



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育电子与信息技术应用专业教学用书

电子测量技术

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编
中国机械工业教育协会
孟凤果 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



GUIHUA JIAOCAI

gz

教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育电子与信息技术应用专业教学用书

电子测量技术

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编
中国机械工业教育协会
主 编 孟凤果
参 编 李福军 颜云华 吴晓艳 笪秉宏
主 审 孟凤果



机械工业出版社

本书根据目前高职、高专教育的特点,从电子测量技术的实际应用出发,简明扼要地介绍了电子测量技术及常用电子测量仪器使用技术,重点讨论了相关仪器的正确操作方法和典型应用实例,且每章后附有相关实验内容。这些实验题目选题典型、可操作性强,通过实验操作能使学生更好地掌握相关知识。

全书共分为9章,主要内容包括电子测量的基本知识,信号发生器,电子示波器及测量技术,万用表及其测试技术,电压测量技术,时间与频率测量技术,扫频仪与晶体管特性图示仪和集成电路测试仪,计算机仿真测量技术,电子仪器的发展趋势和自动测试系统。

本书可供高职高专、中职中专电子技术应用类专业的师生使用,也可供从事电子技术应用类工作的工程技术人员参考和作为职业技术工人的培训教材。

本书配有免费电子教案,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电索取、咨询电话:010-88379195

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术/孟凤果主编. —北京:机械工业出版社,2007.11

教育部职业教育与成人教育司推荐教材. 五年制高等职业教育电子与信息技术应用专业教学用书

ISBN 978-7-111-22773-1

I. 电… II. 孟… III. 电子测量-高等学校:技术学校-教材
IV. TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第173146号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:高倩 责任编辑:张值胜

封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2008年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm • 11.25印张 • 264千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-22773-1

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379195

封面无防伪标均为盗版

机电类高等职业技术教育教材建设 领导小组人员名单

顾问：郝广发

组长：杨黎明

成员：刘亚琴 李超群 惠新才 王世刚

姜立增 李向东 刘大康 鲍风雨

储克森 薛 涛

电子与信息技术应用类专业教材编审委员会

焦 斌 储克森 黄家善 薛 涛 赵 辉

王成安 文国电 钱金法 章彬宏 于淑萍

杨海祥 石小法 曹克澄 曹振军 童建华

杨清学 易培林 孟凤果 于 宁

前 言

本教材是基于目前高职、高专教育的特点及高职、高专毕业生就业岗位的需要而编写的。电子测量技术是一门应用性很强的实用技术，其理论与实践技能是学习电子测量技术不可缺少的，理论与实践的紧密结合，是本书的重要特点。本课程既不是纯理论课，也不是一般的实验课，而是介于两门课程之间的一门理论联系实际比较紧密的课程。本课程内容也是培养学生动手能力和提供基本技能训练的重要环节。

本教材遵循五年制高职、高专学校的教育特点：加强实践技能操作，提高学生的动手能力，重点介绍了各种基本测量技术，并在此基础上结合各种通用仪器进一步讨论了它们的基本组成、工作原理和使用方法等方面的知识，对仪器的组成电路不作详尽的讨论和分析。每章后附有实训实验内容，与章节重点知识紧密结合，可操作性强，从某些方面讲，可以拓宽学生的思路，锻炼和提高学生分析、处理问题的能力。同时，本教材增加了一些新知识内容，如虚拟仪器的应用等。

全书共分9章。第1章介绍了电子测量的基本知识；第2~8章分别讨论了信号发生器、电子示波器及测量技术、万用表及其测试技术、电压测量技术、时间与频率测量技术、扫频仪与晶体管特性图示仪和集成电路测试仪、计算机仿真测量技术等的基本原理及其相关仪器的基本组成、工作原理和使用。第9章介绍了电子仪器的发展趋势和自动测试系统的基本知识。

本课程参考学时为70学时。

本教材由在职业教育教学一线工作、积累有丰富教学经验的各学校教师通力编著。河北机电职业技术学院孟凤果任主编，编写了第1、3、4、5、9章；辽宁机电职业技术学院李福军编写了第2章；常州机电职业技术学院颜云华编写了第6章；安徽机电职业技术学院笪秉宏编写第7章；四川电子工业学校吴晓艳编写第8章。河北机电职业技术学院王晗、滑洁、孙静、都鑫为本教材的电子教案编写做了很多工作。

在本教材编写过程中，得到了河北机电职业技术学院各级领导的大力支持和帮助，在这里表示诚挚的感谢！同时，也向对本教材提供了很多支持的各位同仁表示衷心感谢！尽管作者在教材的组织、编写方面做了许多努力，但由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电子测量的基本知识 1

