



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

信号与系统

第2版

张延华 刘鹏宇 编著

非外借



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

信号与系统

第2版

张延华 刘鹏宇 编著

机械工业出版社

《信号与系统》第2版为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书是在吸收国内外同类经典教材经验的基础上,结合目前大部分高校对该课程的教学改革成果,考虑到工程学科相关专业领域的需求,引入先进的计算软件编写而成的。本书共分6章,论述了信号与系统的基本概念、基本理论和基本分析方法。其中,第1章介绍了信号与系统的基本概念和必要的预备知识;第2、3章分别讨论了连续时间和离散时间信号与系统;第4章介绍傅里叶分析;第5章讨论了拉普拉斯变换与传递函数描述;第6章讨论 z 变换方法。

本书内容取材适当,体系结构合理,融信号分析、系统分析及系统设计于一体,适合用作工科电气、电子、信息、计算机等学科和专业“信号与系统”课程的教材,也可供从事相关领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/张延华,刘鹏宇编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2017.6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-56884-1

I. ①信… II. ①张… ②刘… 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108542号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 路乙达 责任编辑:于苏华 路乙达

责任校对:樊钟英 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2017年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·30.75印张·760千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56884-1

定价:65.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

第2版前言

第1版自2013年出版以来,先后印刷了4次,其间,作者经过广泛调研,从使用第1版的教师、学生(含备考研究生的高年级学生)和同行专家处得到许多意见和建议,在此基础上,结合多年来作者在教学实践中的体会,对第1版进行了补充和修订。

本书沿袭第1版的风格和组织架构。但与第1版相比,本书在保留原有特色的基础上强化了系统方程(微分和差分方程)、图(方框图和仿真框图)与系统传递函数之间的内在联系,突出了它们与变换域系统响应的关系。特别是针对第1版中的特色内容“应用示例及MATLAB实践”,通过引入不同领域且具有实际应用背景的真实数据以及逼近工程实际问题的应用案例,强化了物理概念、应用数学和工程背景的深入理解与融合,使读者在处理多域(时/频/ s/z 域)问题时思路清晰,能够自由地从一个域转换到另一个域。本书主要修订之处如下:

第1章,根据读者的反馈意见,对本章内容进行了重新组织,删减了概括性的介绍内容,重写了1.1节和1.2节,重点介绍了信号的软件算法生成以及系统建模的概念。

第2章,本章的核心是信号的建模和系统微分方程的解算。根据教学中的反馈,对本章部分内容进行了重新组织,全面更新了应用示例及MATLAB实践一节的内容。特别针对常微分方程的标准求解问题,通过引入算法仿真的概念和基本的MATLAB程序代码,给读者展示了基于先进计算软件进行物理信息系统建模机理的探索及方程解算器的调用技术;同时针对一般常微分方程的解析求解问题,则通过介绍MATLAB符号运算的基本概念和基本编程技术,以期帮助读者建立机器推理的概念。

第4章,为突出信号与系统的谱分析,对本章相关章节进行了删减重组,增加了“信号与系统的傅里叶分析”一节。另外针对傅里叶分析的应用难点,通过引进全新的案例全面改写和更新了应用示例及MATLAB实践一节。

第5章,通过对相关章节的增删重组,进一步强化了5.9节,即电气系统与机电系统相似性的介绍。更新了5.11节(应用示例及MATLAB实践)的部分内容,增加了基于MATLAB符号运算的微分方程变换域应用案例。

第6章,通过对相关章节的内容调整,新独立出两节,更新了应用示例及MATLAB实践一节,增加了太阳黑子活动周期分析的应用案例。

本书保留了第1版的大部分习题,补充了一些新习题,并在每章习题页附加参考答案的二维码,供读者扫码阅读。

本书的修订得益于许多使用第1版的教师、选修该课程的学生、备考研究生的高年级学生以及广大读者的意见和建议。另外,本书的一些新观点和新思想则来源于与加拿大Carleton大学的Fei Richard Yu教授的科研合作和范围广泛的研讨。研究生刘硕、杨磊、杨旭月、国珉、陈雅雯和毕瑞琪等修改整理了书中部分应用案例,毕瑞琪对全书的习题部分进行了系统的整理和补充。在此一并致谢!

第1版前言

“信号与系统”是电子、电气工程领域的重要技术基础课，主要研究信号分析与系统分析的基本理论、基本方法与应用。然而，随着现代科学技术的飞速发展，原本以“电”为核心的内容架构正面临着机电工程与信号处理技术、应用数学与计算机科学技术的渗透与融合。例如，传统上信号与系统侧重于对电系统及其应用的讨论，往往先研究连续时间信号与系统模型，继而讨论离散时间信号与系统模型。但如今，电子、电气工程专业的毕业生，却更有可能从事软件编程或者数字组网，而不是单纯的电路分析工作。这就意味着信号与系统应适应于无线通信系统、微机电系统、生物医学仪器、计算机组网、嵌入式系统以及流媒体信息处理等系统中存在的共性问题，当然也包括解决电路系统问题。

本书基于工程数学和电路分析，涉及连续时间和离散时间信号与系统、傅里叶级数、傅里叶变换、拉普拉斯变换和 z 变换等经典内容。通过对时域、频域重要概念及其时-频转换关系的讨论，希望读者掌握变换和滤波的基本原理，并能够在时域和频域中进行自由的转换。

