



“十三五”普通高等教育本科规划教材

ZIDONG KONGZHI YUANLI-JIANMINGPIAN

自动控制原理 ——简明篇

杨平 翁思义 余洁 王志萍 徐晓丽 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育

自动控制原理 ——简明篇

编著 杨 平 翁思义 余 洁
王志萍 徐晓丽
主审 韩 璞



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是“十三五”普通高等教育本科规划教材，是在普通高等教育“十二五”国家级规划教材《自动控制原理——理论篇》、《自动控制原理——练习与测试篇》和《自动控制原理——实验与实践篇》的基础上编写而成的，是以上三种教材的合成简明版。此外，本书在控制系统数学模型编写上采用了更系统、更全面和更简练的阐述方式。

本书针对本科院校非自动化专业的短学时课程教学需要编写，力求通俗易懂又简明实用。本书比较全面地介绍了自动控制系统的分析与设计理论和应用技术，内容包括控制系统的数学模型、控制系统的时域分析与系统设计导论、控制系统的根轨迹分析与设计、频域分析与设计、离散控制系统的分析与设计，以及非线性控制系统的分析。所选内容都是目前控制理论和应用技术中最基础的部分，特别适用于想要了解和掌握控制理论和应用技术的初学者进行入门学习。

本书可作为普通高校工学本科非自动化类专业以及高职高专和成人高校的自动化专业的自动控制原理课程教材，也可供从事自动化科技的工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理. 简明篇/杨平等编著. —北京: 中国电力出版社, 2015.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8120-9

I. ①自… II. ①杨… 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 (2015) 第 176123 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 430 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书针对本科院校非自动化专业的“自动控制原理”或“控制工程基础”短学时课程教学需要编写，力求达到通俗易懂、简明扼要又适于工程应用的目的。为此，本书的编写思路主要有四点：一是用较少的篇幅精练地阐明非自动化专业学生所需的较宽知识面的基本知识；二是尽量不用艰深的数学证明，而用最为直接的简略方式导出自动控制原理的基本理论；三是引导读者在应用理论中理解理论，加大解题和实验指导的比例；四是强化控制系统特性分析方法和控制器的初步设计理念。

每个可能面临控制系统问题的工程科技人员都期待具有这样的能力：首先，会用方框图变换或信号流图法将该系统分解成环节或综合成大的系统；其次，会理解用机理建模或实验建模法建立的系统数学模型；再次，会用系统分析方法分析出控制系统的基本特性，如稳定性、快速性或稳态误差；最后，会利用系统分析设计方法改进控制系统特性。

控制系统特性分析方法主要分为时域法、根轨迹法、频域法和状态空间法四种。前三种方法都基于传递函数模型，第四种方法基于状态方程模型。时域法是最基本的，它以阶跃响应直观地定义了时域性能指标，用劳斯判据可轻松判别系统的稳定性，用稳态误差系数可定量分析系统的稳态误差。根轨迹法则利用变开环增益在闭环根平面上展示系统的动态特性变化。频域法则利用对数幅频特性曲线直观地表示了系统的频率响应。状态空间法则可利用矩阵变换分析出系统的可控性和可观性。状态空间法属于现代控制理论，本书没有展开讲解，只介绍了状态空间模型和简单解法。上述四种分析方法主要用于连续控制系统，而对于离散控制系统，经过离散/连续变换处理后也同样适用。当然，直接用离散系统方法做离散控制系统的分析和设计更简便。另外，非线性系统的基本分析方法也是需要有所掌握的。

本书由韩璞教授主审，他的许多宝贵意见和建议我们已经采纳，在此深表感谢。

对于本书中的不妥之处，恳请广大读者来信批评指正 (yangping1201@126.com)。

编者

2015年5月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统的反馈原理和基本概念	3
1.3 系统分析的方框图表示法	4
1.4 控制系统的组成和基本变量	4
1.5 自动控制系统的分类	5
1.6 自动控制系统的性能分析	10
1.7 自动控制系统的性能要求	12
例题分析 1	13
实验指导 1	14
习题 1	16
第 2 章 控制系统的数学模型	18
2.1 引言	18
2.2 线性时不变连续系统的数学模型	18
2.3 线性时不变离散系统的数学模型	28
2.4 控制系统的方框图和信号流图分析方法	32
2.5 闭环控制系统的典型传递函数	39
2.6 控制系统的机理分析建模方法	40
2.7 控制系统的实验建模方法	45
2.8 典型环节的动态特性	50
例题分析 2	60
实验指导 2	63
习题 2	65
第 3 章 控制系统的时域分析	69
3.1 引言	69
3.2 时域性能指标	69
3.3 标准一阶系统的时域分析	71
3.4 标准二阶系统的时域分析	73
3.5 高阶系统的动态响应及简化分析	80
3.6 控制系统的稳定性与代数判据	84
3.7 控制系统的稳态误差分析及误差系数	93

