

火电厂

热工自动控制技术及应用

刘 禾 白 焰 李新利 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn


火电厂

热工自动控制技术及应用

王 勇 王 强 王 伟 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS



火电厂

热工自动控制技术及应用

刘 禾 白 焰 李新利 编著

附录 (SIC) 目录图

附录 (SIC) 目录图
附录 (SIC) 目录图
附录 (SIC) 目录图



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统地阐述了过程控制的基本原理、基本方法,同时还介绍了许多新的控制理念、控制方法及其在火电厂大型单元机组上的实际应用。

全书共分三篇,第一篇主要是自动控制系统的基础知识,内容包括控制系统基本概念,热工对象动态特性,常规控制规律,单回路控制系统的分析、整定,以及串级控制系统、前馈—反馈控制系统、比值控制系统、复杂控制系统和多变量控制系统的系统组成和控制特点。第二篇为火电厂热工控制系统,内容包括汽包锅炉蒸汽温度控制系统,汽包锅炉给水控制系统,锅炉燃烧过程控制系统,单元机组协调控制系统,直流锅炉控制系统,循环流化床锅炉控制系统以及汽轮机旁路控制系统。第三篇为先进控制策略及其在火电厂热工控制系统上的典型应用。

本书可供从事热工自动控制的科研人员和火电机组运行人员阅读,也可作为自动化、测控技术与仪器、热能与动力工程以及相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂热工自动控制技术及应用 / 刘禾, 白焰, 李新利编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7973-9

I. 火… II. ①刘…②白…③李… III. 火电厂—热力工程—自动控制系统 IV. TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第198212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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年2月第一版 2009年2月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 23.25印张 566千字
印数0001—3000册 定价: 42.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着科学技术的进步,我国的火电机组正朝着高参数、大容量、低能耗、少污染、高自动化的方向迅猛发展,火力发电生产过程的自动化水平显著提高,一些新的控制理念和控制方法已在新建大型火电机组上开始得到应用。为了满足广大从事热工自动控制的科研人员和火电机组运行人员学习提高的需要,同时也为了满足准备进入热工自动控制领域人员的学习要求,编写了本书。

热工自动化主要包括自动检测、顺序控制、自动保护和自动控制。本书主要介绍自动控制内容。全书共分三篇,第一篇主要介绍自动控制系统的基础知识;第二篇主要介绍火电厂组的热工控制系统,内容包括汽包锅炉和直流锅炉的蒸汽温度控制系统、给水控制系统和燃烧过程控制系统,此外,还介绍了单元机组协调控制系统,循环流化床锅炉控制系统以及汽轮机旁路控制系统;第三篇为提高部分,主要介绍先进控制策略的基本知识以及这些控制策略在火电厂热工控制系统上的应用。

在本书的编写中,考虑到 600MW 火力发电机组已成为当前我国的主力机组,因此重点介绍了 600MW 火力发电机组热工控制方法,特别介绍了一些新的控制理念和控制方法以及典型应用。另外,还介绍了循环流化床锅炉控制及在 300MW 机组的典型应用。以往汽轮机旁路控制多采用专业厂家的专门电子控制装置,缺乏统一性和通用性,但这样的局面在 600MW 火力发电机组有所改变,一些机组已采用计算机分散控制系统(DCS)进行控制。因此,本书增加了汽轮机旁路控制系统的介绍。

本书由华北电力大学自动化系刘禾、白焰和李新利编写。其中李新利编写第一篇,刘禾编写第二篇,白焰编写第三篇,最后由刘禾进行统稿。

本书的编写得到了华北电力大学自动化系杨国田的大力帮助,同时研究生刘征远、兰立刚、王亚婧等同学参与了部分章节的文字输入和绘图工作,在此,对他们表示衷心感谢!

