

秦艳芬 编著



大学物理实验

清华大学出版社

大学物理实验

秦艳芬 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校物理实验基础课程教学指导分委员会制定的“非物理类理工科大学物理实验课程教学基本要求”编写。

全书系统地介绍了与大学物理实验有关的实验误差和数据处理知识；以及各类实验的基本知识和常用仪器设备的原理和使用方法；并按不同层次编排了 20 个基本实验,涵盖 5 类包括“力、热、声、光、电”的实验；编排了 26 个综合性设计性实验(含近现代物理实验)。

本书可作为高等理工科院校理工科各专业大学物理实验课程的基本教材和相关实验技术人员的教学参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/秦艳芬编著. --北京:清华大学出版社,2012.8

ISBN 978-7-302-29598-3

I. ①大… II. ①秦… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 179841 号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.25 字 数:338 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版 印 次:2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00 元

产品编号:043297-01

序 言

物理学一词(φυσικη)最早是源于希腊文(φύσις),意为自然。其现代内涵是指研究物质运动最一般规律及物质基本结构的科学。物理学是实验科学,凡物理学的概念、规律及公式等都是以客观实验为基础的。物理学的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的各个方面,是其他自然科学和工程技术的基础。

物理实验课是高等学校的一门基础课,是本科学生进入大学以后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。其任务是培养学生的基本科学实验技能,提高学生的科学实验基本素质,使学生初步掌握实验科学思想和方法。

实验科学的思想和方法是伽利略创立的对物理现象进行实验研究并把实验的方法与数学方法、逻辑论证相结合的科学研究方法。当然物理实验课不同于科学实验,科学实验是探索的过程,是可能成功也可能失败的,结果是可能符合预期也可能有否定预期的,当然还可能有意收获,而得到未曾预期的成功。

而物理实验课是以教学为目的,重在对学生的训练,其目标不在于探索,是以传授知识培养人才为目的。物理实验课中每个实验题目都经过精心设计、安排,是一定能成功的。尽管如此,物理实验课可使同学获得基本的实验知识,在实验方法和实验技能诸方面得到较为系统、严格的训练,是大学里从事科学实验的入门向导,同时在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面,物理实验课程也起着潜移默化的作用。

秦艳芬

2012年5月

前 言

本书共分5章。第1章和第2章重点论述了贯穿整个实验课所必要的“实验误差与不确定度评定”以及“数据处理的基本方法”基本知识。学生对于这些知识必须熟练掌握,并用以指导和贯彻到以后的所有实验中去。第3章实验预备知识,重点对力、热、光、电等各类实验的基本知识和常用仪器进行了介绍,其中基本知识是进行该类实验所需要的预备知识,在预习该类实验之前,必须先学习并掌握这一节的基本知识内容。第4章基本实验,选择了20个实验项目,分述力、热、声、光、电这五类实验的基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法的实验内容,以达到通过这一层次的学习使学生学会如何预习、如何做实验;掌握基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法;掌握处理数据的一般方法;学会对实验结果进行不确定度评价;学习对实验数据和实验现象的分析;学会正确撰写实验报告。第5章综合设计性实验(含近代物理实验),选择了26个实验。目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果、开阔学生的眼界和思路,提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。使学生了解科学实验的全过程、逐步掌握科学思想和科学方法,学习独立实验和运用所学知识解决给定的问题。

为了培养学生借助教材和仪器说明书在老师指导下正确使用仪器,本书对每个实验均编写了“仪器设备”内容,介绍仪器的结构、使用方法、技术指标,同学们要认真阅读,理解实验的设计思想,并进行正确的测试。

原始数据和数据处理用的表格设计是实验设计方案的一部分,是科学研究工作的重要内容之一。为了鼓励学生自己设计表格,本书实验编写中未提供可参考的数据表格,而编写了“实验数据”部分,对原始数据和数据处理内容提出了要求。学生可以按“实验数据”内容的要求合理地设计表格,避免繁杂的数式重复罗列。

