



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 佟 威
徐胜军

多种设计体现分析研究方法
丰富例题诠释自控基础概念



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 佟 威 徐胜军
副主编 孟月波



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统阐述了自动控制理论的基础概念及其分析研究方法。本书从控制理论的基础知识入手,着重讲解基本概念、基本理论和基本的分析方法。全书共7章,主要内容包括:控制系统的数学模型、传递函数、方块图、信号流图;线性控制系统的时域分析法、根轨迹分析法以及频域响应分析法;线性控制系统的频率法校正;非线性控制系统分析中的描述函数法和相平面法等。

本书可以作为普通高等院校自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、智能建筑、机电一体化等专业自动控制原理课程的教材,也可以作为从事控制理论和控制工程应用的技术人员自学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/佟威,徐胜军主编. —北京:北京大学出版社,2013.6

(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 978-7-301-22386-4

I. ①自… II. ①佟…②徐… 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091519号

书 名: 自动控制原理

著作责任者: 佟 威 徐胜军 主编

策 划 编 辑: 程志强

责 任 编 辑: 程志强

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-22386-4/TP·1284

出 版 者: 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: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 15.25印张 351千字

2013年6月第1版 2013年6月第1次印刷

定 价: 30.00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

自动控制原理是研究有关自动控制系统中基本原理和基本方法的一门课程，是高等学校控制类专业的一门核心基础理论课程。本书根据当前本科院校自动化专业“自动控制原理”教学大纲而编写，适用于自动化专业及其他电气信息类专业本科生使用。本书按照自动控制原理的发展过程进行编排，内容由浅入深，简明扼要，语言浅显易懂，简化数学推导。通过大量实际例子的分析和设计举例，使学生对各章节内容有清楚、完整的概念，并使学生在思考问题和解决问题的能力方面得到系统的培养。

本书由佟威、徐胜军担任主编，孟月波担任副主编，共分为7章，其中：第1、2、7章由佟威执笔，第3、4章由徐胜军执笔，第5、6章由孟月波执笔。第1章介绍了自动控制的基本概念和原理，引出了自动控制系统的常用术语，简述了自动控制原理的发展历史。第2章通过实验法和理论推导法建立了自动控制系统的两种数学模型——时域模型和复域模型；还有两种以图形表示的数学模型——动态方框图和信号流图及其求解各种传递函数的方法。第3章介绍了线性控制系统的时域分析法，主要讨论了系统的时域性能指标，系统的动态分析，系统的稳定性分析，系统的稳态分析。第4章针对线性控制系统的根轨迹分析法进行详细讨论，主要包括根轨迹法的基本概念、各种根轨迹的绘制以及控制系统的根轨迹分析方法。第5章介绍了线性控制系统的频率响应分析法，主要包括频率特性的基本概念、典型环节及控制系统的开环频率特性、奈奎斯特稳定判据以及如何利用闭环频率特性分析系统的性能。第6章针对控制系统的校正，以频率法为主讨论对单输出、单输入系统进行校正的各种校正方式以及每种校正方式的基本设计步骤等。第7章重点介绍了常用的描述函数法和相平面法，对具有典型非线性环节的控制系统进行分析研究。

在本书的编写过程中，参考和吸收了兄弟院校教材的部分内容，并得到了西安建筑科技大学信息与控制工程学院自动化教研室等单位 and 有关同志的鼓励和支持，在此向上述有关同志与单位表示衷心的感谢！