限于编者水平,对新理论、新技术的认识和实践也在不断完善之中,书中的不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2008年9月于北京

目 录

前 言

第一篇 自动控制系统基础

第一章	概论	1
	第一节 热工自动化的发展.....	1
	第二节 控制系统组成与分类.....	4
	第三节 控制系统的控制性能指标.....	6
第二章	热工对象动态特性	10
	第一节 概述.....	10
	第二节 被控对象一般特性.....	11
	第三节 建模方法.....	16
	第四节 试验数据处理.....	20
第三章	常规控制规律	33
	第一节 比例控制 (P 控制).....	33
	第二节 积分控制 (I 控制).....	35
	第三节 微分控制 (D 控制).....	37
第四章	单回路控制系统	43
	第一节 概述.....	43
	第二节 被控对象特性对控制品质的影响.....	44
	第三节 测量元件和变送器特性对控制质量的影响.....	50
	第四节 调节机构特性对控制质量影响.....	51
	第五节 单回路控制系统的参数整定.....	54
	第六节 自动控制系统现场投运的一般步骤.....	65
第五章	串级控制系统	66
	第一节 串级控制系统的组成.....	66
	第二节 串级控制系统的特点.....	68
	第三节 串级控制系统的应用范围.....	72
	第四节 串级控制系统的设计原则.....	73
	第五节 串级控制系统的整定.....	74
第六章	前馈-反馈控制系统	77
	第一节 概述.....	77

第二节	前馈控制系统的形式	77
第三节	前馈控制器参数的整定	81
第七章	比值控制系统	83
第一节	概述	83
第二节	比值控制系统的类型	83
第三节	比值控制系统的设计和实施	86
第八章	其他复杂控制系统	90
第一节	分程控制系统	90
第二节	大延迟控制系统	93
第九章	多变量控制系统	100
第一节	概述	100
第二节	耦合程度描述	101
第三节	解耦控制系统设计	104

第二篇 火电厂热工控制系统

第十章	汽包锅炉蒸汽温度控制系统	114
第一节	过热蒸汽温度系统概述	114
第二节	过热蒸汽温度控制方案	117
第三节	过热蒸汽温度控制系统实例	122
第四节	再热蒸汽温度一般控制方案	126
第五节	再热蒸汽温度控制系统实例	130
第十一章	汽包锅炉给水控制系统	132
第一节	概述	132
第二节	给水流量调节方式	135
第三节	给水控制基本方案	136
第四节	给水全程控制	140
第五节	600MW 单元机组给水全程控制实例	147
第十二章	锅炉燃烧过程控制系统	153
第一节	概述	153
第二节	燃烧过程被控对象动态特性	157
第三节	燃烧过程控制基本方案	164
第四节	燃烧控制中的几个问题	168
第五节	中储式锅炉燃烧过程控制	175
第六节	直吹式锅炉燃烧过程控制	179
第七节	600MW 机组燃烧过程控制实例	189

第十三章 单元机组协调控制系统	204
第一节 概述	204
第二节 负荷指令处理回路	209
第三节 机炉主控制器	216
第四节 600MW 机组协调控制实例	223
第十四章 直流锅炉控制系统	235
第一节 直流锅炉特点	235
第二节 直流锅炉动态特性	238
第三节 直流锅炉基本控制方案	240
第四节 直流锅炉给水控制系统	242
第五节 直流锅炉过热汽温控制系统	254
第六节 超临界机组协调控制系统	259
第十五章 循环流化床锅炉控制系统	270
第一节 循环流化床锅炉及控制系统	270
第二节 燃烧过程控制任务与特性	273
第三节 燃烧过程控制系统	275
第四节 300MW 机组循环流化床锅炉控制	279
第十六章 汽轮机旁路控制系统	284
第一节 旁路系统及控制方案	284
第二节 600MW 机组旁路控制系统	287

第三篇 先进控制策略及应用

第十七章 先进控制策略	295
第一节 自适应控制	295
第二节 预测控制	304
第三节 模糊控制	308
第四节 神经网络控制	321
第十八章 先进控制策略应用	334
第一节 先进控制策略在汽温控制中应用	334
第二节 钢球磨中储式制粉系统的智能自适应解耦控制	348
参考文献	361

第一篇

自动控制系统基础

第一章 概 论

第一节 热工自动化的发展

一、热工自动化的发展阶段

电厂热工过程采用自动化技术已有较长的历史,1766年波尔佐诺夫发明的锅炉给水调节装置、1784年瓦特发明的蒸汽机离心摆调速装置,是热动力设备最早的自动控制装置,也是整个自动化领域的早期成果。随着现代科学技术的发展,火力发电机组已由过去的中低压、中小容量发展到现在的高参数、大容量的单元机组,其生产过程的操作由运行人员手动控制到陆续采用各种自动控制装置,实现生产过程的自动控制,使火力发电厂的自动化水平日益提高和发展。

自动化控制技术是理论与技术相结合的一门专业,它的发展可分为理论与技术两个方面。从理论上,大致分为以下三个发展阶段:

