



中 等 专 业 学 校 教 材

■ 河北化工学校 罗挺前 主编

电工测量与 电 工 学 实 验

(第二版) 仪电类专业适用

化学工业出版社

中等专业学校教材

电工测量与电工学实验

仪电类专业适用

(第二版)

河北化工学校 罗挺前 主编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电工测量与电工学实验/罗挺前主编. —2 版. —北
京: 化学工业出版社, 2000
中等专业学校教材
ISBN 7-5025-2660-9

I. 电… II. 罗… III. ①电气测量-专业学校-教
材②电工学-实验-专业学校-教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 01002 号

中等专业学校教材
电工测量与电工学实验
仪电类专业适用
(第二版)

河北化工学校 罗挺前 主编
责任编辑: 王丽娜
责任校对: 李 丽 李 林
封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市燕山印刷厂印刷
北京市燕山印刷厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 5½ 字数 120 千字
2000 年 6 月第 2 版 2000 年 6 月北京第 1 次印刷
印 数: 1—3000

ISBN 7-5025-2660-9/G · 691

定 价: 9.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是原《电工学实验》(化工仪表及自动化专业用)的修订版,并改名为《电工测量与电工学实验》。与前一版相比本书有以下变动。

1. 扩大了专业适用面,可适用于仪表自动化及电类各专业。此次编写的依据是全国化工中专教学指导委员会 1996 年 4 月颁布的《电工学教学大纲》(工业仪表及自动化专业适用)和《电测与电工实验教学大纲》(工业企业电气化专业适用)。

2. 改编了“电工测量”部分,使这部分内容既可作为仪表自动化专业的参阅教材,也可以作为电类专业的讲授教材。其内容符合电类专业教学大纲要求。

3. 重新组织了实验项目。上述两专业教学大纲中规定开出的实验约有 2/3 是相同的,少数实验不尽相同。为此在编写时把实验项目尽量分细了一些,每个实验有的需用 2 学时,也有的需用 1 学时,各专业可根据需要自行组合成 2 学时的单元。

我们认为:作为仪、电类专业,应当在实验课中培养学生动手能力,这是从事实际工作所必需的。因此,实验课应当使用实际工作中的通用仪器、仪表、设备,按照实验目的的要求由学生自行完成电路连接。

书中推荐的仪器设备及有关参数是经过反复试做得出的,一般说来效果较好,但各校现有仪器不尽相同,书中的表格留有空位,可填入实际采用的仪器和元件参数。根据实验结果,学生应自己写出实验报告。附录中“对实验准备工作的建议”对不同专业内容的取舍、实验仪器的选用、型号的代换等提出了建议;实验室主要设备一览表,可供各校尤其是新建实验室的学校参考。

本书由河北化工学校电工电子教研组集体编写。罗挺前任主编,提出编写方案和拟定编写提纲,编写绪论、关于实验准备工作的建议和设备一览表,并负责全书统稿。苑秀香编写电工测量部分;康俊华编写实验七、九、十、十一、十三、十四、十五、十八、二十和综合实验一、二、三,董力编写实验二、八、十二、十六、十七、十九;汪红编写实验一、三、四、五、六。本书由北京化工学校张汉英老师主审,天津市化工学校朱凤芝老师、北京市化工学校高文习老师、沧州工业学校王荣华老师等参加了本书的审稿工作。

此外,耿惊涛老师在编写过程中给予了很多帮助,谨此向以上各位老师表示衷心的感谢。

审稿会后由罗挺前根据会议提出的审稿意见,对书稿作了进一步修改,由于编者水平有限,请各校在使用过程中提出批评、指正。

编者

1999.10

目 录

绪论	1
第一部分 电工测量	2
一、电工测量基本知识	2
二、直流电流和电压的测量	6
三、电阻的测量	9
四、交流电流和电压的测量	12
五、电感和电容的测量	15
六、电功率的测量	16
七、电能的测量	19
八、功率因数的测量	21
第二部分 基础实验	23
实验一 认识实验	23
实验二 直流电流、电压表的校验	27
实验三 伏安法测电阻	28
实验四 电位测定 一段含源电路欧姆定律的验证	30
实验五 基尔霍夫定律及叠加原理的验证	32
实验六 等效电源定理验证	34
实验七 直流电桥	35
实验八 兆欧表及绝缘电阻的测量	37
实验九 单相交流电路的研究	39
实验十 串联谐振与并联谐振	41
实验十一 交流电桥及电容电感的测定	43
实验十二 交流铁心线圈电路等效参数测定	46
实验十三 电感性负载及功率因数提高	47
实验十四 三相负载星形连接	49
实验十五 三相负载三角形连接	50
实验十六 三相电功率的测量	52
实验十七 电度表应用及简单校验	54
实验十八 线性电路的过渡过程	55
实验十九 单相变压器实验	58
实验二十 三相异步电动机的一般检验及直接起动控制电路	60
第三部分 综合实验	63
一、简单万用表的设计、安装与校验	63

