



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Experiment of Electrical Engineering

电工技术 实验教程

阚凤龙 主编

王长涛 吕九一 副主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Experiment of Electrical Engineering

电工技术 实验教程

阚凤龙 主编

王长涛 吕九一 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

电工技术实验教程 / 阚凤龙主编. — 北京 : 人民
邮电出版社, 2012. 9
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-28875-2

I. ①电… II. ①阚… III. ①电工技术—实验—高等
学校—教材 IV. ①TM-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第172720号

内 容 提 要

本书从实验、实践教学角度出发,满足基本教学需求,同时适应于社会发展需要,并提高学生工程实践能力。本书共分4篇,分别介绍了电工学实验基本常识、电工实验、电工安全、常用电工材料。

本书编写注重简单明了,突出实用够用,内容深入浅出、实用性强。

本书可作为理工类院校本科、专科及高职的相关专业学生实践环节的指导书,也可作为相关工程技术人员参考书。

21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材 电工技术实验教程

-
- ◆ 主 编 阚凤龙
副 主 编 王长涛 吕九一
责任编辑 刘 博
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 9.25 2012年9月第1版
字数: 289千字 2012年9月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-28875-2

定价: 22.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

“电工技术实验”是高校非电类理工专业一门重要的技术基础实验课，是学习后续专业课的重要基础。由于电工课程理论性强、概念抽象、实践性强、涉及的基础理论较广，它对培养学生的科学思维能力、工程能力，提高学生分析问题和解决问题的能力起着至关重要的作用。

根据教育部“卓越工程师培养计划”的精神，为满足本科相关非电专业实验能力培养的需要，着力强化基础训练，加深理解课堂知识，提高学生的工程实践能力，编写了本书。本书在编写过程中，注重实践教学与理论教学内容紧密结合，大量吸取近年来电工课程教学改革的新成果，突出验证性实验与设计性实验的结合，对部分实验要求学生自主设计电路、表格和自主处理实验数据，为提升学生理论水平和实践能力做好铺垫。

本书立足于本科应用型人才培养目标，适应于社会发展需要，提高学生工程实践能力。本书在编写过程中，参考了部分院校的教学大纲，以满足基本教学需要和有较宽适应面为出发点，编写了4部分内容：第1篇电工学实验基本常识，第2篇电工实验，第3篇电工安全，第4篇常用电工材料。

本书由阚凤龙任主编，王长涛、吕九一任副主编。参加本书编写的还有：刘建顺、原宝龙、赵岚光、张亚、冯群、马乔矢、张东伟、阚洪亮、毛永明、陈楠。参编的指导教师花费大量时间为实验项目进行了调研和预试，在此谨致以深切的谢意。

本书主审是沈阳建筑大学信息与控制工程实验中心主任黄宽高级实验师，对本书提出了不少宝贵意见和建议，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2012年5月

目 录

第1篇 电工学实验基本常识	1	实验十 R 、 L 、 C 元件的阻抗 频率特性	52
1.1 电工学实验基本要求	1	实验十一 信号发生器和示波器的 使用	55
1.1.1 电工技术实验课的目的	1	实验十二 三相交流电路的研究	58
1.1.2 电工技术实验规则	1	实验十三 RLC 串联谐振电路	62
1.1.3 实验教学程序	3	实验十四 交流电路等效参数的 测量	66
1.2 电工测量基础	4	实验十五 三相电路功率的测量	70
1.2.1 测量的基本知识	4	实验十六 单相电度表的校验	74
1.2.2 电工测量仪表	6	第3篇 电工安全	77
1.2.3 测量误差	9	3.1 触电与安全用电	77
1.3 常用元件识别	15	3.1.1 触电定义及分类	77
1.3.1 电阻元件	15	3.1.2 常见的触电方式	78
1.3.2 电感线圈	16	3.1.3 常见触电的原因	79
1.3.3 电容元件	17	3.2 安全用电与触电急救	79
1.3.4 二极管	18	3.2.1 基本安全措施	79
第2篇 电工实验	20	3.2.2 安全操作(安全作业)	80
实验一 仪表的使用与测量误差的 计算	20	3.2.3 接地与接零	81
实验二 减小仪表测量误差的方法	24	3.2.4 触电急救	82
实验三 电路元件伏安特性的测试	28	第4篇 常用电工材料	83
实验四 电位、电压的测定及电路 电位图的绘制	32	4.1 导电材料	83
实验五 基尔霍夫定律	35	4.1.1 电线与电缆	83
实验六 电压源与电流源的 等效变换	37	4.1.2 电热材料	84
实验七 线性电路的叠加原理	39	4.2 绝缘材料	86
实验八 戴维南定理和诺顿定理	42	4.2.1 常用的绝缘材料	86
实验九 日光灯电路及功率因数的 提高	47	4.2.2 绝缘材料的主要性能指标	87
		参考文献	88

