

广东省精品教材项目资助



自动控制原理

AUTOMATIC CONTROL THEORY

郭小勤 曹广忠 编著
潘剑飞 吴超



清华大学出版社

自动控制原理

郭小勤 曹广忠
潘剑飞 吴超 编著



清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了自动控制理论的基本概念、原理和分析方法,以及控制系统的时域与频域综合校正。全书共分9章,包括3个模块。第1~5章为第1模块,主要阐述自动控制系统概述,系统建模,基于系统时间响应的稳定性、动态特性和稳态特性分析,根轨迹分析法及时域综合。第6~7章为第2模块,包括频域分析法和系统综合校正,主要讨论频率特性、系统校正概述及基于频域的系统校正设计。第8~9章为第3模块,阐述非线性系统的相平面和描述函数分析及线性离散时间系统的建模和分析。附录A和附录B分别为拉氏变换概述和各章的精选习题详解。

本书理论联系实际,可作为高等院校自动化、测控技术与仪器及相关专业的教材,也可供有关科技人员参考。

本书电子课件可通过 <http://www.tupwk.com.cn> 网站免费下载。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 郭小勤 等编著. —北京:清华大学出版社, 2017

ISBN 978-7-302-47692-4

I. ①自… II. ①郭… III. ①自动控制理论—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第156300号

责任编辑:王 定 程 琪

封面设计:周晓亮

版式设计:思创景点

责任校对:牛艳敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京鑫丰华彩印有限公司

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23.5

字 数:586千字

版 次:2017年8月第1版

印 次:2017年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:48.00元

前 言

近年来,由于市场对自动化及智能装备的需求旺盛,关注和学习自动控制原理或控制工程基础的读者也不断增加。作者在长期的教学实践和教学改革的基础上,立足于认知、发现、探寻、创新的学习方法,汲取国内外有关本领域的教学和科研成果,并考虑MOOC课程特点,统一规划,精心组织编写了本书。

本书系统地阐述了自动控制理论的基本概念、原理和分析方法及控制系统的时域与频域综合校正。全书共分9章,包括3个模块。第1~5章为第1模块,是控制理论的基本内容,主要讨论自动控制系统概述、系统建模、时域分析法、根轨迹分析法及时域综合。第6~7章为第2模块,包括频域分析方法与系统综合校正,主要讨论频率特性、系统校正概述及基于频域的系统校正设计。第8~9章为第3模块,包括非线性系统的相平面和描述函数分析及线性离散时间系统的建模和分析。本科自动化专业建议采用所有内容,可安排54~72学时;非自动化专业建议采用除第4章外的第1模块和(或)第2模块的部分内容,可安排36学时。

本书在内容的组织上强调工程背景,注重理论联系实际,用直观和感性的物理概念、工程实例以及MATLAB仿真结果,使读者充分理解和掌握控制系统的基本规律和系统综合设计方法,其特点体现在以下几个方面。

1. 内容编排模块化,满足多种需求

本书将整个自动控制理论的基本知识分为3个模块:时域分析与综合、频域分析与综合校正、非线性与离散系统分析。各模块内容相对独立,逐步递进,可满足不同专业的需求。例如自动化专业可选择全部内容,其他非自动化专业可选择除第4章外的第1模块和(或)第2模块的部分内容。由于在第1模块增加了1个章节专门讨论了PID控制律的解析分析、MATLAB时域仿真、PID参数整定及实际实例PID设计的一般步骤,使第1模块时域分析与综合内容完整,不仅给少学时的控制类课程学习带来了方便,同时还可提高自动化专业学生的综合应用能力。

2. 贯穿工程教育思想,学以致用

本书借鉴工程教育思想,使学生在认知、发现、探寻的实践过程中学习新知识。在书中的多个章节,例如高阶系统主导极点、稳定性、频率特性等均以观察仿真结果为起点,引导读者认知、发现问题(规律),再配合解析推导,得到现象的本质。在编写过程中,以应用为导向,注重理论联系实际。例如在系统综合中,不仅在时域对PID进行解析分析,以运动控制中的点到点控制方式讨论PID控制特点,同时在频域系统综合中将PID与串联校正的超前、滞后及滞后-超前设计进行比较,使读者从不同方面理解这两种类型控制器的实质,同时更易理解实际工程中的带滤波器的PID控制。以某型实际机器人肩关

节角控制为例,讨论PID控制器的设计步骤和具体过程,并应用高阶系统简化、多参数的根轨迹分析、PID调参的策略等来解决实际问题。另外在实例中还涉及实际系统的输入指令设计及饱和限制等,使读者可综合应用所学知识和方法解决所遇到的问题。

3. 适应MOOC课程需要,构建自主学习环境

为了更好地适应自主学习,本书各章末尾设有小结,概括该章的知识体系、重点和难点。同时设计了丰富的习题,包括问答题、基本习题和综合仿真分析题,并在某些基本题后给出了参考答案,附录B给出了各章典型习题的习题详解,方便读者自行检查学习效果,为读者解惑答疑。本书不仅专门设置章节讲解MATLAB的应用方法,而且给出了书中所用MATLAB仿真的程序文本。

本书第1章、第2章、第3章、第5章和附录B由郭小勤编写,第4章和第6章由潘剑飞编写,第7章和附录A由曹广忠编写,第8章和第9章由吴超编写。全书由郭小勤统一修改定稿,书中的插图由王鑫绘制。

本书受到广东省精品教材项目资助,同时也是全国地方高校UOOC(优课)联盟《控制工程基础》课程的指定教材。限于作者水平,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2017年5月