关于读者

本书要求读者对初等微积分和复变函数有一定的了解，对矩阵代数也有初步的认识。

本书的组成

全书共6章。其中，第1章讨论信号与系统中的基本概念；第2章讨论连续时间信号与系统的一般特性及其建模方法；第3章讨论离散时间信号与系统的一般特性及其建模方法；第4章介绍连续时间信号的谱分析；第5章是对连续时间线性时不变系统的变换域分析；第6章是对离散时间线性时不变系统的变换域分析。

本书的使用

本书一方面可作为普通大专院校“信号与系统”课程的教科书，另一方面也能够成为多学科工程技术人员的基础参考书。作为教科书，它首先面向IT类(包括电子、电气)专业的学生；而作为参考书，则试图通过引入具有实际应用背景的真实数据以及逼近工程实际问题的应用例题或独立论题来扩大视野。

本书各章的例题来源于不同的应用领域，具有较强的工程背景。特别强化了(信号与系统的)频域、 s 域和 z 域的分析，重点突出了系统的频率特性和传递函数的概念及其应用。对于离散信号与系统，加强了双边 z 变换与非因果系统的分析。

本书的特点

与同类教材相比，本书具有如下特点：

- 本书注重物理概念和应用背景的理解与融合，强调信号与系统的基本理论和变换思想的重要意义。其宗旨是使学生在处理时域、频域问题时思路清晰，并能够比较容易地

从一个域转换到另一个域。

- 本书内容取材新颖先进，充分反映了信号与系统和相关交叉学科的最新发展，所涵盖的内容既有经典理论，又有最新的应用，便于组织课堂教学。
- 本书强调理论与应用的紧密结合。全书每章都从基本理论出发，循序渐进地引导读者理解、消化和掌握所学的内容，激发读者的学习热情，加深读者对本课程重要地位的认识。
- 本书结构、层次清晰，疑难之处处理得体，如书中关于傅里叶变换的应用、吉布斯现象的讨论以及真实金融数据的分析就很有特色。
- 本书给出许多经典而又内容丰富的应用实例，特别是有些例子直接来源于真实数据，因此具有很强的工程意义。
- 在传统的基础理论和先进的计算工具——MATLAB/Simulink 之间进行了整合，这样有助于读者用计算机实践信号与系统的众多理论和算法，同时也为把这些理论和算法应用于工程实际打下基础。
- 书中所有例子和应用的 MATLAB 程序(包括 Simulink 仿真模型)可以在机械工业出版社教育服务网站注册下载，网址是：www.cmpedu.com。
- 为了便于查阅，本书在附录中列出了 3 个变换的变换表。

软件说明

本书在信号与系统的基础理论和先进的计算软件——MATLAB/Simulink 之间进行了整合，为每章的论题提供了相应的 MATLAB 子程序或者 Simulink 仿真模型。这些子程序可以进行自身演示，也可以用来加深印象、巩固基本概念和验证算法结果，并且有助于解决一些实际的设计问题。当然，作者的主要目的是介绍信号与系统的理论及应用而不是计算软件，所以在正文中没有引入 MATLAB/Simulink 的使用介绍。如果读者需要了解 MATLAB/Simulink 的有关知识，可以浏览 MATLAB 的官方网站 <http://www.mathworks.com>。

致谢

本书的编写工作量很大，单凭作者是无法完成的，感谢北京工业大学为本书的出版提供的资助，感谢北京工业大学孙景琦教授及电子信息与控制工程学院同事的鼓励和建议，特别要感谢孙恩昌、孙艳华、司鹏博和杨睿哲博士对全书初稿的审阅给予的极大帮助，还要感谢研究生张然、李磊、卢丹蕾、陈刚、黄鑫、张黎、张蜜、张肖、宋治坤、王洋、张琳、陈慧琪在文档整理和绘图方面的工作。

编者

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
第 1 章 概述	1
1.1 信号	1
1.2 系统	10
1.3 关于 MATLAB 的说明	15
第 2 章 连续时间信号与系统	17
2.1 信号的基本运算	17
2.2 信号的特性	22
2.3 奇异函数族	28
2.4 常用工程信号	38
2.5 信号的广义傅里叶级数描述	42
2.6 连续时间系统	49
2.7 连续时间系统的特性	54
2.8 卷积积分	63
2.9 卷积积分的性质	71
2.10 LTI 系统的微分方程描述	74
2.11 LTI 微分方程的求解	76
2.12 微分方程系统的特性	86
2.13 系统的图形化建模与仿真	91
2.14 LTI 系统的状态变量描述	96
2.15 应用示例及 MATLAB 实践	104
习题	113
第 3 章 离散时间信号与系统	123
3.1 离散时间序列	123
3.2 序列的运算	134
3.3 序列的分解与卷积和	140
3.4 序列的相关性	146
3.5 卷积和与单位样值响应	152
3.6 离散时间系统	158
3.7 差分方程	165
3.8 差分方程系统的特征	173
3.9 数字滤波器	176
3.10 应用示例及 MATLAB 实践	181
习题	190
第 4 章 傅里叶分析	198
4.1 三角函数系	198
4.2 傅里叶级数	203
4.3 傅里叶系数的对称性	211
4.4 吉布斯现象	216
4.5 傅里叶级数的收敛条件	218
4.6 频谱的概念	219
4.7 傅里叶级数的性质	226
4.8 从傅里叶级数到傅里叶变换	235
4.9 傅里叶变换与傅里叶级数的比较	242
4.10 傅里叶变换的性质	246
4.11 广义傅里叶变换	267
4.12 傅里叶逆变换	272
4.13 信号的采样和重构	274
4.14 信号与系统的傅里叶分析	283
4.15 应用示例及 MATLAB 实践	297
习题	308
第 5 章 拉普拉斯变换与传递函数	
描述	319
5.1 拉普拉斯变换	319
5.2 收敛域及其性质	322
5.3 单边拉普拉斯变换及其性质	328
5.4 拉普拉斯逆变换	341
5.5 求解含初始条件的微分方程	347
5.6 传递函数与单位冲激响应	349
5.7 系统的响应	353
5.8 电路的传递函数	358
5.9 电气系统与机电系统的相似性	363
5.10 LTI 系统的性质和框图描述	367
5.11 应用示例及 MATLAB 实践	374
习题	382
第 6 章 z 变换	392