1.1 电工学实验基本要求

1.1.1 电工技术实验课的目的

《电工技术》是为非电专业开设的一门技术基础课，它面对生产技术实践的直接性决定了电工技术实验课在整个教学过程中的特殊重要地位。电工技术实验，不仅在于验证某些电工理论，更重要的是在于通过实验手段不断提高自己独立分析和解决实际问题的基本技能。关于这一教学目的，在国家教委颁布的、由电工课程指导委员会编写的《电工课程基本要求》中有非常明确的规定。据此，具体地讲应当达到以下要求。

- ① 能够正确使用常用的电工仪表、电子仪器和电器设备；
- ② 能读懂基本的电原理图，了解常用电气、电子元器件，并能组装成实际工作电路；
- ③ 能对组装的实际工作电路进行分析与故障排除，正确调试与测量；
- ④ 具有科学、安全用电的基本能力；
- ⑤ 具有正确归纳实验数据、运用理论科学地分析与指导实践活动的能力，以及严谨的科学态度与实事求是的工作作风。

1.1.2 电工技术实验规则

1. 纪律规则

- ① 按实验课表规定的时间、地点和编组按时上课，不得旷课、迟到、早退或擅自串组换课。
- ② 教师讲解时，要聚精会神地听讲；进行实验时，要专心致志地操作，不能从事与本次实验无关的活动。
- ③ 实验课课堂应保持文明、安静和整洁的环境，组内研讨问题应当文明低语，严禁喧哗打闹和串组走动。
- ④ 未经教师许可，不得随意改变实验内容。
- ⑤ 必须严格服从指导教师的管理，不准私自查阅教师的随堂记录和加以纠缠。

2. 爱护公物规则

- ① 应按仪器仪表和电器设备的技术要求精心操作，严禁漫不经心地使实验器具受到挤压、折弯、冲击、振动、反复磨损或随意拆卸及污染等。

② 严禁擅自用本次实验使用之外的一切设备。

③ 对本次实验发给的元器件、材料或工具应精心使用，结束实验时应仔细清点，如数归还，严禁私自携出。

④ 实验中如发现仪器设备有异常或损坏，实验元件、材料和工具有遗失，应立即向指导教师申报并有义务提供笔录，备案。

⑤ 自觉强化“节约意识”，应千方百计地将实验所耗能源和材料降为最低水平。

3. 安全规则

安全用电常识介绍如下。

实践证明，50 Hz、10 mA 以下的直流电流流经人体不会发生伤亡事故，而当工频（50 Hz）50 mA 以上的交流流经人体就会发生危险，危险程度视电流大小和通电时间而定。

人体通电后的反应为：不舒适的感觉，肌肉痉挛，脉搏和呼吸节奏失常，内部组织损伤，直到死亡。

人体电阻大约在八百欧到几百千欧范围内（受表皮状况影响较大）。如按 800Ω 计，设通入危险电流为 50 mA，则人体承受电压为

$$U=IR=0.05 \times 800=40 \text{ (V)}$$

此值可作为“危险电压值”。因此，我国规定“安全电压”通常为 36V，而在危险场所（如潮湿或含腐蚀性气体等环境），则安全电压降为 12V。

人体被电流伤害分两类：

A 电伤：是人体外部被电弧灼伤。

B 电击：是指人体内部因电流刺激而发生人体组织的损伤。

低压（380/220 V）系统中触电伤害主要是电击，而死亡事故也多为电击所致。

通过上述介绍，可以明确：在实验环境下，如果触摸电压高于 40 V 以上的带电物，均可能发生危险；还可以明确：为了防止触电，一是应对可能产生电弧的部位保持恰当距离；二是在任何瞬间，任何情况下均应使自己的身体绝对不应构成电流的通路（如脚踏良好绝缘物、不用双手触摸通电裸导体等）。为加强安全管理，制定如下规则。

