

PUTONGWULISHIYAN

普通物理实验 (修订本)

万纯娣 王永新 万春华 等编

南京大学出版社

普通物理实验

(修订本)

万纯娣 王永新 万春华 倪新蕾 燕恩光 编

南京大学出版社

1996·南京

内 容 提 要

本书是南京大学普通物理实验室在长期教学实践的基础上编写而成的。内容广泛,包括预备知识、力学、热学、电磁学、光学五大部分,共 36 个实验,并有附表若干。大部分实验是最基本的,但考虑到实验的先进性,编写了一些反映近代新成果的实验,如“集成运算放大器及其简单应用”、“液氮比汽化热的测定”、“全息照相”、“液氮温区超导电性测量”等。此外,还根据不同系科的要求选择了一些有针对性的实验,例如“地磁水平分量的测量”、“电介质电导率测量”、“照相技术”等供不同系科的学生选做。

本书可作为综合性大学、高等师范院校物理类各专业、工科大学有关系、科的实验教学用书或实验教学参考书。也可供业余大学、自学考试、夜大学等选用。

普 通 物 理 实 验

(修订本)

万纯娣 王永新 刁春华 倪新蕾 燕恩光 编

*

南京大学出版社出版

(南京大学校内 邮政编码:210093)

江苏省新华书店发行 滨海教育印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 328 千

1989 年 9 月第 1 版 1996 年 12 月第 2 版第 2 次印刷

印数 1 4500

ISBN 7-305-00434-0/O·25

定价:16.00 元

(南大版图书若有印、装错误可向承印厂退换)

再 版 前 言

本书的第一版,主要作为综合院校非物理专业、师范院校、工科院校学生的物理实验教学用书,出版后,受到了教师和学生的欢迎,并提出了很多很好的建议和修改意见。为了适应教学的需要和根据读者的意见,我们又从内容、仪器设备的介绍、思考题的命题等方面作了一定修改,编写了第二版。

本书第二版除保持第一版的基本内容和特色外,筛选了一些实验,还增加了某些物理专业一年级学生需做的实验,如“空气密度的测量”、“金属切变模量和内耗的测定”、“集成运算放大器及其简单应用”、“衍射光栅”、“共轴球面系统基点的测量”等共有 36 个实验。这样,使本书的内容更丰富,适应面更广。

本书第二版还增加了不少思考题,这样可以促使学生在实验过程中更加认真的观察和分析实验中出现的物理现象,加深对物理概念的理解。

由于历史的原因,这些实验中的相当部分是历年来、分别由很多同志初始编排的,每一个实验的编排和讲义的编写无不浸透了这些初编者和仪器研制者的心血和汗水,在此虽然没有一一列举他们的姓名,但我们对他们的工作和贡献表示衷心的感谢。

本书第二版编写及出版过程中始终得到南京大学出版社的支持和帮助,谨向他们表示感谢。并向关心本书和提出过宝贵意见的教师及广大读者致谢。由于时间仓促,书中不足之处在所难免,热忱欢迎读者批评指正。

编 者

1996.3 于南京大学

编 者 的 话

本书共选了 35 个实验,全部是我校 78 年招生以来,本校化学、生物、环科、数学、计算机、医学院、地科等非物理专业学生采用过的物理实验内容,按照力学、电磁学、光学的顺序编写,适合综合性大学非物理专业、工科院校和师范院校的学生作为物理实验课教材。

本书 35 个实验内容都是最基本的。在选取内容时,注意到介绍基本物理量的测量,基本测量方法的训练,基本仪器的使用。为了启发学生观察和解释实验中出现的物理现象,实验中除了叙述原理和主要步骤外,还提出了一定数量的思考题。另外,根据不同系科的要求选择了有针对性的实验,例如地磁水平分量的测量、电介质电导率测量、照相技术等,供不同系科的学生选做,以提高他们对物理实验的兴趣和应用物理的方法解决实际问题的能力。

关于误差计算和有效数字,在实验课程学习中是非常重要的,本书对误差的基本概念、简单的误差计算和有效数字运算作了介绍,并要求在实验中反复用于处理数据,为学生今后从事科学实验打下基础。

