



“十三五”普通高等教育规划教材

ZIDONG KONGZHI LILUN

自动控制理论

田思庆 梁春英 杨 康 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



配套课件



“十三五”普通高等教育规划教材

自动控制理论

主 编 田思庆 梁春英 杨 康
副主编 王宇春 刘 坤 张春慧
编 写 刘德胜 常 江 薛 迪
主 审 陈光军



内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

本书系统地介绍了自动控制理论的基本内容,着重于基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分9章,主要包括自动控制的基本概念,控制系统的数学模型,线性系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法及校正与设计,描述函数法和相平面法等非线性系统的基本分析法,线性离散系统基础理论、数学模型、分析及数字校正等,最后简单介绍了MATLAB语言与自动控制系统设计。

本书可作为普通高等院校自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、能源与动力工程、机械电子工程、电子信息工程、通信工程等专业的本科生教材,亦可供相关专业的研究生和自动化专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/田思庆,梁春英,杨康主编. —北京:中国电力出版社,2017.8

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5198-0881-5

I. ①自… II. ①田… ②梁… ③杨… III. ①自动控制理论-高等学校-教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第150619号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:乔 莉(010-63412535)

责任校对:常燕昆

装帧设计:郝晓燕 赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

版 次:2017年8月第一版

印 次:2017年8月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:21

字 数:512千字

定 价:48.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

自动控制技术已广泛地应用于工业生产、农业生产、交通运输和国防建设等各个领域。自动控制技术以自动控制理论为基础,由于自动控制技术在各个行业的广泛渗透与应用,自动控制理论已成为很多学科的重要专业基础课。20世纪50年代发展起来的以传递函数为核心的经典控制理论,至今仍应用于控制工程的各相关领域。深入理解、掌握自动控制理论的概念、思想和方法,对于日后解决实际控制工程问题,掌握控制理论其他学科领域的知识,都是必备的基础。

本书全面地阐述了自动控制的基本理论,系统地介绍了自动控制系统分析与综合设计的基本方法。全书共分9章,其中前6章是线性定常连续系统的分析与综合,第7章讲述了非线性系统的分析方法,第8章讲述了线性离散系统的基本理论,第9章是关于MATLAB软件的应用简介和实例。

本书以课程的基本内容为主线,注重基本概念和原理的讲解,突出工程实用方法,在有些理论性较强的部分和主要设计方法上做了较详细的分析与讨论。本书在叙述上简明扼要、通俗易懂,具有条理清晰,层次分明等特点,在内容安排上注意各专业的通用性和便于不同教学时数的取舍。为了帮助读者掌握和运用所学理论,每章均备有足够的例题和习题。另外,由田思庆教授等主编的与本教材相配套的辅助教材《自动控制理论学习指导与习题详解》亦在中国电力出版社出版发行,供读者学习参考。

本书由佳木斯大学田思庆、杨康、王宇春、刘德胜、常江、薛迪,黑龙江八一农垦大学梁春英、刘坤,内蒙古农业大学张春慧编写。其中田思庆编写第1章和第2章,杨康编写第3章,梁春英编写第4章,王宇春编写第5章,张春慧编写第6章,常江、薛迪编写第7章,刘坤编写第8章,刘德胜编写第9章。全书由田思庆教授整理统稿,陈光军博士主审。

本书在编写过程中参考了很多国内外优秀教材和著作,编者向收录于参考文献中的专家、学者表示真诚的谢意。限于编者水平,书中难免有不当之处,恳请使用本书的教师、学生提出宝贵意见。

编者

2017年6月

目 录

前言

第 1 章 自动控制概论	1
1.1 自动控制系统	1
1.2 开环控制和闭环控制	3
1.3 自动控制系统的基本组成	5
1.4 自动控制系统的分类	6
1.5 对控制系统的性能要求	9
1.6 自动控制理论发展概况	10
1.7 本课程的特点与学习方法	12
小结	13
习题	13
第 2 章 控制系统的数学模型	16
2.1 控制系统数学模型概述	16
2.2 控制系统微分方程的建立	18
2.3 拉普拉斯变换	21
2.4 控制系统的复域数学模型	30
2.5 控制系统的框图及其等效变换	35
2.6 信号流图与梅森增益公式	41
2.7 控制系统的传递函数	46
2.8 相似原理	48
小结	50
常用术语和概念	51
习题	51
第 3 章 线性系统的时域分析	56
3.1 典型输入信号及系统时域性能指标	56
3.2 一阶系统的时域分析	58
3.3 二阶系统的时域分析	61
3.4 改善二阶系统动态性能的方法	77
3.5 高阶系统的时域分析	83
3.6 线性控制系统的稳定性分析	85
3.7 线性控制系统的稳态性能分析	92
3.8 减小或消除稳态误差的方法	101
小结	103
常用术语和概念	103

