



普通高等教育“十三五”规划教材  
电工电子基础课程规划教材

# 硬件电路设计与 电子工艺基础

■ 曹文 刘春梅 阎世梁 编著

 中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材  
电工电子基础课程规划教材

# 硬件电路设计与 电子工艺基础

曹文 刘春梅 阎世梁 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

全书围绕“电路设计”、“电子工艺”两个并重的关键词,本着够用、实用、易用的原则,贯穿完整的硬件电路设计、仿真、制作、装接、调试流程,带动读者循序渐进地学习领会相关知识与技能,达到拓展知识面、提升工程实践能力的目的,也为后续更专业的学习夯实基础。

全书共12章,主要包括:电子系统设计概论,电子元器件的分类、功能及选型,模拟电路功能模块设计,数字电路单元设计,电源电路设计基础,电路设计与软件仿真,计算机辅助电路PCB设计,电路PCB加工及制作工艺,元器件装配、焊接及拆焊工艺,元器件参数测试、质量检测及等效代换,电路系统调试工艺,电子电路课程设计示例。作为一个从理论到实践再到创新的学习、训练体系,本书与电路、模电、数电、电工学等基础课程形成紧密互补的依托关系,同时为传统的电路、电子、电工实验注入一股开放、创新、强化的新鲜力量。本书提供配套电子课件、习题解答、授课视频、器件文档等丰富教学资源。

本书可作为高等院校、高职学院、职业技能培训学校的电子、通信、物联网、自动化、电气、检测技术、光电信息、测控技术及仪器、计算机、机电一体化等专业的电子技术课程设计与电子工艺实训教材,可面向电子设计基础、电子技术综合训练、模电/数电技术课程设计、电子创新实验、电子系统设计、电子工程技能培训等课程。本书也可作为全国大学生电子设计竞赛的赛前训练、“卓越工程师”计划、大学生课外科技活动的参考资料;对广大的电子制作爱好者而言,本书也不失为一本全面的入门读本,具有较高参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

硬件电路设计与电子工艺基础 / 曹文, 刘春梅, 阎世梁编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.6

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-28608-7

I. ①硬… II. ①曹… ②刘… ③阎… III. ①硬件—电子电路—电路设计—高等学校—教材 ②硬件—电子电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TP303 ②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第081355号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22.75 字数: 657千字

版 次: 2016年6月第1版

印 次: 2016年6月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254113, wangxq@phei.com.cn。

# 前 言

虽然当前就业形势总体严峻,但基础知识全面、工程能力扎实的工科院校毕业生却备受用人单位青睐,这也使得很多学校在新一轮人才培养方案调整中,逐步压缩理论学时数,转而大幅增加实训、实验、课程设计等实践性教学环节的比重,以培养动手能力强、创新意识突出、综合素质全面的高质量工程技术人才,贴近企业的实际需求。

电子技术课程设计与实训环节有别于传统的验证性电子技术实验,强调工程实践与理论基础的紧密融合,是电类、近电类专业学生进行工程技能培训的重要实践性环节。在传统的课程体系中,学生们虽然具有一定的模电、数电、电路等课程的理论基础,但由于受到指导教材匮乏、整体重视程度不够等因素制约,在面对一个实际的电子技术课程设计题目时,却往往无从下手。有鉴于此,我们在组织电子技术课程设计与实训指导教材的编写及整理时,重点突出“实作”、“实操”、“实用”的特色,将电路设计与仿真、电子元器件型号及参数选型、电路 PCB 设计与加工制作、电路装配焊接工艺、电路测试及调试工艺等知识结构纳入一个交叉融合的有机整体,并按照实际的工作流程连贯地展示给读者,旨在向每位读者提供一套完整、基础、系统的入门培训与设计指导,使其熟悉电路及电子产品设计流程,掌握基本的工作方法与技巧,降低或消除对硬件系统的原发性恐惧。

全书由西南科技大学尚丽平教授主审,西南科技大学信息工程学院曹文副教授对全书进行总体规划与设计,并得到了清华大学自动化系任艳频高级工程师、西南科技大学信息工程学院姚远程教授、四川长虹电子集团何金华国家技能大师工作室专家们的悉心指导。本书的第 2 章、第 5 章由曹文执笔,第 1 章由西南科技大学王银玲执笔,第 3 章、第 4 章、附录 A~D 由西南科技大学刘春梅执笔,第 6 章由西北民族大学电气工程学院张国恒教授执笔,第 7 章、附录 E~G 由天津天狮学院冯芳、郝张红共同执笔,第 8 章由深圳嘉立创科技有限公司袁江涛高级工程师执笔,第 9 章由西南科技大学阎世梁执笔,第 10 章由绵阳师范学院刘刚执笔,第 11 章由长虹集团向永龙高级技师执笔,第 12 章由西南科技大学黎恒高级工程师执笔。全书的视频录制及课件制作由曹文和刘春梅完成。周自刚、邱荣、魏冬梅、胡莉、罗亮、胥学金、刘涇对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。本书提供配套电子课件、习题解答、授课视频、器件文档等丰富教学资源,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

美国德州仪器(TI)公司大学计划的谢胜祥工程师为本书的编写提供了大量有益的素材、资料,同时还就本书的内容提出了许多建设性意见。特别感谢电子工业出版社的王晓庆编辑,她的精心策划和细致的编辑工作,为本书增色不少。

为了让教材图文并茂、通俗易懂,本书在编写过程中广泛参阅了许多相关文献资料,但限于篇幅无法一一列出,特别是很多生动、形象的照片和资料经过多次传播已经无法获悉原作者及出处,在此特向本书引用资料的所有原作者们表示深深的敬意与感谢!

本书获得西南科技大学 2014 年度教材建设基金(xnjc1405)的资助,同时还得到教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会 2015 年度“重大、热点、难点问题”研究课题的支持。

电子行业及高校教学改革的高速发展有目共睹,但作者自身的水平和经验有限,书中出现的错误及不足之处恳请广大读者朋友踊跃地批评指正。对本书的任何意见和建议,敬请发送邮件至 caowen@swust.edu.cn、530149775@qq.com,我们将在后续的印刷及再版中及时改正、改进并致谢!

