新编大学物理实验

上　册

基础性实验

（第二版）

唐远林　朱肖平　主编

重庆大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 简 介

本书是参照1993年国家教委高等学校工科物理实验课程教学指导小组制订的《物理实验课程教学基本要求》编写的，全书共分上、下册，上册为基础实验部分，共24个实验，主要适用于大专以上层次；下册为提高综合与应用创新实验部分，共29个实验，主要适用于本科以上层次。全书内容广泛，系统性较强，共收入52个实验。上册内容包括绪言，常用物理量的测量方法，力学、热学和声学实验，电学和磁学实验，光学实验，附表罗列了16个常用物理基本参数表，以便学生查阅。下册内容包括提高性实验，应用性实验，常用传感器实验，计算机仿真实验，设计性实验和创新实验。本书对有关的实验方法及其原理的叙述力求繁简适当和深入浅出。

本书可作为高等院校各专业的大学物理实验课程的教材或教学参考书，也可作为涉及物理学的广大实验工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验．上册，基础性实验/唐远林，朱肖平主编—2版．—重庆：重庆大学出版社，2004.3

ISBN 7-5624-2160-9

Ⅰ．新…　Ⅱ．①唐…②朱…　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(2004)第005856号

新编大学物理实验

上　册

基础性实验

(第二版)

唐远林　朱肖平　主编

责任编辑：曾令维　　版式设计：曾令维

责任校对：任卓惠　　责任印制：张立全

*

重庆大学出版社出版发行

出版人：张鸽盛

社址：重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编：400030

电话：(023) 65102378　65105781

传真：(023) 65103686　65105565

网址：http://www.cqup.com.cn

邮箱：fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆后勤工程学院印刷厂印刷

*

开本：787×1092　1/16　印张：15　字数：374千

2001年4月第1版　2004年3月第2版　2004年3月第2次印刷

印数：6 001—12 000

ISBN 7-5624-2160-9/O·182　定价：40.00元(上、下册)　本册定价：22.00元

本书如有印刷、装订等质量问题，本社负责调换

版权所有　翻印必究

编　审　人　员

主　　编: 唐远林　朱肖平

编写人员: 唐远林　朱肖平　张　攀　曾光群

沈志强　徐文凤　罗　玲　朱　霞

陈俊斌　邓明晰　康　青　金　蓉

主　　审: 李树河　史通源

前　言

本书是根据1993年国家教委委托课程教学指导委员会制订的《物理实验课程教学基本要求》,结合后勤工程学院现行开设的大学物理实验和使用的教材,参考其他工科院校的物理实验资料整理编写而成的。

本书分上、下两册。上册内容包括绪言,物理实验数据处理理论,常用力、热物理量的测量方法,常用电磁量的测量方法,光学参数的测量方法,力学、热学和声学实验电学和磁学实验,光学实验和附录,上册共7章24个实验。上册主要是基础性实验,适用于大专和本科层次的物理实验教学。下册内容包括提高性实验,应用性实验,常用传感器实验,计算机仿真实验,设计性实验和创新实验,共6章29个实验。下册主要是综合、提高及应用创新实验,适用于本科以上层次的物理实验教学。

为了深化物理实验课的教学改革,本书注意了以下几个问题:

1. 本书较系统地介绍了物理实验数据处理理论,较详尽地描述了各种基本物理量的测量方法,以利于物理实验课教师的课堂讲课和学生自学。

2. 本书在各实验中对数据处理都提出了明确的要求,有利于学生在数据处理的技能上始终得到训练。

3. 本书着眼于加强基本技能的培养和实验方法的训练,对基本的实验方法在实验中反复使用。在基础实验之后,又安排了提高性实验和设计性实验,以利于培养和提高学生的实验能力。

4. 本书结合我院相关专业特点,体现高科技在物理中的应用,编写了应用性实验,将计算机、传感器等技术运用于测试技术之中,有利于学生了解新技术,提高学生的学习积极性,拓宽学生的知识面,为学生后续课程增加了必要的基础知识。

5. 本书为了开阔学生视野,注重创新思维和创新能力的培养,特别编写了创新实验的章节,有利于学生开动脑筋,培养思考问题和解决问题的能力,为学生今后的科研工作打下一定的基础。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,望读者批评指正。

