

21世纪应用型本科系列教材

大学物理实验

(少学时)

李寿岭 刘会玲 王小克



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

21世纪应用型本科系列教材

大学物理实验

(少学时)

李寿岭 刘会玲 王小克



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西安 ·

内容提要

本书分为六部分,包括误差及数据处理、常用物理量的测量及测量仪器、实验方法与测量技术、实验设计的基本知识、基本物理实验和附录。其中,基本物理实验按力学、热学、光学、电磁学、近代物理学等学科汇编,共10个普通物理实验;每一实验的开始都有一简短的引言,叙述该节实验所需要的物理学基本概念和定律。

本书适合作为高等院校物理实验课程教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验(少学时) / 李寿岭,刘会玲,王小克编.
西安:西安交通大学出版社,2007.3

(21世纪应用型本科系列教材)

ISBN 978-7-5605-2426-9

I. 大... II. ①李... ②刘... ③王... III. 物理学—
实验—高等学校—教材 IV. 04—33
中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第007692号

书 名: 大学物理实验(少学时)
编 著: 李寿岭 刘会玲 王小克
出版发行: 西安交通大学出版社
地 址: 西安市兴庆南路10号(邮编:710049)
电 话: (029)82668357,82667874(发行部)
(029)82668315,82669096(总编办)
印 刷: 陕西江源印刷科技有限公司
字 数: 202千字
插 页: 1
开 本: 727mm×960mm 1/16
印 张: 11
版 次: 2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-5605-2426-9/O·256
定 价: 15.00元

版权所有 侵权必究

前 言

本书通过 10 个实验的诸个教学环节,旨在培养学生基本技能和基本素养,并希望把这些物理思想和实验方法引伸到社会科学的相关领域。

为了使学生能有效地掌握课程要求的基本知识,在具体实验前面介绍一些科学实验的基础理论,在实验的选题和所用的仪器方面,尽可能地通用、多样和简单。目的是为了突出物理知识,以期达到触类旁通。

本书包括绪论、误差及数据处理、常用物理量的测量及测量仪器、实验方法与测量技术、基本物理实验和附录等。

第一部分绪论主要介绍课程特点及实验的一些基本要求。

第二部分误差及数据处理,主要介绍一些误差理论和实验数据处理方法。

我们选用了传统的误差和数据处理,而没有采用不确定度的概念,是因为这样做可以使用较少的数学概念和方法,又能满足社会科学相关领域对建模、统计、分析等方面的要求。

第三、四部分介绍了一些常用的实验方法和测量技术,目的是使学生了解和掌握解决实际问题的能力。由于自然科学和社会科学的交叉,使得它们具有一些共性,如果有助于学生把它们扩展到社会科学的某些分析和应用中去,则是我们所希望的。

第五部分是基本实验。我们选题的原则是:数量少一些(受学时限制),少写一些写了又不做的实验。内容的选取是从力、热、光、电、近代等物理学科中,优先考虑那些容易和社会科学建立某种联系并容易引伸的项目。而每个实验的思路和方法多一些,基础和思路宽一些,尽量减少为单一测定某一物理量而设定的具体过程,适当地拓宽物理模型和实验方法的思路,希望多一些举一反三的机会,这样做不仅可以增加内容,也便于因材施教。

考虑到目前获取各种信息的途径和手段已极为丰富,所以,在附录中我们只是摘录了一些常用的数据资料,以便于学生做实验和写报告时的实际应用。

本教材无论在构思、选题还是论述及分析中还存在许多欠妥之处,敬请使用它

的同学和老师不吝指教,以期再版修订时,得以逐步改进!

实验教材历来是实验室全体同志共同劳动的结晶,在本书构思和编写过程中,主要参考了西安交通大学的物理实验教材,同时得到史彭、李恩普和张昌民等各位老师的指导和帮助,在此谨致以衷心的感谢!