(1) 20世纪50年代以前,一般以简单控制系统为主,机组容量小,自动化水平较低。理论基础是经典控制理论,它是用传递函数对被控对象进行数学描述,以根轨迹法和频率法作为分析和综合系统的基本方法。

(2) 20世纪60年代,生产设备走向大型化,生产系统日趋复杂,机组的运行与操作要求更为严格。原来的简单控制已不能满足生产要求,理论上以状态空间分析方法为基础,出现了现代控制理论。现代控制理论以线性系统为前提进行研究,这是控制理论质的飞跃。但实际生产过程应用中,效果并不十分理想。

(3) 由于被控对象机理复杂,难以建立精确的数学模型,第三代控制理论的出现以满足生产要求。以专家系统、神经网络控制和模糊控制为主,同时还有以专家系统、神经网络进行生产过程设备故障分析和性能分析。

从技术装备发展上来分,有以下三个阶段:

(1) 20世纪30~40年代,火力发电机组容量较小,热工生产过程主要是凭生产实践经验来控制,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、电各自独立的分散的局部自动控制。机、炉、电各控制系统之间没有或很少有联系。

(2) 20世纪50~60年代,出现了电动单元组合仪表和巡回检测装置,因而实现了机、炉作为一个单元整体来进行集中控制,仪表盘装在一起监视,从而使机、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与连续化发展的需要。

(3) 20世纪50年代末,计算机开始进入过程控制领域。最初它用于生产过程的安全监

视和操作指导, 后来用于实现监督控制。1958年9月, 美国 Sterling 电厂安装了第一个电厂计算机安全检测系统。1962年, 美国小吉普赛电厂进行第一次电厂计算机控制的尝试, 从此火力发电厂进入了计算机控制的发展历程。随着计算机技术的迅速发展, 电厂热工过程控制又经历了以下几个计算机控制过程。

(1) 直接数字控制 (Direct Digital Control, DDC)。

由控制计算机取代常规的模拟调节仪表, 直接对生产过程进行控制的系统称为直接数字控制。由于计算机造价很高, 所以常常用一台计算机控制全厂所有的生产过程, 即集中型计算机控制, 如图 1-1 所示。

在这种系统中, 输入计算机的模拟量要经过模/数 (A/D) 转换器转换成数字量; 执行设备接受的计算机控制信号是通过数/模 (D/A) 转换器输出的模拟量。整个被控过程的各种状态参数和控制参数的处理, 可以由一台独立的计算机来完成。

DDC 控制的主要优点是控制集中, 能够很好地协调系统各个环节的控制。采用一般的工业控制微型计算机, 就能容易地实现对若干个回路的统一控制。但是, 当面对一个大的、复杂的被控过程时, DDC 控制系统的优点就变成了缺点。因为控制过于集中将带来系统安全可靠降低。

(2) 监督计算机控制 (Supervisory Computer Control, SCC)。

这种系统通常采用两级控制, 如图 1-2 所示。所谓监督控制系统, 就是针对某一特定的生产过程, 依据生产过程的各种状态, 按已有的控制策略或数学模型给出生产设备运行的最佳给定值, 并将最佳值自动地或采用人工的方式, 对 DDC 执行级的计算机或模拟调节仪表进行调整或设定, 由 DDC 或调节仪表对被控过程实施控制的一种控制系统形式。

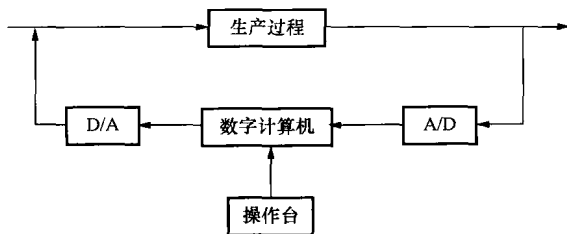


图 1-1 集中型计算机控制系统

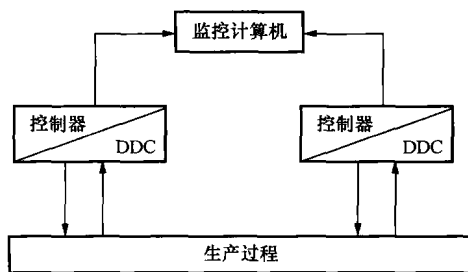


图 1-2 监督计算机控制系统

SCC 系统的特点是分级控制, 下一级控制系统 (如 DDC) 主要的任务是保证系统的运行, 而上一级的控制系统主要任务是保证被控过程始终处于最佳状态。直接影响 SCC 系统效果的因素是它的控制策略或数学模型。因此, 要经常的运行过程中改进控制策略或数学模型, 并相应修改控制算法和应用控制程序, 以使系统达到最佳效果。

