



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

自动控制原理 及其应用

黄 坚 主 编



高等教育出版社

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

自动控制原理及其应用

黄 坚 主编



高等教育出版社

内容提要

本书为教育科学“十五”国家规划课题研究成果。从实际应用出发,介绍了自动控制的基本理论及其工程应用。内容包括时域法、根轨迹法、频率法、系统校正、离散系统分析等传统内容,但强调的是物理概念和实际运用。书中对模拟 PID 调节器和数字 PID 调节器作了重点介绍。本书以一个实例贯穿全书,采用不同的方法,从不同的角度对例子进行分析,紧密结合 MATLAB 等系统仿真软件在自动控制方面的应用。

本书适于应用型本科自动化、机电一体化及各相关专业,也可作为各类职业技术学院、专科学校、成人高校相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理及其应用 / 黄坚主编. —北京: 高等教育出版社, 2004. 1
ISBN 7-04-013033-5

I. 自... II. 黄... III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 097651 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 22.75
字 数 420 000

版 次 2004 年 1 月第 1 版
印 次 2004 年 1 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才培养的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才培养需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和在研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才培养特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才培养探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用

型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

—2003年4月

前 言

本书是为适应应用型本科电气、自动化及机电类各专业的教学需要而编写的。

众所周知,自动控制技术已大量应用于空间科技、冶金、轻工、机电工程以及交通管理、环境保护等领域。这不仅使得生产设备或生产过程实现自动化,大大提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服大自然,改善居住、生活条件等方面也发挥了非常重要的作用。

自动控制技术的研究对象为自动控制系统,而分析和设计自动控制系统的理论基础就是自动控制原理。一般人们将自动控制原理分为经典控制理论和现代控制理论。考虑到实际工程的需要以及相当一部分院校另外开设有“现代控制理论”课程的情况,本书以经典控制理论及其应用为主要内容,全书共分为七章,包括自动控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的校正与设计、采样控制系统的分析等内容。

本书的主要特点是:以简明的语言介绍概念,简化数学推导,增加实例说明,方便自学;从自动控制原理的角度对工程实例进行分析和设计,以解决理论如何用于工程实际的问题,求得理论与实际的紧密结合;有关各章中都结合书本内容介绍了运用 MATLAB 分析和设计自动控制系统的基本方法,配合书末的 MATLAB 应用简介(附录 2),可使读者较易理解和掌握 MATLAB 在控制工程方面的应用。

本书由南京工程学院黄坚任主编,并编写了大部分章节。宋丽蓉、陈桂任副主编,高金凤参加了本书的编写。本书由浙江大学邹伯敏教授主审,邹教授仔细审阅了全书并提出了宝贵的修改意见。本书编辑韩颖同志也花费了不少心血。在此,向所有为本书出版给予支持和帮助的同志致以深切的谢意。

由于编者的水平有限,时间较紧,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者和专家批评指正。

编者

2003 年 10 月

目 录

第一章 概述	1
第一节 自动控制与自动控制系统	1
第二节 自动控制系统的分类	6
第三节 对控制系统的性能要求	7
第四节 自动控制理论发展简述	9
小结	10
习题	11
第二章 自动控制系统的数学模型	13
第一节 控制系统的微分方程	13
第二节 数学模型的线性化	18
第三节 传递函数	21
第四节 动态结构图	32
第五节 反馈控制系统的传递函数	46
第六节 控制系统数学模型建立举例	48
第七节 用 MATLAB 处理系统数学模型	52
小结	56
习题	57
第三章 时域分析法	64
第一节 系统性能指标	64
第二节 一阶系统性能分析	69
第三节 二阶系统性能分析	73
第四节 高阶系统的时域分析	85
第五节 控制系统的稳定性分析	87
第六节 控制系统的稳态误差分析	93
第七节 用时域法分析系统性能举例	102
第八节 MATLAB 用于时域分析	108
小结	116
习题	117

