

HUODIANCHANG REGONG GUOCHENG
KONGZHI XITONG

火电厂热工过程 控制系统

■ 主编 郭南 马阳



东北大学出版社
Northeastern University Press

火电厂热工过程控制系统

主编 郭 南 马 阳

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 郭南 马阳 2017

图书在版编目 (CIP) 数据

火电厂热工过程控制系统 / 郭南, 马阳主编. — 沈阳: 东北大学出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-5517-1579-9

I. ①火… II. ①郭… ②马… III. ①火电厂—热工过程—自动控制系统 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 092913 号

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印刷者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm×240mm

印张: 14.25

字数: 274 千字

出版时间: 2017 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2017 年 4 月第 1 次印刷

组稿编辑: 张德喜

责任编辑: 郎坤

封面设计: 潘正一

责任校对: 一方

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1579-9

定 价: 35.00 元

前 言

本书是根据热能与动力工程、自动化及其相关专业“热工过程控制系统”教学的需要而编写的，它可作为高等院校热能与动力类、自动控制类及相关专业的教材，也可以作为从事热工过程自动控制工作的工程技术人员的参考书。

全书分为两篇，共十二章，第一篇为控制系统基础知识，第一章讲述了自动控制的基本概念，控制系统的分类和性能指标。第二章讲述了热工对象的特点，介绍了根据对象的阶跃响应求取传递函数的方法。第三章讲述了调节器的控制规律。第四章讲述了单回路控制系统的组成、分析、调节器参数的整定方法及实例分析。第五章介绍了串级、前馈-反馈控制等复杂控制系统的组成、特点、分析及整定方法。第二篇为火电厂单元机组自动控制，第六章至第十二章分别介绍了汽包锅炉蒸汽温度控制、汽包水位控制、燃烧控制、协调控制、超超临界机组燃烧控制、直流锅炉给水控制及直流锅炉过热汽温控制系统的组成、工作原理和实例分析。

本书是在历年讲稿基础上经多次修改完善而成，在内容上力求反映热工过程控制的新技术和新发展。在阐述方法上注意深入浅出、循序渐进、理论和实践相结合。

本书由沈阳工程学院郭南、马阳编写，在本书编写过程中，得到了沈阳工程学院自动化系老师们和铁岭电厂热控分场技术人员的大力帮助与支持，并提出了许多宝贵的意见，在此一并致以衷心感谢。

由于作者水平有限，对新技术的认识和实践尚不够，书中的缺点在所难免，真诚希望读者批评指正。

编者

2016年7月

目 录

第一篇 控制系统基础知识

第一章 控制系统概述	3
第一节 概 述	3
第二节 自动控制系统分类	6
第三节 自动控制系统的性能指标	8
第二章 热工对象动态特性及其特点	12
第一节 概 述	12
第二节 有自平衡能力对象	13
第三节 无自平衡能力对象	15
第四节 对象数学模型的求取	19
第三章 调节器的控制规律	25
第一节 概 述	25
第二节 调节器的控制规律	27
第四章 单回路控制系统	35
第一节 单回路控制系统结构与分析	35
第二节 单回路控制系统工程整定方法	39
第三节 单回路控制系统实例	44

第五章 复杂控制系统	48
第一节 串级控制系统	48
第二节 前馈控制系统	52

第二篇 火电厂单元机组自动控制

第六章 汽包锅炉蒸汽温度自动控制系统	64
第一节 引言	64
第二节 串级过热汽温控制系统	67
第三节 采用导前汽温微分信号的双回路汽温控制系统	69
第四节 过热汽温分段控制系统	73
第五节 600MW 过热汽温控制系统实例	75
第六节 再热蒸汽温度自动控制系统	77
第七章 给水自动控制系统	82
第一节 引言	82
第二节 给水自动控制系统	86
第三节 给水全程自动控制系统	97
第八章 燃烧过程自动控制系统	105
第一节 引言	105
第二节 燃烧过程自动控制的典型系统	112
第三节 600MW 机组燃烧控制系统实例	119
第九章 单元机组协调控制系统	134
第一节 引言	134
第二节 单元机组负荷控制方式	142
第三节 600MW 机组主控系统实例	151

