

# 自动控制原理

张摇彬摇摇编著

北京邮电大学出版社

• 北京 •

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了经典控制理论的基本内容,着重阐明基本概念、基本理论和基本分析方法。主要内容包括:控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、控制系统的校正、采样控制系统分析基础。书中可通过计算绘制的图形,都采用计算机完成。

本书可作为高等学校自动化专业及其相关专业的本科生的教材,还可作为从事控制工程应用和研究的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 张彬编著—北京:北京邮电大学出版社,1999

ISBN 7-5306-1744-4

I. ①自... II. ②张... III. ③自动控制理论 IV. ④张彬

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第 1744号

---

书 名:自动控制原理

编 者:张彬

责任编辑:常丽萍

出版者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 45号) 邮 编:100876

传 真:010-61916666 电 话:010-61916666

电子信箱:zhangbin@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:

印 数:1.5万册

开 本:787mm×1092mm 1/32

印 张:8

字 数:300千字

版 次:1999年 8月第 1版 1999年 8月第 1次印刷

---

ISBN 7-5306-1744-4

定 价:18.00元

- 如有质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

# 序 摇摇言

传感测量(信息获取)、通信(信息传递)、计算系统(信息处理)、人工智能(信息认知与决策)、自动控制(信息施效),是信息技术的基本分支,它们分别执行不同的信息功能,共同构成功能完备的信息系统,成为信息领域不可或缺的知识结构体系。

与其它各个信息技术分支不同,自动控制所特有的技术本质在于:根据相关信息,形成控制策略(策略本身也是一种信息,是体现控制者的目的和利益的信息),并按照策略改变或维持被控对象的状态。可见,控制是实现信息效用的最后环节,也是关键的环节。没有控制,就不能实施信息的最终效用。这也是为什么把控制的功能归结为“信息施效”的道理。

历史上,自动控制技术曾在机械、交通、武器、飞行器等各种系统中发挥重要作用;今后还将继续在这些领域发挥不可替代的作用。但是,20世纪中叶以来,随着信息技术的迅速发展和广泛应用,随着物质经济向信息经济的迅速转型,随着信息化的进程不断深化,信息网络正在成为现代社会最为重要的基础结构,成为信息时代人类社会赖以生存和发展的命脉源泉。为了保证大规模信息网络高效可靠地运行,网络的管理与控制就成为头等重要的任务。这就是信息类专业人才必须掌握自动控制理论与技术的原因。

大规模信息网络是一类典型的“开放的复杂的大系统”。而且,随着技术的进步和社会的发展,信息网络的规模将进一步扩大,网络的技术将更加复杂,网络的服务也必将越来越多样。因此,大规模信息网络的的管理与控制,需要大系统控制理论和智能控制理论的支持。此外,信息系统其它方面的自动控制、智能控制与管理的需求也越来越迫切。因此,社会的发展对现代控制理论与技术人才提出了越来越迫切的需求,为自动控制的人才提供了广阔的驰骋天地。

经原邮电部和国家教委批准,北京邮电大学于1985年增设了自动化本科专业。这对于及时为国家培养现代化大规模信息网络的控制与管理人才,促进这一领域科学技术的研究与进步具有重要意义。

本书编者张彬老师毕业于北京理工大学研究生院自动控制理论专业,到北京邮电大学后一直从事与控制相关的教学和科研工作,为信息工程学院自动化专业的创立和建设做了许多贡献。自1985年以来,张彬自己编写了内部教材,每年为自动化专业本科生开设自动控制原理课程。现在,根据新的需要,她总结了多年的教学经验和心得,结合信息领域的最新发展和自动控制技术的最新应用,对原来的自编教材作了进一步扩充和完善,写成了这本教科书。

本书是自动化专业的专业基础教材。编者从本校实际需要出发,选择了(除非线性系统外的)经典控制理论部分,保持了理论体系的系统性和完整性,既侧重于控制系统的分析也兼顾了系统的综合,对书中一些重要的概念给出了物理意义的理解;在每章的后面都给出了小结,同时提供了大量的思考题和习题便于学生自学。书中定量的图形和曲线,全部用AutoCAD软件精确绘制。

教材编写符合自动化专业本科教学大纲的要求。可作为自动化专业本科生教材使用,也可供从事控制工程工作的工程技术人员参考。

钟义信

1995年 远月 圆日于北京

# 前 摇 摇 言

随着网络规模的不断扩大,对电信网及计算机网络的自动化程度要求越来越高,对掌握网络管理和控制的工程技术人员的需求也越来越迫切。为了适应信息与通信领域的需要,为“自动控制原理”课程编写了本教材。本教材是从编者编写的“北京邮电大学信息工程学院自动控制专业内部使用讲义”的基础上发展而来的。该讲义从1995年秋季开始使用至今。本教材在原讲义的基础上结合实际授课的情况进行了修订和扩展。

在本教材中,编者力求做到保持理论体系的系统性和完整性,并努力使读者对经典控制理论的体系、理论和概念有一个比较清楚和完整的了解。在教材中用大量篇幅绘制了大量定量图和曲线,在每章后面附有本章小结及一定数量的思考题和习题。

