



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REGONG GUOCHENG
ZIDONG KONGZHI JISHU

热工过程 自动控制技术

谢碧蓉 主 编
向贤兵 曾 蓉 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REGONG GUOCHENG
ZIDONG KONGZHI JISHU

热工过程 自动控制技术

主 编 谢碧蓉
副主编 向贤兵 曾 蓉
编 写 蒲晓湘
主 审 谢援朝 张广辉



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本教材内容分为三大部分，第一部分（第一章）介绍自动控制理论的基本概念；第二部分（第二章、第三章）介绍热工过程自动控制系统的特性及单元机组中典型的控制系统的应用分析；第三部分（第四章~第七章）重点介绍大型火电机组的热工保护和旁路控制系统、顺序控制系统的作用、结构、原理及应用技术。

本书突出针对性和应用性，注重理论联系实际。内容深入浅出、文字通俗易懂，并配有大量实例、图表、图片，方便多媒体教学。可供高等专科学校热能动力工程、火电厂集控运行等专业教学使用，也可作为火电机组职工培训、运行人员和热控技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工过程自动控制技术/谢碧蓉主编. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5259 - 6

I. 热... II. 谢... III. 热力工程—自动控制—高等学校：技术学校—教材 IV. TK32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 029739 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 6 月第一版 2007 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 447 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.80 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

前 言

随着科学技术的进步,火电机组正向着“大容量、高参数、高自动化”的方向快速发展,计算机分散控制系统(DCS)在单元机组中的广泛应用有力地推动了电力生产技术的进步,显著地提高了火力发电生产过程的自动化水平。为适应高职高专热能动力工程、发电厂集控运行等专业的教学需要以及相关技术人员的学习需要,特编写本书。

本书共七章,第一章介绍电厂热工自动控制基本原理,第二章介绍自动控制系统的基础知识,第三章介绍单元机组模拟量控制系统(MCS),第四章介绍单元机组的热工保护及旁路控制系统,第五章介绍炉膛安全监控系统(FSSS),第六章介绍汽轮机数字电液控制系统(DEH),第七章介绍顺序控制系统(SCS)。

在编写本书的过程中,作者力求做到对基本理论、基本内容的阐述循序渐进、深入浅出、精练扼要;在选材方面力求反映当前电厂热工过程自动控制技术的现状,以实例阐述应用,便于读者掌握,并体现以下特点:

(1) 注重理论与实践相结合,以解决生产过程中的实际问题为基础,以培养职业技能为核心。

(2) 力求反映当前电力生产的新知识、新技术,内容全部取材于当前大型火电机组300MW、600MW电厂采用的自动控制技术。

(3) 从高职高专培养高技能应用型人才的实际需求出发,突出高职高专教学“必需”、“够用”和“有用”的原则,对自动控制理论的内容进行了精炼和整合,并且以应用形态的方式讲解理论知识,尽量避免自动控制理论中复杂的数学公式及其推导。

(4) 体系新颖。根据现场生产实际,将燃烧控制系统、汽包锅炉给水全程控制系统、过热蒸汽温度控制系统、再热蒸汽温度控制系统纳入计算机分散控制系统(DCS)的模拟量控制系统(MCS)中介绍,方便读者更好地理论联系实际。

(5) 全面反映了当前大型火电机组的锅炉保护、汽轮机保护、单元机组大联锁保护、单元机组旁路控制系统、炉膛安全监控系统(FSSS)、汽轮机数字电液控制系统(DEH)、辅助设备顺序控制系统(SCS)等知识,较好地满足了当前大型火电机组高度自动化对运行、检修人员的要求。

(6) 本书内容体现了先进性、综合性、实用性,并且配有丰富的实例、图表、图片和数据,以适应多媒体教学的需要。

本书由重庆电力高等专科学校谢碧蓉主编,并编写了绪论、第一章第一、二小节及第四、五、七章;第二、三章由向贤兵编写;第六章由曾蓉编写;第一章第三小节由蒲晓湘编写。全书由谢碧蓉统稿。本书配有电子课件辅助教学,详情请登录 <http://jc.cepp.com.cn>

重庆发电厂张广辉高级工程师和西安电力高等专科学校谢援朝教授认真仔细地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见和建议,编者在此表示深切的谢意。本书在编写过程中得到了重庆电力高等专科学校其他教师的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2007年1月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 自动控制原理基础	6
第一节 自动控制基本知识	6
第二节 线性自动控制系统的数学描述	14
第三节 自动控制系统时域分析	27
思考题及习题	41
第二章 自动控制系统综述	43
第一节 热工控制对象的动态特性	43
第二节 控制器的动态特性	48
第三节 单回路控制系统的分析与整定	56
第四节 复杂控制系统	66
思考题及习题	76
第三章 单元机组模拟量控制系统(MCS)	78
第一节 协调控制系统概述	78
第二节 单元机组负荷控制系统	83
第三节 燃烧控制系统	101
第四节 汽包锅炉给水全程控制系统	115
第五节 过热蒸汽温度控制系统	124
第六节 再热蒸汽温度控制系统	133
思考题及习题	136
第四章 单元机组的热工保护	137
第一节 热工保护基础知识	137
第二节 热工开关量控制系统的基础部件	142
第三节 热工信号和自动报警系统	148
第四节 单元机组的热工自动保护	153
第五节 锅炉机组的热工保护	155
第六节 汽轮机组的热工保护	162
第七节 单元机组的旁路控制系统	192
思考题及习题	200
第五章 炉膛安全监控系统(FSSS)	202
第一节 概述	202
第二节 炉膛爆炸的原因及防止	204
第三节 火焰检测装置	207

