



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANCHANG REGONG GUOCHENG
ZIDONG KONGZHI

电厂热工过程 自动控制

王建国 孙灵芳 张利辉 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANCHANG REGONG GUOCHENG
ZIDONG KONGZHI

电厂热工过程 自动控制

王建国 孙灵芳 张利辉 编
韩 璞 张雨飞 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书分为基础篇和应用篇两篇，分别为热工过程自动控制的理论基础和单元机组的自动控制系统，共计十一章。内容涵盖自动控制的基本概念、热工对象的数学模型、控制器的动态特性、单回路控制系统、复杂控制系统、汽包锅炉自动控制系统、直流锅炉自动控制系统、汽轮机自动控制系统、机炉辅助设备的自动控制、单元机组协调控制系统和火电厂自动化技术的新进展。

本书可作为普通高等院校能源动力类、仪器仪表类、电气信息类和其他与过程控制相关的专业本科或电力技术类高职高专相关专业的教学用书，也可作为从事热工过程自动控制工作的工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂热工过程自动控制/王建国, 孙灵芳, 张利辉编.
北京: 中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9014 - 7

I. 电… II. ①王…②孙…③张… III. 火电厂—热工工程—自动控制系统—高等学校—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 102214 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>)
航远印刷有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 413 千字
定价 28.00 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

本书根据热能与动力工程、测控技术与仪器、自动化等专业的教学需要，在广泛汲取相关资料技术精华的基础上，结合多年教学和科研经验编写而成。本书可作为高等院校热能动力类、仪器仪表类、电气信息类和其他与过程控制相关的各专业本科或专科教学用书，也可作为从事热工过程自动控制工作的工程技术人员的自学参考书。

全书分为两篇：基础篇——热工过程自动控制的理论基础，应用篇——单元机组的自动控制系统，共计十一章。内容涵盖自动控制的基本概念、热工对象的数学模型、控制器的动态特性、单回路控制系统、复杂控制系统、汽包锅炉自动控制系统、直流锅炉自动控制系统、汽轮机自动控制系统、机炉辅助设备的自动控制、单元机组协调控制系统和火电厂自动化技术的新进展。

本书注重逻辑性、知识性和实用性，紧密结合火力发电厂热工过程的自动控制实际，力求全面、具体、新颖，阐述方式深入浅出、循序渐进。

本书由东北电力大学王建国、孙灵芳和张利辉编写，其中，张利辉副教授编写第一～五章，孙灵芳副教授编写第六～十章及附录，王建国教授编写第十一章。王建国任主编并负责全书统稿工作。本书由华北电力大学博士生导师韩璞教授和东南大学张雨飞主审。两位老师认真审阅了书稿并提出了许多颇有价值的意见和建议，韩璞教授还提供了一些参考素材，在此向他们表示诚挚的感谢。

限于编者水平，书中疏漏和不当之处，请读者不吝指教。

编 者

2009年7月

目 录

前言

第一篇 热工过程自动控制的理论基础

第一章 自动控制的基本概念	1
第一节 自动控制系统的组成及分类	1
第二节 自动控制系统的过渡过程及品质指标	5
第三节 过程控制系统的发展概况	8
习题	10
第二章 热工对象的数学模型	11
第一节 数学模型的概念及建立方法	11
第二节 机理建模方法	12
第三节 试验测定建模方法	19
习题	25
第三章 控制器的动态特性	26
第一节 PID 控制概述	26
第二节 比例控制	27
第三节 积分控制	30
第四节 微分控制	33
第五节 控制器控制规律的实现方法	36
习题	41
第四章 单回路控制系统	42
第一节 概述	42
第二节 被控对象的特性对控制质量的影响	44
第三节 测量元件和变送器特性	46
第四节 执行器	49
第五节 控制规律对控制质量的影响	56
第六节 单回路控制系统的工程整定方法	57
习题	60
第五章 复杂控制系统	62
第一节 串级控制系统	62
第二节 前馈—反馈复合控制系统	73
第三节 大延迟控制系统	75
第四节 比值控制系统	78
第五节 解耦控制系统	82
习题	91

第二篇 单元机组的自动控制系统

第六章 汽包锅炉自动控制系统	96
第一节 过热蒸汽温度自动控制系统	96
第二节 再热蒸汽温度自动控制系统	107
第三节 给水自动控制系统	109
第四节 给水全程自动控制系统	119
第五节 燃烧过程自动控制系统	128
习题	157
第七章 直流锅炉自动控制系统	159
第一节 直流锅炉简介	159
第二节 直流锅炉动态特性	160
第三节 直流锅炉自动控制系统	163
习题	170
第八章 汽轮机自动控制系统	171
第一节 汽轮机自动控制的基本概念	171
第二节 中间再热式汽轮机的控制特点	181
第三节 功率频率电液控制系统	183
第四节 汽轮机数字式电液控制系统	187
习题	198
第九章 机炉辅助设备的自动控制	199
第一节 除氧器的控制	199
第二节 凝汽器的控制	201
第三节 汽轮机旁路控制系统	202
习题	212
第十章 单元机组协调控制系统	213
第一节 单元机组的动态特性	213
第二节 负荷指令的管理	218
第三节 单元机组负荷控制方式	223
第四节 单元机组协调控制系统实例	230
习题	238
第十一章 火电厂自动化技术的新进展	239
第一节 自动发电控制及其应用	239
第二节 大型火力发电机组的先进自动化技术	243
第三节 大型火电机组自动化技术的发展趋势	254
附录	256
附录 1 控制系统 SAMA 图	256
附录 2 热工控制常用缩略词中英文对照	259
参考文献	263

