



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子技术基础实验

——电子电路实验、 设计及现代 EDA 技术

第四版

华中科技大学电子技术课程组 编

罗杰 陈大钦 主编

高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子技术基础实验

——电子电路实验、
设计及现代 EDA 技术

第四版

华中科技大学电子技术课程组 编
罗杰 陈大钦 主编
罗杰 陈大钦 邓天平 陈林 编

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是在第三版基础上修订而成的,是近年来华中科技大学国家电工电子实验教学示范中心在电子技术实验教学方面的总结。这次修订进一步丰富和完善了实验内容与实验教学方式。全书分为三篇和两个附录。

第一篇为电子电路实验与调试基础知识。第二篇为电子技术实验(含基础实验 22 个、综合设计性实验 7 个),在大多数基础实验中,将传统的硬件电路实验内容和现代 EDA 实验内容融合在一起,以适应不同学时、不同层次的教学要求,各任课教师可以灵活选用。第三篇为常用 EDA 软件的使用,介绍了 OrCAD/PSpice 16.6、ISE 14.7 和 Quartus II 9.1 软件的使用方法。

为适应电子技术实验独立设课和不独立设课的不同要求,本教材中每个实验都附有实验原理、参考电路和思考题。

本书可作为高等学校电子信息类、自动化类专业电子技术基础实验教材(含小型课程设计教材和开展第二课堂活动的参考书),也可以作为职业技术学院相关专业电子技术基础实验、综合电路设计的参考书,对从事电子技术工作的工程技术人员也有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础实验:电子电路实验、设计及现代 EDA 技术 / 罗杰,陈大钦主编;华中科技大学电子技术课程组编. --4 版. --北京:高等教育出版社,2017.2

ISBN 978-7-04-046606-5

I.①电… II.①罗… ②陈… ③华… III.①电子技术-实验 IV.①TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 254521 号

策划编辑 欧阳丹 责任编辑 欧阳丹 封面设计 李小璐 版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹 责任校对 胡美萍 责任印制 赵义民

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京七色印务有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	23.25	版 次	1994 年 4 月第 1 版
字 数	570 千字		2017 年 2 月第 4 版
购书热线	010-58581118	印 次	2017 年 2 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	33.90 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 46606-00

作者声明

未经本书作者和高等教育出版社许可,任何单位和个人不得采用抄袭、部分或全部复制等形式将本书内容出版发行,否则追究法律责任。

第四版前言

当今,电子技术飞速发展,电子系统设计方法日新月异,特别是 MOSFET 器件在电子产品中已占统治地位,为了及时反映该领域的新技术、新方法和华中科技大学该课程教学改革的新成果,对第三版教材进行了修订。这次修订仍然遵循前版“突出基础训练(含基本技能培养)和设计性综合能力、创新能力、计算机应用能力的培养”的宗旨,按照“电子电路实验与调试基础知识(含常用元器件、实验数据处理、基本测量技术、调试与故障检测技术)→模拟电子技术基础实验→数字电子技术基础实验→综合设计性实验→EDA 软件使用”的体系结构进行编排,基本思路是:由简单到复杂、从基础到综合、从设计到创新,循序渐进,培养学生综合运用所学电子技术相关理论知识和分析、解决实际问题的能力,使学生掌握电子技术相关的基本实验与实践技能,帮助学生学习电路设计知识、测试技术和 EDA 技术。

本版是在前版的基础上修订而成的,具体考虑有如下几点:

(1) 改写了电阻器、电容器和电感器等分立元件内容,常用半导体器件则分散在各个实验中介绍。同时,在部分实验的预习要求中,增加了通过互联网搜索引擎输入关键词等手段查询有关元器件资料的训练,以方便学生学习和掌握常用电子元器件的特性及使用方法。

(2) 在基础实验中,加强了器件知识、实验技术和测试方法的介绍,引导学生能够由浅入深地逐步掌握各种电路性能指标的测试方法,让学生快速入门,同时培养学生的科学实验方法和严谨的学风。

(3) 增加了二极管的应用(实验二)和 MOSFET 放大电路(实验四),删除了 MSI 组合逻辑电路设计、电子电路设计基础知识等内容,将相关设计知识融入到各个具体实验中。

(4) 改写了数字电子技术实验的很多内容,并以 74HC 系列和 4000 系列为主进行实验,基本上不再使用 74LS 系列器件。同时将 Verilog HDL 与可编程逻辑器件实验融合在每一个硬件电路实验中,以提高学生掌握现代化设计工具的能力,适应新技术的发展。

(5) 更新了 EDA 软件及相关实验内容。PSpice 软件介绍较新版本 16.6,可编程逻辑器件的开发软件则介绍 ISE 14.7 和 Quartus II 9.1 的使用方法。

