



普通高等教育

电气自动化类 国家级特色专业系列规划教材

# 自动控制原理

夏超英 编著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材

# 自动控制原理

夏超英 编著

TP13

X180

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

自动控制原理是系统和控制科学的一门基础课程,主要讲解建立在传递函数输入输出描述基础之上的反馈控制系统的分析与综合方法。本书的主要内容包括控制系统的数学模型、时域分析方法、根轨迹法、频域分析方法,控制系统的校正,采样控制系统和非线性控制系统。

本书在内容上强调基础性和系统性,注重基本概念的阐述和不同分析设计方法的联系与比较;在知识的介绍过程中尽量避免高深的数学公式推导;在写作上力求做到层次清楚,内容精简,逻辑性强,符合工科学生的认识规律,每章最后都安排了 MATLAB 相关知识的介绍。

本书可作为高等院校自动化、电力系统自动化、机电一体化和其他相关专业的本科生教材,也可供相关专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/夏超英编著. —北京:科学出版社,2010.6  
(普通高等教育电气自动化类国家级特色专业系列规划教材)  
ISBN 978-7-03-027621-6

I. ①自… II. ①夏… 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(2010)第 089428 号

责任编辑:巴建芬 余 江 潘继敏 / 责任校对:鲁 素  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**铭浩彩色印装有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 6 月第一次印刷 印张:23 3/4

印数:1—3 500 字数:551 000

**定价: 39.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

在 21 世纪的头一个 10 年里,国家发生了巨大变化,生活在这个时代的每一个人都能切身感受到这一点,这是一个机遇与挑战并存的时代。

由于科研和教学任务繁重,从 2001 年起,本书断断续续地写了近 10 年,现在终于有了结果,并在科学出版社出版,这使作者感到十分欣慰。

本书是作者在多年教学讲义的基础上修改完善而成的,在写作过程中还参考了一些国内外教材。现将本书各章节的内容特点说明如下:

第 1 章为绪论,主要介绍自动控制系统的组成和类型,自动控制理论的形成与发展,反馈控制系统示例和分类等。通过对绪论部分的学习,将使学生对自动控制原理这门课的重要性和控制系统有一个初步的感性认识。

第 2 章的主要内容包括拉普拉斯变换的基本内容,系统的输入输出微分方程描述和传递函数,系统的静态工作点和静态工作点附近的线性化方法,控制系统中常见对象和过程的数学模型,动态结构图及其化简,梅森增益公式等。其中,对拉氏变换的积分下限问题,初值定理和终值定理在使用中应该注意的事项,线性定常微分方程的解及其性质,传递函数的一般和特殊形式等进行了较为详细的阐述,特别指出了运用方框图和方框图化简过程中应该注意的问题。

第 3 章的主要内容包括控制系统的性能指标,稳定性的概念和代数判据,一阶和二阶系统响应,高阶系统响应,主导极点和偶极子的概念,系统的稳态误差等。其中,结合工程实际对稳定性的概念及其对控制工程的重要性进行了深入的讲解,由此说明了系统典型响应的工程意义;补充讲述了临界稳定一阶环节的记忆响应特性和临界稳定二阶环节的自持振荡响应特性,以便在随后的稳态特性设计中引用这些环节来提高系统的控制精度;对二阶无零点系统、二阶有零点系统的阶跃响应表达式和性能指标计算公式,以及有共轭复数主导极点高阶系统阶跃响应的近似表达式和性能指标估算公式,用统一的形式给出,便于学生掌握。

第 4 章的主要内容包括根轨迹的概念,根轨迹的绘制法则,零度根轨迹和参数根轨迹,增加开环零点和开环极点对根轨迹的影响,有时间纯滞后环节时的根轨迹等。其中,特别阐述了根轨迹的连续性和根轨迹的平移相似性,进而指出了不同开环零、极点分布的根轨迹间的联系和包含关系,应用根轨迹的连续性,总结并给出了两极点、单零点传递函数和两极点、两零点传递函数根轨迹的规律性,给出了分离点上根轨迹入射角和出射角的简单计算方法;对零、极点相消情况下的根轨迹及处理方法进行了说明。

第 5 章的主要内容包括频率特性的概念,典型环节的频率特性,频率特性的绘制,奈奎斯特稳定性判据,开环频率特性及指标,闭环频率特性及指标,频域指标和时域指标间的关系等。其中,特别就开环传递函数为临界稳定时,幅相频率特性曲线的绘制方法及规律性,奈奎斯特稳定性判据和对数稳定性判据应用中应该注意的问题,如何根据开环频率特性指标、闭环频率特性指标估算系统的时间响应指标等,进行了深入的讲解。

第 6 章的主要内容包括系统校正的概念和校正方式,常用的校正装置,根轨迹法的串联校正,频率特性法的串联校正,按希望特性进行校正和反馈校正等。其中,归纳总结了选择校正

设计方案的一般步骤,使学生可以根据设计要求,迅速选择滞后、超前、滞后-超前校正方案之一完成系统设计;对无源校正方案和有源校正方案进行了比较说明,通过对比容易使学生看出根轨迹法和频域法两种不同校正设计方法间的内在联系,整章内容的连贯性强,便于学生掌握。

第7章的基本内容包括采样器和保持器及其特性,脉冲传递函数的概念和求取方法, $z$ 平面和 $s$ 平面之间的关系,采样系统的根轨迹分析和设计方法等。除上述基本内容以外,还增加了采样控制系统的最小拍、有限拍和无纹波综合方法,以及离散系统的模拟化设计方法的内容,以满足不同教学计划的需要。