第四节 FSSS 的主要功能	212
思考题及习题	218
第六章 汽轮机数字电液控制系统 (DEH)	219
第一节 DEH 系统构成及工作原理	219
第二节 DEH 系统的主要功能	222
第三节 DEH 系统的自动及手动控制	227
思考题及习题	236
第七章 顺序控制系统 (SCS)	237
第一节 概述	237
第二节 顺序控制装置	240
第三节 联锁控制	250
第四节 锅炉风烟系统的顺序控制	256
第五节 锅炉制粉系统的顺序控制	272
第六节 给水系统的顺序控制	275
思考题及习题	281
附录	282
参考文献	286

绪 论

一、概述

1. 火电厂实现生产过程自动化的意义

随着国民经济的高速增长，社会生产和社会生活的各个方面对电能的需求量日益增多。电力工业作为国民经济的先导行业，得到了迅猛发展，目前已进入了大电网、大机组、高参数、高度自动化的时代。由于高参数、大容量机组的快速发展，装机数量日益增多，因此对机组自动化程度的要求也日益提高。以“4C”（computer、control、communication、CRT）技术为基础的现代火电机组热工自动化技术也得到了迅速发展。其中，具有代表性的是20世纪80年代微机分散控制系统（DCS）的问世和日益完善，并广泛应用于大机组的自动控制中。

大机组的特点之一是监视点多（600MW机组I/O点多达3000~5000个，随着发电机—变压器组和厂用电源等电气部分监视纳入DCS之后，I/O点已超过7000个），参数变化速度快和控制对象数量大（600MW机组超过1300个），而各个控制对象又相互关联，所以，操作稍一失误，所引起的后果是十分严重的。传统的炉、机、电分别监控方式已不能适应像600MW这样大型单元机组监控的要求。如果将大机组的监视与控制操作任务仅交给运行人员去完成，不仅体力和脑力劳动强度大，而且很难做到及时调整和避免人为的操作失误，因此必须由高度计算机化的机组集控取而代之。大量事实证明，自动化技术对于提高机组的安全经济运行水平是行之有效的。

（1）在机组正常运行过程中，自动化系统能根据机组运行要求，自动将运行参数维持在要求值，以期取得较高的效率（如热效率）和较低的消耗（如煤耗、厂用电率等）。以望亭发电厂#14机组（300MW）为例，使用美国西屋公司的WDPF微机分散控制系统后，仅WDPF分散控制系统的自动控制和在线效率监控功能的投用，就分别降低机组供电煤耗 $3.6\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和 $0.85\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，综合降低的机组供电煤耗可达 $4.45\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。以该机组年发电量18亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算，每年可节约标准煤8010t，可见其经济效益是相当可观的。

（2）在机组运行工况出现异常，如参数越限、辅机跳闸时，自动化设备除及时报警外，还能迅速、及时地按预定的规律进行处理。这样既能保证机组设备的安全，又能保证机组尽快恢复正常运行，减少机组的停运次数。

（3）当机组从运行异常发展到可能危及设备安全或人身安全时，自动化设备能适时采取果断措施进行处理，以保证设备及人身安全。如锅炉主燃料跳闸（Master Fuel Trip, MFT）、汽轮机监测系统（Turbine Safety Instrumentation, TSI）和汽轮机紧急跳闸系统（Emergency Trip System, ETS）等。

（4）在机组启停过程中，自动化设备能根据机组启动时的热状态进行相应的控制，以避免机组产生不允许的热应力而影响机组的运行寿命，即延长机组的服役期。如汽轮机的计算热应力估算和寿命管理系统、汽轮机自启停系统（Turbine Automatic System, TAS）。

（5）随着电网的发展，对自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）的要

求日趋严格。AGC是现代电网控制中心的一项基本和重要的功能，是电网现代化管理的需要，也是电网商业化运营的需要。而要实现AGC，单元机组必须有较高的自动化水平，单元机组协调控制系统必须能投入稳定运行。

