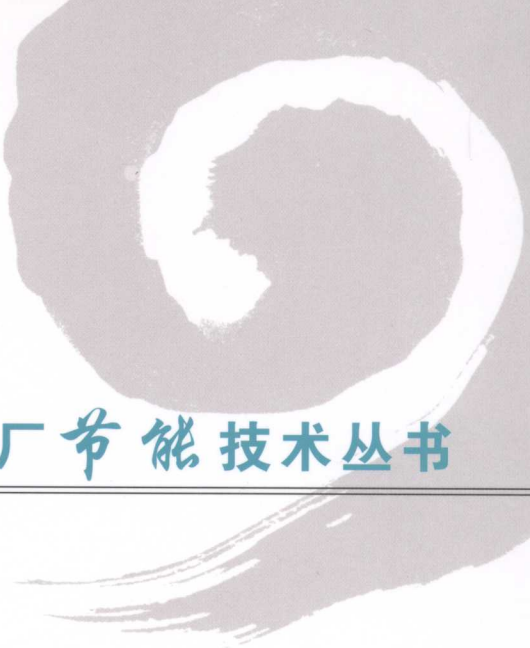




火力发电厂节能技术丛书

中国电力企业联合会科技服务中心 合编
华中科技大学能源与动力工程学院

节能与控制



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



火力发电厂节能技术丛书

中国电力企业联合会科技服务中心 合编
华中科技大学能源与动力工程学院

节能与控制



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书是《火力发电厂节能技术丛书》之一。

本书共五章，主要讲述火力发电厂锅炉、汽轮机和辅机系统节能优化控制技术，以及锅炉—汽轮机协调控制节能技术。内容紧密联系火力发电厂生产运行实际情况，强调节能控制技术的实际应用，对火力发电厂节能工作具有一定的指导和参考价值。

本书可供火力发电厂生产技术人员培训使用，也可供相关专业科研和教学人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

节能与控制/中国电力企业联合会科技服务中心，华中科技大学能源与动力工程学院编. —北京：中国电力出版社，2008.3

(火力发电厂节能技术丛书)

ISBN 978-7-5083-6804-7

I. 节… II. ①中…②华… III. 火电厂—节能 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 024575 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 3 月第一版 2008 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 234 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

火力发电厂节能技术丛书

编 审 委 员 会

主任委员：李玉生

副主任委员：（按姓氏笔画为序）

刘传柱 刘建民 安洪光 祁智明 何 勇
周怀春 侯国立 赵 平 韩大伟 靳东来

委 员：（按姓氏笔画为序）

马国林 王彤音 石朝夕 毕诗方 吴玉鹏
李文学 陈 刚 陈汉平 罗发青 席志红
郭云高 陶洪才 高 伟 黄树红 曾汉才

主 编：周怀春

副 主 编：（按姓氏笔画为序）

王 坤 张小平 张燕平 杨 涛

参 编：（按姓氏笔画为序）

于 斐 马洪波 叶 涛 吴立增 张兴营
张春伟 张聘亭 李永生 李建兰 李昱彤
汪致远 陈汉平 陈 刚 陈 兵 岳 乔
姚斯亮 祝 宪 贺国强 席志红 郭云高
高 伟 黄树红 曾汉才

审 稿：（按姓氏笔画为序）

马永真 周世祥 雍双春 靖长财

前言

“建设节约型社会，实现可持续发展”已经被明确为我国的基本国策。资源与环境的压力，迫切要求各领域(尤其是产能和耗能单位)落实国家既定的发展目标。随着一次能源转换为电能的比重、电能占终端能源消费量的比重不断提高，电力行业固有的资源密集型、资源紧缺性的特点，使电力行业成为我国环境资源工作的关键所在，建设节约型电力企业的重任摆在了所有电力工作者的面前。

电力工业是技术密集型工业，能量的转换和传输是一个关联性强、比较复杂的系统，因而节能工作实施的效果往往不能通过单独的一个环节来认定，也不能片面强调节约而忽略安全。之前电力企业在某些节能工作方面的“谨慎”态度，一定程度上也说明了推动电力行业节能工作的艰巨性和复杂性。因此，电力行业节能工作应该遵循科学、系统、实践、推广的规律，既不能畏难不前，也不能求快冒进。

为了有效地配合电力企业节能工作的开展，发挥电力行业技术服务部门的作用，中国电力企业联合会科技服务中心在认真分析了电力企业节能工作特点的基础上，联合华中科技大学，有针对性地组织编写了《火力发电厂节能技术丛书》(以下简称《丛书》)，分为《锅炉机组节能》、《汽轮机设备与系统节能》、《热力系统节能》、《节能与控制》四个分册。《丛书》突出强调三个方面：

1. 实用性：强调应用、借鉴和参考价值。建立以电力企业生产过程中涉及的能量转换原理、能量传输过程为依据，以节能分析为展开线索，以节能手段为落脚点的三重结构。

2. 开放性：强调聚集全行业的智慧和经验。《丛书》的编写不局限于某几个人的思路，而是面向电力行业所有相关人员，并长期向电力行业开展电力节能案例征集工作。

3. 长期性：强调在完善总结的基础上，与时俱进地跟踪反映电力节能技术的发展。随着认识水平的提升、技术的进步，会产生很多新的、实用的节能措施和手段，《丛书》将根据电力行业的节能技术的进展情况适时再版。

