

应用型本科 电子及通信工程专业“十三五”规划教材

信号与系统分析

(第二版)

徐亚宁 李 和 编著

- 内容新颖：新知识、新技术、新工艺
- 特色鲜明：突出“应用、实践、创新”
- 定位准确：面向工程技术型人才培养
- 质量上乘：应用型本科专家全力打造



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

应用型本科电子及

“五”规划教材

信号与系统分析

(第二版)

徐亚宁 李 和 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在西安电子科技大学出版社出版的《信号与系统分析》(2012年)一书的基础上修订而成的。本书系统论述了信号与系统分析的基本理论与方法,以及利用MATLAB进行信号与系统分析的方法。全书共7章,内容包括:绪论、连续时间信号与系统的时域分析、连续时间信号与系统的频域分析、连续时间信号与系统的复频域分析、离散信号与系统的时域分析、离散信号与系统的 z 域分析、系统的信号流图及模拟。

本书构思新颖、实践性强,内容叙述清楚、深入浅出,所有应用实例均已通过MATLAB上机调试。各章后均附有大量的习题和相应的上机练习题,供读者练习实践。

本书可作为普通高等学校电子信息类及相关专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统分析/徐亚宁,李和编著. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.5
应用型本科电子及通信工程专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4429-5

I. ①信… II. ①徐… ②李… III. ①信号分析 ②信号系统—系统分析 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 068818 号

策 划 马乐惠

责任编辑 杨 璠 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017年5月第2版 2017年5月第3次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.5

字 数 438千字

印 数 6001~9000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-4429-5/TN

XDUP 4721002-3

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本版本是在保留了第一版书基本结构层次的基础上,对其内容的补充和修正。此次修订结合了近几年教学内容和教学方法改革的成果,广泛听取并研究了教师和学生的意见,旨在适应当代信息科学和技术发展的需求,为相关领域输送更多的应用型人才。

“信号与系统分析”是高等院校电子信息类专业本科生的一门重要专业基础课程,具有概念抽象、数学公式推导较为复杂、结果较难理解等特点,且有很强的理论性和实用性。该课程是将学生从电路分析领域引入信号处理与传输领域的关键性课程,对后续专业课有着承上启下的作用。其中的基本分析方法和理论广泛应用于通信、自动控制、信号与信息处理、电路与系统等领域。因此,让学生掌握信号与系统分析的基本理论和方法,无论是对后续专业课的学习,还是对工作后专业能力的培养,均具有重要的意义。

本书是根据高等院校电子信息类专业基础课教学指导委员会对该门课程的基本要求及本科应用型人才的培养目标而编写的,参考学时为 64 学时。本书在内容上力求精选内容、加强基础、例题典型、重点突出;在方法上力求使学生在学信号与系统分析的基本理论和方法的同时,深入掌握 MATLAB 的使用,将大量繁杂的数学运算用计算机实现,并将课程中的重点、难点及例题用 MATLAB 进行形象、直观的计算机模拟与仿真实现,从而加深学生对信号与系统分析的基本原理、方法及应用的理,实现从基本理论到实际应用的过渡,强化学生的工程应用能力和创新能力。

要全面掌握“信号与系统分析”这门课程,必须要有足够数量的练习作保证,因此,本版本中修订了例题、习题的数量和类别,以求用例题阐述具体的分析方法,用不同层次的习题加强与正文内容的密切配合,有利于学生更好地理解这门课程的基本内容,提高分析计算能力。

本书所有 MATLAB 程序都经过运行,其结果都与上机分析结果一致。书中 MATLAB 例题的选取与课后的上机练习相关,以帮助学生课后进一步理解相应的理论知识,并为学培养创新能力提供机会。

本版本由桂林电子科技大学的徐亚宁、桂林电子科技大学信息科技学院的李和共同编著。另外,桂林电子科技大学信息科技学院的欧阳玉梅、汪淑贤,广西大学行健学院的赵玲峰,广西科技大学鹿山学院的曹乃文,桂林理工大学博文管理学院的雷亚平参与了部分章节的编写。

限于编者水平,书中定有不少疏漏和差错,敬请读者批评指正。E-mail: xuyanin@guet.edu.cn

编者

2016 年 12 月

第一版前言

“信号与系统分析”是高等院校电子信息类专业本科生的一门重要专业基础课程，其内容是研究信号与系统的基本概念和基本分析方法。通过本课程的学习，应初步认识如何建立信号与系统的数学模型，如何求解系统响应，并对所得结果予以物理意义。

