



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

(第2版)

王划一 杨西侠 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

(第2版)

王划一 杨西侠 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书第2版作为国家级“十一五”规划教材是在第1版面面向21世纪高等院校教材基础上修订而成的。书中全面系统地介绍了自动控制理论基本分析和设计方法。全书共分9章,前6章介绍连续控制系统的数学建模、时域分析、根轨迹分析、频域分析以及系统的校正等方法。第7章介绍非线性系统的基本分析方法,其中包括相平面法和描述函数法。第8章介绍离散控制系统的理论,用时域法分析了离散系统的稳定性、动态性能和稳态误差,以及数字校正等问题。新增加的第9章内容,精练地介绍了目前国际控制界流行的MATLAB仿真方法,并精心设计了经典的模拟实验以供读者训练之用。在附录中增加了拉普拉斯变换和MATLAB应用的基础知识以供读者查阅。

为便于读者自学,本书精心选编了大量解题指导,旨在加强学生的课后训练,提高分析设计能力,以便学生灵活运用各章方法。同时,根据多年的考研辅导经验,精选了重要例题附在其中,对考研复习意义重大。加之各章配有的内容总结、提要和学习、复习指导,提纲挈领地使本章内容串成一条主线,相互联系起来,有利于突出重点和牢固掌握基本知识。

本教材可作为普通高校自动化、通信、计算机、自动控制、仪器仪表、测控、机械、动力、冶金等专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可作为科技人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 王划一, 杨西侠编著. —2版. —北京:
国防工业出版社, 2009.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-118-06446-9

I. 自... II. ①王... ②杨... 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115789号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 28 字数 701 千字

2009年8月第2版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 42.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

第2版前言

进入21世纪以来,面对高科技的迅猛发展,自动化技术产生了巨大的进步,自动控制理论也得到不断地发展和完善。为了培养适应21世纪需要的高质量人才,近年来,我国各大学不断进行深入的教学改革。本教材第1版是在面向21世纪教学内容和课程体系全面改革的进程中,参照教育部新大纲的要求,根据自动化学科的发展趋势,编写的新一轮教材。该教材第1版发行后,其特色和实用性很快受到读者的欢迎,同时被许多高校选为教材。在发行9年的时间里,重复印刷了12次,印数达5万册。2005年,在国防工业出版社的推荐下,通过教育部专家的评审,本教材入选教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材建设项目。近年来,经过第1版教材的教学实践,不断地探索、研究教学内容,总结实践经验,按国家“十一五”规划教材建设要求,重新对教材进行编写修订。

本书第2版的编写仍然突出三个特色,一是更适应当代教学的要求,在内容选择上更加精练,理论阐述深入浅出,突出物理概念,紧密结合工程实践,并根据教学实验的需要,编入了近年来国际上流行的MATLAB仿真方法,将经典理论与现代技术结合起来,使课程更符合国内外自动化发展的趋势;二是更便于学生自学,对于理论性较强的部分,作了更详细的阐述和论证,使学生易于读懂,从而节省课堂学时;三是书中各章均配有学习指导和例题精解,以指导学生提高解题能力,灵活掌握所学内容。实现了习题解答、学习指导与教科书三者合一的编写特色,其内容和例题的精选均具有较强的代表性,特别适合准备考试、考研的学生复习,不必查阅大量的参考书和试题集,节省大量时间和精力。

本书第2版在编写内容上进行了全面的修订,根据近几年的教学体会,再度精选了各章的内容,削枝强干,深入浅出,以最基本的内容为主线,注重工程概念,保持实用性强的特点,使其更适宜用作大学的教材。特别重新撰写了第3章时域分析法、第4章根轨迹法、第7章非线性系统的全部内容,对第5章频率法中奈氏判据的证明和第7章的串联校正内容均作了相应的修订。同时,为了加强理论与实践的结合,突出实践性教学环节,本书增加了最后一章,编写了以国际控制界最流行的MATLAB仿真和实验室模拟实验为手段的技能性训练内容,弥补了近年来教学实践上存在的薄弱环节。这一章配合全书所讲理论,在计算工具和设计方法上提供了方便而实用的手段。即使没有接触过MATLAB的读者,也能通过本章内容的学习,轻松掌握MATLAB方法。该章实验内容均经过精心的设计和筛选,精练且实用,通过电子模拟的实验手段,锻炼学生的操作技能,真正指导学生达到学以致用。

本教材可作为普通高校自动化、通信、计算机、自动控制、仪器仪表、测控、机械、动力、冶金等专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可作为科技人员参考用书。

本教材第1、2、3、8、9章由王划一编写,第4、5、6、7章由杨西侠编写。

对于本版中存在的错误和不妥之处,恳请广大读者不吝指正。

编者

2009年6月

第 1 版前言

随着 20 世纪自动化技术的巨大进步,自动控制理论得到不断地发展和完善,大学“自动控制理论”课程,越来越受到重视。实践证明,该课程不仅对工程技术有指导作用,而且对培养学生的辩证思维能力,建立理论联系实际的科学观点和提高综合分析问题的能力,都具有重要的作用,现已成为诸多专业普遍开设的课程。

