

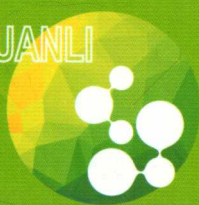
普通高等院校“十三五”规划教材

自动控制原理 及应用

曹伟 主编

马志晟 王妍玮 副主编

ZIDONG KONGZHI YUANLI
JI YINGYONG



化学工业出版社

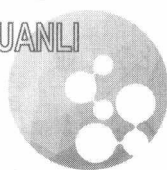
普通高等院校“十三五”规划教材

自动控制原理 及应用

曹 伟 主编

马志晟 王妍玮 副主编

ZIDONG KONGZHI YUANLI
JI YINGYONG



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理及应用/曹伟主编. —北京: 化学工业出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-122-33404-6

I. ①自… II. ①曹… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 283178 号

责任编辑: 高墨荣

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 张雨彤

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 356 千字 2019 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 46.00 元

版权所有 违者必究

前言

Foreword

自动控制是指应用自动化仪器仪表或自动控制装置代替人自动地对仪器设备或工程生产过程进行控制,使之达到预期的状态或性能指标。对传统的工业生产过程采用自动控制技术,可以有效提高产品的质量和企业的经济效益。对一些恶劣环境下的操作,自动控制显得尤其重要。

自动控制理论是与人类社会发展密切联系的一门学科,是自动控制科学的核心。在已知控制系统结构和参数的基础上,求取系统的各项性能指标,并找出这些性能指标与系统参数间的关系就是对自动控制系统的分析;而在给定对象特性的基础上,按照控制系统应具备的性能指标要求,寻求能够全面满足这些性能指标要求的控制方案并合理确定控制器的参数,则是对自动控制系统的分析和设计。自动控制理论在发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理,随着科学技术的进步,现已发展成为一门独立的学科。根据自动控制理论发展的不同阶段,自动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。本书介绍的是“经典控制理论”部分。

自动控制原理是一门工程应用非常广泛的基础课程,所讲述的是控制科学与工程中的基本原理。并且,这门课程的特点是理论性较强,与数学的结合比较紧密。在修读本课程之前应熟练掌握大学高等数学、电路理论、模拟电子技术、电机学等课程相关知识。同时,自动控制原理课程也是控制类的一门基础课程,是运动控制系统、过程控制系统、自适应控制、人工智能等课程最重要的先修课程。

学习自动控制原理的目的是掌握自动控制的基本理论和分析设计控制系统的基本技能,进而能够发现、分析并解决工程中的实际问题,同时也为后续专业课的学习打下基础。

本书比较全面、系统地介绍了自动控制理论的基本内容和控制系统的分析、校正及综合设计方法。内容主要包括自动控制的基本概念,系统数学模型的建立,用以对控制系统进行分析、校正的时域法、根轨迹法和频域法,线性离散系统的分析与校正方法,分析非线性系统的相平面法和描述函数法, MATLAB 在控制系统中的应用等,并配有适当的习题和部分习题参考答案。

本书是以编者近 20 年的教学讲义为基础,集编者多年教学经验而总结出来的。本书具有以下特点:基本概念、基本方法、基本原理归纳清晰;注重前后联系,融会贯通,保持知识的连贯性;注重理论与实践相结合,结合工程实际问题,培养学生实践能力;注重仿真分析,利用 MATLAB 软件分析控制系统的基本理论。全书共 9 章和 1 个附录,其中,第 1~3 章由齐齐哈尔大学马志晟讲师编写,第 4~5 章,第 7~8 章由齐齐哈尔大学曹伟副教授编

写，第 6 章由哈尔滨石油学院张耘讲师编写，第 9 章和附录由哈尔滨石油学院王妍玮副教授编写。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、检测技术与自动化装置和过程控制等专业的教材，也可作为电子信息工程和机电类各专业的教学用书，还可供自动控制等专业领域的工程技术人员参考。

