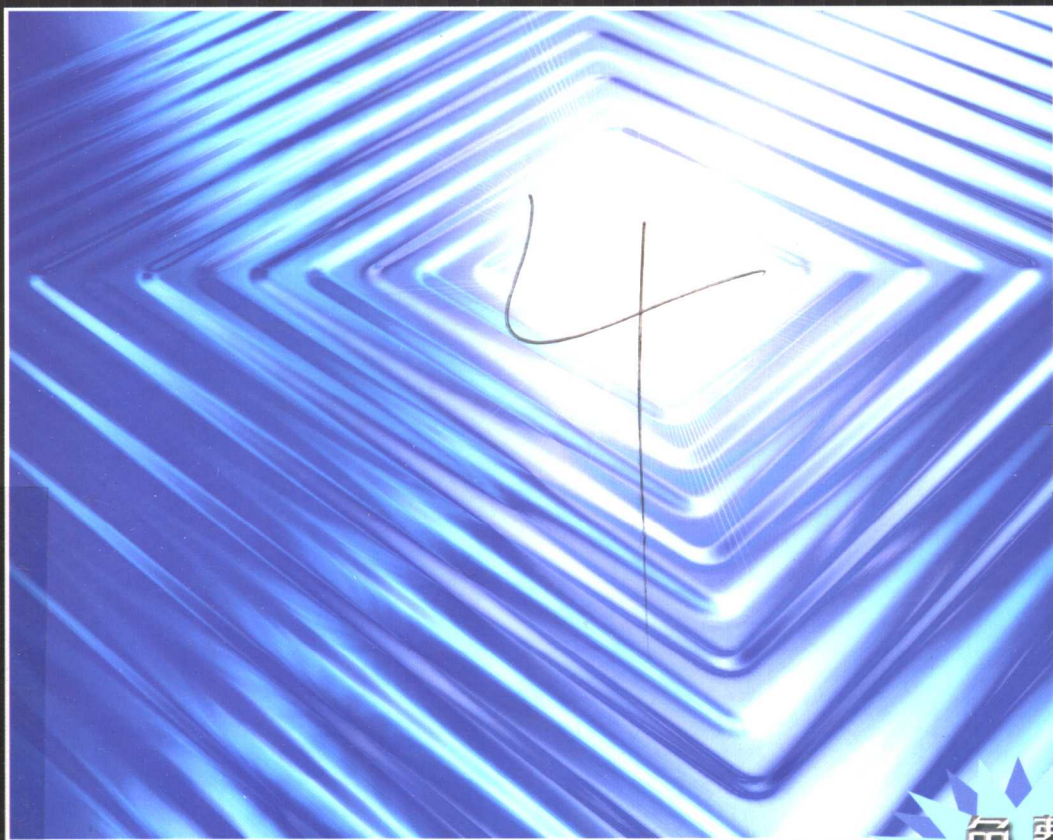




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

孟华 主编



免费
电子课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TP13/226

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

主 编 孟 华
参 编 王金城 曲晓光 邓长辉 韩 敏
 杨 斌 陈 波 马 蕾
主 审 王 伟 刘晓东



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，书中比较全面地阐述了经典控制理论的基本概念、分析方法及其应用。全书共分8章，内容包括自动控制的基本概念，控制系统数学模型的建立，线性系统的时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法，线性控制系统的校正，离散控制系统，非线性系统等，每章末均有习题。附录部分介绍了MATLAB的基本知识及在系统分析中的应用，还有部分习题参考答案。

本书的特点是深入浅出，基本理论清晰，注重实际应用，有较丰富的例题和习题。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

本书可作为高等院校自动化类各专业的教科书，亦可供从事自动化技术工作的科技人员自学与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/孟华主编. —北京: 机械工业出版社,
2007.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-22089-3

I. 自… II. 孟… III. 自动控制理论-高等学校-教材
IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 120336 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: 王保家

责任编辑: 刘丽敏 版式设计: 冉晓华 责任校对: 陈延翔

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·19.5 印张·458 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-22089-3

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

在工业生产和科学技术的发展过程中，自动控制起着极其重要的作用。自动控制作为一种技术手段，不仅提高了劳动生产率和产品质量，改善了人们的劳动条件和生活环境，而且在人类征服自然、探索新能源、开发太空等方面都做出了极其重大的贡献。

自动控制理论的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理，随着科学和技术的进步，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。

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础，专门研究自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法，是一门理论性较强的课程。本书是根据目前本科院校自动化专业“自动控制原理”的教学大纲而编写的，适合自动化专业及其他电气信息类专业本科生使用。

