

EDA 工 | 程 | 技 | 术 | 丛 | 书 |

畅销书全面升级，系统论述FPGA项目设计实战

全面阐述了FPGA项目设计的电子学基础、设计方法与VHDL编程方法
FPGA设计领域的百科全书,提供24个完整的项目设计案例



ELECTRONIC SYSTEM PROJECT DESIGN WITH FPGA
(VHDL LANGUAGE), SECOND EDITION

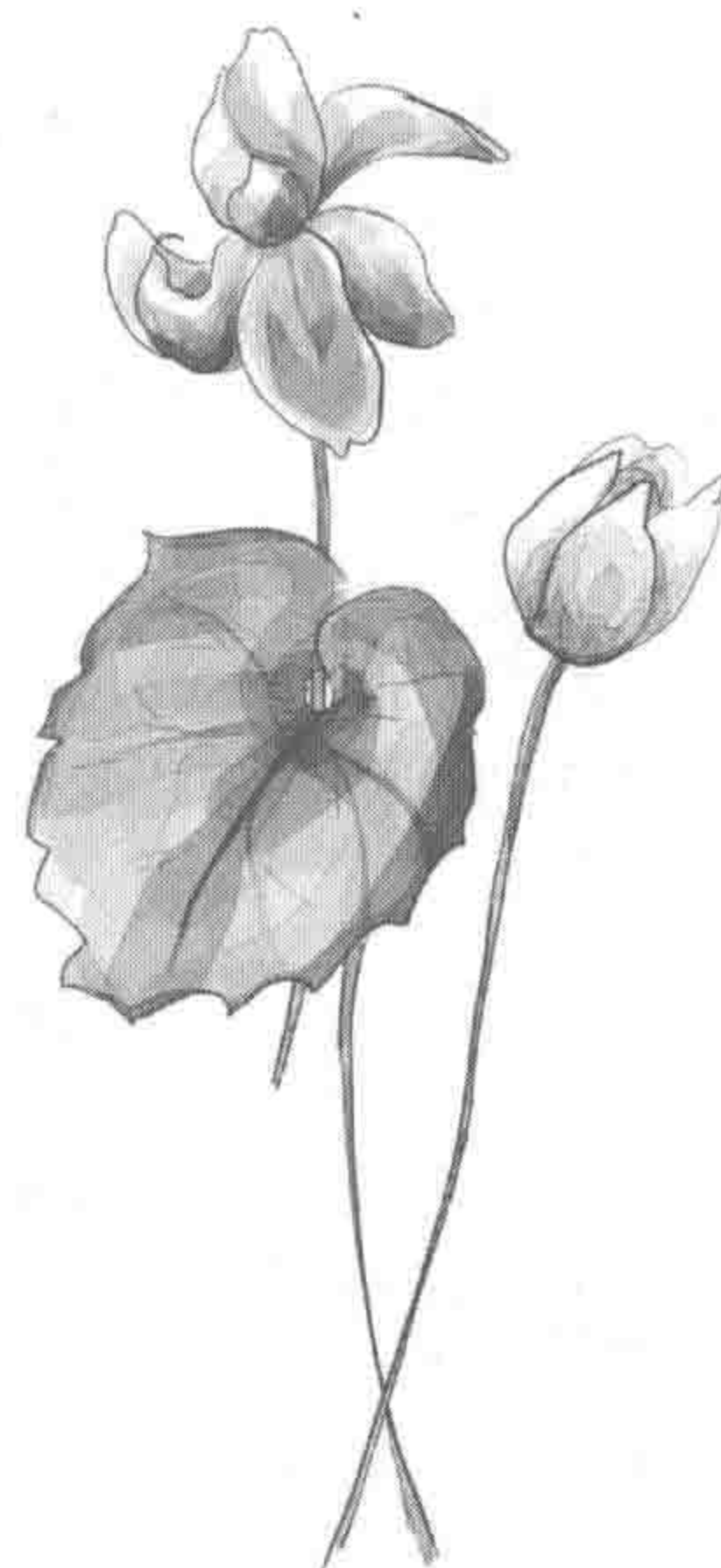
FPGA电子系统设计 项目实战 (VHDL语言) 第2版

王振红 编著

Wang Zhenhong

清华大学出版社





ELECTRONIC SYSTEM PROJECT DESIGN WITH FPGA
(VHDL LANGUAGE), SECOND EDITION

FPGA电子系统设计 项目实战 (VHDL语言) 第2版

王振红 编著
Wang Zhenhong

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地论述了 FPGA 的设计方法,并给出了大量综合电子系统设计项目实例。全书共 11 章。第 1 章介绍 FPGA 电子系统的设计方法;第 2 章介绍 Quartus II 使用方法;第 3~7 章介绍 FPGA 硬件描述语言 VHDL 的特点、VHDL 语言中常用的数据、运算符、顺序描述语句和并行描述语句、时钟信号描述、有限状态机等基本概念和应用;第 8 章介绍门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路(与阎石主编的《数字电子技术基础》(第 4 版)一致),并对其中的各种功能芯片以及基于 VHDL 与 FPGA 的实现方法进行了讲解;第 9 章介绍 FPGA 外围电路——集成运算放大器及其各种应用;第 10 章和第 11 章给出了基于 FPGA 的综合电子系统设计实例。

本书可作为高等院校电类专业学生学习 VHDL 及 FPGA 的实践指导书,也可供有关工程技术人员参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

FPGA 电子系统设计项目实战:VHDL 语言/王振红编著. —2 版. —北京:清华大学出版社,2017
(EDA 工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-46941-4