安全是实验顺利进行的保障,实验安全包含两个方面,一是学生的人身安全,二是仪器设备的安全。本书在每个实验中都编写了“注意事项”,同学们要认真阅读,并贯彻在实验中。

本教材始于2005年由秦艳芬老师编写,在宁波工程学院已使用数届。近几年在准备出版过程中有许多老师参与修订工作,其中尉国栋、金丹青老师参与光学实验部分修订;胡国琦、章国荣老师参与电磁学实验部分修订;胡国琦老师参与近代实验部分修订;金淑华老师参与力学实验部分修订;贺梅英老师参与热学实验部分修订;季丰民老师编写了DS1000数字存储示波器操作面板介绍;汪金芝等老师也提出过修订建议。在此深表谢意。

读者在学习中对教材的编写和实验的扩展有建议和想法,欢迎与编者交流、讨论。

编 者

2012年5月

目 录

绪论 怎样做好物理实验	1
0.1 物理实验课的性质	1
0.2 物理实验课的任务	1
0.3 物理实验的三个环节	2
0.4 关于实验报告	3
0.5 物理实验的观察与分析	4
第 1 章 实验误差与不确定度评定	6
1.1 测量和误差	6
1.2 测量的不确定度评定和测量结果的表示	12
1.3 有效数字及其运算规则	19
第 2 章 数据处理的基本方法	22
2.1 列表法	22
2.2 作图法	23
2.3 逐差法	28
2.4 最小二乘法	29
第 3 章 实验预备知识	34
3.1 力学实验的预备知识和常用仪器	34
3.2 热学实验的预备知识和常用仪器	38
3.3 光学实验的预备知识和常用仪器	41
3.4 电学实验的预备知识和常用仪器	47
3.5 设计性实验的预备知识	59
第 4 章 基本实验	61
4.1 照相底片密度的测量	61
4.2 动量守恒定律的实验研究	63

4.3	弹簧振子振动周期的测量	66
4.4	用三线摆测量物体的转动惯量	68
4.5	用拉伸法测金属丝的杨氏模量	72
4.6	声速的测定	77
4.7	液体的表面张力系数测量	81
4.8	落球法测量液体的粘滞系数	84
4.9	空气比热容比测定	87
4.10	冷却法测量金属的比热容	91
4.11	液体比汽化热的测量	93
4.12	薄透镜焦距的测定	97
4.13	偏振光分析	99
4.14	分光计的调整和使用	105
4.15	用 CCD 成像系统观测牛顿环	111
4.16	光敏电阻基本特性的测量	116
4.17	电桥和电阻测量	119
4.18	示波器的使用	123
4.19	霍尔法测量线圈的磁场	128
4.20	集成霍尔传感器的特性测量与应用	132
第 5 章	综合设计性实验	137
5.1	用波尔共振仪研究受迫振动	137
5.2	集成电路温度传感器的特性测量	142
5.3	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	144
5.4	用分光计研究衍射光栅特性	148
5.5	用 CCD 观测单缝衍射光强分布	152
5.6	旋光实验	156
5.7	阿贝成像原理和空间滤波	158
5.8	全息照相	162
5.9	磁性材料基本特性的研究	166
5.10	用密立根油滴仪测油滴电荷	172
5.11	光电效应测定普朗克常数	177
5.12	夫兰克-赫兹实验	182
5.13	液晶电光效应综合实验	186
5.14	巨磁电阻效应及其应用	193
5.15	太阳能电池伏安特性测量	199
5.16	抛射体运动的照相法研究	
	——数码相机及计算机在实验中的应用	202

5.17	数字温度计的设计制作	203
5.18	用力敏传感器测量不规则固体的密度	203
5.19	自组望远镜	204
5.20	自组显微镜	204
5.21	用分光计研究汞灯光谱	205
5.22	用读数显微镜观测牛顿环	205
5.23	电表的改装与校正	206
5.24	用双踪示波器测 RLC 电路的相位关系	207
5.25	电路元件伏安特性的测绘	207
5.26	电路混沌效应	208
附录	国际单位制和某些常用物理数据	210
附表 1	单位制和单位	210
附表 2	国际单位制中具有专门名称的导出单位	212
附表 3	常用物理量常数表	212
附表 4	常用光谱灯和激光器的可见谱线波长	213
附表 5	在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	213
附表 6	蓖麻油在不同温度时的粘滞系数 η	214
附表 7	铜-康铜温差电偶的温差电动势	214
附表 8	固体的比热容	214
附表 9	某些药物的旋光率	214
参考文献		215