第一篇 热工过程自动控制的理论基础

第一章 自动控制的基本概念

第一节 自动控制系统的组成及分类

在工业生产过程中，为了保证生产的安全性和经济性，保持设备的稳定运行，必须对表示生产过程运行状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。生产过程中总是伴随着某些物质或能量流入或流出生产设备，设备稳定运行的必要条件是流入和流出的物质或能量保持平衡，如果失去平衡，表示生产过程运行状况的物理参数将发生变化。例如，锅炉运行过程中，汽包中的水位是锅炉给水量和蒸发量是否平衡的标志。当给水流量和蒸汽流量相等时，汽包水位不变（假定锅炉的其他工作条件不变）。如果给水流量和蒸汽流量不相等，水位就要发生变化，所以汽包水位就是表征锅炉给水过程运行情况的物理参数。

显然，表示生产过程运行情况的物理参数，如火电厂中汽轮机的转速，锅炉蒸汽的压力、温度，汽包水位，炉膛压力等，在设备运行中总要经常受到各种因素的影响而偏离规定值（额定值），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，这一操作过程就是控制，也称为调节。这个任务如果由人直接操作来完成，称为人工控制。如果用一整套自动化装置来代替人工操作，就是自动控制。

一、自动控制系统的组成

图 1-1 为电厂锅炉运行中炉膛压力的人工控制示意图。在燃煤锅炉运行过程中，为防止炉膛向外喷灰，通常要保持炉膛压力为微负压。锅炉炉膛压力表示燃烧过程中进入炉膛的送风量与流出炉膛的烟气量之间的工质平衡关系。在运行中，操作人员必须经常注视炉膛负压表的指示值是否符合规定值，假若偏正或偏负，他就要开大或关小引风机的调风挡板，直到炉膛负压表的指示值符合规定值并保持平稳为止。

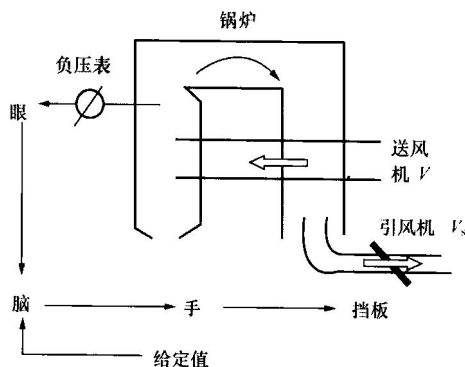


图 1-1 炉膛压力人工控制示意

为了便于说明，下面介绍控制系统中几个常用的术语。

(1) 被控对象：被控制的生产过程或设备称为被控对象，例如图 1-1 中的锅炉炉膛。

(2) 被控量：表征生产过程进行状况的物理量称为被控量或被调量。被控量是通常要保持为规定数值的物理参数，例如本例中的炉膛压力。

(3) 给定值：希望被控量应该具有的数值称为给定值、规定值或希望值，例如炉膛压力希望保持在 -30Pa 左右。

(4) 扰动：生产过程中引起被控量偏离其给定值的各种因素称为扰动，包括内扰和外

扰，例如炉膛负荷、送风量等扰动量的变化都会引起炉膛压力的变化。

(5) 控制量：当被控量受到扰动偏离给定值后，使被控量恢复为给定值所需改变的物理量称为控制量，例如适当的改变系统中引风量，会使被控量逐渐恢复为给定值，这里引风量即为控制量。

(6) 控制机构：改变控制量的装置或设备称为控制机构，例如引风机的调风挡板。

由于自动控制是在人工控制的基础上发展起来的，因此我们先来分析人工控制过程。为了进行控制，操作人员首先要了解情况，即用眼睛观察仪表的指示，了解生产过程的运行情况；其次分析决策，将观察到的炉膛压力值与头脑中记忆的规定值进行比较，根据有无偏差及偏差的方向和大小，确定是否需要控制以及控制机构应向哪个方向动作（开大或关小），再根据自己的实践经验确定应以怎样的规律去开大或关小控制机构；最后执行操作，根据分析决策的结果，手动操作控制机构引风机的调风挡板，改变引风量。重复上述步骤，直到被控量恢复到给定值为止，控制过程才告结束。

生产过程中存在着两种流程：一种是物质和能量的流程，例如蒸汽锅炉中燃料燃烧产生的热量被蒸发受热面中的水所吸收，水变成蒸汽，蒸汽经过过热器加热后送到汽轮机做功；另一种是信息流程，例如在锅炉炉膛压力自动控制中，为了维持压力为给定值，操作人员观察压力表，与给定值比较，然后根据偏差控制引风量，使引风量与送风量相平衡。自动控制系统这门课程主要是研究信息流程，即研究控制系统信号间的相互连接、传递和转换问题。信息流程通常用方框图来表示，即采用图解形式表示系统中各元件或环节的功能和信号传递关系。图 1-2 所示为炉膛压力人工控制系统方框图，图 1-3 所示为炉膛压力自动控制系统方框图。