习题	104
第4章 线性系统的根轨迹法	108
4.1 根轨迹法的基本概念	108
4.2 绘制 180° 根轨迹的基本规则	112
4.3 广义根轨迹	124
4.4 利用闭环主导极点估算系统的性能指标	129
4.5 添加开环零、极点对根轨迹形状的影响	131
小结	136
常用术语和概念	137
习题	137
第5章 线性系统的频率特性法	140
5.1 频率特性的基本概念和表示方法	140
5.2 幅相频率特性图 (Nyquist 曲线)	145
5.3 对数频率特性图 (Bode 图)	151
5.4 最小相位系统	158
5.5 由对数幅频特性曲线确定开环传递函数	159
5.6 奈奎斯特稳定判据	161
5.7 控制系统的相对稳定性	170
5.8 利用开环对数幅频特性分析系统的性能	173
5.9 利用闭环频率特性分析系统的性能	178
5.10 高阶系统频域指标和时域指标的关系	182
小结	183
常用术语和概念	183
习题	184
第6章 线性系统的综合与校正	189
6.1 概述	189
6.2 基本控制规律分析	192
6.3 串联校正	197
6.4 期望频率特性法	213
小结	216
常用术语和概念	216
习题	217
第7章 非线性控制系统分析	219
7.1 非线性系统概述	219
7.2 描述函数法	224
7.3 相平面法	239
7.4 改善非线性系统性能的措施	253
小结	255
常用术语和概念	255

习题.....	256
第 8 章 线性离散系统的分析	259
8.1 概述	259
8.2 信号采样过程与保持	261
8.3 Z 变换	266
8.4 离散系统的数学模型	273
8.5 稳定性分析	281
8.6 动态性能分析	289
8.7 稳态误差分析	292
8.8 离散系统的数字校正	296
小结.....	301
关键术语和概念.....	302
习题.....	302
第 9 章 MATLAB 语言与自动控制系统设计	305
9.1 MATLAB 语言简介	305
9.2 自动控制系统设计	310
小结.....	326
参考文献	327

第1章 自动控制概论

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。目前,自动控制技术已广泛应用于工业、农业、国防和科学技术等领域。一个国家在自动控制方面水平的高低是衡量它的生产技术和科学技术先进与否的一项重要标志。

自动控制理论是控制工程学科的核心课程。自动控制技术的广泛应用不仅使生产过程实现了自动化,极大地提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,并且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活方面都起着极为重要的作用。尽管从历史的发展上看,还是初步的,但从发展的现状与前途上看,却是极活跃、极富生命力的。控制理论不仅是一门重要的学科,而且也是科学方法论之一。因此本课程是一门非常重要的技术基础课,主要讲述自动控制的基本理论和分析、设计控制系统的基本方法。根据自动控制理论发展的不同阶段可分为经典控制理论和现代控制理论。而随着控制理论在内容上的不断扩展和更新,经典控制理论和现代控制理论越来越趋于融合。

本章从工程实例出发,介绍自动控制的基本概念、基本方式和自动控制系统的分类,重点介绍自动控制系统的基本组成原理。同时简单介绍控制理论的发展历史。

【学习目标】

- (1) 了解自动控制系统的工作原理、分类和特点;
- (2) 掌握自动控制系统的组成,根据工作原理画出系统的框图;
- (3) 明确对自控系统的基本要求,熟悉控制系统的基本控制方式;
- (4) 了解控制理论发展概况。

1.1 自动控制系统

所谓自动控制,是指在没有人直接操作的情况下,通过控制器使一个装置或过程(统称为控制对象)自动地按照给定的规律运行,使被控物理量或保持恒定或按一定的规律变化,其本质在于无人干预。系统是指按照某些规律结合在一起的物体(元部件)的组合,它们互相作用、互相依存,并能完成一定的任务。为实现某一控制目标所需要的所有物理部件的有机组合体称为自动控制系统。例如,机械行业的热处理炉温度控制系统、数控车床按照预定程序自动切削工件的控制系统、火电厂锅炉蒸汽温度和压力的自动控制系统等。

反馈是控制理论中一个极其重要的概念,是控制论的基础。一个系统的输出信号直接地或经过中间变换后全部或部分地返回输入系统的过程,就称为反馈。根据反馈信号对输入信号的加强和减弱,反馈分为正反馈和负反馈。正反馈是由输出端返回来的物理量加强输入量的作用,系统不会稳定,可能产生自激振荡。负反馈由输出端返回来的物理量减弱输入量的作用,负反馈可以改善系统的动态特性,控制和减少干扰信号的影响。只有负反馈系统才具有自动调节能力。自动控制理论主要的研究对象一般都是闭环负反馈控制系统。

