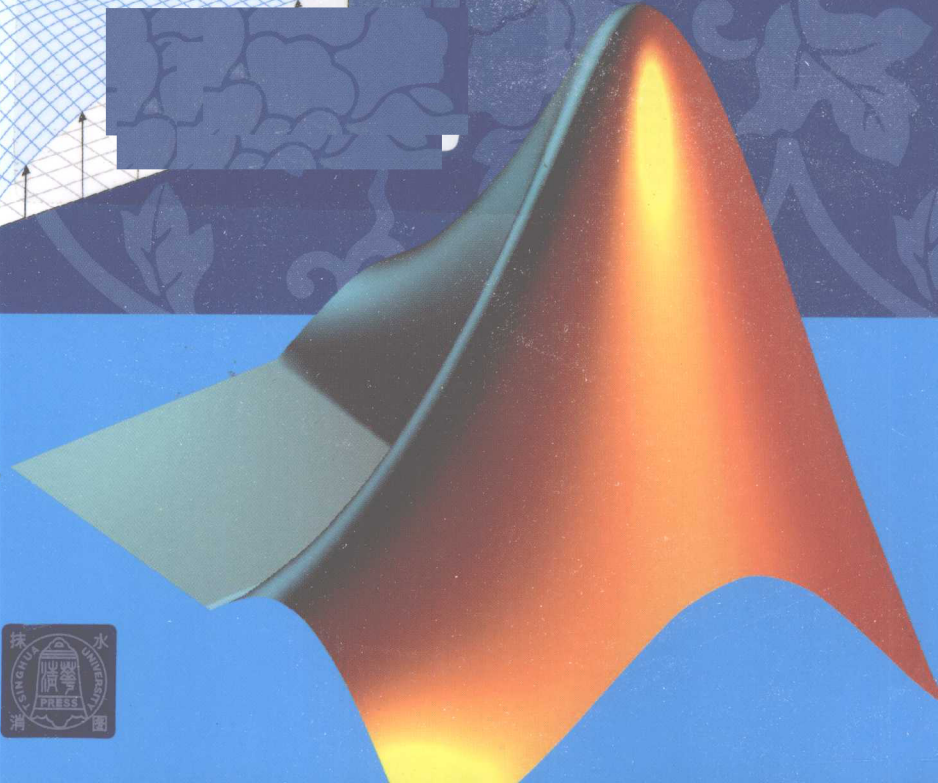
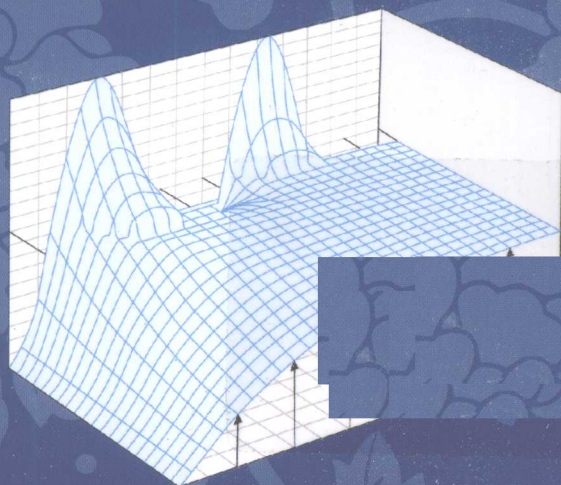


控制工程基础

郁凯元
编著



清华大学出版社



内容简介

控制工程基础

郁凯元 编著

本书可作为高等院校自动化专业及相关专业的教材，也可供从事控制工程工作的工程技术人员参考。

清华大学出版社



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍以工程为主要应用对象的经典(自动)控制理论的基础问题。全书共12章,内容包括:概论;系统的数学模型和数学工具(拉普拉斯变换);时域响应法;反馈控制系统的特性和性能;稳态误差和误差积分;稳定性概念及代数稳定判据;根轨迹法;频率响应法;反馈控制系统的校正;计算机控制系统;非线性控制系统;MATLAB软件及其在控制工程中的应用等。

本书力求做到:内容叙述、公式推导详尽,以便于自学;着重基本概念和方法;公式推导既做到严谨,又略去某些不必要的、繁杂的纯数学过程;选用控制系统在现代高科技中应用的实例。书中不仅介绍了经典控制理论的发展简史,而且介绍了经典控制理论的著作、教材和课程的发展简史,并对为自动控制理论做出重要贡献的历史人物作适当简介。

