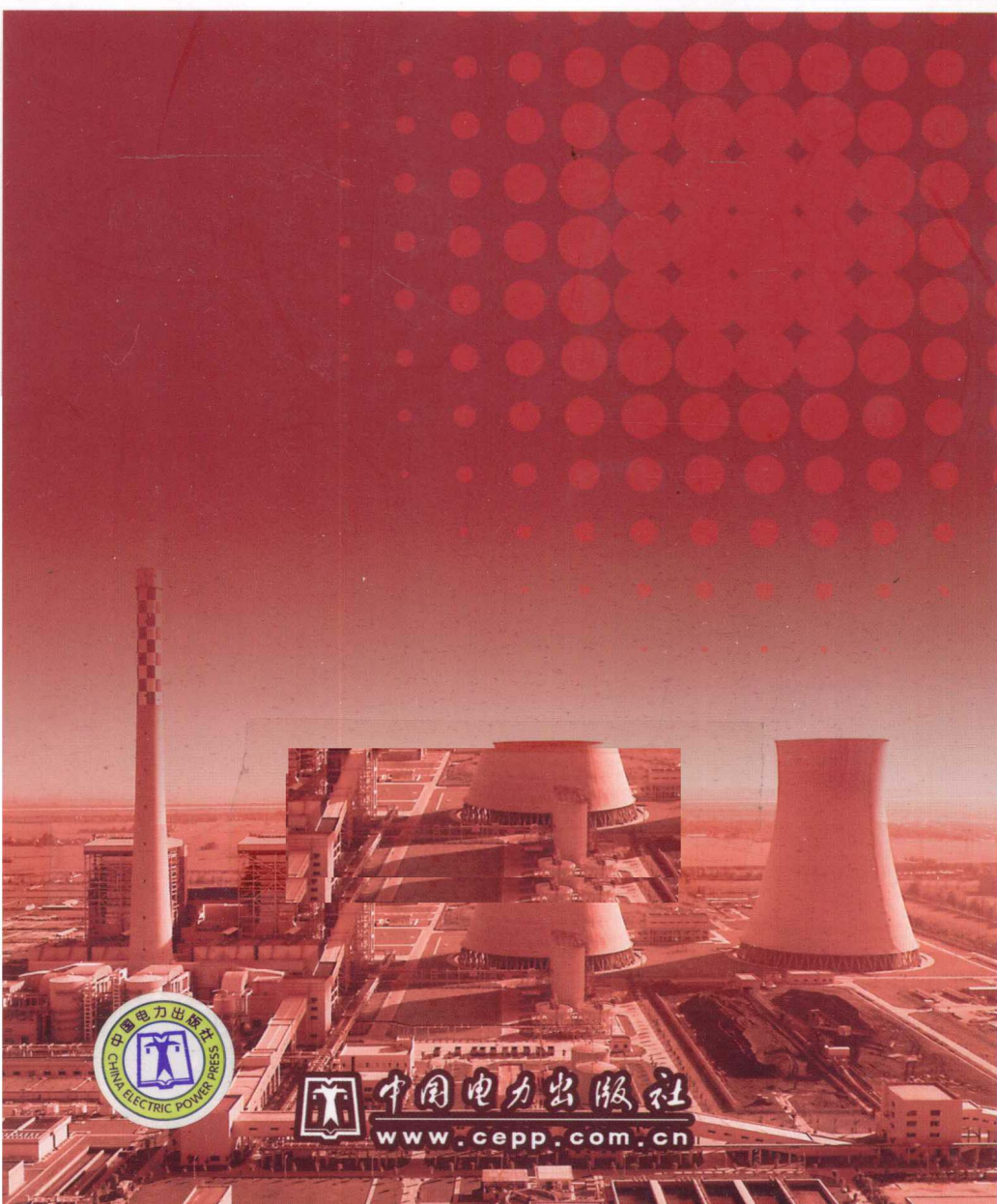


火电厂热工过程 先进控制技术

开平安 刘建民 焦嵩鸣 曹文亮 牛玉广 编著



火电厂热工过程 先进控制技术

开平安 刘建民 焦嵩鸣 曹文亮 牛玉广 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

全书分上、下两篇。上篇介绍基于控制器力学统一性的系统设计方法,把经典控制理论、现代控制理论与过程控制的工程实际需求相结合,研究了几种典型控制系统的改进设计和参数整定方法,并对其进行了力学统一性分析,本书设计的基于经典力学匀加速运动方程的系统状态观测器能够准确观测被控系统。下篇介绍热工过程计算智能方法及其应用研究,在传统神经网络算法的基础上,提出了神经网络的改进算法以及一种新型的动态递归网络;并把神经网络和混沌优化策略以及PSO算法相融合,提出了新型的基于神经网络的智能融合优化方法;针对标准遗传算法存在的问题,提出了改进的遗传算法,通过把模糊技术,量子计算引入遗传算法,提出了新型的模糊量子遗传算法;本书还设计了改进的蚁群优化算法;最后把计算智能应用于电厂热工系统,设计了基于智能计算方法的智能控制策略。

本书不仅适合发电厂控制系统的工程师使用,也适合化工和其他行业的控制工程师阅读,还可供自动控制专业的高等院校师生、科研院所的科技人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂热工过程先进控制技术/开平安等编著. —北京:
中国电力出版社, 2010. 2
ISBN 978-7-5123-0007-1