随着机组容量的增大、参数的提高，对于机组安全经济运行的要求不断提高，火电厂的自动化水平也不断得到提高。从传统的炉、机、电分别人工监控发展到今天的单元机组集控运行，自动化系统的功能也已从单台辅机和局部热力系统发展到整个单元机组的检测与控制。而随着整个单元机组自动化的不断完善以及电网发展的需要，火电厂热工自动化的功能必然会和调度自动化系统（Automatic Dispatch System, ADS）相协调而实现电网的自动发电控制（AGC）。自动化系统在一般情况下虽不需要人工干预，但在特定情况下却要求人工给以提示或协调。因此，随着机组自动化水平的提高，也要求运行人员具有更高的技术和文化水平。

大型火电机组自动控制系统的组成如图0-1所示，这些自动控制系统集中反映了机组的自动化水平。

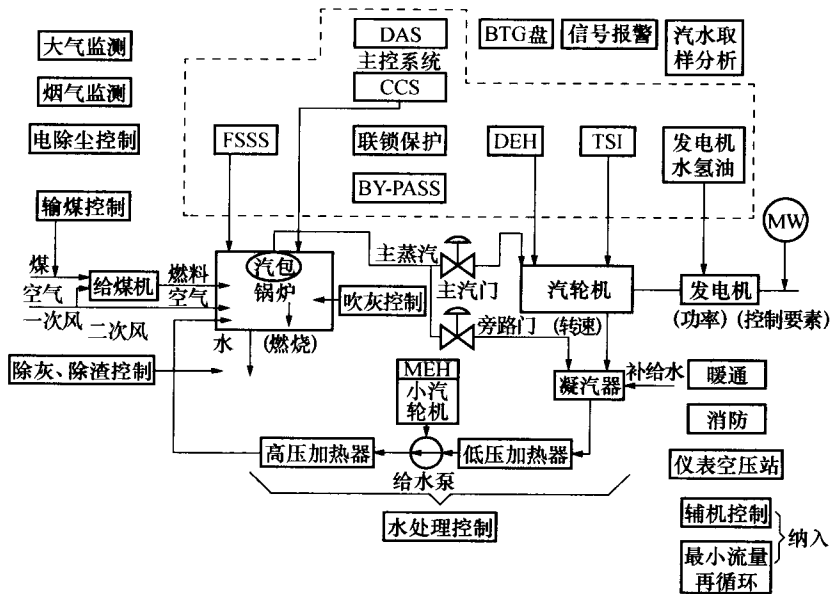


图0-1 大型火电机组控制系统功能构成示意图

2. 火电机组热工过程自动化的内容

火电机组热工过程自动化的内容可以概括为自动检测、自动保护、顺序控制、连续控制、管理和信息处理。

(1) 自动检测。包括对整个机组运行状态和参数的测量、指示、记录，参数计算，参数越限和设备故障时发出报警信号，事故记录和追忆，工业电视监视等。

(2) 自动保护。包括主机、辅机和各支持系统及其相互间的联锁保护，以防止误操作。当设备发生故障或危险工况时，自动采取措施防止事故扩大或保护生产设备。

(3) 顺序控制。包括主机、辅机和各支持系统的启停控制，如输煤系统控制、锅炉吹灰控制、锅炉补给水处理控制、给水泵启停控制、汽轮机自启停控制、锅炉点火系统控制等。

(4) 连续控制。又称调节控制或自动调节，包括对主机、辅机及各系统中的压力、温

度、流量、物位、成分等参数的调节控制，使之保持为预期的数值。

(5) 管理和信息处理。对电厂中各台机组的生产情况（如发电量、频率、主要参数、机组设备的完好率、寿命），电厂的煤、油、水资源情况，环境污染情况进行监督、分析，供管理人员做出相应的决策。

二、单元机组炉、机、电集控

目前国内 600MW 机组基本上实现了炉、机、电集控运行。以平圩、北仑港、石洞口二厂、华能南通、利港 5 个电厂为例，这 5 个电厂的控制室均为炉、机、电集控布置，除北仑港电厂为一台机组一个控制室外，其他 4 个电厂均为 2 台机组共用一个控制室。运行人员在控制室的盘台上可以实现单元机组的启动、停止、正常运行及事故处理的全部监视和操作。但机组启动前的一次性操作设备，如检修用隔离阀及独立的与机组无直接联系的设备，由现场操作人员操作。表盘布置将锅炉、汽轮机、发电机作为一个整体来监视和控制，即自动控制系统是按一个运行人员监视与控制炉、机、电全部工况来设计和布置的，采用炉机长（机组长）制。

上述 5 个电厂的操作盘台布置和监控方式大致可分为 3 类。

1. 以操作台为主、计算机为辅的布置和监控方式

平圩电厂属于这种类型。平圩电厂的计算机数据采集系统（DAS）只用作监视，在启动时为运行人员提供操作指导，运行人员根据计算机的操作指导在操作台上启动辅机、操作阀门和风门等。启动辅机时由继电器组成的逻辑回路进行控制；正常运行时计算机采集数据，在 CRT 上显示图像和数据等作运行监视用，并有报警、打印等功能，可以提醒运行人员并代替人工抄表。此外，还有机组性能计算功能，如计算汽轮机热应力，机组煤耗、效率等。这类监控方式还处于炉机电集控的初级阶段，计算机只代替了部分常规仪表，控制台、盘仍较长，还需几个人监盘操作。

