

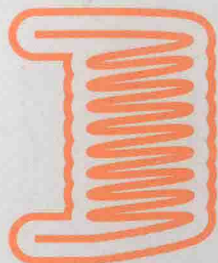
高等学校电子系统设计系列教材
全国大学生电子设计竞赛系列教材

高等教育出版社

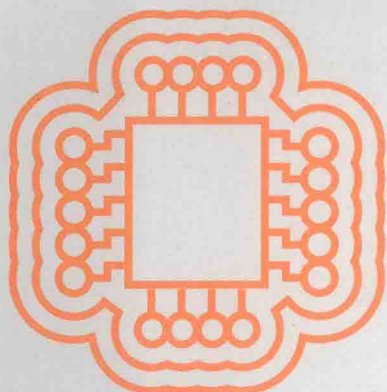
电子系统设计 与 实战

STM32 + FPGA
控制版

薛小铃 编著



2

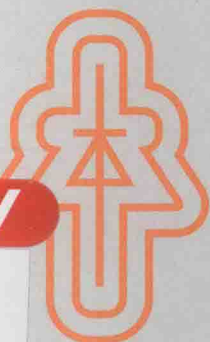
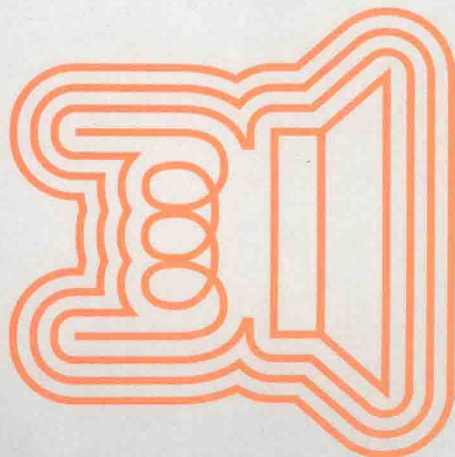
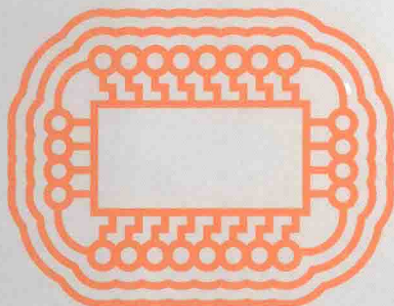


9

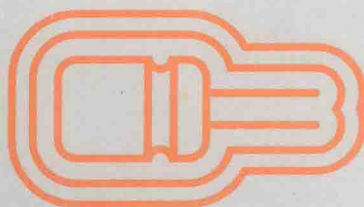
1



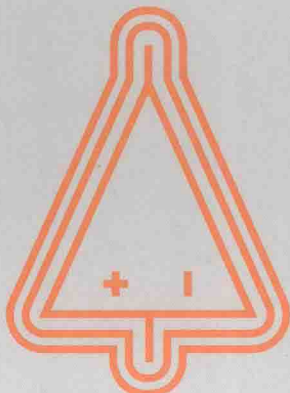
7



5



6



4



Dianzi Xitong Sheji yu Shizhan

—STM32+FPGA Kongzhi Ban

高等学校电子系统设计系列教材
全国大学生电子设计竞赛系列教材

高等教育出版社·北京

电子 设计与 实战

STM32 + FPGA
控制版

薛小铃 编著



内容简介

本书是作者多年项目实践、指导大学生电子设计竞赛、创新实验室实践和课程建设的经验总结。书中内容取材于作者多年积累的手记和项目笔记,突出了数模混合、ARM 和 FPGA 综合的电子系统设计经验与技巧,书中所有模块电路、程序和开发实例都经过了实物的调试和验证。全书内容由导读、模拟系统设计、STM32 应用系统设计、现代数字(FPGA)系统设计和综合系统设计五部分组成,各系统后面安排有相应的设计训练题。全书主要内容包含:运放基础,程控放大器和波形变换电路设计,模拟滤波器快速设计,高速数据转换模块设计;STM32 快速入门,键盘、显示和存储模块设计,STM32F103VCT6 微控制器应用系统设计实例;FPGA 快速入门,FPGA 系统设计基础,现代数字系统设计实例;简易数字频率计,正弦信号发生器,红外光通信装置。

本书可作为电子类、电气类、自动化类等专业的电子系统设计课程和实践教学、电子设计竞赛训练、学生课外科技创新、毕业设计等的教材或参考书,也可作为电子工程师进行电子系统设计的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计与实战:STM32+FPGA 控制版/薛小铃
编著. --北京:高等教育出版社,2015.7

ISBN 978-7-04-042733-2

I. ①电… II. ①薛… III. ①电子系统-系统设计
IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 113584 号

策划编辑 平庆庆 责任编辑 平庆庆 封面设计 钟雨 版式设计 于婕
插图绘制 黄建英 责任校对 刘莉 责任印制 张泽业

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
印刷 北京天时彩色印刷有限公司
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 28.25
字数 700千字
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.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版次 2015年7月第1版
印次 2015年7月第1次印刷
定价 46.50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 42733-00

