



普通高等学校“十二五”规划教材

控制工程 基础教程

■ 许贤良 王传礼 邓海顺 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等学校“十二五”规划教材

控制工程基础教程

许贤良 王传礼 邓海顺 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书重点讲述了经典控制理论的基础知识。全书共分7章,包括绪论、拉普拉斯变换、控制系统的数学模型、时域响应、误差分析、频率响应分析、控制系统设计与校正。本书重点突出,推理严谨,行文流畅简洁,是在参考了大量最新版本的国内外教材的基础上,并结合作者多年授课经验编写而成的。书中除配有适量例题外每章都配有适量的习题,以帮助读者掌握理论要点。

本书可作为高校机械类、机电类及相关专业本科生教材,也可供工程技术人员作参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础教程 / 许贤良, 王传礼, 邓海顺编著.

—北京: 国防工业出版社, 2013. 1

普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 08533 - 4

I. ①控… II. ①许… ②王… ③邓… 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(2012)第 302091 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12½ 字数 283 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

控制工程基础理论是高等院校理工科诸多专业的一门重要基础课或专业基础课。因专业要求不同,教材特点也不相同,一种是电子、电气自动控制专业类(调节)理论(原理),一种是机械类的控制工程基础。两种类型的教材除实例各有所侧重外,基本理论是相同的。就内容安排而言,一类是简本的经典控制理论,另一类则是包含现代控制基础的经典控制理论。作为控制理论数学基础的拉普拉斯变化和 Z 变换,有些教材列入正文之中,有些则列入附录之中。作为控制系统分析和设计的重要软件——MATLAB,有些教材是集中于一章,有些则是分散在各章之中。

本书的编写特点是,将数学基础列入正文之中,以强调其重要性;将利用 MATLAB 软件解决经典控制问题分散于各章,并辅以例题详解,强调其实用性。为便于读者掌握控制理论的基础知识,每章都配有适量的例题和习题。

本书编写的目的是为工科院校机电类本科生提供一本通用教材。因此,在编写过程中,参考了国内外大量最新版本的教材并提出了自己的见解。本书建议课时为 40 学时左右,可根据需要合理分配各章学时数。

本书由许贤良、王传礼和邓海顺共同主编,第 1 章、第 2 章由许贤良老师编写,第 3 章、第 4 章、第 5 章及附录由邓海顺老师编写,第 6 章、第 7 章由王传礼老师编写。各章习题由邓海顺老师选编,全书由三位老师共同统稿。本书由浙江大学丁凡教授审阅并提出宝贵修改意见,在此表示感谢,也向为本书出版给予支持和帮助的所有同志致以诚挚的谢意。

由于编者的水平有限,书中不妥与错误之处在所难免,敬请读者和专家批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述和基本概念	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 基本概念	1
1.2 控制系统的工作原理及组成元件	2
1.2.1 控制系统的实例	2
1.2.2 反馈控制系统的构成	3
1.3 控制系统的基本类型	5
1.3.1 按系统的输入量特征分类	5
1.3.2 按系统的性能分类	6
1.4 对控制系统的基本要求、研究内容	7
1.4.1 基本要求	7
1.4.2 研究内容	7
第 2 章 拉普拉斯变换	10
2.1 拉普拉斯变换定义及典型函数拉普拉斯变换	10
2.1.1 拉普拉斯变换的定义	10
2.1.2 典型函数的拉普拉斯变换	10
2.2 拉普拉斯变换定理	14
2.2.1 实微分定理	14
2.2.2 终值定理	15
2.2.3 初值定理	15
2.2.4 实积分定理	16
2.2.5 复微分定理	16
2.2.6 延时定理	16
2.2.7 位移定理	17
2.2.8 卷积定理	17
2.3 拉普拉斯反变换	18

