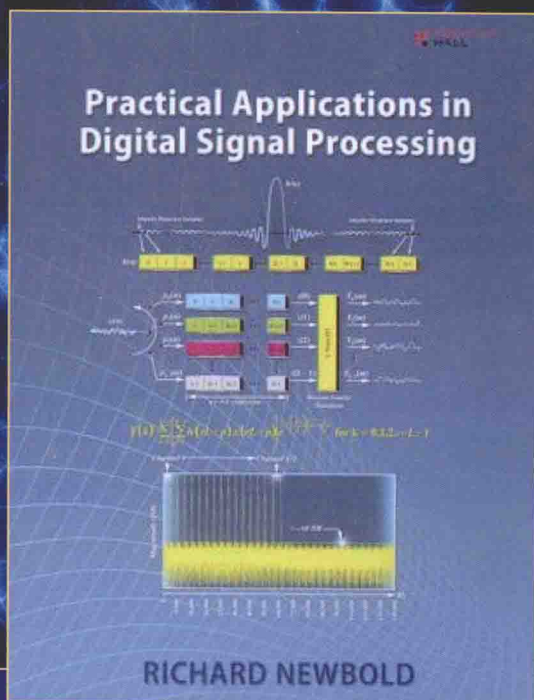


PEARSON

数字信号处理 及应用

[美] 纽伯尔德·理查德 (Newbold Richard) 著
李玉柏 杨鍊 武畅 译

*Practical Applications in
Digital Signal Processing*

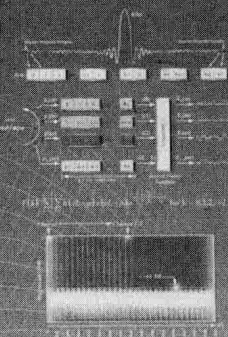


数字信号处理 及应用

[美] 纽伯尔德·理查德 (Newbold Richard) 著
李玉柏 杨鍊 武畅 译

*Practical Applications in
Digital Signal Processing*

**Practical Applications in
Digital Signal Processing**



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理及应用 / (美)理查德(Richard, N.)著;李玉柏,杨鍊,武畅译. —北京:机械工业出版社, 2015.8

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Practical Applications in Digital Signal Processing

ISBN 978-7-111-51340-7

I. 数… II. ①理… ②李… ③杨… ④武… III. 数字信号—信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第207632号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-1394

Authorized translation from the English language edition, entitled Practical Applications in Digital Signal Processing, 1E, 9780133038385 by Newbold Richard, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013.

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 © 2015.

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。

本书着眼于数字信号处理过程中的实际应用, 详细介绍了模拟和数字信号调谐、有限冲激响应数字滤波器、数字频率合成、信号调谐、数字锁定环、信道化滤波器、数字自动增益控制等。本书内容严谨、结构清晰、实例丰富, 适合作为信号处理相关专业本科生与研究生的教材, 也适合有一定 DSP 设计经验的工程人员阅读。

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: 秦秀真

责任校对: 董纪丽

印刷: 三河市宏图印务有限公司

版次: 2015年9月第1版第1次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 37.5

书号: ISBN 978-7-111-51340-7

定价: 119.00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

文艺复兴以降，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；也正是这样的传统，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

电子邮件：hzjsj@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



华章教育

华章科技图书出版中心

译者序

随着数字化、信息化进程的加速，DSP 技术高速发展，其重要地位逐渐突显出来，成为大部分工科学生、研究者所必须掌握的基本技术之一。DSP 既是 Digital Signal Processing 的缩写，也是 Digital Signal Processor 的缩写。前者指数字信号处理的理论和方法，后者则指用于数字信号处理的可编程微处理器核和处理器芯片。

DSP 技术的发展也因其内涵的不同而分为两个知识领域。

一方面，数字信号处理的理论和方法得到迅速发展。除了数字滤波器和频谱分析的理论及算法之外，一些针对特定对象的数字信号处理的理论与算法也都成为研究热点，比如声音与图像的信号处理、无线通信信号处理、生物医学信号处理等。

另一方面，为了满足应用市场的需求，随着微电子科学与技术的发展，通用和专用数字信号处理器的性能也在迅速地提高，目前的工艺水平已经达到纳米量级，时钟频率达到 1GHz 以上。此外，数字信号处理器被设计成一个 IP 核集成到各种电路设计中，比如现在越来越多的通用现场可编程器件 FPGA、CPLD 和 ASIC 都集成有大量的 DSP 核。

针对这两个知识领域，目前都出版了大量的著作、教材和处理器产品说明。其中，许多教材非常经典，比如 Sanjit K. Mitra 的《Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach》，Alan V. Oppenheim 的《Discrete-Time Signal Processing》等。同时，不论是数字信号处理器生产厂家、还是 FPGA、CPLD 和 ASIC 生产厂家，都提供了大量的数字信号处理器或数字信号处理 IP 核的应用手册。

但是，贯通上面两个知识领域，从具体的工程应用、实际数字信号处理功能实现的角度，来审视、理解、分析和实现数字信号处理算法，真正反映数字信号处理实现经验的参考书籍却不多。许多数字信号处理的工程理解、算法实现经验、核心电路的设计技巧、算法性能分析技巧等，往往成为那些 DSP 高手的独家秘籍，只是零星地分布在 DSP 应用的随笔、博客和项目总结报告中。因此，这是存在于 DSP 技术知识领域的灰色区域 (gray area)。

