



“十三五”国家重点图书
电子与信息工程系列

SIGNALS AND SYSTEMS

信号与系统

(第4版)

● 张 晔 主编



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十三五”国家重点图书
电子与信息工程系列

SIGNALS AND SYSTEMS

信号与系统

(第4版)

● 张 晔 主编

● 张钧萍 张腊梅 胡 航 陈 静 参编



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

信号与系统的基本理论、基本概念和基本分析方法已被广泛应用于众多领域,已成为电子、通信、信息、测控、电气、遥感等专业的重要技术基础课。

本书共9章,分三个层次。第1章是本书涉及的基础理论,第9章是针对多输入-多输出的信号与系统分析;对于连续时间信号与系统分析,第2章介绍时域分析,第3~4章是变换域分析;对于离散时间信号与系统分析,第6章介绍时域分析,第7~8章是变换域分析;第5章介绍连续时间信号离散化和离散信号的连续化恢复,是连接连续、离散信号与系统的桥梁和纽带。

本书内容全面、简练,把信号和系统的分析(时域和变换域)统一在一个理论模型框架下,并建立了以卷积定理和抽样定理为纽带的立体架构。此外,本书还注重了数学模型和物理模型的统一、连续和离散的并重,且加强了相关领域概念的分析和解译,力求更适合于学生的学习、消化和理解。

本书可作为高等院校电子和信息领域各专业《信号与系统》课程的教材,也可以作为相关专业的教师、研究生以及科技人员的参考资料。

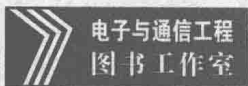
图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/张晔主编.—4版.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2018.1

ISBN 978-7-5603-7162-7

I. ①信… II. ①张… III. ①信号系统—高等学校—教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第319524号



策划编辑 许雅莹 杨桦 张秀华

责任编辑 许雅莹

封面设计 刘洪涛

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 23.25 字数 565千字

版 次 2011年2月第1版 2018年1月第4版第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-7162-7

定 价 44.00元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

“十三五”国家重点图书 电子与信息工程系列

编 审 委 员 会

顾 问 张乃通

主 任 顾学迈

副 主 任 张 晔

秘 书 长 赵雅琴

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 钢 邓维波 任广辉 沙学军

张钧萍 吴芝路 吴 群 谷延锋

孟维晓 赵洪林 赵雅琴 姜义成

郭 庆 宿富林 谢俊好 冀振元

序

FOREWORD

教材建设一直是高校教学建设和教学改革的主要内容之一。针对目前高校电子与信息工程教材存在的基础课教材偏重数学理论,而数学模型和物理模型脱节,专业课教材对最新知识增长点和研究成果跟踪较少等问题,及创新型人才的培养目标和各学科、专业课程建设全面需求,哈尔滨工业大学出版社与哈尔滨工业大学电子与信息工程学院的各位老师策划出版了电子与信息工程系列精品教材。

该系列教材是以“寓军于民,军民并举”为需求前提,以信息与通信工程学科发展为背景,以电子线路和信号处理知识为平台,以培养基础理论扎实、实践动手能力强的创新型人才为主线,将基础理论、电信技术实际发展趋势、相关科研开发的实际经验密切结合,注重理论联系实际,将学科前沿技术渗透其中,反映电子信息领域最新知识增长点和研究成果,因材施教,重点加强学生的理论基础水平及分析问题、解决问题的能力。

本系列教材具有以下特色:

(1) **强调平台化完整的知识体系。**该系列教材涵盖电子与信息工程专业理论基础课程,对现有课程及教学体系不断优化,形成以电子线路、信号处理、电波传播为平台课程,与专业应用课程的四个知识脉络有机结合,构成了一个通识教育和专业教育的完整教学课程体系。

(2) **物理模型和数学模型有机结合。**该系列教材侧重在经典理论与技术的基础上,将实际工程实践中的物理系统模型和算法理论模型紧密结合,加强物理概念和物理模型的建立、分析、应用,在此基础上总结牵引出相应的数学模型,以加强学生对算法理论的理解,提高实践能力。

