



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

自动控制理论

李素玲 胡健 季画 高军伟 编著



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

自动控制理论

李素玲 胡健 季画 高军伟 编著

机械工业出版社

本书以经典控制理论为主,较全面地阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共分8章,主要内容包括绪论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性分析法、控制系统的校正,线性离散控制系统的基础理论、数学模型、性能分析及校正,非线性控制系统分析以及在MATLAB与Simulink支持下对控制系统的计算机辅助分析与设计。书末给出的3个附录可供读者在学习本书的过程中查询之用。全书内容简练,阐述深入浅出;为了便于自学,各章均附有丰富的例题和习题。

本书可作为电气与电子信息学科各专业,机械、化工、航空航天等非电类相关专业的本科生和研究生教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/李素玲等编著. —北京:机械工业出版社,2012.6
21世纪高等院校电气信息类系列教材
ISBN 978-7-111-38317-8

I. ①自… II. ①李… 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(2012)第093536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:时静 责任编辑:时静 王寅生

版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红

责任印制:杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2012年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张·521千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-38317-8

定价:45.00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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

自动控制理论是自动化学科的重要理论基础，是研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程，是高等学校电气信息类专业的一门核心基础理论课程。它是基础课与专业课之间的桥梁，是本科生后续课程和研究生课程的基础，如过程控制、运动控制、智能控制、线性系统理论、系统辨识、最优控制、计算机控制等。它研究的核心内容是对各种各样的控制系统建立数学模型，进行分析计算和控制校正，使其满足所要求的性能指标。

随着科学技术的不断发展，自动控制不仅应用于工农业生产和国防建设，而且近年来在经济、生态、社会科学领域也多有应用。本书是为适应自动化学科的发展、拓宽专业面、优化整体教学体系的教学改革形势，总结了作者多年的教学经验和课程教学改革的成果，参考了国内外控制理论的经典名著，经反复讨论编写而成的。

本书是省级（山东省）精品课程“自动控制原理”的配套教材。

本书共分8章。主要内容分为4大部分：第1部分是自动控制系统的基本概念；第2部分包括线性连续系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹分析、频率特性分析、系统设计与校正，这部分内容阐明自动控制的3个基本问题，即建模、分析和设计；第3部分有意识加强作为数字控制理论基础的离散控制系统的讨论，重点介绍了离散系统的数学模型、性能分析与系统校正；第4部分阐述了非线性系统的基本理论和分析方法，包括描述函数法和相平面法。另外，在各章的最后一节介绍了基于MATLAB与Simulink的分析与设计方法，以适应现代教学利用计算机对控制系统进行辅助分析与设计的需要。

作者在编写过程中，充分注意到以下几点：

1) 全书注重课程体系的优化，强调基本概念、基本理论和基本工程的应用。

2) 以学生为本，加强能力培养，遵照认知规律，内容叙述力求深入浅出、层次分明。

3) 在理论综述和公式推导中，尽量精选内容，用经典例题代替一般性文字叙述。

4) 内容精简，突出工科特点，充分考虑到教学计划的变更和考研的要求，尽量多地采用图表，以代替论述性内容，增加例题和练习题的数量，加强工程技术方法的分析和训练。

5) 详细介绍了基于MATLAB的控制系统计算机辅助分析与设计方法，并给

IV

出了大量的仿真例题，培养学生利用计算机分析与设计控制系统的能力，以适应 21 世纪教学现代化的发展要求。

本书的参考学时为 80 学时，但可根据专业需要和课时限制，对内容自行取舍、组合。

本书由李素玲（第 1、3、5、6 章和附录）、胡健（第 4、7 章）、季画（第 2 章）、高军伟（第 8 章）编著。全书由李素玲教授统稿。在此对在本书编写过程中给予过帮助的各位人员表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论..... 1