2. 操作台手操与计算机 CRT、键盘软手操并存的布置和监控方式

华能南通电厂和利港电厂采用这种方式，这两个电厂都采用以 NETWORK-90（N-90）分散控制系统为主的监控方式。除在控制台上装置了 CRT 显示器外，还在控制盘上装有更多的操作器（DCS 数字控制站）、操作开关（DLS 数字逻辑站）以及部分显示器（DIS 数字显示站），这种数字控制站、数字逻辑站和数字显示站是微机分散控制系统的一部分。运行人员的监视和操作既可以通过 CRT 和键盘进行，也可以在上述 3 种数字站上进行。

对运行人员来说，显示和操作是双份的。在数字控制站上除可进行手/自动切换、手动增/减操作和设定值修改外，还有过程变量、设定值和控制输出 3 种量的数字显示；在数字逻辑站上除可进行启/停或开/关操作外，还有设备的状态指示：运行/停止，已开/已关；数字显示站有 3 个过程变量的显示。通过数字控制站和数字逻辑站进行操作来启停辅机、开关阀（风）门，以及通过手操执行机构开大/关小阀（风）门，虽然是在控制盘上操作，但必须通过分散控制系统的有关总线和模块，这些操作已受到计算机逻辑的制约。启动辅机时严格按功能组进行顺序控制，例如，在启动一组磨煤机时，先开润滑油泵和有关风门，再开磨煤机、给煤机。这样启动操作比较安全，减少了操作步骤和误操作。在数字站上操作与在 CRT 键盘上操作在逻辑功能上是等效的，但数字控制站的手操与 CRT 键盘上的手操还是有些区别的。因为数字控制站操作时仅通过多功能控制器（MFC）的扩展母线，且多功能控制器故障时，操作器可以通过旁路直接操作，即具有后备硬手

操的功能。而 CRT 键盘的操作除需经过扩展母线外, 还需经过模件、模件总线和工厂环路。经过通信送到执行机构, 执行机构的动作再逆向传送到 CRT, 这样来回的传送要求有关模件、模件母线和工厂环路完好, 且在 CRT 和键盘上必须逐一调用画面和逐一操作, 对运行人员的操作水平有较高的要求。这种操作台手操与计算机 CRT、键盘软手操并存的布置和监控方式具有双重监控功能, 对运行人员来说有它优越的一面。但这样的配置使设备资源重复、投资增加, 虽取消了大部分常规仪表, 而盘台长度的缩减仍受限制, 这种监控方式只是一个过渡方式。

3. 以计算机 CRT、键盘软手操为主的布置和监控方式

石洞口二厂和北仑港电厂采用这种布置和监控方式, 以计算机 CRT 和键盘为主进行正常运行监视和控制, 在控制盘上保留一定数量的数字操作站和辅机停止按钮, 以保证启动时操作的灵活性和在计算机系统故障时仍能实现机组的安全停运。这种以计算机 CRT 和键盘软手操为主的布置和监控方式, 对计算机系统的可靠性和可用率要求很高, 因此采用了冗余技术。如石洞口二厂的管理指令系统 (Management Command System, MCS) 采用了两套, 每套都具备整个单元机组的监视和操作功能。随着机组自动化水平的不断提高、要求人工干预的减少以及微机分散控制系统可靠性的提高 (目前微机分散控制系统的系统可用率已达 99.9% 以上), 这种以计算机 CRT、键盘软手操为主的布置和监控方式必将成为 600MW 及以上容量机组集控室布置和运行监控的主要方式。

表 0-1 列出了前述 3 种单元机组集控操作台布置和监控方式的基本配置及技术特色。

表 0-1 3 种单元机组集控操作台布置和监控方式的基本配置及技术特色

监控方式	常规操作台监控为主	操作台与 CRT 监控并存	CRT 监控为主
电 厂	平圩电厂#1、#2	华能南通电厂#1、#2 利港电厂#1、#2	石洞口二厂#1、#2 北仑港电厂#1、#2
机组情况	国产引进型 600MW 亚临界机组	进口 350MW 亚临界机组	进口 600MW 超临界机组 (石洞口二厂) 进口 600MW 亚临界机组 (北仑港)
监控系统	进口 SPEC-200#1 SPEC-200MICRO#2 FOX-1/A 计算机	进口 DCS N-90	进口 DCS N-90 (石洞口二厂) MOD-300 (北仑港)
配置情况	CRT 4 台 记录表<20 只 指示表<100 只 常规 BTG 盘	CRT 4 台 (6 台) 记录表<20 只 指示表<60 只 M/A 站约 60 台 数字逻辑站约 40 台 BTG 盘	CRT 6 台 记录表<20 只 指示表<60 只 M/A 站 20 台
监控水平	开环监视 (DAS) 常规自动 FSSS 数字电液调节系统 (DEH)	数据采集 (DAS) 协调控制 (CCS) 燃烧器管理 (BMS) 顺序控制 (SCS) —子组级 电液调节系统 (EHC)	数据采集 (DAS) 协调控制 (CCS) 燃烧器管理 (BMS) 顺序控制 (SCS) —系统级 数字电液调节系统 (DEH)

