

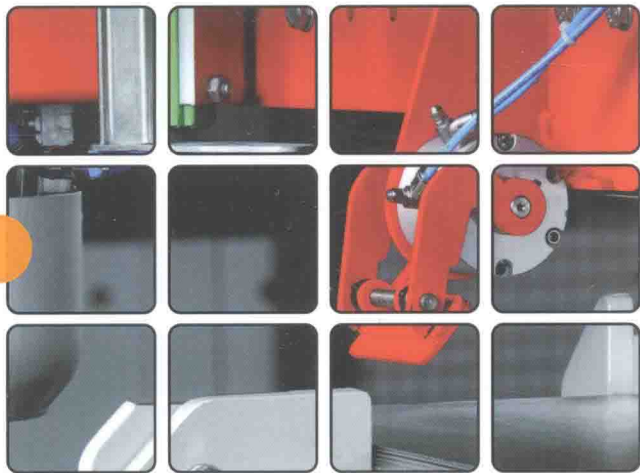
21世纪全国应用型本科 **电子通信系列** 实用规划教材



# 自动控制原理

(第2版)

主 编 袁德成 王玉德 李 凌



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材

# 自动控制原理(第 2 版)

主 编 袁德成 王玉德 李 凌  
参 编 李 娟 张 健 亢 杰



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书是 21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材之一,是电子信息类专业基础课程“自动控制原理”的教科书。全书内容按照数学建模、稳定性分析和控制系统设计的模块组织,重点讲授线性时不变系统的稳定性分析方法。本书结合 MATLAB/Simulink 仿真工具,简化了当前大多数自动控制原理教材中关于经典图解方法的叙述,突出了传统方法的基本思想和用途,也新增加了在控制科学与技术中非常重要的一些概念,例如鲁棒性等内容。本书编写的思路和原则是:传承经典基础知识,便于入门教学;连接和面向控制科学发展的未来,拓展视野。

本书既可作为普通高校电气工程自动化、通信、计算机、自动控制等相关专业本科生的教科书,也可以作为科技和工程人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/袁德成,王玉德,李凌主编.—2版.—北京:北京大学出版社,2015.2

(21世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-25510-0

I. ①自… II. ①袁…②王…③李… 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(2015)第 029470 号

**书 名** 自动控制原理(第2版)  
**著作责任者** 袁德成 王玉德 李 凌 主编  
**策划编辑** 郑 双 程志强  
**责任编辑** 郑 双  
**标准书号** ISBN 978-7-301-25510-0  
**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> 新浪微博: @北京大学出版社  
**电子信箱** [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)  
**电 话** 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667  
**印 刷 者** 三河市博文印刷有限公司  
**经 销 者** 新华书店  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 408 千字  
2006 年 8 月第 1 版  
2015 年 2 月第 2 版 2015 年 2 月第 1 次印刷  
**定 价** 35.00 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](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010-62756370

# 前 言

目前,国内出版的《自动控制原理》教材很多,虽然基本能满足本科教学的需要,但大多数内容已经沿用了30~40年。随着科学技术的不断发展,控制工业已经形成,为社会发展和经济建设提供了大量的技术和产品。作为从事自动化事业的入门知识,《自动控制原理》教材内容及相关教学组织在客观上需要与时俱进。

本科生走出校门参加与各类自动控制相关的工作后,可能有这样的体会,书中学习过的一些控制方法在实践中不知如何运用,也很难应用。原因固然很多,但我们在教材内容组织上是否值得改进和完善,需要深入的思考。20世纪70年代以来,自动控制理论与工程经历了快速发展时期,取得了许多辉煌的成就。关于线性时不变系统的稳定性问题、满足最优性能指标的控制设计方法、适应现场对象不确定性的鲁棒稳定(Robust Stability)和鲁棒性能(Robust Performance)指标设计等问题几乎都有解决方法,并已建立起成熟的理论体系。与控制科学并行发展的数学建模和仿真技术,也为自动化提供了强有力的支持。在传统教材中,一些花很多学时讲授的图解或手算方法,现在借助MATLAB/Simulink等仿真工具,输入几条语句即可完成。还有:自动控制理论的学习主要是掌握给定系统的稳定性分析、控制器设计与性能评价、实施等理论方法和技术。分析与设计一般要基于数学模型(离线),实施(在线)则要综合应用检测仪表、通信、计算机控制等技术。一个重要概念往往被忽视,即控制器设计所依赖的数学模型只是受控过程在某种工况条件下的近似表述,一旦控制器设计完成并投入运行,控制器实际要控制的对象已经不再是一个简单的数学模型(分析设计阶段用),而是一个实实在在的、有扰动且处在不断变化中的物理对象。在学习“自动控制原理”课程时,数学模型(传递函数、微分方程、状态空间等)是已知给定的,具体实践中需要试验获取。要控制的对象特性可能不同,一旦得到过程模型,后续的控制分析设计已经存在可以遵循的系统化方法和程序。商业化的各类控制仪表、软件及计算机控制装置,为控制系统的实施提供了可靠的工具和技术支持,但普遍的看法是目前在工业现场投运的控制系统面临相当多的问题,用自动控制原理的方法,改善、提高和优化自动控制系统的运行效率存在巨大的空间。培养学生建立处理问题的系统思想,掌握应用现代集成工具,强化理论联系实际意识,是新一轮《自动控制原理》教材编写应该遵循的思想。

控制科学与技术已经建立起庞大的理论体系,想在本科阶段到硕士及博士研究生阶段学完所有方法几乎不可能。新材料、新工艺、新装置持续涌现,又在不断呼唤新控制。摒弃一些陈旧少用的内容,突出基本思想和方法如何应用,把学生的视野引向当前实践和未来发展,教学效果可能更好,也有助于增加学生的学习兴趣和培养学生的创新意识。结合编者从事自动控制原理近20年的教学及工业现场自动化项目的实践,深入理解和掌握反馈控制的思想至关重要。反馈基本思想包括负反馈和前馈,具有普适性,广泛存在于人体自身、生物和工程技术界。实现反馈的方式可能多种多样。在实践中不断发现反馈的存在和运用反馈技术,对从事包括自动控制专业在内的许多专业学生都有重要的指导意义。

