

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Principles of Automatic Control

自动控制原理

宋建梅 ○ 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

自动控制原理

宋建梅 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要讲述经典控制理论，全书共8章。第1章讲述自动控制系统的基本概念和发展历史；第2章建立并化简自动控制系统的数学模型；第3章到第5章全面阐述线性连续控制系统的三种分析方法，分别为时域法、根轨迹法和频域法；第6章介绍了线性连续控制系统常用的经典校正方法；第7章讲述了离散控制系统的分析与设计方法；第8章介绍了非线性连续系统的描述函数分析方法。书末是附录，给出了拉氏变换与拉氏反变换的相关知识。

本书主要从稳定性、动态性能、稳态误差、灵敏度等方面，比较全面系统地阐述了控制系统分析与设计的经典理论，同时强调理论联系实际，突出控制理论的工程实用性。

本书可作为高等工科院校自动化、机械电子工程、航空宇航、机械、动力、冶金、化工等相关专业的教科书，也可供涉及自动控制的各专业工程技术人员自学参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/宋建梅编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2020. 10

ISBN 978-7-5682-8810-1

I. ①自… II. ①宋… 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 (2020) 第 137171 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 23.5

字 数 / 552 千字

版 次 / 2020 年 10 月第 1 版 2020 年 10 月第 1 次印刷

定 价 / 76.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

自动控制原理是一门理论与实践相结合的工程性理论课程，是高等工科大学很多专业（例如自动化、机械电子、航空宇航、机械、动力、冶金、化工等）的核心基础课，实用性强，工程应用非常广泛。进一步，工程中的控制理论还被推广应用于社会生活的方方面面，例如经济、生物、社会等领域，从而形成了经济控制论、生物控制论、社会控制论等诸多学科。控制理论在任何工程和科学领域几乎都是必不可少的。

编者自1994年至今一直工作在教学科研一线，长期从事飞行器制导与控制系统的的设计研发工作，承担了北京理工大学宇航学院“自动控制原理”的课程教学，为机械电子工程、探测制导与控制、飞行器设计与工程、航天运输与控制、武器系统与发射工程、飞行器动力工程等许多专业的学生都授过课。

由于学习控制理论的终极目标是实现对实际工程系统的控制，所以本书在系统严谨地阐述自动控制理论中的基本概念与方法的同时，突出自动控制原理的工程学科特点，强调控制系统的工程合理性、实用性、可实现性等原则，将新的教育理念，尤其是回归工程的教育理念贯彻其中，努力从工程角度理解、分析和表达控制系统问题。

具体而言，本书的特色如下：

(1) 本书在强调反馈控制是克服干扰和不确定性影响、构建高品质工程控制系统的重要控制方式的同时，也分析了开环控制、复合控制等的抗扰机理和抗扰效果，引入了双通道控制和不变性原理等重要概念。另外，针对实际工程系统中的不确定性因素，本书引入了灵敏度概念。

(2) 遵循工程理念，本书强调了控制系统的设计总是有约束条件的，每个控制工程师，都应掌握这些约束条件并深入理解它们的含义。本书主要讲述了系统可用带宽、伯德幅相定理、伯德积分定理等三种设计约束条件。其中基于灵敏度函数的伯德积分定理，对控制系统的控制难度进行了频域量化，其“水床效应”（Water Bed Effect）规则适用于所有的控制器。

(3) 由于实际工程中非最小相位系统的普遍存在, 本书特引入了非最小相位系统的时域响应分析、频域稳定性判据和稳定裕度计算等内容。

(4) 鉴于PID控制器在实际工程系统中的广泛应用, 本书在分析PID基本控制原理的基础上, 介绍了PID控制器参数的几种设计方法, 包括基于伯德图的频域设计法、极点配置法、整定法、最小 M_r 串联工程法等。