本书内容虽然是根据专家、同行的论证及面对的各系科的要求经过多年实践而编写的,但作为一本实验教材,仍然是很不完善的。首先实验数量的不足,可提供学生选择的余地不大;其次缺少让学生自行设计实验方法、选择适当仪器、拟出实验步骤的选题。我们近年来通过开放实验室、组织有兴趣的学生参加教师的教学研究活动,以弥补不足。

实验教学是一项集体劳动,这里涉及到实验方案的设计,设备的加工、制作、调试以及数据的测量、计算,讲义的编写、修改,都是实验室主任、任课教师、实验员多年来辛勤劳动的产物,在这个基础上编写的教材理所当然地反映了南京大学物理系普物实验室(外系)许多同志多年来的劳动成果。我们特别要提出的是担任过多年实验室主任工作的燕恩光副教授、张开德讲师、万春华副教授在实验方案设计、讲义的编写和修改工作中做了大量工作,为本书出版奠定了基础。孙秀华实验师、于谣工程师、陈丽如工程师等同志在设备的加工、制作调试工作中进行了辛勤的劳动。

本书编写的分工如下:

万纯娣编写了绪论、力学、热学、光学实验。

王永新编写了电学知识、电磁学实验。

本书由杨润光、俞超、冯璧华、马光群、苗永智副教授、潘元胜高级工程师审稿,编写过程中范全林工程师对电磁学实验进行了清稿、誊写,并绘制了全书的草图。在编写过程和出版过程中,始终得到了南京大学出版社的支持和帮助,在此一并致以衷心感谢。

限于我们的水平和教学经验的不足,请读者不惜赐教。

编 者

1989. 9

目 录

I 绪 论

一、物理实验课的重要意义及目的	(1)
二、物理实验课的三个教学环节	(1)
1. 预习阶段	(1)
2. 进行实验阶段	(1)
3. 完成实验报告阶段	(2)
三、物理实验的基本测量方法	(2)
1. 比较法	(2)
2. 放大法	(2)
3. 换测法	(3)
4. 补偿法	(4)
5. 模拟法	(5)
四、实验误差的基本知识	(6)
1. 测量和误差	(6)
2. 误差的分类	(6)
3. 偶然误差的计算	(8)
五、测量结果的有效数字表示	(12)
1. 测量结果的有效数字	(12)
2. 有效数字的运算规则	(13)
3. 尾数的舍入法则——尾数凑成偶数法	(14)
六、物理实验中常用的数据处理方法	(14)
1. 列表法	(14)
2. 作图法	(14)
3. 累加法	(15)

4. 逐差法	(16)
七、物理量的单位	(16)
练习	(19)

Ⅱ 力学基本仪器介绍

一、米尺	(21)
二、游标卡尺	(21)
三、螺旋测微计	(23)
四、天平介绍	(23)
1. 物理天平	(24)
2. 分析天平	(25)
五、水银气压计	(27)
六、读数显微镜	(27)

Ⅲ 力学、热学和分子物理学实验

实验一 固体密度的测量	(30)
(一) 规则形状固体密度的测量	(30)
(二) 用静力称衡法测量任意形状固体的密度	(32)
实验二 空气密度的测量	(34)
实验三 光杠杆法测金属丝的杨氏弹性模量	(37)
实验四 声速的测量	(42)
实验五 金属切变模量和内耗的测定	(45)
实验六 热电偶与金属比热容的测定	(49)
(一) 热电偶	(49)
(二) 金属比热容的测定	(51)
实验七 液体表面张力系数的测定	(54)
(一) 用拉脱法测量室温下水的表面张力系数	(54)
(二) 用滴定法测量室温下水的表面张力系数	(57)
实验八 用落球法测定液体的粘滞系数	(59)
实验九 液氮比汽化热的测定	(62)

IV 电磁学实验

电磁学实验基本知识	(66)
一、基础电磁学实验最常用的仪表及元件	(66)
1. 测量指示仪表	(66)
2. 电阻类	(68)
二、基础电磁学实验最常用电路	(70)
三、电磁学实验规程	(71)
实验十 电表的改装和校正	(71)
实验十一 分压电路和制流电路的特性研究	(74)
实验十二 用电位差计测量电动势	(78)
实验十三 万用电表的初步使用	(86)
实验十四 示波器的使用	(91)
附录 示波器介绍	(98)
实验十五 二极管的伏安特性曲线与整流	(101)
(一) 二极管伏安特性曲线	(101)
(二) 整流与滤波	(104)
实验十六 晶体管放大电路	(106)
实验十七 双臂电桥测低电阻	(110)
实验十八 地磁水平分量的测量	(116)
实验十九 交流电桥	(119)
实验二十 交流谐振电路的研究	(121)
实验二十一 集成运算放大器及其简单应用	(125)
实验二十二 电介质电导率的测量	(133)
实验二十三 用霍耳元件测磁感应强度	(135)
实验二十四 液氮温区超导电性测量	(138)

