



学校代码 10459

学 号 Z201018295

密 级

郑 州 大 学

专业硕士学位论文

300MW 机组过热蒸汽温度
控制系统建模与仿真

作 者 姓 名: 赵津津

导 师 姓 名: 王杰(教授)

专业学位名称: 控制工程

培 养 院 系: 电气工程学院

完 成 时 间: 2013 年 5 月



A dissertation submitted to
Zhengzhou University
for the degree of Master

Modeling and Simulation for the Superheated Steam
Temperature Control System in 300MW Unit

By Jinjin Zhao
Supervisor: Prof. Jie Wang
Control Theory & Control Engineering
Electrical Engineering School

May, 2013

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者：赵津津

日期：2013年5月27日

学位论文使用授权声明

本人在导师指导下完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属郑州大学。根据郑州大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权郑州大学可以将本学位论文的全部或部分编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或者其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该学位论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为郑州大学。保密论文在解密后应遵守此规定。

学位论文作者：赵津津

日期：2013年5月27日

摘要

在火力发电厂生产过程中，工作在高温、高压条件下的过热蒸汽温度是锅炉汽水系统中工质的最高温度。作为火力发电机组中的主要参数，过热蒸汽温度的测量和控制对于电厂的安全、经济运行具有重要的作用。过热器是一个多容而且延迟比较大的惯性环节，影响过热蒸汽温度的扰动因素比较多，彼此之间相互影响。在各种不同的扰动因素作用下，过热蒸汽温度随时间变化的动态关系也各不相同，这就增加了过热蒸汽温度控制系统的复杂程度。

在分析过热蒸汽温度控制的意义、过热蒸汽温度控制对象的特性（包括静态特性和动态特性）的基础上，本文应用 MATLAB 中的 SIMULINK 动态仿真软件分别采用常规 PID 控制器和自适应模糊 PID 控制器构建了洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组过热蒸汽温度控制系统的结构模型，实现了两种控制系统的仿真分析比较。理论结果表明，基于自适应模糊 PID 控制的过热蒸汽温度控制系统具有良好的动、静态特性，比常规控制方案具有更好的控制效果。

关键词：过热器 过热蒸汽温度 动态特性 MATLAB SIMULINK 仿真 常规控制 模糊控制

Abstract

In the process of the thermal power plant production, superheater works under the condition of high temperature and high pressure, thus the superheated steam temperature is the highest in the steam water system. As a main parameter in the thermal power generating units, superheated steam temperature measurement and control act an important role for power plant safety and economic operation. The superheater is a multi-container link with bigger delay and more inertia. The superheated steam temperature is affected by many disturbance factors, among which influence each other. For these different kinds of disturbance factors, each superheated steam temperature dynamic characteristics are not identical, and this will increase the superheated steam temperature control system complexity.

Based on the analysis of the significance of superheated steam temperature control and the characteristic of superheated steam temperature, the SIMULINK in MATLAB is adopted to simulate conventional PID controller and fuzzy adaptive PID controller to construct the model of the control system respectively in this dissertation, and these two kinds of control system simulation analysis are realized. The results demonstrate that the latter controller is superior to the former one in many aspects.

Key Words: Superheater; Superheated steam temperature; Dynamic characteristic; MATLAB; SIMULINK; Simulation; Conventional control; Fuzzy control

目录

第一章 引言	1
1.1 火力发电厂热力过程自动化的重要意义	1
1.2 智能控制的理论基础	2
1.2.1 智能控制的定义和特点	2
1.2.2 智能控制系统的基本类型	3
1.3 课题研究的背景和意义	5
1.4 设计的主要工作	6
第二章 常规过热蒸汽温度控制系统	8
2.1 汽包锅炉的工艺流程	8
2.2 汽包锅炉自动控制系统	9
2.3 过热蒸汽温度控制的意义	10
2.4 蒸汽温度控制对象的特性	12
2.4.1 静态特性	12
2.4.2 动态特性	15
2.5 洛阳首阳山电厂 300MW 机组蒸汽温度控制系统	20
2.6 本章小结	27
第三章 模糊控制的理论基础	28
3.1 模糊控制的特点	29
3.2 模糊控制系统的组成	30
3.3 模糊控制器	31
3.4 本章小结	40
第四章 蒸汽温度控制系统的分析和设计	41
4.1 MATLAB/SIMULINK 概述	41
4.2 蒸汽温度串级控制系统的分析	41

4.2.1 蒸汽温度控制对象的动态特性.....	41
4.2.2 蒸汽温度串级控制系统的参数整定和仿真.....	44
4.3 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统设计与仿真.....	52
4.4 本章小结.....	62
第五章 结论与展望.....	63
5.1 主要结论.....	63
5.2 后续工作展望.....	64
参考文献.....	65
致谢.....	67
附录 个人简历、攻读学位期间发表论文与研究成果.....	68
1. 个人简历.....	68
2. 攻读学位期间发表论文.....	68
3. 研究成果.....	68

第一章 引言

1.1 火力发电厂热力过程自动化的重要意义

随着我国经济的高速发展，科学技术的不断进步，电力工业在国民经济和社会发展中具有重要作用，火力发电机组逐渐向“大容量、高参数、高自动化”方向发展，对电网的安全、经济要求越来越高。火力发电机组容量越大，设备结构越复杂，因此随着微处理机技术和数字通信技术的迅猛发展，以数字电力系统（DPS）为代表的计算机技术、通信技术、控制技术和 CRT 显示技术为基础的计算机分散控制系统广泛应用于大型发电机组，电厂热力过程自动化迎来了前所未有的发展机遇。

在火力发电厂中，实现热力过程自动化具有重要意义：

（1）提高机组运行的安全性和可靠性。在现代大型发电机组中，随着机组容量的增大和参数的提高，热力设备的结构和热力系统越来越复杂，在运行中需要监视、控制的项目显著增多，参数变化的速度加快，如果仅靠操作人员完成监视和操作，不仅劳动强度大，而且极易由于人为误操作而造成事故，所以必须采用自动化仪表来完成监视和操作。

（2）提高机组运行的经济性。自动化仪表可以保护机组在良好状态下运行而延长使用寿命，因此，可以减少事故停机的损失和设备检修费用，提高热效率，降低燃料消耗和发电成本。

（3）减少操作人员劳动强度，提高劳动生产率，改善劳动条件。实现生产过程自动化，可以使操作人员从繁忙的体力劳动和紧张的精神负担中解脱出来，除了在机组启停时进行某些操作外，正常运行时只需要在控制室内集中监视主设备及自动化仪表的运行情况。

1.2 智能控制的理论基础

自动控制指在没有人直接参与的情况下，利用外加的自动化仪器仪表或者利用自动控制装置（包括计算机和计算机网络）代替人对机器、设备或生产过程的某个运行参数或工作状态进行控制，使被控制的物理量保持恒定或者按照一定的要求变化。伴随着工业技术发展和人类探索自然的需求，自动控制理论研究问题的思路和方法不仅在工业中得到发展，而且逐步渗透到人类生活的各个方面，对人类的发展产生了巨大的影响。作为一门自然学科，自动控制理论自二十世纪三十年代到四十年代的形成到现在，大致可以分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个阶段。

1.2.1 智能控制的定义和特点

作为自动控制发展的高级阶段，智能控制（Intelligent Control, IC）是一种将智能理论应用于控制领域的模型描述、系统分析、控制设计与实现的控制方法^[1]。所谓智能，指人在认识或实践活动中所具有的感知观察能力、记忆能力、逻辑思维能力和语言表达能力等综合心理机能。智能控制是能够在复杂变化的环境下，根据不完整和不确定的信息，模仿人的思维方式，使复杂系统自主达到高层综合目标的一种控制技术。按照 K. S. Fu(傅京孙)和 G. M. Saridis 的观点，自动控制、人工智能与运筹学三个主要学科的结合和交叉，就产生了智能控制^[2]。

近年来，随着科学技术的迅速发展，作为一门高度综合与集成众多学科的新兴边缘交叉学科，智能控制不但包含了自动控制、人工智能、系统理论和计算机科学方面的内容，而且汲取了生物学、心理学等学科中丰富的营养，成为目前在世界范围内和自动化领域中最活跃和具有挑战性的一个分支学科，并被许多发达国家确认为在二十一世纪提高国家竞争力的核心技术。

和传统的自动控制系统比较，智能控制系统具有以下特点^{[1][3]}：

(1) 智能控制系统能够对来源于未知环境的信息实现鉴定、记忆、学习、分析、整合和推理，并不断地对知识和经验的积累进行优化，改善和增强自己

的控制水平，具有一定的自学习能力。

(2) 智能控制系统具有自动获取控制对象特性和外部环境的相关信息的能力。在外部环境因素发生较大的不可预知的变化时，控制系统能够根据控制要求，在线不断地改进控制方案和系统结构，较好地主动适应控制对象动态特性、外部环境和生产过程运行工况的变化，使控制系统的品质指标满足期望，体现出高度的自主性、适应性和鲁棒性。

(3) 智能控制系统采用多级递阶控制，由组织级、协调级和执行级三个控制级组成，彼此之间遵循“智能下降，精确度增加”的基本原则，分别完成组织、协调和执行的控制任务，具有很高的可靠性。其中，组织级是智能控制的核心环节，通过友好的人-机接口和操作人员交互，分析、综合操作人员的命令，根据控制系统获取的自身状态和外部环境等相关信息对协调级和执行级的动作行为进行监督并指导，智能水平最高；协调级是联系组织级和执行级的中间环节，可以进一步划分为控制管理层和控制监督层；执行级直接控制或驱动相关设备完成规定的控制动作，具有比较高的精确度。

(4) 智能控制系统可以主动地诊断控制系统的各种故障并进行屏蔽或者修复，满足多样性目标和高性能指标的控制要求，具有一定的容错能力。

(5) 智能控制系统具有比较强的实时性、准确性和快速响应能力。

(6) 智能控制系统的数学模型既可以是基于传统数学方法的表示，也可以是非数学的以知识形式表示的广义模型，采用开环和闭环以及定性和定量相结合的控制方式，因此可以完成比较复杂控制任务。

1.2.2 智能控制系统的基本类型

作为当今国内、外自动化学科中一个十分活跃和具有挑战性的领域，智能控制代表着当今科学和技术发展的最新方向之一，但是至今没有建立起一套完整的理论体系，因此智能控制是一门正在蓬勃发展和丰富中的具有众多学科集成特点的科学和技术。目前正在开发和应用的智能控制系统有以下几种基本类型^[4]：

(1) 多级递阶控制系统

作为最早的一个智能控制系统,从系统工程的角度来看,多级递阶控制系统是为了实现复杂系统的有效控制,在人工智能和自学习控制、自适应控制和自组织控制的基础之上逐渐形成的。

(2) 专家控制系统

专家控制系统(包括仿人智能控制和智能PID控制)是将专家的知识 and 经验与常规PID控制相结合的产物,它可以在不完全、不精确或不确定的信息基础上,依靠知识和推理,模拟专家的思维分析和解决某种特定专业领域的专业技术问题。

(3) 自学习控制系统

自学习控制系统具有一定的辨别、判断、记忆和调整的能力,指能通过学习自动获取控制对象和外界环境的未知信息,并利用获取的信息和积累的经验不断调整系统结构或控制器的结构和参数,使控制品质提高和改善的控制系统。

(4) 模糊控制系统

模糊控制系统主要以模糊数学、模糊语言形式的知识表示、专家知识或操作人员长期积累的控制经验给出的模糊控制规则为理论基础,应用从微型到大型的通用或专用计算机参与控制并借助输入输出接口、传感器和执行机构与控制对象相联系,为实现一定控制目的而构成的非线性的闭环控制系统,适用于难以建立精确数学模型的控制对象,但是很难做到高精度控制。

(5) 人工神经网络控制系统

由微观上模拟人脑结构和信息处理功能的人工神经网络进行信息的处理、判断、决策、联想、记忆和学习,实现某些智能和仿人控制。

(6) 各种智能控制技术的交叉和结合

为了发挥各种不同智能控制技术的优点,克服它们各自的缺点和不足,将两种或两种以上的智能控制技术按照优势互补原则交叉和结合在一起,就形成了集成智能控制系统,如专家模糊控制系统、模糊神经网络控制系统、专家神经

网络控制系统等。

(7) 各种智能控制技术与传统控制技术的交叉和结合

这两种控制技术交叉和结合形成的控制系统既能发挥智能控制技术的优点，又能发挥传统控制技术的优点，如自适应模糊控制系统、自适应神经网络控制系统、专家模糊 PID 控制系统等。

1.3 课题研究的背景和意义

在火力发电厂生产过程中，工作在高温、高压条件下的过热器出口蒸汽温度，即过热蒸汽温度是锅炉汽水系统中工质的最高温度，也是金属管壁的最高温度。作为火力发电机组中的主要参数，过热蒸汽温度的测量和控制对于电厂的安全、经济运行具有重要的作用^[5]。过热器是一个多容而且迟延比较大的惯性环节，影响过热蒸汽温度的扰动因素比较多，彼此之间相互影响，其中主要包括：锅炉负荷、炉膛火焰中心位置、过量空气系数、给水温度、吹灰蒸汽用量、饱和蒸汽含湿量等。在各种不同的扰动因素作用下，过热蒸汽温度随时间变化的动态关系也各不相同，这就增加了蒸汽温度控制系统的复杂程度^[6]。通常情况下，过热蒸汽温度控制的基本要求是：

(1) 克服各种扰动因素影响，维持过热蒸汽温度稳定，保证合格的蒸汽品质。

(2) 保护过热器的金属管壁材料温度不超过许用温度。

因此，我们必须采用适当的控制方案对过热蒸汽温度进行控制。目前大多数机组普遍通过检测过热蒸汽温度及其变化趋势，由常规 PID 控制器来调节减温水量^[7]，实现过热蒸汽温度的控制。依靠数学模型通过解析方法设计的常规 PID 控制结构简单、容易实现，在正常工况下可以基本满足实时控制的需要，但是对于大容量、高参数的火力发电机组，负荷变化比较频繁，过热蒸汽温度控制对象具有大迟延和大惯性特性，难以建立精确的数学模型，各变量间的相互关系复杂并且参数不确定，凭借经验确定的传统控制方案适应突发性干扰、给定

值突变、对象特性时变性等的能力有限，使被控量出现较大的动态偏差，不利于机组的安全和经济运行。

为了适应电力生产发展的需要，且基于自动控制理论的发展，国内许多专家和学者提出了许多新的控制策略。例如，根据过热器具有大迟延、非线性、时变、多变量等特点，张波在论文中提出了对火电厂过热蒸汽温度采用串级模糊控制的控制策略，将过热器导前区温度信号及其变化率作为模糊控制器的输入，使串级控制和模糊控制的优势结合、互补，探索出进一步提高过热蒸汽温度控制质量的有效途径^[8]。针对惰性区具有多个参数及迟延摄动的火电厂过热蒸汽温度控制问题及其对蒸汽温度响应和抗扰动性的要求，周光明、马永光设计出了副回路采用神经网络控制、主回路采用 PID 控制的串级控制系统^[9]。针对过热蒸汽温度控制对象的特点，刘林辉、黄永红等人设计出了以 MPC（模型预测控制器）为主调节器的 MPC-PID 串级控制系统，具有较好的给定值跟随性、抗干扰性和鲁棒性^[10]。利用神经网络的强鲁棒性、自组织、自学习和可以充分逼近非线性函数等优点，王田、薛建中等人提出一种基于 RBF 神经网络辨识的过热蒸汽温度控制策略，增强了控制系统对不确定因素的适应性^[11]。

1.4 设计的主要工作

本文基于洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组，根据工程流体力学、工程热力学和传热学等基本原理，用一组非线性微分方程和代数方程描述了过热蒸汽温度的动态特性，应用 MATLAB 的动态系统仿真工具 SIMULINK 建立控制系统的模型，并对设计所得的蒸汽温度控制系统做了相应的仿真分析。从理论上来看，自适应模糊 PID 控制器可以实现 PID 控制参数的在线实时调整，在控制对象参数发生较大变化和控制系统有扰动情况下，仍然使控制系统保持有良好的动、静态特性，比常规控制方案具有更好的控制效果。设计的主要工作包括：

(1) 简单介绍了汽包锅炉的工艺流程和过热蒸汽温度控制对于机组安全经济运行的重要意义，详细分析了过热蒸汽温度控制对象的静态特性和动态特性。

(2) 根据工程流体力学、工程热力学和传热学等基本原埋, 建立过热蒸汽温度控制对象的动态特性数学描述。

(3) 由于过热蒸汽系统是一个大迟延、大惯性的复杂热力系统, 本文在简单分析了过热蒸汽温度控制的难点和设计原则的基础上, 重点分析研究了洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组的蒸汽温度串级控制系统, 设计出自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统, 并对两种蒸汽温度控制系统进行了仿真分析比较。