第十章 超超临界机组燃烧控制系统	166
第一节 超超临界机组燃烧控制系统组成	166
第二节 燃烧控制系统的动态特性	171
第三节 水燃比控制实例	175
第四节 燃料控制系统实例	180
第十一章 直流锅炉给水控制系统	194
第一节 给水控制系统组成与任务	194
第二节 给水控制系统对象动态特征	196
第三节 给水控制系统实例	197
第十二章 直流锅炉过热汽温控制系统	205
第一节 主蒸汽温度对象的动态特性	205
第二节 主蒸汽温度控制系统实例	211
参考文献	219



第一篇 控制系统基础知识



第一章 控制系统概述

第一节 概述

控制的含义是某个主体使某个客体按照一定的目的来动作。通常把主体是人的控制称为人工控制，把主体是机器的控制称为自动控制。例如，人驾驶汽车改变车速或方向这就是人工控制，其中人是主体，而汽车是客体；自动汽包水位控制就是自动控制，主体是机器，不需要运行人员操作就可以完成水位的控制。

自动控制是在人工控制的基础上产生、发展起来的。目前，在工程和科学技术的发展过程中，自动控制起着非常重要的作用。人造卫星、宇宙飞船、导弹制导、自动驾驶等高精尖技术都离不开自动控制技术，石油、化工、冶金、电子、航空等工业生产过程也都广泛应用自动控制技术。电力行业更是离不开自动控制技术，复杂的电力生产过程和繁多的过程参数都是通过自动控制技术实现控制和监测的。为了更好地了解自动控制，下面以锅炉汽包水位人工控制为例，来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。

锅炉水位人工控制示意图如图 1-1 所示。为了保证锅炉的安全运行，操作人员应该设法使汽包中的水位稳定在一定的范围内，当某些因素的干扰使汽包水位发生变化时，运行人员必须手动干预。图 1-1 中，给水经过给水控制阀、省煤器加热后进入汽包。蒸汽经过过热器后形成过热蒸汽，再送到汽轮机做功。为了使水位保持在要求的数值上或在一定范围内变化，在汽包上设置一个水位计，运行人员根据水位计的指示，不断地改变控制阀的开度，

控制进入汽包的水量，从而使水位维持在某个要求的范围内。例如，当运行人员从水位计上观测到的水位数值低于要求值时，则开大阀门，增加给水流量，使水

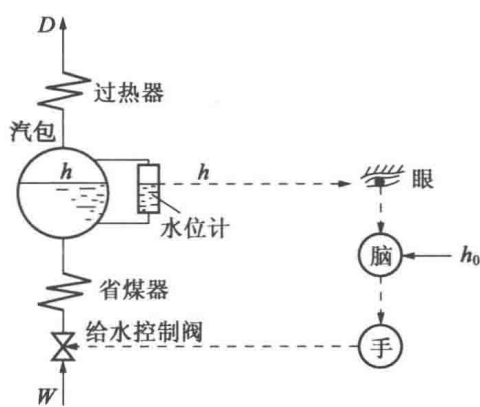


图 1-1 水位人工控制示意图

位上升到要求的数值；当从水位计上观测到的数值高于要求值时，就关小阀门，减小给水流量，使水位降低到要求的数值。

总的来说，为了进行控制，运行人员通过眼睛观察指示仪表的数值，了解生产过程运行情况；运行人员的大脑将汽包水位的指示值与汽包水位要求的数值进行比较，计算出两者的差值，并判断阀门应该向哪个方向动作；运行人员的手按照大脑的指示，按照规定操作给水控制阀。整个过程通过观察、运算和执行，实现了水位的人工控制。其原理框图如图 1-2 所示。