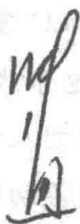
(3) **宽口径培养需求与专业特色兼备。**结合多年来有关科研项目的科研经验及丰硕成果,以及紧缺专业教学中的丰富经验,在专业课教材编写过程中,在兼顾电子与信息工程毕业生宽口径培养需求的基础上,突出军民兼用特色,在

满足一般重点院校相关专业理论技术需求的基础上,也满足军民并举特色的要求。

电子与信息工程系列教材是哈尔滨工业大学多年来从事教学科研工作的各位教授、专家们集体智慧的结晶,也是他们长期教学经验、工作成果的总结与展示。同时该系列教材的出版也得到了兄弟院校的支持,提出了许多建设性的意见。

我相信:这套教材的出版,对于推动电子与信息工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

哈尔滨工业大学教授 张乃通
中国工程院院士



2010年11月于哈工大

第4版前言

PREFACE

《信号与系统》是电子、通信、信息、测控、电气、遥感等专业的第一门技术基础课。该课程涉及的概念多、理论抽象、方法求解难等问题,历来是老师难教、学生难学的课程。本书是针对哈尔滨工业大学电子与信息工程学院对《信号与系统》课程教学改革的需求而编写的。

多少年来,尽管科学技术飞速发展,但作为信息领域技术基础的《信号与系统》课程而言,所涉及的内容相对稳定、数学模型基本不变。而变化的仅是应用需求,也就是物理模型的改变,具体变化主要体现在信号和系统两个方面:在信号方面,主要包括探测信号方式的多样化、信号所描述的内容更丰富、信号分析的要求更严格等;在系统方面,主要包括构成系统的结构更复杂、系统规模的集成度更高、系统分析的应用更广泛等。为了适应新形式的发展,《信号与系统》课程教学的关键问题是,如何把它的基础知识与信息技术的发展相结合,如何与前面课程(如电路等)和后续课程(如数字信号处理、通信电子线路等)相衔接,以及如何把所学的数学理论和分析方法,应用到实际的物理模型和技术中。

本书共9章,分三个层次。第1章对本书所涉及的基本概念、基本理论和基本分析方法进行介绍,是本书其他章节的基础,第9章介绍信号与系统的状态变量分析方法,主要是针对多输入-多输出的信号与系统;第2章~第8章是本书的核心内容。第2章、第3章和第4章对连续时间信号与系统分析进行介绍,其中第2章主要介绍时域分析方法,第3章和第4章主要是变换域分析方法,包括傅里叶变换和拉普拉斯变换分析方法。第6章,第7章和第8章对离散时间信号与系统分析进行介绍,其中第6章主要介绍时域分析方法,第7章和第8章主要是变换域分析方法,包括Z变换和离散傅里叶变换分析方法;为了使连续和离散的分析相互转换、达到统一,第5章主要介绍了连续时间信号离散化和离散信号的连续化恢复,可以说,它是连接连续(第2章、第3章和第4章)、离散(第6章、第7章和第8章)信号与系统的桥梁和纽带。

本书的突出特点主要体现在以下五个方面:

1. 把信号和系统的分析(时域和变换域)统一在一个理论模型框架下

对本课程涉及的确定性信号和线性非时变系统而言,信号和系统分析的共同理论基础是线性叠加原理。任何信号都可以分解成典型基本单元信号的线性组合,而时域分析和变换域分析的主要区别在于分解基元函数的不同;分解信号的分量分别通过线性非时变系统

时,则每个分量的响应叠加就是系统的总响应,这是系统分析的基本出发点。从以上两个方面可以清晰地看出信号分析(分解)和系统分析方法之间的相互关系。

2. 建立了以卷积定理和抽样定理为纽带的立体架构

本书以卷积定理和抽样定理为纽带,采用连续和离散相对应、时域和变换域并行、信号和系统相辅相成的立体架构。在信号分析和系统分析的关系上,信号分析放在相关章节的系统分析前单独介绍,以强调信号和信号特性本身就是很重要的,并且是系统分析所必须的;在时域分析和变换域分析的关联上,时域分析在前、变换域分析在后,并强调卷积定理在它们之间的桥梁作用;抽样定理作为单独一章,放在连续与离散之间,可以看做是从连续时间到离散时间的一个过渡,这样的安排特别有利于连续时间和离散时间的衔接,更有利于理解和掌握二者之间的同一性和差异性。