第二章 常规过热蒸汽温度控制系统

2.1 汽包锅炉的工艺流程

图 2-1 表示洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组的锅炉结构。

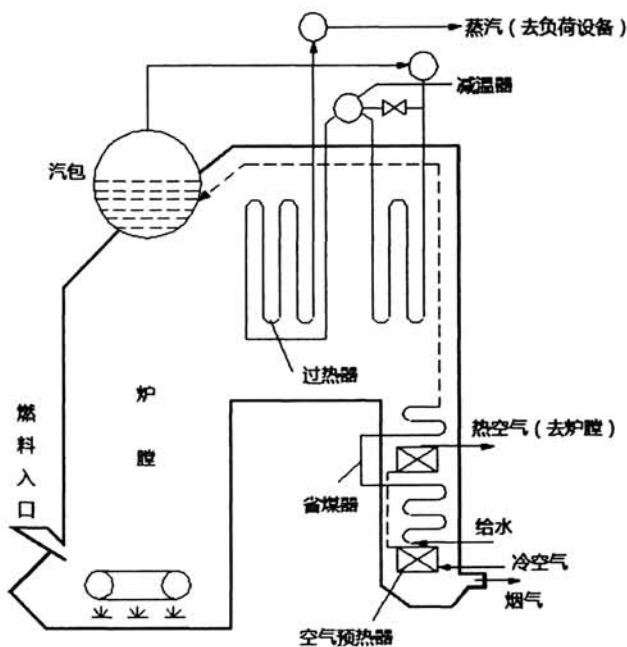


图 2-1 洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组锅炉结构

锅炉是能源工业发展的主要组成部分——火力发电厂的三大主机之一，主要由“锅”和“炉”以及为保证“锅”和“炉”正常运行所必需的附件、仪表和附属设备组成^[12]。原煤在制粉系统中磨制成煤粉后，与空气预热器加热后的热空气一起经燃烧器进入炉膛燃烧，而燃烧生成的高温烟气流经水冷壁、过热器、再热器、省煤器以及空气预热器时将热量传递给受热面中的工质和空气，最后被冷却的废烟气经除尘器除灰后由引风机送入烟囱排往大气。

2.2 汽包锅炉自动控制系统

火力发电机组正常运行过程中，输入和输出的物质和能量时刻处于动态平衡状态，反映生产过程的各项物理量、化学量及各生产设备的工作状态稳定或按一定规律变化。但是，生产过程会由于各种扰动因素偏离正常运行状态，严重时将导致事故的发生，这就要求通过自动控制随时消除各种扰动作用，保证正常运行。二十世纪五十年代左右，火力发电机组的单机容量小，机、炉、电各自独立分散局部自动控制，机组安全性和经济性运行的要求比较低，因此热工自动控制系统非常简单。为了适应国民经济和科学技术的发展，火力发电机组容量逐渐增加，蒸汽参数不断提高，火电厂的生产过程（包括主、辅机和全厂各辅助车间）要求作为一个整体集中进行控制，需要监视、操作或控制的参数也逐渐增多，可靠性和自动化水平要求越来越高，因此随着现代科学技术，特别是计算机技术的迅速发展，火电厂热工自动控制系统逐渐得到了发展。

锅炉是电力生产过程中必不可少的重要动力装置，把燃料燃烧产生的化学能，通过传热过程将热量传递给水，使水变成水蒸汽，为生产和生活提供一定的热能，或者通过蒸汽轮机转换为机械能，再通过发电机将机械能转换为电能。为了满足外界负荷的需要，实现锅炉运行的安全性、经济性，必须对各种参数进行检测和控制。通常情况下，汽包锅炉控制系统包括以下主要内容^[14]：

(1) 汽包锅炉给水控制系统：实现给水量与锅炉的蒸发量之间的物质平衡，保证汽包水位在允许范围内变化。

(2) 过热蒸汽温度控制系统：维持过热器出口蒸汽温度稳定，保证过热器金属管壁材料温度不超过许用温度。

(3) 锅炉燃烧控制系统：燃料燃烧产生的热量与外界负荷的需要相适应，维持进入炉膛的燃料量与送风量之间的比值关系，使燃料充分燃烧并尽可能减少排烟热损失，提高锅炉的燃烧效率，并在燃烧过程中实现送风量与引风量之间的工质平衡关系，保持一定范围内的炉膛压力。

(4) 锅炉给水处理控制系统：采用离子交换树脂对给水进行软化处理，使

其性能指标满足工艺要求。

本文基于洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组，对锅炉蒸汽温度控制系统进行研究与分析。

2.3 过热蒸汽温度控制的意义

过热器出口蒸汽温度，即过热蒸汽温度，是火力发电机组中的主要参数。电力生产过程中，必须严格控制过热蒸汽温度的变化范围和变化速率^[6]。

表 2-1 过热器常用钢材的许用温度

钢材牌号	许用温度 (°C)	钢材牌号	许用温度 (°C)
12CrMo	≤540	X20CrMoV121 (F12)	≤650
15CrMo	≤550	1Cr18Ni9Ti	≤800
12CrMoV	≤580	Cr6SiMo	≤750
12Cr2MoWVB (钢 102)	≤600~620	Cr25Ni12MnSi2	≤900~1000
12Cr3MoVS1TiB (n11)	≤600~620	Cr20Ni14Si2	≤900~1000
10CrMo910	≤540	Cr18Mn9Ni2Si2N	≤900~1000
X20CrMoWV (F11)	≤650		

在火力发电厂中，过热器通常采用耐高温、高压的合金钢材料。为了提高发电厂的循环效率，过热器一般在接近金属材料允许的极限温度，即许用温度条件下运行。从表 2-1 可以看出，过热器许用温度越高，对金属材料的要求越高，价格也越昂贵。过热蒸汽温度太高，钢材的工作温度超过了其许用温度，会引起金属材料的机械强度、热稳定性下降，蠕变速度增加，材质恶化，缩短锅炉受热面及蒸汽管道的使用寿命。如果管壁温度经常超过金属极限温度或蒸汽温度长期超过标准，将会由于管道材料强度的急剧下降而导致管道破裂，危及设备安全。据文献^[6]计算表明，对于一台 300MW 燃煤电站锅炉，过热蒸汽温度在正常运行温度 550°C 基础上每天超温两小时，当超温 1°C 运行一年后机组过热蒸汽管道平均寿命减少 37 小时，当超温 15°C 运行一年后平均寿命将减少 1183

小时。

过热蒸汽温度太低，会降低机组热力循环效率，同时增加燃料消耗量。对于一台 300MW 机组，过热蒸汽温度每降低 5~10℃，热力循环效率降低 1%，燃料消耗量增加 0.2%。过热蒸汽温度太低，会使汽轮机最后几级叶片的蒸汽湿度增加，蒸汽对叶片的侵蚀作用加剧，严重时将会产生水冲击，转子所受的轴向推力增大，推力轴承过载，威胁汽轮机的安全运行。

另外，过热蒸汽温度波动幅度过大，会引起锅炉各受热面焊接及连接部分的金属材料产生较大的热应力，加速部件的疲劳损伤，汽轮机的汽缸和转子间的相对位移增加，严重时可能发生叶轮与隔板的动静摩擦使汽轮机发生剧烈振动。现在绝大多数发电机组的过热蒸汽温度限制在 540~555℃，运行过程中只提高蒸汽压力而不相应地提高蒸汽温度，负荷在额定值的 60%~100% 范围变化时，一般要求过热蒸汽温度不允许超过额定值，偏差为 -10~+5℃。为了防止过热蒸汽温度突然升高或下降，控制温度变化速率在 $\pm 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 以内。

选择正确的过热蒸汽温度控制方案是保证过热蒸汽温度质量的关键，对火力发电机组的安全和经济运行有直接的关系。在锅炉的各项控制任务中，控制过热蒸汽温度是比较困难的，主要是因为^[17]：

(1) 影响过热蒸汽温度的扰动因素比较多，彼此之间相互影响，并且在各种不同的扰动因素下，过热蒸汽温度随时间变化的动态关系也各不相同。

(2) 随着电网中火电机组单机容量的增大和参数的提高，过热器系统复杂，管道加长，蒸汽过热受热面的面积增加，从而进一步影响了过热蒸汽温度控制对象在各种扰动因素作用下的迟延、惯性、非线性和时变性的动态特性。此外，热电偶一般也具有较大的惯性，在动态过程中不能及时地进行温度测量。

(3) 如果减温器布置在过热器进口端，汽包中的饱和蒸汽通过减温器后变成湿蒸汽，过热器受热面起始段用于蒸发湿蒸汽中的水分，蒸汽温度不变，水分蒸发完毕后温度再升高，可以保持较低的过热器金属温度，但是由改变减温水量至过热器出口蒸汽温度改变所需要的时间长；如果减温器布置在过热器出

口端，进入过热器的蒸汽温度沿着过热器长度逐渐升高，在出口端通过减温器降低蒸汽温度至额定温度，这种布置方式汽温调节灵敏，但在减温器前的蒸汽温度可能超过正常值，受热面的金属温度高，需要选用高一级的金属材料。因此现代锅炉减温器都布置在过热器中间位置，既可以保护过热器，使其管壁金属材料工作温度不超过许用温度，又可以得到较高的蒸汽温度调节灵敏度。

2.4 蒸汽温度控制对象的特性

被控制的热工生产过程或设备，称为控制对象。控制对象是热工自动控制系统的重要组成部分。只有了解控制对象的特性，我们才可能设计出合理的热工自动控制系统，增加自动控制的效果。为了设计出优良的过热蒸汽温度控制系统，首先必须分析影响过热蒸汽温度变化的各种因素，即掌握蒸汽温度控制对象的特性。

2.4.1 静态特性^[16]

蒸汽温度控制对象的静态特性，主要指过热蒸汽温度随锅炉运行工况变化的关系。

1. 锅炉负荷的影响

过热蒸汽温度与锅炉负荷之间的关系称为蒸汽温度特性。

蒸汽温度特性与过热器的传热形式、结构及其在炉膛内的布置情况有关。现代大容量高参数的锅炉一般采用辐射型、半辐射型和对流型多级布置的联合型过热器。为了降低受热面管壁钢材温度，过热蒸汽低温段采用辐射型或半辐射型，高温段采用对流型。其中，对流型过热器布置在锅炉的水平烟道内，烟气与蒸汽间主要进行对流换热；辐射型过热器有的按一定宽度布置在全炉膛高度，有的只布置在炉膛上部的部分高度，主要以吸收炉膛内的辐射传热为主；半辐射型过热器（又称屏式过热器）布置在炉膛上前部或出口处，它既吸收炉膛内的辐射传热量，又以对流方式吸收烟气冲刷受热面时的热量，两者所占比例大体相等，因此过热器中蒸汽温度随负荷变化比较平稳。锅炉负荷增加，燃料量

相应增加，燃烧产生的烟气容积增大，烟气在过热器中的流速增加，对流放热系数增大；由于炉膛出口烟气温度升高，对流过热器中烟气与蒸汽之间的温度差异增大。上述两个因素使对流过热器吸热量增加超过了蒸汽流量的增加，蒸汽在过热器中的焓增增大，对流过热器出口蒸汽温度升高。与此相反，对于布置在炉膛中的辐射型过热器，随着锅炉负荷增加，炉膛火焰的平均温度变化不大，辐射传热量增加不多，跟不上蒸汽流量的增加。炉膛出口烟气温度升高，工质在受热面中的焓增减小，即辐射型过热器出口蒸汽温度随着锅炉负荷的增加而下降。如图 2-2 反映了过热蒸气温度随锅炉负荷的变化规律，即过热器的蒸汽温度特性。由于对流型过热器的受热面积大于辐射型过热器，因此蒸汽温度随锅炉负荷的增加而升高。

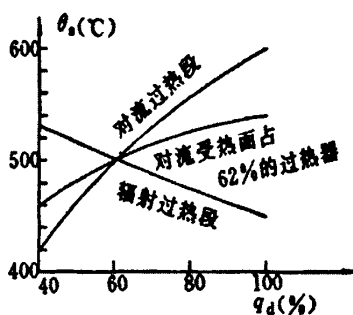


图 2-2 过热器的蒸汽温度特性

2. 炉膛火焰中心位置的影响

(1) 燃料种类和成分

燃料种类和成分变化，主要指水分、灰分、发热量和煤粉粗细程度的变化。

煤中水分、灰分较大，发热量较低时，相同的蒸发量所需要的燃料量增加，同时煤中的水分和灰分吸收了炉内的热量，炉温降低，辐射传热减少，蒸汽温度升高。煤中水分、灰分的增加还使烟气容积增大，火焰中心位置上移，在过热器中的烟气流量和流速增加，对流放热系数增大，对流型过热器吸热量增加，蒸汽温度升高。煤粉变粗时，煤粉在炉内燃尽的时间增加，火焰中心位置上移，参与辐射有效面积减少，辐射传热量减弱，蒸汽温度升高。

(2) 燃烧器工作状态

改变多层燃烧器的运行方式或摆动式燃烧器的喷嘴上下倾斜角度时，炉膛内燃烧工况发生变化，使火焰的中心位置沿炉膛高度发生变化，炉内辐射吸热量变化，炉膛出口烟气温度变化，过热蒸汽温度发生变化。

(3) 炉膛负压

锅炉运行中，由于炉膛受热面管壁外结渣、积灰或管内积垢，烟气流通面积减小，流速增加，引起引风机出力相对不足时，炉膛负压减小，火焰中心位置下降，则在相同负荷下蒸汽温度降低。

3. 其他运行工况的影响

(1) 过量空气系数

为了保证燃料能够完全燃烧，减少各种热经济损失，实际供给的空气量必须大于燃烧所需的理论空气量，两者的比值称为过量空气系数。对于燃煤锅炉，根据经验调整炉膛内的过量空气系数为1.3~1.5左右时，锅炉的热效率最高。

送风量或漏风量增加，过量空气系数增加，炉膛温度降低，对流型过热器中的烟气流量和流速增加，蒸汽温度升高。一般情况下，过量空气系数每增加10%，过热蒸汽温度升高8~10℃。

(2) 给水温度

现代大型锅炉的给水温度一般在280℃左右。给水温度变化前后，锅炉蒸发量，即过热器内蒸汽流量不变。给水温度降低，产生一定蒸汽量所需要的燃料量增加，炉膛出口烟气温度上升，流速增加，过热蒸汽温度升高。研究资料表明，对于超高压以上锅炉，高压加热器是否投入运行，对给水温度会产生很大影响。通常情况下，给水温度每下降3℃，蒸汽温度升高1℃^[18]。

(3) 吹灰蒸汽用量

为了保证锅炉的安全、经济运行，需要清除受热面的结渣和积灰，这时可以采用过热蒸汽、饱和蒸汽或压缩空气作为吹灰介质。当锅炉本体及其辅助设备采用饱和蒸汽吹灰时，使受热面维持清洁的同时，却增加了炉膛内水冷壁的吸热量，因而使后面的过热器吸热量减小，蒸汽温度下降；采用过热蒸汽吹灰

时，锅炉负荷一定，必须增加燃料量，蒸汽温度升高。

(3) 饱和蒸汽含湿量

在不稳定运行工况条件下，如当锅炉负荷突然增加、汽包水位太高或给水含盐量增加而发生汽水共腾时，汽包不能正常地进行汽水分离，出来的饱和蒸汽含湿量急剧增加。增加的水分在过热器内蒸发需要吸收更多的热量，干饱和蒸汽吸热量减少，蒸汽温度下降。

2.4.2 动态特性

影响过热蒸汽温度的原因比较复杂，主要有锅炉负荷、烟气传热量和过热器入口蒸汽温度三个方面。存在这些扰动时，过热器出口蒸汽温度随时间变化的动态关系，反映了蒸汽温度控制对象的动态特性^[13]。

1. 锅炉负荷变化时，蒸汽温度的动态特性

给水经给水泵升压后，送至省煤器中加热，然后送进汽包，经由下降管、下联箱分配给水冷壁。水在水冷壁中吸收炉内热量后变为汽水混合物，经汽包中的汽水分离装置分离后，饱和蒸汽由汽包上部空间引入过热器加热成过热蒸汽经蒸汽母管送往汽轮机做功，饱和水再经下降管进入水冷壁进行循环。改变锅炉蒸汽母管的压力和汽轮机调节汽门的开度，就改变了锅炉负荷的大小。

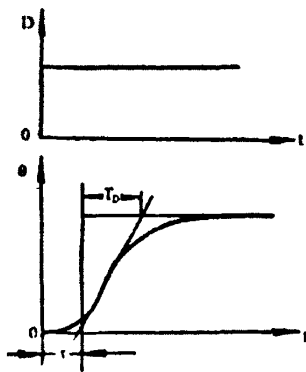


图 2-3 蒸汽流量变化时，过热蒸汽温度的阶跃响应曲线

锅炉负荷变化，即蒸汽流量变化时，引起过热器的对流放热系数变化，传递给蒸汽的热量沿过热器管道长度几乎同时变化，蒸汽温度的阶跃响应曲线如

图2-3所示。当蒸汽流量阶跃上升时，过热蒸汽温度刚开始变化缓慢，然后加快，又逐渐减慢，最后重新稳定下来。尽管在蒸汽流量扰动下，过热蒸汽温度具有较好的动态特性，但是蒸汽流量是由锅炉负荷决定的，以它作为调节信号控制蒸汽温度显然是不合理的，只能看做过热蒸汽温度控制系统的外部扰动。

蒸汽流量变化对蒸汽温度变化的传递函数可以用下式近似表示：

$$W(s) = \frac{\theta(s)}{D(s)} = \frac{K}{1 + T_D s} e^{-\tau}$$

2. 烟气传热量变化时，蒸汽温度的动态特性

过热蒸汽温度与工质从烟气侧吸收的热量有关。烟气的流速和温度变化，沿过热器管道的传热量同时变化，从而引起过热蒸汽温度的变化。通过改变燃烧器喷嘴倾斜角度或改变燃烧器投入的个数，得到当烟气温度阶跃变化时，过热器出口蒸汽温度的响应曲线，如图2-4表示。控制对象动态特性的特点是有迟延、有惯性，并且依靠自身的能力，经过一段时间以后能够达到新的平衡状态。