自动控制系统的种类较多，被控制的物理量各种各样，如温度、压力、液位、电压、转速、位移和力等。组成控制系统的元部件虽然有较大的差异，但是组成系统的结构却基本相同。下面通过两个自动控制系统的实例，来讲述自动控制系统的工作过程。

(1) 锅炉液位控制系统。锅炉是电厂和一些企业中常见的生产蒸汽的设备。为了保证锅炉正常运行，需要维持锅炉汽包液位为正常恒定值。锅炉液位过低，易烧干锅炉而发生严重事故；锅炉液位过高，则易使蒸汽带水并有溢出危险。因此，必须通过调节器严格控制锅炉液位的高低，以保证锅炉正常地运行。图 1-1 为锅炉汽包液位控制系统示意图。

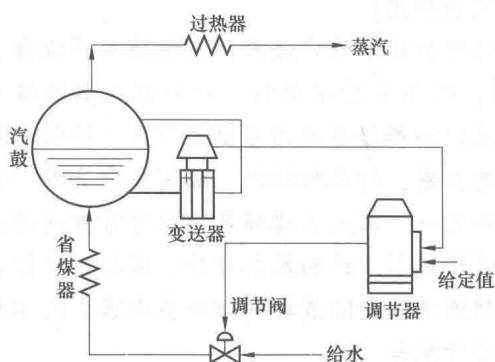


图 1-1 锅炉汽包液位控制系统示意图

当蒸汽的蒸发量与锅炉进水量相等时，液位保持为正常给定值。当锅炉的给水量不变，而蒸汽负荷突然增加或减少时，液位就会下降或上升；或者，当蒸汽负荷不变，而给水管道水压发生变化时，锅炉汽包液位也会发生变化。不论出现哪种情况，只要实际液位高度与正常给定液位之间出现偏差，调节器就应立即进行控制，即开大或关小给水阀门，以使锅炉汽包液位保持在给定值上。

图 1-2 是锅炉汽包液位控制系统框图。图中，锅炉为被控对象，其输出量为被控参数汽包液位；作用于锅炉上的扰动量是指给水压力或蒸汽负荷的变化；差压变送器用来测量锅炉液位，并转换为一定的信号输至调节器；调节器根据测量的实际液位与给定液位进行比较，得出偏差值，根据偏差值按一定的控制规律发出相应的输出信号去推动调节阀动作，以保证锅炉汽包液位控制在恒定给定值上。

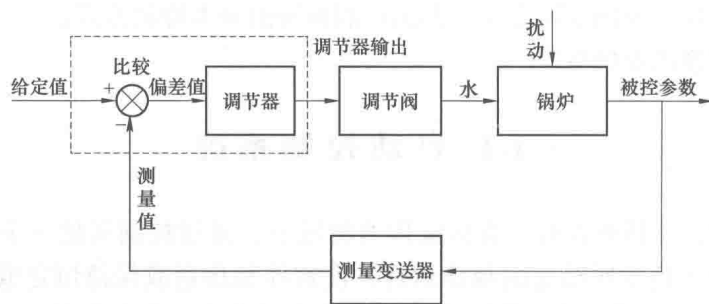


图 1-2 锅炉液位控制系统框图

(2) 电阻炉温度控制系统。电阻炉温度控制系统如图 1-3 所示。在这里，炉温的给定量由电位器滑动端位置所对应的电压值 U_g 给出，炉温的实际值由热电偶检测出来，并转换成电压 U_f ，再将 U_f 反馈到系统的输入端与给定电压 U_g 相比较（通过二者极性反接实现）。由于扰动（例如电源电压波动或加热物件多少等）影响，炉温偏离了给定值，其偏差电压经过放大，控制可逆伺服电

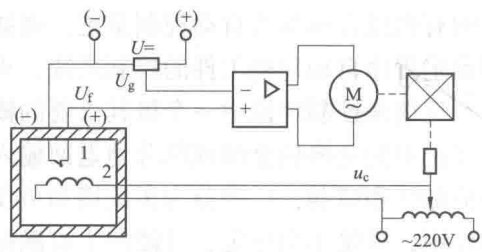


图 1-3 电阻炉温度控制系统

1—热电偶；2—加热器

动机 M，带动自耦变压器的滑动端，改变电压 u_c ，使炉温保持在给定温度值上。系统的自动调节过程可表示为

$$T_c \downarrow \rightarrow U_f \downarrow \rightarrow \Delta U = (U_g - U_f) \uparrow \rightarrow u_c \uparrow \rightarrow T_c \uparrow$$