I. ①火… II. ①开… III. ①火电厂-热力工程-自动
控制系统 IV. ①TM621. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 007777 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

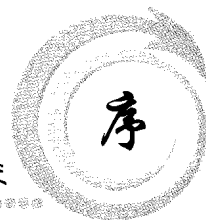
*

2010 年 4 月第一版 2010 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 332 千字
印数 0001—3000 册 定价 33.00 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



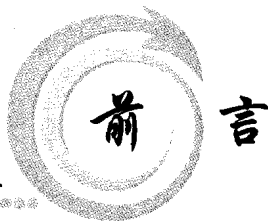
火电厂热工过程先进控制技术

由开平安、刘建民、焦嵩鸣、曹文亮、李欣欣和牛玉广编著的《发电厂热工过程先进控制技术》一书的出版，对于在我国发电厂热工过程中，采用先进控制技术，提高发电厂的自动化水平，促进节能减排具有积极的推动作用。

该书特点是理论结合工程实际，把经典控制理论、现代控制理论与发电厂热工过程实际需求相结合，对发电厂热工过程中一些老、大、难的控制系統（例如再热汽温时变大滞后系统），设计了几种控制策略和参数优化整定方法，并进行了力学统一性分析。该书能够把现代控制理论的一些理念（例如，卡尔曼滤波器、状态观测器、鲁棒控制器、自适应控制、内模控制系统、状态反馈二次型优化控制、预测控制等）设计成能够组态到发电厂分散式控制系统（DCS）的控制策略，这些工作使得该书中的先进控制技术具有实用和可操作性，从附录中可以看到该书中的先进控制技术的应用成果。

该书把现在热门研究的计算智能方法应用于电厂热工系统，设计了基于智能计算方法的智能控制策略。在传统神经网络算法的基础上，提出了神经网络的改进算法以及一种新型的动态递归网络；并把神经网络和混沌优化策略以及 PSO 算法相融合，提出了新型的基于神经网络的存在问题，提出了改进的遗传算法，通过把模糊技术、量子计算引入遗传算法，提出了新型的模糊量子遗传算法。本书还设计了改进的蚁群优化算法并应用于发电厂热工过程中控制器的参数优化和对象辨识，这是利用仿生科学设计改进热工控制系统的一个尝试。这些计算智能优化方法对于进一步提高发电厂热工过程控制系统的品质具有积极的意义。

2009年11月30日



火电厂热工过程先进控制技术

热工过程自动控制是保证电厂热力设备和系统安全、经济运行的重要措施和手段。现在我国的火电厂具有先进的控制系统硬件[分散式控制系统(DCS)、现场总线控制系统(FCS)等,大部分是引进国外的系统硬件和实时操作系统软件,例如,艾默生、ABB、西门子、福克斯波罗、日立等公司的产品]和先进的控制理论(状态反馈控制的最优控制理论、鲁棒控制理论、内模控制理论、预测控制理论、卡尔曼滤波器和状态观测器理论和系统辨识理论等),但是在我国的火力发电机组的过程控制系统中,大部分控制器还是应用传统的PID控制器,其算法简单,控制器的参数还需要人工去反复调试,这直接导致火力发电机组的某些控制系统品质不高,一些控制系统甚至达不到行业运行的技术标准。我们面临着先进的控制设备、先进的控制理论、“老式的控制器算法”的局面。

自从19世纪60年代,卡尔曼(R. E. Kalman)在控制理论中引入状态空间模型([A, B, C, D]模型)和状态变量分析以来^{[84][85][110][111][112][113][116]},开发了现代控制论的许多新领域,例如最优控制、极点配置设计、多变量系统解耦控制等。克服了经典控制理论中用传递函数描述被控对象的不足,提高了人们对控制系统本质的认识,控制系统的能控性和能观性等基本概念就是源于这个[A, B, C, D]模型的。现代控制理论中的控制器设计都依赖被控对象的数学模型[A, B, C, D],即使鲁棒控制器设计也需要模型。然而在实际工程应用中基于[A, B, C, D]模型的最优控制有两个困难,一个是[A, B, C, D]模型是很难获得的,另外一个鲁棒性能问题,即基于[A, B, C, D]模型的最优控制不能很好地解决对系统的不确定性因素带来的非最优化问题。因此关于鲁棒性控制的研究成了目前控制理论界的一大热点,但是鲁棒控制器设计要求控制工程师具有比较高深的数学知识和丰富的工程实践经验,特别是加权函数的设计,这使得鲁棒控制器不容易推广应用。

针对火电机组单机容量和参数不断提高,热工过程和系统更加复杂,过程非线性、时变性、大迟延、大惯性、强耦合性和不确定性越来越严重,建模十分困难的情况,本书对大型火电机组热工过程控制系统的优化控制策略和计算智能方法进行了研究,以解决火电机组热工过程控制系统中存在的一些问题,提高控制系统的品质指标,达到提高生产效率,节约资源,保护环境的目的。

全书共分上、下两篇,12章。本书上篇把经典控制理论、现代控制理论与火电厂热工过程控制的工程需求和现实状况紧密联系,研究了几种典型控制器的设计及参数整定方法。进行了控制系统的动力学统一性分析:虽然大多数控制器的设计方法不同,但是它们在动力学意义上具有统一性。另外,本书设计的基于经典力学匀加速运动方程的系统状态观测器能够准确观测被控系统。第1章对热工过程先进控制策略,如改进的或复

