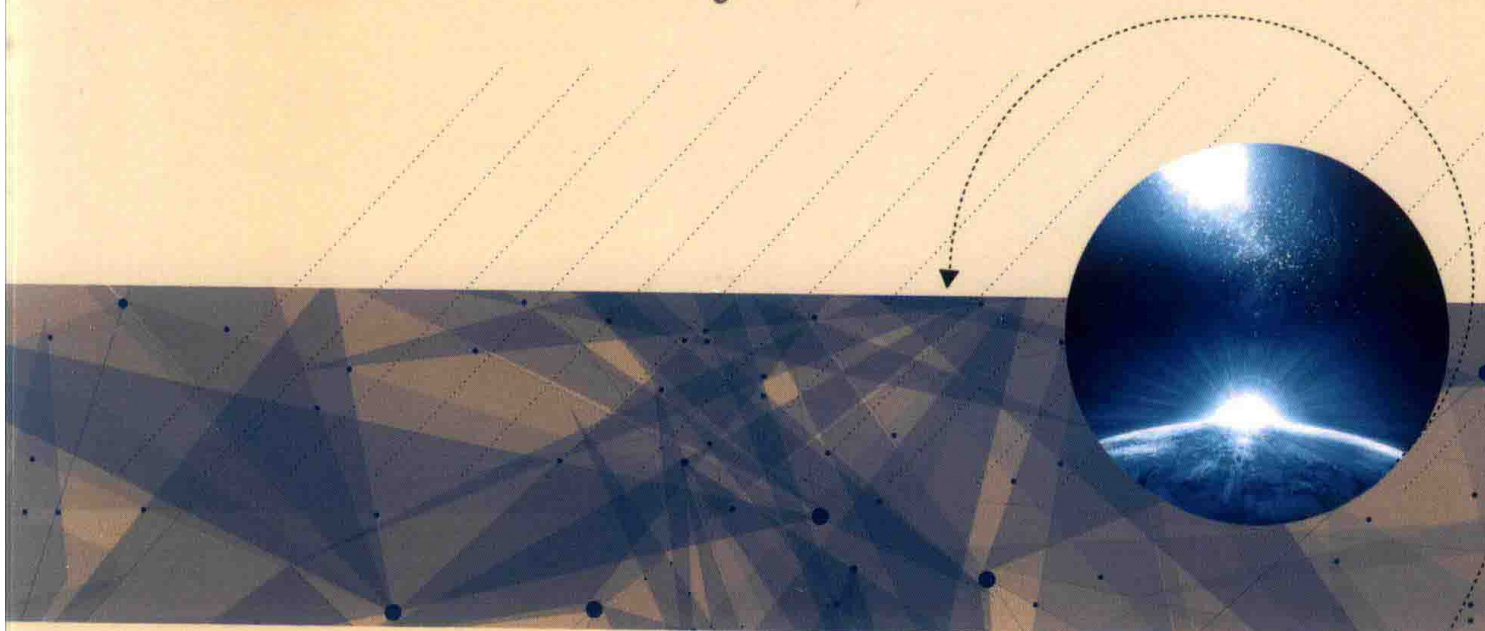


“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电子系统设计

贾立新 编

Design of Electronic Systems



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电子系统设计

贾立新 编



机械工业出版社

本书由模拟电子系统设计、单片机电子系统设计、数字电子系统设计和综合电子系统设计4部分组成。内容包括电子系统设计导论、放大电路设计、滤波器设计、模拟电子系统设计实例、单片机电子系统设计、FPGA应用基础、数字系统设计实例、RLC 测量仪、脉冲信号参数测量仪、红外通信系统。大部分章节除了介绍典型的设计案例外,还设置了思考题和设计训练题,帮助读者加深对教材内容的理解和提高设计能力。

本书内容编排循序渐进,从器件到单元电路,从单元电路再到电子系统;从模拟电子系统到模数结合的单片机电子系统,从单片机电子系统再到单片机和FPGA相结合的综合电子系统,各部分内容由浅入深且融会贯通。

本书可作为高等院校电子电气类专业有关电子系统设计、电子技术综合提高型实验、大学生电子设计竞赛赛前训练等实践类课程的教材,也可作为具备模拟电子技术、数字电子技术、单片机等基础知识的读者学习电子系统设计方法的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计/贾立新编. —北京:机械工业出版社, 2020. 12

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-67176-3

I. ①电… II. ①贾… III. ①电子系统-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TN02

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第259659号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:路乙达 责任编辑:路乙达 韩静

责任校对:王延 封面设计:严娅萍

责任印制:常天培

北京虎彩文化传播有限公司印刷

2021年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·409千字

标准书号:ISBN 978-7-111-67176-3

定价:45.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

随着工程教育专业论证和一流课程建设的开展,对学生能力培养提出了新的要求和新的理念。越来越多的电子信息类专业开设了以提高学生解决复杂工程问题能力为主要目标的电子系统设计课程。教学内容强调传授具备“先进性”和“挑战度”的知识,教学模式强调知识、能力、素质有机融合,教学设计突破习惯性认知模式,以培养学生深度分析、大胆质疑、勇于创新的能力和精

编写本书的目的就是为具备模拟电子技术、数字电子技术、单片机等基础知识的学生开设电子系统设计课程提供一本合适的教材,同时也为参加电子设计竞赛等课外科技创新活动的学生提供一本合适的参考书。

全书内容由以下几部分组成:

第1章为本书的导论。介绍电子系统的有关基础知识,让读者对全书内容有总体了解。

第2~4章为模拟电子系统设计。先介绍放大电路和滤波器的设计理论,然后列举了正弦信号产生电路、测量放大器、D型功放3个典型模拟电子系统设计实例。这3个模拟电子系统均可由学生在实验室自行制作完成。这部分内容既可以作为模拟电子系统设计的实验内容,也可以作为大学生电子设计竞赛封闭式测评的培训内容。