为了适应控制技术和控制理论发展形势的需要,我们对2006年出版的《自动控制原

理》进行了修订。这次修订，除保持本书传承经典、便于入门的特点外，对原书结构进行了调整，整合了系统建模的内容，引入了 MATLAB 软件包应用技术，增加了系统设计与综合、最小拍响应控制等内容，以利于读者掌握和发展控制理论与应用技术，对提高读者综合分析问题的能力具有重要的作用。

本书第 1 章、第 4 章、第 9 章由袁德成执笔，第 2 章、第 3 章、附录 B 由王玉德执笔，第 5 章及附录 A 由李凌、亢杰执笔，第 6 章及附录 C 由李凌执笔，第 7 章、第 8 章由张健和李娟执笔。参与教材编写的老师所在学校的一些同事提出了许多宝贵意见，编者谨在此致谢。由于编者水平有限，编写时间仓促，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 9 月

## 北京大学出版社本科电气信息系列实用规划教材

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
<b>物联网工程</b>						
1	物联网概论	7-301-23473-0	王 平	38	2014	电子课件/答案,有“多媒体移动交互式教材”
2	物联网概论	7-301-21439-8	王金甫	42	2012	电子课件/答案
3	现代通信网络	7-301-24557-6	胡珺珺	38	2014	电子课件/答案
4	物联网安全	7-301-24153-0	王金甫	43	2014	电子课件/答案
5	通信网络基础	7-301-23983-4	王昊	32	2014	
6	无线通信原理	7-301-23705-2	许晓丽	42	2014	电子课件/答案
7	家居物联网技术开发与实践	7-301-22385-7	付 蔚	39	2013	电子课件/答案
8	物联网技术案例教程	7-301-22436-6	崔逊学	40	2013	电子课件
9	传感器技术及应用电路项目化教程	7-301-22110-5	钱裕禄	30	2013	电子课件/视频素材,宁波市教学成果奖
10	网络工程与管理	7-301-20763-5	谢 慧	39	2012	电子课件/答案
11	电磁场与电磁波(第2版)	7-301-20508-2	邬春明	32	2012	电子课件/答案
12	现代交换技术(第2版)	7-301-18889-7	姚 军	36	2013	电子课件/习题答案
13	传感器基础(第2版)	7-301-19174-3	赵玉刚	32	2013	
14	物联网基础与应用	7-301-16598-0	李蔚田	44	2012	电子课件
15	通信技术实用教程	7-301-25386-1	谢 慧	35	2015	
<b>单片机与嵌入式</b>						
1	嵌入式 ARM 系统原理与实例开发(第2版)	7-301-16870-7	杨宗德	32	2011	电子课件/素材
2	ARM 嵌入式系统基础与开发教程	7-301-17318-3	丁文龙 李志军	36	2010	电子课件/习题答案
3	嵌入式系统设计与应用	7-301-19451-5	邢吉生	44	2011	电子课件/实验程序素材
4	嵌入式系统开发基础-----基于八位单片机的 C 语言程序设计	7-301-17468-5	侯殿有	49	2012	电子课件/答案/素材
5	嵌入式系统基础实践教程	7-301-22447-2	韩 磊	35	2013	电子课件
6	单片机原理与接口技术	7-301-19175-0	李 升	46	2011	电子课件/习题答案
7	单片机系统设计与实例开发(MSP430)	7-301-21672-9	顾 涛	44	2013	电子课件/答案
8	单片机原理与应用技术	7-301-10760-7	魏立峰 王宝兴	25	2009	电子课件
9	单片机原理及应用教程(第2版)	7-301-22437-3	范立南	43	2013	电子课件/习题答案,辽宁“十二五”教材
10	单片机原理与应用及 C51 程序设计	7-301-13676-8	唐 颖	30	2011	电子课件
11	单片机原理与应用及其实验指导书	7-301-21058-1	邵发森	44	2012	电子课件/答案/素材
12	MCS-51 单片机原理及应用	7-301-22882-1	黄翠翠	34	2013	电子课件/程序代码
<b>物理、能源、微电子</b>						
1	物理光学理论与应用	7-301-16914-8	宋贵才	32	2010	电子课件/习题答案,“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
2	现代光学	7-301-23639-0	宋贵才	36	2014	电子课件/答案
3	平板显示技术基础	7-301-22111-2	王丽娟	52	2013	电子课件/答案
4	集成电路版图设计	7-301-21235-6	陆学斌	32	2012	电子课件/习题答案
5	新能源与分布式发电技术	7-301-17677-1	朱永强	32	2010	电子课件/习题答案,北京市精品教材,北京市“十二五”教材
6	太阳能电池原理与应用	7-301-18672-5	靳瑞敏	25	2011	电子课件

