



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

AUTOMATIC
CONTROL THEORY

自动控制原理

第2版

© 李晓秀 宋丽蓉 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

自动控制原理

第2版

主 编	李晓秀	宋丽蓉
参 编	赵秀芬	乐春峡
主 审	章 兢	



机械工业出版社

本书是按照普通高等教育工程应用型本科教育系列教材的要求编写的,比较全面地阐述了自动控制的基本理论及应用。全书共分8章,主要内容包括控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的综合校正、非线性控制系统和采样控制系统分析等内容。书中结合MATLAB软件在自动控制系统分析、设计中的应用,在各章都有MATLAB相关知识的介绍和仿真举例。

本书强调基本理论及其工程应用。全书力求突出重点,强调物理概念,尽量简化繁琐的数学推导,叙述深入浅出,通俗易懂,各章都有较多的例题和习题。

本书可作为应用型本科自动化、电气工程及其自动化、机电一体化及其相关专业的教材,也可作为各类职业技术学院、专科学校和成人高校的相关专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/李晓秀,宋丽蓉主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2011.8

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34307-3

I. ①自… II. ①李… ②宋… 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(2011)第103735号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 常建丽 卢若薇
版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉
封面设计:张静 责任印制:杨曦
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2011年8月第2版第1次印刷
184mm×260mm·15.75印张·385千字
标准书号:ISBN 978-7-111-34307-3
定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线:(010)88379203

第2版前言

自动控制原理主要研究自动控制的共同规律,是分析和设计自动控制系统的基础理论。它不但是自动化类专业的主要技术基础课,也是许多非自动化专业的重要教学内容。

本书第1版是为适应应用型本科自动化、电气工程及其自动化及机电类专业教学的需要而编写的。全书以经典控制理论为主要内容,分为9章,包括自动控制的一般概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的综合校正、非线性系统、采样控制系统分析和MATLAB在控制系统分析与设计中的应用。

与第1版相比,本书的内容有较大的修改,全书新编写和修改较大的内容有:绪论;微分方程的建立和非线性微分方程的线性化;结构图建立举例;信号流图与结构图的关系,梅逊公式应用举例;劳斯稳定判据应用;一阶系统分析;闭环主导极点;非最小相位根轨迹;频率特性法;控制系统的综合校正;用相平面法分析非线性系统,非线性特性的利用。另外,第2版已将第1版中第9章MATLAB在控制系统中的分析、设计和仿真的内容融合到各章节,便于各章节教学时的应用。

编者根据多年教授本课程的经验以及使用第1版教材的反馈意见,在本版教材的编写中力求突出重点,讲清概念,强调基本方法的应用,减少繁琐的数学推导;加强理论与实际的结合,在应用上下工夫,以突出应用型本科教材的特色。本书的主要特点是:以简明的语言介绍基本概念和基本方法,简化了数学推导;以一个实例贯穿于数学模型建立、暂态和稳态性能分析中,注重理论与工程实用性的结合;介绍了运用MATLAB分析和设计自动控制系统的基本方法,使读者便于理解和掌握MATLAB在控制系统分析和设计中的应用。

本书适用于56~72学时的教学。本书提供配套的电子课件和习题答案,欢迎选用本书作教材的老师登录<http://www.cmpedu.com>注册下载。

本书由湖南工程学院李晓秀和南京工程学院宋丽蓉任主编,李晓秀编写了第1、2、3、5章,并负责全书的统稿;宋丽蓉编写了第4、8章,并参加了全书的统稿工作;乐春峡编写了第6章;赵秀芬编写了第7章。本书由湖南大学章兢教授担任主审。章教授仔细审阅了全书并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢,并向所有为本书的出版给予了支持和帮助的同志表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者和专家批评指正。

