

应用型本科 机械类专业“十三五”规划教材

控制工程基础

主编 张磊 王荣林

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科 机械类专业“十三五”规划教材

控制工程基础

主 编 张 磊 王荣林

副主编 冯 钧 张建化 肖理庆

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要讲述线性控制系统的经典控制理论及其应用, 主要内容包括绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域响应分析方法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频域分析方法、控制系统的综合与校正方法以及线性离散系统分析方法。

本书结合编者近十年来的教学和工程实践, 突出基础性和实用性, 注重应用型本科人才培养。书中的例题都经过精心安排并且在介绍各部分内容时适时插入 MATLAB 仿真, 便于对理论知识的验证, 使得读者可以深刻理解所学的相关内容。每章后面都配有习题, 便于读者巩固所学知识。

本书适合作为机械工程及自动化、机械电子工程和自动化等相关专业的本科生教材, 亦可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/张磊, 王荣林主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.3

应用型本科 机械类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3993-2

I. ① 控… II. ① 张… ② 王… III. ① 自动控制理论—高等学校—教材 IV. ① TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 020404 号

策划编辑 高 樱

责任编辑 许青青 牛秀月

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.5

字 数 313千字

印 数 1~3000册

定 价 28.00元

ISBN 978-7-5606-3993-2/TP

XDUP 4285001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

应用型本科 信息工程类专业规划教材

编审专家委员名单

主任：张 杰(南京工程学院 机械工程学院 院长/教授)

副主任：杨龙兴(江苏理工学院 机械工程学院 院长/教授)

张晓东(皖西学院 机电学院 院长/教授)

陈 南(三江学院 机械学院 院长/教授)

花国然(南通大学 机械工程学院 副院长/教授)

杨 莉(常熟理工学院 机械工程学院 副院长/教授)

成 员：(按姓氏拼音排列)

陈劲松(淮海工学院 机械学院 副院长/副教授)

郭兰中(常熟理工学院 机械工程学院 院长/教授)

高 荣(淮阴工学院 机械工程学院 副院长/教授)

胡爱萍(常州大学 机械工程学院 副院长/教授)

刘春节(常州工学院 机电工程学院 副院长/副教授)

刘 平(上海第二工业大学 机电工程学院 教授)

茅 健(上海工程技术大学 机械工程学院 副院长/副教授)

唐友亮(宿迁学院 机电工程系 副主任/副教授)

王荣林(南理工泰州科技学院 机械工程学院 院长助理/副教授)

王树臣(徐州工程学院 机电工程学院 副院长/教授)

王书林(南京工程学院 汽车与轨道交通学院 副院长/副教授)

吴懋亮(上海电力学院 能源与机械工程学院 副院长/副教授)

吴 雁(上海应用技术学院 机械工程学院 副院长/副教授)

许德章(安徽工程大学 机械与汽车工程学院 院长/教授)

许泽银(合肥学院 机械工程系 主任/副教授)

周 海(盐城工学院 机械工程学院 院长/教授)

周扩建(金陵科技学院 机电工程学院 副院长/副教授)

朱龙英(盐城工学院 汽车工程学院 院长/教授)

朱协彬(安徽工程大学 机械与汽车工程学院 副院长/教授)

前 言

本书以应用型本科教育为背景，以配合培养卓越工程师为目的，结合编者近年来的教学实践，主要讲述有关经典控制理论方面的内容。书中力图简明扼要地论述自动控制理论的基本概念、基本理论以及分析与设计方法。

全书共七章，主要讲述了自动控制理论的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析方法、控制系统的根轨迹法、控制系统的频域分析方法、控制系统的综合与校正方法以及线性离散系统分析方法。

本书在讲述时力图使复杂问题简单化，简单问题程序化，强调基础性和实用性。在讲述基本概念的基础上，对知识的介绍使用简单、通俗的数学论证，使得读者对自动控制理论有一个全面、基本的理解。书中的例题经过精心安排，在介绍各部分内容时还适时地插入 MATLAB 仿真，以对理论知识进行验证，使得读者可以深刻理解所学的相关内容。每章后面都配有习题，以便读者巩固所学知识。