(5) 在讲述控制系统的稳定性时, 本书采用了运动稳定性概念, 而国内大部分教材采用了平衡状态稳定性概念。虽然对于线性系统而言, 运动稳定性与平衡状态稳定性是等价的, 但严格地说, 它们并不是一回事。在分析线性系统的稳定性时, 我们关心的是系统的运动稳定性。

(6) 从第3章起, 在介绍相关的Matlab控制仿真指令后, 每章都给出了一个基于Matlab软件的数学仿真实验, 包括实验目的、预习内容、实验内容及实验报告要求等。读者可以通过数学仿真实验, 加深对自动控制理论基本概念与方法的理解, 并培养现代化的自动控制系统分析和设计能力。

(7) 本书在每章开头明确指出学生学习本章内容所应达到的学习目标, 使学生能够有目的地去学习, 体现了OBE (Outcome-Based Education) 成果导向的教育理念。

(8) 本书重点参考了国外近几年出版的自动控制原理优秀教材, 在教学思想、教学内涵上与国际先进水平保持接轨, 中西结合, 融会贯通, 博采众家之长。在教学内容处理上, 既注重基本概念、基本方法的系统阐述, 力求物理概念清楚、由浅入深、循序渐进, 又注意理论与实际工程应用相结合, 引入了大量富有时代感的工程实例。

(9) 本书比较详细地追溯了自动控制理论的发展史和形成史, 讲述了一些重要控制理论产生的来龙去脉和关键历史人物, 突出了自动控制理论的悠久历史渊源, 体现出在科学发展过程中需求牵引与技术推动的辩证关系、理论与实践的辩证关系。

另外需要说明的是, 很多国内的经典自动控制理论教材都将“超前校正器”称作“超前校正网络”, 这是因为早期控制系统的超前校正都是基于无源或者有源的超前电路网络实现的。考虑到近些年控制算法已大多由微处理器实现, 而且目前国外的绝大多数教材将其称为“lead compensator”, 不再采用“network”一词, 因此本书与时俱进, 将“lead compensator”译为“超前校正器”。同理, 本书将“滞后校正网络”改称为“滞后校正器”; 将“滞后-超前校正网络”改称为“滞后-超前校正器”。

本书按照自动控制基本概念、系统建模、连续控制系统的分析与校正、离散控制系统的分析与校正、非线性系统的稳定性分析等的思路来编排教材内容, 每章里面的内容都比较系统、丰富, 并遵循认识规律, 层次分明, 模块性较强, 增强了教材的灵活性与可用性, 可以满足不同层次的教学和自学需求。教师可因材施教, 按需组织教学, 有的小节可安排学生课外阅读。

在克利夫兰州立大学先进控制技术研究中心 (Center for Advanced Control Technologies, Cleveland State University) 高志强教授的建议下, 本书加入了可用带宽、伯德幅相定理、

伯德积分定理等控制系统的重要概念和理论，突出了自动控制原理的工程应用属性，在此对高老师的中肯建议以及对部分内容的修改审阅表示衷心的感谢。张春妍博士在本书绘图方面给予了很大的帮助和支持，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中错误或欠妥之处在所难免，恳请各位读者批评指正。

作 者

2020.03

目 录

CONTENTS

第 1 章 自动控制系统的基本概念	001
1.1 引言	001
1.2 反馈控制原理与系统基本组成	003
1.2.1 反馈控制原理	003
1.2.2 反馈控制系统的基本组成	004
1.3 自动控制系统的三种基本控制方式及其特点	005
1.3.1 开环控制方式	005
1.3.2 反馈控制方式	006
1.3.3 复合控制方式	008
1.4 自动控制理论的发展简史	009
1.4.1 19 世纪之前的自动控制技术实践概况	009
1.4.2 19 世纪的自动控制理论发展概况	010
1.4.3 20 世纪前半叶的自动控制理论发展概况	010
1.4.4 20 世纪后半叶的自动控制理论发展概况	011
1.5 自动控制系统的分类	012
1.5.1 恒值控制系统与随动控制系统	012
1.5.2 线性系统与非线性系统	013
1.5.3 连续系统与离散系统	013
1.6 对自动控制系统的基本要求与典型外作用	014
1.6.1 对自动控制系统的基本要求	014
1.6.2 自动控制系统的典型外作用	015
1.7 控制系统设计实例	017
1.7.1 转盘转速控制系统	017
1.7.2 飞机自动驾驶仪系统	018
1.7.3 胰岛素注射控制系统	019
1.7.4 磁盘驱动器读取系统	020

