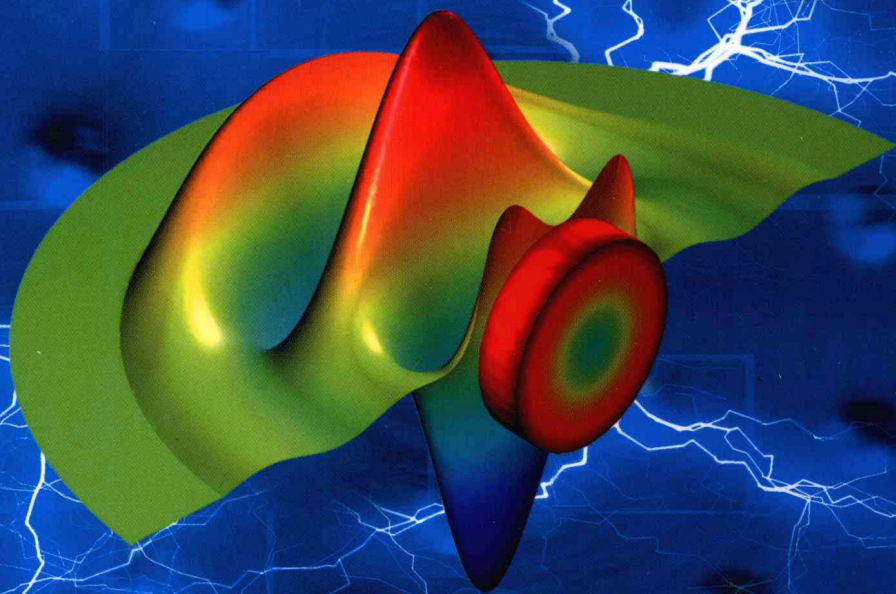


21世纪高等院校教材



主编 李勇华 副主编 陈宗广

工科物理实验教程



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

工科物理实验教程

主 编 李勇华

副主编 陈宗广

参 编 郭 鹏 张 磊 杜三山

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书依照《高等工业学校物理实验课程基本要求》，总结近年来兰州交通大学物理实验教学改革以及实验室建设成果的基础上编写而成。全书共分7章，第1章为测量误差与不确定度的评估；第2章为有效数字与数据处理；第3章为力学、热学和物性参数的测定；第4章为电磁量的测量；第5章为光学参数测量与光测技术；第6章为传感器基础实验；第7章为综合提高性实验。本书以实验方法与测量为主线，重点突出实验方法的系统性与实验内容的协调性，把基本实验、提高性实验分别归入几大物理量的测量内容中，强调培养学生综合素质的重要性。

本书可作为高等院校工科各专业的物理实验课程的教材或参考书，也可供其他专业的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

工科物理实验教程/李勇华主编. —北京:科学出版社,2009
21世纪高等院校教材
ISBN 978-7-03-023730-9

I. 工… II. 李… 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010960号

责任编辑:胡云志 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

涿海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年1月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—6 000 字数:446 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

物理实验是物理学的基础,物理实验的方法与思想是理工科及各个学科实验的典型代表.它在培养学生主动探究知识的精神与实事求是的科学态度,培养学生实践能力、综合创新能力以及适应科技发展与社会进步对人才素质的需求方面有着不可替代的作用.

本书依照《高等工业学校物理实验课程基本要求》,总结近年来我校物理实验教学改革以及实验室建设成果的基础上编写而成.

本书以实验方法与测量为主线,重点突出实验方法的系统性与实验内容的协调性,把基本实验、提高性实验分别归入几大物理量的测量内容中,强调培养学生综合素质的重要性.全书共分7章,第1章为测量误差与不确定度的评估;第2章为有效数字与数据处理;第3章为力学、热学和物性参数的测定;第4章为电磁量的测量;第5章为光学参数测量与光测技术;第6章为传感器基础实验;第7章为综合提高性实验.

此次参加编写教材的都是在实验教学第一线辛勤耕耘、在实验教学方面有深刻理解并积累了丰富实验经验的教师,本书的完成是集体智慧的结晶.本书的编写修改分工如下:李勇华编写第1~3章、第7章;陈宗广编写第5章;郭鹏、张磊、杜三山编写第4章;杜三山编写第6章;赵文杰审阅了全文;杜三山校对第1~3章、第7章;郭鹏、张磊校对第4章;田俊红、陈娟娟两位老师在本书编写中协作完成部分图和数据表格的制作并负责校对了第5章、第6章.

在本书的编写过程中,参阅了许多兄弟院校的教材及其他参考文献,汲取了不少宝贵经验,特致谢意!前实验室主任赵文杰对本书的编写工作给予了大力支持,提出了许多中肯的建议,并在百忙中审阅了全书.兰州交通大学数理软件工程学院的领导给予了深切关注与大力支持,兰州交通大学高压物性研究所的宋青、孙小伟等老师提供了许多建设性的建议.物理实验课是一门体现集体智慧与劳动成果的课,每个实验项目都是日积月累地发展完善起来的,虽然一些老师没有参加教材编写,但是这本教材中也有他们多年来在实验室建设与实验教学中的劳动与奉献.在此一并表示衷心感谢.

