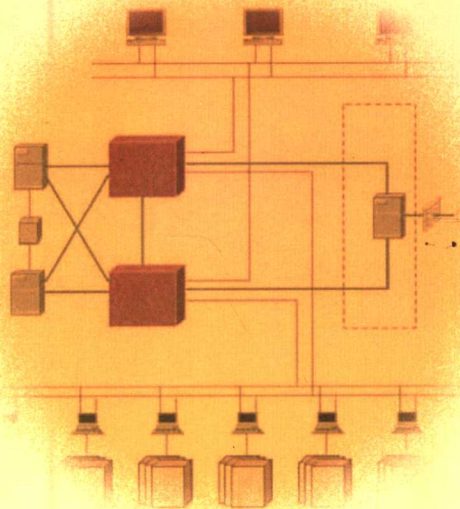


30074

© 刘红波 李少远 著

火电机组 先进智能控制 及其应用



TP23

4



科学出版社

www.sciencep.com

火电机组先进智能控制 及其应用

刘红波 李少远 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从基本原理、多种建模与控制方法的设计与分析、工业实际应用等方面,阐述了火电机组先进智能控制方面的应用研究成果,内容包括:面向控制的机组对象建模方法与特性分析;基于智能解耦的机炉协调控制方法,基于继电反馈自整定的协调控制系统设计方法;电厂锅炉汽包水位非自衡系统的预测控制和加权模糊控制策略;基于自整定和模糊自校正的汽包水位积分过程高性能反馈控制;机组蒸汽温度鲁棒串级控制方法,主回路采用基于模糊切换的复合控制器的串级控制,采用具有延迟补偿的先进PID控制器的串级控制;钢球磨中储式制粉系统的智能自适应解耦控制方法及应用;并以电厂300MW大型燃煤机组为例介绍这些方法结合集散控制系统(DCS)的工业实际应用。本书是国内全面介绍火电厂复杂热工过程建模和先进智能控制的第一本专著,大部分内容取材于作者近年来在这一领域的研究成果。本书理论密切联系实际,反映了这一领域近年来所取得的新进展。

本书适宜控制科学与工程、计算机控制、系统工程和信息工程以及热能与动力工程等专业的教师和研究生作为教学参考书,也可供上述专业的科技与工程人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

火电机组先进智能控制及其应用/刘红波,李少远著. —北京:科学出版社,2005.

ISBN 7-03-014940-8

I. 火… II. ①刘… ②李… III. 火电厂-发电机-机组-智能控制
IV. TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第012242号

责任编辑:胡 凯 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年5月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:1—2 000 字数:247 000

定价:36.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

现代火力发电生产过程是典型的复杂工业过程,广泛地存在着多变量、非线性、大惯性、参数时变、受不确定因素影响和生产条件及工况变化大的问题。常规的机组控制方案结合前馈补偿、串级等控制策略,采用基于 PID 线性控制算法的多个 SISO 反馈控制回路组成的分散控制结构,没有完善考虑上述问题,因而无法保证长期正常投入运行,只能用来维持生产过程的平稳运行,复杂工况则需要运行人员大量的手工操作和监督控制,机组运行参数偏离经济指标较大,造成大量能量损失,增加了设备故障率,严重影响机组的经济效益和安全可靠运行。解决上述问题的关键在于如何实现机组热工过程的先进智能控制。因此复杂工业过程的先进智能控制成为近年来控制科学与工程界共同关注的热点研究领域。

本书以火电厂复杂热工系统为研究对象,围绕复杂工业过程建模与先进智能控制的热点问题,从系统建模、基础控制级、协调控制级和管理决策级的设计与分析等方面,结合作者的研究工作,阐述近年来在这些问题上的应用研究成果。全书共分为七章:第一章为概论,对火电厂复杂热工系统建模与控制的研究进展进行综述,对其发展方向进行分析,并对其应用前景提出见解,为提出和研究适合于工程应用且性能优化的机组控制系统设计方法提供参考和依据;第二章介绍面向控制的机组对象建模方法与特性分析;第三章阐述充分考虑我国燃煤动力机组设备实际运行状况而提出的便于工程应用的基于智能解耦的机炉协调控制方法,以及基于继电反馈自整定的协调控制系统设计方法;第四章结合电厂锅炉汽包水位非自衡系统,逐一论述提出的预测控制动态优化控制系统设计方法、加权模糊控制策略以及基于自整定和模糊自校正的高性能反馈控制策略和它们的满意应用效果;第五章针对火电机组蒸汽温度串级控制系统的设计,从提高系统的鲁棒性和设计的自动化程度、从 PID 线性控制器和模糊控制器优势互补和明显改进控制性能以及从消除内模控制器局限性和获得最佳负荷扰动调节品质等角度,介绍了提出的先进控制方法;第六章以大部分 200MW 以下发电机组和部分 300MW 发电机组都普遍使用的钢球磨煤机中间储仓式制粉系统为应用背景,阐述了多变量非线性系统智能自适应解耦控制方法及技术,这种方法及技术将专家系统、神经网络等人工智能方法、自适应自整定 PID 等先进控制方法与多变量自适应解耦控制方法相结合,针对我国工业生产过程运行工况复杂多变的情况,从控制目标的角度提出了“安全——运行品质——经济效益”的三级决策准则,从控制系统的整体结构的角度提出了“管理决策级——协调控制级——基础控制级”的三级控制结构,并提出了针对工况进行智能辨识的思想。在前面的章节

