



高等学校电子信息类专业规划教材

# 自动控制原理

姚佩阳 主编

曹锦 常永昌 张科英 李峰 副主编



清华大学出版社  
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>



21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材

# 自动控制原理

姚佩阳 主 编  
曹 锦 常永昌 张科英 李 峰 副主编

清华大学出版社  
北京交通大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

本书是 21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材,内容包括经典控制理论和现代控制理论两部分。经典控制理论部分主要介绍控制理论方面的基本知识和必要的数学基础知识,包括拉普拉斯变换、线性控制系统数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、稳定性分析、控制系统的校正等;简单介绍非线性控制系统的描述函数法、相平面法。现代控制理论部分概括介绍现代控制理论的状态空间分析法、系统的能控性和能观测性。简单介绍 MATLAB 语言及其在控制系统的分析与设计中的应用。

本书可以作为高等院校电子信息类专业“自动控制原理”课程的教材,也可供从事相关专业的人员参考。

**版权所有,翻印必究。**

**本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。**

(本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。)

## 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/姚佩阳主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2005.3  
(21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材)  
ISBN 7-81082-500-3

I. 自… II. 姚… 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(2005)第 017315 号

责任编辑:崔晓静

出版者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:13.75 字数:329 千字

版 次:2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-81082-500-3/TP·183

印 数:1~5 000 册 定价:19.00 元

## 前 言

本书是根据高等院校培养适应 21 世纪人才的教学需要而编写的。全书共 10 章,包括经典控制理论和现代控制理论两部分。经典控制理论部分(第 1 章~第 8 章),以线性系统的时域分析法和频域分析法为主,适当介绍非线性控制系统的描述函数法、相平面法。现代控制理论部分(第 9 章),概括介绍现代控制理论的状态空间分析法、系统的能控性和能观测性。由于计算机在控制系统中的广泛应用,本书单列出第 10 章,简介 MATLAB 语言及其在控制系统的分析与设计中的应用,为读者学习和掌握自动控制原理提供了方便、快捷的实用工具。

在编写过程中,编者充分注意教材内容的精练和循序渐进,既注意精减篇幅,又注意保持本门课程的系统性、连续性,以便于自学。本书附有适量的例题和习题,以便读者能更好地掌握基本概念、基本理论以及分析与综合的基本方法。

本书由姚佩阳主编,冯新喜审阅,曹锦、常永昌、张科英、李峰等参加编写。刘作良、常国岑、周生炳、任昭东等同志对本书的编写给予热情的支持、关心和帮助,在此一并表示感谢!

限于时间和作者水平,书中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2005 年 1 月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	( 1 )
1.1 引言 .....	( 1 )
1.2 开环控制系统和闭环控制系统 .....	( 1 )
1.2.1 开环控制系统 .....	( 2 )
1.2.2 闭环控制系统 .....	( 3 )
1.3 自动控制系统的分类和组成 .....	( 5 )
1.3.1 自动控制系统的分类 .....	( 5 )
1.3.2 自动控制系统的组成 .....	( 6 )
1.4 控制系统的基本要求 .....	( 7 )
1.4.1 稳定性 .....	( 7 )
1.4.2 响应速度 .....	( 7 )
1.4.3 精确度 .....	( 8 )
习题 .....	( 8 )
第 2 章 数学基础 .....	( 9 )
2.1 拉普拉斯变换 .....	( 9 )
2.1.1 知识的回顾 .....	( 9 )
2.1.2 拉普拉斯变换的定义 .....	( 10 )
2.2 拉普拉斯变换定理 .....	( 12 )
2.2.1 平移函数 .....	( 12 )
2.2.2 $f(t)$ 与 $e^{-\alpha t}$ 相乘 .....	( 14 )
2.2.3 时间比例尺 .....	( 14 )
2.2.4 微分定理 .....	( 15 )
2.2.5 终值定理 .....	( 16 )
2.2.6 初值定理 .....	( 17 )
2.2.7 积分定理 .....	( 17 )
2.3 拉普拉斯反变换 .....	( 18 )
2.3.1 具有不相同极点的 $F(s)$ 的部分分式展开式 .....	( 19 )
2.3.2 具有共轭复数极点的 $F(s)$ 的部分分式展开式 .....	( 20 )
2.3.3 具有多重极点的 $F(s)$ 的部分分式展开式 .....	( 21 )
2.4 拉普拉斯变换法的应用 .....	( 23 )
第 3 章 控制系统的数学模型 .....	( 25 )
3.1 控制系统数学模型的建立 .....	( 25 )
3.1.1 概述 .....	( 25 )
3.1.2 线性控制系统数学模型的建立 .....	( 26 )