1.1 概述	1
1.1.1 电子测量的内容	1
1.1.2 电子测量的特点	2
1.2 电子测量的分类	2
1.2.1 按测量手段分类	3
1.2.2 按测量性质分类	3
1.3 电子测量实验室的常识	3
1.3.1 电子测量实验室的环境 条件	3
1.3.2 电子测量仪器的组成	4
1.3.3 电子测量仪器的接地	4
1.4 测量误差的基本概念	5
1.4.1 测量误差的表示方法	5
1.4.2 测量误差的来源与分类	7
1.5 误差的合成	8
1.5.1 和、差函数的合成误差	8
1.5.2 积函数的合成误差	9
1.5.3 商函数的合成误差	9
1.5.4 和、差、积、商函数的 合成误差	10
1.6 测量结果的处理	10
1.6.1 数据处理	10
1.6.2 图解分析法	11
本章小结	11
练习题	12

第 2 章 信号发生器 13

2.1 概述	13
2.1.1 信号发生器的分类	13
2.1.2 信号发生器的一般组成	14
2.1.3 信号发生器的主要技术指标	14
2.2 低频信号发生器	15
2.2.1 低频信号发生器的组成与 原理	16
2.2.2 低频信号发生器的主要性 能指标	17

2.2.3 低频信号发生器的使用方法	17
2.2.4 低频信号发生器在测量放 大倍数时的应用	18
2.3 高频信号发生器	19
2.3.1 高频信号发生器的组成与 原理	19
2.3.2 高频信号发生器的主要 性能指标	20
2.3.3 高频信号发生器在调收 音机中频时的应用	20
2.3.4 锁相技术简介	21
2.4 函数信号发生器	22
2.4.1 函数信号发生器的组成与 原理	22
2.4.2 正弦波形成电路	23
2.4.3 函数信号发生器的性能 指标	24
本章小结	25
综合实验	25
实验一 低频信号发生器的使用	25
实验二 高频信号发生器的使用	27
练习题	29

第 3 章 电子示波器及测量技术 30

3.1 概述	30
3.1.1 电子示波器的特点	30
3.1.2 电子示波器的类型	30
3.2 示波管及波形显示原理	31
3.2.1 示波管	31
3.2.2 波形显示原理	33
3.3 通用电子示波器	36
3.3.1 通用电子示波器的 基本组成	36
3.3.2 示波器的垂直系统(Y 轴系统)	37
3.3.3 示波器的水平系统(X 轴系统)	40
3.3.4 主机系统(Z 轴系统)	42
3.4 通用电子示波器的使用	42
3.4.1 示波器的选择	43

3.4.2 示波器的正确使用	43	5.2.3 有效值电子电压表	89
3.5 SR8 型示波器的面板图	44	5.2.4 应用实例	90
3.5.1 主要技术性能	44	5.3 数字电子电压表	91
3.5.2 面板布置	44	5.3.1 数字电压表的基本原理	91
3.5.3 示波器的使用方法	47	5.3.2 多用型 DVM 工作原理	94
3.6 示波器的基本测量方法	47	5.3.3 DVM 主要性能指标与 测量误差	95
3.6.1 电压的测量	48	5.4 电子电压表的使用方法	97
3.6.2 时间和频率的测量	49	本章小结	98
3.7 电子示波器的发展概况	52	综合实验	98
本章小结	53	实验一 电压表波形响应的研究	98
综合实验	54	实验二 变压器变比及直流稳压 电源纹波系数的测量	100
实验一 用示波器观测正弦信号的 幅度	54	练习题	100
实验二 用李萨育图形法观测频率	55	第 6 章 时间与频率测量技术	102
实验三 使用示波器观测电路的 波形	55	6.1 概述	102
练习题	56	6.2 频段的划分及常用测频方法	102
第 4 章 万用表及其测试技术	57	6.3 电子计数器的功能	103
4.1 概述	57	6.3.1 电子计数器的组成与主要 技术指标	103
4.2 模拟式万用表	57	6.3.2 时基信号产生与变换单元	104
4.2.1 模拟式万用表的基本原理	57	6.4 电子计数器的测量原理	104
4.2.2 MF500 型万用表	60	6.4.1 测量频率	105
4.2.3 模拟式万用表的使用	62	6.4.2 量化误差	106
4.2.4 模拟式万用表应用实例	67	6.4.3 电子计数器的测周功能	106
4.3 数字式万用表	70	6.4.4 电子计数器的其他功能	107
4.3.1 数字式万用表结构图	70	6.5 电子计数器的测量误差	107
4.3.2 数字式万用表的分类	70	6.5.1 电子计数器测量误差的分类	107
4.3.3 数字式万用表的性能特点	70	6.5.2 测量频率误差分析	108
4.3.4 DT830 型数字式万用表	71	6.5.3 测量周期的误差分析	110
4.3.5 数字式万用表的应用实例	74	6.5.4 中界频率的确定	110
本章小结	76	6.6 电子计数器的应用	110
综合实验	77	6.6.1 提高测频性能的方法	111
实验一 电压、电阻和电容的测量	77	6.6.2 E434BI 型频率计数器简介	111
实验二 半导体器件的测量	78	本章小结	112
练习题	78	综合实验	113
第 5 章 电压测量技术	80	电子计数器的应用	113
5.1 概述	80	练习题	114
5.1.1 电子电路中电压的特点	80	第 7 章 扫频仪与晶体管特性图示仪和 数字集成电路测试仪	115
5.1.2 交流电压的基本参数	81	7.1 扫频仪概述	115
5.1.3 电子电压表的分类	83	7.1.1 频率特性测试原理	115
5.2 模拟式电子电压表	85		
5.2.1 均值型电子电压表	85		
5.2.2 峰值型电压表	87		