相信在大家的关注和支持下，随着时间的推进、认识的加深、经验的积累，《丛书》一定会为电力企业的节能工作发挥积极的作用。

《丛书》的编写得到了各电力集团公司和发电企业的大力支持和指导，在此表示衷心的感谢！

由于水平所限、时间仓促，又加上电力节能技术是一个围绕实践、应用发展起来的跨专业、跨学科的技术汇总和研究，因而《丛书》疏漏、错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正！

《火力发电厂节能技术丛书》编委会

2008年1月

分册前言

火力发电厂热工控制系统的优化节能,是实现火力发电厂节能降耗的关键问题之一。随着全社会对节能减排的重视和关注,如何减少火力发电厂的能量损失、提高其工作效率,是所有从业人员所面临的挑战。国内外发电企业以节能为目标,从运行优化和节能改造两方面进行了有益的尝试,并取得了很好的效果。

本书是《火力发电厂节能技术丛书》之一,从控制系统的节能设计、控制参数的节能优化和控制策略的节能优化三个方面出发,对火力发电厂热工控制系统的节能潜力进行了分析,阐述了控制系统节能分析的基本理论和一般方法,并对近年来有关发电厂控制系统及相关设备成功的改造经验和优化运行实践进行了归纳总结,同时辅以大量典型案例以说明实施节能降耗的一些具体方案。书中所列举的实例均来自于公开发表的文献资料。

本书由杨涛、高伟、贺国强编写。马永真先生审阅全书,并提出宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,中国电力企业联合会科技服务中心的郭云高先生、席志红先生,华中科技大学能源与动力工程学院黄树红教授、周怀春教授、韩守木教授和张春伟硕士都提供了指导和帮助,在此表示诚挚的谢意!并谨向本书所引用文献的全体作者致以衷心感谢!

由于水平所限,加之时间仓促,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2008年3月

目 录

前言

分册前言

第一章 热工控制系统节能概述	1
第二章 锅炉系统节能优化控制	4
第一节 电站锅炉燃烧优化控制	4
第二节 受热面吹灰智能优化控制	12
第三节 除渣除灰智能优化控制	19
第四节 汽包炉给水优化控制节能	24
第五节 汽包炉蒸汽温度优化控制节能	31
第六节 直流炉优化控制节能	45
第三章 汽轮机的节能优化控制	50
第一节 汽轮机调速系统节能改造	50
第二节 进汽阀优化控制节能	59
第三节 汽轮机排汽温度控制节能	69
第四节 汽轮机旁路控制节能	71
第五节 汽轮机轴封系统控制节能	81
第六节 回热加热器水位控制节能	84
第四章 锅炉-汽轮机协调控制节能技术	86
第一节 火电厂单元机组协调控制概述	86
第二节 炉跟机协调控制节能技术	91
第三节 机跟炉协调控制节能技术	95
第四节 基于机前后压力的直接能量平衡协调控制节能	99
第五节 基于辐射能信号的直接能量平衡协调控制节能	103
第六节 应用先进控制理论的协调控制节能	107
第五章 辅助系统的节能优化控制	119
第一节 电除尘系统的优化控制	119
第二节 泵与风机的调速优化控制	126
第三节 电站辅助系统中 DCS 技术的研究与运行	137
第四节 磨煤机的优化控制	144
参考文献	154

热工控制系统节能概述

一、综述

电力工业作为国民经济的基础产业和主要能源行业,是资金密集的装置型产业,同时也是资源密集型产业。无论电源还是电网,在建设和生产运营中都需要占用和消费大量资源,包括土地、水资源、环境容量以及煤炭、石油、燃气等各类能源。当前,我国火力发电及供热用煤占全国煤炭总量的 51%,产生的灰渣约占全国灰渣的 70%,火电用水量占工业用水总量的 40%,烟尘排放占工业排放的 33%,二氧化硫排放占工业排放的 56%。因此,电力工业节能在我国资源节约工作中占有重要地位^[1]。

电力行业节能减排要以火电厂节能减排为核心,以降低火电厂煤耗、厂用电率和二氧化硫排放量为重点。通过优化电源结构和布局,合理利用能源资源,全面实现单位国内生产总值能源消耗降低和二氧化硫排放总量削减的目标。要达到“十一五”规划的目标,电力行业除了在宏观上加强节能管理外,还需要采用先进的技术手段来提高产品质量和产量,减少能耗,提高能源利用率。

所谓节能是指降低工业生产过程中现有的能耗。因此节能包含了两方面的内容:一个是工艺节能,另一个是控制节能。所谓工艺节能就是通过采用合理的工艺设备和合理的操作规程而达到节能的目的。通常人们所说的节能就是指工艺节能;而控制节能则是通过自动化仪表对变化频繁的生产过程进行及时控制,利用先进的控制技术,对车间、工厂或一个区域的能源(油、汽、水、风、电)进行集中监测、管理和调度,从而达到节能的目的。

火力发电机组控制的中心问题是:一方面要求机组出力迅速地跟踪电网负荷的变化,另一方面在负荷变化时要保证机组的稳定运行,特别是保持主要参数(主汽压力、主汽温度、汽包水位等)的波动不超出运行规程规定的限值。电厂动力装置是一个高度复杂、慢时变和不确定多变量控制对象,传统的控制方式主要是常规 PID 调节,并以它固有的简单性、通用性和鲁棒性等性能,始终在电厂过程中占首要地位。当前针对电厂热工过程的特殊性,以系统节能为目的,将先进控制方法应用到过程系统中,是目前研究的热点。