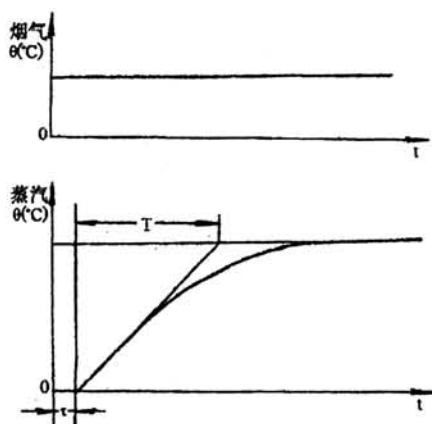


图 2-4 烟气温度变化时，过热器出口蒸汽温度的阶跃响应曲线

锅炉负荷一定，过热器结构及其积灰情况一定时，烟气温度 θ_s 对蒸汽温度 θ 的传递函数可以近似地表示为

$$W(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_s(s)} = \frac{1}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}$$

3. 过热器入口蒸汽温度变化时，蒸汽温度的动态特性

通过减温水改变过热器入口蒸汽温度，可以有效地改变过热蒸汽温度。通过控制减温水流量改变减温水吸收蒸汽的热量，可以保证过热蒸汽温度在一定范围内变化。在现代大型锅炉中，减温器有喷水式和表面式两种基本形式：喷水式减温器由安装在蒸汽管道或过热器联箱内的喷嘴、文丘里管和保护套管组成，过热蒸汽从减温器进口端引入文丘里管，减温水（一般为给水或蒸汽凝结水）直接由喷嘴上的小孔喷入，雾化后在文丘里管的喉部与高速蒸汽充分混合，经过一定长度的保护套管后引至减温器出口端；表面式减温器是一种管壳式热交换器，减温水在管内流动，蒸汽在管外流动。喷水式减温系统结构简单，调节幅度大，惯性小，调节灵敏，有利于自动调节，因此在现代大型锅炉得到广泛的应用。这种减温器的减温水直接喷入蒸汽，所以对水质要求比较高。

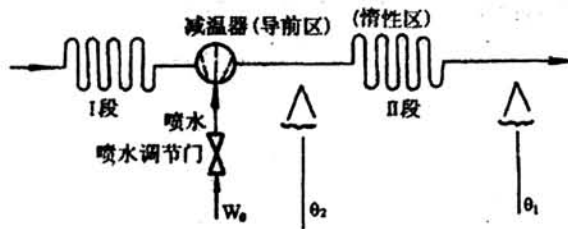


图 2-5 喷水式减温系统

如图2-5所示，喷水式减温器将整个系统分为导前区和惯性区两个串联组成的区域。其中，两个区域的输入信号分别是减温水流量 W_0 和减温器出口蒸汽温度 θ_2 ，输出信号分别是减温器出口蒸汽温度 θ_2 和过热器出口蒸汽温度 θ_1 。

当减温水流量阶跃变化时，过热蒸汽温度的响应曲线如图2-6所示。在 W_0 阶跃变化时， θ_1 和 θ_2 都有一定的延迟和惯性，并且依靠自身的能力，经过一段时间以后都能够达到新的平衡状态，但是 θ_2 的延迟比较小，响应速度快，变化幅值大。

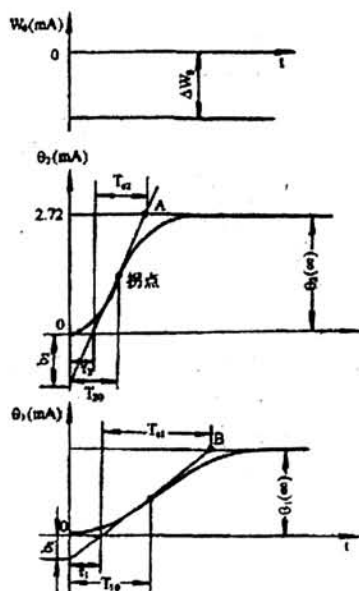


图 2-6 减温水流量阶跃变化时, 过热蒸汽温度的响应曲线

过热器的导前区和惰性区控制对象的传递函数可以表示为

导前区
$$W_{02}(s) = \frac{\theta_2(s)}{W_w(s)} = \frac{K_2}{1 + T_{c2}s} e^{-T_{d2}s}$$

惰性区
$$W_{01}(s) = \frac{\theta_1(s)}{\theta_2(s)} = \frac{K_1}{1 + T_{c1}s} e^{-T_{d1}s}$$

因此, 整个过热器控制对象的传递函数 $W(s) = \frac{\theta_1(s)}{W_w(s)} = W_{02}(s)W_{01}(s)$ 。

导前区和惰性区控制对象的传递函数也可以用多阶惯性环节表示为

导前区
$$W_{02}(s) = \frac{K_2}{(1 + T_2s)^{n_2}}, \text{ 一般 } K_2 < 0, n_2 = 2$$

惰性区
$$W_{01}(s) = \frac{K_1}{(1 + T_1s)^{n_1}}, \text{ 一般 } K_1 > 0, n_1 \geq 2$$

这时, 整个过热器控制对象的传递函数

$$W(s) = W_{02}(s)W_{01}(s) = \frac{K}{(1 + Ts)^n} (K < 0)。$$

通常在控制系统分析及调节器参数整定计算过程中, $W_{01}(s)$ 不能直接由阶跃响应曲线求得, 只能根据已经用阶跃响应曲线通过工程方法求得的 $W_{02}(s)$ 和 $W(s)$ 来求得

$$W_{01}(s) = \frac{W(s)}{W_{02}(s)}$$

根据数学推导, 可得

$$K_1 = \frac{K}{K_2}$$

$$T_1 = \frac{nT^2 - n_2T_2^2}{nT - n_2T_2}$$

$$n_1 = \frac{(nT - n_2T_2)^2}{nT^2 - n_2T_2^2}$$

通过对以上三种扰动下的控制对象动态特性进行分析, 我们可以看出, 在各种扰动因素作用下, 蒸汽温度控制对象的动态特性参数 τ 、 T 和 $\frac{\tau}{T}$ 是不一样的。对于一般中高压锅炉, 在蒸汽流量扰动时, 蒸汽温度反应快, 迟延时间较小, 约有15s左右; 在减温水流量扰动时, 蒸汽温度反应比较慢, 迟延时间大约为30~60s, 惯性时间常数 $T \approx 100$ s; 当烟气传热量扰动时, 蒸汽温度反应比较快, 迟延时间 $\tau \approx 10 \sim 20$ s, 惯性时间常数 $T < 100$ s。减温水流量扰动时 $\frac{\tau}{T}$ 的值最大, 蒸汽流量扰动时最小。

综上所述, 过热蒸汽温度控制系统设计的原则可以归纳为^[19]:

(1) 从动态特性的角度考虑, 改变烟气侧参数, 如通过改变烟气温度(例如改变燃烧器喷嘴倾斜角度或改变燃烧器投入的个数)或改变烟气流速、流量的方法控制锅炉辐射受热面和对流受热面的吸热分配的比例实现蒸汽温度控制是比较理想的。但是在改变烟气流量或温度的同时, 会影响锅炉的燃烧工况, 与燃烧控制系统相互干扰; 另外, 烟气传热量的扰动也会影响再热蒸汽的温度, 因此一般不根据烟气侧参数控制过热蒸汽温度。

(2) 尽量减小热电偶的惯性时间常数，并且安装位置合适，可以及时反映过热蒸汽温度的变化，从而改善控制系统的控制品质。

(3) 尽管在减温水流量扰动下，控制对象的迟延和惯性比较大，但是为了实现过热器的安全运行，因此目前仍然被广泛用于过热蒸汽温度的控制。为了改善控制对象的动态特性，提高控制系统的控制质量，单纯采用单回路控制方案往往不能获得理想的调节品质，因此在实际生产过程中引入一个能够提前反映扰动的中间点信号作为调节器的补充反馈信号，形成多回路控制系统。

2.5 洛阳首阳山电厂 300MW 机组蒸汽温度控制系统

洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组锅炉为东方锅炉（集团）股份有限公司制造，型号为 DG1025/18.2-II6 的亚临界压力一次中间再热、自然循环、单炉膛、平衡通风、固态排渣、露天布置、全钢架、全悬吊结构的燃煤锅炉。

机组采用冷一次风正压直吹式制粉系统，配用五台 MPS-200 型钢球磨煤机（一台备用）。设计煤种为 85%义马混煤+15%新安煤，灰分 26.42%，水分 13.89%，挥发分 34.23%，低位发热量 17794KJ/Kg，煤粉细度 $R_{90}=25\%$ （设计煤种）。锅炉采用四角布置、双切圆燃烧，直流摆动式煤粉燃烧器，四角气流的轴线在炉内与两个假想圆相切，直径分别为 $\Phi 700\text{mm}$ 和 $\Phi 1000\text{mm}$ 。每角燃烧器分上、下两组，下组布置三层一次风喷口，上组布置两层一次风喷口。一、二次风相间布置，共八层二次风喷口。燃烧器上、下两组之间拉开一定距离，改善炉内空气动力场和燃烧器区域的壁面热负荷，防止该区域水冷壁结渣。燃烧器能上下摆动 25° ，每角上、下组四角可以实现同步摆动。

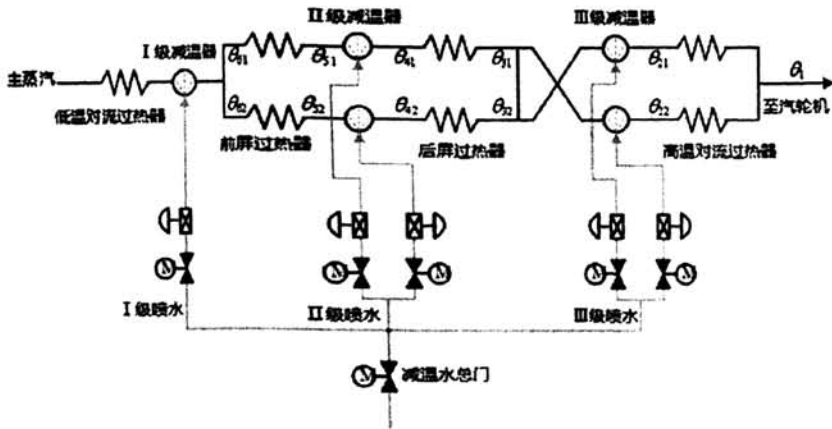


图 2-7 洛阳首阳山电厂二期 300MW 机组过热蒸汽流程

如图 2-7 所示，为了减少热偏差，屏式过热器以及高温对流过热器在锅炉两侧对称安装。由汽包分离出的饱和蒸汽先进入低温对流过热器，然后依次经过前屏过热器和后屏过热器，最终通过高温对流过热器送至汽轮机高压缸做功。由于低温过热器中蒸汽温度较低，安全性好，所以不安装减温器。在前屏过热器入口端安装 I 级喷水减温器，用于保护前屏过热器，并粗调过热蒸汽的温度；前、后屏过热器之间安装 II 级喷水减温器，用于保护后屏过热器，也可以粗调过热蒸汽的温度；在高温对流过热器的入口端安装 III 级喷水减温器，用于保护高温过热器，并对过热蒸汽温度进行细调。其中 II 级和 III 级喷水减温器均是左、右两侧对称安装。每一个减温器都设有一个减温水调节阀、一个电动阀门和一个流量检测元件，减温水取自给水泵后、高压加热器前的给水管。

过热器管道越长，控制对象的迟延和惯性越大。为了克服机组滞后和惯性的影响，蒸汽温度控制系统采用分级控制方案，即由三级相对独立、结构相似的串级蒸汽温度控制系统构成。第一级控制系统中，以前屏过热器入口蒸汽温度作为导前蒸汽温度信号，通过控制 I 级喷水量维持前屏过热器出口蒸汽温度为给定值；第二级控制系统中，以后屏过热器入口蒸汽温度作为导前蒸汽温度信号，通过控制 II 级喷水量以维持后屏过热器出口蒸汽温度为给定值；第三级控制系统中，以高温对流过热器入口蒸汽温度为辅助参数，通过控制 III 级喷水量

来保持高温对流过热器出口蒸汽温度满足要求。

给出蒸汽温度串级控制系统的原理方框图，如图 2-8 所示。从原理方框图可以看出，在串级控制系统运行过程中，减温水阀门直接受副调节器的控制，而副调节器的给定值受主调节器的控制，形成了特有的双回路控制系统：由副调节器和导前蒸汽温度信号——减温器出口温度形成的闭合回路成为副回路，由主调节器和主信号形成的闭合回路称为主回路。

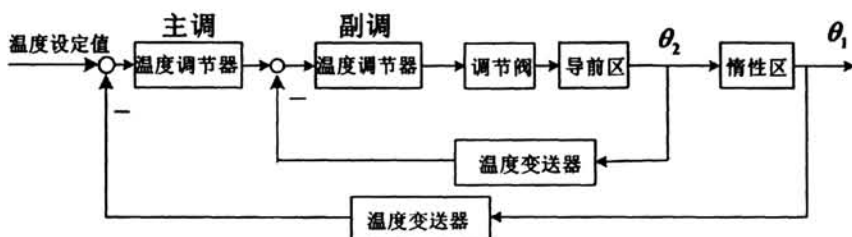


图 2-8 蒸汽温度串级控制系统原理方框图

一般情况下，蒸汽温度串级控制系统的主回路是定值控制系统，因此主调节器选用比例积分调节器；当过热器惯性区的惯性较大时，也可以选用比例积分微分调节器。副回路是随动系统，它的给定值随主调节器输出的变化而变化，为了加快跟踪，副调节器一般不带积分作用；另外，如果副调节器有微分作用，一旦主调节器输出稍有变化，调节阀就将产生大幅度动作，这对控制系统很不利，所以通常选择副调节器为比例调节器。由于副回路反应速度快，抑制扰动能力强，为了使控制系统获得较好的动态特性，应该尽可能地把变化最剧烈、最频繁、幅度最大的主要扰动放在副回路中。

串级控制系统中，当减温水流量在减温水压力或蒸汽压力改变情况下发生自发性波动时，副调节器会首先进行“粗调”——初步控制过热器入口蒸汽温度稳定，主调节器再进一步进行“细调”——不断改变输出信号，使副调节器动作，最终控制过热器出口蒸汽温度等于给定值^[6]。稳态时，过热器入口蒸汽温度可能稳定在与原来不同的数值上，但是出口蒸汽温度基本保持稳定，大大改善了控制系统的控制品质。

1. 一级减温控制系统

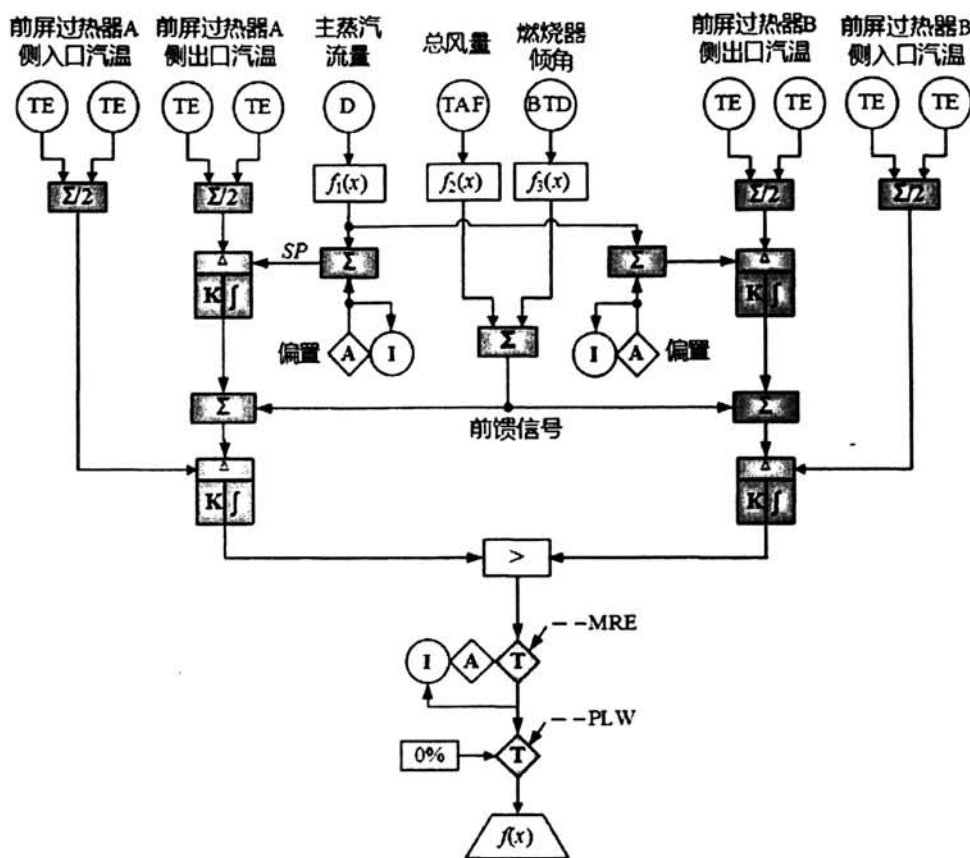


图 2-9 一级减温控制系统原理图

一级减温控制系统结构如图 2-9 所示。

过热器一级减温器设一个调节阀，A、B 侧取大后作为控制输出，A、B 侧一级喷水减温控制系统的结构和工作过程完全相同，下面以 A 侧一级减温控制为例说明。

A 侧一级减温控制是在由主调节器和副调节器组成的串级控制系统的基础上，引入前馈信号形成的蒸汽温度控制系统，控制目的是维持 A 侧一级过热器出口的蒸汽温度在设定值上。