第5章为单片机电子系统设计。内容包括单片机最小系统设计、I/O扩展技术、并行总线扩展技术、串行总线扩展技术。与传统的单片机教材不同,本书在介绍单片机电子系统设计时,不涉及单片机的具体型号,不介绍单片机原理和指令系统,只使用单片机最基本的一些资源,如I/O引脚、定时器、中断系统等,目的是让本书能够与不同系列的单片机教材很好地衔接。通过本章内容的介绍,将电子系统设计从纯模拟电子系统设计提升到数模结合、软硬结合的单片机电子系统设计。

第6、7章为基于FPGA的数字系统设计。内容包括FPGA的原理、Verilog HDL语言基础、FPGA最小系统设计、典型数字系统设计实例。在选取数字系统设计训练题时,注重与本书前后内容的关联。设计实例之一的数字频率计与第9章的等精度频率计相关联,读者可以比较两种频率计设计方案的优缺点。设计实例之二的4×4键盘编码器与第5章的单片机最小系统相关联,该设计可以直接应用于单片机最小系统设计中。设计实例之三的简易SPI接口与第5章介绍的SPI总线扩展相关联,前者用硬件实现SPI总线时序,后者用软件来实现SPI总线时序,读者可以比较两种方法的优缺点。设计实例之四的单片机与FPGA的接口设计则与第8~10章的综合电子系统相关联。通过这两章内容的介绍,将电子系统设计从单片机电子系统设计提升到综合电子系统设计。

第8~10章为基于单片机+FPGA+模拟电路的综合电子系统设计。这部分内容介绍了RLC测量仪、脉冲信号参数测量仪和红外通信系统3个综合电子系统设计实例。每个设计实例都具有以下几方面的特征:①需要采用新的理论或技术,如用于信号产生的DDS技术,用于RLC测量的实部虚部分离技术,用于模拟量和数字量同时传输的FSK调制解调技术等;②需要综合多门课程知识,如需要应用电路原理、模拟电子技术、数字电子技术、单片机、

C 语言程序设计等多门课程知识；③需要使用 EDA 工具，如 Quartus II、Multisim、Altium Designer 等；④需要具备较强的工程实践能力，如仪器使用、焊接调试等；⑤每个子系统或单元电路有多种方案可供选择。

如果从电子系统层次来划分，本书的内容可分为器件、单元电路、电子系统 3 个层次：

第一个层次是器件。本书除了在第 4 章介绍了常用的分立元件，还在各章介绍了众多性能优异的模拟、数字、数模混合集成电路，包括单片机、FPGA、CPLD、高速 A/D 转换器、高速 D/A 转换器、专用 DDS 芯片、步进电动机驱动芯片、集成运放、电压比较器、可编程增益放大器、模拟开关、模拟乘法器等。

第二个层次是单元电路。包括放大电路、滤波电路、串联稳压电路、波形变换电路、PWM 信号产生电路、基于 FPGA 的数字电路（包括 PLL、ROM、FIFO）、单片机和 FPGA 之间的接口电路、简易 SPI 接口、4×4 键盘编码器等。

第三个层次是电子系统。本书介绍了 D 型功放、语音存储与回放系统、RLC 测量仪、脉冲信号参数测量仪（由等精度频率计和高速数据采集系统合二为一）、红外通信系统等。

本书具有以下特色：

1. 淡化单片机的内容。单片机虽然是电子系统中的核心器件，但本书只把单片机视作一片普通的集成芯片，就像一片通用运放或者一片 74LS 系列的数字集成电路，只是更加复杂而已。本书的电子系统只用到了单片机最基本的功能，就如同使用手机时只用到通话和发短信的功能。

2. 采用模块化的电子系统设计方法。该方法将电子系统分成 3~6 个模块，每个模块由 1~3 个单元电路组成，每个单元电路通常由一片集成芯片实现。模块化设计方法提高了电子系统设计的抽象层次，降低了电子系统的设计难度，也便于采用团队协作的方式由多名学生完成一个电子系统的设计。

3. 丰富的设计案例。本书采用了编者 20 多年指导电子设计竞赛和电子系统设计课程教学所积累的设计案例。这些设计案例的硬件电路原理图、程序代码均经过调试验证，同时根据学生在实践过程中出现的问题不断持续改进。

4. 每一章后面均安排思考题或设计训练题。思考题帮助学生理解书本内容，也可以作为教师教学过程中出卷的参考。设计训练题与每一章内容紧密结合，也适合学生实践训练。

5. 本书是一本实践类教材。为了便于课后实践，编者开发了模块化的电子系统设计实验平台，书中所有的设计实例和设计训练题都可以在实验平台上实现。书中也提供了许多核心模块的原理图和实物照片，供读者参考。