Richard Newbold 所著的《Practical Applications in Digital Signal Processing》弥补了这个空白。当然，编写出这样的著作需要具备足够的 DSP 技术功底，需要贯通数字信号处理理论、数字功能核心电路设计技巧、DSP 处理核应用技能并且具有从事工程实际项目的经验。本书作者 Richard Newbold 正是这样的高手，他作为一名数字硬件设计工程师和自学成才的软件设计者，已从业 30 余年。他的设计经验包含特种应用的数字信号处理硬件，包括实时宽带信号处理的计算机、直接序列扩频系统的处理器、变速率处理系统、基于专用砷化镓 ASIC 来实现的高速信号处理系统、异步时钟电路等设计与实现。他的软件经验包含实时信号处理、比特级硬件仿真、微码和比特分片编程以及基于微软 Windows 的面向图形的测试平台设计等。

正是 Richard Newbold 这样的高手，能够让读者从全新的视角来理解数字频率、复信号、数字频率合成等概念；能够从放大镜中看到 FDM 到 TDM 转换系统的各个运动齿轮；能够从时钟的波动中感知弹性存储器的工作原理；能够从信道化器公式表达的不断完善中体会 DFT 的物理意义；能够从大量的 Excel 表格中确知变采样率滤波器的性能；……

正是 Richard Newbold 这样的高手，其所著的《Practical Applications in Digital Signal Processing》吸引着我们，也促使我们决定把它翻译过来，并推荐给更多的读者。参加本书翻译的人员，多年从事 DSP 相关教学和研究工作，建设了《数字信号处理》国家首批精品

课程,对数字信号处理的实际应用能力的重要性有切身体会。

本书的前言和第1章、第12章、第13章由李玉柏翻译,第2章、第4~9章以及附录、索引等由杨鍊翻译,第3章、第10章、第11章由武畅翻译,全书由李玉柏统稿。

感谢机械工业出版社华章分社引进此图书,使IT从业人员和相关专业学生从中受益。特别感谢机械工业出版社华章分社编辑为本书翻译并出版做出了大量的艰苦工作,译者对他们表示衷心感谢。

由于译者对DSP实际应用相关的创新性技术的理解可能有待加深,同时原文中存在作者自定义、非规范的术语,在翻译过程中难免会出现一些不够清楚的描述,有不妥之处,恳请广大读者批评指正,电子邮箱 ybli@uestc.edu.cn。

李玉柏

2015年1月

前 言

我从事数字硬件设计工作已 30 多年了,期间也自学了一些简单的软件设计。我软件方面的工作主要是为了验证硬件设计的正确性,包括位级仿真、微码生成、汇编代码、FORTRAN、C/C++ 以及编写了基于微软 Windows 的面向图形的测试平台,这些软件设计都是用来验证我设计的数字产品操作的合理性。

在数字信号处理(DSP)尚处于萌芽期,我就开始了我的数字设计生涯。在那些日子里,所有的数字设计均以小规模集成(SSSI)电路形式实现,它们不比 4 位的加法器和 8 到 1 位的多路复用器复杂多少。我毕业后就职的第一家公司就主要从事 DSP 早期阶段的工作。

DSP 算法主要依赖重复的乘加运算。我见过的第一个数字乘法器需要整个设备底盘来完成一次 16×16 的乘法。这个乘法器耗费了太多的硬件,因此为了提高效率,它与其他处理独立任务的硬件分时复用。这个设备的传输延时也非常大,以至于当时构建出的硬件系统能工作在 5MHz 的系统时钟下都被视为是高科技的。

当时“硅谷”这一术语尚未创建,可见那时的技术发展水平。也正是在那段时间,一家名为 Intel 的不知名的小公司,正在加利福尼亚山景城米德菲尔路 365 号一幢非常小的办公楼内运转。Intel 研发出了世界上第一块微处理器,它是一台 4 位机,称为 4004 微计算机。这枚处理器是为日本东京的 Nippon Calculating Machine Corporation(NCMC)设计的。随着 4004 的引入,数字时代也随之改变。数字技术迅猛发展,硬件设计几乎每年都在更新。

项目计划需求总要用到正在开发的技术,设计工程师经常面临用现有的技术实现未来的设计任务。这种矛盾很大程度上促进了业界不断制造出更低功耗、更快及更复杂的设备和系统。再回头看看,似乎 DSP 总是走在发展的前沿。硅谷几乎每天都有初创企业诞生。

随着集成电路生产商不断制造出更高速和更低功耗的处理器,DSP 技术不断壮大并成熟。熔线连接可编程逻辑器件问世,很快发展成为可重复编程的逻辑器件,并进一步发展为现场可编程逻辑阵列(FPGA)、复杂可编程逻辑器件(CPLD)和面向应用的集成电路(ASIC),它们现在仍在使用中。另外一些公司开始致力于生产超高速的砷化镓和磷化铟集成电路,他们会教工程师如何用他们的流程进行设计和制造出面向应用的设计。

支持这些复杂器件的编程和测试的设计工具,也已发展成了一流的软件应用。FPGA 公司甚至不惜承受巨大的挑战,为 DSP 设计提供一个称为“核(core)”的 DSP 电路库,只需通过简单的按键操作就可以使其进入到 FPGA 设计中,而无需设计者知道这个电路是如何工作的。