1.1 引言 1

1.2 自动控制系统概述 2

1.2.1 自动控制的基本概念 2

1.2.2 自动控制系统的基本组成 3

1.2.3 自动控制系统的基本控制 方式 4

1.3 自动控制系统的分类 6

1.3.1 按信号传送特点或系统结构 特点分类 6

1.3.2 按给定信号特点分类 7

1.3.3 按数学描述分类 8

1.3.4 按时间信号的性质分类 9

1.3.5 按系统参数是否随时间 变化分类 9

1.4 对控制系统的要求和本课程 的主要任务 9

1.4.1 对控制系统的基本要求 9

1.4.2 本课程的主要任务与控制 系统的设计原则 10

1.5 本章小结 11

1.6 习题 11

第 2 章 控制系统的数学模型 14

2.1 引言 14

2.2 微分方程 14

2.2.1 线性系统微分方程的建立 14

2.2.2 非线性特性的线性化 18

2.2.3 微分方程的求解 20

2.3 传递函数 21

2.3.1 传递函数与脉冲响应函数 21

2.3.2 典型环节及其传递函数 26

2.4 结构图及其等效变换 30

2.4.1 结构图的基本概念 30

2.4.2 结构图的建立 30

2.4.3 结构图的等效变换 32

2.5 信号流图与梅逊公式 38

2.5.1 信号流图的基本概念 39

2.5.2 梅逊公式及其应用 41

2.6 闭环系统的传递函数 43

2.6.1 闭环系统的开环传递函数 43

2.6.2 闭环系统的传递函数 44

2.7 控制系统中数学模型的 MATLAB 描述 45

2.7.1 传递函数模型 45

2.7.2 零极点模型 46

2.7.3 传递函数模型与零极点模型 间的相互转换 47

2.7.4 控制系统模型的连接 47

2.8 本章小结 48

2.9 习题 49

第 3 章 时域分析法 54

3.1 典型输入信号和时域性能指标 54

3.1.1 典型输入信号 54

3.1.2 控制系统的时域性能指标 56

3.2 一阶系统的时域分析 57

3.2.1 数学模型 57

3.2.2 单位阶跃响应 57

3.2.3 单位脉冲响应 58

3.2.4 单位斜坡响应 58

3.3 二阶系统的时域分析 59

3.3.1 数学模型 59

3.3.2 单位阶跃响应 60

3.3.3 单位脉冲响应 66

3.3.4 具有零点的二阶系统分析 67

3.3.5 二阶系统的性能改善 69

3.4 高阶系统的时域分析 71

3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应 71

3.4.2	系统阶跃响应与闭环零、极点关系的定性分析	73	应关系的定性分析	131
3.4.3	闭环主导极点和偶极子	73	4.4.3	增加开环零、极点对根轨迹的影响
3.4.4	高阶系统的动态性能估算	74	4.5	用 MATLAB 绘制系统根轨迹图
3.5	线性系统的稳定性分析	75	4.6	本章小结
3.5.1	稳定性基本概念	75	4.7	习题
3.5.2	线性系统稳定的充要条件	75	第 5 章	频率特性分析法
3.5.3	劳斯判据	77	5.1	频率特性的基本概念
3.5.4	赫尔维茨稳定判据	79	5.1.1	频率特性的定义
3.5.5	稳定判据的应用	80	5.1.2	频率特性和传递函数的关系
3.6	线性系统的稳态误差	81	5.1.3	正弦输入信号下稳态误差的计算
3.6.1	误差与稳态误差的定义	81	5.1.4	频率特性的表示方法
3.6.2	给定信号作用下的稳态误差与静态误差系数	83	5.2	典型环节的频率特性
3.6.3	扰动信号作用下的稳态误差与系统结构的关系	86	5.3	系统开环频率特性的绘制
3.6.4	用动态误差系数法计算系统的稳态误差	87	5.3.1	开环幅相频率特性（极坐标图）的绘制
3.6.5	提高系统稳态精度的措施	88	5.3.2	开环对数频率特性（伯德图）的绘制
3.7	用 MATLAB 进行时域响应分析	91	5.3.3	最小相位系统与非最小相位系统
3.7.1	MATLAB 函数指令方式下的时域响应分析	91	5.4	奈奎斯特稳定判据
3.7.2	利用 Simulink 动态结构图的时域响应仿真	94	5.4.1	奈奎斯特判据的数学基础
3.7.3	判别系统稳定性	98	5.4.2	奈奎斯特判据
3.8	本章小结	99	5.4.3	开环传递函数中有积分环节时奈奎斯特判据的应用
3.9	习题	99	5.4.4	对数稳定判据
第 4 章	根轨迹分析法	104	5.5	控制系统的相对稳定性
4.1	根轨迹的基本概念	104	5.6	用频率特性分析系统品质
4.1.1	根轨迹的定义	104	5.6.1	闭环频率特性及其特征量
4.1.2	根轨迹方程	105	5.6.2	频域性能指标与时域性能指标的关系
4.2	绘制根轨迹的基本法则	107	5.6.3	开环对数频率特性与时域响应的关系
4.3	广义根轨迹	119	5.7	系统传递函数的实验确定法
4.3.1	零度根轨迹	119	5.7.1	用正弦信号相关分析法测试频率特性
4.3.2	参量根轨迹	122	5.7.2	由伯德图确定系统的传递函数
4.3.3	多回路系统的根轨迹与根轨迹族	124	5.8	MATLAB 在频域分析中的应用
4.4	控制系统的根轨迹分析	126		
4.4.1	闭环系统零、极点的确定	126		
4.4.2	闭环零、极点分布与阶跃响			

