

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

■ 主 编 郭小勤

■ 副主编 曹广忠 潘剑飞 吴 超



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

■ 主 编 郭小勤

■ 副主编 曹广忠 潘剑飞 吴 超



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/郭小勤主编. —广州:华南理工大学出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5623-3745-4

I. ①自… II. ①郭… III. ①自动控制理论-高等学校-教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 191725 号

自动控制原理

主编 郭小勤 副主编 曹广忠 潘剑飞 吴超

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020-87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 吴翠微

印刷者: 广东省农垦总局印刷厂

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 19 字数: 510 千

版次: 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

前 言

本书是编者在课程 CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) 工程教育的教学改革实践的基础上, 总结同类教材的编写经验, 吸取国内外有关本领域内最新的教学和科研成果, 精心组织编写而成的。

本书融入基于项目的认知、发现、探索、创新学习的 CDIO 工程教学方法, 在教材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, 使学生充分理解和掌握控制系统的基本规律和系统综合方法。本书的特色体现在以下几个方面。

1. 贯穿 CDIO 工程教育思想

本书借鉴 CDIO 工程教育思想, 着重培养学生应用知识的能力, 编写体系符合认知规律, 好教易学。在论述上由浅入深, 由表及里。例如, 在建模后的时域分析章节中, 并不是直接进入定量的数学分析与计算, 而是在简单模型知识的基础上, 从一阶系统入手, 通过简单例题和工业控制问题说明反馈控制结构的优点, 并引出控制系统的时域性能、稳态误差和抗干扰特性, 从而使读者加深对控制理论本质的理解, 避免只会解题计算, 不解其意。

2. 重视工程应用

在内容编排上, 注重理论联系实际, 力求展现工程应用的本质。学生在科技制作及未来的工程实践中, 经常遇到控制问题, 但是精确的数学模型难以获得, 本书在系统建模章节中增加了应用实验方法建模的介绍。书中除了列举许多具有工程应用背景的例题外, 采用循序渐进的方法引出控制工程中广泛采用的 PID 控制器。本书不仅在稳定性、动态性能改善、稳定误差的有关章节适时引出 PID 控制器, 讨论它是如何改变系统结构、如何改善系统性能, 而且在系统综合校正章节中介绍了 PID 参数的工程整定方法。

3. 增强 MATLAB 辅助教学的应用

利用 MATLAB 辅助自动控制原理的教学已成为所有新教材的选择, 这是大势所趋。本书不仅在附录中给出了 MATLAB 中控制系统分析计算常用的命令列表, 而且从第 2 章开始, 每章均有应用 MATLAB 的习题和练习。为了便于学生更好地理解相关的知识, 书中多处附有 MATLAB 的 .m 文件或 .mdl 文件。书中

的曲线均采用 MATLAB 语言绘制。

4. 体例编排醒目, 习题类型丰富

书中重要的内容用黑体字标出, 对于同一问题的引申(深度)讨论, 采用不同字体来呈现, 便于读者根据自己的情况自行选择。每章末尾有小结, 概括该章的知识结构体系、重点和难点; 还设有丰富的习题, 既有基本题和讨论题, 也有基于 MATLAB 仿真的综合分析题, 全方位地巩固知识, 训练提高分析问题的能力。

为了便于读者学习, 在附录中不仅给出 MATLAB 常用命令列表, 同时还为不具备复变函数知识的读者介绍了拉普拉斯变换的基础知识。

本书分为 8 章, 前 6 章分别讲述自动控制系统的基本概念、数学模型、时域和频域分析法、系统综合和校正等, 第 7 章和第 8 章分别讨论非线性系统和离散控制系统。对于自动化等相关专业的“自动控制原理”课程推荐学时为 54~72 学时; 其他专业的“控制工程(基础)”课程可根据实际情况选择前 6 章(或部分章节), 推荐学时为 36~54 学时。

本书第 1 章、第 2 章、第 3 章及附录 A 由郭小勤编写, 第 4 章及第 5 章第 1 节至第 8 节由潘剑飞编写, 第 5 章第 9 节、第 6 章及附录 B 由曹广忠编写, 第 7 章、第 8 章由吴超编写。全书由郭小勤修改定稿。