注1:本教材适用于16~20学时的教学。

注2:在教学安排上,建议除了选做8个实验外,在课程的开始和中间(4次实验之后)各安排一次讲座。

第一次:介绍课程并讲解基础知识(误差、有效数字及实验方法等);

第二次:总结前4次实验的问题,提高并明确后4次实验的内容及要求。

编者

2007年1月

目 录

绪 论	(1)
第1章 误差与实验数据处理	(3)
第1节 测量误差及其分类	(3)
第2节 直接测量结果的误差估算	(9)
第3节 间接测量结果的误差估算	(12)
第4节 关于误差估算的总结	(16)
第5节 有效数字及其运算	(18)
第6节 用列表法和作图法处理数据	(21)
第7节 逐差法处理数据	(25)
第1章附录 与随机误差有关的概率和统计初步知识	(27)
习 题	(33)
第2章 常用物理量的测量及测量仪器	(36)
第1节 单位制	(36)
第2节 长度的测量	(38)
第3节 时间的测量	(48)
第4节 质量和压力的测量	(51)
第5节 温度的测量	(58)
第6节 电磁学量的测量	(65)
第3章 实验方法与测量技术	(73)
第1节 实验装置的基本调整	(74)
第2节 比较测量法	(77)
第3节 放大测量法	(81)
第4节 补偿法	(82)

第 5 节	零示法	(86)
第 6 节	模拟法	(87)
第 7 节	替代法	(88)
第 8 节	非电量的电测技术	(90)
第 9 节	光测技术简介	(93)
第 4 章	实验设计的基础知识	(95)
第 1 节	物理思想(模型)的建立	(95)
第 2 节	仪器的选用与配置	(97)
第 3 节	实验程序的制定	(99)
第 5 章	基本实验	(101)
实验 1	物质密度的测定	(101)
实验 2	液体粘滞性的认识	(108)
第 5 章附录 1	测量显微镜	(113)
实验 3	三线悬摆的研究	(114)
实验 4	金属材料的弹性模量	(118)
第 5 章附录 2	标尺(尺读)望远镜(JCW-1 型)	(124)
实验 5	小灯泡伏安特性的研究	(126)
实验 6	桥式电路的应用	(129)
实验 6-A	用惠斯通电桥测定电阻温度系数	(131)
实验 6-B	用开尔文(双臂)电桥测定金属材料的电阻率	(133)
实验 7	用稳恒电流场模拟静电场	(135)
实验 8	示波器的应用	(140)
实验 9	分光计的调节和使用	(151)
实验 10	光电效应	(158)
附录 A	中国法定计量单位	(163)
附录 B	常用物理数据	(166)

绪 论

一、物理实验课程的地位、作用和任务

科学实验是人们认识和研究客观世界的手段和基础。从历史上看科学实验源自自然科学,而科学技术的发展和各个学科的交叉与渗透,使得学科之间的联系愈来愈密切,那些原来应用并指导着自然科学的一些理论、方法和规律,在社会科学乃至人文、艺术、特别是经济管理方面,也在逐渐被引用、研究和发展。例如,我们在总体规划和管理方面,常常用到的一个思路和方法叫做宏观调控,它实际上包含了广泛而深入的数学和物理概念。

从物理实验课程的内容来看,无论它的物理思想、物理模型、样品的选择,到实验的具体过程、数据(试样)的采集及综合处理、结果评价等各个方面,都可以引伸到管理(包括人文、财经、社会等)领域的许多方面,并有重要的参考价值和启迪作用。事实上,有没有严格、周密的物理思想和严谨、认真的科学实验素养,对培养学生理论联系实际的能力、实事求是的品德和坚韧不拔的探索创新意识都有其重要的作用和价值,这就是对非理工学科开设物理实验课程的初衷和目的。

通过本课程的学习,应该达到如下目的。

1. 通过对实验现象的观察和分析,学习研究客观世界物质运动规律的方法和手段。
2. 通过实验过程的数据采集,学习认识和记录客观现象,量化和分析客观规律的基本途径和技巧。

在实验教学中,学生应努力做到以下几点。

1. 注意实验现象的观察和物理量的测量,复习和充实相关的物理理论知识。
2. 注意培养自己的一些基本能力:
 - (1)阅读(教材、说明书、参考资料等);
 - (2)动手(使用仪器、量具及各种工具仪表,电路、光路及机械装置的调整);
 - (3)采集(各种数据及信息的采集,样品的选择等);
 - (4)综合(分析、评价和报告)。