编 者

目 录

第2版前言

第1章 绪论..... 1

1.1 自动控制理论及其发展简述..... 1

1.2 自动控制的基本概念..... 2

1.2.1 自动控制的基本原理..... 2

1.2.2 自动控制系统的组成..... 3

1.3 自动控制系统的分类..... 4

1.3.1 按控制系统的结构分类..... 4

1.3.2 按系统输入信号的变化 规律分类..... 5

1.3.3 按系统传输信号的特性 分类..... 6

1.3.4 按系统传输信号的时间 性质分类..... 7

1.4 对自动控制系统性能的 基本要求..... 7

小结..... 8

习题..... 9

第2章 控制系统的数学模型..... 10

2.1 微分方程..... 10

2.1.1 微分方程的建立..... 10

2.1.2 非线性微分方程的线性化..... 11

2.1.3 线性定常微分方程的求解..... 13

2.2 传递函数..... 14

2.2.1 传递函数的基本概念..... 14

2.2.2 典型环节及其传递函数..... 15

2.2.3 传递函数的求取..... 19

2.3 结构图..... 20

2.3.1 结构图的基本概念..... 20

2.3.2 结构图的等效变换及化简..... 24

2.3.3 闭环控制系统的传递函数..... 28

2.4 信号流图..... 31

2.4.1 信号流图的符号及术语..... 31

2.4.2 信号流图的等效变换规则..... 32

2.4.3 信号流图与结构图的关系..... 32

2.4.4 梅逊公式及其应用..... 33

2.5 MATLAB 中数学模型的表示..... 34

2.5.1 传递函数模型的 MATLAB 表示..... 35

2.5.2 结构图模型的 MATLAB 表示..... 36

小结..... 37

习题..... 38

第3章 时域分析法..... 42

3.1 典型输入信号和时域性能指标..... 42

3.1.1 典型输入信号..... 42

3.1.2 时域性能指标..... 44

3.2 控制系统的稳定性分析..... 45

3.2.1 稳定的概念..... 45

3.2.2 线性定常系统稳定的充分 必要条件..... 45

3.2.3 劳斯稳定判据..... 46

3.2.4 胡尔维茨稳定判据..... 50

3.3 控制系统的暂态性能分析..... 51

3.3.1 一阶系统分析..... 51

3.3.2 二阶系统分析..... 52

3.3.3 高阶系统分析..... 59

3.4 控制系统的稳态性能分析..... 60

3.4.1 误差及稳态误差的定义..... 60

3.4.2 给定输入信号作用下的 稳态误差..... 61

3.4.3 扰动信号作用下的稳态 误差..... 63

3.4.4 转速负反馈调速系统分析..... 64

3.5 MATLAB 用于时域响应分析..... 66

3.5.1 用 MATLAB 分析系统的 稳定性..... 66

3.5.2 用 MATLAB 分析系统的

暂态性能	67	5.4.3 伯德图上的奈奎斯特稳定 判据	122
小结	70	5.5 控制系统的相对稳定性	125
习题	70	5.5.1 相位裕量	125
第4章 根轨迹分析法	75	5.5.2 幅值裕量	125
4.1 根轨迹的基本概念	75	5.6 系统频率特性与时域性能的关系	127
4.1.1 根轨迹	75	5.6.1 开环频率特性与时域性能的 关系	127
4.1.2 根轨迹方程	76	5.6.2 闭环频率特性与时域性能的 关系	129
4.2 绘制根轨迹的方法	77	5.7 MATLAB 用于频域分析	131
4.2.1 绘制根轨迹的基本规则	77	5.7.1 用 MATLAB 命令绘制频率 特性曲线	131
4.2.2 根轨迹绘制举例	84	5.7.2 用 MATLAB 命令分析系统的 相对稳定性	133
4.3 参量根轨迹	86	小结	134
4.4 零度根轨迹	88	习题	135
4.5 用根轨迹分析系统性能	89	第6章 控制系统的综合校正	139
4.5.1 由根轨迹增益 K_r 确定 闭环极点	89	6.1 系统校正基础	139
4.5.2 由系统的性能指标确定闭环 极点和 K_r	90	6.2 串联超前校正	141
4.5.3 增加开环零、极点对系统性能 的影响	91	6.2.1 超前校正装置及特性	141
4.6 MATLAB 用于根轨迹分析	95	6.2.2 串联超前校正设计	142
4.6.1 根轨迹绘制	95	6.3 串联滞后校正	145
4.6.2 根轨迹分析	97	6.3.1 滞后校正装置及特性	145
小结	97	6.3.2 串联滞后校正设计	147
习题	98	6.4 串联滞后-超前校正	150
第5章 频率特性法	101	6.4.1 滞后-超前校正装置及特性	150
5.1 频率特性的基本概念	101	6.4.2 串联滞后-超前校正设计	152
5.1.1 频率响应	101	6.5 PID 控制器	154
5.1.2 频率特性的定义	102	6.5.1 比例控制作用	155
5.1.3 频率特性的表示	103	6.5.2 积分控制作用	155
5.2 极坐标图(奈氏图)	105	6.5.3 比例-积分控制作用	156
5.2.1 典型环节的奈氏图	105	6.5.4 比例-微分控制作用	156
5.2.2 控制系统开环奈氏图	107	6.5.5 比例-积分-微分控制作用	157
5.3 伯德图	109	6.6 串联校正的期望特性法	158
5.3.1 典型环节的伯德图	110	6.6.1 期望特性法	158
5.3.2 控制系统开环伯德图	113	6.6.2 典型期望对数幅频特性	159
5.3.3 由伯德图确定传递函数	115	6.6.3 期望特性法设计举例	160
5.4 奈奎斯特稳定判据	117	6.7 局部反馈校正	162
5.4.1 辐角定理	117		
5.4.2 奈奎斯特稳定判据	118		

