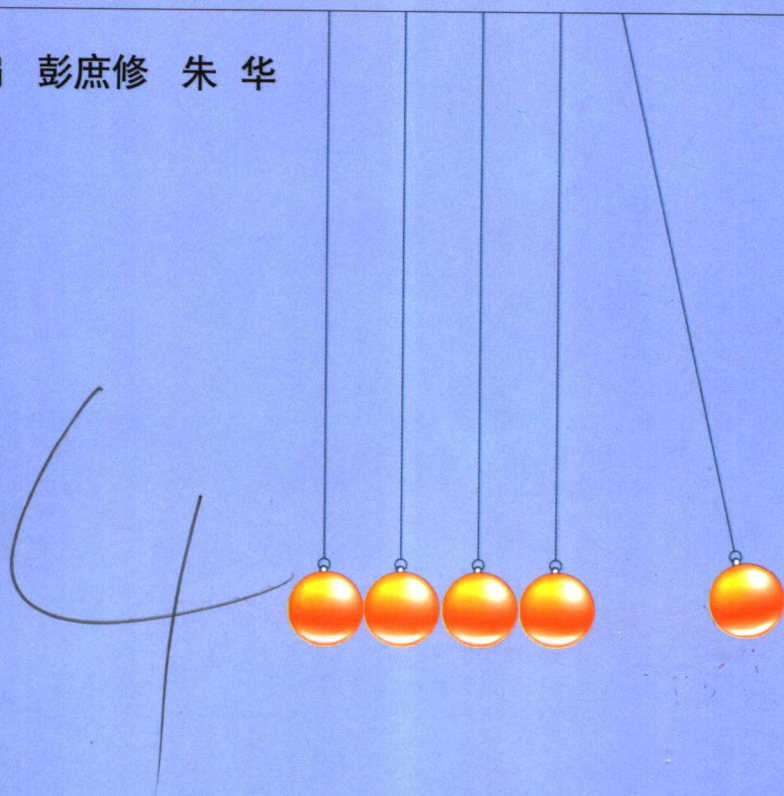


21世纪高等院校规划教材

大学物理实验教程

主编 彭庶修 朱 华



国防工业出版社
National Defense Industry Press

21 世纪高等院校规划教材

大学物理实验教程

主 编 彭庶修 朱 华

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,总结景德镇陶瓷学院物理实验课程教学改革的实践经验编写而成。

全书共分4章,内容包括:实验数据处理基本知识、基础物理实验、综合与近代物理实验、设计性物理实验。本书对测量误差、不确定度作了介绍,分3个层次收录了45个实验;在精选经典实验项目的基础上,充实了近代与综合实验项目,增加了近几年教学改革中编写的设计性实验项目;精炼了实验步骤,以充分发挥学生的主动性与积极性。同时书中还介绍了微软 Office 中的 Excel 软件在物理实验数据处理中的应用,以及常用的物理常量。

本书可作为高等工业学校各专业的物理实验教学用书,也可供高等职业学校、函授大学及夜大学选作教材,亦可作为教师教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/彭庶修,朱华主编. —北京:国防工业出版社,2006.2

21世纪高等院校规划教材

ISBN 7-118-04308-7

I. 大... II. ①彭...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(2005)第 161053 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10½ 字数 240 千字

2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

本书是按照教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合我们使用多年的大学物理实验讲义修订编写而成。

全书共分4章。第1章比较系统地介绍了误差和不确定度的概念及其评定方法，对有效数字、实验数据处理的初步方法也作了介绍。该章内容在本课程中占有重要地位，它是学生进行实验和数据处理的基础。第2章至第4章收录了力学、热学、电磁学、光学、近代物理与综合实验、设计性实验共45个。结合工科院校大学物理实验的改革趋势和改革成果，我们在实验选题上力求题目典型、内容丰富，以使学生在较短的学时内掌握、提高实验技能。依据物理实验课的教学特点，为了便于教学，在编写时努力做到：实验目的明确，实验原理叙述清楚，实验内容安排得当，实验步骤简洁明了。在每个实验后面都列有思考题，以便于学生预习和进行实验分析。书后的附表给出了实验常用的物理常量和量值。