第8章的内容包括非线性系统的特点,控制系统中的典型非线性,非线性系统的描述函数分析方法,非线性系统的相平面分析方法等。其中,重点讲述了与控制工程相关的一些典型非线性特性对控制系统性能的影响,部分内容也涉及了简单非线性系统的综合问题。

在写作风格上,本书力求做到言简意赅、避免大篇幅的叙述性内容,尽量压缩各章节的篇幅,注重基本概念的准确、完整阐述。

为更能适应不同教学计划的需要,本书注意了内容和章节的合理划分及其相对独立性。例如,如果开设有计算机控制系统的后续课程,采样控制系统一章的内容可以选择讲或不讲,或删除其中有限拍采样系统设计和模拟化设计方法两节。同样,非线性控制系统一章的内容也可以根据课时的不同,讲或不讲,或只讲其中的一部分。

考虑到篇幅以及自动控制原理、现代控制理论在大多数高校中两学期单独设课的实际情况,本书只介绍经典控制理论的内容,现代控制理论的内容将作为另外一本书,安排在随后的写作计划中。

感谢科学出版社的编辑,他们热忱有效的工作作风给作者留下了深刻的印象。

感谢在本书写作过程中不断给予鼓励和支持的学院和系领导,以及为本书讲义稿提出意见和建议的老师和同学们,他们的肯定极大地增强了作者完成本书的决心和信心。

感谢许燕斌博士,她为本书编写了各章最后 MATLAB 的一节。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,希望读者不吝指正。

夏超英

2010年2月于天津大学

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1-1 控制系统的组成和基本结构 .....	1
1-2 自动控制理论的内容和发展 .....	4
1-3 反馈控制系统示例 .....	6
1-4 控制系统分类 .....	7
1-5 控制系统设计的基本要求 .....	8
习题 .....	9
<b>第 2 章 控制系统的数学模型</b> .....	13
2-1 拉普拉斯变换 .....	13
2-2 线性系统的输入输出描述和传递函数 .....	26
2-3 非线性微分方程在工作点附近的线性化 .....	30
2-4 一些典型对象和零部件的传递函数 .....	34
2-5 动态结构图 .....	45
2-6 信号流图 .....	54
2-7 在 MATLAB 中创建系统模型 .....	56
习题 .....	62
<b>第 3 章 控制系统的时域分析方法</b> .....	69
3-1 控制系统的性能指标 .....	69
3-2 控制系统的稳定性和代数判据 .....	72
3-3 一阶系统的响应 .....	80
3-4 二阶系统的响应 .....	84
3-5 高阶系统的阶跃响应 .....	96
3-6 控制系统的稳态误差 .....	103
3-7 在 MATLAB 中进行系统时域分析 .....	112
习题 .....	116
<b>第 4 章 根轨迹法</b> .....	121
4-1 根轨迹的概念 .....	121
4-2 一般根轨迹的绘制法则 .....	125
4-3 零度根轨迹的绘制法则 .....	137
4-4 参数根轨迹(广义根轨迹) .....	141

4-5	增加开环零、极点对根轨迹的影响 .....	143
4-6	有时间纯滞后环节时的根轨迹 .....	152
4-7	用 MATLAB 命令绘制根轨迹 .....	158
	习题 .....	161
<b>第 5 章</b>	<b>控制系统的频域分析方法</b> .....	165
5-1	频率特性的概念 .....	165
5-2	典型环节的频率特性 .....	167
5-3	幅相频率特性曲线的绘制 .....	177
5-4	对数频率特性曲线的绘制 .....	181
5-5	频率特性曲线的实验测取 .....	182
5-6	奈奎斯特稳定性判据 .....	184
5-7	开环频率特性的稳定裕度指标 .....	195
5-8	闭环频率特性及特性指标 .....	196
5-9	系统频域指标与时域指标的关系 .....	202
5-10	系统开环频率特性与系统性能的关系 .....	206
5-11	用 MATLAB 命令绘制频率特性 .....	208
	习题 .....	215
<b>第 6 章</b>	<b>控制系统的校正</b> .....	222
6-1	系统设计指标和校正方式 .....	222
6-2	常用的校正装置 .....	224
6-3	串联校正 .....	230
6-4	按希望特性进行串联校正 .....	253
6-5	反馈校正 .....	257
6-6	PID 参数的工程整定 .....	260
6-7	用 MATLAB 命令进行系统校正 .....	261
	习题 .....	264
<b>第 7 章</b>	<b>采样控制系统</b> .....	271
7-1	采样器和保持器 .....	271
7-2	$z$ 变换与 $z$ 反变换 .....	275
7-3	脉冲传递函数 .....	282
7-4	采样系统分析 .....	287
7-5	采样系统的根轨迹分析与设计 .....	296
7-6	有限拍采样系统设计 .....	301
7-7	离散系统的模拟化设计方法 .....	306
7-8	用 MATLAB 命令进行采样系统分析 .....	308

习题	310
<b>第 8 章 非线性控制系统</b>	<b>316</b>
8-1 非线性系统的特征和研究方法	316
8-2 控制系统中的典型非线性特性	318
8-3 非线性控制系统的描述函数分析方法	321
8-4 非线性系统的相平面分析方法	332
8-5 用 MATLAB 命令进行非线性系统分析	351
习题	355
参考文献	361
附录 MATLAB 函数一览表	362
部分习题参考答案	364

