



普通高等教育
“十一五”国家级
规划教材



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材

AUTOMATIC CONTROL THEORY

自动控制理论

王孝武 方敏 葛锁良 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

自动控制理论

王孝武 方 敏 葛锁良 编



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书系统地介绍了经典控制理论的基本理论和基本方法,包括控制系统建模、线性定常连续系统的时域分析法、根轨迹法和频域分析法;利用频率法和根轨迹法进行系统校正,以达到期望的性能。书中同时较详细地介绍了线性定常离散控制系统的建模、系统分析和校正的基本理论和方法。对于非线性系统,介绍了应用相平面法和描述函数法分析系统性能以及常用的改进控制系统性能的基本方法。

本书的内容阐述循序渐进,富有启发性;论证与实例配合紧密;注意各章节之间内容的衔接,可读性强,便于自学;重视理论联系实际,各章配有 MATLAB 仿真实例。本书配有电子教案,欢迎选用本书的老师索取。邮箱: wangyaxin1993@sohu.com。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、计算机科学与技术、电子信息工程、测控技术等专业本科生教材,也可供从事这些领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/王孝武,方敏,葛锁良编. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-27618-0

I. 自… II. ①王…②方…③葛… 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 117758 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:王雅新 版式设计:霍永明

责任校对:刘志文 封面设计:王洪流 责任印制:李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2009 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·26.75 印张·660 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-27618-0

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编 审 委 员 会

主任委员 汪櫬生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教学专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这类教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有

力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈永时 郑大钟

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

根据教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会制定的《普通高等学校自动化专业规范》中关于“自动控制理论”课程的知识点要求,本书系统全面地介绍了经典控制理论,主要包括连续时间系统的建模方法;线性定常系统的时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法;线性定常系统的校正方法;离散时间系统的建模、分析和校正方法;非线性系统的分析方法等。在已知系统数学模型的基础上,本书对系统稳定性、瞬态性能、稳态性能和抗干扰性能等进行了详细分析,针对系统要求的性能指标,介绍了基于根轨迹的校正方法和基于频率特性的校正方法。考虑到工程实际中存在的延迟现象,书中用一定的篇幅介绍了延迟系统的分析和校正。本书在内容上注意与《现代控制理论基础》(王孝武主编)一书的衔接,可与该书配套使用。

在编写方法上,本书从实例出发,引出问题,进而分析问题,解决问题。书中内容的阐述循序渐进,富有启发性,论证与实例配合紧密,并注意各章节之间的呼应,可读性强,便于自学。考虑到 MATLAB 编程语言已有专门课程介绍,本书直接应用 MATLAB 编程语言进行系统的模型描述、性能分析和校正设计。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、计算机科学与技术、电子信息工程、测控等专业本科生教材,也可供从事这些领域的工程技术人员参考。

本书由合肥工业大学王孝武教授、方敏教授、葛锁良副教授合编,王孝武编写第1、4章,方敏编写第2、6、7章,葛锁良编写第3、5、8章。

本书由上海交通大学田作华教授、中国科技大学李嗣福教授主审,他们对本书作了严谨、认真的审阅,提出了许多宝贵的意见,在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书得到全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会的关心和帮助,得到机械工业出版社和合肥工业大学的大力支持和资助,在此一并致谢。

在编写本书时,参考了一些专家、教授的专著和教材,在本书完稿之际,向他们致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中的不妥和错误之处恳请指正。

编 者

2009年2月于合肥工业大学

目 录

序

前言

第1章 绪论

1.1 自动控制与自动控制系统	1
1.2 自动控制系统	4
1.2.1 自动控制系统的组成	4
1.2.2 自动控制系统的原理框图	5
1.2.3 原理框图上的术语	5
1.2.4 自动控制系统原理框图的绘制	5
1.3 自动控制的基本方式	6
1.4 自动控制系统的分类	7
1.5 对自动控制系统的要求	9
1.6 自动控制系统与控制理论	10
1.7 自动控制理论发展概况	11
1.8 本课程的基本任务	13
小结	13
习题	14

第2章 控制系统的数学模型

2.1 引言	17
2.2 控制系统的微分方程	18
2.2.1 动态系统微分方程的建立	18
2.2.2 非线性微分方程的线性化	24
2.2.3 用拉普拉斯变换求解线性常 系数微分方程	28
2.3 线性定常系统的传递函数	29
2.3.1 传递函数的定义	29
2.3.2 传递函数的一般形式	30
2.3.3 关于传递函数的几点说明	31
2.3.4 典型环节及其传递函数	32
2.3.5 控制系统的传递函数	35
2.4 控制系统的结构图	36
2.4.1 结构图的组成	37
2.4.2 结构图的绘制	37
2.4.3 结构图的等效变换	39
2.5 控制系统的信号流图	45

