler and the accuracy of monitoring models were verified. Based on this result, the supercritical boiler fouling monitoring system including the functions of online operation monitoring and sootblowing guiding was developed.

Ou Zong-xian (Thermal Power Engineering)

Directed by Prof. Yan Wei-ping

KEY WORDS: fouling monitoring, supercritical, utility boiler, sootblowing optimization

声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《1000MW 超超临界机组受热面污染在线监测方法研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 段守现 日 期： 2009.3.10

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保管，并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名： 段守现

导师签名： 闻鹤平

日 期： 2009.3.10

日 期： 2009.3.10

主要符号表

A	截面积, m^2
a_l	炉膛黑度
a_b	积灰层的黑度
B_j	燃料量, kg/s
CF	洁净因子
c_j	金属比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
c_p	定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
D	蒸汽流量, kg/s
d	管径, mm
F_{ct}	炉墙表面积, m^2
FF	污染率
f	亥姆霍兹自由能, kJ/kg
g	吉布斯自由焓, kJ/kg
H'	进口烟气焓, kJ/kg
H''	出口烟气焓, kJ/kg
h	焓, kJ/kg
h'	进口蒸汽焓, kJ/kg
h''	出口蒸汽焓, kJ/kg
k_{bx}	理想传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$
k_s	实际传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$
M_j	受热面金属质量, kg
N_e	机组额定功率, MW
P	机组发电功率, MW
p	压力, Pa
Q_g	金属壁面传递给工质的热量, kW
Q_a	工质的吸热量, kW
Q_v	烟气放热量, kW
q	辐射换热量, kW/m^2
R_j	金属蓄热的动态修正因子

R_m	工质蓄热的动态修正因子
s	熵, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
T	绝对温度, K
T_p	平均烟气温度, K
T'	进口烟气温度, K
T''	出口烟气温度, K
t_{gb}	水冷壁管外壁温度, $^{\circ}\text{C}$
t_j	金属温度, $^{\circ}\text{C}$
u	内能, kJ/kg
V	工质总体积, m^3
VC	比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot{}^{\circ}\text{C})$
v	比容, m^3/kg
w	烟气流速, m/s
x_i	测量值
α_1	烟气侧的放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot{}^{\circ}\text{C})$
α_2	工质的放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot{}^{\circ}\text{C})$
α_f	烟气辐射放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot{}^{\circ}\text{C})$
α_d	烟气对流放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot{}^{\circ}\text{C})$
β_a	燃尽度
δ_i	计算平方差
ε	灰污系数, $(\text{m}^2\cdot{}^{\circ}\text{C})/\text{W}$
φ	保热系数
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot{}^{\circ}\text{C})$
ν	运动粘度, m^2/s
θ'	进口烟气温度, $^{\circ}\text{C}$
θ''	出口烟气温度, $^{\circ}\text{C}$
ρ	积灰系数, $(\text{m}^2\cdot{}^{\circ}\text{C})/\text{kW}$
τ	时间, s
ξ	受热面的冲刷系数
ψ_{cp}	平均热有效系数

第一章 绪论

1.1 研究背景

近年来，超（超）临界压力发电机组由于具有效率高、排放少、易于调峰、运行稳定的特点，在我国得到大力发展。超（超）临界压力锅炉由于蒸汽参数很高，对设备的要求更为严格，与一般的低参数锅炉相比，积灰和结渣对锅炉运行的危害更加严重^[1-3]。超（超）临界锅炉炉膛结渣会使炉内传热变差，加剧结渣过程；炉膛出口烟温将升高，引起蒸汽温度偏高或热偏差增大；水冷壁积灰、结渣较多时，还会并发高温腐蚀^[4]。锅炉受热面的非正常积灰、结渣使传热热阻和烟道的通风阻力增加，排烟温度升高等，影响锅炉的正常运行，降低锅炉热效率并增加机组煤耗。严重时将导致机组降负荷运行或者停机，甚至酿成重大事故。因此，预防和减轻锅炉受热面积灰结渣是确保超（超）临界机组安全经济运行的重大问题之一^[5-8]。

此外，因为燃煤供应比较紧张，电厂常常被动地接受煤质特性与设计煤种偏差很大、有时甚至完全改变了的煤种，这种锅炉被迫燃用非设计煤种的情况无论在国内还是国外都很常见。煤质变化对锅炉运行最大的影响之一就是原本便较为严重的受热面积灰结渣问题常会变得更为突出。此时需要加重对受热面的吹扫，但是过分的吹扫往往会产生严重的负面影响^[9-12]。

首先，如果吹扫过于频繁，蒸汽长期冲刷没有积灰的受热面管外壁，壁面的氧化膜保护层将遭到严重破坏，使得受热面管壁的磨损大大增加，国内不少机组发生过由于吹灰过频而爆管的事故。另外，蒸汽吹灰时烟气中水蒸汽含量会升高，使尾部受热面的腐蚀机率大大增加。

其次，吹灰器的运作是用一定量的蒸汽介质消耗来换取受热面的清洁，因而其运作本身要消耗一定成本。如果吹灰过于频繁，虽然保证了受热面的清洁，但是吹灰过程所消耗的热量也将增加，锅炉出力会降低，电厂运行经济性降低。

在实际运行过程中，超（超）临界锅炉不同受热面上的积灰结渣倾向和速度相差很大，积灰结渣的类型也不尽相同。将不同位置的受热面不加区别地进行吹扫的定期吹灰方式显然缺乏合理性，也是不经济的。因此对于不同位置的受热面应采用不同的判断方式来确定其吹灰时间。炉膛受热面易发生结渣，结渣发生后不易清除，应考虑在受热面发生结渣前进行吹灰；屏过、高过等高温受热面易发生高温烧结性积灰，沉积层经高温烧结后也不易清除，应考虑适当减少受热面积灰被高温烟气烧结的时间和机会；而尾部烟道处的受热面则会发生松散型积灰，松散型积灰虽易于清除，却容易发生堵灰，也要在适当的时候进行吹扫。

从前面的分析来看，过吹灰或者欠吹灰对于超（超）临界燃煤锅炉运行的安全性都具有负面影响，如何把握吹灰器工作的适度性对于保持受热面的清洁和较长的使用寿命具有重要意义。因此，在锅炉运行中，应尽可能准确地监测炉内结渣积灰的程度和发展趋势，并根据积灰结渣的状况和运行需要，合理、有效地动作吹灰器，及时吹灰清渣。由于锅炉实际运行环境的限制，不可能直接判断炉内的结渣情况。而运行人员对运行数据综合分析能力的局限性以及其它人为因素的影响，使得试图单纯依靠操作人员根据常规的运行数据来判断炉内结渣和积灰的程度变得十分困难。因此，需要研究和开发基于实时运行数据的在线监测技术，用于诊断炉内的积灰结渣，指导运行人员对吹灰器进行操作，将传统的周期性定时定量吹灰改变为根据受热面污染状况和其它运行需要的动态吹灰，以达到提高锅炉效率、协调汽温控制、延长管道使用寿命、降低污染物排放的目的。

1.2 电站锅炉污染监测的研究现状

作为电站锅炉节能领域的一个重要研究方向，从上个世纪 60 年代初开始燃煤电站的锅炉受热面积灰结渣在线监测技术的开发与示范在国外已经引起了广泛高度的重视。特别是工业发达国家十分重视燃煤电站锅炉受热面结渣积灰在线监测理论模型的研究与开发，目前此类监视系统已经成为维持燃煤电站锅炉安全经济运行的一个重要技术手段^[13-15]。

美国 Wabamun 电厂的#4 机组安装了基于 Windows95 的积灰结渣报警监视软件后，避免了因事故停机造成的经济损失^[16]。

德国的 Kraftwerk 电厂#5 机组于 1992 年 6 月底安装了锅炉受热面污染监测系统并投入运行。吹灰器的启停由该系统自动控制。通过对吹灰器的操作和一些其它相关参数的优化调整使锅炉始终处于最佳运行状态，其可靠性已被实践证明^[17]。

加拿大燃烧中心 CANMET 开发了积灰监测系统 AMS，并于 1994 年在 EPCOR 电厂投入使用。之后该中心又开发了 OPG System，在 Lambton 的#3 机组上运行^[18]。

美国纽约燃气公司和通用物理公司联合开发的 Sootblow Advisor 专家系统，此系统使用锅炉和汽轮机循环中的关键参数测量值来确定锅炉不同部位的清洁因子，帮助运行人员确定吹灰策略。

瑞士 ABB 公司开发的 OPTIMAX 计算软件包，它的锅炉清洁模块在线计算受热面的清洁度和每个受热面的烟气入口温度，结果用于优化锅炉吹灰器的运行。

华北电力大学（保定）的阎维平教授自 1997 年开始承担国家电力公司重点科技项目，在国内率先进行了燃煤电站锅炉受热面污染监测理论与实践的研究工作。经过多年研究，开发出了大型燃煤电站锅炉受热面污染监测及吹灰优化系统^[19,20]。

浙江大学热能工程研究所 1998 年起，开始了燃煤锅炉火焰图像处理技术的科技攻关，开发出了基于火焰图像和红外辐射传感器的电站锅炉燃烧优化系统。该系统能够对燃烧进行优化，计算炉内结渣的趋势指数，预测炉膛的结渣情况。

华北电力大学（北京）的孙保民教授等人也进行了污染监测和吹灰优化的研究。开发出以神经网络为核心的锅炉吹灰实时监测系统，对锅炉受热面积灰、结渣进行在线监测。

到目前为止，国内开发的各种锅炉积灰结渣监测技术，都没有超（超）临界机组应用的实例。国外积灰结渣监测技术在超（超）临界机组的应用在文献中也未见提及。

电站锅炉受热面污染监测根据其换热机理不同，分为辐射受热面监测（主要指炉膛）和对流受热面监测两大部分。因为辐射受热面和对流受热面在传热机理、受热面结构、布置区域烟气平均温度等方面均有所不同，其监测方式也存在差异。

（一）炉膛结渣监测

炉膛结渣沾污情况大都是从炉内传热的变化来判断，往往采用某个传热参数变化来衡量炉内沾污过程，如单位水冷壁吸热量、火炬平均投射热流、火炬平均温度、炉内灰污系数、沾污层热阻、沾污水冷壁平均温度等。目前炉膛结渣监测的常用方法和最新方法主要有：

1) 炉膛出口烟气温度。炉膛结渣状况直接影响了炉膛传热，而炉膛烟气出口温度恰反映了炉膛传热。于是炉膛烟气出口温度的变化反映了结渣的整体状况。因此国外几乎所有的结渣监控系统都采用炉膛烟气出口温度作为主要或辅助手段^[20]。它可以由热平衡计算，也可以直接用光学高温计或声学高温计测量而得，数据的准确程度对监测结果的影响显著。它最大缺点是无法得知炉膛局部状态。对于大部分只存在积灰污染和轻微结渣污染的锅炉，采用炉膛出口烟温间接监测是比较经济现实的方法。

2) 直接诊断。直接诊断是通过仪器设备直接观察炉内受热面的结渣状况来监测炉膛污染^[21,22]。由于炉内高温和飞灰等复杂环境的限制且缺乏合适的装置和信息评价方法，可用作直接诊断的方法并不多。而且其造价昂贵、维护困难、产品可靠性不足等缺点限制了进一步推广和应用。

3) 采用热流计间接诊断监控。用安装在水冷壁上的热流计表面沾污模拟其附近水冷壁的沾污过程，根据结渣造成的热流变化对其进行监测^[23,24]。为了获得清洁热流需加装清洁热流计。它是一种带有热流测量装置和冷却装置的特殊辐射计，工作温度较低，需要气流清除测量头上的灰污。而保持清洁头在长期运行时的清洁是很困难的，而这成为这种监测方式的主要缺陷。

4) 利用水冷壁背面温差间接诊断。利用背面温差测点在线测量水冷壁局部热负荷即灰污热负荷, 通过直接测量清洁热流得到正常情况下的清洁热负荷。比较灰污热负荷和清洁热负荷可以判断出结渣的位置和严重程度^[25]。由于这些技术的成本和应用效果亟待检验, 大多处于研究和试点应用阶段, 离大范围应用还有一定的距离。

5) 基于神经网络的诊断方法。利用人工神经网络并行处理、非线性映射能力及自学习、自适应能力, 选取能够反映受热面污染程度变化的特征参数作为神经网络的输入参数, 建立了基于人工神经网络的锅炉受热面污染非机理计算模型^[26-29]。它与炉膛出口烟温间接诊断方法相似, 最大缺点是无法得知炉膛局部状态。而且特征参数与训练样本的选取准确与否直接影响到神经网络模型的准确性与可靠性。

如上所述, 炉膛污染监测的方法主要有通过炉膛出口烟温间接判断方法、直接诊断方法、利用各种热流计诊断方法、测量水冷壁背面温差诊断方法以及神经网络法。这些监测方法虽然各有特点, 但都存在一些不足之处。

(二) 对流区域的积灰监测

锅炉对流区域的积灰监测, 一般采用整体监测的方法^[30,31]。其基本思路是根据烟气侧和工质侧的实时测量数据, 计算出对流受热面的灰污热阻或洁净因子, 以此来表示受热面的积灰程度或相对清洁程度。相比于炉膛等辐射受热面, 对流受热面所处区域烟气温度较低, 烟气侧和工质侧实时数据的测量较为方便, 而且现场已安装的热工测点也较完备, 因而对流受热面的积灰监测较易实现。这种监测方法最主要的优点是所需要的设备少, 它只需计算机和远程数据采集设备。在煤质、负荷相对稳定, 无较大运行扰动的情况下, 对流受热面污染在线监测的效果较为理想^[32,33]。

目前用于衡量对流受热面积灰状况的参数主要有以下三种:

1) 传热有效度比 Φ

传热有效度 ε 是指被加热工质的真实吸热量和换热器的最大可传递热量的比值, 即换热器的温差传热效率。其计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_2} \quad (1-1)$$

其中 T_1 为烟气进口温度, °C; t_1 、 t_2 分别为工质的进、出口温度, °C。

受热面的沾污程度, 用传热有效度比来表示:

$$\Phi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1-2)$$

其中 ε_0 表示受热面在清洁状态下的传热有效度。传热有效度比 Φ 越大，则受热面管壁越清洁；反之，受热面的积灰越严重。当锅炉负荷和煤质变化时，受热面的进出口烟气温度和工质温度将发生变化，计算所得的受热面传热有效度将不尽相同。在不同的负荷工况下，即使受热面的积灰状况相似，传热有效度比也会存在差异。因此，通过传热有效度比不能准确地反映不同工况下受热面的积灰程度。

2) 灰污热阻 R_f

灰污热阻是指受热面金属管壁上灰垢的热阻，其数值越大表示受热面的积灰越严重。灰污热阻的计算式如下：

$$R_f = \frac{t_s - t_w}{q} \quad (1-3)$$

式中 t_s 灰污表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_w 为受热面管外壁温度， $^{\circ}\text{C}$ ； q 为受热面的热流密度， kW/m^2 。

灰污表面温度由烟气温度、热流密度和烟气侧对流换热系数求得，而受热面管外壁温度则通过相应的温度测点直接测得。对于低温区域的受热面，烟气温度可直接测得，灰污表面温度准确性较高，计算所得的灰污热阻能够较准确地反映受热面的积灰程度；而对于高温区域的受热面，烟气温度很难通过温度测点直接测得，灰污表面温度及灰污热阻的计算将遇到困难。

3) 洁净因子 CF

洁净因子是指受热面实际传热系数 k_{sj} 与理想传热系数 k_{sx} 的比值^[19]，其计算式：

$$CF = \frac{k_{sj}}{k_{sx}} \quad (1-4)$$

理想传热系数是指受热面处于洁净状态时的传热系数，根据烟气特性进行计算；实际传热系数是指受热面实际换热过程中的传热系数，由烟气侧和工质侧的热平衡方程式计算得到。当受热面外表面处于清洁时 $CF = 1$ ，否则 $CF < 1$ 。用洁净因子表示受热面的积灰状态，可以直观地反映出沾污对受热面吸热量的影响大小。

1.3 超临界锅炉受热面污染监测的难点

对于超（超）临界锅炉，炉膛容积和水冷壁表面积相对较大，锅炉受热面管内的压力非常高，在炉墙或管壁表面安装过多的测量设备，将会影响锅炉的安全稳定运行，所以通过安装一定数量的仪器设备直接观察炉内受热面的结渣积灰状况的直接诊断方法是不可行的。而采用间接诊断方法，通过建立锅炉受热面的污染在线监测模型，依赖于现有的热工测点，进行锅炉热力计算得到表征受热面积灰结渣程度的污染率，则较为现实可行。但是现有的受热面污染在线监测模型存在一定的局限性和不足之处，尚不能满足超（超）临界锅炉污染在线监测的要求，所以必须开发新的炉膛和对流受热面污染在线监测模型。

当发电机组变负荷及启停时，锅炉负荷变化幅度较大且剧烈，存在明显的过渡过程，工质和金属的温度将发生较大改变，其蓄热量随之改变，该蓄热量的变化必然影响机组的性能，现有的污染监测模型没有考虑负荷变化造成的影响，监测结果将会出现偏差甚至错误。所以必须开发适用于各种工况的受热面污染监测模型。另外，当入炉煤质发生变化时，锅炉的运行特性及烟气特性将发生相应变化，受热面污染监测模型所涉及的传热系数和换热量等也将发生变化。因此，受热面污染在线监测模型必须实现对煤质变化的自适应。

1.4 本文主要研究内容

本文针对超临界锅炉受热面污染在线监测进行研究，主要内容包括以下方面：

分析超临界锅炉炉膛水冷壁工作特点，考虑到沿炉膛高度水冷壁温度变化大和热负荷分布的不均匀性，推导出适合于超临界锅炉炉膛的分区段热力计算方法。在计算各个区段水冷壁热有效系数时引入积灰系数，以反映水冷壁结渣状况对炉膛换热的影响。采用炉膛出口烟温和水冷壁工质温度等作为关键参数，基于改进的炉膛分区段热力计算方法，逆着烟气流程计算炉膛各个区段的进口烟温以及壁面热负荷，以整个炉膛水冷壁的吸热量进行校核，通过迭代计算最终得到该时刻对应的炉膛水冷壁的积灰系数，根据水冷壁积灰系数得到炉膛的污染率，以此反应整个炉膛的结渣状况，从而建立超（超）临界锅炉炉膛污染监测模型。

基于热平衡计算原理，建立稳定负荷工况下对流受热面污染监测静态模型；通过分析锅炉变负荷工况下的运行特性和负荷变化对污染监测的影响，指出对流受热面污染监测静态模型在不同的稳定负荷工况和快速变负荷工况下监测结果与实际情况存在偏差。对锅炉动态过程进行研究，分析出负荷变化过程中炉内烟气侧参数和工质侧参数的变化规律。基于受热面金属管壁蓄热及工质蓄热变化的考虑，建立

