



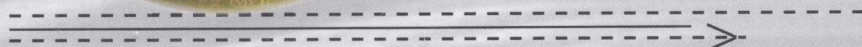
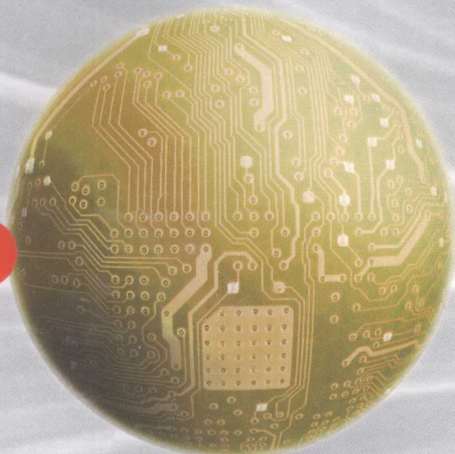
普通高等教育电子信息类专业“十二五”规划系列教材

模拟电子技术 综合实训教程



主编 ◎ 于 卫

主审 ◎ 谢 勇



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

013070943

TN710.4
03

普通高等教育电子信息类专业“十二五”规划系列教材

模拟电子技术综合实训教程

主 编 于 卫
副主编 李志军 张正华
主 审 谢 勇



北航

C1680034

华中科技大学出版社
中国·武汉

TN710.4
03

内 容 简 介

本教材是根据电子信息、通信和电气自动化等专业为配合“卓越工程师教育培养计划”,培养创新性和实践性人才的要求而编写的,以集成运算放大器和模拟可编程逻辑器件应用为主线,以培养大学生的创新和综合实践能力为宗旨,着力提高大学生的设计和应用模拟集成电路的技能。全书分为3个部分,共7章。第1部分包括第1章,介绍了模拟电路实验的基础知识。第2部分包括第2~4章,涵盖以设计和应用性实验为主的模拟电路硬件实验和模拟可编程实验、综合设计和工程训练内容。此部分是重点内容,在全面做好实验的基础上,再通过综合设计和工程训练培养学生的模拟电路与系统设计和实现的提高性技能,也是学生将来进行工程项目开发的基础。第3部分包括第5~7章,涉及常用电子元器件、常用电子仪器和常用仿真、编程和绘图(电路图和印制版图)软件的使用,这部分也是学生必须要熟练掌握的内容。

本教材内容全面、丰富、通俗易懂、实践实用性强,书中列举了大量的设计和工程应用实例。将自上而下层次化设计思想引入电路系统设计中,加强集成运算放大器和模拟可编程器件的工程实践应用是本教材的一大特色。本教材可作为电子信息、通信、电气自动化、物联网、测控等专业的学生模拟实验和综合训练教材,也可作为供电一体化、机械等专业的学生参考的实践教材;既适合于本科,又适合于专科及高职高专类学生使用,还可以供从事模拟电路和系统开发与应用的广大教师和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术综合实训教程/于卫主编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.8
ISBN 978-7-5609-8980-8

I. 模… II. 于… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 102672 号

模拟电子技术综合实训教程

于 卫 主 编

策划编辑:谢燕群

责任编辑:熊 慧

封面设计:李 嫒

责任校对:马燕红

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:14

字 数:373千字

版 次:2013年8月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言 Preface



创新是大学生最重要的素质之一,一个具有创新能力的大学生,必须具有创新的理论知识基础和创新的实践能力,这样才能敏锐地发现问题、准确地分析问题、有效地解决问题。因此,全面实施以培养开拓创新能力和实践动手能力为核心的素质教育是当前高等工科院校实践教学改革的重要目标,也是“卓越工程师教育培养计划”的重要目标,更是培养适应现代科学技术发展和 21 世纪社会需求的专业性复合型人才的重要举措。目前实践教学在工科专业教学体系中的地位正愈来愈得到应有的重视,实践教学和理论教学已经成为培养学生创新能力与工程实践能力相辅相成的两个重要方面。