本书是根据高等院校电子信息类专业基础课教学指导委员会对该门课程的基本要求及本科应用型人才培养目标而编写的，参考学时数为 64 学时。本书在内容上力求精选内容、加强基础、例题典型、重点突出；在文字论述上力求简洁明了、通俗易懂；在方法上力求使学生在学信号与系统分析的基本理论和方法的同时，深入掌握 MATLAB 的使用，将大量繁杂的数学运算用计算机实现，并将课程中的重点、难点及课后练习用 MATLAB 进行形象、直观的计算机模拟与仿真实现，从而加深学生对信号与系统基本原理、方法及应用的理，强化培养学生的工程应用能力和创新能力。

书中所有 MATLAB 程序都经过运行，所有结果都与上机分析结果一致，以帮助学生课后进一步理解相应理论知识。书中 MATLAB 例题的选取与课后上机练习相关，给学生培养创新能力提供机会。

本书由桂林电子科技大学徐亚宁、桂林电子科技大学信息科技学院李和编著。桂林电子科技大学信息科技学院唐璐丹、王旬，广西大学行健学院赵玲峰，广西工学院鹿山学院曹乃文，桂林理工大学博文管理学院雷亚平参加了部分章节的编写。

限于编者水平，书中定有不少疏漏和差错，恳请读者批评指正！

编 者

2012 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号与系统	1
1.2 信号的描述与分类	2
1.2.1 确定信号与随机信号	2
1.2.2 连续时间信号与离散时间信号	3
1.2.3 周期信号与非周期信号	4
1.2.4 能量信号与功率信号	4
1.2.5 一维信号与多维信号	4
1.3 系统的描述与分类	4
1.3.1 线性时不变(LTI)系统	5
1.3.2 因果性和因果系统	7
1.3.3 稳定性和稳定系统	7
1.4 信号与系统分析方法概述	8
1.5 MATLAB 基本知识	8
1.5.1 MATLAB 简介	8
1.5.2 MATLAB 快速入门	9
习题	12
第 2 章 连续时间信号与系统的时域分析	15
2.1 常用信号及信号的基本运算	15
2.1.1 常用信号	15
2.1.2 信号的基本运算	16
2.1.3 常用信号及其运算的 MATLAB 实现	20
2.2 单位阶跃信号和单位冲激信号	28
2.2.1 单位阶跃信号	28
2.2.2 单位冲激信号	29
2.2.3 冲激信号的性质	29
2.2.4 阶跃信号和冲激信号的 MATLAB 表示	31
2.3 连续系统及其描述	33
2.4 连续系统的零输入响应	35
2.4.1 连续系统的零输入响应求解	35
2.4.2 连续系统的零输入响应的 MATLAB 实现	36
2.5 冲激响应和阶跃响应	37
2.5.1 冲激响应和阶跃响应的定义及计算	37
2.5.2 冲激响应和阶跃响应的 MATLAB 实现	39
2.6 连续系统的零状态响应——卷积积分	44
2.6.1 卷积积分	44
2.6.2 卷积积分的图解法	46
2.6.3 卷积积分的性质	48

2.6.4 卷积积分的 MATLAB 实现	51
2.7 连续系统的时域分析	58
2.7.1 连续系统的时域分析方法	58
2.7.2 利用 MATLAB 求解零状态响应	59
习题	62
上机练习	71
第 3 章 连续时间信号与系统的频域分析	72
3.1 周期信号的傅里叶级数分析	72
3.1.1 三角函数形式的傅里叶级数	72
3.1.2 复指数形式的傅里叶级数	75
3.1.3 周期信号频谱的特点	79
3.1.4 周期信号频谱分析的 MATLAB 实现	80
3.2 非周期信号的傅里叶变换分析	84
3.2.1 从傅里叶级数到傅里叶变换	84
3.2.2 频谱函数 $F(j\omega)$ 的特性	86
3.2.3 典型非周期信号的傅里叶变换	87
3.2.4 非周期信号频谱的 MATLAB 求解	91
3.3 傅里叶变换的性质	93
3.3.1 线性特性	94
3.3.2 对称特性	94
3.3.3 时移特性	95
3.3.4 频移特性	96
3.3.5 时域展缩特性	96
3.3.6 时域微分特性	97
3.3.7 频域微分特性	98
3.3.8 时域积分特性	98
3.3.9 卷积特性(卷积定理)	99
3.4 连续系统的频域分析	101
3.4.1 系统频域分析法	102
3.4.2 系统频域分析法举例	103
3.4.3 连续信号频域分析的 MATLAB 实现	105
3.4.4 用 MATLAB 计算连续系统的频率响应	116
3.5 连续系统频域分析应用举例	117
3.5.1 无失真传输系统	118
3.5.2 理想低通滤波器	119
3.5.3 调制与解调	120
3.6 抽样及抽样定理	121
3.6.1 信号的抽样	122
3.6.2 时域抽样定理	123
习题	126
上机练习	136
第 4 章 连续时间信号与系统的复频域分析	138
4.1 拉普拉斯变换	138