合PID控制、预测控制自适应控制、状态变量控制做了简单介绍,并对热工过程控制的研究及存在问题进行了分析。第2章提出了控制系统“时间尺度”的概念,给出了一套PID控制器参数整定方法。并详细分析了二阶系统的时域和频域特性,应用梯度最速下降方法进行系统辨识,给出了二阶系统参数变化扰动的补偿公式并据此设计了[opt优化策略]。第3章基于经典力学匀加速运动方程,构建了一种系统状态观测器(OD),设计了基于观测器(OD)组态的过程控制系统(SCOD)。第4章针对确定性大时滞对象,给出了控制系统参数整定的两步方法。第5章基于经典动力学特性,设计了一种通用控制器 $G_c(s)$ 。在此基础上分析了鲁棒控制器、内模控制器、PID控制器、状态观测器、LQ二次型优化方法和预测控制器的动力学统一性,并对这些控制器作了设计改进。第6章对非线性控制系统设计理论上的难点问题进行了探讨,就非线性控制系统的反馈线性化和基于系统间隙度指标的多线性模型建立和切换控制进行了分析。

本书下篇中的第7章对计算智能做出简单介绍并对计算智能在热工系统中的应用现状进行综述。第8章提出几种神经网络的改进算法。第9章主要研究混沌策略、PSO算法以及它们与神经网络耦合应用。第10章在研究标准遗传算法的基础上,提出针对标准遗传算法的改进算法,并应用模糊量子遗传算法对某电厂循环流化床锅炉一次风对床温的传递函数进行辨识,取得了比较理想的效果。第11章主要进行基于计算智能的热工控制系统应用方案设计。设计了单神经元神经网络控制器、基于PID神经网络逆模型的干扰观测器,并将神经网络和遗传算法应用于燃烧系统优化,仿真试验表明优化后的燃烧系统的氮氧化物排量明显降低。第12章设计了改进的蚁群优化算法并应用于热工过程中控制器的参数优化和对象辨识,这是利用仿生科学设计改进热工控制系统的一个尝试。

本书上篇中所有的控制技术和策略都可以利用目前火电机组的分散式控制系统(DCS)进行组态,使得这些控制技术和策略具有实用性和可操作性。附录1《KPAACP优化在汽包水位系统中的应用》是本书部分控制技术在大唐公司张家口发电厂4号机组给水系统控制优化项目的应用成果分析。附录2《张家口发电厂4号机组再热汽温调节改进》是本书部分控制技术在大唐公司张家口发电厂4号机组再热汽温系统控制优化项目的应用成果分析。

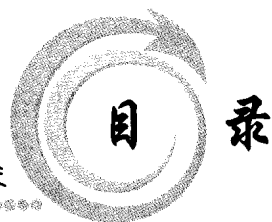
本书最后一章还设计了改进的蚁群优化算法并应用于热工过程中控制器的参数优化和对象辨识,这是利用仿生科学设计改进热工控制系统的一个尝试。

本书上篇由开平安、刘建民、曹文亮和牛玉广执笔,其中所有的控制技术和策略已经编写了软件包,这个软件包还包括模型辨识功能(需要的读者可与作者联系),下篇由焦嵩鸣、曹文亮、李欣欣和开平安执笔。曹文亮和开平安对全书做了统一筹划。

限于作者水平,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2009年11月于北京



序
前言

上篇 基于控制器力学统一性的系统设计方法

第 1 章 热工过程控制策略概述	1
1.1 概述	1
1.2 热工过程先进控制策略研究现状	2
1.2.1 改进的 PID 控制	3
1.2.2 预测控制	3
1.2.3 自适应控制	5
1.2.4 状态变量控制	6
1.2.5 热工过程控制的研究及存在的问题	7
第 2 章 基于时间尺度的 PID 参数整定和二阶系统参数辨识	9
2.1 基于时间尺度的 PID 控制器参数整定	9
2.1.1 系统的时间尺度	9
2.1.2 基于时间尺度的 PID 控制器参数整定	10
2.1.3 仿真研究.....	10
2.2 二阶系统参数辨识.....	12
2.2.1 线性时不变二阶系统描述.....	12
2.2.2 时变参数二阶系统及其参数辨识.....	13
2.3 本章小结.....	15
第 3 章 基于匀加速运动方程构建的系统状态观测器	16
3.1 卡尔曼滤波器.....	16
3.2 状态观测器.....	19
3.3 基于匀加速运动方程构建的系统状态观测器.....	21
3.3.1 理论推导.....	21
3.3.2 仿真研究.....	27
3.4 基于匀加速运动方程状态观测器构建的控制系统.....	27
3.4.1 控制系统设计.....	27
3.4.2 仿真研究.....	29