本书是深圳大学精品课程“自动控制原理”的主教材, 凝聚了课程编写小组教师们的心血和教学改革成果。编写小组立足自己的教学环境, 重点总结 and 解决教学实践中的问题。由于教学改革与教材的与时俱进是一个不断实践的过程, 不可能一次完成, 书中可能具有一些不尽如人意的地方, 还需使用本书的教师、学生和科技人员对于书中的错误和不妥之处给予指正, 多提宝贵意见。

本书的编写获得深圳大学教务处的项目资助。华南理工大学出版社对本书的编写和出版给予了大力的支持, 在此表示真诚的感谢。

编 者
2012 年 6 月

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制的基本原理	1
1.2.1 自动控制问题的引出	1
1.2.2 控制方式	4
1.3 自动控制系统的基本组成	8
1.4 自动控制系统示例	9
1.4.1 函数记录仪	9
1.4.2 磁盘驱动读取系统	10
1.4.3 导弹发射架的方位控制	11
1.4.4 机器人	12
1.5 自动控制系统的分类	12
1.5.1 按给定输入信号特征分类	12
1.5.2 按系统的数学特性分类	13
1.5.3 其他类型的分类	14
1.6 对自动控制系统的基本要求	14
1.7 控制分析与 MATLAB	15
1.7.1 控制系统工具箱 (Control System Toolbox)	16
1.7.2 MATLAB 辅助分析与设计	16
1.8 自动控制理论的发展概况	16
1.8.1 早期的自动控制	16
1.8.2 经典控制理论	17
1.8.3 现代控制理论	18
1.9 小结	18
习题	19
第 2 章 控制系统的数学模型	22
2.1 引言	22
2.2 控制系统的时域数学模型	22
2.2.1 线性元件的微分方程建立	22
2.2.2 控制系统微分方程的建立与求解	27
2.2.3 线性系统的基本特性	29
2.2.4 非线性微分方程的线性化	29
2.3 线性系统的传递函数	31

2.3.1	传递函数的定义和性质	31
2.3.2	典型元部件的传递函数	34
2.4	系统结构图及其等效变换	39
2.4.1	结构图的组成与绘制	39
2.4.2	结构图的等效变换	41
2.5	信号流图及梅逊公式	47
2.5.1	信号流图的组成及性质	47
2.5.2	信号流图的绘制	48
2.5.3	梅逊增益公式	50
2.6	闭环系统的传递函数	52
2.6.1	输入信号作用下的闭环传递函数	52
2.6.2	扰动作用下的闭环传递函数	52
2.6.3	闭环系统的误差传递函数	53
2.7	控制系统建模的 MATLAB 方法	53
2.7.1	控制系统模型描述	53
2.7.2	模型转换	53
2.7.3	系统连接	54
2.8	数学模型的实验测定法	54
2.9	小结	56
	习题	56
第 3 章	线性系统的时域分析	61
3.1	反馈控制系统的特性及基本分析	61
3.1.1	开环和闭环控制	61
3.1.2	控制系统的瞬态响应	62
3.1.3	反馈控制系统的干扰信号	63
3.1.4	稳态误差	66
3.1.5	反馈的代价	67
3.2	控制系统时间响应的性能指标	67
3.2.1	典型输入信号	68
3.2.2	控制系统的时间响应过程	69
3.2.3	控制系统的时域性能指标	69
3.3	一阶系统的时域分析	70
3.3.1	一阶系统的数学模型	71
3.3.2	一阶系统的单位阶跃响应	71
3.3.3	一阶系统的单位脉冲响应	72
3.3.4	一阶系统的单位斜坡响应	72
3.4	二阶系统的时域分析	73
3.4.1	二阶系统的数学模型	73
3.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	75

