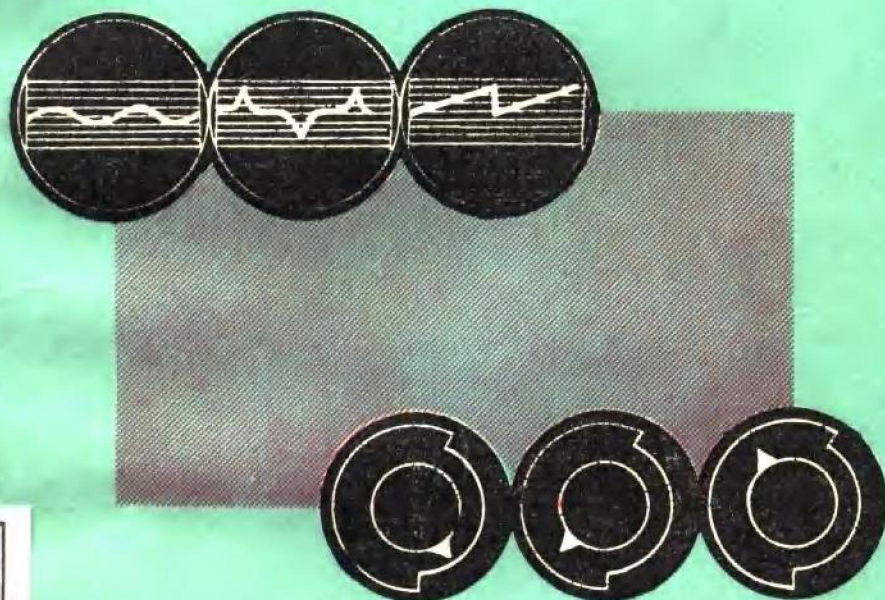


基础电工测量与校验

〔美〕L.M.汤姆逊 著



机械工业出版社

《基础电工测量与校验》一书主要内容分三大部分：一部分是电工仪表及其应用，包括直流电流表，直流电压表，直流电桥，整流式交流仪表及其应用等；第二部分介绍常用电子仪器及其应用，主要包括示波器，函数—信号发生器，衰减器及增益控制器，分贝测量与衰减器的应用等；第三部分重点讲述一些必要的测量方面的基础知识，如误差基础理论，分贝的概念等。该书着重从使用的角度介绍了常用电工仪表和电子仪器的结构、简单原理、使用方法、技术特性和检验方法，论述是全面的。通过学习可以正确掌握测试技术，并能正确理解和使用常用电工仪表及电子仪器。

该书可供大学、中专工院校学生及有关科技人员学习参考。

BASIC ELECTRICAL MEASUREMENTS AND CALIBRATION

LAWRENCE M. THOMPSON

ISA SECOND PRINTING APRIL 1981

* * *
基础电工测量与校验
[美] L. M. 汤姆逊 著
张万静 汤镛之 译
程少庚 校

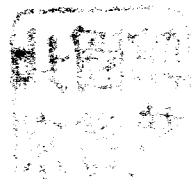
*
责任编辑：贡克勤
封面设计：田淑文

*
机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）
重庆印制一厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 850×1168 1/32·印张 8²/₈·字数 220 千字
1987 年 12 月重庆第一版·1987 年 12 月重庆第一次印刷

印数 0.001—5.000·定价：2.50 元

*
统一书号：15033·7028



译 者 的 话

《基础电工测量与校验》一书为美国德克萨斯州州立技术学院仪表系的 L. M. 汤姆逊 (L. M. Thompson) 博士所著。作者从使用的角度介绍了常用电工仪表和电子仪器的结构, 简要原理, 技术特性和检验方法等。论述较为全面。通过书中精心设计的实验项目可以深刻地体会理论讲述部分的概念, 使读者掌握测试技术并正确使用仪器仪表。

