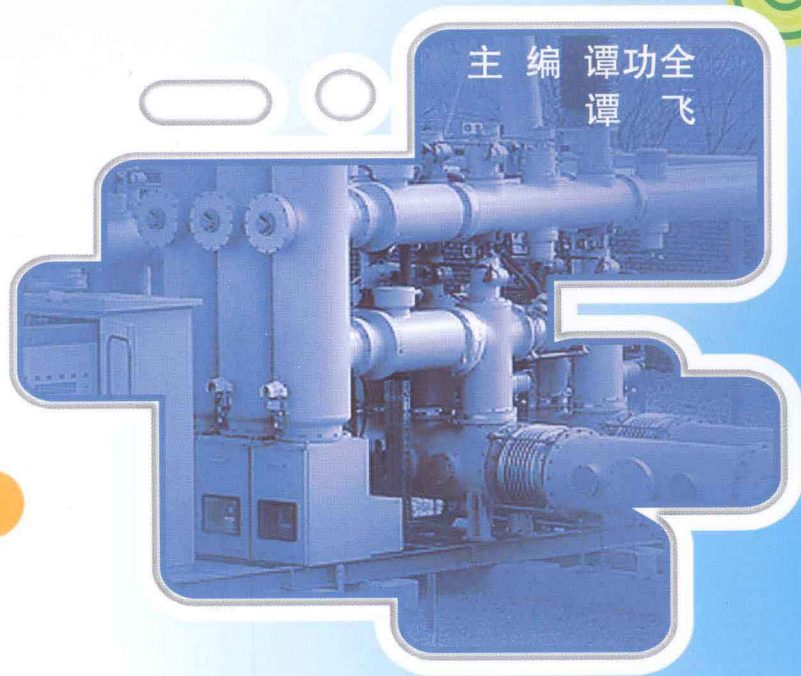




21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

自动控制原理

主 编 谭功全
谭 飞



注重基础性，全面阐述自动控制的基本知识与基础理论
强调易读性，着重解释清楚结果的正确内涵和物理意义
突出应用性，配有小知识并采用 MATLAB 辅助分析设计



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

自动控制原理

主 编 谭功全 谭 飞
副主编 陈永会 陈昌忠



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

自动控制原理是系统与控制学科领域的一门基础课程。本书按照课程教学大纲和学科定位,以线性时不变系统为基本研究对象,对线性系统的时间分析理论和频率分析理论做了全面系统的论述。全书共分8章,主要内容包括自动控制的基本概念,控制系统的数学模型及其推算,线性系统的时域分析法、根轨迹分析法和频率响应分析法,线性系统的校正与综合,线性离散系统分析,非线性系统的描述函数分析法和相平面分析法,以及线性系统的时域和频域综合方法等。各章还含有 MATLAB 支持下的计算机辅助分析与设计,以及典型例题和习题。

本书可作为高等院校自动化、电气自动化、机械、化工、生物、冶金和管理等专业的教科书,也可供从事自动控制类的各专业工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/谭功全,谭飞主编. —北京:北京大学出版社,2013.5

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22448-9

I. ①自… II. ①谭… ②谭… 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(2013)第 084204 号

书 名: 自动控制原理

著作责任者: 谭功全 谭 飞 主 编

策 划 编 辑: 郑 双 程志强

责 任 编 辑: 魏红梅

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22448-9/TP • 1282

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16 开本 23.25 印张 535 千字

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 44.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

自动控制原理是控制科学与工程一级学科的重要理论基础，是高等学校自动化、机械、电子、航空航天等专业的一门核心基础理论课程，也是控制学科全国硕士研究生入学考试专业基础课的必考科目。自动控制技术已广泛应用于机械制造、农业、化工、交通、航空航天、生物和制药等众多产业部门，极大地提高了社会劳动效率，改善了人们的劳动条件，提高了人民的生活水平。

在控制技术需求的推动下，控制理论本身也取得了显著进步。从线性系统到非线性系统，从连续事件系统到离散事件系统，从集中参数系统到分布参数系统等研究有了新的突破。自适应、自校正、自修复、自组织系统的研究和应用也有了新的发展。自动控制原理课程中的很多概念、方法、原理和结论，对于研究系统与控制理论的许多学科分支起到不可或缺的基础性作用。

本书按照教学大纲的要求编写，突出基础性、先进性和易读性，以强调概念的物理意义和工程应用为背景，全面阐述自动控制的基本理论、基本概念、基本方法和结论，并配有大量的例题和习题。本书以分析为主、综合为辅，并引入 MATLAB 辅助分析与设计。在介绍过程中力求避免高深的数学论证，着重于解释清楚结论的正确内涵和直观意义，培养正确和灵活运用理论解决实际问题的能力与技巧。书中的材料都是按照控制理论的逐步发展过程来组织编写的。读者应具备有关微分方程、电路分析、积分变换、复变函数和普通物理等课程的一些基础知识。

本书由谭功全负责组织编写，具体分工为：谭飞编写第 1 章和第 3 章，陈再秀编写第 2 章，方宁编写第 4 章，陈永会编写第 5 章，谭功全编写第 6 章，陈昌忠编写第 7 章，任小洪和谭功全编写第 8 章。全书由谭功全和谭飞负责统稿和定稿。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥和疏漏之处，恳请广大读者不吝批评指正。