7.1.2 扫频仪常用的基本概念及分类	116	8.2 EWB 的工作界面	142
7.1.3 扫频仪的组成及原理	116	8.2.1 EWB 的主窗口	142
7.2 BT3 型频率特性测试仪	118	8.2.2 EWB 的工具栏	143
7.2.1 电路组成	118	8.2.3 EWB 的元器件与仪器库栏	143
7.2.2 使用方法	119	8.3 EWB 的操作使用方法	144
7.3 晶体管特性图示仪	123	8.3.1 电路的创建	144
7.3.1 晶体管特性图示仪的工作原理	123	8.3.2 仪器的操作	146
7.3.2 晶体管特性图示仪的组成	124	8.3.3 电子电路的仿真操作过程	154
7.3.3 XJ4810 型晶体管特性图示仪	124	8.4 电路仿真测试举例	155
7.3.4 晶体管特性图示仪使用测试应用实例	128	8.4.1 电路基础应用举例	155
7.4 数字集成电路测试仪	132	8.4.2 模拟电路应用举例	156
7.4.1 ICT-33 数字集成电路测试仪	132	8.4.3 数字电路应用举例	158
7.4.2 ICT-33 数字集成电路测试仪应用实例	133	本章小结	160
本章小结	137	综合实验	161
综合实验	138	计算机仿真电路测试	161
实验一 BT3 型扫频仪的使用练习	138	练习题	162
实验二 用 BT3 型扫频仪测试高频头	138	第 9 章 电子仪器的发展趋势和自动测试系统	163
实验三 二极管的测量	139	9.1 概述	163
实验四 晶体管的测量	140	9.2 智能仪器	163
实验五 数字集成电路测试仪的应用	140	9.2.1 智能仪器及其发展	163
练习题	140	9.2.2 智能仪器的特点	164
第 8 章 计算机仿真测量技术	142	9.2.3 智能仪器的基本结构	165
8.1 概述	142	9.3 自动测试系统简介	166
		9.3.1 自动测试系统的基本概念	166
		9.3.2 自动测试系统的发展趋势	166
		本章小结	167
		练习题	168
		参考文献	169

第 1 章 电子测量的基本知识

内容提要:

在本章可以了解到电子测量的基本概念、内容、特点；掌握电子测量的分类、电子测量实验室的常识、测量结果的表示方法和测量误差的基本分析方法。

1.1 概述

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程。人们认识客观世界，首先是对具体事物进行观察，形成定性认识，然后进行测量，获得定量的概念，在此基础上才可以总结出各种客观规律，形成定理和定律。所以，测量是打开自然科学“未知”知识的钥匙。

测量的实现是通过物理实验的方法，获取被研究对象定量信息的过程。测量技术主要研究测量原理、方法和仪器等方面的内容。电子测量是测量学的一个重要分支。从广义上讲，凡是利用电子技术进行的测量都可以称为电子测量；从狭义而言，电子测量是特指对各种电参量和电性能的测量，这正是我们要讨论的范畴。在电子技术领域中，正确的分析只能来自正确的测量。电子测量已成为一门发展迅速、应用广泛、精确度愈来愈高、对科学技术发展起着巨大推动作用的独立学科。电子测量的水平，是衡量一个国家科技水平的重要标志之一。

