

大型火电机组控制技术丛书

安全监测保护系统

杨晋萍 白建云 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

大型火发电机组控制技术丛书

安全监测保护系统

杨晋萍 白建云 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从实用角度出发,对大型火力发电机组安全监测保护系统的主要内容进行了阐述。书中所讲述的监测仪表和系统均为目前应用较多的产品。

全书共分十章,第一章至第五章介绍了大型锅炉基本结构、燃烧方式、启停和运行特性及炉膛安全监控系统;第六章至第九章以本特利公司的3500系列为例介绍汽轮机轴系参数的检测技术及其保护系统,并从理论上分析了造成汽轮机轴向位移、振动等多项参数异常的原因、产生的危害及这些参数的测量方法;第十章介绍了汽轮机的紧急跳闸系统。

本书可供从事大型火力发电机组仪控和集控工作的技术人员参考,也可作为自动化、热工检测与控制技术、集控运行、热动力等专业学生的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

安全监测保护系统/杨晋萍,白建云编著. —北京:中国电力出版社,2005

(大型火电机组控制技术丛书)

ISBN 7-5083-3193-1

I. 安... II. ①杨...②白... III. 火电厂-安全管理 IV. TM621.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第088754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

*

2006年1月第一版 2006年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 264千字

印数0001—3000册 定价18.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《大型火机组控制技术丛书》

编委会

顾 问 李子连 金以慧 刘吉臻 熊淑燕

林金栋

主 编 张丽香 石 生

编 委 (以姓氏笔画排序)

王 琦 白建云 印 江 冯江涛

杨晋萍 张丽香 降爱琴 郝秀芳

安全监测保护系统

前言

随着现代工业生产的迅猛发展和人民生活水平的日益提高,对供电质量的要求不断提高,电网负荷的峰谷差明显加大,用电结构也发生了很大的变化。为了适应机组调频和调峰的需要,要求大型火力发电机组均能实现自动发电控制(AGC)。

随着工程技术人员对分散控制系统(DCS)应用于火力发电厂生产过程控制策略研究与实践的不断深入,以及DCS软/硬件系统的不断升级换代,火电生产过程的数据采集系统、模拟量控制系统、程序控制系统、机炉安全监测保护系统、汽轮机电液调节与旁路控制系统以及部分电气系统逻辑控制等都由DCS组态实现,使锅炉、汽轮发电机组的主要设备和系统均处于DCS的统一监控管理之下。同时,还可以借助DCS这一控制平台,将先进控制理论和智能决策方法应用到火电生产过程控制系统中,解决常规控制方案无法应对的现场控制难题。

为了提高火电机组运行的自动化水平,我们结合国内外机组控制系统的特点和近年来对大时滞、非线性、时变及强耦合生产过程控制策略研究与现场实践的成功经验编著了本套丛书。该丛书共有5个分册:《电厂分散控制系统》、《程序控制系统》、《数字电液调节与旁路控制系统》、《安全监测保护系统》和《模拟量控制系统》。主要读者对象为从事自动控制、热工过程自动化、热能动力、集控运行、计算机等专业的科学研究与工程技术人员和大学高年级学生。

组编和出版这套丛书是一次尝试,我们热忱欢迎选用本套丛书的科学研究工作者、现场技术人员、大专院校老师和学生提出批评和建议。

《大型火发电机组控制技术丛书》编委会

2005年9月

编者的话

安全监测保护系统是大型火力发电机组自动化工作的重要内容之一,随着大型机组自动化水平的不断提高,安全监测保护系统的应用有了较大的发展。为了能够全面反映这方面的内容,本书从实际工程需要出发,对大型火力发电机组安全监测保护系统的主要内容进行了阐述。由于本书为系列丛书之一,为避免重复,有关开关量控制的基础知识不再编入本书(这部分在本系列丛书的《程序控制系统》中编写)。

《安全监测保护系统》分两个部分,第一部分以 600MW 和 300MW 机组为原型,在介绍大型锅炉的基本结构、燃烧方式、启停和运行特性的基础上,讲述美国福尼公司的火焰监视器、放大器、燃烧器管理、炉膛吹扫和点熄火控制及保护系统。第二部分以本特利公司的 3500 系列为例介绍汽轮机轴系参数的检测技术及其保护系统。

本书由山西大学工程学院杨晋萍、白建云合编。在编写过程中得到杨炜副教授和山西大学工程学院一些同事的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,加之水平所限,书中难免会存在许多疏漏不足之处,恳请广大专家和读者批评指正。