近年来 DCS 新的发展趋势是采用超大型屏幕 CRT, 国内外已有电厂采用此项新技术。在控制室内只布置一套超大型墙幕式 CRT (键盘/球标), 另设 2~4 台通常的 CRT (键盘/鼠标/球标/光笔)。机组各热力系统和电气系统的模拟图、参数显示、状态显示、报警显示、操作指导等均可在此超大型墙幕式 CRT 上显示、操作, 完全取消 BTG 盘。华能汕头电厂二期 600MW 机组即是采用的此种方式布置。

第一章 自动控制原理基础

第一节 自动控制基本知识

在工业生产过程中，为了保证生产的安全性、经济性，保持设备的稳定运行，必须对标志生产过程进行情况的一些物理参数进行控制，使它们保持在所要求的额定值附近，或按照一定的要求变化，如火电厂中汽轮机的转速，锅炉蒸汽的温度、压力，汽包的水位，炉膛负压等。在设备运行中，这些参数经常受到各种因素的影响而偏离额定值（规定值），此时，运行人员就要及时进行操作，对它们加以控制，使这些参数保持为所希望的数值。这个控制任务可以由人工操作来完成，称为人工控制。假若用一整套自动控制装置来代替人工操作，就是自动控制。

一、自动控制的基本概念

（一）人工控制

早期的控制是通过人工操作来完成的，称为人工控制。汽包水位人工控制如图 1-1 (a) 所示，其控制过程如下。

首先，操作人员通过眼睛观察被控量水位的变化，同时利用大脑分析观察的结果。将观察到的水位 h 与其给定值 h_0 进行比较，判断是否存在偏差，以及偏差的大小和方向（水位比给定值高还是低），再决定是否需要控制阀进行操作：开大还是关小以及按什么规律进行操作（是缓开还是猛开，先过调再回调等）。手则根据大脑的指挥（命令）去操作给水控制阀，使水位 h 恢复正常。

可见，人工控制就是通过人的眼睛、大脑和手分别进行观察、分析和操作来实现的。控制过程就是了解情况、分析决策、执行操作的过程。人工控制的质量取决于操作人员的运行经验和操作的熟练程度，控制精确度较低。

在图 1-1 (a) 所示的人工控制中，从扰动发生到被控量重新恢复到给定值，其间要经过一段过渡过程，即要经过一段时间，这个过渡过程时间的长短及被控量偏差的大小取决于操作人员的运行经验。这些经验包括对控制对象特性的了解，以及根据控制对象特性确定的控制规律。倘若运行人员还不了解被控对象的特性，要想正确进行控制是不可能的。

（二）自动控制

随着生产的发展，人工控制已远远不能满足生产的要求。如果用一整套自动控制装置来代替人工控制中操作人员的作用，使生产过程不需要操作人员的直接参与而能自动地执行控制任务，这就实现了自动控制。

自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置使被控制对象（如机器、生产过程）的某一物理量（或工作状态）自动地按照预定的规律运行（或变化）。

图 1-1 (b) 为汽包水位自动控制的示意图。实现自动控制作用所需要的自动控制装置主要包括 3 个部分。

(1) 测量部件（变送器）。用来测量被控量的大小，并将被控量转变成某种便于传送、且与被控量大小成正比（或某种函数关系）的信号 i_h 。测量部件代替了人眼。

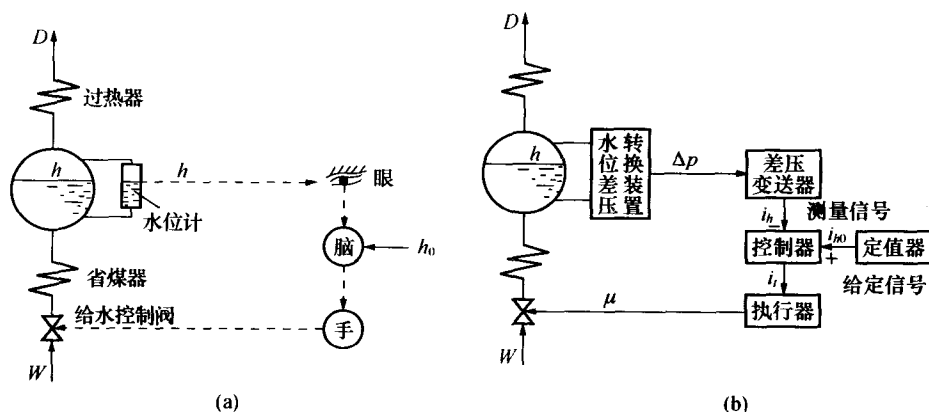


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

(a) 人工控制；(b) 自动控制

(2) 运算部件(控制器)。控制器接受测量部件输出的与被控量大小成比例的信号,把它与被控量的给定值进行比较。当被控量与给定值之间存在偏差时,根据偏差的大小和方向,按预定的运算规律进行运算,并根据运算结果发出控制指令。这里,控制器代替了人脑。

