

新编电气与电子信息类本科规划教材

自动控制理论

(非自动化专业)

陈建明 主编

何琳琳 姜素霞 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

新编电气与电子信息类本科规划教材

自动控制理论

(非自动化专业)

陈建明 主 编

何琳琳 姜素霞 副主编

王伟生 郭广颂 王成凤 参 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书系统全面地介绍了经典控制理论的基本内容,主要包括:自动控制概论、控制系统的数学模型、线性系统的时域分析法、线性系统的根轨迹法、线性系统的频域分析法、线性系统的综合与校正、采样控制系统。同时,介绍了 MATLAB 软件在自动控制系统仿真中的基本应用。为便于读者深入理解本书的重要概念,每章都选配了一定数量的习题并提供部分参考答案。本书提供配套的电子课件,读者可登录华信教育资源网: www.huaxin.edu.cn 或 www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

本书可作为高等院校本科非自动化专业及相近专业的“自动控制理论”或类似课程的教材,也可作为各类院校专科层次相关专业类似课程的选用教材,并可作为电子信息类或其他与控制有关专业工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论(非自动化专业)/陈建明主编. —北京:电子工业出版社,2009.7

新编电气与电子信息类本科规划教材

ISBN 978-7-121-09029-5

I. 自... II. 陈... 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(2009)第 093827 号

策划编辑: 凌毅

责任编辑: 史鹏举

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.25 字数: 416 千字

印 次: 2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 26.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着科学技术的不断发展,自动控制技术已广泛应用于工业、农业、交通、生命学科、国防装备、航空航天和科学实践的各个领域,极大地提高了整个社会的劳动生产率,改善了人们的劳动条件,推动和促进了现代社会的快速发展。在当今社会,自动控制技术可以说无处不在,无时不有,与相关领域技术相融合又产生了许多新的专业学科。“自动控制理论”是专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,不仅是高等院校自动化专业主修的专业基础课,同时也是与自动化相关专业必修的专业基础课程。

为了适应广大高校非自动化专业学生学习的要求,我们编写的“自动控制理论”一书更注重于:经典控制技术和控制理论的基本概念、基本原理和基本方法;控制技术与相关行业技术的融合与应用;利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。书中系统全面地介绍了经典控制理论的基本内容,主要包括:自动控制概论、控制系统的数学模型、线性系统的时域分析法、线性系统的根轨迹法、线性系统的频域分析法、线性系统的综合与校正、采样控制系统。同时,介绍了 MATLAB 软件在自动控制系统仿真中的基本应用。为了便于读者深入理解本书所述的重要概念,每章都选配了一定数量的习题并提供部分参考答案。

本书可作为高等院校本科非自动化专业及相近专业的“自动控制理论”或类似课程的教材,也可作为各类院校专科层次相关专业类似课程的选用教材,并可作为电子信息类或其他与控制有关专业工程技术人员的参考书。

本书由华北水利水电学院陈建明任主编,郑州航空工业管理学院何琳琳、郑州轻工业学院姜素霞任副主编,王伟生、郭广颂、王成凤任参编。具体分工如下:第 1~2 章和第 3 章的 1~4 节由陈建明编写;第 3 章的 5~7 节和第 4 章由姜素霞编写;第 5 章由何琳琳编写;第 6 章由王伟生编写;第 7 章由郭广颂编写;王成凤同志负责部分习题的编写和全书文档的编辑工作。全书由陈建明统稿、定稿,并由华北水利水电学院丘道尹教授审阅。

本书提供配套的电子课件,读者可登录华信教育资源网:www.huaxin.edu.cn 或 www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