为方便读者对照阅读和理解，本书用 EDA 软件所生成的原理图和仿真图中的符号均保留与软件中一致的形式，不再按照标准对其进行修改。

本书是浙江工业大学 2019 年立项的重点建设教材，也是浙江工业大学与杭州英联科技有限公司实施教育部产学研合作协同育人项目的成果之一。

本书由贾立新负责编写。由于编者学识有限，书中难免有错误与不妥之处，望广大读者批评指正。

目 录

前言	
第 1 章 电子系统设计导论 1	
1.1 什么是电子系统	1
1.2 电子系统的设计方法	4
1.3 电子系统的设计步骤	6
1.4 本书的内容体系	8
思考题	10
第 2 章 放大电路设计	11
2.1 运算放大器的模型	11
2.2 用集成运放构成的基本放大电路	14
2.3 集成运放的参数	19
2.4 单电源放大电路设计	26
思考题	28
第 3 章 滤波器设计	29
3.1 概述	29
3.2 有源滤波器设计	32
3.2.1 二阶 MFB 低通滤波器设计	34
3.2.2 二阶 MFB 高通滤波器设计	37
3.2.3 二阶 MFB 带通滤波器设计	38
3.2.4 二阶 MFB 带阻滤波器设计	39
3.2.5 有源滤波器的级联	40
3.3 无源滤波器设计	44
思考题	46
第 4 章 模拟电子系统设计实例	47
4.1 常用电子元器件	47
4.2 正弦信号产生电路设计	52
4.3 测量放大器设计	55
4.4 D 型功放的设计	59
思考题	69
设计训练题	69
第 5 章 单片机电子系统设计	72
5.1 概述	72
5.2 单片机最小系统设计	75
5.3 I/O 扩展技术	78
5.3.1 步进电动机调速系统设计	78
5.3.2 可编程增益放大器设计	83
5.4 并行总线扩展技术	87
5.4.1 并行总线时序及软件模拟	87
5.4.2 语音存储与回放系统设计	90
5.5 SPI 总线扩展技术	96
5.5.1 SPI 总线及软件模拟	96
5.5.2 数控稳压电源设计	99
5.6 I ² C 总线扩展技术	103
5.6.1 I ² C 总线及软件模拟	103
5.6.2 短路故障点位置测量装置 设计	109
思考题	114
设计训练题	114
第 6 章 FPGA 应用基础	116
6.1 概述	116
6.2 FPGA 的结构和原理	117
6.3 Verilog HDL 语言基础	125
6.3.1 Verilog HDL 模块的基本结构	125
6.3.2 Verilog HDL 语言要素	127
6.3.3 Verilog HDL 行为语句	133
6.4 FPGA 最小系统设计	138
6.4.1 设计方案	138
6.4.2 硬件电路设计	140
6.4.3 硬件电路测试	141
6.4.4 JTAG 间接模式编程配置器件	152
思考题	154
设计训练题	155
第 7 章 数字系统设计实例	156
7.1 4 位数字频率计设计	156
7.2 4×4 键盘编码器设计	162
7.3 简易 SPI 接口设计	170
7.4 单片机和 FPGA 之间的并行接口 设计	175

思考题	177	9.5 FPGA 内部电路设计	216
设计训练题	177	9.5.1 FIFO 数据缓冲电路设计	216
第 8 章 RLC 测量仪	180	9.5.2 频率占空比测量电路设计	223
8.1 设计题目	180	9.5.3 与单片机接口电路设计	224
8.2 设计方案	180	9.6 单片机软件设计	226
8.3 理论分析与计算	182	9.7 系统调试	230
8.4 正交信号发生器设计	183	思考题	233
8.4.1 直接数字频率合成的原理	183	设计训练题	233
8.4.2 基于 FPGA 的正交信号发生器 设计	184	第 10 章 红外通信系统	235
8.4.3 基于 AD9854 的正交信号发生器 设计	191	10.1 设计题目	235
8.5 实部虚部分离电路设计	197	10.2 设计方案	235
8.6 单片机软件设计	200	10.3 异步串行通信接口	236
8.7 系统调试	203	10.4 数字温度传感器 DS18B20 原理	240
思考题	205	10.4.1 单总线与 DS18B20 简介	240
设计训练题	205	10.4.2 DS18B20 的操作命令	243
第 9 章 脉冲信号参数测量仪	207	10.4.3 DS18B20 的操作时序	244
9.1 设计题目	207	10.4.4 DS18B20 程序设计	245
9.2 设计方案	207	10.5 发送端硬件电路设计	247
9.3 等精度测频原理	209	10.6 接收端硬件电路设计	249
9.4 模拟量输入通道设计	211	10.7 单片机软件设计	253
9.4.1 高速 A/D 转换电路设计	211	10.8 系统调试	255
9.4.2 信号调理电路设计	214	思考题	256
		设计训练题	256
		参考文献	258

第1章 电子系统设计导论

1.1 什么是电子系统

电子系统是由若干相互联系、相互制约的电子元器件或部件组成，能够独立完成某种特定电信号处理的完整电子电路。或者说，凡是完成一个特定功能的完整电子装置就可以称为电子系统。例如，数字化语音存储与回放系统就是一个典型的电子系统，其原理框图如图 1.1-1 所示。声音信号经过传声器（MIC，俗称麦克风）转换成电信号。由于传声器输出的电信号非常微弱，并且含有一定的噪声，因此需要经过放大滤波后送入 A/D 转换器。在单片机（Single-Chip Microcontroller Unit, MCU）的控制下，A/D 转换器将模拟的声音信号转换成数字化的声音信号，然后存储在半导体存储器中，这个过程称为录音。MCU 从半导体存储器中取出数字化的语音信号，通过 D/A 转换恢复成模拟的语音信号，经过滤波放大后驱动扬声器（俗称喇叭），这个过程称为放音。

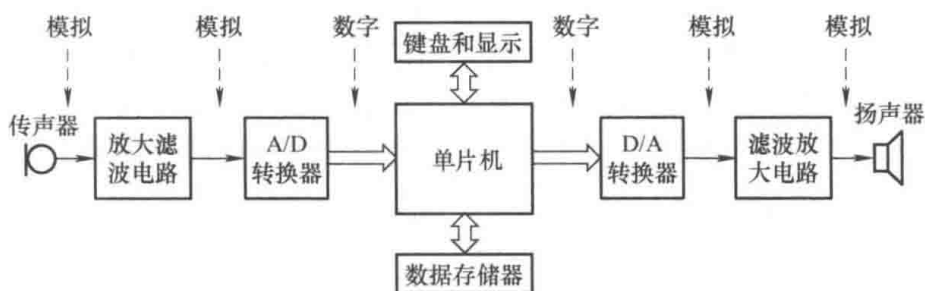


图 1.1-1 数字化语音存储与回放系统

电子系统种类繁多，涵盖军事、工业、农业、日常生活各个方面，大到航天飞机的测控系统，小到人们日常生活中的电子手表。根据功能划分，电子系统通常可以分为以下几类：

- 1) 测控系统。例如航天器的飞行轨道控制系统、工业生产控制系统等。
- 2) 测量系统。包括电量及非电量的测量。
- 3) 数据处理系统。例如语音、图像处理系统。
- 4) 通信系统。包括有线通信系统、无线通信系统。
- 5) 家用电器。例如数字电视、扫地机器人、智能家电等。