① 实验线路的搭接、改装或拆除，均应在可靠断电条件下进行。

② 在电路通电情况下，人体严禁接触电路中不绝缘的金属导线和连接点带电部位，以免触电。万一发生触电事故，应立即切断电源，保证人身安全。

③ 实验中特别是设备刚投入运行时，要随时注意仪器设备的运行情况。如发生有超量程、过热、异味、冒烟、火花等，应立即断电，并请指导老师检查。

④ 了解有关电器设备的规格、性能及使用方法，严格按照要求操作。注意仪器仪表的种类、量程和接线方法，保证设备安全。

⑤ 实验时应精力集中，衣服、头发等不要接触电动机及其他可动电器设备，以免发生事故。

⑥ 严禁到他组任意取用物件或乱说乱动。

⑦ 实验结束整理中，首先要先关闭一切设备的电源开关。在整理中，也应精心处置实验所用的一切导体，以免为下一班实验留下隐患。

4. 卫生规则

① 实验室内自觉保持卫生整洁，个人用品应合理放置，对实验台上的灰尘杂物应随时主动清除，严禁乱扔杂物，随地吐痰、抽烟和吃零食。

② 实验结束后,应认真做好整理。要将仪器设备、实验材料与工具、坐凳等整齐地归回原位。

③ 每次做实验的学生均有清扫教室的劳动义务,参加实验的班级均有课余时间参加实验室大扫除的义务。

1.1.3 实验教学程序

1. 预习要求

(1) 预习内容

课前应认真阅读指导书中的《学生必读》和该次实验项目的全部内容,并将所涉及的理论知识复习好。

(2) 书写预习报告

应在实验课前按下述要求工整、清楚、整洁地将有关内容写入专门格式的《电工技术实验报告》内。

① 实验目的:可按指导书抄写(或自己加以完整准确的表述)。

② 实验仪器与设备:可按指导书抄写。

③ 实验原理:可按指导书“实验原理”中的相关内容,自己做出逻辑层次清楚、内容完整准确的表述。表述一般要“图文并茂”,即应当完整地画出实验电路示意图,附必要的电路原理图、向量分析图,对某些重要元器件(如集成片),应画出引线示意图。这一环节既要正确地阐明原理,又要便于指导自己参加实验。

④ 实验内容与步骤:可按指导书抄写(或自己加以完整准确的表述)。书写形式上应突出操作步骤的有序性和强调必要的注意事项。

“实验步骤”中的数据表格,应按指导书规定格式画出,注意做必要的“放大”,以便在实验中填写,表内如列有“计算值”栏目,系指就实验电路中所采用的元器件的标称值(即指导书中给定数值)作为电路参数,依据理论公式进行计算的结果。书写预习报告时,应写出理论公式的表达式并进行相应的计算,将计算结果填入表中“计算值”栏目。事先的理论分析与计算,对指导自己正确地实际操作和测试,显然是有益的。

书写预习报告决不是不假思索地抄写指导,而是以实验题目为“技术任务”,根据所学到的基本知识和基本理论,参照指导书给定的格式,为“技术实现”而书写的技术性设计或报告。写出工整简洁的、逻辑严谨的科学技术报告,是工程师必须具备的基本技能。

2. 课堂教学程序

① 学生应准时按规定到实验台前就坐、出示预习报告。

② 教师讲授:实验主讲教师以口头、板书和密切对照实物的方式讲授本次实验的精华(如:线路板结构、仪器仪表使用要领、实验步骤和操作流程以及注意事项)。一般时间长度不超过30分钟,这就要求每个学生特别仔细地听取与记录。

③ 学生搭接电路:教师讲授结束后,在断电条件下搭接电路。搭接时应注意体会接线要领且应循序渐进,已搭接的电路应确保其可靠性。事实证明,对电路原理图熟悉的学生,此项工作进行较快。

④ 学生自检:电路搭接完毕,应反复检查(必要时用万用表欧姆挡观察线路接的可靠性)。如确认无误,方可报告教师审查。

⑤ 教师审查:指导教师对学生搭接电路的审查主要着眼两个方面,一是安全用电方面,

即着眼电路不应危及人员安全；二是实验设备与器件方面安全，即着眼电路不应造成器材损失。教师此时不着眼电路搭接是否全面正确，只要确认为上述“两个安全”得以保证，即允许该实验组通电操作。

⑥ 通电操作：学生必须经教师审查电路允许后方可接通电源，否则视为违章。通电后，如发现自己接的电路不能正常工作，应积极思考，立足于自己排除故障，不应当不做任何努力而试图请教师代劳，在实验过程中必须用如下观念来明确师生关系：

学生——实验操作的“主角”

教师——实验操作的“顾问”

实验指导教师在学生进行实验过程中的“指导”职责体现在两方面：一是对“经过努力、仍感到困难”的学生进行启发、引导；二是注意观察并随时考核每个学生的动手能力。由此可见，每个学生必须以“勤于动脑、勤于动手”操作主角的身份投入实验，才能在教师指导下提高解决实验问题的基本技能，这一点与理论课堂上被动听课的身份相比，是一个转化，希望引为注意。

⑦ 结束整理：下课前留 5~10 分钟作为整理时间，应按前述实验室规则要求完成，经教师允许后，方可离开。

1.2 电工测量基础

1.2.1 测量的基本知识

1. 测量的基本概念和常用术语

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程，是人们认识和改造自然的一种不可缺少的重要手段。在自然界中，对于任何被研究的对象，若要定量地进行评价，必须通过测量来实现。在电工电子技术领域中，正确的测量更为重要。

测量的定义：以确定被测对象的量值为目标而进行的一组操作。

在测量过程中，不可避免地存在着误差，即测量误差客观存在于一切科学实验与工程实践中。在表示测量结果时应将测量结果与误差同时标注出来，说明测量结果的可信赖程度。

测量的常用术语如下。

① 量值：由数值（大小及符号）与相应的计量单位的乘积表示量的大小。例如，6 mV、1A 等。

当然，测量的结果也可以用一组数据、曲线或图形等方式表示出来，但它们同样包含着具体的数值与单位。没有单位，量值是没有物理意义的。

② 被测量：被测量的量。它可以是待测量的量，也可以是已测量的量。如测量电压时，电压即为被测量。

③ 影响量：不是被测量，但却影响被测量的量值或计量器具示值的量。例如，测量电阻时，环境温度就是它的一个影响量。

④ 量的真值：某量在所处的条件下被完美地确定或严格定义的量值。或者可以理解为没有误差的量值。量的真值是一个理想的概念，实际上不可能确切得知，只能随着科学技术的发展和人们认识的提高逐渐接近它。近年来，在测量不确定度的表述中，鉴于量的真值是一个理想的概念，已不再使用它，而以“量的值”或“被测量的值”代之。