6.1 双边 z 变换及其收敛域	392	6.10 系统方程与 z 变换解	445
6.2 双边 z 变换的性质及综合应用	400	6.11 系统的框图与仿真	448
6.3 零点、极点和 z 平面	408	6.12 应用示例及 MATLAB 实践	454
6.4 逆 z 变换	412	习题	464
6.5 极点位置和序列的形式	424	附录	475
6.6 传递函数	428	附录 A 傅里叶变换及其性质	475
6.7 系统的响应	435	附录 B 拉普拉斯变换及其性质	477
6.8 频率响应函数	439	附录 C z 变换及其性质	479
6.9 单边 z 变换	440	参考文献	481

第 1 章

概述

信号(Signals)携带信息,而系统(Systems)变换信号。本书涉及这两个基本术语的研究。由于信号总是通过系统进行传播和变换,因此在内容上将侧重于研究系统的输入(激励)信号与输出(响应)信号之间的关系,以及系统将输入信号变换为输出信号的过程。前者是对系统的一种描述或者建模,后者则是对信号的一种运算或者处理。

例如,声音是一种信号,但针对信号本身有关其声学特性的描述并不是本书讨论的议题,我们真正关心的是如何将声音信号进行分解,并理解各分量具有的意义。图像也是一种信号,本书同样不研究图像可视的生物、生理学特性,而是考虑对于图像信号的有效分解问题,比如应用中经常利用这种分解研究导致图像模糊的原因,并据此设计相应的图像处理算法来恢复或者重构图像。

信号是一个比具体的声音或者图像更为抽象的概念。例如,信号可以是来自传感器的电压,也可以是一个指令序列,甚至是一张表单。概念上,信号是一种将时间或者空间定义域变换成某个值域的函数,这类值域在工程上一般属于物理测量的范畴,如温度、压力或发光强度等。系统则是一种将来自定义域内的输入信号变换成属于值域范围内的输出信号的函数。这里定义域和值域均为信号的集合,也称为信号空间。因此,系统就是对信号进行运算的函数。

信号与系统不同于一般学科领域,主要体现在它所涉及的特殊数据类型——信号。通常,这些信号来源于现实世界中的各种传感器数据,如地震波形、大气压力、视频流、医学影像、遥测、遥感以及无线电波等。信号与系统的任务就是为此类信号以及对这类信号进行变换的系统利用数学工具构建其函数模型,并对其进行分析。这种分析事实上可以认为是包含多种意图和目的的数学及算法的特殊运用,比如提高视频流的播放质量、语音识别及合成、数据压缩、信号重构等。

1.1 信号

1.1.1 信号的特征和分类

可以根据自变量的特性和函数值来定义信号。例如:自变量可以是连续变量或离散变量,这样,信号就可以被划分为连续函数或离散函数。此外,信号还可以被分为实值函数和复值函数。

信号可以由一个或多个信号源产生,前者是一个标量信号,而后者一般是一个矢量信号(或称作多路信号)。

一维信号(1-D)是拥有一个自变量的函数。二维信号(2-D)是拥有两个自变量的函数。多维信号(M-D)是拥有两个以上自变量的函数。例如,语音信号是典型的以时间为自变量的一维信号;一幅照片是以二维空间为自变量的二维信号。黑白视频信号的每一帧是一个二维图像信号,它是二维离散空间变量的函数,又因为它的每一帧都以固定(离散)的时间间隔顺序出现,因此黑白视频信号可以认为是一个三维信号的例子(三个自变量分别是两个空间变量加一个时间变量)。彩色视频信号是由三个分别代表红、绿、蓝(RGB)三基色的三维信号组成的。为了方便传输,RGB电视信号通常被转换成一种由亮度信号分量和两个色度信号分量组成的三通道信号。

当信号的自变量取确定值时,信号的取值被称作幅值。信号的幅值随自变量的变化而变化,这种变化的图形描述称作信号的波形。

对于一维信号,自变量通常被标定为时间。如果自变量是连续的,信号就称为连续时间信号;如果自变量是离散的,信号则被称为离散时间信号。连续时间信号在时间坐标的每一点上都有定义;而离散时间信号则在时间坐标的离散点上才有定义,因此它是一个时间序列。