本书一个最鲜明的特点是理论与实际、实践和使用紧密结合。在每讲述一种仪表之后, 紧接着就安排有关熟悉这类仪表的构造、使用方法、原理和操作注意事项的实验项目, 这对实践性很强的“电工测量与校验”来说, 极其重要。本书较好地处理了电工仪表与电子仪器之间的关系, 适当地加强了电子仪器部分。在电工仪表与测量部分中, 以磁电式仪表为主, 且将整流式仪表 (即磁电式测试机构+整流元件) 置于较重要的地位, 然后将电磁式、电动式、静电式、热电式仪表汇成一章, 予以简要叙述。这与电工测量的新趋势相适应, 具有特色。总之, 作者在不失概念的科学性和严密性的前提下, 做到概念清楚, 少而精, 深入浅出, 通俗易懂。为此, 译者特将本书推荐给工科院校电类学生和广大工程技术人员参考。

本书由汤镛之 (第一至十三章) 和张万静 (第十四至二十五章, 附录 I、II) 翻译。陕西机械学院电工原理教研室副教授程少庚同志精心地进行了校订, 译者在此特致衷心感谢。

译者对原书的错误作了修订。

由于译者水平所限, 错误和不妥之处在所难免, 欢迎广大读者批评指正。

译者

一九八六年九月

目 录

第一章	名词术语	1
第二章	误差	10
第三章	直流电表	24
第四章	电表内阻 (实验项目一)	38
第五章	直流电流表	42
第六章	电流表的应用 (实验项目二)	56
第七章	直流电压表	60
第八章	直流电压表的应用 (实验项目三)	77
第九章	直流电表的负载效应	83
第十章	测量负载效应 (实验项目四)	94
第十一章	直流电桥	98
第十二章	直流电桥的应用 (实验项目五)	108
第十三章	示波器基础	111
第十四章	示波器的应用	123
第十五章	函数—信号发生器的应用	139
第十六章	示波器的应用 (实验项目六)	143
第十七章	整流式交流仪表	152
第十八章	整流式交流仪表的应用 (实验项目七)	165
第十九章	其它几类仪表的测量机构	170
第二十章 A	分贝	182
第二十章 B	衰减器及增益控制器	208
第二十一章	分贝测量与衰减器的应用 (实验项目八)	223
第二十二章	交流电桥	227
第二十三章	交流电桥的应用 (实验项目九)	239

第二十四章 阻抗的测量.....	243
第二十五章 阻抗的测量 (实验项目十)	248
附录 I 实验板.....	251
附录 II 器材一览表.....	256

第一章 名 词 术 语

本书主要讲述基础电工和电子学的测量。基本的被测量是伏特(V)、欧姆(Ω)和安培(A)，也涉及一些其它的被测量，如：频率、时间、亨利、法拉和电抗。在学会测量前，先要了解一些测量方面的词汇含义，这就是本章的内容。认真地学好本章十分重要，因为这些名词术语和定义将贯穿全书。

本章要求

学完本章，可以正确地将测量方面的名词术语与各种定义进行对照比较。这样，就能做到：

1. 正确区分误差类型（过失误差、系统误差、随机误差），以便对特定误差情况作出正确判断。
2. 正确选择“标准”以利应用（国际标准、一级标准、二级标准、工厂标准）。
3. 确定标准的数学词头符号（如本章所列出的）。
4. 弄清精密度与准确度的区别。

准确度和精密度

世界上没有绝对精确的测量，也没有完美无缺的测量。所有测量都是真值的近似，而测量准确度表示与真实值接近的程度。准确度、精密度以及分辨率均是与任何测量密切相关的名词术语，这三个术语中的任何一个都能用在各种测量上，即使是一个简单的线段测量，如图 1-1 所示。