第四章 根轨迹分析法	124
第一节 根轨迹的基本概念	124
第二节 绘制根轨迹的基本方法	126
第三节 广义根轨迹	142
第四节 用根轨迹法分析系统性能	147
第五节 MATLAB 用于根轨迹分析	156
小结	159
习题	159
第五章 频率特性法	163
第一节 频率特性的基本概念	163
第二节 典型环节与系统的频率特性	167
第三节 用实验法确定系统的传递函数	185
第四节 用频率特性法分析系统稳定性	190
第五节 频率特性与系统性能的关系	203
第六节 用频率特性法分析系统性能举例	215
第七节 MATLAB 用于频域分析	217
小结	224
习题	224
第六章 控制系统的校正与设计	231
第一节 系统校正的一般方法	231
第二节 控制系统的工程设计方法	253
第三节 控制系统设计举例	263
第四节 MATLAB 用于系统校正与设计	269
小结	272
习题	273
第七章 采样控制系统分析	280
第一节 采样控制系统的基本概念	280
第二节 采样控制系统的数学基础	286
第三节 采样控制系统的脉冲传递函数	297
第四节 采样控制系统的动态性能分析	304
第五节 采样控制系统的稳定性分析	311
第六节 采样控制系统的稳态误差分析	314
第七节 MATLAB 用于采样控制系统分析	318
小结	324
习题	325

附录 1 常用函数的拉氏变换与 z 变换对照表	329
附录 2 MATLAB 应用简介	332
附录 3 部分习题参考答案	340
参考文献	352

第一章 概 述

本章将简要介绍有关自动控制的一般概念、自动控制系统的组成和分类、对控制系统的性能要求以及有关自动控制理论的发展概况。

第一节 自动控制与自动控制系统

一、自动控制的基本概念

在现代科学技术的许多领域中,自动控制技术得到了广泛的应用。自动控制技术最显著的特征就是通过对各类机器、各种物理参量、工业生产过程等的控制直接造福于社会。

自动控制是指在无人直接参与的情况下,利用控制装置操纵受控对象,使受控对象的被控量等于给定值或按给定信号变化规律去变化,如图 1-1 所示。

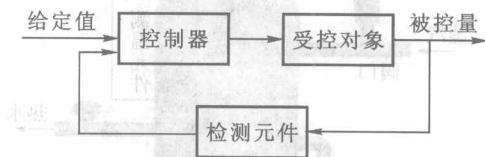


图 1-1 自动控制示意图

图中,由控制器与检测元件组成的控制装置以及受控对象为物理装置,而给定值和被控量均为一定形式的物理量。自动控制系统由控制装置和受控对象构成。对自动控制系统性能进行分析和设计则是自动控制原理的主要任务。下面,进一步举例说明。

例 1-1 水温人工控制系统见图 1-2。这里受控对象为水箱,具体地说,是水箱中的水。被控量则是水的温度,它是表征受控对象物理特征的物理量。水箱中注入冷水,蒸汽经阀门并流经热传导器件,通过热传导作用将冷水加热,加热后的水流出水箱。同时,蒸汽冷却成水后由排水口排出。由人通过调节阀门来调节蒸汽流量,进而调节水的温度,使其满足要求。这种人工控制方式要依

赖人的感官和经验,因而难以实现稳定的高质量控制。

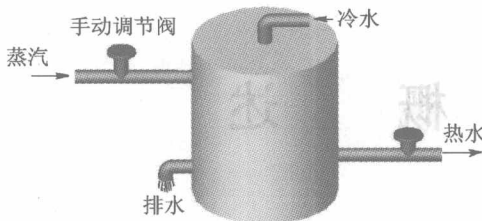


图 1-2 水温人工控制系统

例 1-2 水温自动控制系统见图 1-3。通过控制装置来调节蒸汽的流量,达到控制水温的目的。控制装置包括热敏测温元件、控制器、执行机构和阀门。给定值为要求达到的水温值,它可以是与该水温值对应的不同形式的物理量。测温元件将检测到的水温值转换成与给定值相同的物理量,并馈送给控制器。控制器将给定值和检测值比较之后,发出控制信号。当水箱中的水温低于给定值的要求时,执行机构将阀门的开度增大,使更多的蒸汽流入,直至实际水温与给定值相符为止。反之,当水温偏高时,同样亦可进行相应的调节。这样,就实现了没有人直接参与的自动水温控制。