本书可供机械工程专业、仪器仪表、能源动力、冶金、交通运输、农业工程类等专业的本科、成教、函授学生作为教材,也可作为控制、电子、信息类有关专业的教学参考书,并可用作对控制工程、控制理论感兴趣的工程技术人员或其他读者的自学教材或参考书。

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

控制工程基础/郁凯元编著. —北京:清华大学出版社,2010.5

ISBN 978-7-302-21872-2

I. ①控… II. ①郁… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012374 号

责任编辑:陈志辉 刘佩伟

责任校对:焦丽丽

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 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:31.5 字 数:758千字

版 次:2010年5月第1版 印 次:2010年5月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:43.50元

产品编号:014368-01

“控制工程基础”主要介绍以工程为主要应用对象的经典(自动)控制理论的基础问题。经典控制理论主要研究单变量的反馈控制问题,所谓反馈控制指的是用检测误差来“自动”消除误差的闭环控制原理或装置。反馈(即闭环)控制原理在工程等领域得到广泛应用,在自然界和人类社会也有普遍意义。

反馈控制原理似可追溯到动物和原始人类捕猎时的本能,眼睛检测猎物—反馈到大脑—控制追捕的方向和速度。反馈控制原理的早期实践应用已很久远,在荷兰物理学家惠更斯 1673 年发明的风车离心调速器的基础上,英国发明家瓦特 1788 年发明的控制蒸汽机速度的飞球调节器是最著名的早期应用于工业过程的反馈控制装置。研究解决蒸汽机速度飞球调节器的稳定性问题,促使经典控制理论的诞生。

1868 年英国科学家麦克斯韦发表“论调速器”的论文。文中应用数学模型和数学工具进行飞球调节器稳定性问题的探索,这可标志为自动控制理论的诞生。

无意识的反馈控制原理实际应用可追溯到公元前。1927 年美国电气工程师布莱克在改进长途通讯用信号放大器时发明负反馈放大器,这是反馈控制从无意识应用到自觉应用的转折。

负反馈放大器稳定性问题的研究促进了控制理论的进一步发展。在研究解决负反馈放大器稳定性问题时,瑞典裔美国电气工程师奈奎斯特提出根据系统开环频率特性来确定闭环稳定性的简便分析方法,后人称之为奈奎斯特稳定判据;频率特性的伯德图法也是伯德在研究解决负反馈放大器稳定性问题时产生的。

19 世纪 20 年代初~40 年代末,经典控制理论得到迅速发展。三十年间美国、苏联、德国等发表了一系列相关论文,产生了经典控制理论两大支柱的频率法和根轨迹法。在第二次世界大战期间,德国的空中优势和英国的防御地位,迫使美国、英国和西欧各国科学家集中精力解决防空火控系统(高射炮等)和飞机自动导航系统等军事技术问题,设计出各种自动调节装置,解决这些问题的需求刺激了经典控制理论的发展。20 世纪 40 年代末,经典控制理论基本形成。

美国麻省理工学院出版社 1943 年出版了 A. C. 霍尔的著作《线性伺服机构的分析和综合》;同年,德国 R. 奥尔登堡和 H. 赛多利斯的著作《动态自动调节》出版,马上就有了英俄译本。“二战”后由于战时出版禁令的解除,出现了系统阐述经典控制理论的著作,如 1945 年美国电信工程师 L. A. 麦科尔发表第一本关于经典控制理论的专著《伺服机构的基本理论》,1947 年美国麻省理工学院的物理学家 H. M. 詹姆斯、电信工程师 N. B. 尼柯尔斯和数学家 R. S. 菲利普斯合著的《伺服机构理论》正式出版。

美国麻省理工学院、普渡大学、加州理工学院等大学,在“二战”中就已开始讲授伺服机构理论的课程。从20世纪40年代末开始,美国和西欧的一些大学工科专业的大学生和研究生普遍开设该课程,而在苏联的工业大学里则开设自动调节理论的课程。在美国,经典控制理论原称为伺服机构理论,在苏联和德国,则称为自动调节理论。

我国解放前交通大学张钟俊教授就已开设有关控制理论的课程,解放初清华大学钟士模教授也在有关课程中讲授控制理论。但控制理论正式开课是在1954年以后,1954年秋刘豹开始为天津大学化工系各专业开设“化工测量仪表与自动调节”课程,1956秋则为天津大学精密仪器系开始讲授“自动控制原理”课程。