自动控制技术在航空航天、军事工业、核能及电等现代科学技术领域,在生物、医学、环保、智能交通、新能源利用、经济管理 etc 新兴领域,都起着非常重要的作用。

自动控制的理论是自动控制技术的基础理论,是当今大多数工程技术人员和科学工作者必须具有的基本知识之一。它既具有理论性,同时又具有很强的工程性和实践性。在这门课的学习过程中,应特别注意结合工程实际加深对所学理论的理解,弄清所学知识的工程背景,逐步建立对系统的概念,掌握分析和解决系统的方法。

## 1-1 控制系统的组成和基本结构

控制系统由一些相互联系和相互影响的环节组成,是有一定功能的一个整体。控制系统中的主要环节有:

1. 被控对象——即被控制的对象,它可以是某一台机器或设备,也可以是某一个生产或工艺过程。

2. 执行机构——即控制决策的执行机构,它将控制信号转化为功率级输出,加载在被控对象上改变它的输出。在控制系统中,执行机构有时被看成是一个独立的环节,有时被看成是被控对象的一部分。常用的执行机构有功率放大器、执行电机、阀门等。

3. 校正装置——即调节器或控制器,用来产生控制信号。简单的校正装置由电阻、电容无源器件或有源器件组成,复杂的校正装置要借助计算机来实现。

4. 比较元件——其作用是将给定环节给出的参考输入与测量装置检测的被控量进行比较,得到偏差量。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

5. 给定环节——其作用是给出与期望的被控量相对应的参考输入量。参考输入量常常是电信号,常用的给定环节有电位器、指令开关、旋转变压器等。

6. 测量装置——其作用是检测被控制的物理量,将其转换为大小与之成比例的电信号。常用的测量元件有测量转速的测速发电机、测量角度的旋转变压器、测量温度的热电偶、测量电压的电位器等。

控制系统以及它的各个环节都有它的输入量和输出量。不同环节的输入量、输出量的含义是不同的,说明如下:



# 第 1 章 绪 论

自动控制就是在没有人直接参与的情况下,应用某种装置操纵生产机械或生产过程,使之具有预定的工作状态。数控机床能够按照设定的程序自动切削工件;化学反应炉的温度和压力能够自动地维持恒定;制导系统能够引导导弹准确地射向敌方目标;无人驾驶飞机能够按照预定的轨迹升降和飞行;人造卫星可以准确地进入轨道并回收等,这一切都离不开自动控制技术。

在过去的几十年中,自动控制技术在国民经济各部门中的广泛应用,极大地促进了化工、造纸、电力、冶金、汽车、家电等行业的技术进步,改善了劳动条件,提高了产品质量和劳动生产率,促进了产品的更新换代。特别是近二三十年来,随着微电子技术和计算机技术的进步,自动控制技术在航空航天、军事工业、核能发电等现代科学技术领域,在生物、医学、环保、智能交通、新能源利用、经济管理等新兴领域,都起着非常重要的作用。

自动控制理论是自动控制技术的基础理论,是当今大多数工程技术人员和科学工作者必须具备的基本知识之一,它的理论性较强,同时又有着很强的工程性和实践性。在这门课的学习过程中,应该有意识地结合工程实际问题以加深理解,搞清所学知识的工程背景,逐步建立起系统的概念,掌握分析和解决问题的方法。

## 1-1 控制系统的组成和基本结构

控制系统由一些相互联系和相互影响的环节组成,是有特定功能的一个整体。控制系统中的主要环节有:

**被控对象**——即被控制的对象,它可以是某一台机器或设备,也可以是某一个生产或工艺过程。

**执行机构**——即控制决策的执行机构,它将控制信号转化为功率级输出,加载在被控对象上改变它的输出。在控制系统中,执行机构有时被看成是一个独立的环节,有时被看成是被控对象的一部分。常用的执行机构有功率放大器、执行电机、阀门等。

**校正装置**——即调节器或控制器,用来产生控制信号。简单的校正装置由电阻、电容无源器件或有源器件组成,复杂的校正装置要借助计算机来实现。

**比较元件**——其作用是将给定环节给出的参考输入与测量装置检测的被控量进行比较,得到偏差量。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

**给定环节**——其作用是给出与期望的被控量相对应的参考输入量。参考输入量常常是电信号,常用的给定环节有电位器、指令开关、旋转变压器等。

**测量装置**——其作用是检测被控制的物理量,将其转换为大小与之成比例的电信号。常用的测量元件有测量转速的测速发电机、测量角度的旋转变压器、测量温度的热电偶、测量电压的电位器等。

控制系统以及它的各个环节都有它的输入量和输出量。不同环节的输入量、输出量的含义是不同的,说明如下:

输出量——指被控对象的被控变量,即被控对象的输出变量,也是控制系统的输出量。实际中,被控对象的输出量总有特定的物理单位,如温度、压力、转速、流量等,而且一般总可以通过某种测量装置实时地测量到。