根据所采用的电子器件划分，电子系统可分为模拟电子系统、数字电子系统、单片机电子系统和综合电子系统。

模拟电子系统：以模拟电子技术为主要技术手段的电子系统称为模拟电子系统。模拟电子系统通常把被处理的物理量（如声音、温度、压力、图像等）通过传感器转换为电信号，然后对其进行放大、滤波、整形、调制、检波，以达到信号处理的目的。如本书第 4 章将要介绍的 D 型功放、测量放大器等，就属于典型的模拟系统。

数字电子系统：以数字电子技术为主要技术手段的电子系统称为数字电子系统。从实现

的方法来分，数字电子系统可分为3类：一类是采用标准数字集成电路实现的数字系统，所谓标准集成电路是指功能、物理配置固定、用户无法修改的集成电路，如74LS系列、74HC系列集成电路；一类是采用FPGA/CPLD组成的数字系统，FPGA/CPLD允许用户根据自己的要求实现相应的逻辑功能，并且可以多次编程，本书主要介绍采用FPGA/CPLD组成的数字系统；一类是采用定制专用集成电路（ASIC）实现的数字系统，由于FPGA/CPLD内包含大量可编程开关，消耗了芯片面积，限制了运行速度的提高，因此采用ASIC设计的数字系统集成度最高、性能最好。

单片机电子系统：以单片机为核心的电子系统，称为单片机电子系统。除了单片机之外，单片机电子系统通常还包含数字模拟外围电路。为了与综合电子系统相区别，本书介绍的单片机电子系统特指不包含FPGA芯片的电子系统。单片机电子系统的主要功能通过软件实现。

综合电子系统：由单片机、FPGA和模拟电路组成的电子系统称为综合电子系统。在综合电子系统中，系统的功能一般由数字部分实现，而指标则借助模拟电路达到。单片机和FPGA虽同属数字器件，但在综合电子系统中，两者又有不同的分工，分别发挥着各自的优势。

电子系统的发展趋势之一是复杂度越来越高。什么是电子系统的复杂度？这里借用工程教育专业认证标准中对复杂工程问题的定义来说明。根据2015版工程教育专业认证标准的定义，复杂工程问题必须具备下述特征1)~7)的部分或全部：

- 1) 必须运用深入的工程原理，经过分析才可能得到解决。
- 2) 涉及多方面的技术、工程和其他因素，并可能相互有一定冲突。
- 3) 需要通过建立合适的抽象模型才能解决，在建模过程中需要体现出创造性。
- 4) 不是仅靠常用方法就可以完全解决的，需要运用现代工具。
- 5) 问题中涉及的因素可能没有完全包含在专业工程实践的标准和规范中，具有不确定性。
- 6) 问题相关各方利益不完全一致。
- 7) 具有较高的综合性，包含多个相互关联的子问题。

下面以直流电能表的设计为例，说明电子系统复杂度的含义。随着直流电广泛应用于高压直流输电、楼宇自动化、轨道交通、光伏发电以及电动汽车中，对直流电能表的需求急剧增加。直流电能表设计要求高精度、低功耗、低成本、小体积、安全性。其中高精度、安全性与低成本通常是矛盾的。

直流电能表设计中的一些工程问题必须运用深入的工程原理经过分析才能得到解决。直流电能表由硬件和软件两部分组成，其原理框图如图1.1-2所示。硬件电路由单片机和外围电路组成，包括模拟电路、DC/DC电源电路、数字电路等，软件部分采用模块化设计，由应用层、功能模块层、驱动层3部分组成。直流电能表的设计将涉及电路原理、单片机原理、电力电子技术中的开关电源原理、数字信号处理中的 $\Sigma-\Delta$ 调制原理、数字电路中的低功耗原理等。

直流电能表的设计必须运用多种工具才能解决问题，如硬件电路设计需要EDA软件Altium Designer，软件开发需要单片机集成开发软件。直流电能表的校准需要昂贵的标准直流源。

直流电能表的设计具有较高的综合性，包含多个相互关联的子问题。需要综合运用多门课程知识，如电路原理、模拟电子技术、数字电子技术、单片机原理、C 语言程序设计基础、电力电子技术、电子线路 CAD 等。涉及多个关联子问题，如电源需要与主电路隔离，保证安全性；电流电压检测既要确保精度又要降低成本；还有单片机的选型和供货问题，能否保证供货，能否用其他单片机替代。