3. 自身素养的锻炼与培养,务必做到实事求是、认真负责、刻苦钻研和积极进取。

二、物理实验课程的基本程序

物理实验课是在教师指导下,以学生自己动手独立完成一系列实验的一门课程,它由预习、课堂操作和报告三个环节组成。

1. 预习

预习是进行实验以前必须做好的工作。学生应通过阅读实验教材,参考实验仪器及相关资料,明确所做实验的目的、任务和所依据的理论知识,了解所用仪器、工具,及器材的性能、使用及特征,准备好要用的数据表格及自拟的实验步骤,以及拟向教师咨询的问题。

2. 课堂操作

进入实验室,不要急于动手,要先清点实验仪器及器材,并准备回答教师的质疑,在全部明确之后,按自己的安排,布置仪器、调整装置、连结电路、光路,并全部调整至正常使用状态。

按自己拟定的步骤进行实验、测试并记录数据(数据记录用规定的记录纸),并请教师审定。

实验完成后,应整理好全部数据,经教师审查签字后,将仪器设备复原,填写好使用记录,方可离开实验室。

3. 报告

实验做完后,用规定的纸张和规范的格式,书写正式的实验报告。

实验报告应有如下内容:

- (1)实验名称、实验目的、使用仪器、(名称、规格、数量)、实验原理、主要步骤;
 - (2)数据记录及处理、实验结果与评价(含误差计算与分析、实验心得及建议)。
- 报告要按规定的时间和方式交任课教师审阅。

第 1 章 误差与实验数据处理

第 1 节 测量误差及其分类

1.1.1 测量与真值

任何一个物理量,在一定的条件下都有一个客观存在的值,叫做真值,例如某一物体在常温条件下的几何形状及其质量。真值是一个抽象的概念,一般来说无法得到这个值,通常测量所得到的值总是和真值有一定的差异。为了实际应用方便,一般对真值以下述几种方式来约定:理论真值(如四边形内角和为 360°)、公认真值、计量约定真值和标准器的相对真值等。在以后讲到的误差计算中还常常用多次测量的算术平均值来代替真值。我们在实际应用中,将根据要求和可能在相应的手册及标准中找到所需要的真值。

测量是用实验的方法通过一定的量具(或仪器)寻找真值的一组操作。一般的过程是用选定的标准量和被测量在一定条件下进行比较,用被测量是标准量的倍数和标准量的单位来表征测量的结果。因此,测量的必要条件应该是被测物体、标准量及操作者,测量结果应是一组数字和单位,以及与之相关的测量手段及条件。例如测量一段金属丝的直径,体现标准量的是千分尺,由人来操作,如果得到的结果是以毫米为单位标准的 3.257 倍,则直径的测量值即为 3.257mm,量具为千分尺,测量环境温度为 20.0°C 。

凡是能够找到与被测量同一量纲而且可以通过直接进行比较得到结果的一组操作,叫做直接测量,例如用米尺测量物体的长度、用天平称量质量等。但是更多的物理量很难直接找到单一的与之相比较的标准量,例如物质的密度、某地的重力加速度等。为了测得这些物理量,常常借助某些直接测得量,通过一定的函数运算求出被测量,这样一组操作和运算过程叫做间接测量。例如某一金属立方体的密度是通过对其质量、长、宽及高的测量,根据密度的定义式

$$\rho = \frac{m}{l \cdot b \cdot h}$$

求出的。式中 m 表示质量, l, b, h 分别表示长、宽、高, ρ 表示该金属材料的密度。由于材料的密度和它的温度有关, 因此, 这个测量结果还应注明测量过程的条件参数——环境温度, 这个结果才是完整而且有意义的。