4.1.1	单边拉普拉斯变换	138
4.1.2	拉普拉斯变换的收敛域	139
4.1.3	常用信号的拉普拉斯变换	141
4.2	单边拉普拉斯变换的性质	141
4.2.1	线性特性	141
4.2.2	时移特性	142
4.2.3	复频移(s 域平移)特性	142
4.2.4	尺度变换(时-复频展缩)特性	143
4.2.5	时域卷积定理	143
4.2.6	微分定理	143
4.3	拉普拉斯变换的 MATLAB 实现	145
4.4	拉普拉斯逆变换	148
4.4.1	极点为实数且无重根	148
4.4.2	极点为复数且无重根	150
4.4.3	极点为多重极点	151
4.5	部分分式展开及拉普拉斯逆变换的 MATLAB 实现	152
4.6	连续系统的复频域分析	154
4.6.1	微分方程的拉普拉斯变换求解	155
4.6.2	电路网络的复频域模型分析法	157
4.6.3	系统函数(转移函数)	159
4.6.4	连续系统复频域分析的 MATLAB 实现	162
4.6.5	利用 MATLAB 分析 $H(s)$ 的零极点与系统特性	164
	习题	166
	上机练习	174
第 5 章	离散信号与系统的时域分析	175
5.1	离散信号	175
5.1.1	离散信号概述	175
5.1.2	典型的离散信号	176
5.1.3	典型离散信号的 MATLAB 表示	178
5.2	离散信号的基本运算及 MATLAB 实现	181
5.3	离散系统及其描述	186
5.4	离散系统的零输入响应	187
5.4.1	离散系统的零输入响应求解	188
5.4.2	用 MATLAB 求解离散系统的零输入响应	189
5.5	离散系统的单位样值响应	190
5.5.1	单位样值响应的定义及求解	190
5.5.2	用 MATLAB 求解离散系统的单位样值响应	192
5.6	离散系统的零状态响应——卷积和	194
5.6.1	卷积和的定义	194
5.6.2	卷积和的性质	196
5.6.3	卷积和的计算	197
5.6.4	卷积和及系统零状态响应的 MATLAB 实现	200
5.7	离散系统响应的时域分析	203

5.7.1 离散系统的时域分析	203
5.7.2 离散系统时域分析的 MATLAB 实现	206
习题	210
上机练习	217
第 6 章 离散信号与系统的 z 域分析	218
6.1 离散信号的 z 变换	218
6.1.1 z 变换的定义	218
6.1.2 常用离散信号的单边 z 变换	219
6.2 z 变换的基本性质	220
6.2.1 线性特性	221
6.2.2 移位特性	221
6.2.3 尺度变换特性	222
6.2.4 时间翻转特性	222
6.2.5 z 域微分(时域线性加权)	222
6.2.6 卷积定理	223
6.3 逆 z 变换	223
6.4 利用 MATLAB 计算 z 变换和逆 z 变换	225
6.5 离散系统的 z 域分析	228
6.5.1 差分方程的变换解	228
6.5.2 系统函数	229
6.5.3 离散系统因果性、稳定性与 $H(z)$ 的关系	231
6.5.4 离散系统 z 域分析的 MATLAB 实现	231
6.5.5 利用 MATLAB 分析 $H(z)$ 的零极点与系统特性	232
6.5.6 利用 MATLAB 求解离散系统的频率响应	235
习题	237
上机练习	245
第 7 章 系统的信号流图及模拟	246
7.1 系统的信号流图	246
7.2 系统的信号流图模拟	250
7.2.1 直接形式(卡尔曼形式)	250
7.2.2 串联形式(级联形式)	250
7.2.3 并联形式	251
习题	253
部分习题答案	258
附录	277
参考文献	288



