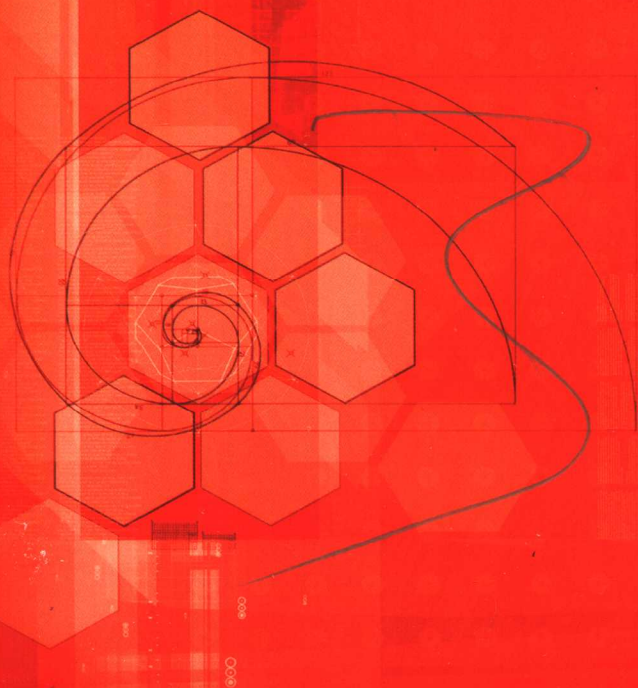


控制工程基础

杨建玺 徐莉萍 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

TP13/236

2008

控制工程基础

杨建玺 徐莉萍 等 编著

本书由河南科技大学教材出版基金资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书作为一门技术基础课教材,在介绍控制理论的基本原理和基本概念的同时,以机械系统、电路系统为背景,阐明了控制理论在工程中的应用。本书的主要内容包括数学基础——拉普拉斯变换、传递函数、时间响应分析、系统误差分析、频率特性分析、系统稳定性分析和系统的校正设计。每章都给出应用实例、MATLAB 实现以及习题。

本书可作为机械类各专业大学本科学生的教材,也适于工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础 / 杨建玺, 徐莉萍等编著. — 北京: 科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021307-5

I. 控… II. 杨… III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 031287 号

责任编辑: 耿建业 于宏丽 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 刘士平 / 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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008 年 4 月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—5 000 字数: 290 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(环伟))

前 言

应用控制理论解决工程实际问题越来越受到工程技术人员的重视,控制理论和控制工程解决问题的方法已成为工程技术人员分析问题和解决问题的有效手段。

本书作为一门技术基础课的教材,在明确基本控制原理和控制理论基本概念的前提下,以机械系统(特别是质量-弹簧-阻尼系统)、电路系统等为背景,力求阐明控制工程的基本知识和解决问题的基本方法。同时,本书还增加了很多应用实例,不仅有利于加强控制工程基础与专业课之间的联系,而且为学生今后将控制理论应用于工程实际打下良好的基础。此外,本书还在每一章的最后给出了 MATLAB 的实现方法,增加了解决控制工程基础问题的手段。

全书由杨建玺、徐莉萍等编著,第 1 章绪论,由杨建玺编写;第 2 章数学基础——拉普拉斯变换和第 8 章系统的校正设计,由张明柱、赵书尚编写;第 3 章传递函数,由陈龙编写;第 4 章时间响应分析和第 5 章系统误差分析,由张书涛编写;第 6 章频率特性分析,由徐莉萍编写;第 7 章系统稳定性分析,由赵书尚编写。全书由杨建玺统稿。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 控制论概述	1
1.2 控制系统的工作原理与组成	2
1.2.1 工作原理	2
1.2.2 控制系统的组成	4
1.3 控制系统的分类与基本要求	5
1.3.1 控制系统的分类	5
1.3.2 控制系统的基本要求	7
1.4 MATLAB 语言简介	8
1.4.1 MATLAB 的系统界面	8
1.4.2 MATLAB 数学运算	11
1.4.3 MATLAB 绘图	18
1.5 本课程的特点及要求	27
习题	28
第2章 数学基础——拉普拉斯变换	29
2.1 复数和复变函数	29
2.1.1 复数的概念	29
2.1.2 复数的表示法	29
2.1.3 复变函数	30
2.1.4 极点与零点概念	30
2.2 拉氏变换	31
2.2.1 拉氏变换定义	31
2.2.2 典型时间函数的拉氏变换	32
2.2.3 拉氏变换的性质	34
2.3 拉氏反变换及其数学方法	39
2.3.1 拉氏反变换	39
2.3.2 拉氏反变换的数学方法	40
2.4 拉氏变换的应用	43
2.5 拉氏变换的 MATLAB 实现	45