3.2 线性控制系统的传递函数	(28)
3.2.1 传递函数的概念	(29)
3.2.2 传递函数的几点说明	(31)
3.2.3 典型环节及其传递函数	(32)
3.3 结构图	(35)
3.3.1 结构图的组成	(35)
3.3.2 结构图的建立	(36)
3.3.3 结构图的等效变换	(37)
3.4 信号流图	(41)
3.4.1 信号流图及其组成	(41)
3.4.2 信号流图的绘制	(43)
3.4.3 梅逊增益公式	(45)
3.4.4 闭环控制系统的传递函数	(47)
习题	(48)
<b>第4章 时域分析法</b>	<b>(51)</b>
4.1 典型输入信号	(51)
4.2 阶跃响应的性能指标	(53)
4.2.1 动态过程	(53)
4.2.2 稳态过程	(54)
4.3 一阶系统时域分析	(54)
4.3.1 一阶系统的单位阶跃响应	(54)
4.3.2 一阶系统的单位脉冲响应	(55)
4.3.3 一阶系统的单位斜坡响应	(56)
4.4 二阶系统时域分析	(57)
4.4.1 二阶系统的单位阶跃响应	(58)
4.4.2 二阶系统的动态性能指标	(60)
4.5 控制系统的稳定性	(63)
4.5.1 稳定的基本概念	(63)
4.5.2 劳斯(Routh)判据	(64)
4.6 基于 MATLAB 的稳态误差分析	(67)
4.6.1 稳态误差的基本概念	(67)
4.6.2 误差传递函数	(68)
4.6.3 基于 MATLAB 的稳态误差分析	(70)
习题	(72)
<b>第5章 根轨迹法</b>	<b>(75)</b>
5.1 根轨迹方程	(75)
5.2 绘制根轨迹的基本法则	(78)
5.3 控制系统根轨迹分析	(84)
5.3.1 闭环系统零、极点与系统的阶跃响应	(85)

5.3.2	系统性能指标的估算	(86)
5.4	基于 MATLAB 的根轨迹绘制及分析	(87)
	习题	(91)
<b>第 6 章</b>	<b>频域分析法</b>	<b>(93)</b>
6.1	频率特性	(93)
6.1.1	频率特性的概念	(93)
6.1.2	频率特性的几何表示	(94)
6.2	典型环节的频率特性	(98)
6.3	稳定性判断	(104)
6.3.1	辐角原理	(104)
6.3.2	奈奎斯特稳定判据	(105)
6.3.3	对数频率稳定判据	(108)
6.4	稳定裕度	(109)
6.4.1	幅值裕度 $h$	(110)
6.4.2	相角裕度 $\gamma$	(111)
6.5	基于 MATLAB 的频率特性图绘制	(112)
	习题	(115)
<b>第 7 章</b>	<b>控制系统的校正</b>	<b>(119)</b>
7.1	控制系统校正的概念	(119)
7.1.1	时域分析法校正思想	(119)
7.1.2	频域分析法校正思想	(120)
7.2	串联校正	(121)
7.2.1	超前网络	(121)
7.2.2	迟后网络	(123)
7.2.3	复合网络	(125)
7.3	反馈校正	(130)
	习题	(133)
<b>第 8 章</b>	<b>非线性控制系统</b>	<b>(134)</b>
8.1	非线性问题概述	(134)
8.2	描述函数分析法	(135)
8.2.1	描述函数的概念	(135)
8.2.2	典型非线性特性的描述函数	(137)
8.2.3	用描述函数分析非线性系统的稳定性	(142)
8.3	相平面分析法	(144)
8.3.1	相轨迹的概念	(144)
8.3.2	线性系统的相轨迹	(145)
8.3.3	非线性系统的相轨迹	(149)
<b>第 9 章</b>	<b>状态空间分析法</b>	<b>(151)</b>
9.1	状态空间方程的建立	(151)

