



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

许丽佳 主 编



新颖的体系编排模式，理论和实践完美结合
突出工程性和实用性，大量应用实例及分析



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 许丽佳
副主编 陈晓燕
参 编 庞 涛 杨成林 蒋荣华
黄诚剔 周 波



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书简明扼要地介绍了自动控制的基本理论和研究方法,包括控制系统的数学建模、时域分析、根轨迹绘制、频域分析、控制系统的校正设计,以及离散控制系统的分析。另外,每章还介绍了 MATLAB 在控制系统分析中的应用。

本书精选了一些重要的例题,旨在帮助读者理解和掌握控制系统的基本理论和分析方法。本书叙述精练,深入浅出,举例翔实,适合教学和自学。本书可作为普通高校自动化、机械工程、电气自动化、计算机、通信、测控、农业电气化与自动化、环境工程等相关专业的教材,也可供高职高专院校的相关专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/许丽佳主编. —北京:北京大学出版社, 2013. 2
(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 - 22112 - 9

I. ①自… II. ①许… 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 026667 号

书 名: 自动控制原理

著作责任者: 许丽佳 主编

策 划 编 辑: 童君鑫

责 任 编 辑: 童君鑫 黄 南

标 准 书 号: ISBN 978 - 7 - 301 - 22112 - 9/TP · 1274

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: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 340 千字

2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 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

本书详细地介绍了经典控制理论的基本理论和分析方法。编者依据多年的教学经验，精选了各章的内容。本书分为七章，以最基本的内容为主线，注重系统性和逻辑性，介绍精练，层次分明，便于读者自学。本书主要内容如下：

第1章 绪论。介绍自动控制系统的基本概念、基本组成和分类，并辅之以实例。

第2章 控制系统的数学模型。介绍了采用分析法来建立系统的数学模型，对传递函数、结构图的化简、梅森公式等给予了详细的介绍。

第3章 控制系统的时域分析法。介绍了控制系统的性能指标、暂态和稳态性能分析、稳态误差的计算等，并重点突出对系统的稳定性、快速性和准确性的讨论与分析。

第4章 控制系统的根轨迹分析法。介绍了根轨迹的绘制原则、广义根轨迹和零度根轨迹，并辅以实例介绍了用根轨迹法分析系统的性能。

第5章 控制系统的频域分析法。介绍了频率特性的概念、频率特性曲线的绘制方法、频域稳定判据和系统频域性能指标的估算。

第6章 控制系统的校正。介绍了目前工程实践中常用的三种校正方法，即串联校正、反馈校正和复合校正。

第7章 离散控制系统。介绍了信号的采样与复现、 z 变换和脉冲传递函数、离散系统动态和稳态性能的分析。

各章后均附有习题，在学完每章后，读者可通过大量习题的练习进一步巩固所学的内容。

本书第1、5章由四川农业大学许丽佳编写，第2章由四川农业大学许丽佳、电子科技大学杨成林编写，第3章由四川农业大学许丽佳、四川大学蒋荣华编写，第4章由四川农业大学庞涛、华侨大学黄诚剔编写，第6章由四川农业大学陈晓燕编写，第7章由四川农业大学陈晓燕、四川理工学院周波编写。同时，张红美、吴宇、张云等参与了部分章节的编写和校稿，在此表示感谢。全书由许丽佳统稿并定稿。

