

21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

自动控制原理

李国勇 主编 李虹 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

自动控制原理

李国勇 主 编

李 虹 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面阐述了经典控制理论的基本概念、原理和自动控制系统的各种分析方法。主要包括：绪论、控制系统的数学模型、线性控制系统的时域分析法、线性控制系统的复域分析法、线性控制系统的频域分析法、线性控制系统的校正方法、非线性控制系统的分析、线性离散控制系统的分析与设计。该书取材先进实用，讲解深入浅出，各章选例和习题丰富，且均有用 MATLAB/Simulink 编写的仿真及解题实例，便于读者自学。

本书可作为高等院校自动化专业和电气信息类其他专业的本科生教材，或作为其他相关专业的研究生和高年级本科生教材，也可作为从事自动控制研究、设计和应用的科学技术人员的参考用书。

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

自动控制原理 / 李国勇主编 — 北京：电子工业出版社，2010.8

21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

ISBN 978-7-121-11562-2

I. ①自… II. ①李… 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 (2010) 第 154719 号

责任编辑：张 榕

印 刷：北京京科印刷有限公司

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：18.5 字数：473 千字

印 次：2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：29.80 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。

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。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

自动控制理论不仅是高等学校自动化及其他电类专业的一门核心基础理论课,而且在机械、化工等非电类工程专业的课程设置中也占有重要地位。特别是近年来,由于自动控制技术在各行各业的广泛渗透,其控制理论已逐渐成为高等学校许多学科共同的专业基础,且越来越占有重要的位置。

本教材是为适应自动化及相关学科的发展,拓宽专业面、优化整体教学体系的教学改革形势,按照“理论讲透,重在应用”的原则,总结了作者多年的教学经验和课程教学改革的成果,参考了国内外自动控制理论及应用发展的方向,经反复讨论编写而成的。

本书系统地论述了以下内容。

(1) 自动控制的基本概念及自动控制系统的组成、基本控制方式、分类和基本要求。

(2) 控制系统的数学模型,包括线性系统的微分方程、非线性系统微分方程的线性化、传递函数、结构图、信号流图和 MATLAB 中数学模型的表示。

(3) 线性控制系统的时域分析法,包括典型输入信号、一阶系统的时域响应、二阶系统的时域响应、高阶系统的时域响应、系统的稳定性、系统的稳态误差和基于 MATLAB 的控制系统时域分析。

(4) 线性控制系统的复域分析法,包括常规根轨迹的绘制、广义根轨迹的绘制、纯迟延系统根轨迹的绘制、利用根轨迹分析控制系统和基于 MATLAB 的根轨迹分析。

(5) 线性控制系统的频域分析法,包括典型环节的频率特性、系统的开环频率特性、奈奎斯特稳定判据、控制系统的稳定裕量、系统的闭环频率特性、利用频率特性对闭环系统进行分析 and 基于 MATLAB 的控制系统频域分析。

(6) 线性控制系统的校正方法,包括校正装置及其特性、频率法串联校正、根轨迹法串联校正、反馈校正、复合校正和基于 MATLAB 的控制系统校正。

(7) 非线性控制系统的分析,包括常见非线性特性、相平面分析法、线性系统的相轨迹、非线性系统的相平面分析、描述函数法和基于 MATLAB 的非线性系统分析。

(8) 线性离散控制系统的分析与设计,包括采样过程与采样定理、采样信号保持器、 z 变换、离散系统的数学模型、离散系统的稳定性分析、离散系统的稳态误差、离散系统的动态性能、离散系统的校正和基于 MATLAB 的离散系统分析与设计。

全书遵循由浅入深、循序渐进的原则,各章选例和习题丰富,且均有用 MATLAB/Simulink 编写的仿真及解题实例,强调了理论与实际相结合。

本教材由李国勇任主编,李虹任副主编。全书共包括 8 章和 2 个附录,其中第 1 章由杜欣慧编写;第 2 章由李虹编写;第 3 章由李国勇和赵山川编写;第 4 章由李晔编写;第 5 章由郭红戈编写;第 6 章由马志芳编写;第 7 章由韩念琛编写;第 8 章由乔学工编写;其余部分由赵润章和吕青编写。全书由李国勇统稿。李岚教授主审了全书,在此表示衷心的感谢。

本教材适用总学时数为 48~96 (3~6 学分),其中课堂教学 42~82 学时,实验 6~14 学时。各章节编排具有相对的独立性,使教师和学生便于取舍,适合不同层次院校的不同专业选用,以适应不同教学学时的需要。