前 言

2001年，我生平第一次接到横向课题，在产品功能的初步实现方面还算比较顺利，但在可靠性设计方面却遭遇了前所未有的挑战，那时网络资源还比较匮乏，我只好不断地从书本和期刊杂志中寻找解决方法的蛛丝马迹并不断地进行实验验证。由于资料零散，所以我随身携带记事本以备随时用于记录、电路分析、公式推算和实验验证。从那时起我养成了随身携带记事本记录优秀电路与方案、设计经验与技巧的习惯，还会在研发工作中根据需要对某些电路和方案进行实验验证并写下自己的应用体会。2005年，开始指导学生参加全国大学生电子设计竞赛感到身心疲惫，主要是因为每一届指导都要重复同样的工作，即使引入上一届带下一届的“传帮带”方式，但依然需要付出大量的时间和精力。于是萌生了“项目笔记”这个想法，不但减少了重复劳作之苦，还利于技术的总结和进步。回想起来，正是这些手记和项目笔记，见证了自己这些年的艰辛与不懈的追求，也慢慢铺平了自己电子系统的设计之路。

现如今，新技术铺天盖地，新器件层出不穷，主控器件琳琅满目，优秀仿真与调试软件多得让人目不暇接。一方面，好东西诱惑力太强，让人爱不释手；另一方面，苦于精力有限，只能“望洋兴叹”。而信息技术的高速发展为电子工程师的研发提供了极大的便利，可以方便地从网络获取各种设计参考，但是海量的网络资料需要通过大量的甄选和实验才能探索出真理！鉴于现状，我精心挑选了这些年积累的手记和项目笔记中的部分经验、技巧和实例，经过组织和再次整理，展现了电子系统设计、开发和调试过程，期望带给广大读者一股“小清新”，吾愿足矣！

书中包含导读和主体两大部分内容，主体又分为四个部分：共13章，包括近50个典型模块设计实例和12个综合应用开发实例（包括4个全国大学生电子设计竞赛赛题实例详解）。

导读部分通过电子系统构成和设计特点分析，说明了本书电子系统的架构和设计思路，意在强调电子系统的学习和设计方法。

第一部分是模拟系统设计，从第1章至第4章，介绍了运放、程控放大器、波形变换电路、模拟滤波器、高速数据转换器等常用模拟器件或模块的使用基础、器件选型、电路设计、调试结果分析、应用方法和注意事项，可使读者较快地掌握包括信号调理电路、高速A/D和高速D/A在内的模拟系统设计方法和技巧。

第二部分是STM32应用系统设计，从第5章至第7章，首先以8051单片机为基础，说明了STM32微控制器软硬件设计的快速入门方法；然后通过矩阵键盘、字符和彩色液晶以及存储等模块的软硬件设计，进一步说明了STM32常用外设的原理、应用方法和技巧；最后结合第一部分的信号调理电路，列举了4个基于STM32的工程实例，强化STM32应用的同时，自然地过渡到了STM32和模拟系统综合设计过程。分层次推进的学习方式，可使读者轻松高效地掌握设计、制作、调试一个STM32综合应用开发系统的方法和技巧。

第三部分是现代数字 (FPGA) 系统设计, 从第 8 章至第 10 章, 首先从 FPGA 内部资源、电气特性、工程设计流程、开发软件和硬件描述语言等方面, 说明了 FPGA 系统硬软件设计的快速入门方法; 然后通过列举实例说明了 FPGA 系统中常用组合逻辑电路、时序逻辑电路、存储电路和时钟电路的设计方法、技巧以及注意事项; 最后通过 5 个工程实例, 说明了 FPGA 逻辑和算法设计的一般过程及方法、FPGA 和高速模拟器件的混合设计方法及注意事项, 探讨了 FPGA 和 STM32 的数据通信方式。通过工程实例, 层层揭开 FPGA 设计的神秘面纱, 可使读者轻松学会 FPGA 系统设计的一般方法和技巧。

第四部分是综合系统设计, 从第 11 章至第 13 章, 以前三部分的内容为基础, 通过 3 个全国大学生电子设计竞赛赛题实例, 展现了包括模拟系统、STM32 系统和 FPGA 系统在内的电子系统设计与开发全貌。以方案论证→总体设计→原理分析→硬件设计→程序设计→调试分析→总结改进为主线, 并着重描述了设计过程出现的问题和解决方法, 使读者理解并掌握电子系统的设计精髓, 切实提高设计水平。

本书根据作者多年的教学和项目实践、带队参加全国大学生电子设计竞赛与省大学生电子设计竞赛实践、创新实验室实践等经验编写的, 具有良好的实践性和指导性, 适合作为电子系统设计课程和实践教学、电子设计竞赛赛前训练、学生课外科技创新、毕业设计等的教材或参考书, 也适合作为电子工程师从事电子系统设计的参考资料。总体来看, 本书具有以下特色:

(1) 简洁明了的入门引导, 恰到好处的原理分析与提示, 深入浅出的硬软件设计过程, 细致详实的调试过程与总结, 是本书编写的总体思路。

(2) 实例丰富, 且所有实例均源自作者的教学和项目经历, 并均经过实物调试验证。难能可贵的是, 书中使用的 STM32、FPGA 和高速模拟三合一电子系统开发板以及信号调理模块是经过多年使用并不断改良的产物, 书中附录展现了这些实物照片。因此, 书中实例借鉴意义大。

(3) 各部分内容均取材于作者多年的手记和项目笔记, 展现了更多的技术细节和经验技巧。系统和模块总体设计突出实现方法, 原理分析突出设计重点和难点解析, 硬件电路设计突出参数的选取原则和计算方法, 程序设计突出设计思路、流程和算法并给出关键程序, 系统和模块调试侧重说明调试过程中可能出现的问题和解决办法。

(4) 强调工程应用的方法和手段, 遵循“删繁就简”的原则: 利用现代 EDA 工具进行电路的设计和仿真, 避免了复杂的数学公式推导过程; STM32 和 FPGA 学习则在引导基本硬软件入门后, 不再纠缠于全面知识的简单灌输, 而是通过实例展现部分常用资源应用与设计的方法和技巧, 不但起到“抛砖引玉”的作用, 而且很大程度上提高了学习效率。这其实也是在这个新技术铺天盖地的时代下切入新技术工程应用的正确方法。

(5) 各部分内容循序渐进, 衔接自然, 又相互独立, 方便教学过程中根据实际情况进行取舍。

(6) 为了满足不同层次人员的需要和选用, 与本书同步出版了《电子系统设计与实战——C8051F 单片机+FPGA 控制版》一书, 替换 STM32 芯片而使用高级 SoC 单片机——C8051F 单片机作为微控制器, 其他风格和内容保持不变, 增加了读者的选择余地。

西安交通大学的王建校教授和浙江大学的阮秉涛副教授审阅了本书大纲, 并提出了许多宝贵的意见; 常熟理工学院的徐健老师审阅了本书全稿, 提出了详细的修改意见; 国家自然科学基金

基金（51277091）为本书的实物制作提供了资金资助；林志平、方财华、廖传发、骆秋梅、周明、韩朋朋、杨为平、苏斌、黄和平、林冰川、林小清等对书稿质量的完善付出了艰辛的劳动。在此一并致以诚挚的谢意！

由于时间和作者水平的限制，书中难免有疏漏及不妥之处，恳请读者批评指正。欢迎大家登录博客（<http://xxl1925.blog.163.com/edit/>）并留言，和作者一起探讨、交流。

薛小铃

2015. 1. 25

目 录

导 读	1
-----	---

第一部分 模拟系统设计

第 1 章 运放基础	6	2.4 几种常见信号波形变换实例	36
1.1 理想运放的模型与求解方法	6	2.4.1 波形叠加放大电路	36
1.2 主要运放参数与常用运放	7	2.4.2 极性变换电路	37
1.3 基本放大电路	13	2.4.3 低速和高速电压比较电路	39
1.4 运放外部调零电路	16	第 3 章 模拟滤波器快速设计	43
1.5 运放构成的衰减器	18	3.1 模拟滤波器基础	43
1.6 基于运放的放大电路设计 要点	19	3.2 滤波器设计软件使用简介	48
第 2 章 程控放大器和波形变换电路 设计	23	3.3 模拟滤波器快速设计实例	58
2.1 程控放大器的实现方法	23	第 4 章 高速数据转换模块设计	69
2.2 模拟开关和运放组成的程控 放大器设计	29	4.1 A/D 转换器 (ADC) 与 D/A 转换器 (DAC) 基础	69
2.3 基于 AD603 的程控放大器设计 技巧	32	4.2 高速 ADC 模块设计	74
		4.3 高速 DAC 模块设计	77
		模拟系统设计训练	82

第二部分 STM32 应用系统设计

第 5 章 STM32 快速入门	84	5.3.3 基础外设原理和程序举例	103
5.1 STM32F103VCT6 与传统 8051 单片机对比	84	第 6 章 键盘、显示和存储模块设计	124
5.2 STM32F103VCT6 最小系统电路 设计	87	6.1 矩阵键盘模块设计	124
5.3 STM32 程序设计基础	91	6.2 1602 字符型液晶显示模块及 应用	128
5.3.1 开发环境的搭建	92	6.3 2.8 寸 TFT 彩色液晶模块 设计	138
5.3.2 STM32 微控制器和通用 8051 单片机的主要编程差异	102	6.4 基于 W25Q16 芯片的存储模块 设计	155