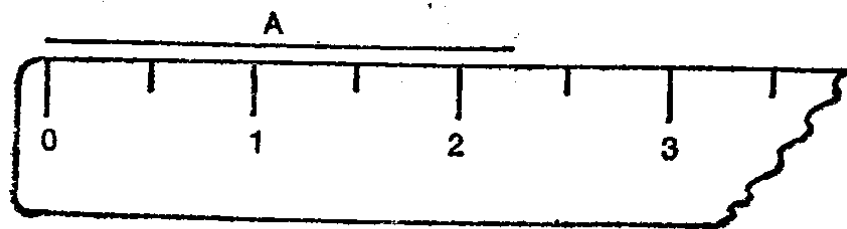


图 1-1 简单的线段测量

准确度是指测量值与真实值接近的程度 测量方法示于图1-1中，示值在 2 与 $2\frac{1}{2}$ 英寸[⊖]之间。如果所要求的准确度在 1 或 $\frac{1}{2}$ 英寸内，那么这一测量就是准确的；如果被测量要准确到 $\frac{1}{8}$ 英寸之内，那么用这把尺子准确度就太低了。用这把尺子测得图1-1线段长度约为 $2\frac{1}{2}$ 英寸。

精密度也就是再现性 为了提高精度必须要求准确。再现性指的是每次在对同一个真实值进行测量而能够获得相同测量值的程度。每次用图 1-1 的尺子测量线段 A ，都测得其长度为 $2\frac{1}{4}$ 英寸，确实，则图 1-1 尺子的精密度是 $\frac{1}{4}$ 英寸。所以用这把尺子，每进行一次测量都重复得到 $2\frac{1}{4}$ 英寸的测量值。

分辨率是指能够测量的最小量 对于图 1-2 的尺子，分辨率就是如何对被测线段找出最佳近似值。线段 A 为 $2\frac{1}{2}$ 英寸，而线段 B 为 $2\frac{1}{8}$ 英寸。很明显，如果没有线段 A 作比较，就很难说出它们之间差多少。若在图 1-2 上加上 $\frac{1}{4}$ 英寸刻度，如图 1-3，就很容易测出其变化值了。

通过增加 $\frac{1}{4}$ 英寸刻度，准确度提高了，因为在 2 英寸和 $2\frac{1}{2}$ 英寸之间增加了刻度，使测量值更为接近真实值；精密度也增加了，这是因为对于每次测量所能获得同样量值的可能性增加了，分辨率更好了，因为检测线段长度的变化更容易了。

提问：是否存在没有精密度的准确度？

⊖ 1 英寸等于 2.54cm。——译者注

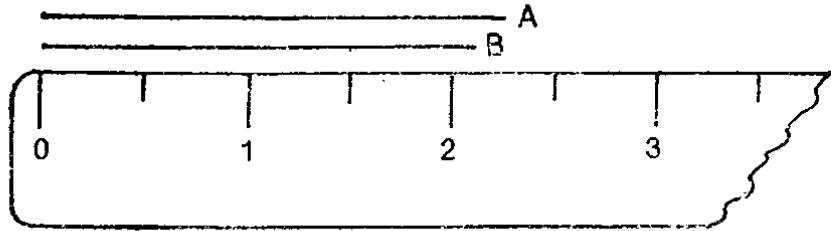


图 1-2 在 $\frac{1}{2}$ 英寸刻度下比较

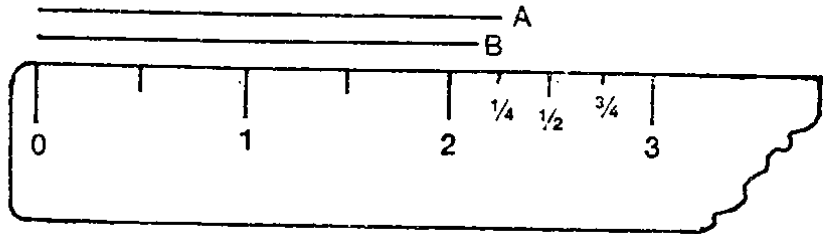


图 1-3 在 $\frac{1}{4}$ 英寸刻度下比较

答：否。所谓准确度指的是接近实际值的程度。就准确度而言，每测量相同的量值应当具有相同的读数。只有这样才能使每次测量获得接近真实值的读数。而精密度的定义是指：重复相同的测量，达到相同量值的程度。

提问：是否存在没有准确度的精密度？

答：所谓精密度指的是测量的再现性。如果对于每次测量都获得相同的值（这里，实测值可能是对的，也可能是错的），而测量装置又是精确的，那么，答案为“是”。举例，见图1-4。线段 A 长 $2\frac{1}{4}$ 英寸，尺子精确到 $\frac{1}{4}$ 个单位，然而尺子是米制的，如果将测量值读作英寸，则测量是错的，但它是精密的。