编 者

2005 年 9 月

安全监测保护系统

目 录

前言

编者的话

绪论	1
第一章 炉膛安全监控系统	5
第一节 炉膛爆燃的原因	6
第二节 炉膛防爆措施	10
第二章 锅炉燃烧系统	12
第一节 风烟系统	12
第二节 制粉系统	16
第三节 W 型火焰锅炉的燃烧器系统	23
第四节 四角喷燃锅炉的燃烧器系统	35
第三章 燃烧器管理系统组成及功能实现	45
第一节 燃烧器管理系统的组成	45
第二节 燃烧器管理系统的基本功能	47
第三节 硬件组成和软件编程	49
第四章 锅炉炉膛火焰监视系统	57
第一节 火焰监视的原理及类型	57
第二节 炉膛火焰特性及检测原理	60
第三节 福尼 DPD 火焰检测装置	67
第四节 福尼 DPD 的编程	69
第五节 福尼 DP7000 放大器	75
第五章 锅炉炉膛安全监控系统的逻辑控制	81
第一节 炉膛吹扫控制逻辑	81
第二节 总燃料跳闸控制逻辑	87
第三节 油燃料跳闸控制逻辑	92

第四节 紧急减负荷控制逻辑	93
第六章 汽轮机状态监测的基本参数 ⇨	96
第七章 本特利 3500TSI 系统的传感器 ⇨	102
第一节 电涡流传感器	102
第二节 速度传感器	109
第八章 本特利 3500TSI 系统的监视器 ⇨	113
第一节 BN3500 系统综述	114
第二节 3500/15 电源及电源输入模块	116
第三节 3500/50 转速表	117
第四节 3500/40 位移监视器	125
第五节 3500/45 双通道胀差监视器	132
第六节 3500/25 键相器模块	135
第七节 3500/53 超速保护装置	138
第九章 汽轮机 TSI 系统分析 ⇨	140
第一节 振动监视	141
第二节 轴向位移的监视	149
第三节 偏心监视	152
第四节 缸胀及胀差的监视	154
第五节 速度监测	157
第十章 汽轮机紧急跳闸系统 ⇨	159
第一节 危急跳闸装置	159
第二节 危急遮断保护	163
参考文献	167

绪 论

现代大型机组的特点是大容量、高参数、单元制机组运行,锅炉、汽轮机、发电机及各种辅机之间的关系十分密切。此外,现代大型机组还有一套为控制这些主设备而必备的相当复杂的控制系统及装置。这些主、辅设备及控制装置在生产过程中组成一个有机的整体,其中某些环节一旦发生故障,就会不同程度地影响整个机组的正常运行,严重的故障还会导致机组停止运行,甚至危及设备和人身的安全。

热工保护是通过对其机组的工作状态和运行参数进行监视和控制而起保护作用的。当机组发生异常时,保护装置及时发出报警信号,必要时自动启动或切除某些设备或系统,使机组仍然维护原负荷运行或者减负荷运行。当发生重大故障危及机组设备安全时,会停止机组(或某一部分)运行,从而避免事故进一步扩大。

热工保护有时是通过连锁控制实现的。所谓连锁控制就是指,将被控对象通过简单的逻辑关系连接起来,使这些被控对象相互牵连,形成连锁反应,从而实现自动保护的一种控制方式。例如引风机因故障跳闸,引起送风机、排粉机、给煤机、磨煤机等相继依次跳闸;又如汽轮机润滑油压力低时,自动启动交流油泵,油压继续降低时,启动直流油泵并停止交流油泵的运行等。

总之,热工保护是一种自动控制手段。在主、辅设备或电网发生故障时,热工保护装置使机组自动进行减负荷,改变运行方式或停止运行,以安全运行为前提,尽量缩小事故的范围。

一、热工保护主要包括的内容

(一) 汽轮机组的热工保护

当汽轮机组发生故障危及机组的安全运行时,或锅炉、发电机发生故障需要汽轮机跳闸时,保护系统应能自动迅速地动作使汽轮机跳闸。

汽轮机保护系统由监视保护装置和液压系统组成。当汽轮机超速、真空低、轴向位移大、振动大、润滑油压低等监视保护装置动作时,电磁阀动作,快速泄放高压动力油,使高、中压主汽门和调节汽门迅速关闭,紧急停止汽轮机运行,达到保护汽轮机组的目的。另外,还有汽轮机进水保护、高压加热器保护及旁路保护等自动保护系统,以保障汽轮机组的正常启停和安全运行。