2.5.1 信号流图的概念	46
2.5.2 信号流图的绘制	47
2.5.3 信号流图的等效变换	48
2.5.4 梅逊增益公式	50

2.6 闭环控制系统中几个常用的 传递函数概念	52
2.7 应用 MATLAB 建立控制系统 模型	53
小结	56
习题	57

第3章 控制系统的时域分析

3.1 引言	63
3.1.1 典型初始状态	64
3.1.2 典型输入信号	64
3.1.3 典型时间响应	66
3.1.4 性能指标	67
3.2 一阶系统的时域分析	68
3.2.1 一阶系统的数学模型	68
3.2.2 一阶系统的响应	68
3.3 二阶系统的时域分析	73
3.3.1 二阶系统的数学模型	73
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	73
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	82
3.3.4 二阶系统的单位斜坡响应	82
3.3.5 二阶系统瞬态性能的改善	85
3.3.6 非零初始条件下二阶系统的 响应	88
3.4 高阶系统的时域分析	89
3.4.1 高阶系统的阶跃响应	89
3.4.2 闭环主导极点和偶极子	90
3.4.3 高阶系统瞬态性能估算	91
3.5 线性定常系统的稳定性分析	93
3.5.1 稳定的基本概念	93
3.5.2 线性定常系统稳定的数学 条件	93
3.5.3 稳定判据	94

3.6 线性系统的稳态误差计算	101	4.7.1 延迟系统根轨迹的绘制依据	161
3.6.1 误差与稳态误差	101	4.7.2 延迟系统根轨迹的绘制规则	162
3.6.2 典型输入信号作用下的稳态 误差计算	104	4.8 用 MATLAB 绘制根轨迹	167
3.6.3 典型扰动信号作用下的稳态 误差计算	109	4.8.1 根轨迹的绘制	167
3.6.4 减小或消除稳态误差的措施	111	4.8.2 根轨迹增益 K^* 和闭环极点位置的 确定	167
3.7 控制系统的灵敏度	112	小结	170
3.7.1 控制系统灵敏度的定义	112	习题	171
3.7.2 控制系统灵敏度分析	113	第5章 控制系统的频域分析	174
3.8 用 MATLAB 进行控制系统时域 分析	114	5.1 频率特性	174
3.8.1 用 MATLAB 求控制系统的输出 响应	114	5.1.1 频率特性的基本概念	174
3.8.2 用 MATLAB 求控制系统的 参数	117	5.1.2 频率特性的几何表示	177
3.8.3 用 MATLAB 判断控制系统的 稳定性	117	5.2 典型环节的频率特性	179
3.8.4 用 MATLAB 计算静态误差 系数	118	5.2.1 比例环节	179
小结	119	5.2.2 惯性环节	180
习题	119	5.2.3 一阶微分环节	181
第4章 根轨迹法	124	5.2.4 积分环节	182
4.1 引言	124	5.2.5 微分环节	183
4.2 绘制根轨迹的依据	125	5.2.6 振荡环节	184
4.2.1 闭环零、极点和开环零、极点的 关系	125	5.2.7 二阶微分环节	187
4.2.2 根轨迹方程	127	5.2.8 不稳定环节	188
4.3 根轨迹的绘制规则及控制系统 闭环极点的确定	128	5.2.9 延迟环节	190
4.3.1 根轨迹的绘制规则	128	5.3 系统开环频率特性的绘制	191
4.3.2 控制系统闭环极点的确定	143	5.3.1 最小相位系统和非最小相位 系统	192
4.4 利用根轨迹分析系统性能	145	5.3.2 开环幅相曲线的绘制	192
4.5 参数根轨迹及根轨迹簇	148	5.3.3 开环对数频率特性曲线的 绘制	196
4.5.1 参数根轨迹	148	5.4 乃奎斯特稳定判据及系统 稳定性的判断	199
4.5.2 几个参变量的根轨迹簇	150	5.4.1 映射定理	199
4.5.3 多环系统的根轨迹	152	5.4.2 乃奎斯特稳定判据	200
4.6 零度根轨迹	154	5.4.3 虚轴上有开环极点时的乃氏 判据	202
4.6.1 零度根轨迹的定义	154	5.4.4 根据博德图判断系统的 稳定性	205
4.6.2 零度根轨迹的绘制规则	155	5.4.5 条件稳定系统	206
4.7 延迟系统的根轨迹	161	5.4.6 应用对数频率稳定判据判断多环 系统稳定性	207
		5.5 系统的相对稳定性和稳定 裕度	207
		5.6 系统的闭环频率特性	209