9.1.1	状态空间方程的概念 .....	(151)
9.1.2	状态空间方程的列写方法 .....	(153)
9.2	连续系统状态方程的解法 .....	(162)
9.2.1	时域解法 .....	(162)
9.2.2	复频域解法 .....	(163)
9.3	系统的能控性和能观测性 .....	(165)
9.3.1	能控性 .....	(165)
9.3.2	能观测性 .....	(168)
	习题 .....	(169)
<b>第 10 章</b>	<b>MATLAB 简介</b> .....	<b>(172)</b>
10.1	MathWorks 控制系统解决方案 .....	(172)
10.1.1	集成的系统设计环境 .....	(172)
10.1.2	MathWorks 产品支持控制流程的关键环节 .....	(173)
10.2	Simulink 与建模仿真 .....	(174)
10.2.1	Transfer Fcn(传递函数模块) .....	(174)
10.2.2	以零点—极点表示的传递函数模块 .....	(176)
10.2.3	增益模块 .....	(177)
10.2.4	偏移模块 .....	(178)
10.2.5	饱和度模块 .....	(179)
10.2.6	Mux(向量合成模块) .....	(181)
10.2.7	Constant(常数源模块) .....	(181)
10.2.8	Pulse Generator(脉冲信号发生器) .....	(182)
10.2.9	Ramp(“斜坡”信号) .....	(184)
10.2.10	Step(阶跃函数模块) .....	(185)
10.2.11	Clock(仿真时间模块) .....	(186)
10.2.12	Scope(示波器模块) .....	(187)
10.3	MATLAB 控制系统工具箱函数 .....	(189)
10.3.1	时域响应 .....	(189)
10.3.2	频域响应 .....	(193)
10.3.3	根轨迹 .....	(201)
<b>附录 A</b>	<b>工具箱命令参考</b> .....	<b>(205)</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>(209)</b>



# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。随着科学技术和工程技术的迅速发展,逐步形成了适应时代需求和要求的一门独立学科:控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论等。这样,自动控制理论和技术从工程技术学科领域(如机械、化工、电气、航空、航天、人工智能等)的理论研究及工程应用,渗透到了生物学(如生物工程等)、社会科学(如经济管理等)等领域,自动控制技术及其应用在科研工作和日常生活中扮演着重要的角色。

自动控制原理是控制论中工程控制论的一个分支,主要研究自动控制的基本理论和控制系统的分析、设计的基本方法。自动控制原理包括经典控制理论和现代控制理论两大部分。经典控制理论形成于20世纪50年代末,以描述系统输入/输出关系的传递函数为理论基础,主要研究单输入/单输出线性时不变系统的分析和设计。现代控制理论形成于20世纪60年代初,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,主要研究具有高性能、高精度的多输入/多输出、变参数系统的分析和设计。

应当指出,虽然现代控制理论解决了经典控制理论所不能解决的许多理论问题和工程问题,但绝不意味着经典控制理论已经过时。由于经典控制理论便于工程应用,这就意味着经典控制理论在自动控制技术的发展中将继续发挥其理论指导作用,而现代控制理论可以补其不足,共同推动自动控制技术和应用的发展。

## 1.2 开环控制系统和闭环控制系统

什么是自动控制?自动控制是指在没有人直接操作的情况下,利用控制装置使被控制对象(如机器、设备或生产过程)的某一物理量或工作状态自动地按照预定的规律运行或变化。这里的“自动控制”是相对于“人工操作”而言,例如:人造地球卫星在预定轨道上的运行,无人驾驶飞机自动地按预定航迹飞行,数控机床自动地按预定程序加工工件,化工生产过程中反应塔的温度或压力自动地保持恒定不变,机器人自动地按预定程序在危险的环境中工作等等,这些都是自动控制技术的典型应用。

什么是自动控制系统?下面首先明确系统的概念。系统是指若干个部件的组合,这些部件组合在一起完成一定的任务。应该指出,系统不局限于物理系统,还可以应用于抽象的动态现象。自动控制系统是指能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统。

自动控制系统一般由控制装置和被控制对象组成。被控制对象(简称被控对象)是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程,例如人造地球卫星、飞机、机床以及化工生产过程等。控制装置是指对被控对象起控制作用的设备总体,包括测量装置、比较装置、放大装置

和执行机构等。自动控制系统的组成和功能是多种多样的,它可以是只控制一个物理量(如温度、压力、电压等)的简单系统,也可以是包括一个企业、机构全部过程的复杂系统;可以是一个具体的工程系统,也可以是抽象的社会系统、生态系统或经济系统等。

自动控制的基本方式通常有开环控制方式、闭环控制方式和复合控制方式,而复合控制方式就是开环控制方式和闭环控制方式相结合的一种控制方式。本节主要讨论开环控制系统和闭环控制系统。

### 1.2.1 开环控制系统

开环控制系统是指组成系统的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系统。也就是说,开环控制系统的输出量对系统的控制作用没有任何影响。下面通过一个开环控制系统的例子来说明。

