

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

■ 主 编 王 锋
■ 副主编 邱深玉 李健文

中国科学技术大学出版社

DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

主 编 王 锋
副主编 邱深玉



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书包括绪论、基本仪器和基本测量、基础物理实验、综合设计实验、近代物理实验等五章,实验项目针对不同层次、不同专业的学生进行了系统的安排,突出对学生实践能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养,可作为高等院校理工科大学物理实验课的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王锋主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.7
ISBN978-7-312-02472-6

I. 大… II. 王… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 074533 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址:<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 安徽江淮印务有限责任公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 14.25
字数 278 千
版次 2009 年 7 月第 1 版
印次 2009 年 7 月第 1 次印刷
定价 25.00 元

前 言

本书以全国工科物理课程指导委员会制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》为指导,汲取了实验教学示范中心建设的成果,根据高校专业设置特点和实验设备的具体情况,结合大批教师多年的教学经验,在原讲义的基础上,吸收了国内同类教材的精华,编写而成。

本书内容共分为五章,第一章为绪论,介绍物理实验的目的、要求和进程,数据处理的多种方法,物理实验的技巧;第二章为基本仪器和基本测量;第三章为基础物理实验;第四章为综合设计实验;第五章为近代物理实验。

本书以培养学生的实践能力和创新能力为目标,根据“层次+模块”的创新人才培养模式,突出对学生实践能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养。在内容的组织上,实验项目针对不同层次、不同专业的学生进行了系统的安排,分为基础实验训练、综合应用能力训练、设计实验能力和科研能力训练等几个方面。在编写上尽量做到直观、简洁、实效。本书注重实验思维的培养,书中引入了丰富的背景知识和翔实的实验素材,引导学生进行更深入的创新实验和科学研究。

我们努力使本书达到形式上的多样性、层次上的立体性、内容上的丰富性、文字上的简洁性。

在本书编写的过程中,得到了龚建民副教授、熊华林副教授、陈小玲副教授的指导,获益良多,同时感谢桂卫军老师、傅雅卿老师、王叶安老师、何玉平老师为本书的编写做出的贡献。

本书可作为高等院校理工科大学物理实验课的教材或参考书。

王 锋

2009年2月

目 录

前 言	(i)
第一章 绪论	(1)
第一节 物理实验课程程序和实验报告的要求	(1)
第二节 误差分析和数据处理	(2)
第三节 物理实验的基本方法	(24)
第二章 基本仪器和基本测量	(33)
第一节 长度测量仪器	(33)
第二节 质量测量仪器	(43)
第三节 时间测量仪器	(47)
第四节 温度测量仪器	(49)
第五节 常用的电磁学仪器	(52)
第六节 常用的光学仪器	(64)
第三章 基础物理实验	(71)
实验一 刚体转动惯量的测定	(71)
实验二 弦振动实验	(77)
实验三 导热系数的测定	(82)
实验四 杨氏模量的测定	(85)
实验五 电阻元件伏安特性的测定	(89)
第四章 综合设计实验	(99)
实验一 液体粘滞系数的测定及液体粘滞性随温度变化的研究	(99)
实验二 用恒定电流场模拟静电场	(105)
实验三 惠斯顿电桥	(112)
实验四 霍尔效应实验	(116)
实验五 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线的测绘	(124)
实验六 分光计调节及棱镜折射率测量	(131)
实验七 牛顿环实验	(143)

实验八 电表改装与校准	(150)
实验九 金属箔式应变片性能——单臂电桥	(157)
实验十 光电传感器设计实验	(161)
实验十一 温度传感器特性实验	(169)
第五章 近代物理实验	(185)
实验一 迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(185)
实验二 密里根油滴实验	(194)
实验三 普朗克常数的测定	(202)
实验四 夫兰克-赫兹实验	(211)

第一章 绪 论

第一节 物理实验课程程序和实验报告的要求

大学物理实验课的完成需要经过预习、实验操作、处理数据并完成实验报告等过程。

一、预习

实验课前应认真预习,仔细阅读实验教材和相关的资料,弄清实验的研究对象,实验原理和实验方法、步骤,了解仪器的结构及调节要求.在充分预习的基础上用简洁的科学语言写好预习报告.