1.7.5 射电望远镜天线方位控制系统	021
习题 1	022
第 2 章 自动控制系统的数学模型	025
2.1 引言	025
2.2 自动控制系统的微分方程描述	026
2.3 非线性微分方程的线性化	029
2.4 传递函数	030
2.5 典型环节的传递函数	032
2.6 结构图及其等效变换	037
2.6.1 结构图的基本概念	037
2.6.2 结构图的绘制	037
2.6.3 结构图的等效变换	039
2.7 信号流图及梅森增益公式	042
2.7.1 信号流图的基本概念	042
2.7.2 梅森增益公式	044
2.7.3 信号流图的绘制	046
2.8 典型反馈控制系统的传递函数与灵敏度函数	048
2.8.1 典型反馈控制系统的传递函数	048
2.8.2 误差信号与灵敏度函数	050
2.9 反馈控制系统的灵敏度	051
2.9.1 系统对参数变化的灵敏度	051
2.9.2 反馈控制系统对被控对象变化的灵敏度	052
2.10 反馈的代价	052
2.11 自动控制系统设计实例	053
2.11.1 磁盘驱动器读取系统	053
2.11.2 天线方位控制系统	055
2.12 在 Matlab 中描述控制系统的数学模型	056
2.12.1 控制系统在 Matlab 环境中的描述指令	056
2.12.2 基于 Matlab 指令的结构图化简	057
2.12.3 控制系统在 Simulink 环境中的描述	058
习题 2	060
第 3 章 自动控制系统的时域分析	065
3.1 引言	065
3.2 极点、零点与系统响应	066
3.2.1 传递函数的极点和零点	066
3.2.2 极点和零点对系统输出的影响	067
3.3 一阶系统的时域分析	068
3.4 典型二阶系统的时域响应	069
3.5 欠阻尼二阶系统的动态性能指标	073

3.5.1	欠阻尼二阶系统	073
3.5.2	欠阻尼二阶系统的动态性能指标定义与计算分析	074
3.6	二阶系统动态性能的改善措施	081
3.6.1	比例微分控制	081
3.6.2	测速反馈控制	082
3.7	附加极点和零点对二阶系统响应的影响	083
3.7.1	附加极点对二阶系统响应的影响	083
3.7.2	附加零点对二阶系统响应的影响	084
3.8	高阶系统的时域分析	086
3.8.1	高阶系统的瞬态响应	086
3.8.2	闭环主导极点	088
3.9	线性系统的稳定性分析	090
3.9.1	稳定性的概念及系统稳定的充要条件	090
3.9.2	劳斯稳定性判据	092
3.9.3	应用劳斯判据设计系统参数	094
3.10	线性系统的稳态误差分析	097
3.10.1	引言	097
3.10.2	单位反馈系统的稳态误差	098
3.10.3	三种标准测试输入信号下的稳态误差	099
3.10.4	非单位反馈系统的稳态误差	102
3.10.5	扰动作用下的稳态误差	104
3.11	自动控制系统设计实例	107
3.11.1	磁盘驱动器读取系统	107
3.11.2	英吉利海峡海底隧道钻机	110
3.11.3	履带车辆的转向控制系统	112
3.11.4	火星漫游车	113
3.11.5	哈勃太空望远镜定向系统	115
3.12	利用 Matlab 进行控制系统的性能分析	117
3.13	基于 Matlab 的系统时域分析数学仿真实验	119
	习题 3	120
第 4 章	根轨迹法	125
4.1	引言	125
4.2	根轨迹法的基本概念	126
4.2.1	根轨迹与系统性能	126
4.2.2	根轨迹方程	127
4.3	根轨迹绘制的基本法则	128
4.4	参量根轨迹	141
4.5	增加开环极点或零点对根轨迹的影响	144
4.6	控制系统设计实例	147