编者

2004年1月

学生实验守则

(1) 实验前必须认真预习实验教材及有关参考资料, 做到初步掌握实验的原理和方法, 并写出预习报告。

(2) 实验开始时, 首先检查和熟悉仪器, 根据操作规程正确调试。学生应在规定的仪器上进行实验, 未经教师同意, 不得任意调换他组仪器。

(3) 实验时, 应集中精力仔细观察和思考所研究的物理现象, 及时记录数据, 字迹要清楚, 不可凭事后回忆“ 追记 ”数据, 更不得为拼凑改原始数据。

(4) 实验完毕, 应将仪器整理好, 凳子放好, 桌子抹干净, 经指导教师同意后, 方可离开实验室。

(5) 严格遵守实验室规则, 爱护实验仪器。实验过程中如果损坏仪器, 应及时报告指导教师。凡属学生责任事故者, 应根据“ 物理实验室赔偿制度 ”酌情赔偿。

(6) 实验后, 应及时整理实验数据。如发现原始数据有错、漏, 应重测或补测, 绝不允许抄袭他人数据和实验报告。实验报告必须在下次实验时交指导教师, 不得拖欠。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

绪　言 …… (1)
0.1　物理实验在物理学发展中的作用 …… (1)
0.2　大学物理实验课的地位和任务 …… (3)
0.3　怎样学好物理实验 …… (3)
0.4　物理实验课的基本程序 …… (4)
第 1 章　物理实验数据处理理论 …… (6)
1.1　测量与误差的基本概念 …… (6)
1.2　测量结果的评定和不确定度 …… (11)
1.3　有效数字 …… (18)
1.4　数据处理 …… (21)
附录 I　随机误差的补充知识 …… (35)
附录 II　标准合成与技术规范合成不确定度 …… (36)
附录 III　教学中常用仪器误差限 $\Delta_{仪}$ …… (38)
第 2 章　常用力、热物理量的测量方法 …… (39)
2.1　长度的测量 …… (39)
2.2　角度的测量 …… (43)
2.3　质量的测量 …… (45)
2.4　时间的测量 …… (47)
2.5　温度的测量 …… (52)
2.6　压强的测定 …… (55)
第 3 章　常用电磁量的测量方法 …… (59)
3.1　电流的测量 …… (59)
3.2　电压的测量 …… (64)
3.3　电阻的测量 …… (65)
3.4　磁场的测量 …… (72)
3.5　电容和电感的测量 …… (75)
第 4 章　光学参数的测量 …… (79)
4.1　实验室常见光源 …… (79)
4.2　光度测量 …… (80)
4.3　分光技术 …… (81)
4.4　偏振技术 …… (85)
4.5　照相技术 …… (89)
4.6　非光量光测的换能原理 …… (92)
第 5 章　力学、热学和声学实验 …… (95)
实验一　基本测量 …… (96)
实验二　气轨上测滑块的速度和加速度 …… (101)
实验三　能量守恒定律的研究 …… (106)

实验四　刚体转动惯量的测定 …… (112)
实验五　用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量 …… (118)
实验六　用单摆测定重力加速度 …… (123)
实验七　液体粘滞系数的测定 …… (126)
实验八　液体比热的测定 …… (130)
第 6 章　电学和磁学实验 …… (132)
实验九　伏安法测电阻 …… (134)
实验十　用模拟法测绘静电场 …… (139)
实验十一　电表的改装和校正 …… (144)
实验十二　用惠斯顿电桥测热电阻 …… (148)
实验十三　用双臂电桥测低电阻 …… (151)
实验十四　用电位差计测量热电偶 …… (155)
实验十五　示波器的使用 …… (158)
实验十六　声速的测量 …… (167)
实验十七　磁化曲线与磁滞回线的研究 …… (175)
第 7 章　光学实验 …… (180)
实验十八　薄透镜焦距的测定 …… (181)
实验十九　分光计的调整和使用 …… (188)
实验二十　光的干涉——牛顿环 …… (196)
实验二十一　组装望远镜和显微镜 …… (201)
实验二十二　偏振光的研究 …… (206)
实验二十三　普通照相技术 …… (210)
实验二十四　数码照相技术 …… (216)
附　表 …… (222)
附表 1　基本物理常数 …… (222)
附表 2　国际制词头 …… (223)
附表 3　在 20 ℃时常用固体和液体的密度 …… (223)
附表 4　在标准大气压下不同温度的水的密度 …… (224)
附表 5　在海平面上不同纬度处的重力加速度 …… (224)
附表 6　在 20 ℃时某些金属的弹性模量(杨氏模量) …… (225)
附表 7　固体的线膨胀系数 …… (225)
附表 8　液体的比热 …… (226)
附表 9　在 20 ℃时与空气接触的液体表面张力系数 …… (226)
附表 10　在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 …… (227)
附表 11　不同温度时水的粘滞系数 …… (227)
附表 12　液体的粘滞系数 …… (227)
附表 13　某些金属和合金的电阻率及其温度系数 …… (228)
附表 14　不同金属或合金与铂(化学纯) 构成热电偶的热电动势(热端在 100 ℃, 冷端在0 ℃时) …… (228)
附表 15　在常温下某些物质相对于空气的光的折射率 …… (229)
附表 16　常用光源的谱线波长表 …… (229)

