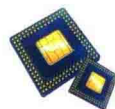
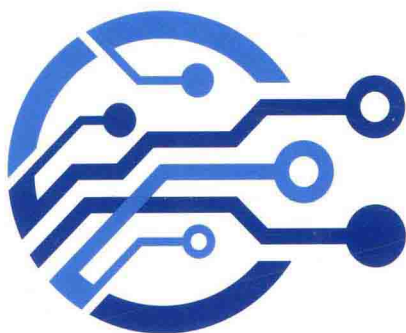




WILEY



电子电气工程师技术丛书



# DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Using the ARM Cortex-M4

## 基于ARM Cortex-M4的 DSP系统开发

[英] 唐纳德 S. 雷伊 著 李磊 译  
(Donald S. Reay)



机械工业出版社  
China Machine Press



电子电气工程师技术丛书

# DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Using the ARM Cortex-M4

## 基于ARM Cortex-M4的 DSP系统开发

[英] 唐纳德 S. 雷伊 著 李磊 译  
(Donald S. Reay)



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于 ARM Cortex-M4 的 DSP 系统开发 / (英) 唐纳德 S. 雷伊 (Donald S. Reay) 著; 李磊译. —北京: 机械工业出版社, 2017.6

(电子电气工程师技术丛书)

书名原文: Digital Signal Processing: Using the ARM Cortex-M4

ISBN 978-7-111-57062-2

I. 基… II. ①唐… ②李… III. 数字信号处理—程序设计 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 108942 号

本书版权登记号: 图字: 01-2016-3970

Copyright © 2016 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Digital Signal Processing: Using the ARM Cortex-M4, ISBN 978-1-118-85904-9, by Donald S. Reay, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

## 基于 ARM Cortex-M4 的 DSP 系统开发

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: 刘立卿

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 16.25

书号: ISBN 978-7-111-57062-2

定价: 69.00 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) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@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

## The Translator's Words 译者序

本书介绍采用 ARM Cortex-M4 微型控制器进行数字信号处理 (DSP) 的实践教学的方法。作者长期从事 DSP 一线教学, 之前已有此类书的编写经验, 他把多年教学与研究工作的经验融入本书, 知识点组织条理清晰, 分析详实严谨, 理论与实践充分结合。

长期以来, DSP 教学重理论、轻实践的现象一直存在, 枯燥的理论学习使得学生学习 DSP 的热情逐渐冷却。造成这一问题的原因, 一是缺乏合适的 DSP 基础实验教材; 二是 DSP 硬件开发平台成本高昂, 教学无法负担。本书采用成本极为低廉的硬件开发平台——ARM Cortex-M4 开发系统 (第 1 章), 提供了大量的简明编程示例, 涵盖 DSP 的众多基本概念, 诸如模数转换和数模转换 (第 2 章)、有限冲激响应滤波 (第 3 章) 和无限冲激响应滤波 (第 4 章)、快速傅里叶变换 (第 5 章) 以及自适应滤波 (第 6 章), 是广大师生完成 DSP 实践环节、巩固 DSP 理论的绝佳选择。

译者很高兴承担了此书的翻译工作, 在翻译过程中也获益匪浅。

本书适合用作高年级本科生或者一年级硕士研究生进行 DSP 实验的教材 (建议开设 1 学期的课程), 同时也适合电气工程师使用物美价廉的 ARM Cortex-M4 学习 DSP 时参考。

李 磊

2017 年 1 月

## 前言 Preface

自1990年Rulph Chassaing和Darrell Horning所著《基于TMS320C25的数字信号处理》出版以来,已经有一系列有关数字信号处理器的图书与读者见面了,涉及德州仪器相继生产的几代数字信号处理器,本书就是此系列的延续。确切地说,直到目前为止,受益于“德州仪器大学计划”,该系列的每一本书都有相配套的以教学为目的的廉价开发套件。丛书秉承一贯的风格,在电气工程实验室环境下,以大量的简明编程示例(本书简称为“例程”)讲解各种DSP的实时概念。

Rulph Chassaing一直认为,进行DSP实践教学,使用硬件开发套件和实验室测试设备来处理模拟音频信号,是巩固理论教学的重要且有效的手段。我同样坚信这一点。

