

高等学校适用教材

# 电气实验技术与测量

第二版

编著

高琦 吕江虹 高琦 吕江虹

中国计量出版社



高等学校适用教材

# 电气实验技术与测量

(第二版)

方之稹 高琦 吕江虹 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气实验技术与测量/方之积, 高琦, 吕江虹编著. 2 版. —北京: 中国计量出版社, 2003.3

高等学校适用教材

ISBN 7-5026-1773-6

I. 电… II. ①方… ②高… ③吕… III. 电气测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 010756 号

## 内 容 提 要

本书是根据全国电气技术专业指导委员会通过的“电气技术专业(宽口径)基本教学要求”编写的,旨在加强实验型教学环节。全书共 12 章,介绍了电气测量原理、测量方法、测量技术与测量手段,重点安排了电气工程中常用的电量、电参量以及其他一些非电物理量的测量实验,按渐进深度分为基础性实验、提高性实验、综合性实验三个层次。全书突出了循序渐进、培养学生能力及严谨的科学作风的特点。

本书可作为高等工业院校电类工程专业教材,也可供机电一体化各类专业的工程技术人员以及从事实验室工作的技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 18.25 字数 440 千字

2003 年 3 月第 2 版 2003 年 3 月第 5 次印刷

\*

印数 1—3 000 定价: 28.00 元

# 再版前言

本书是根据全国电气技术专业指导委员会通过的“电气技术专业(宽口径)基本教学要求”编写的,旨在加强实验教学环节,并以学生的能力培养作为首要的目标。

本书的第一版于1991年9月出版,由北京联合大学机械工程学院宋光汉和北京工业大学方之稹合作编著。出版后,经多年实践表明,使用效果良好,深受有关院校师生欢迎,至今曾四次印刷。为了适应新技术的发展以及新世纪知识经济和信息时代对教材的要求,经与出版社商讨,决定对该书进行修订再版。

经与联大机械工程学院协商,决定本书的修订工作由北京工业大学和北方交通大学有关老师合作完成,联大机工学院虽不再参与修订工作但表示大力支持本书的再版工作。在此,我们谨向联大机工学院原负责牵头编写本书的电气工程系主任谢述濂教授以及当时参与本书编写工作的有关老师表示衷心的感谢。

本书在修订过程中,删去了某些传统和陈旧内容,结合科技发展增加了智能IC卡电表、虚拟仪器、测量不确定度的评定、非电量的电测量和传感器等内容,并增补了实验设备和装置的完好性检查、实验设备装置的布局和接线技能等内容,完善了可用内容,但仍保持了原教材的四个特色:一是学科性,即面向整个电工学科而不是以某一特定的电气工程为对象;二是基础性,突出技术基础和技术基础课程自身学科体系的相对完整性;三是综合性,突出了学科的相互交叉和相互渗透,提出四个结合,即强弱电相结合,元件系统相结合,软硬件相结合和电与机相结合;四是实践性,在切实加强基础理论和基本技能的同时,特别强调培养综合运用基础理论和技能来分析和解决实际工程问题的能力,也就是加强了实践性的教学环节,同时重视自学能力的培养。

本书内容由三大部分十二章组成:第一部分阐述了电气实验技术。为适应新世纪创新性人才培养和实践教学深化改革的需要,本部分特别强调电气工程领域中实验技术的必要性和重要性,并对实验技能、科学作风、独立思考和表达能力提出了具体的要求和措施。第二部分系统地介绍电气测量仪表仪器和测量方法。内容包括传统仪表仪器、近代仪表仪器、测量误差和测量不确定度以及测量方法。为了拓宽思路和知识面还适量地介绍了非电量测量技术和传感器等内容。第三部分是电气工程中有关的实验项目,包括电路、电子、电机等实验或某些电气工程试验内容。在实验内容安排上

按循序渐进、由浅入深的原则,分为基础性实验、提高性实验、综合性实验三个层次。实验项目分为验证性实验和综合性实验两大类,各校可以根据自身条件和教学要求来安排。另外,为适应各类不同类型院校专业需要,全书采用积木式结构,理论部分与实验部分可衔接、前后呼应,也可独立成章。