⑤ 约定真值：为约定目的而取的可以代替真值的量值。一般来说，约定真值与真值的差值可以忽略不计。故在实际应用中，约定真值可以代替量的真值。

⑥ 准值：具有明确规定的值。例如，该值可以是被测值、测量范围上限、刻度盘范围、某一预调值或者其他明确规定的值。

⑦ 示值：对于测量仪器，是指示值或记录值；对于标准器具，是标称值或名义值；对于供给量仪器，是设置值或标称值。

⑧ 额定值：由制造者为设备或仪器在规定工作条件下指定的量值。

⑨ 读数：仪器刻度盘或显示器上直接读到的数字。例如，以 100 分度表示 50 mA 的电流表，当指针指在 40 时，读数是 40，而示值为 20 mA。有时为了避免差错和便于查对，在记录测量的示值时应同时记下直接的读数。

⑩ 实际值：满足规定精确度的用来代替真值的量值。实际值可以理解为由实验获得的，在一定程度上接近真值的量值。在计量检定中，通常将上级计量标准所复现的量值称为下级计量器具的实际值。

⑪ 测得值（测量值）：由测量得出的量值。它可能是从计量器具上直接得出的量值，也可能是通过必要的换算查表等（如系数换算、借助于相应的图表或曲线等）所得出的量值。

2. 测量方法

测量方法的正确与否是十分重要的，它直接关系到测量工作能否正常进行和测量结果的有效性。应根据测量任务提出的精度要求和其他技术指标，进行认真的分析和研究，找出切实可行的测量方法，选择合适的测量仪表、仪器或装置，然后进行测量。

测量方法的分类是多种多样的。根据测量时被测量是否随时间变化可分为静态测量和动态测量；根据测量条件可分为等精度测量和非等精度测量；根据测量元件是否与被测介质接触可分为接触式测量和非接触式测量；根据测量方法可分为直接测量、间接测量和组合测量；根据测量方式可分为直读式测量、零位式测量和微差式测量。下面着重介绍后两种分类方法。

（1）按测量方法分

① 直接测量。在使用仪表进行测量时，对仪表读数不需经过任何运算就能直接表示测量所需的结果，称为直接测量。例如用电流表测电路中某一支路的电流；用温度计测量温度等。此方法广泛应用于工程中。

② 间接测量。用直接测量方法测量几个与被测量有确切函数关系的物理量，然后通过函数关系式求出被测量的值，称为间接测量。例如测量导体的电阻率 ρ ，可以通过测量该导体的电阻和它的长度 l 及其截面积 A ，然后通过下式求电阻率 ρ 。

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (1-1)$$

间接测量法的测量手续繁多，花费时间较长，为下列情况之一者，才进行间接测量。

a. 直接测量很不方便，例如直接测量晶体管集电极电流 I_c 很不方便，可直接测量某集电极电阻 (R_c) 上的电压 U_{Rc} ，然后用公式 $I_c = U_{Rc} / R_c$ 算出 I_c 。

b. 直接测量误差大。

c. 缺乏直接测量仪器。

d. 有多参数综合测试仪，测量手续可以简化等。

间接测量法多在实验室中使用，在工程测量中很少用。

③ 组合测量。它是兼用直接测量和间接测量的方法。将被测量和另外几个量联立方程，

通过测量这几个量来最后求解联立方程，从而得出被测量的大小。此时用计算机来求解，是比较方便的。

(2) 按测量方式分

① 直读式测量。直接从仪器、仪表的刻度线上读出测量结果的方法称为直读测量法。例如，用电压表测量电压，用温度计测量温度等都是直读测量法。这种方法是根据仪器、仪表的读数来判断被测量的大小的，从表面上看似似乎没与标准量进行直接比较，但由于使用的指示仪表在生产制造和校正过程中必须借助于标准仪表，因此在直读式测量中，被测量和标准量的比较是间接进行的。

这种方法具有简单易行、迅速方便等优点，被广泛应用。

② 零位式测量（又称补偿式或平衡式测量）。测量过程中，用指零仪的零位指示检测、测量系统的平衡状态，在测量系统达到平衡时，用已知的基准量决定未知量的测量方法，称为零位式测量。用此方法进行测量时，标准量具装在仪表内，在测量过程中标准量直接与被测量相比较。测量时，要调整标准量，即进行平衡操作，一直到被测量与标准量相等，即指零仪回零。例如用电位差计测量被测电动势即为零位式测量。

