

刘 军
朱 杰 编著
刘丙午

自动 控制 技术

ZIDONG
KONGZHI
JISHU

兵器工业出版社

北京市教委科学研究计划项目:SM200610037001
北京市属市管高等学校人才强教计划项目(学术创新团队)

自动控制技术

刘军 朱杰 刘丙午 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书使用大量的图示代替繁杂的数学推导,力求用简洁的语言系统地阐述自动控制技术的理论基础、实现技术和应用前景。在内容组织上,侧重知识体系的系统完整和知识结构的合理组织,以学习和掌握基本概念、基础理论和知识框架为主,以了解实际应用为辅。书中内容遵循由浅入深、由理论到实现技术、由整体到细节、由硬件到软件、由小系统到大系统、由个性到共性的编排顺序,以方便读者阅读和学习。

本书可作为高等院校计算机科学与技术、物流管理、物流工程以及信息管理与信息工程等非自动化专业本科生的教材,也可作为这些领域的工程技术人员的参考书或培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制技术/刘军,朱杰,刘丙午编著. —北京:兵器工业出版社, 2007. 5

ISBN 978 - 7 - 80172 - 844 - 9

I. 自… II. ①刘…②朱…③刘… III. 自动控制—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 034379 号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596, 68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟10号

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市登峰印刷厂

版 次:2007年5月第1版第1次印刷

责任编辑:常小虹

封面设计:李 晖

责任校对:全 静

责任印制:赵春云

开 本:787×1092 1/16

印 张:9.75

字 数:240千字

定 价:20.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

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。自动控制技术是以自动控制理论、计算机控制技术、现代检测技术和网络通信技术为基础的综合应用技术。随着电子计算机技术的发展和应用，自动控制技术在工业过程控制、航空航天、机器人控制、导弹制导以及核动力等高新技术领域得到了广泛作用。不仅如此，自动控制技术的应用范围还扩展到了生物、医学、环境、物流、经济管理和其他许多社会生活领域中。

自动控制技术呈现出技术综合、信息综合、多学科知识交叉的特点。作为高等学校非自动化专业本科生的入门教材，或作为相关工程领域技术人员的参考书，本书使用大量的图示代替繁杂的数学推导，用简洁的语言系统地阐述了自动控制技术的理论基础、实现技术和发展前景。

本书在内容安排上体现了基础理论与实用技术并重的特点。考虑到非自动化专业读者知识结构的特点，书中内容阐述侧重知识体系系统完整、知识结构合理，以学习和掌握基本概念、基础理论和知识框架为主，尽量避开复杂数学公式推导和对电工电子基础知识的要求。读懂书中大部分内容仅需要微积分和计算机文化基础课程的知识。

全书共分8章，第1章绪论，介绍自动控制的概念，阐述控制系统基本控制方式、分类和性能指标以及自动控制技术的发展概况；第2章控制技术理论基础，简要介绍控制系统的数学模型及其相应表示方法，对实际工程中应用广泛的几类反馈控制系统包括单回路控制系统、串级控制系统和前馈控制系统的结构与工作原理进行了较详细的叙述，并对程序控制的概念、常用术语和分类进行了介绍；第3章控制系统元件，对组成一个完整控制系统的三个组成部分包括控制器、传感器和执行器进行介绍，控制器主要介绍PID、PI、P控制器及其数字表达形式，传感器重点介绍传感器的组成、分类和一般特性，并列举了十几种常用传感器及其用途，执行器重点介绍常用低压电器中的继电器、执行电动机和阀；第4章计算机控制技术，是全书的重点内容，本章较全面地介绍计算机控制的基本概念、组成、特点、分类与应用，并对工业控制计算机、控制网络、工业组态软件及其计算机控制系统的抗干扰与可靠性技术进行了介绍；第5章可编程控制器，介绍了PLC的概念、特点、组成、工作原理、性能指标以及发展趋势，还给出了国内外主要PLC生产厂家和产品的介绍；第6章集散控制系统，介绍了DCS的硬件构成、软件系统和用途、网络结构以及DCS的发展和應用；第7章控制系统设计与仿真，简要介绍控制系统设计的一般原则和步骤、控制系统仿真的概念、控制系统计算机辅助设计的概念以及Matlab的作用和特点；第8章复杂系统与先进控制技术，简要介绍传统控制技术的局限性，重点介绍复杂系统及其控制、大系统及其控制、先进控制技术的基本概念和方法。