控制量——指被控对象的控制输入,也是执行机构或控制器的输出,控制量通常是一些可以对被控对象输出产生有效影响的变量。

参考输入——指给定环节的输出,表示被控对象输出量的测量值应该达到的数值,通常情况下参考输入也是控制系统的输入。

误差——参考输入信号与被控对象输出量的测量值之间的偏差,误差信号一般是控制器的输入信号。

扰动输入——除去控制作用以外加载到被控对象上的其他输入作用的总和,一般会对系统输出产生不利的影响。

根据上面的定义,自动控制的任务就是根据参考输入决定控制作用并施加在被控对象上,最终使被控对象的输出等于参考输入规定的数值。

要完成上述控制任务,自动控制系统有开环控制和闭环控制两种基本的控制方式。

开环控制方式的原理框图如图 1.1 所示。在开环控制系统中,信号从控制器到执行机构再到被控对象只有单方向传递,输出量不对控制作用产生影响,故称为开环控制。

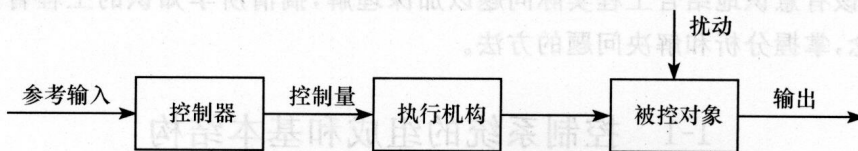


图 1.1 开环控制方式的原理框图

在开环控制系统中,控制器总是根据执行机构和被控对象的特性进行设计的,使得在由参考输入得到的控制量作用下,被控对象的输出可以快而准地响应参考输入信号。开环控制无需对被控量进行测量,系统结构简单,成本低。然而,被控对象除去控制输入外还会受到扰动输入的影响,它会使被控对象的输出偏离希望值。除此以外,被控对象和执行机构的特性参数也会随时间发生变化,会使系统达不到预想的设计性能。在开环控制系统中,这种由于扰动作用和参数发生变化引起的系统性能的改变,无法得到及时的修正或补偿。在工程实际中,对于控制精度要求不是很高,系统特性参数相对稳定,干扰比较弱的场合,开环控制不失为一种简单有效的控制方案。例如,数控机床由步进电动机组成的进给控制系统,打印机打字头的位置控制,洗衣机的顺序控制等都是开环控制系统的例子。

当作用到被控对象上的干扰较强,可以实时测量到时,可以采取基于干扰补偿的控制方法,如图 1.2 所示将测量到的干扰信号前引给控制器,改变控制作用去抵消干扰对输出的影



图 1.2 基于干扰补偿控制的原理框图

响。显然,干扰补偿控制也是开环控制,因为补偿控制信号的传递也是单方向的。基于干扰的补偿控制对不可测干扰、被控对象特性参数发生变化引起的输出变化无能为力。

为克服开环控制系统的上述缺点,在自动控制系统中广泛采用的是闭环控制方式。

闭环控制方式也称为反馈控制方式,它的原理框图如图 1.3 所示。在闭环控制系统中,被控对象的输出反方向被引到控制系统的输入端,信号沿前向通路和反馈通路闭路传输,控制量不仅与参考输入有关,还与输出有关,即根据参考输入和系统输出之间的偏差进行控制。

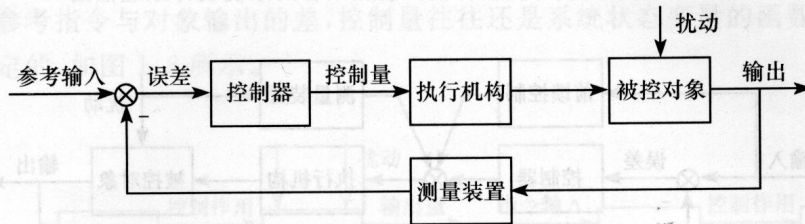


图 1.3 闭环控制方式的原理框图

采用反馈控制可以有效地抑制被反馈通路所包围的前向通路中各种扰动对系统输出的影响。以参考输入为一定值的情况为例,假设扰动作用使输出量减小,则反馈量也相应减小,由于参考输入未变,故误差增大,控制作用增强,增强的控制作用加载到被控对象上又使被控对象的输出增大,向减小误差的方向变化;反之,如果扰动作用使输出量增大,误差变小或变负,使控制作用减弱,被控对象的输出减小,同样向减小误差的方向变化。总之,反馈控制对扰动引起的输出量的波动起到了调节抑制作用。

反馈控制是控制系统最基本的控制方式,它可以有效地克服开环控制系统存在的缺点,提高控制系统的响应速度、控制精度和抗干扰能力。另外,因为被控对象对控制信号的响应要有一个过程,需要一定的时间,不适当的控制策略会使系统出现振荡甚至不稳定。闭环控制和开环控制不同,稳定性问题是它面临和必须解决的特殊问题。

在控制工程实践中,闭环控制系统的快速性、控制精度和稳定性设计,跟踪特性和抗干扰能力的设计等往往会相互矛盾和相互制约。在某些情况下,将开环控制方式和闭环控制方式相结合,往往可以达到好的控制效果。图 1.4 给出的是反馈控制与前馈控制相结合的系统设计原理框图,除误差外,控制作用还综合了参考输入的信息,因此前馈控制常用来提高系统对参考输入的响应特性。图 1.5 给出的是反馈控制与扰动补偿控制相结合的系统设计原理框图,控制作用综合了误差和系统扰动的信息,常用来提高控制系统的抗扰能力。前馈控制和扰动补偿都属于开环控制,将反馈控制与前馈控制、扰动补偿相结合称为复合控制,如图 1.6 所示。在复合控制系统中,控制作用是反馈控制、前馈控制和补偿控制的和。

