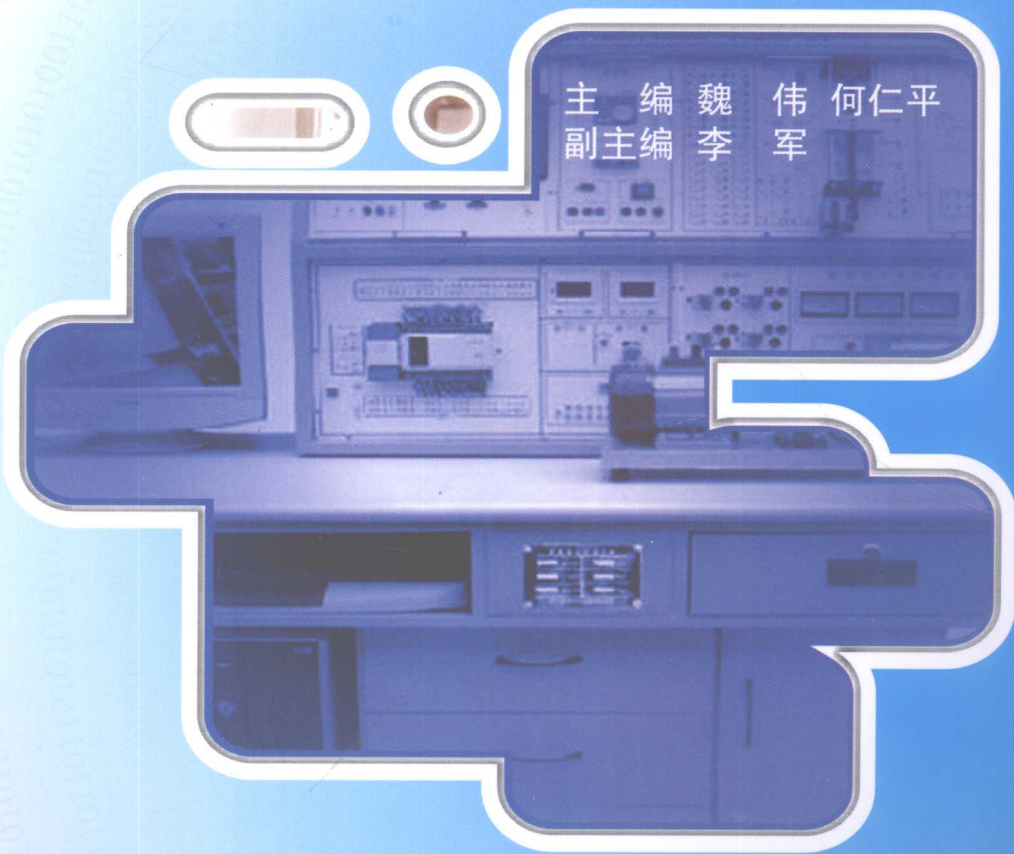




21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

电工电子实验教程

主 编 魏 伟 何仁平
副主编 李 军



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

电工电子实验教程

主 编 魏 伟 何仁平
副主编 李 军



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是根据教育部高等工业学校“电工技术(电工学 I)”和“电子技术(电工学 II)”两门课程的基本教学要求,结合多年来电工电子技术实践性教学环节改革的经验,跟踪电工电子技术发展的新形势和教学改革不断深入的需要,针对加强学生实践能力和创新能力培养的教学目的而进行编写的。

本书举例丰富,内容新颖,实用性强。

本书可作为高等工业学校非电类和部分电类专业本科学生的电工电子实验教材,也可供相关专业的专科学生和从事电工电子技术的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子实验教程/魏伟,何仁平主编. —北京:北京大学出版社,2009.8

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15440-3

I. 电… II. ①魏… ②何… III. 电工技术—实验—高等学校—教材 ②电子技术—实验—高等学校—教材 IV. TM-33 TN-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第111608号

书 名: 电工电子实验教程

著作责任者: 魏 伟 何仁平 主编

策 划 编 辑: 李 虎 李娉婷

责 任 编 辑: 李娉婷

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-15440-3/TM·0025

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 16.5印张 384千字

2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

定 价: 26.00元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是按照教育部高等工业学校电工电子技术基础课程教学基本要求、结合编者多年来的电工电子实验课程的教学实践而进行编写的。本书力图反映近年来电工电子实验教学改革的成功经验和现代电工电子测量新技术的应用,为读者打开一扇新的电工电子技术之窗。本书在注重实际应用电路与综合设计创新研究实验内容的同时,尽可能追求较强的可读性和易引导性,做到易读易懂。

