

21世纪高等学校规划教材

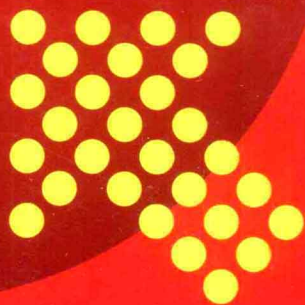


ZIDONG KONGZHI YUANLI JI YINGYONG

自动控制原理及应用

侯卓生 主 编

马会贤 张 萍 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

21世纪高等学校规划教材



ZIDONG KONGZHI YUANLI JI YINGYONG

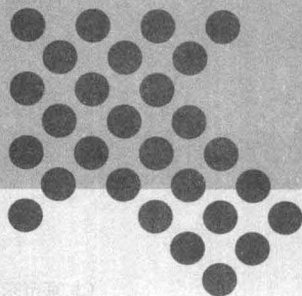
自动控制原理及应用

主 编 侯卓生

副主编 马会贤 张 萍

编 写 孙 娜 燕林滋 吴 楠 张彦迪 顾凌云

主 审 王福平



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

前 言

随着现代科学技术的迅速发展,自动控制技术已广泛应用于农业、交通、航空航天及制造业等行业,自动控制理论得到了不断地发展和完善,自动控制原理的应用课程也越来越受到社会各界的重视。本课程不仅对自动控制系统的分析和设计具有指导作用,而且对培养学生理论联系实际、综合分析和解决问题的能力,都具有重要的作用。

本书全面阐述了自动控制的基本理论知识,力求做到既保持自动控制理论系统的完整性,又要少而精,尽量用简明的语言介绍书中的专业知识。同时,本书注重基本概念和原理的阐述,突出工程应用方法,理论严谨,系统性强,便于读者自学。

全书共分七章,由银川能源学院的侯卓生教授主编、马会贤和张萍副主编,北方民族大学王福平教授主审。第一章由孙娜编写,第二章由燕林滋编写,第三章由马会贤编写,第四章由吴楠编写,第五章由张彦迪编写,第六章由顾凌云编写,第七章由张萍编写。

由于编者水平所限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

目 录

前言

第一章 自动控制的基本概念	1
第一节 自动控制的基本原理	1
第二节 自动控制系统的分类	5
第三节 控制系统的基本要求	6
第四节 自动控制的发展简史	8
小结	9
习题	10
第二章 系统的数学模型	11
第一节 自动控制系统的微分方程	11
第二节 拉普拉斯变换	13
第三节 传递函数	19
第四节 系统框图和信号图	23
第五节 控制系统的传递函数	30
小结	31
习题	32
第三章 控制系统的时域分析	33
第一节 典型输入信号和时域性能指标	33
第二节 一阶系统的时域响应	36
第三节 二阶系统的时域分析	40
第四节 系统的误差分析和计算	49
第五节 稳定性分析	58
小结	65
习题	65
第四章 控制系统的根轨迹分析	68
第一节 根轨迹的基本概念	68
第二节 根轨迹绘制的基本规则	70
第三节 控制系统的根轨迹法	75
小结	76
习题	76
第五章 控制系统的频域分析	78
第一节 频率特性	78
第二节 典型环节的频率特性	83

第三节	系统开环频率特性	91
第四节	频域稳定性判据	98
第五节	系统的稳定裕度	105
第六节	系统的闭环频率特性与闭环频域指标	107
小结		109
习题		109
第六章	控制系统的校正	111
第一节	校正概述	111
第二节	校正环节及其特性	115
第三节	校正方法及设计	119
小结		139
习题		139
第七章	采样控制系统分析	141
第一节	概述	141
第二节	采样过程与采样定理	143
第三节	采样控制系统的数学基础	148
第四节	脉冲传递函数	154
第五节	采样控制系统的稳定性分析	160
第六节	动态分析	164
第七节	MATLAB 基础简介	166
小结		170
习题		170
附录 1	常用函数的拉氏变换与 Z 变换对照表	173
附录 2	常用的 MATLAB 函数表	175
参考文献		177

第一章 自动控制的基本概念

自动控制作为一种技术手段已经广泛地应用于工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学许多领域。在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术也得到了迅猛的发展,并且已经成为现代社会不可缺少的组成部分。无论是在航空航天领域、军事领域还是民用领域、工业领域,自动控制技术所取得的成就都是惊人的。自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化,提高了劳动生产率和产品质量,降低了生产成本,提高了经济效益,改善了劳动条件,使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来,而且在人类征服大自然,探索新能源,发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。自动控制技术的理论基础是自动控制理论,而自动控制技术的发展反过来又促进了自动控制理论的进一步完善。