绪　　言

0.1　物理实验在物理学发展中的作用

物理学是一门实验科学,物理实验在物理学的发展中占有极其重要的地位,离开了物理实验,就无法去谈论物理学的发展。

(1)有许多物理学的理论规律是直接从大量实验事实中总结概括出来的。

经典物理学中,开普勒(1571—1630,德国)依据弟谷·布拉赫(1546—1601,丹麦)所积累的大量观测资料,采纳了哥白尼体系,又把哥白尼(1473—1543,波兰)的圆轨道修改为椭圆轨道,从而得到了开普勒行星运动三定律。牛顿(1642—1727,英国)是在伽利略(1564—1642,意大利)、开普勒、胡克(1635—1703,英国)、惠斯(1629—1695,荷兰)等人的实验及工作基础上,总结归纳出万有引力定律及完成经典力学体系的。能量守恒及转换定律也是大量实验的归纳,其中包括很重要的焦耳(1818—1889,英国)的热功当量实验等。

电磁学中的一系列定律,如库仑定律、欧姆定律、安培定律、毕奥-沙伐尔定律、法拉第电磁感应定律等,都是实验的总结。在有关实验规律和法拉第(1791—1867,英国)的"力线"和场的概念基础上,麦克斯韦(1831—1879,英国)总结了经典电动力学方程组,麦克斯韦曾经说过,他是"为法拉第的场的概念提供数学方法的基础"。

原子光谱中的巴尔末公式和里德伯公式,也是从大量实验数据中综合、归纳甚至是"凑"出来的经验公式。

(2)物理学中的争论要靠实验做出判断来解决。

物理学中常常发生一些不同意见或从不同的理论解释同一问题的争论。实验常常会给予某一种意见以有力的支持,最终,还要靠实验作出判断来解决。

历史上,在对光的本质的认识的过程中,微粒说和波动说的争论持续过很长一段时间。最初,由于光的成影和直线传播的事实,很自然地支持了微粒说,可是,光的独立传播,即两束光交叉后还是各自按原来的方向和强度传播,又给惠更斯的波动说提供了有力的佐证。杨氏(1773—1829,英国)的双缝干涉实验显然证明光是一种波动,马吕斯发现光的偏振证明光是一种横波。列别捷夫(1866—1912,俄国)的光压的测定又有利于光是一种粒子的学说。劳厄(1879—1960,德国)的 X 射线实验证实了 X 线也是一种电磁波,具有波动的性质。还有光电效应及康普顿(1892—1962,美国)效应又给爱因斯坦(1879—1955,美国)的光量子论以有力的支持。最后,以波粒二象性结束了这一场旷日持久的争论,解释了全部实验事实。

(3)实验是修正错误的依据,并常常成为发展理论的新的起点。

例如:亚里士多德(384B. C. —332B. C.,古希腊)曾经断言:体积相等的两个物体,较重的下落较快。他认为,物体下落的快慢精确地与它们的重量成正比。这种理论曾经统治过一千

八百多年。到1586 年,斯台文在他出版的一本力学著作中写道:“ 反对亚里士多德的实验是这样的: 让我们拿两只铅球,其中一只比另一只重十倍,把它们从 30 英尺的高度同时丢下来,落在一块木板或者什么可以发出清晰响声的东西上面,那么,我们会看出轻铅球并不需要比重铅球慢 10 倍的时间,而是同时落到木板上,因此它们发出的声音听上去就像是一个声音一样 ”(梅森:《自然科学史》) 。以后的无数实验事实以及伽利略的逻辑分析都无可争辩地否定了亚里士多德的观点。

再如,在 1956 年以前,物理学家们普遍相信,基本粒子理论在 C(电荷共轭变换) 、P(空间反演) 、T(时间反演) 中任一个单独作用下都是守恒的。但是,有一个令人困惑不解的实验事实却对空间的左右对称性提出了疑问,这即是有名的“ τ-θ”之谜。从质量和寿命方面,粒子 τ 和 θ几乎一样,好像应该是同一种粒子; 可是,实验却发现 τ能衰变成三个 π介子,而 θ只能衰变成两个。因此,它们又好像是两种粒子。从这点出发,杨振宁和李政道提出在弱作用下空间对称不成立。而过去也没有过实验直接证实在弱作用下空间对称成立。他们提出的实验方案被吴健雄等人的实验所证实,从而确立了新的理论,为此获得了 1957 年的诺贝尔物理奖。

(4) 理论的确立有赖于实验验证。

在物理学的发展史上,常常有这样的一种情况,就是在实验事实的基础上,科学家提出了大胆的设想或理论的模型,或从此出发进一步演绎,建立了新的理论体系并得到一定的推论,或给出理论上的预言。但是,不论这些理论看来是多么有创见、合情合理,甚至在数学上也无懈可击,可以解释迄今为止的实验事实,在它们得到实验的进一步验证之前,这种理论还只能算是一种设想,还不能被承认为科学的定论。