第 7 章 STM32F103VCT6 微控制器

应用系统设计实例 168

7.1 基于 STM32F103VCT6 的简易
数字频率计设计 168

7.1.1 任务要求 168

7.1.2 频率测量原理 168

7.1.3 系统设计 171

7.1.4 测试结果与分析总结 178

7.2 基于 STM32F103VCT6 的波形
识别系统设计 179

7.2.1 任务要求 179

7.2.2 波形识别原理 180

7.2.3 STM32F103VCT6 之 ADC 181

7.2.4 系统设计 188

7.2.5 测试结果与分析总结 194

7.3 基于 STM32F103VCT6 的程控

放大器设计 195

7.3.1 任务要求 195

7.3.2 程控放大器原理 195

7.3.3 STM32F103VCT6 之 DAC 196

7.3.4 系统设计 200

7.3.5 测试结果与分析总结 203

7.4 基于 STM32F103VCT6 的
简易自动电阻测试仪设计
(2011 国赛 G 题) 204

7.4.1 任务要求 204

7.4.2 方案论证 205

7.4.3 主要原理与理论分析 206

7.4.4 系统设计 208

7.4.5 测试结果与分析总结 214

STM32 应用系统设计训练 216

第三部分 现代数字 (FPGA) 系统设计

第 8 章 FPGA 快速入门 218

8.1 FPGA 简介 218

8.1.1 FPGA 逻辑资源 218

8.1.2 芯片电源选择 219

8.1.3 I/O 口分类与特性 221

8.1.4 FPGA 时钟与配置 223

8.2 FPGA 最小系统电路设计 225

8.2.1 电源电路设计 225

8.2.2 时钟与复位电路设计 227

8.2.3 配置电路设计 228

8.2.4 接口电路设计 229

8.3 Quartus II 9.0 的使用 231

8.3.1 Quartus II 9.0 简介 231

8.3.2 FPGA 工程设计流程 232

8.4 Verilog HDL 编程基础 247

8.4.1 Verilog HDL 语言简介 247

8.4.2 Verilog HDL 基本结构 248

8.4.3 基本语法与数据类型 249

8.4.4 常用运算符 252

8.4.5 赋值语句与块语句 256

8.4.6 结构说明语句 258

8.4.7 条件语句 259

第 9 章 FPGA 系统设计基础 262

9.1 组合电路设计 262

9.1.1 阻塞赋值与非阻塞赋值 262

9.1.2 数值比较器 262

9.1.3 多路选择器 264

9.1.4 锁存器 268

9.1.5 编码器与译码器 269

9.2 时序电路设计 272

9.2.1 数据寄存器 273

9.2.2 计数器与分频器 274

9.2.3 移位寄存器 278

9.2.4 复位电路 279

9.2.5 边沿脉冲发生器 280

9.3 存储电路设计 281

9.3.1 先进先出存储器 FIFO 281

9.3.2 只读存储器 ROM 287

9.3.3 随机存储器 RAM	292	系统设计	325
9.4 时钟电路设计	296	10.3.1 任务要求	325
9.4.1 锁相环倍频	296	10.3.2 高速 ADC 模数关系与工作 时序	325
9.4.2 计数分频	302	10.3.3 系统设计与仿真	327
第 10 章 现代数字系统设计实例	305	10.4 FPGA 与微控制器的 SPI 通信 模块设计	329
10.1 基于 FPGA 的等精度测频 模块设计	305	10.4.1 FPGA 与微控制器通信的几种 常用方式	329
10.1.1 任务要求	305	10.4.2 SPI 通信模块的设计与 仿真	330
10.1.2 等精度测频原理	305	10.5 基于 FPGA 的曼彻斯特编码器 设计	337
10.1.3 设计与仿真	307	10.5.1 任务要求	337
10.1.4 模块接口与注意事项	314	10.5.2 曼彻斯特编码原理	337
10.2 基于 FPGA 的 DDS 模块 设计	315	10.5.3 设计与仿真	338
10.2.1 任务要求	315	10.5.4 模块接口与注意事项	343
10.2.2 DDS 工作原理与模块结构	315	FPGA 系统设计训练	345
10.2.3 DDS 模块设计	319		
10.2.4 DDS 模块测试与仿真	320		
10.3 基于 FPGA 的高速数据采集			

第四部分 综合系统设计

第 11 章 简易数字频率计 (1997 国赛 B 题)	348	控制模块硬件设计	353
11.1 功能要求	348	11.5 系统程序设计	353
11.2 方案论证与系统总体设计	349	11.5.1 FPGA 程序设计	353
11.2.1 方案论证	349	11.5.2 STM32F103VCT6 微控制器 程序设计	362
11.2.2 系统总体设计	351	11.6 系统调试与误差分析	368
11.3 主要原理与理论分析	351	11.7 方案总结与改进	370
11.3.1 直接测频法和直接测周法 原理	351	第 12 章 正弦信号发生器 (2005 国赛 A 题)	373
11.3.2 等精度测频法原理	351	12.1 功能要求	373
11.3.3 脉宽测量与占空比测量 原理	351	12.2 方案论证与系统总体设计	374
11.4 系统硬件电路设计	352	12.2.1 方案论证	374
11.4.1 整形电路设计	352	12.2.2 系统总体设计	375
11.4.2 FPGA 测量模块硬件电路 设计	352	12.3 主要原理与理论分析	376
11.4.3 STM32F103VCT6 微控制器		12.3.1 奈奎斯特定理	376
		12.3.2 DDS 技术	376
		12.3.3 正弦信号	380

