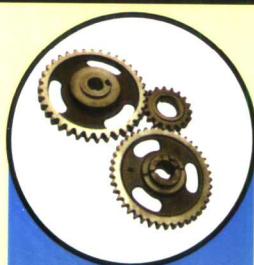
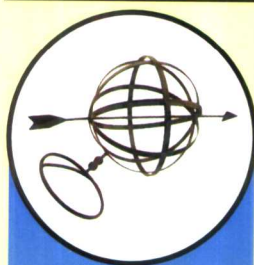


原所佳 主编

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

大学物理实验

主编 原所佳



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学的基本要求》，结合 21 世纪人才培养目标，总结大学物理实验课程建设多年来的实践经验，参阅有关资料编写而成。全书包括绪论、实验误差理论与数据处理、常用测量仪器、基础实验、近代物理和综合物理实验 4 章等。全书充分反映了大学物理实验课程改革的成果，探索实验理论与实践有机结合的课程体系，注重教学内容的系统性和实验技能的严格训练。全书涵盖了力学、热学、电磁学、光学及近代物理学的内容。可供读者根据教学内容、教学要求和学时情况等自行选题。

本书可作为高等工科院校各专业的物理实验教学用书，也可作为实验工作者和其他科技工作者的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验 / 原所佳主编. — 北京: 国防工业出版社, 2005.2

ISBN 7-118-03756-7

I. 大... II. 原... 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 142422 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)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14¼ 329 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 22.00 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

本书是根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学的基本要求》,在参考借鉴许多大学物理实验教材的基础上,作者结合多年大学物理实验课程教学经验及教学改革的探索与实践,编写了本教材。

全书内容包括绪论、实验误差理论与数据处理、实验常用测量仪器、基础实验、近代物理实验和综合物理实验等4章,共35个实验项目,并附有物理数表、重要物理实验年表等。编者在编写时,注意了以下几个方面。

1. 物理实验教学内容整个体系贯穿着强化实验基本技能、基本方法和物理实验思想的训练,注意培养和提高科学实验素质,重点突出能力培养和创新意识的训练。

2. 在精选基本实验的基础上,大力充实具有强烈现代意识和高新技术色彩的实验项目,吸收国内外有特色的精品实验。例如将超导体研究编入教材中。

3. 大学物理实验是各工科院校本科生入学后第一门系统训练的实验课程。因此实验选题适当照顾了物理的各个领域、不同实验方法及常用仪器使用,实验项目按由浅入深、循序渐进的原则安排教学内容和实验要求。

4. 为便于学生预习和自学,在内容的叙述上,力求做到实验目的明确,实验原理叙述清楚,仪器介绍实用、典型,实验步骤简明可行。

本书采用国际单位制(SI)为基础的我国法定计量单位,物理学名词使用全国自然科学名词审定委员会公布的《物理学名词(基础物理部分)》(1996年)的表述,按量和单位国家标准(GB3100—3102)的规定,表示物理量的符号和科学符号。需要说明的是,考虑到现使用仪器面板上符号的实际情况,有些符号字体作了灵活处理。

本书由原所佳组织编写并统稿。参加本书编写人员及所承担的内容为(按姓氏笔画为序):王惠(第3章实验2,3,6,7),刘进庆(第3章实验10,17,19),许振峰(绪论(四),第3章实验12,22,23,24,29),宋淑慧(第3章实验20,第4章实验3),张洪丽(第3章实验1,5,15,26,第4章实验2,6),高峰(第3章实验4,9,16,第4章实验5),高奇辉(第3章实验8,11,13,14,18),原所佳(绪论(一),(二),第1章,第2章,第3章实验27,28,第4章实验1,4,附录1—6),裴娟(绪论(三),第3章实验21,25)。全体编写者一致认为,实验教学是一门集体的事业,无论是实验教材的编写,还是实验仪器设备的准备和开发,都是实验室全体任课教师和技术人员、管理人员长期辛勤耕耘、不断改进、充实和完善的结果。本书在编写过程中,得到不少同行专家的帮助,借鉴和参阅了兄弟院校的有关教材和经验,特此深表谢意。