6.7.1 局部反馈校正的基本原理	162	习题	201
6.7.2 局部反馈校正设计	163	第8章 采样控制系统分析	205
6.8 复合校正	166	8.1 采样控制系统的基本概念	205
6.8.1 按输入补偿的复合校正	166	8.1.1 采样控制系统的基本结构	205
6.8.2 按扰动补偿的复合校正	167	8.1.2 采样过程与采样定理	206
6.9 基于 MATLAB 和 Simulink 的系统		8.1.3 采样信号的复现	207
综合校正设计	168	8.2 采样控制系统的数学基础	209
6.9.1 串联超前校正设计	168	8.2.1 z 变换的定义	209
6.9.2 串联滞后校正设计	169	8.2.2 求 z 变换的方法	209
6.9.3 Simulink 在系统校正中的		8.2.3 z 变换的基本定理	212
应用	170	8.2.4 z 反变换	213
小结	172	8.2.5 差分方程及其求解	214
习题	173	8.3 脉冲传递函数	217
第7章 非线性控制系统	176	8.3.1 脉冲传递函数的定义	217
7.1 非线性系统概述	176	8.3.2 开环系统的脉冲传递函数	218
7.1.1 非线性系统的特征	176	8.3.3 闭环系统的脉冲传递函数	220
7.1.2 非线性系统的分析与		8.4 采样控制系统的动态性能分析	223
设计方法	177	8.4.1 采样系统的动态响应分析	223
7.1.3 常见的非线性特性及其对		8.4.2 闭环极点的位置与动态特性	
系统运动的影响	177	的关系	224
7.2 描述函数法	180	8.5 采样控制系统的稳定性分析	227
7.2.1 描述函数的基本概念	180	8.5.1 z 平面内的稳定条件	227
7.2.2 典型非线性特性的描述函数	181	8.5.2 劳斯稳定判据	229
7.2.3 非线性系统的简化	184	8.6 采样控制系统的稳态误差分析	230
7.2.4 用描述函数法分析非线性系统		8.7 MATLAB 用于采样控制系统分析	231
的稳定性	186	8.7.1 数学模型处理	231
7.3 相平面法	189	8.7.2 动态响应分析	232
7.3.1 相平面的基本概念	189	8.7.3 Simulink 仿真分析	235
7.3.2 绘制相轨迹的方法	189	8.7.4 稳定性判定	235
7.3.3 奇点和极限环	192	小结	236
7.3.4 由相平面求时间解	195	习题	237
7.3.5 非线性系统的相平面法分析	195	附录	240
7.4 非线性特性的利用	198	参考文献	243
7.5 基于 Simulink 的非线性系统分析	200		
小结	201		

第 1 章 绪 论

1.1 自动控制理论及其发展简述

自动控制技术是一种运用自动控制理论、仪器仪表、计算机和其他信息技术,通过自动控制系统对各类机器、各种物理参量、工业生产过程等实现检测、控制、优化、调度、管理和决策,达到增加产量、提高质量、降低消耗、确保安全等目的的综合性技术。随着工业生产和科学技术的发展,自动控制已广泛应用于国民经济的各个领域及社会生活的各个方面,无论是从瓦特的蒸汽机,还是阿波罗登月、海湾战争,无处不显示着自动控制技术的威力。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,涉及受控对象、环境特征、控制目标和控制手段以及它们之间的相互作用,主要研究自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径,为建造高性能的自动控制系统提供必要的理论手段。

古代就有具有“自动”功能的控制装置,即称为“水钟”的计时器。1765 年,瓦特在他发明的蒸汽机上设计的离心调速器,被公认是首例最成功应用反馈调节器的自动控制装置。英国的麦克斯韦对它的稳定性进行分析,于 1868 年发表的论文被公认为是自动控制理论的开端。

根据自动控制技术的发展阶段,自动控制理论一般可分为古典控制理论和现代控制理论。

古典控制理论也就是自动控制原理,它是从 20 世纪 20 年代到 20 世纪 40 年代形成的以时域法、频率法和根轨迹法为主要内容的一门独立学科,以传递函数为基础,研究单输入-单输出一类定常控制系统的分析与设计问题。

20 世纪 60 年代,在蓬勃兴起的航空航天技术的推动和飞速发展的计算机技术的支持下,现代控制理论在古典控制理论的基础上迅速发展起来。它以状态空间法为基础,研究多输入-多输出、时变参数、高精度复杂系统的控制问题,并形成了如最优控制、最佳滤波、系统辨识和自适应控制等学科分支。

古典控制理论和现代控制理论主要是针对线性系统的线性理论。20 世纪 70 年代末,由于被控对象、环境、控制任务的复杂性,控制理论在非线性系统理论、离散事件系统理论、大系统理论、复杂系统理论和智能控制理论等方面均有不同程度的发展。尤其是从“仿人”概念出发的智能控制,在实际应用方面得到了很快的发展,它主要包括模糊控制、神经网络控制和专家系统控制等。

需要指出的是,控制理论的应用和发展是与计算机技术的应用和发展紧密联系的,离开了计算机强大、高速的计算能力,就不可能实现生产的现代自动化。另外,使控制理论实用化的一个重要途径就是数学模拟(仿真)和计算机辅助设计(CAD)。

1.2 自动控制的基本概念

1.2.1 自动控制的基本原理

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置操纵受控对象,使受控对象的被控制量自动地按预定的规律运行。

下面以温度控制系统为例来说明自动控制的基本原理。

图 1-1 所示为一个人工温度控制系统。根据工件加工的工艺要求,系统的控制任务是保持加热炉内的温度恒定或按一定的要求变化。炉内的温度会受到环境温度和工件数量的影响,调节燃气阀门的开度,可以控制炉内温度的高低。采用人工操纵时,靠人眼观察温度仪,根据实际温度和要求温度的误差情况,通过大脑的思考,用手调节燃气阀门的开度来控制炉内温度,使炉温能按要求变化。

图 1-2 所示是一个温度自动控制系统。系统中,设定温度是通过调节给定电压 $u_g(t)$ 的值来调整,热电偶检测到的温度信号(热电动势)放大后作为反馈电压 $u_f(t)$,比较器的输出 $\Delta u = u_g(t) - u_f(t)$ 反映了设定温度和实际温度的偏差, Δu 放大后控制电动机调节气阀的开度就可控制炉内温度的高低。若实际温度小于给定温度, $\Delta u > 0$, 它放大后控制电动机开大阀门,调高炉温;若实际温度大于给定温度, $\Delta u < 0$, 使电动机反转关小阀门,调低炉温。只要 $\Delta u \neq 0$, 系统就会进行自动调节,直到实际温度与给定温度相等,即 $\Delta u = 0$, $u_d = 0$, 电动机停转为止,实现了温度的自动控制。

