

PEARSON

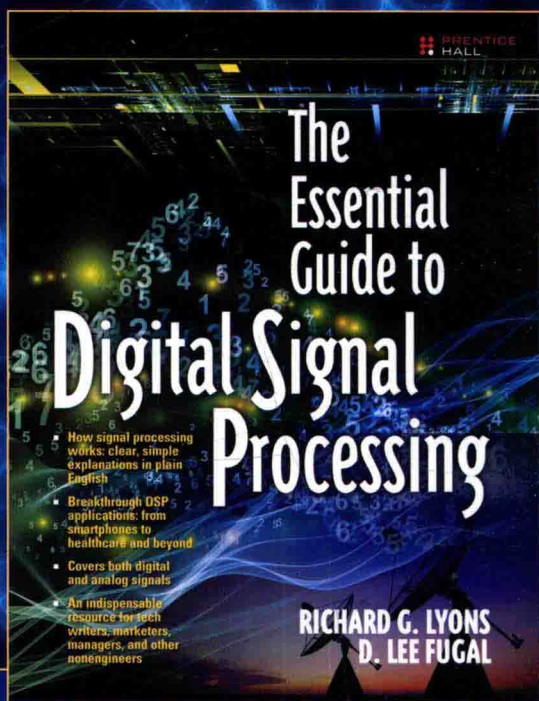
# 数字信号处理精要

[美] 理查德 G. 莱昂斯 (Richard G. Lyons) 著

D. 李·富盖尔 (D. Lee Fugal)

余磊 等译 孙洪 张海剑 审校

*The Essential Guide  
to Digital Signal  
Processing*



机械工业出版社  
China Machine Press

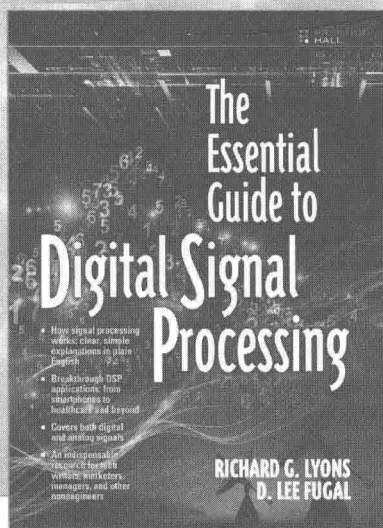
# 数字信号处理精要

[美] 理查德 G. 莱昂斯 (Richard G. Lyons) 著  
D. 李·富盖尔 (D. Lee Fugal)

余磊等译 孙洪 张海剑 审校



*The Essential Guide  
to Digital Signal  
Processing*



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理精要 / (美) 莱昂斯 (Lyons, R. G.), (美) 富盖尔 (Fugal, D. L.) 著; 余磊等译. —北京: 机械工业出版社, 2016.3

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: The Essential Guide to Digital Signal Processing

ISBN 978-7-111-52986-6

I. 数… II. ① 莱… ② 富… ③ 余… III. 数字信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 030713 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-4436

Authorized translation from the English language edition, entitled The Essential Guide to Digital Signal Processing, by Richard G. Lyons; D. Lee Fugal. published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2014.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2016.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括中国台湾地区和香港、澳门特别行政区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书以通俗易懂的语言介绍数字信号处理的基本内容。本书共分 9 章, 第 1 章介绍什么是数字信号处理, 第 2 章介绍什么是模拟信号, 第 3 章介绍模拟信号的频率和频谱, 第 4 章介绍数字信号及其产生方式, 第 5 章介绍数字信号的采样与频谱, 第 6 章介绍数字信号频谱的计算方式, 第 7 章介绍小波变换, 第 8 章介绍数字滤波器, 第 9 章介绍二进制数。

出版发行: 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: 谢晓芳

责任校对: 董纪丽

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 11.5

书号: ISBN 978-7-111-52986-6

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

## 出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, John Wiley & Sons, CRC, Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Thomas L. Floyd, Charles K. Alexander, Behzad Razavi, John G. Proakis, Stephen Brown, Allan R. Hambley, Albert Malvino, Mark I. Montrose, David A. Johns, Peter Wilson, H. Vincent Poor, Dikshitulu K. Kalluri, Bhag Singh Guru, Stephane Mallat 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：[www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