上述分析为我们提供了一个重要的思路, 即在实际测量中, 对于那些难于直接测量的物理量, 我们可以在与之相关的所有函数表达式中选择最方便可行的一个, 作为测量的依据, 在后面的实验中我们可以充分体会和理解这点。又因为这类函数表达式常常不是唯一的, 就出现了多种方法和手段。例如, 根据欧姆定律的表达式可以用伏安法测电阻, 根据电桥平衡原理可以用电桥法测电阻; 根据替代原理可以用替代法(比较法)测量电阻等等。

由于物理学发展过程中出现过不同的单位制, 为了统一, 国际计量大会于 1960 年制定了通用的国际单位制(即 SI), 我国已采用, 并根据我国具体情况作了一些补充(见附录一), 在今后的测量中必须按此规定执行。

1.1.2 误差的定义及分类

误差的定义是指测量值和真值的差异。设某被测量的真值为 X_0 , 测量值为 X , 则其误差 ΔX 表示为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1.1)$$

在实际测量中, 由于真值不可知的缘故, 除了可选用前述的某种相对真值外, 常常用多次测量的算术平均值代替真值 X_0 , $(X - \bar{X})$ 将不再是误差而叫做偏差。由于真值的不可知性, 就决定了误差无法计算, 也就是说实际能计算的只有偏差, 因而在实际应用中也就不再细分二者的差异而统称误差了。

1. 绝对误差和相对误差

由式 1.1 所计算的结果叫做绝对误差, 它的数值可正可负, 它是两个相同物理量之差, 所以它是有量纲的, 它表示测量值偏离真值的程度。例如测量某一物体的长度, 它的标称值 $L_0 = 75.00 \text{ mm}$, 测量值是 $L = 74.95 \text{ mm}$, 根据定义, 其测量误差 $\Delta L = 74.95 - 75.00 = -0.05 \text{ mm}$, 它表示该次测量值偏离真值是 0.05 mm 。同样测量一块金属板的厚度, 它的标称值 $d_0 = 1.00 \text{ mm}$, 测量值 $d = 1.05 \text{ mm}$, 其绝对误差 $\Delta d = 0.05 \text{ mm}$ 。显然, 对不同物理量的测量, 它们的绝对误差可能相同, 但直观结果告诉我们, 对测量结果的影响是不同的。为了更全面地表征测量结果, 我们引入一个相对误差的概念, 用 E 表示, 定义为

$$E = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1.2)$$

例如上面物体长度测量时, 它的相对误差 E_L 表示为

$$E_L = \frac{-0.05}{74.95} \times 100\% \approx -0.07\%$$

而薄板厚度测量的相对误差 E_d 表示为

$$E_d = \frac{0.05}{1.05} \times 100\% \approx 4.8\%$$

由于分子分母是同量纲的,因此相对误差是一个没有量纲的百分数;显然 $E_d > E_L$,这说明虽然两组测量的绝对误差大小相同,但其相对误差却大不一样,这就客观地说明长度测量的精度要比厚度测量的精度高得多。还要说明的是有的在计算相对误差时是以真值 X_0 作分母,且把这个定义为百分误差,由于测量值、平均值及相对真值差异不是很大,在计算相对误差时常常不易区分,所以在较多的情况下,常常将二者合而为一,不再区别。

综上所述,从计算和表示的形式来看,误差可分为绝对误差(有量纲)和相对误差(无量纲的纯百分数)两种,它们分别表示了误差绝对值的大小和测量精度的差异。

2. 随机误差和系统误差

测量误差以其产生的原因及处理的方法不同可分为两大类,一类是无规律、随机变化的,但当测量次数无限增加时,它仍有一大致的分布,可以用统计的方法来处理。另一类是有一定的规律或特征,一般都可找到原因并可设法减小乃至消除的。

第一类误差叫做随机误差,它是由一些不可控制的原因造成的。例如水银温度计的毛细管直径不均匀,其变化带有一定的随机性,测量时,虽然相同的温升引起水银体积相同的变化,但由于管径不均匀,其示值可能有一定涨落。也包含测量者和测量条件不可控的因素造成的误差,如读数时每次眼睛的视角并不完全一致引起的读数误差,测量仪器放置的位置并不完全相同,测量时环境温度、风速及电磁场的变化等,都可能使测量结果产生一定的变化。但当尽量保持测量条件不变而将测量次数增加时,将会发现如下特点:

第一,从绝对误差的数值来看,数值小的比数值大的出现的可能性大,且数值愈小,出现的可能性愈大;

第二,从绝对误差的符号来看,出现正误差和负误差的可能性大致相同,因此当测量次数增加时,它们将可能正负抵偿;

第三,绝对误差值很大的误差出现的可能性很小,甚至趋于零。

这就是通常所说的随机误差的单峰性、对称性、有界性和抵偿性。随机误差的特点,符合数学上的正态分布,因此可以用正态分布来表达并且进行数学处理。可以证明,在修正或消除第二类误差之后,若测量次数无限增加,则其多次测量的平均值将无限趋近于真值。

第二类误差包含系统误差及其它一切不能用统计方法处理的误差。

系统误差是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差的大小和符号(正、负)均保持不变或按某一确定的规律变化的误差。例如由于所依据的原理在使用中的近似所造成的(如伏安法测电阻时电表内阻引起的误差),或者由于仪器本身(含使用条件变化)缺陷造成测量结果偏大(或偏小)。这些误差一般情况下都可以找到原因并予以修正,所以又叫做可修正系统误差。在仔细分析时,常常将系统误差归纳为方法误差、仪器误差及环境或条件误差几部分。需要特别指出的是,在仪器误差中也含有一定的随机成分的误差,如刻度的不均匀、测量机构的非线性或不均匀等,它们是无法预先修正的,在处理时应归入第一类误差。

1.1.3 随机误差的估算

对千分尺校零后,测量一个钢球直径,数据如下:

测量次数 n	1	2	3	4	5	6	7
测量值 d/mm	2.145	2.148	2.150	2.138	2.152	2.144	2.147

对于这样一系列测量值,随机误差的估算通常有两种方法。

1. 平均误差(又叫算术平均误差)

在相同的条件下,在修正了可修正系统误差之后对被测量 X 进行 n 次测量,测量值为 x_1, x_2, \dots, x_n , 则其算术平均值 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3)$$

单次测量的绝对误差 Δx_i 为

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.4)$$

显然, Δx_i 的值其大小和正负各不相同,如果把各次测量值的绝对误差相加并求其平均,就得到平均绝对误差 $\overline{\Delta x}$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n}(|x_1 - \bar{x}| + |x_2 - \bar{x}| + \dots + |x_n - \bar{x}|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (1.5)$$

同样可以计算相对误差 E_d

$$E_d = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1.6)$$

将前述测量数据代入,可求得

$$\bar{d} = 2.146 \text{ mm}, \quad \Delta d = 0.003 \text{ mm}, \quad E_d = 0.14\%$$

2. 标准误差(方均根误差)

将各次测量的绝对误差 Δx_i 平方后求和,再求其平均而后开方,所得到的误差

叫做标准误差,其表达式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.7)$$

严格地讲,上式是在 $n \rightarrow \infty$ 时成立,但实际测量中 n 总是有限次,则上式 σ 变换为 S

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} \quad (1.8)$$

同理,其相对误差 E_s , 为

$$E_s = \frac{S}{x} \times 100\% \quad (1.9)$$

将前述数据代入以上诸式,就可求得

$$\bar{x} = 2.146 \text{ mm}, \quad \Delta S = 0.005 \text{ mm}, \quad E_s = 0.23\%$$