经过多年的努力,“模拟电子技术”课程的理论教学和教材建设取得了很大的进展,但实践教学改革和教材建设相对滞后,没有比较系统的、完整的、强调器件应用基础、体现创新能力和动手能力训练的综合性实践教材,学生往往按照一本简单的实践讲义或实践指导书规定的实践步骤去做,收效甚微。为了使大学生真正重视实践教学,提高创新和实践动手能力,确保实践教学的效果,目前各高等院校正全面进行实践教学改革,并结合“卓越工程师教育培养计划”的要求,在电子技术实践创新能力培养过程中,逐步注重实践教学体系的“四结合”,即基础验证性实验、设计应用性实验、课程设计和大型综合设计相结合;课内实践与课外实践相结合;实践教学与科研训练相结合;校内实践与企业实习相结合。要求学生在完成计划内的实验和设计基础上,积极参加计划外实践,如课外科技兴趣小组、设计竞赛小组,通过科研训练和电子作品制作,系统地掌握电子产品设计和研制的整个工艺流程。学校应该积极创造硬件条件,并配备指导教师帮助学生将在课外研究设计和实践服务中所遇到的难题再带回到实验室内解决。最终使大学生具备工程实践能力、创新能力和专业竞争力。正是基于这样的认识和要求,教材从应用能力和工程实践的角度,以工程师培养为主线,突破理论教学的学时内容限制,总结了重要的模拟集成电路的功能及应用,不仅为大学生计划内的实践和设计提供了基本内容,而且为课外实践、科研训练、设计竞赛、产品制作等提供了大量的素材。我们以极大的热情尝试编写这本集综合性、先进性、设计性和实用性为一体的综合实践教材,希望该教材有助于全面推行实践教学改革和全面实施“卓越工程师教育培养计划”。

一、本教材定位

我们对新的实践教学体系进行了层次化设计,将整个实践教学分为四个层次,即基础实验层、综合设计层、课外科技活动层和电子产品开发层。计划内实践教学定位在前三个层次。本教材适合电子信息、通信、自动、电气、测控、智能等专业的学生层次式实践教学用,可作为独立设课和开放实践教学形式实施。本教材既可作为公办本科实践教材,又可作为民办本科和高职高专教材;既可作为课内实践教学用,又可作为课外实践用;既可供各类大学生使用,又可作为从事电子产品设计与开发的广大教师和工程技术人员的重要参考资料。通过该课程的综合实践训练,学生和相关人员应具有较强的实践技能,培养他们科学的工作方法和严谨的工作作风。

二、本教材特点和意图

(1) 介绍常用电子元器件和电子仪器的使用,让学生掌握其基本应用。

(2) 以设计性实践和搭接硬件电路为主,加强提高学生的设计创新和动手能力。

(3) 将现代电子设计自动化技术(EDA)引入电子线路和技术实践,介绍了 Multisim、PAC-Desinger、Protel 99 SE 三种软件,要求学生学会用其中任一种 EDA 工具分析和设计电子线路并完成仿真测试。在综合设计应用中,先要用一种 EDA 软件进行仿真,在做硬件——安装焊接印制电路板前用 Protel 99 SE 绘制印制电路板。PAC-Desinger 是本教材要重点使用的编程模拟软件。

(4) 大量介绍模拟集成电路,尤其是运算放大器和仪表放大器的应用。

(5) 大篇幅介绍模拟可编程器件及其应用。

(6) 多一点分析,多一点启发,多一点引导,多一点设计和思想上的提示。

(7) 每个实验都设有思考题和故障分析,进一步加强理论分析和实践能力培养。

(8) 减少验证性实验,增加设计性和综合性实验,尽量做到因材施教。

(9) 每个实验项目都设置了若干难度要求不同的实验内容,便于分层次培养。

(10) 增加综合设计及应用性实验内容。

为实现上述意图,我们对“模拟电子技术实践”课程内容进行了适当的整合,在保留了原课程基本内容的基础上,增加了集成运算放大器、仪表放大器和模拟可编程器件及其工程应用内容,充实了模拟电子技术的综合应用和设计训练内容,以及用 Protel 99 SE 绘制原理图与印制电路板图内容,同时我们还自主开发了模拟电子技术综合实践系统,给学生提供了一个实践研究平台。

本书共分 3 部分,第 1 部分介绍模拟电子技术实践的基本知识;第 2 部分为基础实验,以设计性和综合性实验为主;第 3 部分为大型综合设计与工程训练。分 3 个层次开展实践教学。

本书在编写过程中,得到了广大同仁的许多帮助:全国电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员、扬州大学胡学龙教授,以及朱蜀梅、周俊、纪晓华、王莉、鲁玲、杜宇人、钮霞、江丽莉、宁进喜等教师给予了关心和指导,在此表示最衷心的感谢。