5.6.1 等 M 圆图	209	6.3.3 串联滞后-超前校正	248
5.6.2 等 N 圆图	211	6.4 串联校正: 根轨迹分析法	250
5.6.3 尼柯尔斯图线	212	6.4.1 串联超前校正	250
5.6.4 非单位反馈系统的闭环频率特性	214	6.4.2 串联滞后校正	254
5.7 系统时域指标估算	215	6.4.3 串联滞后-超前校正	256
5.7.1 频域性能指标	215	6.5 串联校正: 频域综合法	259
5.7.2 频率尺度与时间尺度的反比性质	215	6.5.1 绘制希望的开环频率特性	259
5.7.3 二阶系统时域指标估算	217	6.5.2 频域综合法设计串联校正装置	264
5.7.4 高阶系统时域指标估算	219	6.6 串联校正: PID 控制器的工程设计方法	266
5.7.5 根据闭环幅频特性形状估算时域指标	221	6.6.1 PID 控制规律	266
5.7.6 开环频率特性和时域指标的关系	221	6.6.2 PID 串联校正的工程设计方法	269
5.8 用 MATLAB 进行控制系统频域分析	223	6.7 反馈校正	271
5.9 传递函数的实验确定法	225	6.7.1 反馈校正的作用	271
5.9.1 频率响应实验确定数学模型的原理	226	6.7.2 反馈校正的频域综合法	273
5.9.2 包含延迟环节传递函数的确定	226	6.8 复合校正	276
5.9.3 国产 BT-6A 型超低频频率特性测试仪	227	6.8.1 复合校正的概念	276
小结	228	6.8.2 按扰动补偿的复合控制系统	276
习题	228	6.8.3 按输入补偿的复合控制系统	277
第 6 章 线性系统的校正	232	6.9 延迟系统的校正	280
6.1 引言	232	6.9.1 用帕德展开法处理 $e^{-\tau}$ 环节	280
6.1.1 控制系统的设计	232	6.9.2 史密斯预估补偿方案	281
6.1.2 性能指标	233	6.10 MATLAB 在系统校正中的应用	282
6.1.3 校正的作用	234	小结	286
6.1.4 校正方式	235	习题	287
6.1.5 校正装置的设计方法	235	第 7 章 线性离散控制系统	291
6.2 常用的串联校正装置及其特性	236	7.1 引言	291
6.2.1 超前校正网络	236	7.1.1 离散控制系统的结构	291
6.2.2 滞后校正网络	238	7.1.2 离散控制系统的研究方法	293
6.2.3 滞后-超前校正网络	239	7.2 信号的采样与恢复	293
6.2.4 有源校正网络	240	7.2.1 采样过程及采样信号的表示	294
6.3 串联校正: 频域分析法	240	7.2.2 采样信号的拉普拉斯变换	295
6.3.1 串联超前校正	241	7.2.3 采样信号的频谱	297
6.3.2 串联滞后校正	245	7.2.4 采样定理	299
		7.2.5 采样周期的选取	300
		7.2.6 信号的恢复	300
		7.3 Z 变换与 Z 反变换	304
		7.3.1 Z 变换的定义	304
		7.3.2 Z 变换的计算	305