由于水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

目录

CONTENTS

第 1 章	自动控制的基本概念	001
1.1	概述	001
1.2	自动控制的基本原理	002
1.2.1	自动控制系统举例	002
1.2.2	自动控制系统的构成	004
1.3	控制系统的控制方式	005
1.3.1	开环控制	005
1.3.2	闭环控制	005
1.3.3	复合控制	006
1.4	控制系统的分类	006
1.4.1	按输入信号的变化规律分	006
1.4.2	按系统传输的信号特征分	007
1.4.3	按系统各环节输入-输出关系的特征分	007
1.4.4	按系统参数的变化特征分	007
1.5	对控制系统的性能要求	008
1.5.1	稳定性能	008
1.5.2	动态性能	008
1.5.3	稳态性能	008
习题		009
第 2 章	控制系统数学模型的建立	011
2.1	控制系统微分方程的建立	011
2.1.1	典型控制系统举例	012
2.1.2	线性系统的重要性质	014
2.1.3	线性系统微分方程的通用形式	015
2.1.4	非线性微分方程的线性化	015
2.2	线性系统的传递函数	017

2.2.1	传递函数的定义	017
2.2.2	传递函数的性质	018
2.2.3	典型环节及其传递函数	019
2.3	控制系统结构图	024
2.3.1	结构图的构成要素	024
2.3.2	控制系统结构图的建立	025
2.3.3	结构图的等效变换	027
2.4	控制系统的信号流图	030
2.4.1	信号流图	030
2.4.2	梅森增益公式	031
2.5	闭环控制系统的传递函数	032
2.5.1	闭环系统的开环传递函数	032
2.5.2	系统的闭环传递函数	032
2.5.3	闭环系统的误差传递函数	033
2.5.4	闭环系统的特征方程	034
习题		035

第3章 时域分析法 039

3.1	典型输入信号	039
3.2	瞬态响应分析	041
3.2.1	一阶系统的瞬态响应	041
3.2.2	二阶系统的瞬态响应	042
3.2.3	时域性能指标	045
3.2.4	二阶系统的动态性能指标	046
3.2.5	二阶系统性能的改善	048
3.2.6	高阶系统的近似分析	049
3.3	稳定性分析	050
3.3.1	稳定性的基本概念	050
3.3.2	线性系统稳定的充分必要条件	051
3.3.3	劳斯判据	051
3.4	稳态误差分析	055
3.4.1	稳态误差的概念	055
3.4.2	稳态误差的计算	056
3.4.3	减小或消除稳态误差的措施	061
习题		063

第4章 根轨迹分析法 065

4.1	根轨迹的概念	065
4.1.1	根轨迹	065

4.1.2	根轨迹方程	066
4.2	根轨迹的绘制	068
4.2.1	绘制根轨迹的基本规则	068
4.2.2	绘制根轨迹举例	075
4.3	广义根轨迹的绘制	077
4.3.1	参变量根轨迹的绘制	077
4.3.2	正反馈系统轨迹的绘制	080
4.4	控制系统的根轨迹分析	081
4.4.1	增加开环极点对控制系统的影响	081
4.4.2	增加开环零点对控制系统的影响	082
4.4.3	闭环极点的位置与系统性能的关系	083
4.4.4	用根轨迹分析系统的动态性能	083
习题		085

第5章 频域分析法 087

5.1	频率特性	087
5.1.1	频率特性的基本概念	087
5.1.2	频率特性的求取	088
5.2	频率特性的图示方法	090
5.2.1	极坐标图	090
5.2.2	对数坐标图	095
5.3	频域稳定性判据	101
5.3.1	开环频率特性与闭环特征方程的关系	101
5.3.2	幅角原理	102
5.3.3	奈奎斯特判据	103
5.3.4	对数频率稳定判据	106
5.4	系统的稳定裕度	107
5.4.1	相位裕度	107
5.4.2	幅值裕度	108
5.5	频域性能指标与瞬态性能指标之间的关系	109
5.5.1	开环频域性能指标与瞬态性能指标之间的关系	109
5.5.2	闭环频域性能指标与瞬态性能指标之间的关系	111
习题		112