由于我们的水平和条件有限,书中难免有不妥或疏漏,欢迎各位专家和同学批评指正.

编 者

2008年11月

目 录

前言	28
绪论	1
第 1 章 测量误差与不确定度的评估	5
1.1 测量与误差的基本知识	5
1.1.1 测量及其分类	5
1.1.2 误差及其分类	6
1.1.3 研究误差的重要意义	9
1.2 系统误差	11
1.2.1 系统误差的种类	11
1.2.2 系统误差的发现	12
1.2.3 系统误差的减消和修正	13
1.3 随机误差	14
1.3.1 随机误差的统计意义	15
1.3.2 随机误差的分布特征	16
1.3.3 随机误差的表征	17
1.4 测量结果的表达——不确定度	19
1.4.1 引入不确定度的意义	19
1.4.2 测量不确定度的定义及分类	20
1.4.3 测量误差与不确定度	22
1.5 直接测量不确定度的评定	23
1.5.1 物理实验中不确定度基本评定方法	23
1.5.2 实验中的仪器误差限 Δ_{INS}	25
1.5.3 测量结果的表达	26
1.5.4 多次直接测量的不确定度评定步骤	26
1.6 间接测量不确定度的估算	27
1.6.1 间接测量的最佳估计值	27
1.6.2 间接测量的不确定度传递	27
1.6.3 间接测量不确定度评定步骤	
第 2 章 有效数字与数据处理	30
2.1 有效数字	30
2.1.1 有效数字的定义及性质	30
2.1.2 有效数字的取舍修约规则	31
2.1.3 有效数字运算规则	31
2.2 实验数据的有效位数确定	32
2.2.1 原始数据的有效位数确定	32
2.2.2 运算过程中的数和中间运算结果的有效位数	33
2.2.3 测量结果最终表达式中的有效位数	33
2.2.4 实验数据的有效数字处理实例	33
2.3 数据处理方法	35
2.3.1 列表法	36
2.3.2 图示法和图解法	36
2.3.3 逐差法	38
2.3.4 线性回归与最小二乘法	40
练习题	42
第 3 章 力学、热学和物性参数的测定	45
3.1 弹性模量的测定	45
3.1.1 概述	45
3.1.2 杨氏弹性模量的测量方法	45
3.1.3 实验 1 拉伸法测量钢丝的杨氏模量	51
3.1.4 实验 2 霍尔位置传感器法测量杨氏模量	59
3.1.5 实验 3 动态悬挂法测量金属的杨氏模量	62
3.2 转动惯量的测定	68
3.2.1 概述	68

3.2.2 测量方法·····	68	4.2.4 实验 16 开尔文电桥测量金 属的电阻率·····	140
3.2.3 实验 4 扭摆法测量转动惯量 ·····	74	4.3 电场的描绘·····	145
3.2.4 实验 5 三线摆测量转动惯量 ·····	78	4.3.1 概述·····	145
3.3 简谐振动·····	82	4.3.2 实验 17 电场的描绘·····	146
3.3.1 概述·····	82	4.4 电感的测量·····	149
3.3.2 实验 6 弹簧振子的振动周期 测量·····	82	4.4.1 概述·····	149
3.4 液体性质的测定·····	88	4.4.2 实验 18 谐振法测电感·····	149
3.4.1 概述·····	88	4.5 磁场的描绘与测量·····	152
3.4.2 测量方法·····	90	4.5.1 概述·····	152
3.4.3 实验 7 拉脱法测定液体表面 张力系数·····	94	4.5.2 实验 19 霍尔元件测量磁场 ·····	152
3.4.4 实验 8 落球法测定液体黏滞 系数·····	98	4.5.3 实验 20 霍尔传感器测量磁 化曲线与磁滞回线·····	158
3.5 声速的测量·····	100	4.5.4 实验 21 示波器测绘铁磁材 料的磁化曲线与磁滞回线···	162
3.5.1 概述·····	100	4.5.5 实验 22 冲击电流计测量磁场 ·····	170
3.5.2 测量方法·····	100	4.6 电磁波综合实验·····	174
3.5.3 实验 9 声速的测量·····	101	4.6.1 概述·····	174
3.6 热敏电阻温度特性研究·····	107	4.6.2 实验 23 电磁波综合实验···	175
3.6.1 概述·····	107	4.7 非线性电路混沌实验·····	181
3.6.2 实验 10 热敏电阻温度特性 的研究·····	108	4.7.1 概述·····	181
第 4 章 电磁量的测量 ·····	113	4.7.2 实验 24 非线性电路混沌实验 ·····	182
4.1 电压的测量·····	113	第 5 章 光学参数测量与光测技术 ·····	186
4.1.1 概述·····	113	5.1 光学实验基础知识·····	186
4.1.2 实验 11 电势差计·····	114	5.1.1 概述·····	186
4.1.3 实验 12 示波器的调整与使 用(一)·····	118	5.1.2 光学实验注意事项·····	186
4.1.4 实验 13 示波器的调整与使 用(二)·····	130	5.2 几何光学综合实验·····	186
4.2 电阻的测量·····	133	5.2.1 概述·····	186
4.2.1 概述·····	133	5.2.2 实验 25 薄透镜焦距的测量·····	187
4.2.2 实验 14 线性与非线性电阻 ·····	134	5.3 显微镜和望远镜·····	192
4.2.3 实验 15 惠斯通电桥测电阻 ·····	137	5.3.1 概述·····	192
		5.3.2 实验 26 望远镜与显微镜的组装 ·····	192

