

自动控制原理

葛一楠 唐毅谦 喻晓红 樊云 谢虹 编著

黄家英 主审

清华大学出版社



自动控制原理

葛一楠 唐毅谦 喻晓红 樊云 谢虹 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了自动控制的基础理论与应用。全书共9章,主要内容有:自动控制系统的概念和结构、微分方程、传递函数、结构图模型、连续系统时域分析、复域分析与校正、频域分析方法与校正、离散控制基础、状态空间分析和设计方法、非线性控制理论等。本书以经典控制、现代控制理论为主,兼顾理论联系实际,并给出一些工程应用内容。各章均给出了相应的习题,并给出了部分实验实例。

为配合国家卓越工程师的培养目标,突出控制理论的工程实践指导性,本书在进行理论内容讲解的基础上,引入实际的机床导轨伺服控制系统实验平台,分章逐步地对该系统进行分析与设计,大大强化了本书的理论与工程实践的结合性。本书可作为高等院校“卓越工程师培养计划”的本科教材,也可作为高等院校和职业技术学院的自动化、电气工程自动化、机械工程及其自动化、仪器仪表、电子、通信、机电一体化等本、专科专业的相关课程的教材,还可作为广大从事自动控制系统设计的技术人员的参考手册。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/葛一楠等编著.--北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-42245-7

I. ①自… II. ①葛… III. ①自动控制理论—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 292621 号

责任编辑:杨倩 洪英

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:22.25

字 数:548千字

版 次:2016年1月第1版

印 次:2016年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.80元

产品编号:063240-01

前言

FOREWORD

自动控制原理是自动化学科的重要基础理论,是学习控制理论的入门基石。它是主要研究自动控制系统的概念、原理、方法的一门课程。自动控制原理已成为我国高等学校自动化专业、电气工程自动化专业、电子信息类专业、机械类专业的主干课程之一。自动控制原理包括经典控制理论和现代控制理论两大部分,本书全面系统地介绍了经典理论的时域、复域、频域分析方法,现代理论的状态空间分析法,以及离散控制理论基础和非线性控制理论。

全书共分9章。第1章主要介绍自动控制原理的发展概况,控制系统的基本概念、组成、典型结构及对控制系统的基本要求;第2章主要介绍连续系统数学模型的建立,包括微分方程、传递函数、结构图、信号流图等;第3章主要介绍系统的时域分析;第4章介绍系统的根轨迹分析与设计;第5章介绍系统的频域分析与校正设计;第6章介绍数字离散控制基础;第7章和第8章介绍状态空间分析和设计方法;第9章对非线性系统分析进行了相应的介绍。

为配合国家自动化、电气工程及其自动化专业、机械控制及其自动化专业的“卓越工程师教育”,实现让学生“具有扎实的工程基础知识和本专业的基本理论知识,了解本专业的发展现状和趋势,具有信息获取和职业发展学习能力,具有扎实的理论基础,同时具有综合应用学科理论知识分析和解决工程实际问题的能力,能够进行工程设计,并具有运行和维护能力;具有较强的创新意识和进行产品开发和设计、技术改造与创新的初步能力”的培养目标,本书突出强调自动控制理论课程的基础性及理论的工程实践指导性。

书中在经典控制理论及离散控制理论部分贯穿了一个机床导轨伺服控制系统实例。依据自主研制的机床导轨伺服控制实验台,从分析系统原理到建立模型,并分别使用时域、频域、复数域以及离散域分析方法对本系统进行了细致的分析设计,从而在一个实际的实例中全方位展示了自动控制理论的工程应用,使读者将系统的理论与实际相结合,对自动控制原理课程有更好的理解。

在本书编写过程中,作者结合多年的教学与科研工作经验,立足基础性、系统性、实用性、工程性,叙述简洁、层次分明,做到理论与应用并重,在立足经典控制的基础上对现代控制理论进行了讲解。为便于学生更好地理解书中的基本知识和概念,每章末都附有习题。全书由葛一楠统筹安排,并编写全书各章节机床导轨相关知识的全部内容;喻晓红统稿并编写第1、2、6~9章及附录;樊云编写第3~5章;谢虹完成与本书相对应的机床导轨伺服控制系统实验平台的制作以及参数的确定与部分相关内容的编写;唐毅谦教授对全书内容

进行审定并编写部分内容。本书在四川大学黄家英教授的指导下编写完成,黄教授从本书的结构安排到具体内容编写上都提出了很多宝贵的意见,并对全部书稿进行了总审,在此表示深深的敬意及谢意!