本章主要介绍自动控制的基本原理、自动控制系统的分类、对控制系统的基本要求等内容。

第一节 自动控制的基本原理

一、自动控制与自动控制系统的概念

所谓自动控制(Automatic control)是指在脱离人的直接干预,利用控制装置(简称控制器)使被控对象(如设备生产过程等)的工作状态或被控量(如温度、压力、流量、速度、pH 值等)按照预定的规律运行。自动控制系统(Automatic control system)是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。

为了便于研究,下面来介绍几个自动控制的常用术语。

(1) 被控对象。被控对象是指被控设备或物体,也可以是被控过程。

(2) 控制器。控制器是指使被控对象具有所要求的性能或状态的控制设备。它接收输入信号或偏差信号,按控制规律给出控制量,经功率放大后驱动执行装置以实现对被控对象的控制。

(3) 系统输出(被控量)。系统输出(被控量)是指表征对象或过程的状态和性能,是实现控制的重点,也称为输出量。

(4) 参考输入。参考输入是指人为给定,由它决定系统预期的输出。

(5) 干扰量。干扰量也称为扰动输入,指干扰并破坏系统使系统不能按预期性能输出的信号。

(6) 特性。特性用于描述系统输出与输入的关系,可分为静态特性和动态特性,通常用特性曲线来描述。

从物理角度来看,自动控制理论研究的是特定激励作用下的系统响应变化情况;从数学角度来看,自动控制理论研究的是输入与输出之间的映射关系;从信息处理的角度来看,自

动控制理论研究的是信息的获取、处理、变换、输出等问题。

下面以直流电动机调速控制系统为例，说明自动控制系统的结构特点。

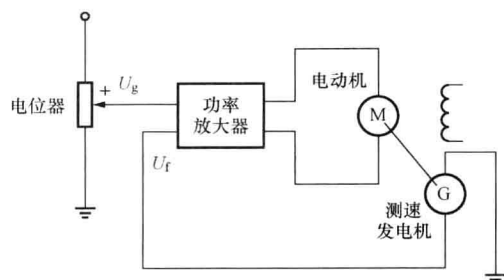


图 1-1 直流电动机速度自动控制的原理结构图

直流电动机速度自动控制的原理结构图如图 1-1 所示。图中，电位器电压为输入信号，测速发电机是电动机转速的测量元件。图 1-1 中，代表电动机转速变化的测速发电机电压送到输入端与电位器电压进行比较，两者的差值（又称偏差信号）控制功率放大器（控制器），控制器的输出控制电动机的转速，这就形成了电动机转速自动控制系统。

引起电动机转速变化的电源变化、负载变化等，称为扰动。电动机被称为被控对象，转速称为被控量。当电动机受到扰动后，转速（被控量）发生变化，经测量元件（测速发电机）将转速信号（又称为反馈信号）反馈到控制器（功率放大器），使控制器的输出（称为控制量）发生相应的变化，从而可以自动地保持转速不变或使偏差保持在允许的范围内。直流电动机转速控制系统原理框图如图 1-2 所示。

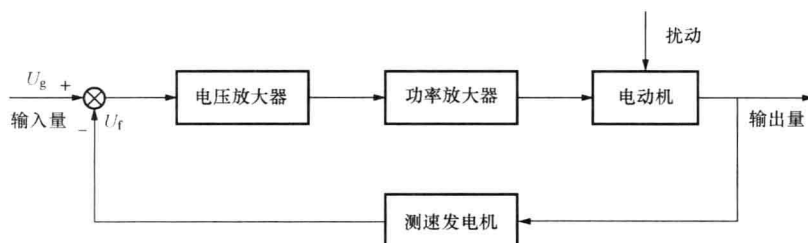


图 1-2 直流电动机转速控制系统原理框图

二、自动控制系统的基本组成

自动控制的任务——利用控制器操纵受控对象，使其被控量按技术要求变化。若 $r(t)$ 为给定量， $c(t)$ 为被控量，则自动控制任务的数学表达式为：使被控量满足 $c(t) \approx r(t)$ 。自动控制系统的组成框图如图 1-3 所示。

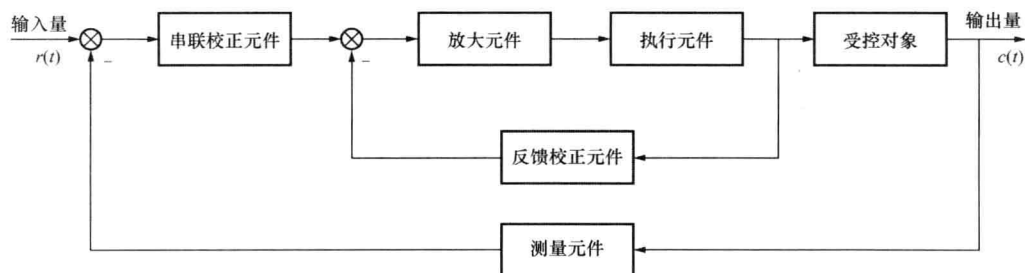


图 1-3 自动控制系统的组成框图

(1) 给定元件。其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量。一般为电位器。

(2) 比较元件。其职能是将测量到的被控量实际值与给定元件给出的输入量预定值进行比较, 求出它们之间的偏差。常用的有差动放大器、机械差动装置、电桥电路、计算机等。

