

学校编码: 10384

分类号: \_\_\_\_\_ 密级: \_\_\_\_\_

学 号: 200433015

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

循 环 流 化 床 锅 炉 负 荷 协 调 控 制 系 统  
研 究

The Load Coordinate Control System of  
CFBB

曾 祥 平

指导教师姓名: 江青茵 教授

专 业 名 称: 化 学 工 程

论文提交日期: 2007 年 7 月

论文答辩时间: 2007 年 8 月

学位授予日期: 2007 年

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2007 年 7 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在            年解密后适用本授权书。

2、不保密（  ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期：     年   月   日

导师签名：

日期：     年   月   日

# 循环流化床锅炉负荷协调控制系统研究

## 摘要

循环流化床锅炉(Circulating Fluidized Bed Boiler, 简称 CFBB 或 CFB 锅炉)作为高效、低污染、燃料适应性广、负荷调节性能好的洁净燃煤技术,在全世界受到广泛重视,正在成为燃煤技术的主力军。循环流化床锅炉商业化的迅速发展给它的运行自动化提出了很高的要求。因此在我国大力开发研制循环流化床锅炉的自动控制技术是一项迫在眉睫的战略任务,尤其是开发适合中国国情的循环流化床热工控制系统。

由于现有的控制系统都是建立在近似线性化模型或是辨识模型的基础上,根据过程的输入输出数据直接建模,过于依赖过程的输入输出数据,模型不具有可解释性。因此,我们希望在实验室已开发的循环流化床锅炉机理模型的基础上开发新的控制系统。

首先,由于循环流化床锅炉工作点附近的蒸汽焓值公式难以直接应用于在线计算,因此,对蒸汽焓值进行最小二乘法拟合,得到拟合式;然后提出热效率的概念用于衡量锅炉与发电机组之间的能量关系,并应用工业数据进行了仿真计算,最后对热效率的影响因素进行了讨论。

其次,在循环流化床锅炉机理简化模型基础上,分别应用 BP 和 RBF 神经网络理论来构造循环流化床锅炉的给煤含碳量和挥发分含量的逆系统,构建煤质在线观测模型。分别研究了各网络的泛化能力,并结合实时数据,进行煤质预测。通过分析比较,发现基于 BP 神经网络的煤质在线观测模型的煤质预测效果好于 RBF 网络。将动态模型和煤质在线观测模型结合,构建循环流化床锅炉综合模型。通过对综合模型的实时仿真研究,发现基于标准 BP 网络的综合模型的实时仿真结果要更加理想。

最后,结合循环流化床锅炉机理模型和煤质在线观测模型,以及热效率的概念,构建循环流化床锅炉发电机组的仿真平台,在此基础上建立基于给煤量的负荷协调控制系统。在 XD-APC 上的仿真表明,该系统能很好的适应工业上的需求。

关键词: 循环流化床锅炉; 煤质预测; 协调控制

## The Load Coordinate Control System of CFBB

### Abstract

Circulation Fluidized Bed (CFB) is becoming the main coal combustion technique all over the world for its attractive advantages of high combustion efficiency, Efficient Sulfur Removal, Low NO<sub>2</sub> Emission, fuel flexibility and good load-following capability. High demand of automatic control of CFBB is proposed with its fast commercial development. Study of the control strategy for CFBB is getting more and more important now, especially for national circulating fluidized bed boilers.

The existing control system is built based on approximately linearization model or identification model. The model is just depending on the data of process inputs and outputs, so it can't interpret the mechanics of industrial process. So we want to create a new control system base on the mechanics model which have built by own team.

Firstly, online calculation for heat to power output efficiency of thermal generator set is important for the load coordinate control in the CFB boiler thermal generator set. Least-square polynomial fitting method is adopted to get a simple expression of steam enthalpy. Based on it, an online algorithm to calculate the heat to power output efficiency is proposed. Simulation is done using the data acquired from an industrial unit, which may provide a basis for further global optimization. And then the influencing factors of the heat to power output efficiency is discussed.