在 30 年的从业生涯中,我翻阅了大量的 DSP 参考书。这些书的内容几乎都相同,不同的作者用自己不同的方式诠释了相同的主题。通过阅读不同的作者对相同问题的处理方法,让我从不同的角度审视了 DSP 处理技术,同时也填充了我对这个问题在理解上的诸多空白。这些书由业界的资深人士撰写,为我们在 DSP 设计方面提供了良好的技术基础。

然而,市面上却缺少关于专门处理日常应用中 DSP 问题和算法的参考书。通常来说,这些应用的 DSP 算法常常是来自于口述、设计指导以及设计经验。随着时间的推移,所有的设计工程师都会(在他们的头脑中)积累一个包含电路、设计过程、算法和技术等的工具库,这些都是他们付出时间、汗水以及经历了成功、失败、演算和无数次碰壁之后获得的经验。遗憾的是,这些工具库并未被记载下来,所以其他工程师无法访问到工具库中的这些珍贵信息。绝大部分的工程师都是涉密人员,所以在他们求职时,大都不愿意公开自

己宝贵的商业机密。

在 DSP 设计中,有许多在我熟悉的工程参考书里并未详细记载的灰色区域。这些灰色区域通常不会触及这样的问题,比如我该如何设计能实现这样或那样 DSP 关键功能的电路。

例如,我所熟悉的 DSP 参考书中,并没有详细讨论过类似复数字信号的使用、实或复数字信号的频谱、复到实信号的转换、数字信号的转化或数字频率合成的概念等应用。

我也从没有看到过一篇关于如何设计一个用于数字调谐应用中的数控振荡器(NCO)的详细文献、如何设计用于脉冲编码调制(PCM)复用应用中的弹性存储器、数字锁定环(DLL)或数字自动增益控制(dAGC)的文献。

在如今市面上各种各样的 DSP 书籍中,很少有对面向应用问题的详细讨论,包括多相滤波器(PFF)、级联的积分梳状(CIC)滤波器以及数字信道器(有时又称传输复用器)的应用。这些多功能电路,在很多应用中都可能看到,比如频分多路(FDM)到时分多路(TDM)的转换、混合控制、宽带扫描仪以及无线天文学中的宽带拦截处理等,这里仅仅举这几个例子。所有这些问题都可以归结为一个问题“数字信号处理中的实际应用”。

本书的编写目的

本书旨在将我个人工具库中的部分内容与大家共享,旨在填充 DSP 灰色区域的一部分。我希望能实际的设计应用提供一些有用的信息和 DSP 设计技术。

在 DSP 设计界,有许多 DSP 参考书可以被视为“圣经”。其中的很多书,以及资深业界人士撰写的技术论文,本书中都有引用。本书的目的并非重复许多前作者已经做过的工作。本书中不会涉及标准 DSP 概念的解释以及延伸,因为其他作者已经讨论得足够深入了。本书唯一的目的是作为已经出版的众多 DSP 教材的面向应用的补充。

本书读者对象

本书针对有一定 DSP 知识和开发经验的人群。本书适用于即将进入信号处理领域的本科生和大学毕业生。本书也适用于有一定 DSP 设计经验的业界工程师以及从事常见 DSP 硬件或软件的设计与实现的技术人员,本书可以为这些技术人员提供宝贵的资源。

本书内容

本书收集了一些常见的 DSP 应用,将其整理为一系列教程。前 4 章详细地回顾了用于分析、设计和构建复数字处理系统所需的数学工具。剩下的 9 章详细讨论了业界常用的一些的信号处理应用。附录^①中是关于混合语言编程的深入讨论。下面给出每一章的主要内容。

第 1 章:数字频率概述

该章阐述了数字频率及其与系统采样率的关系,并给出了一个特定数字频率值的数学表示以及如何确定数字正弦波的所有采样值。

第 2 章:复变量概述

该章对复变量进行完整的回顾。读了该章之后,一个没有这方面知识的人也可以熟练地使用这一有用的数学工具进行信号处理电路和系统的设计与开发。首先,该章给出了复数的定义和性质,然后再一步完整地讨论了留数定理。留数的计算为工程师们提供了计算数字系统冲激响应的一种简便方法。

第 3 章:傅里叶变换概述

该章对傅里叶级数以及连续和离散的傅里叶变换(分别为 CFT 和 DFT)进行了深入的回顾。讨论了变换性质的推导、变换对、帕塞瓦尔(Parseval's)定理、能量及功率谱密度(PSD)关系的推导。另外,对 DFT 的频谱泄漏、带通滤波器和低通滤波器模型也进行了

① 附录参见华章网站: <http://www.hzbook.com>。——编辑注

研究。信号处理的讨论包括窗的使用、相干与非相干处理增益以及信号识别。尽管这部分内容是扩展的，我们还是在这里写出来，旨在让没有傅里叶级数或傅里叶变换相关背景的读者，也可以在信号处理应用时熟练地使用它们。

第4章： z 变换概述

该章对 z 变换进行了全面回顾，详细讨论了零极点图、反 z 变换、收敛和系统稳定性。在阅读该章之后，对 z 变换毫无知识的人也可以用这些知识来分析复数字系统，从而推导出一个系统的频率响应，确定系统的稳定性，并计算出系统的冲激响应。此外，读者还将学习到如何在实际情况中用 z 变换来修改现有设计，或为了提高其性能，或为了更改其参数以并入其他系统中。

