



普通高等教育“十一五”规划教材

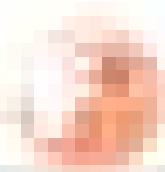
电气控制系统 设计基础与范例

第2版

易泓可 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”规划教材

电气控制系统 设计基础与范例

陈学军

陈永河 主审

机械工业出版社

普通高等教育“十一五”规划教材

电气控制系统设计 基础与范例

第2版

主 编 易泓可
副主编 葛芦生
参 编 蔡 文 万 涛 刘 升
主 审 龚幼民



机械工业出版社

本书分为上、下两篇。上篇为进行电气控制系统设计所必需掌握的理论知识,包括常见的自动控制系统组成和特点、工业参数检测仪表、现场总线和以太网技术以及电控系统常用器件等。下篇除介绍设计电控系统的一般过程和应注意的具体事项外,重点介绍近年来已在企业生产现场成功应用的范例,既有传统的继电器接触器控制装置,又有采用 PLC、变频器、工控机和组态软件以及现场总线、工业以太网的较复杂的控制系统,还有单片机控制装置以及电气传动系统仿真研究等。这些项目适用的领域包括汽车制造、冶金、矿山、化工、环保、城镇建设等行业。

本书主要用作工业自动化、电气技术、机电一体化和机械电子工程等本科专业学生毕业设计的指导教材,也可用作高专高职类似专业毕业实训阶段教材,对于从事电气控制系统设计、调试、维修的技术人员也有参考价值。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登陆 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 Edmondyan@hotmail.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制系统设计基础与范例/易泓可主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2008. 11

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-15567-6

I. 电… II. 易… III. 电气控制系统—系统设计—高等学校—教材
IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 128925 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2008 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17 印张 · 417 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-15567-6

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书出版已经三年，在高校工业自动化、电气技术、机械电子工程等专业学生毕业设计中发挥了积极作用。通过教学实践我们感到本书内容还需作适当调整：首先是当前现场总线和工业以太网技术发展很快，已经成为工业自动化领域主导技术之一，应予专章阐述；近年来 MATLAB 软件在自动控制系统的分析和设计方面获得了广泛的应用，也应在第一章中作简要介绍；考虑到一般院校都开设了传感变送器方面的课程，因而在本书中不必重复叙述，应着重从电气控制系统设计的角度介绍如何选用合适的检测仪表和调节器；在控制系统中人机界面使用非常广泛，为此应再写一节插入第四章中。增添以上内容之后可以较好地反映当前自动化技术发展现状。下篇的设计范例是本书主要特色，这次修订新编写了 7 个课题，删去原有的 4 个课题，范例增至 16 个，涉及的技术领域进一步扩大，学生在进行毕业设计时有更大的选择空间，读者也可以从中得到更多的启示。还应说明的是，有些范例较为复杂，需要由数名学生组成毕业设计课题组分工合作才能在三个月左右的时间之内完成，指导教师可以根据实际情况选择适合的课题，合理安排。

在这次修订工作中，编写组成员增加了安徽工业大学刘升副教授，他编写了上篇第三章和下篇设计范例十二、范例十三；南昌科技大学易泓可编写了第四章第四节，上海师范大学蔡文编写了上篇第一章第八节和下篇范例十五；南昌科技大学万涛编写了下篇范例六、范例七、范例八、范例九；万涛和刘升协助整理了全部书稿；上海大学冀幼民先生再次对书稿进行了认真的审阅。在安徽工业大学葛芦生教授主持下，由刘升、蔡文、万涛共同制作了上篇理论基础的多媒体光盘，可供学校教学和广大读者自学参考。通过全体编审人员的共同努力，顺利完成了本书的修订工作。

本书是一本开放型的教材。我们深知兄弟院校许多同行积累了很多毕业设计的优秀课题，欢迎贡献出来，在下次修订时作为范例，为培养应用型技术人才发挥更大的作用。本书虽经修订难免还有错漏之处，恳切期盼广大读者批评指正。我们相信在大家的关心和帮助下，这本教材一定能够与时俱进，更臻完善。