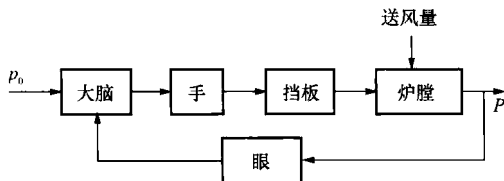


图 1-2 炉膛压力人工控制系统方框图



图 1-3 炉膛压力自动控制系统方框图

下面介绍方框图中的几个组成元素：

(1) 方框：代表系统中的设备或过程，通常方框中是该环节的数学模型，描述该设备或过程输入信号和输出信号之间的动态传递关系，而不代表设备的具体结构。

(2) 信号：用带有箭头的连接线表示信号的传递途径和方向。箭头进入方框的信号称输入信号，箭头离开方框的信号称输出信号。

(3) 比较环节：用 \otimes 表示，将引入该环节的各输入信号进行代数加法运算，并将得到的信号输出。

方框图中各个环节的信号传递方向是不可逆的。

由炉膛压力人工控制系统的分析可以看出，人工控制效果的好坏主要取决于操作人员的实践经验，这些经验包括对被控对象特性的了解以及根据控制对象特性确定的控制规律。倘若操作人员不了解被控对象特性，要想正确进行控制是不可能的。

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

人员的直接操作便能自动地执行控制任务，这就实现了自动控制。实现自动控制作用所需要的自动控制装置主要有：

(1) 测量单元（变送器）：用来测量被控量的大小，并能把被控量（水位、温度、压力等物理信号）转换成与之成比例（或其他固定的函数关系）并便于远距离传送和综合的测量信号，其功能相当于人工控制系统中人的眼睛。

(2) 控制单元（控制器）：接受测量单元送来的被控量信号，并把它与给定值进行比较。当被控量偏离给定值时，控制单元将偏差信号按它的大小和方向以预定的规律进行运算（例如比例、积分、微分等运算），根据运算结果向执行单元发出一定规律的控制信号，给定值可以由专门的给定单元取得，也可以由控制单元内部取得，运行人员可根据生产上的要求预先设定给定值。

(3) 执行单元（执行器）：按照控制单元发出的控制信号去移动控制机构，改变控制量。

当被控对象（锅炉炉膛）受到扰动（送风量和引风量的变化或炉膛漏风等），被控量（炉膛压力）偏离给定值后，测量单元（压力变送器）检测出被控量的变化，被控量与其给定值比较后的偏差值通过控制单元进行运算和综合，控制单元输出的信号传给执行器，执行器改变控制量（引风量），直到被控量恢复到给定值。

二、自动控制系统的分类

实际生产过程中应用到的自动控制系统是多种多样的，要看从什么角度去分类，一般有以下几种常见的分类方法。

(一) 根据生产过程中被控量所希望保持的数值情况分类

(1) 恒值控制系统（也称定值控制系统）：给定值在系统工作过程中保持不变，从而使被控量保持恒定。如锅炉的汽温、汽压、水位等。

(2) 程序控制系统：给定值是时间的确定函数，被控量按预先确定好的随时间变化的数值改变。如锅炉启动时的升温和升压曲线。在这类系统中，需要有一套可控的程序发生装置。

(3) 随动控制系统：给定值按事先不确定的随机因素改变，在这类系统中，给定值需要随时由运行人员或其他外来信号决定。

(二) 根据控制系统内部结构分类

(1) 闭环控制系统（或称反馈控制系统）：输出或被控量的变化信号经过一定的规律反馈到输入端，使之与给定值不断比较，继而在控制规律作用下引起控制机构动作，达到预期效果。闭环控制系统是最常见最基本的控制系统。由于闭环控制系统是按被控量与给定值的偏差进行控制的，因而当控制系统受到扰动时，只要被控量出现偏差就开始进行控制。

(2) 开环控制系统：控制系统中不存在反馈回路，控制器只根据直接或间接的扰动进行控制。一旦扰动发生，控制器就按照预先确定好的控制规律对被控对象产生控制作用，以减弱扰动对被控量的影响。这类控制系统也称前馈控制系统。前馈控制系统的缺点是当被控量和给定值之间出现偏差时，系统没有“纠偏”能力，一般用于对被控量要求不高的系统。

(3) 复合控制系统：当开环控制和闭环控制互相配合使用时，就组成了复合控制系统，也称前馈—反馈控制系统。当扰动产生时，前馈部分先进行“粗调”，抑制被控量的较大变化，闭环部分则进行“细调”校正，减少或消除偏差，因此，这种控制系统能获得较好的控制效果。