采用此方法测量的优点是可获得较高的测量精度，但测量时操作复杂，测量速度也较慢。此方式不适于测量快速变化的信号，而只适于测量缓慢变化的信号。

③ 微差式测量。微差式测量综合了直读式测量和零位式测量的优点。它将被测量 x 与已知的标准量 N 进行比较，得到差值 $\Delta x = x - N$ ，然后用高灵敏度的直读式仪表测量微差 Δx ，因此可得到被测量： $x = N + \Delta x$ 。由于微差 $\Delta x \ll N$ ， $\Delta x \ll x$ ，虽然直读式测量仪表测量 Δx 时，精度可能不高，但是测量 x 的精度仍然很高。

微差式测量方法的优点是反应快、测量精度高，既适于测量缓慢变化的信号，也适于测量迅速变化的信号，因此，在实验室和工程测量中都得到广泛应用。

各种测量方法都有各自的特点，在选择测量方法时，应首先研究被测量本身特性、所提出的精度要求、环境条件及所具有的测量仪表（装置）、仪器等，经综合考虑，再确定采用哪种测量方法和选择哪些测量设备。

1.2.2 电工测量仪表

用来测量电流、电压、功率等电量的仪器、仪表，称为电工测量仪表。它不仅可以用来测量各种电量，还可以利用相应变换器的转换来间接测量各种非电量，如温度、压力等。在种类繁多的电工仪表中，应用最广、数量最大的是指示式仪表。另外随着科学技术的发展，数字仪表、智能仪表和虚拟仪表也逐渐应用于电工测量中。

1. 电工指示仪表的基本组成和工作原理

电工指示仪表的基本工作原理都是将被测电量或非电量转换成指示仪表活动部分的偏转角位移量。如图 1-1 所示，电工指示仪表一般由测量线路和测量机构两个部分组成。

被测量往往不能直接加在测量机构上，一般需要将测量转换成测量机构用以测量的过渡量，这个将被测量转换为过渡量的结构部分称为测量线路。将过渡量按某一关系转换成偏转角的机构称为测量机构，它由活动部分和固定部分组成，是仪表的核心。

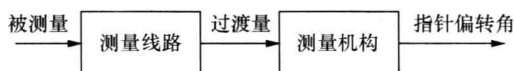


图 1-1 电工指示仪表的基本组成

测量线路的作用是利用测量机构把被测电量或非电量转换为能直接测量的电量。测量机构的主要作用是产生使仪表指示器偏转的转动力矩,以及产生使指示器保持平衡和迅速稳定的反作用力矩及阻尼力矩。

它的活动部分可在偏转力矩的作用下偏转。同时测量机构产生反作用力矩的部件所产生的反作用力矩也作用在活动部件上,当转动力矩与反作用力矩相等时,可动部分便停止下来。由于可动部分具有惯性,以至于可动部分达到平衡时不能迅速停止下来,而是在平衡位置附近来回摆动。测量机构中的阻尼装置产生的阻尼力矩使指针迅速停止在平衡位置上,指示出被测量的大小,这就是电工指示仪表的基本工作原理。

2. 常用电工仪表的分类

电工测量仪表种类繁多,分类方法也各有不同,了解电工测量仪表的分类,有助于认识它们所具有的特性,对了解电工测量仪表的原理有一定的帮助。下面介绍几种常见的电工测量仪表的分类方法。

(1) 按仪表的工作原理分类

根据测量仪表的工作原理,指示式仪表有以下几种类型:磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表、感应系仪表、电子系和整流系仪表等。

(2) 按测量对象分类

根据测量对象的不同,指示式仪表有电流表、电压表、功率表、电阻表、频率表以及多种用途的万用表等。

(3) 按测量电量的种类分类

根据测量电量的类型不同,指示式仪表分为直流仪表、单相交流表、交直两用表和三相交流表。

(4) 按测量准确度分类

根据测量准确度等级,仪表有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 个等级。

(5) 按仪表的内部结构分类

根据仪表的内部结构,仪表有模拟仪表、数字仪表、智能仪表等。

3. 电工测量仪表的发展

(1) 电工测量仪表的发展

电工测量仪表的发展大体经历了如下 4 个阶段。

① 模拟仪表。模拟仪表基本结构是电磁机械式的,借助指针来显示测量结果。

② 数字仪表。数字仪表将模拟信号的测量转换为数字信号的测量,并以数字方式输出测量结果。

③ 智能仪表。智能仪表内置微处理器和 GPIB 接口,既能进行自动测量又具有一定的数据处理能力。它的功能模块全部以软件或固化软件形式存在,但在开发或应用上缺乏灵活性。

④ 虚拟仪器。虚拟仪器是一种功能意义上的仪器,在微型计算机上添加强大的测试应用软件和一些硬件模块,具有虚拟仪器面板和测量信息处理系统,使用户操作微机就像操作真实仪器一样。虚拟仪器强调软件的作用,提出“软件就是仪器”的概念。