5.4 分光技术	194	6.2.2 实验 36 电涡流传感器	241
5.4.1 概述	194	第 7 章 综合提高性实验	245
5.4.2 实验 27 分光计的调整与使用	195	7.1 真空的获得与测量	245
5.4.3 实验 28 光栅常数的测量	202	7.1.1 引言	245
5.5 干涉仪	204	7.1.2 实验 37 真空的获得与测量	245
5.5.1 概述	204	7.2 化学气相沉积薄膜制备技术	252
5.5.2 实验 29 菲涅耳双棱镜测激 光波长	205	7.2.1 引言	252
5.5.3 实验 30 牛顿环与劈尖干涉	208	7.2.2 实验 38 类金刚石薄膜的制备	253
5.5.4 实验 31 迈克耳孙干涉仪	214	7.3 磁共振技术	258
5.6 光电效应	216	7.3.1 引言	258
5.6.1 概述	216	7.3.2 实验 39 核磁共振	260
5.6.2 实验 32 普朗克常量的测定	217	7.3.3 实验 40 光泵磁共振	268
第 6 章 传感器基础实验	222	7.4 激光全息照相	277
6.1 传感器基础	222	7.4.1 引言	277
6.1.1 引言	222	7.4.2 实验 41 全息照相	277
6.1.2 实验 33 电阻应变片特性研究	224	7.5 激光散斑干涉技术	282
6.1.3 实验 34 热电偶	228	7.5.1 引言	282
6.2 传感器综合实验	231	7.5.2 实验 42 ESPI 散斑干涉原理 测量位移	283
6.2.1 实验 35 光敏传感器的光电 特性研究	231	参考文献	288
		附录	289
		附录 I 常用基本物理常数	289
		附录 II 国际单位制简介	290

绪 论

1. 科学实验的重要性

物理学是研究物质运动最一般规律及物质基本结构的科学,它是一门建立在实验基础上的学科.无论是物理概念的建立还是物理规律的发现,都必须以严格的科学实验为基础,并被今后的科学实验所证实.实验是对自然有目的、有准备的积极探索.

物理学的方法是科学方法的典型代表,科学的研究方法就是细心观察和创造概念使各个观察结果发生关联,经验(表现为实验和观察)与思想(表现为创造性地构筑使经验关联起来的理论和假说)之间的动态相互作用.所谓理论就是人类认识自然中使观察结果相互关联的创造性的智力框架,理论是正确的(有相对性).对现象的解释,提出某些假设和看法,还未得到实验证实的就是假说.为检验假说,筹划适当的手段和方法,根据由此产生的现象来判断假说的真伪.假说如果接受实验的检验就上升为理论,否则就要修改重新接受实验检验或者扬弃.因此,科学实验的重要性是不言而喻的,物理实验在物理学的发展过程中起着重要的和直接的推动作用.

在物理学史上最早把科学的实验方法引入物理学研究中的人是16世纪意大利的科学家伽利略(G. Galileo, 1564~1642),他是最早运用我们今天所称的科学方法的人.伽利略在建立系统的科学思想和实验方法中,开创了实验物理学和近代物理学,对物理学的发展作出了划时代的贡献.正如他自己在《两种新科学的对话》中所述:“我们可以说,大门已经向新方向打开,这种将带来大量奇妙成果的新方法,在未来年代会博得许多人的重视.”事实正是如此,当代著名物理学家爱因斯坦(A. Einstein, 1879~1955)在《物理学的进化》中,对伽利略的科学思想方法给予了高度评价.他指出:“伽利略的发现,以及他所用的科学推理方法,是人类思想史上最伟大的成就之一,而且标志着物理学的真正开端.”

历史表明,在物理学上许多关键问题的解决,最后都是诉诸实验的.例如,杨氏的光干涉实验对于证实光的波动性,迈克耳孙-莫雷实验对于证实以太的不存在,赫兹实验对于证实麦克斯韦的电磁场理论,都起了决定性的作用.每一次科学实验的成功都再一次揭示出自然界的奥秘,使人类在认识自然的道路上又前进一步.

