



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材

电子技术基础实验 与课程设计 (第三版)

Experiment on Basis of Electronic
Technology & Course Exercise

Third Edition

© 高吉祥 库锡树 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业精品教材

电子技术基础 实验与课程设计 (第三版)

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是为高等学校电气类、电子类、自动化类和其他相近专业而编著的电子技术基础实验和课程设计教材。本书分为五篇,第一篇电子技术基础实验和课程设计基础,主要介绍测量方法,常用仪器仪表原理及使用,常用电子元器件的识别和正确选用;第二篇模拟电子技术基础实验和课程设计;第三篇高频电子线路实验与课程设计;第四篇数字电子技术基础实验和课程设计;第五篇综合设计篇。第二、三、四篇除了介绍电气类、电子类、自动化类必修的三门主要专业基础课应做的实验外,还搜集整理了近几年来有关模拟和数字电路的综合应用的课程设计。第五篇为综合设计篇,是专门为参加全国大学生电子设计竞赛而编著的。

本书可作为本科生模拟和数字电子技术的单科实验指导教材和电子线路的综合实验的教材,同时也为本科生参赛各类电子制作、毕业设计提供了极其有用的参考资料。

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

电子技术基础实验与课程设计 / 高吉祥, 库锡树主编. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2011. 4
高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-121-13112-7

I. ①电… II. ①高… ②库… , III. ①电子技术—试验—高等学校—教材②电子技术—课程设计—高等学校—教材 IV. ①TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 044814 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订:

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: 787×1 092 1/16 印张: 24.25 字数: 784 千字

版 次: 2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 42.00 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。

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。

服务热线: (010)88258888。

第三版前言

《电子技术基础实验与课程设计》一书从 2001 年出版以来,已使用了近十年头印刷十一次之多,累计印数达 3 万多册。作为实验教材被许多院校采用,深受广大读者的喜爱,并反馈了许多宝贵意见,这次准备在前两版的基础上,再次进行修订,使本书更加符合当前电子技术基础课程教学的需要。

第二版修订时,本着从本课程的目的和任务出发,在保证打好基础的前提下,精选了内容,例如删去了第三章的第六节、第五章的第六及第七节、第九章的课程设计 9-7 和 9-9、第十章的附录 10-16 等内容。

为了训练和全面系统地提高本科生实际动手及工作能力,增加了第五篇(综合设计篇)第十二章内容。这些素材为全国大学生参加各类电子设计大赛、电子设计工程师从事产品设计提供了有益的参考资料。

第二版各章基本上由原作者修订,参加修订的人员有高吉祥、易凡、丁文霞、陆珉、刘安芝、卢启中、刘希顺、关永峰、宿珣莹、唐小妹、曹东波、吴任、蒋元军、吕喜在、范进殉、余丽、张清明、方艾。

第三版修订工作的指导思想是,主要依据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课教学指导委员会讨论通过的“电子信息科学与电气信息类基础理论课程教学基本要求”,同时继续遵循本书前两版的编写原则:“确保基础、精选内容、加强概念、推陈出新、联系实际、侧重集成、避免遗漏、防止重复、统一符号、形成系统。”在第二版的基础上,删除了陈旧的集成芯片,增加了当代流行的集成芯片。删除了实验 8-3 三参差调谐放大器,增加了实验 6-9 集或直流稳压电源。

本教材于 2001 年列入了“面向 21 世纪高等学校电子信息类教材”,2006 年正式列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。2009 年 3 月,国防科技大学在长沙主持召开了“以人才培养为目标,以教学改革为契机,建设高水平电子技术基础系列教材”成果鉴定会,鉴定委员会一致认为:该系列教材系统性强、配套性好,具有很高的实用和推广价值。详见鉴定意见。

第三版的修订工作由高吉祥、庠钊树、刘菊荣等人完成。参与修订的还有丁节涛、田曦、高勐、张小溪、周群、张仁民、张子惊等,并得到国防科技大学电子科学与工程学院唐朝京院长的大力支持。由于编者水平有限,难免会有错误和缺点,敬请读者批评指正。我们表示万分感谢。

编者

2011 年元月

“电子技术基础”系列教材成果鉴定意见

2009年3月29日,国防科技大学在长沙主持召开“以人才培养为目标,以教学改革为契机,建设高水平电子技术基础系列教材”成果鉴定会,鉴定委员会听取了系列教材建设的成果汇报,审查了系列教材总结报告和相关材料,经讨论,一致认为该成果具有以下主要特色及创新点:

1. 总体结构设计思想清晰,注重系统配套。

该系列教材横向包括5个子系列,即电路分析基础系列、模拟电子技术基础系列、数字电子技术基础系列、高频电子线路系列和全国大学生电子设计竞赛培训系列:每个子系列纵向又分为6个部分,即主干教材、学习辅导及习题详解、实验教材、教师参考用书及配套多媒体课件光盘。整套教材总体结构全面系统,配套性好。

2. 重基础和基本技能训练

该系列教材既保留了对经典基础知识论述精辟、配套习题丰富的特点,又特别注重对学生基本实践技能的培养,为每门课的重点内容均编写了相应的实验指导内容,强化了学生基本实验技能的训练。

3. 注重学生创新能力的培养,拓宽学生的知识面

系列教材在四门主干教材的基础上,增加了电子设计竞赛培训教程等拓宽教材,编写了大量综合设计实验及课程设计,引进了许多新技术、新方法、新器件及新设计思路的讲解。实践证明:该系列教材极大地拓宽了学生知识面,促进了学生创新能力的培养。

4. 教学、科研和设计相结合,构建特色鲜明的教材体系

系列教材在编写过程中立足于电子信息科技发展前沿,依托高水平科研成果,将科研成果有机融合到教材编写中,形成了教材建设、教学实践和科学研究相互促进的良性互动机制。

鉴定委员会一致认为:该系列教材系统性强、配套性好,具有很高的实用和推广价值。其中《高频电子线路》属“十一五”国家级规划教材,在国内同类教材中具有一流水平,《全国大学生电子设计竞赛培训系列教程》(共5册)填补了此类教材编写的空白。该系列教材现已正式出版16种,发行17万余册,对推进教学改革,促进人才培养起到了重要作用。

鉴定委员会主任:

委员:

沈和/3
傅华 王超
王 王 王
in 3

2009.3.29

目 录

第一篇 电子技术基础实验和课程设计基础	(1)
第一章 电子技术基础实验的目的、意义及要求	(1)
第一节 电子技术基础实验的目的和意义	(1)
第二节 电子技术基础实验的一般要求	(1)
第三节 误差分析与测量结果的处理	(2)
第二章 基本测量技术	(6)
第一节 概述	(6)
第二节 电压测量	(8)
第三节 阻抗测量	(10)
第四节 增益及幅频特性测量	(11)
第三章 课程设计的基础知识	(13)
第一节 电子电路的设计方法	(13)
第二节 电子电路的组装	(14)
第三节 电路的调试	(15)
第四节 检查故障的一般方法	(18)
第五节 课程设计总结报告	(21)
第四章 常用电子电路元件、器件的识别与主要性能参数	(22)
第一节 电阻器的简单识别与型号命名法	(22)
第二节 电容器的简单识别与型号命名法	(26)
第三节 电感器的简单识别与型号命名法	(29)
第四节 半导体器件的简单识别与型号命名法	(30)
第五节 半导体集成电路型号命名法	(34)
第五章 常用实验测量仪器	(37)
第一节 电子示波器及其应用	(37)
第二节 信号发生器	(58)
第三节 电子电压表	(66)
第四节 晶体管特性图示仪	(70)
第五节 BT-3 频率特性测试仪(扫频仪)	(76)

第二篇 模拟电子技术基础实验与课程设计	(80)
第六章 模拟电子技术基础实验	(80)
实验 6-1 常用仪器的使用	(80)
实验 6-2 晶体管的测试实验	(83)
实验 6-3 单管共发射极放大器研究	(90)
实验 6-4 功率放大器实验	(94)
实验 6-5 负反馈对放大器的影响	(96)
实验 6-6 运算放大器应用实验	(99)
实验 6-7 有源滤波器实验	(103)
实验 6-8 信号发生器实验	(105)
实验 6-9 集成直流稳压电源	(106)
第七章 模拟电子技术基础课程设计	(110)
课程设计 7-1 音响放大器设计	(110)
附录 7-1 设计举例	(117)
课程设计 7-2 集成直流稳压电源的设计	(120)
课程设计 7-3 函数发生器的设计	(125)
课程设计 7-4 水温控制系统	(131)
课程设计 7-5 语音放大电路	(133)
第三篇 高频电子线路实验与课程设计	(140)
第八章 高频电子线路实验	(140)
实验 8-1 常用高频电子仪器的使用	(140)
实验 8-2 小信号谐振放大器	(141)
实验 8-3 选择滤波式高频小信号放大器	(142)
实验 8-4 LC 振荡器的研究	(144)
实验 8-5 高频谐振功率放大器	(146)
实验 8-6 调幅实验	(150)
实验 8-7 调频振荡器的设计与实验	(152)
实验 8-8 鉴频器	(156)
实验 8-9 模拟乘法器的应用	(160)
实验 8-10 锁相环的应用	(166)
第九章 高频电路课程设计	(176)