面对高科技的迅猛发展,为了培养适应 21 世纪需要的高质量人才,我国各大学正在深入进行教学改革。本教材是在面向 21 世纪教学内容和课程体系全面改革的进程中,参照高校教改方针,为适应学时压缩,专业面拓宽的教改方向,并根据自动化学科的发展趋势,结合近年来探索、研究与实践的经验,组织编写的新一轮教材。

本书全面地阐述了自动控制的基本理论,系统地介绍了自动控制理论基本分析和研究方法,根据多年的教学体会,精选了各章的内容,使其更适宜作大学的教材。本书共分八章,以最基本的内容为主线,注重系统性、逻辑性。不仅具有理论严谨、系统性强的特点,而且突出工程概念,实用性强,便于读者自学。

本书第一章介绍了自动控制的基本概念,将控制理论研究的对象和任务作了整体的介绍,引出了自动控制系统的常用术语,并给出了从系统原理图到方框图的定性分析方法,简述了自动控制理论的发展历史。

第二章是控制系统数学描述方法,详述了数学模型作为理论研究的重要意义,系统地介绍了作为定量分析控制系统的两种数学模型和两种数学图形,突出强调参数模型的必要性及基本要素与其表达,并着重对传递函数分析和基于方框图、梅逊公式的数学模型的简化方法进行了详细讨论。

第三章介绍了线性系统的时域分析方法,并重点对系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法进行了讨论。

第四章介绍了线性系统根轨迹分析方法,编入了根轨迹作图的基本内容,并引进了 MATLAB 方法绘制根轨迹。

第五章频率法是工程上重点应用的方法,对频率域作图、分析的原理进行了详细讨论,并给出了截止频率、相位裕量等频域指标的分析计算方法。

第六章介绍了线性系统的校正方法,重点介绍工程中常用的频率法校正,对反馈校正、复合校正的内容,也作了介绍,并给出了各种校正装置的设计方法和性能指标的验算方法。

第七章介绍了非线性系统的描述函数法和相平面图法,讨论了工程实际中常见的非线性特性及解决的一般方法。

第八章介绍了离散控制系统理论,详细讨论了 Z 变换理论对离散信号的分析基础,指出了应用线性理论分析系统性能的方法与连续系统的相似性,并重点介绍了数字控制器的直接设计方法。

本书的编写意图有二:一是适应教学的需要,在内容上保留了课程的重点,去掉了工程

上不常用的扩展内容,以突出基础和重点;二是便于自学,有些理论性较强的部分,在文字上作了较详细的阐述和论证,使学生较容易看懂,从而节省课上学时,同时配有大量例题精选,以方便指导学生提高解题能力,同时对考研的学生也是很重要的参考。归纳本书的特色有以下几点:

1. 符合新时期自动化专业发展的方向,内容实用、精练。

2. 注重基本概念的讲解,针对工科学生特点,对于重要的定理,兼顾到理论完整性的同时,力求避免采用高深数学推导,尽量用物理概念或几何意义来形象直观地阐述。

3. 遵照课堂学时减少,课后加强训练的原则,在内容编排上将教科书与自学指导融为一体,每章前半部分精选基本内容以利于课堂讲解,后半部分适当深入展开讨论,并配有解题指导,大量例题精解,内容小结和自学指导,既便于教,又便于学。

4. 符合国内外自动化专业发展的趋势,充分体现计算机技术与网络信息技术的应用,特别是融入了国际上流行的 MATLAB 应用软件,对于分析、计算、设计和仿真研究均有很好的效果。