2.3.1	概述	18
2.3.2	部分分式展开	19
2.3.3	含有多重极点的 $F(s)$ 的部分分式展开	20
2.3.4	用 MATLAB 进行部分分式展开	22
第 3 章	控制系统的数学模型	25
3.1	数学模型	25
3.1.1	引言	25
3.1.2	数学模型的性质	25
3.1.3	建模的方法和步骤	26
3.1.4	非线性微分方程的线性化	26
3.2	传递函数	28
3.2.1	传递函数的定义	28
3.2.2	传递函数的特点	29
3.2.3	典型环节的传递函数及实例	29
3.3	方块图	35
3.3.1	闭环系统的方块图及组成	35
3.3.2	开环传递函数和前向传递函数	36
3.3.3	闭环传递函数	36
3.3.4	扰动作用下的闭环系统	37
3.3.5	绘制方块图的步骤	38
3.3.6	方块图的简化	39
3.3.7	实例	41
3.4	典型物理系统的运动方程和传递函数	46
3.4.1	机械系统	46
3.5.2	电气系统	49
3.5.3	液压系统	52
3.5.4	液位系统	54
第 4 章	时域响应	59
4.1	引言	59
4.2	一阶系统的时域响应	59
4.2.1	一阶系统的单位阶跃响应	60
4.2.2	一阶系统的单位斜坡响应	61
4.2.3	一阶系统的单位脉冲响应	62
4.2.4	响应之间的关系	62
4.3	二阶系统的时域响应	62

4.3.1	引言	62
4.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	63
4.3.3	二阶系统的瞬态响应性能指标	65
4.3.4	二阶系统计算实例	69
4.3.5	二阶欠阻尼系统的非零初始条件下的响应	72
4.3.6	二阶欠阻尼系统的单位脉冲响应	73
4.3.7	二阶欠阻尼系统的单位斜坡响应	74
4.4	高阶系统的时域响应分析	75
4.4.1	高阶系统的数学模型	75
4.4.2	高阶系统的单位阶跃响应	75
4.4.3	控制系统时域响应的 MATLAB 计算	77
4.5	线性控制系统的稳定性	78
4.5.1	概述	78
4.5.2	稳定的概念	79
4.5.3	系统的稳定条件	80
4.6	劳斯—胡尔维茨稳定判据	82
4.6.1	劳斯稳定判据	82
4.6.2	应用劳斯判据时的特殊情况	85
4.6.3	胡尔维茨判据	87
第 5 章	误差分析	90
5.1	概念和术语	90
5.1.1	系统的型和阶	90
5.1.2	开环增益和误差系数	90
5.2	偏差和误差概念及稳态误差理论	91
5.2.1	误差的定义	91
5.2.2	稳态误差计算理论	92
5.2.3	扰动作用下的稳态误差计算理论	92
5.2.4	系统稳态误差计算	93
5.2.5	稳态误差计算实例	96
5.3	动态误差系数	98
第 6 章	频率响应分析	101
6.1	概述	101
6.2	频率特性	101
6.2.1	线性定常系统对正弦输入信号的稳态响应	101
6.2.2	频率特性的定义	103

6.2.3	频率特性的确定方法	104
6.2.4	频率特性的表示方法	105
6.3	系统的极坐标图	107
6.3.1	典型环节的极坐标图	107
6.3.2	开环系统的极坐标图——极坐标图的一般形式	110
6.3.3	用 MATLAB 作极坐标图	112
6.4	系统的对数坐标图	113
6.4.1	引言	113
6.4.2	典型环节的伯德图	114
6.5	系统开环的伯德图	119
6.5.1	系统开环伯德图绘制方法和步骤	119
6.5.2	最小相位系统和非最小相位系统	121
6.5.3	用 MATLAB 绘制伯德图	123
6.6	奈奎斯特稳定判据	124
6.6.1	理论关键点	125
6.6.2	奈奎斯特稳定判据的数学基础	126
6.6.3	映射定理在闭环系统稳定性分析中的应用	128
6.6.4	奈奎斯特稳定性判据	129
6.6.5	奈奎斯特稳定判据实例	131
6.6.6	复杂奈奎斯特图的稳定判据	134
6.6.7	基于逆极坐标的奈奎斯特稳定判据	135
6.6.8	伯德图上的奈奎斯特稳定判据	136
6.7	相对稳定性分析	138
6.7.1	系统的相对稳定性	138
6.7.2	相位裕量和增益裕量	139
6.7.3	补加说明及应用实例	141
6.8	闭环系统的频率特性	144
6.8.1	单位反馈系统的闭环频率响应	144
6.8.2	等幅值轨迹(M 圆)	145
6.8.3	等相角轨迹(N 圆)	145
6.8.4	等 M 圆和等 N 圆的应用	147
6.8.5	尼柯尔斯曲线	147
6.8.6	非单位反馈系统的闭环频率响应	149
6.9	频域指标与时域指标的关系	149
6.9.1	控制系统的性能指标	149

