

火力发电机组过程控制工程师培训教材

# 机组自动控制 系统

第四册

江苏省电力科学研究院有限公司 组编  
何育生 编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

火力发电机组过程控制工程师培训教材

# 机组自动控制系统 (第四册)

---

江苏省电力科学研究院有限公司 组编  
何育生 编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是《火力发电机组过程控制工程师培训教材》丛书的第四分册。本书在简要地介绍了自动调节系统原理的基础上,重点对火力发电厂热工控制系统的组态、调试以及维护进行了讨论,内容包括被控设备的工艺流程、控制系统的任务、被控对象的动态特性和燃煤机组常用的几种控制策略等,并对控制方案中的一些细节进行了剖析。本书共分五章,第一章结合试验、整定等实际生产过程需要,介绍了自动调节系统的原理、现场试验方法、SAMA图的应用等;第二章至第五章分别对火电厂蒸汽温度控制系统、给水控制系统、燃烧控制系统以及机组的协调控制系统展开了讨论。

本书可以作为生产控制过程工程师的培训教材,同时对从事热工自动控制系统现场运行的技术人员能起到交流经验、提高分析能力的作用,也可供大中专热工自动控制专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机组自动控制系统/江苏省电力科学研究院有限公司  
组编;何育生编. —北京:中国电力出版社, 2005

火力发电机组过程控制工程师培训教材

ISBN 7-5083-2551-6

I. 机… II. ①江…②何… III. 发电机-机组-自  
动控制系统-工程师-技术培训-教材 IV. TM310.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 085968 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>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2005 年 1 月第一版 2005 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 4 印张 101 千字

印数 0001—3000 册 定价 9.00 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)

# 编审委员会

主任委员 王海林

副主任委员 蒯狄正

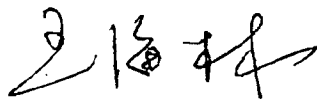
委 员 张红光 鲁松林 张 斌 陈 斌  
王 继

火力发电机组过程控制系统是随着现代大型工业生产自动化的不断兴起和过程控制要求的日益复杂应运而生的综合控制系统，它是计算机技术、系统控制技术、网络通信技术和多媒体技术相结合的产物，是完成过程控制、过程管理的现代化设备。现代化的电力企业已经大规模地使用集散控制系统作为企业生产过程的自动化控制。

先进的控制技术带来的好处是显而易见的，但也要求电力企业员工特别是过程控制工程师有很高的人力素质（包括专业技能），现在电力企业的经营，人力素质的提升成为企业竞争中最重要经营策略之一。提升人力素质就是提高电力企业各方面品质，就是提高生产力，就是提高竞争力。而提高人力素质最直接、最有效而成本最低的方法就是教育培训。

随着自动控制技术的发展，在发电企业中过程控制的重要性被逐渐体现出来，为了使发电机组安全、稳定的运行在电网中，发电企业需要一大批有相当专业技能和很高人力素质的过程控制技术及过程控制技术管理人员。过程控制工程师培训就是针对火力发电机组生产过程的热工控制专业技能的一种提高方式。

因此，江苏省电力科学研究院有限公司（江苏省电力公司技术中心）在培训讲义基础上组织编写了本套培训教材，它得到了江苏省电力公司、东南大学动力系及有关发电企业的各位领导和同仁的指导和帮助，谨向他们表示诚挚的谢意。



2004年7月6日

由于用户对电能<sub>在质上的提高和量上的增加</sub>，电能作为特殊商品，发、供、用电必须同时进行，发电机组的稳定运行越来越重要；由于用户的用电结构在变化，使得电网负荷的峰谷差加大，发电机组要求有调峰能力，对这种电网负荷指令的随时变化要求能够快速稳定地响应；由于单元机组容量的逐步增大，机组的热工参数的提高，热工被控对象变得越来越复杂。所有的这些，都对火力发电厂热工自动控制提出了更新更高的要求。