例题分析 3	100
实验指导 3	102
习题 3	104
第 4 章 控制系统设计导论及时域设计	107
4.1 引言	107
4.2 系统结构设计	109
4.3 控制规律选择	112
4.4 控制器参数整定	116
4.5 串级控制系统	119
4.6 前馈控制系统	120
4.7 迟延补偿控制系统	122
例题分析 4	123
实验指导 4	124
习题 4	127
第 5 章 控制系统的根轨迹分析与设计	128
5.1 引言	128
5.2 根轨迹的基本概念	128
5.3 根轨迹图的绘制规则和方法	131
5.4 线性系统的根轨迹图分析	140
5.5 控制系统的根轨迹设计	142
例题分析 5	147
实验指导 5	150
习题 5	152
第 6 章 控制系统的频域分析与设计	153
6.1 引言	153
6.2 极坐标频率特性图 (奈奎斯特图)	153
6.3 对数坐标频率特性图 (伯德图)	159
6.4 控制系统稳定性的频域判据	169
6.5 控制系统的频域分析	174
6.6 闭环系统频率特性分析	179
6.7 控制系统的频域设计	181
例题分析 6	186
实验指导 6	189
习题 6	191
第 7 章 离散控制系统的分析与设计	194
7.1 引言	194
7.2 连续信号的采样和复现	195
7.3 连续系统的离散化	198
7.4 闭环控制系统的脉冲传递函数	200

7.5 离散控制系统的性能分析	203
7.6 离散控制系统的设计	210
例题分析 7	217
实验指导 7	218
习题 7	219
第 8 章 非线性控制系统的分析	221
8.1 引言	221
8.2 典型非线性环节特性	223
8.3 非线性控制系统的描述函数法分析	226
8.4 非线性控制系统的相平面分析	234
例题分析 8	242
实验指导 8	245
习题 8	247
附录 1 拉氏变换表及定理	249
附录 2 用拉氏变换求解微分方程	252
附录 3 Z 变换表及定理	254
附录 4 Z 反变换解算	256
附录 5 典型系统的根轨迹图	258
附录 6 一些常用数学运算公式	259
习题参考答案	261
参考文献	275

第1章 概 述

1.1 引 言

在人类社会的发展过程中,控制科学与技术起着十分重要的作用。人造卫星上天、宇宙飞船登月、导弹制导、自动驾驶等高精尖的项目和工程离不开控制科学与技术。控制科学与技术不仅在石油、化工、冶金、机械、轻工、电子、汽车、通信、航空、航天、电力等工程领域被广泛应用,而且在经济、管理、生物、社会学、生态等非工程领域也被广泛应用。可以毫不夸张地说,控制科学与技术已经成为现代化社会中不可或缺的组成部分。

控制科学与技术的基础是自动控制理论。自动控制理论常被称为自动控制原理,主要讲述自动控制系统的基本原理以及分析和设计方法。本章将简要介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的基本组成和分类、自动控制系统性能分析和要求等内容。

1. 自动控制的概念

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用自动控制装置操控被控对象,使被控对象或过程自动地按预定的规律运行。能够实现自动控制的系统称为自动控制系统。

下面用一个常见的控制系统案例解释自动控制的概念。

图1-1所示为水箱水位人工控制系统,控制任务是要求水箱水位按期望水位变化。水位的高低受到进水量和出水量的影响,通过调节进水阀门的开度控制水位高低。在人工控制方式下,人通过眼睛观测水箱的实际水位并与期望水位作比较,再根据实际水位与期望水位偏差通过手调节进水阀门开度。当实际水位低于期望水位时,将阀门开大一点使进水量增加,再观察一段时间看实际水位与期望水位是否达到一致。若不足,则开大一点;若过量则关小一点。通过多次调整,可达到水位控制的要求。在人工控制方式中,人的劳动强度较大,控制质量依赖于控制操作人的经验和反应,控制准确度和速度一般都不高。

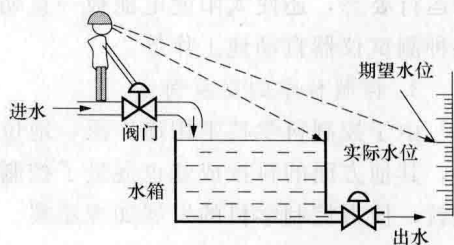


图 1-1 水箱水位人工控制系统

图1-2所示为水箱水位自动控制系统。电位器的参考电压 u_0 对应期望水位;浮子是水箱水位的检测装置,浮子通过连杆带动电位器的动触点,于是 u_1 对应实际水位。当实际水位低于期望水位时,放大器的输入电压值 Δu 为正,且其大小反映了实际水位与期望水位的差值,放大器输出信号将产生正向的电

