

FPGA Circuit Design for
Digital Signal Processing



数字信号处理 FPGA电路设计

施国勇 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

FPGA Circuit Design for Digital Signal Processing

数字信号处理 FPGA 电路设计

Shuzi Xinhao Chuli FPGA Dianlu Sheji

施国勇 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

由于大规模集成电路技术的飞速发展,一块 FPGA 芯片上能实现的逻辑功能大幅度增加,并进一步向嵌入式 DSP 模块和嵌入式处理器核技术发展,由此带来的结果是在一块 FPGA 芯片上能实现相当复杂的数字信号处理功能并保持相对较低的功耗,而芯片价格也一直在不断下降。如今, FPGA 已不再局限于 ASIC 设计的原型实现和功能验证,而是可以直接用于复杂信号处理系统的商业化应用和解决方案的开发。本书专门为这样一种技术发展趋势而写作。

书中主要介绍基于 FPGA 的数字信号处理电路的设计和实现方法。使用由全球最大 FPGA 芯片供应商 Xilinx 公司的大学合作计划(XUP)提供的 Virtex-II Pro 开发板和标准开发套件。书中除了介绍一些易于在 FPGA 上实现的 DSP 电路及其相关理论之外,特别强调采用 FPGA 作为电路实现平台时需要对算法和电路进行的特殊改造和设计,同时强调为充分利用硬件资源所需要采取的设计技巧。因此即使是从事 ASIC 设计的读者也能从本书获得关于 DSP 电路实现的许多参考知识。

本书可作为大专院校电子工程类高年级学生和研究生相关课程教材,也适用于工业界从事 DSP 应用开发的工程师自学或培训。本书能帮助读者获得从 DSP 算法设计到硬件实现的整个流程的专业训练,并在动手实现一些常用 DSP 电路的过程中熟悉业界通用的设计流程和 EDA 工具软件。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 FPGA 电路设计/施国勇编著. —北京:
高等教育出版社, 2010. 5
ISBN 978 - 7 - 04 - 029074 - 5

I. ①数… II. ①施… III. ①可编程序逻辑器件 - 系统设计 - 高等学校 - 教材②数字电路 - 电路设计 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP332.1②TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 056498 号

策划编辑 刘 英 责任编辑 柳秀丽 封面设计 于 涛
责任绘图 尹 莉 版式设计 张 岚 责任校对 刘 莉
责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787 × 960 1/16
印 张 17
字 数 310 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 5 月第 1 版
印 次 2010 年 5 月第 1 次印刷
定 价 37.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

、版权所有 侵权必究
物料号 29074 - 00

序

施国勇教授是我在上海交通大学任教时由衷地敬重的老师之一。他 2005 年夏从华盛顿大学回国时最初的办公桌就在我对面，那时候，七八个老师挤在浩然大厦 15 楼一个狭小的房间里，憧憬着闵行校园中的新微电子大楼的场景犹在眼前；而我，也得以近距离感受施教授深厚的数学功底和严谨的学术作风。

数字信号处理是所有电子信息类学生应该熟练掌握的专业基础课程之一。长期以来，由于理论性较强，涉及的数学内容较多，教学一直颇有难度。尽管近年来的教学改革陆续将 MATLAB 等软件工具引入课程，但距离实际的工程工作，比如设计出具有数字信号处理系统能力的软硬件系统以及芯片，仍然有较远距离。施国勇教授的这本书填补了这方面的空白。

这本书涉及的内容虽然属于基础性理论，但是，利用 FPGA 进行数字信号处理的教學方法却是国际工科电子类教育研究中的前沿课题。Xilinx 公司有幸和欧洲该领域顶尖的专家教授合作，于 2006 年将这种最前沿的课程资料引入中国。经过施教授在上海交通大学面向研究生以及面向本科生近三年的实际教学，并经过教学实践的积累和提炼，终于成书，可喜可贺。

2010 年以后，随着集成电路工艺越来越接近 10 nm，FPGA 由于结构整齐、可现场编程，成为下一个十年中能够继续存活的为数不多的集成电路种类之一，并会加速发展，被更多的电子设备设计所采用。在这个进程中，FPGA 也脱离了传统的角色，越来越多地运用于嵌入式数字信号处理系统中。因此，2010 年后的工程师需要熟练掌握 FPGA 技术，同时也要熟练掌握数字信号处理技术，才能够应对电子设备可移动化、网络化、多媒体化的三重挑战。而本书的推出，使学生在第一次接触数字信号处理时，就以高度并行的思路，完整地将并行世界的本源，以 FPGA 设计的形式呈现出来，而 Xilinx 公司的 System Generator 等图形化工具的引入，使得这个学习过程变得容易并且富有乐趣。