4.6.1	激光操纵控制系统	147
4.6.2	磁盘驱动器读取系统	149
4.7	应用 Matlab 绘制根轨迹	150
4.8	基于 Matlab 的根轨迹数学仿真实验	152
习题 4	152
第 5 章	频域分析法	155
5.1	引言	155
5.2	频率特性	156
5.2.1	频率特性的基本概念	156
5.2.2	频率特性的几何表示法	157
5.3	开环系统的伯德图	160
5.3.1	典型环节的伯德图	160
5.3.2	开环系统的伯德图绘制	167
5.3.3	非最小相位系统的伯德图	169
5.3.4	通过频域实验确定系统的传递函数	172
5.4	开环系统的幅相频率特性曲线	173
5.5	奈奎斯特稳定性判据	176
5.5.1	复变函数 $F(s)$ 的选择及辐角原理	176
5.5.2	奈奎斯特稳定性判据	180
5.5.3	开环系统含有积分环节时奈氏判据的推广	182
5.5.4	对数频率稳定性判据	184
5.5.5	非最小相位系统的稳定性判断	186
5.6	稳定裕度	188
5.6.1	最小相位系统的稳定裕度	188
5.6.2	非最小相位系统的稳定裕度	193
5.7	控制系统频域性能指标与时域性能指标的关系	194
5.7.1	系统闭环频域指标	194
5.7.2	二阶闭环系统的闭环频域指标与时域指标的关系	196
5.7.3	开环系统频域指标与闭环系统时域指标的关系	198
5.7.4	闭环系统频域指标与开环系统频域指标的转换	201
5.8	控制系统设计实例	202
5.8.1	雕刻机控制系统	202
5.8.2	磁盘驱动器读取系统	204
5.8.3	液位控制系统	206
5.8.4	天线控制系统频域分析	207
5.9	利用 Matlab 进行控制系统频域分析	209
5.10	基于 Matlab 的系统频域分析数学仿真实验	210
习题 5	211

第 6 章 控制系统校正	215
6.1 系统校正问题概述	215
6.2 频域串联校正的基本概念	217
6.3 超前、滞后及滞后-超前串联校正装置及其特性	218
6.3.1 超前校正器	218
6.3.2 滞后校正器	221
6.3.3 滞后-超前校正器	223
6.4 基于伯德图的超前、滞后及滞后-超前串联校正	224
6.4.1 串联超前校正	224
6.4.2 串联滞后校正	229
6.4.3 串联滞后-超前校正	232
6.4.4 三种串联校正方式的对比与可用带宽概念	235
6.5 基于期望开环频率特性的串联综合法校正	237
6.6 采用 PID 控制器的系统串联校正	242
6.6.1 PID 控制原理简介	242
6.6.2 基于伯德图的 PID 控制器设计	243
6.6.3 基于极点配置法的 PID 控制器设计	249
6.6.4 基于高阶系统累试法的 PID 控制器设计	250
6.6.5 基于齐格勒-尼柯尔斯法的 PID 控制器设计	251
6.6.6 基于串联工程法的 PID 控制器设计	252
6.7 基于标准闭环传递函数的串联综合法校正	255
6.7.1 按 ITAE 准则确定标准传递函数	255
6.7.2 按最小节拍响应确定标准传递函数	259
6.8 反馈校正	261
6.8.1 反馈校正的基本思想	261
6.8.2 常用的反馈校正系统	262
6.9 复合校正	264
6.9.1 按扰动补偿的复合校正	264
6.9.2 按输入补偿的复合校正	266
6.10 控制系统的性能指标描述与设计约束	268
6.10.1 基于开环幅频曲线的性能指标描述与设计约束	268
6.10.2 基于灵敏度函数的性能指标描述与设计约束	269
6.11 控制系统设计实例	272
6.11.1 磁盘驱动器读取系统	272
6.11.2 热钢锭机器人控制系统	274
6.11.3 天线方位控制系统	276
6.12 利用 Matlab 进行控制系统校正	278
6.13 基于 Matlab 的系统频域校正数学仿真实验	279
习题 6	279