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
7	新能源照明技术	7-301-23123-4	李姿景	33	2013	电子课件/答案
<b>基 础 课</b>						
1	电工与电子技术(上册)(第2版)	7-301-19183-5	吴舒辞	30	2011	电子课件/习题答案, 湖南省“十二五”教材
2	电工与电子技术(下册)(第2版)	7-301-19229-0	徐卓农 李士军	32	2011	电子课件/习题答案, 湖南省“十二五”教材
3	电路分析	7-301-12179-5	王艳红 蒋学华	38	2010	电子课件, 山东省第二届优秀教材奖
4	模拟电子技术实验教程	7-301-13121-3	谭海曙	24	2010	电子课件
5	运筹学(第2版)	7-301-18860-6	吴亚丽 张俊敏	28	2011	电子课件/习题答案
6	电路与模拟电子技术	7-301-04595-4	张绪光 刘在娥	35	2009	电子课件/习题答案
7	微机原理及接口技术	7-301-16931-5	肖洪兵	32	2010	电子课件/习题答案
8	数字电子技术	7-301-16932-2	刘金华	30	2010	电子课件/习题答案
9	微机原理及接口技术实验指导书	7-301-17614-6	李干林 李 升	22	2010	课件(实验报告)
10	模拟电子技术	7-301-17700-6	张绪光 刘在娥	36	2010	电子课件/习题答案
11	电工技术	7-301-18493-6	张 莉 张绪光	26	2011	电子课件/习题答案, 山东省“十二五”教材
12	电路分析基础	7-301-20505-1	吴舒辞	38	2012	电子课件/习题答案
13	模拟电子线路	7-301-20725-3	宋树祥	38	2012	电子课件/习题答案
14	电工学实验教程	7-301-20327-9	王士军	34	2012	
15	数字电子技术	7-301-21304-9	秦长海 张天鹏	49	2013	电子课件/答案, 河南省“十二五”教材
16	模拟电子与数字逻辑	7-301-21450-3	邬春明	39	2012	电子课件
17	电路与模拟电子技术实验指导书	7-301-20351-4	唐 颖	26	2012	部分课件
18	电子电路基础实验与课程设计	7-301-22474-8	武 林	36	2013	部分课件
19	电文化——电气信息学科概论	7-301-22484-7	高 心	30	2013	
20	实用数字电子技术	7-301-22598-1	钱裕禄	30	2013	电子课件/答案/其他素材
21	模拟电子技术学习指导及习题精选	7-301-23124-1	姚妮川	30	2013	电子课件
22	电工电子基础实验及综合设计指导	7-301-23221-7	盛桂珍	32	2013	
23	电子技术实验教程	7-301-23736-6	司朝良	33	2014	
24	电工技术	7-301-24181-3	赵莹	46	2014	电子课件/习题答案
25	电子技术实验教程	7-301-24449-4	马秋明	26	2014	
26	微控制器原理及应用	7-301-24812-6	丁筱玲	42	2014	
27	模拟电子技术基础学习指导与习题分析	7-301-25507-0	李大军	32(估)	2015	
28	电工学实验教程(第2版)	7-301-25343-4	王士军 张绪光	27	2015	
<b>电子、通信</b>						
1	DSP 技术及应用	7-301-10759-1	吴冬梅 张玉杰	26	2011	电子课件, 中国大学出版社图书奖首届优秀教材奖一等奖
2	电子工艺实习	7-301-10699-0	周春阳	19	2010	电子课件
3	电子工艺学教程	7-301-10744-7	张立毅 王华奎	32	2010	电子课件, 中国大学出版社图书奖首届优秀教材奖一等奖
4	信号与系统	7-301-10761-4	华 容 隋晓红	33	2011	电子课件
5	信息与通信工程专业英语(第2版)	7-301-19318-1	韩定定 李明明	32	2012	电子课件/参考译文, 中国电子教育学会2012年全国电子信息类优秀教材
6	高频电子线路(第2版)	7-301-16520-1	宋树祥 周冬梅	35	2009	电子课件/习题答案

序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
7	MATLAB 基础及其应用教程	7-301-11442-1	周开利 邓春晖	24	2011	电子课件
8	计算机网络	7-301-11508-4	郭银景 孙红雨	31	2009	电子课件
9	通信原理	7-301-12178-8	隋晓红 钟晓玲	32	2007	电子课件
10	数字图像处理	7-301-12176-4	曹茂永	23	2007	电子课件,“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
11	移动通信	7-301-11502-2	郭俊强 李 成	22	2010	电子课件
12	生物医学数据分析及其 MATLAB 实现	7-301-14472-5	尚志刚 张建华	25	2009	电子课件/习题答案/素材
13	信号处理 MATLAB 实验教程	7-301-15168-6	李 杰 张 猛	20	2009	实验素材
14	通信网的信令系统	7-301-15786-2	张云麟	24	2009	电子课件
15	数字信号处理	7-301-16076-3	王震宇 张培珍	32	2010	电子课件/答案/素材
16	光纤通信	7-301-12379-9	卢志茂 冯进玫	28	2010	电子课件/习题答案
17	离散信息论基础	7-301-17382-4	范九伦 谢 颢	25	2010	电子课件/习题答案,“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
18	光纤通信	7-301-17683-2	李丽君 徐文云	26	2010	电子课件/习题答案
19	数字信号处理	7-301-17986-4	王玉德	32	2010	电子课件/答案/素材
20	电子线路 CAD	7-301-18285-7	周荣富 曾 技	41	2011	电子课件
21	MATLAB 基础及应用	7-301-16739-7	李国朝	39	2011	电子课件/答案/素材
22	信息论与编码	7-301-18352-6	隋晓红 王艳营	24	2011	电子课件/习题答案
23	现代电子系统设计教程	7-301-18496-7	宋晓梅	36	2011	电子课件/习题答案
24	移动通信	7-301-19320-4	刘维超 时 颖	39	2011	电子课件/习题答案
25	电子信息类专业 MATLAB 实验教程	7-301-19452-2	李明明	42	2011	电子课件/习题答案
26	信号与系统	7-301-20340-8	李云红	29	2012	电子课件
27	数字图像处理	7-301-20339-2	李云红	36	2012	电子课件
28	编码调制技术	7-301-20506-8	黄 平	26	2012	电子课件
29	Mathcad 在信号与系统中的应用	7-301-20918-9	郭仁春	30	2012	
30	MATLAB 基础与应用教程	7-301-21247-9	王月明	32	2013	电子课件/答案
31	电子信息与通信工程专业英语	7-301-21688-0	孙桂芝	36	2012	电子课件
32	微波技术基础及其应用	7-301-21849-5	李泽民	49	2013	电子课件/习题答案/补充材料等
33	图像处理算法及应用	7-301-21607-1	李文书	48	2012	电子课件
34	网络系统分析与设计	7-301-20644-7	严承华	39	2012	电子课件
35	DSP 技术及应用	7-301-22109-9	董 胜	39	2013	电子课件/答案
36	通信原理实验与课程设计	7-301-22528-8	邬春明	34	2013	电子课件
37	信号与系统	7-301-22582-0	许丽佳	38	2013	电子课件/答案
38	信号与线性系统	7-301-22776-3	朱明早	33	2013	电子课件/答案
39	信号分析与处理	7-301-22919-4	李会容	39	2013	电子课件/答案
40	MATLAB 基础及实验教程	7-301-23022-0	杨成慧	36	2013	电子课件/答案
41	DSP 技术与应用基础(第 2 版)	7-301-24777-8	俞一彪	45	2015	
42	EDA 技术及数字系统的应用	7-301-23877-6	包 明	55	2015	
43	算法设计、分析与应用教程	7-301-24352-7	李文书	49	2014	
44	Android 开发工程师案例教程	7-301-24469-2	倪红军	48	2014	
45	ERP 原理及应用	7-301-23735-9	朱宝慧	43	2014	电子课件/答案
46	综合电子系统设计与实践	7-301-25509-4	武林	32(估)	2015	
47	高频电子技术	7-301-25508-7	赵玉刚	29(估)	2015	
48	信息与通信专业英语	7-301-25506-3	刘小佳	28(估)	2015	