Secondly, four kinds of the coal quality online observation system are proposed by applying the BP and RBF neural networks, which take the coal feed, the primary air, the secondary air, the temperature of dense phase and O<sub>2</sub> concentration of the dilute phase as inputs. Compared the generalization capability between the BP and RBF networks, and the online coal quality prediction indicates that the online observation systems based on the BP neural network are more effective than the RBF networks. The CFB boiler total model is proposed by composing the CFB boiler system dynamic model and the coal quality on-line observation models (standard BP network and L-M BP network). Compared with the results of the real time simulation

of the different CFB boiler total models, the model based on the standard BP network is better than the L-M BP networks.

Finally, by combining the CFBB mechanics model, the coal quality online observation system and the concept of the heat to power output efficiency, the simplified system of thermal generator set is built and load coordinate control system base on the coal feed is successfully developed. The result of simulation indicates that control system can meet the need of the engineering application.

**Keywords:** CFBB; coal quality prediction; coordinate control

厦门大学博硕士学位论文摘要库



## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 循环流化床锅炉正成清洁燃煤技术的发展方向.....	1
1.2 协调控制的基本思想及其应用.....	5
1.3 本论文的工作安排.....	9
本章主要参考文献.....	10
<b>第二章 循环流化床锅炉热功效率的在线计算</b> .....	<b>11</b>
2.1 曲线拟合的最小二乘法.....	11
2.2 热功效率的计算.....	13
2.3 热功效率的仿真计算.....	16
2.4 本章小结.....	23
本章主要参考文献.....	24
<b>第三章 基于神经网络理论的煤质在线观测模型</b> .....	<b>25</b>
3.1 神经网络.....	25
3.2 建立煤质在线观测模型.....	37
3.3 综合模型的构造与仿真研究.....	49
3.4 本章小结.....	53
本章主要参考文献.....	54
<b>第四章 循环流化床锅炉负荷协调控制系统</b> .....	<b>55</b>
4.1 循环流化床锅炉控制策略分析.....	55
4.2 循环流化床锅炉负荷协调控制系统.....	58
4.3 本章小结.....	63
本章主要参考文献.....	64



第五章 结论与展望 .....	65
硕士期间所发表的论文 .....	67
致谢 .....	68

厦门大学博硕士论文摘要库





# Catalogue

<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 CFBB—the new clean coal combustion technique .....	1
1.2 Principle of coordinate control .....	5
1.3 Objectives.....	9
References .....	10
<b>CHAPTER 2 ONLINE CALCULATION OF HEAT TO POWER OUTPUT EFFICIENCY OF CFB BOILER</b> .....	<b>11</b>
2.1 Least square approximation.....	11
2.2 Calculation of heat to power output efficiency .....	13
2.3 Simulation .....	16
2.4 Brief Summary.....	23
References .....	24
<b>CHAPTER 3 THE COAL QUALITY ONLINE OBSERVATION MODEL BASED ON NEURAL NETWORK</b> .....	<b>25</b>
3.1 Neural Networks.....	25
3.2 The Coal Quality Online Observation Model .....	37
3.3 The Construction and the Simulation of the Total Model.....	49
3.4 Brief Summary.....	53
References .....	54
<b>CHAPTER 4 THE LOAD COORDINATE CONTROL SYSTEM OF CFBB</b> .....	<b>55</b>
4.1 The control strategy of CFBB.....	55
4.2 The Load Coordinate Control System of CFBB .....	58
4.3 Brief Summary.....	63



<b>References</b> .....	<b>64</b>
<b>CHAPTER 5 CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS</b> .....	<b>65</b>
<b>PAPER LIST</b> .....	<b>67</b>
<b>ACKNOWLEDGMENTS</b> .....	<b>68</b>