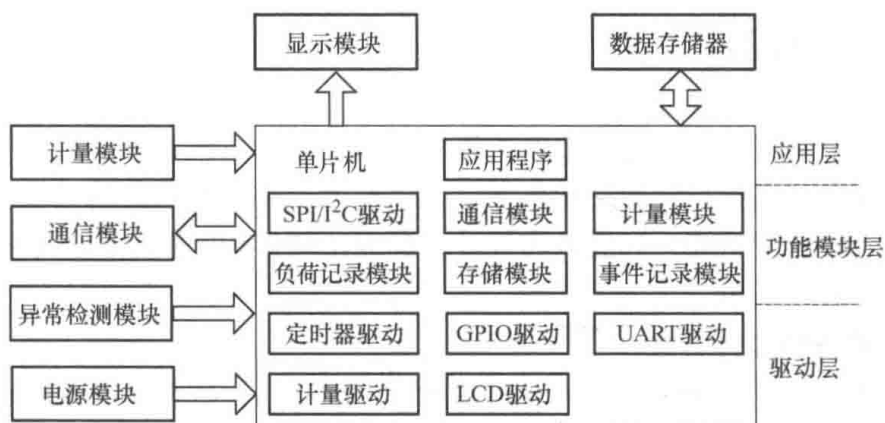


图 1.1-2 直流电能表原理框图

为了管理电子系统的复杂性，通常将电子系统划分为不同的抽象（Abstraction）层次，如图 1.1-3 所示。最底层的抽象层为物理层，即电子的运动。高一级的抽象层为器件，包括模拟和数字集成器件，也包括电阻、电容、电感、晶体管等分立元件。在模拟电路这一层次，主要研究如何采用模拟集成电路来构成放大电路、滤波电路、电源等。在数字电路层次，主要研究基于硬件描述语言和 FPGA/CPLD 设计数字系统。在单片机层次，主要研究如何选择合适的单片机型号，如何进行系统扩展，如何使用单片机的片内和片外资源。进入软件层面后，操作系统负责底层的抽象，应用软件使用操作系统提供的功能解决用户的问题。对于复杂的电子系统，不同的抽象层次通常由不同的设计者来完成设计。尽管某一设计者可能只负责其中一个抽象层次的设计，但该设计者应该了解当前抽象层次的上层和下层。

应用软件	程序设计
操作系统	设备驱动程序
单片机	结构、内部资源、接口
数字电路	FPGA/CPLD
模拟电路	放大器、滤波器、电源
器件	分立元件、集成芯片
物理层	电子

图 1.1-3 电子系统的层次划分

电子系统的发展趋势之二是智能化程度越来越高。电子系统可分为智能型电子系统和非智能型电子系统。非智能型电子系统一般指功能简单或功能固定的电子系统，例如电子门铃、楼道灯控制系统等。智能型电子系统是指具有一定智能行为的电子系统，通常应具备信息采集、传输、存储、分析、判断和控制输出的能力。在智能化程度较高的电子系统中，还应该具备预测、自诊断、自适应、自组织和自学习功能。例如，智能机器人对一个复杂的任

务具有自行规划和决策能力，有自动躲避障碍运动到目标位置的能力。

电子系统的发展趋势之三是引入互联网+技术。采用移动互联网、云计算、大数据、物联网等信息通信技术，与传统的电子系统相结合。在传统的电子系统基础上增加网络软硬件模块，借助移动互联网技术，实现远程操控、数据自动采集分析等功能，极大地拓展了电子系统的应用范围。

1.2 电子系统的设计方法

如前所述，电子系统可以分为模拟电子系统、数字电子系统、单片机电子系统、综合电子系统。由于不同类型电子系统的功能各异，规模有大有小，所以目前还没有一套通用的方法用于设计各种类型电子系统，只能依靠设计者的理论知识和实践经验，根据具体的条件来选择合适的设计方法。

1. 模拟电子系统的设计方法

第1步：选择符合电路功能要求的电路结构。本书的第2章和第3章将介绍常见的放大电路和滤波电路，设计者只有从理论上充分理解这些电路的工作原理，了解这些电路有什么差异，并且具备一定的实践经验，才有可能做出合理的选择。

第2步：器件选择。满足某一功能的集成器件可能有很多种，要根据技术参数进行筛选，同时应尽量选择使用方便的器件型号，如外围电路少、稳定性高、容易购买的型号。

第3步：参数计算。以放大电路为例，在设计时需要考虑多项技术指标，如输入阻抗、输入信号的动态范围、输出阻抗、电压放大倍数、输出电平（功率）、频率带宽、放大器的效率、放大器的稳定性等，这些指标都需要通过计算选择合适的参数才能实现。可以这么说，没有计算就谈不上设计。

第4步：电路仿真。电路仿真，顾名思义就是设计好的电路图通过仿真软件进行实时模拟，模拟出实际功能，然后通过其分析改进，从而实现电路的优化设计。常用的模拟电路仿真软件有 Multisim、TINA-TI 软件。

第5步：实际调试。首先要根据电路的复杂程度，用面包板、通用板、自行制作或者外加工 PCB 搭建模拟电路，然后采用稳压电源、示波器、信号源、万用表等仪器对电路进行测试。

2. 数字电子系统的设计方法

数字电子系统的设计通常有手工设计和 EDA 设计两种方法。

传统手工设计方法：设计者采用真值表、逻辑函数化简得到数字系统的逻辑函数表达式，然后采用标准集成电路实现。虽然标准集成电路品种多、价格低，但采用标准集成电路设计的数字系统体积大、功能固定。这种设计方法在工程实际中已很少采用。

现代 EDA 设计方法：这种设计方法通常由设计者借助 EDA 工具和硬件描述语言（Hardware Description Language, HDL）来完成设计，然后采用可编程逻辑器件实现。其设计流程如图 1.2-1 所示。

3. 单片机电子系统的设计方法

单片机电子系统的设计可分为硬件设计和软件设计两部分。

第1步：对硬件和软件承担的任务进行合理的划分，画出原理框图。划分的原则是尽量

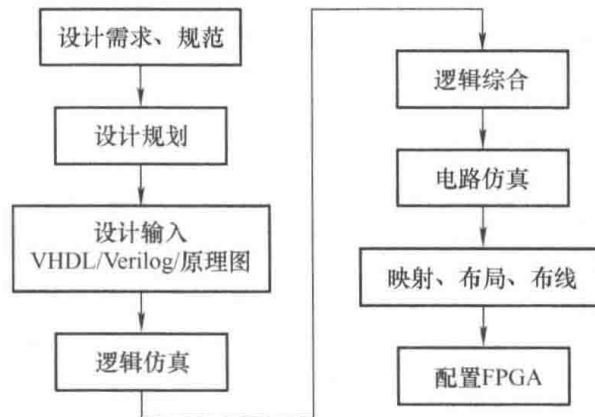


图 1.2-1 数字电子系统的设计流程

用软件来实现系统功能，以降低成本、缩小体积。因为随着单片机技术的发展，从前必须由模拟电路或数字电路实现的功能，现在已能用单片机通过软件方法来实现了。

第2步：单片机硬件系统扩展。在确定单片机型号和外围器件的基础上，将单片机和外围器件连接，称为系统扩展，包括人机接口扩展、I/O扩展、串行总线扩展、并行总线扩展。系统扩展时，需要查阅器件数据手册，了解器件的电气特性。