Xilinx 公司大学合作计划将一如既往地支持本书的后续发展，包括更新软件版本、更新实验板卡、联合实验室捐赠等，期待本书的读者和学生们从中获得学习的乐趣。

Xilinx 公司大学合作计划中国区经理

谢凯年

2009 年 11 月

前 言

2006年初全球FPGA芯片最大供应商美国Xilinx(赛灵思)公司(www.xilinx.com)开始在中国区成立大学合作计划(Xilinx University Program, XUP)办事处。由时任办事处代表的谢凯年博士发起,于2006年8月28日至9月1日与上海交通大学微电子学院合作举办了FPGA-DSP培训班,吸引了来自全国各地高校的50多名教师参加。当时应邀担任培训主讲的是来自英国Strathclyde大学的Bob Stewart教授及其助手Steve Alexander。在为期四天的强化培训期间,使用的培训教材是由Bob Stewart教授亲自编撰的讲义和实验指导书¹。所使用的讲义由课件幻灯片编辑而成,没有完整的文字叙述,但作为培训教材起到了很好的参考作用。实验指导书大多给出了完整的实验步骤与所有实验细节,包括已设计好的电路。培训学员只要跟随实验指导书中给出的步骤就能顺利完成所有实验。当时本书的作者也参加了部分培训授课,微电子学院的一些年轻教师和研究生参加了实验辅导。

随后,上海交通大学微电子学院于2006年秋季学期正式对研究生开设了FPGA-DSP课程,由本书作者任主讲教师。感谢Xilinx公司大学合作计划捐赠给上海交通大学微电子学院40块Virtex-II Pro(V2P)实验板和软件工具,使课程实验得以顺利开展。当时为了把四天的培训内容扩展成一学期的正规课程,我们对培训课件和实验内容进行了大规模改造,增添了大量授课内容,在实验中增加了让学生自己动手、思考、设计并解决问题的内容。

随后我们又分别于2007年和2008年的春季学期两次对微电子学院的本科生开设了FPGA-DSP课程。为了适合本科教学,本书作者继续对课程内容进行了大幅度修改和扩充,并结合当前业界的技术动向,进一步增加了新的实验内容。上海交通大学微电子学院的本科生在大学三年级下学期学习FPGA-DSP课程。在此之前他们已经学习了信号与系统基础课程、数字信号处理理论课程、晶体管及数字集成电路设计课程,因此学生已经具备足够的DSP理论基础和数字集成电路的基本知识,很容易接受并理解在FPGA上实现DSP设

1 Bob Stewart, Steve Alexander, Jamie Bowman. The DSP Primer. Xilinx University Program, April 2006
Bob Stewart, Steve Alexander, Jamie Bowman. DSP Primer Workbook. Xilinx University Program, January 2006

计。特别是他们已经具备了 CMOS 集成电路设计的基础知识，对于在 FPGA 上实现数字电路抱有强烈的兴趣与好奇心。对于当前国内受流片条件限制的学生来说，在 FPGA 上实现数字电路设计是很有意义的实践。

经过过去三年连续的教学实践，本书作者积累了相当丰富的教学材料，包括课件、笔记、实验材料等。在此基础上，本书作者发现已经有足够多的材料可以写成一本教科书，供同行们在教学实践中使用。同时在教学实践中本书作者和学生都感到需要有一本正规的教材在 FPGA - DSP 教学过程中使用。

虽然国内工程界接触 FPGA 已有许多年，但可能由于实验条件限制，在国内大学里开设 FPGA 数字信号处理课程的高校至今仍不普遍。而业界对于具备 FPGA - DSP 设计能力人才的需求却在不断上升。本书作者认为此书的正式出版能为 FPGA 技术的普及和人才培养起到一些促进作用。

FPGA - DSP 是一门实践性很强的课程，有意开设此类课程的大学或研究机构应具备一定的实验条件。Xilinx 的 FPGA 开发平台是业界比较流行的平台，其他如 Altera 等公司的平台也在业界流行。本书主要介绍以 Xilinx Virtex-II Pro 开发板为实现对象的设计流程。其中用到的工具包括 Xilinx System Generator、ISE、EDK 和与之配套的美国 THE MATHWORKS(www.mathworks.com)公司的 MATLAB / Simulink 等工具。为帮助读者开展实验，本书提供了一些设计案例和一系列教学实验供读者学习和训练。