绪论 怎样做好物理实验

0.1 物理实验课的性质

根据国家教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》的规定,物理实验是对高等学校理工科类专业学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是理工科学生进入大学以后接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有不可替代的作用。

物理实验在人类文明的发展中一直扮演着重要的角色,许多物理实验在历史发展中具有里程碑的作用。可以毫不夸张地讲,没有物理实验就没有当今的人类文明。愿我们共同努力学好物理实验;愿有志于攀登科学高峰的学子,钻研、探索、创新,为物理实验的发展做出贡献。

0.2 物理实验课的任务

本课程将在中学物理实验的基础上,按照循序渐进的原则,学习物理实验知识、方法和技能,了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后学习和工作奠定良好的实验基础。其具体任务如下:

(1) 培养和提高学生的物理实验技能。通过物理现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理思想、原理及方法,加深对物理实验设计创新思维的理解。

(2) 培养和提高学生的科学实验基本素质。其中包括:

① 能够通过阅读实验教材或资料,正确理解原理及方法,为进行实验做好准备。

② 能够借助教材和仪器说明书,在老师指导下正确使用仪器,尤其是对实验设计思想的理解,并进行正确的测试。

③ 能够正确地运用物理理论对实验现象进行初步分析和判断,逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法。

④ 能够正确地记录和处理实验数据,绘制曲线,分析实验结果,撰写合格的实验报告。

⑤ 能够完成符合规范要求的设计性内容的实验。

⑥ 在老师指导下,能够查阅有关方面的科技书籍,采用其实验原理、方法进行简单的具

有研究性和创意性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养,培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风,认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

为完成以上任务,下面结合实验课的程序提出一些意见和规定,要求学生参照执行。

0.3 物理实验的三个环节

做好物理实验要抓好实验预习、实验过程和实验报告三个环节。

1. 实验预习

实验预习是实验的基础,是实验顺利进行和提高实验质量的保障。为确保预习质量,在预习中要结合实验仪器设备进行。预习首先要明确本次实验的目的,以此为出发点明确实验原理,实验的方法、特点,应测量的内容及注意事项。重点是实验的具体任务“做什么,怎么做”,哪些是直接测量量,各用什么仪器和方法来测量;哪些是间接测量量,各用什么方法来测量;结果的不确定度如何估算等。从而能够制定合理的实验规划,能在课堂实验过程中有的放矢,有目的、有指导地进行操作和观察,及时发现和解决问题,独立完成各项任务,实现各个目标。在此基础上写出实验预习报告。

2. 实验过程

(1) 认真检查并熟悉测量仪器,记下主要测量仪器的型号和主要技术参数(测量范围和仪器误差)。

(2) 根据仪器使用说明,正确安装和调整仪器,经检查无误后,按实验程序进行实验。

(3) 严肃认真,胆大心细,独立操作,有条不紊。一般每个物理量至少测6次。

(4) 实事求是,正确记录实验数据和实验现象。

(5) 实验中和实验完毕要及时分析和整理数据,如有问题,应该重测或补测。原始数据送教师签字后,将电源关掉,将仪器归整好,填写学生实验记录和仪器设备损坏记录。经教师检查同意后离开实验室。

实验中强调规范操作,注意操作的安全性;逐渐学会边实验、边检查、边分析,避免实验结束时才发现实验做错了的现象发生。树立误差观念,时刻注意避免产生失误和注意减小误差。实验中出现故障时应立即控制现场(如断电、降温等),主动报告老师,分析原因,排除故障,总结教训,切不可有意回避,推卸责任,或擅自调换别组的仪器。仪器如有损坏,凡属学生责任事故者,将酌情赔偿。