本书参考、吸取了大量国内出版的教材、论文的长处,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,书中难免存在缺漏或不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 10 月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 历史的回顾	1
1.2 自动控制系统的基本概念	2
1.3 自动控制系统的基本类型	3
1.3.1 开环、闭环与复合控制系统	3
1.3.2 连续系统与离散系统	4
1.3.3 线性系统与非线性系统	5
1.3.4 定常控制系统与时变控制系统	5
1.3.5 恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统	5
1.4 控制系统示例	6
1.4.1 机床导轨的伺服控制系统	6
1.4.2 机床导轨的伺服控制系统的基本原理	6
1.5 对控制系统性能的基本要求	7
1.6 本书内容的安排	8
本章小结	9
习题	9
第 2 章 控制系统的数学模型	11
2.1 系统的数学模型的概念与建立方法	11
2.2 控制系统的时域数学模型	12
2.2.1 系统的微分方程描述	12
2.2.2 机床导轨的伺服控制系统的运动描述	15
2.2.3 非线性微分方程的线性化	16
2.3 传递函数	18
2.3.1 传递函数的定义	18
2.3.2 传递函数的表达形式	19
2.3.3 典型环节的传递函数	20
2.3.4 机床导轨的伺服控制系统的传递函数	24

2.4	结构图	25
2.4.1	结构图的建立	25
2.4.2	机床导轨的伺服控制系统结构图	26
2.4.3	结构图的等效变换	27
2.5	信号流图	31
2.5.1	信号流图的定义	31
2.5.2	信号流图的常用术语	32
2.5.3	系统的信号流图及绘制方法	32
2.5.4	信号流图的变换法则与简化	33
2.5.5	梅森公式	34
2.6	反馈控制系统的传递函数	36
2.7	MATLAB 软件介绍及 Simulink 系统建模方法	38
2.7.1	MATLAB 软件介绍	38
2.7.2	控制系统数学模型的种类	38
2.8	用 MATLAB 求机床导轨的伺服控制系统的传递函数	41
	本章小结	43
	习题	43

第 3 章	时域法	47
3.1	引言	47
3.2	控制系统的时域响应	48
3.3	时域性能指标	48
3.3.1	典型输入信号	48
3.3.2	动态性能指标	49
3.3.3	稳态性能指标	50
3.4	时域分析法	51
3.4.1	稳定性分析	51
3.4.2	动态特性分析	56
3.4.3	稳态特性分析	66
3.5	线性系统的基本控制规律	75
3.5.1	控制器的基本控制律——PID 控制	75
3.5.2	控制器控制律的实现	79
3.6	时域法的应用	82
3.6.1	机床导轨伺服控制系统的理论分析	82
3.6.2	机床导轨伺服控制系统的 Simulink 分析	85
3.6.3	PID 调节器的设计实例	87
	本章小结	90
	习题	91

第 4 章 根轨迹法	95
4.1 引言	95
4.2 根轨迹法的基本概念	95
4.2.1 根轨迹方程	97
4.2.2 根轨迹方程的几何意义	98
4.3 绘制根轨迹的基本规则	98
4.4 广义根轨迹	104
4.4.1 参数根轨迹	104
4.4.2 零度根轨迹	105
4.5 根轨迹的分析法	107
4.5.1 由根轨迹确定系统的闭环极点	107
4.5.2 用主导极点来估算系统的性能	109
4.5.3 利用 MATLAB 软件绘制根轨迹法	110
4.6 根轨迹的综合法	111
4.6.1 根轨迹形状的改变	111
4.6.2 串联校正	113
4.7 根轨迹法的应用	122
4.7.1 利用 MATLAB 绘制实际系统的根轨迹	122
4.7.2 根轨迹综合法的应用	123
本章小结	125
习题	126
第 5 章 频域法	129
5.1 引言	129
5.2 频率特性	130
5.2.1 频率特性的基本概念	130
5.2.2 频率特性的求取	131
5.2.3 频率特性的图示方法	132
5.3 系统的开环频率特性	133
5.3.1 典型环节的频率特性	134
5.3.2 开环频率特性的绘制	144
5.3.3 由伯德图确定传递函数	151
5.3.4 频率特性的实验确定法	151
5.4 系统的闭环频率特性	152
5.4.1 单位反馈系统的闭环频率特性	152
5.4.2 等 M 圆图与等 N 圆图	153
5.4.3 尼科尔斯图	156
5.4.4 闭环频域指标	157
5.5 频率响应分析法	158