二、实验操作

实验课是锻炼实践能力、培养创造精神的极好机会.学生应该像科学工作者那样要求自己,井井有条地布置仪器,安全操作,细心观察实验现象.应注重实验过程,独立思考,手脑并用,提高运用理论知识和已有的经验分析解决问题的能力,培养严谨、耐心、实事求是的科学态度和探索、求真的科学精神.总之,要将重点放在实验能力的培养上,而不要放在测数据上.

实验课前应带好预习报告和数据记录草稿,动手前应先了解本次实验的注意事项和仪器调试的特殊要求,在草稿上记录有关资料和仪器参数,设计好数据表.采集数据要注意有效数字的有关规定,记录的数据应该是有效数字.对实验数据要严肃对待,原始数据必须是真实的,不允许抄袭和任意涂改.完成实验后全部数据应交给指导老师检查,检查后,教师在预习报告和记录草稿上签字,才能切断电源,整理好实验装置,结束本次实验.

三、处理数据并完成实验报告

完成的实验报告应包括下列项目：

- ① 实验名称.
- ② 实验仪器. 包括主要仪器及其型号、精度等有关参数.
- ③ 实验目的. 简单地写明本次实验的目的、要求.
- ④ 实验原理. 用简洁的语言说明实验原理, 给出基本公式并说明公式及公式中各物理量的意义, 绘制重要的原理图.
- ⑤ 实验内容. 简明扼要地写出实验内容和重要步骤, 绘制主要的线路图和光路图.
- ⑥ 数据处理. 按数据表的要求设计科学、合理的表格, 首先将整理好的原始数据填入表格内, 再根据每个实验的具体要求进行数据处理. 计算待测量要写明所用公式并代入数据. 要求作图的必须用坐标纸, 要求计算不确定度的必须给出每个不确定度分量及总不确定度的计算方法、计算过程和计算结果. 最后应按要求给出完整的结果表述.
- ⑦ 结果分析. 认真分析、讨论本次实验的结果及问题, 可以对实验中的问题和实验方法提出改进的设想和建议, 也可解答思考题.

实验报告分两次完成, 预习报告即实验报告的前半部分(包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容), 应在上实验课前写好, 其余部分实验课后完成.

实验课后应及时处理数据, 完成报告并在规定的时间内上交. 实验报告要求清洁整齐, 重点突出, 语言简洁, 制图制表规范, 字迹端正清晰.

第二节 误差分析和数据处理

一、测量与误差

通过实验测量所得大量数据是实验的主要成果, 但在实验中, 由于实验设备、测量方法、周围环境、人的观察和测量程序等方面的原因, 实验观测值和真值之间总存在一定的差异. 所以在整理这些数据时, 首先应对实验数据的可靠性进行客观地评定.

误差分析的目的就是评定实验数据的精确度或误差, 通过误差分析, 可以认清

误差的来源及其影响,设法排除数据中包含的无效成分,还可以进一步改进实验方案.在实验中要注意哪些是影响实验精确度的主要方面,这对正确组织实验方法、正确评判实验结果和设计方案,从而提高实验的精确性具有重要的指导意义.

(一) 测量

物理实验不仅要定性地观察物理现象,还要找出有关物理量之间的定量关系,因此就需要进行定量的测量,以取得物理量数据的表征.对物理量进行测量,是物理实验中极其重要的一个组成部分.对某些物理量的大小进行测定,就是将此物理量与规定的作为标准单位的同类量或可借以导出的异类物理量进行比较,得出结论,这个比较的过程就叫做测量.例如,物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而得出测量结果;物体运动速度则必须通过与两个不同的物理量,即长度和时间的标准单位进行比较而获得结果.比较的结果记录下来就叫做实验数据.测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位,两者缺一不可.

国际上规定了七个物理量的单位为基本单位,其他物理量的单位则是由以上基本单位按一定的计算关系式导出的.因此,基本单位之外的其余单位均称为导出单位.以上提到的速度以及经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位.

测量可以分为两类.按照测量结果获得的方法来分,可将测量分为直接测量和间接测量;而从测量条件是否相同来分,又可分为等精度测量和不等精度测量.

直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果.用米尺测量物体的长度,用天平称量物体的质量,用电流表测量电流等,都是直接测量.间接测量就是借助函数关系由直接测量的结果计算出物理量.已知路程和时间,根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量.