本书作为技术基础课程安排,课堂讲授可控制在40~60学时;实验课程独立设置,不再附属于某门理论课,但实验项目安排可与理论课相互配合。每个实验项目内容根据难易程度与量的多少建议用2~3学时,极个别难度大、量多的可用4学时。有关院校根据总体教育计划及教学大纲的要求,一般可安排2~3学期完成全部内容。

本书除了可作为高等学校电类工程专业学生的教材外,同时适用于民办大学、高等职业技术学院电类专业。此外还可供电类工程技术人员以及实验室技术人员参考。

本书的修订工作第一、四、八、九章由北京工业大学方之稷教授完成;第二、五、六、七章由北方交通大学高琦老师完成;第十、十一、十二章由北方交通大学吕江虹老师完成。第三章由高琦和方之稷合作完成。

书中内容以及修改和增补若有不妥,欢迎读者指正。

编著者

2002年10月

# 目 录

## 第一章 电气实验技术..... ( 1 )

- 第一节 概述 ..... ( 1 )
- 第二节 电气实验装置组成的基本技能 ..... ( 2 )
- 第三节 观察和分析实验现象 ..... ( 3 )
- 第四节 数据的测试与处理 ..... ( 3 )
- 第五节 实验过程中故障的判别与排除 ..... ( 9 )
- 第六节 实验设计的基本方法 ..... ( 11 )
- 第七节 电子电路读图法 ..... ( 12 )
- 第八节 焊接、安装与调试 ..... ( 16 )
- 第九节 安全技术 ..... ( 19 )
- 第十节 科学作风 ..... ( 22 )
- 第十一节 实验报告与论文书写 ..... ( 23 )

## 第二章 传统仪表和仪器 ..... ( 25 )

- 第一节 概述 ..... ( 25 )
- 第二节 指示仪表的分类和标志符号 ..... ( 25 )
- 第三节 指示仪表的技术要求 ..... ( 30 )
- 第四节 仪表误差及准确度 ..... ( 31 )
- 第五节 指示仪表的静态特性 ..... ( 34 )
- 第六节 指示仪表的动态特性 ..... ( 35 )
- 第七节 指示仪表的一般结构和工作原理 ..... ( 37 )
- 第八节 磁电系仪表 ..... ( 39 )
- 第九节 电磁系仪表 ..... ( 43 )
- 第十节 电动系仪表 ..... ( 45 )
- 第十一节 静电系仪表 ..... ( 47 )
- 第十二节 感应系仪表 ..... ( 48 )
- 第十三节 带变换器的磁电系仪表(整流系仪表) ..... ( 52 )
- 第十四节 万用表 ..... ( 53 )
- 第十五节 兆欧表 ..... ( 54 )
- 第十六节 指零仪表 ..... ( 56 )

第十七节	直流电桥	(59)
第十八节	交流经典电桥	(60)
第十九节	电位差计	(61)
第二十节	标准元件简介	(62)
第二十一节	自然基准器简介	(68)
<b>第三章 近代仪表和仪器</b>		<b>(71)</b>
第一节	概述	(71)
第二节	运放式仪表	(71)
第三节	感应耦合臂电桥	(74)
第四节	有源电桥	(76)
第五节	数字仪表	(79)
第六节	几种特殊变换功能的仪表	(85)
第七节	新型电能表	(90)
第八节	虚拟仪器	(94)
<b>第四章 测量方法和测量误差</b>		<b>(101)</b>
第一节	概述	(101)
第二节	测量误差	(101)
第三节	间接测量时系统误差的估算	(105)
第四节	测量方法	(109)
第五节	测量不确定度	(114)
<b>第五章 电测量</b>		<b>(121)</b>
第一节	概述	(121)
第二节	电流和电压的测量	(121)
第三节	功率、能量和功率因数的测量	(131)
第四节	频率的测量	(142)
第五节	电路参数的测量	(144)
<b>第六章 电子测量技术</b>		<b>(154)</b>
第一节	概述	(154)
第二节	电子测量的基本要求	(156)
第三节	示波器测量技术	(157)