课程设计 9—1	调频接收机的设计	(176)
课程设计 9—2	LC 正弦振荡器的设计与实验	(177)
* 课程设计 9—3	50W 高频宽带功率放大器的设计	(180)
课程设计 9—4	频率合成器的设计与实验	(183)
课程设计 9—5	小功率调幅高频发射机的设计与实验	(192)
课程设计 9—6	收放、录、放、扩 4 位一体机的设计	(194)
第四篇	数字电子技术基础实验和课程设计	(198)
第十章	数字电子技术基础实验	(198)
实验 10—1	集成“与非门”参数测试	(198)
附录 10—1	几种常用 TTL 门电路引脚图	(201)
实验 10—2	CMOS “或非门” 参数测试	(202)
附录 10—2—1	CMOS 使用规则	(204)
附录 10—2—2	几种常用的 CMOS 门电路引脚图	(205)
实验 10—3	组合逻辑电路设计	(206)
实验 10—4	常用组合电路及其应用	(209)
实验 10—5	触发器及参数测试	(212)
实验 10—6	计数器(分频器)设计及其应用	(218)
实验 10—7	计数、译码和显示	(223)
附录 10—7	七段显示器、译码器/驱动器及发光二极管	(225)
实验 10—8	移位寄存器	(226)
实验 10—9	同步时序电路逻辑设计	(227)
实验 10—10	中规模全加器	(231)
实验 10—11	中规模计数器及其应用	(234)
实验 10—12	中规模移位寄存器	(235)
实验 10—13	中规模数据选择器及其应用	(238)
实验 10—14	555 定时器及其应用	(242)
实验 10—15	GAL 器件一般设计过程及编程设计举例	(245)
实验 10—16	GAL 组合逻辑电路设计	(251)
实验 10—17	GAL 时序电路逻辑设计	(255)
第十一章	数字电子技术基础课程设计	(261)
课题设计 11—1	数字频率计	(261)

附录 11-1 单片数字频率计简介	(265)
课题设计 11-2 数字电压表	(266)
课题设计 11-3 数字时钟	(273)
课题设计 11-4 出租汽车里程计价表	(275)
课题设计 11-5 数字电子秤	(277)
课题设计 11-6 红外线数字转速表	(285)
课题设计 11-7 数字温度计	(289)
课题设计 11-8 电容数字测量仪	(290)
课题设计 11-9 大电流测量仪	(291)
课题设计 11-10 加/减法运算电路	(292)
课题设计 11-11 可预置的定时显示报警系统	(296)
课题设计 11-12 高速并行 A/D 转换系统	(297)
附录 11-12 改进的 8 位并行 A/D 转换器工作原理	(299)
课题设计 11-13 多路数据采集系统	(299)
第五篇 综合设计篇	(303)
第十二章 综合设计	(303)
12-1 测量放大器设计	(303)
12-2 数字式工频有效值多用表设计	(309)
12-3 频率特性测试仪设计	(316)
12-4 数字化语音存储与回放系统	(322)
12-5 高效率音频功率放大器设计	(327)
12-6 简易智能电动车设计	(336)
12-7 液体点滴速度监控装置设计	(347)
12-8 电压控制 LC 振荡器设计	(357)
12-9 智能调制接收机设计	(367)
常用文字符号说明	(374)
第一篇至第三篇	(374)
第四篇	(376)
参考文献	(380)

第一篇 电子技术基础实验和课程设计基础

电子技术基础按照传统的说法主要包括模拟电子技术基础和数字电子技术基础,为适应科技的发展,知识的拓展,本书将传统的低频电子线路和高频电子线路归于模拟电子技术基础部分,而将脉冲电路、数字电路、逻辑设计归于数字电子技术基础部分。

第一章 电子技术基础实验的目的、意义及要求

第一节 电子技术基础实验的目的和意义

大家知道,科学和技术的发展离不开实验,实验是促进科技发展的重要手段。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 4 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 4 个方面结合在一起,必然有一条红线,这条红线就是科学实验。”

