

控制工程基础

(第2版)

谭跃刚 黄安贻 主 编

刘兆冰 陈 祯 副主编

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍机械工程、电气工程等工程系统分析与控制的基础理论，主要内容包括工程系统（简称系统）的数学模型、时域分析、根轨迹分析、频域分析，以及工程系统控制设计等。本书的特点是以“工程控制系统—建模—分析—设计”为主线，重点突出工程系统控制性能的分析及设计，不强调严格的数学推演，在继续保持第1版内容的系统性和完整性基础上，侧重基本概念、思想方法的理解和应用，适应传授理论知识和培养创新能力并重的需要。

本书是高等学校仪器仪表、机械工程等机电大类专业本科学生的教材，也可供相关专业师生和从事自动化方面的工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

控制工程基础 / 谭跃刚, 黄安贻主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2022.9

ISBN 978-7-121-44241-4

I. ①控… II. ①谭… ②黄… III. ①工程控制论—高等学校—教材 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 160131 号

责任编辑：郭穗娟

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：22.5 字数：572.8 千字

版 次：2013 年 8 月第 1 版

2022 年 9 月第 2 版

印 次：2022 年 9 月第 1 次印刷

定 价：69.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254502, guosj@phei.com.cn。

前　　言

编者在第 1 版的基础上，参考任课教师和学生的反馈意见，结合培养本科生分析处理复杂工程系统能力等专业认证要求进行修订，形成第 2 版。本书不仅在内容上有所调整和更新，而且加强了理论与实际的结合，突出了控制工程基础的实用性。

根据我国高等学校“新工科”建设发展的要求，以及我国本科生工程基础类课程教学改革的需要，为使学生在较少的学时内能够系统地掌握控制工程的基本概念、基础理论和方法，编者删除了控制理论中一些不常用的内容，增加了从实际系统到数学模型的系统建模内容，使学生能够获得从实际系统分析到数学模型建立的知识和能力。在控制系统设计方面，编者弱化了控制系统校正中的图形试凑设计，增强了串联校正与 PID 控制的关系，以及 PID 控制器设计的内容。在内容表述上，编者侧重于概念的阐述和系统分析，不苛求数学上的严密推演，突出对控制工程基础的概念、理论和方法等共性问题的理解和实际应用。全书文字简洁，易读易懂，各章习题配有答案，便于学生自学。本书内容编排满足工科高校相关专业 40~64 课时的教学需要。

本书由谭跃刚教授和黄安贻教授担任主编，刘兆冰副教授和陈祯副教授担任副主编。各章编写分工如下：谭跃刚、刘兆冰编写第 5~7 章，黄安贻、陈祯编写第 1~4 章。最后，由谭跃刚、黄安贻进行审核定稿。

本书的再次出版得到了不少任课教师的大力支持，在此向这些教师表示衷心的感谢。本书可能存在一些缺陷和不妥之处，恳请广大读者和同行专家批评指正。

编　者
2022 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制与反馈控制	1
1.2 开环控制和闭环控制	4
1.2.1 开环控制	4
1.2.2 闭环控制	4
1.3 控制系统的分类	5
1.4 控制理论的发展历程	7
1.5 控制系统性能的基本要求和设计	9
1.5.1 控制系统性能的基本要求	9
1.5.2 控制系统的设计	10
习题	11
第 2 章 控制系统的数学模型	12
2.1 数学模型概述	12
2.2 控制系统的微分方程	13
2.2.1 控制系统微分方程的建立	13
2.2.2 非线性微分方程的线性化	17
2.3 控制系统的状态方程	20
2.3.1 基本概念	20
2.3.2 线性系统状态空间表达式的建立	23
2.4 控制系统的传递函数	26
2.4.1 传递函数的定义和特性	26
2.4.2 传递函数的计算	28
2.4.3 传递函数的基本形式	29
2.4.4 典型环节的传递函数	30
2.5 控制系统的框图	35
2.5.1 框图的组成及建立步骤	35
2.5.2 框图的等效变换	36
2.5.3 梅逊公式	43
2.6 控制系统的传递函数	47
2.6.1 闭环控制系统的开环传递函数	47



2.6.2 闭环控制系统的闭环传递函数	48
2.7 应用 MATLAB 建立系统数学模型	51
2.7.1 传递函数的 MATLAB 模型	51
2.7.2 状态空间表达式的 MATLAB 模型	55
习题	58

第3章 控制系统的时域分析 66

3.1 概述	66
3.2 控制系统的典型输入信号	67
3.3 控制系统时域响应的求解	70
3.3.1 基于微分方程求解时域响应	70
3.3.2 基于状态方程求解时域响应	72
3.3.3 基于传递函数求解时域响应	76
3.4 控制系统的时域性能指标	77
3.4.1 系统时域响应的时间历程	77
3.4.2 系统的动态性能指标	78
3.4.3 系统的稳态性能指标	79
3.5 控制系统的时域分析与性能指标计算	79
3.5.1 一阶系统的时域分析与性能指标计算	80
3.5.2 二阶系统的时域分析与性能指标计算	82
3.5.3 高阶系统的时域分析与性能指标计算	90
3.6 控制系统的稳态误差	93
3.6.1 稳态误差的概念	93
3.6.2 系统的型次	94
3.6.3 系统稳态误差的计算	95
3.6.4 提高系统稳态精度的方法	100
3.7 控制系统的稳定性分析	102
3.7.1 稳定性的概念	102
3.7.2 系统稳定的条件	103
3.7.3 系统稳定性的劳斯判据	107
3.7.4 劳斯判据的应用	110
3.8 控制系统的可控性和可观测性	112
3.8.1 可控性及其判断	112
3.8.2 可观测性及其判断	116
3.8.3 系统传递函数与可控性和可观测性的关系	118
3.9 基于 MATLAB 的系统时域响应计算和时域性能分析	119
3.9.1 系统的时域响应计算	119
3.9.2 系统的动态响应特性分析	122