本书可作为集成电路相关专业本科高年级学生的专业选修课教材，也可以作为研究生相关课程的教材。根据学生背景，授课教师可以自由选择本书内容。本书除前 4 章关于 DSP 基础认识的介绍之外，其余各章相对独立。实验一和实验二为熟悉 FPGA 设计平台而设计。实验三至实验六也相对独立。本书第 1 章有关于如何使用本书的详细建议。

本书在介绍数字信号处理基础知识的同时，更重视关于 DSP 电路实现的介绍。随着数字信号处理技术不断渗透到各应用领域，从事信号处理实践的工程师不能局限于算法的仿真或软件设计，也要涉足电路设计。为此本书的编写也主要定位在训练读者的电路设计能力上。为了满足不同层次读者的学习需要，书中关于各种设计问题的介绍尽量做到系统、独立、顺序渐进。在介绍每种电路设计前先介绍算法的基本原理与算法的详细推导。设计人员只有在了解一个电路实现的来龙去脉的基础上才可能有创新，设计出更好的电路来。

近年来不断提升的设计复杂度以及设计自动化工具的快速发展使得当今的设计人员在很大程度上依赖设计工具，但这并不意味着数字集成电路的设计不再需要设计工程师的创意。高性能 DSP 设计仍要求设计师根据应用需要对 DSP 系统从结构到基本处理单元进行创造性设计，在此基础上再用一个好的开发平台和综合工具在最短的时间内设计成功 DSP 芯片，只有这样，才能在市场竞

争中取胜。

数字信号处理算法大多基于严密的数学理论，而作为一门工程性很强的学科，许多关于电路设计的传统教科书又常常忽略数学处理的严密性。本书试图在基础理论的严密性与电路设计的工程性之间取得平衡。从事电路设计的人最好具备一定的算法素养，了解算法与电路之间的密切联系，这种素养对于改进电路设计极有帮助。由于集成电路制造工艺的演变和应用的复杂性，许多经典算法及其经典电路的实现都需要不断被革新或被重新设计才能适应新的工艺平台和新的应用需求。本着这样的精神，本书努力启发读者在关于从 DSP 算法到电路的各种可能环节进行创新。

本书是自 2006 年以来在上海交通大学微电子学院 FPGA - DSP 课程教学实践的产物。大部分内容已在本科和研究生教学中使用，效果良好。在教学实践中，作者从各届学生的反馈中获益良多，在此表示诚挚的感谢。助教（上海交通大学微电子学院研究生）祝翔宇（2006 级）和陈安（2007 级）为本书的编写做出了建设性贡献，感谢他们在担任助教期间为实验指导书编写和具体实验指导所付出的努力。感谢上海交通大学微电子学院 EDA 实验室的学生对本书做了文档方面的工作。同时感谢上海交通大学微电子学院为开设本课程所提供的各种支持。感谢 Xilinx 大学合作计划（XUP）向上海交通大学微电子学院捐赠的 FPGA 实验板以及设计软件。感谢 XUP 中国区经理谢凯年博士在 XUP 与微电子学院合作中，以及在本书编写过程中所提供的各种支持；感谢谢博士在百忙之中为本书作序。

本书的编写努力做到深入浅出，希望对初学者或从事 DSP 设计已有一定经验的读者都有一定参考作用。书中所有疏忽和错误均属于作者本人，请读者不吝指正。反馈信息请发送至 shiguoyong@ic.sjtu.edu.cn，本书编者将在教学实践中继续改进全书内容。