第5章：FIR 数字滤波器

该章的重点在于有限冲激响应(FIR)数字滤波器的设计。这里不会重复那些由资深作者们编著的理论材料中的内容。几乎所有的DSP文献都对数字滤波器的历史、原理、结构、计算以及传统的设计技术泛泛而谈。而在这里，我们则要针对某些更常用的滤波器类型，对它们的一种设计和实现方法进行重点讨论。该章的目标有两个。首先，为了建立一个系统的概念，我们会给出数字滤波器的简要概述。其次，我们将基于 Parks-McClellan 最优滤波器设计程序，来实现几种类型的数字滤波器，以此来演示计算机辅助设计的方法。完整的程序清单参见附录A。

第6章：多速率 FIR 滤波器设计

该章详细讨论了用于变信号采样率的数字滤波器的设计。设计者常常会遇到这样的任务，将信号的采样率增加或减少某一整数或分数倍。改变一个数字信号的采样率有好几种方法。这些方法全都会用到数字滤波器，我们常常称之为“多速率滤波器”。有些多速率滤波器可能比其他的更适用于某种特定速率改变的应用中。该章将讨论三种采样率变化情况，它们分别使用到下面三种滤波器：

- 1) 多相滤波器。适用于中等大小速度变化率的方法。
- 2) 半带滤波器。适用于速度变化率为2的倍数的一种有效方法。
- 3) CIC 滤波器。适用于大速率变化的、计算量又节省的滤波器。

第7章：复信号到实信号的转换

该章详细讨论了复信号转换成实信号的方法。这是一种常见的信号处理功能，但如何实现这一重要问题，却很少能在工程参考书中找到。在利用前端调谐器的数字系统中可见到复信号处理的范例。这些系统可以广义地归类于“数字无线电”，其中的宽带输入信号的频率向上或向下搬移，然后将其通过一个带通或低通滤波器，提取出我们感兴趣的某些窄带频率。从数学上看，调谐功能就是将实输入信号转换为复信号。接着，滤波后的窄带信号再以复数形式处理，从而按照特定应用指定的任意方式实现。在此处理过程完成后，复信号再转换为实数形式并输出。

第8章：数字频率合成

在DSP应用领域中，很多时候都会用到数控振荡器，简称为NCO。NCO就是可编程振荡器，它在用户指定频率和相位输出数字正弦波。这个正弦波可以被编程固定在某个频率上，也可以在一个频带内扫频或跳频。该正弦波可以具有常数相位，也可以编程为多个相位或可切换相位。根据NCO应用场合的需求不同，它可以是一个简单或复杂的设备。NCO的一个典型应用是产生一个可编程的复正弦波，将带通信号向下搬移到基带，然后进行滤波和后续处理，类似于调频无线电中的本振信号。该章包含了能清楚说明NCO的设计及其所有内部处理功能的详细图示。该章还给出了很多仿真，以图示方式说明NCO如何产生信号。

第9章：信号调谐

该章深入讨论了连续模拟域和离散数字域中的信号调谐问题。调谐即将信号从一个频

率域搬移到另一个频率域。在处理通信信号时，为了简化数据流的过程，就常常将中心频率在 f_1 处的一个带限信号搬移到另一中心频率 f_2 处。该章说明了如何向上和向下搬移实信号和复信号频谱的方法。

第 10 章：弹性存储器

在他们的从业生涯中，大多数工程师都设计过两个或多个采用同步数据流的数据处理系统间的接口。但是，若他们要设计的是采用异步数据传输的两个或多个处理系统或数据流的接口呢？该章中，术语“异步”指每一组数据流均按自己的时钟建立时间队列，该时钟由一个独立的时钟振荡器生成。每一组同步数据流的频率和相位都是相似的，但一定又不会完全相同。因为每个时钟振荡器的输出频率随时间和温度而改变，所以都是独一无二的。在许多情况下，这些时钟可能相差几千赫兹。该章将说明如何用一个弹性存储器来同步这些系统。

第 11 章：数字化的数据锁定环

假设给你一个时分多路或 TDM 系统，其数据流由两个或多个独立的异步支路复合而成。我们该怎样对这些支路解复用，然后再为每条支路合成一个独立的比特时钟，使其与复用前的原始时钟在平均意义上相等呢？该信号类似于承载了多个较低级支路的较高级电话 PCM 复用。这只是众多可能例子中的一个。对原始支路之间原本就是异步复用的支流，在解复用时，也会遇到相同的问题。答案就是需要使用一个数字化的数据锁定环，或称为 DLL。DLL 的原理非常简单，它先利用弹性存储器来合成一个比特流时钟，然后再用此时钟同步解复用比特流或支路，而无需对原始时钟的频率有任何先验知识。该章对如何为相关应用设计 DLL 进行了非常深入的研究。

第 12 章：信道化滤波器组

该章首先对其整体功能进行了探讨，再深入地研究数字信道器（有时称为传输复用器）的设计方法。正如之前所提到的，这种多功能电路会出现在许多信号处理应用中。信道化器可以简单地用单个集成电路取代数以百计的接收机。该章中，我们将设计一个可同时处理多达 2000 路独立等带宽信号的信道化器。