本书主要是为准备从事电工电子技术的人员学习电工电子技术知识而写的,如工程类专业本科生,以及那些已经掌握技能而又想使自己的工作更有成效的朋友或其他从事相关工程技术工作的朋友。本书除了介绍电工电子实验的一般知识之外,还补充介绍了电工测量仪器仪表技术和常用仿真软件,利于读者自学,并且还还对电工电子基础实验以外的内容进行了扩充,增加了综合性实验和仿真实验等内容。为拓宽读者视野,紧跟电工电子技术发展的时代前沿,我们还编写了电工电子仿真软件的相关内容,以供读者选读。

全书分两篇共8章。第1篇电工电子实验概论,主要介绍电工电子实验的基础知识;常用电工测量仪器仪表技术,除传统的指针式仪表技术之外,还介绍了当前广泛应用的现代数字式仪表和智能仪表以及有发展前景的虚拟仪器;另外还介绍了目前应用较为广泛的两种电工电子仿真软件 PSpice 6.3 和 EWB 5.0 的使用方法。第2篇为电工电子实验,共包括43个实验,分为电工实验、模拟电路实验、数字电路实验、综合性实验和仿真实验共5章。最后为附录,主要介绍示波器、函数信号发生器、交流毫伏表、模拟电路实验板及部分常用集成电路引脚功能图等。

本书由魏伟、何仁平任主编,李军担任副主编。魏伟编写了第1章、第2章、第6章及附录,何仁平编写了第4章、第5章及第7章,李军编写了第3章、第8章。全书由魏伟统稿。李玉军、张雯参加了本书部分章节的绘图工作,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平和经验,本书难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

于华中科技大学电气学院

2009年6月

目 录

第 1 篇 电工电子实验概论

第 1 章 电工电子实验基础知识 1

- 1.1 概论 1
- 1.2 测量的基础知识 3
- 1.3 测量误差分析 7
- 1.4 有效数字 14
- 1.5 实验数据处理 16
- 1.6 电工电子实验台简介 20
- 习题一 24

第 2 章 常用电工测量仪器仪表技术 26

- 2.1 电工测量仪器、仪表概述 26
- 2.2 磁电系仪表 27
- 2.3 万用表 29
- 2.4 电磁系仪表 32
- 2.5 电动系仪表 34
- 2.6 电动系功率表 36
- 2.7 数字仪表概述 38
- 2.8 数字电流表和数字电压表 42
- 2.9 数字毫欧表和电容表 45
- 2.10 DT-830 型数字万用表 48
- 2.11 智能仪表 52
- 2.12 虚拟仪器 63
- 习题二 65

第 3 章 电工电子仿真软件 67

- 3.1 PSpice 仿真软件简介 67
- 3.2 Schematic 程序项 68
- 3.3 Probe 程序项 80
- 3.4 元件模型 86
- 3.5 PSpice 6.3 软件应用举例 93
- 3.6 EWB 软件简介 99

- 3.7 EWB 软件界面 99
- 3.8 EWB 基本操作方法 104
- 3.9 虚拟工作台方式电路仿真 109
- 3.10 PSpice 方式分析电路 111
- 习题三 114

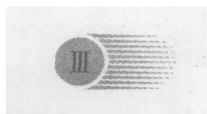
第 2 篇 电工电子实验

第 4 章 电工实验 118

- 4.1 实验一 直流电压源、电流源的外特性 118
- 4.2 实验二 基尔霍夫定律、叠加定理、互易定理 120
- 4.3 实验三 戴维南定理 123
- 4.4 实验四 日光灯电路与功率因数的增大 125
- 4.5 实验五 三相电路实验 128
- 4.6 实验六 一阶电路的响应 131
- 4.7 实验七 二阶电路的响应 132
- 4.8 实验八 三相异步电动机的直接启动 134
- 4.9 实验九 三相异步电动机的正反转控制 135
- 4.10 实验十 可编程控制器(PLC)及其应用 137

第 5 章 模拟电路实验 145

- 5.1 实验一 半导体二极管、三极管的特性与检测 145
- 5.2 实验二 常用电子仪器的使用练习 147
- 5.3 实验三 单管交流放大电路 149
- 5.4 实验四 负反馈放大电路 153
- 5.5 实验五 RC 正弦波振荡器 156
- 5.6 实验六 LC 正弦波振荡器与 LC 选频放大器 159