对于电子技术基础这样一门具有工程特点和实践性很强的课程,加强工程训练,特别是技能的培养,对于培养工程人员的素质和能力具有十分重要的作用。

电子技术实验,通常分为验证性实验、训练性实验、综合性实验和设计性实验四大类。

验证性和训练性实验主要是针对电子技术本门学科范围由理论论证和实际技能的培养奠定基础。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。

课程设计对于学生来说既有综合性又有探索性。它主要侧重于某些理论知识的灵活运用,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。

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、用户专业化和测试智能化的优势。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)是必然的,也是很有益的。

总之,电子技术实验应突出基础技能、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。

第二节 电子技术基础实验的一般要求

尽管电子技术各个实验的目的和内容不同,但为了培养良好的学风,充分发挥学生的主观能动作用,促使其独立思考、独立完成实验并有所创造。我们对实验前、实验中和实验后分别提出如下基本要求。

一、实验前的要求

为避免盲目性,参加实验者应对实验内容进行预习。要明确实验目的要求,掌握有关电路的基本原理(课程设计则要完成设计任务),拟出实验方法和步骤,设计实验表格,对思考题作出解答,初步估算(或分析)实验结果(包括参数和波形),最后作出预习报告。

二、实验中的要求

(1) 参加实验者要自觉遵守实验室规则。

(2) 根据实验内容合理分置实验现场。准备好实验所需的仪器设备和装置并安放适当。按实验方案连接实验电路和测试电路。

(3) 要认真记录实验条件和所得数据、波形,发生故障应独立思考,耐心排除,并记下排除故障过程和方法。

(4) 发生故障应立即切断电源,并报告指导老师和实验室工作人员,等待处理。

实验过程中不顺利,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”也不一定收获大。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) 实验结束时,可将记录送指导教师审阅签字。经教师同意后方可拆除线路,清理现场。

三、实验后的要求

实验后要求学生认真写好实验报告。

1. 实验报告内容

(1) 列出实验条件,包括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的数据和用坐标纸描绘出波形,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,作出简明扼要结论。找出产生误差原因,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) 写出对本次实验的心得体会,以及改进实验的建议。

2. 实验报告的要求

文理通顺,书写简洁;符号标准,图表齐全;讨论深入,结论简明。

第三节 误差分析与测量结果的处理

众所周知,在测量过程中,由于各种原因,测量待测量的客观真值之间总存在一定差别,即测量误差。因此,分析误差产生的原因,如何采取措施减少误差,使测量结果更加准确等,对实验人员及科技工作者来说是应该了解和掌握的。

一、误差的来源

1. 仪器误差

此误差是由于仪器的电气或机械不完善所产生的误差,如校准误差、刻度误差等。

2. 使用误差

使用误差又称操作误差。它是指在使用仪器过程中,因安装、调节、布置、使用不当引起的误差。

3. 人身误差

人身误差是由于人的感觉器官和运动器官的限制所造成的误差。

4. 环境误差

它是指由于受到温度、湿度、大气压、电磁场、机械振动、声音、光照、放射性等影响所造成的附加误差。

5. 方法误差

方法误差又称理论误差。它是指由于使用的测量方法不完善,理论依据不严密,对某些经测量方法做了不适当的修改简化所产生的,凡是在测量结果的表达式中没有得到反映,而实际上又起作用的因素所引起的误差。例如,测量并联谐振回路的谐振频率时,常用近似方式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

若考虑 L 的串联损耗电阻 R_L 时,实际的谐振频率为

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} / \sqrt{\left(\frac{R_L}{2\pi f_0 L}\right)^2 + 1}$$

则有: $\Delta f = f'_0 - f_0$

上述用近似公式带来的误差称为方法误差。

二、测量误差的分类

按误差的性质和特点可分为系统误差、随机误差和疏失误差。

1. 系统误差

该误差是指在相同条件下重复测量同一个量时,误差的大小和符号保持不变,或按照一定规律变化的误差。系统误差一般可以通过实验及分析方法,查明其变化规律及产生原因。因此,这种误差是可以预测的,也可以减少或消除。

2. 随机误差(偶然误差)

该误差是指在相同条件下多次重复测量同一个量时,误差大小、时正时负,其大小和符号无规律变化的误差。随机误差不能用实验方法消除,但通过多次测量,采用统计的方法进行估算。最简单的方法就是取算术平均值。