第 13 章：数字自动增益控制

该章详细讨论了 I 型和 II 型数字自动增益控制，或称为 dAGC。在很多电子系统中，一个最重要的功能就是自动增益控制。通常，AGC 是一个非线性反馈电路，如果设计不好，就会不稳定。该章旨在设计一个 dAGC 电路，推导其工作参数，并进行仿真，然后再用图示说明其暂态响应、环路误差的稳态操作、环路增益以及各种输入信号和输入干扰信号下的电路响应输出。

附录 A：C/C++ FORTRAN 混合语言编程^①

经过多年的工作，业界的工程师们已经积累了一些老旧的 FORTRAN 程序、函数或子程序，它们都是很有价值的遗留代码。如果这些例程没有价值，那么工程师们就不会保留它们。通常，这些例程是经过测试、调试和验证的代码，它们仍可用于当今的工程环境中，是一笔财富。最大的问题在于现在大多数软件使用 C/C++ 编写。如果这就是你现在陷入的困境，那我现在有一个好消息和一个坏消息要告诉你。好消息是程序开发者们已经有经过验证的现成的 FORTRAN 代码可用，将这些代码很好地集成到一个工程中，将会大大减少劳动成本和缩短程序开发周期。当然，坏消息是 C/C++ 是目前最常用的语言，因此用 FORTRAN 写出来的代码并不是切实可用的。那么若你是一个编程人员或设计工程师，在这种情况下你会怎么办呢？一个办法就是构建混合语言程序，其中 main 程序的主体部分用 C/C++ 编写，然后再链接一个或多个有用的 FORTRAN 遗留函数或子例程。该附录演示如何实现这一过程。

^① 附录 A 参见华章网站：<http://www.hzbook.com>。——编辑注

致 谢

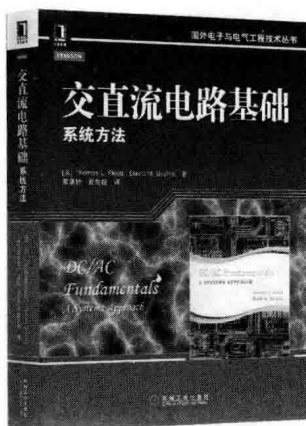
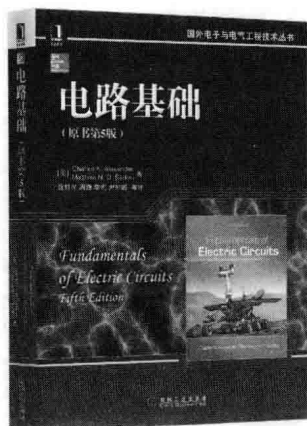
我向 Pearson North America 的 Prentice Hall 专业技术出版社的执行编辑 Bernard Goodwin 表达我诚挚的谢意，感谢他在向专业技术出版界引荐一名新作者时给予的大力帮助和支持。同时我感谢 John Treichler 博士允许我引用他发表的关于传输多路复用器的原创论文。

我要感谢《Understanding Digital Signal Processing》(Prentice Hall 出版社)的作者 Richard Lyons;《Notes on Digital Signal Processing》(Prentice Hall 出版社)的作者 David Myers、Jim Kemerling、Michael Myers 和 C. Britton Rorabaugh，感谢他们对原稿的技术审核。

我还要感谢电磁系统实验室的 Mike Tate 长期的帮助，他是我曾一起工作过的、绝对顶级的技术员。在很多年前，他的帮助让我成功地开始了我的职业生涯。我要感谢 Northrop Grumman 的 Tom Ranweiler，他是我一同工作过的最敏锐的软件设计工程师，他协助我成功地完成了我职业生涯一项重要的成果，那就是对独特的专用信号处理系统的设计。同样我有幸能够和 Northrop Grumman 的 Pin-Wei Chen 博士一同工作，他是一名优秀的系统工程师，在他的帮助下使我能够不断地深入研究，确保设计项目的开展。

最后我要对我的妻子 Mary 表达深深的谢意，在这个漫长的项目中，感谢她对待我的耐心、支持、理解和鼓励。

推荐阅读



电路基础（原书第5版）

作者：（美）Charles K. Alexander 等 译者：段哲民 等 ISBN: 978-7-111-47088-0 定价：129.00元

本书是电类各专业“电路”课程的一本经典教材，被美国众多名校采用，是美国最有影响力的“电路”课程教材之一。本书每章开始增加了中文“导读”，适合用做高校“电路”课程双语授课或英文授课的教材。本书前4版获得了极大的成功，第5版以更清晰、更容易理解的方式阐述了电路的基础知识和电路分析方法，并反映了电路领域的最新技术进展。全书总共包括2447道例题和各类习题，并在书后给出了部分习题答案。