5.7	实验七 整流滤波及简单稳压电路	161	7.8	实验八 数字频率计的设计	220
5.8	实验八 串联稳压电源	164	第8章 电工电子仿真实验	225	
5.9	实验九 集成运算放大器基本功能实验	167	8.1	实验一 含有运算放大器的直流电路的计算机仿真分析	225
第6章 数字电路实验	170		8.2	实验二 一阶动态电路的计算机仿真分析	226
6.1	实验一 与非门电路的测试	170	8.3	实验三 二阶动态电路的计算机仿真分析	229
6.2	实验二 基本门电路逻辑关系的测试	173	8.4	实验四 正弦稳态电流电路的计算机仿真分析	232
6.3	实验三 组合逻辑电路的实验分析	175	8.5	实验五 频率特性及谐振的仿真分析	235
6.4	实验四 组合逻辑电路的设计	177	8.6	实验六 双极型三极管特性及应用电路	238
6.5	实验五 触发器	178	8.7	实验七 运算放大器参数测量与研究	240
6.6	实验六 555 电路的应用	181	8.8	实验八 模拟及数字转换器电路	241
6.7	实验七 计数器及其应用	182	附录 常用仪器仪表及电子器件	243	
6.8	实验八 移位寄存器及其应用	187	附录 A	SR-071B 双踪示波器	243
第7章 电工电子综合实验	193		附录 B	YB1602 型函数信号发生器	245
7.1	实验一 直流稳压电源的安装与测试	193	附录 C	YB2172 型交流毫伏表	247
7.2	实验二 阻抗变换器的应用与测试	196	附录 D	模拟电路实验板简介	248
7.3	实验三 特勒根(Tellegen)定理及其应用	201	附录 E	部分常用集成电路引脚功能图	250
7.4	实验四 波形变换器的设计与测试	204	附录 F	常用电工仪表的类、组代号	253
7.5	实验五 移相器的设计与测试	206	参考文献	255	
7.6	实验六 直流数字电压表设计	210			
7.7	实验七 电子秒表的设计	216			

第 1 篇 电工电子实验概论

第 1 章

电工电子实验基础知识

1.1 概 论

1.1.1 课程的作用和地位

1. 实验的重要性

英国科学家培根曾经指出：任何科学都是实验科学。尤其是在应用科学领域，任何一项研究成果都离不开科学实验。

著名物理学家丁肇中在 1976 年领取诺贝尔奖时说：“我是旧中国长大的，因此，想借这个机会向在发展中国家的青年强调实验工作的重要性。事实上，自然科学的理论，不能离开实验的基础。因此，我希望由于我这次获奖，能够唤起发展中国家的学生们的兴趣，而注意实验工作的重要性。”

由此可见，实验不仅是在促进科学技术的发展，还是在培养高素质的专门人才方面都起着极其重要的作用。实验技术的掌握程度体现了一个专业技术人员的基本素质，本课程提供了培养和提高实验基本技能的机会和条件，希望同学们珍视这样一个机会，重视实验课的学习，认真对待每一次实验，真正从实验课中有所收益，在提高动手实践能力上下功夫，很好地完成这门实验课程的学习任务。

2. “电工电子实验”课程的意义

“电工电子实验”是一门技术基础实验课程。它主要包括电路实验、模拟电路实验、数字电路实验、综合实验等内容，以实验模式来说，它包括模拟实验、仿真实验以及科学分析计算等内容。进行这些实验主要具有如下意义：

1) 促进和强化理论与实践的结合

理论来源于实践，实践又可促进理论的发展，理论对实践具有指导性的作用，两者缺一不可。因此，同学们在实验中要注意应用理论知识分析解决实践中出现的现象和问题。



2) 培养学生的动手能力, 启发学生敢想、敢做、敢为的精神

人们常说: 实践出真知。从国内外的教育经验来看, 特别是对工科学生而言, 在学习理论知识的基础上, 创造条件, 让学生多动手是一种人才培养的有效途径, 只有这样, 才能提高学生的动手能力, 特别是有助于培养学生综合思维问题、解决问题的能力, 最终达到具有从事科学技术研究的能力。

3) 旨在规范学生从事科学技术工作的行为

敢想、敢干不是瞎想、盲目地干, 而是在理论的指导下, 科学合理的想象和实践。比如要做一个实际的实验, 首先就需要了解这个实验涉及哪些理论知识, 需要用什么样的实验原理和实验线路, 实验线路中要用到哪些元器件、仪器设备, 这些元器件具有什么特点, 仪器设备应如何操作等。其次, 还须了解在实验中应如何接线、如何调整电路元器件参数、如何选择仪器仪表合理的量程并记录重要的参数。最后清理实验场地, 并及时进行小结, 写出心得体会、完成实验报告。

养成一种良好的工作习惯, 有利于今后在实际工作中, 对我们的操作能力达到事半功倍的效果, 有利于避免因为盲目而造成经济损失、设备事故甚至于人身伤亡。

“电工电子实验”作为一门技术基础实验课程, 其意义是广泛、深远的, 学生通过本课程的学习可获得电工与电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能, 了解电工电子技术的发展方向; 为学习后续课程以及从事与本专业有关的电工电子技术工作打下一定的基础。