编 者
2013 年 2 月

北京大学出版社本科计算机系列实用规划教材

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
1	7-301-10511-5	离散数学	段禅伦	28	38	7-301-13684-3	单片机原理及应用	王新颖	25
2	7-301-10457-X	线性代数	陈付贵	20	39	7-301-14505-0	Visual C++程序设计案例教程	张荣梅	30
3	7-301-10510-X	概率论与数理统计	陈荣江	26	40	7-301-14259-2	多媒体技术应用案例教程	李 建	30
4	7-301-10503-0	Visual Basic 程序设计	闵联营	22	41	7-301-14503-6	ASP .NET 动态网页设计案例教程(Visual Basic .NET 版)	江 红	35
5	7-301-21752-8	多媒体技术及其应用(第2版)	张 明	39	42	7-301-14504-3	C++面向对象与 Visual C++程序设计案例教程	黄贤英	35
6	7-301-10466-8	C++程序设计	刘天印	33	43	7-301-14506-7	Photoshop CS3 案例教程	李建芳	34
7	7-301-10467-5	C++程序设计实验指导与习题解答	李 兰	20	44	7-301-14510-4	C++程序设计基础案例教程	于永彦	33
8	7-301-10505-4	Visual C++程序设计教程与上机指导	高志伟	25	45	7-301-14942-3	ASP .NET 网络应用案例教程(C#.NET 版)	张登辉	33
9	7-301-10462-0	XML 实用教程	丁跃潮	26	46	7-301-12377-5	计算机硬件技术基础	石 磊	26
10	7-301-10463-7	计算机网络系统集成	斯桃枝	22	47	7-301-15208-9	计算机组成原理	娄国焕	24
11	7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30	48	7-301-15463-2	网页设计与制作案例教程	房爱莲	36
12	7-5038-4421-3	ASP.NET 网络编程实用教程(C#版)	崔良海	31	49	7-301-04852-8	线性代数	姚喜妍	22
13	7-5038-4427-2	C 语言程序设计	赵建锋	25	50	7-301-15461-8	计算机网络技术	陈代武	33
14	7-5038-4420-5	Delphi 程序设计基础教程	张世明	37	51	7-301-15697-1	计算机辅助设计二次开发案例教程	谢安俊	26
15	7-5038-4417-5	SQL Server 数据库设计与应用	姜 力	31	52	7-301-15740-4	Visual C# 程序开发案例教程	韩朝阳	30
16	7-5038-4424-9	大学计算机基础	贾丽娟	34	53	7-301-16597-3	Visual C++程序设计实用案例教程	于永彦	32
17	7-5038-4430-0	计算机科学与技术导论	王昆仑	30	54	7-301-16850-9	Java 程序设计案例教程	胡巧多	32
18	7-5038-4418-3	计算机网络应用实例教程	魏 峥	25	55	7-301-16842-4	数据库原理与应用(SQL Server 版)	毛一梅	36
19	7-5038-4415-9	面向对象程序设计	冷英男	28	56	7-301-16910-0	计算机网络技术基础与应用	马秀峰	33
20	7-5038-4429-4	软件工程	赵春刚	22	57	7-301-15063-4	计算机网络基础与应用	刘远生	32
21	7-5038-4431-0	数据结构(C++版)	秦 锋	28	58	7-301-15250-8	汇编语言程序设计	张光长	28
22	7-5038-4423-2	微机应用基础	吕晓燕	33	59	7-301-15064-1	网络安全技术	骆耀祖	30
23	7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26	60	7-301-15584-4	数据结构与算法	佟伟光	32
24	7-5038-4425-6	办公自动化教程	钱 俊	30	61	7-301-17087-8	操作系统实用教程	范立南	36
25	7-5038-4419-1	Java 语言程序设计实用教程	董迎红	33	62	7-301-16631-4	Visual Basic 2008 程序设计教程	隋晓红	34
26	7-5038-4428-0	计算机图形技术	龚声蓉	28	63	7-301-17537-8	C 语言基础案例教程	汪新民	31
27	7-301-11501-5	计算机软件技术基础	高 巍	25	64	7-301-17397-8	C++程序设计基础教程	郝亚辉	30
28	7-301-11500-8	计算机组装与维护实用教程	崔明远	33	65	7-301-17578-1	图论算法理论、实现及应用	王桂平	54
29	7-301-12174-0	Visual FoxPro 实用教程	马秀峰	29	66	7-301-17964-2	PHP 动态网页设计与制作案例教程	房爱莲	42
30	7-301-11500-8	管理信息系统实用教程	杨月江	27	67	7-301-18514-8	多媒体开发与编程	于永彦	35
31	7-301-11445-2	Photoshop CS 实用教程	张 瑾	28	68	7-301-18538-4	实用计算方法	徐亚平	24
32	7-301-12378-2	ASP.NET 课程设计指导	潘志红	35	69	7-301-18539-1	Visual FoxPro 数据库设计案例教程	谭红杨	35
33	7-301-12394-2	C#.NET 课程设计指导	龚自霞	32	70	7-301-19313-6	Java 程序设计案例教程与实训	董迎红	45
34	7-301-13259-3	VisualBasic .NET 课程设计指导	潘志红	30	71	7-301-19389-1	Visual FoxPro 实用教程与上机指导(第2版)	马秀峰	40
35	7-301-12371-3	网络工程实用教程	汪新民	34	72	7-301-19435-5	计算方法	尹景本	28
36	7-301-14132-8	J2EE 课程设计指导	王立丰	32	73	7-301-19388-4	Java 程序设计教程	张剑飞	35
37	7-301-21088-8	计算机专业英语(第2版)	张 勇	42	74	7-301-19386-0	计算机图形技术(第2版)	许承东	44