3. 注重了数学模型和物理模型的统一

针对本课程涉及的数学工具较多,学生往往在学习过程中过多地关注数学模型,而淡化其物理模型的状况,我们加强了物理意义的引入和解释,力图把物理模型和数学模型达到统一。在学习过程中,使学生把精力主要集中到对物理概念、意义和分析方法的理解和掌握上,而不必把时间花费在复杂的计算,过多地强调数学求解的间接性、技巧性和特殊性等数学问题上。进而使学生改变观念和学习方法,突出系统概念和分析过程,以提高学生分析实际问题的能力,以利于对学生实践潜能的培养。

4. 凸显了连续和离散的并重性

连续系统和离散系统分析,既相互独立又相互对应。随着计算机技术的发展,尽管连续信号和系统物理概念相对明确,但离散信号和离散系统必将成为应用和处理的主体。本书首先给出连续时间的分析,而其相关知识也有助于理解离散时间信号的频谱和离散傅里叶变换的特性。在具体介绍过程中,加强了离散时间与连续时间的对比分析,避免不必要的重复,同时也注重了离散时间的独特意义和深层次的进化。

5. 加强了相关领域概念的分析 and 解释

在连续系统分析中,在介绍傅里叶变换、拉普拉斯变换的数学概念、基本性质和工程应用背景基础上,特别突出了傅里叶变换具有明确的物理意义,在信号频谱分析中具有特殊的地位。同时加强了离散信号与系统中的概念,如 Z 变换、DTFT、DFT、FFT等定义的出发点及与连续信号与系统相应概念的联系与差异。本书第5章引入了滤波器的概念,它利用了前面章节研究的信号与系统分析方法,反过来,也可以通过滤波器由离散时间信号恢复连续时间信号。这些内容都可以认为是分析方法应用的很好例子,为以后信号处理的学习提供了有益的基础。

此外,本书的习题侧重了综合。为了使学生巩固知识、更好地理解学过的内容,书中各章都配备了典型的例题和难度适当的习题,而且在习题的选取上,特别选择了几道综合性习

题,尽量把该章和该章以前章节学过的内容能够联合运用。

本书由哈尔滨工业大学电子与信息工程学院张晔教授主编,张钧萍、张腊梅、胡航、陈静等参加了编写工作。本书在编写的过程中,作者对每一字句都进行了认真的推敲,以便简化教材内容,提高可读性;对书中的图、表和例题都进行了认真研究,以便使它们有助于课程内容的理解和消化;对涉及的概念、理论和方法,都进行了适当的评述和分析,以便理解它们的物理意义和应用价值。作者认为,教师在教学过程中应该重点把这些要点给学生讲清楚,而过多的数学推导和计算可以留给学生自学。

本书的筹备和编写过程得到了哈尔滨工业大学电子与信息工程学院张乃通院士的亲切关怀。张院士对本书的内容和特点听取了汇报,并提出了许多指导性意见,在此向张院士表示崇高敬意和衷心感谢。

对本书的试用稿,哈尔滨工程大学、哈尔滨理工大学、黑龙江大学等几所大学的相关教学人员提出了许多建设性意见。哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 07 级、08 级部分本科生代表,08 级、09 级部分研究生代表,对本书的试用稿进行了试用或阅读,提出了许多宝贵意见;此外,作者还从网络上搜索了大量热心网友关于对《信号与系统》课程的评论和建议,对本书的编写都起到了积极的作用。在此,作者对上述人员的反馈信息和帮助,表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有一些不足之处,特别是一些评述,可能属于开放性学术问题,难免有不恰当之处,敬请各位读者批评指正。

