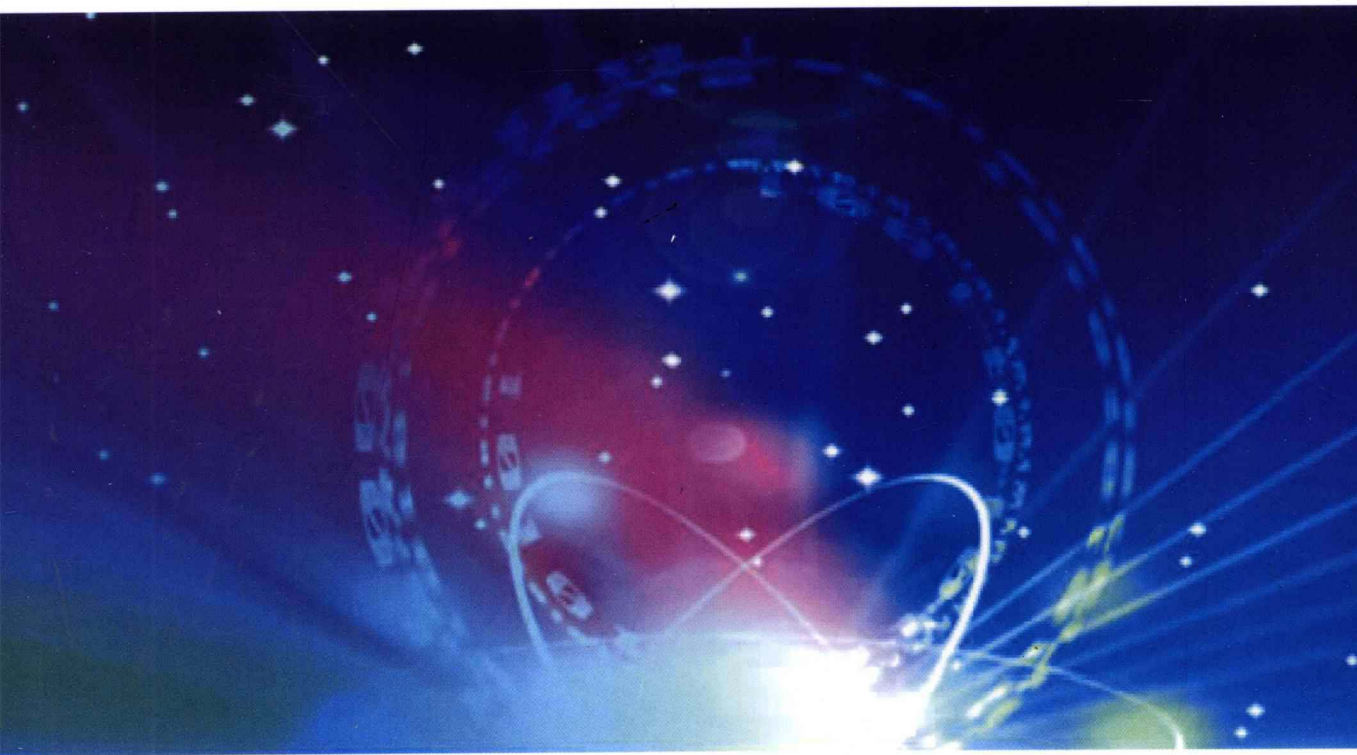


21世纪高等教育规划教材

大学物理实验

王红玲 张元敏 主编



DAXUEWULISHIYAN



西南交通大学出版社

[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪高等教育规划教材

大学物理实验

主 编 王红玲 张元敏

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/王红玲,张元敏主编. —成都:西南交通大学出版社,2008.8

21 世纪高等教育规划教材

ISBN 978-7-5643-0033-3

I. 大… II. ①王…②张… 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(2008)第 131375 号

21 Shiji Gaodeng Jiaoyu Guihua Jiaocai

21 世纪高等教育规划教材

Daxue Wuli Shiyān

大学物理实验

主 编 王红玲 张元敏

*

责任编辑 张华敏

特邀编辑 高青松 李科亮

封面设计 水木时代

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段 111 号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

北京广达印刷有限公司印刷

*

成品尺寸:185 mm×260 mm 印张:12.25

字数:326 千字

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0033-3

定价:30.00 元

版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

前 言

本书是为适应当前实验教学改革的要求,根据教育部《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,以作者所在院校多年使用的讲义为基础并结合近年来实验教学改革实践的成果编写而成的。本书在编写过程中打破了传统的实验教学内容体系,在熟悉基本仪器和基本测量的基础上,采用基本实验、综合设计性实验、研究性实验的三级构架模式,以保证学生通过实验课能够较好地掌握和运用理论知识,提高实验技能。

全书共 5 章内容,包括 41 个实验。第 1 章误差理论与数据处理,主要介绍物理实验的基本测量方法、测量及其误差、测量不确定度等基本知识;第 2 章力热实验,涉及力学和热学方面共 14 个实验;第 3 章电磁学实验,涵盖电磁学方面的基本原理及主要内容;第 4 章光学实验;第 5 章近代物理实验。

本书由王红玲、张元敏主编。第 1、2 章由葛瑜编写;第 3 章由张元敏编写;第 4 章由王红玲编写;第 5 章由杨钢、王安梅、韩红培编写。全书由王红玲统稿。

编写适合教学改革需要的实验教材是一种探索,它是一项凝聚教师集体劳动的工程。作者在编写本教材时,吸收了多年来在物理实验室工作过的许多同志的智慧和成果,也参考和借鉴了兄弟院校的有关教材。在此我们一并表示衷心的感谢!