V 光学实验

实验二十五 薄透镜焦距的测定	(142)
实验二十六 共轴球面系统基点的测量	(147)
实验二十七 平行光束在球形界面上的反射和折射	(154)

实验二十八 测定凸透镜的表面曲率半径和液体的折射率·····	(158)
实验二十九 分光计的调节和三棱镜折射率的测定·····	(160)
实验三十 显微镜的使用及其分辨本领的研究·····	(165)
(一)显微镜的使用·····	(165)
(二)显微镜的分辨本领·····	(169)
实验三十一 光的干涉·····	(172)
(一)用牛顿环测定透镜表面曲率半径·····	(172)
(二)用劈尖测量纸的厚度·····	(176)
实验三十二 单缝衍射的研究·····	(178)
实验三十三 衍射光栅·····	(182)
实验三十四 光的偏振与波片的作用·····	(185)
实验三十五 照相技术·····	(191)
实验三十六 全息照相·····	(196)
附录 普通物理实验室常用光源·····	(199)
附表 1 海平面上不同纬度处的重力加速度·····	(202)
附表 2 某些元素及无机化合物的密度·····	(202)
附表 3 某些液体密度·····	(202)
附表 4 水在不同温度时的密度·····	(203)
附表 5 不同温度和压强下干燥空气的密度·····	(203)
附表 6 不同温度下干燥空气中的声速·····	(204)
附表 7 液体的粘滞系数 η 与温度的关系·····	(204)
附表 8 水的粘滞系数 η 与温度的关系·····	(205)
附表 9 水的表面张力与温度的关系·····	(205)
附表 10 某些元素的比热容(25°C)·····	(206)
附表 11 某些常见物理常数·····	(206)
附表 12 镍铬-镍铝热电偶温度——绝对毫伏对照表·····	(207)
参考书目·····	(208)

I 绪 论

一、物理实验课的重要意义及目的

物理学是一门重要的基础科学,从本质上讲是一门实验科学。每个物理学新概念和规律的发现和确立都要依赖于反复的实验。物理学上新的突破经常依赖于新的实验的技术的发展,从而促成科学技术的革命,形成新的生产力。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经普遍地应用于各个自然科学领域、技术部门以至其他学科领域。

物理实验课与物理理论课有着紧密的联系,但又是独立的课程。它不仅有助于学生真正理解和掌握物理学理论,而且是提高学生的分析问题和解决问题能力的不可缺少的教学环节。物理实验课能使学生在如何运用理论知识、实验方法和实验技能方面受到较系统的训练,培养学生初步的实验能力;学习掌握一些基本仪器及测量工具的构造原理和使用方法,用以测量一些基本物理量;培养学生严肃的工作态度、严谨的工作作风和良好的工作习惯,使学生具有良好的实验素质,为日后走向社会打好基础。

二、物理实验课的三个教学环节

1. 预习阶段

进行实验前,仔细阅读实验教材及有关书籍,了解本实验的目的、原理和方法,并初步了解有关的测量仪器的使用方法。在此基础上写出实验预习报告。预习报告要求如下:

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 所用仪器。
- (4) 简单原理:画出本实验所需的装置原理图、电路图或光路图,并写出主要公式。
- (5) 列出本实验的主要步骤及需要测量的物理量,并为这些物理量设计合理的记录数据的表格。

上课前要将预习报告带入实验室供记录用。

2. 进行实验阶段

进入实验室要遵守实验室规则:

- (1) 在自己座位上备好预习报告,随时准备回答教师提问。
- (2) 熟悉实验所需仪器,注意仪器种类、量程、精度,调整仪器使其处于可用状态。
- (3) 按步骤进行实验,遵守操作规程,细心操作,认真观察实验中出现的各种现象,实验时做到边实验边思考,用思考来指导实验。
- (4) 待条件稳定方可读取数据。忠实记录数据(注意该仪器应读几位有效位数),测量的数