2. 物理实验课的任务

整个物理学的发展史是人类不断深刻了解自然、认识自然的历史进程,它是在实验和理论互相推动、密切结合下进行的,实验和理论在物理学中具有同等重要的地位,恰如鸟之双翼、人之双足,缺一不可.因此,学习物理学时除学习理论外,还必须学习通过实验进行探索知识的方法.

大学物理实验是工科学生进入大学后接受系统的实验思想和实验技能训练的开端,是以教学为目的,其目标不在于探索,而在于培养基本技能.教学实验都经过精心设计准备,是一定能成功的.尽管如此,教学实验的地位仍然非常重要,因为该课程担负着培养学生基本科学素质的任务.物理实验课是一门基础实验课,是知识的底层,这底层的重要性

更是不言而喻的。

大学物理实验的任务是：

(1) 培养学生主动探究知识的精神。实验过程中无论成功的喜悦还是失败的挫折，都会激发我们去深思其中的原因，只有经过思考的知识才能变为自己的知识，才能提高我们的思维能力与创造能力。

(2) 培养学生基本的实验能力和初步的科研能力。通过预习，使学生学会阅读文献，了解实验的思想与背景知识，概括出实验原理和方法要点，明确实验目的，知道怎么去做，书本上是怎样实现的，是否还有更好的方法；通过动手做实验，学习各种物理量的测量，学会基本仪器的使用与设备的操作，学会观察实验现象并获取数据信息的能力；通过撰写实验报告，学会正确记录数据，处理数据以及分析数据，通过每个实验的总结与讨论有意识地培养综合能力，这些都是科研必备的基本素质，也是进一步学习、工作、研究的基础。

(3) 培养学生严谨、求实的作风与坚韧不拔的精神。

3. 物理实验课的学习特点

实验课是同学们在教师的指导下自己动手，独立地完成实验任务。在物理实验过程中，同学们应关注以下几点：

1) 实验的物理思想

对于每一个物理实验，不仅应重视其原理、实验装置和数据处理方法等问题，更应着重了解其物理思想，这对于我们设计新的实验往往能提供很多启示和借鉴。例如，对杨氏模量的测量，我们在实验中可以用三种测量方法来实现，有什么共同之处，它们各自的思想、特点是什么，与当今的技术发展有什么联系，是否能设计出新的方法等都值得我们去思考。

2) 实验装置与仪器

使用仪器或装置必然要了解它的原理和使用方法，作为一个实验者还要了解该仪器设计的独创性之所在。例如，测量低电阻的双臂电桥的创造性就在于它消除了导线电阻和接触电阻的影响，使低电阻的测量成为可能。

仪器的改进可以减小某些误差。但是不论设计如何精良，加工和装配如何精细，都不可能制造出没有误差的仪器。因此，在使用仪器时都会给测量引入误差。测量时我们一要采取适当的方法削减其误差的影响，二要将实验仪器的误差限作为测量不确定度的一部分去评估测量的好坏程度。

使用仪器时，要遵守仪器的操作规程，这是取得客观数据、保护仪器所必需的。

实验后，不要立即拆散测量系统，要对记录做初步分析，在不需要补测数据时才可结束。实验结束时，仪器装置要恢复到使用前的状态。

3) 及时发现问题

实验者一般都是细心安排实验的，实验的进程可能比较顺利，但是由于某种原因实验中出现问题也是常见的。实验者应能及时发现问题，及时进行处理，防止精力和物资的浪费。出现问题的原因是多方面的，如理解上的偏差、仪器调节不到位、线路接错、参量取值不当、看错了现象、读错了数据、实验装置变动等。

实验时要边观察现象，边审查数据，边思考分析，看看有无不正常的现象或数据，如果

不假思索地埋头测量,可能在实验结束时才发现测错了!应力求避免这种情景的出现。

4) 实验记录

记录是整理实验结果以及分析问题的依据,这要求记录的是原始数据,即从仪器上读出的未经任何运算的量值。记录内容不仅包括实验数据,还应包括实验的环境条件,仪器的型号和编号,实验中遇到的问题、故障及可疑现象等一切有价值的内容。学生实验结束前应将原始记录交给指导教师审查签字后方可离开实验室。

5) 实验报告

对实验报告首先要明确,报告是工作的总结。实验报告要对实验过程和结果有分析和评价,并要有自己的思考,这是培养我们分析问题能力及综合能力的重要步骤。

实验报告的基本要求是:字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。

报告的内容包括:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理。在理解实验原理的基础上做到简明扼要、图文并茂(原理图和装置示意图等),并列测量和计算所依据的主要公式,注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