本教材共有七章,并在最后附有自动控制原理的七个典型实验。第1章介绍有关自动控制的简要历史和基本概念,第2章主要介绍系统数学模型的建立,描述系统的四种数学模型,即微分方程、传递函数、方框图和信号流图,其中微分方程是基础,传递函数法是工程中常用的,第3章为控制系统的时域分析法,主要讨论了一阶、二阶系统的性能指标的计算,系统参数和性能之间的关系,介绍了高阶系统的分析方法,详细讨论了系统稳定性的定义、判断及稳态误差的计算,第4章为控制系统的根轨迹分析法,主要介绍绘制根轨迹图的规则,通过根轨迹研究系统参数的变化对系统性能的影响,第5章为系统的频域分析法,主要介绍频率特性的基本概念、典型环节和系统的频率特性、奈奎斯特稳定判据及系统的相对稳定性、系统性能的频域分析方法,第6章主要介绍控制系统的频率校正法,其中包括控制系统校正的基本概念、方式和方法,重点讨论应用对数频率特性进行串联校正的方法,并以串联超前校正、滞后校正、超前-滞后校正为例展开讨论,第7章为采样控制系统的分析基础,主要介绍采样的过程、采样定理、采样信号的复现,差分方程、z变换和脉冲传递函数,采样控制系统的稳定性、稳态误差和暂态响应以及采样系统的校正等采样控制系统分析的基础内容。

在本教材的编写过程中,参考和吸收了一些兄弟院校教材的部分内容,在此对这些教材的单位、作者谨致真诚的感谢。另外,要特别感谢北京理工大学自动控制系的张宇河教授,承蒙张宇河教授厚爱,在百忙之中抽出宝贵的时间对本教材进行了审定,并提出了许多建设性的修改和指导意见。

由于编者的水平有限,加上编写时间仓促,因此书中可能存在不妥甚至错误之处,恳请广大读者和专家予以批评和指正,以便进一步修订和完善。

编 者

1999年 缘月于北京

# 目 录

第 1 章 自动控制的基本概念 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 自动控制的基本方式 .....	2
1.3 自动控制系统的分类 .....	3
1.4 闭环控制系统的基本组成 .....	4
1.5 控制系统举例 .....	4
1.6 评价控制系统的基本指标 .....	5
1.7 本书组织安排与学习要求 .....	5
本章小结 .....	5
思考题 .....	5
习题 .....	5
第 2 章 控制系统的数学模型 .....	6
2.1 引言 .....	6
2.2 线性系统的微分方程 .....	6
2.3 非线性特性及其线性化 .....	7
2.4 线性系统的传递函数 .....	7
2.5 典型环节的传递函数 .....	8
2.6 系统方框图 .....	8
2.7 信号流图 .....	9
2.8 反馈控制系统的传递函数 .....	9
本章小结 .....	9
思考题 .....	9
习题 .....	9
第 3 章 时域分析法 .....	10
3.1 引言 .....	10
3.2 一阶系统的时间响应 .....	10
3.3 二阶系统的时间响应 .....	11
3.4 高阶系统的时间响应 .....	11
3.5 稳定性分析 .....	11
3.6 稳态误差分析及计算 .....	11
本章小结 .....	11
思考题 .....	11

摇习题 .....	愿
第源章摇根轨迹法 .....	愿
摇源爱摇根轨迹的基本概念 .....	愿
摇源爱摇绘制根轨迹的基本规则 .....	愿
摇源爱摇根轨迹草图绘制举例 .....	怨
摇源爱摇参量根轨迹 .....	员
摇源爱摇用根轨迹法分析控制系统 .....	员
摇本章小结 .....	员
摇思考题 .....	员
摇习题 .....	员
第缘章摇控制系统的频域分析 .....	员
摇缘爱摇频率特性的基本概念 .....	员
摇缘爱摇典型环节的频率特性 .....	员
摇缘爱摇系统开环频率特性的绘制 .....	员
摇缘爱摇奈奎斯特稳定性判据 .....	员
摇缘爱摇系统的相对稳定性 .....	员
摇缘爱摇系统的闭环频率特性 .....	员
摇缘爱摇频域性能指标和时域性能指标的关系 .....	员
摇本章小结 .....	员
摇思考题 .....	员
摇习题 .....	员
第远章摇控制系统的校正 .....	员
摇远爱摇控制系统校正的概念 .....	员
摇远爱摇线性系统的基本控制规律 .....	员
摇远爱摇常用校正装置及其特性 .....	员
摇远爱摇频率特性法在系统校正中的应用 .....	员
摇远爱摇局部反馈校正 .....	员
摇本章小结 .....	员
摇思考题 .....	员
摇习题 .....	员
第苑章摇采样控制系统分析基础 .....	员
摇苑爱摇引言 .....	员
摇苑爱摇信号的采样与采样定理 .....	员
摇苑爱摇采样信号的复现与零阶保持器 .....	员
摇苑爱摇扎变换和扎反变换 .....	员
摇苑爱摇差分方程 .....	员

第 4 章 离散脉冲传递函数 .....	105
第 5 章 离散采样控制系统的稳定性分析 .....	115
第 6 章 离散采样控制系统的稳态误差 .....	125
第 7 章 离散采样系统的动态性能分析 .....	135
第 8 章 离散采样控制系统的校正 .....	145
第 9 章 离散最少拍采样控制系统的校正 .....	155
本章小结 .....	165
思考题 .....	175
习题 .....	185
附录 A 离散拉普拉斯变换 .....	195
附录 B 离散采样拉氏变换的两个重要性质 .....	205
附录 C 离散自动控制原理实验 .....	215
参考文献 .....	225

