

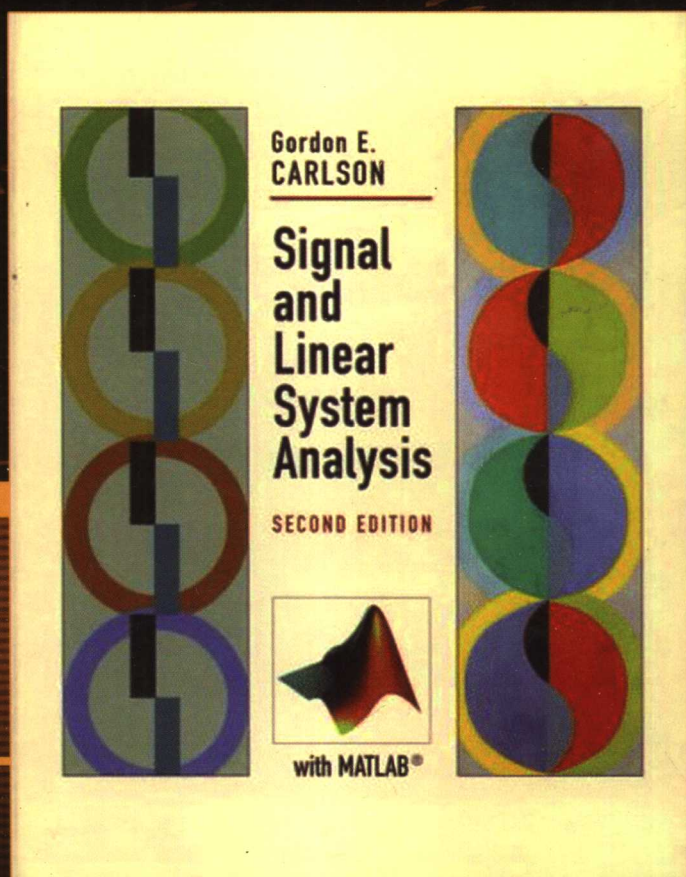
信号与线性系统分析

(原书第2版)

Signal and Linear System Analysis

(Second Edition)

(美) Gordon E. Carlson 著
曾朝阳 王卫国 周少英 邱铭铭 译



机械工业出版社
China Machine Press

电子与电气工程丛书

信号与线性系统分析

(原书第2版)

Signal and Linear System Analysis (Second Edition)

(美) Gordon E. Carlson 著
曾朝阳 王卫国 周少英 邱铭铭 译



机械工业出版社
China Machine Press

本书系统论述了信号与线性系统的基本原理和分析方法。全书分为两大部分,其中第3章到第9章是连续信号与系统的内容,第10章到第16章是离散信号与系统的内容。本书内容全面、论述清晰,包含了大量使用计算机求解的例题和习题,并且结构灵活,便于教学使用。

本书可作为高等工科院校电子类各专业“信号与系统”课程的教材,对于有关专业的研究生、教师和科技人员也有很高的参考价值。

Gordon E. Carlson: *Signal and Linear System Analysis, Second Edition* (ISBN: 0-471-12465-6).

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 1998 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号: 图字: 01-2003-8701

图书在版编目(CIP)数据

信号与线性系统分析(原书第2版)/(美)卡尔逊(Carlson, G. E.)著;曾朝阳等译.-北京:机械工业出版社,2004.10

(电子与电气工程丛书)

书名原文: *Signal and Linear System Analysis, Second Edition*

ISBN 7-111-14826-6

I. 信… II. ①卡… ②曾… III. ①信号理论-高等学校-教材 ②线性系统-系统分析-高等学校-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第064935号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑: 陆颖 华章

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年10月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·43.5印张

印数: 0 001-4 000册

定价: 69.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

译者序

信号与系统这门课交叉和渗透了许多学科的基础理论。原则上讲,任何事物都可以看作为一个系统,用系统模型的建立和系统分析的理论,对其进行定量分析。

早在20世纪40年代,信号处理就受到了电子学界的重视。此后,微电子集成电路技术的兴起更是推动了信号处理的发展。近20年来,计算机技术的飞速发展和它在电子领域的广泛应用,更是带动了信号处理技术的发展,并使之逐渐成为一门具有旺盛生命力的独立学科,其重要性也越来越为人们所认知。信号处理已成为电子工程专业人员的必备知识,我国早已将信号处理纳入了电子信息类专业本科学生的教学计划中。相信引入国外该学科的优秀教材,必将对该学科的教学和科研工作起到积极的推动作用。

本书具有两个特点。

其一,采用先连续后离散、时域和变换域并行、信号和系统分析并行的结构体系。这样便于根据课程学时调整教学内容,既可以按顺序进行教学,也可以把连续和离散的内容综合起来进行教学。既可以按两个学期组织教学,也可以调整为一个学期的教学内容。

其二,配备了大量的MATLAB例程和上机题,把精力集中到对概念、理论和方法的掌握上而不必把时间花费在复杂的计算中,从而突出了对实践能力的培养,以提高读者使用计算机解决实际问题的能力。