现代数字电路和系统基本上不再使用中、小规模集成电路搭建,而是采用 CPLD 或 FPGA 实现,甚至将系统集成在单一芯片上。本书将传统的硬件电路实验内容和现代 EDA 实验内容融合在一起,既节省篇幅,又可以适应不同学时、不同层次的教学需求,建议有条件的学校将 EDA 实验内容纳入到教学计划中。

本书可与康华光主编的《电子技术基础》(第六版)教材配套使用。为适应电子技术实验独立设课和不独立设课的不同要求,本书中每个实验都附有实验原理、参考电路和思考题,多数学生通过自学实验原理内容,即可自行完成实验。实验独立设课时,建议采用开放式实验教学模式,将一学期的实验元器件和实验面包板发给学生自己保管,将必做实验内容和选做实验内容相结合,安排一定的课内学时以利于教师指导和对实验项目的验收,同时开放实验室,让学生通过网上实验预约系统预约实验时间,自主进行实验,激发学生的学习热情与兴趣。实践表明,这种

教学方法是行之有效的,对于培养与提高学生工程实践与设计能力具有明显效果。

参加本版修订工作的有陈大钦(第一、二、三章)、罗杰和邓天平(第四、五、七、八、九章,第六章的实验二十三、实验二十四、实验二十六、实验二十八、实验二十九及附录 A、B)、陈林(第六章的实验二十五、实验二十七)。罗杰和陈大钦共同担任主编,负责全书的组织、修改和定稿。

本书由第二届国家教学名师奖获得者、西安电子科技大学孙肖子教授主审。孙肖子教授仔细阅读了全部书稿,并提出了许多宝贵意见和修改建议,在此谨致衷心的感谢。

本书得到了华中科技大学教务处及电子信息与通信学院的关怀和大力支持,康华光教授和课程组的各位老师十分关心本次修订工作,给予了热情支持并提出了许多修改意见。在本书出版之际,谨向他们致以最诚挚的谢意。

感谢读者多年来对本书的关心与支持。由于水平和时间的限制,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。您可以通过 Luojiewh@gmail.com 给作者发送邮件,我们会阅读所有的来信,并尽可能及时回复。

编 者

2016年6月于华中科技大学

目 录

第一篇 电子电路实验与调试基础知识

第 1 章 电子技术实验基础知识 1

- 1.1 电子技术基础实验的目的和意义 1
- 1.2 电子技术基础实验的流程与要求 2
- 1.3 常用分立元件简介 4
 - 1.3.1 电阻器 4
 - 1.3.2 电容器 10
 - 1.3.3 电感器 16
- 1.4 误差分析与测量结果的处理 19
 - 1.4.1 误差的来源与分类 19
 - 1.4.2 误差表示方法 20
 - 1.4.3 测量结果的处理 22

第 2 章 基本测量技术 25

- 2.1 概述 25
- 2.2 电压测量 27
 - 2.2.1 高内阻回路直流电压的测量 28
 - 2.2.2 交流电压的测量 29
 - 2.2.3 电压测量的数字化方法 34
- 2.3 阻抗测量 35
 - 2.3.1 输入电阻的测量 35
 - 2.3.2 输出电阻的测量 36
- 2.4 增益及幅频特性测量 36
- 2.5 电子示波器及其在测量中的应用 37

- 2.5.1 模拟电子示波器显示波形的原理 38
- 2.5.2 模拟电子示波器的基本组成及工作原理 43
- 2.5.3 双通道模拟示波器 46
- 2.5.4 数字示波器的基本工作原理 49
- 2.5.5 数字示波器的组成和关键技术 50
- 2.5.6 数字示波器的技术参数 54
- 2.5.7 示波器的使用 55

第 3 章 电子电路调试与故障检测技术 ... 56

- 3.1 电子电路的调试 56
 - 3.1.1 调试前的直观检查 56
 - 3.1.2 调试方法 57
 - 3.1.3 调试中的注意事项 58
- 3.2 检查故障的一般方法 59
 - 3.2.1 故障现象和产生故障的原因 59
 - 3.2.2 检查故障的一般方法 60
- 3.3 电子电路干扰的抑制 62
 - 3.3.1 干扰源 62
 - 3.3.2 干扰途径及其抑制方法 63
 - 3.3.3 有关接地的几点基本知识 66

第二篇 电子技术实验

第 4 章 模拟电子技术基础实验 69

- 实验一 常用电子仪器的使用练习 69
- 实验二 二极管的应用 71
- 实验三 集成运算放大器的基本应用 76
- 实验四 MOSFET 放大电路 84
- 实验五 结型场效应管共源放大电路 95
- 实验六 双极型三极管单级共射放大

- 电路 99
- 实验七 共射-共集放大电路 105
- 实验八 负反馈放大电路 109
- 实验九 正弦波产生电路 114
- 实验十 方波和三角波产生电路 117
- 实验十一 精密全波整流电路 120
- 实验十二 有源滤波电路 122
- 实验十三 低频功率放大电路 125