对流受热面污染监测动态模型。通过实例计算，对受热面污染监测静态模型和动态模型的计算结果进行比较，验证动态模型在各种负荷工况下都具有良好适应性。

用 VB6.0 语言开发 1000MW 超超临界锅炉受热面污染在线监测与吹灰指导系统。系统包含数据输入输出模块、参数预处理模块、受热面污染监测模块以及网络发布模块，具备在线运行监测、吹灰指导、历史和实时曲线查询、以及原始测点消缺等一系列功能。以邹县 1000MW 超超临界机组为试验对象，验证锅炉不同受热面污染在线监测模型的准确性、稳定性和实用性。

第二章 超临界锅炉炉膛污染监测

2.1 引言

国内外锅炉制造厂家及研究单位对煤灰的熔融温度、粘度及灰成份与煤的结渣性能间的关系作了大量研究，针对不同煤种或某一地区的煤建立了煤灰结渣特性指标，试图对煤的结渣特性做出准确判断。这些指标包括煤灰的熔融温度指标、煤灰成份结渣指标、煤灰粘度结渣指标以及灰熔点与灰成份等的综合指标^[34-36]。这些煤灰结渣特性指标不考虑锅炉运行状况，在具体应用中判别率不高，而且无法实现结渣的在线监测。

采用红外成像相机或摄像机的直接诊断方法，可以监测炉膛水冷壁各个部位的结渣状况；采用热流计也可以用于炉膛局部或整体的结渣监测。但是对于超（超）临界锅炉而言，其炉膛水冷壁表面积较大，炉膛水冷壁的工作压力非常高，在炉墙或水冷壁表面安装过多的测量设备，将会影响锅炉的安全稳定运行。另外，直接诊断方法所用装置结构比较复杂、成本比较高，而且由于其工作环境恶劣，导致故障率高，只有停炉时才能检修和维护，难以大面积推广。

目前，国内外普遍采取炉膛出口烟温作为主要特征参数，计算炉膛的污染系数来表征炉内平均污染程度，从整体上反应炉内结渣状况^[37,38]。该方法虽然只能对炉膛整体结渣的状况做出判断，不能反映炉内结渣的分布，但由于炉膛出口烟温可以由尾部受热面通过热平衡计算逆推得到，除了少量的测温元件外，不需要安装其它任何硬件和添加复杂的数据采集系统，其可靠性高，维护简单，而且避免了由于在炉墙或管壁表面增设复杂繁多的监测仪器所带来的安全隐患。通过建立锅炉受热面的污染在线监测模型，依赖于现有的热工测点，进行锅炉热力计算得到表征受热面积灰结渣程度的污染率，则较为现实可行。

但是现有的以炉膛出口烟温作为关键参数的炉膛污染在线监测模型，其所依赖的炉膛热力计算方法不适用于大容量的超临界直流锅炉，所得出的炉膛结渣的判定标准不够合理准确，计算精度有待提高。因此，有必要分析超临界锅炉炉膛水冷壁工作特点，考虑炉膛的传热特性及热负荷分布的不均匀性，推导出适合于超临界锅炉的炉膛热力计算方法。在此基础上，定义炉膛污染率，并得到以炉膛出口烟温和水冷壁工质温度作为关键参数的超临界锅炉炉膛污染监测模型，以满足超（超）临界锅炉污染监测及优化吹灰的需要。

2.2 炉膛分区段热力计算方法

2.2.1 超临界锅炉炉膛水冷壁的工作特点

超临界直流锅炉具有水蒸气参数高、容量大的特点^[3]。一方面，超临界锅炉炉膛水冷壁内工质为强制流动，与自然循环汽包锅炉相比，沿炉膛高度方向的水冷壁工质温度和金属管外壁温度的变化很大。图 2-1 显示了邹县电厂 1000MW 超超临界锅炉炉膛水冷壁工质温度和金属温度的变化，两者的变化幅度都在 100℃左右^[5]。当水冷壁积灰之后，其表面温度将有显著的增加，沿炉膛高度方向的温度差别更加明显。另一方面，与小容量锅炉相比，超临界锅炉炉膛容积大且呈瘦高，均采用分级燃烧方式以降低 NO_x 排放，燃烧器的净高度、煤粉燃烧与放热的区间增加，火焰行程相对增加，炉内沿炉膛高度的烟气温度、热负荷等分布规律也与亚临界锅炉有明显的区别。因此，进行超临界锅炉炉膛传热计算时，必须考虑水冷壁表面温度的显著变化与燃烧热负荷的改变对沿炉膛高度的烟气温度的影响。

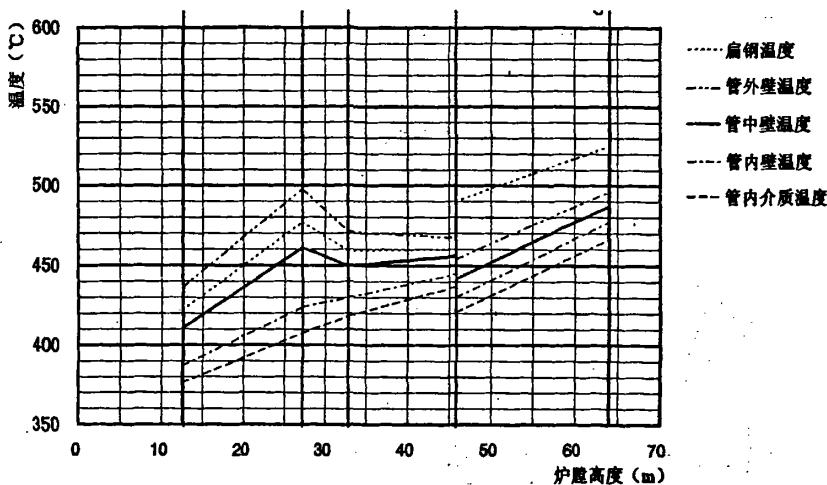


图 2-1 沿炉膛高度的水冷壁温度

原苏联锅炉机组热力计算标准中炉膛传热计算所采用的零维模型^[39]，对炉膛换热过程进行了简化，炉膛受热面和火焰面均按灰体来处理，假定整个炉膛受热面具有近似相同的平均壁面温度，该假定对自然循环锅炉炉膛壁面是比较合理的，而对超临界直流锅炉显然是不合理的。采用零维模型进行超临界锅炉炉膛传热计算势必会产生比较大的误差。

原苏联锅炉机组热力计算标准中还推荐了炉膛传热计算一维模型，即炉膛分区

段计算方法。按各个区段的能量方程，依据该区段中的放热、燃烧产物焓的变化以及该区段的传热量，计算区段的出口烟气温度，依次往上逐段计算，最后得到沿炉膛高度的烟气温度与炉膛出口烟温。炉膛分区段计算方法可以确定沿炉膛高度的烟气温度分布和局部热负荷。由此可知，在零维模型不能满足实际需要的情况下，可以以标准中的原分区段计算方法为基础，结合超临界锅炉炉膛水冷壁的实际工况和炉内燃烧放热与传热特点，对炉膛区段进行合理地划分，推导存在若干放热区段的能量平衡方程及各个区段的进口烟气温度的计算式，为炉膛污染在线监测模型提供计算方法。

2.2.2 各个区段的计算方程

首先对原分区段计算方法进行改进，将燃烧器所在区段沿炉膛高度划分为两个或多个放热区段，各自均包含若干数量的燃烧器，送入锅炉的燃料的绝大部分热量在此放出；放热区段上面再划分若干区段（3~6段）。基于各个区段热量平衡原理，并考虑与原计算标准所定义的重要计算参数的一致性，推导了各个区段的计算方程：

1) 放热区段 I (最大放热区段)

最大放热区段的热平衡方程为^[40]：

$$\text{本区段的烟气带走的热量} + \text{本区段炉墙吸收的辐射热及向相邻区段辐射的热量} = \text{本区段燃料燃烧放热量}$$

$$\begin{aligned} & B_{j1}VC\theta + \sigma_0 a_1 \psi_{CP} T_{pj}^4 F_{CT} + \sigma_0 a_1 \psi' T'^4 A_1 + \sigma_0 a_1 \psi' T'^4 A_2 \\ &= B_{j1} \left(\frac{100}{100 - q_4} \beta_a Q_{ar,net} + Q_k + Q_{wr} - Q_{hz} \right) \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中： B_{j1} 为送入该区段的燃料量，kg/s； VC 为 1kg 燃料燃烧产物的平均比热容，kJ/(kg·°C)； θ 为该区段的出口烟气温度，°C； σ_0 为黑体辐射系数，其值为 5.67×10^{-11} kW/(m²·K⁴)； a_1 为该区段的炉膛黑度； ψ_{CP} 为区段中水冷壁的平均热有效系数； T_{pj} 为该区段的平均烟气温度，K， $T_{pj}^4 = (T^4 + T'^4)/2$ ； T' 、 T 分别为该区段的进、出口烟气温度，K； F_{CT} 为区段中炉墙表面积，m²； A_1 和 A_2 为区段的上、下截面积，m²； ψ' 为对上面区段辐射放热的热有效系数； ψ' 为对炉底或冷灰斗方向辐射放热的热有效系数； β_a 为燃料在该区段的燃尽度； $Q_{ar,net}$ 为燃料的收到基发热量，kJ/kg； Q_k 为空气带入炉膛的热量，kJ/kg； Q_{wr} 为外来热源加热空气时带入的热量，kJ/kg； Q_{hz} 为由排渣带走的热量，kJ/kg。

根据式(2-1)得到该区段进口处烟气温度的计算式:

$$\theta' = \left[\frac{1}{\sigma_0 a_i \psi A_1} \left(B_{j1} \left(\frac{100}{100 - q_4} \beta_{cr} Q_{ar,net} + Q_k + Q_{wr} - Q_{hz} \right) - B_{j1} V C \theta' - \sigma_0 a_i \psi_{cr} T_{pj}^4 F_{cr} - \sigma_0 a_i \psi'' T''^4 A_2 \right) \right]^{1/4} - 273 \quad (2-2)$$

在该区段出口烟气温度 θ'' 已知的情况下, 用渐近逼近法按式(2-2)可求得该区段进口处的烟气温度 θ' 。

2) 放热区段 II

放热区段 II 的热平衡方程为:

本区段烟气带走的热量 + 本区段吸收的辐射热量 + 本区段向上面区段辐射的热量 = 本区段燃烧放热量 + 下面区段烟气带入的热量 + 下面区段向本区段辐射的热量

$$\begin{aligned} & (B_{j1} + B_{j2}) V C \theta'' + \sigma_0 a_i \psi_{cr} T_{pj}^4 F_{cr} + \sigma_0 a_i \psi'' T''^4 A_2 \\ & = B_{j1} \Delta \beta_{cr} Q_{ar,net} + B_{j2} \left(\frac{100}{100 - q_4} \beta_{cr} Q_{ar,net} + Q_k + Q_{wr} - Q_{hz} \right) \\ & \quad + B_{j1} V C \theta' + \sigma_0 a_i T''^4 \psi' A_1 \end{aligned} \quad (2-3)$$

根据式(2-3)得到该区段的进口处烟气温度的计算式:

$$\begin{aligned} \theta' & = \frac{1}{B_{j1} V C} \left[(B_{j1} + B_{j2}) V C \theta'' + \sigma_0 a_i \psi_{cr} T_{pj}^4 F_{cr} + \sigma_0 a_i \psi'' T''^4 A_2 - B_{j1} \Delta \beta_{cr} Q_{ar,net} \right. \\ & \quad \left. - B_{j2} \left(\frac{100}{100 - q_4} \beta_{cr} Q_{ar,net} + Q_k + Q_{wr} - Q_{hz} \right) - \sigma_0 a_i T''^4 \psi' A_1 \right] \end{aligned} \quad (2-4)$$

在该区段出口烟气温度 θ'' 已知的情况下, 用渐近逼近法按式(2-4)可求得该区段进口处的烟气温度 θ' 。

在放热区段 II 的基础上, 可以根据实际需要将剩下的燃烧器区域再划分成若干放热区段, 其热平衡方程及区段进口烟温的计算方法与放热区段 II 的相类似。

3) 放热区段之上的区段

对于放热区段以上的各区段，不再有明显的放热，以换热为主，热平衡方程为：

本区段烟气带走的热量 + 本区段吸收的辐射热量 + 本区段向上面区段辐射的热量 = 本区段剩余燃料燃烧放热量 + 下面区段烟气带入的热量 + 下面区段向本区段辐射的热量

$$\begin{aligned} & B_j V C \theta' + \sigma_0 a_i \psi_{CP} T_{pj}^4 F_{CT} + \sigma_0 a_i \psi' T'^4 A_2 \\ & = B_j \Delta \beta_{cr} Q_{ar,net} + B_j V C \theta' + \sigma_0 a_i T'^4 \psi' A_1 \end{aligned} \quad (2-5)$$

根据式 (2-5) 得到该区段的进口处烟气温度的计算式：

$$\begin{aligned} \theta' &= \frac{1}{B_j V C} [B_j V C \theta' + \sigma_0 a_i \psi_{CP} T_{pj}^4 F_{CT} + \sigma_0 a_i \psi' T'^4 A_2 \\ &\quad - B_j \Delta \beta_{cr} Q_{ar,net} - \sigma_0 a_i T'^4 \psi' A_1] \end{aligned} \quad (2-6)$$

在该区段出口烟气温度 θ' 已知的情况下，用渐近逼近法按式 (2-6) 可求得该区段进口处的烟气温度 θ 。

2.2.3 各个区段水冷壁的热有效系数

水冷壁热有效系数为水冷壁的辐射换热量和水冷壁的投射辐射之比^[41]，其定义式如下：

$$\psi_{CP} = \frac{q}{q_t} = \frac{q_t - q_{yb}}{q_t} \quad (2-7)$$

式中： q 为水冷壁的辐射换热量， kW/m^2 ； q_t 为水冷壁的投射辐射， kW/m^2 ； q_{yb} 为水冷壁的有效辐射， kW/m^2 。

在零维模型和原分区段方法中，水冷壁热有效系数在整个炉膛范围内取平均值，而超临界锅炉沿炉膛高度方向火焰的平均温度和水冷壁表面温度变化大， q_t 和 q_{yb} 的分布是不均匀的，水冷壁热有效系数取平均值是不合理的。为此，需要从定义上出发推导各个区段的水冷壁热有效系数计算式，以考虑水冷壁表面温度和热负荷

的不均匀性。

水冷壁的辐射换热量 q 的计算公式如下：

$$q = a_b q_t - a_b \sigma_0 (\rho q + t_{gb} + 273)^4 \quad (2-8)$$

将 $q_t = q / \psi_{cp}$ 代入上式，整理得：

$$\psi_{cp} = \frac{a_b q}{a_b \sigma_0 (\rho q + t_{gb} + 273)^4 + q} \quad (2-9)$$

式中： q 为区段的热负荷，根据该区段的进出口烟温 θ' 和 θ'' 计算得到； a_b 为水冷壁积灰层的黑度； ρ 为积灰系数， $(m^2 \cdot ^\circ C)/kW$ ，引入该系数是为了考虑炉膛水冷壁结渣对炉膛换热的影响； t_{gb} 为水冷壁管外壁温度， $^\circ C$ ； $\rho q + t_{gb} = t_{hb}$ 为水冷壁积灰层温度， $^\circ C$ 。式 (2-9) 充分考虑了水冷壁表面温度 t_{gb} （或积灰层温度 t_{hb} ）和热负荷 q 的不均匀性，能够比较准确地计算出各个区段的水冷壁热有效系数。

2.2.4 炉膛水冷壁的吸热量

根据各个区段进出口烟气温度和水冷壁热有效系数，可以计算出各个区段水冷壁的热负荷，其计算式为：

$$q_i = \sigma_0 a_{bi} \psi_{cp,i} T_{pj}^4 \quad (2-10)$$

由烟气侧计算得到的炉膛水冷壁总的辐射换热量为：

$$Q_{ct} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n q_i F_{cti} = \sum_{i=1}^n \sigma_0 a_{bi} \psi_{cp,i} T_{pj}^4 F_{cti} \quad (2-11)$$

式中 Q_i 为第 i 个区段水冷壁的换热量， kW ； $\psi_{cp,i}$ 为第 i 个区段的水冷壁热有效系数； T_{pj} 为第 i 个区段的平均烟气温度， K ， $T_{pj}^4 = (T'_i^4 + T''_i^4)/2$ 。

由工质侧计算得到的炉膛水冷壁总的吸热量为：

$$Q_{LT0} = D(h_{slb}^* - h_{slb}) \quad (2-12)$$

式中 D 为炉膛水冷壁的蒸汽流量, kg/s ; h_{slb}^* 、 h_{slb} 分别为水冷壁工质的进出口焓值, kJ/kg 。

炉膛水冷壁的热平衡方程为:

$$Q_{CT} = Q_{LT} = Q_{LT0} + Q_m + Q_j \quad (2-13)$$

式中 Q_m 水冷壁管内工质的蓄热量, kW ; Q_j 水冷壁金属的蓄热量, kW 。工质蓄热量和金属蓄热量的计算方法见 3.4.1 节。

2.3 基于炉膛分区段计算方法的污染监测模型

以炉膛出口烟气温度作为关键参数的炉膛污染监测模型, 其所需的炉膛出口烟气温度由其后的对流受热面热平衡计算逆推得到。一般在省煤器出口都安装若干个烟气温度测点, 即在省煤器出口烟温已知的情况下, 可以从省煤器开始, 逆着烟气流程进行各个受热面热平衡计算, 以得到炉膛之后各个受热面的进、出口烟温, 此时的屏式过热器进口烟气温度即为炉膛出口处的烟气温度。

在获得炉膛出口烟气温度的前提下, 基于改进的炉膛分区段计算方法, 逆着烟气流程依次计算炉膛各个区段的进口烟温及壁面热负荷, 以整个炉膛水冷壁的吸热量作为热平衡校核进行迭代计算, 最终得到该时刻对应的炉膛水冷壁的积灰系数。由水冷壁积灰系数便可得到炉膛的污染率数值, 以此来反应整个炉膛的结渣状况。

2.3.1 炉膛污染率的定义

在计算炉膛水冷壁热有效系数时, 引入了积灰系数 ρ , 其数值的大小反映了炉膛结渣的程度。在此定义炉膛的污染率为:

$$FF = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2-14)$$

式中, ρ 为实际的炉膛平均积灰系数, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{kW}$, 由炉膛分区段热力计算得到; ρ_0 为洁净状态下的炉膛平均积灰系数, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{kW}$ 。当炉膛处于洁净状态时, $\rho = \rho_0$, 污染率 $FF = 0$; 在结渣状态下, $\rho > \rho_0$, 污染率 $FF > 0$ 。结渣越严重,