作 者

# 目 录

|                                 |    |                          |    |
|---------------------------------|----|--------------------------|----|
| 第 1 章 电子系统设计概论                  | 1  | 2.4.5 电容器的选型             | 47 |
| 1.1 电子系统设计的基本工作流程               | 1  | 2.5 电感器                  | 49 |
| 1.2 分析设计任务、查找参考方案、<br>拟定初步设计方案  | 2  | 2.5.1 电感器的结构             | 49 |
| 1.3 单元电路仿真及系统集成仿真               | 2  | 2.5.2 电感器的主要参数           | 52 |
| 1.4 设计电路 PCB                    | 4  | 2.5.3 电感器的串联与并联          | 55 |
| 1.5 元器件选型                       | 5  | 2.5.4 常用电感器              | 56 |
| 1.6 加工、制作电路 PCB                 | 6  | 2.5.5 电感器选型及注意事项         | 58 |
| 1.7 电路的装配、焊接及调试                 | 6  | 2.6 变压器                  | 58 |
| 1.8 修改、升级原先的设计方案, 整理<br>并完成设计文档 | 6  | 2.6.1 变压器的种类、特性及设计       | 59 |
| 第 2 章 电子元器件的分类、功能及选型            | 7  | 2.6.2 变压器的主要参数           | 59 |
| 2.1 元器件的分类、参数及封装                | 7  | 2.6.3 变压器的主要分类           | 60 |
| 2.1.1 元器件的参数标称值                 | 7  | 2.7 晶振                   | 62 |
| 2.1.2 元器件的型号及参数标注               | 9  | 2.7.1 无源晶振               | 62 |
| 2.2 电阻器                         | 13 | 2.7.2 有源晶振               | 63 |
| 2.2.1 电阻器的常见类型                  | 14 | 2.7.3 常用的晶振频率            | 63 |
| 2.2.2 电阻器的主要参数                  | 16 | 2.8 电声器件                 | 63 |
| 2.2.3 电阻器的串联与并联                 | 17 | 2.8.1 麦克风                | 63 |
| 2.2.4 电阻器的选型                    | 19 | 2.8.2 扬声器                | 65 |
| 2.2.5 排阻                        | 20 | 2.8.3 蜂鸣器                | 66 |
| 2.2.6 保险管                       | 21 | 2.9 半导体二极管               | 67 |
| 2.2.7 熔断电阻                      | 22 | 2.9.1 二极管的结构工艺及封装        | 67 |
| 2.2.8 敏感电阻                      | 23 | 2.9.2 二极管的分类             | 68 |
| 2.3 电位器                         | 26 | 2.9.3 二极管的参数及选型          | 71 |
| 2.3.1 电位器的内部结构及工作原理             | 27 | 2.9.4 二极管使用时的注意事项        | 71 |
| 2.3.2 电位器的基本工作电路                | 27 | 2.10 发光二极管               | 72 |
| 2.3.3 常用电位器的分类                  | 28 | 2.10.1 LED 的外形特征         | 72 |
| 2.3.4 电位器的主要参数                  | 32 | 2.10.2 LED 应用电路          | 72 |
| 2.3.5 电位器的选型                    | 34 | 2.11 三极管(双极型晶体管)         | 73 |
| 2.4 电容器                         | 35 | 2.11.1 三极管的常见类型          | 74 |
| 2.4.1 电容器的功能概述                  | 36 | 2.11.2 三极管型号的识别          | 75 |
| 2.4.2 电容器的主要种类                  | 36 | 2.11.3 三极管的选用原则及注意<br>事项 | 75 |
| 2.4.3 电容器的主要参数                  | 44 | 2.12 场效应管                | 75 |
| 2.4.4 电容器的串联与并联                 | 46 | 2.12.1 场效应管的分类           | 76 |
|                                 |    | 2.12.2 MOSFET 的正确使用      | 76 |
|                                 |    | 2.13 集成芯片                | 76 |

|        |                  |     |        |                   |     |
|--------|------------------|-----|--------|-------------------|-----|
| 2.13.1 | 常用集成芯片的基本分类及使用   | 77  | 3.3.12 | 精密整流电路            | 108 |
| 2.13.2 | 集成芯片的型号命名规则      | 77  | 3.3.13 | 电流-电压转换电路         | 109 |
| 2.13.3 | 常用集成芯片的封装及引脚排列规律 | 78  | 3.3.14 | 电压-电流转换电路         | 110 |
| 2.13.4 | 集成芯片的正确使用        | 79  | 3.4    | 电压比较器电路设计         | 111 |
| 2.14   | 接插件              | 80  | 3.4.1  | 单限电压比较            | 111 |
| 2.14.1 | 排针与排插            | 81  | 3.4.2  | 迟滞电压比较            | 113 |
| 2.14.2 | 排针与杜邦线           | 81  | 3.4.3  | 窗口电压比较            | 114 |
| 2.14.3 | 接插件的防呆工艺         | 82  | 3.5    | 功率放大电路设计          | 115 |
| 2.14.4 | 集成芯片插座           | 82  | 3.5.1  | OTL 功放            | 115 |
| 2.14.5 | 其他常用接插件          | 84  | 3.5.2  | OCL 功放            | 116 |
| 2.15   | 开关与继电器           | 84  | 3.5.3  | BTL 功放            | 117 |
| 2.15.1 | 翻转开关             | 85  | 3.6    | 有源滤波电路设计          | 118 |
| 2.15.2 | 自复位按钮            | 88  | 3.6.1  | 滤波电路的计算机辅助设计      | 119 |
| 2.15.3 | 电磁继电器            | 89  | 3.6.2  | 低通滤波电路 (LPF)      | 122 |
| 2.15.4 | 开关的机械抖动与消抖       | 91  | 3.6.3  | 高通滤波电路 (HPF)      | 123 |
| 习题     |                  | 93  | 3.6.4  | 带通滤波电路 (BPF)      | 123 |
| 3.6.5  |                  |     | 3.6.5  | 带阻滤波电路 (BEF)      | 124 |
| 第 3 章  | 模拟电路功能模块设计       | 94  | 3.7    | 波形发生器电路设计         | 125 |
| 3.1    | 模拟电路设计概述         | 94  | 3.7.1  | 正弦波振荡电路           | 125 |
| 3.1.1  | 模拟电路的基本结构        | 94  | 3.7.2  | 矩形波振荡电路           | 127 |
| 3.1.2  | 模拟电路的发展趋势        | 95  | 3.7.3  | 三角波发生电路           | 128 |
| 3.2    | 集成运放基础           | 96  | 3.8    | 晶体管驱动电路设计         | 129 |
| 3.2.1  | 集成运放电路的实用分析方法及步骤 | 96  | 3.8.1  | 晶体管反相驱动电路         | 129 |
| 3.2.2  | 集成运放的电源供电        | 96  | 3.8.2  | 功率负载驱动电路          | 130 |
| 3.2.3  | 集成运放的输出调零        | 97  | 习题     |                   | 130 |
| 3.2.4  | 集成运放的负载驱动能力      | 98  | 第 4 章  | 数字电路单元设计          | 131 |
| 3.3    | 电压放大及转换电路设计      | 99  | 4.1    | CMOS 逻辑门          | 131 |
| 3.3.1  | 同相比例运算放大电路       | 99  | 4.1.1  | 逻辑门的特殊类型          | 132 |
| 3.3.2  | 同相交流放大电路         | 100 | 4.1.2  | 逻辑门的等效替换          | 133 |
| 3.3.3  | 反相比例运算放大电路       | 101 | 4.1.3  | 提高 CMOS 逻辑门的驱动能力  | 134 |
| 3.3.4  | 反相交流放大电路         | 102 | 4.2    | 组合逻辑电路设计          | 134 |
| 3.3.5  | 交流信号分配电路         | 102 | 4.2.1  | 二进制译码器 74HC138    | 135 |
| 3.3.6  | 反相加法电路           | 103 | 4.2.2  | 显示译码器             | 137 |
| 3.3.7  | 差动减法电路           | 103 | 4.2.3  | 数值比较器 74HC85      | 139 |
| 3.3.8  | 仪表放大器电路          | 105 | 4.2.4  | 数据选择器 74HC151     | 140 |
| 3.3.9  | 反相积分电路           | 106 | 4.3    | 计数器设计             | 142 |
| 3.3.10 | 反相微分电路           | 106 | 4.3.1  | 同步计数器 74HC160/161 | 142 |
| 3.3.11 | 峰值检测电路           | 107 | 4.3.2  | 可逆计数器 74HC192/193 | 143 |
|        |                  |     | 4.3.3  | 计数器级联             | 144 |
|        |                  |     | 4.4    | 移位寄存器设计           | 144 |