由于时间有限，加上编者水平所限，书中难免存在一些不足之处，恳请广大读者不吝指正。

编者

2012.11

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

50667, pup6_czq@163.com, szheng_pup6@163.com, linzhangbo@126.com, 欢迎

目 录

第 1 章 绪论	1	习题	49
1.1 概述	2	第 3 章 控制系统的时域分析法	52
1.1.1 自动控制在国民经济中的 作用	2	3.1 时域分析基础	53
1.1.2 自动控制理论的发展	2	3.1.1 典型输入信号	53
1.2 基本控制方式	3	3.1.2 典型时间响应	54
1.2.1 基本概念	3	3.1.3 单位阶跃响应的性能 指标	55
1.2.2 开环控制	3	3.2 控制系统的时域分析	56
1.2.3 闭环控制	4	3.2.1 一阶系统的时域分析	56
1.2.4 复合控制方式	5	3.2.2 二阶系统的时域分析	58
1.3 自动控制系统的分类	5	3.2.3 改善二阶系统响应的 措施	67
1.4 自动控制系统示例	7	3.2.4 高阶系统的时域分析	68
1.5 自动控制系统的性能要求	10	3.3 控制系统的稳定性分析	69
习题	12	3.3.1 系统稳定的概念	69
第 2 章 控制系统的数学模型	13	3.3.2 稳定的数学条件	70
2.1 控制系统的时域数学模型	14	3.3.3 线性系统的代数稳定性 判据	70
2.1.1 控制系统的微分方程	14	3.4 控制系统的稳态误差分析	75
2.1.2 控制系统的线性近似	18	3.4.1 误差与稳态误差	75
2.2 拉普拉斯变换	20	3.4.2 稳态误差的计算	75
2.2.1 拉普拉斯变换的定义	20	3.4.3 给定输入下的稳态误差 计算	76
2.2.2 拉普拉斯的常用定理	22	3.4.4 干扰作用下的稳态误差 计算	78
2.2.3 拉普拉斯反变换	27	3.5 MATLAB 在控制系统时域 分析中的应用	79
2.2.4 微分方程的求解	30	习题	81
2.3 控制系统的复数域数学模型	31	第 4 章 控制系统的根轨迹分析法	83
2.3.1 传递函数的定义和性质	31	4.1 根轨迹的基本概念	84
2.3.2 典型环节的传递函数	32	4.1.1 根轨迹的概念	84
2.4 控制系统的结构图和信号流图	36	4.1.2 根轨迹与系统性能	84
2.4.1 系统结构图及其等效变换	36		
2.4.2 控制系统的信号流图和 梅森公式	44		
2.5 MATLAB 在控制系统建模中的 应用	47		



4.1.3 根轨迹的幅值条件和相角条件	85
4.2 绘制根轨迹的基本法则	86
4.3 特殊根轨迹	93
4.3.1 广义根轨迹	93
4.3.2 零度根轨迹	94
4.4 系统闭环零极点分布与阶跃响应的关系	96
4.4.1 用闭环零极点表示的阶跃响应解析式	96
4.4.2 闭环零极点分布与阶跃响应的定性关系	97
4.4.3 主导极点与偶极子	97
4.5 开环零极点的变化对根轨迹的影响	99
4.5.1 开环零点的变化对根轨迹的影响	99
4.5.2 开环极点的变化对根轨迹的影响	101
4.6 MATLAB在根轨迹法中的应用	103
习题	105
第5章 控制系统的频域分析法	107
5.1 频率特性	108
5.1.1 频率特性的基本概念	108
5.1.2 频率特性的图形表示	110
5.2 控制系统的幅相特性图	111
5.2.1 典型环节的幅相特性图	111
5.2.2 开环幅相特性图的绘制	115
5.3 控制系统的对数频率特性图	117
5.3.1 典型环节的 Bode 图	117
5.3.2 开环系统的 Bode 图	121
5.3.3 最小相角系统和非最小相角系统	123
5.4 频域稳定判据	125
5.4.1 奈氏判据的数学基础	125
5.4.2 奈氏判据	128
5.4.3 对数频率稳定判据	129
5.5 稳定裕度	131
5.5.1 相角裕度	131
5.5.2 幅值裕度	131
5.6 频率特性分析	134
5.6.1 应用开环频率特性分析系统的性能	134
5.6.2 应用闭环频率特性分析系统的性能	137
5.6.3 开环频域指标和闭环频域指标的关系	140
5.7 MATLAB在频域分析中的应用	141
习题	145
第6章 控制系统的校正	147
6.1 系统校正的基本概念	148
6.1.1 性能指标	148
6.1.2 系统带宽确定	149
6.1.3 校正方式	149
6.1.4 基本校正规律	151
6.1.5 校正方法	154
6.2 系统串联校正	154
6.2.1 串联超前校正	154
6.2.2 串联滞后校正	158
6.2.3 串联滞后-超前校正	161
6.2.4 串联校正的期望频率特性综合法	164
6.3 反馈校正	165
6.3.1 反馈校正的原理	166
6.3.2 反馈校正的特点	166
6.3.3 反馈校正装置的设计	167
6.4 复合校正	169
6.4.1 按扰动补偿的复合校正	170
6.4.2 按输入补偿的复合校正	171
6.5 MATLAB在系统校正设计中的应用	172
习题	175

7.4.3	开环系统脉冲传递函数	192
7.4.4	闭环系统脉冲传递函数	194
7.5	离散系统的性能分析	197
7.5.1	离散系统的稳定性分析	197
7.5.2	离散系统的稳态误差	201
7.5.3	离散系统的动态性能	203
7.6	MATLAB 在离散系统分析中的应用	205
习题		209
答案		211
文献		226

