

(京) 新登字162号

内 容 简 介

本书由两部分组成,第一部分着重介绍电路测量的基本知识:直流电路参数的测量原理和测量方法;交流电路参数的测量原理和测量方法;常用仪表如万用表、低功率因数瓦特表、示波器、正弦信号发生器、毫伏表等基本原理及使用。第二部分是拟有20个实验的实验指导书,其实验内容与电路分析基础课程有着密切的联系亦是电路分析基础课程的实践补充。本书在结构方面克服了纯实验指导书的不足之处,加强了对实验原理和方法的指导作用,有利于提高学生的实验技巧和能力。

本书的第一部分内容较精练,可安排课时讲授,也可供学生自学。第二部分可根据需要选择实验。

本书可作为无线电专业,自动控制专业及通信专业的本科和高函教科书,也可供有关教师、科研人员学习参考。

电路测量基础

编 者 陈素华 李超平

*

北京邮电学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京昌平马池口印刷厂印刷

*

850×1168毫米 1/32 印张 8 字数 217千字

1993年2月第一版 1993年2月第一次印刷

印数: 1—10000册

ISBN 7-5635-0106-1/TM·4 定价: 4.50元

目 录

绪论.....	
---------	--

第一部分 电路测量基础理论与常用仪表

第一单元 测量基础知识.....	(1)
一、测量的概念.....	(1)
二、测量的误差.....	(2)
三、电工仪表等级的确定.....	(5)
四、测量方法.....	(8)
五、测量结果表示法.....	(9)
思考题与练习题.....	(13)
第二单元 常用测试仪表 (一)	(14)
一、磁电式仪表.....	(14)
二、直流电桥.....	(39)
三、数字电压表	(41)
思考题与练习题.....	(44)
第三单元 直流电路参数的测试.....	(46)
一、分立元件直流电阻值的测试方法.....	(46)
二、无源二端网络等效内阻的测试方法.....	(46)
三、有源二端网络等效参数的测试方法.....	(52)
思考题与练习题	(57)
第四单元 RC 一阶电路的响应测试.....	(58)
一、脉冲序列作用于 RC 电路的响应.....	(58)
二、微分电路和积分电路.....	(64)
三、微分电路测试波形分析.....	(66)
四、时间常数 τ 的求法	(70)

思考题与练习题	(71)
第五单元 正弦交流电路等效参数的测试	(72)
一、正弦交流电路的基本概念	(72)
二、实际电路的器件	(86)
三、正弦交流电路等效参数的测试	(96)
思考题与练习题	(111)
第六单元 常用测试仪表 (二)	(112)
一、示波器	(112)
* 二、正弦信号发生器	(122)
* 三、毫伏表及电平概念	(133)
四、瓦特表	(142)
* 五、选频电平表	(143)
思考题与练习题	(148)

第二部分 实验指导书

实验一 常用元件及仪表的识别	(152)
实验二 直流非线性电阻特性的测试	(152)
实验三 有源二端网络等效参数的测试	(156)
实验四 特勒根定理的研究	(161)
实验五 受控源的实验研究	(163)
实验六 微分电路、积分电路的研究	(172)
实验七 二阶电路过渡过程的研究	(179)
实验八 戴维南定理的验证	(186)
实验九 万用表的组装与调测	(190)
实验十 示波器和信号发生器的使用练习	(200)
实验十一 伏安法测单个元件阻抗特性	(204)
实验十二 三表法测量交流电路等效参数	(206)
实验十三 万用电桥和高频 Q 表测元件参数	(212)
实验十四 RC 电路的幅频特性测试	(214)
实验十五 RC 电路的相频特性测试	(217)

实验十六	谐振电路的研究·····	(220)
实验十七	正弦交流电路的相量研究·····	(225)
实验十八	带抽头铁心电感作用的研究·····	(227)
实验十九	非正弦周期信号的幅度频谱分析·····	(233)
实验二十	时域信号的抽样定理·····	(237)
附	实验报告的格式·····	(242)