|                       |                                     |     |                        |                     |     |
|-----------------------|-------------------------------------|-----|------------------------|---------------------|-----|
| 4.4.1                 | 串入-串/并出 8 位移位寄存器<br>74HC164         | 145 | 5.2.3                  | 负电源转换电路             | 172 |
| 4.4.2                 | 串入-并出 8 位移位寄存器<br>74HC595           | 145 | 5.3                    | 电流检测电路设计            | 173 |
| 4.4.3                 | 串/并入-串出 8 位移位寄存器<br>74HC165、74HC166 | 146 | 5.4                    | 电池                  | 174 |
| 4.4.4                 | 双向 4 位移位寄存器 74HC194                 | 147 | 5.4.1                  | 碱性电池、碳性电池           | 174 |
| 4.4.5                 | 十进制脉冲分配器 CD4017                     | 149 | 5.4.2                  | 镍氢电池、镍镉电池           | 174 |
| 4.5                   | 锁存器设计                               | 150 | 5.4.3                  | 铅蓄电池                | 175 |
| 4.6                   | 触发器设计                               | 151 | 5.4.4                  | 一次性锂电池              | 175 |
| 4.7                   | 单稳态触发器设计                            | 152 | 5.4.5                  | 可充电锂电池              | 175 |
| 4.7.1                 | 不可重复触发单稳态触发器                        | 152 | 5.4.6                  | 银锌电池                | 175 |
| 4.7.2                 | 可重复触发单稳态触发器                         | 153 | 5.4.7                  | 太阳能电池               | 175 |
| 4.8                   | 多谐振荡电路设计                            | 154 | 习题                     |                     | 175 |
| 4.8.1                 | CD4047 构成多谐振荡电路                     | 154 | <b>第 6 章 电路设计与软件仿真</b> |                     | 176 |
| 4.8.2                 | CD4060 构成多谐振荡/分频<br>电路              | 154 | 6.1                    | Multisim 仿真软件基本操作   | 176 |
| 4.8.3                 | 逻辑门构成多谐振荡电路                         | 155 | 6.1.1                  | 软件使用须知              | 176 |
| 4.8.4                 | 采用晶振的多谐振荡电路                         | 157 | 6.1.2                  | 软件操作界面              | 176 |
| 4.9                   | 模拟开关设计                              | 159 | 6.1.3                  | 仿真元器件库              | 179 |
| 4.9.1                 | 4 路双向模拟开关 74HC4066                  | 159 | 6.1.4                  | 虚拟仿真仪器库             | 182 |
| 4.9.2                 | 单 8/双 4 路模拟开关<br>ADG608/609         | 160 | 6.2                    | 模拟电路的仿真             | 183 |
| 4.10                  | 555 定时器设计                           | 161 | 6.2.1                  | 电气连线、电气节点的放置与<br>删除 | 184 |
| 4.10.1                | 多谐振荡电路设计                            | 161 | 6.2.2                  | 电源、信号源、参考地的设置       | 184 |
| 4.10.2                | 单稳态电路设计                             | 162 | 6.2.3                  | 虚拟示波器的设置            | 186 |
| 4.10.3                | 施密特触发器设计                            | 163 | 6.2.4                  | 虚拟万用表的设置            | 191 |
| 习题                    |                                     | 163 | 6.2.5                  | 电位器的参数调整            | 192 |
| <b>第 5 章 电源电路设计基础</b> |                                     | 164 | 6.2.6                  | 模拟电路的仿真、调试          | 192 |
| 5.1                   | 线性直流电源电路设计                          | 164 | 6.3                    | 数字电路的仿真             | 193 |
| 5.1.1                 | 整流电路                                | 164 | 6.3.1                  | 数字集成芯片              | 193 |
| 5.1.2                 | 滤波电路                                | 166 | 6.3.2                  | 时钟源、电源及数字地          | 193 |
| 5.1.3                 | 电压基准 TL431                          | 168 | 6.3.3                  | 虚拟逻辑分析仪             | 194 |
| 5.1.4                 | 串联反馈型稳压电源电路                         | 168 | 6.3.4                  | 虚拟函数信号发生器           | 195 |
| 5.1.5                 | 固定电压集成稳压芯片                          | 169 | 6.3.5                  | 运行数字电路仿真            | 196 |
| 5.1.6                 | 电压可调集成稳压芯片                          | 170 | 6.3.6                  | 绘制总线                | 197 |
| 5.1.7                 | 低压差 LDO 集成稳压电路                      | 170 | 6.3.7                  | 按钮与开关在数字电路中的<br>应用  | 199 |
| 5.2                   | 开关电源电路                              | 170 | 6.4                    | 子电路的创建              | 201 |
| 5.2.1                 | 降压型 BUCK 电路                         | 171 | 6.4.1                  | 子电路的创建概述            | 201 |
| 5.2.2                 | 升压型 BOOST 电路                        | 172 | 6.4.2                  | 搭建子电路的内部电路结构        | 201 |
|                       |                                     |     | 6.4.3                  | 子电路输入/输出端口设定        | 202 |
|                       |                                     |     | 6.4.4                  | 调用子电路完成电路的仿真        | 202 |
|                       |                                     |     | 习题                     |                     | 203 |