本书的翻译由曾朝阳组织,其中第1章到第9章由王卫国和周少英翻译,第10章到第16章由曾朝阳和邱铭铭翻译,在翻译过程中得到了西安电子科技大学郭宝龙教授、装备指挥技术学院赵继广教授的帮助和建议,在此谨表感谢。

信号与系统的理论涉及的专业面很广,由于译者水平和学识有限,翻译中难免有错误和不妥之处,希望同行专家和广大读者批评指正。

曾朝阳

2004年3月

前 言

本书是为(美国)工科学生在第三学年所学的信号与系统分析课程编写的,是电工类课程的标准教材,同时其采用的分析概念也是许多工程学科的组成部分。尽管本书主要是为两个学期的课程编写的,但也很容易调整成一个学期课程的教材。

本书假定学生已经学习了大学微积分学和微分方程,以及大学物理等课程。为了充分理解例题和应用,希望提前学习包括交流电路分析方法的电路入门课程。不过,即使没有这一学习背景,学生也可以理解本书的基本分析方法。

第2版的特点

与第1版相比,本书第2版进行了许多内容和组织上的变化。其中部分变化源于作者使用第1版后的教学经验。另外,第2版还从采用第1版作为教材的几所学校的教学人员那里得到了许多坦诚的建议。这些教学人员的经验,以及出版社从调查中得到的反馈都对第2版的编写起了积极的促进作用。

本书在修改过程中,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。图形、例子和数学公式推导也进行了仔细的研究,以便使它们有助于内容的理解。

第1版的主要特点如下:

1. 第一部分是由三章组成的。前两章给出了基本的定义以及信号与系统的基本特性。第3章包括卷积的定义、计算和性质。

2. 第二部分和第三部分中的连续时间和离散时间信号与系统的分析,既相互独立又相互对应。首先给出连续时间的分析,因为连续时间信号频谱的知识有助于理解离散时间信号频谱和离散傅里叶变换的特性。第三部分中章节的排列顺序与第二部分中的相对应,使得教师在组织课程时更具灵活性。

3. 各章都特别针对某个概念(例如连续时间信号的时域表示,连续时间系统的时域分析),这样就可以把精力集中在定义清晰的目标对象上。

4. 信号分析是在系统分析之前的章节中单独给出的(第二部分和第三部分都是如此),以便强调信号和信号的特性本身就是很重要的,并且是系统分析所必需的。

特点2和特点3在第2版中保留下来,因为它们曾起到了很好的作用,赢得了读者和评论者的好评。

在第2版中也有独立的第一部分(特点1)。但是,它是由两章组成的,一章包括入门内容和基本的定义,另一章给出了信号与系统的基本特性。在第1版第2章中的卷积内容移到了第二部分和第三部分中时域系统分析章节中的叠加积分和叠加和之后。这更有利于对卷积运算的掌握。

特点4也保留了下来,但是对编排顺序进行了调整。在第1版中,所有信号分析(时域和频域)都放在系统分析之前的两章中。许多读者和评论者更喜欢在频域分析之前给出所有的时域分析。这两种方式各有所长。在第2版中使用第二种方式,因为更多的教师喜欢这种方式。

在第2版中,使用与连续时间信号频谱相对应的方法给出离散时间信号的频谱。它包括下面三个新的内容:1)使用离散傅里叶级数求周期信号的频谱,2)使用傅里叶变换求能量信号的频谱,3)使用离散傅里叶变换的极限形式求非能量信号的频谱。这种方法比第1版中的方法更为经典。对采样间隔不是单位时间而是 T 的采样信号也给出了它的频谱,它是根据连续时间信号频谱中熟悉的频率变量 f 给出的。这样,它就具有与连续时间信号频谱相同的含义。它也与被采样的连续时间信号的频谱有直接的关系。频率的尺度也包括在频谱的讨论中。

采样定理是在第1版第三部分中的离散时间信号频谱一章中给出的。在第2版中,它作为单独的一章,放在第二部分的末尾,可以看作是从连续时间到离散时间的一个过渡。

从第1版到第2版的一个重要的符号变化是离散时间信号的符号。第1版中使用了非标准的符号 $x_T(n)$ 表示离散时间信号。这种表示试图清楚地指出采样间隔 T 和采样序号 n 。第2版中使用更标准的符号 $x[nT]$,它同样也指出了采样间隔 T 和采样序号 n 。

第2版的每一章中都增加了一个称为“关键概念”的内容,列出了每章的关键概念,同时包括概念定义及相关讨论所在的小节,在适当的地方也给出相应公式的编号。这些都有助于读者快速找到书中的关键概念。

每章还增加了用计算机计算的例题,采用MathWorks公司的数值计算和可视化软件MATLAB。这些例子包括MATLAB源程序和相应的结果。每章后还有上机习题。书中还给出了几个在MATLAB工具箱中没有的函数,以作为信号与系统分析的工具。这些源程序可以在John Wiley & Sons的FTP文档<ftp://ftp.wiley.com/public/college/Engineering/Carlson>中得到。所有的函数在开始处都有注释,这些注释指出了函数的功能、定义输入和输出变量,有时提供修改的建议和要求。在文档中还有简要的MATLAB教程,以指导使用MATLAB,书中所有例子的m-文件源程序,以及许多实际的和综合的数据文件。