限于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者、专家批评指正。

编 者

2013年3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	7-301-22437-3	单片机原理及应用教程(第2版)	范立南	43	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 数据库设计与管理	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	Visual Basic .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	单片机原理及应用及 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)	邬春明	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	106	7-301-20505-1	电路分析基础	吴舒辞	38
76	7-301-16933-9	自动控制原理	丁 红	32	107	7-301-20506-8	编码调制技术	黄 平	26
77	7-301-17540-8	单片机原理及应用教程	周广兴	40	108	7-301-20763-5	网络工程与管理	谢 慧	39
78	7-301-17614-6	微机原理及接口技术实验指导书	李干林	22	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
79	7-301-12379-9	光纤通信	卢志茂	28	110	301-20725-3	模拟电子线路	宋树祥	38
80	7-301-17382-4	离散信息论基础	范九伦	25	111	7-301-21058-1	单片机原理与应用及其实验指导书	邵发森	44
81	7-301-17677-1	新能源与分布式发电技术	朱永强	32	112	7-301-20918-9	Mathcad 在信号与系统中的应用	郭仁春	30
82	7-301-17683-2	光纤通信	李丽君	26	113	7-301-20327-9	电工学实验教程	王士军	34
83	7-301-17700-6	模拟电子技术	张绪光	36	114	7-301-16367-2	供配电技术	王玉华	49
84	7-301-17318-3	ARM 嵌入式系统基础与开发教程	丁文龙	36	115	7-301-20351-4	电路与模拟电子技术实验指导书	唐 颖	26
85	7-301-17797-6	PLC 原理及应用	缪志农	26	116	7-301-21247-9	MATLAB 基础与应用教程	王月明	32
86	7-301-17986-4	数字信号处理	王玉德	32	117	7-301-21235-6	集成电路版图设计	陆学斌	36
87	7-301-18131-7	集散控制系统	周荣富	36	118	7-301-21304-9	数字电子技术	秦长海	49
88	7-301-18285-7	电子线路 CAD	周荣富	41	119	7-301-21366-7	电力系统继电保护(第2版)	马永翔	42
89	7-301-16739-7	MATLAB 基础及应用	李国朝	39	120	7-301-21450-3	模拟电子与数字逻辑	郭春明	39
90	7-301-18352-6	信息论与编码	隋晓红	24	121	7-301-21439-8	物联网概论	王金甫	42
91	7-301-18260-4	控制电机与特种电机及其控制系统	孙冠群	42	122	7-301-21849-5	微波技术基础及其应用	李泽民	49
92	7-301-18493-6	电工技术	张 莉	26	123	7-301-21688-0	电子信息与通信工程专业英语	孙桂芝	36
93	7-301-18496-7	现代电子系统设计教程	宋晓梅	36	124	7-301-22110-5	传感器技术及应用电路项目化教程	钱裕禄	30
94	7-301-18672-5	太阳能电池原理与应用	靳瑞敏	25	125	7-301-21672-9	单片机系统设计与实例开发(MSP430)	顾 涛	44
95	7-301-18314-4	通信电子线路及仿真设计	王鲜芳	29	126	7-301-22112-9	自动控制原理	许丽佳	30
96	7-301-19175-0	单片机原理与接口技术	李 升	46	127	7-301-22109-9	DSP 技术及应用	董 胜	39
97	7-301-19320-4	移动通信	刘维超	39	128	7-301-21607-1	数字图像处理算法及应用	李文书	48
98	7-301-19447-8	电气信息类专业英语	缪志农	40	129	7-301-22111-2	平板显示技术基础	王丽娟	52
99	7-301-19451-5	嵌入式系统设计与应用	邢吉生	44	130	7-301-22448-9	自动控制原理	谭功全	44
100	7-301-19452-2	电子信息类专业 MATLAB 实验教程	李明明	42	131	7-301-22474-8	电子电路基础实验与课程设计	武 林	36
101	7-301-16914-8	物理光学理论与应用	宋贵才	32	132	7-301-22484-7	电文化——电气信息学科概论	高 心	30
102	7-301-16598-0	综合布线系统管理教程	吴达金	39	133	7-301-22436-6	物联网技术案例教程	崔逊学	40
103	7-301-20394-1	物联网基础与应用	李蔚田	44	134	7-301-22598-1	实用数字电子技术	钱裕禄	30
104	7-301-20339-2	数字图像处理	李云红	36	135	7-301-22529-5	PLC 技术与应用(西门子版)	丁金婷	32
105	7-301-20340-8	信号与系统	李云红	29	136	7-301-22386-4	自动控制原理	佟 威	30