5.5.1	稳定性分析	159
5.5.2	稳态特性和动态特性分析	169
5.5.3	应用 MATLAB 进行频域分析	173
5.6	频率响应综合法	178
5.6.1	串联校正	178
5.6.2	反馈校正	193
5.7	频域法的应用	194
5.7.1	频域法的实例分析	194
5.7.2	串联校正分析法的应用	195
	本章小结	198
	习题	199

第 6 章	离散控制系统	203
6.1	采样过程	203
6.1.1	信号的采样	203
6.1.2	信号的恢复与保持	207
6.2	Z 变换	208
6.2.1	Z 变换与 Z 反变换	208
6.2.2	线性定常离散系统的差分方程及其求解	215
6.2.3	离散控制系统的脉冲传递函数	217
6.2.4	开环和闭环脉冲传递函数	217
6.2.5	应用 MATLAB 建立离散系统的数学模型	221
6.3	离散控制系统的特性分析	222
6.3.1	S 平面到 Z 平面的映射	222
6.3.2	离散控制系统稳定的充要条件	223
6.3.3	线性离散系统的稳定判据	224
6.3.4	离散控制系统的过渡过程分析	226
6.3.5	离散控制系统的稳态误差分析	229
6.3.6	利用 MATLAB 进行离散系统分析	232
6.4	离散控制系统的根轨迹设计法	233
6.5	离散控制系统的频域设计法	237
6.6	等效模拟控制器综合法与数字 PID 控制器	239
6.6.1	等效模拟控制器综合法的基本思路	239
6.6.2	控制器传递函数离散化的方法	239
6.6.3	数字 PID 算法	240
6.6.4	机床导轨伺服系统的等效模拟控制器综合	240
	本章小结	242
	习题	243

第 7 章 线性系统的状态空间分析方法	244
7.1 系统的状态空间描述	244
7.1.1 状态与状态空间	244
7.1.2 状态空间表达式	245
7.2 状态空间表达式与传递函数之间的关系	255
7.3 状态方程的线性变换	256
7.3.1 线性变换	256
7.3.2 系统矩阵的对角化	257
7.4 线性定常系统状态方程的解	264
7.4.1 线性定常连续系统状态方程的求解	264
7.4.2 非齐次状态方程的解	270
本章小结	272
习题	272
第 8 章 线性系统的状态空间综合法	274
8.1 系统的能控性与能观测性	274
8.1.1 线性定常连续系统的能控性	274
8.1.2 线性定常连续系统的能观测性	278
8.1.3 对偶性原理	280
8.1.4 能控规范型与能观规范型	281
8.2 线性系统的结构分解	284
8.2.1 系统按能控性分解	284
8.2.2 系统按能观测性分解	286
8.2.3 线性定常系统结构的规范分解	288
8.2.4 传递函数中的零极对消	289
8.3 稳定性与李雅普诺夫稳定判据	291
8.3.1 与稳定性相关的基本概念	291
8.3.2 李雅普诺夫稳定性的定义	292
8.3.3 李雅普诺夫第一法	293
8.3.4 李雅普诺夫第二法	295
8.4 线性定常系统的极点配置	300
8.4.1 反馈控制系统的基本结构及设计	300
8.4.2 极点配置	302
8.5 状态观测器及其实现	305
8.5.1 全维观测器的设计思想	305
8.5.2 反馈矩阵的确定	306
8.6 带观测器的状态反馈系统	308
8.6.1 带观测器的状态反馈系统结构	308
8.6.2 分离性原理	308