第3步：软件设计。先设计程序流程图，再编写代码。单片机的程序分为主程序和中断服务程序。对于不同的单片机系统，主程序的基本框架可以说是大体一致的，由初始化部分和循环体部分构成。初始化部分包括单片机的内部资源的初始化，以及程序中使用到的一些变量和数据的初始化。中断服务程序主要用于处理实时性要求较高的任务和事件，如外部突发性信号的检测、按键的检测和处理、定时计数等。一般情况下，中断程序应尽可能保证代码的简洁和短小，对于不需要实时去处理的功能，可以在中断中设置触发的标志，然后由主程序来执行具体的事务。这一点非常重要，特别是对于低功耗、低速的MCU来讲，必须保证所有中断的及时响应。

第4步：系统调试。系统调试包括硬件系统调试和软件系统调试。两者一般同时进行，如在软件调试时，可借助示波器观测单片机系统的关键信号，以提高调试效率。

4. 综合电子系统的设计方法

综合电子系统的设计方法之一是采用自顶向下的设计方法。什么是“顶”呢？“顶”是指系统的功能。何为“底”呢？“底”就是最基本的元器件。所谓自顶向下的设计方法，就是从顶层到底层，将系统划分为若干个子系统，再将子系统划分为若干个单元电路，再选择合适的元器件完成单元电路设计。自顶向下的设计方法抓住主要矛盾，从概括到展开，从粗略到精细，不纠缠在具体细节上，不过早考虑具体电路、元器件和工艺。另一种设计方法是采用自底向上的设计方法，先从选择元器件开始，设计单元电路，再由单元电路构成子系统，最后由子系统构成完整系统。自顶向下的设计方法和自底向上的设计方法示意图如图1.2-2所示。

自顶向下的设计方法将复杂的系统分解为相对简单的子系统或单元电路，找出每个子系统或单元电路的重点和难点所在，可以有效地控制系统的复杂性。EDA软件工具的使用，使得设计者可以将精力集中于系统的高层设计，如功能、算法等概念方面的设计，而将大量具体设计过程留给EDA软件去完成。自底向上的设计方法在设计过程中虽然受元器件和单

元电路的限制，但优点是可利用前人的设计成果，避免重复设计。另外，在系统的组装和调试过程中，通常是采用自底向上的流程进行调试的。

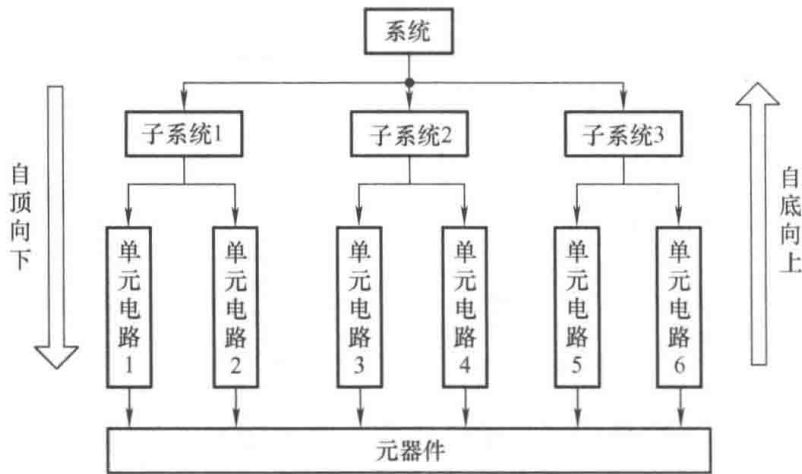


图 1.2-2 综合电子系统的设计方法

采用自顶向下的设计方法应遵循以下 3 条原则：层次化（Hierarchy）、模块化（Modularity）和规整化（Regularity）。这些原则对于软硬件的设计都是通用的。

层次化：将系统划分为若干个模块，然后更进一步划分每个模块，直到这些模块变得很容易理解。

模块化：所有模块有定义好的功能和接口，以便它们之间可以很容易地相互连接。

规整化：在模块之间寻求一致，通用的模块可以重复使用多次，以减少设计不同模块的数量。

1.3 电子系统的设计步骤

1. 分析设计题目

对设计题目进行具体分析，明确所要设计的系统功能和技术指标，确保所做的设计不偏题。如果是电子设计竞赛题发生了偏题，则你的作品可能无法获奖；如果是实际的项目发生了偏题，则你的作品不但用户拒绝接受，甚至可能要承担经济责任和法律责任。所以，分析设计题目这一步，必须考虑周到。

2. 方案设计

通过查阅文献资料，了解国内外相关课题的技术方案，提出 2~3 种可行的设计方案。从系统的功能、性能指标、稳定性、可靠性、成本、功耗、调试的方便性等方面，对几种方案进行认证比较，确定最优设计方案。在方案论证过程中，要敢于探索，勇于创新。需要指出的是，方案的优劣标准不是唯一的，它与电子系统的开发目的有关。例如，当某一电子系统的开发要求快速完成时，应尽量采用成熟可靠但不十分先进的技术方

确定了总体设计方案后，画出完整原理框图，对总体方案的原理、关键技术、主要器件进行说明。对关键技术难点，应深入细致研究。例如，一个电子系统通常既包括模拟电路又包括数字电路，当模拟电路发挥到极致时，如何用数字电路来弥补模拟电路的不足？在方案设计阶段还需要关注电子系统的测试问题，即电子系统设计制作完成后，如何测试技术

