



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
电子信息

自动控制原理

(第二版)

余成波 张莲 胡晓倩 主编

清华大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校教材

电子信息

自动控制原理

(第二版)

余成波 张莲 胡晓倩 主编

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍分析和设计反馈控制系统的经典理论和应用方法。全书共 8 章,内容包括自动控制系统的概念,自动控制系统的数学模型,自动控制系统的时域分析法、根轨迹法、频率特性法,控制系统的校正,非线性控制系统、离散控制系统的分析和综合应用等。在每章后面分别介绍了 MATLAB 在自动控制理论中的一些应用,以及如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。同时,各章均提供了一定数量的习题与 MATLAB 实验题,以帮助读者理解基本概念并掌握分析和设计方法。

本书可作为高等工科院校自动化及相关专业的教材,也可供从事自动化方面工作的科技人员学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/余成波,张莲,胡晓倩主编.—2版.—北京:清华大学出版社,2009.8
(高等学校教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-17950-4

I. 自… II. ①余… ②张… ③胡… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 092606 号

责任编辑:魏江江·李玮琪

责任校对:李建庄

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:28.25 字 数:699 千字

版 次:2009 年 8 月第 2 版 印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:027910-01

编审委员会成员

高等学校教材·电子信息

东南大学	王志功	教授
南京大学	王新龙	教授
南京航空航天大学	王成华	教授
解放军理工大学	邓元庆	教授
	刘景夏	副教授
上海大学	方 勇	教授
上海交通大学	朱 杰	教授
	何 晨	教授
华中科技大学	严国萍	教授
	朱定华	教授
武汉理工大学	刘复华	教授
	李中年	教授
宁波大学	蒋刚毅	教授
天津大学	王成山	教授
	郭维廉	教授
中国科学技术大学	王煦法	教授
	郭从良	教授
	徐佩霞	教授
苏州大学	赵鹤鸣	教授
山东大学	刘志军	教授
山东科技大学	郑永果	教授
东北师范大学	朱守正	教授
沈阳工业学院	张秉权	教授
长春大学	张丽英	教授
吉林大学	林 君	教授
湖南大学	何怡刚	教授
长沙理工大学	曾喆昭	教授
华南理工大学	冯久超	教授
西南交通大学	冯全源	教授
	金炜东	教授
重庆工学院	余成波	教授
重庆通信学院	曾凡鑫	教授

重庆大学	曾孝平	教授
重庆邮电学院	谢显中	教授
	张德民	教授
西安电子科技大学	彭启琮	教授
	樊昌信	教授
西北工业大学	何明一	教授
集美大学	迟岩	教授
云南大学	刘惟一	教授
东华大学	方建安	教授

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制定的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合新世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻

性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过二十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会
E-mail:dingl@tup.tsinghua.edu.cn

自动控制原理是在自动控制、电气工程、信息工程以及计算机技术学科发展基础上建立起来的一门理论与实践相结合的课程,是一门实践性很强的课程。与本书第一版相比,再版的内容有大量改动。在编写过程中,根据我国当前本学科领域课程设置与教学改革的实际情况,注意对传统的《自动控制原理》课程进行改革,进行适当选择和裁剪以形成本课程体系,突出自动控制系统作为一种特定的反馈系统其自身的特点和相应的分析设计方法,强调设计与综合能力的培养,在讲述分析方法的基础上介绍了相应的设计方法,以达到学生学以致用目的。尽力做到以注重素质培养和能力培养为目标,以加强基础和拓宽专业为原则,并考虑到教学条件和学生的基础的特点,使本书既能适应新世纪对人才培养的要求,又能切实应用于相关专业的教学之中。为此,本书在论述了自动控制原理的基本理论和方法后,还介绍了相应的 MATLAB 实现方法,给出了 MATLAB 实现必需的一些函数和编程及应用实例,使本书能够很好地做到理论联系实际,让读者对 MATLAB 在自动控制原理中的应用有一个感性的认识,书中按照各种理论来介绍 MATLAB 在该方面的应用,使所有的编程和应用实例都能找到理论根源,从而方便了读者对基本理论和方法的学习。同时,该教材配备了大量 MATLAB 例程,以提高读者的动手能力,读者不必把时间耗费在复杂的计算中,而是把精力集中到对概念、理论和方法的掌握上,从而突出了实践能力的培养,以提高读者运用计算机解决相关问题的能力,更有效地学习知识,培养创新素质。

