

高等学校教材

电气实验技术

主 编 滕国仁

副主编 竺清琪

煤炭工业出版社

高等学校教材

电气实验技术

主 编 滕国仁

副主编 竺清琪

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书是高等工程专科学校工业自动化、应用电子技术、供用电、机电、检测技术、通信和计算机专业的必修课教材；立足于学生工程实际能力的培养，把电路、磁路、模拟电子、数字电子实验课与电气测量课融为一门课，把测量仪器和测量方法融在相应的实验中。这样，既避免了教学内容重复，精简了学时，又使实验课更系统。全书共分三篇，主要介绍测量误差分析、实验结果的处理、电气测量仪表的组成原理和正确使用，以及各电量的测量方法。书中编写了包括交直流电路、磁路、模拟电子和数字电子实验共38个，其中还有设计性和综合性实验。书后附有常用电工元件和常用电子器件明细表，以及常用集成电路索引。

本书文字叙述详细，便于自学，是电类和机电类专业的教材，也可作为高职、函大教材，还可供工程技术人员参考。

高等学校教材 电气实验技术

主编 滕国仁

副主编 竺清琪

参编 梁秀荣 李京 张全

主审 王永才

责任编辑：田国 廖永平

煤炭工业出版社 出版

(北京朝阳区霞光里8号 100016)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/16}$ 印张 $18^{5/8}$

字数 440 千字 印数 1—3,300

2000年9月第1版 2000年9月第1次印刷

ISBN 7-5020-1940-5/TM50

社内编号 4711 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，本社负责调换

前 言

本书是为适应高等专科学校电工电子实验课教学内容和课程体系改革而编写的教材。在编写中力求贯彻知识归类、科学组合、加强实践的改革原则。

电气实验技术课程的特点是知识面广、实践性强。为了改变实验单纯验证理论的状态,立足学生工程实际能力的培养,加强电气基础实践能力,理论与实践紧密结合,把电气测量课与电路、模拟电子、数字电子等实验课融为一体;把测量方法、仪器仪表融在相应实验中,强化实践基础和实践理论基础。这样既避免教学内容重复,精简了学时,又有利于培养应用型高级工程技术人才。

全书共分三篇,第一篇为电气测量的基础知识,主要介绍测量的误差分析和实验结果的处理方法,以及电工仪表的基础知识;第二篇为电工测量与实验,主要介绍电磁测量仪表和测量方法,包括交、直流电路及磁路实验;第三篇为电子测量与实验,主要介绍电子仪器和测量方法,包括模拟电子技术及数字电子技术实验。书后还附有常用电工元件和常用电子器件明细表,以及常用集成电路索引。

本教材按100学时编写,根据专业要求可选择有关内容,有的内容可以自学,综合性实验学生应提前准备好。

本书绪论、第一章、第二章、第三章由滕国仁编写;第四章第一节~第十二节,第六章第一节~第六节由竺清琪编写;第四章第十三节和第三章实验3-3由张全编写;第五章由梁秀荣编写;第六章第七节和附录由李京编写。全书由滕国仁任主编,竺清琪任副主编。王永才高级工程师任主审。

本书在编写过程中得到了华北矿业高等专科学校领导、教务处和电子与信息系领导的支持,在此表示衷心感谢。

由于编写时间仓促和编者水平有限,错误和不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

2000年7月

目 录

绪 论	1
-----------	---

第一篇 电气测量的基础知识

第一章 电气测量的基本知识	4
第一节 测量仪器和测量方法的分类	4
第二节 电气测量指示仪表的误差及准确度	5
第三节 测量误差及其消除方法	7
第四节 工程上最大测量误差的估算	11
第五节 测量结果的处理	14
习题与思考题	21
第二章 常用电工仪表的基本知识	23
第一节 电气测量指示仪表的主要技术性能	23
第二节 电气测量指示仪表的分类	24
第三节 电气测量指示仪表的组成和基本原理	26
第四节 电气测量指示仪表的正确使用	28
习题与思考题	30