本书第 1 章、第 3 章、第 5 章由徐州工程学院张磊、张建化、肖理庆编写，第 2 章、第 4 章、第 6 章、第 7 章由南京理工大学泰州科技学院王荣林、冯钧编写。张磊、王荣林担任主编，冯钧、张建化、肖理庆担任副主编。本书在编写过程中，得到了南京理工大学机械工程学院陈机林副研究员、高强副研究员、王力讲师，常熟理工学院周自强副教授，以及江苏科技大学刘芳华教授的悉心指导和帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中可能还有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.7 数学模型的 MATLAB 实现	41
1.1 自动控制的基本概念	1	2.7.1 MATLAB 简介	41
1.1.1 自动控制系统及其组成	1	2.7.2 控制系统在 MATLAB 中的描述	41
1.1.2 自动控制系统的分类	3	2.7.3 用 MATLAB 展开部分分式	42
1.2 控制理论的发展及其在机械制造业中的应用	6	2.7.4 用 MATLAB 求系统传递函数	43
1.2.1 控制理论的发展	6	习题	44
1.2.2 控制理论在机械制造业中的应用	7	第 3 章 控制系统的时域响应分析方法	48
1.3 自动控制的基本要求及课程任务	9	3.1 时域响应及典型输入信号	48
1.3.1 自动控制的基本要求	9	3.1.1 时域响应概述	48
1.3.2 课程任务	10	3.1.2 典型输入信号	49
习题	10	3.1.3 典型输入信号选择	50
第 2 章 控制系统的数学模型	13	3.2 一阶系统的时域响应	50
2.1 系统的微分方程	14	3.2.1 一阶系统的单位阶跃响应	50
2.1.1 机电控制系统常用元件的物理定律	14	3.2.2 一阶系统的单位斜坡响应	51
2.1.2 列写微分方程的一般方法	16	3.2.3 一阶系统的单位脉冲响应	51
2.2 非线性微分方程的线性化	18	3.3 二阶系统的时域响应	52
2.3 拉普拉斯变换	19	3.3.1 二阶系统的单位阶跃响应	52
2.3.1 复变函数的概念	20	3.3.2 欠阻尼二阶系统的时域性能指标	55
2.3.2 拉普拉斯变换	20	3.4 控制系统的稳定性分析	59
2.3.3 拉氏变换的性质	21	3.4.1 稳定性的概念	59
2.3.4 拉普拉斯反变换	23	3.4.2 系统稳定的充要条件	60
2.3.5 拉普拉斯变换解微分方程	27	3.4.3 劳斯(Routh)判据	61
2.4 传递函数	27	3.5 控制系统的稳态误差分析	64
2.4.1 传递函数的定义与求取方法	28	3.5.1 误差、偏差和稳态误差	64
2.4.2 典型环节的传递函数	29	3.5.2 控制系统的分类与偏差传递函数	65
2.5 系统传递函数方框图及简化	33	3.5.3 参考输入作用下系统的稳态偏差	66
2.5.1 方框图的结构要素	33	3.5.4 干扰作用下系统的稳态偏差	68
2.5.2 系统方框图的建立	34		
2.5.3 系统方框图的简化	35		
2.6 控制系统的传递函数推导举例	37		

3.6 基于 MATLAB 的时域分析	70	5.5 基于 MATLAB 的频域分析	135
3.6.1 借助 MATLAB 绘制系统各种 输入的响应曲线	70	5.5.1 借助 MATLAB 绘制 奈奎斯特图	135
3.6.2 利用 MATLAB 求系统时域 性能指标	72	5.5.2 借助 MATLAB 绘制伯德图	136
3.6.3 利用 MATLAB 判断系统的 稳定性	73	5.5.3 借助 MATLAB 分析系统的相对 稳定性	137
习题	74	习题	138
第 4 章 控制系统的根轨迹法	80	第 6 章 控制系统的综合与校正方法	141
4.1 根轨迹的基本概念	80	6.1 系统校正的基本概念	141
4.2 根轨迹的幅值条件与相角条件	81	6.1.1 控制系统的性能指标	141
4.3 绘制根轨迹的基本法则	83	6.1.2 校正的概念	142
4.4 控制系统的根轨迹绘制与分析举例	88	6.1.3 校正的方式	143
4.4.1 根轨迹绘制举例	88	6.1.4 期望伯德图	145
4.4.2 根轨迹分析举例	91	6.2 串联校正	146
4.5 参数根轨迹	95	6.2.1 串联超前校正网络	147
4.6 基于 MATLAB 的根轨迹分析	96	6.2.2 串联滞后校正网络	151
4.6.1 pzmap 命令	96	6.2.3 串联滞后-超前校正网络	153
4.6.2 rlocus 命令	96	6.3 反馈校正	156
4.6.3 rlocfind 和 sgrid 命令	97	6.3.1 反馈的功能	157
习题	98	6.3.2 位置反馈校正	157
第 5 章 控制系统的频域分析方法	100	6.3.3 速度反馈校正	158
5.1 频率特性的基本概念	100	6.4 PID 校正	158
5.1.1 频率响应与频率特性	100	6.4.1 比例控制器(P 控制器)	159
5.1.2 频率特性的表示方法	104	6.4.2 比例-微分控制器(PD 控制器)	160
5.2 幅相频率特性图	106	6.4.3 积分控制器(I 控制器)	162
5.2.1 极坐标图	107	6.4.4 比例-积分控制器(PI 控制器)	162
5.2.2 典型环节的极坐标图	107	6.4.5 比例-积分-微分控制器(PID 控制器)	163
5.2.3 开环系统极坐标图的绘制	113	6.5 MATLAB 在校正中的应用	165
5.3 对数频率特性图	116	6.5.1 串联超前校正	165
5.3.1 典型环节的伯德图	116	6.5.2 串联滞后校正	167
5.3.2 开环系统伯德图的绘制	124	6.5.3 串联滞后-超前校正	169
5.3.3 由频率特性确定传递函数	127	习题	171
5.4 频域稳定判据	128	第 7 章 线性离散系统分析方法	173
5.4.1 幅角定理	129	7.1 线性离散系统概述	173
5.4.2 奈奎斯特(Nyquist)稳定判据	129	7.1.1 线性离散系统的基本结构与 组成	173
5.4.3 对数稳定判据	133		
5.4.4 相对稳定性	133		