(3) 测量元件。其职能是检测被控量的物理量, 如测速机、热电偶、自整角机、电位器、旋转变压器、浮子等。

(4) 放大元件。其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大, 用来推动执行元件去控制受控对象, 如晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器、功率放大器。

(5) 执行元件。其职能是直接推动受控对象, 使其被控量发生变化, 如阀门、电机、液压马达等。

(6) 校正元件。也称为补偿元件, 是结构或参数便于调整的元件, 用串联或并联(反馈)的方式连接于系统中, 以改善系统的性能。常用的有电阻、电容组成的无源或有源网络, 计算机。

自动控制系统的特点如下。

(1) 从信号传送看, $c(t)$ 经测量后回到输入端, 构成闭环, 具有反馈形式, 且为负反馈。

(2) 从控制作用的产生看, 由偏差产生的控制作用使系统沿减小或消除偏差的方向运动, 即偏差控制。

三、自动控制的方式

控制系统按其结构通常可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。对于某一个具体的系统, 采取什么样的控制手段, 应该根据具体的用途和目的而定。

1. 开环控制系统

开环控制系统是指系统的输出端与输入端不存在反馈回路, 输出量对系统的控制作用不发生影响的系统。控制装置与被控对象之间只有顺向作用, 没有反向联系。开环控制系统结构原理框图如图 1-4 所示。

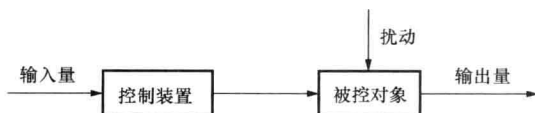


图 1-4 开环控制系统结构原理框图

例如, 工业上使用的数字程序控制机床就是开环控制系统的典型例子, 如图 1-5 所示。

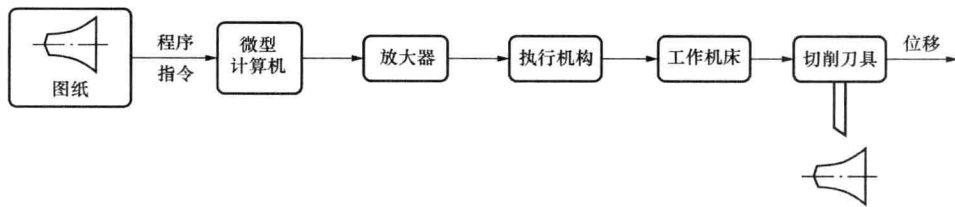


图 1-5 数字程序控制机床（开环系统）原理框图

系统的每一个输入信号, 必有一个固定的工作状态和一个系统的输出量与之相对应, 但是不具有修正由于扰动而出现的被控量希望值与实际值之间误差的能力。

开环系统的优点是结构简单, 成本低廉, 工作稳定; 但开环控制不能自动修正被控量的偏差、系统元件参数的变化, 且外来未知扰动也会影响系统的精度。开环系统常应用于控制

量的变化规律可以预知、可能出现的扰动可以抑制、被控量很难测量或者不需要测量的场合，如家电、加热炉、车床等。

2. 闭环控制系统

闭环控制系统是指系统输出信号与输入端之间存在反馈回路的系统，也称为反馈控制系统。反馈有正反馈和负反馈之分。当反馈量极性与输入量同相时，称为正反馈。正反馈应用较少，只是在补偿控制中偶尔使用。当反馈量极性与输入量反相时，称为负反馈。闭环控制的实质就是利用负反馈，使系统具有自动修正被控量（输出量）偏离参考给定量（输入量）的控制功能。因此，闭环控制又称为反馈控制，闭环控制系统又称为反馈控制系统，其系统结构原理框图如图 1-6 所示。