图 1-1 为电烤箱开环控制示意图,它由电阻丝、电键 K、电源 E、导线、箱体等组成。电键 K 受时间继电器的控制,当按照预先设定的时间接通电源 E 时,电烤箱内的温度升高,一旦达到所设定的时间,电源 E 就断开,因此实现了对电烤箱内温度的控制,使其保持在希望值的一定范围内。

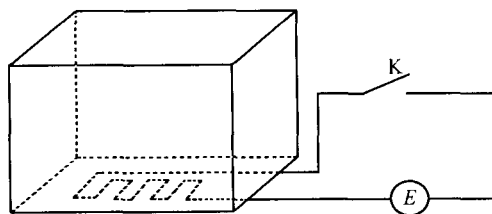


图 1-1 电烤箱开环控制示意图

这里,被控对象是电烤箱;控制装置是电键 K 和电阻丝,这是因为电键 K 和电阻丝一起对被控制量起到了控制作用。另外,电烤箱内的温度是要求实现自动控制的物理量,通常称为被控制量或输出量;预先设定的接通或断开电源 E 的时间,称为输入信号或输入量。图 1-2 给出了电烤箱开环控制的方框图。

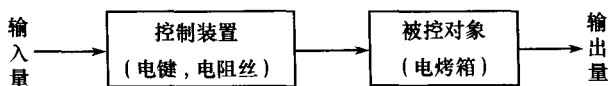


图 1-2 开环控制系统的方框图

在图 1-2 中,控制装置与被控对象分别用方框表示;系统中感兴趣的物理量,如电流、电压、温度、力等称为信号,信号的传递方向用箭头表示;进入方框的箭头表示输入信号(或称输入量),离开方框的箭头表示输出信号(或称输出量);控制系统的输出量就是被控制量,它的希望值一般是系统输入信号的函数。

需要指出,电键 K 接通或断开电源的时间,通常是参照在正常情况下电烤箱内温度可以达到希望值的经验数据来确定的,这时实际温度可能稍高于或稍低于希望值,一般来说还是能满足恒温要求。但是,如果工作条件发生变化,例如电烤箱门的开闭次数增加,则电烤箱内热量的散失情况会超出事先估计的范围,此时电烤箱内的实际温度将不再等于希望值,而出

现偏差。这种使输出量(电烤箱内的实际温度)偏离希望值的因素(电烤箱门的开闭)称为对系统的扰动或干扰。

扰动是一种对系统的输出量产生相反作用的信号。如果扰动产生在系统的内部,则称为内扰;如果扰动产生在系统外部,则称为外扰。外扰是系统的输入量。

在开环控制中,控制装置(电键,电阻丝)只是按照给定的输入信号对被控对象(电烤箱)进行单向控制,而不对输出量进行测量并反向影响控制作用。对于系统的每一个输入信号,必定有一个固定的工作状态和一个系统输出量与之对应。例如,一定的时间间隔对应于电阻丝的一个通电和断电状态以及相应的温度值,这种对应关系调整得越准确,元件的参数及性能变化就越小,开环系统的工作精度相应就会越高。但是,当电烤箱内的温度由于受干扰等因素的影响而偏离希望值后,电键K的接通或断开时间不会做出相应地调整。因此,开环控制系统不具有修正由于扰动而出现的输出量与输入量(希望值)之间偏差的能力,即开环控制系统的抗扰动能力差,因此它的应用有一定的局限性。

常见的开环控制系统有自动售货机、全自动洗衣机、指挥道路的红绿灯、数控车床、工业产品生产自动线等。

### 1.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用,又有反向联系的控制系统。也就是说,闭环控制系统的输出量对系统的控制作用产生直接影响。通常,把输出量送回到输入端并与输入信号相比较的过程称为反馈。若反馈信号与输入信号相减而使偏差值越来越小,则称这种反馈为负反馈;反之,则称为正反馈。

反馈控制系统是一种能对输出量与参考输入量进行比较,并力图保持两者之间既定关系的系统。应当指出,反馈控制系统是对预先无法知道的扰动而设计的,而对于那些可以预计或者已知的扰动,一般可以在系统中加以校正。

负反馈控制是一种利用输入信号和反馈信号的偏差进行控制并最后消除偏差的控制过程。在扰动存在的情况下,负反馈控制能够力图减小系统的输出量与希望的输入量或者任意变化的希望状态之间的偏差,而且其工作也正是基于这个偏差的基础上。由于反馈的存在,使得整个控制过程是闭合的,因此负反馈控制也称为闭环控制,通常所说的闭环控制系统往往是指负反馈控制系统。

