

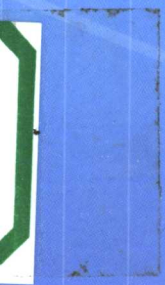


高等学校教材

信号分析与处理

芮坤生 潘孟贤 丁志中

第二版



高等教育出版社

TN911.6

88

高等学校教材

信号分析与处理

第二版

芮坤生 潘孟贤 丁志中

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是为电气信息类专业编写的信号与系统教材,包括信号与系统的主要内容和信号处理的基本内容。全书共分6章:信号与系统、线性时不变系统的时域分析、傅里叶分析——连续时间信号与系统、傅里叶分析——离散时间信号与系统、拉普拉斯变换与 z 变换、模拟与数字滤波。本书的特点是将连续时间和离散时间信号与系统放在一起平行叙述,利用它们的共同点分享各自获得的概念和观点,同时注意它们之间的差异以加深对内容的理解。

本书也可供高等学校非电类专业学生作为信号与系统课程的教材使用,还可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号分析与处理/芮坤生,潘孟贤,丁志中编著.
2版. —北京:高等教育出版社,2003.8
ISBN 7-04-011895-5

I.信... II.①芮...②潘...③丁... III.①信号
分析—高等学校—教材②信号处理—高等学校—教材
IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 040488 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 22
字 数 400 000

版 次 1993 年 12 月第 1 版
2003 年 8 月第 2 版
印 次 2003 年 8 月第 1 次印刷
定 价 25.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策	划	刘激扬
编	辑	曲文利
封面设计		刘晓翔
责任绘图		朱 静
版式设计		王艳红
责任校对		俞声佳
责任印制		孔 源

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 82028899 转 6897 (010)82086060

传真：(010) 82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

邮编：100011

购书请拨打读者服务部电话：(010)64054588

第二版前言

1993年10月由高等教育出版社出版的《信号分析与处理》(第一版)包括信号与系统的主要内容和信号处理的基本内容,供电子、电力及非电专业使用。这些年来,信息技术在各学科领域的应用更加广泛,为更好地适应这一发展趋势,特修订出版此书。

与第一版相同,第二版仍设为6章:1.信号与系统,2.线性时不变系统的时域分析,3.傅里叶变换——连续时间信号与系统,4.傅里叶变换——离散时间信号与系统,5.拉普拉斯变换与 z 变换,6.模拟与数字滤波。从工程应用对本科生知识结构要求的发展趋势来看,从新近出版或再版的有关教材来看,同时考虑到适应少学时、适应多专业,以及考虑到本科生和研究生教材的层次区别,笔者认为本书第二版仍然编写6章还是比较合适的。

第二版仍将连续时间和离散时间信号与系统放在一起平行叙述,利用它们的共同点分享各自获得的概念和观点,同时注意它们之间的差异,以加深对内容的理解,对时域分析和变换域分析都是如此。在内容编排上,注意连续和离散两部分的对称性,但是在连续和离散叙述的先后问题上,视学生接受的难易程度对部分内容的讲授顺序做了一些调整,以利于提高讲授和学习效率。例如第1章在介绍基本信号时,考虑到对 $\delta(n)$ 和 $\delta(t)$ 理解的难易程度,先讲离散时间基本信号,后讲连续时间基本信号;而第2章在介绍方程求解时,则先讲微分方程的求解,后讲差分方程的求解。

频域分析不仅具有清晰的物理概念,同时也是本课程应该掌握的核心内容,因此对连续时间和离散时间的频域分析均独立设章介绍。先介绍频域分析,后介绍 s 域分析或 z 域分析,在概念叙述和理解上会更流畅一些,这是本书3、4、5章编排顺序的考虑。

本书对第一版50%以上的内容进行了改写或重写,并对有关内容的阐述进行了重新组合和编排,增设了若干子标题。这些改动主要出于以下几点考虑。

1. 加强本课程主干核心内容的阐述,对于学生在其他基础课程中已学或易于掌握的内容等,只简述其基本概念和基本思想,删除一些枝节性内容的介绍,以便更好地适应少学时的特点。