5.9 本章小结	186	7.3.2 z 变换的求法	244
5.10 习题	186	7.3.3 z 变换的基本定理	246
第 6 章 控制系统的校正	191	7.3.4 z 反变换	247
6.1 系统校正的基本概念	191	7.4 离散系统的数学模型	250
6.1.1 校正的一般概念	191	7.4.1 线性常系数差分方程	250
6.1.2 系统的性能指标	191	7.4.2 脉冲传递函数	252
6.1.3 系统的校正方式	193	7.4.3 差分方程和脉冲传递函数 之间的相互转换	260
6.1.4 校正装置的设计方法	193	7.5 离散系统的动态性能分析	261
6.2 常用校正装置及其特性	195	7.5.1 闭环极点的分布与动态性能 的关系	261
6.2.1 超前校正装置	195	7.5.2 s 平面与 z 平面的映射关系	264
6.2.2 滞后校正装置	197	7.5.3 离散控制系统的时间响应及动态 性能指标	264
6.2.3 滞后-超前校正装置	198	7.6 离散系统的稳定性分析	267
6.3 频率法串联校正	202	7.6.1 稳定的充要条件	267
6.3.1 串联超前校正	202	7.6.2 劳斯稳定判据	267
6.3.2 串联滞后校正	204	7.6.3 朱利稳定判据	269
6.3.3 串联滞后-超前校正	207	7.7 离散系统的稳态误差分析	270
6.3.4 PID 校正	209	7.7.1 单位阶跃输入时的稳态误差	271
6.3.5 串联综合法 (期望特性法) 校正	215	7.7.2 单位斜坡输入时的稳态误差	271
6.4 频率法反馈校正	219	7.7.3 单位抛物线输入时的稳态 误差	272
6.4.1 反馈校正对系统特性的影响	219	7.8 离散系统的校正	274
6.4.2 综合法反馈校正	220	7.8.1 校正方式	274
6.5 MATLAB 在系统校正中的应用	223	7.8.2 数字控制器的脉冲传递函数	275
6.5.1 超前校正	223	7.8.3 最少拍系统及其设计	276
6.5.2 滞后校正	226	7.9 MATLAB 在离散系统中的应用	279
6.5.3 PID 校正	228	7.9.1 脉冲传递函数的建立	279
6.6 本章小结	230	7.9.2 连续系统的离散化	280
6.7 习题	231	7.9.3 离散系统的动态响应	281
第 7 章 线性离散控制系统	235	7.10 本章小结	282
7.1 离散控制系统概述	235	7.11 习题	283
7.1.1 连续信号和离散信号	235	第 8 章 非线性控制系统分析	286
7.1.2 离散控制系统	235	8.1 非线性控制系统概述	286
7.2 信号的采样与保持	237	8.1.1 非线性系统的特征	286
7.2.1 采样与采样方式	237	8.1.2 典型非线性环节及其对系统 的影响	288
7.2.2 采样过程的数学描述	237	8.1.3 非线性系统的分析与设计	
7.2.3 采样定理	239		
7.2.4 零阶保持器	241		
7.3 z 变换	243		
7.3.1 z 变换的定义	243		

方法	291	8.3.5 非线性系统的相平面法分析.....	317
8.2 描述函数法	292	8.3.6 利用非线性特性改善系统的	
8.2.1 描述函数的基本概念	292	控制性能	322
8.2.2 典型非线性特性的描述函数.....	293	8.4 MATLAB 在非线性系统分析中的	
8.2.3 用描述函数法分析非线性		应用	325
系统	299	8.5 本章小结	330
8.2.4 非线性系统的简化	304	8.6 习题	330
8.3 相平面法	306	附录.....	334
8.3.1 相平面的基本概念	306	附录 A 常用函数的拉普拉斯变换表	334
8.3.2 相轨迹的绘制	307	附录 B 拉普拉斯变换的一些定理	335
8.3.3 线性系统的相轨迹	311	附录 C 常用函数的 z 变换表	336
8.3.4 奇点与奇线.....	314	参考文献.....	338

第 1 章 绪 论

本章主要介绍自动控制的基本概念，自动控制系统的组成与分类，对控制系统的基本要求以及自动控制理论的发展简史。

1.1 引言

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门科学，目前已形成工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论等多个分支，其中工程控制论是控制论中的一个重要分支。本课程主要研究工程领域的自动控制。

所谓自动控制就是指在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使整个生产过程或设备自动地按预定规律运行，或使其某个参数按要求变化。

当前，自动控制技术已在工农业生产、交通运输、国防建设和航空、航天事业等领域中获得广泛应用。比如：人造地球卫星的发射成功与安全返回；运载火箭的准确发射；导弹的准确击中目标；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；冰箱、洗衣机、微波炉等家用电器自动完成制冷、洗涤过程和加热过程。随着生产和科学技术的发展，自动控制技术已渗透到各种学科领域，成为促进当代生产发展和科学技术进步的重要因素。