I. ①F… II. ①王… III. ①VHDL 语言—程序设计 IV. ①TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 074150 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:白 蕾

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:42.75

字 数:1014 千字

版 次:2014 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 2 版

印 次:2017 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:99.00 元

产品编号:071997-01

近年来,FPGA 的生产和销售规模以惊人的速度增长。大力发展集成电路设计与制造,是我国制定的重要发展目标,也是经济全球化新形势下的科技挑战。发展集成电路行业,离不开对电子信息类专业人才的培养,尤其是对电子信息类专业人才的创新能力培养。

如何提高学生的实践创新能力?首先,要使学生对实践感兴趣。在综合性设计实验中,学生能做出来就会有兴趣。其次,增加练习数量,练习多了水平就会提高。最后,根

第 1 章	FPGA 电子系统的设计方法	1
1.1	电子系统设计	1
1.1.1	总体方案确定	1
1.1.2	子系统设计	2
1.2	印制电路板设计	3
1.2.1	准备工作	4
1.2.2	元器件布局与布线	4
1.2.3	印制焊盘的尺寸及形状	8
1.2.4	印制导线的尺寸及形状	10
1.2.5	印制导线的抗干扰和屏蔽	12
1.2.6	印制电路板的对外连接	14
1.2.7	表面贴装技术对印制板的要求	15
1.3	电子系统的安装与调试	15
1.3.1	电子系统的安装	15
1.3.2	元器件的引脚识别	16
1.3.3	电子系统的调试	17
1.4	电子系统抗干扰措施	18
1.4.1	正确选择器件	19
1.4.2	正确分布元器件	19
1.4.3	交流输入电源增加电源滤波器	19
1.4.4	施加屏蔽措施	20
1.4.5	使用合理的接地方式	21
1.4.6	电路加入滤波电容和补偿电容	22
第 2 章	FPGA 设计软件——Quartus II 及其使用方法	24
2.1	编程存储及编译	24
2.2	指定器件引脚及编译	28
2.3	下载	30
2.4	存储及编译图形描述(电路图)	30
2.5	掉电可存储下载方法	33
第 3 章	FPGA 的硬件描述语言 VHDL	36
3.1	VHDL 程序的特点	36
3.2	VHDL 程序的基本结构	37