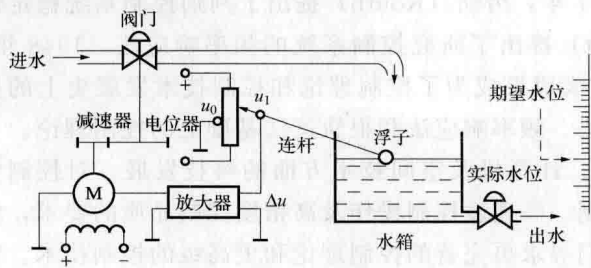


图 1-2 水箱水位自动控制系统

动机电枢电压，电动机带动减速器使阀门开度增大，使实际水位上升；反之，当实际水位高于期望水位时， Δu 为负，放大器输出信号将产生负向的电动机电枢电压，电动机带动减速器使阀门开度减小，使实际水位下降。自动控制方式中，机器操作代替了人工操作，自动控制质量取决于自动控制机器的设计和制作水平，借助于现代科学技术，自动控制机器完全可以超越人工控制时人的局限性，达到较高的控制准确度和速度。

2. 自动控制的概念实例

反映自动控制概念的实例有很多。从家用电器到工业机器，从地球到太空，涉及范围很广。以下仅举几例：

(1) 电饭煲温度自动控制：根据人们事先设计好的顺序，电饭煲能自动进行定时加温、保温。

(2) 空调温度控制：根据人们设定的温度，空调能自动开关冷气机（或加热器），并且自动调节空调主机转速，向室内送冷气或热气，使室温保持在设定温度上。

(3) 汽轮机转速控制：汽轮机控制系统可自动维持汽轮机的转速为额定值；当转速高于或低于额定转速时，将自动关小或开大主汽阀门。

(4) 声控光控路灯：路灯的控制器可根据人的脚步声开启路灯，还可根据环境亮度来控制路灯的开启和关闭。

(5) 导弹飞行控制：导弹控制器具有自动纠正方向、自动导向目标和飞行姿态控制功能。

(6) 宇宙飞船控制：宇宙飞船的自动控制装置将导引飞船正确进入预定轨道并控制飞船的运行姿态，还使太阳能电池板一直朝向太阳、使无线电天线一直指向地球、使它所携带的各种测试仪器自动地工作等。

3. 控制科学的发展简述

由于控制科学技术用途广泛，地位越来越重要，所以控制学科的发展非常迅速。除此之外，其他方面的科技成就也促进了控制学科快速发展，尤其是计算机、通信和网络技术的成就，使得控制学科的发展如虎添翼。

控制学科和其他学科一样，也经历了由简单到复杂、由初级到高级的发展过程。控制学科包括控制理论和控制技术两个方面。其中，控制理论一般分为经典控制理论和现代控制理论两部分。

经典控制理论是指 20 世纪 50 年代以前发展起来的控制理论。在工业化的历史发展中，经典控制科学技术也逐渐发展起来。瓦特（Watt）18 世纪发明的蒸汽机离心调速器是将自动控制技术应用到工业中的最早代表。1877 年，劳斯（Routh）提出了判别控制系统稳定性的代数判据。1932 年，奈奎斯特（Nyquist）提出了研究控制系统的频率响应法。1948 年，伊文斯（Evans）提出了根轨迹法。这些重大成果成为了控制理论和控制技术发展史上的里程碑。经典控制理论正是建立在时域分析法、频率响应法和根轨迹法基础上的控制理论。

20 世纪 50 年代末至 60 年代初，核能、计算机及空间技术方面的科技发展，对控制学科提出了更高的要求。大型复杂系统的控制、高速度控制操作及高精度控制品质的要求，使经典控制理论的局限性暴露出来，促使人们寻求更完善的控制理论和更高级的控制技术。在这种背景下，贝尔曼（Bellman）等人提出了状态空间法。1960 年，卡尔曼（Kalman）在控制系统的研究中成功地应用了状态空间法，并提出了能控性和能观测性的新概念，这被认为

是现代控制理论发展的开端。20 世纪 60 年代以后,新控制理论不断涌现,如最优控制、系统辨识、多变量控制、自适应控制、专家系统、人工智能、神经网络、模糊控制、预测控制、智能控制理论等。现代控制理论正是指 20 世纪 50 年代以后发展的控制理论。

1.2 自动控制系统的反馈原理和基本概念

一个自动控制系统主要由两部分组成:一部分是被控制的设备或过程,称为**受控对象**或**受控过程**;另一部分是起控制作用的设备或装置,称为**控制装置**,如图 1-3 所示。对于受控过程子系统而言,其输出变量是表征设备或过程的运行情况或状态且需要加以控制的参数,称为**被控量**;其输入变量是可使被控量发生变化的**控制量**(或称**操作量**)。对于控制装置子系统而言,其输入变量一般有两种:一种是希望被控量应该具有的数值,称为**设定值**或**给定值**;另一种是被控量的**反馈量**。控制装置子系统的输出变量就是受控过程子系统的输入量——**控制量**(或称**操作量**)。引起被控量发生不期望的变化的外部和内部因变量,统称为**扰动量**。