第1章

绪论



本章学习目标

- ★ 了解自动控制理论的发展史。
- ★ 了解自动控制系统的分类。
- ★ 了解自动控制系统的性能要求。



本章教学要点

知识要点	能力要求	相关知识
自动控制理论的发展史	了解自动控制理论的发展史、特点及功能	自动控制原理的定义、发展、特点及功能
自动控制系统的分类	了解自动控制系统的分类	各种类型的自动控制系统及特点
自动控制系统的性能	了解自动控制系统的性能	自动控制系统三大性能的定义及要求



导入案例

自动控制系统的作用是比人干得更快、更好，极大地提高生产力，从自动化生产线上生产的产品质量越来越好，价格越来越低。自动控制系统把人从繁重、危险的工作中解放出来，如矿井掘井、核电站检查、消防救火、无人侦察机、导弹(无人)。自动控制系统完成人无法完成的工作，如管道机器人(各种油管、水管)、水下 6000m 机器人。现在农业也实现自动化了，如播种、管理、收割等全部由机器人完成。自动控制系统还替人完成许多繁琐的日常劳动，如全自动洗衣机、擦玻璃机器人、壁面清洗机器人、汽车加油机器人等。图 1 所示为擦玻璃机器人。

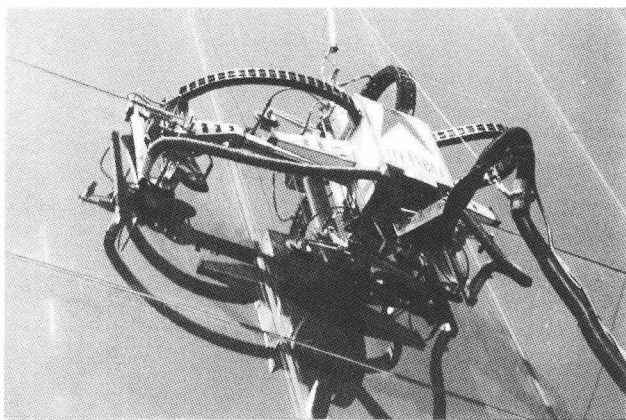


图 1 擦玻璃机器人

1.1 概 述

1.1.1 自动控制在国民经济中的作用

自动控制,通常指在无人直接参与的情况下,通过控制器使被控对象或过程自动地按照预定的要求运行。

20 世纪中叶以来,随着科技的发展自动控制技术的作用越来越重要,一个国家在自动控制方面的水平,是衡量它的生产技术和科学技术水平先进与否的一项重要标志。目前,自动控制广泛地应用于现代的工业、农业、国防和科学技术领域中。军事领域中,导弹命中目标、飞机驾驶系统、无人机等;航天技术领域中,宇宙飞船登月并返回地球、人造卫星按预定轨迹运行;工业生产中,对压力、温度、湿度、流量、燃料成分比例等参数的控制;现代农业中,自动温控系统、自动灌溉系统等。不仅如此,自动控制技术的应用已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中,如无人驾驶车、智能家电、机器人等。自动控制已经成为现代社会生活中不可缺少的重要组成部分。

1.1.2 自动控制理论的发展

随着生产的发展,自动控制技术也在不断地发展。计算机的更新换代,更加推动了控制理论不断地向前发展。控制理论的发展过程一般可分为 3 个阶段。

第一阶段:时间为 20 世纪 40~60 年代,称为“经典控制理论”时期。经典控制理论主要是解决单输入单输出问题,主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法。此阶段所研究的系统大多是线性定常系统,对非线性系统,分析时采用的相平面法一般也不超过两个变量。经典控制理论能够较好地解决生产过程中的单输入单输出问题。这一时期的主要代表人物有伯德(H. W. Bode)和伊文思(W. R. Evans)。伯德于 1945 年提出了简便而实用的伯德图法。1948 年,伊文思提出了直观而又形象的根轨迹法。

第二阶段:时间为 20 世纪 60~70 年代,称为“现代控制理论”时期。这个时期,计



算机的飞速发展,推动了空间技术的发展。经典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分方程组,用以描述系统的动态过程,即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题,系统既可以是线性的、定常的,也可以是非线性的、时变的。这一时期的主要代表人物有庞特里亚金(Pontryagin)、贝尔曼(Bellman)及卡尔曼(R. E. Kalman)等人。庞特里亚金于1961年发表了极大值原理,贝尔曼在1957年提出了动态规划原则,1959年卡尔曼发表了关于线性滤波器和估计器的论文,即著名的卡尔曼滤波。

第三阶段:时间为20世纪70年代末至今。70年代末,控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展。前者是控制理论在广度上的开拓,后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点,研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论;“智能控制”是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研究具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统。