3.9.3 系统稳定性分析	123
3.9.4 可控性和可观测性分析	127
习题	129
第 4 章 控制系统的根轨迹分析	134
4.1 根轨迹的概念	134
4.2 根轨迹的基本条件与绘制规则	136
4.2.1 根轨迹的基本条件	137
4.2.2 根轨迹的绘制规则	138
4.3 控制系统根轨迹的绘制	148
4.3.1 最小相位系统的根轨迹绘制	148
4.3.2 零度根轨迹的绘制	149
4.3.3 系统的参量根轨迹绘制	153
4.4 控制系统的根轨迹分析	155
4.4.1 增加开环零点和开环极点对根轨迹的影响	155
4.4.2 系统性能的根轨迹分析	158
4.5 基于 MATLAB 的系统根轨迹分析	162
习题	164
第 5 章 控制系统的频域分析	166
5.1 控制系统的频率响应与频率特性函数	166
5.1.1 系统的频率响应	166
5.1.2 系统的频率特性函数	168
5.2 控制系统的频率特性图	170
5.2.1 系统的极坐标图	170
5.2.2 系统的对数频率特性图	179
5.3 奈奎斯特稳定判据	192
5.3.1 系统的奈奎斯特稳定条件	192
5.3.2 基于对数频率特性图的系统稳定性判据	199
5.4 控制系统的相对稳定性	201
5.5 控制系统的频域性能指标	205
5.5.1 系统的闭环频率特性	205
5.5.2 系统闭环频率特性与开环频率特性的关系	208
5.6 基于 MATLAB 的系统频域性能分析	210
5.6.1 系统的频域特性函数	210
5.6.2 利用 MATLAB 绘制频率特性图	212
习题	216

第6章 控制系统的设计 221

6.1	控制系统设计的基本问题	221
6.1.1	系统的校正	221
6.1.2	串联校正装置的一般结构	223
6.2	串联校正装置的设计	226
6.2.1	串联超前校正装置的设计	226
6.2.2	串联滞后校正装置的设计	233
6.2.3	串联滞后-超前校正装置的设计	237
6.3	PID控制系统的设计	243
6.3.1	PID控制器的设计	243
6.3.2	设计PID控制器的Z-N法	250
6.4	状态反馈与极点配置设计	255
6.4.1	状态反馈	256
6.4.2	极点配置设计法	256
6.5	应用MATLAB进行控制系统设计	259
	习题	265

第7章 离散控制系统的基础理论 270

7.1	概述	270
7.1.1	采样控制系统	271
7.1.2	数字控制系统	271
7.2	离散信号与Z变换	272
7.2.1	信号采样与离散信号	272
7.2.2	离散信号的Z变换	278
7.3	离散控制系统的数学模型	284
7.3.1	差分方程	284
7.3.2	离散控制系统的状态空间表达式	287
7.3.3	脉冲传递函数	289
7.4	离散控制系统的性能分析	295
7.4.1	离散控制系统的时域分析	295
7.4.2	离散控制系统的稳定性分析	299
7.4.3	离散控制系统的稳态误差	304
7.4.4	离散控制系统的根轨迹分析	308
7.4.5	离散控制系统的频域分析	309
7.5	离散控制系统的应用	312
7.5.1	离散PID控制器的模拟化设计	312
7.5.2	离散控制系统的离散化设计	316



7.6 应用 MATLAB 分析与设计离散控制系统	316
7.6.1 连续控制系统的离散化	317
7.6.2 离散控制系统的数学模型	318
7.6.3 离散控制系统的分析	319
7.6.4 基于 MATLAB 离散控制系统设计	324
习题	325
参考文献	330
附录 A 拉氏变换	331
附录 B 常用函数的拉氏变换与 Z 变换表	336
附录 C 部分习题参考答案	337

第1章 绪论



【学习要求】

正确理解反馈、控制与控制系统及其有关的概念，能够分析控制系统的工作原理，能辨别控制对象并确定输入信号、输出信号和反馈信号等物理量，能够正确绘制控制系统的框图；能够理解并应用线性控制系统的特性和叠加原理；了解系统分类方法和类别，熟悉对控制系统性能的基本要求。

控制工程是指应用控制理论分析和处理各种工程系统，使之实现自动化的综合性工程技术。控制理论是控制工程的基础，主要指研究工程系统的建模、分析、控制的理论和方法，其发展一般分为经典控制理论和现代控制理论两个阶段。

经典控制理论是在 20 世纪四五十年代逐步形成的自动控制理论，它主要以传递函数、频率特性函数为基础，研究单输入/单输出控制系统设计和性能分析。现代控制理论是从 20 世纪 60 年代发展起来的，主要以状态方程为基础，研究多输入/多输出控制系统设计和性能分析。本章主要介绍控制系统的组成、原理、分类及对控制系统性能的基本要求。