第四节	电子测量中的变换技术 .....	(163)
<b>第七章</b>	<b>磁测量</b> .....	(169)
第一节	概述 .....	(169)
第二节	磁性测量的基本原理 .....	(170)
第三节	磁性测量的方法和仪器设备 .....	(174)
<b>第八章</b>	<b>非电量的电测量</b> .....	(186)
第一节	概述 .....	(186)
第二节	非电量的基本含义和分类 .....	(186)
第三节	传感器的原理与类别 .....	(186)
第四节	传感器的应用实例 .....	(188)
<b>第九章</b>	<b>抗干扰技术</b> .....	(195)
第一节	概述 .....	(195)
第二节	干扰的来源 .....	(195)
第三节	形成干扰的三要素 .....	(196)
第四节	串模干扰与共模干扰 .....	(201)
第五节	抗干扰措施 .....	(203)
<b>第十章</b>	<b>基础性实验</b> .....	(215)
第一节	概述 .....	(215)
第二节	基础性实验阶段的要求 .....	(215)
第三节	实验项目与内容 .....	(216)
实验 1	电路的电位分析 .....	(216)
实验 2	电路基本定理 .....	(218)
实验 3	线性电路的过渡过程 .....	(220)
实验 4	正弦交流电路参数的测定和电路性能的调整 .....	(222)
实验 5	三相电路电压、电流和功率的测量 .....	(223)
实验 6	互感电路的测量和分析 .....	(224)
实验 7	运算放大器电路的性能及其应用 .....	(225)
实验 8	串联谐振电路的分析 .....	(226)
实验 9	示波器测量技术(一)—— <i>RLC</i> 元件模型 .....	(227)
实验 10	示波器测量技术(二)——阻抗角及阻抗模 .....	(228)



实验 11	示波器测量技术(三)——非正弦电路	(229)
实验 12	示波器测量技术(四)——一阶与二阶电路性能	(230)
实验 13	磁性材料的动态特性	(232)
实验 14	测量方法的比较与分析	(233)
实验 15	放大电路(一)——交流放大器	(233)
实验 16	放大电路(二)——直流放大器	(234)
实验 17	反馈电路	(235)
实验 18	触发电路	(236)
实验 19	计数电路	(238)
实验 20	寄存器	(239)
实验 21	译码和数字显示	(241)
实验 22	单相电能表的校验与调整	(242)

## 第十一章 提高性实验 (244)

第一节	概述	(244)
第二节	提高性实验阶段的要求	(244)
第三节	实验项目与内容	(244)
实验 1	无源双口网络性能	(244)
实验 2	几种典型波形的波形因数的测量和确定	(245)
实验 3	指示仪表性能的研究	(246)
实验 4	非线性电路的研究	(247)
实验 5	等效电源和等效阻抗的研究	(247)
实验 6	三相 Y 形接线中性点位移的研究	(248)
实验 7	三相系统的谐波分析	(248)
实验 8	无源滤波器的设计与调试	(249)
实验 9	有源滤波器的分析与调试	(250)
实验 10	选频电路的设计与调试	(252)
实验 11	裂相电路的设计与调试	(253)
实验 12	简单稳压电源的设计、组装和调试	(255)
实验 13	逻辑组合电子电路	(256)
实验 14	单相变压器的空载和短路试验	(257)
实验 15	三相变压器的联结组别	(259)
实验 16	三相异步电动机的启动和制动	(259)
实验 17	三相异步电动机运行的控制和保护	(260)
实验 18	三相异步电动机的运行特性	(261)
实验 19	三相异步电动机的空载和短路	(262)
实验 20	直流发电机的特性测定	(263)

实验 21 直流并励电动机的特性测定 .....	(264)
<b>第十二章 综合性实验 .....</b>	<b>(266)</b>
第一节 概述 .....	(266)
第二节 综合性实验阶段的要求 .....	(266)
第三节 实验项目与内容 .....	(266)
实验 1 $RC$ 移相电路的设计与调试 .....	(266)
实验 2 万用电表设计、装配与调试 .....	(268)
实验 3 负载的最大功率和系统的效率 .....	(272)
实验 4 用补偿法测量电压、电流以及测量机构和测量 变换器的保护研究 .....	(273)
实验 5 标尺展开式仪表的研究 .....	(274)
实验 6 霍尔变换器的应用研究 .....	(274)
实验 7 新型相位测量电路的研究 .....	(275)
实验 8 数字钟、频率表、周期计 .....	(277)
实验 9 变压器的出厂试验 .....	(279)
实验 10 电动机的出厂试验 .....	(280)
第四节 教学实验与管理技术展望 .....	(280)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(282)</b>