在本书的编纂过程中参考了大量相关文献和著作，在此向这些文献的作者致以诚挚的谢意。并欢迎读者对书中的错误和不足提出宝贵意见。

编者

2007年3月于北京

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 自动控制的概念	1
1.1.1 自动控制系统	1
1.1.2 反馈控制系统	1
1.2 控制系统基本控制方式	3
1.2.1 反馈控制方式	3
1.2.2 开环控制方式	3
1.2.3 复合控制方式	4
1.3 控制系统的分类	4
1.3.1 线性连续控制系统	4
1.3.2 线性定常离散控制系统	5
1.3.3 非线性控制系统	5
1.4 控制系统的性能指标	6
1.4.1 对控制的基本要求	6
1.4.2 动态过程和稳态过程	7
1.4.3 动态性能和稳态性能	7
1.5 自动控制技术的发展概况	8
1.5.1 控制理论与技术的发展	9
1.5.2 计算机控制技术的发展	10
思考题与习题	13
第2章 控制技术理论基础	14
2.1 控制系统的数学模型	14
2.1.1 微分方程	14
2.1.2 传递函数	15
2.1.3 方框图及其简化	18
2.1.4 离散控制系统与Z变换	21
2.2 反馈控制系统的典型结构	22
2.2.1 单回路控制系统	22
2.2.2 串级控制系统	23
2.2.3 前馈控制系统	24

2.3 程序控制	25
2.3.1 程序控制技术的历史	25
2.3.2 程序控制的基本概念	26
2.3.3 程序控制技术中的常用术语	27
2.3.4 程序控制系统的分类	28
思考题与习题	30
第3章 控制系统元件	31
3.1 控制器	31
3.1.1 控制规律	31
3.1.2 控制器的基本控制规律	32
3.1.3 PID 控制器	33
3.1.4 PID 控制器的数字形式	34
3.1.5 P 与 PI 控制器	34
3.2 参数测量与传感器	35
3.2.1 参数测量	35
3.2.2 传感器的组成	35
3.2.3 传感器的分类	36
3.2.4 传感器的一般特性	38
3.2.5 常用传感器举例	38
3.3 执行元件	39
3.3.1 常用低压电器	39
3.3.2 执行电动机	44
3.3.3 阀	45
思考题与习题	47
第4章 计算机控制技术	48
4.1 计算机控制系统的概念	48
4.1.1 计算机控制系统的概念	48
4.1.2 计算机控制系统的工作方式与实时性	49
4.1.3 计算机控制系统的信号类型	49
4.2 计算机控制系统的组成	50
4.2.1 计算机控制系统的硬件组成	50
4.2.2 计算机控制系统的软件组成	51
4.2.3 通信设备与通信网络	52
4.3 计算机控制系统的分类	52
4.3.1 计算机巡回检测和操作指导系统	52
4.3.2 计算机直接数字控制系统	53
4.3.3 计算机监督控制系统	53

4.3.4	集散控制系统	54
4.3.5	现场总线控制系统	55
4.3.6	PLC + 上位机系统	55
4.3.7	计算机集成制造系统(CIMS)	56
4.4	工业控制计算机	58
4.4.1	IPC 工控机的组成结构	58
4.4.2	IPC 工控机的特点	60
4.4.3	IPC 工控机的主要类型	61
4.5	控制网络	62
4.5.1	控制网络与信息网络的异同	62
4.5.2	控制网络的体系结构	63
4.5.3	控制网络的应用架构	64
4.5.4	局部控制网络	65
4.5.5	现场总线技术	66
4.5.6	基于 Internet 的远程控制	69
4.6	工业控制组态软件	69
4.6.1	组态软件的概念	69
4.6.2	组态软件的特点	70
4.6.3	组态软件的组成	70
4.6.4	组态软件的一般功能	71
4.7	计算机控制系统的抗干扰与可靠性技术	73
4.7.1	干扰源	73
4.7.2	抗空间干扰的措施	74
4.7.3	过程通道的抗干扰措施	75
4.7.4	系统供电与接地的抗干扰措施	76
4.7.5	采用软件方法的抗干扰措施	78
4.7.6	提高计算机控制系统的可靠性措施	78
	思考题与习题	82
第 5 章	可编程控制器	83
5.1	PLC 概述	83
5.1.1	PLC 的定义	83
5.1.2	PLC 的产生	83
5.1.3	PLC 的特点	84
5.1.4	PLC 的典型特性	85
5.1.5	PLC 的分类	85
5.2	PLC 的基本组成	85
5.2.1	硬件组成	85
5.2.2	软件组成	89