本书是以作者 20 余年的教学讲义为基础，广泛参考国内外优秀教材，集全体编者多年教学经验而总结出来的。本书包括了原讲义中的几乎所有内容，同时又丰富了许多问题的不同解法，加入了较多的例题和习题，特别是提供了部分习题参考答案，便于学生自学。鉴于近年来 MATLAB 在理工科教学中的广泛应用，为自动控制系统的分析和设计带来了极大的方便。为帮助读者学习，本书的附录部分增加了 MATLAB 基本知识的介绍，讨论了 MATLAB 在控制系统分析中的应用，以适于现代化教学发展的需要。

全书共分 8 章及两个附录。主要内容分为四大部分：第一部分包括基本概念、线性系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹分析、频域响应分析、控制系统校正等，这些均为线性定常连续系统所涉及的内容，阐述了自动控制系统的模型、分析和设计了 3 个基本问题；第二部分介绍了以数字控制理论为基础的离散控制系统，包括采样系统的模型、稳定性分析等；第三部分阐述了非线性系统的基本理论和分析方法，主要包括相平面法和描述函数法；第四部分为附录，包括 MATLAB 简介和部分习题参考答案。

本书由孟华任主编，第 1、2 章由王金城编写，第 3 章由曲晓光编写，第 4 章由孟华编写，第 5 章由孟华、邓长辉编写，第 6 章由邓长辉编写，第 7 章由韩敏编写，第 8 章由杨斌、陈波编写，附录 A 由马蔷编写，全书由孟华统稿。



自动控制原理

大连理工大学电子与信息工程学院王伟教授、刘晓东教授审阅了全书，并提出许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，诚请广大读者批评指正。

编 者

2007年4月

目 录

前言

第 1 章 自动控制的基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 自动控制的基本原理	2
1.2.1 自动控制系统举例	2
1.2.2 自动控制系统的构成	4
1.3 控制系统的分类	6
1.3.1 按信号传递路径分类	6
1.3.2 按输入信号特征分类	7
1.3.3 按系统数学模型分类	8
1.3.4 按时间变量特性分类	9
1.3.5 按系统参数特性分类	9
1.4 对控制系统的性能要求	9
1.4.1 稳定性	10
1.4.2 动态性能指标	10
1.4.3 稳态误差	10
习题	11
第 2 章 控制系统数学模型的建立	13
2.1 概述	13
2.2 控制系统微分方程的建立	14
2.2.1 典型控制系统举例	15
2.2.2 非线性微分方程的线性化	22
2.3 传递函数	26
2.3.1 传递函数的概念	26
2.3.2 传递函数的性质	28
2.3.3 典型环节及其传递函数	29
2.4 控制系统的结构图	33
2.4.1 结构图的概念	33
2.4.2 控制系统结构图的建立	34
2.4.3 结构图的等效变换	37
2.5 控制系统的信号流图	43
2.5.1 信号流图的定义	44
2.5.2 由系统结构图绘制信号	

流图	45
2.5.3 用梅逊公式求传递函数	46
2.6 控制系统的传递函数	49
习题	52
第 3 章 时域分析法	57
3.1 概述	57
3.2 瞬态响应	58
3.2.1 典型输入信号	58
3.2.2 一阶系统的瞬态响应	60
3.2.3 二阶系统的瞬态响应	62
3.2.4 时域性能指标	66
3.2.5 瞬态响应分析	67
3.2.6 线性定常系统的重要特性	72
3.2.7 高阶系统的近似分析	72
3.3 稳定性	74
3.3.1 稳定性的基本概念	74
3.3.2 劳斯判据	78
3.3.3 赫尔维茨判据	83
3.4 稳态误差分析	85
3.4.1 稳态误差的概念	85
3.4.2 稳态误差的计算	86
3.4.3 降低稳态误差的主要措施	92
习题	93
第 4 章 根轨迹分析法	97
4.1 概述	97
4.2 根轨迹的概念	98
4.3 根轨迹的绘制	100
4.3.1 绘制根轨迹的基本规则	101
4.3.2 绘制根轨迹举例	110
4.4 广义根轨迹的绘制	114
4.4.1 参变量根轨迹的绘制	114
4.4.2 正反馈系统根轨迹的绘制	116
4.5 控制系统的根轨迹分析	118
4.5.1 性能指标在 s 平面上的表示	118