中介绍了针对我国火电机组实际运行中普遍存在的问题提出的便于集散控制系统实现的火电机组先进智能控制方法。第七章结合某电厂 300MW 机组计算机监控系统技术改造项目,全面介绍这些方法的工程应用,其中包括系统的工程设计和实施情况以及系统实施后的控制效果分析。

本书由山东大学刘红波副教授与上海交通大学李少远教授统一撰写。第一、二、三章以及第五、七章由刘红波副教授撰写,第四、六章由李少远教授撰写。

本书作者对中国工程院院士东北大学柴天佑教授在复杂工业过程建模与先进智能控制方面所给予的指导表示衷心感谢;感谢上海交通大学席裕庚教授对作者在博士后流动站研究工作期间给予的关心指导和提供的良好的学术环境和工作条件;感谢本书参考文献中提到的作者及他们的合作者,是他们的成果奠定了我们的工作基础。感谢国家自然科学基金、国家“863”高技术研究发展计划课题和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金对作者研究工作的资助;并对课题组成员的通力合作和所进行的有益讨论表示感谢。

本书是作者近几年研究工作的结晶,希望本书的出版能对这一领域的研究和应用起到积极的推动作用。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

作者

2004 年 10 月

目 录

前言

第一章 概论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 火电机组生产设备和工艺流程简介	(2)
1.3 火电机组的控制目标和控制问题的复杂性	(4)
1.3.1 系统的复杂特性描述	(4)
1.3.2 火电机组的控制目标和复杂控制任务	(6)
1.4 火电机组建模与控制研究和应用状况	(8)
1.4.1 机组常规整体控制系统的应用现状分析与存在的问题	(8)
1.4.2 火电机组先进控制方法与应用研究现状	(13)
1.4.3 智能控制方法与应用研究现状	(19)
1.4.4 复合(混合)型智能控制方法	(25)
1.4.5 火电机组建模研究状况	(27)
1.5 本书的安排	(29)
参考文献	(30)
第二章 面向控制的机组对象建模方法与特性分析	(36)
2.1 概述	(36)
2.2 机组对象建模的单向性假定	(37)
2.3 机组各个局部对象的数学模型	(38)
2.3.1 直吹式制粉系统的数学模型	(38)
2.3.2 炉内燃烧传热过程模型	(39)
2.3.3 烟风系统模型	(39)
2.3.4 烟氧量(过剩空气系数)模型	(40)
2.3.5 蒸汽发生系统模型	(41)
2.3.6 过热器及其连接管道和汽轮机的压力流量通道模型	(44)
2.3.7 汽轮发电机的电功率模型	(45)
2.4 协调控制对象的非线性模型与特性分析	(46)
2.5 协调控制对象的动态特性实验和线性模型参数辨识	(47)

2.5.1	协调控制对象的动态特性实验	(48)
2.5.2	协调控制对象动态数学模型	(48)
2.6	过热器及再热器焓温通道动态模型	(51)
2.7	基于工况分解的机组对象非线性控制模型建立方法	(54)
2.7.1	建模方法要求满足的假设条件	(54)
2.7.2	建模方法选用的非线性模型结构	(55)
2.7.3	各运行工况线性模型辨识	(55)
2.7.4	非线性过程全局广义双线性系统模型的构造	(55)
2.7.5	矩阵 A 和 N_i 元素的计算方法	(56)
2.7.6	建模方法的应用	(57)
2.7.7	小结	(61)
	参考文献	(61)
第三章	机炉协调先进智能控制方法	(63)
3.1	基于智能解耦的机炉协调控制方法	(63)
3.1.1	常规控制方法分析和改进设计需要考虑的问题	(63)
3.1.2	基于解耦控制的机炉协调控制方法	(64)
3.1.3	基于智能解耦的机炉协调控制策略	(67)
3.1.4	控制方法的设计步骤小结	(73)
3.2	基于继电器反馈自整定的协调控制系统设计方法	(73)
3.2.1	多变量控制系统分散控制器的设计概述	(73)
3.2.2	常规协调控制方案控制器参数自整定方法	(75)
3.2.3	具有前馈解耦补偿器的协调控制系统设计方法	(82)
3.2.4	小结	(94)
	参考文献	(94)
第四章	汽包水位的预测控制和模糊控制	(96)
4.1	电厂锅炉汽包水位非自衡系统的预测控制	(96)
4.1.1	动态矩阵控制(DMC)的一般算法	(96)
4.1.2	改进的 DMC 算法的原理	(98)
4.1.3	控制系统设计和实际应用效果	(102)
4.1.4	小结	(104)
4.2	机组汽包水位系统的加权模糊控制策略	(105)
4.2.1	动力锅炉被控过程的描述	(105)
4.2.2	模糊控制器在锅炉汽包水位控制中的应用	(107)