6.9.2 伯德图的形状对系统性能指标的影响	151
第7章 控制系统设计与校正	155
7.1 概述	155
7.1.1 设计与校正的概念	155
7.1.2 性能指标	156
7.1.3 校正方法	157
7.1.4 校正方式	158
7.2 串联校正装置的结构和特性	159
7.2.1 超前校正装置	159
7.2.2 滞后校正装置	161
7.2.3 滞后—超前校正装置	162
7.3 基于频率响应法的串联校正设计	164
7.3.1 引言	164
7.3.2 串联超前校正	166
7.3.3 串联滞后校正	168
7.3.4 串联滞后—超前校正	171
7.3.5 三种校正装置的比较	173
7.4 反馈校正和复合校正	173
7.4.1 反馈校正	173
7.4.2 反馈校正设计	176
7.4.3 复合校正	178
7.5 PID 控制器及串联校正	180
7.5.1 引言	180
7.5.2 PID 有源校正装置	180
7.5.3 基于 PID 串联的设计方法	183
附录 常用函数的拉普拉斯变换和 Z 变换表	188
参考文献	191

第 1 章 绪 论

1.1 概述和基本概念

1.1.1 概述

控制理论分为经典和现代两部分，本教程内容属于经典控制理论。自 1948 年诺伯特·维纳发表了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书以来，控制论的思想和方法已经渗透到了几乎所有的自然科学和社会科学领域。维纳把控制论看作是一门研究机器、生命社会中控制和通信的一般规律的科学，更具体地说，是研究动态系统在变化的环境条件下如何保持平衡状态或稳定状态的科学。因此，大多数工程技术人员和科学工作者都必须具备一定的控制基础知识。

1.1.2 基本概念

在学习控制理论之前，定义一些概念或术语是必要的。

1. 系统

在工程上，系统通常定义为用以完成一定任务的一些元部件的组合。实际上系统的概念相当广泛，不仅仅限于物理系统，还可以用于抽象的动态现象，如经济学中遇到的一些现象，因此，“系统”一词，应当理解为包含了物理学、生物学、经济学等方面的系统。

2. 被控变量和操作变量

被控变量是一种被测量和被控制量值或状态。操作变量是一种由控制器改变的量值或状态，进而影响被控变量的值。被控变量通常是系统的输出量。控制意味着对系统的被控变量值进行测量，并且使操作变量作用于系统，以修正或限制测量值(实际输出值)对期望的偏离。

3. 反馈控制

反馈控制是这样的一种控制：对系统的被控变量进行适时检测并不断地直接或经过中间变换传递后全部或部分地返回到系统中(通常是输入端)，力图减小系统输出量与某种参考输入量之间的偏差。如果反馈量与输入量极性相反，则称“负反馈”；如果极性相同，则称“正反馈”。不加说明的反馈通常指负反馈。控制系统通常指负反馈控制系统。