(3) 分散控制系统 (Distributed Control System, DCS)。

20 世纪 70 年代初, 大规模集成电路和廉价微处理器的问世, 使得计算机的可靠性和运算速度大大提高。火力发电厂采用了分散控制系统, 它是纵向分层、横向分散的大型综合控制系统。以多层计算机网络为依托, 将分布在全厂范围内的各种控制设备和数据处理设备连接在一起, 实现各部分的信息共享和协调工作, 共同完成各种控制、管理及决策功能。

DCS 克服了 DDC 中的集中控制缺点, 采用了分散控制, 使得控制集中带来的集中危险

也分散了，因此系统的可靠性大大增加。从 20 世纪 80 年代中期，我国一批大型火力发电机组开始陆续采用了 DCS。随着 DCS 的不断发展和成熟，各大 DCS 厂家的产品也不断进行更新换代，同时我国也研制了自己品牌的 DCS，典型代表有国电智深、和利时和新华等公司，这些公司 DCS 已在大型火力发电机组中广泛使用。

图 1-3 所示为一个分散控制系统的典型结构，自下而上分别是：现场级、控制级、监控级和管理级。

(4) 现场总线控制系统 (Fieldbus Control System, FCS)。

随着控制技术、计算机技术和通信技术的飞速发展，数字化作为一种趋势，正在从工业生产过程的决策层、管理层、监控层和控制层一直渗透到现场设备。如图 1-4 所示现场总线控制系统的出现代表了工业自动化领域中一个新纪元的开始。

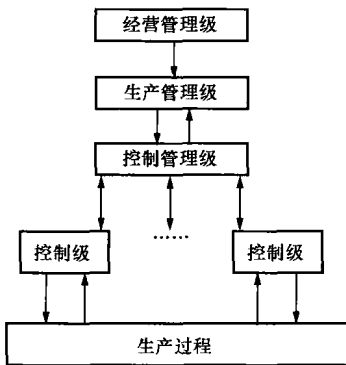


图 1-3 分散控制系统

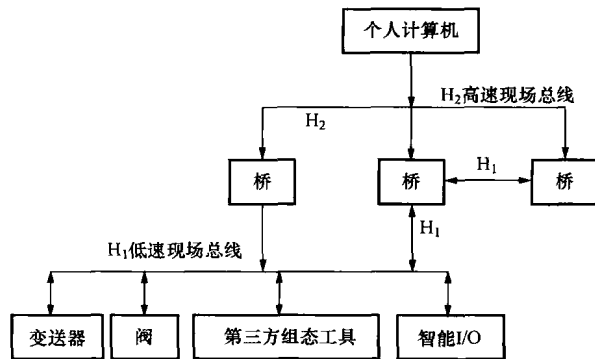


图 1-4 现场总线控制系统

现场总线是一种连接现场设备和控制中心设备的全数字、双向、多点、开放式的通信系统。现场总线系统将测控任务分散到现场设备中，上位计算机只负责监控一些复杂的优化过程和先进控制功能的实现等工作。

采用现场总线控制系统取代分散控制系统能取得更高的经济效益。它可节省大量的通信电缆；将控制功能下放到现场，使过程控制更具有准确性、实时性和可靠性；降低控制系统的设计、安装、调试和维护的工作量及相关费用等。在墨西哥 CFE 热电厂的 3 台机组使用 Smar 公司的 System302 现场总线控制系统，装机总容量达 790MW，运行都十分理想，而且比 DCS 节省很多投资。

二、热工自动化的主要内容

早期的热工自动控制系统是非常简单的，因发电机组的单机容量都很小，对控制系统的要求也不高，只要求对给水、汽温、汽压、汽机的转速作简单的控制，整个机、炉、电也是分别控制的。随着技术的不断发展，发电机组已由过去的中温、中压、中小容量发展到大容量、高参数的单元机组。对 300MW 以上的大型发电机组，要求更高的可靠性和自动化水平，否则它的事故会给电网造成巨大的损失。大型发电机组，必须把机、炉、电看成一个整体，从整体的观念来设计自动控制系统，使机组安全经济运行。