不论信号与系统的课程是否使用MATLAB,都可以使用本书。在不使用MATLAB的课程中,只要跳过MATLAB练习的例子即可。本书还有其他足够的例子来说明信号与系统分析的概念及方法。但是,有些教师希望学生注意在MATLAB例子中得到和讨论的结果,以便进一步理解信号和系统的概念。

每章后的上机题在大多数情况下确实需要计算机求解,但并不是必须使用某个特殊的软件。如果教师想采用另外一种教学方式,那么书中也提供了足够的非上机题,让学生练习信号与系统问题的求解。

有助于教学的内容

- **定义** 关键定义简明扼要,易于理解。
- **例子** 大约300个精心选择和认真求解的例子,大多数选自电工类教材。其中的76个例子说明了MATLAB在信号和系统分析中的应用,许多例子使用的是实际的信号数据。
- **小结** 每章后的小结再一次强调了该章的目标,并对该章中的概念进行了总结。
- **关键概念** 在每章后面有一个关键概念列表,其中包括概念定义及相关讨论所在的小节。
- **习题** 大约550个章后习题对书中内容进行了准确的梳理,学生可以把所学的方法应用到解题中。其中有102道习题是使用MATLAB求解的。
- **图解** 有大约600个图,绝大多数是对信号和频谱的描述,包括许多实际的语音信号、心电图信号和雷达信号。

• 附录 为了便于查阅, 在附录中包括了数学表和变换表。

结构和内容

第一部分包括第1章和第2章, 介绍了信号与系统中的入门概念。第1章讨论了基本的定义, 第2章对连续时间信号与系统及离散时间信号与系统, 给出了信号与系统的一般特性和建立数学模型的方法。

从第3章到第9章是第二部分“连续时间信号与系统”的内容。第3章介绍信号的时域表示, 第4章是对单输入单输出系统的分析, 包括叠加积分和连续卷积的计算。

第5章中给出了信号的频域表示, 即信号频谱。为了便于学习, 从讨论正弦信号开始给出信号频谱的概念。然后介绍了复指数傅里叶级数, 此级数简化为三角傅里叶级数以及傅里叶变换, 这些为确定信号的频谱提供了有用的工具。

第6章给出了单输入单输出系统的频域分析。分析的方法涉及到第5章的频谱概念。第7章讨论使用拉普拉斯变换的理由之后, 研究了变换方法, 并把它用于系统分析。

连续时间滤波器的概念是在第8章中介绍的, 使用了在前面章节中研究的信号与系统分析方法。考虑了理想和实际这两类滤波器。这些内容是分析方法应用的很好例子, 为以后的信号处理的学习提供了有益的基础。

第二部分的最后一章, 即第9章给出了采样理论。它是从第二部分的连续时间学习到第三部分的离散时间学习的过渡内容。

第三部分(离散时间信号与系统)包括从第10章到第16章的内容。除了第16章之外, 每一章的内容在第二部分都有对应的内容。因为从第10章到第15章的讲述依赖于第二部分定义的许多概念, 没有必要重新定义这些概念, 例如频谱和频率响应。

第16章给出了离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)算法, 后者用于快速计算DFT。在这个水平的教材中介绍这些内容是很重要的, 因为DFT和它的FFT实现是进行频谱分析和系统实现的工具。其中对DFT进行了详细的研究, 使用了许多信号和频谱的图解来强调信号截断效果(频谱泄漏)、频谱混叠效果、变换信号的周期扩展、变换信号的长度和频谱样本间隔的关系, 等等。因为DFT常常用来计算连续时间信号的频谱样本, 所以DFT的研究从连续时间信号的傅里叶变换开始。这样, 学生就可以理解连续时间信号的频谱样本的特性。

致谢

本书的编写需要大量的工作, 作者独自一人是无法完成的。感谢Missouri-Rolla大学电子工程系同事的鼓励和建议。特别要感谢David Cunningham和John Stuller博士对部分初稿的审阅给予的极大帮助。感谢我的学生们在测试新方法时的耐心。对这些方法的反复改进使本书独具特色。

以下审阅者提供了许多建议, 为第2版的改进提供了帮助。真诚地感谢他们的尽职尽责的努力和有益的评论。

Gonzalo Arce, University of Delaware

Mauro Caputi, Hofstra University

Dwight Day, Kansas State University

Victor DeBrunner, University of Oklahoma

Wojtek Kozodziej, Oregon State University .