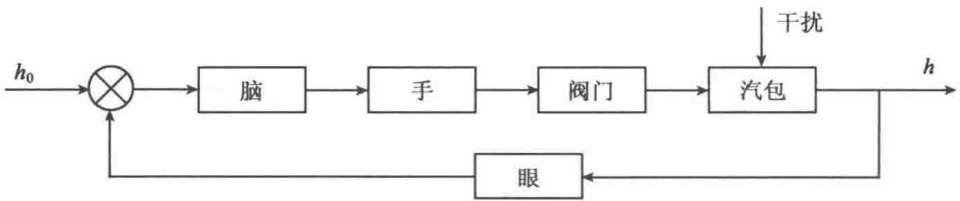


图 1-2 水位人工控制原理框图

如果用一整套自动控制装置来代替人工控制中运行人员，使生产过程不需要运行人员的直接参与而能自动地执行控制任务，就叫作自动控制。

锅炉给水汽包水位自动控制示意图如图 1-3 所示。

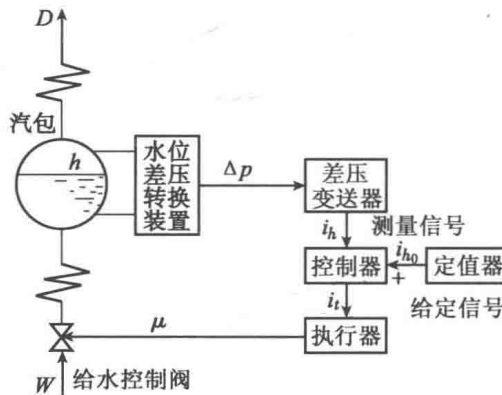


图 1-3 水位自动控制示意图

图 1-3 中由测量元件(差压变送器)、定值器、控制器、执行器代替操作人员完成控制给水的任务。测量元件用来测量水位的大小，并把水位信号转变成与之成一定关系、便于远距离传送的电流或电压信号，其功能相当于人工控制中人眼睛的作用。控制器接受测量元件送来的水位测量信号，并把它与水位要求保持的值(由定值器给出)进行比较，计算偏差。控制器根据偏差的大小将有一定规律的控制指令送给执行器，其功能相当于人的大脑。执行器再根据控制器输出的信号

改变控制机构(给水控制阀)的位置,进而改变水位值。这一过程反复进行,直到水位达到要求值为止。这样就实现了用自动控制仪表代替人工控制的自动控制。图 1-3 的原理框图如图 1-4 所示。

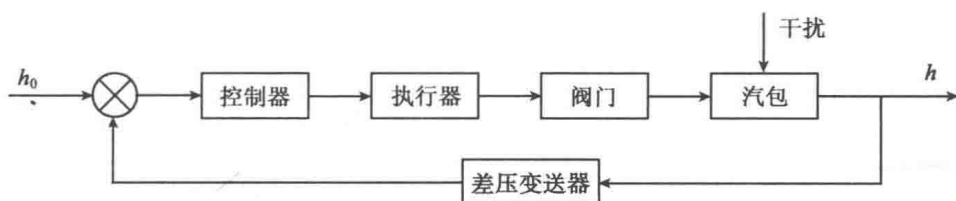


图 1-4 水位自动控制原理框图

通过以上分析,可以总结出自动控制过程几个常用的术语。

- ① 被控对象:被控制的生产过程或者设备,如图 1-3 中的汽包。
- ② 被控量:表征生产过程是否正常运行并需要加以控制的物理量。例如图 1-3 中的汽包水位 h 。
- ③ 给定值:按生产要求希望被控量维持的数值,简称给定值或希望值,如图 1-3 中要求的水位 h_0 。
- ④ 控制量:当被控量受到扰动影响偏离给定值时,被控量恢复为给定值时需要加以改变的物理量,例如图 1-3 中的给水量 W 。
- ⑤ 扰动:引起被控量偏离其给定值的各种原因。如果扰动不包括在控制回路内部(例如外界负荷),称为外扰;如果扰动发生在控制回路内部,称为内扰。其中,由于控制机构开度变化造成的扰动,称为基本扰动;变更控制器的给定值的扰动,称为给定值扰动,有时也称控制作用扰动。
- ⑥ 控制器:接受被控量信号与给定值信号比较后的偏差信号,输出有一定规律的控制指令给执行器。
- ⑦ 控制机构:改变控制量的装置或设备。例如图 1-3 中的给水控制阀。
- ⑧ 测量变送器:用来测量被控量,并把被控量转换为与之成比例的某种便于传递和综合的信号。
- ⑨ 控制过程(调节过程):原来处于平衡状态的控制对象,一旦受到扰动作用,被控量就会偏离给定值。通过自动控制仪表或运行人员的控制作用使被控量重新恢复到新的平衡状态的过程,称为控制过程。
- ⑩ 自动控制系统:自动控制仪表和控制对象通过信号的传递互相联系起来构成的系统。