图 1-5 所示为大型单元发电机组的负荷控制系统一般结构图。从图可见，控制系统强调了机炉之间协调，以求达到最佳运行状态，在保证安全的前提下，提高机组运行的经济性。这是与以前小型发电机组所不同的。

热工自动化主要包括以下几个内容。

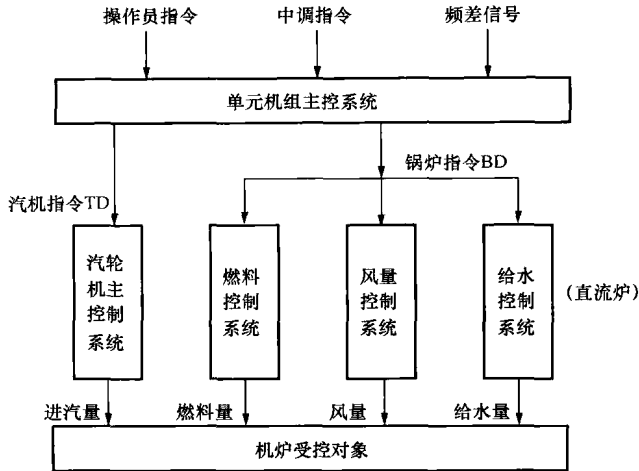


图 1-5 单元机组负荷控制

(1) 自动检测：对反映热工过程运行状态的物理量、化学量以及表征设备工作状况的参数进行自动的检查、测量和监视。常用的检测设备有模拟式仪表、数字式仪表、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及条件，自动地对机组进行启动、停止及其他操作，也称为程序控制。如汽轮机的自动启停，锅炉制粉系统的自动启停和切换，定期排污和定期吹灰等。

(3) 自动保护：发生事故时，自动采取保护措施，以防事故进一步扩大或保护设备使之不受严重破坏。如炉膛的灭火保护、汽轮机的超速保护、锅炉的超压保护以及发电设备的过电压、过电流保护等。

(4) 自动控制：自动地维持生产过程在规定的工况下进行，又称自动调节。热工过程的调节目的在于维持一个或几个能够表征热力设备正常工作状况的物理量，为规定值或按一定规律变化。

对热工自动控制设备与系统的要求：

- (1) 工作可靠，在任何情况下，都有操作手段能双向平衡无扰动切换。
- (2) 专用的监控装置，对工况监视、报警、联锁。
- (3) 设备的抗干扰性能强。
- (4) 使用和维护方便。

第二节 控制系统组成与分类

一、控制系统的组成及术语

在工业生产过程中，为保证生产的安全性、经济性，保持设备的稳定运行，必须对生产过程中的一些物理参数进行调节，使它们保持在所要求的规定值附近，如火力发电厂中锅炉蒸汽的温度与压力、汽包水位、炉膛负压和汽轮机的转速等。在设备运行中这些参数总要经常受到各种因素影响而偏离规定值，此时运行人员要及时操作，对它们加以控制，使这些参数保持在额定的数值范围。这一操作过程就是调节。若由人工操作来完成，叫人工调节；若用自动控制装置来完成，叫自动调节。

下面以如图 1-6 所示的汽包水位控制来说明控制系统的组成及术语。

要保证锅炉正常运行，必须维持锅炉水位。若水位过低，会破坏水循环，引起水冷壁破裂，严重时则易烧干锅，发生事故；若水位过高，则会破坏汽水分离装置的正常工作，易使蒸汽带水，并有溢出的危险。理想情况下（不排污），要保持水位一定，满足进水量等于蒸

汽流量。当给水量不变，蒸汽流量变化，会使水位变化；当蒸汽流量不变，给水压力变化，会使给水量变化，最后使水位变化。

在稳定工况下，被调量水位等于给定值，这时不需要调节。若有扰动发生，使被调量水位偏离给定值，通过测量变送器传送，与给定值形成偏差送入控制器中，控制器输出调节指令给调节阀，从而控制给水流量，维持锅炉水位在给定值。

