

自动控制原理

■ 吴秀华 邹秋滢 刘 潭 / 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

自动控制原理

主 编 吴秀华 邹秋滢 刘 潭
副主编 王永刚 袁青云
参 编 杜 文 张淑美 王丽娜

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了自动控制理论基本分析与设计方法。全书共分为7章,前6章主要介绍了自动控制系统的基本概念,各类连续控制系统数学模型的建立,基于系统时间响应的稳定性、动态特性及稳态特性分析,根轨迹分析法,频域分析法以及校正和设计的基本方法;第7章介绍了非线性控制系统中常见的非线性特性和非线性系统的基本分析方法,主要包括相平面分析法和描述函数分析法。另外,针对目前工程计算和实践应用的需要,增加了MATLAB软件在控制系统中的应用,以利于相关教学的需要。

本书可作为非控制类、工科或农科高等院校相关专业的专业基础课教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 吴秀华, 邹秋滢, 刘潭主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2021. 3
ISBN 978 - 7 - 5682 - 9620 - 5

I. ①自… II. ①吴… ②邹… ③刘… 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(2021)第043152号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 14.25

字 数 / 332千字

版 次 / 2021年3月第1版 2021年3月第1次印刷

定 价 / 42.00元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

近年来,由于市场对自动化及智能装备的需求旺盛,自动控制技术已被广泛应用于工业、农业、交通、国防等众多部门。因此,关注和学习“自动控制原理”课程的读者不断增加,尤其在一些非控制类工科高等院校,或者一些农业高等院校中,出于实际生产实践的需要,相继开设了“自动控制原理”课程,为适应这些院校的教学要求和教学需要,并考虑 MOOC 课程特点,精心编写了此书。

“自动控制原理”课程是自动化专业及相关专业的学科基础课程,是一门理论与实践并重,工程性、综合性、方法性、实践性很强的课程。本书结合非控制类、工科或农科高等院校的相关专业特点对本理论体系的要求,把本书的重点放在基本概念和基本原理的讲述和理解应用上,尽量做到深入浅出。本书共分 7 章内容,第 1 章为绪论,介绍了自动控制系统的概念、自动控制系统的控制方式及分类情况等。第 2 章为自动控制系统的数学模型,主要针对控制系统的微分方程和传递函数做较详细的阐述,以使学生在理解基本概念的基础上能够熟练掌握这两种控制系统数学模型的建立以及转换过程。第 3 章为自动控制系统时域分析,主要以一阶系统和二阶系统为例,详细介绍各种典型输入信号下的时域响应,且重点叙述了控制系统稳定性的判断方法和稳态误差的计算。第 4 章为根轨迹法,主要讲述系统分析方法中的根轨迹法的概念和根轨迹图的绘制原则以及运用根轨迹法分析系统性能的过程和方法。第 5 章为频域分析法,重点叙述了频率特性的定义,各典型环节频率特性以及开、闭环控制系统的频率特性,阐述应用频率特性对控制系统进行分析的方法。第 6 章为自动控制系统的设计与校正,把频率法校正作为基本内容,叙述了串联校正、反馈校正、复合校正的基本概念和方法。第 7 章为非线性控制系统分析,介绍了非线性的基本种类和目前对非线性系统进行分析的基本方法(描述函数分析法和相平面分析法),并对非线性控制器做了论述。

本书在编写过程中考虑 MOOC 课程特点,首先以应用为导向,注重理论联系实际,在每章中都加入了 MATLAB 应用实验,并给出相应的仿真程序文本,以提高本书的实用性。另外,为了更好地适应自主学习,本书各章节末尾设有小节,概括该章节相关知识点,同时设计了丰富的习题,方便读者自行巩固学习。

本书按 60 学时左右编写,当然不同院校可根据需要舍弃某些章节的讲授,如若 40 学时左右可讲授前六章主要内容。全书可配备 7~8 个实验,可根据具体实验条件进行选择。

参加本书编写的单位主要有沈阳农业大学、天津大学、中国计量大学等院校。

本书的编写人员有吴秀华、邹秋滢、刘潭、王永刚、袁青云、杜文、张淑美、王丽娜等,全书由付立思教授统稿。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

编 者

第 1 章 绪 论	(1)
§ 1-1 自动控制系统的基本概念	(1)
§ 1-2 自动控制系统的基本控制方式	(4)
§ 1-3 自动控制系统的分类	(5)
§ 1-4 控制系统分析与设计的基本要求及步骤	(7)
小 结	(9)
[历史人物及事件简介]——飞球调速器	(9)
习 题	(9)
第 2 章 自动控制系统的数学模型	(13)
§ 2-1 控制系统微分方程的建立	(13)
§ 2-2 非线性特性的线性化	(21)
§ 2-3 拉普拉斯变换及其应用	(24)
§ 2-4 控制系统的传递函数	(29)
§ 2-5 系统动态结构图和信号流图	(33)
§ 2-6 数学模型的 MATLAB 仿真分析	(43)
小 结	(47)
[历史人物及事件简介]——皮埃尔·西蒙·拉普拉斯	(47)
习 题	(48)
第 3 章 自动控制系统时域分析	(52)
§ 3-1 典型输入信号及时域性能指标	(52)
§ 3-2 一阶系统时域分析	(55)
§ 3-3 二阶系统时域分析	(57)
§ 3-4 高阶系统时域分析	(64)
§ 3-5 控制系统的稳定性分析	(65)
§ 3-6 控制系统稳态误差分析	(69)
§ 3-7 运用 MATLAB 进行控制系统时域分析	(75)
小 结	(79)
[历史人物及事件简介]——诺伯特·维纳	(80)
习 题	(80)
第 4 章 根轨迹法	(84)