由于编写时间仓促与编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请相关专家与读者不吝赐教,以便不断修订完善。

编 者

2008 年 8 月

目 录

第 1 章 误差理论与数据处理	(1)
1.1 大学物理实验的主要任务和环节	(1)
1.2 物理实验的基本测量方法	(2)
1.3 测量及其误差	(7)
1.4 测量不确定度	(9)
1.5 有效数字及其运算规则	(13)
1.6 误差的处理	(16)
1.7 数据处理几种常用方法	(20)
复习思考题	(27)
第 2 章 力热实验	(28)
实验 1 长度的测量	(28)
实验 2 精密称衡	(32)
实验 3 密度的测量	(35)
实验 4 杨氏模量的测定(伸长法)	(37)
实验 5 杨氏模量的测定(梁弯曲法)	(40)
实验 6 摆动法测定棒状材料的切变模量	(42)
实验 7 单摆及自由落体运动	(45)
实验 8 刚体转动的研究	(48)
实验 9 惯性秤	(51)
实验 10 弹簧振子的简谐振动	(54)
实验 11 声速的测量(超声法)	(55)
实验 12 液体黏滞系数的测量	(59)
实验 13 金属线胀系数的测定	(60)
实验 14 液体表面张力系数的测量	(62)
第 3 章 电磁学实验	(65)
实验 15 伏安法测电阻	(65)
实验 16 用模拟法测绘静电场	(68)
实验 17 用电位差计测量电池的电动势和内阻	(73)
实验 18 用箱式电位差计校正电表	(76)
实验 19 示波器的使用	(77)
实验 20 磁场的描绘	(85)
实验 21 电子束的电偏转和磁偏转	(88)
实验 22 铁磁物质动态磁滞回线的测定	(93)
实验 23 电子束的电聚焦和磁聚焦	(100)
实验 24 惠斯通电桥	(104)

实验 25	万用电表改装	(107)
实验 26	霍尔效应	(111)
第 4 章	光学实验	(115)
实验 27	薄透镜焦距的测定	(115)
实验 28	分光计的调节及棱镜玻璃折射率的测定	(119)
实验 29	用牛顿环干涉测透镜曲率半径	(126)
实验 30	单缝衍射光强分布的测定	(128)
实验 31	用透镜光栅测定光波波长	(132)
实验 32	偏振现象的观测与分析	(135)
实验 33	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	(142)
实验 34	全息照相	(147)
第 5 章	近代物理实验	(154)
实验 35	高温超导转变温度测量实验	(154)
实验 36	塞曼效应实验	(157)
实验 37	密立根油滴实验	(163)
实验 38	核磁共振实验	(168)
实验 39	光电效应和普朗克常数的测定	(174)
实验 40	电子衍射实验	(179)
实验 41	夫兰克-赫兹实验	(182)
参考文献		(188)

第1章 误差理论与数据处理

物理学是一门实验科学,在物理学的建立和发展中,物理实验起到了直接的推动作用。从经典物理到近代、现代物理,物理实验在发现新事物、建立新规律、检验理论、测量物理量等诸多方面发挥着巨大作用。随着现代科学技术水平的高度发展,物理实验的思想、方法、技术与装置已广泛地渗透到了自然学科和工程技术的各个领域,解决了一大批生产和科研问题。

1.1 大学物理实验的主要任务和环节

大学物理实验是一门重要的基础课程,是对学生进行实验教育的入门课程,其教学目的在于:使学生在物理实验基础知识的同时,受到严格的训练,掌握初步的实验能力,养成良好的实验习惯和严谨的科学作风。

1.1.1 大学物理实验的主要任务

(1)通过对实验现象的分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。运用物理学原理和物理实验方法研究物理规律,加深对物理学原理的理解。

(2)培养与提高学生从事科学实验的能力。主要包括:

①自学能力。能够独立阅读实验教材与参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备工作。

②动手能力。能借助教材与仪器说明书,正确调整和使用仪器,制作样品,发现和排除故障。

③思维判断能力。运用物理学理论,对实验现象与结果进行分析和判断。

④书面表达能力。能够正确记录和处理实验数据,绘制图表,分析实验结果,撰写规范、合格的实验报告或总结报告。

⑤综合运用能力。能够将多种实验方法、实验仪器结合在一起,运用经典与现代测量技术和手段,完成某项实验任务。

⑥初步的实验设计能力。根据课题要求,能够确定实验方法和条件,合理选择、搭配仪器,拟定具体的实验步骤。

(3)培养学生从事科学实验的素质。包括理论联系实际、实事求是的科学作风;严肃认真的工作态度;不怕困难、勇于探索的创新精神;遵纪守法、爱护公物的优良品德;团结协作、共同进取的作风。

1.1.2 大学物理实验的主要环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验操作和测量的一项实践活动。要有效地学习、完成一个实验,必须遵循以下三个环节。