实验课教学是一项集体劳动，无论是实验教材的编写，还是实验项目的开设准备，都凝聚着全体实验教师和技术人员的智慧和劳动成果。同时，在编写本书的过程中，我们广泛参阅了兄弟院校的有关教材，吸取了其中富有启发性的观点和内容，在此表示衷心的感谢。

本书由彭庶修、朱华任主编。教材编写分工如下：彭庶修负责统稿及编写实验2-4、实验2-14、实验2-19、实验2-20、实验3-4、实验3-9、实验4-1、实验4-2、实验4-3、实验4-4、实验4-5、实验4-6、实验4-7、实验4-9、实验4-10、实验4-12、实验4-13、实验4-14；朱华负责编写绪论，第1章测量误差与数据处理的基本知识，实验2-1、实验2-5、实验2-6、实验2-7、实验2-8、实验2-15、实验2-16、实验2-17、实验2-18、实验3-3、实验3-6、实验3-7、实验4-8；江惠民负责编写实验2-9、实验2-10；李翠云负责编写实验2-2、实验2-3；曾庆明负责编写实验2-13、实验3-1、实验3-2、实验3-5、实验3-8、实验3-10、实验4-11、实验4-15；张顺如负责编写实验2-11、实验2-12。另外，在编写过程中，占俐琳、吴汉水同志在资料提供等方面给予了很大的帮助，01计科专业的程充、樊晓峰、李孟山同学协助制图、改稿，在此表示衷心的感谢。

由于学术水平有限，加上经验不足，书中难免有错误和不妥之处，真诚地希望读者提出宝贵意见，以便于今后再版时修订。

编者

2006年1月

目 录

绪论	1
0.1 物理学对社会的重要性	1
0.2 物理实验课教学的任务	2
0.3 物理实验课教学的特点	3
0.4 遵守实验规则	4
第1章 测量误差与数据处理的基本知识	5
1.1 测量与误差	5
1.1.1 测量	5
1.1.2 测量误差	5
1.1.3 正确度、精密度、准确度	6
1.1.4 绝对误差、相对误差和百分差	7
1.2 随机误差的高斯分布与标准误差	7
1.2.1 高斯分布的特征与数学表述	7
1.2.2 标准误差的物理意义	8
1.2.3 极限误差	8
1.3 实验结果的最佳值——算术平均值	9
1.4 随机误差的估计——标准偏差	10
1.5 间接测量值误差的估算——误差传递公式	11
1.5.1 误差的一般传递公式	11
1.5.2 标准误差的传递公式	12
1.6 不确定度与测量结果表示	13
1.6.1 不确定度的概念	13
1.6.2 不确定度的历史发展	13
1.6.3 普通物理实验中测量不确定度评定	14
1.6.4 间接测量量的不确定度	15
1.6.5 单次直接测量量的不确定度的估计	15
1.6.6 计算实例	15
1.7 实验数据处理的基本方法	16
1.7.1 制表	16
1.7.2 作图	17
1.7.3 拟合	18
1.8 Microsoft Excel 在物理实验教学中的应用简介	20

第 2 章 基础物理实验	23
实验 2-1 基本测量实验	23
实验 2-2 液体粘滞系数的测定	27
实验 2-3 三线扭摆法测转动惯量	29
实验 2-4 金属线[膨]胀系数的测定	32
实验 2-5 空气摩尔热容比 $C_{p,m}/C_{v,m}$ 的测定	34
实验 2-6 模拟电冰箱制冷系数的测量	37
实验 2-7 驻波实验	41
实验 2-8 电表的扩程与校准	45
实验 2-9 电桥法测电阻	48
实验 2-10 电位差计原理及其应用	53
实验 2-11 用模拟法测绘静电场	56
实验 2-12 用霍尔传感器测量磁场	59
实验 2-13 电子在电场、磁场中的偏转	64
实验 2-14 示波器的使用	68
实验 2-15 磁性材料居里温度的测定	73
实验 2-16 分光计的使用	76
实验 2-17 衍射光栅	81
实验 2-18 等厚干涉	84
实验 2-19 迈克耳逊干涉仪的使用	87
实验 2-20 偏振光实验	90
第 3 章 综合与近代物理实验	94
实验 3-1 密立根油滴实验	94
实验 3-2 光电管特性的研究	99
实验 3-3 弗兰克—赫兹实验	102
实验 3-4 金属电子逸出功的测定	106
实验 3-5 声速的测量	111
实验 3-6 用动态悬挂法测定金属材料的弹性模量	114
实验 3-7 激光双光栅法测弱振动	117
实验 3-8 全息照相	120
实验 3-9 传感器实验	125
实验 3-10 光衍射相对光强分布的测量	138
第 4 章 设计性物理实验	144
实验 4-1 变阻器变流和分压电路的设计	144
实验 4-2 误差分配和实验仪器的选择	145
实验 4-3 用补偿法“改装”电表实验	146
实验 4-4 非线性电阻的研究	147
实验 4-5 非平衡电桥的研究	147
实验 4-6 光电效应的研究	147

