


高等院校选用教材

自动控制原理

王万良 编著

 科学出版社

高等院校选用教材

自动控制原理

王万良 编著

吴启迪 主审

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是作者多年教学改革实践的经验总结。本书将经典控制理论与现代控制理论的教学内容有机地结合起来,用统一的理论框架介绍连续系统与离散系统控制理论,因此能够在较少的学时内讲授更多的内容,适应了自动控制的发展。

本书第1章介绍自动控制的基本概念;第2章介绍连续系统的状态空间、微分方程、传递函数、结构图、信号流图、频率特性等数学模型及其相互关系;第3章介绍离散系统中的采样与保持、差分方程与Z变换、离散系统的数学模型及其相互关系;第4至6章分别介绍控制系统的稳定性、动态性能和稳态误差、能控性和能观性等系统性能的分析方法。在系统分析的基础上,第7至9章分别介绍控制系统的频域设计、状态反馈控制和状态观测器设计、最优控制设计等方法。最后在第10章,从实用角度介绍了基于最小二乘法的控制系统实验建模方法,为控制理论与工程应用之间架起了一座桥梁。

本书可以作为自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、计算机科学与技术、通信工程等电气信息类专业的教材,也可作为其他非自动化专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/王万良编著. -北京:科学出版社,2001.9

(高等院校选用教材)

ISBN 7-03-009317-8

I. 自… II. 王… 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(2001)第019228号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001年9月第一次印刷 印张:27 3/4

印数:1—4 000 字数:645 000

定 价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

《自动控制原理》教科书大多数着重介绍以传递函数等为数学模型的经典反馈控制和以状态方程为数学模型的“现代控制理论”。它们一般都是沿着自动控制理论发展的历程,按照先“经典控制理论”,后“现代控制理论”;先连续系统理论,后离散系统理论;先线性系统理论,后非线性系统理论,的顺序进行介绍。事实上,随着控制理论在内容上的不断扩展和更新,所谓的“经典控制理论”和“现代控制理论”越来越趋于融合。因此,根据控制理论的内在联系,将“经典控制理论”与“现代控制理论”的教学内容有机地结合起来,从控制理论体系本身的结构来介绍自动控制理论,能够使学生更系统地掌握控制系统分析、设计的方法。许多专家学者对这一问题已经进行了广泛深入的讨论,一些教材的体系也已经进行了改革实践,本书就是基于这个指导思想编写的。经过几年来的教学实践,这种教材体系能够在较少的学时内讲授更多的内容,使学生能够更深入地掌握自动控制理论

全书共 10 章。第 1 章介绍自动控制的基本概念。第 2 章介绍连续系统的状态空间、微分方程、传递函数、结构图、信号流图、频率特性等数学模型及其相互关系。随着计算机控制技术的发展,离散系统控制理论得到越来越广泛的应用,因此本书突出了离散系统的理论,与连续系统理论并列介绍。在第 3 章介绍了离散系统中的采样与保持、差分方程与 Z 变换、离散系统的数学模型及其相互关系,为用统一的理论框架介绍连续系统与离散系统控制理论奠定了基础。在控制系统数学模型的基础上,第 4、第 5 与第 6 章分别介绍了控制系统的稳定性、动态性能和稳态误差、能控性和能观性等系统分析方法,删除了根轨迹分析与设计方法以及尼柯尔斯图分析与设计方法等不太重要的内容。在系统分析的基础上,第 7、第 8 与第 9 章分别介绍了控制系统的频域设计、状态反馈控制和状态观测器设计,最优控制等系统设计方法。最后,第 10 章从工程应用角度介绍了基于最小二乘法的控制系统实验建模方法,为控制理论与工程应用之间架起了桥梁。

自动控制技术是生产过程中的关键技术,也是许多高新技术产品中的核心技术。因此,自动控制理论已成为自动化及许多非自动化专业的重要教学内容。本书可以作为自动化、电气工程以及相关电气信息类专业的自动控制理论教材,同时也适用于其它非自动化专业。对于非自动化专业的学生,可以只学习第 1 至 5 章和第 7 章,这样仍可保持体系结构的完整性。