本书在介绍自动调节系统控制理论的基础上，以300MW火力发电单元机组为控制对象，重点对机组的协调控制系统、燃烧控制系统、给水控制系统以及蒸汽温度控制系统进行了讨论，内容包括被控设备的工艺流程、控制系统的任务、被控对象的动态特性和燃煤机组常用的几种控制策略，并对控制方案中的一些细节进行了剖析。

本书在编写中注重实用性和可操作性。在自动调节系统基本控制理论的内容里，介绍的主要是从事热工控制专业工作人员所必须要掌握的内容，而且重点放在自动调节系统的现场试验方法上，如被控对象动态特性的试验获得方法、阀门及风门挡板的特性试验方法、自动调节系统的现场投运和整定方法等等，有些试验方法是根据我们长年在现场进行相关试验时的试验措施编写而成，具有很强的可操作性。在介绍协调、燃烧、给水和汽温控制系统的章节里，所列举的系统结构、控制逻辑、直至系数设置和参数整定，大多是在运行机组上的实例，具有参考价值。

本书注意了所述内容的通用性。对同一控制对象使用较为普遍的多种控制策略都作了介绍和讨论，并分析了各种控制策略的特点。例如协调控制系统中的直接能量平衡控制策略和间接能量

平衡控制策略、燃料控制系统中的燃料控制器指令调节磨煤机一次风量和调节磨煤机的给煤机转速等等。

本书还注意到编写依据的实时性和先进性，以电力行业最新的标准、规程、导则、要求和法规规定为依据编写而成。例如，在给水平衡调节系统信号测量这一节中，《防止电力生产重大事故的二十五项重点要点》[国电发（2000）589号]和《国家电力公司电站锅炉汽包水位测量系统配置、安装和使用若干规定（试行）》[国电发（2001）795号]作为汽包水位补偿运算的依据；又如，在模拟量控制系统性能指标中，编写依据是2001年国家经贸委颁布执行的《火力发电厂分散控制系统运行检修导则》[DL/T774-2001]，该导则针对单机容量300MW及以上采用分散控制系统（DCS）的火力发电机组而制定，是目前热控专业对分散控制系统进行检修和维护的最新导则。

另外，本书还对机组协调控制系统中设计的快速甩负荷（FCB）逻辑，从意义上、功能上以及组态上进行了实例分析，由于目前试验难度比较大，实现起来有一定的风险，这里仅供各位同行讨论。