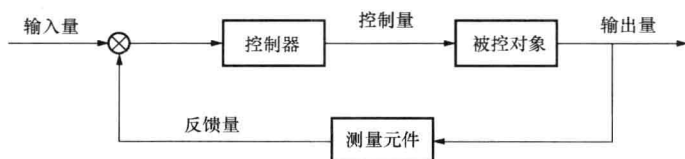


图 1-6 闭环控制系统结构原理框图

“闭环”就是应用反馈作用来减小系统误差，如图 1-7 所示的微型计算机控制机床（闭环系统）原理框图。

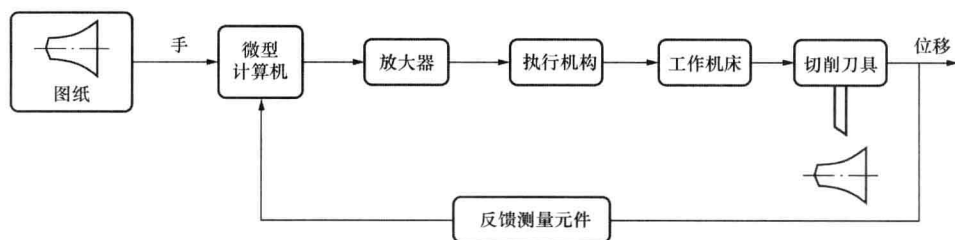


图 1-7 微型计算机控制机床（闭环系统）原理框图

在图 1-7 中，引入了反馈测量元件，闭环控制系统由于有“反馈”作用的存在，具有自动修正被控量出现偏差的能力，可以修正元件参数变化及外界扰动引起的误差，所以其控制效果好，精度高。闭环控制系统也有不足之处，除了结构复杂、成本较高外，一个主要的问题是由于反馈的存在，控制系统可能出现“振荡”，从而使系统不能稳定工作。因此，控制精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环控制系统所面临的主要问题。

3. 复合控制系统

开环控制系统的缺点是精度低，优点是控制稳定，不会产生闭环控制系统的振荡及不稳定现象。而闭环控制系统的优点是抗干扰能力强，控制精度高。复合控制系统是闭环控制系统和开环控制系统相结合的一种方式，是在闭环控制系统的基础上增加一个干扰信号的补偿控制，以提高控制系统的抗干扰能力，如图 1-8 所示。

将给定后扰动直接折算到系统输入端对控制量的大小进行修正，这种控制方式称为补偿控制。增加干扰信号的补偿控制作用，可以在扰动对被控量产生不利影响的同时及时提供控制作用以抵消此不利影响。纯闭环控制则要等待该不利影响反映到被控信号之后才引起控制作用，对扰动的反应较慢。两者的结合既能得到高精度控制，又能提高抗干扰能力。

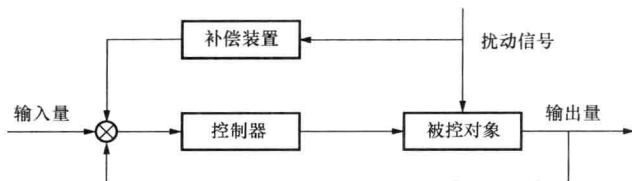


图 1-8 复合控制系统原理框图

各种控制方式都有其各自的特点和各自的适用场合。近几十年来，以现代数学为基础，随着电子计算机的普及和发展，新的控制方式也在不断发展，如最优控制、极值控制、自适应控制、模糊控制等。

第二节 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的，用不同的标准划分，便有不同的分类方法。下面介绍几种常用的自动控制系统分类方法。

一、按信号传送的特点或系统结构特点分类

按信号传送的特点或系统结构特点，可将控制系统分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统三大类，前已述及，故不赘述。

二、按输入信号的形式分类

按输入信号的形式，可将控制系统分为恒值控制系统（或称自动调节系统）、过程控制系统（或称程序控制系统）、随动控制系统（或称伺服系统）。

1. 恒值控制系统（或称自动调节系统）

这类系统的特点是输入信号是一个恒定的数值。恒值控制系统主要研究各种扰动对系统输出的影响以及如何克服这些扰动，将输入量、输出量尽量保持在希望数值上。系统结构设计的好坏，直接影响到恢复的精度。例如，轧钢厂里的钢板加热炉控制和生活小区的恒压给水控制、直流电动机调速系统等。

2. 过程控制系统（或称程序控制系统）

这类系统的特点是输入信号是一个已知的时间函数，系统的控制过程按预定的程序进行，要求被控量能迅速准确地复现。例如，炉温控制系统中的温度调节，要求温度按预先设定的规律变化（自动升温、恒温和降温）。恒值控制系统也被认为是过程控制系统的特例。

3. 随动控制系统（或称伺服系统）

这类系统的特点是输入信号是一个未知函数，要求输出量跟随给定量变化，跟随性能是这类系统中要解决的主要问题。例如，火炮自动跟踪系统、工业自动化仪表中的显示记录仪、跟踪卫星的雷达天线控制系统等，均属于随动控制系统。

三、按信号形式分类

按信号形式，可将控制系统分为连续系统、离散系统。

1. 连续系统

连续系统是指系统内各处的信号都是以连续的模拟量传递的系统，即系统中各元件的输入量和输出量均为时间的连续函数。连续系统的运动规律可以用微分方程来描述。

2. 离散系统

在系统的某一处或几处, 信号以脉冲序列或数字量传递的控制系统。其主要特点是: 系统中用脉冲开关或采样开关, 将连续信号转变为离散信号。离散系统可分为脉冲控制系统和数字控制系统。