施国勇

2009 年 11 月

于上海交通大学微电子学院

目 录

第 1 章 集成电路技术与数字信号处理	1
1.1 数字信号处理基本原理	1
1.2 FPGA 技术	2
1.3 数字信号处理的应用	3
1.4 数字信号处理的发展趋势	4
1.5 基于 FPGA 设计基本要点	5
1.6 从算法到硬件：一个设计例子	6
1.7 一个电路多样性例子	9
1.8 本书的特色与重点	10
1.9 本书结构	11
1.10 对课堂教学的建议	12
1.11 本章小结	12
1.12 练习	13
1.13 参考文献	13
第 2 章 Virtex-II Pro FPGA 资源与设计工具	14
2.1 FPGA 的基本资源	14
2.2 FPGA 的设计流程	19
2.3 Xilinx FPGA 的设计流程	20
2.4 Xilinx FPGA 设计工具软件与安装	21
2.5 本章小结	23
2.6 与 System Generator 兼容的 ISE 和 MATLAB 版本信息	23
2.7 参考文献	26
第 3 章 基本算术运算电路	28
3.1 加法器设计与实现	28
3.2 符号数加法	31
3.3 溢出与饱和	32
3.4 乘法器设计	33

3.5	乘法器在 Slice 上的实现	35
3.6	符号数乘法	37
3.7	除法器设计	39
3.8	开平方根电路的设计	42
3.9	本章小结	45
3.10	练习	45
3.11	参考文献	46
第 4 章	采样与量化	47
4.1	Fourier 级数与 Fourier 变换	47
4.2	采样数学模型	48
4.3	采样定理	50
4.4	混叠	51
4.5	下采样与上采样	53
4.6	采样与电路实现	58
4.7	量化	61
4.8	本章小结	68
4.9	练习	68
4.10	参考文献	69
第 5 章	低成本低功耗滤波器设计	70
5.1	CIC 滤波器	70
5.2	CIC 位宽分析	76
5.3	CIC 电路实现	80
5.4	本章小结	83
5.5	练习	84
5.6	参考文献	85
第 6 章	CORDIC 原理与实现	86
6.1	CORDIC 基本原理	86
6.2	CORDIC 的收敛性	88
6.3	双曲 CORDIC	93
6.4	CORDIC 电路实现	97
6.5	本章小结	98
6.6	练习	99

6.7 参考文献	99
第7章 FFT算法与电路实现	100
7.1 基2FFT算法推导	101
7.2 基2FFT蝶形计算电路	104
7.3 基4FFT算法推导	106
7.4 FFT电路结构设计	111
7.5 本章小结	118
7.6 练习	118
7.7 参考文献	119
第8章 自适应滤波器设计	120
8.1 最小二乘问题	120
8.2 最小二乘问题迭代算法	121
8.3 自适应滤波算法	123
8.4 自适应滤波器电路设计	127
8.5 QR分解与电路实现	128
8.6 本章小结	133
8.7 练习	133
8.8 参考文献	134
第9章 数据流图与时序分析	135
9.1 数据流图	136
9.2 数据流图时序分析	137
9.3 时序重整	143
9.4 节点时序重整	146
9.5 最短路径算法	149
9.6 本章小结	151
9.7 Karp定理证明	152
9.8 练习	153
9.9 参考文献	153
第10章 设计案例	155
10.1 用4个乘法器实现10抽头FIR滤波器	155
10.2 8位除法器设计与实现	163

10.3	8 位开平方根电路的设计与实现	171
10.4	本章小结	174
附录 实验指导书		175
	实验前言	175
	参考文献	176
实验一 Xilinx Virtex-II Pro 实验板与设计软件		177
A1.1	实验简介	177
A1.2	实验目的	177
A1.3	实验任务	178
A1.4	实验报告写作要求	178
A1.5	实验步骤	178
A1.6	参考文献	194
实验二 基本算术电路的 FPGA 实现		195
A2.1	实验简介	195
A2.2	实验目的	195
A2.3	实验任务	195
A2.4	实验报告写作要求	195
A2.5	实验步骤	196
A2.6	练习	206
A2.7	参考文献	207
实验三 FIR 滤波器设计		208
A3.1	实验简介	208
A3.2	实验目的	208
A3.3	实验任务	208
A3.4	实验报告写作要求	209
A3.5	实验步骤	209
A3.6	参考文献	222
实验四 数控振荡器设计与降频转换		223
A4.1	实验简介	223
A4.2	实验目的	223

A4.3	实验任务	224
A4.4	实验报告写作要求	224
A4.5	实验步骤	224
A4.6	参考文献	231
实验五	CIC 滤波器设计与应用	232
A5.1	实验简介	232
A5.2	实验目的	232
A5.3	实验任务	232
A5.4	实验报告写作要求	233
A5.5	实验步骤	233
A5.6	参考文献	244
实验六	CORDIC 计算向量长度	245
A6.1	实验简介	245
A6.2	实验目的	246
A6.3	实验任务	246
A6.4	实验报告写作要求	246
A6.5	实验步骤	247
A6.6	练习	254
A6.7	参考文献	255