教师的指导和规则的约束是实验顺利进行的保障,但绝不意味着束缚学生的主观能动性。学生既要勇于发问,又要有所见地;既要吃透规则,又要有所创新。要有意识地培养独立工作的能力。

3. 实验报告

写实验报告字体要端正,文字要简练,数据要齐全,图表要规范,计算要正确,分析要充分、具体、定量。

要按时交实验报告,过时无故不交者无分。如发现有抄袭报告或修改原始数据现象,将严肃处理。

实验报告是实验者的成果报道,这就决定了报告是给人阅读的,阅读者要从报告中了解实验者做了些什么,根据什么去做的,取得了那些观测资料和分析得到什么实验结果;并取得了什么成果或结论。实验者要表明的是自己所做的工作和成果,而不是一份学生作业。实验报告应能反映实验者对所做实验的完整思路,其中特别应注意实验目的、实验原理、实验结论的和谐一致。即:实验中的结论应该是在原理的指导下取得的结果,来说明对实验目的的实现程度。

0.4 关于实验报告

为了阶段性学习的需要,我们将实验报告分为预习报告、课上记录和课后报告三部分。

实验课前必须做书面预习报告,实验课上请老师审阅。无预习报告或预习报告不合格者不准上实验课。

1. 预习报告内容

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理:主要原理公式及简要说明(主要是公式适用条件,以及如何在实验过程中得以保证)(不得抄书);画好必要的原理图、电路图或光路图。

(4) 实验仪器:实验主要仪器的名称、型号及主要技术参数(测量范围和仪器误差)。

(5) 预习思考题回答。

(6) 实验数据记录表格。

2. 课上记录内容

(1) 实验中的现象和处理。

(2) 数据记录(表格化记录、不得用铅笔、经教师签字)。

3. 课后报告内容

(1) 数据处理

① 测量的原始数据和多次重复性简单计算的数据尽量一起列成表格,并注意数据的有效数字位数。

② 单次测量的数据要同时标出不确定度;多次测量的数据求出平均值后,同时求出不确定度,并标在平均值后面。

③ 较复杂的间接测量的计算要有计算过程,计算过程包括依据的公式、列出数式和得出结果。并同步计算不确定度。

④ 正确写出最后的实验结果。

⑤ 数据和不确定度都要有单位,且单位要统一(原始数据的单位用仪器读数的单位,计算时统一换成通用的国际单位)。

(2) 结果的分析讨论

包括:①实验结论是什么,结论是否正确、合理,不合理问题在哪里;②误差分析,分析影响实验的主要误差、系统误差修正等,尽可能具体、定量或半定量,切忌空谈;③实验中现象处理的分析;④实验方法讨论,主要是方法的优劣、实验的改进、提高,新的创见等。

课后报告与预习报告、课上记录构成一份完整实验报告。

0.5 物理实验的观察与分析

实验报告中误差分析和结果的分析讨论常常是学生感到比较困难的,我们在物理实验的观察与分析中编写了实验误差分析和结果分析等内容以供参考。

实验需要测量,更需要观察和分析,因为只有通过对实验现象的观察分析,才能对所研究对象及其规律作出合乎客观事实的正确判断,为实验成功奠定基础;同样,也只有通过对测量过程和结果的分析才能从所得的数据中发现其物理本质,并给予某种恰当的评价。

观察和分析是科学实验素质和能力的重要内容。实验者要认识自身的价值与地位,即使所做的实验已被许多前人研究过,也要认真而严肃地用清晰准确的文字向他人说明自己对这个问题的理解和取得的实验成果。

0.5.1 实验观察的方法

观察是收集科学事实、形成科学认识的基础,是检验假设的重要标准。实验者可以通过自身的观察实践逐步形成自己的方法。下面介绍的几种方法,作为引导。

1. 作好预习,明确观察对象

作好预习的标志就是实验者具有明确的实验目的,对实验的对象和根据有充分的了解,以及对实验如何进行已有初步的设想方案(其中包括观察设计)。在预习过程中,预习笔记是不可缺少的,它是实验者为自己准备的一份计划书。它应包含以下内容。