编者

第1版前言

近年来随着我国经济持续高速增长,高等教育规模不断扩大,工程类专业的主要任务是培养应用型技术人才以支持工业部门的发展。多年来的教学实践证明,毕业设计是实现上述培养目标的重要教学环节,因为学生在设计过程中必须综合运用所学的知识和技能去分析和解决工程实际问题,学会检索资料,收集信息,树立工程与经济观念,提高图文处理和文字表达能力,以便在毕业后就能够较快地适应工作需要。但是由于当前人才需求市场的变化,学生在毕业前要参加很多的社会活动,在校内进行毕业设计的有效时间相当有限,加之学生缺乏工程实践经验,要在较短的时间里完成一个设计课题确有困难。针对上述新的情况,我们对电气自动化、机械电子工程等专业的毕业设计教学进行了改革和探索,具体做法是在学生毕业设计前(例如四年制的第七学期)开设专题讲座,为学生讲授进行电气控制系统设计所必须的理论知识,以若干设计项目作为示范,说明设计过程如何进行,应该完成的设计图样及文字资料等等,然后下达设计课题,学生可以从寒假开始进行准备,充分发挥主观能动性展开工作,在这个过程中教师给予必要的指导,学生在规定的时间内完成设计并进行毕业答辩。教学实践证明,这些改革措施使学生有了主动权,不仅提高了毕业设计质量,而且提高了学生的独立工作能力,对他们毕业后求职上岗都有帮助。

在机械工业出版社的大力支持下,我们在总结电气自动化和机械电子工程专业毕业设计教学改革工作经验的基础上编写了这本教材,上篇为进行电气控制系统设计所应具备的基础知识,包括常见的自动控制系统组成和特点;传感器与变送器工作原理、工业参数检测仪表选用以及电控系统常用器件等;下篇除介绍设计电控系统的一般过程和应注意的具体事项外,重点介绍近年来已在企业生产现场成功应用的项目中选出的13个范例,它们各具特色;既有传统的继电器、接触器控制装置,又有采用PLC、变频器、工控机和组态软件和现场总线等较为复杂的控制系统;还有单片机控制装置以及电气调速系统仿真等等。就复杂程度而言,有的项目相当简单,可用作设计入门;大部分项目能够用作毕业设计课题。这些项目适用的领域很宽,包括汽车制造、冶金、矿山、化工、环保、城镇建设等行业。本书主要用作本科院校工业自动化、电气技术、机电一体化和机械电子工程等专业学生的毕业设计指导教材,同时也可作为高专、高职类似专业毕业实训阶段的参考教材,在进行教学时可以根据各个院校的相关专业教学计划以及该专业的主要服务方向,选择其中部分内容进行课堂讲授,例如上篇学生已经学过的内容就不必重复;下篇则选择几个项目作较全面的介绍,某些项目可作为学生应独立完成的毕业设计课题,其余项目对学生走上工作岗位之后还有一定的参考价值。

本书由南昌科技大学易泓可教授任主编、安徽工业大学葛芦生教授任副主编,上海师范大学蔡文讲师、南昌科技大学万涛讲师共同编写。上篇第一、二、三、四章分别由蔡文、万涛、葛芦生、易泓可执笔;易泓可编写了下篇概述及设计范例一至六;万涛编写了范例七;葛芦生编写了范例八至十;蔡文编写了范例十一至十三。全书由上海大学自动化学院博士生导师龚幼民教授主审,他对书稿提出了许多建设性意见,并提供了有关资料。

在本书编写过程中得到了兄弟院校同行的热心支持,上海欧姆龙自动化系统有限公司杨海云提供了部分资料,南昌同济机电科技有限公司刘江华、李志华、熊勇等参加了部分书稿的整理工作,在此一并致谢。

最后还要说明的是,这本教材将我们目前的做法和正在使用的毕业设计资料奉献给大家,其中缺点错误在所难免,希望能够起到抛砖引玉的作用,恳切期待广大读者批评指正。我们还希望本书能够成为一本开放型教材,热忱欢迎兄弟学校的同行对本书的理论知识、设计范例等诸多方面提供更多更好的资料,我们深信大家共同努力,集思广益,就能够使本书修订后内容更加充实,更加符合毕业设计教学工作的需要,在培养应用型技术人才上发挥更大的作用。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