# 第 1 章 自动控制的基本概念

## 1.1 引言

### 1.1.1 自动控制理论概述

自动控制理论是研究各种自动控制过程共同规律的技术科学。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节理论,随着科学技术的进步,现已发展成为一门独立的学科——控制论,包括工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论。工程控制论是控制论中最成熟的分支,主要研究工程领域自动控制系统中的信息分析、变换、传送的一般理论与设计应用。自动控制理论是工程控制论的一个分支,它只研究自动控制系统分析和设计的一般理论。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论相应地分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论是指 19 世纪 50 年代末期所形成的理论体系,它主要是研究单输入-单输出线性定常系统的分析和设计问题,其理论基础是描述系统输入-输出关系的传递函数,主要采用复频域分析方法。

现代控制理论是在 20 世纪 50 年代初期,为适应宇航技术发展的需要而出现的新的控制理论,适用于研究具有高性能、高精度的多输入-多输出、线性或非线性、定常或时变系统的分析和设计问题,如最优控制、最优滤波、自适应控制等。描述系统的方法是基于系统状态这一内部特征量的状态空间法,本质上是一种时域方法。

信息技术特别是大规模信息技术的发展对控制理论提出了新的需求,现代应用数学、大系统理论、人工智能理论和计算机技术的进步则为控制理论的发展提供了强有力的支持。因此,现代控制理论正向大系统控制理论和智能控制理论等方向深入发展。

经典控制理论和现代控制理论构成了全部的控制理论。控制理论的发展促进了自动控制技术和相关学科的发展。生产、管理、流通、军事等各个领域自动化的要求,推动现代自动控制在机械、冶金、石油、化工、电力、航空、航海、核反应堆、通信、交通运输、生物学及工业管理等领域得到了越来越普遍的应用。自动控制理论与技术的发展前景十分广阔。

由于学时有限,本教材将重点介绍经典控制理论,为进一步深入学习自动控制的有关课程及其它学科打下良好的基础。

### 1.1.2 控制理论简要历史

控制理论发展初期,众多杰出的学者作出了重大贡献。1789 年英国科学家詹姆斯·瓦特( James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,可以誉为自动控制领域的第一项重大成果。为了克服当时调节器的振荡现象,导致了麦克斯韦( James Clerk Maxwell)1868 年对微分方程系统稳定性的分析,后来又出现了劳思( Edward S. Routh)和霍尔维茨( Evgeny Prigogine)分别于 1877 年和 1905 年对稳定性的研究成果。1920 年,李雅普诺夫对调节理论做出了重要贡献,提

出了几个重要的稳定性判据。1868年,迈纳斯基(配圣奥罗)研制出船舶操纵自动控制器,证明了从描述系统的微分方程确定系统稳定性的方法。1892年奈奎斯特(拿静)提出了一种可以根据稳态正弦输入的开环响应确定闭环系统稳定性的简便方法。1931年,海森(匀援)提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念。

为了设计满足性能指标要求的线性闭环控制系统,20世纪40年代发展了系统的频域分析方法,它是在奈奎斯特、伯德(月)等早期的关于通信学科的频域研究工作的基础之上建立起来的。1946年哈里斯(匀)提出的传递函数的概念首次将频域分析方法应用到了控制领域,构成了控制系统频域法理论研究的基础。20世纪40年代末到50年代初,伊万思(宰)提出并完善了线性反馈系统的根轨迹分析技术,成为那个时代的另一个里程碑。

频域分析法和根轨迹法是经典控制理论的核心。采用这两种方法可以设计出稳定的并满足一定性能指标要求的系统。但是,通过这两种方法设计出的系统还不是最优系统。因此,从20世纪50年代开始,控制系统设计问题的研究重点转移到最优系统的设计上。原苏联学者庞特里亚金(匀)于1957年提出的极大值原理、贝尔曼(月)于1957年提出的动态规划和卡尔曼(匀)于1960年提出的状态空间分析技术开创了控制理论研究的新篇章,他们的理论当时被统称为“现代控制理论”。从那个时期以后,控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器(匀),最优状态观测器(匀)以及线性二次型高斯(匀)问题的研究。

从1950~1960年这段时间,人们对确定系统和随机系统的最优控制、复杂系统的自适应控制和学习控制进行了充分的研究。大约从1960年起,电子计算机开始应用于控制系统的研究与设计。

从1960年到现在,现代控制理论的研究主要集中于鲁棒控制、自适应控制以及相关的课题,其中鲁棒控制是控制系统设计中又一个令人瞩目的研究领域。1959年,美国学者查默斯(在)提出了基于哈代(匀)空间范数最小化方法的鲁棒最优控制理论。1960年多依尔(阅)等人提出了最优控制的状态空间数值解法,为该领域的发展作出了重要的贡献。目前,自动控制理论正向以控制论、信息论和人工智能为基础的智能控制理论方向发展,同时,由于大规模信息网络管理控制的需要,自动控制理论也在向大系统控制理论方向前进。

## 1.1 自动控制的基本方式

自动控制系统有两种最基本的形式,即开环控制和闭环控制,而复合控制是将开环控制和闭环控制适当结合的控制方式,可用来实现复杂且控制精度较高的控制任务。下面分别介绍这三种控制方式。