据经老师检查确认无误签字后,方可整理仪器。

(5) 实验结束后要将仪器整理清点后放回原处,打扫卫生,得到教师允许后方可离开实验室。

3. 完成实验报告阶段

实验报告是学生工作成绩的总结。要求书写字迹工整,文句简练,卷面清洁,画图必须用规定的坐标纸,并且合乎规范和美观。

实验报告内容包括名称、目的、仪器、原理、数据记录及处理,分析讨论实验中观察到的现象、结果及误差,回答问题。实验报告在下次实验时连同预习报告一并交给任课老师。

三、物理实验的基本测量方法

物理测量是泛指以物理理论为依据,以实验仪器和装置及实验技术为手段进行测量的过程。其内容非常广泛,它包括对力学量、分子物理与热学量、电学量和光学量的测量等。测量的方法也很多,按测量方法分类,可分为直接测量、间接测量、组合测量等;按测量内容分类,可分为电量测量和非电量测量两类;根据测量过程中被测物理量是否随时间的变化,又可分为静态测量和动态测量等等。在这里,仅对物理实验中常用的几种基本测量方法作简单的介绍。

1. 比较法

比较法是物理实验中最普遍、最基本的测量方法,它是将待测物理量与选作标准单位的物理量进行比较而得到测量值的。例如,用米尺来测量某一物体的长度就是最简单的比较法,其中最小分度毫米就是作为比较用的“标准单位”。在比较法中,被选作比较用的标准单位与待测量应该是同类物理量。

在直接比较中,标准单位一般可选标准量具。这样,测量的准确度主要决定于标准量具的准确度。

有些物理量难于制成标准量具,因而先制成与标准量值相关的仪器,再用这些仪器与待测量进行比较,这种仪器也可称为量具,比如温度计、电表等。

有时,光有标准量具还不够,还要配置比较系统,使被测量和标准量具能够实现比较。比如只有标准电池还不能测电压,还需要由比较电阻等附属装置组成电位差计来测量电压,这些装置便称为比较系统。

在测量中常用的替代法、置换法,其实也是比较法的一种,它的特点是异时比较。实际上,所有物理量的测量都是将待测量与标准量进行比较的过程。只不过比较的形式不那么明显而已。

2. 放大法

在物理实验的测量中,有时由于被测量过分小,以至无法被实验者或仪器直接感觉和反应,这时可以先通过某种途径将被测量放大,然后再进行测量。放大被测量所用的原理和方法便称为放大法。

例如,在实验中可利用光杠杆原理把被测长度的变化放大,使测量微小长度的变化变成可行,并能达到一定的测量精确度。

光杠杆法测量微小长度变化的装置原理见实验三。

由实验三(5)式, ΔL 原来是一个微小的长度变化量,当取 D 远大于 K 后,经光杠杆转换

后的变化量 r 却是一个较大的量,可在标尺上直接读出。变换(5)式有:

$$r = \frac{2D}{K} \Delta L$$

我们称 $2D/K$ 为光杠杆装置的放大倍数。

一般在实验中 K 约为 4—8cm, D 约为 1—2m, 这样,放大倍数可达到 25—100 倍。

3. 换测法

在物理学中,许多物理量之间存在着多种效应和关系,故可有各种不同的换测方法。这也是物理实验最富有启发性和开创性的一个方面。

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

利用各种参量的变换及其变化的相互关系,以达到测量某一物理量的目的。这种测量方法,称参量换测法。该方法在物理实验中的应用是很多的。

例如,最常见的玻璃温度计,就利用在一定范围内材料(水银、酒精等)的热膨胀与温度的线性关系,将温度测量转换为长度测量。

(2) 能量换测法

能量换测法是指某种形式的物理量,通过变换器,变成另一种形式物理量的测量方法。系统的主要部分由传感器和测量装置组成,传感器也就是能量变换器。

传感器种类很多,从原则上讲,所有物理量,比如尺寸、形状、速度、加速度、振动参量、光洁度等力学量以及温度、压力、流量、湿度、气体成分等都总能找到与之相应的传感器,从而将这些物理量转换为其它信号进行测量。下面只介绍几种比较典型的能量转换器的换测法。