具有连续幅值的连续时间信号一般被称作模拟信号,它在现实世界中随处可见。语音信号是典型的模拟信号。有限数字描述的具有离散幅值的离散时间信号被称为数字信号,比如MP3格式的数字音频信号。另外,时间上离散、幅值上连续的信号被称作抽样信号。数字信号是被量化的抽样信号。最后,具有离散幅值的连续时间信号可以被看成是量化的矩形信号。

在数学表示上可以清楚地看到信号的函数相关性。对一维连续时间信号,其自变量通常用时间 t 表示;对一维离散时间信号,其自变量一般用时间的离散值 n 表示。这样, $u(t)$ 代表一维连续时间信号,而 $\{v(n)\}$ 表示一维离散时间信号, $\{v(n)\}$ 中的每一个元 $v(n)$ 是离散时间信号的一个样本。在许多应用中,离散时间信号是由连续时间信号在归一化时间区间上抽样产生的。如果离散时间信号的时间间隔是均匀分布的,那么离散时间自变量 n 可以被归一化为整数。

在二维连续时间信号中,自变量一般是空间坐标,可用 x 和 y 表示。例如,一幅黑白图像的亮度可以用 $u(x, y)$ 表示,而一幅数字化图像则是二维离散时间信号,它的两个自变量是离散的空间坐标变量 m 和 n ,因此数字图像可以用 $v(m, n)$ 表示。同样,黑白视频信号是三维信号,可用 $u(x, y, t)$ 表示,这里 x 、 y 分别代表两个空间坐标变量,而 t 代表时间变量。彩色视频信号是由代表红、绿、蓝三基色的三个信号分量组成的信号矢量:

$$\mathbf{u}(x, y, t) = \begin{bmatrix} r(x, y, t) \\ g(x, y, t) \\ b(x, y, t) \end{bmatrix}$$

信号还可以根据信号的统计特性来分类。其中,可以用数学表达式、规则或者表查寻来完全描述的信号被称为确定性信号,而那些随机产生的或者不可预测的信号则被称为随机信号。本书主要讨论确定性时间连续和时间离散信号。现已发现,把一些相关信号表示为随机信号并用统计学方法进行分析有其方便之处。

1.1.2 信号的工程实例

为了更好地理解信号与系统的概念,下面给出一些典型的工程应用信号实例。

1. 信号的采样和重构——音叉实验

音叉信号的采样和重构可以通过设计一个简单的实验过程实现,如图 1.1.1 所示。首先需要准备一台配置 A-D 转换器的(基于 Windows 操作系统)计算机、一个麦克风和一个音叉,安装好 MATLAB 软件。

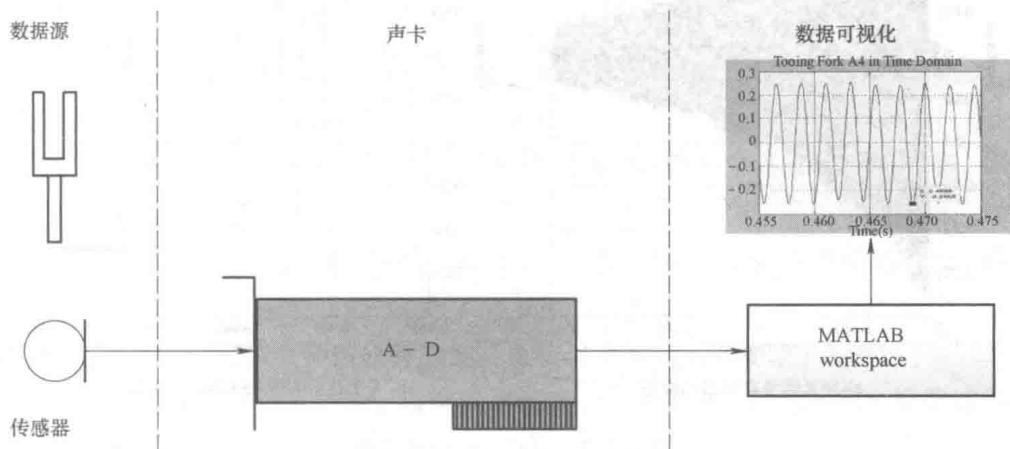


图 1.1.1 音叉实验

启动 Windows 自带的录音程序或者第三方录音软件,敲击音叉并对产生的声音信号录音。麦克风将音叉声音信号转换成电信号,计算机上的 A-D 转换器将原来模拟的声音信号经过采样和量化转换成数字数据(信号)并存储;播放这段录音时,计算机又通过 D-A 转换器将存储的数据恢复为模拟的声音信号。音叉信号在时域的波形如图 1.1.2a 所示,它的 MATLAB 源程序如下:

```
[y,Fs] = audioread('tuning_fork_A4.wav');
Nsamps = length(y);
t = (1/Fs) * (1:Nsamps);      % Prepare time data for plot
% Plot Sound File in Time Domain
figure
subplot(121),plot(t,y)
xlabel('Time (s)'),ylabel('Amplitude')
title('Tuning Fork A4 in Time Domain')
subplot(122),plot(t(9501:10000),y(9501:10000))
xlabel('Time (s)'),ylabel('Amplitude')
title('Tuning Fork A4 in Time Domain')
```