序号	书名	书号	编著者	定价	出版年份	教辅及获奖情况
<b>自动化、电气</b>						
1	自动控制原理	7-301-22386-4	佟 威	30	2013	电子课件/答案
2	自动控制原理	7-301-22936-1	邢春芳	39	2013	
3	自动控制原理	7-301-22448-9	谭功全	44	2013	
4	自动控制原理	7-301-22112-9	许丽佳	30	2013	
5	自动控制原理	7-301-16933-9	丁 红 李学军	32	2010	电子课件/答案/素材
6	自动控制原理	7-301-10757-7	袁德成 王玉德	29	2007	电子课件, 辽宁省“十二五”教材
7	现代控制理论基础	7-301-10512-2	侯媛彬等	20	2010	电子课件/素材, 国家级“十一五”规划教材
8	计算机控制系统(第2版)	7-301-23271-2	徐文尚	48	2013	电子课件/答案
9	电力系统继电保护(第2版)	7-301-21366-7	马永翔	42	2013	电子课件/习题答案
10	电气控制技术(第2版)	7-301-24933-8	韩顺杰 吕树清	28	2014	电子课件
11	自动化专业英语(第2版)	7-301-25091-4	李国厚 王春阳	46	2014	电子课件/参考译文
12	电力电子技术及应用	7-301-13577-8	张润和	38	2008	电子课件
13	高电压技术	7-301-14461-9	马永翔	28	2009	电子课件/习题答案
14	电力系统分析	7-301-14460-2	曹 娜	35	2009	
15	综合布线系统基础教程	7-301-14994-2	吴达金	24	2009	电子课件
16	PLC 原理及应用	7-301-17797-6	缪志农 郭新年	26	2010	电子课件
17	集散控制系统	7-301-18131-7	周荣富 陶文英	36	2011	电子课件/习题答案
18	控制电机与特种电机及其控制系统	7-301-18260-4	孙冠群 于少娟	42	2011	电子课件/习题答案
19	电气信息类专业英语	7-301-19447-8	缪志农	40	2011	电子课件/习题答案
20	综合布线系统管理教程	7-301-16598-0	吴达金	39	2012	电子课件
21	供配电技术	7-301-16367-2	王玉华	49	2012	电子课件/习题答案
22	PLC 技术与应用(西门子版)	7-301-22529-5	丁金婷	32	2013	电子课件
23	电机、拖动与控制	7-301-22872-2	万芳瑛	34	2013	电子课件/答案
24	电气信息工程专业英语	7-301-22920-0	余兴波	26	2013	电子课件/译文
25	集散控制系统(第2版)	7-301-23081-7	刘翠玲	36	2013	电子课件, 2014年中国电子教育学会“全国电子信息类优秀教材”一等奖
26	工控组态软件及应用	7-301-23754-0	何坚强	49	2014	电子课件/答案
27	发电厂变电所电气部分(第2版)	7-301-23674-1	马永翔	48	2014	电子课件/答案
28	自动控制原理实验教程	7-301-25471-4	丁 红 贾玉瑛	29	2015	
29	自动控制原理(第2版)	7-301-25510-0	袁德成	35	2015	

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.cn](http://www.pup6.cn) 下载或在线阅读。

扑六知识网([www.pup6.com](http://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](http://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.cn](http://www.pup6.com.cn))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](mailto:pup6_czq@163.com), [szheng\\_pup6@163.com](mailto:szheng_pup6@163.com), 欢迎来电来信咨询。