第 5 章 数字电子技术基础实验	131	实验二十二 A/D 转换器	198
实验十四 集成逻辑门的功能测试与 应用	131	第 6 章 综合设计性实验	207
实验十五 组合逻辑电路设计	139	实验二十三 多位 LED 显示器的动态 扫描驱动电路	207
实验十六 脉冲产生与整形电路	149	实验二十四 数字式音量自动调节电路 ..	212
实验十七 集成触发器及其应用电路 设计	155	实验二十五 数字温度计	217
实验十八 计数、译码、显示电路	164	实验二十六 交通信号灯控制电路	224
实验十九 篮球竞赛 24s 定时电路设计 ..	177	实验二十七 音乐彩灯控制电路	228
实验二十 移位寄存器及其应用	183	实验二十八 语音放大电路	233
实验二十一 D/A 转换器	190	实验二十九 简易心电图仪设计	243
第三篇 常用 EDA 软件的使用			
第 7 章 OrCAD/PSpice 16.6 软件的 使用	257	7.4.6 实验任务	290
7.1 概述	257	第 8 章 ISE 14.7 软件的使用	292
7.1.1 PSpice 软件的主要构成	257	8.1 Xilinx ISE 14.7 仿真过程	292
7.1.2 运行 PSpice 的有关规定	258	8.1.1 建立新的设计项目	292
7.1.3 电路仿真的一般流程	261	8.1.2 输入 Verilog HDL 设计文件	294
7.2 三极管共射放大电路的仿真分析	262	8.1.3 输入测试平台文件	295
7.2.1 利用 OrCAD Capture 绘制 电路图	262	8.1.4 编译设计项目,进行功能 仿真	295
7.2.2 直流工作点分析	269	8.2 Xilinx ISE 14.7 逻辑综合与实现	298
7.2.3 时域(瞬态)分析	272	8.2.1 分配引脚	298
7.2.4 交流扫描分析	275	8.2.2 逻辑综合与实现	299
7.2.5 参数扫描分析	279	8.2.3 对目标器件编程,实际测试电路 功能	300
7.2.6 实验任务	281	8.2.4 实验任务	302
7.3 MOS 晶体管特性曲线分析	282	8.3 Xilinx FPGA 实验平台	304
7.3.1 绘制电路图	282	8.3.1 开发板提供的基本资源	305
7.3.2 设置分析参数,观察输出特性 曲线	283	8.3.2 开发板提供的 PMOD 扩展 插座	307
7.3.3 设置分析参数,观察转移特性 曲线	284	8.4 四位显示器的动态扫描控制电路 设计	307
7.3.4 实验任务	285	8.4.1 电路工作原理	307
7.4 差分放大电路分析	286	8.4.2 逻辑设计	309
7.4.1 绘制电路图	286	8.4.3 实际测试	311
7.4.2 设置分析参数	287	8.5 TestBench 的编写	312
7.4.3 执行 PSpice 程序	288	8.5.1 TestBench 的基本结构	312
7.4.4 利用 Probe,显示分析结果	289	8.5.2 Verilog HDL 系统任务	315
7.4.5 调用文字输出文件	290	8.5.3 Verilog HDL 编译器指令	317

第 9 章 Quartus II 9.1 软件的使用	321	9.3 Quartus II 9.1 逻辑综合与实现	333
9.1 Quartus II 9.1 软件主界面及其设计 流程	321	9.3.1 引脚分配	333
9.2 Quartus II 9.1 仿真过程	325	9.3.2 对目标器件编程	335
9.2.1 建立新的设计项目	326	9.3.3 实验任务	338
9.2.2 输入设计文件	327	9.4 Altera FPGA 实验平台	340
9.2.3 编译设计文件	328	9.4.1 开发板提供的基本输入/输出 资源	341
9.2.4 设计项目的仿真验证	329	9.4.2 开发板提供的时钟源与 扩展槽	344
9.2.5 分析信号的延迟特性	333		
附录 A 常用集成电路引脚排列图	351		
A.1 模拟集成电路	351		
A.2 74 系列数字集成电路	352		
A.3 4000 系列 CMOS 集成电路	355		
附录 B 常用逻辑符号对照表	357		
参考文献	358		

第一篇 电子电路实验与调试基础知识

第 1 章 电子技术实验基础知识

1.1 电子技术基础实验的目的和意义

众所周知,科学技术的发展离不开实验,实验是促进科学技术发展的重要手段。我国著名科学家张文裕在为《著名物理学实验及其在物理学发展中的作用》一书所写的序言中,精辟论述了科学实验的重要地位,他说:“科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,也是工程技术的基础”,又说“基础研究、应用研究、开发研究和生产四个方面如果结合得好,经济建设和国防建设势必会兴旺发达。要把上述四个环节紧密贯穿在一起,必须有一条红线,这条红线就是科学实验。”