编写水平有限,书中如有不当之处,恳请斧正。

编者于济南

2005.1

目 录

绪论	1
一、绪论	1
二、物理实验守则	2
三、开放物理实验室使用说明	3
四、开放实验室管理条例	5
第一章 实验误差理论与数据处理	7
第一节 测量与误差	7
第二节 随机误差的高斯分布与标准误差	9
第三节 近真值——算术平均值	11
第四节 标准误差的估算——标准偏差	12
第五节 间接测量值误差的估算——误差传递公式	13
第六节 不确定度与测量结果表述	15
第七节 有效数字	19
第八节 简算方法及数字取舍规则	20
第九节 数据处理方法	23
练习题	30
第二章 常用测量仪器	32
第一节 力学、热学实验常用仪器	32
第二节 电磁学实验常用仪器	40
第三节 光学实验常用仪器及光源	48
第三章 基础实验	52
实验一 杨氏模量的测定	52
实验二 三线摆法测刚体的转动惯量	56
实验三 毛细管法测定水的表面张力系数	60
实验四 落球法测定液体的粘滞系数	63
实验五 固体线膨胀系数的测定	66
实验六 弦振动的研究	68
实验七 密度的测量——设计性实验(一)	73
实验八 稳态法测定橡胶板的导热系数	75
实验九 示波器的使用	79
实验十 铁磁性材料磁滞回线的测量	85
实验十一 惠斯登电桥	88

实验十二	导体电阻率的测定	91
实验十三	十一线板式电位差计	98
实验十四	温差电动势的测量	102
实验十五	霍耳效应法测磁场	107
实验十六	伏安特性曲线的测绘——设计性实验(二)	113
实验十七	静电场的描绘	116
实验十八	直流电表的改装与校准——设计性实验(三)	120
实验十九	制作简易万用电表——设计性实验(四)	125
实验二十	变阻器分压与限流特性的研究——设计性实验(五)	128
实验二十一	直流稳压电源的制作——设计性实验(六)	129
实验二十二	分光计的调节和用光栅测定光波的波长	130
实验二十三	折射率的测量——设计性实验(七)	135
	I 最小偏向角法	135
	II 掠入射法	138
实验二十四	牛顿环	140
实验二十五	旋光仪测糖溶液的浓度	143
实验二十六	迈克耳逊干涉仪的调节和使用	148
实验二十七	摄影技术	151
实验二十八	光电管特性的研究	156
实验二十九	用劈尖法测量细丝的直径和透明液体的折射率 ——设计性实验(八)	159
第四章	近代物理、综合实验	162
实验一	超导转变温度测量	163
实验二	弗兰克——赫兹实验	167
实验三	密立根油滴实验	170
实验四	全息照相	175
实验五	超声声速的测量	183
实验六	光强度分布的测量	187
附录 1	全息干板使用说明	191
附录 2	YB4320A示波器	192
附录 3	SG1641型信号发生器	195
附录 4	ZL-1整流波形仪使用说明书	197
附录 5	常用数表	198
附录 6	重要物理实验年表	215
参考文献		221

绪 论

一、绪 论

1. 物理实验的地位和作用

物理实验是物理学和其他自然科学的重要基础科学,是研究自然现象,掌握客观规律的重要手段。物理实验在科学、技术的发展中有着独特的作用。历史上每次重大的技术革命都起源于物理学的发展。热力学、分子物理学的发展,使人类进入热机、蒸汽机时代。电磁学的发展使人类跨入电气化时代。原子物理、量子力学的发展,促进了半导体、原子核、激光、电子计算技术的迅猛发展。然而,物理学本质上是一门实验科学,一切物理概念的确立,物理规律的发现,物理理论的建立都有赖于实验,并受实验的检验。

物理实验不仅在物理学自身发展中有着重要作用,而且在推动各自然科学、工程技术的发展中也起着重要的作用。特别是近代各学科相互渗透,发展了许多交叉学科,物理实验的构思、实验方法和技术与化学、生物学、天体学等学科相互结合已经取得、并且必将取得更大的成果。

大学物理实验是国家教委规定的工科大学生必修的主要课程之一,这是一门独立的课程。作为培养高级工程技术人才的高等工业院校,不仅要使学生具备比较深广的理论知识,而且要使学生具有较强的从事科学实验的能力。物理实验是对高等工业院校学生进行科学实验基本训练的一门基础课程,是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。在培养学生运用实验手段去发现、观察、分析和研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着重要作用,同时也将为学生今后的学习和参加祖国现代化建设奠定一个良好的实验基础。