(1) 信号的测量与处理

如图 2-9 所示,系统的被控量为前屏过热器出口蒸汽温度。A 侧前屏过热器出口蒸汽温度分别有两个测量信号,正常情况下采用二选均标准逻辑,即由操作人员在操作员站求取两个测量信号的平均值后输入到比较器。如果两个测量信号中有一个测量信号超出正常范围,则自动选取另外一个测量信号作为输出值,不影响控制系统的工作;如果两个测量信号都超出正常范围,则使用到该测量信号的控制系统将强制切换到手动控制状态。

(2) 给定值的形成

被控量的给定值通过机组负荷(用主蒸汽流量代表)信号由函数发生器 $f_1(x)$ 产生,并可以由操作人员根据现场运行情况在操作员站的软手操控制器 M/A 上对蒸汽温度给定值进行偏置。函数发生器的设置使机组在较低的负荷下就可以投入蒸汽温度自动。

(3) 前馈信号

如图 2-9 所示,在副调节器的输入端,控制系统引入送风量、燃烧器倾角等扰动信号作为前馈信号。将其引入系统后,可以用来抑制各种扰动对过热蒸汽温度的影响,改善前屏过热器出口蒸汽温度的质量。例如,当送风量增加时,过热蒸汽温度升高,将送风量信号作为前馈信号引入系统,副调节器输入偏差增大,输出增加,增加减温水量,可以有效地抑制蒸汽温度升高,改善系统在送风量扰动下的控制品质。

(4) 调节原理

一级减温控制采用的串级控制系统由两个闭合回路组成:主回路的控制任务是消除前屏过热器出口蒸汽温度的稳态偏差,控制量为前屏过热器出口蒸汽温度;副回路的控制任务是快速消除机组负荷变化、减温水压力等扰动影响,控制量为一级减温器出口蒸汽温度(即前屏过热器的入口蒸汽温度)。主调节器的输出加上由送风量、燃烧器组成的两个前馈信号后作为副调节器的设定值。

主调节器的输入偏差信号,是前屏过热器出口的蒸汽温度给定值与实际值的偏差。前屏过热器入口温度与主调节器信号输出的差,加上前馈信号,形成

副调节器的输入信号。当某种扰动引起前屏过热器出口蒸汽温度上升时，主调节器输入偏差减小，主调节器的输出下降，引起副调节器的输入信号增大，输出信号随之增加，减温水流量增加，前屏过热器入口温度立即下降，经延时使前屏过热器出口蒸汽温度下降，进而使副调节器的输入信号减小。

(5) 减温水超驰 (override) 控制

随着计算机分散控制系统的广泛应用，在大型火电机组热工自动调节中逐渐应用了“超驰控制”，在控制系统由于各种信号装置、调节回路、执行机构等失灵出现异常，不能正常工作时监测异常情况，保证自动控制系统使用安全。所谓超驰控制，指自动控制系统接到事故报警、偏差越限、故障等异常信号时，超驰逻辑将根据事故发生的原因立即执行自动切手动 (MRE)、优先增 (PRA)、优先减 (PLW)、禁止增 (RAI)、禁止减 (LWI) 等逻辑功能直接转换当前工作模式或调节被控设备，将系统自动切换到手动或转换到预先设定好的安全状态，并发出报警信号^[21]。

当主燃料跳闸、汽轮机跳闸或负荷小于 $x\%$ 时，一级减温水调节阀门操作站强制输出为 0% ，一级减温水调节阀门全关。减温水调节阀的开度较大，则发出一个脉冲信号打开隔离阀门，反之，当减温水调节阀的开度较小时，经延时关闭隔离阀门，以彻底关闭减温水调节阀门，避免因辅机故障发生 RB (Runback, 快速减负荷) 时过热蒸汽温度大幅下降。

(6) 一级减温调节阀控制逻辑

出现下列情况之一时，一级减温水调节阀门操作站强制切到手动状态：

①前屏过热器出口蒸汽温度信号故障；②前屏过热器入口蒸汽温度信号故障；③减温水调节阀的控制指令与实际的位置偏差大；④主燃料跳闸；⑤汽轮机跳闸；⑥负荷小于 $x\%$ ($x \approx 20\%MCR$)；⑦前屏过热器出口蒸汽温度与设定值之间偏差大。

2. 二级减温控制系统

二级减温控制系统结构如图 2-10 所示。

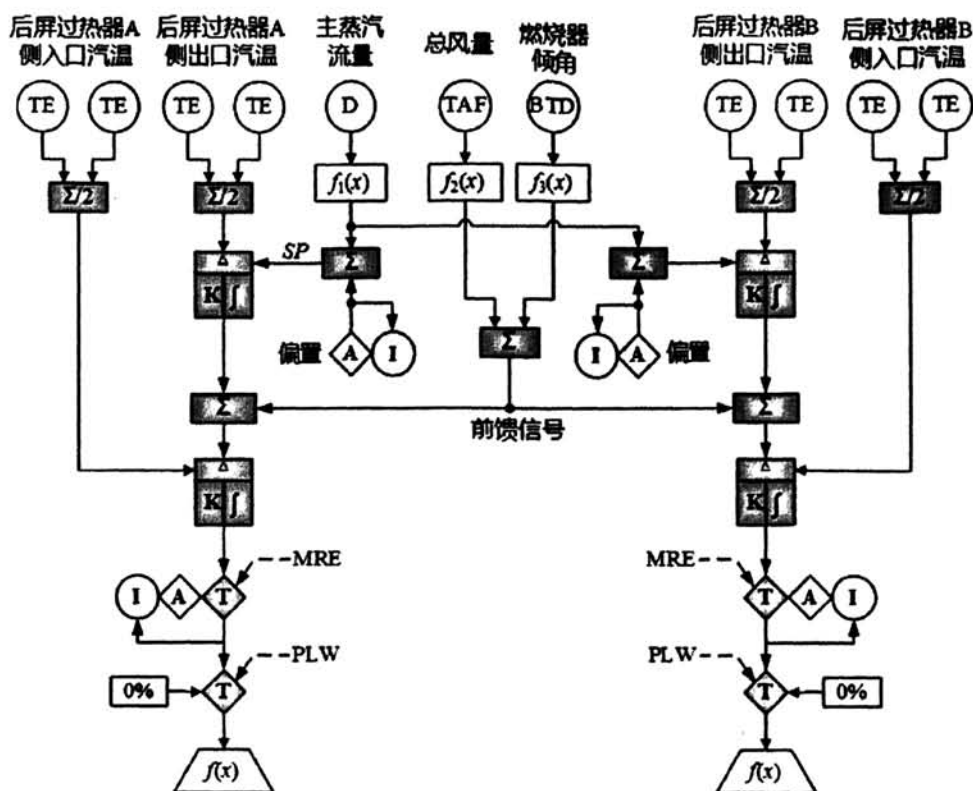


图 2-10 二级减温控制系统原理图

过热器二级减温器设两个调节阀，两侧分别控制。A、B 侧二级喷水减温控制系统的结构相同，也是在由主调节器和副调节器组成的串级控制系统的基础上，引入前馈信号形成的蒸汽温度控制系统。它的工作过程与一级减温控制系统相似，因此这里不再重复。

3. 三级减温控制系统

三级减温控制系统结构如图 2-11 所示。同二级减温器一样，三级减温器也设两个调节阀，两侧分别控制。A、B 侧三级喷水减温控制系统的结构相同，也是在由主调节器和副调节器组成的串级控制系统的基础上，引入前馈信号形成的蒸汽温度控制系统。与一、二级减温控制系统不同，三级减温控制系统中，高温过热器出口温度的给定值由操作人员根据现场运行情况手动设定，并且引

第三章 模糊控制的理论基础

在自动控制技术产生之前，人们只能首先通过眼睛观察控制对象的输出，其次大脑根据观察到的结果与给定值进行比较，判断是否有偏差及偏差的大小和方向，然后手根据分析决策的结果执行相应操作，操作人员不断地监视→决策→操作，实现了生产过程的人工控制过程。后来，人们在生产过程中逐渐采用各种测量、变送部件取代人的眼睛，完成观察任务；利用各种调节器取代大脑，完成运算任务；使用各种气动或电动执行机构取代手，对控制对象（或生产过程）进行某种操作控制^[22]。

最简单的自动控制系统——单回路控制系统的原理方框图如图 3-1 所示，它仅由一个检测元件与变送器、一个调节器和一个执行器及控制对象组成。

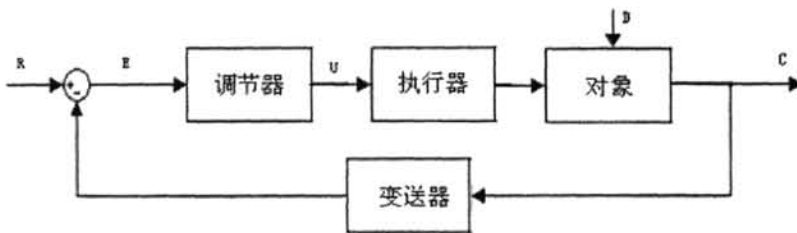


图 3-1 单回路负反馈控制系统方框图

经过人们长期研究和实践形成的经典控制理论，对解决线性定常系统的控制问题非常有效，并且随着计算机尤其是微型计算机的发展和应用，建立在状态空间法基础上、可以解决线性或非线性、定常或时变的多输入多输出控制系统问题^[23]的现代控制理论在工业过程控制中获得了广泛的应用。但是，随着科学技术的进步和工业生产的发展，对自动控制的稳定性、准确性和快速性有了更高的要求。传统控制中，只有事先知道控制对象精确的数学模型和控制系统给定的各项性能指标，才能进行恰当的控制。但是，实际生产过程中，控制系

统往往会受到各种扰动因素影响，控制对象很难建立比较精确的数学模型。这种情况下，有经验的操作人员却仍然能够进行有效的控制。于是，激发了我们深入研究控制原理的动力，希望利用计算机模拟人类思维过程，反映人的操作经验，从而对生产过程进行有效的控制。在这种思想指导下，模糊控制理论与技术诞生了。

3.1 模糊控制的特点

1965年，美国工程科学院院士、伯克利加利福尼亚大学电机工程与计算机科学系教授扎德（Lotfi A. Zadeh）在《信息与控制》杂志第8期上发表了论文《fuzzy set（模糊集合）》，第一次提出了“隶属函数”的概念，为我们提供了一种分析复杂控制系统的新方法。目前，模糊控制理论在人类生产和生活的不同领域都得到了迅速发展和广泛应用^{[24][25]}。

模糊控制是一种利用计算机模拟操作人员的思维方式，以模糊集合和模糊逻辑推理为理论基础，对模糊事物进行辨识和判定，得到精确的控制量，从而对生产过程进行控制的计算机数字控制技术。因此，模糊控制实质上是一种从属于智能控制的非线性控制。

1980年，通过对李宝绶、刘志俊基于工业过程设计的模糊控制器进行动态特性仿真，表明模糊控制不同于常规PI控制，它不需要精确地建立控制对象数学模型，而是模拟了人工控制的过程和方法，更接近人的思维方法和推理习惯^[1]，便于现场操作人员的理解和接受，并能够适应干扰和控制对象参数的任何变化，无论控制对象是线性还是非线性的，通过根据实际专家知识和现场操作人员经验建立的模糊规则都可以对其进行有效的控制^[26]。

然而，模糊控制毕竟还是一门新兴学科，它的不足之处主要体现在：

(1) 模糊控制的设计缺乏系统性，难以适应比较复杂系统的控制。目前还没有建立起一套系统的模糊控制理论，用于解决模糊控制中知识和经验的表示、知识推理的法则、知识的获取和总结、模糊控制系统稳定性分析、模糊控制系

统的设计方法等问题。

(2) 获得模糊控制规则和隶属函数，即模糊控制系统的设计方法，这在目前完全凭现场操作人员的控制经验或相关控制专家知识进行，具有一定的主观性。

(3) 扩充模糊语言变量和增加量化论域中元素的个数增加了控制规则的数目，从而获得详细的控制系统动态信息，提高模糊控制系统的精确度和控制品质，但是计算量增加，系统响应速度降低。

3.2 模糊控制系统的组成

模糊控制系统在结构上与传统的控制系统类似，可以分为模糊控制器、输入/输出接口、执行机构、控制对象和传感器五个基本组成部分^[4]，如图 3-2 所示。

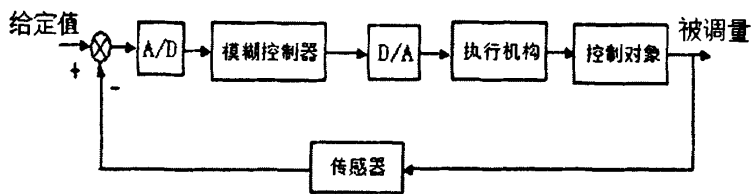


图 3-2 模糊控制系统基本结构

(1) 控制对象。它具有很多种形式，一般指被控制的设备或生产过程。

(2) 模糊控制器。属于非线性控制器^[3]，是模糊控制系统的核心部分。

(3) 传感器。将被调量按照一定规律转换为电信号或其他信号输出的检测装置。它在自动检测和自动控制中具有重要地位，其精确度直接影响整个模糊控制系统的精确度。

(4) 执行机构。主要包括各种电动或气动调节装置。

(5) 输入/输出接口。在输入/输出接口装置中，除了必要的模-数、数-模转换单元外，还包括模糊化接口和清晰化接口，用于实现精确量和模糊量之间的转化。

3.3 模糊控制器

1. 模糊控制器的主要功能

模糊控制系统与传统控制系统的主要差别在于控制器^[1]。如图3-3所示，模糊控制器的基本结构可以分为输入量模糊化接口、知识库(包括数据库和规则库)、模糊推理和输出量清晰化接口^[27]四个部分。

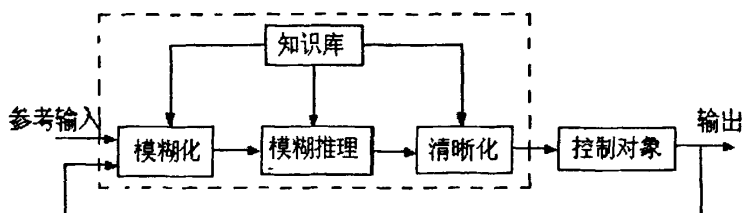


图 3-3 模糊控制器的基本结构

通常情况下，模糊控制器的主要功能如下所述：

(1) 控制系统的参考输入和输出的比较得到偏差，利用输入量模糊化接口和数据库将其从数字量转化为用一定模糊语言值表示的模糊量。

(2) 按照制定的模糊控制规则对模糊量进行模糊推理，得到模糊控制量。

(3) 通过输出量清晰化接口把模糊控制量转化为精确的数字量或模拟量，对控制对象进行控制。

2. 模糊控制器的设计

模糊控制器的设计过程一般包括以下五方面内容：根据模糊控制系统的控制品质要求确定模糊控制器的基本结构；确定输入变量的模糊化和输出变量的清晰化方法；总结现场操作人员长期积累的经验 and 专家知识，设计模糊控制规则；按照设计模糊控制规则进行模糊推理；合理地选择模糊控制算法的采样时间。

(1) 确定模糊控制器的基本结构

确定模糊控制器的基本结构，主要是确定模糊控制器的维数。

模糊控制器的维数，即模糊控制器输入变量的个数，与模糊控制系统的控制

品质有密切的关系。通常情况下，模糊控制器的输入变量选择为偏差、偏差的变化率和偏差变化的速率，输出变量选择为控制量。其中，一维模糊控制器以偏差信号为输入变量，相当于传统控制中的比例控制作用，因此不具有较好的动态控制性能。三维模糊控制器尽管具有较高的控制精度，但是模糊控制规则过于复杂，控制算法的实现也相当困难，所以目前广泛采用的是以偏差和偏差变化率作为输入变量的二维模糊控制器。

(2) 输入变量的模糊化

将精确的输入变量转换成模糊量的过程，就是模糊化。模糊化过程需要完成以下工作：

1) 确定输入变量的量化因子，使其从基本论域转换到相应的模糊论域

设偏差信号的基本论域为 $[e_{\min}, e_{\max}]$ ，采用线性变换后的模糊论域为

$[E_{\min}, E_{\max}]$ ，则偏差信号 e 变换到模糊论域上的值

$$E = \frac{E_{\min} + E_{\max}}{2} + k_e \left(e - \frac{e_{\min} + e_{\max}}{2} \right)$$