在电子技术飞速发展、广泛应用的今天,实验显得更加重要。在实际工作中,电子技术科技人员需要分析器件、电路的工作原理;验证器件、电路的功能;对电路进行调试、分析,排除电路故障;测试器件、电路的性能指标;设计、制作各种实用电路的样机。所有这些都离不开实验。此外,实验还有一个重要任务,即要养成人们勤奋、进取、严肃认真、理论联系实际的作风和为科学事业奋斗到底的精神。

电子技术实验,按性质可分为验证性和训练性实验、综合性实验、设计性实验三大类。

验证性和训练性实验主要是针对电子技术本门学科范围内理论验证和实际技能的培养,着重奠定基础。这类实验除了巩固加深某些重要的基础理论外,主要在于帮助学生认识现象,掌握基本实验知识、基本实验方法和基本实验技能。

综合性实验属于应用性实验,实验内容侧重于某些理论知识的综合应用,其目的是培养学生综合运用所学理论的能力和解决较复杂的实际问题的能力。

设计性实验对于学生来说既有综合性又有探索性,它主要侧重于培养学生的创新设计能力和初步进行科学研究的能力。例如,完成特定功能电子电路的设计、安装和调试等。要求学生在教师指导下独立进行查阅资料、设计方案与组织实验等工作,并写出设计性实验报告。这类实验对于提高学生的素质和科学实验能力非常有益,同时也有利于学生创新能力的培养。

自 20 世纪 90 年代以来,电子技术发展呈现出系统集成化、设计自动化、用户专用化和测试智能化的态势。为了培养 21 世纪电子技术人才和适应电子信息时代的要求,我们认为除了完成常规的硬件实验外,在电子技术实验教学中引入电子电路计算机辅助分析与设计的内容(其中包括若干仿真实验和通过计算机来完成设计的小系统)是必需的,也是很有益的。

总之,电子技术实验应当突出基本技能、设计性综合应用能力、创新能力和计算机应用能力的培养,以适应培养面向 21 世纪人才的要求。

1.2 电子技术基础实验的流程与要求

尽管电子技术各个实验的目的和内容不同,但每个实验的基本流程却是类似的,图 1.2.1 所示是电子技术基础实验的基本流程。它包括实验前的准备、电路的组

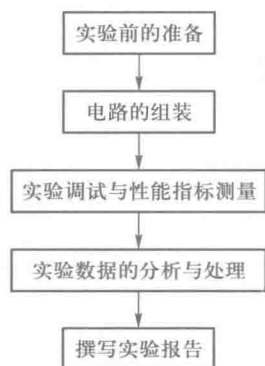


图 1.2.1 实验的基本流程

装、实验调试与性能指标测量、实验数据的分析与处理和撰写实验报告等过程。为了充分发挥学生主动实验的精神,促使其独立思考、独立完成实验并有所创造,我们对电子技术实验的每个过程提出下列基本要求。

1. 实验前的准备

为了避免盲目性,使实验有条不紊地进行,每个实验者实验前应

对实验内容进行预习,并做好以下几个方面的准备:

① 明确实验目的、任务与要求。

② 复习有关电路的基本原理,对思考题作出解答,对于设计性实验则要完成电路设计任务。

③ 根据实验内容,拟出实验方法和步骤,对实验中应记录的原始数据应列出表格待用,并初步估算(或分析)实验结果(包括参数和波形),最后写出预习报告。

实验前,教师要检查预习情况,并对学生进行提问,预习不合格者不准进行实验。

2. 电路组装

对于开放性实验,要求学生以班为单位提前一周到实验室领取所有实验的元器件和实验工具,并要求每次实验课前按实验方案组装好实验电路。对于非开放性实验,在做好预习的前提下,可以到实验室后再组装电路。

电子电路的组装通常采用在面包板上插接和在 PCB 板上焊接两种方式。对于比较简单的单元电路,在面包板上插接电路是一种简便易行的方法。而对于比较复杂的电路,通常需要设计 PCB 板,然后将元器件焊接在 PCB 上进行调试。本书仅介绍在面包板上组装电路的方法。

(1) 面包板的结构

面包板是由有许多小方孔的塑料板组成的,如图 1.2.2 所示。每块插板中央有一凹槽,凹槽两边各有 65×5 个插孔。每 5 个插孔为一组(ABCDE 或 FGHIJ),5 个插孔由内部的金属簧片连通。面包板的上、下各有一条 11×5 的小插孔(图中的 X 和 Y),每 5 个插孔为一组,它们是相通的。X、Y 这两条插孔可用做电源线和地线的插孔。

(2) 元器件的安装

通常按照电路中信号的流向安装元器件,将输入信号安排在左边,输出信号则安排在右边,电源线安排在上边,地线安排在下边,并且元器件的布局要疏密恰当,对于引脚较长的元器件(如电阻、电容等),可以将引脚剪短一些。

集成电路引脚必须插在面包板中央凹槽两边的插孔中,插入时所有引脚应稍向外偏,使引脚与插孔中的簧片接触良好,所有集成电路的方向要一致,缺口朝左(如图 1.2.2 所示),便于正确