2. 加强概念的阐述,力争做到深入浅出。另一方面,将学习本课程前所需具备的知识尽可能地限制在高等数学和复变函数基本概念的范围,同时尽可

能减少本书所阐述内容对其他专业基础或专业知识的依赖性,将本课程知识在后续专业课程中的应用举例留给任课教师根据具体教学对象作适当补充。这样处理的目的是为了能够更好地适应各类专业学生的学习。

3. 调整部分内容的阐述顺序,突出各段内容的主题,以便更易于教与学。

4. 针对初学者可能会感到较难的部分内容,如连续时间冲激函数、卷积的计算、离散时间系统的频域特性等,补充新的阐述内容和方法。

具体的各章内容调整和修改如下。

第1章:增加了信号的分类、离散时间角频率概念的讨论、取样函数。将第一版第2章中冲激信号 $\delta(t)$ 的讨论、系统的方框图表示、LTI系统的性质等移入第1章。删除了第一版中的增量线性系统的概念介绍。

第2章:增加了卷积积分与卷积和求解方法的介绍,使卷积的分段、积分(或求和)的上下限等问题更容易掌握。对 $t=0$ 时刻系统初始状态的跳变问题,在本章中从概念上解释为什么会发生跳变,在什么样的情况下会发生跳变。考虑到拉普拉斯变换中可以很好地解决状态跳变问题,因此时域分析中省去了对一般微分方程跳变问题的求解。

第3章:从信号和系统两个方面加强了频域分析概念的讨论。对傅里叶变换的所有性质在正文中做了证明。考虑到滤波器是系统频率响应最为典型的例子,是学生应该掌握的基本概念,将第一版第6章中的理想滤波器频率响应特性的介绍移入本章。加强了对取样、序列的抽取和内插以及量化问题的讨论。

增加了正交与相关一节。虽然全书没有更多的内容涉及信号的相关性问题,但考虑到相关性分析是随机信号分析中的重要内容,读者可能会在后续课程或实践中遇到有关的概念,因此将它作为可选内容编入本章。

另外增加了解析信号与希尔伯特变换。删除了波特图一节。

第4章:运用与第3章平行的结构,介绍离散时间信号和系统的分析,使之更易于讲授和学习。离散时间信号和系统的频域特性显得更为抽象一些,它既是本课程的重点,又是难点。如果不能真正理解和建立相关的概念,就无法掌握数字滤波器的内容。因此本章增加4.5节,讨论连续时间信号和系统的频谱与离散时间信号和系统频谱之间的关系。

由于序列频谱的离散化导致序列在时域中的周期延拓,离散傅里叶变换(DFT)事实上是用一个周期序列的离散频谱表征非周期序列的连续频谱,换句话说,离散序列的频域分析经历了“傅里叶级数分析→傅里叶变换分析→傅里叶级数分析(隐含于DFT分析中)”的一个“循环”过程,因此本章略加强了傅里叶级数的讨论。

第5章:用拉普拉斯变换求解电路在电路课程中一般已作介绍;对于未学电路课程的学生,又难以理解和接受有关内容,因此本书对这部分内容未作过多的

介绍,并将其作为可选内容。考虑到在离散时间的应用中,非因果系统还是存在的,本章适当加强了双边 z 变换的讨论。另外,本章对于证明过程类似的性质,将其证明编排为学生自己阅读的内容。

第6章:第3章和第4章中已经建立了滤波器的概念,本章在此基础上进行阐述。在滤波器逼近和实现二者中,以逼近为重点。介绍模拟滤波器的实现是为了让学生能够将抽象的滤波器函数 $H(s)$ 和具体的滤波器电路联系起来。模拟滤波器逼近的介绍是以更好地理解与掌握数字滤波器逼近为基本目标的。删除了有源滤波器实现的介绍。