本书提供配套的电子课件,可登录华信教育资源网: www.huaxin.edu.cn 或 www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 自动控制的基本概念	(1)
1.2 自动控制系统的组成	(2)
1.3 自动控制系统的的基本控制方式	(3)
1.4 自动控制系统的分类	(4)
1.5 自动控制系统的的基本要求	(6)
1.6 自动控制理论的产生及其发展	(7)
小结	(10)
习题	(11)
第 2 章 控制系统的数学模型	(12)
2.1 微分方程	(12)
2.1.1 微分方程的建立	(12)
2.1.2 微分方程的增量表示	(18)
2.2 非线性数学模型的线性化	(19)
2.3 传递函数	(21)
2.3.1 传递函数的定义	(21)
2.3.2 传递函数的常用形式	(24)
2.3.3 传递函数的特点	(25)
2.3.4 典型环节的传递函数	(26)
2.4 结构图	(29)
2.4.1 结构图的概念	(29)
2.4.2 结构图的简化	(30)
2.5 信号流图	(37)
2.5.1 信号流图的概念	(37)
2.5.2 信号流图的绘制	(38)
2.5.3 梅逊增益公式	(39)
2.6 利用 MATLAB 描述和求解系统数学模型	(41)
2.6.1 利用 MATLAB 描述系统数学模型	(41)
2.6.2 利用 MATLAB 实现数学模型间的转换	(41)
2.6.3 利用 MATLAB 化简系统数学模型	(42)
小结	(43)
习题	(44)
第 3 章 线性控制系统的时域分析法	(46)
3.1 引言	(46)
3.1.1 典型输入信号	(46)

3.1.2	系统时域响应的形式	(48)
3.1.3	系统时域响应的性能指标	(49)
3.2	系统的稳定性	(50)
3.2.1	稳定性的基本概念	(51)
3.2.2	线性控制系统稳定的条件	(52)
3.2.3	代数稳定判据	(53)
3.2.4	系统参数对稳定性的影响	(56)
3.2.5	相对稳定性和稳定裕量	(57)
3.3	系统的时域响应	(58)
3.3.1	一阶系统的时域响应	(58)
3.3.2	二阶系统的时域响应	(59)
3.3.3	高阶系统的时域响应	(66)
3.4	系统的稳态误差	(69)
3.4.1	稳态误差的定义	(69)
3.4.2	静态误差系数法	(70)
3.4.3	动态误差系数法	(72)
3.4.4	给定信号和扰动信号同时作用下的稳态误差	(74)
3.5	基于 MATLAB 的控制系统时域分析	(75)
3.5.1	利用 MATLAB 分析系统的稳定性	(75)
3.5.2	利用 MATLAB 分析系统的动态特性	(76)
3.5.3	利用 MATLAB 计算系统的稳态误差	(78)
小结	(79)
习题	(79)
第 4 章	线性控制系统的复域分析法	(83)
4.1	引言	(83)
4.1.1	根轨迹的基本概念	(83)
4.1.2	根轨迹的基本条件	(85)
4.2	常规根轨迹的绘制	(86)
4.2.1	负反馈系统的根轨迹	(86)
4.2.2	正反馈系统的根轨迹	(94)
4.3	广义根轨迹的绘制	(96)
4.3.1	单参数根轨迹	(97)
4.3.2	多参数根轨迹	(98)
4.4	纯迟延根轨迹的绘制	(99)
4.5	利用根轨迹分析控制系统	(103)
4.5.1	利用根轨迹定性分析系统	(103)
4.5.2	利用根轨迹定量分析系统	(104)
4.6	利用 MATLAB 进行根轨迹分析	(107)
4.6.1	绘制系统根轨迹和获得根轨迹增益	(107)
4.6.2	绘制阻尼系数和自然频率的栅格线	(109)