本书得到“浙江省高等学校重点建设教材项目”的资助。作为浙江省高等学校重点建设教材,历经四年时间,经过多次修改与实践得以完稿。本书的初稿经过多次试用,取得了较好的教学效果。本书承蒙同济大学校长吴启迪教授主审,在编写过程中还得到许多同行的大力支持与帮助,在此深表谢意!这里特别要感谢中国科学院院士、清华大学信息学院院长李衍达教授的关心和支持,感谢中国自动化学会教育工作委员会副主任、国防科技大学自动化系主任常文森教授的推荐和指导,感谢合肥工业大学王孝武教授、同济大学郑应平教授、许维胜副教授、东北大学薛定宇教授、西南交通大学张汉全教授、江苏石油化工学院史国栋教授、江苏理工大学赵德安教授等有益的讨论与建议,感谢我的同事们的有

益的讨论和改革实践。同时还要感谢我的研究生们精心的校对和许多有益的建议。

由于作者水平有限,书中会存在许多缺点和错误,欢迎使用本书的教师、学生和科技人员提出宝贵意见。

王万良

2001年6月于杭州

目 录

第 1 章 自动控制的基本概念	(1)
1.1 自动控制系统	(1)
1.2 自动控制系统的类型	(4)
1.3 对控制系统性能的基本要求	(8)
1.4 本书内容的安排.....	(10)
习题	(10)
第 2 章 连续控制系统的数学模型	(12)
2.1 控制系统数学模型的概念.....	(12)
2.2 状态空间模型.....	(13)
2.3 微分方程描述.....	(22)
2.4 传递函数.....	(31)
2.5 结构图.....	(39)
2.6 信号流图.....	(49)
2.7 频率特性.....	(58)
习题	(74)
第 3 章 离散控制系统的数学模型	(82)
3.1 信号的采样与保持.....	(82)
3.2 差分方程.....	(91)
3.3 离散状态方程.....	(97)
3.4 Z 变换.....	(99)
3.5 Z 反变换	(109)
3.6 Z 传递函数	(114)
习题.....	(121)
第 4 章 控制系统稳定性分析	(123)
4.1 稳定性定义与稳定性条件	(123)
4.2 代数稳定判据	(130)
4.3 李雅普诺夫稳定判据	(138)
4.4 奈奎斯特稳定判据	(150)
4.5 描述函数法	(161)
4.6 相平面法	(181)
习题.....	(197)
第 5 章 控制系统动态性能分析	(202)
5.1 控制系统的动态性能指标	(202)
5.2 线性连续系统的动态性能分析	(204)

5.3	线性离散系统的动态性能分析	(217)
5.4	线性连续系统状态方程的求解	(232)
5.5	线性离散系统状态方程的求解	(240)
5.6	线性连续系统的稳态性能分析	(245)
5.7	线性离散系统的稳态性能分析	(257)
	习题	(259)
第 6 章	线性系统的能控性和能观性分析	(265)
6.1	系统能控性和能观性问题	(265)
6.2	线性定常系统的能控性	(267)
6.3	线性定常系统的能观性	(272)
6.4	状态空间表达式的对角线标准型	(275)
6.5	状态空间表达式的能控标准型与能观标准型	(287)
6.6	传递函数的几种标准型实现	(292)
6.7	对偶原理	(299)
6.8	线性定常系统的规范分解	(300)
	习题	(308)
第 7 章	线性系统的校正方法	(311)
7.1	控制系统校正的概念	(311)
7.2	串联校正的分析法	(316)
7.3	串联校正的综合法	(333)
7.4	离散控制系统直接设计方法	(339)
	习题	(348)
第 8 章	状态反馈控制与状态观测器设计	(350)
8.1	状态反馈与输出反馈	(350)
8.2	状态反馈设计方法	(355)
8.3	状态观测器的设计	(363)
8.4	带状态观测器的状态反馈系统的设计	(371)
	习题	(374)
第 9 章	最优控制	(376)
9.1	最优控制的概念	(376)
9.2	变分法与泛函的极值条件	(377)
9.3	变分法求解无约束最优控制问题	(378)
9.4	极小值原理	(384)
9.5	线性二次型最优控制	(394)
	习题	(409)
第 10 章	系统辨识	(413)
10.1	系统辨识的概念	(413)
10.2	线性静态模型的最小二乘参数估计	(415)
10.3	线性动态模型的最小二乘参数估计	(422)

10.4 最小二乘参数估计的递推算法·····	(424)
10.5 线性系统的结构辨识·····	(427)
10.6 闭环系统的可辨识性·····	(429)
习题·····	(431)
附录 常用拉普拉斯变换和 Z 变换表 ·····	(433)
参考文献 ·····	(435)