在闭环控制系统中,反馈信号可以是输出信号本身,也可以是输出信号的函数或导数,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装置上,以减小系统的误差,并使系统的输出量趋于希望值。下面通过一个闭环控制系统的例子来说明。

图1-3为电烤箱闭环控制示意图,它由接触式水银温度计、电阻丝、继电器、电源( $E_1$ 、 $E_2$ )、导线、箱体等组成。在接触式水银温度计上设置两个触点 $a$ 和 $b$ ,并将它们接在继电器的线圈电路中。假设触点 $b$ 处的刻度值对应于预先设定的电烤箱内的温度值,当继电器的触点K使电阻丝接通电源 $E_1$ 时,电烤箱内的温度升高,接触式水银温度计的水银柱上升,一旦水银柱上升到触点 $b$ 处,继电器的线圈电路闭合,使继电器启动触点K而切断电阻丝的电源 $E_1$ ,电烤箱内的温度不再升高。当电烤箱内的温度降低时,水银柱下降,继电器的线圈电路断开,这时继电器的触点K又使电阻丝接通电源 $E_1$ ,电烤箱内的温度升高,达到希望的温度值。这样反反复复的调整,就实现了电烤箱内温度的自动控制,使其保持在温度的希望值上。

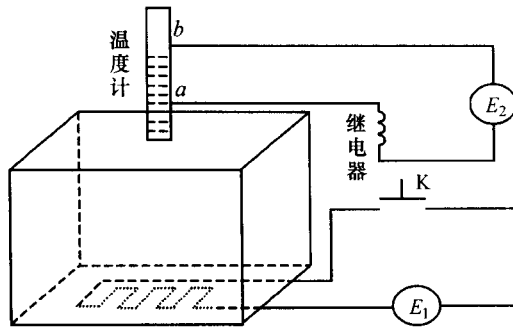


图 1 - 3 电烤箱闭环控制示意图

这里,输入量是电烤箱内温度的希望值;输出量是电烤箱内温度的实际值;被控对象是电烤箱;控制装置是水银温度计、继电器和电阻丝。图 1 - 4 给出了电烤箱闭环控制的方框图。在系统中,用温度计测量电烤箱内的温度,并与温度的希望值进行比较,一旦出现偏差,就通过继电器和电阻丝进行控制,以消除偏差,保持电烤箱内温度的恒定。偏差的消除,只有负反馈控制能够达到,而正反馈控制会使偏差越来越大。在控制装置中,温度计起测量和比较作用,它既是测量装置,又是比较装置。

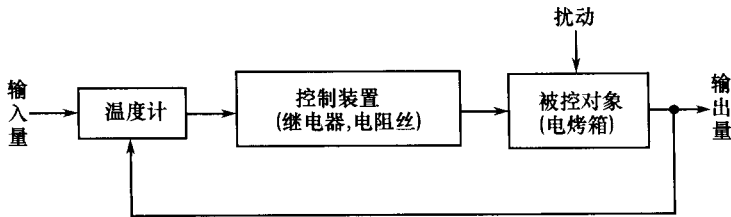


图 1 - 4 闭环控制系统的方框图

在闭环控制系统中,被控制量一般是由测量装置进行测量并反馈到输入端,然后由比较装置将它与输入信号进行综合而得到偏差或误差。有时,被控制量的测量与综合是由同一个装置完成的,因此往往把测量装置和比较装置合称为误差检测器,用符号“⊗”表示。图 1 - 5 为闭环控制系统的典型方框图,其中用符号“-”表示负反馈。

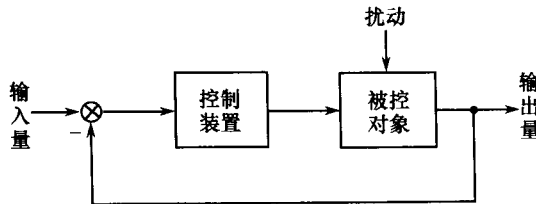


图 1 - 5 闭环控制系统典型方框图

必须指出,只有按负反馈原理组成的闭环控制系统才能实现自动控制的任务。与电烤箱开环控制系统相比,电烤箱闭环控制系统采用了接触式水银温度计作为误差检测器,可以不断地对电烤箱内温度进行测量和比较,从而根据实际的误差进行控制,提高了系统抗扰动的