一个物理量能否直接测量不是绝对的.随着科学技术的发展、测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了.比如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电度表来进行直接测量.物理量的测量,大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础.

等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量,如同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同.等精度测量每次测量的可靠程度相同.若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法改变,这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量,非等精度测量结果的可靠程度自然也不相同.物理实验中大多采用等精度测量.应该指出:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数.

一个被测物理量,除了用数值和单位来表征它外,还有一个很重要的表征它的

参数,这便是对测量结果可靠性的定量估计. 这个重要参数往往容易为人们所忽视. 如果一个测量结果的可靠性几乎为零,那么这个测量结果还有什么价值呢? 因此,从表征被测量这个意义上来说,对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义,三者是缺一不可的.

(二) 误差

1. 真值与平均值

真值是待测物理量客观存在的确定值,也称理论值或定义值. 通常真值是无法测得的. 在实验中,测量的次数无限多时,根据误差的分布定律,正负误差的出现几率相等,再细致地消除系统误差,将测量值加以平均,可以获得非常接近于真值的数值. 但是实际上实验测量的次数总是有限的,用有限测量值求得的平均值只能是近似真值. 常用的平均值有下列几种:

(1) 算术平均值

算术平均值是最常见的一种平均值.

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次测量值, n 代表测量次数,则算术平均值为

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

(2) 几何平均值

几何平均值是将一组 n 个测量值连乘并开 n 次方求得的平均值. 即

$$\bar{x}_L = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (1-2)$$

(3) 均方根平均值

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-3)$$

求平均值的目的是从一组测定值中找出最接近真值的那个值. 在物理实验和科学研究中,数据的分布多属于正态分布,所以通常采用算术平均值.

另外,由于“绝对真值”的不可预知性,人们在长期的实践和科学研究中还总结出以下几种“相对真值”.

理论真值:理论设计值、公理值、理论公式计算值.

计量约定值:国际计量大会规定的各种基本单位值、基本常数.

标准器件值:标准器件相对低一级或两级的仪表,前者是后者的相对标准值.

2. 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,一般分为三类:

(1) 系统误差

系统误差是指在同一条件(指方法、仪器、环境、人员)下多次测量同一物理量时,结果总是向一个方向偏离,其数值按一定规律变化.系统误差的特征是具有一定的规律性.当改变实验条件时,就能发现系统误差的变化规律.

系统误差主要来源于以下几个方面:

第一为仪器误差.它是由于仪器本身具有缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差.

第二为理论误差.它是由于测量所依据的理论公式本身具有近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求带来的误差.

第三为观测误差.它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差.

例如,用“落球法”测量重力加速度,由于空气阻力的影响,多次测量的结果总是偏小,这是测量方法不完善造成的误差;用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间,若停表走时太快,即使测量多次,测量的时间 t 总是偏大为一个固定的数值,这是仪器不准确造成的误差;在测量过程中,若环境温度升高或降低,测量值按一定规律变化,这是由于环境因素变化引起的误差.

在任何一项实验工作和具体测量中,必须要想尽一切办法,最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差,或者对测量结果进行修正.发现系统误差需要改变实验条件和实验方法,反复进行对比,系统误差的消除或减小是比较复杂的一个问题,没有固定不变的方法,要具体问题具体分析,各个击破.产生系统误差的原因可能不止一个,一般应找出影响的主要因素,有针对性地消除或减小系统误差.以下介绍几种常用的方法.

检定修正法:将仪器、量具送计量部门检验取得修正值,以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法.

替代法:指测量装置测定待测量后,在测量条件不变的情况下,用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法.如消除天平的两臂不等对待测量的影响可用此办法.

异号法:指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差,将测量结果取平均值后消除的一种方法.例如在外界磁场作用下,仪表读数会产生一个附加误差,若将仪表转动 180° 再进行一次测量,外磁场将对读数产生相反的影响,引起负的附加误差.两次测量结果平均,正负误差可以抵消,从中可以减小系统误差.

产生系统误差的原因通常是可以被发现的,原则上可以通过修正、改进加以排除或减小.分析、排除和修正系统误差要求测量者有丰富的实践经验.这方面的知识和技能在我们以后的实验中会逐步地学习.