小结	(110)
习题	(111)
第 5 章 线性控制系统的频域分析法	(114)
5.1 引言	(114)
5.1.1 频率特性的基本概念	(114)
5.1.2 频率特性的表示方法	(116)
5.2 典型环节的频率特性	(117)
5.2.1 比例环节	(117)
5.2.2 积分环节	(118)
5.2.3 微分环节	(119)
5.2.4 一阶惯性环节	(119)
5.2.5 一阶比例微分环节	(121)
5.2.6 二阶振荡环节	(121)
5.2.7 纯迟后环节	(123)
5.3 系统的开环频率特性	(124)
5.3.1 开环频率特性的极坐标图 (Nyquist 图)	(124)
5.3.2 开环频率特性的对数坐标图 (Bode 图)	(127)
5.3.3 开环频率特性的对数幅相图 (Nichols 图)	(129)
5.3.4 最小相位系统	(130)
5.4 奈奎斯特稳定判据	(133)
5.4.1 基本原理	(133)
5.4.2 奈奎斯特路径及其映射	(135)
5.4.3 奈奎斯特稳定判据	(136)
5.4.4 奈奎斯特稳定判据的推广	(139)
5.5 控制系统的稳定裕量	(140)
5.5.1 稳定裕量在极坐标图中的表示	(140)
5.5.2 稳定裕量在对数坐标图中的表示	(141)
5.5.3 稳定裕量在对数幅相图中的表示	(142)
5.6 系统的闭环频率特性	(143)
5.6.1 等 M 圆 (等幅值轨迹) 和等 N 圆 (等相角轨迹)	(143)
5.6.2 利用等 M 圆和等 N 圆求系统的闭环频率特性	(145)
5.6.3 利用尼科尔斯图求系统的闭环频率特性	(146)
5.7 利用频率特性对闭环系统进行分析	(147)
5.7.1 系统频域特性与稳态性能的关系	(148)
5.7.2 系统频域特性与时域性能的关系	(148)
5.8 基于 MATLAB 的控制系统的频域分析	(151)
5.8.1 利用 MATLAB 绘制 Bode 图	(151)
5.8.2 利用 MATLAB 绘制 Nyquist 图	(152)
5.8.3 利用 MATLAB 绘制 Nichols 图	(153)
5.8.4 利用 MATLAB 计算系统的相角裕量和幅值裕量	(153)

小结	(154)
习题	(154)
第 6 章 线性控制系统的校正方法	(158)
6.1 引言	(158)
6.1.1 性能指标	(158)
6.1.2 校正方式	(158)
6.2 校正装置及其特性	(159)
6.2.1 PID 控制器	(159)
6.2.2 超前校正装置	(160)
6.2.3 滞后校正装置	(162)
6.2.4 滞后-超前校正装置	(164)
6.3 频率法串联校正	(165)
6.3.1 频率法的串联超前校正	(166)
6.3.2 频率法的串联滞后校正	(168)
6.3.3 频率法的串联滞后-超前校正	(170)
6.4 根轨迹法串联校正	(173)
6.4.1 根轨迹法的串联超前校正	(173)
6.4.2 根轨迹法的串联滞后校正	(176)
6.4.3 根轨迹法的串联滞后-超前校正	(179)
6.5 反馈校正	(182)
6.5.1 反馈校正的原理	(182)
6.5.2 反馈校正的设计	(182)
6.6 复合校正	(183)
6.6.1 按输入补偿的复合校正	(183)
6.6.2 按扰动补偿的复合校正	(185)
6.7 基于 MATLAB 的控制系统校正	(185)
6.7.1 利用 MATLAB 实现频率法的串联超前校正	(185)
6.7.2 利用 MATLAB 实现频率法的串联滞后校正	(187)
6.7.3 利用 MATLAB 实现频率法的串联滞后-超前校正	(188)
小结	(189)
习题	(190)
第 7 章 非线性控制系统的分析	(193)
7.1 引言	(193)
7.1.1 非线性系统的特点	(193)
7.1.2 常见的非线性特性	(194)
7.1.3 非线性系统的分析方法	(196)
7.2 相平面分析法	(197)
7.2.1 概述	(197)
7.2.2 相轨迹图的绘制	(203)
7.2.3 由相轨迹图求系统的暂态响应	(207)

7.2.4	控制系统的相平面分析	(208)
7.3	描述函数分析法	(214)
7.3.1	概述	(214)
7.3.2	典型非线性环节的描述函数	(215)
7.3.3	非线性系统的描述函数法分析	(218)
7.3.4	非线性系统的简化	(224)
7.4	基于 MATLAB 的非线性系统分析	(225)
7.4.1	利用 MATLAB 求解非线性系统的线性化模型	(225)
7.4.2	基于 MATLAB 的相平面法分析非线性系统	(227)
7.4.3	基于 MATLAB 的描述函数法分析非线性系统	(229)
小结	(231)
习题	(232)
第 8 章	线性离散控制系统的分析与设计	(234)
8.1	引言	(234)
8.1.1	信号的采样	(235)
8.1.2	信号的保持	(238)
8.2	z 变换	(240)
8.2.1	z 变换定义	(240)
8.2.2	z 变换方法	(241)
8.2.3	z 变换的基本定理	(242)
8.2.4	z 反变换	(245)
8.3	离散系统的数学模型	(246)
8.3.1	差分方程	(246)
8.3.2	脉冲传递函数	(248)
8.4	离散控制系统的稳定性分析	(253)
8.4.1	离散控制系统稳定的条件	(253)
8.4.2	代数稳定判据	(254)
8.5	离散控制系统的稳态误差	(256)
8.5.1	典型输入信号下的稳态误差	(256)
8.5.2	扰动信号作用下的稳态误差	(258)
8.6	离散控制系统的动态性能	(258)
8.6.1	离散系统的输出响应	(259)
8.6.2	闭环零点、极点分布对瞬态响应的影响	(259)
8.6.3	离散系统的根轨迹分析	(262)
8.7	离散控制系统的校正	(263)
8.7.1	采用伯德图的方法	(263)
8.7.2	最少拍控制系统的校正	(265)
8.8	基于 MATLAB 的离散控制系统的分析与设计	(267)
8.8.1	利用 MATLAB 实现 z 变换	(267)
8.8.2	利用 MATLAB 实现连续系统的离散化	(268)