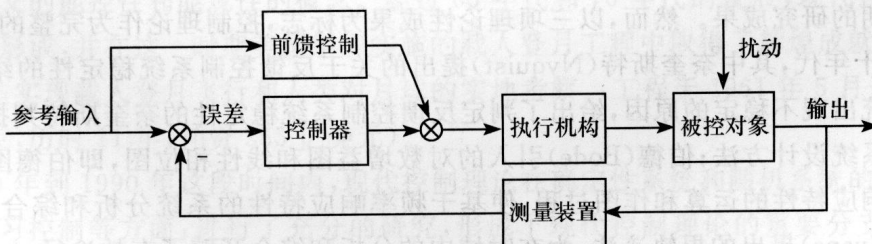


图 1.4 反馈控制与前馈控制相结合的系统设计原理框图

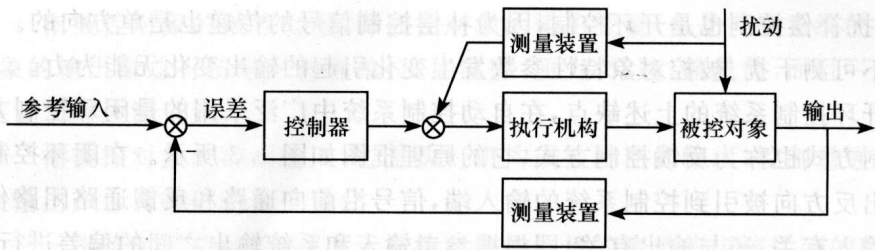


图 1.5 反馈控制与扰动补偿控制相结合的系统设计原理框图

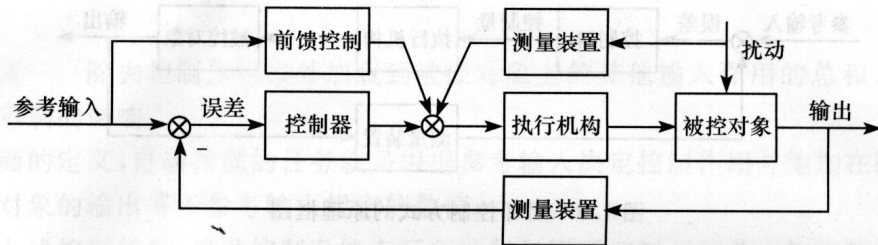


图 1.6 复合控制系统的原理框图

## 1-2 自动控制理论的内容和发展

自动控制理论是研究自动控制系统分析与综合的理论和方法的一门学科,根据自动控制理论发展的不同阶段,分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

### 1) 经典控制理论的研究内容和研究方法

经典控制理论主要以单输入单输出(single input single output, SISO)反馈控制系统的分析与综合作为它的研究内容。单输入单输出系统是指只有一个输入和一个输出的系统,即被控对象只有一个控制量输入和一个被控量输出,控制系统也只有一个参考指令输入和一个输出。在分析与综合中,对被控对象的分析是第一步,其目的是寻找控制输入如何影响对象输出的规律性,回答的是什么是和怎么样的问题;在此基础上,控制器和系统方案的综合设计是第二步,回答如何去做的。

对于线性定常系统,经典控制理论的分析 and 设计方法主要是基于传递函数描述的根轨迹法(时域法)和频率特性方法(频域法)。

### 2) 经典控制理论的形成和发展

18 世纪,詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,是自动控制领域最早期的研究成果。然而,以三项理论性成果为标志,控制理论作为完整的体系形成于 20 世纪三四十年代,其中奈奎斯特(Nyquist)提出的关于反馈控制系统稳定性的结果,揭示了反馈控制系统出现不稳定的原因,给出了判定反馈控制系统稳定性的奈奎斯特判据,提供了避免不稳定的系统设计方法;伯德(Bode)引入的对数增益图和线性相位图,即伯德图,大大简化了系统频率响应特性的运算和作图过程,使基于频率响应特性的系统分析和综合方法得以形成;埃文斯(Evans)提出的根轨迹法,为在时域中的分析和综合开辟了有效途径。

经典控制理论的应用在第二次世界大战期间取得了巨大成功,其中,自动火炮跟踪系统和

V2 火箭自动导航系统是最为突出的范例。到 20 世纪 50 年代中期,经典控制理论已经是一门十分成熟的理论,并在大量军事武器和工业过程的控制装置中得到了广泛应用。

### 3) 现代控制理论的研究内容和研究方法

现代控制理论主要以多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)复杂控制系统的分析与综合作为它的研究内容。

如图 1.7 所示,在现代控制理论中,反馈控制仍然是最常用的控制方式,但一般来说控制量不只取决于参考指令与对象输出的差,控制量往往还是系统状态变量的函数,这是由控制任务的复杂性决定的,如图 1.8 所示。