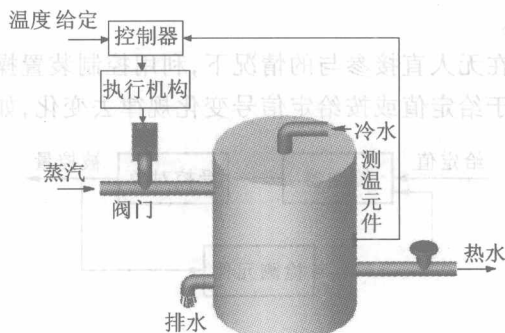


图 1-3 水温自动控制系统

要使自动控制系统能满足工程实际的需要,必须研究自动控制系统的结构、参数与系统性能之间的关系。为了分析方便,常用结构图来表示系统各个部件及变量之间的关系。图 1-4 为水温自动控制系统的结构图。



图 1-4 水温自动控制系统结构图

二、自动控制系统的基本构成及控制方式

自动控制系统一般有两种基本结构,对应着两种基本控制方式。

1. 开环控制

控制装置与受控对象之间只有顺向作用而无反向联系时,称为开环控制。

例 1-3 图 1-5 为一驱动盘片

匀速旋转的转台,这种转台在 CD 机、计算机磁盘驱动器等许多现代装置中广泛应用。该系统利用电池提供与预期速度成比例的电压,直流放大器将给定信号作功率放大后,用来驱动直流电动机。作为执行机构,直流电动机的转速与加在其电枢上的电压成比例,

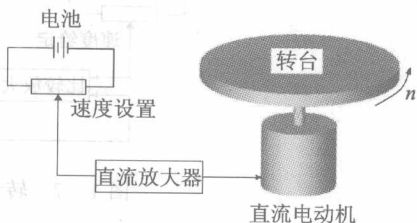


图 1-5 转台速度开环控制系统

例,系统结构如图 1-6 所示。由图可见,系统的被控量没有反馈到系统的输入端与给定量进行比较,即被控量不对系统产生控制作用,故属开环控制系统。这种转台需要在电机或其他部件的参数发生变化的情况下,仍然保持恒定的转速,但在开环控制下是做不到这一点的。电机和直流放大器受到的任何扰动,如电网电压的波动,环境温度变化引起的放大系数的变动等都会引起速度 n 的改变,而这种变化未能被反馈至控制装置并影响控制过程。因此,系统无法克服由此产生的偏差。

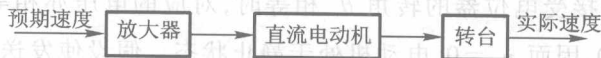


图 1-6 转台速度开环控制系统结构图

开环控制的特点是,系统结构和控制过程均很简单,但由于这类系统无抗扰能力,因而其控制精度较低,大大限制了它的应用范围。开环控制一般只能用于对控制性能要求不高的场合。

2. 闭环控制

控制装置与受控对象之间,不但有顺向作用,而且还有反向联系,即有被控量对控制过程的影响,这种控制称为闭环控制,相应的控制系统称为闭环控制系统。闭环控制又常称为反馈控制或按偏差控制。

例 1-4 图 1-7 为转台速度闭环控制系统,对应的系统结构图如图 1-8 所示。

系统中,测速机是一种传感器,它能提供与转速成比例的电压信号。偏差电压信号是由对应预期速度的给定电压与测速机输出电压比较相减后得到的。当

预期速度为定值,而实际速度受扰动的影响发生变化时,偏差电压也会随之变化,通过系统的调节,使实际速度接近或等于预期速度,从而消除扰动对速度的影响,提高系统的控制精度。