炉膛污染率越大。

2.3.2 炉膛污染监测模型的计算流程

基于改进的炉膛分区段计算方法的炉膛污染监测模型的计算流程如图 2-2 所示。

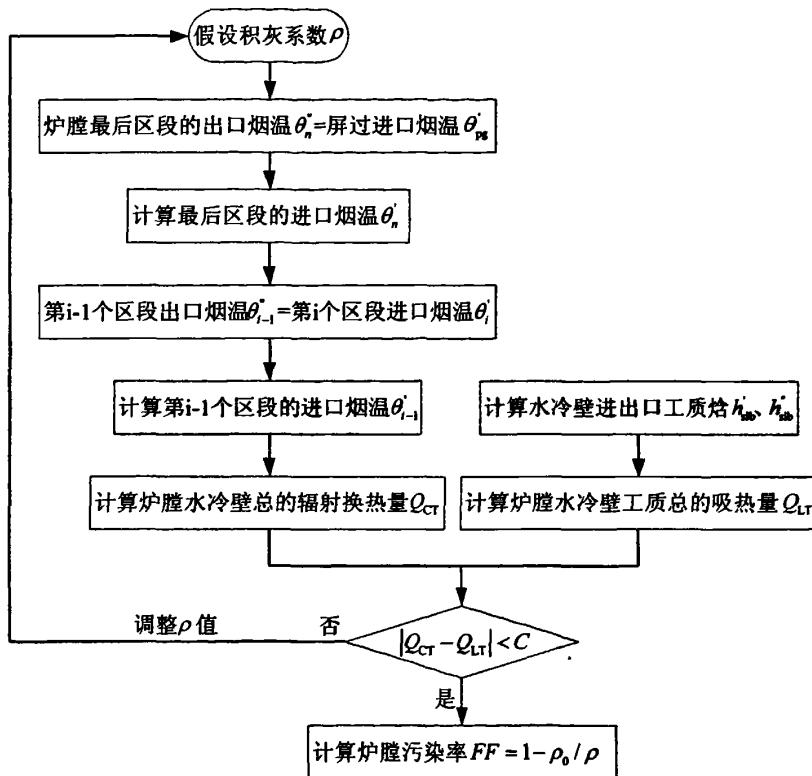


图 2-2 炉膛污染监测模型的计算流程

- 1) 假设炉膛水冷壁的积灰系数 ρ ;
- 2) 将基于热平衡计算得到的屏过进口烟温 θ_{pg}' 作为炉膛最后区段的出口烟温 θ_n' ;
- 3) 计算最后区段的进口烟温 θ_n' ;
- 4) 逆着烟气流程, 依次进行各区段的传热计算, 将上一个区段的进口烟温 θ_i' 作为下一个区段的出口烟温 θ_{i-1}' ;
- 5) 计算第 $i-1$ 个区段的进口烟温 θ_{i-1}' , 依此逐个区段进行计算, 直到最下面的放热区段为止;
- 6) 根据各区段进、出口烟气温度 θ_i' 、 θ_{i-1}' 及水冷壁热有效系数 $\psi_{cp,i}$, 计算炉膛水

冷壁总的辐射换热量 Q_{CT} ；同时根据水冷壁进、出口工质参数，计算水冷壁工质总的吸热量 Q_{LT} ；

7) 吸热量校核，判断 Q_{CT} 与 Q_{LT} 的差值

若 $|Q_{CT} - Q_{LT}| < C$ ，则结束迭代计算，转到 8);

否则，调整积灰系数 ρ ，返回 1);

8) 计算炉膛污染率 FF 。

2.4 实例计算

以邹县电厂 1000MW 超超临界锅炉为对象。锅炉型号：DG3000/26.15-II 1。锅炉为一次中间再热、超超临界压力变压运行带内置式再循环泵启动系统的本生直流锅炉，单炉膛Π型布置、固体排渣，锅炉受热面的布置及汽水流程如图 2-3 所示。锅炉的主要设计参数如表 2-1 所示。锅炉燃用烟煤，煤质特性如表 2-2 所示。

锅炉炉膛宽度为 33.973m，深度为 15.558m，顶棚管标高为 69.700m，炉膛容积为 29810m³，炉膛水冷壁面积为 5760m²。采用双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统，前后墙对冲燃烧，布置三层一次风口，共 48 只燃烧器，距最上层燃烧器 7.15m 处布置一层燃尽风喷口。炉膛布置有 82 只墙式短伸缩蒸汽吹灰器。

图 2-4 给出了炉膛分区的情况：冷灰斗至最下层燃烧器下平面为区段 I；将 1~3 层燃烧器分别划为三个放热区段 II~IV；燃尽区为区段 V，包含燃尽风喷口；燃尽风喷口以上到前屏下沿为区段 VI；屏区域为区段 VII。

表 2-1 锅炉的主要设计参数

		B-MCR	BRL
锅炉蒸发量	t/h	3033	2889
过热器出口蒸汽压力	MPa	26.25	26.11
过热器出口蒸汽温度	℃	605	605
再热蒸汽流量	t/h	2469.7	2347.1
再热器进口蒸汽压力	MPa	5.1	4.841
再热器出口蒸汽压力	MPa	4.9	4.641
再热器进口蒸汽温度	℃	354.2	347.8
再热器出口蒸汽温度	℃	603	603
省煤器进口给水温度	℃	302.4	298.5

表 2-2 煤质特性

	项目	设计煤种	校核煤种
工业元素分析	C _{ar} /%	53.80	48.40
	H _{ar} /%	3.95	3.85
	O _{ar} /%	8.14	7.85
	N _{ar} /%	1.11	1.25
	S _{ar} /%	0.60	0.90
	A _{ar} /%	24.40	27.75
	M _{ar} /%	8.00	10.00
	V _{daf} /%	39.00	37.73
	Q _{ar,net} / kJ·kg ⁻¹	21271	19053
灰熔融性	变形温度/℃	1270	1200
	软化温度/℃	1350	1290
	熔融温度/℃	1410	1350

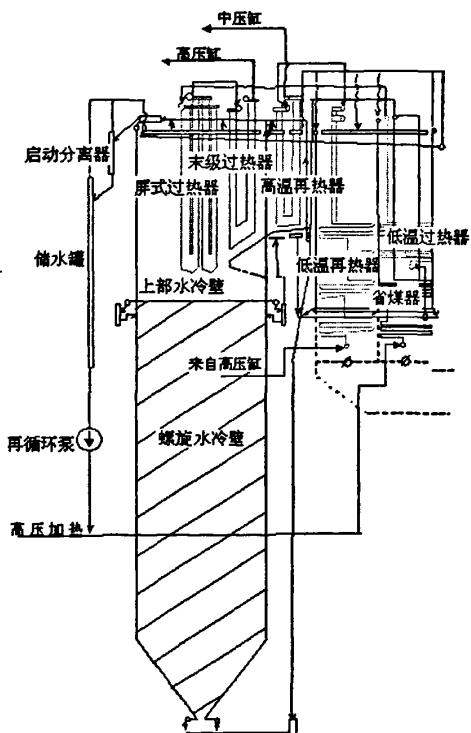


图 2-3 锅炉受热面的布置图

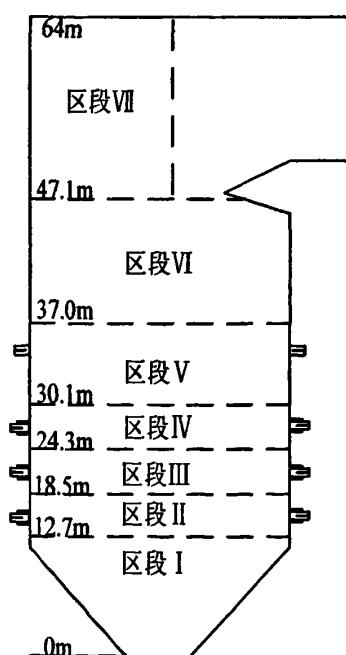


图 2-4 炉膛分区示意图

锅炉各个受热面进口处和出口处都安装有若干温度、压力和流量测点，省煤器出口处布置了若干个烟温测点。测量所得数据均由 DAS 系统采集并保存于 PI 数据库。计算所需的数据均由 PI 数据库中获得。本次计算机组负荷基本保持在 920MW 左右，如图 2-5 所示。

根据现场采集的实时数据，运用基于改进的炉膛分区段计算方法的炉膛污染监测模型，计算了不同时刻的炉膛水冷壁的积灰系数、污染率、炉膛各个区段的进出口烟温及水冷壁的焓升。计算结果如图 2-6~图 2-9 所示。

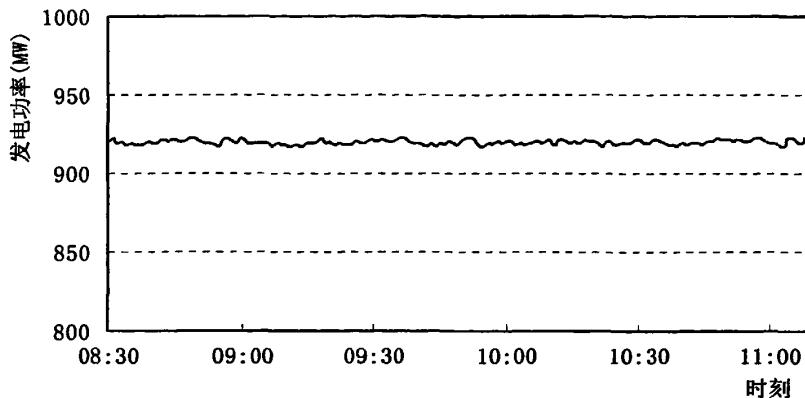


图 2-5 发电功率曲线

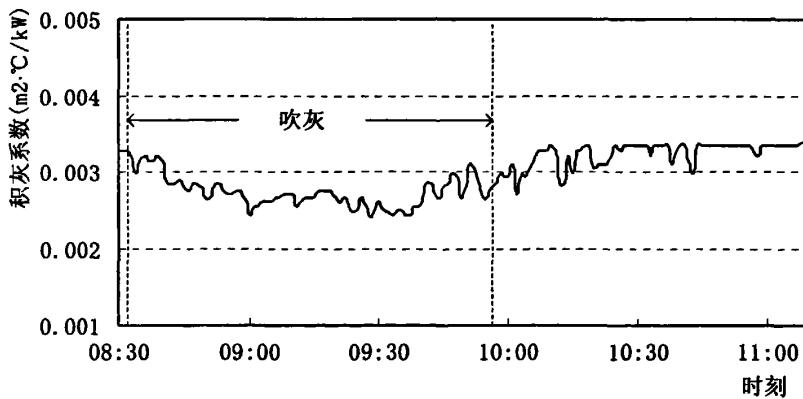


图 2-6 水冷壁积灰系数变化曲线

图 2-6 显示了炉膛水冷壁积灰系数随时间的变化情况。在吹灰之前，水冷壁的积灰系数较高，在 $0.0033(m^2 \cdot ^\circ C)/kW$ 左右；用吹灰器对炉膛进行吹扫过程中，积灰系数以较快速度下降，到达一定数值 $0.0024(m^2 \cdot ^\circ C)/kW$ 之后就不再降低；吹灰结束之后，积灰系数逐渐升高，一开始其增长速度较快，随着时间的推移其增长速度越来越慢，一段时间后达到吹灰之前的数值。由此可知，积灰系数的大小，直接反映了水冷壁的积灰结渣程度：吹灰之前结渣较重，积灰系数较高；对炉膛进行吹灰使水冷壁变干净，积灰系数降低；停止吹灰后，水冷壁表面的灰渣又会随着时

间的推移逐渐增加，积灰系数也随之升高。

由炉膛污染监测模型计算得到的炉膛污染率随时间变化的曲线如图 2-7 所示。从图中可知，炉膛污染率与积灰系数的变化趋势相同：在吹灰之前较高，吹灰过程中会降低，吹灰结束后又逐渐升高。从图中还可以看出，吹灰过程中污染率下降较为明显，炉膛吹灰器的吹扫效果较好；吹灰结束后，污染率回升的速度较快，表明炉膛水冷壁的结渣速度较快，在实际运行中需要对炉膛进行定时吹扫以保持水冷壁清洁，避免严重的结渣。

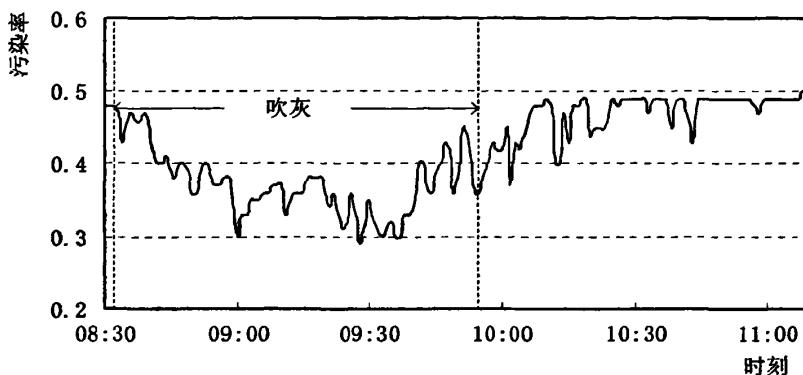


图 2-7 炉膛污染率变化曲线

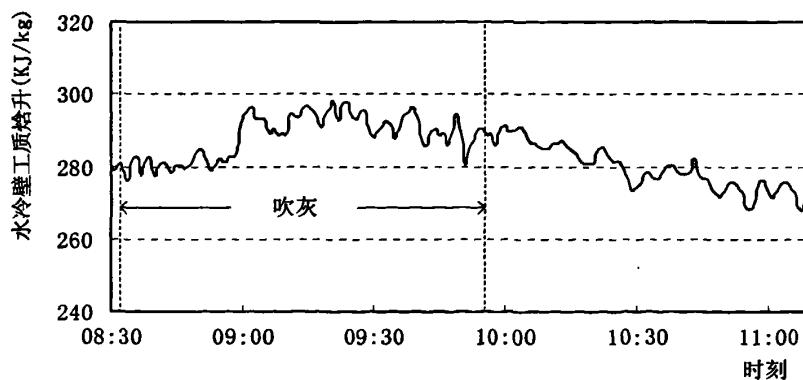


图 2-8 炉膛水冷壁工质的焓升变化曲线

水冷壁管内工质焓升随时间变化的曲线如图 2-8 所示，燃烧器以上各个区段的出口烟气温度如图 2-9 所示。炉膛吹灰之前，水冷壁表面的灰渣层较厚，水冷壁的传热热阻较高，水冷壁与烟气的换热效果较差，水冷壁管内单位质量工质的吸

热量（即焓升）较小，导致燃烧器以上各区段的出口烟气温度均较高；对炉膛进行吹灰，可以除去水冷壁表面的灰渣，使传热热阻降低，水冷壁与烟气的换热效果变好，水冷壁管内工质的焓升变大，各区段的出口烟气温度则会相应地降低；吹灰结束之后，水冷壁表面的灰渣层又会逐渐加厚，使传热热阻增加，换热效果变差，水冷壁管内工质的焓升逐渐降低，各区段的出口烟气温度又会相应地升高。

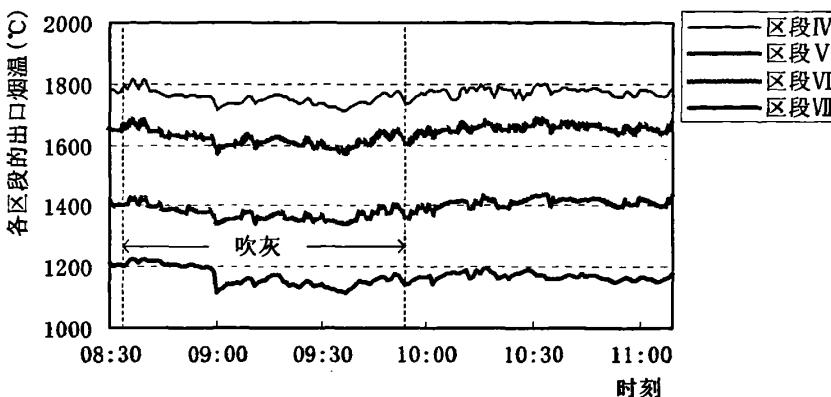


图 2-9 炉膛各区段出口烟温变化曲线

由以上分析可知，水冷壁管内工质焓升和各个区段出口烟气温度的变化规律与炉膛污染监测模型计算得到的炉膛污染率的变化规律相吻合，通过污染率来反映炉膛结渣状况是可行的，基于改进的炉膛分区段计算方法的炉膛污染监测模型具有足够的计算精度。

2.5 本章小结

以炉膛出口烟温作为关键参数的炉膛污染监测模型，能够从整体上反应炉内结渣状况。监测模型所需的炉膛出口烟温可以由尾部受热面通过热平衡计算逆推得到，除了少量的测温元件外，不需要安装其它任何测量设备和仪器，其成本低、可靠性高、维护简单，非常适合于炉膛结渣在线监测。

本章首先分析了超临界锅炉炉膛水冷壁工作特点，考虑炉膛的传热特性及热负荷分布的不均匀性，在原炉膛分区段计算方法的基础上，推导了适合于超临界锅炉的炉膛热力计算方法；然后定义了炉膛污染率，基于改进的炉膛分区段计算方法，建立了以炉膛出口烟温和水冷壁工质温度作为关键参数的超临界锅炉炉膛污染监测模型。

以邹县电厂 1000MW 超超临界锅炉为对象，运用基于改进的炉膛分区段计算方

法的炉膛污染监测模型，计算了不同时刻的炉膛水冷壁的积灰系数、污染率、各个区段进出口烟温以及水冷壁管内工质焓升。结果表明，积灰系数的大小直接反映了水冷壁的结渣积灰程度，炉膛污染率与积灰系数的变化趋势相同；水冷壁管内工质焓升和各个区段出口烟温的变化规律与炉膛污染监测模型计算得到的炉膛污染率的变化规律相吻合，炉膛污染监测模型具有足够的计算精度。

第三章 超临界锅炉对流受热面污染监测

3.1 引言

锅炉对流区域的积灰监测，一般采用整体监测的方式。其基本思路是根据烟气侧和工质侧的实时测量数据，计算出对流受热面的传热有效度比、灰污热阻或洁净因子，以此来表示受热面的积灰程度或相对清洁程度。相比于炉膛等辐射受热面，对流受热面所处区域烟气温度较低，烟气侧和工质侧实时数据的测量较为方便，而且现场已安装的热工测点也较完备，因而对流受热面的积灰监测较易实现。

现有的各种锅炉对流受热面积灰监测的方法当中，以洁净因子或污染率来表示受热面积灰状态的污染监测模型，可以直观地反映出管壁沾污对受热面吸热量影响的大小，模型当中的理想传热系数根据烟气特性进行计算，实际传热系数由烟气侧和工质侧的热平衡方程式计算得到。这种监测方法最主要的优点是所需要的设备少，在煤质、负荷相对稳定，无较大扰动的情况下，监测效果较好，能够满足锅炉运行和吹灰优化的要求。

对于超临界机组而言，锅炉容量非常大，机组负荷需要随用电量的改变而改变。当用电需求发生变化而改变机组的负荷，或者在机组启停时，锅炉负荷变化幅度很大且剧烈^[42]。锅炉变负荷过程中，燃料量和蒸汽流量都会改变，烟气侧和工质侧的温度、压力、流量及吸热量等参数都相应地发生变化^[43]。烟气侧参数与燃料的变化基本同步，而工质侧参数的变化则存在一定的滞后。此时，由于受热面管道所储存的热量发生了变化，烟气放热和工质吸热不再保持平衡，而现有的受热面污染监测模型是建立在热平衡基础之上的，所以其计算所得的洁净因子和污染率必然存在一定程度的偏差。因此，需要对超临界锅炉的动态过程进行研究，分析锅炉动态过程炉内烟气侧参数和工质侧参数的变化趋势，充分考虑变负荷过程的受热面金属蓄热量和工质蓄热量，得到各种负荷工况下受热面实际传热系数和理想传热系数的计算方法，最终建立具有较高监测稳定性的对流受热面污染监测模型。