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第一章 绪论

能源与环境是当今社会发展的两大问题。70年代初出现的中东石油危机,使世界各国将能源结构的比例从燃油(天然气)向燃煤转移。我国是产煤大国,也是用煤大国。目前一次能源消耗中煤炭占76%,在可见的今后若干年还有上升的趋势,而这些煤炭中有84%直接用于燃烧<sup>[1]</sup>。但从目前来看,燃烧效率还不够高,燃烧产生的大气污染也没有得到有效的控制,以至于我国每年排入大气的87%的SO<sub>2</sub>和67%的NO<sub>x</sub>,均来自煤的直接燃烧,虽然近年来链条炉及煤粉燃烧技术得到了长足的发展,但仍不能阻挡由于煤质下降对能源生产及环境保护所带来的越来越大的危害势头。可见发展高效、低污染的清洁燃煤技术已成为当前亟待解决的问题,因此新一代的燃煤技术——具有高效、低污染、煤种适应性好的循环流化床技术应运而生。当然循环流化床锅炉(Circulating Fluidized Bed Boiler,简称CFBB或CFB锅炉)的商业化发展也对它的运行自动化提出了更高的要求。

### 1.1 循环流化床锅炉正成为清洁燃煤技术的发展方向

#### 1.1.1 循环流化床锅炉工艺简介

典型的循环流化床锅炉的系统流程如图 1-1 所示。循环流化床锅炉的燃烧系统较集中的体现了循环流化床锅炉的特点,锅炉燃烧室分为上、下两个部分,上部为氧化燃烧区,下部主要是还原燃烧和固硫区,燃烧室由布风装置、密相区、稀相区(悬浮段)、床内受热面、气固物料分离装置、固体物料再循环装置(回料装置)、尾部受热面及外置式受热面等主要部件构成。粒度 0~10 mm 的燃煤和粒度 0~5 mm 的石灰石由给煤机不断送入高温炉膛,与上升气流混合并被加热,燃煤迅速着火并呈沸腾悬浮状态燃烧。石灰石分解并与燃煤燃烧产生的 SO<sub>2</sub> 反应生成不再污染空气的硫酸钙,达到脱硫的目的。炉膛烟气中的未燃尽固体经旋风分离器分离后,通过回料装置使之重返炉膛循环燃烧。烟气经烟道过尾部受热面进行热交换,最后通过除尘器由烟囱排入大气。床层密相区中的粗灰经自动(或手动)排渣机和冷轧机排出。汽水系统中,给水从给水管引出后,一路经给水调节阀门、省煤器预热后到汽包;另一路经减温水调节阀门进入减温器,以调节主蒸汽温度。汽水分离后的主蒸汽经过热器、减温器热交换后成为成品蒸汽。