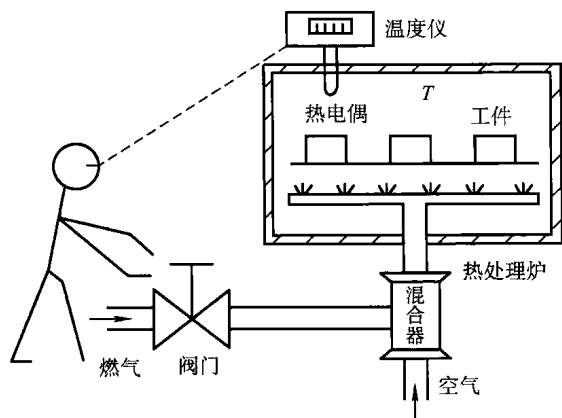


图 1-1 人工温度控制系统

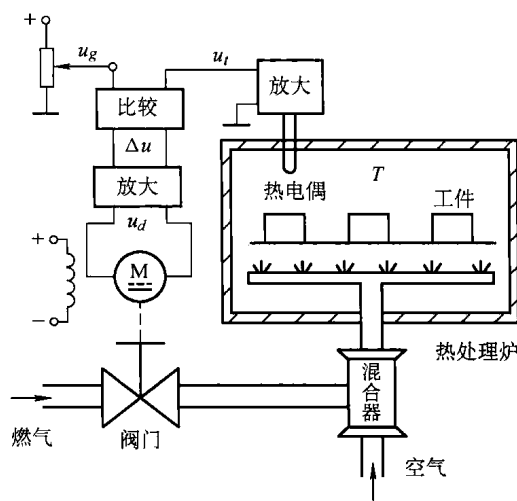


图 1-2 温度自动控制系统

在温度自动控制系统中,反馈电压 $u_f(t)$ 相当于人眼观察到的实际温度值,比较、放大及驱动电动机代替了人们大脑的思考和手的作用,整个控制过程是在无人参与的情况下实现的。

可见,温度自动控制系统由比较器产生的误差信号 Δu 对系统产生控制作用,在炉温达

到设定值时，误差信号 $\Delta u = 0$ ，控制作用消失，否则误差信号 $\Delta u \neq 0$ ，电动机转动，控制调节阀门朝减小 Δu 的方向转动，实现了温度的自动控制。图 1-3 给出了该系统各组成部分职能和各信号间关系的结构框图，其中 $\otimes$ 是比较器的符号。

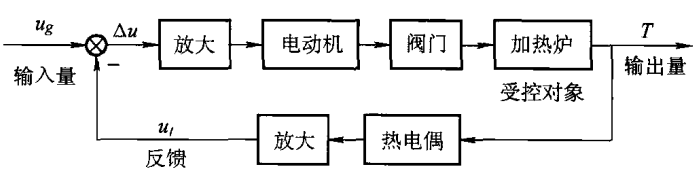


图 1-3 温度自动控制系统框图

1.2.2 自动控制系统的组成

1. 基本组成部分

自动控制系统根据具体功能和控制要求的不同，可以有不同的控制装置或不同的结构形式。但从工作原理来看，自动控制系统通常由一些具有不同职能的基本部分构成。图 1-4 所示是一个典型的自动控制系统结构框图。

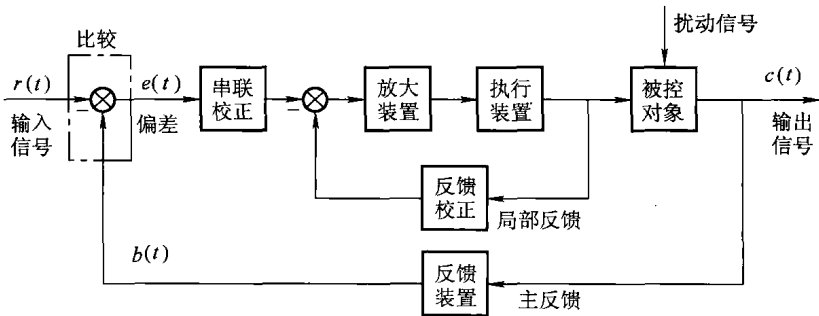


图 1-4 典型的自动控制系统结构框图

测量反馈装置：用以测量被控制量并转换成与输入信号相同的物理量（通常是电压）作为反馈信号，如图 1-3 所示的热电偶和热电动势放大器。反馈有主反馈和局部反馈之分。

比较装置：将输入信号与反馈信号进行比较，产生反映被控制量与要求值之间误差的偏差信号。

校正装置：又称控制装置，是指按照某种函数关系产生控制信号，用以改善系统的控制性能的装置。它可能是一个简单的放大器，也可能是一个具有复杂控制规律的微型计算机。

执行机构：根据控制信号执行相应的控制作用，以便使被控制量按要求值变化，如电动机和液压装置等。

被控对象：又称控制对象或受控对象，常指需要进行控制的工作机械装置、设备或生产过程，如加热炉、汽车和飞机等。

2. 参与控制的信号

输入信号：也称给定量或给定输入，它是人们期望系统输出按照这个信号的要求而变化的指令信号，如图 1-2 中的 u_g 。

输出信号：也称系统的被控量，是指被控对象中要求按一定规律变化的物理量，如温度、速度、流量和距离等。

反馈信号：反馈装置的输出信号。

偏差信号：指给定输入信号与主反馈信号之差。

扰动信号：也称扰动输入，它是一种与控制作用相反、影响系统的输出使之偏离给定作用的信号，如温度自动控制系统中的工件数量、环境温度及燃气压力等的变化量都属于扰动信号。