1.2 开环控制和闭环控制

控制系统按其结构可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

1.2.1 开环控制

如果系统的输出量与输入量间不存在反馈通道，这种控制方式称为开环控制。在开环控制系统中，不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。图 1-4 为开环控制系统框图。由图可见，这种控制系统的特点是结构简单、所用元器件少、成本低，系统一般也容易稳定。然而，由于开环控制系统没有对它的被控制量进行检测，所以当系统受到干扰作用后，被控制量一旦偏离了原有的平衡状态，系统就无法消除或减少误差，使被控制量稳定在给定值上，这是开环控制系统的一个最大缺点。正是这个缺点，大大限制了这种系统的应用范围。然而，对于控制精度不高的一些简单控制，开环控制也有其广泛的应用。例如，洗衣机就是开环控制系统，其浸湿、洗涤和漂清过程是依次进行的，在洗涤过程中，无需对其输出信号，即衣服的清洁程度进行测量。

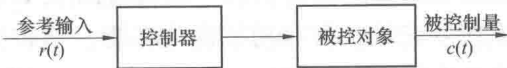


图 1-4 开环控制系统框图

图 1-5 (a) 为一个开环直流调速系统，图 1-5 (b) 为其框图。图中 U_g 为给定的参考输入，它经触发器和晶闸管整流装置转变为相应直流电压 U_d ，并供电给直流电动机，使产生一个 U_g 所期望的转速 n 。但是，当电动机的负载、交流电网的电压以及电动机的励磁稍有变化时，电动机的转速就会随之而变化，不能再维持 U_g 所期望的转速。

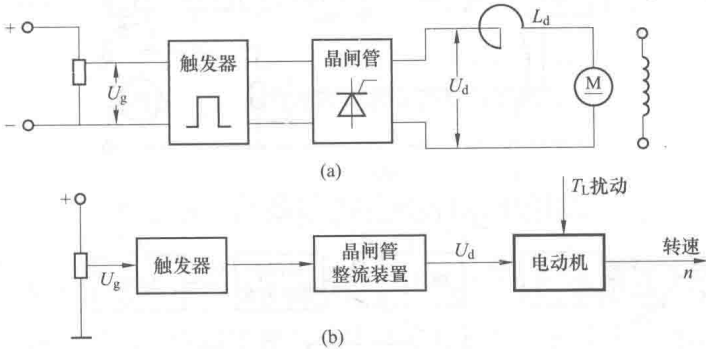


图 1-5 开环直流调速系统

(a) 原理图；(b) 框图

图 1-6 为数控机床中广泛应用的定位系统框图。这是一个开环控制系统，工作台的位移是该系统的被控制量，它是跟随着控制信号（控制脉冲）而变化的。显然这个系统没有

抗扰动的功能。

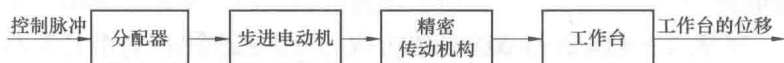


图 1-6 开环定位控制系统框图

如果系统的给定输入与被控制量之间的关系固定，且内部参数或外来扰动的变化都较小，或这些扰动因数可以事先确定并能给予补偿，则采用开环控制也能得到较为满意的控制效果。

1.2.2 闭环控制

若将系统的被控制量反馈到它的输入端，并与参考输入相比较，这种控制方式叫做闭环控制。由于这种控制系统中存在着将被控制量经反馈环节到比较点的反馈通道，故闭环控制又称反馈控制，它是按偏差进行控制的。图 1-1 和图 1-3 所示的系统，都是闭环控制系统。这些系统的特点是：连续不断地对被控制量进行检测，把所测得的值与参考输入作减法运算，求得的偏差信号经控制器的变换运算和放大器的放大后，驱动执行元件，以使被控制量能完全按照参考输入的要求去变化。这种系统如果受到来自系统内部和外部干扰信号的作用时，通过闭环控制的作用，能自动地消除或削弱干扰信号对被控制量的影响。由于闭环控制系统具有良好的抗扰动功能，因而它在控制工程中得到了广泛的应用。

闭环控制是由在开环控制基础上演变而来的。如果将图 1-5 所示的开环直流调速系统改接为图 1-7 所示的闭环系统则它就具有自动抗扰动功能。例如当电动机的负载转矩 T_L 增大时，流经电动机电枢中的电流便相应地增大，电枢电阻上的压降也变大，从而导致电动机转速的降低；而转速的降低使测速发电机的输出电压 U_{fn} 减小，误差电压 Δu 便相应地增大，经放大器放大后，使触发脉冲前移，晶闸管整流装置的输出电压 U_d 增大，从而补偿了由于