(2) 现代电工测量技术的发展趋势

随着微电子技术、计算机技术及数字信号处理(DSP)等先进技术在测试技术中的应用,就共性和基础技术而言,现代电工测量技术的发展趋势是:集成仪器、测试系统

的体系结构、测试软件、人工智能测试技术等方面，以下着重讲述集成仪器和测试软件两个方面。

① 集成仪器概念。仪器与计算机技术的深层次结合产生了全新的仪器结构概念。从虚拟仪器、卡式仪器、VXI 总线仪器……直至集成仪器概念，至今还未有正式的定义。一般说来，将数据采集卡插入计算机空槽中，利用软件在屏幕上生成虚拟面板，在软件引导下进行信号采集、运算、分析和处理，实现仪器功能并完成测试的全过程，这就是所谓的虚拟仪器。即由数据采集，集卡、计算机、输出（D/A）及显示器这种结构模式组成仪器通用硬件平台，在此平台基础上调用测试软件完成某种功能的测试任务，便构成该种功能的测量仪器，成为具有虚拟面板的虚拟仪器。在此同一平台上，调用不同的测试软件就可构成不同功能的虚拟仪器，故可方便地将多种测试功能集于一体，实现多功能集成仪器。因此，出现了“软件就是仪器”的概念，如对采集的数据通过测试软件进行标定和数据点的显示就构成一台数字存储示波器；若对采集的数据利用软件进行快速傅里叶变换（FFT），则构成一台频谱分析仪。

② 测试软件。在测试平台上，调用不同的测试软件就构成不同功能的仪器，因此软件在系统中占有十分重要的地位。在大规模集成电路迅速发展的今天，系统的硬件越来越简化，软件越来越复杂，集成电路器件的价格逐年大幅下降，而软件成本费用则大幅上升。测试软件不论对大的测试系统还是单台仪器子系统来讲都是十分重要的，而且是未来发展和竞争的焦点。有专家预言：“在测试平台上，下一次大变革就是软件。”信号分析与处理要求取的特征值，如：峰值、真有效值、均值、方均根值、方差、标准差等，若用硬件电路来获取，其电路极复杂，若要获得多个特征值，电路系统则很庞大；而另一些数据特征值，如相关函数、频谱、概率密度函数等则是不可能用一般硬件电路来获取的，即使是具有处理器的智能化仪器，如频谱分析仪、传递函数分析仪等。而在测试平台上，信号数据特征的定义式用软件编程很容易实现，从而使得那些只能是“贵族式”分析仪器才具有的信号分析与测量功能得以在一般工程测量中实现，使得信号分析与处理技术能够广泛应用于工程生产实践。

软件技术对于现代测试系统的重要性，表明计算机技术在现代测试系统中的重要地位。但不能认为，掌握了计算机技术就等于掌握了测试技术。这是因为，计算机软件永远不可能全部取代测试系统的硬件，不懂得测试系统的基本原理就不可能正确地组建测试系统和正确应用计算机。一个专门的程序设计者，可以熟练而又巧妙地编制科学算题的程序，但若不懂测试技术则根本无法编制测试程序。测试程序是专业程序编制人员无法编写的，而必须由精通测试技术的工程人员来编写。因此，现代测试技术既要求测试人员熟练掌握计算机应用技术，更要深入掌握测试技术的基本理论。

因此，通用集成仪器平台的构成技术与数据采集、数字信号处理的软件技术是决定现代测试仪器、系统性能与功能的两大关键技术。以虚拟/集成仪器为代表的现代测试仪器、系统与传统测试仪器相比较的最大特点是：用户在集成仪器平台上根据自己的要求开发相应的应用软件，就能构成自己需要的实用仪器和实用测试系统，其仪器的功能不限于厂家的规定。因此，学习、了解测量原理是非常必要的。

4. 电工仪表的选择

电工仪表的选择应从以下几个方面进行考虑。

（1）仪表类型的选择

根据被测量是直流量还是交流量来选用直流仪表或交流仪表。若被测量是直流量时,常采用磁电式仪表,也可选用电动式仪表;若被测量是正弦交流量时;只需测出其有效值即可换算出其他值,可用任何一种交流仪表;若被测量是非正弦量,测量有效值用电动式或电磁式仪表测量,测量平均值用整流式仪表测量,测量瞬时值则用示波器。应该注意,如果被测量是中频或高频,应选择频率范围与之相适应的仪表。

(2) 准确度的选择

应根据测量所要求的准确度来选择相适应的仪表等级。仪表的准确度越高,造价就越高。因此,从经济角度考虑,实际测量中,在满足测量精度要求的情况下,不要选用高准确度的仪表。

通常准确度等级为 0.1 级、0.2 级的仪表为标准表,也可用于精密测量;0.5 级、1.0 级的仪表可用于实验室;而工程实际中对仪表准确度的要求较低,在 1.5 级以下。