(a) 热电偶。热电偶是根据两种不同材料接触时会产生接触电动势的效应制造的。如图 1.1 中,两种不同金属 P 、 Q 在 A 、 B 两处相接,则在接触面 A 和 B 处均会产生接触电动势。这个电动势的大小和接触面的温度有关。当 A 、 B 两处的温度相同时,电表 V 上没有显示,因为两个接触电动势大小相等,方向相反;当 A 、 B 两处的温度不等时,高温处接触电动势较大,在电表 V 内便有电势差显示。若已知一处温度,便可以查阅事先制好的经验表格或经验曲线,从而找出另一处的温度。

热电偶构造简单,测量温度的准确度高,测量范围宽、灵敏度高,在高、低温区应用均很广泛。

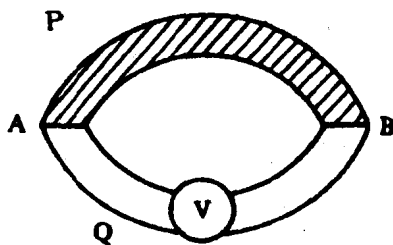


图 1.1 温差电动势产生原理图

(b) 压电传感器。压电传感器是一种典型的自发电式传感器。它是从某些晶体受力后在其表面产生电荷的压电效应为转换原理的传感器。压电晶体是力-电转换元件。它可以测量最终能转换为力的那些非物理量,例如力、压力、加速度等。

压电传感器具有使用频率宽、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠、重量轻等优点。话筒和扬声器就是大家所熟悉的这类传感器。话筒把声波的的压力变化转换成相应的电压变化;而扬声器则进行相反的转换,把变化的电讯号转换成声波。

(c) 光电传感器。光电传感器是将光能通量转换成电量的一种换能器,其变换的物理原理是光电效应。利用光电效应制造的光电管、光电倍增管等光电转换器件可以由光照后产生的电流来测定相对光强。光敏电阻、光导管是用来测量光束中某些谱线光强的器件,它们所依据的原理是受某种光的照射后,电阻率会发生变化。光电池等器件受到光照后会产生与光强有一定关系的电动势,从而也可用测量电动势的办法来测量入射光的相对光强。

(d) 霍耳元件传感器。霍耳元件传感器是利用半导体的霍耳效应制成的一种传感元件,其原理如图 1.2 所示。若在半导体薄片的两端通以控制电流 I ,在薄片的垂直方向上施加磁感应强度 B 的磁场,那么,在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势 V_H ,这种现象称霍耳效应。由理论推导,霍尔电动势 $V_H = K_H IB$,式中 K_H 称霍耳元件的灵敏度或霍尔系数。上式表明霍耳电动势 V_H 的大小与电流 I 和磁感应强度 B 的大小成正比,其方向与 I 及 B 的方向有关。用霍耳元件测量磁场时,需要固定的控制电流,由霍耳电动势的大小和方向便可测得磁感应强度的大小和方向。

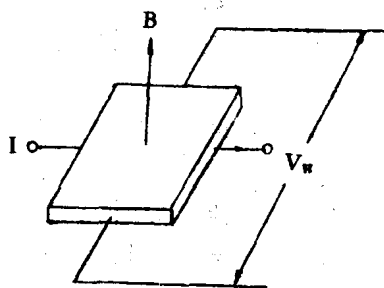


图 1.2 霍耳片应用示意图

4. 补偿法

补偿法在实验中常被使用,它的定义如下:某系统受某种作用产生 A 效应,受另一种同类作用产生 B 效应,如果由于 B 效应的存在而使 A 效应显示不出来,就叫做 B 对 A 进行了补偿。

完整的补偿测量系统由待测装置、补偿装置、测量装置和指零装置组成。待测装置产生待测效应,要求待测量尽量稳定,便于补偿。补偿装置产生补偿效应,要求补偿量值准确达到设计的精度。测量装置可将待测量与补偿量联系起来进行比较。指零装置是一个比较系统,它将显示出待测量与补偿量比较的结果。比较方法可分为零示法和差示法两种。零示法称完全补偿,差示法称不完全补偿。一般都采取零示法,这是因为人的眼睛对刻线重合比刻线不重合而估读的判断能力要高出十倍左右,从而可以提高补偿测量精度。