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	4.6 思考题与作业 .....	119
1.1 系统、反馈与控制 .....	1	第 5 章 线性定常连续时间控制系统 的设计 .....	122
1.2 反馈控制系统举例 .....	4	5.1 控制问题的一般定义 .....	122
1.3 反馈及前馈控制原理 .....	7	5.2 S 域设计 .....	125
1.4 自动控制发展简史 .....	8	5.3 频率法设计串联超前校正 .....	128
1.5 本课程学习内容 .....	9	5.4 频率法设计串联滞后校正 .....	130
1.6 本章小结 .....	10	5.5 频率法设计串联滞后/超前校正 .....	132
1.7 思考题与作业 .....	10	5.6 反馈校正 .....	134
第 2 章 动态系统的数学描述 .....	12	5.7 本章小结 .....	138
2.1 数学模型 .....	12	5.8 思考题与作业 .....	138
2.2 时域数学描述 .....	13	第 6 章 离散时间控制系统分析 与设计 .....	141
2.3 S 域描述 .....	18	6.1 连续信号的离散时间表示 .....	141
2.4 频域描述 .....	21	6.2 Z 变换及其性质 .....	143
2.5 系统动态结构图 .....	25	6.3 动态系统的离散时间域表示 .....	150
2.6 自动控制系统的传递函数与梅逊 (Mason)公式 .....	32	6.4 Z 变换与拉普拉斯变换的关系 .....	155
2.7 模型转换 .....	37	6.5 线性定常离散控制系统的 Z 域 分析 .....	156
2.8 本章小结 .....	47	6.6 线性定常离散系统的数字校正 .....	160
2.9 思考题与作业 .....	47	6.7 本章小结 .....	162
第 3 章 经典的控制系统分析与 计算工具 .....	49	6.8 思考题与作业 .....	162
3.1 系统传递函数的零点与极点的计算 与时域分析 .....	49	第 7 章 非线性控制系统分析 .....	166
3.2 频域 Nyquist 方法 .....	57	7.1 非线性系统的特征 .....	166
3.3 频域 Bode 图方法 .....	62	7.2 相平面分析法 .....	168
3.4 根轨迹方法 .....	73	7.3 描述函数法 .....	176
3.5 本章小结 .....	84	7.4 李雅普诺夫函数法 .....	183
3.6 思考题与作业 .....	85	7.5 本章小结 .....	197
第 4 章 线性定常连续时间控制系统 的分析 .....	87	7.6 思考题与作业 .....	197
4.1 稳定性分析 .....	87	第 8 章 非线性控制系统设计 .....	200
4.2 鲁棒稳定性 .....	106	8.1 反馈线性化方法 .....	200
4.3 系统静态特性分析 .....	112	8.2 Back-stepping 方法 .....	209
4.4 系统动态特性分析 .....	116	8.3 滑动模态控制方法简介 .....	214
4.5 本章小结 .....	119	8.4 自适应控制方法简介 .....	218
		8.5 本章小结 .....	227



8.6 思考题与作业.....	228	A1 线性代数 .....	248
<b>第9章 应用最广泛的两类控制算法:</b>		A2 线性微分方程 .....	252
<b>PID 和 MPC .....</b>	<b>230</b>	A3 拉普拉斯变换 .....	254
9.1 PID 控制算法 .....	230	<b>附录 B MATLAB 编程与 Simulink 仿真</b>	
9.2 MPC 控制算法 .....	237	<b>简介 .....</b>	<b>259</b>
9.3 本章小结 .....	247	B1 MATLAB 编程基础 .....	259
9.4 思考题与作业.....	247	B2 Simulink 仿真方法简介 .....	263
<b>附录 A 控制系统分析与设计的数学</b>		<b>附录 C Z 变换表 .....</b>	<b>268</b>
<b>基础 .....</b>	<b>248</b>	<b>参考文献 .....</b>	<b>270</b>

# 第 1 章 绪 论

## 教学提示

自动控制技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。过去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。近年来,控制学科的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、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。自动控制理论的任务是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。作为现代的工程技术人员和科学工作者,都必须具备一定的自动控制理论知识。

## 教学要求

理解系统、反馈和控制的含义,掌握组成一个反馈控制系统各个部件的工作原理及在系统运作中所起的作用。注意发现自己身边存在的负反馈现象,能归纳抽象表达成用方块图表示的控制系统。

## 1.1 系统、反馈与控制

自从地球上有了人类,利用资源加工制造出各种各样的工具、机器或工厂,用于生产、再生产和消费,就一直是人类的主要活动之一。这些活动影响了环境,维系了人类社会的存在和发展。自然资源越用越少,生态环境越来越差,人类开始担忧,但令人类自豪的是我们已经在地球上建立了一个庞大的人造技术世界(物质)和生产技术(智慧)。看一看我们周边的世界,各类工程系统不断涌现,组成它们的相关机器、部件和工艺也越来越复杂。操作它们所需的反应时间、精细精密精准程度、劳动强度等要求已经远远超过了人自身的能力极限。要不断支持这样的技术进步,广泛深入地采用自动控制技术是我们唯一的选择。

自动控制有很强的应用背景,其发展动力源自于生产和消费需求的日益多样化。小到人追求舒适便捷的日常家用电器、空调、汽车等,大到满足探索、创造和交流欲望的航空航天、制造系统及因特网等,还有各种大型的、更为复杂的系统都需要控制。要学好和用好控制技术,需要掌握系统思想、数学基础、计算机技术。

### 1. 什么是系统

我们先从认识“系统”开始。“系统”一词的中文解释是“同类事物按一定关系组成的整体,侧重指结构完整”,英文“system”一词的解释是“A system is an arrangement

of physical components connected or related in such a way as to form and/or act an entire unit”。不同的行业对系统可能会赋予特定的含义，但至少有两部分(或称子系统)组成，且连接后能实现一个整体目标。两个子系统连接在一起的方式有三种：串联、并联和反馈，如图 1.1 所示。第一个子系统发生的变化影响第二个子系统的行为，反之不然，则为串联，如图 1.1(a)所示。两个子系统间互不直接关联，但影响外联的输入输出关系，则为并联，如图 1.1(b)所示。如果两个子系统间互相影响，它们的动态特性强烈相关耦合，则为反馈，如图 1.1(c)所示。在反馈连接方式中，由于互动作用，两个子系统间的因果关系分析变得困难，必须把它们作为一个整体加以考虑。两个子系统本身的动力学特性可能多种多样，组合后形成的反馈关系可能更加复杂，这是反馈控制理论至今充满魅力和诱惑的主要原因之一。