由于水平与时间的限制,本书可能有许多不妥之处,望广大老师、同学及其他读者给予批评指正。在此表示谢意。

编者

2013 年 3 月于扬州大学

目录 Content



第1章 基础知识	(1)
1.1 模拟电子技术实验须知	(1)
1.2 实验电路的安装调试技术	(3)
1.3 实验电路的故障分析与排除技术	(4)
1.4 实验误差分析	(5)
第2章 基础实验	(10)
实验1 常用半导体器件的识别和检测	(10)
实验2 晶体管放大电路	(19)
实验3 差动放大电路	(25)
实验4 负反馈放大电路	(29)
实验5 加法与减法运算电路	(33)
实验6 积分与微分电路	(39)
实验7 对数、指数与乘法、除法运算电路	(44)
实验8 放大电路	(51)
实验9 信号处理功能电路	(55)
实验10 测量运算电路	(62)
实验11 信号产生功能电路	(67)
实验12 信号转换功能电路	(73)
实验13 取样定理	(80)
实验14 二阶连续系统的模拟	(83)
实验15 仪表放大器及其应用	(86)
实验16 模拟开关及其应用	(90)
实验17 功率放大功能电路	(96)
实验18 直流稳压电源功能电路	(100)
实验19 用 ispPAC 10 器件设计整数增益电路	(106)
实验20 用 ispPAC 10 器件设计非整数增益电路	(110)
实验21 ispPAC 10 器件混叠器和积分器实验	(113)
实验22 ispPAC 20 精密检波与整流电路设计实验	(115)
实验23 ispPAC 20 压控振荡与波形发生电路设计实验	(119)
实验24 ispPAC 20 过压欠压监控电路设计实验	(122)
实验25 二阶及多阶滤波器的实现	(125)
第3章 综合设计	(131)
3.1 设计一个多波形信号发生器	(132)

3.2	心电信号放大系统的设计	(135)
3.3	设计多功能有源滤波器电路	(137)
3.4	“窗口”电压检测电路设计	(138)
3.5	语音放大电路设计	(140)
3.6	程控直流稳压电源	(143)
3.7	宽带放大器电路设计	(146)
3.8	水温控制系统设计	(148)
3.9	用 ispPAC 20 实现的温度监控器	(150)
3.10	用 ispPAC 20 实现的 AC 200 V 过欠压报警	(152)
第4章	工程训练	(155)
4.1	焊接技术与电子装配工艺	(155)
4.2	整机产品的检测	(159)
4.3	实习产品制作	(161)
第5章	常用电子元器件	(175)
5.1	电阻器和电位器	(175)
5.2	电容器	(177)
5.3	晶体二极管	(180)
5.4	晶体三极管	(182)
5.5	集成电路	(185)
第6章	常用电子仪器简介	(187)
6.1	GDM-8245 双显示数字万用表	(187)
6.2	XJ1631 型数字函数信号发生器	(188)
6.3	XJ4318 型双踪示波器	(189)
6.4	SX2290A 型交流电压表	(192)
6.5	YB1718/YB1719 型半导体直流稳压电源	(193)
6.6	三种常用仪器的使用	(193)
第7章	模拟电路设计常用软件	(196)
7.1	计算机仿真软件 Multisim	(196)
7.2	模拟可编程软件 PAC-Designer	(200)
7.3	电路图绘制软件 Protel 99 SE	(206)
附录A	模拟电子技术实验理论考核自测题	(212)
附录B	模拟电子技术实验实践操作考核自测题	(215)

第1章 基础知识

1.1 模拟电子技术实验须知

“模拟电子技术”是一门实践性很强的课程,对应的课程实验在课程学习中占有重要的地位。通过实验,既能验证模拟电路理论的正确性和实用性,又可以从中发现理论的近似性和局限性,从而发现新问题,形成新思路,产生新设想。模拟电子电路主要包含三类,其中,分立元件电路是基本电路;集成运放电路是重点应用电路;可编程模拟电路是反映最新科技成就的电路。实验中应重点体会集成运放电路与分立元件电路相比的优越性,以及可编程模拟电路与集成运放电路相比的优越性。

1.1.1 模拟电子技术实验的目的

- (1) 掌握常用电工仪表和电子仪器的使用。
- (2) 掌握常用电子器件的检测。
- (3) 掌握常用电路性能指标的测量。
- (4) 能够读懂基本电路图,具备分析电路功能的能力。
- (5) 会查阅和利用技术资料,具备根据需求合理选用元器件构成电路的能力。
- (6) 具备设计、安装和调试具有一定功能电路的能力。
- (7) 能独立组织实验、拟订实验步骤,并正确选用仪器仪表。
- (8) 具备独立分析和解决电路故障的能力。
- (9) 加深对模拟电子电路理论的理解,提高实践动手能力和开拓创新能力。

1.1.2 模拟电子技术实验的形式

- (1) 验证性实验:给定电路及参数,要求测试性能指标,并验证其值与理论计算值是否一致,如果一致,证明原电路图正确。
- (2) 设计性实验:给定电路性能指标要求,要求设计电路、选择器件、拟订实验步骤、搭接电路,并测试性能指标,看其值与理论计算值是否一致,若不一致,则需要修改电路、更换器件,直到测量结果和理论计算值一致。
- (3) 综合性实验:实验内容同时涉及多个知识点。
- (4) 创新性实验:实验在课程中未开设过且具有创意性。