2. 物理实验的目的和任务

物理实验作为一门主要的基础课程,它有以下几方面的目的和任务。

(1) 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法及基本技能,能运用物理原理、物理实验方法研究物理现象和规律,加深对物理原理的理解。

(2) 培养和提高学生从事科学实验的素质。包括:理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的科学态度,不怕困难,主动进取的探索精神,遵守操作规程,爱护公共财物的优秀品质,在实验中互相协作,共同探索的协同心理。

(3) 培养和提高学生科学实验的能力。包括:

自学能力——能够自行阅读实验教材和参考资料,正确理解实验内容,在实验前作好准备。

动手能力——能够借助教材和仪器介绍正确调整和使用仪器,完成实验的测量。

思维判断能力——能够运用物理理论,对实验现象进行初步分析和判断。

表达书写能力——能够正确记录和处理数据,绘制图线,说明实验结果,撰写合格的

实验报告。

简单设计能力——能够根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择仪器,拟定具体的实验程序。

3. 实验的过程和要求

1) 实验前的准备(预习)

实验前的准备是保证实验顺利进行,并能取得满意结果的重要步骤,主要做到下面 3 个方面:

(1) 对理论的掌握。认真阅读实验教材和有关书籍,充分理解实验的理论依据和条件。

(2) 对仪器的了解。了解所用仪器的工作原理、工作条件和操作规程;了解实验为什么选用这样的仪器和装置。

(3) 对观察的准备。掌握实验步骤和注意事项,设计既便于记录又便于整理数据的记录表格。

在上述准备的基础上写出预习报告,其内容包括实验名称、实验目的、仪器、原理(包括原理图)、步骤(或内容)和记录表格等。

2) 实验的进行

学生进入实验室上课,必须携带实验教材,预习报告及记录本等,经过指导教师检查后方能开始实验。做实验要注意以下两点:

(1) 仪器的安装和调整。实验正式进行之前,首先要熟悉一下所用仪器、设备、量具等的性能以及正确的操作规程和仪器正常的工作条件(水平、铅直、工作电压、光照等),切勿盲目操作。其次,要全面地想一想实验操作程序,怎样做更为合理,千万不要急于动手。否则,误解一步或调错一次,都可能使整个实验前功尽弃。

(2) 观测。明确了实验目的、测量内容、步骤并能正确使用仪器之后,可以先进行粗测,然后再进行正式观测。观测时要集中精力,尽量排除外界干扰。当从各种仪表的刻度上读数时,一定要进行估读,一般要估读到最小分度的 $1/10$ 或 $1/5$ 。

3) 数据的整理和实验报告

测量结束后,要尽快地整理好数据,以便及时发现问题,做出必要的补充测量,待教师认为测量数据及计算结果符合要求而签字后,再收拾仪器。

实验报告力求简单明了,用语确切,字体工整,其内容应包括:实验名称、目的、仪器、原理(说明、公式、原理图)、步骤(关键的测量方法和调整技巧)、数据记录、数据处理及结论,要求写出数据处理的主要过程、图线和最后结果、误差分析及讨论等。

实验的讨论是培养学生分析能力的一个重要部分,所以应努力去做。可供讨论的问题是多方面的。例如:对本次实验有什么体会?实验目的完成得怎样?实验的系统误差表现在哪里?对实验改进有什么设想?观察到什么反常现象?对测量结果的分析等。

二、物理实验守则

为了保证实验正常进行,以及培养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,望同学们遵守执行。

(1) 学生应在开放实验选定时间内进行实验,不得无故缺席或迟到。若要更改实验时间,须提前一周撤销预约项目。

(2) 学生在每次实验前对选择要做的实验应进行预习,并在预习的基础上,作预习报告。

(3) 进入实验室后,应将预习报告放在桌上由教师检查,并回答教师的提问,经过教师检查认为合格后,才可以进行实验。

(4) 做实验时,应携带必要的物品,如文具、计算器和草稿纸等。对于需要作图的实验应事先准备毫米方格纸和铅笔。

(5) 进入实验室后,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。未列入清单的仪器,另向管理员借用,实验完毕归还。

(6) 实验前应细心观察仪器构造,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,先经教师或实验室工作人员检查,经许可后才可接通电源,以免发生意外。