1. 课前预习

实验前,学生必须预习实验教材和仪器说明书等有关资料,明确实验目的,基本弄懂实验原理和实验内容,并对测量仪器和测量方法有所了解,在此基础上写出实验预习报告。报告内容包括实验名称、实验目的、实验仪器、简要实验原理和实验记录表格。

2. 实验过程

操作和测量是实验教学的主要环节。学生进入实验室后应认真听取教师对本实验的要求、重点、难点和注意事项的讲解。开始实验时,应先检查仪器设备并简单练习操作,待基本熟悉仪器性能和使用方法后才开始进行实验测量。在实验过程中,要严肃认真,仔细观察物理现象,正确读取和记录测量数据。要学会分析和排除实验故障,若发现问题而无法解决时,应及时向教师或实验管理人员报告,由教师或实验管理人员协助处理。仪器设备调整、操作、测量和记录是科学实验的基本功。实验记录内容应包括:

(1)与实验条件有关的物理量(如室温、气压、相对湿度等)。

(2)仪器设备型号、精度等级、允许误差及量程等。

(3)每次测量的物理量数值、有效数字和单位等原始数据。这些原始数据应如实地记录在表格上,如发现记录数据有问题,可以删除或再测量,但绝不允许抄袭或篡改实验数据。实验完毕,应将记录数据交指导教师审查签名,整理好实验仪器后才能离开实验室。

3. 课后实验总结

实验后要对实验数据进行处理,并写出完整的实验报告。实验报告是实验工作的总结,要求用标准的实验报告纸书写,要求字体工整、文理通顺、数据齐全、图表规范、结论明确、纸面整洁。实验报告的格式和内容如下:

(1)实验名称、实验者姓名、实验日期。

(2)实验目的。

(3)实验仪器。

(4)实验原理:简要叙述实验原理、计算公式、实验电路图或光路图。

(5)实验内容和主要步骤:简要写出实验内容、步骤和实验注意事项。

(6)数据记录与处理:将原始记录数据转记于实验报告上,按照实验要求计算测量结果,该作图的要作图,计算要遵循有效数字的运算规则进行,用标准差或不确定度评估测量计算的可靠性。

(7)结果与讨论:这部分要明确给出实验测量结果,并对结果进行讨论,如分析实验中观察的现象、讨论实验中存在的问题、回答思考题等,也可以对实验本身的设计思想、实验仪器的改进等提出建议性意见。

在科学研究和实验过程中,往往离不开对某个物理量的测量。物理实验除了定性地观察物理现象外,也需要对物理量进行定量测量,并确定各物理量之间的关系。由于测量设备、环境、人员、方法等诸多因素的影响,使得测量值与真实值并不完全一致,这种差异在数值上表现为误差。随着科学水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富,误差虽然可以被控制的越来越小,却始终不能把它消除。因此,对实验中测量获得的数据,要合适的方法进行处理,并对其可控性作出评价,否则,测量结果是没有价值的。

误差与数据处理理论已发展为一门学科,它涉及的内容丰富,且较为复杂。本章将从实际教学的角度出发,主要介绍测量误差、不确定度的基本知识和常用的实验数据处理方法。

1.2 物理实验的基本测量方法

物理实验方法是以一定的物理现象、物理规律和物理学原理为依据,确立合适的物理模型,研究各物理量之间关系的科学实验方法。现代的物理实验离不开定量的测量和计算。所以,实

验方法包含测量方法和数据处理方法两个方面,它们既有区别又有联系。本节主要介绍基本测量方法。

物理测量泛指以物理理论为依据、以实验装置和实验技术为手段进行测量的过程。内容非常广泛,它包括对运动力学量、分子力学量、热学量、电学量和光学量的测量等。测量的方法和分类也很多,如以内容分,可分为电量测量和非电量测量;按测量性质分,可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量过程中被测量是否随时间变化分,可分为静态测量和动态测量;根据是否通过对基本量的测量得到测量数据分,可分为绝对测量和相对测量;若从特定的测量方法细分,就有诸如干涉法、衍射法、偏振法、电桥法、冲击法、冷却法、霍尔效应法、核磁共振法,等等。

本节主要介绍的测量方法是进行物理实验的思想方法,而不是指非常具体的测量过程与方式。学习并掌握好这些基本的实验思想方法,在实验中可指导我们进行实验方案的选择和实验的测试,有助于实验工作与科学研究的开展和科学能力的提高。

1.2.1 比较法

1. 直接比较法

直接比较法是将待测量与经过校准的仪器或量具进行直接比较,测出其大小。例如:用米尺测量长度就是最简单的直接比较法。用经过标定的电表、秒表、电子秤测量电量、时间、质量等量时,其直接测出的读数也可看做是直接比较的结果。要注意的是,采用直接比较法的量及仪器必须是经过标定的。

2. 补偿平衡比较法

平衡测量、补偿测量或示零测量是物理实验与科学研究中常用的测量方法。

例如:用等臂天平称物体的质量是一种平衡测量。如图 1-1 所示的惠斯通电桥测量电阻 R_x ,从原理上讲,也是一种平衡测量,因为只有当电桥平衡时(电流计 G 示零)才能得出