最小计量差

假设进行四次测量，读数记录如下：

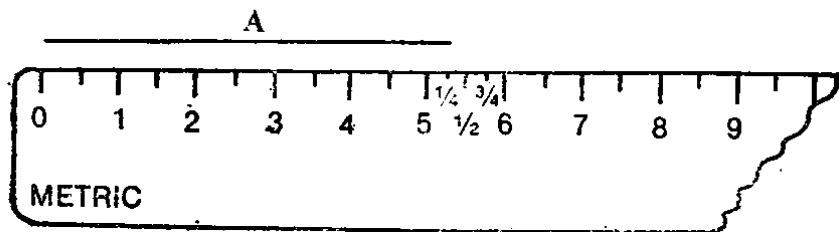


图 1-4 米制尺

$$2.25 \text{ 英寸} \quad \left(2\frac{1}{4} \text{ 英寸}\right)$$

$$2.30 \text{ 英寸} \quad \left(2\frac{1}{4} \text{ 英寸} + 0.05 \text{ 英寸}\right)$$

$$2.20 \text{ 英寸} \quad \left(2\frac{1}{4} \text{ 英寸} - 0.05 \text{ 英寸}\right)$$

$$2.25 \text{ 英寸} \quad \left(2\frac{1}{4} \text{ 英寸}\right)$$

它们彼此之间的读数差为0.05英寸。没有出现比这更大的差值，所以0.05英寸是上述测量的最小计量差。最小计量差的确定，取决于标尺的分度值。标尺的分度越细，最小计量差也越小。

最小计量差与精密度有关。测量的精密度由数值表示。若要精密度高，必须使每次相同的测量获得相同的量值。最小计量差也是由标尺的数值或测量装置的数值所决定。

准确度怎样表示？它可以用误差的百分比表示，也可用真实值的容许偏差表示。下面公式用于计算测量准确度：

$$\frac{\text{真实值} - \text{测量值}}{\text{真实值}} \times 100\% = \% \text{ 百分比准确度}$$

许多仪表制造厂采用：

$$\frac{\text{真实值} - \text{测量值}}{\text{测量值}} \times 100\% = \% \text{ 百分比准确度}$$

当然，这个公式只适用于仪器仪表。

通过本讲，将学会如何进行测量和计算准确度的百分值。为了使上述第一个公式实用，可改写如下，并可任用其一：

$$\frac{\text{真实值} - \text{测量值}}{\text{真实值 (由标准表实测)}} \times 100\% = \% \text{ 准确度}$$