(二) 锅炉机组的热工保护

锅炉机组的热工保护主要包括炉膛安全监控、总燃料跳闸、锅炉快速切回负荷、机组快速切断等自动保护。

(1) 炉膛安全监控保护。当锅炉启动、点火、运行或工况突变时,保护系统监视有关参数和状态的变化,防止锅炉或燃烧系统煤粉的爆燃,并对危险状态作出逻辑判断和进行紧急处理,停炉后和点火前进行炉膛吹扫等保护措施。实现炉膛安全监控的系统称为炉膛安全监

控系统 FSSS (furnace safeguard supervisory system)。

(2) 总燃料跳闸保护。当锅炉设备发生重大故障，如送、引风机全部跳闸，汽包压力超过限值，锅炉水循环不正常，汽包严重缺水，炉膛压力过高或过低，锅炉灭火，再热蒸汽中断等，以及汽轮机由于某种原因跳闸或厂用电母线发生故障时，保护系统立即使整个机组停止运行，即切断供给锅炉的全部燃料，并使汽轮机跳闸，这种处理故障的方法称为总燃料跳闸 MFT (master fuel trip) 保护。

(3) 锅炉快速切回负荷保护。当锅炉的主要辅机 (如给水泵、送风机、引风机) 有一部分发生故障时，为了使机组能够继续安全运行，必须迅速降低锅炉的负荷。这种处理故障的方法称为锅炉快速切回负荷 RB (Run Back) 保护。

(4) 机组快速切断保护。当锅炉方面一切正常，而电力系统或汽轮机、发电机方面发生故障引起甩负荷时，为了能在故障排除后迅速恢复发送电，避免因机组启停而造成经济损失，采用锅炉继续运行，但迅速自动降低出力，维持在尽可能低的负荷下运行，以便故障排除后能迅速重新并网带负荷，这种处理故障的方法称为机组快速切断 FCB (Fast Cut Back) 保护。

(三) 炉、机、电大连锁保护

大型单元机组的特点是炉、机、电在生产中组成一个有机的整体，其中某些环节出现故障时，必然会不同程度地影响整个机组的正常运行。因此需要综合考虑故障情况下炉、机、电三者之间的关系，通常称为炉机电大连锁保护。例如在机组发生异常工况时，保护系统可以使机组继续运行或紧急停止。又如，当机组外部负荷突然甩去，或者机组内部重要辅机跳闸时，分别通过 FCB 或 RB 进行自动减负荷。当发生汽轮机超速、推力瓦磨损、真空低、润滑油压低等故障时，汽轮机自动停机，同时连锁控制发电机跳闸，使锅炉转入点火状态或停炉。当锅炉灭火、送风机或引风机全停、炉膛压力过高或过低时紧急停炉，同时连锁控制汽轮机和发电机跳闸。

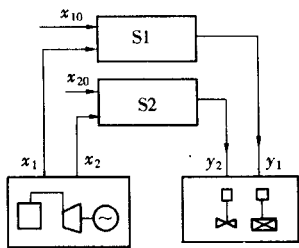


图 0-1 保护系统的组成框图
 x_1, x_2 —保护输入信号; x_{10}, x_{20} —给定值; S1—事故处理回路; S2—事故跳闸回路; y_1, y_2 —保护输出信号

二、热工保护系统的组成

热工保护系统 (下称保护系统) 一般由输入信号单元、逻辑处理回路 (或专用保护装置) 以及执行机构等组成，如图 0-1 所示。

保护系统输入信号 x_1, x_2 由测量传感器取得，并与其相应的给定值 x_{10}, x_{20} 相比较，当输入信号超过其限值时，事故处理回路或跳闸回路动作，输出信号 y_1 或 y_2 ，从而使保护系统的执行机构动作。

热工保护可分为两级保护，即事故处理回路 (包括进行局部操作和改变机组的运行方式) 和事故跳闸回路的保护。例如，锅炉主汽压力过高时，切除部分燃烧器，投入旁路系统；汽轮机轴承润滑油压过低时，自动启动辅助油泵，这些事故处理的目的是维持机组继续运行。但是，当事故处理回路或其他自动控制系统处理事故无效，致使机组设备处于危险工况下，或者这些自动控制系统本身失灵而无法处理事故时，只能被迫进行跳闸处理，使机组的局部退出工作或整套机组停止运行。跳闸处理的目的是防止机组产生机毁人亡的恶性事故，所以跳闸处理是热工保护最极端的保护手段。