8.8.3 利用 MATLAB 分析离散控制系统的稳定性	(268)
8.8.4 利用 MATLAB 计算离散系统的稳态误差	(269)
8.8.5 利用 MATLAB 分析离散系统的动态特性	(269)
小结	(271)
习题	(271)
附录 A 拉普拉斯变换	(273)
附录 B 习题参考答案	(277)
参考文献	(283)

第1章 绪 论

随着科学技术的飞速发展,自动控制系统在工业和国防的科研、生产中起着越来越重要的作用,计算机的广泛应用给自动控制系统的发展提供了更广阔的前景。自动控制理论是研究自动控制系统共同规律的技术科学。自动控制技术的广泛应用,不仅将人们从繁重的体力劳动和大量重复性的操作中解放出来,而且也将极大地提高了劳动生产率和产品质量。本章将从自动控制理论的基本概念出发,介绍自动控制系统的基本结构、工作原理、控制方式及分类。在对自动控制系统进行深入分析之前,首先要明确自动控制理论研究的内容和对控制系统的基本要求。

1.1 自动控制的基本概念

下面通过一个实际生产过程的自动控制系统来给出控制和自动控制的定义。

图 1-1 所示的是恒温箱水位控制系统。在生产过程中,常常需要维持被加热箱体的水位高度,以满足工业生产的需要。

1. 工艺过程

用户通过用户阀门 R_2 不定时、不定量地从加热的水箱中取走热水 Q_2 以满足工业生产的需要,即 $R_2 \rightarrow Q_2 \rightarrow H_{\text{实}}$ 。

2. 控制要求

人需要控制进水阀门 R_1 来改变流入量 Q_1 ,即通过不断调节进入箱体内的流量,使得水箱中的实际水位 $H_{\text{实}}$ 等于规定的水位 H_0 。水位过高 \rightarrow 溢出 \rightarrow 不经济;水位过低 \rightarrow 干箱 \rightarrow 不安全。

在人工控制过程中,人要连续不断地观测箱体内的水位,并与要求水位比较,反映到大脑中,然后大脑根据水位差的大小和方向,产生控制指令,加大或减小进水阀门的开度,以减少差异,人通过连续不断的操作,使箱体水位维持在要求值附近。

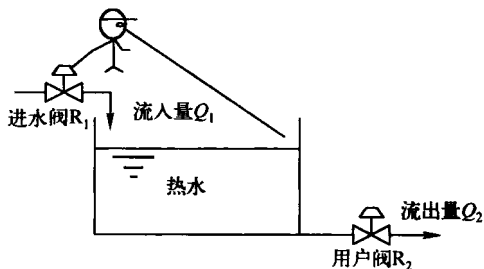


图 1-1 恒温箱水位控制系统

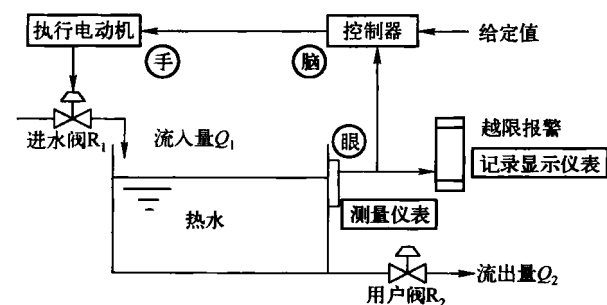


图 1-2 恒温箱水位自动控制系统

通过研究上述人工控制恒温箱水位的过程可以看到,所谓控制就是使某个对象中物理量按照一定的目标来动作。本例中,对象指箱体,其中的物理量指箱体水位,一定的目标就是事先要求水位的高度期望值 H_0 。