12.3.4 调制信号	380	13.3 主要原理与理论分析	409
12.4 系统硬件电路设计	384	13.3.1 模拟信道与数字信道	409
12.4.1 FPGA 最小系统及 DAC 输出 电路设计	384	13.3.2 红外信号传输方式	410
12.4.2 微控制器最小系统及外扩 电路设计	384	13.3.3 红外光发射的距离与功率的 关系	411
12.4.3 无源低通滤波及放大电路 设计	385	13.3.4 红外信道编码	411
12.5 系统程序设计	386	13.4 系统硬件电路设计	412
12.5.1 FPGA 部分	386	13.4.1 红外发射端电路设计	412
12.5.2 MCU 部分	396	13.4.2 红外接收端电路设计	416
12.6 系统调试与误差分析	400	13.4.3 中继转发模块电路设计	418
12.7 方案总结与改进	404	13.5 系统程序设计	419
第 13 章 红外光通信装置 (2013 国赛 F 题)	406	13.5.1 红外发射端程序设计	419
13.1 功能要求	406	13.5.2 红外接收端程序设计	426
13.2 方案论证与系统总体设计	407	13.6 系统调试与误差分析	430
13.2.1 方案论证	407	13.7 总结与方案改进	433
13.2.2 系统总体设计	409	附录 电子系统设计开发板与部分信号 调理模块实物照片	436
		参考文献	441

导 读

1. 电子系统的组成与特点

由若干电子元件或模块搭接而成，能实现实际应用功能的系统称为电子系统。小到电子玩具，大到外空探测器，都包含电子系统。电子系统在人类生活中扮演着重要角色，它可以代替人类完成智能测量和智能控制等活动。电子系统种类繁多，其中以测量系统应用最为广泛，也最具典型。

图 1 是以 MCU/FPGA/ARM/DSP 为核心的电子测量系统的典型组成示意图。从该示意图可知，该电子系统主要由模拟系统、数字系统和主控系统组成。其中，主控系统为系统核心，负责协调控制系统各部分有序工作；模拟系统主要负责模拟信号和数字信号之间的转换、采集和处理等，电源模块为整个系统供电；数字系统主要负责数字信号的输入输出、显示、通信以及存储等。

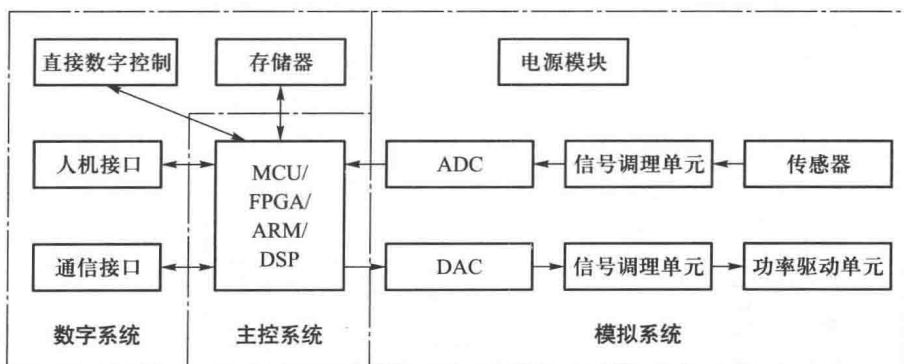


图 1 电子测量系统的典型组成示意图

由图 1 可以看出，电子系统具有如下特点：

(1) 综合性极强。可以是独立的模拟系统，可以是独立的数字系统，也可以是数模混合系统；所涉及的内容几乎囊括了电子专业的基础课和专业课（电路、模电、数电、高频、单片机、FPGA、信号与系统、数字信号处理等课程），知识点多，是各门理论和实践课的综合运用，是电子系统设计类课程的核心，对学习者的专业知识要求较高。目前，国内高校一般根据各自的强项或特色选择合适的模块。因此，对于工程师来说，如此庞大的系统应该遵循“拿过来”就用的原则，而不是什么都去研究的清清楚楚。一块好的开发板和好的学习资料可以大大缩短学习、掌握电子系统设计的速度。

(2) 实践，这是最突出、最显著的特点。没有实践将永远无法领会系统设计要点。如果一直纠结于电子系统中电子元器件和电路的基本原理、基本理论，与实际的工程设计相脱节，那么就无法直接从事电子工程设计工作。动手不够，面对实际工程设计任务时，常常感到无从下手，即使开始了设计工作，也因不清楚工程设计的要领而经常走弯路，导致设计效率低下。

(3) 强调的是“系统”。系统的设计实践，既包含硬件设计，也包含软件设计。软件设计对系统的智能化和性能起到了非常关键的作用，强大健壮的程序可以让同样的系统卖出更高的价格并占领市场。也有一种现象需要引起警惕，很多人选择软件，不是因为喜欢软件设计，而是因为硬件设计太难。而事实上，一个硬件系统也离不开软件，需要通过程序设计来验证硬件设计效果，这个工作也通常是硬件工程师要完成的工作。在这场“硬件和软件的博弈”中，你会是最后的赢家吗？