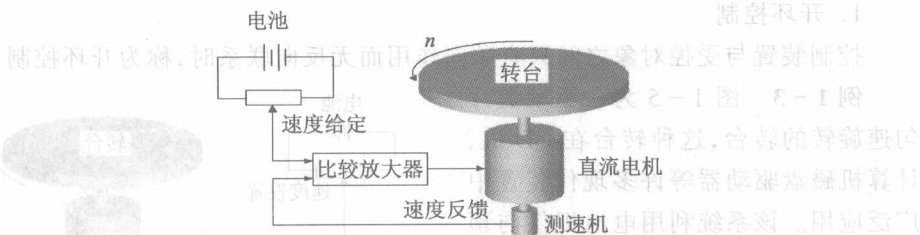


图 1-7 转台速度闭环控制系统

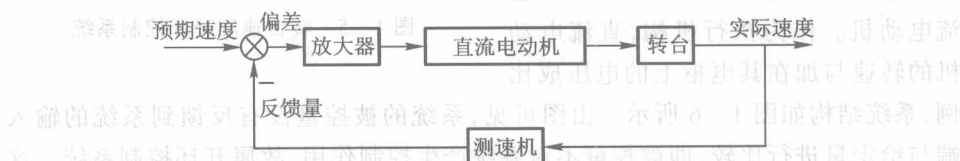


图 1-8 转台速度闭环控制系统结构图

例 1-5 图 1-9 是一个位置随动系统,其结构如图 1-10 所示。该系统用一对电位器作为位置检测元件,并形成比较电路。两个电位器分别将系统的输入和输出位置信号转换成与之成比例的电压信号,并作出比较。当发送电位器的转角 θ_r 和接受电位器的转角 θ_c 相等时,对应的电压亦相等,即 $u_r = u_c$, $u_e = u_r - u_c = 0$,因而 $u_d = 0$,电动机处于静止状态。假设使发送电位器的转角按逆时针方向增加一个角度,而接收电位器没有同时旋转这样一个角度,则两者之间将产生角度偏差 $\Delta\theta$ 。相应地, u_r 大于 u_c 而产生一个偏差电压 u_e ,经放大器放大后得到 u_d ,供给直流电动机,使其带动负载和接收电位器的动臂一起逆

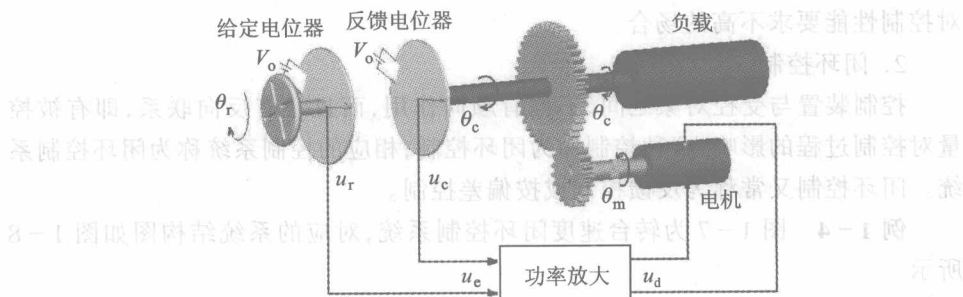


图 1-9 直流随动系统

时针旋转,直至 $\theta_r = \theta_c$ 为止。

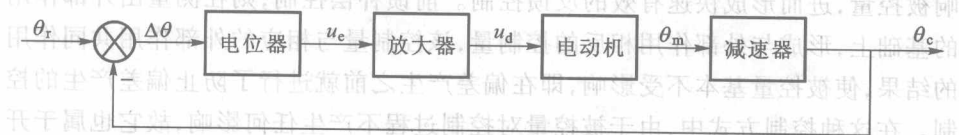


图 1-10 直流随动系统结构图

例 1-6 采用转速负反馈的直流电动机调速系统见图 1-11。此系统的测量装置为测速发电机和分压电位器,电动机的转速 n 被其转换成反馈电压 u_f ,并反馈至系统的输入端,形成闭合回路。加在放大器输入端的电压 e 为给定电压 u_n 与 u_f 的差值,即 $e = u_n - u_f$ 。