5.3 PLC 的工作原理	90
5.3.1 PLC 控制系统的基本结构	90
5.3.2 PLC 的等效电路	91
5.3.3 建立 I/O 映像区	92
5.3.4 循环扫描的工作方式	92
5.3.5 PLC 扫描工作过程	93
5.3.6 PLC 执行程序的过程及特点	93
5.4 PLC 的性能指标与发展趋势	94
5.4.1 PLC 的性能指标	95
5.4.2 PLC 的发展趋势	95
5.5 国内外典型 PLC 产品	97
5.5.1 美国 PLC 产品	97
5.5.2 欧洲 PLC 产品	97
5.5.3 日本 PLC 产品	98
5.5.4 我国 PLC 产品	99
思考题与习题	100
第 6 章 集散控制系统	101
6.1 DCS 概述	101
6.1.1 DCS 的基本概念	101
6.1.2 DCS 的特点	102
6.2 DCS 的硬件构成	104
6.2.1 DCS 的基本构成	104
6.2.2 操作员站	105
6.2.3 现场控制站	105
6.2.4 工程师站	105
6.2.5 服务器及其他功能站	106
6.2.6 系统网络	106
6.2.7 现场总线网络	107
6.2.8 高层管理网络	108
6.3 DCS 的软件系统	109
6.3.1 DCS 软件的作用	109
6.3.2 现场控制站软件	110
6.3.3 操作员站软件	110
6.3.4 工程师站软件	111
6.3.5 各种专用的功能节点及其相应的软件	112
6.3.6 DCS 软件体系结构的演变和发展	112
6.3.7 OPC 技术	114
6.4 DCS 的网络结构	115

6.4.1	网络拓扑结构	115
6.4.2	DCS 的网络软件	116
6.5	DCS 的发展概况	117
6.5.1	第一代 DCS(初创期)	118
6.5.2	第二代 DCS(成熟期)	118
6.5.3	第三代 DCS(扩展期)	119
6.5.4	新一代 DCS 的出现	120
	思考题与习题	122
第 7 章	控制系统设计与仿真	123
7.1	控制系统设计的一般原则和步骤	123
7.1.1	控制系统设计的原则	123
7.1.2	控制系统设计的步骤	124
7.2	控制系统仿真	125
7.2.1	仿真的概念	125
7.2.2	控制系统仿真的分类	126
7.2.3	控制系统仿真的过程	126
7.2.4	控制系统仿真的作用	127
7.3	控制系统的计算机辅助设计	128
7.4	数字仿真与计算机辅助设计	128
7.5	Matlab 概述	129
7.5.1	Matlab 的产生与发展	129
7.5.2	Matlab 语言的特点	129
7.5.3	Matlab 6.5 的新特点	131
7.5.4	Matlab 语言的基本使用环境	132
	思考题与习题	133
第 8 章	复杂系统与先进控制技术	134
8.1	传统控制理论的局限性	134
8.1.1	被控对象和控制任务的复杂性	134
8.1.2	传统控制理论的局限性	134
8.1.3	自动控制技术的变革	135
8.2	复杂系统及其控制	136
8.2.1	复杂系统及控制的困难	136
8.2.2	先进控制技术	136
8.3	大系统控制	139
8.3.1	大系统及其控制论的研究内容	139
8.3.2	大系统的控制	140
8.4	基于网络的控制技术	142

