



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

数字信号处理 理论、算法与实现 (第三版)

胡广书 编著

清华大学出版社



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

数字信号处理 理论、算法与实现 (第三版)

胡广书 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了数字信号处理的理论、相应的算法及这些算法的软件与硬件实现。全书共 16 章,分为上、下两篇。上篇是经典数字信号处理的内容,包括离散时间信号与离散时间系统的基本概念、Z 变换及离散时间系统分析、离散傅里叶变换、傅里叶变换的快速算法、离散时间系统的相位与结构、数字滤波器设计(IIR、FIR 及特殊形式的滤波器)、信号的正交变换(正交变换的定义与性质、K-L 变换、DCT 及其在图像压缩中的应用)、信号处理中若干典型算法(如抽取与插值、子带分解、调制与解调、反卷积、SVD、独立分量分析及同态滤波)、数字信号处理中的有限字长问题及数字信号处理的硬件实现等;下篇是统计数字信号处理的内容,包括平稳随机信号的基本概念、经典功率谱估计、参数模型功率谱估计、维纳滤波器及自适应滤波器等。

本书介绍了数字信号处理中所涉及到的绝大部分 MATLAB 文件,并给出了使用的具体实例。所附光盘中的 120 多个用 MATLAB 编写的信号处理程序可用于求解书中的绝大部分例题并绘制其插图。

本书阐述了数字信号处理的基础理论与概念,同时尽量反映该学科在近 30 年来的新进展;书中章节安排合理,说理详细,论证清楚,便于自学。本书可作为理工科研究生及大学本科高年级学生的教材及参考书,也可供工程技术人员自学参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理——理论、算法与实现 / 胡广书编著. —3 版. —北京: 清华大学出版社, 2012.10
ISBN 978-7-302-29757-4

I. ①数… II. ①胡… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 189127 号

责任编辑: 王一玲

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 梁毅

责任印制: 宋林

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×230mm 印 张: 41.75 字 数: 890 千字

版 次: 2003 年 8 月第 1 版 2012 年 10 月第 3 版 印 次: 2012 年 10 月第 1 次印刷

(附光盘 1 张)

印 数: 1~3000

定 价: 66.00 元

产品编号: 047804-01

前言



随着信息、计算机和微电子等学科的飞速发展,数字信号处理的理论、算法及实现手段也都获得了飞速的发展,并且应用越来越广泛。为适应这一发展对人才的需要,目前国内外高校中开设数字信号处理课程的专业也越来越多。

由于数字信号处理的内容广泛,理论复杂,因此,广大读者迫切需要能有一本适应学科发展和教学改革要求的高水平的数字信号处理的教科书。本书正是在第二版(2003年)的基础上朝着这一目标所做的努力与尝试。再版后的本书力求在详尽论述数字信号处理基础理论的同时,更多地反映该学科的新进展;同时,在内容的安排上也更多地考虑如何有利于教学和读者的自学。为此,本书相对于第二版,在章节安排和内容选取乃至一些论述的细节上都做了较大的改动。

数字信号处理的理论总体上可以分为三大部分,即经典数字信号处理(classical digital signal processing)、统计(statistical)数字信号处理和现代(modern,或 advanced)数字信号处理。经典数字信号处理包括离散信号和离散系统分析、Z变换、DFT、FFT、IIR和FIR及一些特殊形式的滤波器设计、有限字长问题及数字信号处理的硬件实现等。经典的内容自然是重要的和相对成熟的。本书把这一部分内容列为“上篇”,即第1章~第11章。统计数字信号处理研究的对象是随机信号。因为我们在自然界所遇到的信号基本上都是随机的,所以研究随机信号的分析 and 处理是非常重要的。对这一类信号研究的方法主要是统计的方法或“估计”的方法,其内容包括随机信号的描述、平稳随机信号、自相关函数的估计、经典功率谱估计和现代功率谱估计,维纳滤波和自适应滤波。本书将这些内容列为“下篇”,即第12章~第16章。