标准误差的意义是指这个测量列中单次测量值 x_i 的标准误差的大小。有时要求表征多次测量平均值 \bar{x} 的标准误差,则其表达式为 $S_{\bar{x}}$

$$S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (1.10)$$

将前列测量数据代入,可得 $S_{\bar{x}} = 0.002 \text{ mm}$

3. 两种误差的比较

从前列计算可以看出同样一组测量数据,其平均误差为 $\Delta d = 0.003 \text{ mm}$, 标准误差为 $S = 0.005 \text{ mm}$, 仔细分析上列数据,不难看出平均误差只是粗略地反映了误差的大小,而标准误差则反映了误差的分布,为了进一步说明这一问题,我们再引入两组测量数据。

$$\text{A 组} \quad x_i = 1.255, 1.256, 1.251, 1.250 \quad \bar{x}_A = 1.253$$

$$\text{B 组} \quad x_i = 1.253, 1.258, 1.253, 1.248 \quad \bar{x}_B = 1.253$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\Delta x_A} &= 0.03, \quad E_A = 0.24\% \\ \overline{\Delta x_B} &= 0.03, \quad E_B = 0.24\% \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{S_A} &= 0.003, \quad E_A = 0.24\% \\ \overline{S_B} &= 0.004, \quad E_B = 0.32\% \end{aligned} \right\}$$

对前列 A、B 两组数据,如果都用平均误差计算,则其绝对误差和相对误差都是一样的,没有区别。若用标准误差计算,则它们的绝对误差和相对误差都不一样。仔细分析数据可以看出, A 组测量数据的涨落小于 B 组,这就更清楚的说明,标准误差比平均误差能更全面的表征测量结果及其数据分布情况。但是平均误差计算比

较简单,因此在要求不高或数据离散度不大时,还是一种比较方便的方法,仍有一定的使用价值。

1.1.4 系统误差的处理方法

由于系统误差的特点,决定了它不能用增加测量次数来减少,因此在实验过程中,应尽可能地把所有产生系统误差的因素无遗漏地找出来,有针对性地加以消除。

系统误差的发现有时是很明显的,如理论要求无限大、均匀及某些因素不计等,在实验中无法完全满足,就会带来一定的系统误差。也可以从数据来分析,如绝对误差本应正负几率相同,但结果是绝对误差全部是正的(或全部是负的),这就说明必然有一个恒定的误差因素存在。还有一些更明显的因素,如电表或其它量具(如千分尺)的零点读数不为零,电压表的内阻(Ω/V)太小,电流表内阻过大等,这些都应采取一定的措施消除之。至于有些难以判断或发现的系统误差,如天平的不等臂,量具刻度的不对称(不均匀),量具的中心轴偏离,电表的磁场自然减弱等,就要靠细心地观察和实验经验来寻找,务使在综合评定时不重复,不遗漏。

下面介绍几种处理系统误差的方法。

1. 可定系统误差的消除

这类误差多是直接明显地表现出来的,应针对其产生的原因来消除。

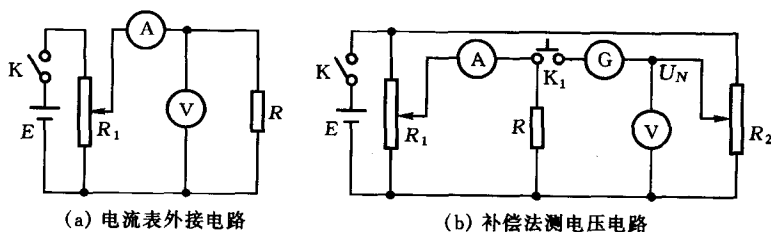


图 1-1 伏安法测电阻

例 1,伏安法测电阻。它依据的是欧姆定律,实验要求电压表内阻无穷大,电流表内阻为零。这是做不到的。如果将电路图进行一定的变换,由图 1-1(a)变换为图 1-1(b),变换成用补偿法测量电压,当调节 R_2 到电流计 G 示值为“0”时,相当于做到了电压表内阻 $R_V = \infty$,电流表读数就是流过电阻 R 的电流,从而消除了系统误差。

例 2,天平的不等臂误差又是一种可定系统误差。如果将被测物分别放在左右两盘,称得其质量为 m_1 和 m_2 ,将两次质量值乘积再开方作为测量值,或近似用 m_1 和 m_2 的平均值表示测量值

$$m = \sqrt{m_1 \cdot m_2} \approx \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \quad (1.11)$$

同样的情况,还可以用别的方法处理。例1中,若保证电路图1-1(a)中电压值和电流值不变,将被测电阻 R 换成另一个标准电阻箱,调节电阻箱之阻值,实现测 R 时的条件,即电流表和电压表示值不变,则电阻箱的示值就是被测电阻的阻值。