由图 1-6 可知，对锅炉水位控制必须有检测元件与变送器、控制器、调节阀，其方框图如图 1-7 所示。

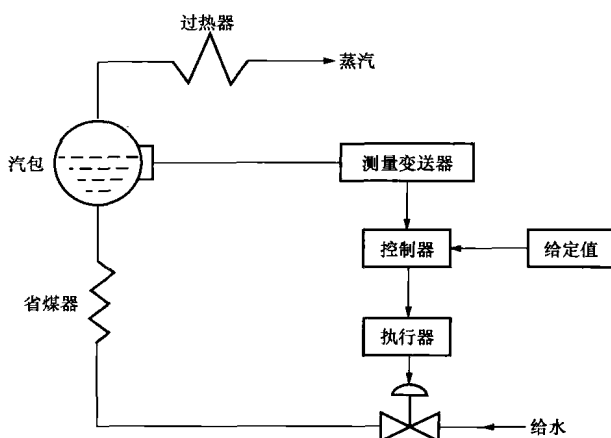


图 1-6 汽包水位自动控制示意图

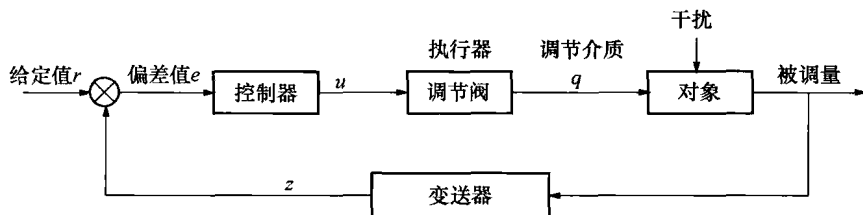


图 1-7 汽包水位自动控制系统原理框图

控制系统中常用的术语如下所述。

(1) 被控对象（对象或过程）：被控制的设备或机器，在汽包水位自动控制系统中的被控对象是锅炉汽包。

(2) 被控参数（被调量）：按照生产过程的要求，某些工艺参数应维持在预定的变化范围内，如对它们进行控制，它们就叫做被控参数。在汽包水位自动控制系统中的汽包水位就是被控参数。如一个控制系统中只控制一个参数，则此自动控制系统称为单变量控制系统，调节两个以上的物理量的称为多变量系统。

(3) 干扰（扰动）：在生产过程中，凡是影响被控参数的各种作业都叫干扰（扰动）。一般分内扰和外扰。内扰指调节阀（调节阀未动作）所在通道的物质或能量的各种因素变化引起的干扰。汽包水位自动控制系统中：给水压力变化的干扰就是内扰。外扰指除内扰以外的其他一切干扰。如汽包水位自动控制系统中蒸汽流量的变化就是外扰。为了进行实验求取被控对象的动态特性，常人为地用调节阀的开大或关小来引起被调量发生变化，这种用调节阀开度变化来产生的干扰称为基本扰动。

(4) 调节量（调节介质）：由控制作用来改变并去控制被调量变化的物理量。如汽包水位自动控制系统中的给水流量。

(5) 测量元件：将被控参数的物理量转换成一种电信号（或其他信号）的传感测量装置。

(6) 测量值 z ：变送器的输出值。

(7) 给定值 r ：根据生产要求，被调量需达到的数值。

(8) 偏差 e : 偏差等于给定值与测量值之差。

仪表制造部门定义: $e=z-r$ 为正作用, 这时测量值 z 增大, 仪表输出增加; 反之, $e=r-z$ 为反作用, 这时测量值 z 增大, 仪表输出减小; 仪表的正、反作用与调节阀的正、反作用一起, 构成控制系统的负反馈控制。如在汽包水位控制系统中, 调节阀采用气关阀, 则控制器应取正作用, 这样才能达到控制的目的。

(9) 调节机构: 用来改变进入被控对象的物质或能量的装置, 主要有调节阀、挡板、电动机调速器。调节阀有电动调节阀和气动调节阀, 其中气动调节阀又分气开阀和气关阀。

(10) 闭环与开环: 系统输出的被调量和输入端之间存在着反馈回路的系统称为闭环系统; 反之, 被调量未以任何形式反馈到输入端的则称为开环系统。

控制系统的主要组成如下所述:

(1) 被控对象;

(2) 检测元件与变送器: 用来测量被调量, 并把被调量转换为与之成某种便于传送和综合的信号;