(3) 执行机构(执行器)。根据控制器送来的控制指令,驱动控制机构,改变控制量。如图 1-1 (b) 中的执行器,根据控制器输出信号 i_i 改变给水控制阀开度 μ ,从而改变给水量。可见,执行器起人手的作用。

(三) 常用术语

在自动控制领域,经常使用一些专业术语。

(1) 被控对象(控制对象)。指被控制的生产设备或生产过程,如汽轮机、汽包。

(2) 被控量。表征生产过程是否正常而需要控制的物理量,如汽轮机的转速、给水压力、汽包水位等。

(3) 给定值。根据生产工艺要求,被控量应该达到的数值。例如,汽包水位的希望值为 h_0 , h_0 即汽包水位 h 的给定值。

(4) 扰动。引起被控量偏离其给定值的各种原因。如给水流量的变化会引起汽包水位变化,给水流量的变化称为扰动。

(5) 控制作用。控制机构在执行器带动下施加给被控对象的作用。

(6) 控制机构。改变对象流入量或流出量的机构,如上例中给水控制阀。

(7) 控制量。由控制作用来改变,以控制被控量的变化,使被控量恢复为给定值的物理量。如上例中水位的控制是通过改变给水量来实现的,给水量就是汽包炉水位控制系统中的控制量。

二、自动控制系统的组成及方框图

用一套自动控制装置代替人工操作,实现自动控制,把自动控制装置与被控对象连接起来,就构成了自动控制系统,如图 1-1 (b) 所示。

(一) 自动控制系统的组成

由前例可知,汽包炉水位自动控制系统由被控对象和自动控制装置两个基本部分组成,

也就是说,自动控制系统包括起控制作用的自动控制装置(如变送器、控制器、执行器等)和在自动控制装置控制下运行的生产设备(即被控对象)。在控制过程中,这两部分是相互作用的。当被控量受到扰动而变化后,其值与给定值之差作用于控制器,使控制器动作。控制器的动作通过执行器去改变控制阀的开度,使给水量变化,给水量的变化又反过来作用于被控对象,从而使被控量逐步趋近其给定值。

自动控制系统中的各装置是通过信号的传递和转换相互联系起来的。

(二) 自动控制系统的方框图

锅炉汽包水位自动控制系统中的信号传递关系可用图 1-2 所示的方框图直观地表示出来,

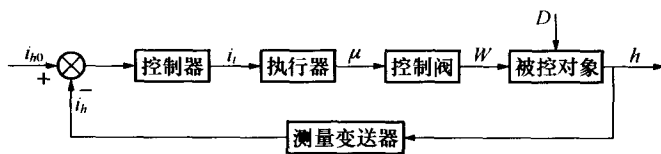


图 1-2 汽包锅炉给水自动控制系统方框图

象这种能直观地表达自动控制系统中各设备之间相互作用与信号传递关系的示意图称为自动控制系统的方框图。方框图是研究自动控制系统的重要工具。

方框图有 4 个要素,如图

1-3 所示。

(1) 信号线。用箭头表示信号“ x ”的传递方向的连接线,如图 1-3 (a) 所示。

(2) 汇交点。即信号相加点,表示两个信号“ x_1 ”与“ x_2 ”的代数和,如图 1-3 (b) 所示。

(3) 分支点。即信号引出点,表示把信号“ x ”分两路取出,如图 1-3 (c) 所示。

(4) 环节。方框图中的每一个方框即一个环节,如图 1-3 (d) 所示。环节表示系统中一个元件或一个设备,或者几个设备的组合体。 x 为环节的输入信号, y 为环节的输出信号。

方框图中环节的输入信号是引起环节变化的原因,而环节的输出信号则是在该输入信号作用下环节变化的结果。如汽包水位变化的原因可以是给水流量或者蒸汽流量的变化,故给水流量和蒸汽流量都是汽包环节的输入信号。蒸汽流量或给水流量变化都会引起汽包内部工况发生变化,其结果是水位变化,水位是这个环节的输出信号。

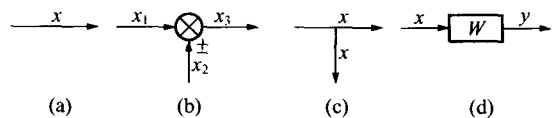


图 1-3 方框图的四要素

(a) 信号线; (b) 汇交点; (c) 分支点; (d) 环节

应当注意,环节的输入信号与输出信号之间的因果关系是不可逆的。如上例中,蒸汽流量或给水流量的变化都能引起水位变化,但水位的变化不能反过来影响给水流量或蒸汽流量,即信号只能沿箭头方向传递,具有单向性。方框图中的信号线只是表示环节之间信号的传递关系,不代表实际物料的流动。例如蒸汽流量是“汽包”环节的输入信号,是从蒸汽流量的变化会直接引起水位发生变化这一因果关系的意义来说的,故方框图与实际的生产流程图是有本质区别的。