由于作者水平所限,难免存在错漏之处,恳切希望同行专家、学者及读者提出宝贵意见,以便今后改进、提高。作者 E-mail: cjmhs5@sina.com。

陈建明
2009 年 6 月

目 录

第 1 章 自动控制概论	1
1.1 自动控制与自动控制系统的基本概念	1
1.1.1 自动控制理论	1
1.1.2 反馈控制原理	1
1.1.3 自动控制系统基本控制方式	4
1.2 自动控制系统示例	5
1.2.1 函数记录仪	5
1.2.2 锅炉液位控制系统	6
1.3 自动控制系统的分类	7
1.3.1 线性连续控制系统	7
1.3.2 线性定常离散控制系统	8
1.3.3 非线性控制系统	8
1.4 对控制系统的基本要求	8
1.4.1 基本要求的提法	8
1.4.2 典型外作用	9
习题	11
第 2 章 控制系统的数学模型	14
2.1 自动控制系统微分方程的建立	14
2.1.1 线性元器件的微分方程	14
2.1.2 控制系统的微分方程	15
2.1.3 线性系统的特性	17
2.2 非线性微分方程的线性化	18
2.3 传递函数	19
2.3.1 传递函数的定义	19
2.3.2 传递函数的基本性质	20
2.3.3 控制系统的典型环节及传递函数	21
2.4 控制系统的方框图和传递函数	27
2.4.1 框图的组成	27
2.4.2 系统框图的建立	28
2.4.3 框图的等效变换	29
2.4.4 自动控制系统的传递函数	33
2.5 信号流图和梅逊公式	36
2.5.1 信号流图的术语和性质	37
2.5.2 梅逊增益公式	38
2.6 脉冲响应	40

2.7 MATLAB 在本章中的应用	41
习题	42
第3章 线性系统的时域分析法	45
3.1 系统时间响应的性能指标	45
3.1.1 典型输入信号	45
3.1.2 时域性能指标	46
3.2 一阶系统的时域响应	47
3.2.1 一阶系统的数学模型	47
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	48
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	48
3.2.4 一阶系统的理想单位脉冲响应	49
3.2.5 一阶系统的单位加速度响应	49
3.3 二阶系统的时域响应	50
3.3.1 二阶系统的数学模型	50
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	51
3.3.3 欠阻尼二阶系统的动态过程分析	53
3.3.4 二阶系统的单位脉冲响应	57
3.4 高阶系统的时域响应	58
3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应	58
3.4.2 系统的主导极点与偶极子	59
3.5 线性系统的稳定性分析	60
3.5.1 稳定的概念和定义	60
3.5.2 线性系统稳定的充分必要条件	61
3.5.3 劳斯稳定判据	62
3.5.4 赫尔维兹判据	65
3.6 线性系统稳态误差的计算	66
3.6.1 稳态误差的定义	66
3.6.2 系统类型	67
3.6.3 扰动作用下的稳态误差	69
3.6.4 提高系统稳态精度的方法	70
3.7 MATLAB 在本章中的应用	71
3.7.1 控制系统的传递函数	71
3.7.2 控制系统的时域响应	73
习题	77
第4章 线性系统的根轨迹法	80
4.1 根轨迹法的基本概念	80
4.1.1 根轨迹的定义	80
4.1.2 根轨迹方程与系统性能	82
4.1.3 根轨迹的幅值条件与相角条件	84
4.2 根轨迹的绘制	86

4.2.1 绘制根轨迹的基本规则	86
4.2.2 绘制零度根轨迹	100
4.2.3 绘制开环零、极点变化时的根轨迹	103
4.3 控制系统性能的根轨迹分析	106
4.3.1 闭环零、极点位置对系统性能的影响	106
4.3.2 单位阶跃响应的根轨迹分析	107
4.4 MATLAB 在绘制根轨迹图中的应用	111
4.4.1 函数及调用格式	111
4.4.2 分析设计工具 rltool 的应用	114
习题	115
第 5 章 频域分析法	118
5.1 频率特性的一般概念	118
5.1.1 频率特性定义	118
5.1.2 频率特性的三种图示方法	120
5.2 典型环节的频率特性	122
5.3 系统开环频率特性	131
5.3.1 系统开环对数频率特性	131
5.3.2 系统开环极坐标图(奈氏图)	135
5.3.3 最小相位系统和非最小相位系统	136
5.4 奈奎斯特稳定判据及稳定裕量	137
5.4.1 奈奎斯特稳定判据的基本原理	137
5.4.2 奈奎斯特稳定判据	140
5.4.3 奈奎斯特对数稳定判据	144
5.4.4 频域法分析系统的稳定性	145
5.5 系统闭环频率特性和性能指标	147
5.5.1 闭环频率特性曲线	147
5.5.2 等 M 圆图	148
5.5.3 等 N 圆图	149
5.5.4 性能指标	150
5.6 频率特性分析系统的性能	151
5.6.1 闭环频域指标与时域指标的关系	151
5.6.2 开环对数幅频特性和时域指标	152
5.7 MATLAB 在频域特性分析中的应用	154
5.7.1 频率特性性能分析的 MATLAB 实现	154
5.7.2 频率法判定系统稳定性的 MATLAB 实现	155
习题	157
第 6 章 线性系统的综合与校正	161
6.1 系统校正基础	161
6.1.1 受控对象	161
6.1.2 控制系统的性能指标	161