1.1 控制与反馈控制

人们在日常生活和生产中，不论做什么事都希望按照自己期望的或规定的目标和要求发展，当发现事物的发展偏离期望目标和要求时，就会对事物进行调整。例如，驾驶人总是期望汽车能安全、快速地沿着期望道路行驶，在驾驶过程中就依据汽车行驶状态和道路状况对其进行各种驾驶操作，使之达到期望的行驶要求。在这里，“事物的发展偏离期望目标和要求”是对事物进行调整的依据，调整的目的就是希望事物按照期望的和规定的标准和要求发展。这种调整实际上就是对事物施加某种操作或作用，从广义上看就是对事物的控制。

在控制工程领域，需要调整或控制的对象是各种工程系统，如电气系统、机械系统、化工过程系统等。具体地说，就是电力系统的电流/电压控制、机械系统的位置/速度控制、化工过程的压力/流量控制、建筑物的振动控制等。这些工程系统虽然各自具有不同的物理属性，但是从控制的角度来看，它们都是被控制对象或系统，都具有输入信号和输出信号，其输入信号实际就是对系统的控制作用，其输出信号就是系统对输入信号控制作用的响应，并且这种响应输出信号一般要求达到或接近某种目标。因此，控制就是对系统施加某种输入信号，使系统输出信号达到保持规定或要求的运动目标/性能的过程。当这种输入控制作用不是由人直接控制，而是由某个或某些装置自动实现时就是自动控制。

下面分析两个实例。

实例 1

图 1.1 所示为一个恒温箱控制系统。恒温箱的恒定温度（作为控制的目标温度或设定温度）由输入信号 u_1 设定，当恒温箱内的温度与设定温度一致时，设定的输入信号 u_1 和温度传感器的输出信号 u_2 就相等，驱动装置和传动装置保持恒定工作状态，调压装置输出恒定电压，使恒温箱内加热器保持恒定加热状态。此时，恒温箱内的加热和散热达到平衡，其内部温度就恒定在设定温度上。当某种原因使得恒温箱内的温度发生变化时，温度传感器的输出信号 u_2 就与设定的输入信号 u_1 形成偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ ，使驱动装置和传动装置改变原工作状态，调压装置的输出电压使加热器按照减小温度变化的方向（使 Δu 趋于 0 的方向）改变热量，直到恒温箱内的温度再次保持在设定温度值上为止。本实例中的恒温箱就是控制对象，加热器上的电压对这个系统施加作用，箱内的实际温度（由温度传感器检测得到的温度）就是恒温箱控制系统对上述电压的响应输出。显然，改变加热器上的电压可以改变恒温箱内的温度，那么利用反映设定温度与实际温度之差的信号 Δu 来调节加热器上的电压，即调节恒温箱的输入作用，就可使恒温箱内的温度达到并保持设定温度值，从而实现恒定温度的自动控制。

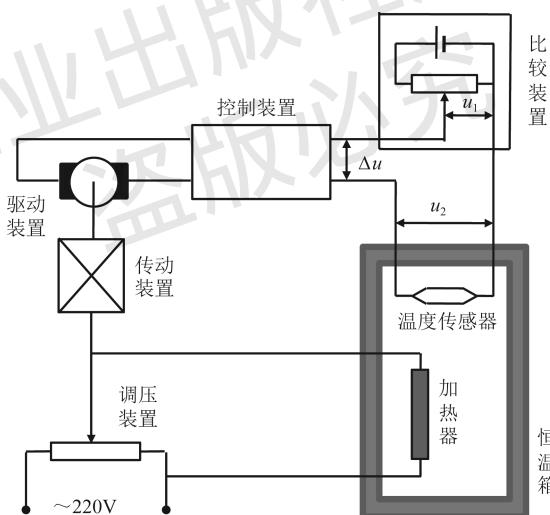


图 1.1 恒温箱的控制系统

实例 2

图 1.2 所示为水箱的水位控制系统。水箱应保持的水位（需要控制的目标水位）由输入电位器设定，当水箱的水位与设定水位一致时，检测装置的输出信号 $\Delta u = 0$ ，此时，进水阀门的开度保持不变；当水箱的进/出水量不一致时，水箱的水位就会偏离设定水位，这时检测装置的输出信号 $\Delta u \neq 0$ ，驱动装置通过传动装置对进水阀门的开度进行调节，直到水箱的水位再次达到设定水位为止。在本实例中，由水箱和进/出水阀门等组成的系统是控制对象，开/闭进水阀门就是对该系统施加作用，水箱的实际水位就是对该“施加作用”的响应输出。可见，改变进水阀门的开度可以改变水箱的水位，利用检测装置的输出信号可