4.2.3 小结	(113)
4.3 基于自整定和模糊自校正的汽包水位积分过程高性能反馈控制	(113)
4.3.1 汽包水位积分过程反馈控制器的自整定	(114)
4.3.2 PI 或 PID 控制器结构上存在局限性的分析和高性能反馈控制策略	(116)
4.3.3 PI 控制器参数模糊自校正机构	(120)
4.3.4 设计实例与仿真研究	(123)
4.3.5 小结	(126)
参考文献	(126)
第五章 改进的蒸汽温度串级控制方法	(128)
5.1 汽温鲁棒串级控制方法	(128)
5.1.1 引言	(128)
5.1.2 鲁棒串级控制系统及其性能分析	(128)
5.1.3 鲁棒串级控制系统控制器参数的自整定方法	(131)
5.2 主回路采用基于模糊切换的复合控制器的串级控制	(132)
5.2.1 引言	(132)
5.2.2 模糊 PID 复合控制系统的结构	(133)
5.2.3 模糊 PID 控制器的设计和参数整定	(133)
5.2.4 模糊切换方法设计	(137)
5.3 采用具有延迟补偿的先进 PID 控制器的串级控制	(138)
5.3.1 具有延迟补偿的先进 PID 控制器	(138)
5.3.2 内模控制器的局限性	(139)
5.3.3 分布时滞过程	(141)
5.3.4 闭环系统的鲁棒性	(144)
5.3.5 过程辨识	(145)
5.3.6 过热器蒸汽温度的控制	(147)
参考文献	(148)
第六章 钢球磨中储式制粉系统的智能自适应解耦控制方法及应用	(150)
6.1 钢球磨中储式制粉系统简介	(150)
6.2 钢球磨中储式制粉系统的数学模型	(152)
6.3 多变量非线性系统智能自适应解耦控制方法及技术	(153)
6.3.1 基础控制级	(154)
6.3.2 协调控制级	(155)
6.3.3 管理决策级	(155)

6.3.4	小结	(158)
6.4	工业应用	(160)
6.4.1	神经网络解耦补偿器设计	(160)
6.4.2	底层各个回路的控制器设计	(161)
6.4.3	协调控制级和管理决策级设计	(161)
6.4.4	系统工业应用效果	(162)
	参考文献	(164)
第七章	先进智能控制技术的工程应用	(165)
7.1	引言	(165)
7.2	机组设备实际运行情况和原有控制方案分析	(165)
7.2.1	机组设备实际运行情况	(165)
7.2.2	原有控制方案分析	(166)
7.3	系统的硬件设计	(168)
7.3.1	系统的设计原则	(168)
7.3.2	系统的硬件配置	(169)
7.4	系统的控制方案工程设计和软件实现	(171)
7.4.1	机炉协调控制系统的工程设计	(171)
7.4.2	过热蒸汽温度控制系统工程设计	(174)
7.4.3	再热蒸汽温度控制系统工程设计	(179)
7.4.4	控制方案在分散控制系统上的软件实现	(180)
7.5	系统的工程实施和控制效果评价	(186)
7.5.1	控制系统的调试和参数整定	(186)
7.5.2	系统的工业实施效果及评价	(189)
7.6	小结	(195)
	参考文献	(196)

第一章 概 论

1.1 引 言

随着国家电力体制改革的逐步实施,当前发电企业面临的总体形势可用许多富有挑战性的问题来表征,其中最重要的是各自独立的电力生产厂家之间为满足最终用户的能源要求进行的竞争,为达到国家关于最大限度地利用自然资源和对环境最低程度影响的严格规定而承受的压力,电厂主设备的老化,建设新厂区的投资收益的不确定性。火电机组这种应用最广泛的发电机组的运行受到多种因素的制约:首先,机组在任一时刻都必须为电力系统的主要目标提供支持,即在任何时候不仅在数量上满足电力系统的负荷需求,而且在质量上也要保证供电电压和频率的恒定;其次,发电企业之间的竞争以及其他市场驱动力使得机组参与电网调峰调频的任务增加;最后,机组运行必须达到节能降耗、维持和延长主设备寿命及降低环境影响规定的严格要求。