3. 信号传递通道

前向通道：从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通道。

反馈通道：从输出端经反馈装置回到系统输入端的通道。

主回路：前向通道与主反馈通道一起构成的回路。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多，它们的结构、性能以及要完成的控制任务都不相同，因此有不同的分类方法。下面介绍几种常见的分类方法。

1.3.1 按控制系统的结构分类

1. 开环控制系统

若系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用不产生影响，则称这类系统为开环控制系统。图 1-5 所示的直流电动机开环调速系统，就是开环控制系统的一例。

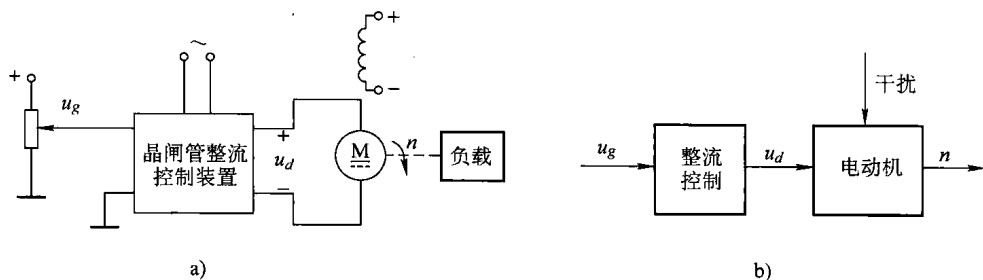


图 1-5 直流电动机开环调速系统

a) 原理图 b) 框图

系统中的电动机是被控对象，电压 u_g 是给定输入信号，电动机的转速 n 为系统的输出量。由于电动机的励磁电压恒定，调整给定电压就可改变晶闸管整流控制装置的输出 u_d ，从而控制电动机的转速。由于系统中只有给定电压对电动机转速的控制，没有信号的反馈，所以当发生负载转矩变化、电网电压波动等扰动时，都将引起输出转速的偏离。

开环控制的特点是系统的结构和控制过程都很简单。但由于这类系统无抗扰能力，因而其控制精度较低，大大限制了它的应用范围。开环控制一般用于对控制性能要求不高的场合。

2. 闭环控制系统

如图 1-2 所示的温度自动控制系统，系统中不但存在从输入端到输出端的信号，还有从输出端到输入端的反馈信号，称为闭环控制系统，也称反馈控制系统。

图 1-6 所示为直流电动机闭环调速系统。与图 1-5 所示的直流电动机开环调速系统比

较,电动机同样是被控对象、电压 u_g 为给定输入信号、电动机的转速 n 为系统的输出量,只是另增加了测速发电机以及分压电位器,将输出转速 n 转换成电压 u_f ,并反馈至输入端,形成闭合回路。系统的调速原理也与开环控制相同,但它是用差值 $\Delta u = u_g - u_f$ 来进行控制的,即输出量参与了控制。不管是电网电压波动、负载改变,还是对象参数的改变引起输出量转速的变化,都会引起 Δu 变化,而经过系统的自动调整对这个变化加以抑制,可保持转速的恒定。

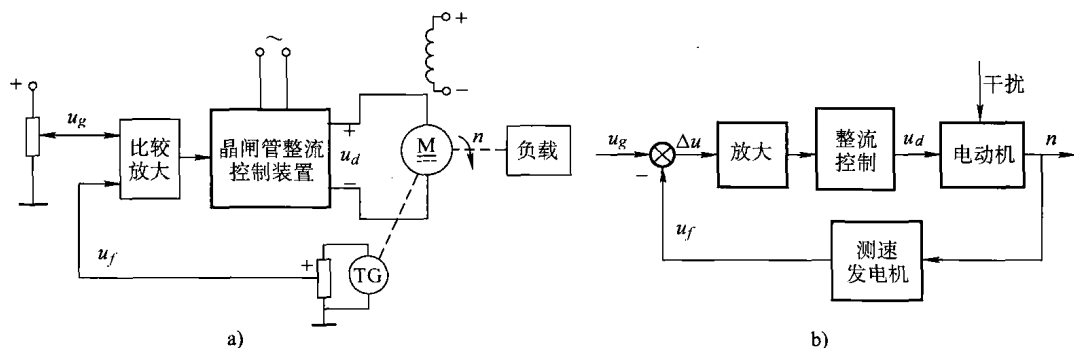


图 1-6 直流电动机闭环调速系统

a) 原理图 b) 框图

闭环控制系统的特点是：

- 1) 闭环控制的实质就是负反馈控制。在闭环控制系统中,负反馈控制使系统具有自动修正被控制量偏离给定值(或期望值)的能力,较好地实现了自动控制的功能。
- 2) 闭环控制有较强的抗干扰能力。引入负反馈后,作用在被反馈包围的前向通道各环节上的扰动引起的被控制量偏离,都会通过负反馈形成偏差,从而产生相应的控制去减小或消除这些偏差,故闭环系统可以抑制扰动的影响,提高系统的控制精度。
- 3) 闭环控制的结构和特性相对复杂,如果参数配合不当,系统容易产生振动,甚至不稳定。