自动调节进水阀门的开度，使水箱的水位达到并保持设定的水位。因此，水箱的水位控制属于自动控制。

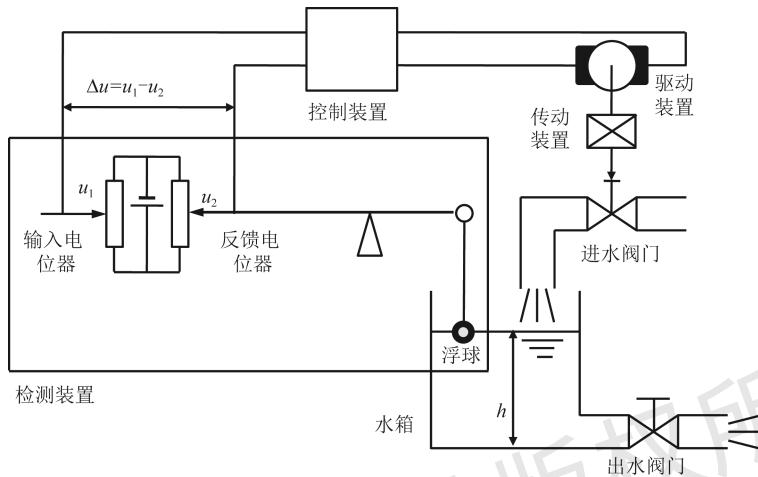


图 1.2 水箱的水位控制系统

从图 1.1 和图 1.2 所示的两个不同系统的控制过程可以看出，对某个系统实施控制时，必须实时检测系统输出信号是否达到或实现期望的目标和要求，检测的结果决定对控制对象施加的控制影响。这种对系统输出信号进行检测并将检测结果引入被控系统输入端实施控制，使其输出信号达到或接近期望目标的过程称为反馈控制，这类控制系统称为反馈控制系统。

图 1.1 和图 1.2 所示控制系统的结构和控制作用各不相同，但从反馈控制过程的共同特点来看，它们都可以抽象为图 1.3 所示的反馈控制系统的框图。在图 1.3 中，给定的输入信号 $r(t)$ 一般为控制系统应达到的目标信号，称为系统的参考输入或输入量；输出信号 $y(t)$ 一般是系统在给定输入信号 $r(t)$ 作用下的实际输出，称为系统的响应或输出量，也称为被控制量。输出信号通过测量装置引入给定输入端的过程称为反馈，其目的是将反馈信号 $b(t)$ 与给定的输入信号进行比较，以得到反映控制目标是否实现的偏差信号 $e(t)$ 。控制装置对偏差信号 $e(t)$ 进行计算处理后产生的控制信号 $u(t)$ 称为系统的控制量，它作用于控制对象，使之产生输出信号 $y(t)$ 。

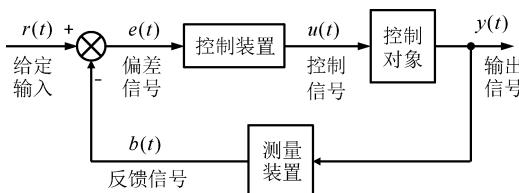


图 1.3 反馈控制系统的框图

从上述分析可知，这种将系统输出信号引入输入端，利用可供比较检测的偏差信号进行的反馈控制过程，实际上是一种“检测偏差—纠正偏差”的过程，并且这个控制过程没有人的直接参与，控制系统自动完成测量反馈、比较检测和控制调节作用。

1.2 开环控制和闭环控制

1.2.1 开环控制

在图 1.1 所示的恒温箱的控制系统中，如果没有使用温度传感器，仅使用电位器设定输入信号 u_1 ，通过控制装置及驱动/传动装置来调节恒温箱内加热器上的电压，仍可实现恒温箱的温度自动控制。当然，在这种情况下，要实现高精度的温度恒定控制有一定难度，需要确定设定的输入信号 u_1 与恒温箱内实际温度的关系等条件。同样，对于图 1.2 所示的水箱的水位控制系统，如果没有浮球和反馈电位器的检测，仅依据输入电位器的设定输入信号 u_1 ，也可实现水箱的水位自动控制。在准确地建立设定的输入信号 u_1 与水箱水位的关系和其他相关条件后，可以有效实现水箱的水位控制。显然，这两种控制的共同特点是没有将系统输出信号反馈引入输入端，其控制效果完全取决于系统中各个装置的性能及其对应关系和条件。

这种对系统输出信号没有进行测量和反馈的控制称为开环控制，这类控制系统就称为开环控制系统，开环控制系统的框图如图 1.4 所示。可见，开环控制就是没有输出反馈作用的控制，即系统输出信号对输入信号没有任何反馈影响的控制。因此，当控制系统受到外界干扰和某些变化因素的影响，导致系统输出信号偏离原始状态时，开环控制不具备自动纠正误差的能力。在这种情况下，若要实现误差补偿或误差纠正，则只能改变系统的输入信号。但是，当控制系统中各个装置的性能充分稳定，并且外界干扰很小时，使用开环控制可以达到高质量的控制效果，如打印机的打印控制、数控机床进给系统的控制等。

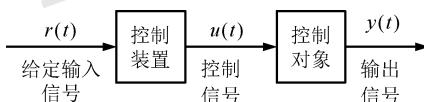


图 1.4 开环控制系统的框图

由于开环控制系统是由给定的输入信号直接实施控制作用的，一定的输入量对应一定的输出量，没有对系统输出进行测量和反馈的过程，因此，开环控制系统的结构较简单，控制过程稳定和反应迅速。

1.2.2 闭环控制

系统输出信号通过反馈通道（或反馈环节）对输入信号实施影响的控制称为闭环控制，这类控制系统称为闭环控制系统，其框图如图 1.5 所示。显然，反馈控制属于闭环控制。

在图 1.5 中，输入信号 $r(t)$ 与系统的期望输出信号呈一定关系，有时也认为它就是系统的期望输出信号。反馈环节的作用是将输出信号 $y(t)$ 转换成与输入信号 $r(t)$ 量纲相同的反馈信号 $b(t)$ ，并把该反馈信号引入输入端，与输入信号 $r(t)$ 进行比较。比较得到的结果为偏差信号 $e(t)$ ，用该偏差信号检验系统输出信号是否达到期望要求。信号 $d(t)$ 是外界对系统的扰动输入信号，它一般使系统输出信号偏离期望要求。