(4) 系统大脑核心选择面广，有单片机（MCU）、FPGA、ARM 和 DSP 等，应该说它们各有优点，价格和性能也不一样，学习和开发难度也不一样。实际应用应根据系统具体要求选择，而“大刀砍小树”或者“小刀砍大树”都不可取，适合自己的才是最好的。没有一个工程师可以将所有的处理器都应用地游刃有余。比如某测量仪器，需要使用 FPGA 进行设计，对于一个不懂或不熟悉 FPGA 的 SoPC 技术工程师来说，是选择 SoPC 技术还是选择“FPGA（进行逻辑和算法设计）+微控制器（进行控制和数据处理设计）”模式开发，答案不言而喻。很多人学习控制核心的时候喜欢把所有内核及其涉及的外设都练习一遍，但等到实际使用时却发现还是无法灵活应用。事实上，对一个控制核心，如果没有花费较多的时间并结合工程实践，则往往不能深刻领会，从而导致无法灵活应用。因此，最初应该更关注其内核和某些常用外设的学习，等到工程实践再来领会使用，既保证了学习效率，也有利于工程能力的提高。

(5) 电子系统开发涉及了各种各样的开发工具与编程语言（如图 2 所示）。善于应用现代仿真和开发工具，犹如手握一把“利刃”，往往可以达到事半功倍的效果。有些学习者在开发之前喜欢把每个软件的功能都操作一遍，在具体应用时却不懂得用。其实，正确的方法应该是知道如何入门即可，剩下的功能可以在具体实践中一个个消化。后者要比前者深刻的多，还能提高学习设计效率。切记，工程师永远不要想“一口吞个大胖子”。

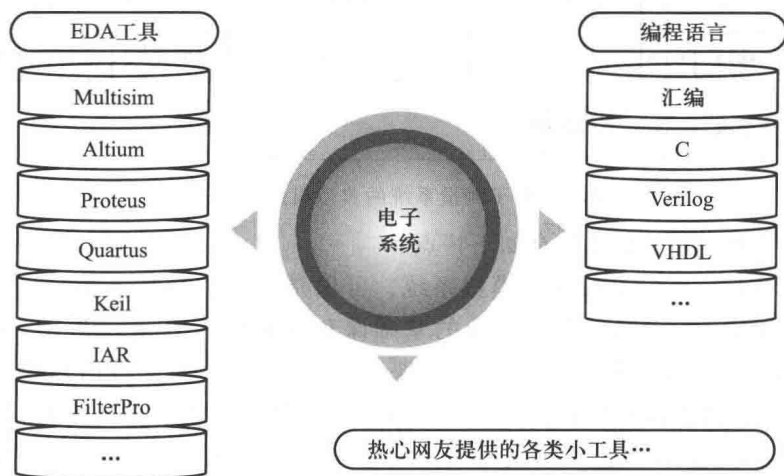


图 2 各种各样的开发工具与编程语言

2. 本书电子系统的架构和设计思路

本书的电子系统主要由电源模块、STM32F103VCT6 应用系统、FPGA 系统、高速 ADC/DAC/比较器模块以及信号调理模块等组成，其主要组成框图如图 3 所示。