8.4.1 基于网络的控制系统	142
8.4.2 未来基于数据包的控制系统	143
思考题与习题	144
参考文献	145

第1章 绪 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。近几十年来，随着电子计算机技术的发展和应用，自动控制技术在工业过程控制、航空航天、机器人控制、导弹制导以及核动力等高新技术领域得到了广泛作用。不仅如此，自动控制技术的应用范围现在已经扩展到生物、医学、环境、物流、经济管理和其他许多社会生活领域中，自动控制技术已经成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

本章将介绍自动控制的基本概念、基本控制方式，自动控制系统的分类、性能指标以及自动控制技术的发展。

1.1 自动控制的概念

所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称被控对象）的某个工作状态或参数（即被控量）自动地按照预定的轨迹运行。例如，数控车床按照预定程序自动地切削工件；化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定；雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统，自动地将导弹引导到敌方目标；无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行；人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等，这一切都是以应用高水平的自动控制为前提的。

1.1.1 自动控制系统

为了实现各种复杂的控制任务，首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，组成一个有机总体，这就是自动控制系统。在自动控制系统中，被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量，它可以要求保持为某一恒定值，例如，温度、压力、液位等，也可以要求按照某个给定轨迹运行，例如，飞行航迹、记录曲线等；而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制，但最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。

1.1.2 反馈控制系统

在反馈控制系统中，控制装置对被控对象施加的控制作用，是取自被控量的反馈信息，用来不断修正被控量与输入量之间的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务，这就是反馈控制的原理。图1-1的系统方框图表示反馈控制系统的基本组成及工作原理。

在方框图中，被控对象和控制装置的各元部件（硬件）分别用一些方框表示。系统中感兴趣的物理量（信号），如电流、电压、温度、位置、速度、压力等，标志在信号线上，其流向用箭头表示。用进入方框的箭头表示各元部件的输入量，用离开方框的箭头表示其输

出量，被控对象的输出量便是系统的输出量，即被控量，一般置于方框图的最右端；系统的输入量，即目标值，一般置于系统方框图的左端。

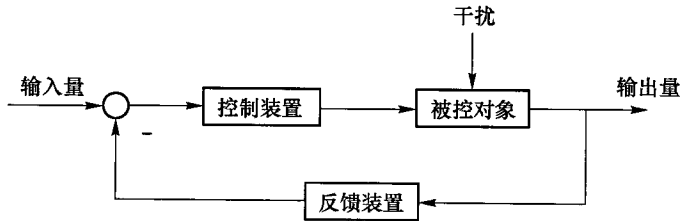


图 1-1 反馈控制原理方框图

通常，我们把取出输出量送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号的过程，称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减，使产生的偏差越来越小，则称为负反馈；反之，则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程，而且，由于引入了被控量的反馈信息，整个控制过程成为闭合过程，因此反馈控制也称闭环控制。

在工程实践中，为了实现对被控对象的反馈控制，系统中必须配置完成特定功能的设备，以便用来对被控量进行连续地测量、反馈和比较，并按偏差进行控制。这些设备依其功能分别称为测量元件、比较元件和执行元件，并统称为控制装置。

反馈控制系统是由各种结构不同的元部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分，而控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中，结构完全不同的元部件却可以具有相同的职能，因此，将组成系统的元部件按职能进行分类主要有以下几种：

测量元件 其职能是检测被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般要转换为电量。例如，测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压；电位器、旋转变压器或自整角机用于检测角度并转换为电压；热电偶用于检测温度并转换为电压等。

给定元件 其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即目标值）。

比较元件 其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的目标值进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

放大元件 其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。电压偏差信号可用晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

执行元件 其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

校正元件 也叫补偿元件，它是结构或参数便于调整的元部件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用电子计算机。

一个典型的反馈控制系统基本组成可用图 1-2 方框图表示。图中，用“○”代表比较元件，它将测量元件检测到的被控量与目标值进行比较，“-”号表示两者符号相反，即负反馈；“+”号表示两者符号相同，即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一