(2) 随机误差

在相同测量条件下,多次测量同一物理量时,误差时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差称为随机误差,有时也叫偶然误差。

引起随机误差的原因也很多,与仪器精密度和观察者感官灵敏度有关,如无规则的温度变化、气压的起伏、电磁场的干扰、电源电压的波动等。这些因素不可控制又无法预测和消除。

当测量次数很多时,随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布),其特点表现为:

- ① 单峰性. 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- ② 对称性. 绝对值相等的正负误差出现的概率相同。
- ③ 有界性. 绝对值很大的误差出现的概率趋于零。
- ④ 抵偿性. 误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

因此,增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除。

(3) 过失误差

由于测量者过失,如实验方法不合理、仪器用错、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差,是一种人为的过失误差,不属于测量误差,只要测量者采取严肃认真的态度,过失误差是可以避免的。在数据处理中要把含有过失误差的异常数据加以剔除。

3. 精确度和精密度、准确度

反映测量结果与真实值接近程度的量,称为精度(亦称精确度)。它与误差大小相对应,测量的精度越高,测量误差就越小。精度应包括精密度和准确度两层含义。

(1) 精密度

测量中所测得数值重现性的程度称为精密度。它反映偶然误差的影响程度,精密度高就表示偶然误差小。

(2) 准确度

测量值对于真值的偏移程度称为准确度。它反映系统误差的影响程度,准确度高就表示系统误差小。

(3) 精确度(精度)

它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。

在一组测量中,精密度高的准确度不一定高,准确度高的精密度也不一定高,但精确度高,则精密度和准确度都高。

为了说明精密度与准确度的区别,可用打靶子例子来说明。如图 1-1 所示。

图 1-1(a)中表示精密度和准确度都很高,则精确度高;图 1-1(b)表示精密度很高,但准确度却不高;图 1-1(c)表示精密度与准确度都不高。在实际测量中没有像

靶心那样明确的真值,要设法去测定这个未知的真值。

学生在实验过程中,往往满足于实验数据的重现性,而忽略了数据测量值的准确程度。绝对真值是不可知的,人们只能订出一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。随着人类认识的推移和发展,可以逐步逼近绝对真值。

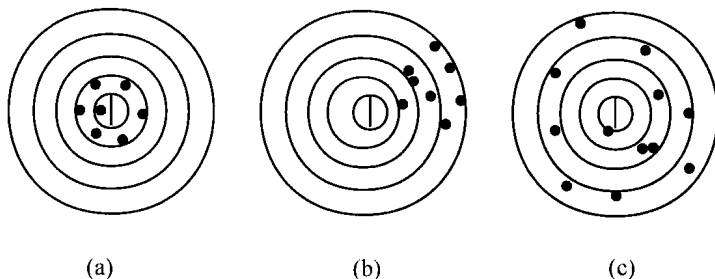


图 1-1 精密度和准确度的关系

4. 误差的表示方法

利用任何量具或仪器进行测量,总存在误差,测量结果总不可能准确地等于被测量的真值,而只是它的近似值。测量的质量高低以测量精确度作指标,根据测量误差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差愈小,则认为测量就愈精确。

(1) 绝对误差

测量值 N 与真值 N_0 之差记为

$$\Delta N = N - N_0 \quad (1-4)$$

显然误差 ΔN 有正负之分,因为它是测量值与真值的差值,常称为绝对误差。注意,绝对误差不是误差的绝对值。

(2) 相对误差

绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差,用 E 表示。

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$$

由于真值无法知道,所以计算相对误差时常用 N 代替 N_0 。在这种情况下, N 可能是公认值,或高一级精密仪器的测量值,或测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度,相对误差用百分数表示,保留两位有效数字。

5. 随机误差的估算

由于客观条件以及人们认识的局限性,测量不可能获得待测量的真值,只能是近似值。设某个物理量真值为 x_0 ,进行 n 次等精度测量,测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ (测量过程无明显的系统误差),它们的误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0$$

$$\Delta x_2 = x_2 - x_0$$

$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

求和得

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n x_i - nx_0$$

即

$$\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,可以证明 $\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \rightarrow 0$,而且 $\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$ 是 x_0 的最佳估计值,称 $\bar{x}$ 为测量值的近似真实值. 为了估计误差,定义测量值与近似真实值的差值为偏差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

偏差又叫做残差. 实验中真值得不到,因此误差也无法知道,而测量的偏差可以准确知道. 实验误差分析中要经常计算这种偏差,用偏差来描述测量结果的精确程度.