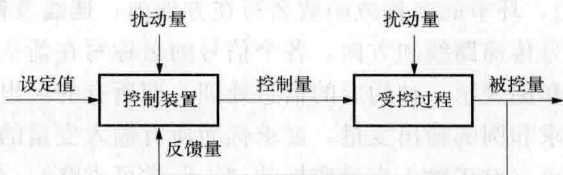


图 1-3 典型自动控制系统的最简构成

现实中的自动控制系统绝大部分为反馈控制系统,即控制装置引入了被控量的反馈量,控制过程存在反馈工作机理。“反馈”是自动控制理论中最基本的概念之一,反馈控制是一种最基本的自动控制原理。正是由于反馈机制的存在,才使得控制的动态过程趋于稳定状态,使得系统的内外扰动被抑制。

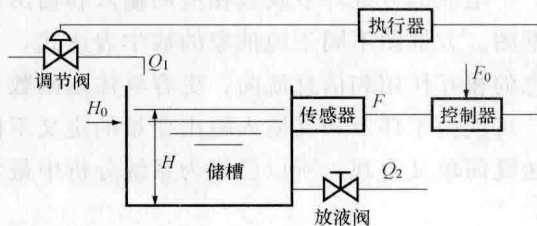


图 1-4 储槽液位控制系统的原理结构

现以一储槽的液位控制系统为例来进一步说明反馈控制原理和控制系统的一些基本概念。图 1-4 所示为储槽液位控制系统的原理结构。图中 Q_1 为进入储槽的液体流量, Q_2 为流出储槽的液体流量。控制的目的是使储槽中的液位以一定的精度稳定于某一高度 H_0 。这里储槽即为受控对象,液位 H 是被控量, H_0 为期望值。期望值 H_0 的大小可以根据需要改变,故常称为设定值。当该系统受到了内部或外部的扰动,如进液压力增高使 Q_1 增加,或者是放液管道阻力变化使 Q_2 改变时,即 $Q_1 \neq Q_2$,将使液位上升或下降。图 1-4 中的液位传感器将自动地检测液位的变化,并把液位高低的变化变换成与之成比例的统一信号(一般为电量信号),此信号就是送入控制器的液位测量值 F 。在控制器中,液位给定值 F_0 (与 H_0 成比例)与液位测量值 F 将被比较而得出偏差值。控制器根据偏差值的大小,按某种运算规律计算出控制器应输出的控制量信号。控制量信号送到执行器,执行器去操作调节阀阀门,使 Q_1 改变,从而使液位保持在所期望的数值上。这就是储槽液位的自动控制工作原理和基本过程。在这个控制过程中,控制器改变控制量不仅仅依据给定值还考虑了被控量的反馈量,形成了反馈控制机制。

1.3 系统分析的方框图表示法

在研究任何一种系统的变量信息关系时，为了便于清楚地表示和分析系统各组成环节间的相互影响和变量信息（或称信号）传递关系，常采用方框图（功能图）表示法。针对自动控制系统分析的方框图表示法定义了四种基本的图形元素：矩形或方框、连线及箭头、求和圆、分支点，如图 1-5 所示。其中，矩形或方框表示系统的各个环节（或信息处理功能模块），环节的名称或函数名写在方框内；连线及箭头表示系统的各方框或求和圆或分支点的信号传递路线和方向，各个信号的名称写在箭头旁边，箭头指向表示变量信息传递的方向；求和圆表示一种约定的信息处理，即所有的输出变量将是所有输入变量的代数和，为正确计算求和圆的输出变量，要求标明所有输入变量的极性，一般将“-”标在负输入变量箭头旁即可（对正输入变量应标的“+”常可省略）；分支点表示信息的等量传递关系，即进入分支点和离开分支点的信号都是相同的（正因为如此，进入分支点的连线端处不画箭头，而离开分支点的连线端处才画箭头）。

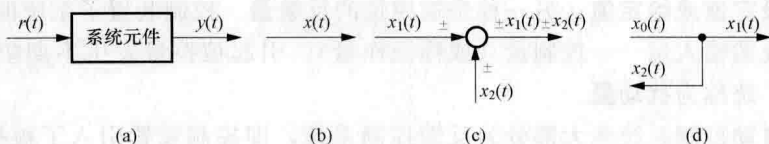


图 1-5 方框图表示的四种图形元素

(a) 方框；(b) 信号线；(c) 求和圆；(d) 分支点

当一个系统为某种分析的需要，定义了每一个组成部分或环节及其相应的输入和输出变量，就可以用方框图表示法绘制出该系统的方框图。方框图不同于纯抽象的数学表达式，它的优点在于可以清晰地看出实际系统中内部信息的相互作用和信息流向，更容易体现函数功能，便于定性和定量地分析系统。对同一系统，可能由于环节和其输入输出变量的定义不同而绘制出多种形式的方框图。由于方框图表示法既简单又直观，所以已成为系统分析中最常见的分析方法之一。

在应用方框图表示法时，需要注意区别求和圆和分支点的差别，不要混淆。因为，在分支点上无论进入还是输出的变量都是相同的，而在求和圆上的进入变量各不相同，但输出的变量一定相同。