第二节 自动控制系统分类

自动控制系统的分类方法很多，一般有以下几种常用的分类方法。

一、按给定值特点分类

在不同的生产过程中，被控量给定值可分为以下三种情况。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统是工业生产过程中应用最多的一种过程控制系统。在运行时，系统被控量如温度、压力、流量、液位、成分等的给定值是固定不变的（有时在规定的小范围附近不变）。电厂锅炉水位、温度控制系统属于这一类型。

2. 随动控制系统

随动控制系统是一种被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的主要作用是克服一切扰动，使被控量随时跟踪给定值。此系统给定值需要随时由运行人员或其他外来信号确定。例如，在锅炉滑压运行时，主蒸汽压力的给定值随外界负荷而变化，其变化规律是未知的，要求主蒸汽压力（测量值）紧紧跟踪其给定值变化而变化。随动控制系统在热工过程自动控制中应用日益增多，特别是在参与调峰调频的大型单元机组系统中得到广泛应用，例如，锅炉燃烧控制系统，单元机组负荷控制系统，军事上的火炮跟踪系统、导弹预测拦截系统等。

3. 程序控制系统

程序控制系统是被控量的给定量按预定的时间程序来变化的控制系统。例如，汽轮机自动启停系统 TAS，汽轮机启动过程中，要求汽轮机的转速按一定程序升降；炉膛吹灰系统；等等。

二、按控制系统结构特点分类

1. 反馈控制系统

反馈控制系统又称闭环控制系统，是根据系统被控量与给定值的偏差进行工作的，偏差值是控制的依据，最后达到减小或消除偏差的目的。反馈信号可能有多个，从而可以构成多回路控制系统（如串级控制系统）。如图 1-5 所示。

反馈控制的特点是在调节结束时，可以使被控量等于或接近于给定值。当调节系统受到扰动作用时，必须等到被控量出现偏差后才开始调节，所以调节的速度相对比较缓慢。

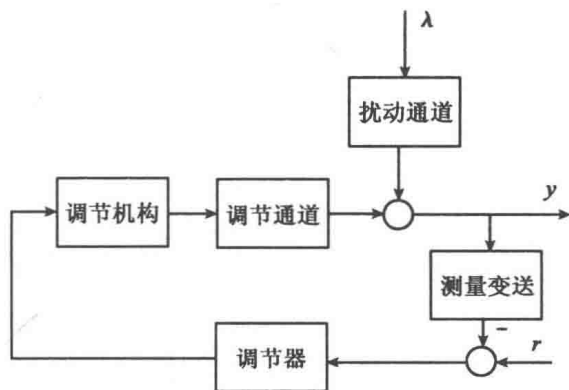


图 1-5 闭环控制系统

2. 前馈控制系统

前馈控制系统又称开环控制系统，控制系统中没有反馈回路，没有形成闭合回路，如图 1-6 所示。控制器只根据扰动量的大小进行工作，扰动是控制的依据。一旦扰动 λ 发生，前馈控制器就按照预先确定好的控制规律对被控对象产生抑制作用，以减弱扰动对被控量的影响。这种控制的特点是由于扰动 λ 影响被控量的同时，调节器的调节作用已产生，所以调节速度相对比较快。前馈控制在实际生产中不能单独采用。