实现上述所有要求的一条途径是研究开发更加综合和适应性强的机组控制方法,这种方法应当提供保证机组高性能大范围负荷跟随运行所需要的功能,同时在变化的物理和经济条件下保证满足维持和延长主设备寿命、污染物排放以及燃料消耗量等方面规定的约束条件。因此在着重考虑了负荷跟踪以及电压、频率稳定性基本控制问题后,为使机组在任何运行工况下都能成功地参与到电力系统每天更加需求的结构中,在任意的多个相互冲突运行目标下最优地工作,急需设计更加有效的机组控制系统。

机组控制系统的控制对象——火电机组是具有强耦合、非线性、大惯性、参数时变和不确定因素的典型复杂热工系统,它有多个控制量和被控量,具有上述的复杂控制目标和相应的复杂控制任务。具有多种非时变性质或动态性质的运行约束极限条件,环境中存在着的各种扰动,对过程动态带来很大影响。常规的机组控制方案结合前馈补偿、串级等控制策略,采用基于PID线性控制算法的多个SISO反馈控制回路组成的分散控制结构,目前仍在大多数机组中获得广泛应用,但无法保证长期正常投入运行,只能用来维持生产过程的平稳运行,复杂工况需要运行人员大量的手工操作和监督控制,机组运行参数偏离经济指标较大,造成大量能量损失,增加了设备故障率,严重影响机组的经济效益和安全可靠运行。

先进和智能控制理论的发展及计算机控制技术日益广泛的应用,极大地促进了应用非常规设计方法对电厂机组控制系统的重新考察。为了解决常规机组控制系统

应用中存在的问题,适应电网综合自动化发展提出的越来越高的性能要求,人们对电厂控制对象及其控制方法进行了广泛深入的研究,提出了许多新的控制策略和设计方法,并在实际应用中取得了较好的实验效果。本章对这个领域的建模与控制方法的研究进展进行综述,对其发展方向进行分析,并对其应用前景提出见解,为提出和研究适合于工程应用且性能优化的机组控制系统设计方法提供参考和依据。

1.2 火电机组生产设备和工艺流程简介

火电机组是典型的过程控制对象,它是由锅炉、汽轮发电机组及其辅助设备组成的庞大的设备群。根据生产流程又可以把锅炉分为制粉系统、锅炉本体和风烟系统,锅炉本体则由燃烧系统和汽水系统组成,制粉系统和风烟系统用来维持燃烧系统的运行。下面以本书着重讨论的实际工程对象某电厂 300MW 机组为例具体介绍机组的生产设备和工艺流程。该电厂 300MW 机组的锅炉是瑞士苏尔寿低循环倍率褐煤塔式锅炉,汽轮机是法国 CEM 公司生产的 300MW 单轴三缸亚临界中间再热凝汽式汽轮机。锅炉的制粉系统根据机组所用燃煤品种——褐煤的特点,选用了风扇磨负压直吹式系统,主要由 S45-50 型定速风扇磨及与之配套的惯性分离器组成。图 1.1 是此机组所用 947 T/H 锅炉的示意图。

经过预处理的原煤从原煤斗经过六台链板式给煤机(17)送入落煤管(18),进入落煤管后在 24m 处落入烟风管道(31),与由空气预热器(28)出口的环形风道来的热风(温度约 297℃)、由电气除尘器的联络风道经冷烟风机吸取来的冷炉烟(温度约 130℃)以及由炉膛出口处的抽烟管(31)被风扇磨吸取来的热炉烟(温度约 1050℃)三种干燥介质相接触,在进入磨煤机前预先得干燥。初步干燥后的原煤与干燥介质一起进入风扇磨煤机(19),除被高速旋转的叶片(打击板)破碎外,还有部分大颗粒的煤被反击到机壳的护板上进一步破碎,磨煤机中的气粉混合物在风扇磨煤机叶轮作用下被吹入风扇磨煤机上部的惯性分离器(20),较粗的煤粉被分离出来由两个回粉管返回磨煤机进一步磨制;合格的煤粉与干燥介质一起继续上升经三条风粉管道和直流式燃烧器被吹入炉膛燃烧,煤粉与一次风和二次风在炉膛燃烧产生的烟气依次以辐射对流方式将热量传给水冷壁(5)、墙式过热器(7),传给高温过热器(8)、高温再热器(9)、中温过热器(10)、低温再热器(11)、省煤器(12)及烟道中的空气预热器(28)中的(汽水空气)工质,最后经电气除尘器,由引风机通过烟囱排入大气。除了直流式燃烧器以外,锅炉还设置了六支油枪。油枪主要在机组启停和较低负荷时使用。