|  |     |                                  |     |
|--|-----|----------------------------------|-----|
| <b>第 7 章 计算机辅助电路 PCB 设计</b> .....      | 204 | 8.2.3 多层 PCB 的丝网印刷工艺             | 261 |
| 7.1 印制电路板设计概述                          | 204 | 8.3 手绘制板工艺                       | 261 |
| 7.1.1 PCB 的演变历史                        | 204 | 8.3.1 鸭嘴笔手绘制板工艺                  | 261 |
| 7.1.2 PCB 设计的任务及要求                     | 204 | 8.3.2 手绘制板工艺的应用范围及<br>局限性        | 262 |
| 7.1.3 基于 Altium Designer 的 PCB<br>设计流程 | 205 | 8.4 紫外曝光制板工艺                     | 262 |
| 7.2 电路原理图设计                            | 205 | 8.5 雕刻制板工艺                       | 263 |
| 7.2.1 创建并保存 PCB 工程、原<br>理图设计文件         | 206 | 8.5.1 手工雕刻 PCB 制板工艺              | 263 |
| 7.2.2 加载原理图库文件                         | 209 | 8.5.2 机械雕刻 PCB 制板工艺              | 264 |
| 7.2.3 原理图库元器件在绘图工作<br>区中的操作            | 212 | 8.5.3 激光雕刻 PCB 制板工艺              | 264 |
| 7.2.4 电气连线                             | 220 | 8.6 热转印 PCB 制板工艺                 | 264 |
| 7.3 设计 PCB                             | 223 | 8.6.1 热转印 PCB 制板工艺的特点            | 264 |
| 7.3.1 PCB 设计流程                         | 223 | 8.6.2 针对热转印工艺对 PCB 版图<br>进行修改    | 265 |
| 7.3.2 新建 PCB 文件                        | 223 | 8.6.3 热转印 PCB 制板工艺的基本<br>流程      | 266 |
| 7.3.3 PCB 的长度计量单位                      | 226 | 8.7 金属墨滴 PCB 制板工艺                | 272 |
| 7.3.4 PCB 板外框的规划设计                     | 226 | 习题                               | 272 |
| 7.3.5 将电路原理图导入 PCB 设计<br>文件            | 228 | <b>第 9 章 元器件装配、焊接及拆焊工艺</b> ..... | 273 |
| 7.3.6 元器件在 PCB 中的布局                    | 230 | 9.1 装配工艺                         | 273 |
| 7.3.7 设定 PCB 的布线规则                     | 233 | 9.1.1 直插元器件在 PCB 中的插装            | 273 |
| 7.3.8 对 PCB 进行电气布线                     | 237 | 9.1.2 元器件插装前的准备工作                | 276 |
| 7.4 编辑原理图库元器件                          | 244 | 9.1.3 元器件插装过程中的典型故障              | 278 |
| 7.4.1 新建原理图库文件                         | 244 | 9.2 常规电子焊接工艺                     | 279 |
| 7.4.2 创建并编辑原理图库元器件                     | 245 | 9.2.1 电子焊接工艺概述                   | 279 |
| 7.4.3 修改并编辑系统自带的原理<br>图库元器件            | 250 | 9.2.2 常用焊接工艺的分类                  | 279 |
| 7.5 创建 PCB 封装库元器件                      | 252 | 9.2.3 锡焊的原理及基本条件                 | 280 |
| 7.5.1 新建并保存 PCB 库文件                    | 252 | 9.2.4 焊料                         | 282 |
| 7.5.2 PCB 封装库元器件的创建流程                  | 253 | 9.2.5 助焊剂                        | 284 |
| 7.5.3 加载自制的 PCB 封装库文件                  | 256 | 9.2.6 电烙铁                        | 285 |
| 习题                                     | 256 | 9.2.7 其他焊接辅助工具                   | 291 |
| <b>第 8 章 电路 PCB 加工及制作工艺</b> .....      | 257 | 9.2.8 手工焊接工艺                     | 297 |
| 8.1 PCB 制板工艺概述                         | 257 | 9.2.9 特殊元器件的焊接工艺                 | 302 |
| 8.1.1 敷铜板                              | 257 | 9.3 拆焊工艺                         | 303 |
| 8.1.2 电路 PCB                           | 258 | 9.3.1 毁坏式拆焊工艺                    | 303 |
| 8.2 丝网印刷制板工艺                           | 260 | 9.3.2 手工逐点拆焊工艺                   | 303 |
| 8.2.1 单层 PCB 的丝网印刷工艺                   | 260 | 9.3.3 局部集中加热拆焊工艺                 | 306 |
| 8.2.2 双层 PCB 的丝网印刷工艺                   | 261 | 9.3.4 拆焊工艺的特点                    | 306 |
|  |     | 9.4 表面贴装焊接工艺                     | 307 |
|  |     | 9.4.1 贴片元器件的特点                   | 307 |



|                                 |     |  |     |
|---------------------------------|-----|--|-----|
| 9.4.2 贴片元器件的手工焊接及拆焊工艺           | 308 | 10.7 驻极体麦克风的简单性能检测                             | 326 |
| 习题                              | 311 | 10.8 开关类元器件的检测                                 | 326 |
| <b>第 10 章 元器件参数测试、质量检测及等效代换</b> | 312 | 习题   | 326 |
| 10.1 电阻类元器件的测量与测试               | 312 | <b>第 11 章 电路系统调试工艺</b>                         | 327 |
| 10.1.1 固定电阻的检测                  | 312 | 11.1 电路系统调试人员需要具备的基本技能                         | 327 |
| 10.1.2 固定电阻的故障判别及其替换            | 314 | 11.2 常用的电路调试仪器仪表                               | 328 |
| 10.1.3 熔断电阻器的检测                 | 314 | 11.3 电路系统调试的基本步骤                               | 329 |
| 10.1.4 敏感电阻的检测                  | 315 | 11.3.1 预检查                                     | 329 |
| 10.1.5 电位器的检测                   | 315 | 11.3.2 通电调试                                    | 330 |
| 10.2 电容器的测量与测试                  | 316 | 11.3.3 整机联调                                    | 332 |
| 10.2.1 使用数字万用表对电容器进行参数测试        | 316 | 11.4 电路调试过程中的常见故障排查                            | 332 |
| 10.2.2 使用模拟万用表对电容器进行性能评估及故障检测   | 317 | 11.4.1 观察法                                     | 333 |
| 10.2.3 电容器的故障类型及判别方法            | 318 | 11.4.2 测量法                                     | 334 |
| 10.2.4 采用观察法识别电容器故障             | 318 | 11.4.3 替换法                                     | 335 |
| 10.2.5 电容器的等效代换原则               | 319 | 习题   | 336 |
| 10.3 电感器与工频变压器的检测               | 319 | <b>第 12 章 电子电路课程设计示例</b>                       | 337 |
| 10.3.1 电感器的故障类型及检测              | 319 | 12.1 电子电路课程设计概述                                | 337 |
| 10.3.2 工频变压器的检测                 | 320 | 12.2 电子电路课程设计示例                                | 338 |
| 10.3.3 工频变压器的主要故障及维修            | 321 | 12.3 电子电路课程设计的总结与展望                            | 344 |
| 10.4 二极管的识别与测试                  | 321 | 习题   | 344 |
| 10.4.1 利用数字万用表的二极管挡测试普通二极管      | 321 | <b>附录</b>                                      | 345 |
| 10.4.2 利用模拟万用表的欧姆挡测试普通二极管       | 322 | 附录 A 模拟电路常用元器件的内部结构及引脚排列                       | 345 |
| 10.4.3 稳压二极管的检测                 | 322 | 附录 B 常用数字集成逻辑电路的型号及功能                          | 346 |
| 10.4.4 LED 的检测                  | 322 | 附录 C 元器件常见封装前缀的含义及尺寸                           | 347 |
| 10.4.5 桥堆的检测                    | 323 | 附录 D 常用稳压二极管的标称稳压值                             | 348 |
| 10.5 三极管的引脚识别及质量检测              | 323 | 附录 E 元器件单位的数量级标识                               | 348 |
| 10.5.1 三极管的引脚排列规律               | 323 | 附录 F Altium Designer 软件中的常用原理图库元器件             | 349 |
| 10.5.2 双极型三极管的检测                | 324 | 附录 G 常用元器件在 Altium Designer 软件中的封装参数 (单位: mil) | 350 |
| 10.5.3 MOSFET 场效应管的检测           | 325 | <b>参考文献</b>                                    | 353 |
| 10.6 集成芯片的测试                    | 325 |  |     |