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
75	7-301-15689-6	Photoshop CS5 案例教程 (第 2 版)	李建芳	39	84	7-301-16824-0	软件测试案例教程	丁宋涛	28
76	7-301-18395-3	概率论与数理统计	姚喜妍	29	85	7-301-20328-6	ASP. NET 动态网页案例教程 (C#.NET 版)	江 红	45
77	7-301-19980-0	3ds Max 2011 案例教程	李建芳	44	86	7-301-16528-7	C#程序设计	胡艳菊	40
78	7-301-20052-0	数据结构与算法应用实践教程	李文书	36	87	7-301-21271-4	C#面向对象程序设计及 实践教程	唐 燕	45
79	7-301-12375-1	汇编语言程序设计	张宝剑	36	88	7-301-21295-0	计算机专业英语	吴丽君	34
80	7-301-20523-5	Visual C++程序设计教程与上 机指导(第 2 版)	牛江川	40	89	7-301-21341-4	计算机组成与结构教程	姚玉霞	42
81	7-301-20630-0	C#程序开发案例教程	李挥剑	39	90	7-301-21367-4	计算机组成与结构实验实训 教程	姚玉霞	22
82	7-301-20898-4	SQL Server 2008 数据库应 用案例教程	钱哨	38	91	7-301-22119-8	UML 实用基础教程	赵春刚	36
83	7-301-21052-9	ASP.NET 程序设计与开发	张绍兵	39					

北京大学出版社电气信息类教材书目(已出版)

欢迎选订

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
1	7-301-10759-1	DSP 技术及应用	吴冬梅	26	38	7-5038-4400-3	工厂供配电	王玉华	34
2	7-301-10760-7	单片机原理与应用技术	魏立峰	25	39	7-5038-4410-2	控制系统仿真	郑恩让	26
3	7-301-10765-2	电工学	蒋 中	29	40	7-5038-4398-3	数字电子技术	李 元	27
4	7-301-19183-5	电工与电子技术(上册)(第2版)	吴舒辞	30	41	7-5038-4412-6	现代控制理论	刘永信	22
5	7-301-19229-0	电工与电子技术(下册)(第2版)	徐卓农	32	42	7-5038-4401-0	自动化仪表	齐志才	27
6	7-301-10699-0	电子工艺实习	周春阳	19	43	7-5038-4408-9	自动化专业英语	李国厚	32
7	7-301-10744-7	电子工艺学教程	张立毅	32	44	7-5038-4406-5	集散控制系统	刘翠玲	25
8	7-301-10915-6	电子线路 CAD	吕建平	34	45	7-301-19174-3	传感器基础(第2版)	赵玉刚	30
9	7-301-10764-1	数据通信技术教程	吴延海	29	46	7-5038-4396-9	自动控制原理	潘 丰	32
10	7-301-18784-5	数字信号处理(第2版)	阎 毅	32	47	7-301-10512-2	现代控制理论基础(国家级十一五规划教材)	侯媛彬	20
11	7-301-18889-7	现代交换技术(第2版)	姚 军	36	48	7-301-11151-2	电路基础学习指导与典型题解	公茂法	32
12	7-301-10761-4	信号与系统	华 容	33	49	7-301-12326-3	过程控制与自动化仪表	张井岗	36
13	7-301-19318-1	信息与通信工程专业英语(第2版)	韩定定	32	50	7-301-12327-0	计算机控制系统	徐文尚	28
14	7-301-10757-7	自动控制原理	袁德成	29	51	7-5038-4414-0	微机原理及接口技术	赵志诚	38
15	7-301-16520-1	高频电子线路(第2版)	宋树祥	35	52	7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30
16	7-301-11507-7	微机原理与接口技术	陈光军	34	53	7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26
17	7-301-11442-1	MATLAB 基础及其应用教程	周开利	24	54	7-301-12562-5	嵌入式基础实践教程	杨 刚	30
18	7-301-11508-4	计算机网络	郭银景	31	55	7-301-12530-4	嵌入式 ARM 系统原理与实例开发	杨宗德	25
19	7-301-12178-8	通信原理	隋晓红	32	56	7-301-13676-8	单片机原理与应用及 C51 程序设计	唐 颖	30
20	7-301-12175-7	电子系统综合设计	郭 勇	25	57	7-301-13577-8	电力电子技术及应用	张润和	38
21	7-301-11503-9	EDA 技术基础	赵明富	22	58	7-301-20508-2	电磁场与电磁波(第2版)	郭春明	30
22	7-301-12176-4	数字图像处理	曹茂永	23	59	7-301-12179-5	电路分析	王艳红	38
23	7-301-12177-1	现代通信系统	李白萍	27	60	7-301-12380-5	电子测量与传感技术	杨 雷	35
24	7-301-12340-9	模拟电子技术	陆秀令	28	61	7-301-14461-9	高电压技术	马永翔	28
25	7-301-13121-3	模拟电子技术实验教程	谭海曙	24	62	7-301-14472-5	生物医学数据分析及其 MATLAB 实现	尚志刚	25
26	7-301-11502-2	移动通信	郭俊强	22	63	7-301-14460-2	电力系统分析	曹 娜	35
27	7-301-11504-6	数字电子技术	梅开乡	30	64	7-301-14459-6	DSP 技术与应用基础	俞一彪	34
28	7-301-18860-6	运筹学(第2版)	吴亚丽	28	65	7-301-14994-2	综合布线系统基础教程	吴达金	24
29	7-5038-4407-2	传感器与检测技术	祝诗平	30	66	7-301-15168-6	信号处理 MATLAB 实验教程	李 杰	20
30	7-5038-4413-3	单片机原理及应用	刘 刚	24	67	7-301-15440-3	电工电子实验教程	魏 伟	26
31	7-5038-4409-6	电机与拖动	杨天明	27	68	7-301-15445-8	检测与控制实验教程	魏 伟	24
32	7-5038-4411-9	电力电子技术	樊立萍	25	69	7-301-04595-4	电路与模拟电子技术	张绪光	35
33	7-5038-4399-0	电力市场原理与实践	邹 斌	24	70	7-301-15458-8	信号、系统与控制理论(上、下册)	邱德润	70
34	7-5038-4405-8	电力系统继电保护	马永翔	27	71	7-301-15786-2	通信网的信令系统	张云麟	24
35	7-5038-4397-6	电力系统自动化	孟祥忠	25	72	7-301-16493-8	发电厂变电所电气部分	马永翔	35
36	7-5038-4404-1	电气控制技术	韩顺杰	22	73	7-301-16076-3	数字信号处理	王震宇	32
37	7-5038-4403-4	电器与 PLC 控制技术	陈志新	38	74	7-301-16931-5	微机原理及接口技术	肖洪兵	32