第 1 章 自动控制的基本概念

1.1 自动控制系统

自动化技术几乎渗透到国民经济的各个领域及社会生活的各个方面,是当代发展最迅速、应用最广泛、最引人注目的高科技,是推动新的技术革命和新的产业革命的关键技术,在某种程度上说,自动化是现代化的同义词。

1769 年瓦特发明的蒸汽机,推动了工业革命的进一步发展。但是,当时的蒸汽机需要人不断地调节蒸汽阀门才能保持蒸汽机的速度稳定,蒸汽机的应用受到调速精度的限制。为了解决蒸汽机的速度控制问题,瓦特于 1788 年又发明了飞球调节器,这是被世界公认的第一个自动控制系统。其工作原理如图 1.1 所示。它是一个与蒸汽机轴相联的机械装置,当蒸汽机的负载减轻或者蒸汽温度升高等原因导致蒸汽机转速升高时,飞球调节器的转速也升高,离心力增加,飞球升高,带着套环上升,汽阀联结器关小蒸汽阀门,从而降低蒸汽机速度。反之,当蒸汽机的负载增加或者蒸汽温度下降等原因导致蒸汽机转速降低时,飞球调节器的转速也下降,离心力减小,飞球降低,带着套环下降,汽阀联结器开大蒸汽阀门,从而提高蒸汽机速度。可见,尽管存在负载、蒸汽温度变化等扰动,蒸汽机速度仍然可以稳定在设定值上。

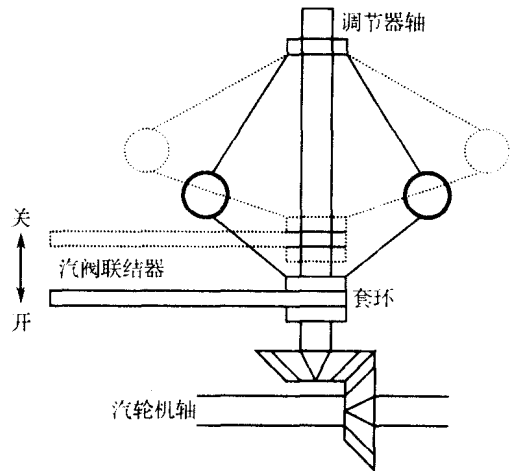


图 1.1 飞球调节器原理图

飞球调节器的发明进一步推动了蒸汽机的应用,促进了工业生产的发展。但是,有时为了提高调速精度,反而使蒸汽机速度出现大幅度振荡,其后出现的其他自动控制系统也有类似现象发生。由于当时还没有自动控制理论,所以不能从理论上解释这一现象。为了解决这个问题,不少人为提高离心式调速机的控制精度进行了改进研究。有人认为系统振荡是因为调节器的制造精度不够,从而努力改进调节器的制造工艺,这种盲目的探索持续了大约一个世纪之久。

1868 年,英国麦克斯韦尔发表的“论调速器”论文,第一次指出不应该单独讨论一个离心锤,必须从整个控制系统出发推导出微分方程,然后讨论微分方程解的稳定性,从而分析实际控制系统是否会出现不稳定现象。这样,控制系统稳定性的分析,变成了判别微分方程的特征根的实部的正、负号问题。麦克斯韦尔的这篇著名论文被公认为自动控制理论的开端。

自动控制理论研究的对象是系统。我们在日常生活中就接触到很多系统,如经常提

到的电力系统、机器系统,还有文教系统、卫生系统等。事实上,系统是一个相当广泛的概念,一部机器、一个生物体、一条生产线、一个电力网都是一个系统,一个企业、一个社会组织也是一个系统。有小系统、大系统,也有把一个国家甚至整个世界作为对象的巨系统。

系统的种类如此繁多,又如此地千差万别,但它们有一个共同的特点,就是都具有一定的功能,自身的各部分是互相依赖、互相制约的。例如,一条生产线是为了加工某个产品而设立的,生产线的各个部分存在一定的结构关系和运动关系。我们把系统的这一特征作为“系统”的定义,即由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的具有一定功能的整体称为系统。或者说,为实现规定功能以达到某一给定目标而构成的相互关联的一组元件称为系统。