1.1.1 电子测量的内容

随着电子技术的不断发展，电子测量的内容愈来愈丰富。本课程中电子测量的内容是指对电子学领域内电参量的测量，主要有：

1. 电能量的测量

例如：电流、电压、功率、电场强度等的测量。

2. 电信号特征量的测量

例如：频率、相位、周期、波形参数等的测量。

3. 电路元件参数的测量

例如：电阻或电导、电抗或电纳、阻抗或导纳、电感、电容、品质因数、介电常数导磁率等的测量。

4. 电路性能特性量的测量

例如：增益或衰减、谐波失真度、灵敏度、通频带等的测量。

5. 特性曲线的显示

例如：幅频特性、器件特性等的显示。

以上并非严格的分类法，一个参量从不同角度看，既可以把它归入某一类，也可以将其归入另一类。如电压既是电能的一个属性，同时又是电信号的一个重要特征。

1.1.2 电子测量的特点

与其他测量相比，电子测量主要具有以下几个特点：

1. 测量频率范围宽

除测量直流电量外，还可以测量交流电量，其频率值下限为 10^{-4} Hz，上限为 THz ($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$ ，读作太赫) 数量级。但要注意的是，不同频段的测量，即使测量同一种电量，也需要采用不同的测量方法与测量仪器。

2. 仪器的量程宽

量程是测量范围上限值与下限值之差。由于被测量范围的大小相差悬殊，因此要求测量仪器应有足够宽的量程。例如：一台数字电压表，要求测出从纳伏 (nV) 级到千伏 (kV) 级的电压，量程达 12 个数量级。用于测量频率的电子计数器，其量程可达 17 个数量级。量程宽是电子测量仪器的突出优点。

3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高很多，特别是对频率和时间的测量。例如：长度测量的准确度最高为 10^{-8} 的量级；而用电子测量方法测量频率和时间，其准确度可达到 10^{-13} 数量级，这是目前人类在测量准确度方面达到的最高标准。

4. 测量速度快

由于电子测量是通过电子技术实现的，因而测量速度很快。只有高速度的测量，才能测出实时变化的物理量，这正是它在现代科技领域得到广泛应用的重要原因。例如：载人飞船发射过程中，就需要有电子测量系统快速测出它的运行参数，通过对这些参数的处理，再对它的运动下达控制信号去进行调整，使其运行正常。

5. 易于实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测。例如：环境恶劣的、人体不便于接触或无法达到的区域（深海、地下、高温炉子、核反应堆内等），都可以通过传感器或电磁波、辐射等方式进行测量。

6. 易于实现测量的自动化

由于微电子技术和微处理器的应用，使电子测量呈现了崭新的局面。电子测量同计算机相结合，使测量仪器智能化，可以实现测量的自动化。例如：在测量中能实现程控、自动校准、自动转换量程、自动诊断故障和自动修复，对测量结果可以自动记录、自动进行数据处理等。

由于电子测量具有以上特点，所以被广泛应用于自然科学的一切领域。电子测量技术的水平往往是科学技术最新成果的反映，因此，一个国家电子测量技术的水平，往往标志着这个国家科学技术的水平。这就使得电子测量技术在现代科学技术中的地位十分重要，也是使得电子测量技术日新月异发展的原因。

1.2 电子测量的分类

根据测量方法的不同，电子测量有不同的分类方法。这里仅介绍常用的分类方法。

1.2.1 按测量手段分类

按测量手段分类，有直接测量、间接测量和组合测量三种。

1. 直接测量

用测量仪器直接测得被测量量值的方法称为直接测量。例如：用电压表测量电路元器件两端上的工作电压等。

2. 间接测量

利用直接测量得到的量值与被测量的量值之间已知的函数关系，得到被测量量值的测量方法称为间接测量。例如：测量电阻 R 上的消耗功率 $P=UI=I^2R=U^2/R$ ，可以通过直接测量电压、电流，电流、电阻或电压、电阻等方法求出。

当被测量的量不便于直接测量或者间接测量的结果比直接测量的更为准确时，多采用间接测量法。例如：测量晶体管集电极电流，多采用直接测量集电极电阻 (R_C) 上的电压，再通过公式 $I=V_{RC}/R_C$ 算出，而不再使用断开电路串联接入电流表的方法。