按其发展的不同阶段，通常可把自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论是 20 世纪 40 年代到 50 年代形成的一门独立学科。它的发展初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，主要用于工业控制。第二次世界大战期间，由于生产和军事的需要，各种控制系统的理论研究和分析方法应运而生。1932 年奈奎斯特（H·Nyquist）在研究负反馈放大器时创立了著名的稳定性判据，并提出了稳定裕量的概念。在此基础上，1945 年伯德（H·W·Bode）提出了分析控制系统的一种图解方法即频率法，致使研究控制系统的方法由初期的时域分析转到频域分析。随后，1948 年伊文斯（W·R·Evans）又创立了另一种图解法即著名的根轨迹法。追溯到 1877 年，劳斯（E·Routh）和 1895 年赫尔维茨（A·Hurwitz）分别独立地提出了关于判断控制系统稳定性的代数判据。这些都是经典控制理论的重要组成部分。20 世纪 50 年代中期，经典控制理论又增加了非线性系统理论和离散控制理论。至此，形成了比较完整的经典控制理论体系。

由于空间技术的发展，各种高速、高性能的飞行器相继出现，要求高精度地处理多变量、非线性、时变和自适应等控制问题，因此 20 世纪 60 年代初又形成了现代控制理论。现代控制理论的基础是：1956 年庞特里亚金提出的极大值原理，1957 年贝尔曼（R·Bellman）提出的动态规划，1960 年卡尔曼（R·E·Kalman）提出的最优滤波理论以及状态空间方法的应用。从 20 世纪 60 年代至今 40 多年来，现代控制理论又有巨大的发展，并形成了若干学科分支，如线性控制理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系

统理论等。

经典控制理论以传递函数为数学工具，研究单输入、单输出自动控制系统的设计问题，主要研究方法有时域分析法、根轨迹法和频率特性法。而现代控制理论则以矩阵理论等近代数学方法作为工具，不仅研究系统的输入、输出特性，而且还研究系统的内部特性。它适于研究多输入、多输出的复杂系统，这些系统可以是线性的、非线性的、定常的或时变的，其主要研究方法为状态空间法。

目前，自动控制理论还在继续发展，正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

1.2 自动控制系统概述

1.2.1 自动控制的基本概念

在许多工业生产过程或生产设备运行中，为了维持正常的工作条件，往往需要对某些物理量（如温度、流量、压力、液位、位移、电压、转速等）进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或使其按一定规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时的操作和控制，以抵消外界的扰动和影响。这种操作和控制，既可以用人工操作来完成，又可以用自动控制来完成。

1. 人工控制

图 1-1 所示为人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水源源不断地经出水管道流出，以供用户使用。随着用水量的增多，水池中的水位必然下降。这时，若要保持水位高度不变，就得开大进水阀门，增加进水量以作补充。因此，进水阀门的开度是根据实际水位的多少进行操作的。上述过程由人工操作实现的正确步骤是：操作人员首先将要求水位牢记在大脑中，然后用眼睛和测量工具测量水池实际水位，并将实际水位与要求水位在大脑中进行比较、计算，从而得出误差值。再按照误差的大小和正负性质，由大脑指挥手去调节进水阀门的开度，使实际水位尽量与要求水位相等。

由于图 1-1 所示系统有人直接参与控制，故称为人工控制。人工控制的过程是测量、求误差、控制、再测量、再求误差、再控制这样一种不断循环的过程。其控制目的是要尽量减小误差，使实际水位尽可能地保持在要求水位附近。

2. 自动控制

如果找到某种装置来完全代替图 1-1 中人所完成的全部职能，那么人就可以不直接参与控制，从而构成一个自动控制系统。

图 1-2 所示为水位自动控制系统。由浮子代替人的眼睛，测出实际水位；由连杆代替人的大脑，将实际水位与要求水位进行比较，得出误差，并以位移形式推动电位器的滑臂作上下移动。电位器输出电压的高低和极性充分反映出误差的性质，即误差的大小和方向。电位器输出的微弱电压经放大器放大后用以控制伺服电动机，其转轴经减速器降速后驱动进水阀