闭环控制在自动控制中得到了广泛的应用,自动控制原理所研究的系统主要是闭环控制系统。

另外,还有将闭环控制与开环控制(补偿控制)相结合的控制,称为复合控制。

1.3.2 按系统输入信号的变化规律分类

1. 恒值系统

若系统的输入信号一经整定好就保持恒值,而系统的控制任务就是克服扰动,使输出量保持恒值,此类系统称为恒值系统。图 1-6 所示的直流电动机闭环调速系统就是一个恒值系统。此外,工业过程中的压力、流量、液位等控制和日常生活中空调、冰箱的温度控制均为恒值系统。

恒值控制系统主要研究如何克服各种扰动对系统输出的影响。

2. 随动系统

若系统的输入信号是随时间任意变化的函数,系统的控制任务是要求输出量能跟随输入信号变化,此类系统称为随动系统,如火炮自动跟踪系统和舵舵位置控制系统等。

图 1-7 所示为一个用以控制导弹发射架方位的随动系统，其结构框图如图 1-8 所示。

该系统用两个并联后接在同一电源上的电位器作为方位角检测元件，它们的滑臂分别与输入轴和输出轴连接，将系统的输入、输出方位角信号转换成与之成比例的电压信号。当摇动手柄给出一个输入角 θ_r 时，若与输出转角 θ_c 不相等，对应的电压也不相等，即 $u_r \neq u_c$ ，比较后的偏差值 u_e 经功率放大驱动电动机，控制发射架转动一个角度，直至 $\theta_r = \theta_c$ ， $u_r = u_c$ ， $u_e = 0$ ，电动机停止转动。发射架停留在要求的方位角上，输出轴跟随输入轴运动。

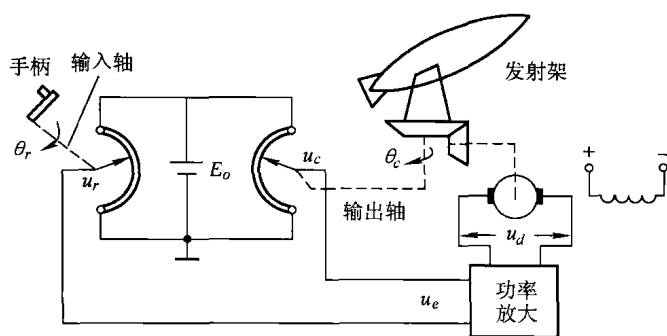


图 1-7 导弹发射架方位控制系统

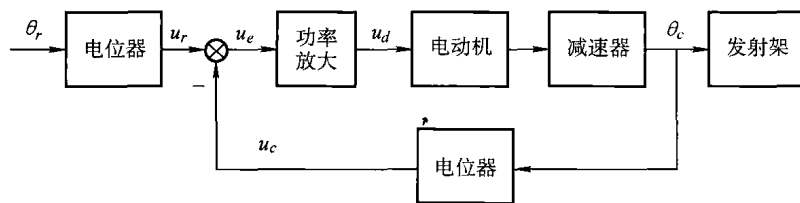


图 1-8 导弹发射架方位控制系统结构框图

随动系统也是根据反馈控制原理进行控制的，它要解决的问题是被控制量如何快速、准确地跟踪输入。

3. 程序控制系统

若系统的给定值按照预先知道的时间函数变化，即要求被控量按照预先确定的规律变化，则称为程序控制系统。例如，热处理炉温度控制系统中的升温、保温、降温控制，都是按工艺要求设定的规律进行控制的。又如，机械加工中的数控机床、加工中心及一些自动化生产线等均是程序控制系统的典型例子。

1.3.3 按系统传输信号的特性分类

1. 线性系统

若组成系统的全部元器件的特性都是线性的，系统的运动过程可用一个或一组线性微分方程(或差分方程)来描述，则称为线性系统。当微分方程的系数都是常数时，称为线性定常系统；当微分方程的系数是时间的函数时，称为线性时变系统。