实验 4-7 电位差计校准电表和测定电阻	148
实验 4-8 微小电阻的测定	149
实验 4-9 电表内阻的测定	150
实验 4-10 软磁材料静态磁特性的测定	150
实验 4-11 用玻尔氢原子理论测量普朗克常数	151
实验 4-12 数字万用表的组装与调试	152
实验 4-13 电子温度计的组装与调试	152
实验 4-14 声光双控延时电路设计与组装	153
实验 4-15 组装迈克耳逊干涉仪	153
附表 1 我国法定计量单位和国际单位制	155
附表 2 物理常量表	158
附表 3 物理密度表	158
附表 4 海平面上不同纬度处的重力加速度	159
附表 5 固体的线[膨]胀系数	159
附表 6 在 20℃ 时某些金属的弹性模量	160
附表 7 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	160
附表 8 粘滞系数	161
附表 9 固体导热系数	161
附表 10 某些固体和液体的比热容	162
附表 11 常用光源的谱线波长表	162

绪 论

0.1 物理学对社会的重要性

物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科,它对人类未来的进步起着关键的作用。对物理教育的支持和研究,在所有国家都是重要的,这是因为:

(1) 物理学是发展未来技术进步所需的基本知识,而技术进步将持续驱动着世界经济发动机的运转。

(2) 物理学有助于技术的基本建设,它为科学进步和发明的利用,提供所需训练有素的人才。

(3) 物理学在培养化学家、工程师、计算机科学家、以及其他物理科学和生物医药科学工作者的教育中,是一个重要的组成部分。

(4) 物理学扩展和提高我们对其他科学的理解,诸如地球科学、农业科学、化学、生物、环境科学,以及天文学和宇宙学——这些学科对世界上所有民族都是至关重要的。

(5) 物理学提供发展应用于医药的新设备和新技术所需的基本知识,如计算机层析技术(CT)、磁共振成像、正电子发射层析术、超声波成像和激光手术等,改善了我们生活质量。

以上这段话摘录于 1999 年 3 月在美国亚特兰大市召开的第 23 届国际纯粹物理和应用物理联合会(IUPAP)代表大会通过的关于物理学对社会的重要性所作的决议。

为了体会决议的意义,让我们来回顾一下 20 世纪物理学与技术发展的几个史实。

当今,廉价计算机的单块芯片可以容纳数十万只晶体管,一块指甲大小的芯片具有二三十年前一台房间大小的计算机那样的计算能力。如此辉煌的成就应归功于 1948 年晶体管的诞生。肖克利(W.Shockly)、巴丁(J.Bardeen)和布拉顿(W.Barttain)通过研究不同条件下电流流过半导体的方式,发现了晶体管效应,为集成电路、微电子学和整个计算机革命开辟了道路。因此他们获得了 1956 年诺贝尔物理学奖。

1958 年,肖洛(A.Schawlow)和汤斯(G.Townes)在研究光对分子和固体作用的基础上,提出了制造光波受激发射放大器的具体设想和建议,为制造激光器奠定了基础。1960 年,梅曼(T.H.Maiman)研制成功了世界上第一台激光器,它的发明是光学发展史上的伟大里程碑,也是整个科学史上一个伟大的里程碑。激光器让许多原子、分子同时在同一方向发光,光束在颜色上的纯度比以往可能产生的高 100 万倍,在月球上可以看到地球上功率仅为几瓦的激光。激光器一问世,就获得迅速发展,应用极其广泛。