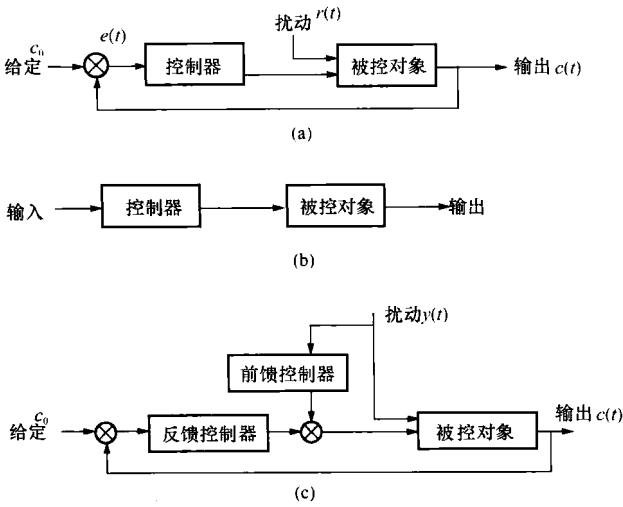


图 1-4 三种控制系统的结构

(a) 闭环控制系统；(b) 开环控制系统；(c) 复合控制系统

上述三种控制系统的方框图见图

1-4。

(三) 按照控制器形式分类

(1) 常规控制系统（或称模拟控制系统）：控制系统中的控制器采用的是连续信号（也称模拟信号），它的控制规律通常是比例—积分—微分（PID）作用，目前在过程控制中仍广泛使用。

(2) 计算机控制系统：计算机控制系统组成与常规控制系统基本相同，所不同的是计算机控制系统的控制器用数字控制器实现，如图 1-5 所示。被控量的信号经测量环节变换成模拟信号，再由模/数转换器（A/D）

变换成数字量，与给定值比较后送到数字控制器，按照一定的控制规律进行运算输出控制量，该控制量经数/模转换器（D/A）变换成模拟量后，送给执行器，最后去控制生产过程（或对象）。

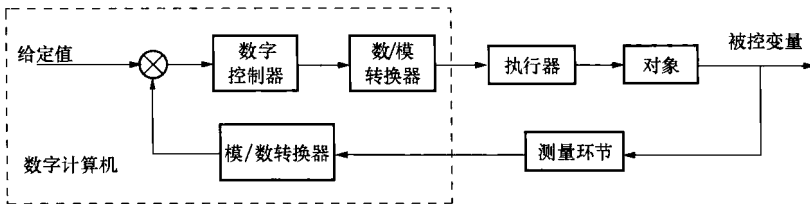


图 1-5 计算机控制系统方框图

(四) 按照系统的输入与输出信号的数量分类

1. 单变量系统（SISO）

所谓单变量是从系统外部变量的描述来分类的，不考虑系统内部的变量和结构。单变量系统只有一个输入量和一个输出量，但系统内部的结构可以是多回路的，内部变量（或中间变量）也可以是多种形式的，如图 1-6 所示。

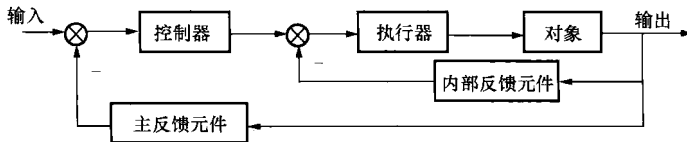


图 1-6 单变量系统

2. 多变量系统（MIMO）

多变量系统有多个输入量和多个输出量。一般来说，当系统输入与输出信号高于一个时，就称为多变量系统，如图 1-7 所示。多变量系统的特点是变量多，回路多，相互之间呈现多回路耦合，研究起来比单变量系统复杂得多。

另外,还有几种分类方法,如按控制系统闭环回路的数目分,有单回路和多回路控制系统;按系统变化特性来分,有线性性和非线性控制系统。

在各类控制系统中,热工生产过程中应用最广泛,也是最基本的是线性、闭环、恒值控制系统。

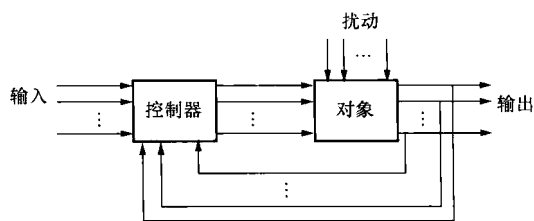


图 1-7 多变量系统

第二节 自动控制系统的过渡过程及品质指标

一、静态特性与动态特性

自动控制系统的输入有两种类型,一种是给定值的变化,另一种是扰动量的变化。当输入恒定不变时,整个系统若能建立平衡,系统中各个环节将暂不动作,它们的输出都处于相对静止状态,这种状态称为静态(也称为稳态)。例如前述锅炉炉膛压力系统中,当送风量与引风量平衡时,炉膛压力保持不变,此时称系统达到了平衡,即处于静态。这里所说的静态,并非指系统内没有物料与能量的流动,而是指各个参数的变化率为零,即参数保持不变。此时输出与输入之间的关系称为系统的静态特性。

假设一个系统原来处于静态,由于出现了扰动,即输入起了变化,系统的平衡受到破坏,被控量(即输出)发生变化,自动控制装置就会动作,进行控制,以克服扰动的影响,试图使系统恢复平衡。从输入开始变化,经过控制,直到再建立静态,在这段时间中整个系统的各个环节和变量都处于变化的过程之中,这种状态称为动态。另一方面,在给定值变化时,也会引起动态过程,控制装置试图使被控量在新的给定值或其附近建立平衡。总之,由于输入的变化,输出随时间而变化,它们之间的关系称为系统的动态特性。