(1) 对“实验目的”的理解。“实验目的”规定了实验和观察的目的、对象和任务。

(2) 对“实验原理”的理论分析。“实验原理”包括:实验原理的条件、适用范围,物理量的表现形式、物理量之间的关系,原理所预期的现象及其现象出现与转化的条件等,通过这些分析将有助于指导实验的观察和测量。

(3) 观察设计。要使“实验原理”分析在实验中实施,应从实验原理理论回到实践中去形象思维,设计具体做法。观察设计应有步骤性,明确先观察什么,后观察什么,一步步地逼近实验的最终目的。由于此时的设计并未接触到实验的实际,难免有片面性,甚至错误,这是完全正常的,实验者正是通过对这些错误设想的反面教训才逐步学会如何正确地思考的。

2. 粗测观察

通过预习,对目的、原理已有了初步的了解,对实验如何进行也有了设想,那么在实验开始时按预习设想将整个实验粗略地实施一遍,对实验的全貌有一整体认识,这就是粗测观察。

这种观察为发现问题和提出问题创造了条件,理论分析和实验现象之间的任何不一致都可能是值得进一步探索的问题。

3. 变动性观察

如果仅仅观察研究对象的静态表现(许多测量量就是只对静态进行的),认识的范围和深度就会受到局限,若要扩大认识的范围,就必须进行变动性观察,即有意识地改变某些物理量的大小,改变某个实验条件或实验状态,观察它们对研究对象的影响。

0.5.2 实验的分析

要反映观察取得的信息的本质,就必须通过思维分析。实际上,观察和分析并不能严格地分开讨论,分析的实施就需要进行观察,而观察的判断就是分析的结果,所以在实际过程中它们往往是交替进行的。下面介绍几种实验中涉及的分析。

1. 现象分析

在实验过程中,应边实验观察,边检查分析做出判断。运用物理的和数学的知识以取得较为确切的科学结论。这是理论联系实际的一种很好的学习方式,有利于提高分析能力。这里要注意对有意义的现象做分析,还要抓住那些具有本质意义的现象,对其产生的原因、形成的条件、表现的形态及其规律性等作出较为仔细的理论分析。

2. 误差分析

这部分是对实验的主要误差来源进行分析。这些分析主要是对实验中的系统误差(已定系统误差和未定系统误差)产生的原因和影响的大小进行定量或半定量的分析。在实验结果出现不一致时,这种分析尤为重要,它可以帮助实验者找到结果不一致的原因。

3. 结果分析

这种分析属于对实验结果评价的一种综合分析。具体内容为:

- (1) 从实验结果看该实验的目的、要求是否达到?
- (2) 假若这是一个验证性实验,那么实验结果是否符合已知定律或标准值?
- (3) 假若是探索性实验,那么实验取得了怎样的规律或结果? 对此规律应作何种解释?

第 1 章

实验误差与不确定度评定

在科学实验中,总要进行大量的测量工作。要测量就会有误差,而误差的存在与大小将直接影响测量效果;测量效果的好坏即测量的质量由不确定度评定。因此,研究实验误差与不确定度是从事任何科学实验所必不可少的。

1.1 测量和误差

1.1.1 测量的基本概念

1. 测量定义和测量分类

(1) 测量的定义

测量就是用一定的工具或仪器,通过一定的方法,直接或间接地与被测对象进行比较。

(2) 测量的分类

测量的分类很多,这里只介绍一种按测量值获取方法进行的分类:直接测量和间接测量。

直接测量是把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较,例如用直尺测量长度和用天平测物体的质量。

间接测量是指按一定的函数关系,由一个或多个直接测量量计算出另一个物理量,例如测物体密度时,先测出该物体的体积和质量,再用公式($\rho=m/V$)算出物体的密度。在物理实验中进行的测量,有许多属于间接测量。

2. 测量数据

数据不同于数值,它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位,才具有特定的物理意义,这时它才可以称为一个物理量。因此测量所得的值就是数据,数据应包括数值(大小)和单位,两者缺一不可。通常直接测量量的单位同测量时所用的仪器单位;间接测量量用国际单位。