其中， $k_e = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}}$ ，表示偏差信号的量化因子。

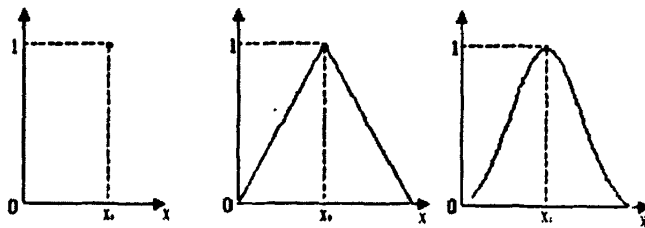
利用相同的方法可以确定偏差变化信号变换到模糊论域上的值 EC 和偏差变化的量化因子 k_{ec} 。不难看出，若模糊论域 $[E_{\min}, E_{\max}]$ 不变，量化因子 k_e 越大，则基本论域 $[e_{\min}, e_{\max}]$ 越小，偏差的控制作用越强；反之， k_e 越小，则基本论域 $[e_{\min}, e_{\max}]$ 越大，偏差的控制作用越弱，即偏差控制的灵敏度下降，系统的响应速度变慢。

2) 输入变量从基本论域转换到相应的模糊论域后，利用隶属函数将精确量转化为具有一定隶属度的模糊量

作为经典集合的推广形式，模糊集合中的元素 x 属于该模糊集合的程度可以通过隶属函数 $\mu(x)$ 定量表示， $\mu(x) \in [0, 1]$ 。隶属函数是数据库的一个重要组成部

分, 正确地确定隶属函数, 是运用模糊集合理论分析实际问题的基础。通常情况下, 隶属函数可以根据控制对象的特点, 结合专家的实际经验, 加上必要的数学处理得到。一般情况下, 应该根据下述原则选取符合人们的常识和经验的隶属函数:

- a. 隶属函数具有单峰性, 即论域中只有一点的隶属函数具有最大隶属度。
- b. 输入变量和输出变量的隶属函数通常具有对称性^[28]。
- c. 论域中的任何一点应该属于不超过两个模糊集合。
- d. 相邻两个隶属函数重叠时, 论域中相同的点具有不同的隶属度, 并且重叠部分论域中任何点的隶属度的和不大于 1。
- e. 偏差接近于零或较小时, 隶属函数曲线的斜率应该比较大, 保证控制系统具有较好的灵敏性; 偏差较大时, 隶属函数曲线的斜率应该比较小, 保证控制系统具有较好的稳定性。
- f. 定义某一模糊语言变量的各模糊集合应该较好地覆盖整个论域, 否则会出现控制不灵敏区, 影响模糊控制系统的性能品质。
- g. 模糊集合中任意两个模糊子集之间的相互关系对控制系统的控制品质具有一定的影响。两模糊子集的交集的最大隶属度 α 值较小, 控制器具有较高的灵敏度; α 值较大, 控制器能够较好的适应控制对象参数变化, 体现出较好的鲁棒性。通常情况下, α 值既不能过小也不能过大, 一般 α 值选取为 0.4~0.8。



(a) 单值隶属函数 (b) 三角形隶属函数 (c) 高斯型隶属函数

3-4 常用隶属函数

常用的隶属函数有三种基本形式:

①单值隶属函数

如图3-4 (a) 所示, 输入变量只有在精确量 x_0 处的隶属度为1, 其他输入值在模糊论域范围内对应的隶属函数值都为0, 即

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x = x_0 \\ 0 & x \neq x_0 \end{cases}$$

从形式上看, 利用单值隶属函数已经将精确量转化成了模糊量, 但是实质上仍然为精确量。在模糊控制过程中, 这种隶属函数只用于测量数据准确的情况。由于这种隶属函数舍弃了所有 $x \neq x_0$ 处的隶属度, 因此, 对输入数据干扰的鲁棒性较差。

②三角形隶属函数

如图3-4 (b) 所示, 隶属函数曲线在点 x_0 处隶属度具有最大值1, 即

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x - x_0|}{\sigma} & |x - x_0| \leq \sigma \\ 0 & |x - x_0| > \sigma \end{cases}$$

其中, 参数 $\sigma > 0$ 。

由图可以看出, 当 $\sigma \rightarrow 0$ 时, 三角形隶属函数就变成了单值隶属函数。 σ 越大, x_0 的变化对隶属函数 $\mu(x)$ 的影响越小。也就是说, 当 σ 足够大时, 三角形隶属函数具有足够强的抗干扰能力。由于利用三角形隶属函数模糊化运算简单, 因此在实践中得到了广泛应用。

③高斯型隶属函数

如图3-4 (c) 所示, 隶属函数曲线有点像正态分布曲线, 因此又称为正态分布隶属函数。利用这种隶属函数模糊化运算具有良好的抗干扰能力, 模糊化结果更接近于人的认知特点。

隶属函数可以表示为 $\mu(x) = e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ 。其中, 参数 $\sigma > 0$, 决定了高斯隶属函数的陡度。

3) 输入和输出语言变量的分级

模糊控制规则是以“if<前提>then<结论>”形式表示的模糊推理语句，前提和结论部分分别用过程状态输入语言变量和控制输出语言变量表示。语言变量的状态一般用若干个具有相同论域的语言值表示，语言值的个数，即输入和输出语言变量的分级数量影响了模糊控制器的控制品质。

(2) 设计模糊控制规则

作为模糊控制系统的重要组成部分，规则库是由若干个模糊控制规则组成的。这些模糊控制规则反映了人工控制过程，是通过长期学习和经验分析、归纳形成的，它的数量由语言变量的分级数量和控制精确度决定。

模糊控制规则必须满足：

①完备性

所谓完备性，指输入语言变量中的任意语言值至少存在一条可利用的模糊控制规则，这是模糊控制系统正常工作的必要条件。

②交叉性

为了保证模糊控制系统的输入输出行为连续、平滑，一般要求相邻的模糊规则之间有一定的交叉性。模糊规则的交叉性可以反映出概念类属的不明确性，而这种类属的不确定性正是模糊性的体现，完全符合人类认知的实际情况。通过模糊规则的交叉设计，可以提高控制系统的鲁棒性。

③相容性

如果两条模糊规则的条件部分相同，但结论部分相差很大，则称这两条规则相互矛盾。相容性指模糊控制系统的规则库中不存在相互矛盾的模糊规则。因此，在设计模糊控制系统时，应该尽量避免相互矛盾的模糊规则出现。对于规则自动生成的自适应模糊控制系统，应该给出解决规则矛盾的确切方法。

④适应性

对于一个时不变系统，预先建立的模糊规则，可以比较好的满足控制过程；对于一个时变系统，控制系统的参数和结构随外界环境发生变化，模糊规则可以完整地描述控制系统的输入输出之间的对应关系，较好地完成控制任务。

(3) 模糊推理

模糊推理是根据一定的模糊控制规则，模仿人的思维过程，从已知模糊命题引出新的模糊命题的思维过程。模糊控制规则的数量越多，模糊推理准确程度越高，但是需要的时间也越长。

(4) 输出变量的清晰化

经过模糊推理得到的结论是一个模糊集合，必须通过去模糊确定一个最能代表模糊集合的精确量，这个过程就是清晰化，它是模糊控制系统必不可少的环节。去模糊过程需要完成以下工作^[16]：

1) 采用一定的去模糊方法，将输出变量的模糊值转化成为模糊论域范围的精确量

由于模糊性的存在，去模糊方法并不唯一，获得的表示在模糊论域范围的精确量可能有所不同。在确定去模糊方法时，在考虑隶属函数形状和模糊推理方法^[29]的基础上，一定要考虑到以下准则：①有效性。所得到的精确量能够直观地表达该模糊集合；②简便性。去模糊运算要足够简单，以保证模糊控制系统实时使用；③鲁棒性。模糊集合的微小变化不会使精确量发生大幅变化。常用的去模糊方法有以下三种：

①最大隶属函数法

选取模糊集合覆盖的论域中，对应隶属度最大的元素作为该模糊集合的精确量，这种去模糊方法称为最大隶属函数法。

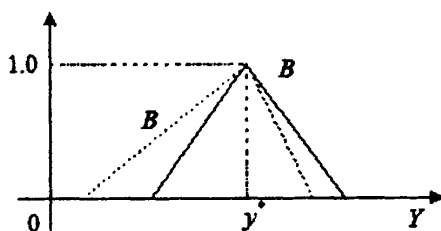


图 3-5 最大隶属函数法去模糊

这种去模糊方法不需要考虑隶属度函数的形状，计算简单，但是精确量为具

有最大隶属度的输出变量，从而造成其他信息的损失。另外，由于这种方法忽略了其他输出变量对精确量的影响，使得两个差异很大的模糊集合，可能获得同样的精确结果（见图3-5）。为了保证清晰化后的精确量唯一，一般要求给定的模糊集合是正态凸模糊集合。对于离散论域上的模糊集合，直接取对应于隶属度最大的基础变量作为精确量。在一些控制要求不高的场合，采用这种去模糊方法非常方便。

显然，对于隶属函数只有唯一最大值的模糊集合，这种去模糊方法是适用的。但是，模糊控制系统的实际推理结果，其最大隶属度对应的输出变量可能并不唯一，甚至有无穷多个输出变量与之对应。比如采用Mamdani方法进行推理得到的结果，其隶属函数的最大值往往是不唯一的，如图3-6所示。这种情况下，可以采用以下三种方法清晰化处理：

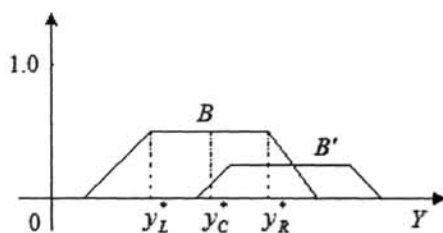


图 3-6 隶属函数极大值不唯一时的去模糊

a. 左取大法

取模糊集合隶属函数左边达到最大值时所对应的输出变量 y_L^* 作为精确量。

b. 右取大法

取模糊集合隶属函数右边达到最大值时所对应的输出变量 y_R^* 作为精确量。

c. 最大平均法

取最大隶属度对应的所有输出变量的平均值 y_C^* 作为该模糊集合的精确量，

即

$$y_C^* = \frac{(y_L^* + y_R^*)}{2}$$

由图3-6可以看出，虽然模糊推理结果由 B 和 B' 两个模糊集合构成，但只要

采用最大隶属函数法（包括左取大、右取大和最大平均法）去模糊，模糊集合 B' 对最终获得的精确量没有任何作用，说明这种去模糊法模糊信息的损失十分严重，清晰化结果鲁棒性较差。

②重心法^[1]

若 y^* 为精确量， $y \in Y$ ， $\mu(\cdot)$ 为模糊集合隶属函数，则

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \mu(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu(y) dy}$$

当模糊集合为离散论域时，精确量

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i \mu(y_i))}{\sum_{i=1}^N \mu(y_i)}$$

式中， N 为论域中的元素个数， $\mu(y_i)$ 为模糊集合中第 i 个元素 y_i 对应的隶属函数。

这种方法的精确量是输出隶属函数曲线与横坐标所围面积的重心，包含和利用了模糊推理结论中的所有信息，得到的精确量鲁棒性较好，然而由于这种方法在去模糊过程中使用了积分计算，因此运算量比较大。

③中心平均法^[3]（加权平均法^[1]）

若 y_i^* 为 N 个模糊集合中第 i 个模糊集合的中心，对应的最大隶属函数为 $\mu'_{\max}(y)$ ，则精确量

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^* \mu'_{\max}(y))}{\sum_{i=1}^N \mu'_{\max}(y)}$$

显然，这种方法采用各个模糊集合中心的最大隶属函数的加权平均值作为精确量，避开了求取复杂隶属函数的积分运算，因此这种方法计算比较简单，精确量的鲁棒性也比较强，是目前最常用的一种去模糊方法。

当模糊集合为有 N 个元素的离散论域时，模糊集合的中心 y_i^* 和模糊单点值

y_i 相等, 最大隶属函数 $\mu_{\max}^i(y)$ 与 y_i 对应的隶属度 $\mu(y_i)$ 相等, 则精确量

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i \mu(y_i))}{\sum_{i=1}^N \mu(y_i)}$$

由此看出, 当模糊集合为离散论域时, 利用这种方法去模糊时, 结果与应用重心法去模糊的结果相同。

2) 确定输出变量的比例因子, 使其从模糊论域转换到相应的基本论域, 即实际控制量

设模糊控制器输出变量的模糊论域为 $[U_{\min}, U_{\max}]$, 相应的基本论域, 即实际控制量变化范围为 $[u_{\min}, u_{\max}]$, 采用线性变换, 则比例因子

$$k_u = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}$$

因此, 模糊论域上的值 U 变换为实际控制量

$$u = \frac{u_{\min} + u_{\max}}{2} + k_u \left(U - \frac{U_{\min} + U_{\max}}{2} \right)$$

若模糊论域 $[U_{\min}, U_{\max}]$ 不变, 比例因子 k_u 越小, 则基本论域 $[u_{\min}, u_{\max}]$ 越小, 控制系统动态响应时间越长; 反之, k_u 越大, 则基本论域 $[u_{\min}, u_{\max}]$ 越大, 相当于控制系统的输出放大倍数增大, 控制系统动态响应时间越短, 但是 k_u 过大, 会引起控制系统产生较大的超调量, 从而导致控制系统振荡加剧。

(5) 模糊控制算法的采样周期

设计模糊控制器时, 我们还必须合理地选择模糊控制算法的采样周期 T 。根据香农 (Shannon) 采样定理^[30], 只有当采样频率达到系统信号最高频率的两倍或两倍以上, 才能使采样信号不失真地复现原来的信号, 即

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_{\max}}$$

式中, ω_{\max} 是被采样信号的上限角频率。

选择采样周期 T 时，一般考虑以下因素：

- 1) 采样周期 T 应该比控制对象的时间常数小得多。
- 2) 采样周期 T 应该远小于控制对象扰动信号的周期。
- 3) 当控制系统纯滞后占主导地位时，应该按照纯滞后大小选择采样周期 T 。
- 4) 采样周期 T 应该大于执行器的响应速度。
- 5) 采样周期 T 的下限是完成采样、运算和输出所需要的时间。

一般情况下，采样周期 T 选择越小，采样后的离散信号越接近于被采样的连续信号，对系统控制过程的信息了解越多，控制效果越好。但是，采样周期 T 选得过短，数据存储量增加，将增加不必要的计算工作量。反之，采样周期 T 选择过长，会给控制过程带来较大的误差，系统的动态品质降低，甚至有可能导致整个控制系统失去稳定性。因此，要根据实际情况综合考虑，合理选择采样周期 T ，有时要经过反复几次实验最后确定。

3.4 本章小结

本章介绍了智能控制的一种基本类型——模糊控制的特点，阐述了模糊控制系统的五个组成部分，并重点介绍了核心部分——模糊控制器的主要功能和设计过程。

第四章 蒸汽温度控制系统的分析和设计

4.1 MATLAB/SIMULINK 概述

由于受机组安全运行限制，一般在现场很难进行控制系统的试验研究。为了保证控制系统安全经济运行，需要对控制系统进行离线仿真研究，而 MATLAB 对自动控制系统的设计、安装调试和运行维护具有重要的指导意义^[31]。

MATLAB 是由美国 MathWorks 公司于 1984 年开发出的具有高性能数值计算功能的可视化软件，名字由 Matrix 和 Laboratory (矩阵实验室) 两词的前三个字母组合而成，在应用代数、数理统计、自动控制、数字信号处理、模拟与数字通信、时间序列分析、动态系统仿真等领域都具有广泛的应用^[14]。

控制系统的数学模型对于控制系统的研究具有重要意义。SIMULINK 是 MATLAB 的重要组成部分，通过 SIMULINK 系统提供或用户自己创建的功能模块，可以快速实现连续或离散控制系统以及线性或非线性控制系统^[32]的建模、仿真与分析，并可以按照特定的方法改变和设定控制系统的参数，使其与实际控制系统相对应。

4.2 蒸汽温度串级控制系统的分析

4.2.1 蒸汽温度控制对象的动态特性

高温高压过热蒸汽的温度 t 与密度 ρ 、压力 P 之间的关系通常用经验公式表示^[33]：

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{K_m P}{\rho} + C_m P - d_m \\ K_m = \frac{712}{1 - \frac{P_m}{921} \left(\frac{1000}{t_m + 300} \right)^{4.53}} \\ C_m \approx \frac{K_m}{712} \left(\frac{1000}{t_m + 300} \right)^{3.53} \\ d_m \approx K_m \left(\frac{t_m + 300}{219} \right) - t_m \end{array} \right.$$

式中, P_m 、 t_m 分别为使用的压力、温度范围的中心值。

(1) 过热器内蒸汽的连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0$$

式中, τ 和 x 分别为时间和长度坐标变量, v 为蒸汽的流速。

设 D 为蒸汽的质量流量, 若 A 为过热器的蒸汽流通总面积, 则 $D = A\rho v$, 代入上式, 可得

$$A \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial D}{\partial x} = 0$$

在实际流动过程中, 若蒸汽的密度 ρ 比较小, 或者速度和高度变化相对较小, 则有

(2) 过热器内蒸汽的动量守恒方程

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

式中, ζ 为流动阻力系数。

(3) 过热器内蒸汽的热平衡方程

$$A \frac{\partial(hw\rho)}{\partial x} + A \frac{\partial(h\rho)}{\partial \tau} = \alpha s(t_w - t)$$

式中, h 为蒸汽的焓值; t_w 为管壁温度; α 为管壁对过热器内蒸汽的对流放热系

数, $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$; s 为以内壁计算的过热器管子的周长, m 。