物理学家利用激光在一种材料上记录图形,它提供了一种存储和取用信息的技术,可以将相当于数百万卷百科全书内容的信息存储在糖块大小的材料之中。

激光的光脉冲宽度窄、持续时间可以做到几个飞秒(10^{-15} 秒(s))。飞秒激光可用来

拍摄瞬间的照片,如拍摄化学反应中分子的影片等。新的计算机技术与产生飞秒光脉冲技术相结合,有可能实现接近 1 拍次每秒(10^{15} 次/s)的逻辑运算。未来新型的高速计算机可能采用短的光脉冲来传递信息。物理学家借助光学双稳态现象能够用另一个光束接通或者切断,这展现了一种光学型晶体管的可能性,它为光学计算机的出现打开了大门。

由于玻璃纤维比金属导体质量小、价格低、抗干扰能力强,因而光纤通信发展迅速。技术专家展望下一世纪光纤传输技术的新发展:一对细如头发丝的光纤可以传输近 2 000 万路电话。这就是说,上海市全体市民同时通话,光纤的传递能力还绰绰有余。光子能够传输的信息量比电子大几百万倍。可以预言,光技术最终可能比电子学对社会的影响更大,如果说 20 世纪是电子时代,那么 21 世纪就可能是光子时代。

1895 年德国物理学家伦琴(W.C.Rortgen)发现了 X 射线。其后,X 射线透视术逐渐成为医生诊断疾病的一种手段。20 世纪 70 年代开始,医学专家利用物理学原理发明了计算机辅助的 X 射线层析摄影术(CT)等一些新技术,借助它们可以确定人体内部结构,而无需将器械插入人体内。CT 术给医生显示一幅人体的内部器官的三维图像。它是用一连串 X 射线束穿透人体,每一束射线给出了透过人体的一个线条,借助于计算机可以从这些线条的数据重构出通过人体的一个断层的影像,几幅这样的影像就构成一幅三维图像。

回眸 20 世纪,大量事实说明,高新技术的出现和发展与基本粒子物理学、原子核物理学、分子物理学、光学、等离子体和流体、凝聚态物理学以及引力、宇宙学和宇宙射线物理学等物理学领域及其交叉学科有着密切关系。可以说,物理学是高新技术的源泉。令人信服地确信,物理学是有生命力和富有成果的学科,它对社会发展具有极大的影响力。

0.2 物理实验课教学的任务

物理学的研究方法通常是在观察和实验的基础上对物理现象进行分析、抽象和概括,建立物理模型,探索物理规律,进而形成物理理论。可见,物理规律是实验事实的总结,而物理理论的正确与否需要实验来验证。

在 20 世纪 70 年代末,物理实验从原来的物理课程中分离出来,独立形成一门课程——物理实验。它与大学物理是关系密切的两门课程。实验需要理论指导,在实验过程中,通过理论的运用与现象的观察、分析,理论与实验相互补充,以加深和扩大学生对物理知识的理解。

物理实验是理工科大学生进行科学实验训练的一门基础课程,也是素质教育的重要环节。它的主要任务是:

(1) 通过实验,学习运用理论指导实验,以及分析和解决问题的科学方法。在学习物理实验的一些典型方法时,尤其要注意学习它的思想方法,以有助于思维与创新能力的培养。

(2) 使学生获得必要的实验知识和操作技能的训练,培养学生初步具有科学实验工作能力,即正确使用仪器、进行测量、处理数据、分析结果以及书写实验报告等。在此基础上,着重培养学生的探索精神、创新精神、自主学习能力和科学研究方法。

(3) 培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度以及爱护国家财产的道德品质。培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等科学习惯。

总之,教学的重点放在培养学生科学实验能力与提高学生科学实验素养方面,使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合能力、动手实践能力、设计创新能力以及严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度方面得到训练与提高。

0.3 物理实验课教学的特点

实验课与理论课不同,它的特点是同学们在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务。通常,每个实验的学习都要经历以下3个阶段。

1. 实验的准备

实验前必须认真阅读讲义,做好必要的预习,才能按质、按量、按时地完成实验。同时,预习也是培养阅读理解能力的学习环节。

在学生预习实验教材的基础上,教师重点讲解有关实验理论,使学生更好地理解实验原理,体会实验方法的思路和适用条件,以及教学具体要求等;教师还需对仪器设备进行介绍,讲解操作规程。让学生在正式做实验之前,有机会了解实验装置,学会仪器的使用,以便进一步考虑如何来做好实验。