误差理论证明,平均值的标准偏差为

$$s_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (1-5)$$

其意义表示某次测量值的随机误差在 $-\sigma_x \sim +\sigma_x$ 的概率为 68.3%.

当测量次数 n 有限时,其算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-6)$$

其意义是测量平均值的标准偏差在 $-\sigma_{\bar{x}} \sim +\sigma_{\bar{x}}$ 的概率为 68.3%. 或者说,待测量的真值在 $(\bar{x} - \sigma_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + \sigma_{\bar{x}})$ 的概率为 68.3%. 因此 $\sigma_{\bar{x}}$ 反映了平均值接近真值的程度.

(三) 异常数据的剔除

剔除测量值中异常数据的标准有几种,有 $3\sigma_x$ 准则、肖维准则、格拉布斯准则等.

1. $3\sigma_x$ 准则

统计理论表明,测量值的偏差超过 $3\sigma_x$ 的概率已小于 1%. 因此,可以认为偏差

超过 $3\sigma_x$ 的测量值是其他因素或过失造成的,为异常数据,应当剔除.剔除的方法是针对多次测量所得的一系列数据,算出各测量值的偏差 Δx_j 和标准偏差 σ_x ,把其中最大的 Δx_j 与 $3\sigma_x$ 比较,若 $\Delta x_j > 3\sigma_x$,则认为第 j 个测量值是异常数据,舍去不计.剔除 x_j 后,对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差,并继续审查,直到各个偏差均小于 $3\sigma_x$ 为止.

2. 肖维准则

假定对一物理量重复测量了 n 次,其中某一数据在这 n 次测量中出现的几率小于 $\frac{1}{2n}$,则可以肯定这个数据的出现是不合理的,应当予以剔除.

根据肖维准则,应用随机误差的统计理论可以证明,在标准偏差为 σ_x 的测量列中,若某一个测量值的偏差等于或大于误差的极限值 K_σ ,则此值应当剔除.不同测量次数的偏差极限值 K_σ 列于表 1-1.

表 1-1 肖维系数表

n	K_σ	n	K_σ	n	K_σ
4	1.53σ	10	1.96σ	16	2.16σ
5	1.65σ	11	2.00σ	17	2.18σ
6	1.73σ	12	2.04σ	18	2.20σ
7	1.79σ	13	2.07σ	19	2.22σ
8	1.86σ	14	2.10σ	20	2.24σ
9	1.92σ	15	2.13σ	30	2.39σ

3. 格拉布斯(Grubbs)准则

若有一组测量得出的数值,其中某次测量得出数值的偏差的绝对值 $|\Delta x_i|$ 与该组测量列的标准偏差 σ_x 之比大于某一阈值 $g_0(n, 1-p)$,即

$$|\Delta x_i| > g_0(n, 1-p) \cdot \sigma_x$$

则认为此测量值中有异常数据,并可予以剔除.这里 $g_0(n, 1-p)$ 中的 n 为测量数据的个数,而 p 为服从此分布的置信概率,一般取 p 为 0.95 和 0.99(至于在处理具体问题时,究竟取哪个值则由实验者自己来决定).我们将在表 1-2 中给出 $p=0.95$ 和 0.99 时或 $1-p=0.05$ 和 0.01 时,对不同的 n 值所对应的 g_0 值.

表 1-2 $g_0(n, 1-p)$ 值表

n	$1-p$		n	$1-p$	
	0.05	0.01		0.05	0.01
3	1.15	1.15	17	2.48	2.78
4	1.46	1.49	18	2.50	2.82
5	1.67	1.75	19	2.53	2.85
6	1.82	1.94	20	2.56	2.88
7	1.94	2.10	21	2.58	2.91
8	2.03	2.22	22	2.60	2.94
9	2.11	2.32	23	2.62	2.96
10	2.18	2.41	24	2.64	2.99
11	2.23	2.48	25	2.66	3.01
12	2.28	2.55	30	2.74	3.10
13	2.33	2.61	35	2.81	3.18
14	2.37	2.66	40	2.87	3.24
15	2.41	2.70	45	2.91	3.29
16	2.44	2.75	50	2.96	3.34

二、测量结果的评定和不确定度

我们不但要测量待测物理量的近似值,而且要对近似真实值的可靠性做出评定(即指出误差范围),这就要求我们还必须掌握不确定度的有关概念.下面将对不确定度的概念、分类、合成等问题进行讨论.