# 第1章 电子系统设计概论

电子系统设计是按照一定的原理和规则,采用合适的方法手段设计出满足任务要求的完整电路系统;这不仅仅局限在单纯的功能电路设计上,而应包含电路系统的结构规划、元器件选型、单元电路功能仿真、电路 PCB 板图设计与加工、元器件装配与焊接、单元电路及系统整机调试等密切相关的完整工作体系。

对于一个多人参加的电子设计项目,往往需要一名项目负责人,对所有的工作内容进行有机分割,然后再落实给每位项目参与人员(团队),并负责监督、控制整个设计的进展程度,协调各单元工作的有序衔接。

每位项目参与成员除了负责自己所分担的具体工作外,也需要和项目中其他相关人员进行接口方案的沟通;最后在总负责人的协调组织下,参与项目的个人和团队共同对整个系统设计进行联合测试与调试。

对功能简单的小型电子系统设计项目(如电子技术课程设计)而言,则需要每位设计者参与并完成从电路方案选择与对比、单元电路的仿真与设计、电路 PCB(Printed Circuit Board, 印制电路板)的设计与制作、电路装配焊接与调试、设计报告写作的全套工作,通过全面的锻炼,为将来参与大型的电子系统设计项目奠定坚实的基础。

## 1.1 电子系统设计的基本工作流程

电子系统设计的基本工作流程如图 1-1-01 所示。

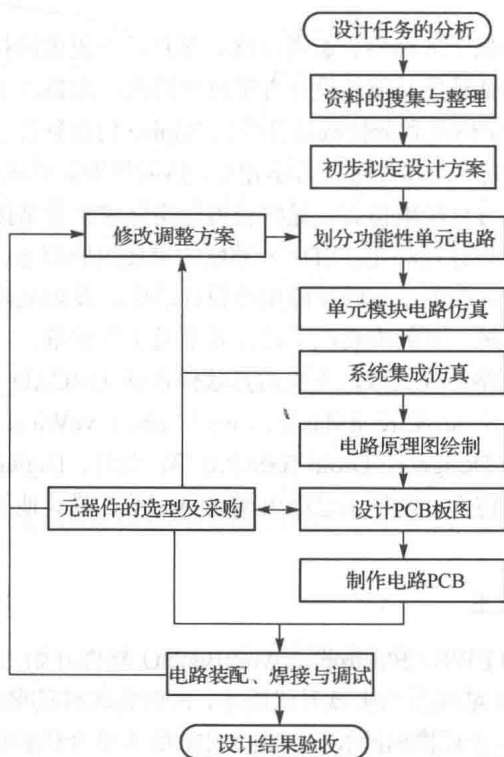


图 1-1-01 电子系统设计的基本工作流程

从图 1-1-01 可以看出, 电子系统设计的主要几个模块包括: 电路方案的设计与优化调整、电路单元的设计及仿真、电路 PCB 的设计与制作、元器件的选型及采购、电路系统的装配与调试。各个模块之间相互影响、相互渗透。例如, “元器件的选型及采购” 模块直接影响电路设计方案的制定、电路 PCB 设计结果, 而“电路系统的装配与调试” 将反过来影响电路及 PCB 设计方案。

## 1.2 分析设计任务、查找参考方案、拟定初步设计方案

设计任务往往会提出较为详细的功能指标, 而不会指定某种思路。每个设计任务不会凭空产生, 而肯定会与某些设计具有千丝万缕甚至相互依存的关系。因此, 设计任务的“破题” 将是一个至关重要的阶段。

通过设计任务的陈述, 首先需要明确基本的设计方向, 然后围绕该设计方向展开资料的搜索、查阅、汇总、整理, 初步梳理出相关的设计思路。随着网络技术的发展, 当前查找资料的平台日益增多, 除了传统的搜索引擎 Google、Baidu、维基百科之外, 还有豆丁网、360DOC、百度文库、道客巴巴等众多的在线分享平台; 而在各类大中专院校, 还有图书馆的馆藏书籍和维普、CNKI 等电子数据库文献可供查阅。

通过大量查阅和收集相关资料, 剔除相关性不高的内容, 然后把剩余的参考方案或设计思路进行对比, 从中选出相对较为可行的首选设计方案及少数几项备用方案。在这一过程中, 可能没有直接的解决方案, 这就需要设计者对相关方案进行集成、创新。

接下来, 根据拟定的首选设计方案, 设计者需要开始绘制总的设计框图, 并将设计内容进行功能模块的有机划分, 得到若干功能相对独立的电路单元。

## 1.3 单元电路仿真及系统集成仿真

早期的电路设计工程师根据个人经验、参考电路、芯片厂家提供的技术文档展开设计, 然后搭建电路进行测试, 再根据实际测试结果对原始设计方案进行修改、调整, 工作强度大。

20 世纪 70 年代, 加州大学伯克利分校成功开发出 PSpice 仿真软件之后, 引领着电路设计工程师的工作重心逐步开始调整。首先对元器件进行数学建模, 然后借助计算机强大的数据存储及运算功能, 对电路的工作状态、运行结果进行精确仿真, 最终获得与实际结果非常接近的波形与数据。

自此, 电路仿真成为电子设计自动化 (EDA) 领域的重要组成部分。专业的仿真软件通过对仿真波形的测试及其相关参数分析, 帮助工程师排除电路设计缺陷, 发现故障背后隐藏的问题; 通过优化电路参数, 减少后续测试工作量、有效提高电子设计效率及工作质量。

目前在模拟电路、数字电路仿真领域, 主流仿真软件包括 ORCAD\_PSpice、Multisim、Proteus、Altium Designer、TINA Design Suite、CircuitMaker、CircuitLab、LiveWire、CIRCUIT WIZARD、Edison、Bright Spark、Electronic Circuit Designer、Droid Tesla Pro 等, 此外, Digital Works 及一些 FPGA 开发系统也能对通用型数字电路进行仿真。近年来已经出现在 Android 或其他智能手机平台上运行的电路仿真软件, 如EveryCircuit。

### 1. Multisim 仿真软件概述

从 20 世纪 80 年代推出的 EWB (Electronics WorkBench) 软件开始, 加拿大图像交互技术公司 IIT (Interactive Image Technoligics) 陆续发布多款升级版本, 同时将软件的名称更改为 Multisim, 意为“多功能电路的仿真”。经过不断完善后推出的 Multisim 8.3.30 版本至今仍被广泛应用在模拟电路、数字电路的仿真领域。

IIT 公司并入美国国家仪器 (NI) 有限公司后, 推出了 Multisim 9、10、10.1、11.0 等升级版本。Multisim 9 以后的版本与 Multisim 8.3.30 相比, 最大的改进在于增加了单片机仿真、开关电源仿真与虚拟仪器方面的内容, 对于传统的模拟电路与数字电路仿真的变化并不大。从 Multisim 10 开始, 软件仿真的收敛性大大增强。

## 2. Multisim 进行电路仿真的基本流程

电路设计人员通过使用 Multisim 交互式地搭建模拟、数字系统的仿真电路, 再结合软件提供的虚拟仪器仪表进行信号的测试, 从而完成“理论→设计→仿真”的全新设计流程。Multisim 仿真软件的基本体系结构如图 1-3-01 所示。