3.5 本章小结	29
第4章 大滞后控制系统的几种设计方法	31
4.1 确定性大时滞控制系统的两步整定方法	31
4.1.1 控制系统设计	31
4.1.2 仿真研究	33
4.2 时变大时滞控制系统的两种设计方法	34
4.2.1 纯滞后系统的 Smith 控制算法	34
4.2.2 史密斯预估控制系统的改进设计	35
4.2.3 基于极点配置的状态观测器及其控制系统	37
4.3 本章小结	40
第5章 几种典型控制器的动力学统一性分析及其设计改进	41
5.1 二阶系统通用控制器	41
5.1.1 通用控制器设计	41
5.1.2 仿真研究	43
5.2 鲁棒控制器	44
5.2.1 鲁棒控制系统概述	44
5.2.2 鲁棒控制器设计	46
5.2.3 仿真研究	51
5.2.4 鲁棒控制器动力学统一性分析	51
5.2.5 控制系统鲁棒性能进一步分析	52
5.3 PID 控制器	53
5.3.1 PID 控制器动力学统一性分析	53
5.3.2 非线性 PID 控制器设计	54
5.3.3 自适应(自校正)PID 控制器设计	57
5.4 内模控制系统(IMC)	60
5.5 状态反馈控制	61
5.5.1 状态反馈控制的动力学统一性分析	61
5.5.2 仿真研究	63
5.6 预测控制(GPC/MPC)	63
5.6.1 预测控制的动力学统一性分析	63
5.6.2 仿真研究	65
5.7 本章小结	66
第6章 对非线性控制系统设计的探讨	67
6.1 引言	67
6.2 反馈线性化	68
6.3 系统间隙度和非线性系统的优化控制	69

6.3.1	间隙度	69
6.3.2	间隙度的性质	70
6.3.3	仿真研究	71
6.4	本章小结	72

下篇 热工过程计算智能方法及其应用研究

第7章	计算智能概论	73
7.1	概述	73
7.2	计算智能在电厂热工系统中的应用	74
第8章	神经网络及其算法研究	77
8.1	BP神经网络及其改进算法	78
8.1.1	BP神经网络的拓扑结构及其学习算法	78
8.1.2	加入动量项的学习算法	79
8.1.3	RPROP——局部自适应的弹性更新值算法	80
8.2	RBF神经网络	82
8.2.1	RBF神经网络拓扑结构及其算法	82
8.2.2	OLS (Orthogonal Least Square) 算法	84
8.3	CMAC神经网络	87
8.4	PID神经网络	90
8.4.1	PID神经网络的拓扑结构	90
8.4.2	PID神经网络拟合能力仿真试验	92
8.5	HIOCDRN 动态递归神经网络及其在系统辨识中的应用	94
8.5.1	Elman神经网络	94
8.5.2	HIOCDRN神经网络	96
8.5.3	辨识仿真	97
8.6	本章小结	98
第9章	混沌和 PSO 算法研究及其与神经网络的混合应用	99
9.1	混沌优化策略	99
9.2	RPROP 与混沌优化耦合算法	99
9.3	PSO 算法	103
9.3.1	粒子群算法的生物模型	103
9.3.2	粒子群算法基本原理	104
9.3.3	标准粒子群算法流程	105
9.3.4	PSO 算法的设计步骤	105
9.3.5	PSO 与其他进化算法的比较	106
9.4	PSO 算法改进策略	107
9.4.1	基本 PSO 算法性能分析	107

9.4.2	动态变量区间方法和重新启动策略	108
9.4.3	改进算法性能测试	110
9.4.4	改进 PSO 算法优化主汽温控制系统 PID 控制器参数	111
9.5	基于 PSO 的 RBF 神经网络在热工系统辨识中的应用	113
9.5.1	PSO 算法中的非线性惯性因子递减策略	113
9.5.2	辨识原理分析	113
9.5.3	热工对象辨识仿真实验	115
9.6	本章小结	116
第 10 章	模糊量子遗传算法	117
10.1	标准遗传算法	117
10.1.1	遗传算法的概念	117
10.1.2	遗传算法过程	118
10.1.3	遗传算法中的编码	119
10.1.4	遗传算法中的适应度函数设计	120
10.1.5	遗传操作算子	120
10.2	改进的自适应遗传算法	123
10.3	模糊量子遗传算法	125
10.3.1	量子计算及量子编码	125
10.3.2	基于模糊规则调整的量子旋转门	128
10.3.3	模糊量子遗传算法在热工过程辨识中的应用	130
10.4	本章小结	134
第 11 章	计算智能在热工控制系统中的应用研究	135
11.1	单神经元神经网络控制器	135
11.1.1	单神经元神经网络控制器原理及算法	135
11.1.2	单神经元自适应控制器在 DCS 中的实现	137
11.2	基于神经网络的内模控制	139
11.3	神经网络预测控制	143
11.4	基于 PID 神经网络的干扰观测器设计	148
11.4.1	干扰观测器设计原理	148
11.4.2	基于 PID 神经网络逆模型的干扰观测器	148
11.5	一种基于神经网络和遗传算法的锅炉燃烧优化方法	151
11.5.1	锅炉燃烧送风控制系统及优化方案	152
11.5.2	锅炉燃烧过程建模	152
11.5.3	遗传算法寻优	153
11.5.4	仿真实验	153
11.6	本章小结	155