吕佳同志为本书绘制了所有的插图，在此表示衷心感谢！

由于作者水平有限，加之编写时间仓促，书中的描述得不够详细、谬误和不妥之处也在所难免，敬请各位批评指正。

何育生

2003年10月

序

前言

|            |                    |    |
|------------|--------------------|----|
| <b>第一章</b> | <b>自动调节系统的基础知识</b> | 1  |
| 第一节        | 引言                 | 1  |
| 第二节        | 自动调节系统的基本概念        | 2  |
| 第三节        | 热工对象动态特性的特点        | 7  |
| 第四节        | 调节器的动态特性           | 19 |
| 第五节        | 自动调节系统的品质指标        | 23 |
| 第六节        | 阀门和风门挡板的特性试验       | 27 |
| 第七节        | 自动调节系统的整定方法        | 28 |
| 第八节        | 自动调节系统的试验方法        | 35 |
| 第九节        | 自动调节系统中的前馈控制       | 36 |
| 第十节        | 用 SAMA 图表示的自动调节系统图 | 38 |
| <b>第二章</b> | <b>蒸汽温度自动控制系统</b>  | 42 |
| 第一节        | 汽温控制系统的任务          | 42 |
| 第二节        | 汽温控制系统的对象特性        | 42 |
| 第三节        | 过热汽温控制系统结构         | 45 |
| 第四节        | 汽温控制系统细节分析         | 48 |
| 第五节        | 再热汽温控制系统结构         | 52 |
| <b>第三章</b> | <b>给水自动控制系统</b>    | 55 |
| 第一节        | 给水系统信号的测量          | 55 |
| 第二节        | 给水控制系统的任务          | 64 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 第三节        | 给水控制系统的对象特性 .....       | 65         |
| 第四节        | 给水系统的设备配置 .....         | 68         |
| 第五节        | 给水全程控制系统的结构 .....       | 69         |
| 第六节        | 给水控制系统细节分析 .....        | 72         |
| <b>第四章</b> | <b>燃烧控制系统 .....</b>     | <b>77</b>  |
| 第一节        | 燃烧控制系统任务 .....          | 77         |
| 第二节        | 燃烧控制系统的对象特性 .....       | 78         |
| 第三节        | 燃烧控制系统的控制策略 .....       | 81         |
| 第四节        | 燃烧各控制子系统的分析 .....       | 84         |
| <b>第五章</b> | <b>协调控制系统 .....</b>     | <b>96</b>  |
| 第一节        | 协调控制系统的任务 .....         | 96         |
| 第二节        | 协调控制系统的对象特性 .....       | 97         |
| 第三节        | 机组的负荷控制方式 .....         | 98         |
| 第四节        | 协调控制的控制策略 .....         | 101        |
| 第五节        | 机组负荷指令和压力设定值的形成回路 ..... | 108        |
| 第六节        | 机组负荷指令的限制运算逻辑 .....     | 109        |
|            | <b>参考文献 .....</b>       | <b>117</b> |

# 自动调节系统的基础知识

## 第一节 引言

火力发电厂的生产过程是将一次能源转换成二次能源的过程，对于燃煤机组，就是将燃煤中的化学能依次转换为热能、机械能、获得电能。

电力生产过程中，除了必须保证产生的电能满足一定的电量和质量要求外，同时主要保证生产的安全和经济。这就要求生产过程必须在预定的工况下进行。但是，在实际生产过程中总会经常受到各种因素的干扰和影响。首先，机组的负荷决定于用户的需要，即网调的 AGC 指令，随时变动的负荷影响机组的稳定工作，这种来自外界的干扰称为外扰。其次，即使机组带固定的基本负荷运行，但它们的运行工况也会不停变动，例如，燃煤品种的变化、执行机构的抖动、运行设备的状态变化等情况都会影响锅炉的稳定运行，进而影响整个机组的稳定，这类来自系统内部的扰动称之为内扰。因此，机组的运行工况经常由于外扰或内扰而发生变动。任何工况的变化都会引起机组某些运行参数的变化，从而使运行工艺参数发生变化而偏离规定值。

过去的小型机组可以部分或全部地由人工调节。在这种情况下，运行人员必须时刻监视仪表的指示值，检查设备的工作情况，并根据机组的运行特性进行分析，作出正确的判断和及时的调整。运行人员对变化的参数及时进行操作，对它们加以控制，以使这些参数保持为生产所期望的数值，这一操作控制过程就是调节。随着机组容量的增大，蒸汽参数的提高以及分散控制系统的

应用,这个机组的结构也愈加复杂,因此,对运行参数调节的要求也愈来愈高,人工调整已不能满足机组安全稳定运行的需求,有运行经验告诉我们,某 300MW 机组在升负荷过程中,汽包给水控制如果不能及时地投入自动调节,而靠运行人员手动调节,则难以将机组负荷稳定在高负荷运行。因此,需要将这个对参数的操作控制过程用一套自动控制装置来代替人工操作,完成调节任务,这就是自动调节。