通过上述调整和改写,本书篇幅得到控制,总字数约40万。可安排48学时的授课,外加实验时间。书中有*号的章节是可选内容。

国内高校工科信号与系统、数字信号处理课程一般使用计算机做实验,如使用MATLAB语言及其工具箱,可选用适当的教材,例如参考书目中[20]及[21]。

书中各章备有例题和习题可供选用,书末附有答案供读者参考。

芮坤生编写第1、2、5章,潘孟贤编写第6章,丁志中编写第3、4章及全书习题。

本书承清华大学电子工程系郑君里教授审阅并提出宝贵意见。高等教育出版社对书的出版予以关心与支持,特对他们表示衷心的感谢!

恳请读者对书中错误与不妥之处予以指正。

作者于2003年1月

第一版前言

随着科学技术特别是微电子与计算机技术的不断发展,电子技术已渗透到各个领域。在高等学校中不仅无线电技术专业需要信号分析与处理的知识,电子类、电力类以及一些非电专业也迫切要求学习这方面的知识。某些高等学校的非无线电技术类专业已经开设了这方面的课程,但缺乏适用的教材;另外,有的专业需要信号分析课程少学时的教材,为此,1991年5月在无锡召开的国家教委电工教学指导委员会电路理论与信号分析小组会议上,一致同意将编写《信号分析与处理》列入国家教委高等学校工科基础课“八、五”教材规划,以满足广大学习者的需要。

回顾这一课程的沿革,20世纪60年代无线电技术基础课程中仅讲连续时间信号与系统的内容,70年代末设立了信号与系统课程,加入离散时间信号与系统。现在已是连续时间和离散时间信号与系统并重。我们编写的教材是将连续和离散时间信号与系统放在一起平行叙述。这种方法不仅在数学分析上是可取的,而且可以利用连续和离散时间信号与系统之间的共同点来分享各自获得的概念和观点,同时又注意它们之间的差异,以加深对内容的理解。在时域中用微分和差分方程,卷积积分及卷积和对连续和离散时间信号与系统进行分析,变换域中的分析也是如此。将连续和离散的傅里叶变换扩展为拉普拉斯变换和 z 变换,并放在一章中阐述,以便对比。在连续和离散系统中,用抽样定理作为连续时间与离散时间的桥梁,以连续时间的复频域(s 平面)与离散时间复频域(z 平面)之间的变换来沟通它们的联系。

在信号处理方面论述快速傅里叶变换及数字滤波器两个方面,从离散傅里叶变换(DFT)到快速傅里叶变换(FFT),从模拟滤波器到数字滤波器。

本教材共分六章,第一章讨论了信号自变量的某些变换,两种基本类型的信号,系统的概念尤其是线性时不变系统的特点,进而介绍对求解响应极有用的增量线性系统。第二章是对线性时不变(LTI)系统的时域分析,在上述线性时不变性的基础上,结合单位脉冲序列的移位性质,以建立离散时间LTI系统的卷积和表示,连续时间LTI系统的卷积积分表示,然后转到线性常系数微分和差分方程求响应的问题,以及这两种方程的方框图表示,认识到这些方程是相加器、系数相乘器和延时器(离散时间)或积分器(连续时间)等基本单元所组成。最后进一步讨论奇异函数在描述和分析连续时间LTI系统的作用,特别强调在