丛书的内容,一如既往地涵盖数字信号处理的众多基本概念,如模数转换和数模转换、有限冲激响应(FIR)滤波和无限冲激响应(IIR)滤波、傅里叶变换以及自适应滤波,这些几乎没有变动。每个学年都吸引一批学生学习这些知识。然而,每本书却以不同的DSP开发工具包为特色。

2013年,Robert Owen曾建议我使用一款廉价的ARM Cortex-M4微控制器来完成DSP实践教学。我当时指出,德州仪器C674x处理器的计算能力显著强于ARM Cortex-M4的。不过,我也开始着手尝试,并购置了一套德州仪器的Stellaris LaunchPad。利用沃尔夫森(Wolfson)WM8731编解码器,我编制了一个音频接口,并将我之前著作中的例程成功地移植到了Stellaris LaunchPad上。

本书适合电气工程专业的高年级本科生和研究生使用,这些学生已经具备了C语言编程基础,并掌握了线性系统的理论知识。不过,也希望本书能对任何从事DSP教学或者正在学习DSP的人有用,成为他们继续进步的起点。

感谢Robert Owen向我推荐ARM Cortex-M4;感谢“ARM大学计划”的Khaled Benkrid和英国皇家工程学院使得为期6个月的ARM工业借调顺利进行,在此期间我完成了关于STM32F01平台教学材料的编写;感谢沃尔夫森微电子学研究所的Gordon McLeod和Scott Hendry,在他们的帮助下,我获得了STM32F01开发所需的沃尔夫森Pi声卡;感谢ARM的

Sean Hong、Karthik Shivashankar 和 Robert Iannello 给予的热情帮助；感谢 Joan Teixidor Buixeda 帮忙调试例程；感谢“德州仪器大学计划”的 Cathy Wicks 和 CircuitCo 的 Hieu Duong 帮忙开发音频扩展板；感谢 Wiley 的 Kari Capone 和 Brett Kurzman 给予的耐心帮助。最后，尤其要感谢 Rulph Chassaing 激励我从事 DSP 实践教学。

Donald S. Reay

# 目 录 Contents

译者序

前言

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 ARM Cortex-M4 开发系统 .....                                | 1  |
| 1.1 简介 .....                                                  | 1  |
| 1.1.1 音频接口 .....                                              | 1  |
| 1.1.2 德州仪器 TM4C123 LaunchPad 和 STM32F407 Discovery 开发套件 ..... | 2  |
| 1.1.3 硬件和软件工具 .....                                           | 5  |
| 参考文献 .....                                                    | 5  |
| 第 2 章 模拟输入和输出 .....                                           | 6  |
| 2.1 简介 .....                                                  | 6  |
| 2.2 用作音频输入和输出的 AIC3104 立体声信号编解码器 .....                        | 7  |
| 2.3 用作音频输入和输出的 WM5102 音频插孔板信号编解码器 .....                       | 9  |
| 2.4 编程示例 .....                                                | 9  |
| 2.5 使用查询、中断和 DMA 进行实时输入和输出 .....                              | 10 |
| 2.5.1 TM4C123 的 I2S 仿真 .....                                  | 11 |
| 2.5.2 程序操作 .....                                              | 11 |
| 2.5.3 运行程序（例程 tm4c123_loop_poll.c） .....                      | 12 |
| 2.5.4 将输入连接改为 LINE IN .....                                   | 12 |
| 2.5.5 改变抽样频率 .....                                            | 12 |
| 2.5.6 使用沃尔夫森声卡上的数字 MEMS 麦克风 .....                             | 15 |
| 2.5.7 运行程序（例程 stm32f4_loop_poll.c） .....                      | 15 |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.8 运行程序 (例程 tm4c123_loop_intr. c)                     | 18        |
| 2.5.9 TM4C123 处理器的 DMA                                   | 21        |
| 2.5.10 运行程序 (例程 tm4c123_loop_dma. c)                     | 24        |
| 2.5.11 监测程序执行                                            | 24        |
| 2.5.12 测量由基于 DMA 的 I/O 方式引入的时延                           | 24        |
| 2.5.13 STM32F407 处理器的 DMA                                | 27        |
| 2.5.14 运行程序 (例程 stm32f4_loop_dma. c)                     | 28        |
| 2.5.15 测量由基于 DMA 的 I/O 方式引入的时延                           | 28        |
| 2.5.16 运行程序 (例程 stm32f4_loop_buf_intr. c)                | 38        |
| 2.6 实时波形生成                                               | 38        |
| 2.6.1 运行程序 (例程 stm32f4_sine_48_intr. c)                  | 40        |
| 2.6.2 AIC3104 信号编解码器输出中的带外噪声 (例程 tm4c123_sine48_intr. c) | 41        |
| 2.6.3 运行程序 (例程 stm32f4_sine_intr. c)                     | 44        |
| 2.6.4 运行程序 (例程 stm32f4_square_intr. c)                   | 51        |
| 2.6.5 运行程序 (例程 tm4c123_am_poll. c)                       | 58        |
| 2.7 利用伪随机噪声识别 DAC 的频率响应                                  | 58        |
| 2.7.1 AIC3104 信号编解码器的可编程去加重滤波器                           | 61        |
| 2.7.2 AIC3104 信号编解码器的可编程数字特效滤波器                          | 63        |
| 2.8 混叠                                                   | 65        |
| 2.9 利用自适应滤波器识别 DAC 的频率响应                                 | 70        |
| 2.10 STM32F407 的 12 位 DAC 的模拟输出                          | 79        |
| 参考文献                                                     | 82        |
| <b>第3章 有限冲激响应滤波器</b>                                     | <b>83</b> |
| 3.1 数字滤波器简介                                              | 83        |
| 3.1.1 FIR 滤波器                                            | 83        |
| 3.1.2 $z$ 变换简介                                           | 84        |
| 3.1.3 $z$ 变换的定义                                          | 85        |
| 3.1.4 $z$ 变换的性质                                          | 92        |
| 3.1.5 $z$ 传递函数                                           | 94        |
| 3.1.6 $s$ 平面到 $z$ 平面的映射                                  | 94        |