Dwight Mix, University of Arkansas

另外, John Wiley & Sons出版公司的工作人员为本书的出版提供了极大的支持和帮助。特别感谢编辑Charity Robey和Charlotte Hyland的指导和帮助。同时感谢Ingrao Associates的经理Suzanne Ingrao在出版过程中给予的指导和帮助。她有求必应,出色地充当了我与出版人员之间的桥梁。

完成初稿的一个很重要的工作是文字录入。特别感谢Tonda Davis,她兢兢业业,独自一人完成了初稿的录入工作,包括对第1版文字和图解所做的众多修改。她为录入文字和制作图解工作花费了大量的时间。

最后,感谢我的妻子Kathy在本书写作过程中的耐心和支持。

G. E. C

教学计划

本书易于组织，可以用于两个学期的课程。教师在讲解连续时间（CT）和离散时间（DT）信号与系统分析时，可以顺序讲解，也可以采取综合地教学方式。本书还可以方便地调整为一个学期的课程。

本书可直接用于两个学期课程的学习。其中，连续时间分析作为第一学期的教学内容，离散时间分析作为第二学期的教学内容。如前面所述，第二部分的每个主题在第三部分都有对应的内容，并且它们的顺序是相同的。所以，如果教师希望在两个学期的课程中综合讲解连续时间和离散时间分析内容，那么可以从第二部分和第三部分中交叉选择章节内容进行讲解。

如果只用一个学期学习本书，那么可选择第1章到第7章和第9章到第14章的内容，但是在内容深度上要有所减少。并且也可以综合讲解第二部分和第三部分的内容，交叉选择两部分的章节。

下面清晰地列出了用于一个学期和两个学期课程的教学计划，当然，选择方法不是惟一的。通过适当选择内容和讲解深度，可以实现不同的侧重点。

两个学期的课程：顺序讲解CT和DT分析

第一学期

第1章 信号与系统

第2章 特性及模型

时域

第3章 CT信号表示

第4章 CT系统分析

频域

第5章 CT信号表示

第6章 CT系统分析

第7章 拉普拉斯变换

第8章 CT滤波器

第9章 采样理论

第二学期

时域

第10章 DT信号表示

第11章 DT系统分析

频域

第12章 DT信号表示

第13章 DT系统分析

第14章 Z变换

第15章 DT滤波器

第16章 DFT

两个学期的课程：综合讲解CT和DT分析

第一学期

第1章 信号与系统

第2章 特性及模型

时域表示

第3章 CT信号

第10章 DT信号

时域分析

第4章 CT系统

第11章 DT系统

频域表示

第5章 CT信号表示

第9章 采样理论 省略10.2节

第12章 DT信号
频域分析
第6章 CT系统
第13章 DT系统
第二学期

第7章 拉普拉斯变换
第14章 Z变换
第8章 CT滤波器
第15章 DT滤波器
第16章 DFT

一个学期的课程：顺序讲解CT和DT分析

顺序

第1章 信号与系统
第2章 特性及模型
时域
第3章 CT信号表示
第4章 CT系统分析
频域
第5章 CT信号表示
第6章 CT系统分析
第7章 拉普拉斯变换
第9章 采样理论
时域

第10章 DT信号表示
第11章 DT系统分析
频域

第12章 DT信号表示
第13章 DT系统分析
第14章 Z变换

内容

省略3.5节

省略6.4节和6.5节

省略7.5节

省略离散时间傅里叶变换的推导和功率谱密度

注意：在一个学期的课程中，省却广义的傅里叶级数和傅里叶变换推导的教学内容。这意味着仅仅给出傅里叶级数和傅里叶变换的定义，而不进行推导。教师在给出定义的时候需要包括一些推导中的内容。

下面给出的是在一个学期的课程中综合讲解CT和DT分析的建议。

一个学期的课程：综合讲解CT和DT分析

顺序

第1章 信号与系统
第2章 特性及模型
时域表示
第3章 CT信号
第10章 DT信号
时域分析
第4章 CT系统
第11章 DT系统
频域表示
第5章 CT信号表示
第9章 采样理论
第12章 DT信号

频域分析

第6章 CT系统
第13章 DT系统
第7章 拉普拉斯变换
第14章 Z变换

内容

省略3.5节

省略傅里叶变换推导和功率谱密度

省略10.2节

省略离散时间傅里叶变换的推导和功率谱密度

省略6.4节和6.5节

省略7.5节

目 录

译者序
前言
教学计划

第一部分 基本概念

第1章 信号与系统	1
1.1 基本定义	2
1.2 数学模型	3
1.3 连续时间和离散时间信号与系统	4
1.4 小结	8
关键概念	8
第2章 信号与系统的特性及模型	9
2.1 信号的基本运算	9
2.1.1 时域尺度变换	9
2.1.2 时域反转	10
2.1.3 时移	12
2.1.4 混合运算	14
2.2 信号的特性	16
2.2.1 确定性信号	17
2.2.2 简单定义和分段定义的信号	17
2.2.3 偶信号和奇信号	17
2.2.4 量化信号	18
2.2.5 周期信号和非周期信号	19
2.3 系统表示和模型	21
2.3.1 系统表示	21
2.3.2 系统数学模型	23
2.4 系统特性	25
2.4.1 集总参数系统和分布参数系统	25
2.4.2 系统的记忆	25
2.4.3 因果系统	26
2.4.4 系统阶数	27
2.4.5 线性系统	27
2.4.6 时不变系统	31
2.4.7 系统稳定性	33