卷积意义下定义并解释信号。第三章完整地建立了连续时间信号与系统的傅里叶分析方法。第四章是以平行的方式来讨论离散时间信号与系统的情况。在这两章中先介绍对傅里叶分析的某些数学方面的理解及这种分析在信号与系统的研究中所起的作用。这类分析特别强调:相当广泛的一类信号都可以表示成复指数信号的加权和或加权积分;LTI 系统对一个复指数信号的响应就是同一复指数输入信号乘以该系统的系统函数值。为此每一章首先导出周期信号的傅里叶级数表示,然后在周期信号的周期趋于无穷大时求其傅里叶级数的极限即可导出非周期信号的傅里叶变换,这说明傅里叶级数和傅里叶变换的密切关系。在讨论它们的性质时,特别突出卷积及调制的性质,这是讨论滤波、调制和抽样等问题的基础。由于这两章平行处理的方法,在第四章末着重突出连续和离散时间傅里叶表示法对称的性质,在分析时也对比两者不同点来加深对各自性质的认识。例如离散时间中傅里叶级数是一有限级数,离散时间系统的频谱都是周期的等等,利用这一特性引出离散傅里叶变换(DFT),然后叙述其性质,运用快速傅里叶变换(FFT)的方法,提高运算的速度。这两章的最后都是用变换法来分析由微分和差分方程表征的 LTI 系统,采用部分分式法很易求得由微分和差分方程描述的 LTI 系统的响应。另外研究了典型的一阶和二阶系统,作为系统的基本构造单元;对于较繁的系统运用波特图来求出它们的幅频和相频响应。第五章讨论拉普拉斯变换和 z 变换,着重讨论两种变换的单边变换及其在非零初始条件下求解微分和差分方程中的应用。在说明这两种变换时,均从连续时间或离散时间的傅里叶变换扩展而成,又从因果条件考虑成为单边的。本章还讲述它们的有理函数变换式与零极点概念,利用部分分式展开求反变换,根据零极点图来对系统函数和频率响应作几何求值以及变换的性质等等,另外本章还分别利用这两种变换对 LTI 系统的系统函数性质和应用进行了讨论,其中包括由微分和差分方程确定系统函数,最后介绍了把一个有理函数的连续系统映射到有理系统函数的离散时间系统的变换方法。第六章开始对信号处理作一概要的叙述,然后对模拟滤波器如巴特沃思,切比雪夫,椭圆滤波器;数字滤波器中无限冲激响应(IIR)及有限冲激响应(FIR)滤波器在设计中的定性和定量问题作了研究。关于快速傅里叶变换及滤波器等内容对于不单独开设信号处理方面课程的学习者来说无疑是十分有用的。

本教材是考虑到学生已学过高等数学微分方程及电路的基础上编写的,所以这方面的求解就不详细叙述。使用本书可按每周 4 学时,每学期 18 周来安排,计 72 学时,讲课大致为 60 学时,习题、实验为 12 学时。

各章讲课参考时数

章 次	讲 课 学 时 数
第一章	4
第二章	8
第三章	14
第四章	10
第五章	14
第六章	10

如有的专业只需要信号分析的内容,可按每周3学时,每学期18周安排,计54学时,可将§4-7及§4-8(4学时)及第六章(10学时)删去,则讲课为46学时,习题、实验为8学时。本书是为适应教改需要而编写的,是一种尝试,没有统一的教学大纲或基本要求,各个专业可根据不同要求对本书内容加以选用或补充。

1992年6月下旬在合肥工业大学召开本教材的审稿会,由国家教委电工课程教学指导委员会主任兼电路理论与信号分析指导小组组长、东南大学管致中教授主持,清华大学郑君里教授主审,西安电子科技大学吴大正教授,大连理工大学万金良副教授,东南大学夏恭恪副教授等参加会议,对本书提出了许多宝贵意见,特向他们表示衷心的感谢!