二、小型变压器的设计与绕制	67
三、一般继电器接触控制电路的设计与接线	70
附录一 关于实验准备工作的建议	75
附录二 实验设备一览表（参考方案）	78
主要参考文献	79

绪 论

测量过程是指用实验方法将未知量与已知标准量进行比较以求得被测量数值的过程。

电工测量的任务是对电压、电流、电功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容等电量进行测量。这是电测技术的基础，也是本门课程要学习的内容。

一些非电量如温度、压力、厚度等也可通过传感器转换成电量进行间接测量，称为非电量的电测技术。目前这项技术发展很快，在掌握电工测量的基础上，结合本专业的需要，在后面的专业课中将可以进一步引伸到非电量的电测方法。

测量的过程大体分三步。

第一步，准备。

明确测量对象、要达到的精度和测量时外部的环境条件，从而确定测量方式和选择合适的仪器设备。

例如：电压、电流、电功率等有源量可直接用指示仪表测量；电阻、电感、电容等电参量，必须另加试验电源，常用比较仪器测量。生产环境中的仪表要求抗干扰能力强，但对精度要求不是很高；实验室仪表要求精度高且必须有好的环境以保证其精度。

第二步，测量。

正确进行测量操作，取得并记录测量数据，尽量避免或减少测量误差。

例如：指示仪表的读数误差，往往因人而异，有经验的人能将误差减至最低，在实践中应努力培养这方面的能力。

第三步，进行数据处理，求得测量结果。

在测量过程中，往往要进行多次重复以排除偶然造成的误差，因此应对所得数据正确地进行分析和处理。

近年来，电子技术推动了测量技术的发展，使测量范围进一步扩大，灵敏度进一步提高，数字显示仪表减少了读数误差，增加了有效数字位数，使用更为方便。

本门课程要通过实验课进行测量技术的实地练习，应达到两个目的：验证所学的电工基础理论知识和练习生产实践中实用的测量方法。

在实验过程中应当做到以下几点。

1. 严肃认真 要养成规范的、良好的操作习惯。例如：用表之前首先正确选择量程，熟练度盘做好读数准备；线路连接要整齐，仪表排列要有条理；组织小组人员，尽量同时读出各项数据以减少电源电压波动对读数的影响等。

2. 实事求是 出现不合理的结果要进行分析，必要时重新再做，决不将就。

3. 养成爱护仪器、仪表的良好习惯。

4. 注意安全 通电前必须再次检查线路，通电后要注意带电部分（如接线端）切勿触及人体，电源开关要有专人负责，发现情况能及时切断电路。

第一部分 电工测量

一、电工测量基本知识

1. 测量方法分类

测量方法共分三种：即直接测量法、间接测量法和比较法。

(1) 直接测量法 用电工仪表直接测出被测电量的大小。例如用电压表测电压，用电流表测电流。

(2) 间接测量法 先测与被测量有一定函数关系的中间量，然后利用中间量经过运算确定被测量的数值。例如：用伏安法测电阻，先测得电阻两端的电压和通过电阻的电流，然后根据公式 $R=U/I$ 计算出电阻值。这种测量方法称间接测量法。

(3) 比较法 把被测量与已知标准量进行比较从而确定被测量的数值，例如用电桥测电阻，电位差计测电源电动势。

2. 电工测量指示仪表

(1) 指示仪表的分类 指示仪表可按其工作原理，测量对象等多种方法分类。

按仪表的工作原理可分为：磁电系、电磁系、电动系、感应系等。

按被测量的名称可分为：电压表、电流表、功率表、电度表、功率因数表等。

按被测电流种类可分为：直流表、交流表和交直流两用表。

按使用方式可分为：便携式和开关板式两种。便携式仪表一般准确度较高，价格较贵，适于实验室使用。开关板式仪表一般固定在开关板或某一装置上，准确度较低，多用于工矿企业。