本教材可作为普通高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可作为科技人员的参考用书。

本教材主编王划一,副主编杨西侠、林家恒、杨立才。第一、二、八章由王划一编写;第三、四章由杨立才编写;第五、六章及附录由杨西侠编写;第七章由林家恒编写。

因编写时间仓促,编者水平有限,书中所出现的缺点、错误,恳请读者批评指正。

编者
2001年5月

目 录

第 1 章 自动控制的基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制的基本知识	2
1.2.1 自动控制问题的提出	2
1.2.2 自动控制的定义及基本职能 元件	3
1.2.3 自动控制中的一些术语及方 框图	4
1.3 自动控制系统的基本控制方式	5
1.3.1 开环控制	5
1.3.2 闭环控制	7
1.3.3 开环系统与闭环系统的比较	8
1.4 自动控制系统的分类及基本 组成	9
1.4.1 按给定信号的特征分类	9
1.4.2 按系统的数学描述分类	10
1.4.3 按信号传递的连续性分类	11
1.4.4 按系统的输入与输出信号的 数量分类	12
1.4.5 自动控制系统的基本组成	13
1.5 对控制系统的要求和设计	14
1.5.1 对系统的要求	14
1.5.2 控制系统的分析与设计	16
1.6 自动控制理论的发展概况	17
1.6.1 早期的自动控制工作	17
1.6.2 经典控制理论	17
1.6.3 现代控制理论	19
1.7 例题精解	19
学习指导与小结	21
习题	23
第 2 章 控制系统的数学模型	25
2.1 引言	25
2.1.1 系统数学模型的特点	25
2.1.2 数学模型的类型	26
2.1.3 系统数学模型的建模原则	26
2.2 系统微分方程的建立	26
2.2.1 列写微分方程式的一般步骤	27
2.2.2 机械系统举例	27
2.2.3 电路系统举例	28
2.2.4 实际物理系统线性微分方程的 一般特征	29
2.2.5 电枢控制直流电动机	30
2.2.6 复杂系统微分方程的列写	32
2.3 非线性数学模型线性化	33
2.3.1 小偏差线性化的概念	34
2.3.2 线性化的意义及常用方法	34
2.3.3 系统线性化的条件及步骤	36
2.3.4 关于线性化的几点说明	39
2.4 线性系统的传递函数	40
2.4.1 线性常系数微分方程的求解	40
2.4.2 传递函数的定义和实际意义	41
2.4.3 传递函数的性质及微观结构	43
2.5 典型环节及其传递函数	48
2.6 系统的结构图	54
2.6.1 结构图的定义及基本组成	54
2.6.2 结构图的绘制步骤	55
2.6.3 结构图的基本连接形式	56
2.6.4 结构图的等效变换	59
2.6.5 结构图的简化	60
2.7 信号流图及梅逊公式	62
2.7.1 信号流图的基本概念	62
2.7.2 信号流图的绘制方法	64
2.7.3 梅逊增益公式	66
2.8 例题精解	70
学习指导与小结	80

习题	82	习题	131
第3章 时域分析法	87	第4章 根轨迹法	134
3.1 典型输入信号和时域性能指标 ...	87	4.1 根轨迹	134
3.1.1 典型输入信号	87	4.1.1 根轨迹的基本概念	134
3.1.2 阶跃响应性能指标	89	4.1.2 根轨迹与系统性能	135
3.2 一阶系统时域分析	91	4.1.3 根轨迹方程	136
3.2.1 一阶系统的单位阶跃响应	91	4.2 绘制根轨迹的基本法则	137
3.2.2 一阶系统的单位脉冲响应	92	4.2.1 绘制根轨迹的基本法则	138
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	93	4.2.2 闭环极点的确定	146
3.3 典型二阶系统时域分析	93	4.3 广义根轨迹	147
3.3.1 典型二阶系统的单位阶跃 响应	94	4.3.1 零度根轨迹	147
3.3.2 欠阻尼二阶系统暂态性能指标 估算	99	4.3.2 参变量根轨迹	149
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	102	4.3.3 增加开环零极点对根轨迹的 影响	151
3.3.4 二阶系统的单位斜坡响应	103	4.4 例题精解	152
3.3.5 二阶系统性能的改善	104	学习指导与小结	160
3.4 高阶系统分析	107	习题	161
3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应	107	第5章 线性系统的频率响应法	163
3.4.2 闭环零、极点对系统性能的 影响	108	5.1 频率特性	163
3.4.3 闭环主导极点	109	5.1.1 基本概念	163
3.5 控制系统的稳定性分析	110	5.1.2 频率特性的定义	165
3.5.1 稳定性的概念及线性系统稳定 的充要条件	110	5.1.3 频率特性的几何表示法	166
3.5.2 劳斯稳定判据	111	5.2 典型环节的频率特性	167
3.5.3 两种特殊情况	113	5.3 控制系统的开环频率特性	175
3.5.4 劳斯稳定判据在系统分析中的 应用	114	5.3.1 开环极坐标图	175
3.6 控制系统的稳态误差分析	116	5.3.2 开环伯德图	179
3.6.1 稳态误差的定义及一般计算 公式	116	5.3.3 最小相位系统与非最小相位 系统	181
3.6.2 控制系统的类型	117	5.4 奈奎斯特稳定判据	183
3.6.3 给定信号作用下的稳态误差 分析	117	5.4.1 辅助函数	183
3.6.4 扰动信号作用下的稳态误差 分析	121	5.4.2 幅角原理	184
3.7 例题精解	122	5.4.3 奈氏判据	184
学习指导与小结	129	5.4.4 伯德图上的稳定性判据	190
		5.5 开环频域指标	192
		5.5.1 稳定裕度	192
		5.5.2 开环频域指标与时域性能指标 的关系	194
		5.6 闭环频率特性	197