3. 疏失误差(粗差)

这是一种过失误差。这种误差通常是由于测量者对仪器不了解、粗心,导致读数不正确而引起的,有时测量条件的突然变化也会引起粗差。对于这种异常值(或坏值)必须根据统计检验方法和某些准则去判断哪个测量值属坏值,然后去除。

三、误差表示法

按误差表示方法可分为绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

设被测量值的真值为 A_0 , 测量仪器的示值为 X , 则绝对误差为

$$\Delta X = X - A_0$$

在某一个时间或空间条件下,被测量的真值虽然客观存在,但一般无法得到,只能尽量逼近它。故常用高一级标准仪器测量的示值 A 代替 A_0 , 则

$$\Delta X = X - A$$

测量前,测量仪器应由高一级标准仪器进行校正,校正量常用修正值 C 表示。

利用修正值便可得该仪器所测得的实际值:

$$A = X + C$$

2. 相对误差

绝对误差值的大小往往不能确切地反映被测量的准确程度。因此,工程上常采用相对误差来

比较测量结果的准确程度。

相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用(或满度)相对误差。

实际相对误差是用绝对误差 ΔX 与被测量的实际值 A 的比值的百分数来表示的相对误差,即

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\%$$

示值相对误差是用绝对误差与仪器给出值 X 的百分数来表示的相对误差,即

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$$

引用(或满度)相对误差简称满度误差。它是用绝对误差 ΔX 与仪器的满刻度值 X_m 之比的百分数来表示的相对误差,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

电工仪表的准确度等级就是由 γ_m 决定的,如 1.5 级的电表,表明 $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。我国电工仪表按 γ_m 值共分七级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。

若某仪表的等级是 S 级,它的满刻度值为 X_m ,则测量的绝对误差为

$$\Delta X \leq X_m S\%$$

其示值相对误差为

$$\gamma_X \leq \frac{X_m S\%}{X}$$

在上式中,总是满足 $X \leq X_m$ 的,可见当仪表等级 S 选定后, X 越接近 X_m 时, γ_X 的上限值越小,测量越准确。因此,当我们使用这类仪表进行测量时,一般总使被测量值尽可能在仪表满刻度值的二分之一以上。

例如,测量一个 12V、50Hz 的交流电压,现用 1.5 级的表,可选用 15V 或 150V 的量程。如何选择量程?

用量程 150V 时,测量产生的绝对误差为

$$\Delta V = V_m S\% = 150 \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25(\text{V})$$

而用量程为 15V 时,测量产生的绝对误差为

$$\Delta V = V_m S\% = 15 \times (\pm 1.5\%) = \pm 0.225(\text{V})$$

显然,用 15V 量程测量 12V 电压,绝对误差小很多。

四、测量结果的处理

测量结果通常用数字或图形表示。下面分别讨论。

1. 测量结果的数字处理

(1) 有效数字:由于存在误差,所以测量的数据总是近似值,它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成。例如,由电压表测得电压 24.8V,这是个近似数,24 是可靠数字,而末尾 8 为欠准数字。即 24.8 为三位有效数字。

对于有效值的正确表示,应注意如下几点:

① 有效数字是指从左边第一个非零的数字开始,直到右边最后一个数字为止的所有数字。例如,测得的频率为 0.0157MHz,它是由 1、5、7 三个有效数字组成的频率值,而左边的两个零不是有效数字,它可以写成 1.57×10^{-2} MHz,也可写成 15.7kHz,而不能写成 15700Hz。

② 如已知误差,则有效值的位数应与误差相一致。例如,设仪表误差为 $\pm 0.01\text{V}$,测得电压为 12.352V,其结果应写做 12.35V。

③ 当给出误差有单位时,测量数据的写法应与其一致。

(2) 数据舍入规则:为使正、负舍入误差的机会大致相等,传统的方法是采用四舍五入的办

法,现已广泛采用“小于5舍,大于5入,等于5时取偶数”的办法。

(3) 有效数字的运算规则:当测量结果需要进行中间运算时,有效数字的取舍,原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那一项。一般应遵循以下规则。

① 当几个近似值进行加、减运算时,在各数中(采用同一个计量单位),以小数点后的位数最小的那个数(如无小数点,则以有效值最小者)为准,其余各数均舍入至比该数多一位,而计算的结果所保留的小数点后的位数,应与各数中小数点后位数最少者的位数相同。