习题	46
第 3 章 传递函数	47
3.1 概述	47
3.1.1 数学模型的概念	47
3.1.2 线性系统与非线性系统	48
3.2 系统微分方程的建立	48
3.2.1 机械系统的微分方程	48
3.2.2 电气系统的微分方程	52
3.2.3 系统元件间的负载效应	54
3.2.4 非线性微分方程的线性化	54
3.3 传递函数	58
3.3.1 传递函数的概念	58
3.3.2 传递函数的零、极点	59
3.3.3 典型环节及其传递函数	59
3.4 系统框图及简化	67
3.4.1 系统框图的组成	67
3.4.2 方框图的绘制	68
3.4.3 系统方框图的简化	69
3.5 信号流图与 Mason 公式	73
3.5.1 信号流图	74
3.5.2 Mason 公式	75
3.6 应用实例	76
3.6.1 机床进给传动链	76
3.6.2 汽车悬挂系统	77
3.6.3 车削过程	78
3.6.4 打印轮控制系统	80
3.7 系统数学模型的 MATLAB 实现	82
3.7.1 传递函数模型	82
3.7.2 零极点增益模型	83
3.7.3 模型转换	83
3.7.4 动态结构图	84
习题	84
第 4 章 时间响应分析	88
4.1 时间响应	88
4.1.1 时间响应的概念	88

4.1.2 典型输入信号	89
4.2 一阶系统的时间响应	91
4.2.1 一阶系统的数学模型	91
4.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	91
4.2.3 一阶系统的单位脉冲响应	92
4.2.4 一阶系统的单位斜坡响应	93
4.3 二阶系统的时间响应	94
4.3.1 二阶系统的数学模型	94
4.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	96
4.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	98
4.4 高阶系统的时间响应	100
4.5 瞬态响应的性能指标	101
4.5.1 瞬态响应的性能指标	101
4.5.2 二阶系统的瞬态响应指标	102
4.6 时间响应的 MATLAB 实现	108
习题	110
第 5 章 系统误差分析	111
5.1 概述	111
5.1.1 误差与偏差	111
5.1.2 系统的类型	113
5.2 稳态误差的计算分析	113
5.2.1 静态误差系数与稳态误差	113
5.2.2 扰动作用下的稳态误差	117
习题	119
第 6 章 频率特性分析	121
6.1 概述	121
6.2 频率响应与频率特性	122
6.2.1 频率响应	122
6.2.2 频率特性	123
6.2.3 频率特性的求法	124
6.2.4 频率特性的特点	126
6.2.5 频率特性的表示方法	126
6.3 频率特性的极坐标图(Nyquist 图)	127
6.3.1 极坐标图	127
6.3.2 典型环节的极坐标图	127