一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

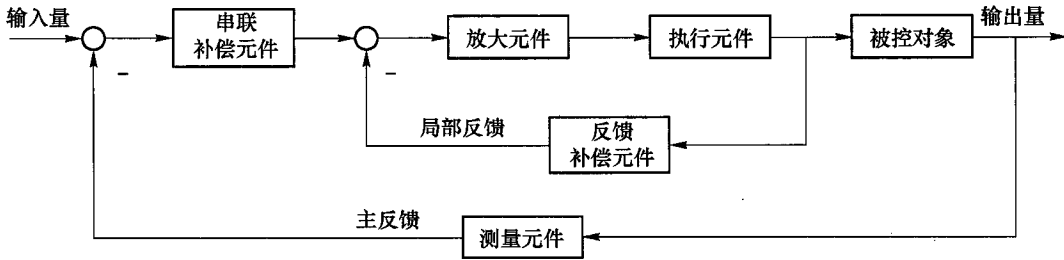


图 1-2 反馈控制系统基本组成

一般地，加到反馈控制系统上的外作用有两种类型，一种是有用输入，一种是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律，例如，目标值；而扰动是系统不希望有的外作用，它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中，扰动总是不可避免的，而且它可以作用于系统中的任何元件上，也可能一个系统同时受到几种扰动作用。电源电压的波动，环境温度、压力以及负载的变化，飞行中气流的冲击，航海中的波浪等，都是现实中存在的扰动。

1.2 控制系统基本控制方式

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外，还有开环控制方式和复合控制方式，它们都有其各自的特点和不同的适用场合。近几十年来，以现代数学为基础，引入电子计算机的新的控制方式也有了很大发展，例如，最优控制、自适应控制、模糊控制等。

1.2.1 反馈控制方式

如前所述，反馈控制方式是按偏差进行控制的，其特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。可以说，按反馈控制方式组成的反馈控制系统，具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力，有较高的控制精度。但这种系统使用的元件多，结构复杂，特别是系统的性能分析和设计也比较麻烦。尽管如此，它仍是一种重要的并被广泛应用的控制方式，自动控制理论主要的研究对象就是用这种控制方式组成的系统。

1.2.2 开环控制方式

开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制方式。按这种方式组成的系统称为开环控制系统，其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用产生影响。开环控制系统可以按给定量控制方式组成，也可以按扰动控制方式组成。

按给定量控制的开环控制系统，其控制作用直接由系统的输入量产生，给定一个输入量，就有一个输出量与之相对应，控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度。因此，这种开环控制方式没有自动修正偏差的能力，抗扰动性较差。但由于其结构简单、调整方便、成本低，在精度要求不高或扰动影响较小的情况下，这种控制方式还有一定的实用价值。如图 1-3



图 1-3 按给定量控制的开环控制系统

所示。

按扰动控制的开环控制系统，是利用可测量的扰动量，产生一种补偿作用，以减小或抵消扰动对输出量的影响，这种控制方式也称前馈控制。如图 1-4 所示。

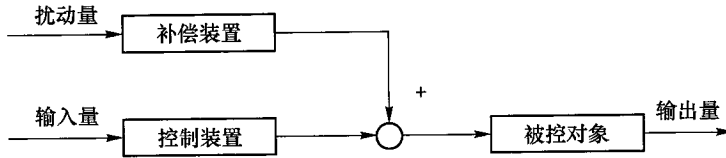


图 1-4 按扰动控制的开环控制系统

可见，这种按扰动控制的开环控制方式是直接从扰动取得信息，并据以改变被控量，因此，其抗扰动性好，控制精度也较高，但它只适用于扰动是可测量的场合。

1.2.3 复合控制方式

按扰动控制方式在技术上比按偏差控制方式实现起来简单，但它只适用于扰动是可测量的场合，而且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素，对其余扰动均不起补偿作用。因此，比较合理的一种控制方式是把按偏差控制与按扰动控制结合起来，对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制，同时，再组成反馈控制系统实现按偏差控制，以消除其余扰动产生的偏差。这样，系统的主要扰动已被补偿，反馈控制系统就比较容易设计，控制效果也会更好。这种按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制方式。图 1-5 所示为一种同时按偏差和扰动控制的复合控制系统原理框图。