4.5.2 开环零、极点对根轨迹的影响	120	6.3.1 串联超前校正	184
4.5.3 闭环零、极点分布与系统性能的关系	122	6.3.2 串联滞后校正	186
习题	125	6.3.3 串联滞后-超前校正	189
第5章 频域分析法	128	6.4 反馈校正	192
5.1 概述	128	6.4.1 反馈校正的原理及特点	192
5.2 频率特性	129	6.4.2 反馈校正及其参数确定	193
5.2.1 频率特性的基本概念	129	习题	196
5.2.2 频率特性的求取	130	第7章 离散控制系统	199
5.3 频率特性的图示方法	132	7.1 概述	199
5.3.1 极坐标图	132	7.2 采样过程与采样定理	201
5.3.2 对数坐标图	139	7.2.1 采样过程及其数学描述	201
5.3.3 对数幅相图	148	7.2.2 采样定理	203
5.4 频域稳定性判据	149	7.2.3 信号的恢复	205
5.4.1 映射定理	149	7.3 Z变换理论	207
5.4.2 奈奎斯特稳定判据	150	7.3.1 Z变换定义	207
5.5 控制系统的稳定裕量	156	7.3.2 Z变换方法	208
5.5.1 相角裕量	156	7.3.3 Z变换的性质	212
5.5.2 幅值裕量	157	7.3.4 Z反变换方法	214
5.5.3 稳定裕量的计算	158	7.4 离散控制系统的数学描述	216
5.6 控制系统的闭环频率特性	160	7.4.1 线性常系数差分方程	216
5.6.1 闭环频率特性曲线的绘制	160	7.4.2 脉冲传递函数	218
5.6.2 闭环频域性能指标	165	7.5 离散控制系统的分析与设计	228
5.7 频域性能指标与瞬态性能指标之间的关系	165	7.5.1 稳定性分析	228
5.7.1 开环频域性能指标与瞬态性能指标之间的关系	166	7.5.2 瞬态响应	231
5.7.2 闭环频域性能指标与瞬态性能指标之间的关系	167	7.5.3 稳态误差	232
习题	170	7.5.4 最少拍设计	235
第6章 线性控制系统的校正	173	习题	237
6.1 概述	173	第8章 非线性控制系统	240
6.2 校正装置及其特性	175	8.1 概述	240
6.2.1 无源校正装置	175	8.2 非线性系统的特点	241
6.2.2 有源校正装置	180	8.2.1 典型非线性特性	241
6.2.3 PID调节器	182	8.2.2 非线性系统的运动特点	242
6.3 串联校正	183	8.3 相平面分析法	244
		8.3.1 相平面的基本概念	244
		8.3.2 相平面图的绘制方法	245
		8.3.3 奇点和极限环	249
		8.3.4 相平面分析举例	252
		8.4 描述函数分析法	258
		8.4.1 描述函数的基本概念	258



8.4.2 典型非线性特性的描述函数·····	259	基本运算·····	276
8.4.3 用描述函数法分析非线性 系统·····	266	A.2.2 矩阵和向量·····	282
习题·····	273	A.2.3 M 文本文件·····	284
附录 ·····	275	A.2.4 图形·····	286
附录 A MATLAB 简介 ·····	275	A.2.5 MATLAB 控制系统工具箱函数 介绍·····	289
A.1 MATLAB 的工作界面·····	275	A.3 MATLAB 程序设计实例·····	291
A.2 MATLAB 的程序设计基础·····	276	附录 B 部分习题参考答案 ·····	295
A.2.1 语句、变量和 MATLAB 的 		参考文献 ·····	302

第 1 章

自动控制的基本概念

当前，自动控制作为一种技术手段已经广泛应用于工农业生产、国防科学以及日常生活中的各个领域。人们经常会问：“什么是自动控制？什么是自动控制系统？”。本章将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问题。

1.1 概述

在工程和科学技术的发展过程中，自动控制担负着非常重要的角色。例如，导弹能正确击中目标；宇宙飞船能准确地登上月球，并在预定的时间和地点返回地球；机床能自动加工出满足精度要求的工件；机器人能按一定的规律进行操作；在工业生产过程中对压力、温度、流量以及原料成分比例的高精度控制等，都与自动控制的应用密切相关。

由于自动控制技术在国民经济各个领域的广泛应用，不仅提高了劳动生产率 and 产品质量，改善了劳动条件和生活环境，而且在人类征服自然、探索新能源、开发太空等方面都起着极为重要的作用。随着科学技术的发展，自动控制理论与技术所起的作用越来越重要，人类生活的自动化水平越来越高。

自动控制理论是自动控制技术的理论基础，是一门理论性较强的科学。它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理，随着科学和技术的进步，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。

20世纪40年代“经典控制理论”正式诞生，其代表作是美国数学家维纳（Wiener）1948年发表的《控制论》（Cybernetics or Control and Communication in the Animal and Machine）一书。Cybernetics一词来源于希腊文，原意是“舵手”与“统治者”。“经典控制理论”以微分方程、传递函数、频率特性为数学工具，研究的对象主要是单输入单输出线性的一类自动控制系统。它的物理概念清晰，一般采用图解的方法对控制系统进行分析和校正，至今仍广泛应用于实际工程中。本书介绍的就是“经典控制理论”部分。