(3) 量限的选择

被测量的值越接近仪表的满刻度值,测量值的准确度就越高,但同时还要兼顾可能出现的最大值,通常应使被测量不小于量限的 $2/3$ 。

(4) 内阻的选择

仪表内阻的大小反映了仪表本身的功耗,仪表的功耗对被测对象的影响越小越好。应根据被测量阻抗的大小和测量线路来合理选择仪表内阻的大小。

(5) 根据仪表的工作条件选择

要根据仪表所规定的工作条件,并考虑使用场所、环境温度、湿度、外界电磁场等因素的影响选择合适的仪表,否则将引起一定的附加误差。总之,在选择仪表时,不应片面追求仪表的某一项指标,应根据被测量的特点,从以上几方面进行全面考虑。

1.2.3 测量误差

任何测量仪器的测得值都不可能完全准确地等于被测量的真值。在实际测量过程中,人们对于客观事物认识的局限性,测量工具不准确,测量手段不完善,受环境影响或测量工作中的疏忽等,都会使测量结果与被测量的真值在数量上存在差异,这个差异称为测量误差。随着科学技术的发展,对于测量精确度的要求越来越高,要尽量控制和减小测量误差,使测量值接近真值。所以测量工作的值取决于测量的精确程度。当测量误差超过一定限度时,由测量工作和测量结果所得出的结论将是没有意义的,甚至会给工作带来危害。因此对测量误差的控制就成为衡量测量技术水平乃至科学技术水平的一个重要方面。但是,由于误差存在的必然性与普遍性,人们只能将它控制在尽量小的范围,而不能完全消除它。

实验证明,无论选用哪种测量方法,采用何种测量仪器,其测量结果总会含有误差。即使在进行高准确度的测量时,也会经常发现同一被测对象的前次测量与后次测量的结果存在差异,用这一台仪器和用那一台仪器测得的结果也存在差异,甚至同一位测量人员在相同的环境下,用同一台仪器进行的两次测量也存在误差,且这些误差又不一定相等,被测对象虽然只有一个,但测得的结果却往往不同。当测量方法先进,测量仪器准确时,测得的结果会更接近被测对象的实际状态,此时测量的误差小、准确度高。但是,任何先进的测量方法,任何准确量的误差都不等于零。或者说,只要有测量,必然有测量结果,有测量结果必然产生误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量的全过程之中,不含误

差的测量结果是不存在的,这就是误差公理。重要的是要知道实际测量的精确程度和产生误差的原因。

研究误差的目的,归纳起有以下几个方面。

① 正确认识误差产生的原因和性质,以减小测量误差。

② 正确处理测量数据,以得到接近真值的结果。

③ 合理地制定测量方案,组织科学实验,正确地选择测量方法和测量仪器,以便在条件允许的情况下得到理想的测量结果。

④ 在设计仪器时,由于理论不完善,计算时采用近似公式,忽略了微小因素的作用,从而导致了仪器原理设计误差,它必然影响测量的准确性。因此设计时必须要用误差理论进行分析并适当控制这些误差因素,使仪器的测量准确程度达到设计要求。

可见,误差理论已经成为从事测量技术和仪器设计、制造技术的科技人员所不可缺少的重要理论知识,它同任何其他科学理论一样,将随着生产和科学技术的发展而进一步得到发展和完善,因此正确认识与处理测量是十分重要的。

1. 测量误差的表示方法

测量误差可表示为4种形式。

(1) 绝对误差

绝对误差定义为由测量所得的示值与真值之差,即

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

式中, ΔA ——绝对误差;

A_x ——示值,在具体应用中,示值可以用测量结果的测量值、标准量具的标称值、标准信号源的调定值或定值代替;

A_0 ——被测量的真值,由于真值的不可知性,常用约定真值和相对真值代替。绝对误差可正可负,且是一个有单位的物理量。绝对误差的负值称为修正值,也称补值,一般用 C 表示,即

$$C = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (1-3)$$

测量仪器的修正值一般是通过计量部门检定给出。从定义不难看出,测量时利用示值与已知的修正值相加就可获得相对真值,即实际值。

(2) 相对误差

相对误差定义为绝对误差与被测量真值之比,一般用百分数形式表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

这里真值 A_0 也用约定真值或相对真值代替。但在约定真值或相对真值无法知道时,往往用测量值(示值)代替,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1-5)$$

应注意,在误差比较小时, γ_0 和 γ_x 相差不大,无须区分,但在误差比较大时,两者相差悬殊,不能混淆。为了区分,通常把 γ_0 称为真值相对误差或实际值相对误差,而把 γ_x 称为示值相对误差。

在测量实践中,常常使用相对误差来表示测量的准确程度,因为它方便、直观。相对误差越小,测量的准确度就越高。

(3) 引用误差

引用误差定义为绝对误差与测量仪表量程之比,用百分数表示,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, γ_n —— 引用误差;

A_m —— 测量仪表的量程。

测量仪表各指示(刻度)值的绝对误差有正有负,有大有小。所以,确定测量仪表的准确度等级应用最大引用误差,即绝对误差的最大绝对值 $|\Delta A|_m$ 与量程之比。若用 γ_{nm} 表示最大引用误差,则有

$$\gamma_{nm} = \frac{|\Delta A|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