本章小结	310
习题	311
第 9 章 非线性系统的分析	313
9.1 控制系统的典型非线性	313
9.1.1 几种常见的控制系统的典型非线性特性	313
9.1.2 典型非线性特性的特点及综合方法	316
9.2 相平面法	316
9.2.1 相平面的基本概念	317
9.2.2 相轨迹的绘制	319
9.2.3 用相平面图求系统运动的时间响应	324
9.2.4 非线性控制系统的相平面分析	325
9.2.5 基于 MATLAB 的相轨迹图绘制	326
9.3 描述函数法	327
9.3.1 描述函数法的基本概念及基本思想	328
9.3.2 描述函数	328
9.3.3 典型非线性特性的描述函数	329
9.3.4 组合非线性特性的描述函数	334
9.3.5 用描述函数法分析非线性系统	335
本章小结	338
习题	338
附录 A 拉普拉斯变换与反变换	341
附录 B 机床导轨的伺服控制系统实验平台	345
参考文献	346

绪 论



当前自动控制技术几乎已经渗透到社会生产、生活的各个方面。除了在宇宙飞船系统、导弹制导系统、机器人系统等先进技术领域起到重要的作用以外,也在当代工业控制技术,如制造工业、航天工业、过程控制工业等各方面都起到极其重要的作用,是推动科学技术和社会发展的的重要因素。

本章从控制理论的发展历程出发,以工程实例为引导,介绍自动控制系统的基本概念、基本方式、结构组成、系统分类以及对控制系统的基本要求,使读者对本课程有一个初步的认识。

1.1 历史的回顾

1788年,瓦特(J. Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心式飞锤速度调节器引发了自动控制理论大研究。麦克斯韦(J. C. Maxwell)、劳斯(Routh)、赫尔维茨(Hurwitz)、李雅普诺夫(Lyapunov)在19世纪后期20世纪初期先后提出了系统稳定性判据。20世纪40年代,频率响应法为工程技术人员提供了一种切实可行的线性闭环系统的分析设计方法,1948年伊凡思(Evans)提出并完善了根轨迹方法。至此,基于传递函数在复数域(根轨迹法)或频率域(频域法)进行讨论的方法逐渐趋于成熟,从而形成了经典控制理论。

20世纪60年代以来,随着空间技术的发展,对自动控制系统的要求越来越高,控制系统也变得越来越复杂,经典控制理论的局限性也就突显出来了,例如,它只适用于线性定常系统,仅适用于单输入单输出系统,对系统性能的要求大多是令人满意的,但它并不是某种意义上的最佳系统。同时,这一时期计算机的迅速发展为控制理论的新方法提供了有力的工具。因此,利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论应运而生,从而使控制理论的应用可扩展至更为复杂的非线性系统、多输入多输出系统,满足了对复杂系统提出的更高精度、更低生产成本的要求。

随着微型计算机技术的快速发展及其与控制理论的相互渗透,控制理论在后期的发展

及研究热点主要集中在非线性控制、预测控制、内模控制、自适应控制、计算机网络为背景的离散控制以及各种智能控制方法与鲁棒控制理念。

现代控制理论的应用甚至已扩展到非工程系统,如生物系统、生工系统、经济系统、社会经济系统等,为社会的发展与进步提供了不可或缺的理论支持。

1.2 自动控制系统的基本概念

下面以瓦特发明的蒸汽机飞锤速度调节器为例,来展示一下自动控制系统工作的基本原理以及一些基本术语。自动控制系统的工作原理如图 1.1 所示,它是一个与蒸汽机轴相连的机械装置,当蒸汽机的负载减轻或蒸汽温度升高等原因导致蒸汽机转速升高时,飞锤的转速也升高,离心力增加,飞球升高,带动套筒上升,汽阀联结器(此处为杠杆)关小蒸汽阀门,从而降低蒸汽机的速度直至达到期望的速度为止。