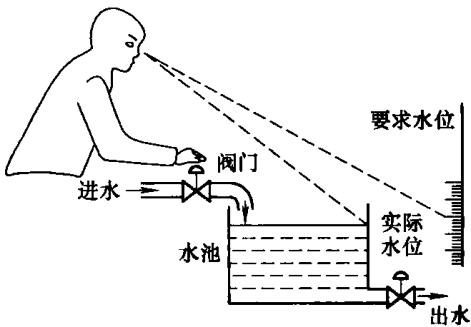


图 1-1 水位人工控制系统

门，从而控制进水量的大小，使水位保持在要求水位。

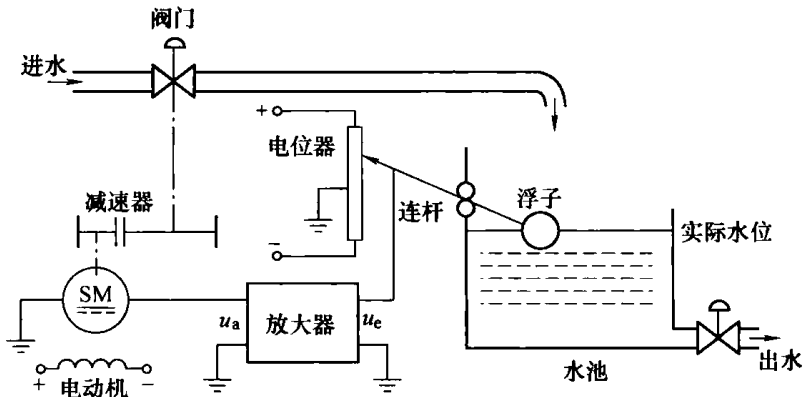


图 1-2 水位自动控制系统

当实际水位等于要求水位时，电位器的滑臂居中， $u_e = 0$ 。当出水量增大时，浮子下降，它带动电位器滑臂向上移动，使 $u_e > 0$ ，经放大成 u_a 后控制电动机作正向旋转，以增大进水阀门的开度，促使水位回升。只有当实际水位回复到要求水位时，才能使 $u_e = 0$ ，控制作用才告终止。

上述的自动控制与人工控制极为相似，只不过把某些装置有机地结合在一起，以代替人的职能而已。这些装置通常称之为控制器。

3. 控制系统中的常用术语

- 1) 自动控制：如前所述。
- 2) 控制装置：外加的控制设备或装置，也称控制器。
- 3) 被控对象：被控制的机器、设备或生产过程。
- 4) 被控量（输出量）：表征被控对象工作状态的物理参量。
- 5) 给定量（输入量）：要求被控量所应保持的数值，也称参考输入。
- 6) 扰动量：系统不希望的外作用，也称扰动输入。
- 7) 反馈量：由系统输出端取出并反向送回系统输入端的信号。反馈有主反馈和局部反馈之分。
- 8) 偏差量：给定量与主反馈信号之差。
- 9) 自动控制系统：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。

1.2.2 自动控制系统的基本组成

自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同，可以有各种不同的结构形式。但是，从工作原理来看，自动控制系统通常是由一些具有不同职能的基本元件所组成。图 1-3 所示为典型的反馈控制系统的基本组成。

图中各元件的职能如下：

给定元件的职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量。给定元件一般为电位器。

比较元件的职能是把测量到的被控量实际值与给定元件给出的输入量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

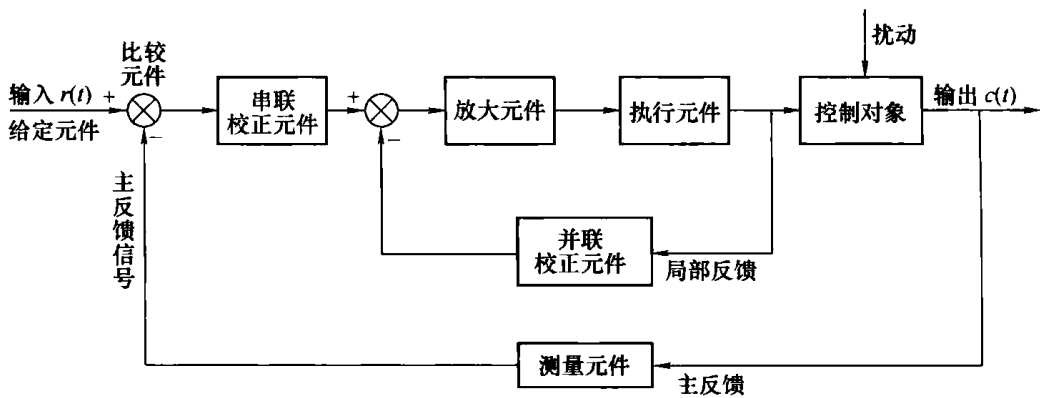


图 1-3 反馈控制系统的基本组成

测量元件的职能是检测被控制的物理量。如测速发电机、热电偶、自整角机、电位器、旋转变压器、光电编码器等都可作为测量元件。

放大元件的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被控对象。如晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器。

执行元件的职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀门、电动机、液压马达等。

校正元件也称补偿元件，它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。最简单的校正元件是电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则可用计算机构成数字控制器。

1.2.3 自动控制系统的的基本控制方式

自动控制系统从信号传送的特点或系统的结构形式来看，有两种基本的控制方式，即开环控制和闭环控制。另外，将开环控制和闭环控制结合起来构成复合控制，也是工程中应用较多的一种控制方式。

1. 开环控制

开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程。开环控制系统的特点是被控量对系统的控制作用不产生影响。如图 1-4 所示的直流电动机速度控制系统就是开环控制系统的一例，图 1-5 所示为该系统的原理框图。