代码中 tuning_fork_A4.wav 是存储的音叉信号的 .wav 文件。

图 1.1.2b 所示的音叉信号在 $[0.455 \ 0.475]$ 区间的波形与正弦信号非常相似,它在对称的幅度范围内振荡,而且呈周期重复的特征(A-440 音叉),周期大约是 0.00227s (2.27ms)。这是偶然现象,还是在音叉的振动与数学上的正弦波之间存在紧密的联系呢?下面从信号分析的角度对音叉振动现象进行分析。可以看到,当音叉于静止状态受到一个敲

击(即从平衡位置产生一个位移)时,听到的声音信号就是一个正弦振动。

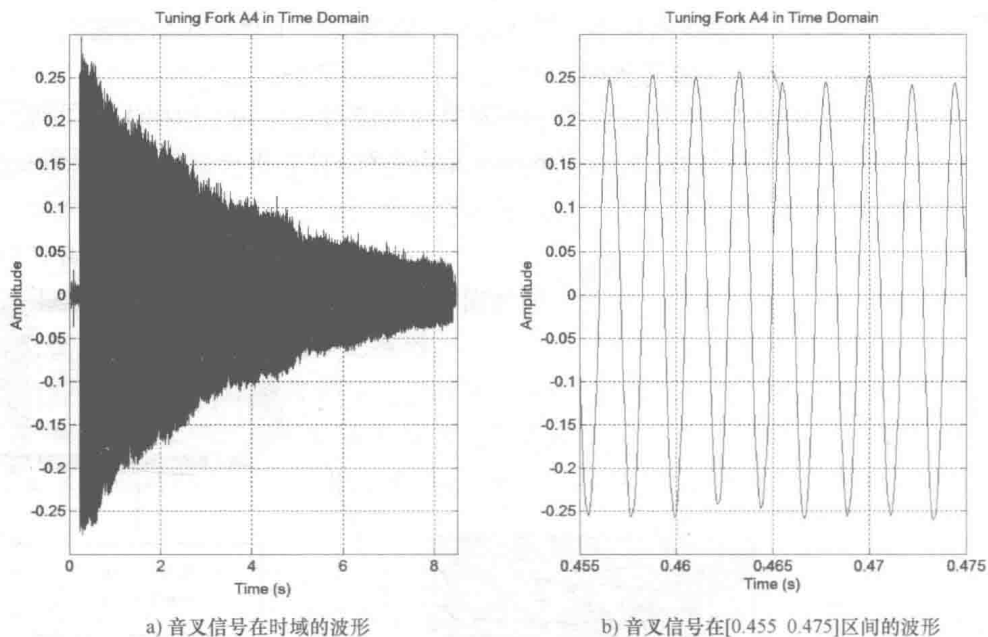


图 1.1.2 音叉实验信号波形

音叉受力分析如图 1.1.3 所示,当敲击音叉的一个叉子时,它从静止状态发生轻微变形并且往复回弹,从而发出一种似乎很“单纯”的声音。假设当发生微小变形时音叉可视为一种弹性材料,则根据胡克定律可知回弹力 F 与形变的大小 x 成正比,基于图 1.1.3 所示的参考坐标,则形变基本是沿 x 轴发生的,因此音叉受力 F 为

$$F = -kx \quad (1.1.1)$$

式中,参数 k 是音叉金属材料的弹性系数,负号表示当音叉受力变形是沿 x 轴的正方向时,回弹力是在负方向上,也就是说回弹力的作用是使音叉回到平衡位置。

音叉受力产生的回弹力还将产生一个加速度(牛顿第二定律),即

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1.1.2)$$

式中, m 是音叉的质量。根据式(1.1.1)和式(1.1.2)可知,这两个力应该互相平衡,因此就可以得到描述音叉受敲击产生的运动 $x(t)$ 与时间 t 的二阶微分方程,即

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -kx(t) \quad (1.1.3)$$

上述微分方程的一个标准解是

$$x(t) = \cos\omega_0 t$$

式中,角频率 ω_0 是一个待定系数。欲确定 ω_0 ,只需将 $x(t) = \cos\omega_0 t$ 代入式(1.1.3),有

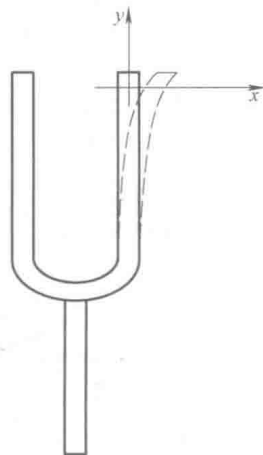


图 1.1.3 音叉受力分析

$$m \frac{d^2}{dt^2}(\cos\omega_0 t) = -k\cos\omega_0 t$$

则可解出 ω_0 为

$$\omega_0 = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.1.4)$$

因此, 音叉振动微分方程的一个解是

$$x(t) = \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \quad (1.1.5)$$

由式(1.1.5)可知, $x(t)$ 描述了音叉的运动并且这个运动是标准的正弦波振动。另外, 根据角频率公式(1.1.4)还可以得到下面两个结论:

1) 如果两个音叉质量相同(m 相同), 则更硬(k 更大)的一个具有更高的频率, 因为音叉振动的角频率 ω_0 正比于 \sqrt{k} 。

2) 如果两个音叉硬度相同(k 相同), 则更重(m 更大)的一个具有更低的频率, 因为音叉振动的角频率 ω_0 反比于 \sqrt{m} 。

讨论题 1.1.1 选用一个音频软件录制一段音叉音频信号, 要求:

1) 对该音频信号进行格式转换, 选择音频标准、采样速率和量化等级; 根据这些指标计算出数字音频的数据速率。

2) 调用函数 `audioread` 对音频信号进行读操作, 播放录音。

3) 调用函数 `audioinfo` 查询音频文件的所有属性, 并且将该音频文件存成数据文件。

2. 实验室信号生成

工程设计和实验室中广泛使用各种信号, 如周期和非周期信号、冲激序列、多路信号和随机序列等。这些信号可以由专业信号发生器产生, 但在众多领域的先进仿真应用中则一般基于信号生成算法由计算机程序产生。下面将通过调用 MATLAB 信号生成函数产生一些常用的工程试验信号。

(1) 周期信号 MATLAB 及其专业工具箱预置了多种周期信号生成函数, 包括正弦、余弦、锯齿波(Sawtooth)和矩形波(Square)等。图 1.1.4 给出了频率 50Hz、采样率 10kHz 并且持续 1.5s 的周期锯齿波和矩形波信号, 源程序如下:

```
fs = 10000; t = 0:1/fs:1.5;
x1 = sawtooth(2*pi*50*t);
x2 = square(2*pi*50*t);
subplot(211), plot(t, x1), axis([0 0.2-1.2 1.2])
xlabel('Time (sec)'); ylabel('Amplitude'); title('Sawtooth Periodic Wave')
subplot(212), plot(t, x2), axis([0 0.2-1.2 1.2])
xlabel('Time (sec)'); ylabel('Amplitude'); title('Square Periodic Wave')
```

(2) 非周期信号 MATLAB 及其专业工具箱预置了多种非周期信号生成函数, 包括三角脉冲(Tripuls)、矩形脉冲(Rectpuls)和高斯脉冲(Gauspuls)等。图 1.1.5 给出了一个脉冲宽度 20ms、采样率 10kHz 并且持续 2s 的三角脉冲和矩形脉冲信号, 源程序如下:

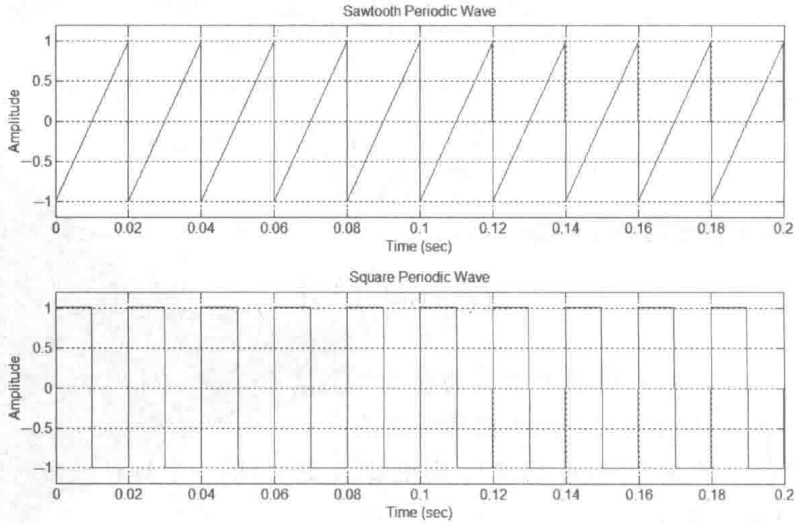


图 1.1.4 频率 50Hz、采样率 10kHz 并且持续 1.5s 的周期锯齿波和矩形波

```

fs = 10000;t = -1:1/fs:1;
x1 = tripuls(t,20e-3);
x2 = rectpuls(t,20e-3);
subplot(211),plot(t,x1), axis([-0.1 0.1-0.2 1.2])
xlabel('Time (sec)');ylabel('Amplitude');
title('Triangular Aperiodic Pulse')
subplot(212),plot(t,x2), axis([-0.1 0.1-0.2 1.2])
xlabel('Time (sec)');ylabel('Amplitude');
title('Rectangular Aperiodic Pulse')
set(gcf,'Color',[1 1 1])

```

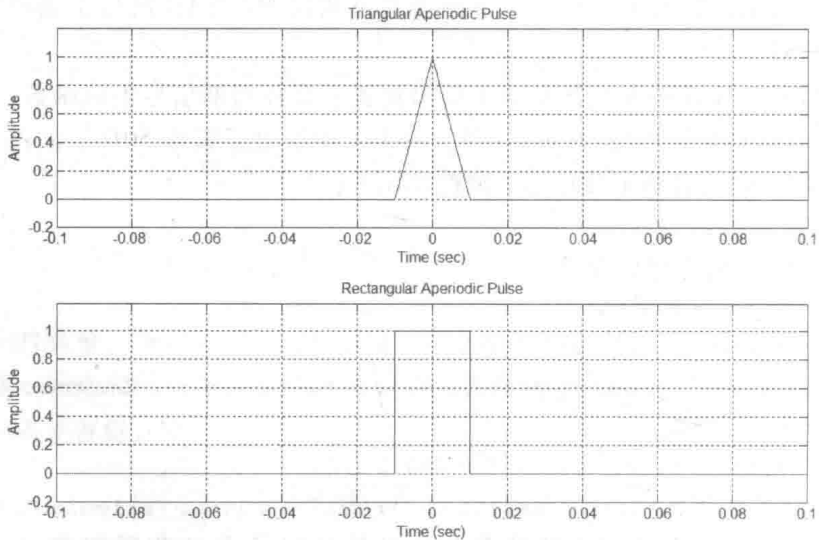


图 1.1.5 脉冲宽度 20ms、采样率 10kHz 并且持续 2s 的三角脉冲和矩形脉冲

其他常用的非周期函数还有高斯脉冲 (Gauspuls) 函数和辛格 (Sinc) 函数。gauspuls 函数生成一个高斯调制正弦脉冲, 指定时间、中心频率和部分带宽。sinc 函数是连续矩形脉冲的