1954年，主要从事力学与火箭技术研究的我国著名科学家钱学森在美国出版了著名的《工程控制论》一书。《控制论》与《工程控制论》的问世吸引了大批数学家和工程技术专家从事控制科学的研究，进一步推动了该学科的发展。

20世纪50~60年代是人类开始征服太空的年代，1957年前苏联成功发射了第一颗人造卫星，1968年美国阿波罗飞船成功登上月球。在这些举世瞩目的成就中，自动控制起着不可磨灭的作用，也因此催生了“现代控制理论”。它无论在理论上，还是在研究方法上都不是“经典控制理论”的简单延伸和推广，而是认识上的一个飞跃。“现代控制理论”以状态空间法为基础，主要研究多输入多输出、时变参数、非线性控制系统的分析和设计问题。最优控制、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域的主要研究课题。

如今，随着数字计算机的性能越来越高、价格不断下降和体积的更为紧凑，数字计算机已经成为自动控制系统中不可缺少的组成部分。而且，自动控制理论的应用范围已经扩充到了非工程领域，如经济系统、生物系统、医疗系统等复杂的大系统。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 自动控制系统举例

在工农业生产和人们的日常生活中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，提高其机械性能，一般需要对工件进行热处理。热处理的任务是使工件的温度按照理想的温度曲线变化，如图1-1a所示。为了完成这一加工任务而设计的一个自动控制系统如图1-1b所示。对自动控制系统的要求是：随时调整燃料的供给量使工件的温度按工艺曲线变化，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燃料燃烧情况的波动等。

系统的工作原理是：假定加热炉内的温度 T 恰好等于希望值，这时炉内温度 T 经热电偶测量并放大和整定，则 $u_T = u_r$ ，即 $\Delta u = 0$ ，故电动机连同调节阀门静止不动，进入加热炉的煤气流量保持不变。

如果希望的工件温度（即对应的 u_r ）发生变化或炉内温度 T 受到干扰影响，使温度 T

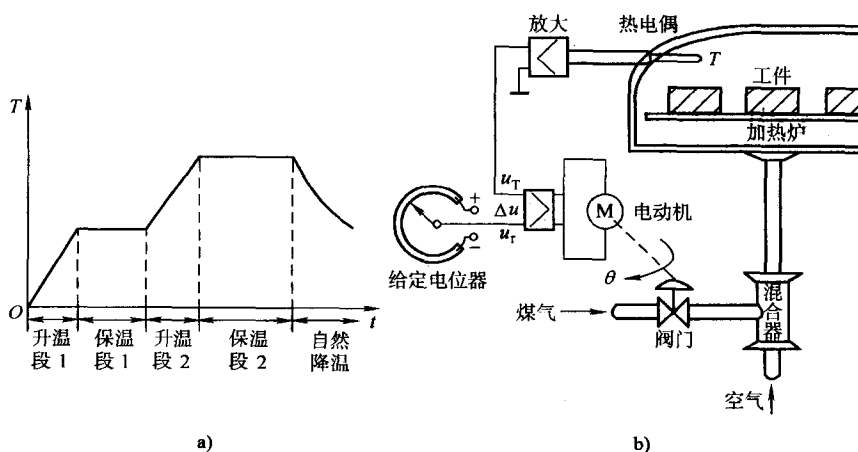


图 1-1 加热炉温度控制系统原理图

偏离了希望值，将导致 $\Delta u \neq 0$ ，则电动机驱动调节阀门开大或关小，使煤气供给量相应地增加或减少，从而使炉内温度 T 发生相应的变化（即向偏差减小的方向变化），直至重新等于希望值（即 $u_T = u_r$ ）为止。

由此看出，控制系统通过测量炉内温度，得到与希望值的偏差，进而驱动电动机和调节阀门改变炉内温度，所以这是一个按偏差调节的反馈控制系统。

控制系统的组成以及相互关系如图 1-2 所示。系统中存在着一个闭合的工作回路，信号从炉内温度 T ，经热电偶和放大元件后反馈到比较电路，再经电动机、调节阀门和加热炉等回到炉内温度 T 。

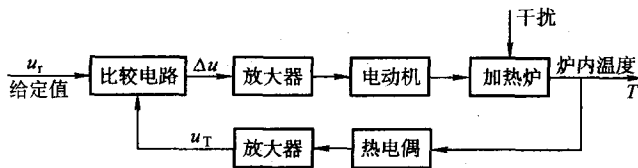


图 1-2 加热炉温度控制系统框图

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和信号传递上的重要标志。

2. 位置随动系统

图 1-3 是某一位置随动系统的工作原理图。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_r ，电位器 2 的滑臂随工作机构转动，相应的电位为 u_c 。以 $u_s = u_r - u_c$ 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。