1.1.3 模拟电子技术实验方法

(1) 直接电路实验法(硬件搭试):用实物器件在面包板或印制电路板上安装连接(焊接)好电路,然后测试性能指标。

(2) 计算机软件仿真法:在计算机上建立系统的模型,然后进行调试分析或加入合适的测试信号对所建模型进行测试,以验证系统是否与理论结果一致或符合预期设计目标,若不一致或不符合,则要分析原因,必要时修改电路结构和参数,直至与理论结果一致或符合预期设计目标为止。

计算机软件仿真就是 EDA(电子设计自动化)方法,它通过在计算机上应用 EDA 软件以实现电子线路或电子产品的分析、设计、开发和制造过程的自动化。该方法利用了计算机速度快、存储容量大的特点,具有易掌握、设计速度快、无成本、可靠性高、在制作样机前就做到基本准确等优点。

现在仿真常用的 EDA 软件有 PSpice、Multisim、MAX+PLUS II、FOUNDER、OrCAD、Protel 等。

1.1.4 模拟电子技术实验过程

1. 实验准备阶段

预习实验内容,观看实验教学 CAI 或 VCD,弄清实验目的、原理和内容要求。对于设计性实验要设计好电路,选择好电子元器件,列出所用电子元器件清单。在看懂实验方法后,拟订出详细的实验步骤及实施方案,包括实验电路的调试步骤、测试电路及测试方法。拟订测量仪器,设计好实验数据记录表格,并按要求填写预习报告。

2. 实验操作阶段

实验时应注意观察实验现象,记录好实验数据、波形和所用仪器,实验做完后经老师检查认可,填写运行记录,并由指导老师签字,整理好实验器材,然后离开实验室。

实验时应注意以下事项。

(1) 搭接电路前先检测电子元器件,确保器件完好。

(2) 搭接电路时应确保线路接线正确,即线路无短路、断路、多线和少线等现象,且布局和布线应满足匀称和横平竖直的原则,便于检查和测试。

(3) 对放大电路,应先调整测量静态工作点,再测试线路性能指标。

(4) 对验证性实验,如结果不对,应寻找原因排除故障;对设计性实验,如结果不对,除了寻找原因排除故障外,必要时还应修改电路结构,调换电子元器件,直至结果符合要求。

(5) 通电情况下,不能拔、插电子器件,遇到故障现象需认真分析原因并予以排除,一旦出现异常情况应立刻断电,确保实验中人身及财产的安全。

3. 实验总结阶段

做完实验后应填写实验报告,报告中需详细记录实验名称、目的、原理、所用仪器、操作步

骤、实验数据处理(表格、曲线)、实验结果分析、思考题解答等内容,并在规定时间内把实验报告按班级、课程和指导老师投入指定信箱。实验全部结束后,交还器材,参加实验考核。

1.2 实验电路的安装调试技术

1.2.1 实验电路的安装技术

实验电路在安装过程中应注意以下方面。

(1) 分立元件安装时,应使其极性和标志便于看到,为防止裸露的引线短路,必要时需使用套管,且不要剪短,以便重复使用。集成电路安装时,应跨槽而装,保持器件方向一致,且缺口朝左,然后均匀用力按下;拔出时应用拔钳夹住器件两端或用螺丝刀对撬,垂直往上拔起,不能用手在一端拔起。

(2) 对于多次使用过的集成电路,其引脚必须修理整齐、不能弯曲,所有的引脚应稍向外偏,以便和面包板插孔接触良好。要根据电路图确定器件在面包板上的排列位置,实物应尽可能和电路图上的位置对应起来且保持适当的距离,目的是便于对照检查,方便走线。注意集成电路不要倒插。

(3) 连线通常使用 0.6 mm 的单股线,连接时应横平竖直。为查找方便,连线应用不同的颜色:正电源用红色;负电源用蓝色;地线用黑色;信号线用黄色。导线两头的裸线以 6 mm 为宜,剥伤的导线不要往面包板孔里插。

(4) 布线时要注意在器件周围走线,不允许导线从集成电路上方跨过,以免妨碍排除故障或调换器件。

(5) 一些体积较大的元器件应先装在安装支架上,再用单股线连到面包板上。面包板应保持干净,切勿将异物掉入插孔内,以免造成短路。

1.2.2 实验电路的调试技术

调试技术是对设计安装的电路能否正常工作以及能否达到性能指标进行检查和测量的技术。调试是判断电路性能好坏、各种指标是否符合设计要求的最后一关。调试过程中,要用仪器对安装好的电路进行调整和测量。