按仪表的准确度可分为：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。

按仪表防御外来电磁场能力可分为 I、II、III、IV 四级，

按仪表使用的环境条件可分为：A、B、C 三组。

按仪表的指示方式可分为：指针式和数字式。

(2) 指示仪表的型号 便携式仪表的型号由系列代号、设计序号、用途号三组信息组成。

如图 1-1-1 所示。

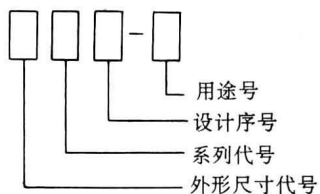


图 1-1-1 便携式仪表型号

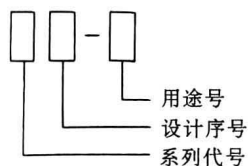


图 1-1-2 开关板式仪表型号

其中：系列代号如 C—磁电系，D—电动系，T—电磁系，G—感应系；

用途号如 A—电流表，V—电压表，W—功率表， φ —相位表

开关板式仪表的型号包含外形尺寸代号、系列代号、设计序号和用途号四组信息，如图

1-1-2 所示。

系列代号的含义与便携式相同。

型号一般标示在仪表面板上（刻度盘上）。

(3) 面板符号介绍 在仪表的面板上，有各种标记符号，用来表示该仪表的工作原理、被测量的单位、准确度等级、正常工作位置、使用环境、防御外磁场能力等，以便正确选择和使用仪表。面板符号的意义见表 1。

表 1 常用电工指示仪表面板符号

分类	符 号	含 义	分类	符 号	含 义
电 流 种 类	—	直流	工 作 位 置		标尺位置：垂直
	~	交流			标尺位置：水平
	≍	直流和交流			标尺位置与水平面倾斜成一定角度例如 60°
测 量 单 位	A	安	绝 缘 强 度		不进行绝缘强度试验
	mA	毫安			绝缘强度试验电压为 2 千伏
	μA	微安	防 御 外 磁 场 能 力	例： 	I 级防外磁场 外磁场引起的误差不超过 0.5%
	V	伏			II 级防外磁场 外磁场引起的误差不超过 1.0%
	mV	毫伏			III 级防外磁场 外磁场引起的误差不超过 2.5%
	W	瓦			IV 级防外磁场 外磁场引起的误差不超过 5.0%
	Var	乏	环 境 条 件	(无标记)	A 组仪表 环境温度 0~40℃ 相对湿度 85% 以下
	Ω	欧			B 组仪表 环境温度 -20~50℃ 相对湿度 85% 以下
	MΩ	兆欧			C 组仪表 环境温度 -40~60℃ 相对湿度 98% 以下
工 作 原 理		磁电系	工 作 原 理		电磁系
		电磁系			电动系
		感应系			整流系
		整流系			磁电系流比计
		磁电系流比计			
		磁电系流比计			
准 确 度 等 级	1.5	以标尺量限百分数表示的准确度等级例如 1.5 级	准 确 度 等 级		以标尺长度百分数表示的准确度等级例如 1.5 级
		以标尺长度百分数表示的准确度等级例如 1.5 级			以指示值百分数表示的准确度等级例如 1.5 级
		以指示值百分数表示的准确度等级例如 1.5 级			

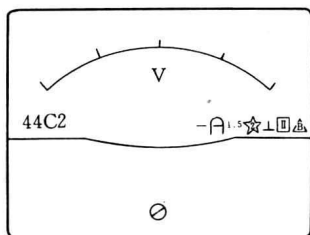


图 1-1-3 44C2 型电压表外形图

例如：44C2 型电压表的面板，如图 1-1-3 所示。

3. 仪表的误差

(1) 误差 仪表测量时，指示值和被测量的实际值之间存在的差异称为误差。任何测量总会存在误差。引起误差的原因有二种：一种是由仪表结构和制作工艺不完善所产生的误差，这种误差是仪表本身固有的，称为基本误差。另一种是因不按规定的正常工作条件进行测量所产生的误差，称为附加误差。

误差的表示方法有三种：即绝对误差、相对误差、引用误差。

绝对误差 ΔA_d 是仪表指示值 A 与被测实际值 A_0 之差，即

$$\Delta A_d = A - A_0 \quad (1-1-1)$$

A_0 值可以由标准表（准确度很高的仪表，一般应高于被校仪表三个等级）的指示值来近似替代， ΔA_d 可能为正，也可能为负。

相对误差是绝对误差与实际值 A_0 的百分比。即

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

在一般情况下，仪表 A 指示值与实际值 A_0 的差别很小，所以

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

相对误差不仅可以说明测量结果与被测量实际值之间的差异，还可以对测量结果的准确程度进行比较。

引用误差是仪表测量时可能出现的最大绝对误差 ΔA_{dm} 与仪表量程 A_m 的百分比

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

引用误差说明仪表在某量程 A_m 时指示值与实际值之间的误差相对于仪表量程的百分数。

(2) 准确度等级 准确度说明仪表指示值与实际值之间的符合程度，误差越小，准确度就越高，根据国标规定仪表的准确度 K 用引用误差来表示。仪表在规定工作条件下使用，仪表的准确度 K 的百分数应大于或等于引用误差的绝对值

$$K\% \geq \frac{|\Delta A_{dm}|}{A_m} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