电子邮件：[hzsj@hzbook.com](mailto:hzsj@hzbook.com)

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

## 译 者 序

如今，数字信号处理技术早已存在于人们日常生活的方方面面，智能手机、数码相机、高清电视、卫星导航、医疗影像……可以说数字信号处理无处不在。然而，对于大多数人，数字信号处理就像一个神秘的盒子，让人充满敬畏而不敢过多涉足。另外，对那些从事数字信号处理相关工作的非专业人士（例如技术销售人员、项目管理人员等）来说，系统学习这样一门神秘的课程显得力不从心，而又迫切需要快速了解该课程的基本概念，那么这本书将是首选！

本书作者 Richard G. Lyons 和 D. Lee Fugal 长期致力于数字信号处理的教学和推广工作，有着丰富的教学和实践经验。本书主要面向非数字信号处理专业的人士，介绍数字信号处理专业的基本概念，旨在以最简洁、最通俗的方式让非专业人士更快、更有效地掌握这些基本知识。

本书包含 9 章和 4 个附录，由余磊副教授组织翻译。其中，第 1 章和术语表由余磊翻译，第 2 章由刘辰光翻译，第 3、4 章由任俊英翻译，第 5 章和附录 C 由刘舟翻译，第 6 章由黄山翻译，第 7 章由胡诗卉翻译，第 8 章由张丽宏翻译，第 9 章由雷谦翻译，附录 A、B 由贾竞源翻译，附录 D 由代翱翻译。余磊副教授完成了全书的统稿和审校工作，孙洪教授和张海剑副研究员对全书进行了审校。

本书的译者都是长期从事数字信号处理领域工作的科研人员，具有丰富的理论和实践经验，但由于数字信号处理内容繁杂，因此对于原著内容的理解难免有所偏差，翻译不当之处，欢迎批评指正。

# 前 言

对于“信号”这个词，我们已经很熟悉了。所有承载信息的东西都可以称为信号，例如交通信号、求救信号，甚至还有烟雾信号。在纸牌游戏中，当我们拿到一手好牌的时候，往往尽量不给对方透露任何“信号”。那么，处理信号意味着什么呢？本书将采用现实生活中大家所熟悉的信号和信号处理方法，以最为简洁明了的方式解答这个问题。

大家可能没有意识到，实际上信号和信号处理时时刻刻影响着我们的日常生活。本书不仅展示了为什么信号和信号处理广泛存在于我们的日常生活中，而且更深入地解释了其中的原理。例如，为什么我们从收音机中听到的声音效果要远好于从手机中听到的声音效果？

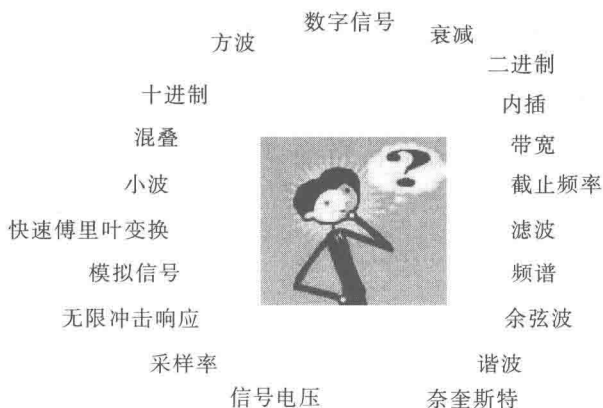
本书面向的读者是非技术类的人群，而不是工程专业的学生。因此，本书的主要目的有两个：首先，采用最少的数学公式，以通俗的方式阐述信号和信号处理的基本概念与原理；其次，介绍信号处理中的“语言”——术语。（为了便于阅读，本书在最后附上了完整的信号处理术语和缩写词。）

对于那些在公司制作或者使用信号处理硬件或软件的非技术类读者，本书将会是你的最佳选择。日常工作中，你可能会碰到许多看似神秘的概念和术语。本书将为你揭开这一层神秘的面纱，让你更深入地理解信号处理，从而更有效地与工程师或者其他技术类人员交流。