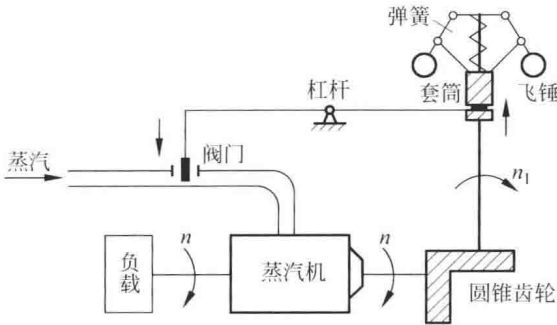


图 1.1 蒸汽机调速原理图

这是一个速度控制系统,自动控制理论研究的对象正是“系统”。系统是个很广的范畴,一部机器、一条生产线、一个生物体、一个社会、一个经济体等都可以称为系统。我们把系统定义为:为完成某种任务或实现某种功能,由若干元部件有机组合的一个整体。

所谓自动控制系统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者生产过程,使之具有一定的状态和性能的系统。

图 1.2 为该系统的职能方块图,简称方块图或方框图,它可以清楚地表示各个组成部分的作用、相互连接关系以及信息传递的路线和流向。蒸汽机是被控对象,实际的输出转速为被控量,它是表示蒸汽机实际转速的信息,称为系统的输出信号,简称输出。期望转速是一

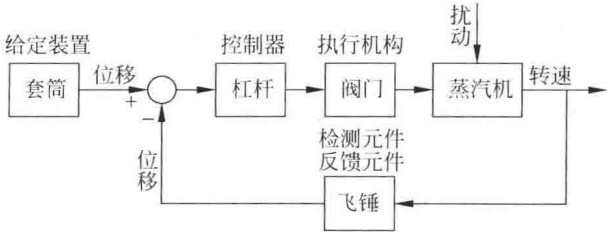


图 1.2 蒸汽机系统方框图

种控制信息,为系统的输入量。一般将从系统外部施加到系统上的信号称为输入信号。施加在系统上的输入信号通常有两类:一类是在控制系统中希望被控信号再现的恒定或随时间变化的输入信号,称为参考输入或期望输入信号;另一类是干扰系统被控量达到期望值的输入信号,称为扰动输入信号。在这里套筒装置将期望转速转化为期望的位移信息以方便与反馈回来的位移信息进行比较,一般来说,将这类装置称为给定装置,它的功能是给出与期望的被控量相对应的系统的参考输入信号(也称给定值信号)。实际转速信息由飞锤测出并以位移的方式返回到输入端再输入到系统中去,这种由输出端返回到输入端的传递方式称为信息的反馈。反馈到输入端的信号称为反馈信号,简称为反馈。飞锤在这里被称为测量元件或反馈装置,其功能是检测被控制的物理量并用作反馈信号或供系统显示用。反馈信号在输入端与输入信号相比较,比较的结果称为偏差信号,偏差等于参考输入信号减去反馈信号。杠杆机构根据偏差信号,调节控制蒸汽机蒸汽的阀门开度,为本系统的执行机构。执行机构的功能是执行控制作用并推动受控对象,使被控量能按照预定的规律变化。

1.3 自动控制系统的基本类型

控制系统种类繁多,根据分类的目的不同,可以使用不同方法进行分类,下面就介绍几种常见的控制系统的类型及性质。

1.3.1 开环、闭环与复合控制系统

根据控制系统反馈的特点,可把控制系统分为开环、闭环及复合控制系统。其中,开环控制、闭环控制为最基本的两种控制方式。

1. 开环控制系统

系统的输出量对控制作用没有影响的系统,称为开环控制系统。开环控制系统不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较,例如常见的洗衣机控制就是开环控制的一个实例。开环控制系统方框图如图 1.3 所示。

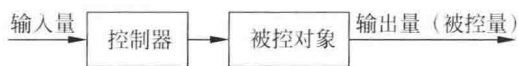


图 1.3 开环控制系统

由于不具有利用输出来影响控制的特点,因此,当实际输出由于扰动而偏离期望输出时,系统本身不具有自行纠偏的能力。但开环控制系统具有结构简单的特点,且不存在复杂的系统稳定性问题,常用于预知期望输出且扰动很小或扰动虽大但预知其变化规律从而能够加以补偿的场合。开环控制精度取决于系统的校准精度和各组成元件性能参数及外界条件的稳定程度,还取决于对扰动采取补偿措施的效果。