(4) 实验仪器。列出实验中使用的仪器名称、型号、规格、编号等。

(5) 实验内容。概括性地写出实验进行的主要过程,特别是关键性的步骤和注意事项。

(6) 数据处理与分析。一般要求以列表形式给出完整而清晰的原始测量数据,写出数据处理的主要过程,绘制图线并进行误差分析、不确定度评估等,以醒目的方式完整地表示出实验结果。

(7) 实验讨论。例如,对物理现象、实验结论和误差来源进行分析,对实验方案提出改进建议,回答实验思考题,叙述实验体会等。

6) 做好实验前的预习

要积极主动地去做实验。

做实验就是在教师指导下独立完成的一项工作。实验前想一想应该如何去做?期望什么结果?实验后应对实验进行评价,并认真反思实验中遇到或想到了哪些问题,收获是什么?总之,在实验过程中一定要动手又动脑,使自己的独立实验能力一步步提高。

预习是主动学习的开始。实验课要认真阅读实验指导书,明确实验目的和要求,理解实验原理,掌握测量方法,初步了解仪器的构造原理和使用方法等,在此基础上写好预习报告。

带着问题学习是探索精神的体现。在预习时如能提出要和教师讨论的问题以及自己要探索的问题,并准备在实验中做些探索和分析,是非常有益的。

4. 遵守实验规则

为保证实验正常进行,培养严肃认真的工作作风和良好的实验习惯,应遵守如下实验规则:

(1) 学生应在课表规定或预约的时间按时进行实验,不得无故缺席或迟到。实验时间

如需变动,要经过实验室批准.

(2) 学生在每次实验前要认真做好实验预习,并在预习的基础上写出预习报告.

(3) 学生进入实验室后,指导教师将检查预习情况和提问,经检查合格后方可进行实验.

(4) 实验时应携带必要的物品,如文具、计算器、草稿纸和作图纸等.

(5) 进入实验室后,学生应核对自己使用的仪器有无缺少或损坏,若发现问题,应向指导教师或实验室管理人员提出.需要借用的仪器,实验完毕应及时归还.

(6) 要细心观察仪器构造,谨慎操作,严格遵守操作规程及注意事项.对电学实验,线路接好后,先经教师或实验室工作人员检查无误后才可接通电源,以免发生意外.

(7) 测量结束应将数据交给指导教师检查,实验合格者予以签字通过,否则要重测或补测.

(8) 要保持实验室整洁、安静.实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐,并由值日同学做好实验室卫生清洁工作.

(9) 如有损坏仪器,应及时报告教师或实验室工作人员,说明损坏原因,赔偿办法根据学校规定处理.

第 1 章 测量误差与不确定度的评估

物理实验是用实验的方法研究物理现象,其最终目的是探索自然规律.物理实验研究的内容包括三部分:第一部分是研究物理现象的再现,是为测量准备条件;第二部分是再现物理现象基础上的测量;第三部分是数据处理.测量是物理实验的中心环节,物理实验课的绝大部分内容是测量,物理实验离不开物理量的测量.由于测量仪器的不准确,测量原理或方法不完善,环境条件不稳定,测量人员不熟练等原因,任何测量结果都可能具有误差,即测量中的误差是不可避免的.

误差理论及不确定度表述体系是以概率论与数理统计为数学基础,以计量测试工作为实践基础的一个理论性、方法性的体系.这一体系的方法要用于所有科学技术和工程的测量、检验和控制领域,并涉及质量控制、工业管理、商品检测、环境监控、医卫检验、标准规范和国际合作交流贸易等许多方面.

误差分析、不确定度计算以及数据处理贯穿于大多数实验的全过程,它表现在实验前的实验设计与论证,实验进行过程中的控制与监视,实验结束后的数据处理和结果分析.通过本章的学习和今后各个实验中的运用,要求达到:

- (1) 建立误差和不确定度的概念,正确估算测量的不确定度.
- (2) 掌握有效数字的概念、实验数据有效位数的确定以及实验数据的有效位数与不确定度的关系.
- (3) 了解系统误差对测量结果的影响,学习发现某些系统误差以及减小系统误差和削弱其影响的方法.
- (4) 掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等常用的数据处理方法.

1.1 测量与误差的基本知识

1.1.1 测量及其分类

1. 测量

纵观物理学发展历史,人们对自然界物质运动形式的最早认识来自观察.观察就其本质来说是数据的采集过程.随着认识的发展,实验研究方法成为人们认识自然、揭示物质运动规律的主要方法之一.物理实验就是由人设计和控制的观察,大部分在实验室中进行,其本质是再现物理现象,取得定量数据的过程,目的是探索物理规律.测量就是定量的观察,因而测量是物理实验中不可缺少的环节.

物理实验中的测量是为了确定被测量的量值,使用专用仪器和量具,通过实验和计算而进行的一组操作过程.简而言之,将待测物理量与一个作为标准的同类量进行比较,得到它们之间的倍数关系.标准同类量是单位,倍数称为测量数值,物理测量值为二者

乘积.