目录

3.2.1	库说明	37
3.2.2	实体说明	38
3.2.3	结构体说明	39
3.3	VHDL 的数据	39
3.3.1	基本标志符	40
3.3.2	数据对象	40
3.3.3	数据类型	41
3.4	VHDL 的表达式	43
3.4.1	逻辑运算符	44
3.4.2	算术运算符	44
3.4.3	关系运算符	45
3.4.4	并置运算符	45
3.4.5	操作符的运算优先级	46
第 4 章	VHDL 的顺序描述语句	47
4.1	信号赋值语句和变量赋值语句	47
4.2	if 语句	48
4.3	case 语句	50
4.4	for loop 循环语句	52
4.5	null 语句	53
第 5 章	VHDL 的并行描述语句	55
5.1	进程语句	55
5.2	并发信号赋值语句	58
5.3	条件信号赋值语句	59
5.4	选择信号赋值语句	61
5.5	元件例化语句	62
5.6	生成语句	66
第 6 章	VHDL 的时钟信号描述方法	70
6.1	时钟信号的 VHDL 描述方法	70
6.1.1	时钟边沿的描述	70
6.1.2	时序电路中进程敏感信号是时钟信号	71
6.2	时序电路中复位信号的 VHDL 描述方法	71
6.2.1	同步复位	72

6.2.2	异步复位	72
第 7 章	VHDL 的有限状态机的设计	74
7.1	有限状态机的基本概念	74
7.2	一个 Moore 型有限状态机的设计方法	75
第 8 章	FPGA 数字电路设计实例	81
8.1	门电路 FPGA 设计	81
8.1.1	与非门电路	81
8.1.2	二输入或非门电路	84
8.1.3	二输入异或门电路	85
8.1.4	反向器门电路	87
8.1.5	三态门电路	88
8.1.6	单向总线缓冲器	88
8.1.7	双向总线缓冲器	89
8.2	组合逻辑电路 FPGA 设计	89
8.2.1	监视交通信号灯工作状态的逻辑电路	89
8.2.2	8 线—3 线编码器	90
8.2.3	8 线—3 线优先编码器	91
8.2.4	二—十进制编码器	93
8.2.5	译码器(3 线—8 线)	94
8.2.6	二—十进制译码器	96
8.2.7	BCD 七段显示译码器	97
8.2.8	代码转换电路	98
8.2.9	四选一数据选择器	100
8.2.10	八选一数据选择器	101
8.2.11	4 位全加器	101
8.2.12	8 位加法器	103
8.2.13	多位数值比较器	105
8.3	触发器 FPGA 设计	105
8.3.1	RS 触发器	106
8.3.2	主从 JK 触发器	106
8.3.3	D 触发器	108
8.4	时序逻辑电路 FPGA 设计	109
8.4.1	寄存器	109

目录

8.4.2	双向移位寄存器	110
8.4.3	串行输入并行输出移位寄存器	111
8.4.4	循环移位寄存器	112
8.4.5	4 位同步二进制计数器	113
8.4.6	单时钟同步十六进制加/减计数器	114
8.4.7	双时钟同步十六进制加/减计数器	115
8.4.8	同步十进制加法计数器	118
8.4.9	单时钟同步十进制可逆计数器	120
8.4.10	异步二进制加法计数器	121
8.4.11	同步一百进制计数器	123
8.4.12	同步二十九进制计数器	124
8.4.13	顺序脉冲发生器	126
8.4.14	序列信号发生器	127
8.4.15	用状态机方法设计十三进制计数器	128
8.4.16	串行数据检测器	129
8.4.17	能自启动的七进制计数器	131
8.4.18	能自启动的三位环形计数器	132
8.4.19	用状态机方法设计十进制减法计数器	133

第 9 章	FPGA 外围电路——集成运算放大器	135
-------	--------------------------	-----

9.1	集成运算放大器典型电路	135
9.1.1	反相比例运算电路	135
9.1.2	同相比例运算电路	136
9.1.3	反相求和运算电路	136
9.1.4	同相求和运算电路	136
9.1.5	加减运算电路	137
9.1.6	积分运算电路	137
9.1.7	微分运算电路	138
9.1.8	压控电压源二阶低通滤波器	138
9.1.9	压控电压源二阶高通滤波器	138
9.1.10	RC 桥式正弦振荡电路	139
9.1.11	方波发生电路	139
9.1.12	方波和三角波发生电路	140
9.1.13	过零比较器	140
9.1.14	一般单限比较器	141