3.2 对流受热面污染监测静态模型

对流受热面污染监测模型采用基于热平衡的计算原理，在锅炉整体热平衡的基础上，从省煤器出口开始，逆烟气的流程逐段进行各受热面的热平衡和传热计算。

3.2.1 实际传热系数的计算

实际传热系数是指受热面实际换热过程中的传热系数。在已知受热面出口烟温

和进出口工质温度的基础上，分别由烟气侧和工质侧的热平衡方程式（3—1）与（3—2），计算该受热面的换热量和进口烟温，再根据式（3—3）计算得到该工况下该受热面的实际传热系数 k_{sj} 。

烟气侧放热方程^[1]：

$$Q_y = \varphi(H' - H'' + \Delta\alpha H_{lk}^0) \quad (3-1)$$

工质侧吸热方程：

$$Q_q = D(h'' - h') / B_j \quad (3-2)$$

受热面的传热方程：

$$Q_c = \frac{k_{sj} F \Delta t}{B_j} = Q_y \quad (3-3)$$

式中： H' 、 H'' 为受热面进、出口烟气焓，kJ/kg； φ 为保热系数； $\Delta\alpha$ 为漏风系数； H_{lk}^0 为理论冷空气焓，kJ/kg； h' 、 h'' 为受热面进口及出口的蒸汽焓，kJ/kg； B_j 为计算燃料量，kg/s； k_{sj} 为实际传热系数，W/(m²·°C)； Δt 为传热温压，°C； F 为计算对流受热面积，m²。

3.2.2 理想传热系数的计算

理想传热系数是指受热面处于洁净状态时的传热系数。受热面理想传热系数 k_{lx} 根据烟气特性进行计算。理想传热系数与烟气辐射放热系数 α_f 、烟气对流放热系数 α_d 、蒸汽对流放热系数 α_2 、热有效系数 ψ 或灰污系数 ε 有关。

1) 屏式过热器的理想传热系数

对于屏式过热器，其吸热量包含两部分：一部分来自炉膛辐射的热量，另一部分来自屏间烟气的对流和辐射热量，因此其理想传热系数的计算式为：

$$k_{lx} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + (1 + \frac{Q_f}{Q_d})(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2})} \quad (3-4)$$

式中 Q_f 为炉膛辐射的热量, W; Q_d 为屏间烟气的对流和辐射热量, W; ε 为灰污系数, 由于烟气中含灰以及管壁灰渣层引起的热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C) / W$, 由于理想传热系数是指管壁处于洁净状态时的传热系数, 所以 $\varepsilon \approx 0$; α_1 为烟气侧不含灰气流对干净管壁冲刷的放热系数, $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$, 其计算式为 (3-5); α_2 为管壁对工质的放热系数, $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$, 其计算式为 (3-6)。

$$\alpha_1 = \zeta(\alpha_d + \alpha_r) \quad (3-5)$$

$$\alpha_2 = 0.023 \frac{\lambda}{d_{dl}} \left(\frac{wd_{dl}}{v} \right)^{0.8} P_r^{0.4} c_t c_l \quad (3-6)$$

式中, ζ 为受热面的冲刷系数, 它考虑了烟气对受热面冲刷的不均匀性、部分烟气跨越受热面绕流以及出现停滞区等以致发生吸热量减少的影响, 在大容量超临界锅炉机组中管子被横向气流冲刷时, ζ 可取为 1; α_d 为烟气对管壁表面的对流放热系数, 管束为顺列时其计算式为 (3-7)、管束为错列时其计算式为 (3-8); α_r 为烟气对管壁表面的辐射放热系数, 其计算式为 (3-9)。

$$\alpha_d = 0.2 C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^{0.65} P_r^{0.33} \quad (3-7)$$

$$\alpha_d = C_z C_s \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{v} \right)^{0.6} P_r^{0.33} \quad (3-8)$$

$$\alpha_r = \sigma_0 \frac{a_b + 1}{2} a T^3 \frac{1 - \left(\frac{T_b}{T} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_b}{T} \right)} \quad (3-9)$$

对于超临界压力锅炉的对流式受热面, 管壁对工质的放热系数 α_2 会达到相当大的数值 [5000~23250 W/(m²·°C)], 因此工质内壁的热阻可以忽略。此时屏式过热器的理想传热系数为:

$$k_{bx} = \frac{\alpha_1}{1 + (1 + \frac{Q_f}{Q_d})\varepsilon\alpha_1} \quad (3-10)$$

2) 对流式受热面的理想传热系数

水平烟道及尾部竖井内的对流受热面，其理想传热系数的计算公式分别为式(3-11)和式(3-12)：

管排是顺列布置：

$$k_{bx} = \psi \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3-11)$$

管排是错列布置：

$$k_{bx} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3-12)$$

式中 ψ 为热有效系数，计算理想传热系数时管壁处于洁净状态 $\psi \approx 1$ 。

对于超临界压力锅炉的对流式受热面，忽略工质内壁的热阻 $1/\alpha_2$ 之后，式(3-11)、(3-12)变为：

$$k_{bx} = \psi\alpha_1 \quad (3-13)$$

$$k_{bx} = \frac{\alpha_1}{1 + \varepsilon\alpha_1} \quad (3-14)$$

3.2.3 对流受热面污染率的计算

定义受热面实际换热过程中的传热系数 k_{sj} 与理想状态下的传热系数 k_{bx} 的比值为受热面的洁净因子 CF ，用来描述受热面的洁净程度。当 CF 等于1时，受热面处于理想的洁净状态，当 CF 小于1时受热面偏离洁净状态，其值越小则污染越严重。定义1减去 CF 的值为受热面污染率 FF ，描述受热面的污染程度。当 FF 等于0时，

受热面处于理想的洁净状态，当 FF 大于 0 时，受热面处于污染状态， FF 越大则污染越严重。

洁净因子计算公式：

$$CF = \frac{k_{sj}}{k_{lx}} \quad (3-15)$$

污染率计算公式：

$$FF = 1 - CF \quad (3-16)$$

通过计算得到受热面的洁净因子或污染率，就能够判断出受热面的污染程度，此即为对流受热面污染监测静态模型。在稳定工况下（机组负荷稳定在 920MW 左右不变），如图 3-1 所示，对流受热面污染监测静态模型计算所得的受热面实际传热系数、理想传热系数和污染率，如图 3-2~图 3-4 所示。

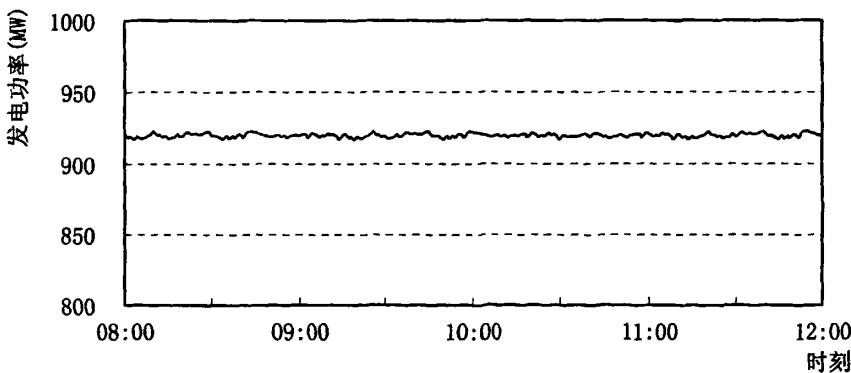


图 3-1 机组负荷变化曲线

从图 3-2 可知，受热面实际传热系数的大小反映了受热面整体的换热效果。吹灰之前，受热面的管壁表面的积灰较重，管束与烟气之间的换热效果较差，其实际传热系数较低；对受热面进行吹灰时，管壁表面的积灰被清除，管束与烟气之间的换热效果变好，其实际传热系数升高；吹灰结束之后，灰粒又在管壁表面沉积，管子的换热热阻随时间的推移逐渐升高，实际传热系数相应地降低。

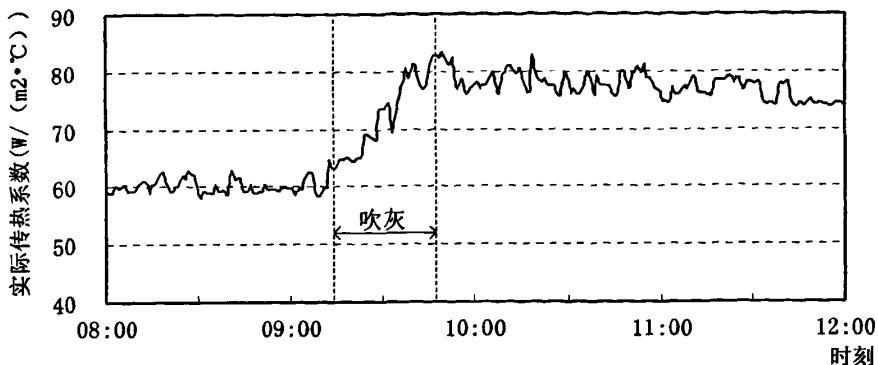


图 3-2 受热面实际传热系数变化曲

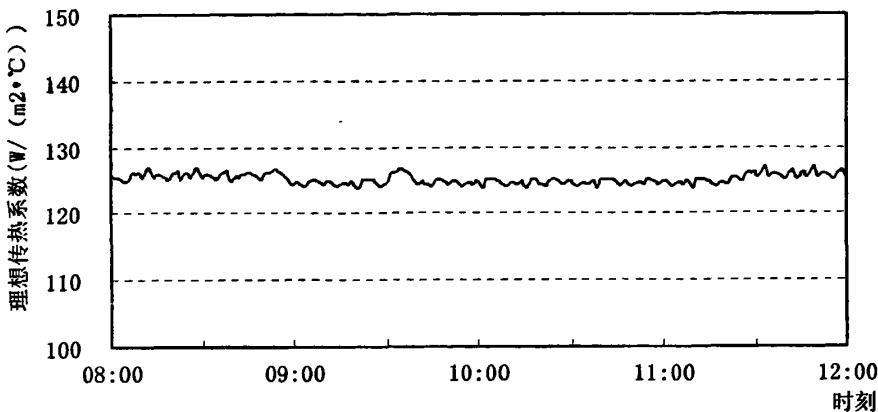


图 3-3 受热面理想传热系数变化曲线

从图 3-3 可知，在吹灰前后受热面的理想传热系数始终维持在一个稳定的数值。这是因为理想传热系数表示了受热面处于洁净状态时的传热系数，它的大小只与受热面管子的结构、布置方式以及烟气的特性有关。对于某个受热面而言，其管子的结构和布置方式是固定的，理想传热系数的大小就取决于烟气特性，即烟气的成分、温度、流速及黏度等。在稳定工况下，烟气特性基本固定，所以理想传热系数维持在一个稳定的数值。

模型计算所得的污染率如图 3-4 所示，对受热面进行吹灰，管子外表面的积灰被清除，其污染率会显著下降；在吹灰结束之后，随着时间的推移，受热面管子外表面的积灰逐渐加重，污染率缓慢上升。受热面的污染率很好地反映了受热面管壁积灰的状况，其变化规律符合理论分析结果，表明对流受热面污染监测静态模型在定量监测稳定工况下的对流受热面污染时，具有足够的精度。

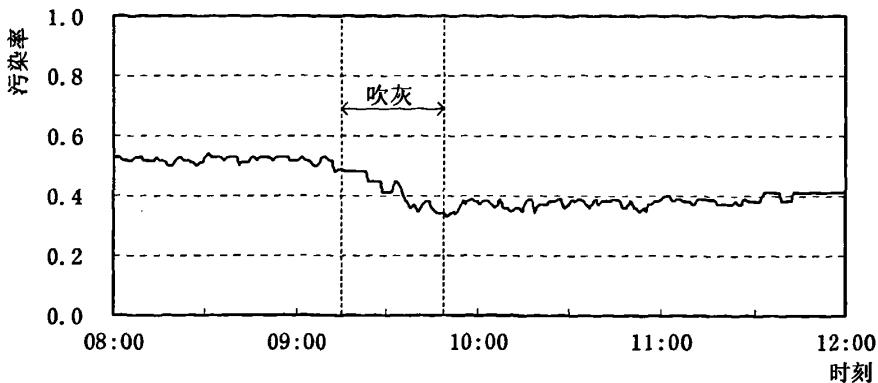


图 3-4 受热面污染率变化曲线

3.3 负荷变化对污染监测的影响

锅炉负荷改变将引起燃料消耗量、炉内辐射换热量、对流换热量、锅炉效率等发生相应的变化。燃料消耗量应与负荷相适应，即燃料消耗量与负荷基本成正比关系^[2]。

对于辐射过热器，当锅炉负荷增加时，炉内辐射受热面总的换热量随负荷增加而增加，但对应于单位质量工质或单位燃料量的辐射换热量则随负荷增加而减少，炉内温度和炉膛出口烟气温度升高，而辐射过热器的出口蒸汽温度降低。

对于对流过热器，当锅炉负荷增加时，因为燃料耗量基本上同比增加，所以对流过热器中的烟速增加，烟气侧的对流放热系数增大；同时燃料消耗量的增加也使得烟温增加，烟温增加使对流过热器的传热温差相应增大，从而使对流过热器的对流吸热量的增加值超过了负荷的增加值，使对流过热器中单位质量工质的吸热量增加，即焓升增加，其结果是对流式过热器出口汽温增加。对流式过热器布置得离炉膛出口越远，汽温随锅炉负荷的升高而增加的趋势越明显。

在锅炉快速变负荷过程中，对流受热面的烟气侧和汽水侧相对于燃料量变化的滞后时间是不相同的。对于烟气侧，燃料量增加以后，由于烟气是由燃料燃烧直接产生，烟气的温度、流量等参数在很短的时间内就和增加后的燃料量一致了。烟气侧的滞后时间和燃料的增加量关系不是很大，主要取决于烟气速度。相对而言，蒸汽侧的滞后时间就比较大。因此，在快速变负荷过程中，锅炉的汽水侧相对于烟气侧也有一个滞后的过程。

在稳定工况下，锅炉中各处工质参数和各个受热面的金属温度均为其各自的恒定值而无变化。燃煤带入锅炉的热量，除了各项损失，几乎全用于将给水加热成过

热蒸汽和蒸汽的再热，用于汽轮机的做功。然而，在变负荷工况下，锅炉中的工质参数和金属温度在不断发生变化，此时，燃煤带入锅炉的热量，除了各项损失外，并不完全用于将给水加热成过热蒸汽和蒸汽的再热，还有一部分变成了工质蓄热与金属蓄热。

对于某一单相受热面，变负荷工况下的锅炉烟气放热量 Q_y ，除了各项损失之外，主要包含以下三部分：一部分用于将受热面中蒸汽的温度提升，记为 Q_q ；一部分是工质的蓄热，记为 Q_m ；另一部分是金属管壁的蓄热，记为 Q_j 。

非稳态热平衡方程为：

$$Q_y = Q_q + Q_m + Q_j \quad (3-17)$$

而静态模型认为烟气放热量等于蒸汽吸热量，即稳态热平衡方程为：

$$Q_y = Q_q \quad (3-18)$$

在变负荷工况下，工质参数和金属温度会发生变化。当负荷升高，锅炉的烟气、汽水参数和金属温度升高时，即 $Q_m > 0$ 、 $Q_j > 0$ ，此时若仍采用静态模型计算，烟气放热量计算值将会小于实际值，由此计算得到的实际传热系数 k_s 将小于实际值；反之当负荷降低，锅炉的烟气、汽水参数和金属温度降低时，即 $Q_m < 0$ 、 $Q_j < 0$ ，此时若仍采用静态模型计算，烟气放热量计算值将会大于实际值，由此计算得到的实际传热系数将大于实际值。

在快速升负荷工况下（机组负荷从 760MW 快速升高到 920MW），如图 3-5 所示。对流受热面污染监测静态模型计算所得的受热面实际传热系数、理想传热系数和污染率，如图 3-6~图 3-8 所示。

图 3-6 显示了快速升负荷工况下，由对流受热面污染监测静态模型计算得到的实际传热系数。在升负荷过程中，实际传热系数的计算值要比理论值小 10~15 W/(m²·°C)。这导致了计算所得的受热面污染率在快速升负荷时有明显的跃升，即出现失真，如图 3-8 所示。

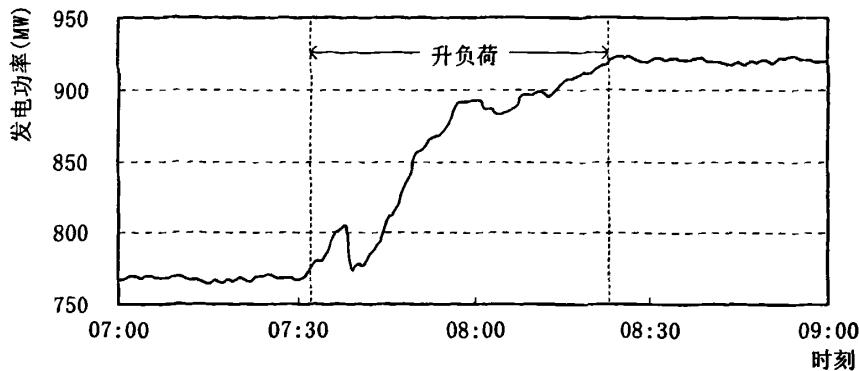


图 3-5 机组负荷曲线

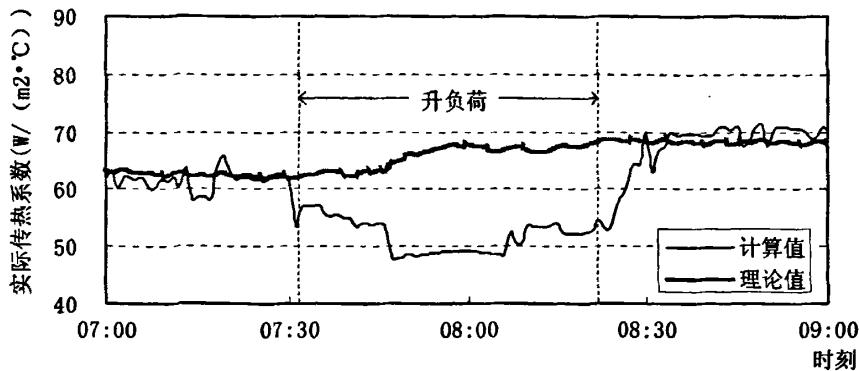


图 3-6 变负荷时的实际传热系数

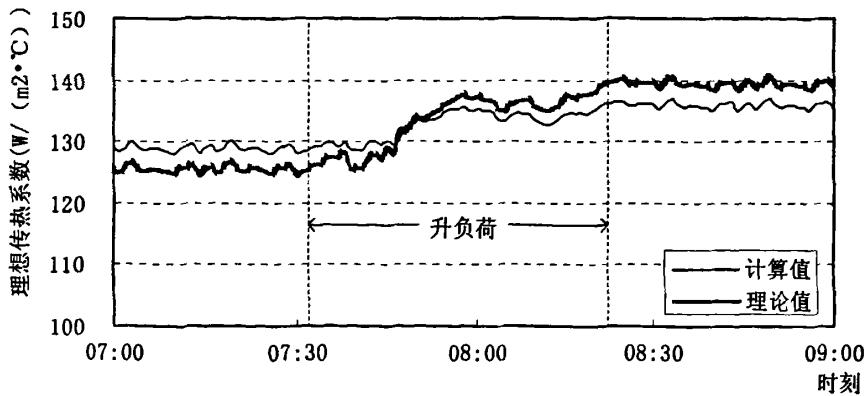


图 3-7 变负荷时的理想传热系数

受热面理想传热系数 k_{ix} 是根据烟气特性和管内工质特性进行计算。理想传热系数与烟气辐射放热系数 α_f 、烟气对流放热系数 α_d 、蒸汽对流放热系数 α_2 、热有效系数 ψ 或灰污系数 ε 有关。