5.6.1 闭环频率特性	197	7.2.1 描述函数的定义	252
5.6.2 闭环频域指标与时域性能指标 的关系	197	7.2.2 描述函数的求法	253
5.6.3 闭环频域指标与开环频域指标 的关系	199	7.2.3 组合非线性特性的描述函数	256
5.7 例题精解	199	7.2.4 用描述函数法分析非线性 系统	257
学习指导与小结	205	7.3 相平面法	260
习题	206	7.3.1 相平面法的基本概念	261
第6章 控制系统的校正	210	7.3.2 相平面图的绘制	261
6.1 校正的基本概念	210	7.3.3 线性系统的相平面图	263
6.1.1 校正的定义	210	7.3.4 奇点和奇线	266
6.1.2 校正方式	211	7.3.5 非线性系统的相平面法分析	270
6.1.3 设计方法	212	7.4 例题精解	274
6.2 典型校正装置	213	学习指导与小结	283
6.2.1 典型无源超前校正网络	213	习题	284
6.2.2 典型无源滞后校正网络	214	第8章 离散控制系统	288
6.2.3 典型无源滞后—超前校正 网络	215	8.1 引言	288
6.2.4 调节器	216	8.1.1 离散系统的基本概念	288
6.3 频率法串联校正	218	8.1.2 离散系统的定义及常用术语	290
6.3.1 串联超前校正	218	8.1.3 离散系统的特点	292
6.3.2 串联滞后校正	221	8.2 采样过程和采样定理	293
6.3.3 串联无源滞后—超前校正	224	8.2.1 采样过程的数学描述	293
6.3.4 串联综合法	224	8.2.2 采样信号频谱分析	295
6.3.5 PID 调节器	226	8.2.3 采样定理	297
6.4 频率法反馈校正	229	8.3 信号恢复	298
6.5 控制系统的复合校正	232	8.3.1 信号保持的基本原理	298
6.5.1 按扰动补偿的复合校正	232	8.3.2 零阶保持器	299
6.5.2 按输入补偿的复合校正	234	8.4 Z 变换	301
6.6 例题精解	235	8.4.1 Z 变换的定义	302
学习指导与小结	243	8.4.2 Z 变换的求法	302
习题	244	8.4.3 Z 变换的性质	305
第7章 非线性系统	248	8.4.4 Z 反变换	310
7.1 典型非线性特性	248	8.5 离散系统的数学模型	312
7.1.1 典型非线性特性的种类	248	8.5.1 差分方程	313
7.1.2 非线性系统的若干特征	250	8.5.2 脉冲传递函数	317
7.1.3 非线性系统的分析方法	252	8.5.3 离散系统结构图与脉冲传递 函数	321
7.2 描述函数法	252	8.5.4 两种数学模型之间的相互 转换	329
		8.6 离散系统的时域分析	330

8.6.1 s 平面与 z 平面的映射关系	331	9.2.6 常数与算术运算符	379
8.6.2 离散系统的动态性能分析	332	9.2.7 MATLAB 图形窗口	380
8.6.3 离散系统的稳定性分析	338	9.2.8 MATLAB 编程指南	380
8.6.4 离散系统的稳态误差	341	9.3 MATLAB 在控制系统中的	
8.7 离散系统的数字校正	344	应用	381
8.7.1 数字控制器的脉冲传递函数 ..	345	9.3.1 用 MATLAB 建立传递函数	
8.7.2 最少拍系统及其设计	347	模型	381
8.8 例题精解	358	9.3.2 用 MATLAB 求系统的零点、极点	
学习指导与小结	366	及特征多项式	385
习题	370	9.3.3 用 MATLAB 绘制二维图形	387
第 9 章 控制系统的 MATLAB 仿真		9.3.4 用 MATLAB 分析控制系统	
与模拟实验	374	性能	391
9.1 MATLAB 简介	374	9.4 Simulink 方法建模与仿真	407
9.1.1 MATLAB 的安装	374	9.5 自动控制理论模拟实验与	
9.1.2 MATLAB 工作界面	375	Simulink 仿真	410
9.1.3 MATLAB 命令窗口	376	实验一 典型环节与阶跃响应测试	411
9.2 MATLAB 基本操作命令	377	实验二 系统频率特性测量	417
9.2.1 简单矩阵的输入	377	实验三 连续系统的频率法串联	
9.2.2 复数矩阵输入	378	校正	422
9.2.3 MATLAB 语句和变量	378	附录 1 拉普拉斯(Laplace)变换	428
9.2.4 语句以“%”开始和以分号“;”		附录 2 MATLAB 常用命令	436
结束的特殊效用	379	参考文献	438
9.2.5 工作空间信息的获取、退出和			
保存	379		

第 1 章 自动控制的基本概念

1.1 引言

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术所起的作用越来越重要。无论是在宇宙飞船、导弹制导的尖端技术领域,还是在机器制造业及工业过程控制中,所取得的成就都是惊人的。不仅如此,在人们的现代生活和工作中,自动化技术也无时不在地为人们创造着方便快捷的环境,使人们享受着高科技所带来的现代生活。

科学技术的发展是需要理论指导的,人类历史上的许多技术由于没有概括出原理,得不到发展和流传,所以也很难成为全社会的生产力。自动控制技术也是一样,在长达数千年的技术发展中,直到 20 世纪,人们才能概括出自动控制的基本原理,然后将其应用到各个生产领域,制造出各种各样的自动化装置、机器人、无人工厂,以及办公自动化、农业自动化、家庭自动化设备等,逐步形成今天这样强大的社会生产力,把人类推进到一个崭新的时代——自动化时代。可以说,没有控制论的建立和发展,也就没有今天这样高度发达的自动化技术。