(7) 实验完毕应将实验数据及处理结果交给教师检查,实验合格者,教师予以签字通过。

(8) 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。

(9) 如有仪器损坏,应及时报告教师或实验室工作人员,并填写损坏单,说明损坏原因,赔偿办法根据学校规定处理。

(10) 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课,其实验成绩按满分 60 分计算,经教师许可方可离开实验室。

三、开放物理实验室使用说明

1. 熟悉系统界面

进入开放实验(<http://211.64.121.240/openlab/labmism.asp>)页面(见图0-1)。在此

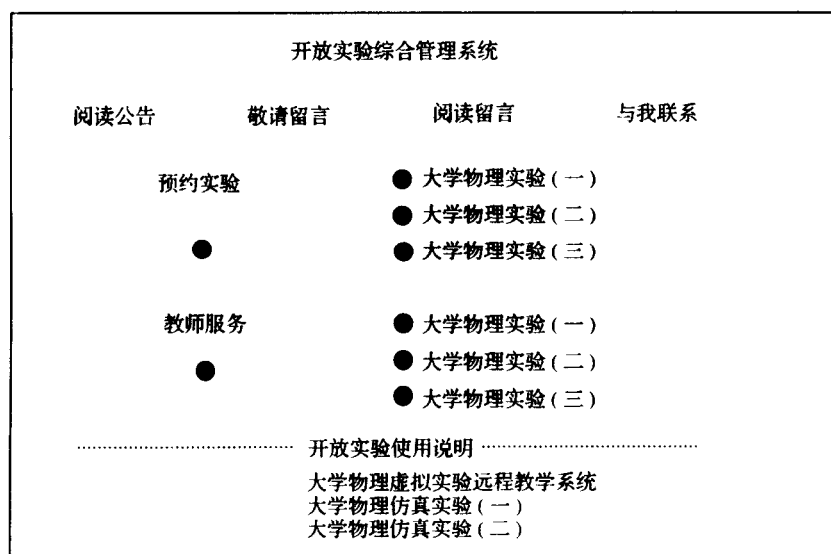


图 0-1 开放实验综合管理系统

标题下面有“阅读公告”、“敬请留言”、“阅读留言”、“与我联系”项供同学使用。接下来是“预约实验”、“教师服务”、“大学物理虚拟实验远程教学系统”3个栏目。同学只用“预约实验”栏目就可以。在“预约实验”栏目中有三个层次：“大学物理实验(一)”、“大学物理实验(二)”、“大学物理实验(三)”。其中“大学物理实验(一)”是第一学期预约实验项目，“大学物理实验(二)”是第二学期预约实验项目，“大学物理实验(三)”是选修课物理实验预约项目。具体使用方法是根据学期选择相应的层次。用鼠标点击即可进入“开放实验教学管理系统”(见图0-2)。