1.1.2 课程的进行方式、内容及要求

1. 实验教学课程的进行方式

(1) 教师讲授和学生自学相结合, 且以自学为主。

(2) 课内课外相结合, 课内课外学时比例为 3:6, 课外实验室实行开放, 学生在课外进入实验室必须带学生证, 并登记。

(3) 根据教师要求为实验课程改革做出实际成绩的学生, 发给一定的生活补助费。

(4) 实验报告批改主要看有无特色和独到见解。

2. 课程要求

(1) 实验前要作好预习报告, 做到四明, 即目的明、原理明、任务明、步骤明。

(2) 实验中要求思路清晰、方法正确, 善于独立思考或与同组同学讨论的方式解决实验中出现的现象和故障。

(3) 遵守纪律、讲文明礼貌。

(4) 实行按学号分组责任制, 正确使用、精心爱护仪器设备。

(5) 注意环境卫生, 严禁课桌文化。

1.1.3 分组与评分方法

1. 分组

两人一组(交名单), 固定组号不变, 实行责任制。

2. 评分方法

本课程的学习成绩由平时成绩、笔试成绩和实验操作 3 部分组成。



评分原则：平时成绩占40%~45%，考试占55%~60%。

- (1) 平时成绩评定的依据是完成的各次实验报告情况。
- (2) 笔试的内容主要是由实验概论和各次实验中的思考题组成。
- (3) 实验操作评分的形式为：给定某个实验任务，由学生自己独立完成该项实验任务。

1.1.4 实验报告规范

实验报告规范在实验前完成，其规范如下：

- (1) 实验目的。
- (2) 实验原理(不要照抄，用自己的语言加以说明)。
- (3) 完成指定的预习要求及回答思考题。
- (4) 实验任务、实验线路及画出数据表格。
- (5) 实验数据分析处理(数据运算、曲线绘制、误差分析等)。
- (6) 继续完成思考题。
- (7) 心得体会。

1.1.5 注意事项

学生应遵守以下实验室规章制度及教学纪律：

- (1) 不得迟到(迟到15分钟不能参加实验)。
- (2) 3次不交实验报告或3次不参加实验者不能参加考试。
- (3) 注意用电安全，遵守“先接线后合电源，先断电后拆线”的程序。
- (4) 发生异常情况，应立即断开电源并保护现场，请老师检查。
- (5) 视损坏仪器设备轻重情况进行处理并赔偿。
- (6) 注意所选择仪表的量程。
- (7) 注意正确选择元件的额定参数。
- (8) 实行组员负责制，对本实验台的仪器设备负责。
- (9) 遵守计算机的使用管理，不得修改设置、界面，不得使用自带软盘。
- (10) 保持实验室清洁卫生，整理好桌面、放好导线、不在桌面上写、画，放好坐凳。

1.1.6 图表和曲线的绘制

- (1) 数据记录表格化，实验数据必须记于表格中，实验前应画好记录表格。
- (2) 曲线按工程要求绘制，使用作图工具，不得徒手画；曲线应光滑，不能画成折线；要使用坐标纸，比例要适当，坐标轴应注明物理量的符号和单位。

1.2 测量的基础知识

1.2.1 测量的基本概念

1. 测量单位

国际单位制，简称SI，它有7个基本单位，如表1-1所示。



表 1-1 SI 基本单位

长度单位	质量单位	时间单位	电流单位	热力学温度单位	物质的量的单位	发光强度单位
米(m)	千克(kg)	秒(s)	安[培](A)	开[尔文](K)	摩[尔](mol)	坎[德拉](cd)

在电磁测量技术领域中,根据表 1-1 中前 4 个(即 m、kg、s、A)就可以导出各种电磁物理量的单位。这样制定的单位称做 SI 电学和磁学部分单位,如表 1-2 所示。

表 1-2 SI 电学和磁学的部分单位

电压	电阻	电导	电容	电感	频率
伏[特] V	欧[姆](Ω)	西[门子][S(U)]	法[拉](F)	亨[利](H)	赫[兹](Hz)

2. 量具

测量单位是理论定义,测量过程应是实物与实物的比较过程。因此,需要根据测量单位的定义复制出体现测量单位(单位尺度)的实物,以实现测量。这个实物就称做量具(也称为度量器)。

根据量具在单位量值传递中的地位 and 作用,可分为基准器、标准器和工作量具。主要的电学基准器有电压、电阻和计算电容器等基准器,它们构成了电学计量的基础。

电压基准器由饱和标准电池组组成,其中每个电池的稳定性和其他性能均经过严格考核挑选,然后以这组标准电池的电动势来保存电压单位(V)的量值。

电阻基准器由稳定性极好的标准电阻器组成,并以它们的平均电阻值来保存电阻单位(Ω)的量值。

计算电容器基准器以“汤姆逊-蓝帕德定律”制定的交叉电容器为原器,单位为法[拉](F)。

在一般的电工工程测量中,主要用到的是工作量具,如各种仪器、仪表。

3. 量程(量限)、灵敏度、准确度及精确度

(1) 量程(量限):指仪器、仪表在规定的准确度下对应于某一测量范围内所能测量的最大值。如实验台上各种仪器、仪表的量限,如表 1-3 所示。

表 1-3 仪器仪表的量限

名 称	量 限	准确度	备注
直流电压表	35V(50V)	1 级	
直流电流表	1A	1 级	
交流电压表	500V(有效值)	1 级	
交流电流表	1A(有效值)	1 级	
数字示波器	300V(峰值)	3 级	