控制论的形成和发展,是始于技术的。最早从解决生产实践问题开始,首先建立的是工程控制论。即从工程技术提炼到工程技术的理论,是控制工程系统的技术的总结。其后,由于它对生产力的发展、尖端技术的研究与尖端武器的研制产生了巨大的推动作用,以致引起包括非工程系统及各社会各行业专家的关注。控制论所揭示的思想方法,已大大超出了工程控制领域,吸引了许多不同行业技术专家和社会科学家,他们用控制论的思想方法去研究各自所从事的学科。因此,控制论在它建立后的短短时期内便迅速渗透到各个科学技术领域,并以相关的分析观点派生出许多新型的边缘学科。其中包括生物控制论、经济控制论、人口控制论、生态环境控制论、社会控制论等。20 世纪上半叶,相对论、量子论和控制论被认为是三大伟绩,称为三项科学革命,是人类认识客观世界的三大飞跃。

控制论的分析观点,广泛地渗透到各个学科领域中去,这是由它所研究的内涵决定的。其核心是研究世间一切能量变换和信息变换如何满足人类的最佳需求。它的任务,是对各类系统中的信息传递与转换关系进行定量分析,然后根据这些定量关系预见整个系统的行为。没有定量分析,就没有控制论。因此,在理论的研究中,广泛地利用了各种数学工具。例如微积分、微分方程、概率论、高等代数、复变函数、泛函分析、变分法、拓扑学等几乎数学的所有分支理论都渗透到了控制论的研究中。从这个意义上来说,控制论可以称作应用数学的一个分支。

我们要讨论的自动控制理论,仅仅是工程控制论的一个部分,它只研究控制系统分析和设计的一般理论。随着自动化技术发展的不同阶段,自动控制理论相应分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。目前,控制理论已不仅仅是数学研究人员关心的课题,由于它对工程实践的指导作用,已成为工程技术人员的必修课。在技术高度发达的今天,控制工程师已更多更广泛地将控制理论与控制技术结合起来,在各个专业工程领域中,将人们的许多希望和梦想变成了现实。所以自动控制已被列为最有前途的领域之一,而它的发展趋势似乎又是无

可限量的。

1. 控制理论的基础观念

控制理论是建立在有可能发展一种一般方法来研究各式各样系统中控制过程这一基础上的理论。这个观念的重要性,在于它提供了一个有力的工具来定量地描述、解决复杂问题的过程。它的目的是综合各类系统的技术成果,提炼出一般性的理论,从而对自动控制技术的发展起指导作用。

2. 控制理论的研究对象

控制理论的研究是面向系统的。广义地说,是研究信息的产生、转换、传递、控制、预报的科学。简言之,是研究有输入与输出的信息系统。但从工程控制的角度来说,控制理论研究的对象可狭义地定义为这样一种信息系统,即根据期望的输出来改变输入,使系统的输出能有某种预期的效果。

3. 控制论与数学及自动化技术的关系

控制论是应用数学的一个分支,它的某些理论的研究还要借助于抽象数学。而控制理论的研究成果若要应用于实际工程中,就必须在理论概念与用来解决这些问题的实用方法之间架设一座桥梁。理论本身不能直接解决工程技术中的实际问题,要靠工程领域中相应的自动化技术来实现应用。所以说自控理论的读者或研究工作者,都至少应该熟悉一个具体领域中的工程技术,用控制理论去指导工程的设计,才能设计出一种可行的或最佳的系统。

1.2 自动控制的基本知识

在讨论控制系统之前,先介绍自动控制的基本知识,然后对一些术语进行定义。

1.2.1 自动控制问题的提出

人类企图控制自然的要求,一直是促进历史发展的动力。控制自然的目的是借以完成超出人们力所能及的任务。在工农业生产、国防建设、科学技术以至日常生活领域的各个方面,人们存在着同类相当普遍的实际希望和要求:要求某些物理量维持在某种特定的(恒定的或变动着的)标准上。但是在实际中,上述要求不可能自然地实现。现举例说明如下:

图1-1所示的是一个简单的水箱液面。为满足生产和生活的需要,希望液面高度 h 维持恒定(或在允许的偏差范围以内)。当水的流入量与流出量平衡时,水箱的液面高度维持在预定的(希望的)高度上。

当水的流出量增大或流入量减小,平衡则被破坏,液面的高度不能自然地维持恒定,而且这种出水量与进水量不平衡现象是必然要经常发生的(例如,进水压力的下降或用水量的增加)。这样使得这种“水位恒定的要求”变得难以实现了。

从上面这个浅近的例子中,我们开始体会到,生产和生活中的确存在着一种普遍的客观矛盾。矛盾的双方一方是必要性,另一方是不可能性。正如上例所指出的,要求水位维持在某种特定标准上的必要性,而在实际中由于各种原因,自然地实现上述要求的不可能性。

人们在与大自然做斗争的长期过程中,创造了各种有效的方法,积累了异常丰富的经验,在不同程度上解决了或者正在解决着这个普遍存在着的实际矛盾。其中最行之有效的方法就是采用了控制法。所谓控制就是强制性地改变某些物理量(如上例中的进水量),而使另外某