7.1.2 线性离散系统的特点	175	7.4.4 开环系统脉冲传递函数	190
7.1.3 线性离散系统的研究方法	175	7.4.5 闭环系统脉冲传递函数	193
7.2 信号的采样和保持	176	7.4.6 Z变换法的局限性	195
7.2.1 信号的采样	176	7.5 离散系统的稳定性与稳态误差	195
7.2.2 信号采样的数学描述	177	7.5.1 s 域到 z 域的映射	195
7.2.3 香农采样定理	179	7.5.2 离散系统稳定的充分必要 条件	196
7.2.4 采样周期的选取	179	7.5.3 离散系统的稳定性判据	197
7.2.5 信号的保持	180	7.5.4 离散系统的稳态误差	199
7.3 Z变换理论	181	7.5.5 离散系统的型别与静态误差 系数	200
7.3.1 Z变换定义	181	7.5.6 离散系统的动态性能分析	201
7.3.2 Z变换方法	182	7.6 离散系统分析的 MATLAB方法	202
7.3.3 Z变换性质	182	习题	203
7.3.4 Z反变换	184	附录 常用函数的拉氏变换和 Z 变换表	205
7.4 离散系统的数学模型	187	参考文献	206
7.4.1 离散系统的数学定义	187		
7.4.2 线性常系数的差分方程及其 解法	187		
7.4.3 脉冲传递函数	189		

第1章 绪论

内容提要

本章介绍了自动控制的基本概念、自动控制系统的组成与分类、自动控制技术的发展历程及其在机械制造业中的应用,阐明了自动控制系统的基本要求。本课程主要讲述基于传递函数的经典控制理论,研究对象为单输入单输出的闭环控制系统,该类系统一般可以用常系数线性微分方程描述。

引言

自动控制在现代科学技术的发展进程中起着极为重要的作用。在工农业生产、交通运输、国防建设、科学研究及日常生活的各个领域,自动控制技术都有非常普遍的应用。以机械制造业为例,从工艺过程中对压力、温度、湿度、黏度和流量等参数的控制到机械零件的加工、后续处理和装配,自动控制技术渗透于其中各个环节。在航空航天、人造卫星和导弹制导等高新技术中,更展现了自动控制技术发展的辉煌成果。

自动控制理论与实践的不断发展,为人们提供了设计最佳系统的方法,大大提高了生产率,同时促进了技术的进步。目前,工程技术人员和科学工作者都十分重视自动控制理论的学习。在大学里,“自动控制原理”已成为许多专业开设的必修课程。

1.1 自动控制的基本概念

1.1.1 自动控制系统及其组成

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。例如,无人驾驶飞机飞行,室内温度控制,数控机床按照给定的加工指令进行自动化加工,导弹的制导过程等都采用了自动控制技术。

下面以恒温箱的温度控制为例,来说明自动控制与人工控制的不同。

图1-1所示为人工控制的恒温箱简图。其调节过程可归结如下:

- (1) 观测恒温箱内的温度(被控制量)。
- (2) 与要求的温度(给定值)进行比较,得到温度偏差的大小和方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向调节调压器,控制

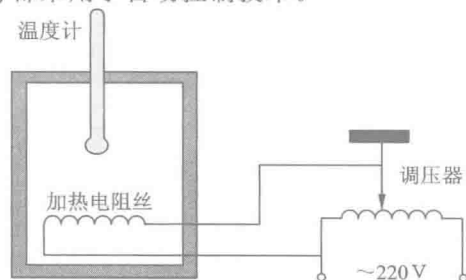


图 1-1 人工控制的恒温箱

加热电阻丝的电流以调节温度达到要求值。当恒温箱内温度高于给定的值时,调整调压器使电流减小,温度降低;若温度低于给定的值,则调整调压器使电流增加,温度升高到正常范围。

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差和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。为简化控制过程的表述,可用如图 1-2 所示的控制系统的功能方框图表示上述恒温箱的人工控制过程。