我国最早的自动控制理论专著是刘豹的《自动控制原理》,1954年出版;同年,苏联麦耶罗夫著,王众讷译的《电机自动调整原理》出版(原版1952年),这是我国最早的自动控制方面的译著。1957年则出版了苏联B. B. 索洛多夫尼柯夫主编,王众讷译的《自动调整原理》(原版1954年);1963年刘豹的《自动调节理论基础》出版。介绍经典控制理论的课程名和书名“自动控制原理”,被广泛沿用至今。

1967年美国R. C. 多尔夫(Dorf)的《现代控制系统》出版,书中除包括经典控制理论外还包括现代控制理论内容;该书的第八版(作者增加R. H. 毕晓普)由谢红卫和邹逢兴等翻译,2001年国内出版;该书第九和第十版英文影印版分别于2002和2005年在我国出版。从1999年秋开始至2004年春,本人曾应用该原版教材为5届本科生进行控制工程基础课程双语教学。这是一本非常优秀的控制理论教材,书中的很多高科技应用实例把控制系统与高科技紧密联系起来,具有现代气息,成为其鲜明特色。据称该书为世界上400多所高校所采用。

1970年日裔美国明尼苏达大学教授绪方胜彦(Katsuhiko Ogata)的《现代控制工程》出版,同样该书除经典控制理论外,还包括现代控制理论内容;卢伯英等翻译的译著1976年在国内出版,其第二版译著(繁体)1993年在中国台湾出版;第三版和第四版译著分别于2000年和2003年在国内出版;第四版的英文版2006年在国内出版。这也是一本非常优秀的控制理论教材。

1978—1979年开始,控制技术成为全国各重点院校机械类专业必修的专业基础课。20世纪80年代,适合机械类本科专业的控制技术教材纷纷出版,主要有:1980年上海交大王显正、范崇讷《控制理论基础》,1982年清华大学张伯鹏《控制工程基础》,1984年华中工学院杨叔子、杨克冲《机械工程控制基础》,1986年西安交大阳含和《机械控制工程(上册)》等。“控制工程基础”课程和书名被沿用至今,本书也继续沿用。

本书的目标是充分继承国内外优秀教材,特别是多尔夫和毕晓普的“现代控制系统”以及绪方胜彦的“现代控制工程”已有成果,既博采众长又有自身特色,争取写成一本适合国内机械类、仪器仪表、能源动力、冶金、交通运输、农业工程类等及其他非控制和非电类专业的,介绍经典控制理论基础内容的教材。本书力求做到:

1. 内容叙述、公式推导力求详尽,以便于自学;
2. 着重基本概念和方法,略去某些不必要的、繁杂的数学推导;
3. 选用多尔夫和毕晓普“现代控制系统”书中现代高科技应用实例;
4. 书中包含了本人参与的科研项目的成果;
5. 不仅介绍经典控制理论的发展简史,而且介绍经典控制理论的著作、教材和课程的

发展简史,同时对为自动控制理论做出重要贡献的历史人物作适当简介。

本书是在清华大学出版社的激励下写成的,原定一年半完成的书,竟写了五年半,在此要深切感谢出版社的支持和理解。本书编写过程中曾得到天津大学刘豹教授和大连理工大学王众讷院士的指教,在此深表谢意。也要衷心感谢我的妻子欧华莹女士,没有她多方面的支持,这本书是难以完成的。