张 晔

2017 年 12 月 1 日于哈尔滨

目 录

CONTENTS

第 1 章 信号与系统分析的理论基础	1
1.1 引 言	1
1.2 信号与系统的分类	4
1.3 典型信号及信号与系统分析的基本过程	7
1.4 奇异函数	10
1.5 正交函数基	17
1.6 线性非时变系统	22
1.7 系统分析的基本方法	23
1.8 卷 积	24
1.9 本章小结	29
习 题	31
第 2 章 连续时间信号与系统的时域分析	34
2.1 信号的时域运算	34
2.2 信号的时域分解	37
2.3 系统模型及响应的经典解法	39
2.4 系统的零输入响应	47
2.5 系统的零状态响应	51
2.6 线性系统的时域模拟	58
2.7 系统响应的计算机求解	63
2.8 本章小结	64
习 题	65
第 3 章 连续时间信号与系统的频域分析	69
3.1 周期信号的频谱分析——傅里叶级数	70
3.2 典型周期信号的频谱	77
3.3 非周期信号的频谱分析——傅里叶变换	84
3.4 典型信号的傅里叶变换	87
3.5 傅里叶变换的基本性质	93

3.6	卷积定理	102
3.7	周期信号的傅里叶变换	106
3.8	系统的频域分析及响应	109
3.9	已调信号的频谱	116
3.10	本章小结	120
	习 题	122
第 4 章	连续时间信号与系统的复频域分析	129
4.1	拉普拉斯变换	130
4.2	拉普拉斯变换的基本性质	136
4.3	拉普拉斯反变换	143
4.4	系统的拉普拉斯变换域分析法	149
4.5	系统的零、极点分布与系统特性	158
4.6	系统的因果性与稳定性	168
4.7	线性系统的 s 域模拟	171
4.8	本章小结	173
	习 题	175
第 5 章	连续时间信号离散化及恢复	179
5.1	抽样信号及其频谱	179
5.2	抽样定理	185
5.3	理想滤波器的分析	188
5.4	系统的无失真传输	193
5.5	连续时间信号的恢复	196
5.6	本章小结	203
	习 题	203
第 6 章	离散信号与系统的时域分析	207
6.1	离散 vs 连续信号与系统	207
6.2	离散时间信号的运算与分解	209
6.3	离散时间系统的描述	214
6.4	离散系统响应的递归迭代解法	220
6.5	离散系统响应的经典解法	221
6.6	系统的零输入响应和零状态响应	226
6.7	本章小结	235
	习 题	236
第 7 章	离散信号与系统的 z 域分析	239
7.1	z 变换	239

7.2	Z 反变换	243
7.3	Z 变换的基本性质	248
7.4	Z 变换与拉普拉斯变换的关系	255
7.5	离散系统响应的 z 域分析	257
7.6	离散系统的时域特性	262
7.7	离散系统的频率响应	264
7.8	本章小结	268
	习 题	270
第 8 章	离散傅里叶变换及应用	274
8.1	离散傅里叶级数	274
8.2	离散傅里叶变换	278
8.3	离散傅里叶变换的基本性质	282
8.4	离散傅里叶变换与 Z 变换的关系	290
8.5	快速傅里叶变换	292
8.6	离散傅里叶变换的应用	298
8.7	本章小结	301
	习 题	302
第 9 章	系统的状态变量分析法	304
9.1	状态变量与状态方程	304
9.2	状态方程的建立	310
9.3	连续系统状态方程的解法	317
9.4	离散系统状态方程的解法	328
9.5	系统的可控性和可观性	335
9.6	本章小结	339
	习 题	339
	习题参考答案	343
	参考文献	355