第1章 绪论

【内容提要】 本章为信号与系统的概述，其内容包括信号与系统的概念、信号的描述与分类、系统的描述与分类、信号与系统的分析方法概述以及 MATLAB 基本知识等。

1.1 信号与系统

信号与系统在人们的生活中无处不在。某电路中的电压、电流是信号，而这个电路则是一个系统。人们日常使用的手机也是一个系统：在通话过程中，手机内置的麦克风将人的声音转变为电信号，电信号再经过手机系统的处理最后转变为电磁波辐射出去。在这个过程中，麦克风转换的电信号作为手机这个系统的输入信号，辐射的电磁波作为手机这个系统的输出信号。一架数码相机也是一个系统：它接收不同光源和目标反射的光，通过 CCD 图像传感器(光电转换器件)将光转换为电信号，再经过相机上的显示器输出一幅数字图像。

上面提到的这些信号有两个非常基本的共同点：首先，它们都是时刻变化的，可以看成是关于单个或多个独立变量的函数，一般以时间为变量；其次，这些信号一般都包含某种相关的信息和消息。所谓信息，是指存在于客观世界的一种事物形象，如语言、文字、图像等。前面提到手机系统中的电信号就包含有声音信息，数码相机输出的数字图像信号就包含有图像信息。对信号的处理和传输，其最终目的是传递其中所包含的信息。由于对语言、文字、图像这些信息进行直接处理和传输会受到很多限制，如传输速度慢、传输距离和传输容量有限等，因此，随着科技的发展，现如今对信息的处理和传输都以电磁信号作为媒介和载体(光信号可以看成是电磁波的一种)。如一个典型的现代通信系统，它的主要任务是传输信息(语言、文字、图像、数据、指令等)，为了便于传输，先由转换设备将所传信息按一定规律变换为相对应的信号(如光信号、电信号，它们通常是随时间变化的电压、电流和光强等)，经过适当的信道(即信号传输的通道，如传输线、电缆、自由空间、光纤等)，将信号传递到接收方，再经过转换设备转换为声音、文字、图像等信息。

综上所述，信号可以定义为带有信息的随时间变化的物理量。信号有电信号和非电信号之分，本课程着重研究电信号的分析、处理和传输。

系统和信号是密不可分的，系统对输入的特定信号(输入信号)响应，然后产生另外一些信号(输出信号)。本书将系统定义为具有特定功能的整体，它由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成。这一定义不仅适用于自然科学领域，还适用于社会科学领域，例如企业会根据产品的产量、货存与销售速率等信息建立一个经验系统，用来研究如何根据市场销售状况调节生产速度，使产品既不脱销也不积压，以节省资金、提高收益。本书主要讨

论处理电信号的系统，一般是具有某些特定功能的电路，因此，在本书中，电路与系统二者通用。图 1-1 所示就是一个典型的通信系统示意图。

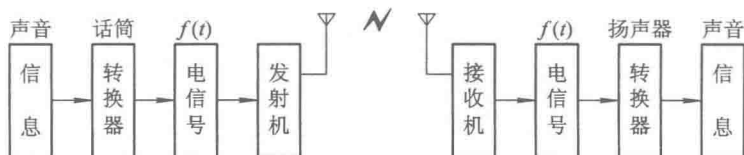


图 1-1 典型的通信系统示意图

信号与系统的分析有各种各样的研究内容。有时，面对一个特定的系统，人们感兴趣的是，如果对这个系统输入一个信号会得到什么样的响应，这种试图找出系统输入输出之间关系的问题，归为系统的分析，如在“模拟电子线路”课程中分析一个放大器电路，就是对一个系统的分析。而在另一些场合，需要设计出一个系统来对输入信号进行处理，使处理后的输出信号满足要求，这一类问题归为系统的设计。例如，当飞机驾驶员和空运交通管制台通信时，通信会受到驾驶舱的背景噪声影响而使通信系统恶化，在这种情况下，就需要设计一个系统，使通信信号经过该系统的处理后，保留需要的信号（此处指驾驶员的声音）而排除不需要的信号（驾驶舱的背景噪声）；再比如，在接收来自卫星探测的太空图像时，一般由于成像设备的缺陷和大气影响，收到的图像可能非常不清晰，就需要设计一个图像处理系统来补偿图像的某些缺陷，或者根据应用要求增强图像的某些特征，如突出图像上的某些线条等。