本书由 8 章组成,主要由余成波、张莲、胡晓倩编写。全书由余成波教授统稿,徐霞、张睿、高云、李泉、龚智、胡柏栋、谢东坡、秦华峰、许超明、张方方、张冬梅等同志参加了本书的审核与编排工作。

再版书是在初版书的基础上改写的,并利用了初版书的部分材料;同时,得到重庆工学院的资助,在此一并向初版书的编著人员和学院有关领导表示衷心的感谢。

全书的错误和缺点由主编和全体编著者共同负责,欢迎广大的同行与读者提出宝贵意见。

编 者

2008 年 12 月

自动控制原理课程是高等工科大学电气信息类专业的一门重要的技术基础课程,其应用领域非常广泛,几乎遍及电类及非电类的各个工程技术学科。随着科学的进步,特别是近年来高集成度与高速数字技术的飞跃发展,新材料、新工艺和新器件的不断出现,使各技术学科领域和现代化工业的面貌发生了深刻和巨大的变化。当今科技革命的特征是以信息技术为核心,促使社会由电气化时代进入信息时代,并以知识密集产业作为主体产业。

在人类面临 21 世纪的新问题、新技术和新机遇的挑战所进行的教育改革中,加强素质培养,淡化专业,拓宽基础,促进各学科与专业的交叉与渗透业已成为不可逆转的世界潮流。为了适应我国社会主义现代化建设和以信息技术为核心的高新技术迅猛发展的需要,依据我国当前电气工程学科课程设置与教学改革的实际情况,在编写中,特别注意和“信号与系统”内容的衔接,避免不必要的重复。学习自动控制理论的目的主要在于应用。对于工科学生应当强调设计与综合能力的培养,特别是在学生已经有了“信号与系统”关于系统基本分析方法基础的情况下,更应如此。所以本书以设计为主线来讲述自动控制的基本理论。

本书主要的内容,也就是控制系统要解决的两个问题,即系统分析和系统设计。控制系统的分析和设计是两个互逆的研究过程,前者是从已知确定系统出发,分析计算系统所具有的性能指标,而后者则是根据要求的性能指标来确定系统应具备的结构模式。

系统分析是在描述系统数学模型基础上,用数学的方法来进行研究讨论的。因此,必须在规定的工作条件下,对已知系统进行以下步骤的工作:

- (1) 建立系统的数学模型;
- (2) 分析系统的性能,计算三大性能指标是否满足要求;
- (3) 讨论系统性能指标与系统结构、参数的关系。

系统设计的目的,是在给出被控对象及其技术指标要求的情况下,寻找一个能够完成既定控制任务,满足所要求技术指标的自动控制系统。而在控制系统的主要元件和结构形式确定的前提下,设计任务往往是需要改变系统的某些参数或加入某种装置(有时还需要改变系统的结构),使其满足要求的性能指标。这种附加的装置称为校正装置,这个过程称为对系统进行校正。

本书的内容安排如下:

第1~5章讲述自动控制系统的基本概念、自动控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率特性法,属于控制系统分析部分;第6章介绍控制系统的校正方法,属于控制系统设计方法部分;在学习了连续时间控制系统的各种分析设计方法之后,再在第7章讲述非线性控制系统;第8章讨论离散控制系统的分析和综合等。另外在书中还介绍了MATLAB在自动控制理论中的一些应用,及如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。

全书由余成波统稿,参加编写的有张莲、邓力(第1、2、3章),徐霞(第4章),胡晓倩(第5、6章、附录),余成波、李恭琼(第7、8章)。陶红艳同志参加了本书审核与编排工作。