1.4 控制系统的组成和基本变量

应用方框图表示法可把图 1-4 所示的储槽液位控制系统表示为图 1-6。可见，经过方框图这种抽象表达，储槽液位控制系统中的有关控制的变量关系变得十分明确，而该系统的具体设备物理特征被淡化了。

典型的反馈控制系统可以应用方框图表示，如图 1-7 所示。可以看出，典型的反馈控制系统由四个基本环节组成，即由受控过程、传感器、控制器和执行器组成，而传感器，控制器和执行器构成了控制装置。受控过程又可细分为可控通道和干扰通道两部分。

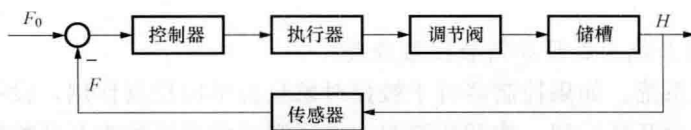


图 1-6 储槽液位控制系统方框图

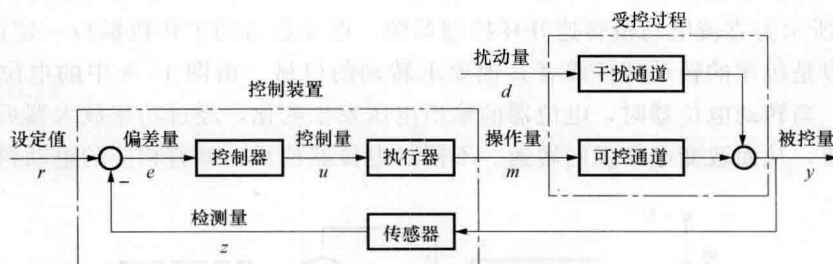


图 1-7 控制系统的组成和基本变量

典型反馈控制系统的四个基本环节可以进一步定义如下：

受控过程：指被控制的生产设备或生产过程，如液位控制系统的储槽。受控过程中细分的可控通道建立了从操作量到被控量间的关系，而细分的干扰通道则反映了扰动量对被控量的影响。

传感器：用来测量被控量的大小，并把被控量变换成统一的标准电气信号或数字信号，送往控制器。例如，测速发电机用于检测电动机轴的转速并转换为电压，热电偶用于检测温度并转换为电压等。

控制器：将传感器反馈的被控量与给定值比较生成的偏差信号，按一定的控制规律运算出控制信号（标准的电气信号或数字信号）给执行器。

执行器：将控制器发来的控制信号变换成受控对象的输入变量，如阀门开度、质量流量、力矩等。

图 1-7 所示的典型反馈控制系统图还表示了典型反馈控制系统的七个基本变量：**设定值** r (Setpoint Value, SV)、**偏差值** e (Deviation Value, DV)、**被控量** y (Process Value, PV)、**控制量** u (Control Value)、**操作量** m (Manipulation Value, MV)、**扰动量** d (Disturbance Value) 和 **被控量** y 的**检测量** z (Measurement Value)。在调节和显示仪表中或在监控计算机的显示屏上，常可见到缩写字母 SV、PV 和 MV，它们就是控制系统中设定值、被控量和操作量的标记名称。当忽略执行器，或者把执行器归为受控过程的一部分时，则控制量就等同于操作量。当忽略传感器，或者把传感器归为受控过程的一部分时，则被控量就等同于它的检测量。在本书后面的论述中，常常为了系统分析简明起见，只论及被控量和控制量。

1.5 自动控制系统的分类

根据分析和观察一个自动控制系统不同视角和着眼点，可以做出不同的自动控制系统分类。以下列出常用的几种分类，不同的分类方法将从不同的侧面反映控制系统的不同

特征。

1. 按自动控制系统是否形成闭合回路分类

(1) 开环控制系统。如果控制器对于被控对象只有单向控制作用，没有被控对象到控制器的反向联系，称为开环控制。按开环控制方式所组成的系统称为开环控制系统。开环控制系统的控制作用完全由系统的输入量产生，其控制精度取决于所用的元部件及其精度。

常见的开环控制系统有自动售货机、自动洗衣机、自动门、面包烤炉箱等。

图 1-8 所示为直流电动机转速开环控制系统。电动机带动工作机械以一定的转速旋转，工作机械可以是机床的转动部件或者其他要求转动的机械。由图 1-8 中的电位器可改变电动机的转速。当转动电位器时，电位器的输出电压发生变化，经过功率放大器后去改变电动机的电枢电压，从而改变电动机的转速。不同的电位器位置，就有相应的电动机转速。