第 1 章 集成电路技术与 数字信号处理

1.1 数字信号处理基本原理

信号通常表示为时间的函数(如语音信号)或是空间的函数(如平面图像)。信号处理的目的是为了提高信号传输的效率、节约存储空间、抑制噪声、收集信息、给消费者带来享受等。

自然界的信号其原本的形式是连续的模拟信号。最早的信号处理采取直接对模拟信号进行模拟处理的方法,处理的电路也是模拟电路。整个处理过程不出现二进制的数值表示,因此不属于数字信号处理范畴。

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)起源于数字计算机的诞生。数字计算机由于采用了开关电路技术,任何数据在数字计算机中必须被表示为二进制的形式,为此任何信号或数学函数要在数字计算机上进行处理之前必须首先数字化,这导致了数字信号处理这样一门学科和技术的诞生。

由于基于中央处理器(Central Processor Unit, CPU)的数字计算技术的通用性、快速性、处理的可靠性以及易于传递和存储的特性,数字信号处理自从数字计算机诞生之日起便迅速成为一项新兴技术,并从此获得了迅速发展。时至今日,数字信号处理随着集成电路技术的迅猛发展已逐渐走到了人们日常生活的方方面面。

通常对信号进行处理大致有以下几方面:滤波、变换、编码、检测、估计、辨识、分类、合成和信号再生等。这些处理的目的是基本上都是为了传输、接收、提取、存储信息等。由于其应用的广泛性,信号处理在日常工程实践和日常生活中无处不在。

由于自然界存在的模拟信号特性与数字处理器能处理的数字信号不一致,在数字信号处理之前一般都要进行从模拟信号到数字信号的转换。通常单变量模拟信号可以表示为一个连续函数

$$y = f(x) \quad (1.1)$$

其中 x 和 y 都是连续变量。为了对此信号(函数)进行处理,变量 x 和 y 都需要离散化。对变量 x 的离散化在数字信号处理中被称为“采样”(sampling),对

变量 y 的离散化称为“量化”(quantization)。

对连续信号进行采样的原因是数字处理器没有能力直接处理连续的信号变量,而实际上也没有必要这样做。根据 Nyquist 采样定理(见第 4 章第 3 节),任何有限带宽的信号都可以从比带宽高两倍的采样频率得到的离散信号重构出连续信号(详细见本书第 4 章)。因此,采样在数字信号处理中是一项基本和必要的操作,也具有丰富的技术性内容,本书将详细介绍采样的原理和结合电路设计需要考虑的细节。

由于现行的任何数字处理器都以有限字长(wordlength)的方式保存信息,因此必须把从连续信号采样得到的数据进行量化之后才能开始数字处理。处理器的体系结构决定了处理器对数据进行算术运算的基本字长(如 16 位/32 位/64 位)。为了既节省计算资源又不牺牲精度,设计者需要根据应用需要采用某种字长的量化器。量化器设计属于模拟集成电路设计中模数(A/D)转换器设计的一部分,一般在设计 A/D 转换器时处理。采样和量化通常在同一芯片模块中实现。

连续信号经采样量化之后就可以开始进行数字信号处理。后续的处理方式有很多种:根据应用的需要可能是普通的个人计算机、DSP 专用处理器或定制的集成电路。一种特殊的定制集成电路就是 FPGA,它的特点是 FPGA 芯片上实现的电路根据应用需要可以随时被更改,所以有“现场可编程”(field-programmable)的名字。

1.2 FPGA 技术

随着集成电路技术的飞速发展,数字信号处理的应用范围迅速扩大。数字信号处理的实现方式也越来越多。本书主要介绍当前流行的数字信号处理的实现方式之一——FPGA,即在 FPGA 上实现数字信号处理的原理和方法,侧重电路设计的特殊性以及与之相关的算法设计与实现技术。

FPGA 是英文 Field Programmable Gate Array(现场可编程门阵列)的缩写。自从 Xilinx 公司于 1984 年发明 FPGA 芯片以来,它已从只能做一些简单逻辑处理的以互连为主的芯片发展到今天在一些领域几乎能取代定制芯片与专用处理器的地步。FPGA 芯片技术采用阵列设计,它的发展与存储技术的发展同步,并最大限度地从摩尔定律获益。1985 年至 1987 年的 FPGA 主要用于粘接逻辑(glue logic)或可编程互连。1987 年至 1992 年期间带有处理器硬核的结构开始出现,到 2001 年左右带 IP(Intellectual Property)核的 FPGA 开始出现。随后带硬核和软核的系统开发平台被推出。2005 年的 FPGA 市场份额为 19 亿美元,据预测,到 2010 年这一数字将达到 27.5 亿美元。过去只有精通数字集成