电位差计是典型的补偿电路应用。其原理如图 1.3。 E_x 为被测电动势, E_s 为标准电池,作为补偿装置。 R_x 、 R_s 均是标准电

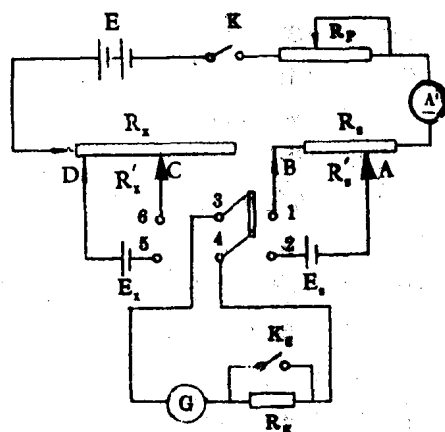


图 1.3 电位差计原理图

阻(做比较电阻用),它连同电源 E 、可变电阻 R_P 构成测量装置,有时也可以用电流表 A 监控测量电路中电流的大小。由检流计 G 以及 R_x 、 K_x 组成指零装置。

当由 R_P 调节的电流 I 流过 R_x 、 R_s 时,在其上便产生电压,可以引出一部分电压与 E_s 和 E_x 补偿,首先将双向双掷开关掷向 E_s 一侧, R'_s 、 E_s 、指零装置组成一回路,调节 R'_s 使检流计 G 中无电流显示,于是 R'_s 上的电压 V_s 与 E_s 补偿,即 $V_s = E_s$,而 $V_s = IR'_s$,即 $E_s = IR'_s$ 。再将 K 掷向 E_x 一边,在保证 I 不变的情况下,调节 R'_x 再使检流计 G 中无电流显示,于是 R'_x 上的电压 V_x 与 E_x 补偿。由于 $V_x = IR'_x$,于是比值

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{V_x}{V_s} = \frac{IR'_x}{IR'_s}$$

由于过程中电流 I 不变,得

$$E_x = \frac{R'_x}{R'_s} \cdot E_s$$

由于标准电池 E_s 和标准电阻 R'_x 、 R'_s 的精度都很高,再配上高精度的检流计 G ,就可使电位差计具有很高的精度。

电位差计有如下优点:

(1) 准确度高(因为精密电阻可以做得很均匀准确,标准电池的电动势准确稳定,检流计很灵敏,电源很稳定)。

(2) 测量范围宽广,可测小电压或电压的微小变化。学生式电位差计的低量程档可测到 10^{-6}V 。

(3) “内阻”高,不影响待测电路。用电位差计测量时,补偿回路中电流为零,故可测出电源电动势。

电位差计由于每次测量都必须经过校准和测量两个步骤,所以其缺点是操作繁复、费时。

近年来,数字式仪表有了很大发展,数字式电压表的内阻高($>10^7\Omega$),准确度高,测量范围也广,而且操作方便,结果显示快,正在越来越多的场合代替电位差计而成为测量电位和电动势的高精度仪器。

5. 模拟法

模拟法是指不直接研究某物理现象或物理过程的本身,而是用与该物理现象或过程相似的模型来进行研究的一种方法。许多难以测量或甚至无法测量的物理量,可以通过模拟法进行。不言而喻,模拟法的基本条件是模拟量与被模拟量必须是等效或类似的。模拟法可以分为物理模拟和数学模拟两个类型。物理模拟就是保持同一物理本质的模拟。例如,在风洞里,用大型电扇吹动空气流动,产生具有一定流速的人造风,将飞机模型静止置于其中,调整好模型与原型的尺寸比例以及风的速度,便可用模型动力学参量的测量,代替原型动力学参量的测量。数学模型又称类比,它和几何相似、物理相似都不相同,原型和模型在物理形式上和实质上均毫无共同之处。数学模拟就是把两个不同本质的物理现象和过程,用同一个数学形式来描述。比如常用恒稳电流场来模拟静电场。模拟法被广泛应用于科学实验和生产实践中,有时既实用方便,又简单经济。

以上所述五种基本测量方法,在物理实验中得到了广泛的应用。应该指出,有时各种方法在物理实验中往往是相互联系、综合使用的。

四、实验误差的基本知识

实验误差理论是一门专门的学科,深入讨论它需要有丰富的实验经验和较多的数学知识。这里我们仅介绍一些有关实验误差的基本知识。要求同学着重了解它的物理意义,学会简单的计算,体会误差在物理实验中的重要性。