由人工控制的系统称为手动控制系统。下面通过两个具体例子,分析手动控制的过程,从而可以看出控制系统的基本原理。

例 1.1 热力系统。

图 1.2 所示为一个热力系统。通过调节蒸汽阀门,使流出的热水保持一定的温度。如果由人工控制,就要求控制者观测温度计的指示值,调节阀门开关的开度。调节方法:如果温度计的指示值高于期望值,则关小阀门,降低热水温度;否则,开大阀门,升高热水温度,从而使流出的热水保持设定的温度。

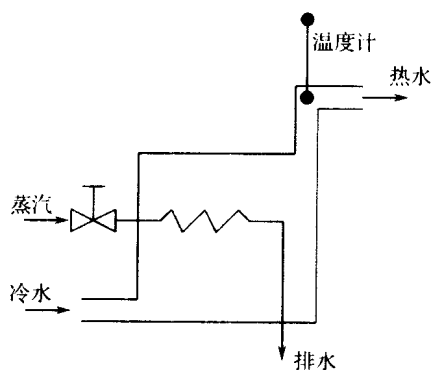


图 1.2 热力系统

例 1.2 直流电动机速度控制系统。

图 1.3 所示为直流电动机速度控制系统。控制目标是使电动机在要求的转速上稳定运行。从图中可见,对应滑动电阻器触点的某一位置,有一给定电压 U_g , 经过放大器放大为 U_d , 即为电动机电枢电压。在没有任何扰动的情况下,对应滑动电阻器触点的某一位置,有一电机转速与之对应。

如果负载恒定,电机及放大器参数也不变化,那么,给定电压 U_g 不变,电机转速也不会变。但这只是一种理想情况,实际上,电机负载是经常变化的,电动机、放大器的参数也会发生漂移,因此,即使保持给定电压 U_g 不变,电机转速也会变化,不能达到控制的目的。如果用人工控制,则可以观测转速表的指示值,调整滑动电阻器的触点位置改变 U_g , 从而使电机转速保持在期望值运行。例如,当负载增大使速度下降时,控制人员则调节触点位置,增大 U_g , 使 U_d 增大,从而使电机转速回升。

上述两个系统都是由人工控制的,可以看出,人在控制过程中起到三个作用:

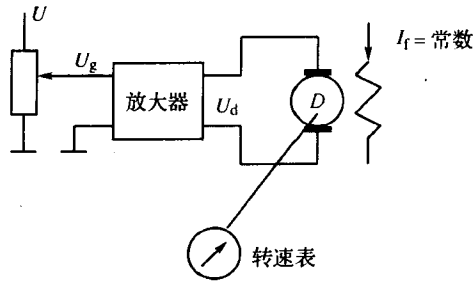


图 1.3 直流电动机速度控制系统

- 1) 观测:用眼睛去观测温度计和转速表的指示值;
- 2) 比较与决策:人脑把观测得到的数据与要求的数据相比较,进行判断,根据给定的控制规律给出控制量;
- 3) 执行:根据控制量用手具体调节,如调节阀门开度、改变触点位置。

在自动控制系统中,则用控制装置代替人来完成上述功能。例如,自动控制热力系统如图 1.4 所示。

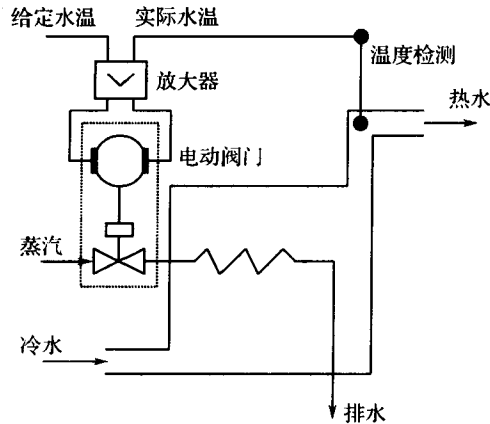


图 1.4 温度控制系统

温度测量元件测出实际水温,并转换成电压信号,与给定水温的电压信号同时加在放大器输入端,即可比较大小,其差值信号经放大器放大后,驱动执行电机,从而调节阀门开度。例如,当实际水温偏低时,给定水温与实际水温的偏差是一正值,驱动执行电机朝开启阀门方向运转,增大蒸汽流量,从而使水温上升。反之,当实际水温偏高时,给定水温与实际水温的偏差是一负值,驱动执行电机朝关闭阀门方向运转,减小蒸汽流量,从而使水温下降。可见,控制装置能够代替人进行控制。