能力。

一般来说,开环控制系统结构简单、成本低廉、工作稳定,特别是当系统的输入信号及扰动作用能预先知道时,采用开环控制可以取得较为满意的效果。但是,开环控制不能自动修正被控制量的偏离,抗扰动能力差。闭环控制系统具有自动修正被控制量出现偏差的能力,可以修正元件参数变化以及外界扰动引起的误差,控制精度较高。然而,闭环控制系统也有不足之处,这就是被控制量可能出现振荡,严重时会使系统无法工作。闭环控制系统中的“振荡”或“发散”问题是自动控制系统设计的重要课题之一。

## 1.3 自动控制系统的分类和组成

自动控制系统的种类很多,它们具有不同的结构和性能,完成不同的控制任务,应用范围也十分广泛。

### 1.3.1 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法有很多种,下面介绍几种常用的分类方法。

#### 1. 线性控制系统和非线性控制系统

按照描述系统的数学模型不同可分为:线性控制系统和非线性控制系统。在自动控制系统中,线性控制系统的数学模型(又称运动方程)用线性代数方程式、线性微分方程式、线性差分方程式等来描述,其主要特点是组成系统的元器件都是线性的,并且系统的响应与初始状态无关,系统的稳定性与输入信号无关,满足均匀性和叠加性。

如果组成线性控制系统的元器件参数都是不随时间变化的常数,则系统的数学模型是系数均为常数的线性微分方程式,并称这样的线性控制系统为定常线性控制系统或线性时不变系统。本教材主要讨论的就是这类系统。

如果组成控制系统的元器件至少有一个是非线性的,则称这样的控制系统为非线性控制系统。在非线性控制系统中,系统的响应与初始状态有极大的关系,不能运用叠加原理。

#### 2. 连续控制系统和离散控制系统

在自动控制系统中,按照系统中传送信号的性质不同可分为:连续控制系统和离散控制系统。

所谓连续控制系统是指系统中各部分信号都是连续函数形式的模拟量。连续控制系统有线性连续控制系统和非线性连续控制系统两类。

离散控制系统是指在系统中至少有一处的信号是脉冲序列或数码形式。描述离散控制系统的运动方程是差分方程式,离散控制系统有线性离散控制系统和非线性离散控制系统两类。

#### 3. 自动调节系统和随动系统

按照系统输入信号的变化规律可分为:自动调节系统和随动系统。

自动调节系统(又称自动调整系统或自动稳定系统)是一种反馈控制系统,它的基本作用在于使系统的输出量不受扰动等因素的影响而保持恒定。也就是说,在存在扰动的情况下,将系统的实际输出量保持在希望数值上。这类系统的输入信号在一段时间内为常量,称为参考信号或基准信号。

随动系统(又称跟踪系统)也是一种反馈控制系统,它的基本作用在于使系统的输出量能够不受扰动等因素的影响而及时、准确地随着输入量的变化而变化。也就是说,在存在扰动的情况下,将系统的实际输出量与输入量的偏差控制到最小。这类系统的输入信号通常是时间的不确定函数,随工作要求等变化。

### 1.3.2 自动控制系统的组成

通过上面的学习知道,闭环控制系统是一种能够实现自动控制的系统,以后主要讨论的自动控制系统就是指闭环控制系统。任何一个闭环控制系统,尽管它由不同的元件组成,系统的功用也不一样,但都是采用了负反馈工作原理。相同的工作原理决定了它们必然具有类似的结构。因此,闭环控制系统可以粗略地看做由误差检测器、控制装置和被控对象三大部分组成。按照闭环控制系统各组成元件或装置的具体作用,又可分为测量装置、比较装置、放大装置和执行机构等。

图 1-6 所示是一个典型的自动控制系统基本组成方框图,系统的基本组成元件或装置和被控对象都用方框表示;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;符号“ $\oplus$ ”表示误差检测器;“-”号表示输入信号与反馈的信号相减,即负反馈。

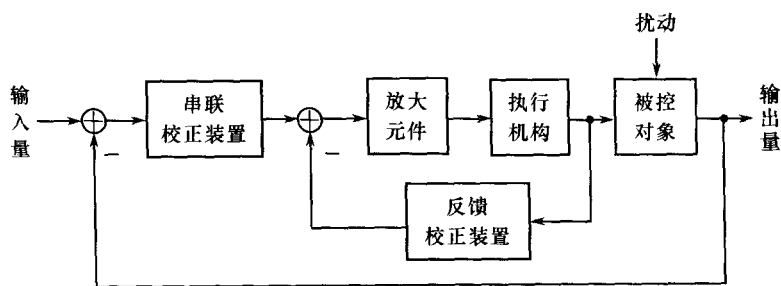


图 1-6 自动控制系统的组成

自动控制系统的组成元件或装置的基本功能如下。

(1) 误差敏感元件。它的作用是对系统输出量进行测量,并将系统的输出量与输入信号转化为同一物理量(一般为电量)并进行比较,得到偏差(或误差)信号,用来控制后级。误差敏感元件对信号起综合作用,这个作用往往是由测量元件和比较元件共同完成,简称综合器或比较器,用符号“ $\oplus$ ”表示。