二、节能控制系统的设计

节能控制系统是以节省能耗为主要目的的控制系统。从经济观点看,它和其他生产过程一样,一个设计比较合理和先进的节能控制系统,都能实现提高产品产量、质量、节约原材料、减少事故等目的,从而达到预期的经济效益。设计较为合理、经济的节能控制方

案,需要控制理论和经验相结合。例如:考虑一个连续加热的生产过程,定有升温、保温及降温三个阶段,温度对象是有一定惯性的,这种惯性的变化规律,一般可以用指数函数来描述。指数规律是一种比较普遍的自然现象,如果按指数规律来升温,则可节省大量的能源。

如果能从节能的实际需要和可能出发来设计控制系统,就可以很好地达到节能的目的。节能控制系统不一定要非常复杂,简单的控制系统有时也能收到很好的节能效果,而复杂的控制系统有时可能因为仪表装置的投资大,仪表本身的耗能多而失去节能作用,因此在节能控制系统设计中要分析主要节能对象的特性,研究最佳节能控制方案,选择与此相适应的各种仪表。对于火电厂热工控制系统,可以从其控制策略和控制参数的节能优化以及控制结构的节能优化两个方面进行。

三、控制策略和控制参数的节能优化

当前,火电厂的控制系统多数还是以经典控制理论为基础,采用常规的 PID 调节。随着控制理论的发展,各种先进的控制算法如预测控制、自适应控制、模糊控制、智能控制及最优控制等已经在工业生产中得到了逐步的应用。因此,火电厂热工控制系统控制策略和控制参数的节能优化从本质上讲就是针对具体的控制系统,可以采用上述各种先进控制策略来替代传统的 PID 调节,以获得更好的控制精度,减少参数的波动,提高控制系统的稳定性,最终达到节能降耗的目的。例如:锅炉的控制包括给水循环系统和燃烧系统,是一个复杂的时变动态过程,有多个控制回路,有的有很强的非线性、大时延及大干扰特征。因此,传统的 PID 调节器难以使工业锅炉达到理想的控制效果。而预测控制具有对过程模型要求低、实施方便、鲁棒性强等独特的优点,因此国外许多学者用预测控制的成果来开发新型的锅炉—汽轮机机组的控制系统,取得了一些成就。如日立公司已开发出用于锅炉主汽温控制的新型预测控制系统,其采用 Kalman 滤波器估计输入输出状态值,再用预测模型预测主汽温度,然后根据预测温度和给定温度之差进行比例积分作用。有人认为,基于非参数模型的预测控制的进一步发展,有可能根本改变目前过程控制停滞不前的局面。如在对象时变时,如何进行在线校正,使控制算法具有自适应的功能;非线性系统如何得到一个类似的算法等。

自适应控制已在电厂主要过程系统,如燃烧过程、主汽温度控制等方面成功地实施了。如 Fessl 等人提出了一种具有递推辨识和 LQ 多步控制准则的自适应控制器,并于 20 世纪 80 年代在 200MW 单元机组的亚临界汽包炉上第一次通过验证。

模糊(Fuzzy)控制方法则对非线性系统具有很好的鲁棒性,已有用这种方式研究火电厂过程控制的实例。如电厂磨煤机采用 Fuzzy 控制方法,可克服负荷测量信号的非线性、慢时变性,使其负荷在很大变化范围内都可得到较好的控制。

尽管现代控制理论已有很大发展,但在实际过程中各种先进控制方案还未能得到广泛应用,其重要原因在于实施困难。计算机技术的迅速发展和分散控制系统在火电厂的应用,使热控人员将先进控制策略用于热工过程变得易于实现。

实际情况表明,先进控制策略在电厂的应用研究潜力很大,特别是优化控制、自适应

控制和智能控制等的应用会使电厂自动控制达到一个新的水准。由于不能完全取代原有的控制系统,故需改进和完善现有系统,应用新老控制系统相结合的方法获得较佳的工作效益,如逐渐从局部最优控制过渡到整个发电机组的整体最优控制。可以预见,各种先进控制系统的不断开发应用,必将进一步促进我国整个电力工业自动化水平的提高。

四、控制结构的节能优化^[2]

控制结构的节能优化就是采用合适的控制结构来降低控制系统自身的能耗,并提高控制参数的精度和稳定性,以达到节能降耗的目的。

例如,对于采用液压调速系统的汽轮发电机组,将其液压系统改造为数字电液调节(DEH)系统,自然可以达到提高机组的控制精度,降低能耗,进行经济性运行的目的。而对于电除尘系统,采用间歇供电方式比采用普通供电方式可以大大降低用电量。同样,对于泵与风机等在火电厂大量使用的旋转设备,可以根据其工作原理和工作方式不同,采用变频器或液力耦合器对其进行变频调速,以达到降低厂用电的目的。

火电厂热工控制系统控制策略和控制参数的节能优化,以及控制结构的节能优化并不是绝对独立的,不同的控制系统既可以同时采用这两种方式进行节能优化,也可以只采用一种方式进行节能优化。这个需要针对具体的系统进行费用—效益比的评估,以确定采用何种方式为最优。

锅炉系统节能优化控制

第一节 电站锅炉燃烧优化控制

一、锅炉燃烧控制系统^[3]