通常可以将信号分为两大类：模拟信号和数字信号。本书将逐步解释这两种信号的本质，以及如何在日常生活中使用它们来提高生活品质。

本书的章节是按照作者的理解安排的，你不必按照章节依次阅读，也不见得要阅读整本书。第1章主要介绍信号处理如何在近现代变得如此重要及其原因。第2~5章则阐述模拟信号和数字信号的基本性质。其他章节介绍模拟信号和数字信号的处理方法。

全书的内容大致如此。我们希望你能喜欢这本书，还望它能给你带来帮助。







出版者的话

译者序

前言

## 第 1 章 什么是数字信号处理····· 1

1.1 幻影技术····· 2

1.2 什么是信号····· 2

1.3 模拟信号和数字信号····· 3

1.4 数字信号处理····· 3

1.5 本章要点····· 5

## 第 2 章 模拟信号····· 7

2.1 什么是模拟信号····· 8

2.2 温度模拟信号····· 8

2.3 音频模拟信号····· 9

2.4 电子模拟信号····· 10

2.4.1 什么是电压····· 11

2.4.2 正弦电压····· 13

2.4.3 其他有用的周期模拟信号····· 17

2.5 人类语音模拟信号····· 18

2.6 本章要点····· 20

## 第 3 章 模拟信号的频率和频谱····· 21

3.1 频率····· 22

3.1.1 频率的定义····· 22

3.1.2 频率的表示····· 24

3.2 频谱的概念····· 25

3.3 模拟信号频谱····· 26

3.3.1 一个复合信号频谱的例子····· 28

3.3.2 谐波····· 29

3.3.3 谐波失真····· 32

3.3.4 带宽····· 33

3.3.5 带宽的其他定义····· 35

3.4 本章要点····· 36

## 第 4 章 数字信号及其产生方式····· 37

4.1 什么是数字信号····· 38

4.1.1 数字的概念····· 38

4.1.2 数字信号定义 I····· 38

4.1.3 数字信号定义 II····· 39

4.2 数字信号的产生方式····· 41

4.2.1 通过观察产生数字信号····· 41

4.2.2 通过软件产生数字信号····· 43

4.2.3 通过采样模拟信号产生数字  
信号····· 43

4.2.4 数字信号的采样率····· 45

4.3 语音数字信号····· 45

4.4 数字信号处理例子 1····· 47

4.5 数字信号处理例子 2····· 49

4.6 模拟信号采样的两个重要方面····· 53

4.6.1 采样率限制····· 53

4.6.2 模-数转换器输出数字····· 53

4.7 采样率变换····· 54

4.7.1 抽取····· 54

4.7.2 内插····· 54

4.8 本章要点····· 56

<b>第 5 章 数字信号的采样和频谱</b> ··· 59	7.2.2 传统 / 采样离散小波变换··· 102
5.1 模拟信号的频谱——快速回顾··· 60	7.3 本章要点··· 104
5.2 采样如何影响数字信号的频谱··· 63	<b>第 8 章 数字滤波器</b> ··· 107
5.2.1 周期振荡信号的采样··· 65	8.1 模拟滤波··· 108
5.2.2 对模拟正弦电压波的采样··· 67	8.2 常见滤波器类型··· 109
5.2.3 我们为什么要关心混叠··· 71	8.3 数字滤波··· 111
5.3 数字正弦信号的频谱··· 72	8.4 本章要点··· 113
5.4 数字语音信号的频谱··· 75	<b>第 9 章 二进制数</b> ··· 115
5.5 数字音乐信号的频谱··· 76	9.1 计数系统··· 116
5.6 抗混叠滤波器··· 78	9.1.1 十进制计数系统··· 116
5.7 模-数转换器输出数字··· 81	9.1.2 四进制计数系统··· 117
5.8 本章要点··· 81	9.1.3 二进制计数系统··· 118
<b>第 6 章 如何计算数字信号的频谱</b> ··· 83	9.1.4 二进制数的应用··· 120
6.1 计算数字频谱··· 84	9.2 二进制数··· 121
6.1.1 离散傅里叶变换··· 84	9.3 为什么使用二进制数··· 122
6.1.2 快速傅里叶变换··· 85	9.3.1 构建数字式硬件比较 容易··· 122
6.2 频谱计算实例··· 85	9.3.2 二进制数的可靠性高··· 122
6.2.1 计算实例··· 86	9.4 二进制数和模-数转换器··· 123
6.2.2 相关运算的含义··· 90	9.5 本章要点··· 126
6.3 频谱分析实例··· 90	<b>附录 A 科学计数法</b> ··· 127
6.4 本章要点··· 92	<b>附录 B 分贝</b> ··· 131
<b>第 7 章 小波</b> ··· 95	<b>附录 C 调幅和调频广播信号</b> ··· 141
7.1 快速傅里叶变换——快速回顾··· 96	<b>附录 D 二进制数格式</b> ··· 147
7.2 连续小波变换··· 98	<b>术语表</b> ··· 155
7.2.1 非抽取小波变换或冗余离散 小波变换··· 102	





