

控制工程与 信号处理

罗转翼 程桂芬 付家才 编著



化学工业出版社
教材出版中心

控制工程与信号处理

罗转翼 程桂芬 付家才 编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

控制工程与信号处理 / 罗栉翼, 程桂芬, 付家才编著.
北京: 化学工业出版社, 2004.7
ISBN 7-5025-5631-1

I. 控… II. ①罗… ②程… ③付… III. ①自动
控制理论②信号处理 IV. ①TP13②TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 047896 号

控制工程与信号处理

罗栉翼 程桂芬 付家才 编著

责任编辑: 唐旭华

文字编辑: 徐卿华

责任校对: 王素芹

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http: // www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 36¼ 字数 904 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5631-1/G · 1466

定 价: 55.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

写本书的主要目的是为了给控制工程和信号处理的基础理论一种新的诠释。

本书的主要特点是在假设读者已经学过“积分变换与复变函数”的前提下,把“自动控制原理”和“信号与系统”的基本内容融会贯通,从统一的角度介绍给读者。1982年科学出版社出版,(美)B.P.拉斯著《信号、系统和控制》与本书的宗旨和思路是类似的。

对于自动化专业和其他不少工科专业而言,“积分变换与复变函数”作为一门工程数学课程被广泛开设,在“电路”、“电工学”、“自动控制原理”等课程中又得到了应用。但是,近年来不少学校又在上述专业开设了“信号与系统”课。浏览一下《积分变换》、《自动控制原理》和《信号与系统》这三本书,就会发现它们存在着大量重复的内容。为什么要把“积分变换”中的内容再重复一次?为什么原来是“自动控制原理”基础内容的“卷积”、“传递函数”、“频率特性”、“ z 变换”要放到另一门课中去?这三门课之间的关系如何?这些问题不断地困扰着作者。经过思考和实践,作者逐渐形成了下述观点和做法。

(1) 作为一门工程数学和“电路”、“电工学”的基础,“积分变换与复变函数”不宜取消,也不宜在另一门课中大量重复。

(2) “信号与系统”作为信号分析的基础理论,主要是傅氏变换、拉氏变换、 z 变换在信号分析方面的应用;它作为系统分析的基础理论,某些概念的阐述比“自动控制原理”中的介绍更为严谨和全面,但某些概念的介绍则不如后者详细。

(3) “自动控制原理”是建立在“信号与系统”的基础之上的。通常“自动控制原理”中的大部分内容如微分方程、卷积、传递函数、结构图、信号流图、稳定性、根轨迹、频率特性、奈氏判据、稳定裕量、 z 变换与 z 传递函数、状态方程、非线性系统等,从概念和应用上都与一般系统相联系。如果把这些都算作“信号与系统”的内容,则“自动控制原理”自身的内容就只剩下控制性能、系统综合等很少的内容。当然,课程的设立与分工是一个见仁见智的问题。但几十年过去了,只学“自动控制原理”而未学“信号与系统”照样可行,这说明它基本符合控制工程实践的需要,也自然地融合了“信号与系统”的很多内容。当然,由于只把控制系统作为对象,“自动控制原理”并没有包含“信号与系统”的全部内容。

(4) 从学科的发展史也可以知道,“控制理论”学科与“信号处理”学科是两门关系特别密切的学科。很难把某些内容划为“自动控制原理”,而另一些内容划为“信号与系统”。作者强烈认为,对于这两门相互交叉和融合的学科,合在一起介绍它们的基础理论将产生1+1大于2的效果。出于这种考虑,作者已经写了《信号、系统与自动控制原理》和《随机信号处理与控制基础》这两本书。前者实际上是本书的前身,但它篇幅过少,不够成熟。

(5) 本书并不是“自动控制原理”和“信号与系统”的简单相加,而是从统一的角度重新叙述。主要线索是由一般系统到控制系统,即一般理论是控制理论的基础,控制理论是一般理论的应用。积分变换主要作为复习来叙述。大部分篇幅仍是原“自动控制原理”的内容,但着眼点明显提高,大部分基本概念的阐述更加严谨全面。同时,控制工程自然地为“信号与系统”提供了大量的实例,使理论更加结合实际。由于大部分篇幅仍是原“自动控制原理”,

所以也可以说,本书是对“自动控制原理”的某种补充,这种做法有利于原来没有学过“信号与系统”的各专业的广大工程技术人员。

本书的其他特点还有以下几方面。

(1) 用一章的篇幅介绍了二维信号与系统。这是信号处理的前沿之一,也与各专业密切相关。本书按照与前面章节相同的线索介绍这一部分内容,同时也融合了一些作者独立思考和科研的成果。

(2) 最后一章介绍了 MATLAB 在本书中的应用。是按照前面章节的顺序,作为 MATLAB 初学者的上机指导书来写的。读者可以在阅读前面章节的同时,随时依据这一章来上机,这将有利于对理论的理解。

(3) 理论联系实际。几乎在所有的章节,都配合实例,以解决实际工程问题为主要目的,引入或应用基本概念。还安排了不少联系实际、扩大知识面的习题。

(4) 选材针对初学者,突出基础。一方面,尽量避免理论性和工程性过强的内容,次要的结论、公式、图表予以删除;另一方面,越是基础性、概念性的内容越是重点发掘和详细叙述,其中也包含了不少作者的独到见解。

(5) 层次清晰。把信号分析与系统分析、一般系统与控制系统、连续与离散、时域与频域、经典与现代分开叙述,希望使各自的特点更加分明,也更容易被读者所接受。每一个段落都有标题,篇幅都不长;结论和推导截然分开;首次出现的名词、概念以黑体标出;个别参考性的内容标以“*”号以示区别。这些做法都有利于分清层次和进行选择阅读。

(6) 叙述力求深入浅出,循序渐近,层层深入。

(7) 论证力求严谨简练,推导细致周详。

(8) 内容丰富但篇幅较短,语句的浓缩性较强。需要边看边想地反复阅读,不必一次全看懂。用作教学时,应选择最基础的内容重点讲解,不宜面面俱到。很多段落和句子可以自学。