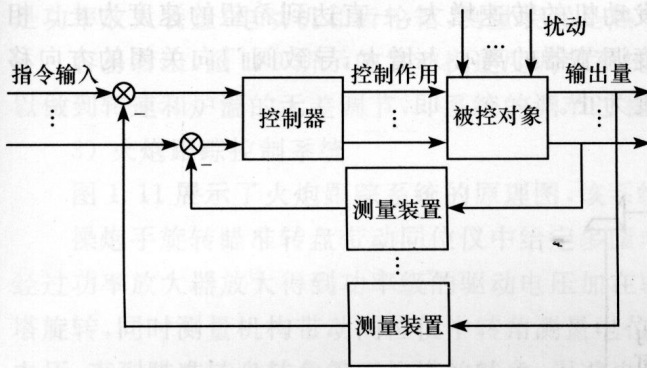


图 1.7 多输入多输出反馈控制系统的原理框图

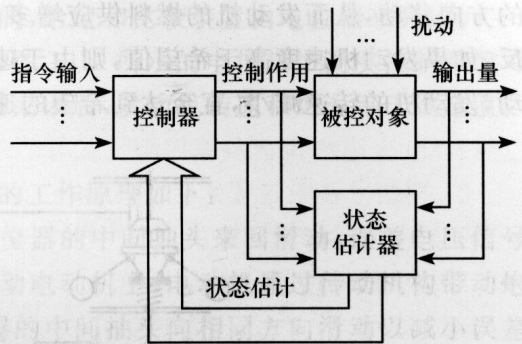


图 1.8 多输入多输出控制系统的原理框图

一般来说,现代控制理论所面对的控制问题比经典控制理论要复杂和困难得多,多输入多输出被控对象的各个输入量和输出量之间往往存在相互间的影响(即耦合),控制策略不仅要考虑某个控制量对相应输出量的控制作用,同时也要考虑对其他输出量的影响。根据控制对象和控制任务的不同,衡量控制系统优劣的性能指标的形式也各不相同,复杂程度迥异,往往是要寻求某种意义上的最佳系统,而并非只是使被控对象的输出等于参考指令。

现代控制理论的研究方法主要是基于状态方程描述的时域方法,一般要借助计算机求解。计算机技术和微处理器技术的进步为现代控制理论的实际应用创造了技术和物质条件。

### 4) 现代控制理论的形成和发展

在 20 世纪 50 年代蓬勃兴起的航天技术需求推动下,1960 年前后,控制理论开始了从经典理论到现代理论的过渡。反映这一过渡的重要标志性成果是卡尔曼(Kalman)把在分析力学中广泛采用的状态空间描述引入控制理论中,并在此基础上,引入了对研究系统结构和控制具有基本意义的能控性和能观性的概念。经过 60 年代和 70 年代的发展,现代控制理论的基本框架已经形成,并在这一时期美国组织实施的载人登月工程中取得了辉煌成就(又称阿波罗计划,目的是实现载人登月飞行和人类对月球的实地考察。工程于 1961 年 5 月开始,至 1972 年 12 月结束,历时 11 年,耗资 255 亿美元)。

在 1970 年到 1990 年这段时间内,现代控制理论在确定性系统和随机系统的最优控制、自适应和自学习控制等方面,进行了充分的研究,形成了现代控制理论的重要分支最优控制理论、最优估计理论、随机控制理论、系统辨识理论、自适应控制等。1980 年至今,现代控制理论的进展主要集中在非线性系统控制、鲁棒控制、模糊控制等方面。

### 1-3 反馈控制系统示例

下面通过几个具体的实例,来进一步加深对反馈控制系统的构成以及工作方式的理解。

#### 1) 发动机的速度调节系统

图 1.9 展示了瓦特式发动机速度调节系统的原理图,它根据发动机的希望转速与实际转速的差调节进入发动机的燃油数量,该系统的工作原理如下:

当发动机工作于希望的转速时,高压油将不进入动力油缸的任何一侧,如图 1.9 中的情况所示。否则,如果发动机速度低于希望值,则由于速度调节器的离心力下降,导致阀门向打开的方向移动,从而发动机的燃料供应增多,发动机的转速增大,一直达到希望的速度为止。相反,如果发动机速度高于希望值,则由于速度调节器的离心力增大,导致阀门向关闭的方向移动,发动机的转速减小,直至达到希望的速度为止。

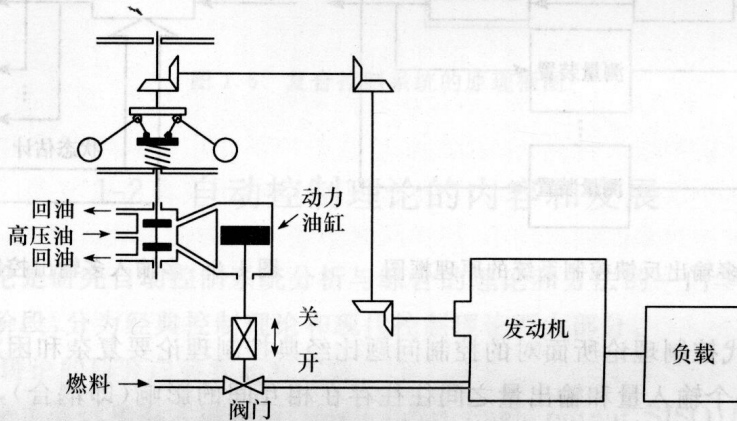


图 1.9 瓦特式发动机速度调节系统原理图

在图 1.9 所示的转速控制系统中,被控对象是发动机,输出是发动机的转速,动力油缸和阀门是执行机构,离心装置是速度调节器。燃料供应量是控制量,作用在负载上的不可预测的负载转矩变化是扰动量。

#### 2) 电加热炉温度控制系统

图 1.10 展示了电加热炉温度控制系统的原理图,该系统的工作原理如下:

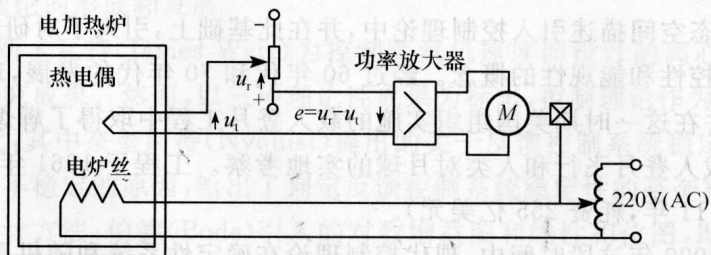


图 1.10 电加热炉温度控制系统原理图

当温度设定电位器上的电压  $u_r$  和温度测量装置热电偶上的电压  $u_t$  不相等时,假设电位

器设定电压所对应的温度比炉子的实际温度高,即误差信号  $e = u_r - u_i > 0$ ,它经过功率放大器放大后去驱动电动机  $M$ ,电动机旋转使自耦变压器的中间抽头向上移动,加在电炉丝上的电压变高,电炉丝的发热量增大,炉温开始升高。相反,如果电位器设定的温度比炉子的实际温度低,即  $e = u_r - u_i < 0$ ,它经过功率放大器放大后驱动电动机  $M$  向相反的方向旋转,使自耦变压器的中间抽头向下移动,加在电炉丝上的电压变低,电炉丝的发热量减小,炉温开始降低。上述调节过程一直进行到电位器设定的温度等于炉子的实际温度,即  $e = u_r - u_i = 0$  时,电动机停止旋转,自耦变压器的中间抽头停止在某一位置上,此时电炉丝发出的热量正好和炉子的散热量达到动态平衡,炉温维持在给定值上。

在图 1.10 所示的炉温度控制系统中,被控对象是电加热炉,系统输出量是炉温,执行机构是功率放大装置、电动机和齿轮箱,测量装置是热电偶,给定和比较装置由电位器来完成。

容易看出,图 1.9 所示的发动机速度调节系统和图 1.10 所示的电加热炉温度控制系统可以做到转速和炉温的无差调节,即系统的调节过程结束以后,发动机转速和炉温等于设定值。

### 3) 火炮跟踪控制系统

图 1.11 展示了火炮跟踪系统的原理图,该系统的工作原理如下:

操炮手旋转瞄准转盘带动同位仪中给定多圈电位器的中间抽头来回滑动,误差电压信号经过功率放大器放大得到功率级的驱动电压加在驱动电动机上,电动机通过传动机构带动炮塔旋转,同时测量机构带动同位仪中转角测量电位器的中间抽头向相同方向滑动以减小误差电压,直到瞄准转盘转角等于炮塔的转角,误差电压为零,电动机停止转动。显然,图 1.11 所示的火炮跟踪系统可以实现对固定目标的无差调节。当操炮手跟随目标来回不断旋转瞄准转盘时,炮塔便随之同步快速旋转。当操炮手持续向一个方向旋转瞄准转盘时,其转速越快,驱动电动机的转速就越高,需要加在电动机上的电压也就越大,因为功率放大器的放大倍数总是有限的,因此误差电压也就越大,这说明图 1.11 所示的系统只能实现对运动目标的有差调节。

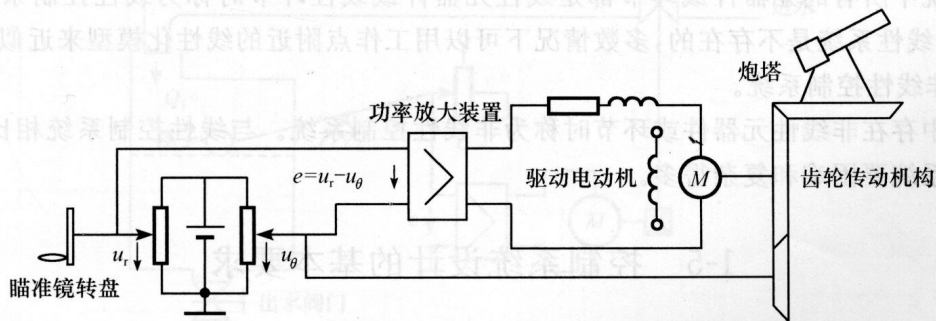


图 1.11 火炮跟踪控制系统原理图

在图 1.11 所示的火炮跟踪控制系统中,被控对象是炮塔,被控量是炮塔的旋转角,执行机构是功率放大装置、电动机和齿轮传动机构,给定、测量和比较装置是同位仪。

火炮跟踪系统的例子说明,同一控制系统响应不同指令信号的特性一般也是不同的。

## 1-4 控制系统分类

自动控制系统可以按照不同的方法进行分类,例如,按照控制方式可分为开环控制系统、

反馈控制系统、复合控制系统等；按执行机构的类型可分为机电系统、液压系统、气动系统等；按被控对象可分为温度控制系统、压力控制系统、运动控制系统、过程控制系统等。为了便于进行理论上的概括和抽象，一般根据指令信号的种类、系统中信号的采集和传递形式、系统分析和设计方法的不同对控制系统进行分类如下：