第二篇 电工测量与实验

第三章 直流电路测量与实验	31
第一节 磁电系仪表的结构与工作原理	31
第二节 磁电系电流表及电流的测量	33
第三节 磁电系电压表及电压的测量	37
第四节 磁电系欧姆表	39
第五节 带整流器的磁电系仪表	40
第六节 万用表	42
第七节 直流电桥	48
第八节 直流电位差计	56
第九节 直流电阻的测量方法	60
习题与思考题	63
第十节 直流电路实验	64
实验 3—1 电阻元件的测量	64
实验 3—2 线性有源二端网络的测量	66
实验 3—3 受控源电路的研究	68

第四章 交流电路的测量与实验	73
第一节 电磁系仪表	73
第二节 电动系仪表	77
第三节 电动系功率表和低功率因数功率表	80
第四节 功率的测量	84
第五节 电动系单相相位表	89
第六节 电动系频率表	91
第七节 交流电桥	93
第八节 万用电桥	97
第九节 信号发生器	99
第十节 电子示波器及其应用	102
第十一节 兆欧表	113
第十二节 钳形电流表	116
习题与思考题	117
第十三节 交流电路实验	119
实验 4-1 电感、电容元件的测量	119
实验 4-2 示波器的使用	122
实验 4-3 交流电路等效参数的测量	124
实验 4-4 日光灯及其功率因数的提高	126
实验 4-5 R 、 L 、 C 串联电路的频率响应 (设计性实验)	129
实验 4-6 互感电路的测量	131
实验 4-7 三相电路的测量	133
实验 4-8 三相电路功率的测量	135
实验 4-9 二端口网络参数的测量	139
实验 4-10 非正弦周期量的测量	142
实验 4-11 一阶电路的响应	144
实验 4-12 二阶电路的响应	146
实验 4-13 均匀传输线模拟研究	148
实验 4-14 简单电阻性网络节点的计算机分析 (综合性实验)	150
第五章 磁路测量与实验	154
第一节 感应系电度表及电能的测量	154
第二节 磁电系检流计和冲击检流计	161
第三节 磁场的测量	164
习题与思考题	169
第四节 磁路实验	169
实验 5-1 基本磁化曲线的测定	169
实验 5-2 交流磁化曲线的测量	172
第三篇 电子测量与实验	
第六章 电子测量与实验	177
第一节 电子电压表	177

第二节 晶体管特性图示仪	179
第三节 TD1711 型四路直流稳压电源	184
第四节 TD1910 型交流数字电压表	185
第五节 数字万用表	187
习题与思考题	189
第六节 模拟电子技术实验	189
实验 6—1 半导体元件的测试	189
实验 6—2 单级放大器的调试与测量	193
实验 6—3 负反馈放大器调试与测量	196
实验 6—4 RC 桥式正弦波振荡器	198
实验 6—5 OTL 功率放大器的调整与测试	200
实验 6—6 差动放大器的调整与测试	204
实验 6—7 集成运算放大器主要参数的测试	207
实验 6—8 集成运放的线性应用	212
实验 6—9 集成运放的非线性应用	217
实验 6—10 直流稳压电源测试	218
实验 6—11 直流稳压电源设计(综合性)	222
第七节 数字电子技术实验	225
实验 6—12 TTL 集成逻辑门的逻辑功能与参数测试	225
实验 6—13 组合逻辑电路实验分析	229
实验 6—14 组合逻辑电路的设计与测试	233
实验 6—15 触发器及其应用	235
实验 6—16 计数器及其应用	241
实验 6—17 555 时基电路及其应用	246
实验 6—18 D/A、A/D 转换器	251
实验 6—19 拔河游戏机综合性、趣味性实验	256
附 录	259
附录 I 常用电阻器和电容器	259
附录 II 常用电子器件	263
附录 III 常用数字集成电路索引	281
参考文献	289

绪 论

一、电气实验技术课的地位

测量是人们借助专门的设备,通过实验的方法,对客观事物的数量进行研究的过程。

在日常生活中,随时可见到测量问题。例如买布用尺测量长度;买粮要用秤称重量;要知道时间须看一看钟表……。其中尺、秤、钟表就是测量仪器或量具。

在科学技术领域里更离不开测量,例如人造地球卫星或宇宙飞船发射后,飞到哪里去了?如何进行控制?也要先通过测量。在发射时,还要依靠大量的测量仪器对发射的全过程进行全面的测量、控制。