随着机组容量的不断增加,处理事故的过程更为复杂,热工保护装置也在不断发展和完善。20世纪60年代以前,大多采用电气式保护仪表和继电器控制电路。20世纪70年代开始,逻辑控制电路大多由半导体逻辑元件构成,这些保护装置制造完成后,其功能就固定不变了。如要修改程序或改变功能,就必须改动逻辑卡件或逻辑线路。20世纪80年代以来,随着微处理器技术的发展,产生了可编程序控制器(PLC),它取代了继电器及半导体逻辑元件,从而使保护装置的可靠性大大提高。近年来,集散型微机控制系统在过程控制领域得到迅速发展,我国很多电厂都引进了这一先进技术。集散型微机控制系统是以微处理器为基础,集中了数据采集、模拟量连续控制、开关量程序控制和机组保护等功能的计算机综合控制系统,其特征是信息和操作管理集中化而控制分散化。例如,某电厂引进的美国贝利(Bailey)公司生产的集散型微机控制系统 Network-90,在热工保护中可用作炉膛安全监控,即进行炉膛压力保护,全火焰丧失保护,炉膛吹扫,油、煤燃烧器的自动启停等操作控制,该微机控制系统还可进行汽包水位保护、蒸汽流量受阻保护等,并且在机组发生故障跳闸时进行事故顺序记录。该微机控制系统投入运行以来,避免了多次锅炉事故的发生。此外,集散型微机控制系统还用于自动调节,包括燃料、送风、引风、汽温、汽压、给水、旁路等系统的自动调节;还具有数据采集和通信功能,包括模拟量、开关量、脉冲量的信号采集、报警、记录和控制功能。总之,集散型微机控制系统是控制技术、计算机技术和通信技术迅速发展的产物。

三、热工保护系统的特点

热工保护以保障设备和人身安全为首要任务。如果保护系统本身不可靠,就会造成不必要的停机,或保护系统起不到应有的保护作用,从而造成不堪设想的严重后果。为此,必须精心设计一整套安全可靠的保护系统。

热工保护系统一般具有以下特点:

(1) 输入信号可靠。输入信号来自各种被测参数的传感器或反映设备工作状态的开关触点。一般采用独立的传感器,对重点的保护项目,其输入信号采用多重化设计。

(2) 保护系统动作时能发出报警信号。当被监视参数超限时,发出预报信号,使运行人员在事故处理前采取必要的应急措施。当保护系统动作时,发出事故处理或跳闸信号。

(3) 保护命令一般是长信号。命令能满足保持到被控对象完成规定动作的要求。

(4) 保护动作是单方向的。保护系统动作后,设备的重新投入在查出事故原因和排除故障后进行,由运行人员人工完成。

(5) 保护系统能进行在线试验。在进行保护动作试验时,不会影响机组的安全经济运行。

(6) 确定保护系统的优先级。当两个以上的保护连锁动作或相继动作时,如果它们之间动作不一致,则应确定它们的优先级,并采取必要的闭锁措施,优先保证处于主导地位的高一级保护和连锁动作的实现。

(7) 保护系统有可靠的电源。保护装置能绝对避免因失电而引起拒动或误动,重要的保护连锁控制电源和执行机构电源一般采用不停电电源供电,以便在设备故障时有效地起到保护作用。

(8) 保护系统中设置了切换开关。自动保护系统不可能达到绝对的安全可靠,检测元件、控制回路或执行机构有时也会出现故障,这时保护系统能从“投入”位置切换到“解

列”位置，以便进行检修。

(9) 由计算机对保护系统进行监视。在计算机系统中有监视保护装置投入、切除的状态信号，在保护装置动作时，能通过 CRT 屏幕和记录仪自动地显示和记录保护系统的动作顺序、继电器动作和延时情况、工艺设备的工作状态等，使运行人员及时了解保护系统的动作情况，甚至对保护信号回路也进行必要的监视，以便及时处理和分析事故原因。