§ 4-1 根轨迹及其条件方程	(84)
§ 4-2 根轨迹的基本绘制法则	(87)
§ 4-3 广义根轨迹	(97)
§ 4-4 根轨迹分析法	(99)
§ 4-5 运用 MATLAB 绘制根轨迹及分析	(102)
小 结	(105)
[历史人物及事件简介]——沃尔特·理查德·伊文思	(105)
习 题	(106)
第 5 章 频域分析法	(108)
§ 5-1 频率特性	(108)
§ 5-2 典型环节的频率特性	(110)
§ 5-3 控制系统的开环频率特性	(119)
§ 5-4 频域稳定判据	(124)
§ 5-5 控制系统的频域性能分析	(135)
§ 5-6 运用 MATLAB 进行控制系统频域分析	(140)
小 结	(144)
[历史人物及事件简介]——奈奎斯特	(144)
习 题	(145)
第 6 章 自动控制系统的设计与校正	(149)
§ 6-1 系统校正的基本概念	(149)
§ 6-2 常用串联校正网络	(156)
§ 6-3 反馈校正	(164)
§ 6-4 复合校正	(167)
§ 6-5 运用 MATLAB 进行控制系统设计与校正	(170)
小 结	(176)
[历史人物及事件简介]——PID 控制	(177)
习 题	(177)
第 7 章 非线性控制系统分析	(181)
§ 7-1 控制系统的非线性特性	(181)
§ 7-2 相平面分析法	(186)
§ 7-3 描述函数分析法	(198)
§ 7-4 运用 MATLAB 进行非线性系统分析	(202)
小 结	(207)
[历史人物及事件简介]——钱学森	(208)
习 题	(208)
习题答案	(210)
参考文献	(219)

第 1 章

绪 论

现代工业、农业、国防和科学技术以及人类日常生活中，自动控制技术发挥着越来越重要的作用。自动控制技术使机器设备高速高效地运行，使生产过程自动化，改善人类劳动条件，减小劳动强度，使汽车等交通工具在无人参与的情况下能自动驾驶，使现代军事武器自动地跟踪和定位入侵目标，使空间事业得以突飞猛进的发展。

“自动控制原理”是研究自动控制系统共同规律的一门科学，主要研究自动控制的基本理论和设计控制系统的基本方法。

本章从工程实例出发，介绍自动控制的基本概念、基本控制方法、自动控制系统的分类、自动控制系统分析与设计的基本要求等内容。

§ 1-1 自动控制系统的基本概念

所谓**自动控制**是指在无人参与的情况下，利用自动控制装置使被控制的生产设备或生产过程自动地按照预定的规律去工作的过程。而**自动控制系统**是按照某些规律连接为一个整体的元部件的组合，它们根据输入信号的要求调节相应的物理量，使之达到预期的目标，或按照预期的规律进行变化。