### 1.2.1 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。因此,开环控制系统的输出信号不对系统的控制作用发生影响。

图1.2.1所示的电加热器是一个开环控制系统,可以采用电加热器在冬天来控制房间的温度。房间是被控对象,房间的温度是要求实现

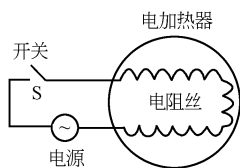


图1.2.1 采用电加热器控制室温(开环)示意图

自动控制的物理量,称为被控制量。电阻丝的开关 杂受时间继电器控制,按照预先规定的时间接通或断开电源,对房间温度进行控制,使其保持在希望值的一定范围内。开关 杂和电阻丝对被控制量起控制作用,故合称为控制装置。开关 杂的接通或断开时间,一般是依照在正常情况下房间温度可以达到希望值的经验数据来确定的。此时,实际的室内温度可能稍高于或低于希望温度,但仍能满足对室温的要求。而一旦工作条件发生了变化,例如,房门的开关次数发生变化,则室内热量的散失情况超出了事先估计的范围,实际的室温将不再等于所希望的温度而出现误差超过允许范围的情况。这种使被控制量偏离希望值的因素称为对系统的扰动作用。由于开环控制的特点是控制装置只按照给定的输入量对被控对象进行单向控制,而不对被控制量进行测量并反向影响控制作用,因而当室温偏离希望值时,开关 杂的接通或断开时间不会相应地改变,所以,这种开环控制系统不具有修正由于扰动而出现的被控制量与希望值之间误差的能力。

开环控制系统的示意框图,如图 1.2.1 所示。在开环控制中,对于每一个参考输入信号,都有一个与之相对应的工作状态和输出信号。系统的精度取决于元、器件的精度和特性调整的精度。当系统的内扰和外扰影响不大,并且控制精度要求不高时,可采用开环控制方式。

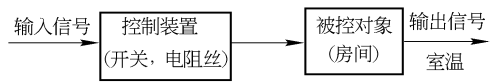


图 1.2.1 采用电加热器控制室温(开环)示意框图

### 1.2.2 闭环控制

闭环控制的特点是在控制器和被控对象之间,不仅存在着正向作用,而且存在着反馈作用,即系统的输出信号对被控制量有直接影响。将检测出来的输出信号送回系统的输入端,并与输入信号比较的过程称为反馈。若反馈信号与输入信号相减,则称为负反馈,若相加,则称为正反馈。输入信号与反馈信号之差,称为误差信号。误差信号作用于控制器上,使系统的输出信号趋向于给定的数值。闭环控制的实质,就是利用负反馈的作用来减小系统的误差,因此闭环控制又称为反馈控制。其示意框图,如图 1.2.2 所示。

一种可自动修正室温偏离的电加热器的示意图,如图 1.2.2 所示,它是一个闭环控制系统。电阻丝电源的通断由温度比较器的输出量来控制。当温度比较器的输出为正时,即室温低于设定值时,开关接通,电阻丝开始加热。随着时间的推移,在电阻丝加热作用下,房间温度逐步上升。当室温上升到等于或大于室温设定值时,温度比较器的输出为 0 或为负,在温度比较器输出的作用下,开关断开,停止加热。

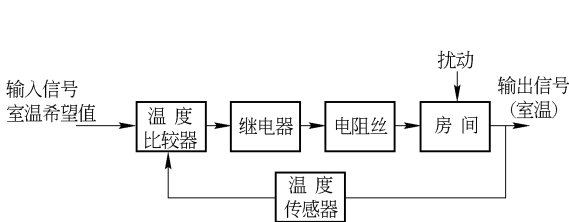


图 1.2.2 采用电加热器控制室温(闭环)示意框图

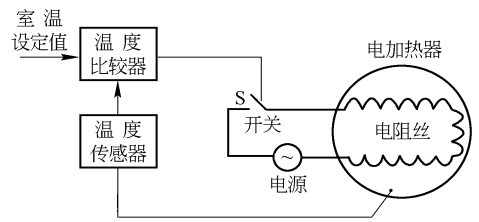


图 1.2.2 采用电加热器控制室温(闭环)示意图

图 1.2.3 是一种字符信息处理机或电子打印机的打印轮控制系统的框图。打印轮有若干个字符,打印时需将打印轮转动到要打印的字符处,并在打印锤前停止。通常由键盘选择字符,

一旦按下键盘上的某键后,即发出打印轮由现在位置转动到所需位置的指令,指令通常是数码的形式。微处理器计算转动的方向与所需的转角,然后发出一个控制信号给放大器,控制电动机转动打印轮。打印轮的位置传感器检测打印轮转动的位置,并将打印轮位置反馈信号用数码的形式反馈到微处理器中,与所要求的位置指令进行比较,直到电动机转动到所要求的位置为止。

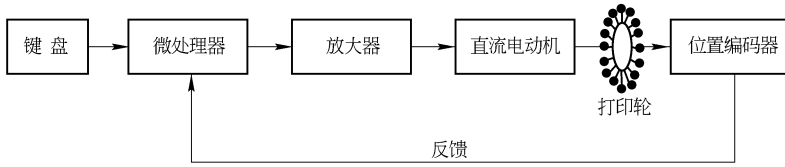


图 1.2.2 打印轮控制系统框图

上述打印轮转动位置的控制要求有较高的精度,用开环控制方式难于达到要求。因为任何扰动都可能干扰位置指令的执行,而开环控制系统对此将无能为力。

必须指出,只有按负反馈原理组成的闭环系统才能实现自动控制的任务。例如,在电加热器闭环系统中,负反馈能使加热器的温度对于希望值的偏离逐渐减小,而正反馈则相反,将使加热器的温度的偏离越来越大,从而不可能达到自动控制的目的。