本书既可以作为大学生、研究生“自动控制原理”、“信号与系统”和其他课程的教材或教学参考书,又可以作为工程技术人员的参考读物。用作教学时,最多使用 2 个学期,2 次考试;而如果同时开设“自动控制原理(含现代控制理论)”、“信号与系统”,则需要 3 门课程,3 次考试,这就是说,使用本书能节约学时,减轻学生的负担。

本书由罗抟翼主编。第 1、3、4、5、6、9、11 章由罗抟翼执笔,第 2、7、8 章由程桂芬执笔,第 10 章由付家才执笔,第 12 章由王正、吴伟执笔,研究生宋云东参与了第 12 章程序的验证。全书由罗抟翼修改定稿。

本书的初稿曾经郭庆鼎、薛定宇、孙庭玉、王汝荣、梁中华、杨洪兵、刘爱民、刘丽钧、常丽、王雪丹、江志成等老师阅读,并提出了不少宝贵的意见,在此特致诚挚的谢意。

书中的不足和错误之处,恳请读者给予指正。

作 者

2004 年 2 月于沈阳

内 容 提 要

本书针对各专业(包括自动化专业)工程技术人员学习基础理论的需要,把《自动控制原理》和《信号与系统》融会贯通,从统一的角度重新编写而成,但在章节上两者仍有明显的界限。本书除了包括通常《自动控制原理》和《信号与系统》的内容以外,还包括二维信号与系统、MATLAB 在控制工程与信号处理中的应用。

本书主要内容包括连续信号的频域分析,连续系统的时域分析,控制系统的时域分析与校正(含根轨迹法),连续系统的频域分析(含模拟滤波器),控制系统的频域分析与校正,离散信号的频域分析(含 DFT),离散系统分析(含数字滤波器),状态空间分析与综合,非线性系统与李雅普诺夫稳定性,二维信号与系统, MATLAB 在控制工程与信号处理中的应用。各章后附有习题。

本书内容丰富,叙述准确精炼,基础性、适用性和通用性强,读者主要是大专院校自动化专业和其他专业的本科生、研究生、教师及工程技术人员和计算机开发人员。

目 录

1 绪论1	2.2.2 信号的频谱密度与频域分析.....29
1.1 信号与系统.....1	2.2.3 单位脉冲函数 $\delta(t)$ 的复习.....30
1.1.1 信号与信号处理.....1	2.2.4 单位脉冲偶函数 $\delta'(t)$31
1.1.2 几种类别的信号.....1	2.2.5 几种重要信号的频谱.....32
1.1.3 信号的分析与综合.....2	2.2.6 周期信号的傅氏变换.....33
1.1.4 系统.....2	2.2.7 傅氏变换表.....35
1.1.5 系统的数学模型.....3	2.3 卷积及其性质.....35
1.1.6 信号与系统理论.....4	2.3.1 定义.....35
1.2 系统的分类.....5	2.3.2 性质.....35
1.2.1 定常系统与时变系统.....5	2.4 傅氏变换的基本性质.....36
1.2.2 线性系统与非线性系统.....6	2.5 信号的能谱分析.....39
1.2.3 确定性系统与随机信号系统.....9	2.5.1 信号的总能量和帕斯瓦尔等式.....39
1.2.4 即时系统与动态系统.....9	2.5.2 信号的功率谱密度.....40
1.2.5 可逆系统与不可逆系统.....10	2.6 信号的相关分析.....42
1.2.6 连续时间系统与离散时间系统.....10	2.6.1 相关函数.....42
1.2.7 单输入单输出系统与多输入 多输出系统.....10	2.6.2 相关定理.....45
1.2.8 一维信号系统与多维信号系统.....10	2.6.3 维纳-辛钦定理.....45
1.2.9 非线性特性的小偏差线性化.....11	2.7 傅氏变换的局限性与时频分析.....46
1.3 自动控制工程与自动控制理论.....11	2.7.1 对非平稳信号的分析.....46
1.3.1 自动控制工程.....11	2.7.2 对短时信号的分析.....47
1.3.2 自动控制理论.....14	2.7.3 时频分析.....48
1.3.3 反馈控制系统及其组成.....14	2.8 拉普拉斯变换.....48
1.3.4 开环控制.....15	2.8.1 双边拉氏变换.....48
1.3.5 前馈补偿和复合控制.....16	2.8.2 单边拉氏变换.....49
1.3.6 基本控制方式.....17	2.8.3 单边拉氏变换的基本性质.....50
1.3.7 恒值系统与随动系统.....17	2.8.4 拉氏反变换.....51
1.3.8 电力传动系统、过程控制 系统与液压控制系统.....17	2.8.5 拉氏变换的应用.....52
1.3.9 控制理论的回顾.....17	习题.....52
1.3.10 自动控制工程与信号处理的关系.....18	3 线性连续系统的时域分析53
1.3.11 本书概要.....19	3.1 线性常系数常微分方程和它的解.....53
习题.....20	3.1.1 线性常系数常微分方程的经典解.....53
2 连续信号的频域分析23	*3.1.2 把函数的定义域扩大到 $t \in (0^-, +\infty)$ 时的初值问题.....54
2.1 周期信号的傅里叶级数.....23	3.1.3 用拉氏变换法解初值问题.....56
2.1.1 三角形式的傅里叶级数.....23	3.1.4 零输入响应与零状态响应.....56
2.1.2 指数形式的傅里叶级数.....25	3.1.5 线性系统定义的修正.....58
2.2 傅里叶积分与傅里叶变换.....27	3.1.6 响应的暂态分量与稳态分量.....59
2.2.1 傅氏积分与傅氏变换的概念.....27	3.2 线性定常系统的脉冲响应函数与卷积.....60
	3.2.1 脉冲响应函数和卷积.....60

