



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

热工自动控制系统 (第三版)

文群英 主 编

潘汪杰 雷鸣雳 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

热工自动控制系统 (第三版)

主 编 文群英
副主编 潘汪杰 雷鸣雳
编 写 罗红星
主 审 高 伟 方 昆



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书内容共分两篇十章：第一篇（第一～第三章）为自动控制的基本知识，比较全面地介绍了自动控制的基本概念，单回路及复杂回路控制系统的组成、特点、工作原理及整定方法；第二篇（第四～第十章）为火电厂单元机组自动控制系统，介绍了单元机组协调控制系统、汽包锅炉自动控制系统、直流锅炉自动控制系统、汽轮机控制系统、炉膛安全监控系统、顺序控制系统、火电厂计算机控制系统。

本书可作为高职高专火电厂集控运行、热能动力设备、检测技术与应用、生产过程自动化技术等专业“热工自动控制系统”“热工控制技术及应用”“热工控制系统组态与维护”及同类课程的教材，也可供有关专业师生及从事热工自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工自动控制系统/文群英主编. —3 版. —北京：中国电力出版社，2015.8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-8057-8

I. ①热… II. ①文… III. ①火电厂—热力工程—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 160874 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 8 月第一版

2015 年 8 月第三版 2015 年 8 月北京第七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 404 千字

定价 33.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

本书为“十二五”职业教育国家规划教材，是在 2009 年版《热工自动控制系统》的基础上修订而成的。

本次修订的主要内容：

- (1) 第一章删除了“电厂热工自动控制系统的组成”，增加“人工控制与自动控制”“自动控制系统的组成”；
- (2) 第二、三章修改了部分数据、图表；
- (3) 第四章第三节“600MW 机组协调控制系统实例”改为“1000MW 机组协调控制系统实例”；
- (4) 第十章“WDPF 系统的构成”改为“Ovation”系统构成。

本书从实用角度出发，对目前热工控制过程正在使用和将要使用的热工自动控制系统进行了全面系统的阐述，重点介绍了这些系统的功能特征、结构原理和应用特点，力求把生产过程中新技术、新方法和新内容融合到教材中去，并注重实用性和先进性，缩短理论到实践的差距。

本书由武汉电力职业技术学院文群英组织修订并统稿。全书由华中科技大学高伟教授和湖北华电武昌热电有限公司高级工程师、副总经理方坤主审。同时，本书在编写过程中还得到了谢援朝教授、林文孚教授级高工、彭同明教授等的热心指导，在此一并表示感谢。

编者

2015 年 8 月

❖ 第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004～2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书在全面地介绍了自动控制的基本概念，单回路及复杂回路控制系统的组成、特点、工作原理及调节器参数的整定方法的基础上，重点介绍了火电厂有关自动控制系统的构成，并在各章节中都加入了具体实例的分析，力求把生产过程中新技术、新方法和新内容融合到教材中去，并注重实用性和先进性，缩短理论到实践的差距。

本书由武汉电力职业技术学院文群英主编，并编写了第四章、第五章、第十章；武汉电力职业技术学院潘汪杰编写了第六章、第七章、第八章；西安电力高等专科学校雷鸣雳编写了第一章、第二章、第三章；江西电力职业技术学院罗红星编写了第九章。文群英负责全书的统稿工作。

全书由华中科技大学高伟教授和黄石发电股份有限公司高级工程师方坤主审。编者对主审老师对本书付出的心血表示深深的谢意。同时，本书在编写过程中还得到了谢援朝副教授、林文孚副教授级高工、彭同明副教授等的热心指导，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，加之编者水平所限，书中难免有疏漏及不足之处，敬请使用本书的师生及读者批评指正。

编者

2006年4月

❖ 第二版前言

《教育部职业教育与成人教育司推荐教材 热工自动控制系统（第二版）》在保持了第一版特色的基础上，紧扣高职高专的培养目标，坚持以“应用为主，够用为度，学有所用，用有所学”的定位原则，遵循“拓宽基础、培养能力、重在应用”的宗旨，完成第二次修订任务。

第二版主要调整的内容有：

- (1) 第一章增加了自动控制系统的品质指标、阀门和风门挡板的特性试验内容。
- (2) 第四章将协调控制的基本控制方式进行了综合整理。
- (3) 在第七章汽轮机控制系统应用新实例进行分析说明。
- (4) 在第八章炉膛安全监控系统中增加了等离子点火内容。
- (5) 将第十章火电厂计算机控制系统的第一节删除，调整了第二节和第三节的内容。