当负荷升高时，对于烟气侧，燃料输入量增加，烟气的温度、流量和流速等参数都会升高，烟气辐射放热系数和烟气对流放热系数会变大；对于工质侧，蒸汽的温度、流量和流速等参数也会升高，蒸汽对流放热系数相应变大，其结果是受热面的理想传热系数变大。反之，负荷降低时，受热面的理想传热系数会变小。将以上建立的对流受热面污染监测静态模型应用于超临界机组后发现，在变负荷工况下，静态模型计算得到的理想传热系数误差较大：在低负荷时其值偏大，在高负荷时其值偏小，如图 3-7 所示。这就导致受热面的污染率在低负荷时偏大，在高负荷时偏小，如图 3-8 所示。

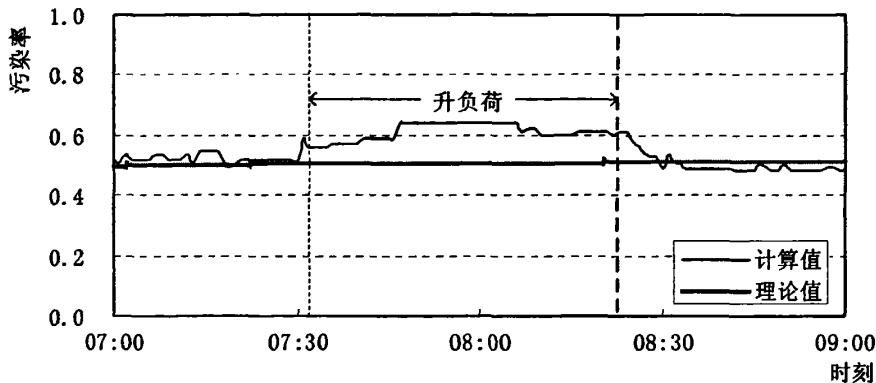


图 3-8 变负荷时的污染率

由此可知，静态模型在计算实际传热系数时没有考虑工质蓄热和金属蓄热，计算理想传热系数时没有充分考虑负荷变化的影响，所得到的受热面污染率不能很好地反映受热面管壁的沾污情况。所以必须对现有的计算方法进行改进，以满足变负荷工况下对流受热面污染监测的要求。

3.4 变负荷工况下对流受热面污染监测模型

由于锅炉的动态过程包括几十甚至上百个快慢不一的储质和蓄热过程，为了便于模型的建立和实现，可做如下的假设：

- 1) 金属管壁对工质的放热量包括管壁的传热量和金属管壁的蓄热量；
- 2) 金属管壁温度和蒸汽温度在单位时间（即一个计算周期）内是随时间按线

性变化的。

基于以上几方面的假设，建立变负荷工况下的热平衡方程，计算受热面的实际传热系数及理想传热系数，最终得到适用于变负荷工况的对流受热面污染监测动态模型。

3.4.1 变负荷中的实际传热系数

在计算变负荷工况下的烟气放热量、工质蓄热量及金属蓄热时，为了使计算具有较高的精度又不至于太复杂，采用集总参数动态修正模型^[44]。由于受热面工质的进口、出口参数已知，所以采用金属环节与汽水环节分开的集总参数动态修正模型，其计算方法如下^[45,46]：

$$D_t = (D + \frac{T_D D_{t0}}{\delta\tau}) / (1 + \frac{T_D}{\delta\tau}) \quad (3-19)$$

$$x_1 = (h + \frac{T_H x_{10}}{\delta\tau}) / (1 + \frac{T_H}{\delta\tau}) \quad (3-20)$$

$$x_2 = (x_1 + \frac{T_H x_{20}}{\delta\tau}) / (1 + \frac{T_H}{\delta\tau}) \quad (3-21)$$

$$x_3 = (x_2 + \frac{T_H x_{30}}{\delta\tau}) / (1 + \frac{T_H}{\delta\tau}) \quad (3-22)$$

$$h_t = (x_3 + \frac{T_H h_{t0}}{\delta\tau}) / (1 + \frac{T_H}{\delta\tau}) \quad (3-23)$$

$$Q_g = D_t (h - h_t) + R_m \frac{(V \rho h - V_0 \rho_0 h_0)}{\delta\tau} \quad (3-24)$$

$$Q_{yt} = Q_g + R_j M_j c_j \frac{\delta t_j}{\delta\tau} \quad (3-25)$$

$$Q_y = Q_{yt} + T_Q \frac{Q_{yt} - Q_{y10}}{\delta\tau} \quad (3-26)$$

式中： R_m 、 R_j 分别为工质蓄热和金属蓄热的动态修正因子； T_D 、 T_H 、 T_Q 分别为汽水流量扰动、入口焓扰动和管外热流量扰动的惯性补偿时间常数； h 、 h_t 分别为受热面进、出口工质焓； V 为工质总体积； ρ 为工质密度； M_j 、 c_j 、 t_j 分别为受热面金属质量、比热和温度； Q_g 为金属壁面传递给工质的热量； Q_{yt} 、 D_t 、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 h_t 为计算过程定义的中间量； Q_{y10} 、 D_{t0} 、 x_{10} 、 x_{20} 、 x_{30} 、 h_{t0} 、 V_0 、 ρ_0 、 h_0 分别为 Q_y 、 D_t 、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 h_t 、 V 、 ρ 、 h 在前一时刻的值。

以上各式中，式(3-19)、式(3-20)~(3-23)及式(3-26)分别为针对工质流量扰动、入口焓扰动及管外热流量扰动的惯性补偿方程式。通过增加这些惯性补偿方程以及适当调整动态修正因子 R_m 、 R_j 和惯性补偿时间常数 T_D 、 T_H 、 T_Q ，使集总参数动态修正模型更好地逼近分布参数模型，提高了模型的动态精度，从而能够更好地反映对象的分布参数特性。

模型中五个待定的参数 R_m 、 R_j 、 T_D 、 T_H 、 T_Q 可由以下各式计算：

$$R_m = \frac{T_m + 0.5(\tau_0 + \alpha_0 T_m)}{4T_m(1 + \alpha_0)} \quad (3-27)$$

$$R_j = \frac{T_m + 0.5(\tau_0 + \alpha_0 T_m)}{4\tau_0} \quad (3-28)$$

$$T_D = T_Q + T_m(1 - m)(R_j - 1) \quad (3-29)$$

$$T_H = 0.25[0.75(\tau_0 + \alpha_0 T_m) + T_m(R_j - 0.5)] \quad (3-30)$$

$$T_Q = 0.5[T_m + 0.5(\tau_0 + \alpha_0 T_m)] \quad (3-31)$$

以上各式中的参数 τ_0 、 α_0 、 T_m 由下面的式(3-32)~(3-34)计算：

$$\tau_0 = \frac{V\rho}{D} \quad (3-32)$$

$$\alpha_0 = kD''/(DC_p) \quad (3-33)$$

$$T_m = M_j c_j / (kD'') \quad (3-34)$$

式中 k 为比例系数，与传热面积和物性有关； m 为指数，取 $m=0.8$ 。

在以上模型当中，金属工质蓄热量和金属蓄热量的计算式如下：

$$Q_m = Q_g - Q_q \quad (3-35)$$

$$Q_j = Q_y - Q_g \quad (3-36)$$

通过集总参数动态修正模型计算得到烟气放热量 Q_y 之后，便可根据下式计算受

热面的实际传热系数：

$$k_{sj} = \frac{B_j Q_y}{F \Delta t} \quad (3-37)$$

3.4.2 变负荷中的理想传热系数

根据前面的分析可知，对流受热面理想传热系数的计算会受机组当前负荷的影响。同一个受热面的理想传热系数在不同负荷工况下具有不同的数值。因此，需要将其折算到同一负荷标准下进行比较。试验证明，理想传热系数会随着负荷的增减而增减，采用当前负荷与额定负荷的比值为变量可以修正负荷对理想传热系数的影响。根据锅炉试验数据拟合而得的理想传热系数的修正系数为：

$$\alpha = a + b \left(\frac{P}{N_e} \right) + c \left(\frac{P}{N_e} \right)^2 + d \left(\frac{P}{N_e} \right)^3 \quad (3-38)$$

式中 P 为机组当前时刻的发电功率值， N_e 为机组额定功率值， a 、 b 、 c 、 d 为经验系数，与锅炉的运行特性和受热面的结构有关，通过分析锅炉的运行数据和现场经验来确定。

由此得到受热面的理想传热系数：

$$k_{lx} = \alpha k_{lx0} \quad (3-39)$$

其中 k_{lx0} 为修正之前的理想传热系数，根据烟气特性计算得到。

3.4.3 对流受热面污染监测动态模型

在受热面进、出口工质参数及出口烟气参数已知的前提下，基于热平衡的计算原理，考虑工质蓄热和金属蓄热，采用集总参数动态修正模型计算受热面的实际传热系数；引入功率修正系数对由烟气特性计算得到的理想传热系数进行修正；根据实际传热系数和理想传热系数计算得到受热面污染率。由此便建立了对流受热面污染监测动态模型。其计算流程如图 3-9 所示：

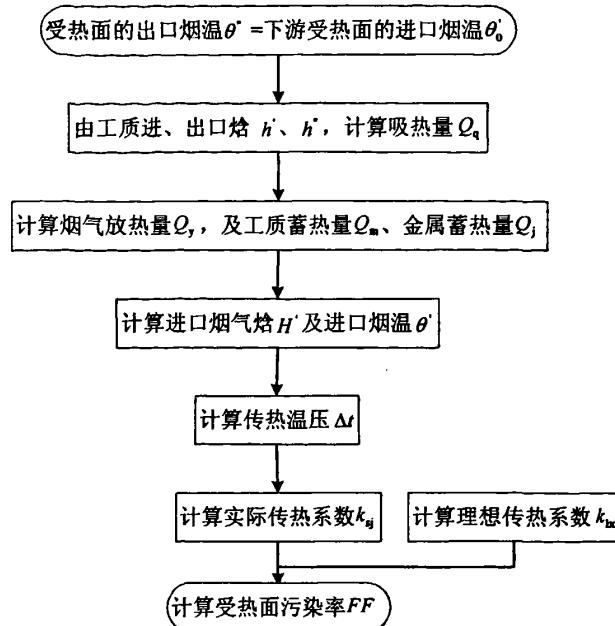


图 3-9 污染监测动态模型的计算流程

3.5 实例计算

3.5.1 变负荷中的受热面污染率计算

以第二章中的邹县 1000MW 超超临界锅炉为例，分别采用对流受热面污染监测静态模型和动态模型计算变负荷工况下的锅炉低温过热器的污染率。通过对比两种模型计算所得的受热面吸热量、实际传热系数、理想传热系数和受热面污染率等计算结果，验证对流受热面污染监测动态模型的可行性。

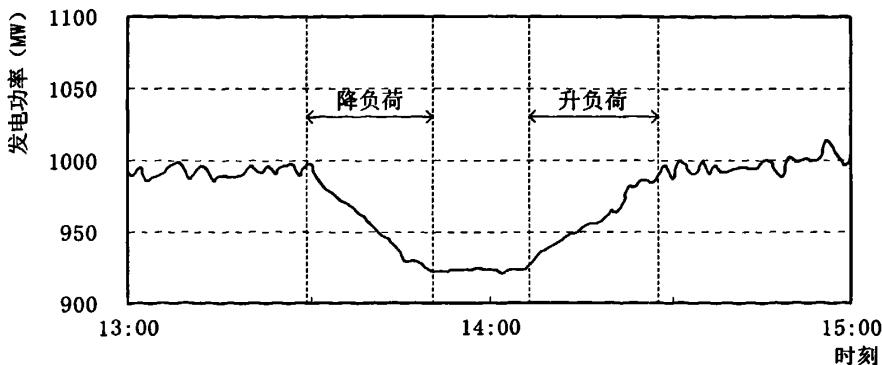


图 3-10 机组负荷变化曲线

机组负荷变化情况如图 3-10 所示，在 13: 30~13: 50 时刻为快速降负荷过程，在 14: 10~14: 30 时刻为快速升负荷过程。在计算时间段内，锅炉没有吹灰操作。

在动态模型中计算受热面吸热量时考虑了金属蓄热及工质蓄热，其计算所得的结果如图 3-11 所示。在负荷稳定时金属蓄热量和工质蓄热量的绝对值都较小；快速降负荷过程中金属蓄热量和工质蓄热量在大多数情况下均为负值，其绝对值较大；快速升负荷过程中两者大多数情况下均为正值，绝对值也较大。

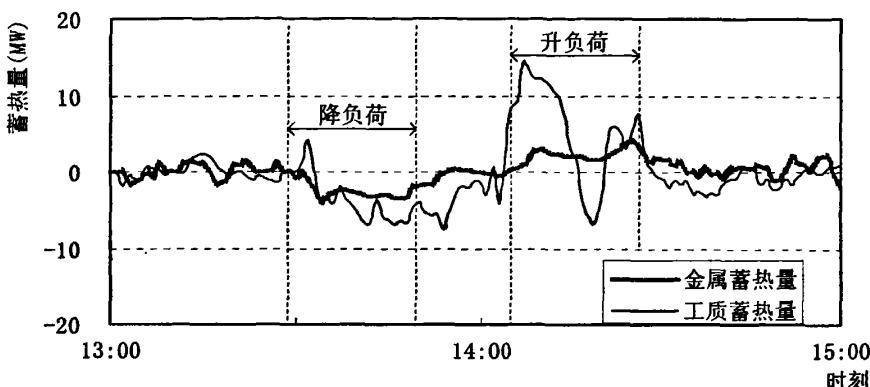


图 3-11 金属蓄热量和工质蓄热量变化曲线

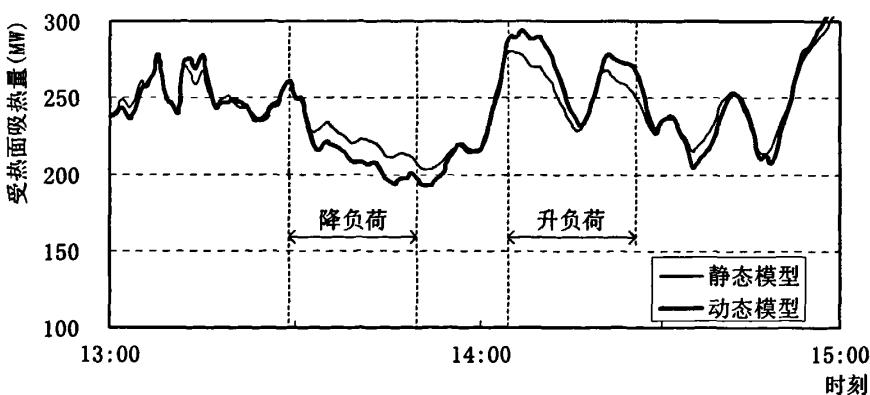


图 3-12 受热面吸热量的计算结果

图 3-12 显示静态模型和动态模型计算得到的受热面吸热量，即烟气传给受热面的热量。由图可知，在负荷较平稳时，静态模型计算所得烟气放热量与动态模型计算所得的烟气放热量基本相同；在快速降负荷过程中，静态模型计算所得烟气放

热量要大于动态模型计算所得烟气放热量，这是因为静态模型在计算工质吸热量及烟气放热量时没有考虑工质蓄热和金属蓄热，而动态模型则充分考虑了受热面换热的动态特性，计算结果与实际情况比较吻合；升负荷过程中，静态模型计算所得烟气放热量则要小于动态模型计算所得烟气放热量。

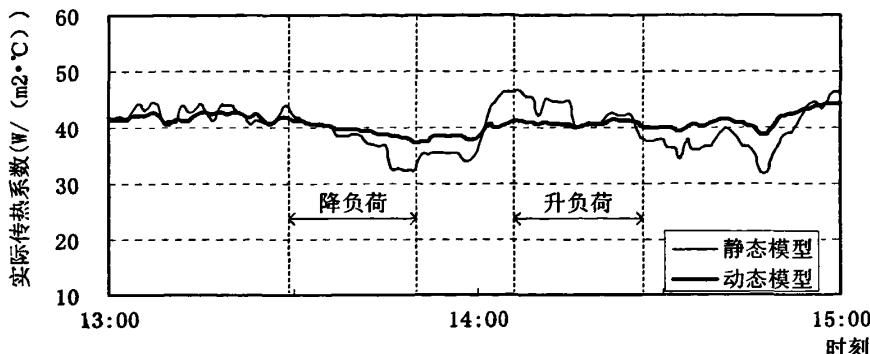


图 3-13 实际传热系数的计算结果

动态模型在计算受热面实际传热系数时，采用集总参数动态修正模型，考虑了工质蓄热量及金属蓄热，计算得到的实际传热系数曲线较为平稳；而静态模型没有考虑蓄热的影响，计算所得的实际传热系数曲线波动较大，特别是在快速升降负荷时会出现失真的情况。两种模型计算所得的实际传热系数如图 3-13 所示。

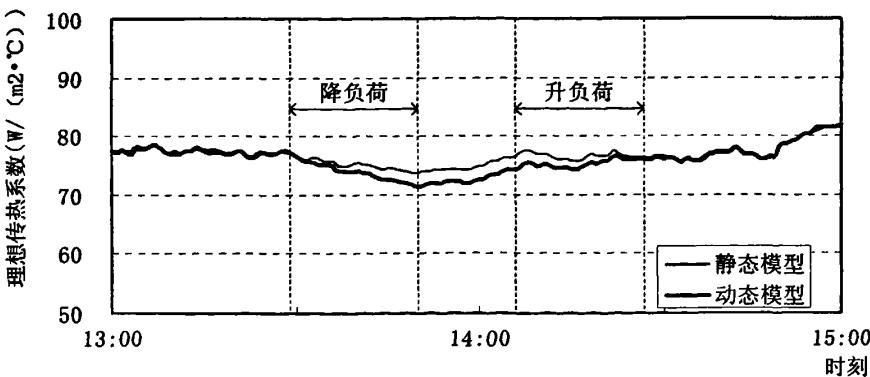


图 3-14 理想传热系数的计算结果

图 3-14 显示了静态模型和动态模型计算得到的受热面理想传热系数变化曲

线。在高负荷时，两条曲线基本重合；而在低负荷时，动态模型计算所得的理想传热系数则比静态模型的小。这是因为静态模型和动态模型虽然都是根据烟气特性来计算受热面的理想传热系数，但是动态模型在计算时加入了负荷修正系数，所以在不同负荷工况下，两者的计算结果是有区别的。