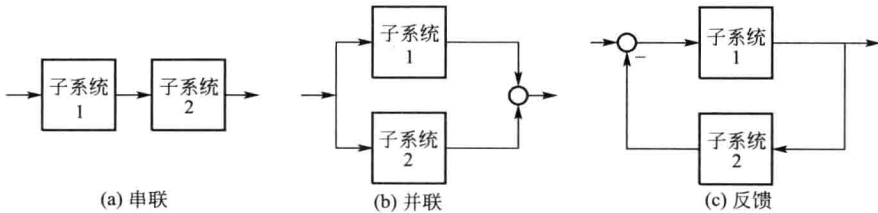


图 1.1 两个子系统连接的方式

## 2. 什么是反馈

对于反馈行为，人们并不陌生。看一看我们人体本身，借助于反馈维持着各种生态平衡。例如，人体细胞产生能量时需要血糖，而且生物机能总是试图维持定常的血糖浓度。在血液流中，通过胰腺产生胰岛素和胰增血糖素，调整血糖高低就是典型的反馈系统。餐后血糖可能增加，荷尔蒙胰岛素开始释放，引导身体在肝脏中储藏过量的血糖。当血糖降低时，胰腺开始分泌荷尔蒙胰岛素。每天胰岛素和胰增血糖素分泌间的互动，帮助维持每 100mL 血液中血糖含量在 90mg 左右。当然，对于糖尿病患者，由于分泌胰岛素的功能出现障碍，则须借助于外部注射胰岛素或药物来调节血液内的血糖浓度。

在工程中早期使用的反馈控制系统，一般认为是 1769 年出现的瓦特蒸汽机的调速器，它被用来控制蒸汽机的转速。瓦特蒸汽机调速系统如图 1.2 所示，其中机械装置用来测量

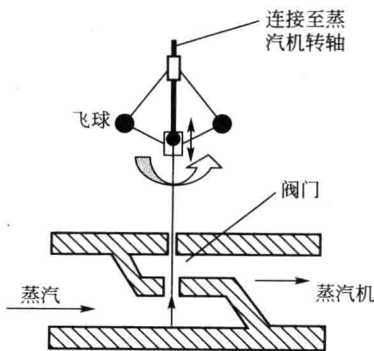


图 1.2 瓦特蒸汽机调速系统示意图

驱动杆的转速并利用飞球的转动来控制阀门，进而控制进入蒸汽机的蒸汽流量。当转速增大时，飞球离开轴线，重心上移，阀门被关紧，进入蒸汽机的蒸汽流量减少，蒸汽机的转速将减慢，速度得到了控制，反之亦然。

通过以上两个实例，我们总结一下反馈构成的三要素。

**感测变化：**及时掌握受控系统变化状态，如上例中的血糖浓度、蒸汽机转速。

**期望目标：**如 100ml 血液中血糖含量在 90mg 左右。

校正执行：根据偏差(期望的受控系统状态与其当前所处状态)产生校正作用，驱动受控系统从当前所处状态向期望状态靠近，如分泌或注入胰岛素等、进入蒸汽机的蒸汽流量。

### 3. 什么是控制

控制一词在不同的领域具有不同的含义。在《自动控制原理》一书中，控制是指在工程系统中使用反馈和算法。在电子放大器中的反馈回路、化学与材料加工中的定值调节器、飞机上的飞行电子控制仪、因特网上控制信息量的路由器协议、并联在减震板上的压电陶瓷线路、高信度软件系统、自主式车辆和机器人、实时资源管理系统、生物工程系统等，都可视为控制。控制是一门信息科学，涵盖了传统的模拟信息和现代的数字信息。

系统无处不在，本书主要学习的是控制系统。一个控制系统可以定义为“把一些物理部件连接或组合在一起实现命令或指挥或调节自身或其他一个系统的目的”。事实上，我们可以把任何一个物理目标视为一个控制系统，任何一件事或物都在主动或被动地影响着周边的事物。例如，图 1.3 所示的一块玻璃镜，它按照“反射角  $\alpha$  等于入射角  $\alpha$ ”的简单方程控制着照射在玻璃镜面上的一束光的走向。进一步假设，光源入射角不变，通过调整螺丝改变玻璃镜面与支撑面的夹角，则反射后的光束将按照我们的动作而变化，实现了简单的控制意图。

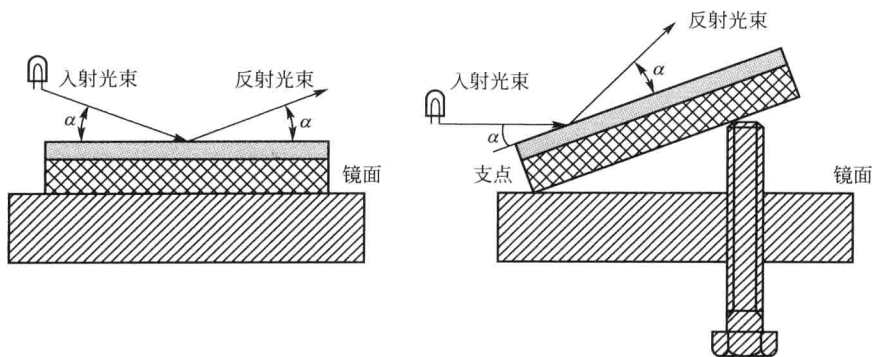


图 1.3 反射镜面

在工程和科学领域，所谓控制系统主要是指能动态、主动地实现调控功能的那些系统。其一般组成如图 1.4 所示。假设一个子系统是我们控制的对象，它可能是一个物理过程、化学反应、生物的新陈代谢等，在它们内部完成物质流或能量流的转换。另一个子系统是我们设计的控制器，它们也可能有能量流转换发生，但显著的是信息流。这三类流能和谐、持续共存，就达到了一个人造技术系统的设计目标。要让这些过程(流)按我们的旨意发展、变化，基于全局的、系统的思想，设计适当的控制规律至关重要。