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	本章小结	53
1.1 自动控制系统简介	2	习题	53
1.2 自动控制和自动化技术的发展 简史	2	第 3 章 线性控制系统的时域分析	60
1.3 自动控制的一般概念	4	3.1 时域性能指标	61
1.3.1 状态的转移和控制	4	3.1.1 典型试验信号	61
1.3.2 自动控制的基本原理	5	3.1.2 时域性能指标	63
1.3.3 典型自动控制系统举例	9	3.2 一阶系统的时域响应	64
1.3.4 自动控制系统的组成	11	3.2.1 一阶系统的数学模型	64
1.3.5 自动控制系统的分类	13	3.2.2 单位阶跃响应	66
1.3.6 对自动控制系统的基本 要求	14	3.2.3 单位斜坡响应	67
本章小结	15	3.2.4 单位脉冲响应	68
习题	16	3.3 二阶系统的时域响应	69
第 2 章 控制系统的数学模型	18	3.3.1 二阶系统的数学模型	69
2.1 控制系统的时域模型：输入— 输出时域描述	20	3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	72
2.2 非线性微分方程的线性化	26	3.3.3 二阶系统的时域性能指标	75
2.3 控制系统的复域模型——传递 函数	28	3.3.4 改善二阶系统动态品质的 方法和措施	80
2.3.1 传递函数的定义	28	3.4 高阶系统的时域响应	83
2.3.2 传递函数的性质	30	3.4.1 高阶系统的数学模型	83
2.3.3 传递函数的求法	31	3.4.2 高阶系统的单位阶跃 响应分析	84
2.4 典型环节的传递函数	32	3.4.3 闭环主导极点	85
2.5 动态方框图	37	3.4.4 高阶系统动态性能的 估算	85
2.5.1 动态方框图的组成	37	3.5 线性系统的稳定性分析	86
2.5.2 系统或元部件动态方框图 的绘制	38	3.5.1 稳定性的概念	86
2.5.3 动态方框图的简化—— 等效变换法	40	3.5.2 线性控制系统稳定的 条件	88
2.6 信号流图及梅逊增益公式	46	3.5.3 判断线性系统稳定性的 方法	88
2.6.1 信号流图	46	3.6 线性系统的稳态分析	95
2.6.2 信号流图的绘制	48	3.6.1 误差及稳态误差	95
2.6.3 梅逊(S. J. Mason)增益 公式	49	3.6.2 线性系统跟随误差的分析 和计算	96
2.7 自动控制系统的传递函数	51	3.6.3 线性系统扰动误差的分析 和计算	99



3.6.4 动态误差和动态误差系数	101	5.3.2 开环对数坐标下频率特性 曲线绘制(Bode图)	148
3.6.5 消除或减小系统稳态误差 的方法和措施	103	5.3.3 最小相位和非最小相位系统	150
本章小结	105	5.4 映射定理与奈奎斯特稳定判据	151
习题	106	5.4.1 映射定理	151
第4章 线性控制系统的根轨迹		5.4.2 奈奎斯特稳定判据	152
分析法	110	5.4.3 稳定裕量	155
4.1 根轨迹法的基本概念	111	5.5 用闭环频率特性分析系统的性能	157
4.1.1 根轨迹的概念	111	5.5.1 开环对数幅频特性曲线 与系统性能的关系	158
4.1.2 根轨迹的条件	112	5.5.2 开环频域指标与时域指标 的关系	159
4.2 常规根轨迹的绘制法则	114	5.5.3 开环频域指标和闭环频域 指标的关系	161
4.2.1 180°根轨迹的绘制法则	114	本章小结	162
4.2.2 0°根轨迹绘制法则	122	习题	162
4.2.3 参量根轨迹	122	第6章 线性控制系统的校正	164
4.3 控制系统的根轨迹分析	123	6.1 系统校正的基本概念	165
4.3.1 开环零点、极点对系统 根轨迹的影响	124	6.1.1 性能指标	165
4.3.2 利用根轨迹法估算系统的 性能	126	6.1.2 频域法校正	166
4.3.3 利用根轨迹法计算系统的 参数	127	6.1.3 系统校正方式	169
本章小结	128	6.2 串联超前校正的频域设计	171
习题	128	6.2.1 无源超前校正装置 的特性	171
第5章 线性控制系统的频率响应		6.2.2 有源超前校正装置 的特性	173
分析法	130	6.2.3 超前校正的特点	174
5.1 频率特性的基本概念	131	6.2.4 串联超前校正基本步骤	174
5.1.1 频率特性的基本定义	131	6.3 串联滞后校正的频域设计	179
5.1.2 频率特性的表示方法	132	6.3.1 无源滞后校正装置的 特性	179
5.2 典型环节的频率特性	136	6.3.2 有源滞后校正装置的 特性	180
5.2.1 比例环节	136	6.3.3 滞后校正的特点	181
5.2.2 微分环节	137	6.3.4 串联滞后校正方法	182
5.2.3 积分环节	137	6.4 相位滞后-超前校正的频域设计	185
5.2.4 惯性环节	138	6.4.1 无源滞后-超前校正装置 的特性	185
5.2.5 一阶微分环节	140	6.4.2 有源滞后-超前校正装置 的特性	186
5.2.6 二阶振荡环节	141		
5.2.7 二阶微分环节	142		
5.2.8 延迟环节	144		
5.3 控制系统的开环频率特性	145		
5.3.1 开环极坐标下幅相特性 曲线绘制(Nyquist图)	145		