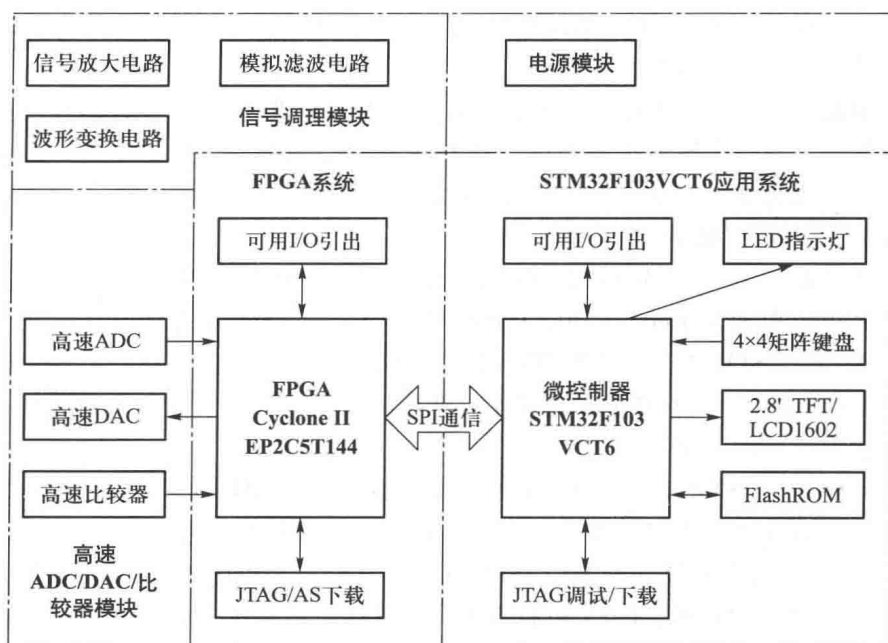


图3 本书电子系统的主要组成框图

整个系统采用“微控制器+FPGA”为核心控制，加上独立功能模块的系统架构。电源模块包括系统供电、电源滤波、模拟数字共地处理等部分，不仅为各系统或模块供电，良好的电源滤波共地处理技术更为系统高性能、高可靠性工作提供强有力的保证。整个系统人机通信，数据处理、显示、存储，低速模拟信号处理等功能由 STM32 微控制器应用系统提供，利用 STM32 微控制器强大的控制能力和丰富的内外设资源，可以完成很多功能复杂的系统设计。FPGA 系统主要完成复杂逻辑和算法设计、高速信号采集和处理，以及与微控制器通信的功能，利用 FPGA 灵活多变的特点，可以完美构建复杂高速的数字系统设计。高速 ADC/DAC/比较器模块主要负责完成高速信号的调理、采集、输出等功能，优良的高速模拟系统设计，保证了整个系统对高速信号也可以游刃有余。信号调理模块主要包括信号固定放大、程控放大、信号滤波、波形变换等部分，“模拟无处不在”，“模拟设计也是一门艺术”，这部分展现模拟设计的主要问题、方法和技巧，犹如“庖丁解牛”，让模拟设计不再令人畏惧。在图 3 的基础上添加合适的器件、电路或模块就可以构建更为复杂的系统，比如添加红外收发头和音频功放就可以构成红外光通信装置这样复杂的系统。

书中，用通俗形象的语言描述晦涩难懂的技术原理，用言简意赅的文字描述开发工具的使用；案例不是简单的堆砌，而是全部来自项目实践和手记，但又遵循循序渐进、由浅入深的原则精心挑选。遵从知识导入到原理分析，再到详细的设计过程，电子系统设计那种犹如“空中楼阁，可望而不可即”的迷离将荡然无存。

3. 控制器件选型

(1) 微控制器选型

可能很多人学习完电子技术、单片机和 FPGA（甚至 FPGA 还未学习）后就开始电子系统

设计,这时候应该把主要精力放在系统构建上,而不是纠结于微控制器的选择,本书选用 STM32 微控制器作为整个系统的控制核心。

随着单片机技术的发展,单片机技术已经由 8 位逐步升级到了 32 位,芯片内部资源也由单一的外设发展到了适合多种需求的外设。32 位单片机以主频高,性价比高,调试方便,技术支持好等优点,成为越来越多工程技术人员的首选。典型的代表就是 ST(意法半导体)公司生产的 STM32 系列微控制器。

STM32 系列芯片是由 ST 出品的 32 位基于 ARM Cortex-Mx 核的 RISC 内核的微控制器,其种类繁多,产品中主要使用 Cortex-M0、Cortex-M3、Cortex-M4 等内核,目前推向市场的有 STM32F1、STM32F2、STM32F3、STM32F4 等系列的微控制器。主频也由 72 MHz 上升到 120 MHz 甚至是 168 MHz。其高性能、低成本、低功耗、应用广泛、兼容性强等优点让其迅速在单片机市场占有重要的一席。

STM32F103VCT6 是 STM32 中一款增强型的微控制器,它使用了 Cortex-M3 32 位的 RISC 内核,最高工作主频可以达到 72 MHz。片内集成了数据采集和控制系统中常用的模拟外设(如 A/D、D/A 等)、数字外设(如 I²C、SPI、CAN、USB、SDIO、USART 等接口,多功能定时器 PCA、静态存储器控制器、DMA 控制器等)及其他功能部件(如 CRC 循环冗余校验等);内置 FLASH 程序存储器、内部 RAM;内置的嵌套矢量中断控制器(NVIC)支持 16 级的中断嵌套;支持串行总线调试(SWD)和 JTAG 接口,这两种接口可以提供程序在线调试的可能,提高开发效率,同时还可以通过 USART1 下载程序。

在技术支持方面,ST 公司在中国市场的推广力度很大,不仅提供了芯片的标准固件库及应用实例,而且很多技术文档都有中英文版本,比如芯片技术手册、参考手册、库手册、应用笔记等;同时还开放很多论坛,给用户提供一个技术交流的平台。

(2) FPGA 选型

由于本书电子系统中定位 FPGA 主要完成数字系统的逻辑和算法设计,所以 FPGA 选择 Altera 公司的 CycloneII EP2C5T144。EP2C5T144 拥有大约 5 000 个逻辑资源(LE)和 70 个独立的 I/O 端口(除去时钟、电源、地、JTAG 的 I/O 端口)等,这样的资源在大多数电子应用系统中是够用的。

事实上,现在很多公司还在使用资源更少的 CPLD 芯片,这是因为有些项目不需要使用资源那么多的 FPGA 芯片,而 CPLD 不需要配置芯片,性价比更高。

鉴于现在官方的数据手册内容都非常细致详实,因此本书不会再去罗列 STM32F103VCT6 微控制器和 EP2C5T144 FPGA 芯片各数据手册的内容,而是对具体应用内容进行归纳总结。建议读者朋友从相应网站下载数据手册,配合本书内容学习。

