



普通高校“十二五”规划教材

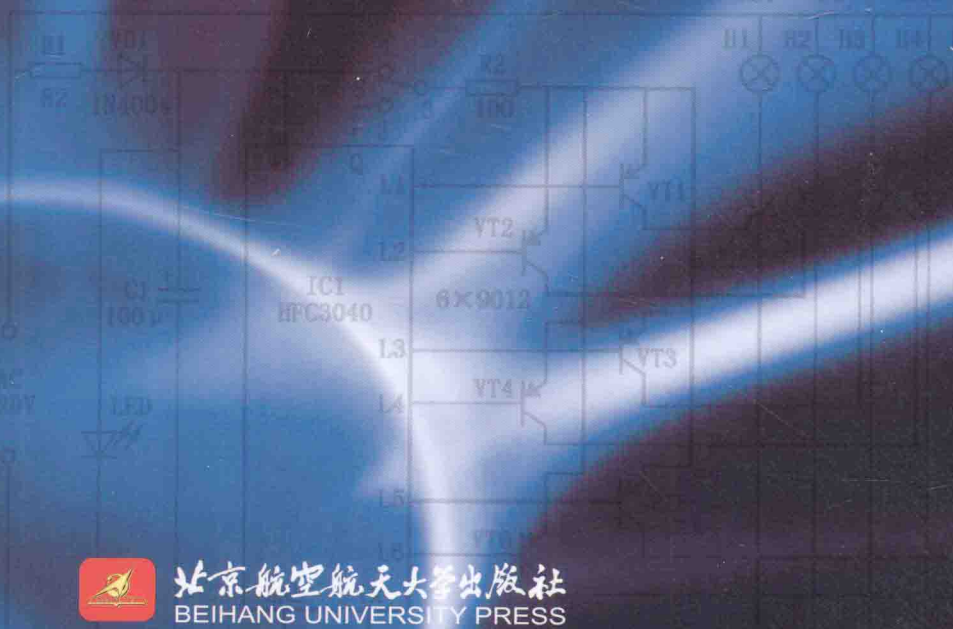
电子系统设计

——基础篇

本书配套多媒体教学课件

(第3版)

庑先国 余小平 奚大顺 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十二五”规划教材

电子系统设计

——基础篇(第3版)

庾先国 余小平 奚大顺 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书内容充实、新颖、深入浅出、尽量避免繁琐的数学推导。从设计和实用的角度出发,首先介绍了电子系统的设计方法,然后从构成电子电路的基本元器件的应用入手,分别讲述了模拟电路、数字电路、数/模与模/数变换电路、单片机应用系统的设计方法以及现代 EDA 工具等知识,最后给出了几个典型的电子系统设计实例。试图在读者已掌握了若干原理性课程的基础上,介绍如何将这些知识加以综合应用,并强调了各种元器件、电路的使用常识。为便于学习,每章均附有“小结”和“设计练习”。

本书可作为电子信息类专业本科和硕士研究生的课程教材,也可作为各种电子设计竞赛的培训教材或教辅,同时还可作为广大电路设计爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子系统设计. 基础篇 / 庾先国, 余小平, 奚大顺
编著. --3 版. --北京: 北京航空航天大学出版社,
2014. 7

ISBN 978-7-5124-1490-7

I. ①电… II. ①庾… ②余… ③奚… III. ①电子系
统一系统设计 IV. ①TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 033691 号

版权所有,侵权必究。

电子系统设计——基础篇(第 3 版)

庾先国 余小平 奚大顺 编著

责任编辑 刘 星

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316524

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:32.75 字数:698 千字

2014 年 7 月第 3 版 2014 年 7 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-1490-7 定价:69.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

第3版前言

本书自2007年3月第1版第1次印刷,经过2011年9月第2版第2次印刷,迄今已6个年头。经过多次的教学实践,并考虑到当前电子技术的发展,深觉应该对书中的内容做必要的补充与修改。第3版与第2版比较,在以下方面有所变动:

- 补充了若干新内容,如智能液晶显示器、电流负反馈运算放大器等。
- 第6章和第9章则全部改写:第6章单片机系统设计采用了目前使用广泛的MSP430单片机和C8051F单片机为例;第9章更新全部实例,MCU以MSP430为主。
- 增加了一些新的知识,如用Altium Designer。
- 删除了少数已停产的芯片,如ICM7216D等。
- 鉴于TI公司产品的优良性能以及在国内高校的普及程度,原书中的芯片基本以TI产品取代,如运算放大器、DC-DC芯片、单片机、ADC、DAC等,仅保留了少数其他公司具有代表性的优秀品种;并对WEBENCH在线设计软件在滤波器中的应用做了介绍。
- 补充了少数原书中未充分说明,而又经常使用的知识,如数控稳压电源的设计。
- 修改了部分设计练习。
- 改正了第2版中的极少数文字错误。

本版更加突出了原书的特点:

- 综合性:如加入了基本元器件在各方面的应用,如器件与可靠性“减额”、“冗余”的关系,如9.1节从方案调研、方案选择直到软件的容错设计等涉及系统设计的方方面面做了介绍,这是作者写作本书的初衷。
- 实用性:从元器件、芯片到电路基本都有“应用要点”,方便读者上手,这是本书的重点。
- 与时俱进:添加一些新器件、新知识,选择了获得2012年15省赛区大学生电子设计TI杯竞赛的优秀作品作为设计实例,对TI公司器件进行重点介绍,均反应了当前的技术动向。其实这也是电子技术类书籍所必须遵循的原则。

第3版的修订由庾先国主持,并撰写了第6章和第9章。本版得到了TI公司大学计划部、尤其是胡国栋工程师的大力支持,成书过程中也得到了蒿书利、廖斌、黄河、周刚、陈松、陈俊、许杰、陈起传、龙小翠等研究生的帮助,在此一并致谢。

写书和制作电影一样,也是“遗憾的艺术”,总觉得意犹未尽,也觉得惶恐。真心希望得到广大读者的宝贵意见。

作 者
2014年元旦

第 2 版前言

《电子系统设计——基础篇》出版已历三年有余,两次印刷,所剩无几。为适应教学的需要和适应电子技术的发展,有必要在原书的基础上重新出版《电子系统设计——基础篇(第 2 版)》,此次的修订版主要做了如下工作:

- 对于原书存在的少数文字错误,甚至漏掉了图 3.2.12,此次加以改正。
- 原书中有少数应包含的内容,如电感器、进制转换电路、单片机 UART 串口使用等,进行了拾漏补遗;并增补了少数设计练习;删除了与“基础篇”不太合适的 7.4 节“SOPC 的简介”。
- 由于电子技术本身的飞速发展,补充一些新的新的知识点,如 Quartus II 的使用、ADC 外围电路等。
- 原书涉及的一些资料、程序,原打算以光盘的形式提供,但未能实现。此次尽可能地列出,如 T6963C 驱动的 240×128 点阵 LCD 程序等。

本书在修订过程中,范磊磊、周传文、张贵宇、张兆义、蒿书利参与了电路实验,李隆、庾先国、倪为芬、穆克亮、杨剑波、施刚进行了程序调试,李哲、罗辉、宋茜茜对文档进行了整理,在此一并表示感谢。

作 者

2010 年 7 月

第 1 版前言

电子信息类专业的技术人员应该具有对电子系统进行分析与设计的能力。各学科知识的综合利用以及设计与实践能力的培养已受到各学校普遍的重视,系统设计类课程亦应运而生。

作者曾在 1997 年出版过一本《电子设计技术》,此书对设计方法介绍较少,资料偏多,所涉及的不少内容也已过时。

本书从设计和实用的角度出发,首先介绍了电子系统的设计方法;然后从构成电子电路的基本元器件的应用入手,分别讲述了模拟电路、数字电路、D/A 与 A/D 变换电路、单片机应用系统的设计方法以及现代 EDA 工具等知识;最后给出了几个典型的电子系统设计实例。

本书有以下特点:

- 介绍部分均从设计的角度出发,着重实用,仅对少数设计者较陌生的器件或电路简介其原理。
- 比较系统、详细地介绍了作为系统基础的常用电子元器件的应用知识。
- 所选内容较新。如滤波器设计只是很简单地回顾了其基本原理,而主要介绍 FilterLAB 设计软件和引脚可编程的开关电容滤波器。
- 讲述上由浅入深,循序渐进,尽量避免繁琐的数学推导,着重各学科知识的综合应用。
- 各章均附有小结及设计练习,适宜自学和教学。
- 注意紧密结合工程实践,如对线性稳压器件的散热进行了比较切合实际的介绍。
- 本书只能算是设计入门,故为“基础篇”。而“专题篇”则按专题(如测量技术、控制技术、无线电技术等)进一步介绍。

此书既可供广大电子技术应用人员使用,也可作为大学相应专业高年级、硕士研究生和电子设计竞赛的教材,同时又是一本工具书。

余小平、奚大顺为本书主编。余小平编写了第 1、4~8 章,奚大顺编写了第 2、3 章以及 9.1 节,唐蓉编写了 9.2 节,王洪辉编写了 9.3 节。

在编写过程中,借鉴了大量的参考书、文献和近几年新发表的文章,在此向相关的作者表示深切的谢意。放大器、滤波器设计软件由 Microchip 公司授权,在此一并致谢。

本书的电子教案可以在北京航空航天大学出版社网站(www.buaapress.com.cn)本书所附资料内下载或向出版社索取,书中所涉及的元器件资料可以从中国电子网(www.21ic.com)、中国芯片手册网(www.datasheet.com.cn)查阅。

由于作者水平所限,加之时间紧迫,错误不妥之处在所难免,恳望广大读者提出宝贵意见。有兴趣的读者,可以发送电子邮件到 yxpse@yahoo.com.cn,与作者进一步交流;也可以发送电子邮件到 bhcbxlx@sina.com,与本书策划编辑进行交流。

作 者
2007 年元旦
于成都理工大学

敬告读者

➤ 本教材配有教学课件。需要用于教学的教师,请与北京航空航天大学出版社联系。

➤ 北京航空航天大学出版社联系方式如下:

通信地址:北京海淀区学院路 37 号北京航空航天大学
出版社嵌入式系统图书分社

邮 编: 100191

电 话: 010-82317035

传 真: 010-82328026

E-mail: emsbook@gmail.com

目 录

第 1 章 电子系统设计导论	1
1.1 电子系统的构成	1
1.2 电子系统设计方法和原则	2
1.2.1 电子系统设计的一般方法	2
1.2.2 电子系统设计的一般原则	4
1.3 电子系统设计步骤	5
小 结	6
第 2 章 常用电子元器件的应用	7
2.1 电阻器	7
2.1.1 主要技术参数	7
2.1.2 分类、特性与应用场合	10
2.1.3 电阻器的应用	14
2.1.4 数字电位器	18
2.1.5 电阻衰减器的设计	22
2.2 电容器	24
2.2.1 主要技术参数	25
2.2.2 分类与特性	26
2.2.3 电容器的应用	27
2.2.4 电解电容器的特性与应用	30
2.3 电感器	32
2.3.1 电感器在电子电路中的应用	32
2.3.2 电感器的主要技术参数	36
2.3.3 电感器的种类	37
2.3.4 电感器的应用	40
2.4 晶体管	41
2.4.1 硅二极管和硅整流桥	41
2.4.2 半导体三极管	47
2.4.3 场效应管	49
2.4.4 功率 VMOS 场效应晶体管	51