麦克斯韦电磁理论的建立是一个明显的例子。19 世纪六七十年代,麦克斯韦在大量实验基础上,特别是把法拉第关于电磁现象所做的大体上是定性的解释发展成为定量的数学形式,提出了“ 涡旋电场 ”和“ 位移电流 ”的假设,建立了著名的麦克斯韦方程组,从理论上阐明了电磁波与光波有共同的特性,并预言电磁波是以光速在空间传播的。麦克斯韦还指出,当时已积压的全部电磁现象都可以用他的四个微分方程来表示。但是,直到 1887 年赫兹(1857—1894,德国) 以一个特制的谐振器作为接收器,接收到了由莱顿瓶放电发出的电磁波,并且做了电磁波的反射、折射、衍射和偏振实验,测出电磁波的传播速度与光速同数量级,才从实验上证实了麦克斯韦的全部假设,使麦克斯韦的电磁理论开始被普遍接受。

对获得诺贝尔物理奖的分析,也可以得到很有意思的结果。

从 1901 年到 1982 年的 81 年间,获得诺贝尔物理奖的科学家中,由于实验得出结论或与实验直接有关的约占有三分之二。而在主要由于理论上的贡献而获奖的名单上,有许多都是在判定性的实验结果得出后不久授予的。例如,1924 年德布洛意(1892—?,法国) 提出物质波的假说,1927 年戴维逊、盖末(美国) 以及汤姆逊(1856—1940,英国) 等人发现了电子衍射,给予德布洛意理论以进一步实验验证。1929 年授诺贝尔奖予德布洛意。又如前述,1956 年吴健雄以钴-60 在超低温下放出的 β粒子多朝一个方向发射的实验,验证了弱相互作用下宇称不守恒。从而杨振宁和李政道于第二年即 1957 获得诺贝尔奖。

我们强调了实验在发展理论中的重要作用,但是,丝毫也没有轻视理论的意图。在物理学的发展史上,理论的发展往往有其相对的独立性; 物理学发展到了今天,在理论指导下进行实验就变得更加重要了。我们应该坚持实验—理论—实验的原则来认识世界、改造世界。

0.2　大学物理实验课的地位和任务

大学物理实验是以一些基本物理量、基本仪器的基本测量方法与基本操作技能为主要内容进行教学训练的课程，是工科各专业第一门必修的、独立设置的基础课程。它是学生进入大学后，接受系统实验技能训练的开端，是入门的向导，在培养学生用实验手段去发现和观测问题、分析研究问题，最终能解决问题等能力方面，起着重要的作用。

本课程的目的是：

(1)学习和掌握如何运用实验原理和方法去研究某些物理现象并进行具体测试，主要是训练学生具有一定的运用测试手段的技能。

(2)熟悉常用仪器的基本原理、结构性能、调整操作、观察和故障排除，着重训练学生操作、调整实验仪器的基本技能。

(3)培养学生如何从测量目的出发，依据适用的原理、方法，利用合适的仪器，确定合理的实验程序去获得准确的实验结果。着重训练学生获取准确的测量结果，进行科学实验的能力。

(4)学习处理实验数据，分析实验方法对测量结果的影响、测量仪器对测量结果的影响、周围环境对测量结果的影响、测量次数和操作技能对测量结果的影响，着重训练学生处理实验数据和分析实验测量结果的能力。

(5)培养学生严肃认真、细致踏实、实事求是、一丝不苟的工作作风。

对于工程技术人员来说，只有具备较为深广的理论知识和足够的现代科学实验的能力，才能适应科学技术飞速发展的需要，担负起建设现代化社会主义祖国的重任。

0.3　怎样学好物理实验

物理实验是对高等工科学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程，是学生进入大学后受到实验方法和技能训练的开端。通过本课程的学习，学生应掌握物理实验知识、方法和技能，了解科学实验的主要过程和基本方法，为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。物理实验课的实施，按照循序渐进的原则，对学生进行由浅入深、由简到繁的培养和锻炼。那么，怎样才能学好这门课程呢？

(1)要注意掌握所采用的实验方法，特别是基本量的测量方法。基本量的测量方法既要经常用到，也是复杂的测量方法的基础，学习时不但要弄明白它的道理，也要逐步加以熟悉和牢记。任何实验方法都有它的运用条件、优点和缺点，只有亲手认真做过实验，才能对这些条件、优缺点有较深的印象。