1. 测量和误差

做物理实验时,不仅要观察物理现象,而且还要定量地测定物理量的大小。为了进行测量,首先必须规定一些标准单位,如选定质量的单位为千克(kg),长度的单位为米(m),时间的单位为秒(s)等等。所谓测量,就是将被测物理量与这些选作为标准单位的同类物理量进行比较的过程,其比值即为被测物理量的测量值。

(1) 直接测量和间接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量,称为直接测量,相应的物理量称为直接测量量。例如,用米尺测得某物体的长度为 0.1502 米(m),用物理天平测得物体的质量为 31.645 克(g),用秒表测得单摆运动的周期为 2.24 秒(s)等。而更多的物理量是由一些直接测量量通过一定的关系式计算出来的,这样的测量就称为间接测量,相应的物理量称为间接测量量。例如,圆柱体的体积是通过直接测量其直径 D 和高 H ,由公式 $V = \frac{1}{4}\pi D^2 H$ 算得的。值得指出的是,对同一物理量,由于选用的测量方法不同,它可以是直接测量量,也可以是间接测量量。例如,上面所说的间接测得的圆柱体体积,改用量筒排水法来测量,它又成为直接测量量了。

(2) 等精度测量与不等精度测量

如对某一物理量进行多次重复测量,而且每次测量的条件都相同(同一观察者,同一组仪器,同一种实验方法,温度和湿度等环境也相同),那么我们就没有任何根据可以判断某次测量一定比另一次更准确。所以每次测量的精度只能认为是具有同等级别的。我们把这样进行的重复测量叫做等精度测量。在诸测量条件中,只要有一个发生了变化,这时所进行的测量,就成为不等精度测量。一般在进行多次重复测量时,要尽量保持为等精度测量。

(3) 测量与误差

任何物理实验都离不开对物理量进行测量,由于测量仪器、测量方法、实验条件、人的主观因素等等的局限,测量结果是不能无限精确的,我们把被测物理量的客观存在值称为真值,那么真值是不能确定的,每个测量值都有一定的近似性,它们与真值之间总会有或多或少的差异,这种差异就叫做误差。若某物理量的测量值为 X ,客观存在的真值为 A ,则测量误差 ΔX 为:

$$\Delta X = X - A$$

2. 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,可将误差分成三大类:系统误差、偶然误差和过失误差。

(1) 系统误差

系统误差是由确定的因素引起的。其特点是:总使测量结果向真值的某一方向偏离,并有规律可寻。产生系统误差的主要原因有以下几个方面:

(a) 仪器误差。这是由于测量仪器的不完善或有缺陷,以及没有按规定条件使用仪器而造

成的误差。例如,米尺磨损短缺,天平的两臂不等,仪器零点不准,电表没有校正等。

(b) 环境误差。由于外界环境(如湿度、温度、气压、震动、电磁场等等)与要求的标准状态不一致,且偏向一边所造成的误差。

(c) 理论误差(方法误差)。这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或对测量方法考虑不周所带来的误差。

(d) 人身(习惯)误差。这是由于观测者本人生理或心理特点造成的。这类误差往往因人而异,如有人读数总是偏高(或右),有人总是偏低(或左);按停表有人总是过早,有人总是过迟等等。

系统误差不能通过多次测量来消除。只有找出产生系统误差的具体原因,再采取一定的方法来消除它的影响或对测量结果进行修正。

(2) 偶然误差(随机误差)

偶然误差是由于某些偶然的或不确定的因素所引起的。具体些说,这种误差是由于人的感觉器官灵敏度和仪器精度有限,周围环境的干扰以及随测量而来的其他不可预测的偶然因素所造成的。对于某一次测量来说,偶然误差的大小和正负是无法预计的。但是,对同一物理量作大量次数的等精度测量时,可以发现其结果服从一定的统计规律。若把横坐标取为测量值,纵坐标取为各次测量值出现的几率,则一般都遵守正态分布规律。

(3) 过失误差

明显歪曲测量结果的误差称为过失误差。它是由于实验者使用仪器的方法不正确,实验方法不合理,粗心大意读错、记错、算错等原因所引起的。含有过失错误的测量值称之为坏值或异常值,正确的结果中不应包含有过失错误。在实验测量中要极力避免过失错误,在数据处理中要尽量剔除坏值。