|            |                                 |            |
|------------|---------------------------------|------------|
| 3.1.7      | 差分方程 .....                      | 95         |
| 3.1.8      | 频率响应和 $z$ 变换 .....              | 96         |
| 3.1.9      | $z$ 反变换 .....                   | 96         |
| 3.2        | 理想滤波器响应分类: LP、HP、BP、BS .....    | 96         |
| 3.2.1      | 采用窗口法设计 FIR 滤波器 .....           | 96         |
| 3.2.2      | 窗函数 .....                       | 98         |
| 3.2.3      | 采用窗口法设计理想高通、带通和带阻 FIR 滤波器 ..... | 101        |
| 3.3        | 编程示例 .....                      | 105        |
| 3.3.1      | 改变滑动平均滤波器的系数 .....              | 112        |
| 3.3.2      | 使用 MATLAB 生成 FIR 滤波器系数头文件 ..... | 117        |
| <b>第4章</b> | <b>无限冲激响应滤波器 .....</b>          | <b>139</b> |
| 4.1        | 简介 .....                        | 139        |
| 4.2        | IIR 滤波器结构 .....                 | 140        |
| 4.2.1      | 直接 I 型结构 .....                  | 140        |
| 4.2.2      | 直接 II 型结构 .....                 | 140        |
| 4.2.3      | 直接 II 型转置 .....                 | 141        |
| 4.2.4      | 级联型结构 .....                     | 142        |
| 4.2.5      | 并联型结构 .....                     | 143        |
| 4.3        | 冲激不变法 .....                     | 144        |
| 4.4        | 双线性变换 .....                     | 145        |
| 4.5        | 编程示例 .....                      | 146        |
|            | 参考文献 .....                      | 183        |
| <b>第5章</b> | <b>快速傅里叶变换 .....</b>            | <b>184</b> |
| 5.1        | 简介 .....                        | 184        |
| 5.2        | 基 2 FFT 算法的开发 .....             | 184        |
| 5.3        | 频率抽取基 2 FFT 算法 .....            | 185        |
| 5.4        | 时间抽取基 2 FFT 算法 .....            | 188        |
| 5.5        | 频率抽取基 4 FFT 算法 .....            | 191        |
| 5.6        | 快速傅里叶反变换 .....                  | 192        |
| 5.7        | 编程示例 .....                      | 192        |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| 5.8 基于帧或者块的编程 .....                                        | 202        |
| 5.8.1 运行程序 (例程 <code>tm4c123_dft128_dma.c</code> ) .....   | 205        |
| 5.8.2 频谱泄露 .....                                           | 206        |
| 5.9 快速卷积 .....                                             | 212        |
| 5.9.1 运行程序 (例程 <code>tm4c123_fastconv_dma.c</code> ) ..... | 216        |
| 5.9.2 以快速卷积法实现 FIR 滤波器的执行时间 .....                          | 216        |
| 参考文献 .....                                                 | 220        |
| <b>第6章 自适应滤波器</b> .....                                    | <b>221</b> |
| 6.1 简介 .....                                               | 221        |
| 6.2 自适应滤波器布局 .....                                         | 222        |
| 6.2.1 自适应预测 .....                                          | 222        |
| 6.2.2 系统识别或者直接建模 .....                                     | 222        |
| 6.2.3 噪声消除 .....                                           | 222        |
| 6.2.4 均衡 .....                                             | 223        |
| 6.3 性能函数 .....                                             | 224        |
| 6.4 搜索最小值 .....                                            | 225        |
| 6.5 最小均方算法 .....                                           | 226        |
| 6.5.1 LMS 演化 .....                                         | 227        |
| 6.5.2 归一化 LMS 算法 .....                                     | 227        |
| 6.6 编程示例 .....                                             | 227        |