第 7 章 线性离散系统分析	284
7.1 离散控制系统的基本概念	284
7.1.1 采样控制系统	284
7.1.2 数字控制系统	285
7.2 信号的采样与保持	286
7.2.1 采样过程及其数学描述	286
7.2.2 采样定理	288
7.2.3 保持器的数学描述	290
7.3 z 变换理论	292
7.3.1 z 变换的定义	292
7.3.2 z 变换的求法	293
7.3.3 z 变换的性质	296
7.3.4 z 反变换	297
7.4 离散系统的数学模型	299
7.4.1 线性常系数差分方程及其解法	299
7.4.2 脉冲传递函数	301
7.4.3 开环系统脉冲传递函数	303
7.4.4 闭环系统的脉冲传递函数	305
7.5 离散系统的稳定性与稳态误差	307
7.5.1 离散系统稳定的充分必要条件	307
7.5.2 离散系统的稳定性判据	309
7.5.3 离散系统的稳态误差	311
7.6 离散系统的动态性能	314
7.7 离散控制系统串联校正设计与实现	317
7.7.1 离散控制系统串联校正设计	317
7.7.2 离散控制器的实现	320
7.8 离散控制系统设计实例	321
7.8.1 导弹数字控制系统的稳定性判断	321
7.8.2 天线方位控制系统的离散串联校正设计	322
7.9 利用 Matlab 进行离散控制系统分析	324
7.9.1 基本指令介绍	324
7.9.2 闭环离散系统的响应	324
7.9.3 带数字控制器的离散控制系统仿真	325
7.10 基于 Matlab 或 Simulink 的离散控制系统仿真实验	326
习题 7	327
第 8 章 非线性系统	331
8.1 非线性系统概述	331
8.1.1 本质非线性与非本质非线性	331
8.1.2 常见非线性特性	331

8.1.3 非线性系统的运动特点	333
8.1.4 非线性系统的分析方法	333
8.2 描述函数	334
8.2.1 描述函数的基本概念	334
8.2.2 描述函数计算举例	336
8.3 用描述函数法分析非线性系统	342
8.3.1 非线性系统的稳定性分析	342
8.3.2 自激振荡的稳定性	343
8.4 基于 Simulink 分析非线性控制系统	347
8.4.1 基于 Simulink 的非线性开环系统仿真分析	347
8.4.2 基于 Simulink 的非线性控制系统闭环响应仿真分析	348
8.5 基于 Simulink 的非线性控制系统数学仿真实验	349
习题 8	350
附录 拉氏变换与拉氏反变换	353
参考文献	361

第 1 章

自动控制系统的基本概念

[本章学习目标]

- (1) 理解自动控制的概念和内涵；
- (2) 掌握反馈控制的基本原理及反馈控制系统的基本组成；
- (3) 深入理解并掌握开环控制与闭环控制的本质区别；
- (4) 了解自动控制理论的发展历史；
- (5) 了解控制系统的基本性能指标要求；
- (6) 能够分析控制系统的基本工作原理，并画出其工作原理方框图。

1.1 引言

自动控制在任何工程和科学领域几乎都是必不可少的，自动控制技术已经被广泛应用于现代社会活动的方方面面。例如，卫星发射、卫星入轨及回收、火星车自动着陆并行走、无人驾驶飞机自动起飞降落和巡航、导弹发射与目标攻击、雷达搜索目标、机器人送货与危险排查、数控机床切削工件、化学反应炉恒温控制、自动仓储和库存管理、轧钢过程中的钢板厚度控制、风力发电、太阳能取暖、医疗康复、农业灌溉及农产品保鲜、经济和社会管理等。可以说，自动控制提高了劳动生产率和产品质量，改善了劳动条件，推动了经济发展，促进了社会进步，是一门非常重要的科学技术。