1.1.2 测量误差的基本知识

1. 真值与误差

(1) 真值:任何物理量在某一状态下都必然具有某一客观反映事物本身特性的真实数据,称为真值。真值是我们想要获得的。

(2) 误差:实验测量的结果和客观的真值之间总存在着一定的差值,将其称为测量量

的测量误差,简称“误差”。误差的大小反映了测量的准确程度,即测量接近于客观真实的程度。误差的大小可以用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

(3) 绝对误差与相对误差

绝对误差=测量值-真值,即

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

相对误差= $\frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}}$,即

$$E_r = \frac{\Delta_x}{x_0} \cdot 100\% \quad (1-2)$$

绝对误差和相对误差的关系是

$$\Delta_x = \frac{\Delta_x}{x_0} \cdot x_0 = E_r \cdot x_0 \quad (1-3)$$

一般表示测定值的误差用绝对误差,评价测量的精确程度则需用相对误差。误差可正、可负; $\Delta_x > 0$ 时称为正误差, $\Delta_x < 0$ 时称为负误差。

由于真值不能确切地知道,测量误差实际上也不能确切地知道,只能对它进行合理的估算。

2. 误差的分类

误差按其性质和产生原因的不同,可分为“系统误差”和“随机误差”两大类。不同性质的误差,其处理的方法也不相同,所以,我们处理误差时必须首先分清误差的性质。测量结果的总误差应是这两类误差的总合。

(1) 系统误差

在相同的条件下,多次测量同一物理量时,如果误差的大小和正负号总保持不变或按一定的规律变化,则这种误差称为系统误差。系统误差的来源主要有以下几种。

① 理论公式的近似性。例如单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件之一是摆角趋于零,而在实验中,摆角趋于零是不现实的。

② 测量方法的因素。如伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响。

③ 仪器因素。如天平的两臂不等长,千分尺的零点不准等。

④ 环境的因素。如测磁体磁场时受到地磁场的影响,在 30°C 时使用 20°C 时标定的标准电池等。

⑤ 观测者的因素。如有人读数时有偏大(或偏小)的癖好,有人按秒表时总是滞后等。

系统误差有些是定值的,如千分尺的零点不准;有些是积累性的,如用受热膨胀的钢卷尺进行测量时,其测量值就小于真值,误差随测量长度成比例地增加;还有些是周期性变化的,如停表指针的转动中心与表面刻度的几何中心不重合,造成偏心差,其读数误差就是一种周期性的系统误差。

系统误差是测量误差的重要组成部分,发现、估计和消除系统误差,对一切测量工作都非常重要。这种误差的特征是误差的确定性,不能通过多次测量来发现、表征和消除。但它有其一定的内在规律性,消除的方法是找出它的影响规律,对测量值进行修正,这正是实验科学的基本任务。为了找出系统误差的影响规律,往往要做一系列的补充实验。

(2) 随机误差

在相同的条件下,多次测量同一物理量时,如果误差的符号时正时负,其绝对值时大时小,没有确定的规律,则这种误差称为随机误差。

随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响。其主要来源有:环境的因素,如温度、湿度、气压的微小变化等;观测者的因素,如瞄准、读数的不稳定等;测量装置的因素,如零件配合的不稳定性,零件间的摩擦等。

随机误差的特征是误差的随机性。如果我们对某一物理量只进行一次测量,它的随机误差是没有规律可循的;但如果在相同的宏观条件下对一个量进行足够多次的测量,就会发现随机误差是按一定的统计规律变化的,即它们服从某种概率分布。

增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除,因此在实验中常常要进行多次测量。一般大学物理实验中对物理量的测量为6次。对测量中随机误差的估算,可以利用统计理论处理,这是误差理论的任务。

3. 与误差相关的几个概念

(1) 精密度:用同一测量工具与方法在同一条件下多次测量,如果测量值随机误差小,即每次测量结果离散性小,说明测量重复性好,称为测量精密度好也称稳定度好,因此,测量随机误差的大小反映了测量的精密度。