6.1.3	系统带宽的确定	163
6.1.4	校正装置与校正系统结构	165
6.2	基本控制规律	167
6.2.1	比例控制规律(P)	167
6.2.2	比例微分控制规律(PD)	168
6.2.3	积分控制规律(I)	169
6.2.4	比例积分微分控制规律(PID)	170
6.3	超前校正参数的确定	171
6.3.1	RC超前网络	171
6.3.2	串联超前校正	172
6.3.3	超前校正的优缺点	174
6.4	滞后校正参数的确定	175
6.4.1	滞后校正及滞后校正元器件的特性	175
6.4.2	滞后校正举例	176
6.4.3	滞后校正的特点	180
6.5	滞后-超前校正参数的确定	180
6.5.1	滞后-超前校正网络特性	180
6.5.2	串联滞后-超前校正	181
6.5.3	滞后-超前校正的特点	184
6.6	按系统期望频率特性确定串联校正参数	184
6.6.1	几个基本概念	184
6.6.2	“期望特性”校正举例	185
6.6.3	“期望特性”校正的优点	189
6.7	反馈校正参数的确定	189
6.7.1	反馈校正的特点	190
6.7.2	反馈校正的简化方框图	192
6.7.3	反馈校正举例	193
6.7.4	反馈环节的实现	194
6.7.5	校正分析	195
6.8	MATLAB 在本章中的应用	196
6.8.1	设计方法	196
6.8.2	系统设计步骤	197
	习题	201
第7章	采样控制系统	203
7.1	基本概念	203
7.1.1	采样控制系统	203
7.1.2	数字控制系统	204
7.1.3	离散控制系统的特点	204
7.2	采样过程与采样定理	204
7.2.1	采样过程	204

7.2.2 采样定理	205
7.3 采样信号保持器	207
7.3.1 信号复现	207
7.3.2 零阶保持器	207
7.4 z 变换	209
7.4.1 z 变换定义	209
7.4.2 z 变换方法	210
7.4.3 z 变换性质	211
7.4.4 z 反变换	212
7.5 采样系统的数学模型	214
7.5.1 离散系统的数学定义	214
7.5.2 线性常系数差分方程	214
7.5.3 脉冲传递函数	215
7.6 采样系统的稳定性分析	220
7.6.1 采样系统的稳定条件	220
7.6.2 离散系统的稳定性判据	221
7.7 采样系统的稳态误差	223
7.8 采样系统动态性能估算	225
7.8.1 采样系统闭环极点分布与瞬态响应的关系	226
7.8.2 采样系统动态性能的估算	227
7.9 MATLAB 在本章中的应用	228
7.9.1 连续系统的离散化	228
7.9.2 采样系统的响应	228
习题	229
参考答案	233
参考文献	250

第 1 章 自动控制概论

本章简要介绍自动控制系统的基本概念,是了解和掌握自动控制技术的必修内容。介绍了根据系统的控制任务和要求,大致确定系统应具有的结构示意图;掌握开环控制和闭环控制特点;了解对自动控制系统性能的要求,及其自动控制系统的类型、组成框图。

本章主要内容:

- 控制系统的基本概念、特点与作用;
- 自动控制系统组成及分类;
- 对自动控制系统性能的要求。

1.1 自动控制与自动控制系统的基本概念

自动控制是在没有人直接干预下,利用物理装置对生产设备和工艺过程进行合理的控制,使被控制的物理量保持恒定或者按照一定的规律变化。自动控制系统则是为实现某一控制目标所需要的所有物理部件的有机组合体。例如:

- ① 数控车床按照预定程序自动地切削工件;
- ② 化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定;
- ③ 雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统;
- ④ 自动地将导弹引导到敌方目标;
- ⑤ 无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行;
- ⑥ 人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收。

在自动控制系统中,被控制的设备或过程称为被控对象或对象;被控制的物理量称为被控量或输出量;决定被控量的物理量称为控制量或给定量;妨碍控制量对被控量进行正常控制的所有因素称为扰动量。给定量和扰动量都是自动控制系统的输入量。扰动量按其来源可分为内部扰动和外部扰动。

1.1.1 自动控制理论

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,其发展经历了如下 3 个阶段。

- ① 以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入/单输出、线性定常系统的分析和设计问题。
- ② 现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的最优控制问题,主要采用的方法是以状态为基础的状态空间法。
- ③ 以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论。

1.1.2 反馈控制原理

1. 自动控制系统

为了实现各种复杂的控制任务,将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,组成一

个有机总体。

在自动控制系统中,被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量,它可以要求保持为某一恒定值,如温度、压力、液位等,也可以要求按照某个给定规律运行,如飞行航迹、记录曲线等;而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体,它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制,但最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。

2. 反馈控制原理

在反馈控制系统中,控制装置对被控对象施加的控制作用,取自被控量的反馈信息,用来不断修正被控量与输入量之间的偏差,从而实现对被控对象进行控制的任务,这就是反馈控制原理。

例 1-1 人用手拿取桌上的书,如图 1-1 所示。

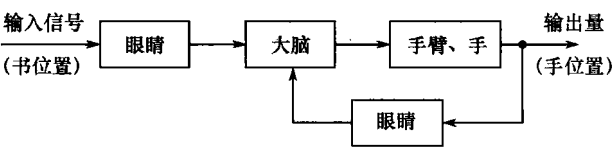


图 1-1 人取书的反馈控制系统方框图

把人取物视为一个反馈控制系统时,手是被控对象,手位置是被控量(系统的输出量),产生控制作用的机构是眼睛、大脑和手臂,统称为控制装置。

显然,反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程,因此,它也称为按偏差的控制,反馈控制原理就是按偏差控制的原理。

反馈:取出输出量送回到输入端,并与输入信号相比较产生偏差信号的过程。

负反馈:反馈的信号与输入信号相减,使产生的偏差越来越小。

正反馈:反馈的信号与输入信号相加,使产生的偏差越来越大。

反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程,而且,由于引入了被控量的反馈信息,整个控制过程成为闭合过程,因此反馈控制也称闭环控制。

在工程实践中,为了实现对被控对象的反馈控制,系统中必须配置具有类似人的眼睛、大脑和手臂功能的设备,以使用来对被控量进行连续地测量、反馈和比较,并按偏差进行控制。这些设备依其功能分别称为测量元器件、比较元器件和执行元器件,并统称为控制装置。

例 1-2 龙门刨床速度控制系统示意图如图 1-2 所示。

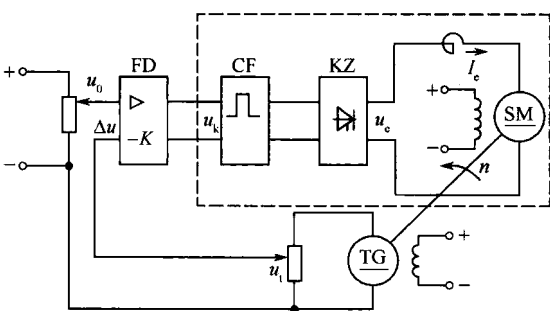


图 1-2 龙门刨床速度控制系统示意图

图中,刨床主电动机 SM 是电枢控制的直流电动机,其电枢电压由晶闸管整流装置 KZ 提供,并通过调节触发器 CF 的控制电压 u_k ,来改变电动机的电枢电压,从而改变电动机的转速(被控量)。测速发电机 TG 是测量元器件,用来测量刨床速度并给出与速度成正比的电压 u_t 。然后,将 u_t 反馈到输入端并与给定电压 u_0 反向串联便得到偏差电压 $\Delta u = u_0 - u_t$ 。在这里, u_0 是根据刨床工作情况预先设置的速度给定电压,它与反馈电压 u_t 相减形成偏差电压,因此, u_t 称为负反馈电压。偏差电压经过放大器 FD 放大后作为触发器的控制电压。