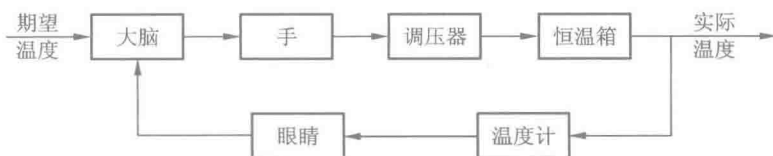


图 1-2 人工控制恒温箱系统功能方框图

上述控制过程要求操作者随时观察箱内温度的变化情况,并随时进行调节。对于这种控制要求,利用机电控制知识,也可以用一个控制器来代替人的职能,把人工控制系统变成一个自动控制系统。

图 1-3 所示为自动控制的恒温箱示意图。与图 1-1 相比,其控制过程的主要变化在于:

- (1) 恒温箱实际温度由热电偶转换为对应的电压 u_2 。
- (2) 恒温箱期望温度由电压 u_1 给定,并与实际温度对应电压 u_2 比较,得到温度偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。
- (3) 温度偏差信号的电压和功率经放大后,用以驱动执行电机,并通过传动机构(减速器等)拖动调压器动触头。当温度偏高时,动触头向减小电流的方向运动,反之向加大电流的方向运动,直到温度达到给定值为止,此时,偏差 $\Delta u = 0$,电机停止转动。

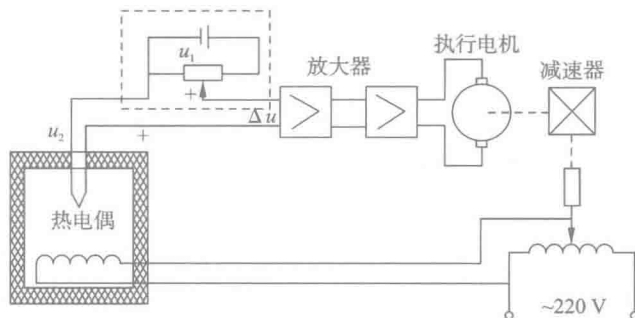


图 1-3 自动控制的恒温箱

使用自动控制系统的功能方框图表示上述控制过程如图 1-4 所示。

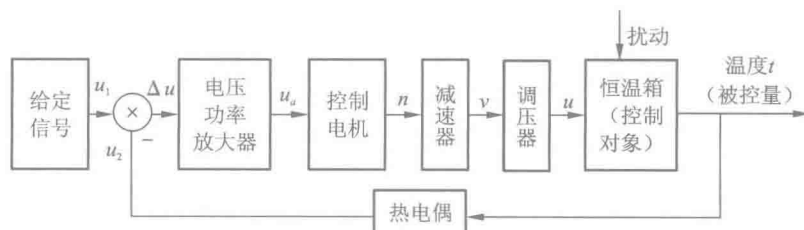


图 1-4 自动控制的恒温箱系统功能方框图

图1-4中的扰动又称扰动值,是指对恒温箱恒温控制起干扰作用的因素,如环境温度等。 $\times$ 代表比较元件,箭头代表作用的方向。比较上述恒温箱的人工控制过程和自动控制过程,发现二者非常相似。自动控制系统中,测量装置相当于人的眼睛和温度计,控制器类似于人脑,执行机构好比人手。它们的共同特点是都要检测偏差,并根据检测到的偏差去纠正偏差。因此,没有偏差就没有控制调节过程。

在控制系统中,给定量位于系统的输入端,称为系统输入量,也称为参考输入量(信号);被控制量位于系统的输出端,称为系统输出量;输出量(全部或一部分)通过测量装置返回系统的输入端,使之与输入量进行比较,产生偏差信号(给定信号与返回的输出信号之差);输出量的返回过程称为反馈;返回的全部或部分输出信号称为反馈信号。

将恒温箱的控制系统方框图即图1-2和图1-4中的具体元器件推广到一般情况,就得到了典型的带反馈控制的控制系统方框图,如图1-5所示。

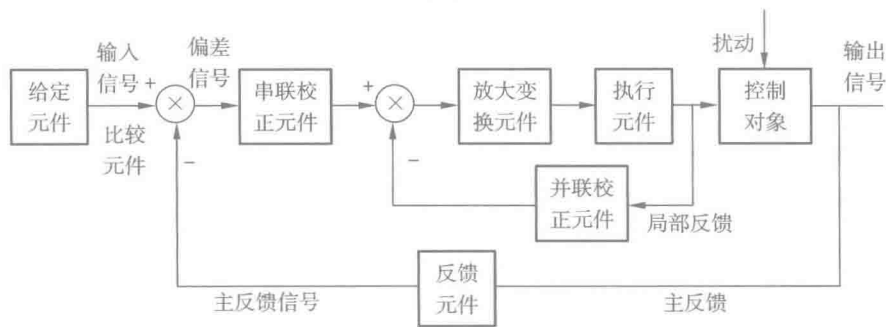


图1-5 典型的反馈控制系统方框图

图1-5中,组成控制系统的各基本元件解释如下:

- (1) 给定元件:主要用于产生给定信号或输入信号。
- (2) 反馈元件:测量被控量或输出量。
- (3) 比较元件:比较输入信号和反馈信号之间的偏差。
- (4) 放大变换元件:对偏差信号进行放大和功率放大。
- (5) 执行元件:直接对控制对象进行操作。
- (6) 校正元件:或称校正装置,用于改善系统的控制性能,分为并联校正元件和串联校正元件。
- (7) 控制对象:控制系统所要操纵的对象,它的输出量即为系统的被控制量。

反馈控制系统具备测量、比较和执行三个基本功能。

在反馈控制系统中,反馈信号与给定信号相减,使偏差越来越小,称为负反馈。负反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

1.1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统多种多样,可以从不同的角度进行分类。例如,按照系统输入信号的变化规律不同,自动控制系统可以分为恒值控制系统、随动控制系统和过程控制系统。恒值控制系统的输入信号是一个恒定的数值,例如恒温、恒压等控制系统就是恒值控制系统。随动控制系统的输入信号是一个未知函数,要求输出量跟随给定量变化,例如火炮瞄准系统、工业自动化仪表中的显示记录仪、跟踪卫星的雷达天线控制系统等均属于随动控制系统。

过程控制系统与随动控制系统的区别在于过程控制系统的输入信号是一个已知的时间函数，系统的控制过程按预定的程序进行。恒值控制系统也可以认为是过程控制系统的特例。

按照系统传输信号的不同，自动控制系统可以分为连续系统和离散系统。连续系统即系统各部分的信号都是模拟的连续函数。离散系统则是指系统的某一处或几处，信号以脉冲序列或数码的形式传递的控制系统。

按照系统的数学描述不同，控制系统还可分为线性系统和非线性系统等。

下面要介绍的控制系统分类是机械工程控制系统中常用的分类方法。

1. 按照系统的反馈回路分类

1) 开环控制系统

系统的输出端与输入端不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用不发生影响的系统叫做开环控制系统。其控制系统功能方框图如图 1-6 所示。



图 1-6 开环控制系统方框图

开环控制系统的优点是结构简单，成本低廉，工作稳定。其缺点也是显而易见的：不能自动修正被控制量的误差，系统元件参数的变化以及外来未知干扰都会影响系统精度。

例如，机械零件加工上使用的数字程序控制机床，其控制系统如图 1-7 所示，该系统就是开环控制系统。

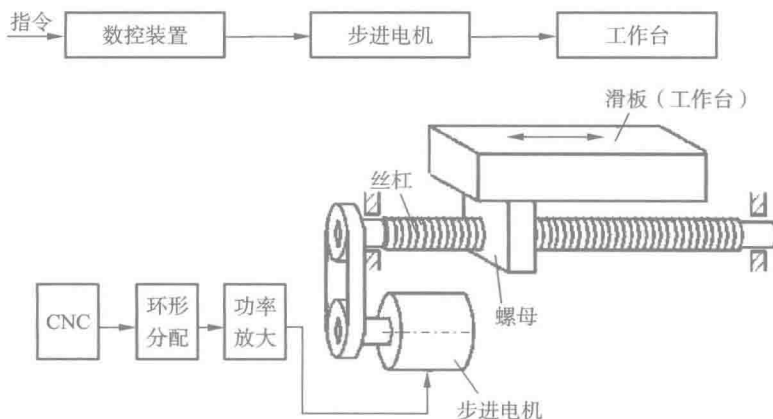


图 1-7 数控机床开环进给系统示意图

2) 闭环控制系统

系统输出端与输入端之间存在反馈回路的系统叫做闭环控制系统。闭环控制系统也叫反馈控制系统。“闭环”这个术语的含义，就是应用反馈作用来减小系统误差。其控制系统功能方框图如图 1-8 所示。



图 1-8 闭环控制系统方框图

在图 1-8 中,引入了反馈测量元件,闭环控制系统由于有“反馈”作用存在,具有自动修正被控制量的偏差的能力,可以修正元件参数变化及外界扰动引起的误差,所以其控制效果好,精度高。闭环控制系统除了结构复杂,成本较高外,另一个主要的问题是由于反馈的存在,控制系统可能出现“振荡”。