3.2.2	卷积的图解	62	4.1.1	典型输入信号	102
3.2.3	卷积的数值求法	62	4.1.2	零状态响应的代表性	103
3.2.4	因果系统	63	4.1.3	单位阶跃扰动下的动态性能指标	104
3.2.5	小结	63	4.1.4	阶跃扰动时的误差和稳态误差	105
3.3	因果线性定常系统的传递函数	64	4.1.5	单位阶跃响应的代表性	106
3.3.1	传递函数的定义	64	4.1.6	阶跃给定下的动态性能指标	106
3.3.2	传递函数与微分方程的关系	64	4.1.7	阶跃给定下的稳态误差	107
3.3.3	关于传递函数的一些规律	65	4.1.8	抗扰性能与跟随性能的关系	107
3.3.4	延迟环节	66	4.1.9	单位阶跃响应的最优化性能指标	108
3.3.5	系统的静态数学模型	66	4.2	一阶系统的性能计算	108
3.4	动态结构图及其等效变换	67	4.2.1	一阶系统的实例	108
3.4.1	动态结构图	67	4.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	109
3.4.2	结构图的等效变换	68	4.2.3	一阶系统的脉冲响应和斜坡响应	110
3.5	信号流图与梅逊公式	71	4.3	二阶系统的性能计算	111
3.5.1	信号流图	71	4.3.1	二阶系统的实例	111
3.5.2	梅逊公式	71	4.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	111
3.6	实际系统的结构图	74	4.4	高阶系统动态性能的计算	115
3.6.1	引言	74	4.4.1	高阶系统的阶跃响应	115
3.6.2	机械系统	74	4.4.2	高阶系统暂态响应的特点	117
3.6.3	电气系统	77	4.5	用终值定理计算稳态误差	118
3.6.4	液位系统	81	4.5.1	引言	118
3.6.5	热力系统	82	4.5.2	用终值定理计算给定稳态误差	119
3.6.6	液压系统	83	4.5.3	用终值定理计算扰动稳态误差	123
3.6.7	小结	84	4.6	反馈控制系统的根轨迹	124
3.7	BIBO 稳定性	85	4.6.1	由开环传递函数分析闭环 动态性能	124
3.7.1	BIBO 稳定的概念	85	4.6.2	根轨迹图	125
3.7.2	线性定常系统 BIBO 稳定的充要 条件	86	4.6.3	根轨迹方程	126
3.7.3	传递函数 BIBO 稳定的充要条件	88	4.6.4	徒手绘制根轨迹的基本法则	127
3.8	零输入稳定性	89	4.7	根轨迹分析举例	133
3.8.1	零输入稳定性的概念	89	4.7.1	由开环传递函数分析闭环性能	133
3.8.2	零输入稳定的一些实际情况	91	4.7.2	分析开环系统中的其他参数 对闭环性能的影响	135
3.8.3	零输入稳定的充要条件	91	4.7.3	有纯延迟系统的根轨迹	136
3.8.4	微分环节的零输入稳定性	92	4.8	根轨迹法校正	138
3.8.5	BIBO 稳定性和零输入稳定性的 区别和联系	92	4.8.1	校正的概念	138
3.8.6	临界不稳定	92	4.8.2	串联超前校正	141
3.8.7	不稳定系统的全响应	93	4.8.3	串联滞后校正	143
3.9	代数稳定判据	93	4.8.4	串联滞后-超前校正	146
3.9.1	传递函数稳定的必要条件	94	4.8.5	反馈校正	146
3.9.2	赫尔维茨判据	94	4.8.6	小结	147
3.9.3	劳斯判据	95	4.9	PID 调节器	147
3.9.4	代数稳定判据应用于控制系统	96	4.9.1	PID 调节器	147
习题		97	4.9.2	PID 调节作用的时域解释	148
4	控制系统的时域分析与校正	102	4.9.3	PID 调节器参数的 实验整定	150
4.1	控制系统的时域性能指标	102			

4.10 前馈补偿	152	6 控制系统的频域分析与校正	193
4.10.1 按扰动的前馈补偿	152	6.1 闭环频率特性与时域动态性能的关系	193
4.10.2 按给定的前馈补偿	153	6.1.1 闭环频率特性	193
习题	155	6.1.2 二阶系统	193
5 线性连续系统的频域分析	159	6.1.3 高阶系统	194
5.1 线性定常系统的频率特性函数	159	6.2 奈奎斯特稳定判据	195
5.1.1 频率特性函数	159	6.2.1 由开环频率特性分析闭环动态性能	195
5.1.2 稳定系统的正弦稳态响应	161	6.2.2 开环无纯虚数极点时的奈氏判据	196
5.1.3 理想滤波器	162	6.2.3 开环串联有积分环节时的奈氏判据	197
5.1.4 频率特性的实验测定和频域分析法	164	6.2.4 开环没有右半开平面上的极点的情况	198
5.1.5 几点补充	165	6.2.5 开环串联有延迟环节时的奈氏判据	199
5.2 频率域滤波原理	165	6.2.6 已知开环伯德图时的稳定性判断	200
5.2.1 频率域滤波的概念	165	6.3 最小相位系统的稳定裕量	200
5.2.2 无失真传输的条件	168	6.3.1 定义	200
5.2.3 线性相位滤波器	168	6.3.2 在开环伯德图上看稳定裕量	201
5.3 非因果系统与因果系统	169	6.3.3 相位裕量的计算	202
5.3.1 非因果系统	169	6.3.4 开环对数幅频曲线与稳定性的关系	203
5.3.2 脉冲响应函数、传递函数与频率特性的适用范围	170	6.3.5 开环传递函数的简化	205
5.3.3 因果滤波器的必要条件	171	6.3.6 小结	205
5.3.4 因果系统频率特性的另一特点	171	6.4 开环频率特性与其他闭环性能的关系	206
5.4 模拟滤波器	172	6.4.1 单位反馈的二阶系统	206
5.4.1 巴特沃斯低通滤波器	172	6.4.2 高阶系统	207
5.4.2 巴特沃斯高通滤波器	175	6.4.3 由开环频率特性曲线绘制闭环频率特性曲线	208
5.4.3 巴特沃斯带通和带阻滤波器	175	6.4.4 开环对数幅频曲线与稳态精度的关系	208
5.4.4 切比雪夫 I 型滤波器	176	6.4.5 开环对数幅频曲线的高频部分	208
5.4.5 切比雪夫 II 型滤波器	177	6.5 串联超前校正	208
5.4.6 椭圆滤波器	177	6.5.1 频率法校正	208
5.5 对数频率特性曲线	177	6.5.2 超前校正装置	209
5.5.1 对数幅频特性曲线	177	6.5.3 用伯德图说明串联超前校正原理	210
5.5.2 对数相频特性曲线	179	6.5.4 用伯德图进行超前校正的步骤	211
5.5.3 典型环节的对数频率特性曲线	179	6.6 串联滞后校正	213
5.6 串联系统的伯德图	181	6.6.1 滞后校正原理	213
5.6.1 一般规律	181	6.6.2 滞后校正步骤	215
5.6.2 串联系统伯德图的简捷画法	182	6.7 串联滞后-超前校正和 PID 调节器	217
5.6.3 最小相位系统的伯德图	184	6.7.1 串联滞后-超前校正	217
5.6.4 从实验的频率特性曲线求传递函数	185	6.7.2 PID 调节器	218
5.7 幅相频率特性曲线	186	6.8 频率法反馈校正	218
5.7.1 幅相频率特性曲线	186	6.8.1 反馈结构的基本特点	218
5.7.2 串联系统的幅相频率特性曲线	187	6.8.2 反馈校正与反馈结构的优点	219
5.7.3 最小相位系统幅相频率特性曲线的特点	188		
习题	189		