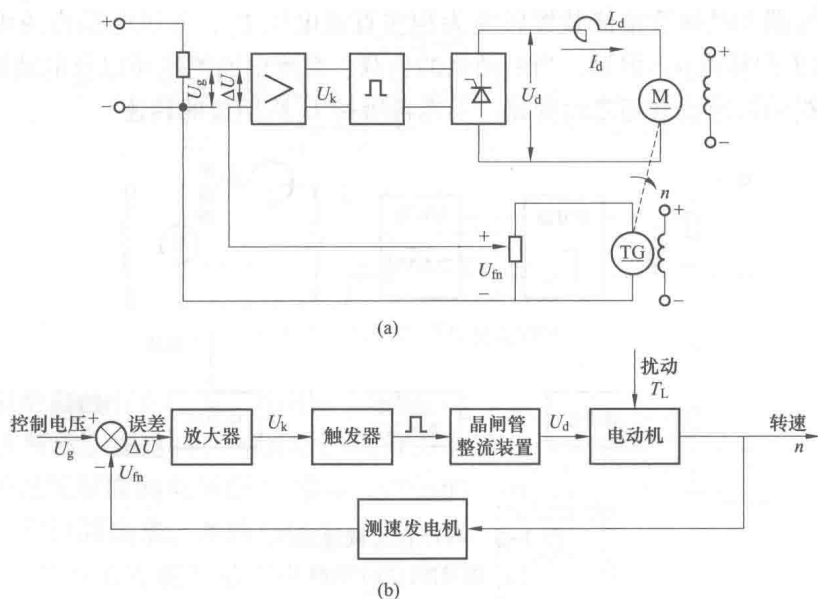


图 1-7 闭环直流调速系统

(a) 原理图；(b) 框图

负载转矩 T_L 的增大或电网电压 u 的减小而造成的电动机转速的下降,使电动机的转速近似地保持不变。上述的调节过程可表示为

$$\left. \begin{array}{l} T_L \uparrow \\ u \downarrow \end{array} \right\} \rightarrow n \downarrow \rightarrow u_m \downarrow \rightarrow \Delta u = (U_g - u_m) \uparrow \rightarrow u_k \uparrow \rightarrow u_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

1.2.3 开环控制和闭环控制的比较

一般来讲,开环控制系统结构比较简单,成本较低。开环控制的缺点是控制精度不高,抑制干扰能力差,而且对系统参数变化比较敏感。一般用于控制精度要求不高的场合,如洗衣机、普通车床和步进电机装置等。

在闭环控制系统中,只要是被控量偏离了给定值,都会产生相应的作用去消除偏差,即产生以偏差消除偏差的作用。因此,闭环控制抑制干扰能力强。与开环控制相比,系统对参数变化不敏感,可以选用不太精度的元件构成较为精密的控制系统,获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件,造价高的同时,也增加了系统的复杂性,如果系统的结构和参数选取不当,控制过程可能变得较差,甚至出现振荡或者不稳定的情况。因此,如何分析系统,合理选择系统的结构和参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

1.2.4 复合控制系统

反馈控制只有在外部作用,即输入信号或干扰对控制对象产生影响之后,才能做出相应的控制。当控制对象具有较大延迟时间时,反馈控制不能及时调节输出的变化,会影响系统的控制精度和平稳性。前馈控制是开环控制,能使系统及时感受输入信号,使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。将前馈控制和反馈控制结合起来,构成复合控制,它可以有效提高系统的控制精度。复合控制是由开环和闭环传递路径组成的混合控制系统,它兼有开环控制和闭环控制的特点。图 1-8 为按扰动补偿的复合控制系统框图。关于复合控制系统的结构和分析综合方法将在第 3 章中详细介绍。

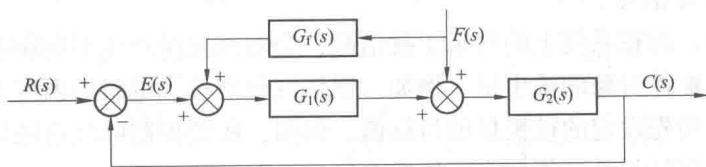


图 1-8 按扰动补偿的复合控制系统框图

1.3 自动控制系统的基本组成

尽管控制系统复杂程度各异,但基本组成是相同的,一个简单的闭环自动控制系统由被控对象、检测装置或传感器、控制器和执行器(执行机构)四个基本部分组成。

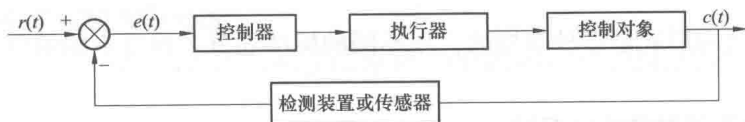


图 1-9 控制系统框图

(1) 被控对象或调节对象,是指控制系统的工作对象即进行控制的设备或过程。控制就是控制器对被控对象施加一种控制作用,以达到人们所期望的目标。如前面所举例子中的电阻炉、电动机等。相应地,控制系统所控制的某个物理量就是系统的被控制量或输出量,如电阻炉的温度和电动机的转速等。被控制的对象五花八门,从简单的温度、湿度到复杂工业过程控制,从民用过程的控制到导弹、卫星和飞船的发射及运行控制等。被控制对象的数学模型是控制系统设计的主要依据。被控制对象的动态行为可以用数学模型加以描述。