由于连续控制系统和离散控制系统的信号形式有较大差别, 因此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, 并用拉氏变换法求解微分方程; 而离散系统则用差分方程来描述系统的运动状态, 用 Z 变换法引出脉冲传递函数来研究系统的动态特性。

四、按描述系统的数学模型分类

按描述系统的数学模型, 可将控制系统分为线性系统、非线性系统。

1. 线性系统

当系统的运动规律用线性微分方程或者线性差分方程描述时, 则称这类系统为线性系统。线性系统有两个重要特性: 叠加性和齐次性。叠加性是指当多个输入信号同时作用于系统时, 其总输出等于各个输入信号单独作用时所产生输出的总和。齐次性指系统输入增大或缩小 n 倍, 则系统输出也增大或缩小 n 倍。即当系统的输入分别为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时, 对应的输出分别为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$, 则当输入为 $r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 时, 输出量为 $c(t) = a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$, 其中 a_1 、 a_2 为常数。

2. 非线性系统

在构成系统的环节中有一个或一个以上的非线性环节时, 则称此系统为非线性系统。这时要用非线性微分方程 (或差分方程) 来描述其特性。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的高次幂或乘积项, 一般只能定性地描述或数值计算。

严格地说, 实际物理系统中都含有不同程度的非线性元部件, 如放大器和电磁元件的饱和特性, 运动部件的死区特性和间隙特性等。但为了研究问题的方便, 许多系统在一定的条件下、一定的范围内, 可以近似地看成为线性系统来加以分析研究, 其误差往往在工业生产允许的范围之内。

五、其他分类方法

自动控制系统还有其他的分类方法, 如下所示。

- (1) 按系统的输入/输出信号的数量划分: 有单输入/单输出系统和多输入/多输出系统。
- (2) 按控制系统的功能划分: 有温度控制系统、速度控制系统、位置控制系统等。
- (3) 按系统元件组成划分: 有机电系统、液压系统、生物系统等。
- (4) 按不同的控制理论分支设计的新型控制系统划分: 有最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等。

一个系统性能将用特定的品质指标来衡量其优劣, 如系统的稳定特性、动态响应和稳态特性。

第三节 控制系统的基本要求

当自动控制系统受到干扰或者人为要求给定值改变, 被控量就会发生变化, 偏离给定值。通过系统的自动控制作用, 经过一定的过渡过程, 被控量又恢复到原来的稳定值或稳定

在一个新的给定值。被控量在变化过程中的过渡过程称为动态过程（即随时间而变的过程），被控量处于平衡状态称为静态或稳态。自动控制系统最基本的要求是被控量的稳态误差（偏差）为零或在允许的范围内。对于一个好的自动控制系统来说，一般要求稳态误差在被控量额定值的 $2\% \sim 5\%$ 之内。

自动控制系统还应满足动态过程的性能要求，自动控制系统被控量变化的动态特性有以下几种，如图 1-9 所示。

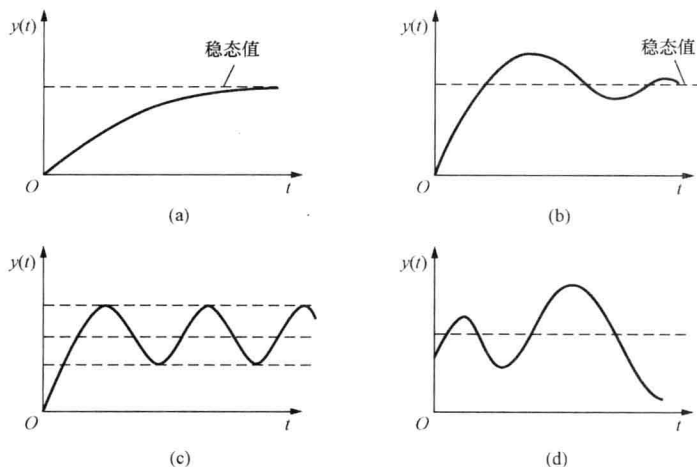


图 1-9 自动控制系统被控量变化的动态特性

(a) 单调过程；(b) 衰减振荡过程；(c) 等幅振荡过程；(d) 渐扩振荡过程

(1) 单调过程。被控量 $y(t)$ 单调变化（即没有“正”、“负”的变化），缓慢地到达新的平衡状态（新的稳态值）。一般这种动态过程具有较长的动态过程时间（即到达新的平衡状态所需的时间），如图 1-9 (a) 所示。