锅炉控制系统包括燃料量控制系统、送风控制系统和炉膛压力控制系统等。下面通过实例对这些控制系统的基本情况作简要介绍。

1. 燃烧量控制系统

单元机组能量的输入是靠燃料的及时供给和炉膛内的良好燃烧来保证的。燃料量控制系统的任务是在满足发电负荷指令要求下控制进入锅炉的燃料量,并保证燃料的充分燃烧,使燃料燃烧所提供的热能满足蒸汽流量(当然是在保证蒸汽质量的前提下)的需求。燃料量控制系统的结构方案与制粉系统设备的选型及设计密切相关。这里以 300MW 机组普遍采用的中速磨煤机直吹式制粉系统的燃料量控制为例介绍其控制系统。国内还有一种常见的中间储仓式制粉系统的锅炉,它的燃料控制量系统也与之类似。这种燃料量控制系统的基本组态如图 2-1 所示。

该系统采用 6 台中速磨煤机和 6 台给煤机,燃料量的控制是通过改变给煤机的转速来实现的。

在燃料量控制系统中,燃料量控制系统接受机组协调控制系统送来的锅炉负荷指令 P_B , P_B 指令经给水温度校正和总风量交叉限制后,得到总燃料量指令,总燃料量指令减去实际燃油量的响应换算值所得到的是燃煤量指令。燃煤量指令作为给定值在 PID 调节器入口与经过发热量校正后的总给煤量信号进行比较,其偏差值经 PID 运算及速率限制后,形成控制给煤机的指令,以控制给煤机的转速,进而改变给煤量,维持总给煤量与给定值一致,满足汽轮机蒸汽负荷对锅炉热能的需求。同时,燃煤量指令还作为给煤量的前馈控制信号,通过函数器,用以提高系统的动态适应性。 $f_4(x)$ 用来设置前馈作用的强度。

给水系统加热器的投入和切断对给水温度的影响很大。因此,在如图 2-1 所示的系统组态中,应用了给水温度校正信号对锅炉负荷指令 P_B 进行校正。给水温度校正信号是给水温度和给水温度设计值的差值通过函数器 $f_1(x)$ 产生的,它与锅炉负荷指令相乘,对锅炉的燃烧率进行动态校正。例如,当给水温度低于其设计值时,适当增加锅炉负荷指令以满足锅炉能量的需求。