4. 对象

它可能是一台设备(多数由一些机器零件有机地组合在一起)，其作用是完成一种特定的操作。本书中称任何被控物体(如一种机械装置、一个加热炉或一辆汽车)为一个对象。

5. 扰动

对系统输出量产生不利影响的信号称为扰动，如果扰动产生在系统的内部，则称为内部扰动；反之，如果扰动产生在系统的外部，则称为外部扰动。

6. 过程

过程定义为人为的或自然发生的连续进行的运动状态，这种运动状态，由一系列受控制的动作和一直进行到某一特定结果或目标的有规则的运动构成，或简言之，任何被控制的运动状态为过程。

1.2 控制系统的工作原理及组成元件

1.2.1 控制系统的实例

1. 速度控制系统

发动机的瓦特式速度调节器工作原理如图 1-1 所示，允许进入发动机内的燃料数量，根据发动机的希望速度与其实际速度之差进行调整。速度调节的调节原理是：当工作于希望的速度时，高压油不进入动力液压缸的任何一侧；如果由于扰动，使实际速度下降到希望值之下，则速度调节器的离心力变小，离心摇锤使控制阀芯向下移动，液压缸活塞下移，使控制阀开口变大，对发动机的燃料供应增多，发动机速度增大，直到达到速度期望值为止；如果发动机速度增大以至超过期望值，则速度调节器的离心力变大，从而导致控制阀芯上移，液压缸活塞上移，控制阀开口变小，燃料供应减小，发动机速度变小，直到达到期望值时为止。在这个速度控制系统中，控制对象(被控系统)是发动机，被控变量是发动机的速度。期望速度与实际速度之差形成偏差信号，作用到对象(发动机)上的控制信号(燃料的数量) 为驱动信号(操作变量)。对被控量起干扰作用的外部输入量称为扰动量，不能预测的负载变化就是一种扰动量。

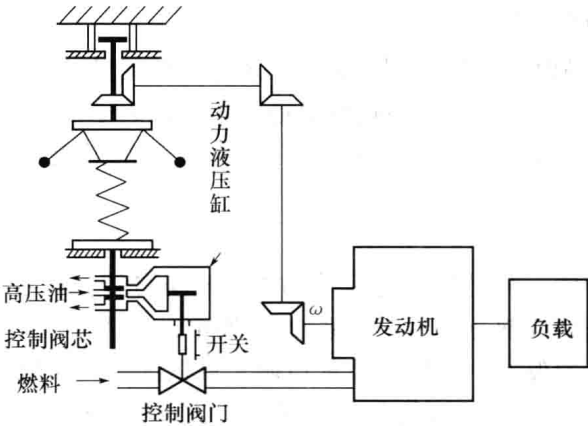


图 1-1 速度控制系统

2. 温度控制系统

图 1-2 所示为电炉温度控制系统的工作原理。电炉内的温度由温度计测量，温度计是一个模拟装置(热电偶)。模拟量温度(一般为电压)通过 A/D 转换器转变为数字量温度，数

字量温度通过接口设备传递到控制器。这个数字温度与编程输入温度进行比较，如果存在某种偏差，控制器就会通过界面、放大器和继电器向加热器发送信号，从而使电炉温度达到要求的温度。