或

$$\frac{\text{测量1} - \text{测量2}}{\text{测量1}} \times 100\% = \% \text{ 误差}$$

举例

如果真实值（实际值）为10.0V，由仪表测出的测量值为10.5V，那么仪表的准确度为多少？

经计算得 $\pm 5\%$ ，这表明测量引起的百分误差。当已知一仪表的百分准确度时，则可由测量值得出其真实值的范围。

举例

见图 1-5，电表实际读数为 10.0V 。如果电表的标称准确度为 $\pm 5\%$ ，那么真实值的范围是多少，亦即真实值为从几伏至几伏的范围内？

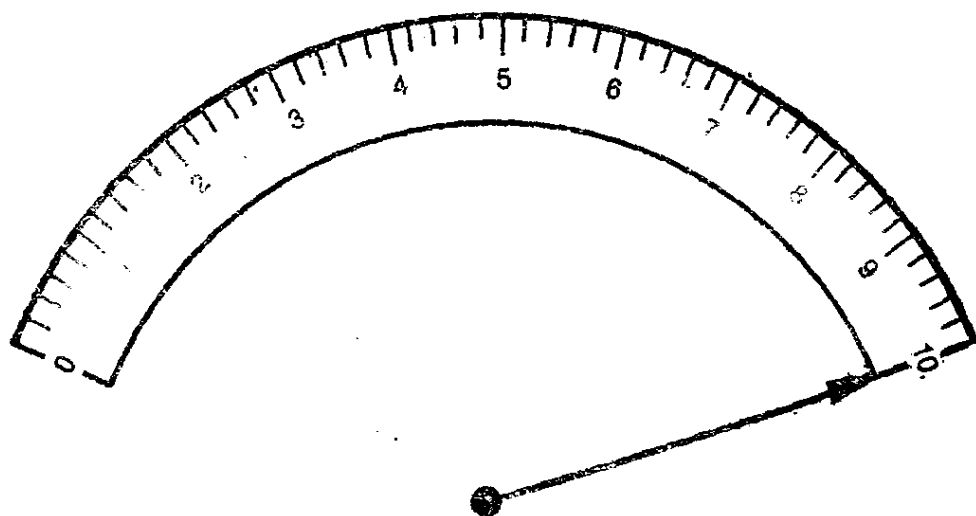


图 1-5 电表读数为 10.0

由于 $\pm 5\%$ 等于 ± 0.05 ，而电表读数为 10.0V ，由其标称准确度，可以得出电表读数与真实值之间的差为： $10.0\text{V} \times 0.05 = 0.5\text{V}$ 。其真实值范围为 $10.0\text{V} \pm 0.5\text{V}$ ，或者从 9.5V 至 10.5V 。这并不是说所有 9.5V 至 10.5V 之间的量值电表均读作 10.0V 。其含义是，当电表读数为 10.0V 时，实际的电压将在上述范围内的某一点上。但是 10.0V 的可能性要比 9.5V 至 10.5V 之间的任何一个值都大。如果实际电压值不变（不管它的真实值在 9.5V 至 10.5V 的哪一点上），只要每次测这个电压总是得到 10.0V 量值，则电表可谓精确的。

该仪表的精密程度怎样？仅仅作一次测量是不能确定其精密程度的，而且实际值又在 9.5V 与 10.5V 之间，所以这个刻度盘对这个仪表并不适当。对于这个刻度盘要求仪表的准确度在 2% 或更高些才能完全适用（因为 2% 的容许误差范围为 9.8V 至 10.2V ，

正好在刻度误差范围内)。精密度与读数的次数和读数间的偏差有关。如果读数为10次,最大偏差为0.2V,那么电表的精密度为0.2V或2%。实际上该电表刻度的分辨率为0.2V。

对于相同精度的电表,可以有几种方法获得较好的近似值,这将在第二章讲述。现在,我们将前面的图1-3重画于图1-6中。

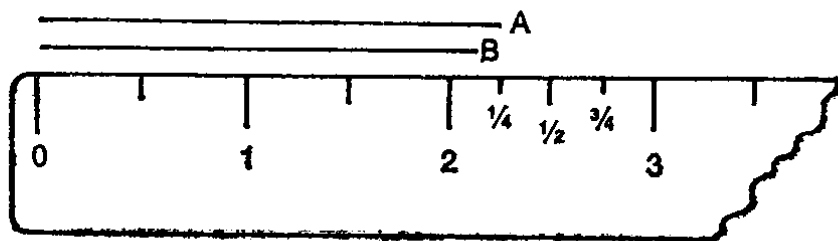


图 1-6 重画的图1-3

在简单的测量中,会有几种不同形式的误差不知不觉地出现。其中一种为过失误差——一种人为的误差。不正确的量器,不正确的刻度,不正确的内推法等会引起这种误差。由图1-6可见:

1. 线段的末端没有真正对准尺子的零点。
2. 尺子刻度读错产生观察误差。这是由于从不同的角度观察所产生的视差,或是看错了刻度。
3. 将米制尺读成英制尺等等。

所有这些都是人为的误差,也被称作过失误差,这种误差在各种测量中都有可能产生。

此外,还有另一种误差也会在简单的测量中出现,叫系统误差。它是一种设备误差,包括设备准确度、精密度、校正情况和操作中的容差。由图1-6可见:

1. 尺子的物理变形。
2. 用笔作记号与尺子的刻线粗细不一致。
3. 尺子的刻度不准确。
4. 尺子受潮后膨胀。

系统误差通常不如过失误差引人注目。对于一系列测量,过失误差通常趋于一定的限度,甚至可以忽略,而只剩下系统误

差。

图 1-6 尺子的刻度，除非产生机械性破坏，其误差只取决于制造厂，其刻度的精确度决定于制造厂所用的标准尺的准确度。

标准

每个测量装置都必然涉及各种标准。在科学和技术领域里，目前常用的长度单位是米。标准米是根据氪的辐射波长数作为基准的，这个标准及其测量装置现放在法国。对于所有的非导出标准（基本标准）都放在法国，作为国际标准。

国际标准是测量的基本单位，它不是由任何别的单位导出的。

每个国家，当然也有他们自己的标准，但这些标准不时地要同国际标准进行比对。这就是一级标准。美国的一级标准放在华盛顿国家标准局。

计量测试站放的标准叫二级标准，它不时地要与一级标准进行比对。

与大家接触最多的标准是工厂或车间标准。绝大部分工厂和设备都用这种标准。这种标准不如二级标准精确，它要求周期地同二级标准进行校对。但工厂标准可以作为国际标准的传递，形成测量的基本单元。

随机误差

还有一种误差这里必须提一下，这就是随机误差。这种误差很难预测，通常只影响测量中的一个方面。随机误差符合概率定律，并且能进行运算，但这超出了本书的讲述范围。

结论

1. 准确度是一种相对的测量概念。
2. 精密度是测量的再现性。
3. 分辨率是所能测出的最小量值。
4. 过失误差是人为误差。
5. 系统误差是设备误差。
6. 随机误差较难预测。

7. 有四种标准等级：国际标准，一级标准，二级标准，以及工厂或车间的标准。

还有一点应当提一下，就是十进数词头的表示，这在电工学和电子学测量方面经常用到。

吉 (千兆)	1×10^9	用 G 表示
兆 (百万)	1×10^6	用 M 表示
千	1×10^3	用 K 表示
毫	1×10^{-3}	用 m 表示
微	1×10^{-6}	用 μ 表示
纳 (毫微)	1×10^{-9}	用 n 表示
皮 (微微)	1×10^{-12}	用 p 表示

练 习

1. 如果某一电压的真实值为10.00V，电表读数为9.25V，测量准确度为多少？

2. 如同样的测量做四次，得到的读数如下：

9.25

9.26

9.24

9.25

则该读数的最小计量差为多少？

3. 根据下面第一列数值找出相对应的第二列数值。

第一列	第二列
a) 1500000Hz	1) 1mA
b) 150000 Ω	2) 0.001 μ F
c) 0.00015V	3) 15ns
d) 0.000000001F	4) 150k Ω
e) 0.000000015s	5) 1.0pF
f) 0.000000000001F	6) 1.5GHz
g) 1500000000Hz	7) 1.0 μ V

h) 1200000Ω 8) 0.15mV i) 0.000001V 9) 1.5MHz ✓ j) 0.001A 10) $1.2\text{M}\Omega$

4. 一个仪表维修车间所用的标准是哪一级标准?

5. 二级标准需要通过谁来校正?

6. 根据下面第一列术语或定义找出第二列相对应的术语或

定义:

第一列		第二列	
a)	过失误差	1)	再现性
b)	系统误差	2)	观察误差
c)	分辨率	3)	在华盛顿国家标准局保存的标准
d)	准确度	4)	在计量测试站的标准
e)	视差	5)	与量值接近的程度
f)	国际标准	6)	最小可测量
g)	一级标准	7)	人为误差
h)	二级标准	8)	在法国保存的标准
i)	工厂标准	9)	工厂常用的标准
j)	精密度	10)	设备误差
k)	真实值	11)	世界的真正量值

第二章 误 差

在第一章已学过,不可能存在绝对准确的测量,在被测值和真实值之间总是存在偏差,这种偏差就叫做误差。本章讨论如何预估和纠正测量误差的方法,它可以应用统计法和校正曲线法来实现。

本章要求

学好本章,须掌握:

1. 用统计学方法分析测量装置并获得:

- 1) 算术平均值
- 2) 各自独立的偏差
- 3) 平均偏差

2. 绘制测量装置的校正曲线。

3. 用校正曲线纠正仪表读数。

由第一章已知有三种测量误差:过失误差(人为误差)、系统误差(设备误差)和随机误差(不可预料的误差)。对于某些用于校正系统误差和随机误差的方法也可用在过失误差上。

定义

误差 指的是与真实值之间出现的任何偏差。

算术平均值 指的是测量装置的平均值。所谓平均值是将所有测量值之和除以测量次数。

偏差 指的是测量装置的各测量值的算术平均值与每个测量值之间的差值。

容差 指的是与规定值之间的偏差,通常标在元件上(如电阻器、电容器等),表示元件所具有的标称值的范围。

准确度 指的是测量装置的测量值与真实值之间偏差的百分数。

范围 指的是在准确度或容差规定下的真实值所覆盖的区

域。

图2-1列出电表的读数。电表的保证准确度是5%，刻度是0~10V。通过仔细观察这些测量值，如何推测其真实值？能否得出其真实值的近似值？

通过仔细观察，其真实值大致是10V。也可以通过计算求近似的真实值，不难发现电表读数的平均值非常接近测量的真实值，这个过程叫做求算术平均值。

求平均值的公式是：

$$\frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}{n} = \bar{m}$$

其中 $\bar{m}$ 为平均值， m 为测量值， n 为总的测量次数。

用图2-2的数值求得平均值。

测量次数	被测值	测量次数	被测值
n	m/V	n	m/V
1	9.8	1	9.8
2	10.3	2	10.3
3	10.0	3	10.0
4	9.7	4	9.7
5	10.2	5	10.2
6	10.0	6	10.0
7	9.9	7	9.9
8	10.0	8	10.1
9	9.9	9	9.9
10	10.1	10	10.1
算术平均值 $\bar{m}=10.0V$			

图 2-1 电表的读数

图 2-2 求平均值

其答案为10.0V。

下一步求每个测量值的偏差。它可由各个测量值与平均值之差求出。

举例

图2-3，对于测量1，偏差值为-0.2，它是实际测量值9.8和平均值10.0的差。

$$9.8 - 10.0 = -0.2$$

测量 2 的偏差值为 +0.3，它是实际测量值 10.3 和 平均值 10.0 的差。

$$10.3-10.0=+0.3$$

依此算出图2-3的各偏差值，填入d这一列里。所得答案依次应是：-0.2，+0.3，0，-0.3，+0.2，0，-0.1，+0.1，-0.1，+0.1。

下一步求平均偏差值，为什么？因为平均偏差值越低，测量值或测量装置的精密度就越高。同求算术平均值的方法一样，将偏差的平均值求出来。

偏差是有正负号的。求平均偏差只要绝对值。求平均偏差的公式为：

$$\frac{|d_1|+|d_2|+|d_3|+.....|d_n|}{n}=\bar{D}$$

n	m	d
1	9.8	_____
2	10.3	_____
3	10.0	_____
4	9.7	_____
5	10.2	_____
6	10.0	_____
7	9.9	_____
8	10.1	_____
9	9.9	_____
10	10.1	_____

图 2-3 偏差数值表

n	m	d
1	9.8	-0.2
2	10.3	+0.3
3	10.0	0.00
4	9.7	-0.3
5	10.2	+0.2
6	10.0	0.00
7	9.9	-0.1
8	10.1	+0.1
9	9.9	-0.1
10	10.1	+0.1
n=10	$\bar{D}$ =平均偏差=_____	

图 2-4 求平均偏差数值

求出图2-2测量的平均偏差数值如图2-4。

将偏差的总和(1.4)除以测量次数(10)，得出平均偏差 值为 0.14。它的含义是：电表读数偏离平均值 平均 为 0.14。需要指出，平均偏差越小，该测量方法或测量设备就越精确。因为读数偏离平均值越小，说明它们彼此之间越接近，所以相同测量值所出现的重复率也越高。