6.3.3 系统 Nyquist 图的一般画法	132
6.4 频率特性的对数坐标图(Bode 图)	138
6.4.1 对数坐标图	138
6.4.2 典型环节的 Bode 图	138
6.4.3 绘制系统 Bode 图的步骤	147
6.5 开环频率特性对数坐标图的含义	151
6.6 最小相位系统及频域性能指标	153
6.6.1 最小相位系统的概念	153
6.6.2 由 Bode 图估计最小相位系统的传递函数	153
6.6.3 频域性能指标	154
6.7 频率特性的 MATLAB 实现	158
6.7.1 利用 MATLAB 绘制 Nyquist 图	158
6.7.2 利用 MATLAB 绘制 Bode 图	159
6.7.3 利用 MATLAB 求系统的频域特征量	160
习题	161
第 7 章 系统稳定性分析	163
7.1 稳定性概述	163
7.2 Routh-Hurwitz 稳定性判据	165
7.2.1 Routh 稳定性判据	165
7.2.2 Hurwitz 稳定性判据	169
7.3 Nyquist 稳定性判据	171
7.3.1 基本原理	171
7.3.2 Nyquist 法判别系统的稳定性举例	174
7.3.3 具有延时环节的系统的稳定性分析	177
7.4 系统的相对稳定性	178
7.4.1 相位裕量和幅值裕量	178
7.4.2 条件稳定系统	182
7.5 应用实例	183
7.5.1 Routh-Hurwitz 稳定判据应用实例	183
7.5.2 Nyquist 稳定判据应用实例	184
7.5.3 相对稳定性应用实例	186
7.6 稳定性分析的 MATLAB 实现	188
7.6.1 利用 MATLAB 求系统的特征根	188
7.6.2 利用 MATLAB 中的函数直接求解	189
思考题	191

习题	191
第 8 章 系统的校正设计	194
8.1 概述	194
8.1.1 系统的时域和频域性能指标	194
8.1.2 校正的概念	195
8.1.3 校正的类型	195
8.2 串联校正	196
8.2.1 增益校正	197
8.2.2 相位超前校正	197
8.2.3 相位滞后校正	200
8.2.4 相位滞后-超前校正	204
8.3 并联校正	206
8.3.1 反馈校正	207
8.3.2 顺馈校正	208
8.4 PID 校正	212
8.4.1 PD 控制作用	213
8.4.2 PI 控制作用	216
8.4.3 PID 控制作用	217
8.5 应用实例	218
8.5.1 电压-转角位置随动系统	218
8.5.2 直流电机调速系统	222
8.6 系统校正的 MATLAB 实现	224
习题	227
参考文献	231

第 1 章 绪 论

1.1 控制论概述

控制论是自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互渗透的产物,是在 20 世纪 40 年代酝酿形成的。控制论研究的是一个系统,这个系统可以是具体的一个执行机构,如厕所马桶的液面自动调节装置、机床进给系统等,也可以是一个工厂管理系统、人体自身控制系统等。控制论主要研究系统的性能,包括静态性能和动态性能,也就是研究系统的稳定性、准确性和快速性。

自从有了人类社会,控制论的应用就已经开始了。因为人们总是根据眼睛等感觉器官将得到的信息反馈给大脑,从而指导手、腿等执行器官完成计划的工作。其实,人类社会的发展过程就是一个完整的控制系统改造过程。如图 1.1 所示,人们为了做成某项产品,首先在大脑中产生一个计划,大脑指挥人体活动器官,通过手工作用在控制对象上,形成产品雏形,通过人体感觉器官将产品雏形反馈给大脑,大脑做出与原计划差异的判断,再指挥手进行修正,直到完成满意的产品为止。从这个过程我们可以看出,人参与了整个控制过程。人类社会的发展也是一个控制系统发展的过程。随着社会文明的进步,出现了石器时代,也就是控制对象是石器,而到了铁器时代的时候,控制对象更新为铁器,后来有了机器,由机器作为控制对象,这使人们得以大大减轻体力劳动,而测量工具仍是离线测量工具,由人眼测量到利用测量工具如直尺、千分尺等,这一切都仅仅是控制对象和系统中相应的环节发生了改变,却让人类奋斗了上千年的时间。今天很多问题又进一步得到解决,开始使用各种各样的传感器来替代人的感觉器官,使用计算机来替代人的大脑,可以说,人类社会的进步实质上就是逐步用机器、传感器、电脑等将人从控制系统中解放出来。