② 进行乘法运算时,以有效数值位数最小的那个数为准,其余各数及积(或商)均舍入至比该因子多一位,而与小数点位置无关。

③ 将数平方或开方后,结果可比原数多保留一位。

④ 用和进行运算时, n 位有效数字的数应该用 n 位对数表。

⑤ 若计算式中出现如 e 、 π 、 $\sqrt{3}$ 等常数时,可根据具体情况来决定它们应取的位数。

2. 曲线的处理

在分析两个或多个物理量之间的关系时,用曲线比用数字、公式表示常常更形象和直观。因此,测量结果常要用曲线来表示。

在实际测量过程中,由于各种误差的影响,测量数据将出现离散现象,如将测量点直接连接起来,将不是一条光滑的曲线,而是呈波动的折线状,如图 1-3-1 所示。但我们利用有关的误差理论,可以把各种随机因素引起的曲线波动抹平,使其成为一条光滑的均匀的曲线,这个过程称为曲线的修正。

在要求不太高的测量中,常采用一种简便、可行的工程方法——分组平均法来修匀曲线。这种方法是将各数据点分成若干组,每组含 2~4 个数据点,然后分别取各组的几何重心,再将这些重心连接起来。图 1-3-2 就是每组取 2~4 个数据点进行平均后的修匀曲线。这条曲线,由于进行了数据平均,在一定程度上减少了偶然误差的影响,使之较为符合实际情况。

对电子电路实验误差分析与数据处理应注意以下几点:

① 实验前应尽量做到心中有数,以便及时分析测量结果的可行性。

② 在时间允许时,每个参数应多测几次,以便搞清实验过程中引入系统误差的因素,尽可能提高测量的准确度。

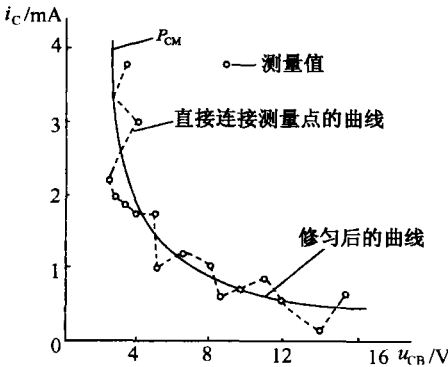


图 1-3-1 直接连接测量点时曲线的波动情况

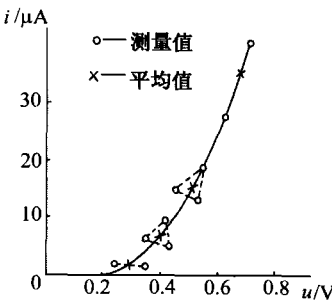


图 1-3-2 分组平均法修匀的曲线

③ 应注意测量仪器、元器件的误差范围对测量的影响,通常所读得的示值与测量值之间应该有:“测量值=示值+误差”的关系,因此测量前对测量仪器的误差及检定、校准和维护情况应有所了解,在记录测量值时要注明有关误差,或决定测量的有效位数。

④ 正确估计方法误差的影响。电子电路中采用的理论公式常常是近似公式,这将带来方法误差;其次计算公式中元件的参数一般都用标称值(而不是真值),这将带来随机性的系统误差,因此应考虑理论计算值的误差范围。

⑤ 应注意剔除粗差。

第二章 基本测量技术

第一节 概 述

一个物理量的测量可以通过不同的方法来实现,而电子测量技术是一门发展十分迅速的学科,它涉及电量及各种非电量的测量,这里只简要介绍基本电量测量技术中的共性问题。

一、测量方法的分类

1. 直接测量与间接测量

(1) 直接测量:顾名思义,这是一种可以直接得到被测量值的测量方法。例如用电压表测量稳压电源工作电压等。

(2) 间接测量:与直接测量不同,间接测量是利用直接测量的量与被测量之间已知函数关系,得到被测量值的测量方法。例如,测量放大器的电压放大倍数 A_u ,一般是分别测量输出电压 U_o 与输入电压 U_i 后再算出 $A_u = U_o/U_i$ 。这种方法常用于被测量不便于直接测量,或者间接测量的结果比直接测量更为准确的场合。