上篇 理论基础

第一章 控制系统基本知识	1
第一节 自动控制系统的基本概念	1
第二节 控制系统的性能指标	6
第三节 自动控制系统中常用名词与术语	8
第四节 常用控制系统的基本类型	10
第五节 常用调节器的控制规律	15
第六节 控制系统的数学模型及其频域分析方法	22
第七节 调节器的工程设计方法	28
第八节 Matlab/Simulink 在自动控制系统分析中的应用	41
第二章 控制系统常用检测仪表	46
第一节 基础知识和基本概念	46
第二节 温度检测	52
第三节 压力检测	64
第四节 流量测量	74
第五节 物位测量	80
第六节 调节器与执行器	87
第三章 现场总线与工业以太网技术	95
第一节 工业控制网络	95
第二节 现场总线技术	103
第三节 几种典型的现场总线	106
第四节 现场总线控制系统	109
第五节 工业以太网	116
第四章 电控系统常用器件	126
第一节 常用低压电器	126

第二节	可编程序控制器	130
第三节	通用型变频器	131
第四节	人机界面	135
第五节	自动控制用微特电机	137
第六节	电气测量仪表	141

下篇 设计范例

概述	145
范例一 热压成型机电气控制	149
范例二 工业循环水系统电气控制	154
范例三 变频恒压供水控制系统	157
范例四 覆膜砂生产线电气控制	163
范例五 脉冲清灰袋式除尘器电控系统	168
范例六 车轮旋转弯曲疲劳试验机的电气控制	183
范例七 小型污水处理站的电控系统	188
范例八 无线遥控物料运送小车	198
范例九 用微型 PLC 控制的机床二维进给装置	202
范例十 脉冲编码器、测速发电机性能自动测试分析系统	206
范例十一 钢管磨削生产线分布式测控系统	214
范例十二 基于工业以太网的带钢质量数据无纸记录及分析系统	223
范例十三 基于现场总线的电机运行状态分布式监测系统	231
范例十四 微机控制的自动排料系统设计	238
范例十五 智能型洗衣机控制器的设计	248
范例十六 基于 MATLAB 的双闭环直流调速系统的仿真	255
参考文献	262

上篇 理论基础

第一章 控制系统基本知识

第一节 自动控制系统的基本概念

一、自动控制的基本原理与分类

1. 自动控制的基本原理

在现代科学技术的众多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称被控对象）的某个工作状态或参数（即被控量）自动地按照预定的规律运行。近几十年来，随着电子计算机技术的发展和运用，在宇宙航行、机器人控制、导弹制导以及核动力等高新技术领域中，自动控制技术更具有特别重要的作用。不仅如此，自动控制的应用现已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多领域中，成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

自动控制发展初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，主要用于工业控制。为了实现各种复杂的控制任务，首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，组成一个有机整体，这就是自动控制系统。在自动控制系统中，被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量，它可以要求保持为某一恒定值，如温度、压力、液位等，也可以要求按照某个给定规律运行，例如飞机航行、记录曲线等；而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制，但最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。

在反馈控制系统中，控制装置对被控对象施加的控制作用，是取自被控量的反馈信息，用来不断修正被控量与输入量之间的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务。下面我们通过一个例子来说明反馈控制的原理。

厨师用一台电热烤炉来烤制某种食品，温度以 150°C 时为宜，为此在烤炉上装了一只水银温度计，如图 1-1 所示。食品原料装入后，便将电源开关 S 接通，烤炉的电阻 R 通电加热；温度达到 150°C 时，再把开关 S 断开，烤炉内的温度便逐步下降，当温度低于 150°C 时，又要将开关 S 合上，这样操作下去直到食品取出为止，显然，这位厨师需要一直坚守岗位，如果疏忽大意，烘烤的食品不是半生不熟就是

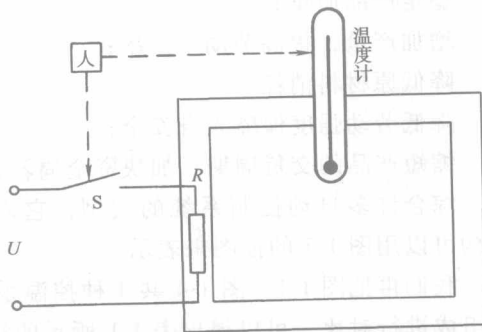


图 1-1 装水银温度计的电烤炉

被烤焦了不能食用。

如果把水银温度计换成一套控温仪表，它不但能显示当前的炉内温度，而且它还有一对控制接点，再把手动开关换成交流接触器，于是变成了图 1-2 的形式。当我们把食品原料放入烤炉以后，将电源接通，接触器 KM 的线圈得电，烤炉的电阻 R 通电加热；温度达到 150°C 时，接触器 KM 断电，其工作过程与前面的情况相同，但炉温可以自动保持在 150°C 左右，不再需要人的参与。