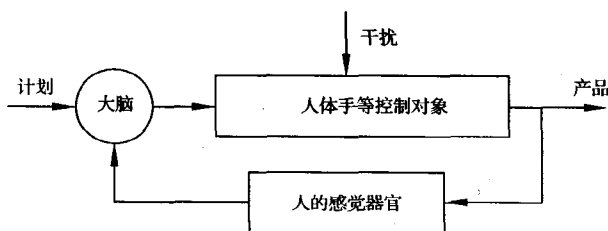


图 1.1 人类社会控制系统的框图

控制论作为一门系统科学,其理论发展时间还很短暂。1788年 Watt 发明了蒸汽机,其工作原理如图 1.2 所示,但没有对其离心调速器所带来的调速问题进行分析研究,1868年 Maxwell 在 *Proceeding of the Royal Society of London* 第 16 卷上发表了“论调速器”一文,专门对离心调速问题进行了深入细致的数学分析,成为控制理论的奠基人。之后的 1884 年 Routh 又提出了线性系统稳定性的判据,1932 年 Nyquist 提出了系统稳定性的又一种判别方法等,这些都奠定了古典控制论的基础。1948 年 Wiener 将前人所做的工作进行了系统性的总结,出版了 *Cybernetics* (含义为控制论、方法论),形成了完整的经典控制理论。第二次世界大战期间,由于战争的需要,欧洲一些科学家致力于研究状态空间法、极大值理论、动态规划、Kalman 滤波、最优控制等,形成了现代控制理论。随着计算机技术的不断发展,各种复杂的问题通过数值方法得以解决,各种新的控制算法不断涌现,构成了所谓智能控制理论。

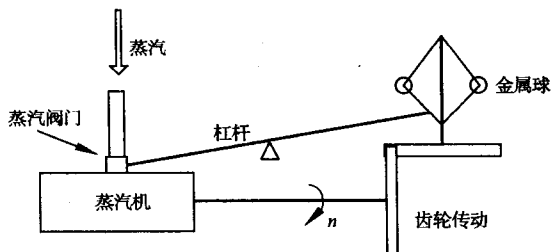


图 1.2 蒸汽机调速器调速工作原理图

本课程主要讲述经典控制理论在机电工程方面的应用,也就是经典控制论的内容,更多的列举机械和电路方面的例子。

1.2 控制系统的工作原理与组成

1.2.1 工作原理

系统是指能够完成某种功能的元件或者元件集合。控制工程中所指的系统是广义的。广义系统不限于具体的物理系统(如质量-弹簧-阻尼系统,一台机器);也可以是一个过程(如切削过程,生产过程);同时,也可以是一些抽象的动态现象。所谓控制系统,是指系统的输出能按照要求的输入进行调节的系统。图 1.3 为人工控制水箱液位的示意图。人工调节进水阀门,控制输入流量 q_1 , 克服水箱出水口扰动量 q_2 的变化,达到控制水箱液位的目的。其调节过程为:给定液面高度 h_0 , 当人眼观察得到的液面高度小于给定值 h_0 时,开启阀门加大流量 q_1 , 直至达到 h_0 为止。

图 1.4 为水箱液位自动控制系统。采用浮子作为测量元件代替人眼,用电位器作为比较器代替人脑,用放大器、电动机以及减速器作为执行元件代替人手。水箱液位的自动控制过程为:当电位器的电刷位于中点位置,其输入电压为 u_1 时,控制电压为 $\Delta u = u_1$,电机 M 不动,控制阀门有一定开度,水箱中进水量与出水量相等,液位保持在希望值上。一旦进水量 q_1 或出水量 q_2 发生变化,如使液面上升时,浮子位置也相应升高,通过杠杆作用使电位器电刷下移,