下面以直流电动机转速控制系统加以说明，如图 1-1 所示。

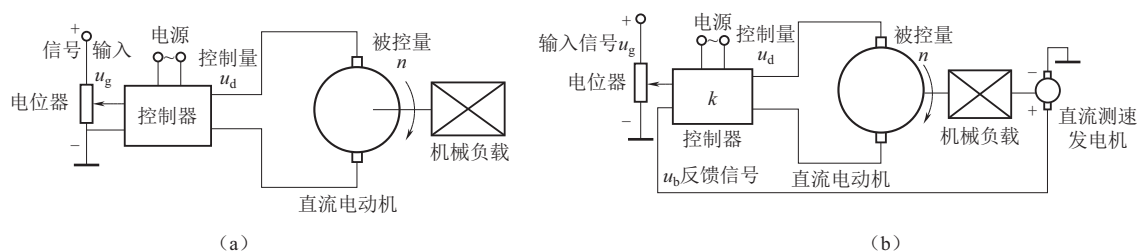


图 1-1 直流电动机转速控制系统原理示意图

(a) 开环控制系统；(b) 闭环（反馈）控制系统



该系统的工作过程可以描述如下：电位器产生初始输入电压信号 u_g ，通过控制器的处理产生控制直流电机电枢回路的控制电压 u_d ，加在电机电枢回路上，使直流电动机旋转，产生一定的转速 n 或角速度 ω ，带动负载运转。如图 1-1 (a) 所示，为一个开环控制系统。在此系统中，当由于负载的增减等因素使电动机转速发生变化，偏离希望值时，系统不能自动地进行调节，使之恢复希望的转速。若要实现此功能，就应该采用如图 1-1 (b) 所示的闭环控制系统，也称反馈控制系统。它通过一个直流测速发电机，把直流电动机的输出转速变换为一个电压值 u_b ，反送回输入端，与初始的输入电压 u_g 做比较，若二者相等，表明电机实际转速与希望转速相等，可以不调节；若二者不等，表明电机实际转速偏离了希望转速，则系统把两个电压的差值经过控制器的放大处理后送给电动机，使电动机调节转速的大小，直到电机的输出转速与希望转速达到一致。如负载增加时， n 会下降，测速发电机的输出电压 u_b 下降，差值 $u_g - u_b$ 上升（一般参考输入 u_g 保持不变），控制器输出 u_d 也增加，则电机的转速上升，直到与希望值相等。

可见，闭环控制系统比开环控制系统性能优越，实现了系统的自动控制过程，控制的精度得到极大的提高。所以，闭环控制系统是自动控制原理研究的主要对象。现对一般自动控制系统中涉及的相关概念做以下说明。

(1) **参考输入量**：也称为给定值或希望值，是控制系统的输入量，也是系统输出应该达到的标准值或希望值。如图 1-1 中的电压信号 u_g 。

(2) **被控对象**：也称受控对象，是指被控制的装置或设备，也可以是某个生产或工艺过程。如图 1-1 中的直流电动机即为被控对象。

(3) **被控量**：指被控制的物理量，即被控对象的输出量，也是控制系统的输出量，亦称受控量或输出量。实际控制系统中被控量往往是可以通过测量装置检测出来的可控物理量。如温度、压力、转速、流量等。图 1-1 中电动机的转速 n 即是系统的被控量。

(4) **控制器**：将输入信号按一定控制规律转换成控制量的元件或设备，也称为调节器、控制装置或校正装置。一般它由电子电路或微型计算机和功率变换器组成，可以将弱电信号放大以驱动后续的执行机构动作。控制器还可以具有复杂的函数关系。

(5) **控制量**：控制被控对象的物理量，是控制器或执行机构的输出，一般连接被控对象的输入端。如图 1-1 中的信号 u_d 。

(6) **测量元件**：将一种物理量检测出来，按照某种规律转换成另一种物理量（一般为电信号）的元件或设备，也称为传感器、测量变送元件。在一般控制系统中用测量元件来检测被控量，将其转换成相应的电信号、气压信号等，以与参考输入量做比较。

(7) **反馈**：把被控量通过测量元件反送回输入端的过程，称为反馈。若反馈信号与参考输入信号作差，作为控制器输入的系统，称为负反馈系统。若反馈信号与参考输入信号作和，作为控制器输入的系统，称为正反馈系统。若系统没有反馈回路则构成开环控制系统（见图 1-1 (a)），若系统有反馈回路则构成闭环控制系统（见图 1-1 (b)）。

(8) **偏差信号**：参考输入量与测量元件反馈信号的差值称为偏差信号，是控制器的实际输入信号，是驱动系统实现自动控制的激励信号。如图 1-1 中的 $u_g - u_b$ 。

(9) **比较元件**：将参考输入量与反馈量作差，得到偏差信号的元件称为比较元件。常用的比较元件有差动运放器、机械差动装置、电桥电路等。

(10) **定值元件**：也称为给定元件或装置，是设定或给出参考输入量的设备。常用的定值元件有电位器、指令开关、旋转变压器或计算机等。

(11) **执行元件**：是执行控制策略的机构，将控制量进行功率级别转换后加载在被控对象上控制其输出，可以看作是控制器的一部分。常用的执行元件有功率放大器、执行电机、调节阀等。