目

录

第 1 章 自动控制系统概述	1
1.1 自动控制的基本原理	2
1.1.1 自动控制问题的引出	2
1.1.2 控制方式	5
1.2 自动控制系统的基本组成	10
1.3 自动控制系统实例	11
1.3.1 函数记录仪	11
1.3.2 磁盘驱动读取系统	12
1.3.3 导弹发射架方位控制	13
1.3.4 机器人	13
1.4 自动控制系统的分类	14
1.4.1 按给定输入信号特征 分类	14
1.4.2 按系统模型的数学特性 分类	15
1.4.3 其他类型的分类	16
1.5 自动控制系统的基本要求	16
1.5.1 稳定性	16
1.5.2 快速性	17
1.5.3 准确性	17
1.6 控制工程设计概论	18
1.6.1 工程设计	18
1.6.2 控制系统设计	18
1.6.3 系统分析与设计工具 MATLAB	19
1.7 自动控制理论的发展概况	20
1.7.1 早期的自动控制	21
1.7.2 经典控制理论	21
1.7.3 现代控制理论	22
1.8 小结	22
1.9 习题	23

第 2 章 控制系统的数学模型	27
2.1 控制系统的时域数学模型	27
2.1.1 线性元件的微分方程	28
2.1.2 控制系统微分方程的 建立	33
2.1.3 线性系统的基本特性	35
2.1.4 非线性系统的小偏差 线性化	35
2.2 线性系统的传递函数	37
2.2.1 传递函数的定义和性质	37
2.2.2 典型元部件的传递函数	42
2.3 结构图及其等效变换	48
2.3.1 结构图的组成与绘制	48
2.3.2 结构图的等效变换	51
2.4 信号流图及梅逊公式	58
2.4.1 信号流图的组成及性质	58
2.4.2 信号流图的绘制	59
2.4.3 梅逊增益公式	61
2.5 闭环系统传递函数	64
2.6 控制系统建模的 MATLAB 方法	65
2.7 数学模型的实验测定法	67
2.8 小结	68
2.9 习题	69
第 3 章 时域分析法	73
3.1 控制系统时间响应的性能 指标	73
3.1.1 典型输入信号	73
3.1.2 时间响应过程	75
3.1.3 时域性能指标	75
3.2 一阶系统时域分析	77
3.2.1 数学模型	78
3.2.2 单位阶跃响应	78

3.2.3 单位脉冲响应	79	4.5.2 系统性能的定性分析 ...	159
3.2.4 单位斜坡响应	80	4.6 小结	165
3.3 二阶系统时域分析	82	4.7 习题	166
3.3.1 数学模型	82	第5章 基本控制律与机器人关节角	
3.3.2 单位阶跃响应	83	控制分析	170
3.3.3 动态性能指标计算	87	5.1 基本控制律分析	171
3.3.4 改善二阶系统性能的常用		5.1.1 比例(P)控制	171
方法	95	5.1.2 比例-微分(PD)控制	171
3.4 高阶系统时域分析	101	5.1.3 比例-积分(PID)控制	172
3.4.1 高阶系统的阶跃响应 ...	101	5.1.4 比例-积分-微分(PID)	
3.4.2 闭环主导极点和动态性能		控制	173
分析	105	5.2 线性系统时域仿真的 MATLAB	
3.5 稳定性分析	107	方法	176
3.5.1 稳定的概念和定义	107	5.2.1 基于脚本文件的仿真 ...	176
3.5.2 稳定的充要条件	108	5.2.2 基于模型文件的仿真 ...	178
3.5.3 稳定的代数判据	109	5.3 PID 控制器的参数整定	182
3.6 稳态误差分析	115	5.3.1 衰减曲线法	182
3.6.1 误差与稳态误差	116	5.3.2 稳定边界法	183
3.6.2 给定信号作用下的稳态误差		5.3.3 其他方法	183
计算	117	5.4 机器人关节角控制系统设计	
3.6.3 扰动作用下的稳态误差		与分析	184
计算	121	5.4.1 某 ARM II 电动肩关节角	
3.6.4 提高控制精度的措施 ...	123	控制系统	185
3.7 小结	126	5.4.2 PID 控制律设计	186
3.8 习题	127	5.4.3 斜坡型输入指令响应 ...	189
第4章 根轨迹分析法	133	5.5 小结	190
4.1 根轨迹的基本概念	133	5.6 习题	191
4.1.1 根轨迹图	133	第6章 频域分析法	193
4.1.2 闭环零极点与开环零极点的		6.1 频率特性	193
关系	135	6.1.1 频率特性的基本概念 ...	193
4.1.3 根轨迹方程	137	6.1.2 频率特性的图形表示 ...	196
4.2 根轨迹的绘制法则	138	6.2 典型环节的频率特性	199
4.3 其他形式的根轨迹	151	6.2.1 比例环节	199
4.3.1 参数根轨迹	151	6.2.2 积分环节和微分环节 ...	199
4.3.2 零度根轨迹	153	6.2.3 惯性环节和一阶微分	
4.4 基于 MATLAB 的根轨迹图		环节	201
绘制	156	6.2.4 振荡环节与二阶微分	
4.5 根轨迹分析	158	环节	203
4.5.1 闭环零极点与时间		6.2.5 延迟环节	206
响应	158		