在科学发展史上,根据大量测量数据总结出一般规律,从而建立了各种定理和定律,这样的例子屡见不鲜。万有引力定律是牛顿以前多少年大量天文观测结果的一个基本总结。

在现代工业生产中,同样离不开测量。就飞机生产来说,每架飞机都是由上万个零件组成的,其中某一零件测量不准确,就会影响装配;即使勉强装合,也会使飞机的性能、质量、寿命等受到影响。

可见,没有测量及测量仪器,人类认识世界和改造世界的能力会受到限制;没有先进的测量技术和精密仪器,现代科学技术和现代工业生产不可能发展。因此,世界各先进国家都非常重视测量方法的研究和测量仪器的开发。

在测量技术中,电气测量占重要地位。随着电子技术和计算机的发展,可进行自动测量、计算、校正和控制,特别是单片计算机的应用,使得“智能”仪表层出不穷。

电气实验技术课是培养学生电气测量基本技能和动手能力的一门课。通过本课程的学习将使学生对有关理论的理解,理论与实践紧密结合,因此它又是工业自动化、电子技术、供用电、计算机、机电和相关专业的一门实践性很强的综合性课程。

二、本课程的任务及安排

本课程的任务是通过实验教学,使学生掌握电气测量仪器的工作原理和正确使用方法;根据仪器特点,学会正确地用仪器测量各种电量(如电压、电流及功率等)和非电量(如温度、压力、气体浓度等);掌握常用电气设备和元件特性,并能正确应用。在实验中掌握合理选用测量仪器(种类、准确度及量限等)和测量方法,能应用理论分析实验结果,判定实验是否成功。通过编写实验报告,培养综合数据的能力、文字组织能力和处理实验结果的能力(如实验数据的误差分析、曲线拟合等)。对典型系统能正确调试,掌握电气工程有关的测量方法和实验技能,学会排除一些常见故障。最后能进行综合性实验。

在教学安排上,仪器的原理和使用,以及测量方法分散在有关实验中,并安排一定的自学内容,培养学生自学能力。综合实验可与课程设计结合起来。对学生在实验中的操作能力要进行考核,主要考核学生实际动手能力和实验过程中对实验结果的分析能力等,其

次考核实验报告的编写。有条件的可进行考试，但考试不能代替上述考核。实践证明，这样能全面考核学生实验水平，也起到督促学生认真预习教材的目的。为了培养合格的高级工程技术人材，实验室必须开放，让学生把实验室作为学习的重要基地。

三、实验要求

实验前要学习好电气测量理论，在实验中学会正确地使用电气测量仪表及电气设备，能独立完成实验接线、测试、正确选择测量仪器，能准确地读取、整理和分析实验数据，能写出完整的实验报告，在实验中掌握安全用电知识。

1. 实验须知

(1) 实验前必须认真地预习实验教材，明确实验目的、内容及实验步骤和方法，并做好实验数据记录表格等一切准备工作。

(2) 从准备接线到送电前要做好下列工作：

①注意设备容量、参数是否合适，工作电源电压不能超过额定值。

②合理布线。布线原则是：安全、方便、整齐、防止相互影响。

③正确接线。接线应遵守的原则：

(i) 根据实验电路的特点，选择合理的接线步骤，一般是“先串后并”，“先分后合”，或“先主后辅”。

(ii) 接线前先搞清楚电路图上的节点与实验电路中各元件的接头的对应关系。

(iii) 养成良好接线习惯，导线的长短粗细要合适，防止接线短路，每个接线点一般不超过两根导线，接线松紧要适中。

④接线完毕后，必须认真检查，经指导教师检查同意后，方可接通电源进行实验。在改接线路之前必须切断电源，不得带电操作。遵守“先接线后合电源，先断电源后拆线”的操作程序。

(3) 每做完一个实验，都要分析检查实验结果是否符合要求，有的要简单钩画曲线形状或趋势，检查实验结果的合理性；然后再请教师审查，教师同意后方可拆线；将所有仪器放回原处，才能离开实验室。