若水位控制要求精度高,那么由人来控制就很难满足要求,这时就需要用控制装置来代替人,形成恒温箱水位自动控制系统,如图 1-2 所示。

3. 控制设备

(1) 测量仪表：将水位位置的变化，转换成仪表系统中的（电）信号。它的作用类似于人工控制中人的眼，将水位的变化输送到大脑中。

(2) 显示（记录、报警）仪表：将水位变化相应的（电）信号，用仪表显示给监视人员，或者用记录纸连续记录下来，报警可采用声光等形式。

(3) 控制器：控制器将水位变化的（电）信号（对应于实际水位的测量值 $H_{测}$ ）与设定的（电）信号（对应于要求的水位 H_0 ）进行比较。它的作用类似于人工控制中人的脑。 μ_1 为进水调节阀的开度。

当 $H_{测} > H_0$ 时，要求 $\mu_1 \downarrow \rightarrow Q_1 \downarrow \rightarrow H_{实} \downarrow \rightarrow H_{测} \downarrow$ ；

当 $H_{测} < H_0$ 时，要求 $\mu_1 \uparrow \rightarrow Q_1 \uparrow \rightarrow H_{实} \uparrow \rightarrow H_{测} \uparrow$ ；

当 $H_{测} = H_0$ 时，要求 μ_1 不变。

(4) 执行器：执行器为一电动调节阀，它包括执行电动机和阀体两部分，它根据控制器的命令，改变进水调节阀的开度 μ_1 。调节阀的作用类似于人工控制中人的手，去执行大脑的命令。

恒温箱水位自动控制系统由测量仪表、显示仪表、控制器和执行器等构成。测量仪表将箱体的实际水位测量出来，并将其传送给控制器和显示仪表。控制器将根据水位的给定信号与箱体实际水位测量信号的偏差，产生相应的信号控制执行电动机的转速和方向。执行电动机根据控制器的要求调节进水阀门的开度 μ_1 ，以减少实际水位 $H_{实}$ 与要求的水位 H_0 差异，直到偏差为零。

自动控制和人工控制的基本原理是相同的，它们都是建立在“测量偏差，修正偏差”的基础上，并且为了测量偏差，必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制和人工控制的区别在于自动控制用控制装置代替人完成控制。总之，所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象中某一物理量或数个物理量准确地按照预定的要求规律变化。

为了方便技术人员讨论问题，一般将控制系统表示成框图的形式。框图是由若干方框，有向信号线，信号的相加点与分支点所组成的框图。它是实际工艺设备图中控制系统的信号传递的一种抽象简明的表示，它可用在自动控制系统的分析中，去表明每个重要设备在系统中的功能和各个重要设备之间的相互关系。例如，可把图 1-2 所示的恒温箱水位自动控制系统表示成如图 1-3 所示的框图。

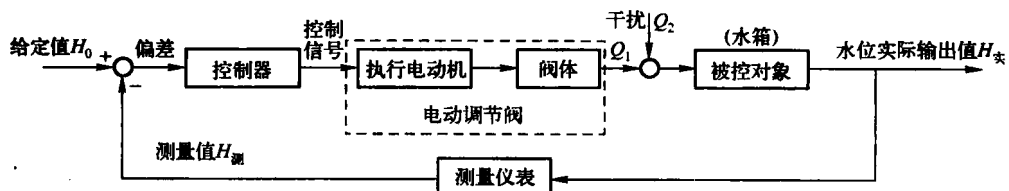


图 1-3 恒温箱水位自动控制系统的框图

1.2 自动控制系统的组成

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。虽然自动控制系统根据被控对象和具体用途

的不同，可以有各种各样的结构形式。但是，就其工作原理来说，一个典型自动控制系统的组成可用如图 1-4 所示的框图来表示。

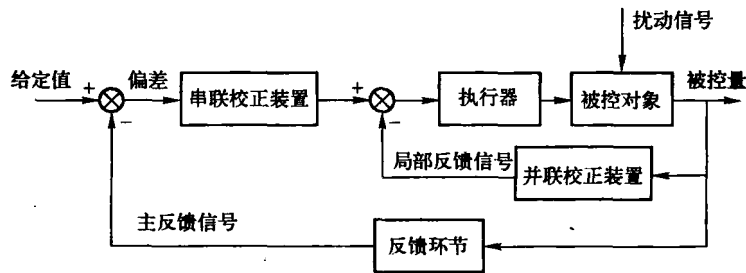


图 1-4 典型自动控制系统的原理框图

(1) 被控量：是指控制系统中被控制的物理量，也称为输出量，一般用 $y(t)$ 表示，如以上水位的实际值 $H_{实}$ 。

(2) 给定值：在控制系统中被控量 $y(t)$ 所希望的值，也称为参考输入，一般用 $r(t)$ 表示，如以上水位的设定值 H_0 。

(3) 扰动信号：使被控量偏移给定值的所有因素，它是系统要排除影响的量，一般用 $n(t)$ 表示。它包括内扰和外扰。内扰为调节阀不动作时，调节阀所在通道中物料的各种因素变化引起的干扰，如以上进水管道的压力波动引起进水量 Q_1 的变化；外扰为除内扰以外的一切干扰，如以上用户用水量 Q_2 的变化。