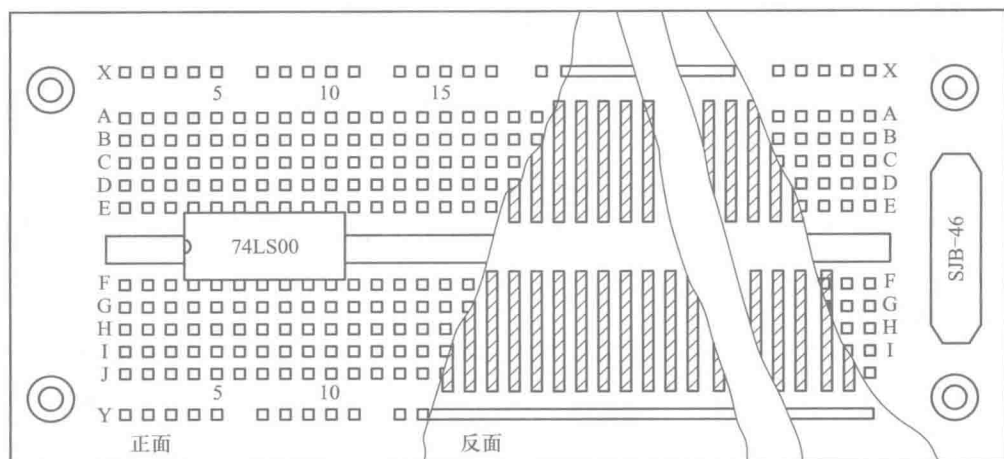


图 1.2.2 面包板结构图

布线 and 查线。集成电路在插入与拔出时,最好用起子或镊子插入到芯片下面的凹槽中轻轻用力撬起,以免引脚弯曲或断裂。

(3) 正确合理布线

一般选直径为 0.6 mm 的单股导线,长度适当。先将两头绝缘皮剥去 7~8 mm,然后把导线两头弯成直角,用镊子夹住导线,垂直插入相应的插孔中。

连线时,要紧贴面包板走线,并要求横平竖直,不要从元器件上面走飞线。为便于检查连线,尽可能采用不同颜色的导线,一般正电源线用红色,负电源线用蓝色,地线用黑色,信号线用其他颜色(如绿色等)。

3. 对电路进行实验调试与性能指标的测量

进入实验室后,为了保证实验效果,要按照实验操作的规范进行实验,具体要求如下:

- ① 参加实验者要自觉遵守实验室规则。
- ② 根据实验内容合理布置实验现场,仪器设备和实验装置安放要适当。图 1.2.3 所示是实验电路板与仪器的布局 and 连接示意图。

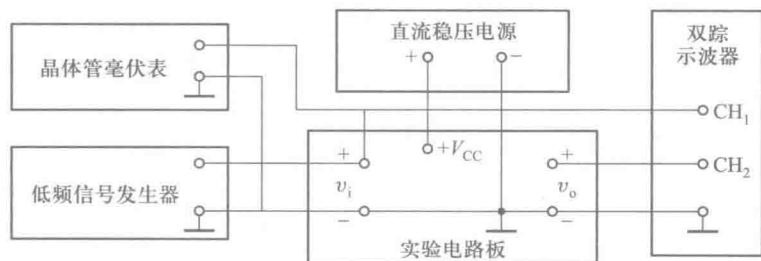


图 1.2.3 实验电路板与仪器的布局 and 连接示意图

③ 按实验方案对实验电路进行测试与调整,使电路处于正常的工作状态。然后要认真记录实验条件和所得数据、波形(并分析、判断所得数据、波形是否正确)。发生故障时应独立思考,耐心排除,并记下排除故障的过程和方法。

④ 发生事故时应立即切断电源,并报告指导教师和实验室有关人员,等候处理。师生的共

同愿望是做好实验,保证实验质量。这里所谓做好实验,并不是要求学生在实验过程中不出现问题,一次成功。实验过程不顺利,不一定是坏事,常常可以从分析故障中增强独立工作能力。相反,“一帆风顺”也不一定有收获。所以做好实验的意思是独立解决实验中所遇到的问题,把实验做成功。

⑤ 实验完成后,要将记录的实验结果送指导教师审阅签字,教师一般会当场抽查部分实验数据,并记录实验情况,作为平时实验操作部分成绩的评分依据。经教师验收合格后才能拆除线路,清理现场。

4. 分析实验数据,撰写实验报告

作为工程技术人员,必须具有撰写实验报告这种技术文件的能力。写实验报告时,必须对测量的实验数据进行分析 and 处理,有关实验数据的处理方法,详见 1.3.3 节。下面给出实验报告的写作要求。