同样是控制电热烤炉的温度，还可以采用另外一种方法，如图 1-3 所示，厨师操作一只调压器，当炉温接近 150°C 时，把输送到电阻 R 上的电压适当降低，当炉温低于 150°C 时又适当提高这个电压，这样也可以将炉温保持在 150°C 上下，但是还得依靠人工操作。

我们将水银温度计换成另一种控温仪表，调压器也改用由电动机带动滑动电刷的调压器，如图 1-4 所示，这时当炉温低于 150°C 时，调压器输出电压最高以加快升温速度，炉温接近 150°C 时，输出电压将适当下降，超过 150°C 时输出电压为零，显然，这样炉温同样可以自动保持在 150°C 左右，也不需人的参与。

如果将图 1-1、图 1-2 的控制方法与图 1-3、图 1-4 相比较，不难看出前者的加热电压是不变的，电阻 R 上的电流则是时有时无；后者的加热电压是变化的，电阻 R 上的电流大小随炉温变化，一般情况下不致完全断电，这样烤炉的温度波动会小些，但是控温装置显然也要复杂些。

概括起来，自动化带来的主要效益是：

- 稳定产品质量；
- 增加产量，提高劳动生产率；
- 降低原材料消耗；
- 降低劳动强度保障人身安全；
- 缩短产品的交货周期，加快资金周转；
- 综合许多自动控制系统的实例，它们的

结构可以用图 1-5 的框图来表示。

我们再把图 1-1 ~ 图 1-4 共 4 种控温系统的组成进行对比，可以得出表 1-1 所示的结果，由此可见，自动控制装置是模仿人的操作，从而取代了人的劳动。

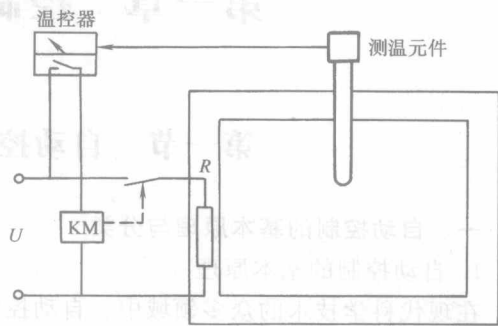


图 1-2 带温控仪表的电烤炉

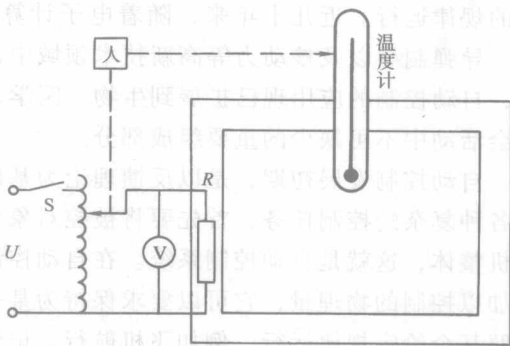


图 1-3 厨师操作调压器的电烤炉

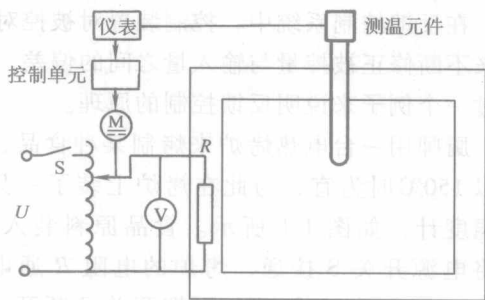


图 1-4 具有自动调压器的电烤炉

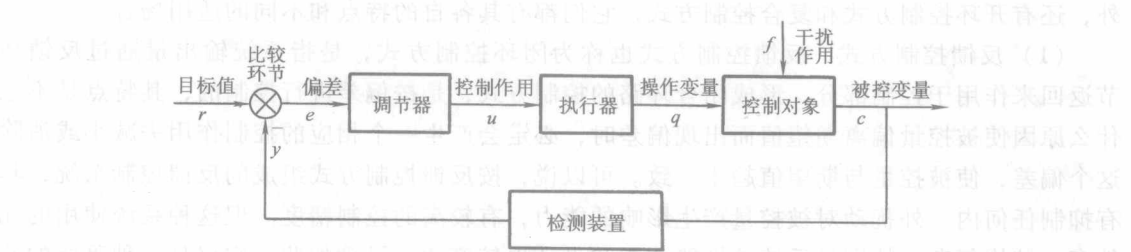


图 1-5 单闭环控制系统结构框图

表 1-1 4 种控温系统结构对比

	手控开关型	带温控仪表型	手控调压器型	电动调压器型
控制对象	电热炉			
被控变量	炉内温度			
目标值	150℃			
检测装置	温度计	测温元件	温度计	测温元件
比较环节	人脑	温控器	人脑	控温仪表
调节器	人脑	控温接点	人脑	控制单元
执行器	手控开关	交流接触器	手控调压器	电动调压器
操作变量	电源通断	电源通断	电压高低	电压高低
干扰作用	电源电压变化，炉门开闭，烘烤产品进出等			