自动控制系统的方框图一般是一个闭合回路。图 1-2 中水位 h 通过测量变送器、控制器和执行器等环节,反过来影响水位本身。所以这个系统中的信号是在闭合回路中传递的,这种系统称为闭环系统或反馈系统。传递到控制器的信号是给定水位 i_{h0} 与实际水位 i_h 的偏差值。当水位升高时,偏差信号 $e = i_{h0} - i_h$ 是一个负值,其意义是要关小给水控制阀,使水位向反方向变化。因此,自动控制系统是一个“负反馈系统”,这种负反馈的实质就是“基于偏差、消除偏差”。如果不存在被控量与给定值的偏差,其控制作用不变化,而控制作用

变化的最终目的是要消除偏差,使被控量重新恢复到给定值。

三、自动控制系统的基本控制方式

1. 开环控制

开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程,如图 1-4 所示。因此,开环控制系统的输出量不对系统的控制作用发生影响。目前用于国民经济各部门的一些自动化装置,如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线以及交通指挥的红绿灯转换等,一般都是开环控制系统。

开环控制系统的控制装置只按照给定的输入信号对被控对象进行单向控制,而不对被控制量进行测量并反向影响控制作用。在开环控制中,对于系统的每一个输入信号,必有一个固定的工作状态和一个系统输出量与之对应。这种对应关系调整得越准确,元件的参数及性能变动越小,开环系统的工作精度便越高。

一般来说,开环控制结构简单、成本低廉、工作稳定。因此,当系统的输入信号及扰动作用能预先知道时,采用开环控制可取得较为满意的效果。但由于开环控制不能自动修正被控量的偏离,系统的元件参数变化以及外来的未知扰动对控制精度影响较大,因此它的使用有一定的局限性。

2. 闭环控制

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用,又有反向联系的控制过程,如图 1-5 所示。闭环控制是自然界中一切生物控制自身运动的基本规律,也是工程自动控制的基本原理,它可以实现复杂而准确的控制。

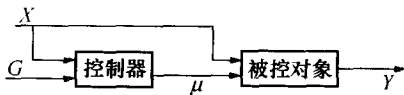


图 1-4 开环控制系统



图 1-5 闭环控制系统

闭环控制根据实际偏差进行控制,具有自动修正被控量出现偏离的能力,因此可以修正元件参数变化以及外界扰动引起的误差,其控制精度较高。但正由于存在反馈,闭环控制也有其不足之处,这就是被控量可能出现振荡,严重时会使系统无法工作。这是由于被控量出现偏离之后,经过反馈便形成一个修正偏离的控制作用。但在这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间,一般是有时间延迟的,因此被控量的偏离不能立即得到修正,从而有可能使被控量处于振荡状态。如果系统参数选择不当,不仅不能修正偏离,反而会使偏离越来越大,系统无法工作。自动控制系统设计的重要课题之一,就是要解决闭环控制中的这个“振荡”或“发散”问题。

如果要求实现复杂且精度较高的控制任务,可将开环控制和闭环控制方式适当结合起来,组成一个比较经济且性能较好的控制系统,即复合控制系统。

3. 复合控制

复合控制就是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。实质上,它是在闭环控制回路的基础上,附加一个输入信号或扰动作用的前馈通路。前馈通路通常由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成,分别称为按输入信号补偿和按扰动作用补偿的复合控制系统,如图 1-6 所示。

复合控制中的前馈通路相当于开环控制,因此,对补偿装置的性能稳定性要求较高,否

则，会由于补偿装置参数本身的漂移而减弱其补偿效果。此外，前馈通路的引入对闭环回路性能的影响不大，但却可以大大提高系统的控制精度，因此获得了广泛应用。目前，在雷达站随动系统、飞机自动驾驶仪系统中，都广泛使用复合控制系统。

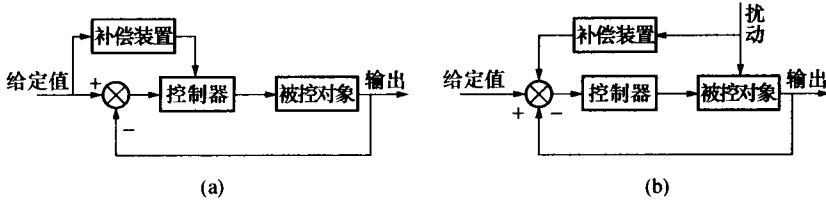


图 1-6 复合控制系统

(a) 按给定值补偿；(b) 按扰动作用补偿

四、自动控制系统的分类

由于生产过程不同，生产设备不同，被控对象具有不同的性质。因此，对自动控制系统可从不同的角度进行分类，每种分类都反映了自动控制系统的某些特点。

(一) 按控制信号的馈送方式分类

1. 前馈控制系统

前馈控制系统直接根据扰动进行控制，也称为开环控制系统，如图 1-4 所示。若控制量选择合适，就可以及时抵消扰动的影响，使被控量保持不变。但由于没有被控量的反馈，控制过程结束后，很难保证被控量等于给定值。因此在一般的生产过程中，这种系统是不能单独使用的。