# ARM Cortex-M4 开发系统

## 1.1 简介

实时数字信号处理 (DSP) 一般由专业但相对昂贵的硬件, 如数字信号处理器或者现场可编程门阵列 (FPGA) 来完成。而 ARM Cortex-M4 处理器使得利用显著低廉且简单的微控制器进行实时音频处理 (至少是以教学为目的) 成为可能。

ARM Cortex-M4 是一款 32 位微控制器。本质上, 它是在 ARM Cortex-M3 的基础上增加了 DSP 和单指令多数据 (SIMD) 指令集, 以及一个 (可选的) 单精度浮点单元 (FPU)。尽管其计算能力远不及某些单精度浮点数字信号处理器 (如德州仪器的 C674x), 但已足够胜任实时音频信号的 FIR 和 IIR 滤波以及快速傅里叶变换等 DSP 算法的实现。

许多半导体制造商已经开发出了多款基于 ARM Cortex-M4 处理器的微控制器, 集成了专用的外围接口和其他 IP 模块。这些半导体制造商还为他们的 ARM Cortex-M4 微控制器制造非常廉价的评估板。在这些平台上实现实时音频例程, 而不是利用传统的 DSP 开发套件, 可以使 DSP 实践教学的硬件成本下降一个数量级。学生终于可以首次拥有属于自己的硬件平台。该平台既可完成通用微控制器/微处理器的编程和连接操作, 也可用于实时 DSP 的实现。

### 1.1.1 音频接口

在为本书编写例程期间, 还买不到集成有高质量音频输入/输出接口的廉价 ARM Cortex-M4 开发板。STMicroelectronics STM32F407 Discovery 板配有一个高质量的音频数模转换器 (DAC), 但没有相应的模数转换器 (ADC)。许多 ARM Cortex-M4 设备, 包括 STMicroelectronics STM32F407 和德州仪器 TM4C123 都配有多路测试级的 ADC。但是, 如果没有附加外部电路, 它们都不适用于本书讨论的各种应用。

本书的例子需要 (在廉价的 ARM Cortex-M4 开发板上) 附加一个 (廉价的) 音频接口。

与 STMicroelectronics STM32F407 Discovery 板和德州仪器 TM4C123 LaunchPad 相兼容且廉价的音频接口可分别由沃尔夫森 Pi 声卡和 CircuitCo 音频扩展板充任。尽管这两款音频接口的底层接口细节以及精确工作特性和额外功能有些许差异, 不过, 有了它们, 在 ARM Cortex-M4 处理

器实现 DSP 算法时所接收/产生的高质量音频信号都可以方便地进行输入/输出。

本书在随后各章中给出的几乎所有例程都可以在合作网站 <http://www.wiley.com/go/Reay/ARMcortexM4> 处下载，只是 STM32F407 Discovery 和 TM4C123 LaunchPad 的版本略有不同。

而且在多数情形下，例程的介绍会十分详尽，还会给出两种硬件平台之一的程序清单。值得注意的是在第 2 章，两种硬件平台的底层 I/O 机制（实现细节略有差异）都会被详细介绍，并配有少量利用各自处理器/音频接口特性的例程。