影响流化床锅炉燃烧效率的因素<sup>[2]</sup>包括燃煤的性质、粒度分布、布风装置、流化质量、给煤方式、床温、床层结构、回料量和运行水平等。

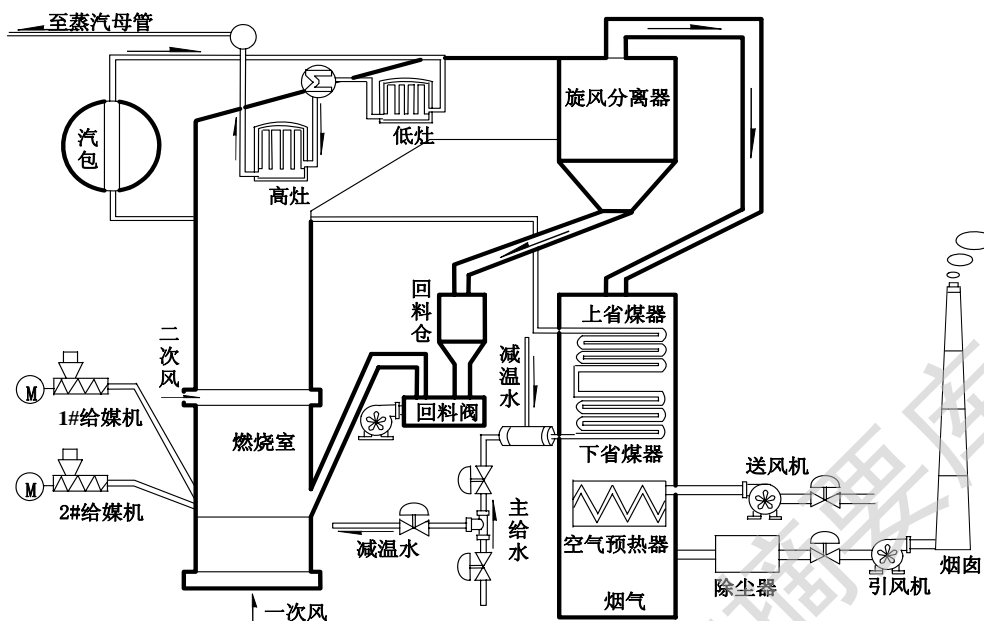


图 1-1 典型循环流化床锅炉系统示意图

### 1.1.2 循环流化床锅炉的优点及特点

与煤粉炉及链条炉相比，CFB 锅炉独特的流体动力学特性和结构使其具有许多独特的优点<sup>[3-6]</sup>：

#### 1. 对燃料适应性特别好

在循环流化床锅炉中按质量百分比计，燃料仅占床料的 1%~3%，其余为灼热的床料。循环流化床的特殊流动动力特性使得气-固和固-固混合得非常好。因此，即使是很难着火燃烧的燃料进入炉膛后也能很快地与灼热的床料混合，被迅速加热至高于着火点温度，而同时床层温度没有明显降低。这就使得 CFB 锅炉不需辅助燃料而能燃用任何燃料。CFB 锅炉可燃用优质煤，也可燃用各种劣质燃料，如高灰煤、高硫煤、高灰高硫煤、煤矸石、高水分煤、泥煤、尾矿、炉渣、树皮，甚至垃圾等。我国是一个煤种非常丰富，劣质煤较多的国家，发展 CFB 锅炉意义重大。

#### 2. 燃烧效率高

在循环流化床锅炉中，燃烧区域扩展到整个炉膛乃至旋风分离器，携带出炉膛的颗粒被旋风分离器捕集后直接送回燃烧室下部循环再燃烧，使得燃料可以在炉膛内具有很长的停留时间进行充分燃烧，因此，循环流化床锅炉的燃烧效率一般可达到 97.5~99.5%，可以与煤粉炉相比。

### 3. 污染物排放低，是环保型锅炉

SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>是煤燃烧中产生的主要污染气体，这两种污染气体对环境和人类的健康都能产生严重危害。循环流化床锅炉采用低温(850~900℃)及分级送风的燃烧方式使NO<sub>x</sub>排放量只有煤粉炉的1/3~1/4，并且这样的燃烧温度范围也是脱硫剂石灰石活性最好的温度，另外，循环流化床锅炉具有良好的气-固与固-固混合特性，以及通过物料的再循环大大增加了物料在炉内的停留时间，以上因素使得可以通过直接向炉内添加廉价的石灰石脱除燃烧过程中产生的SO<sub>2</sub>，当Ca/S摩尔比在1.5~2.5范围内，脱硫效率可达90%以上，可满足较严格的SO<sub>2</sub>排放标准。可见流态化燃烧是一种洁净燃烧方式。

### 4. 负荷调节范围大

当负荷变化时，CFB锅炉只需改变给煤量、空气量和物料循环量就可以满足负荷的变化。CFB锅炉由于燃烧截面风速高和吸热控制容易，所以负荷调节很快，负荷调节范围可达10%~110%，负荷调节速度可达5%~10%/min。适用于电网调峰机组和热电联产的锅炉。

### 5. 灰渣综合利用性能好

循环流化床锅炉燃烧过程属于低温燃烧，同时锅炉内部良好的燃烧条件使得锅炉的灰渣含碳量低，易于实现灰渣的综合利用。另外炉内加入石灰石后，灰渣的成分也有所变化，含有一定的CaSO<sub>4</sub>和未反应的CaO。循环流化床锅炉的灰渣可以用于制造水泥的掺和料或者其他建筑材料的原料，有利于灰渣的综合利用。