第 12 章 蚁群优化算法及其在热工控制系统中的应用	156
12.1 关于蚁群优化算法	156
12.1.1 概述	156
12.1.2 国内外研究动态	157
12.1.3 本章内容	158
12.1.4 基本蚁群算法及其特点	159
12.1.5 基本蚁群算法流程	163
12.1.6 基本蚁群算法的优点与不足	163
12.1.7 本节小结	164
12.2 具有分工特征的蚁群算法	164
12.2.1 算法的启发思想	165
12.2.2 连续空间中变量编码规则	165
12.2.3 三维坐标信息素体系	166
12.2.4 人工蚂蚁的行为	167
12.2.5 具有分工特征的蚁群算法模型	169
12.2.6 晋级组蚁群与工蚁群工作流程	170
12.2.7 具有分工特征的蚁群算法流程	170
12.2.8 仿真算例	170
12.2.9 本节小结	173
12.3 基于具有分工特征的蚁群算法的热工过程辨识	173
12.3.1 过程辨识的步骤和方法	174
12.3.2 基于具有分工特征的算法的热工过程辨识	174
12.3.3 过程辨识方案设计	176
12.3.4 仿真与应用研究	176
12.4 基于具有分工特征的蚁群算法的控制器参数优化	182
12.4.1 PID 控制器参数整定的研究状况	182
12.4.2 基于具有分工特征的蚁群算法的 PID 参数优化整定	182
12.4.3 应用研究	184
12.4.4 串级 PID 控制器参数整定	185
12.5 本章小结	187
附录 1 KPAACP 优化在汽包水位系统中的应用	193
附录 2 300MW 火电机组再热汽温调节	198
致谢	201
参考文献	202

第 1 章

热工过程控制策略概述

1.1 概 述

火电厂热工过程自动控制是保证电厂热力设备和系统安全、经济运行的重要措施和手段。目前热工过程自动控制广泛采用的控制策略是 PID 控制,其算法简单,鲁棒性好且可靠性高,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。但随着火电机组单机容量和参数不断提高,过程和系统均变得更加复杂,热工过程的非线性、时变性、大迟延、大惯性、强耦合性和不确定性越来越严重,对其建立精确的数学模型十分困难^[1~5]。因此,常规 PID 控制和部分先进控制的局部应用,难以获得理想的控制效果。

近几年来,国内大型热力设备的自动控制系统已采用先进的分散控制系统(DCS),这为先进控制理论的应用提供了良好的实现条件。但目前绝大多数大型发电厂的关键自动控制系统几乎均采用常规的线性 PID 控制策略,难以适应机组深度调峰的需求,以及在大范围负荷变动下取得优良的控制品质,影响了发电系统运行的安全性、经济性和可调性。

例如:大型火电机组锅炉过热汽温和再热汽温控制^[6~11],仍采用常规的串级控制系统,汽温对象的动态特性具有非常大的迟延和惯性,且运行过程和喷水阀存在严重的非线性,使得当机组负荷变化时,汽温往往偏离设定值 8~10℃,控制效果不够理想。再如:汽压被控对象也是一个大滞后的对象,即当从燃料量变化,到锅炉蒸汽压力的变化响应需要很长的时间。对于大滞后被控对象,常规控制方案无法协调好控制系统稳定性、准确性和快速性之间的矛盾。同时,大型火电机组的负荷系统是一个多变量非线性动态系统,它的动态特性随工况的变化而大范围变化^[12~15]。基于传统控制规律的机、炉协调控制系统,只是根据机组在某一负荷点及其附近的对象特性来设计的,当机组的负荷大范围变化时,被控对象的动态特性往往变化很大。因此,采用常规控制策略对电站热工控制系统进行优化,控制品质的提高必定会受到限制。

因此,研究适合于大型火电机组热工过程控制系统的优化策略,对解决目前热工系统优化控制中的一些难点问题,有效提高火电机组整体自动化水平,确保其运行的安全性、经济性和可靠性具有重要的意义^[16~20]。

1.2 热工过程先进控制策略研究现状

工业过程控制系统的发展是随着控制理论和控制技术(设备)前进的。工业过程控制系统的设备进步经历了:自动化控制装置(集测量仪器、执行机构、控制器于一体,例如瓦特1788年发明的蒸汽机转速控制离心式调节器),由电子元件/汽动元件组成的电动/汽动仪表控制器(例如,DDZ型仪表、QDZ型仪表),微机直接数字控制(DDC),分散式控制系统(DCS),现场总线控制系统(FCS)四个时期。1975年美国最大的仪表公司之一 Honeywell 首次推出它的综合分散控制系统 TDC-2000,目的是针对生产规模大,过程参数和控制回路多为特点的生产过程,同时充分利用工业控制计算机的高可靠性和灵活性。起始于20世纪70年代的分散式计算机控制系统是集计算机技术、控制技术、通信技术和图形显示(CRT)所谓4C技术于一体的计算机系统,一经问世,就受到工业界的瞩目。从此计算机在工业生产过程控制方面的应用进入一个新的发展阶段,即分布式计算机控制系统的新时代。

经典控制理论和PID控制器的广泛应用,起始于1900年前夕,其特征为在不同应用领域中对控制过程用严格的数学方法进行研究。1895年,劳斯(E. Routh)^[12]和胡维茨(A. Hurwitz)^[13]提出了稳定性的代数判据。1932年,奈奎斯特(H. Nyquist)^[14]根据频率特性曲线提出了新的稳定性分析方法。20世纪40年代,控制对象用传递函数进行数学描述,以根轨迹法和频率法作为分析和综合控制系统的主要工具,被称为“经典”控制理论,产生了自动控制动态过程最初的完整的数学处理^{[15][16]}。