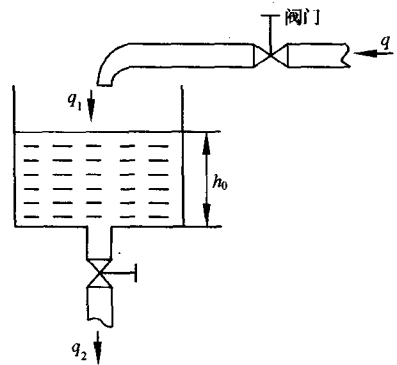


图 1.3 液位人工控制系统示意图

此时输入电压 $\Delta u = u_1 - u_2$ 升高,驱动电机和减速器减小阀门开度,使水箱的进水量减少。水箱液面开始下降,浮子位置也相应下降,直至偏差 $\Delta u = 0$, 电位器电刷回到中点位置,系统重新处于平衡状态,液面恢复到给定的高度。反之,若水箱液位下降,则系统会自动增大阀门开度,加大进水量,使液位上升到指定高度。

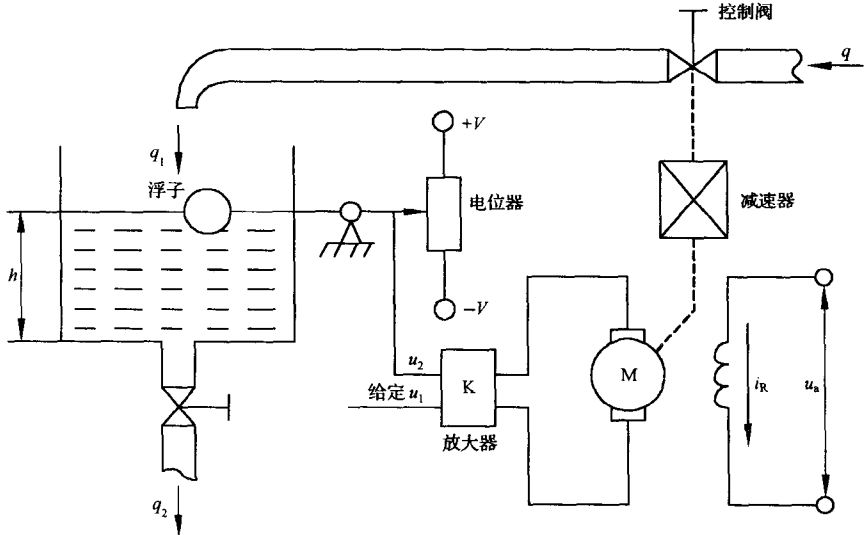


图 1.4 水箱液位自动控制系统示意图

由此可见,控制系统的工作原理可以归纳如下:

- (1) 检测被控制量或输出量的实际值。
- (2) 将实际值与给定值进行比较得出偏差值。

(3) 用偏差值产生控制调节去消除偏差。

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或闭环控制系统。通常反馈控制系统至少具备检测、比较和执行三个基本功能。

为了表明控制系统的调节原理以及信号的传递情况,通常把系统的各个元件用方框图表示,并用箭头标明各作用量的传递方向,用 $\otimes$ 表示比较元件,每一个方框代表一个环节。每个环节的作用是单向的,且输出受输入的控制。水箱自动控制系统的框图如图 1.5 所示。

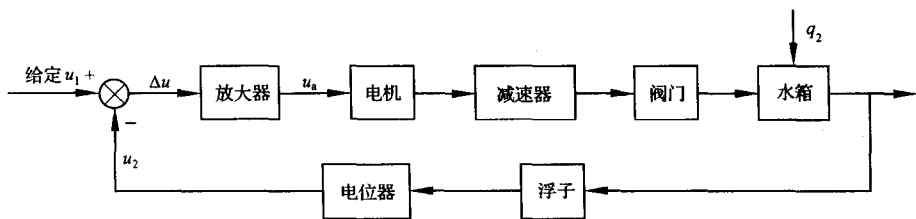


图 1.5 水箱液位自动控制系统框图

1.2.2 控制系统的组成

上述水箱液位自动控制系统中的电机、减速器和阀门合在一起完成了一个执行元件所完成的工作,浮子和电位器可以看作是一个检测元件,同时,电位器还是一个比较元件。从而可以将一般控制系统的框图归纳表示为图 1.6 所示的形式。