### 1.2.3 开环控制与闭环控制的比较

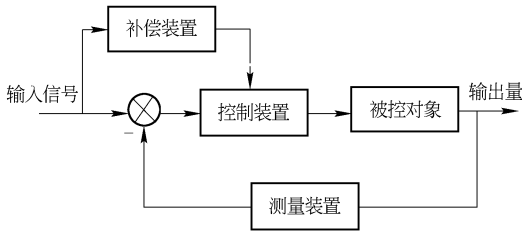
一般来说,开环控制结构简单、成本低廉、工作稳定。因此,当系统的输入信号及扰动作用能预先知道、且要求精度不高时,可以采用开环控制。但由于开环控制不能自动修正被控制量的偏离,所以,系统的元件参数变化以及外来的未知扰动对控制精度的影响较大。

闭环控制具有自动修正被控制量出现偏离的能力,因此可以修正元件参数变化以及外界扰动引起的误差,其控制精度较高。但是正由于存在反馈,闭环控制也有其不足之处,这就是被控制量可能出现振荡,严重时会使系统无法工作。这是由于被控制量出现偏离之后,经过反馈便形成一个修正偏离的控制作用。这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间,一般是有时间延迟的,使被控制量的偏离不能立即得到修正,从而有可能使被控制量处于振荡状态。因此,如果系统参数选择不当,不仅不能修正偏离,反而会使偏离越来越大,系统无法工作。自动控制系统设计的重要课题之一,就是要解决闭环控制中的这个振荡或发散问题。摇摇摇摇

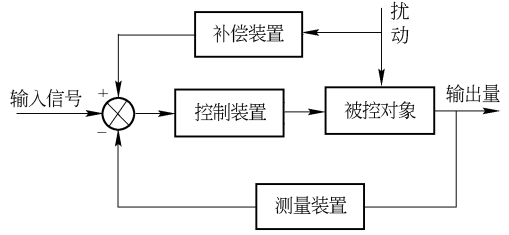
### 1.2.4 复合控制

复合控制就是将开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。实质上,它是在闭环控制回路的基础上,附加一个对输入信号或对扰动作用的顺馈通路,来提高系统的控制精度。顺馈通路通常由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成,分别称为按输入信号补偿和按扰动作用补偿的复合控制系统,如图 1.2.3 所示。

通常,按输入信号补偿的补偿装置可提供一个输入信号的微分作用,并作为顺馈控制信号,与原输入信号一起对被控对象进行控制,以提高系统的跟踪精度。按扰动作用补偿的补偿装置,能够在可测量的扰动对系统的不利影响产生之前,提供一个控制作用以抵消扰动对系统输出的影响。补偿装置按照不变性原理设计,即在任输入下,都保证系统输出与作用在系统



(a) 按输入作用补偿



(b) 按扰动作用补偿

图 1-1-1 复合控制典型方框图

上的扰动完全无关或部分无关,从而使系统的输出完全复现输入。

## 1.1 自动控制系统分类

由于自动控制技术发展很快,应用很广,因此分类方法很多。为了便于学习本课程和阅读有关参考资料,本节仅介绍常见的两种分类方法。

### 1.1.1 按输入信号特征分类

#### 1. 恒值控制系统

如果系统的输入量是常数,并要求在干扰作用下,其输出量在某一希望值附近做微小变化,则这类系统称为恒值控制系统。如生产过程中的温度、压力、流量、液位高度等自动控制系统属于这一类。

#### 2. 程序控制系统

如果系统的输入量是已知给定值的时间函数时,则这类系统称为程序控制系统。如热处理炉温度控制系统的升温、保温、降温过程都是按照预先设定的规律进行控制的,所以该系统属于程序控制系统。

#### 3. 随动系统

如果系统的输入量是时间的未知函数,即给定量的变化规律是事先不能确定的,并要求输出量精确地跟随输入量变化,则这类系统称为随动系统。如雷达天线跟踪系统,当被跟踪目标位置未知时属于这类系统。

### 1.1.2 按所使用的数学方法分类

#### 1. 线性系统和非线性系统

##### (1) 线性系统

自动控制系统是一个动态系统,它的运动规律通常可用微分方程或差分方程来描述。当系统的运动规律用线性微分方程或线性差分方程描述时,则这类系统称为线性系统。线性系统有两个重要特性:叠加性和齐次性。

##### ① 叠加性

当系统同时存在几个输入量时,其输出量等于各输入量单独作用时所引起的输出量的和。如果用箭头表示输入量  $x$  和输出量  $y$  的对应关系,上述性质可表示如下:

若  $u \rightarrow y$ ,  $ku \rightarrow ky$ ; 则  $u \rightarrow y$ ,  $ku \rightarrow ky$ 。

② 齐次性

当输入量增大或缩小  $k$  (实数) 倍时, 系统输出量也按同一倍数增大或缩小。齐次性可用下式表示:

若  $u \rightarrow y$ , 则  $ku \rightarrow ky$ 。

(三) 非线性系统

若描述系统的运动方程为非线性微分方程或差分方程, 则此系统称为非线性系统。非线性系统的特点是方程的系数随变量大小而变化, 并且不满足叠加原理。当系统中某一元件的输入-输出特性为非线性函数时, 则称该系统为非线性系统。图 1-7 为几种常见的非线性特性。