2.4.5 晶体管阵列·····	56
2.5 表面贴装元器件·····	59
2.5.1 表贴无源元器件·····	60
2.5.2 表贴有源元器件·····	66
2.6 光电耦合器·····	67
2.6.1 “地”电流的影响·····	67
2.6.2 通用光电耦合器·····	69
2.6.3 线性光电耦合器·····	77
2.7 继电器·····	80
2.7.1 电磁继电器·····	80
2.7.2 固态继电器·····	84
2.8 功率驱动·····	87
2.8.1 几种常见的功率负载·····	87
2.8.2 常用数字器件的输出特性·····	89
2.8.3 功率驱动设计·····	90
2.8.4 电动扬声器的驱动·····	93
2.9 显示器件·····	93
2.9.1 LED ·····	97
2.9.2 LED 数码管及其驱动 ·····	100
2.9.3 LCD 显示器及其驱动 ·····	107
小 结·····	131
设计练习·····	132
第3章 模拟电路设计 ·····	134
3.1 运算放大器的基本特性 ·····	134
3.2 放大器设计 ·····	145
3.2.1 负反馈电路 ·····	145
3.2.2 基本放大电路 ·····	146
3.2.3 放大电路设计要点 ·····	148
3.2.4 运算放大器的参数对放大器性能的影响 ·····	154
3.2.5 放大电路计算机辅助设计软件 ·····	155
3.3 滤波器设计 ·····	158
3.3.1 滤波器的基本特性 ·····	158
3.3.2 滤波器计算机辅助设计软件 ·····	161
3.3.3 开关电容滤波器 ·····	166
3.4 电源电路设计 ·····	171

3.4.1 模拟线性稳压电源设计	172
3.4.2 数控稳压电源设计	184
3.4.3 开关稳压电源	189
小 结	202
设计练习	203
第 4 章 数字电路设计	204
4.1 数字电路设计概述	204
4.1.1 数字电路系统的结构	204
4.1.2 数字电路系统的设计步骤	204
4.1.3 数字电路系统的设计方法	205
4.2 常用中规模数字逻辑电路的应用	206
4.2.1 模拟开关和数据选择器	206
4.2.2 数值比较器	213
4.2.3 计数器/分频器	216
4.2.4 译码器	223
4.3 锁相环及频率合成器的应用	228
4.3.1 锁相环	228
4.3.2 频率合成器	233
4.4 数字集成电路应用若干问题	242
4.4.1 数字集成电路的种类及特点	242
4.4.2 数字集成电路型号的组成及含义	244
4.4.3 数字集成电路系统中的旁路电容	245
4.4.4 数字集成电路使用应注意的问题	247
4.4.5 数字集成电路的接口驱动	249
小 结	252
设计练习	252
第 5 章 D/A 与 A/D 转换	253
5.1 D/A 转换器	253
5.1.1 DAC 的主要技术指标	253
5.1.2 DAC 的选择	254
5.1.3 DAC 的应用	256
5.2 A/D 转换器	265
5.2.1 ADC 的分类	265
5.2.2 ADC 的主要技术指标	268

5.2.3	ADC 的选择	269
5.2.4	ADC 的应用	270
5.3	ADC/DAC 外围电路	285
5.3.1	参考源	285
5.3.2	驱动放大器	289
5.3.3	其他外围电路考虑	293
小 结		293
设计练习		294
第 6 章	单片机应用系统设计	295
6.1	概 述	295
6.1.1	单片机的发展趋势	295
6.1.2	单片机的应用及选择	296
6.1.3	单片机应用系统综合设计的一般过程	297
6.2	以 MSP430 为核心的应用系统设计	298
6.2.1	MSP430 简介	298
6.2.2	IAR Embedded Workbench IDE 的使用	300
6.2.3	Grace 软件的使用	306
6.2.4	MSP430F2619 简介	311
6.2.5	通用 I/O 口控制的 LED 闪烁	313
6.2.6	PA 端口实现跑马灯	315
6.2.7	矩阵式键盘扫描	316
6.2.8	触摸按键及显示	318
6.2.9	ADC 数据采集	323
6.2.10	UART 串口通信	324
6.2.11	单总线的使用	327
6.2.12	I ² C 总线的使用	331
6.3	以 C8051F 为核心的应用系统设计	339
6.3.1	C8051F 单片机简介	339
6.3.2	Silicon Laboratories IDE 的使用	341
6.3.3	Configuration Wizard 的使用	344
6.3.4	C8051F350 简介	347
6.3.5	定时中断及 I/O 口控制实例	349
6.3.6	24 位 ADC 数据采集	352
6.3.7	SPI 通信	355
6.3.8	UART 串口通信	360