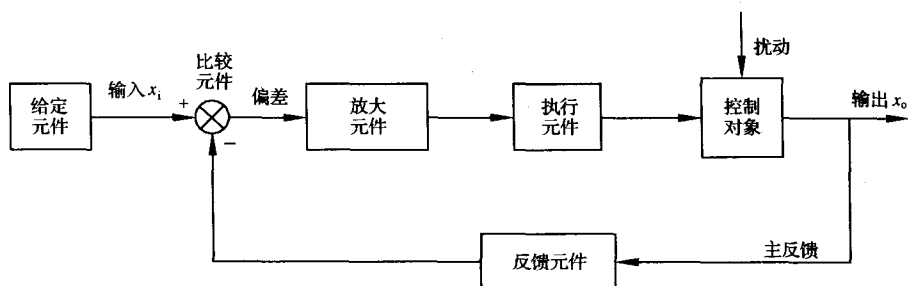


图 1.6 自动控制系统框图

由图 1.6 可以看出,一般的控制系统包括:

- (1) 给定元件——主要用于产生给定信号或输入信号。
- (2) 检测元件——测量被控量或输出量,产生反馈信号,并反馈到输入端。
- (3) 比较元件——用于比较输入信号和反馈信号的大小,产生反映两者差值的偏差信号。
- (4) 放大元件——对较弱的偏差信号进行放大,以推动执行元件动作。放大

元件有电气的、液压的和机械的。

(5) 执行元件——用于驱动被控对象的元件。如伺服电机、液压马达、液压缸以及减速器和调压器等。

(6) 控制对象——亦称被调对象。在控制系统中,运动规律或状态需要控制的装置称为控制对象,如水箱液位控制系统中的水箱。

由图 1.6 还可以看出,系统的各作用信号和被控制信号有:

(1) 输入信号——又称为控制量或调节量,它通常由给定信号电压构成,或通过检测元件将非电输入量转换成信号电压。如给定电压 u_1 。

(2) 输出信号——又称为输出量、被控制量或者被调节量。它是被控制对象的输出,表征被控对象的运动规律或状态的物理量。如液位控制系统中的液面高度。

(3) 反馈信号——它是输出信号经过反馈元件变换后加到输入端的信号。若反馈信号的符号与输入信号相同,称为正反馈;反之,称为负反馈。控制系统中的主反馈一般采用负反馈,以免系统失控。

(4) 偏差信号——它是系统输入信号与反馈信号叠加的结果,是比较环节的输出。

(5) 扰动信号——又称为干扰信号。扰动信号是指偶然的无法加以人为控制的信号。扰动信号也是一种输入信号,通常对系统的输出产生不利的影响。

1.3 控制系统的分类与基本要求

1.3.1 控制系统的分类

控制系统的种类很多,按照实际应用情况和分类方法的不同,可对控制系统做如下分类:

1) 按输入量的变化规律进行分类

(1) 恒值控制系统。恒值控制系统的输入量是一个恒定值,运行过程中就不再改变。这种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定值。

1.2 节中的液位控制系统就是一个恒值控制系统。工业生产中的温度、压力、流量等参数的控制,以及某些动力机械的速度控制、机床的位置控制等均属此类系统。

(2) 程序控制系统。这种控制系统的输入量不为恒定值,其变化规律是预先知道的。可将输入量的变化规律预先编成程序,由程序发出控制指令,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,使控制对象按照指令的要求运动。