图 1-9 所示为数控机床闭环进给系统的功能方框图和示意图。

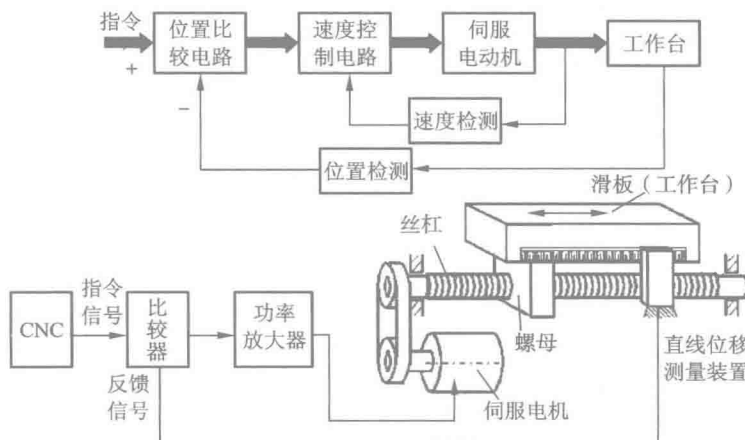


图 1-9 数控机床闭环进给系统方框图和示意图

图 1-9 中,控制系统的输出量是位移量,反馈信号直接从位移输出端取得。而在工业控制中,考虑到测量的经济性与技术实施的难易程度,常常不直接从系统输出量取反馈信号,而是从系统中间环节取得反馈信号,再由测量的中间量与输出量的数学关系推导出输出量的大小,此类控制系统常称为半闭环控制系统。例如,图 1-9 中的反馈信号若为丝杠的角位移信号,该系统就可称为半闭环控制系统。本书将半闭环控制系统归为闭环控制系统。

2. 按照系统的输入与输出信号的数量分类

1) 单输入单输出系统

单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统又称单变量系统,是指从系统外部变量来描述,系统只有一个输入量和一个输出量,而不考虑系统内部的通道与结构。系统内部的结构回路可以是多回路的,内部变量也可以是多种形式的。内部变量又称为中间变量,输入量与输出量称为外部变量。对于此系统,只研究外部变量之间的关系。

单输入单输出系统是经典控制理论的主要研究对象,它以传递函数作为基本数学工具,讨论线性定常系统的分析和设计问题,这也是本课程讲述的主要内容。

2) 多输入多输出系统

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统又称多变量系统,是指具有多个输入量和多个输出量的系统。一般来说,当系统输入或输出多于一个时,就称为多变量系统。多变量系统的特点是变量多、回路也多,而且相互之间常存在多路耦合,研究起来比单变量系统复杂得多。多变量系统是现代控制理论的主要研究对象。在数学上以状态空间法为基础,讨论多变量、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计。

本课程讲述的是单输入单输出的闭环控制系统的研究和分析方法。

1.2 控制理论的发展及其在机械制造业中的应用

1.2.1 控制理论的发展

人类祖先很早就开始制造、使用工具,后来又逐渐进化到发明、制造机器,并用于生产活动中,以取代人力或畜力,使人类自身从繁重的体力劳动中解放出来。从远古的铜壶滴漏计时器到公元前的水利枢纽工程,从中世纪的钟摆、天文望远镜到工业革命的蒸汽机、蒸汽机车和轮船,从百年前的飞机、汽车和电话通讯到半个世纪前的电子放大器和模拟计算机,从二战期间的雷达和火炮防空网到冷战时代的卫星、导弹和数字计算机,从 20 世纪 60 年代的登月飞船到现代的航天飞机、宇宙和星球探测器,这些著名的人类科技发明催生和发展了自动控制技术。

近代控制理论的发展可追溯到 18 世纪中叶英国的第一次技术革命。1765 年,James Watt(詹姆斯·瓦特)发明了蒸汽机,进而应用离心式飞锤调速器原理控制蒸汽机,标志着人类以蒸汽机为动力的机械化时代的开始。后来,工程界用自动控制理论讨论调速系统的稳定性问题。1868 年 Maxwell(麦克斯韦)发表的《论调节器》一文中指出,控制系统的品质可用微分方程来描述,系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来研究。1872 年 E. J. Routh(劳斯)和 1895 年 Hurwitz(霍尔维茨)先后找到了系统稳定性的代数判据,即系统特征方程根具有负实部的充分必要条件。1892 年俄国学者 Lyapunov(李雅普诺夫)发表了名为《论运动稳定性的一般问题》的博士论文,提出了用适当的能量函数——Lyapunov 函数的正定性及其倒数的负定性来鉴别系统的稳定性准则,从而总结和发展了系统的经典时域分析法。

随着通信及信息处理技术的迅速发展,电气工程师们发展了以实验为基础的频率响应分析法。1932 年,美国 Bell 实验室工程师 Nyquist(奈奎斯特)发表了关于反馈放大器稳定性的著名论文,给出了系统稳定性的 Nyquist 稳定判据。在第二次世界大战期间,由于军事上的需要,雷达及火力控制系统有较大发展,频率法被推广到离散系统、随机过程和非线性系统中。美国著名的控制论创始人 N. Wiener(维纳)教授系统地总结了前人的成果,1948 年出版了《控制论》一书,书中论述了控制理论的一般方法,推广了反馈的概念,为控制理论这门学科的产生奠定了基础。而经典控制理论中的频域分析技术是在 Nyquist(奈奎斯特)、Bode(伯德)等早期关于通信学科的频域研究工作的基础上建立起来的。Harris(哈里斯)于 1942 年提出了传递函数的概念,首先将通信科学的频域技术移植到了控制领域,构成了控制系统频域分析技术的理论基础。Evans(埃文斯)等在 1946 年提出的线性反馈系统的根轨迹分析技术是那个时代的另一个里程碑。至此,控制理论发展的第一阶段基本完成。建立在频域法和根轨迹法基础上的控制理论称为经典控制理论。