第6章 线性控制系统的校正 115

6.1	系统的性能指标与校正方式	115
6.1.1	系统的性能指标	115
6.1.2	校正方式	115

6.2	常用校正装置及其特性	116
6.2.1	无源校正装置	116
6.2.2	有源校正装置	120
6.3	串联校正	121
6.3.1	校正方法	122
6.3.2	串联超前校正	122
6.3.3	串联滞后校正	125
6.3.4	串联滞后-超前校正	126
6.3.5	PID 校正	128
习题		130
第 7 章	离散控制系统	132
7.1	离散控制系统的基本结构	132
7.2	信号采样过程与采样定理	133
7.2.1	信号的采样	133
7.2.2	采样定理	134
7.2.3	信号的恢复	135
7.3	Z 变换理论	137
7.3.1	Z 变换定义	137
7.3.2	Z 变换的性质	137
7.3.3	Z 变换方法	138
7.3.4	Z 反变换方法	141
7.4	离散控制系统的数学描述	143
7.4.1	差分的定义	143
7.4.2	差分方程	144
7.4.3	差分方程的解法	144
7.4.4	脉冲传递函数	145
7.5	离散控制系统的分析	150
7.5.1	稳定性分析	150
7.5.2	稳态误差	153
7.5.3	瞬态响应	156
7.6	离散系统的数字控制器设计	157
7.6.1	数字控制器的脉冲传递函数	157
7.6.2	最少拍设计	158
习题		160
第 8 章	非线性控制系统	163
8.1	概述	163
8.2	典型非线性特性与特点	164

8.2.1	典型非线性特性	164
8.2.2	非线性系统的特点	165
8.3	相平面分析法	166
8.3.1	相平面法的概念	167
8.3.2	相轨迹的绘制方法	167
8.3.3	相轨迹的特点	170
8.3.4	由相轨迹求时间响应曲线	170
8.3.5	奇点和极限环	171
8.3.6	相平面分析举例	174
8.4	描述函数分析法	179
8.4.1	描述函数的基本思想	179
8.4.2	描述函数法的表示式	179
8.4.3	典型非线性元件的描述函数	180
8.4.4	用描述函数法分析非线性系统	186
习题		191

第9章 应用 MATLAB 的控制系统分析 193

9.1	应用 MATLAB 建立控制系统数学模型	193
9.1.1	控制系统数学模型的建立与转换	193
9.1.2	各系统模型连接后的等效模型	195
9.1.3	应用 Simulink 求控制系统的传递函数	195
9.2	应用 MATLAB 进行控制系统时域分析	196
9.2.1	绘制系统的响应曲线与读取动态性能指标	196
9.2.2	系统的稳定性分析	198
9.2.3	系统的稳态误差分析	199
9.3	应用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	200
9.4	应用 MATLAB 进行控制系统频域分析	202
9.4.1	对数坐标图的绘制	202
9.4.2	极坐标图的绘制	204
9.5	应用 MATLAB 进行线性系统校正	204
9.5.1	应用 MATLAB 程序进行系统校正	205
9.5.2	Simulink 环境下的系统设计和校正	206
9.6	MATLAB 在离散控制系统中的应用	207
9.6.1	连续系统的离散化	207
9.6.2	离散控制系统的稳定性分析	208
9.6.3	离散控制系统的最少拍设计	211

9.7 MATLAB 在非线性控制系统中的应用	212
9.7.1 基于 Simulink 非线性控制系统的相平面分析	212
9.7.2 利用 MATLAB 判断非线性系统的稳定性及自持振荡	213
附录 部分习题参考答案	215
参考文献	221

第1章

自动控制的基本概念

在科学技术飞速发展的今天，自动控制技术正在迅猛地发展，并作为一种技术手段已经广泛应用于农业生产、交通运输、国防建设和航空航天事业等领域中。本章介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的构成和特点、自动控制系统的几种类型等。

1.1 概述

随着现代生产和科学技术的发展，自动控制技术起着越来越重要的作用。自动控制带动了生产力的进步和发展，反过来现代技术和现代工程要求又促进了自动控制理论的发展。

所谓自动控制，是指在没有人参与的情况下，利用控制器的作用使生产过程或被控对象的一个或多个物理量，能维持在某一给定水平或按照期望的规律变化。自动控制技术的广泛应用，不仅使生产过程实现了自动化，极大地提高了生产效率，同时也减轻了人们的劳动强度。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，人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收，宇宙飞船能够准确地月球着陆并返回地面等，都是以应用高水平的自动控制技术为前提的。