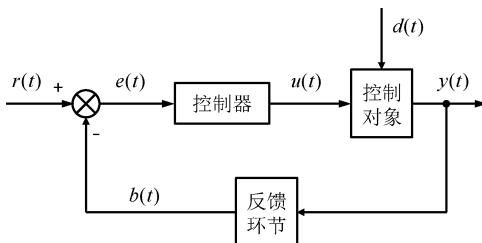


图 1.5 闭环控制系统的框图

系统在各种扰动输入信号和内部参数变化等因素的影响下，其输出信号将偏离原来的状态，经过反馈环节产生偏差信号 $e(t)$ 。该偏差信号通过控制器的运算、变换形成控制对象的控制信号 $u(t)$ 。在这种控制信号的作用下，控制对象的输出信号逼近期望输出信号，从而减小或消除系统的偏差信号。这表明闭环控制系统具有抵抗外部各种干扰和内部变化的能力，即具有自动纠正偏差的能力。因此，闭环控制系统的主要优点是控制精度高。但是，这种控制是利用偏差信号来纠正偏差的，在整个控制过程中偏差信号始终存在，从而使系统有时产生振荡等不稳定现象。

应当指出的是，在实际控制工程中，系统反馈信号有时不是取自系统的对外输出信号，而是取自系统内部，反馈点也不是系统的给定信号输入端而是系统内。例如，目前在大多数数控机床的进给控制系统中，位置测量光栅往往安装于传动丝杆机构上，通过对传动丝杆位置的检测反馈，实现对数控机床工作台位置的控制。这类控制系统称为半闭环控制系统（也称为局部反馈控制系统），如图 1.6 所示。

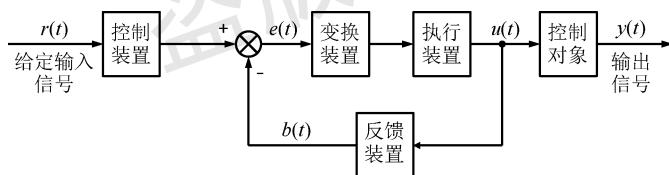


图 1.6 半闭环控制系统的框图

有的控制系统中既有开环控制又有闭环控制，这类控制系统称为复合控制系统。理论上，复合控制系统可以使被控制量的误差为 0，也就是说，复合控制可以提高控制精度。

1.3 控制系统的分类

从不同的角度，可以把控制系统分为多种类型，如线性控制系统、非线性控制系统、恒值控制系统、随动控制系统、连续控制系统和离散控制系统等。下面简要介绍几类常用控制系统。

1. 线性控制系统和非线性控制系统

按信号之间的关系，控制系统可以分为线性控制系统和非线性控制系统。线性控制系统是指系统的信号之间都呈线性关系的控制系统，一般采用线性数学模型进行描述，如线

性微分方程、传递函数、状态方程等。线性控制系统的主要特征是齐次性和可叠加性，这是鉴别线性控制系统的依据。例如，在下列线性微分方程中（其中， $u(t)$ 、 $y(t)$ 分别是系统的输入信号和输出信号）：

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = u(t)$$

当 $u(t) = u_1(t)$ 时， $y(t) = y_1(t)$ ；当 $u(t) = u_2(t)$ 时， $y(t) = y_2(t)$ 。由此可知，当 $u(t) = u_1(t) + u_2(t)$ 时， $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ ，这一特性称为可叠加性。当 $u(t) = au_1(t)$ 时（ a 为常数），上述线性微分方程的解为 $y(t) = ay_1(t)$ ，这一特性称为齐次性。线性控制系统的叠加原理表明，系统在多个输入量作用下产生的总输出量等于各个输入量单独作用时分别产生的输出量之和，并且输入量的数值增大若干倍时，其输出量也增大相同的倍数。因此，如果有多个输入量同时作用于线性控制系统时，就可以将它们分别处理，依次求出各个输入量单独作用于线性控制系统时的输出量，然后将它们叠加，并且每个输入量在数值上只取单位值，从而大大简化线性控制系统的研究工作。

若线性数学模型中的各项系数均为常数，则称这类线性控制系统为线性定常控制系统或线性时不变控制系统。否则，就称为线性非定常控制系统或线性时变控制系统。

非线性控制系统是指系统的信号之间存在非线性关系的控制系统，一般采用非线性数学模型进行描述。非线性控制系统的特点是，变量关系式中含有该变量及其导数的非一次幂或乘积项，并且不满足叠加原理。例如

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + y^2(t) = u(t)$$

常见的放大器饱和特性、运动部件的死区、间隙和摩擦特性等都表现为非线性。

同样，依据数学模型参数的时变性质，非线性控制系统还可以分为非线性定常（非时变）控制系统和非线性时变（非定常）控制系统。非线性控制系统的输出响应特性与初始状态密切相关，在相同输入量的作用下，初始状态的微小变化易引起系统输出量的很大变化。因此，非线性控制系统设计和性能分析是复杂的，其理论还远远不如线性控制系统那样完整，一般只能针对具体的非线性控制系统进行性能分析和计算，或者在一定条件下把它转化为线性控制系统来处理。

严格地说，任何实际系统的信号之间都呈非线性关系，或者说任何实际控制系统都是非线性控制系统。但是，从工程应用角度来看，在允许的误差范围内只要能满足一定条件，就可以将非线性问题转化为线性问题来处理。