现代数字信号处理的“现代”一词比较模糊,理论上说应该是新内容,但不同的教科书对此赋予了不同的内容。例如,统计数字信号处理中的基于参数模型的功率谱估计(本书第14章)又称为现代功率谱估计,维纳滤波器和自适应滤波器(本书第15章、第16章)又称为“现代滤波器”。此处所说的现代信号处理指的是非平稳信号分析和处理的理论。其主要内容包括时-频联合分析、滤波器组和小波变换等。笔者已将这一部分内容放在拙著《现代信号处理教程》(清华大学出版社,2004)一书中。

本书上篇中,第1章介绍了离散时间信号与离散时间系统的基本概念,包括离散信号

的运算、噪声、信号空间、离散系统的性质和输入输出关系、相关函数的定义、性质及应用等。

Z 变换是离散时间系统分析与综合的重要工具,第 2 章详细讨论了 Z 变换的定义、收敛域、性质及应用,包括转移函数、频率特性、极零分析以及离散系统的实现和信号流图等。

离散时间信号的傅里叶变换是数字信号处理中的核心内容,因此在第 3 章以较大的篇幅分别详细地讨论了离散时间序列傅里叶变换(DTFT)和离散傅里叶变换的定义、性质及应用,还详细讨论了和这两个变换相关联的基本问题,如信号截短对频谱分析的影响、周期卷积、分辨率的基本概念、时宽-带宽积及 DFT 对 FT 的近似等。最后介绍了信号处理中的另一个基本变换,即希尔伯特变换的定义和性质。

第 4 章是第 3 章的延续,详细介绍了快速傅里叶变换(FFT)的各种算法,包括基 2 算法、分裂基算法及频域细化的 CZT 算法。

第 5 章内容是第 2 章的继续和深入,主要涉及离散时间系统的相位和结构,包括线性相位的定义、线性相位系统零点分布、全通系统、最小相位系统、谱分解及离散时间系统的 Lattice 结构等。

第 6 章、第 7 两章集中讨论数字滤波器的设计问题。前者讨论 IIR 滤波器的设计,后者讨论 FIR 滤波器的设计,并简要介绍了一些特殊形式滤波器的设计问题。

正交变换的概念在数字信号处理中具有重要的作用,因此在第 8 章对其进行了详细的讨论,包括信号正交分解和正交变换的基本概念,K-L 变换,特别是针对 K-L 变换的不足,重点介绍了离散余弦变换,同时介绍了信号处理中的其他正交变换。此外,为使读者了解这些正交变换的应用,还增加了图像压缩的内容。

在前 8 章系统地讨论了有关信号处理理论的基础上,本书选择了信号处理中的 7 个典型算法在第 9 章给予介绍,目的是让读者了解和掌握更多的信号处理的内容以及它们应用的背景。这些算法是:信号的抽取与插值、信号的子带分解、调制与解调、反卷积、奇异值分解、独立分量分析及同态滤波等。它们有的是经典内容,有的是近 20 年来新发展的内容。

第 10 章是关于数字信号处理中有限字长问题。尽管使用高精度的 A/D 转换器可以大大减轻有限字长所带来的误差及其影响,但是,有限字长问题毕竟是数字信号处理中的基本问题,特别是当用硬件来具体实现一个数字系统时,掌握这些误差的行为、了解它们对系统的影响是每一个设计者所必须考虑的。

第 11 章以美国 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 为主集中介绍了 DSP 硬件的结构、性能、软件和硬件的开发方法及工具等,同时还介绍了 DSP 的应用。

下篇的第 12 章~第 16 章讨论随机信号的统计处理。第 12 章主要讨论平稳随机信号的定义、性质、描述及通过线性系统的行为。第 13 章主要讨论经典功率谱估计问题,包

括自相关函数的估计、功率谱估计的周期图法与自相关法、估计的性能及改进方法并介绍了短时傅里叶变换。现代功率谱估计是近 30 年来信号处理学科中最为活跃的内容之一,因此在第 14 章讨论这一领域的主要内容,即参数模型法,包括 AR、MA 及 ARMA 模型,还简要介绍了非参数模型法,如最小方差方法、基于特征值分解的谱估计方法。第 15 章讨论维纳滤波器。维纳滤波器已经有 50 年以上的历史,但它是所有现代滤波器(自适应滤波器、卡尔曼滤波器)的基础,并继续得到应用。第 16 章重点讨论 LMS 和 RLS 两种自适应滤波器,并介绍了它们的应用。