(4) 金属管壁的传热方程

$$q - mC_w \frac{\partial t_w}{\partial \tau} = \alpha s(t_w - t)$$

式中, m 为单位长度管壁的质量, C_w 为金属的比热, q 为单位时间内管外放热介质对单位长度金属管壁的放热量。

由此可以看出, 过热蒸汽温度动态特性的数学描述^{[21][34]}由若干个非线性微分方程和代数方程组成, 利用计算机仿真技术分析系统动态特性的关键问题是求解非线性微分方程^[36]。数值积分法是在实际问题中求解常微分方程最常用、最有效的方法。目前实用的数值积分方法按照计算精确度从低到高分别为 Euler 法、梯形法(常用的是改进型 Euler 法)、实时二阶龙格-库塔法和四阶龙格-库塔法。实际过程中, 我们必须根据计算精度和速度、数值解的稳定性、误差估计和自启动问题等因素选择合适的数值积分方法^{[35][36]}。实际上, 在小步长的情况下, Euler 法与二阶及四阶龙格-库塔法的精确度非常接近, 但是 Euler 法的计算时间大约是实时二阶龙格-库塔法的二分之一和四阶龙格-库塔法的五分之一, 因此在控制系统动态仿真时通常选用 Euler 法。

在机组运行工况稳定的情况下, 快速手动操作减温水调节阀, 即阶跃关小减温水调节阀开度, 使减温水流量的变化尽量接近阶跃响应, 过热蒸汽温度控制对象的传递函数由参考文献^[37]给出, 即

$$W(s) = W_{02}(s)W_{01}(s) = \frac{9}{(1+15s)^2(1+25s)^3},$$

其中导前区控制对象的传递函数 $W_{02}(s) = \frac{8}{(1+15s)^2}$ ($^\circ C/mA$), 过热蒸汽温度测量

变送器的传递函数 $\gamma_{\theta_1} = \gamma_{\theta_2} = 0.1$ ($mA/^\circ C$), 执行机构和减温水调节阀门的传递

函数 $K_z K_\mu = 1$, 则惰性区控制对象的传递函数 $W_{01}(s) = \frac{1.125}{(1+25s)^3}$ ($^\circ C/mA$)。

4.2.2 蒸汽温度串级控制系统的参数整定和仿真

控制系统整定参数前, 给定值阶跃扰动作用下, 建立蒸汽温度控制系统 SIMULINK 模型如图 4-1 所示。

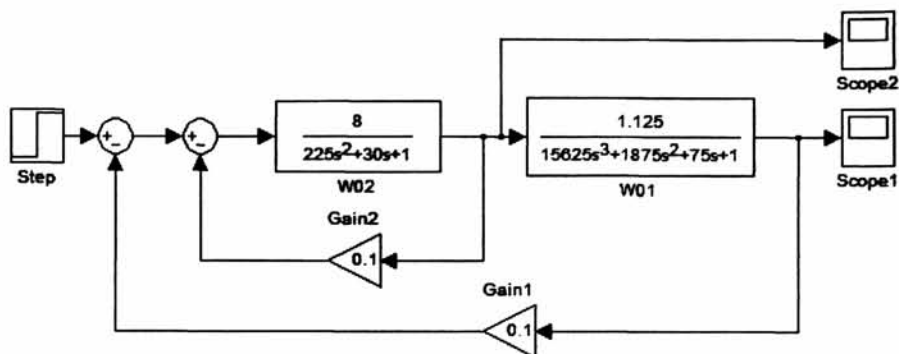


图 4-1 蒸汽温度控制系统整定参数前的模型

控制系统参数整定前, 过热器出口和导前区控制对象的输出特性曲线分别如下图 4-2、图 4-3 所示。

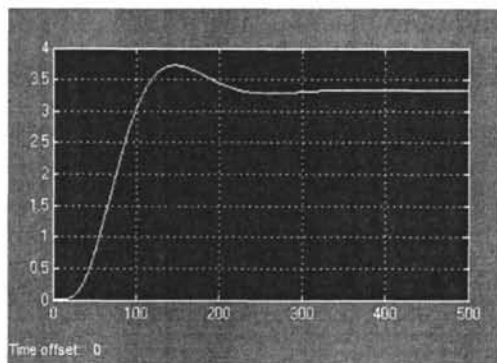


图 4-2 参数整定前, 过热器出口蒸汽温度的输出特性曲线

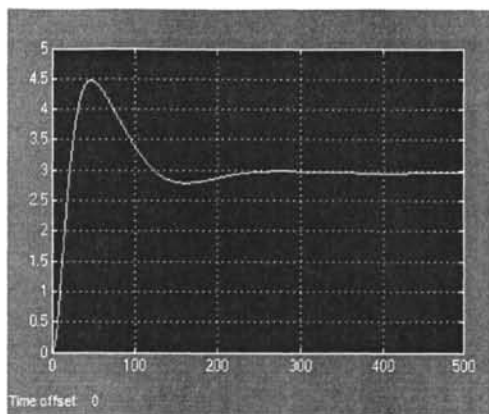


图 4-3 导前区蒸汽温度的输出特性曲线

从过热器出口和导前区控制对象的输出特性曲线可以看出，在控制系统整定参数之前，导前区比过热器出口蒸汽温度响应速度快，但是两者的控制品质指标都不理想，控制系统的输出信号变化不能准确地跟踪输入信号，稳态误差大，调节时间长，快速性差，因此必须根据控制对象的静态和动态特性设置和调整控制系统的参数，即对控制系统进行参数整定^[6]，使控制系统获得最佳的控制品质指标。

目前，控制系统的整定方法在生产上广泛应用工程整定方法。和理论计算整定方法比较，工程整定方法源于理论分析，结合试验和工程实际经验等一套工程上的方法直接在控制系统中进行整定，方法简单，计算方便，容易掌握。常用的工程整定方法有经验法、临界比例带法、衰减曲线法和动态特征参数法等，应该根据具体情况选择一种合适的整定方法。但是无论我们采用何种方法获得了控制系统中调节器的参数，在实际运行时都必须进行不断地修改才能获得满意的控制效果。

根据图 2-8 表示的蒸汽温度串级控制系统原理方框图，我们得到控制原理图 4-4。

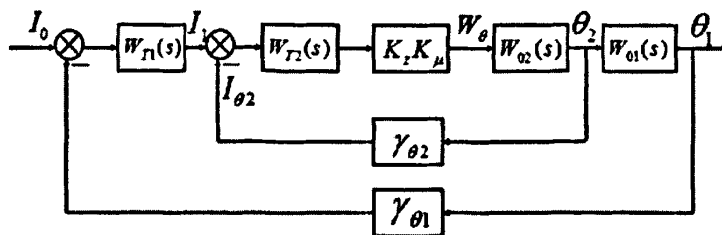


图 4-4 过热蒸汽温度串级控制系统控制原理图

串级控制系统可以看做由副回路和主回路两个闭合回路组成。根据图 2-6 减温水变化时，蒸汽温度的阶跃响应曲线可以看出，导前区蒸汽温度控制对象 $W_2(s)$ 的迟延和惯性明显要比惰性区 $W_1(s)$ 小，而且副调节器选用了比例调节规律，因此副回路的控制过程比较快，可以快速消除减温水自发性扰动，保持过热器出口蒸汽温度基本不变。通常情况下，串级控制系统可以采取主、副回路分别整定的方法进行调节器参数整定。

1. 副回路整定

副调节器选用比例调节规律，设传递函数 $W_{r2}(s) = \frac{1}{\delta_2}$ 。

主回路开路，得到控制系统副回路原理框图如图 4-5 所示。

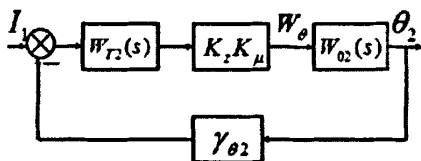


图 4-5 蒸汽温度串级控制系统副回路原理框图

将除 $W_{\theta 2}(s)$ 以外的部分视为等效调节器，则等效副调节器的传递函数

$$W_{r2}^*(s) = W_{r2}(s)K_z K_{\mu} \gamma_{\theta 2} = \frac{1}{\delta_2} K_z K_{\mu} \gamma_{\theta 2} = \frac{1}{\delta_2^*}$$

其中，

$$\delta_2^* = \frac{\delta_2}{K_z K_{\mu} \gamma_{\theta 2}}$$

因此等效副调节器仍然具有比例规律，其中等效比例带为 δ_2^* 。

由系统控制原理图，写出副回路的闭环特征方程式：

$$1 + W_{T2}(s)K_z K_\mu W_{02}(s)\gamma_{\theta 2} = 0,$$

$$1 + \frac{1}{\delta_2} \frac{8}{(1+15s)^2} \times 0.1 = 0,$$

整理得到典型二阶控制系统特征方程式

$$s^2 + \frac{30}{225}s + \frac{1}{225} \left(1 + \frac{0.8}{\delta_2}\right) = 0.$$

根据二阶控制系统特征方程式的标准形式

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0,$$

$$\text{求得 } \omega_n = \frac{1}{15} \sqrt{1 + \frac{0.8}{\delta_2}}, \quad \zeta = \frac{30}{2\omega_n \times 225}.$$

取衰减率 $\varphi = 0.75$ 时，阻尼比 $\zeta = 0.216$ ，求出副调节器比例带

$$\delta_2 = \frac{0.8}{\left(\frac{1}{0.216}\right)^2 - 1} = 0.039.$$

2. 主回路整定

当副回路整定好以后，当满足 $nT \geq 3n_2T_2$ 时，即可认为副回路是快速随动系统。当主调节器输出校正信号 I_1 变化时，副回路迅速动作， $I_{\theta 2} \approx I_1$ ，又因为 $I_{\theta 2} = \theta_2 \gamma_{\theta 2}$ ，所以 $I_1 \approx \theta_2 \gamma_{\theta 2}$ ，则

$$\frac{\theta_2}{I_1} \approx \frac{1}{\gamma_{\theta 2}}$$

整个副回路等效为一个比例环节 $\frac{1}{\gamma_{\theta 2}}$ ，这样便可以做出控制系统主回路等效

原理框图，如图 4-6 所示，这是一个单回路定值控制系统。

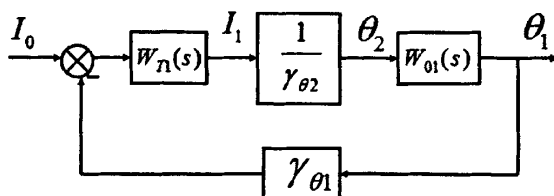


图 4-6 蒸汽温度串级控制系统主回路等效原理框图

如果将主调节器 $W_{\tau 1}(s)$ 以外的部分视为等效控制对象，则等效控制对象的传递函数

$$W_{01}^*(s) = \frac{\gamma_{\theta 1}}{\gamma_{\theta 2}} W_{01}(s)$$

等效控制对象的特性主要与控制对象惯性区的传递函数 $W_{01}(s)$ 有关。求得等效控制对象的传递函数

$$W_{01}^*(s) = \frac{\gamma_{\theta 1}}{\gamma_{\theta 2}} W_{01}(s) = W_{01}(s) = \frac{W(s)}{W_{02}(s)} = \frac{1.125}{(1+25s)^3}$$

该等效控制对象阶跃响应曲线上的特征参数为 $\frac{1}{\rho} = 1.125$, $n = 3$, $T = 25$ 。

$$n = 3 \text{ 时, } \frac{\tau}{T_c} = 0.218, \quad \frac{T_c}{T} = 3.695。$$

根据 $\frac{\tau}{T_c} = 0.218$, 衰减率 $\varphi = 0.75$ 时, 当 $0.2 \leq \frac{\tau}{T_c} \leq 1.5$, 主调节器 $W_{\tau 1}(s)$ 采用

比例积分作用, 传递函数 $W_{\tau 1}(s) = \frac{1}{\delta_1} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$ 时, 调节器的整定参数

$$\delta_1 = 2.6 \frac{\frac{\tau}{T_c} - 0.08}{\rho \frac{\tau}{T_c} + 0.6},$$

$$T_i = 0.8T_c。$$

代入相关数值，求得主调节器参数 $\delta_1 = 0.493$ ， $T_i = 73.9$ (s)。

按照衰减率 $\varphi = 0.75$ 对主调节器和副调节器的参数分别整定后，给定值阶跃扰动作用下，建立串级过热蒸汽温度控制系统的 SIMULINK 模型如图 4-7 所示。

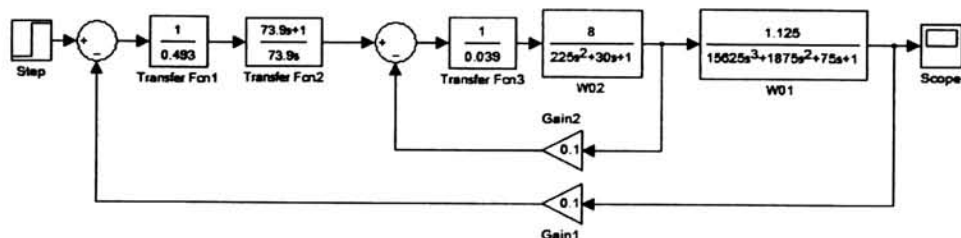


图 4-7 串级蒸汽温度控制系统整定参数后的模型

这时，蒸汽温度的输出特性曲线如图 4-8 所示。

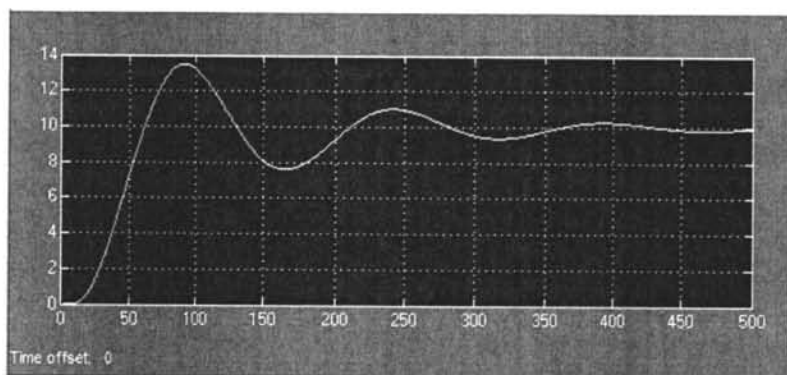


图 4-8 参数整定后，蒸汽温度输出特性曲线

比较图 4-2 和图 4-8，可以看出，在给定值阶跃扰动下，参数整定后，系统的控制品质得到了提高，输出特性曲线要稳定得多，稳态误差小，输出信号变化能够比较准确地跟踪输入信号，调节时间减小。

$t = 100$ s 时，加入减温水扰动（内扰），建立串级蒸汽温度控制系统的 SIMULINK 模型如图 4-9 所示。

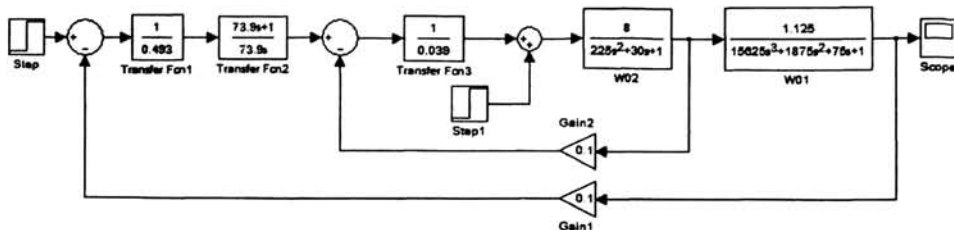


图 4-9 加入减温水扰动后的蒸汽温度控制系统模型

这时，蒸汽温度的输出特性曲线如下图 4-10 所示。

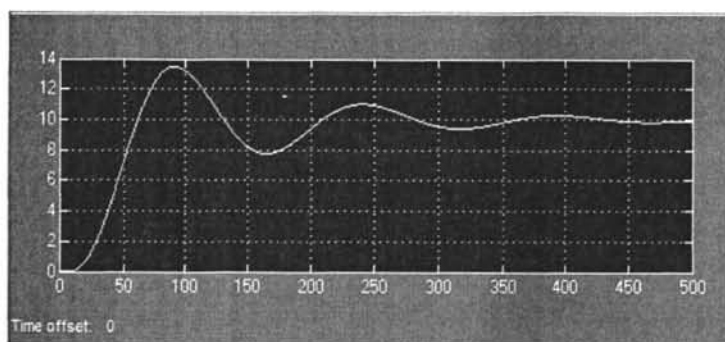


图 4-10 加入减温水扰动后，蒸汽温度输出特性曲线

$t=100\text{ s}$ 时，加入燃烧率扰动（外扰），建立串级蒸汽温度控制系统的 SIMULINK 模型如图 4-11 所示。

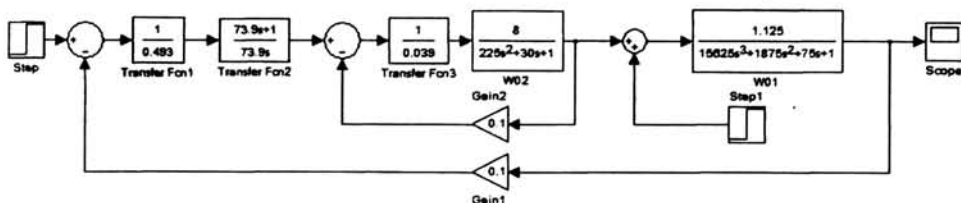


图 4-11 加入燃烧率扰动后的蒸汽温度控制系统模型

这时，蒸汽温度的输出特性曲线如下图 4-12 所示。

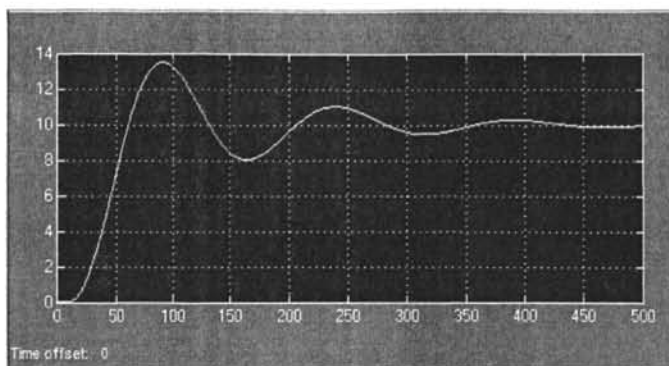


图 4-12 加入燃烧率扰动后，蒸汽温度输出特性曲线

图 4-10 和图 4-12 分别与图 4-8 比较可以看出，串级蒸汽温度控制系统中的调节器均采用 PID 控制规律，概念清晰、算法简捷、易于实现、鲁棒性强、能够快速克服外界扰动（包括内扰和外扰），实现无差调节。但是，由常规 PID 调节器构成的控制系统也存在其固有的缺点：

