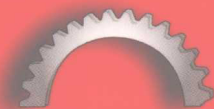




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



机械设计制造及其自动化

专业系列教材

# 控制工程基础

(第二版)

主编 王积伟 吴振顺



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械设计制造及其自动化专业系列教材

# 控制工程基础

Kongzhi Gongcheng Jichu

(第二版)

主 编 王积伟 吴振顺



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书是在 2001 年第一版的基础上修订而成的,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,机械设计制造及其自动化专业系列教材之一,也是教育部新世纪网络课程的主要参考书。

全书共分 8 章:第 1 章控制系统的基本概念,第 2 章数学模型,第 3 章时域分析法,第 4 章频域分析法,第 5 章控制系统的设计和校正,第 6 章线性离散系统与 Z 变换,第 7 章状态空间分析法,第 8 章控制系统的应用和分析。书末附有 5 个附录。每章附有习题,附录 E 有习题参考答案。

本书的特点是:淡化经典控制与现代控制的界限,突出方法论;重点阐述共性问题,适应拓宽专业口径的需要;不苛求严格的数学推证,从直观的物理概念出发分析问题、解决问题;特别重视工程应用,除每章附有较多机、电、液、气方面的例题外,还专辟一章介绍控制理论在工程中应用的成功实例;取材新颖,采用 MATLAB 与 SIMULINK 等先进软件分析和设计系统;编写体系符合教学规律,好教易学;传授科学与培养创新能力并重。

本书可作为高等学校机械类专业控制工程基础课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/王积伟,吴振顺主编. —2 版. —北京:  
高等教育出版社,2010.5

ISBN 978-7-04-029108-7

I. ①控… II. ①王… ②吴… 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 051548 号

策划编辑 卢广 责任编辑 卢广 封面设计 李卫青 责任绘图 尹莉  
版式设计 马敬茹 责任校对 俞声佳 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京七色印务有限公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 25  
字 数 610 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2000 年 8 月第 1 版  
2010 年 5 月第 2 版  
印 次 2010 年 8 月第 2 次印刷  
定 价 42.30 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究  
物料号 29108-00

## 第二版前言

本书第二版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,机械设计制造及其自动化专业系列教材之一,也是教育部新世纪网络课程的主要参考书。

本书第一版自2001年出版以来,受到读者普遍欢迎,先后重印14次,被众多高等院校选为教材,并用作考研主要参考书。近几年来,控制理论的工程应用越来越广泛,教育改革越来越深入,对控制工程基础课程教材的要求越来越高,而且MATLAB与SIMULINK软件的使用越来越普及。因此,在这种背景下对本书进行一次全面修订是适时和必要的。

本次教材修订工作是在总结作者和一线授课教师多年来教学经验的基础上,结合使用本书读者的意见与建议,借鉴同类优秀教材的长处而展开的。

修订工作的思路和做法如下:

1) 考虑到教材的连贯性和读者的使用习惯,本次修订尽可能保持原有特色和风格。全书的编排体系、章节和习题基本不变,仅根据教学要求作些微调。

2) 按照由浅入深、循序渐进的教学规律,根据不同学时的教学要求,采取标注“\*”的办法,分40和60两种不同讲课学时安排教学内容,使教材更加好教易学(标注“\*”的章节供60讲课学时专业或学生自学使用)。但是仍保持各自教学的系统性和完整性。

3) 对教材进行全面梳理,删除一些陈旧的内容和提法。在相应章节中增加了MATLAB与SIMULINK软件在控制工程中应用的实例,使控制系统的分析和设计更直观、更简便、更精确。

4) 对书中的插图进行全面审查和清理,更正了第一版中的错误,并使其更加规范化。

本次教材修订工作由王积伟和吴振顺完成。由于作者水平和时间所限,书中仍难免存在错误和不妥之处,继续恳请广大读者不吝指正。

作者

2009年5月于南京

# 第一版前言

本书是机械设计制造及其自动化专业系列教材之一,也是教育部新世纪网络课程的主要参考书。

本书是在编者几十年教学和科研工作的基础上,总结编写同类教材的经验并吸取国内外有关本课程领域内最新的教学和科研成就,精心组织编写而成。具体内容包括:控制系统的基本概念,数学模型,时域、频域和状态空间分析法,系统设计和校正,线性离散系统,控制系统的应用和分析以及附录等。

本书在编写过程中,始终贯彻少而精、系统性和学以致用原则,着重考虑了以下几个方面:

(1) 淡化经典控制与现代控制的界限,把两者有机地结合起来;主要介绍基本概念、基本原理和基本方法,突出方法论。

(2) 重点阐述共性问题,符合拓宽专业口径和增强培养人才适应性的需要;采用启发式编写方法,以培养学生的创新能力。

(3) 不苛求严格的数学推证,从比较直观的物理概念出发提出问题、分析问题和解决问题。

(4) 特别重视工程应用。书中除每章附有较多机、电、液、气方面的例题外,还专门辟出一章介绍和分析控制理论在工程中应用的成功实例。

(5) 全书取材新颖,舍弃陈旧的内容。尽量采用 MATLAB 等先进的分析和计算软件,使工程应用真正落到实处。

(6) 编写体系符合教学规律,好教易学。论述上深入浅出,层次分明,推理清楚,简单明了。每章配备经过精选的习题,书末附有参考答案。

本书适用于普通工科院校机械类各专业,也适用于其他各类成人高校、职业技术学院、电大、自学考试有关专业,并可供从事自动控制和控制工程的科技工作者参考。

本书由王积伟、吴振顺任主编。参加本书编写的有:东南大学王积伟(第1、2章,附录A和E),北京科技大学吕卫阳(第3章),天津大学王树新(第4章),哈尔滨理工大学王振波(第5章),哈尔滨工业大学吴振顺(第6、7章,附录B、C、D),东北大学张健成(第8章)。全书由王积伟修改定稿。

本书由西安交通大学博士生导师何钺教授主审。参加审稿的还有清华大学腾云鹤教授、北京工业大学薛文贤教授等。他们对本书提出了许多宝贵意见和建议。哈尔滨工业大学李松晶博士提供了第6、7章的习题和参考答案。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不少缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

作者

2001年4月

# 目 录

第 1 章 控制系统的基本概念 .....	1	2.4.4 控制系统的传递函数 .....	54
1.1 控制系统的工作原理及其组成 .....	1	*2.5 非线性数学模型的线性化 .....	56
1.1.1 工作原理 .....	1	2.5.1 线性化问题的提出 .....	56
1.1.2 开环控制和闭环控制 .....	3	2.5.2 非线性数学模型的线性化 .....	57
1.1.3 闭环控制系统的组成 .....	4	2.5.3 系统线性化微分方程的建立 .....	58
1.2 控制系统的基本类型 .....	5	2.6 控制系统传递函数推导举例 .....	60
1.2.1 按输入量的特征分类 .....	5	2.6.1 机械系统 .....	60
1.2.2 按系统中传递信号的性质分类 .....	7	2.6.2 液压系统 .....	65
1.3 对控制系统的基本要求 .....	7	2.6.3 液位系统 .....	67
1.4 控制工程发展概况 .....	8	2.6.4 机电系统 .....	69
习题 .....	9	2.6.5 热力系统 .....	71
第 2 章 数学模型 .....	10	习题 .....	72
2.1 控制系统的运动微分方程 .....	10	第 3 章 时域分析法 .....	77
2.1.1 建立数学模型的一般步骤 .....	10	3.1 典型输入信号 .....	77
2.1.2 控制系统微分方程的列写 .....	11	3.2 一阶系统的时间响应 .....	78
2.2 拉氏变换和反变换 .....	15	3.2.1 一阶惯性环节的单位阶跃响应 .....	79
2.2.1 拉氏变换的定义 .....	15	3.2.2 一阶惯性环节的单位速度响应 .....	80
2.2.2 几种典型函数的拉氏变换 .....	16	3.2.3 一阶惯性环节的单位脉冲响应 .....	80
2.2.3 拉氏变换的主要定理 .....	18	3.2.4 线性定常系统时间响应的性质 .....	81
2.2.4 拉氏反变换 .....	21	3.3 二阶系统的时间响应 .....	81
2.2.5 应用拉氏变换求解线性微分方程 .....	29	3.3.1 二阶系统的单位阶跃响应 .....	83
2.3 传递函数 .....	31	3.3.2 二阶系统的性能指标 .....	87
2.3.1 传递函数的概念和定义 .....	31	3.4 高阶系统的时间响应 .....	93
2.3.2 特征方程、零点和极点 .....	32	3.5 误差分析和计算 .....	95
2.3.3 关于传递函数的几点说明 .....	33	3.5.1 稳态误差的基本概念 .....	95
2.3.4 典型环节及其传递函数 .....	33	3.5.2 稳态误差的计算 .....	96
2.4 系统框图和信号流图 .....	43	3.5.3 稳态误差系数 .....	97
2.4.1 系统框图 .....	43	3.5.4 扰动引起的稳态误差和系统总误差 .....	102
2.4.2 系统框图的简化 .....	47	3.6 稳定性分析 .....	104
2.4.3 系统信号流图和梅森公式 .....	51	3.6.1 稳定的概念 .....	104