正常的燃烧过程总是要求其总燃烧量小于或等于总风量,以保证合适的风煤比。一旦

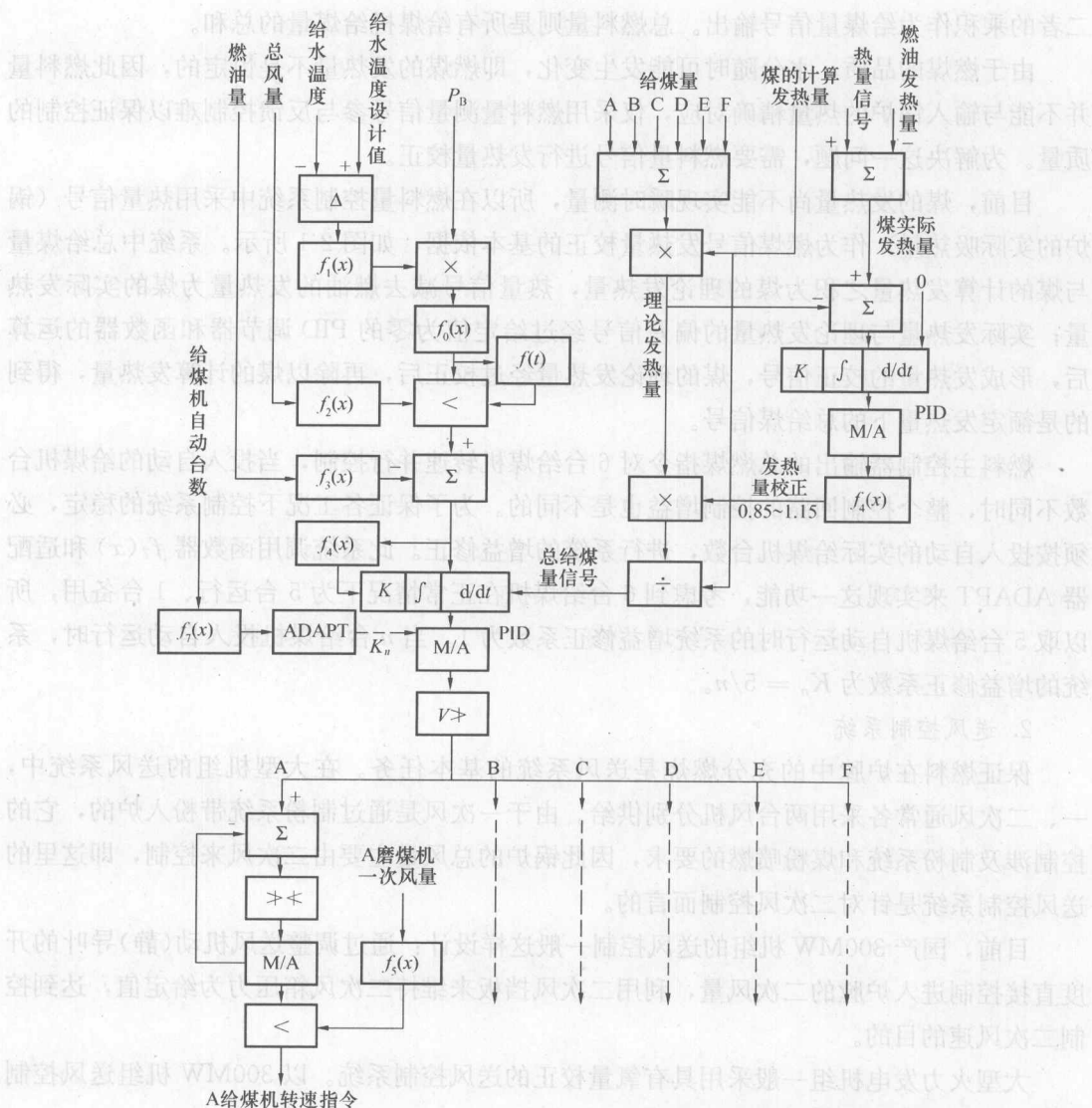


图 2-1 燃料量控制系统的方框图

出现总燃料量大于总风量的情况，燃料量控制系统必须降低其控制输出，减少给煤量，以避免因燃料量在炉膛的积聚而造成不完全燃烧，或引起锅炉烟道积聚煤粉而发生二次燃烧。在燃烧量控制系统中，经给水温度校正的锅炉负荷指令通过函数器 $f_0(x)$ 转换为总燃料量指令，而锅炉的总风量信号通过函数器 $f_2(x)$ 转换为最大允许燃料量指令（燃料量的上限值）。总燃烧量指令及其最大允许值指令输入低值选择器，选择二者中的低者为输出，以保证燃烧过程中始终是总风量大于总燃料量，达到良好的燃烧经济性。除此之外， $f_0(x)$ 输出的总燃料量指令通过一个超前/滞后滤波器 $f(t)$ 也加到低值选择器的入口端， $f(t)$ 在锅炉主控制器投入自动时起作用，其目的是当 P_B 增加时，保证先加风后加煤。

这种系统中，各台给煤机的给煤量信号是由给煤机的制造公司生产的电子重力式皮带给煤机的称重装置给出的。称重装置可测量单位皮带长度上煤的质量和皮带的转速，并将

二者的乘积作为给煤量信号输出。总燃料量则是所有给煤机给煤量的总和。

由于燃煤的品质、水分随时可能发生变化,即燃煤的发热量不是恒定的,因此燃料量并不能与输入锅炉的热量精确对应,仅采用燃料量测量信号参与反馈控制难以保证控制的质量。为解决这一问题,需要燃料量信号进行发热量校正。

目前,煤的发热量尚不能实现瞬时测量,所以在燃料量控制系统中采用热量信号(锅炉的实际吸热量)作为燃煤信号发热量校正的基本依据,如图 2-1 所示。系统中总给煤量与煤的计算发热量之积为煤的理论发热量,热量信号减去燃油的发热量为煤的实际发热量;实际发热量与理论发热量的偏差信号经过给定值为零的 PID 调节器和函数器的运算后,形成发热量的校正信号,煤的理论发热量经过校正后,再除以煤的计算发热量,得到的是额定发热量下的总给煤信号。

燃料主控制器输出的总燃煤指令对 6 台给煤机转速并行控制,当投入自动的给煤机台数不同时,整个控制回路的控制增益也是不同的。为了保证各工况下控制系统的稳定,必须按投入自动的实际给煤机台数,进行系统的增益修正。此系统调用函数器 $f_7(x)$ 和适配器 ADAPT 来实现这一功能,考虑到 6 台给煤机在正常情况下为 5 台运行、1 台备用,所以取 5 台给煤机自动运行时的系统增益修正系数为 1。当 n 台给煤机投入自动运行时,系统的增益修正系数为 $K_n = 5/n$ 。

2. 送风控制系统

保证燃料在炉膛中的充分燃烧是送风系统的基本任务。在大型机组的送风系统中,一、二次风通常各采用两台风机分别供给。由于一次风是通过制粉系统带粉入炉的,它的控制涉及制粉系统和煤粉喷燃的要求,因此锅炉的总风量主要由二次风来控制,即这里的送风控制系统是针对二次风控制而言的。

目前,国产 300MW 机组的送风控制一般这样设计:通过调整送风机动(静)导叶的开度直接控制进入炉膛的二次风量,利用二次风挡板来维持二次风箱压力为给定值,达到控制二次风速的目的。

大型火力发电机组一般采用具有氧量校正的送风控制系统。以 300MW 机组送风控制系统为例,其基本结构如图 2-2 所示。

该送风控制系统是一个简单的单回路系统。送风调节器(PI)接受经过氧量校正的总风量给定值 V_0 与实际总风量反馈信号 V 的偏差值 ΔV ,对此进行控制运算,其输出与为加强送风控制、保证送风量及时适应燃烧需求的前馈信号(此处为总风量给定值 V_0)迭加后,形成送风控制指令,分别送至两台送风机的手动/自动控制站。在手动/自动站中,根据 A 送风机控制站设定的偏置值,分别对送风机动叶控制指令进行偏置处理,然后经切换器、闭锁指令增/减回路和防喘振回路去改变送风机动叶的开度,从而控制送入炉膛的二次风量,最终使送风量再达到其给定值,即 $V = V_0$ 。