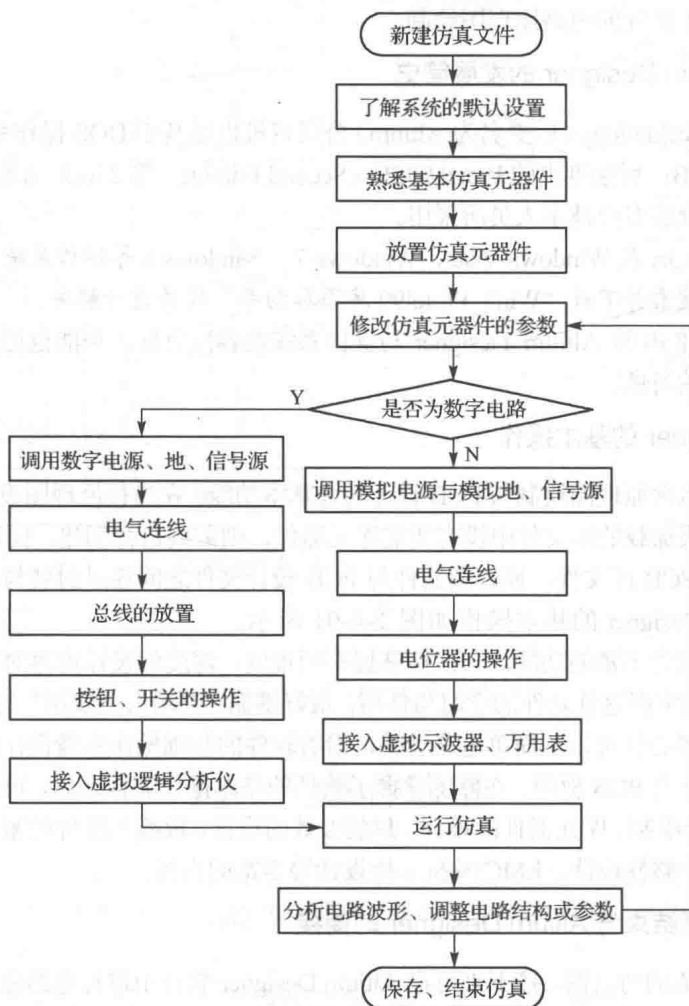


图 1-3-01 Multisim 仿真软件的基本体系结构

## 3. 复杂电路系统的仿真

对一个完整的电路系统进行设计、仿真时, 除非电路非常简单, 一般都不提倡将所有元器件集中在一个仿真文件下运行, 合理的做法是:

- (1) 将复杂的电路系统划分为功能、结构相对独立的不同子模块;
- (2) 对各个子模块分别进行仿真, 以提高仿真精度和收敛性;

(3) 根据各单元模块之间的连接关系决定是否需要进行合成仿真。

如各单元电路之间没有复杂的信号反馈关系,只具有单向的信号传递,则将各个仿真电路单元组合在一起即可构建完整电路系统。但如果各单元电路之间存在复杂的信号反馈,则需要选择相关单元进行合成仿真,此时可能会出现收敛性变差、仿真报错的不正常现象。

## 1.4 设计电路 PCB

常用的 PCB(印制电路板)设计软件包括 Protel 99SE、DesignSpark、PowerPCB、Multisim、Proteus、Altium Designer、WiringX、EAGLE、CSiEDA、CIRCUIT WIZARD。此外,Visio、sPlan、AutoCAD 这类软件则非常适用于单纯的电路原理图绘制。

### 1. Protel→Altium Designer 的发展简史

澳大利亚 Protel Technology(后更名为 Altium)公司曾推出过基于 DOS 操作系统的 TANGO 软件,用于辅助设计电路 PCB;后续推出的 Protel 99SE(Second Edition,第 2 版)功能强大、设计速度快、上手容易,目前仍被众多专业技术人员所采用。

☞提示 Protel 99SE 在 Windows Vista、Windows 7、Windows 8 等操作系统中不能直接加载库文件,对此可在网络中搜索并下载“Win7\_Protel99 库添加助手”软件进行解决。

Altium 公司后来推出的 Altium Designer 与操作系统兼容性更好,功能也更强大,全中文的操作界面更加适合中国人的习惯。

### 2. Altium Designer 的基本操作

Altium Designer 包含原理图绘制与 PCB 设计两大基本功能。在进行原理图设计时,需要加载必要的原理图库文件,如果加载的库文件中没有所需库元器件,则需要自行创建。同理,在进行电路 PCB 设计时,则需要加载 PCB 库文件。原理图文件与 PCB 设计文件之间通过封装与电气连接关系有机地结合为一体。Altium Designer 的基本操作如图 1-4-01 所示。

Altium Designer 包含丰富的功能,一次性掌握不同难度、深度的设计内容对于初学者而言实则没有必要。为了能够尽快掌握这款软件的学习与使用,最好遵循“够用”、“实用”的基本原则,抓住“如何设计出 PCB”这一核心任务,从简单电路着手,沿着软件的基础操作步骤设计出电路原理图,再根据电路原理图初步设计出 PCB 板图。在熟练掌握了软件的基本操作流程之后,再进行一些扩展性知识内容的学习,如总线的绘制、库元器件的设计、封装参数的设计、板载元器件的紧凑化布局、多层 PCB 的规划与设计、信号完整性设计、EMC 及抗干扰设计等丰富的内容。

### 3. Multisim 仿真结果与 Altium Designer 的衔接

根据 Multisim 完成的仿真图,接下来可在 Altium Designer 软件中进行电路原理图的整体绘制;另外,也可以直接将 Multisim 生成的网络表传递给 Altium Designer 进行使用。无论采用哪种方式,都需要注意修改、补充出 Multisim 软件与 Altium Designer 软件不完全一致的元器件(如电源接插件及滤波电容、LED 数码管显示译码单元等)。

完成电路原理图的绘制之后,即可创建该原理图所对应的网络表,接着在 Altium Designer 软件的 PCB 设计环境中,将网络表转化为封装图形和电气连接关系,在一定的电路板面积内,通过移动、调整元器件的布局与相邻关系后得到系统电路的电气连接图;然后利用自动布线功能生成初步的 PCB 草图;最后通过手工修改、调整,得到完整的 PCB 图。