(12) **扰动信号**：是使被控对象输出偏离希望值的所有干扰信号。若干扰来自系统外部则称为外扰，来自系统内部则称为内扰。

了解了自动控制系统中相关的基本概念后，我们再来分析如图 1-2 所示的导弹发射架方位角控制系统。

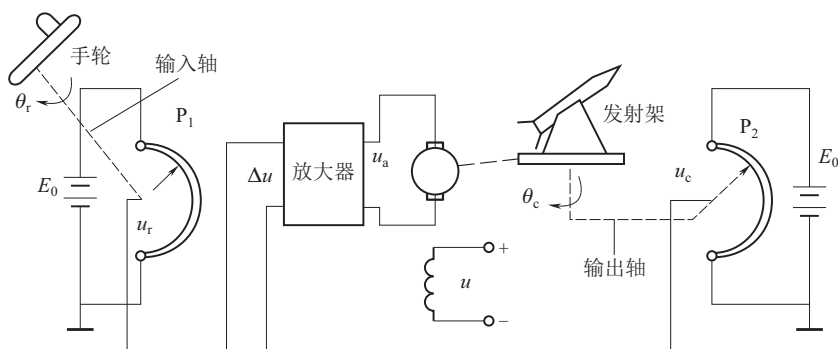


图 1-2 导弹发射架方位角控制系统结构及原理示意图

该系统的控制任务是使发射架能够转动到与手轮转动的方位角 θ_r 相一致的角度。系统的被控对象是导弹发射架，被控量是发射架转动的方位角 θ_c ，参考输入量是手轮转动的方位角 θ_r ，手轮和发射架的转动方位角分别通过电位器 P_1 和 P_2 转变为相应的电压值。电位器 P_1 和 P_2 并联后外接统一电源 E_0 ，形成电桥电路，其滑臂分别与输入轴和输出轴相连接，起测量和比较作用，产生偏差信号 Δu 。输入轴由手轮操作，输出轴由电枢控制直流电动机经减速后带动。

当导弹发射架的方位角与输入轴的方位角一致时，系统处于相对静止状态，当摇动手轮顺时针转动时，将会使电位器 P_1 的滑臂转过一个角度，此时 $\theta_r > \theta_c$ ，产生误差角 $\theta_e = \theta_r - \theta_c$ ， θ_e 通过电位器 P_1 和 P_2 转换成偏差电压 $\Delta u = u_r - u_c$ ， Δu 经过放大器放大后驱动电动机转动，带动导弹发射架顺时针转动，直至 $\theta_c = \theta_r$ ， $u_c = u_r$ ，偏差电压 $\Delta u = 0$ ，电动机停止转动。系统在新的条件下达到平衡，即发射架处于新的希望位置。若手轮逆时针转动，则调节过程相反。绘制导弹发射架方位角控制系统的原理方框图如图 1-3 所示。



图 1-3 导弹发射架方位角控制系统原理方框图

该系统只要 $\theta_c \neq \theta_r$ ，偏差就会产生调节作用，作用的结果是消除偏差 θ_e ，使输出量 θ_c 严格地跟随参考输入量 θ_r 的变化而变化。



§ 1-2 自动控制系统的基本控制方式

1.2.1 开环控制

开环控制是最简单的一种控制方式，按照控制信息传递的路径，它所具有的特点是控制量与被控量之间只有顺向作用而没有反向联系。也就是说，控制信息的传递路径不是闭合的，故称为开环。开环控制系统原理框图如图 1-4 所示。

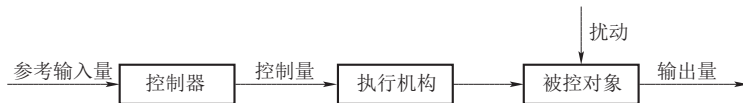


图 1-4 开环控制系统原理框图

在开环控制系统中，控制器根据执行机构和被控对象的特性进行设计。在参考输入量的控制作用下，被控对象的输出可以迅速而准确地响应参考输入信号。开环控制系统无须对被控量进行测量，系统结构简单、成本低。

因此，开环控制方式在国民经济各部门均有采用，如自动售货机、自动洗衣机、面包机、烤箱控制系统、数控机床等。

从开环控制的原理来看，其简单性就在于输出直接受输入的影响。而仅有输入量是不能保证控制精度的。如在上述直流电动机转速控制系统中，若输入值不变，原则上希望输出转速保持相应的恒定值，其他干扰因素不影响输出的状态。但实际情况往往不是这样，当系统受到外界扰动时，其输出量会偏离希望值，系统自身没有纠正偏差的能力。这说明开环控制虽然简单但准确性较差，即抗干扰性差。由于这一缺点，有些控制精度要求较高的场合，开环控制是不能满足要求的。

1.2.2 闭环控制

在控制系统中，控制装置对被控对象所施加的控制作用，若能取自被控量的反馈信息，即根据实际输出来修正控制作用，以实现对被控对象进行控制的任务，这种控制原理称为反馈控制原理。正是由于引入了反馈信息，使整个控制过程成为闭合的。因此，按反馈原理建立起来的控制系统，叫作闭环控制系统。在闭环控制系统中，其控制作用的基础是被控量与给定值之间的偏差。这个偏差是各种实际扰动所导致的总“后果”，它并不区分其中的个别原因。因此，这种系统往往同时能够抵制多种扰动，而且对系统自身元部件参数的波动也不甚敏感。

闭环控制系统原理框图如图 1-5 所示。

闭环控制的突出优点是利用偏差信号来纠正偏差，使系统达到较高的控制精度的目的。闭环控制系统可以克服开环控制系统的上述缺点，但与开环控制系统相比，闭环控制系统的结构比较复杂、造价高。另外，由于闭环控制存在反馈信号，利用偏差进行控制，如果设计不当，将会使系统无法正常和稳定地工作。