3.4.3 二阶系统动态性能指标计算	77
3.4.4 改善二阶系统性能的常用方法	82
3.5 高阶系统的时域分析	87
3.5.1 高阶系统的阶跃响应	87
3.5.2 高阶系统的闭环主导极点和动态性能分析	90
3.6 线性系统的稳定性	91
3.6.1 稳定的概念	91
3.6.2 线性系统稳定的充要条件	92
3.6.3 线性系统稳定的代数判据	93
3.7 线性系统的稳态误差	98
3.7.1 误差与稳态误差	99
3.7.2 给定信号作用下的稳态误差计算	100
3.7.3 扰动作用下的稳态误差计算	103
3.7.4 提高系统控制精度的措施	105
3.8 基本控制律分析	108
3.8.1 比例(P)控制律	109
3.8.2 比例-微分(PD)控制律	109
3.8.3 积分(I)控制律	109
3.8.4 比例-积分(PI)控制律	110
3.8.5 比例-积分-微分(PID)控制律	110
3.9 线性系统时域分析的 MATLAB 方法	112
3.9.1 稳定性分析	113
3.9.2 动态性能和稳态性能分析	113
3.10 小结	113
习题	114
第4章 线性系统的根轨迹法	120
4.1 控制系统的根轨迹	120
4.1.1 根轨迹的基本概念	120
4.1.2 闭环零极点与开环零极点的关系	122
4.1.3 根轨迹方程	123
4.2 根轨迹的绘制法则	124
4.3 其他形式的根轨迹	134
4.3.1 参数根轨迹	134
4.3.2 零度根轨迹	135
4.4 基于 MATLAB 的根轨迹图绘制	138
4.4.1 rlocus	138
4.4.2 rlocfind	138
4.5 根轨迹法分析	139
4.5.1 闭环零点、极点与时间响应	139

4.5.2 系统性能的定性分析	140
4.6 小结	145
习题	145
第5章 线性系统的频域分析法	148
5.1 频率特性	148
5.1.1 频率特性的基本概念	148
5.1.2 频率特性的图形表示方法	150
5.2 典型环节的伯德图	152
5.2.1 比例环节	152
5.2.2 积分环节和微分环节	153
5.2.3 惯性环节和一阶微分环节	154
5.2.4 振荡环节	156
5.2.5 二阶微分环节	157
5.2.6 延迟环节	158
5.3 开环系统的伯德图	158
5.3.1 开环伯德图的绘制	158
5.3.2 最小相位系统	161
5.4 典型环节的极坐标图及开环系统极坐标图绘制	162
5.4.1 典型环节的极坐标图	162
5.4.2 开环极坐标图及近似绘制	165
5.5 频域稳定性判据	168
5.5.1 辅助函数 $F(s)$	168
5.5.2 幅角原理	169
5.5.3 奈奎斯特稳定性判据	170
5.5.4 伯德图上的稳定性判据	173
5.6 稳定裕度	174
5.6.1 相位裕度	175
5.6.2 幅值裕度	175
5.7 闭环频率特性	177
5.7.1 基本关系	177
5.7.2 矢量表示法	177
5.7.3 闭环频率特性	177
5.8 基于 MATLAB 的频率特性图绘制	178
5.8.1 伯德(Bode)图	178
5.8.2 奈奎斯特曲线	178
5.9 频率特性分析	179
5.9.1 三频段的概念	180
5.9.2 开环频域指标与时域指标的关系	181
5.9.3 闭环频域指标与时域指标的关系	182

5.10 小结	184
习题	185
第6章 控制系统的综合与校正	188
6.1 控制系统校正的基本概念	188
6.1.1 性能指标	189
6.1.2 校正方式	189
6.1.3 校正的设计方法	191
6.2 常用校正装置及其特性	192
6.2.1 串联超前校正网络	192
6.2.2 串联滞后校正网络	194
6.2.3 串联滞后-超前校正网络	196
6.3 串联校正的频域法设计	197
6.3.1 串联超前校正设计	197
6.3.2 串联滞后校正设计	202
6.3.3 串联滞后-超前校正设计	207
6.4 反馈校正与复合校正	210
6.4.1 反馈校正的原理与特点	210
6.4.2 复合校正	212
6.5 PID控制器的参数整定	216
6.5.1 衰减曲线法	217
6.5.2 稳定边界法 (Ultimate Sensitivity Method)	217
6.6 小结	218
习题	219
第7章 非线性系统	223
7.1 控制系统的非线性特性	223
7.1.1 典型的非线性特性	223
7.1.2 非线性系统的若干特征	225
7.1.3 非线性控制系统的分析方法	226
7.2 描述函数法	227
7.2.1 描述函数定义	227
7.2.2 典型非线性特性的描述函数	228
7.2.3 非线性系统描述函数法分析	231
7.3 相平面法	235
7.3.1 相平面法的基本概念	235
7.3.2 相平面图的绘制	236
7.3.3 相轨迹的基本特性	236
7.3.4 非线性系统的相平面法分析	239
7.4 非线性系统分析的 MATLAB 方法	242