20 世纪 60 年代以后,控制理论又出现了一个迅猛发展时期,这个时期由于导弹制导、数控加工、空间技术的发展需要和计算机技术的成熟,控制理论发展到了一个新阶段。苏联学者 Pontryagin(庞特里亚金)于 1956 年提出的极大值原理、Bellman(贝尔曼)的动态规划和 Kalman(卡尔曼)的状态空间分析技术开创了控制理论研究的新时代,它是以状态空间法为基础,主要分析和研究多输入多输出、时变和非线性等系统的最优控制问题。近年来,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发展，并逐渐形成一套完整的理论，这就是有别于“经典控制理论”的“现代控制理论”。

纵观控制理论的发展历程，它是与计算机技术、现代应用数学的发展息息相关的。目前控制理论正在与模糊数学、分形几何、混沌理论、灰色理论、人工智能、神经网络、遗传基因等学科的交叉、渗透和结合中不断发展。

本书讲解的是经典控制理论的主要内容。

1.2.2 控制理论在机械制造业中的应用

随着控制理论的发展，其在机械制造工业中的应用越来越广泛，下面仅介绍几个典型的应用实例。

1. 蒸汽机离心调速器

1788年瓦特发明的蒸汽机离心调速器是一个自动调节系统。如图1-10所示，其工作原理是当蒸汽机带动负载转动的同时通过圆锥齿轮带动一对飞锤作水平旋转。飞锤通过铰链可带动套筒上下滑动，套筒内装有平衡弹簧，套筒上下滑动时可拨动杠杆，杠杆另一端通过连杆调节供汽阀门的开度。在蒸汽机正常运行时，飞锤旋转所产生的离心力与弹簧的反弹力相平衡，套筒保持某个高度，使阀门处于一个平衡位置。如果由于负载增大使蒸汽机转速下降，则飞锤因离心力减小而使套筒向下滑动，并通过杠杆增大供汽阀门的开度，从而使蒸汽机的转速回升。同理，如果由于负载减小使蒸汽机的转速增加，则飞锤因离心力增加而使套筒上滑，并通过杠杆减小供汽阀门的开度，迫使蒸汽机转速回落。这样离心调速器就能自动地抵制负载变化对转速的影响，使蒸汽机的转速保持在某个期望值附近。该系统可用如图1-11所示的控制系统方框图表示。

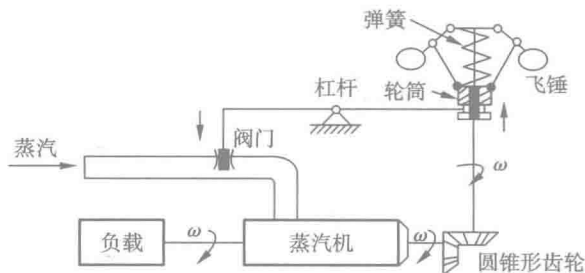


图 1-10 蒸汽机转速自动控制系统原理图

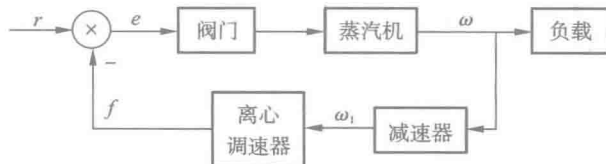


图 1-11 蒸汽机转速控制系统方框图

2. 自动导引车

自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)是指具有磁条、轨道或者激光等自动导引设备，沿规划好的路径行驶，以电池为动力，并且装备安全保护以及各种辅助机构(例如移栽、装配机构)的无人驾驶的自动化车辆，如图1-12所示。通常多台AGV与控制计

算机(控制台)、导航设备、充电设备以及周边附属设备组成 AGV 系统。其主要工作原理为在控制计算机的监控及任务调度下,AGV 可以准确地按照规定的路径行走,到达任务指定位置后,完成一系列的作业任务,控制计算机可根据 AGV 自身电量决定是否到充电区进行自动充电。

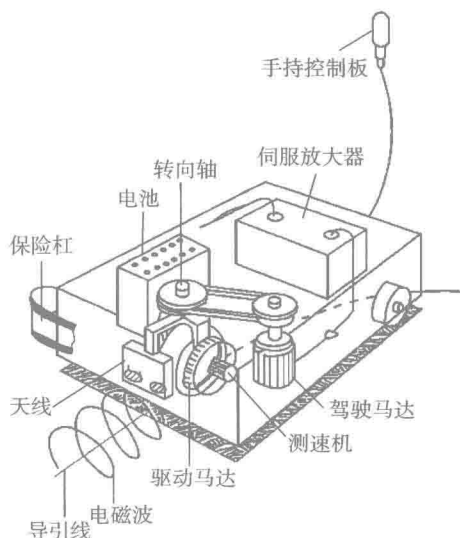


图 1-12 自动导引车(AGV)