2. 直接测量和间接测量

根据实验方法测量可以分为两类,即直接测量与间接测量.

1) 直接测量

直接测量就是把待测量直接与标准量(量具)进行比较,直接读数,直接得到数据.例如,用米尺测量长度、用钟表测量时间、用安培表测量电流、用温度计测量温度等.

2) 间接测量

有些物理量无法直接与标准量进行比较,无法直接读数.但是能够找到这些量与某些可以直接测量的量的函数关系.测出可直接测量的量以后,通过函数关系就可获得被测量的大小.这种测量就称为间接测量.例如,位移 S 、时间 T 可以直接测量,但平均速度是间接测量量.在实际实验中,间接测量的量远远多于直接测量的量.由于任何测量都存在误差,间接量平均速度的误差来源于直接量位移 S 和时间 T 的误差.所以,在研究误差时必须彻底搞清楚直接量的误差及其估算.

当然,一个物理量是直接测量量还是间接测量量并不是绝对的,要由具体测量的方法和仪器来确定.例如,用伏安法测电阻时,电流、电压是直接测量量,电阻是间接测量量;用欧姆表测量时,电阻又成为直接测量量.

3. 等精度测量和非等精度测量

根据测量条件的不同,测量又分为等精度测量和非等精度测量.

1) 等精度测量

等精度测量是指在相同测量条件下对同一物理量所做的重复测量.例如,在相同的环境下,由同一个测量人员,用同样的仪器和方法,对同一个待测量做相同次数的重复测量.由于各次测量的条件相同,测量结果的可靠性是相同的,没有理由认为哪次测量更精确或不精确,所以每次测量的值是等精度的.

应该指出的是,要使测量条件完全相同、绝对不变是难以做到的,一般测量实践中(包括物理实验),一些条件变化很小,或某些次要条件变化后对测量结果影响甚微,一般可按等精度测量处理.

2) 非等精度测量

在科学研究和其他高精度测量中,为了得到更精确、更可靠的结果,特意要在不同的条件下,用不同的仪器、不同的测量方法,由不同的测量人员对同一个待测量进行测量和研究.此时,由于测量条件全部或部分发生了明显变化,每种测量的可靠性、精确度显然不同,这种测量即为**非等精度测量**.而最后的测量结果,是通过待测量的各种非等精度测量结果的加权处理来获得的.

1.1.2 误差及其分类

1. 测量误差的定义

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不以人的意志为转移的客观量值,称为**真值**.在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值.但是,任何测量总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

定的人员进行的. 实验理论的近似性, 实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性, 实验环境的不稳定性和人的实验技能和判断能力的影响等, 使测量值与待测量的真值之间总存在差值, 我们把这种差值称为**测量误差**. 若某物理量的测量值为 x , 真值为 x_0 , 则测量误差定义为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

式(1-1)所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向, 因此 Δx 又称为**绝对误差**. 一般来说, 真值是一个理想的概念, 只有通过完善的测量才能获得. 但是, 严格的完善测量难以做到, 故真值就不能确定. 实际测量中, 一般只能根据测量值确定测量的最佳值. 通常取多次重复测量的平均值作为最佳估计值.

绝对误差可以表示某一测量结果的优劣, 但在比较不同测量结果时则不适用, 需要用相对误差表示. 例如, 测量 20m 长的物体相差 1mm 与测量 1m 长的物体相差 1mm, 两者绝对误差相同, 而相对误差不同. **相对误差**定义为某个测量值的绝对误差 Δx 与其真值 x_0 之比的绝对值的百分数, 称为该测量值的相对误差 E , 即

$$E = \left| \frac{\Delta x}{x_0} \right| \times 100\% \quad (1-2)$$

由此可知, 用绝对误差表示测量结果偏离真值的大小与方向, 即表示某一次测量结果的优劣; 相对误差则可以比较不同测量结果的优劣度. 有时被测量有公认值或理论值, 还可用“**百分误差**”来表征:

$$\text{百分误差} = \left| \frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \right| \times 100\% \quad (1-3)$$

因为真值是不能确知的, 所以测量值的误差也不能确切知道, 因此测量的任务就是给出被测量值的最佳估计值即**算术平均值**, 并估计出这种最佳估计值的可靠程度, 所以误差的概念只有理论上的价值.

2. 关于真值、算术平均值与残差

1) 真值

所谓真值是指被测量所具有的真实值的大小. 一个待测量的真值是一个理想的概念, 一般情况下是不可能准确知道的, 但在某些特定的情况下, 真值又是可知的. 下列情况可视为真值:

- (1) 理论值, 如三角形的内角和为 180° 等.
- (2) 公认值, 世界公认的一些常数值, 如普朗克常量、阿伏伽德罗常量等.
- (3) 计量学约定的真值, 如国际及国家计量部门规定的长度、时间、质量等标准.
- (4) 相对真值, 用准确度高一个数量级的仪器校准的测定值, 可视为相对真值.