(1) 实验报告内容

① 列出实验条件,包括何日何时与何人共同完成什么实验、当时的环境条件、使用仪器名称及编号等。

② 认真整理和处理测试数据和用坐标纸描绘的波形,并列出表格或用坐标纸画出曲线。

③ 对测试结果进行理论分析,作出简明扼要的结论。找出误差产生的原因,提出减少实验误差的措施。

④ 记录产生故障情况,说明排除故障的过程和方法。

⑤ 对本次实验的心得体会,以及改进实验的建议。

(2) 实验报告要求

① 文理通顺,书写简洁;符号标准,图表齐全;讨论深入,结论简明。

② 实验报告用学校统一的实验报告纸书写,每次新的实验开始时,交上一次的实验报告。实验报告将记入平时成绩。

1.3 常用分立元件简介

常用的元器件有电阻器、电容器、电感器和各种半导体器件(如二极管、三极管、集成电路等)。这里仅介绍电阻器、电容器、电感器的基本知识,各种半导体器件则分散在第 4~6 章的各个实验中介绍。

1.3.1 电阻器

电阻器是电子电路中最常用的元件之一,简称电阻。其主要用途是稳定和调节电路中的电流和电压,其次还可作为分流器、分压器和消耗电能的负载等。电阻器种类很多,通常可以分为三类:固定电阻器、电位器和敏感电阻器。这里仅介绍前两种电阻器的结构及主要性能指标。

一、电阻器和电位器的外形及符号

1. 固定电阻器

实际的电阻可以由许多不同的材质构成。根据制作材料和工艺不同,可分为膜式电阻、实芯

电阻、金属线绕电阻(RX)和特殊电阻四种类型。常用电阻器的外形及符号如图 1.3.1 所示。

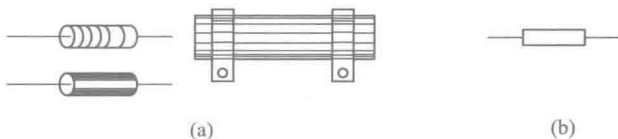


图 1.3.1 常用电阻器的外形及符号

(a) 外形;(b) 符号

2. 电位器

电位器(Potentiometer)是一种具有三个接线端子的可变电阻器,其阻值在一定范围内连续可调。常用电位器的外形及符号如图 1.3.2 所示。

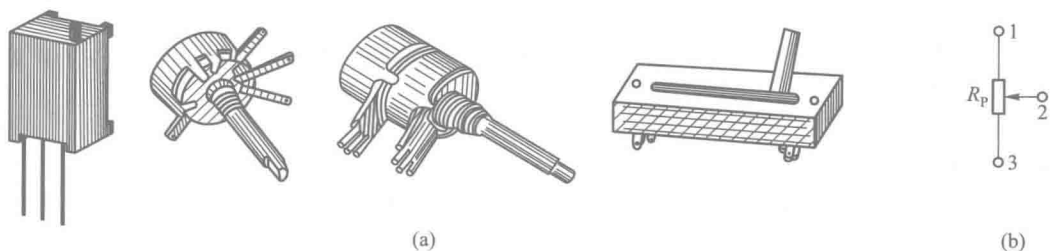


图 1.3.2 常用电位器的外形及符号

(a) 外形;(b) 符号

电位器的分类有以下几种:

按电阻体材料,可分为薄膜电位器和线绕电位器两种。薄膜电位器又可分为 WTX 型小型碳膜电位器、WTH 型合成碳膜电位器、WS 型有机实芯电位器、WHJ 型精密合成膜电位器和 WHD 型多圈合成膜电位器等。线绕电位器的代号为 WX 型。

按调节机构的运动方式分,有旋转式电位器、直滑式电位器。

按结构分,可分为单联电位器、多联电位器、带开关电位器、不带开关电位器等;带开关电位器又有旋转式电位器、推拉式电位器、按键式电位器等。

按用途分,可分为普通电位器、精密电位器、功率电位器、微调电位器和专用电位器等。

按阻值随转角变化关系,又可分为线性电位器和非线性电位器,如图 1.3.3 所示。它们的特点分别为:

X 式(直线式):常用于示波器的聚焦电位器和指针式万用表的调零电位器,其线性精度为 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.3\%$ 、 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.05\%$ 。

D 式(对数式):常用于电视机的黑白对比度调节电位器,其特点是,先粗调后细调。

Z 式(指数式):常用于收音机的音量调节电位器,其特点是,先细调后粗调。

所有 X、D、Z 字母符号一般印在电位器上,使用时应

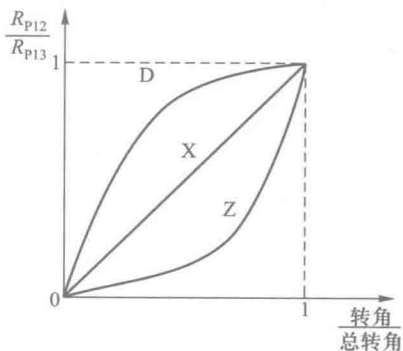


图 1.3.3 电位器阻值随转角变化曲线

注意。

二、电阻器和电位器的主要性能指标

电阻器主要有额定功率、标称阻值、允许误差、最高工作电压、温度系数、电压系数、噪声电动势、高频特性、老化系数等指标。

1. 额定功率

所谓额定功率是指在规定的环境温度和湿度下,假定周围空气不流通,在长期连续负载而不损坏或基本不改变性能的情况下,电阻器上允许消耗的最大功率。功率用符号 P 表示,单位为瓦[特](W)。