# 第一章 电气实验技术

## 第一节 概 述

科学技术是第一生产力,是人类社会发展和进步的源泉和动力。科学与技术(science and technology)既紧密结合又独立延伸。前者更偏重于智力创新活动;后者则强调联系实际的操作、经验、技巧和工艺等,比较偏重于科研成果的运用,包括从设计、操作到工艺的改进和方法更新等。

技术本身除了运用科研成果外还包括对传统知识的大量利用、对工艺的改进和对操作方法及手段的更新。

科技的迅猛发展和知识快速增长,使人类社会进入以信息技术为主体的知识经济时代。现代科学技术高度综合又高度分化的趋势,要求我们既要有坚实的基础理论又要有严格的工程技术训练,从而具有解决工程实际问题的能力和对事物改革的创新能力。一般来说,一个人的知识愈多愈有利于能力的培养和提高,但两者又不等同,即知识多不等于能力强。所谓“知识就是力量”,它的真实含义是有条件的,知识可能转化为力量,但它还需要有一种“催化剂”,即能力。没有或缺乏能力,知识就不能转化为力量。知识是一种信息,力量是一种能量,也是成果,由前者变为后者,必须由具有能力的人才来为之。知识有时易被忘却,易老化,故常需重温和更新,但能力却很难老化和遗忘,似乎能永葆青春且易于发展和提高。

能力通常表现为:

- (1) 发现问题、提出质询的能力;
- (2) 理解思考、表达(口头和书面)的能力;
- (3) 分析综合的能力;
- (4) 推导论证的能力;
- (5) 实验操作的能力;
- (6) 运用知识解决问题的能力;
- (7) 阅读和寻找新知识的能力;
- (8) 发明创造的能力;
- (9) 组织和管理的的能力;
- (10) 交际与沟通的能力。

以上种种能力体现在人们学习、工作和生活的各个方面。有些人因对事物的浓厚兴趣而出类拔萃,而另一些人为了实现某些目标通过自己的努力来培养和提高能力。更多的人则通过受教育和培训逐步地增强自身的能力。

本书是电气工程领域内用于培训电路、电子、电机电器方面实验能力和技能的教材,其目的是至少使学生的前六项能力有机会得到培养。培养的方法不仅是完成实验任务并最终写出合格的实验报告,更重要的是通过这一过程(实验前的各项准备;实验中的各个内容定性

定量测定与分析、方法与工具的使用以及操作技能的学习和掌握；实验后的数据处理，实验结论及总结报告等)不但验证了理论，还学习掌握科学实验的基本方法和科学作风，使学生在能力和素质上都得到提高。

## 第二节 电气实验装置组成的基本技能

电气实验在本书中主要指电路、电子、电机电器等实验。一套实验装置，往往包括了实验所需的设备和部件、电源类型和规格、测试仪器和仪表、附加辅助设备以及连接导线等。

实验者在实验前应充分预习实验指导书或在经过认真思考完成实验方案设计的前提下来具体准备并组成实验装置。

### 一、设备和仪器的检查

检查所需设备和仪器的规格和数量是否齐全；检查各设备和仪器的外观是否完整无损；检查各设备和仪器开关、旋钮、插座等有无松动以判断是否可用；检查电源设备或信号源是否符合实验规定。若以上检查不符合要求则可请求更换或维修，另外对设备和仪器的规格和使用说明应了解，特别是部件的载流量和工作电压规格。

### 二、设备和仪器的布局

根据实验台和放置设备场合的实际情况，对各种设备部件和仪器进行合理布局。原则上按电路接线图顺序放置。某些有电磁干扰的设备要防止相互影响，特别是对仪表读数的影响。若某些设备或仪器因重量和体积原因不便搬动，可通过灵活处理而不搬动。布局时还须考虑到实验者操作和测量方便，并尽可能把操作和测量频繁的部件靠近实验者。