控制的任务是使工作机构的转角 θ_c 跟随指令机构的转角 θ_r 同步转动，亦即

$$\theta_c(t) = \theta_r(t)$$

自动控制系统的工作原理：如果工作机构转角 θ_c 等于指令机构转角 θ_r ，则 $u_r = u_c$ ， $u_s = 0$ ，电动机不动，系统处于平衡工作状态。

如果指令机构转角 θ_r 发生变化，而工作机构转角 θ_c 仍处于原位，则 $\theta_c \neq \theta_r$ ，即 $u_c \neq$

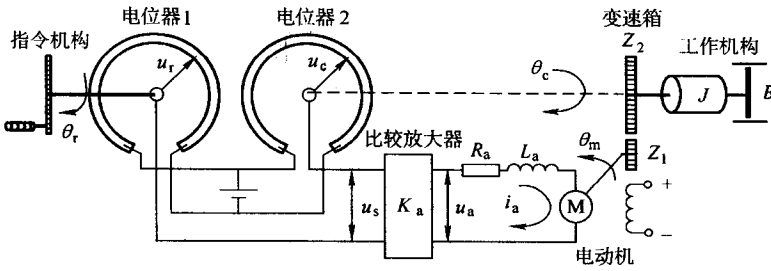


图 1-3 位置随动系统的工作原理图

$u_r, u_s \neq 0$, 从而电动机拖动工作机构朝 θ_r 所要求的方向转动。当 $\theta_c = \theta_r$ 时, 电动机停转, 系统在新的位置上又处于平衡工作状态, 即完成了角位移的跟随任务。

由此看出, 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, 再通过比较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。控制系统的框图如图 1-4 所示, 图中同样存在着一个负反馈闭合回路。

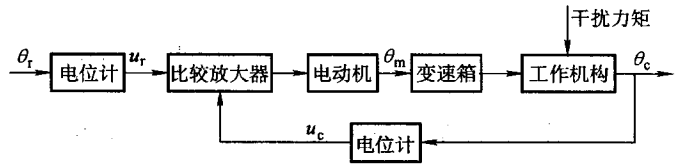


图 1-4 位置随动系统框图

在实际工程中, 如果需要某个机构 (如船闸、轧机、刀架、雷达天线等) 的位置能快速准确地跟随指令信号动作, 都可以仿照这种随动控制系统的原理来实现。这种系统的突出特点是, 被控制对象或装置比较简单, 只相当于执行机构直接拖动着一个纯机械载荷。而指令信号需要根据工作要求经常变化, 有时甚至事先无法确定。这类系统一般用功率较小的指令信号操纵比较笨重的工作机构, 而且可以进行远距离控制。如上述例子中, 指令电位计的电位 u_r 和工作机构转角 θ_c 相对应电位 u_c , 很容易通过电路连接到比较放大器, 二者可以相隔甚远。这种能够任意操纵和跟踪的系统, 常称为随动控制系统或伺服系统。

在实际工程中, 如果需要某个机构 (如船闸、轧机、刀架、雷达天线等) 的位置能快速准确地跟随指令信号动作, 都可以仿照这种随动控制系统的原理来实现。这种系统的突出特点是, 被控制对象或装置比较简单, 只相当于执行机构直接拖动着一个纯机械载荷。而指令信号需要根据工作要求经常变化, 有时甚至事先无法确定。这类系统一般用功率较小的指令信号操纵比较笨重的工作机构, 而且可以进行远距离控制。如上述例子中, 指令电位计的电位 u_r 和工作机构转角 θ_c 相对应电位 u_c , 很容易通过电路连接到比较放大器, 二者可以相隔甚远。这种能够任意操纵和跟踪的系统, 常称为随动控制系统或伺服系统。

1.2.2 自动控制系统的构成

所谓自动控制就是指没有人的直接干预, 利用控制装置使被控制对象 (如生产设备) 的工作状态或被控制量按照预定的规律运行。从自动控制的定义可以看出, 它包含了这样一种意思, 一方面是自动控制必须在没有人的直接干预下, 由设备和装置自己完成控制任务; 另一方面是装置和设备的运动过程必须按照人预定的规律运行。实现上述自动控制的目的, 由相互联系和制约的各部件组成的具有特定功能的整体称为自动控制系统。

剖析一下上述两个实际例子可以看出, 自动控制系统的基本工作原理是, 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。无论是由干扰造成的, 还



是给定值发生变化,或是由于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,故称这种控制方式称为按偏差调节。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。