1.2 信号的描述与分类

一般使用数学工具来帮助进行信号与系统的分析，因此，描述信号的基本方法是建立信号的数学模型，即写出信号的数学表达式。通常，描述信号的数学表达式都以时间 t 为变量，即数学表达式都是时间 t 的函数。绘出函数的图像称为信号的波形。本书中信号的描述采用两种方法：函数表达式和波形。所以，在下面的叙述中，信号与函数两词不加区分。

按照信号的不同性质和数学特性，可以有多种不同的分类方法。通常将信号分为确定信号与随机信号、连续时间信号与离散时间信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号、一维信号与多维信号等。

1.2.1 确定信号与随机信号

若信号被表示为一确定的时间函数，对于指定的某一时刻，可确定一相应的函数值，这种信号称为确定信号或规则信号，例如正弦信号。

但是，实际传输的信号往往具有不可预知的不确定性，如果信号不是自变量（时间）的确定函数，即对某时刻 t ，信号值并不确定，而只知道信号值取某一数值的概率，则此类具有统计规律的信号称为无规则信号或随机信号。无线信道中的干扰和噪声就是这类随机信号。

本书仅讨论确定信号。但应该指出，随机信号及其通过系统的研究，是以确定信号通



过系统的理论为基础的。

1.2.2 连续时间信号与离散时间信号

信号是随时间变化的物理量,在1.1节的举例中,有的信号随时间连续地变化,例如模拟放大电路中的电压信号,而另一些信号只在某些特定的时间点上变化,或者说只关注信号在这些特定时间点上的变化情况,例如经济系统中的产品库存量这一信号,可能是每天变化,也可能是每周变化一次。

用时间函数来表示信号,则可以根据信号在对应时间函数取值的连续性与离散性,将信号划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)。

如果在所考虑的时间区间内,除有限个间断点外,对于任意时间值都有确定的函数值与之对应,这样的信号称为连续信号(例如前面提到的放大器中的电压信号),通常用 $f(t)$ 表示,例如

$$f_1(t) = 10 \cos \pi t$$

$$f_2(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

也可用波形表示连续信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$,如图1-2所示。

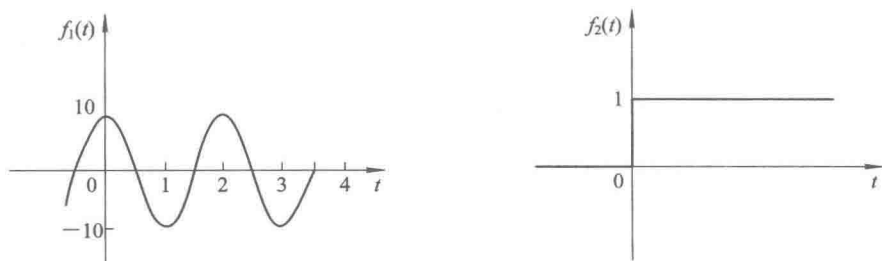


图1-2 连续时间信号

实际上,连续信号就是函数的定义域是连续的。至于值域,可以是连续的,也可以是不连续的。如果函数的定义域和值域都是连续的,则称该信号为模拟信号。但在实际应用中,模拟信号和连续信号两词往往不予区分。

如果只在某些不连续的时间瞬时才有确定的函数值对应,而在其他时间没有定义,这样的信号称为离散信号(例如前面提到的经济系统中产品库存量信号),通常用 $f(n)$ 表示。有定义的离散时间间隔可以是均匀的,也可以是不均匀的,一般都采用均匀间隔,将自变量用整数序号 n 表示,即仅当 n 为整数时 $f(n)$ 才有定义。例如

$$f_1(n) = \begin{cases} 0, & n \leq 0 \\ 1, & n = 1 \\ -1, & n = 2 \\ 0, & n > 2 \end{cases}$$