小 结	363
设计练习	364
第 7 章 ASIC 设计	365
7.1 ASIC 的设计手段	365
7.1.1 ASIC 设计发展历程	365
7.1.2 ASIC 设计方法	366
7.2 GAL 器件的编程及应用	368
7.2.1 FASTMAP 语言及其应用举例	368
7.2.2 ABEL 语言及其应用举例	375
7.3 CPLD/FPGA 器件的编程及应用	381
7.3.1 VHDL 语言介绍	381
7.3.2 VHDL 文本输入设计步骤	386
7.3.3 VHDL 文本输入设计举例	392
7.4 Quartus II 使用简介	396
7.4.1 设计输入	397
7.4.2 综 合	401
7.4.3 适 配	402
7.4.4 时序分析	404
7.4.5 仿 真	406
7.4.6 编程或配置	409
小 结	409
设计练习	410
第 8 章 EDA 工具应用	411
8.1 Pspice 仿真	411
8.1.1 Pspice 简介	411
8.1.2 Pspice 使用	412
8.2 EWB 仿真	420
8.2.1 EWB 5.0c 的主要功能及其特点	420
8.2.2 EWB 软件的界面及电路分析应用	421
8.3 Proteus 仿真	427
8.3.1 Proteus 软件简介	427
8.3.2 Proteus 在单片机系统仿真中的使用	428
8.4 Protel 99SE 的使用	436
8.4.1 Protel 99SE 的原理图设计	436

8.4.2 电路网表的生成	441
8.4.3 印制电路的设计	441
8.5 Altium Designer 的使用	444
8.5.1 Altium Designer 简介	444
8.5.2 Altium Designer 的文件导入	445
8.5.3 PCB 板设计流程	447
8.5.4 Altium Designer 的 PCB 设计	448
小 结	461
设计练习	462
第 9 章 设计实例	463
9.1 数字定时器	463
9.1.1 功能要求	463
9.1.2 整体方案调研	463
9.1.3 整体方案论证	464
9.1.4 硬件电路设计	465
9.1.5 程序设计	467
9.1.6 基于 MSP430 和 C51 编程的另一种数字定时器	474
9.2 简易直流电子负载	481
9.2.1 功能要求	482
9.2.2 总体方案论证	482
9.2.3 硬件电路	483
9.2.4 软件设计	489
9.2.5 系统测试	492
9.3 微弱信号检测装置	493
9.3.1 功能要求	493
9.3.2 方案论证	494
9.3.3 理论分析与计算	495
9.3.4 系统电路设计	497
9.3.5 系统程序设计	502
9.3.6 测试与结果分析	502
设计练习	503
参考文献	507

第 1 章 电子系统设计导论

1.1 电子系统的构成

电子系统主要是指由多个电子元器件或功能模块组成,能实现较复杂的应用功能的客观实体,如自动控制系统、电子测量系统、计算机系统、通信系统等。一般来说,一个复杂的电子系统可以分解成若干个子系统,其中每个子系统又由若干个功能模块组成,而功能模块由若干单元电路或电子元器件组成,如图 1.1.1 所示。