标有“\*”的章节供 60 讲课学时专业或学生自学使用。

3.6.2 稳定的条件 .....	105	之间的关系 .....	166
3.6.3 劳思稳定判据 .....	107	4.6.2 开环频域指标与时域性能指标 之间的关系 .....	166
3.7 基于 MATLAB 与 SIMULINK 的 时域特性分析 .....	112	4.7 用系统开环频率特性分析闭环 系统性能 .....	168
3.7.1 基于 MATLAB 的时域特性 分析 .....	112	4.7.1 低频段 .....	168
3.7.2 基于 SIMULINK 的时域特性 分析 .....	118	4.7.2 中频段 .....	169
习题 .....	124	4.7.3 结论 .....	171
<b>第 4 章 频域分析法</b> .....	126	4.8 基于 MATLAB 与 SIMULINK 的 频域特性分析 .....	172
4.1 频率特性的基本概念 .....	126	4.8.1 基于 MATLAB 的频域特性 分析 .....	172
4.1.1 频率响应和频率特性 .....	126	4.8.2 基于 SIMULINK 的频域特性 分析 .....	177
4.1.2 频率特性的求取方法 .....	128	习题 .....	181
4.1.3 频率特性的图示方法 .....	128	<b>第 5 章 控制系统的设计和校正</b> .....	186
4.2 典型环节的频率特性 .....	130	5.1 概述 .....	186
4.2.1 比例环节 .....	130	5.2 PID 控制规律 .....	187
4.2.2 惯性环节 .....	130	5.2.1 P 控制(比例控制) .....	188
4.2.3 积分环节 .....	133	5.2.2 PI 控制(比例加积分控制) .....	189
4.2.4 理想微分环节 .....	134	5.2.3 PD 控制(比例加微分控制) .....	190
4.2.5 振荡环节 .....	135	5.2.4 PID 控制(比例加积分加微分 控制) .....	191
4.2.6 一阶微分环节 .....	137	5.3 PID 控制规律的实现 .....	193
4.2.7 二阶微分环节 .....	138	5.3.1 PD 控制规律的实现 .....	193
4.2.8 延迟环节 .....	139	5.3.2 PI 控制规律的实现 .....	195
4.3 系统开环频率特性 .....	141	5.3.3 PID 控制规律的实现 .....	197
4.3.1 最小相位系统 .....	141	5.3.4 小结 .....	200
4.3.2 系统开环尼氏图的绘制 .....	142	5.4 频率法设计和校正 .....	201
4.3.3 系统开环博德图的绘制 .....	144	5.4.1 PID 校正网络参数的确定 .....	201
4.3.4 传递函数实验确定法 .....	147	5.4.2 近似 PID 校正网络的参数 确定 .....	205
4.4 频域稳定性判据 .....	150	5.5 并联校正和复合控制 .....	212
4.4.1 尼奎斯特稳定性判据 .....	150	5.5.1 并联校正(反馈校正) .....	212
4.4.2 对数频率特性的稳定性判据 .....	157	5.5.2 复合控制 .....	215
4.4.3 稳定性裕量 .....	158	5.6 基于 MATLAB 与 SIMULINK 的 控制系统设计与校正 .....	218
4.5 闭环控制系统的频率特性 .....	161	5.6.1 基于 MATLAB 的控制系统设计	
4.5.1 闭环系统频率特性的求取 .....	161		
4.5.2 闭环系统的频域指标 .....	164		
4.6 频域指标与时域性能指标间的 关系 .....	165		
4.6.1 闭环频域指标与时域性能指标			

与校正 .....	218	方程 .....	271
5.6.2 基于 SIMULINK 的控制系统 设计与校正 .....	222	7.2.1 由系统微分方程列写状态方程 及输出方程 .....	271
习题 .....	229	7.2.2 由系统状态变量图列写状态方程 及输出方程 .....	279
* 第 6 章 线性离散系统与 Z 变换 .....	232	7.2.3 由系统框图直接列写状态方程 及输出方程 .....	282
6.1 概述 .....	232	7.2.4 非线性系统的状态方程及输出 方程 .....	286
6.2 采样过程与采样定理 .....	234	7.2.5 时变线性系统的状态方程及 输出方程 .....	290
6.2.1 采样过程 .....	234	7.3 离散系统的状态方程及输出 方程 .....	291
6.2.2 采样定理 .....	235	7.3.1 作用函数不含未来值 .....	292
6.2.3 信号恢复 .....	236	7.3.2 作用函数含未来值 .....	293
6.3 Z 变换与 Z 反变换 .....	238	7.4 控制系统状态方程的解 .....	296
6.3.1 Z 变换 .....	238	7.4.1 连续系统状态方程的解 .....	296
6.3.2 Z 反变换 .....	242	7.4.2 离散系统状态方程的解 .....	313
6.3.3 连续系统的离散化方程 ——差分方程 .....	246	7.4.3 连续系统状态方程的离散化 .....	320
6.3.4 用 Z 变换法求解差分方程 .....	248	7.5 系统状态方程的计算机辅助 分析 .....	324
6.4 脉冲传递函数 .....	249	7.5.1 连续系统状态方程的数值积分 程序 .....	324
6.4.1 脉冲传递函数 .....	249	7.5.2 基于 MATLAB 与 SIMULINK 的 系统状态空间分析 .....	330
6.4.2 离散系统的开环脉冲传递 函数 .....	251	7.6 基于 MATLAB 的系统数学模型 转换 .....	334
6.4.3 离散系统的闭环脉冲传递 函数 .....	253	习题 .....	337
6.4.4 闭环离散系统的过渡过程 .....	255	第 8 章 控制系统的应用和分析 .....	341
6.5 离散系统的稳定性分析 .....	257	8.1 带钢卷取电液伺服控制系统 .....	341
6.5.1 $[s]$ 平面到 $[z]$ 平面之间的 映射 .....	257	8.1.1 概述 .....	341
6.5.2 线性离散系统稳定的充要 条件 .....	257	8.1.2 控制系统的组成和工作原理 .....	342
6.5.3 线性离散系统稳定性的判别 方法 .....	258	8.1.3 控制系统性能分析 .....	343
6.6 数字控制器与离散 PID 控制 .....	260	8.2 电压-转角机电伺服控制系统 .....	350
6.6.1 数字控制器的脉冲传递函数 .....	260	8.2.1 概述 .....	350
6.6.2 离散 PID 控制器及其校正 .....	261	8.2.2 控制系统的组成和工作原理 .....	350
6.7 基于 SIMULINK 的离散系统 时域特性分析 .....	266	8.2.3 控制系统性能分析 .....	351
习题 .....	268	* 8.3 仿形刀架机电液伺服控制系统 .....	355
* 第 7 章 状态空间分析法 .....	270		
7.1 状态变量与状态空间 .....	270		
7.2 连续系统的状态方程及输出			