2. 反馈控制系统的基本组成

反馈控制系统是由各种结构不同的元部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分，而控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中，结构完全不同的部件却可以具有相同的职能，因此将组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种：

(1) 测量元件 其职能是检测被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般要再转换为电量。

(2) 给定元件 其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即参据量）。

(3) 比较元件 其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参据量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(4) 放大元件 其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。

(5) 执行元件 其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。

(6) 校正元件 也叫补偿元件，它是结构或参数便于调整的元部件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。

3. 自动控制系统基本控制方式

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制方式。除此之

外, 还有开环控制方式和复合控制方式, 它们都有其各自的特点和不同的适用场合。

(1) 反馈控制方式 反馈控制方式也称为闭环控制方式, 是指系统输出量通过反馈环节返回来作用于控制部分, 形成闭合环路的控制方式, 是按偏差进行控制的, 其特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时, 必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差, 使被控量与期望值趋于一致。可以说, 按反馈控制方式组成的反馈控制系统, 具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力, 有较高的控制精度。但这种系统使用的元件多, 结构复杂, 特别是系统的性能分析和设计也较麻烦。尽管如此, 它仍是一种重要的并被广泛应用的控制方式, 自动控制理论主要的研究对象就是用这种控制方式组成的系统。

(2) 开环控制方式 开环控制方式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, 其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。

(3) 复合控制方式 按扰动控制方式在技术上较按偏差控制方式简单, 但它只适用于扰动是可量测的场合, 而且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素, 对其余扰动均不起补偿作用。因此, 比较合理的一种控制方式是把按偏差控制与按扰动控制结合起来, 对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制, 同时再组成反馈控制系统实现按偏差控制, 以消除其余扰动产生的偏差。这样, 系统的主要扰动已被补偿, 反馈控制系统就比较容易设计, 控制效果也会更好。这种按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制方式。

二、自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。按控制方式可分为开环控制、反馈控制、复合控制等; 按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统; 按系统功能可分为温度控制系统、位置控制系统等; 按系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等; 按参变量变化规律又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。一般, 为了全面反映自动控制系统的特点, 常常将上述各种分类方法组合应用。

1. 线性连续控制系统

这类系统可以用线性微分方程式描述。按其输入量的变化规律不同又可将这种系统分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

2. 线性定常离散控制系统

离散控制系统是指系统的某处或多处的信号为脉冲序列或数码形式, 因而信号在时间上是离散的。连续信号经过采样开关的采样就可以转换成离散信号。一般, 在离散系统中既有连续的模拟信号, 也有离散的数字信号, 因此离散系统要用差分方程描述。工业计算机控制系统就是典型的离散系统。

3. 非线性控制系统

系统中只要有一个元件的输入-输出特性是非线性的, 这类系统就称为非线性控制系统, 这时, 要用非线性微分(或差分)方程描述其特性。非线性方程的特点是系数与变量有关, 或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项。由于非线性方程在数学处理上较困难, 目前对不同类型的非线性控制系统的研究还没有统一的方法。但对于非线性程度不太严重的元件, 可采用在一定范围内线性化的方法, 将非线性控制系统近似为线性控制系统。

三、对自动控制系统的基本要求

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型,

对每个系统也有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号下，其被控量变化的全过程。对每一类系统被控量变化全过程提出的共同基本要求都是一样的，可以归结为稳定性、快速性和准确性，即稳、准、快的要求。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。它是这样来表述的：系统受到外作用后，其动态过程的振荡倾向和系统恢复平衡的能力。如果系统受到外作用后，经过一段时间，其被控量可以达到某一稳定状态，则称系统是稳定的。图 1-6 为系统受到外作用后，被控量振荡衰减的情况。还有一种情况是系统受到外作用后，被控量单调衰减，在这两种情况中系统都是稳定的，否则称为不稳定，如图 1-7 所示。其中图 1-