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_y$$

并以此算出 R_x 。

如图 1-2 所示的是电势差计测电池电动势的基本电路,它是补偿测量的一个典型例子。合上电键 K,调节 R,使电阻丝 AB 上通有特定电流 I,然后合上电键 K_1 ,在 AB 上滑动触头 C,使电流计 G 示零,则待测电池电动势 E_x 被电势差 U_{AB} 所补偿,这时

$$E_x = U_{AB} = IR_{AB}$$

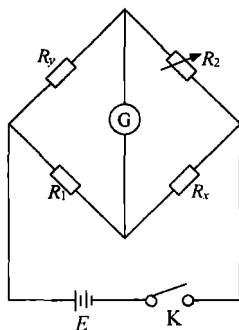


图 1-1

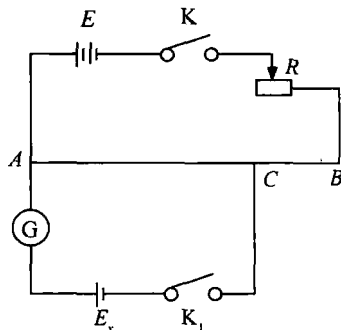


图 1-2

以上两例均是在电流计 G 的指针示零时获得的测量结果,所以又可以称为示零测量。经过补偿达到平衡的比较实验方法的最大优点是:平衡时,电表(平衡臂)示零,对被测物理量影响最小,故大大提高了测量的精确度。

3. 替代比较法

我国古代的少年曹冲用船称象是一例典型的替代比较实验方法。在现代测量技术中,当某些物理量无法直接比较时,往往利用物理量之间的函数关系制作成相应的仪表、仪器进行比较测量,如糖量计、比重计、密度计等。图 1-3 所示是用替代比较法测量电表内阻的电路图。将 K_2 置于“1”处,合上 K_1 ,调节 R ,使安培表指针指在较大示值处(同时注意表头 G 指针不能超过量程)。然后断开 K_1 (为了保护安培表),将 K_2 置于“2”处,再合上 K_1 ,调节原先处在最低阻值上的 R_0 ,使安培表示值不变。此时, R_0 代替了表头内阻 R_x ,若 R_0 为电阻箱,则 R_x 可直接读得。

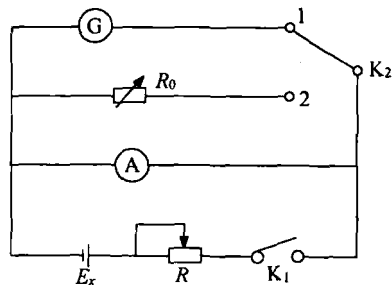


图 1-3

在进行替代比较法测量时,要特别注意“不同时”的替代比较,在“异时”比较时必须以实验条件的稳定性为基础。

1.2.2 放大法

物理学中涉及各种物理量的测量,即使是同一物理量,其值的大小也相差悬殊。例如长度测量,地球半径为 6.38×10^6 m,而氢原子半径仅为 1.06×10^{-10} m,相差达 10^{16} m。要适应各种范围内的精度测量,就需要设计相应的装置或采用不同的方法。其中放大法是常用的基本方法之一(缩小也可视为其放大倍数小于 1 的放大)。放大法有:机械放大法、积累(或累计)放大法、光学放大法、电子学放大法等。

1. 机械放大法

测量微小长度与角度时,为了提高测量读数的精度,常将其最小刻度用游标、螺距的方法进行机械放大。如图 1-4 所示,螺旋测微计主刻度上的最小刻度是 0.5 mm,0.5 mm 以下读数,可通过转动微分套筒放大读出,精度达到 0.01 mm。

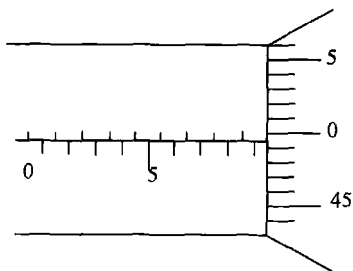


图 1-4

2. 积累(或累计)放大法

我们要测出如图 1-5 所示的干涉条纹间距 l 。 l 的数量级为 10^{-2} mm,为了减小测量的相对误差,。例如, $l = 0.040$ mm,一般不是一个间隔一个间隔地去测量,而是测量

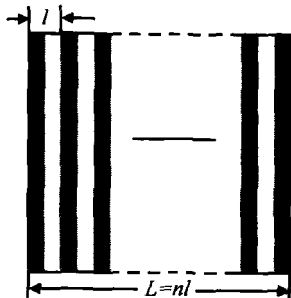


图 1-5

量若干(n)个条纹的总间距 $L = nl$ 所用量具误差为 $\Delta_{\text{仪}} = 0.004$ mm,则测量一个间距为 l 的相对误差为

$$\frac{\Delta_{\text{仪}}}{l} = \frac{0.004}{0.040} = 0.1$$

即为 10%。若采用放大法测量 100 个条纹的总间距 L ,则其相对误差减小为

$$\frac{\Delta_{\text{仪}}}{L} = \frac{0.004}{4.000} = 0.001$$

即为 0.1%，使测量精度大为提高。

又如用秒表测量单摆摆动周期，也不是测一个周期的时间，而是测量累计摆动 50 或 100 周期的时间。设所用机械秒表的仪器误差为 0.1 s，而某单摆周期约为 2 s，则测量单个周期时间间隔的相对误差为 $\frac{0.1}{2.0} = 0.05$ ，即为 5%。若测 100 个周期的累计时间间隔，则相对误差为 $\frac{0.1}{200.0} = 0.0005$ ，即为 0.05%，提高了测量的精度。