(2) 衰减振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个振荡过程，振荡的幅度不断地衰减，到过渡过程结束时，被控量会达到新的稳态值。这种过程的最大幅度称为超调量，如图 1-9 (b) 所示。

(3) 等幅振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡过程，始终不能达到新的稳态值，如图 1-9 (c) 所示。这种过程如果振荡的幅度较大，生产过程不允许，则认为是一种不稳定的系统；如果振荡的幅度较小，生产过程可以允许，则认为是一种稳定的系统。

(4) 渐扩振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程不但是一个振荡过程，而且振荡的幅值越来越大，以致会大大超过被控制量允许的误差范围，如图 1-9 (d) 所示，这是一种典型的不稳定过程，设计自动控制系统要绝对避免产生这种情况。

自动控制系统其动态过程多属于图 1-9 (b) 的情况。控制系统的动态过程要求不仅是稳定的，并且希望过渡过程时间（又称调整时间）越短越好，振荡幅度越小越好，衰减得越快越好。

综上所述，对于一个自动控制的性能要求可以概括为稳定性、快速性和准确性三方面。

(1) 稳定性。自动控制系统的最基本的要求是系统必须是稳定的，不稳定的控制系统是

不能工作的。

(2) 快速性。在系统稳定的前提下, 希望控制过程(过渡过程)进行得越快越好, 但如果要求过渡过程时间很短, 可能使动态误差(偏差)过大。合理的设计应该兼顾这两方面的要求。

(3) 准确性。即要求动态误差和稳态误差都越小越好。当与快速性有矛盾时, 应兼顾这两方面的要求。

第四节 自动控制的发展简史

根据自动控制理论的发展历史, 大致可分为以下四个阶段。

一、经典控制理论阶段

闭环的自动控制装置的应用, 可以追溯到 1788 年瓦特(J. Watt)发明的飞锤调速器的研究。然而最终形成完整的自动控制理论体系, 是在 20 世纪 40 年代末。

19 世纪 60 年代期间是控制系统高速发展的时期, 1868 年麦克斯韦(J. C. Maxwell)基于微分方程描述从理论上给出了稳定性条件。1877 年劳斯(E. J. Routh), 1895 年霍尔维茨(A. Hurwitz)分别独立给出了高阶线性系统的稳定性判据; 另一方面, 1892 年李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)给出了非线性系统的稳定性判据。在同一时期, 维什哥热斯基(I. A. Vyshnegreskii)也用一种正规的数学理论描述了这种理论。1922 年米罗斯基(N. Minorsky)给出了位置控制系统的分析, 并对 PID 三作用控制给出了控制规律公式。1942 年齐格勒(J. G. Zigler)和尼科尔斯(N. B. Nichols)又给出了 PID 控制器的最优参数整定法。上述方法基本上是时域方法。1932 年奈奎斯特(Nyquist)提出了负反馈系统的频域稳定性判据, 这种方法只需利用频率响应的实验数据即可判别系统的稳定性。1940 年伯德(H. Bode)进一步研究通信系统频域方法, 提出了频域响应的对数坐标图描述方法。1943 年霍尔(A. C. Hall)利用传递函数(复数域模型)和框图, 把通信工程的频域响应方法和机械工程的时域方法统一起来, 人们称此方法为复域方法。频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。

第二次世界大战结束时, 经典控制技术和理论基本建立。1948 年伊文斯(W. Evans)又进一步提出了属于经典方法的根轨迹设计法, 给出了系统参数变换与时域性能变化之间的关系。至此, 复数域与频率域的方法进一步完善。

经典控制理论的分析方法为复数域方法, 以传递函数作为系统数学模型, 常利用图表进行分析设计, 比求解微分方程简便。其优点是可通过实验方法建立数学模型, 物理概念清晰, 工程上得到广泛的应用。其缺点是只适应单变量线性定常系统, 对系统内部状态缺少了解, 且用复数域方法研究时域特性得不到精确的结果。

二、现代控制理论阶段

20 世纪 60 年代初, 在原有“经典控制理论”的基础上, 形成了所谓的“现代控制理论”。

为现代控制理论的状态空间法的建立作出贡献的理论有, 1954 年贝尔曼(R. Bellman)的动态规划理论, 1956 年庞特里雅金(L. S. Pontryagin)的极大值原理和 1960 年卡尔曼(R. E. Kalman)的多变量最优控制和最优滤波理论。

频域分析法在第二次世界大战后持续占着主导地位, 特别是拉普拉斯变换和傅里叶变换

的发展。在 20 世纪 50 年代, 控制工程发展的重点是复平面和根轨迹的发展。进而在 20 世纪 80 年代, 数字计算机在控制系统中的使用变得普遍起来, 这些新控制部件的使用使得控制精确、快速。