直流电动机自动调速系统如图 1.5 所示。

调速发电机的输出电压 U_f 与电动机转速成正比,当电动机转速比期望值大时, U_f 大, $\Delta U = U_g - U_f$ 变小, U_d 变小,从而使电动机转速降低;反之,当电动机转速比期望值小时, U_f 小, $\Delta U = U_g - U_f$ 变大, U_d 变大,从而使电动机转速增加。因此,无论负载变化使电动机速度增加还是减少,控制器都能使电动机保持期望转速运行。

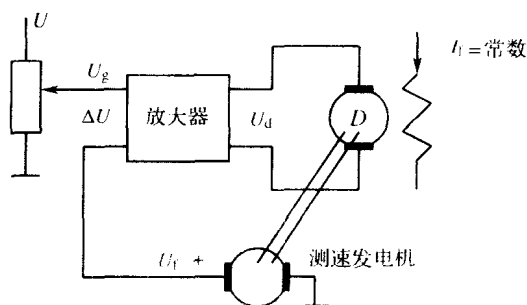


图 1.5 直流电动机自动调速系统

在上述两个自动控制系统中,没有人参与控制,是系统本身进行自动控制来满足要求的。因此,所谓自动控制就是在没有人参与的情况下,系统的控制器自动地按照人预定的要求控制设备或过程,使之具有一定的状态和性能。这种具有自动控制功能的系统称为自动控制系统。

在自动控制系统中,有许多变量或者信号。从系统外部施加到系统上而与该系统的其他信号无关的信号称为输入信号。输入信号包括参考输入和扰动输入。在控制系统中希望被控信号再现的恒定的或随时间变化的输入信号称为参考输入,简称为输入。而干扰系统被控量达到期望值的输入称为扰动输入,简称为扰动。例如,温度控制系统中的温度设定是参考输入,而蒸汽温度的变化、热水流量的变化等都是干扰热水温度恒定的,所以都是扰动输入。在电动机调速系统中,电位器给出的电压是参考输入,而电机负载的变化、电网电压的波动等都是干扰电机速度保持恒定的变量,是扰动输入。

在有些系统中,参考输入是随时间变化的,例如啤酒发酵、家禽孵化过程中,温度设定是时间的函数。而在自动火炮系统中,飞机的飞行轨迹是自动火炮系统的参考输入,是一个事先无法预料的信号。

系统中被控制的量称为被控量。例如,温度控制系统中的温度,电动机速度控制系统中的电动机转速都是被控量。自动控制系统的的作用就是使被控量按照期望的规律变化。控制器的输出称为控制量。例如,温度控制系统中的蒸汽阀门开度,电动机调速系统中的电枢电压都是控制量。控制系统输出的量称为输出量。在控制系统分析与设计中,系统的被控量常作为输出量。实际上,控制系统中需要监控的量都可以作为输出量。例如,系统的误差信号等。

1.2 自动控制系统的类型

自动控制系统根据分类的目的,可以用多种方法进行分类。了解控制系统的分类方法,就能在分析和设计系统之前,对系统有一个正确的认识。

下面介绍控制系统常见的几种类型及其性质。

1.2.1 开环、闭环与复合控制系统

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. 开环控制系统

在例 1.2 所示电动机速度控制系统中,系统仅受控制量的控制,输出对系统的控制没有作用,这是开环控制系统的特点。借助于开环控制系统的这一特点,可以给出开环控制系统的定义:

如果控制系统的被控量对系统没有控制作用,这种控制系统就称为开环控制系统。开环控制系统的控制原理如图 1.6 所示。

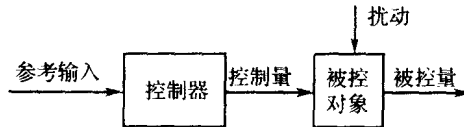


图 1.6 开环控制系统

在开环调速系统中,如果没有任何扰动,电机将按期望的速度运行,但当有扰动时,例如负载的变化、电网电压的变化或者其他参数的变化,这些扰动就要影响到电机的转速,使它偏离期望值。为了能使电机在扰动的影响下也能自动稳定到期望值,必须采用闭环控制系统。

2. 闭环控制系统或反馈控制系统

图 1.5 所示系统就是闭环控制系统。我们已经简单地分析了它的工作原理,可以看出,闭环控制系统有自动修正偏差的能力。现在我们考察闭环控制系统的特点。容易看出,这个系统不仅由给定电压进行控制,而且被控量也参与控制。或者说,是由给定量与被控量的反馈信号的差值进行控制,这就是闭环控制系统的特点,我们借助于这一特点给出闭环控制系统的定义。