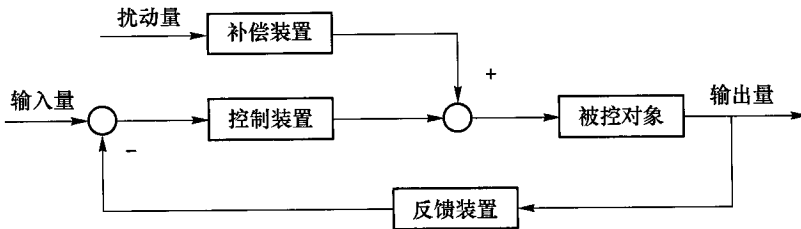


图 1-5 复合控制系统

1.3 控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。例如，按控制方式可分为开环控制、反馈控制、复合控制等；按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等；按系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等；按目标值变化规律又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。一般为了全面反映自动控制系统的特征，常常将上述各种分类方法组合应用。

1.3.1 线性连续控制系统

这类系统可以用线性微分方程描述，其一般形式为

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

式中, $y(t)$ 是被控量; $x(t)$ 是系统输入量。系数 $a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ 是常数时, 称为定常系统; 系数 $a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ 随时间变化时, 称为时变系统。线性定常连续系统按其输入量的变化规律不同又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

(1) 恒值控制系统

这类控制系统的目标值是一个常值, 要求被控量亦等于一个常值, 故又称为调节器。但由于扰动的影响, 被控量会偏离目标值而出现偏差, 控制系统便根据偏差产生控制作用, 以克服扰动的影响, 使被控量恢复到给定的常值。因此, 恒值控制系统分析、设计的重点是研究各种扰动对被控对象的影响以及抗扰动的措施。在恒值控制系统中, 目标值可以随生产条件的变化而改变, 但是, 一经调整后, 被控量就应与调整好的目标值保持一致。

(2) 随动系统

这类控制系统的目标值是预先未知的随时间任意变化的函数, 要求被控量以尽可能小的误差跟随目标值的变化, 故又称为跟踪系统。在随动系统中, 扰动的影响是次要的, 系统分析、设计的重点是研究被控量跟随的快速性和准确性。在随动系统中, 如果被控量是机械位置或其导数时, 这类系统称之为伺服系统。

(3) 程序控制系统

这类控制系统的目标值是按预定规律随时间变化的函数, 要求被控量迅速、准确地加以复现。机械加工使用的数字程序控制机床便是一例。程序控制系统和随动系统的目标值都是时间函数, 不同之处在于前者是已知的时间函数, 后者则是未知的任意时间函数, 而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

1.3.2 线性定常离散控制系统

离散系统是指系统的某处或多处的信号为脉冲序列或数码形式, 因而信号在时间上是离散的。连续信号经过采样开关的采样就可以转换成离散信号。一般, 在离散系统中既有连续的模拟信号, 也有离散的数字信号, 因此离散系统要用差分方程描述, 线性差分方程的一般形式为

$$y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} y(k+1) + a_n y(k) = b_0 x(k+m) + b_1 x(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} x(k+1) + b_m x(k) \quad (1-2)$$

式中, $m \leq n$, n 为差分方程的次数; $a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 为常数; $y(k), x(k)$ 分别为输入和输出采样序列。

计算机控制系统就是典型的离散系统。

1.3.3 非线性控制系统

系统中只要有一个元件的输入/输出特性是非线性的, 这类系统就称为非线性控制系统, 这时, 要用非线性微分(或差分)方程描述其特性。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其导数的高次幂或乘积项。例如

$$\ddot{y}(t) + y(t)\dot{y}(t) + y^2(t) = r(t) \quad (1-3)$$

严格地说，实际物理系统中都含有程度不同的非线性元部件，由于非线性方程在数学处理上较困难，目前对不同类型的非线性控制系统的研究还没有统一的方法。但对于非线性程度不太严重的元部件，可采用在一定范围内线性化的方法，从而将非线性控制系统近似为线性控制系统。

1.4 控制系统的性能指标

控制系统的性能指标是衡量一个控制系统性能好坏的一组技术参数。按照一般情况下对一个控制系统的要求，可以把控制系统的性能指标分为动态性能指标和稳态性能指标。分析一个控制系统时，动态性能指标通常是更重要的。

1.4.1 对控制的基本要求

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型，对每个系统也都有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号下，其被控量变化的全过程。例如，对恒值控制系统是研究扰动作用引起被控量变化的全过程；对随动系统是研究被控量如何克服扰动影响并跟随给定值的变化全过程。但是，对每一类系统被控量变化全过程提出的共同基本要求都是一样的，且可以归结为稳定性、快速性和准确性。