本书在编写过程中,许多兄弟院校的同行为本书的编写提出了许多宝贵意见并提供了帮助。在此,一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有错误和不当之处,敬请同行与读者给予批评与指正。

编 者

2004年7月

相关课程教材推荐

ISBN	书 名	定价(元)
9787302169444	电路分析基础教程与实验	26.00
9787302160670	电子技术	34.00
9787302163688	模拟电子技术教程与实验	24.00
9787302154334	数字信号处理及 MATLAB 实现(第二版)	23.00
9787302156758	电子技术工艺基础	25.00
9787302146902	信号与系统(第二版)	34.00
9787302144151	模拟电路基础	24.00
9787302144137	Protel 99SE 原理图和印制板设计	19.00
9787302132042	数字信号处理——原理与算法实现	23.50
9787302118503	电气工程专业英语实用教程	23.00
9787302117698	电子设计自动化技术及应用	46.00
9787302104407	数字设计基础与应用	29.00
9787302090724	数字电路与逻辑设计	24.00

以上教材样书可以免费赠送给授课教师,如果需要,请发电子邮件与我们联系。

教学资源支持

敬爱的教师:

感谢您一直以来对清华版计算机教材的支持和爱护。为了配合本课程的教学需要,本教材配有配套的电子教案(素材),有需求的教师可以与我们的联系,我们将向使用本教材进行教学的教师免费赠送电子教案(素材),希望有助于教学活动的开展。

相关信息请拨打电话 010-62776969 或发送电子邮件至 weijj@tup.tsinghua.edu.cn 咨询,也可以到清华大学出版社主页(<http://www.tup.com.cn> 或 <http://www.tup.tsinghua.edu.cn>)上查询和下载。

如果您在使用本教材的过程中遇到了什么问题,或者有相关教材出版计划,也请您发邮件或来信告诉我们,以便我们更好为您服务。

地址:北京市海淀区双清路学研大厦 A 座 708 计算机与信息分社魏江江 收
邮编:100084 电子邮件:weijj@tup.tsinghua.edu.cn
电话:010-62770175-4604 邮购电话:010-62786544

第 1 章 控制系统的基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 开环控制系统与闭环控制系统	2
1.2.1 开环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统	3
1.3 自动控制系统的组成	4
1.3.1 基本组成部分	4
1.3.2 自动控制系统中常用的名词术语	5
1.4 自动控制系统的分类	6
1.4.1 按输入信号的特点分类	6
1.4.2 按描述系统的动态方程分类	7
1.4.3 按系统的参数是否随时间而变化分类	7
1.4.4 按信号的传递是否连续分类	7
1.5 自动控制系统的实例	8
1.5.1 炉温控制系统	8
1.5.2 导弹发射架方位控制系统	9
1.5.3 计算机控制系统	10
1.6 自动控制理论发展简史	10
1.7 对自动控制系统的基本要求	12
习题	14
第 2 章 自动控制系统的数学模型	16
2.1 控制系统微分方程的建立	17
2.1.1 机械系统	17
2.1.2 电系统——RLC 串联网路	18
2.1.3 机电系统	19
2.2 非线性系统微分方程的线性化	20

2.2.1	小偏差线性化的概念	20
2.2.2	非线性系统(元件)线性化处理举例	21
2.2.3	系统线性化的条件及步骤	23
2.3	传递函数	24
2.3.1	传递函数的定义和性质	24
2.3.2	用复数阻抗法求电网络的传递函数	27
2.3.3	典型环节及其传递函数	30
2.4	控制系统的结构图及其等效变换	35
2.4.1	结构图的基本概念	35
2.4.2	结构图的组成	35
2.4.3	结构图的建立	36
2.4.4	结构图的等效变换	37
2.5	自动控制系统的传递函数	43
2.5.1	系统的开环传递函数	43
2.5.2	闭环系统的传递函数	44
2.5.3	闭环系统的偏差传递函数	45
2.6	信号流图	46
2.6.1	信号流图的基本要素	46
2.6.2	信号流图的常用术语	46
2.6.3	信号流图的性质	47
2.6.4	信号流图的等效变换法则	47
2.6.5	梅逊(Mason)公式	49
2.7	脉冲响应函数	51
2.8	控制系统数学模型的 MATLAB 实现	51
2.8.1	MATLAB 简介	51
2.8.2	控制系统的数学模型	53
2.8.3	应用举例	55
	习题	57
	MATLAB 实验	61
第 3 章	控制系统的时域分析法	63
3.1	典型输入信号和时域性能指标	63
3.1.1	典型输入信号	63
3.1.2	动态过程与稳态过程	66
3.1.3	时域性能指标	66
3.2	一阶系统的动态性能	68
3.2.1	一阶系统的时域数学模型	68
3.2.2	一阶系统的重要特性	71
3.3	二阶系统的动态性能	72