### 6. 与鼓泡床相比，循环流化床锅炉更易于实现大型化

当然，循环流化床锅炉也有其自身的一些缺点<sup>[6, 7]</sup>，如耗电量大、磨损严重、对辅助设备和材料要求较高以及对运行水平有一定要求等，这些缺点都有待进一步的研究解决。

## 1.1.3 循环流化床锅炉已成为热电工程的首选锅炉

随着环保、高效等要求的日益提高，CFB锅炉由于其诱人的优点已成为锅炉发展及商业化推广的新方向：尤其在热电工程上，它已经成为设计的首选炉型<sup>[8]</sup>。

包括供热站(采暖锅炉房、工业蒸汽锅炉房、热电厂和调峰电厂)在内的热电工程设计中总是希望针对运行特点选择一种合适的炉型。既要安全可靠，又要节省投资；既要减少大气污染，又要节能降耗。一般热电工程在运行中有以下几个

特点:

### 1. 热、电负荷变化范围大

由于主要用于供热、供汽,用户在不同季节、白天/晚上负荷相差很大。因此锅炉必须能适应负荷的大幅度波动,甚至多次启停。

### 2. 能耗高、浪费大

与大型的火电厂相比,由于其负荷的经常波动,锅炉经常不能在额定负荷下工作。因此运行成本高、能耗大,需要选择一种燃烧效率高的炉型。

### 3. 煤种多变

由于热电企业燃用的煤种经常变化且多用劣质煤或用混合煤以降低煤耗。煤种变化可能很大。需要锅炉能适应煤种的多样性。

CFBB 正好具有上述其它锅炉无法企及的优点,能很好的适应上述要求,故在炉型选择上与其它锅炉相比具有很大的优势。表 1.1<sup>[1]</sup>提供了各种炉型运行性能的对比表。由表中数据显见,CFB 锅炉应成为热电工程的首选炉型,从目前工业实际来看,越来越多的厂家选用了循环流化床锅炉。

另一方面,中、小型热电企业,大型工业企业(包括石油化工、电力、建材、冶金等)的自备热电厂在我国数量众多,市场广大,相信在今后的若干年内,循环流化床锅炉将得到迅速的发展。同时在大中型火电厂中,CFB 锅炉也将成为锅炉发展的一种流行、一种趋势,可以预见,未来几年将是 CFBB 飞速发展的重要时刻。

当然,提高循环流化床锅炉的自动控制水平也变得日益紧迫。

表 1.1 5 种 35t/h 中压锅炉比较 (其中投资及设备费为 80 年代末价)

不同型号锅炉 的主要技术及经济 指标	YG-35/3 9-M3 循环流 化床锅炉	BG-35/3 9-M 煤粉炉	SHF-35- 39/450 鼓泡流 化床锅炉	L-35/3 9-W/L 正转链 条炉	P-35/3 9-P 抛煤机 炉
锅炉热效率 (%)	87.8	87.96	68.53	50	60
燃料种类	贫煤	贫煤	煤矸石	贫煤	贫煤
每吨气耗标煤 (kg)	110.69	109.25	140.54	188.94	152.34
燃烧效率(%)	98~99	98~99	94	88.1	89.6
负荷调节范围	较大	小	较大	大	大
对煤种变化的 适应性	适应广	较单一 煤种	适应较 广	单一煤 种	单一煤 种
操作维修水平	一般	高	一般	简单	简单
锅炉本体设备 费(万元)	82.68	97	74.8	86.59	79.4
系统投资(万 元)	245	400	275	200.7	222.8
锅炉钢材耗量 (t)	157	165	120	186	174
SO <sub>x</sub> 排放量	加石灰 石可炉内脱 硫	全部排 放	加石灰 石可炉内脱 硫	全部排 放	全部排 放
NO <sub>x</sub> 排放量	生成少	生成多	生成少	生成较 多	生成较 多
飞灰排放量	较大	大	较大	小	较小