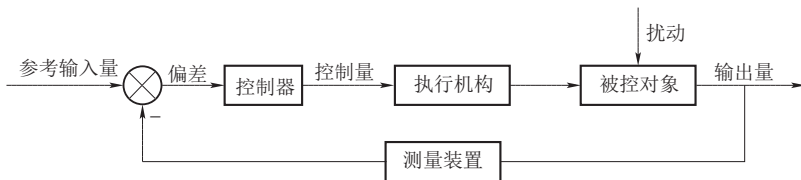


图 1-5 闭环控制系统原理框图

§ 1-3 自动控制系统的分类

实际工程中，尽管控制系统的控制有其基本规律，但因其工作环境、组成结构、被控对象的不同，其分类的方法也有很多。了解控制系统的类型，从而分门别类地掌握不同类型的控制系统的具体规律，对于控制系统的分析和设计很有必要。

1. 按照系统的结构分类

(1) **开环控制系统**：系统中无反馈环节，输入量不受输出量的影响。其结构简单、成本低、调整方便；抗干扰能力差，控制精度不高。

(2) **闭环控制系统**：系统中含有反馈环节，输入量受到实际输出量的影响。其结构复杂、成本高、适应性强；抗干扰能力强，控制精度高。

(3) **复合系统**：由开环和闭环控制系统结合而成，兼有开环控制系统和闭环控制系统的优点。

2. 按照输入量与输出量的关系分类

(1) **线性控制系统**：由线性微分、差分、代数方程等线性函数描述的系统称为线性控制系统。如下式所示：

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_m x(t) \quad (1-1)$$

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

线性控制系统的主要特点是具有叠加性和齐次性，即当输入量为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 时，如果输出量分别为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ ，则当输入量为 $x(t) = ax_1(t) + bx_2(t)$ 时，输出量为 $y(t) = ay_1(t) + by_2(t)$ 。

(2) **非线性控制系统**：由非线性函数描述的系统称为非线性控制系统。非线性控制系统不满足齐次叠加原理。

非线性函数是指函数的系数与变量有关，或含有变量及其导数的高次幂或乘积项的函数。如 $\frac{dy^2(t)}{dt^2} + x(t) \frac{dy(t)}{dt} + y(t) + y^2(t) = x(t)$ 就是非线性函数。

线性系统理论是控制理论中历史最为悠久、体系最完善、技术较成熟且应用最为广泛的理论；而非线性系统理论虽然近年来有很大发展，但还没有形成统一的理论体系，而且，现



有的非线性理论也多以线性理论体系为基础进行分析研究。虽然实际中，每个元件或系统或多或少地存在非线性特性，但如果非线性程度不重，则完全可以用线性控制系统来代替非线性控制系统进行系统分析，所以本书以线性控制系统为主要研究对象。

3. 按照系统传输信号不同分类

(1) **连续控制系统**：所有传输信号都是随时间连续变化的系统。如模拟量控制系统。

(2) **离散控制系统**：指某处或多处传输信号随时间是离散变化的系统。它包括采样控制系统和数字控制系统等。

连续控制系统和离散控制系统虽然是两类性质差异较大的控制系统，但它们所讨论的问题以及分析与综合的基本理论、方法具有平行的相似性。本书讨论以连续控制系统为主，通过对比再介绍离散控制系统的相关内容。图 1-6 示意了连续信号和离散信号波形。

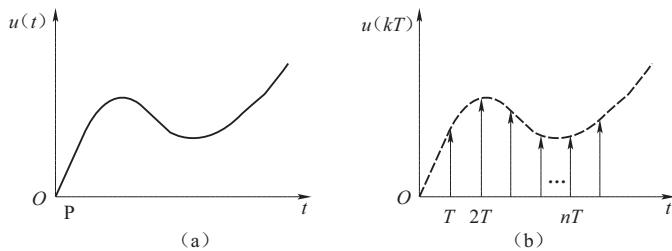


图 1-6 连续信号和离散信号
(a) 连续信号；(b) 离散信号

4. 按照系统参数是否随时间变化分类

(1) **定常控制系统**：又称时不变系统，指结构和参数都不随时间变化的系统。定常控制系统响应特性只取决于输入信号的形式和特性，与输入信号的作用时刻无关。

(2) **时变控制系统**：指结构和参数随时间变化的系统。时变控制系统的响应特性取决于输入信号的形式及信号作用的时刻。如火箭控制系统，随着燃料的消耗，系统的质量和惯性都在随时变化，其控制方式也必然发生变化。

定常控制系统理论体系完整，便于实用，时变控制系统理论尚不成熟。严格来说，在运行过程中，由于各种因素的作用，要使实际系统的参数完全不变是不可能的，定常控制系统只是时变控制系统的一种理想化模型。但是，只要参数的时变过程比系统的运动过程慢很多，用定常控制系统来描述实际系统所造成的误差就很小，可以满足工程需要。而大多数实际系统的参数随时间变化并不明显，所以本书以定常控制系统的分析设计为主。

5. 按照参考输入量的变化规律分类

(1) **恒值系统**：又称自动调节系统，系统的参考输入量在工作过程中保持不变或变化很小，要求输出量保持恒值的系统。例如：电压、温度、转速、液位控制系统等。

(2) **随动系统**：又称伺服系统、跟踪系统。系统参考输入量随机变化，要求输出量以一定精度跟踪输入量变化的系统。例如：雷达高射炮炮身位置随动控制系统、火炮群跟踪雷达天线方位角位置控制系统、轧钢机压下装置位置控制系统、液压仿形刀架控制系统、轮舵位置控制系统等。