6.4.3 滞后-超前校正特点	187	7.2.1 描述函数的基本概念	206
6.4.4 滞后-超前校正方法	187	7.2.2 典型非线性特性的描述 函数	206
6.5 反馈校正	190	7.2.3 用描述函数法分析 非线性系统	210
6.6 复合校正	193	7.3 相平面法	216
本章小结	196	7.3.1 相平面的基本概念	216
习题	198	7.3.2 绘制相平面图的 等倾斜线法	220
第7章 非线性控制系统分析	200	7.3.3 非线性系统的相平面 分析	222
7.1 非线性控制系统概述	201	本章小结	227
7.1.1 典型非线性特性	201	习题	228
7.1.2 非线性控制系统的特点	203	参考文献	231
7.1.3 非线性控制系统的分析 方法	205		
7.2 描述函数法	205		

绪论

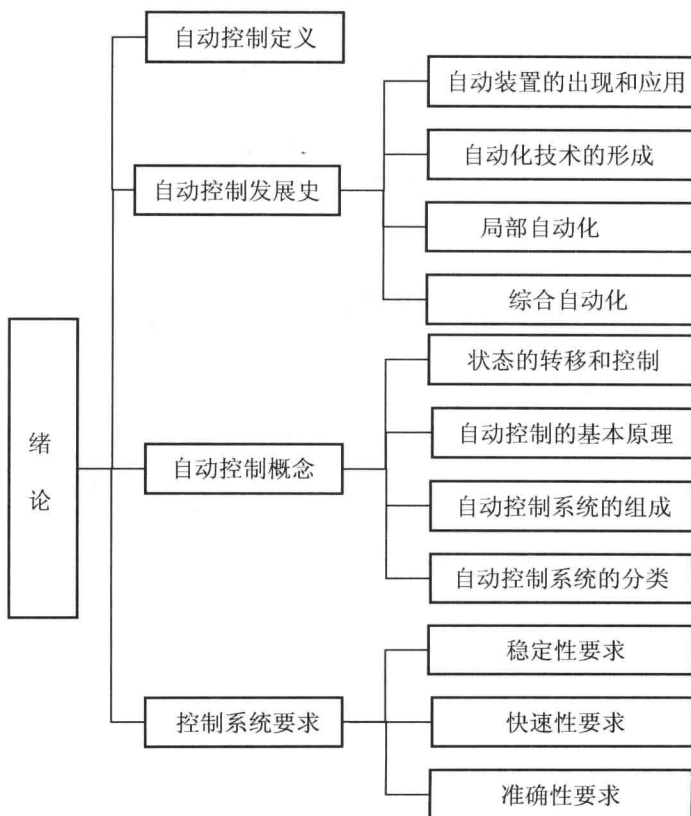


本章教学目标与要求

- 熟悉自动控制系统的基本情况。
- 了解自动化技术的发展史。
- 掌握自动化控制系统的一般概念。
- 熟悉自动化控制技术的一些典型案例。



本章知识架构





引言

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术起着极其重要的作用。目前自动控制技术及理论已经广泛地应用于各类工业学科领域,并为各学科之间的相互渗透起了促进作用。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研究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及途径,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。