状态空间方法属于时域方法, 其核心是最优化技术。它以状态空间描述 (实质上是一阶微分或差分方程组) 作为数学模型, 利用计算机进行系统建模分析、设计乃至控制, 适应于多变量、非线性、时变系统。

三、大系统控制理论阶段

20 世纪 70 年代开始, 出现了一些新的控制方法和理论。例如, 现代频域方法, 该方法以传递函数矩阵为数学模型, 研究线性定常多变量系统; 自适应控制理论和方法, 该方法以系统辨识和参数估计为基础, 处理被控对象不确定和缓时变, 在实时辨识基础上在线确定最优控制规律; 鲁棒控制方法, 该方法在保证系统稳定性和其他性能基础上, 设计不变的鲁棒控制器, 以处理数学模型的不确定性; 预测控制方法, 该方法为一种计算机控制算法, 在预测模型的基础上采用滚动优化和反馈校正, 可以处理多变量系统。

随着控制理论应用范围的扩大, 人们开始了对大系统理论的研究。大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化理论基础, 是动态的系统工程理论, 具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点。它是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。大系统理论目前仍处于发展和开创性阶段。

四、智能控制阶段

智能控制的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧, 解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象的复杂性体现为: 模型的不确定性、高度非线性、分布式的传感器和执行器、动态突变、多时间标度、复杂的信息模式、庞大的数据量以及严格的特性指标等。而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。而试图用传统的控制理论和方法去解决复杂的对象, 复杂的环境和复杂的任务是不可能的。

智能控制的方法包括模糊控制、神经网络控制、专家控制等方法。

小 结

(1) 自动控制是在没有人直接参与的情况下, 利用控制装置使被控对象自动地按要求的运动规律变化。自动控制系统是由被控对象和控制器按一定方式连接起来的、完成一定自动控制任务的有机整体。

(2) 自动控制系统可以是开环控制系统、闭环控制系统或复合控制系统。最基本的控制方式是闭环控制, 亦称反馈控制。实际生产过程的自动控制系统, 绝大多数是闭环控制系统, 也就是负反馈控制系统。

(3) 自动控制系统的分类方法很多, 其中最常见的是按给定信号的特点进行分类, 可分为恒值系统、随动系统和程控系统。

(4) 在分析系统的工作原理时, 应注意系统各组成部分具有的职能, 并能用原理框图进行分析。原理框图是分析控制系统的基础。

(5) 对自动控制系统性能的基本要求可归结为稳、快、准三个字。一个自动控制系统的最基本要求是稳定性, 然后进一步要求快速性和准确性, 当后两者存在矛盾时, 设计自动控

制系统要兼顾两方面的要求。

习 题

1-1 比较开环控制系统与闭环控制系统的优缺点。

1-2 复合控制与开环控制、闭环控制是什么关系？什么情况下可采用复合控制方式？

1-3 判断下列概念正确与否。

- (1) 闭环控制系统通常精度比开环控制系统精度高。
- (2) 负反馈有时用于提高控制系统的精度。
- (3) 开环控制系统不存在稳定性的问题。
- (4) 闭环控制系统总是稳定的。
- (5) 反馈可能引起系统振荡。
- (6) 控制系统的稳定性是其固有特性，由系统结构与外界因素决定。