（1）在实际生产过程中，随着设备运行时间的增加和外界环境因素的变化，蒸汽中的盐分和烟气中的灰渣将导致过热器内外表面逐渐产生污垢，热惯性逐渐增大，即惰性区控制对象的时间常数增加，蒸汽温度对象的精确数学模型具有一定的时变性、不确定性和非线性，使得 PID 调节器参数的整定很难实现动态最优。

（2）理论和仿真研究表明，常规蒸汽温度控制系统的结构特点以及 PID 调节器自身的局限性使得调节器整定参数无法兼顾蒸汽温度控制系统各种扰动作用下的动态特性。如果锅炉运行工况发生较大变化，蒸汽温度控制对象的动态特性和调节器参数将会受到很大影响。

（3）对于具有大延迟和大惯性特性的过热蒸汽温度控制对象，单纯的 PID 线性控制对适应突发性扰动、给定值突变、对象特性时变性等的能力有限，常使被控量出现较大的动态偏差，而这对于过热蒸汽温度控制来说，是不允许出现的。

4.3 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统设计与仿真

常规 PID 控制要求具有精确的数学模型，一旦控制对象的参数或者特性发生较大变化，由于控制器参数固定，使得这种控制方法的控制效果不能令人满意，应用受到一定的限制。根据过热蒸汽温度的静态和动态特性，结合生产运行实际情况进行综合地分析和推理，不断调整控制规律和控制参数，使控制系统能够自动地适应控制对象和机组运行工况的变化，这便产生了蒸汽温度智能控制系统的设计思想。

本文设计的自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统原理图^[38]如图 4-13 所示。

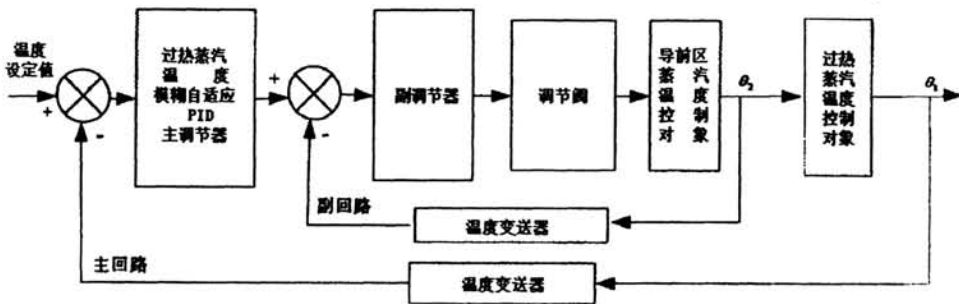


图 4-13 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统原理图

由图 4-13 可以看出，自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统保持了常规串级控制系统的基本结构，副调节器采用常规 P 调节器，主调节器采用参数自适应模糊 PID 控制器，实现 PID 参数的自动整定。下面详细叙述自适应模糊 PID 控制器的设计过程：

1. 确定模糊控制器的输入变量和输出变量

用给定值和测量值比较得到的偏差和偏差变化率表示常规 PID 控制器时，表达形式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

其中， $u(t)$ 为控制器输出量， $e(t)$ 为偏差信号，即控制器输入量， K_p 、 K_i 和 K_D

分别表示控制器的比例放大系数，积分时间系数和微分时间系数。

在常规 PID 控制器中，比例作用根据“偏差的大小”动作，可以使控制系统的响应时间减小，控制精确度提高；积分作用根据“偏差是否存在”动作，可以消除控制系统的静态偏差；微分作用根据“偏差的变化率”动作，可以在偏差信号变化太大之前，在控制系统中引入早期修正信号，有利于克服振荡，提高控制系统的稳定性，加快系统过渡过程。

在过程控制中，虽然常规 PID 控制规律应用比较广，但是它只适用于线性、定常和机理比较简单的控制过程，并且难以在线实时整定控制参数，从而影响控制系统的控制质量；另一方面，模糊控制器虽然可以有效地控制复杂的并且不容易建立精确数学模型的生产过程，但是它只相当于一个比例微分控制作用，控制过程结束后仍然具有一定的静态偏差。将两种控制策略组合在一起，则可以形成一种新型控制器^{[39] [40] [41] [42] [43] [44]}，并且可以进一步通过量化因子、比例因子的调整实现 PID 参数的在线自动整定。

本文用模糊控制器作为监督机构调整 PID 控制器的参数^[45]，因此设计出以蒸汽温度偏差 e 和蒸汽温度偏差变化率 ec 作为两个输入变量，比例放大系数 K_p 、积分时间系数 K_I 和微分时间系数 K_D 作为三个输出变量的自适应模糊 PID 控制器，如图 4-14 所示。在实际运行过程中，根据偏差及偏差变化调整 K_p 、 K_I 和 K_D ^[46]，从而使控制对象具有良好的静态和动态性能^[47]。

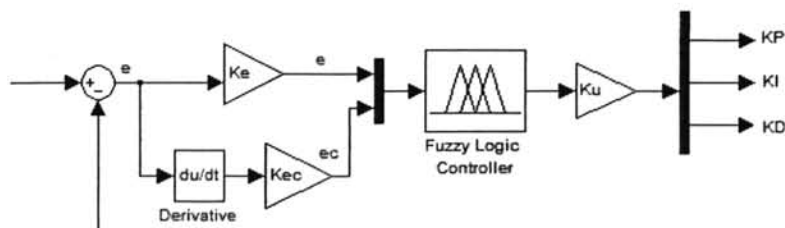


图 4-14 二输入三输出自适应模糊 PID 控制器

2. 描述输入变量和输出变量的语言变量

根据精确程度和控制要求, 蒸汽温度自适应模糊 PID 控制器的模糊输入变量 E 、 EC 和模糊输出变量 K_p 、 K_i 和 K_d 的语言值均采用三级对称划分, 即根据“大、中、小”加上正、负两个方向和零的 $\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 七个等级描述。

3. 定义模糊变量的模糊子集

定义描述模糊变量的各个模糊子集时, 应该使它们较好地覆盖整个论域。

为了方便进行仿真研究, 设计过热蒸汽温度稳定在正常温度的 $[-20, +20]^{\circ}\text{C}$ 内, 偏差变化率整定在 $[-0.2, +0.2]^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (这是两种极限情况, 实际运行过程中一般不会出现), 如果将输入语言变量 E 和 EC 量化到整数论域 $[-6, +6]$, 则偏差的量化因子 $K_e = \frac{6}{20} = 0.3$, 偏差变化率的量化因子 $K_{ec} = \frac{6}{0.2} = 30$; 输出语言变量 K_p 、 K_i 和 K_d 变化范围是 $[-1, +1]$, 量化到整数论域 $[-3, +3]$, 所以输出量 K_p 、 K_i 和 K_d 的比例因子 K_1 、 K_2 和 K_3 均为 $1/3$ 。

各变量的隶属函数曲线选用灵敏度高且在论域范围内均匀分布、等距离的三角型函数, 则分别建立输入变量 E 、 EC 和输出变量 K_p 、 K_i 和 K_d 的隶属函数曲线如图4-15、图4-16所示。

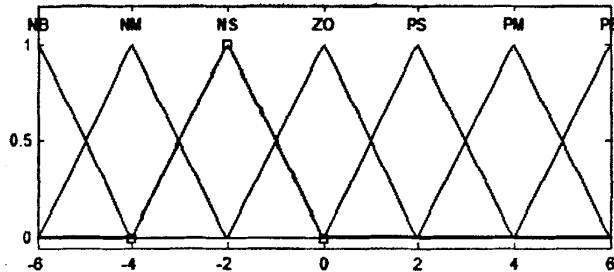
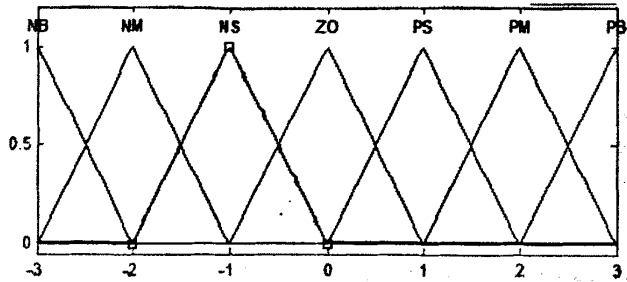


图 4-15 输入变量 E 、 EC 的隶属函数

图 4-16 输出变量 K_p 、 K_i 和 K_d 的隶属函数

4. 建立模糊控制器的控制规则

根据人工控制经验, 得到一般情况下, 在不同的 E 和 EC 时, 控制过程对 K_p 、 K_i 和 K_d 的自整定要求^[47]:

(1) 当 $|E|$ 较大时, 为了提高控制系统的响应速度, 应该选择 K_p 比较大, 同时因为开始偏差 $|E|$ 瞬间变大、 $|EC|$ 比较大, 微分控制作用比较强, 因此应该选择比较小的 K_d 。因为积分饱和现象可能会引起控制系统产生大幅度超调, 所以应该限制积分作用, 取 $K_i = 0$ 。

(2) 当 $|E|$ 和 $|EC|$ 中等大小时, 为使控制系统响应具有比较小的超调量, K_p 、 K_i 和 K_d 都不能取大, 应该取较小的 K_i 值, K_p 和 K_d 的取值大小要适中, 从而使控制系统具有一定的响应速度。这时所用的控制器实际上就是模糊自适应整定PID控制器。

(3) 当 $|E|$ 较小接近设定值时, 为了使控制系统获得良好的稳态性能, 应该增大 K_p 和 K_i 值, 同时为了避免在平衡点出现振荡, 并考虑控制系统抗干扰性能, 应该适当选取 K_d 值。这时所用的控制器实际上是经典的PID控制器。

根据上面的叙述, 我们得到模糊控制器的模糊控制规则表, 如下所示:

表 4-1 K_P 的模糊控制规则表

K_P / EC E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB			PM		ZO	
NM	PB				PS		
NS	PM				ZO	NS	
ZO			PS	ZO			
PS		PS	ZO		NS		
PM		ZO	NS		NM		NB
PB							

表 4-2 K_I 的模糊控制规则表

K_I / EC E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB			NM		ZO	
NM	NB					ZO	
NS			NS		ZO	PS	
ZO		NM		ZO		PM	
PS		NS	ZO	PS			
PM	ZO				PM	PB	
PB	ZO					PB	

表 4-3 K_D 的模糊控制规则表

K_D \ EC \ E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB			NM	PS
NM			NB				
NS	ZO		NM		NS		
ZO			ZO				
PS	ZO						
PM	PB	NS	PS				PB
PB		PM					

本文采用的模糊控制器的模糊控制规则具有以下形式：

$$\text{if } E = A_i \text{ and } EC = B_j \text{ then } U = C_{ij}, i, j=1\sim 7.$$

其中， E 、 EC 和 U 分别表示偏差、偏差变化率和比例放大系数 K_p 、积分时间系数 K_I 或微分时间系数 K_D 的语言变量， A_i 、 B_j 以及 C_{ij} 分别定义在论域 X 、 Y 和 Z 上的模糊语言值。

5. 模糊控制器的输入输出关系曲面显示

根据模糊控制规则表，本文设计的自适应模糊PID控制器利用模糊推理系统编辑器得到输入输出关系曲面如图4-17~图4-19所示。

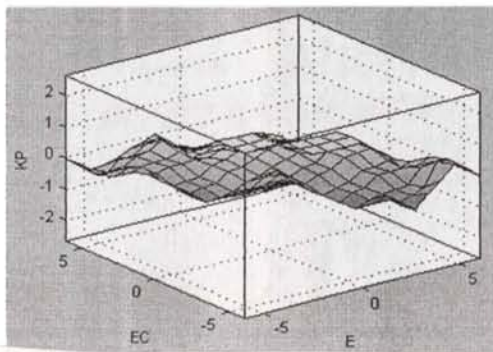
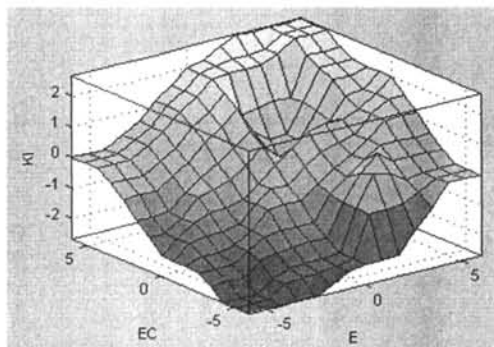
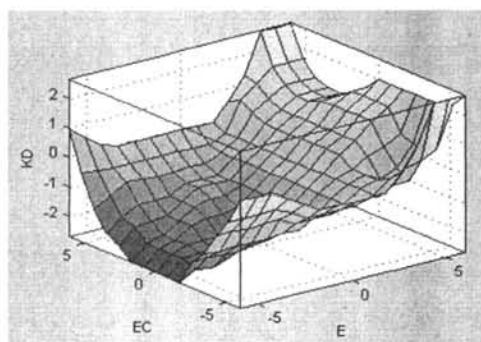


图 4-17 输出为 K_p 时，输入输出关系曲面

图 4-18 输出为 K_I 时, 输入输出关系曲面图 4-19 输出为 K_D 时, 输入输出关系曲面

6. 模糊推理和清晰化运算

模糊逻辑推理是建立在模糊逻辑基础上, 在二值逻辑三段论的基础上发展起来的一种不确定性的推理方法。这种推理过程与人的思维一致或相近, 以模糊判断为前提, 运用模糊语言规则, 推出一个新的近似的模糊判断结论。

模糊推理的结论主要取决于控制规则对应的模糊关系 R 及模糊关系与模糊集合之间的合成运算法则。对于确定的模糊推理系统, 模糊关系 R 一般是确定的, 而合成运算法则与模糊推理方法有关。本文采用模糊控制中普遍使用的 Mamdani 最大最小规则模糊推理法, 则当 E 和 EC 分别取模糊向量 A 和 B 时, 根

据模糊推理合成规则求得控制器输出的模糊子集 $U = (A \times B) \circ R$ ，最后采用中心平均法对 U 进行去模糊，即可以实现把模糊量转化为精确量控制执行机构。

设计自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的 SIMULINK 模型如图 4-20 所示。

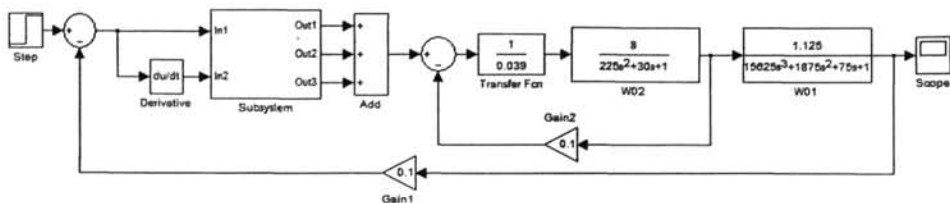


图 4-20 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统

其中，被封装子系统 subsystem 的 SIMULINK 模型如图 4-21 所示。

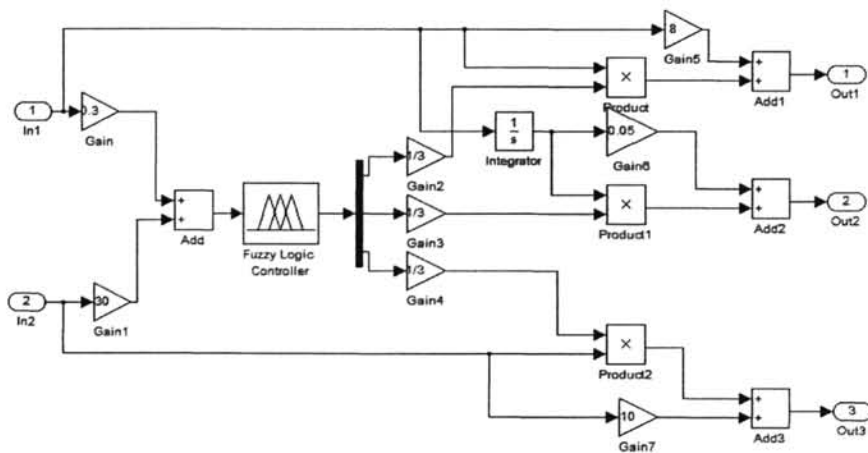


图 4-21 蒸汽温度模糊控制系统子系统

为了更清楚地说明模糊控制器在控制系统中的作用，设计 SIMULINK 模型如下图 4-22 所示，即采用一个显示器同时进行常规和自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的图形输出。