$$f_2(n) = \begin{cases} 0, & n < 0 \\ 1, & n \geq 0 \end{cases}$$

或者也可用波形表示离散信号 $f_1(n)$ 和 $f_2(n)$,如图1-3所示。

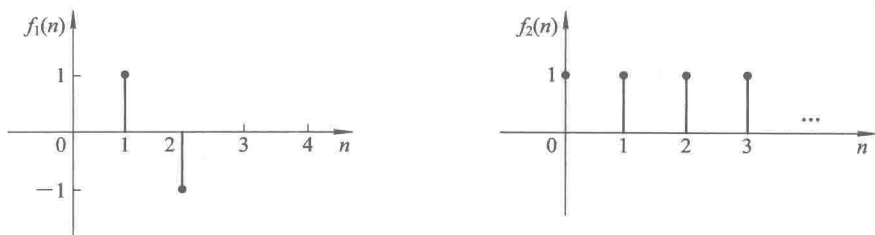


图 1-3 离散时间信号

同样, 离散信号就是函数的定义域是离散的, 只取规定的整数的信号。若函数的值域也是离散的, 则该信号称为数字信号。在实际中, 离散信号和数字信号也不予区分。

1.2.3 周期信号与非周期信号

所谓周期信号, 就是依一定时间间隔周而复始, 而且是无始无终的信号, 它们的数学表达式满足

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

式中, T 为信号的周期。只要给出此信号在任一周期的变化过程, 便可确知它在任一时刻的数值。

非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。若令周期信号的周期 T 趋于无限大, 则成为非周期信号。

1.2.4 能量信号与功率信号

为了知道信号能量或功率的特性, 常常研究信号 $f(t)$ (电流或电压) 在 $1\ \Omega$ 电阻上所消耗的能量或功率。如果消耗的能量是个有限值, 则该信号称为能量信号; 如果消耗的功率是个有限值, 则该信号称为功率信号。

1.2.5 一维信号与多维信号

在 1.1 节中提到, 信号可以看成是关于单个或多个独立变量的函数, 如语音信号可表示为声压随时间变化的函数, 只有一个独立的时间变量 t , 这是一维信号; 而一张黑白图像的每个点(像素)具有不同的光强度, 任一点又是二维平面坐标中的两个变量的函数, 这是二维信号。实际上还可能出现更多维数变量的信号, 例如电磁波在三维空间中传播, 若同时考虑时间变量就构成四维信号。在以后的讨论中, 一般情况下只研究一维信号, 且自变量为时间。

1.3 系统的描述与分类

从 1.1 节内容知道, 系统与信号密切相关, 用图 1-4 可以说明二者之间的关系。

从外部引入系统的量称为输入信号或激励信号, 通常记为 $f(t)$; 在输入信号作用下, 系统的响应称为输出信号, 通常记为 $y(t)$ 。系统分析就是要找出输入和输出信号之间的关系。为此, 首先要对系统进行描述, 即要建立系统的数学模型, 然后用数学方法进行求解,



并对所得结果进行物理解释,赋予其物理含义。

本书中对系统采用两种描述方法:数学模型和模拟框图。



图 1-4 信号与系统的关系

系统的数学模型就是找出系统输入信号 $f(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 的等量关系方程,在已知输入信号 $f(t)$ 的前提下,代入系统的数学模型可以求出 $y(t)$,达到了系统分析的目的。例如一个系统(放大电路)的数学模型是 $y(t) = 2f(t)$,当系统输入信号 $f(t) = 5 \cos 3t$ 时,通过该数学模型可以求出输出信号 $y(t) = 2 \times 5 \cos 3t = 10 \cos 3t$ 。系统的模拟框图用流程图的方式描述输入信号在系统中经过哪些处理最终到达系统的输出端。这两种方式都是对同一系统的不同描述,因此可以相互转换。

由于连续时间系统和离散时间系统的两种描述方式有所不同,因此,系统的这两种描述方法的详细叙述会在后续章节中分别介绍。

关于系统的分类也有许多划分方法。通常将系统分为连续时间系统与离散时间系统、线性系统与非线性系统、时变系统与时不变系统、因果系统与非因果系统、稳定系统与非稳定系统等。本书主要讨论线性时不变(Linear Time-Invariant, LTI)系统,包括连续时间 LTI 系统和离散时间 LTI 系统。