自动调节是一门能自动维持生产过程参数为要求值,以使生产过程保持在规定的工况下运行的自动控制技术。

## 第二节 自动调节系统的基本概念

### 一、术语

#### 1. 被调对象

被调节的生产过程或工艺设备称为被调对象。

#### 2. 调节设备

如传感器、变送器、调节器、执行机构等用于代替人的眼睛、大脑和手来完成调节任务的装置,称调节设备。

#### 3. 自动调节系统

调节设备和被调对象构成的具有调节功能的统一体称为自动调节系统。

#### 4. 被调量

被调对象中需要加以控制和调节的物理量,叫做被调量或被调参数。不能把对象中流入或流出的物质如水、汽等工作介质当做被调对象的被调量。

#### 5. 给定值

根据生产过程的要求,规定被调量应达到并保持的数值,叫做被调量的给定值。

#### 6. 输入量

输入到调节系统中并对被调参数产生影响的信号(包括给定

值和扰动)叫做输入量。不可把调节设备使用的能源(如压缩空气、电源等)当做调节系统的输入量。

#### 7. 扰动

引起被调量产生相反变化的各种因素称为扰动。阶跃变化的扰动叫做阶跃扰动。内扰指系统内部的扰动,外扰指系统外部的扰动。

#### 8. 反馈

把输出量的全部或部分信号送到输入端称为反馈。反馈信号与输入信号极性相同时称为正反馈;极性相反时称为负反馈。

#### 9. 开环与闭环

输出量和输入量之间存在反馈回路的系统叫做闭环系统;反之,称为开环系统。

#### 10. 最优控制系统

为达到最优性能指标的控制系统。

#### 11. 自适应控制

为了达到最优控制,随外部条件变化,自动调整自身结构和参数的控制。

#### 12. 自学习控制

随外界条件变化,不断积累经验的自适应系统。

### 二、自动调节系统的分类

工业生产中所应用的自动调节系统的形式是多种多样的,为了分析各种调节系统的特性,根据不同的分析方法有不同的分类。

#### 1. 按给定值变化规律分类

按给定值变化规律区分,有定值调节系统、程序调节系统和随动调节系统。

定值调节系统的给定值在系统工作过程中是恒定的。扰动作用会使被调量偏离给定值,在调节过程结束后被调量能回到(或接近)给定值。锅炉的汽包水位等调节系统都属于这类系统,在任何负荷下,在任何时间,汽包水位的定值都是不变化的。

按调节过程结束后被调量与给定值之间偏差的情况,定值调节系统又分为有差调节系统和无差调节系统。有差调节系统在调节过程结束后,被调量与给定值之间存在静差。具有比例调节规律的调节系统属于有差调节系统。无差调节系统在调节过程结束后,被调量与给定值之间不存在静差。通常,采用比例积分调节器的调节系统就是一种无差调节系统。

程序调节系统的给定值是根据生产过程的工艺要求,按预先确定的时间函数变化的。例如在锅炉按升温、升压曲线启动的过程中,汽温汽压调节系统属于程序调节系统。

随动调节系统的给定值既不恒定又不按预定的规律变化,而是决定于某些外来因素,是某参数的变化值。系统的输出跟着给定值变化,所以又称为跟踪系统。例如锅炉烟气含氧量调节系统属于随动调节系统,含氧量的定值随负荷变化而变化,汽机的定-滑-定压力曲线等。

## 2. 按调节系统的结构分类

按调节系统的结构区分有闭环调节系统、开环调节系统和复合调节系统

输出量和输入量之间存在反馈回路的系统叫做闭环系统,大多数的调节系统都是闭环调节系统,如高低加水位等定值调节系统。输出量和输入量之间不存在反馈回路的系统叫做开环系统,如某 300MW 机组的燃料风调节系统 (FUEL AIR DAMPER CONTROL) 和燃烬风调节系统 (OVERFIRE AIR DAMPER CONTROL) 都是开环调节系统。

既有开环调节作用又有闭环调节作用的系统复合调节系统,其调节效果比一般闭环调节系统的更好,如采用前馈信号的闭环调节系统都属于复合调节系统,其中的前馈调节是开环调节,如引入蒸汽流量作为前馈信号的汽包水位调节系统,引入总风量作为前馈信号的炉膛负压调节系统等等。