本章通过对自动控制系统的基本概念、原理、控制方式及控制系统的简单分析,建立对这门课程的一个基本认识。

1.1 自动控制系统简介

自动控制或自动化是指没有人直接参与,通过一些装置或设备自行完成人们预定目标的一切科学技术,这里的人是指这些装置或设备的设计者和制造者。在工程和科学技术的发展过程中,自动控制担负着重要的角色,不仅在宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统等领域中,自动控制具有特别重要的作用,它还是现代机器制造业和工业生产过程中重要而不可缺少的组成部分。科学技术的飞速发展,具有两个显著的特征:一是不断探索新的研究领域,开拓新的边缘学科;二是各学科、各专业的相互渗透、融合,研究方法和技术手段不断创新,尤其以电子计算机技术和自动控制技术向各个领域的渗透、扩展最为明显。

自动控制或自动化就是人类活动的能量变换和信息变换的机器化。人们说的自动化与自动控制两者既有联系,也有一定的区别。一般来说,自动化主要研究的是人造系统的控制问题;而自动控制除研究人造系统的控制问题外,还研究社会、经济、生物、环境等非人造系统的控制问题,如生物控制、经济控制、社会控制、人口控制等。人们通常提到的自动控制,是指工程系统的控制,在这个意义上两者是相近的。

1.2 自动控制和自动化技术的发展简史

1. 18 世纪以前,自动装置的出现和应用

公元前 14 世纪至 11 世纪,中国和巴比伦出现了自动计时装置——刻漏,为人类研制和使用自动装置之始。公元 2 世纪中国东汉天文学家张衡创造了漏水转浑天仪,实现天体运行的自动仿真,公元 132 年张衡创造了候风地动仪,实现了地震的自动检测。公元 1088 年北宋苏颂等人制成水运仪象台,实现计报时等自动检测装置。公元 200 年由马鲍、南齐的祖冲之创造指南车。公元 1 世纪古埃及和希腊的发明家创造了教堂庙门自动开启装置、铜祭司自动洒圣水等自动装置。公元 1642 年法国物理学家 B. 帕斯卡发明了加法器。公元 1745 年英国机械师 E. 李发明了带风向控制的风磨。1765 年俄国机械师 H. 波尔祖诺夫发明了蒸汽锅炉水位保持恒定用的浮子式阀门水位控制器。

2. 18 世纪末至 20 世纪 30 年代,自动化技术的形成时期

公元 1788 年英国机械师 J. 瓦特发明了离心式调速器构成蒸汽机转速的闭环自动调速



系统。公元1868年法国工程师J. 法尔科发明了反馈调节器,操纵蒸汽船的舵。到20世纪20~30年代,美国开始采用PID调节器。公元1898年英国物理学家J. 麦克斯韦尔用微分方程描述并证明了蒸汽机转速发生振荡的原因,总结了调节器理论。公元1877年英国数学家E. Routh、1895年德国数学家A. Hurwitz提出代数稳定判据。公元1892年俄国数学家A. 李雅普诺夫提出了稳定性理论。1927年美国电气工程师H. 布莱克在解决电子管放大器失真问题时引入了反馈概念。此后在拉普拉斯变换基础上,引入了传递函数的概念。1932年美国电气工程师N. 奈奎斯特提出了著名的频率稳定判据。公元1938年,原苏联电气工程师A. 米哈伊格夫提出了根据闭环系统频率特性判定稳定性的判据。上述判据加上1932年N. 米诺尔斯基《关于船舶自动操舵的稳定性》和1934年美国H. 黑曾发表的《关于伺服机构理论》的论文标志着经典控制理论的诞生。