由此可知,若测量仪器、仪表超过仪器、仪表的量限,就可能被损坏。一旦示波器烧毁,就将损失近 1 万元人民币。因此,同学们在实验中务必注意根据被测量的大小、类型来选择不同的仪器、仪表和量限来进行测量。



(2) 灵敏度：仪器、仪表对微小电压或者微小电流的识辨能力。

对指针式仪表而言灵敏度是指针产生满刻度偏转所需的电流值 I_g ， I_g 越小，灵敏度越高，例如 $20\mu\text{A}$ 电流表表头一定比 $50\mu\text{A}$ 表头的灵敏度高。

对数字式仪表而言灵敏度是指能反映被测量的最小变化值。例如一个 $3\frac{1}{2}$ 的数字电压表最小显示为 0.001V ，即 1mV ，而 $4\frac{1}{2}$ 位的数字电压表最小显示为 0.0001V ，即 0.1mV ，显然 $4\frac{1}{2}$ 位的数字电压表比 $3\frac{1}{2}$ 位的灵敏度高。

(3) 准确度：指仪表的测量值与实际值的接近程度，通常用仪表的最大引用误差 (γ_{mm}) 来表示。即

$$\gamma_{\text{mm}} = |\Delta X_{\text{m}}| / X_{\text{n}} \cdot 100\% \quad (1-1)$$

式中： ΔX_{m} ——仪表最大绝对误差；

X_{n} ——仪表的满量程。

(4) 精确度(精密度)：可由仪表所能测出数值的有效数字表现出来，有效数字越多，表示其精确度越高。

精确度有时受仪表的刻度不够细密所限制，如图 1-1 所示表头，刻度为 $0 \sim 100$ ，共有 10 个大格、50 个小格，所以有：

0 ~ 10 格：0.1 ~ 9.9，1 ~ 2 位有效数字；

10 ~ 100 格：10.0 ~ 99.9，3 位有效数字。

准确度与精确度二者概念不同，但又密切相关，精确度高，准确度也高，两者是一致的。因此，人们往往就用精确度(也称精度)来描述测量的准确度。

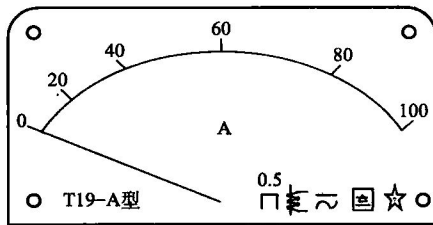


图 1-1 表头示意图

1.2.2 测量方法

选择什么样的测量方法进行测量，首先取决于被测量物的性质，其次还要考虑测量条件，以及提出的测量要求。

1. 直接测量法

用测量仪器、仪表进行测量时，能够直接测得被测量的数值的方法。如用电压表测量电压，如图 1-2 所示。

如用欧姆表测量电阻如图 1-3 所示。

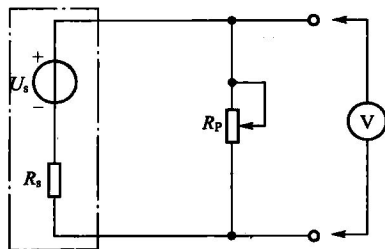


图 1-2 用电压表测量电压

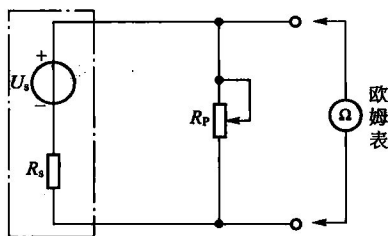


图 1-3 用欧姆表测量电阻

2. 间接测量

测量中，通过对被测物理量的有一定函数关系的几个物理量进行直接测量，然后再按这个函数关系计算出被测物理量数值，称为间接测量。

如电阻的伏安测量法：由欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ ，通过用电压表和电流表所测得的值，即可得出欲测电阻的大小，其电路图如图 1-4 所示。

再如欲测导线的电阻率 ρ ，而现在没有测电阻率 ρ 的仪器，则可通过直接测量确定导线的长度 L 、直径 d 和电阻 R ，然后再通过式 $\rho = \pi d^2 R / 4L$ 计算得出导线的电阻率 ρ 。