交直流电路基础：系统方法

作者：（美）Thomas L. Floyd 译者：殷瑞祥 等 ISBN: 978-7-111-45360-4 定价：99.00元

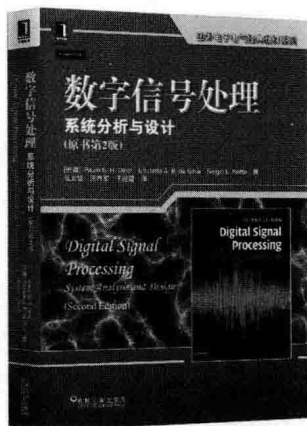
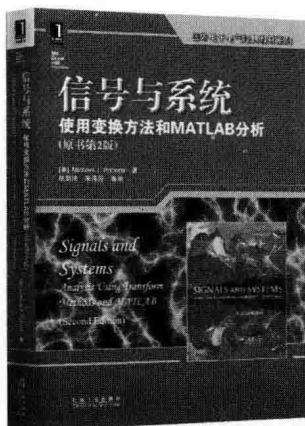
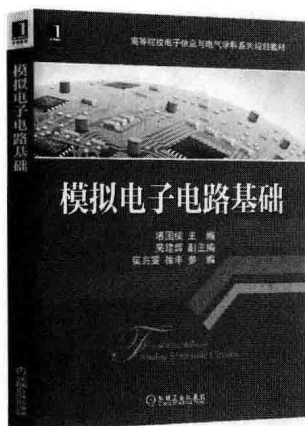
本书是知名作者Floyd的最新力作，在国外被广泛使用。本书系统介绍了直流和交流电路理论，强调直流/交流电路基本概念在实际系统中的应用。全书丰富的实例，有助于学生的理解系统模块、接口和输入/输出信号之间的关系。书中实例使用Multisim进行仿真，并提出在模拟电路与系统和排除故障中存在的问题及解决方法。本书可作为电子信息、电气工程、自动化等类专业的电路课程教材。

应用电路分析

作者：（美）Matthew N. O. Sadiku 等 译者：苏育挺 等 ISBN: 978-7-111-47077-9 定价：99.00元

本书可作为高等院校电类专业“电路分析”课程的教材，以更清晰、生动、易于理解的方式来阐述电路分析的方法。全书分为两部分，第一部分包括第1~10章，主要介绍直流电路；第二部分包括第11~19章，主要介绍交流电路。本书可以作为大学两学期或三学期的教材，授课教师也可选择适当的章节，将其用作一学期课程的教材。

推荐阅读



模拟电子电路基础

作者：堵国 吴建辉 等 ISBN: 978-7-111-45504-2 出版时间：2014年1月 定价：45.00元

本书是在多年教学改革的基础上编写而成的，其基本原则为“以电路分析为主线，以设计应用为目的”。编写思路采用了从宏观到微观，从对集成器件外特性的了解、应用，引导到对内电路研究学习的兴趣；以单元电路的分析为铺垫，强调电子系统设计的思路；以工程教育理念为导向，理论联系实际，教材内容落实到具体的工程项目应用中。本书主要从应用角度介绍器件、集成电路以及电子电路的基本概念、基本原理、性质与特点，通过电子电路具体分析方法的介绍，培养电子电路的设计能力。本书共分11章，内容包括：绪论，运算放大器及其线性应用，运算放大器的非线性应用，半导体器件概述，基本放大电路，负反馈放大电路，集成运算放大器，正弦波产生电路，功率电路，应用电路设计分析，门电路。

信号与系统：使用变换方法和MATLAB分析（原书第2版）

作者：（美）M. J. Roberts 译者：胡剑凌 等 ISBN: 978-7-111-42188-7 出版时间：2013年6月 定价：89.00元

信号与系统课程是数字信号处理和控制理论等课程的基础课程，本书以主要涵盖傅里叶变换、傅里变换分析、拉普拉斯变换、拉普拉斯变换分析、离散时间系统的 z 变换、 z 变换分析等。书中给出了大量的例子，并介绍实现分析方法的MATLAB函数和运算。可作为电子信息类相关专业的本科生教材。

数字信号处理：系统分析与设计（原书第2版）

作者：（巴西）Paulo S. R. Diniz 等 译者：张太镒 等 ISBN: 978-7-111-41475-9 出版时间：2013年4月 定价：85.00元

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论和分析方法，详细介绍了离散时间信号及系统、傅里叶变换、 z 变换、小波分析和数字滤波器设计的确定性数字信号处理，以及多重速率数字信号处理系统、线性预测、时频分析和谱估计等随机数字信号处理，使读者深刻理解数字信号处理的理论和设计方法。本书不仅可以作为高等院校电子、通信、电气工程与自动化、机械电子工程和机电一体化等专业本科生或研究生教材，还可作为工程技术人员DSP设计方面的参考书。

出版者的话
译者序
前言
致谢

第 1 章 数字频率概述	1
1.1 定义	1
1.2 数字频率的定义	1
1.3 数字频率的数学表示	5
1.4 归一化频率	7
1.5 数字频率的表征	7
第 2 章 复变量概述	9
2.1 复数的直角坐标形式	10
2.2 复数的极坐标形式	11
2.3 复数的根	13
2.4 复数的绝对值	16
2.5 复数的指数形式	17
2.6 复变量 z 的图形化表示	18
2.7 极限	18
2.8 解析函数	19
2.9 奇点	19
2.10 整函数	19
2.11 复数 ∞	20
2.12 复数微分	20
2.13 柯西-黎曼方程	21
2.14 单连通区域	23
2.15 围线	23
2.16 线积分	24
2.17 实线积分	25
2.18 复线积分	38
2.19 柯西定理	43
2.20 常用积分表	48
2.21 柯西积分	49
2.22 留数定理	54
2.23 参考文献	57
第 3 章 傅里叶变换概述	58
3.1 傅里叶级数简述	58
3.2 傅里叶变换简述	73
3.3 离散傅里叶变换概述	88