电路设计的工程师才有可能接触到 FPGA 技术。今天高层设计工具的快速发展使得基于图形化界面的设计或基于 C 语言代码直接综合成 FPGA 电路成为可能。

自从 20 世纪 90 年代深亚微米技术发展以来,定制集成电路设计遇到了前所未有的挑战,门延迟逐渐被互连延迟所取代,芯片设计从早期的以晶体管为中心的设计逐渐演变成了以互连设计为中心的设计。随着加工技术的日益精细化,芯片集成程度日益提高,芯片工作频率也同步提高,定制集成电路的设计成本也随之水涨船高。而日益严重的工艺偏移(process variation)问题导致设计的可靠性和对良率成为当前设计实践最大的障碍。与之相对照,基于规则阵列设计制造的 FPGA 芯片却能有效地应对定制电路面临的难题。阵列化制造技术能最大限度地抵御工艺偏移对互连系统造成的时序与信号完整性的影响,确保对良率与制造成本的合理控制。同时由于 IP 技术的迅速发展,一些成熟的 IP 模块可以被比较稳定地以硬核或软核形式灵活地实现在 FPGA 芯片上,使低成本快速进行系统集成和开发成为可能,而不必受制于传统定制设计因高门槛、高成本给技术应用带来的障碍。因此 IC(Integrated Circuit)技术的飞速发展给 FPGA 提供了极为广阔的发展空间。可以预期在不久的将来,FPGA 技术的应用将渗透到各种技术领域。

当前最先进的 FPGA 芯片已经使用 10 层以上的金属互连层,加上先进的封装技术,FPGA 芯片的集成和处理能力得到了进一步加强。未来的 FPGA 技术将继续受益于正在快速发展的 3 维集成电路制造技术,从而使它的处理能力进一步获得显著提高,并有可能直接在 FPGA 芯片上实现一些大规模的复杂计算,如稀疏矩阵的乘法运算、交通规划问题仿真、热传导问题仿真以及分子动力学和生物学等问题的仿真。

1.3 数字信号处理的应用

数字信号处理在过去几十年里已经出现了无数的应用,我们可以列举出无数过去、现在和未来的应用领域。通信中的回声消除(echo cancellation)、调制解调器、全球定位系统、声卡、图像加速器、手机、电视会议、自动取款机等;语音处理中的语音识别、语音编码、语音增强、文字到语音转换、声音邮件等;仪器仪表中的谱分析、数字示波器、质谱仪、地震信号分析仪等;专业音响处理中的音频/视频编辑、数字合成器、家庭影院等;消费电子中的数字扬声器、数字电视、音乐合成器、玩具、游戏、音乐播放器等;工业控制中的机器人、过程控制、输电线监视、电动机伺服控制等,军事中的安全通信、声纳、红外成像、雷达、导航等;医疗中的病人监视、超声设备、诊断仪器、胎

儿监视器、生命支持系统、图像增强等。

当前数字信号处理的最大应用市场无疑来自于无线通信领域。手机的广泛使用更是给 DSP 开辟了无穷无尽的应用市场。同时数字家庭市场的逐渐兴起也给这一趋势添加了更加强劲的动力。这些趋势将在未来几十年里继续保持增长的势头。本书也将重点介绍在通信系统中常用的 DSP 算法与实现。

在各领域的 DSP 应用中为了达到大吞吐量实时处理, 对处理器的处理速度有很高的要求。通用个人计算机虽然处理功能强大, 但由于其针对通用处理, 直接用于专用信号处理显得不够经济, 又不便于携带、集成和嵌入, 一般不直接用于工业产品中的信号处理。基于通用处理器构架但经过结构和指令裁剪的专用信号处理器在 DSP 应用产品中得到了广泛的应用。但是任何基于处理器的 DSP 产品在处理高带宽信息量的场合都会遇到处理速度的瓶颈。