其他章节的内容在原有基础上，尽量删繁就简，加强方法与能力的训练和培养；在分析问题突出主要矛盾和主要问题，忽略次要因素，注重应用性及概念的清晰；贯彻理论与实践相结合，以应用为目的，理论够用的原则，突出高职高专的教学特色。

本书由武汉电力职业技术学院文群英主编，并编写了第四章、第五章、第十章；武汉电力职业技术学院潘汪杰编写了第六章～第八章；西安电力高等专科学校雷鸣雳编写了第一章～第三章；江西电力职业技术学院罗红星编写了第九章。文群英负责全书的统稿工作。

全书由华中科技大学高伟教授和西塞山发电股份有限公司高级工程师方坤主审。编者对主审老师表示深深的谢意。同时，本书在编写过程中还得到了谢援朝副教授、林文孚副教授级高工、彭同明教授等的热心指导，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，加之编者水平所限，书中难免有疏漏及不足之处，敬请使用本书的师生及读者批评指正。

编者

2009.06

目 录

前言

第一版前言

第二版前言

第一篇 自动控制的基本知识

第一章

概论	1
第一节 自动控制的基本概念	1
第二节 热工控制对象的动态特性及其求取方法	8
第三节 控制器的动作规律及其对过渡过程的影响	14
第四节 执行器	17
第五节 测量变送器和控制机构特性及其对控制品质的影响	19
本章小结	22
思考题及习题	23

第二章

单回路控制系统	24
第一节 单回路控制系统的结构	24
第二节 单回路控制系统工作原理分析	26
第三节 单回路控制系统的整定	27
本章小结	31
思考题及习题	31

第三章

复杂控制系统	33
第一节 串级控制系统	33
第二节 前馈 - 反馈复合控制系统	37
第三节 导前微分控制系统	41
本章小结	43
思考题及习题	43

第二篇 火电厂单元机组自动控制系统

第四章

单元机组协调控制系统	45
第一节 协调控制系统的基本概念	45
第二节 协调控制系统的组成与分析	50
第三节 1000MW 机组协调控制系统实例	52

本章小结	72
思考题及习题	73

第五章

汽包锅炉自动控制系统	74
第一节 给水自动控制系统	74
第二节 蒸汽温度自动控制系统	91
第三节 燃烧过程自动控制系统	106
本章小结	129
思考题及习题	131

第六章

直流锅炉自动控制系统	133
第一节 直流锅炉控制的任务和特点	133
第二节 直流锅炉的动态特性	135
第三节 直流锅炉基本控制方案	137
第四节 直流锅炉自动控制系统举例	140
本章小结	142
思考题及习题	143

第七章

汽轮机控制系统	144
第一节 概述	144
第二节 汽轮机数字电液控制系统	148
第三节 旁路控制系统	169
本章小结	177
思考题及习题	178

第八章

炉膛安全监控系统	179
第一节 概述	179
第二节 炉膛安全监控系统的控制逻辑分析	189
本章小结	201
思考题及习题	202

第九章

顺序控制系统	203
第一节 概述	203
第二节 顺序控制系统功能组举例	212
本章小结	218
思考题及习题	218

第十章

火电厂计算机控制系统	220
第一节 分散控制系统	220
第二节 现场总线控制系统	244
本章小结	253
思考题及习题	253

附录

SAMA 标准功能图例	255
-------------------	-----

参考文献

.....	256
-------	-----

第一篇

自动控制的基本知识

第一章 概 论

第一节 自动控制的基本概念

随着科学技术的发展和社会的进步，自动控制在工业生产、航空航天、电力等各领域发挥着更加重要的作用。一般来说，自动控制是指在没有人直接参与的情况下，通过控制设备使被控对象或生产过程自动地按照预定的规律运行。目前，自动化水平已经成为衡量一个国家生产技术和科学水平先进与否的一项重要指标。尤其在电力生产过程中，电厂热工自动化的地位更为突出，电厂热工自动化水平的高低是衡量电厂生产技术的先进与否和企业现代化的重要标志。

一、热工过程自动控制的发展

热工过程自动控制主要经历了以下几个发展阶段：

（1）初级阶段。大约在 20 世纪 50 年代，热工生产过程主要是凭生产实践经验，局限于一般的控制元件及机电式控制仪器，采用比较笨重的基地式仪表实现机、炉、电各自独立的局部自动控制。机、炉、电各控制系统之间没有或很少有联系。过程控制的目的是几种热工参数，如温度、压力、流量及液位的定值控制，以保证产品质量和产量的稳定，所应用的理论为古典控制理论。