2.5 小结	33
关键概念	34
习题	34
上机习题	38

第二部分 连续时间信号和系统

第3章 连续时间信号的时域表示	41
3.1 正弦信号和复指数信号	41
3.2 指数信号	45
3.3 奇异函数信号	47
3.3.1 冲激函数	47
3.3.2 单位冲激函数	48
3.3.3 冲激函数的性质和符号	49
3.3.4 冲激函数的积分	52
3.4 信号能量和功率	58
3.5 信号的广义傅里叶级数表示	63
3.6 小结	70
关键概念	71
习题	72
上机习题	75
第4章 连续时间系统的时域分析	78
4.1 求解系统方程	78
4.2 系统冲激响应	80
4.3 线性时不变系统的零状态响应: 叠加积分	82
4.3.1 叠加积分	82
4.3.2 因果系统	83
4.3.3 系统对正弦输入的响应	85
4.4 连续卷积的计算和性质	85
4.4.1 连续卷积的计算	86
4.4.2 连续卷积的性质	96
4.5 小结	100
关键概念	100
习题	101

上机习题	105	上机习题	212
第5章 连续时间信号的频域表示	106	第7章 利用拉普拉斯变换分析连续 时间系统	213
5.1 连续时间信号的频谱和带宽	106	7.1 拉普拉斯变换	213
5.1.1 幅度谱和相位谱	107	7.1.1 双边拉普拉斯变换	213
5.1.2 信号带宽	111	7.1.2 单边拉普拉斯变换	215
5.2 信号的傅里叶级数表示	111	7.2 拉普拉斯变换的计算和定理	217
5.2.1 在某区间上信号的傅里叶级数表示	113	7.2.1 简单信号的拉普拉斯变换	217
5.2.2 周期信号的傅里叶级数表示	119	7.2.2 拉普拉斯变换的定理	218
5.3 周期信号的幅度谱和相位谱	121	7.3 拉普拉斯逆变换的计算	228
5.3.1 周期信号的频谱计算和频谱性质	121	7.3.1 有理函数的逆变换	230
5.3.2 周期信号频谱信息中的信号功率	127	7.3.2 变换式极点和信号形式	239
5.4 非周期能量信号的傅里叶变换和频谱	130	7.4 线性微分积分方程的拉普拉斯 变换求解	240
5.4.1 傅里叶变换的求解	131	7.5 电路的拉普拉斯变换求解	243
5.4.2 能量谱密度和频谱计算的例子	134	7.6 系统转移函数	249
5.4.3 傅里叶变换和频谱的性质	140	7.6.1 转移函数的计算	250
5.4.4 傅里叶变换定理	144	7.6.2 转移函数和系统响应特征的关系	253
5.5 非能量信号的傅里叶变换和频谱	154	7.7 利用转移函数确定系统稳定性和 频率响应	255
5.5.1 傅里叶变换的极限形式	154	7.7.1 系统稳定性	255
5.5.2 特定信号的傅里叶变换和频谱	154	7.7.2 系统频率响应	257
5.5.3 周期信号的傅里叶变换和频谱	168	7.8 小结	260
5.5.4 功率谱密度	162	关键概念	261
5.6 小结	164	习题	261
关键概念	165	上机习题	266
习题	165	第8章 连续时间滤波器	268
上机习题	170	8.1 无失真传输	269
第6章 连续时间系统的频域分析	172	8.2 理想滤波器	270
6.1 系统频率响应	172	8.3 理想滤波器的近似	275
6.1.1 频率响应的特性	172	8.3.1 理想幅度响应的近似	275
6.1.2 系统带宽	181	8.3.2 其他低通近似	286
6.2 频率响应的确定	182	8.3.3 高通、带通和带阻的近似	287
6.2.1 由系统微分方程确定频率响应	182	8.4 巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器 的设计	287
6.2.2 利用相量概念确定频率响应	184	8.4.1 低通滤波器的设计	288
6.3 电路的频率响应	186	8.4.2 带通滤波器的设计	294
6.4 相位延迟和群延迟	187	8.4.3 巴特沃斯和切比雪夫滤波器的 计算机设计	297
6.4.1 相位延迟	188	8.5 小结	302
6.4.2 群延迟	189		
6.5 幅度响应和相位响应的波特图	194		
6.6 小结	207		
关键概念	208		
习题	209		

关键概念	303
习题	303
上机习题	306
第9章 连续时间信号的采样	307
9.1 理想采样和采样定理	307
9.2 实际的采样效果	313
9.3 小结	318
关键概念	319
习题	319
上机习题	321