2. 反馈控制系统

反馈控制系统按反馈的原理进行工作，即根据偏差进行控制，最终消除偏差，也称为闭环控制系统，如图 1-5 所示。

3. 前馈—反馈控制系统

在反馈控制系统的基础上加入主要扰动的前馈控制，即构成前馈—反馈控制系统，也称为复合控制系统，如图 1-6 所示。与反馈控制系统相比，它具有更高的快速性和控制质量，因此得到了比较广泛的应用。

(二) 按给定值的变化规律分类

1. 定值（恒值）控制系统

被控量的给定值在运行中恒定不变的系统称为定值控制系统。例如锅炉的汽包水位控制系统，锅炉的过热汽温控制系统等。

2. 程序控制系统

被控量的给定值是时间的已知函数的控制系统称为程序控制系统。例如发电厂锅炉汽轮机的自启停控制系统。

3. 随动控制系统

被控量的给定值是时间的未知函数的控制系统称为随动控制系统。例如在机组滑压运行时的锅炉负荷控制回路中，主蒸汽压力的给定值是随外界负荷而变化的，其变化规律是时间的未知函数。

4. 比值控制系统

这种控制系统是维持两个变量之间的比值保持一定数值。例如锅炉燃烧过程中，要求空

气量随燃料量的变化而成比例变化,这样才能保证经济燃烧。因此,对于锅炉燃烧经济性的控制要求采用比值控制系统。

(三) 按控制系统信号的形式分类

1. 连续控制系统

当控制系统中各部分的信号均是时间变量 t 的连续函数时,称此类系统为连续控制系统。连续控制系统的运动状态或特性一般用微分方程来描述,模拟式工业自动化仪表和用模拟式仪表来实现自动化的过程控制系统均属此类系统。

2. 离散控制系统

当控制系统中某处或多处的信号为在时间上离散的脉冲序列或数码形式时,这种系统称为离散控制系统。离散系统和连续系统的区别仅在于信号只在特定的离散瞬时是时间的函数。离散时间信号可由连续信号通过采样开关获得,具有采样的控制系统又称为采样控制系统。离散系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述,其分析研究方法也不同于连续系统。

自动控制系统的分类还有很多,这里不再赘述。

五、自动控制系统的品质指标

(一) 自动控制系统的过渡过程

控制系统在受到某一扰动后,被控量将偏离原来的稳态值而产生偏差,系统的控制作用又使其趋近于回到原来的稳态值,这一过程称为控制系统的过渡过程,或称为控制过程。对于定值控制系统,在受到扰动后,被控量的变化总是先偏离给定值,经历一个变化过程后,又趋近于给定值。以后,只要系统不受到新的扰动,系统中的参数就不再发生变化。因此,控制系统存在两种状态,即系统的静态(或称为稳态)和动态(或称为暂态、瞬态)。

被控量不随时间变化的平衡状态称为系统的静态,静态出现在控制过程结束之后。一个处于静态的系统一旦受到某一扰动,系统内部就会发生物质或能量的不平衡,被控量将偏离给定值而随时间变化,这种被控量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。干扰作用使系统由静态进入动态,控制作用使系统克服扰动的影响,建立新的平衡,从而恢复到静态。例如锅炉汽压控制系统中,当负荷发生扰动使蒸汽流量发生变化时,被控量汽压就会发生变化,系统进入动态。控制器根据汽压的偏差发出控制指令,改变燃料量,使之与蒸汽流量重新平衡,被控量汽压重新稳定在给定值上,系统重新进入静态。这样,系统就经历了一个过渡过程。所以,过渡过程就是系统在控制设备的控制作用下,克服扰动的影响,从动态重新进入新的静态的过程。

显然,在不同形式和幅度的扰动作用下,自动控制系统的过渡过程是不一样的,实际生产过程中可能遇到的扰动形式是多种多样的。为了分析控制系统性能指标的好坏,判断一个控制系统能否满足实际生产过程的需要,通常是选择实际过渡过程中遇到的一种最典型、最经常出现的扰动形式作为研究自动控制系统品质指标的标准输入信号。如果控制系统在这种标准信号扰动下能令人满意地完成控制任务,则在其他形式信号扰动下必然能满足实际工作的要求。在自动控制系统中,最常用的扰动信号是一种在某一时刻突然变化、过了此时刻不再变化的信号,称为阶跃信号。阶跃信号的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} x_0, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1-1)$$