2. 实验的进行

实验内容包括:仪器的安装与调整,观察实验现象与选择测试条件,读数与数据记录,计算与实验结果分析,以及不确定度估算等。

进入实验室,要遵守实验规则(见0.4节)。实验过程中,对观察到的现象和测得的数据要及时进行判断,判断它们是否正常合理。实验过程中可能会出现故障,在教师的指导下,分析故障原因,学会排除故障的本领。实验完毕,做好仪器设备的整理工作。

实验过程中遇到挫折不是坏事,坚持探索,认真分析研究,找出原因,解决问题,就可以得到更大的收获。

3. 书写实验报告

撰写实验报告是为了训练学生具有以书面形式汇报实验工作成果的能力。通常完整的实验报告分为以下3个部分。

第一部分:预习报告。它作为正式报告的前面部分,要求在正式做实验之前写好。内容包括以下几个方面。

(1) 目的:说明本实验的目的。

(2) 原理摘要:在理解的基础上,用简短的文字扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄。力求做到图文并茂,图是指原理图、电路图或者光路图。写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位,以及公式的适用条件(或实验的必要条件)。

第二部分:实验记录。实验的原始数据先记录在专用的物理实验报告本中的实验数据记录栏上,实验完毕后需教师签名。记录内容包括以下几个方面。

(1) 仪器:记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学逐步地熟悉它,以培养选

用仪器的能力。

(2) 实验内容和现象观测记录。

(3) 数据:数据记录应做到整洁、清晰而有条理,尽量采用列表法。在根据数据特点设计表格时,力求简单明了,分类清楚而有条理,便于计算与复核,达到省工、省时的目的。在标题栏内要求注明单位。

数据不得任意涂改。确实测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样。不得任意划去。

第三部分:数据处理与计算。此部分在实验后进行,包括以下内容。

(1) 作图、计算结果与不确定度估算:按图解法要求绘制图线(详见数据处理方法一节中的图解法)。计算时,先将文字公式化简,再代入数值进行运算。不确定度估算要预先写出计算公式。

(2) 结果:按标准形式写出实验的结果。在必要时,注明得出该结果的实验条件。

(3) 附注:对实验中出现的问题进行说明和讨论,或写出实验心得和建议等。

实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合格、文理通顺、内容简明扼要。实验报告一律用专用的物理实验报告纸书写。

0.4 遵守实验规则

为了保证实验正常进行,以及养成严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯,特制定下列规则。

(1) 学生在校园网上预约实验项目和时间,按所预约的内容与时间进行实验,不得无故缺席或迟到。若实验时间变动,需经实验室教师同意。

(2) 学生在每次实验前对排定要做的实验应进行预习,并在预习的基础上写出预习报告。

(3) 进入实验室后,应根据仪器清单核对自己使用的仪器是否缺少或损坏。若发现问题,应向教师或实验室管理员提出。

(4) 实验前应细心观察仪器结构,操作时动作应谨慎细心,严格遵守各种仪器仪表的操作规程及注意事项,尤其是电学实验,线路接好后,先经教师检查,经许可后才可接通电源,以免发生意外。

(5) 实验完毕应将实验数据交给教师检查,实验合格者,教师予以签字通过。实验不合格或请假缺课的学生,由指导教师登记,通知学生在规定时间内补做。

(6) 实验时,应注意保持实验室整洁、安静。实验完毕,应将仪器、桌椅恢复原状放置整齐。

(7) 如有损坏仪器,应及时向教师或实验工作人员报告,并填写损坏单,说明损坏原因,赔偿办法根据学校规定处理。

第 1 章 测量误差与数据处理的基本知识

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

物理实验不仅要定性观察各种物理现象,更重要的是找出有关物理量之间的关系,为此就需要进行测量。测量的意义就是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系。选来作为标准的同类量称之为单位,倍数称之为测量数值。由此可见,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积。一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就有所不同。单位愈大,测量值愈小,反之测量数值愈小。

根据《中华人民共和国计量法》,国家计量局于 1987 年 2 月 1 日发布了国家法定计量单位名称、符号和非国家法定计量单位的废除办法,规定以国际单位制(SI 制)为国家法定计量单位,即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他量都由以上 7 个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。并规定 1991 年起实行国家法定计量单位,中华人民共和国法定计量单位见本书附表 1。