第一部分 电路测量基础理论与常用仪表

第一单元 测量基础知识

一、测量的概念

1. 定义

测量是人们借助专门设备，通过实验的方法，将被测量的量与作为测量单位的已知量相比较的过程。在比较过程中可以确定被测量的量是已知测量单位的几倍或几分之几。

测量的结果由两部分组成。一是比较的数量，二是比较的单位。

2. 单位

关于测量单位，世界各国曾用过不同的制式。如电磁单位制 (CGSM)、静电单位制 (CGSE) 和实用单位制 (MKSA) 等。由于单位制的类型很多，各国所采用的制式又各不相同，这就给测量技术的进一步发展带来许多困难。因此人们迫切需要有一个公认的共同单位制，于是国际上正式通过了以实用单位制为基础的新的统一测量单位制，命名为国际单位制 (SI)。

国际单位制的基本单位有：

长度单位：米 (m)；质量单位：千克 (kg)；时间单位：秒 (s)；电流单位：安培 (A)；热力学单位：开尔文 (K)；光强单位：坎德拉 (cd)；物质量单位：摩尔 (mol)。

此外，在国际单位制中还有两个便于引出有关单位而定义的辅助单位，即平面角单位——弧度 (rad) 和立体角单位——球面度 (sr)。

二、测量的误差

1. 误差的种类

(1) 系统误差 (也称为有规律误差)

是指在一定条件下误差的数值是恒定的误差,或按某种已知的函数规律变化的误差。产生系统误差的原因有

① 仪表误差 (也称工具误差或基本误差): 由于仪表结构和制作的不完善而产生的误差。如仪表零件位置安装不正确,刻度不精确,仪表出厂前没有校准等,为仪表所固有的误差。

② 使用误差 (也称操作误差): 在使用仪表过程中,由于安装、调节、布置、使用不当所产生的误差。如把水平的仪表垂直放置,接线太长或未按阻抗匹配联接,接地不当,未按操作规程进行预热、校准和测量等都会产生使用误差。减小这种误差的方法是严格按技术规程操作,提高实验技巧以及对各种现象的分析能力。

③ 方法误差: 由于测量方法不完善或依据的理论不严密而产生的误差。如间接测量时所用的是近似计算公式,就会给测量结果带来误差。

④ 影响误差: 在测量中由于仪表受外界的温度、湿度、气压、电磁场、机械震动、声音、光照和放射性等的影响所产生的误差。

⑤ 人身误差: 是指由人的感觉和运动器官不完善所产生的误差。对于某些借助于人耳、人眼来判断结果的测量以及需要进行人工调谐等的测量工作,均会产生人身误差。

系统误差在测量中因为有一定的规律性,所以可以采用一定的技术措施设法防止或削弱。如,在正常条件下使用仪表,提高操作技巧,改进测量方法,或引入校正值等都可以减少或消除系统误差。

(2) 随机误差 (也称偶然误差)

这种误差的数值与符号均不一定,出现的时间和变化规律也

不清楚。随机误差是在重复测量的情况下发现的。使用同样的方法和设备进行多次仔细测量时，所测得结果总有差别，但多次测量结果综合起来，是有规律的。该误差服从统计规律，可以根据概率论由多次重复测量的数据中来估计随机误差的影响。

在有随机误差因素的条件下，欲使测量结果有更大的可靠性，可在相同条件下进行重复多次测量，最后取多次测量的算术平均值作为测量结果。这个值是测出的量的概率最大的数值，是最可信的数值，更近于实际值。

(3) 粗大误差（也称疏失误差、粗差或巨差）

是在一定条件下，测量结果明显的偏离其实际值时所对应的误差。如测量方法不当；测量时电源突然跳动、仪器中某元件打火；测量人员读错了仪表指示数；测量前未对仪表进行校准、调零及记录的错误等而产生的误差。粗大误差明显地和严重地歪曲了测量结果。

2. 误差表示法

(1) 绝对误差

被测量的测量值 x 与被测量的实际值 A （即真值）之差称绝对误差 Δ

$$\Delta = x - A \quad (1-1)$$

从(1-1)式看出绝对误差 Δ 值可正可负。测量值 x 比真值 A 大，则 Δ 为正值，否则为负值。切记 Δ 的正负是以真值 A 为参考决定的。

(2) 相对误差

绝对误差与被测量真值之比的百分数称为相对（真值）误差 β_A ，即

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

绝对误差表示了被测量的误差大小。相对误差表示了被测量的准确度。例如，测量两个电压， $V_1=5V$ ， $\Delta V_1=0.1V$ ， $\beta_{A1}=2\%$ ， $V_2=50V$ ， $\Delta V_2=0.1V$ ， $\beta_{A2}=0.2\%$ 。由此可以看出，两个被测