在汽水系统中,锅炉的给水由给水泵打出,先经过高压加热器利用来自汽轮机的中、高压缸的抽汽进行预热,再经过省煤器(12)回收一部分烟气中的余热后与汽水分离器(1)下部流出的过饱和水在混合器(2)中混合,经再循环泵(3)然后进入水冷

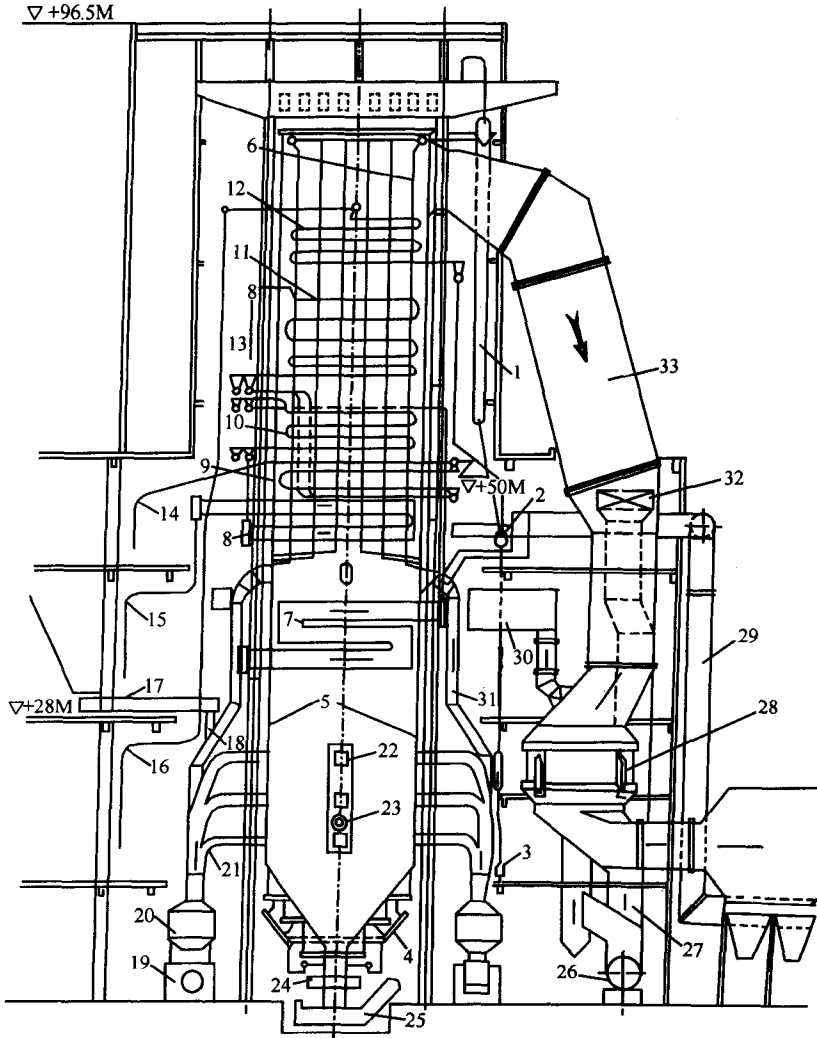


图 1.1 某电厂 300MW 机组 947 吨/时低循环倍率锅炉示意图

1—汽水分离器;2—混合器;3—循环泵;4—下联箱;5—水冷壁;6—悬吊管;7—墙式辐射过热器;8—屏式过热器;9—高温再热器;10—中温对流过热器;11—低温再热器;12—省煤器;13—再热蒸汽入口管;14—再热蒸汽出口管;15—过热蒸汽出口管;16—给水管;17—给煤机;18—落煤管;19—风磨磨煤机;20—粗粉分离器;21—一次风管;22—一次风口;23—油喷燃器;24—炉排;25—除渣机;26—送风机;27—冷风道;28—空气预热器;29—冷烟道;30—热风道;31—抽炉烟道;32—暖风器;33—烟道