第 1 章

信号与系统分析的理论基础

信号与系统是电子、通信、信息类专业重要的技术基础课,主要是通过描述信号和系统的数学模型来研究和说明信号与系统的分析方法。信号和系统是表示与物理设备或现象相关联的重要概念的术语,例如电路可以看做是一个系统,它是由电阻、电容等功能元件和电流、电压这样的信号构成。而数学模型是用来描述信号和系统的数学公式,使用它们可以对信号和系统进行数学分析,以确定信号特性和系统功能。本章作为信号与系统分析的理论基础,共涉及 8 节:第 1 节主要介绍信号、系统、激励、响应等一些概念,并描述本书的总体框架;第 2 节主要针对本书涉及的两大领域——信号分析和系统分析,介绍了信号与系统的通常分类方法;第 3 节在介绍典型信号的基础上,系统介绍本书对信号与系统分析的基本过程,重点是建立线性叠加原理的概念,即信号分解(分解成典型信号)、典型信号分别经过系统、分别求响应、最后叠加求总响应;第 4 节和第 5 节主要针对信号分析的两大类方法——时域法和变换域法,引入时域分析中的奇异函数和变换域分析中的正交基函数的概念,它们是信号分析的重要基础,占有重要的地位;第 6 节和第 7 节重点介绍本书涉及的线性非时变系统及其信号经过这样系统的基本分析方法,线性非时变性是本书进行信号与系统分析的前提;第 8 节主要对系统分析中所使用的基本技术——卷积,进行详细地介绍,目的是进一步凸显卷积在线性非时变系统分析中的重要作用。

1.1 引言

在人类的社会生活中,为了实现人类社会职能乃至维持人类本身的生存,人们必须不断地以某种方式、通过某种系统发送消息和接收消息,并对其携带信息的信号进行加工处理或转换成所要求的形式,从而更好地服务于人类。例如,我国古代利用烽火台的火光,传送敌人入侵的警报信息;人们利用击鼓鸣金的音响声,传达战斗命令信息等。人们这种将待传送的消息转换为光和声的形式,即形成了光信号和声信号。可见,所谓的信号就是携带信息的一种载体,而根据载体的不同,可以有不同的信号形式。然而在当时,由于技术的限制,信号的形式和内容以及传递信号的方式都是很简单的。因此要实现信号的传送,无论在距离、速度及可靠性等方面都受到很大局限。

19 世纪以后,人们开始利用所谓的电信号传送消息,并从此进入了近代通信时代。1837 年,莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报,将待传送的字母和数字经编码后变成电信号进行传输。1876 年,贝尔(A. G. Bell)发明了电话,直接将声音转变为电信号沿导线传送。与此同时,人们致力于研究电信号的无线传输也有突破。1865 年,英国的麦克斯韦



(J. C. Maxwell)总结了前人的科学技术成果,提出了电磁波学说。1887年,德国的赫兹(H. Hertz)通过实验证实了麦克斯韦的学说,从而为无线电电子科学的发展奠定了理论基础。1895年,俄国的波波夫(A. C. Popov)、意大利的马可尼(G. Marconi)实现了电信号的无线传送。这样,经过科学家们的不断努力,终于实现了利用电磁波传送信号的美好理想。从此以后,现代通信手段不断孕育而生,传送电信号的通信方式也得到迅速发展,无线广播、超短波通信、广播电视、雷达、无线电导航、遥感、卫星通信、深空探测等相继出现,并且已经应用到工农业生产、国民经济管理、国防、航空航天及人们日常生活的各个方面。

无线电电子技术的发展和应用,归根到底是要解决信号探测、传输和处理问题,也就是根据不同物理事件形成的不同信号,建立一个传输装置或进行加工处理的系统,进而来满足人们的应用需求,如图1.1.1所示。广义来讲,系统是由一些相互作用和相互依赖的事物组成的具有特定功能的整体。相对于系统而言,输入信号常称为激励,输出信号常称为响应。激励是外界对系统的作用,响应是激励和系统共同作用的结果。这样,为了便于系统分析需要什么样的激励,根据给定的激励和所要求的响应需要什么样的系统,激励经过系统产生什么样的响应等一系列问题的研究,形成了信号与系统这门技术基础课程。

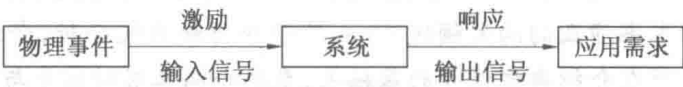


图 1.1.1 激励、系统与响应

需要进一步说明的是系统的含义极其广泛,可包括物理系统和非物理系统、人工系统和自然系统,如通信系统、自动控制系统、机械系统,以及生产管理、交通运输、生物的群落、自然界中水的循环、太阳系等。在具体应用中,一个完整的系统往往也可能包含若干个子系统,每个子系统完成相对独立的部分功能,通过这些子系统的不同组合(串联或并联)来共同作用完成系统的整体功能。