9.1.15	滞回比较器	141
9.1.16	窗口比较器	143
9.1.17	精密整流电路	143
9.2	单电源供电的集成运算放大器的应用	144
9.2.1	单电源集成运放的放大电路	144
9.2.2	单电源集成运放的正弦波发生器	145
9.2.3	单电源集成运放的方波三角波发生器	146
9.2.4	单电源集成运放的低通滤波器	146
9.2.5	单电源集成运放的高通滤波器	146
9.2.6	单电源集成运放的比较器	147
9.2.7	单电源比较器	147
9.2.8	单电源比较器组成的窗口比较器	148
9.2.9	高效率音频功率放大器	148
9.2.10	单电源集成运放综合设计	152
9.3	集成运算放大器的综合应用	153
9.3.1	小信号功率放大器	153
9.3.2	具有放大、滤波及继电器控制的模拟信号检测与控制系统	155
9.3.3	具有放大、F/V 转换及继电器控制的模拟信号频率检测与 控制系统	158
9.3.4	间歇正弦波控制路	160
9.3.5	语音信号放大器	162
9.3.6	程控放大器 0~40dB	162
9.3.7	宽带放大器	164
9.3.8	正弦交流电压有效值控制的压控振荡电路	165
9.3.9	电压转换恒定电流电路	166
9.3.10	实用温控器	167
9.3.11	用热释电传感器的报警电路	168
9.3.12	基于 PWM 的 LED 调光电路	168
9.3.13	具有放大、滤波器、计数功能的电子电路	170
第 10 章	FPGA 数字电路系统设计实例	173
10.1	数字信号的发送和接收电路	173
10.2	序列计数器	175
10.3	设计一个自动售邮票的控制电路	178
10.4	数字锁	180

目录

10.5	设计一个汽车尾灯的控制电路	183
10.6	交通灯控制器	186
10.7	双十字路口交通灯控制器	193
10.8	16×16 的点阵显示设计	196
10.9	乒乓球游戏机	200
10.10	三层电梯控制器	205
10.11	汽车停车场停车位显示系统	210
10.12	智力竞赛抢答计时器的设计	212
10.13	出租车计费器	218
10.14	定时器	223
10.15	秒表	226
10.16	数字钟	232
10.17	数字频率计	239
10.18	电子琴电路设计	245
10.19	《友谊地久天长》乐曲演奏电路设计	247
10.20	寄存序列型信号发生器	254
10.21	正负脉宽数控调制信号发生器设计	257
10.22	智能函数发生器设计	258
10.23	周期可调的多波形发生器	265
10.24	模拟信号检测	271
10.25	数据采集及监控系统	277
第 11 章 FPGA 电子系统设计项目		282
11.1	项目 1 FPGA 控制的数码显示电路	282
11.1.1	设计要求	282
11.1.2	设计分析	282
11.1.3	显示原理	282
11.1.4	驱动 8 位数码管显示电路框图	283
11.1.5	模块及模块功能	284
11.2	项目 2 键盘控制电路	288
11.2.1	设计要求	288
11.2.2	设计分析	288
11.2.3	设计思想与源程序	289
11.3	项目 3 用 8×8 行共阴、列共阳双色点阵发光器件显示汉字	295
11.3.1	设计要求	295