现代控制理论起始于1960年前后,这些方法包括以最小二乘法为基础的系统辨识,以前苏联庞德里亚金(L. Pontrjagin)^[17]提出的“极大值原理”和美国贝尔曼(R. Bellman)^[18]提出的“动态规划”为主要方法的最优控制和以卡尔曼(Kalman)^[19]提出的卡尔曼滤波理论为核心的最佳估计等三部分。自从20世纪60年代,卡尔曼在控制理论中引入状态空间模型([A, B, C, D]模型)和状态变量分析以来,开发了现代控制论的许多新领域,例如最优控制、极点配置设计、多变量系统解耦控制等,克服了经典控制理论中用传递函数描述被控对象的不足,提高了人们对控制系统本质的认识,控制系统的能控性和能观性等基本概念就是源于这个[A, B, C, D]模型。这些现代控制方法的原理要求使用控制系统新的描述方式即状态空间描述,特别适用于多变量控制系统的研究,在空间技术和军事领域得到成功的应用。与此同时,采样控制、非线性控制^[20]得到了进一步的发展。现代控制理论是人们对控制技术在认识上的一次质的飞跃,为实现高水平的自动化奠定了理论基础。现代控制理论中的控制器设计都依赖被控对象的数学模型[A, B, C, D],即使鲁棒控制器设计也需要模型。然而在实际工程应用中基于[A, B, C, D]模型的控制有两个困难,一个是[A, B, C, D]模型是很难获得的,另外一个鲁棒性能问题,即基于[A, B, C, D]模型的最优控制不能很好地解决对系统的不确定性因素带来的非最优化问题,因此关于鲁棒性控制的研究成了目前控制理论界的一大热点。但是鲁棒控制器设计要求控制工程师具有比较高深的数学基础知识和丰富的工程实践经验,特别是加权函数的选择,标称模型的选择和对系统不确定性判断的困难,同时设计出的鲁棒控制系统品质指标不一定好于PID控制系统,使得鲁棒控制器不容易推广应用。这就是现代控制理论为什么发展了这么多年还没有广泛应

用的主要原因。

现在我国的火电厂具有先进的控制系统硬件 [分散式控制系统 (DCS), 现场总线控制系统 (FCS) 等, 大部分是引进国外的系统硬件和实时操作系统软件] 和先进的控制理论 (状态反馈控制的最优控制理论、鲁棒控制理论、内模控制理论、预测控制理论、卡尔曼滤波器和状态观测器理论和系统辨识理论等)。但是在我国的火力发电机组的过程控制系统中, 大部分控制器还是应用传统的 PID 控制器, 算法简单, 控制器的参数还需要人工去反复调试, 这直接导致火力发电机组的某些控制系统品质不高, 一些控制系统甚至达不到行业运行的技术标准。我们面临着先进的控制设备, 先进的控制理论, “平庸的控制器” 这样一种局面。目前, 学术界所研究、开发出来的控制策略 (算法) 很多, 但其中许多算法只停留在计算机仿真或实验装置的验证上, 真正能有效地应用在火电厂热工系统中的为数不多, 以下是一些较公认的先进控制策略 (算法)。

1.2.1 改进的 PID 控制

PID 控制因其具有结构简单、容易实现、鲁棒性强和能够实现无差调节的特点, 在传统的热工控制系统中得到了广泛的应用。然而, 常规的 PID 控制器是线性的, 适用于小惯性、小滞后的过程, 当把 PID 控制应用在线性、大时滞、参数不确定的系统时, 很难获得满意的控制效果。因此, 近年来, 很多学者将其他方法和 PID 控制结合起来, 在线调整 PID 参数来处理各种不确定性、非线性以及大时滞, 这是热工自动化控制的一个很好的发展方向。

为了解决大惯性、大滞后过程的控制问题而又无需建立被控过程的数学模型, 可以采用一种模糊预估 PID 控制方法, 即在常规 PID 控制器前串联一个模糊预估器, 通过模糊预估器对过程未来输出的预估作用来补偿被控过程的惯性和滞后对控制系统性能的影响, 从而有效防止当被控过程的纯滞后较大时, PID 控制系统出现严重的超调和振荡, 有利于抑制扰动。对于不确定时滞热工过程, 常规的 PID 控制往往不能做到及时调节, 造成了控制品质的下降。将调节器输入的被控量的偏差根据被控量的大小和其变化速率、方向以及时间关系, 先进行预补偿, 然后再经过 PID 控制器运算输出, 可以使控制品质得到有效改善, 补偿后的系统对控制对象的特性变化适应性更好。

文献^[21]将模糊控制与常规 PID 控制有机结合起来形成模糊 PID 控制器, 结合现场运行人员的经验和专家知识建立模糊规则和模糊推理, 应用在锅炉汽温调节系统中, 用一组模糊校正规则, 实时地对锅炉主汽温串级控制系统主 PID 控制器的参数进行在线调整, 使 PID 控制器能根据系统运行情况进行变参数调节, 从而提高了系统对非线性、时变性和不确定性等的处理能力。文献^[23]将模糊 PID 控制器应用于锅炉一次风压的控制系统中, 建立了模糊控制规则, 根据被调量的偏差和被调量的变化率来选择不同的控制规律。文献^[26]提出了适配值函数选择的一般原则和遗传算法的自适应机制。利用遗传算法自动仿生寻优随机算法, 在线优化 PID 参数, 并将其运用到电厂锅炉过热汽温的 PID 参数优化控制中。

1.2.2 预测控制^[11]