在无线电电子学中,信号与系统之间存在着十分密切的联系。离开了信号,系统将失去存在的意义。例如,一个电视系统,要传送的消息是配有声音的图像画面。该系统首先要利用电视摄像机拍摄场景画面,再把它转换成图像信号,同时利用话筒把声音转换成伴音信号,经过合成处理就形成了待传送的全电视信号。图1.1.2给出了这种信号的基本形式,图1.1.2(a)是一段表示“哈尔滨工业大学”的语音信号,它是一个随着时间 t 变化而变化的一维函数 $f(t)$,一般称为一维信号。该信号表明,随着语音音素的不同,其幅度和变化周期都随时间有显著变化。图1.1.2(b)是一帧“哈尔滨工业大学主楼”的图像信号,它是随着空

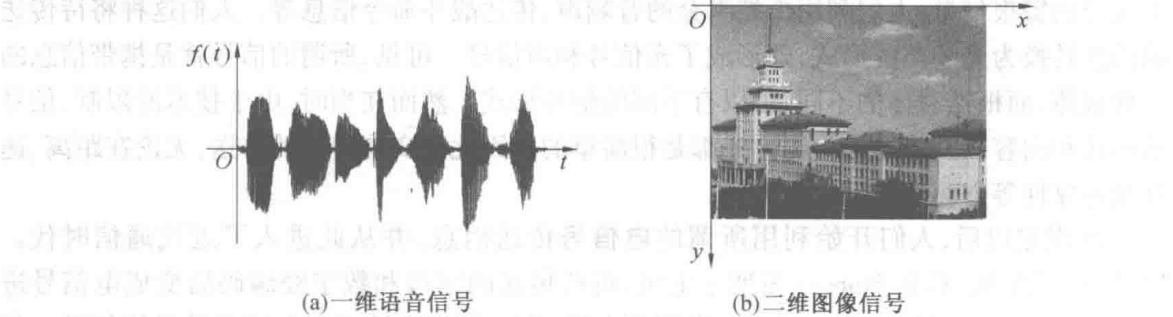


图 1.1.2 全电视信号中的语音信号和图像信号



间位置 (x, y) 变化而变化的二维函数 $f(x, y)$ ，一般称为二维信号。该信号反映的是空间某个位置的光强度大小，该值越大，表明该位置的能量越强。

由于一般的信号振荡频率较低，例如语音信号主要集中在 3.2 kHz 以内，图像信号主要集中在 6.0 MHz 以内，这样很难直接在天线上激励起电磁波，因此需要利用电视发射机把全电视信号变换为频率更高的信号，通过天线将这种高频信号转换为电磁波发射出去，电磁波携带所要求的信息在空间传播。在接收端，电视接收天线截获到电磁波的部分能量，并将其转变成微弱的高频电信号，送入电视接收机。电视接收机将高频信号的频率降低，变回全电视信号，再分解为图像信号和伴音信号，并分别送到显像管和喇叭，于是我们就能收看到配有伴音的图像画面，从而得到发送端的消息。该过程如图 1.1.3 所示，可概括为三个方面：消息与信号之间的能量转换、信号处理和信号传输。我们看到，这种通信系统是以信号为核心进行工作的，信号是通信系统中所传输的主体，而系统中所包含的各种电路、设备只是实现这种传输的手段。为了保证信号以尽可能小的失真进行传输及得到满意的处理结果，作为无线电技术工作者应首先研究信号的特性，即进行信号分析。