根据国家标准规定，指示仪表的准确度共分：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等七个等级。例如：准确度为 0.5 级的仪表其引用误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。

在规定的正常工作条件下，使用指示仪表测量时，仪表的量程 A_m 和准确度 K 是已知的，因此可以计算出允许的最大绝对误差 ΔA_{dm}

$$\Delta A_{dm} = \pm K\% \cdot A_m$$

由此可以计算出该仪表指示值为 A 时的最大相对误差

$$\gamma = \frac{\Delta A_{dm}}{A} \times 100\% \approx \frac{\Delta A_{dm}}{A_0} \times 100\%$$

【例 1】 分别用量程为 100mA，准确度为 0.1 级的直流电流表和量程为 100mA，准确度为 2.5 级的直流电流表，测量实际值为 80mA 的直流电流，求两次测量可能产生的最大绝对误差和相对误差（仪表内阻的影响略去不计）。

解：第一只电流表测量时

$$\Delta A_{dm1} = \pm 0.1\% \times 100 = \pm 0.1 \text{ mA}$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta A_{dm1}}{A_0} \times 100\% = \frac{0.1}{80} \times 100\% = \pm 0.12\%$$

第二只毫安表测量时

$$\Delta A_{dm2} = \pm 2.5\% \times 100 = \pm 2.5 \text{ mA}$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta A_{dm2}}{A_0} \times 100\% = \frac{2.5}{80} \times 100\% = \pm 3.12\%$$

计算结果说明：仪表准确度对测量结果的误差影响很大。

【例 2】 用准确度为 1.0 的直流毫安表一只，分别用它的 100mA 量程和 10mA 量程测量实际值为 10mA 的直流电流，求两次测量可能产生的最大绝对误差和相对误差。

解：用量程 100mA 时

$$\Delta A_{dm1} = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1 \text{ mA}$$

$$\gamma_1 = \frac{\Delta A_{dm1}}{A_0} \times 100\% = \pm \frac{1}{10} \times 100\% = \pm 10\%$$

用量程 10mA 时

$$\Delta A_{dm2} = \pm 1.0\% \times 10 = \pm 0.1 \text{ mA}$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta A_{dm2}}{A_0} \times 100\% = \pm \frac{0.1}{10} \times 100\% = \pm 1\%$$

计算结果说明：用同一只仪表（准确度等级相同）的不同量程测量实际值相同的物理量时，测量结果的准确程度大不相同，因此根据被测量正确选用指示仪表的量程，才会得到比较准确的测量结果。

最大测量误差的粗略估计：

根据公式

$$\gamma = \frac{\pm K\% \cdot A_m}{A_0} \times 100\%$$

若指针的指示位于最后四分之一标尺内，便可认为测量的相对误差等于准确度等级；若指针偏转位于标尺中部，则可认为测量的相对误差约等于准确度等级值的 2 倍。在第一个四分之一标尺内进行测量误差过大，不宜使用。

(3) 有效数字 由于测量不可避免地存在误差，仪表的分辨能力也有一定的限制，因此测量数据不可能完全准确而往往是一个近似数，我们规定测量结果的末位数应该与绝对误差的大小相适应，为不准确数字。即末位为欠准数字，末位欠准数与它前面的准确数组成有效数字。例如：10.3 是一个三位有效数。其中 3 是欠准数字，10 是准确数字。

值得注意的是“0”这个数字，当它在数尾和其他非零数字中间时是有效数字，例如：203，400，5.60 都是三位有效数字，而当“0”在第一个非零数字之前时就不是有效数字了，例如：0.012 前面的两个“0”都不是有效数字，它只有两位有效数字。对于 1.20V 这样的测量数据，其百分位是欠准的。不可任意改写为 1.2V 或 1.200V，它反映了测量准确程度的变化。

在记录实验数据和计算间接测量结果时，要正确表示有效数字。

①记录仪表的指示值时，一般只保留一位与仪表准确度相适应的欠准数。

②算式中的常数的有效数字位数没有限制，根据需要选取。

③大数数值与小数数值要用幂的乘积形式来表示。

例如测得功率为 $4.5 \times 10^3 \text{W}$ ，不能记为 4500W

④误差一般只取一位有效数字，最多取两位。

4. 有效数字的运算规则

(1) 加减运算 在进行加减运算之前，先将参加运算的各数字的小数点的位数修约到比小数点后位数最少的数只多一位小数，计算结果应保留的小数位数与参加运算的数中小数位数最少的相同。

例如：21.4，0.073 和 1.666 相加。

小数点后位数最少的是 21.4

$$21.4 + 0.07 + 1.67 = 23.14 = 23.1$$

(2) 乘除运算 在求除运算之前，先将参加运算的各数字修约到比有效数字位数最少的那个数多 1 位有效数字，计算结果的有效数字位数应该与参与运算的所有数字中有效数字位数最少的数相同。