(4) 误差与测量结果之间的关系

由于测量不是绝对准确的,如不对测量值的不准确范围有所认识,测量结果将是含糊不清的。测量结果一般用精密度、准确度、精确度三个概念来评价。

(a) 精密度。所谓精密度是指测量结果的重复性程度。精密度高,其测量的重复性好,各次测量误差的分布密集。因此对于精密度高的测量结果,其偶然误差必定较小,反之,精密度低的测量结果,其重复性必差,误差分布不密集,偶然误差较大。

(b) 准确度。准确度表示测量结果与真值的符合程度,即准确性。准确度一般表示仪器误差的大小,测量仪器和测量方法一经选定,测量的准确度就确定了。用同一台仪器对同一个物理量进行多次测量,只能确定其重复性的好坏,而不能确定其准确度。但是,精密度高不一定准确度高,这是由于使用一台比较粗糙的仪器,也能做到测量的精密度高。由于仪器本身限制了测量的准确度,因此精密度和准确度是两个不同的概念,不能混淆。

(c) 精确度。在实验中,一般要求所进行的测量既精密又准确,简称“精确”。从误差的角度来说,即要求系统误差和偶然误差均较小,我们就说测量结果的“精确度”高。也简称其测量精度高。

例如:对某长度作三次测量,设真值为 A ,如图 1.4 中所示。第一种测量表明系统误差大,偶然误差小,称“精密度”高;第二种测量表明偶然误差大,系统误差小,称“准确度”高;第三种测量表明系统误差、偶然误差都小,称“精确度”高。

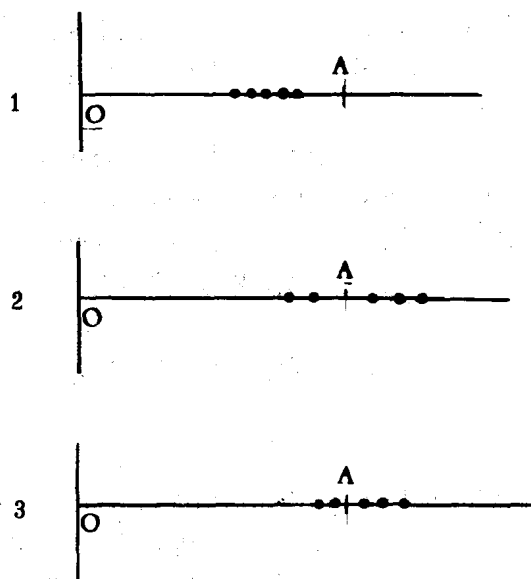


图 1.4

3. 偶然误差的计算

首先应当说明,偶然误差的计算是在错误数据已经剔除,系统误差已经消除或系统误差相对于偶然误差小得多的情况下进行的。

(1) 直接测量量的结果及其偶然误差的估算

(a) 单次直接测量的误差估算。在物理实验中,常常由于条件不许可,测量不能重复。或者由于测量仪器的精密度太低,对测量结果的精确度要求不高,不需精确测量。我们便采取一次测量并估计其误差。估计误差要根据仪器的精度、测量的环境条件等具体考虑,要尽量符合实际情况,不能一概而论。如果主要是仪器精度的限制,可取仪器的精度也就是仪器的分度值的 $\frac{1}{10}$ 或 $\frac{1}{5}$ 或 $\frac{1}{2}$ 作为单次测量的误差。

(b) 多次测量结果的表示及误差估算。为了测量准确,在条件许可的情况下,总是采用多次重复测量求其算术平均值,并估计其偶然误差的大小。

① 算术平均值是最佳估计值

如果对一个真值为 A 的物理量进行 n 次等精度重复测量,其测量值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, 根据误差的定义,测量值 X_i 的误差为:

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

由于真值 A 不知道,所以(1)式不能估计误差,因此我们首先要估计真值。如果对各测量值的误差求和,则有:

$$\begin{aligned} \Delta X_1 + \Delta X_2 + \dots + \Delta X_i + \dots + \Delta X_n &= \sum_{i=1}^n \Delta X_i \\ &= (X_1 + X_2 + \dots + X_i + \dots + X_n) - nA \end{aligned}$$

等式两边除以 n , 则有