自动控制理论是控制工程的理论基础，是研究自动控制共同规律的技术科学。自动控制理论按其发展过程分成“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

20世纪40年代“经典控制理论”正式诞生，代表作是维纳（Wiener）1948年出版的《控制论》（Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine）。到20世纪50年代末，经典控制理论已形成比较完整的体系，它主要以传递函数为基础，研究单输入、单输出反馈控制系统的分析和设计问题，其基本内容有时域法、频域法、根轨迹法等。

现代控制理论是20世纪60年代在经典控制理论的基础上，随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的，它以状态空间法为基础，研究多变量、变参数、非线性、高精度等各种复杂控制系统的分析和综合问题，其基本内容有线性系统基本理论、系统辨识、最优控制等。近年来，由于计算机和现代应用数学研究的迅速发展，控制理论继续向纵深方向发展。目前，自动控制理论正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入发展。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 自动控制系统举例

目前，在人们的日常生活和工农业生产中都有许多自动控制系统的例子。下面以两个工业生产过程的自动控制系统为例，介绍自动控制系统的工作原理和基本构成。

(1) 温度控制系统

在机械加工行业，为了消除被加工工件的内部应力，提高其力学性能，一般需要对工件进行热处理。为了完成这一加工任务而设计的一个自动控制系统如图 1-1 所示。对自动控制系统的要求是：随时调整直流伺服电动机的转动方向，并以此来改变调压变压器，从而达到对电阻炉温度的控制。同时又要保证工件温度尽量不受加工条件和外部干扰的影响，如环境温度的变化和电压的波动等。

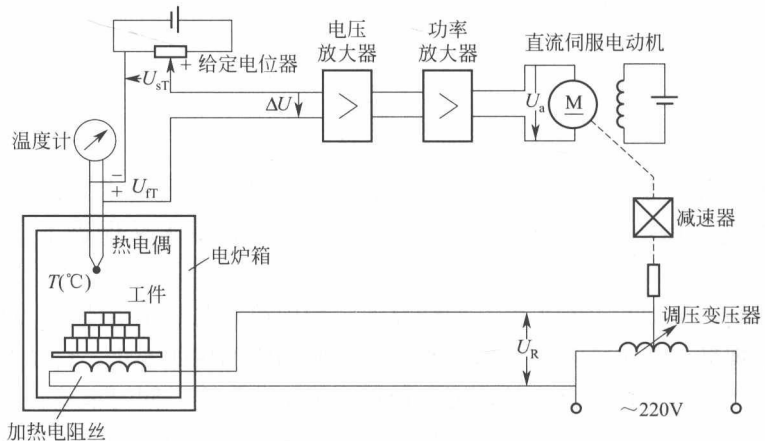


图 1-1 电阻炉温度控制系统

自动控制系统的工作原理是：图 1-1 中热电偶将检测到的温度信号 T 转变成电压信号 U_T 并以负反馈形式返回输入端与给定信号 U_{ST} 相比较，得到偏差电压 ΔU ，此偏差电压 ΔU 经过电压放大器、功率放大器放大后，改变直流伺服电动机的转速和方向，并通过减速器带动调压变压器，实现对炉温的闭环控制。

在图 1-1 中，输出量直接（或间接）地反馈到输入端形成闭环，使输出量参与系统的控制，这样的系统称为反馈控制系统，又称为闭环控制系统。在这里，控制装置和被控对象不仅有顺向作用，而且输出端和输入端之间存在反馈关系。图 1-2 表示电阻炉温度控制系统框图。由于系统是按偏差调节原则设计的，所以反馈连接和闭合回路是必然存在的，而且反馈信号应与给定值相减，以便得到偏差信号，故这种反馈又称为负反馈。负反馈是按偏差调节的自动控制系统在结构上和信号传递上的重要标志。

(2) 角位置随动系统

某角位置随动系统的工作原理图如图 1-3 所示。两个相同的电位器由同一直流电源供电，电位器 1 的滑臂由指令机构转动，相应的电位为 u_i ，电位器 2 的滑臂随工作机构转动，