(3) **程序控制系统**：参考输入量是预定的时间函数，要求输出量能够准确而自动地按事先给定的规律变化的系统。例如：数控机床、数控加工中心、自动化生产线等控制系统。

恒值系统和随动系统是两类典型的自动控制系统，在工程中得到了广泛的应用。而程序控制系统现在在工业领域中应用越来越普遍。

6. 按照系统输入输出端口关系分类

(1) **单入单出控制系统**：简称 SISO 系统，即只有一个输入量和一个输出量端口关系的系统，如图 1-7 (a) 所示。

(2) **多入多出控制系统**：简称 MIMO 系统，即具有多个输入量和多个输出量端口关系的系统，如图 1-7 (b) 所示。

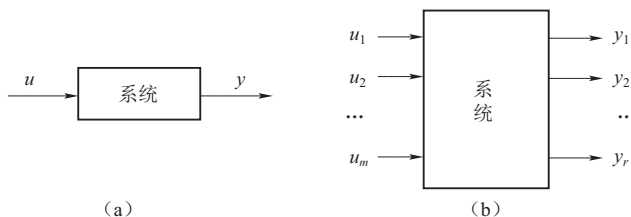


图 1-7 控制系统端口关系示意图

(a) SISO 系统；(b) MIMO 系统

单入单出控制系统是最简单的控制系统，是多入多出控制系统的基础。单入单出控制系统是经典控制理论的主要研究对象，多入多出控制系统是现代控制理论的主要研究对象。

§ 1-4 控制系统分析与设计的基本要求及步骤

1.4.1 控制系统分析与设计的基本要求

自动控制系统分析和设计的基本要求可以归纳为三点：稳定性、准确性和快速性，即稳、准、快。

1. 稳定性

稳定性是自动控制系统的重要特性，也是衡量闭环控制系统性能的主要指标之一。保证系统稳定是对系统最基本也是最重要的要求。系统稳定指当系统受到外界或内部的扰动时能重新回到初始稳定运行状态的性能。系统不稳定，即系统失控，指系统受到扰动作用后被控变量不是趋于希望值，而是趋于所能达到的最大值，或在两个较大的量值之间剧烈波动或振荡。当系统失稳时，常常会损伤设备，甚至造成系统的彻底损坏，引起重大事故。如图 1-8 所示，曲线①是稳定系统的响应，曲线②是不稳定系统的响应。

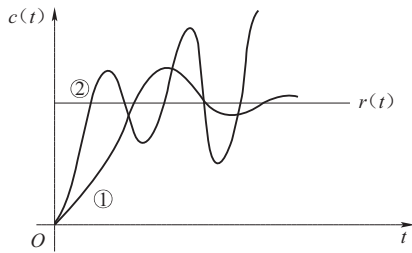


图 1-8 稳定与不稳定控制系统响应曲线



2. 准确性

系统在输入信号作用下,被控量由初始稳定值变化到另一个稳定值需要一段时间,有一个变化过程,这个过程称为过渡过程。在过渡过程结束之后,系统被控量的实际值与希望值的误差称为系统的稳态误差,它是衡量系统性能的重要指标,用以表示系统的准确性。一般控制系统的准确性控制在允许的精度范围内。如图 1-9 所示,曲线①的准确性高,曲线②的准确性低。

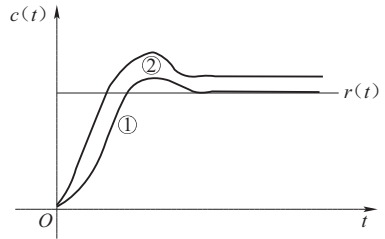


图 1-9 控制系统动态响应曲线

3. 快速性

快速性是指系统过渡过程结束的快慢。一般希望控制系统的过渡过程既快速又平稳,所以快速性和平稳性是衡量系统过渡过程中动态性能的主要指标。

如图 1-9 所示,曲线②的响应快,快速性好,曲线①的响应慢,快速性差。而曲线①的振荡幅值小,平稳性好,曲线②的振荡幅值大,平稳性差。

稳定性是系统正常工作的前提;快速性和平稳性是对稳定系统动态性能的要求;准确性是对稳定系统稳态性能的要求。只有在系统稳定的前提下,谈论其快速性及准确性才有意义。从上面的分析也可以看出,稳定性、准确性、快速性以及平稳性要求常常是互相制约、互相矛盾的,所以在进行系统设计时要考虑多方面因素,结合实际系统的具体要求,综合进行分析设计。

1.4.2 控制系统分析与设计的步骤

根据控制系统分析与设计的基本要求,进行自动控制系统设计的基本步骤可以归纳如下。

1. 设定设计目标

主要是设计被控量的标准值和各项性能指标。控制系统的性能指标包括动态性能指标和稳态性能指标。此外,还有抗干扰能力、鲁棒性(当系统数学模型和参数不精确并在一定范围内变化时,系统仍能稳定地工作并具有良好的控制性能的特性)等指标。性能指标是根据用户和现场实际的需求提出来的,同时也应该考虑现实条件和成本等因素。