（2）仪表化阶段。20 世纪 50 年代末及以后十多年间，先后出现了电动单元组合仪表和巡回检测装置，因而实现了把机、炉作为一个单元整体进行集中控制，仪表盘集中安装进行监视，使机、炉启停运行更为协调，对提高设备效率和强化生产过程有所促进，适应了工业生产设备日益大型化及连续化发展的需要。随着仪表工业的迅速发展，对过程控制及对象特性的认识，对仪表及控制系统的设计计算方法都有了较快的发展，而且随着机组容量的增大，集中控制机、炉又进一步发展为机、炉、电集中控制。此时所用的仪表有电动及组装仪表，所应用的理论为古典控制理论。

（3）综合自动化阶段。20 世纪 70 年代至今，随着集成电路与计算机技术的迅猛发展，由分散的机组或车间控制，向全车间甚至全企业的综合自动化发展，实现了过程控制最优化与管理调度自动化相结合的分散计算机控制，这是过程控制发展的一个新阶段。对电厂而言，则是把火电厂的生产过程（包括主、辅机，全厂各辅助车间）作为一个整体来进行控制，此时所用的仪表有气动仪表、电动组合仪表、组装仪表及计算机。所用理论基础大多为古典控制理论，少量为现代控制理论。

随着计算机技术的迅速发展，热工过程控制又经历了以下几个计算机控制过程：

（1）集中型计算机控制。它是用一台计算机对整个生产过程进行整体控制，因此对计算机的可靠性要求很高，一旦计算机出现事故，将使整个生产受到影响。

(2) 分散型计算机控制。随着微机的大批生产,成本的不断降低,逐渐把集中控制改为用微机进行局部控制,克服了集中控制的一些缺点,但此时各系统之间很难协调起来。

(3) 计算机分散控制。它把各系统之间,厂级管理、调度等用一台功能很强的计算机进行上位管理,而把各子系统用微机控制,充分发挥了集中控制和分散控制各自的优点,是一种比较合理的控制方法。

(4) 现场总线控制。随着网络技术的发展和应用,利用现场总线这一开放的、具有可互操作的网络将现场各控制器及仪表设备互连,构成现场总线控制,同时控制功能彻底下放到现场,降低了安装成本和维护费用。因此,现场总线控制实质是一种开放的、可互操作的、彻底分散的分布式控制系统,有望成为 21 世纪控制系统的主流产品。

二、火电厂热工自动控制的主要内容

火电厂热工自动控制主要包含以下内容:

(1) 自动检测。自动地检查和测量反映生产过程运行情况的各项物理参数、化学量(例如温度、压力、液位、化学成分等)及各项生产设备的工作状态参数,以监视生产过程的运行情况和趋势,称为自动检测。它所使用的检测设备有常规的模拟量仪表、巡回检测数字式仪表,还有计算机图像显示、自动记录、打印和报警装置。

(2) 顺序控制。根据预先拟定的顺序和条件,自动地对设备进行一系列操作,称为顺序控制。顺序控制又称程序控制,在发电厂中主要用于主机或辅机的自动启动和停止,例如汽轮机的自动启停程序控制以及磨煤机的自动启停程序控制等。

(3) 自动保护。在运行参数和设备状态异常或系统局部故障时,自动采取保护措施,以防止故障进一步扩大并避免事故发生,保护生产设备使之不受严重破坏,称为自动保护。例如汽轮机的超速保护、锅炉的超压保护以及发电机的过电压、过电流保护等。

(4) 自动控制。自动地克服干扰影响,维持生产过程在规定的工况下运行,称为自动控制。

生产过程中必须保证产品满足一定的数量和质量要求,同时也要保证生产的安全和经济,这就要求生产过程在预期的工况下运行。然而,生产过程总是由于经常会受到各种因素的干扰和破坏,其运行工况偏离正常情况,必须通过自动控制随时消除各种干扰,保证正常运行。

更为严重的是,有时自动控制系统本身也要发生故障,这就要求在设计控制系统时,考虑可能发生的故障,并加以自动保护。因而,现代的自动控制系统常包含自动保护、自动检测、自动报警、顺序控制等内容。有时,它们有机地组合成一个不可分割的整体,以确保控制系统的安全可靠。

三、人工控制与自动控制

生产过程实现自动化,能有效地改善劳动条件,有利于现代化生产,有利于提高生产安全性,降低生产成本。随着生产技术和生产工艺的发展,自动控制水平也不断提高,人们通过长期的生产实践,从早期的人工控制过程逐步发展到目前高水平的自动控制过程。