3. 光学放大法

光学放大法有两种，一种是被测物通过光学仪器形成放大的像，以便观察判别，如常用的测微目镜、读数显微镜。另一种是通过测量放大的物理量来获得本身较小的物理量。例如，我们要测如图 1-6 所示的 AB 对 C 的微小张角 α ，可利用三角函数关系， $\tan \alpha = \frac{AB}{CB}$ ，测出 AB 和 CB 即可求得 α 。但 AB、CB 也是微小量，若放大为测量相应的 $A'B'$ 与 CB' ，则在使用同样量具的情况下，相对误差可大为减小， CB' 越长相对误差越小。因此，常常利用光学平面镜多次反射来测光程。例如：测量激光束的发散角，常用如图 1-7 所示的平行平面镜装置，使发散角较小的激光束在两镜间多次反射后射出，再测量其光斑大小。又如，测量长度微小变化和测量角度微小变化的光杠杆镜尺法，也是一种常用的光学放大法。

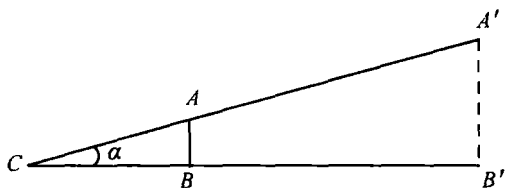


图 1-6

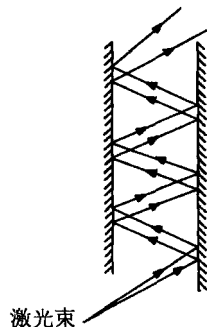


图 1-7

4. 电子学放大法

要对微弱电信号(电流、电压或功率)有效地进行观察测量，常用电子学放大法。最基本的交流放大电路是如图 1-8 所示的共发射极三极管放大电路。

交流电压 U_i 由基极 B 和发射极 E 之间输入时，在输出端就可获得放大一定倍数的交流电压 U_o 。其基本原理是利用半导体 PN 结特性实现基极对集电极电流的控制作用。图 1-9 中的三极管由两个 PN 结构成。B、E 间的发射结所加的是正向偏置电压，使发射区的多数载流子——电子加速进入基区。B、C 间的集电结加的是反向偏置电压，它阻止集电区电子向基区扩散，但对基区内的电子则是一个加速电压。发射区发射的电子(少数一部分)不断地与基区中的空穴“复合”，形成基区电流 I_B ，大多数电子经两次加速后向集电区扩散，形成集电极电流 I_C ，基极电流 I_B 的微小变化将引起集电极电流 I_C 很大的变化，从而实现放大作用。

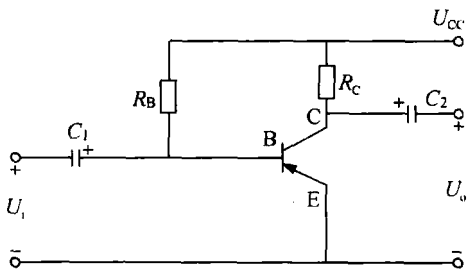


图 1-8

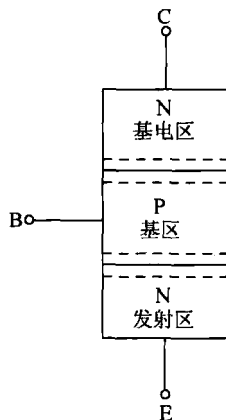


图 1-9

1.2.3 转换测量法

转换测量法简称换测法,是根据物理量之间的各种效应和函数关系,利用变换原理进行测量的方法。由于物理量之间存在多种效应,所以有各种不同的换测法,这正是物理实验最富有启发性和开创性的一面。随着科学技术的发展,物理实验方法渗透到各学科领域,实验物理学也不断地向高精度、宽量程、快速测量、遥感测量和自动化测量发展,这一切都与转换测量紧密相关。

换测法大致可分为参量换测法和能量换测法两大类。

1. 参量换测法

参量换测法是利用各参量的变换及其变化规律,以达到测量某一物理量的方法。这种方法几乎贯穿于整个物理实验领域中。例如:在杨氏模量实验中,钢丝的杨氏模量 Y 的测定依据是应变与应力呈线性变化的规律,将 Y 的测量转换为对应变 σ 与应力 F 的测量后,得到 Y 。又如:在利用单摆测定重力加速度 g 的实验中,是依据周期 T 随摆长 l 变化的规律,将 g 的测量转换为对 T, l 的测量。

2. 能量换测法

能量换测法是利用一种运动形式转换成另一种运动形式时物理量间的对应关系进行测量的方法。下面介绍几种比较典型的能量换测法。

(1) 热电换测:将热学量转换成电学量测量。例如:利用温差电动势原理,将温度的测量转换成热电偶的温差电动势的测量,或利用电阻随温度变化的规律将测温转换成对电阻的测量。