2. 确定控制系统结构

主要指选择驱动装置和配置适当的传感器等设备,但设计者不能改变被控对象的结构。对于复杂的控制系统还要确定多个反馈回路的结构。

3. 建立控制系统数学模型、设计控制装置

根据系统结构,建立系统的微分方程或传递函数等数学模型,分析系统性能,进而设计控制装置,修正、改善控制系统性能。设计控制系统的关键部件,需要反复调整控制装置的结构和参数来获得期望的性能指标。最后,对所设计的控制系统进行计算机仿真,校核系统的输出响应。

4. 实验室或现场调试

理论分析和设计过程都是经过一定简化,忽略了某些因素的影响,因此,一个工程设计方案必须经过实验的验证,并且,一般的控制系统往往经过多次从理论到实践,从实践到理论的反复修正,才能达到工程要求的结果。经过实验或现场调试后,再进行调整是必要的。

● 小 结

自动控制技术是人类战胜自然、解放自我过程中发展起来的一门实用技术,自动控制理论是研究这门技术发展、完善、成熟的理论体系。其与人类的生产和生活均密切相关。本章介绍了自动控制理论和自动控制技术的相关基本知识。

(1) 自动控制是以无人化为目标的控制技术,包括开环控制和闭环控制,本书主要讲述闭环控制系统,闭环控制系统中有一些基本的概念,包括被控对象、控制器、反馈、测量元件等。

(2) 自动控制系统按照不同的分类标准可以分成不同的种类,如线性控制系统和非线性控制系统,定常控制系统和时变控制系统,连续控制系统和离散控制系统等。

(3) 评价不同控制系统的定性和定量标准是稳定性、准确性和快速性。

● 历史人物及事件简介

飞球调速器是英国著名发明家詹姆斯·瓦特 (James Watt) (1736—1819) 继 1765 年发明了蒸汽机后,于 1788 年对蒸汽机转速进行控制的调节装置,如图 1-10 所示。飞球调速器由两个飞球和连杆机构组成,连接在蒸汽机转轴上,当蒸汽机转速增高时,飞球做离心运动,使上部连杆呈菱形压缩,通过连杆机构减小蒸汽阀门的开度,使蒸汽机的转速降下来。若蒸汽机转速降低,则飞球离心运动减弱,连杆机构呈菱形伸长,增大蒸汽阀门的开度,使蒸汽机转速上升。飞球调速器被认为是反馈调节理论在工业生产中最早的完美应用。它的结构简单,安装方便,调节效果好,目前,有些手工作坊仍在使用。

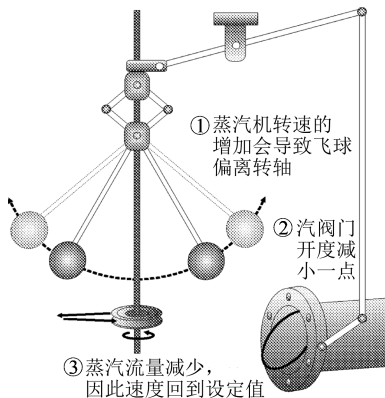


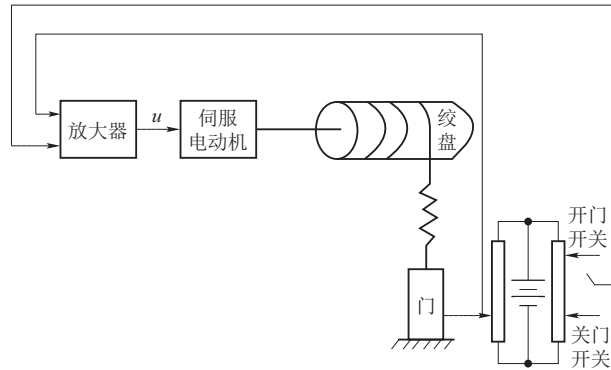
图 1-10 飞球调速器

● 习 题

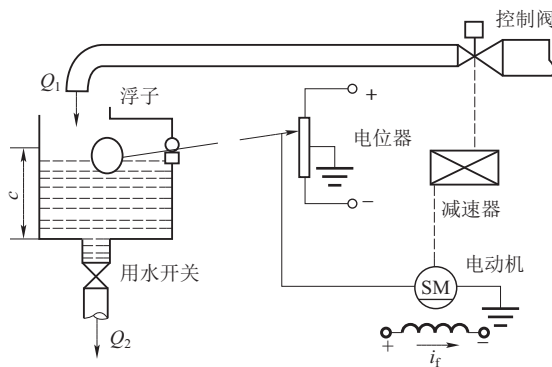
1-1 (1) 什么是自动控制系统?自动控制系统通常由哪些基本环节组成?各环节起什么作用?(2) 试比较开环控制系统和闭环控制系统的优缺点。