例如：21.4，0.073 和 1.666 相乘，有效数字位数最少的数是 0.073，是两位有效数字

$$21.4 \times 0.07 \times 1.67 = 2.61 = 2.6$$

5. 有效数字的修约规则

有效数字的位数确定后，多余的位数一律进行修约（舍入）处理，规则如下。

①“四舍六入”所要舍去的数字中最左第一位数字小于 5，则舍去，大于 5，则进 1。

②所要舍去的数字最左面第一位数字等于 5，而 5 之后的数不全为零，则进 1。

③所要舍去的数字最左面第一位数字等于 5，而 5 之后数字全为零，则当保留的数字末位数为奇数则加 1，否则末位数不变。例如：要把 6.150 和 8.450 修约得只留一位小数。前者应为 6.2，后者应为 8.4。

练 习 题

1. 62T51-A 型电流表面板符号如图 1-1-4 所示，叙述各符号含义。

2. 用量程为 50V 的直流电压表，测量实际值为 40V 的直流电压，仪表指示值为 40.5V，求①测量的绝对误差、相对误差；②若该表的准确度为 1.5 级，此测量结果是否达到了应有的准确度？

3. 在下列数中，有效数字位数最少的是_____

A: 7.86; B: 0.125; C: 0.0001

4. 将下列各数修约成二位有效数字。

3.57; 0.0554; 2.550; 1.650; 3.651

5. 计算下列各数的和。

0.027; 1.545; 3.874

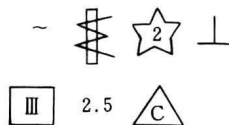


图 1-1-4 练习题 1 的图

二、直流电流和电压的测量

测量电流和电压，通常使用电流表和电压表，测量电流时电流表应与被测电路串联，使被测量电流通过电流表；测电压时，电压表则应与被测电路并联，使被测电压加在电压表的两端，见图 1-2-1。

由于电流表与电压表接入电路后，会影响电路的工作状态，造成测量误差。因此，电流表的内阻应足够小，电压表的内阻应足够大。

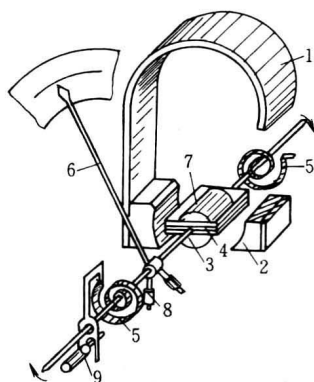
直流电流和电压的测量常用磁电系仪表。

1. 磁电系仪表的测量机构及工作原理

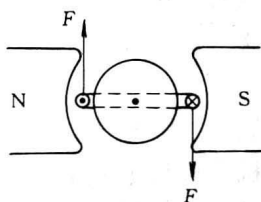
(1) 磁电系仪表的测量机构（动圈式） 图 1-2-2 (a) 是磁电系仪表结构简图，由图可以看到它由两部分组成，固定部分和转动部分。

固定部分：由马蹄形磁铁 1，极靴 2 和固定在仪表支架上的圆柱形铁心 3 组成。极靴与圆柱形铁心之间有均匀很小的气隙，气隙中有很强的匀强磁场。

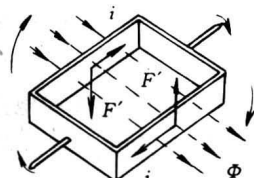
转动部分：由绕在铝框 4 上的线圈 7，转轴 3、指针 6、游丝 5、平衡锤 8 组成。游丝弹簧同时起引入和引出被测电流的作用，分别与线圈的两端相连。



(a) 结构



(b) 工作原理



(c) 阻尼原理

图 1-2-2 磁电系仪表

1—磁铁；2—极靴；3—铁心；4—铝框；5—游丝；6—指针；7—可动线圈；8—平衡锤；9—零点调整

(2) 磁电系仪表的工作原理 磁电系仪表是利用载流线圈在永久磁铁的磁场中受电磁力作用，使指针偏转而工作的。当可动线圈通入直流电流 I 时，可动线圈每边导线受到电磁力 F 的作用。可由下式求出