第三部分 离散时间信号和系统

第10章 离散时间信号的时域表示	323
10.1 正弦信号和复指数信号	324
10.2 指数信号	327
10.3 单位阶跃、单位斜坡和单位冲激信号	328
10.3.1 单位阶跃序列和单位斜坡序列	328
10.3.2 单位冲激序列	331
10.4 信号能量和功率	333
10.5 小结	335
关键概念	336
习题	336
上机习题	339
第11章 离散时间系统的时域分析	340
11.1 系统方程的解	340
11.2 系统方程的递归解法	341
11.3 系统的单位冲激响应	343
11.4 线性时不变系统的零状态响应: 叠加和	344
11.4.1 叠加和	345
11.4.2 因果系统	346
11.4.3 输入信号为正弦信号时的系统响应	347
11.5 离散卷积的计算和性质	347
11.5.1 离散卷积的计算	348
11.5.2 离散卷积的有关性质	356
11.6 小结	361
关键概念	362
习题	362

上机习题	366
第12章 离散时间信号的频域表示	368
12.1 离散时间信号的频谱和带宽	368
12.1.1 幅度谱和相位谱	368
12.1.2 信号带宽	373
12.2 周期信号的离散时间傅里叶级数和频谱	374
12.2.1 信号在某一区间内的离散时间傅里叶级数表示	375
12.2.2 周期信号的离散时间傅里叶级数表示	380
12.2.3 周期信号的幅度谱和相位谱	381
12.3 能量信号的离散时间傅里叶变换和频谱	387
12.3.1 离散时间傅里叶变换的求解	388
12.3.2 离散时间傅里叶逆变换	391
12.3.3 能量谱密度	393
12.3.4 有关频谱计算的实例	393
12.3.5 离散时间傅里叶变换和离散时间信号频谱的性质	402
12.4 非能量信号的离散时间傅里叶变换和频谱	413
12.4.1 非能量信号的离散时间傅里叶变换和频谱	416
12.4.2 周期信号的离散时间傅里叶变换和频谱	418
12.4.3 功率谱密度	421
12.5 小结	423
关键概念	425
习题	426
上机习题	431
第13章 离散时间系统的频域分析	433
13.1 系统的频率响应	433
13.1.1 频率响应的特征	433
13.1.2 系统带宽	443
13.2 频率响应的确定	444
13.2.1 系统的差分方程	444
13.2.2 系统表示	448
13.3 小结	452
关键概念	452

习题	453	15.4.4 FIR和IIR滤波器设计过程的 比较	571
上机习题	457	15.5 小结	571
第14章 离散时间系统的z变换分析	459	关键概念	572
14.1 z变换	459	习题	573
14.1.1 双边z变换	459	上机习题	577
14.1.2 单边z变换	462	第16章 离散傅里叶变换	579
14.2 z变换的计算和相关定理	463	16.1 离散傅里叶变换和离散傅里叶 逆变换	580
14.2.1 简单信号的z变换	463	16.1.1 DFT的推导过程	580
14.2.2 相关定理	467	16.1.2 IDFT的推导过程	587
14.3 z逆变换的计算	474	16.1.3 离散傅里叶变换对	590
14.3.1 关于 z^{-1} 的有理函数的z逆变换	476	16.1.4 DFT变换计算举例	591
14.3.2 z变换的极点和信号形式	483	16.2 离散傅里叶变换的特征和性质	600
14.4 线性差分方程的z变换解	484	16.2.1 一般特征	600
14.5 系统的转移函数	490	16.2.2 对称性质	607
14.5.1 转移函数的计算	490	16.3 窗函数在DFT计算中的应用	608
14.5.2 转移函数和系统响应特征的 关系	494	16.4 离散傅里叶变换的参数选择	614
14.6 转移函数在确定系统稳定性和系统 频率响应中的应用	499	16.5 离散傅里叶变换定理	616
14.6.1 系统的稳定性	499	16.6 利用DFT计算离散卷积	619
14.6.2 系统的频率响应	499	16.6.1 循环卷积	620
14.7 小结	502	16.6.2 离散卷积	622
关键概念	503	16.7 利用DFT进行离散时间信号滤波	626
习题	504	16.7.1 实现过程分析	626
上机习题	508	16.7.2 选择保留的实现	627
第15章 离散时间系统的实现和离散 时间滤波器	511	16.8 快速傅里叶变换	634
15.1 系统类型	511	16.8.1 算法的推导	635
15.2 系统实现	511	16.8.2 FFT逆变换	641
15.2.1 直接实现	512	16.8.3 FFT计算实例	642
15.2.2 串联实现和并联实现	515	16.8.4 计算时间的比较	644
15.3 IIR滤波器设计	520	16.9 小结	645
15.3.1 时域响应匹配	521	关键概念	646
15.3.2 频率响应匹配	535	习题	648
15.4 FIR滤波器设计	548	上机习题	652
15.4.1 时域响应匹配法	549		
15.4.2 频率响应匹配——傅里叶级数 设计法	550	附录	
15.4.3 窗函数的应用	565	附录A 周期信号之和	655
		附录B 数学用表	657
		附录C 变换表	660
		索引	665