2) 算术平均值

在实际测量中, 为了减小误差, 常常对某一物理量 x 进行多次等精度测量, 得到一系列测量值 x_1, x_2, \dots, x_n , 则测量结果的**算术平均值** \bar{x} 定义为

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-4)$$

一般就取算术平均值作为该待测量的结果. 由于每一个测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 是等精

度的,也就是每一次重复测量的人员、工具、方法及环境必须保持不变,因此对它们的信任程度也应是一样的,利用它们来求解 x 的最后结果时,各个测量值 x_i 应占有同样的比重;在同样的系统误差情况下,每个测量值的随机误差(后面讲到)根据其抵偿性,当 $n \rightarrow \infty$ 时而趋于零,因而 $\bar{x} \rightarrow x_0$. 故算术平均值比任一次测量值的可靠性更高,所以算术平均值 \bar{x} 是真值 x_0 的最佳估计值.

3) 残差

由于实际测量中用算术平均值代替真值,那么单次测量的结果 x_i 与算术平均值 \bar{x} 之差称为残差,并以 v 表示

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-5)$$

3. 误差的分类

误差的产生有多方面的原因. 根据误差的性质及产生的原因,一般将误差分为系统误差、随机误差(也叫偶然误差)和粗大误差.

1) 系统误差

在相同条件下,多次测量某一物理量,其误差的绝对值与符号保持不变,或按某个确定规律变化,这种误差称为系统误差. 产生系统误差的原因很多,如仪器装置的零点不准、天平不等臂、示值有差值等引起的误差;环境的温度、湿度、气压、电磁场等的变化而引入的误差;方法误差,如采用近似计算公式或测量过程中因方法不当引入附加值而引起的误差;人员的生理反应能力或者习惯引起的误差,如计时过程中有人总是超前,有人总是滞后.

2) 随机误差

如果实验中已理想地消除了系统误差,在相同条件下多次重复测量同一物理量时,还是会发现各次测量值之间有差异,由此而产生的误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化着,称之为随机误差. 这类误差的起因也是多方面的,如实验条件和环境因素微小的、无规则的起伏变化,尤其与观测者生理分辨本领、手的灵活程度等因素有关. 由于它的大小和符号均不可预先确定,它的发生都是偶然的,所以也叫偶然误差. 这种误差永远存在,不可能消除. 虽然对于实验中任意一次测量而言,由于测量值偏离真值而产生的误差的大小和符号是不确定的,但就它们的整体(指一系列的测量值)而言,误差大小和符号的分布却遵循一定的规律,即统计规律.

3) 粗大误差

粗大误差是由于测量者在测量过程中所发生的错误或失误而造成的一种误差,如漏读、错记、算错等因素产生的误差,这是初做实验者常犯的错误. 实验中不允许有粗大误差,但初学者很难避免过失发生. 应采取多种措施防止这种粗大误差,以利于实验的正常进行.

4. 测量的正确度、精密度和准确度

实验中常说的精度,反映测量结果与真值接近程度的量,称为精度,它与误差的大小相对应,因此可用误差大小来表示精度的高低,误差小则精度高,误差大则精度低. 精度可分为:

1) 正确度

正确度是指测量数据的算术平均值偏离真值较小,但不能反映数据的分散情况.

2) 精密度

精密度是指重复测量所得结果相互接近的程度,它是描述实验或测量的重复性程度的尺度,即反映随机误差大小的程度。

3) 准确度

准确度描述测量值接近真值的程度,准确度是精密度与正确度的综合反映.当随机误差小到可忽略的程度时,准确度等于正确度;当系统误差小到可忽略或得到修正时,准确度等于精密度.对具体的实验来说,随机误差与系统误差并不显示固定的依从关系,但在物理实验中,常常是实验结果的精密度高于正确度.准确度定量特征可用测量的不确定度(或极限误差)来表示。

从图 1-1 中可以形象地理解这些概念。

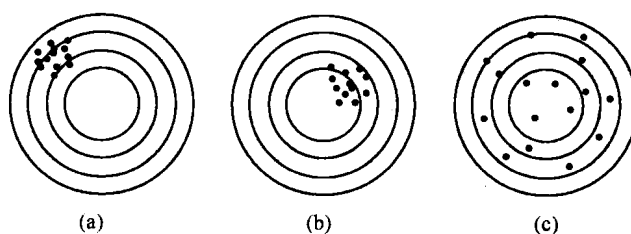


图 1-1 中靶记录

(a) 精密度好,但正确度差,系统误差大;(b) 正确度、精密度均好,因而准确度高;(c) 正确度好而精密度差

由于实验的要求而尽可能地消除或减少系统误差.误差计算主要是估算随机误差,因此不再严格区分精密度和准确度,而称为“精度”.正确度、精密度、准确度只是对测量结果作定性评价,有时不严格区分这“三度”而泛称为精度。