本书并没有详细介绍 ARM Cortex-M4 处理器的内部架构或特性。关于此话题以及 DSP 各种相关功能的精彩论述请参见参考文献 [1]。

1.1.2 德州仪器 TM4C123 LaunchPad 和 STM32F407 Discovery 开发套件

本书所用德州仪器和 STMicroelectronics ARM 的 Cortex-M4 处理器开发板分别如图 1.1 和图 1.2 所示。本书给出的例程默认使用 Keil MDK-ARM 开发环境，该开发环境与上述两种开发套件都兼容。另一种可选的开发环境是德州仪器的 Code Composer Studio，同样适用于 TM4C123 LaunchPad，且例程已经过测试。与 Code Composer Studio 6 相兼容的各个版本的例程都可以在合作网站 <http://www.wiley.com/go/Reay/ARMcortexM4> 处下载。

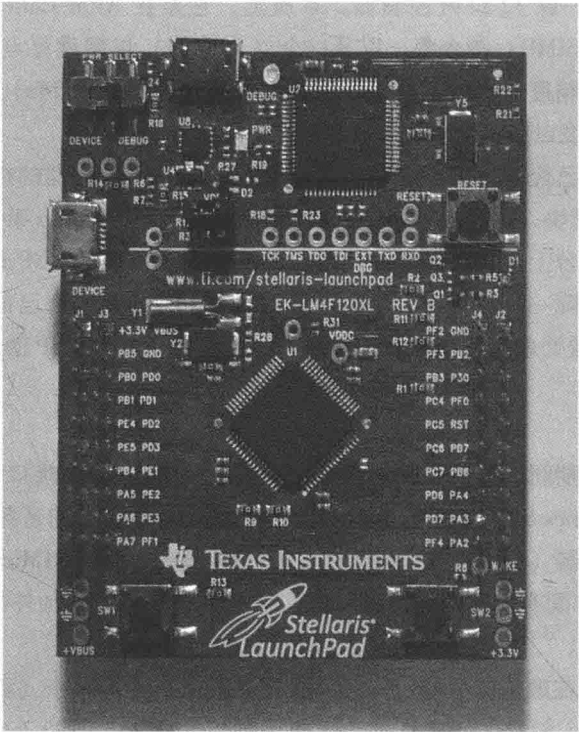


图 1.1 德州仪器 TM4C123 LaunchPad

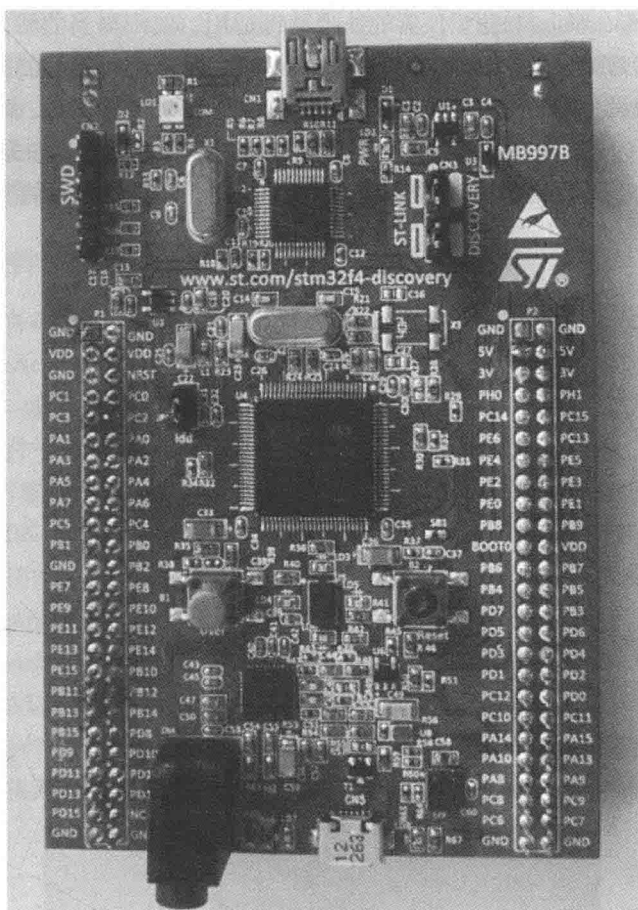


图 1.2 STMicroelectronics STM32F407 Discovery

CircuitCo 音频扩展板（配合 TM4C123 LaunchPad）和沃尔夫森 Pi 声卡（配合 STM32F407 Discovery）分别如图 1.3 和图 1.4 所示。音频扩展板和 LaunchPad 可以直接插接在一起，而沃尔夫森声卡被设计成与 Raspberry Pi 计算机一起使用，所以必须通过一种定制的带状电缆（经销商 Farnell 有售）才能与 Discovery 相连。