至于各种量具或仪表的零值不对,则应在使用前尽量予以校正。实在无法完全校正,则可作为零点读数在数据处理时予以消除。

综上所述,对于可定系统误差的消除,应该在正确校正仪器仪表的前提下,采用替代法(又叫代换法)和交换法(有时叫做对称观测法)实现。对于原理中要求的各种理想条件,不能在仪器或装置本身去消除(如伏安法测电阻中尽量增加电压表内阻),而应该从方法上(如用补偿法测电压)加以解决。

2. 未定系统误差的处理

这类误差多数以仪表或量具的精度或级别给出,它在整个测量过程中始终存在且处处存在,如量程在100 mm以内的一级千分尺的额定误差为0.004 mm,从它的分布规律来看,一般多视为均匀分布,无法消除,只能在总体误差计算时,把它作为后一个分量予以考虑。

第2节 直接测量结果的误差估算

由于任何测量总是含有误差,因此任一被测量的测量结果,都应该由被测量的量值和误差两部分组成,即

$$X = \bar{X} + \Delta x \quad (1.12)$$

一般情况下,被测量的量值用多次测量的平均值来表示,但也有只测量一次的情况。至于误差 ΔX 项,影响的因素很多,也是我们分析和计算的主要成分,我们将就不同情况分别予以介绍。

1.2.1 单次测量结果的表示

在测量过程中,有些物理量只允许测量一次,不可能再现;有许多被测量,其中某几个被测量在整个实验中所占的相对误差极小,可以忽略不计,没有必要多次测量;或者由于仪器的精度较低,多次测量的误差成分小于仪器的系统误差,致使多次测量的结果没有变化等等。这种进行多次测量没有可能或没有必要的情况,一般都只测量一次,就是所谓的单次测量。

对于单次测量过程,只有一个测量值,无多次测量的平均值,测量值是唯一的。

它的误差项 Δx , 则只能用仪器的额定误差来表示。由于它属不可定系统误差, 遵循均匀分布, 仪器的额定误差一般取极限误差, 通常在不与其它误差成分合成时, 就用仪器的额定误差作为单次测量结果的误差。例如, 用 0~25 mm 的一级千分尺测量某钢板的厚度 D 为 2.463 mm, 从手册查到它的额定误差为 0.004 mm, 则它的测量结果是

$$D = 2.463 \pm 0.004 \text{ mm}$$

$$E_d = \frac{0.004}{2.463} \times 100\% = 0.16\%$$

当测量不能在正常状态下进行时, 单次测量结果的误差应根据测量的实际情况和仪器误差进行估计。

1.2.2 多次测量结果的误差估算

同样用 0~25 mm 的一级千分尺对某一钢球的直径进行多次测量, 其测量结果为:

$$d_i = 1.006, 1.008, 1.002, 1.001, 0.998, 1.010, 0.993, 0.995, 0.990, 0.997 \text{ (mm)}$$

根据第一节随机误差的计算, 它的数据处理有两种方法。

1. 算术平均误差

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum d_i = 1.000 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 0.005 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$$

它的误差是由多方因素构成的。从可定系统误差来说, 因为它是直接测量, 若测量者能正确使用仪器并能正确读数, 记录的数据已经过零点读数修正(或已准确校正零位), 如果测量过程所用的时间不长, 在此期间内环境条件无明显变化, 则可认为可定系统误差已被消除。仪器的额定误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 是极限误差, 属不可定系统误差, 按均匀分布分析(参阅本章附录), 通常的处理方法是将它除以 $\sqrt{3}$, 再与算术平均绝对误差以方和根的形式合成构成总误差, 即

$$\Delta = \sqrt{\Delta d^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\Delta_{\text{仪}}\right)^2} \quad (1.13)$$

根据上式, 钢球测量结果的误差为

$$\Delta = \sqrt{0.005^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}0.004\right)^2} = 0.006 \text{ mm}$$

钢球直径测量结果为