第一部分

模拟系统设计

第1章 运放基础

1.1 理想运放的模型与求解方法

在分析集成运放的各种应用电路时，常常将其中的基础运算放大器看成理想运算放大器，将集成运放的几个主要指标理想化后再分析，从而简化电路的分析过程。

1. 理想运放的模型

理想运放模型如图 1.1.1 所示，运放理想化后认为其满足：

- (1) 输入电阻 $R_i = \infty$ ；
- (2) 输出电阻 $R_o = 0$ ；
- (3) 电压放大倍数 $K = \infty$ ；

由理想化的条件，可以得出理想运放的两条基本规则：

(1) 由于 $K = \infty$ ，而输出电压 u_o 为有限值，所以 $u_i = u_o / K \approx 0$ ，即两个输入端可近似为短路（虚短）；在同相输入端接地时，反相输入端与地几乎同电位（虚地）。

(2) 由于 $R_i = \infty$ ，所以输入电流接近于零。此时，输入端可以近似看成断路（虚断）。

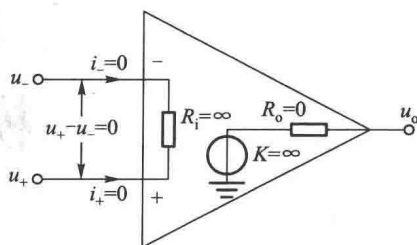


图 1.1.1 理想运放模型

2. 运放的计算方法

理想运放的两条基本规则是分析含有理想运放电路的依据。合理应用这两条规则，并与节点的基尔霍夫电流定律（KCL）、节点电压法和叠加定理结合起来加以运用，是分析理想运放电路的有效方法。

【例 1.1.1】如图 1.1.2 电路所示，求其输出电压 u_o 。

(1) 法一：根据节点列写 KCL 方程。

由虚断的概念，有 $i_+ = i_- = 0$ ，则 $i_1 = i_2$ ， $i_3 = i_4$ ，所以

$$\begin{cases} \frac{u_1 - u_-}{R_1} = \frac{u_- - u_o}{R_2} \\ \frac{u_2 - u_+}{R_1} = \frac{u_+ - 0}{R_2} \end{cases} \quad (1.1.1)$$

由虚短的概念，有 $u_+ = u_-$ ，则

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1) \quad (1.1.2)$$

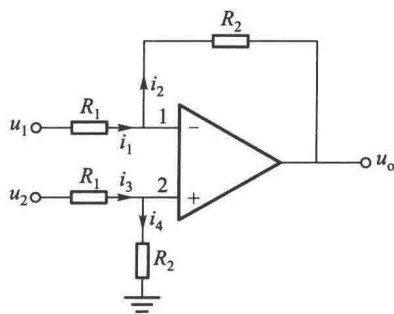


图 1.1.2 例 1.1.1 图

(2) 法二：节点电压法。

对节点 1 和节点 2 列出节点电压方程，得

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) u_- = \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_o}{R_2} \\ \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) u_+ = \frac{u_2}{R_1} \end{cases} \quad (1.1.3)$$

由虚短的概念，有 $u_+ = u_-$ ，同样得到式 (1.1.2) 的结果。

注意：在法一和法二中，由于运放输出电流未知，所以不可列写运放输出端的 KCL 方程或节点电压方程；在法二中，运放输出 u_o 应当成独立电压源看待。

(3) 法三：叠加定理。

当有多路信号输入时，选择叠加定理进行求解可简化分析和运算过程。输出信号 u_o 的大小可看成由 u_1 和 u_2 单独作用所得输出信号的叠加。

当 u_1 单独作用时， u_2 端接地，运放输出为

$$u_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} u_1 \quad (1.1.4)$$

当 u_2 单独作用时， u_1 端接地，运放输出为

$$u_{o2} = \frac{R_2}{R_1} u_2 \quad (1.1.5)$$

所以，运放最终输出为

$$u_o = u_{o1} + u_{o2} = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1) \quad (1.1.6)$$

1.2 主要运放参数与常用运放

1. 主要运放参数

集成运放的基本参数很多，包括静态技术指标（直流参数）和动态技术指标（交流参数）。例如，输入失调电压、输入失调电流、输入偏置电流、输入失调电压温漂、最大差模输入电压、最大共模输入电压、供电电源等就属于静态技术指标；而开环差模电压放大倍数、差模输入电阻、共模抑制比、-3 dB 带宽、单位增益带宽、转换速率等就属于动态技术指标。

对电路而言，哪些特性最重要，要取决于完成何种任务。在评估运放或其他任何器件时，务必了解它们的电气特性、测试条件以及具体的测试数据表格，这样才有利于器件选型、电路设计与应用。

运放参数中，输入失调电流 I_{OS} 、输入失调电压 V_{OS} 、单位增益带宽 GBW 和转换速率 SR 是比较难以理解的概念，对电路设计影响也最大，需要充分理解和掌握。

(1) 输入失调电流和输入失调电压

理想状态下，并无电流进入运放的输入端。而实际电路中，始终存在两个输入偏置电流，即 I_{B+} 和 I_{B-} ，如图 1.2.1 所示。当两个输入偏置电流不均衡时，便产生输入失调电流。“输入