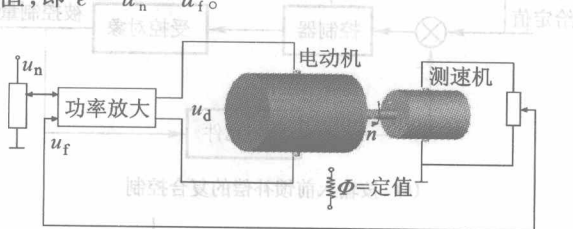


图 1-11 闭环控制的调速系统

此闭环控制系统中,输出转速 n 取决于给定电压 u_n 。对于由电网电压波动、负载变化以及除测量装置之外的其他部分的参数变化所引起的转速变化,都可以通过系统的自动调整加以抑制。例如,如果由于以上原因使得转速下降 ($n \downarrow$),将通过以下的调节过程使 n 基本维持恒定。

$$n \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow e \uparrow \rightarrow u_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

由上述例子可知,闭环控制系统具有如下的特点:

(1) 由于系统的控制作用是通过给定值与反馈量的差值进行的,故这种控制常称为按偏差控制,又称反馈控制。

(2) 这类系统具有两种传输信号的通道:由给定值至被控量的通道称为前向通道;由被控量至系统输入端的通道叫反馈通道。

(3) 不论取什么物理量进行反馈,作用在反馈环内前向通道上的扰动所引起的被控量的偏差值,都会得到减小或消除,使得系统的被控量基本不受该扰动的影响。正是由于这种特性,使得闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。

自动控制原理中所讨论的系统主要是闭环控制系统。

3. 复合控制

反馈控制是在外部(给定及扰动)作用下,系统的被控量发生变化后才作出

相应调节和控制的,在受控对象具有较大时滞的情况下,其控制作用难以及时影响被控量,进而形成快速有效的反馈控制。前馈补偿控制,则在测量出外部作用的基础上,形成与外部作用相反的控制量,该控制量与相应的外部作用共同作用的结果,使被控量基本不受影响,即在偏差产生之前就进行了防止偏差产生的控制。在这种控制方式中,由于被控量对控制过程不产生任何影响,故它也属于开环控制。前馈补偿控制与反馈控制相结合,就构成了复合控制。复合控制有两种基本形式:按输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制,见图 1-12。

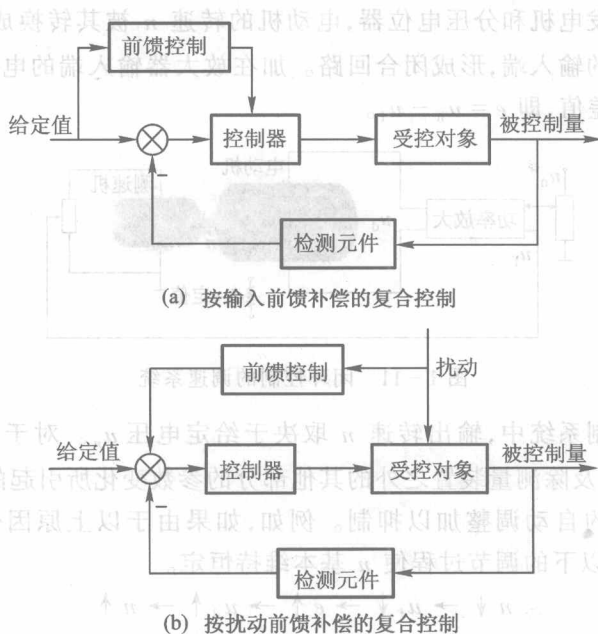


图 1-12 复合控制方式

第二节 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法较多,常见的有以下几种。

一、线性系统和非线性系统

由线性微分方程或线性差分方程所描述的系统称为线性系统;由非线性方程所描述的系统称为非线性系统。

二、定常系统和时变系统

若系统微分方程的系数不是时间变量的函数,则称此类系统为定常系统,否则称为时变系统。

若线性系统微分方程的系数为常数,则称这类系统为线性定常系统。此类系统为本书的主要讨论对象。

三、连续系统和离散系统

从系统中的信号来看,若系统各部分的信号都是时间 t 的连续函数,即模拟量,则称此类系统为连续系统。若系统中有一处或多处信号为时间 t 的离散函数,如脉冲或数码信号,则称之为离散系统。