(2) 压电换测:这是一种压力和电势间的变换,话筒和扬声器就是大家所熟悉的换能器。话筒把声波的的压力变化变换为相应的电压变化,而扬声器则进行相反的转换,即把变化的电信号转换成声波。

(3) 光电换测:这是一种将光学量变换为电量的换能器,其变换的原理是光电效应,转换元件有光电管、光电倍增管、光电池、光敏二极管、光敏三极管等。各种光电转换器件在测量和控制系统中已获得广泛的应用。近年来又有用于光通信系统和计算机的光输入设备(光纤)等。

(4) 磁电换测:这是利用半导体霍尔效应进行磁学量与电学量的转化测量。

设计或采用某种转换测量方法应注意以下原则:

(1) 首先要确定变换原理和参量关系式的正确性。

(2) 变换器(传感器)要有足够的输出量和稳定性,便于放大或传输。

(3)要考虑在变换过程中是否还伴随其他效应,若有,则必须采取补偿或消除措施。

(4)要考虑变换系统和测量过程的可行性和经济效益。

1.2.4 模拟法

模拟法指的是以相应理论为基础,不直接研究自然现象或过程的本身,而利用与这些自然现象或过程相似的模型来进行研究的一种方法。模拟法可分为物理模拟和数学模拟。

物理模拟就是保持同一物理本质的模拟。例如,用光测弹性法模拟工件内部应力的分布情况;用“风洞”(高速气流装置)中的飞机模型模拟实际飞机在大气中飞行等。

数学模拟是指把两个不同本质的物理现象或过程,用同一数学方程来描述。例如,用恒温电场来模拟静电场,就是基于这两种场的分布有相同的数学形式。

把上述两种模拟法配合起来使用,就更容易见成效。随着微机的引入,用微机进行模拟实验更为方便,并能将两者很好地结合起来。

以上所述的四种基本测量方法,在物理实验中有广泛的应用。实际上,在物理实验中,各种方法往往是相互渗透、联系而综合起来使用的,无法截然分开。读者在进行实验时,应认真思考,仔细分析,并不断总结,以逐步积累丰富的实验知识和经验。

1.3 测量及其误差

1.3.1 量、测量和单位

任何现象和实体都能以量来表征。量具有对现象和实体作定性区别或定量确定的属性,测量是人类对自然界中的现象和实体取得数字概念的一种认识过程。为确定被测对象的测量值,首先要选定一个单位,用它与被测对象进行比较,求出被测对象与它的比值——倍数,这个倍数即为数值。显然数值的大小与所选用的单位有关,对同一对象测量时,选用单位越大,数值就越小,反之亦然。因此,在表示一个被测对象的测量值时就必须包含数字和单位两个部分。

目前,物理学上各物理量的单位,都采用中华人民共和国法定计量单位,它是以国际单位制(SI)为基础的单位。国际单位制是在1960年第11届国际计量大会上确定的,它以米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(发光强度)作为基本单位,称为国际单位制的基本单位。其他量(如力、能量、电压、磁感应强度等)的单位均可由这些基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

1.3.2 测量误差及其分类

被测物理量的大小(即真值)是客观存在的,然而在具体测量它时,要经过一定的方案设计,运用一定的实验方法,在一定的条件下,借助于仪器由实验人员完成。尽管我们千方百计改进实验方案设计,提高仪器精度和测量人员的水平。但是,仪器精度总有一个限度,实验方法不可能完美无缺,测量人员的技术水平不可能无限提高,这就使测量所得的值与客观真值有一定差异。测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差 Δx ,简称误差。测量误差反映测量结果的准确程度,可用绝对误差表示,也可用相对误差来表示:

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

即

$$\Delta x = x - X$$

$$\text{相对误差} = (\text{绝对误差} / \text{真值}) \times 100\%$$

即

$$E = \frac{\Delta x}{X} \times 100\%$$

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中。所以,科学实验的结果不仅要包括测量所得的数据,而且还要包括误差范围的估计。

测量永远不可能得到真值,那么怎样的测量值是最接近真值的最佳值呢?又如何来估算误差范围呢?这就有必要对误差进行研究和讨论,用误差分析的思想方法来指导实验的全过程。

误差分析的指导作用包含以下两个方面:

首先,为了从测量中正确认识客观规律,必须分析误差的原因和性质,正确地处理所测得的数据,尽量消除、减少误差或确定误差范围,以便能在一定条件下得到接近真值的最佳结果,并作出精度评价。

其次,在设计一项实验时,先对测量结果确定一个精度要求,然后用误差分析确定合理的测量方法、仪器和条件,以便能在最有利的条件下,获得恰到好处的预期结果。

误差的产生有多方面的原因,根据误差的性质和产生的原因,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

1. 系统误差

系统误差的特点是:在相同的条件下(指方法、仪器、环境、人员)对同一量进行多次测量时,误差的绝对值和符号(正、负)保持不变或按一定规律变化。当测量条件改变时,误差亦按一定的规律变化。

系统误差的来源有以下几个方面:

(1)仪器的固有缺陷。例如,刻度不准,零点没有调准,仪器水平或铅直未调整,砝码未经调准等。

(2)实验方法不完善或这种方法所依据的理论本身具有近似性。例如,称重量时未考虑空气浮力,采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等。

(3)环境的影响或没有按规定的条件使用仪器。例如,标准电池是以 20 °C 时的电动势数值作为标准值的,若在 30 °C 条件下使用而不加以修正,就会引入系统误差。