7.4.1 微分方程高阶数值解法	242
7.4.2 综合运用：非线性系统的稳定性分析	242
7.5 小结	244
习题	244
第8章 离散控制系统	246
8.1 离散控制系统基本概念	246
8.1.1 采样控制系统	246
8.1.2 数字控制系统	247
8.1.3 离散控制系统的特点	247
8.2 信号采样和复现	248
8.2.1 信号采样	248
8.2.2 采样信号频谱分析	248
8.2.3 采样定理	250
8.2.4 信号复现	250
8.3 Z变换及反变换	252
8.3.1 Z变换定义	252
8.3.2 Z变换的求法	252
8.3.3 Z变换的性质	254
8.3.4 Z反变换	255
8.4 离散系统的数学模型	256
8.4.1 差分方程	256
8.4.2 脉冲传递函数	258
8.5 离散控制系统性能分析	265
8.5.1 离散控制系统的稳定性	265
8.5.2 离散控制系统的稳态误差	270
8.5.3 离散系统动态性能	273
8.6 线性离散系统分析的 MATLAB 方法	275
8.6.1 连续系统的离散化	275
8.6.2 离散系统时域分析	275
8.6.3 综合运用	275
8.7 小结	277
习题	277
附录 A 拉氏变换与反变换	280
附录 B MATLAB 常用命令索引	292
参考文献	294

第 1 章 自动控制的一般概念

1.1 引 言

进入 21 世纪以来,科学技术得到突飞猛进的发展,自动控制技术已成为现代化社会不可缺少的组成部分。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、医药工业等的过程控制中,都有自动控制技术的成功应用。此外,在城市交通、通讯网络控制、大型电网的调度与控制中,自动控制也都发挥着重要作用。

什么是自动控制呢?所谓自动控制就是指在没有人的直接参与情况下,利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预先确定的规律运行。例如空调可按照设定的温度自动调节室温,数控车床可按照预定的程序自动加工工件,自动生产线上产品的自动监测、包装,导弹通过导引装置自动地飞向敌方目标,无人机通过自动驾驶仪控制飞机的姿态和位置,这一切都是应用自动控制技术的结果。自动控制系统的广泛应用,不仅提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类利用自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活方面起着极为重要的作用。

自动控制理论是研究有关自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的科学技术。自动控制原理是自动控制技术的基础理论,学习和研究自动控制原理是为了探索自动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。作为现代工程技术人员和科学研究及管理工作,都应该具备一定的自动控制理论基础知识。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 自动控制问题的引出

在许多工业生产过程中或日常生活中,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,或使其按一定的规律变化。若要满足这种需要,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,例如人驾驶汽车,那么称为人工控制。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,那么就称为温度的自动控制。下面通过几个具体例子说明自动控制的概念。

1.2.1.1 水位高度控制

图 1-1a 所示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。随着用水量的增多，水池中的水位必然下降。这时若要保持水位高度不变，就要开大进水阀门，增加进水量以作补充。在本例中，进水阀门的开启程度（简称开度）并不是一成不变的，而是根据实际水位的高低进行操作的。上述过程可由人工操作实现。正确的步骤是：

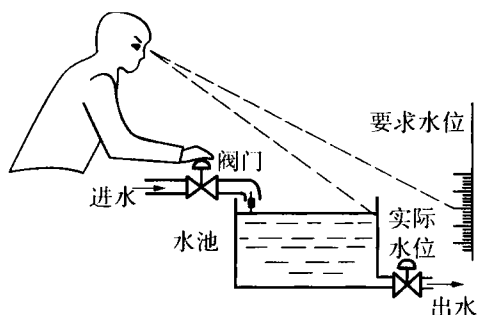
①将所要求的水位期望值牢记在大脑中。

②用眼睛和测量工具测量水池实际水位。

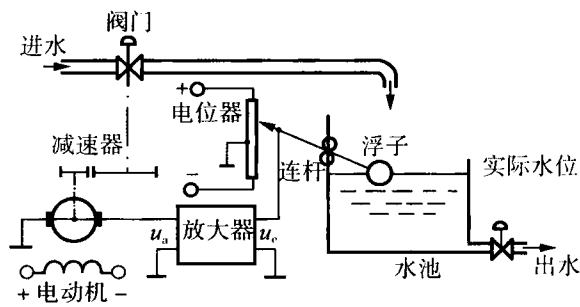
③用大脑将期望水位与实际水位进行比较、计算出误差值。

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。然后用手操作进水阀门，调节进水的流量，最终使水位接近或等于给定值。