(3) 组合测量:这是一种兼用直接测量和间接测量的方法,将被测量和另外几个量组成联立方程,最后通过求解联立方程来得出被测量的大小。这种方法用计算机求解比较方便。

2. 直读测量法与比较测量法

(1) 直读测量法:它是直接从仪器仪表的刻度线(或显示)上读出测量结果的方法。例如,用电流表测量电流就是直读法,它具有简单方便等优点。

(2) 比较测量法:这是一种在测量过程中,将被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法。电桥利用标准电阻(电容、电感)对被测量进行测量就是一个典型例子。

应当指出,直读法与直接测量、比较法与间接测量并不相同,二者互有交叉。例如,用电桥测电阻,是比较法,属于直接测量;用电压、电流表法测量功率,是直读法,但属于间接测量;等等。

3. 按被测量性质分类

虽然被测量的种类很多,但根据其特点,大致可分为以下几类。

(1) 频域测量:频域测量技术又称为正弦测量技术。测量参数多表现为频域的函数,而与时间因素无关;测量时,电路处于稳定工作状态,因此又叫稳定测量。

这种测量技术用的信号是正弦信号,线性电路在正弦信号作用下,所有电压和电流量都有相同的频率,仅幅度和相位有差别。利用这个特点,可以实现各种电量的测量,如放大器增益、相位差、输入阻抗和输出阻抗等。此外,还可以观察非线性失真。其缺点是,不宜用于研究电路的瞬态特性。

(2) 时域测量:时域测量技术,与频域测量技术不同,它能观察电路的瞬变过程及其特性,如上升时间 t_r 、平顶降落 δ 、重复周期 T 和脉宽 t_w 等。

时域测量技术采用的主要仪器是脉冲信号发生器和示波器。

(3) 数据域测量:这是用逻辑分析仪对数字量进行测量的方法。它具有多个输入通道,可以同时观测许多单次并行的数据。例如微处理器地址线、数据线上的信号,可以显示时序波形,也可以用“1”、“0”显示其逻辑状态。

(4) 噪声测量:噪声测量属于随机测量。在电子电路中,噪声与信号是相对存在的,不与信号大小相联系来讲噪声大小是无意义的。因此工程技术中,常用噪声系数 F_N 来表示电路噪声的大

小,即

$$F_N = \frac{\text{输入信噪比}}{\text{输出信噪比}} = \frac{P_{IS}/P_{IN}}{P_{OS}/P_{ON}} = \frac{1}{A_p} \cdot \frac{P_{ON}}{P_{IN}}$$

式中, P_{IS} 、 P_{IN} 表示电路输入端的信号功率与噪声功率; P_{OS} 、 P_{ON} 表示电路输出端的信号功率与噪声功率; $A_p = P_{OS}/P_{IS}$ 表示电路对信号的功率增益。

若 $F_N = 1$, 则说明该电路本身没有产生噪声。一般放大电路的噪声系数都大于 1。放大电路产生的噪声越小, F_N 就越小, 放大微弱信号的能力就越强。

测量方法还可以根据测量的方式分为自动测量和非自动测量、原位测量和远距离测量等。

此外, 在电子测量中, 还经常用到各种变换技术。例如, 变频、分频、检波(如测交流电压有效值的原理就是首先利用各种检波器将交流量变成直流量, 然后再测量)、斩波、A/D、D/A 变换等。有关这方面的问题, 这里不详细讨论。

二、选择测量方法的原则

在选择测量方法时, 应首先研究被测量本身的特性及所需要的精确程度、环境条件及所具有的测量设备等因素, 综合考虑后, 再确定采用哪种测量方法和选择哪些测量设备。

一个正确的测量方法, 可以得到好的结果, 否则, 不仅测量结果不可信, 而且有可能损坏测量仪器、仪表和被测设备或元器件。下面举例加以说明。

【例 2.1.1】 用万用表的 $R \times 1$ 挡测试半导体三极管的发射结电阻或用图示仪显示输入特性曲线时, 由于限流电阻较小, 而使基极电流过大, 结果可能使三极管在测试过程中被损坏。

【例 2.1.2】 测量图 2-1-1 所示放大电路中场效应三极管 VT 的漏极电位时, 设在漏极与“地”之间用一只内阻为 $10M\Omega$ 的数字电压表来测量, 其值为 $V_D = 10V$, 而用 $20k\Omega/V$ 的万用表直流电压 6V 挡测量, 其值 $V'_D = 5V$ (仪表的准确度影响不计)。为什么相差这么大? 试分析一下。