(一) 不确定度的含义

在物理实验中,常常要对测量的结果做出综合的评定,这时要采用不确定度的概念.不确定度是“误差可能数值的测量程度”,表征所得测量结果代表被测量的程度,也就是因测量误差存在而对被测量不能肯定的程度,因而是测量质量的表征.对一个物理实验的具体数据来说,不确定度是指测量值(近真值)附近的一个范围,测量值与真值之差(误差)可能落于其中,不确定度小,测量结果可信赖程度高;不确定度大,测量结果可信赖程度低.在实验和测量工作中,不确定度一词近似于不确定、不明确、不可靠、有质疑,是作为估计而言的.因为误差是未知的,不可能用指出误差的方法去说明可信赖程度,而只能用误差的某种可能的数值去说明可信赖程度,所以不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量.用不确定度评定实验结果的误差,包含了来源不同的误差对结果的影响,而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律,这是更准确地表述了测量结果的可靠程度,因而有必要采用不确定度的概念.

(二) 测量结果的表示和合成不确定度

在做物理实验时,要表示测量的最终结果.在这个结果中既要包含待测量的近似真实值 $\bar{x}$,又要包含测量结果的不确定度 σ ,还要反映出物理量的单位.因此,要写成物理含意深刻的标准表达形式,即

$$x = \bar{x} \pm \sigma (\text{单位})$$

式中: x 为待测量; $\bar{x}$ 是测量的近似真实值; σ 是合成不确定度,一般保留一位有效数字.这种表达形式反映了三个基本要素:测量值、合成不确定度和单位.

在物理实验中,直接测量时若不需要对被测量进行系统误差的修正,一般就取多次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 作为近似真实值;若在实验中只需测一次或只能测一次,该次测量值就为被测量的近似真实值.如果要求对被测量进行一定系统误差的修正,通常是将一定系统误差(即绝对值和符号都确定的可估计的误差分量)从算术平均值 $\bar{x}$ 或一次测量值中减去,从而求得被修正后的直接测量结果的近似真实值.例如,用螺旋测微器测量长度时,从被测量结果中减去螺旋测微器的零误差.在间接测量中, $\bar{x}$ 即被测量的计算值.

在测量结果的标准表达式中,给出了一个范围 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$,它表示待测量的真值在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$ 的概率为68.3%,不要误认为真值一定就会落在 $(\bar{x}-\sigma) \sim (\bar{x}+\sigma)$.认为误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 是错误的.

在上述的标准式中,近似真实值、合成不确定度、单位三个要素缺一不可,否则就不能全面表达测量结果.同时,近似真实值 $\bar{x}$ 的末位数应该与不确定度的所在位数对齐,近似真实值 $\bar{x}$ 与不确定度 σ 的数量级、单位要相同.在实验中,测量结果的正确表示是一个难点,要引起重视,从开始就注意培养良好的实验习惯,才能逐步克服难点,正确书写测量结果的标准形式.

在不确定度的合成问题中,主要是从系统误差和随机误差等方面进行综合考虑的,提出了统计不确定度和非统计不确定度的概念.合成不确定度 σ 是由不确定度的两类分量(A类和B类)求“方和根”计算而得.为使问题简化,本书只讨论简单情况下(即A类、B类分量保持各自独立变化,互不相关)的合成不确定度.

A类不确定度(统计不确定度)用 S_A 表示,B类不确定度(非统计不确定度)用 σ_B 表示,合成不确定度为

$$\sigma = \sqrt{S_A^2 + \sigma_B^2}$$

(三) 合成不确定度的两类分量

物理实验中的不确定度,一般主要来源于测量方法、测量人员、环境、测量对象等.计算不确定度是将可修正的系统误差修正后,将各种来源的误差按计算方法分为