(2) 检测装置或传感器,是指能将一种物理量检测处理并转换成另一种容易处理和使用的物理量的装置。如压力传感器、热电偶、测速发电机等。如果将人看成一个被控制对象,那么人的眼睛、耳朵、鼻子、皮肤也是传感器。

(3) 控制器,能接收传感器来的测量信号,并与被控制量的设定值进行比较,得到实际测量值与设定值的偏差,然后根据偏差信号的大小和被控对象的动态特性,经过思维和推理,决定采用什么样的控制规律,以使被控制量快速、平稳、准确地达到所预定的给定值。控制规律是自动化系统功能的主要体现,一般采用比例—积分—微分控制规律。控制器是自动化系统的大脑和神经中枢。控制器可以是电子—机械装置。

(4) 执行器,也称执行机构,其直接作用于控制对象,使被控制量达到所要求的数值,它是自动化系统的手和脚。执行器(执行机构)可以是电动机、阀门或由它们所组成的复杂的电子—机械装置。

另外,还有一些常用术语,随着控制理论的进一步学习,学习者会对这些概念有更深入的理解。

(1) 输入信号:由外部加到系统中的变量称为输入信号。

(2) 控制信号:由控制器输出的信号,它作用在执行元件控制对象上影响和改变被控变量。

(3) 反馈信号:被控量经由传感器等元件变换并返回输入端的信号,主要与输入信号比较(相减)产生偏差信号。

(4) 扰动信号:加在系统上的外来干扰信号,会对被控量产生不利影响。

(5) 被控量:被控对象的输出量,例如,锅炉汽包液位、电阻炉温度和电动机转速等。

(6) 整定值:预先设定的被控量的目标值,例如,所要控制的汽包液位、电阻炉温度。

(7) 偏差:被控量的给定值与实际值的差值。

(8) 闭环:传递信息的闭合通道。即获得被控量的信息后,经过反馈环节与给定值进行比较产生偏差,该偏差又作用于控制器,控制被控对象,使其输出量按特定规律变化,这就形成了一个传递信息的闭合通道。

(9) 反馈控制:先从被控对象获得信息,然后把该信息馈送给控制器的控制方法。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的,用不同的标准划分,就有不同的分类方法。常见的有下述几种。

1.4.1 线性系统和非线性系统

按照控制系统是否满足叠加原理和齐次定理划分,可以将系统分为线性系统和非线性

系统。

1. 线性系统

线性系统是由线性元件组成的系统，其性能和状态可以用线性微分方程来描述，线性系统的特点是具有叠加性和齐次性，在数学上比较容易实现和处理。

叠加性：若干个输入信号同时作用于系统所产生的响应等于各个输入信号单独作用于系统所产生响应的代数和。

齐次性：当输入信号同时倍乘一常数时，那么响应也倍乘同一常数。

式(1-1)体现了线性系统的叠加性和齐次性

$$\begin{aligned} & a_n(t) \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1(t) \frac{dc(t)}{dt} + a_0(t) c(t) \\ & = b_m(t) \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1}(t) \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1(t) \frac{dr(t)}{dt} + b_0(t) r(t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中， $r(t)$ 为系统的输入量； $c(t)$ 为系统的输出量。

在该方程式中，输出量 $c(t)$ 及其各阶导数都是一次的，并且各系数与输入量无关。线性微分方程的各项系数为常数时，称为线性定常系统。这是一种简单而重要的系统，关于这种系统已有较为成熟的研究成果和分析设计的方法。

2. 非线性系统

在构成系统的元部件中，只要有一个输入/输出特性是非线性的，则称为非线性系统。非线性系统要用非线性方程描述其输入/输出关系，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导数的高次幂或乘积项。例如

$$\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + c(t) \frac{dc(t)}{dt} + c^2(t) = r(t)$$

典型的非线性特性主要有继电器特性、饱和特性、不灵敏区特性，如图 1-10 所示。

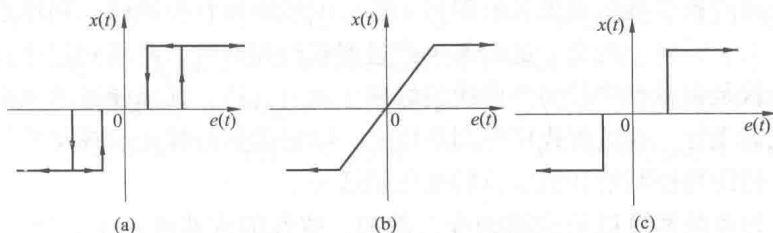


图 1-10 典型非线性环节特性

(a) 继电器特性；(b) 饱和特性；(c) 不灵敏区特性

对于非线性控制系统的理论研究远不如线性系统那样完整，一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。本书第 7 章将介绍有关非线性理论的描述函数法和相平面法等基本内容。