11.3.2 设计分析..... 295

11.3.3 器件及硬件电路..... 295

11.3.4 设计软件的思路及源程序..... 298

11.4 项目 4 FPGA 控制的数模 D/A 转换电路 311

11.4.1 设计要求..... 311

11.4.2 设计分析..... 311

11.4.3 DAC0832 转换器 311

11.4.4 数模 D/A 转换电路 312

11.4.5 FPGA 控制的数模 D/A 转换电路 313

11.5 项目 5 FPGA 控制的模数 A/D 转换 0809 的应用 314

11.5.1 设计要求..... 314

11.5.2 设计分析..... 315

11.5.3 ADC0809 转换器及其转换电路 315

11.5.4 FPGA 控制的模数 A/D 转换电路 318

11.5.5 用数码管显示模数 A/D 转换器的输入电压 321

11.5.6 ADC0809 转换模拟输入负电压电路 326

11.6 项目 6 数控式可逆步进调压直流稳压电源 327

11.6.1 设计要求..... 327

11.6.2 原理及硬件电路..... 327

11.6.3 软件设计思想及源程序..... 328

11.7 项目 7 数控式直流电流源 331

11.7.1 设计指标及框图..... 331

11.7.2 硬件电路图..... 331

11.7.3 软件设计思想及源程序..... 333

11.8 项目 8 低频数字式相位测量仪 336

11.8.1 低频数字式相位测量仪设计指标及框图..... 336

11.8.2 移相网络..... 336

11.8.3 相位测量..... 338

11.9 项目 9 多路数据采集系统 348

11.9.1 设计内容..... 348

11.9.2 现场模拟信号产生器..... 349

11.9.3 8 路数据采集器 351

11.9.4 主控器..... 354

11.10 项目 10 测量放大器 369

11.10.1 测量放大器系统..... 369

目录

11.10.2	桥式电路	370
11.10.3	信号变换放大器	370
11.10.4	直流电压放大器	370
11.10.5	程控的直流电压放大器	372
11.11	项目 11 功率放大器	384
11.11.1	设计任务	384
11.11.2	功率放大器	384
11.11.3	前置放大器	385
11.11.4	系统测试	386
11.11.5	自制稳压电源	386
11.11.6	集成功率放大器	387
11.12	项目 12 开关型稳压电源	392
11.12.1	脉冲宽度调制电路 MIC2194	393
11.12.2	MC34060 控制的串联型开关稳压电源	394
11.13	项目 13 程控滤波器	395
11.13.1	设计要求	395
11.13.2	设计框图	396
11.13.3	程控放大器	396
11.13.4	程控低通滤波器	399
11.13.5	程控高通滤波器	402
11.13.6	程控滤波器的 FPGA 控制核心	403
11.14	项目 14 信号发生器	425
11.14.1	设计要求	425
11.14.2	信号发生器的功能及其内部接线	425
11.14.3	信号发生器的 FPGA 内部结构	427
11.14.4	调用 Quartus II 中的除法器件方法	448
11.15	项目 15 交流电压参数的测量	451
11.15.1	设计要求	451
11.15.2	给定的器件	452
11.15.3	硬件电路	454
11.15.4	软件电路	456
11.16	项目 16 宽带放大器	472
11.16.1	设计要求	472
11.16.2	硬件电路	473
11.16.3	软件电路	476

11.17	项目 17	高效率音频功率放大器	493
	11.17.1	设计要求	493
	11.17.2	D 类放大器的工作原理	493
	11.17.3	硬件电路	494
	11.17.4	软件电路	497
11.18	项目 18	数字化语音存储与回放系统	508
	11.18.1	设计要求	508
	11.18.2	硬件电路	508
	11.18.3	软件电路	511
11.19	项目 19	数字式工频有效值多用表	517
	11.19.1	硬件电路	518
	11.19.2	软件电路	518
11.20	项目 20	简易电阻、电容和电感测量仪	538
	11.20.1	设计要求	538
	11.20.2	硬件电路	538
	11.20.3	软件电路	540
11.21	项目 21	数字幅频均衡功率放大器	553
	11.21.1	设计要求	553
	11.21.2	设计框图	554
	11.21.3	三级放大电路	554
	11.21.4	带阻网络	555
	11.21.5	低通滤波电路	555
	11.21.6	A/D 转换	555
	11.21.7	D/A 转换和功率放大器	555
	11.21.8	FPGA 程序	555
11.22	项目 22	红外光通信装置	562
	11.22.1	设计要求	562
	11.22.2	红外光语音通信装置	563
	11.22.3	红外光温度数字信号通信装置	565
	11.22.4	红外光通信装置总结	583
11.23	项目 23	数字频率计	584
	11.23.1	设计要求	584
	11.23.2	系统设计方案和电路	584
	11.23.3	信号频率测量	587
	11.23.4	时间间隔测量系统模块	595