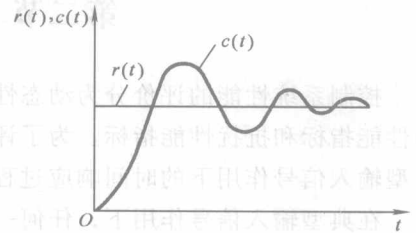


图 1-6 稳定系统的动态过程

7a 为受扰动作用后，被控量不能恢复平衡的情况；图 1-7b 为在给定信号作用下，被控量振荡发散的情况。另外，若系统出现等幅振荡，即处于临界稳定的状态，这种情况也可视为不稳定。线性自动控制系统的稳定性是由系统结构决定的，与外界因素无关。

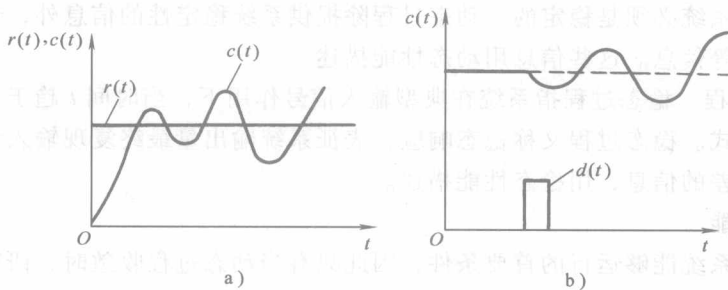


图 1-7 不稳定系统的动态过程

a) 给定信号作用被控量振荡发散 b) 受扰动后系统不能恢复平衡

2. 快速性

为了很好完成控制任务，控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的，还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求，一般称为动态性能。快速性是通过动态过程时间长短来表征的，如图 1-8 所示。系统响应越快，说明系统复现输入信号的能力越强。

3. 准确性

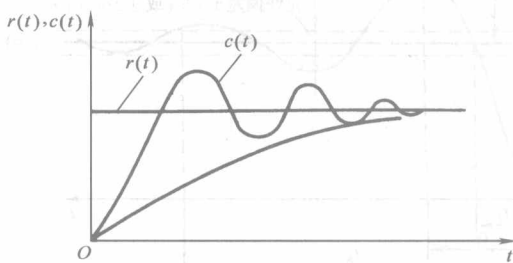


图 1-8 控制系统快速性

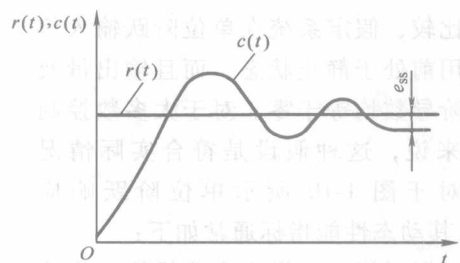


图 1-9 控制系统的稳态精度

理想情况下,当过渡过程结束后,被控量达到的稳态值应与期望值一致。但实际上,由于系统结构、外作用形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响,被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在,称为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统精度的重要标志。若系统的最终误差为零,则称为无差系统,否则称为有差系统,见图 1-9。

第二节 控制系统的性能指标

控制系统性能的评价分为动态性能指标和稳态性能指标两类,动态性能指标又可分为跟随性能指标和抗扰性能指标。为了评价控制系统时间响应的性能指标,需要研究控制系统在典型输入信号作用下的时间响应过程。

在典型输入信号作用下,任何一个控制系统的时间响应都是由动态过程和稳态过程两部分组成。

(1) 动态过程 动态过程又称过渡过程,指系统在典型输入信号作用下,系统输出量从初始状态到最终状态的响应过程。由于实际控制系统具有惯性、摩擦以及其他一些原因,系统输出量不可能完全复现输入量的变化。根据系统结构和参数选择情况,动态过程表现为衰减、发散或等幅振荡形式。显然,一个可以实际运行的控制系统,其动态过程必须是衰减的,换句话说,系统必须是稳定的。动态过程除提供系统稳定性的信息外,还可以提供响应速度及阻尼情况等信息。这些信息用动态性能描述。

(2) 稳态过程 稳态过程指系统在典型输入信号作用下,当时间 t 趋于无穷大时,系统输出量的表现方式。稳态过程又称稳态响应,表征系统输出量最终复现输入量的程度,提供系统有关稳态误差的信息,用稳态性能描述。