(3) 控制(调节)器: 接受被调量信号和给定值信号, 并对偏差信号进行一定规律控制, 其输出送至执行器。

(4) 调节机构(调节阀): 根据控制器送来的控制指令去改变调节量(调节介质)来控制被调量。

二、过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法有很多种。按结构分可分为单变量控制系统和多变量控制系统。单变量控制系统只有一个被调量, 而多变量控制系统有两个或更多个被调量, 这些被调量互相影响、互相制约, 因而不能一个一个地单独加以调节; 按工艺参数分可分为流量控制系统、压力控制系统等; 按控制任务分可分为比值控制、前馈控制等; 按装置分可分为常规过程控制系统、计算机控制系统(DCS、FCS); 按闭环分可分为开环控制系统、闭环控制系统。

每一种分类方法只反映了控制系统的某一方面的特点, 但是在分析控制系统时, 给定值的形式不同, 会涉及不同的分析方法, 所以可将控制系统按给定值的不同来进行分类, 主要有三种:

1. 定值控制系统

被调量的给定值恒定不变, 电力工业生产多数都属于定值控制系统, 如汽包水位自动控制系统就是一定值控制系统。

2. 随动控制系统

被调量的给定值是不断变化, 而这种变化往往是无规律的, 是未知的函数。被调量也是跟随给定值而随机变化, 如接受中调指令的单元发电机组负荷控制系统就是一例。

3. 程序控制系统

被调量的给定值是变化的, 变化规律是一个已知的函数。如汽轮机启动过程中, 要求汽轮机的转速按一定程序上升。锅炉在滑压启动过程中, 汽压和汽温要按预先给定的曲线变化。

第三节 控制系统的控制性能指标

在自动控制系统中, 把被调量不随时间而变化的平衡状态称为静态(或稳态), 把被调

量随时间变化的不平衡状态称为动态。当有扰动发生时，系统的平衡状态被破坏，被调量偏离给定值，控制器、调节阀相应动作以改变调节量的大小，使被调量回到给定值，系统恢复平衡状态。这样，从扰动发生，经过调节，直到系统重新建立平衡，即系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程，称为控制系统的过渡过程。可见，控制的过程就是克服干扰的过程。一个系统的优劣在稳态下难以判别，只有在过渡过程中才能体现出来。

一般而言，当系统受到干扰时，会出现如图 1-8 所示的四种典型的过渡过程。

图 1-8 (a) 是一个衰减振荡过程，被控参数经过一段时间的振荡后，能很快地趋向于一个新的平衡状态，这种过渡过程是比较理想的。

图 1-8 (b) 所示是非周期过程，也称单调过程，被调参数没有振荡，单调趋向于一个新的平衡状态，这种过渡过程的时间一般较长。这两种情况下被控参数最后都能重新达到平衡值，这个新的平衡值，可能是扰动前被调量的数值，也可能是一个新的数值，这两种过渡过程都称为稳定过程。图 1-8 (c) 所示是发散振荡过程，被控参数的变化幅度越来越大，直到超出限值，或受到限幅保护装置的限制为止，这种过程称为不稳定过程。图 1-8 (d) 所示是等幅振荡过程，被控参数的数值以及调节机构的位置都作等幅振荡，幅值既不衰减也不发散，这种过渡过程称为边界稳定过程。

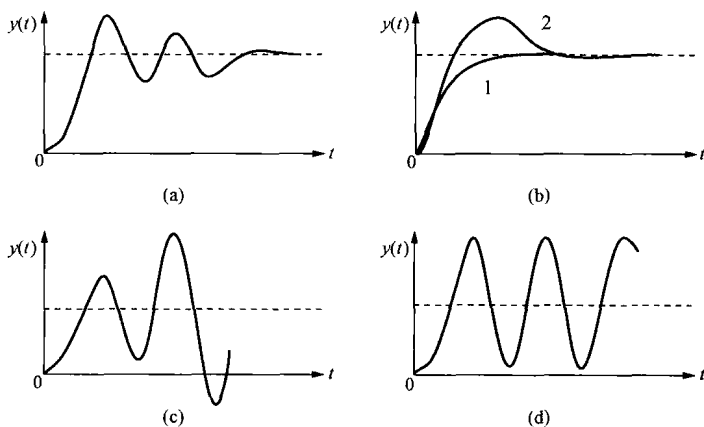


图 1-8 典型的过渡过程形式

(a) 衰减振荡；(b) 非周期过程；(c) 发散振荡；(d) 等幅振荡

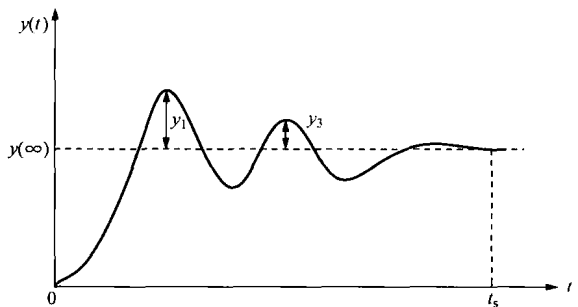


图 1-9 典型的过渡过程曲线

衡量一个控制过程的质量，是在稳定的前提下，即控制系统在受到干扰作用后，在控制装置的控制作用下，控制系统能恢复到一个新的平衡状态，这称为稳定系统，如图 1-9 所示。在此前提下，有四个常用指标：