定义 如果系统的被控量直接或间接地参与控制,这种系统就称为闭环控制系统或更直接地称为反馈控制系统。

反馈控制系统的控制原理如图 1.7 所示。

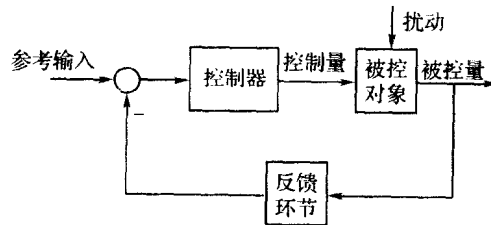


图 1.7 反馈控制系统

反馈控制系统分为正反馈和负反馈两种情况,上面说的是负反馈的情况,这里仍以电动机自动调速系统为例说明正反馈的概念。若将测速发电机的正负极性反接一下,就成为正反馈系统。此时, $\Delta U = U_g + U_f$, 所以,当电动机转速升高, U_f 增加, ΔU 增加,则 U_d 增加,电动机转速会进一步增加,如此循环,电机转速越来越高。反之,若扰动使电机转速下降,则 U_f 减少, U_d 减小,则电机转速会进一步减少。可见正反馈助长了系统扰动的影响,而负反馈则抑制扰动的影响。

反馈是十分重要的概念,在自动控制中得到了广泛应用。反馈控制系统的研究是本

课程的重要内容。

3. 复合控制系统

开环控制的缺点是精度低,优点是控制稳定,不会产生闭环控制系统中可能出现的振荡情况。相反,闭环控制(负反馈)的优点是控制精度高,缺点是容易造成系统的不稳定,这一问题早在瓦特发明飞球调节器时就引起人们的注意。

为了发扬开环控制和闭环控制的优点,克服它们的缺点,人们在系统中同时引进了开环控制和闭环控制,这种系统称为复合控制系统。复合控制系统的原理如图 1.8 所示。

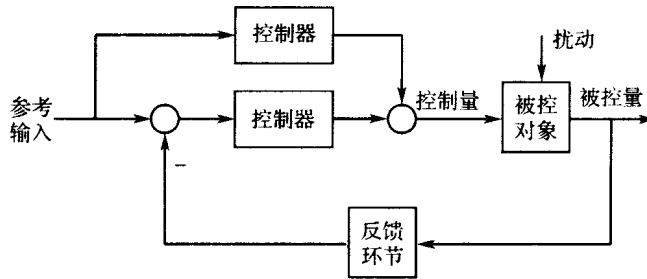


图 1.8 复合控制系统

1.2.2 线性系统与非线性系统

这是根据分析和设计系统的方法来分类的。

定义 如果一个系统具有下列性质:

- 1) 输入 $x_1(t)$ 产生输出 $y_1(t)$;
- 2) 输入 $x_2(t)$ 产生输出 $y_2(t)$;
- 3) 输入 $c_1x_1(t) + c_2x_2(t)$ 产生输出 $c_1y_1(t) + c_2y_2(t)$ 。

其中, $x_1(t), x_2(t)$ 是任意的输入信号; c_1, c_2 是任意的常数。则该系统是线性系统, 否则是非线性系统。

从上面的叙述可以看出,“线性”性和叠加原理是等价的。

叠加原理 在线性系统中,由 n 个输入 $x_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$ 共同产生的输出 $y(t)$, 等于各个输入 $x_i(t)$ 单独产生的输出 $y_i(t)$ 之和, 即

$$y(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \quad (1.1)$$

因此,线性系统满足叠加原理。反之,满足叠加原理的系统是线性系统。

在本课程中,着重讨论线性系统的分析和设计方法,这是因为对线性系统已经进行了长期的研究,形成了一套较为完整的分析和设计方法,并且在实践中已经获得了相当广泛的应用。而非线性控制系统很难用数学方法处理,目前尚无解决各种非线性系统的通用方法。

需要指出的是,因为所有的物理系统在某种程度上都是非线性的,所以,线性系统只是一种理想模型,实际上是不存在的。但很多实际系统的输入输出在一定的范围内基本上是线性的,可以用线性系统(环节)这一理想模型来描述。例如,控制系统中的放大器,在输入信号较小时,输入输出基本上是线性的,而当输入信号较大时,系统进入饱和状态,