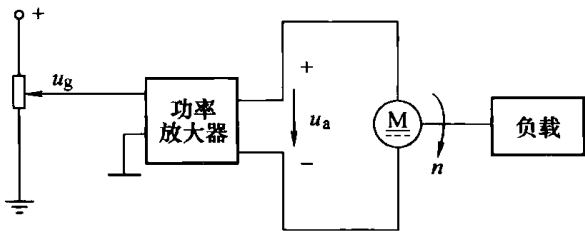


图 1-4 开环直流调速系统

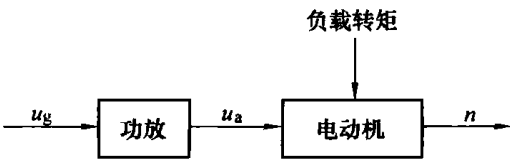


图 1-5 开环直流调速系统原理框图

图 1-4 所示开环系统的输入量是给定电压 u_g ，输出量是转速 n 。电动机励磁电压为常数，采用电枢控制方式。调整给定电位器滑臂的位置，可得到不同的给定电压 u_g ，放大后得到不同的电枢电压 u_a ，从而控制电动机转速 n 。当负载转矩不变时，给定电压 u_g 与电动机

转速 n 有一一对应关系。因此，可由给定电压直接控制电动机转速。如果出现扰动，如负载转矩增加，电动机转速便随之降低而偏离要求值。

开环控制系统虽电路简单、成本低、工作稳定，但其最大的缺点就是不具备自动修正被控量偏差的能力，所以系统的控制精度低。

2. 闭环控制

闭环控制是指被控量经反馈后与给定值比较，用其偏差对系统进行控制，也称反馈控制。闭环控制系统的特点是当被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。

对于图 1-4 所示的开环直流调速系统，加入一台测速发电机，并对电路稍作改动，便构成了图 1-6 所示的闭环直流调速系统。

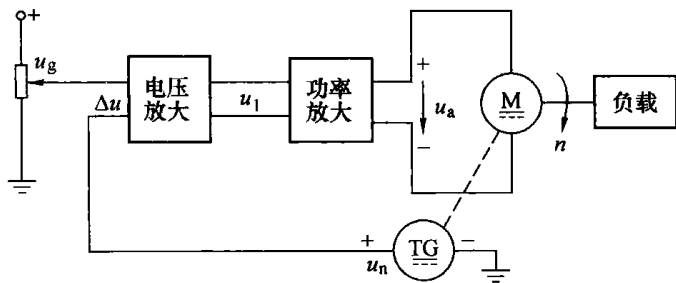


图 1-6 闭环直流调速系统

在图 1-6 中，测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 n （即系统的输出量）测量出来，并转换成电压 u_n ，反馈到系统的输入端，与给定电压 u_g 进行比较，从而得出偏差电压 $\Delta u = u_g - u_n$ 。偏差电压 Δu 经电压放大器放大为 u_1 ，再经功率放大器放大成 u_a 后，作为电枢电压用来控制电动机转速 n 。

图 1-7 为该系统的原理框图。通常，把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道，从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。图中用符号“ $\otimes$ ”表示比较环节，其输出量等于该环节各个输入量的代数和。因此，各个输入量均须用正负号表明其极性，通常正号可以省略。

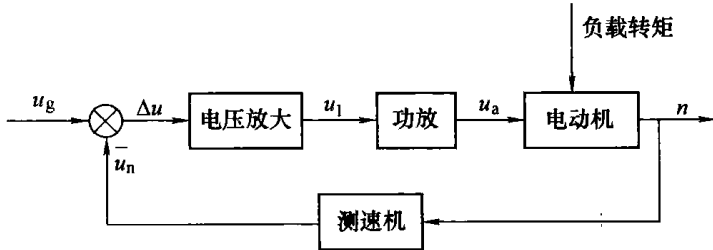


图 1-7 闭环直流调速系统原理框图

图 1-6 所示的闭环直流调速系统，在某个给定电压下电动机稳定运行。若一旦受到某些扰动，如负载转矩突然增大，就会引起转速下降，此时系统就会自动地产生如下调整过程：

负载转矩 $T_L \uparrow \rightarrow (\text{电磁转矩 } T_e < T_L) \rightarrow n \downarrow \rightarrow u_n \downarrow \rightarrow \Delta u \uparrow \rightarrow u_1 \uparrow \rightarrow u_a \uparrow$

$n \uparrow$

结果，电动机的转速降落得到自动补偿，使输出量 n 基本保持不变。

闭环控制系统由于引入了反馈作用，具有很强的自动修正被控量偏离给定值的能力，因此可以抑制内部和外部扰动所引起的偏差，具有较强的抗干扰能力。同时，在组成系统的元器件精度不高的情况下，采用反馈控制也可以达到较高的控制精度，所以应用很广。但正是由于引入了反馈作用，如果系统参数配合不当，系统容易产生振荡甚至不稳定，使系统无法工作。这是闭环系统中非常突出的现象，也是本课程要解决的主要问题之一。