(2)要有意识地培养良好的实验习惯，教材中对如何正确读数记数、如何处理实验数据、如何正确操作实验仪器等都做了一定的叙述。这些良好的方法和习惯是前人经历了很多实验后的总结，它们能保证实验安全，避免差错。但是，就单个习惯而言，由于它很易明白，不难掌握，反而容易被学生忽视，认为无关紧要。实际上，要真正养成良好的习惯不光是要经过多次实验，还要在每次实验中有意识地锻炼自己。

(3)要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种故障。实验结束时一般会获得测量数据,靠什么去判断这些数据是否正确?数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是靠分析实验本身来判断,即必须分析实验方法是否正确,会带来多大误差,仪器本身会带来多大的误差,实验环境又有多大的影响等等。由于大学物理实验的学习对象是大学一年级学生,他们的实验经验很少,也未掌握分析实验的方法,他们往往误认为实验的目的是为了得到接近于公认的、标准的数据结果。当实验数据和理论计算一致时,他们就会心满意足,简单地认为已学好了这次实验,而一旦数据的计算差别较大,又会感到失望,抱怨仪器装置,甚至拼凑数据以应付实验报告。这两种表现都是不正确的。实际上,任何理论公式都是一定条件下理论上的抽象和简化,而客观现实比实验所处的环境条件要复杂得多,实验结果必然会带来和理论公式的差异,问题在于差异的大小是否合理。所以,不论数据好坏,主要的是要逐步学会分析实验,找出原因。

当出现数据不佳时,应该怎样对待呢?首先,要检查自己的操作和读数,这往往需要重复一下实验,关键的操作和读数最好请教师当场检查和指导。如果操作和读数都正确,那么毛病可能出现在仪器和装置上,仪器装置的小毛病和小故障,学生要力求自己动手解决,起码要留意观察教师怎样动手解决。即使是仪器装置失灵,也要观察教师怎样去判断仪器的毛病,怎样修复(指能当场修复的仪器)。应该说,能否发现仪器装置故障,能否修复仪器,是实验能力强弱的一个重要表现,学生也要逐步有所提高。

(4)每次实验要掌握好重点。实验是一件实际的工作,除了学习重点的内容外,还会遇到很多零散的问题,做一些枝节的工作。教材中所指出的每个实验的实验目的都是该实验的学习重点,学生应在实验时把主要精力放在这些地方,以提高学习效率。

本书中每个实验都有一定的测量内容,通过这些测量使学生体验实验方法和操作技能,并取得必要的数据。在完成规定的测量内容以后,如果还有富裕的时间,可以根据自己实验时的具体情况来分析一下实验可能存在的问题,例如,所用的某个仪器是否可靠?实验条件是否已得到满足?如何予以证实?或者提出对实验内容、实验仪器的一些改进意见等。

实验课有它自己的特点和规律,要学好实验课不是一件容易的事情。希望学生在学习过程中能够不断提高对实验的兴趣,逐步提高实验技能,使自己成为一名有素养的工程技术人员。

0.4 物理实验课的基本程序

大学物理实验课的基本程序一般可分为三个阶段:

(1)实验前的预习

由于实验课的时间有限,而熟悉仪器和测量数据的任务一般都比较重,不允许在实验课内才开始研究实验课的原理。为了在规定时间内高质量地完成实验课的任务,学生应当做好实验前的预习。预习时要写好预习报告。

预习报告的内容为:①实验名称;②实验目的;③实验仪器;④实验简要原理;⑤实验内容(简要写出实验步骤);⑥列出实验数据记录表格;⑦记录预习中遇到的问题和实验注意事项等。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

以上所列的预习报告的内容作为将来实验报告的前半部分。每次实验前,教师都要检查,没有预习报告者,将不准进入实验室做实验。

(2)进行实验

实验前要熟悉仪器,了解仪器的工作原理和方法,然后将仪器安装调整好。例如,调节气垫导轨达到水平,调整自由落体跟地面垂直,调节光具座上各光学元件处于同轴等高等等。

每次测量后,应立即将数据记录在实验数据记录表上。要根据仪表的最小刻度单位或准确度等级决定实验数据的有效数字位数。如果觉得测量的数据有错误,可在错误的数字上画一条整齐的直线;如果整段数据都测错了,则划一个与此段大小相适应的“×”号,并重新测量。在情况允许时,可以简单地说明为什么是错误的。错误记录的数据不要用黑圆圈或黑方块涂掉。我们保留“错误”数据,不毁掉它,是因为原先认为“错误”的数据有时经过比较后竟是对的。当实验结果与温度、湿度和气压有关时,要记下实验进行时的室温、空气湿度和大气压等实验条件。

在两人或多人合作做实验时,应当既有分工又有协作,以便共同达到预期的实验要求。

(3)写实验报告

实验报告是实验工作的总结,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来。写报告时,要求文字通顺,字迹端正,图表规矩,结果正确,讨论认真。应养成实验完成后尽早将实验报告写出来的习惯。

完整的实验报告,通常包括下列几个部分:

1)实验名称;2)实验目的;3)仪器设备;4)简要原理和公式;5)简要的实验步骤;6)实验数据(以上6项是预习报告所要求的内容);7)计算或作图;8)误差分析;9)实验结果表示;10)问题讨论。

误差分析包括两方面的内容:一是确定实验结果的误差范围,因为在精确测量中判定实验结果不准确范围跟获得实验结果具有同等的重要性;二是找出影响实验结果的主要因素,从而采取相应的措施(例如,合理选择仪器,实现最有利的测量条件等)以减小误差。显然,对于不同的实验,因所用的实验方法或所测量的物理量不同,误差分析的方式亦不尽相同。误差过大时,应分析原因,对误差做出合理的解释。

在表达实验结果时,一般包括不可分割的三部分,即结果的测量值 $\bar{x}$、不确定度 σ 和相对不确定度 E_x,综合起来可写为

$$x = (\bar{x} \pm \sigma)\ \text{单位},\quad E_x = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%$$

如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理定律,则只需扼要地写出实验的结论。

在最后的讨论中(包括回答教材中的思考题):分析实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释;对于实验仪器装置和实验方法的建议等。还可以谈实验的心得体会,但不要求每个实验都写心得体会,有则写,没有则不写。

第 1 章　物理实验数据处理理论

1.1　测量与误差的基本概念

1.1.1　测量与数据的获得

在物理实验中,是用实验的方法研究各种物理现象及其规律,因此既要定性地观察物理现象的过程,又要定量地测出有关物理量的大小。为了进行测量,必须规定一些物理量的标准单位。如在国际单位制中,选定质量的单位为千克,长度的单位为米,时间的单位为秒,电流强度的单位为安培等等。测量就是将待测物理量与这些选定了标准单位的物理量进行比较,其倍数即为物理量的测量值。测量可分为直接测量和间接测量。

(1)直接测量

所谓直接测量,就是把待测量直接与标准量(量具或仪表)进行比较,直接读数,直接得到数据。例如,用米尺量得某物体长度为 0.516 3 m,用停表测得某单摆运动的周期为 1.05s 等。在物理实验和工程技术中,直接测量是一切实验的基础。

(2)间接测量

有些物理量无法直接与标准量进行比较、读数,即不能直接把结果测量出来,因而只能用间接的办法进行测量。例如,要测量铜柱的密度,可以用卡尺和测微计分别量出它的高 h 和直径 d,算出体积 $V=\pi d^2 h/4$,再用天平称出它的质量 M,则铜柱密度 $\rho=M/V=4M/\pi d^2 h$。像这样一类测量称为间接测量。在实验中,需要间接测量的量,远远多于直接测量的量。实验中的原理、方法、计算等,大都是间接测量的内容。

在直接测量中,实验数据直接从测量仪器中读得。正确的读数应该读到仪器最小分刻度的估计位。对此,以一个最简单的用米尺测量钢棒长度的例子来说明。如图 1-1 所示,把钢棒的一端和米尺的零刻度对齐后,另一端的米尺读数即为棒长。从图中可以看到棒长在 4.2 cm 与 4.3 cm 之间,正确的读数应该为 4.23 cm。在这个数字中,前两位数是可靠数字,最后一位数是估计出来的,称为可疑数字。在直接测量读数时必须要读到仪器最小分格的估计位。仪器的最小分格的刻度也叫该仪器的精度。如图 1-1 所示的米尺的精度为 1 毫米。故读数要读到仪器精度的估计位。若图 1-1 中的钢棒的长度刚好与“4”对齐,则在记录数据时应记作 4.00 cm。

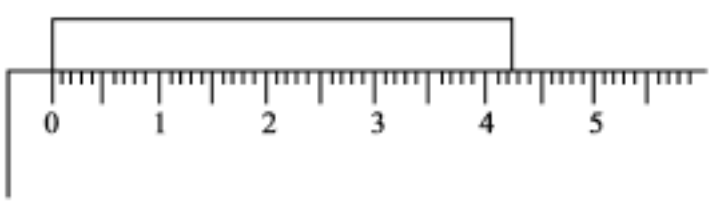


图 1-1

在间接测量中,实验数据的位数应该根据有效数字运算法则或误差理论来确定。

1.1.2 等精度测量和不等精度测量

按测量条件的不同,测量可分为等精度测量和不等精度测量。

等精度测量是指在测量过程中,影响测量的诸因素都相同的测量,也就是说,在测量条件相同的情况下进行的一系列测量都是等精度测量。例如:由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一被测物理量进行多次测量,每次测量的可靠程度都相同,这些测量是等精度测量。

不等精度测量是指测量系列中,如果测量仪器不同,测量方法不同,测量次数不同,测量人员不同,即测量的条件不同,各测量结果的可靠程度自然也不相同,这样的测量系列称为不等精度测量。