壁下部联箱(4),在水冷壁(5)中进行强制循环,不断吸收炉膛辐射热量,由此产生的汽水混合物经汽水分离器(1)汽水分离后得到湿度较小的饱和蒸汽从顶部流出,经

过墙式过热器(7)、中温过热器(10)和高温过热器(8)进一步加热获得具有规定温度、压力和流量的过热蒸汽,过热蒸汽经过主蒸汽管道分两路经过两个高压主汽阀,再由四个调节阀控制,分成四股导入汽轮机高压缸第一级的四个喷嘴组,利用调节阀顺序开启来调节进入高压缸的进汽量,改变汽轮机的转速达到控制机组负荷的目的。高温高压的蒸汽经过汽轮机内部的喷嘴叶栅发生体积的膨胀,蒸汽温度压力降低,使蒸汽流速增加,热能转换成动能,高速气流以一定方向进入动叶栅,在动叶栅中改变速度产生作用力,推动汽轮机叶轮旋转,带动发电机产生电功率。为了提高热效率,需要把这部分蒸汽的能量充分利用。为此把从高压缸排出的蒸汽送回锅炉,经过低温再热器(11)和高温再热器(9)再次加热,再热蒸汽通过控制阀门顺序送入汽轮机的中、低压缸膨胀做功驱动汽轮机继续进行机电转换,最后成为乏汽从低压缸排入冷凝器,冷凝为凝结水。凝结水与补充水一起经过凝结水泵先打到低压加热器利用来自汽轮机的中、低压缸的抽汽进行预加热,然后进入除氧器去除水中的氧气,除氧后进入给水泵,从而完成汽水系统的一次循环。

为了控制主蒸汽和再热蒸汽温度,在汽水系统中设有喷水减温器,以满足对进入汽轮机高压缸的蒸汽温度和进入中、低压缸的蒸汽温度较高的控制要求。

1.3 火电机组的控制目标和控制问题的复杂性

1.3.1 系统的复杂特性描述

从控制的角度看,火电机组是具有强耦合、非线性、大惯性、参数时变和不确定因素的典型复杂热工系统。下面以上述的300MW机组为例进行说明。

1. 火电机组有多个控制量和被控量

机组负荷控制系统也称机炉协调控制系统,具有主汽压力和机组电功率两个回路,其控制量分别是给煤机总转速控制回路给定值和汽轮机调汽阀门伺服控制回路给定值。

锅炉燃烧过程控制系统包括给煤机总转速控制回路、各台给煤机转速控制回路、喷燃器风煤比控制回路、总风量控制回路、磨煤机一次风控制回路、磨煤机出口温度控制回路和炉膛负压控制回路。其控制量分别是给煤机无级变速装置的电信号给定和电信号、喷燃器二次风量、喷燃器风煤比控制回路给定校正信号、磨煤机一次风调节挡板开度、冷炉烟调节挡板开度和引风机入口导向挡板开度。

锅炉汽水分离器(汽包)水位控制系统常采用三冲量(汽包炉)或四冲量(低倍率复合循环锅炉)前馈-反馈控制结构,因为这种结构能较好地处理给水控制对象非最小相位特性带来的控制难题。其直接控制量为给水泵转速或给水调节阀开度。

过热蒸汽温度控制系统常采用分级(段)控制系统,例如上述的300MW机组过热蒸汽温度控制系统由一级喷水控制系统和二级喷水控制系统组成,其直接控制量

为各级喷水调节阀开度。

对再热蒸汽温度的控制系统,定压运行机组常采用烟气侧的调温方式作为主要控制手段,而对滑压运行机组采用喷水减温控制方式是较经济而又可靠的再热器调温方法,同时在结构上又是最简便的方法。上述的电厂 300MW 机组再热蒸汽温度控制系统采用喷水减温串级控制结构,其直接控制量为喷水调节阀开度。

2. 对象的非线性特性

机炉协调被控对象的非线性表现在:

(1) 当机组负荷在大范围变化时,对象呈现明显的非线性。K. J. Astrom^[1,2]通过对一个 160MW 单元机组大负荷范围内的系统辨识分析和物理验证,得出结论,锅炉-汽轮机对象是非线性的,并给出了一个简化的非线性数学模型。

(2) 两个控制量的控制范围受限,特别是由于采用风扇磨直吹式制粉系统,为了不使煤粉的浓度过低和相应的二次风速过低而对燃烧造成影响及磨煤机出力过低造成单位电耗增加,磨煤机最低出力应保持在额定出力的 70% 以上运行。为了不出现磨煤机出力过大而造成干燥出力不足、通风阻力过大以致使磨煤机堵塞,磨煤机最高出力应保持在额定出力的 120% 以下运行。这使得燃料量(给煤量)的调节只能在有限的范围内进行,当处于范围的两个极限时,会产生明显的非线性控制效果。

过热及再热蒸汽温度焓温通道动态特性^[3,4] $G_T(s)$ 近似为 $e^{-T_0s}/(1+Ts)^n$, 其中 $n = a_d/2$, $T = a_d T_b/n$, 具有明显的非线性。因为 T_b 几乎与机组负荷的倒数成比例, n 则与机组负荷的 0.2 次方的倒数成比例,因此当过热器或再热器出口蒸汽温度 T_0 采用喷水减温调节方式时,其调节通道的动态特性近似为具有纯滞后的多容环节特性,且此特性随机组负荷呈非线性变化。

3. 对象的惯性时间常数和时滞

机炉协调被控对象的大惯性、大滞后主要表现在从给煤量指令变化到机前主汽压力和机组负荷变化要经过给煤机、磨煤机、锅炉蒸发受热面、过热受热面等多个环节,而其中的磨制过程、蒸发过程具有非常大的惯性和滞后。由动态实验^[5]结果可知给煤量指令变化到机前主汽压力通道的纯滞后时间约为 2~4min,惯性时间约为 5~7min。