第一部分 基本概念

第1章 信号与系统

“那是人的一小步，同时也是人类的一大步”，登月队长阿姆斯特朗说着这句举世名言，从登月车走到月球表面，从而成为历史上登月第一人。登月队长阿姆斯特朗的声音和登月第一步的视频图像通过图1-1所示的路径以电信号的形式传送回来，这个路径称为通信系统。这个系统的功能是把声音和视频数据发送到用户的电视机。接收、处理和转发数据信号的系统部件包含在指挥舱、任务控制器设备中。通信系统是更大的月球探索系统的组成部分，后者包括运载火箭、指挥舱发动机和登月车控制设备。

在前面对月球探索通信系统的描述中使用了“信号”和“系统”这样的术语，这些术语被广泛应用于各种领域，如工程、科学、经济、卫生保健和政治，等等。我们可能会在每天的早报上看到关于某种新的高清晰电视系统、提议的铁路运输系统或者国家卫生保健系统等方面的报道。工程师分析一台设备或者一组设备，就是把它作为一个系统来考虑，分析它对信号的作用。这样，工程师必须熟悉信号和系统的概念，才能够分析具体的信号和系统。

本书致力于应用在信号和系统中的数学方法的研究。首先，在该入门章节中使用具体示例中的图解来说明定义术语“信号”和“系统”。同时，定义和讨论信号和系统的数学模型概念，从而使用这样的模型进行信号和系统的定量分析。另外，讲解连续时间和离散时间信号与系统的区别。这里定义的基本概念是连续时间和离散时间信号与系统分析方法的基础。

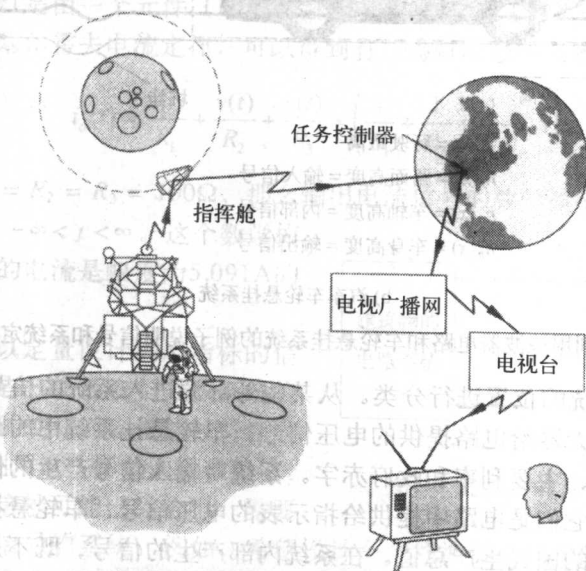


图1-1 月球探索通信系统

1.1 基本定义

本节通过具体示例的图解给出信号和系统的定义。在第一个例子中，电气工程师分析示于图1-2a中的电路，以计算电路特性。在这种情况下，电路是系统，组成电路的电阻、电容、电感和晶体管是系统的元件，电路中随时间变化的电压和电流是信号。在第二个例子中，机械工程师分析示于图1-2b的汽车轮胎悬挂系统，他要确定悬挂系统是否合乎要求。在这个例子中，汽车是系统，车身、车轮、轮胎、弹簧和减震器是系统元件，作为行驶距离函数的各种系统元件的垂直位置和速度是信号。第三个（非工程的）例子是经济学家分析一个国家的经济性能。在这里，经济系统是由诸如劳动力、工厂生产能力和资本等系统元件组成的。信号包括作为时间函数的资金供应、主要利率、政府赤字和国民生产总值。这三个例子说明了系统元件是物理对象（如电阻）或者物理条件（如工厂生产能力）。同时也说明信号是自变量如时间、距离或力的函数。