相应的电位为 u_c 。以 $u_r - u_c$ 作为放大装置的输入，然后驱动电动机转动。电动机的转轴经变速箱后拖动工作机构按照给定的要求转动。

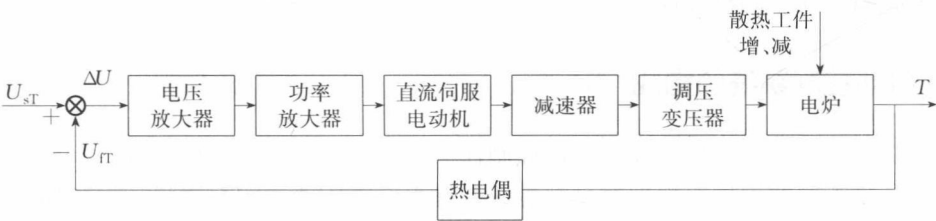


图 1-2 电阻炉温度控制系统框图

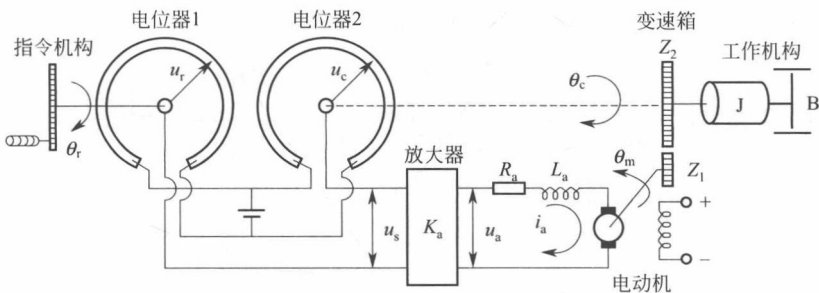


图 1-3 角位置随动系统工作原理图

此系统控制的任务是控制工作机械角位置 θ_c 跟踪手柄转角 θ_r 。工作机械是被控对象，工作机械的角位置是被控量，手柄角位移是给定量。

自动控制系统的工作原理是：当工作机械转角 θ_c 与手柄转角 θ_r 一致时，两环行电位器组成的桥式电路处于平衡状态，输出电压 $u_s = 0$ ，电动机不动。系统相对静止。

如果手柄转角 θ_r 变化了，而工作机械仍处于原位，则电桥输出 $u_c \neq 0$ ，此电位器信号经放大器放大后驱动电动机转动，经变速箱拖动工作机械向 θ_r 要求的方向偏转。当 $\theta_c = \theta_r$ 时，电动机停转，系统达到新的平衡状态，从而实现角位置跟踪目的。

由此看出，此控制系统通过机械传动机构和电位器来测量 θ_c ，将工作机构的角位移转换为便于处理的电位信号，并与指令机构 θ_r 产生的电位信号进行比较而产生偏差信号，再通过放大器和电动机来控制 θ_c ，所以仍是按偏差调节的反馈控制系统。角位置随动系统框图如图 1-4 所示，图中同样存在着一个负反馈闭合回路。

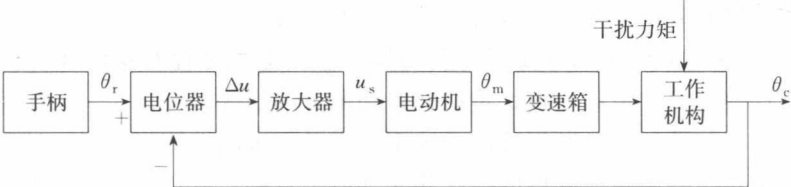


图 1-4 角位置随动系统框图

通过上述两个实例概括出自动控制系统的基本工作原理：通过测量装置随时监测被控量，并与给定值进行比较，产生偏差信号；根据控制要求对偏差信号进行计算和信号放大，并且产生控制量，驱动被控量维持在希望值附近。无论是干扰造成的，还是给定值发生变化或系统内部结构参数发生变化引起的，只要被控量与希望值出现偏差，控制系统就自行纠

偏，故称这种控制方式为按偏差调节的闭环控制。由于是将输出量反馈到输入端进行比较，并产生偏差信号，所以这种控制系统称为反馈控制系统。显然，这种反馈控制方式在原理上提供了实现高精度控制的可能性。