### 三、接线和连线

首先选用有足够载流量的导线和插接导线，并检查其端点钩钗或插头插座的焊接是否有虚焊或脱落。在条件许可情况下导线可选择外皮带有颜色的，以便区分类别或主次且醒目。连接各设备部件时，接线柱应当拧紧，插头与插座应插紧到位，一般以牢固不易脱落为度，接线柱或接线点不宜超过两个以上接线片、叉等以免接触不良或松动引起设备和人身安全事故。另外，连接导线不宜跨越仪器设备，特别是发热的设备(如调节用的变阻器、灯箱、加热电炉和其他发热部件)。接线方法和顺序以电路和电机实验为例，应先接负载后接电源、先接串联部件后接并联支路，这样易于理解并避免混乱。总之，接线应循“安全、方便、整齐、美观”的原则。

### 四、设备和仪器初始状态检查

实验前的最后一个环节是检查各个设备和仪器是否处于实验进行前要求的初始状态。一般的状态包括仪器和设备是否需要预热，仪器的指示零位是否准确，可调电源或信号源的输出旋钮是否处于零位，仪器的测量或输入输出类别挡位是否正确，量程挡位是否选择妥当，电阻箱或变阻器的要求初始位置是否正确，仪器的测笔或探头是否松动等，所有以上项目应在实验前检查完毕，对不符合要求的应调整好或维修更换好。

最后一步是电路接线复查,要求认真仔细核对后,确认正确无误。复查分两种情况:一种是对在校学生而言,要求电路接成后必须经指导教师检查同意后方可进行实验;另一种是独立实验者经过本人复查可以直接做实验。有些学校为了培养学生独立工作能力,有计划地安排一些较为简单的实验逐步放手由学生自行复查,与此同时也适当建立一些制约规定以利学生加强责任感。

### 第三节 观察和分析实验现象

电路接线复查合格后,可以接通电源或信号源并逐步调高施加值,与此同时仔细观察实验设备和仪器指示以及连接导线等有无出现异常现象。调高外施电压过程应慢而稳地最终升到工作要求的数值。有些实验所用电压很低且无需调节,则在加电后立即观察各部件有无异常现象。若出现异味、冒烟、火花、异常声音和仪器指示超值等情况,就应立即切断电源,并作检查分析,待原因弄清、故障解除后再做实验。总之,操作原则是手管电源开闭,眼观全局,先看现象,再读数据,严禁合闸时打闹说笑。若加电压后一切正常,则应注意实验在正常情况下出现的现象、电路各部分的电压、电流是否符合理论上应有的值。对于有转动部件的装置,应注意其转速是否正常。对于有操作开关的,在开关操作后是否起作用。对于有控制和被控制对象的实验装置在操作时,被控对象能否正常受控,调节元件的调节范围是否符合要求。对于变换性质的实验装置(如变压器、放大器、整流器、滤波器等),应检测其输入和输出端口的特性(包括量值或波形,有时还检测频率及其他电量电路参数),分析它们是否在预计的定性和定量的范围之内。

实际上对于我们所述的电气实验,一般可分为理论的验证、性能的测定、电路网络或元器件、装置的调试和研究等几类。所要做的测试项目大多是电学量(电压、电流、功率、频率、相位、电阻、电感、电容、电量增益等)。此外还有些其他物理量(如温度、转速、转矩等)。因此,实验过程中在测量时不仅读取、记录数据,还应思考和分析实验现象。观察现象时除出现非正常现象要及时果断采取排除措施外,对于正常状态应注意实验过程中量值变化是否符合规律、其误差是否在估算范围之内。如果误差过大,应分析测量仪器和测量方法可能存在问题,也可能被测对象某些元件参数实际量值已与标定值不符,应予以修理或更换。总之,观察现象、思考和分析现象是实验者从事实验工作的重要内容,也是科学素质的训练项目之一,认真完成会使实验效果更佳,收获也将更大。

### 第四节 数据的测试与处理

实验的重要内容和目的之一就是做定量分析,包括数据测量和误差分析及最终表达,并得出结论。数据测量又可分为数据的读取、记录和处理;误差分析是一种测量结果可信度分析,其结果表示本次实验所采用的测量方法、测量仪器和测量环境以及人为因素等综合造成的误差。下面就数据的读取与记录、数据的处理、误差的分析与数据整理后的表示作一简要的阐述。