6.3 开环系统频率特性图		
绘制	207	
6.3.1 开环伯德图的绘制	207	
6.3.2 开环极坐标图的近似		
绘制	211	
6.3.3 最小相位系统	214	
6.4 频域稳定性判据	217	
6.4.1 幅角原理	217	
6.4.2 奈奎斯特稳定性判据	219	
6.5 稳定裕度	225	
6.5.1 相位裕度	225	
6.5.2 幅值裕度	226	
6.6 闭环频率特性	228	
6.7 基于 MATLAB 的频率特性		
图绘制	229	
6.8 频率特性分析	232	
6.8.1 三频段的概念	232	
6.8.2 开环频域指标与时域指标的		
关系	233	
6.8.3 闭环频域指标与时域指标的		
关系	235	
6.9 小结	237	
6.10 习题	238	
第 7 章 控制系统的综合与校正	242	
7.1 系统校正的基本概念	242	
7.1.1 性能指标	243	
7.1.2 校正方式	243	
7.1.3 校正设计方法	245	
7.2 常用串联校正装置及其		
特性	246	
7.2.1 超前校正网络	246	
7.2.2 滞后校正网络	249	
7.2.3 滞后-超前校正		
网络	252	
7.3 串联校正的频域法设计	254	
7.3.1 串联超前校正设计	254	
7.3.2 串联滞后校正设计	260	
7.3.3 串联滞后-超前设计	265	
7.3.4 期望开环对数幅频特性		
设计法	268	
7.4 反馈校正与复合校正	269	
7.4.1 反馈校正的原理与		
特点	269	
7.4.2 复合校正	272	
7.5 小结	275	
7.6 习题	275	
第 8 章 非线性系统	279	
8.1 控制系统的非线性特性	279	
8.1.1 典型的非线性特性	279	
8.1.2 非线性系统的若干		
特征	281	
8.1.3 非线性控制系统的分析与		
设计方法	283	
8.2 描述函数法	283	
8.2.1 描述函数定义	283	
8.2.2 典型非线性特性的描述		
函数	285	
8.2.3 非线性系统描述函数法		
分析	288	
8.3 相平面法	291	
8.3.1 相平面法的基本概念	291	
8.3.2 相平面图的绘制	292	
8.3.3 相轨迹的基本特性	294	
8.3.4 非线性系统的相平面法		
分析	296	
8.4 非线性系统分析的 MATLAB		
方法	299	
8.5 小结	301	
8.6 习题	302	
第 9 章 离散控制系统	304	
9.1 离散控制系统基本		
概念	304	
9.1.1 采样控制系统	304	
9.1.2 数字控制系统	305	
9.1.3 离散控制系统的特点	306	
9.2 信号采样和复现	306	
9.2.1 信号采样	306	
9.2.2 采样信号频谱分析	307	
9.2.3 香农采样定理	308	
9.2.4 信号复现	308	

9.3	z 变换及反变换	310
9.3.1	z 变换定义	310
9.3.2	z 变换的求法	311
9.3.3	z 变换的性质	312
9.3.4	z 反变换	313
9.4	离散系统的数学模型	315
9.4.1	差分方程	315
9.4.2	脉冲传递函数	316
9.5	离散控制系统性能分析	323
9.5.1	离散控制系统的稳定性	323
9.5.2	离散控制系统的稳态误差	327
9.5.3	离散系统动态性能	330
9.6	线性离散系统分析的 MATLAB 方法	332
9.7	小结	335
9.8	习题	335
附录 A	拉氏变换概述	337
A.1	拉普拉斯变换的定义	337
A.2	几种典型函数的拉氏变换	337
A.2.1	单位阶跃函数 $1(t)$ 的拉氏变换	337
A.2.2	指数函数 $f(t)=e^{-at}$ 的拉氏变换	338
A.2.3	正弦函数与余弦函数的拉氏变换	338

A.2.4	单位脉冲函数 $\delta(t)$ 的拉氏变换	339
A.2.5	单位斜坡函数的拉氏变换	339
A.2.6	单位加速度函数的拉氏变换	340
A.3	拉氏变换的主要定理	340
A.3.1	叠加定理	341
A.3.2	微分定理	341
A.3.3	积分定理	341
A.3.4	复数位移定理	342
A.3.5	终值定理	342
A.4	拉普拉斯反变换	344
A.5	应用拉氏变换解线性微分方程	347
附录 B	精选习题详解	349
B.1	第 1 章习题	349
B.2	第 2 章习题	350
B.3	第 3 章习题	352
B.4	第 4 章习题	355
B.5	第 6 章习题	357
B.6	第 7 章习题	361
B.7	第 8 章习题	362
B.8	第 9 章习题	365
参考文献		368

第 1 章 自动控制系统概述

当今社会信息与控制无处不在，大到登月飞船，小到各种形式的机器人(例如清洁机器人、工业机器人、无人驾驶汽车等)，自动控制技术已成为现代化社会不可缺少的组成部分。2015 年国务院印发的《中国制造 2025》强国战略，其中第一个十年行动纲领就是智能制造，数字化、网络化的智能机器人迎来新的发展契机。自动控制原理正是研究类似这些机器人系统的控制机理和一般控制方法的科学。

自动控制技术广泛应用于航空、航天、工农业生产和社会生活的各个方面。无论是在宇宙飞船、导弹制导、雷达定位等尖端技术领域，还是在机械制造、石油、化工、医药工业等过程控制中，自动控制技术都有成功的应用。此外，在城市交通、通讯网络控制、大型电网的调度与控制中，自动控制也发挥着重要作用。