3.4 DFT 处理增益	129
3.5 DFT 信号处理应用举例	133
3.6 离散时间傅里叶变换	135
3.7 快速傅里叶变换	137
3.8 参考文献	138
第 4 章 z 变换概述	139
4.1 复数表示	139
4.2 z 变换的原理	140
4.3 左边 z 变换	142
4.4 右边 z 变换	142
4.5 双边 z 变换	142
4.6 z 变换的收敛条件	142
4.7 系统稳定性	147
4.8 z 变换的性质	149
4.9 常见 z 变换对	154
4.10 反 z 变换	156
4.11 零极点标准形式	168
4.12 z 变换的应用	177
4.13 重要公式的总结	193
4.14 参考文献	194
第 5 章 FIR 数字滤波器	195
5.1 数字滤波器的回顾	195
5.2 FIR 滤波器设计的 Parks-McClellan 法	199
5.3 半带滤波器的 PM 实现	221
5.4 参考文献	225
第 6 章 多速率 FIR 滤波器设计	226
6.1 多相滤波器	226
6.2 半带滤波器	243
6.3 级联的积分梳状滤波器	245
6.4 参考文献	280
第 7 章 复信号到实信号的转换	281
7.1 一个典型的数字信号处理系统	282
7.2 复信号到实信号的转换	285
7.3 复信号到实信号的仿真结果	295
7.4 参考文献	304

第 8 章 数字频率合成	305	10.8 参考资料	431
8.1 NCO	305	第 11 章 数字化的数据锁定环	432
8.2 增强的 NCO 相位累加器	323	11.1 数字化的数据锁定设计	432
8.3 NCO 合成输出的频率误差	327	11.2 数字化的数据锁定的稳态表现	445
8.4 对 NCO 输出加入一个可编程的相位偏移	331	11.3 数字化的数据锁定的瞬态表现	447
8.5 设计一个行业级的 NCO	335	11.4 数据锁定环比特级仿真	452
8.6 NCO 的相位抖动	342	11.5 工程上的注意事项	466
8.7 参考文献	344	11.6 重要公式的总结	466
第 9 章 信号调谐	345	11.7 参考文献	467
9.1 连续时间(模拟)傅里叶变换	345	第 12 章 信道化滤波器组	468
9.2 离散时间(数字)傅里叶变换	365	12.1 概述	468
9.3 重要公式	401	12.2 信道化器功能概述	470
9.4 参考文献	403	12.3 信道化器详细设计的概念	494
第 10 章 弹性存储器	404	12.4 信道化器的软件仿真结果	519
10.1 弹性存储器的应用举例	404	12.5 信道化器的硬件设计实例	523
10.2 PCM 多路复用分层结构	405	12.6 重要公式的总结	526
10.3 DS-1C 多路复用器设计概述	409	12.7 参考文献	526
10.4 弹性存储器的设计	412	第 13 章 数字自动增益控制	527
10.5 弹性存储器的硬件实现	423	13.1 设计 I 型 RMS AGC 电路	529
10.6 DS-1C 多路复用器的总体设计框图	429	13.2 设计 II 型 RMS AGC 电路	566
10.7 附加信息	431	13.3 参考文献	568
		索引	569

第 1 章

数字频率概述

在文献中,模拟频率很容易用数学的方法表示,因为模拟频率的值域在理论上是连续和无限的。如果我们用符号 f_0 表示任意的模拟频率,则它可以等于无限个可能频率值中的任何一个。比如,我们可以选择 f_0 等于 23.456 Hz,也可以让它等于 1.005 MHz。我们可以让 f_0 等于我们能想到的具有任何精度的任何数值,只要具有可实现性,它的取值精度范围没有任何限制。

一个数字系统所处理的数字数据和得到的数字结果只在离散时刻有效,其有效时刻等于系统采样时钟周期的整数倍。因此,一个以数字方式产生的离散频率的值域,只是模拟频率值域的一个很小的子集。这个子集中离散频率的值,是由数字系统时钟的采样频率决定的。

当人们处理数字频率时,这种情况会引起一些混淆。可以将这些混淆归纳为如下三类常见问题:

- 1) 如何定义数字频率?
- 2) 如何用数学的方法表示数字频率?
- 3) 在硬件和软件中如何合成数字频率?

本章重点回答前面两个问题,第三个问题的解答将放在第 8 章中详细讨论。

1

1.1 定义

在本章中,我们对符号做如下定义:

- 1) f 表示任意的模拟频率,单位为 Hz。
- 2) f_0 表示特定的模拟频率,单位为 Hz。
- 3) f_K 表示特定的数字频率,单位为 Hz。
- 4) ω_0 表示特定的模拟角频率,单位为 rad/s。
- 5) ω_K 表示特定的数字角频率,单位为 rad/s。
- 6) f_s 表示采样频率或数字系统时钟频率。
- 7) T 表示数字采样时钟周期, $T = \frac{1}{f_s}$ 。

1.2 数字频率的定义

与模拟频率不同,用数字方式产生的频率,其分辨率不是无限的,只能取得离散的值。比如一个数字的正弦波,它的频率、相位和振幅都只能取离散的值。在本章我们将说明,一个数字正弦信号的频率分辨率受数字采样时钟周期 $T = \frac{1}{f_s}$ 的限制,而其幅度的精度受每个数字样点值的位宽限制。下面从一个数字正弦波开始进行讨论。