图 1.7 所示为一个数控机床切削加工的程序控制系统。将待加工的工件按图

样要求预先编制成加工程序,将程序指令通过输入装置送到数控装置进行计算,产生的控制脉冲使刀具和工件按程序指令的要求运动,这样就加工出所需的工件。

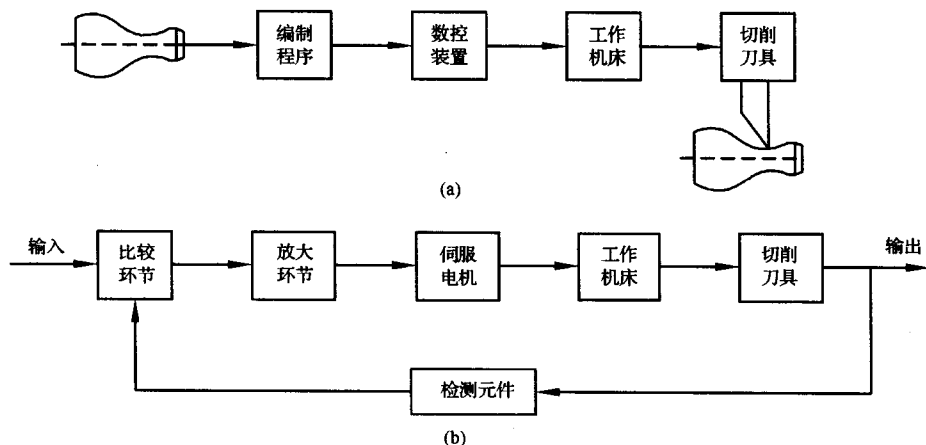


图 1.7 程序控制系统

(a) 数控加工过程原理图; (b) 数控机床进给系统框图

(3) 随动系统。随动系统又称伺服系统。这种控制系统输入量的变化规律是不能预先确定的。当系统的输入量发生变化时,要求输出量迅速平稳地随着输入量变化,并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。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。如机械加工中的仿形机床、武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹自动跟踪系统等均属于随动系统。

2) 按系统中传递信号的性质分类

(1) 连续控制系统。连续控制系统是指系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统。连续控制系统又可分为线性系统和非线性系统。能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。离散控制系统是指系统中某一处或几处的信号是以脉冲序列或数字量传递的系统,又称数字控制系统。由于连续控制系统和离散控制系统的信号形式差别较大,因此在分析方法上有明显的不同。连续控制系统以微分方程来描述系统的运动状态,并用拉普拉斯变换法求解微分方程;而离散控制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,还可以按描述系统的数学模型将控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统;按系统部件的类型分为机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统、电气控制系统等。

1.3.2 控制系统的基本要求

评价一个控制系统的好坏,其指标是多种多样的。对每一个具体系统,由于控制对象不同,工作的方式不同,完成任务不同,因此,对系统性能的要求往往也不完全一样,甚至差异很大。但是,对控制系统的基本要求(即控制系统所需的基本性能)一般可归纳为:稳定性、准确性、快速性,即“稳、准、快”。系统的“稳、准、快”与有关的性能一起,统称为系统的动态性能或动态特性。因此,又可以说,本课程是研究机械或者电路等控制系统的稳定性、准确性和快速性的。在学习本课程时可知,这又集中体现在系统的单位脉冲响应(时域中的根本特性)与频域特性(频域中的根本特性)上。现将“稳、准、快”的基本概念介绍如下:

1) 系统的稳定性

稳定性的要求是一般的控制系统正常工作的首要条件,而且是最重要的条件。所谓稳定性是指系统在干扰信号作用下,偏离原来的平衡状态,当干扰取消之后,随着时间的推移,系统恢复到原来平衡状态的能力。一个系统如果不稳定或失稳,它的行为便不受预定的约束,受控量将忽大忽小,摇摆不定,或者使运动发散,以致不能保持原定的工作状态不变。这种系统是不能完成控制任务的。因此,任何一个控制系统,要想完成令人满意的工作,首先应该是稳定的,也就是说应该具有这样的性质:输出量对给定的输入量的偏离初始值应该随着时间的推移逐渐趋近于零。但必须指出,稳定性的要求应该考虑到满足一定的稳定裕度,以便照顾到系统工作时参数可能发生的变化,以免由此变化而导致系统失稳。