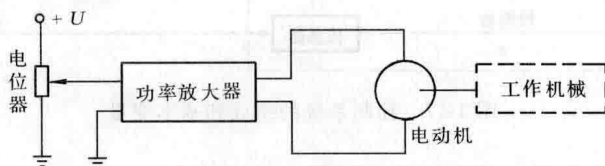


图 1-8 直流电动机转速开环控制系统

图 1-8 的控制系统可以用图 1-9 表示。可以看出，这个系统的信息传递是单方向的。电位器位置相当于转速设定值，功率放大器相当于控制器和执行器，电动机是受控对象，电动机转速是被控量。被控量没有反馈至控制器而形成一个闭合回路。当电动机所带动的工作机械有变化时，即使电位器位置不变，转速也会升高或降低，这就造成了转速设定值与实际转速值的不一致。所以，开环控制系统的最大缺点就是易受干扰的影响、控制精度较低，而它明显的优点是结构简单、成本低、容易实现。

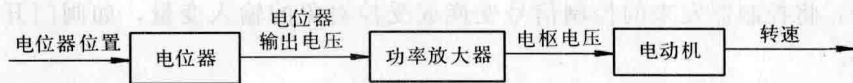


图 1-9 电动机转速开环控制系统方框图

(2) 闭环控制系统。在图 1-8 所示系统的基础上，增加一个测速发电机来检测电动机转速，再将这个转速信号反馈到功率放大器输入端与电位器的电压进行比较，其偏差值使放大器的输出电压改变，再去控制电动机的转速，这就形成了电动机转速的闭环控制系统，如图 1-10 所示。该控制系统还可用图 1-11 所示的方框图表示。可以看出，该系统的特点是其信息传递路线形成了一个闭合回路，被控量电动机转速被反馈至控制器。这样一来，只要电位器的位置不变，无论电源变化（内扰）或负载变化（外扰）等扰动引起的转速（被控量）变化，都将使放大器的输出发生相应变化，从而自动地保持电动机输出转速不变。闭环控制系统的优点就是控制精度高、抗干扰，而缺点是结构复杂、成本高。

2. 按控制器的馈入信号的特点分类

(1) 反馈控制系统。将被控量信号反馈到控制器的输入端，就形成一个闭合回路系统，该系统就是反馈控制系统。反馈控制系统也是闭环控制系统。图 1-11 所示的电动机转速闭

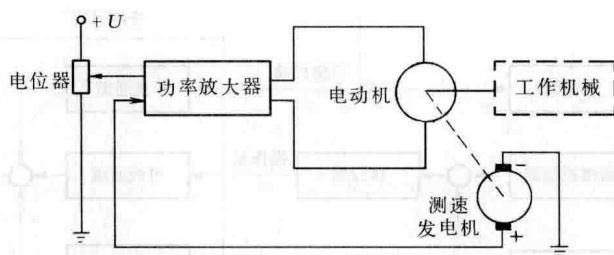


图 1-10 电动机转速闭环控制系统

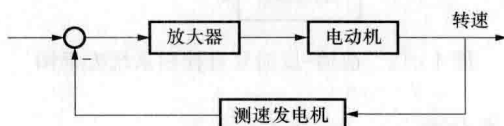


图 1-11 电动机转速闭环控制方框图

环控制系统就是一个反馈控制系统。一个复杂的控制系统，也可能含有多个反馈信号并形成多个闭合回路，这称为多回路反馈控制系统。

(2) 前馈控制系统。前馈控制系统是直接根据可测扰动信号进行调节的系统。可测扰动量是前馈控制量变化的依据。由于它没有被控量的反馈信号，不能形成闭合回路，所以它是一种开环控制系统。

图 1-12 所示为前馈控制系统方框图，扰动 d 将使被控量 y 发生变化，前馈控制器根据扰动量进行控制，及时抵消扰动量 d 对被控量 y 的影响，从而使被控量 y 保持不变。当有其他不可测的扰动 v 影响受控对象时，这种开环结构的前馈控制系统就不能保证控制被控量到较高的精度，所以，单纯的前馈控制系统在实际过程中很少使用。

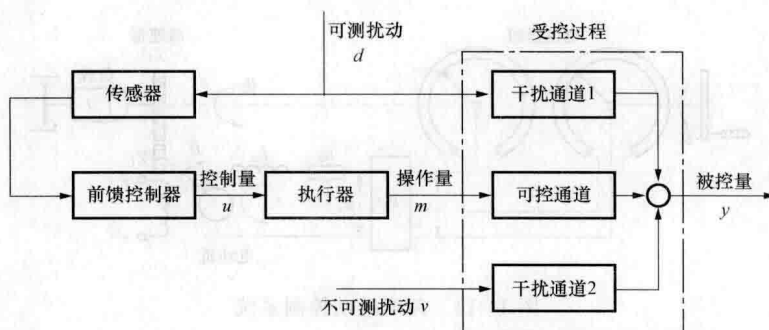


图 1-12 前馈控制系统方框图

(3) 前馈-反馈复合控制系统。如图 1-13 所示，在反馈控制系统的基础上，增加了对可测扰动 d 的前馈控制，便构成了前馈-反馈复合控制系统。当可测扰动 d 发生后，前馈控制器能及时消除可测扰动对被控量的影响，而对于其他的扰动，反馈控制器将发挥作用，两种控制作用优势结合，可得到更高的控制质量。