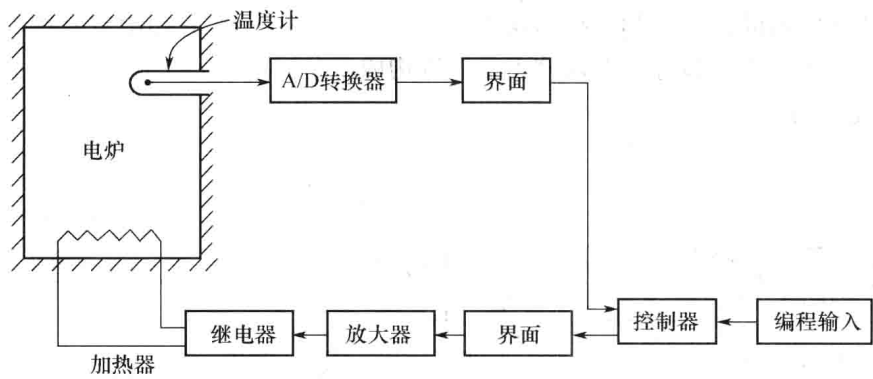


图 1-2 温度控制系统

1.2.2 反馈控制系统的构成

在上述速度控制系统和温度控制系统中都具有反馈控制环节。利用反馈原理(见 1.1 节中反馈控制术语)构成的自动控制系统称反馈控制系统。特别强调，这里的反馈是指来自被控变量(输出信号)的反馈，系统内部固有的反馈作用，在工程上一般不能称为反馈控制。

1. 开环控制和闭环控制

根据有无反馈控制环节，控制系统可分为开环控制系统、闭环控制系统和半闭环控制系统。

如果系统只是根据输入量对输出量进行控制，输出端和输入端不存在反馈回路，系统的输出量对系统的控制不产生任何影响，这样的系统称为开环控制系统。简言之，开环控制系统就是没有反馈控制的系统。开环控制系统的输出量仅受输入量的控制，如果由于某种扰动使输出量偏离输出量的原始值，其没有自动纠偏能力，若要进行补偿，必须借助人工改变输入量，所以开环控制系统的控制精度较低。如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定，受外界干扰较小，这种控制系统可以保持一定的精度。其最大的优点是系统简单，一般都能可靠地工作，因此对精度要求不高时可以采用。

闭环控制系统是输出端和输入端存在反馈、输出量对控制过程产生直接影响的系统。在工程上闭环控制系统、反馈控制系统或负反馈控制系统是同一概念。闭环控制系统的突出优点是控制精度高，只要被控制变量的实际值偏离给定(期望)值，闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。

闭环控制系统也有其缺点，由于该系统是靠检测偏差来纠正偏差的，并且实际工作过程中总会存在偏差，再加上控制元件或负载的惯性，若参数配量不当，容易引起振荡，使系统不稳定而无法正常工作。闭环控制系统中的控制精度和稳定性始终是一对矛盾，必须合理解决。而开环控制系统不存在不稳定问题，但付出的代价是控制精度差。

如果控制系统的反馈信号不是直接从系统的输出端引出，而是间接取自中间的某个元件，则称半闭环控制系统。其性能介于开环控制系统和闭环控制系统之间。目前大多数数控机床都采用这种半闭环控制的进给伺服控制系统。

2. 闭环控制系统的构成

一个比较完整的闭环控制系统的功能方块图如图 1-3 所示，它由给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等构成，分述如下。

1) 给定元件

它的作用是产生输入信号。

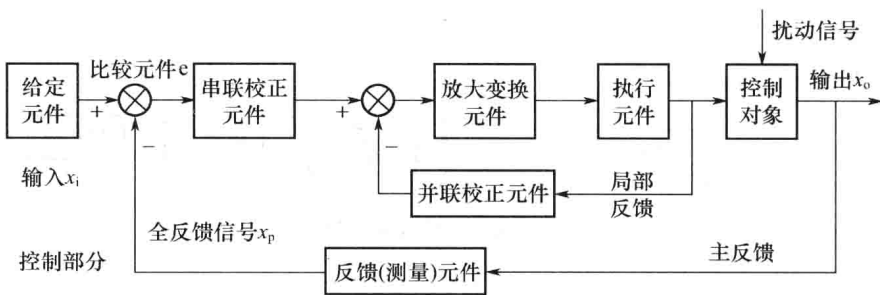


图 1-3 闭环系统的功能方块图

2) 反馈元件

反馈元件亦称测量元件，其作用是检测系统的被控制量或输出量，产生主反馈信号。通常，系统的被控物理量(输出信号)为非电量信号，为便于传输和控制，反馈元件将被测的非电量信号转换成电量信号作为主反馈信号。例如，测速发电机常作为控制系统的测量元件，它将被测的转速信号变换为电压信号。