1.3.1 线性时不变(LTI)系统

具有线性和时不变性的系统称为线性时不变系统。

1. 线性

系统的线性性质包含两个内容:齐次性和可加性。对于图 1-5 所示的一个 LTI 系统,激励为 $f(t)$ 或 $f(n)$,用 $f(\cdot)$ 表示;响应为 $y(t)$ 或 $y(n)$,用 $y(\cdot)$ 表示,则有

$$f(\cdot) \rightarrow y(\cdot) \quad (1-1)$$



图 1-5 LTI 系统

设 a 为任意常数,若 $f(\cdot)$ 增大 a 倍,其响应 $y(\cdot)$ 也增大 a 倍,即

$$af(\cdot) \rightarrow ay(\cdot) \quad (1-2)$$

则称该系统是齐次的或均匀的,即具有齐次性。

若系统对于激励 $f_1(\cdot)$ 或 $f_2(\cdot)$ 之和的响应等于各个激励单独作用所引起的响应之和,即

$$\begin{aligned} f_1(\cdot) &\rightarrow y_1(\cdot), & f_2(\cdot) &\rightarrow y_2(\cdot) \\ f_1(\cdot) + f_2(\cdot) &\rightarrow y(\cdot) = y_1(\cdot) + y_2(\cdot) \end{aligned} \quad (1-3)$$

则称该系统是可加的,即具有可加性。

若系统既是齐次的,又是可加的,则称该系统是线性的,具有线性特性,即

$$a_1 f_1(\cdot) + a_2 f_2(\cdot) \rightarrow a_1 y_1(\cdot) + a_2 y_2(\cdot) \quad (1-4)$$

【例 1-1】 某连续系统的输入、输出关系为

$$y(t) = \frac{1}{12}f(t) - \frac{5}{6}$$

判断该系统是否是线性系统。

解 设

$$f_1(t) \rightarrow y_1(t), \quad f_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则有

$$y_1(t) = \frac{1}{12}f_1(t) - \frac{5}{6} \quad ①$$

$$y_2(t) = \frac{1}{12}f_2(t) - \frac{5}{6} \quad ②$$

将式①与式②相加得

$$y_1(t) + y_2(t) = \frac{1}{12}[f_1(t) + f_2(t)] - \frac{10}{6} \quad ③$$

而若激励为 $f_1(t) + f_2(t)$ 时, 相应的响应 $y(t)$ 为

$$y(t) = \frac{1}{12}[f_1(t) + f_2(t)] - \frac{5}{6} \quad ④$$

可见, 式③与式④并不一致, 即

$$y(t) \neq y_1(t) + y_2(t)$$

也就是该系统不满足可加性, 故该系统不是线性系统。

【例 1-2】 某离散系统的输入、输出关系为 $y(n) = nf(n)$, 试判断该系统是否是线性系统。

解 设

$$f_1(n) \rightarrow y_1(n), \quad f_2(n) \rightarrow y_2(n), \quad f_1(n) + f_2(n) \rightarrow y(n)$$

则有

$$y_1(n) = nf_1(n) \quad ①$$

$$y_2(n) = nf_2(n) \quad ②$$

将式①与式②相加得

$$y_1(n) + y_2(n) = n[f_1(n) + f_2(n)] \quad ③$$

而

$$y(n) = n[f_1(n) + f_2(n)] \quad ④$$

可见式③与式④相等, 故该系统满足可加性。

又因为

$$a_1 f_1(n) \rightarrow n \cdot a_1 f_1(n) = a_1 y_1(n)$$

$$a_2 f_2(n) \rightarrow n \cdot a_2 f_2(n) = a_2 y_2(n)$$

所以该系统满足齐次性。故有

$$a_1 y_1(n) + a_2 y_2(n) \rightarrow a_1 y_1(n) + a_2 y_2(n)$$

即该系统是线性系统。

2. 时不变性

如果系统的参数都是常数, 不随时间改变, 则系统的零状态响应与激励施加的时刻无关。也就是说, 若激励为 $f(\cdot)$ 时, 产生的零状态响应为 $y_f(\cdot)$; 若激励延迟一定时间 $t_0(m)$ 接入, 即为 $f(t-t_0)$ 或 $f(n-m)$ 时, 其响应也应延迟 $t_0(m)$, 为 $y_f(t-t_0)$ 或 $y_f(n-m)$ 。具有这种特性的系统称为时不变(或非时变)系统。反之, 称为时变系统。本书只讨论线性时不变系统, 所研究的系统的数学模型是常系数线性微分(或差分)方程。

【例 1-3】 一连续系统的系统方程(即输入、输出关系)为 $y(t) = tf(t) + 4$; 一离散系



统的系统方程为 $y(n) = f^2(n)$ 。这两个系统是否是时不变的?