(1) 不通电检查。

① 检查连线:从电路图到实物接线,或从实物接线到电路图,检查是否存在少线、多线、错线,或短路、断路、接触不良的情况。

② 直观检查:检查电源、地线、信号线、元件引脚之间有无短路,器件引脚有无错接,以及集成电路是否插对等。

(2) 通电检查。

电路电源接通后不要急于测量数据和观察结果,首先要观察有无异常现象,如有无冒烟,是否闻到异常气味,手摸元件是否发热,电源有无短路等。如果发现异常应关闭电源,待排除故障后再通电。

(3) 分块调试。

① 静态调试:在无输入信号的情况下,测试电路中各点的电位,将测出的数据与计算值比较,若超出允许范围,则应分析原因并进行处理。

② 动态调试:输入测试信号,测试各项指标是否满足要求,包括信号幅值、波形形状、相位关系、频率、增益及输出动态范围等。

(4) 整机联调。

复杂电路应分成若干部分,先将每部分分别调试好,再将电路各部分连好,加上所有测试仪器,从而构成一个完整的实验研究系统,并输入总测试信号,将测试指标与理论值逐一对比,找出问题。对于设计性实验,必要时需修改电路参数甚至电路结构,直至测试指标符合要求。

(5) 调试注意事项。

- ① 熟悉各种仪器的使用方法,避免因仪器使用不当作出错误判断。
- ② 仪器地线和电路地线应连在一起,使整个系统只有一个公共参考点。
- ③ 更换器件和连线时应该断电,防止电流冲击损坏器件。
- ④ 测试数据与理论值比较时,若发现问题(包括异常现象、结果不符、无波形、波形失真等),则要认真分析原因,切不可一遇故障就拔掉线路重新安装。

1.3 实验电路的故障分析与排除技术

检查与排除电路故障可以提高分析和解决问题的能力。调试中常见的故障原因如下。

- (1) 电路原理图不符合设计要求;
- (2) 安装的电路与原理图不符(如短路、断路、错路等);
- (3) 元器件使用不当或损坏;
- (4) 仪器使用不当(如信号线断路);
- (5) 实验系统没有连好(如没有共地);
- (6) 没有按工艺要求布局布线;
- (7) 实验方法不当、误操作,等等。

电路出现故障后,就实验结果而言会出现无波形或曲线、波形或曲线失真、无实验数据或实验数据不正确等情况。

查找故障的方法很多,首先应观察电路元件有无损坏现象,如器件是否过热、变色或损坏,导线有无折断、短路或接触不良。上述原因排除后如果电路仍不能工作,则可用以下通用方法进一步查找模块内部故障原因。

(1) 测量元器件引脚的电源电压。使用面包板做实验出现故障时,要检查是否因引脚接触不良导致元器件本身没有正常工作,以及焊接电路有无断路、脱焊、虚焊和短路。

(2) 检查电路中有关点的电压和波形,与正常情况比对,找出故障器件。

(3) 断开故障模块输出端所接的负载,判断故障来自模块本身还是负载。

(4) 检查元器件是否使用得当或已经损坏,注意器件的引脚是否接错。根据现象,如果怀疑某一元器件损坏,必须对它单独测试。单独测试时,既可以在通电情况下测试,也可在断电情况下测试,断电测试时应注意将电解电容正极端对地短路一下,放掉存储的电荷,以免损坏仪表。

(5) 对具有反馈的电路,只要有一个模块出现故障,往往导致整个系统的异常。查找此类故障时需要把反馈回路断开,然后插入一个合适的输入信号,使系统成为一个开环系统,最后再逐一查找发生故障的模块及元器件等。找到故障元件后,还要进一步分析其损坏的原因,以保证电路今后工作的稳定性和可靠性,防止发生类似的故障。

1.4 实验误差分析

被测量有一个真实值,简称为真值,它由理论给定或由计量标准规定。在实际测量该被测量时,由于受到测量仪器精度、测量方法、环境条件或测量者能力等因素的限制,测量值与真值之间不可避免地存在误差,这种误差称为测量误差。学习有关测量误差和测量数据处理知识的目的就在于在实验中合理地选用测量仪器和测量方法,并对实验数据进行正确的分析、处理,以便获得符合误差要求的测量结果。

1. 测量误差产生的原因及其分类

根据误差的性质及产生的原因,测量误差可以分为三类。

1) 系统误差

在规定的测量条件下对同一量进行多次测量时,如果误差的数值保持恒定或按某种确定规律变化,则称这种误差为系统误差。例如,电表零点不准,以及温度、湿度、电源电压等变化造成的误差,均属于系统误差。

系统误差有一定的规律性,可以通过实验和分析找出原因,设法减弱或消除。

2) 随机误差

在规定的测量条件下对同一量进行多次测量时,如果误差的数值发生不规则的变化,则称这种误差为随机误差。例如,热骚动、外界干扰和测量人员感觉器官无规律的微小变化等引起的误差,均属于随机误差。