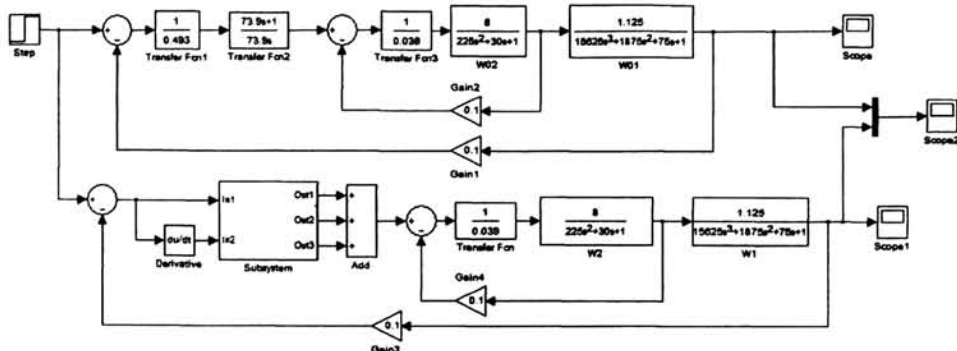


图 4-22 蒸汽温度串级控制和自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的系统构成

在蒸汽温度给定值阶跃扰动作用下，蒸汽温度特性曲线如图 4-23 所示。

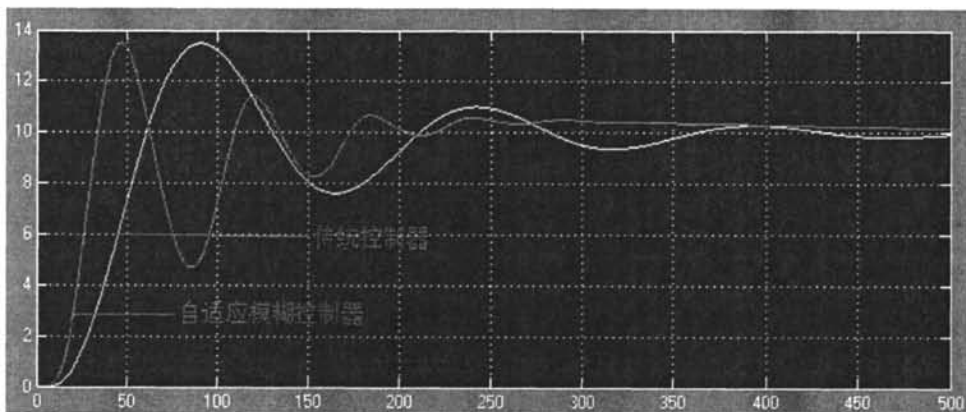


图 4-23 蒸汽温度串级控制和自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的蒸汽温度特性曲线

根据图 4-23 可以看出，两种控制方案都能达到控制要求，保持过热蒸汽温度在正常温度的 $\pm 20^\circ\text{C}$ 内，但是自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统可以根据当前的控制效果在线实时自整定 PID 参数，和常规 PID 串级控制系统比较，不难得到：(1) 从扰动开始到响应达到与稳态值的偏差在允许范围，自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统所需要的时间短；(2) 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统阶跃响应的最大值与其稳态值的差值小；(3) 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统第一次达到稳态值需要的时间短。由于某种原因，模糊控制器的输入量要经过量化，输出值也是离散量，所以模糊控制系统在控制结束时存在一些静态偏差，

对于蒸汽温度自动控制系统是允许的。

$t=100\text{s}$ 时, 加入减温水扰动, 得到自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的 SIMULINK 模型如图 4-24 所示。

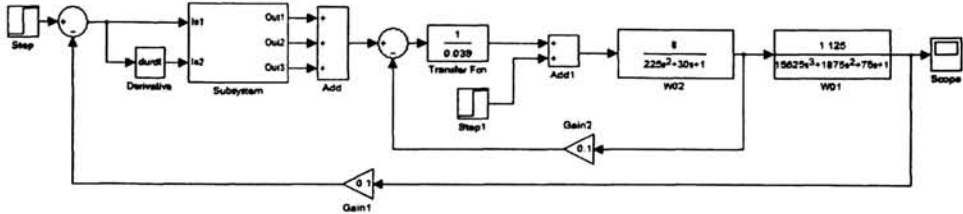


图 4-24 减温水扰动时, 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统

这时, 蒸汽温度特性曲线如图 4-25 所示。

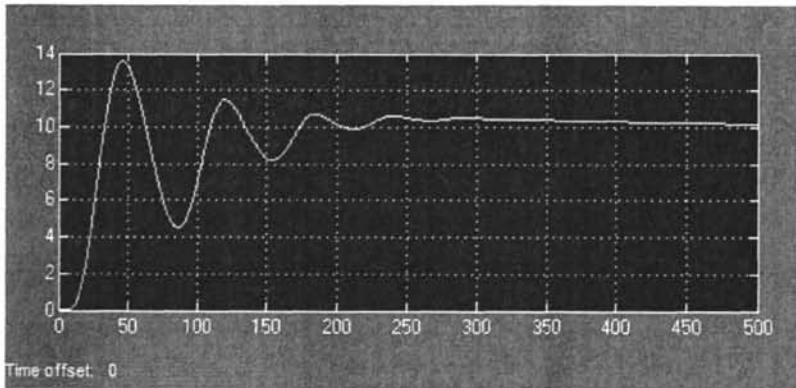


图 4-25 减温水扰动时, 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的蒸汽温度特性曲线

$t=100\text{s}$ 时, 加入燃烧率扰动, 得到自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的 SIMULINK 模型如图 4-26 所示。

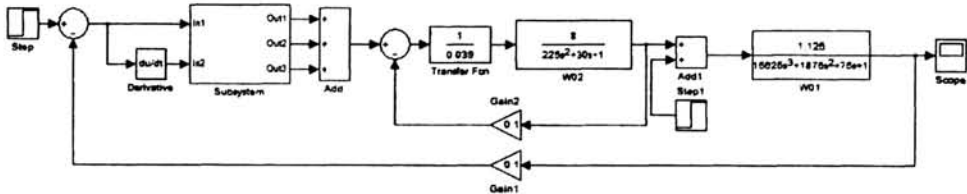


图 4-26 燃烧率扰动时, 自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统

这时，蒸汽温度特性曲线如图 4-27 所示。

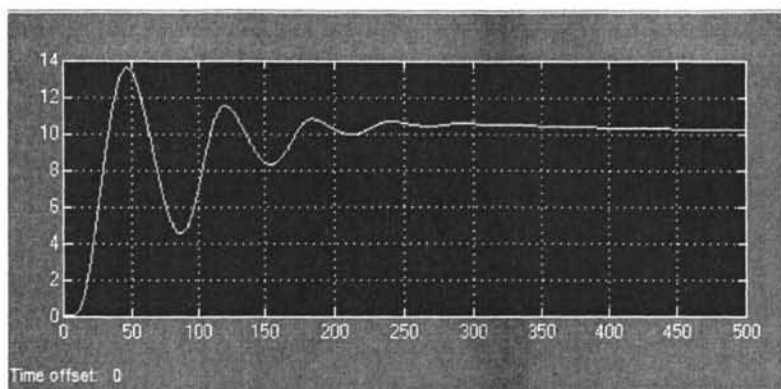


图 4-27 燃烧率扰动时，自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的蒸汽温度特性曲线

可以看出，在外界扰动作用下，自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的过热蒸汽温度特性曲线基本不发生变化，反映了系统在不确定因素和干扰因素作用下具有良好的自适应能力。

4.4 本章小结

本章介绍了 MATLAB 的动态系统仿真工具 SIMULINK，建立了基于 SIMULINK 的蒸汽温度串级控制系统和自适应模糊 PID 蒸汽温度控制系统的模型，并对两种不同控制系统分别进行了给定值阶跃响应和扰动（包括内扰和外扰）阶跃响应进行了仿真分析比较。

第五章 结论与展望

5.1 主要结论

作为火力发电机组中的主要参数，过热蒸汽温度的测量和控制对于电厂的安全、经济运行具有重要的作用。过热器是一个多容而且迟延比较大的惯性环节，影响过热器出口蒸汽温度的因素很多，并且各种扰动因素之间相互影响。对各种不同的扰动，过热蒸汽温度的动态特性也各不相同，这就增加了过热蒸汽温度控制系统的复杂程度。对过热汽温的控制采用的常规PID控制方案结构简单、特性直观、鲁棒性强，并且能够实现无差调节，但是随着电力生产的发展以及工艺的革新，对操作条件要求更加严格，变量间的相互关系更加复杂，并且由于过热蒸汽温度的大迟延、大惯性和非线性等特点，常规PID控制的效果并不理想。为了适应生产发展的需要，且基于自动控制理论的发展，越来越多的智能控制技术，被引入到过热蒸汽温度控制过程中。作为其中重要的一个分支，模糊控制不依赖控制对象的精确数学模型，参考专业技术人员的经验知识和操作依据，本文主要设计了一种自适应模糊PID蒸汽温度控制系统，通过仿真试验，证明这种控制系统的品质指标优于常规蒸汽温度控制系统，并且在不确定因素和干扰因素作用下具有良好的自适应能力。

总的来说，本文主要做了以下几方面的工作：

(1) 根据火力发电厂过热蒸汽温度控制对象的静态特性和动态特性，并结合洛阳首阳山电厂二期300MW机组实际情况，介绍了锅炉蒸汽温度串级控制系统的基本控制方案和参数整定方法。

(2) 根据模糊控制理论的发展现状，设计了一种自适应模糊PID蒸汽温度控制系统。

(3) 对常规锅炉蒸汽温度控制系统和自适应模糊PID蒸汽温度控制系统分别

进行了给定值阶跃响应和扰动阶跃响应的仿真试验。

5.2 后续工作展望

由于作者水平有限，本文难免有疏漏和不足之处，有待今后进一步研究。

(1) 仿真过程中所用的控制对象的模型简单，控制系统的给定值和扰动也只是阶跃信号，还需要对控制系统进行深入地了解 and 掌握。

(2) 本文只是通过仿真试验得出一定的研究结论，初步证明了采用现代控制方案的可行性，具体应用到实际生产过程中，还需要做许多的工作。

参考文献

- [1]赵明旺, 王杰. 智能控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010
- [2]Shizhong He. Control of Dynamical Processes Using an on-line Rule-Adaptive Fuzzy Control System[J]. Fuzzy Sets and Systems. 1993
- [3]师黎, 陈铁军, 李晓媛等. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009
- [4]姜长生, 王从庆, 魏海坤等. 智能控制与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [5]张玉铎, 王满稼. 热工自动控制系统[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993
- [6]丁轲轲. 热工过程自动调节[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010
- [7]阮刚, 罗自学, 周怀春. 锅炉过热蒸汽温度控制新策略动态仿真研究[J]. 华中电力, 2004年5月
- [8]张波. [硕士学位论文]火电厂过热蒸汽温度串级模糊控制的研究[D]. 重庆大学, 2008
- [9]周光明, 马永光. 神经网络在火电厂过热蒸汽温度控制系统中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2005年5月
- [10]刘林辉, 黄永红, 张亚强. 300MW火电机组过热蒸汽温度模型预测控制研究[J]. 热力发电, 2009年9月
- [11]王田, 薛建中, 习志勇等. 基于RBF神经网络辨识的过热蒸汽温度控制[J]. 热力发电, 2008年10月
- [12]韩耀鹏. [硕士学位论文]模糊控制在蒸汽温度控制系统中的仿真研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2004
- [13]边立秀, 周俊霞, 赵劲松等. 热工控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001
- [14]刘文定, 王尔林. 过程控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009
- [15]刘期彬. [硕士学位论文]大型火力发电厂过热汽温控制策略的改进[D]. 上海交通大学, 2009
- [16]丁利, 楼波. 过热蒸汽温度变化对锅炉经济和安全影响研究[J]. 节能技术, 2010年7月
- [17]李遵基. 热工自动控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997
- [18]陈广栋. 锅炉主蒸汽温度的控制、调节[J]. 中国科技博览, 2012年1月
- [19]黄晨. [硕士学位论文]基于DSP的过热蒸汽温度的控制系统的设计[D]. 安徽理工大学, 2009
- [20]黄新元. 电站锅炉运行与燃烧调整[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [21]姚金环. 分散控制系统中的超驰控制[J]. 华东电力, 2000年3月
- [22]刘向杰, 周孝信. 模糊控制在电厂锅炉控制中的应用现状及前景[J]. 电网技术, 1998年11月
- [23]李占宝. [硕士学位论文]电站锅炉汽包水位模糊控制的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2002
- [24]Mamdani E.H, Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant[S]. Proc IEEE, 1974
- [25]王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003

- [26] Zadeh L.A, Fuzzy Set[J], Information and control. 1965
- [27] 李国勇. 智能预测控制及其MATLAB实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010
- [28] 余琼芳, 陈迎松. 模糊数学中隶属函数的构造策略[J]. 漯河职业技术学院学报, 2003年3月
- [29] 闻新, 周露, 李东江等. MATLAB模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [30] 谢麟阁. 自动控制原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991
- [31] 王文兰, 凌呼君, 冯永祥. 基于MATLAB在电厂单元机组过热汽温控制系统的应用[J]. 自动化技术与应用, 2007年2月
- [32] Liu Wending, Meng Keming, Dong Wenbin. The self-adjusting intelligent Fuzzy control system to superheated steam temperature in mono-block unit[C]. In: Proceedings of the 3rd World Congress Intelligent Control and Automation. 2000
- [33] 刘正华, 赵津津, 佟莹欣. 热工自动检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011
- [34] 阮刚. [硕士学位论文] 锅炉过热蒸汽温度控制新策略动态仿真研究[D]. 华中科技大学, 2004
- [35] 王广军, 辛国华. 热力系统动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [36] 韩璞. 火电站仿真机原理及应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998
- [37] 马玲, 王爽心, 谷毅. FUZZY-PI串级系统在火电厂汽温控制中的应用[J]. 华北电力技术, 2004年4月
- [38] 吴明永, 王国伟. 基于模糊自适应PID的锅炉汽包水位智能控制系统[J]. 工业锅炉, 2010年4月
- [39] Misir D, Malki H A, Chen G R. Design and analysis of a fuzzy proportional integral derivative controller[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996
- [40] Malki H A, Misir D, Feigenspan D, et al. Fuzzy PID control of a flexible joint robot arm with uncertainties from time varying loads[S]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1997
- [41] Li W. Design of a hybrid fuzzy logic proportional pulse conventional integral derivative controller[S]. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1998
- [42] Xu J X, Hang C C, Liu C. Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller[J]. Automatics, 2000
- [43] Mudi R K, Pal N R .A robust self tuning scheme for PI and PD type fuzzy controllers[S]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1999
- [44] Wu Z Q, Mizumoto M. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996
- [45] 复红, 赏星耀, 宋建成. PID 参数自整定方法总综述[J]. 浙江科技学院学报, 2003年12月
- [46] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [47] 孙志英, 伶振声, 赵文升等. 模糊自调整PID过热汽温控制系统[J]. 华北电力大学学报, 2001年4月

致谢

在论文的撰写过程中，很多人都给予了我直接或间接地帮助。

首先，我要感谢的是导师王杰教授，他从论文的选题、开题一直到论文撰写结束都给予了我很多指导性的建议和宝贵的意见，并帮助获得相关的资源。另外，在论文的关键问题设计阶段，朱晓东老师也曾经给予了耐心的指导，在此表示衷心的感谢！

我还要真诚地感谢郑州大学电气工程学院，在我的几年在职硕士生学习生活阶段，这里的众多老师和同学们都给予了我无私的帮助和前进的力量。

同时，感谢哺育我生长的父母，感谢给予过我帮助的朋友们，是他们给予我学业上的鼓励与关心。

最后，感谢在本论文中被引用文章的不相识的老师和朋友们！

附录 个人简历、攻读学位期间发表论文与研究成果

1. 个人简历

赵津津，1975年4月23日出生，1997年7月毕业于东北电力学院生产过程自动化专业，获得工学学士学位，现在读郑州大学电气工程学院控制工程专业在职研究生。

2. 攻读学位期间发表论文

- [1]赵津津. 深化教育改革, 全面提高教育质量[J]. 中国教育导刊, 2009年1月
- [2]赵津津, 董爱华, 雷莱. 模糊控制在锅炉汽包水位控制系统中的应用[J]. 科学时代, 2011年9月
- [3]雷莱, 赵津津, 曾志伟. 模糊传感器及其在模糊控制洗衣机中的应用[J]. 科学时代, 2011年10月
- [4]刘正华, 赵津津, 佟莹欣. 热工自动检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011

3. 研究成果

- (1) 2010年8月, 参与完成《热工测量仪表使用及系统维护》网络课程, 获得三等奖(发证单位: 河南省教育厅)
- (2) 2010年9月, 参与第十四届全国多媒体教育大奖赛, 获得二等奖(发证单位: 河南省教育厅)
- (3) 校级科研项目: 风力发电技术研究与分析, 2010年11月结题
- (4) 2011年7月, 省级精品课程《热工测量仪表及系统维护》的建设工作
- (5) 2013年2月, 网络课程《热工测量仪表及系统维护》的建设工作