3. 组合测量

将被测量的量和另外几个量组成联立方程，通过直接测量这几个量后求解联立方程，从而得到被测量的大小。组合测量是兼用直接测量与间接测量的一种测量方法。

1.2.2 按测量性质分类

尽管被测量的种类繁多，但它们总是遵循一定规律。按被测量的量值变化规律分类，可分为时域测量、频域测量、数据域测量等。

1. 时域测量

时域测量是测量被测量随时间变化的特性，这时被测量是一个时间函数。例如：用示波器显示电压、电流的瞬时波形，测量它的幅度、上升沿和下降沿等参数。

2. 频域测量

频域测量是测量被测量随频率变化的特性，这时被测量是一个频率函数。例如：用频率特性图示仪可以观测放大器的增益随频率变化的规律等。

3. 数据域测量

数据域测量是对数字系统逻辑特性进行的测量。例如：用逻辑分析仪可以同时观测多个离散信号组成的数据流等。

1.3 电子测量实验室的常识

电子测量是在一定环境条件下进行的。作为电子测量的基本场所——电子测量实验室，对测量的准确度起重要的作用，应该熟悉实验室内的一些基本常识。

1.3.1 电子测量实验室的环境条件

电子测量仪器是由各种电子元器件构成的，它们往往不同程度地受到诸如温度、湿度、大气压强、振动、电网电压、电磁场等外界环境的影响，因此，在同一环境条件下，用同一台仪器及同样的测量方法去测量同一个物理量，就会出现不同的测量结果。

根据电子测量的任务及各种电子测量仪器的技术要求的不同,电子测量应具备的环境条件也是不同的。仪器的使用应在生产厂家规定的范围内进行,以保证一定的测量精度。其中,特别注意电网电压、环境温度和湿度必须符合要求。

1.3.2 电子测量仪器的组成

在实验室完成一次测量,常常需要数台测量仪器及辅助设备。例如:要测量放大器的增益,就需要低频信号发生器、电子示波器、电子电压表及直流稳压电源等仪器。电子测量仪器的放置方式、连接方法等都会对测量过程、测量结果及仪器自身的安全产生影响。

1. 电子测量仪器的放置

在测量前应安排好各仪器的位置。要注意以下两点:

(1) 在摆放仪器时,尽量使仪器的指示电表或显示器与操作者的视线平行,以减少视觉误差;对那些在测量中需要频繁操作的仪器,其位置的安排应便于操作者的使用。

(2) 在测量中,当需要两台或多台仪器重叠放置时,应把重量轻、体积小的仪器放在上层;对于散热量较大的仪器,还要注意它自身散热及对相邻仪器的影响。

2. 电子测量仪器之间的连线

电子测量仪器之间的连线原则上要求尽量短,尽量减少或消除交叉,以免引起信号的串扰和寄生振荡。例如:图 1-1a、c 所示是正确的连线方法;图 1-1b 所示连接线太长;图 1-1d 所示连接线有交叉。