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
75	7-301-16932-2	数字电子技术	刘金华	30	103	7-301-20394-1	物联网基础与应用	李蔚田	44
76	7-301-16933-9	自动控制原理	丁 红	32	104	7-301-20339-2	数字图像处理	李云红	36
77	7-301-17540-8	单片机原理及应用教程	周广兴	40	105	7-301-20340-8	信号与系统	李云红	29
78	7-301-17614-6	微机原理及接口技术实验指导书	李干林	22	106	7-301-20505-1	电路分析基础	吴舒辞	38
79	7-301-12379-9	光纤通信	卢志茂	28	107	7-301-20506-8	编码调制技术	黄 平	26
80	7-301-17382-4	离散信息论基础	范九伦	25	108	7-301-20763-5	网络工程与管理	谢 慧	39
81	7-301-17677-1	新能源与分布式发电技术	朱永强	32	109	7-301-20845-8	单片机原理与接口技术实验与课程设计	徐懂理	26
82	7-301-17683-2	光纤通信	李丽君	26	110	301-20725-3	模拟电子线路	宋树祥	38
83	7-301-17700-6	模拟电子技术	张绪光	36	111	7-301-21058-1	单片机原理与应用及其实验指导书	邵发森	44
84	7-301-17318-3	ARM 嵌入式系统基础与开发教程	丁文龙	36	112	7-301-20918-9	Mathcad 在信号与系统中的应用	郭仁春	30
85	7-301-17797-6	PLC 原理及应用	缪志农	26	113	7-301-20327-9	电工学实验教程	王士军	34
86	7-301-17986-4	数字信号处理	王玉德	32	114	7-301-16367-2	供电电子技术	王玉华	49
87	7-301-18131-7	集散控制系统	周荣富	36	115	7-301-20351-4	电路与模拟电子技术实验指导书	唐 颖	26
88	7-301-18285-7	电子线路 CAD	周荣富	41	116	7-301-21247-9	MATLAB 基础与应用教程	王月明	32
89	7-301-16739-7	MATLAB 基础及应用	李国朝	39	117	7-301-21235-6	集成电路版图设计	陆学斌	36
90	7-301-18352-6	信息论与编码	隋晓红	24	118	7-301-21304-9	数字电子技术	秦长海	49
91	7-301-18260-4	控制电机与特种电机及其控制系统	孙冠群	42	119	7-301-21366-7	电力系统继电保护(第2版)	马永翔	42
92	7-301-18493-6	电工技术	张 莉	26	120	7-301-21450-3	模拟电子与数字逻辑	邹春明	39
93	7-301-18496-7	现代电子系统设计教程	宋晓梅	36	121	7-301-21439-8	物联网概论	王金甫	42
94	7-301-18672-5	太阳能电池原理与应用	靳瑞敏	25	122	7-301-21849-5	微波技术基础及其应用	李泽民	49
95	7-301-18314-4	通信电子线路及仿真设计	王鲜芳	29	123	7-301-21688-0	电子信息与通信工程专业英语	孙桂芝	36
96	7-301-19175-0	单片机原理与接口技术	李 升	46	124	7-301-22110-5	传感器技术及应用电路项目化教程	钱裕禄	30
97	7-301-19320-4	移动通信	刘维超	39	125	7-301-21672-9	单片机系统设计与实例开发(MSP430)	顾 涛	44
98	7-301-19447-8	电气信息类专业英语	缪志农	40	126	7-301-22112-9	自动控制原理	许丽佳	30
99	7-301-19451-5	嵌入式系统设计及应用	邢吉生	44	127	7-301-22109-9	DSP 技术及应用	董 胜	39
100	7-301-19452-2	电子信息类专业 MATLAB 实验教程	李明明	42	128	7-301-21607-1	数字图像处理算法及应用	李文书	48
101	7-301-16914-8	物理光学理论与应用	宋贵才	32	129	7-301-22111-2	平板显示技术基础	王丽娟	52
102	7-301-16598-0	综合布线系统管理教程	吴达金	39	130	7-301-22448-9	自动控制原理	谭功全	44

相关教学资源如电子课件、电子教材、习题答案等可以登录 www.pup6.com 下载或在线阅读。

扑六知识网(www.pup6.com)有海量的相关教学资源和电子教材供阅读及下载(包括北京大学出版社第六事业部的相关资源),同时欢迎您将教学课件、视频、教案、素材、习题、试卷、辅导材料、课改成果、设计作品、论文等教学资源上传到 pup6.com, 与全国高校师生分享您的教学成就与经验,并可自由设定价格,知识也能创造财富。具体情况请登录网站查询。

如您需要免费纸质样书用于教学,欢迎登陆第六事业部门户网(www.pup6.com)填表申请,并欢迎在线登记选题以到北京大学出版社来出版您的大作,也可下载相关表格填写后发到我们的邮箱,我们将及时与您取得联系并做好全方位的服务。

扑六知识网将打造成全国最大的教育资源共享平台,欢迎您的加入——让知识有价值,让教学无界限,让学习更轻松。

联系方式: 010-62750667, pup6_czq@163.com, szheng_pup6@163.com, linzhangbo@126.com, 欢迎来电来信咨询。