量电压的绝对误差相同,但相对误差不同,测得的 V_2 比 V_1 准确。

3. 测量的准确度、精密度及精确度

(1) 准确度

指被测量的测量值与其真值接近的相对程度。二者相对误差越小,就认为越准确。其表示式如下

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

其中 Δ 表示绝对误差; A 表示被测量真值; β 表示准确度 (也称相对误差)。

在测量中有关的真值怎样确定,对于初学者来说是一个实际问题。大家知道每一个被测量的真值在不同的时间和空间,它的大小往往是不同的。在一定时间、空间条件下,被测量的真值是客观存在的确定数值,但要确切的说出真值的大小很困难。例如时间标准“秒”的真值是指铯 (Cs^{133}) 原子在基态的两个超精细能级间跃迁所对应辐射的9192631770个周期的持续时间为1秒,而实际中公式的真值 A ,可认为是理论值,也可由更高二级的标准仪器测得的值来代替真值 A 。

影响准确度的因素是系统误差。如在电路测量中,电路的联接方式、仪表等级、依据的理论都影响测量的准确度。要想提高测量的准确度必须在克服系统误差上下功夫。

(2) 精密度

指多次测量结果之间的差异程度,即反映随机误差大小的程度。

例如,用一块电压表测真值为10V的电压,三次测得的结果分别为8.95V、8.951V、8.949V。用另一块电压表测真值为10V的电压,而三次测得结果分别为9.90V、9.85V、9.95V。从测量结果上看,虽然第一块表测得结果与真值差异比第二块表测得结果比真值差异大,但三次结果之间差异小,所以说第一块表比第二块表精密度高。

精密度高表示测量系统抗干扰能力强。也可以说精密度是用

来表现随机误差的大小。

(3) 精确度

精密度和准确度总称为精确度。通常说某仪器精确度高,就是说它既精密又准确。但必须注意,精密度与准确度是两个不同的概念,精密度高不等于准确度高,同样准确度高不一定精密度高。

三、电工仪表等级的确定

1. 电工仪表的准确度

以仪表的满度相对误差 β_m 表示电工仪表的准确度。仪表的满度相对误差是仪表各指示值中最大绝对误差值 Δ_m 与仪表满度值(即满量程值) A_m 之比的百分数。

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

根据我国标准规定,仪表准确度等级共分七级,分别是0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。如: $\beta_m = \pm 0.1\%$ 的表为0.1级表, $\beta_m = \pm 1.0\%$ 的表为1.0级表等。

2. 确定仪表等级的方法

确定仪表等级的方法是将被定级的表与标准表去测同一个量,认为标准表的读数是真值,待定表的读数与标准表的读数之差是绝对误差。在全量程上找出最大绝对误差 Δ_m 代入(1-4)式中,算出满度相对误差值。根据该值确定待定仪表的等级,如表1-1所示。

例1-1 有一量程为100mA电流表,用一块标准表校验它。测得的结果如表1-2所示。试确定该电流表应属于哪一级。

解 从表中看出,被定级表读数为80mA处的绝对误差最大, $\Delta_m = x - A = 80 - 78 = 2\text{mA}$,表的最大量程 $A_m = 100\text{mA}$,所以该表的满度相对误差为

$$\beta_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% = \frac{+2\text{mA}}{100\text{mA}} \times 100\% = +2\%$$

根据 β_m 值的大小,确定该表为2.5级。

表 1-1 电工仪表准确度等级

仪表等级	满度相对误差%	仪表等级	满度相对误差%
0.1	± 0.1	1.5	± 1.5
0.2	± 0.2	2.5	± 2.5
0.5	± 0.5	5.0	± 5.0
1.0	± 1.0		

表 1-2

被测定表读数 x (mA)	0	20	40	60	80	100
标准表读数 A (mA)	0	20.3	39.5	59	78	99
绝对误差 Δ	0	-0.3	+0.5	+1	+2	+1

3. 测量中如何选择仪表

在测量中为了得到准确的结果，初学者一定会认为使用仪表的级别越高，测量的结果越准确。实际上，测量的结果是否准确，不仅仅取决于仪表的等级，还与量程有关。不同等级的仪表由于量程不同，可得到同样效果。