电阻器的额定功率越大,允许流过的电流越大。额定功率分为 19 个等级,常用的有 $\frac{1}{16}$ W、 $\frac{1}{8}$ W、 $\frac{1}{4}$ W、 $\frac{1}{2}$ W、1 W、2 W、4 W、5 W、…。线绕电位器应用较多的有 2 W、3 W、5 W、10 W 等。为保证安全使用,一般选其额定功率比它在电路中消耗的功率高 1~2 倍。

2. 标称阻值

为了表示阻值的大小,电阻器在出厂时会在表面标注阻值。标注在电阻器上的阻值称为标称阻值,电阻器的实际阻值与标称阻值往往有一定的差距,这个差距称为偏差(或误差)。电阻器的常用单位是欧[姆](Ω)、千欧(k Ω)、兆欧(M Ω)等。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ M}\Omega = 10^3 \text{ k}\Omega = 10^6 \Omega$$

电阻器的标称阻值和误差的标注方法有直标法、数字标注法和色环法等。

(1) 直标法

直标法是指用文字符号(数字和字母)在电阻体上直接标注出阻值和误差的方法。其中误差的表示一般有两种方式:一是用罗马数字 I、II、III 分别表示误差为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 50\%$ 、 $\pm 20\%$,如果未标注误差,则误差为 $\pm 20\%$;二是采用字母表示误差,各字母对应的允许误差见表 1.3.1,如 J、K 分别表示误差为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 。

此外,直标法中表示阻值时不使用小数点,而是将小于 1 的数字放在英文字母后面。例如,6R2J 表示该电阻的标称值为 6.2 Ω ,允许误差为 $\pm 5\%$;3k6K 表示该电阻的标称值为 3.6 k Ω ,允许误差为 $\pm 10\%$ 。

表 1.3.1 各字母对应的允许误差

字 母	B	C	D	F	G	J	K	M	N
允许误差(%)	± 0.1	± 0.25	± 0.5	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30

线绕电位器的允许误差一般小于 $\pm 10\%$,非线绕电位器的允许误差一般小于 $\pm 20\%$ 。

(2) 数字标示法

对于贴片电阻,则常用三位数字表示电阻的标称值。三位数中,从左自右的第一、二位为有效数字,第三位数字表示有效数字后面加上零的个数(单位为 Ω),如果阻值中有小数点,则用“R”表示,并占一位有效数字。例如标示为“222”的电阻,其阻值为 2 200 Ω ,即 2.2 k Ω ;标示为“103”的电阻,其阻值为 10 000 Ω ,即 10 k Ω ;标示为“470”或“47”的电阻,其阻值为 47 Ω 。

(3) 色环法

色环法是指在电阻器上标注不同颜色的圆环来表示阻值和误差的方法。体积较小的电阻器通常采用色环法,常见的有四个色环(也称为四环电阻器)或者五个色环(也称为五环电阻器)两种标示方法,如图 1.3.4 所示。五环电阻器的阻值精度较四环电阻器的高。

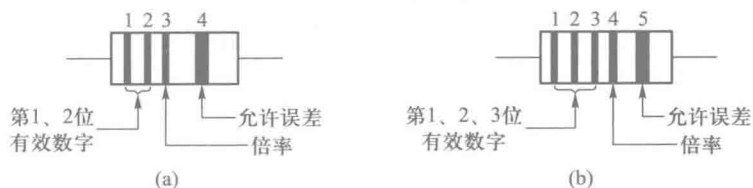


图 1.3.4 电阻的色环标记

(a) 四环标记;(b) 五环标记

不同颜色的色环代表不同的数字,通过色环的颜色可以读出阻值的大小和允许误差。各种色环代表的含义见表 1.3.2。为了便于记忆,我们将颜色与代表的数字编成口诀如下:

棕 1 红 2 橙 3, 4 黄 5 绿 6 是 蓝, 7 紫 8 灰 9 雪白, 黑色是零需牢记。

表 1.3.2 色环颜色的规定

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色环
对应数字	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
倍率	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{-1}	10^{-2}	
允许误差 (%)		± 1	± 2			± 0.5	± 0.25	± 0.1			± 5	± 10	± 20

色环电阻器的识读方法:

四环电阻器的第四条色环代表误差,一般为金色或者银色,首先找到该色环(它与第三条色环的间距较大),从该环向另一个引脚方向排列的三条色环顺序依次为三、二、一。然后按照第一、二环为有效数字,第三环表示倍率(即有效数字后面加上零的个数),第四环表示误差,读出其标称阻值和允许误差,举例如图 1.3.5(a)所示。