$$F = NBIL$$

式中 L ——磁场内可动线圈每边有效长度，m；

I ——线圈内的电流，A；

B ——气隙磁场的磁感应强度，T；

N ——线圈的匝数；

F ——电磁力，N。

由此产生的转动力矩

$$M = Fb = NBILb = NBSI$$

式中 M ——转动力矩，N·m；

b ——可动线圈宽度，m；

S ——可动线圈面积， $S = L \cdot b$ ， m^2 。

仪表的结构确定之后， N ， b ， S 为常数。令 $K_1 = Nbs$ ，则 $M = K_1 I$ 转矩与电流 I 成正比。

当 M 使线圈转动后，引起游丝弹簧的变形而产生转矩 M' ，它与线圈偏转角 α 成正比。

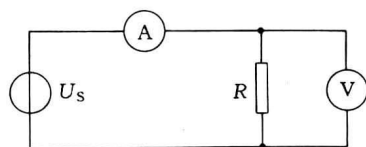


图 1-2-1 电流表电压表
测量时接线方法

$$M' = D\alpha$$

式中 D ——游丝反转矩系数, 对于一个确定的游丝它近似为常数。

当 $M = M'$ 时, 指针将停留在一个稳定位置上。即

$$K_1 I = D\alpha$$

$$I = \frac{D}{K_1} \alpha = K\alpha \quad (1-2-1)$$

式中 K 为常数, I 与 α 成正比。所以线圈偏转角度正比于线圈中的电流。磁电系仪表标尺刻度均匀, 便于读数。

由于仪表的转动部分有惯性, 当 $M = M'$ 时, 指针会在平衡位置左右摆动, 不能很快静止下来, 造成读数困难, 因此需要一个与运动方向相反的力矩称阻尼力矩。可动线圈的骨架铝框就是阻尼机构。

在 F 作用下线圈沿力的方向运动, 见图 1-2-2。闭合导体铝框由于切割磁力线也要产生感生电流, 电流方向根据右手定则与线圈电流方向相反, 因此铝框的两个有效边将受到与线圈相反的作用力 F' , 它能使运动很快停下来。当线圈静止时, F' 为零, 因此阻尼力矩只在运动过程中出现, 静止时自动消失。这不影响测量的结果。

2. 磁电系电流表和电压表

磁电系测量机构可以制成电流表, 用来测量直流电流, 由于可动线圈的导线很细, 电流又要流过游丝, 因此磁电系测量机构只允许通过几十微安到几十毫安的电流。

为了扩大磁电系测量机构的量程, 采用与可动线圈(电阻为 R_g) 并联分流电阻 R 的方法。图 1-2-3 (a) 表示单量程电流表, 要制成多量程电流表, 需要不同的分流电阻, 一般采用环形分流电路来实现。见图 1-2-3 (b)。

磁电系测量机构的可动线圈自身电阻为 R_g , 通过它的电流 I_g 和外加电压 U_g 成正比。因此, 它可以用来测量电压, 如果测量机构允许通过的最大电流为 I_{gm} , 则它可测的最高电压为 $U_m = I_{gm} \cdot R_g$, 因为 R_g 小, I_g 也小, 因此, 它可测电压的数值也很小, 通常是毫伏级。

为了测量较高的电压, 可以用一个阻值较大的分压电阻 R 与测量机构相串联。如图 1-2-4 (a) 所示。

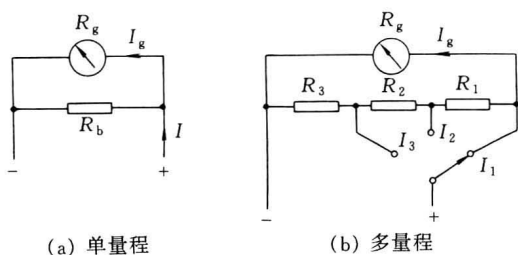


图 1-2-3 电流表内部电路

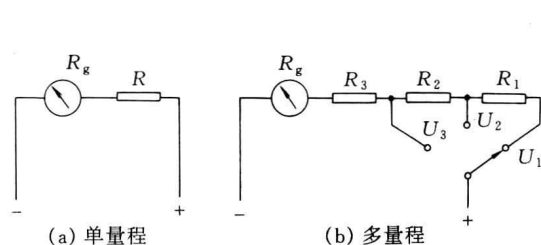


图 1-2-4 电压表内部电路

如果用三个电阻连接成图 1-2-4 (b) 的形式就组成了三量程电压表。三量程电压表是通过转换开关切换不同的测量电路来实现的。电压表各量程的内阻与相应电压量程的比是一个常量, 而且是电压表的重要参数, 常标在电压表的表面上, 其单位为 “ Ω/V ”。

3. 磁电系仪表主要技术特性

- (1) 磁电系仪表磁场很强, 因此受外界磁场的影响小, 灵敏度、准确度都比较高。
- (2) 指针的转角与电流成正比关系, 表盘刻度均匀, 便于读数。

(3) 游丝和线圈导线截面小, 允许通过的电流小, 因此过载能力差。

练 习 题

MF18 型万用表, 直流电压挡内阻常数为 “20kΩ/V”, 试计算它的 2.5V; 10V; 50V; 250V 量程时仪表的内阻。

三、电阻的测量

直流电阻的测量有以下几种方法。

1. 伏安法测电阻

伏安法测电阻是间接测量法, 其结果需要计算才能得到而且测量误差一般都比较大。伏安法测电阻的优点是能测出被测电阻在工作的状态下的阻值, 例如: 大型电机、变压器工作状态下的直流电阻的测量以及非线性电阻的测量。