线性系统的主要特点是具有齐次性和叠加性。线性定常系统的响应只与输入信号有关，与初始条件无关。

2. 非线性系统

若系统中含有一个或多个非线性元器件，则称为非线性系统。这类系统的运动过程需用非线性微分方程(或差分方程)描述，如饱和限幅特性、死区特性和继电特性等。

非线性系统不具有叠加性。非线性系统的响应既与输入信号有关，也与初始条件有关。

非线性系统尚无一种完整、统一、成熟的分析方法。对于非线性程度不很严重的系统，可近似为线性系统来分析。

1.3.4 按系统传输信号的时间性质分类

1. 连续系统

若系统各部分的信号都是时间的连续函数，即信号的大小都是可以任意取值的模拟量，则称为连续系统。如前面讨论过的温度、转速和方位控制系统等都是连续系统。

2. 离散系统

若系统中有一处或多处信号为时间的离散函数，如脉冲或数字信号等，则称为离散系统。图 1-9 所示的计算机控制系统就属于离散系统。

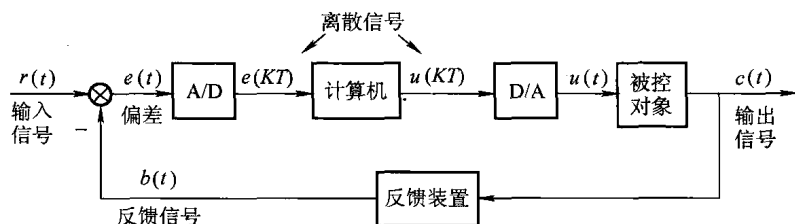


图 1-9 计算机控制系统

1.4 对自动控制系统性能的基本要求

自动控制系统在控制过程中不可避免地存在着过渡过程，所以自动控制系统的性能不仅取决于稳态时的控制精度，还取决于暂态过程的控制状况。因此，对自动控制系统性能的基本要求，主要包括稳定性、暂态性能和稳态性能 3 个方面。

1. 稳定性

稳定性是系统能够正常工作的首要条件，它是系统的固有特性，由系统的结构和参数决定，与外部输入信号无关。稳定性是指系统重新恢复平衡工作的能力。当系统的输入量改变或受任何干扰作用时，经过一段时间的控制过程后，其被控量可以达到某一稳定状态，则称系统是稳定的，否则称为不稳定。

不同的控制系统在阶跃给定信号作用下的响应也不相同。图 1-10a 所示为稳定系统在阶跃给定信号作用下的响应情况。图 1-10b 所示为不稳定系统在阶跃给定信号作用下的响应情况，曲线 1 为等幅振荡现象，曲线 2 呈发散振荡现象，最终系统不能达到平衡，无法正常工作。

2. 暂态性能

暂态性能是指输入作用改变后系统重新达到平衡状态前的特性。对于一个稳定系统，暂态过程响应的平稳性（相对稳定性）和快速性都是非常重要的。

如果平稳性差，即动态过程振荡激烈，不但会使控制质量下降，而且会导致系统中的元件和设备损坏。如图 1-10a 所示中，曲线 2 较曲线 1 有更好的平稳性。

快速性是由动态过程的时间长短来表征的。动态过程也称为过渡过程，过渡过程时间越

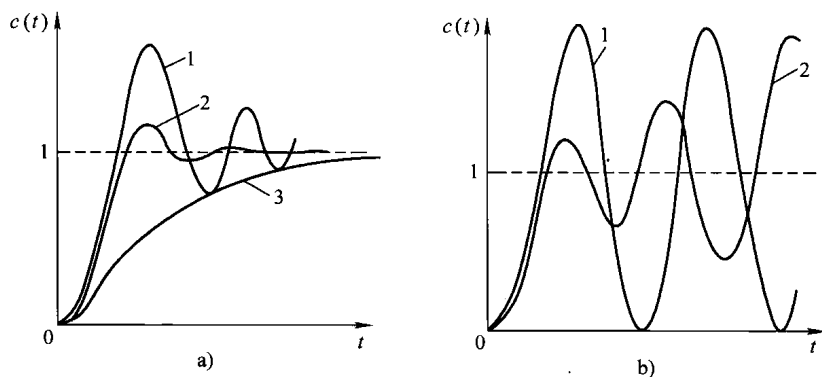


图 1-10 控制系统在阶跃信号作用下的响应

a) 稳定系统的响应情况 b) 不稳定系统的响应情况

短,表明快速性越好。如图 1-10a 所示,曲线 3 为单调变化过程,虽平稳性好,但比曲线 2 响应时间长,反应迟钝,快速性差。快速性是衡量系统性能的重要指标之一,它在现代军事设备及工作状态需要经常改变的随动系统中显得更为重要。

3. 稳态性能

系统的稳态输出与给定输入所要求的期望输出之间的误差称为稳态误差。控制系统的稳态性能是由稳态误差来表征的,它反映了系统的稳态精度。稳态误差越小,表示系统的输出跟随输入的精度越高,准确性越好。

对于温度、压力和速度等恒值控制系统,由于系统一般工作在稳态,稳态精度会直接影响到产品的质量,所以准确性是这类控制系统最重要的性能指标之一。

怎样根据工作任务的不同,分析和设计自动控制系统,使其对 3 方面的性能有所侧重并兼顾其他,以全面满足要求,这正是本课程所要研究的内容。

小 结

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,是分析和设计自动控制系统的基础,一般可分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。本书主要介绍古典控制理论。

自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置操纵受控对象,使被控量等于给定值。

可根据需要将自动控制系统按照系统的结构、输入信号的变化规律、传输信号的特性和时间性质进行归类。

自动控制系统有开环控制和闭环控制两种结构。开环控制实行起来简单,但抗扰动能力较差,控制精度也不高。自动控制原理中主要讨论闭环控制方式,其主要特点是抗扰动能力强,控制精度高,但存在能否正常工作,即稳定与否的问题。

对自动控制系统性能的基本要求主要包括稳定性、暂态性能和稳态性能 3 个方面,而这些性能往往是相互矛盾的,因此需要根据不同的工作任务来分析和设计自动控制系统,使其在满足主要性能要求的同时,兼顾其他性能。