用于信号处理的处理器基于指令处理数据。处理器一般只提供极为有限的 (1 或 2 个) 算术逻辑运算单元 (Arithmetic-Logic Unit, ALU)。因此能实现的并行计算能力也非常有限。而在大量的 DSP 应用领域, 尤其是通信系统中, 随着手持设备等应用产品的需求量的增大, 终端设备上的数据流量与日俱增。而且大多数信号处理的基本运算为算术运算。这就要求进行数字信号处理的电路具有海量平行处理的能力, 这对于专用处理器来讲是个难题, 为此常求助于定制电路。可是设计定制/半定制电路 (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC) 投资大、设计门槛高、设计周期 (time-to-market) 长。除非有较大产量需求和一定的市场份额, 一般的产品开发厂商难以承担这样高的开发风险。选用基于 FPGA 的可程式电路设计自然成了一种低成本、低风险的开发方式。随着芯片加工技术的不断进步, FPGA 芯片的价格会继续下降, 而其功能和可设计电路规模却继续加大; 同时随着设计工具的持续改进, 进入 FPGA 设计的门槛仍将继续降低。因此在今天的应用市场, 基于 FPGA 开发的数字信号处理产品的比例正在逐渐上升。本书正是在这样的技术发展背景下编写的。

1.4 数字信号处理的发展趋势

为了实现实时处理, DSP 处理速度必须跟上采样的频率。如音乐 CD 的采样频率为 44.1 kHz; 语音采样频率为 8 ~ 22 kHz; 视频采样频率为几十千赫到几十兆赫。

虽然数字信号处理的研究与应用已有很长的历史, 但由于集成电路制造技术的快速发展, 信号处理技术也在不断获得发展。DSP 技术发展的总体趋势是:

- 更快——在同样的时间里能处理更多的信息。这来自于运算更快的电路

芯片和不断改进的算法。许多因素决定 DSP 的处理速度，如集成电路器件、处理器体系结构、算法甚至有一些先进的数学原理(见图 1.1)。

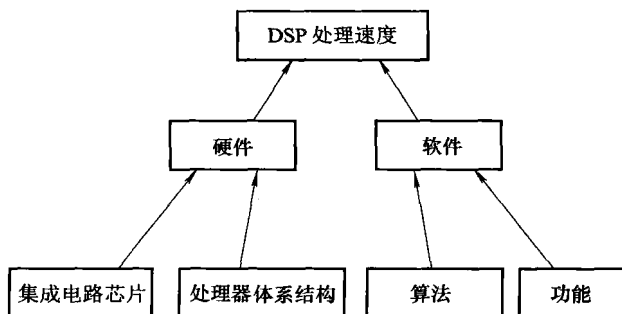


图 1.1 决定 DSP 处理速度的因素

- 更便宜——用更低的成本处理信息。成本体现在用更少的电路实现一个功能，或用同样规模的电路，但以更低的功耗处理更多的信息，或者由于设计工具和设计流程的改进所带来的更快捷、更可靠的设计产品。这些都很大程度依赖于更好的设计技术和对数字信号处理过程的更深刻的理解。本书会比较多关注这方面的设计技术。

- 更好——处理更高质量的信息，包括更高的精度、更高的清晰度、更高的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)以及更好的可携带性和可靠性。

1.5 基于 FPGA 设计基本要点

FPGA 设计与全定制设计的基本区别是 FPGA 有一些现成的设计资源可供使用。随着技术的进步，一块 FPGA 芯片可供设计使用的资源越来越丰富。1999 年—2000 年期间 FPGA 芯片才有足够的资源用于实现乘法器，而在 2000 年由 FPGA 实现的乘法器时钟频率已达到 100MHz，且一块芯片上可以同时实现 4~500 个以上的乘法器。2005 年前后在 Xilinx 的 DSP48 逻辑芯片(Slice)中开始出现基于信号流图的定制 FIR(Finite Impulse Response)滤波器。随着芯片集成技术的不断提高，FPGA 逐渐成为高速数字信号处理应用的主流平台。

针对一个 DSP 应用，通常设计人员需要考虑选择合适的设计实现平台。面对当前市场上流行的众多设计实现平台，设计者一般会根据对设计工具的熟悉程度以及技术需求选择设计平台。本书主要介绍基于 Xilinx FPGA 的设计平台。通过本书的学习，读者可以基本掌握关于 Xilinx FPGA 设计平台的基本应用。

一个信号处理设计分为几个步骤：通常软件设计先于硬件设计。软件设计