若离散系统中既有离散信号又有模拟量,亦称之为采样系统。

四、恒值系统、随动系统和程序控制系统

若系统的给定值为一定值,而控制任务就是克服扰动,使被控量保持恒值,此类系统称为恒值系统。例如,电机速度控制、恒温、恒压、水位控制等。若系统给定值按照事先不知道的时间函数变化,并要求被控量跟随给定值变化,则此类系统称为随动系统。如火炮自动跟踪系统、轮船位置控制系统等。

若系统的给定值按照一定的时间函数变化,并要求被控量随之变化,则此类系统称为程序控制系统。例如数控伺服系统以及一些自动化生产线等。

此外,根据系统元部件的类型,还可分为机电控制系统、液压控制系统、气动系统以及生物系统等。根据系统被控物理量的不同,可分为位置控制系统、速度控制系统、温度控制系统等。

第三节 对控制系统的性能要求

在控制过程中,一个理想的控制系统,始终应使其被控量(输出)等于给定值(输入)。但是,由于机械部分质量、惯量的存在,电路中储能元件的存在以及能源功率的限制,使得运动部件的加速度受到限制,其速度和位置难以瞬时变化。所以,当给定值变化时,被控量不可能立即等于给定值,而需要经过一个过渡过程,即动态过程。所谓动态过程就是指系统受到外加信号(给定值或扰动)作用后,被控量随时间变化的全过程。

动态过程可以反映系统内在性能的好坏,而常见的评价系统优劣的性能指标也是从动态过程中定义出来的。对系统性能的基本要求有三个方面。

一、稳定性

稳定性是这样来表述的: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。如果系统受外作用力后,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,见图 1-13。否则称为不稳定的,见图 1-14。图 1-14(a)为在给定信号作用下,系统被控量呈振荡发散的情况;图 1-14(b)所示为系统受扰动 $d(t)$ 作用后,被控量不能恢复平衡状态的情况。另外,若系统出现等幅振荡,即处于临界稳定的状态,也视为不稳定。

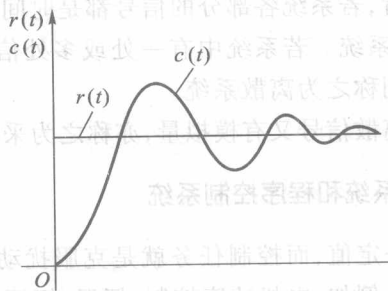


图 1-13 稳定系统的动态过程

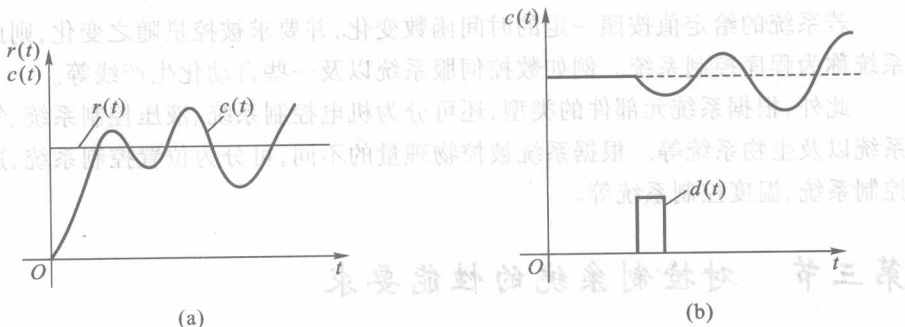


图 1-14 不稳定系统的动态过程

显然,不稳定的系统是无法正常工作的。一个能在生产实际中应用的系统,不仅应具有稳定性,而且,在动态过程中,被控量的振荡也不能过于强烈,否则不能满足生产实际的要求,甚至会导致系统部件的松动和被破坏。

二、快速性

快速性是通过动态过程时间长短来表征的,见图 1-15。过渡过程时间越短,表明快速性越好,反之亦然。快速性表明了系统输出 $c(t)$ 对输入 $r(t)$ 响应