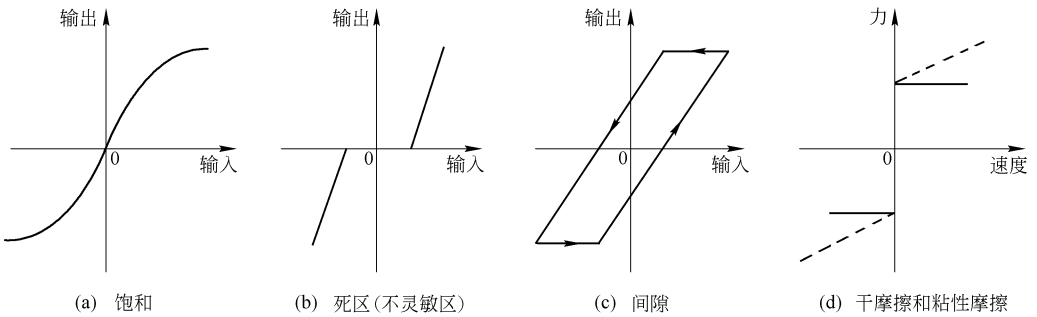


图 1-7 常见的非线性特性

二、连续系统和离散系统

(一) 连续系统

若系统中各元件的输入量和输出量均为  $t$  的连续函数时, 这类系统称为连续系统。连续系统的运动规律可用微分方程描述。

(二) 离散系统

在系统中只要有一处的信号是脉冲序列或数字编码时, 这类系统就称为离散系统。离散系统的特点是信号在特定离散时刻  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  是时间的函数, 而在上述离散时刻之间, 信号无意义, 如图 1-8 所示。离散系统的运动规律可用差分方程来描述。

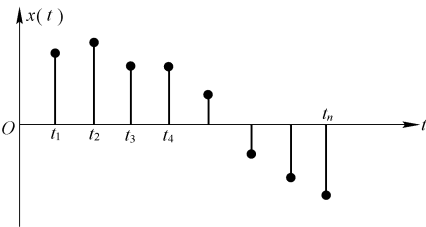


图 1-8 离散信号

在数字计算机引入控制系统后, 控制系统由连续系统变成离散系统。因此, 随着数字计算机在自动控制中的

广泛应用, 离散系统理论得到迅速发展。

三、定常系统和时变系统

(一) 定常系统

如果系统中的参数不随时间变化, 则这类系统称为定常系统。在实践中遇到的系统, 大多数属于这一类。

(二) 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。

## 典型闭环控制系统的基本组成

从上述闭环控制系统典型的实例看到,尽管控制系统由不同的元件组成,系统的功能也不一样,但它们都是采用了负反馈原理。相同的工作原理决定了它们必然具有相同的结构,如它们都有测量装置、比较装置、放大装置和执行机构。一般说来,一个闭环控制系统可由以下基本元件组成:

- 测量元件:对系统输出量进行测量的元件。
- 比较元件:对系统输出量与输入信号进行加减运算,给出误差信号,起信号的综合作用。
- 放大元件:对微弱的误差信号进行放大,输出足够功率和要求的物理量。
- 执行机构:根据放大后的误差信号,对被控对象执行控制,使被控制量趋于希望值。
- 被控对象:自动控制系统所控制的机器、设备或生产过程。
- 校正装置:用于改善系统性能的元件。

一个典型的自动控制系统的基本组成,如图 1-1 所示。图中系统的基本元件和被控对象用方块表示,信号的传输方向用箭头表示,该传输方向是单向不可逆的,这是由元件的物理特性所决定的;“ $\ominus$ ”号表示输入信号与反馈信号相减,即负反馈(“ $\oplus$ ”号表示正反馈)。

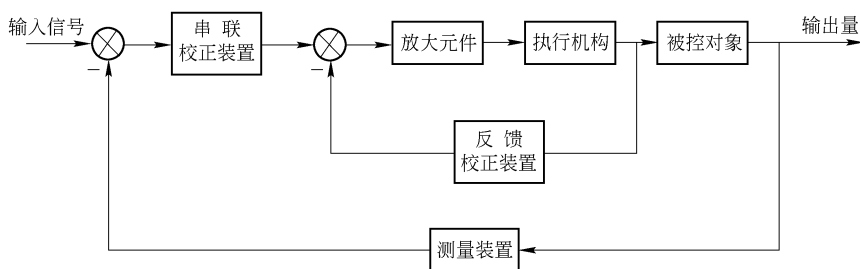


图 1-1 典型的自动控制系统方框图

信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通路;系统输出量经由测量装置反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路,前向通路与主反馈通路一起构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它组成的内回路。只有一个反馈通路的系统称为单回路系统,有两个以上反馈通路的系统称为多回路系统。

通常,控制系统有两种外作用,即有用信号和扰动,系统的有用输入信号决定系统被控制量的变化规律,而扰动是系统所不希望的外作用,它破坏有用信号对系统输出量的控制。在实际系统中,扰动通常是不可避免的,它可以作用于系统中的任何部位。电源电压的波动、环境温度的变化、飞行中气流的扰动以及负载的变化等,都是现实中存在的扰动。通常所说的系统输入信号,一般是指有用信号。