可见,这是一个由负反馈产生偏差,并利用偏差进行控制直到最后消除偏差的过程,这就是负反馈控制原理,简称反馈控制原理。

龙门刨床速度控制系统方框图如图 1-3 所示。

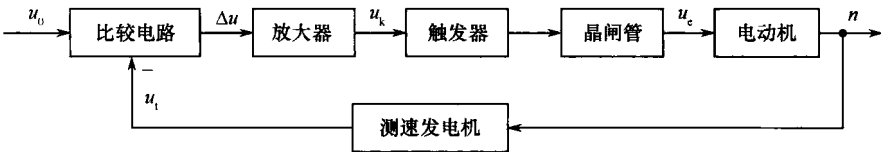


图 1-3 龙门刨床速度控制系统方框图

3. 反馈控制系统的基本组成

反馈控制系统是由各种结构不同的元器件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看,一个系统必须包含被控对象和控制装置两大部分,而控制装置是由具有一定职能的各种基本元器件组成的。在不同的系统中,结构完全不同的元器件可以具有相同的职能,因此,将组成系统的元器件按职能分类主要有以下几种。

测量元器件:其职能是检测被控制的物理量,如果这个物理量是非电量,一般要再转换为电量。例如,测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压;电位器、旋转变压器用于检测角度并转换为电压;热电偶用于检测温度并转换为电压等。

给定元器件:其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量(参据量),例如图 1-2 中给出电压 u_0 的电位器。

比较元器件:其职能是把测量元器件检测的被控量实际值与给定元器件给出的参据量进行比较,求出它们之间的偏差。常用的比较元器件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。图 1-2 中,由于给定电压 u_0 和反馈电压 u_t 都是直流电压,故只需将它们反向串联便可得到偏差电压。

放大元器件:其职能是将比较元器件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元器件去控制被控对象。电压偏差信号,可用晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器加以放大。

执行元器件:其职能是直接推动被控对象,使其被控量发生变化。用来作为执行元器件的有阀、电动机、液压马达等。

校正元器件:也叫补偿元器件,它是结构或参数便于调整的元器件,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统的性能。最简单的校正元器件是由电阻、电容组成的无源或有源网络,复杂的则用电子计算机。

一个典型的反馈控制系统基本组成可用图 1-4 表示。图中用“⊗”代表比较元器件,它将测量元器件检测到的被控量与参据量进行比较,“-”表示两者符号相反,即负反馈,“+”表示两者符

号相同,即正反馈(也可忽略不画)。方框两边直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路。系统输出量经测量元器件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统;有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。一般加到反馈控制系统上的外作用有两种类型,一种是有用输入,一种是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律,如参据量;而扰动是系统不希望有的内、外作用,它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中,扰动总是不可避免的,而且它可以作用于系统中的任何元器件上,也可能一个系统同时受到几种扰动作用。电源电压的波动,环境温度、压力以及负载的变化,飞行中气流的冲击,航海中的波浪等,都是现实中存在的扰动。

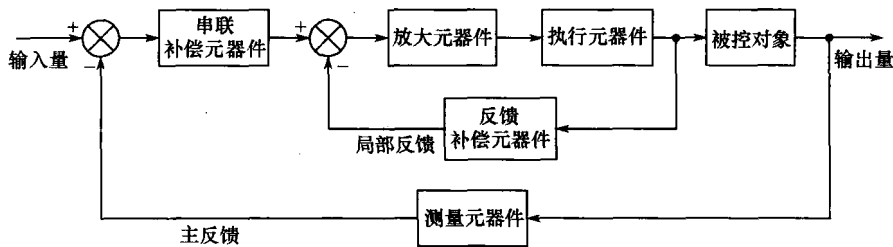


图 1-4 反馈控制系统基本组成方框图

1.1.3 自动控制系统基本控制方式

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式,也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外,还有开环控制方式和复合控制方式,它们都有各自的特点和不同的适用场合。