已知正弦波具有归一化的幅度,且以 2π 为周期,如图 1.1 所示。若我们定义一个半径为 1 的圆,称为单位圆,则可以看成一个具有归一化幅度的相量(phasor),以固定的角频率 ω_K 围绕单位圆旋转。每当相量绕单位圆一周,就转过 2π 弧度。绕单位圆上所有相位一次。我们定义相量的旋转速度为 ω_K (rad/s),用符号 C 表示该相量。由于相量 C 只在采样周期 T 离散时刻取值,所以可以用一个离散时间函数 $C(nT)$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 来表示它。

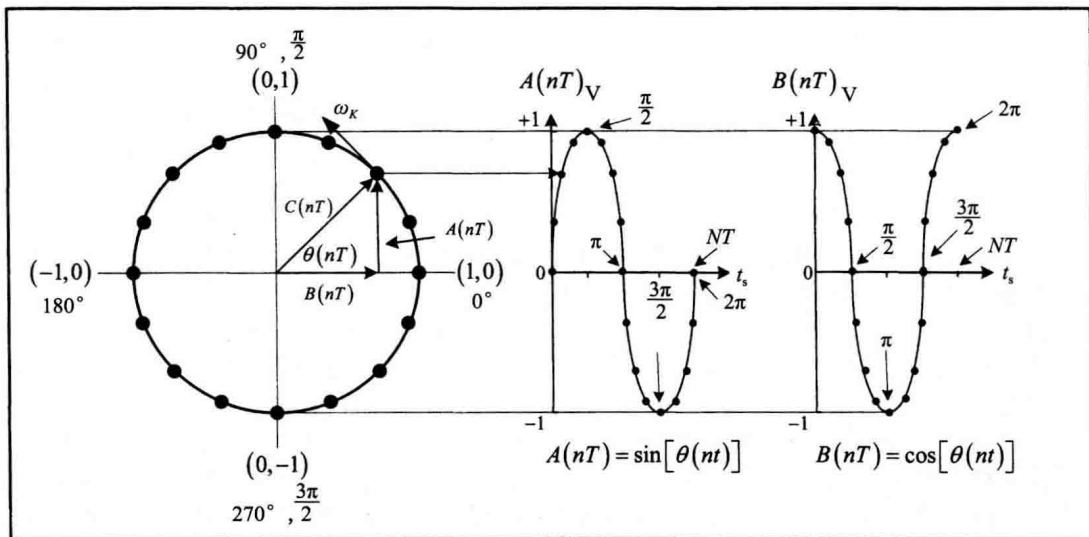


图 1.1 单位圆

相量 $C(nT)$ 可以用简单的三角函数关系来表示, 如图 1.1 所示, 分别定义 $A(nT)$ 为其垂直分量, $B(nT)$ 为其水平分量。 C 的幅度与这些分量的关系可以用勾股定理表示: $C(nT) = \sqrt{A^2(nT) + B^2(nT)}$ 。

我们可以看到, 当相量 C 绕单位圆旋转时, A 分量的幅度循环地发生变化, 从 0 弧度处的 0, 增长到 $\frac{\pi}{2}$ 弧度处的 +1, 再衰减到 π 弧度处的 0, 到 $\frac{3\pi}{2}$ 弧度处再变成 -1, 最后当相量通过 2π 弧度时, 幅度又回到 0。每当相量完成一次 2π 弧度的旋转, A 分量的幅度变化轨迹为一个正弦波, 相应的 B 分量的幅度变化轨迹为一个余弦波, 如图 1.1 所示。

对于数字系统, 图 1.1 中 C 相量的分量 A 、 B , 相量 C 的相角 θ , 都只能在采样周期的整数倍, 即 $T = \frac{1}{f_s}$ 的整数倍处的离散时刻取值。采样时刻序列可用以下无限序列表示:

$$1T, 2T, 3T, \dots, nT, \dots$$

我们可用 $nT (0 \leq n < \infty)$ 来表示任意的采样时刻, 结合图 1.1 中绕单位圆旋转的相量表示方式, 我们定义在 nT 时刻的相量的垂直分量 A 、水平分量 B 以及相量 C 的相角 θ 的值, 由三角函数关系可得到:

$$\begin{aligned} \sin(\theta) &= \frac{A}{C} = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \\ \cos(\theta) &= \frac{B}{C} = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \end{aligned}$$

又由于相量处于单位圆上, 所以其幅度满足关系 $C = \sqrt{A^2 + B^2} = 1$, 因此, 在任意采样时刻 nT 处有表达式:

$$\begin{aligned} A(nT) &= \sin[\theta(nT)] \\ B(nT) &= \cos[\theta(nT)] \end{aligned} \quad (1.1)$$

到目前为止, 我们已定义了数字系统中的相量表示, 但还没有对正弦波上的离散值进行定量分析。下面, 我们将单位圆等分为 N 段圆弧, 在图 1.1 中用黑点标注其边界。每段圆弧都是单位圆的一部分, 相量 C 所对应的相角 θ 均为 $\frac{2\pi}{N}$ 弧度。

借此机会我们提出一个全新的、具有高技术含量的术语——弧度块 (radian chunk),