#### 一、数据的读取与记录

读数精度(或分辨力)取决于测量仪器或仪表的读数精密度,即从标尺或读数显示屏上读

出的有效数字位数,前者指的是指示仪表(指针式或光标式),后者指的是数字仪表(发光管或液晶显示屏)。另外数据精度还取决于实验本身要求的准确度和精密度,因为仪表所能读出数据的精密度可能其有效数位数高于或低于实验本身的要求。若在仪表上有效数位数高于要求则好办,只要读够位数即可。反之,则必须选用有足够读数精度的仪表。关于指示仪表标尺读数精度和数字仪表显示屏的读数精度请参阅本书第二章第三节中的仪表的标尺特性和第三章中数字仪表的读数精度。

数据的记录是实验定量分析的原始依据,因此必须正确、准确,力求避免模糊和涂改,应避免粗心大意产生笔误。原始数据的记录是重要的环节。其内容应包括实验名称、各实验项目内容的数据记录表格、实验者姓名(对于学生应写上学号和班级)、实验日期和实验环境条件(如当时的室温等),还应记录实验设备和仪器等编号(或出厂号)。原始数据格式示例如下(仅作参考)。

### 受控源特性

实验者:

实验日期: 2000年10月12日

室温: 18℃

#### 一、实验内容

##### 1. VCVS 的受控特性

$U_i/V$	0	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
$U_o/V$								
$\mu = U_o/U_i$								

##### 2. VCVS 的负载特性

$R_L/\Omega$	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
$U_o/V$					

其中  $U_i = 0.50V$   
维持恒定

##### 3. CCCS 的受控特性

$I_b/\mu A$	0	50	100	150	200	250	300
$I_c/mA$							
$\beta = I_c/I_b$							

##### 4. CCCS 的负载特性

$R_L/\Omega$	100	200	300	400
$I_c/mA$				

其中  $I_b = 50\mu A$   
维持恒定

#### 二、实验设备和仪器编号

- |             |          |            |     |
|-------------|----------|------------|-----|
| 1. 直流双路稳压电源 | DH1718 型 | 编号 202-S14 | 1 台 |
| 2. 直流电压表    | C31-V 型  | 编号 202-V3  | 1 块 |
| 3. 直流电流表    | C31-A 型  | 编号 202-A5  | 1 块 |
| 4. 万用表      | MF-10 型  | 编号 202-M12 | 1 块 |

- |                           |             |             |     |
|---------------------------|-------------|-------------|-----|
| 5. 电阻箱                    | ZX-36 型     | 编号 202-R008 | 1 个 |
| 6. 滑线电阻                   | 1.45A, 250Ω | 编号 202-RX21 | 1 个 |
| 7. 受控源实验盒(VCVS、CCCS、VCCS) |             | 编号 202-EB7  | 1 个 |

指导教师签字:

必须强调指出,原始数据记录纸上写上实验者姓名、日期、环境温度以及仪器设备编号绝不是可有可无的,这是科学作风的体现。它们表示这一实验是谁在哪天做的,当时环境条件如何,完成这一套实验具体所使用的仪器是哪些,被测试的实验装置和附件是什么,所用电源或信号源是哪个等等。不难理解,不同的设备和仪器所得到的数据是不同的,即使是同一种型号、同一个测量挡位的两块仪表测量同一个被测对象,其所得结果的数据也会略有差别。实验者用一组实验装置和仪器测得数据后,在做实验总结报告时,如果发现数据有疑问,则他(她)必须重新到实验室寻找原来所做实验的这套仪器设备来再重做一遍,其寻找原设备的依据就是设备和仪器的编号,否则就无法知道造成数据出现疑问究竟是实验者的主观因素还是这套仪器设备客观因素所造成。对于一位有严谨科学态度的技术人员来说,这种记录数据的良好习惯是绝对必要的。

另外还须指出,要记录的数据切忌涂改,例如,想把数字“5”改为“6”或把“4”改为“9”,千万不可改成“6”及“9”。因为这样有可能被误认或难以确认。正确的做法在原始数据需要改数的地方是用修改来替代涂改,其办法如下,仍将以上两个数字作为例,把它们分别用斜道线划掉,并在右上角重写。如 $5^6$ 和 $4^9$ 。应强调的是,这种修改方法在原始数据记录表格中是很科学的。原始数据的一切记录应附在最后实验总结报告上作为实验的原始依据。