2. 闭环控制系统

如果系统的被控量直接或间接地参与控制,这种系统称为闭环控制系统,也称为反馈控

制系统。例如,前面所述的蒸汽机飞锤速度调节系统以及机床导轨伺服控制系统都是闭环控制系统。闭环控制系统方框图如图 1.4 所示。

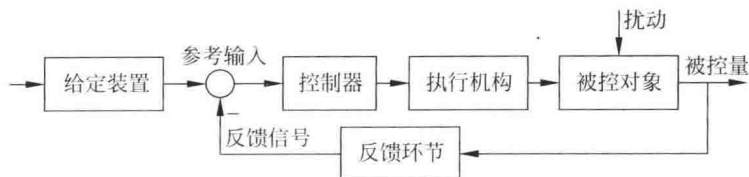


图 1.4 闭环控制系统

闭环控制系统中,作为输入信号与反馈信号(反馈信号可以是输出信号本身也可以是输出信号的导数或其积分等)之差的偏差信号被传送到控制器,以便减小误差,并且使系统的输出达到期望值。

闭环控制系统的特点就是可以利用输出来影响控制作用,所以是闭式控制方式。因此,当实际输出由于扰动而偏离期望输出时,闭环控制系统本身就具有自行纠偏的能力,它具有抗扰动能力强的优点,所以可采用精度不高、价格比较低的元件来构成精确的控制系统。但闭环系统的组成一般比较复杂,且当参数调配不当时,可能引发系统出现持续振荡甚至发散的不稳定现象。闭环控制系统常用于实际输出不难测得而扰动较大且不能预知其变化规律或不可测的场合,尤其是期望输出不能预知时只能采用闭环控制系统。

3. 复合控制系统

为了发挥开环控制与闭环控制的优点,将两种控制方式结合起来,从而构成的一种新的控制方式叫做复合控制。具体来讲,可将复合控制系统分为按输入信号补偿的复合控制系统和按扰动信号补偿的复合控制系统。带有负反馈的闭环起主要的调节作用,开环控制部分可以按输入量进行控制或按扰动量进行控制(当扰动量可测量时)。图 1.5 所示为一类按输入信号补偿的复合控制系统。

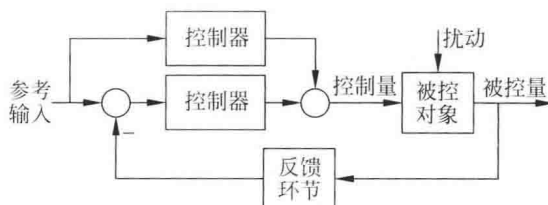


图 1.5 复合控制系统

复合控制最大的特点是控制精度高,但结构较复杂。

1.3.2 连续系统与离散系统

控制系统中存在各种形式的信号,根据通过系统的信号的时间连续性,可将自动控制系统分为连续控制系统与离散控制系统。

1. 连续控制系统

如果通过系统各处的信号均为连续信号,则这种系统称为连续控制系统。所谓连续信号,是指信号随着时间作连续变化,即对于任意的时间点,都可以给出确定的值的信号。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。例如,直流电机调速系统就是连续控制系统。

2. 离散控制系统

如果通过系统的信号只要有一处是离散信号,这种系统就称为离散控制系统或数字控制系统。所谓离散信号,是指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,则又可称为采样信号。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,计算机控制系统的输入、输出信号就是数字信号,因此计算机控制系统即是一种离散控制系统(数字控制系统)。

1.3.3 线性系统与非线性系统

根据系统的特性可将自动控制系统分为线性控制系统(简称线性系统)与非线性控制系统(简称非线性系统)。

按数学的观点,凡是由线性函数(包括线性微分方程、线性差分方程和线性代数方程)描述的系统称为线性系统,而由非线性函数描述的系统则称为非线性系统。

按物理的观点,凡是同时满足叠加性与均匀性(也称齐次性)的系统称为线性系统。所谓叠加性,是指当有几个输入信号同时作用于系统时,系统的总的输出等于每个输入信号单独作用时所产生的输出之和。所谓均匀性,是指当系统的输入变化多少倍时,系统的输出也相应地变化多少倍。叠加性和均匀性合起来也称叠加原理,所以也可以说,凡是满足叠加原理的系统为线性系统。当系统不满足叠加原理时,我们称此系统为非线性系统。