第 1 章

什么是数字信号处理

## 1.1 幻影技术

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 技术对我们的日常生活产生了深远的影响。观看电视节目、利用因特网获取信息、使用数码相机拍摄照片、和朋友煲电话粥、驾驶自己的爱车, 或者在家里用电脑完成一份报告, 又或者刷信用卡付账时, 你都在使用数字信号处理技术。从技术层面来说, 数字信号处理是这些设备的“大脑”。尽管我们每天都在利用数字信号处理做许许多多的事情, 但是很少有人听说过数字信号处理这个概念。正因如此, 数字信号处理也称为一种“幻影技术”。为了展示在日常生活中我们对“隐形”的数字信号处理技术依赖到了何种程度, 表 1-1 给出了生活中一些常见的例子, 并且揭示了没有数字信号处理技术的生活将变成什么样子。

表 1-1 没有数字信号处理的世界

离开数字信号处理	后果
没有手机和智能手机	没有短信或者无法上网。回到用公用电话的时代
没有电脑	没有因特网、电子邮件、Facebook、Youtube、Skype
没有有线电视或者卫星电视	只能看少量低清晰度的本地电视频道
没有 CD	回到磁带时代
没有 DVD	只能看低清晰度的 VHS 录像带
没有信用卡用于购物	只能用现金或者支票支付
没有数码相机	带着相机胶卷去照相馆冲洗照片
没有超声波扫描和 MRI 或者 CAT 扫描	回到开刀诊断的时代
没有 GPS	回到使用纸质地图的时代
没有多普勒雷达	没有远距离天气预报
没有现代石油勘探	更高的汽油价格 (甚至更高)
没有电子游戏	孩子们只能去外面玩
没有恶劣天气下的航班	带上你的睡袋去机场
没有音乐贺卡	多无聊啊

由此看来, 数字信号处理对我们的日常生活是非常重要的, 我们有必要去了解什么是所谓的 DSP 技术。而在理解什么是数字信号处理之前, 我们首先要了解信号的概念。

## 1.2 什么是信号

对信号的任何完整定义都不可避免地使人捉摸不透。例如, 有人将信号定义

为任意传递到接收端的信息的表达。因此，这里并不打算讨论“信号”的定义。让我们通过日常生活中一些经常碰到的例子来阐述信号对于我们的意义。例如，当我们倾听喇叭播放出来的音乐时，信号以声波的形式通过空气传入我们的耳朵，并刺激鼓膜振动使得我们能听到该段音乐；当我们开着车经过十字路口时，信号以光的形式从红绿灯辐射出来，告诉我们是应继续前进还是停下来，假如我们没有注意到此时亮着红灯而继续保持前进（闯红灯），那么马上就会有警车伴随着警笛声从身后呼啸而来，提醒靠边停车。

当我们用手机拨打电话时，信号以如图 1-1 所示的符号形式出现在手机屏幕上，提示我们手机是否能够从本地手机基站接收足够强的射频信号；当我们使用温度计时，信号以水银柱的高度值的形式，告诉我们当前的温度；而当朋友在我们脸颊上亲吻时，信号