必须指出，在机械、液压等系统中存在着内在反馈。这是一种缺少专用反馈元件的信息反馈，是系统内部各参数相互作用而产生的反馈信息流(如作用力与反作用力之间直接形成的反馈)。内在反馈回路由系统动力学特性确定，它构成的闭环系统是一个动力学系统，而不是通常意义上的反馈控制系统。例如，机床工作台低速运行等自激振荡现象都是由具有内在反馈的闭环系统产生的。

3) 比较元件

它的作用是接收输入信号和反馈信号并进行比较而产生偏差信号。常用的比较元件有机械差动装置、电桥电路、差动放大器等。

4) 放大元件

它的作用是将比较元件给出的偏差信号进行放大，以推动执行元件控制被控对象。例如，常见的放大元件有电压放大器、功率放大器、电液伺服阀、电气比例伺服阀等。

5) 执行元件

它的作用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电动机、液压(气动)马达、液压(汽)缸等。

6) 校正元件

校正元件又称校正装置或补偿元件，使系统结构或参数便于调整且获得良好的静动

态特性而加入的元件，可分为串联校正元件和并联校正元件。前者是串联在系统的前向通路的，后者是与反馈回路并联的。常见的校正元件多为电气元件。

尽管一个控制系统是由许多起着不同作用的元件构成的，但从总体看来，比较元件、放大元件、执行元件和反馈元件共同起着控制作用，而剩余部分就是控制对象。因而一个控制系统也可以说成仅由控制部分(装置)和被控对象两部分组成。

1.3 控制系统的基本类型

控制系统的种类很多，分类方法也有多种。根据控制方式，可分为开环控制系统、闭环控制系统和半闭环控制系统；根据元件类型或信号传递介质，可分为机械系统、电气系统、液压系统、气动系统及机电系统、机械—液压(气动)系统、电气—液压(气动)系统等；根据系统的功能或系统的被控物理量，可分为温度控制系统、压力控制系统、位置(移)控制系统和速度控制系统等；根据输入信号(参数)变化规律，可分为恒值控制系统、程序控制系统和随机(伺服)控制系统等；根据系统的性能，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。具有反馈控制的线性定常控制系统是最常见的控制系统。

1.3.1 按系统的输入量特征分类

1. 恒值控制系统

该系统的输入量是一个定值，一经给定，在运行过程中就不再改变(但可定期校准或改变输入量)，同时被控量亦等于一个相应的定值。由于扰动的影响，被控量会偏离期望值，恒值控制系统的目标就保证输出量值的恒定，不管系统发生何种扰动。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。

工业生产过程中的温度、压力、流量、液位等参数(量)的控制，有些原动机的速度控制、机床的位置控制、电力系统的电网电压和频率控制等，都属于恒值控制系统。

2. 程序控制系统

该类系统的输入量不为常值，是时间的函数，但其变化规律是可以预先知道和可以确定的。要求被控量迅速准确地复现，可以预先将输入量的变化规律编成程序，由该程序发出控制指令，在输入装置中再将控制指令转换为控制信号，经过系统的作用，使被控对象按指令的要求运动。计算机绘图仪就是典型的程序控制系统。

在工业生产中的过程控制系统，按生产工艺要求编制成特定的程序，由计算机来实现其控制。这就是近年来迅速发展的数字程序控制系统和计算机控制系统。

3. 随动系统

随动系统在工业部门又称伺服控制系统。该类系统的输入量是预先未知的和随时间任意变化的，要求被控量迅速而平稳地跟随时间任意变化，且能排除各种干扰因素，准确地复现控制信号的变化规律。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。函数记录仪便是典型的随动系统，机械加工中的仿形机床和武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹目标自动跟踪系统也是随动系统。

在随动系统中, 如果被控量是机械位移或其导数时(见图 1-1 中发动机的转速), 这类系统称为伺服控制系统。伺服控制系统通常使用伺服控制元件(见图 1-1 中的伺服阀)。但在工程中, 并不将随动系统和伺服控制系统严格区分开来。