伏安法测电阻有两种接线方法, 见图 1-3-1 (a)、(b)。

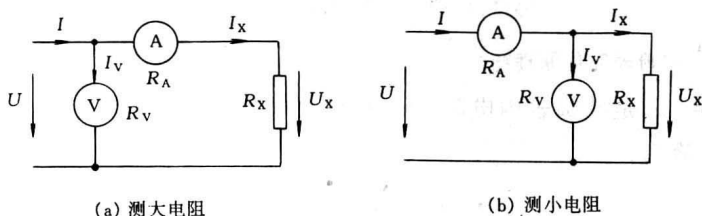


图 1-3-1 伏安法测电阻的电路

当采用图 1-3-1 (a) 电路测量电阻时, 电压表测得电压 $U_V = U_{R_A} + U_{R_X}$, 包含电流内阻压降和被测电阻的压降。

由欧姆定律计算测量结果,

$$R_X' = \frac{U}{I_X} (=R_X + R_A)$$

若 R_A 足够小, 即 $R_X \gg R_A$, 可以认为 $R_X = R_X'$ 。这种测量方法所带来的误差为:

$$\gamma = \frac{R_X' - R_X}{R_X} \times 100\% = \frac{R_A}{R_X} \times 100\% \quad (1-3-1)$$

由公式可以看出, 这种电路适合于测量比电流表内阻大的多的电阻。

另一种测量电路见图 1-3-1 (b)。这种测量电路电流表指示值包含了电压表流过的电流 I_V 和负载电流 I_X 。

$$I = I_V + I_X$$

由欧姆定律计算测量结果:

$$R_X' = \frac{U_X}{I} \left(= \frac{R_V \cdot R_X}{R_V + R_X} \right)$$

若 $R_V \gg R_X$ 时, 可以认为 $R_X' = R_X$

这种测量方法所带来的误差:

$$\gamma = \frac{\frac{U_X}{I} - R_X}{R_X} \times 100\% \quad (1-3-2)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{R_V R_X}{R_V + R_X} - R_X}{R_X} \times 100\% \\
 &= \frac{R_X}{R_V + R_X} \times 100\%
 \end{aligned}$$

由式 (1-3-2) 可以看出, 这种电路适合于测量比电压表内阻小得多的电阻。

2. 欧姆计测电阻 (万用表的欧姆挡)

使用万用表欧姆挡测电阻是最常用的测电阻方法。图 1-3-2 是欧姆表简化原理图。

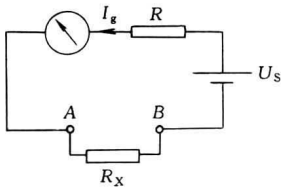


图 1-3-2 欧姆表简化原理图

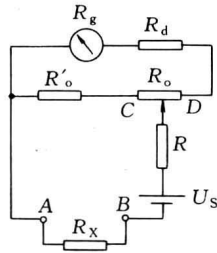


图 1-3-3 欧姆表原理图

R_g 为表头内阻, R 是欧姆表内电阻, R_X 是被测电阻, U_s 是欧姆表内电池的电压。通过磁电系测量机构的电流为:

$$I_g = \frac{U_s}{R_g + R + R_X}$$

当 U_s 一定时 I_g 随 R_X 而变化, 所以指针的偏转可以反映 R_X 的大小。

当 $R_X = \infty$ 时, 即 $I_g = 0$, 指针不偏转, 欧姆表的刻度为“ ∞ ”; 当 $R_X = 0$ 时, 即 $I_g = \frac{U_s}{R_g + R}$, 此时电流为满量程, 欧姆表刻度应为“0”。

欧姆表的刻度与电压表、电流表的刻度反方向。又因为:

$$I_g = \frac{U_s}{R_g + R + R_X}$$

I_g 与 R_X 是非线性关系, 因此标尺刻度不均匀。

欧姆表内电池的端电压随使用时间的增加而逐渐下降, 使得 $R_X = 0$ 时, 指针不能指到零欧姆位置, 使测量结果偏大, 为减少这种测量误差, 欧姆表内装有零欧姆调整器 R_o 。(可调电阻), 见图 1-3-3 欧姆表原理图, 由 R_o' 、 R_o 组成环形分流电路。调整 R_o 的滑动触头, 可改变表头支路的电阻, 使得 I_g 得到调整, 减小测量误差。