些特定的物理量(如液面高度 h) 维持在某种特定的(恒定的或变动着的)标准上。作为人工控制的例子,如图 1-2 所示。

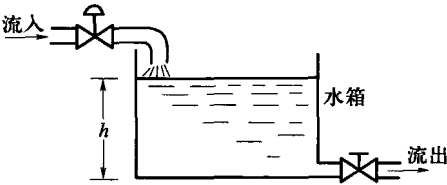


图 1-1 水箱液面

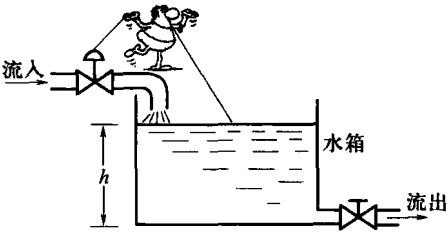


图 1-2 液面人工控制

当水位偏离希望值时,人通过眼睛对液面高度进行观测,及时地做出决定,操动进水阀门,对进水量进行相应的修正,使液面恢复到希望的高度。这种人为地强制性地改变进水量,而使液面高度维持恒定的过程,即是人工控制过程。人工控制在复杂、快速、精确的系统中是不能满足要求的,也不利于减轻劳动强度。于是,没有人直接参与的自动控制,随着控制工程的发展而逐步发展起来了。

1.2.2 自动控制的定义及基本职能元件

1. 自动控制的定义

自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用控制器使被控对象(或过程)的某些物理量(或状态)自动地按预先给定的规律去运行。

对于液位自动控制,可用图 1-3 所示的方式实现。液面的希望高度由自动控制器刻盘上的指针标定。当出水与进水的平衡被破坏时,水箱水位下降(或上升),出现偏差。该偏差由浮子检测出来,自动控制器在偏差的作用下,控制气动阀门使阀门开大(或关小),对偏差进行修正,从而保持液面高度不变。

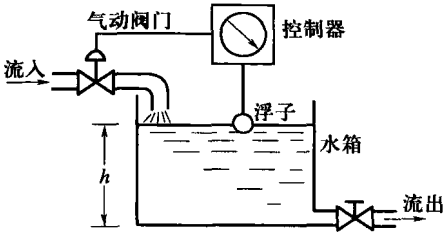


图 1-3 液面自动控制

2. 自动控制的基本职能元件

从以上介绍的由人工控制发展到自动控制的例子可以看出,自动控制的实现,实际上是由自动控制装置来代替人的基本功能,从而实现自动控制的。画出以上人工控制与自动控制的功能方框图进行对照,如图 1-4 所示。

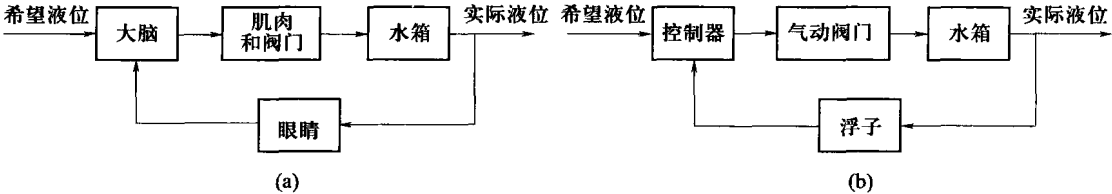


图 1-4 控制功能框图
(a) 人工控制; (b) 自动控制。

比较两图可以看出,用自动控制实现人工控制的功能,存在必不可少的三种代替人的职能的基本元件。

测量元件与变送器(代替眼睛);

自动控制器(代替大脑);

执行元件(代替肌肉、手)。

这些基本元件与被控对象相连接,一起构成一个自动控制系统。图 1-5 示出了典型控制系统方框图。

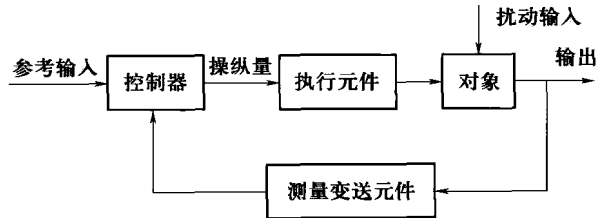


图 1-5 控制系统典型方框图

1.2.3 自动控制中的一些术语及方框图

1. 常用术语

控制对象:指被控设备或物体,也可以是被控过程(我们称任何被控制的运行状态为过程。如化学过程、经济学过程或生物学过程)。

控制器:使被控对象具有所要求的性能或状态的实行控制的设备。它接收输入信号或偏差信号,按控制规律给出操作量,送到被控对象或执行元件。

系统:作为一个整体,是一些部件的组合。这些部件组合在一起,完成一定的任务。系统的概念不限于物理系统,还可用于抽象的动态现象,像生物学、经济学系统等。

系统输出:就是被控制的量。它表征对象或过程的某个状态和性能。我们称系统的输出为对输入的响应。

操作量:是一种由控制器改变的量值或状态。它将影响被控量的值,也可称为控制量。体现出控制作用的变化信息。

参考输入:是人为给定的,使系统具有预定性能或预定输出的激发信号。它代表输出的希望值。

扰动:干扰和破坏系统具有预定性能和预定输出的干扰信号。如果扰动产生在系统内部,称为内部扰动;反之当扰动来自系统外部时,则称为外部扰动。外部扰动视为系统的输入量。

特性:指系统的输入与输出之间的关系,可分为静态特性和动态特性。我们可以用特性曲线来直观地描述和观察系统。

静态特性:在系统稳定以后,表现出来的输入与输出之间的关系。在控制系统中,静态是指各参数或信号的变化率为零。静态特性表现为静态放大倍数。

动态特性:输入和输出处在变化过程中所表现出来的特性。动态特性表现为过渡过程,即从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