本书第一至五章由芮坤生编写,第四章§4-7及§4-8与第六章由潘孟贤编写,各章习题由丁志中选编;本书初稿承合肥工业大学计算机与信息系计算机房芮雪等帮助打印,使书稿得以顺利完成。

编者水平所限,书中定有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1992年10月于合肥工业大学
计算机与信息系

目 录

1 信号与系统	1
1.1 信号的概念	1
1.1.1 信号的定义和描述	1
1.1.2 信号的分类	1
1.1.3 信号的运算和自变量变换	4
1.2 离散时间基本信号	8
1.2.1 单位样值序列和单位阶跃序列	9
1.2.2 正弦序列	10
1.2.3 指数序列	12
1.3 连续时间基本信号	13
1.3.1 单位阶跃信号和单位冲激信号	13
1.3.2 正弦信号和指数信号	20
1.3.3 取样函数	21
1.4 系统	21
1.4.1 系统的概念	21
1.4.2 连续时间系统及其描述	22
1.4.3 离散时间系统及其描述	23
1.4.4 系统特性	24
1.4.5 LTI 系统	27
1.4.6 几个术语	27
1.5 信号分析与处理和信号与系统	28
习题	29
2 线性时不变系统的时域分析	34
2.1 引言	34
2.2 用冲激函数表示信号	35
2.3 冲激响应和阶跃响应的定义	36
2.4 离散时间 LTI 系统:卷积和	37
2.5 连续时间 LTI 系统:卷积积分	43
2.6 冲激响应和系统的性质	51
2.7 微分方程描述系统的响应求解	52

2.7.1	自由响应与强迫响应	52
2.7.2	$t=0$ 时刻的状态跳变	55
2.7.3	零输入响应和零状态响应	56
* 2.7.4	冲激响应的时域求解	58
2.8	差分方程描述系统的响应求解	63
2.8.1	自由响应与强迫响应	63
2.8.2	零输入响应和零状态响应	66
* 2.8.3	冲激响应的时域求解	67
2.9	由微分方程或差分方程描述的系统及其方框图表示	70
2.9.1	用线性常系数微分方程或差分方程描述的系统为 LTI 系统的条件	70
2.9.2	差分方程描述系统的方框图表示	71
2.9.3	微分方程描述系统的方框图表示	72
	习题	74
3	傅里叶分析——连续时间信号与系统	79
3.1	引言	79
3.2	周期信号傅里叶级数分析	82
3.2.1	三角形式的傅里叶级数	82
3.2.2	指数形式的傅里叶级数	85
3.2.3	周期信号的频谱	88
* 3.2.4	周期信号傅里叶级数的几点补充	96
3.3	非周期信号的傅里叶变换分析	98
3.3.1	傅里叶变换的定义	98
3.3.2	非周期信号的频谱	100
3.3.3	傅里叶变换的性质及其在频谱分析中的应用	108
3.3.4	周期信号的傅里叶变换	122
3.4	连续 LTI 系统的频率特性和频域分析	126
3.4.1	连续 LTI 系统的频域表征和频域求解	126
3.4.2	滤波器的频率特性	127
* 3.4.3	因果稳定系统的频率响应特性	129
3.5	取样和量化	129
3.5.1	模拟信号的数字处理系统	129
3.5.2	时域取样分析和取样定理	133
* 3.5.3	量化	140
3.5.4	频域取样分析和取样定理	142
* 3.6	正交与相关	144
3.6.1	正交	144
3.6.2	相关	146

习题	152
4 傅里叶分析——离散时间信号与系统	156
4.1 引言	156
4.2 周期序列的傅里叶级数分析	157
4.2.1 离散复指数序列的特点	157
4.2.2 离散周期序列的傅里叶级数展开式	158
4.3 非周期序列的傅里叶变换分析	162
4.3.1 离散序列傅里叶变换的定义	162
4.3.2 非周期序列的频谱	163
4.3.3 离散时间傅里叶变换的性质	169
4.3.4 周期序列的傅里叶变换	170
4.3.5 序列的内插和抽取	174
4.4 离散 LTI 系统的频率特性和频域分析	179
4.4.1 离散 LTI 系统的频域表征和频域求解	179
4.4.2 离散系统的频率响应特性	180
4.5 连续系统频率响应与离散系统频率响应	183
* 4.6 频谱分析应用举例——子带编码	187
* 4.7 正交与相关	189
* 4.8 离散傅里叶变换(DFT)	191
4.8.1 DFT 的定义和序列频谱的离散化	191
4.8.2 周期卷积和圆周卷积	195
4.8.3 DFT 性质	200
* 4.9 快速傅里叶变换(FFT)	201
习题	209
5 拉普拉斯变换与 z 变换	213
5.1 引言	213
5.2 拉普拉斯变换	214
5.3 拉普拉斯变换的性质	218
5.4 拉普拉斯逆变换的求解	223
5.5 连续时间系统响应的 s 域求解	228
5.5.1 LTI 系统零状态响应的求解	228
5.5.2 微分方程的 s 域求解	228
* 5.5.3 电路的 s 域分析	231
5.6 系统函数和系统特性的 s 域分析	234
5.6.1 系统函数	234
5.6.2 系统函数和系统特性	235