在恒值控制系统中,扰动不断产生,控制作用也就不断克服其影响,系统经常处于动态过程中。同样,在随动控制系统中,给定值不断变化,系统也经常处于动态过程中。因此,控制系统的分析重点要放在系统和环节的动态特性上,这样才能设计出良好的控制系统,以满足生产提出的各种要求。

二、自动控制系统的过渡过程

当自动控制系统的输入发生变化后,被控量(即输出)为了跟随输入量随时间不断变化进而达到一种新的平衡,把这段变化过程称为系统的过渡过程。也就是系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

为了分析一个系统的动态特性,常以阶跃作用作为系统的输入对系统进行分析,因为阶跃作用很典型,实际上也经常遇到,且这类输入变化对系统来讲是比较严重的情况。如果一个系统对这种输入有较好的响应,那么对其他形式的输入变化就更能适应。阶跃输入信号的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \text{ 时} \\ R, & t \geq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1-1)$$

当式(1-1)中的 $R=1$ 时,称为单位阶跃信号,记为 $1(t)$ 。阶跃信号的函数曲线如图1-8所示。

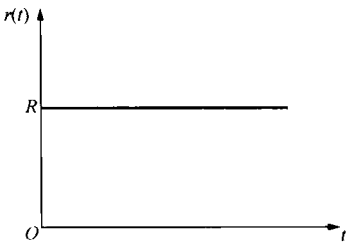


图 1-8 阶跃信号的函数曲线

在图 1-4 (a) 所示的恒值控制系统中, 扰动为阶跃输入信号时, 系统的过渡过程的几种形式如图 1-9 所示。图 1-9 (a) 是衰减振荡, 图 1-9 (b) 是单调衰减, 这两种形式都是稳定的, 即受到扰动作用后, 经过一段时间, 最终能趋于一个新的平衡状态, 故这两种形式是可以采用的。图 1-9 (c) 是等幅振荡, 处于稳定与不稳定的边界, 称为临界稳定, 这种系统在一般情况下不采用。图 1-9 (d) 是发散振荡, 被控量一直处于振荡状态, 且振幅逐渐增加。

图 1-9 (e) 是单调发散, 被控量虽不振荡, 但偏离原来的静态点越来越远, 以上两种形式都属于不稳定。在过程控制系统中, 要求系统是稳定的。

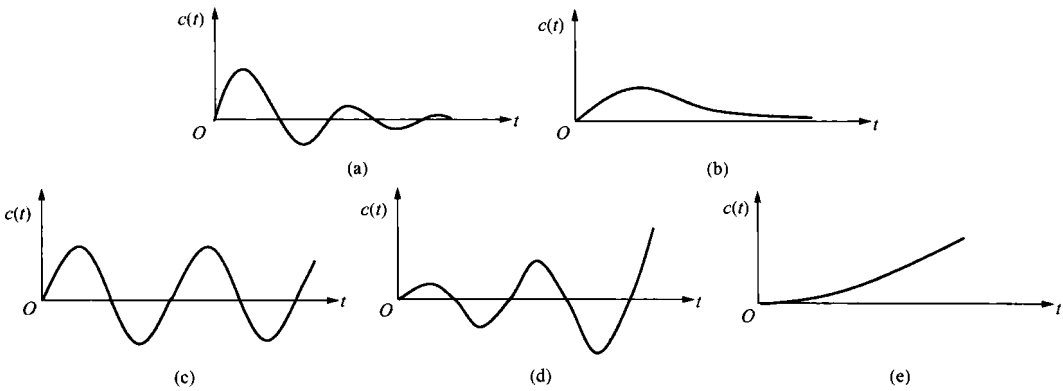


图 1-9 恒值控制系统的过渡过程几种形式

(a) 衰减振荡; (b) 单调衰减; (c) 等幅振荡; (d) 发散振荡; (e) 单调发散

三、自动控制系统的性能指标

工业过程对控制的要求, 可以概括为稳定性、准确性和快速性。恒值控制系统和随动控制系统对控制的要求既有共同点, 也有不同点。恒值控制系统的目标在于恒定, 即要求克服干扰, 使系统的被控参数能稳、准、快地保持接近或等于给定值。而随动控制系统的主要目标是跟踪, 即稳、准、快地跟踪给定值。图 1-10 是恒值控制系统和随动控制系统在阶跃作

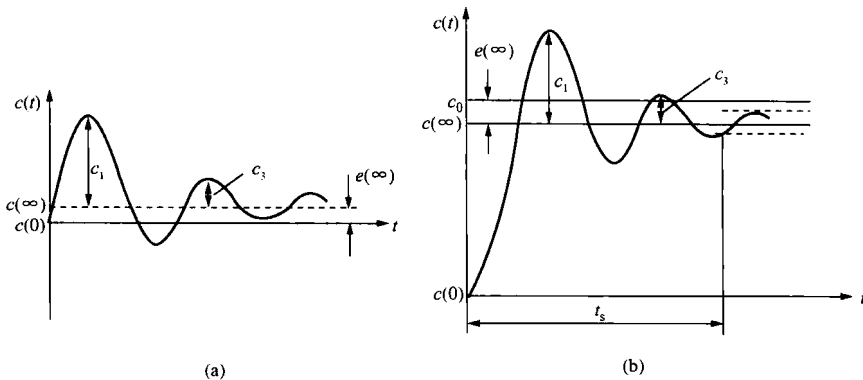


图 1-10 过渡过程控制指标示意

(a) 内部扰动作用; (b) 给定值扰动作用

用下的过渡过程响应曲线。一个控制系统在受到外作用时，要求被控变量要平稳、迅速和准确地趋近或恢复到给定值。因此，在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项控制指标和综合性控制指标。这些控制指标仅适用于衰减振荡过程。