2. 恒值控制系统和随动控制系统

在实际工程中，经常要求控制系统输出量保持恒定值或按某种规律变化。

输出量为恒定值的控制系统称为恒值控制系统，这种控制系统的输入量为常量。例如，在图1.1所示的恒温箱的控制系统和图1.2所示的水箱的水位控制系统中，当系统输入信号 u_1 不变时，就是恒值控制系统。恒值控制系统在控制过程中，对干扰所引起的输出量变化都要求能尽快恢复到原有的输出量，即恒值控制的主要任务就是保证系统在任何干扰下的输出为恒定值。因此，恒值控制系统也称为自动调节系统，属于反馈控制系统。



输出量随输入量变化的控制系统称为随动控制系统，例如，在图 1.2 所示的水箱的水位控制系统中，若输入信号 u_1 是变化的，则在反馈电位器的控制下，使水箱的水位也发生变化。因此，随动控制系统是一种反馈控制系统。若控制系统的输入量不是常量，则其主要控制任务就是实现系统输出量能快速、准确地跟踪输入量。在实际工程中，随动控制系统也称为伺服控制系统，应用非常广泛，如自动火炮控制系统、雷达跟踪控制系统、数控机床进给位置伺服控制系统等。

数控机床在加工工件时的刀具轨迹控制实际上是按照事先编写好的程序进行的，这种按照已知程序进行控制的系统称为程序（过程）控制系统。

3. 连续控制系统和离散控制系统

按控制系统中信号的性质分类，控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。若控制系统中的信号均是关于时间的连续函数，则这类控制系统就称为连续控制系统。例如，前面介绍的恒温箱的控制系统和水箱的水位控制系统就属于连续控制系统。在经典控制理论中，拉普拉斯变换和传递函数是描述和分析连续控制系统的主要工具和方法。若控制系统中某一处或多处的信号是关于时间的离散信号，则这类控制系统就称为离散控制系统。例如，计算机控制系统就属于离散控制系统。 Z 变换和脉冲传递函数是用来描述和分析离散控制系统的主要数学工具和方法。

1.4 控制理论的发展历程

控制理论的产生与发展主要源于“反馈”的思想和方法。公元前 1400 年至公元前 1100 年，中国、古埃及和古巴比伦相继出现了可自动计时的漏壶，这是具有反馈原理的早期控制装置。公元前 3 世纪中叶，古希腊出现了使用浮子调节的计时水钟，这种浮子的调节作用也包含了反馈思想；同时期，李冰父子主持修建的都江堰水利工程也充分体现了自动控制系统的观念，是自动控制原理的典型实践。具有反馈思想的古代发明还有很多，如我国东汉时期著名天文学家张衡发明的漏水转浑天仪、地动仪、指南车，以及北宋时期的天文学家苏颂等制作的水运仪象台等。

在 18 世纪前后，随着人类对动力需求的增加，各种动力装置成为研究开发的重点，相继出现了具有反馈作用的各种自动调节动力装置，如利用扇尾装置的反馈作用实现自动面朝风向的风车、蒸汽机锅炉的水位自动调节器等。这一时期最著名的自动调节装置当属瓦特发明的蒸汽机节流飞球调节器，这个发明使蒸汽机最终得到了广泛应用，有力地促进了第一次工业革命。然而，在这些具有自动调节作用的动力装置中，反馈环节所带来的振荡等问题仍制约着动力装置的应用效率，使得人们将研究的重点转移到了如何提高反馈控制的稳定性上。

从 19 世纪中叶开始，人们更多地采用微积分研究反馈控制的性能，使反馈控制的研究出现了较大的突破和发展。1868 年，英国著名物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell）用微分方程分析了蒸汽机在节流飞球调节器控制下的稳定性问题，发表了关于控制的第一篇理论

文章——《论调节器》，给出了“反馈”这一重要概念和蒸汽机转速不稳定的理论分析结果。英国学者劳斯（E. J. Routh）和瑞士学者赫尔维茨（A. Hurwitz）分别在1877年与1895年，提出了基于高阶方程的根与系数的关系判别系统稳定性的方法，这就是著名的劳斯判据和赫尔维茨判据。1892年，俄国学者李雅普诺夫（A. M. Lyapunov）给出了系统稳定性的一般判据。到20世纪初，电子技术和通信技术开始得到发展。1928年，在美国AT&T公司工作的工程师布莱克（H. Black）利用负反馈原理设计出了电子管反馈放大器，这种反馈放大器的出现有力地推动了当时电子技术和通信技术的迅速发展。但是，它存在的振荡问题也一直困扰着人们。1932年，美国学者奈奎斯特（H. Nyquist）通过对反馈放大器振荡现象的频域分析研究，提出了频域上的系统稳定性判据，即著名的奈奎斯特判据；1940年，美国学者伯德（H. Bode）建立了一种反馈放大器的频域分析方法，这种方法后来发展成为控制系统设计和性能分析所用的方法。到了20世纪40年代，为突破频域分析方法的局限性，人们又进一步研究其他方法。1942年，哈里斯（H. Harris）在复数域上引入了传递函数的概念和方法，使控制系统的描述更具有普遍意义。1948年，美国电气工程师伊万斯（W. R. Evans）在复数域上提出了控制系统设计和性能分析的根轨迹分析方法；同年，美国数学家维纳（N. Wiener）出版了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制与通信的科学》一书，书中论述了控制理论的一般方法，推广了反馈的概念。这本书的出版被认为控制理论发展的一个重要里程碑。