## 控制系统举例

控制系统的例子很多,除了上面提到的一些例子之外,下面将对水箱液位控制系统、遥控苑

机器人双向力反应随动系统、蒸汽压力闭环控制系统、磁悬浮轴承控制系统、自动请求重发系统(粤四)和业务组织系统等例子进行简单介绍。

### 1.5.1 水箱液位控制系统

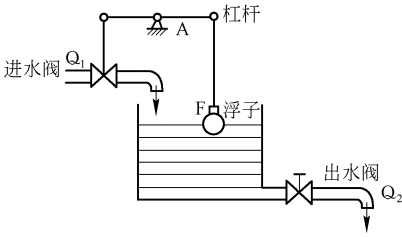


图 1.5.1 水箱示意图

在人们的生活中经常见到水箱这种装置。传统的水箱的示意图,如图 1.5.1 所示,水箱由进水阀 1、出水阀 2、浮子 F 和杠杆 A 组成,是一个恒定水位输出的自动控制装置。它通过调整杠杆和浮子之间的位置关系,可以调整水箱的水位。

当打开出水阀放出水箱中的水并关闭出水阀后,浮子的位置将下降,通过杠杆的传递,进水阀将被开启;开启进水阀后,通过进水管向水箱注水;随着水位的升高,浮子在浮力的作用下不断升高,当水位达到设定的水位高度时,浮子将达到设定的高度,通过杠杆的传递作用,进水阀被关闭。这时,水箱中就注入了设定水位高度的水。

### 1.5.2 遥控机器人双向力反应随动系统

在对人体有害(如放射性、剧毒、高温等)和人身不便接近的场所(如深潜作业等),可采用遥控机器人来完成希望的操作任务。图 1.5.2 是一种遥控机器人(或称为伺服主从操作机)中单一完成夹持运动的主、从操作系统的结构图。

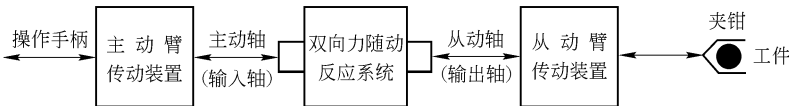


图 1.5.2 进行夹持的主从操作系统结构图

它由操作手柄、主动臂传动装置、双向力随动反应系统、从动臂传动装置和夹钳等组成。主动臂和从动臂的传动装置均是可逆的(即能双向转动)。双向力反应随动系统的作用是使从动轴跟随主动轴运动,并在主动轴上作出力反应;同时主动轴也能跟随从动轴运动,并在从动轴上作出力反应。这样就使夹钳的动作受手柄控制,并在操作手柄上有夹持工件的力感觉。另外,随动系统各电气部件之间可用电缆连接,因而可实现远距离的操作任务。系统的具体结构形式如图 1.5.3 所示。

整个系统由两个子系统组成,即控制负载运动的随动系统和对输入端(即主动轴)作出力反应的力反应系统。当操作人员给系统输入控制信号  $\varphi_{测}$  时,位置比较元件便产生误差信号  $\Delta$ ,经过电压放大后,一路经功放(1)、执行电机(2)和减速器(3)推动负载按输入轴的运动规律而运动,使输出  $\varphi_{籍}$  总是跟随输入  $\varphi_{测}$ 。另一路经力比选择器和倒相(即反极性)、功放(4)、执行电机(5)和减速器(6)对输入轴(即主动轴)施加反力矩  $\varphi_{反}$ ,使操作人员有如直接操作负载运动那样的力感觉。由于随动系统的输出力矩既与负载力矩  $\varphi_{籍}$  相平衡,又与误差信号  $\Delta$  的大小成比例,而力反应系统的输出力矩  $\varphi_{反}$  也与误差信号  $\Delta$  的大小成比例,所以主动端的反应力矩  $\varphi_{反}$  与从动端的负载力矩  $\varphi_{籍}$  成比例,比例系数的大小可通过力比选择器来调节。主动端的减速器(6)与从动端的减速器(3)都是摩擦与惯性极小而且是可逆传动的减速装置。

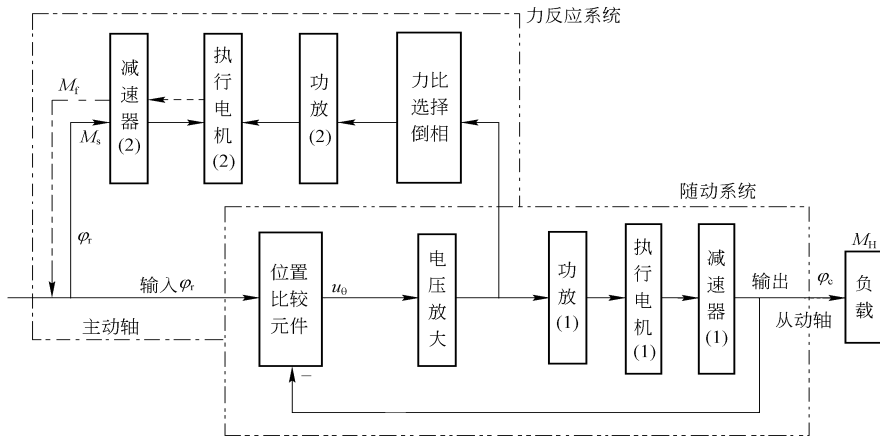


图 1.5.2 双向力反应系统结构图

### 1.5.3 蒸汽压力闭环控制系统

酿酒工业如啤酒的生产过程中,每天要消耗大量的蒸汽。然而实际上各生产车间对蒸汽的需求量是有等级差别的。如糖化车间,为保证生产质量,要求提供较稳定的蒸汽压力为 $0.4 \times 10^5$  Pa左右,但是有时由于煤的质量差或其它车间大量用汽,常使糖化车间的额定蒸汽压力得不到保证,影响了产品质量;而罐装车间一般只需要 $0.2 \times 10^5$  Pa的蒸汽压力,如不控制将造成能源浪费。