1.2 基本控制方式

1.2.1 基本概念

控制:使某些物理量按指定的规律变化(包括保持恒定),以保证生产的安全性、经济性及产品质量等要求的技术手段。

自动控制:应用自动化仪表或控制装置代替人,自动地对机器设备或生产过程进行控制,使之达到预期的状态或性能要求。

系统:为达到某一目的,由相互制约的各个部分按一定规律组成的、具有一定功能的整体。

自动控制系统:指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统,它一般由控制装置(控制器)和被控对象所组成。

控制装置:指对被控对象起控制作用的设备总体。

被控对象:指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。例如,汽车、飞机、炼钢、化工生产的锅炉等。

自动控制系统性能在很大程度上取决于系统中的控制器。为了产生控制作用而必须接收的信息,有两个可能的来源:①来自系统外部,即由系统输入端输入的参考输入信号;②来自被控对象的输出端,即反映被控对象的行为或状态的信息。

把从被控对象输出端获得的信息通过中间环节(称为反馈环节)再送回控制器的输入端的过程,称为反馈。传送反馈信息的载体,称为反馈信号。是否采用反馈,对控制系统的各个指标(即稳定性、快速性和准确性)影响很大。因此系统的基本控制方式也按有无反馈分为三大类:开环控制、闭环控制和复合控制。

1.2.2 开环控制

开环控制是一种最简单的控制方式,其特点是在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用,即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的示意图如图1.1所示。

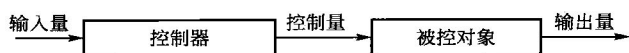


图 1.1 开环控制系统

1.2.3 闭环控制

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有正向作用，又有反向联系的控制过程，即如果控制器的信息来源中包含有来自被控对象输出的反馈信息，则称为闭环控制系统，或称为反馈控制系统，如图 1.2 所示。

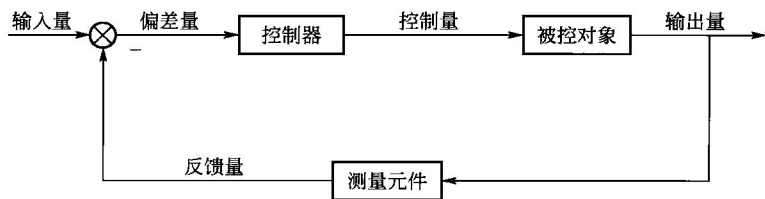


图 1.2 闭环控制系统

在控制系统中，控制装置对被控对象所施加的控制作用，若能取自被控量(输出量)的反馈信息(反馈量)，即根据实际输出来修正控制作用，实现对被控对象进行控制的任务，那么这种控制原理称为反馈控制原理。正是由于引入了反馈信息(反馈量)，使整个控制过程成为闭合的，因此称为闭环控制系统。在此类系统中，其控制作用的基础是被控量(输出量)与给定值之间的偏差，这个偏差是各种实际扰动所导致的，无须区分其中的个别原因。这种闭环系统往往同时能够抵制多种扰动，而且对系统自身元部件参数的波动也不甚敏感。

闭环控制系统是由各种系统部件组成的。一个控制系统包含被控对象和控制装置两个部分。其中，控制装置由具有一定职能的各种基本元件组成。在不同系统中，结构完全不同的元部件都可以具有相同的职能。组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种：

测量元件：测量被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般转换为电量。

给定元件：给出与期望的被控量相对应的系统输入量(即给定值)。

比较元件：把测量元件检测的被控量实际值与系统的给定值进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置和电桥等。

放大元件：将比较元件给出的偏差进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。例如电压偏差信号，可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器给予放大。

执行元件：直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

校正元件：也称补偿元件，它是结构或参数便于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用电子计算机。

图 1.3 所示的框图是一个典型的闭环控制系统的基本组成，图中用“⊗”号代表比较

元件，它将测量元件检测到的被控量与参考量进行比较，“-”号代表两者符号相反，即负反馈；“+”号代表两者符号相同，即正反馈。信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。

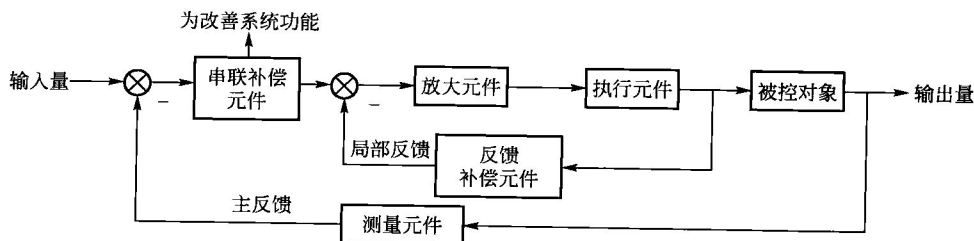


图 1.3 闭环系统的一般组成

包含一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。例如，在日常生活中经常遇到的抽水马桶（见图 1.4），就是一个典型的闭环控制系统。先检测偏差，然后进行调节，使偏差逐渐减小，最后直至消除偏差。