1.4.2 连续系统和离散系统

按照控制系统中传送的时间信号的性质分类，可分为连续系统和离散系统。

1. 连续系统

如果系统中传递的信号都是时间的连续函数，则该系统称为连续系统。

2. 离散系统

系统中只要有一个传递的信号是时间上断续的信号,则该系统称为断续系统,或采样系统,或离散系统。图 1-1 和图 1-3 所示的系统可以认为是连续系统,而计算机控制系统一定是离散系统。离散系统将在第 8 章中介绍。

1.4.3 恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统

按给定信号的变化规律不同,可将控制系统划分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的给定量是恒定不变的,这种系统的输出量也应是恒定不变。其特点是输入保持为常量,而系统的任务是克服和排除扰动的影响,以一定的精度将输出量保持在期望的数值上。如果由于扰动的作用使输出偏离期望值而出现偏差,控制系统则会根据偏差产生控制作用,克服扰动的影响,使输出量恢复到与输入量相对应的期望的常值上。因此,恒值控制系统又称为自动调节系统。

在生产过程中这类系统非常多。例如,在冶金部门,要保持退火炉温度为某一个恒值;在石油化学工业部门,为保证工艺和安全运行,反应器要保持压力恒定等。一般像温度、压力、流量、液位等热工参数量的控制多属于恒值控制。

2. 随动控制系统

随动控制系统又称为伺服系统或跟踪系统,其特点是给定值总在频繁或缓慢地变化,给定值的变化规律完全取决于事先不能确定的时间函数。要求系统的输出量能以一定精度跟随给定值的变化而变化。这类系统在航天、军工、机械、造船、冶金等部门得到广泛应用。

恒值控制系统和随动系统的控制任务是不一样的,但分析和设计这两种系统的理论和方法无本质不同,只是在考虑的重点上略有差异。恒值系统侧重于“抗扰”,随动系统侧重于“跟踪”。

3. 程序控制系统

自动控制系统的被控制量如果是根据预先编好的程序进行控制的,则该系统称为程序控制系统。在对化工、军事、冶金、造纸等生产过程进行控制时,常用到程序控制系统。如加热炉的温度控制就是在微机中按加热曲线编好程序而进行的;洲际弹道导弹也靠程序控制系统按事先给定轨道飞行。在这类程序控制系统中,给定值是按预先的规律变化的,而程序控制系统则一直保持使被控制量和给定值的变化相适应。

当然,这三种系统都可以是连续的或离散的,线性的或非线性的,单变量的或多变量的。本书着重以恒值系统为例,来阐明自动控制系统的基本原理。

1.4.4 定常系统和时变系统

按系统参数是否随时间变化,可以将系统分为定常系统和时变系统。

如果控制系统的参数在系统运行过程中不随时间变化,则称之为定常系统或者时不变系统,否则称为时变系统。实际系统的温度漂移、元件老化等影响均属时变因素。严格的定常系统是不存在的。在所考察的时间间隔内,若系统参数的变化相对于系统的运行缓慢得多,则可近似作为定常系统来处理。

1.4.5 单变量系统和多变量系统

按照系统输入信号和输出信号的数目,可将系统分为单输入/单输出(SISO)系统和多

输入/多输出 (MIMO) 系统。

单输入/单输出系统通常称为单变量系统, 这种系统只有一个输入 (不包括扰动输入) 和一个输出。多输入/多输出系统通常称为多变量系统, 有多个输入或多个输出。单变量系统可以视为多变量系统的特例。

1.5 对控制系统的性能要求

评价一个系统的好坏, 其指标是多种多样的, 但对控制系统的基本要求 (即控制系统所需的基本性能) 一般可归纳为稳定性、快速性和准确性。

1. 稳定性

稳定性是保证系统正常工作的条件和基础。因为控制系统中都包含储能元件, 若系统参数匹配不当, 就可能引起振荡。稳定性就是指系统动态过程的振荡倾向及其能够恢复平衡状态的能力。对于稳定性满足要求的系统, 当输出量偏离平衡状态时, 应能随着时间的收敛并且最后回到初始状态。稳定性和系统的结构参数有关。

2. 准确性

准确性是指控制系统的控制精度, 一般用稳态误差来衡量。稳态误差是指以一定的输入信号作用于系统后, 当调整过程趋于稳定时, 输出量的实际值与期望值之间的误差。显然, 这种误差越小, 表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。

3. 快速性

快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时, 系统消除这种偏差的快慢程度。快速性是在系统稳定的前提下提出的, 它主要针对的是系统的过渡过程形式和快慢即系统的动态性能。