(一) 单项控制指标

1. 静态偏差 $e(\infty)$

静态偏差是指过渡过程结束后，给定值 c_0 与被控量稳态值 $c(\infty)$ 的差值，即 $e(\infty) = c_0 - c(\infty)$ ，如图 1-10 (a) 所示。它是控制系统静态准确性的衡量指标。无论是给定值扰动还是内扰，都要求系统的静态偏差为零，或不超过预定的范围，静态偏差是反映控制准确性的一个重要稳态指标，如图 1-10 (a)、(b) 所示。

2. 衰减比 n 和衰减率 ψ

衰减比是衡量振荡过程衰减程度的指标，等于两个相邻同向波峰值之比，即 $n = c_1 / c_3$ ，衰减比习惯上用 $n : 1$ 表示。衰减率是指每经过一个周期以后，波动幅度衰减的百分数，即 $\psi = \frac{c_1 - c_3}{c_1}$ 。显然，对衰减振荡而言， n 恒大于 1。 n 越小，意味着控制系统的振荡过程越剧烈，稳定度也越低， n 接近于 1 时，控制系统的过渡过程接近于等幅振荡过程；反之， n 越大，则控制系统的稳定度也越高，当 n 趋于无穷大时，控制系统的过渡过程接近于非振荡过程，衰减比究竟以多大为合适，没有确切的定论，可以根据实际经验操作。在实际生产中，为保持足够的稳定裕度，工程上一般希望控制系统的衰减比为 4 : 1 到 10 : 1，它相当于衰减率 ψ 为 0.75 ~ 0.9。若衰减率 ψ 为 0.75，则大约振荡两个周期就认为系统进入稳态。

3. 最大动态偏差 e_{\max} 和超调量 M_p

最大动态偏差或超调量是描述被控量偏离给定值最大限度的物理量，也是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。在内部扰动作用时，通常采用最大动态偏差指标，其定义是被控量第一个波的峰值与给定值之差，如图 1-10 (a) 中的 $e_{\max} = c_1 + e(\infty)$ 。在给定值扰动作用时，通常采用超调量这个指标来表示被控量偏离给定值的程度，它的定义是第一个波的峰值与最终稳态值之差占被控量稳态值的百分比，即 $M_p = \frac{c_1 - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$ 。最大动态偏差或超调量越大，生产过程瞬时偏离给定值就越远。最大动态偏差能直接反映到生产记录曲线上，特别是在越来越先进的计算机过程控制系统中，能够更为方便、直观地在监视器屏幕上观察到被控参数的实时响应波形。

4. 过渡过程时间 t_s 和振荡频率 ω

过渡过程时间 t_s 表示控制系统过渡过程的长短，也就是控制系统在受到阶跃信号外作用后，被控量从原有稳态值达到新的稳态值所需要的时间。严格地讲，控制系统在受到外作用后，被控量完全达到最终稳态值需要无限长时间。但实际上当被控量的变化幅度衰减到足够小，并保持在一个极小的范围内所需要的时间还是有限的。

对于给定值变化的控制系统（即随动控制系统），一般在稳态值附近设定误差带 $\pm \Delta$ （2% 或 5% 稳态值），当被控量进入其稳态值的 $\pm \Delta$ 范围内，就认为过渡过程已经结束，这时所需时间就是过渡过程时间 t_s 。过渡过程时间 t_s 短，表示控制系统的过渡过程快，即使扰动频繁出现，系统也能适应；反之，过渡过程时间 t_s 长，表示控制系统的过渡过程慢。显然，过渡过程时间 t_s 越短越好，它是反映控制快速性的一个指标。

在衰减比相同的条件下,被控量响应曲线的振荡频率与过渡过程时间 t_s 成反比,振荡频率越高,过渡过程时间 t_s 越短。因此振荡频率也可作为衡量控制快速性的指标,恒值控制系统常用振荡频率来衡量控制系统的快慢。

必须说明,这些控制指标在不同的控制系统中各有其重要性,而且相互之间又有着内在的联系。同时要求严格满足这几个控制指标是很困难的,因此,应根据工艺生产的具体要求分清主次,区别轻重,对于主要的控制指标应优先保证。

(二) 综合控制指标

所谓综合控制指标,是指对上面的几个目标特征数值进行某种数学上的处理,设法把它们统一地包含在一个数学表达式中。一般用期望的系统响应和实际系统响应之差的某个函数作为目标函数。

由于过渡过程中动态偏差越大,或是过渡过程时间越长,则控制品质越差。因此综合控制指标常采用动态偏差的积分形式。常用的有三种积分性能指标:

1. 平方积分指标 ISE

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

2. 绝对值积分指标 IAE

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-3)$$

若用动态偏差 $e(t)$ 作积分,正、负偏差将相互抵消。即使 $e(t)$ 值很大或剧烈波动,积分指标 J 值仍然可以很小,所以一般用动态偏差 $e(t)$ 的平方或绝对值来评定恒值控制系统质量指标。