在这个送风量控制系统中,送风量给定值 V_0 由如图 2-3 所示回路形成。由图 2-3 可见,送风量给定值由下列四种信号中的最大值形成:

- (1) 总燃料量信号经函数运算和氧量信号校正后,所得的风量请求值。
- (2) 燃料主控制器指令经函数运算和氧量信号校正后,所得的风量请求值。

(3) 燃料主控制器指令经函数运算、氧量信号校正和 $f(t)$ 的超前/滞后处理后, 所得的风量请求值。

(4) 吹扫风量或最小风量指令经过速率限制后, 所得的风量请求值。

选择上述信号中的最大值作为送风量给定值, 一是为了保证在锅炉点火前的吹扫风量和锅炉点火初期燃料量较小时的最小风量; 二是为了保证锅炉增加负荷时, 先加风后加煤; 锅炉减负荷时, 先减煤后减风, 使锅炉始终处于送风量大于燃料量的燃烧状态。

送风控制系统的氧量校正回路见图 2-3 中的虚线部分。该回路是一个以 PI 调节器为核心的氧量控制回路, 调节器根据空气预热器前烟气含氧测量值与氧量给定值之间的偏差进行控制运算, 输出经函数器 $f(x)$ 后, 形成氧量校正信号。调节器的控制作用最终使氧量测量值与给定值相等, 使炉膛燃料充分燃烧。

在氧量校正回路中, 氧量给定值是由代表机组负荷的主要蒸汽流量信号经函数运算后, 与运行人员设定的具有速率限制的偏量值迭加而形成的; 而氧量测量值是通过测量两侧空气预热器 A 和 B 前的氧量, 并对两个氧量测量信号进行筛选, 取其中一个恰当的值所获得的。

送风机动叶控制和引风机动叶控制密切相关。在投自动时, 必须严格遵循如下程序: 引风机→送风机→氧量校正。

3. 炉膛压力控制系统

锅炉炉膛内的压力直接影响炉膛内燃料的燃烧质量和锅炉的安全性。炉膛压力控制系统的基本任务是通过控制引风机动(静)导叶或入口挡板来维持炉膛压力为给定值(维持为负压), 以稳定燃烧、减少污染、保障安全。

目前, 国产 300MW 火电机组中一台锅炉一般配有两台控制炉膛压力的引风机。

图 2-4 是一个典型的 300MW 机组炉膛压力控制系统的原理方框图。

该炉膛压力控制系统是一个简单的单回路系统。压力调节器(PI)接受炉膛压力的偏差信号 Δp_1 并对其进行控制运算, 其运算结果与送风指令(前馈信号)迭加后, 形成引风机的控制指令, 分别送至两台引风机的手动/自动站。在手动/自动站中, 根据 A 引风机控制站设定的偏置量, 分别对送入的控制指令进行偏置处理, 然后经切换器、防喘振回路和闭锁指令增/减逻辑去改变引风机动叶的开度, 从而控制引风量以及炉膛内的压力, 最终