(4) 必须严格遵守实验室的一切规章制度。

(5) 分压器和调压器等可调设备的起始位置放在最安全处。

(6) 处理故障的一般步骤 实验所用电源一般是可调的，实验时电压应从零缓慢上升，同时注意仪表指示是否正常，有无声响、冒烟、焦臭味及设备发烫等异常现象。一旦发生上述之一异常现象，应立即切断电源，报告指导教师，共同分析故障发生的原因。查找和处理故障的一般步骤：

①若电路出现短路或其它可能损坏设备的故障时，应立即切断电源查找故障。不属上述情况可用电压表带电检查，一般首先检查接线是否正确。

②根据出现故障的现象和电路的结构判断故障发生的原因，确定可能发生故障的范围。

③逐步缩小故障范围，常用电压法和欧姆法检查故障点。

(i) 电压法 带电（或降低电源电压）用万用表的电压档测量可能产生故障的各部分电压；根据电压的大小和有无，判断电路的故障点。

(ii) 欧姆法 断开电源，用万用表的欧姆档检查各支路是否连通，元件是否良好。

(7) 操作时要做到手合电源，眼观全局，先看现象，再读数据。

2. 使用仪表

(1) 正确地选择仪表的种类、量限、准确度等级。尽量减少测量仪表对被测电路工作状态的影响。

(2) 注意仪表刻度盘上的符号，弄清楚被测物理量是什么，如何正确连接，以免损坏仪表。

(3) 读数前要弄清仪表量限和刻度盘，读数时姿势要正确，要求“眼、针、影成一线”，合理取舍有效数字（最后一位为估算数字）。

3. 实验报告

实验报告是实验工作的总结，它是在整理、分析和计算实验结果的基础上，将实验结果完整和真实地表达出来。实验报告要简明扼要，文理通顺，字迹端正，图表清晰，结论正确，分析合理，讨论深入。实验报告一般应包括：

- (1) 实验目的；
- (2) 实验电路图，在图中标明各电量的正方向；
- (3) 实验数据及计算结果；
- (4) 曲线与相量图；
- (5) 实验结果的分析处理（包括结论、体会与意见）；
- (6) 回答问题。

第一篇 电气测量的基础知识

正确使用电气测量仪器是正确测量的前提。首先必须了解仪器的分类、工作原理和使用方法,在此基础上,根据实验内容,恰当地选择实验仪器(包括仪器的种类、量限、准确度等级等)。测量方法直接关系到测量结果的正确与误差问题。掌握测量方法,了解仪表误差和测量误差,才能正确处理实验结果。

第一章 电气测量的基本知识

第一节 测量仪器和测量方法的分类

电气测量仪器主要指电工测量仪器和电子测量仪器,以及非电量电测仪器。电工测量仪器分为直读指示仪器和比较仪器两种。直读指示仪器有交直流电流表、电压表、功率表、万用表等,多系电测量指示仪表,这种仪器的特点是指针在标尺上的位置可移动,直接读出被测量的值。比较仪器包括各类交直流电桥,交直流补偿式的测量仪器。电子测量仪器主要有示波器、电子管或晶体管电压表、晶体管参数测试仪、晶体管特性曲线测试仪、信号发生器、直流稳压电源,频率计和Q表等。