## 二、数据的处理

实验所测得和记录的数据有些需要经过运算或换算,有些则需要经过适当选取或合理删除。分析实验现象或数据的变化规律是实验数据处理的任务。处理数据通常采用的方法有表格法、图示法和公式法。近代所采用的手段有计算机、打印机和绘图仪等,用以代替人工核算笔绘。但对于工作量不大的小型实验用人工方法仍然是很基本的方法。现就表格法、图示法和公式法作些简单的说明。

### 1. 表格法

用表格来表示实验现象变化的规律在工程技术上是经常被使用的。表格法就是将数据从原始记录经换算、运算和整理并列成表格形式。这种方法简单方便,数据读出精度较高,但不易清楚地看出变量之间(或函数关系)的变化规律,特别是几组相似量之间进行比较更是困难。但它是一种基本的数据表示与保存方法。

### 2. 图形法

图形法也称为图示法或曲线表示法,它可以直观地说明某些因素之间的关系,看出函数的变化规律,例如递增规律或递减规律,最大值或最小值等,尤其是几个函数之间的比较,可以定性地进行分析。因此,图形法不仅在工程技术上广泛应用,甚至在社会学、日常生活诸如商业贸易报表、运输报表等中也经常被采用。但是图形法只能局限于函数变化关系而无法实现更精确的数学分析。

根据不同需要,图形法有直角坐标、单对数、双对数等方法,但使用最多的是直角坐标法。直角坐标法以横坐标为自变量,以纵坐标为对应的函数。将各实验数据描绘成曲线时,应尽可能使曲线通过数据点,一般不能逐点连接、不能成为折线,应以数据点的变化趋势将尽可能多的数据点根据趋向规律连接成曲线,曲线以外的数据点应尽量接近曲线,并删去明显不合理的数据点,两侧的数据点数目大致相等,最后连成的曲线应是一根平滑的曲线。

图形法一般应做到以下几点:

(1) 选坐标:横坐标代表自变量,纵坐标代表因变量;坐标轴末端近旁标明所代表的物理量及其单位,坐标值应采用“量/单位”的形式表示,而不采用“量(单位)”或“量,单位”等其他形式。

(2) 正确分度:分度是否恰当,关系到能否反映出函数关系。图上坐标读数的有效数字位数应大体上与实验数据的有效数字位数相同。分度应以不用计算就能直接读出图线上每一点的坐标为宜,所以通常取1, 2, 5, 10等。而不取3, 7, 9等,分度应使图线占图纸的大部分,分度过细图形太大,而分度过粗使图形太小,因此,相同的实验数据因分度不同可以得出完全不同的图线。横坐标与纵坐标的分度可以不同,两轴的交点即坐标原点也可以不为零,而取比实验数据中最小值再小一些的整数为开始分度的值。如果实验数据特别大或特别小,可以在数值中提出乘积因子,例如提出 $10^5$ 或 $10^{-2}$ ,将这些乘积因子放在坐标轴最大值端点。

(3) 描述(连点):实验数据点不醒目极易被所描曲线遮盖,或者在同一坐标图中有几条曲线时数据点极易混淆,因此通常是以该数据点为中心,用“+”, “×”, “⊙”, “△”, “□”等符号来标明,同一种图线上的各数据点应采用同一种符号,不同的图线则采用不同的符号,但最后应在图纸的空白处注明符号所代表的内容。

连点时除对严重偏离图线的个别点应舍弃外,应使尽可能多的点通过图线,并使数据点均匀地分布于图线两侧。绘制图形(曲线)力求粗细均匀、光滑且符合预估或理论的规律。

### 3. 公式法

将实验数据用一个公式来代替,不仅使数据表达显得紧凑,而且可以利用公式的数学模型来进行数学运算,从而更详细地研究变量与函数之间的关系。

公式法的关键是如何根据一系列测量数据建立公式。要想使建立的公式能完全正确地表达实验数据的函数关系,也不是一件容易的事情,很大程度上取决于实验操作者的经验判断与能力,一般讲需要多次反复,才能得到与实验数据比较接近的公式。