或者输出被限幅,此时,输入输出间的关系是非线性的。在大多数情况下,可以限制系统的输入信号,从而使系统部件工作在线性特性的范围内。

1.2.3 连续系统与离散系统

控制系统中存在各种形式的信号。按照时间变量取值的连续性与离散性,可将信号分为连续时间信号与离散时间信号,简称为连续信号与离散信号。

如果在所讨论的时间间隔内,对于任意时间值(除若干不连续点外),都可以给出确定的值,此信号就称为连续时间信号。例如,正弦波、方波信号等都是连续信号。连续信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的,即只取某些规定的值。对于时间和幅值都是连续的信号又称为模拟信号。

离散时间信号在时间上是离散的,只在某些不连续的规定瞬时给出函数值,而在其他时间上没有定义。离散时间信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的。若离散信号的幅值是连续的,则又称为抽样信号。如果离散信号的幅值也被限定为某些离散值,即信号取值时间和幅值都是离散的,则又称为数字信号。例如,数字计算机的输入、输出信号就是数字信号。今后所讨论的离散信号可以是抽样信号,也可以是数字信号,两者在分析方法上并无区别。

离散时间信号是数的序列,一般记为 $f(k)$, $y(k)$ 等。 $f(k)$ 既可直接产生,如产品的年产量或月产量,也可以是对连续信号 $f(t)$ 进行采样得到的。

根据系统中的信号是连续信号还是离散信号,可以将系统分为连续时间系统和离散时间系统。若系统中所有信号都是连续信号,则称为连续时间系统,简称为连续系统。如果系统中有一处或几处的信号是离散信号,则称为离散时间系统,简称为离散系统。

严格说来,输入信号和输出信号都是离散信号的系统称为离散系统。例如,数字计算机本身就是一个离散系统。但实际控制工程中,离散系统一般与连续系统连用,例如,图 1.9 所示的计算机控制系统中,被控对象的输入信号 $r(t)$, 输出信号 $c(t)$ 等均为连续信号,如果采用计算机控制,由于计算机处理的是二进制数据,其输入信号不能是连续信号,所以,误差信号 $e(t)$ 要经过模数转换器(A/D)变成计算机能接受的离散数字信号 $e(kT)$ 。这种将连续信号变为离散信号的过程称为采样。

具有采样过程的离散控制系统通常又称为采样控制系统。若离散信号是以数码(数字)形式传递的,则又特别称为数字控制系统。计算机控制系统就是数字控制系统。采样系统与数字系统的分析和设计方法并无区别,所以,在大部分控制理论著作中,并不对离散系统进行严格的区分,而是统称为离散系统。

在离散系统中存在采样、保持、数字处理等过程,具有一些独特的性能。随着计算机的发展,离散系统得到了越来越广泛的应用。

1.2.4 定常系统与时变系统

如果控制系统的结构、参数在系统运行过程中不随时间变化,则称为定常系统或者时不变系统,否则,称为时变系统。

虽然时变线性系统仍然是线性系统,但它的分析与研究就比较复杂了。

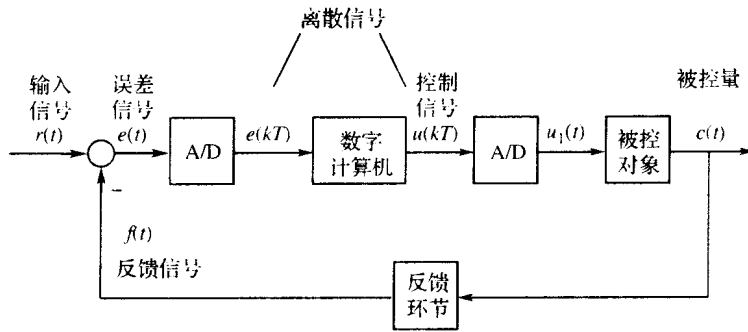
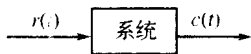
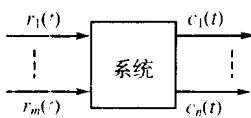


图 1.9 计算机控制系统



(a) 单变量系统



(b) 多变量系统

图 1.10 单变量系统与多变量系统

1.2.5 SISO 系统和 MIMO 系统

按照输入信号和输出信号的数目,可分为单输入单输出(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,一般如图 1.10(a)所示。