3. 复合控制

在反馈控制的基础上，附加给定补偿或干扰补偿就组成复合控制。图 1-8 所示调速系统是在速度闭环控制的基础上增加了负载扰动补偿。图 1-9 为该系统的原理框图。该系统是按扰动补偿与闭环控制相结合方式组成的复合控制系统。

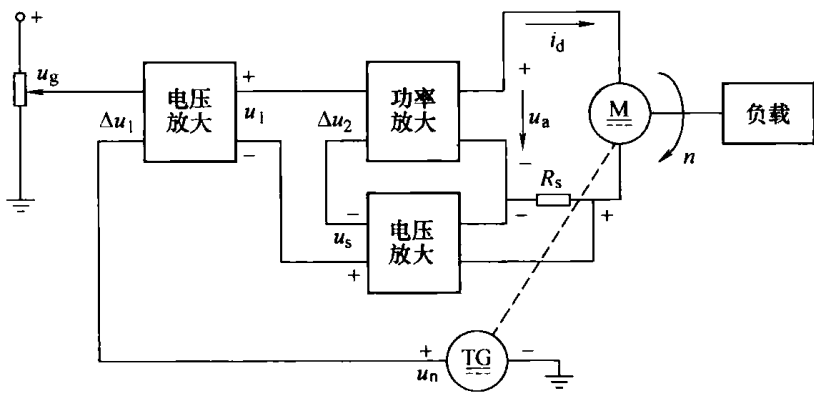


图 1-8 复合控制调速系统原理图

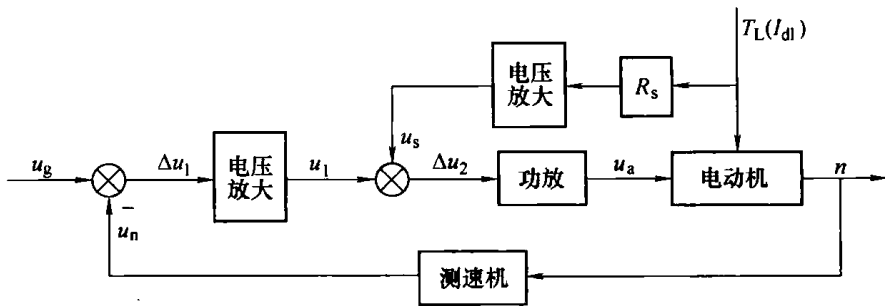


图 1-9 复合控制调速系统原理框图

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统根据分类目的的不同，可以有多种分类方法。现仅介绍几种常见的分类方法。

1.3.1 按信号传送特点或系统结构特点分类

按信号传送特点或系统结构特点可以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 3 大类，前已述及，故不赘述。

1.3.2 按给定信号特点分类

按给定信号特点可以将控制系统分为恒值系统、随动系统和程控系统 3 大类。

1. 恒值系统

给定信号为常值的系统称为恒值系统，其任务是使输出量保持与输入量对应的恒定值，并能克服扰动量对系统的影响。工程上常见的恒压、恒速、恒温、恒定液位等控制系统都属于此类系统。

图 1-10 所示为电阻炉微机温度控制系统，图 1-11 为该系统的原理框图。在此，电阻丝通过晶闸管主电路加热，炉温期望值用计算机键盘预先设置，实际炉温由热电偶检测，并转换成电压信号，经放大滤波后，由模-数（A-D）转换器将模拟信号转换成数字信号送入计算机，并在计算机中与所设置的期望值比较后产生偏差信号。计算机便根据预定的控制算法（即控制规律）计算相应的控制量，经 D-A 转换为 4~20mA 的电流信号，通过触发器控制晶闸管的控制角 α ，从而改变晶闸管的整流电压，也就改变了电阻丝中电流的大小，达到控制炉温的目的。

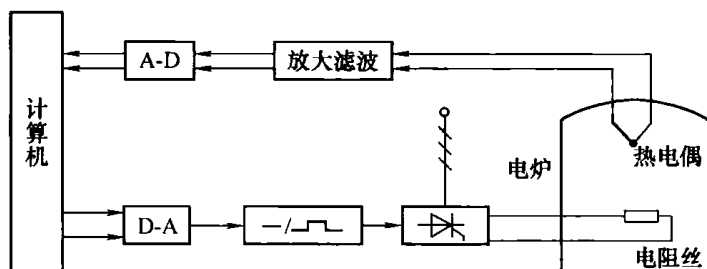


图 1-10 电阻炉微机温度控制系统

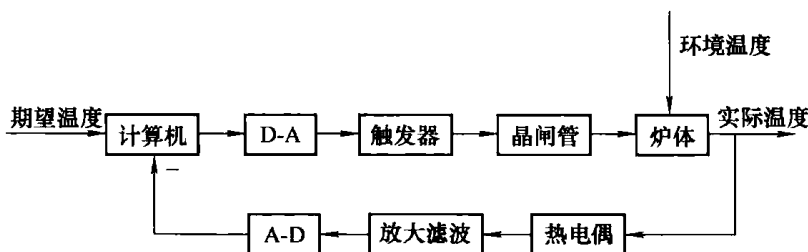


图 1-11 电阻炉微机温度控制系统原理框图

2. 随动系统

给定值随意变化而事先无法知道的系统称为随动系统，其任务是使输出量按一定精度跟踪输入量的变化。如跟踪目标的雷达系统、火炮群控制系统、导弹制导系统、参数的自动检验系统、X-Y 记录仪、船舶驾驶舵位跟踪系统、飞机自动驾驶仪等都属于此类系统。