解: 由于万用表的内阻

$$R_V = 20k\Omega/V \times 6V = 120k\Omega$$

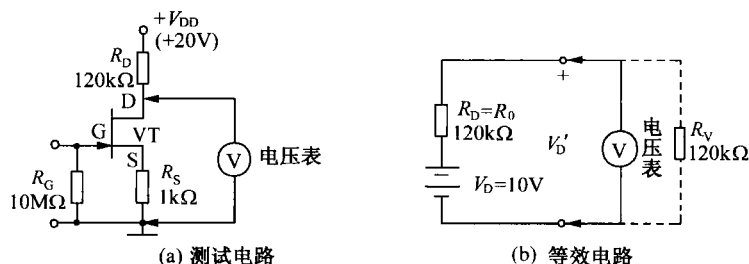


图 2-1-1 用万用表测高内阻回路电压

显然, R_V 与等效电阻 $R_0 = R_D$ 对 $V_D = 10V$ 的分压就是万用表的示值 V'_D 。因此有

$$V'_D = \frac{R_V}{R_D + R_V} \cdot V_D = \frac{120}{120 + 120} \times 10 = 5(V)$$

【例 2.1.3】 一测量电流电路如图 2-1-2 所示, 当未串接测量仪表时, 回路的实际电流(即真值)为 $I = V/R$, 串接测量仪表后, 由于仪表内阻 r_i 的影响, 实际的测量值为

$$I' = \frac{V}{R + r_i} = I / \left(1 + \frac{r_i}{R}\right)$$

只有当 $r_i \ll R$, 测量值 I' 才近似接近真值 I , 否则误差很大。

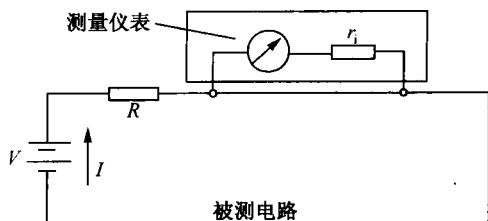


图 2-1-2 测量电流电路示意图

第二节 电压测量

在电子测量领域中,电压是基本参数之一。许多电参数,如增益、频率特性、电流、功率、调幅度等都可视为电压的派生量。各种电路工作状态,如饱和、截止等,通常都以电压的形式反映出来。不少测量仪器也都用电压来表示。因此,电压的测量是许多电参数测量的基础。电压的测量对调试电子电路可以说是不可少的。

电子电路中电压测量的特点如下。

1. 频率范围宽

电子电路中电压的频率可以从直流到数百兆赫范围内变化,对于甚低频或高频范围的电压测量,一般万用表是不能胜任的。

2. 电压范围广

电子电路中,电压范围由微伏级到千伏以上高压,对于不同的电压挡级必须采用不同的电压表进行测量。例如,用数字电压表,可测出 10^{-9} V 数量级的电压。

3. 存在非正弦量电压

被测信号除了正弦电压外,还有大量的非正弦电压。如用普通仪表测量非正弦电压,将造成测量误差。

4. 交、直流电压并存

被测的电压中常常是交流与直流并存,甚至还夹杂有噪声干扰等成分。

5. 要求测量仪器有高输入阻抗

由于电子电路一般是高阻抗电路,为了使仪器对被测电路的影响减至足够小,要求测量仪器有高的输入电阻。

此外,在测量电压时,还应考虑输入电容的影响。

上述情况,如果测量精度要求不高,用示波器常常可以解决。如果希望测量精度要求较高,则要全面考虑,选择合适的测量方法,合理选择测量仪器。

一、高内阻回路直流电压的测量

在例 2.1.2 中曾提到,用普通万用表 6V 挡($20\text{k}\Omega/\text{V}$)测量一个内阻为 $120\text{ k}\Omega$ 的 10V 等效电源电压时,其测量值为 5V ,造成了很大的误差。如果要想提高测量精度,就必须选用内阻比被测电路等效电阻高得多的仪表才行。

一般来说,任何一个被测电路都可以等效成一个电源电压 U_0 和一个阻抗 Z_0 相串联。例如,由 U_S 、 Z_1 、 Z_2 组成的图 2-2-1(a)所示电路,当接入电压表时,相当于将仪表的输入阻抗 Z_i 并联在被测电路上。对于图 2-2-1(a)所示被测电路,可以用 U_0 和 Z_0 组成的串联电路来等效,式中 $Z_0 = Z_1 // Z_2$, $U_0 = Z_2 / (Z_1 + Z_2) \cdot U_S$ 。