五环电阻器的第五条色环代表误差,该色环的宽度较其他环宽一些,且与第四条色环的间距较大,其颜色除了金色、银色外,还可能是棕、红、绿、蓝和紫色。接着按照与四环电阻器类似的识别方法找到四、三、二、一,然后读出其标称阻值和允许误差,举例如图 1.3.5(b)所示。

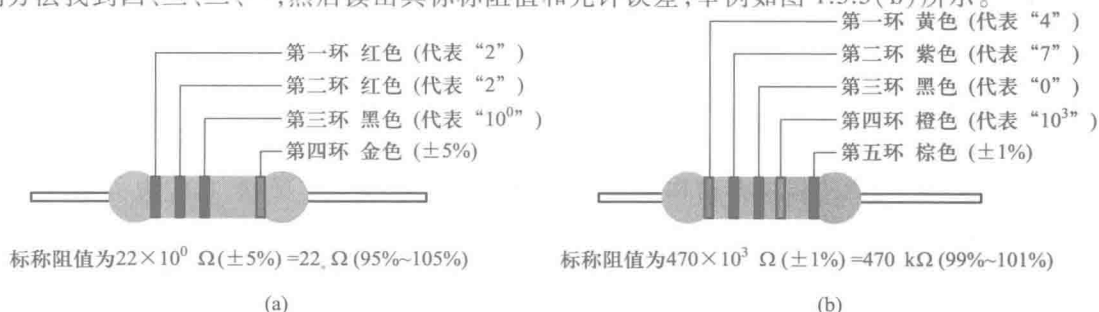


图 1.3.5 色环电阻器阻值和误差的识读

(a) 四环电阻器;(b) 五环电阻器

对于阻值较小的电阻器,则倍率色环用金色或者银色表示,分别代表 10^{-1} 和 10^{-2} 。例如,某电阻器的4个色环排列依次为“棕、灰、金、金”,则其阻值和误差为

$$18 \times 10^{-1} \Omega (\pm 5\%) = 1.8 \Omega (\pm 5\%)$$

3. 允许误差

电阻器是由厂家生产出来的,但厂家不能随意生产任何阻值的电阻器。为了生产和选用的方便,国家规定了电阻器阻值的系列标称值,常用标称阻值系列见表 1.3.3。其中,E6 系列有 6 个标称值,而 E12、E24、E48 系列则分别有 12 个、24 个和 48 个标称值。除此之外,还有 E96 和 E192 等标称值系列,表中未给出 E96 和 E192 系列。

在每一个系列中,还规定了产品的允许误差。所谓允许误差是指该产品的实际阻值相对于标称阻值的最大允许偏差范围。电阻的实际阻值与标称阻值的偏差,除以标称阻值所得的百分数就是电阻的误差。误差越小,表明电阻的精度越高。

电阻器的误差等级与标称阻值系列直接相关。E6、E12 和 E24 为普通电阻器,其允许误差分别为 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 5\%$; E48、E96 和 E192 为高精度电阻器,其允许误差分别为 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 。

厂家在生产某系列的固定式电阻器时,其产品必须按标称阻值生产,其阻值应符合表中所列数值或表中所列数值乘以 $10^n \Omega$,其中 n 为整数,其取值为 $-2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots, 9$ 。并且产品的实际阻值不能超过允许误差。由于 E6、E12 和 E24 系列标称阻值的有效数字只有 2 位,所以用 4 个色环表示;而 E48、E96 和 E192 等高精度系列标称阻值有 3 位有效数字,所以用 5 个色环表示。

表 1.3.3 标称阻值系列及允许误差

系列代号	标称阻值系列	允许误差
E48	100 105 110 115 121 127 133 140 147 154 162 169 178 187 196 205 215 226 237 249 261 274 287 301 316 332 348 365 308 402 422 442 464 487 511 536 562 590 619 649 681 715 750 787 825 866 909 953	$\pm 2\%$
E24	10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82 91	$\pm 5\%$
E12	10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82	$\pm 10\%$
E6	10 15 22 33 47 68	$\pm 20\%$

4. 温度系数

温度每变化 1°C 所引起电阻值的相对变化值,叫做电阻器的温度系数,通常也称为电阻温度特性(TCR)。电阻值随温度升高而增大的称为正温度系数(PTC),反之称为负温度系数(NTC)。温度系数越小,电阻器的热稳定性越好。温度系数的单位为 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。例如,标称阻值为 $1 \text{ k}\Omega$ 的电阻,温度系数为 $\pm 100 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,表示温度变化 1°C ,电阻值的变化为 $\pm 0.1 \Omega$ 。

5. 最高工作电压

最高工作电压是由电阻器、电位器最大电流密度、电阻体击穿及其结构等因素所规定的工作电压限度。对于阻值较大的电阻器,当工作电压过高时,虽然功率不超过定值,但是内部会发生