1.1.3 测量误差的基本概念

每个物理量都是客观存在的,在一定的条件下具有不依人的意志为转移的一定的数值,这个客观数值称为物理量的真值。进行测量就是想要获得待测量的真值。但是测量是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人进行的。由于实验理论和方法的近似性,实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性,实验人员的习惯、素质的不同以及环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的,测量结果和待测量的真值之间总会存在或多或少的偏差,这种偏差就称为待测量的误差。

某一量的误差 ε定义为该量的测量值(测得值) x 与其真值(真实值) a 的差,即

$$\varepsilon = x - a \tag{1-1}$$

由于在测量中误差是不可避免的,因此测量中应力求做到:

(1) 设法将测量值的误差减至最小;

(2) 求出在测量条件下,被测量的最近真值(最佳值);

(3) 估计最近真值的可靠程度。

为此,必须研究误差的性质、来源以及采取适当的措施,得到最好的结果。

1.1.4 误差的分类

由于误差来源和性质不同,一般可将误差分为系统误差、随机误差和过失误差三类。在实验数据中,这三类误差常常是混杂在一起出现的,现分别讨论之。

(1) 系统误差

在同一条件下(方法、仪器、环境和观察者不变)多次测量同一个物理量时,其结果的符号和大小按一定规律变化的误差称为系统误差。其来源有以下几方面:

1) 仪器的固有缺陷。如刻度不准、零点没有调好、砝码未经校正等仪器本身的缺陷,或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。

2) 环境的改变。如光照、温度、湿度、电磁场等外界环境的影响而产生的误差。

3) 理论和方法的近似性。这是实验方法或理论的不完善或者没有按照公式要求的近似条件去做实验而产生的误差。例如,用公式 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 测量重力加速度时,若单摆的摆角大于 5° 时,就会产生明显的系统误差。

4) 人的习惯与偏向。如有人读数总是偏高, 而有人读数总是偏低, 这是由观测者的感官的偏向或不正确的习惯而引起的误差。

此外, 在实验过程中, 有关的因素考虑不周全, 也会导致系统误差。例如, 精确测定某物体的体积时, 未考虑物体因受热而膨胀的影响; 精密测定某物体的重量时, 忽略了空气浮力产生的影响等。

系统误差的出现一般都有较明确的原因, 因此, 可以采取适当措施使之降低到可忽略的程度, 如校准仪器, 对测量值作合理修正等。但是, 怎样找到产生系统误差的原因, 却是比较复杂的问题, 我们将在某些实验中做一些定性的分析和讨论。

(2) 随机误差

在同一条件下多次测量同一物理量时, 在极力消除或改正一切明显的系统误差之后, 测量结果仍会出现一些无规律的起伏, 也就是每次测量的误差的绝对值和符号随机变化, 时大时小, 时正时负, 不可预定。这种绝对值和符号随机变化的误差, 称为随机误差。其可能的来源是:

1) 人们的感官(如听觉、视觉、触觉) 的分辨能力不尽相同, 表现为每个人估读能力不一致; 即使是同一个人, 在各次重复测量中所得到的测量结果也不会完全相同。这样就造成了各次测量值的起伏, 即误差。

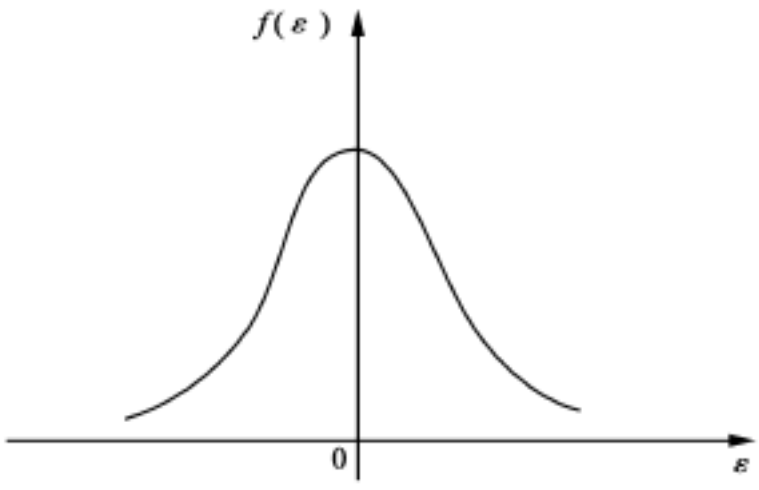


图 1-2

2) 外界环境的干扰(如温度不均匀、振动、气流、噪声等) 既不能消除, 又无法估量, 这也会产生随机误差。

3) 在测量中还未出现的、影响测量结果的次要因素造成了测量值的起伏。

这种误差是无法控制的, 从表面看, 似乎杂乱无章。但当测量次数足够多时, 随机误差就出现明显的统计规律, 呈正态分布(高斯分布), 如图 1-2 所示。

图 1-2 中横坐标表示随机误差 ε, 纵坐标 f(ε) 表示该误差出现的概率。由图可知, 随机误差有如下的性质:

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　在一定测量条件下, 误差的绝对值不超过一定限度。

④抵偿性　随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零。

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\varepsilon\right)=0 \qquad \text{或} \qquad \lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)=x_{真}$$

即多次测量的算术平均值可以作为测量的最近真值(最佳值)。在一定条件下, 增加测量次数可以减小随机误差。但是在实验测量中, 测量次数不可能很多, 在一般的科学研究中重复测量次数取 13 次到 20 次, 而在物理实验中则取 6 次到 10 次。因此, 在测量中必然存在着随机误差。

(3) 过失误差

凡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,过度疲劳,读错、记错数据等引起的误差称为过失误差。这种误差是人为的。只要实验者采取严肃认真的态度,具有一丝不苟的作风,过失误差是可以避免的。

1.1.5 误差与偏差

在任何测量过程中,由于测量仪器、实验条件及其他种种原因,测量是不能无限精确的,测量结果与客观存在的真值之间总有一定差异,测量值 N 与真值 N_0 之差定义为误差,即

$$\Delta N = N - N_0$$

显然误差 ΔN 有正负大小之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差。注意,绝对误差不是误差的绝对值!

误差存在于测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能。

实验总是根据对测量结果误差限度的一定要求来制定方案和选用仪器的,不要以为仪器精度越高越好,因为测量的误差是各个因素所引起的误差的总和,要以最小的代价来取得最好的结果,要合理地设计实验方案,选择仪器,确定采用这种或那种测量方法。如比较法、替代法、天平的复称法等,都是为了减少测量误差;对测量公式进行这种或那种的修正,也是为了减少某些误差的影响;在调节仪器时,如调铅直、水平,要考虑到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以忽略不计;电表接入电路和选择量程都要考虑到引起的误差大小。在测量过程中某些对结果影响大的关键量,就要努力想办法将它测准;有的量测不太准对结果没有什么影响,就不必花太多的时间和精力去对待。处理数据时,某个数据取到多少位,怎样使用近似公式,作图时坐标比例、尺寸大小怎样选取,如何求直线的斜率等,都要考虑到引入误差的大小。

由于客观条件、人的认识的局限性,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 $x_1, x_2, \cdots, x_n$(测量过程无明显的系统误差)。它们的误差为

$$\Delta x_1 = x_1 - x_0$$
$$\Delta x_2 = x_2 - x_0$$
$$\cdots$$
$$\Delta x_n = x_n - x_0$$

求和

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

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 $n \to \infty$,可以证明 $\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i}{n} \to 0$,而且 $\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = x$ 是 x_0 的最佳估计值,称 x 为近真值。

为了估计误差,定义测量值与近真值的差值为偏差:即 $\Delta x_i = x_i - x$。

偏差又叫残差。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。

1.1.6 相对误差

绝对误差与真值之比的百分数叫相对误差,用 E 表示:

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

由于真值无法知道,因此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,其值用百分数表示,保留两位数。

1.1.7 随机误差的估算

关于随机误差的分布规律和处理方法,涉及较多的概率论和数理统计知识,这里只引用结论,不进行论证。

大量实践证明,对某一观测量进行多次重复测量,其结果服从一定的统计规律,也就是正态分布(或高斯分布)[见附录Ⅰ]。我们用描述高斯分布的两个参数(x 和 σ)来估算随机误差。

设在一组测量值中,n 次测量的观测值分别为:$x_1, x_2, \cdots, x_n$

(1)根据最小二乘法原理证明,多次测量的算术平均值:

$$x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (1\text{-}2)$$

是待测量真值 x_0 的最佳估计值。称 x 为近真值,以后将用 x 来表示多次测量的近似真实值。

(2)标准偏差

$$S_x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2}{n-1}} \qquad (\text{贝塞尔公式}) \qquad (1\text{-}3)$$

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

1.1.8 算术平均值的标准偏差

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2}{n(n-1)}} \qquad (1\text{-}4)$$

其意义表示测量值的平均值的随机误差在 $-\sigma_x \sim +\sigma_x$ 之间的概率为 68.3%,或者说待测量的真值在 $(x-\sigma_x) \sim (x+\sigma_x)$ 范围内的概率为 68.3%。因此 σ_x 反映了平均值接近真值的程度。

1.1.9 标准偏差 σ_x

作为随机误差大小的描述,σ_x 小表示测量值密集,即测量的精密度高;σ_x 大表示测量值

需要全本请访问 www.ertongbook.com