## 1.2 协调控制的基本思想及其应用<sup>[9]</sup>

### 1.2.1 协调控制的基本思想

火力发电厂中汽机和锅炉联合运行时,有母管制和单元制两种不同的原则性热力系统。目前,大型热力发电机组都采用单元制,单元制机组是由发电机、汽轮机和锅炉共同适应电网的负荷要求的,它们共同保持机组的稳定运行。也即单元机组的两个基本功能:一是对外适应电网负荷要求,二是对内协调动作保持机组能量平衡、稳定运行。常规的自动调节系统是汽轮机和锅炉分别控制的。汽轮机调节机组负荷和转速,机组负荷的变化必然会反映到机前主蒸汽压力的变化,即机前主蒸汽压力反映了机炉之间的能量平衡。而主蒸汽压力的控制由锅炉燃烧调节系统来完成,燃烧调节系统一般又划分为主蒸汽压力(或燃料)调节系统、送风和氧量调节系统、炉膛负压调节系统等子系统。随着单元机组容量的不断增大、电网容量的不断增加和电网调频、调峰要求的提高以及机组自身安全稳定运行要

求的提高,常规的自动调节系统已很难满足单元机组既参加电网调频、调峰又稳定机组自身参数这两方面的要求。同时单元机组是一个多输入、多输出、相互关联的复杂被控对象,因此必须把机、炉、电看成一个统一的控制对象,从整体的观念设计自动控制系统,既进行协调控制。

从单元机组负荷变化时的动态特性来看,锅炉具有较大的惯性,即从燃烧率改变到汽压(蒸汽量)变化有较大的滞后和时间常数,单元机组负荷增加时,初始阶段所需的蒸汽量主要是由于锅炉释放的蓄热量而产生的。随着单元机组容量的日益增大,相对而言,锅炉的蓄热量越来越小,单元机组的负荷适应能力与保持气压不变之间的矛盾越来越突出。从电网运行的经济性考虑一般应由效率较高的单元机组承担基本负荷而由效率较低的机组承担调频或尖峰负荷。近年来,电网对单元机组的负荷适应性能提出了更高的要求,即使是承担基本负荷的单元机组也应具有参加电网一次调频的能力,以便使电网在二次调频之前减少电网频率变化的幅度。

为了提高电网的自动化水平,保证高质量的电力供应,要求电网调度中心发出的负荷分配指令 ADS (Automatic Dispatch system)和电网频差信号直接对火力发电机组进行连续控制。特别是针对目前严重缺电、峰谷负荷差较大的局面,迫使一些电网公司采取奖罚措施,对具有 AGC(Automatic Generate Control)功能的机组的上网电价给予奖励。随着单元机组容量的增大,早期的锅炉跟随汽轮机或汽轮机跟随锅炉控制方式已远远不能满足单元机组负荷控制要求,必须寻找新的、更为合理的控制方案。单元机组协调控制的任务就是既要保证机组输出功率迅速满足电网的要求,又要使输入机组的热能尽快与机组输出的功率相适应。于是兼顾锅炉、汽轮机和发电机能量平衡及动态特性的协调控制系统应运而生。

所谓协调控制,是指通过控制回路协调汽轮机、锅炉和发电机的工作状态,同时给锅炉自动控制系统和汽轮机自动控制系统发出指令,以达到快速响应负荷变化的目的,尽最大可能发挥机组的调频、调峰能力,并稳定运行参数,协调机、炉、电之间的能量。任何事物都有其发生和发展的过程,协调控制也不例外,它是由早期的锅炉跟随汽轮机或汽轮机跟随锅炉控制方式发展而来的。

### 1.2.1.1 锅炉跟随汽轮机

其基本原理是:两个相互独立的调节器,一个控制输出功率,另一个调节器控制压力,功率调节器通过改变汽机调节阀的开度,从而改变进汽量,使发电机



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库