由于图 1-1a 所示为有人的直接参与控制，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。



(a) 人工控制的水位恒值系统



(b) 水位恒值自动控制系统

图 1-1 水池水位恒值控制系统

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……这样一种不断循环的过程。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 1-1a 中人所完成的全部职能，那么人就可以不直接参与控制，就称为自动控制了。

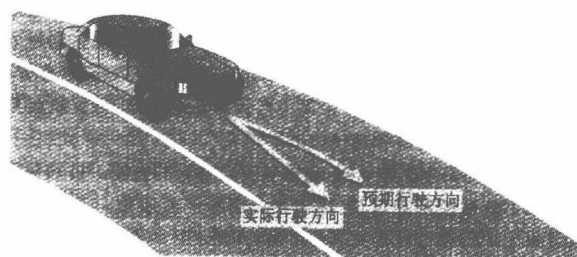
图 1-1b 所示是一种水池水位自动控制系统。图中用浮子代替人的眼睛，用来测量水位的高低，连杆起着比较作用，它将期望水位与实际水位进行比较，得出误差，并以运动的形式推动电位器的滑块作上下移动。电位器输出电压的高低和极性反映出误差的大小和方向。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机，其转轴经减速后带动进水阀门，对水池水位进行调节。在正常情况下，实际水位等于期望值，此时，电位器的滑块居中，输出电压 $u_e = 0$ 。当输出水量增大时，浮子下降，它带动电位器滑块向上移动，输出电压 $u_e > 0$ ，经放大器放大后控制电动机正向旋转，以增大进水阀门的开度，促使水位回升。只有当实际水位恢复到期望值时，才能使 $u_e = 0$ ，控制作用才告终止。反之，若用水量变小，水位及浮子上升，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下进行的,所以是自动控制过程。其工作步骤可归纳为:

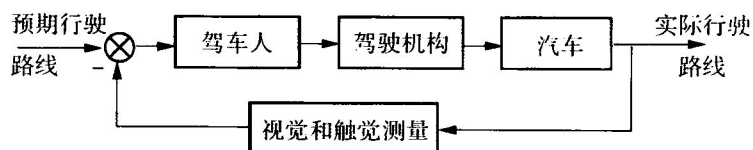
- ①用连杆和电位器滑块标定好水位的期望值。
- ②用浮子和连杆测量水位高度,通过电位器滑块得到误差。
- ③误差经放大器放大后,由电动机和减速机构带动进水阀门动作。
- ④按照减小误差的方向控制进水阀门的开度。

1.2.1.2 汽车驾驶控制

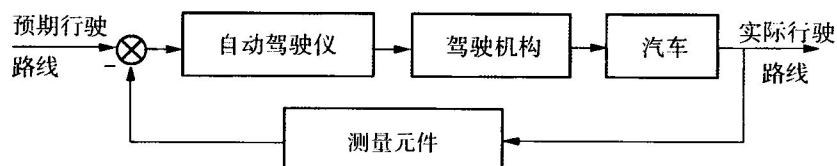
当汽车能快速准确地对司机的操纵作出响应时,驾驶汽车无疑是一件令人惬意的事情。汽车是装有驾驶和制动的动力装置,它们通过液压放大器将操纵力放大以便控制驱动轮或者刹车。图1-2a是驾驶汽车在道路上行驶的示意图。图1-2b为人工驾驶汽车方块图,在人工驾驶情况下,驾驶员通过视觉和触觉(身体运动)测量汽车当前位于道路中心线的位置(距离中心线的横向偏差和偏角),根据驾驶经验作出判断,确定方向盘的转向和转动角度,然后用手操作方向盘,改变汽车的行驶位置,最终使汽车沿预期线路行驶。只要汽车位置偏离了预期线路,驾驶员便要重复上述调节过程。图1-2c为汽车自动驾驶控制系统的方块图。其中汽车是被控对象,汽车的位置是被控量。若要使汽车自动地沿预期行驶线路行驶,就需要一个自动驾驶仪(自动驾驶装置)和测量元件,代替驾驶员的眼睛和身