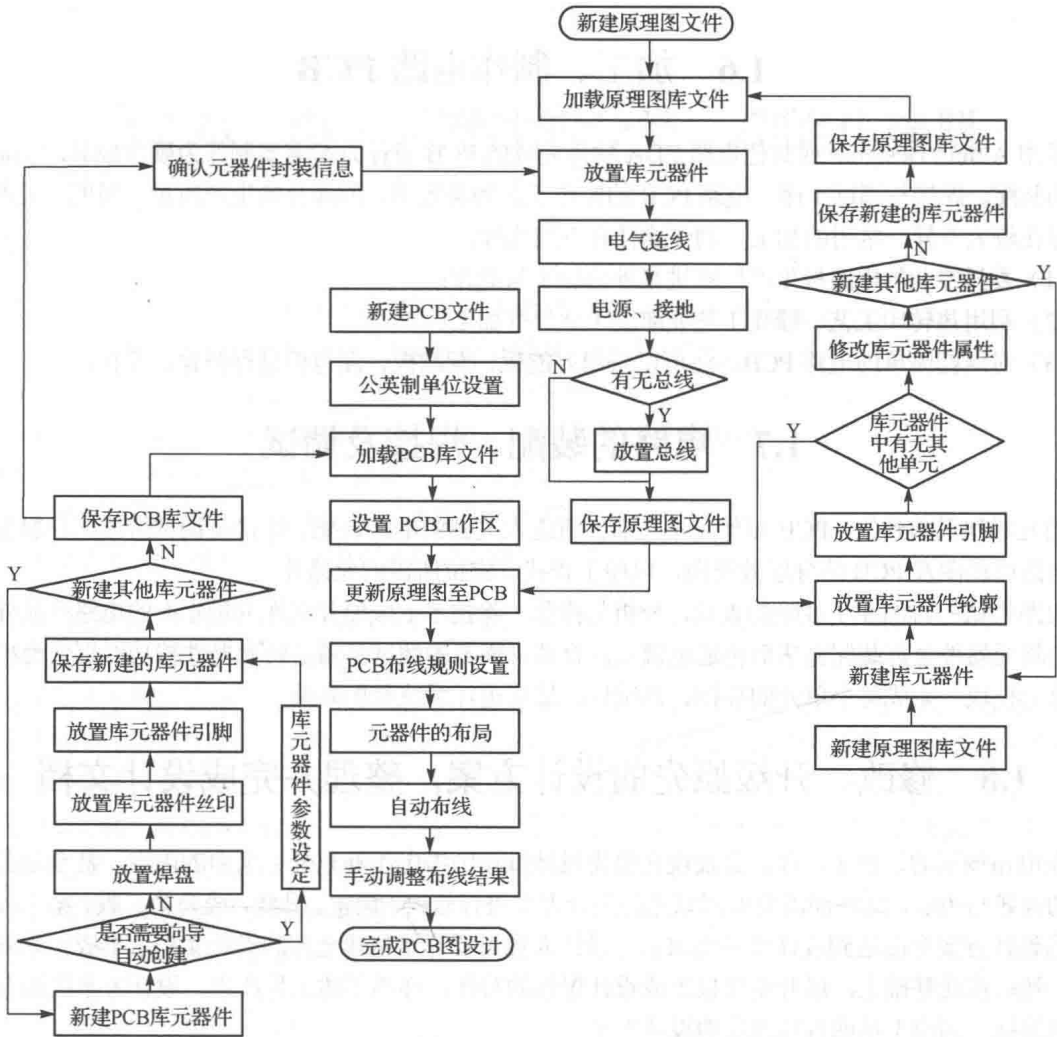


图 1-4-01 Altium Designer 的基本操作

## 1.5 元器件选型

元器件是构成电路系统的基本单元。元器件种类繁多，相同类型的元器件还存在型号、参数及生产厂家等众多的差别。设计者只有对常用电子元器件的特性有了较为深入的认识，才能够在电路设计中进行元器件的合理选型。

在电路仿真阶段就需要进行元器件的合理选型，避免将已停产或难以购买的生僻元器件用于设计方案。在 PCB 设计阶段，则需要重点关注元器件的封装参数，确保能够以合适的价格采购到所需元器件。

**【例 1-5-1】** DIP、PLCC 等较大封装体积的集成芯片，正在被生产厂家调整为 TSSOP、TQFP 等微小体积的封装，传统封装的集成芯片往往价格较贵。

为避免元器件型号与数量的遗漏，可根据 Altium Designer 生成的元器件 BOM 清单（包含型号、数量、封装等信息）增加一定数量的冗余后进行准备。



## 1.6 加工、制作电路 PCB

采用 Altium Designer 或其他电路 EDA 软件完成的 PCB 设计方案需要制作成硬件成品,方能进入后续的装配、焊接与调试工序。电路 PCB 的制作工艺种类较多,所涉及的生产质量、周期、成本、性能也存在较大差异。常用的加工、制作途径有下列几种:

- (1) 委托专业的电路板生产厂家进行外协加工与制作;
- (2) 利用热转印工艺、曝光工艺或雕刻工艺自行加工;
- (3) 对结构简单的电路 PCB,还可以采用万能板、洞洞板、面包板进行搭建、焊接。

## 1.7 电路的装配、焊接及调试

当元器件采购到位、PCB 制作完毕之后,将进入关键的电路装配、焊接及调试阶段。一般需要打印出电路原理图及 PCB 的分层效果图,以便于查找、定位所需的元器件。

电路调试的目的在于故障的查找、分析与排除。除技术上成熟并实现批量生产的电路产品外,一般不会将元器件全部装配完毕后再通电调试。合理、规范的调试步骤是将元器件按功能划分为相对独立的单元模块,完成每个单元的焊接、调试后,最后进行系统整机联调。

## 1.8 修改、升级原先的设计方案,整理并完成设计文档

在电路调试的过程中,往往会发现在原先设计过程中考虑不够充分、全面的内容,甚至还会发现一定的问题与错误,这些都需要返回原先的设计方案进行修改、调整、升级,成为第二版、第三版……

当设计方案全面达到设计任务要求后,设计人员需要开始整理全部的设计文档,形成一系列资料文件。然后在此基础上,展开结题报告或设计报告的写作,详细阐述工作成果、设计方案的综合性能及测试指标,列出不足或有待改进的设计细节。

## 第2章 电子元器件的分类、功能及选型

### 学习要点:

- (1) 熟记颜色对应的数值、E24 系列的 24 种数值规格、常用的耐压值。
- (2) 掌握电阻器的特性及用途,了解各种电阻器的差异及选型。
- (3) 了解电容器的参数识别、极性判断方法及选型。
- (4) 熟悉开关、继电器、接插件、蜂鸣器、MIC 的原理及使用。
- (5) 了解电感及变压器的基本分类及工作原理。
- (6) 熟悉电感、电容、电阻的串、并联参数计算。
- (7) 掌握稳压二极管、LED 的典型应用电路。

电子电路由各类电子元器件按照一定规律组合而成,了解和掌握常用电子元器件的种类、结构、性能、选择条件、使用方法,对设计电路的电气性能、综合可靠性及产品成本都具有重要影响。

每年有很多的新型电子元器件投入商用,但是也有很多的元器件停止生产,逐步退出历史舞台。种类繁多的电子元器件在功能、性能、材料、价格及应用范围上存在较大差异。只有充分认识和熟悉常用电阻器、电容器、电感器、半导体分立元器件、集成芯片的基本特性、主要参数、常见种类特点、选型原则及检测方法,在电路设计过程中才能科学、规范地进行元器件合理选型。涉及的主要内容包括:

- (1) 根据外形特征及电路 PCB 中的标识正确识别元器件类型;
- (2) 准确判断元器件引脚的排列规律;
- (3) 正确判断元器件的引脚极性;
- (4) 掌握元器件表面标注字符与实际参数之间的对应关系;
- (5) 熟悉元器件质量检测的一般方法;
- (6) 了解元器件的替换原则或维修方法;
- (7) 掌握元器件选型的参考原则;
- (8) 对于电位器、可变电容、可变电感等参数可调元器件,需掌握参数调整方法及技巧。