### 1) 按输入信号的特征分类

#### (1) 恒值控制系统。

被控量被稳定在一个恒定的数值上，如温度、压力、流量控制系统及调速系统等。

#### (2) 程序控制系统。

被控量按照事先预定的规律变化，如机械手、数控机床和加工中心的程序控制及自动化生产线的节拍控制等。

#### (3) 随动控制系统(又称伺服系统)。

指令随时间任意变化，被控量快速跟踪指令的变化，如函数记录仪、仿形车床的位置伺服控制系统、火炮和雷达跟踪控制系统等。

### 2) 按信号传输过程是否连续分类

#### (1) 连续时间控制系统。

系统中的控制量和测量量随时间连续变化，这样的系统称为连续时间控制系统，如所有由模拟调节器组成的控制系统都是连续时间控制系统。

#### (2) 离散时间控制系统。

系统被控量的测量只在离散的时间点上进行，控制作用只在离散的时间点上才改变，这样的系统称为离散时间控制系统，如所有计算机控制系统都是离散时间控制系统。

### 3) 按系统构成元件是否为线性分类

#### (1) 线性控制系统。

当系统中所有的元器件或环节都是线性元器件或线性环节时称为线性控制系统。实际中，真正的线性系统是不存在的，多数情况下可以用工作点附近的线性化模型来近似。

#### (2) 非线性控制系统。

系统中存在非线性元器件或环节时称为非线性控制系统。与线性控制系统相比，研究非线性控制系统要困难和复杂得多。

## 1-5 控制系统设计的基本要求

控制系统完成控制任务的优劣，可以从它对参考指令的动态响应和稳态响应性能，以及克服外部扰动对系统影响的能力两个方面来衡量。

控制系统对参考指令的动态响应特性集中反映了系统的稳定性和快速性，静态响应特性则主要体现了系统的控制精度，而抗扰性能要求控制系统在扰动输入作用下输出的动态和静态波动小，恢复时间短。

稳定性是指系统动态响应过程的收敛性和阻尼特性。如果在控制指令发生变化时，控制装置无法使被控对象跟随指令运行，偏差越来越大；或者，系统受到扰动时偏离了原来的工作状态，扰动去除后无法恢复，而是越偏越远，这样的系统称为不稳定系统。显然，不稳定的控制系统是无法完成控制任务的，稳定性是对控制系统的最基本要求。



在稳定的基础上,控制系统要求动态响应过程要有一定的阻尼,在振荡幅值和振荡频率方面都应该满足一定的设计要求。

快速性是指系统动态过程时间的长短。如果系统动态过程持续的时间过长,响应速度过慢,就无法及时对快速变化的指令信号做出反应。实际中,对于一定的被控对象,系统的稳定性和快速性往往是一对矛盾,系统设计的目的就是使这种矛盾得到合理的解决。高的快速性设计要求,往往导致高的能量损耗和高的系统磨损,因此过高的快速性设计要求,在实际中并不提倡。

控制精度是指系统动态过程结束进入稳定工作状态以后,或系统在扰动作用下进入稳定工作状态以后,被控量相对于给定值的偏差。高的控制精度往往要求系统执行机构和测量元件有较高的精度,系统的设计和制造成本都高。

总之,在控制工程实践中,各项设计指标间往往是相互制约、相互矛盾的。综合考虑各种因素的影响,科学妥善地解决这些矛盾,这也正是控制科学和控制工程师的任务和使命。

## 习 题

1-1 什么是开环控制系统?什么是闭环控制系统?比较开环控制系统和闭环控制系统的不同,说明各自的优缺点。

1-2 日常生活中反馈无处不在。人的眼、耳、鼻和各种感觉、触觉器官都是起反馈作用的。试以驾车行驶和伸手取物过程为例,说明人的眼、脑在其中所起的反馈和控制作用。

1-3 水箱水位控制系统的原理图如图 1.12 所示,图中浮子杠杆机构的设计使得水位达到设定高度时,电位器中间抽头的电压输出为零。描述图 1.12 所示水位调节系统的工作原理,指出系统中的被控对象、输出量、执行机构、测量装置、给定装置等。

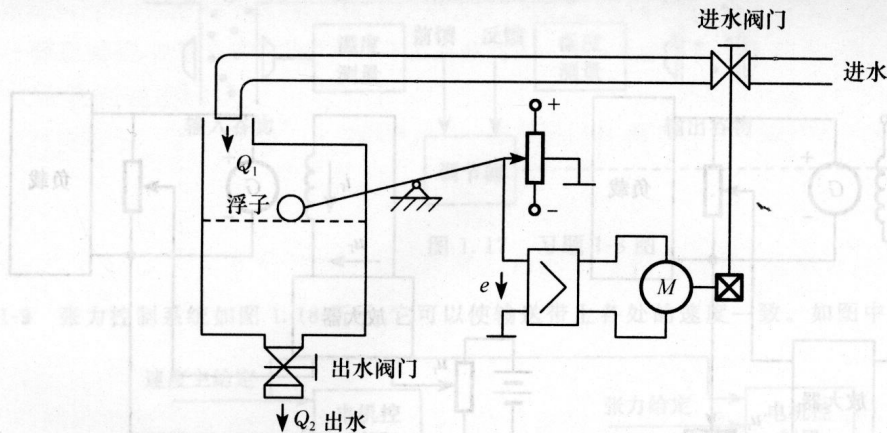


图 1.12 习题 1-3 图

1-4 工作台位置液压控制系统如图 1.13 所示,该系统可以使工作台按照给定电位器设定的规律运动。描述图 1.13 所示工作台位置液压控制系统的工作原理,指出系统中的被控对象、被控量、执行机构、给定装置、测量装置等。

1-5 图 1.14 的电加热炉温度控制系统与图 1.10 所示的有所不同,试描述系统的温度调节过程,它能做到加热炉温度的无差调节吗?为什么?