预测控制不是某一种统一理论的产物, 而是在工业实践过程中独立发展起来的。它是由美国和法国几家公司在 20 世纪 70 年代先后提出来的, 一经问世, 就引起了工业控制界的广

泛兴趣，在石油、化工和航空等领域中得到十分成功的应用。

预测控制算法通常可分为两类：第一类是基于非参数化模型的预测控制。最早应用于工业过程的预测控制算法，有 Richalet、Mehar 等提出的基于脉冲响应模型的模型预测启发式控制 (MPHC)，或称为模型算法控制 (MAC)，以及由 Culter 等提出的基于阶跃响应模型的动态矩阵控制 (DMC)，它们均是基于非参数模型的预测控制算法。由于这类算法用来描述过程动态行为的信息，是直接从生产现场检测到的过程响应（脉冲响应或阶跃响应），且不要求对模型的结构有先验知识，所以不必通过复杂的辨识过程便可设计控制系统。这类算法汲取了现代控制理论中的优化思想，取代了传统的最优控制。由于在优化过程中利用实测信息不断进行反馈校正，所以在一定程度上克服了不确定性的影响，增强了系统的鲁棒性。此外，这类算法的在线计算比较简易。这些特点使它们很适合工业过程控制的实际要求。因此，这类算法引起了工业控制界的广泛兴趣。第二类是基于参数化模型的预测控制。这类算法主要有 Clarke (1987) 提出的广义预测控制 (GPC) 和 Lelic 提出的广义预测极点配置控制 (GPP) 等。这类算法保持了基于非参数模型的预测控制算法的基本特征，不同点在于所采用的模型是具有一定结构和参数的受控自回归积分滑动平均模型 (CARIMA)，或者受控自回归滑动平均模型 (CARMA)。由于参数模型是最小化模型，需要已知模型结构，而需要确定的参数比非参数模型少得多，减小了预测控制算法的计算量，但当模型结构和参数时变且存在未建模动态和扰动时，系统的鲁棒性有所削弱。另一方面，由于采用了大时域长度的多步输出预测、滚动实现优化的控制策略，来取代原来的只采用一步预测优化的广义最小方差控制策略，并引进自适应控制中的在线递推来估计模型参数。这样，所获取的反映过程未来变化趋势的动态信息量较丰富，系统的控制性能和对模型失配的鲁棒性有所提高；由于过程参数时变所引起的预测模型输出误差的增大趋势得以及时克服和弥补，从而使系统的动态性能有所改善。但它对模型结构的变化和未建模动态对系统鲁棒性的影响，仍然是一个不容忽视的问题。

无论是基于非参数模型的预测控制还是基于参数模型的预测控制，它们之所以一经产生就引起了工业控制界的广泛兴趣并得到许多成功的应用，主要是因为预测控制算法有以下三个显著特点：

(1) 模型预测。预测控制是一种基于模型的控制算法，这一模型称为预测模型。预测模型的功能是根据对象的历史信息和未来输入预测其未来输出。这里只强调模型的功能而不强调其结构形式。因此，状态方程、传递函数这类传统的数学模型可以作为预测模型。对于线性稳定对象，阶跃响应、脉冲响应这类非参数模型，也可直接作为预测模型。此外，非线性系统、分布参数系统的模型，只要具备上述功能，也可以在对这类系统进行预测控制时作为预测模型使用。

(2) 滚动优化。预测控制是一种优化算法，它是通过某一性能指标的最优来取得未来的控制作用的。它与通常的离散最优控制算法不同，不是采用一个对全局相同的优化性能指标，而是在每一时刻有一个相对于该时刻的优化性能指标。不同时刻优化性能指标的相对形式是相同的，但其绝对形式，即所包含的时间区域，则是不同的。因此，在预测控制中，优化不是一次离线进行的，而是反复在线进行的，这就是滚动优化的含义，也是预测控制区别于传统最优控制的根本点。

(3) 反馈校正。预测控制是一种闭环控制算法。由于实际系统中存在非线性、时变、模型失配、干扰等因素的影响,基于不变模型的预测输出不可能与系统的实际输出完全一致,而在滚动实施优化过程中,又要求模型输出与系统实际输出保持一致,为此,在预测控制算法中,采用检测实际输出与模型输出之间的误差进行反馈校正来弥补这一缺陷。反馈校正的形式是多样的,可以在保持预测模型不变的基础上,对未来的误差作出预测并加以补偿,也可以根据在线辨识的原理直接修改预测模型。不论采取何种校正形式,预测控制都把优化建立在系统实际的基础上,并力图在优化时对系统未来的动态行为作出比较准确的预测。因此,预测控制中的优化不仅基于模型,而且利用了反馈信息,因而构成了闭环优化。由上述可知,预测控制是一种基于模型、滚动实施并结合反馈校正的新型计算机优化控制算法。