(4) 反馈信号：将系统（或环节）的输出信号经变换、处理送到系统（或环节）的输入端的信号，称为反馈信号。若此信号是从系统输出端取出送入系统输入端，这种反馈信号称为主反馈信号，一般用 $y_m(t)$ 表示。而其他称为局部反馈信号。

(5) 偏差：给定值 $r(t)$ 与主反馈信号 $y_m(t)$ 之差，一般用 $e(t)$ 表示，即 $e(t) = r(t) - y_m(t)$ 。

(6) 输入信号：泛指对系统的输出量有直接影响的外界输入信号，既包括参考输入 $r(t)$ （或给定值 $r(t)$ ），又包括扰动信号 $n(t)$ 。

(7) 被控对象：它是控制系统所控制和操作的对象，如以上的恒温水箱。

(8) 校正装置：对系统的参数和结构进行调整，用于改善系统控制性能的仪表或装置，也称为控制器或调节器，如以上的水位控制器。

(9) 执行器：接收校正装置的输出信号，并将其转换为对被控对象进行操作的装置或设备，如以上的电动调节阀。

(10) 反馈环节：它用来测量被控量 $y(t)$ 的实际值，并经过信号处理，转换为与被控量有一定函数关系，且与输入信号同一物理量的信号。反馈环节一般也称为测量变送环节。

1.3 自动控制系统的的基本控制方式

闭环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。

1. 开环控制系统

开环控制系统是指无被控量反馈的控制系统，即需要控制的是被控对象的某一量（被控

量),而被控量对于控制作用没有任何影响的系统。信号由给定值至被控量单向传递。这种控制较简单,但有较大的缺陷,即对象或控制装置受到干扰或工作中特性参数发生变化时,会直接影响被控量,而无法自动补偿。因此,系统的控制精度难以保证。从另一种意义上理解,也意味着对被控对象和其他控制元件的技术要求较高,如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。开环控制系统原理框图如图 1-5 所示。信号流动由输入端到输出端单向流动。

2. 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外,还有输出端到输入端的反馈信号,则构成闭环控制系统,也称反馈控制系统,框图如 1-6 所示。闭环控制的定义是有被控制量反馈的控制。从系统中信号流向看,系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端,构成闭合通道,故称闭环控制系统或反馈控制系统。这种控制方式,无论是由于干扰造成,还是由于结构参数的变化引起被控量出现偏差,系统就利用偏差去纠正偏差,故这种控制方式为按偏差调节。

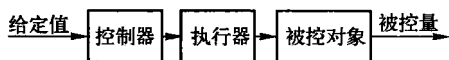


图 1-5 开环控制系统原理框图

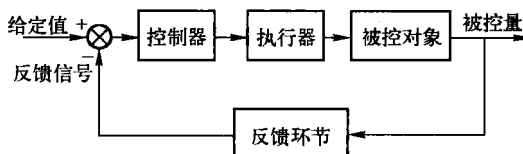


图 1-6 闭环控制系统框图

闭环控制系统的突出优点是,利用偏差来纠正偏差,使系统达到较高的控制精度。但与开环控制系统比较,闭环系统的结构比较复杂,构造比较困难。需要指出的是,由于闭环控制存在反馈信号,利用偏差进行控制,如果设计得不好,将会使系统无法正常和稳定地工作。另外,控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

3. 复合控制系统

开环控制和闭环控制方式各有优缺点,在实际工程中应根据工程要求及具体情况来决定采用何种控制方式。如果事先预知给定值的变化规律,又不存在外部和内部参数的变化,则采用开环控制较好。如果对系统外部干扰无法预测,系统内部参数又经常变化,为保证控制精度,采用闭环控制则更为合适。如果对系统的性能要求比较高,为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾,可以采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统或其他复杂控制系统。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统根据控制方式及其结构性能和完成的任务,有多种分类方法。除以上按控制方式分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统等外,还可以根据系统输入信号分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等;按系统性能又可以分为线性控制系统和非线性控制系统、连续控制系统和离散控制系统、定常控制系统和时变控制系统、确定性控制系统和不确定性控制系统等。下面简单介绍几种常见的分类方法。