对于同一电量,可以用不同的方法测量。选择测量方法的依据是被测量的特性、测量条件以及对准确度的要求等。测量方法可以根据获得测量结果的过程或所用测量设备进行分类。

一、按获得测量结果的过程分类

1. 直接测量法

被测量可直接从仪器的度盘上读出,称为直接测量法。属于直接测量法的有:电流表测电流、电桥测电阻等。

2. 间接测量法

间接测量法是通过直接测量得到几个数据(这些数据并不是最终所求的结果),利用所测数据,按一定的关系式求出最终结果。

例如,伏安法测电阻,是根据测量的电流和电压值,利用欧姆定律确定出电阻值。

间接测量法常用于被测量不能直接测量、直接测量较复杂或直接测量的结果不如间接测量的结果准确等情况。

3. 比较测量法

比较测量法是将作用于任何系统的被测量,同作用于同一系统的其它已知量相比较。如

用示波器根据李沙育图形测量频率等。

二、按测量仪器设备分类

1. 直读测量法

这种测量方法是直接从仪表上读取被测量的值。这时所用的测量仪表已按被测量的单位预先刻好分度，能直接读出被测量的大小。如用电流表测电流，用伏安法测电阻等。

这种测量方式具有设备简单、操作方便、节省时间等优点，因而应用广泛。其缺点是测量的准确度常受仪表准确度的限制而不够高。

2. 比较测量法

这种测量方法是把被测量与度量器（如标准电池、标准电阻、标准电容等）相比较来确定被测量大小的。如用直流电位差计测量电压及测量电阻等。

这种测量方式的准确度高，灵敏度高，但测量费时，操作麻烦，对设备的要求高。

第二节 电气测量指示仪表的误差及准确度

用任何仪器仪表对某一被测量进行有限次的测量都不能求得测量的真值，仪器仪表的读数与真值之间总存在着一定的差值，这个差值称为误差。

仪表准确度表示仪表的读数与被测量的真值相符合的程度，误差越小，准确度越高。

一、仪表误差的分类

根据引起误差的原因，可将误差分为基本误差和附加误差两种。

1. 基本误差

仪表在规定的条件下（即在规定的温度、湿度，规定的放置方式，仪表指针调整到机械零位，除地磁外没有外来电磁场干扰等条件），由于内部结构和制造工艺的限制，仪表本身所固有的误差。例如摩擦误差，标尺刻度不准，轴承与轴尖间隙造成的倾斜误差等都能产生基本误差。

2. 附加误差

仪表偏离其规定的正常工作条件产生的除上述基本误差外的误差称为附加误差。如温度过高，波形非正弦，频率过高或过低，外电场或外磁场的影响所引起的误差都属于附加误差。为此，仪表离开规定的工作条件形成的总误差中，除了基本误差之外，还包含有附加误差。

二、误差的表示方法

常用的误差表达形式如下：

1. 绝对误差

测量值 A_x 与被测量真值 A_0 之差称为绝对误差 Δ ，即

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

例 1-1 用一电压表测量电压，其读数为 97V，而用标准表测量的读数（视为真值）为 100V，求绝对误差。

解 由式 (1-1) 得

$$\Delta = A_x - A_0 = 97 - 100 = -3V$$

可见, 绝对误差的单位与被测量的单位相同, 绝对误差的符号有正负之分, 用绝对误差表示仪表误差的大小比较直观。

2. 相对误差

相对误差是绝对误差 Δ 与被测量的真值 A_0 之比, 通常用百分数表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

因为 A_0 难以测得, 且 A_x 与 A_0 相差不大, 有时用 A_x 代替 A_0 , 则

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-3)$$

例 1-2 用两块电压表测量两个电压, 一个电压的测量值为 100V, 绝对误差为 +1V; 另一个的测量值为 10V, 绝对误差为 0.5V。求两次测量结果的相对误差。

解

$$\gamma_1 = \frac{\Delta_1}{A_{x_1}} \times 100\% = \frac{1}{100} \times 100\% = +1\%$$
$$\gamma_2 = \frac{\Delta_2}{A_{x_2}} \times 100\% = \frac{0.5}{10} \times 100\% = +5\%$$

可见, 前者的绝对误差 Δ_1 比后者的绝对误差 Δ_2 大, 但其相对误差 γ_1 却比 γ_2 小, 说明前者的测量准确度要高些。显然, 相对误差便于对不同的测量结果的测量误差进行比较, 所以一般都用它来表示误差。

3. 引用误差

相对误差虽然可以用来表示某测量结果的准确度, 但若用来表示指示仪表的准确度则不太合适, 因为指示仪表是用来测量某一规定范围 (通常称为量限) 内的被测量, 而不是只测量某一固定大小的被测量。当用仪表测量不同大小的被测量时, 由于式 (1-2) 中的分母不同, 相对误差便随着变化。所以用相对误差衡量仪表的性能是不方便的。