1-4 根据图 1-10 所示的电动机速度控制系统工作原理图，完成：

(1) 将 a、b、c、d 用线连接成负反馈状态。

(2) 画出系统原理框图。

1-5 炉温闭环控制系统如图 1-11 所示，试画出系统的原理框图。

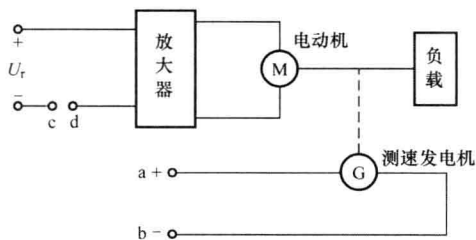


图 1-10 电动机速度控制系统工作原理图

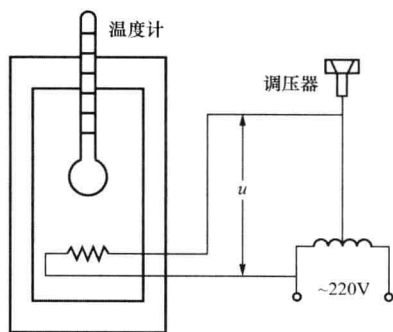


图 1-11 炉温闭环控制系统原理图

1-6 设直流电动机转速控制系统如图 1-12 所示，简述其工作原理，并画出系统的原理图。

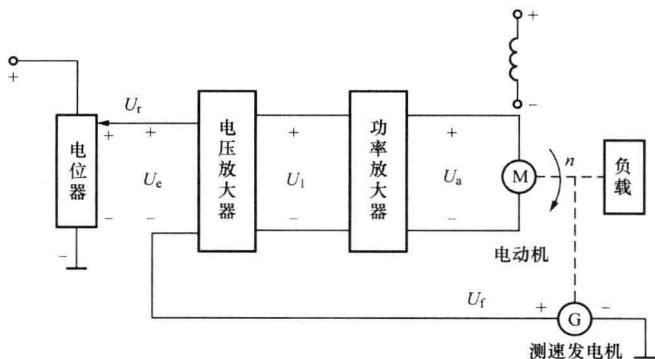


图 1-12 直流电动机转速控制系统原理图

第二章 系统的数学模型

什么是系统的数学模型？为什么要建立系统的数学模型？系统的数学模型是定量地表达系统各个变量之间的关系的数学表达式，通常分为两种描述方法：端部描述和状态变量描述。端部描述是指输入—输出描述，微分方程是其最基本的形式，传递函数、框图等其他形式的数学模型均由微分方程导出。状态描述是指不仅描述系统的输入和输出关系，而且描述系统内部的特性。为了从理论上更好地对控制系统进行分析和计算，使系统控制效果最优，首先要建立系统的数学模型。

系统数学模型建立的方法主要有解析法和实验法两种。解析法是根据系统及元件各变量之间所遵循的一些物理规律（如力学、电磁学、运动学、热学等）而导出系统的输出和输入的数学关系式也就是运动方程。实验法是通过实际系统的实验测试，并对测试数据的处理而获得系统的数学模型。本章主要讨论解析法。

第一节 自动控制系统的微分方程

系统微分方程是描述系统输出量和输入量及其各阶导数之间关系的数学模型。

一、系统微分方程式建立的一般步骤

- (1) 根据控制要求，确定系统的输入、输出变量。
- (2) 依据各变量所遵循的物理或化学的定律，列出各变量之间的动态方程，通常是一组微分方程。
- (3) 将中间变量消除，得到输入和输出变量的微分方程。
- (4) 对微分方程进行整理将其标准化，即把和输入量有关的各项放在等号右边，把输出量有关各项放在等号的左边，并作降幂排列。

二、系统微分方程建立举例

1. 电气系统

【例 2-1】 如图给定输入电压 $u_r(t)$ 和输出电压 $u_c(t)$ ，写出系统的微分方程。

解 由电路知识得出

$$u_r = iR, \quad i = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

由基尔霍夫电压定律，得

$$u_r + u_c(t) = u_r(t)$$

消去中间变量 i ，得

$$RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t)$$

令 $RC=T$ ，则

$$T \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-1)$$

这就是图 2-1 网络的微分方程。

【例 2-2】 图 2-2 所示为一个 RLC 网络，当输入电压为 $u_r(t)$ ，输出电压为 $u_c(t)$ 时，试写出系统的微分方程。

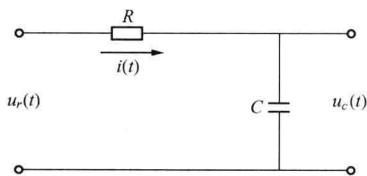


图 2-1 RC 网络

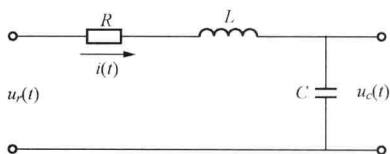


图 2-2 RLC 网络

解 (1) 列出原始微分方程式。

设回路电流为 $i(t)$ ，根据电路理论，得

$$u_r(t) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt + Ri(t)$$

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

式中： $i(t)$ 为网络电流，是除输入量、输出量之外的中间变量。

(2) 消去中间变量 $i(t)$ ，得

$$LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-2)$$

显然，这是一个二阶线性微分方程，也就是图 2-2 所示 RLC 无源网络的数学模型。

2. 机械平移系统

【例 2-3】 如图 2-3 所示为一个具有质量、弹簧、阻尼器的机械位移系统，试列写质量 m 在外力 $F(t)$ 作用下，质量块位移 $y(t)$ 的运动方程。

解 根据已知条件列写方程。

阻尼器的阻尼力方程为

$$F_1(t) = f dy(t)/dt$$

式中： f 为阻尼系数。

弹簧弹性力方程为

$$F_2(t) = Ky(t)$$

式中： K 为弹性系数。

根据牛顿第二定律，有

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = F(t) - F_1(t) - F_2(t)$$

将 $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 代入上式中，经整理后即得该系统的微分方程式为

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = F(t) \quad (2-3)$$

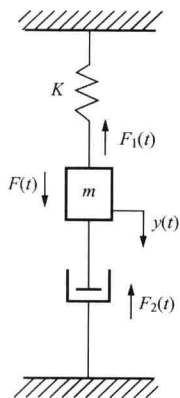


图 2-3 质量、弹簧、
阻尼器系统