3. 20世纪40~50年代,局部自动化的时期

第二次世界大战期间,为了解决防空火力控制系统和飞机自动导航系统等军事技术问题,各国科学家设计出了各种精密的自动调节装置。1945年美国数学家N. 维纳把反馈概念推广到生物等一切控制系统,1948年出版了著名的《控制论》,提出控制论是“关于动物和机器中的控制和通信的科学”的论断。1948年美国数学家W. 伊文斯(Evans)提出了根轨迹法。1954年中国科学家钱学森出版了《工程控制论》。代数稳定判据和传递函数、频率稳定判据和根轨迹法奠定了适宜于单变量控制问题的经典控制理论的基础。第二次世界大战后工业迅速发展,随着高速飞行器、核反应堆、大电力网和大化工厂等的出现提出了新的控制问题,如非线性系统、时滞系统、脉冲及采样控制系统、时变系统、分布参数系统及有随机信号输入的系统控制等问题,通过对这些问题的深入研究,经典控制理论在20世纪50年代有了新的发展。局部自动化的广泛应用,在工业上已广泛应用PID调节器,并用电子模拟计算机来设计自动控制系统,20世纪30~40年代我国出现了统一信号的、通用的、标准的气动单元组合自动化仪表,到20世纪50年代研制出了电动单元组合自动化仪表。

4. 20世纪50年代末至今是综合自动化时期

复杂工业、复杂工业过程和航空航天技术的自动控制问题,大都是多变量、时变、非线性、强耦合复杂系统。公元1956年前苏联数学家П. 庞特里亚金提出了极大值原理,同年美国数学家R. 贝尔曼(Bellman)创立了动态规划,1960年美国数学家R. 卡尔曼(Kalman)等提出能控性和能观性的概念并引入了状态空间法,提出具有二次型性能指标的线性状态的反馈律,这些新概念和新方法标志着现代控制理论的诞生。20世纪60~70年代,英国学者H. 罗森布罗克(Rosenbrock)、A. 麦克法兰(Macfarlane)等提出了现代频率法。随着现代控制理论的迅速发展,已形成了多个重要分支:系统辨识、建模与仿真(根据系统输入、输出数据为系统建立数学模型的理论和方法);自适应控制和自校正控制器(在对数学模型变动和系统外界信号不完备的情况下改变反馈控制器特性,以保持良好的工作品质);遥测、遥控和遥感(用装载在飞机、卫星或宇宙飞船等运载工具上的传感器,收集由地面目标物反馈或反射出来的电磁波,再根据这些数据来获得关于目标物的信号及控制);综合自动化及大系统理论(对大的系统,如大电力系统、化工联合企业、钢铁联合企业及



社会经济等系统,进行调度、优化和控制)的诞生;模式识别和人工智能(使用计算机,并使它能接受和处理各种自然的模式信息,如语言、文字、图像、景物等,用来模拟人类解决问题时的思维规律);智能控制(将人工智能与自动控制和系统工程的一些方法结合,形成智能自动化控制系统)的诞生等。

自动控制理论和实践不断发展,为人们提供了获得动态系统最佳性能的方法,大大提高了生产效率,并使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的手工操作中解放出来。因此,大多数工程技术人员和科学工作者都必须具备一定的自动控制方面的知识。自动控制原理是自动控制理论中最基础、最基本也是最成熟的入门知识,且在工程实践中得到广泛应用,并获得实际检验,被证明是非常实用的技术,学好自动控制原理是自动化及其控制类专业学生及工程技术人员必备的看家本领。