多输入多输出系统通常称为多变量系统,这种系统有多个输入和多个输出,一般如图 1.10(b)所示。单变量系统可以作为多变量系统的特例。

1.2.6 集中参数系统与分布参数系统

如果在系统分析与设计中,可以把一个系统看作是有限多个理想的分立部件的总体,这类系统称为集中参数系统,例如:电阻、电容、电感、阻尼、弹簧、质量等。集中参数系统由常微分方程描述。如果系统只能看作是由无穷多个无穷小的分立部件组成,则该系统为分布参数系统,它由偏微分方程描述。例如,导线上的电压分布是时间和地点的函数,因此只能以偏微分方程描述,是一个分布参数系统。

分布参数系统的分析和设计比较复杂,本书不涉及这部分内容。

1.3 对控制系统性能的基本要求

在自动控制理论中,对控制系统的性能的要求,主要是稳定性、暂态性能和稳态性能几个方面。

1.3.1 稳定性

稳定性是控制系统最基本的性质。所谓稳定性是指控制系统偏离平衡状态后,自动恢复到平衡状态的能力。

当系统受到扰动后,其状态偏离了平衡状态,在随后所有时间内,如果系统的输出响应能够最终回到原先的平衡状态,则系统是稳定的;反之,如果系统的输出响应逐渐增加趋于无穷,或者进入振荡状态,则系统是不稳定的。

图 1.11 所示的控制系统在阶跃输入作用下的典型输出响应中,曲线 1 表示系统的响应逐渐趋于稳态值,到达平衡状态,系统是稳定的;曲线 2 表示系统的响应为衰减振荡,逐渐趋于稳态值,到达平衡状态,系统也是稳定的;而曲线 3,4 逐渐增加趋于无穷,所以,系统是不稳定的。可见,系统稳定是保证系统能正常工作的首要条件。

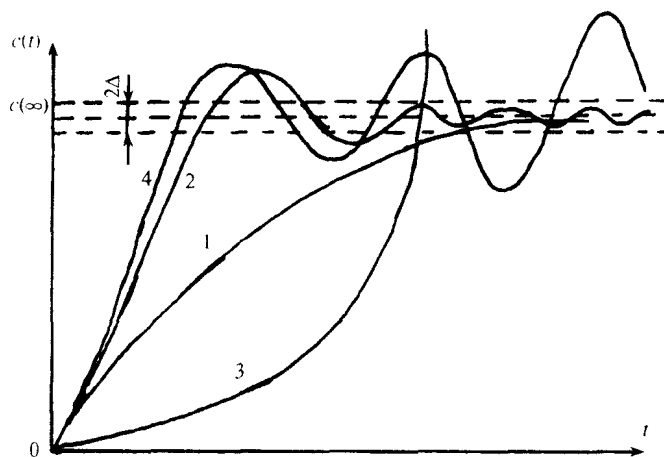


图 1.11 控制系统阶跃响应曲线

判别系统是否稳定的问题,称为绝对稳定性分析。事实上,对于稳定或者不稳定的系统,还需要进一步分析系统稳定或者不稳定的程度,称为相对稳定性分析。

1.3.2 暂态性能

对于稳定的系统,虽然理论上能够到达平衡状态,但还要求能够快速到达,而且,在调节过程中,要求系统输出超过给定的稳态值的最大偏差,即所谓的超调量不要太大,要求调节的时间比较短,这些性能统称为暂态性能。系统的超调量刻画了系统的振荡程度,所以反映了系统的相对稳定性。超调量大的系统容易不稳定,所以相对稳定性差,而超调量小的系统的相对稳定性较好。

1.3.3 稳态性能

当暂态过程结束,系统达到新的稳态时,希望系统的输出就是系统的给定值,但实际上可能存在误差。在控制理论中,系统给定值与系统稳态输出的误差称为稳态误差。系统的稳态误差衡量了系统的稳态性能。由于系统一般工作在稳态,稳态精度直接影响到产品的质量,例如,造纸过程中的纸张厚度控制、啤酒发酵过程中的温度控制等,所以,稳态性能是控制系统最重要的性能指标之一。

系统的暂态性能和稳态性能常常是矛盾的。由于控制系统的功能要求不同,所以对系统暂态性能和稳态性能的要求往往有所侧重。例如,对于恒温控制、调速系统等定值调节系统,主要侧重系统的稳态性能,而对于随动系统则侧重于暂态性能,要求能够快速调节,跟上输入量的变化。

对于实际的控制系统,除了上述要求以外,还有其他方面的要求。这里简单介绍一下