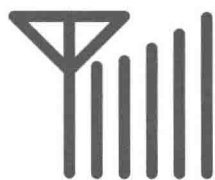


图 1-1 手机信号强度指示器

则以亲吻的动作传达爱慕的信息。上述这些例子中，我们都接收了携带某种信息的信号。

### 1.3 模拟信号和数字信号

信号可以分为模拟信号（Analog Signal）和数字信号（Digital Signal）。日常生活中碰到的信号，例如 1.2 节中提到的声和光信号都是模拟信号。第 2 章和第 3 章详细讨论模拟信号。

简单来讲，数字信号就是由数字构成的序列，或者叫数列。这样的数列可以存储在电脑、数码相机和电子游戏机的存储器中，或者记录在 CD 和 DVD 上。通过适当的方式，信号处理领域的工程师可以将声光等模拟信号转换成数字信号（数列），使转换后的数字信号包含原始模拟信号的所有信息。经过恢复处理，数字信号还能转换回模拟信号（声音信号或者光信号）。将模拟信号转换成数字信号，然后再将数字信号转换回模拟信号看起来似乎没有太大用处，但正是有了这样的转换，才有了数字信号处理。

### 1.4 数字信号处理

数字信号处理就是将数字信号中的数值进行某种数学处理的过程，其目的是改善数字信号某些方面的性质。例如，一位流行歌手对着麦克风演唱歌曲，这

时我们首先将模拟声音信号转换成数字信号。转换后的数字信号中的数值大小经过某种处理，然后再转换回模拟语音信号，由扬声器播放出去，最后听到的歌声带有一点点优美的回音。当今的商业音乐中，对流行歌手的声音进行音效处理是行业标准流程。第4章详细介绍这个话题。

数字信号处理在医学领域的应用也相当多，例如在使用心电图检查心脏时，往往需要将一些小电极贴在病人前胸，检测心脏产生的模拟电信号，如图1-2a所示。而在实际中，由于多种原因，模拟电极信号往往被一些与信号幅度相当的突发性干扰所扰乱（这种干扰称为噪声），使医生无法根据心电图准确评估心脏的电活动。

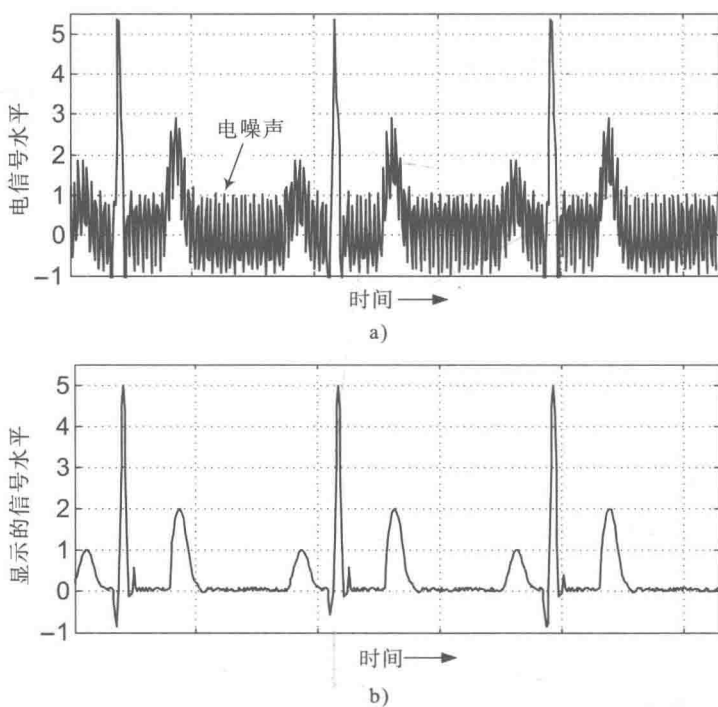


图 1-2 心电图信号：a) 原始测量的带噪声信号；b) 经过数字信号处理后改善的信号显示

现在，数字信号处理可以解决这个问题。如图1-3所示，首先我们将传感器检测到的模拟电信号转换成数字信号。然后，数字信号中的数值经过处理，信号中的噪声部分被消除，最后就可以得到非常清晰明了的心电图，如图1-2b所示。这时，医生就可以使用这种清晰明了的心电图来快速评估心脏是否健康。