1. 按系统输入信号形式划分

1) 恒值控制系统(自动调节系统)

这种系统的特征是输入量为—恒值,通常称为系统的给定值。控制系统的任务是尽量排

除各种干扰因素的影响，使输出量维持在给定值（期望值）。如工业过程中恒温、恒压、恒速等控制系统。

2) 随动控制系统（跟踪控制系统）

该系统的输入量是一个事先无法确定的任意变化的量，要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动控制系统。

3) 程序控制系统

系统的输入量不是常值，而是事先确定的运动规律，编成程序装在输入装置中，即输入量是事先确定的程序信号，控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如数控机床就属此类系统。

2. 按系统微分方程形式划分

1) 线性控制系统

组成系统元器件的特性均为线性的，可用一个或一组线性微分方程来描述系统输入和输出之间的关系。线性控制系统的主要特征是具有齐次性和叠加性。

2) 非线性控制系统

在系统中只要有一个元器件的特性不能用线性微分方程描述其输入和输出关系，则称为非线性控制系统。非线性控制系统还没有一种完整、成熟、统一的分析法。通常对于非线性程度不很严重，或做近似分析时，均可用线性系统理论和方法来处理。非线性控制系统分析将在第7章专门讨论。

3. 按系统参数与时间有无关系划分

1) 定常控制系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数，则称为定常控制系统。该类系统只要输入信号的形式不变，在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。

2) 时变控制系统

如果描述系统特性的微分方程中至少有一项系数是时间的函数，此系统称为时变控制系统。

4. 按系统信号形式划分

1) 连续控制系统

系统中所有元件的信号都是随时间连续变化的，信号的大小均是可任意取值的模拟量，称为连续控制系统。

2) 离散控制系统

离散控制系统是指系统中有一处或数处的信号是脉冲序列或数码。若系统中采用了采样开关，将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号，此类系统也称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器，其离散信号是以数码形式传递的，此类系统也称为数字控制系统。在这种控制系统中，一般被控对象的输入/输出是连续变化的信号，控制装置中的执行部件也常常是模拟式的，但控制器是用数字计算机实现的，所以，系统中必须有信号变换装置，如模/数转换器（A/D转换器）和数/模转换器（D/A转换器）。计算机控制系统将是今后控制系统的主要发展方向。

5. 按系统控制作用点个数划分

1) 单输入单输出控制系统

若系统的输入量和输出量各为一个, 则称其为单输入单输出控制系统, 简称为单变量控制系统。

2) 多输入多输出控制系统

若系统的输入量和输出量多于一个, 称为多输入多输出控制系统, 简称为多变量控制系统。对于线性多输入多输出控制系统, 系统的任何一个输出等于每个输入单独作用下输出的叠加。

另外, 自动控制系统还可以按系统的其他特征来分类, 如按元器件类型可分为机械控制系统、电气控制系统、机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统和生物控制系统等; 按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统和位置控制系统等, 这里将不再一一讨论, 有兴趣的读者可参阅有关文献。一般为了全面反映自动控制系统的特性, 常常将上述各种方法组合应用。本书将从线性连续控制系统、非线性连续控制系统和线性离散控制系统三方面来研究自动控制系统的分析和设计问题。

1.5 自动控制系统的基本要求

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, 对该系统在某种典型输入信号作用下, 其被控量变化全过程的基本要求都是一样的, 可以归结为稳定性、准确性和快速性, 即稳、准、快的要求。

1. 稳定性

对于一个自动控制系统, 最基本要求为系统是稳定的。否则系统无法正常工作, 也无法完成控制任务, 甚至会毁坏设备, 造成重大损失。考虑到实际系统工作环境或参数的变动, 可能导致系统不稳定, 因此, 我们除要求系统稳定外, 还要求其具有一定的稳定裕量。

2. 准确性

系统的准确性是用稳态误差来衡量的, 稳态误差是指系统过渡到新的平衡工作状态以后, 或系统对抗干扰重新恢复平衡后最终保持的精度。稳态误差与控制系统的结构和参数及输入信号形式有关。

3. 快速性

动态过程是指控制系统的被控量在输入信号作用下随时间变化的全过程, 衡量系统快速性的品质好坏常采用单位阶跃信号作用下动态过程中的超调量、上升时间和过渡过程时间等性能指标。