指标。

如果一个设计项目是由团队成员合作完成的，那么在方案设计阶段，应该明确各成员的分工，确定各自的任务。

3. 相关理论分析

对于复杂的电子系统，需要运用一定的理论才能解决问题。例如，在温度测控系统中，需要运用PID控制算法；在信号产生中，需要采用直接数字频率合成（DDS）理论；在信号分析中，需要采用快速傅里叶变换（FFT）理论。通过理论分析确定系统设计中的一些技术指标和参数。

4. 软硬件详细设计

根据自顶向下的设计方法，电子系统通常可分为单片机子系统、FPGA子系统、模拟子系统等多个不同的子系统。对于每个子系统的设计，可参考本书1.2节介绍的设计方法。

5. 组装调测

当单元电路设计完成以后，需要将其组装在一起构成系统。元器件应合理布局，提高电磁兼容性；为了方便调测，电路中应留有测试点。组装调测时应采用自底向上法，即分段装调。

6. 撰写设计报告

撰写设计报告是整个设计中非常重要的一个环节。设计报告是技术总结、汇报交流和评价的依据。设计报告的内容应该反映设计思想、设计过程、设计结果和改进设想，要求概念准确、数据完整、条理清晰、突出创新。表1.3-1为设计报告的参考评分表。

表 1.3-1 设计报告参考评分表

项 目	内 容	满 分	评 分	备 注
方案设计论证	方案比较	10		
	正确性	10		
	优良程度	5		
理论分析与计算	完成程度	10		
	正确性	10		
电路与程序设计	完整性	10		
	规范程度	5		
测试方法与数据	方法正确性	10		
	数据完整性	10		
	测试仪器（型号）	5		
结果分析		10		
设计报告工整性		5		
总分		100		

1.4 本书的内容体系

本书的内容体系由4部分组成：模拟电子系统设计、单片机电子系统设计、数字电子系统设计、综合电子系统设计。各部分内容安排循序渐进，有机联系。

在模拟电子系统设计部分，先介绍放大电路和滤波器的设计理论，然后介绍3个典型的模拟电子系统设计实例。在介绍模拟电子系统设计时，依次介绍了电路结构、理论分析、参数计算、电路仿真、焊接调试等整个设计流程。每个模拟电子系统均给出实物图和测试波形，便于读者课后实际制作，提高动手能力。

在单片机电子系统设计部分，由于本书主要针对具备单片机基础知识的读者，因此，不涉及单片机原理、指令系统的内容，而是直接以单片机最小系统设计为起点，依次介绍单片机的I/O扩展技术、并行总线扩展技术、串行总线扩展技术。考虑到存在多种单片机主流系列，为了增加本书的适用范围，本书在介绍单片机系统设计时，一般不针对具体的单片机型号，在进行单片机系统扩展时，尽量采用软件模拟的方法来产生各种总线时序。尽管不涉及具体的单片机型号，但是本书所有的单片机电子系统均可由目前主流的MCS-51系列单片机、MSP430系列单片机和Cortex-M4系列单片机来实现。将单片机与模拟电路相结合是本书的特色之一，如可编程增益放大器就是单片机和放大电路相结合的单片机电子系统，数控稳压电源就是单片机和串联型稳压电路相结合的单片机电子系统，短路故障点位置测量装置就是单片机和仪表放大器相结合的单片机电子系统，语音存储与回放系统就是单片机和语音前置放大、语音功放和滤波电路相结合的单片机电子系统。以上4个单片机电子系统设计实例可以用表1.4-1来进一步说明。

表 1.4-1 单片机电子系统设计实例说明表

设计实例	总线类型	典型外围器件	模拟电路
可编程增益放大器	I/O	微型继电器、模拟开关	同相放大器
语音存储与回放系统	并行总线	并行 A/D 转换器 (TLC0820)、并行 D/A 转换器 (TLC7524)、大容量 SRAM (IS61WV5128)	前置放大电路、功放电路、带通滤波电路
数控稳压电源	SPI	串行 D/A 转换器 (DAC7512)	串联式稳压电路
短路故障点位置测量装置	I ² C	串行 A/D 转换器 (ADS1115)	仪表放大电路

在数字电子系统设计部分，主要介绍FPGA的结构和原理、Verilog HDL语言、FPGA最小系统设计、Quartus II软件的基本操作，这些知识是开展基于FPGA的数字系统设计的基础。为了介绍数字系统的设计方法，选择了数字频率计、4×4键盘编码器、简易SPI接口、单片机与FPGA的并线总线接口4个设计实例。这些设计实例看似独立，实际上是与本书内容前后互相联系的。例如，4×4键盘编码器可直接应用于前面介绍的单片机最小系统；单片机与FPGA的并线总线接口可以直接应用于后面的综合电子系统设计。

本书的另一特色是单片机与FPGA/CPLD相结合。尽管单片机的内部资源和性能逐步提高，但在许多电子系统中，FPGA/CPLD仍具有不可替代的作用。如在单片机最小系统设计

中,采用了一片 CPLD 实现键盘接口、TFT (LCD) 显示接口、地址锁存器、地址译码器等功能,大大提高了电子系统的集成度。在频率测量、高速数据采集、信号产生等一些需要高速数字电路的电子系统中,需要采用 FPGA 来实现高速计数、高速 A/D 和 D/A 控制、数据缓存、状态机等功能。将单片机和 FPGA/CPLD 相结合,可充分发挥两者的优点。本书在综合电子系统设计部分,选取了单片机 + FPGA + 模拟电路的 3 个设计实例:电阻电感电容 (RLC) 测量仪、脉冲信号参数测量仪、红外通信系统。