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。

(1) 被控对象 它是控制装置所控制和操纵的对象,它接受控制量并输出被控量。被控对象可以是一套装置或设备,也可以是一个动态过程。如化学工业中将原料经物理变化或化学变化处理成所需要产品的生产过程。

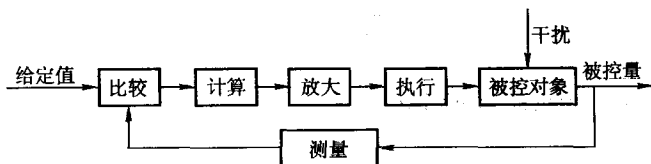


图 1-5 自动控制系统框图

(2) 测量装置 它的职能是把被控对象的被控量(温度、压力、流量、位移等)检测出来,并且一般需要转换成标准的电信号(如0~5V直流电压或0~10mA直流电流),以便于处理。为了保证控制精度,测量装置应当测量准确,并且牢固、可靠、受环境条件影响小。

(3) 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。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。

(4) 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,而对于复杂的运算可以利用计算机完成。

(5) 放大装置 由于经过计算处理的信号通常是标准化的弱信号,不能驱动被控制对象,所以总是需要加以放大。放大装置的输出必须有足够的能量,一般需要幅值的放大和功率的放大,才能实现驱动能力。

(6) 执行装置 它的职能是产生控制量,直接推动被控对象的被控量发生变化。如上述例子中的电动机和调节阀等就是执行装置。

除此之外,下面给出部分在控制系统框图中常用的名词术语。关于其他方面的概念和定义将在后续的章节中介绍。

(1) 给定值 又称为参考输入,是指人规定的并且要求系统输出量参照变化的外部指令信号。给定值与希望的输出值之间一般存在着物理量纲转换关系,如上述例子中的希望工件温度和希望工作机构角位移都是不易于比较的物理量,所以将其转化为电信号作为给定值。给定值可以是常值,也可以是随时间变化的已知函数或未知函数。

(2) 被控量 又称为输出量,是指被控制对象中某个需要被控制的物理量。它与给定值之间存在一定函数关系。



(3) 干扰 又称为扰动信号,是指由某些因素(外部和内部)引起的、对被控制量产生不利影响的信号。

(4) 反馈通道 从被控量端(输出)到给定值端(输入)所经过的通路。

(5) 前向通道 从给定值端(输入)到被控量端(输出)所经过的通路。

由以上讨论可以得出反馈控制系统具有如下特点:

1) 系统是以被控量的反馈为基础的反馈控制系统。

2) 由偏差产生控制作用,目的是减小或消除偏差,以提高控制系统性能。

3) 由于存在惯性和延滞特性,反馈的引入有可能使系统性能变坏。

因此,兼顾系统特性来研究反馈控制系统性能是自动控制理论的主要任务。

1.3 控制系统的分类

自动控制系统的的应用范围非常广泛,在名称上也很不一致,如何分类取决于分类的目的。在进行系统分析和设计之前,掌握控制系统的分类方法是很有必要的。下面介绍几种常用的分类方法。

1.3.1 按信号传递路径分类

1. 按给定值操作的开环控制系统

这种自动控制系统的工作原理是,为了完成控制任务,只是根据给定值的要求进行计算和控制。按给定值操作的开环控制系统如图 1-6 所示。从图中可以看出,信号由给定值至被控量单向传递,故这种控制方式称为开环控制。

这种控制系统结构比较简单,但存在较大的缺陷。当被控对象或被控量受到干扰,或系统中某些参数发生变化,会直接影响控制品质而无法自动补偿。但是如果系统的参数比较稳定或干扰很弱,或对被

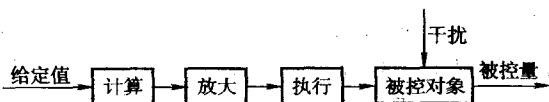


图 1-6 按给定值操作的开环控制系统框图

控对象和控制装置的精度较高,就可以采用这种开环控制。一些自动化流水线、包装机等多为这类控制。

2. 按干扰补偿的开环控制系统

按干扰补偿的开环控制系统如图 1-7 所示。这种自动控制系统的工作原理是,当某一干扰对被控量影响较大并且可以测量时,利用干扰信号产生控制作用,以减少或消除干扰对被控量的影响。由于干扰经测量、计算、执行诸环节直至被控对象的被控量,信号也是单向传递,故亦称开环控制方式,有时也称为顺馈控制方式。

这种控制系统只能对可测干扰进行补偿。当系统受到不可测量的干扰,以及系统内部参数发生变化时,由于系统自身无法进行补偿,因此,控制精度仍然受到限制。这种控制方式一般不单独使用。