1. 反馈控制方式

如前所述,反馈控制方式是按偏差进行控制的,其特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时,必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差,使被控量与期望值趋于一致。可以说,按反馈控制方式组成的反馈控制系统,具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力,有较高的控制精度。但这种系统使用的元器件多,结构复杂,特别是系统的性能分析和设计也较麻烦。尽管如此,它仍是一种重要的并被广泛应用的控制方式,自动控制理论主要的研究对象就是用这种控制方式组成的系统。

2. 开环控制方式

开环控制方式是指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过程,按这种方式组成的系统称为开环控制系统,其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。开环控制系统可以按给定量控制方式组成,也可以按扰动控制方式组成。按扰动控制的开环控制系统,是利用可测量的扰动量,产生一种补偿作用,以减少或抵消扰动对输出量的影响,这种控制方式也称为顺馈控制。

这种开环控制方式没有自动修正偏差的能力,抗扰动性较差。但由于其结构简单、调整方便、成本低,在精度要求不高或扰动影响较小的情况下,这种控制方式还有一定的实用价值。目前,用于国民经济各部门的一些自动化装置,如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线、数控车床以及指挥交通的红绿灯的转换等,一般都是开环控制系统。

3. 复合控制方式

把按偏差控制与按扰动控制结合起来,对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制(顺馈控制),同时,再组成反馈控制系统实现按偏差控制,以消除其余扰动产生的偏差。这种按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制方式。图 1-5 表示一种同时按偏差和扰动控制电动机速度的复合控制系统原理图和方框图。

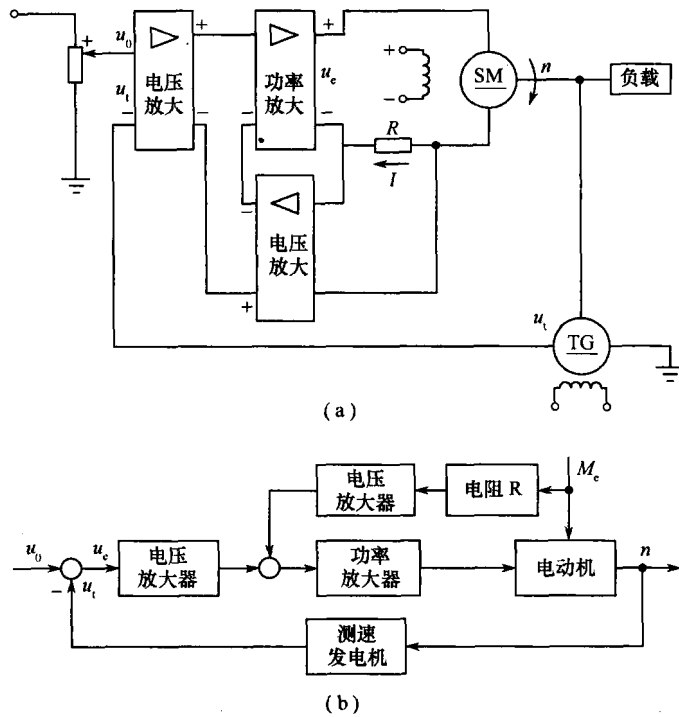


图 1-5 电动机速度复合控制系统

1.2 自动控制系统示例

1.2.1 函数记录仪

函数记录仪是一种通用的自动记录仪,它可以在直角坐标上自动描绘两个电量的函数关系。同时,记录仪还带有走纸机构,用以描绘一个电量对时间的函数关系。函数记录仪通常由衰减器、测量元器件、放大元器件、伺服电动机、测速机组、齿轮系及绳轮等组成,采用负反馈控制原理工作,如图 1-6 所示。系统的输入是待记录电压,被控对象是记录笔,其位移即为被控量。系统的任务是控制记录笔位移,在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