(1) 常见的实验图线对应的方程式有:

- 1) 直线方程  $y = ax + b$ ;
- 2) 指数曲线方程  $y = ae^{bx}$ ;
- 3) 双曲线或抛物线方程  $y = ax^b$ ;
- 4) 变形双曲线方程  $y = \frac{x}{a + bx}$ 。

(2) 建立方程式的步骤是:

- 1) 根据实验数据在直角坐标纸上绘出实验图线,然后利用解析几何的知识判断图线类型。
- 2) 由图线的类型判断公式的特点。例如判断是直线,还是双曲线、抛物线、指数曲线;判断公式中是否带有常数项;或者都不易确定时,则需按多项式建立。
- 3) 利用对数、单对数或倒数坐标纸等将原图线改画为直线,计算原公式中的常数。
- 4) 确定公式的形式,并用实验数据来检验所得公式的准确程度。



例如, 确认实验曲线为指数曲线  $y = ae^{bx}$ , 则可以两边取对数得

$$\ln y = \ln a + bx$$

或

$$\lg y = \lg a + (b \lg e)x$$

可令  $Z = \ln y$ ,  $A = \ln a$ ,  $B = b$ , 则

$$Z = A + Bx$$

实验曲线成为直线, 即按  $(x, \ln y)$  或  $(x, \lg y)$  为坐标绘图。

如果实验曲线是变形双曲线, 则公式应为

$$y = \frac{x}{a + bx}$$

将上式改变形式, 可得

$$\frac{1}{y} = b + a \frac{1}{x}$$

或

$$\frac{x}{y} = a + bx$$

则以  $(\frac{1}{x}, \frac{1}{y})$  或  $(x, \frac{x}{y})$  为坐标绘图, 曲线就变成直线。

其他形式的曲线也可按类似方法变为直线, 化为直线方程后确定方程中的常量就简单多了。但必须指出, 有些实验数据的变化规律较为复杂, 用公式法建立数学模型或方程组较为困难。可建立拟合方程(直线或曲线), 然后相应代入实验数据得到最终的方程, 其中端值法可适用于其拟合方程为直线的, 而平均法和最小二乘法既可拟合直线也可拟合曲线, 对于曲线数据用最小二乘法的直线或曲线之间的残差的平方和为最小。读者可参阅有关书籍, 这里不再一一阐述。

### 三、有效数字的运算与表达方法

测量中会遇到大量数据的读取、记录和运算。如果读取位数过多, 不但增加数据处理的工作量, 而且会被误认为测量精度很高而造成错误的结论。反之, 位数过少, 将丢失测量应有的精度, 影响测量的准确度。测量时不可避免地存在着误差, 例如, 仪表的指针位置并不是恰好与仪表的刻度线重合, 那么只能根据仪表刻度的最小分度凭借目测和经验来估计这一位数字, 这个估计的数字虽然欠准确, 但仍属于有意义的。如果超过这一位欠准数字再作任何估计都是无意义的。另一方面, 在对测量数据进行计算时, 也经常会遇到诸如  $\pi$ ,  $e$ ,  $\sqrt{2}$  等无理数, 在计算时也只能取近似值, 因此得到的数据通常只是一个近似数。如果用这个数表示一个量时, 为了表示得确切, 规定误差不得超过末位单位数字的一半。例如, 末位数字是个位, 则包含的误差绝对值应不大于 0.5, 若末位数字是十位, 则包含的误差绝对值应不大于 5; 又例如, 满量程为 1V 的电压表, 如果读出 0.422V, 则前面两位 0.42 是可靠的, 最后一位的 2 是靠刻度分配估计出来的, 因此这末位 2 有一定的不可靠性, 称为欠准数字, 但还是有意义的, 需要保留, 因此仍是一位有效数字。如果读数再多一位, 读成 0.422 4V, 则毫无意义了。

#### 1. 对有效数字的一些规定

(1) 数字“0”可以是有效数字, 也可以不是有效数字

1) 第一个非零数字之后的“0”是有效数字。

例如, 90.20mV 是四位有效数字, 9.0mV 是两位有效数字。