AGV 是融合了电子技术和机械技术的典型的机电一体化产品。它由车体、蓄电池和充电系统、驱动装置、转向装置、精确停车装置、运动控制器、通信装置、移载系统和导航系统等组成。AGV 的引导原理是根据自动导引车行走的轨迹进行编程,数字编码器检测出的电压信号判断其与预先编程的轨迹的位置偏差,控制器根据位置偏差调整电机转速对偏差进行纠正,从而使自动导引小车沿预先编程的轨迹行走。因此 AGV 行走过程中,需不断地根据输入的位置偏差信号调整电机转速,对系统进行实时控制。

3. 工业机器人

工业机器人是控制理论在机械行业的又一成功运用。最通用的工业机器人是具有多个自由度的机械手。图 1-13 所示为六自由度工业机器人。

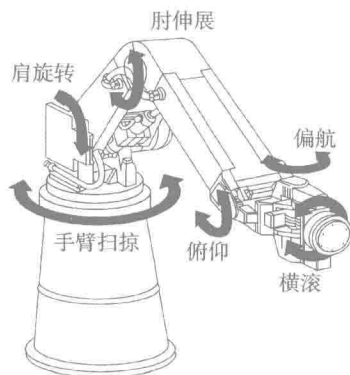


图 1-13 六自由度工业机器人

每一个运动轴都是一路伺服控制。机器人伺服控制系统利用位置和速度反馈信号控制机械手运动。智能机器人除伺服回路以外,控制器还包括视觉、触觉以及语音识别等其他传感器。控制器利用这些信号检测目标形貌、目标尺寸以及目标个性。

4. 计算机集成制造系统(CIMS)

计算机集成制造是随着计算机控制技术在制造领域中广泛应用而产生的一种生产模式,如图1-14所示。它借助于计算机的硬件、软件技术,综合运用现代企业管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术和系统工程技术,对企业的生产作业、管理计划、调度经营、销售等整个生产过程中的信息进行统一处理,并对分散在产品制造过程中各种孤立的自动化子系统的功能进行有机的集成,优化运行,从而缩短产品开发周期、提高质量和降低成本。这是工厂自动化的发展方向,未来制造业工厂的模式,也是自动控制理论在机械制造领域的集大成,代表了当今机械制造领域的前沿水平。

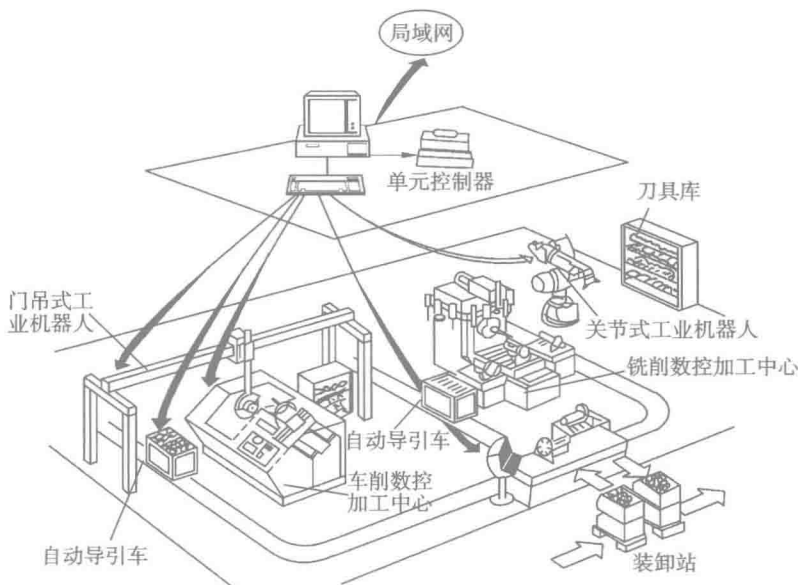


图1-14 计算机集成制造系统

1.3 自动控制的基本要求及课程任务

1.3.1 自动控制的基本要求

评价一个控制系统的好坏,其指标是多种多样的,但对控制系统的基本要求一般可归纳为“稳,快,准”三点,即稳定性(稳)、快速性(快)和准确性(准)。

1. 稳定性

稳定性是指自控系统动态过程的振荡倾向及其恢复平衡状态的能力。稳定的系统当输出量偏离平衡状态时,其输出能随时间的增长收敛并回到初始平衡状态。稳定性是控制系统正常工作的先决条件,同时系统还应有一定的稳定裕量,以确保系统工作参数发生变化时,系统仍然具有稳定性。