(10) 保护系统具有独立性。保护系统不受其他自动化系统投入与否的影响，任何时候都能独立进行控制。

第一章

炉膛安全监控系统

随着锅炉机组容量的增大, 锅炉设备及所属设备的结构变得复杂, 影响锅炉安全运行的因素也随之增多, 要监控的项目也大大增加。从锅炉的实际运行情况看, 锅炉事故时有发生, 就大型锅炉机组而言, 有些事故可能在极短的时间内发生, 以致运行人员来不及作出正确的判断和操作, 造成事故的扩大, 甚至出现锅炉爆炸事故, 造成巨大的经济损失。为此原国家电力公司要求已投产机组应加装锅炉灭火保护装置, 对大型机组应设置锅炉安全监控系统, 以确保锅炉的安全运行, 简化运行人员的操作, 有效避免误操作, 一旦发生事故, 能有效抑制事故的扩大。

炉膛安全监控系统 FSSS (Furnace Safeguard Supervisory System) 也可称为燃烧器管理系统 BMS (Burner Management System), 目前已成为我国大型电站锅炉必不可少的组成部分。BMS 作为大型火电机组自动保护和自动控制系统的一个重要组成部分, 其主要功能是保护锅炉炉膛避免发生爆炸事故, 对气、油、煤燃烧器进行遥控(程控)等管理, 它在锅炉正常运行和启停等各种运行方式下, 密切监视燃烧系统的大量参数和状态, 防止在锅炉的任何部位积聚可爆的燃料和空气混合物而引发炉膛爆炸。通过逻辑运行和判断, 当某一运行状态对设备和人身产生危险时发出总燃料跳闸信号 (MFT), 同时利用各种连锁和顺控装置使燃烧系统中的有关设备严格按照一定的逻辑顺序进行操作和处理, 以保证锅炉燃烧系统的安全。另外, 当产生 MFT 时, 提供首次跳闸的有关信息, 以便进行事故查找和分析。

FSSS 在锅炉运行中起着重要作用, 它通过一系列必要的安全连锁顺序来动作。这些动作要先制定顺序, 每一步都有合理的严格的安全连锁。FSSS 对燃烧设备的大量参数和状态进行严密的和连续的监视, 并按照预定的安全顺序对它们进行判断和各种逻辑运算, 发出动作指令, 自动动作有关设备或报警, 提示运行人员通过手操去动作有关设备。在锅炉的启动、机组正常运行和停炉(包括紧急情况下发出紧急停炉指令自动停炉或停某些设备)时, FSSS 都在起作用, 以此来防止在炉膛和尾部烟道及燃烧系统内形成危险的可燃物, 从而达到确保机组安全运行, 提高机组运行可靠性的目的。

虽然 FSSS 不参加燃料量和风量的调节, 但是它的安全连锁功能都有着超越运行人员和过程控制系统的作用。例如: 如果燃料控制系统把风量降低到启动期间允许风量的最低值以下[典型的为 30% 全负荷风量, 美国国家防火协会 (National Fire Protection Association, NFPA) 法定值不低于 25% 的全负荷风量], 系统将自动地切除燃料, 同时也不允许运行人员在遵守上述安全顺序的情况下启动设备, 并且若违背上述安全顺序, 设备将被自动停掉。

FSSS 的安全连锁条件要根据燃烧系统和燃料种类的不同和燃烧方式等来确定, 但是必须包括下述安全功能:

- (1) 点火前清扫;
- (2) 点火前要有适当的允许条件;

- (3) 炉膛引进主燃料的允许条件;
- (4) 连续监视燃料条件和其他运行状态;
- (5) 当需要时紧急停下部分或全部燃料设备;
- (6) 停炉后的清扫。

FSSS 的清扫功能是防止锅炉爆炸的有效手段。清扫的目的是将炉膛和燃烧系统管道中沉积的未燃烧的燃料清除掉, 根据美国 NFPA 防爆标准, 炉膛清扫时, 用全负荷的 30% 风量, 连续清扫 5min。在清扫前, MFT 记忆器处于置位状态, MFT 信号闭锁住一切可操作的程序。当一个完整的 5min 吹扫过程完成后, 才能使 MFT 复位, 方可进行程序操作。

清扫完成后, 可进行锅炉准备点火, 锅炉点火条件满足后, 就可点火了。在锅炉负荷达到 30% MCR (全负荷风量) 之前必须保持这个 30% 的最低风量, 以确保在整个启动阶段炉膛内的风量能有富余。对每个点火器都要进行火焰检测, 如果同时把燃料量信号也综合起来, 就可以确定是否已有了足够的点火能量。根据所选的主燃料和燃烧系统的配置, 主燃料可直接从点火器或点火层获得点火能量。

FSSS 系统应具备以下功能:

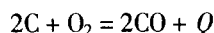
- (1) 切除主燃料后, 炉膛点火前进行炉膛清扫并监视吹扫过程。
- (2) 在集控室操作盘上, 对单个或几个成组的点火器进行启动和停止程序, 并监视执行情况。
- (3) 连续监视点火器的火焰, 监视点火器燃油阀是否打开, 点火器是否全部伸进或退出, 总之, 监视点火器的运行情况。
- (4) 若某点火器点火失败, 失去火焰, 打火杆没有进到位或者点火燃油阀有故障, 则自动切除此点火器。
- (5) 连续监视预定的锅炉跳闸条件, 一经出现, 则立即发出 MFT 跳闸信号。
- (6) 提供锅炉“首次跳闸原因”指示, 把引起锅炉跳闸的第一原因显示在操作控制盘上, 并且闭锁由此跳闸条件而引起的其他跳闸条件指示。
- (7) 报警指示系统用来监视整个控制系统, 并给出适当的输出信号来提醒运行人员和其他需要的系统, 如中央计算机或事故记录装置等。
- (8) 用来控制某些辅助设备如探头冷却风机等, 并且应包括必要的安全连锁。

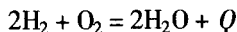
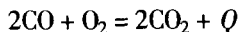
第一节 炉膛爆燃的原因

一、炉膛内火焰形成的机理分析

炉内燃烧过程实质上是燃料与氧发生化学反应的过程, 同时放出热和光, 这种燃烧反应过程在很复杂的条件下进行, 与一系列过程有关。如传热过程、流动过程、扩散过程等, 这些物理过程与化学反应过程同时进行并相互影响, 因此炉内过程是很复杂的, 但我们可以从化学反应的最终结果和物质平衡关系来了解炉内的燃烧过程。

无论是煤、油还是气体燃料, 它们的主要组成成分是碳和 (或) 氢化物, 对煤等固体燃料来说, 还含有氢、氧、氮、硫等。炉内燃烧过程是燃烧中的碳或氢化物与空气中的氧进行剧烈的化学反应, 见下面的化学平衡式:





这些可燃物被氧化、还原、再氧化直至最后不能再反应。在剧烈燃烧的化学反应过程中，将释放包括紫外线、红外线、可见光、热辐射和声波等电磁波能量。在火焰监视中，所有这些能量又构成了火焰是否存在的检测基础，电磁波能量的各成分的强度构成又与燃料的不同种类甚至同种类不同品位的燃料有关。如氢含量较高的气体和液体燃料燃烧火焰具有高能量紫外线辐射，因此以紫外光敏管检测燃烧火焰有较大技术发展。而紫外线辐射的能量是与燃料中的氢、碳比成比例的，碳氢化合物中，甲烷（ CH_4 ）氢碳的比例为 4:1，煤却小于 2:1，煤燃烧时，碳与氧形成 CO 的过程需要吸收一部分紫外线能量，因此煤燃烧的火焰检测不能以紫外线能量检测为基础，而要选择其他电磁波能量作为检测基础。

煤粉炉中，煤粉空气混合物进入炉膛后，卷吸炉膛内的高温烟气产生对流换热，另外，还产生炉膛高温火焰辐射换热。通过这两种热交换，进入炉膛的煤粉气流温度迅速提高，而后着火，开始强烈燃烧，形成火焰，煤粉着火后从局部开始传播开去，其快慢以火焰传播速度即着火速度决定，它涉及到着火的稳定性。

保证煤粉气流喷入炉膛后能连续稳定着火，是煤炉安全运行中的一个重要问题，尤其在燃用挥发分较低的无烟煤或贫煤时，保证在低负荷下着火的稳定性更为重要。

影响煤粉气流着火和着火稳定性的因素有：

(1) 一次风量。减少煤粉气流中的一次风量，使煤粉气流加热到着火温度所需要的热量（称为着火热）显著降低，因而在同样卷吸烟气量的前提下，可将煤粉气流加热到更高温度，加速着火过程。但一次风量不能过低，否则会在着火初期得不到足够的氧气而使化学反应速度减慢。

(2) 一次风速。若一次风速过高，则通过单位截面积的气流流量过大，温度提高速度慢。但如果一次风速太低，则容易烧坏燃烧器喷口。所以一般情况下，煤中挥发物越高，火焰传播速度越快，相应一次风速可选择高些。