测量可分为两类:一类是直接测量,如用米尺量长度、钟表计时间、天平称质量、安培表测电流等;另一类是间接测量,是根据直接测量所得到的数据,依照一定的公式,通过运算,得出所需要的结果,例如直接测出单摆的 L 和单摆的周期 T ,应用公式 $g = 4\pi^2 L / T^2$,以求重力加速度 g 。在物理量的测量中,绝大部分是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。不论直接测量或间接测量,都要满足一定的实验条件,按照严格的方法及正确地使用仪器,才能得出应有的结果。因此,在实验过程中,一定要了解实验的目的,正确地使用仪器,细心地进行操作、读数和记录,以达到巩固理论知识和加强实验技能训练的目的。

1.1.2 测量误差

物理量在客观上有着确定的数值,称为真值。然而在实际测量时,由于实验条件、实验方法和仪器精度等的限制或者不够完善,以及实验人员技术水平的原因,使得测量值与客观存在的真实值之间有一定的差异。测量值 X 与真值 T_X 的差值称为测量误差 δ ,简称为误差,即

$$\delta = X - T_X$$

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分。既然测量不能得到真值,那么怎样才能最大限度地减小测量误差并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质。测量误差按其产

生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差 3 大类。

1. 系统误差

系统误差的特点是有规律的,测量结果都大于真值或小于真值。在测量条件改变时,误差也按一定规律在变化。

系统误差的来源有下列几个方面。

(1) 由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不妥,如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平放置的仪器没有放水平等。

(2) 由于实验理论和实验方法的不完善,所引用的理论与实验条件不符,如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响,测长度时没有考虑温度使尺长改变,量热时没有考虑热量的散失,测电压时未考虑电压表内阻对电路的影响,标准电池的电动势未作温度修正等。

(3) 由于实验者生理或心理特点、缺乏经验等引入的误差。例如有些人习惯于侧坐斜视读数,眼睛辨色能力较差等,使测量值偏大或偏小。

系统误差的消除或减小是实验技能问题,应尽可能采取各种措施将它降低到最小程度。例如将仪器进行校正,改变实验方法或者在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响,纠正不良实验习惯等。

能否识别和降低系统误差与实验者的经验和实际知识有密切关系。学生在学习过程中要逐步积累这方面的感性知识,结合实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。

2. 随机误差(又称偶然误差)

在相同条件下,对同一物理量进行重复多次测量,使系统误差减小到最低程度之后,测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的涨落,而且测量误差的绝对值和符号在随机地变化着。这种误差称为随机误差。

随机误差主要来源于人们视觉、听觉和触觉等感觉能力的限制以及实验环境偶然因素的干扰。例如温度、湿度、电源电压的涨落、气流波动以及振动等因素的影响。从个别测量值来看,它的数值带有随机性,好像杂乱无章,但是,如果测量次数足够多的话,就会发现随机误差遵循一定的统计规律,可以用数理统计理论来估算。

3. 过失误差(错误)

在测量中还可能出现错误,如读数错误、记录错误、操作错误、估算错误等。错误已不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。克服错误的方法,除端正工作态度,严格工作方法外,可用和另一次测量结果相比较的办法纠正,或者运用异常数据剔除准则来判别因过失而引入的异常数据,并加以剔除。

1.1.3 正确度、精密度、准确度

正确度、精密度和准确度是评价测量结果好坏的 3 个术语。

测量结果的正确度是指测量值与真实值的接近程度。正确度高,说明测量值接近真值的程度好,即系统误差小。可见,正确度是反映测量结果系统误差大小的术语。

测量结果的精密度是指重复测量所得结果相互接近的程度。精密度高,说明重复性好,各个测量误差的分布密集,即随机误差小。可见,精密度是反映测量结果随机误差大小的术语。

测量结果的准确度是指综合评定测量结果重复性与接近真值的程度。准确度高,说明精密度和正确度都高。可见准确度反映随机误差和系统误差的综合效果。

由于在实验中,要求尽可能地消除或减小系统误差,误差计算主要是估算随机误差,因此往往不再严格区分精密度和准确度,而泛称为精度。

1.1.4 绝对误差、相对误差和百分差

误差的表示形式,有绝对误差与相对误差之分。绝对误差 $\pm \Delta x$ 表示测量结果 x 与真值 T_x 之间的差值以一定的可能性(概率)出现的范围,即真值以一定可能性(概率)出现在 $(x - \Delta x) \sim (x + \Delta x)$ 区间内。仅仅根据绝对误差的大小难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要看测量值本身的大小,为此引入相对误差的概念。相对误差 $E = \frac{\Delta x}{T_x} \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$, 表示绝对误差在整个物理量中所占的比重,一般用百分比表示。例如测量一长度时得 1000m,而绝对误差为 1m。测另一长度时得 100cm,而绝对误差为 1cm。后者的相对误差为 1%,而前者为 0.1%,所以我们公认前者较后者更可靠。