由于预测控制具有优良的性能,国内外不少学者对预测控制在火电机组热工过程控制中的应用进行了一些研究。文献[27]将模糊控制和预测控制相结合,提出模糊预测控制方法,并应用该方法对火电厂锅炉过热汽温控制进行了仿真研究。仿真结果表明,该系统具有优良的控制性能和很强的鲁棒性;文献[28]介绍了基于非线性模型的预测控制,并对锅炉负荷控制系统进行了全工况的仿真研究;文献[29]通过神经网络模型来辨识被控对象的全局动态模型,并给出了基于神经网络模型的非线性全局预测控制算法,应用于锅炉的主蒸汽温度和主蒸汽压力控制系统中;文献[30]给出了一种改进的广义预测控制算法,引入阶梯式控制策略,增强算法的鲁棒性和抗干扰能力,实现主蒸汽压力的控制;文献[31]将基于模型的预测控制应用于电站的控制中,将预测控制与人工智能方法相结合,用来解决电厂控制中的最优化问题;文献[32]将普通的预测控制优化方法与遗传算法的优化方法有机地融合起来,用遗传算法来监督整个优化过程。文献[33]将预测函数控制推广应用到200MW火电机组的多变量再热汽温系统;文献[35]将模型算法控制技术应用于锅炉制粉系统的磨煤机控制中,实际运行结果表明,该控制系统使磨煤机能自动地保持在经济工况下运行,取得了较好的经济效益。

1.2.3 自适应控制

任何受控系统都存在不确定性,仅强弱程度不同而已。而自适应控制的对象是那些存在不确定性的系统,所以这种控制应首先能在控制系统的运行过程中,通过不断地量测系统的输入、状态、输出或性能参数,逐渐了解和掌握对象。然后根据所得的过程信息,按一定的设计方法,做出控制决策去更新控制器的结构、参数或控制作用,以便在某种意义下使控制效果达到最优或次最优,或达到某个预期目标。按此设计思想建立的控制系统的便是自适应控制系统。它具有3个基本特征:

(1) 过程信息的在线积累。在线积累过程信息的目的,是为了降低受控系统原有的不确定性。

(2) 可调控制器。可调控制器是指它的结构、参数或信号可以根据性能指标要求进行自动调整。这种可调性要求是由受控系统的不确定性决定的,否则就无法对过程实现有效的控制。

(3) 性能指标的控制。性能指标的控制可分为开环控制方式和闭环控制方式两种。开环控制的特点是没有根据系统实际达到的性能指标再作进一步的调整。与开环控制方式不同,

在性能指标的闭环控制中，还要获取实际性能与预定性能之间的偏差信息，将其反馈后修改可凋控制器，直到实际性能达到或接近预定性能为止。

目前，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自适应控制。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，20 世纪 80 年代已在 200MW 单元机组的亚临界汽包炉上第一次通过验证。所谓多步自校正控制器是按多变量编程单输入单输出控制器，系统中把自校正控制器接入模拟式串级控制回路，且代替主 PID 控制器。电厂和模拟试验结果证明，用多步控制准则的自适应控制器能改善过热汽温控制效果，解决了内环动态特性和非线性特性及采样周期的选择等问题。

对于不确定系统，自适应控制在提高控制品质与鲁棒性方面是有效方法。目前自适应控制的研究仅限于对象模型结构已知（阶次、时延及有关扰动特性等）；对结构未知、不确定系统具有不可测输出干扰时，采用通常的自适应控制方法往往会出现不稳定现象。鲁棒控制、自适应控制等控制方式的共同特点（也是经典控制方式的最大局限性）是必须建立被控对象的数学模型，但是对于许多复杂系统（包括非线性系统、非确定性系统以及病态结构系统）都难以建立满足控制要求的数学模型，另一方面有些计算机控制系统因模型本身不准（包括噪声特性），在控制效果上不尽如人意。G. C. Goodwin 等人认为出现不稳定现象的根本原因在于现存的自适应算法都没有从鲁棒控制器出发。因此，目前自适应控制的热点是寻找不确定系统的鲁棒性自适应算法，以及在系统动态特性慢变化特定条件下提高控制系统的性能。

1.2.4 状态变量控制

从 20 世纪 60 年代开始发展起来的现代控制理论，已经在许多控制领域显示出相对于经典控制理论的优越性，并在现代工业控制中发挥着重要作用。现代控制理论中系统的极点配置、整定、输入—输出解耦和干扰解耦、无静差渐近跟踪和线性二次型最优控制等，都要依赖于引入适当的状态反馈才能实现。但是，状态反馈的物理实现通常会遇到许多困难，甚至不可能实现，从而出现了状态反馈在性能上的不可替代性和在物理上的不能实现性之间的矛盾。解决这一矛盾的途径之一就是重新构造一个系统，利用原系统可直接测量的变量作为其构造系统的输入信号，并使构造系统的状态在一定的约定下等价于原系统的状态，然后用构造系统的状态来实现所要求的状态反馈^[1]。

然而在工业过程控制中，状态变量控制的应用研究仍处于起步阶段。因为在工业过程控制中，由于有些被控过程和被控对象的复杂性和不可预见性，导致对对象的动态特性研究不充分，没有获得其精确动态数学模型的有效手段。

对于给定的不确定性被控对象，当被控对象的状态不能直接检测时，可以通过引入状态观测器解决。在设计状态观测器时，通过恰当地选择观测器的参数，能够使得闭环系统的性能逼近或恢复到状态反馈系统所能达到的性能水准。因此，采用状态变量控制时，状态观测器的设计是系统具有良好鲁棒性的关键。状态观测器要保持较好的性能，关键在于保证其模型误差具有鲁棒性，以及引入观测器后系统开环传递函数的变化要小。一方面，状态观测器的动态特性不是越快越好，实际上当观测器的动态过程变快时，系统的鲁棒性降低了。另一方面，观测器对生产过程中的噪声和干扰应当具有很好的抑制作用。同时，还必须能克服