到20世纪40年代末和50年代初，主要由频域方法和根轨迹方法构成的经典控制理论基本形成，它在军事、通信和工业各领域的广泛应用有力地推动了自动化技术的迅速发展。我国著名科学家钱学森在1954年出版的《工程控制论》中，将控制理论发展到受控工程系统分析、设计和运行的理论，为控制工程奠定了理论基础。

在20世纪50年代末和60年代初，随着计算机技术的迅速发展，以及针对数控技术、空间技术的发展需求和工业自动化要求的提高，控制理论进入了一个新的发展阶段，出现了现代控制理论。这一发展的标志性事件主要如下：1957年，美国学者贝尔曼（R. Bellman）创立了用于解决最优控制问题的动态规划方法；1959年，苏联学者庞特里亚金（L. S. Pontryagin）提出了系统最优轨迹的极大值原理，并给出了最优轨迹存在的必要条件；1959年，匈牙利裔美国数学家卡尔曼（R. E. Kalman）提出了一种从含有噪声的信号中将所需信号分离出来的状态估计递推滤波方法，该方法称为卡尔曼滤波。1960年，卡尔曼将其他领域的状态空间法引入控制系统中，形成了控制系统的状态空间法，并且提出了控制系统的可控性和可观测性。1970年之后，随着工业自动化规模的扩大和多任务控制要求的进一步提高，由于对大规模工业过程存在的滞后严重、多变量耦合、非线性和时变等问题难以建立准确的数学模型，使得状态空间法难以发挥应有的作用。于是，产生了系统辨识、自适应控制、鲁棒控制、非线性系统控制、预测控制、智能控制等新的现代控制理论。

纵观控制理论的发展历程可知，它的形成和发展与社会生产力的发展密切相关。在社会生产力水平较低的时代，人们关注的重点是努力提高生产效率，各种具有反馈思想和方法的动力装置和仪器设备所存在的振荡现象一直是人们研究解决的主要问题，由此发展并形成了经典控制理论。经典控制理论主要是从系统的稳定性和准确性方面，给出了控制系



统设计和性能分析的原理与方法。随着社会生产力的发展和工业自动化规模的扩大，人们对生产过程的关注重点转移到了最优控制问题上，由此发展并形成了现代控制理论。现代控制理论主要围绕最优控制问题，开展控制系统设计和性能分析研究。

1.5 控制系统性能的基本要求和设计

1.5.1 控制系统性能的基本要求

图 1.7 所示是自动控制系统的一般形式，控制对象、控制器、反馈装置是 3 个基本要素。控制对象是实现控制目标的执行器，反馈装置用于检验控制对象是否按控制目标运行，控制器提供对检测误差进行校正的控制方法。因此，设计自动控制系统时，需要针对控制对象，通过恰当的反馈方式寻求一种控制方法，使控制对象的响应输出达到控制目标或满足控制要求。

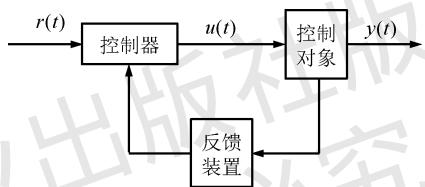


图 1.7 自动控制系统的一般形式

从实际工程的角度看，控制对象（或系统）的输出不可能总是按照控制目标要求响应的。此外，由于任何控制系统具有储能属性，使得控制器难以对检测误差进行同步校正，就是说，控制作用不可能瞬时实现，控制必须经历一个过程。在实际工程中，往往只要控制过程的性能指标，使之满足一定要求，就可认为达到了控制目标。控制系统性能的基本要求如下。

(1) 稳定性。稳定性是控制理论的一个古老的基本问题，它是控制趋于平衡工作状态的固有特性。对于稳定的系统，当其运动偏离平衡工作状态且没有任何外界作用时，总能收敛或恢复到原来的平衡工作状态，如钟摆的运动、陀螺的运动等。不稳定的系统是不能正常工作的，在实际工程中就会造成设备或系统的事故。因此，稳定性是控制系统的最基本要求，是控制系统正常工作的首要条件。系统稳定与否，只与系统的结构参数有关，与输入量和输出量无关。

(2) 响应特性。控制系统在输入信号作用下产生输出信号的过程称为系统的响应过程，一般分为动态响应过程和稳态响应过程两个阶段。控制系统的响应特性就是指系统在输入信号作用下的输出过程特性，对应地分为动态响应特性和稳态响应特性。动态响应又称为瞬态响应，是系统从一种平衡状态到另一种平衡状态的过渡过程，稳态响应是指系统经历动态响应过程后进入一种新的平衡状态。衡量系统响应特性的指标主要有响应速度和控制精度。响应速度是评价控制系统动态响应特性的主要指标，反映控制过程达到目标的速度快慢，一般要求响应速度适当。过快的响应速度会使系统的振荡加剧，降低系统的稳定性。甚至使系统不稳定。评价控制系统稳态响应特性的主要指标是控制精度，也称为稳态精度，