2. 系统方框图

以上我们在列举简单控制的实例中,已经应用了方框图来帮助阐述系统各元件的功能及相互之间的连接。因为我们在具体讨论一个控制过程时,并不特别关心系统中各部件的详细构造,包括体积、重量、材料、强度等,也不特别关心能量流通的路径,功率的大小,效率的高低等。我们特别注意的是“信息”的传递,“信息”传递的路径,“信息”的变换等。在控制理论的讨论中,这种“信息传递”的观点,是一个非常重要的观点。方框图正是从控制系统信息流程图上抽象出来的。它突出了系统中各环节输入与输出的关系及各环节之间的相互影响,对于定性和定量分析,都比原理图清晰方便。

我们将系统中各个部分都用一个方框来表示,并注上文字或代号,根据各方框之间的信息传递关系,用有向线段把它们依次连接起来,并标明相应的信息,就得到整个系统的方框图。方框图对于定性分析系统工作原理,比原理图清晰得多。今后还会看到,在方框中写出各元件数学模型,可用来进行定量运算,在进行理论分析时,这将是十分有利的工具。

1.3 自动控制系统的的基本控制方式

自动控制系统的形式是多种多样的,对于某一个具体的系统,采取什么样的控制手段,要视具体的用途和目的而定。本节主要介绍控制系统中最常见的几种控制方式。

1.3.1 开环控制

开环控制是最简单的一种控制方式,按照控制信息传递的路径,它所具有的特点是,控制量与被控量之间只有顺向作用而没有反向联系。也就是说,控制信息的传递路径不是闭合的,故称为开环。开环控制方式按照信号输入位置的不同,又可分为按给定控制和按扰动控制两种常见形式。以下举例分别讨论。

1. 按给定控制

图 1-6 是一个直流电动机转速控制系统。图中电动机是电枢控制的直流电动机,要求带动负载以一定的转速转动。其电枢电压由功率放大器提供,当调节电位器滑臂位置时,可以改变功率放大器的输入电压,从而改变电动机的电枢电压,最终改变电动机的转速。

以上的控制过程,可用方框图简单直观地表示成图 1-7 的形式。

由方框图可明显地看出控制信息的传递过程是由输入端沿箭头方向逐级传向输出端,控制作用直接由系统的输入量产生,给定一个输入量,就有一个输出量与之相应。控制精度完全取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。

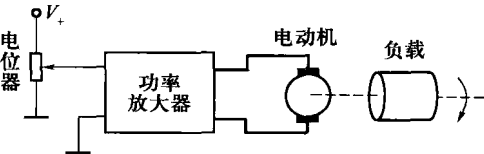


图 1-6 直流电动机转速开环控制

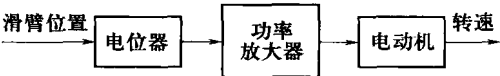


图 1-7 直流电动机转速开环控制方框图

这种控制方式的特点是控制作用的传递具有单向性,作用路径不是闭合的,属于典型的开环控制方式。由于开环控制结构简单、调整方便、成本低,在国民经济各部门均有采用。如自

动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线、数控机床及交通指挥红绿灯转换等。

从开环控制的控制原理来看,其简单性就在于输出直接受输入的控制。至于控制的精度,是不能由输入值来保证的。就以上系统来说,假如输入值不变,原则上希望输出转速保持相应的恒定值,其他的干扰因素不要影响输出的状态。但实际情况往往不是这样,当系统受到外界扰动时,如电动机的负载增大,即使电位器的位置按控制指令不变,输出转速仍要跟着下降。这说明开环控制虽然简单但准确性较差,即抗干扰性差。由于这一缺点,有些控制精度要求较高的场合,开环控制是不能满足要求的。

2. 按扰动控制

为了克服开环控制的缺点,提高控制精度,在一些扰动可以预计或可测的场合,可根据测得扰动量的大小,对系统产生一种补偿和修正,从而减小或抵消扰动对输出量的影响。这种控制方式,从原理上讲,是把外界扰动看作系统的一种输入,针对它将对系统输出产生的影响,及时地施加一种相应的控制,在干扰刚刚出现之初,就立即给以相应的调节,其结果用以抵消扰动对输出的影响,做到“防患于未然”,起到抗干扰的作用。例如直流电动机转速控制系统中,负载的增大引起转速下降。负载变化可以及时通过测量电枢回路电流变化间接反映出来,按电流变化的大小,产生一个附加的控制作用,用以补偿由它引起的转速下降。这样构成的转速控制系统,即为按扰动控制,如图 1-8 所示。

以上的控制过程用方框图表示出来,可明显地看出控制作用的传递过程,见图 1-9。图中用“ $\otimes$ ”代表多路信号汇合点,“+”号表示相加,“-”号表示相减。