MATLAB 是学习和应用数字信号处理的一个极好的工具。因此,本书在 1.9 节简要介绍了 MATLAB 的功能,在各章(第 10 章和第 11 章除外)的最后一节都对该章所涉及到的 MATLAB 文件给予了说明,并给出了使用的具体实例。通过 MATLAB 的应用,读者可以掌握应用 MATLAB 实现信号处理的方法,同时更深入地理解数字信号处理的理论。

本书所附光盘除了包含第一版所附软盘中的全部内容(即 40 个分别用 FORTRAN 和 C 语言编写的信号处理子程序)外,还包含了 100 多个用 MATLAB 编写的信号处理程序,它们是本书各个章节的大部分例题。这些程序都很短,通过程序的运行可以掌握这些例题的求解方法及 MATLAB 的编程方法。此外,光盘中还包含了本书部分习题所需要的数据。

本书内容丰富,既包含了经典数字信号处理和统计数字信号处理中的主要内容,也包含了部分前沿内容;编写中注重理论和应用相结合,特别注重应用 MATLAB 来解决理论和算法的实现问题。通过本书的学习,读者可以掌握数字信号处理的主要内容。

本书定位于理工科的研究生教材,也可作为相关专业的本科生教材。同时本书也可供从事数字信号处理研究与应用的广大科技人员学习与参考。根据笔者使用此书的历史,建议可按如下方式组织教学。对研究生,若

32 学时:建议讲授第 1 章~第 8 章和第 11 章,第 9 章选讲,第 10 章供同学自学;

48 学时:建议讲授第 1 章~第 8 章和第 11 章~第 14 章,第 9 章选讲,第 10 章供同学自学;

64 学时:建议讲授第 1 章~第 8 章和第 11 章~第 16 章,第 9 章选讲,第 10 章供同学自学。

对本科生,建议以上篇(第 1 章~第 8 章,第 11 章)的内容为主,根据不同的学时,选择下篇的部分内容,或选用拙著《数字信号处理导论》(清华大学出版社,2005)。

为了方便组织教学,笔者将可以概括讲、用讲座讲或让研究生自己阅读的部分,在标题前标注了“*”,供使用此书的老师和读者选用。

自本书前两版分别于 1997 年和 2003 年出版以来,得到了使用本书作为教材的老师、研究生以及广大读者的热情关心,他们对本书提出了许多非常好的建议。2000 年,本书

被教育部研究生工作办公室推荐为“研究生教学用书”,2005年本书被评为“北京市高等教育精品教材”。读者的期望及上级主管部门的肯定既是鼓励,又是鞭策,促使笔者完成了本书的修订。在此,向广大的读者及使用本书的老师表示衷心的感谢!

作者在编写本书和承担清华大学研究生公共课“数字信号处理”的过程中得到了清华大学研究生院、生物医学工程系的关心与支持,在此向他们表示衷心的感谢!

承蒙 TI 公司的林坤山博士和郑小龙先生审阅了本书的第 11 章,他们提出了非常中肯的建议;清华大学张辉博士协助编写了本书的 11.5 节;清华大学张旭东教授审阅了本书的第 15 章和第 16 章,张教授对这两章提出了很多非常有益的建议。在此对林坤山博士、郑小龙先生、张辉博士和张旭东教授表示衷心的感谢!

在本书第一版~第三版的编著过程中,朱莉、汪梦蝶、张戈亮、王俊峰、劳长安、李晓娟、洪波、朱常芳、丁海艳、孙勇、刘冰、肖宪波、徐进、刘少颖、许燕、耿新玲、黄惠芳、赵龙莲、郭晓莲、彭美然、董晓霞和王新增等在协助本书习题和计算机程序的编写、绘图以及资料搜集等各个方面都做了大量的工作,在此一并表示感谢!