6.8.3 反馈校正对控制性能的改善 与校正过程	220	7.7 z 反变换	262
6.8.4 试凑法的小结	222	7.7.1 定义	262
习题	223	7.7.2 z 反变换的方法	263
7 离散信号的频域分析	225	7.8 z 变换的性质	265
7.1 离散信号与离散系统	225	习题	268
7.1.1 实际信号的谱分析	225	8 线性离散系统分析	270
7.1.2 数字滤波	225	8.1 常系数线性差分方程和它的解	270
7.1.3 计算机控制系统	227	8.1.1 微分方程的差分近似	270
7.1.4 数字传输电话	228	8.1.2 常系数线性差分方程	271
7.1.5 离散信号	229	8.1.3 差分方程初值问题的迭代解法	272
7.1.6 离散系统和采样系统	229	8.1.4 非因果系统和因果系统	272
7.2 周期序列的傅里叶级数	229	8.1.5 因果线性定常差分方程的 初值问题	273
7.2.1 推导和定义	229	8.1.6 差分方程初值问题的经典解	273
7.2.2 说明	231	8.1.7 z 变换法解差分方程的初值问题	274
7.2.3 举例	232	8.2 脉冲响应函数与卷积	275
7.3 序列的傅里叶积分与频谱函数	234	8.2.1 脉冲响应函数与卷积	275
7.3.1 序列傅里叶积分概念的引出	234	8.2.2 因果系统的脉冲响应函数	276
7.3.2 序列傅氏变换即频谱的定义	235	8.3 线性定常离散系统的 z 传递函数	276
7.3.3 举例	235	8.3.1 z 传递函数的定义	276
7.3.4 连续信号与其采样序列 频谱的关系	237	8.3.2 因果系统 z 传递函数与差分 方程的关系	278
7.3.5 采样定理	238	8.3.3 静态数学模型	279
7.3.6 序列傅氏变换的性质	241	8.3.4 动态结构图及其等效变换	279
7.4 有限长序列的 DFT	242	8.3.5 零阶保持器及其后面连续 系统的离散化	280
7.4.1 有限长序列的 DFT	242	8.3.6 闭环采样系统的 z 传递函数	281
7.4.2 DFT 与序列连续频谱的关系	243	8.4 离散系统的稳定性	283
7.4.3 DFT 与其采样前连续信号 频谱的关系	246	8.4.1 稳定性的定义	283
7.4.4 频谱混叠和频谱泄漏	247	8.4.2 稳定的充分必要条件	283
7.4.5 DFT 的矩阵形式	248	8.4.3 用 w 变换判断因果系统 z 传递函数的稳定性	285
7.4.6 DFT 的快速算法 FFT	249	8.5 采样控制系统的时域性能分析	286
7.5 有限长序列 DFT 的主要性质	250	8.5.1 用 z 变换法求时域响应的例	286
7.5.1 线性	250	8.5.2 z 传递函数与暂态响应的关系	287
7.5.2 奇偶性质	250	8.5.3 最少拍系统	289
7.5.3 反褶性质	250	8.5.4 采样控制系统的稳态误差	289
7.5.4 帕斯瓦尔等式	250	8.5.5 根轨迹法	290
7.5.5 循环移位性质	251	8.6 线性定常离散系统的频率特性	290
7.5.6 循环卷积性质	251	8.6.1 频率特性的定义	290
7.5.7 循环相关性性质	257	8.6.2 频率特性与 z 传递函数的关系	291
7.6 序列的 z 变换	257	8.6.3 正弦稳态响应	291
7.6.1 序列的双边 z 变换	257	8.6.4 由 z 传递函数的零、极点 概略地画频率特性曲线	293
7.6.2 举例与收敛域	258	8.7 数字滤波原理和 FIR 滤波器	295
7.6.3 因果序列的单边 z 变换	260	8.7.1 数字滤波的目的和思路	295
7.6.4 z 变换表	261		
*7.6.5 序列的拉氏变换	261		