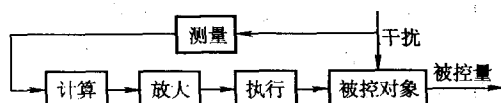


图 1-7 按干扰补偿的开环控制系统框图



3. 按偏差调节的闭环控制系统

按偏差调节的闭环控制系统如图 1-8 所示。从图中可以看出, 信号沿着测量、比较、控制、被控对象、被控量, 再到测量、比较……形成一个闭合回路, 由于存在偏差信号和闭合回路, 所以称为按偏差调节的闭环控制, 或称为反馈控制。闭环控制或反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式, 在实际系统中获得了广泛的应用。

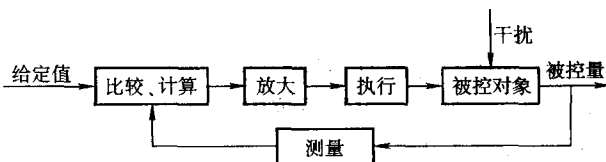


图 1-8 按偏差调节的闭环控制系统框图

4. 复合控制系统

复合控制系统实际上是闭环控制系统与按扰动补偿的开环系统相结合的一种自动控制系统, 其原理图如图 1-9 所示。如果是单纯的闭环控制, 当出现干扰信号时, 由于系统一般都有惯性或延迟特性, 所以不能马上观察到被控量受到影响, 闭环控制自然也就不能马上产生作用。而当被控量受到的影响反映出来时, 控制作用已经滞后。因此, 需要按干扰进行补偿控制, 使干扰信号作用于系统的同时产生一个补偿作用来抵消干扰的影响。当然, 采用这种复合控制的前提条件是干扰信号可以测量。

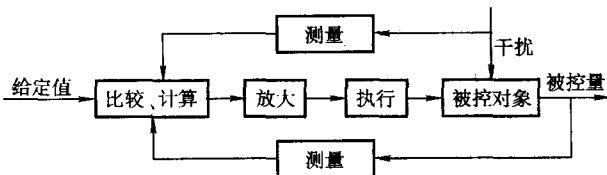


图 1-9 自动控制框图

1.3.2 按输入信号特征分类

1. 恒值控制系统

如果系统的输入信号是某一恒定的常值, 要求系统能够克服干扰的影响, 使输出量在这一常值附近做微小变化, 则这类控制系统称为恒值控制系统。如连续生产过程中要求某些温度、压力、液位高度等保持恒定的自动控制系统均属于这一类。

2. 程序控制系统

如果系统的输入信号是某一已知的时间函数 (不是常数), 要求系统按照该时间函数进行顺序操作, 则这类系统称为程序控制系统。如数控机床按给定程序加工一个工件、供热锅炉的点火操作等就属于这类控制系统。这类系统实际上是开环控制系统, 而不是反馈控制系统。

3. 随动控制系统 (又称伺服系统)

如果系统的输入信号是一个已知或未知函数, 要求输出量能够精确地跟随输入信号变化, 则这类系统称为随动控制系统。如导弹自动跟踪系统, 敌方飞机为被攻击目标, 而飞机的运动轨迹是无法预知的, 要求控制系统能够不断调整导弹的方位, 随时跟踪飞机的运



动轨迹，直到击中目标。考虑到飞机的机动性，要求该控制系统具有很高的跟踪能力。

1.3.3 按系统数学模型分类

1. 线性系统

自动控制系统是个动态系统，它的运动规律通常可用微分方程描述。当系统的运动规律可以用线性微分方程来描述时，则这类系统称为线性系统。严格地说，线性系统实际上并不存在，因为实际的物理系统总是具有某种程度的非线性。线性系统纯粹是为了简化分析和设计而提出的理想模型。但是，当控制系统内部信号的变化范围在各部件的线性特征范围内时，就可以认为系统是线性的。

线性系统中各元件的静特性为直线，如图 1-10 所示。图中 r 为输入量， c 为输出量。

线性系统有两个重要特性——叠加性和齐次性。

(1) 叠加性 当同时存在几个输入量时，线性系统的输出量等于各输入量单独作用时所引起的输出量之和。如果用 $c_1(t)$ 表示由输入量 $r_1(t)$ 产生的输出量，用 $c_2(t)$ 表示由输入量 $r_2(t)$ 产生的输出量，则当 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 同时作用时，输出量为 $c_1(t) + c_2(t)$ 。