3. 时间乘以动态偏差绝对值的积分指标 ITAE

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| t dt$$

上式是为了突出快速性的要求,一般用于随动控制系统的质量指标评定。

对于有静态偏差的系统,存在 $e(\infty)$,三种形式的积分指标值都将趋于无穷大,无法衡量系统的控制质量,为此常采用 $e(t) - e(\infty)$ 作为动态偏差项代入积分指标运算中。

自动控制系统控制质量的好坏,取决于组成控制系统的各个环节,特别是被控对象的特性。自动控制装置应按对象的特性加以适当的选择和调整,才能达到预期的控制质量。

第三节 过程控制系统的发展概况

生产过程自动化的发展,大体上可以分为三个阶段。

1. 仪表自动化阶段

20世纪40年代前后,生产过程自动化主要是凭生产实际经验,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,实现生产设备就地分散的局部自动控制。在不同设备之间或同一设备中的不同控制系统之间没有或很少有联系。过程控制的对象主要是温度、压力、流量、成分等几个热工参数的恒值控制,以保证生产过程的稳定进行。

20世纪50年代~60年代,先后出现了电动与气动单元组合仪表和巡回检测装置,采用了集中监控与集中操作的控制系统,实现了工厂仪表化和局部自动化。这对当时迫切希望提

高设备效率和强化生产过程的要求起了有力的促进作用，适应了工业生产设备日益大型化与连续化的客观需要。随着仪器仪表工业的迅速发展，对于过程辨识的理论和方法，对于仪表及控制系统的设计计算方法都有较快的进展。但过程控制的理论仍采用以频率法和根轨迹法为主体的经典控制理论，主要解决单输入、单输出的定值控制系统的分析和综合问题，各控制系统间互不关联或关联甚少，只是控制的品质有较大的提高。

2. 计算机控制阶段

20 世纪 70 年代至 80 年代，由于集成电路与计算机技术的飞速进展，为过程控制的发展创造了条件，开始采用计算机直接数字控制（Direct Digital Control, DDC）与计算机监控（Supervisory Computer Control, SCC）系统。由于计算机硬件的可靠性高、成本较低，有丰富的软件支持，有直观的 CRT 显示，便于人机联系；它既没有模拟常规仪表那样数量多、仪表柜庞大的缺点，也不会像 20 世纪 60 年代初采用的大型计算机集中控制那样，一旦出现故障，就会影响全局，因此得到了广泛的应用。特别是随着现代工业生产的规模不断扩大，控制要求不断提高，过程参数日益增多，致使控制回路更加复杂。为了满足工业生产的监控集中、危险分散的要求，20 世纪 70 年代中期，分散控制系统（Distributed Control System, DCS，也称分布式控制系统）开发问世了。分散控制系统是集计算机技术、控制技术、通信技术和图形显示技术为一体的装置。这种系统在结构上是分散的，就是将计算机分布到车间或装置。这不仅使系统的危险分散，消除了全局性的故障点，而且提高了系统的可靠性，同时能方便灵活地实现各种新型的控制规律与算法。这种系统由于是分级的，能实现优化的最佳管理。它的出现是新形势下的一种必然趋势。它一经出现就受到了工业控制界的青睐，实现了过程控制最优化和生产调度与经营管理自动化相结合的分散控制系统，使生产过程自动化的发展达到了一个新的水平。由原来分散的机组或车间控制，向全车间、全厂和整个企业的综合自动化方向发展。

在过程控制系统结构方面，为了提高控制质量与实现一些特殊的控制要求，相继出现了各种复杂控制系统。例如，串级、比值、前馈—反馈复合控制和解耦控制的应用。

在过程控制理论方面，除了仍然采用经典控制理论以解决实际生产过程中遇到的问题外，现代控制理论开始得到应用，最优控制、推理控制、预测控制、自适应控制等控制方法得到了比较迅速的发展，控制系统由单变量系统转向多变量系统，以解决实际生产过程中遇到的更为复杂的问题。

3. 综合自动化阶段

从 20 世纪 90 年代开始，过程控制进入了综合自动化阶段。这一阶段具有以下突出特征：

在自动化工具上推出了现场总线（fieldbus）控制技术。根据国际电工委员会（IEC）和现场总线基金会（FF）的定义，现场总线是智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的通信网络。它有如下特点：

（1）用一对 N 结构代替一对一结构，一条通信线能连接 N 台仪表，减少了连接线，因而减少了安装维护费用，工期短，可靠性高，抗干扰性强。

（2）互换性、互操作性好，不同制造厂生产的仪表可以互连、互操作，开放性好。

（3）控制分散，现场仪表不仅有检测功能，而且可以有运算功能和控制功能，因而通过现场仪表就可构成控制回路，使控制回路彻底分散。现场总线采用公开的、标准的网络协

议,很容易与其他网络集成,方便共享信息,为综合自动化奠定了基础。它的出现标志着控制工具的又一次重大变革,过程控制进入了真正的计算机时代。

在控制理论上采用了第三代控制理论,即智能控制理论。智能控制将人工智能、控制理论和运筹学三大学科相结合,采用模糊、神经网络和专家系统等技术,比较好地解决了对象建模的困难和干扰众多与控制要求提高的矛盾,在许多难以控制的场合下,发挥了卓越的作用。与此同时,现代控制理论中的诸如非线性系统、分布参数系统、随机控制以及容错控制等也在理论上和实践中得到了发展。