一、动态性能

稳定是控制系统能够运行的首要条件,因此只有当动态过程收敛时,研究系统的动态性能才有意义。

1. 跟随性能指标

通常在阶跃函数作用下,测定或计算系统的动态性能。一般认为,阶跃输入对系统来说是最严峻的工作状态。如果系统在阶跃函数作用下的动态性能满足要求,那么系统在其他形式的函数作用下,其动态性能也是令人满意的。

描述稳定的系统在单位阶跃函数作用下,动态过程随时间 t 的变化状况的指标,称为动态性能指标。为了便于分析和比较,假定系统在单位阶跃输入信号作用前处于静止状态,而且输出量及其各阶导数均等于零。对于大多数控制系统来说,这种假设是符合实际情况的。对于图 1-10 所示单位阶跃响应 $c(t)$,其动态性能指标通常如下:

延迟时间 t_d 指响应曲线第一次达到其终值一半所需的时间。

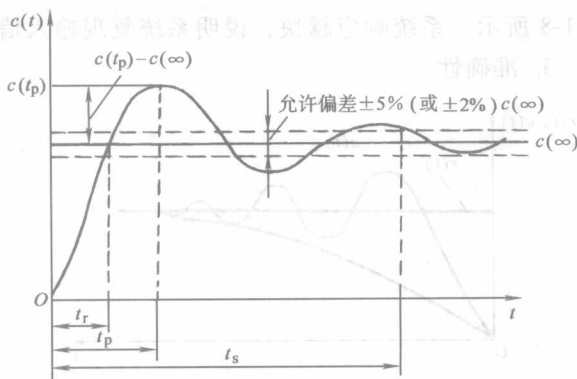


图 1-10 阶跃响应曲线与跟随性能指标

上升时间 t_r 指响应从终值 10% 上升到终值 90% 所需的时间；对于有振荡的系统，也可定义为响应从零第一次上升到终值所需的时间。上升时间是系统响应速度的一种度量。上升时间越短，响应速度越快。

峰值时间 t_p 指响应超过其终值到达第一个峰值所需的时间。

调节时间 t_s 指响应到达并保持在终值 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 内所需的时间。

超调量 $\sigma\%$ 指响应的最大偏离量 $c(t_p)$ 与终值 $c(\infty)$ 的差与终值 $c(\infty)$ 比的百分数，即

$$\sigma\% = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

若 $c(t_p) < c(\infty)$ ，则响应无超调。超调量也称为最大超调量或百分比超调量。

上述五个动态性能指标，基本上可以体现系统动态过程的特征。在实际应用中，常用动态性能指标多为上升时间、调节时间和超调量。通常用 t_r 或 t_p 评价系统的响应速度；用 $\sigma\%$ 评价系统的阻尼程度；而 t_s 是同时反映响应速度和阻尼程度的综合性能指标。

2. 抗扰性能指标

如果控制系统在稳态运行中受到扰动作用，经历一段动态过程后，又能达到新的稳态，则系统在扰动作用之下的变化情况可用抗扰性能指标来描述。图 1-11 为系统稳定运行中突加一个使输出量降低的负扰动之后的典型过渡过程，据此可定义抗扰性能指标：

动态降落 $\Delta c_{\max}$ 对稳态运行中的系统，突加一个约定的标准负扰动量，在过渡过程中出现的系统输出量的最大降落值。

恢复时间 t_v 从阶跃扰动作用开始，到系统输出量基本恢复稳态，距新稳态值 $c_{\infty 2}$ 之差进入某基准值 c_b 的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内所需的时间。 c_b 的值视具体情况而定。 $\Delta c_{\max}$ 、 t_v 小，说明系统抗扰能力强。

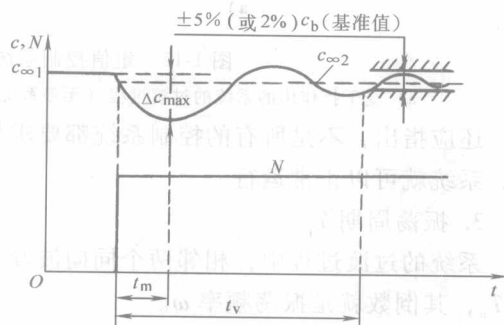


图 1-11 突加扰动的动态过程和抗扰性能指标

二、稳态性能

稳态误差是描述系统稳态性能的一种性能指标，通常在阶跃函数、斜坡函数、加速度函数作用下进行测定或计算。若时间趋于无穷时，系统的输出量不等于输入量的确定函数，则系统存在稳态误差。稳态误差是系统控制精度或抗扰能力的一种度量。