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差 E_0 来表示测量的好坏,即

$$E_0 = \frac{|\text{测量值 } x - \text{公认值 } x'|}{\text{公认值 } x'} \times 100\%$$

绝对误差、相对误差和百分差通常只取 1 位~2 位数字来表示。

1.2 随机误差的高斯分布与标准误差

随机性是随机误差的特点。也就是说,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,每次测量值的误差时大时小,对某一次测量来说,其误差的大小与正负都无法预先知道,纯属偶然。但是,如果测量次数相当多的话,随机误差的出现仍服从一定的统计规律。根据实验情况的不同,随机误差出现的分布规律有高斯分布(又称正态分布)、 t 分布、均匀分布等。按照教学要求,这里仅简要地介绍随机误差的高斯分布。

1.2.1 高斯分布的特征与数学表述

遵从高斯分布规律的随机误差具有下列 4 大特征。

- (1) 单峰性:绝对值小的误差出现的可能性(概率)大,大误差出现的可能性小。
- (2) 对称性:大小相等的正误差和负误差出现的机会均等,对称分布于真值的两侧。
- (3) 有界性:非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。
- (4) 抵偿性:当数量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消,于是,误差的代数和趋近于零。

高斯分布的特征可以用高斯分布曲线形象地表述出来,如图 1-2-1 所示。横坐标为误差 δ ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。根据误差理论可以证明函数的数学表述为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2-1)$$

测量值的随机误差出现在 $(\delta, \delta + d\delta)$ 区间的可能性(概率)为 $f(\delta)d\delta$,即图1-2-1中阴影所包含的面积元。上式中的 σ 是一个与实验条件有关的常数,称为标准误差。其值为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-2-2)$$

式中, n 为测量次数。各次测量值的随机误差为 $\delta_i, i=1,2,3,\dots,n$ 。可见标准误差是将各个误差的平方取平均值,再开方得到,所以,标准误差又称为均方根误差。

1.2.2 标准误差的物理意义

由式(1-2-1)可知,随机误差正态分布曲线的形状取决于 σ 值的大小,如图1-2-2所示。 σ 值愈小,分布曲线愈陡峭,峰值 $f(\delta)$ 愈高,说明绝对值小的误差占多数,且测量值的重复性好,分散性小;反之, σ 值愈大,曲线愈平坦,峰值愈低,说明测量值的重复性差,分散性大。标准误差反映了测量值的离散程度。

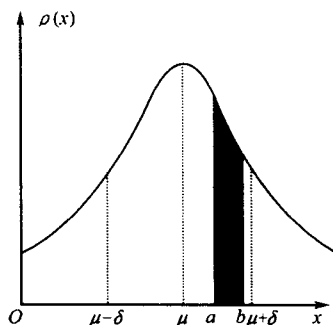


图 1-2-1 高斯分布曲线

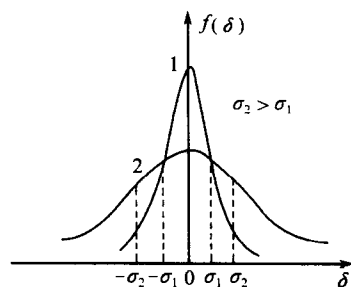


图 1-2-2 随机误差正态分布曲线

由于 $f(\delta)d\delta$ 是测量值随机误差出现在小区间 $(\delta, \delta + d\delta)$ 的可能性(概率),那么,测量值误差出现在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 内的可能性(概率)就是

$$p(-\sigma < \delta < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 68.3\%$$

这说明对任一次测量,其测量误差出现在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间的概率为68.3%。也就是说,假如我们对某一物理量在相同条件下进行了1000次测量,那么,测量值误差可能有683次落在 $(-\sigma, +\sigma)$ 区间内。这里要特别注意标准误差的统计意义,它并不表示任一次测量值的误差就是 $\pm\sigma$,也不表示误差不会超出 $\pm\sigma$ 的界限。标准误差只是一个具有统计性质的特征量,用以表征测量值离散程度的一个特征量。