(3) 一次风煤粉气流的初温。一次风温度越高，着火热越少，着火速度越快，但一次风温过高时，对于挥发分较高的煤种，会使着火区离喷口太近，易烧坏喷口。对于挥发分较少的无烟煤或贫烟，为了保证着火的稳定性，通常采用热风送粉，而且要求热风温度较高（350~400℃），对于挥发分较高的煤，如烟煤，可以不采用热风送粉，要求空气预热器出口热风温度也较低（250~300℃）。

(4) 燃料性质。燃料性质中对着火过程影响最大的是挥发分。在相同的气粉条件下，挥发分降低，火焰传播速度显著降低，燃烧稳定性下降。燃料中灰分增加，火焰传播速度降低；而燃料中水分增加，着火热增加，炉内温度水平降低，这些情况对着火均不利。

(5) 煤粉细度。煤粉越细，煤粉总的表面积越大，煤粉吸热量越多，同时火焰传播速度越快，有利于着火，但过细的煤粉，会增加磨煤机的耗电量。

煤粉炉气流着火和着火稳定性还与燃烧器形成、着火区域炉膛温度水平等有关。

二、炉膛爆燃的原因

炉膛是指锅炉炉膛到烟囱的整个烟气通道部分，包括有关的锅炉部件、烟道、风箱和风机在内。燃料在炉膛内燃烧，进行能量转换。燃烧不稳易灭火，如进一步操作不当，则易发

生爆燃。

1. 炉膛爆燃过程

炉膛爆燃是指在锅炉的炉膛、烟道和通风管道中积存的可燃物突然同时被点燃，释放大量的热能，生成烟气后容积突然增加，一时来不及由炉膛排出，因而使炉膛压力骤增，这种现象即为爆燃，严重的爆燃即为爆炸。爆燃所产生的爆炸力量，据现场记录，压力可达150kPa，远远大于炉墙所能承受的压力，故爆燃对锅炉本体的损坏有时是毁灭性的。在锅炉炉膛内产生爆燃，炉内气体猛烈膨胀，使烟气侧压力升高，其作用力将炉墙推向外侧，称为外爆。当炉膛内突然灭火，炉内气体由于火焰熄灭，温度剧烈下降而猛烈收缩，炉外大气压力将炉墙推向内侧，称为内爆。在采用平衡通风的机组上，当主燃料点燃之前或燃料突然中断时，送风机突然停转，而引风机还在抽吸，因而使炉内空气及烟气量陡减，在10~20s之内烟气量减少到额定值的50%，因而燃气侧压力急降，使炉膛负压在7~8s之内降到-3050~-6860Pa，造成炉膛、刚性梁及炉膛墙壁的破坏。

为了防止锅炉内爆，在燃烧控制系统的设计中应注意以下几点：

(1) 锅炉甩负荷时，向炉膛的送风量必须维持在甩负荷前的数值；

(2) 机组甩负荷后，应尽可能减少炉膛中的燃烧产物流量；

(3) 若能在5~10s的期限内（不是立即地）消除掉炉膛中燃料，则机组甩负荷后，炉膛压力偏离的幅度就可能缩小。

炉膛爆燃可分为冷态爆燃、热态爆燃、穿透性爆燃和局部爆燃，其中危害最大的为冷态爆燃和穿透性爆燃。

在正常情况下，进入炉膛的燃料立即被点燃，燃烧后产生的烟气也随之被排出，炉膛和烟道内没有可燃混合物积存，因而也就不会发生爆炸。如果运行人员操作顺序不当，设备或控制系统设计不合理，或者设备和控制系统出现故障等，就有可能发生爆燃。从理论分析可知，只有在符合下列三个条件时才能产生爆燃：

(1) 炉膛或烟道内有燃料和助燃空气积存；

(2) 积存的燃料和空气混合物是爆炸性的并达到爆炸浓度；

(3) 具有足够的点火能源。

三个条件中如有一个不存在时，就不会发生爆燃。所谓爆炸性混合物也就是炉膛中可以点燃的混合物。在锅炉运行时不可能没有可燃混合物，也不可能没有点火能源，因此主要是设法防止可燃混合物积存在炉膛和烟道中。

燃料与空气按一定比例混合时才能形成可燃混合物。正在燃烧的火焰如果熄灭，则将有燃料和空气混合物积存在炉膛，持续的时间越长，炉内积存的可燃物就越多。当积存的可燃混合物被点燃时，由于火焰的传播速度很快，可能混合物同时点燃，烟气容积突然增大，又来不及由炉膛出口排出，因而炉膛压力骤增。为了说明问题，假定瞬间的爆燃为定容绝热过程，大致可以用理想气体方程来说明。