目 录

第 1 章 绪论 1

- 1.1 自动控制的历史 3
- 1.2 控制系统的基本概念 5
 - 1.2.1 自动控制问题的提出 5
 - 1.2.2 开环控制系统 7
 - 1.2.3 闭环控制系统 8
 - 1.2.4 开环控制系统与闭环控制系统的比较 9
 - 1.2.5 控制系统示例 10
- 1.3 控制系统的分类 13
 - 1.3.1 按自动控制系统是否形成闭合回路分类 13
 - 1.3.2 按信号的结构特点分类 14
 - 1.3.3 按给定值信号的特点分类 15
 - 1.3.4 按控制系统元件的特性分类 15
 - 1.3.5 按控制系统信号的形式分类 17
 - 1.3.6 其他的分类方法 17
- 1.4 控制系统的响应模态与基本要求 18
- 本章小结 19
- 习题 1 20

第 2 章 控制系统的数学模型 21

- 2.1 系统建模与动态方程 23
 - 2.1.1 电气和电子系统 23
 - 2.1.2 机械系统 25
 - 2.1.3 热量系统 27
 - 2.1.4 非线性系统微分方程的线性化 28
- 2.2 线性定常系统的传递函数 30
 - 2.2.1 传递函数的定义 30
 - 2.2.2 传递函数的性质 32
 - 2.2.3 典型环节的传递函数 32
 - 2.2.4 系统传递函数 35
- 2.3 控制系统的结构图与化简 35

- 2.3.1 结构图的组成 36
- 2.3.2 结构图的建立 36
- 2.3.3 结构图的等效变换 37
- 2.3.4 自动控制系统的传递函数 44
- 2.4 信号流图和梅森增益公式 46
 - 2.4.1 信号流图 46
 - 2.4.2 梅逊公式 47
- 本章小结 49
- 习题 2 50

第 3 章 线性系统的时域分析法 54

- 3.1 概述 56
 - 3.1.1 时域法的作用和特点 56
 - 3.1.2 时域法常用的典型输入信号 56
 - 3.1.3 系统的时域性能指标 56
- 3.2 一阶系统的时域分析 58
 - 3.2.1 一阶系统传递函数标准形式及单位阶跃响应 58
 - 3.2.2 一阶系统动态性能指标计算 59
 - 3.2.3 典型输入下一阶系统的响应 60
- 3.3 二阶系统的时域分析 62
 - 3.3.1 二阶系统传递函数标准形式及分类 62
 - 3.3.2 过阻尼二阶系统动态性能指标计算 63
 - 3.3.3 欠阻尼二阶系统动态性能指标计算 66
 - 3.3.4 改善二阶系统动态性能的措施 78
- 3.4 高阶系统的时域分析 81
 - 3.4.1 高阶系统单位阶跃响应 81
 - 3.4.2 闭环主导极点 82
 - 3.4.3 估算高阶系统动态性能指标的零点极点法 82
- 3.5 线性系统的稳定性分析 84



3.5.1 稳定性的概念	84	5.4 奈奎斯特稳定性	166
3.5.2 稳定的充要条件	84	5.4.1 幅角原理和奈奎斯特 判据	166
3.5.3 稳定判据	85	5.4.2 奈奎斯特判据的应用	170
3.6 线性系统的稳态误差分析	89	5.4.3 相对稳定性	177
3.6.1 误差与稳态误差	90	5.5 频率响应特性与系统性能	183
3.6.2 计算稳态误差的一般方法	90	5.5.1 频率响应特性与系统的 稳态性能	183
3.6.3 静态误差系数法	92	5.5.2 频率响应特性与系统的 动态性能	185
3.6.4 干扰作用引起的稳态误差 分析	95	5.5.3 频率响应特性与系统的 鲁棒性	191
3.6.5 动态误差系数法	97	5.6 期望开环和闭环频率特性	196
3.6.6 减小稳态误差的方法	100	5.6.1 期望开环频率特性	196
本章小结	101	5.6.2 期望闭环频率特性	199
习题3	102	本章小结	200
第4章 根轨迹	107	习题5	201
4.1 根轨迹基本概念	109	第6章 线性系统的校正与综合	205
4.1.1 根轨迹	109	6.1 系统综合的基本概念	206
4.1.2 根轨迹方程	110	6.1.1 系统的校正方式	207
4.2 绘制根轨迹	111	6.1.2 系统的性能指标	209
4.2.1 绘制根轨迹的基本法则	111	6.1.3 典型校正环节	211
4.2.2 根轨迹绘制举例	117	6.1.4 典型校正方法	218
4.2.3 正反馈系统的根轨迹	118	6.2 滞后校正	219
4.2.4 参数根轨迹	120	6.2.1 基于根轨迹法的滞后校正 技术	219
4.3 基于根轨迹的系统性能分析	122	6.2.2 基于伯德图的滞后校正 技术	222
4.4 开环零、极点分布对系统性能的 影响	125	6.2.3 基于参数搜索的滞后校正 技术	224
本章小结	129	6.3 超前校正	226
习题4	129	6.3.1 基于根轨迹的超前校正 技术	226
第5章 线性系统的频率响应分析法	134	6.3.2 基于伯德图的超前校正 技术	228
5.1 频率响应特性	135	6.3.3 基于参数搜索的超前校正 技术	230
5.1.1 正弦稳态响应和频率响应	136	6.4 滞后超前校正	232
5.1.2 传递函数和正弦传递函数	138	6.4.1 基于根轨迹法的滞后超前 校正技术	232
5.1.3 频率响应特性的图形表示	139		
5.2 伯德图	141		
5.2.1 基本环节的伯德图	141		
5.2.2 开环频率特性的伯德图	149		
5.2.3 最小相位系统和非最小 相位系统	155		
5.3 奈奎斯特图	158		
5.3.1 典型系统的奈奎斯特图	158		
5.3.2 开环奈奎斯特图的一般 绘制方法	162		