以计算机集成技术为基础的综合自动化体系正在形成。综合自动化系统就是包括生产计划和调度、操作优化、基层控制和先进控制等内容的递阶控制系统,也称管理控制一体化的系统。这类系统是靠计算机及其网络来实现的,因此也称为计算机集成过程系统(Computer Integrated Process System, CIPS)。这里,计算机集成指出了它的组成特征,过程系统指明了它的工作对象,正好与离散型工业中的计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS)相对应,因此,也将CIPS称为过程工业的CIMS。

CIPS是一种全新的哲理与概念,它以企业整体优化为目标,以计算机及网络为主要技术工具,以生产过程的管理和控制自动化为主要内容,将过去局部自动化的“孤岛”模式集成为一个整体的系统,它代表了当代自动化的潮流。

应当看到,生产过程自动化是适应生产发展的需要而发展起来的,它们之间相互依存,相互促进,密切相关。生产工艺的变革、设备的更新、生产规模的扩大、新产品的涌现都会促进自动化的发展进程。同样,自动控制理论、技术、设备等方面的新成就,又保证了现代工业生产在安全而稳定的情况下高速、高产、高质地运行,可以充分地发挥和利用设备的潜力,大大地提高生产率,获得最大的社会与经济效益。

最后应当指出,虽有这样丰富而先进的现代控制理论,但实际行之有效的控制方法太少,不能适应生产过程不断提出的更高级、更严格的需求。随着神经网络的研究应用,人工智能专家系统日益推广运用,模糊控制的逐渐兴起,在不远的将来可能形成简单、实用、控制品质高的各种控制网络与控制方法,将现代控制理论工程化和实用化,使过程控制达到完善的地步。

习 题

- 1-1 一个简单控制系统由哪几部分组成?各有什么作用?
- 1-2 自动控制系统通常可分为哪几种类型?
- 1-3 常用的评价控制系统性能的单项目标有哪些?它们与动态偏差积分指标各有何特点?
- 1-4 简述过程控制的发展概况及各阶段的特点。

第二章 热工对象的数学模型

第一节 数学模型的概念及建立方法

设计一个优良的过程自动控制系统时,首先需要知道被控对象的数学模型,然后依据被控对象的数学模型,按照控制要求来设计控制器。虽然现在已经发展出一些不依赖于精确的被控对象数学模型的控制算法,但也需要对被控对象的动态特性有一个定性的了解。许多情况表明,对一些复杂对象不能设计出良好的自动控制系统,往往是由于被控对象的数学模型建立不准确而引起的,因此建立准确、合适的被控对象数学模型并了解其特点是自动控制系统设计的基础。

一、数学模型的建立

要想建立一个较完善的数学模型,需要掌握以下三方面的内容。

(1) 要确定明确的输入量与输出量。由于同一个系统可以有很多个研究对象,这些研究对象将决定建模过程的方向。只有确定了输出量,目标才得以明确。而影响研究对象的输出量发生变化的输入信号也可能有多个,通常选一个可控性良好、对输出量影响最大的输入信号作为输入量,而其余的输入信号则为干扰量。

(2) 要有先验知识。在建模中,所研究的对象是工业生产中的各种设备或过程,例如换热器、工业窑炉、电厂蒸汽锅炉等。而被控对象内部所进行的物理、化学过程可以是各种各样的,但它们必定符合已经发现了的许多定理、原理及模型。因此在建模中必须掌握建模对象所要用的先验知识。

(3) 试验数据。在进行建模时,通过对被控对象的试验与测量可以获得有关的信息和试验数据。合适的定量观测和试验是验证模型或建模的重要依据。

对被控对象数学模型的要求,首先是要准确可靠,但这并不意味着愈准确愈好。应根据实际应用情况提出适当的要求。超过实际需要的准确性要求必然造成不必要的浪费。在线运用的数学模型还有实时性的要求,它与准确性要求往往是矛盾的。实际生产过程的动态特性是非常复杂的。在建立其数学模型时,往往要抓住主要因素,忽略次要因素,否则就得不到可用的模型。为此需要做很多近似处理,例如线性化、分布参数系统集总化和模型降阶处理等。

由于模型的误差可视为干扰,而闭环控制本身具有一定的鲁棒性,在某种程度上具有自动消除干扰影响的能力,因此,一般来说,用于控制的数学模型并不要求非常准确。

二、建立数学模型的方法

建立被控对象的数学模型,一般可采用多种方法,大致可分为机理法和试验法两类。

(一) 机理法建模

用机理法建模就是根据生产过程中实际发生的变化机理,写出各种有关的平衡方程,例如:物质平衡方程,能量平衡方程,动量平衡方程以及反映流体流动、传热、化学反应等基本规律的运动方程,特性参数方程和某些设备的特性方程等,从中获得所需的数学模型。

用机理法建模的首要条件是生产过程的机理必须已经为人们充分掌握,并且可以比较确