对于过热和再热蒸汽温度控制系统,当采用喷水减温控制方式时,过热和再热蒸汽温度是具有分布参数的受控对象(其调节通道动态特性描述可用多容惯性环节来近似),由减温水阶跃扰动响应动态特性实验结果^[5]可以看出,该对象特性具有较大的惯性和滞后。

4. 对象的时变特性

机炉协调控制对象由于煤粉磨制过程、蒸汽蒸发过程而存在较大的惯性和滞后,且此惯性和滞后特性随煤质变化、磨煤机的磨损情况和锅炉受热面的污染结焦情况而呈现时变性。

过热器和再热器受热面的污染结焦、管道中沉积物的增加等因素影响会导致过

热和再热汽温对象特性的慢时变。

5. 对象的强耦合特性

机炉协调对象的强耦合特性表现在:对象的任一输入变化都会影响到两个输出的变化,即

- (1) 燃料量增加,会同时使机前主汽压力和机组负荷增加;
- (2) 汽机的调汽阀门开大,会使机前主汽压力降低,机组负荷暂时增加。

经过分析^[6],当机组采用炉跟机为基础的协调控制方式时,对象的耦合非常强,具有结构上的不稳定性,必须采取解耦措施才能保证系统稳定。

锅炉燃烧过程控制对象是三输入三输出的耦合对象,但控制实践通常通过引入前馈补偿等控制方法将系统简化为三个单回路控制问题。

6. 对象的不确定性

对象的不确定性主要由于燃用的煤并不都是设计煤种,煤种、煤质的变化及磨煤机的磨损造成给煤量与出粉量之间存在着不确定的动态关系,以致会使控制量不能很好地起到其作用,对系统的稳定和控制带来很大难度。

给煤机、磨煤机随着使用时间的增长、效率的下降,会造成给煤机转数与进入炉内的煤粉量之间存在不确定的对应关系,使锅炉燃烧工况不稳定,成为锅炉侧产生频繁扰动的主要因素。

其他的不确定性还有:电网负荷的不可预测的变化;机组辅机如风机或给水泵的跳闸;发电机负荷的丧失(甩负荷)。

1.3.2 火电机组的控制目标和复杂控制任务

1. 火电机组的控制目标

对于单元机组这个复杂被控过程,其控制目标可概括为:在克服机组内部各种干扰因素的条件下,使机组以最佳的效率满足电网对机组负荷的需求,同时保持最小的机组设备寿命的损耗与机组主设备和关键辅机跳闸的最小可能性。

所谓机组以最佳的效率满足电网对机组负荷的需求,就是当电网需要快速响应负荷要求时,使机组能以接近运行极限的最大负荷跟随能力(load following capability)适应外界负荷的变化,同时使机组的主要过程变量与其最佳设定值的动态偏差和偏离时间最小,使燃料量与送风量之间保持最佳配比保证高效燃烧。机组的主要过程变量包括主汽压力和温度、再热器出口蒸汽温度。

所谓同时保持最小的机组设备寿命的损耗,就是在机组快速响应外界负荷变化的过程中,机组的主要过程变量、汽包(汽水分离器)水位和燃烧过程的关键参数都保持在规定的限度内,并使它们的波动程度和变化速率限制在规定的范围内,以保证不使金属蒸汽管道、蒸汽发生器汽包和联箱(母管)、汽轮机机壳和转子等承受过大的热应力而发生蠕变和疲劳,从而使机组设备使用寿命缩短;以保证蒸汽品质,保持

正常汽水循环,维持炉膛负压稳定。

所谓机组主设备和关键辅机跳闸的最小可能性,就是对最重要设备子系统运行约束极限条件^[7]的实时监视和评价,当机组主设备和关键辅机故障时,自动采取相应的措施,把故障限制在最小范围内,对机组负荷予以限制,通过运行方式的选择和无扰切换,保证机组在设备安全的前提下,以最大允许出力维持机组的连续运行。

2. 火电机组的复杂控制任务

为了实现上述控制目标,必须完成下列复杂的控制任务:

(1) 机组的负荷控制

机组自动控制的首要任务是机组负荷的自动控制,在克服机组内部各种干扰因素的条件下,使机组以最佳的效率满足电网对机组负荷的需求。机组负荷控制的任务在于如何控制锅炉和汽轮机各自的出力,使两者相互适应,以共同满足机组负荷的需要。机炉相互适应的标志是主汽压力的稳定程度,因此机组负荷控制系统有两个被控量:机组负荷(或电功率)和主汽压力。