引用误差是一种简化和实用方便的相对误差, 它常用仪表的绝对误差 Δ 与其量限 A_m 之比的百分数表示, 即

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 γ_n ——仪表的引用误差;

Δ ——仪表在某一刻度上的绝对误差。

三、仪表的准确度

由于仪表在不同刻度上基本误差不完全相等, 其值有大、小, 其符号有正、负, 所以用最大引用误差衡量仪表的准确度更为合适。最大引用误差是仪表在不同刻度上可能出现的最大绝对误差 Δ_m 与仪表的量限 A_m 之比的百分数, 即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 γ_{nm} ——仪表的最大引用误差;

Δ_m ——仪表在不同刻度上的最大绝对误差。

最大引用误差愈小,则基本误差愈小,表示仪表的准确度愈高。因此,仪表的准确度决定于仪表本身在规定使用条件下本身的性能。

根据我国国家标准 GB776-1965《电气测量指示仪表通用技术条例》规定,按最大引用误差的不同,其准确度 a 分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5等七个等级。现已生产出准确度为0.05级的仪表。准确度为0.1级的仪表,其最大引用误差 γ_m 小于或等于0.1%;1.0级的仪表的 γ_m 在0.5%到1%之间,但不超过1%。依次类推。

例1-3 用量限为10A,准确度为0.5级的电流表去测量10A和5A两个电流,求测量相对误差。

解 测量10A电流时所产生的最大绝对误差为:

$$\Delta_m = \pm a\% A_m = \pm 0.5\% \times 10 = \pm 0.05A$$

其最大相对误差 $\gamma_{10} = \pm \frac{0.05}{10} = \pm 0.5\%$

测量5A电流时 $\Delta_m = \pm 0.5\% \times 10 = \pm 0.05A$

$$\gamma_5 = \pm \frac{0.05}{5} = \pm 1\%$$

由此可见:

①仪表的准确度,直接影响测量结果的准确程度。一般来说,仪表的准确度并不就是测量结果的准确度,后者还与被测量的大小有关,二者不能混为一谈。

②在选择仪表时,只有考虑仪表的准确度等级,同时又选择合理的量限,才能保证获得较高的测量结果的准确度。当仪表的准确度等级确定后,所选仪表的量限越接近被测量的值,测量结果的误差越小。若量限选择不合理,其测量结果的误差可能会超过仪表的准确度等级(测5A时)。

第三节 测量误差及其消除方法

不论是采用什么样的测量方法,也不论采用什么样的仪器仪表,由于仪表本身不够准确,测量方法不够完善以及实验者本人经验不足,人的感觉器官不完善等等原因,都会使测量结果与被测量的真值之间存在差异,这种差异称为测量误差。测量误差可分为三类。

一、系统误差

在相同的测量条件下,多次测量同一个量时,大小和符号保持恒定或按一定规律变化的误差称为系统误差。如用重量不准的天平砝码称物质,产生恒定误差;用不准的米尺量布,布越长,误差积累得越多,这些都是系统误差。

1. 产生系统误差的原因

1) 工具误差

工具误差是指测量时所用的装置或仪器、仪表本身的缺点引起的误差。例如用量限为100V的0.5级电压表测50V的电压时,测量误差可达到 $\pm 1\%$,这就是工具误差。

2) 外界因素影响误差

外界因素影响误差是指由于没有按照技术要求使用测量工具,周围环境(温度、湿度、

电场、磁场等) 不合乎要求引起的误差。例如万用表未调零, 仪器设备放置不当互相干扰, 仪表放在强磁场附近等, 都会产生这种误差。

3) 方法误差或理论误差

方法误差或理论误差是指由于测量方法不完善或测量所用的理论根据不充分引起的误差。例如, 当用伏安法测电阻时, 如果不考虑所用仪表的内阻对电路工作状态的影响, 所测的电阻值中便有方法误差。

4) 人员误差

人员误差是指由于测量人员的感官、技术水平、习惯等个人因素不同引起的误差。例如, 有人听觉不够灵敏, 当他用耳机作平衡指示器, 调整交流电桥平衡时, 就可能产生误判断, 使测量不准。