8.7.2 IIR 滤波器与 FIR 滤波器	296	9.4 动态方程与传递函数矩阵的关系	337
8.7.3 FIR 滤波器的稳定性	296	9.4.1 由动态方程求传递函数矩阵	337
8.7.4 非因果和因果 FIR 滤波器	297	9.4.2 系统矩阵特征值与传递函数极点的关系, 输出的稳定性	340
8.7.5 线性相位 FIR 滤波器的特点	297	9.4.3 单输入单输出系统的能控形实现	340
8.7.6 FIR 滤波器设计的时窗法	298	9.4.4 传递函数的分子分母阶次相同的情况	343
8.7.7 FIR 滤波器设计的频率采样法	300	9.4.5 单输入单输出系统的能观形实现	343
8.7.8 小结	301	9.4.6 单输入单输出系统的特征值标准形实现	344
8.8 IIR 滤波器	301	9.4.7 传递函数矩阵的实现	345
8.8.1 IIR 滤波器的特点	301	9.4.8 小结	346
8.8.2 脉冲响应不变法设计 IIR 滤波器	302	9.5 状态方程的解	346
8.8.3 双线性变换法设计 IIR 滤波器	303	9.5.1 状态方程的初值问题	346
*8.8.4 零相位 IIR 滤波器	307	9.5.2 矩阵指数	347
8.8.5 小结	308	9.5.3 齐次状态方程的解	347
8.9 采样控制系统的连续系统等效分析与校正	308	9.5.4 直接法计算 e^{At}	348
8.9.1 采样控制系统频域分析的困难性	308	9.5.5 拉氏变换法计算 e^{At}	348
8.9.2 计算机控制系统的特点和对策	308	9.5.6 凯莱-哈密顿定理	348
8.9.3 零阶保持器的延迟作用	308	9.5.7 化为有限长级数计算 e^{At}	349
8.9.4 连续系统等效分析法	309	9.5.8 状态变量的稳定性	351
8.9.5 连续系统等效校正法	310	9.5.9 状态转移矩阵	352
*8.10 采样控制系统的离散化校正	311	9.5.10 矩阵指数 (状态转移矩阵) 的性质	352
8.10.1 引言	311	9.5.11 非齐次状态方程的解	354
8.10.2 闭环 z 传递函数的期望主导极点	312	9.6 系统的状态能控性	356
8.10.3 根轨迹法校正	312	9.6.1 引言	357
8.10.4 直接法	313	9.6.2 状态能控性的概念	357
8.10.5 大林算法	315	9.6.3 线性定常系统的能控性判据	358
8.10.6 史密斯补偿控制	317	9.6.4 系统矩阵是对角阵时的能控性判据	360
习题	317	9.6.5 系统矩阵是约当阵时的能控性判据	361
9 系统的状态空间分析与综合	320	9.6.6 能控标准形的能控性	362
9.1 多输入多输出系统	320	9.6.7 化状态方程为能控标准形	362
9.1.1 多输入多输出系统的概念	320	9.6.8 输出能控性	364
9.1.2 线性定常系统的传递函数矩阵	321	9.7 基于状态反馈设计控制器	365
9.1.3 传递函数矩阵的解耦	323	9.7.1 问题的提出	365
9.1.4 脉冲响应函数矩阵与卷积	325	9.7.2 单输入多输出系统的状态反馈	366
9.2 状态方程	326	9.7.3 举例	367
9.2.1 状态方程	326	9.7.4 稳态精度与跟踪问题	369
9.2.2 状态变量图	329	9.7.5 小结	372
9.2.3 最小实现	329	9.8 系统的状态能观测性	373
9.2.4 状态变量的另一种定义	330	9.8.1 状态观测问题	373
9.2.5 由实际系统列写动态方程	330	9.8.2 状态的能观测性	374
9.2.6 非线性时变系统的动态方程	332	9.8.3 线性定常系统的能观性判据	374
9.3 状态变换	333		
9.3.1 状态变换的概念	333		
9.3.2 化动态方程为对角标准形	334		
9.3.3 化动态方程为约当标准形	336		

9.8.4 系统矩阵是对角阵时的 能观性判据	376	10 非线性系统与李雅普诺夫稳定性	415
9.8.5 系统矩阵是约当阵时的 能观性判据	377	10.1 控制系统中的非线性	415
9.8.6 能观标准形的能观性	377	10.1.1 连续的非线性	415
9.8.7 对偶原理	377	10.1.2 分段线性的非线性	417
9.8.8 化状态方程为能观标准形	378	10.1.3 非线性系统及其特点	420
9.9 状态观测器	379	10.1.4 非线性系统的计算机求解	422
9.9.1 状态观测器	379	10.1.5 本章概要	423
9.9.2 举例	380	10.2 李雅普诺夫稳定性	423
9.9.3 降阶观测器及卡尔曼滤波器	383	10.2.1 李雅普诺夫运动稳定性	423
9.9.4 带状态观测器的状态反馈系统	383	10.2.2 系统的平衡状态	425
9.10 系统的结构分解与最小实现	385	10.2.3 平衡状态的稳定性	426
9.10.1 系统的结构分解	385	10.2.4 运动的渐近稳定性	428
9.10.2 单输入单输出系统传递函数的 零、极点对消问题	386	10.2.5 运动稳定性与平衡状态 稳定性的关系	428
9.10.3 传递函数矩阵的零、极点对消 问题	388	10.3 李雅普诺夫第一法	429
9.10.4 最小实现与能控能观性的关系	389	10.3.1 引言	429
9.10.5 最小实现之间的关系	391	10.3.2 把状态方程在平衡状态 附近线性化	429
9.11 最优控制与最大值原理	392	10.3.3 李氏第一法	429
9.11.1 最优控制问题	392	10.4 李雅普诺夫第二法	431
9.11.2 最优控制问题的解法概述	393	10.4.1 标量函数的正负	431
9.11.3 泛函	393	10.4.2 李氏第二法的基本定理	431
9.11.4 泛函的极值与积分型最优 控制问题	393	10.4.3 基本定理的补充	434
9.11.5 最大值原理	394	10.4.4 大范围渐近稳定性的判断	435
9.12 线性二次型最优控制	397	10.4.5 平衡状态不是原点的情况	436
9.12.1 线性二次型最优控制问题	397	10.4.6 李氏第二法在控制系统 中的应用	436
9.12.2 有限时间状态调节器	398	10.4.7 小结	438
9.12.3 无限时间状态调节器	401	10.5 李氏第二法应用于线性定常系统	438
9.13 离散系统的状态空间分析	402	10.5.1 线性定常系统稳定的充要条件	438
9.13.1 离散系统的 z 传递函数矩阵	402	*10.5.2 应用于二次型性能指标 的最优化	439
9.13.2 脉冲响应函数矩阵与卷积	402	10.6 二阶自治系统的相平面分析	441
9.13.3 离散系统的动态方程	403	10.6.1 相平面图	441
9.13.4 离散系统的状态变量图	403	10.6.2 相轨迹的特点	443
9.13.5 状态变换	405	10.6.3 画相平面图的等斜线法	445
9.13.6 由动态方程求 z 传递函数矩阵	405	10.6.4 线性定常系统奇点的类型	445
9.13.7 单输入单输出系统的实现	405	10.6.5 非线性系统的相平面分析	447
9.13.8 连续状态方程的离散化	406	10.7 用描述函数法讨论非线性系统的 自振荡问题	452
9.13.9 线性定常离散状态方程的解	408	10.7.1 引言	452
9.13.10 离散系统状态变量的稳定性	409	10.7.2 一类非线性系统的正弦响应	452
9.13.11 状态能控性和能观测性	409	10.7.3 描述函数	454
9.13.12 离散状态观测器	409	10.7.4 反馈系统自振荡的必要条件	455
9.13.13 采样控制系统的综合	410	10.7.5 基波近似下奈氏判据的推广	456
习题	410	10.7.6 基波近似下的自振荡分析	456