(2) 准确度:在不计随机误差时,而获得的测量结果与真值偏离程度称为测量准确度,其从根本上取决于系统误差的大小,因而系统误差大小反映了测量可能达到的准确程度。

(3) 精确度:是测量的准确度与精密度的总称,在实际测量中,影响精确度的可能主要是系统误差,也可能主要是随机误差,当然也可能两者对测量精确度影响都不可忽略。在某些测量仪器中,常用精度这一概念,实际上包括了系统误差与随机误差两个方面,例如常用的仪表就常以精度划分仪表等级。

精确度和误差可以说是孪生兄弟,因为有关误差的存在,才有精确度这个概念。

(4) 等精度测量:是指系统和环境都不变的测量。

4. 测量误差的客观性和普遍性

(1) 误差存在于一切测量中,而且贯穿测量过程的始终。因此,在每次测量的过程中都要注意分析各种可能的误差影响因素,注意观察测量过程产生的各种物理现象,分析它们对测量结果的影响。

这也包括理论计算的结果。一方面理论本身有局限性(有其适用条件和范围);其次,计算的参量本身也是测量量,是有测量误差的,由此计算出来的因变量自然也是有误差的。

(2) 误差可以通过各种途径不断减小,但无法绝对避免。为此,我们要对众多的影响因素至少进行半定量的估计,以便找出主要误差影响因素,采取措施重点予以减小。

(3) 误差无法确知,但可进行合理的估算。

1.1.3 系统误差的处理

在许多情况下,系统误差是影响测量结果精确度的主要因素,然而它又不可能通过多次测量被发现,容易被遗漏,从而给实验结果带来严重影响。因此,发现系统误差,估算出它对结果的影响,设法修正它或消除它的影响是误差处理一项重要而困难的内容。

1. 系统误差的修正

系统误差中有一部分是可以找出它们的影响规律的,因此可以直接对测得值进行修正,经修正后,这一系统误差就得到消除。

不计随机误差,系统误差 Δ_x^* 定义为测量值 x 与真值 x_0 之差,即

$$\Delta_x^* = x - x_0 \quad (1-4)$$

当测量值大于真值时,规定系统误差是正的;当测量值小于真值时,规定系统误差是负的。

对测量结果进行修正,即测量结果要加上修正值 δ :

$$x_0 = x + \delta \quad (1-5)$$

而

$$\delta = -\Delta_x^* \quad (1-6)$$

2. 估计上限的系统误差

在物理实验中,大多数情况下,很多系统误差的影响规律无法确知,自然也无法对它们进行修正,从而无法消除,而这些系统误差往往构成实验中的主要误差部分而不可略去。如果我们估计其上限,在此上限内,这些误差的存在又尚在我们的实验要求容许范围内,则我们不必把它们的影响规律研究得十分清楚,也不必对此进行系统误差修正,而是把它们视为形同随机误差,作类似处理。这种误差被称为估计上限的系统误差,仪器误差大多数属于此类。

1.1.4 随机误差的估算

1. 测量结果的最佳估计值

对某一物理量进行直接多次测量,测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 由于随机误差的存在,那么用什么值才能合理地代表测量结果呢? 由随机误差的性质可以证明,多次测量值的算术平均值最接近真值,作为真值的最佳估计值,作为测量结果的最佳值。算术平均值

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-7)$$

其中 n 为测量次数, x_i 为第 i 次测量值。可以证明,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x} \rightarrow x_0$ (真值)。

2. 随机误差的估算

由随机误差的定义知,其大小、方向是不确定的,因此无法计算其值。但可对其进行估算,测量中是用其对测量值的离散性来说明随机误差的大小。由误差理论知,测量值的标准偏差 S_x 反映测量值的离散性。把测量值的标准偏差 S_x 作为测量中随机误差的估算。标准偏差 S_x 的数学表达式如式(1-8),此式称为贝塞尔公式。

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-8)$$

1.1.5 常见的随机误差分布

随机误差中服从概率分布的形式较多,这里只介绍几种常见的概率分布。概率分布形