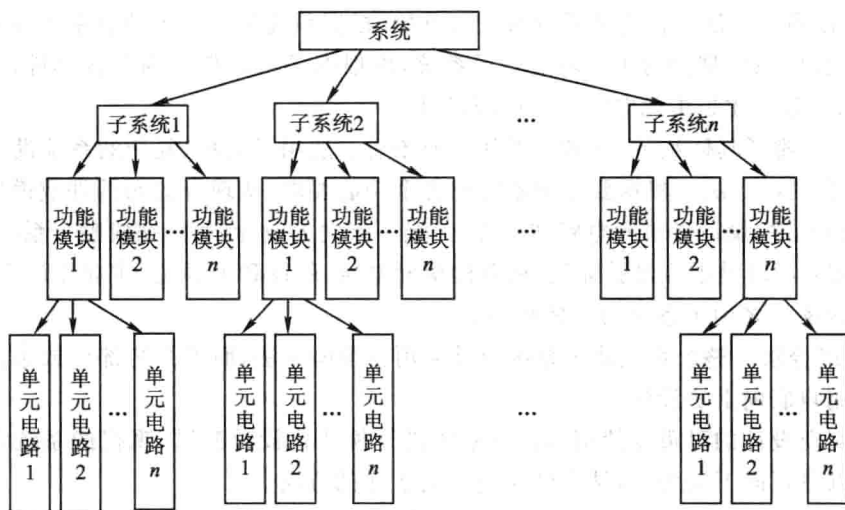


图 1.1.1 电子系统构成示意图

图 1.1.2 为以 MCU/ARM/DSP 为核心的电子测量系统的组成示意图。由图可知,该电子测量系统主要由以下分系统组成:模拟子系统(传感器、信号处理、系统电源及监控、驱动等)、数字子系统(存储器、译码控制、人机接口、通信接口等)、数/模混合子

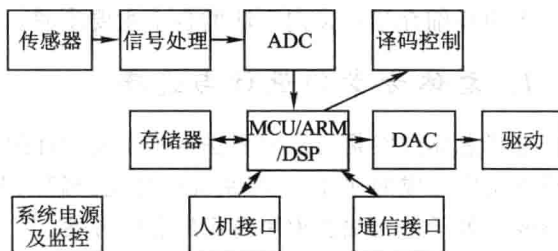


图 1.1.2 以 MCU/ARM/DSP 为核心的电子测量系统组成示意图

系统(ADC、DAC)和 MCU/ARM/DSP 子系统。其中这些子系统又由各个功能模块构成,如数模混合子系统由信号调理与驱动模块、输入/输出接口模块、通信接口模块、系统译码与控制模块、电源模块等组成。

1.2 电子系统设计方法和原则

1.2.1 电子系统设计的一般方法

电子系统设计是系统工程设计,一般是比较复杂的,必须采用有效的方法去管理才能使设计工作顺利并取得成功。

基于系统的功能与结构上的层次性,电子系统设计一般有以下三种方法:自顶向下法(Top to Down)、自底向上法(Bottom to Up)和组合法(TD&BU Combined)。

① 自顶向下法。首先从系统级设计开始,根据系统级所描述的该系统应具备的各项功能,将系统划分为单一功能的子系统,再根据子系统任务划分各部件,完成部件设计后,最后才是单元电路和元件级设计。

优点:避开具体细节,有利于抓住主要矛盾。适用于大型、复杂的系统设计。

② 自底向上法。根据要实现系统的各个功能要求,从现有的元器件或模块中选出合适的元件,设计各单元电路和部件,一级一级向上设计,最后完成整个系统设计。

优点:可以继承经过验证的、成熟的单元电路、部件和子系统,实现设计重用,提高设计效率。多用于系统的组装和测试。

③ 组合法。整个系统或子系统设计采用自顶向下法,而子系统部件或单元电路设计采用自底向上法设计。

为实现设计的可重复使用以及对系统进行模块化设计测试,现代的系统设计通常采用以自顶向下法为主,结合使用自底向上法的方法。

由于电子电路种类繁多,千差万别,设计方法也因具体情况而不同,因此在设计时,应根据实际情况灵活掌握。

下面详细介绍自顶向下法的各个主要步骤。

1. 总体方案的设计与选择

选择总体方案是自顶向下法电子系统设计的第一步。根据设计任务、指标要求,分析系统应完成的功能,并将系统按功能分解成若干子系统,分清主次和相互关系,并形成由若干单元功能模块组成的总体方案。

一般需要多个方案,每个方案用方框图的形式表示出来(关键的功能模块的作用一定要表达清楚,还要表示出它们各自的作用和相互之间的关系,注明信息走向等),然后通过实际的调查研究、查阅有关的资料或集体讨论等方式,着重从方案能否满足

设计指标要求、结构是否简单、实现是否经济可行等方面,对几个方案进行比较和论证,择优选取。

在方案选择中,还应注意以下两个问题:

- 对不同的方案,应深入分析比较。对关键部分,还要提出各种具体电路,根据设计要求进行分析比较,从而找出最优方案。
- 还需考虑方案的可行性、性能、可靠性、成本、功耗等实际问题。