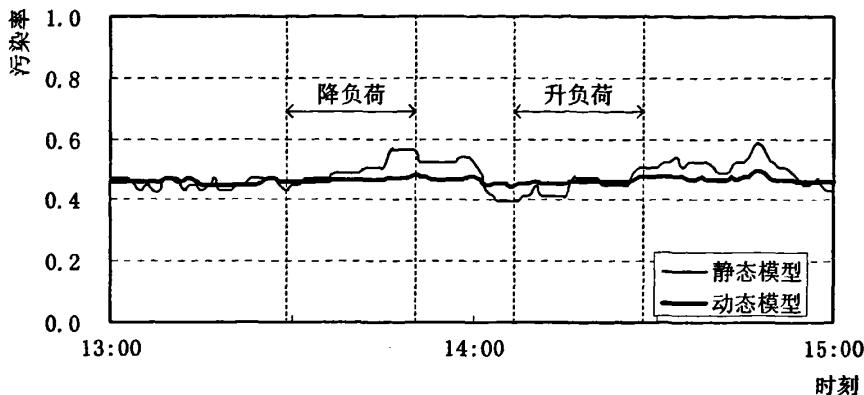


图 3-15 污染率的计算结果

静态模型和动态模型计算得到的受热面污染率曲线如图 3-15 所示。在负荷快速变动时，静态模型计算所得的受热面污染率曲线会出现较大波动；而动态模型计算所得的污染率曲线则较为平稳，能够更好地反映受热面的积灰情况。由此可知，与对流受热面污染监测静态模型相比，对流受热面污染监测动态模型对负荷变化的自适应性更强，可以准确地计算出受热面的污染率，能够满足全负荷工况污染监测的需要。

3.5.2 各个对流受热面污染率的计算结果

图 3-16 图 3-21 显示了由对流受热面污染监测动态模型计算得到的屏式过热器、高温过热器、高温再热器、低温再热器、低温过热器及省煤器等对流受热面的污染率曲线。图中各条污染率曲线不是非常的平滑，都有一定程度的波动，其原因是计算所用的实时数据均由相应锅炉热工测点测量得到，而测量过程中会受到各种各样的扰动，导致测量所得的实时数据会有一定程度的波动，污染监测模型计算所得的污染率曲线就会出现波动。但是污染率的整体变化趋势还是比较明朗，污染监测动态模型的计算结果完全可以用于判断受热面的积灰情况。

在锅炉正常运行且不吹灰时，各个受热面的积灰随着时间的推移逐渐加重，管子的传热热阻随之增加，受热面传热效果变差，实际传热系数降低，其结果是受热面污染率随时间缓慢上升。当管壁表面的灰污沉积到一定程度之后能够达到动平

衡，积灰层厚度基本固定不变，此时受热面的传热热阻会保持较高的数值，受热面的污染率也会稳定在一个较高的水平上。

对锅炉各个对流受热面进行吹灰，可以清除受热面管壁表面的积灰，提高受热面的传热效果，管子的传热热阻降低，实际传热系数增大，受热面污染率降低。不同受热面的吹灰效果不同，其污染率变化的幅度就不同。吹灰效果越好，受热面污染率下降越明显，变化幅度越大。对比吹灰前后的污染率数值，可以判断受热面的吹灰效果。从各图的污染率曲线可知，屏式过热器、高温过热器和高温再热器等受热面在吹灰前后其污染率变化都比较明显，表明吹灰器的清扫效果明显；而低温过热器及省煤器等受热面吹灰前后污染率的变化不明显，吹灰器的清扫效果不佳。

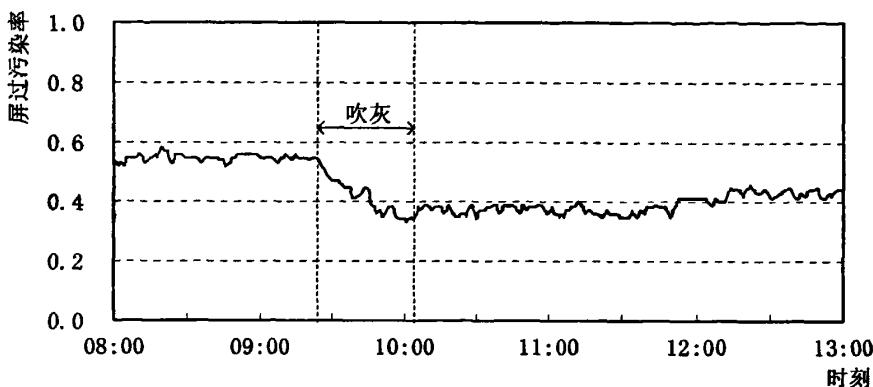


图 3-16 屏式过热器的污染率曲线

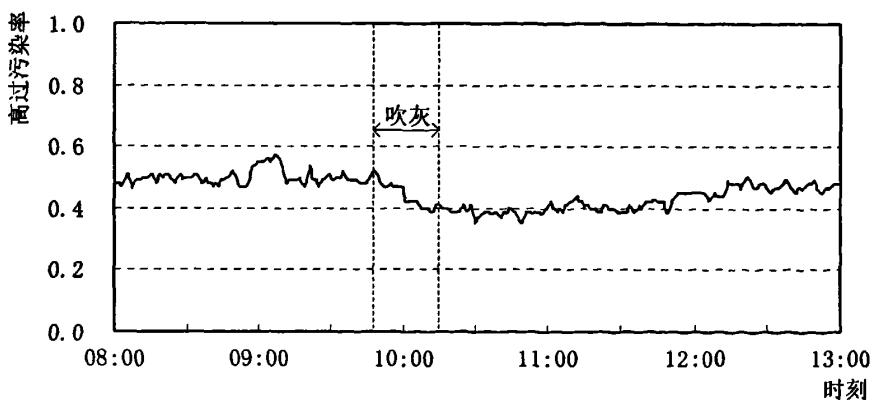


图 3-17 高温过热器的污染率曲线

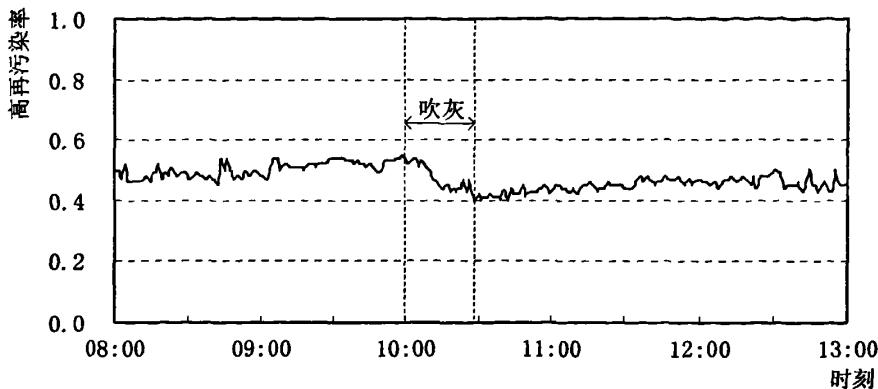


图 3-18 高温再热器的污染率曲线

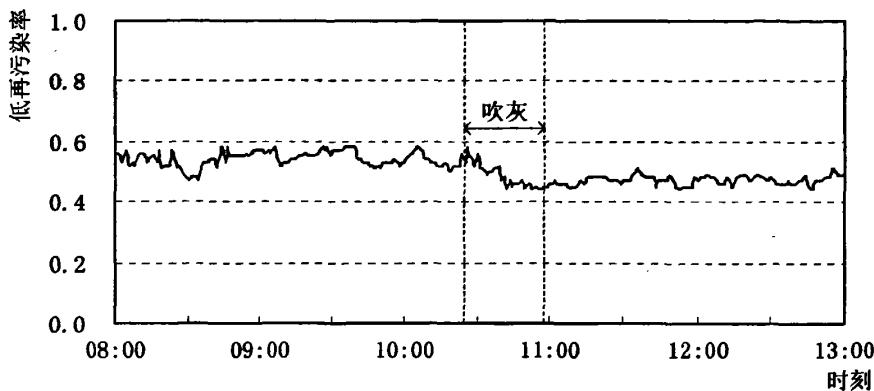


图 3-19 低温再热器的污染率曲线

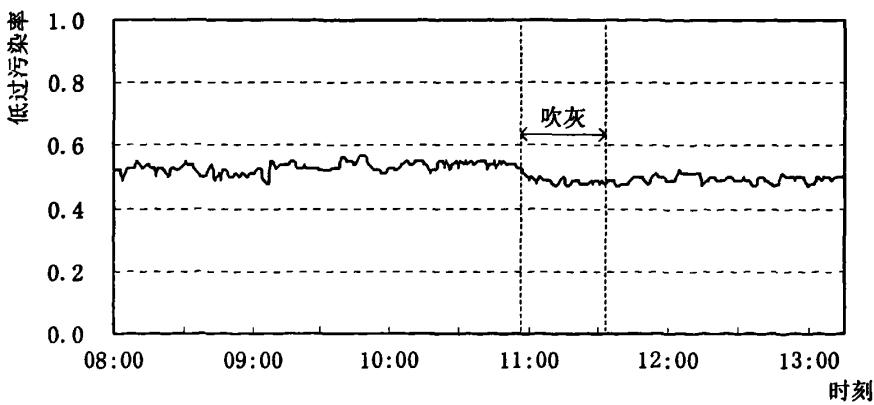


图 3-20 低温过热器的污染率曲线

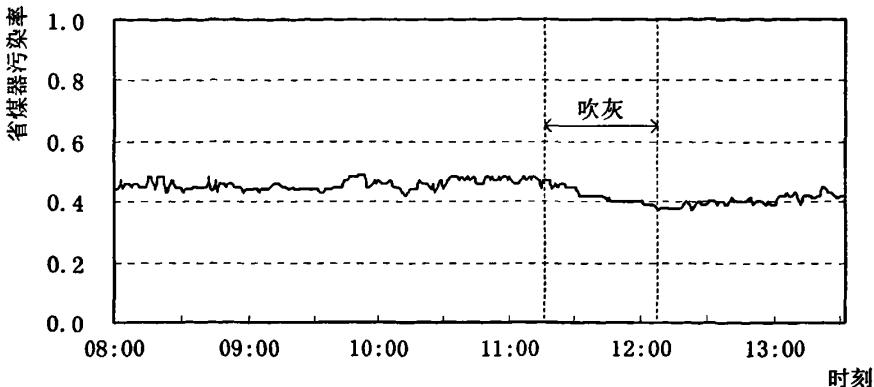


图 3-21 省煤器的污染率曲线

从各图中还可以看出，在吹灰结束之后一段时间内，受热面的灰沉积能力较强，管壁表面的灰层厚度增长较快，污染率上升速度较快；越往后，灰层厚度增长越慢，污染率上升的速度也越慢；经过较长一段时间之后，受热面的积灰达到动平衡，灰层厚度不再增加，受热面污染率就保持在较高的数值。

3.6 本章小结

基于热平衡的计算原理，在锅炉整体热平衡的基础上，给出了实际传热系数和理想传热系数的计算方法，并定义了受热面的污染率，从而建立了超临界锅炉的对流受热面污染监测静态模型，根据模型计算得到的受热面污染率来判断受热面的积灰程度。运用静态模型进行了实例计算，结果表明在稳定负荷工况下静态模型的计算结果较为理想，计算所得的实际传热系数和理想传热系数与实际情况相符，污染率能够反映受热面积灰情况；而在变负荷工况下，其计算结果存在较大偏差。

对超临界锅炉的动态过程进行研究，分析了负荷变化过程中炉内烟气侧参数和工质侧参数的变化规律。在计算受热面实际传热系数时考虑了金属管壁蓄热及工质蓄热，采用集总参数动态修正模型进行对流受热面的换热计算，使计算所得的受热面实际传热系数更加准确；而计算理想传热系数时充分考虑负荷变化的影响，引入了功率修正；最终建立了超临界锅炉对流受热面污染监测动态模型。以邹县 1000MW 超超临界锅炉为对象，分别采用污染监测静态模型和动态模型进行对流受热面污染监测的实例计算。结果表明：动态模型能够比较准确地监测出各种负荷工况下对流受热面的污染状况，其性能优于静态模型，具有较高的稳定性，能够实现全负荷工况的对流受热面污染监测。

第四章 超临界锅炉受热面污染在线监测与吹灰指导系统

4.1 引言

电站锅炉污染监测与吹灰指导系统一般包括数据输入输出模块、参数预处理模块、受热面污染率计算模块、以及能够提供合理吹灰策略的吹灰指导模块，乃至最终实现全自动吹灰的自动控制模块。电站锅炉污染监测与吹灰指导系统所要实现的功能是实现对锅炉各主要受热面污染在线监测，为各受热面寻找最佳的吹灰时刻，并能根据负荷变化与机组的实际运行状况，及时调整临界污染率和吹灰指导方式，最终实现按需吹灰。开发大型电站锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统是一个非常复杂的过程，涉及到很多方面的因素，主要包含以下几方面内容：

- 1) 首先根据研究对象的运行特性，确定吹灰优化的主要目标，了解受热面结构和原始热工测点的布置情况，增加必要的测点，并将其引入 DAS 系统。然后对原始参数的准确性与可靠性进行校验，调试和处理因测点损坏或其它原因造成的不可靠的原始数据。
- 2) 建立锅炉炉膛和主要对流受热面的污染在线监测模型，通过实例计算，验证模型的准确性，对监测计算效果不佳的受热面进行单独的吹灰试验，根据试验结果对模型进行适当调整和改进。
- 3) 在经过一段时间的试运行，验证了炉膛和对流受热面污染监测模型的可行性之后，需要进行一系列的吹灰优化基础试验：通过变蒸汽压力吹灰试验为蒸汽吹灰系统确定最为合理的吹灰压力；通过污染上下限试验确定不同受热面的极限污染率和达到最大污染所需的时间；进行吹灰器单独吹灰试验，对吹灰器的工作性能做出评价，并进行合理分组，必要时增设部分吹灰器，或更换无效的吹灰器。
- 4) 利用现场采集得到的实时数据进行离线计算，得到各种工况下的受热面污染率变化曲线，从中分析出锅炉各受热面的污染特性，获得每个受热面临界污染率，划定每个受热面的吹灰报警界限。根据机组实际运行的需要，为每一个区域的受热面制定合适的吹灰模式。

完成锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统的软件编制和各个模块的调试工作之后，便可以将其应用于实际对象上。系统根据受热面污染在线监测模型的监测结果，判断是否需要吹灰，并给出吹灰建议以及应该动作哪些吹灰器。运行人员根据系统提示，执行吹灰操作。

4.2 系统的基本结构

4.2.1 系统的硬件构成

系统的硬件构成如图 4-1 所示，测量信号由传感器通过前置机与 DAS 系统相连，采集的数据通过前置机的通讯卡接入 DCS 系统，数据由 DCS 与 PI 系统的接口机送入 PI 系统，位于信息中心的污染在线监测与吹灰指导系统服务器通过 MIS 或 SIS 网络自 PI 系统取得计算所需的数据，经过锅炉污染监测与吹灰指导系统各个模型的计算，将结果返到主控室的显示终端上，供运行人员参考，指导吹灰过程。

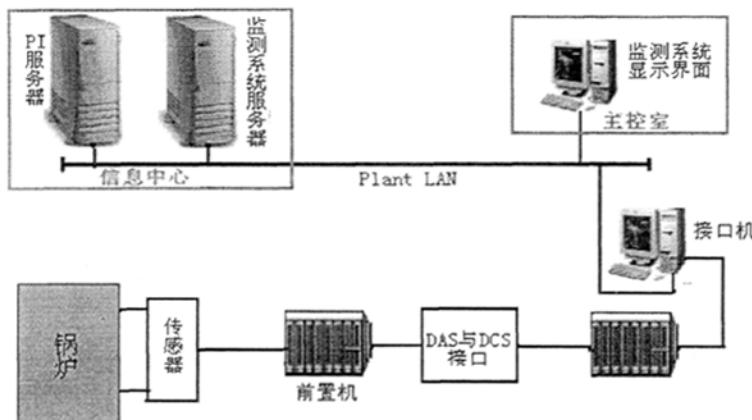


图 4-1 系统硬件构成示意图

在实施“受热面污染监测与吹灰指导系统”的过程中，要对系统所需的热工测点进行认真的核对，如果现场原有的测点不够完善，需新增及改造部分测点。以邹县 1000MW 超超临界机组为例，在搭建受热面污染监测与吹灰指导系统硬件平台过程中，需要新增以下几个测点：3 个主蒸汽流量测点、3 个再热蒸汽流量测点、2 个汽水分离器入口蒸汽压力测点、2 个低温过热器入口蒸汽压力测点、2 个屏式过热器入口蒸汽压力测点、2 个高温过热器入口蒸汽压力测点和 2 个低温再热器出口蒸汽压力测点。

4.2.2 系统的软件结构

锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统采用 Visual Basic6.0 语言编程实现，其编程思想采用模块化设计方法。采用模块化编程方法的优点是可将复杂的系统分成若干个相对简单的子系统，从而简化系统的设计。同时，模块化设计可以将整个系统

的详细功能分散到各个模块中完成，每个模块仅承担较少的功能，且具有通用性。此外，模块化设计还具有相当的安全性和稳定性，每个模块可以单独进行实现和调试，使得整个系统的安全性和稳定性得到提高。最后，模块化的设计还增加了系统的灵活性，在需要时可以更换、完善或新增部分模块，使系统能够满足新的应用需求。

系统的软件结构如图 4-2 所示。系统启动时，首先读入结构参数和煤质参数；在每一个计算周期，首先由计时器发出采样指令，从 PI 数据库获取计算所需的实时数据，通过参数预处理模块过滤掉不可信数据，保证输入系统的热工数据的合理性，避免整个系统因个别测点失效而导致瘫痪；然后分别进入炉膛污染率计算模块和对流受热面污染率计算模块，计算出当前时刻的炉膛和对流受热面污染率；将计算结果送入吹灰指导模块，给出吹灰建议；最后内部计算程序与用户界面进行信息交互，将计算得到的监测结果和吹灰建议提供给运行人员。在系统运行过程中，运行人员可以根据需要改变系统的采样计算周期；当锅炉燃煤的煤质发生较大变化时，运行人员还可以通过相应的用户界面输入新的燃用煤种成分。