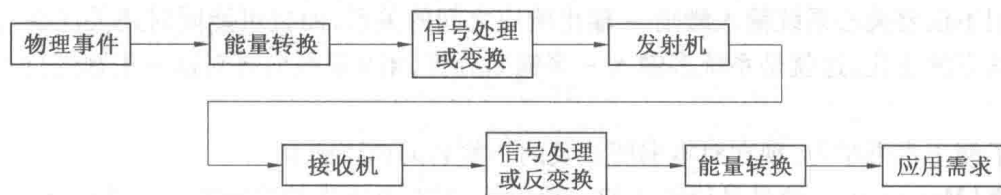


图 1.1.3 电视信号传输与处理系统

尽管以上是以电视传输系统为例介绍的，但它具有普遍意义，图 1.1.4 给出了一个描述信号与系统的一般框图模型，其中， $e_1(t), e_2(t), \dots, e_p(t)$ 是系统的 p 个输入信号，即系统的激励； $r_1(t), r_2(t), \dots, r_q(t)$ 是系统的 q 个输出信号，即系统的响应。如果 $p = q = 1$ ，系统是一个单输入 - 单输出的系统，这是本书前 8 章重点要介绍的内容；如果 $p > 1$ 和 $q > 1$ ，则系统是一个多输入 - 多输出的系统，我们将在第 9 章详细介绍。



图 1.1.4 具有 p 个输入和 q 个输出的系统

研究系统必然涉及网络的概念。网络 and 系统都是完成对信号传输、加工处理的设备。系统的核心是输入激励与输出响应之间的关系或者运算，而网络问题的着眼点则在于应有怎样的结构和参数。通常认为，系统比网络更复杂、规模更大的组合，但在实际应用中却很难从复杂程度或规模大小来区分网络 and 系统。确切地说，系统与网络二者的区别应体现在观察事物的着眼点或处理问题的角度上。系统的着眼点在于全局，而网络的着眼点则注意局部。例如仅由一个电阻和一个电容组成的 RC 电路，在网络分析中，注意研究其各支路和回路的电流或电压，而从系统的观点来看，可以研究它如何构成具有积分或微分功能的运算器。

信号、信号处理和信号传输的共同点是信号分析和系统分析，包括连续时间信号与系统



分析(第2章~第4章)和离散时间信号与系统分析(第6章~第8章)。为了使连续时间和离散时间的信号分析相互转换、达到统一,需要深入了解从连续信号转换为离散信号的**抽样定理**和由离散信号再转换为连续信号的**信号恢复**(第5章)。可以说,**抽样定理是连接连续、离散信号与系统的桥梁和纽带**。从信号与系统分析方法的角度,通常包括时(空)域分析方法和变换域分析方法。对于连续时间信号与系统分析,第2章主要介绍时域分析方法,第3章和第4章主要介绍变换域分析方法,包括傅里叶变换和拉普拉斯变换分析方法,它们分别对应信号的频域和复频域;对于离散时间信号与系统分析,第6章主要介绍时域分析方法,第7章和第8章主要介绍变换域分析方法,包括Z变换和离散傅里叶变换分析方法,它们是通过计算机使信号处理走向应用的重要环节。为了使时域和变换域分析方法达到统一,需要深入了解**卷积定理**。可以说,**卷积定理是连接时域分析与变换域分析的桥梁和纽带**。

此外,无论是连续时间信号与系统分析,还是离散时间信号与系统分析(第2章~第8章),它们主要关心的是信号作用于系统时,系统的激励与响应之间的关系,没有考虑系统内部参数或状态的变化情况,这种分析通常称为**单输入-单输出分析**。而在实际应用中,有时人们不仅要关心系统输入激励-输出响应之间的关系,而且可能同时还关注系统内部参数或状态的变化,这就是**系统多输入-多输出分析**,第9章我们将对这一主题进行专门介绍。

为了便于本书学习,现在对本书所涉及的一些名词稍作解释。

消息(Message) 消息是待传送的一种以收、发双方事先约定的方式组成的符号,例如语言、文字、电码等。

信号(Signal) 信号是携带消息的载体。按照习惯,人们通常将用于描述和记录消息的任何物理状态随时间变化的过程表示为信号。由于消息一般不便直接传输,故需要把消息转换成相应变化的电压或电流,即电信号。可以这样理解,信号是消息的一种表现形式,而消息是信号的具体内容。