5.6.3 系统函数和系统的频率响应特性	236
* 5.6.4 全通系统和最小相移系统	238
5.7 z 变换	240
5.8 z 变换的性质	244
5.9 逆 z 变换的求解	249
5.9.1 部分分式展开法	249
* 5.9.2 幂级数展开法	251
5.10 离散时间系统响应的 z 域求解	252
5.10.1 LTI 系统零状态响应的求解	252
5.10.2 差分方程的 z 域求解	253
5.11 系统函数和系统特性的 z 域分析	256
5.11.1 系统函数	256
5.11.2 系统函数和系统特性	256
5.11.3 系统函数和系统的频率特性	257
5.12 拉普拉斯变换和 z 变换	258
习题	261
6 模拟与数字滤波	266
6.1 引言	266
6.2 模拟滤波器的逼近	268
6.2.1 模拟滤波器模平方函数	268
6.2.2 巴特沃思低通滤波器	269
6.2.3 切比雪夫滤波器	273
* 6.2.4 高通、带通和带阻模拟滤波器的逼近	278
* 6.3 模拟滤波器的实现	280
6.3.1 无源 LC 单端口网络的综合	280
6.3.2 无源滤波器的实现	282
6.4 IIR 数字滤波器的逼近	288
6.4.1 IIR 滤波器和 FIR 滤波器	288
6.4.2 冲激响应不变法	289
6.4.3 双线性变换法	293
6.4.4 高通、带通和带阻数字滤波器的逼近	297
6.5 FIR 数字滤波器的逼近	302
6.6 数字滤波器的实现	311
6.6.1 IIR 滤波器的结构	312
6.6.2 FIR 滤波器的结构	313
习题	315
习题参考答案	318

索引	328
参考书目	331

1

信号与系统

1.1 信号的概念

1.1.1 信号的定义和描述

广义来说,一切运动或者状态的变化都是一种信号。通常把语言、文字、图像或数据等统称为信号,信号是消息的表现形式或运载工具,即消息蕴涵于信号之中。与信号密切相关的概念是信息,一般而言,信息是指从客观世界获得的新知识或者对客观事物发出的新要求,它是变化的,不可预知的,有些还可进一步认识。信息的传递、变换、存储和提取是借助信号完成的。所以信息、消息和信号三者既有密切的联系又有区别。信号的具体形式是某种物理量,如光信号、电信号、声音信号等。所谓电信号通常是指随时间变化的电压和电流,也可以是电荷或磁通以及电磁波等,电信号是应用最广的信号形式。

描述信号的基本方法是将它表示成一个或多个变量的函数,一般是时间的函数,也可以是空间或其他变量的函数。该函数的曲线或几何图像称为信号波形。为方便起见,本书讨论中一般将信号看作时间变量的函数,且认为信号和函数两种术语具有相同的含义。

1.1.2 信号的分类

为了分析和研究问题的需要,可以按照某一准则或某一信号特性对信号进行分类。例如,将信号分为连续时间信号和离散时间信号;周期信号和非周期信号;确定性信号和随机信号等。