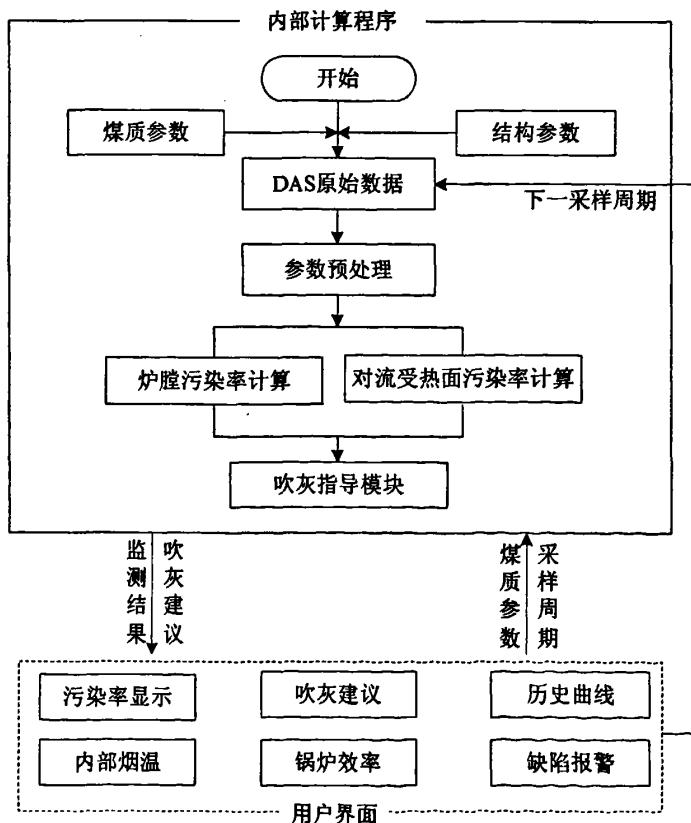


图 4-2 系统软件结构图

4.3 计算数据预处理

要开发一个完善的锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统，不仅要完成炉膛和对流受热面污染率计算程序的编制，各种显示界面和交互界面的开发，还要完成锅炉热工参数的预处理程序的编制，各个受热面结构参数的计算及录入，以及水和水蒸气热力性质计算程序的编制。

4.3.1 热工参数预处理

通常，热工参数的扰动包括稳定扰动和脉冲扰动，稳定扰动使得参数测量值小幅度地上下波动，而脉冲扰动则不定时地与稳定扰动相互作用，可能相互抵消而削弱，也可能相互叠加导致测量值大幅偏离真实值，成为必须剔除的“坏值”，此时最容易导致系统的误判断。因此，本系统的参数预处理模块由“上下限校核”和“移动平均”两部分组成。首先为每个实时热工参数设定合理的变化范围，系统用到的如工质温度或压力等参数通常均有2个以上的测点，对于超出正常变化幅度的参数，能够剔除的剔除，不能剔除的给出合理的替代值。然后对其进行加权移动平均处理，以保证原始数据的准确性与连续性。

其基本思路是：利用最小二乘原理进行参数估计，预测参数在下一个时刻的数值，比较实测值与预测值之差，对于明显偏离真实值的“坏值”，其偏差必然较大，予以剔除，并以预测值代替，这样可消除“坏值”的影响；然后将前n个值与下一个测量值（或预测值）加权平均，得到一个可用于监测和分析计算的新值。

具体的数据处理步骤如下：

当前测量值时刻向前取连续n个时刻的已测量值 $x_i(i=1,2,3,\dots,n)$

1) 计算算术平均值 \bar{x} ：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4-1)$$

2) 计算平方差 δ_i ：

$$\delta_i = (x_i - \bar{x})^2 \quad (4-2)$$

3) 计算标准差 σ ：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n - 1}} \quad (4-3)$$

4) 预测第 $n+1$ 个值 \hat{x}_{n+1} [47]

$$\hat{x}_{n+1} = \mathbf{T}_{n+1}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (4-4)$$

其中 $\mathbf{T}_m = (1, x, x^2, \dots, x^m)^T$, $m = 1, 2, \dots, n$, $\mathbf{A} = (\mathbf{T}_0, \mathbf{T}_1, \dots, \mathbf{T}_n)$

5) 将新的测量值 x_{n+1} 与预测值 \hat{x}_{n+1} 相比较,

若 $(x_{n+1} - \hat{x}_{n+1}) \leq \alpha \sigma$, 则保留原值, (α 为系数, 根据实际情况自定, 一般取 $1.5 < \alpha < 3$);

若 $(x_{n+1} - \hat{x}_{n+1}) > \alpha \sigma$, 则剔除此值, 用预测值代替, $x_{n+1} = \hat{x}_{n+1}$;

6) 将这 $n+1$ 个值加权平均, 得新值 \bar{x}_{n+1} , 其权重按由旧到新逐次增大的规则, 即越靠近 x_{n+1} , 权重越大, x_{n+1} 的权重 w 要保证不小于 0.5, 以保持数据的实时性;

$$\bar{x}_{n+1} = x_{n+1} w + \sum_{i=1}^n x_i \frac{2i}{n(n+1)} (1-w) \quad (4-5)$$

7) 对下一个计算周期的采集值, 舍弃之前 n 个步长的一个旧值, 重复步骤 1~7, 得相应的 new 值。依此类推。

这样, 既消除了“坏值”的影响, 又减少了参数的波动, 提高了监测数据的可靠性, 使其与数据的历史和未来趋势吻合较好。

4.3.2 锅炉受热面结构参数

在计算锅炉受热面污染率的过程中, 需要用到各个受热面的管子节距、管径、工质流通面积、烟气流通面积及换热面积等结构参数。为了便于系统计算, 在锅炉厂家提供的原始数据的基础上进行必要的计算之后, 将其汇总并制作成文本文件或表格文件, 以方便系统在计算过程中进行读取。本次应用的对象——邹县 1000MW 超超临界锅炉各个受热面的结构参数如表 4-1 所示。

表 4-1 锅炉受热面的结构参数

	横向节距 (mm)	纵向节距 (mm)	管径 (mm)	横向管排数	每排管子根数	工质流通面积 (m ²)	烟气流通面积 (m ²)	换热面积 (m ²)
屏过	1714	57	Φ45×6.7	19	21	0.30	593	4042
高过	914	57	Φ45×5.6	36	24	0.74	523	4261
高再	342	70	Φ50.8×3.2	98	12	1.84	362	5179
低再	114	76	Φ50.8×5.4	296	6	2.34	87	25426
低过	114	76	Φ57×11	296	3	0.85	153	17848
省煤器	114	76	Φ57×8	296	4	1.56	153	34309

4.3.3 水和水蒸汽热力性质的计算

在受热面污染率计算过程中，需要根据水或水蒸汽的温度、压力计算出工质焓及工质吸热量。因此，受热面污染监测与吹灰指导系统中必须包含水和水蒸汽热力性质的计算程序。

关于水和水蒸汽热力性质计算公式，我国一直沿用 1967 年国际公式化委员会通过的 IFC-67 水和水蒸气热力性质计算公式。但是，IFC-67 仍然存在一定的缺陷，特别是近年来超临界机组的出现，需要计算高参数或超高参数下水和水蒸气的热力性质，采用 IFC-67 公式的误差明显偏大，或者有些热力性质已经超出其适用范围。

为了满足工业应用和科学的需求，提高水和水蒸汽热力性质计算公式的计算精度和适用范围，国际水和水蒸气性质学会 IAPWS 在 1997 年推出了 IAPWS-97 水和水蒸气热力性质计算公式，以取代原有的 IFC-67 水和水蒸气热力性质计算公式。与 IFC-67 相比，IAPWS-97 的适用范围更广，计算精度更高，计算时间也大大缩短，而且各区的计算模型在其边界处具有很好的一致性^[48-49]。

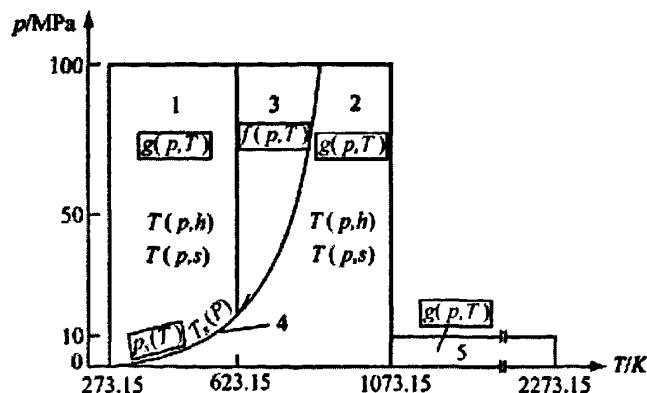


图 4-3 IAPWS-97 公式的分区及公式

IAPWS-97 公式在保证计算精度的前提下，涵盖了以下有效范围：

$$273.15\text{K} < T < 1073.15\text{K}, p \leq 100\text{MPa}$$

$$1073.15\text{K} < T < 2273.15\text{K}, p \leq 10\text{MPa}$$

如图 4-3 所示，IAPWS-97 公式将以上有效范围划分为 5 个区域^[50]。IAPWS-97 公式在 1 区和 2 区采用吉布斯自由焓 $g(p,T)$ ，在 3 区采用亥姆霍兹自由能 $f(\rho,T)$ ，在 4 区采用饱和压力公式 $p_s(T)$ ，在高温区 5 采用吉布斯自由焓 $g(p,T)$ 。这 5 个公式被称为 IAPWS-97 基本方程。

以 2 区为例，其基本方程及其导出方程为：

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (4-6)$$

其中各个无量纲参数定义为： $\pi = p / p^*$ ， $\tau = T^* / T$ ， $\eta = h / h^*$ ， $\sigma = s / s^*$ 。

理想气体项 $\gamma^0(\pi, \tau)$ 和余项 $\gamma^r(\pi, \tau)$ 的计算式分别为：

$$\gamma^0(\pi, \tau) = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i^0 \tau^{j_i^0} \quad (4-7)$$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{l_i} (\tau - 0.5)^{j_i} \quad (4-8)$$

水和水蒸汽的其它热力性质由吉布斯函数及其导数求得，表达式如下：

$$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r) \quad (4-9)$$

$$\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r) - \pi(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r) \quad (4-10)$$

$$\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r) - (\gamma^0 + \gamma^r) \quad (4-11)$$

$$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r) \quad (4-12)$$

$$\frac{c_p(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r) \quad (4-13)$$

基于以上分析，本系统选用 IAPWS-97 作为水和水蒸气热力性质的计算公式，用 VB6.0 编程实现。

4.4 系统的主要功能及界面

锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统具备污染在线监测、吹灰指导、历史和实时曲线查询，以及原始测点消缺等一系列功能。系统用户界面是污染监测系统与运行人员进行信息交互的窗口。一方面，系统将计算得到的炉膛和对流受热面的污染率、炉内烟气温度、吹灰建议等信息，以棒图、曲线、动画及表格等直观的形式提供给用户，指导运行人员进行吹灰操作；另一方面，运行人员可以通过煤种输入窗口，调整煤质参数，以适应入炉煤的变化，还可以根据需要适当调整采样计算周期。系统主要包含以下几个界面：

1) 污染率显示界面

污染率显示界面作为系统的主界面，如图 4-4 所示。该界面主要分为四个区域：棒图区、曲线区、结构示意图区和状态栏区，用于显示不同受热面污染率的实时计算结果以及当天的污染率曲线。

棒图区：实时显示锅炉各受热面的污染率（以棒图和数字两种方式表现），受热面污染越严重，污染率数值越大，棒图越长，颜色也相应由紫色变成红色。

曲线区：棒图下面的“实时曲线”按钮分别对应各个受热面的实时污染率曲线。点击相应的按钮，该受热面的当天污染率变化情况将在界面右上角显示。

结构示意图区：锅炉各个受热面布置示意图，帮助运行人员了解锅炉受热面的布置情况。

状态栏区：提供了当前服务器端的运行状况。如果服务器端能够正常采集数据和计算，则状态栏提示“正在计算实时数据；当前负荷： $\times \times \text{MW}$ ”；如果出现其它情况，则状态栏提示相应的信息。

2) 吹灰指导界面

吹灰指导界面提供了当前系统通过受热面污染监测模型和吹灰指导模块分析得到的吹灰建议，其界面如图 4-5 所示。当系统提示吹灰时，需要动作的吹灰器不断闪烁，提示需要吹灰。右下方的吹灰流程表是系统给出的吹灰指导意见。

3) 历史曲线查询界面

历史曲线查询界面提供了污染率、烟气温度、工质温度及流量等数据的历史曲线查询和历史数据统计功能，如图 4-6 所示。

4) 烟气温度显示界面

烟气温度界面提供了锅炉各个受热面的进出口平均烟气温度、工质温度和各级减温水流量的数值，如图 4-7 所示。方便用户了解温度及流量的变化情况。

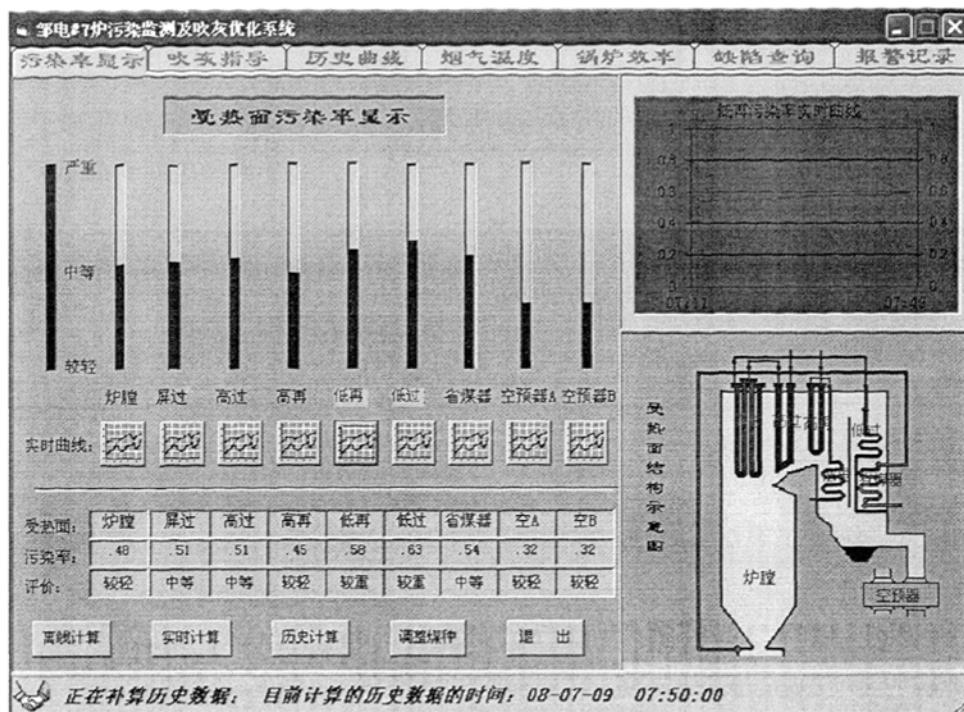


图 4-4 污染率显示界面

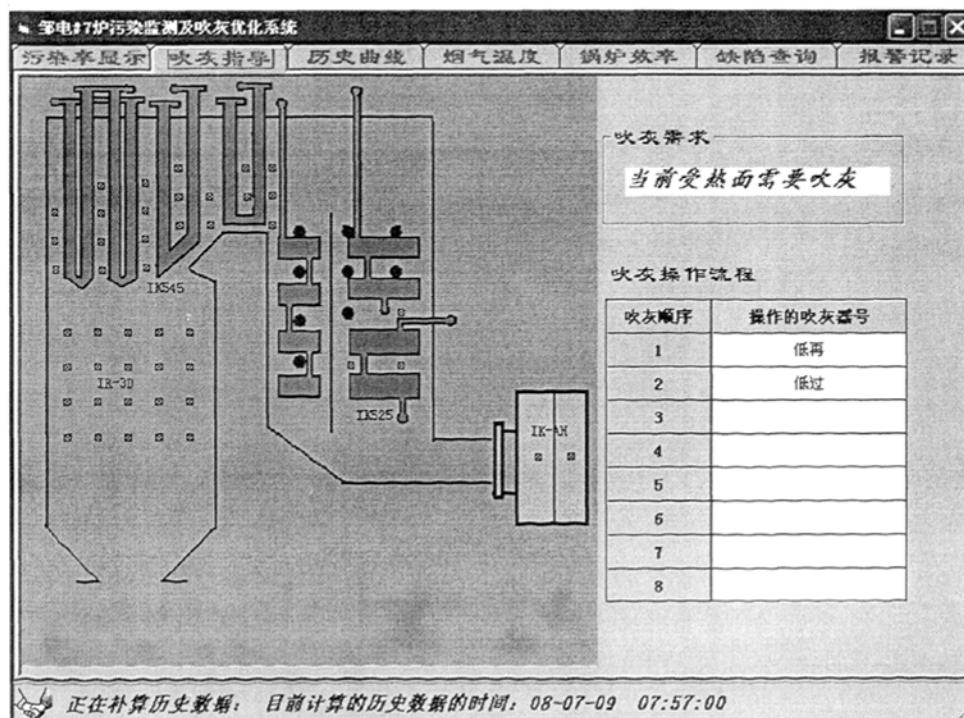


图 4-5 吹灰指导界面



图 4-6 历史曲线查询界面

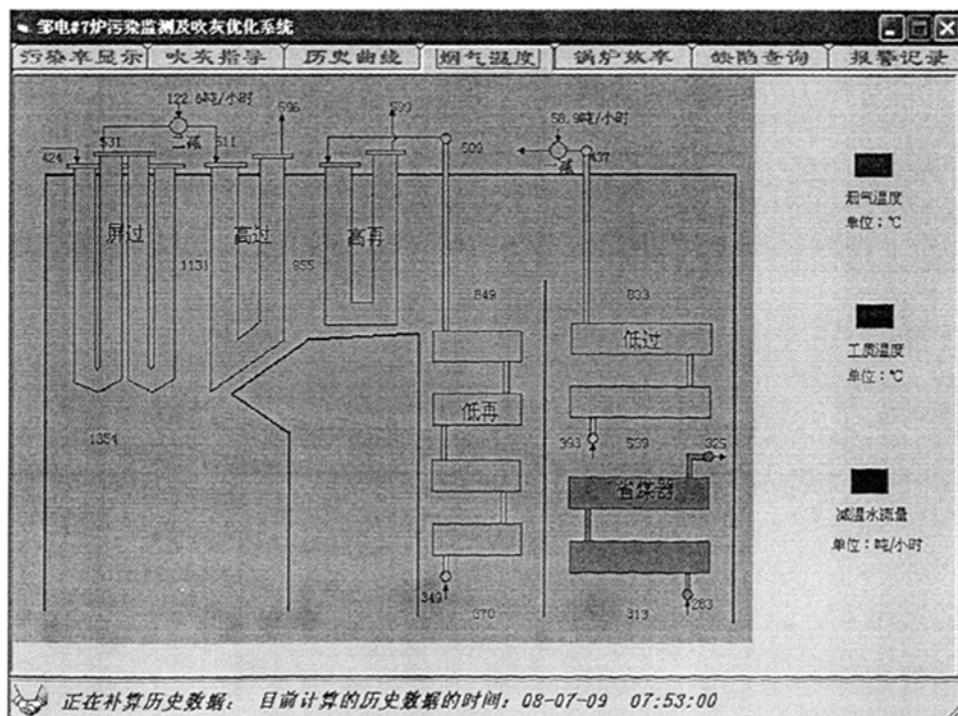


图 4-7 烟气温度显示界面

4.5 系统的网页发布模块

锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统（简称主系统）的计算结果都保存在自带的 ACCESS 数据库中，而主系统只能在服务器上运行，位于集中控制室的运行人员无法查看主系统的计算结果。因此，需要增加网页发布模块，将 ACCESS 数据库中的数据以网页的形式发布到电厂局域网中，以便现场运行人员查询并指导运行。