为了了解自动控制系统的一般概念,首先以人工控制水箱水位为例,分析完成一个控制任务需要哪些功能,以及这些功能在自动控制系统中是如何实现的。

水箱水位控制示意如图 1-1 所示。图 1-1 (a) 是水箱水位人工控制示意图,图中 q_1 为流入水箱的进水流量, q_2 为流出水箱的出水流量, h 为水箱水位。水箱水位是进水流量和

出水流量是否平衡的标志。为了保证水工质传递的安全与稳定,通常希望将水箱水位保持在某一个规定值附近,这个规定值就是水箱水位的希望值,称为水箱水位的给定值,用 h_0 表示。当实际水位稳定在给定值附近时,水箱的进水量与出水量平衡,不需要控制。当水箱的进水量或者出水量发生变化时,可通过调整进水阀门的开度来改变进水流量,使之与出水流量平衡,以维持水箱水位在希望的范围之内。

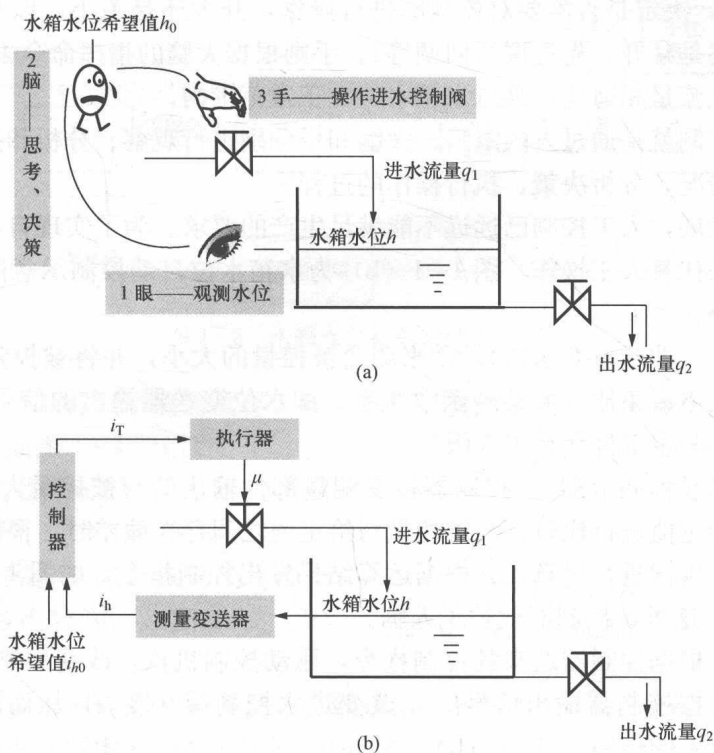


图 1-1 水箱水位控制示意图

(a) 人工控制; (b) 自动控制

为了便于分析说明上述水位控制过程,先介绍自动控制理论的几个常用术语。

(1) 控制对象 (或称调节对象)。指被控制的生产设备或生产过程,如图 1-1 中以水箱为中心的水工质传递设备。

(2) 被控量。表征生产过程是否正常而需要控制的物理量。如本例中的水箱水位 h , 单元机组自动控制中常见的被控量有压力、温度、水位、电压、频率等。

(3) 给定值。根据生产工艺要求,被控量应达到的数值。如本例中水箱水位的希望值为 h_0 , 即水位 h 的给定值。

(4) 控制量 (或称控制变量)。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。如本例中水位的控制是通过改变进水流量来实现的,进水流量就是水箱水位控制中的控制量。

(5) 控制机构 (或称调节机关)。接受控制作用去改变控制量的具体设备,如图 1-1 中的进水控制阀。

(6) 扰动。引起被控量偏离其给定值的各种原因,如出水流量的变化会引起水箱水位变化,出水流量的变化称为扰动。

运用上述术语可以说,控制就是指当扰动作用使被控量偏离给定值以后,根据被控量与给定值的偏差情况,通过分析判断后适当地动作控制机构,改变控制量,抵消扰动的影响,使被控量重新恢复到给定值的过程。下面运用这些概念分析人工控制过程。

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(实际水位比给定值高还是低),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进水控制阀,使进水流量与出水流量相适应,维持水箱水位在正常范围内。

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。

随着生产的发展,人工控制已远远不能满足生产的要求。为了实现自动控制,就要用一套自动控制装置来代替人工操作。图 1-1 (b) 为水箱水位自动控制示意图。自动控制装置包括以下三个部分:

(1) 测量部件(即测量变送器)。用来测量被控量的大小,并将被控量转变成某种便于传送、与被控量大小成正比(或某种函数关系,如水位变送器输出的信号 i_h 与水箱水位 h 成比例)的信号,测量部件代替了人眼。