解 对于连续系统, 设

$$f_1(t) \rightarrow y_1(t)$$

则有

$$y_1(t) = t f_1(t) + 4$$

若激励为 $f_1(t-t_0)$ 时, 设其响应为 $y(t)$, 则有

$$y(t) = t f_1(t-t_0) + 4$$

若该系统是时不变的, 应该有

$$y(t) = y_1(t-t_0)$$

但从上式可知

$$y(t) = t f_1(t-t_0) + 4 \neq (t-t_0) f_1(t-t_0) + 4$$

即

$$y(t) \neq y_1(t-t_0)$$

故该连续系统是时变的, 不是时不变系统。

对于离散系统, 设

$$f_1(n) \rightarrow y_1(n)$$

则有

$$y_1(n) = f_1^2(n)$$

若激励为 $f_1(n-m)$ 时, 设其响应为 $y(n)$, 则有

$$y(n) = f_1^2(n-m)$$

显然

$$y(n) = y_1(n-m)$$

即有

$$f_1(n) \rightarrow y_1(n)$$

$$f_1(n-m) \rightarrow y_1(n-m)$$

所以, 该系统为时不变系统。

对于线性时不变连续系统, 除了具有线性特性和时不变特性之外, 还具有微分特性, 即对一 LTI 连续系统, 其具有的微分特性如下:

若

$$f(t) \rightarrow y(t)$$

则有

$$\frac{df(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt} \quad (1-5)$$

1.3.2 因果性和因果系统

如果系统现在的输出只取决于现在或过去的输入, 则称该系统为因果系统, 具有因果性; 反之, 称为非因果系统。本书主要讨论因果系统。

1.3.3 稳定性和稳定系统

一个系统, 当输入是有界的, 其系统的输出也是有界的, 则称该系统为稳定系统, 具有稳定性。有关系统稳定性的详细讨论, 将在后续章节中进行。

1.4 信号与系统分析方法概述

系统分析的主要任务是在给定已知系统和激励的条件下求得响应,所以响应既与激励信号有关,又与系统有关。系统分析的过程就是信号分析过程和系统分析过程。信号的分析包括信号的定义、性质、运算与变换、信号的分解等。系统分析方法有两大类:时域法和变换域法。时域法比较直观,通过直接分析时间变量的函数来研究系统的时域特性,该方法将在第2章和第5章中详细讨论。变换域法是将信号与系统的时间变量函数变换成相应变换域中的某个变量函数,如第3章中讨论的频域分析是将时域函数变换到以频率为变量的函数,利用傅里叶变换来研究系统的特性;第4章中讨论的复频域分析是将时域函数变换到以复变量为变量的函数,利用拉普拉斯变换来研究系统的特性;第6章中讨论的 z 域分析是将时域函数变换到 z 域中,利用 z 变换来研究离散系统的特性。而对系统的数学模型,在时域中使用微分(或差分)方程,在变换域中便转换成代数方程。

1.5 MATLAB 基本知识

1.5.1 MATLAB 简介

MATLAB 的含义是 Matrix Laboratory——矩阵实验室,最初是为了方便矩阵的存取而开发的一套软件。经过几十年的扩充和完善, MATLAB 已发展成为集科学计算、可视化和编程于一体的高性能的科学计算语言和软件环境,几乎成为各类科学研究和工程应用中的标准工具。

MATLAB 是一个交互的系统,输入一条命令,立即就可以得到该命令运行的结果,其基本元素是无需定义维数的矩阵(或数组)。与其他语言相比, MATLAB 的语法更简单,更贴近人的思维,用 MATLAB 编程犹如在草稿纸上排出数学公式进行演算那样方便、高效。因此, MATLAB 被称为“草稿纸式”的科学工程计算语言。 MATLAB 的这些特性使之可以方便地解决大量的工程计算问题,尤其当问题包含有矩阵和矢量运算时,用 MATLAB 编程比传统的非交互式标量编程语言,如 C、Fortran 等在编程上耗费的时间与精力少得多。

目前, MATLAB 的数值计算、信号处理、图像处理、自动控制、算法设计和通信仿真等在众多领域都获得了广泛的应用。在美国许多高校, MATLAB 甚至成为了数学、科学和工程学科的标准教学工具,是理工科学生必须掌握的编程语言之一。在工业上, MATLAB 也常被用来作为产品研发、算法分析和预研仿真的工具。

MATLAB 除了其基本组件外,还附带了大量的专用工具箱,用于解决各种特定类别的问题。本书以 MATLAB 7.0 为基础,主要涉及信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)和控制系统工具箱(Control System Toolbox)。