尽管随机误差的变化是不规则的,但是实践证明,如果测量的次数足够多,则随机误差平均值的极限就会趋近于零。所以只要多次测量某量,测量结果的算术平均值就会接近于被测量的真值。

3) 粗大误差

粗大误差是指在一定的测量条件下,测量值显著偏离其真实值时的误差。从性质上来看,粗大误差可能属于系统误差,也可能属于随机误差,但是它的误差值一般都明显地超过相同条件下的系统误差和随机误差。例如,读错刻度、记错数字、计算错误及测量方法不对等引起的误差,均属于粗大误差。通过分析,确认是粗大误差的测量数据,应该予以剔除。

2. 误差的表示方法

1) 绝对误差的表示

如果用 x_0 表示被测量的真值, x 表示测量仪器的示值(标准值),则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - x_0$$

若用高一级标准的测量仪器测得的值作为被测量的真值,则在测量前,测量仪器应由高一级标准的仪器进行校正。校正量常用修正值表示。对于某被测量,高一级标准的仪器的示值

减去测量仪器的示值得到的值,就称为修正值。实际上,修正值就是绝对误差,只是它们的符号相反。例如,用某电流表测量电流时,电流表的示值为 10 mA,修正值为 +0.04 mA,则被测电流的真值为 10.04 mA。

2) 相对误差的表示

相对误差 γ 是绝对误差与被测真值的比值,用百分数表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\%$$

当 $\Delta x \ll x_0$ 时

$$\gamma \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

例如,用频率计测量频率,频率计的示值为 500 MHz,频率计的修正值为 -500 Hz,则

$$\gamma \approx \frac{500}{500 \times 10^6} \times 100\% = 0.0001\%$$

又如,用修正值为 -0.5 Hz 的频率计测得频率为 500 Hz,则

$$\gamma \approx \frac{0.5}{500} \times 100\% = 0.1\%$$

从上面两个例子可以看到,尽管后者的绝对误差小于前者,但是后者的相对误差却远远大于前者,因此,前者的测量准确度实际上比后者的高。

3) 容许误差的表示

测量仪器的准确度一般用容许误差表示,它根据技术条件的要求规定了某一类仪器的误差不应超过的最大范围。通常仪器(包括量具)技术说明书所标明的误差都是指容许误差。

在指针式仪表中,容许误差就是满刻度相对误差 γ_m ,定义为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\%$$

式中: x_m 为满刻度读数。

指针式仪表的误差主要取决于它本身的结构和制造精度,而与测量值的大小无关。因此,用上式表示的满刻度相对误差实际上是绝对误差与一个常数的比值。我国电工仪表按 γ_m 值分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5 等七级。

例如,用一只满刻度为 150 V、1.5 级的电压表测量电压,其最大绝对误差为 $150 \text{ V} \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25 \text{ V}$ 。若表头的示值为 100 V,则被测电压的真值在 97.75~102.25 V 范围内;若示值为 10 V,则被测电压的真值在 7.75~12.25 V 范围内。

在无线电测量仪器中,容许误差又分为基本误差和附加误差两类。基本误差是指仪器在规定工作条件下在测量范围内出现的最大误差。规定工作条件又称定标条件,一般包括环境条件(温度、湿度、大气压力、机械振动及冲击等)、电源条件(电源电压、电源频率、直流供电电压及纹波等)、预热时间、工作位置等。附加误差是指定标条件的一项或几项发生变化时,仪器附加产生的误差。附加误差又分为两类:一类为使用条件(如温度、湿度、电源等)发生变化时产生的误差;另一类为被测对象参数(如频率、负载等)发生变化时产生的误差。

3. 消除系统误差的主要措施

对于随机误差和粗大误差的消除方法,前面已作过简要介绍,这里只讨论消除系统误差的措施。产生系统误差的原因有如下几个方面。

1) 仪器误差

仪器误差是仪器本身的电气或机械性能不完善所造成的误差,例如,仪器校准不好、刻度不准等。清除方法是要预先校准或确定其修正值,以便在测量结果中引入适当的补偿值来消除它。

2) 装置误差

装置误差是测量仪器和其他设备放置不当或使用不正确,以及由于外界环境条件改变所造成的误差。为了消除这类误差,测量仪器的安放必须遵守使用规定,例如,三用表应水平放置,电表之间必须远离,并注意避开过强的外部电磁场影响等。

3) 人身误差

人身误差是测量者个人特点所引起的误差。例如,有人读指示刻度总是超过或欠少,或回路总不能调到真正的谐振点上等。为了消除这类误差,应提高测量技能,改变不正确的测量习惯和改进测量方法。