## 3. 按调节系统内闭环回路的数量分类

按调节系统内闭环回路数量区分,有单回路调节系统和多回

路调节系统。

单回路调节系统中只有一个被调量信号反馈到调节器的输入端，只形成一个闭环回路。这种调节系统适用于简单的调节对象。

如果调节对象有两个或两个以上的输出信号被反馈的调节器的输入端，从而形成两个以上的闭环回路的系统，则属于多回路调节系统。带有超前信号的汽温调节系统，就是多回路调节系统。

#### 4. 按系统的特性分类

按系统特性区分，有线性调节系统和非线性调节系统。

系统中，有一个环节是非线性的，则称这个系统为非线性控制系统，当前火电厂热力生产过程中广泛采用的是线性、闭环定值调节系统，基本上能满足生产实际要求。也有特例，偶尔引入个别的非线性元件，如引风调节系统中的死区环节、协调控制系统中的饱和和特性环节等等。

### 三、自动调节系统的原理方框图

调节系统的原理方框图是人们从实际生产过程中总结出来的一种描述系统组成原理的方法，用方框图分析和综合自动调节系统是非常方便的。在方框图中，用方框表示各种环节，环节之间信号的传递方向用带箭头的线段表示。用符号 $\otimes$ 表示信号的叠加点，称做比较器，箭头指向 $\otimes$ 的表示比较器的输入量，箭头离开 $\otimes$ 的表示比较器的输出量。输出量等于各输入量的代数和。

方框图清楚地表示出自动调节系统中信号在各环节中的传递方向和顺序，表示调节系统的动态结构，在对调节系统的分析和设计是很有用的。对每个环节而言，输入量和输出量是确定的每个环节受它前一个环节的作用，又按照它本身的特性输出信号，并对下一个环节施加作用。每个环节的输入量是引起该环节内部发生运动的原因，其输出量是该环节发生运动的结果。就是说，输入量的变化引起输出量的变化，而输出量不会反过来去影响输入量，这种特点称做调节系统的单向性。

方框图同工艺流程图不同，方框图中的信号线并不表示工质的流向，而只表示调节系统中各环节之间的信号传递关系。在实际工作中，为便于分析问题，可以把一个设备划分成几个环节，或者把几个设备合并为一个环节。

任何一个调节系统或复杂的环节都可以看作是由若干个比较简单的环节组成的，这些简单的环节是按一定的信号传递方式联系起来的。系统的特性是由这些简单环节的特性综合而成的。

常规的热工自动调节系统主要由四大部分组成：调节器、执行机构、测量变送器和被控对象，其原理方框图见图 1-1。

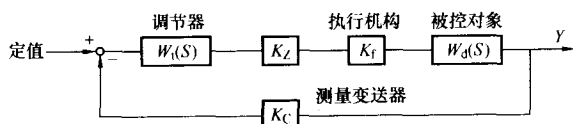


图 1-1 热工自动调节系统原理方框图

调节器的作用是接受主信号和定值信号之间的偏差信号，进行一定规律的运算后产生一个调节作用送给执行机构。通常用  $W_c(S)$  表示。

执行机构通常包括执行器和阀门，它接受调节器送来的控制信号去完成被控对象的控制任务。通常用  $K_L$  和  $K_T$  表示。

测量变送器由测量元件和变送器组成，它的作用是把系统中的被控信号测量出来，并把非电量信号转换成能进行控制运算的电量信号，通常用  $K_C$  来表示。

在电厂热工系统中，温度信号采用热电偶或热电阻进行测量，然后送进 DCS 内部进行处理；流量信号采用节流孔板和喷嘴进行测量，送差压变送器进行转换；水位信号通过测量筒产生差压信号，送差压变送器进行转换；压力信号送压力变送器进行转换。