大门升降系统动画

所谓自动控制，就是在没有人参与的情况下，利用控制装置，使机器、设备或生产过程等（统称为被控对象）的输出量（即被控制量）自动地在一定的精度范围内按照预定的规律运行。简言之，没有人参与的控制系统就是自动控制系统，有人参与的控制系统就是人工控制系统。

为了更好地理解自动控制的含义，图 1.1.1~图 1.1.3 给出了水箱水位控制系统的示意图。图 1.1.1 为水箱水位人工手动控制系统。人观测实际水位，并将实际水位与期望的水位值相比较，得出两者偏差，然后根据偏差的大小和方向手动调节进水阀门的开度。当实际水位高于期望值时，关小进水阀门，反之则加大阀门开度以改变进水量，从而改变水箱水位，使之与期望值保持一致。

图 1.1.2 为一个机械式水箱水位自动控制系统。图中浮子相当于人的眼睛，用来测量水位高低；连杆机构相当于人的大脑和手，用来进行比较并实施控制，连杆的一端由浮子带动，另一端连接着进水调节阀门。当水箱出水量增大时，水位开始下降，浮子也随之降低，

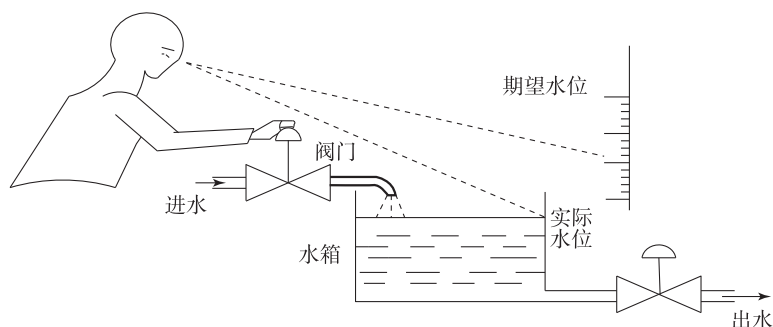


图 1.1.1 水箱水位人工手动控制系统

通过杠杆的作用使进水阀门开大，使水位回到期望值附近。反之，若出水量变小，水位及浮子上升，进水阀门关小，水位自动下降到期望值附近。在整个过程中，无须人工参与，调节过程是自动完成的。

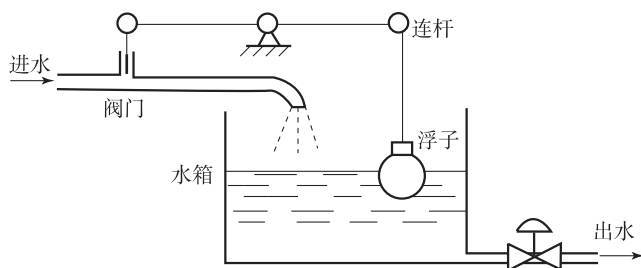


图 1.1.2 机械式水箱水位自动控制系统

必须指出的是，图 1.1.2 所示的系统虽然可以实现自动控制，但由于控制装置简单而存在缺陷，即控制结果总是存在一定范围的误差。假设初始时水箱实际水位等于期望水位，当出水量增加时，为使水箱水位保持恒定不变，就得开大进水阀门以增加进水量，而要开大进水阀门，唯一的途径是浮子要比初始时的高度多下降一些，这就意味着最终实际水位会低于期望水位。

图 1.1.3 为改进的水箱水位自动控制系统，是一个机电系统。在该系统中，浮子相当于人的眼睛，用来测量实际水位；连杆和电位器相当于人的大脑，它将实际水位与期望水位进行比较，给出偏差的大小和正负；电动机和减速器阀门相当于人的手，用于调节阀门开度，对水位实施控制。当实际水位低于期望水位时，电位器输出电压值为正，且电压大小反映了实际水位与期望水位的差值，放大器输出信号驱动电动机，通过减速器使阀门开度增加，直到实际水位重新与期望水位相等时为止。