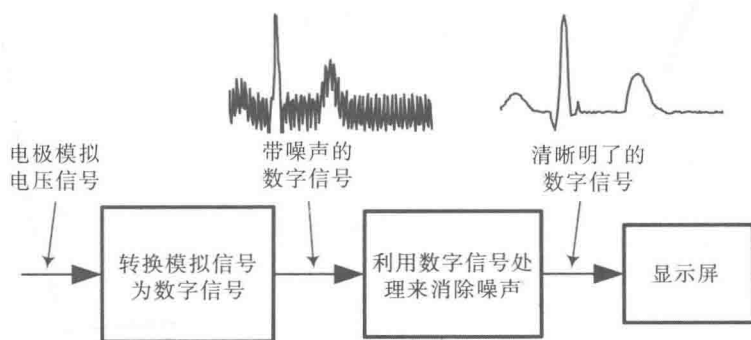


图 1-3 利用数字信号处理来改善心电图信号显示

如今，信号处理的应用领域相当广泛，包括军事、工业、太空探索、摄影、通信、科技、地震、气候等。正如表 1-1 中描述的那样，虽然离开了信号处理仍然可以继续生活，但是我们的生活会变得非常不便。

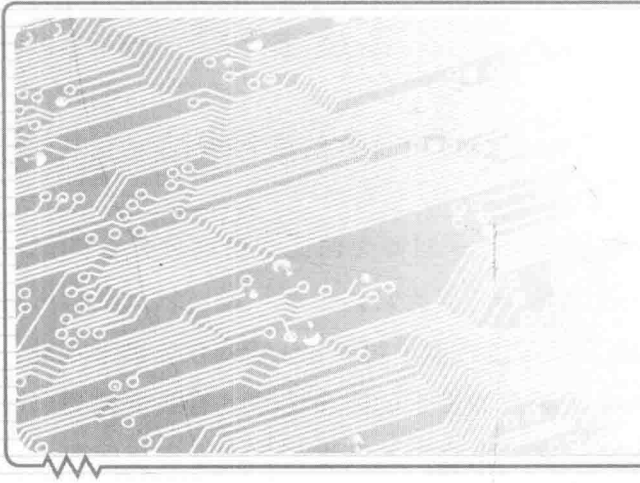
本章简要介绍了模拟信号、数字信号，以及数字信号处理的基本概念，以后的章节将详细介绍信号及信号处理。

## 1.5 本章要点

本章要点如下：

- 信号无处不在，而这些信号往往都是模拟的声音信号或者光信号。
- 通过适当的方式，我们可以将模拟信号（声音信号或者光信号）转换成数字信号（数列），然后将其存储在电子设备中。数字信号包含了原始模拟信号的全部信息。
- 对数字信号中的数值进行数学处理可以增强信号的某些重要性质，或者降低污染信号的噪声。
- 在必要情况下，可以从处理后（修改和增强）的数字信号中恢复模拟信号。
- 数字信号处理的应用广泛而多样。我们也许看不到哪里使用了这种幻影技术，但是离开了它，生活将变得极为不便。





## 第2章 模拟信号



正如第1章描述的，理解数字信号之前，首先要对模拟信号有一定的了解。正因如此，本章将介绍模拟信号的概念及其基本性质。

## 2.1 什么是模拟信号

这里，可以将模拟信号定义为满足如下条件的某个物理量的任意表示：

- 其值随时间而变化
- 在每一个时刻都有值
- 含有信息

上述条件有些难以理解，模拟信号似乎很神秘。但事实上并非如此，现实生活中模拟信号无处不在，手机扬声器发出的声音信号、有线电视公司发出的电子视频信号、温度计的水银柱在一天之内的高度变化，还有夜间闪烁的星星发出的波动的光强，这些都是模拟信号的例子。不难发现，模拟信号的一个重要性质是含有有用的信息。下面先详细介绍几种常见的模拟信号。

## 2.2 温度模拟信号

温度是一种非常简单的模拟信号，图2-1中的温度曲线显示了密歇根州马凯特<sup>⊖</sup>一年之中室外温度的变化。我们可以把这些曲线当成模拟信号——它们代表随时间变化的物理量。给定一年内的任意一天，我们都能根据这条曲线估计马凯特地区当天的室外温度。那么图2-1中的模拟信号曲线包含什么信息呢？它告诉我们如果无法适应寒冷的环境，那么就不应该选择在密歇根州的马凯特工作。