3. 比较测量法

以将被测量与同种类量的已知值相比较为基础的测量方法，称为比较测量法。

如用电桥测量电阻。测量中是将被测电阻与标准电阻进行比较，得出被测电阻值，如图 1-5 所示。

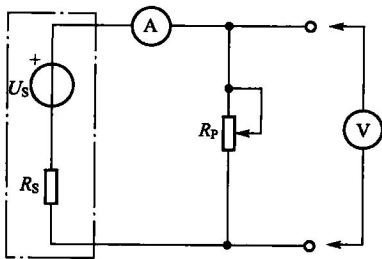


图 1-4 电阻的伏安测量法

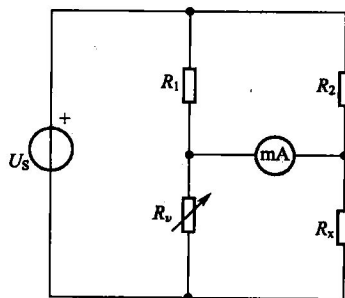


图 1-5 用电桥测量电阻

比较测量法的特点是：测量准确、灵敏度高，但测量过程较麻烦，测量仪器较贵。

4. 组合测量法

组合测量法的测量目的有多个，而且它们和直接测量或间接测量的物理量之间有一定的函数关系，可通过关联求解方程来确定被测量的数值。

如线性有源一端口网络等效参数的测量，如图 1-6 所示。

调节 $R_p = R_{p1}$ ，测出 U_1, I_1 ；调节 $R_p = R_{p2}$ ，测出 U_2, I_2 。则有：

$$U_1 + R_s I_1 = U_s$$

$$U_2 + R_s I_2 = U_s$$

二式联立可解出 R_s 和 U_s 。

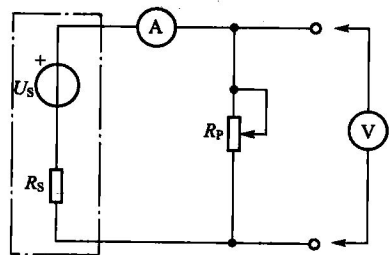


图 1-6 线性有源一端口网络等效参数的测量



1.3 测量误差分析

学习要求：熟练运用绝对误差、相对误差、满度相对误差、分贝误差等正确表示电路参数的测量结果；掌握计算机辅助分析系统误差、随机误差、粗大误差及其计算方法。

1.3.1 测量误差的定义

1. 绝对误差

测量值 x 与被测量的真值 x_0 间的偏差称为绝对误差 (Δx)，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2)$$

2. 相对误差

测量的绝对误差 Δx 与真值 x_0 的比值称为相对误差 (γ)。常用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \cdot 100\% \quad (1-3)$$

3. 满度相对误差

测量的绝对误差 Δx 与测量仪表的满度值 x_n 的比值称为满度相对误差 (γ_n)。常用百分数表示，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\% \quad (1-4)$$

测量中的满度相对误差不能超过测量仪表的准确度等级 S 的百分值 $S\%$ (S 分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5.0 等 7 级)，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_n} \cdot 100\% \leq S\% \quad (1-5)$$

如果仪表的等级为 S ，被测量的真值为 x_0 ，选满度值为 x_n ，则测量的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \cdot 100\% \leq \frac{x_n \cdot S\%}{x_0} \quad (1-6)$$

式(1-6)表明，当仪表的等级 S 选定后， x_n 越接近 x_0 ，测量的相对误差就越小。使用这类仪表时，要尽可能使仪表的满量程接近被测量的真值。或者说，测量时使仪表的指针(或显示值)落在满量程的 2/3 以上区间内，这样测量误差较小。

4. 分贝误差

电压增益或功率增益的相对误差用分贝表示时称为分贝误差，即

$$\gamma_{dB} = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta A}{A_0} \right) \text{dB} \quad (1-7)$$

$$\gamma_{dB} = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0} \right) \text{dB} \quad (1-8)$$

式中， $\Delta A/A$ 为电压增益的相对误差； $\Delta P/P_0$ 为功率增益的相对误差。

分贝误差与相对误差的关系为

$$\gamma_{dB} = 8.69 \frac{\Delta A}{A_0} \text{dB} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta A}{A_0} \approx 0.115 \gamma_{dB} \quad (1-9)$$

1.3.2 测量误差的分类

根据测量误差的性质、特点及产生原因,可将其分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,误差的大小和方向均保持不变,或在条件变化时,按照某种确定规律变化的误差称为系统误差(简称系差)。较常见的系差有恒值系差、累进性变化系差、周期性变化系差等。

1) 累进性变化系差判据

将 n 次等精度测量的残差 v 按测量条件 θ 的变化顺序(如按时间的先后顺序)排列为 $v_1, v_2, \dots, v_i, k, \dots, v_n$, 然后把 n 个残差分成两部分并求其差值 Δ 。

当 n 为偶数时

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n/2} v_i - \sum_{i=(n/2)+1}^n v_i \quad (1-10)$$