本书不会详细介绍指令集，毕竟指令集会随着 MDK-ARM 下个版本的发布而废止。读者可以登录合作网站 <http://www.wiley.com/go/Reay/ARMcortexM4> 上了解入门指南，在开始下一章的学习之前，需要先安装 MDK-ARM，以及与所使用的硬件平台相配套的各种安装包以及 CMSIS DSP 库，从该网站下载例程，并熟悉如何在 MDK-ARM 开启一个项目，为项目添加和删除文件，构建一个项目，启动和终止一个调试进程，以及运行和暂停 ARM Cortex-M4 处理器上的一个程序。

某些例程实现 DSP 算法的方式较为直接，侧重于清晰明了、简单易懂，而非计算效率或者精度。许多情形会用到 ARM 的 CMSIS DSP 库函数，作为 MDK-ARM 开发环境的一部分，这些

库函数对于 STMicroelectronics 和德州仪器的处理器都适用。使用得当的话，这些库函数的计算效率特别高。这对于需要接近 ARM Cortex-M4 所能达到的极限实时运行的某些例程来说用处颇多。本书使用的两款设备的一个区别是，STM32F407 的主频是 168MHz，而 TM4C123 的主频是 84MHz。正如之前所述，所有例程需要在两款设备上实时运行。因此，如果使用的参数值改变，如一个 FIR 滤波器的系数数目增加，那么相较于快速设备，慢速设备可能更容易达到极限。

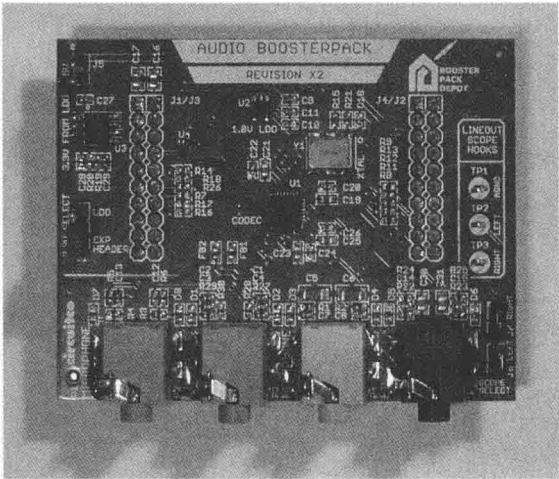


图 1.3 AIC3104 音频扩展板

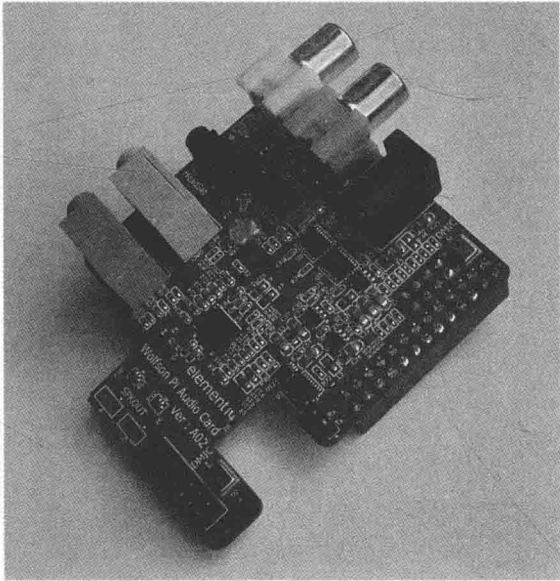


图 1.4 沃尔夫森 Pi 声卡

所有例程都通过免费、代码规模受限的 MDK-ARM 版本的测试。DSP 实践教学的目的以及本书的意图并不是教授 ARM Cortex-M4 的体系架构。使用这款设备的原因在于它能够具备一定功能且廉价的平台。DSP 实践教学的目的以及本书的意图也不是教授如何使用 MDK-ARM。DSP 实践教学的目的，在于，通过在电气工程实验室环境（即具有一些测试设备，如示波器、信号发生器以及连接电缆等的场所）下实时处理音频信号的示例来强化课堂所学的 DSP 理论。