本人涉“控”不深、水平有限,书中错误不足不可避免。衷心希望读者们不吝赐教,欢迎并衷心感谢宝贵意见和批评建议。

郁凯元

2009年7月

第 1 章 概论	1
1.1 反馈控制的基本概念	1
1.2 经典控制理论发展简史	3
1.3 自动控制系统的应用	6
1.3.1 电炉的温度控制	6
1.3.2 液面的反馈闭环控制	7
1.3.3 汽车驾驶的闭环控制原理	7
1.3.4 自动高射炮的随动系统	8
1.3.5 数字控制机床	9
1.3.6 计算机硬盘驱动器读写磁头位置控制	11
1.3.7 半导体晶圆检查仪三轴位置反馈计算机控制	11
1.3.8 汽轮发电机协调控制	12
1.3.9 力反馈控制的灵巧机器人	13
1.3.10 机器人	13
1.3.11 糖尿病人血糖的胰岛素注射控制	14
1.3.12 国民收入的反馈控制	15
1.4 控制系统的分类	15
1.4.1 开环和闭环控制系统	16
1.4.2 伺服、过程、自动调节、程序控制系统	16
1.4.3 线性和非线性控制系统	17
1.4.4 定常(时不变)和时变控制系统	17
1.4.5 单变量和多变量控制系统	17
1.4.6 连续和离散控制系统	18
1.4.7 集中参数和分布参数控制系统	18
1.4.8 确定性和随机控制系统	18
1.5 控制系统的两种基本状态和基本性能要求	19
1.5.1 控制系统的两种基本状态	19
1.5.2 控制系统的基本性能要求	20
1.6 自动控制理论的进一步发展	20

1.6.1	经典控制理论的局限性	21
1.6.2	现代控制理论	21
1.6.3	大系统理论	22
1.6.4	智能控制理论	22
习题		22
第2章	系统的数学模型和数学工具	25
2.1	引言	25
2.2	物理系统的微分方程	26
2.2.1	机械系统的机理建模	26
2.2.2	电气系统的机理建模	29
2.2.3	电子系统的机理建模	31
2.2.4	流体系统数学模型(非线性)	33
2.3	非线性系统模型的线性近似	35
2.3.1	线性和非线性系统的基本概念	35
2.3.2	非线性模型线性近似的原理	35
2.3.3	非线性系统模型的线性近似实例	37
2.3.4	分析非线性系统特性方法简介	39
2.4	拉普拉斯变换	39
2.4.1	拉普拉斯变换和反变换的定义	39
2.4.2	简单函数的拉普拉斯变换公式	40
2.4.3	拉普拉斯变换的性质	43
2.4.4	拉普拉斯反变换	48
2.4.5	应用拉普拉斯变换解常系数线性微分方程	53
2.5	线性定常系统的传递函数模型	57
2.5.1	传递函数的定义	57
2.5.2	由微分方程建立传递函数	57
2.5.3	典型环节的传递函数	60
2.6	框图模型	66
2.6.1	框图建立	67
2.6.2	框图变换	70
2.6.3	框图简化实例	72
2.6.4	单回路闭环系统的传递函数	73
2.7	信号流图模型及梅森增益公式	78
2.7.1	信号流图的术语	78
2.7.2	梅森增益公式	79
2.7.3	应用梅森公式求系统传递函数的实例	80
2.8	控制系统计算机仿真概述	84
2.9	小结	84

习题	85
第 3 章 时域响应法	92
3.1 典型试验输入信号	92
3.1.1 阶跃函数	92
3.1.2 速度(斜坡)函数	93
3.1.3 加速度(抛物线)函数	93
3.1.4 脉冲函数	94
3.1.5 正弦函数	94
3.2 一阶系统的瞬态响应及关于输入信号微分或积分的输出响应的原理	95
3.2.1 一阶系统单位阶跃响应	95
3.2.2 线性定常系统输入信号微分或积分的输出响应的原理	97
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	97
3.2.4 一阶系统的单位脉冲响应	99
3.3 二阶系统瞬态响应概述	99
3.4 二阶系统的单位阶跃响应	100
3.4.1 欠阻尼单位阶跃响应($0 < \zeta < 1$)	101
3.4.2 临界阻尼单位阶跃响应($\zeta = 1$)	101
3.4.3 过阻尼单位阶跃响应($\zeta > 1$)	103
3.4.4 无阻尼(零阻尼)单位阶跃响应($\zeta = 0$)	104
3.4.5 负阻尼单位阶跃响应($\zeta < 0$)	104
3.5 二阶系统的单位脉冲响应	106
3.5.1 欠阻尼单位脉冲响应($0 < \zeta < 1$)	106
3.5.2 临界阻尼单位脉冲响应($\zeta = 1$)	107
3.5.3 过阻尼单位脉冲响应($\zeta > 1$)	107
3.6 二阶系统的单位斜坡响应	107
3.6.1 欠阻尼单位斜坡响应($0 < \zeta < 1$)	108
3.6.2 临界阻尼单位斜坡响应($\zeta = 1$)	108
3.6.3 过阻尼单位斜坡响应($\zeta > 1$)	108
3.7 二阶系统瞬态响应总结	110
3.8 控制系统时域响应性能指标	112
3.8.1 典型的控制系统单位阶跃响应曲线	112
3.8.2 控制系统时域响应性能指标的定义	113
3.9 二阶欠阻尼系统时域响应性能指标	113
3.9.1 二阶欠阻尼系统时域响应性能指标计算	113
3.9.2 固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 对二阶系统阶跃响应的影响	116
3.10 第三极点和零点对二阶系统瞬态响应的影响	118
3.10.1 第三极点对二阶系统瞬态响应的影响	118
3.10.2 零点对二阶系统瞬态响应的影响	118