7.3.3 Z 变换的基本定理	309	应用	356
7.3.4 Z 反变换的计算	313	小结	360
7.4 离散系统的数学模型	316	习题	361
7.4.1 线性常系数差分方程及其求解	316	第8章 非线性控制系统	364
7.4.2 脉冲传递函数	319	8.1 引言	364
7.4.3 离散系统的结构图化简	322	8.1.1 典型非线性特性及其对系统 运动的影响	364
7.5 离散控制系统的稳定性分析	330	8.1.2 非线性系统的特征	367
7.5.1 从 s 平面到 z 平面的映射	330	8.1.3 非线性系统的分析方法	369
7.5.2 线性定常离散系统稳定的充分 必要条件	331	8.2 相平面法基础	369
7.5.3 线性定常离散系统的稳定 判据	332	8.2.1 相平面法的概念	369
7.5.4 采样周期和保持器对离散系统 稳定性的影响	337	8.2.2 相轨迹的绘制方法	370
7.6 离散控制系统的瞬态性能 分析	337	8.2.3 由相平面图求时间解	374
7.6.1 线性定常离散系统的单位阶跃 响应	337	8.3 二阶系统的相平面分析法	376
7.6.2 用输出采样信号分析离散系统的 条件	339	8.3.1 线性系统的相轨迹	376
7.6.3 离散系统闭环极点分布与瞬态 响应的关系	340	8.3.2 奇点与平衡点	379
7.7 离散控制系统的稳态误差 分析	343	8.3.3 极限环	381
7.7.1 利用终值定理求稳态误差	343	8.3.4 非线性系统的相轨迹	381
7.7.2 离散系统的型别与静态误差 系数	344	8.3.5 速度反馈对系统自由运动的 影响	389
7.8 根轨迹和频率特性在离散系统 分析中的应用	347	8.3.6 继电系统的滑动现象	390
7.9 线性定常离散系统的数字 校正	349	8.3.7 利用非线性改善系统的性能	392
7.9.1 数字控制器的模拟化和离散化 设计方法	349	8.4 描述函数	396
7.9.2 最少拍无差系统的设计	351	8.4.1 描述函数的一般概念	396
7.9.3 数字控制器的实现	354	8.4.2 典型非线性特性的描述函数	397
7.10 MATLAB 在离散控制系统中的		8.5 用描述函数分析非线性系统	404
		8.5.1 系统的典型结构及基本条件	404
		8.5.2 非线性系统的稳定性分析	404
		8.5.3 非线性系统的自持振荡分析	406
		8.5.4 非线性系统结构图的简化	409
		8.6 MATLAB 在非线性系统中的 应用	410
		小结	412
		习题	413
		参考文献	416

第1章 绪 论

1.1 自动控制与自动控制系统

在国民经济各部门中，自动控制起着十分重要的作用。它不仅可以提高劳动生产率和产品质量、改善劳动条件，而且在人类开发利用自然资源和改善人民物质生活等方面都起着极为重要的作用。特别是在导弹制导、正确命中目标，宇宙飞船能够按照预定的轨道运行并安全返回地面等方面，不采用自动控制是不可能实现的。因此，自动控制是实现工业、农业、科学技术和国防现代化的重要技术手段，已被列为当今最有前途的领域之一，它的发展和应用是无可限量的。

什么是自动控制呢？从字面上讲，控制是使被控对象具有某种状态或具有要求的性能。而自动控制，就是在不需要人直接参与的情况下，控制被控对象，使之达到预定状态或所要求的性能。所谓被控对象，是指由一些机器零件有机组合在一起、完成一个（些）特定的运动规律或实现所要求任务的设备或装置。例如机床、雷达天线、加热炉、宇宙飞船等等。被控对象也可以是一个过程，是由一系列逐渐变化、以相对固定的规律发生、发展，最后导致一个特定的结果或状态。如化工过程、生物学过程或社会经济领域。通过控制，使它们达到预定的状态和（或）所要求的性能。对被控对象实施控制的装置称为控制装置或称为控制器。控制器通常是由一些元、部件组成的。控制器与被控对象构成的整体称为自动控制系统。一般地说，系统是指由一些相互制约的部件组成的完成一定任务或具有一定功能的整体。而自动控制系统则指具有自动控制功能的系统。下面举例说明自动控制系统的组成和工作原理。

例 1-1 水箱的水位控制系统。水箱的水位控制系统如图 1-1a 所示。在工作过程中，要求水箱的水位保持一定的高度 H_1 。水箱的进水量 Q_1 由控制阀的开度进行控制。水位的高度由浮子带动水位指示盘的指针指示。出水量 Q_2 是由用户操纵出水阀的开度大小来决定的。如果要保持水箱水位在一定高度，必须根据指示盘指示的水位由人工操纵控制阀控制进水量。若水位比要求的水位高了，则操纵控制阀，使其开度减小，流入水箱的水量 Q_1 相应减少；反之，若水位比要求的水位低了，则使控制阀开度增大，流入水箱的水量 Q_1 相应增加。从而维持水箱的水位保持在要求的高度。这种靠人来控制，在精确、快速的系统中是不能满足要求的，也不利于减轻劳动强度。在图 1-1a 中，水箱是被控制的对象，水位指示盘、控制阀和操作人员构成控制器。两者的组合构成水箱水位的控制系统。该系统通过操作者的直接参与达到控制水箱水位的目的，但不是自动控制。如何实现自动控制呢？在这个系统中，如果能够根据水箱内的水位高低，通过控制控制阀的开度自动调整进水量 Q_1 的大小，就可以使水箱的水位维持在要求的高度，即 $H_0 \approx H_1$ 。为此，在图 1-1a 的基础上，加上一个杠杆机构，如图 1-1b 所示，就可以实现水位的自动控制。图中浮子随水箱中的水位高低而上下移动，反映水位的实际高度 H_0 。（这里浮子也反映要求水位高度 H_1 和实际水位高度 H_0 之差）。