10.7.7 小结	458	11.7.1 把偏微分方程近似成多维 差分方程	482
习题	458	11.7.2 多维差分方程定解问题的解	483
11 二维信号与系统	460	11.7.3 差分方程定解问题的稳定性	484
11.1 多维连续信号系统与偏微分方程	460	11.7.4 差分近似的收敛性	484
11.1.1 多维信号与多维信号系统	460	11.8 二维离散信号系统简介	485
11.1.2 偏微分方程的引入	460	11.8.1 二维离散信号系统	485
11.1.3 定解条件和定解问题	462	11.8.2 因果递归型线性常系数 差分方程	485
11.1.4 连接条件	463	11.8.3 脉冲响应函数与卷积	486
11.1.5 定解问题是多维信号系统的 一种数学模型	463	11.8.4 z 传递函数	486
11.1.6 本章概要	464	11.8.5 二维离散系统稳定的充要条件	486
11.2 用拉氏变换法解偏微分方程的 定解问题	464	11.8.6 因果系统 z 传递函数稳定 的充要条件	487
11.2.1 用拉氏变换法解定解问题	464	11.8.7 线性定常系统的频率特性	489
11.2.2 线性定常系统	465	11.8.8 用一维滤波构成二维滤波	489
11.2.3 分布参数系统在某处 的传递函数	466	11.8.9 小结	490
11.3 线性定常系统的脉冲响应 函数与卷积	466	12 MATLAB 在控制工程与信号处理 中的应用	491
11.3.1 二维 δ 函数	466	12.1 MATLAB 概述	491
11.3.2 脉冲响应函数与卷积	466	12.1.1 MATLAB 简介	491
11.3.3 线性定常系统的稳定性	467	12.1.2 MATLAB 的工作环境	492
11.4 二维连续信号的傅氏积分 与傅氏变换	467	12.1.3 演示程序	493
11.4.1 二维谐波	467	12.2 基本语法	494
11.4.2 二维傅氏积分与傅氏变换	468	12.2.1 变量	494
11.4.3 二维傅氏变换的性质	469	12.2.2 矩阵的赋值	494
11.4.4 等值线为平行直线的二维 信号的频谱	472	12.2.3 矩阵的初等运算	496
11.5 二维信号系统的频率特性与 二维滤波	473	12.2.4 元素群运算	498
11.5.1 线性定常系统的频率特性	473	12.2.5 关系运算与逻辑运算	499
11.5.2 正弦稳态响应	474	12.2.6 流程控制	500
11.5.3 μ 方向或 ν 方向低通、 带通和高通滤波器	474	12.2.7 基本绘图方法	502
11.5.4 二维圆对称滤波器	474	12.2.8 M 文件及程序调试	504
11.5.5 二维扇形理想滤波器	475	12.3 开发环境和工具	507
11.5.6 偏微分方程形式的 二维滤波器	477	12.3.1 与其他软件的接口	507
11.6 二维序列的频谱与二维 z 变换	479	12.3.2 文件管理系统	507
11.6.1 二维序列	479	12.4 连续信号的频域分析	508
11.6.2 二维序列的频谱	479	12.4.1 周期信号傅氏级数的演示	508
11.6.3 序列频谱与其采样前连续 信号频谱的关系	480	12.4.2 信号的频谱	508
11.6.4 二维序列的双边 z 变换	480	12.4.3 傅氏变换的解析表达式	510
11.7 偏微分方程定解问题的差分解法	481	12.4.4 信号的相关函数	511
		12.5 线性连续系统的时域分析	513
		12.5.1 部分分式分解	513
		12.5.2 多项式乘除	513
		12.5.3 传递函数的建立和连接	514
		12.5.4 由传递函数求单位阶跃响应	515
		12.5.5 由传递函数求单位斜坡响应	516