1.3 自动控制的一般概念

1.3.1 状态的转移和控制

所谓状态是指事物过去、现在及将来所处的状况。现以浴盆水位和水温的操纵过程为例,如图 1.1 所示。水、煤气分别由阀门 V_w 和 V_G 来调节。当人们入浴前,首先调节 V_w 和 V_G 使浴盆处于洗浴的最理想状态,简称为希望状态:水温 $T=42^\circ\text{C}$, 水位 $h=60\text{cm}$, 用 $S(42, 60)$ 表示。当人进入浴盆后,水位 h 和水温 T 都将发生变化,致使浴盆的希望状态发生了转移,变为实际的洗浴状态,简称为实际状态,用 $S(T, h)$ 表示。为了使洗浴过程始终保持希望状态,应如何进行呢?通常的做法是:先求出希望状态和实际状态之间的差值,把这个差值称为偏差,用 $e(42 - T, 60 - h)$ 表示,以偏差的大小和符号作为确定阀门操作量的依据进行操纵,从而使浴盆从实际状态向希望状态转移。这个过程可用简单的图形来表示,如图 1.2 所示。由图 1.2 可清楚看出,浴盆的实际状态 $S(T, h)$ 是随操纵量 $U(W, G)$ 和各种干扰(如人的进入、进水压力的变化、环境等)而时刻变化的。若根据偏差提供适当的操纵,才能使浴盆从实际状态向希望状态转移,并使浴盆保持在希望状态,将这一操纵过程称为控制。如果在这样反复操纵的过程中有人参与,称为人工控制。如果从检测、判断到操纵阀门的全部过程由机器来完成,称为自动控制。

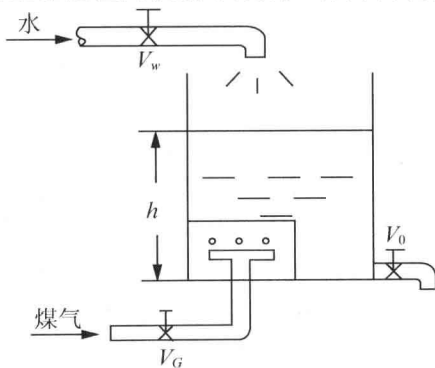


图 1.1 浴盆的水位和水温

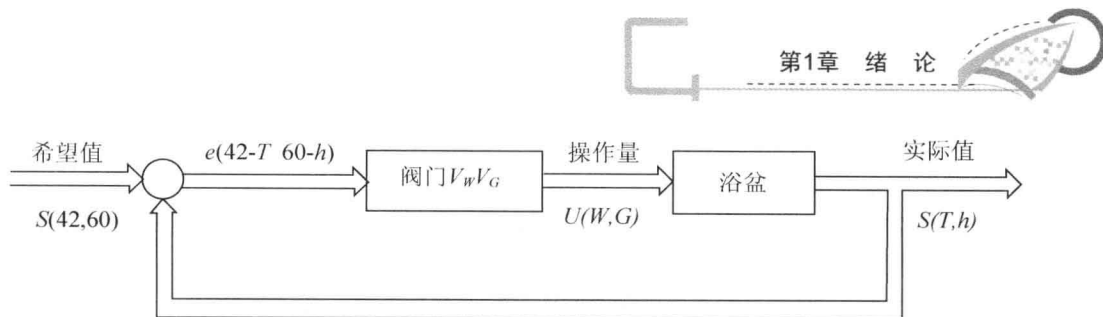


图 1.2 浴盆水位和水温操纵方框图

综上所述，浴盆由希望状态向实际状态转移，是由人的进入引起的，而人的进入对浴盆来说就是一种干扰，因此，这种状态的转移是必然的。但是，要使浴盆从实际状态向希望状态转移，必须进行操纵，也就是说，只有进行控制才能实现状态的二次转移。

【思考题】

- (1) 状态转移的原因是什么？状态的两种转移有何不同？
- (2) 试给控制下一个适当的定义。

1.3.2 自动控制的基本原理

1. 开环控制原理

以浴盆的水位控制为例，如图 1.3 所示。首先依据希望水位（如 60cm）操纵阀门 V_W 和 V_G ，使浴盆的水位处于希望值，如 60cm，调整好以后人将不再介入，在没有干扰的情况下，浴盆的水位将始终保持在希望水位上。为了清楚表明控制的过程及各元器件之间的相互关系，可用图 1.4 所示的方框图表示，这种方框图称为职能方框图。职能方框图是由方框、带箭头的线段和圆圈组成的信号传递网络，其中方框表示元器件，方框内写上元器件的职能（或功能），带箭头的线段表示信号及其传递的方向，指向方框的信号表示送入到该元器件的信号，称为输入量，带箭头的线段从方框送出，表示将该元器件受到输入信号作用后的结果送出来，称为输出量，圆圈表示对进入它的信号进行比较计算，并将计算的结果送出去，称它为综合点（或比较点）。由方框图可清楚地看出，这个系统有以下特点。