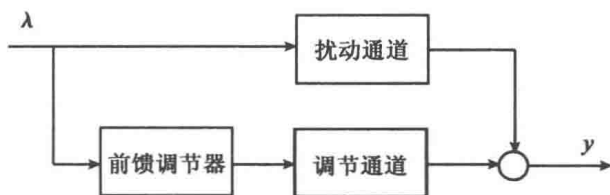


图 1-6 开环控制系统

3. 前馈-反馈复合控制系统

在闭环控制系统的基础上加入前馈控制就称为前馈-反馈复合控制系统。将经常发生的主要扰动(负荷)作为前馈信号，由于前馈信号快于被控量的偏差信号，故可以立刻进行调节，及时克服主要扰动对被控量的影响。利用反馈来克服其他扰动，使系统的被控量在稳态时能准确地控制在给定值。在复合控制系统中，把前馈控制称为粗调，把反馈控制称为细调。只要充分利用前馈与反馈的优点，就可以提高控制质量。

复合控制系统是目前广泛应用的系统。

第三节 自动控制系统的性能指标

一、静态特性与动态特性

自动控制系统调节品质的优劣，直接表征了控制系统克服外来干扰能力的大小。性能良好的控制系统，在受到外来扰动作用或给定值发生变化后，应平稳、准确、迅速地回到(或趋近于)给定值上。因而，讨论自动控制系统的品质指标也就显得尤为重要。为此，先给出静态和动态的概念。

静态：被控参数不随时间而变化的平衡状态叫静态或稳态。

动态：被控参数随时间而变化的不平衡状态叫动态。

二、自动控制系统典型过渡过程

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。当给定值有了变化或有干扰进入系统，原来的平衡状态被破坏，被控参数开始偏离给定值，调节器、调节阀相应动作以改变调节量的大小，而使被控量重新回到给定值上。把被控量开始变化到新的平衡状态这一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一个新的平衡状态的过程。

一般来说，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鉴别。自动控制系统所要克服的干扰有小有大，有的变化快，有的变化比较缓慢。缓慢的干扰总是比突然的干扰更容易克服。而阶跃干扰是最不利的干扰形式，如果一个控制系统能很好地克服阶跃干扰的影响，那么它对于其他形式的干扰也就不难克服，因此把阶跃干扰作为研究控制系统调节品质的标准输入信号，把对阶跃干扰的反应作为判别系统抗干扰能力好坏的标准。单位阶跃输入函数曲线如图 1-7 所示。

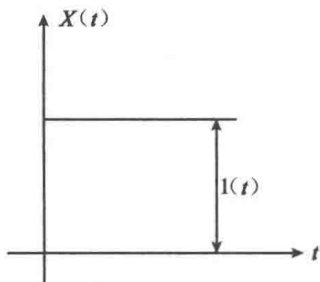


图 1-7 单位阶跃输入函数曲线

自动控制系统受到阶跃扰动后，被控量可能出现以下几种典型的调节过程，见图 1-8。

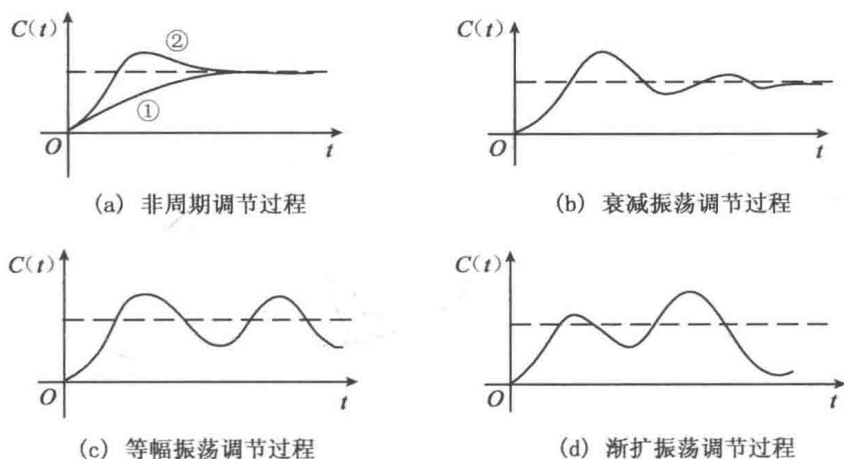


图 1-8 控制过程典型过渡形式

闭环系统受到扰动影响后，若经过控制能达到新的平衡状态，称为稳定的控制过程。这种新的平衡状态的被控量可以稳定在扰动前的数值或者新的数值。如图 1-8(a)(b)所示的非周期及衰减振荡过程都是稳定的系统。