8.3.1 概述 .....	355	附录 A 常用函数的拉氏变换和 Z 变换表 .....	369
8.3.2 控制系统的组成和工作原理 .....	356	附录 B Z 变换基本定理 .....	372
8.3.3 控制系统性能分析 .....	357	附录 C 矩阵运算 .....	373
* 8.4 定量浇注气动调节控制系统 .....	362	附录 D 基本的数值解法 .....	375
8.4.1 概述 .....	362	附录 E 部分习题参考答案 .....	377
8.4.2 控制系统的组成和工作原理 .....	362	参考文献 .....	387
8.4.3 控制系统性能分析 .....	364		
附录 .....	369		

# 第 1 章

## 控制系统的基本概念

### 1.1 控制系统的工作原理及其组成

#### 1.1.1 工作原理

下面以恒温控制系统为例,分析其控制过程。实现恒温控制有人工控制和自动控制两种办法。图 1.1 为人工控制的恒温箱简图。人工控制的任务是克服外界干扰(如电源电压波动、环境温度变化等),保持箱内温度恒定,以满足物体对温度的要求。操作者可以移动调压器触头改变通过加热电阻丝的电流,以达到控制温度的目的。箱内温度由温度计测量。人工调节过程可归结如下:

(1) 观察由测量元件(温度计)测出的恒温箱内的温度(被控制量)。

(2) 与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。

(3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱内温度高于所要求的给定温度值时,调整调压器将电流减小,使温度降到正常范围内。若温度低于给定的值,则调整调压器,将电流增加,使温度升到正常范围。

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程,简单地说就是“检测偏差再纠正偏差”的过程。

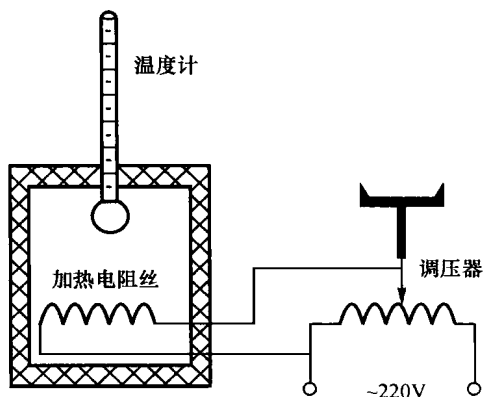


图 1.1 人工控制的恒温箱

这种人工控制要求操作者随时观察箱内温度的变化情况,随时进行调节。对于这样简单的控制形式,当然可以用一个控制器来代替人的职能,把人工控制变成一个自动控制系统。

图 1.2 是一个自动控制系统。其中,恒温箱的所需温度由电压信号  $u_1$  给定。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶,把温度转换成对应的电压信号  $u_2$ ,并反馈回去与给定信号  $u_1$  相比较,所得结果即为温度的偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、功率放大后,用以控制执行电动机的转速和方向,并通过传动装置移动调压器触头。当温度偏高时,触头向着减小电流的方向运动,反之加大电流,直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号  $\Delta u = 0$  时,电动机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。上述这些元件便组成了一个自动控制系统。

分析上述恒温箱的两种工作过程可以看出,自动控制系统和人工控制系统非常相似。自动控制系统中,测量装置相当于人的眼睛,控制器类似于人脑,执行机构好比人手。它们的共同特点都是要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差。因此,可以说没有偏差就不会有控制调节过程。