2. 单元电路的设计与选择

在确定了电子系统的总体方案,绘出了子系统中各部件的详细功能框图后,便可进行单元电路设计。任何复杂的电子电路都是由若干具有简单功能的单元电路组成的,这些单元电路的性能指标往往比较单一。在明确每个单元电路的技术指标后,要分析清楚单元电路的工作原理,设计出各单元的电路结构形式。尽量采用学过的或熟悉的单元电路,也要善于通过查阅资料、分析研究一些新型电路,开发利用新型器件。

根据设计要求和已选定的总体方案的原理框图,确定对各单元电路的设计要求,必要时应详细拟定主要单元电路的性能指标。注意各单元电路之间的相互配合,但要尽量少用或不用电平转换之类的接口电路,以简化电路结构,降低成本。

各单元电路之间要注意在外部条件、元器件使用、连接关系等方面的配合,尽可能减少元器件的数量、类型、电平转换和接口电路,以保证电路最简单,工作最可靠,且经济实用。各单元电路拟定后,应全面地检查一次,检查每个单元各自的功能是否能够实现,信息是否畅通,总体功能是否满足要求,如果存在问题,必须及时做出局部调整。

3. 元器件的选择

选择元器件时,一般优先选用集成电路。集成电路的广泛应用,不仅减少了电子设备的体积和成本,提高了可靠性,使安装调试和维修变得比较简单,而且大大减化了电子电路的设计。

(1) 集成电路的选择

集成电路的种类繁多,选用方法一般是“先粗后细”,即先根据主体方案考虑应选用什么功能的集成电路,再进一步考虑其具体性能,然后再根据价格等因素选用型号。选择的集成电路不仅要在功能和特性上实现设计方案,而且要满足功耗、电压、温度、价格等多方面的要求。

(2) 阻容元件的选择

电阻和电容种类很多,正确选择电阻和电容是很重要的,不同的电路对电阻和电容性能要求也不同,有些电路对电容漏电要求很严格,有些电路对电阻和电容的精度要求很严格,设计时要根据电路的要求选择性能和参数合适的阻容元件,并要注意功耗、容量、频

率、耐压范围是否满足要求。

(3) 分立元器件的选择

分立元器件包括二极管、三极管、场效应管和晶闸管等,选择器件的种类不同,注意事项也不同。例如三极管,在选用时应考虑是 NPN 管还是 PNP 管,是大功率管还是小功率管,是高频管还是低频管,并注意管子的电流放大倍数、击穿电压、特征频率、静态功耗等是否满足电路设计的要求。

4. 元器件的参数计算

单元电路的结构、形式确定以后,需要对影响技术指标的元器件的参数进行计算。这种计算有的需要根据电路理论公式进行,有的按照工程估算方法进行,有的可用典型电路参数或经验数据。选用的元器件参数值最终都必须采用标称值。计算电路参数时应注意如下问题:

① 各元器件的工作电流、工作电压、频率和功耗应在允许的范围内,并留有适当的余量,以保证电路在规定的条件下正常工作,达到所要求的性能指标。

② 对于环境温度、其他干扰等工作条件,计算参数时应按最坏的情况考虑。

③ 保证电路性能的前提下,尽可能设法降低成本,减少元器件的品种、功耗和体积,并为安装调试创造有利条件。

④ 在满足性能指标和上述各项要求的前提下,应优先选用现有或容易买到的元器件,以节省时间和精力。

1.2.2 电子系统设计的一般原则

任何一项系统的设计,都要遵循一定的原则或标准、规范。进行电子系统设计,一般要求遵循以下一些原则。

(1) 兼顾技术的先进性和成熟性

当今世界,电子技术的发展日新月异。系统设计应适应技术发展的潮流,使系统能保持较长时间的先进性和实用性。同时也要兼顾技术上的成熟性,以缩短开发时间和上市时间。

(2) 安全性、可靠性和容错性

安全在任何产品中都是第一位的,在电子系统设计中也是必须首先考虑的。采用成熟的技术、元器件和部件,可以在一定程度上保证系统的可靠、稳定和安全。系统还应具有较强的容错性,例如,不会因人员操作失误而使整个系统无法工作;或因某个模块出现故障而使整个系统瘫痪等。

(3) 实用性和经济性

在满足基本功能和性能的前提下,系统应具有良好的性价比。