(2) 放大元件。它的作用是实现对前级微弱的偏差信号的放大和变换,输出具有足够功率和满足要求的物理量,用来推动后级的执行机构。

(3) 执行机构。它的作用是在前级送来的信号控制下,完成对被控对象的控制任务,使执行机构按照输入信号的要求进行工作。

(4) 被控对象。它是自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象中要求实现自动控制的物理量称为被控制量或系统输出量。

(5) 校正装置。它的作用是用来改善个别元件或装置的工作性能,也可以用于改善系统的性能。校正装置包括串联校正装置和反馈校正装置。

在图 1-6 中,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,如放大元件、执行机构、反馈校正装置和综合器构成的内回路。只有一条反馈通路的闭环控制系统称单回路系统,有两条以上反馈通路的闭环控制系统称为多回路系统。

在实际控制系统中,扰动总是不可避免的,它可以作用于系统中的任何部位。控制系统通常受两种外作用,即有用的输入信号和扰动,它们都是系统的输入信号。系统的有用输入信号决定系统被控制量的变化规律,而扰动是系统不希望的外作用。一般情况下,扰动破坏了有用信号对系统输出量的控制。应当指出,通常所说的系统输入信号,一般是指有用信号。

## 1.4 控制系统的基本要求

对于任何一个能够正常工作的控制系统,首先必须是稳定的,这是对控制系统的—个基本要求。除了具有绝对的稳定性,控制系统还必须具有适当的相对稳定性,也就是说,系统响应速度必须相当快,同时响应还应当有合理的阻尼。另外,控制系统应能使系统的误差减小到零或减少到某一允许的最小范围,也就是说,系统的精确度必须相当高。只有满足上述这些基本要求——稳定性好、响应速度快、精确度高的控制系统,才是有实用价值的控制系统。

### 1.4.1 稳定性

自动控制系统是一种具有反馈作用的闭环控制系统,从结构上讲,系统的输出量通过反馈支路反馈到系统的输入端,并利用其与输入信号的偏差对系统进行控制,这就有可能使系统出现振荡。如果随着时间的增加系统振荡的振幅是逐渐减小的,并很快恢复到原来的静止状态,则称这种振荡为衰减振荡,这时系统是稳定的;反之,随着时间的增加系统振荡的振幅是恒值或者是逐渐增加的,则称为等幅振荡或发散幅振,这时的系统振荡不止或振荡愈演愈烈,那么系统是不稳定的。

系统稳定性包括两层含义,分别称为绝对稳定性和相对稳定性。绝对稳定性就是通常所说的稳定性,即系统稳定;而相对稳定性是指系统的输出相应振荡的强烈程度。考虑到实际系统中元器件的参数和特性都会产生一些变化,因此对于控制系统来说,它不但必须是稳定的,而且还必须具有一定的稳定裕度,这样才有可能保证系统的稳定。

### 1.4.2 响应速度

在自动控制系统的实际工作中,不仅要求系统必须是稳定的,而且要求系统的被控制量能够迅速地按照输入信号所规定的形式变化,也就是说,要求系统具有一定的响应速度。

对于自动控制系统,它受到的外作用是多种多样的,既有确定性外作用,又有随机性外作用。对不同形式的外作用,系统有不同的输出特性,一般称为响应特性。控制系统在没有受到外作用时总是处于一个稳定的平衡状态,系统的输出亦保持其原来的状态不变。可是,当系统受到外作用时,其输出将会发生相应变化。由于系统中总是包含具有惯性或储能特性的元件,因此系统的输出量不可能立刻按希望的规律变化,而是要经过一段过渡过程,然后才