3. 直流单臂电桥

工程上广泛应用直流单臂电桥 (又称惠斯登电桥), 测量 $1\Omega \sim 1M\Omega$ 的电阻, 其准确度远高于万用表的欧姆挡。

图 1-3-4 是直流单臂电桥的原理电路, R_X 是被测电阻, R_1 、 R_2 、 R 是标准电阻, U_s 是直流电源电动势, G 是检流计, S_G 、 S_B 分别是检流计和电源的按钮开关, 接通 S_G 、 S_B , 调节 R_1 、 R_2 、 R 使 $I_g = 0$ (检流计中电流为零) 电桥达到平衡, 此时

$$R_X = \frac{R_1}{R_2} \cdot R$$

$\frac{R_1}{R_2}$ 称比率臂, R 称比较臂, 比率臂的数值乘以比较臂的值就得到被测电阻的数值。

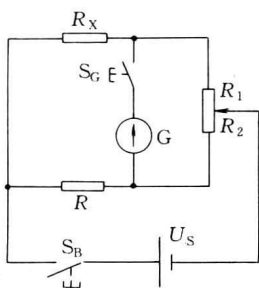


图 1-3-4 直流单臂电桥原理图

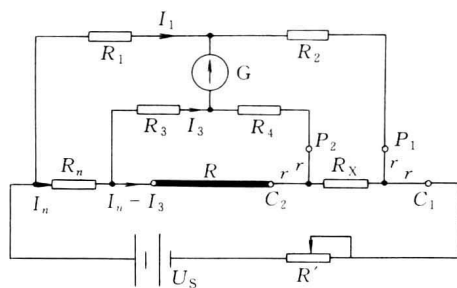


图 1-3-5 直流双臂电桥原理图

由于 R_1 、 R_2 、 R 都是标准电阻，并且十进电阻箱可以读出多位有效数字，检流计的灵敏度也很高，所以测量结果准确度高。

4. 直流双臂电桥

直流双臂电桥也称为凯尔文电桥，适用于测量小电阻 (1Ω 以下)。

图 1-3-5 是直流双臂电桥电原理图。与单电桥相比，其优点是它消除了由接线电阻和接触电阻造成的测量误差，而这种误差与被测量的小电阻的极值 ($10^{-5}\Omega$) 具有同一数量级。

图中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为桥臂电阻，数值在 10Ω 左右。

R_1 与 R_3 ， R_2 与 R_4 设有机械联动转换开关，使电桥调节平衡过程中有：

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} \quad (1-3-3)$$

R_n 为标准电阻，用作电桥的比较臂； R_X 为被测电阻。 R_n 与 R_X 之间用一根短粗导线连接起来，粗导线电阻记为 R ，被测电阻 R_X 与电桥之间共 4 个接线端钮，一对是电流端钮 C_1 、 C_2 ，一对是电压端钮 P_1 、 P_2 ，设它们的接触电阻和接线电阻均为 r ，当电桥平衡时 $I_g = 0$ 。

根据基尔霍夫定律，可列出下列方程组：

$$\begin{cases} I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_n R_n = 0 \\ I_1 (R_2 + r) - I_n R_X - I_3 (R_4 + r) = 0 \\ I_3 R_3 + I_3 (R_4 + r) - (I_n - I_3) (R + r) = 0 \end{cases}$$

解方程组，得

$$R_X = \frac{R_2 + r}{R_1} R_n + \frac{(R + r)(R_2 + r)}{R + R_3 + R_4 + 2r} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4 + r}{R_2 + r} \right) \quad (1-3-4)$$

因为 r 远小于 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，包含在 R_2 、 R_4 支路中的 r 可不计，所以可以认为：

$$\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4 + r}{R_2 + r} \approx \frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} = 0$$

又因为 R 极小，所以 $R + r$ 也极小，因此，式 (1-3-4) 中的第二项可以忽略不计，于是：

$$R_X = \frac{R_2 + r}{R_1} R_n \approx \frac{R_2}{R_1} \cdot R_n$$

可见，恰当选择比率臂 R_2/R_1 并调节比较臂 R_n 就能准确测出 R_X ，至于 C_1 与 R_X 之间的接线及接触电阻 r 只使桥路的工作电流略受影响，不影响测量结果。

5. 兆欧表及绝缘电阻的测量

兆欧表主要用来测量绝缘电阻。标度尺单位是兆欧 ($M\Omega$)，它由一台手摇发电机和一磁电系流比计组成。图 1-3-6 是兆欧表的结构简图。

磁铁 3、极靴 4 和有缺口的圆环铁心 5 构成闭合磁路，极靴和圆环铁心的形状使气隙磁场