(4)实验者生理或心理特点,或缺乏经验引入的误差。例如,有的人习惯于侧坐斜视读数,就会使估读的数值偏大或偏小。

系统误差的消除、减小或修正都属于技能问题,可以在实验前、实验中、实验后进行。例如,实验前对测量仪器进行校准,对人员进行专门训练等;在实验中采取一定方法对系统误差加以补偿;实验后在结果处理中进行修正,等等。

虽然系统误差的发现、消除、减小或修正是一个技能问题,但是,要找出其原因,寻求其规律性并非轻而易举之事。这是因为:

首先,实验条件一经确定,系统误差就获得了一个客观上的恒定值,在此条件下进行多次测量并不能发现该系统误差。

其次,在一个具体的测量过程中,系统误差往往会和随机误差同时存在,这给分析是否存在系统误差带来了很大的困难。

能否识别和消除系统误差与实验者的经验和实际知识有着密切的关系。因此,对于实验初学者来说,应该从一开始就逐步积累这方面的感性知识,在实验时要分析采用这种实验方法(理论)、使用这套仪器、运用这种操作技术会不会给测量结果引入系统误差。

科学史上有这样一个事例。

1909~1914年间,美国著名物理学家密立根以他巧妙设计的油滴实验,证实了电荷的不连续性,并精确地测得基本电荷电量

$$e=(1.591\pm0.002)\times10^{-19}\text{ C}$$

后来,由X射线衍射实验测得 e 值与油滴实验值误差了千分之几。通过查找原因,发现密立根实验中所用的空气黏度值偏小,以致引入系统误差。在重新测量了空气的黏度之后,油滴实验测得

$$e=(1.601\pm0.002)\times10^{-19}\text{ C}$$

它与衍射法测得的结果($1.602\,773\,349\times10^{-19}\text{ C}$)十分吻合。

此例说明实验条件一经确定,多次测量(密立根曾观察了几千个带电油滴)并不能发现系统误差,必须要用到其他的方法(本例中改变了产生系统误差根源的条件),才可能发现系统误差。同时也说明,实验中应从各方面去考虑是否会引入系统误差,当忽略某一方面时,系统误差就可能从这一方面渗透到测量结果中去。

我们将在今后的实验中,针对各实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。

2. 随机误差

随机误差的特点是随机性,即当我们在竭力消除或减小一切明显的系统误差之后,在相同条件下,对同一量进行多次重复测量时,每次测量的误差时大时小,时正时负,既不可预测又无法控制。

随机误差的出现,从表面上看似乎纯属偶然,但是人们经过长期的实践后发现,重复测量的次数很多时,偶然之中会显示出一定的规律性。我们可以利用这种规律对实验结果作出随机误差的误差估算。

3. 粗大误差

粗大误差又称疏失误差,它是由工作人员疏失、仪器失灵等原因造成的超出规定条件下预期的误差。含有粗大误差的测量值明显偏离被测量的真值,在数据处理时,应首先检验,并将含有粗大误差的数据剔除。

应当指出,系统误差是测量过程中某一突发因素变化所引起的,随机误差是测量过程中多种因素微小变化综合引起的,二者不存在绝对的界限,变化的系统误差数值较小时与随机误差的界限不明显。随机误差和系统误差有时可以相互转化。

1.4 测量不确定度

测量的理想结果是获得被测量在测量条件下的真值,但是实际上在测量时,由于实验方法和计量器具的不完善,测量环境不理想、不稳定,实验者在操作上和读取数值时不十分准确等原因,都将使测量值偏离真值,因而测得值不能准确表达真值。在报道被测量的测量结果时,因为报道的是被测量的近似值,所以应同时报道对它的可靠性的评价,即给出对此测量质量的指标,测量不确定度就是测量质量的指标,也即是对测量结果残存误差的评估。

测量值不等于真值,可以设想真值就在测量值附近的一个量值范围内,测量不确定度就是评定作为测量质量指标的此量值范围。设测量值为 x ,其测量不确定度为 u ,则真值可能在量值范围 $(x-u, x+u)$ 之中,显然此量值范围越窄,即测量不确定度越小,用测量值表示真值的可靠性

就越高。

对测量不确定度的评定,常以估计标准偏差来表示大小,这时称其为标准不确定度。

由于测量有误差,因而要评定不确定度。误差的来源不同,它对测量的影响也不同,就其影响表现可分为两类:一类是偶然效应引起的,使测量值分散开,例如用手控停表测摆的周期,由于手的控制存在偶然性,每次测量值不会相同;另一类则使测量值恒定的向某一方向偏移,重复测量时,此偏移的方向和大小不变,例如,用电压表测一电阻两端的电压,由于这时偶然效应很弱,反复测量其值基本不变,当用更精密的电势差计去测量时,可以得知电压计的示值有恒定的偏差,这是电压计的基本误差所致。这两类影响都给被测量引入不确定度,都要评定其标准不确定度,但是评定的方法不同。