1-2 习题 1-2 图是仓库大门自动控制系统原理示意图,试说明系统自动控制大门开闭的工作原理并画出系统原理方框图。

1-3 习题 1-3 图是液位自动控制系统原理示意图。在任意情况下,希望液面高度 c 维持不变,试说明系统工作原理并画出系统原理方框图。

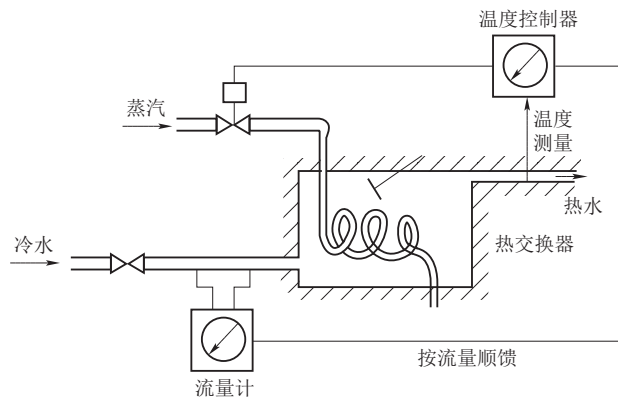


习题 1-2 图



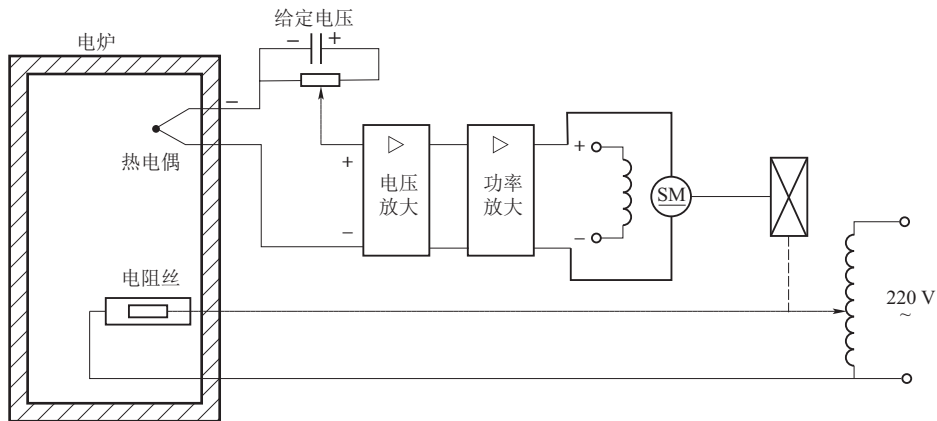
习题 1-3 图

1-4 习题 1-4 图为水温控制系统示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热，从而得到一定温度的热水。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方框图，并说明为了保持热水温度为期望值，系统是如何工作的？系统的被控对象和控制装置各是什么？



习题 1-4 图

1-5 习题 1-5 图是电炉温度控制系统原理示意图。试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程，指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用，最后画出系统原理方框图。



习题 1-5 图

1-6 下列各式是描述系统的微分方程，其中 $c(t)$ 是输出量， $r(t)$ 是输入量。试判断哪些是线性的，哪些是非线性的，哪些是变系数的？

$$(1) 4 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} = c(t) \frac{dc(t)}{dt};$$

$$(2) t^2 \frac{d^3 c(t)}{dt^3} - e^{-t} \frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = r(t);$$

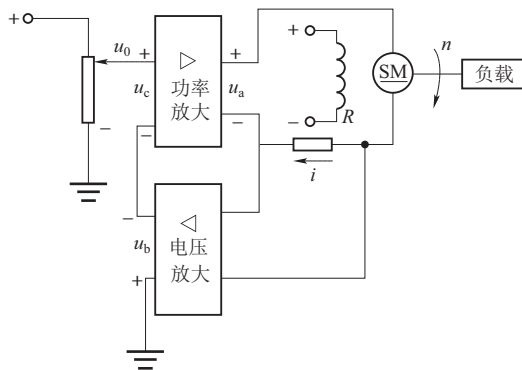
$$(3) \frac{1}{c(t)} \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{1}{c(t)} \frac{dc(t)}{dt} + 1 = 0;$$

$$(4) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{1}{c(t)} \frac{dc(t)}{dt} - 3 = 0;$$

$$(5) (1 - t^2) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} - 2t \frac{dc(t)}{dt} + n(n+1)c(t) = 0 \quad (n \text{ 是常数});$$

$$(6) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \frac{1}{t} \frac{dc(t)}{dt} + \left(1 - \frac{n^2}{t^2}\right) c(t) = 0 \quad (n \text{ 是常数}).$$

1-7 在按扰动控制的开环控制系统中，为什么说一种补偿装置只能补偿一种与之相应的扰动因素？对于习题 1-7 图按扰动控制的速度控制系统，当电动机的激磁电压变化时，转速如何变化？该补偿装置能否补偿这个转速的变化？



习题 1-7 图