4) 方法误差或理论误差

方法误差是因测量方法所依据的理论不够严格,或采用不适当的简化和近似公式等所引起的误差。例如,用伏安法测量电阻时,若直接以电压表的示值与电流表的示值之比作为测量的结果,而不计电表本身内阻的影响,就会引起此类误差。

系统误差按其表现特性还可分为固定的和变化的两类:在一定条件下,多次重复测量时给出的误差是固定的,称为固定误差;给出的误差是变化的,称为变化误差。对于固定误差,可以用一些专门的测量方法加以抵消,这里只介绍常用的替代法和正负误差抵消法。

(1) 替代法。在测量时,先对被测量进行测量,记取测量数据;然后用一已知标准量代替被测量,改变已知标准量的数值,使测量仪器恢复到原来记取的测量数值;这时已知标准量的数值就应是被测量的数值。由于两者的测量条件相同,因此可以消除包括仪器内部结构、各种外界因素和装置不完善所引起的系统误差。

(2) 正负误差抵消法。该方法在相反的两种情况下分别进行测量,使两次测量所产生的误差等值而异号,然后取两次测量结果的平均值便可将误差抵消。例如,在有外磁场影响的情况测量电流值,可把电流表转动 180° 再测一次,然后取两次测量数据的平均值,就可抵消外磁场影响所引起的误差。

4. 一次测量时的误差估计

在许多工程测量中,通常对被测量只进行一次测量,这时,测量结果中可能出现的最大误差与测量方法有关。

测量方法有直接法和间接法两类:直接法是直接对被测量进行测量并取得数据的方法;间接法是通过测量与被测量有一定函数关系的其他量,然后换算得到被测量数值的方法。当采用直读式仪器并按直接法进行测量时,其可能出现的最大测量误差就是仪器的容许误差。

例如,前面提到的用满刻度为150 V、1.5级指针式电压表测量电压时,若被测电压为100 V,则相对误差为

$$\gamma = \frac{2.25}{100} \times 100\% = 2.25\%$$

若被测电压为10 V,则相对误差为

$$\gamma = \frac{2.25}{10} \times 100\% = 22.5\%$$

因此,为了提高测量准确度,减小测量误差,应使被测量出现在接近满刻度区域。当采用间接法进行测量时,应先由直接法估计出直接测量时各量的最大可能误差,然后根据函数关系找出被测量的最大可能误差。下面举例说明。

例 1-1 $x=A^m B^n C^p$

式中: x 为被测量; A 、 B 、 C 为直接测得的各量; m 、 n 、 p 为正或负的整数或分数。

为了求得误差之间的关系,将上式两边取对数

$$\lg x = m \lg A + n \lg B + p \lg C$$

再进行微分,得

$$\frac{dx}{x} = m \frac{dA}{A} + n \frac{dB}{B} + p \frac{dC}{C}$$

将上式微变量近似用增量代替后有

$$\frac{\Delta x}{x} = m \frac{\Delta A}{A} + n \frac{\Delta B}{B} + p \frac{\Delta C}{C}$$

即 $\gamma_x = m\gamma_A + n\gamma_B + p\gamma_C$

上式中, A 、 B 、 C 各量的相对误差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 可能为正也可能为负,因此在求 x 的最大可能误差 γ_x 时,应取其最不利的情况,即使 γ_x 的绝对值达到最大。

例 1-2 $x=A+B$

由上式可得

$$x + \Delta x = (A + \Delta A) \pm (B \pm \Delta B)$$

因此

$$\Delta x = \Delta A + \Delta B$$

该式说明不论 x 等于 A 和 B 的和或差, x 的最大可能误差都等于 A 、 B 最大误差的算术和。这时欲求的相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}$$

必须指出,当 $x=A-B$ 时,如果 A 、 B 两量很接近,相对误差就可能达到很大的数值。所以在选择测量方法时,应尽量避免用两个量之差来求第三个量。

根据上述两个例子,用间接法测量的误差估计计算公式可归纳如表 1-1 所示。

表 1-1 使用间接法测量的误差表

函数关系式	绝对误差	相对误差
$x=A+B$	$\Delta x=\Delta A+\Delta B$	$\Delta x/x$
$x=A-B$	$\Delta x=\Delta A+\Delta B$	$\Delta x/x$
$x=A \cdot B$	$\Delta x=A \cdot \Delta A+B \cdot \Delta B$	$\Delta x/x$
$x=kA$	$\Delta x=k \cdot \Delta A$	$\Delta x/x$
$x=A^k$	$\Delta x=kA^{k-1} \Delta A$	$\Delta x/x$

5. 测量数据的处理

1) 有效数字的概念

测量所得的结果都是近似值,这些近似值通常用有效数字的形式来表示。所谓有效数字,是指从数据左边第一个非零数字开始直到右边最后一个数字为止所包含的数字。例如,测得的频率为 0.0234 MHz,它是由“2”“3”“4”三个有效数字表示的频率值。在其左边的两个“0”