上述要求简称为稳、准、快。一个自动控制系统的最基本要求是稳定性, 然后进一步要求快速性、准确性。由于被控对象的具体情况不同, 各种系统对稳、准、快的要求应有所侧重。例如, 恒指系统对稳态性能要求较高, 随动系统一般对动态性能, 即快速性要求较高。

同一个系统, 上述三项指标之间往往是相互制约的。提高过程的快速性, 可能会引起系统的强烈振荡; 改善了平稳性, 控制过程又可能很迟缓, 甚至造成稳态精度也较差。如何分析和解决这些矛盾, 将是本课程讨论的主要内容。系统的单位阶跃响应各种过程如图 1-11 所示。

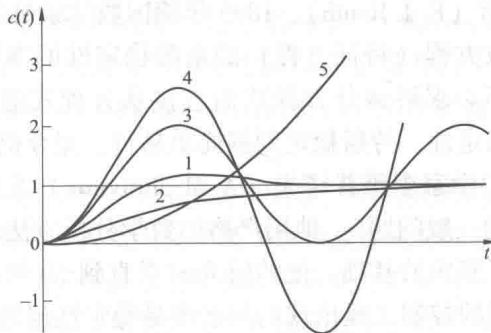


图 1-11 系统的单位阶跃响应过程

1—振荡收敛过程; 2—单调收敛过程; 3—等幅振荡过程; 4—振荡发散过程; 5—单调发散过程

1.6 自动控制理论发展概况

自动控制思想及其实践可以说历史悠久。它是人类在认识世界和改造世界的过程中产生的,并随着社会的发展和科学水平的进步而不断发展。依靠它,人类可以从笨重的、重复性的劳动中解放出来,从事更富创造性的工作。自动化技术是当代发展迅速,应用广泛,最引人瞩目的技术之一,是推动新的技术革命和新的产业革命的关键技术。第二次世界大战前后,由于自动武器的需要,为控制理论的研究和实践提出了更大的需求,从而大大推动了自控理论的发展。概括地说,控制理论发展经过了三个时期:

第一时期是 20 世纪 40 年代末到 50 年代的古典控制论时期,着重研究单机自动化,解决单输入/单输出 (Single Input Single Output, SISO) 系统的控制问题;它的主要数学工具是微分方程、拉普拉斯变换和传递函数;主要研究方法是时域法、频域法和根轨迹法;主要问题是控制系统的快速性、稳定性及其精度。

第二时期是 20 世纪 60 年代的现代控制理论时期,着重解决机组自动化和生物系统的多输入/多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 系统的控制问题;主要数学工具是一次微分方程组、矩阵论、状态空间法等;主要方法是变分法、极大值原理、动态规划理论等;重点是最优控制、随机控制和自适应控制;核心控制装置是电子计算机。

第三时期是 20 世纪 70 年代的大系统理论时期,着重解决生物系统、社会系统这样一些众多变量的大系统的综合自动化问题;方法是时域法为主;重点是大系统多级递阶控制和智能控制等;核心装置是网络化的电子计算机。

1. 古典控制理论

1765 年瓦特 (J. Watt) 发明了蒸汽机。1770 年他又用离心式飞锤调速器构建了蒸汽机转速自动控制系统,使得蒸汽机转速在锅炉压力以及负荷变化的条件下维持在一定的范围之内,保证动力之源。以应用蒸汽动力装置为开端的自动化初级阶段的到来使人们在为之而欢快的同时亦为多数调速系统出现振荡问题而苦恼。于是唤起许多学者开始对控制系统稳定性的研究。1868 年,英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 的论文“论调节器”,首先解释了 Watt 转速控制系统中出现的不稳定性问题,通过线性微分方程的建立与分析,指出了振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程 (即特征方程) 的根的分布密切相关,从而开辟了用数学方法研究控制系统运动的途径。

1877 年英国数学家劳斯 (E. J. Routh)、1895 年德国数学家赫尔维兹 (A. Hurwitz) 各自独立地建立了直接根据代数方程 (特征方程) 的系数稳定性的准则,即代数判据 (Routh-Hurwitz 判据)。这种方法不必求解微分方程式而直接从方程式的系数,也就是从“对象”的已知特性来判断系统的稳定性。劳斯稳定判据简单易行,至今仍广泛应用。

1892 年,俄罗斯数学力学学家李雅普诺夫 (А. М. Ляпунов) 发表了其具有深远历史意义的博士论文“运动稳定性的一般问题”。他用严格的数学分析方法全面地论述了稳定性理论及方法,为控制理论奠定了坚实的基础。他的研究成果直到 50 年后才被引进自动控制系统理论领域。总之,这一时期的控制工程出现的问题多是稳定性问题,所用的数学工具是常系数微分方程。

1927 年,美国 Bell 实验室的电气工程师布莱克 (H. S. Bleck) 发明了负反馈放大器,在