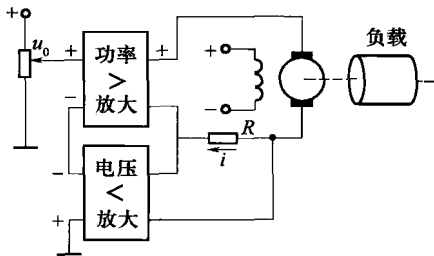


图 1-8 按扰动控制

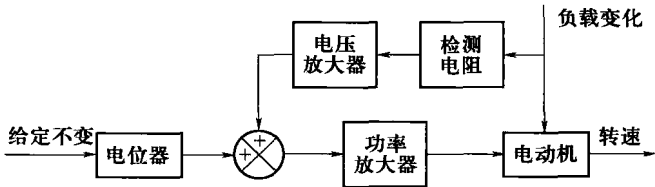


图 1-9 按扰动控制方框图

把负载变化视为外部扰动输入,对输出转速产生的影响及控制(补偿)作用,分别沿箭头的方向从输入端并行地传送到输出端,作用的路径也是单向的,不闭合的。有时我们称按扰动控制为顺馈控制。对照前一种按给定控制的路径,它们是相互平行的。因此,按给定控制和按扰动控制原则建立起来的系统,都属于开环控制。它们的基本特征是:作用信号是单方向传递的,形成开环。

3. 开环控制的定义

由以上介绍的开环控制的两种方式来看,无论是按给定控制还是按扰动控制,都具有以下两个特点:

- (1) 输入量产生控制作用影响输出量的变化;
- (2) 输出量对输入产生的控制作用没有影响。

由此我们可以给出开环控制的一般定义:

定义 若系统的输出量对系统的控制作用没有影响,则称为开环控制系统。

开环控制系统的典型方框图如图 1-10 所示。

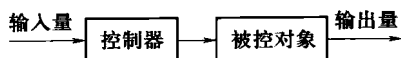


图 1-10 开环控制系统

前面叙述了开环控制的功能特征,并指出其优缺点。但是,我们知道控制系统存在着各种干扰信号,会直接或间接影响系统的控制精度。对于这些干扰信号,有些是可以预先估计的,有些则是无法预知的随机信号。对于能够预测的部分,虽然可以采用补偿的方式来实行控制,但由于干扰的种类繁多,测量的困难,实现起来也不可能面面俱到。而那些随机的干扰信号,开环控制就显得无能为力了。总之,开环系统精度不高的原因,就是没有根据系统的实际输出修正控制作用,以使系统输出具有准确的值。开环控制的这一“致命”缺点,大大地限制了这种系统的应用范围。

1.3.2 闭环控制

在控制系统中,控制装置对被控对象所施加的控制作用,若能取自被控量的反馈信息,即根据实际输出来修正控制作用,来实现对被控对象进行控制的任务。这种控制原理称为反馈控制原理。正是由于引入了反馈信息,使整个控制过程成为闭合的。因此,按反馈原理建立起来的控制系统,叫做闭环控制系统。在闭环控制系统中,其控制作用的基础是被控量与给定值之间的偏差。这个偏差是各种实际扰动所导致的总“后果”,它并不区分其中的各别原因。因此,这种系统往往同时能够抵制多种扰动,而且对系统自身元部件参数的波动也不甚敏感。作为直流电动机转速闭环控制的例子如图 1-11 所示。

该系统在原来开环控制的基础上,增加了一个由测速发电机构成的反馈回路,用来检测输出的转速,并给出与电动机转速成正比的反馈电压。将这个代表实际输出转速的反馈电压与代表希望输出转速的给定电压进行比较,所得出的偏差信号作为产生控制作用的基础,通过功率放大器来控制电动机的转速,常称为按偏差控制。可以看出,在控制过程中,只要偏差存在,控制作用总是存在的。控制的最终目的是减小偏差,提高控制精度。

用方框图直观地把上述控制过程描述出来,更方便进行性能分析,方框图如图 1-12 所示。

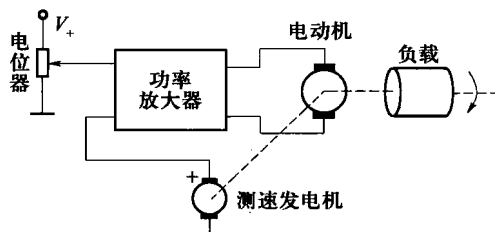


图 1-11 直流电动机转速闭环控制系统

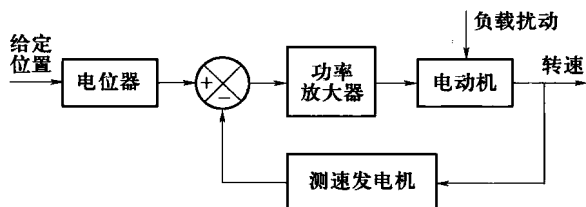


图 1-12 直流电动机转速闭环控制方框图

由方框图分析电动机转速自动调节的过程如下:当系统受到扰动影响时,例如负载增大,则电动机的转速降低,测速发电机的端电压减小。在给定电压不变时,偏差电压则会增大,则功率放大器输入电压增加,电动机的电枢电压上升,使得电动机转速增加。如果负载减小,则电动机转速调节的过程与上述过程变化相反。这样,抑制了负载扰动对电动机转速的影响。