在图 1-6 中,测量元器件是电位器 R_Q 和 R_M 组成的桥式测量电路,记录笔就固定在电位器 R_M 的滑臂上,因此,测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当有慢变的输入电压 u_r 时,在放大元器件输入口得到的偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$,经放大后驱动伺服电动机,并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动,同时使偏差电压减少。当偏差电压 $\Delta u = 0$ 时,电动机停止转动,记录笔也静止不动。此时, $u_p = u_r$,表明记录笔位移与输入电压相对应。如果输入电压随时间连续变化,记录笔便描绘出随时间变化的相应曲线。函数记录仪原理框图如图 1-7 所示。

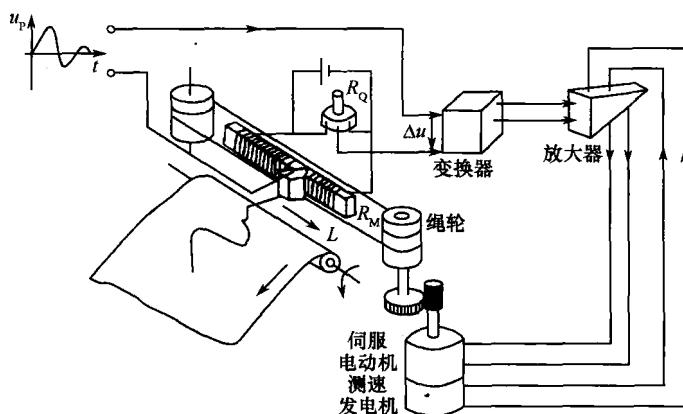


图 1-6 函数记录仪示意图

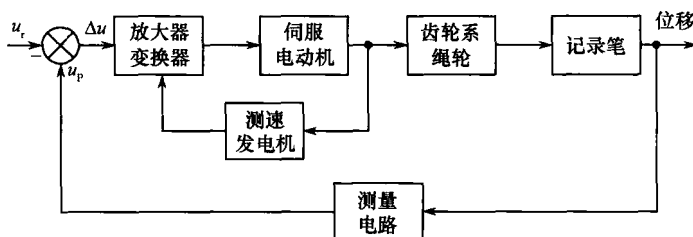


图 1-7 函数记录仪原理框图

1.2.2 锅炉液位控制系统

锅炉是电厂和化工厂里常见的生产蒸气的设备。为了保证锅炉正常运行,需要维持锅炉液位为正常标准值。锅炉液位过低,易烧干锅而发生严重事故;锅炉液位过高,则易使蒸气带水并有溢出危险。因此,必须通过调节器严格控制锅炉液位的高低,以保证锅炉正常安全地运行。常见的锅炉液位控制系统如图 1-8 所示。

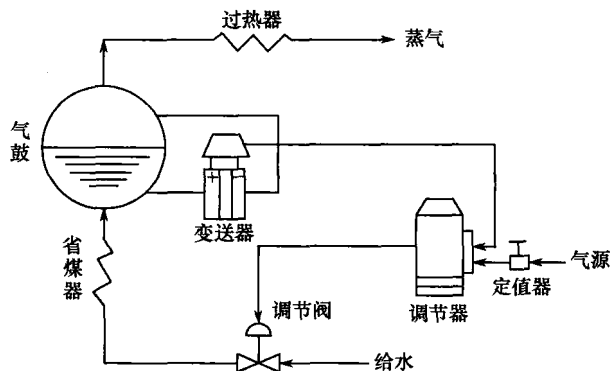


图 1-8 锅炉液位控制系统示意图

当蒸气的耗气量与锅炉进水量相等时,液位保持为正常标准值。当锅炉的给水量不变,而蒸气负荷突然增加或减少时,液位就会下降或上升;或者,当蒸气负荷不变,而给水管道的压力发生变化时,引起锅炉液位发生变化。不论出现哪种情况,只要实际液位高度与正常给定液位之间出现了偏差,调节器均应立即进行控制,去开大或关小给水阀门,使液位恢复到给定值,原理