(2) 控制器(或称调节器)。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,按给定的运算规律进行运算,并根据运算结果发出控制指令,如图 1-1 (b) 所示控制器的输出信号 i_T 。这里,控制器代替了人脑。

(3) 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 中的电动执行器,根据控制器输出信号 i_T , 改变进水控制阀开度 μ , 从而改变进水流量 q_1 。可见,执行器起人手的作用。

用一套自动控制装置代替人工操作,实现自动控制,把自动控制设备与控制对象连接起来,构成自动控制系统,如图 1-1 (b) 所示。不难理解,人工控制效果的好坏主要取决于操作人员的操作经验。如上述水箱水位控制系统,当出水流量扰动发生后,要很快恢复水位为给定值,操作人员必须要了解扰动发生后水位是如何随时间变化的?变化量有多大?变化速度怎样?只有对这些胸中有数,才能正确地操作控制阀门,收到预期的控制效果。如果对水位的变化过程一无所知,要正确地进行控制是不可能的。同理,并不是自动控制设备一经安装就能执行控制任务、实现自动控制的。为使自动控制系统能满意地进行工作,必须研究控制系统的运动规律、研究控制对象的动态特性,研究如何根据控制对象特性组成自动控制系统。

四、自动控制系统的组成

如上所述,自动控制系统是由控制对象和自动控制设备组成的,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(即控制对象)。自动控制系统中的各设备是通过信号的传递和转换相互联系起来的。在图 1-1 (b) 所示的水箱水位控制系统中,当出水流量 q_2 发生变化时,水箱水位 h 就会发生变化,反映水位高低的测量值 i_h 也随之变化, i_h 与其给定值 i_{h0} 比较得到偏差信号 e 。在控制器中按预定的规律对偏差信号 e 进行运算得到控制信号 i_T , i_T 在执行器中

进行功率放大后去推动进水控制阀,改变控制阀的开度 μ ,从而改变进水流量 q_1 ,以抵消出水流量变化对水位的影响。水箱水位控制系统中的信号传递关系可用图 1-2 直观地表示出来。像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。

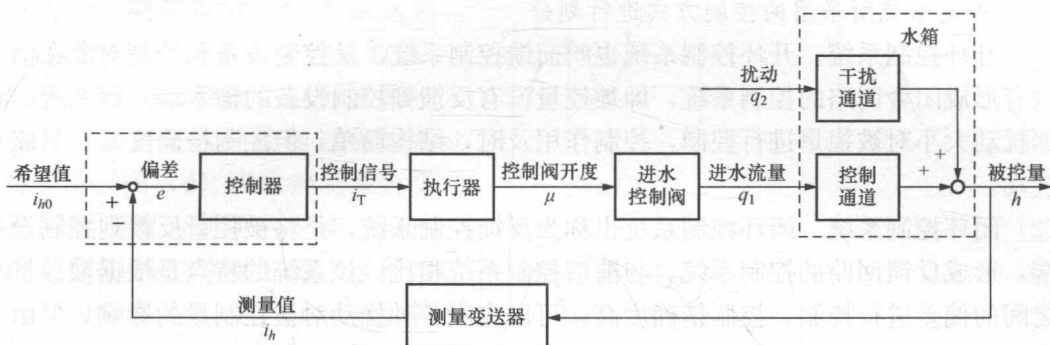


图 1-2 水箱水位控制系统方框图

方框图是研究自动控制系统的重要工具。方框图有四要素,即信号线、信号综合点、信号分支点和环节,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) 相加点。即信号综合点,表示两个或两个以上信号的代数和,如图 1-3 (b) 所示。

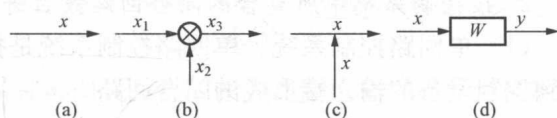


图 1-3 方框图的四要素

(a) 信号线; (b) 相加点; (c) 分支点; (d) 环节

(3) 分支点。表示把信号 x 分两路或多路取出,如图 1-3 (c) 所示。

(4) 环节。即方框图中的一个方块,如图 1-3 (d) 所示。方框图中的每一个方块即一个环节。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。如水箱水位变化的原因可以是进水流量或者出水流量的变化,故进水流量和出水流量都是水箱环节的输入信号。出水流量或进水流量变化都会引起水箱水位发生变化,水位是这个环节的输出信号。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。图 1-1 中,出水流量或进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直接影响进水流量或出水流量,即信号只能沿箭头方向传递,具有单向性,同时,还要看到,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。例如出水流量是“水箱”环节的输入信号,是从出水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称为反馈系统。传递到控制器的信号是给定水位信号 i_{h0} 与实际水位信号 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,其意义是要关小进水控制阀门,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，也就不会产生控制作用，而控制作用的最终目的是要消除偏差，使被控量重新恢复到给定值。