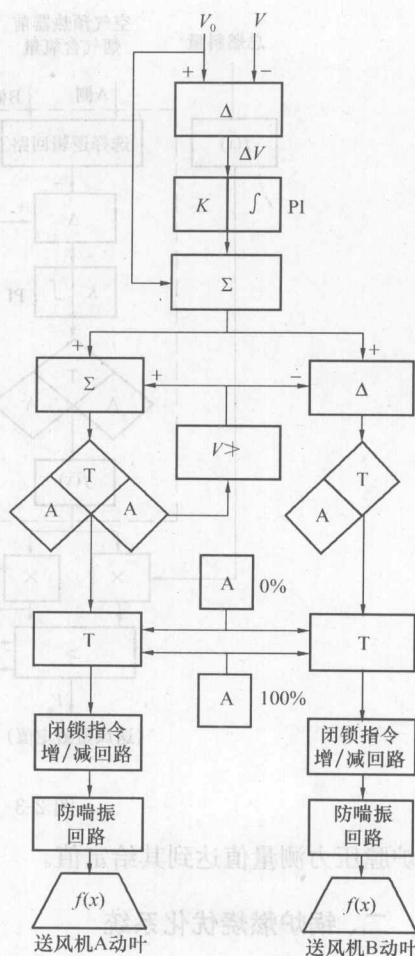


图 2-2 送风控制系统原理方框图

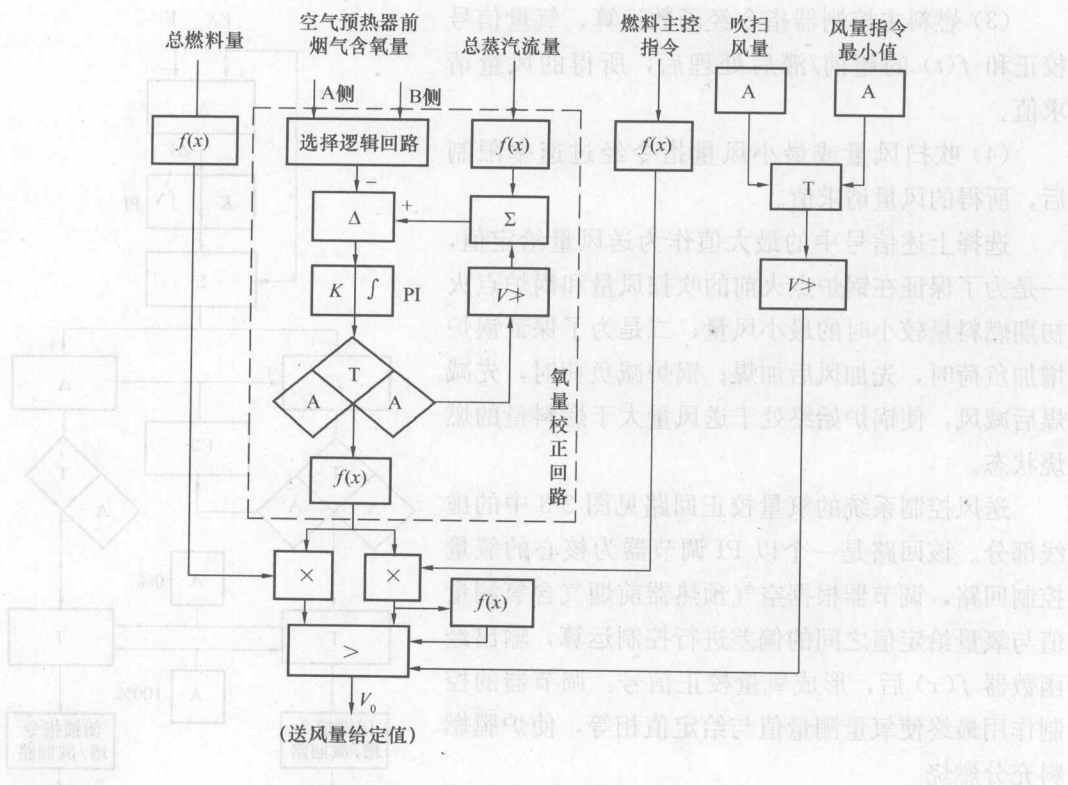


图 2-3 送风量的给定值形成回路

使炉膛压力测量值达到其给定值。

二、锅炉燃烧优化系统

在锅炉燃烧过程中，需要对以下主要运行参数进行控制：蒸汽压力、蒸汽流量、喷油量、送风量、引风量、炉膛负压及水位。锅炉的燃烧效率决定于锅炉燃烧系统状态的好坏，因此，应保证锅炉燃烧系统的稳态运行过程处于优化状态。采用自动控制系统来对锅炉的燃烧过程进行控制，可以使系统工作过程长时间维持在稳定运行状态；而要保证锅炉燃烧系统处于稳态运行的同时，能处于优化状态，则需对锅炉燃烧系统的稳态运行参数进行优化才能实现。

锅炉燃烧调节系统的基本任务，是使燃料燃烧所产生的热量适应锅炉蒸汽负荷的需要，同时还要保证锅炉的安全经济运行。因此锅炉燃烧调节系统的设计目标，是在满足主蒸汽供给要求的前提下，最经济地控制锅炉燃料输入，准确迅速地调节风、煤比，以获得最高的效率，并确保锅炉的安全运行。

锅炉燃烧过程是一个相当复杂的过程，难以用一个精确的对象模型描述。由于热交换和汽水变换等物理过程具有明显热力系统特征，所以此过程是一个大滞后、大延迟过程。一旦燃料供给量发生变化，或者由于燃料品质发生变化，而锅炉燃烧调节系统又没有做出合适有效的动作则势必带来很大的延迟，造成控制的瞬态失控，使锅炉的正常运行产生一系列问题：长时间的入炉燃料量与锅炉负荷的不协调可能导致锅炉运行参数达不到使用要