习 题

1-1 试阐述下列术语的意义并举例说明：

自动控制；控制装置与受控对象；给定值与被控量；开环控制与闭环控制；恒值系统与随动系统；稳定性、暂态性能和稳态性能。

1-2 试列举几个日常生活中开环控制和闭环控制的例子，画出它们的结构框图，并说明其工作原理。

1-3 直流发电机端电压控制系统如图 1-11 所示。图中的 U 是发电机的端电压， U_0 是非常稳定的电源电压，且等于发电机端电压的设定值。由于负载变化及其他扰动的影响，发电机端电压会随时波动。试分析发电机端电压控制系统的工作原理，并画出系统框图。

1-4 炉温控制系统如图 1-12 所示，要求：

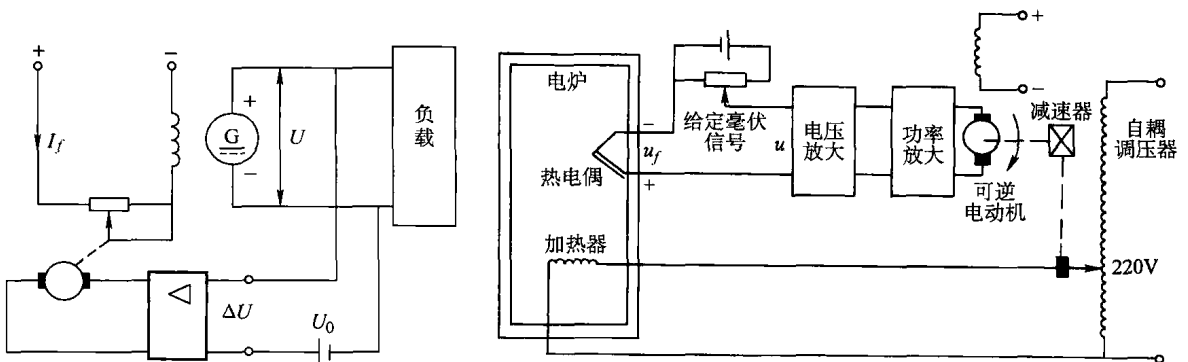


图 1-11 题 1-3 图

图 1-12 题 1-4 图

(1) 指出系统输出量、给定输入量、扰动输入量、被控对象和控制装置的各组成部分，并画出系统框图。

(2) 说明该系统是怎样消除或减少偏差的。

1-5 图 1-13 所示为水位控制系统，要求：

(1) 画出系统的原理框图，指出系统的输出量和输入量(包括给定输入量和扰动输入量)。

(2) 分析工作原理。

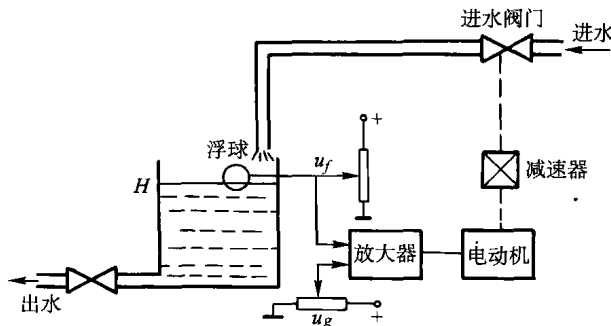


图 1-13 题 1-5 图

第2章 控制系统的数学模型

如前所述,自动控制系统是由控制对象、执行机构、检测装置和控制装置等组成的。为了研究自动控制系统的运动特性,对系统进行定量分析,进而探讨改善系统性能的具体方法,首先必须建立控制系统的数学模型。

描述控制系统在动态过程中输入、输出及各变量之间关系的数学表达式,称为系统的数学模型。

建立控制系统数学模型的方法有分析法和实验法。分析法是对系统各部分的运动机理进行分析,根据它们所依据的物理规律和化学规律列写相应的运动方程。实验法是人为地给系统施加某种测试信号记录其响应,并用适当的数学模型去逼近,这种方法也称为系统辨识。本章只讨论用分析法建立线性定常系统数学模型的方法。

数学模型有解析式模型和图模型两种形式。古典控制理论中常用的解析式模型有微分方程、传递函数和频率特性,它们分别是系统在时域、复域和频域的数学模型。图模型主要有结构图和信号流图。本章主要介绍微分方程、传递函数、结构图和信号流图模型,频率特性模型将在第5章中讨论。

2.1 微分方程

2.1.1 微分方程的建立

微分方程是描述自动控制系统动态特性的最基本的数学模型。一个完整的控制系统通常由若干元器件或环节组成,系统可以由一个环节组成的小系统,也可以是由多个环节构成的大系统。

列写微分方程的一般步骤如下:

- 1) 根据实际工作情况,确定系统或各元器件的输入变量和输出变量。
- 2) 从输入端开始,按照信号传递的顺序和各元器件所遵循的物理规律,列出微分方程组。
- 3) 消去中间变量,得到描述系统输出量与输入量(包括扰动量)关系的微分方程。
- 4) 标准化,即将微分方程中与输出量有关的项写在方程的左端,与输入量有关的项写在方程的右端,方程两端变量的导数项均按降幂排列。

例 2-1 求图 2-1 所示 RLC 串联电路的微分方程。其中, $u_r(t)$ 为输入量, $u_c(t)$ 为输出量。

解 设回路电流为 $i(t)$,根据基尔霍夫定律有

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + u_c(t) = u_r(t)$$

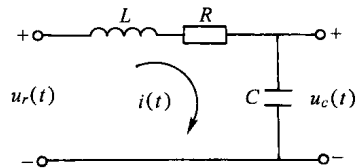


图 2-1 RLC 串联电路