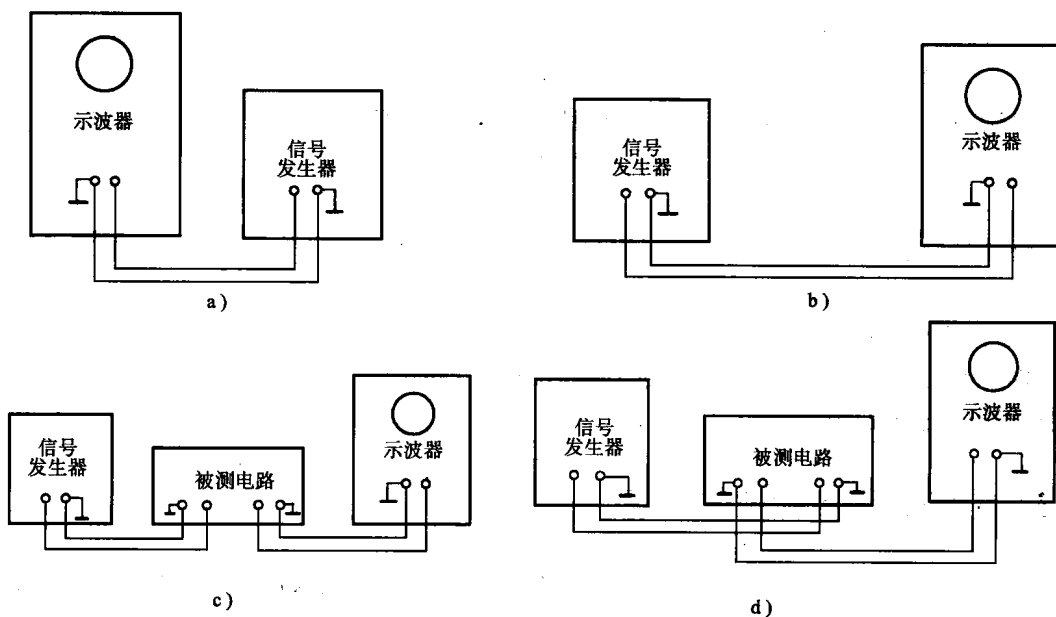


图 1-1 仪器的连线

1.3.3 电子测量仪器的接地

电子测量仪器的接地有二层含义,即以保障操作者人身安全为目的的安全接地和以保证电子测量仪器正常作为目的的技术接地。

1. 安全接地

安全接地即将机壳和大地连接。这里所说的“地”是指真正的大地。安全接地的目的：一是防止机壳上积累电荷，产生静电放电而危及设备和人身安全；二是防止当设备的绝缘损坏而使机壳带电时，危害操作者的安全。为了消除隐患，一般可采取以下措施。

(1) 在实验室的地面上铺设绝缘胶。

(2) 仪器的电源插头应采用“三星”插头，其中“一星”为接地端（另一端连接在仪器的外壳上）。

(3) 电子实验室的总地线可用大块金属板或金属棒深埋在附近的地下，并撒些食盐以减少接触电阻，再用粗导线引入实验室。通过接地线，泄漏电流就流入大地这个巨大的导体。

2. 技术接地

技术接地是一种防止外界信号串扰的方法。这里所说的“地”，并非大地，而是指等电位点，即测量仪器和被测电路的基准电位点。技术接地一般有一点接地和多点接地两种方式。前者适用于直流或低频电路的测量，即把测量仪器的技术接地点与被测电路的技术接地点连在一起，再与实验室的总地线（大地）相连；多点接地则应用于高频电路的测量。

在电子测量过程中，由于被测对象工作频率较高、阻抗较大且信号较弱，容易受外界因素影响，从而使测量误差增大，稳定性降低。为避免干扰，大多数电子测量仪器的两个输入端中一端为接地端，与仪器的外壳相连，并与连接被测对象的电缆引线外层屏蔽线连接在一起，这个端点通常用“⊥”表示。在一次测量过程中，如果同时使用多台仪器，则需要将它们“⊥”端均接在一起，即“共地”。仪器外壳则可通过电源插头中的接地端与大地相连，这样就组成了测试系统的屏蔽网络，可避免外界电磁场的干扰，提高测量稳定性，减少测量误差。因此，在电子测量中，一定注意不要将接地端与非接地端任意调换。

1.4 测量误差的基本概念

一个量在被测量时，其本身所具有的真实大小，称为该量的真值。测量的目的是希望获得被测量的真值。然而，由于测量设备、测量方法、测量环境和测量人员素质等条件的限制，都会使测量结果与被测量的真值不同，这个差异称为测量误差。当测量误差过大时，则根据测量工作或测量结果所得出的结论或发现将是毫无意义的，甚至会给工作带来危害。研究测量误差的目的，就是要了解产生误差的原因及其产生规律，从而寻找减小测量误差的方法，使测量结果准确可靠。

1.4.1 测量误差的表示方法

测量误差有两种表示方法：绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

(1) 定义 设被测量的真值为 A_0 ，测量所得到的被测量值为 x ，则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - A_0$$

注意：这里所说的被测量值是指仪器的示值。

这里，当 $x > A_0$ 时， Δx 是正值；当 $x < A_0$ 时， Δx 是负值。所以 Δx 是具有大小、正负和量纲的数值。它的大小和符号分别表示测得值偏离真值的程度和方向。

例 1.1 一个被测电压, 其真值 U_0 为 100V, 用一只电压表测量, 其指示值 U_x 为 101V, 则绝对误差为

$$\Delta U = U_x - U_0 = 101V - 100V = +1V$$

这是正误差, 表示以真值为参考基准, 测量值大了 1V。

在某一时间及环境条件下, 被测量的真值是客观存在的, 但无法获得。因此, 在实际测量中常以高一级标准仪器的示值 A 来代替真值 A_0 , A 称为实际值, 即

$$\Delta x = x - A$$

这是通常使用的表达式。

(2) 修正值 与绝对误差的绝对值大小相等, 但符号相反的量值, 称为修正值, 用 C 表示, 即

$$C = -\Delta x = A - x$$

测量仪器在使用前都要经过高一级标准仪器的校正, 校正量用修正值 C 表示, 它通常以表格、曲线或公式的形式给出。

在日常测量中, 使用该受检仪器测量所得到的结果应加上修正值, 以求得被测量的实际值, 即

$$A = x + C$$

例 1.2 用电流表测电流, 其示值为 4.56mA, 已知修正值为 -0.02mA, 则被测电流为

$$A = x + C = 4.56\text{mA} - 0.02\text{mA} = 4.54\text{mA}$$

2. 相对误差

绝对误差虽然可以说明测得值偏离实际值的程度, 但不能说明测量的准确程度。因此, 除绝对误差外, 误差的另一种表示是相对误差。

(1) 定义 测量的绝对误差 Δx 与被测量的真值 A_0 之比 (用百分数表示), 称为相对误差, 用 γ_0 表示, 即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\%$$