1.3.2 按系统的性能分类

归根结底, 系统的性能是用微分方程描述的, 从信号流的观点看, 信号流的性质也是用微分方程描述的。从微分方程或信号流的观点出发, 控制系统可分三类。

1. 线性连续控制系统

这类系统可用线性微分方程描述, 其一般形式为

$$a_n x^{(n)}(t) + a_{n-1} x^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1 \dot{x}(t) + a_0 x(t) = b_m y^{(m)}(t) + b_{m-1} y^{(m-1)}(t) + \cdots + b_1 \dot{y}(t) + b_0 y(t) \quad (1.3.1)$$

式中: $x^{(n)}(t)$ ($n=0, 1, 2, \cdots, n$) 为 t 的 n 阶导数; $y^{(m)}(t)$ ($m=0, 1, 2, \cdots, m$) 为 y 的 m 阶导数; $x(t)$ 为输入量; $y(t)$ 为输出量; $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0, b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 为常数时称定常系统, 随时间变化时称时变系统。

按输入量变化规律, 线性定常系统可分为恒值控制系统、程序控制系统和随动系统。

2. 线性定常离散系统

离散系统是指系统的某处或多处信号为脉冲序列或数字量(数码形式)的控制系统, 也称数字系统。在离散系统中, 数字测量、放大、比较、给定等部件一般由微处理机实现, 计算机的输出经 D/A 转换器和伺服放大器, 然后驱动执行元件, 或由计算机直接输出数字信号, 经数字放大器后驱动数字执行元件。

由于连续控制系统与离散控制系统的信号形式有较大差别, 因而在分析方法上也有明显的不同。连续控制系统以微分方程来描述系统的运动状态(见式(1.3.1)), 并用拉普拉斯(Laplace)变换求解微分方程; 而离散控制系统则以差分方程描述其运动状态, 线性差分方程的一般形式为

$$a_n x(k+n) + a_{n-1} x(k+n-1) + \cdots + a_1 x(k+1) + a_0 x(k) = b_m y(k+m) + b_{m-1} y(k+m-1) + \cdots + b_1 y(k+1) + b_0 y(k) \quad (1.3.2)$$

式中: $a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_{m-1}, b_m$ 为常系数($m \leq n$, n 为差分方程的次数); $x(k)$, $y(k)$ 分别为输入和输出的采样序列。

工业计算机控制系统是典型的离散系统, 如电炉温度控制系统等。

3. 非线性控制系统

系统中只要有一个元部件的输入—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(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高次幂或乘积项, 例如

$$\ddot{x}(t) + x(t)\dot{x}(t) + x^2(t) = y(t) \quad (1.3.3)$$

严格说来, 实际物理系统都含有程度不同的非线性元部件, 如放大器和电磁元件的

饱和特性；运动部件的死区、间隙和摩擦特性；液压控制的流量—压力特性等。在古典控制理论中，对非线性问题常用的方法是在一定范围内(如零位或稳态位置附近)作线性化处理，从而将非线性控制系统近似为线性控制系统。

1.4 对控制系统的基本要求、研究内容

1.4.1 基本要求

控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。尽管实际工程中的控制系统类型及功能不同，但对控制系统在某种典型输入信号下，对被控量变化全过程的共同规律的基本要求都是一致的，一般可归结为稳定性、准确性和快速性。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。稳定性是指系统的动态过程(或被控量)的振荡倾向及恢复平衡状态的能力。对于稳定的系统，当输出量偏离平衡状态(被控量实际值偏离期望值)时，应随着时间的增加，它收敛并且回到初始平衡状态(恢复到原来的期望值)。

线性系统的稳定性是由系统的结构决定的，与外界因素(输入或扰动信号的形式)无关。

2. 准确性

控制系统的准确性即控制精度，一般用稳态误差来评价。所谓稳态误差是指在一定输入信号作用下，经过一定的时间(调整时间)，当调整过程结束而趋于稳定时，输出量的实际值与期望值的误差，它反映了动态过程后期的性能。稳态误差既与系统的结构相关，又与输入信号的形式相关。通常以阶跃输入信号评价这一误差。误差率一般限制在 3%~5% 范围以内。