通过以上分析可知，控制科学与技术至少与三门专业知识紧密相关：建模、计算机和运筹学。联系最为密切的是物理系统(受控过程)的建模，控制的建模要求更强调，通过：①输入输出关系表达系统的行为；②复杂模型简化或降阶；③子系统间不同连接方式的适应性评价，为控制系统分析和综合提供依据。计算机软硬件系统是现代控制系统得以完成从分析、综合、设计到付诸实施的手段和工具，更是反馈控制规律的实现载体。控制和扰动是一对孪生体，博弈的结果是某些指标的折中即优化。运筹学中包括线性规划、非线性

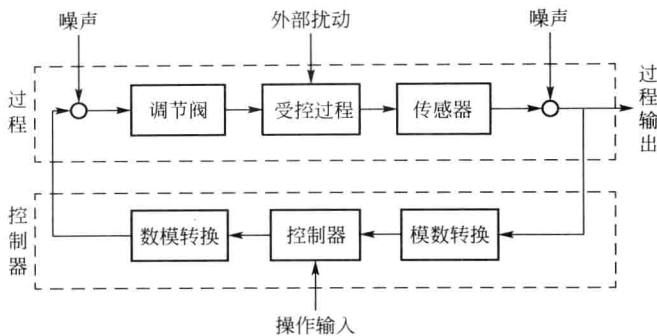


图 1.4 现代控制系统的一般组成

规划、整数规划、混合整数的线性规划等理论与软件都为最优控制问题的解在线实施提供了数学工具。

另外也要特别强调，一方面，要想在某个领域成为控制专家，了解和掌握这个领域的专业知识也非常必要。另一方面，控制系统除在人造技术系统内发挥关键作用外，在自然界也普遍存在，借鉴天然控制系统的机理，对发展和完善人造控制系统的性能也非常有益处。

## 1.2 反馈控制系统举例

### 1. 交通运输与航空航天的自动控制

交通信号控制出现在 1914 年的英国，现在的城市交通控制系统 (Urban Traffic Control System, UTCS) 主要是采集处理交叉口上下游的交通参数，预测车辆的到达图式和排队长度，确定交叉口合适的信号参数(周期、绿信比、相位差)等，给予不同进口方向车辆的时间分配通行权，从而实现交叉口车辆运行的安全、有序。随着智能交通系统 (Intelligent Transportation Systems, ITS) 在全世界的快速发展，先进的交通管理系统 (Advanced Traffic Management System, ATMS) 和先进的交通信息系统 (Advanced Traffic Information System, ATIS) 成为 ITS 重点发展的两大子系统。而交通信号控制系统和交通流疏导系统分别属于其中，交通信号控制系统在接近百年的发展过程中已趋于成熟，而交通流疏导系统则成为继交通信号控制系统后的重点发展领域。交通流疏导和交通控制的共同管理对象都是由人、车、路、环境构成的复杂时变的交通流，两个系统的共同管理目标都是为了实现路网交通流的畅通，提高安全性、舒适性。

除了城市内交通控制系统外，在高速公路上的车流量控制也是智能交通控制研究的另外一个重要分支。高速公路的建设总是赶不上车辆的持续增加，新建或扩建高速公路，投资巨大，周期长。解决车辆拥挤、提高运行效率的另一个途径就是通过全球卫星定位系统，采用类似火车车皮编组的方式，把装备自动驾驶和导航控制系统的车辆编成一列。现在已经具备了单车的自动驾驶技术，但驶入高速公路时的并道和到达目的地时的下道还需要驾驶员手工驾驶。一旦一辆车辆并道成功，加入了正在运行的车辆列，则由更高层次的区域控制站加以协同操作。世界各国的科学家正在从理论和工程基础、计算机模拟、现场

试验手段等多方位出发,探索建立这样一个智能化的庞大高速公路车流量控制系统。

在航空航天中最早的反馈控制出现在 20 世纪初期,即莱特兄弟首次实现的动力推动的飞机飞行。在莱特的飞行器上,安装了垂直的尾舵与前舵以及翘曲的机翼,这些简单的机械设计组合在一起,实现了飞行员可控制的飞机飞行。由于高空大气流处在不断地变化中,飞机平稳航行需要适应能力很强的稳定装置。现在,无人驾驶飞机、飞船登月、永久太空舱和航天飞机(飞船)对接、火星车着陆探索等都是人类征服自然的杰出成就,控制技术在这些伟大的工程中发挥着关键作用。

科学家已经解决了单体诸如汽车和飞机的自动控制问题,但在市区交通流量疏导、高速公路车辆协同操作、大机场飞机起降调度等方面,形成了多层次分散化的大系统,用目前成熟的技术还不能为它们提供解决方案,这些问题正在向控制工程师,特别是成长中的青年控制专家,提出许多新的挑战性问题。