浮子推动杠杆机构,驱动控制阀的开度,便可以实现水位的自动调整,使水位在一定准确度下维持 $H_o = H_i$ 。如何自动调整呢?假设初始水位 $H_o = H_i$,如果出水量 Q_2 增大,在控制阀开度未改变情况下,实际水位 H_o 下降,浮子下移,通过杠杆机构,使控制阀的开度增大, Q_1 增加,使 H_o 增大,直到 $H_o = H_i$;反之,出水量 Q_2 减少, H_o 增大,浮子上移,推动杠杆机构使控制阀开度减小, Q_1 减小,使 H_o 下降,直到 $H_o = H_i$ 。

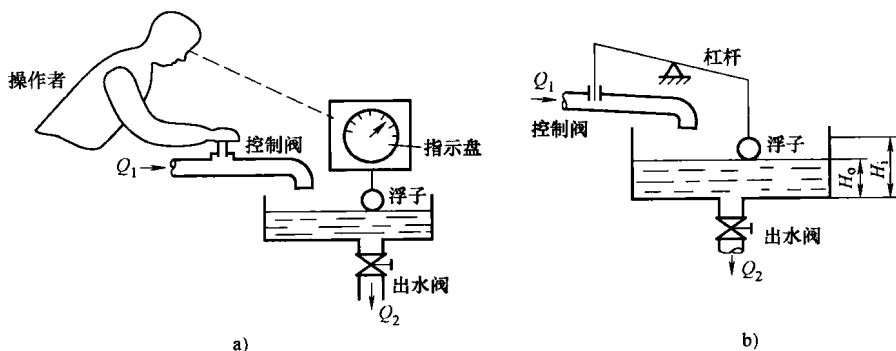


图 1-1

在这个水位控制系统中,水箱是被控对象,要求的水位高度 H_i 是给定量或称系统输入量;水位的实际高度 H_o 是被控制量或称输出量;出水量 Q_2 和进水压力等因素是影响水位保持 H_i 不变的量,称为扰动量,其中 Q_2 是影响水位保持 H_i 的主要因素,称为主扰动;控制阀是执行元件,其开度大小是控制量;浮子及杠杆机构起测量比较作用,它将系统的输出量 H_o 与输入量 H_i 进行比较。这种将系统输出量与输入量进行比较的控制方式称为反馈控制方式。反馈信号的量值称为反馈量。若输入量与反馈量相减,称这种反馈为负反馈,否则称为正反馈。反馈控制原理在工程中有相当广泛的应用,例如石化工业中用来控制湿度、流量、压力、反应物质的浓度以及机械工业中的电动机速度控制等。

例 1-2 位置控制系统。位置控制系统的简化电路如图 1-2 所示。系统包括由两个电位器并联的电桥构成的角度测量比较元件、电压放大器、功率放大器、执行电动机和齿轮传动机构等。手柄 A 与发送电位器 RP_1 的滑臂相连,发送电位器 RP_1 和接收电位器 RP_2 连成电桥。接收电位器 RP_2 与系统的负载轴机械相连。系统的输入是手柄 A 转动的角度 θ_i ,输出是负载轴的角度 θ_o 。系统控制的目标是使输出量 θ_o 精确地跟随输入量 θ_i 。电桥用来比较 θ_i 和 θ_o ,得到角度的位置误差信号 $\Delta\theta = \theta_i - \theta_o$,并将 $\Delta\theta$ 转换成电压信号。经过电压放大、功率放大后的电压 u_D 加到直流他励电动机电枢上。电动机经过齿轮机构带动负载转动,同时带动接收电位器 RP_2 的滑臂转动。滑臂转动的方向是使误差 $\Delta\theta$ 减小的方向。当 $\theta_o = \theta_i$ 时,电动机就不再转动。从而实现了输出量精确地跟随输入量。可见,这个系统是一个具有位置负反馈的自动控制系统。它是按照位置误差进行自动调整的,只要 $\theta_o \neq \theta_i$,系统就自动地进行调整,直到 $\theta_o = \theta_i$ 。