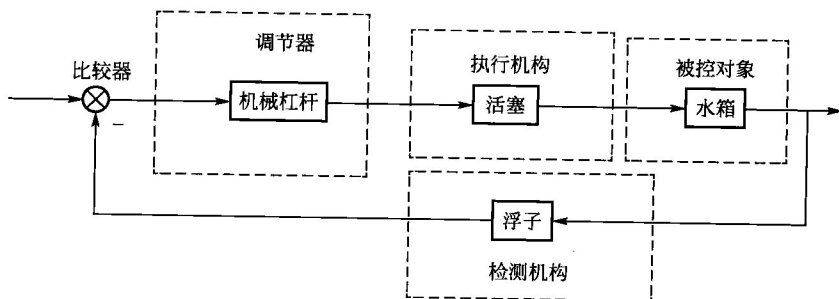


图 1.4 抽水马桶原理框图

1.2.4 复合控制方式

对主要的扰动，采用适当的补偿装置实现按扰动原则控制，同时，组成闭环反馈控制实现按偏差原则控制，以消除其他扰动带来的偏差。这样按偏差原则和按扰动原则结合起来构成的系统，称为复合控制系统，它兼有两者的优点，可以构成精度很高的控制系统。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统有多种分类方法。例如，按控制方式可分为开环控制、反馈控制、复合控制等；按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等；按系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等；按给定值变化规律又可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等。一般地，为了全面反映自动控制系统的点，常常将上述各种分类方法组合应用。



1. 线性系统与非线性系统

线性系统是指组成系统的元器件的静态特性为直线, 该系统的输入与输出关系可以用线性微分方程或线性差分方程来描述。线性系统的主要特点是具有叠加性和齐次性, 系统的时间响应特性与初始状态无关。线性系统可以用线性微分方程式描述, 其一般形式为

$$\begin{aligned} & a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t) \\ &= b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t) \end{aligned}$$

式中, $c(t)$ 是被控量; $r(t)$ 是系统输入量。系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 是常数时, 称为定常系统; 系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 随时间变化时, 称为时变系统。线性定常连续系统按其输入量的变化规律不同又可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统。

1) 恒值控制系统

这类控制系统的参据量是一个常值, 要求被控量也等于一个常值。如温度控制系统、压力控制系统、液位控制系统等均为恒值控制系统。在工业控制中, 如果被控量是温度、流量、压力、液位等生产过程参量时, 这种控制系统则称为过程控制系统, 它们大多数都属于恒值控制系统。

2) 随动系统

这类控制系统的参据量是预先未知的随时间任意变化的函数, 要求被控量以尽可能小的误差跟随参据量的变化, 故又称为跟踪系统。示例中的函数记录仪便是典型的随动系统。在随动系统中, 如果被控量是机械位置或其导数时, 这类系统称之为伺服系统。

3) 程序控制系统

这类控制系统的参据量是按预定规律随时间变化的函数, 要求被控量迅速、准确地加以复现。机械加工使用的数字程序控制机床便是一例。

程序控制系统和随动系统的参据量都是时间函数, 不同之处在于前者是已知的时间函数, 后者则是未知的任意时间函数, 而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

非线性系统是指组成系统的元器件中有一个以上具有非直线的静态特性的系统, 只能用非线性微分方程描述, 不满足叠加原理。非线性方程的特点是系数与变量有关, 或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项, 例如

$$y''(t) + y(t)y'(t) + y^2(t) = r(t)$$

严格地说, 实际物理系统中都含有程度不同的非线性元部件, 如放大器和电磁元件的饱和特性, 运动部件的死区、间隙和摩擦特性等。由于非线性方程在数学处理上较困难, 目前对不同类型的非线性控制系统的研究还没有统一的方法。但对于非线性程度不太严重的元部件, 可采用在一定范围内线性化的方法, 从而将非线性控制系统近似为线性控制系统。

2. 连续系统和离散系统

连续系统是指系统内各处的信号都是以连续的模拟量传递的系统。其输入-输出之间的关系可以用微分方程来描述。离散系统是指系统一处或多处的信号以脉冲序列或数码形式传递的系统。