当 n 为奇数时

$$\Delta = \sum_{i=1}^{(n-1)/2} v_i - \sum_{i=(n+3)/2}^n v_i \quad (1-11)$$

式中, v_i 为残差。 $v_i = x_i - \bar{x}$, \bar{x} 为算术平均值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-12)$$

若测量中含有累进性变化系差, 则前后两部分的 v_i 值的和明显不同, 因而 Δ 值明显不为零, 通常 $|\Delta| \geq |v_{\max}|$ 。

2) 周期性变化系差判据

按照一定顺序把残差两两相乘, 然后取乘积项的绝对值的和, 若满足关系式(1-13), 则可认为测量中存在周期性变化系差。

$$\left| \sum_{i=1}^{n-1} v_i \cdot v_{i+1} \right| > \sqrt{n-1} \hat{\sigma}^2(x) \quad (1-13)$$

式中, $\hat{\sigma}^2(x)$ 为测量数据的方差的估计值, 其计算式见式(1-15)。

引起系统误差的因素很多, 常见的有测量仪器不准确、测量方法不完善、测量条件变化及测量人员不正确的操作等, 系统误差是可以根据产生的原因, 采取一定措施减小或消除的。

2. 随机误差

在相同条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的大小和方向均发生变化且无确定的变化规律, 称这种误差为随机误差。

一次测量的随机误差没有规律, 但是, 对于大量的测量结果, 从统计学观点来看, 随



机误差的分布接近正态分布, 只有少数服从均匀分布或其他分布。因此, 可以采用数理统计的方法来分析随机误差; 可以用有限个测量数据来估计总体的数据特征。

1) 数学期望的估计值

在实际测量中, 将有限次测量数据的算术平均值作为测量真值的估计值, 或作为测量值的数学期望 $\hat{M}(x)$ 的估计值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \hat{M}(x) \quad (1-14)$$

2) 均方差的估计值——贝赛尔(Bessel)公式

在实际测量中, 常用有限次测量数据的均方差作为测量精度的估计值或作为测量值均方差的估计值, 即

$$\hat{\sigma}(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad \text{或} \quad \hat{\sigma}^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1} \quad (1-15)$$

$$\hat{\sigma}(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad \text{或} \quad \hat{\sigma}^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}$$

$\hat{\sigma}(x)$ 值越小, 说明测量精度越高。

对于单次测量的均方差可按式(1-16)估算

$$\hat{\sigma}(x) = \frac{\Delta_{\min}}{\sqrt{3}} \quad (1-16)$$

式中, Δ_{\min} 为测量仪器的最小分度。

3) 估计被测量真值所处的区间

若测量中只存在随机误差(或系统误差可忽略), 则可以用有限次测量数据来估计被测量真值 x_0 (x_0 满足关系式(1-17)), 称 x_0 所处的区间为 $[\bar{x} - t_a \hat{\sigma}(\bar{x}), \bar{x} + t_a \hat{\sigma}(\bar{x})]$

$$x_0 = \bar{x} + t_a \hat{\sigma}(\bar{x}) \quad (1-17)$$

式中, $\hat{\sigma}(\bar{x})$ 为平均值的均方差的估计值, 即 $\hat{\sigma}(\bar{x}) = \hat{\sigma}(x)/\sqrt{n}$; t_a 为有限次测量的 t 分布系数, 与测量次数 n 及指定的置信概率 p 有关, 其关系如表 1-4 所示。

表 1-4 有限次测量的 t 分布(t_a 值表)

$k \backslash p$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
1	1	1.37	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.92	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.765	0.978	1.25	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	0.741	0.941	1.19	1.553	2.132	2.776	3.747	4.604	8.61
5	0.727	0.92	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.718	0.906	1.134	1.44	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.86	2.306	2.896	3.355	5.041



(续)

$k \backslash p$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
9	0.703	0.883	1.1	1.383	1.833	2.262	2.821	3.25	4.781
10	0.7	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
20	0.687	0.86	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.85

注: $k = n - 1$ 。

3. 粗大误差与可疑数据

粗大误差通常是由测量人员的不正确操作或疏忽等原因引起的。粗大误差明显地超过正常条件下的系统误差和随机误差。凡被确认含有粗大误差的测量数据均称为坏值, 应该剔除不用。

可疑数据是指那些使误差的绝对值超过给定范围的测量值(x_k), 即

$$|x_k - \bar{x}| > ch \hat{\sigma}(x) \quad (1-18)$$

式中, ch 为给定的系数, 与测量次数 n 有关, 如表 1-5 所示。

表 1-5 肖维纳准则表

n	ch	n	ch	n	ch	n	ch
5	1.65	11	2	17	2.18	23	2.3
6	1.73	12	2.04	18	2.2	24	3.32
7	1.79	13	2.07	19	2.22	25	2.33
8	1.86	14	2.1	20	2.24	26	2.34
9	1.65	15	2.13	21	2.26		
10	1.65	16	2.16	22	2.28		