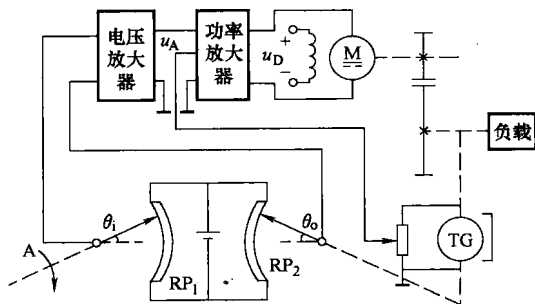


图 1-2

系统中负载是被控对象，输出轴与接收电位器 RP_2 的机械连接构成系统的主反馈。影响该系统实现 θ_0 跟踪 θ_i 的因素为负载变化、电网电压变化等，其中负载变化是影响 θ_0 准确跟踪 θ_i 的主要因素，是系统的主扰动。

在负载轴上安装一个永磁式测速发电机 TG，其输出电压正比于输出角 θ_0 的导数即负载的角速度，加到放大器上，极性与控制电压 u_A 相反，形成的速度负反馈称为局部反馈，目的是进一步改善控制系统的性能。

这种系统应用很广，例如机床进给系统的位置控制、轮船舵的控制系统、冶金工厂的飞剪控制系统等。

例 1-3 热压炉温度控制系统。热压炉是用于满足晶体管、集成电路等器件制造过程中各种外延烧结和扩散工艺要求的加热设备，其构造如图 1-3 所示。炉丝为石墨材料制成，炉内加入一定压力的惰性气体氦气，防止石墨氧化而损坏。炉丝由晶闸管电路供电，采用相控方式，通过控制炉丝电压（电流），进而控制炉温。炉子的温度在 $1000 \sim 2000^\circ\text{C}$ 内可调。为了实现温度的自动控制，测量炉内温度的热电偶输出电压（mV）与毫伏定值器的设定值（mV）相比较，差值经放大后，控制晶闸管导通角，从而自动控制炉丝电压（电流）。在设定的温度下，如果炉内温度低于设定值，误差电压经放大后，使晶闸管导通角增大，炉丝电压（电流）增加，炉温升高；反之，炉温高了，误差电压经放大后，使晶闸管导通角减小，加到炉丝上的电压减小，炉温下降，从而保持炉内温度为设定值。这是一个温度负反馈自动控制系统。

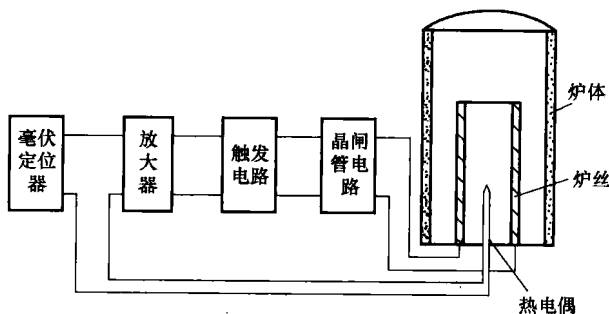


图 1-3

在这个例子中，被控对象是热压炉，它是一个具有时间延迟的大惯性设备。供电电源电压波动、环境温度变化、炉门开启次数等因素影响炉内温度保持在设定值，是扰动信号。

在自动控制系统中，若考虑物体从一点至另一点的传输时间、执行元件的动作时间以及计算机控制中复杂运算所需时间等因素时，严格地说均属于具有时间延迟的自动控制系统。

例 1-4 机器人机械手的计算机控制。机械手计算机控制系统的结构如图 1-4 所示。机械手是被控对象，其位置是被控量（系统输出量），它是连续时间信号。由测量元件测量机械手位置，经采样器进行采样，得到离散时间形式的位置信号。经模数转换器 A/D 将其转换成数字信号，送入计算机，并与计算机中设定的参考信号相减（负反馈），得到误差信号。计算机对误差信号进行计算，计算结果由数模转换器 D/A 转换成连续时间形式的模拟信号，经放大器放大，控制直流电动机（执行元件），从而驱动机械手，使其趋于希望的位置。

该系统的自动调整作用是这样进行的：如果机械手偏离希望位置，误差不为零。计算机根据误差的大小和符号，计算出控制量，经放大器放大后，加到直流电动机电枢上，使直流电动机转动，驱使机械手向希望的位置移动直到位置误差等于零，此时计算机输出的控制信号为零，直流电动机停止转动。