如果输出量的过渡过程呈现渐扩振荡或等幅振荡，就称为不稳定的控制过程，如图 1-8(c)(d)所示。图 1-8(c)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，也属于不稳定范畴；图 1-8(d)不但不能达到新的平衡，而且偏差时正时负，振幅越来越大，直到发生破坏作用受到限幅保护装置的干涉为止，这种控制系统是不稳定的。在过程控制系统中，要求系统是稳定的。

三、自动控制系统的性能指标

一个控制系统的衡量指标一般可以归纳为三个方面，即稳定性、准确性和快速性。

1. 稳定性

通常所说的控制系统是稳定的，是指控制系统在受到干扰作用后，系统的平衡被破坏，在控制设备的控制作用下，控制系统能恢复到一个新的平衡状态，成为稳定的控制系统。稳定的控制系统的被控参数和控制参数的过渡过程曲线最后趋向平衡，不稳定的控制系统过渡过程曲线则是无法恢复平衡的。典型的定值扰动过渡过程曲线如图 1-9 所示。

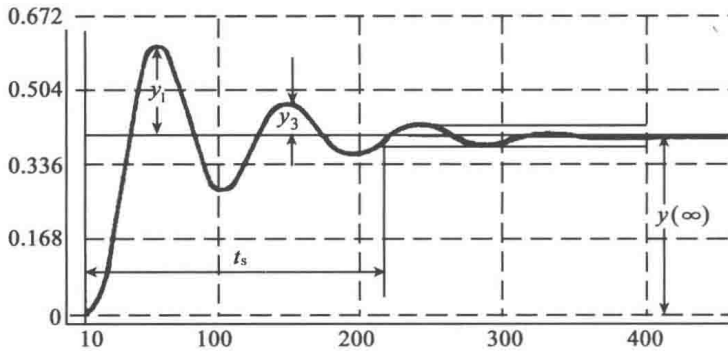


图 1-9 典型的定值扰动过渡过程曲线

控制系统的稳定程度一般可以用衰减率来表示, 即

$$\varphi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 1 - \frac{y_3}{y_1}$$

式中, y_1 ——偏离稳态值的第一个波峰幅值;

y_3 ——偏离稳态值的第三个波峰幅值。

根据 φ 的数值, 可以判别过渡过程的性质和形式:

若 $\varphi = 1$, 则调节过程是不振荡的衰减过程(非周期过程), 如图 1-8(a) 所示。这种系统稳定性高。

若 $0 < \varphi < 1$, 则调节过程是衰减振荡, 如图 1-8(b) 所示。这种系统是稳定的, 可以应用。

若 $\varphi = 0$, 则调节过程是等幅振荡, 如图 1-8(c) 所示。这种系统处于边界稳定。在某些不利因素的影响下, 它可能变为发散振荡。这种系统不能应用。

若 $\varphi < 0$, 则调节过程是发散振荡, 如图 1-8(d) 所示。这种系统是不稳定的, 不能应用。

在实际生产过程中, 不仅要求系统是稳定的, 还要求有一定的稳定裕量, 以保证在每次控制过程中振荡次数不致过多(约 2~3 次), 一般取 $\varphi = 0.75 \sim 0.95$ 。

2. 准确性

准确性是指被控参数的实际值与给定值之间的动态偏差和静态偏差。动态偏差或超调量表示系统短期偏离给定值的程度。偏离越大, 偏离的时间越长, 则控制系统离开规定的工况就越远, 这是不希望的。静态偏差是过渡过程结束后被控参数与给定值的差值。在现场希望两个偏差越小越好。

3. 快速性

快速性是指控制过程的持续时间, 控制过程时间越短, 即控制过程进行得越迅速, 说明控制系统克服干扰的能力越强。