(a)汽车在道路上行驶示意图



(b)人工驾驶汽车方块图



(c)汽车自动驾驶控制系统方块图

图1-2 汽车驾驶控制图

体感知完成汽车当前位置与预期位置偏差的测量；代替驾驶员的大脑，载入驾驶经验，根据当前状况，确定方向盘的转动方向和转角大小；通过电动操作机构代替人的手臂，完成方向盘的转动，最终使汽车沿预期线路行驶。无论任何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。

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 1-1 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，通常称为控制器或控制装置。在图 1-2c 中，自动驾驶仪完成位置偏差的测量、方向盘控制量的决策及动作的操作，它也是控制器。实际上，任何一个控制系统，都是由被控对象和控制器两部分组成的。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系统的输出，它们通常称为反馈控制或闭环控制系统。

1.2.2 控制方式

闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式，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，应根据各自具体的目的和不同的适用场合而定。

1.2.2.1 闭环控制方式

典型的闭环控制系统的方块图如图 1-3 所示。图中方框表示系统中具有相应职能的元部件；带箭头的线段表示元部件之间的信号及传递方向。通常，把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道；从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方块图中的符

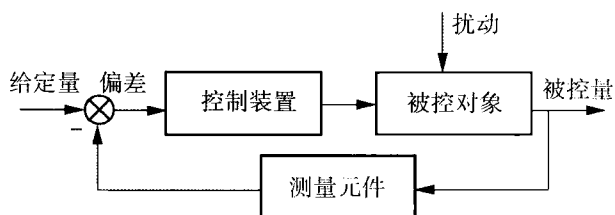


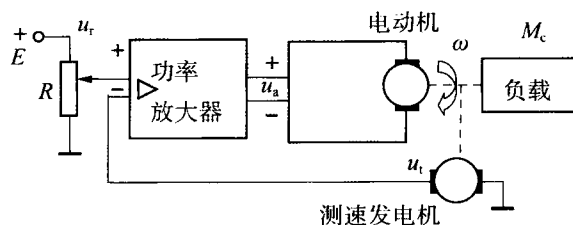
图 1-3 典型闭环控制系统方块图

号 $\otimes$ 表示比较环节，其输出量等于各输入量的代数和。因此，各个输入量均需用正、负号表明其极性，如果是相加，其“+”可以省略。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，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。但闭环系统使用的元件多、结构复杂，即使各元件是稳定的，组成的闭环系统也可能不稳定。尽管如此，它仍然是一种重要的并被广泛应用的控制方式。闭环控制系统将是本课程讨论的重点。

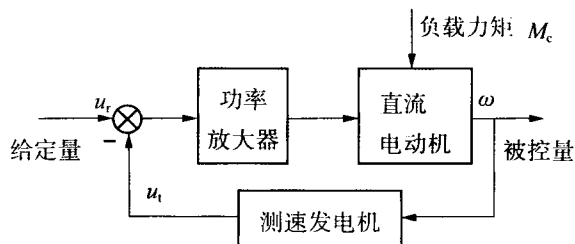
图 1-4 是直流电动机转速闭环控制系统，图中电动机是电枢控制的直流电动机，其电枢电压由功率放大器提供。调节电位器滑臂位置，可以改变功率放大器的输入电压，从而改变电动机的电枢电压，最终改变电动机的转速。测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速测量出来，并转换为电压，再反馈到系统的输入端，与代表期望输出转

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来调节电动机的转速,从而使偏差减小,这种控制通常也称为按偏差控制。

直流电动机转速闭环控制系统可用图1-4b所示的方块图表示。直流电动机是被控对象,电动机的转速是被控量,或称为输出量。参考电压通常称为系统的给定量或输入量。图中由于采用了反馈回路,致使信号的传输路径形成了闭合回路,使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈使系统构成闭环,并按偏差产生控制作用,用于减小或消除偏差的控制系统,也称为反馈控制系统。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系统。