3.11	闭环特征根在 s 平面中的位置对瞬态响应影响	121
3.12	高阶系统的瞬态响应, 偶极子和主导极点	122
3.13	小结	124
	习题	124
第 4 章	反馈控制系统的特性和性能以及稳态误差和误差积分	128
4.1	反馈控制系统的特性和性能概述	128
4.1.1	反馈控制系统的特性——开环和闭环控制系统比较	128
4.1.2	反馈控制系统性能的评价	129
4.2	利用反馈控制降低系统对参数变化的灵敏度	129
4.2.1	特性变化对输出的影响——开环、闭环控制系统比较	130
4.2.2	灵敏度——参数变化对控制系统特性影响的度量	130
4.3	利用反馈控制改善系统的快速性和稳定性	132
4.3.1	利用输出的反馈减小一阶系统的时间常数	133
4.3.2	利用输出的微分正反馈减小一阶系统时间常数	135
4.3.3	利用输出的微分负反馈提高二阶系统阻尼比	135
4.4	利用反馈控制抑制扰动对系统输出的影响	137
4.4.1	前向通路内的扰动	137
4.4.2	反馈通路内的扰动	139
4.4.3	输出节点上的扰动	139
4.4.4	输入端的扰动	141
4.5	利用反馈控制减小稳态误差	141
4.5.1	开环系统的稳态误差	141
4.5.2	反馈控制减小稳态误差的原理	142
4.6	反馈控制系统的稳态误差计算	143
4.6.1	影响闭环控制系统误差的因素	143
4.6.2	系统类型	144
4.6.3	稳态误差计算	144
4.7	误差积分性能指标	150
4.7.1	误差积分性能指标的概念	150
4.7.2	各种误差积分性能指标	151
4.7.3	各种误差积分性能指标的比较	152
4.7.4	最优控制系统	154
4.8	反馈控制的代价	158
4.9	小结	158
	习题	159
第 5 章	稳定性概念及代数稳定判据	164
5.1	稳定性概念	164

5.2	稳定的必要条件	166
5.3	劳斯稳定判据	167
5.3.1	劳斯阵列	167
5.3.2	劳斯判据	168
5.3.3	应用劳斯稳定性判据的若干重要情况	168
5.3.4	劳斯稳定判据工程应用实例	173
5.4	应用劳斯判据确定特征根位置和相对稳定性	174
5.5	小结	175
	习题	175
第 6 章	根轨迹法	178
6.1	引言	178
6.2	根轨迹概念	178
6.3	根轨迹的性质及绘制根轨迹的步骤	183
6.3.1	特征方程的基本形式	183
6.3.2	根轨迹的性质	183
6.3.3	绘制根轨迹的步骤	199
6.4	根轨迹法在控制系统分析设计中的应用实例	202
6.4.1	直流电动机控制自平衡秤的参数设计	203
6.4.2	汽车车身焊头控制系统参数设计	206
6.5	小结	209
	习题	213
第 7 章	频率响应法(一)频率响应和频率特性以及闭环频率特性分析	215
7.1	频率响应和频率特性的概念	215
7.1.1	频率响应的概念	215
7.1.2	频率特性的概念	216
7.2	频率特性的极坐标图——奈奎斯特图,最小相位系统	219
7.2.1	频率特性极坐标图画法	219
7.2.2	典型环节的极坐标图	222
7.2.3	最小、非最小相位传递函数和最小、非最小相位系统的概念	225
7.2.4	极坐标图低频、高频(即起、终点)的渐近特性	230
7.2.5	控制系统极坐标图的一般作图法	233
7.2.6	极坐标图的局限性	234
7.3	频率特性的对数坐标图——伯德图	234
7.3.1	对数坐标图——伯德(Bode)图	234
7.3.2	典型环节的伯德图	237
7.3.3	绘制控制系统伯德图的实例	242
7.4	频率特性测量,由频率特性曲线求传递函数	247