因为一般情况下不容易得到真值, 所以, 可以用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 之比来表示相对误差, 称为实际相对误差, 用 γ_A 表示, 即

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

例 1.3 两个电压的实际值分别为 $U_{1A}=100V$, $U_{2A}=10V$; 测得值分别为 $U_{1x}=99V$, $U_{2x}=9V$ 。求两次测量的绝对误差和相对误差。

解:

$$\Delta U_1 = U_{1x} - U_{1A} = 99V - 100V = -1V$$

$$\Delta U_2 = U_{2x} - U_{2A} = 9V - 10V = -1V$$

$$\gamma_{1A} = \frac{\Delta U_1}{U_{1A}} \times 100\% = \frac{-1}{100} \times 100\% = -1\%$$

$$\gamma_{2A} = \frac{\Delta U_2}{U_{2A}} \times 100\% = \frac{-1}{10} \times 100\% = -10\%$$

$|\Delta U_1| = |\Delta U_2|$, 但 $|\gamma_{1A}| < |\gamma_{2A}|$ 。可见, 用相对误差可以恰当地表征测量的准确程

度。相对误差是一个只有大小和符号，而没有量纲的数值。

在误差较小，要求不太严格的场合，也可用测量值 x 代替实际值 A ，因此而得到的相对误差称为示值相对误差，用 γ_x 表示，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

式中的 Δx 由所用仪器的准确度等级定出，由于 x 中含有误差，所以 γ_x 只适用于近似测量。

(2) 满度相对误差 绝对误差 Δx 与仪器满度值 x_m 的比值，称为满度相对误差（或引用相对误差），用 γ_m 表示，即

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

因仪器仪表刻度线上各点示值的绝对误差并不相等，为了评价仪表的准确度，所以取最大的绝对误差 Δx_m 。这里有

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

γ_m 是仪器在工作条件下不应超过的最大相对误差，这种误差表示方法较多地用在电工仪表中。按 γ_m 值划分电工仪表的准确度等级分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。上述等级值在仪表上通常用 s 表示。 $s=1$ ，说明仪表的满刻度相对误差 $-1\% \leq \gamma_m \leq 1\%$ 。

由上述内容可知，测量的绝对误差为

$$\Delta x \leq x_m s\%$$

测量的相对误差为

$$\gamma_0 \leq \frac{x_m s\%}{A_0}$$

由式 $\Delta x \leq x_m s\%$ 可知，当一个仪表的等级 s 选定后，测量中绝对误差的最大值与仪表刻度的上限 x_m 成正比，因此，所选仪表的满刻度值不应比实测量 x 大得太多。同样，在式 $\gamma_0 \leq \frac{x_m s\%}{A_0}$ 中，总是满足 $x \leq x_m$ ，可见当仪表等级 s 选定后， x 越接近 x_m 时，测量中相对误差的最大值越小，测量越准确。因此，在用这类仪表测量时，在一般情况下应使被测量的值尽可能在仪表满刻度的 $2/3$ 以上。

(3) 分贝误差 用对数表示的相对误差称为分贝误差，在电子测量仪器中，常用分贝 (dB) 来表示相对误差。

对电流、电压类参量，即

$$\gamma_{dB} \approx 8.69 \gamma_x \text{ dB}$$

对于功率类参量，有

$$\gamma_{dB} \approx 4.37 \gamma_x \text{ dB}$$

1.4.2 测量误差的来源与分类

1. 误差来源

由上述知识可知，一切实际测量中都存在一定的误差。误差的产生是各种综合因素作用的结果，主要来源见表 1-1。

表1-1 误差来源

误差名称	来源说明
仪器误差	由于仪器本身设计上的不完善造成的误差,如校准不好,刻度不准等
使用误差	在仪器使用过程中,由于安装、调节、放置或使用不当造成的误差
人为误差	由操作者个人引起的误差,如读数时习惯偏大或偏小
环境误差	由各种外界环境,如温度、电磁场等的影响而产生的误差
方法误差	由于测量时所依据的理论不严密或应用不当的简化及近似公式引起的误差