设 V_r 和 Q_r 表示积存的可燃混合物的容积和单位容积的发热值， V 表示炉膛容积，也表示爆燃后炉膛介质的总容积，瞬间爆燃放出的热量增多用于加热炉膛介质，在定容绝热过程中，炉膛介质的温升 ΔT 为

$$\Delta T = V_r Q_r / VC_V \quad (1-1)$$

式中 C_V ——定容过程炉膛介质的平均比热容， m^3/mol 。

理想气体的定容变化式为

$$p_2/p_1 = T_2/T_1 = (T_1 + \Delta T)/T_1 = 1 + \Delta T/T_1 \quad (1-2)$$

式中 p_1 、 p_2 ——爆燃前、后炉膛介质的压力，Pa；

T_1 、 T_2 ——爆燃前、后炉膛介质的热力学温度，K。

由式 (1-1) 和式 (1-2) 得

$$p_2 = p_1 [1 + (V_r/V) Q_r / (C_v T_1)] \quad (1-3)$$

容积比值 V_r/V 是一个相对值，只有当容积比大到一定数值时，爆燃压力才会升高很多，大炉膛积存少量的可燃物，即使爆燃也不会引起破坏。

单位容积的发热量 Q_r 越大，爆燃后压力升高越多，爆燃产生的破坏力越大。因此，对燃用石油及天然气的锅炉应更加注意预防炉膛的爆燃。

炉膛介质的热力学温度 T_1 越低，爆燃后压力越高，这是因为容积压力一定时，绝对温度越低，介质的质量就越多。在锅炉点火期间，炉膛温度低，突然着火以后， ΔT 温升较大，气体的容积膨胀也较大，故低温冷态爆燃时产生的破坏力较大，爆炸时往往损坏炉膛中下部，一般形成穿透性爆燃。炉膛介质温度高时，比如运行中突然灭火，这时炉膛的温度仍然较高，进入炉膛的介质随热气流不断上升和气化，上升到炉膛顶部，遇到高温过热器而产生爆燃，这种爆燃形成的温差 ΔT 较小，其破坏力低于前者，破坏区域大多在炉膛的顶部及水平烟道，简称热态爆燃。

在推导式 (1-3) 时，曾假定爆燃为定容过程，实际上烟气膨胀时总有些气体由出口排出。爆燃能量越大，瞬间的烟速增加将使烟道阻力大大增加，这时排烟降压的作用是有限的。炉墙上装设的防爆门也只能对局部不大的爆燃起降压作用，因为在曾经发生过大爆破的锅炉炉墙上均装有防爆门，所以证明防爆门对大能量爆燃是无能为力的。因此，最好是想尽一切办法防止爆燃的发生，关键是防止可燃混合物的积存。

2. 可能造成炉膛爆燃的危险情况

(1) 锅炉燃烧煤种的多变。在燃烧优质煤时，由于发热量高，炉温也较高，要求从燃烧器喷出的风速较高。对于烟煤，大约要求风速为 20~25m/s，这样可保持整个炉膛的稳定燃烧，从而保证喷入锅炉的煤粉不会造成聚积，而是即刻被烧掉。只要能保持炉膛稳定高温燃烧，就不会造成锅炉灭火。如果煤种多变而又不能很好地保证风煤比例，结果就会造成炉膛燃烧不稳，导致喷燃器熄灭。如变为烧无烟煤时，应相应降低风速。由于风机挡板的可调性差，造成运行人员无法根据煤种变化及时改变风煤比例，就会引起燃烧不稳导致喷燃器熄灭。若这种灭火又未被运行人员发现，熄灭了的喷燃器仍旧向炉膛内喷射煤粉和相应的一、二次风，造成炉膛内可燃物的聚集，当达到一定煤粉浓度而炉膛的高温又为这种可能性提供了点火源时，就会引起炉膛爆燃。

(2) 燃料、空气或点火能量中断，造成炉膛内瞬间失去火焰，形成可燃物堆积，而接着再点火或火焰恢复时，就可能引起爆燃和打炮。

(3) 在多个燃烧器正常运行时，一个或几个燃烧器突然失去火焰，造成可燃混合物的堆积。

(4) 整个炉膛灭火，造成燃料和空气混合物的积聚，随后再次点火或者存在其他点火源时，使这些可燃混合物点燃。

(5) 在停炉检修过程中，燃料漏进停用的炉膛。