逆傅里叶变换, 后续章节中会专门讨论。图 1.1.6 给出了一个 50kHz、采样速率 1MHz 且 60%带宽的高斯射频脉冲和辛格函数, 该脉冲在其包络线低于峰值 40dB 处截断信号, 源程序如下:

```
% Generate a 50 kHz Gaussian RF pulse with 60% bandwidth, sampled at
% a rate of 1 MHz
tc = gauspuls('cutoff',50e3,0.6,[],-40);
t1 = -tc : 1e-6 : tc;
y1 = gauspuls(t1,50e3,0.6);
% Generate the sinc function for a linearly spaced vector
t2 = linspace(-5,5);
y2 = sinc(t2);
subplot(211),plot(t1 * 1e3,y1);
xlabel('Time (ms)');ylabel('Amplitude');title('Gaussian Pulse')
subplot(212),plot(t2,y2);
xlabel('Time (sec)');ylabel('Amplitude');title('Sinc Function')
```

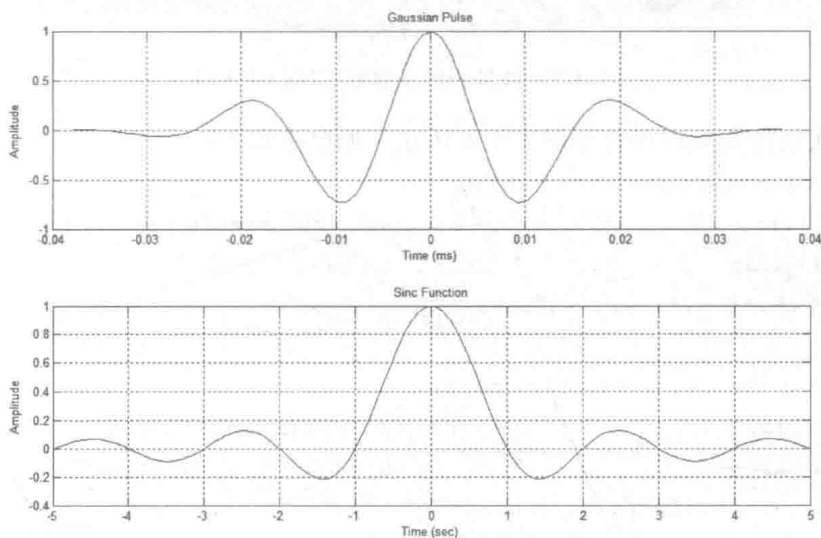


图 1.1.6 50kHz、采样速率 1MHz 且 60%带宽的高斯射频脉冲和辛格函数

(3) 扫频波形 扫频信号, 例如 chirp 函数也是工程实验室常用的信号。MATLAB 内嵌的 chirp 函数有两个可选参数指定要选择的扫描法和初始相位。线性扫频函数和二次扫频函数如图 1.1.7 所示, 源程序如下:

```
% Generate a linear chirp
t = 0:0.001:2; % 2 secs, 1kHz sample rate
ylin = chirp(t,0,1,150); % Start DC, cross 150Hz at t=1sec

% Generate a quadratic chirp
t = -2:0.001:2; % +/-2 secs, 1kHz sample rate
yq = chirp(t,100,1,200,'q'); % Start 100Hz, cross 200Hz at t=1sec

% Compute and display the spectrograms
```

```
subplot(211), spectrogram(ylin, 256, 250, 256, 1E3, 'yaxis');
title('Linear Chirp')
subplot(212), spectrogram(yq, 128, 120, 128, 1E3, 'yaxis');
title('Quadratic Chirp')
```