(a) 直流电动机转速闭环控制系统示意图



(b) 直流电动机转速闭环控制系统方块图

图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

1.2.2.2 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,其特点是系统的输出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

按给定量控制的开环控制系统的典型方块图如图1-5所示,其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对应,控制精度完全取决于所用的元件及校准精度。

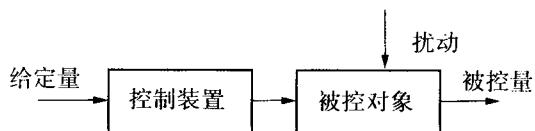


图 1-5 开环控制系统方块图

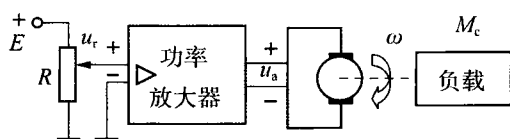
图1-6是开环控制方式的电动机转速控制系统。它的任务是控制电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作过程是调节电位器的滑臂,使其输出的给定参考电压 u_r 经放大后送到电动机的电枢端,用来控制电动机的转速 ω 。在负载恒定的条件下,直流电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比,只要改变给定电压 u_r ,便可得到相应的电动机转速 ω 。

在系统中,直流电动机是被控对象,电动机的转速是被控量,或称为输出量。参考电压通常称为系统的给定量或输入量。对于图1-6所示系统,输出量转速只由输入量单向控制,与实际输出没有任何联系,故这种控制方式称为开环控制。

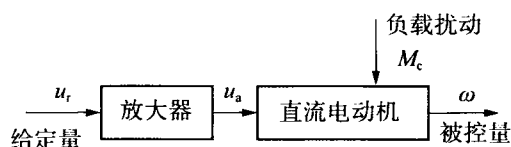
直流电动机转速开环控制系统可用图 1-6b 所示的方块图表示。控制器由放大器组成,电动机负载转矩的任何变化,都会使输出量偏离期望值。因此,这种开环控制方式没有自动修正偏差的能力,抗扰动性较差。但由于其结构简单、调整方便、成本低,在精度要求不高或扰动影响较小的情况下,开环控制方式有一定的实用价值。例如图 1-1 所示的水位控制系统也可以用开环控制方式来实现。如果进水管路和出水管路的流量受外界干扰影响很小,近似为常值的话,可以根据期望的水位要求,设定一个不变的进水阀门开度,这样供水系统就可以使水池的高度近似等于给定值。如果环境(用户用水量)的变化规律事先已知,可以预先设计进水阀门开口随时间的变化规律,当系统运行时,就可保证水池高度位于给定值的附近。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、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。

(2)按扰动控制

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输出的影响,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,这样就可以构成按扰动控制的开环控制系统,如图 1-7 所示。其中,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: $\omega \downarrow \rightarrow i \uparrow \rightarrow u_{R_1} \uparrow \rightarrow u_c \uparrow \rightarrow \omega \uparrow$, 即转速下降引起负载回路电流增大,从而测量电阻 R_1 两端的电压降增加;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

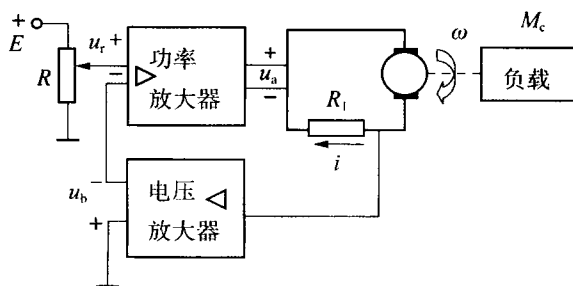


(a) 直流电动机转速开环控制系统示意图

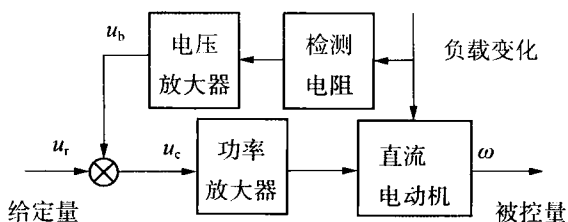


(b) 直流电动机转速开环控制系统方块图

图 1-6 直流电动机转速开环控制系统



(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

图 1-7 按扰动控制的转速控制系统