在实际中选用测量仪表的原则是：①满足测量结果准确度的要求；②从经济效益出发，能用低级仪表做的实验，就不用高级仪表。在同样等级仪表中量程小的测得结果准确。选用指针式仪表量程时，测量值应大于仪表量程的1/2以上。

例1-2 用两只伏特表测同一个真值为40伏的电压。一只伏特表为0.5级，量程为100伏。另一只伏特表为1.0级，量程为50伏。求两只伏特表测量结果中最大可能的相对误差。

解 用0.5级量程为100伏的伏特表测量时可能产生的最大绝对误差应为

$$\Delta_{m1} = \beta_{m1} \cdot A_{m1} = \pm 0.5\% \times 100V = \pm 0.5V$$

用该表测40伏电压时产生的最大相对误差为

$$\beta_1 = \frac{\Delta_{m1}}{A} \times 100\% = \frac{\pm 0.5}{40} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

用1.0级表，量程为50伏的伏特表测量时产生的最大绝对误差为

$$\Delta_{m2} = \beta_{m2} \cdot A_{m2} = \pm 1.0\% \times 50V = \pm 0.5V$$

用该表测真值为40伏电压产生的最大可能相对误差为

$$\beta_2 = \frac{\Delta_{m2}}{A} \times 100\% = \frac{\pm 0.5}{40} = \pm 1.25\%$$

此例说明，用级别不同、量程不同的仪表测得的相对误差相同。其原因是测量结果的绝对误差 $\Delta_m = \beta_m \cdot A_m$ 。即绝对误差与满度相对误差成正比，与表的量程成正比。

4. 仪表的修正值

当仪表等级确定后，用该表测量时产生的最大绝对误差也就确定。由误差理论可知，绝对误差等于测量值减去真值。即 $\Delta = x - A$ ，其中 x 表示测量值； A 表示真值； Δ 表示绝对误差。

所以 $-\Delta = A - x$ ，令 $-\Delta = \lambda$ ，称为仪表的修正值。因此 $A = x + \lambda$ ，即被测量的真值等于测量值加上修正值。

要想确定被校表的修正值，必须选一块标准表。标准表的级别应比被校表高二、三个等级，标准表的量程与被校表的量程相同或稍大一些。校验时由零刻度开始，单方向增加，将被校表指示到预先选定的指示值上（一般取整数），读取标准表的读数 $A_{\pm}$ 。然后使被校表从满偏值单方向下降到同一指示值上，再读取标准表的读数 $A_{\mp}$ ，则被校表的每个指示值都有两次标准表的读数，取它的平均值作为标准表的读数 A ，即

$$A = \frac{A_{\pm} + A_{\mp}}{2}$$

由于 $\lambda = A - x$ ，修正值 λ 就等于标准表的读数 A 减去被校表的指示值。修正值给出的不一定是具体的数，也可以是一条曲线（也称更正曲线）。它是以测量值 x 为横坐标、修正值 λ 为纵坐标的关系曲线，见图1-1。

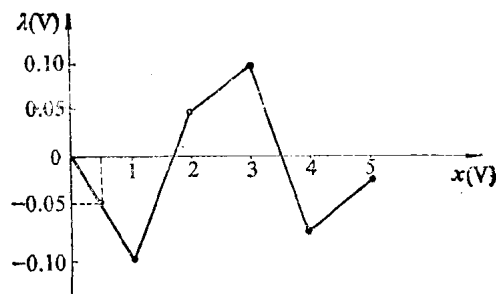


图 1-1 更正曲线

例1-3 设伏特表各主要刻度的数值与实际测得值如表1-3所示，求出修正值并画出更正曲线。若 $x=0.5\text{V}$ ，求实际值是多少？

表 1-3

指示值 $x(\text{V})$	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
实际值 $A(\text{V})$	0	0.90	2.05	3.10	3.92	4.98
修正值 $\lambda=A-x(\text{V})$	0	-0.10	+0.05	+0.10	-0.08	-0.02

从图(1-1)更正曲线可找出 $x=0.50\text{V}$ 时对应 $\lambda=-0.05\text{V}$ 。所以实际值 $A=x+\lambda=0.50-0.05=0.45\text{V}$ 。

四、测量方法

测量方法的分类形式很多。例如，在测量过程中，按照时域分析区分，可分为静态测量和动态测量；按照测量结果区分，可分为必要测量和多余测量。但从测量技术来看，更重要的是按测量方法分为直接测量、间接测量以及组合测量。