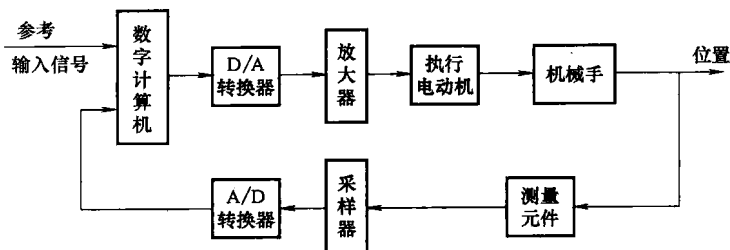


图 1-4

1.2 自动控制系统

1.2.1 自动控制系统的组成

由上面列举的几个例子可见，系统实现自动控制的共同特征是：

- 1) 系统中含有参考元件（有时并不明显存在），它产生参考输入量或给定量。
- 2) 系统中含有测量元件，用来测量系统输出量并将其转换成能与输入量相比较的量。
- 3) 系统中含有执行机构，它可以改变被控对象的状态或行为。
- 4) 系统中含有起比较、放大等功能控制元件，其作用在于控制执行机构。
- 5) 系统的自动调整作用是沿着闭合回路循环进行的。自动调整的全部过程就是通过测量元件测量被控量并与输入量进行比较（一般为相减）形成误差信号，误差信号经放大，驱动执行机构对被控对象实施控制，达到希望的控制目标。

上述特征表明，构成一个自动控制系统一般包括下面几部分：

- 1) 被控对象指被控制的机器、设备或发生物理或化学变化的过程。被控制的物理量为输出量或被控制量。
- 2) 测量元件是对输出量或系统内部某个量进行测量和转换的元件，也称为传感器及其变换装置。例如测速发电机（用于测量电动机速度）、热电偶（用于测量温度）、流量计（用于测量流量），压力传感器（用于测量压力或液位）等。当被测量是系统输出量时，测量元件的输出就是主反馈量。因为测量元件的精度直接影响系统的控制精度或性能，所以应尽可能选择性能高的测量元件及合适的转换电路。
- 3) 比较元件或称比较器，是用来对两个或两个以上的量进行加、减运算的元件。该元件常常是用来完成系统的输入量和主反馈量进行减法运算（负反馈控制系统），以形成误差信号（简称误差）。

在系统中也遇到局部正反馈的情况，这时比较元件进行加法运算。在工程控制中，正反

馈控制仅仅作为系统的局部反馈。因此，通常所说的闭环控制系统实际上是指具有负反馈的自动控制系统。

4) 放大元件也称放大器，是对微弱的信号进行放大、转换并传送给执行机构的元件。例如电压、功率放大元件（电气放大元件），杠杆、齿轮机构（机械放大元件）等。

5) 执行元件也称执行器，是实现控制动作的元件。它接受放大元件的输出信号（或称控制信号），并执行其控制动作。常用的执行元件有各种电动机、继电器、电动调节阀和气动调节阀等。

6) 校正元件是用来改善系统性能的元件。一般地说，按上述基本元件构成的反馈控制系统往往难以达到预期的系统性能，这就要求加入能改善或提高控制系统性能的校正元件。校正元件的结构和参数应根据需要方便地进行调整。

测量元件、比较元件、放大元件、执行元件和校正元件的组合构成系统的控制器。因而，一般认为自动控制系统是由控制器和被控对象两部分组成。

1.2.2 自动控制系统的原理框图

上一节介绍的几个自动控制系统，物理实现不同，作用机理也不同，但是这些系统控制的基本原理都是一样的。若不考虑组成实际系统的具体元、部件机理，只注意控制信号的传递、转换以及自动调整的原理，可将一个自动控制系统抽象成一种称为原理框图的模型加以研究，如图1-5所示。图中符号“ $\otimes$ ”表示输入量 $r(t)$ 和反馈量 $b(t)$ 的比较运算。