图 1.1.3 为改进的水箱水位自动控制系统，是一个机电系统。在该系统中，浮子相当于人的眼睛，用来测量实际水位；连杆和电位器相当于人的大脑，它将实际水位与期望水位进行比较，给出偏差的大小和正负；电动机和减速器阀门相当于人的手，用于调节阀门开度，对水位实施控制。当实际水位低于期望水位时，电位器输出电压值为正，且电压大小反映了实际水位与期望水位的差值，放大器输出信号驱动电动机，通过减速器使阀门开度增加，直到实际水位重新与期望水位相等时为止。

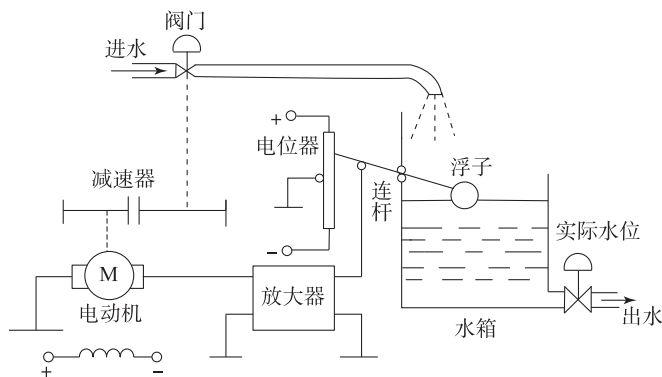


图 1.1.3 机电式水箱水位自动控制系统

1.2 反馈控制原理与系统基本组成

1.2.1 反馈控制原理

反馈控制是自动控制系统最基本的一种控制方式，在反馈控制系统中，控制装置对被控对象施加的控制作用是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，这就是反馈控制的原理。

其实，人的一切活动都体现出反馈控制原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。例如，人用手拿取桌上的书、司机操纵方向盘驾驶汽车沿公路平稳行驶等，这些日常生活中习以为常的平凡动作都渗透着反馈控制的深奥原理。下面通过解剖手从桌上取书的动作过程，透视一下它所包含的反馈控制机理。在这里，书的位置是指令信息，一般称为输入信号。取书时，首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置，并将这个信息送入大脑；然后由大脑判断手与书之间的距离，产生偏差信号，并根据其大小发出控制手臂移动的命令，逐渐使手与书之间的距离（即偏差）减小。显然，只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，直到偏差减小为零，手便取到了书。可以看出，大脑控制手取书的过程，是一个利用偏差（手与书之间的距离）产生控制作用，并不断使偏差减小直至消除的运动过程，为了获得偏差信号，必须要有手位置的反馈信息，因此就构成了反馈控制。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（即系统的输出量）。产生控制作用的机构是眼睛、大脑和手臂，统称为控制装置。我们可以用图 1.2.1 所示的系统方框图来展示这个反馈控制系统的基本组成及工作原理。

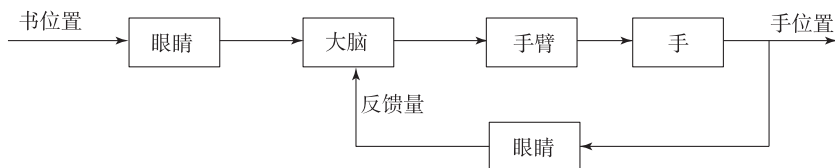


图 1.2.1 人取书的反馈控制系统方框图

图 1.1.1 所示的水箱水位人工手动控制系统也是一个反馈控制系统。操纵者用眼睛观察水位高低情况，用大脑比较实际水位与期望水位来得到偏差，并根据其大小确定进水阀门的调节方向和幅度，然后用手调节进水阀门以改变水箱水位，从而达到减小偏差的目的。水箱水位人工反馈控制系统的工作原理方框图如图 1.2.2 所示，其中水箱是被控对象，水箱水位是被控量，眼睛、大脑、手、进水阀门等是控制装置。