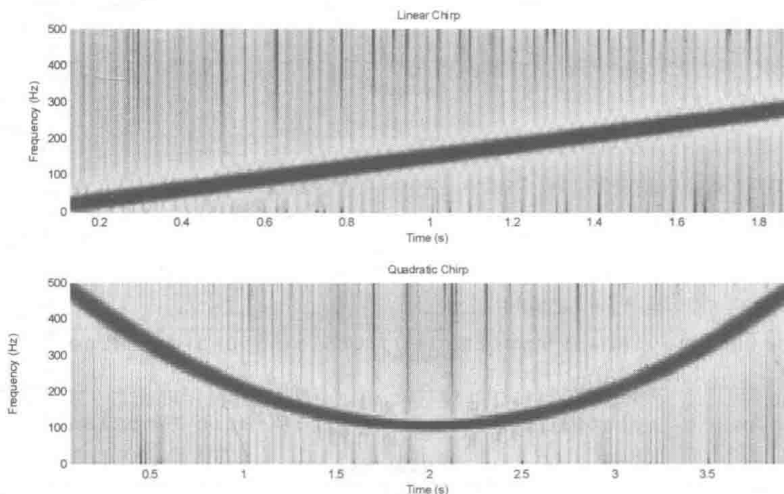


图 1.1.7 线性扫频函数和二次扫频函数

凸、凹二次线性调频波函数如图 1.1.8 所示，源程序如下：

```
% Generate a convex quadratic chirp.
t = -1:0.001:1;           % +/-1 second, 1kHz sample rate
fo = 100; f1 = 400;       % Start at 100Hz, go up to 400Hz
ycx = chirp(t, fo, 1, f1, 'q', [], 'convex');

% Generate a concave quadratic chirp:
t = -1:0.001:1;           % +/-1 second, 1kHz sample rate
fo = 400; f1 = 100;       % Start at 400Hz, go down to 100Hz
ycv = chirp(t, fo, 1, f1, 'q', [], 'concave');

% Compute and display the spectrograms
subplot(211), spectrogram(ycx, 256, 255, 128, 1000, 'yaxis');
title('Convex Chirp')
subplot(212), spectrogram(ycv, 256, 255, 128, 1000, 'yaxis');
title('Concave Chirp')
```

除此之外，还有一个常用的信号是压控振荡器 (Voltage Controlled Oscillator, VCO)，它能生成一个由输入矢量控制其频率的振荡信号。图 1.1.9 给出了用 VCO 分别生成的三角波和矩形波，源程序如下：

```
% Generate 2 seconds of a signal sampled at 10kHz whose instantaneous
% frequency is a triangle (respectively a rectangle) function of time:
fs = 10000;
t = 0:1/fs:2;
x1 = vco(sawtooth(2* pi* t, 0.75), [0.1 0.4]* fs, fs);
```



```
x2 = vco(square(2* pi* t),[0.1 0.4]* fs, fs);

% Plot the spectrograms of the generated signals:
subplot(211), spectrogram(x1, kaiser(256, 5), 220, 512, fs, 'yaxis');
title('VCO Triangle')
subplot(212), spectrogram(x2, 256, 255, 256, fs, 'yaxis')
title('VCO Rectangle')
```

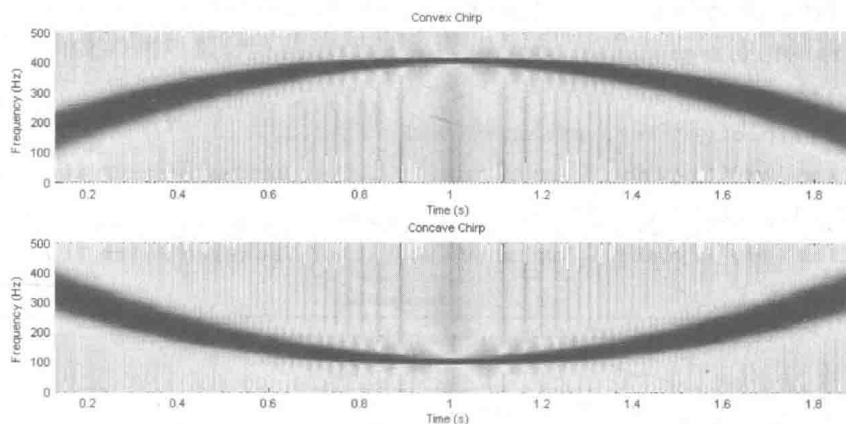


图 1.1.8 凸、凹二次线性调频波函数

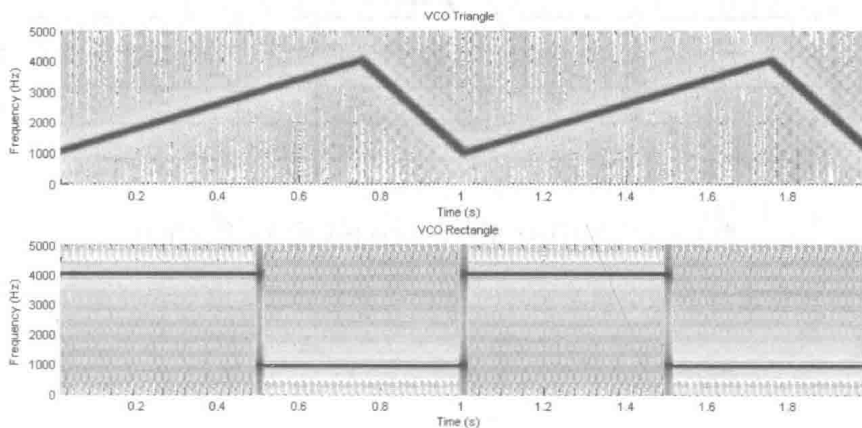


图 1.1.9 用 VCO 分别生成的三角波和矩形波

(4) 脉冲序列 图 1.1.10 给出了 MATLAB 使用 `pulstran` 函数生成的脉冲序列。图 1.1.10a 为一个采样频率 100GHz、间距 7.5ns 的 2GHz 矩形脉冲信号，图 1.1.10b 为一个 10kHz、50%带宽的周期性的高斯脉冲信号，源程序如下：

```
% Pulse Trains
% Construct a train of 2 GHz rectangular pulses sampled at a rate of
% 100 GHz at a spacing of 7.5nS.
fs = 100E9; % sample freq
D = [2.5 10 17.5]' * 1e-9; % pulse delay times
t = 0 : 1/fs : 2500/fs; % signal evaluation time
w = 1e-9; % width of each pulse
```