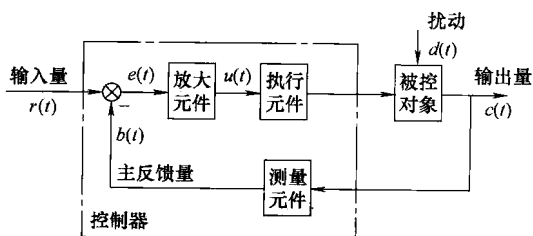


图 1-5

1.2.3 原理框图上的术语

通常将原理框图上从系统输入端沿着信号传递的路径到输出端的通道称为系统的前向通道；而由输出端经测量元件到比较元件的通道称为反馈通道。

自动控制系统原理框图中的术语定义如下：

- 1) 参考输入信号 $r(t)$ ：加到控制系统的指令信号，与反馈控制系统本身无关；
- 2) 主反馈信号 $b(t)$ ：系统被控量或其函数的测量信号，其量纲与参考输入相同；
- 3) 误差信号 $e(t)$ ：参考输入信号与主反馈信号之差；
- 4) 控制信号 $u(t)$ ：控制元件（如放大元件等）的输出信号，作用于执行元件；
- 5) 系统输出信号 $c(t)$ ：系统中被控制的量；
- 6) 扰动信号 $d(t)$ ：不是控制系统需要的但又影响被控制量达到希望值的信号。

1.2.4 自动控制系统原理框图的绘制

由自动控制系统的原理图绘制原理框图时，首先需要分析自动控制系统的工作原理，明确：①系统的被控对象是什么？被控制量是什么？②系统的参考输入信号是什么？③哪个元件是控制元件？控制信号是什么？④哪个元件是执行元件？⑤哪个元件是测量元件？主反馈信号是什么？局部反馈信号是什么？⑥系统中有哪些扰动信号？主扰动信号是什么？

基于以上分析,按信号传递路径将系统中的元部件联系起来,即可得到系统的原理框图。

对于例 1-2 的位置控制系统来说,被控对象是齿轮机构从动轴上的负载,参考输入是手柄 A 的转角 $\theta_i(t)$,控制元件是接收误差信号的放大器,电动机与齿轮机构是执行元件。主反馈信号是由接收电位器 RP_2 反映的系统输出轴转角 $\theta_o(t)$,发送电位器 RP_1 和接收电位器 RP_2 构成测量比较元件,将角位置误差转换成电压信号,经放大后驱动电动机,实现 $\theta_o(t)$ 跟踪 $\theta_i(t)$,从而形成按误差调整的位置自动控制系统。局部反馈信号是测速发电机的输出电压,它反映了系统输出轴的转动角速度,该电压作用在功率放大器输入端。负载变化 $d(t)$ 是系统的主扰动。将系统中各部分按信号传递方向和路径连接起来即可得到位置控制系统原理框图,如图 1-6 所示。

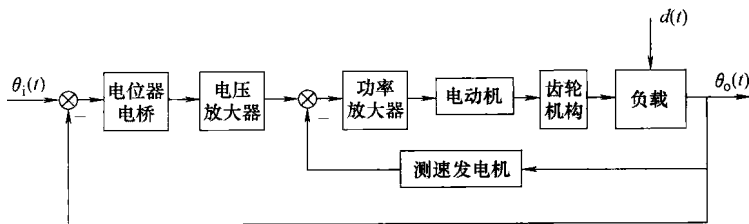


图 1-6

1.3 自动控制的基本方式

控制系统基本的控制方式有开环控制和闭环控制两种。

1. 开环控制

开环控制系统是一种简单的控制系统,如图 1-7a 所示。在这种控制系统中,没有测量元件对输出量进行测量并反馈到输入端,系统的输出量对系统的控制作用没有影响,这样的系统称为开环控制系统。显然,在开环控制系统中,当系统元部件参数变化或外部扰动等因素引起输出量出现偏差时,系统不能自动调整,控制精度完全取决于系统中采用的元、部件的特性和质量。从保证精度考虑,这种控制系统要求元、部件有好的特性与质量。此外,要有良好的运行环境,才可能使系统取得满意的控制效果。

为了改善开环控制系统性能,有时采用基于补偿的控制方法:

其一是基于扰动补偿的开环控制,如图 1-7b 所示。通过选择合适的补偿元件,减小或消除扰动信号对系统输出量的影响。不过,这种补偿控制只适合扰动信号可测量的场合。

其二是基于输入补偿的开环控制,如图 1-7c 所示。通过选择合适的补偿元件结构和参数,可使系统输出接近

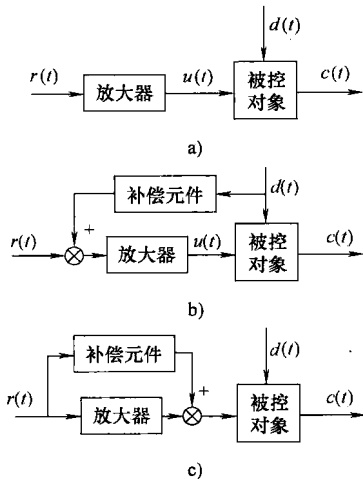


图 1-7