评价控制系统的性能，除了用以上动态性能指标和稳态性能指标外，还有以下几个最常用的指标：

1. 衰减比 n

衰减比是衡量控制系统过渡过程稳定性的重要动态指标，它的定义是第一个波的振幅 B 与同方向的第二个波的振幅 B' 之比，即 $n = B/B'$ ，如图 1-12 所示。显然对于衰减振荡来说， $n > 1$ ， n 越小就说明控制系统的振荡越剧烈，稳定度越低； $n = 1$ ，就是等幅振荡； n 越大，意味着系统的稳定性越好，根据实际经验，以 $n = 4 \sim 10$ 为宜。有些场合采用衰减率 ψ 来表示， $\psi = 1 - B'/B$ ，即 $\psi = 0.75 \sim 0.90$ ，与 $n = 4 \sim 10$ 是一致的。

2. 静差

静差即静态偏差，有些场合也称之为余差，它是控制系统过渡过程终结时被控变量实际

稳态值与目标值之差，静差是反映控制准确性的一个重要稳定指标。图 1-12a 为系统受干扰作用的过渡过程，新的稳态值为 $c(\infty)$ ，如果原来的稳态值也就是目标值为 $c(0)$ ，两者相差为 c ，这个系统就称为有差系统；图 1-12b 表示目标值发生改变后系统的过渡过程，新的稳态值 $c(\infty)$ 如果和新的目标值一致，这个系统就称为无差系统。

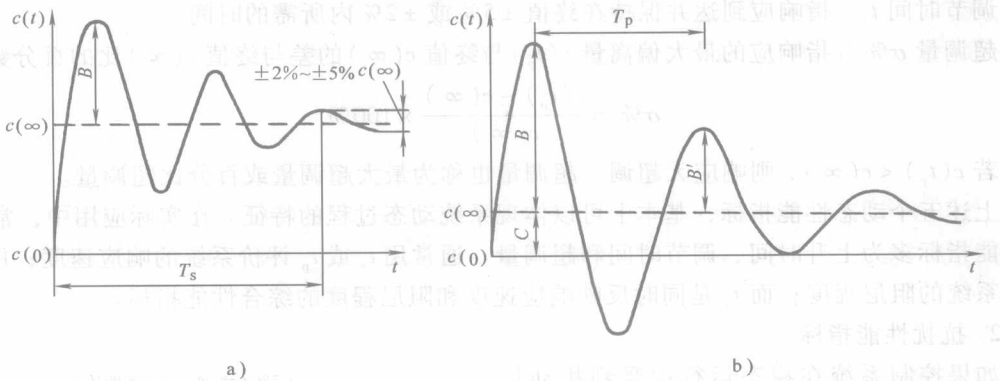


图 1-12 定值控制系统过渡过程评价指标示意图

a) 受干扰作用的系统的过渡过程（无差系统） b) 目标值改变的过渡过程（有差系统）

还应指出，不是所有的控制系统都要求静差为零，通常只要静差在工艺允许的范围内变化，系统就可以正常运行。

3. 振荡周期 T_p

系统的过渡过程中，相邻两个同向波峰所经过的时间即振荡一周所需的时间称为振荡周期 T_p ，其倒数就是振荡频率 ω 。

必须指出，这些指标相互之间是有内在联系的，我们应根据生产工艺的具体情况区别对待，对于影响系统稳定和产品的主要控制指标应提出严格的要求，在设计和调试过程中优先保证实现，只有这样控制系统才能取得良好的经济效益。

第三节 自动控制系统中常用名词与术语

为今后叙述的方便，下面集中介绍控制系统常用名词术语的基本意义。

1. 控制和调节

“控制”和“调节”的含义十分接近，两者都是为达到预期目的而按照某种规律对控制对象施加作用，又如“调节原理”和“控制理论”都是指同一学科；有些场合两者也有不完全通用的地方，例如通常把开环系统中的动作称为控制而该装置称为控制器；在闭环系统中则分别称为调节和调节器。还有“自控”一词包括了各种形式的自动控制，不能称为“自调”；又如“超调”是指控制系统在动态过程中瞬时值与稳态值的偏差，不能称为“超控”等等，这些都是人们的用词习惯形成的。

2. 自动控制

它是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置，使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行的控制机制。

3. 控制对象和被控变量