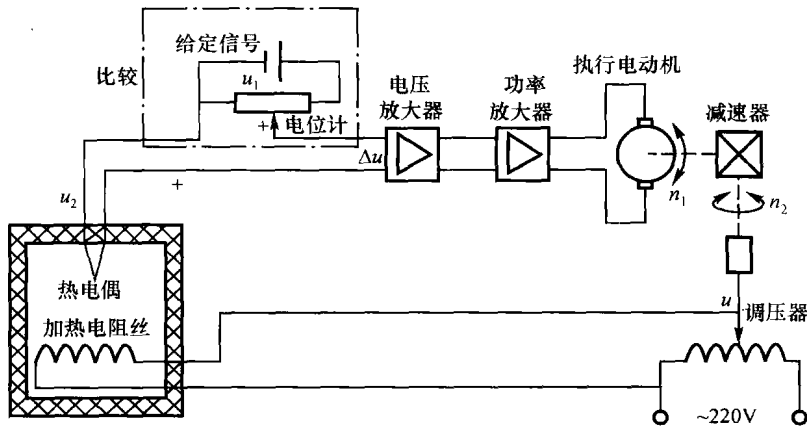


图 1.2 恒温箱的自动控制系统

在控制系统中,给定量又称为系统的输入量,被控制量又称为系统的输出量。输出量的返回过程称为反馈,它表示输出量通过测量装置将信号的全部或一部分返回输入端,使之与输入量进行比较。比较产生的结果称为偏差。在人工控制中,这一偏差是通过人眼观测后,由人脑判断、决策得出的;而在自动控制中,偏差则是通过反馈,由控制器进行比较、计算产生的。

因此,可以归纳出上述控制系统的工作原理如下:

- (1) 检测输出量的实际值。
- (2) 将实际值与给定值(输入量)进行比较得出偏差值。
- (3) 用偏差值产生控制调节作用去消除偏差。

这种基于反馈原理,通过“检测偏差再纠正偏差”的系统称为反馈控制系统。可见,作为反馈控制系统至少应具备检测、比较(或计算)和执行三个基本功能。

控制系统的控制过程可以用系统框图清晰而形象地表示。图 1.3 所示为恒温箱温度自动控制系统的框图。⊗代表比较元件,箭头代表作用方向,每个方框代表一个环节,各环节的作用是单向的,其输出受输入控制。从图中可以清楚地看到反馈控制的基本原理。各种不同的控制系

统实现自动控制的元件可以不尽相同,但反馈控制的原理却是相同的,可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

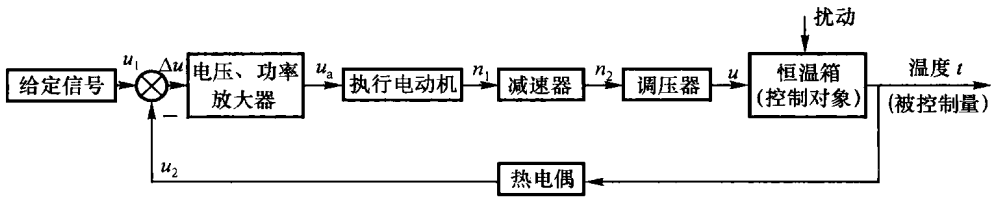


图 1.3 恒温箱温度自动控制系统框图

### 1.1.2 开环控制和闭环控制

实际的控制系统,根据有无反馈作用和如何反馈可以分为开环控制系统、闭环控制系统和半闭环控制系统三类。

#### 1. 开环控制系统

如果系统只是根据输入量和干扰量进行控制,而输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量在整个控制过程中对系统的控制不产生任何影响,这样的系统称为开环控制系统。图 1.4 所示的数控机床进给系统,由于没有反馈通道,所以是一个开环控制系统。系统的输出量仅受输入量的控制。

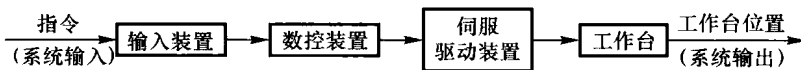


图 1.4 数控机床的开环控制系统

开环控制系统用一定输入量产生一定的输出量,如果由于某种干扰作用使输出量偏离原始值,它没有自动纠偏的能力。要进行补偿,必须再借助人工改变输入量。所以开环系统的控制精度较低。但是如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定,而且外界的干扰也比较小,则这种控制系统也可以保证一定的精度。开环控制系统的最大优点是系统简单,一般都能稳定可靠地工作,因此对于要求不高的系统可以采用。

#### 2. 闭环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间存在反馈回路,输出量对控制过程产生直接影响,这种系统称为闭环控制系统。这里,闭环的作用就是应用反馈来减少偏差。因此,反馈控制系统必是闭环控制系统。例如,前述的恒温箱温度自动控制系统就是一个闭环控制系统。

闭环控制系统的突出优点是控制精度高,不管遇到什么干扰,只要被控制量的实际值偏离给定值,闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。因此,高精度数控机床都采用闭环控制。

闭环控制系统也有它的缺点,这类系统是靠偏差进行控制的,因此,在整个控制过程中始终存在着偏差,由于元件的惯性(如负载的惯性),若参数配置不当,很容易引起振荡,使系统不稳定,而无法工作。所以,在闭环控制系统中精度和稳定性之间总存在着矛盾,必须合理地解决。