五、自动控制系统的分类

根据不同的应用需要，通常可将自动控制系统按以下方式进行分类。

1. 按控制系统所采用的控制方式进行划分

(1) 开环控制系统。开环控制系统也叫前馈控制系统，是控制设备和控制对象在信号关系上没有形成闭合回路的控制系统，即被控量没有反馈到控制设备的输入端。该系统的特点是根据扰动大小对被控量进行控制，控制作用及时，结构简单，但控制精确度差，只能克服单一扰动。

(2) 闭环控制系统。闭环控制系统也称为反馈控制系统，是将被控量反馈到控制设备的输入端，形成反馈回路的控制系统。与前馈控制系统相比，该系统的特点是根据被控量与给定值之间的偏差进行控制，控制精确度高，可以克服各种扰动对被控制量的影响，但由于控制作用落后于干扰，因而控制不及时。

(3) 复合控制系统。复合控制系统也称为前馈-反馈复合控制系统，是由开环控制和闭环控制组合而成的一种控制系统。

2. 按控制系统中所包含的闭合回路数目进行划分

(1) 单回路控制系统。单回路控制系统是指系统中只有一个闭合回路，即是将被控量反馈到控制设备的输入端形成的闭合回路。

(2) 多回路控制系统。多回路控制系统是指系统中存在两个或者两个以上闭合回路，例如后面介绍的串级控制系统和导前微分控制系统就是双回路控制系统。

3. 按控制系统的给定值进行划分

(1) 定值控制系统。控制系统中，若送入控制设备输入端的被控量的给定值为常数，且不随时间发生变化，则称这样的系统为定值控制系统。电厂中常见的热工控制系统多为定值控制系统，例如主汽温度控制系统、汽包水位控制系统都是定值控制系统。

(2) 随动控制系统。控制系统中，若送入控制设备输入端的被控量的给定值随时间发生变化，且变化规律是事先无法确定的，则称这样的系统为随动控制系统。

(3) 程序控制系统。控制系统中，若送入控制设备输入端的被控量的给定值随时间发生变化，且变化规律是事先确定的，则称这样的系统为程序控制系统。

六、自动控制系统的品质指标

1. 控制品质指标的确定

对任何一个设计并安装完成的自动控制系统，都希望它能具有良好的工作质量。如何来判断一个控制系统的工作好坏呢？最直观的方法是看系统受到扰动作用后，被控量随时间而变化的状况——控制过程。因为一个原来处于平衡状态的控制对象，一旦受到扰动作用，被控量就会偏离规定值。这时，要通过自动控制作用才能使被控量重新稳定并回到规定值。这一过程称为控制过程，控制过程直接反映了控制系统工作的好坏。

显然，一个控制系统在不同形式和幅度的扰动作用下，其控制过程是不一样的。在实际生产过程中可能遇到的扰动形式是多种多样的，为了比较控制工作品质的好坏，分析系统工作品质能否满足生产过程的要求，通常要选定一种最典型或最经常出现的扰动形式，作为研究控制系统工作品质的标准输入信号。在热工过程自动控制中，最常用的是

单位阶跃输入。

闭环控制系统在阶跃扰动作用下,被控量的控制过程可能有图 1-4 所示的几种不同形状。其中 (a)、(b)、(c) 三种过程中,被控量最后能重新达到平衡。这新的平衡状态的被控量数值,可能就是扰动前的数值,也可能是一个新的数值。具有这种控制过程的系统是稳定的。图 (d) 表示控制系统受扰动作用后不能达到新的平衡,被控量和控制作用都作等幅振荡,这种情况称为“边界稳定”。图 (e) 表示控制系统受扰动作用后,不但不能达到新的平衡,而且偏差时正时负,振幅越来越大,直到发生破坏作用或受到限幅保护装置的干涉为止,这种控制系统是不稳定的。