12.5.6	由传递函数求脉冲响应函数	516	12.8.9	连续系统的离散化	538
12.5.7	用卷积求零状态响应	517	12.9	状态空间分析	539
12.5.8	由传递函数求任意输入响应	518	12.9.1	传递函数矩阵的模型	539
12.5.9	多项式的根和稳定性判断	519	12.9.2	传递函数矩阵的响应	539
12.6	反馈系统的根轨迹	519	12.9.3	传递函数矩阵的实现	539
12.6.1	一般画法	519	12.9.4	状态变换	541
12.6.2	零-极-增益模型	520	12.9.5	由动态方程求传递函数矩阵	543
12.6.3	求指定根的根轨迹增益	520	12.9.6	特征值与特征向量	544
12.6.4	指定 K^* 变化的步长逐点绘制	522	12.9.7	矩阵指数	545
12.6.5	离散系统的根轨迹	523	12.9.8	状态空间模型的响应	545
12.7	连续系统的频域分析	524	12.9.9	能控性阵和能观性阵的计算	546
12.7.1	由传递函数求频率特性	524	12.9.10	矩阵的秩	546
12.7.2	由传递函数画伯德图	526	12.9.11	能控与不能控分解	547
12.7.3	由传递函数画奈奎斯特图	529	12.9.12	能观与不能观分解	548
12.7.4	正弦稳态响应的演示	531	12.9.13	离散系统和采样系统	548
12.7.5	频率域滤波原理	531	12.10	复杂系统的响应与 Simulink	549
12.7.6	由传递函数求稳定裕量	533	12.10.1	概述	549
12.8	离散信号与系统	533	12.10.2	Simulink 仿真模型的建立	549
12.8.1	离散信号的频谱分析 与相关分析	533	12.10.3	仿真参数的设定和仿真过程	552
12.8.2	迭代法解差分方程求全响应	533	12.10.4	带有延迟环节的系统	554
12.8.3	用卷积求零状态响应	534	12.11	非线性系统	555
12.8.4	由 z 传递函数求脉冲 响应函数	534	12.11.1	饱和环节和非线性函数	555
12.8.5	基于 FFT 求卷积	535	12.11.2	继电特性	556
12.8.6	用“控制系统工具箱” 中的函数求响应	535	12.11.3	自振荡现象的演示	557
12.8.7	由 z 传递函数求频率特性	537	附录 A	傅里叶变换简表	559
12.8.8	数字滤波原理	537	附录 B	拉普拉斯变换简表	562
			附录 C	本书所用的 MATLAB 命令、 函数或标识符	563
			参考文献		565

1 绪 论

本章不仅是全书的引子,而且包括本书最重要的若干基本概念和实例。

1.1 信号与系统

1.1.1 信号与信号处理

(1) **信号** 信号是用来传递信息的机械动作、光、电、声或其他物质运动的形式,也可以简单地认为是携带有信息的某种物理量。例如,电话线中传递的电流、在工业熔炉中测得的温度、一张黑白照片上各点的灰度(即黑白程度)等就都是信号。信号的数学形式通常是时间的一维函数,但也可以是时间和空间的多维函数(例如工业熔炉中的温度也与位置有关),甚至也可以是非时间变量的函数(例如照片上各点的灰度)。信号的表述形式与函数基本相同:既可以是解析的,也可以是非解析的。但它与函数不同的是,通常具有能量和量纲。

(2) **信号处理** 与信号有关的理化或数学过程有:信号的发生、信号的传送、信号的接收、信号的分析(即了解某种信号的特征)、信号的处理(即把某一个信号变为与其相关的另一个信号,例如滤除噪声或干扰,把信号变换成容易分析与识别的形式)、信号的存储、信号的检测与控制(1.3节将介绍)等。也可以把这些与信号有关的过程统称为**信号处理**。

显然,现代社会的各个领域都与各种形式的信号与信号处理有着密切的关系。

1.1.2 几种类别的信号

(1) **确定性信号与随机信号** 性质为确定性函数的信号称为**确定性信号**。其函数值为随机变量的信号称为**随机信号**。

【例 1-1】 测试某电路阶跃响应曲线。为了得到较准确的结果,需要多次测量后取平均。每一次测量所得的曲线都是确定性信号,但由于有测量误差,它们不完全相同。如果要问“该电路阶跃响应的测试曲线在 0.1s 时刻的值是多少”这样一个问题,应该如何回答呢?当然,多次测量的平均值是一种可行的回答,但准确的回答应该是:此刻的值不是一个确定性的数,而是一个随机变量。

这一簇测试曲线所描述的信号就是随机信号,相应的时间函数称为**随机过程**。

(2) **连续信号与离散信号** 定义域是连续区间的信号即数学形式为连续函数的信号称为**连续信号**(见图 1-1)。前面所举的例子基本上都是连续信号。

【例 1-2】 通常,计算机检测系统中的程序是周期性地被执行的,需要检测的变量也只能周期性地被采样。被测变量的值在计算机中的存储形式是一个时间序列(见图 1-2),相邻值之间的时间间隔都相等,称为**采样周期**。即使是非计算机系统,对实际变量的检测和记录通常也都只能这样一次又一次地进行。

例 1-2 中被测信号的定义域是不连续的离散时刻,这样的信号称为**离散信号**。在图 1-2 中,用离散时刻的线段表示离散信号的值,线段的端点所连成的曲线称为**包络线**。图中的序列是一个时间序列,而且序列中相邻两个值之间的时间间隔相等。这和数学上所说的序列是

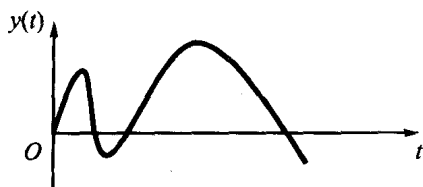


图 1-1 连续信号

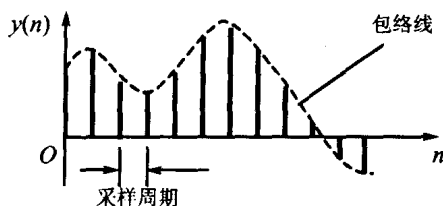


图 1-2 离散信号

不完全相同的。以后如果不特别申明，本书所说的离散信号和序列所指的都是这种等间距的时间序列。离散序列可以记作 $y(n), n=0,1,2,\dots$ 或 $\{y(0), y(1), y(2), \dots\}, n=0,1,2,\dots$

(3) **一维信号与多维信号** 是时间的一维函数的信号称为**一维信号**，像黑白照片上各点的灰度那样，是时间和空间的多维函数或纯粹是空间的多维函数的信号称为**多维信号**。