1.2.2 自动控制系统的构成

自动控制系统由被控对象以及为完成控制任务而配置的控制装置两大部分构成，而控制装置又可以分成不同的部件。根据每个部件或装置承担的职能及前后因果关系，构成一个用框图表示的自动控制系统，如图 1-5 所示。图中以方框表示各种职能，以箭头和连线表示各部分的联系。图中，被控对象是控制系统控制和操作的对象，即被控制的机器、设备、过程或系统。被控对象接受控制量并输出被控量。

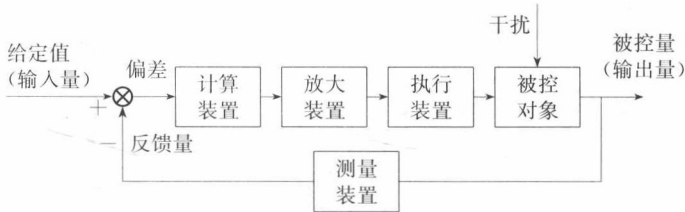


图 1-5 自动控制系统原理框图

控制系统中除被控对象以外的元部件统称控制装置。但依控制元件在系统中的作用不一样，可将控制装置分为以下几类：

① 计算装置：它是控制装置的核心，决定着控制系统性能的好坏。它的职能是根据控制要求，对偏差信号进行各种计算并形成适当的控制作用。校正装置就是可以实现某种控制规律的计算装置，而对复杂的运算可以利用计算机完成。

② 放大装置：它对偏差信号进行放大，使之成为适合控制器执行的信号。常用放大装置有放大器、晶闸管整流器、液压伺服放大器等。

③ 测量装置：测量装置又称为反馈环节，它用来测量被控量的实际值，并将其转换为与被控量有对应关系且与输入量为同一物理量的信号的装置。常用的测量元件有测速电机、编码器、自整角机等。

④ 比较装置：它的职能是把测量信号与给定信号进行比较，求出它们之间的偏差（图 1-5 中反馈量端的“-”号表示负反馈；如果是正反馈，则用“+”号表示，可以省略）。通常采用的比较装置有差动放大器、电桥、机械的差动装置等。

⑤ 执行装置：它的职能是用来实现控制动作，直接操纵被控对象的元件。常用执行元件有：交、直流伺服电机，液压马达，传动装置和调节阀门等。

当上述控制装置与控制对象所组成的系统不能满足要求的性能指标时，控制系统中还要加入一些元件或装置以提高系统的性能，这些元件或装置构成校正环节。在本书第 6 章中将详细描述。

除此之外，自动控制系统框图中还有以下常用的名词术语：

- ① 输入量：输入到控制系统中的指令信号（参考输入或给定值）。
- ② 输出量：被控对象的输出量，即控制系统的被控量。
- ③ 反馈量：系统的输出量经过变换、处理后送到系统的输入端的信号。

- ④ 控制量：被控对象的输入量，它是偏差量的函数，故可将偏差量看作控制量。偏差量是输入量与反馈量之差。
- ⑤ 干扰量：除输入信号外，对系统产生不利影响的信号。干扰来自系统内部或外部。
- ⑥ 反馈通道：从被控量端（输出）到给定值端（输入）所经过的通路。
- ⑦ 前向通道：从给定值端（输入）到被控量端（输出）所经过的通路。

1.3 控制系统的控制方式

自动控制系统的基本控制方式有开环控制、闭环控制和复合控制，分别叙述如下。

1.3.1 开环控制

开环控制系统是指系统的输出端和输入端不存在反馈关系，系统的输出量对控制作用不发生影响的系统。这种系统既不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到输入端与输入量进行比较，控制装置与被控对象之间只有顺向作用，没有反向联系。根据信号传递的路径不同，开环控制系统有两种：一种是按给定值操作的开环控制系统；另一种是按干扰补偿的开环控制系统。其系统框图分别如图 1-6 和图 1-7 所示。