7.4.1	频率特性测试方法	247
7.4.2	通过实测伯德图确定系统传递函数-实验建模	248
7.5	闭环频率特性	252
7.5.1	闭环频率特性曲线的特点	252
7.5.2	通过开环频率特性建立闭环频率特性的图解法	254
7.6	闭环控制系统的闭环频域性能指标	258
7.7	频率特性的对数幅相图和尼柯尔斯图	262
7.7.1	频率特性的对数幅相图	262
7.7.2	尼柯尔斯图	264
7.7.3	应用对数幅相图和尼柯尔斯图求闭环频率特性	265
7.8	小结	267
	习题	268
第 8 章	频率响应法(二)奈奎斯特稳定判据以及开环频率特性分析	272
8.1	引言	272
8.2	幅角原理——奈奎斯特稳定性判据的数学基础	273
8.2.1	s 平面中围线在 $F(s)$ 平面中映射的规律	273
8.2.2	幅角原理	275
8.3	奈奎斯特稳定判据	278
8.4	闭环控制系统的开环频域相对稳定性指标	290
8.4.1	闭环控制系统相对稳定性问题	290
8.4.2	开环频域相对稳定性指标——相对稳定性度量	291
8.4.3	用伯德图和对数幅相图表达闭环系统的绝对稳定性和 相对稳定性——幅值裕量和相位裕量	293
8.4.4	幅值裕量和相位裕量之间的关系	296
8.4.5	二阶系统的开环频域相对稳定性指标	297
8.5	二阶系统频域与时域性能指标比较	298
8.6	时滞系统的稳定性分析	303
8.6.1	时滞系统	303
8.6.2	应用奈奎斯特稳定判据分析时滞系统的稳定性	304
8.7	小结	305
	习题	309
第 9 章	反馈控制系统的校正	312
9.1	引言	312
9.1.1	反馈控制系统设计和校正问题	312
9.1.2	反馈控制系统的校正方法	313
9.1.3	反馈控制系统校正装置的设计方法	315
9.2	反馈控制系统的性能要求和性能指标	316
9.2.1	反馈控制系统的性能指标	316

9.2.2	闭环控制系统的开环频率特性曲线的要求	317
9.2.3	闭环共轭主导极点在 s 平面的期望位置	318
9.3	串联校正装置	318
9.3.1	超前校正装置	318
9.3.2	滞后校正装置	321
9.3.3	滞后-超前校正装置	322
9.3.4	比例-积分-微分(PID)控制器	324
9.4	串联校正装置设计的频率法	327
9.4.1	频率法校正装置设计方法概述	327
9.4.2	频率法超前校正装置设计	328
9.4.3	频率法滞后校正装置设计	331
9.5	串联校正装置设计的根轨迹法	336
9.5.1	前言	336
9.5.2	根轨迹法超前校正装置设计	338
9.5.3	根轨迹法滞后校正设计	344
9.5.4	根轨迹法 PID 控制器设计	348
9.6	并联校正(反馈校正)	350
9.7	小结	351
	习题	352
第 10 章	计算机控制系统	356
10.1	计算机控制系统概述	356
10.2	数据采样和保持	359
10.3	z 变换和 z 反变换	363
10.3.1	z 变换定义	363
10.3.2	求离散时间函数 z 变换的方法	364
10.3.3	z 变换表	366
10.3.4	z 变换的基本性质	367
10.3.5	z 反变换	371
10.4	采样系统的数学模型	374
10.4.1	线性常系数差分方程及其解法	374
10.4.2	z 传递函数(脉冲传递函数)	375
10.5	闭环采样控制系统的时域响应	385
10.6	闭环采样控制系统稳定性分析	387
10.7	闭环采样控制系统的稳态误差	393
10.7.1	闭环采样系统的稳态误差概念	393
10.7.2	采样系统的型别	395
10.7.3	不同型别采样系统,在三种典型输入信号作用下的 稳态消差系数和稳态误差计算	396