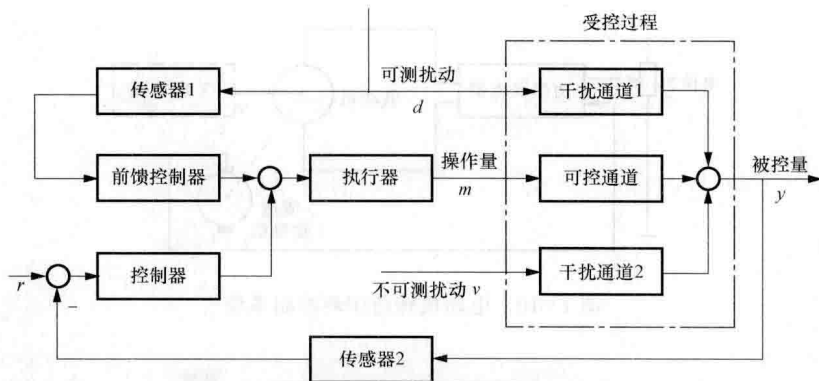


图 1-13 前馈-反馈复合控制系统方框图

3. 按给定值信号的特点分类

(1) 恒值控制系统。当自动控制系统运行时，给定值保持恒定不变，也就是使被控量保持不变，这就是恒值控制系统。它是实际中应用最多的一种控制系统。例如，电动机转速控制、空调房间温度控制、容器的液位控制、电力网的频率控制等都是恒值控制系统。

(2) 随动控制系统（伺服系统）。随动控制系统简称随动系统，是给定值随时间变化频繁的控制系统，要求被控量能随时跟踪给定值的变化。例如，在锅炉燃烧过程控制中，要求空气量随燃料量的变化而成比例地变化。运动目标的自动跟踪、跟踪卫星的雷达天线控制系统、机械加工中的靠模加工控制系统等都属于随动控制系统。

图 1-14 为角度随动控制系统的原理图。控制系统的目标是控制负载的角位移 θ_c 随给定角度 θ_r 的变化而变化。当负载角位置与给定位置有偏差时，通过电位器组得到偏差电压 u_s ，通过放大器转换为电枢电压 u_a ，使得执行电动机带动减速器和负载跟随给定角度 θ_r ，直至 $\theta_c = \theta_r$ 。

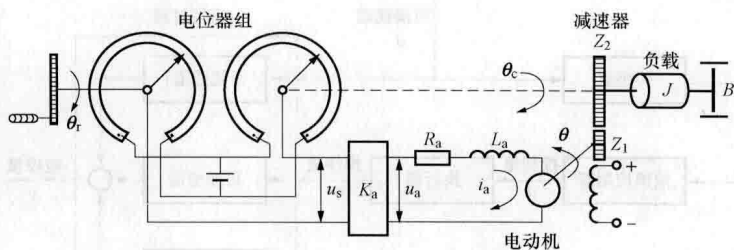


图 1-14 角度随动控制系统

(3) 程序控制系统。程序控制系统的给定值是一个已知的时间函数，控制的目的是让被控量按给定值时间函数变化。例如，在发电厂汽机启动过程中，要求转速按预先规定的时间函数来升速。又如，材料热处理时的升温保温过程控制及程序控制机床等，都属于程序控制系统的范畴。

4. 按控制系统的传递信号在时间上是否连续分类

(1) 连续（时间）控制系统。当控制系统的传递信号都是时间的连续函数时，这种系统称为连续（时间）控制系统，又常称为模拟量控制系统（相对于数字量控制系统而言）。本

书除第7章外,主要分析连续(时间)控制系统。

(2) 离散(时间)控制系统。控制系统在某一处或几处传递的信号是脉冲形式或数字形式的系统称为离散控制系统。离散控制系统的主要特点是离散信号是特定离散时刻(常常是连续时间的固定周期倍长时刻)的函数。对于连续信号则用采样开关采样方式转变为离散信号。通常,因离散信号采用脉冲形式的系统而称之为脉冲控制系统;因采用计算机或数字控制器,其离散信号以数字形式传递的系统称之为采样控制系统或数字控制系统,其方框图如图1-15所示。图中,A/D和D/A分别为模/数和数/模转换器。