### 2.1 元器件的分类、参数及封装

无须外加电压/电流就能够表现出自身基本特性的元器件,被称为无源元器件(Component),其他元器件则可以归为有源元器件(Device)的范畴,两者合称为“元器件”。另一种具有参考意义的分类标准是判断元器件内部是否包含半导体 PN 结,普通无源元器件内部一般不包含 PN 结。近几年来,随着半导体集成工艺的迅猛发展,无源元器件与有源元器件之间的分类界限开始模糊,表现出了明显的渗透与融合趋势。

典型的无源元器件包括电阻、电容、电感、电位器(可变电阻)、变压器、接插件、开关、继电器、保险器件等;而二极管、三极管、单向可控硅、双向晶闸管、JFET、MOSFET、IGBT、集成芯片则被划分为有源元器件。

#### 2.1.1 元器件的参数标称值

为了让元器件生产企业能够以较高的效率进行电阻、电容、电感等商品化无源元器件的规模化生

产,同时兼顾技术、经济等指标的合理性,国际电工委员会(IEC)于1952年颁布了统一的国际标准,规定以式(2-1-1)计算得到的 $E$ 数列数值作为元器件参数的系列化规格。

$$a_n = (\sqrt[n]{10})^{n-1} \quad (n=1, 2, 3, \dots, E) \quad (2-1-1)$$

若 $E$ 取6、12、24等整数数值, $a_n$ 可分别计算得到6、12、24组序列值;通过保留、圆整一位的小数位数后,得到表2-1-1所示的参数标称值。

表 2-1-1 E24、E12、E6 系列标称值及精度

| 系列  | 允许偏差 | 标称值 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|     |      |     | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2.0 | 2.4 | 3.0 | 3.6 | 4.3 | 5.1 | 6.2 | 7.5 | 9.1 |
| E24 | ±5%  | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 2.2 | 2.7 | 3.3 | 3.9 | 4.7 | 5.6 | 6.8 | 8.2 |     |
| E12 | ±10% | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 2.2 | 2.7 | 3.3 | 3.9 | 4.7 | 5.6 | 6.8 | 8.2 |     |
| E6  | ±20% | 1.0 |     | 1.5 |     | 2.2 |     | 3.3 |     | 4.7 |     | 6.8 |     |     |

从表2-1-1可以看出,E24系列的24个标称值中包含了E12、E6系列的所有标称值,因而在元器件的参数取值中应用最广。而如果E6、E12、E24系列标称值的元器件无法达到更高精度的指标要求时,可以选择更高标准的E48、E96、E192系列标称值。

在式(2-1-1)中,若 $E$ 的取值为48、96、192三个整数值,同时保留 $a_n$ 计算值的两位小数位数,即可得到E48、E96、E192系列标称值,E192系列标称值如表2-1-2所示。

表 2-1-2 E192 系列标称值

|             |      |      |      |             |      |      |      |             |      |      |      |
|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|
| <u>1.00</u> | 1.01 | 1.02 | 1.04 | <u>1.05</u> | 1.06 | 1.07 | 1.09 | <u>1.10</u> | 1.11 | 1.13 | 1.14 |
| <u>1.15</u> | 1.17 | 1.18 | 1.20 | <u>1.21</u> | 1.23 | 1.24 | 1.26 | <u>1.27</u> | 1.29 | 1.30 | 1.32 |
| <u>1.33</u> | 1.35 | 1.37 | 1.38 | <u>1.40</u> | 1.42 | 1.43 | 1.45 | <u>1.47</u> | 1.49 | 1.50 | 1.52 |
| <u>1.54</u> | 1.56 | 1.58 | 1.60 | <u>1.62</u> | 1.64 | 1.65 | 1.67 | <u>1.69</u> | 1.72 | 1.74 | 1.76 |
| <u>1.78</u> | 1.80 | 1.82 | 1.84 | <u>1.87</u> | 1.89 | 1.91 | 1.93 | <u>1.96</u> | 1.98 | 2.00 | 2.03 |
| <u>2.05</u> | 2.08 | 2.10 | 2.13 | <u>2.15</u> | 2.18 | 2.21 | 2.23 | <u>2.26</u> | 2.29 | 2.32 | 2.34 |
| <u>2.37</u> | 2.40 | 2.43 | 2.46 | <u>2.49</u> | 2.52 | 2.55 | 2.58 | <u>2.61</u> | 2.64 | 2.67 | 2.71 |
| <u>2.74</u> | 2.77 | 2.80 | 2.84 | <u>2.87</u> | 2.91 | 2.94 | 2.98 | <u>3.01</u> | 3.05 | 3.09 | 3.12 |
| <u>3.16</u> | 3.20 | 3.24 | 3.28 | <u>3.32</u> | 3.36 | 3.40 | 3.44 | <u>3.48</u> | 3.52 | 3.57 | 3.61 |
| <u>3.65</u> | 3.70 | 3.74 | 3.79 | <u>3.83</u> | 3.88 | 3.92 | 3.97 | <u>4.02</u> | 4.07 | 4.12 | 4.17 |
| <u>4.22</u> | 4.27 | 4.32 | 4.37 | <u>4.42</u> | 4.48 | 4.53 | 4.59 | <u>4.64</u> | 4.70 | 4.75 | 4.81 |
| <u>4.87</u> | 4.93 | 4.99 | 5.05 | <u>5.11</u> | 5.17 | 5.23 | 5.30 | <u>5.36</u> | 5.42 | 5.49 | 5.56 |
| <u>5.62</u> | 5.69 | 5.76 | 5.83 | <u>5.90</u> | 5.97 | 6.04 | 6.12 | <u>6.19</u> | 6.26 | 6.34 | 6.42 |
| <u>6.49</u> | 6.57 | 6.65 | 6.73 | <u>6.81</u> | 6.90 | 6.98 | 7.06 | <u>7.15</u> | 7.23 | 7.32 | 7.41 |
| <u>7.50</u> | 7.59 | 7.68 | 7.77 | <u>7.87</u> | 7.96 | 8.06 | 8.16 | <u>8.25</u> | 8.35 | 8.45 | 8.56 |
| <u>8.66</u> | 8.76 | 8.87 | 8.98 | <u>9.09</u> | 9.20 | 9.31 | 9.42 | <u>9.53</u> | 9.65 | 9.76 | 9.88 |

表2-1-2囊括了E192系列的所有192种标称值,采用E192系列标称值的元器件参数允许偏差有±0.5%、±0.2%、±0.1%和±0.05%等规格,偏差越小,无疑价格也越贵。

E192系列元器件标称值的取值范围最广,向下兼容E96系列、E48系列。

(1)表2-1-2中第1、第5、第9列采用加粗、下画线标注的数值为E48系列的48种标称值,对应的参数偏差多为±2%。

(2)表2-1-2中第1、第3、第5、第7、第9、第11列具有灰色背景表格中的数值为E96系列的96种标称值,对应的参数偏差多为±1%。