10.8	计算机闭环控制系统数字校正器的设计	397
10.8.1	应用数字控制器改善闭环采样系统性能	397
10.8.2	数字控制器设计的 $G_c(s) - D(z)$ 转换法及其应用	398
10.9	计算机控制系统分析设计的根轨迹法	404
10.9.1	采样控制系统的根轨迹法	404
10.9.2	数字控制器设计的根轨迹法	406
10.10	数字 PID 控制器	407
10.11	小结	408
	习题	409
第 11 章 非线性控制系统		416
11.1	概述	416
11.1.1	典型非线性环节	416
11.1.2	非线性系统的特点	419
11.1.3	分析非线性系统的方法	419
11.2	非线性控制系统稳定性分析的描述函数法	420
11.2.1	描述函数的基本概念	421
11.2.2	典型非线性环节的描述函数	422
11.2.3	非线性系统的简化	426
11.2.4	用描述函数分析非线性系统的稳定性	428
11.3	小结	433
	习题	433
第 12 章 MATLAB 软件及其在控制系统分析设计中的应用		438
12.1	MATLAB 软件简介	438
12.2	MATLAB 中控制系统的描述	440
12.3	应用 MATLAB 进行部分分式展开	442
12.4	应用 MATLAB 进行时域响应分析	445
12.4.1	用 MATLAB 求阶跃响应	445
12.4.2	用 MATLAB 求脉冲响应	446
12.4.3	用 MATLAB 求斜坡响应	447
12.4.4	对初始条件的响应	448
12.4.5	MATLAB 在系统校正设计中的应用实例	449
12.5	应用 MATLAB 绘制闭环零极点分布图和稳定性分析	451
12.6	应用 MATLAB 绘制和分析根轨迹图	453
12.6.1	应用 MATLAB 绘制根轨迹图	453
12.6.2	应用 MATLAB 分析根轨迹图	455
12.7	应用 MATLAB 绘制频率特性图和稳定性分析	457
12.7.1	应用 MATLAB 绘制频率特性曲线	458

12.7.2	相对稳定性分析——应用 MATLAB 求相位裕量和幅值裕量	463
12.7.3	时滞环节的有理函数近似——Pade'近似	464
12.8	应用 MATLAB 进行数字控制系统的分析设计	466
12.8.1	应用 MALAB 进行连续系统和离散系统模型间的变换	466
12.8.2	应用 MALAB 计算离散系统的时域响应	468
12.8.3	应用 MALAB 进行数字控制器设计	470
12.9	应用 Simulink 工具软件包进行控制系统框图化建模和动态仿真简介	471
12.9.1	Simulink 工具软件包简介	471
12.9.2	Simulink 的功能及其建模仿真过程简介	473
12.9.3	Simulink 的非线性系统建模仿真功能简介	475
12.10	小结	477
附录 1	拉普拉斯变换表	478
附录 2	拉普拉斯变换性质	479
附录 3	z 变换表	480
附录 4	z 变换性质	481
附录 5	复数运算	482
参考文献	484

第 1 章

概 论

1.1 反馈控制的基本概念

“控制”在字典中解释为动词驾驭、调节、节制等,也可解释为名词控制装置或控制系统。控制这个概念的内涵有如下意义:通过一定的方法和装置,使被控对象按指令(或称输入)进行动作、响应(或称输出)。

所谓“自动控制”指的就是负反馈控制(简称反馈控制),亦称闭环控制。其原理为:对控制系统输出信号进行检测,将输入指令信号与输出的检测信号进行比较(相减)产生误差信号,此误差信号通过放大器等控制装置驱动控制系统的执行机构,执行机构的工作使被控对象的输出与指令输入保持一致,即被控对象的输出信号与输入信号之间的误差降低为零或最小,因为若误差信号不降低为零或最小,系统的执行机构就会不断工作直至降低为零或最小为止。换言之,将检测到的被控对象的输出信号进行负反馈,与输入指令信号进行比较,通过控制机构和执行机构的作用,“自动”消除输入与输出信号之间的误差,实现输入指令对输出的驾驭、调节、节制等控制功能,这就是负反馈控制或闭环控制即自动控制的原理。从字义上“自动控制”也可理解为“没有人参与”的控制,但没有人参与的控制应确切地称为自动化控制。