#### 3. 半闭环控制系统

如果控制系统的反馈信号不是直接从系统的输出端引出,而是间接地取自中间的测量元件,

例如在数控机床的进给伺服系统中,若将位置检测装置安装在传动丝杠的端部,间接测量工作台的实际位移,则这种系统称为半闭环控制系统。

半闭环控制系统可以获得比开环系统更高的控制精度,但比闭环系统要低;与闭环系统相比,它易于实现系统的稳定。目前大多数一般精度的数控机床都采用这种半闭环控制进给伺服系统,以降低制造成本。

### 1.1.3 闭环控制系统的组成

图 1.5 所示为一个较完整的闭环控制系统。由图可见,闭环控制系统一般应该包括给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等。

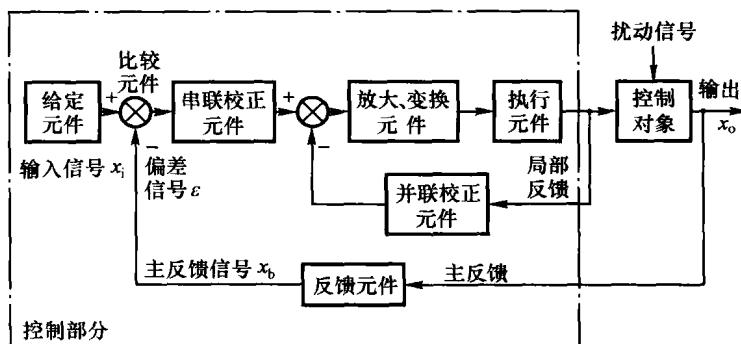


图 1.5 闭环控制系统的组成

#### 1. 给定元件

主要用于产生给定信号或输入信号,例如图 1.2 中电位计里的可变电阻。

#### 2. 反馈元件

它检测被控制量或输出量,产生主反馈信号。一般来说,为了便于传输,主反馈信号多为电信号。因此,反馈元件通常是一些用电量来测量非电量的元件。例如,用电位器或旋转变压器将机械转角变换为电压信号;用测速发电机将转速变换为电压信号;用热电偶将温度变换为电压信号和用光栅测量装置将直线位移变换为数字电信号等。

必须指出,在机械、液压、气动、机电、电机等系统中存在着内在反馈。这是一种没有专设反馈元件的信息反馈,是系统内部各参数相互作用而产生的反馈信息流,如作用力与反作用力之间形成的直接反馈。内在反馈回路由系统动力学特性确定,它所构成的闭环系统是一个动力学系统。例如,机床工作台低速爬行等自激振荡现象,都是由具有内在反馈的闭环系统产生的。

#### 3. 比较元件

用来接收输入信号和反馈信号并进行比较,产生反映两者差值的偏差信号,例如图 1.2 中的电位计。

#### 4. 放大元件

对偏差信号进行放大的元件,例如电压放大器、功率放大器等。有些放大元件还兼有能量形式变换的功能,如电液伺服阀、电气比例/伺服阀等。放大元件的输出一定要有足够的能量,才能驱动执行元件,实现控制功能。

## 5. 执行元件

直接对控制对象进行操纵的元件,例如伺服电动机、液压(气)马达、伺服液压(气)缸等。

## 6. 校正元件

为保证控制质量,使系统获得良好的动、静态性能而加入系统的元件。校正元件又称校正装置。串接在系统前向通路上的称为串联校正装置,并接在反馈回路上的称为并联校正装置。

尽管一个控制系统是由许多起着不同作用的元件所组成,但从总体来看,比较元件、放大元件、执行元件和反馈元件等共同起着控制作用,而剩余部分就是控制对象。因此,任何控制系统也可以说仅由控制部分和控制对象两部分组成。图 1.5 中点画线所包含的内容就是控制部分。扰动信号不是由元件产生的,而是由系统的外部环境或内部因素造成的,它集中地表现在控制量与被控制量之间的偏差上。而闭环控制系统就是按偏差进行自动调节的,所以采用图 1.5 所示的这种表示方式是合适的。

# 1.2 控制系统的基本类型

控制系统的种类很多,在实际工程中,可以从不同的角度对控制系统进行分类。

## 1.2.1 按输入量的特征分类

### 1. 恒值控制系统

这种控制系统的输入量是一个恒定值,一经给定,在运行过程中就不再改变(但可定期校准或更改输入量)。恒值控制系统的任务是保证在任何扰动作用下系统的输出量为恒值。因此,它又称自动调节系统。

工业生产中的温度、压力、流量、液面等参数的控制,有些原动机的速度控制,液压工作台的位置控制,电力系统的电网电压、频率控制等,均属此类。

### 2. 程序控制系统

这种系统的输入量不为常值,但其变化规律是预先知道和确定的。可以预先将输入量的变化规律编成程序,由该程序发出控制指令,在输入装置中再将控制指令转换为控制信号,经过全系统的作用,使控制对象按指令的要求而运动。计算机绘图仪就是典型的程序控制系统。

工业生产中的过程控制系统按生产工艺的要求编制成特定的程序,由计算机来实现其控制。这就是近年来迅速发展起来的数字程序控制系统和计算机控制系统。微处理机控制将程序控制系统推向更普遍的应用领域。