## 2. 信息与网络控制系统

有了因特网,我们居住的这个大星球变成了“地球村”。我们来设想一下,你在北京,你的三个同学分别在沈阳、西安和广州,你们在网上同时请求一个设在美国纽约的服务器提供信息服务,内容可能是 MP3 音乐下载、数字图片传输、网上聊天等。你们的请求命令如何发出?路由器如何定向传输?远端服务器收到请求后的服务响应如何进行?当前安装在网络终端、路由和服务器的传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)为此提供支持。人们无法观察在 TCP 控制下、在网络上的信息流动,但当下载的速度减慢时,肯定会想到网络上访问的人太多,出现拥塞了,于是反馈控制自动开始工作。在他人的访问量减少时,你的下载又会变得快起来。其实,网络的控制涉及很多题目,包括拥塞控制、邮件路由控制、数据存储和动力管理等。与传统的控制相比,有一些显著的特征,例如,因特网系统的规模极大,大概是人类曾经建造的最大的反馈控制系统。另一个是控制问题的分散性,当某个终端的局部需求信息被快速发布到网络上传播时,在被远端接受的过程中,可能由于网络拥塞导致随机变化的滞后出现。我们知道,一个系统含有时变滞后,其稳定性条件更加复杂,因为关于网络状态信息和局部控制动作只能经过一定时间延迟后才能被感测或发挥影响,网络拓扑、传输通路特性、通信量需求、可利用资源等随时在发生不可预见的变化。还有控制设计必须适应网络通信的多样性统计特征和客户对服务质量的不同要求等。在这种环境里必须管理的资源包括计算、储存和在末端主机、路由器的输送能力。传输量、延迟、掉包率、公平性、可靠性,以及网络适应改变通行模式、资源可用量、网络阻塞等时的速度与品质等,都是评价网络性能指标。

## 3. 医学治疗过程的自动控制

生物医学过程是一个崭新的、自动控制理论应用相对薄弱的研究领域,专家预测有广阔的市场前景。在过去十多年,发明了许多新的生物执行器和传感器,对生物体运动规律的认识也不断加深,在医学治疗过程研究中,传统内置反馈控制系统已经逐渐被外置反馈控制技术所取代。主要研究动态有以下几种。

(1) 胰岛素自动给药控制。糖尿病已经严重危害人类的健康,全世界每年投入巨资研发药品和治疗患者。对于胰岛素依赖症者,通常的治疗策略是每天按时注射 3~4 次胰岛素(前馈控制算法),然后根据 3~8 次毛细血管血糖浓度检测值调整给药的剂量和间隔(反馈控制算法)。这样一个过程的自动控制问题,目前的主要技术障碍是找到能够在线自动检



测血糖浓度的传感器, 以及能进行皮下注射或静脉注射(两种手段各有其优缺点)的执行装置。对胰岛素如何降解血糖的机理和动态过程特性, 人类已经积累了相当的认识, 相关的控制策略研究也已完成计算机模拟和小批量临床试验。

(2) 临床麻醉过程的自动控制。在外科手术期间, 麻醉师是“控制算法”, 他要根据病人的肌肉松弛、痛觉和催眠状态(系统输出变量), 决定施加(静脉注射或外涂挥发麻醉)多少麻醉药物量或通风或肌肉迟缓剂参数(系统输入变量)等手段, 同时要保证病人始终处于生命可恢复的药理状态(约束条件)。在手术过程中, 操作不当产生的刺激和失血过多(外部扰动)都可能影响病人的麻醉程度, 因此实时调整非常必要。如果检测肌肉松弛、痛觉和催眠状态的传感器成熟可用, 则可以把外科手术的麻醉过程设置成自动控制状态。适度、适时的麻醉程度对减轻麻醉师的劳动强度、降低对患者健康的损伤、减少药品使用和缩短康复期等都有潜在的益处。

(3) 基于生物机理模型的疾病分析。例如, 在动物和人的微循环中, 改变血压将影响氧化氮的消耗。在血液循环过程中, 氧化氮的扩散和反应可以用一组复杂的非线性分布参数模型描述。利用这个模型以及实验数据, 在辨认和量化氧化氮在血液传递中遇到的各种阻力后, 分析这种阻力产生或传递失衡的原因就使相关疾病的诊断成为可能。

(4) 基于生物系统模型的计算机辅助制药。以新药研发过程为例, 据统计每种新药研发成本约 5 亿美元, 耗时 10~15 年。在发现可以作为候选药物研发的物质中, 只有不到 1% 的药物能最终进入市场, 60% 以上在临床试验前期的检验中被剔除, 剩下的约 80% 在临床试验后被淘汰。成本高有许多原因, 主要问题是在一个集成的生物体内, 如何评价单个生物化学途径调整后的影响, 目前还缺乏相关技术支持。现在一方面基因分析、蛋白质分析、高速扫描摄像, 以及组合化学等技术进步, 不断产生“海量”数据; 另一方面, 从这些数据中分析和发现有关疾病的技术则远远落后。把这些数据与生命体的某种生物功能联系在一起, 建立生物系统模型可能是最直接又经济的手段。同时, 这些模型在新药研发过程中的预测和指导能力、构造模型需要的时间和成本, 以及模型本身的时效性等问题又使科学工作者面临两难选择。

#### 4. 材料与加工领域的自动控制

自动控制技术应用最为成功也是最为广泛的领域应该是在材料与加工业, 每年有几百亿元的自动化仪表和装置在投入运行。一个现代大型石油化工生产厂的建设投资经费中, 自动化仪表和装置的投资费用一般要占到 1/3 左右。走进这样一个工厂的中央控制室, 你可能也会像看航天飞机发射升空的转播一样, 发出赞叹: 如此庞大的企业完全在计算机的控制之下。轻点一下鼠标, 成千上万个物理、化学参数的当前值和历史变化曲线就会呈现在小小的计算机屏幕上。轻按一下键盘, 一个按照获取市场利润最大原则而调整某种产品质量或产量的决策, 可能就通过计算机网络传送到现场的有关执行装置开始动作, 人与机器如此和谐。

现在我们每天的工作和生活几乎离不开计算机。组成计算机的核心是一个叫中央处理器的芯片(CPU), 想一想它是如何制造加工出来的? 最高级的工匠能用手工加工出来? 完全不可能。在一块几平方厘米的硅片上, 目前已经可以集成上亿个晶体管, 从设计开始到最终生产出晶片, 完全在专用的计算机软硬件系统支持下进行, 由于原理和工艺极其复杂, 设计自动化、加工自动化和管理自动化必须高度统一, 人的智慧得到充分展现。

材料与加工工业为我们的衣食住行提供了巨大的物质保障, 但企业在参与全球化竞争