例如在无人驾驶汽车中，汽车为什么会自动驶向目的地呢？你可能会说，有导航仪啊。是的，导航仪会指示汽车行驶的路线，但要使汽车沿给定道路行驶，需要随时控制汽车的油门和方向盘。回顾一下，有人驾驶汽车的情况，驾驶员不仅要有导航仪的指引，还要根据当前的路况和车况，由驾驶经验做出判断，并及时调整油门的大小和方向盘转角，才能安全到达目的地。汽车如果无人驾驶，则要通过一些设备来完成驾驶员所完成的任务，即感知路况和车况，根据现场环境计算出当前油门量和方向盘转角，并完成相应的操作。

什么是自动控制呢？所谓自动控制就是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置，使机器、设备或生产过程自动地按照预先设定的规律运行，或使它们的某些物理量按预定的要求变化。将外加的设备称为控制装置；将被控制的机器或设备称为被控对象；将被控机器或设备的物理量称为被控量；将预先设定的规律称为给定量。所以，自动控制可以描述为，利用控制装置使被控对象的被控量自动地按给定量所设定的规律运行。给定量、被控量及控制装置和被控对象称为自动控制定义的四要素，自动控制系统的工作过程可用方块图 1-1 来描述。图中信号线表示变量，方框表示对变量进行变换的装置，其中的给定量和被控量有时也称为输入和输出。此处可以举出很多自动控制的应用，例如在日常生活中的空调和洗衣机。对于空调，当设定期望的温度后，空调会自动工作，使室内温度达到所设定的值；对于洗衣机，确定了控制方式之后，洗衣机会自动启动相应的控制程序，例如进水水位控制、漂洗时间控制、脱水时间控制以及它们之间的转换，自动完成洗衣任务。日常生活中还有很多自动控制的应用，例如交通指示灯、自动门等，自动控制提高了人们的生活质量。工业生产中也广泛使用自动控制，例如工业生产过程中的温度、压力、湿度的控制及各种机器人，例如应用于产品的装配、工件的焊接、产品的码垛、货物的自动搬运等，自动控制减轻了人们的劳动强度，提高了生产质量和生产效率。在航空航天领域中的自动控制应用比比皆是，例如导弹自动飞行击中目标，无人机自动完成战场侦察、航天飞行器的对接和登陆月球等。在发展空间技术方面，自动控制完成了人所不能完成的高精度控制任务。随着现代化和智能化的不断推进，自动控制的应用已经渗透到人

们生活的方方面面。



图 1-1 自动控制系统方块图

控制理论是研究控制系统分析和设计的一般性理论，是研究所有控制系统共同规律的科学。而自动控制原理是控制系统分析与综合的基础理论，学习自动控制原理是为了探索控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的途径和方法，为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论储备。

1.1 自动控制的基本原理

在工业生产过程或日常生活中，有时为了保证正常的工作条件或生活环境，往往需要对某些物理量(例如温度、压力、流量、液位、位移或速度等)进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或按一定的规律变化。要满足这种需求的控制系统是如何工作的？基本的控制方式有哪些呢？下面通过几个人工控制和自动控制示例的比较和解析来讨论自动控制系统的的基本原理和控制方式。

1.1.1 自动控制问题的引出

若要对某些物理量进行控制，使其尽量维持在某个数值附近，或按一定的规律变化，就应该对生产机械或设备进行及时的操作，以抵消外界干扰的影响，这种操作通常称为控制。如果一个系统由人来操作机器，例如有人驾驶汽车，那么称为人工控制(manual control)。如果一个系统由某个装置来操作机器，例如用恒温器来调节室内温度，那么称为自动控制(automatic control)。下面通过几个示例来对两者进行讨论。

1. 恒值水位控制

图 1-2(a)所示的是人工控制水位保持恒定的供水系统，水池中的水源不断地经出水管道流出，以供用户使用。影响水池水位的因素有两个，一个是进水阀门的开度，开度大，进水量就增加。另一个是出水量，若出水量增加，水位就会下降，但它是不受控的，会根据工作环境而发生变化，因为每家每户的用水量和用水时间是无法事先知道的。对供水系统的控制任务是通过调节进水阀门的开度，保持水池水位维持在期望的高度上。为了达到这个目的，需要不断监测水池的水位，只要水位小于期望值，就要加大进水阀门开度，增加进水量，使水位上升。反之，若水位高于期望值，就要减小进水阀门开度。例如，若用户的用水量增加，这时水池中的水位必然下降，若要保持水位高度不变，就要加大进水阀门的开度，增加进水量以作补充。在本例中，进水阀门的开度并非是一成不变的，而是根据实际水位的高低进行调节的。上述过程可由人工操作来实现，正确的步骤是：

- (1) 将所要求的水位期望值牢记在大脑中。
- (2) 用眼睛和测量工具测量水池实际水位。
- (3) 用大脑将期望水位与实际水位进行比较，计算出误差值。

(4) 按照误差的大小和正负性质, 根据经验做出决策, 确定进水阀门的调节方向和幅度, 由大脑指挥手去正确地调节进水阀门, 即按照减小误差的方向来调节进水阀门的开度, 最终使水位接近或等于给定值。

由于图 1-2(a) 为有人直接参与的控制, 故称为人工控制。在本例中, 水池的水位是被控制的物理量, 简称被控量, 水池这个设备是被控制的对象, 简称被控对象, 期望的水池水位是给定值。

人工控制的过程是测量实际水位、求误差、确定控制策略、调节被控量、再测量、再求误差、再控制、再调节, 这样一个不断循环的过程, 其控制的目的是尽量减小误差, 使被控量尽可能地保持在期望值附近。只要水位偏离了期望值, 工人便要重复上述调节过程。