网页发布模块采用 ASP.NET 语言来编制，它负责读取 ACCESS 数据库中的数据，将主系统计算得到的锅炉各个受热面污染率及其他参数实时发布到电厂局域网内，指导运行人员的吹灰操作。系统的网页发布主页如图 4-8 所示。

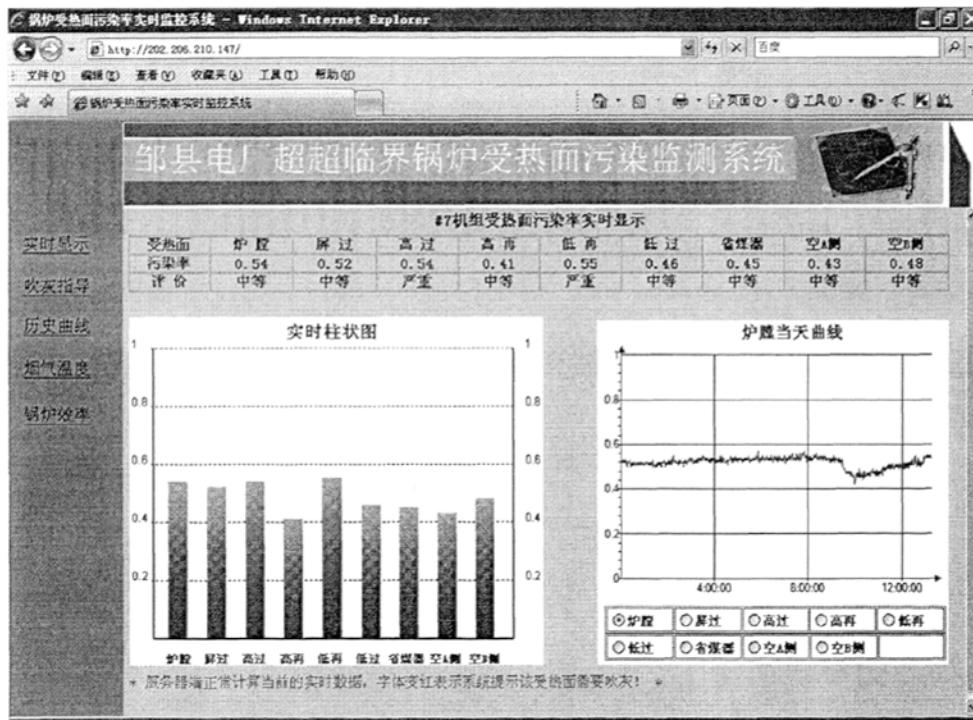


图 4-8 网页发布的主页

4.6 本章小结

锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统在实施过程中，需要搭建硬件平台和开发软件系统。硬件平台以电厂现有的 DCS 系统和计算机网络为基础，通过新增必要的热工测点和其它设备构建而成；软件系统采用模块化系统设计方法，由数据输入输出模块、参数预处理模块、受热面污染率计算模块以及吹灰指导模块组成。

系统开发过程中所需要完成的工作有：炉膛和对流受热面污染率计算程序的编制，各种显示界面和交互界面的开发，锅炉热工参数的预处理程序的编制，各个受热面结构参数的计算及录入，水和水蒸气热力性质计算程序的编制，以及网页发布模块的开发。

锅炉受热面污染监测与吹灰指导系统具备在线运行监测、吹灰指导、历史和实时曲线查询，以及原始测点消缺等一系列功能。系统将计算得到的炉膛和对流受热面的污染率、炉内烟气温度、吹灰建议等信息，以棒图、曲线、动画及表格等直观的形式提供给用户，指导运行人员进行吹灰操作。

第五章 结论与展望

5.1 本文的主要研究成果

超(超)临界燃煤锅炉运行过程中,炉内受热面发生积灰结渣会对锅炉的安全经济运行带来严重影响。因此,应该尽可能准确地监测炉内结渣积灰的程度和发展趋势,并根据积灰结渣的状况和运行需要,合理、有效地动作吹灰器,及时吹灰除渣。本文根据超(超)临界锅炉各受热面的运行特性和污染特征,建立了基于炉膛分区段计算方法的炉膛污染监测模型和对流受热面污染监测动态模型,开发了超超临界锅炉受热面污染在线监测与吹灰指导系统,实现了积灰结渣的在线监测和吹灰的优化指导。

本文的主要研究成果包括:

- 1) 分析了超临界锅炉炉膛水冷壁工作特点,考虑炉膛的传热特性及热负荷分布的不均匀性,在原炉膛分区段计算方法的基础上,推导了适合于超临界锅炉的改进的炉膛分区段计算方法;然后定义了炉膛污染率,基于改进的炉膛分区段计算方法,建立了以炉膛出口烟温和水冷壁工质温度作为关键参数的超临界锅炉炉膛污染监测模型。
- 2) 以邹县电厂 1000MW 超超临界锅炉为对象,运用基于改进的炉膛分区段计算方法的炉膛污染监测模型进行实例计算,计算了不同时刻的炉膛水冷壁的积灰系数、污染率、各个区段的进出口烟温及水冷壁的焓升,验证了炉膛污染监测模型的可行性。
- 3) 基于热平衡的计算原理,在锅炉整体热平衡的基础上,建立了超临界锅炉的对流受热面污染监测静态模型,根据模型计算得到的受热面污染率来判断受热面的积灰程度。运用静态模型进行了实例计算,结果表明在稳定负荷工况下静态模型的计算结果较为理想,而在变负荷工况下其计算结果存在较大偏差。
- 4) 对超临界锅炉的动态过程进行研究,分析了负荷变化过程中炉内烟气侧参数和工质侧参数的变化规律。在计算受热面实际传热系数时考虑了金属蓄热及工质蓄热,采用集总参数动态修正模型进行对流受热面的换热计算,使计算所得的受热面实际传热系数更加准确;而计算理想传热系数时充分考虑负荷变化的影响,引入了功率修正;最终建立了超临界锅炉对流受热面污染监测动态模型。
- 5) 以邹县 1000MW 超超临界锅炉为对象,分别采用污染监测静态模型和动态模型进行对流受热面污染监测的实例计算。结果表明:动态模型能够比较准确地监测出各种负荷工况下对流受热面的污染状况,其性能优于静态模型,具有较高的稳

定性，能够实现全负荷工况的对流受热面污染监测。

6) 用 VB6.0 语言开发了 1000MW 超超临界锅炉受热面污染在线监测与吹灰指导系统。系统具备在线运行监测、吹灰指导、历史和实时曲线查询，以及原始测点消缺等一系列功能。系统将计算得到的炉膛和对流受热面的污染率、炉内烟气温度、吹灰建议等信息，以棒图、曲线、动画及表格等直观的形式提供给用户，指导运行人员进行吹灰操作。

5.2 进一步研究工作的展望

本文对超临界锅炉炉膛和对流受热面污染在线监测方法进行了研究，初步实现了超临界锅炉受热面污染的在线监测。但是对于超临界锅炉受热面污染在线监测方法及吹灰优化系统的开发等问题，还有很多需要进一步深入研究的工作：

1) 以炉膛出口烟温和水冷壁工质温度作为关键参数的超临界锅炉炉膛污染监测模型，只能监测出炉内整体的结渣状况，却无法得知炉膛各个部位的结渣情况。对于超临界燃煤锅炉而言，沿炉膛四周不同方向以及高度方向的结渣速度、渣层的物理特性不尽相同，结渣对水冷壁的危害也不尽相同，在监测炉膛结渣时应该加以区分，尽可能准确地监测和预报炉膛不同部位的结渣状况。

2) 本文所提出的炉膛和对流受热面污染监测模型以污染率来表征受热面管壁外表面的积灰结渣程度，虽然其结果是可信的，但其形式仍不够直接，不能直观地反映出积灰层的厚度。今后应该进一步研究锅炉燃煤的煤灰成分和灰渣的传热特性，并进行相应的锅炉积灰结渣特性试验，寻找受热面污染率与灰渣层厚度的关系式，以建立更加完善的污染监测模型，提高锅炉受热面污染监测的可视化程度。

3) 在实现超临界锅炉受热面污染在线监测的基础上，应综合考虑受热面吹灰的效果、吹灰造成的蒸汽损失、吹灰过程的热应力、腐蚀和磨损，以及吹灰装置的维护费用等因素，建立吹灰优化模型以准确地计算吹灰收益和损失，最终形成一个完整的超临界锅炉吹灰优化系统。

参考文献

- [1] 樊泉桂, 阎维平. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004, 203~275
- [2] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理与计算(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 1998, 593~594
- [3] 西安交通大学. 直流锅炉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1977, 10~25
- [4] 岑可法. 锅炉和热交换器的积灰、结焦、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994, 15~46
- [5] 易广宙, 徐海燕. 华电国际邹县发电厂四期工程 2×1000MW 超超临界机组锅炉初步设计评审说明书[R]. 东方锅炉股份有限公司, 2004, 10~18
- [6] 郝莉丽. 600MW 超超临界锅炉设计探讨[J]. 电站系统工程, 2007, 23 (1): 39~40
- [7] 李平. 超临界直流锅炉几个技术问题的探讨[J]. 电站系统工程, 2001, 17 (11): 24~27
- [8] 樊泉桂. 超临界锅炉水冷壁工质温度的控制[J]. 动力工程, 2006, 26 (1): 38~41
- [9] Carter R. Advances in intelligent sootblowing [J]. Power, 2005, 149 (8): 38~41
- [10] Piboontum S J, Swift S M, Conrad R S. Boiler modeling optimizes sootblowing[J]. Power, 2005, 149 (8): 34~37
- [11] Sim K Y, Sung H K, Hae W J, et al. Enhancement of boiler performance through optimized sootBlower system for power plants[J]. SPIE, 2005, 6404 (1): 132~135
- [12] 杨卫娟, 周俊虎, 刘建忠, 等. 600MW 机组锅炉吹灰器优化投用分析[J]. 热力发电, 2005, 34 (1): 24~26
- [13] Nakoneczny G J, Conrad R S, Scavuzzo S A, et al. Implementing B&W's intelligent sootblowing system at MidAmerican energy company's Louisa energy center unit 1[C]. Western Fuels Conference, New Mexico, 2002: 11~15
- [14] John W S. Intelligent clean on Lambton unit3[R]. Lehigh University Energy Research Center Research Report, USA, 2003: 37~42
- [15] Bruce R C. Ash monitoring system for coal-fired utility boilers[R]. CANMET Energy Technology Centre Research Report, Ottawa, 2007: 7~10

- [16] Richard E T, Tom C F. A fouling monitor alarm to prevent forced outages[C]. International Joint Power Generation Conference and Exposition and the International Conference on Power Engineering, USA, 1999: 212~221
- [17] Von K Z, Wignjosaputro A, Sackermann R, et al. Einsatz des kessel diagnose systems KEDI im kraftwerk staudinger 5 realisierung und betriebserfahrung[J]. VGA Kraftwerkstechnik , 1995, 75: 9
- [18] Nenad S, Bruce R C. Sootblowing optimization : part II sootblower characterization and implementation of an intelligent sootblowing advisor[R]. Combustion Canada, 2003: 21~25
- [19] 阎维平, 梁秀俊, 周健, 等. 300MW 燃煤电站锅炉积灰结渣计算机在线监测与优化吹灰[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (9): 84~88
- [20] 陈宝康. 电站锅炉受热面污染监测及优化吹灰的理论与实验研究: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学动力工程系, 2004
- [21] EPRI, Fireside test guidelines[R]. EPRI, USA, 1990: 14~33
- [22] Afonso R F, Dyas B E, Johnson S A, et al. Effects of coal quality on ash deposition and the use of advanced testing techniques[C]. Proc 3rd Inter Conf on the effects of coal quality on power plants, San diego, CA, USA, 1993: 52~58
- [23] 俞海森, 曹欣玉等. 应用灰污热流计监测燃煤锅炉炉膛灰污结渣的动态过程 [J]. 中国动力工程学报, 2005, 25 (1): 88~91
- [24] Chambers A K, Wynnykyi J R, Rhodes E. A furnace wall ash monitoring systems for coal fired boilers[J]. Journal of Engineering for Power, 1981, 103 (3): 532~538
- [25] 武彬. 电站锅炉受热面污染监测: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2000
- [26] Teruel E, Cortes C. Monitoring and prediction of fouling in coal-fired utility boilers using neural networks[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60 (18): 5035~5048
- [27] 陈晓梅, 马晓茜. 基于改进 BP 神经网络的锅炉结渣预测模型[J]. 华东电力, 2005, 33 (7): 43~45
- [28] 陈宝康, 阎维平, 李宵飞, 等. 基于神经网络的电站锅炉辐射受热面污染监测 [J]. 动力工程, 2003, 18 (5): 120~125

- [29] 张忠孝. 用模糊数学方法对锅炉结渣特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (10): 64~66
- [30] 侯斌, 吕子安. 电站锅炉对流受热面积灰状态的在线监测[J]. 中国电力, 2002, 20 (3): 20~23
- [31] 陆继东, 刘定坡. 电站锅炉优化吹灰模糊模型的研究[J]. 华中科技大学学报, 2005, 19 (6): 35~37
- [32] 谭蓬, 朱予东. 锅炉受热面污染监测影响原因的分析[J]. 电力科学与工程, 2005, 8 (3): 42~43
- [33] 谭蓬. 锅炉动态特性对锅炉受热面污染监测的影响: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学动力工程系, 2005
- [34] 张忠孝. 用模糊数学方法对电厂锅炉结渣特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (10): 64~65
- [35] 吴福保, 撤应禄, 李奇, 等. 煤灰结渣特性的粗集评判[J]. 动力工程, 1999, 19 (6): 451~454
- [36] 赵利敏. 电站锅炉结渣的模糊综合评判[J]. 热力发电, 1998, 27 (5): 8~10
- [37] Chambers A K, Wynnyckyj J R, Rhodes E. A furnish wall ash monitoring system for coal fired boiler[J]. ASME, J Eng Power, 1981, 103 (5): 532~538
- [38] Vassallo A M, Finnie K S, Palmisano A J, et al. Infra-red emission analysis of coal mineral thermal transformations[C]. Proc of 5th Australian Coal Sci Conf, Australian, 1992: 222~231
- [39] 北京锅炉厂译. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976, 44~46
- [40] 阎维平, 欧宗现, 曹锐. 电站炉膛分区段改进热力计算方法[J]. 锅炉技术, 2007, 38 (5): 11~14
- [41] 秦裕琨. 炉内传热[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981, 114~116
- [42] 樊泉桂. 超超临界及亚临界参数锅炉[M]. 中国电力出版社, 2007, 13~17
- [43] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987, 1~20
- [44] 郭喜燕, 杨勇平, 王修彦, 等. 锅炉蓄热过程对机组煤耗的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (26): 30~34
- [45] 范永胜, 眭皓, 姜学智, 等. 一种高精度的锅炉单相区段集总参数动态修正模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (1): 50~54

- [46] 范永胜, 眭喆, 姜学智, 等. 两类实用的单相受热管集总参数动态修正模型[J]. 动力工程, 2000, 20 (2): 635~639
- [47] 董学育. 电站性能分析采样数据的可靠性检验方法[J]. 动力工程, 1998, 18 (2): 16~19
- [48] 王培红, 贾俊颖, 程懋华. 水和水蒸汽性质 IAPWS-IF97 计算模型[J]. 动力工程, 2000, 20 (6): 988~991
- [49] 李春曦. 工业用水和水蒸气热力性质计算公式—IAPWS-IF97[J]. 锅炉技术, 2002, 33 (6): 16~19
- [50] The International Association for the Properties of Water and Steam. Release on the IAPWS International Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam[R]. Erlangen Germany, September 1997

致 谢

在论文完成之际，谨向我的导师，向所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友，向我的家人致以诚挚的谢意！

首先向我的导师——阎维平教授致以最诚挚的感谢！在追随导师从事学习和科研的三年多时间里，导师严谨的学风、渊博的学识、丰富的经验、严谨的治学态度使我在科研探索的道路上受益匪浅，导师豁达的胸襟、淡泊的学术品格和对事业的执着追求是我永远学习的榜样！同时，我还要特别感谢朱予东副教授！无论是在学习和科研上，还是在日常生活中，朱老师都给予我无微不至的关怀和帮助！

其次，要感谢邢德山、李钧、黄景立、王全钢和谭蓬等博士硕士的帮助；感谢阎维平教授课题组的全体成员对我的关怀与鼓励；感谢在论文试验研究阶段提供支持和帮助的邹县电厂刘乃辉和张学斌专工！

最后，我要感谢在我多年求学生涯中一直无私奉献，给予我最大关心、支持和理解的家人！感谢亲人和朋友们多年来对我的无微不至的关心和帮助！

在学期间发表的学术论文和参加科研情况

发表的学术论文：

- [1] 阎维平, 欧宗现, 曹 锐. 电站炉膛分区段改进热力计算方法[J]. 锅炉技术, 2007, 38 (5): 11~14
- [2] 阎维平, 朱予东, 欧宗现. 熵产分析法在锅炉吹灰优化模型中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (8): 13~17
- [3] 朱予东, 王运泽, 欧宗现, 阎维平. 应用局部投影网络预测燃料分级燃烧锅炉的飞灰含碳量[J]. 热能动力工程, 2008, 23 (3): 265~268
- [4] 欧宗现, 阎维平, 朱予东, 李玉超. 锅炉吹灰优化系统的研究与应用[J]. 发电设备, 2008, 22 (4): 288~290
- [5] 欧宗现, 朱予东, 阎维平. 燃用神华煤的锅炉受热面污染特性试验研究[J]. 热力发电, 2008, 37 (7): 35~38
- [6] 欧宗现, 阎维平, 张永胜, 麦宏伟. 双调风旋流煤粉燃烧器出口空气动力场试验与数值模拟[J]. 华北电力大学学报, (已录用)
- [7] 欧宗现, 阎维平, 朱予东. 基于污染监测和熵产分析的锅炉吹灰策略研究[J]. 热能动力工程, (已录用)

参加科研情况：

- [1] 聊城电厂、邹县电厂、莱城电厂、大港电厂和定洲电厂的锅炉吹灰优化系统, 2006~2008年
- [2] 北京国电科环洁净燃烧工程技术有限公司的炉膛分区段热力计算软件, 2007年
- [3] 北京京能热电股份有限公司的200MW煤粉锅炉热力计算软件, 2007年
- [4] 河北电力科学研究院的炉膛空气动力场可视化软件, 2008年
- [5] 大唐国际化工技术研究院的干燥褐煤用热烟气炉设计, 2008年