电子学中的负反馈电子放大器是典型的自动控制系统。家用电器中的电冰箱、空调、电热水器等均是负反馈控制系统,控制的参数(输出)都是温度,控制的目标是使温度保持预设的值。其原理是:用温度传感器检测电冰箱冷藏室或冷冻室、空调机室内机出风口的温度、电热水器内胆的水温;若检测到的温度与设定的温度(输入信号电压)不一致,则通过内部控制电路(即加法器)产生误差信号电压并驱动压缩机(电冰箱和空调机)或使热水器的电加热器工作,从而使输出的温度变化,直至与设定的温度相同,误差信号减少为零,执行机构——压缩机或电加热器随即停止工作。而当电冰箱中放入食品,空调房间开关门,热水器热水龙头打开,环境温度的变化等原因(这些因素在反馈闭环控制中称为扰动或干扰),使被控温度发生变化,这又将出现误差信号,执行机构重新启动,输出温度又将发生变化,误差信号又回复为零。

抽水马桶水箱液位的控制也是反馈控制,液位通过浮球检测。当抽水后,浮球下降,同时浮球的连接杆将进水龙头打开,水箱注水,浮球随水位上升进行液面位置反馈,当水位达到设定值时,将进水龙头关闭,水位保持设定的高度。

此外,教师的课堂提问和作业批改也体现了反馈控制原理。通过课堂提问和批改作业,检测学生的学习情况,教师可改进教学内容和教学方法,使学生对课程的掌握尽可能达到期

望的要求。

通过以上实例,不难体会、理解反馈控制的基本原理。反馈控制的基本原理可用框图表示,如图 1-1-1 所示。

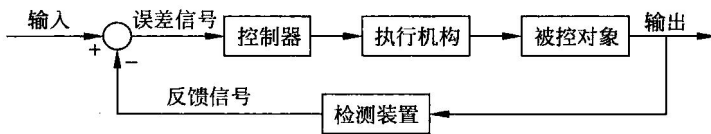


图 1-1-1 反馈(闭环)控制系统原理

反馈控制系统中的“输入”也称“输入变量”、“输入信号”、“输入指令”等,还有多种其他名称,如“参考输入”、“预期(期望)输出”等;图中,输入与反馈信号汇交处的圆称为比较器、加法器或误差检测器等,反馈信号后的“-”表示负反馈,比较器的输出为误差信号;“输出”又称“输出变量”、“输出信号”、“输出响应”等。同样,“反馈控制”与“闭环控制”、“反馈闭环控制”、“闭环反馈控制”等名称也都是等价的。此外,若不特别指明“正反馈控制”,“反馈控制”默认为“负反馈控制”。反馈控制系统在工程和各种其他领域中得到广泛应用。

还有一类控制系统,如家用电器中的全自动洗衣机、微波炉、烤面包炉、家用电烤箱等。这类系统的输出,如洗衣机的衣服洗净和甩干程度、微波炉加热或蒸煮食品的温度或成熟程度、烤面包炉的面包片的焦黄程度、家用电烤箱中食品的烤熟程度等,通常难以检测或不进行检测,不通过反馈与输入进行比较。此类系统称为开环控制系统,其原理如图 1-1-2 所示。开环控制系统也在各种领域中得到广泛应用。

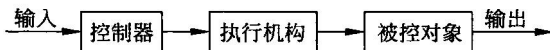


图 1-1-2 开环控制系统原理

本课程主要研究的是闭环反馈控制系统,但开环控制系统是其基本组成部分,因此闭环控制系统的研究必然涉及开环控制系统问题。

随着应用领域的扩展和控制对象的复杂化,数学方法的发展以及计算机软硬件技术的进步,自动控制理论不断得到发展,至今主要包括“经典控制理论”、“现代控制理论”和“智能控制理论”等部分。本书主要介绍自动控制理论的经典部分。

经典控制理论在 20 世纪 40 年代末 50 年代初已基本成熟。此后,在采样系统(离散时间系统)的分析和设计方法,处理非线性问题的方法,特别是基于计算机软硬件技术飞速发展的计算机控制技术和 MATLAB 等控制系统仿真计算机软件的出现等方面取得进一步发展。

经典控制理论早期在美国称伺服机构理论,在德国和苏联则称自动调节理论,主要解决单变量(单输入-单输出)系统的控制问题。经典控制理论这个名称是 1960 年在第一届全美联合自动控制会议上提出来的,并得到全世界公认。在这次会议上把系统与控制领域中研究单变量控制问题的学科称为经典控制理论,把研究多变量控制问题的学科称为现代控制理论。智能控制理论实际上在 20 世纪 80 年代开始形成,并取得较大发展。经典控制理论在工程控制,机电装备等领域一直得到广泛的实际应用。