3.3.1	数学模型的标准式	72
3.3.2	典型二阶系统的单位阶跃响应	73
3.3.3	典型二阶系统动态性能指标	76
3.3.4	二阶系统性能的改善	80
3.4	高阶系统的动态性能	83
3.4.1	三阶系统的单位阶跃响应	83
3.4.2	高阶系统的数学模型	84
3.4.3	高阶系统的单位阶跃响应	85
3.4.4	高阶系统的分析方法	86
3.5	稳定性和代数稳定判据	87
3.5.1	稳定的概念	88
3.5.2	线性定常系统稳定的充分必要条件	88
3.5.3	劳斯稳定判据	89
3.5.4	劳斯稳定判据的应用	90
3.6	系统稳态误差分析	94
3.6.1	误差与稳态误差的定义	95
3.6.2	控制系统的型别	96
3.6.3	给定输入下的稳态误差	97
3.6.4	扰动作用下的稳态误差	99
3.6.5	改善系统稳态精度的方法	101
3.7	控制系统时域分析的 MATLAB 应用	102
3.7.1	基于 Toolbox 工具箱的时域分析	102
3.7.2	Simulink	105
	习题	109
	MATLAB 实验	111
第 4 章	根轨迹法	113
4.1	根轨迹的基本概念	113
4.1.1	根轨迹概念	113
4.1.2	根轨迹方程	115
4.2	绘制根轨迹图的基本规则	116
4.3	控制系统根轨迹的绘制	126
4.3.1	单回路负反馈系统的根轨迹	127
4.3.2	参数根轨迹	131
4.3.3	多回路系统的根轨迹	133
4.3.4	正反馈系统的根轨迹	135
4.3.5	滞后系统的根轨迹	137
4.4	控制系统的根轨迹分析	139
4.4.1	闭环零、极点和时间响应	140

4.4.2	增加开环零、极点对根轨迹和系统性能的影响	144
4.4.3	条件稳定系统的分析	146
4.5	应用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	147
4.5.1	绘制根轨迹的相关函数	147
4.5.2	利用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	147
习题	150
MATLAB 实验	152
第 5 章	频率特性法	154
5.1	频率特性的基本概念	155
5.1.1	频率响应	155
5.1.2	频率特性	156
5.1.3	由传递函数求取频率特性	158
5.1.4	常用频率特性曲线	160
5.2	幅相频率特性及其绘制	160
5.2.1	幅相频率特性曲线(奈氏图)基本概念	160
5.2.2	典型环节的幅相频率特性	161
5.2.3	开环奈氏图的绘制	167
5.3	对数频率特性及其绘制	173
5.3.1	对数频率特性曲线基本概念	173
5.3.2	典型环节的伯德图	175
5.3.3	开环伯德图的绘制	183
5.3.4	最小相位系统	186
5.3.5	由实测伯德图求传递函数	187
5.4	奈奎斯特稳定判据	189
5.4.1	幅角原理	189
5.4.2	奈奎斯特稳定判据	190
5.4.3	简化奈奎斯特稳定判据	195
5.4.4	奈奎斯特稳定判据在伯德图上的应用	198
5.4.5	奈奎斯特稳定判据的其他应用	200
5.5	控制系统的相对稳定性	201
5.5.1	幅值穿越频率 ω_c 与相位穿越频率 ω_g	202
5.5.2	相位裕量	203
5.5.3	幅值裕量	203
5.5.4	系统的稳定裕量	204
5.6	利用开环频率特性分析系统的性能	205
5.6.1	开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 低频段与系统性能的关系	205
5.6.2	开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 中频段与系统动态性能的关系	207
5.6.3	开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 高频段与系统性能的关系	213