RLC 测量仪采用矢量测量原理来测量电阻、电感、电容的参数,整个系统由正交信号产生电路、实部虚部分离电路、单片机系统 3 部分组成,其中正交信号的产生就是采用了 FPGA + 高速 D/A + DDS 技术实现的。

脉冲信号参数测量仪的要求是实现脉冲信号的频率、占空比和幅值的测量,同时还需要将脉冲信号波形显示在显示屏上。脉冲信号参数测量仪实际上是将等精度测量系统和高速数据采集系统两者合二为一。等精度测量系统完成频率、周期、占空比等时间参数测量。由于脉冲信号的频率范围为 100Hz ~ 1MHz,为了确保精度,脉冲信号的幅值由高速数据采集系统完成测量。

红外通信系统通过红外光实现同时传输模拟信号和数字信号。其基本原理是将数字信号调制成 FSK 信号,采用 FPGA 实现 FSK 信号的调制和解调。

为了掌握 FPGA 的使用方法,本书将 FPGA 内部资源的使用与设计实例相结合,将 FPGA 内部的一些常用资源的使用方法以及 EDA 软件操作安排在不同的设计实例中,具体说明见表 1.4-2。

表 1.4-2 FPGA 内部资源应用和 EDA 操作

FPGA 内部资源	设计实例	对应章节
多余 I/O 引脚的处理	FPGA 最小系统	6.4.3 节
复用 I/O 引脚的处理	FPGA 最小系统	6.4.3 节
锁相环 (PLL) 使用	FPGA 最小系统	6.4.3 节
I/O 引脚内部上拉电阻的设置	4 × 4 键盘编码器设计	7.2 节
内部 ROM 的使用	基于 FPGA 的正交信号发生器设计	8.4.2 节
内部 FIFO 的使用	脉冲信号参数测量仪	9.5 节

本书的最终目标是让读者能够独立或合作完成一个综合电子系统的设计与调试。为了达到这个目标,引入了由荷兰教育家范梅里恩伯尔提出的“整体教学设计”理论,即在一系列的设计实例中,设计任务从简单到复杂,而设计过程的介绍从详细到简略,体现由扶到放。例如,本书的最后一章为红外通信系统,该系统的许多单元电路已在前面的章节中介绍,如有源滤波器、语音放大电路、波形变换电路分别在第 3 章、第 5 章、第 9 章作了介绍,单片机最小系统、FPGA 最小系统分别在第 5 章和第 6 章作了介绍,DDS 技术在第 8 章作了介绍。因此,虽然红外通信系统是一个十分复杂的电子系统,但是,只要完成了方案设计,就可以直接采用前面章节已经完成的单元电路,从而降低了红外通信系统的设计难度,减少了设计工作量。

综上所述，本书的内容体系可以用图 1.4-1 所示的框图来表示。

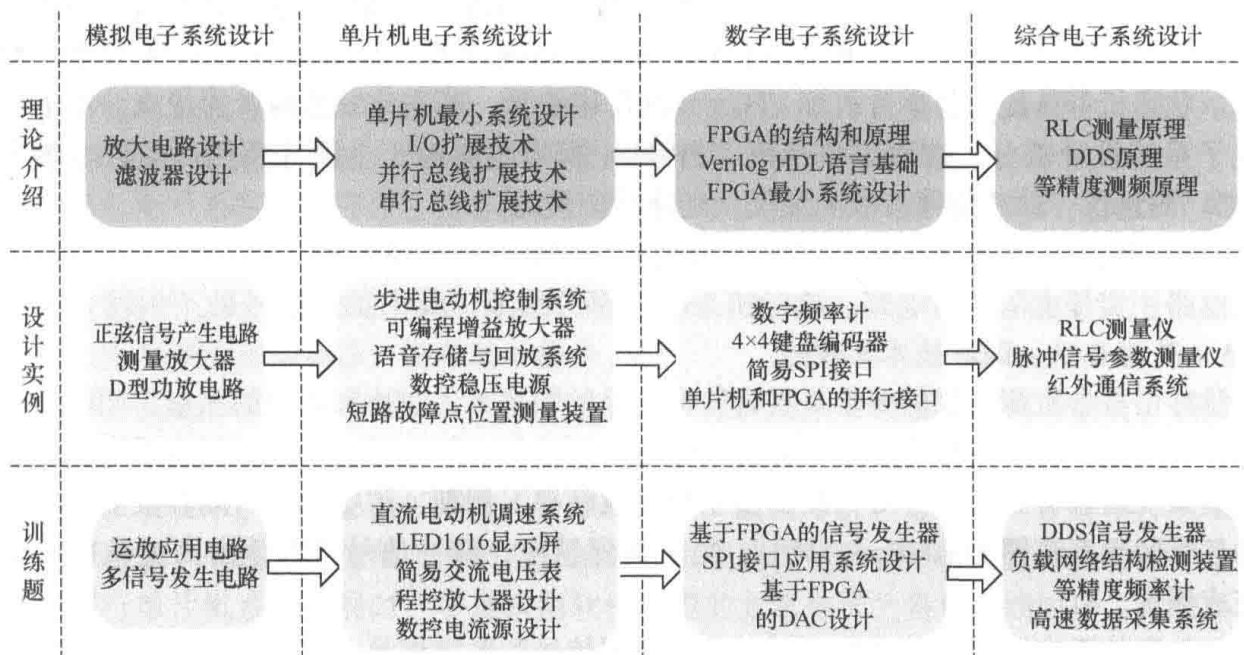


图 1.4-1 本书的内容体系

思考题

1. 什么是电子系统？请列举 3 项实际的电子系统实例。
2. 什么是自顶向下的设计方法？其有什么优点？
3. 简述电子系统的设计步骤。
4. 从下列电子产品中选择一种你所熟悉的，画出它的系统级和子系统级框图，并附上必要的说明（数字万用表、示波器、智能小车、扫地机器人）。
5. 试将采用通用集成电路和采用 FPGA 设计数字系统的方法作一类比。