(1) 衰减比和衰减率。

衰减比或衰减率可以衡量一个控制系统的稳定程度，定义为

$$\text{衰减比: } \eta = \frac{y_1}{y_3} \quad (1-1)$$

$$\text{衰减率: } \varphi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} \quad (1-2)$$

式中： y_1 和 y_3 是被控参数从新稳定值 $y(\infty)$ 起的第一和第三波峰值。

衰减率 φ 和系统稳定性之间的关系如下：

$0 < \varphi < 1$ ，过渡过程为衰减振荡过程，如图 1-8 (a) 所示。

$\varphi = 1$ ，过渡过程为非周期过程，如图 1-8 (b) 所示。

$\varphi=0$ ，过渡过程为等幅振荡过程，如图 1-8 (d) 所示。

$\varphi<0$ ，过渡过程为发散振荡过程，如图 1-8 (c) 所示。

热工控制过程中一般要求 $\varphi=0.75$ 和 0.9 ，对应的衰减比是 4:1 和 10:1。

(2) 最大偏差和超调量。

最大偏差和静态偏差可以衡量控制系统的准确性。

最大偏差：被调量偏离给定值的最大偏差值。通常要求被调量的偏差即使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动范围。

$$\text{超调量} = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-3)$$

(3) 余差（静态偏差）：新的稳态值 $y(\infty)$ 与给定值之间的差值。

(4) 调节时间（控制时间 t_s ）。

调节时间可以衡量控制系统的快速性，即从原来的平衡状态被破坏到另一个新的平衡状态所需要的时间 t_s 。理论上， t_s 是趋于 ∞ 的，实际上，被调量恢复到给定值的 95% 的范围时，就认为是稳定的，这时的时间就是 t_s 。调节时间越短，系统的品质也就越好。

衰减比或衰减率、最大偏差或超调量和调节时间是衡量控制系统的动态指标，而余差是衡量控制系统的静态指标。

在计算机控制系统中，常用误差积分指标衡量控制系统性能的优良程度。误差积分是指在单位阶跃扰动下的被调量与稳态值之间偏差的某个函数（或权函数）的积分值。它是一类综合指标，希望它越小越好，不同的形式如下所述。

(1) 误差积分（IE -Integral error）。

$$J = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (1-4)$$

误差积分的缺点在于其系统的过渡过程是振荡的， $e(t)$ 的数值有正有负，其积分值互相抵消，则会导致一个错误结论。一个等幅振荡的过程，积分值为零，这个调节质量很不好的过程反而成为误差积分值最佳的过程。

(2) 平方误差积分（ISE -Integral time absolute error）。

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-5)$$

平方误差积分在一定程度上克服了误差积分的缺点，但是由于平方误差积分强调了偏差的平方，按此积分值最小所设计的系统往往具有较小的最大动态偏差，过程具有较大振荡，衰减率偏小。

(3) 绝对误差积分（IAE -Integral absolute error）。

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-6)$$

绝对误差积分既克服了误差积分的正负偏差相消的弊病，又补偿了平方误差积分过于强调偏差值而忽略衰减率的不足之处。按绝对误差积分准则最小所设计的调节系统，具有较合适的衰减率和动态响应，但对于过阻尼（衰减率较大）和过分欠阻尼（衰减率较小）的系统，这个积分的选择性不太好，即其相邻积分值相差不多，不易找出其极值点。

(4) 时间与绝对误差乘积积分（ITAE -Integral time absolute error）。

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1-7)$$

时间与绝对误差乘积积分着重解决过渡过程拖得较长的缺陷。

总之，不同的积分公式意味着估计整个过渡过程优良程度时的侧重点不同，但它们都不能都保证控制系统具有合适的衰减率。通常的做法是首先规定衰减率的要求，在此前提下，再考虑使误差积分最小。