目录

11.23.5	占空比测量系统模块.....	603
11.24	项目 24 基于 FPGA 与 nRF24L01 的无线数据传输与应用.....	607
11.24.1	nRF24L01 无线收发器	607
11.24.2	nRF24L01 无线收发器工作模式	609
11.24.3	nRF24L01 配置	611
11.24.4	用 FPGA 对 nRF24L01 进行配置	618

参考文献	669
------------	-----

第1章 FPGA电子系统的设计方法

本章主要介绍 FPGA 电子系统的设计方法。电子系统是指由一组电子元器件或基本的电子单元电路相互连接、相互作用而形成的电路整体,它能按特定的控制信号,去执行所设想的功能。按照所处理加工完成信号的不同,电子系统可分为模拟电子系统、数字电子系统和数字—模拟混合电子系统。FPGA 电子系统是数字—模拟混合电子系统或是数字电子系统。当 FPGA 完成数字信号加工处理,外围电路完成模拟信号处理时,FPGA 电子系统是数字—模拟混合电子系统;当外围电路也完成数字信号处理时,FPGA 电子系统就是数字电子系统。

FPGA 电子系统设计的步骤如图 1.1 所示,接到电子系统任务书后,首先对电子系统进行分析和设计,画出电路图;根据电路图对电子系统实验和调试,一边实验一边对电子系统设计进行修改,直至符合电子系统任务书所下达的系统功能和技术指标;然后制作电路板(即 PCB 板);再对电子系统进行安装和调试;最后制成合格成品。



图 1.1 FPGA 电子系统设计步骤

1.1 电子系统设计

1.1.1 总体方案确定

在全面分析电子系统任务书所下达的系统功能、技术指标后,根据已掌握的知识和资料,将总体系统功能合理地分解成若干个子系统(如硬件单元电路、软件设计的功能模块),并画出由各个子系统框图相互连接而形成系统原理框图。电子系统总体方案的选择,直接决定电子系统设计的质量。在进行总体方案设计时,要多思考、多分析、多比较,要从性能稳定、工作可靠、电路简单、成本低、功耗小、调试维修方便等方面综合考量,选出最佳方案。

1.1.2 子系统设计

1. 硬件单元电路设计

在进行硬件单元电路设计时,必须明确对各单元电路的具体要求,详细拟定出单元电路的性能指标,认真考虑各单元电路之间的相互联系,注意前后级单元电路之间信号的传递方式和匹配,尽量少用或不用电平转换之类的接口电路,并考虑到使各单元电路的供电电源尽可能地统一,以便使整个电子系统简单可靠。另外,尽量选择现有的、成熟的电路来实现单元电路的功能;有时找不到完全满足要求的现成电路,可在与设计要求比较接近的电路的基础上适当改进,或自己进行创造性设计。为了使电子系统的体积小、可靠性高,单元电路尽可能用集成电路组成,如集成运放、集成稳压器件、模拟开关、频压变换等。

在进行硬件单元电路设计参数计算时,应根据单元电路的性能指标要求决定单元电路元器件的参数。例如,根据电压的放大倍数,可决定反馈电阻的取值;根据振荡器要求的振荡频率,利用公式,可计算出决定振荡频率的电阻和电容值等。但一般满足电路性能指标要求的理论参数值不是唯一的,设计者应根据元器件性能、价格、体积、通用性和货源等方面灵活选择。计算单元电路参数时应注意以下几点:

(1) 在计算元器件工作电流、电压和功率等参数时,应考虑工作条件最为不利的情况,并留有适当的余量。

(2) 对于元器件的极限参数必须留有足够的余量,一般取 1.5~2 倍的额定值。

(3) 对于电阻、电容参数的取值,应选计算值附近的标称值。电阻值一般在 $1\text{M}\Omega$ 内选择;非电解电容一般在 $100\text{pF}\sim 0.47\text{F}$ 选择;电解电容一般在 $1\sim 2000\mu\text{F}$ 范围内选用。