信息(Information) 信息是指包含在消息中的有效成分。

信号处理(Signal Processing) 信号处理主要是通过某种手段,对信号进行加工处理,进而提取需要信息的过程。

系统(System) 系统是由一些相互作用和相互依赖的事物组成的具有特定功能的整体。

能量转换器(Energy Converter) 能量转换器是把消息转换为电信号,或者反过来把电信号还原成消息的装置,如摄像管和显像管、话筒和喇叭等。由于这些装置具有将一种形式的能量转换为另一种形式能量的功能,所以也常称其为**能量换能器**。

信道(Channel) 信道是信号传输的通道,它可以是双导线、同轴电缆和波导,也可以是空间和人造卫星,或者是光导纤维。有时发射机和接收机也可以看成是信号的通道。

1.2 信号与系统的分类

对于实际应用中的各种信号与系统,由于应用的出发点不同,可以从不同的角度进行分类,因而也就有不同的分类方法。我们这里只介绍几种通常的分类方法。



1.2.1 信号的分类

由上一节讨论可知,信号是运载消息的载体,其最常见的表现形式是随时间变化的电压或电流,因此描述信号的常用方法是用抽象的数学模型或数学表达式(也可以用直观的绘图)来表示。

1. 确定性信号与随机信号

所谓确定性信号是指信号是一个确定的时间函数,即给定某一时间值,就可以确定出一个相应的函数值,确定性信号又称为规则信号。然而在实际应用中,人们所获得的信号往往具有不可预知的不确定性,这种信号通常称为随机信号或不确定性信号。严格来说,在自然界中确定性信号是不存在的。因为在信号获取和传输过程中,不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响,这些干扰和噪声都具有随机特性。对于随机信号不能表示为确切的时间函数,只能用统计模型或方法进行研究。由于确定性信号是任何信号分析的基础,所以本书主要研究确定性信号,对于随机信号将在其他相关课程中进行介绍。

2. 周期信号与非周期信号

在确定性信号中,又可分为周期信号和非周期信号。所谓周期信号就是依一定的时间间隔周而复始、无始无终地重复着某一变化规律的信号,可以表示为

$$f(t) = f(t + nT) \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1.2.1)$$

满足式(1.2.1)关系的最小 T 值称为周期信号的周期。非周期信号是在时间上不具有这种周而复始变化的规律,或者可以认为是周期 T 趋于无限大的周期信号。当然,真正的周期信号实际上是不存在的,所谓周期是指在相当长的时间内按某一规律重复变化的信号。本书既涉及周期信号,也涉及非周期信号。

3. 连续时间信号与离散时间信号

信号按照时间函数自变量取值的连续性和离散性可分为连续时间信号与离散时间信号(简称连续信号与离散信号)。如果在某一时间范围内,对于任意时间的函数值,除若干个不连续点外,都可以给出确定的值,则这类信号称为连续信号。如图1.2.1所示的正弦波和矩形波,都是在 $-\infty < t < +\infty$ 时间范围内的连续信号。只是在图1.2.1(a)中 $t < 0$ 和图1.2.1(b)中 $t < 0$ 及 $t > t_0$ 的范围内信号值均为零,并且图1.2.1(b)中在 $t = 0$ 和 $t = t_0$ 处存在两个不连续点。

需注意,连续信号的幅值可以是连续的,即可以取任何实数,如图1.2.1(a)所示,也可以是离散的,即可以取有限个规定的数值,如图1.2.1(b)所示。对于时间和幅值都是连续的信号又称为模拟信号,如图1.2.1(a)所示。

与连续信号相对应的是离散信号,它们是离散时间的函数,只在某些不连续的规定瞬间给出函数值,其他时间函数没有定义。如在图1.2.2(a)中,函数 $f(t_k)$ 只在 $t_k = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 离散时刻分别给出函数值 $1.3, -1.7, 2, 3, 1, 4, 1, -2.5, \dots$ 此时的函数幅值可以取任意实数。

值得注意的是,离散时间间隔一般都是均匀的(对应于均匀抽样,第5章将介绍),也可以是不均匀的(对应于非均匀抽样)。对于给出均匀间隔的离散信号,通常也称为均匀序列,以 $f(nT)$ 表示,这里 T 为抽样间隔; n 取整数,表示各点函数值在序列中出现的序号。如