2. 误差的分类

根据测量误差的性质和特点,可将它们分为系统误差、随机误差和过失误差。

(1) 系统误差 在一定条件下,对某一物理量进行重复测量时,若误差值保持恒定或按某种确定规律变化,这种误差就称为系统误差。如电表零点不准,测量方法引起的误差,温度、电源电压等变化引起的误差均属系统误差范畴。

系统误差具有一定的规律性。根据系统误差产生的原因,采取一定的技术措施,可以消除或减弱它。

(2) 随机误差 在一定条件下,对某一物理量进行重复测量时,若误差发生不规则的变化,则这种误差就称为随机误差或偶尔误差。例如:外界干扰或操作者感觉器官无规则的微小变化等引起的误差。

在多次测量中,随机误差具有有界性、对称性、抵偿性,所以,可以通过多次测量取平均值的办法来减小随机误差。

(3) 过失误差 在一定条件下,测量值显著偏离其实际值的误差,称过失误差或粗大误差。这种误差主要是操作者粗心大意造成操作失误或读错数据等引起的。

过失误差明显歪曲了测量结果,因此,对应的测量结果(称坏值)就应剔除不用。

1.5 误差的合成

前述是直接测量的误差计算方法,在很多场合,由于进行直接测量很困难或直接测量难以保证准确度,而需要采用间接测量。

通过直接测量与被测量有一定函数关系的其他参数,再根据函数关系算出被测量。在这种测量中,测量误差是各个测量值误差的函数。

已知被测量与各参数之间的函数关系及各测量值的误差,求函数的总误差,这就是误差的合成。例如,功率、增益等电参数的测量,一般是通过电压、电流、电阻等直接测量值计算出来的,如何用各分项误差求出总误差是经常遇到的问题。所以,了解常用的误差合成方法是有必要的。

下面是常用函数的合成误差公式,这里略去了推算过程。

1.5.1 和、差函数的合成误差

设 $y = A \pm B$, A 与 B 的绝对误差分别为 ΔA 与 ΔB , 则 y 的绝对误差为

$$\Delta y = \pm (|\Delta A| \pm |\Delta B|)$$

和函数的相对误差为

$$\gamma_y = \pm \left(\frac{A}{A+B} |\gamma_A| + \frac{B}{A+B} |\gamma_B| \right)$$

差函数的相对误差为

$$\gamma_y = \pm \left(\frac{A}{A-B} |\gamma_A| + \frac{B}{A-B} |\gamma_B| \right)$$

例 1.4 有两个电阻(R_1 和 R_2)串联, $R_1 = 5\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, 其相对误差均等于 $\pm 5\%$, 求串联后的总误差。

解: 串联后的总电阻 $R = R_1 + R_2$

所以
$$\gamma_R = \pm \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} |\gamma_{R_1}| + \frac{R_2}{R_1 + R_2} |\gamma_{R_2}| \right)$$

当 $\gamma_{R_1} = \gamma_{R_2}$ 时

$$\gamma_R = \pm \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2} |\gamma_{R_1}| = \gamma_{R_1} = \gamma_{R_2}$$

实际计算结果

$$\gamma_R = \pm \left(\frac{5}{5+10} \times 5\% + \frac{10}{5+10} \times 5\% \right) = \pm 5\%$$

可见, 相对误差相同的电阻串联后总的相对误差与单个电阻的相对误差相同。

通过本例提示我们, 误差合成时不要想当然给出结果。例 1.4 中的和函数的相对误差并不等于两个变量的相对误差之和。

1.5.2 积函数的合成误差

设 $y = A \cdot B$, A 与 B 的绝对误差分别为 ΔA 与 ΔB , 则 y 的绝对误差为

$$\Delta y = B\Delta A + A\Delta B$$

y 的相对误差为

$$\gamma_y = \gamma_A + \gamma_B$$

此式说明, 用两个直接测量值的积来求第三个量值时, 其总的相对误差等于各分项误差相加。当 γ_A 和 γ_B 分别都有 $\pm$ 号时, 有

$$\gamma_y = \pm (|\gamma_A| + |\gamma_B|)$$

例 1.5 已知电阻上的电压、电流的相对误差分别为 $\gamma_U = \pm 3\%$, $\gamma_I = \pm 2\%$, 问: 电阻消耗功率 P 的相对误差是多少?

解: 因为电阻消耗功率为 $P = UI$

所以, 电阻消耗功率的相对误差为

$$\gamma_P = \pm (|\gamma_U| + |\gamma_I|) = \pm (3\% + 2\%) = \pm 5\%$$

1.5.3 商函数的合成误差

设 $y = \frac{A}{B}$, A 与 B 的绝对误差分别为 ΔA 与 ΔB , 则

y 的绝对误差为