能达到稳态,这个过渡过程称为暂态过程。系统在暂态过程中的工作情况,就反映了系统的响应速度。

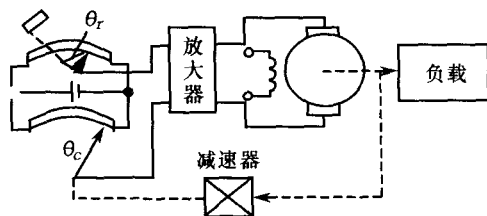
### 1.4.3 精确度

控制系统的精确度一般用系统在稳态工作时的误差来衡量。系统在输入信号的作用下,其输出响应经过暂态过程进入某种稳态后,系统的输出量与希望值之间存在的误差叫做稳态误差。

由于闭环控制系统的工作建立在偏差控制的基础上,因此要求系统没有误差是不可能的。另外,控制系统产生的误差还有:与控制系统的组成结构和输入信号的性质有关的系统本身的原理性误差;由控制系统的组成结构和元器件的特性不够完善以及非线性等因素引起的误差;在控制系统的内部或外部存在的各种干扰所产生的误差。

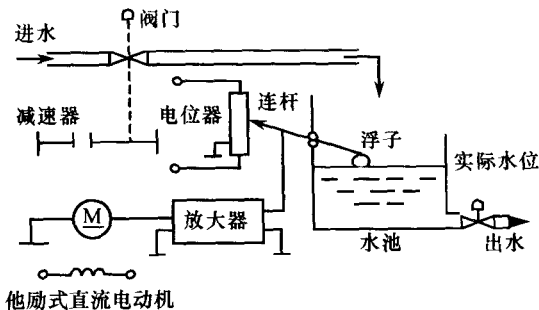
## 习 题

- 1-1 举出几个日常生活中的开环控制系统和闭环控制系统的例子,并说明其工作原理。
- 1-2 习题图 1-2 所示为一随动系统。试说明其工作原理,并画出其原理方框图。



习题图 1-2

- 1-3 习题图 1-3 所示为水位自动控制系统的示意图。试说明系统的工作原理,并画出其原理方框图。



习题图 1-3



## 第2章 数学基础

拉普拉斯变换法是一种解线性微分方程的简便运算方法。利用拉普拉斯变换,能使许多普通函数(如正弦函数、指数函数)转换成复变数的代数函数,微积分的运算可以由在复平面内的代数运算代替。这样,线性微分方程就转换成复变数的代数方程,解微分方程就可以同时获得解的瞬态分量和稳态分量。

### 2.1 拉普拉斯变换

#### 2.1.1 知识的回顾

在学习时间函数  $f(t)$  的拉普拉斯变换之前,先简单地回忆一下复变数和复变函数的知识。

一个复变数  $s$ ,它具有一个实部  $\sigma$  和一个虚部  $j\omega$ ,即

$$s = \sigma + j\omega$$

该复变数可以用在  $s$  平面上的一个点来表示。图 2-1 表示复变数  $s_1 = \sigma_1 + j\omega_1$  作为一个点  $s_1$  在  $s$  平面上的位置。

一个复变函数  $G(s)$  是  $s$  的函数,它有一个实部  $\operatorname{Re}G(s) = G_x$  和一个虚部  $\operatorname{Im}G(s) = G_y$ ,即

$$G(s) = G_x + jG_y$$

式中,  $G_x$  和  $G_y$  都是实数。复变函数  $G_x + jG_y$  的模和辐角分别由  $\sqrt{G_x^2 + G_y^2}$  和  $\arctan(G_y/G_x)$  确定。辐角从正实轴开始度量,并规定逆时针方向为测量的正方向。图 2-2 表示复变函数  $G(s)$  在复平面的位置。

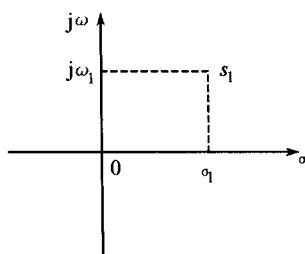


图 2-1  $s$  平面和复变数的点

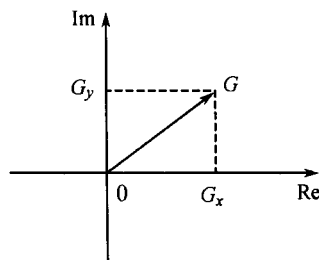


图 2-2 复平面和复数量的点

复变函数  $G(s) = G_x + jG_y$  的共轭复数定义为  $\bar{G}(s) = G_x - jG_y$ 。复数和它的共轭复数具有相同的实部,但是虚部则是另一个虚部的负数。

在线性控制系统中,通常用到的复变函数  $G(s)$  是  $s$  的单值函数,并且对应于  $s$  的一个