限于作者的水平,不妥及错误之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

作 者

2012 年春于清华大学

E-mail: hgs-dea@tsinghua. edu. cn

$\mathcal{F}[\cdot]$	傅里叶正变换
$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$	傅里叶反变换
$\mathcal{Z}[\cdot]$	Z变换
$\mathcal{Z}^{-1}[\cdot]$	Z反变换
DFT $[\cdot]$	离散傅里叶变换
IDFT $[\cdot]$	离散傅里叶反变换

2. 常用函数(或信号)专用字母

$\delta(t), \delta(n)$	单位冲激信号,单位抽样信号
$u(t), u(n)$	单位阶跃信号,单位阶跃序列(有时作为噪声信号)
$x(t), x(n)$	一般时域信号,或系统的输入;随机信号的一次实现
$y(t), y(n)$	一般时域信号,或系统的输出;随机信号的一次实现
$h(n), H(z), H(e^{j\omega})$	离散系统的单位抽样响应,转移函数及频率响应
$h(t), H(s), H(j\Omega)$	连续系统的单位冲激响应,转移函数及频率响应
$d(t), d(n)$	矩形函数
$w(n)$	一般窗函数
$p(n)$	脉冲串序列
$p(t)$	冲激串序列
$r(m), r(\tau)$	相关函数, m 和 τ 分别为离散时间及连续时间的延迟
$P(e^{j\omega}), P(j\Omega)$	功率谱
$\hat{r}(m), \hat{P}(e^{j\omega})$	$r(m)$ 和 $P(e^{j\omega})$ 的估计值
$X(s), X(j\Omega), X(e^{j\omega}),$ $X(z), X(k)$ 等	频域信号
X, Y 等	随机变量
$X(t), X(n)$ 等	随机信号
x 等	时域向量
X 等	频域向量
R, W 等	矩阵或向量

3. 频率变量

f	实际频率,单位为 Hz
Ω	相对连续信号的角频率, $\Omega=2\pi f$,单位为 rad/s
ω	相对离散信号的圆频率(或圆周频率),单位为 rad
f'	归一化频率, $f'=\omega/2\pi$,无量纲

1.9	关于 MATLAB	39
1.10	与本章内容有关的 MATLAB 文件	42
	小结	49
	习题与上机练习	49
	参考文献	53
第 2 章	Z 变换及离散时间系统分析	54
2.1	Z 变换的定义	54
2.2	Z 变换的收敛域	57
2.3	Z 变换的性质	62
2.4	逆 Z 变换	66
2.4.1	幂级数法	66
2.4.2	部分分式法	67
2.4.3	留数法	67
2.5	LSI 系统的转移函数	70
2.5.1	转移函数的定义	70
2.5.2	离散系统的极零分析	71
2.5.3	滤波的基本概念	76
2.6	IIR 系统的信号流图与结构	79
2.6.1	IIR 系统的信号流图	79
2.6.2	IIR 系统的直接实现	79
2.6.3	IIR 系统的级联实现	81
2.6.4	IIR 系统的并联实现	81
2.7	用 Z 变换求解差分方程	82
2.8	与本章内容有关的 MATLAB 文件	84
	小结	90
	习题与上机练习	90
	参考文献	93
第 3 章	信号的傅里叶变换	94
3.1	连续时间信号的傅里叶变换	95
3.1.1	连续周期信号的傅里叶级数	95
3.1.2	连续非周期信号的傅里叶变换	96
3.1.3	傅里叶级数和傅里叶变换的区别与联系	97

3.1.4 关于傅里叶变换的进一步解释	101
3.2 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	102
3.2.1 DTFT 的定义	102
3.2.2 DTFT 的性质	104
3.2.3 关于 DTFT 存在的条件	109
3.2.4 一些典型信号的 DTFT	111
3.2.5 信号截短对 DTFT 的影响	114
3.3 连续时间信号的抽样	117
3.3.1 抽样定理	117
3.3.2 信号的重建	120
3.4 离散时间周期信号的傅里叶级数	121
3.5 离散傅里叶变换(DFT)	123
3.5.1 DFT 的定义	123
3.5.2 DFT 导出的图形解释	125
3.5.3 DFT 与 DTFT 及 Z 变换的关系	126
3.5.4 DFT 的性质	127
3.6 用 DFT 计算线性卷积	131
3.6.1 用 DFT 计算线性卷积的方法和步骤	131
3.6.2 长序列卷积的计算	133
3.7 与 DFT 有关的几个问题	135
3.7.1 频率分辨率及 DFT 参数的选择	135
3.7.2 补零问题	139
3.7.3 DFT 对 FT 的近似	140
3.8 关于正弦信号抽样的说明	145
3.9 二维傅里叶变换	147
3.10 希尔伯特变换	153
3.10.1 连续时间信号的希尔伯特变换	154
3.10.2 离散时间信号的希尔伯特变换	156
3.10.3 希尔伯特变换的性质	157
3.10.4 实因果信号傅里叶变换的实部与虚部、对数幅度与 相位之间的关系	158
3.11 与本章内容有关的 MATLAB 文件	160
小结	162
习题与上机练习	163