6.4.2 基于伯德图的滞后超前校正技术	235	7.6.2 离散系统稳态性能分析举例	298
6.4.3 基于参数搜索的滞后超前校正技术	237	7.7 离散系统的动态性能分析	300
6.5 二自由度控制系统	240	7.7.1 由动态响应曲线直接求得动态指标	300
6.5.1 二自由度控制结构	240	7.7.2 闭环极点位置与系统过渡过程的关系	302
6.5.2 二自由度系统跟踪特性的零点配置法	243	7.7.3 离散系统的性能分析示例	304
6.6 内模控制系统	246	7.8 应用 MATLAB 进行离散系统分析	306
6.6.1 内模控制与内部稳定性	246	本章小结	310
6.6.2 内模控制器设计方法	249	习题 7	310
本章小结	254		
习题 6	254	第 8 章 非线性控制系统分析	313
第 7 章 线性离散系统	258	8.1 非线性系统概述	314
7.1 离散系统概述	260	8.1.1 非线性现象	315
7.2 信号的采样与复现	261	8.1.2 典型非线性特性	316
7.2.1 采样函数	261	8.1.3 非线性系统的分析方法	320
7.2.2 采样定理——采样频率的选择	262	8.2 描述函数法	322
7.2.3 保持器——采样信号的复现	262	8.2.1 谐波线性化与描述函数	322
7.3 z 变换理论	264	8.2.2 典型非线性特性的描述函数	324
7.3.1 z 变换的定义	264	8.2.3 组合非线性特性	329
7.3.2 z 变换求法	265	8.2.4 基于描述函数的非线性系统分析	331
7.3.3 z 变换的基本定理	268	8.3 相平面法	338
7.3.4 z 反变换	272	8.3.1 相轨迹的基本概念	338
7.3.5 用 z 变换法解差分方程	275	8.3.2 线性二阶系统的相轨迹与特性	339
7.4 线性离散系统的数学模型	276	8.3.3 相轨迹绘制方法及其一般特性	344
7.4.1 差分方程	276	8.3.4 极限环	346
7.4.2 脉冲传递函数	277	8.3.5 非线性系统的相平面分析	348
7.5 离散系统的稳定性分析	286	本章小结	351
7.5.1 离散系统的零点、极点概念	286	习题 8	351
7.5.2 Z 平面与 S 平面的映射关系	287	附表 1 常用函数的拉氏变换及 z 变换对照表	355
7.5.3 离散系统稳定的充要条件	289	附表 2 常见典型的非线性特性及描述函数	356
7.5.4 劳斯判据在 z 域中的应用	290	参考文献	358
7.5.5 朱利判据	293		
7.6 离散系统的稳态性能分析	295		
7.6.1 离散系统的稳态误差	295		

绪论

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术及理论已经广泛应用于石油、化工、机械、冶金、电子、电力、航空、航海、航天、核反应堆、国防等各个学科领域,高效率地创造社会财富,服务于国家建设,是促进社会发展,丰富人民生活不可缺少的技术手段。



教学目标

- 了解自动控制原理的发展历史;
- 精通自动控制系统的基本结构;
- 掌握自动控制原理经典部分的研究内容;
- 掌握控制系统各环节的定义和系统的性能要求;
- 理解自动控制系统各个要求间的矛盾性。



教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
发展历史	(1) 了解控制理论知识体系的发展; (2) 了解做出控制理论卓越成就的人物及事件	
经典与现代控制理论	(1) 了解控制历史的发展和控制理论的分类; (2) 理解经典控制理论的研究方法、对象和内容	经典控制、现代控制
系统结构及分类	(1) 了解控制系统的分类方法; (2) 理解各分类方法的分类结果; (3) 掌握按结构和输入分类的各系统特性及要求	控制系统分类方法
系统的评价	(1) 了解控制系统的评判方法与方式; (2) 理解控制系统的动态与静态特点; (3) 掌握动态系统的评判要求(稳、快、准)及关系	



推荐阅读资料

1. 维纳. 控制论. 郝季仁, 译. 北京: 科学出版社, 1961.
2. 项国波. 控制理论的发展. 电气时代, 2005, 11.



3. 陈复扬. 自动控制原理. 北京: 国防工业出版社, 2010.
4. 王庆林. 自动控制理论的早期发展历史. 自动化博览, 1996, 5: 22—25.



基本概念

自动控制: 在没有人直接参与的情况下, 通过控制装置使被控对象或过程按照预定的规律运行。

自动控制系统: 由控制装置和被控对象组成, 能够实现自动控制任务的系统。

被控变量: 在控制系统中, 保证系统被控对象按规定的任务正常运行需要加以控制的物理量。

控制量: 控制器的输出, 作为被控制量的控制指令而加给系统对象的输入量, 也称控制输入。

扰动量: 干扰或破坏系统按预定规律运行的输入量, 也称扰动输入或干扰输入。

反馈: 通过测量变换装置将系统或元件的输出量反送到输入端, 与输入信号相比较并作为控制决策的依据。反送到输入端的信号称为反馈信号。

负反馈: 单回路中各环节正负符号之积为负, 通常表现为反馈信号与输入信号相减, 其差为偏差信号。

负反馈控制原理: 检测偏差用以消除偏差。分析负反馈系统中利用偏差信号产生相应的控制作用, 力图消除或减少偏差的相关理论。

开环控制系统: 表现为系统的输入和被控制量之间不存在反馈回路。开环控制又分为干扰补偿和输入补偿两种。

闭环控制系统: 系统输出端与输入端存在反馈回路, 即输出量对控制量有直接影响的系统。自动控制原理课程中所讨论的主要是闭环负反馈控制系统。

复合控制系统: 一种将开环控制和闭环控制结合在一起的控制系统。它在闭环控制的基础上, 用开环方式增加一个控制输入信号或扰动输入信号的顺馈通道, 目的是提高系统的精度。