1.1.3 信号的分析与综合

在对信号进行各种处理时，往往需要对信号的特性有所了解。

正如一个力可以分解为若干个分力一样，信号也往往可以分解为若干个其他信号的和。

【例 1-3】 电视画面可以分解为红、蓝、绿三幅画面。

【例 1-4】 一个以某恒值为平均值振荡的正弦电流可以分解为该恒值与正弦信号之和。

【例 1-5】 在高等数学中已经知道，正如太阳光可以分解为各色光之和一样，周期信号都可以分解为傅里叶级数，即一系列正弦信号的叠加。

把一个复杂的信号分解为简单信号之和可以帮助人们了解这个信号。信号的分解也称为**信号的分析**。信号分解的逆过程，即把若干信号相加成为一个所希望的信号，称为**信号的综合**。在设计电子琴时，如何产生某种乐器的声音就属于信号综合。本书不讨论信号综合。

1.1.4 系统

(1) **一般的系统概念** 由相互有关系的一类事物所组成的具有某种特定功能的一个整体称为**系统**。例如，电网络系统、通信系统、铁路运输系统、电力系统、经济管理系统、人体系统、生态系统等。

(2) **数学上的系统概念** 上述各系统分属于不同的很多专业。然而，它们都有一个相同的基本理论问题，即：某一个信号作用于系统后，影响如何？更具体地说，在这种情况下，该系统中人们所关心的某些信号将等于什么？

【例 1-6】 图 1-3 所示的低通滤波电路，设原来电容器未被充电。如果在某一时刻开始输入持续的电压信号 $r(t)$ ，则所关心的是输出电压 $y(t)$ 等于什么，这可以表示为图 1-4。在这里， $r(t)$ 可看作“输入”信号， $y(t)$ 可看作“输出”信号。

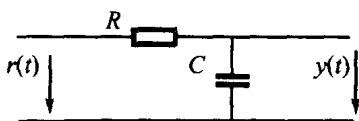


图 1-3 低通滤波电路

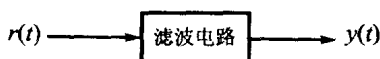


图 1-4 电路的输入和输出

【例 1-7】 图 1-5 所示是混有 50Hz 交流干扰的心电信号，把它输入一个滤波器后，输出信号见图 1-6，可见干扰已被滤除。在这里，图 1-5 的信号是输入信号，图 1-6 的信号是输出信号。

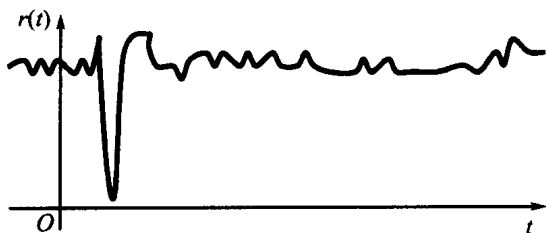


图 1-5 混有 50Hz 交流干扰的心电信号

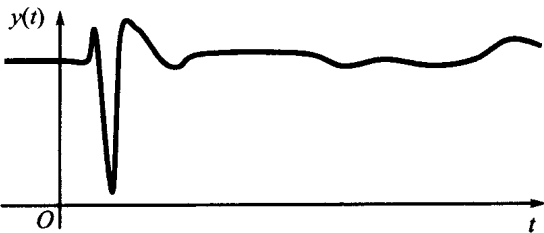


图 1-6 滤除了干扰的心电信号

【例 1-8】 炉温控制系统如图 1-7 所示。控制原理是：通过煤气阀的开度来控制燃烧的强度，从而达到温度保持不变的目的。这个系统可以表示为图 1-8。在这里，阀门开度是输入，炉温是输出。

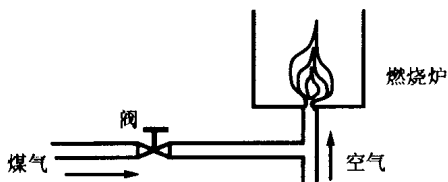


图 1-7 炉温控制系统



图 1-8 控制系统的输入和输出

系统理论是主要从输入和输出的关系这个角度来研究系统运动一般规律的工程学科。由于它不涉及系统的其他具体性质，所以它适用于不同专业的所有系统。系统理论的研究对象既然是这种抽象的系统，所以在系统理论中，定义映射 $y(t)=T[r(t)]$ 为系统，其中 $r(t)$ 是输入（也称为激励）， $y(t)$ 由 $T[\cdot]$ 和 $r(t)$ 所完全确定，是输出（也称为响应）。

由于实际系统中包含有多个信号，而其中任意两个信号都可以看作是一对输入和输出，故一个实际系统可以包含多个这种抽象系统。

【例 1-9】 图 1-3 所示的低通滤波电路，如果把流经电容的电流看作另一个输出，则该电流与输入电压之间也构成一个系统。

【例 1-10】 图 1-7 所示的炉温控制系统，实际上空气的流量也影响到炉温的高低，即炉温与空气流量之间也构成一个系统。

显然，1.1.1 段所说的信号处理，即信号的发生、传送、接收、分析、处理、存储、检测、控制，都必须通过某个系统才能实现。

(3) 系统理论的研究内容 系统理论的研究领域包括两个基本方面。其一是系统分析，即在给定系统和输入信号的数学形式的条件下分析输出响应的数值和特性，例如例 1-6 中的求输出电压、例 1-7 中的求滤波输出、信号经过某种传送有无失真，就都属于系统分析。其二是系统综合，即对于给定的输入信号和所要求的输出响应求系统，例如例 1-7 中设计滤波器、例 1-8 中设计一个装置来给出适当的阀门开度以使温度达到要求的恒值，就都属于系统综合。显然，综合的基础是分析，本书主要涉及系统分析，这也是系统理论的主要内容和基础。

1.1.5 系统的数学模型

从其他课程早已熟知（在第 3 章将举例复习），对于例 1-6 这样的元件特性已知的系统，通常可用下述线性常系数常微分方程描述其输入输出特性。

$$\frac{d^n}{dt^n} y(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y(t) + \cdots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_0 r(t) \quad (1-1)$$