参考文献	165
第 4 章 快速傅里叶变换	166
4.1 概述	166
4.2 时间抽取(DIT)基 2 FFT 算法	168
4.2.1 算法的推导	168
4.2.2 算法的讨论	170
4.3 频率抽取(DIF)基 2 FFT 算法	173
4.4 进一步减少运算量的措施	175
4.4.1 多类蝶形单元运算	175
4.4.2 W 因子的生成	176
4.4.3 实输入数据时的 FFT 算法	177
4.5 基 4 算法与分裂基算法	177
4.5.1 频率抽取基 4 FFT 算法	177
4.5.2 分裂基算法	178
4.6 线性调频 Z 变换(CZT)	184
4.6.1 CZT 的定义	184
4.6.2 CZT 的计算方法	186
4.7 与本章内容有关的 MATLAB 文件	188
小结	190
习题与上机练习	190
参考文献	191
第 5 章 离散时间系统的相位与结构	193
5.1 离散时间系统的相频响应	193
5.2 FIR 系统的线性相位特性	196
5.3 具有线性相位特性的 FIR 系统的零点分布	198
5.4 全通系统与最小相位系统	201
5.4.1 全通系统	201
5.4.2 最小相位系统	204
5.5 谱分解	207
5.6 FIR 系统的结构	209
5.6.1 直接实现与级联实现	210
5.6.2 具有线性相位的 FIR 系统的结构	210

5.6.3	FIR 系统的频率抽样实现	210
5.7	离散时间系统的 Lattice 结构	212
5.7.1	全零点系统(FIR)的 Lattice 结构	213
5.7.2	全极点系统(IIR)的 Lattice 结构	216
5.7.3	极零系统的 Lattice 结构	218
5.8	与本章内容有关的 MATLAB 文件	221
	小结	223
	习题与上机练习	223
	参考文献	225
第 6 章	无限冲激响应数字滤波器设计	226
6.1	滤波器的基本概念	226
6.1.1	滤波器的分类	226
6.1.2	滤波器的技术要求	228
6.2	模拟低通滤波器的设计	230
6.2.1	概述	230
6.2.2	巴特沃思模拟低通滤波器的设计	231
6.2.3	切比雪夫 I 型模拟低通滤波器的设计	234
6.3	模拟高通、带通及带阻滤波器的设计	239
6.3.1	模拟高通滤波器的设计	239
6.3.2	模拟带通滤波器的设计	241
6.3.3	模拟带阻滤波器的设计	243
* 6.4	用冲激响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器	244
6.5	用双线性 Z 变换法设计 IIR 数字低通滤波器	248
6.6	数字高通、带通及带阻滤波器的设计	252
6.7	与本章内容有关的 MATLAB 文件	256
	小结	260
	习题与上机练习	261
	参考文献	261
第 7 章	有限冲激响应数字滤波器设计	262
7.1	FIR 数字滤波器设计的窗函数法	262
7.2	窗函数	269
* 7.3	FIR 数字滤波器设计的频率抽样法	274