稳定性: 系统正常工作的必要条件。稳定性是衡量系统相对于不稳定的“距离”描述。

准确性: 在系统过渡过程结束后, 描述系统输出与期望值间差, 系统的这个差越小准确性越高。

快速性: 对控制系统响应速度快慢的描述, 系统过渡过程消失越快, 达到稳定所需时间越短, 快速性越好。只要系统的稳定性足够好、频带足够宽, 就能实现快速性的要求。



引例: 马尔萨斯人口论

马尔萨斯主义产生于18世纪, 是以英国经济学家马尔萨斯为代表的资产阶级学派。马尔萨斯在其代表作《人口原则》和《政治经济学原理》中提出了“马尔萨斯人口论”, 他指出: 人类必须控制人口的增长; 否则, 贫穷是人类不可改变的命运。他还提出: 第一, 食物为人类生存所必需; 第二, 人口繁衍是必然的, 几乎保持现状; 在这两者中, 人口增殖力比土地生产人类生活资料力更为巨大。在无所妨碍时, 人口以几何级数增加率增加, 即以1、2、4、8、16、32、64、128、256、512的增加率增加; 生活资料将以1、2、3、4、5、6、7、8、9、10的算术级数增加率增加。当人口增加超过了生活资料的增加, 自然就会以贫困和罪恶来限制人口的增加。18世纪前, 世界人口不到十亿, 中国只有几千万, 但到1999年10月12日, 全世界的人口总数突破60亿, 世界人民的生活比18世纪好得多, 为什么? 满足人民不断增长的物质财富高效率地创造归因于什么手段呢?

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论, 是研究自动控制共同规律的技术科学。学习和研究自动控制理论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可能性和途径, 为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。作为现代的工程技术人员和科学工作者, 必须具备一定的自动控制理论知识。



近年来,控制学科的应用范围不断扩大,已经扩展到高级楼宇、交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域,并为各学科之间的相互渗透起到了促进作用。自动控制技术的不断应用使生产过程实现了自动化,提高了劳动生产率和产品质量,并且创造了大量的社会财富,满足了人们日益增长的物质需求,极大提高了社会生产力水平,还降低了生产成本,提高了经济效益,改善了劳动条件,从而使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来,提高了人类的生活品质。自动控制在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。

自动控制原理是自动控制技术的理论基础,是一门理论性较强的工程科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论一般可分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论主要以描述线性定常系统的传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题,由于发展较早,现已成熟。在工程上,它相当成功地解决了大量实际问题,因此是研究自动控制系统的重要理论基础。

现代控制理论主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出一类自动控制系统的分析和设计问题。随着现代科学技术的发展,已出现最优控制、最佳滤波、模糊控制、系统辨识、自适应控制等一些新的控制方式。因此它也是研究庞大的系统工程和模仿人类智能等方面的控制必不可少的理论基础。

本书内容以经典控制理论的分析为主,同时由于 MATLAB 软件的诞生,使控制系统的分析与设计由相当烦琐变得简单。MATLAB 为控制系统的设计与仿真提供了一个强有力的工具。

1.1 自动控制的历史

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。

早在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。例如,我国北宋时代(公元 1086—1089 年)苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪象台,就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统;1681 年 Dennis Papin 发明了用做安全调节装置的锅炉压力调节器;1765 年俄国人普尔佐诺夫(I. Polzunov)发明了蒸汽锅炉水位调节器等。

1788 年,英国人瓦特(James Watt)在他人发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。以后人们曾经试图改善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。

实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。1868 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特速度控制系统中出现的不稳定问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学



家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家古尔维茨(A. Hurwitz)分别在 1877 年和 1895 年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1932 年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,伯德(H. W. Bode)和尼柯尔斯(N. B. Nichols)在 20 世纪 30 年代末和 40 年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法。为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间,反馈控制方法被广泛应用于设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统及其他军用系统。这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统及随机控制系统的研究。

1948 年,美国科学家伊万斯(W. R. Evans)创立了根轨迹分析方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析和设计中。

1948 年以美国学者维纳(N. Wiener)的《控制论》为标志,控制理论体系正式形成。

以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具,这样就构成了经典控制理论的基本框架。到 20 世纪 50 年代,经典控制理论已发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。

经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入单输出系统,还不能解决如时变参数问题,多变量、强耦合等复杂的控制问题。

20 世纪 50 年代中期,空间技术的发展迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题(如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度,低消耗控制等)。实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件,适合于描述航天器的运动规律,又便于计算机求解的状态空间描述成为主要的模型形式。俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)1892 年创立的稳定性理论被引用到控制中。1956 年,前苏联科学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)提出极大值原理;同年,美国数学家 R·贝尔曼(R. Bellman)创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959 年美国数学家卡尔曼(R. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器,1960 年卡尔曼又提出系统的可控性和可观测性问题。到 20 世纪 60 年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。现代控制理论在航空、航天、制导与控制中创造了辉煌的成就,使人类迈向宇宙的梦想变为现实。

为了解决现代控制理论在工业生产中所遇到的被控对象精确状态空间模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造、所得最优控制器往往过于复杂等问题,科学家们通过



不懈努力,近几十年中不断提出一些新的控制方法和理论,如自适应控制,模糊控制,预测控制,容错控制,鲁棒控制,非线性控制和大系统、复杂系统控制等,大大扩展了控制理论的研究范围。表 1.1 为自动控制发展的各阶段理论比较表。