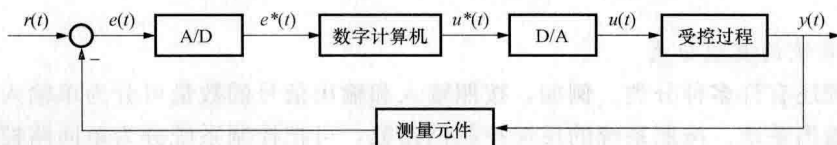


图1-15 采样(数字)控制系统方框图

5. 按照控制系统主要元件的特性来分类

(1) 线性控制系统。当控制系统各环节的输入/输出特性具有线性关系,即其动态特性过程可以用线性微分方程来描述(对于离散系统而言,则是可以用线性差分方程来描述),其稳态特性如图1-16所示,则称这种系统为线性控制系统。线性系统可以应用叠加原理来分析。这是因为线性系统具有两个重要特性:叠加性和齐次性。所谓叠加性是指当同时有几个输入量作用于一个线性系统时,该系统的输出量等于各输入量单独作用时所产生的输出量之和。所谓齐次性是指当系统输入量成倍增大或缩小时,线性系统的输出量也成倍增大或缩小。例如,当有 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别作用于某线性系统时产生的响应为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$,则当输入为 $r(t)=r_1(t)+r_2(t)$ 时,该线性系统的响应就应为 $c(t)=c_1(t)+c_2(t)$;又当有 $r(t)$ 作用于某线性系统时产生的响应为 $c(t)$,则当输入为 $r^*(t)=k \times r(t)$ 时,该线性系统的响应就应为 $c^*(t)=k \times c(t)$ 。

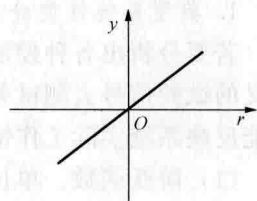


图1-16 线性环节的稳态特性

(2) 非线性控制系统。当控制系统中含有一个或一个以上的非线性环节时,称此类系统为非线性控制系统。对于一个非线性环节,其稳态特性必然不符合图1-16所示的输出与输入成比例的特性。典型的非线性环节的稳态特性有饱和非线性、死区非线性、继电特性非线性等,如图1-17所示。从动态特性上分析,一个连续时间非线性环节也不能用线性微分方程来描述,只能用非线性微分方程来描述。非线性微分方程的特点是方程系数可能是含有某个变量(不是自变量 t)的函数,或者方程中含有变量导数的高次幂。例如, $\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + \left[\frac{dc(t)}{dt} \right]^2 + c(t) = r(t)$,或 $[c(t)-1] \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) \frac{dr(t)}{dt}$ 。非线性系统不能应用叠加原理,而且其动态特性与初始条件有关,而线性系统的动态过程则与初始条件无关。

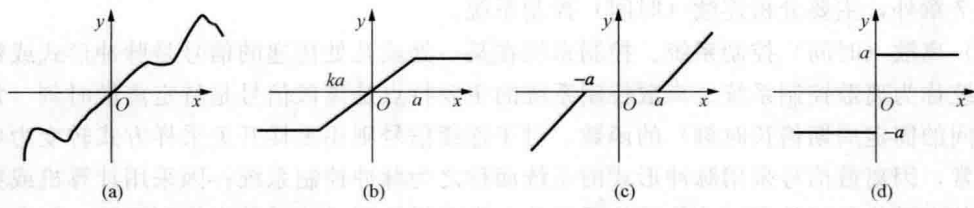


图 1-17 非线性环节的典型稳态特性

(a) 非线性元件；(b) 饱和非线性；(c) 死区非线性；(d) 继电特性非线性

6. 控制系统的其他分类

控制系统还有许多种分类。例如，按照输入和输出信号的数量可分为单输入单输出系统和多输入多输出系统。按照系统的反馈控制回路数，可把控制系统分为单回路控制系统、双回路控制系统或多回路控制系统。按照控制器的输入/输出特性控制的功能特性来分，可分为最优控制系统、自适应控制系统、鲁棒性系统、PID 控制系统等。

1.6 自动控制系统的性能分析

1. 典型系统性能分析试验信号

若要分析出各种控制系统性能的优劣，必须有一个比较的基础。人们常用几种具有典型意义的试验信号去测试各种系统对这些信号的响应，然后进行分析比较。这些典型试验信号应能反映系统实际工作情况，并且便于产生和实现。常用的典型试验信号有以下几种：

(1) 阶跃函数。单位阶跃函数的定义是

$$x(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases} \tag{1-1}$$

阶跃函数的波形如图 1-18 所示。在实际系统中，控制系统的输入，即设定值，像阶跃函数这样以无穷大的速度改变是不可实现的。但是，相对变化非常快就可认为是阶跃变化。显然，这是对控制系统的一种极限考验。

(2) 斜坡函数。单位斜坡函数的定义是

$$x(t) = t \times 1(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ t & (t \geq 0) \end{cases} \tag{1-2}$$

斜坡函数如图 1-19 所示。斜坡函数也称速度函数，它等于阶跃函数对时间的积分，而它对时间的导数就是阶跃函数。

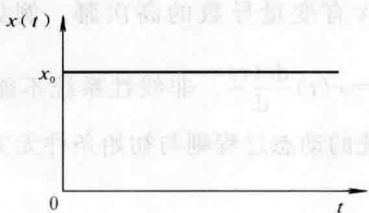


图 1-18 阶跃函数

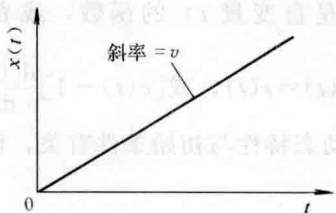


图 1-19 斜坡函数