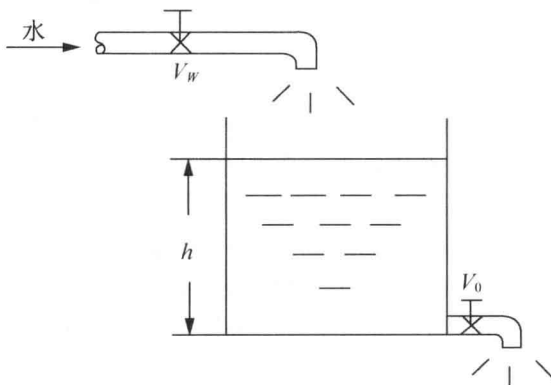


图 1.3 浴盆水位控制

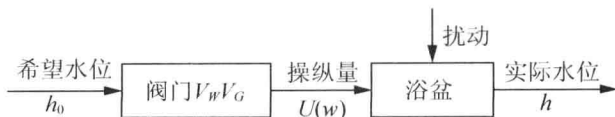


图 1.4 浴盆水位开环控制方框图



(1) 信号沿箭头方向单向传递。

(2) 测量的是希望值。

(3) 实际水位受希望水位的控制，而实际水位不参与控制。希望水位是沿箭头送入系统的，称为系统的输入量(也称给定量)；实际水位是从系统送出来的信号，称为系统的被控制量，或输出量。浴盆是需要控制的对象，称为受控对象，简称对象。

(4) 希望水位确定后，如进水压力的变化、周围环境的变化、内部元器件特性或参数的改变等都将对浴盆水位产生影响，使实际水位偏离希望值，但系统对这些干扰没有自动调节的能力，不能维持实际水位始终保持在希望水位上。

(5) 结构简单，造价低廉。

综上所述，这种控制的原理是：对象的输出量是由给定的输入量进行控制的，而输出量对输入量不产生影响，不形成闭合的环路，是开环的，因此，称为开环控制。该系统适用于要求不高、扰动很小(很少)，或者有扰动但能够补偿的场合。如自动售票机、洗衣机、调光台灯、母子钟等。

2. 闭环控制原理

开环控制精度不高的主要原因是，它不能根据实际的输出及时改变输入量，即输出量对输入量不产生作用。为了提高控制的效果，就必须人为参与，对输入量进行及时修正，这就是人工控制。下面先来考察人工控制的过程，如图 1.5 所示。人工控制的过程通常要经过以下 3 个步骤，并需要人的相应器官来协调完成。

(1) 看——用眼睛看实际水位。

(2) 想——将看到的实际水位送入大脑，并与大脑中的希望水位进行比较计算，求出差值，并根据差值的大小和符号做出操纵阀门 V_w 的决策。

(3) 做——用手或脚操纵阀门 V_w ，使实际水位等于希望水位。

以上过程需要不断地重复进行，才能始终保持浴盆的水位处于希望的水位上。如果能仿照人工控制的过程，用一些元器件代替人的相应器官，来完成保持浴盆的水位始终处于希望水位的任务，就能实现浴盆水位的自动控制。

图 1.6 所示为浴盆水位自动控制的原理图。用杠杆—浮球—连杆机构代替人的大脑—眼睛—手或脚的功能，自动实现浴盆水位始终保持在希望水位。首先根据希望水位人工调节杠杆的平衡度，即调节阀门的开度，使浴盆的水位等于希望水位，调好后人就不再介入。若有扰动出现(如进水压力变化等)，浮球立即感知水位的上升(或下降)，带动连杆使杠杆的右端上升(或下降)，根据杠杆原理，杠杆的左端将会下降(或上升)，带动连杆和阀门下降(或上升)，使进水量减小(或增大)，致使浴盆的水位下降(或上升)，直至保持在希望的水位。以上过程自动循环进行，可用单线图来描述自动控制的过程。下面的单线图描述当进水压力升高时自动保持希望水位的控制过程为