1.1.3 研究误差的重要意义

1. 误差存在的普遍性

类似认识论中的真理命题,人们对被测对象的真值认知过程也是一个不断接近的过程.准确和误差是一对矛盾.与矛盾的普遍性类似,任何测量结果都可能具有误差.“误差‘自始至终’,存在于一切科学实验和测量的过程之中”.这一论述曾被称为“误差公理”。

误差的普遍性可以这样表述:误差普遍存在于测量过程中.由于测量对象的定义不唯一、测量仪器装置不准确、测量原理方法不完善、测量环境条件不稳定、测量人员技术不熟练等原因、任何测量结果都可能具有误差。

任何实验结果都不可避免地存在着误差.因为误差的存在,可能会歪曲客观事实,如果未对误差进行科学分析而贸然下结论,以至于多年的研究可能得到一个荒谬的结论,这样的先例并不鲜见.另外,一个没有标明误差的实验结果,几乎没有用,因为人们将对它的可靠性提出质疑,所以误差又是评价测量结果必不可少的依据。

2. 误差的普遍性决定了误差分析和不确定度评定的重要性

误差分析与不确定度评定的重要性要求我们应逐步做到:

- (1) 掌握误差来源,分析误差性质,减小测量误差.
- (2) 正确处理数据,合理评价结果,估计不确定度.
- (3) 优化实验方案,合理选用仪器,提高测量水平.

历史上曾出现过由于对误差的分析,从一个侧面成功地检验了科学理论,并推动了科学技术发展的先例.以下物理学史上的两个例子充分说明误差和不确定度的重要性.

【例 1-1】 光速的测量史.

1679年,天文学家勒默从观察木星的卫星蚀第一个测出光速为 215000km/s ,没有误差标明.1862年的光速值是 $(298000 \pm 500)\text{km/s}$,已有了误差说明.1958年,弗鲁姆用微波干涉法测得的光速值是 $(299792.500 \pm 0100)\text{km/s}$.这是当时公认的光速值,所有的光速精密测量均以公式 $c=\lambda\nu$ 为基础,即电磁波在真空中的传播速度等于其频率与相应真空波长之乘积.当时的不确定度是 $3 \times 10^{-7}\text{m/s}$,其主要原因是使用的波长较长(4mm),因此波长测量的准确度较低,衍射效应带来的误差也大.20世纪60年代,激光器的出现把光速的测量推向一个新阶段,1973年承认和推荐的光速值 $c=299792458\text{m/s}$,不确定度为 $4 \times 10^{-9}\text{m/s}$.可以说,人类在科学技术“量”方面的研究所取得的一切成就,几乎都与分析误差、变革实验方法以减少误差,以及提高测量结果的准确度密切相关.

【例 1-2】 $8'$ 的误差宣告了地心说的终结.

古代对几何量、天体、时间等早已有较小的测量误差.16世纪末“星学之王”第谷(B. Tycho, 1546~1601)在哥本哈根附近的小岛乌兰尼堡(天体之堡)上建造了测量误差不大于 $2'$ 的仪器,进行了20年的行星位置观测.开普勒(J. Kepler, 1571~1630)深入计算分析了第谷历时数十年的天体观测数据,算出火星轨道测得值与理论值偏差 $8'$,显著大于仪器误差限 $2'$.开普勒正是从这一系统性误差出发,以一种甚至在科学家中也是罕见的严谨性,“看出了流传达两千年之久的信念,由于一个超过容许限度仅 $6'$ 的误差而受到末日的审判”.开普勒发现了行星运动三定律,开创了天体力学新纪元,真正宣告了托勒密地心说的终结.开普勒是第一个以科学实验为依据系统否定地心说的科学家.开普勒之前的哥白尼在否定地心说的斗争中提出过被历史学家称之为划时代的学说,但哥白尼的论据是带有一定神秘色彩的哲学美学.他认为,地心说中行星运动不是匀速圆周运动以及轨道是复杂的本轮均轮组合的非圆周轨道,这违背了毕达哥拉斯的“天体运动必须是匀速圆周运动”的美学原则,也违背了物理规律必须和谐简洁的原则.当时哥白尼的理论对提高历法精度的贡献并未能比1300年前托勒密的地心说大.哥白尼理论的行星轨道虽然减少了托勒密地心说中本轮均轮的数目,但仍然需要用数十个圆的组合来描述行星运动,因此从一定意义上可以说,真正彻底宣告地心说破产的是站在实验物理学基础上的开普勒.

3. 误差分析与不确定度估计是科学方法学习的内容之一

误差分析与不确定度估计是实验数据分析与处理的最重要内容,因而也是科学方法的学习内容之一.对实验观测数据的分析处理方法的学习和初步实践,是理工科学生学习科学方法、培养科学素养的环节之一.

因而了解误差的物理内容,建立误差分析思想和培养误差分析能力在整个物理实验教学过程中自始至终地贯彻是完全必要的.