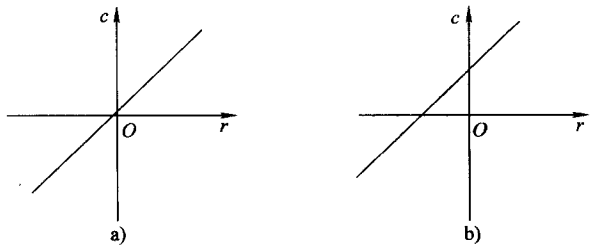


图 1-10 线性系统的静特性

(2) 齐次性(倍增性) 当输入量增大或缩小 $K(K$ 为实数) 倍时，线性系统的输出量也按同一倍数增大或缩小。即用 $c(t)$ 表示由 $r(t)$ 产生的输出量，则在 $Kr(t)$ 作用下的输出量为 $Kc(t)$ 。

2. 非线性系统

系统中只要某一部件具有非线性特性就是非线性系统。非线性系统的特点是不满足叠加原理。图 1-11 示出几种常见的非线性特性，分别为继电器、死区、饱和、间隙特性，另外还有大量的其他非线性特性。对于非线性控制系统，由于没有通用的数学方法解决，一般采用近似方法或计算机仿真技术求解。

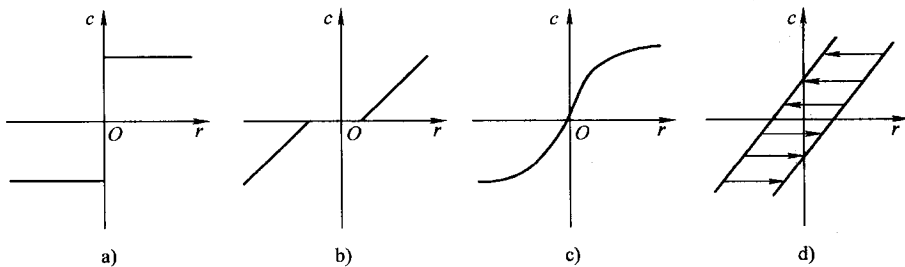


图 1-11 非线性特性



1.3.4 按时间变量特性分类

1. 连续时间系统

若控制系统中各环节的输入量和输出量均为时间 t 的连续函数时, 则这类系统称为连续时间系统, 简称为连续系统。连续系统的运动规律一般可用微分方程描述。如图 1-1 所示的温度控制系统和图 1-3 所示的位置随动系统, 以及目前工业生产中普遍采用的常规仪表控制系统, 就属于这类系统。

2. 离散时间系统

在控制系统中有一处或一处以上的信号是脉冲序列或数字编码时, 这类系统就称为离散时间系统, 简称离散系统。离散系统的特点是信号只在特定离散时刻 t_1, t_2, \dots, t_n 上有意义, 而在离散时刻之间无意义 (见图 1-12)。离散系统的运动规律可以用差分方程描述。

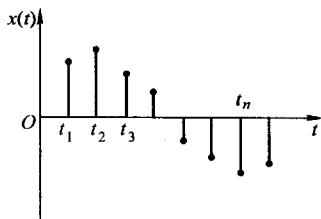


图 1-12 离散时间函数

随着数字计算机技术的飞速发展, 数字计算机已经广泛引入控制系统之中, 因此离散控制系统越来越多, 离散控制系统理论亦得到迅速发展。

1.3.5 按系统参数特性分类

1. 定常系统

如果系统参数在系统运行过程中相对于时间是不变的, 则称这类系统为定常系统或时不变系统。许多物理系统在所观察的时间范围内, 可以认为参数是定常的, 它的微小变化可以忽略不计。

2. 时变系统

如果系统中的参数是时间 t 的函数, 则这类系统称为时变系统。严格地讲, 在工程上的大部分系统属于这类系统。比如电气设备的内部温升、机械部件的磨损和老化、管道的结垢等, 都属于慢参数变化的系统。另外还有一类是随运动过程参数明显变化的系统, 其典型例子是导弹或火箭控制系统, 它的质量参数会随着所携带的燃料不断消耗而减小。尽管不具有非线性的时变系统仍然是线性系统, 但是这类系统的处理比线性定常系统困难得多。

自动控制系统还有许多其他的分类方法。如按控制系统的输入、输出数量分类, 有单变量系统和多变量系统。如按系统的功能分类, 有温度控制系统、压力控制系统、速度控制系统等。如按组成系统的部件分类, 有机械系统、电力系统、液压系统等。如按控制理论分类, 有 PID 控制系统、最优控制系统、预测控制系统、模糊控制系统等。

对于线性控制系统, 有许多解析和图解的方法进行分析与综合校正。作为自动控制理论的基础理论, 本书主要介绍单输入单输出线性定常连续反馈控制系统的分析与综合校正。

1.4 对控制系统的性能要求

在分析和设计自动控制系统的时候, 需要有一个评价控制系统性能优劣的标准, 这个标准通常用性能指标来表示。对于线性定常系统, 经典控制理论所使用的性能指标主要包