### 1.1.3 硬件和软件工具

要完成本书中的各项实验，需要一些软件和硬件资源。

1) 一款 ARM Cortex-M4 开发板以及扩展音频接口。德州仪器 TM4C123 LaunchPad 搭配 CircuitCo 音频扩展板，或者 STMicroelectronics STM32F407 Discovery 板搭配沃尔夫森 Microelectronics Pi 声卡都是适用的硬件平台。

2) 一台用于运行集成开发环境（IDE）的个人主机，要有一个空闲的 USB 接口。本书所用例程都是在 Keil MDK-ARM 开发环境下编写和测试的。不过，针对 TM4C123 LaunchPad 的例程的各个版本以及与德州仪器 Code Composer Studio IDE 相兼容的工程文件可在合作网站 <http://www.wiley.com/go/Reay/ARMcortexM4> 处下载。

3) TM4C123 LaunchPad 和 STM32F407 Discovery 板用来与主机相连的 USB 线有些许差异。LaunchPad 配备有一根 USB 线，而 STM32F407 Discovery 则没有。

4) 音频扩展板是与 LaunchPad 插接在一起的，而沃尔夫森 Pi 声卡则不是插在 STM32F407 Discovery 板上的。连接两者需要使用一根定制的带状电缆，这种电缆可以在经销商 Farnell 处购买。

5) 一台示波器、一台信号发生器、麦克风、耳麦以及各种连接线，这些差不多都能在电气工程实验室里找到。如果使用的是 STM32F407 Discovery 和沃尔夫森 Pi 声卡，就不需要麦克风了。沃尔夫森 Pi 声卡内置有 MEMS 数字麦克风，且兼容集成有麦克风和耳麦的头戴式耳机（包括苹果和三星的智能手机提供的头戴式耳机）。立体声 3.5mm 插头至 3.5mm 插头线，立体声 3.5mm 插头至（两个）RCA（留声机）插头以及 RCA 至 BNC 的转换器都是必需的。

6) 从合作网站 <http://www.wiley.com/go/Reay/ARMcortexM4> 处下载项目和例程文件。

## 参考文献

- [1] Yiu, J., “The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors”, Third Edition, Elsevier Inc., 2014.

## 模拟输入和输出

### 2.1 简介

一个适于处理音频信号的基础 DSP 系统主要包括数字信号处理器和模拟接口, 如图 2.1 所示。德州仪器 TM4C123 LaunchPad 搭配音频扩展板——使用的是 TM4C123 ARM Cortex-M4 处理器和 TLV320AIC3104 (简称 AIC3104) 信号编解码器<sup>[1]</sup>, 就组成了这样一个系统。STMicro STM32F407 Discovery 搭配沃尔夫森声卡——使用的是 TM4C123 ARM Cortex-M4 处理器和 WM5102 信号编解码器<sup>[2]</sup>, 也能组成这样一个系统。所谓信号编解码器指的是, 将模拟波形编码成数字信号并将数字信号解码成模拟波形。AIC3104 和 WM5102 信号编解码器同时具备模数转换 (ADC) 和数模转换 (DAC) 的功能, 如图 2.1 所示。

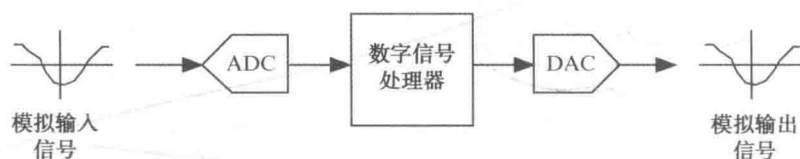


图 2.1 数字信号处理系统基本框图

AIC3104 和 WM5102 信号编解码器用相同的方式与各自相应的处理器 (TM4C123 和 STM32F407) 通信, 都使用 I2C 总线进行控制 (写入信号编解码器的控制寄存器), 使用 I2S 总线进行 (音频) 数据传输。