如图 1-9 所示。

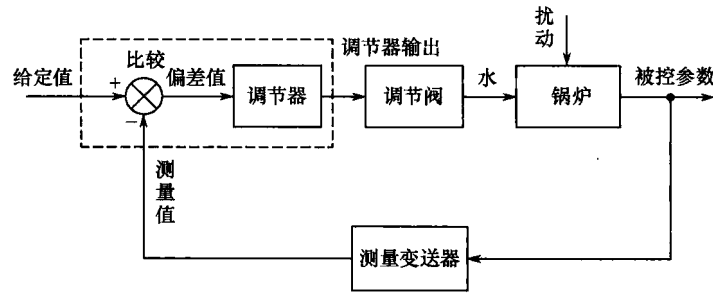


图 1-9 锅炉液位控制系统方框图

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。例如，按控制方式可分为开环控制、反馈控制、复合控制等；按元器件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等；按系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等；按参据量变化规律又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。为了全面反映自动控制系统的特性，常常将上述各种分类方法组合应用。

1.3.1 线性连续控制系统

这类系统可以用线性微分方程式描述，其一般形式为

$$\begin{aligned} & a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t) \\ &= b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t) \end{aligned}$$

式中， $c(t)$ 是系统被控量； $r(t)$ 是系统输入量。系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 是常数时，称为定常系统；系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 随时间变化时，称为时变系统。线性定常连续系统按其输入量的变化规律不同又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

1. 恒值控制系统

这类控制系统的参据量是一个常值，要求被控量等于一个常值。如温度控制系统、压力控制系统、液位控制系统等均属于恒值控制系统。在工业控制中，如果被控量是温度、流量、压力、液位等生产过程参量时，这种控制系统称为过程控制系统，它们大多数都属于恒值控制系统。

2. 随动系统

这类控制系统的参据量是预先未知的随时间任意变化的函数，要求被控量以尽可能小的误差跟随参据量的变化而变化，故又称为跟踪系统。示例中的函数记录仪就是典型的随动系统。在随动系统中，如果被控量是机械位置或其导数时，这类系统称为伺服系统。

3. 程序控制系统

这类控制系统的参变量是按预定规律随时间变化的函数,要求被控量迅速、准确地加以复现。机械加工使用的数字程序控制机床便是一例。

程序控制系统和随动系统的参变量都是时间函数,不同之处在于前者是已知的时间函数,后者则是未知的任意时间函数,而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

1.3.2 线性定常离散控制系统

离散系统是指系统的某处或多处的信号为脉冲序列或数码形式,因而信号在时间上是离散的。离散系统要用差分方程描述,线性差分方程的一般形式为

$$\begin{aligned} & a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) \\ & = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} r(k+1) + b_m r(k) \end{aligned}$$

式中, $m \leq n$, n 为差分方程的次数; $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$ 为常系数; $r(k), c(k)$ 分别为输入和输出采样序列。

工业计算机控制系统就是典型的离散系统,如炉温微机控制系统等。

1.3.3 非线性控制系统

系统中只要有一个元器件的输入/输出特性是非线性的,这类系统就称为非线性控制系统,这时,要用非线性微分(或差分)方程描述其特性。非线性方程的特点是系数与变量有关,或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项,例如

$$\ddot{y}(t) + y(t)\dot{y}(t) + y^2(t) = r(t)$$

严格地说,实际物理系统中都含有程度不同的非线性元器件,如放大器和电磁元器件的饱和特性,运动部件的死区、间隙和摩擦特性等。由于非线性方程在数学处理上较困难,目前对不同类型的非线性控制系统的研究还没有统一的方法。但对于非线性程度不太严重的元器件,可采用在一定范围内线性化的方法,从而将非线性控制系统近似为线性控制系统。

1.4 对控制系统的基本要求

虽然控制系统的类型及功能各不相同,但其研究的内容及方法都是类似的。控制系统在没有受到外作用时,其处于一个平衡状态,系统的输出保持其原状态不变。当系统受到外作用时,其输出必将发生相应的变化。因为系统中总是包含具有惯性或储能特性的元器件,所以输出量不能立即按希望的规律变化,而是有一个过渡过程。每个控制系统在不同的外作用下,都会表现出各不相同的过渡过程特性,它是衡量控制系统动态品质的重要标志。一旦动态过渡过程结束,系统将进入新的平衡状态。此时,用系统的静态特性来描述输入量与输出量之间的关系。

1.4.1 基本要求的提法

系统被控量变化全过程提出的基本要求都是一样的,可以归结为稳定性、快速性和准确性,即稳、快、准的要求。