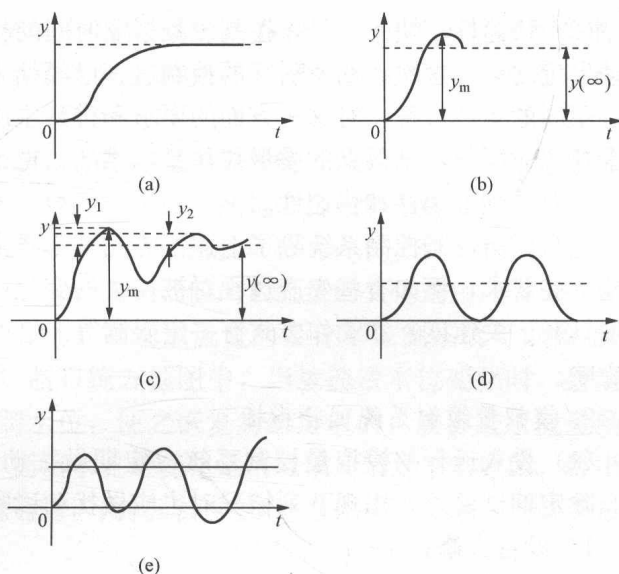


图 1-4 几种典型的控制过程曲线

- (a) 单调变化的非周期过程; (b) 有单峰值的非周期过程;
(c) 衰减振荡过程; (d) 等幅振荡过程;
(e) 扩大振荡发散过程

从生产过程的要求来看,希望自动控制系统能随时保持被控量和规定值相等,不受任何扰动的影响。实际上控制过程中被控量总是要发生变化,产生偏差。那么怎样来衡量一个控制过程(即控制系统工作品质)的好坏呢?一般从三个方面,即稳定性、准确性和快速性来衡量。

(1) 稳定性。控制过程的稳定性是对控制系统最基本的要求。不稳定的系统在生产上是不能采用的;边界稳定的系统一般也不能符合生产的要求(只有在个别情况下可以允许有振幅不大、频率不高的持续振荡);只有稳定的系统才能完成正常的控制任务。在实际生产过程中,不但要求系统是稳定的,而且还要求有一定的“稳定性裕度”,以保证在每次控制过程中振荡次数不致过多(2、3次)。

衰减率 ψ 是判定控制系统稳定性的主要指标,检验一个控制过程的品质,用衰减率比较形象和直观,也能方便地从响应特性曲线上得到它的数值,如图 1-4 (c) 所示:

$$\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1}$$

热工控制对象的控制过程的衰减率通常选择 $\psi = 0.75 \sim 0.9$ 。

(2) 准确性。准确性是指被控量偏差的大小,它包括动态偏差 y_m 和静态偏差 $y(\infty)$ [见图 1-4 (c)]。

动态偏差 y_m 是指控制过程中被控量偏离规定值的最大偏差值。通常要求控制系统保证被控量的动态偏差,即指在可能出现的最大扰动作用下,也不超过生产过程所允许的变化范围。

静态偏差 $y(\infty)$ 是指控制过程结束后被控量的残余偏差。最大静态偏差往往出现在负荷变动幅度最大的时候(如由满负荷跌到最低负荷)。一般应使最大静态偏差不超过生产所允许的变动范围。但有时为了提高生产设备对变动负荷的适应能力,有意造成静态偏差(即不同负荷下被控量保持不同的稳定值)。

(3) 快速性。快速性是指控制过程持续时间的长短。一般希望尽可能短，以保证下一次扰动发生之前，这次扰动所引起的控制过程已经结束。

不同的生产过程，对这三方面的要求和排列主次地位是不同的，对于一个控制系统同时要求这三方面都达到很高的质量往往是困难的，也是不必要的。一般总是首先满足稳定性要求，再兼顾到准确性和快速性。

应当指出，对控制系统除了上述三方面基本要求之外，还应使它满足与运行条件有关的其他一些要求，例如有些生产过程对被控量的变化速度有一定限制，有的对控制作用的变化速度（开、关速度）和动作方式有一定限制等。这些限制条件对控制系统的工作往往有重大的影响。

2. 模拟量控制系统试验指标

(1) 投入运行的模拟量控制系统应定期做扰动试验。扰动试验分为内扰试验和外扰试验。除定期试验外，出现下列情况时也应做扰动试验：

- 1) 设备大修；
- 2) 控制策略变动；
- 3) 控制参数有较大修改；
- 4) 模拟量控制系统发生异常。

(2) 试验前应编写试验措施，经审批后方可执行；试验结束后，应填写试验报告；试验结果如达不到规定的控制品质要求，应分析原因，提出解决对策。

(3) 内扰试验（包括定值扰动）。内扰试验应在 70% 负荷以上进行，扰动量宜为被控介质满量程的 10%。控制过程衰减率应为 0.7~0.9，被控制量的峰值不应达到保护动作值（对于主蒸汽压力和负荷控制系统，衰减率应为 0.9~0.95）。