2) 响应的准确性

准确性是指在过渡过程结束后输出量与给定的输入量(或同给定输入量相应的稳态输出量)的偏差,它又称为静态偏差或稳态精度。它也是衡量系统工作性能的重要指标。人们总是希望由一个稳态过渡到另一个稳态,输出量尽量接近或复现给定的输入量,或者说要求稳态精度尽可能高。由于外界干扰和给定的输入量经常在变化,系统实际上经常处在不断调整的过程中,但对缓慢变化的干扰或输入在一定时间内,系统的输出大致可视为是不变的。值得指出的是,对于同一系统,输入的变化规律不同,系统的稳态精度也不同。

3) 响应的快速性

这是在系统稳定的前提下提出来的。所谓快速性,就是指当系统的输出量与给定的输入量(或同给定输入量相应的稳态输出量)之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度。可见快速性是衡量系统性能的一个很重要的指标。在分析和研究控制系统时,对衡量其快速性一般有两种提法:

一种提法是在阶跃信号作用下,用系统的过渡过程时间的长短(图 1.8 的 t_s)来衡量。当 $t > t_s$, 有 $|x_o(t) - x_o(\infty)| \leq \Delta \cdot x_o(\infty)$, 式中 Δ 为给定的允差,一般

取 $\Delta = 0.02$ 或 0.05 , $x_o(\infty)$ 为稳态输出量, 过渡过程时间或称调整时间 t_s 越小, 说明系统从一个稳态过渡到另一个稳态所需要的时间越短, 也就是系统的响应速度越快。

另一种提法是用在过渡过程中, 出现 $x_o(t) > |x_o(\infty)|$ 的情况 (表示系统产生了超调现象) 时的超调量 M_p 来衡量, 见图 1.8。 M_p 越小, 则说明系统的过渡过程进行得越平稳。值得注意的是, 超调现象严重的系统, 不仅使组成系统的各个元件处于恶劣的工作条件下, 而且过渡过程在长时间内不能结束, 致使系统的误差不能很快地减小到允许范围之内。

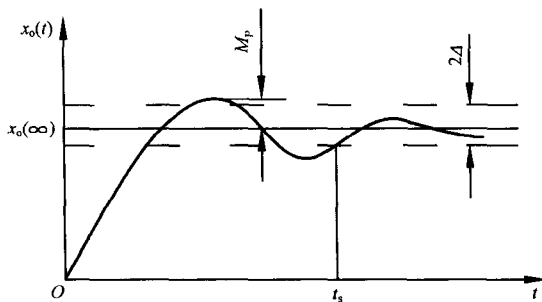


图 1.8 振荡系统的阶跃响应

综上所述, 人们要求控制系统中被控对象的行为 (响应、输出、动态历程) 应尽可能迅速而准确地实现它所应遵循的变化规律。这规律由“给定环节”的输出即系统的输入决定。当然, 毫无疑问, 这里就隐含了系统必须是稳定的。由此可见, “稳、准、快”显然是系统的主要动态性能。

1.4 MATLAB 语言简介

MATLAB 是美国 Mathworks 公司开发的大型数学计算软件, 它提供了强大的矩阵处理和绘图功能, 并具有界面友好的用户环境。MATLAB 带有一些强大的具有特殊功能的工具箱, 几乎涵盖了所有工业、电子、医疗、建筑等领域, 已经成为国际上最流行的软件之一。现在的 MATLAB 已不仅仅是一个“矩阵实验室” (matrix laboratory), 而且已经成为一种实用的计算机高级编程语言, 是工程技术人员的必备软件。

1.4.1 MATLAB 的系统界面

1.4.1.1 MATLAB 窗口

MATLAB 具有强大的编程功能和易操作的交互式计算环境。MATLAB 语言