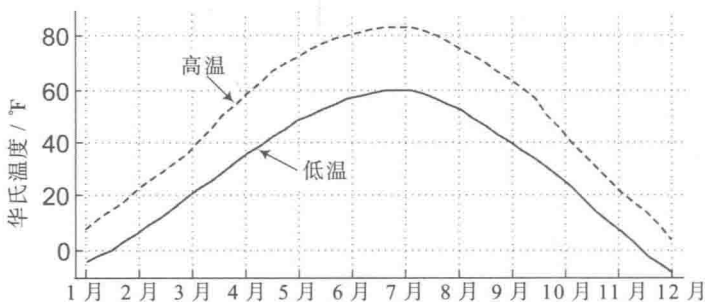


图 2-1 密歇根州马凯特室外温度的变化

⊖ 本书涉及该示例时均采用华氏温度。 $t_F = \frac{9}{5}t + 32$ ，其中  $t_F$  表示华氏温度（°F）， $t$  表示摄氏温度（°C）。

模拟信号的一个重要特点是，当我们在一张纸上以时间为横坐标描绘模拟信号时，笔尖是不会离开纸面的，如图 2-1 所示。换句话说，曲线中不能有间隙，并且不能丢失信息。我们称这种没有间断的曲线称为连续曲线。事实上，许多工程师把模拟信号称为连续信号。

## 2.3 音频模拟信号

图 2-2a 所示为扬声器发出的音频信号，它也是一种模拟信号。当音频电压作用于扬声器终端时，扬声器的纸盆会发生振动，从而发出声音。图 2-2b 显示了由纸盆振动引起的气压变化。图 2-2b 右边三条深灰色的圆弧表示高压下的波动，相邻圆弧中间白色的区域表示低气压。

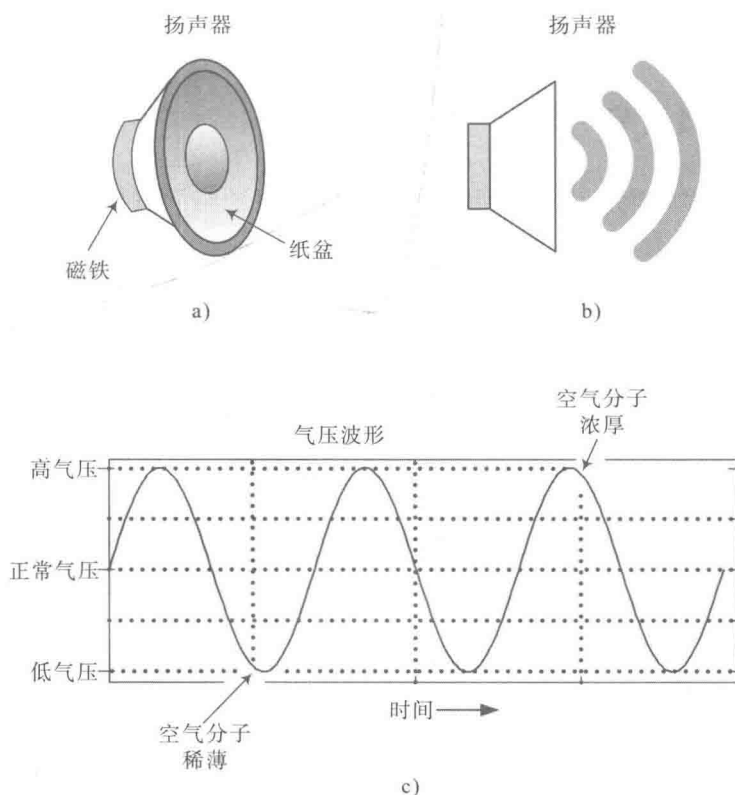


图 2-2 音调模拟声波：a) 扬声器；b) 扬声器及传出的气压波；c) 变化的气压引起的音叉声波随时间变化进入人耳

当来自扬声器的声音是一个音调（如音叉发出的音）时，进入听者耳朵的气压波形