(4) 评价标准。机组主要参数变化范围见表 1-1。

表 1-1 机组主要参数变化范围

负荷状态	给定负荷变化速率		
	稳态 (<3%Pe/min)	慢速变化 (3%Pe/min)	快速变化 (5%Pe/min)
主汽压力 (MPa)	±0.3	±0.5	±0.8
汽包水位 (mm)	±25	±40	±60
新蒸汽温度 (℃)	±4	±8	±10
再热蒸汽温度 (℃)	±5	±10	±12
炉膛压力 (Pa)	±100	±200	±250

第二节 热工控制对象的动态特性及其求取方法

自动控制系统是由控制对象和自动控制设备组成的。控制对象的输出就是控制系统的被控量，要分析研究控制系统的工作质量，设计或改造自动控制系统，必须先分析控制对象的动态特性，并根据它来正确地选择和使用自动控制设备，确定控制器的最佳整定参数，使控制设备与控制对象相互协调配合，构成一个合理的控制系统，才能获得预期

的控制效果。对于机组运行人员来说,熟悉控制对象的动态特性,也是正确使用好控制系统的必要前提。所以,研究热工控制对象的动态特性,是研究控制系统、实现生产过程自动化的基础工作。

控制对象的动态特性就是控制对象在动态变化过程中各种输入信号与输出信号之间的关系,影响控制对象输出的扰动分为外部扰动和内部扰动。凡是来自控制系统之外,引起被控量发生变化的各种原因,都称为外扰,而控制系统内部的扰动称为内扰。例如水箱水位控制系统,进水流量和出水流量的变化都会引起水位变化,但出水流量的变化是用户需求变化引起的,控制系统本身无法控制,是系统的外扰,而进水流量的变化是控制系统可以控制的,是系统的内扰。图 1-2 所示的水箱水位控制系统方框图中,当被控量水位变化时,控制系统是通过控制作用改变进水流量 q_1 来控制水位,使之恢复为给定值的,故称进水流量到水箱水位之间的信号作用路径为控制通道。而出水流量变化是水位偏离给定值的原因,称由出水流量到水位之间的信号作用路径为干扰通道。内扰通过控制通道作用于对象,外扰通过干扰通道作用于对象。

热工控制对象的动态特性取决于它内部的物理性质、设备结构和运行条件等,原则上可以用分析方法求出它的动态特性。但对于复杂对象,用数学方法求取精确的动态特性表达式是困难的,通常是用实验方法求取对象的阶跃响应曲线,再利用阶跃响应曲线来进行系统分析、设计和控制器整定。

一、热工控制对象动态特性分析

(一) 控制对象分类

实际热工控制对象虽然种类很多,但基本上可以分为两类:一类是简单对象,称为单容对象;另一类是复杂对象,称为多容对象。单容对象只有一个储存物质或者能量的容积,而多容对象具有两个或两个以上储存物质或能量的容积。同一参数在多容对象内部各处的数值可能是不一致的,所以,这类对象又称为具有分布参数特性的对象。同时按控制对象有无自平衡能力划分,可分为有自平衡能力被控对象和无自平衡能力被控对象。

自平衡能力是指控制对象在受到扰动后,仅依靠自身能力而不依靠任何外加的控制作用就能使被控量趋于某一稳定值的能力。

因此可将控制对象分为单容有自平衡能力控制对象、单容无自平衡能力控制对象、多容有自平衡能力控制对象、多容无自平衡能力控制对象。

1. 单容有自平衡能力控制对象

有自平衡能力的单容控制对象称为单容有自平衡能力被控对象,简称单容有自平衡对象,图 1-5 所示水箱就是一个单容有自平衡对象,该对象具有自平衡能力。

若设水箱水位 H 为该被控对象的被控量,假设水箱在 $t=t_0$ 时刻以前处于平衡状态,即水箱的流入量等于流出量, $q_i=q_o$; 水箱水位等于恒定值, $H=H_0$ 。在 $t=t_0$ 时刻流入量突然增加,导致水箱水位升高,使得水箱底部所承受的压力增加,从而导致控制阀 2 前后差压增加,流出量 q_o 变大,流出量 q_o 的增加又影响水位上升的速度,使得水位增加的速度降低,是一个负反馈作用,这样,经过一段时间的自调整,水箱水位又重新达到某一稳定值。可见,水箱具有自平衡的能力。

2. 单容无自平衡能力控制对象

无自平衡能力的单容控制对象称为单容无自平衡能力控制对象,简称单容无自平衡对