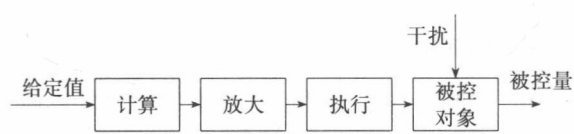


图 1-6 按给定值操作的开环控制系统框图

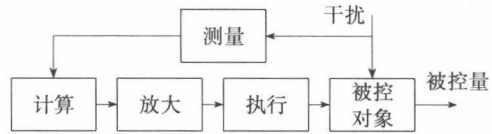


图 1-7 按干扰补偿的开环控制系统框图

开环控制系统的优点是系统结构和控制过程简单，稳定性好，调试方便，成本低。缺点是抗干扰能力差，当受到来自系统内部或外部的各种扰动因素影响而使输出量发生变化时，系统没有自动调节能力，因此控制精度较低。一般用于对控制性能要求不高，系统输入-输出之间的关系固定，干扰较小或可以预测并能进行补偿的场合。

1.3.2 闭环控制

闭环控制是指被控量有反馈的控制，相应的控制系统称为闭环控制系统，或反馈控制系统。闭环控制系统中，输入量通过控制器去控制被控量，而被控量又被反馈到输入端与输入量进行比较，比较的结果为偏差量，偏差量经由控制器适当的变换后控制被控量。这样整个控制系统就形成了一个闭合的环路。图 1-8 表示闭环控制系统框图。

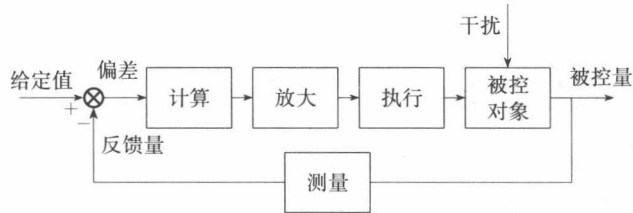


图 1-8 闭环控制系统框图

闭环控制系统的突出优点是控制精度高，抗扰能力强，适用范围广。无论出现什么干扰，只要被控量的实际值偏离给定值，闭环控制就会通过反馈产生控制作用来使偏差减小。这样就可使系统的输出响应对外部干扰和内部参数变化不敏感，因而有可能采用不太精密且成本较低的元件来构成比较精确的控制系统。

闭环控制也有其固有的缺点：一是结构复杂，元件较多，成本较高；二是稳定性要求较高。由于系统中存在反馈环节和元件惯性，而且靠偏差进行控制，因此偏差总会存在，时正时负，很可能引起振荡，导致系统不稳定。可见控制精度与稳定性是闭环系统的基本矛盾。

1.3.3 复合控制

为了降低系统误差，在反馈控制系统中从输入顺馈补偿，如图 1-9 所示，顺馈补偿与反馈控制相结合，就构成复合控制。顺馈补偿与偏差信号一起对被控对象进行控制。

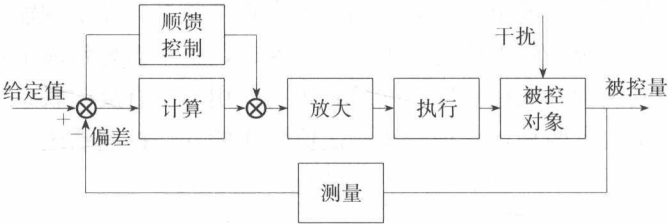


图 1-9 按输入顺馈补偿的复合控制

若扰动是可测量的，应用如图 1-10 所示的复合控制可补偿扰动信号对系统输出的影响。这种复合控制是在可测扰动信号的不利影响产生之前，通过顺馈控制的通道对其进行补偿，以减小或抵消干扰对系统输出的影响。

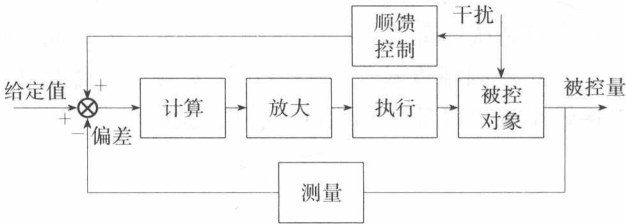


图 1-10 按扰动顺馈补偿的复合控制

1.4 控制系统的分类

自动控制系统分类方法很多，常见的主要有以下几种分类方法和基本类型。

1.4.1 按输入信号的变化规律分

(1) 恒值控制系统

此类系统中，输入信号在某种工作状态下一经给定就不再变化，控制的任务就是抑制各种干扰因素的影响，使被控量也维持恒定。如生产过程中的温度、压力、流量和液位等自动