5.7	闭环系统频率特性	214
5.7.1	闭环频域指标	214
5.7.2	闭环频率特性的求取	216
5.7.3	闭环频域指标与时域指标的关系	223
5.8	MATLAB 在频率特性法中的应用	225
5.8.1	奈氏图的绘制	225
5.8.2	伯德图的绘制	226
5.8.3	尼柯尔斯图的绘制	228
	习题	229
	MATLAB 实验	232
第 6 章	控制系统的校正	234
6.1	控制系统校正的基本概念	234
6.1.1	控制系统的性能指标	234
6.1.2	校正的一般概念与基本方法	235
6.1.3	频率法校正	237
6.1.4	其他设计方法	238
6.2	控制系统的基本控制规律	238
6.2.1	基本控制规律	238
6.2.2	比例-微分控制	240
6.2.3	比例-积分控制	241
6.2.4	比例-积分-微分控制	242
6.3	超前校正装置及其参数的确定	243
6.3.1	相位超前校正装置及其特性	243
6.3.2	系统超前校正的分析法设计	246
6.3.3	小结	249
6.4	滞后校正装置及其参数的确定	250
6.4.1	相位滞后校正装置及其特性	250
6.4.2	串联滞后校正装置的分析法设计	254
6.4.3	小结	257
6.5	滞后-超前校正装置及其参数的确定	257
6.5.1	相位滞后-超前校正装置及其特性	257
6.5.2	系统滞后-超前校正的分析法设计	260
6.5.3	小结	263
6.6	期望对数频率特性设计法	265
6.6.1	期望法设计的基本概念	265
6.6.2	常见系统的期望特性	266
6.6.3	应用实例	269
6.6.4	小结	273

6.7	基于根轨迹法的串联校正	274
6.7.1	根轨迹法校正的基本概念	274
6.7.2	利用根轨迹法设计超前校正装置	276
6.7.3	利用根轨迹法设计滞后校正装置	278
6.7.4	利用根轨迹法设计滞后-超前校正装置	281
6.8	反馈校正装置及其参数的确定	282
6.8.1	反馈校正的基本概念	282
6.8.2	反馈校正的设计方法	284
6.8.3	常用反馈校正形式与功能	288
6.8.4	小结	290
6.9	控制系统校正的 MATLAB 应用	291
6.9.1	MATLAB 函数在控制系统校正中的应用	291
6.9.2	基于 Simulink 的系统校正	293
	习题	295
	MATLAB 实验	297
第 7 章	非线性控制系统	298
7.1	非线性系统的基本概念	298
7.1.1	非线性系统的数学描述	298
7.1.2	非线性特性的分类	299
7.1.3	非线性系统的特点	302
7.1.4	非线性系统的分析和设计方法	303
7.2	二阶线性和非线性系统的相平面分析	303
7.2.1	相平面、相轨迹和平衡点	303
7.2.2	二阶线性系统的特征	305
7.2.3	二阶非线性系统的特征	307
7.3	非线性系统的相平面分析	310
7.3.1	绘制相轨迹的方法	310
7.3.2	相轨迹求系统暂态响应	314
7.3.3	相轨迹分析非线性系统	315
7.4	非线性特性的一种线性近似表示——描述函数	321
7.4.1	描述函数的意义	322
7.4.2	典型非线性特性的描述函数	323
7.4.3	非线性系统的描述函数分析	330
7.5	非线性环节的串并联及系统的变换	335
7.5.1	系统线性部分的变换与集中	335
7.5.2	非线性环节串联的特性	336
7.5.3	非线性环节并联的特性	337
7.6	利用非线性特性改善线性系统的性能	338