(2) 锅炉燃烧过程的控制

机组的运行效率本质上依赖于锅炉燃烧过程的质量。为了适应外界负荷变化,产生所需的蒸汽量以保持主汽压力为给定值,对普遍采用直吹式制粉系统的大型燃煤机组,常用固定煤层厚度控制给煤机转速的方法调节进入磨煤机中的给煤量,从而达到间接控制进入炉膛中燃料量的目的。

在改变给煤量的同时,为保证燃烧的经济性,减少排烟热损失,还应控制一次风量、二次风量和总风量使之与燃料量之间保持最佳配比。对采用风扇磨直吹式制粉系统的300MW机组,由送风机来的冷风经空气预热器加热后得到的热风,用六条支管分别供给六台风扇磨的一次风量通过调节两台送风机的总风量来保证,每台风扇磨对应喷燃器的二次风通过调节每台喷燃器的风煤比来实现。为了保证风扇磨磨出煤粉的良好流动性,同时不发生自燃,还必须控制磨煤机出口的风粉温度保持不变。

为了不使炉膛火焰和烟尘外逸,维持燃烧的稳定性和保证设备和运行人员安全,要调节引风量维持炉膛负压稳定,一般要求炉膛压力控制在 $-10 \sim -20\text{Pa}$ 范围内。

(3) 锅炉汽水分离器(汽包)水位的控制

对于汽包炉和带有汽水分离器的低倍率循环锅炉,汽水分离器(汽包)水位反映了机组燃水比的失调程度,水位太高使饱和蒸汽带水过多,影响过热器的安全运行;水位过低则汽包炉将破坏汽水循环回路的正常工作,造成水冷壁爆管,让低倍率循环锅炉使再循环泵产生汽化,难以维持汽水循环。为保证机组的安全运行,要求汽包炉汽包水位控制在设定值附近 $\pm 50\text{mm}$ 范围内,低倍率循环锅炉汽水分离器水位控制在设定值附近 $\pm 2\text{m}$ 范围内。

(4) 过热蒸汽温度的控制

大型发电机组的过热器是在其金属管道接近极限温度的条件下工作的,且设计

的安全系数较小,因此过热蒸汽温度过高将降低管道的强度而使寿命缩短,超温严重还使汽机设备膨胀过大,造成汽机轴向推力增大而发生事故;汽温过低则影响机组效率,主蒸汽温度每降低 5°C ,机组效率降低 1% 。一般要求主蒸汽温度与其设定值的偏差不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 再热蒸汽温度的控制

大型机组为提高机组的循环热效率和减低汽耗,同时降低汽机低压缸的蒸汽湿度,普遍采用中间再热。由于汽机中、低压缸在机组正常工作时调汽阀门全开,因此再热器出口的蒸汽温度成为再热蒸汽的关键参数,也是需要严格控制的机组过程变量,再热器出口的蒸汽温度的控制要求与主蒸汽温度的相同。

除上述控制任务外,很明显机组控制系统要实现控制目标,还必须能完成下列非常规的任务^[7]:

- (a) 对最重要设备子系统运行约束极限条件的实时监视和评价;
- (b) 各相关过程效率的实时最佳化;
- (c) 机组最大可应用的负荷变动率的实时预测;
- (d) 当出现大的干扰或设备故障时控制系统结构和参数的迅速适应。

此外为了简化操作人员的工作,同时要达到最关键设备操纵的高度可重复性。控制系统经常要求能完成机组的全程自动化,例如机组的自动启动和停止及跳闸到带厂用电等。

1.4 火电机组建模与控制研究和应用状况

1.4.1 机组常规整体控制系统的应用现状分析与存在的问题

火电机组生产电能是一系列能量转换过程的结果。大致说来这个过程的主要能量传递包括:输入的燃料的燃烧,蒸汽的产生,推动机械轴的转动,生产出电能,最后是做完功后蒸汽的冷凝。所有这些能量传递过程构成了一个大的热动力学循环,并且它们之间强烈地互相关联着。

目前的机组控制策略可使得产生的电能满足电网负荷的需求,同时保持机组内部的各个能量传递过程之间的平衡,主要是使锅炉的蒸汽流量能量输出与汽轮发电机所需要的能量相匹配,以在任何时候与电网需要的电负荷相匹配。机组整体控制方案构成了整个控制系统的最上层部分,它负责将锅炉——汽轮机——发电机组作为一个整体加以操纵,机组的主要行为由电功率和主汽压力回路所支配,机组控制方案从基于PID控制算法的多个SISO控制回路组成的分散控制结构演变而来,采用的控制策略可分成三类:炉跟机、机跟炉和机炉协调控制^[8,9]。

机组控制系统广义来说是一个二级递阶控制系统。处于上位级的机组整体控制系统也称为单元机组主控系统,是整个系统的核心,可分为机组负荷管理中心(LM-