图 1.6 表示一个用于机床切削加工的程序控制系统。

### 3. 随动系统

随动系统在工业部门又称伺服系统。这种系统的输入量的变化规律是不能预先确定的。当输入量发生变化时,则要求输出量迅速而平稳地跟随着变化,且能排除各种干扰因素的影响,准确地复现控制信号的变化规律(此即伺服的含义)。控制指令可以由操作者根据需要随时发出,也可以由目标物或相应的测量装置发出。

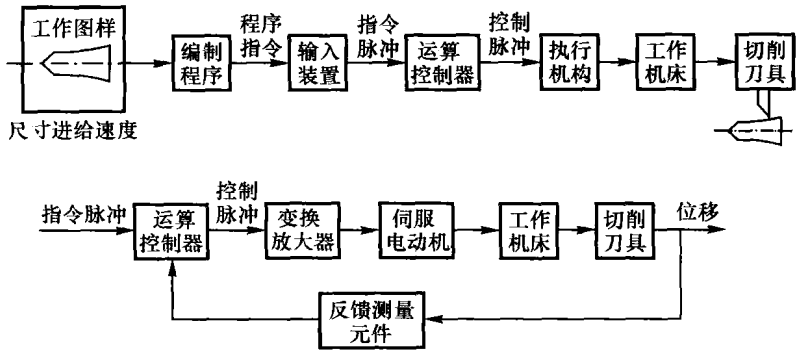


图 1.6 程序控制系统

机械加工中的仿形机床和武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹目标自动跟踪系统等均属随动系统。

图 1.7 所示为液压仿形车床工作原理图。当阀心 8 处于图示中间位置时,没有压力油进入液压缸前后两腔,液压缸不动。当阀心偏离中位,例如向前伸出时,节流口 2、4 保持关闭,节流口 1、3 打开,压力油经节流口 3 进入液压缸前腔,而其前腔的油液经节流口 1 流回油箱 9,缸体带动刀具向前运动;同样,当阀心偏离中位向后收缩时,节流口 1、3 关闭,2、4 打开,压力油经节流口 2 进入液压缸后腔,而缸前腔的油液则经节流口 4 流回油箱,缸体带动刀具向后运动。图中,液压缸缸体和控制阀阀体连成一体,形成液压缸运动的负反馈,使液压缸缸体与阀心的运动距离和方

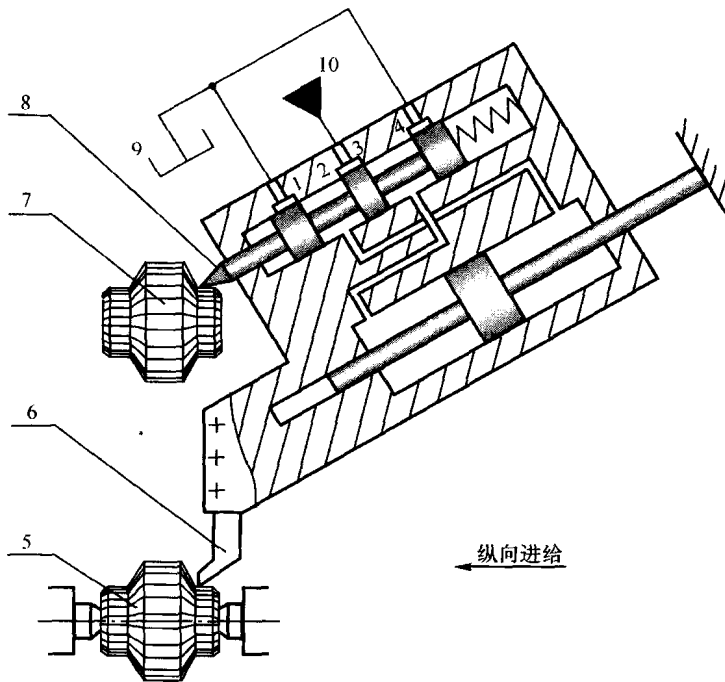


图 1.7 液压仿形车床工作原理图

1、2、3、4—节流口;5—工件;6—刀具;7—样件;8—触销;9—油箱;10—油源

向始终保持一致,所以液压缸缸体(刀具)完全跟随阀心(触销 8)运动。因此,这是一个随动(伺服)系统。

另外,多自由度控制器、机器人等也都是随动系统。

## 1.2.2 按系统中传递信号的性质分类

### 1. 连续控制系统

系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统。连续控制系统又有线性系统和非线性系统之分。用线性微分方程描述的系统称为线性系统,不能用线性微分方程描述、存在着非线性部件的系统称为非线性系统。

### 2. 离散控制系统

系统中某一处或数处的信号是脉冲序列或数字量传递的系统称为离散控制系统(也称数字控制系统)。在离散控制系统中,数字测量、放大、比较、给定等部件一般均由微处理机实现,计算机的输出经 D/A 转换加给伺服放大器,然后再去驱动执行元件;或由计算机直接输出数字信号,经数字放大器后驱动数字式执行元件。