不是有效数字,因为该值可以通过单位变换写成 23.4 kHz 。数值中末位数字“4”是在测量读数时估计出来的,因此称它为欠准数字,其左边的各有效数字均是准确数字。准确数字和欠准数字对测量结果都是不可缺少的,它们都是有效数字。

在记录和计算数据时,必须掌握对有效数字的正确取舍。不能认为一个数据中小数点后面的位数越多,这个数据就越准确;也不能认为计算测量结果时保留的位数越多,准确度就越高。

2) 有效数字的表示

(1) 有效数字中,只应保留一个欠准数字,因此,在记取测量数据时,只有最后一位有效数字是欠准数字,这样记取的数据表明被测量可能在最后一位数字上变化 ± 1 个单位。例如,用一只刻度为50分度、量程为50V的电压表测得的电压为41.6V,则该电压是用3位有效数字来表示的,“4”和“1”两个数字是准确的,而“6”是欠准的,因为它是根据最小刻度估计出来的,它可能被估读为5,也可能被估读为7,所以测量结果也可以表示为 $(41.6 \pm 0.1)\text{ V}$ 。

(2) 欠准数字中,要特别注意“0”的情况。例如,测量某电阻的阻值为 $13.600\text{ k}\Omega$,表明前面四个位数“1”“3”“6”“0”是准确数字,最后一个位数“0”是欠准数字;如果改写成 $13.6\text{ k}\Omega$,则表明前面两个位数“1”“3”是准确数字,最后一个位数“6”是欠准数字。这两种写法尽管表示同一数值,但实际上却反映了不同的测量准确度。

(3) 如果用10的方幂来表示一个数据,则10的方幂前面的数字都是有效数字。例如,上面的数值写成 $13.60 \times 10^3\text{ }\Omega$,则表明它的有效数字为4位。

(4) 对于 π 、 $\sqrt{2}$ 等具有无限位数的常数,在运算时可根据需要取适当位数的有效数字。

3) 有效数字的处理

对于计量测定或通过计算获得的数据,在规定的精确度范围以外的那些数字一般按照“四舍五入”的规则进行处理,即如果只取 n 位有效数字,那么第 $n+1$ 位及其以后的各位数字都应舍去。传统的“四舍五入”法则对于第 $n+1$ 位为“5”的数字都是只入不舍的,这样就会产生较大的累计误差。目前广泛采用的“四舍五入”法则对“5”的处理是:当被舍的数字等于5,而5之后有非零数字时,则可以舍5进位;若5之后无数字或为“0”时,这时只有在5之前为奇数时才能舍5进位,如5之前为偶数(包括“0”),则舍5不进位。

第2章 基础实验

实验1 常用半导体器件的识别和检测

一、实验目的

- (1) 学会检测二极管的好坏、管脚及其伏安特性曲线。
- (2) 学会检测三极管的好坏、管脚及其伏安特性曲线。
- (3) 学会检测集成运算放大器的好坏、主要性能指标。
- (4) 了解半导体管特性图示仪的使用。

二、实验原理

1. 用万用表的 $R \times 100$ 、 $R \times 1\text{ k}$ 挡判别二极管的极性和好坏

用万用表的红、黑表笔分别测二极管的两端,如果一次是极大值(接近 ∞),另一次是有限值(几千欧到几十千欧),则二极管是好的。出现极大值时加的是反向电压,即红表笔接的是阳(P)极,黑表笔接的是阴(K)极,因为反向阻值不是 ∞ ,说明有反向电流,且反向电流越大,该二极管单向导电性能越差;出现有限值时加的是正向电压,即黑表笔接的是阳(P)极,红表笔接的是阴(K)极。如果用万用表的 $R \times 100$ 、 $R \times 1\text{ k}$ 挡测量二极管的正、反向电阻均很大或均为零,则说明二极管已损坏(断路或短路)。

2. 二极管的伏安特性测量

图 2-1 给出了二极管的伏安特性测量电路及其曲线。其中,测量正向伏安特性的电路如图 2-1(a)所示,测量反向伏安特性的电路如图 2-1(b)所示。应正确选择直流电压表、电流表的极性和量程,然后根据上述电路用逐点法即可量得二极管的伏安特性曲线,如图 2-1(c)所示。也可用半导体管特性图示仪显示二极管的伏安特性曲线。

3. 用万用表的 $R \times 100$ 、 $R \times 1\text{ k}$ 挡判别三极管的极性和好坏

可以把三极管的结构看做是两个背靠背的 PN 结。对 NPN 管来说,基极是两个结的公共阳极;对 PNP 管来说,基极是两个结的公共阴极。因此,根据 PN 结单向导电原理,只要