1. 直接测量

直接测量是指被测量值可直接通过测量仪表得到数据（即测量的结果）。如用电流表测电流；用欧姆表测电阻；用电桥测电

阻，用数字频率计测频率等。

2. 间接测量

是指被测量不能直接通过仪器得到测量结果，但可找到被测量与某些可以直接测量的量的函数关系，通过计算，可得出被测量值。例如用伏安法测电阻，依据公式 $R=V/I$ ，其中电阻两端电压 V 和流过电阻的电流 I 可直接测出，把测得的数代入公式，就可求出电阻值。

当被测量缺少直接测量条件、或用直接测量法不方便、或直接测量法测出结果的误差大时，可采用间接测量方法。

3. 组合测量

在测量中，使各个未知量以不同的组合形式出现（通过改变测量条件来获得不同的组合），根据直接测量和间接测量所得的数据，再通过解联立方程而求出未知量的数值，这类测量称为组合测量。例如，测电阻温度系数 α 、 β 值。因导体的电阻与温度的关系式为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

在测定 20°C 、 t_1 及 t_2 三个温度下的电阻值 R_{20} 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} ，就可列出二个方程

$$R_{t_1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$R_{t_2} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

由以上二个方程联立求解，可得出未知量 α 及 β 。

五、测量结果表示法

1. 数据表格法

数据表格法是将测量结果填写在一个表格中，让读者能清楚地从表格中得知实验中各种数据。例如表 1-4 所示的是某一电路输出端电压值与电路中电源频率值的对应关系。

2. 图解表示法

测量结果除用数据表格表示外，还经常用各种曲线表示。在研究几个物理量之间关系时，用曲线表示测量结果，可以形象、

表 1-4

电源频率 f (kHz)	0.3	0.6	1.0	3.0	4.0	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10.0	15.0	20.0	25.0
端电压(V)	5.28	5.56	5.10	2.44	1.70	0.44	0.23	0.13	0.45	0.81	1.10	2.20	3.60	3.60

直观、清晰地反应它们之间的关系。

图解表示法就是根据实验数据画出一条或几条反映真实情况的曲线。从曲线上找出被测量的数值。

怎样画出一条符合客观规律的曲线呢？第一步，选择坐标系。坐标系有直角坐标系，极坐标系和对数坐标系等。第二步，标明坐标的名称与单位，标好坐标分度。分度的大小要根据测得的数据合理选择。如果分度不合适，有可能反映不出曲线变化特征。如图1-2中，由于纵坐标分度不合适，曲线的变化特征看不

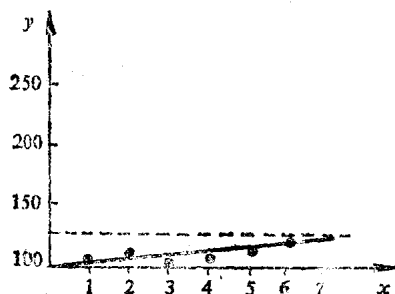


图 1-2

出来。若把图1-2的纵坐标分度改变为如图1-3所示的那样，同一个测量结果，曲线的变化特征就能看出来了。第三步，合理选取测量点。在测量中被测量有最大值和最小值，这两个点必须测出来；另外，在曲线变化陡峭部分要多测几个点，在曲线变化平缓的部分，可少取一些点，如图1-4所示。第四步，根据测量数据，在坐标图中标明测试点，测试点的符号可用“·”、“○”、“×”等，同一曲线测试点符号要相同。第五步，把坐标图上的各测试点符

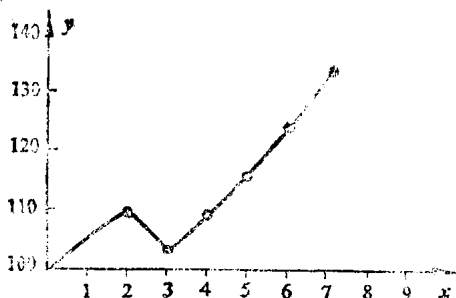


图 1-3

号用线连接起来。第六步，修匀曲线。测量结果应是一条光滑的曲线，由于测量过程中有随机误差的影响，测试点的值有时产生正误差，有时产生负误差，结果使曲线变得不光滑。在作曲线时应消除随机误差的影响，使曲线变得光滑，下面介绍一种工程修匀法——分组平均法。作法是：把横坐标分成几组，每组测量2~4个点，分别求出各组数据点的几何重心坐标。如图1-5所示。图中，“。”代表测量数据点，“×”代表分组后测试点的几何重心，用线连接符号，得到的曲线为修匀曲线。