表 1.1 各阶段理论比较

	经典控制理论	现代控制理论	大系统理论
对象	单输入单输出线性定常系统、连续与离散系统	线性与非线性、定常与时变、单变量与多变量、连续系统与离散系统	规模庞大、结构复杂、变量众多、关联严重、信息不完备的信息系统
方法	时域、根轨迹、频域法	时域矩阵法	时域法
数学工具	拉普拉斯变换(简称拉氏变换)	矩阵与向量空间理论	控制论、运筹学
数学模型	传递函数	状态方程与输出方程	子系统
基本内容	时域法、频域法、根轨迹法、描述函数法、相平面法、代数与几何稳定判据、校正网络设计、Z 变化法	线性系统基础理论(包括系统的数学模型、运动的分析、稳定性的分析、能控性与能观测性、状态反馈与观测器)、系统辨识、最优控制、自适应控制、最优滤波及鲁棒性控制	多级递阶控制、分解-协调原理、分散最优控制、大系统型模降阶理论
主要问题	稳定性问题	最优化问题	系统的最优化
控制装置	无源与有源 RC 网络	数字计算机	数字计算机
着眼点	输出	状态方程与输出方程	大系统的最优化
评价	具体情况具体分析,适宜处理较简单系统的控制问题	具有优越性,更适合处理复杂系统的控制问题	应用控制和管理的思路,适用于多学科交叉综合的研究控制领域

控制理论实质是一种方法论。控制论的基本概念和方法是人类认识史上的一个飞跃,开辟了人类认识世界的新途径。在几百年的发展历程中,控制论形成了时域法和复域法两种主要的方法体系。这两种方法体系各有所长,它们是相互补充、互相促进,并且不断发展的,目前正向智能控制系统方向发展,具有自组织、自学习、自修复功能,甚至可自繁殖。控制理论已形成了以理论控制论为中心的四大分支(面对的对象不同):工程控制论、生物控制论、社会控制论和智能控制论。

1.2 控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制问题的提出

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了保证正常的工作条件,往往需要对某些

物理量(如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近,或使其按一定规律变化。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。这种借助某种仪器设备工具等使对象的某一个或多个属性满足希望运动规律的操作通常称为**控制**,用人工操作称为**人工控制**,用自动装置来完成操作称为**自动控制**。

如图 1.1(a)所示,是人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水位是被控制的物理量,简称被控量。水池这个设备是控制的对象,简称被控物理对象。当水位在给定的期望位置且流入、流出量相等时,它处于平衡状态。当出口用水的变化使流出量发生变化、水位给定值发生变化或管路系统等原因使进水发生变化时,就需要对流入量进行必要的操作控制使水位恢复到给定位置,并使流入与流出量相等,重新达到平衡状态。在人工控制方式下,工人用眼观看水位情况,用脑比较实际水位与期望水位的差异并根据经验做出决策,确定进水阀门的调节方向与幅度,然后用手操作进水阀门进行调节,最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值,工人便要重复上述调节过程。

如图 1.1(b)所示,是水池水位自动控制系统的一种简单形式。图中用浮子代替人的眼睛,用来测量水位高低;另用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能,用来进行比较、计算误差并实施控制。杠杆的一端由浮子带动,另一端则连向进水阀门。当用水量增大时,水位开始下降,浮子也随之降低,通过杠杆的作用将进水阀门开大,使水位回到期望值附近。反之,若用水量变小,水位及浮子上升,进水阀关小,水位自动下降到期望值附近。整个过程中无需人工直接参与,控制过程是自动进行的。

图 1.1(b)所示的系统虽然可以实现自动控制,但由于结构简陋而存在缺陷,主要表现在被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多,水位就越低,偏离期望值就越远,误差越大。控制的结果总存在着一定范围的误差值。这是因为当出水量增加时,为了使水位基本保持恒定不变,就得开大阀门,增加进水量。要开大进水阀,唯一的途径是浮子要下降得更多,这意味着实际水位要偏离期望值更多。这样,整个系统就会在较低的水位上建立起新的平衡状态。这时的水位与原来没受干扰前的水位比较是有差距的。

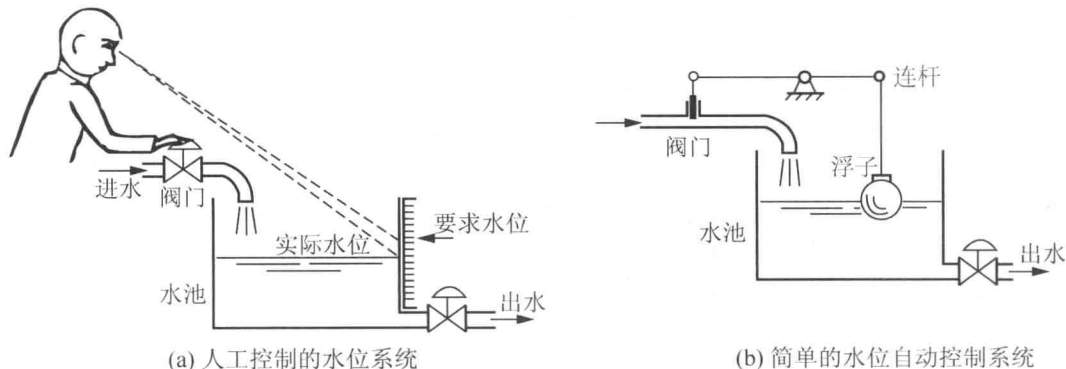


图 1.1 水位控制系统

为克服上述缺点,可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统,如图 1.2 所示。这里,浮子仍是测量元件,连杆起着比较作用,它将期望水位与实际水位两者进行比较,得出误差,同时推动电位器的滑臂上下移动。电位器输出电压反映了误差的