它是指控制对象跟踪目标运动的误差大小，反映控制的准确性，常用稳态误差描述。在实际工程中，在满足控制系统要求的前提下并非控制精度越高越好。

(3) 可控性和可观测性。可控性和可观测性反映系统外部作用与系统内部工作状态的关联关系，可控性是指系统的外界输入信号的作用可否控制其内部工作状态的变化，可观测性是指从系统输出信号中可否“窥视”到其内部工作状态的变化。可控性和可观测性是控制系统的基本要求，尤其是对多输入/多输出控制系统来说，它是实现状态反馈控制的先决条件。不难想象，对一个不可控的对象（或系统），就难以实现有效的控制作用；对一个不可观的对象（或系统），就难以或无法了解系统内部工作状态变化的情况。

(4) 鲁棒性。鲁棒性问题是从20世纪70年代开始在控制领域受到重视和研究的问题。它是指系统对各种因素变化的适应特性，即反映控制系统在参数的一定扰动下维持某些性能的能力。鲁棒性高，就表示系统抵抗内部参数变化和外部因素影响的能力就强，即对性能或参数的扰动不敏感。在实际工程中，控制系统的性能或参数的扰动问题总是存在的，如电气系统的器件老化和环境变化引起的性能波动、机械系统的摩擦磨损和疲劳损伤等都会引起系统运行参数或性能的变化。因此，随着工业自动化的发展，鲁棒性已成为现代控制工程系统设计必须考虑的一个重要问题。

应当指出的是，实际工程中的控制系统千差万别，对稳定性、响应特性等方面性能的要求往往各有侧重。例如，对恒值控制系统的性能要求往往侧重于稳定性，对随动控制系统的性能要求一般侧重于快速跟踪的响应特性。此外，对同一个控制系统，各性能要求一般是相互制约的。例如，提高控制系统的稳定性，就会使其响应速度变缓，甚至使控制精度变差；提高控制系统的响应速度，就会降低系统的稳定性，容易引起系统振荡。

1.5.2 控制系统的设计

控制工程基础就是在不同性能要求及其相互制约条件下，进行控制系统设计和性能分析的工程技术基础，它要解决的主要问题有两个：一是针对具体的控制对象（或系统），如何计算和分析其性能，以判断系统性能在控制要求方面还有哪些不足；二是针对由分析得到的控制对象性能，依据其性能指标要求，如何设计控制系统使其输出全面满足要求。针对这两个主要问题，首先，建立控制系统的数学模型；其次，采用时域分析方法、频域分析方法、根轨迹分析方法等对数学模型进行计算和分析，确定控制对象在各方面的性能；最后，依据控制系统性能指标要求和已获得的控制对象性能，进行控制系统的分析。

数学模型是分析、计算系统性能和设计控制系统的基础。数学模型是系统变量之间关系的一种表征，通过对数学模型的计算和分析，能了解系统变量的相互作用和变化规律，进而掌握系统的性能，明确控制对象的性能在哪些方面还未达到控制要求，以此确定控制对象存在的“缺陷”。下一步就是如何解决“缺陷”，即如何设计一个控制器使这“缺陷”得到“补偿”或校正，从而使控制对象能够完全按照性能指标要求输出响应。在经典控制理论中，这种控制器也称为补偿器或校正装置。

显然，建立数学模型是进行控制系统设计和性能分析的前提条件。在控制工程基础理论中，建立的数学模型主要是传递函数、频率特性函数和状态方程等。

经典控制理论主要是以传递函数、频率特性函数为基础的分析和设计理论，现代控制



理论则主要是以状态方程为基础的分析和设计理论，它们都是基于数学模型的分析和设计理论。尽管现代控制理论是在经典控制理论基础上发展起来的，其涉及的内容比经典控制理论更丰富，但是从长期的工程应用实践来看，经典控制理论在单输入/单输出控制系统设计和分析中，仍然是非常实用和有效的。

习题

1-1 试从实际生活或生产中选出 1~2 个开环控制和闭环控制的实例，分析说明它们各自的工作原理并绘制框图。

1-2 开环控制系统与闭环控制系统各有什么特点？

1-3 图 1.8 所示是采用浮子控制的水钟计时原理示意。试分析其保持准确计时的原理并绘制其框图，说明浮子的控制作用，指出该系统的输入量、输出量和反馈量。

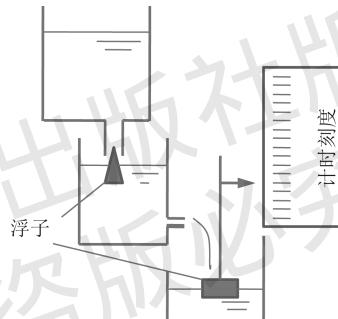


图 1.8 水钟计时原理示意

1-4 图 1.9 所示是自动升降门系统的自动控制原理示意。试分析说明其工作原理并绘制其框图，指出该系统的输入量、输出量和反馈量。

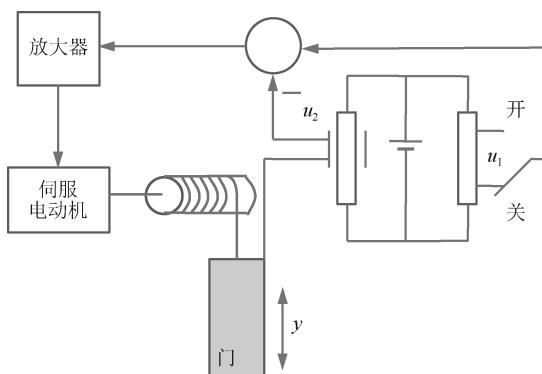


图 1.9 自动升降门系统的自动控制原理示意