1.4.1 标准不确定度的 A 类评定

由于偶然效应,被测量 X 的多次重复测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 将是分散的,从分散的测量值出发,用统计的方法评定标准不确定度,就是标准不确定度的 A 类评定。设 A 类标准不确定度为 $u_A(x)$,用统计方法求出平均值的标准偏差 $s(\bar{x}) = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / [n(n-1)]}$,A 类评定标准不确定度(又称为标准不确定度的 A 类分量)就取为平均值的标准偏差,即

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) \quad (1-1)$$

按误差理论的高斯分布,如果不存在其他误差影响,则测量范围 $[\bar{x} - u_A(\bar{x}), \bar{x} + u_A(\bar{x})]$ 中包括真值的概率为 68.3%,如扩大量值范围为 $[\bar{x} - 1.96 \cdot u_A(\bar{x}), \bar{x} + 1.96 \cdot u_A(\bar{x})]$,其中包括真值的概率为 95%。

1.4.2 标准不确定度的 B 类评定

当误差的影响仅使测量值向某一方向有恒定的偏离,这时不能用统计的方法评定不确定度,这一类的评定就是 B 类评定。

B 类评定,有的依据计量仪器说明书或鉴定书,有的依据仪器的准确度等级,有的则粗略的依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差 Δ (或容许误差或示值误差),此类误差一般可视为均匀分布,而 $\Delta/\sqrt{3}$ 为均匀分布的标准差,则 B 类评定标准不确定度(又称为标准不确定度的 B 类分量) $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \Delta/\sqrt{3} \quad (1-2)$$

严格地讲,从 Δ 求 $u_B(x)$ 的变换系数与实际分布有关,在此均近似按均匀分布处理。

例 1.1 使用量程 0~300 mm、分度值 0.05 mm 的游标卡尺测量长度时,按国家计量技术规范 JJG 30—84,其示值误差在 ± 0.05 mm 以内,即极限误差 $\Delta = 0.05$ mm,则由游标卡尺引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = 0.05/\sqrt{3} = 0.029 \text{ (mm)}$$

例 1.2 使用数字毫秒计测一时间间隔 t ,按 JJG 602—89,其示值误差在 $\pm$ (晶体频率准确度 $\times$ 时间间隔 $t+1$ 个时标)范围内,频率准确度为 1×10^{-5} 。

当 $t = 2.157$ s 时,则 $\Delta = (1 \times 10^{-5} \times 2.157 + 0.001) \text{ s} \approx 0.001 \text{ s}$,则由数字毫秒计引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = 0.001/\sqrt{3} = 0.00058 \text{ (s)}$$

1.4.3 合成标准不确定度 $u_c(x)$ 或 $u_c(y)$

对一物理量测定之后,要计算测得值的不确定度,由于其测得值的不确定度来源不止一个,所以要合成其标准不确定度。

例如,用螺旋测微计测钢球的直径,不确定度的来源有:

- (1)重复测量读数(A类评定);
- (2)螺旋测微计的固有误差(B类评定)。

又如,用天平称衡一物体的质量,不确定度的来源有:

- (1)重复测量读数(A类评定);
- (2)天平不等臂(B类评定);
- (3)砝码的标称值的误差(B类评定),标称值指仪器上标明的量值;
- (4)空气浮力引入的误差(B类评定)。

由不同来源分别评定的标准不确定度要合成为测得值的标准不确定度,首先应明确一点,作为标准不确定度不论是A类评定或B类评定在合成时是等价的;其次是合成的方法,由于实际上各项误差的符号不一定相同,采用算术求和将可能增大合成值,因而采用几何求和法,如图1-10所示。

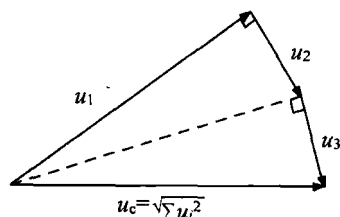


图 1-10

对于直接测量,设被测量 X 的标准不确定度的来源有 k 项,则合成标准不确定度 $u_c(x)$ 取

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k u^2(x_i)} \quad (1-3)$$

式(1-3)中的 $u(x)$ 可以是A类评定或B类评定。

对于间接测量,设被测量 Y 由 m 个直接被测量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 算出,它们的关系为 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$,各 x_i 的标准不确定度为 $u(x_i)$,则 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (1-4)$$

偏导数 $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 为传递系数, $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 的计算与导数 $\frac{dy}{dx_i}$ 的计算很相似,只是计算 $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 时要把 x_i 以外的变量作为常量处理,对于幂函数 $y = Ax_1^a \cdot x_2^b \cdot \dots \cdot x_m^k$,由于

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = y \frac{a}{x_1}, \quad \frac{\partial y}{\partial x_2} = y \frac{b}{x_2}, \quad \dots, \quad \frac{\partial y}{\partial x_m} = y \frac{k}{x_m}$$

则式(1-4)化成比较简单的形式为

$$u_c(y) = y \sqrt{\left(a \frac{u(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(b \frac{u(x_2)}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(k \frac{u(x_m)}{x_m} \right)^2} \quad (1-5)$$

1.4.4 测量结果的报道

$$Y = y + u_c(y) \text{ (单位)}$$

或用相对不确定度 $u_r = u_c(y)/y$, 则

$$Y = y(1 \pm u_r) \text{ (单位)}$$

测量后,一定要计算不确定度,如果实验时间较少,不便于比较全面计算不确定度时,对于偶