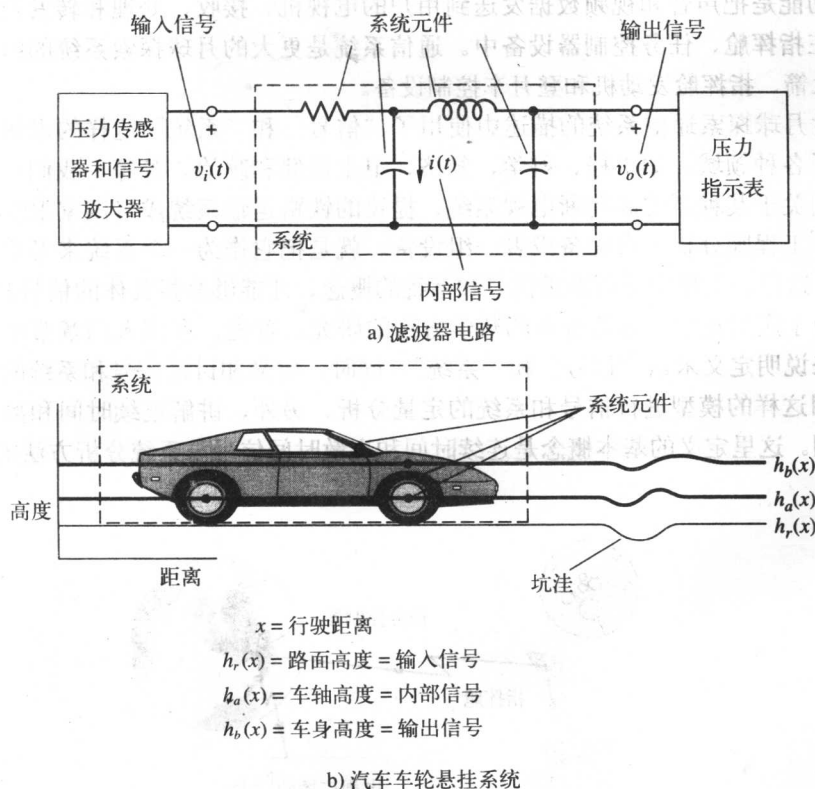


图1-2 利用滤波器电路和车轮悬挂系统的例子说明信号和系统定义的图例

按信号相对于系统的位置进行分类。从某些外部源进入系统的信号称为输入信号或者输入，这些信号包括放大器给电路提供的电压信号，车轮悬挂系统中的路面垂直位移，以及经济系统中的资金供应、主要利率和政府赤字。系统对输入信号产生的供外部使用的信号称为输出信号或者输出。它们是电路中提供给指示表的电压信号，车轮悬挂系统中的车身垂直位移，以及经济系统中的国民生产总值。在系统内部产生的信号，既不是输入信号也不是输出信号，称为内部信号。

在图1-2中所示的变量或者信号是某个自变量的函数。在电路中时间就是自变量，在汽车系统中行驶距离就是自变量。因为许多信号都是时间的函数，所以在分析方法的研究及例题中将使用时间作为自变量。同时，由于本书主要是为电子工程专业的学生编写的，因此例子集中在电信号和系统方面。但是，一定要记住得到的分析方法同样可以用于其他自变量，以及非电量的信号和系统中。

1.2 数学模型

通过对信号和系统的分析，我们可以确定信号的特性和/或系统的性能。信号的特性之一就是信号的波形，即作为时间函数的信号变化。使用的系统性能的度量是系统增益，即输出信号幅度与输入信号幅度的比率。通过由信号和系统分析确定的信号特性或系统性能可以知道系统是否符合设计的指标。

信号特性或系统性能的定量数据可使信号与系统的说明和比较变得更容易。因此，我们希望使用数学工具得到定量数据，从而对信号和系统进行分析。于是就产生了对数学模型的需要，它们是表示信号和系统的数学公式。例如，建筑物内的电压是时间 t 的函数，它的信号模型由下式给出

$$v(t) = 120\sqrt{2} \cos(2\pi(60)t) \quad V \quad -\infty < t < \infty \quad (1-1)$$

时间 t 在某个时间参考点上为零，例如可以设定参考点为当天中午。作为系统元件模型的例子，电阻可以用下式建模

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (1-2)$$

其中 $v(t)$ 是电阻两端的电压， $i(t)$ 是流过电阻的电流， R 是电阻的阻值。

可以使用这两个数学模型分析如图1-3所示的有三盏灯的走廊照明系统所需的电流。在这个分析中，照明系统的输入信号是电压 $v(t)$ ，它的模型是公式(1-1)。输出信号是照明系统需要的电流 $i_a(t)$ ，每盏灯是由一个元件（即电阻灯丝）组成。所以，公式(1-2)是系统中每盏灯的数学模型。利用基尔霍夫电流定律，可以得到有三盏灯的照明系统的数学模型是

5

$$i_a(t) = \frac{v(t)}{R_1} + \frac{v(t)}{R_2} + \frac{v(t)}{R_3} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) v(t) \quad (1-3)$$

假设灯丝的电阻是 $R_1 = R_2 = R_3 = 100\Omega$ ，那么输出电流信号的数学模型是 $i_a(t) = (0.03) v(t) = 5.091 \cos[2\pi(60)t] \text{ A}$ ， $-\infty < t < \infty$ 。这个数学模型说明照明系统需要的电流是幅度为5.091A的余弦。

使用数学模型可以定量设计满足指标的信号或系统。设计步骤是：1) 改变信号或系统的参数值，2) 分析参数的变化对定量信号特性或系统性能的影响，3) 利用这些影响选择参数值。

在许多情况下，输入信号可能已经给出，需要

分析或设计的是处理信号的系统。例如，希望设计一个滤波器来滤除收音机中输入信号中的不需要成分，如大气噪声。在有些情况下，可能要求改变输入信号，以得到某一具体系统的信号和系统性能的总体最优。例如，在无线电传输系统中，通过幅度调制或者频率调制改变

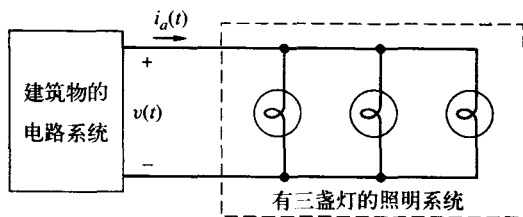


图1-3 走廊中的有三盏灯的照明系统