由于连续控制系统和离散控制系统的信号形式有较大差别,因此在分析方法上也有明显的不同。连续控制系统以微分方程来描述系统的运动状态,并用拉氏变换法求解微分方程;而离散系统则用差分方程来描述系统的运动状态,用 Z 变换法引出脉冲传递函数来研究系统的动态特性。

此外,还可按系统部件的物理属性分为机械、电气、机电、液压、气动、热力等控制系统。

## 1.3 对控制系统的基本要求

控制系统应用于不同场合,对它有不同的性能要求。但从控制工程的角度来看,对控制系统却有一些共同的要求,一般可归结为稳定、精确、快速。

### 1. 稳定性

由于控制系统都包含储能元件,若系统参数匹配不当,便可能引起振荡。稳定性就是指系统动态过程的振荡倾向及其恢复平衡状态的能力。对于稳定的系统,当输出量偏离平衡状态时,应能随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。稳定性乃是保证控制系统正常工作的先决条件。

### 2. 精确性

控制系统的精确性即控制精度,一般以稳态误差来衡量。所谓稳态误差是指以一定变化规律的输入信号作用于系统后,当调整过程结束而趋于稳定时,输出量的实际值与期望值之间的误差值,它反映了动态过程后期的性能。这种误差一般是很小的,如普通数控机床的加工误差小于 0.02 mm,一般恒速、恒温控制系统的稳态误差都在给定值的 1% 以内。

### 3. 快速性

快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度。快速性



好的系统,它消除偏差的过渡过程时间就短,就能复现快速变化的输入信号,因而具有较好的动态性能。

由于控制对象的具体情况不同,各种系统对稳定、精确、快速这三方面的要求是各有侧重的。例如,调速系统对稳定性要求较严格,而随动系统则对快速性提出较高的要求。

即使对于同一个系统,稳、准、快也是相互制约的。提高快速性,可能会引起强烈振荡;改善了稳定性,控制过程又可能过于迟缓,甚至精度也会变差。分析和解决这些矛盾,正是本书所要讨论的主要内容之一。

## 1.4 控制工程发展概况

控制工程是一门新兴的技术科学,也是一门边缘科学。它的理论基础是工程控制论。

早在一千多年以前,我国就先后发明了铜壶滴漏计时器、指南针以及天文仪器等多种自动控制装置,这些发明促进了当时社会经济的发展。即使从1788年瓦特(J. Watt)发明蒸汽机飞球调速器算起,控制工程也已有了二百多年的历史。然而,控制工程作为一门学科,它的形成并迅速发展却是最近六七十年的事。

二次世界大战前,控制系统的设计因缺乏系统的理论指导而多采用试凑法。二次大战期间,由于建造飞机自动驾驶仪、雷达跟踪系统、火炮瞄准系统等军事装备的需要,推动了控制理论的飞跃发展。1948年威纳(N. Wiener)发表了著名的《控制论》,从而基本上形成了经典控制理论,使控制工程有了扎实的理论支撑。经典控制理论以传递函数为基础,主要研究单输入-单输出系统的分析和控制问题。

除了威纳之外,在经典控制理论的形成和发展过程中作出重大贡献的还有:1868年,马克斯威尔(J. C. Maxwell)发表了《论调速器》一文,首先提出了“反馈控制”的概念;1877年劳思(E. J. Routh)和1895年赫维茨(A. Hurwitz)先后独立地提出了判别系统稳定性的代数判据;1932年,尼奎斯特(H. Nyquist)提出了著名的尼奎斯特稳定性判据;此后,博德(H. W. Bode)总结了负反馈放大器,至1945年,控制系统设计的频域方法——“博德图”(Bode plots)方法已基本确立;1950年,埃文斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法,进一步充实了经典控制理论。

二次世界大战后,控制理论扩展到民用,在化工、炼油、冶金等工业部门得到了进一步的应用,控制理论也日渐成熟。1954年,我国科学家钱学森发表了《工程控制论》这一名著,为控制工程这门技术科学奠定了理论基础。

20世纪50年代末和60年代,控制工程又出现了一个迅猛发展时期,这时由于导弹制导、数控技术、空间技术发展需要和电子计算机技术的成熟,控制理论发展到了一个新的阶段,产生了现代控制理论。它是以状态空间分析法为基础,主要分析和研究多输入-多输出、时变、非线性等系统的最优控制问题。特别是近二十年来,在计算机技术和现代应用数学高速发展的推动下,现代控制理论在最优滤波、系统辨识、自适应控制、智能控制等方面又有重大进展。

对现代控制理论作出贡献的有:1892年,俄国的利亚普诺夫(A. М. Ляпунов)提出的判定系统稳定性的方法被广泛应用于现代控制理论;1956年,前苏联的蓬特里亚金(Л. С. Понтрягин)提出了极大值原理;1957年,美国的贝尔曼(R. Bellman)提出了动态规划理论;1960