1.2.3 极限误差

与上述相仿,同样可以计算在相同条件下对某一物理量进行多次测量,其任一次测量

值的误差落在 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区域之间的可能性(概率)。其值为

$$p(-3\sigma, +3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 99.7\%$$

也就是说,在 1000 次测量中,可能有 3 次测量值的误差绝对值会超过 3σ 。在通常的有限次测量情况下,测量次数很少超过几十次,因此,测量值误差绝对值超出 3σ 范围的情况几乎不会出现,所以把 3σ 称为极限误差。

在测量次数相当多的情况下,如果出现测量值误差的绝对值大于 3σ 的数据,可以认为这是由于过失引起的异常数据而加以剔除。但是,对于测量次数较少的情况,这种判别方法就不可靠,而需要采用另外的判别准则。

1.3 实验结果的最佳值——算术平均值

尽管一个物理量的真值是客观存在,然而,即使对测量值已经进行了系统误差的修正,由于随机误差的存在,企图得到真值的愿望仍不能实现。那么,是否能够得到一个测量结果的最佳值,或者说得到一个最接近真值的数值(近真值)呢?这个近真值又如何来求得?根据随机误差具有抵偿性的特点,由误差理论可以证明,如果对一个物理量测量了相当多次,那么,算术平均值就是接近真值的最佳值。

设在相同条件下对一个物理量进行了多次测量,测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 各次测量值的随机误差分别为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$, 并用 T_x 表示该物理量的真值。根据误差的定义,有

$$\delta_1 = x_1 - T_x$$

$$\delta_2 = x_2 - T_x$$

$$\delta_n = x_n - T_x$$

将以上各式相加,得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nT_x$$

或

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - T_x \quad (1-3-1)$$

用 $\bar{x}$ 代表算术平均值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-3-2)$$

式(1-3-1)写为

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \bar{x} - T_x \quad (1-3-3)$$

根据随机误差的抵偿性特征,当测量次数 n 相当多时,由于正负误差相互抵消,各个误差的代数和趋近于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

于是,有

$$\bar{x} \rightarrow T_x$$

由此可见,测量次数愈多,算术平均值接近真值的可能性愈大。当测量次数相当多时,算术平均值是真值的最佳值,即近真值。

1.4 随机误差的估计——标准偏差

任意一次测量值的标准偏差的估算方法如下所述。

某一次测量值 x_i 的误差 δ_i 是测量值 x_i 与真值 T_x 的差值。由于真值不知道,误差 δ_i 计算不出,因而按照式(1-2-2),标准误差 δ 也无从估算。根据算术平均值是近真值的结论。在实际估算时是采用算术平均值 $\bar{x}$ 代替真值,用各次测量值与算术平均值的差值

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-4-1)$$

来估算各式的误差,差值 v_i 称为残差。

误差理论可以证明,当测量次数 n 有限,用残差来估算标准误差时,其计算式(贝塞尔公式)为

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

σ_x 称为任意一次测量值的标准偏差,它是测量次数有限多时,标准误差 σ 的一个估计值。其代表的物理意义为:如果多次测量的随机误差遵从高斯分布,那么,任意一次测量,测量值误差落在 $(-\sigma_x, +\sigma_x)$ 区域之间的可能性(概率)为 68.3%。或者说,它表示这组数据的误差有 68.3% 的概率出现在 $(-\sigma_x, +\sigma_x)$ 区间内。

误差理论证明,平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1-4-3)$$

式(1-4-3)说明,平均值的标准偏差是 n 次测量中任意一次测量值标准偏差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍。 $\sigma_{\bar{x}}$ 小于 σ_x , 这个结果的合理性是显而易见的。因为算术平均值是测量结果的最佳值,它比任意一次测量值 x_i 更接近真值,误差要小。 $\sigma_{\bar{x}}$ 的物理意义是,在多次测量的随机误差遵从高斯分布的条件下,真值处于 $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ 区间内的概率为 68.3%。

值得注意的是,用式(1-4-2)和式(1-4-3)来估算随机误差,理论上要求测量次数相当多。但在目前的实验中,往往受到教学时间的限制,重复测量的次数不可能很多,所