如果找到某种装置完全代替图 1-2(a) 中人所完成的全部职能, 那么人就可以不直接参与控制, 就称为自动控制。

图 1-2(b) 所示的是一种保持水池水位恒定的自动控制系统。图中用浮子代替人的眼睛, 用来测量水位的高低, 它的一端和连杆相连, 另一端连接在电位器上, 推动电位器的滑块进行上下移动, 电位器的输出端为滑块和地之间的电压。当水位下降时, 由于杠杆的作用, 电位器的输出电压将增加; 若水位升高, 则电位器的输出电压将减小。当水位到达某一高度时, 电位器输出电压将为零, 此时的水位就是期望的水位高度。所以说电位器和连杆起求差作用, 它们将期望水位与实际水位进行比较, 求出误差。电位器输出电压的高低和极性反映出误差的大小和方向。电位器输出的微弱电压经放大器放大后用以控制电动机转动, 经减速后带动进水阀门动作, 从而改变进水量, 调节水池水位。

当实际水位等于期望水位时, 电位器输出电压为零, 电动机停止转动, 阀门开度保持不变, 进水量和出水量达到平衡。若突然用户的用水量增加, 则水位下降, 浮子下降, 通过连杆带动电位器滑块向上移动, 输出电压大于零, 经放大器放大后控制电动机正向旋转, 以增大进水阀门的开度, 促使水位回升。只有当实际水位恢复到期望值时, 才能使电位器的输出电压等于零, 调节过程才终止。反之, 若用水量减小, 水位和浮子上升, 电位器滑块向下移动, 电动机反向旋转, 进水阀门开度减小, 进水量减小, 水位自动下降至期望值。整个过程是在无人直接参与的情况下进行的, 是自动控制的过程。该系统可看作为高楼水箱水位自动控制系统, 其工作过程可归纳为:

- (1) 用连杆和电位器标定好水位的期望值。
- (2) 用浮子和连杆测量实际水位, 通过电位器得到误差。
- (3) 误差经放大器放大后, 由电动机和减速机构带动进水阀门动作。
- (4) 按照减小误差的方向控制进水阀门的开度。

将恒值水位自动控制与人工控制进行比较, 可以看到, 这时候用电位器、浮子和连杆代替了人的眼睛和大脑完成测量和求差的工作, 用放大器、电动机和减速机构代替人的手臂来完成操作阀门的工作, 从而使实际水位保持为给定的水位。它的工作过程可用方块图来表示, 如图 1-3 所示, 方块图更方便、清晰地描述了恒值水位自动控制系统保持水位为给定值的调节过程。