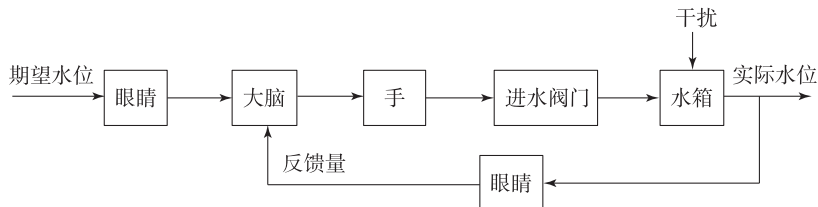


图 1.2.2 水箱水位反馈控制系统的工作原理方框图（人工控制）

图 1.1.3 所示的水箱水位自动控制系统，也是一个典型的反馈控制系统。浮子测量水箱的实际水位（被控量）；电位器和连杆将实际水位与期望水位进行比较，给出偏差的大小和正负；偏差信号经放大器进行电压和功率放大后，驱动电动机，并通过减速器来调节阀门的开度，以改变水箱水位，从而达到不断修正实际水位与期望水位之间偏差的目的。图 1.2.3 为机电式水箱水位反馈控制系统的工作原理方框图。

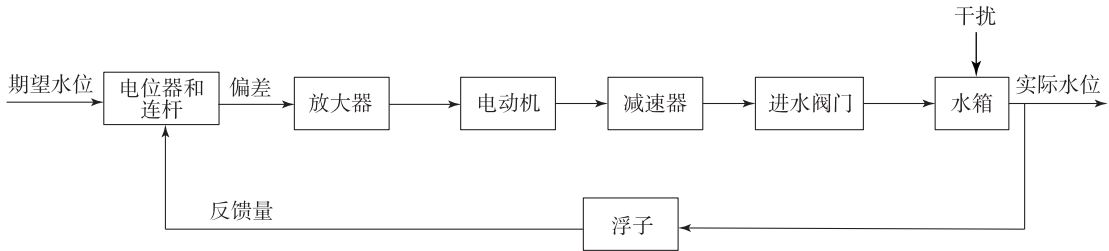


图 1.2.3 机电式水箱水位反馈控制系统的工作原理方框图

通常，我们把传感器测量得到的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，称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减，则称为负反馈；反之，则称为正反馈。一般的反馈控制系统都是负反馈控制系统。

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



1.2.2 反馈控制系统的基本组成

在工程实践中，为了实现对被控对象的自动反馈控制，系统中必须配置具有人的眼睛、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装置、比较器、控制器和执行机构。图 1.2.4 为一个典型的反馈控制系统基本组成框图。

液位反馈控制系统动画

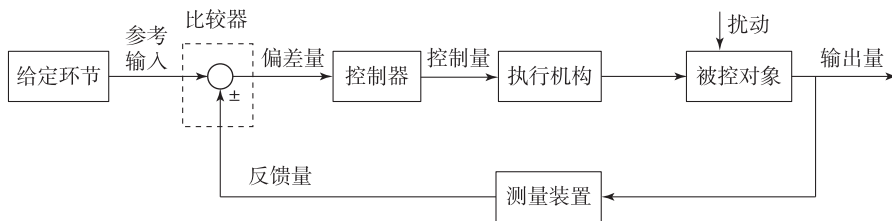


图 1.2.4 反馈控制系统的基本组成框图

测量装置：其职能是测量被控对象的输出量，如果这个物理量是非电量，一般再转换为电量。例如，测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压；湿敏传感器利用“湿-电”效应来检测湿度，并将其转换成电信号；电位器、旋转变压器、自整角机等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；等等。

给定环节：其职能是给出与被控量的期望值相对应的系统输入量（也称为参考输入量）。