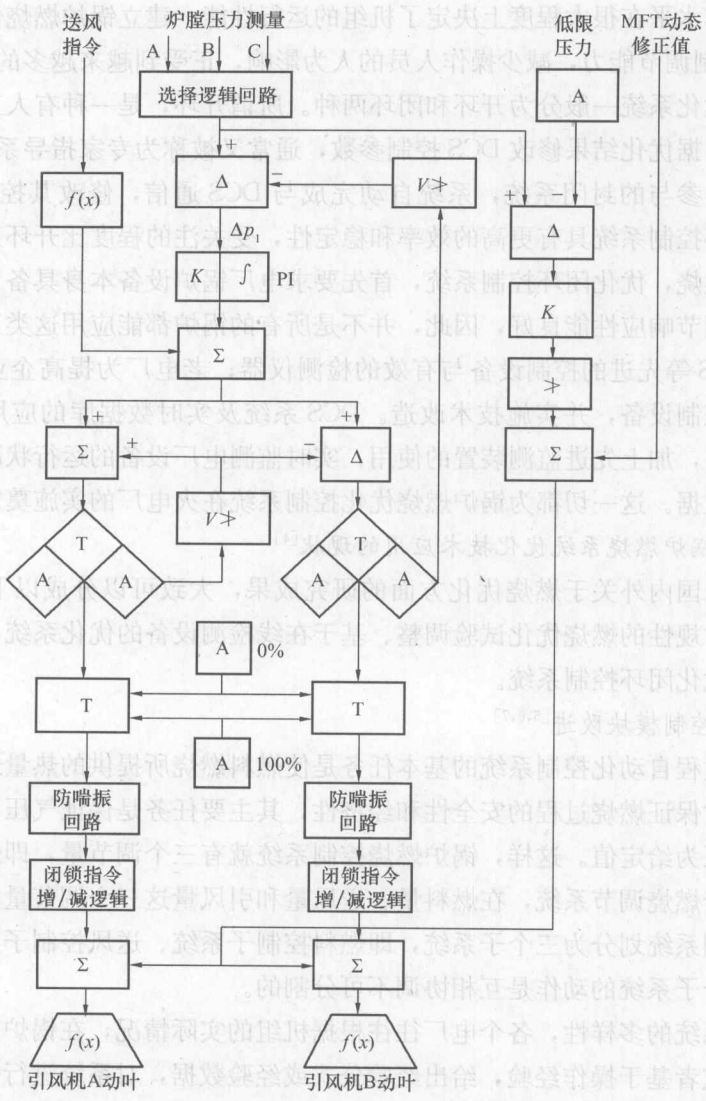


图 2-4 炉膛压力控制系统的原理方框图

求；多余的燃料进入炉膛会引起燃烧温度升高，给炉管带来超温或者超压的危险，使用寿命降低，严重时导致爆管事故的发生。这些不仅会降低锅炉运行的经济性，也将使燃烧过程的安全性失去保障。

燃煤电厂锅炉燃烧排放的硫氧化物（ SO_x ， SO_2 为主）、氮氧化物（ NO_x ）和粉尘等，对环境造成了很大的危害。因此，如何在电力生产中保持发电机组运行的经济性和环保性，已成为技术人员必须考虑的问题。

锅炉燃烧优化，最早以提高锅炉燃烧安全性和经济性为目标，通过燃烧优化来降低锅炉煤耗，提高火电厂发电效率。随着电子信息技术的发展，人工智能技术给电站锅炉燃烧优化注入了新的活力，锅炉燃烧优化技术进入新的快速发展时期。但目前采用的分散控制系统（DCS）控制调节往往无法完全针对锅炉燃烧的特点控制最佳运行工况，而是运行人

员的经验和操作水平在很大程度上决定了机组的运行性能。建立锅炉燃烧优化系统来提高锅炉 DCS 的控制调节能力,减少操作人员的人为影响,正受到越来越多的关注。

锅炉燃烧优化系统一般分为开环和闭环两种。所谓开环,是一种有人工参与的控制方式,操作人员根据优化结果修改 DCS 控制参数,通常又被称为专家指导系统;所谓闭环,是一种没有人员参与的封闭系统,系统自动完成与 DCS 通信,修改其控制参数等操作。比较而言,闭环控制系统具有更高的效率和稳定性,受关注的程度比开环系统高。

实施锅炉燃烧,优化闭环控制系统,首先要求电厂锅炉设备本身具备自动化检测与控制能力,并且调节响应性能良好,因此,并不是所有的锅炉都能应用这类系统。新建电厂普遍采用了 DCS 等先进的控制设备与有效的检测仪器;老电厂为提高企业竞争力,也正在添加自动化控制设备,并实施技术改造。DCS 系统及实时数据库的应用,电厂自动化水平的不断提高,加上先进监测装置的使用,实时监测电厂设备的运行状况,为调整设备运行提供参考数据。这一切都为锅炉燃烧优化控制系统在火电厂的实施奠定了基础。

(一) 电站锅炉燃烧系统优化技术应用的现状^[4]

综合近年来国内外关于燃烧优化方面的研究成果,大致可以分成以下四类:DCS 控制模块改进、常规性的燃烧优化试验调整、基于在线检测设备的优化系统、基于多目标寻优技术的燃烧优化闭环控制系统。

1. DCS 的控制模块改进^[5,6,7]

锅炉燃烧过程自动化控制系统的基本任务是使燃料燃烧所提供的热量适应锅炉蒸汽负荷的需要,同时保证燃烧过程的安全性和经济性,其主要任务是保证气压、炉膛过量空气系数和炉膛负压为给定值。这样,锅炉燃烧控制系统就有三个调节量,即燃料量、送风量和引风量。对于燃烧调节系统,在燃料量、送风量和引风量这三个调节量协调配合的基础上,将燃烧控制系统划分为三个子系统,即燃料控制子系统、送风控制子系统、引风控制子系统,这三个子系统的动作是互相协调不可分割的。

由于锅炉系统的多样性,各个电厂往往根据机组的实际情况,在锅炉系统进行机理分析的基础上,或者基于操作经验,给出经验公式或经验数据,对系统进行优化调整,即主要是针对三个控制回路的 DCS 逻辑修改,或者根据需要增加少量辅助回路,例如镇海发电厂根据 3 号机组的特点,增加了一次风压控制回路^[8]。这类优化调整虽然可以在一定程度上提高锅炉运行的效率,但是碍于 DCS 系统的数据处理和分析能力及其侧重于目标控制对象的安全、稳定的控制,未能在综合分析、整体优化上突破。

2. 常规性的燃烧优化调整试验^[8,9,10]

这类优化调整从锅炉系统实际出发,根据不同的燃烧器和燃烧方式,确定需要调试的参数,通过常规性的燃烧调整试验,采集当前机组的状态数据,根据机组运行特点及燃烧调整的经验,制定出重要控制参数改进策略,使机组在较优的状态下运行。需要调整的参数主要是炉膛出口含氧量,一次风速、风量,二次风速、风量,给煤量等,而不同燃烧设备的特点不同,所选取的参数也不一样。

常规性的燃烧调整往往只能针对重要控制参数,给出特定工况点及特定时段的优化策略,缺乏普遍适应性。该方法在解决较少的优化目标时比较有效,可以提供操作指导,对