2. 汽车驾驶控制

当汽车能快速准确地对司机的操纵作出响应时, 驾驶汽车无疑是一件令人惬意的事情。汽车是装有驾驶、驱动和制动的装置, 通过液压放大器将操纵力放大以便控制驱动轮

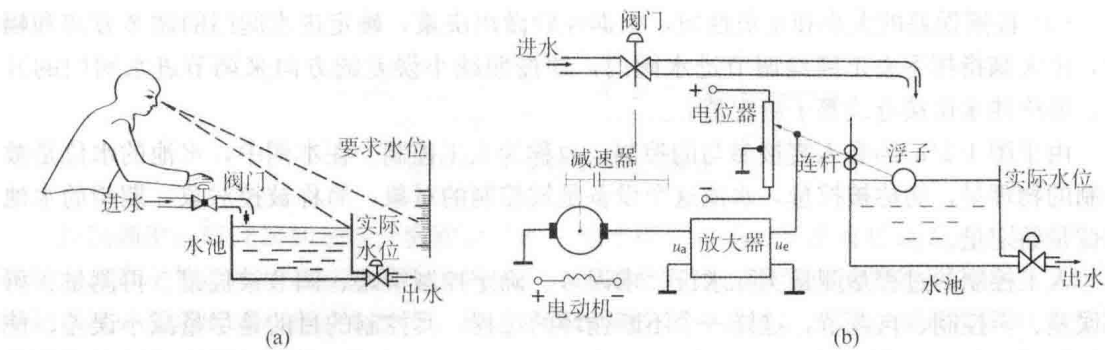


图 1-2 恒值水池水位控制系统

(a) 恒值水位人工控制系统；(b) 恒值水位自动控制系统

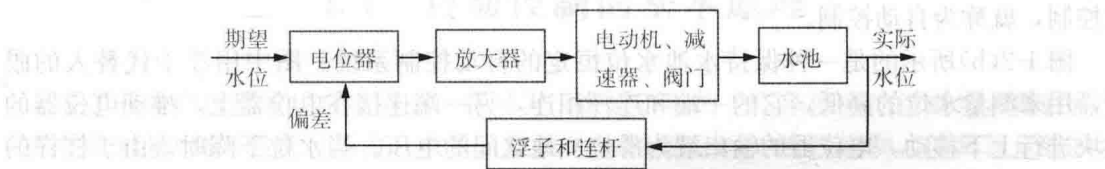


图 1-3 恒值水位自动控制系统方块图

或者刹车。图 1-4(a)是驾驶汽车在道路上行驶的示意图。在人工驾驶情况下，驾驶员通过视觉和触觉(身体运动)测量汽车当前是否位于道路中心线的位置(距离中心线的横向偏差和偏角)，根据驾驶经验作出判断，确定方向盘的转向和转动角度及油门大小，然后用手操作方向盘，用脚踩油门踏板，从而改变汽车的行驶位置，最终使汽车沿预期线路行驶。只要汽车位置偏离了预期线路，驾驶员便要重复上述调节过程。在汽车驾驶控制中，汽车是被控对象，汽车的位置是被控量。若要使汽车自动地沿预期线路行驶，就需要一个测量装置，代替驾驶员的眼睛和身体感知，完成汽车位置与预期位置偏差的测量；需要一个自动驾驶仪(即自动驾驶装置)，代替驾驶员的大脑，载入驾驶经验，根据当前路况和车况，确定方向盘的转动方向和转角大小及油门量大小，并通过电传操作机构代替人的手臂和脚，完成方向盘的转动和油门控制，最终使汽车沿预期线路行驶。无论什么原因使汽车偏离了预期行驶线路，自动驾驶装置均可自动修正偏差，使汽车沿预期线路行驶。汽车自动驾驶系统的工作过程如图 1-4(b)所示。

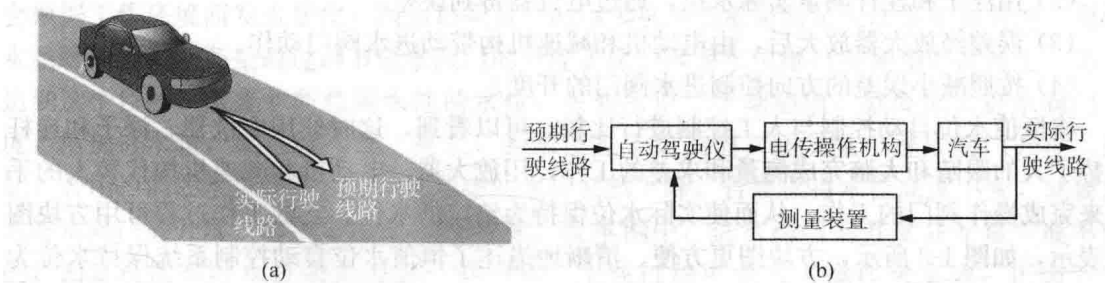


图 1-4 汽车驾驶控制图

(a) 汽车在道路上行驶示意图；(b) 汽车自动驾驶系统方块图

通过以上两个例子可以看出，自动控制和人工控制极为相似，自动控制系统只不过是

把某些装置有机地组合在一起,以代替人的职能而已。在图 1-2(b) 中浮子代替人的眼睛,对实际水位进行测量;电位器和连杆类似人的大脑,完成比较求差运算,给出偏差的大小和方向;电动机及减速器相当于人的手臂,调节阀门的开口大小,对水位实施控制。这些装置相互配合,承担着控制的职能,通常将它们称为控制装置。在图 1-4(b)中,自动驾驶仪和电传操作机构完成了线路偏差的测量、方向盘和油门控制量的决策及执行操作,它们称为控制装置。实际上,控制装置是控制被控量的策略和实施操作的装置。以上两个控制系统都是通过期望值与实际值的偏差来控制被控对象输出的,它们通常称为反馈控制或闭环控制系统。

1.1.2 控制方式

闭环控制是自动控制系统中最基本的控制方式,也是应用最为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。对于某一个具体的系统,采取什么样的控制方式,应根据具体控制目的和适用场合而定。

1. 闭环控制方式

在机电控制系统中,经常需要对被控对象的位置或速度进行控制,以满足产品设计的需要。例如在移动机器人中要控制机器人的行进速度,在工业机器人中要控制机器人手臂的位置和速度等。图 1-5(a)是一个小车转速闭环控制系统的示意图,图中小车转轴和电动机同轴连接,电动机是电枢控制的直流电动机,其电枢电压由功率放大器提供,当改变功率放大器的输入电压,就可以改变小车的转动速度。期望转速这个物理量控制系统是无法直接接收的,所以需要有一个装置将给定的转速转换为给定电压。图中通过设置电位器滑块的位置,就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。实际运行中电动机的转速到底是多少呢?是否达到了控制的要求值呢?在图 1-5(a)的后半部分中,测速发电机由电动机同轴带动,它输出的电压与电动机的实际转速成正比,将其反馈到功率放大器输入端的负端,与代表给定转速的给定电压进行相减得到偏差信号,该偏差信号经过功率放大器放大后来调节电动机的转速,从而使偏差减小。

根据系统的工作原理,可以画出小车转速闭环控制系统的方块图如图 1-5(b)所示。其中,小车是被控对象,小车的转速是被控量,测速发电机是测量元件,电位器将给定转速转化为给定电压,功率放大器完成求差和放大任务,放大的偏差信号通过电动机驱动小车转动,小车在运行中可能会受到各种扰动力矩的影响。本例中,控制装置就是功率放大器和电动机。

忽略具体的被控对象和控制任务,一个典型的闭环控制系统的方块图如图 1-6 所示。图中方框表示系统中具有相应职能的元部件;带箭头的线段表示信号及其传递方向。符号 $\otimes$ 表示比较操作,也称为比较器,它的输出等于各输入的代数和。因此,输入均需用正、负号表明其极性,如果是相加,其“+”可以省略,如果是相减,其“-”需要标注在输入信号线的左侧(如图 1-6 所示),或标注在比较器的符号内部。图中将被控量引入到输入端,所以说它存在反馈,这种控制方式也称为反馈控制。同时可以看到,给定量和反馈量是相减的,也称为负反馈控制。由于采用了反馈,致使信号的传输路径形成了闭合回路,也称为闭环控制。

必须指出,在系统主反馈通道中,只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。所以在控制工程中,几乎采用的都是