对不同的被控对象, 系统对稳、准、快的要求有所侧重。例如, 随动系统对快要求较高。同一系统稳、准、快是相互制约的。过分提高响应动作的快速性, 可能会导致系统的强烈振荡; 而过分追求系统的平稳性, 又可能使系统反应迟钝, 控制过程拖长, 最终导致控制精度也变差。如何分析与解决这些矛盾, 是自动控制理论研究的重要内容。

自动控制理论研究的主要内容是阐述对自动控制系统进行分析和设计的基本理论。在自动控制理论中, 对实际控制系统进行分析和设计时, 首先要建立研究问题的数学模型, 进而利用所建立的数学模型来讨论对自动控制系统进行分析和设计的基本理论和方法。在已知系统数学模型

下, 计算和研究自动控制系统的性能并寻找系统性能与系统结构、参数之间的关系, 称为控制系统的分析。如果已知对工程系统性能指标的要求, 寻找合理的控制方案, 这类问题称为控制系统的设计或校正。

1.6 自动控制理论的产生及其发展

自动控制理论由经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论组成, 它的发展初期, 是以反馈理论为基础的自动调节原理, 主要用于工业控制。

1. 自动控制技术的发展

人类发明具有“自动”功能的装置的历史, 可以追溯到公元前 14 到公元前 11 世纪, 在中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。我国汉朝科学家张衡发明了浑天仪和地动仪, 把自动控制思想应用到了天文观测仪器和地震观测仪器。公元 235 年, 我国发明了按开环控制的自动指示方向的指南车, 它是确定方位仪器中利用自动控制思想的成功事例。公元 1086 年左右, 我国苏颂等人发明了按闭环控制工作的具有“天衡”自动调节机构和报时机构的水运仪象台, 它是将用于天文观测的浑天仪和用于天文演示的浑象仪及自动计时装置结为一体的仪器。古埃及和古希腊出现了半自动的简单机器, 如教堂庙门自动开启装置、自动洒圣水的铜祭司、投币式圣水箱和在教堂门口自动鸣叫的青铜小鸟等自动装置, 这些都是些互不相关的原始的自动装置, 是一些个别的发明。17 世纪以后, 随着生产的发展和科学的进步, 在欧洲出现了多种自动装置, 其中包括, 1642 年法国物理学家帕斯卡发明了能自动进位的加法器; 1657 年荷兰机械师惠更斯发明了钟表; 1745 年英国机械师 E. 李发明了带有风向控制的风磨, 这种风磨可以利用尾翼的调向作用使主翼对准风向; 1765 年俄国机械师波尔祖诺夫发明了浮子阀门式水位调节器, 可以自动控制蒸汽锅炉的水位。这一时期, 自动控制技术都是由于生产发展的需求而产生的。但比较自觉运用反馈原理设计出来并得到成功应用的是英国瓦特 (J. Watt) 于 1788 年发明的离心式节速器 (也叫做飞球调速器), 瓦特用它来控制蒸汽机的蒸汽阀门, 构成蒸汽机转速的闭环自动控制系统, 从而实现了离心式节速器对蒸汽机转速的控制。瓦特的这项发明促进了近代自动调节装置的广泛应用, 对由蒸汽机带来的第一次工业革命及以后的控制理论的发展都有重要的影响。在其他国家的各种发明还有 1854 年俄国机械学家和电工学家康斯坦丁诺夫发明的电磁调速器。1868 年法国工程师法尔科发明了反馈调节器, 通过它来调节蒸汽阀, 操纵蒸汽船的舵, 这就是后来得到广泛应用的伺服机构。在 1868 年以前, 自动化技术只是些个别的发明和简单的应用, 所以把它叫做第一阶段。在 1868 年之后, 逐渐开始了对自动控制系统的理论分析和大规模的广泛应用, 所以把它叫做第二阶段。

2. 自动控制理论的发展和形成

虽然各种简单自动控制装置的发明在 18 世纪以前经历了漫长的历史过程, 但是它们对自动化技术的形成起到了先导作用; 它们都是从实际经验中总结出来的, 但是还没有理论分析和数学描述。17~18 世纪是自动化技术的逐渐形成时期, 接下来是近代自动化技术的发展时期, 数学描述和理论分析起到了至关重要的作用。人们最初遇到的是自动调节器的稳定性问题, 由于瓦特发明的离心式调速器有时会造成系统的不稳定, 使蒸汽机产生剧烈的振荡; 到 19 世纪又发现了船舶上自动操舵机的稳定性问题。这些问题引起了人们的广泛关注, 一些数学家尝试用微分方程来描述和分析系统的稳定性问题。对自动控制系统最初的数学描述是