剔除可疑数据的步骤如下:

- (1) 计算算术平均值 \bar{x} 、均方差的估计值 $\hat{\sigma}(x)$ 及残差 $v_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。
- (2) 判断有无可疑数据。先由表 1-5 查出测量次数 n 对应的系数 ch , 然后用式 (1-18) 判断可疑数据。若存在可疑数据, 则应指出其对应的测量值 x_k 和序号 k 。
- (3) 剔除 x_k 不改变原测量值的顺序, 令 $n = n - 1$ (设剔除了一个可疑数据), 重复步骤 (1)、(2)、(3) 直到无可疑数据为止。

注意: 可疑数据是否一定要剔除不用, 应慎重考虑。对那些因仪器不正常或测量人员的疏忽造成的可疑数据 (又称为坏值) 应剔除不用; 但对那些由某种特殊原因 (如电路工作不稳定) 导致的可疑数据不能轻易剔除, 需要进一步测量分析。

1.3.3 测量误差的计算机辅助分析

人工分析与判断测量误差, 工作量较大且可靠性较低, 但如果利用计算机辅助分析, 则变得简单可靠。下面举例说明。

例 1-1: 用数字频率计测量某信号源的输出频率 f , 每隔 1min 读取 1 个测量值, 连续读取了 11 次, 测量值如下:



序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
f/kHz	99.72	99.75	99.65	99.71	99.62	99.45	99.62	99.70	99.67	99.73	99.74

试回答：这些测量值中有无可疑数据？有无系统误差？设置信概率 $p = 95\%$ ，试估计信号源输入频率的真值 f_0 所处的范围。

解：(1) 程序流程图如图 1-7 所示。

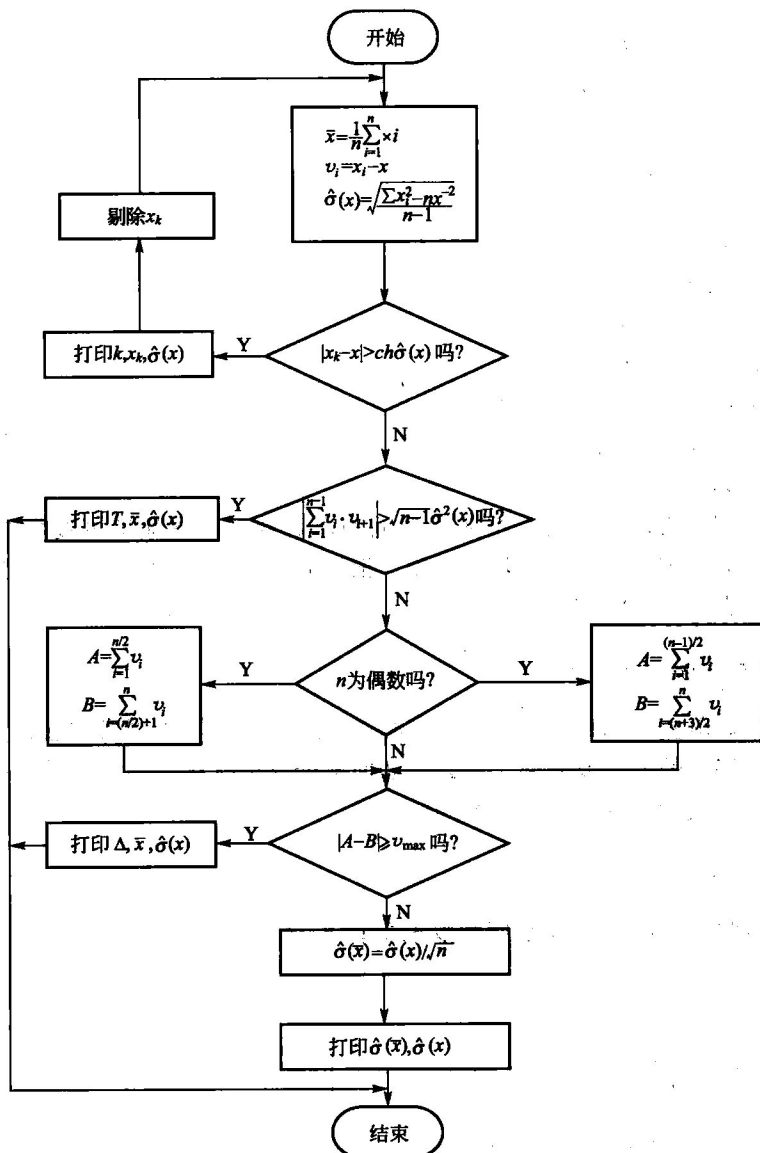


图 1-7 例 1-1 程序流程图

(2) 程序设计。C 语言程序略。

(3) 程序运行结果：