图 1-12 所示为船舶驾驶舵角位置跟踪系统，其任务是使船舵角位置按给定指令变化，图 1-13 所示为该系统的原理框图。驾驶盘（又称舵轮）所转过的角度用 θ_i 表示，驾驶盘与电位器 RP_1 作机械连接，作为系统的给定装置。直流电动机的转轴经减速箱减速后带动舵叶旋转（舵叶的偏转角用 θ_o 表示），同时通过机械连接带动电位器 RP_2 的滑臂作相应的转动。 RP_2 的电压 u_o 反馈到输入端，与 RP_1 的电压 u_i 进行比较后得出偏差电压 $u_e = u_i - u_o$ 。若

$\theta_o = \theta_i$ ，则预先整定 $u_i = u_o$ ，那么 $u_e = 0$ ，电动机不转，系统处于平衡状态。若 θ_i 变了，而 θ_o 未变，则有 $\theta_o \neq \theta_i$ ， $u_i \neq u_o$ ，所以 $u_e \neq 0$ ，从而使电动机转动，带动舵叶的偏转角 θ_o 向 θ_i 要求的位置变化，直至 $\theta_o = \theta_i$ ，才有 $u_e = 0$ ，电动机停止，系统重又平衡。

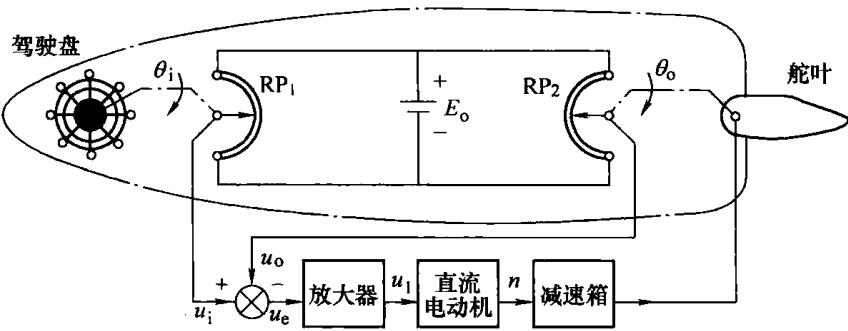


图 1-12 船舶驾驶舵角位置跟踪系统

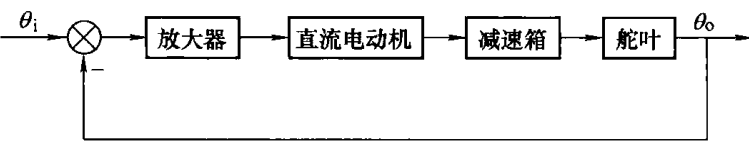


图 1-13 船舶驾驶舵角位置跟踪系统原理框图

3. 程控系统

给定值或指令输入信号按已知时间函数变化的系统称为程控系统，其任务是使输出量按预定的程序去运行。如热处理炉温度控制系统中的升温、保温、降温等过程，都是按照预先设定的程序进行控制的。又如机械加工中的数控机床、仿形机床等均是典型的例子。

图 1-14 所示为数控机床控制系统原理框图。其中的输入处理、插补计算和控制功能可由逻辑电路实现，也可由计算机来完成。一般都将加工轨迹编好程序，并转换成进给脉冲，再将工作台移动轨迹转换成反馈脉冲，与进给脉冲比较后，换算成模拟信号用以控制伺服电动机。

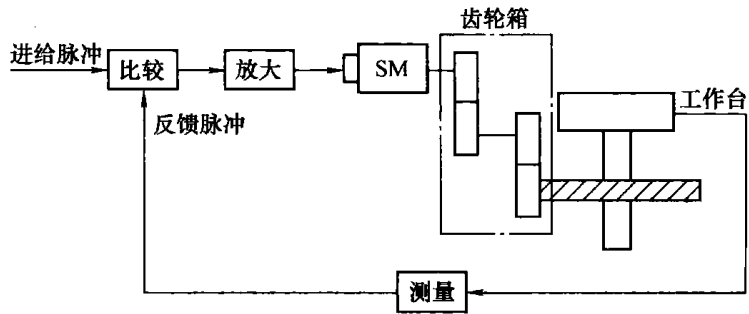


图 1-14 数控机床控制系统原理框图

1.3.3 按数学描述分类

按数学描述可以将控制系统分为线性系统和非线性系统。