消除或尽量减小系统误差是进行准确测量的条件之一, 所以在测量之前, 必须预先估计一切产生系统误差的根源, 采取措施减小或消除系统误差。

2. 消除系统误差的常用方法

1) 修正误差

在测量之前, 对测量所用量具、仪器、仪表进行检定, 确定它们的修正值 (实际值 = 修正值 + 测量值), 把用这些仪表测得的数值加上修正值, 就可以求得被测物理量的实际值 (真值), 消除工具误差。另外, 可以考虑温度、湿度等环境因素对仪器仪表读数的影响, 并对测量结果进行修正; 也可以控制环境条件, 使其保持稳定, 以减小环境条件改变带来的误差。

2) 消除误差来源

测量之前检查所用仪器设备的调整 and 安装情况, 例如仪表指针是否指零, 仪器设备的安放是否合乎要求, 是否便于操作和读数, 是否互相干扰等; 测量过程中, 严格按照规定的技术条件使用仪器, 如果外界条件突然改变, 则应停止测量; 测量人员要保持情绪安定和精神饱满。这些都可以防止系统误差。此外让不同的测量人员对同一个量进行测量, 或用不同的方法对同一个量进行测量, 也有助于发现并消除系统误差。

3) 采用特殊测量方法

(1) 替代法 这种方法能消除由于测量工具不准和装置不妥善引起的系统误差。图 1-1 为替代法测量电阻 R_x 阻值的电路。第一步, 将 S 合到 1 位置, 调节可变电阻 R , 使电流表指针有一较大的偏转, 记下读数; 第二步, 电源 E 和可变电阻 R 保持不变, 将 S 合到 2 位置, 用标准电阻 R_0 替代被测电阻 R_x 并调节 R_0 使电流表的读数与第一步的读数值相同, 这时被测电阻值就等于标准电阻值。测量 R_x 的误差就仅取决于所用标准电阻是否准确以及电源电压是否稳定, 与仪表等因素无关, 消除了仪表引起的误差。

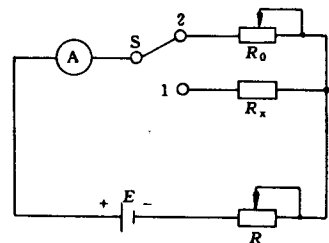


图 1-1 替代法测电阻

(2) 正负误差补偿法 采用正负误差补偿法消除系统误差, 即对同一被测量反复测量两次, 并使其中一次误差为正, 另一次误差为负, 取其平均值, 便可消除系统误差, 例如为了消除外磁场对电流表读数的影响, 可在一次测量之后, 将电流表位置调转 180° , 重新测量一次, 取两次测量结果的平均值, 可以消除外磁场带来的系统误差; 再如用电桥测量,