若有的测量结果不知道是不是一条光滑曲线，则先别修匀曲线，而是缓慢地取横坐标值，先大致观察一下纵坐标数据，多测

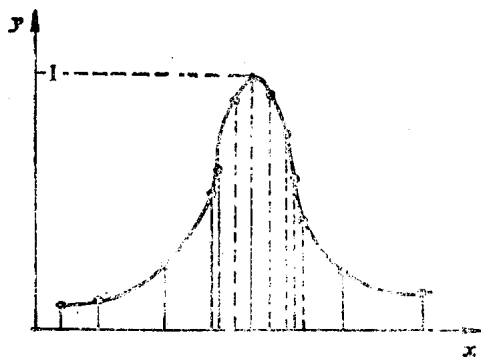


图 1-4

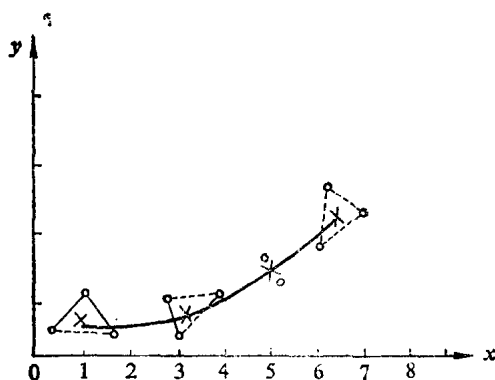


图 1-5

量几次数据，就可以判断曲线是否是光滑的。

为了把曲线特征表现出来，而又不受纸张篇幅的限制，这就需要合理地选取坐标。如测电路中频率响应特性，由于其频率变化范围很大，若选用均匀坐标，则低频部分压缩在一起，低频特性表现就不充分；如果采用对数坐标，这个问题就可解决。还有的自变量取值范围很广，在自变量变化的某一宽阔的范围内，因变量变化非常微小，这时可把代表自变量的坐标在某一范围内用断裂线断开，把图幅减小，如图1-6所示。

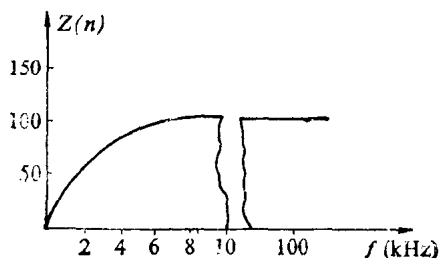


图 1-6

思考题与练习题

1. 如何确定电工仪表等级? 电工仪表等级分为哪几级?
2. 测量结果的准确度是否只与仪表的等级有关? 为什么?
3. 准确度、精密度、精确度三者含义是什么?
4. 什么是仪表的更正值? 怎样获得仪表的更正曲线? 更正曲线有何用途?
5. 校正 30mA、2.5级电流表, 现有下列四块标准电流表:
① 100mA, 0.5级; ② 50mA, 2.5级; ③ 150mA, 0.2级;
④ 50mA, 0.5级。问选哪一块表最合适? 为什么?
6. 用一块量程为150V、1.0级的电压表测量某电压, 读数为80V。
 - ① 试计算测量结果的准确度。
 - ② 若表的读数为60V, 其准确度是多少?
 - ③ 若表的读数为30V, 其准确度是多少?
 - ④ 通过上面的计算, 能说明什么问题?
7. 用量程为10A的电流表测实际值为8A的电流时, 读数为8.1A。
 - ① 求测量的绝对误差和相对误差。
 - ② 若此时测得的绝对误差就是仪表的最大绝对误差, 问其准确度是哪一级?
 - ③ 如果仍用此表测量另一电流, 其读数为5A, 求此电流的实际范围。
8. 测4A的电流时, 要求测量相对误差小于 $\pm 1\%$ 。若选用量程为5A的电流表, 问它的准确度至少应是哪一级?
9. 图1-7(a)、(b)为伏安法测量电阻的两种电路, 被测电阻的实际值为 R_x , 电压表的内阻为 R_v , 电流表的内阻为 R_A , 求两种电路测电阻 R_x 的相对误差。