应该说,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。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,可以用线性系统这一理想模型来描述。同时,线性系统理论经过长期的研究,目前已经形成了一套比较完善的分析和设计方法,并且在实践中已经获得了相当广泛的应用,所以对于非本质的非线性系统,常常是使用线性化的方法将其近似为线性系统来进行讨论。而对于本质非线性的系统,由于难以用纯粹的数学方法处理,目前尚无解决各类非线性系统的通用方法。

1.3.4 定常控制系统与时变控制系统

根据系统是否含有随时间变化的参数,自动控制系统可分为定常系统与时变系统两大类。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,则称为定常系统或时不变系统;否则,称为时变系统。在数学上,如果描述系统运动的微分或差分方程的参数均为常数而非时间的函数,则该系统称为定常系统或时不变系统;否则,称为时变系统。

1.3.5 恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统

根据参考输入信号的特性,可把自动控制系统分为恒值(定值)控制系统、随动(伺服)控制系统和程序控制系统。

恒值控制是指输入信号为某个恒定不变的常数。对这类系统的要求是系统的被控量应尽可能地保持在期望值附近；系统面临的主要问题是存在使被控量偏离期望值的扰动；控制的任务是增强系统的抗扰动能力，使扰动作用于系统时，被控量能尽快地恢复到期望值上。

随动控制是指输入信号是随时间任意变化的函数。对这类系统的要求是系统的输出信号紧紧跟随输入信号的变化；系统面临的主要矛盾是被控对象和执行机构因惯性等因素的影响，使得系统的输出信号不能紧紧跟随输入信号的变化；控制的任务是提高系统的跟踪能力，使系统的输出信号能跟随难于预知的输入信号的变化。如果被控量是机械位置或是其导数时，这类系统也称为伺服控制系统。

程序控制是指输入信号按照预先知道的函数变化，例如热处理炉温度控制系统中的升温、保温、降温等过程都是按照预先设定的规律进行的，又如机械加工的数控机床也是典型的程序控制系统。

1.4 控制系统示例

1.4.1 机床导轨的伺服控制系统

伺服控制系统是一种带反馈的动态控制系统，其中，输出量一般是机械量，例如机械位移、速度或加速度。反馈装置将输出量变换成与输入量相同的信号，得到给定量与输出量的差，即偏差信号。控制系统按照偏差的性质（大小及符号）进行控制，控制目的是减少偏差或最终消除偏差，使得系统的输出量能准确地表现输入量的变化。

由于系统的输出量是机械量，故其输出常常以机械位移和旋转运动的形式表现出来，故称之为伺服系统(servo system)或伺服机构(servo mechanism)。

伺服系统已经广泛应用于军事和民用工业。例如，在机械制造业中的各类数控机床，冶金工业轧钢机的压下装置，造纸工业中纸张卷筒之间的同步协调运转，仪器仪表工业中的电位差计、XY记录仪，交通运输业中大型海轮的自动舵以及飞机上的自动驾驶仪都广泛装备着各种各样的伺服系统。伺服系统在军事上的应用更为普遍，例如跟踪雷达天线的控制、坦克炮塔在行驶中的控制、火炮群的引导、导弹的制导等。

1.4.2 机床导轨的伺服控制系统的基本原理

机床导轨作为机床工件平移或刀具进给中的重要环节，对精度、快速性和低速运动的平稳性都有较高的要求。图 1.6 及图 1.7 简单描述了机床导轨的机械机构，其中轴 I 由伺服电动机硬轴连接减速器组成， $M(t)$ 为电动机的驱动力矩（单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ ）， $\theta(t)$ 为电动机轴的转动的角度（单位为 rad ）， z_1 和 z_2 构成机械减速器，轴 II 硬轴带动丝杠将旋转运动转变成直线运动。

机床导轨伺服控制系统原理图如图 1.7 所示。

图 1.7 中，电位器 BP_1 、 BP_2 接到同一电源 E 两端，其滑臂分别与输入导轨、输出导轨相连，以组成位置的给定和位置的反馈。当人为地通过输入导轨带动电位器 BP_1 的滑臂移动