也可以采用这个方法消除热电势引起的系统误差, 测量时, 可把电桥电源极性对调测量两次, 取其平均值。

(3) 等时距对称观测法 图 1-2a 是用电位差计测量电阻的线路。图中 R_x 为被测电阻, R_n 为已知的标准电阻。开关 S 先合到左边测出 U_n

$$U_n = IR_n$$

再将开关 S 合到右边测出 U_x

$$U_x = IR_x$$

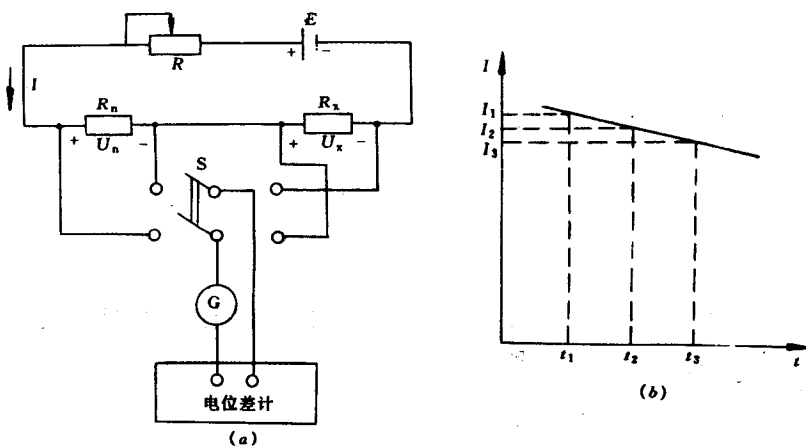


图 1-2 等时距对称观测法

a—电位差计测量电阻的电路; b—等时距观测法的图示

则

$$R_x = \frac{U_x}{U_n} R_n \quad (1-6)$$

如果在测量 U_n 和 U_x 的过程中, 电路中的电流 I 不稳定, 那么用式 (1-6) 计算的 R_x 就有误差。若电流 I 随时间按直线规律变化, 用等时距观测法可以消除上述的误差。其测量步骤如下:

第一步, 在 $t = t_1$ 时, 用电位差计测出 $U_n = U_{n1}$;

第二步, 在 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时, 用电位差计测出 U_x , 这时电流 I 降为 I_2 ;

第三步, 在 $t_3 = t_2 + \Delta t$ 时, 再用电位差计测出 $U_n = U_{n3}$ 。因为

$$\frac{U_{n1} + U_{n3}}{2} = \frac{I_1 R_n + I_3 R_n}{2} = I_2 R_n$$

所以

$$R_x = \frac{U_x}{\frac{1}{2} (U_{n1} + U_{n3})} R_n$$

这样算出的 R_x 消除了因电流随时间直线变化产生的系统误差。

二、偶然误差

偶然误差也叫随机误差，这是一种大小、符号都不确定的误差。这种误差是由周围环境的偶发原因引起的，因此无法消除。若只含有随机误差，进行多次重复测定，可发现随机误差符合统计学的规律性。若用 δ 表示随机误差，用 f 表示误差出现的原因，由实验可得 f 与 δ 的关系曲线如图 1-3 所示，该曲线称为随机误差的正则分布曲线。

从误差的正则分布曲线，可得出四个特性：

(1) 有界性 在一定测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定界限，称有界性。

(2) 单峰性 绝对值小的误差出现的机会比绝对值大的误差出现的机会多，称单峰性。

(3) 对称性 误差可正、可负或为零。绝对值相等的正误差与负误差出现的机会大致相等，称对称性。

(4) 抵偿性 以等精度多次测量某一量时，随机误差的算术平均值随着测量次数 n 的无限增加趋于零，称抵偿性。

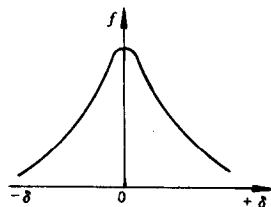


图 1-3 随机误差正则分布曲线

由于随机误差具有上述特性，所以工程上可以对被测量进行多次重复测量，然后用它们的算术平均值表示被测量的真值，即

$$A_0 \approx \bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (1-7)$$

式中 $\bar{A}$ ——算术平均值；

n ——测量次数。

测量次数越多， $\bar{A}$ 越趋近 A_0 。如果测量次数不够多，算术平均值与真值偏离较大。因此用算术平均值表示测量结果时，其测量精度可用标准差表示，即

$$A_0 = \bar{A} \pm \sigma_x \quad (1-8)$$

式中 σ_x ——标准差。

根据概率论原理，所谓标准差可通过均方根差 σ 或剩余误差 $U_i = A_i - \bar{A}$ (A_i 为每次测量值) 求得，即

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \quad (1-9)$$

应该指出，用算术平均值表示测量结果，首先要消除系统误差。因为有系统误差存在时，测量次数尽管足够多，算术平均值也不能接近被测量的真值。

例如对某一电压进行了 15 次测量，求得其算术平均值为 20.18，并计算得出均方根差为 0.34，标准差 $\sigma_x = \frac{0.34}{\sqrt{15}} = 0.09$ ，其测量结果及其评价为：

$$A_0 = \bar{A} \pm \sigma_x = 20.18 \pm 0.09$$

在常用的电子计算器上，都设有计算算术平均值和均方根误差的按键，利用它来处理随机误差很方便。