7.4	FIR 数字滤波器设计的切比雪夫逼近法	279
7.4.1	切比雪夫最佳一致逼近原理	280
7.4.2	利用切比雪夫逼近理论设计 FIR 数字滤波器	281
7.4.3	误差函数 $E(\omega)$ 的极值特性	284
7.4.4	线性相位 FIR 数字滤波器四种形式的统一表示	287
7.4.5	设计举例	290
7.4.6	滤波器阶次的估计	292
7.5	几种简单形式的滤波器	293
7.5.1	平均滤波器	294
7.5.2	平滑滤波器	296
7.5.3	梳状滤波器	299
* 7.6	低阶低通差分滤波器	301
7.6.1	最佳低阶低通差分滤波器的导出	301
7.6.2	几种常用的低通整系数差分滤波器	305
7.7	滤波器设计小结	310
7.8	与本章内容有关的 MATLAB 文件	311
	小结	316
	习题与上机练习	317
	参考文献	318
第 8 章	信号处理中常用的正交变换	320
8.1	希尔伯特空间中的正交变换	320
8.1.1	信号的正交分解	320
8.1.2	正交变换的性质	323
8.1.3	正交变换的种类	324
8.2	K-L 变换	325
8.3	离散余弦变换(DCT)与离散正弦变换(DST)	328
8.3.1	DCT 的定义	328
8.3.2	DCT 和 K-L 变换的关系	329
8.3.3	DST 的定义及与 K-L 变换的关系	330
8.4	DCT 的快速算法	333
* 8.5	图像压缩简介	335
8.5.1	图像的基本概念	335
8.5.2	图像压缩的基本概念	337

8.5.3 图像压缩国际标准简介	342
* 8.6 重叠正交变换	345
8.7 与本章内容有关的 MATLAB 文件	349
小结	350
习题与上机练习	351
参考文献	353
第 9 章 信号处理中的若干典型算法	355
9.1 信号的抽取与插值	355
9.1.1 信号的抽取	356
9.1.2 信号的插值	359
9.1.3 抽取与插值相结合的抽样率转换	361
9.1.4 抽取与插值的滤波器实现	363
9.2 信号的子带分解及滤波器组的基本概念	370
9.3 窄带信号及信号的调制与解调	375
9.3.1 窄带信号	375
9.3.2 信号的调制与解调	378
9.3.3 窄带信号的抽样	381
9.4 逆系统、反卷积及系统辨识	384
* 9.5 奇异值分解	387
* 9.6 独立分量分析简介	392
* 9.7 同态滤波及复倒谱简介	394
9.8 与本章内容有关的 MATLAB 文件	397
小结	402
习题与上机练习	402
参考文献	404
第 10 章 数字信号处理中有限字长影响的统计分析	406
10.1 量化误差的统计分析	407
10.2 量化误差通过 LSI 系统的统计分析	410
10.3 IIR 系统系数量化对系统性能的影响	412
10.4 FIR 系统系数量化对系统性能的影响	415
10.5 乘法运算舍入误差对系统性能影响的统计分析	417
10.5.1 IIR 系统中的极限环振荡现象	417

10.5.2	IIR 系统中乘法运算舍入误差的统计分析	418
10.5.3	FIR 系统中乘法运算舍入误差的统计分析	423
10.6	DFT 运算中舍入误差的统计分析	423
	小结	424
	习题与上机练习	425
	参考文献	426
第 11 章	数字信号处理的硬件实现	427
11.1	DSP 微处理器概述	427
11.1.1	DSP 处理器在结构上的主要特点	428
11.1.2	DSP 处理器在结构上的新发展	433
11.1.3	DSP 处理器的发展趋势	434
11.2	评价 DSP 性能的几个主要指标	438
11.3	TI DSP 产品的路线图	439
11.3.1	TI 早期的 DSP 产品	439
11.3.2	TI DSP 的三大主流产品	439
11.3.3	TI DSP 的新产品	441
11.4	TI 几个典型 DSP 芯片的结构与性能	445
11.4.1	TMS320C25 的结构及主要性能	445
11.4.2	TM3320F28M35X 系列的结构及主要性能	448
11.4.3	TM3320C553X 系列的结构及主要性能	450
11.4.4	OMAP-L138 的结构及主要性能	451
11.4.5	TMS320DM8168 的结构及主要性能	452
11.4.6	TMS320C6678 的结构及主要性能	454
11.5	基于 TMS320 系列 DSP 系统的设计与调试	456
11.5.1	系统设计的总体考虑	456
11.5.2	软件开发工具	457
11.5.3	硬件系统集成及调试工具	462
11.6	DSP 在医疗仪器中的应用简介	467
	小结	469
	参考文献	469