负反馈控制。

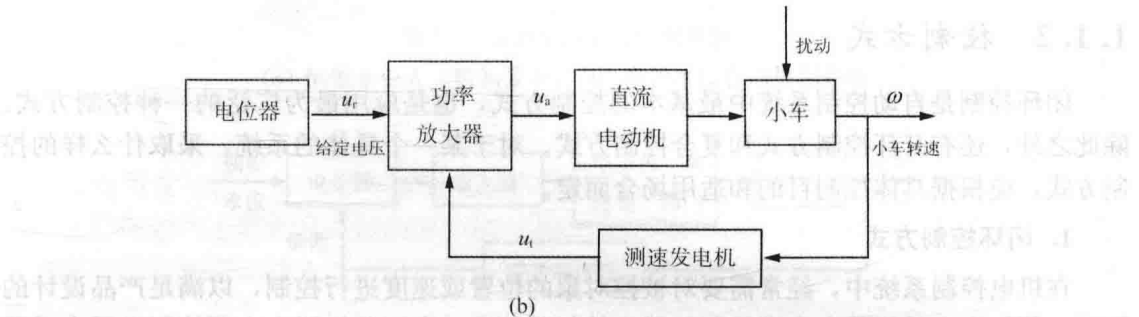
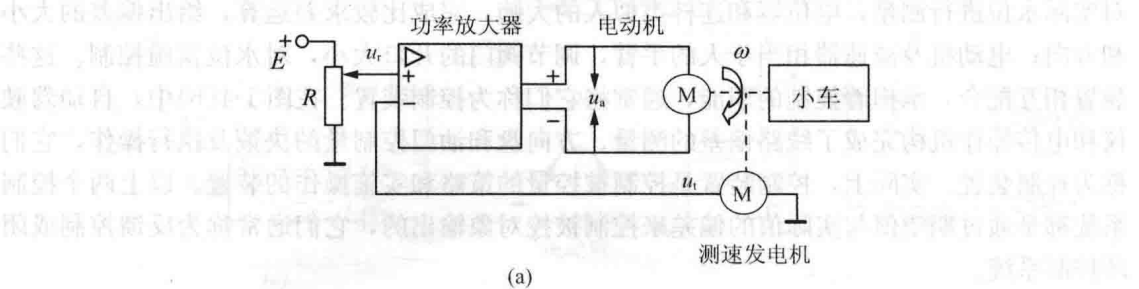


图 1-5 小车转速闭环控制系统
(a) 小车转速闭环控制系统示意图；(b) 小车转速闭环控制系统方块图

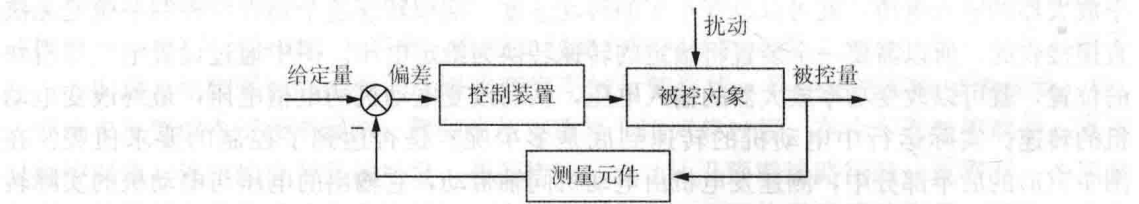


图 1-6 典型闭环控制系统方块图

闭环控制系统工作的机理是：将系统的被控量引回到输入端，与给定量进行比较，形成偏差，利用所得的偏差信号对被控对象进行控制，达到减小偏差或消除偏差的目的，且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使被控量与期望值趋于一致。所以闭环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，具有较高的控制精度。但闭环系统除了控制装置外，必须使用测量元件，所以它使用的元件多、结构复杂，即使各元件是稳定的，但组成的闭环系统有可能不稳定。尽管如此，它仍然是一种重要的并被广泛应用的控制方式。闭环控制系统将是自动控制原理讨论的重点。

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，没有反向联系的控制过程。按照这种方式组成的系统称为开环控制系统，其特点是系统的被控量不会对系统的控制作用产生影响。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。

(1) 按给定量控制

我们在儿童时代都玩过玩具车，它的速度控制很简单，只需在面板上拨动对应低速、

中速和高速的开关即可。

图 1-7(a) 是开环控制方式的小车转速控制系统的示意图。它的任务是控制电动机以恒定的转速带动小车运动。系统的工作过程是调节电位器的滑臂，使其输出的给定电压 u_r ，经放大器放大后送到电动机的电枢端，用来控制电动机的转速 ω 。在负载恒定的条件下，稳态时电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比，只要改变给定电压 u_r ，便可得到相应的转速 ω 。

在系统中，小车是被控对象，小车的转速是被控量，电位器的输出电压为系统的给定量。对于图 1-7(a) 系统，被控量转速只由给定量单向控制，与实际被控量所达到的效果无关，故这种控制方式称为开环控制。

小车转速开环控制系统可用图 1-7(b) 所示的方块图表示，可以看到，小车负载转矩的任何变化，都会使被控量偏离期望值。例如，对于玩具车，我们都有这样的经历，当电池电量下降时，尽管开关的位置不变，但小车的转速变慢了；在相同开关位置，小车在水泥地面和沙地上车速也不相同。因此，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，开环控制具有一定的实用价值。目前用于国民经济中的一些自动化装置，如自动售货机、自动洗衣机、液体自动灌装、数控车床以及指挥交通的红绿灯转换等，一般都是开环控制系统。