为了实现啤酒生产的现代化,有必要对影响产品质量的最关键因素——蒸汽压力进行自动控制。蒸汽压力闭环控制系统框图如图 1.5.3 所示。

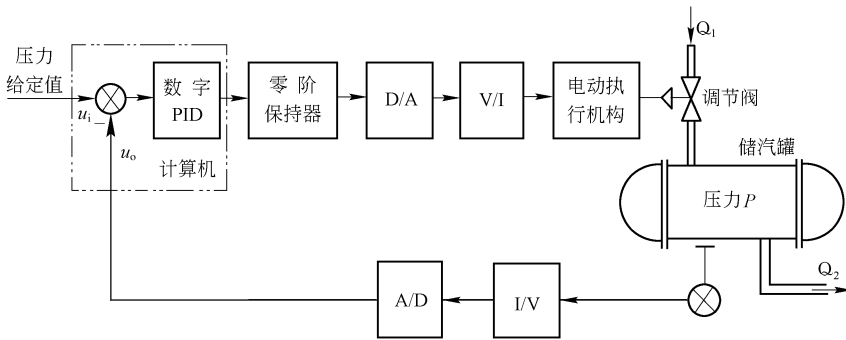


图 1.5.3 蒸汽压力闭环控制框图

计算机完成定时对压力值检测和比较,得到压力误差值,然后对误差量作 $P$ 、 $I$ 、 $D$ 规律的运算,得到输出控制量,经过 $D/A$ 、 $V/I$ 转换后去调节阀门的开度,以控制蒸汽压力始终跟踪压力给定值。

### 1.5.4 磁悬浮轴承控制系统

随着高速机械的发展,常规的滚珠轴承,由于存在诸如震动、摩擦、寿命等问题,使应用受到了限制。磁悬浮轴承利用磁场力将转子完全悬浮起来,保持转子和轴承座之间没有机械接触,因而消除了机械摩擦,具有速度快、精度高、动态性能良好等特点,在高速以及精密机械领域

域已经获得了许多成功的应用。

图 11.5.4 是利用磁场力构成的单轴磁悬浮轴承控制系统。图中电磁铁的吸力与转子的重力相平衡。涡流传感器检测转子相对磁极的位置变化，输出交流电压经前置放大和相敏检波转换成直流电压，再经过校正放大和电流输出功率放大器，相应地改变电磁铁线圈中的电流，从而调节电磁铁对转子的吸力，以保持转子恢复到平衡位置。

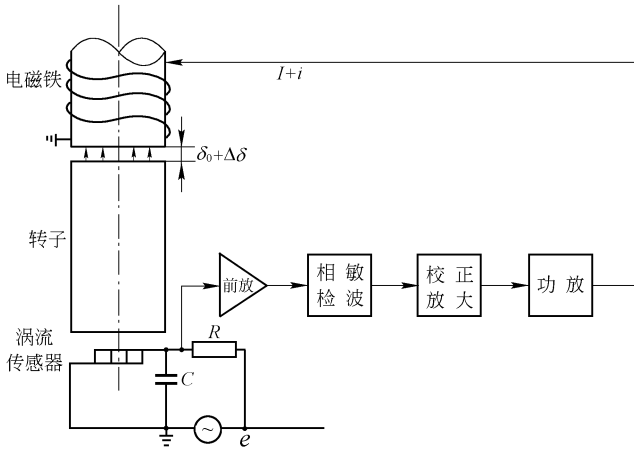


图 11.5.4 单轴磁悬浮轴承控制系统原理图

### 1.5.5 自动请求重发系统 (ARQ)

在数据通信系统中，采用反馈重发纠错的差错控制方式，也是闭环控制。这种方式是发送端将发送的数据信息，附加多余码元后发送，接收端对接收的信息进行差错检测，如果检测结果有错，则通过反馈信道把判定结果用判定信号告诉发送端，发送端根据这些判定信号，把接收端认为有错的信息再次传送，直到接收端认为正确接收为止。这种方式即为 ARQ。ARQ 纠错系统如图 11.5.5 所示。

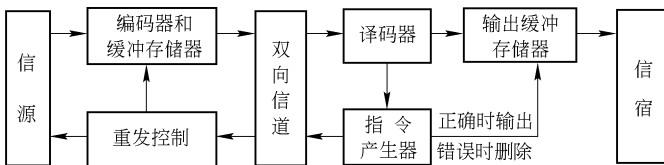


图 11.5.5 ARQ 纠错系统组成方框图

发送端信源送出的数据序列，一方面经检错码编码器编码由发送机送入信道；另一方面把它存入存储器。存储器将数据序列一直存储到发送端从反馈信道收到判定无错的信号为止。接收端检错码译码器对接收到的序列进行译码，判定有无错误，若无差错，则送出无错信号，该信号一方面经反馈信道送至发送端，一方面通知信宿接收译码后的数据序列；若有差错，则通过反馈控制器，使信宿不接收此时的数据序列，同时产生一重发指令，通过反馈信道送至发送端。重发指令通常是一组抗干扰能力很强的特殊码，它经发送端的判定信号检测器检测后，就控制信源暂时停发新数据；同时，打开存储器，将有错的信息重发一遍；并且仍需将重发数据存入存储器备用。接收端收到重发码后，若判定无错，则通过反馈控制器使信宿接收此时