3. 快速性

快速性是指系统的输出量值与期望值之间产生误差时，消除这种误差的快慢程度或所用时间长短。一般称为动态特性，通常是用过渡时间来评价的。快速性好的系统，就能复现快速变化的输入信号，消除误差的过渡时间较短，因而具有较好的动态特性。

由于控制对象的具体情况不同，系统对稳定性、准确性和快速性的要求是有侧重的。例如，调速系统对稳定性要求较严格，随动系统则对快速性提出更高的要求。对于同一系统，三种性能要求是互相制约的。提高快速性，可能会引起激烈的振荡；改善稳定性，调整时间也可能过长，甚至精度变差。分析和解决这些矛盾，是本书讨论的主要内容之一。

1.4.2 研究内容

控制系统的研究内容可为三个方面，即控制系统的分析、设计和辨识。

1. 控制系统的分析

控制系统的分析是指在系统结构确定或数学模型已经知道的情况，对控制系统施加

假想的典型输入控制信号,对系统的输出信号或响应作出理论评价。根据输入信号的形式不同,可分为时域特性分析和频率特性分析。前者的输入信号通常为阶跃信号,后者的输入信号为正弦频率信号。这也是本书着重介绍的内容。

2. 控制系统的设计

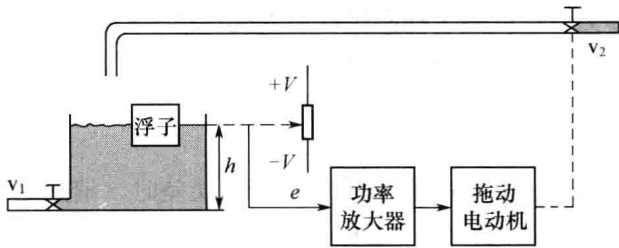
所谓控制系统的设计,就是根据所要求的系统的性能指标(以时间性能指标或频率性能指标或两种指标的混合表示),构建控制系统的结构以满足工作及性能要求。一般来说,设计过程不是一个简单的一次能完成的过程,而是一个逐步试探和完善的过程,也称为系统的综合。为达到满意的性能指标,通常要在系统中添加一些辅助装置——校正装置。因而,控制系统的设计可归结为校正装置的设计。

3. 控制系统的辨识

控制系统的辨识,就是对实际系统施加典型控制信号并检测它的输出信号,并根据输入与输出的典型关系,判定它的性能结构或传递函数。这不同于已知系统的实验证明。如果辨识的控制系统的参数完全是未知的,称为黑色系统;如果部分是已知的,则称为灰色系统。本书不讨论系统的辨识。

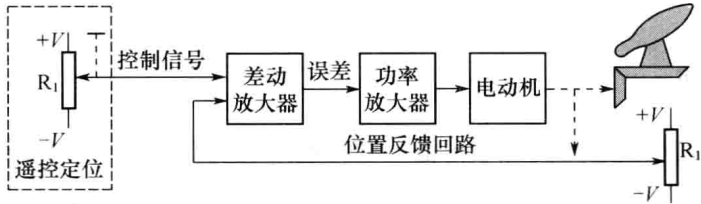
习 题

1-1 贮槽液面自动控制系统如题图 1-1 所示, v_1 和 v_2 是控制阀, h 是希望控制的液位高度,说明阀门 v_1 输出流量时,系统是怎样控制液位高度 h 的?



题图 1-1 贮槽液面自动控制系统

1-2 导弹发射架自动定位系统如题图 1-2 所示。说明发射架位置角(输出量)是如何达到希望位置角的? 期望位置角是用电位器 R_1 上的电压(输入信号)表示的。



题图 1-2 导弹发射架自动定位系统