(4) 在保证电路达到功能指标要求的前提下,尽量减少元器件的品种、价格、体积等。

2. 软件设计

为了满足电子系统的系统功能、技术指标的要求,软件设计首先要完成功能模块的设计,如键盘、数码显示、A/D、D/A 转换等功能模块。功能模块设计好以后可以反复使用,使设计更加快捷和方便。用 VHDL 语言编写功能模块,用图形输入的方法将各个功能模块连接起来,将其下载到 FPGA 芯片上,然后把 FPGA 芯片和硬件电路连接起来,就构成整个具有一定功能和技术指标的 FPGA 电子系统。

3. 元器件的选择

电子系统的设计就是选择最合适的元器件,并把它们有机地组合起来。在确定电子元件时,应根据电路处理信号的频率范围、环境温度、空间大小、成本高低等诸多因素全面考虑。具体表现为:

(1) 一般优先选择集成电路。由于集成电路体积小、功能强,可使电子系统可靠性增强,安装调试方便,大大简化电子系统的设计。如随着模拟集成技术的不断发展,适用于各种场合的集成运算放大器层出不穷,只要外加极少量的元器件,利用运算放大器就可构成性能良好的放大器。同样地,目前设计直流稳压电源时,已很少采用分立元器件进行设计了,取而代之的是性能更稳定、工作更可靠、成本更低的集成稳压器。

(2) 电阻器和电容器是两种最常见的元器件,它们的种类很多,性能相差也很大,应用的场合也不同。因此,对于设计者来说,应熟悉各种电阻器和电容器的主要性能指标和特点,以便根据电路要求,对元件做出正确的选择。

(3) 分立半导体元件的选择。首先要熟悉它们的性能,掌握它们的应用范围;根据电路的功能要求和元器件在电路中的工作条件,如通过的最大电流、最大反向工作电压、最高工作频率、最大消耗的功率等,确定元器件型号。

4. 计算机模拟仿真

随着计算机技术的飞速发展,电子系统的设计方法发生了很大变化。目前,EDA (Electronic Design Automation, 电子设计自动化) 技术已成为现代电子系统设计的必要手段。在计算机平台上,利用 EDA 软件,可对各种电子电路进行调试、测量、修改,这样大大提高了电子设计的效果和精确度,同时节约了设计费用。

5. 实验调试

电子系统设计要考虑的因素和问题很多,由于电路在计算机上进行模拟时所采用的元器件参数和模型与实际器件有差别,所以对经计算机仿真过的电路,还要进行实际实验。通过实验可以发现问题、解决问题。若性能指标达不到要求,应深入分析问题出在哪些单元电路或软件设计的模块上,再对它们重新设计和选择,直到完全达到性能指标为止。

6. 绘总体电路图

总体电路图是在总框图、单元电路设计、软件设计、参数计算和元器件选择的基础上绘制的,它是组装、调试、印刷电路板设计和维修的依据。目前绘电路图一般是利用绘图软件在计算机上完成。绘制电路图时主要注意以下几点:

(1) 总体电路图尽可能画在同一张图上;注意信号的流向,一般从输入端画起,由左向右或由上至下按信号的流向依次画出各单元电路;对于电路图比较复杂的,应将主电路图画在一张或数张图纸上,并在各图所有端口两端标注上标号,依次说明各图纸之间的连线关系。

(2) 注意总体电路图的紧凑和协调,要求布局合理、排列均匀。图中元器件的符号应标准化,元件符号旁边应标出型号和参数。集成电路通常用方框表示,在方框内标出它的型号,在方框的两侧标出每根连线的功能和引脚号。

(3) 连线一般画成水平线或垂直线,并尽可能减少交叉和拐弯。对于相互交叉有电的连接线,应在交叉处用圆点标出。对于连接电源负极的连线,一般用接地符号表示;对于连接电源正极的连线,仅需标出电压值。

1.2 印制电路板设计

随着集成电路集成规模的提高,印制板的制造精度也进一步提高。印刷板电路工艺技术向着高密度、高精度、高可靠性、大面积、细线条的方向发展。

印制电路板的设计是将原理图转换成印制板图,印制电路板设计通常有人工设计和计算机辅助设计两种方式。无论采用哪种方式,都必须符合原理图的电气连接和电气、机械性能要求。