### 抽样, 重建和混叠

在 DSP 框架中, 信号由离散抽样值序列表示。只要对信号进行抽样, 就可能产生混叠。在本章后面部分会详细探讨混叠的现象。目前完全可以认为混叠是不合要求的, 可以通过图 2.1 所示系统的输入端放置一个抗混叠滤波器并且恰当地设计 DAC 来消除。在低通系统中, 所谓有效的抗混叠滤波器是指滤波器允许低于一半抽样频率的频率成分通过, 极大地衰减或者阻止大于或等于一半抽样频率的频率成分。对于低通系统来说, 适宜的 DAC 本身就是一个低通

滤波器，其特性与之前提及的抗混叠滤波器类似。术语 DAC 通常是指能够将数字硬件表征的离散抽样值转换成连续模拟电信号的电子设备。从单纯的信号处理视角看，DAC 扮演的是重建滤波器的角色。尽管 AIC3104 和 WM5102 信号编解码器在许多方面不尽相同，但它们都包含数字/模拟抗混叠和重建滤波器，因此并不需要额外的滤波器。

## 2.2 用作音频输入和输出的 AIC3104 立体声信号编解码器

音频扩展板使用 AIC3104 信号编解码器作为模拟输入和输出（参见图 2.2 和图 2.3）。AIC3104 是一款基于 Sigma-Delta 技术的低功耗立体声音频编解码器，适用于便携式电池供电的各种应用。它配有若干麦克风和线路级输入，可以配置成单端或者差动连接。在其输出端配有若干差动大功率输出，能驱动耳麦。AIC3104 支持 8kHz ~ 96kHz 区间内若干不同的抽样速率，其模数转换器（ADC）或编码器部分可以将输入模拟信号转换成（16 位、24 位或者 32 位带符号整数）抽样值序列以供 DSP 处理，而数模转换器（DAC）或解码器部分则将 DSP 处理完毕并写入 DAC 的（16 位、24 位或者 32 位带符号整数）抽样值序列，重建成模拟信号输出。

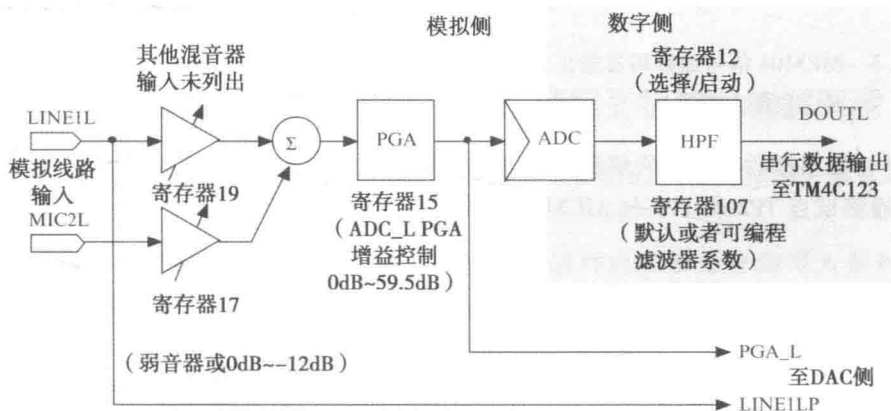


图 2.2 AIC3104 信号编解码器输入侧的简化框图（仅显示本书例程用到的模块和信号路径，仅限左声道）

AIC3104 还拥有若干可编程数字滤波器和增益模块。该编解码器配置了大量控制寄存器，提供如此多的选项已经超出了本书的范围，这里就不全面介绍了。不过，可以通过在例程中向函数 `tm4c123_aic3104_init()` 传递参数来选择抽样频率、输入方式以及 ADC PGA 增益。此外，还可以使用函数 `I2CRegWrite()` 向任意编解码器控制寄存器写入数据。

本章后面部分将介绍通过向 AIC3104 的控制寄存器写入数据来开启某些内部数字滤波器模块的例子。第 4 章将更加详细地探讨 AIC3104 内部可编程数字滤波器的各种特性。

数据通过 I2S 串行接口入/出 AIC3104。通过音频扩展板上的 4 个 3.5mm 插孔来实现 MIC IN（粉色）、LINE IN（蓝色）、LINE OUT（绿色）和 HP OUT（黑色）的连接（如图 2.4 所