(1) 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零。具体来说，对于稳定的恒值控制系统，被控量因扰动而偏离期望值后，经过一个过渡过程时间，被控量应恢复到原来的期望值状态；对于稳定的随动系统，被控量应能始终跟踪目标值的变化。反之，不稳定的控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差将随时间的增长而增大，因此，不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

线性自动控制系统的稳定性是由系统结构所决定的，与外界因素无关。这是因为控制系统中一般含有储能元件或惯性元件，如绕组的电感、电枢转动惯量、电炉热容量、物体质量等，储能元件的能量不可能突变，因此，当系统受到扰动或有输入量时，控制过程不会立即完成，而是有一定的延缓，这就使得被控量恢复期望值或跟踪目标值有一个时间过程，称为过渡过程。例如，在反馈控制系统中，由于被控对象的惯性，会使控制动作不能瞬时纠正被控量的偏差；控制装置的惯性则会使偏差信号不能及时完全转化为控制动作。这样，在控制过程中，当被控量已经回到期望值而使偏差为零时，执行机构本应立即停止工作，但由于控制装置的惯性，控制动作仍继续向原来方向进行，致使被控量超过期望值又产生符号相反的偏差导致执行机构向相反方向动作，以减小这个新的偏差；另一方面，当控制动作已经到位时，又由于被控对象的惯性，偏差并未减小为零，因而执行机构继续向原来方向运动，使被控量又产生符号相反的偏差。如此反复进行，致使被控量在期望值附近来回摆动，过渡过程呈现振荡形式。如果这个振荡过程是逐渐减弱的，系统最后可以达到平衡状态，控制目的得

以实现，我们称为稳定系统；反之，如果振荡过程逐步增强，系统被控量将失控，则称为不稳定系统。

(2) 快速性

为了很好完成控制任务，控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的，还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求，一般称为动态性能。例如，对于稳定的高射炮射角随动系统，虽然炮身最终能跟踪目标，但如果目标变动迅速，而炮身跟踪目标所需过渡过程时间过长，就不可能击中目标。因此，对控制系统过渡过程的时间（即快速性）和最大振荡幅度（即超调量）一般都有具体要求。

(3) 准确性

理想情况下，当过渡过程结束后，被控量达到的稳态值（即平衡状态）应与期望值一致。但实际上，由于系统结构，外作用形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响，被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在，称为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志，在技术指标中一般都有具体要求。

1.4.2 动态过程和稳态过程

在典型输入信号作用下，任何一个控制系统的时间响应都由动态过程和稳态过程两部分组成。

(1) 动态过程

动态过程又称过渡过程或瞬态过程，指系统在典型输入信号作用下，系统输出量从初始状态到最终状态的响应过程。由于实际控制系统具有惯性、摩擦以及其他一些原因，系统输出量不可能完全复现输入量的变化。根据系统结构和参数选择情况，动态过程表现为衰减、发散或等幅振荡形式。显然，一个可以实际运行的控制系统，其动态过程必须是衰减的；换句话说，系统必须是稳定的。动态过程除提供系统稳定性的信息外，还可以提供响应速度及阻尼情况等信息。这些信息用动态性能描述。

(2) 稳态过程

稳态过程指系统在典型输入信号作用下，当时间 t 趋于无穷时，系统输出量的表现方式。稳态过程又称稳态响应，表征系统输出量最终复现输入量的程度，提供系统有关稳态误差的信息，用稳态性能描述。

由此可见，控制系统在典型输入信号作用下的性能指标，通常由动态性能和稳态性能两部分组成。

1.4.3 动态性能和稳态性能

稳定是控制系统能够运行的首要条件，因此只有当动态过程收敛时，研究系统的动态性能才有意义。

(1) 动态性能

通常在阶跃函数作用下，测定或计算系统的动态性能。一般认为，阶跃输入对系统来说是最严峻的工作状态。如果系统在阶跃函数作用下的动态性能满足要求，那么系统在其他形式的函数作用下，其动态性能也是令人满意的。

描述稳定的系统在单位阶跃函数作用下，动态过程随时间 t 的变化状况的指标，称为动