被控对象是指需要进行控制的生产设备和生产过程，通常用  $W_d(S)$  表示，被控对象中需要进行控制的物理量称为被控制

量。

对于火力发电机组，被控制量和相应的控制手段可以用表 1-1 表示。

表 1-1 火力发电机组被控制量和相应的控制手段

| 被控制量      | 控 制 手 段             |
|-----------|---------------------|
| 汽包水位      | 给水调节阀门、给水泵转速        |
| 主蒸汽温度     | 减温水阀门开度             |
| 再热汽温      | 烟气再循环挡板、燃烧器倾角、减温水阀门 |
| 锅炉负荷指令    | 磨煤机一次风量、给煤量         |
| 炉膛负压      | 引风挡板开度、引风勺管位置       |
| 烟气含氧量、送风量 | 送风挡板开度、动叶导向、送风勺管位置  |
| 一次风压      | 一次风机挡板开度、动叶导向       |
| 机组功率      | 汽机调门开度、锅炉燃烧率        |
| 除氧器水位     | 凝结水控制阀门开度           |
| 凝汽器水位     | 化学水补水门开度            |
| 高低加水位     | 高低加疏水门开度            |

### 第三节 热工对象动态特性的特点

调节对象的动态特性是指调节对象的输入（调节作用和扰动）发生变化时，其输出（被调量）随时间变化的规律。

由于一个调节对象在生产过程中会受到多个输入（干扰）作用的影响，而在不同的输入作用发生时，调节对象的动态特性一般是不同的，因此把调节对象的特性又区分为外扰特性和内扰特性。所谓调节对象内扰特性是调节器阀门开度发生变化时所引起被调量变化的情况，而外扰特性则是指对象在某一生产干扰发生变化时所引起的被调量的变化情况。对象内扰动态特性的掌握对自动调节问题的研究具有更重要的意义，因为对象的内扰动态特性将直接影响调节系统的调节过程。

图 1-2 为引风自动调节系统的方框图。

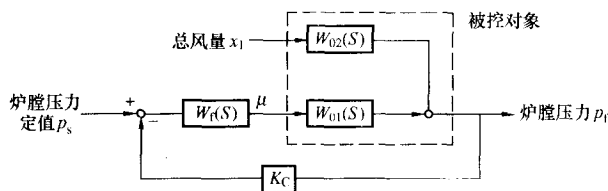


图 1-2 引风自动调节系统的方框图

图中调节对象是多输入、单输出的物理系统，如图中虚线所示，引起被调量  $p_f(S)$  变化的原因很多（调节作用  $\mu$ ，外部扰动  $x_1$ ），而且各个输入信号引起被调量变化的动态特性（ $W_{01}$ ， $W_{02}$ ）是不同的，这是热工对象的一个特点。

对于有些热工对象（例如锅炉 - 汽轮机组），可能是多输出的，即生产过程中要求控制的被调量有好几个，而且，引起这些被调量变化的原因也是多种多样的，因此，调节对象通常是一个多输出的环节。一个多输入多输出的环节可以分解成若干个单输入和单输出环节。

图 1-3 为协调控制系统的调节系统方框图，它表示了一个二输入二输出对象。

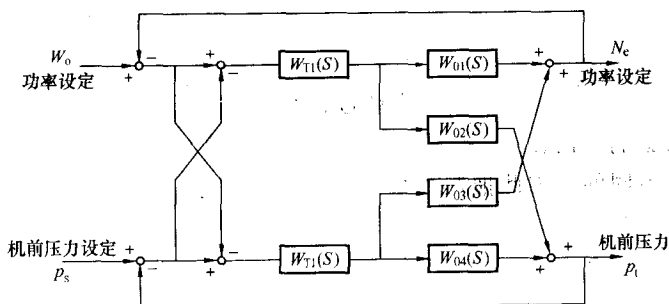


图 1-3 协调控制系统的调节系统方框图