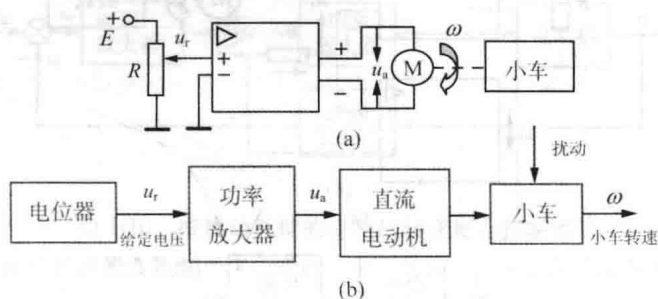


图 1-7 小车转速开环控制系统

(a) 小车转速开环控制系统示意图；(b) 小车转速开环控制系统方块图

按给定量控制的开环控制系统的典型方块图如图 1-8 所示，其控制作用直接由系统的给定量产生，只要确定一个给定量，就有一个被控量与之对应，控制精度完全取决于所用的元件及校准精度。开环控制方式就无法实现对抗扰动的抑制吗？如果扰动是可以测量的，可采用下面的方法——按扰动的开环控制。



图 1-8 开环控制系统方块图

(2) 按扰动量控制

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，以减小或抵消扰动对被控量的影响，这种控制方式也称为顺馈控制。例如，在一般的直流电动机速度控制系统中，转速常常随负载的增加而下降，其转速的下降是由于电枢回路电压降低引起的。如果设法将负载引起的电流变化测量出来，并按其大小产生一个附加的控制作用，用于补偿由它引起的转速下降，这样的控制系统就具有抗负载变化的能力了，它构成了按扰

动控制的开环控制系统。在图 1-9(a)中, 在电枢回路设置一个电阻 R_1 来测量电枢电流的变化, 进而可感知转速的变化, 将电阻 R_1 两端电压通过电压放大器引入到功率放大器的输入端, 其极性应保证所测量的电压增加时功放的输出电压加大, 即功率放大器输入端的电压 $u_c = u_r + u_b$ 。补偿负载变化引起的转速下降的工作过程如下: $\omega \downarrow \Rightarrow i \uparrow \Rightarrow u_{R_1} \uparrow \Rightarrow u_b \uparrow \Rightarrow u_c \uparrow \Rightarrow \omega \uparrow$, 即转速下降引起负载回路电流增大, 从而测量电阻 R_1 两端的压降增加; 电压 u_{R_1} 的增加使电压放大器输出端电压 u_b 增加, 这样使功率放大器输入端的电压 u_c 加大, 从而使负载转速上升。这种按扰动控制的开环控制方式是直接从扰动获取信息, 并据以改变被控量, 因此, 其抗扰动性好, 控制精度也较高, 但它只适用于扰动是可测量的场合。

按扰动控制的电动机转速控制系统方块图如图 1-9(b)所示, 其中并没有通过对被控量的测量, 反馈到给定量的通路, 所以它仍然是开环控制方式。尽管按扰动的开环控制方式与闭环控制方式中都含有测量装置(元件), 都有比较操作, 但它们的根本区别是闭环控制方式中的被测量必须是被控量, 它可以抑制任何原因引起的被控量的变化。而按扰动的开环控制方式中测量的是扰动的变化, 它只能补偿可测扰动对被控量的影响, 对于其他因素引起的被控量的变化没有修正作用。

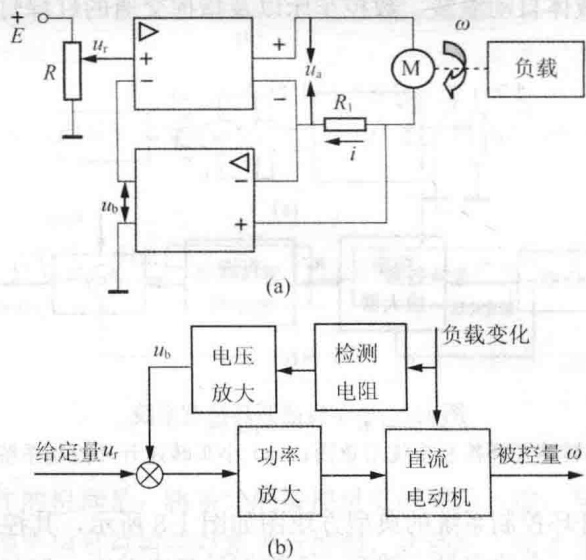


图 1-9 按扰动控制的转速控制系统

(a) 按扰动控制的电动机转速控制系统示意图; (b) 按扰动控制的电动机转速控制系统方块图

3. 复合控制方式

按扰动控制方式只适用于扰动是可以测量的场合, 而且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素, 对其余扰动均不起作用。为了提高系统的抗扰动能力, 比较合理的控制方式是按偏差控制的反馈控制与按扰动控制的顺馈结合起来, 对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制, 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。这样, 系统的主要扰动已被补偿, 反馈控制系统也比较容易设计, 控制效果也会更好。这种按偏差控制和按扰动控制结合的控制方式称为复合控制方式, 图 1-10 为按扰动补偿的电动机转速复合控制系统。忽略具体的被控对象, 可以画出按扰动补偿的复合控制系统的方块图如图 1-11(a)所示。复合控制的另一种形式是按输入补偿的复合控制如图 1-11(b)所示, 附加的补偿装置可提供一个前馈控制信号, 与原输入信号一起对被控对象进