国家标准 GB776—76《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测量仪表的准确度等级指数 a 分为: 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 级。它们的基本误差(最大引用误差)不能超过仪表准确度等级指数 a 的百分数,即

$$\gamma_{nm} \leq a\% \quad (1-8)$$

依照上述规定,不难看出: 电工测量仪表在使用时所产生的最大可能误差可由下式求出。

$$\Delta A_m = \pm A_m \times a\% \quad (1-9)$$

$$\gamma_x = \pm (A_m / A_x) \times a\% \quad (1-10)$$

引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的,它可以较好地反映仪表的准确度,引用误差越小,仪表的准确度越高。

[例] 某 1.0 级电压表,量程为 500 V,当测量值分别为 $U_1=500\text{V}$, $U_2=250\text{V}$, $U_3=100\text{V}$ 时,试求出测量值的(最大)绝对误差和示值相对误差。

解: 根据式(1-9)可得绝对误差

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \pm 500 \times 1.0\% \text{V} = \pm 5\text{V}$$

$$\gamma_{U_1} = (\Delta U_1 / U_1) \times 100\% = (\pm 5 / 500) \times 100\% = \pm 1.0\%$$

$$\gamma_{U_2} = (\Delta U_2 / U_2) \times 100\% = (\pm 5 / 250) \times 100\% = \pm 2.0\%$$

$$\gamma_{U_3} = (\Delta U_3 / U_3) \times 100\% = (\pm 5 / 100) \times 100\% = \pm 5.0\%$$

由上例不难看出: 测量仪表产生的示值测量误差 γ_x 不仅与所选仪表等级指数 a 有关,而且与所选仪表的量程有关。量程 A_m 和测量值 A_x 相差越小,测量准确度越高。所以,在选择仪表量程时,测量值应尽可能接近仪表满刻度值,一般不小于满刻度值的 2/3。这样,测量结果的相对误差将不会超过仪表准确度等级指数百分数的 1.5 倍。这一结论只适合于以标度尺上量限的百分数划分仪表准确度等级的一类仪表,如电流表、电压表、功率表,而对于测量电阻的普通型电阻表是不适合的,因为电阻表的准确度等级是以标

度尺长度的百分数划分的。可以证明电阻表的示值接近其中值电阻时，测量误差最小，准确度最高。

(4) 容许误差

容许误差是指测量仪器在使用条件下可能产生的最大误差范围，它是衡量测量仪器质量的最重要的指标。测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。按 SJ943—82《电子仪器误差的一般规定》的规定，容许误差可用工作误差、固有误差、影响误差、稳定性误差来描述。

① 工作误差。工作误差是在额定工作条件下仪器误差极限值，即来自仪器外部的各种影响量和仪器内部的影响特性为任意可能的组合时，仪器误差可能达到的最大极限值。这种表示方式的优点是使用方便，即可利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。不足的是由于工作误差是在最不利的组合条件下给出的，而在实际测量中最不利组合的可能性极小，所以，由工作误差估计的测量误差一般偏大。

② 固有误差。固有误差是当仪器的各种影响量和影响特性处于基准条件下仪器所具有的误差。由于基准条件比较严格，所以，固有误差可以更准确地反应仪器所固有的性能，便于在相同条件下对同类仪器进行对比和校准。

③ 影响误差。影响误差是当一个影响量处在额定使用范围内，而其他所有影响量处在基准条件时仪器所具有的误差，如频率误差、温度误差等。

④ 稳定性误差。稳定性误差是在其他影响量和影响特性保持不变的情况下，在规定的时间内，仪器输出的最大值或最小值与其标称值的偏差。

容许误差通常用绝对误差表示。测量仪表的各刻度值的绝对误差有明显的特征：其一是存在与示值 A_x 无关的固定值，当被测量为零时可以发现它；其二是绝对误差随示值 A_x 线性增大。因此其具体表示方法有以下三种可供选择。

$$\Delta = \pm(A_x \alpha\% + A_m \beta\%) \quad (1-11)$$

$$\Delta = \pm(A_x \alpha\% + n \text{ 个字}) \quad (1-12)$$

$$\Delta = \pm(A_x \alpha\% + A_m \beta\% + n \text{ 个字}) \quad (1-13)$$

式中， A_x ——测量值或示值；

A_m ——量限或量程值；

α ——误差的相对项系数；

β ——固定项系数。

式(1-12)、式(1-13)主要用于数字仪表的误差表示，“ n 个字”所表示的误差值是数字仪表在给定量限下分辨力的 n 倍，即末位一个字所代表的被测量量值的 n 倍。显然，这个值与数字仪表的量限和显示位数密切相关，量限不同，显示位数不同，“ n 个字”所表示的误差值不同。例如，某4位数字电压表，当 n 为4，在1V量限时，“ n 个字”表示的电压误差是4mV，而在10V量限时，“ n 个字”表示的电压误差是40mV。通常仪器准确度等级指数由 α 与 β 之和来决定，即 $a = \alpha + \beta$ 。

2. 测量误差的分类

根据误差的性质，测量误差可分为系统误差、随机误差和疏失误差三类。

(1) 系统误差