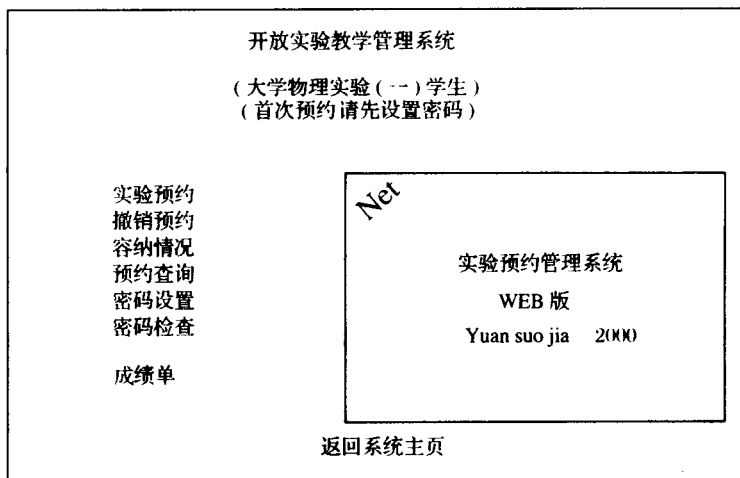


图0-2 开放实验教学管理系统

2. 使用系统界面

在“开放实验教学管理系统”页面有7项可供同学们使用,具体使用方法如下。

1) 密码设置及密码检查

进入“开放实验教学管理系统”后,如果是首次预约,则必须先进行密码设置(6位),否则预约不会成功。点击“密码设置”→“建立和更改密码”,输入学号(山东交通学院一卡通号码),原始密码(wlsy),点击“发送”→“提示”页面,输入新密码,并确认新密码。点击“立即设置”→“提示”页面,此页面建议我们查询一下密码设置是否正确。回到“开放实验教学管理系统”,点击“密码检查”,输入学号及刚设置的密码,点击“发送”→“提示”,确定密码设置是否成功。密码一旦设置,不允许更改。若忘记学号可到“阅读公告”中查询。

2) 进行预约

密码设置成功后,返回到“开放实验教学管理系统”,点击“实验预约”→“大学物理实验网络预约”,输入自己的学号及密码,按“确定”键。出现的界面中有3个表格:

(1) 座位信息表(数字表示预约空缺数,例如:“0”表示已预约满,“10”表示最多可有10人选做)。

(2) 实验项目窗口(选定一个实验及要做的周次,点击“确定”)。

(3) 预约窗口(选定星期、单元号,如913表示第九周星期一下午1、2节课,点击“下一步”→“提示”页面,建议我们查询一下是否选上)。点击表示离开的箭头“→”返回“开放实

验教学管理系统”页面。

3) 查询预约情况及成绩

点击“预约查询”(必须做)→“预约情况查询”,输入学号,点击“查询”→“物理实验预约查询”,确定实验预约是否成功(使用此项可查询到已经预约的实验名称、该实验的时间代码、成绩以及以预约实验的数目等)。此页面与“撤销预约”、“进行预约”、“查询容纳情况”3个页面相关链接,供同学参考使用。

4) 撤销预约

如果对自己已经预约的实验项目不满意或者时间安排出现问题,那么可以使用“撤销预约”项。点击“撤销预约”→“撤销实验预约”,选择要撤销的实验项目,输入学号、密码,点击“确定”。撤销成功后,系统会给出一定的提示,再根据提示进行相应的操作。

● 注意事项:

有下列情况之一的不能撤销:

- (1) 未预约实验。
- (2) 学号密码输入错误。
- (3) 该实验已经做过或属于当前周以前的。

5) 查询容纳情况

为了快速有效的预约上自己要做的实验,可以点击“容纳情况”项,查询一下想要预约的实验及能够预约的时间和容纳人数。点击“容纳情况”→“座位查询”,选择实验名称及实验周次,点击“确定”→“座位情况”,根据座位情况确定选做实验的时间。此页面与“返回”、“查询预约情况”、“进行预约”3个页面相关链接,根据自己的需要选择使用。

3. 预约出现问题

预约出现问题可以采用下列方式处理:

- (1) 询问其他同学。
- (2) 请在“阅读留言”中说明出现的问题,请某位教师回答。
- (3) 直接到物理实验中心询问教师。

上述使用方法是开放物理实验的简单说明,详细使用方法请同学们到图 0-1 页面“开放实验使用说明”查看,祝你成功!

四、开放实验室管理条例

(1) 物理实验室为全开放实验室,学生做物理实验须提前一周预约,具体预约实施方法见《开放物理实验室使用说明》。

(2) 预约成功后,学生要预习实验,并写出预习报告。

(3) 进入实验室必须携带学生证或考试证、身份证及实验预习报告,经教师检验后,签名登记并按编号入座,无证件者不得进入实验室。

(4) 迟到者在该次实验成绩中酌情扣分。

(5) 在实验室中应关闭手机等一切通信工具,无视课堂纪律者终止其实验。

(6) 不正当损坏仪器者须照价赔偿并签名记录。

(7) 学生须当堂完成实验报告。

(8) 实验报告各项内容填写完整,否则扣分。

(9) 因事不能按时做实验者,请提前一周撤销预约项目,择时再预约该项目,若来不及撤销实验项目,请出示由系盖章的请假条,经教师批准再重选实验项目。已预约实验不做者该次实验判为零分且不得补做。

(10) 有抄袭伪造数据等作弊行为者,该次实验成绩判为零分。

第一章 实验误差理论与数据处理

第一节 测量与误差

一、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定量关系,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,测量数值愈小,反之亦然。

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录。

测量可分为两类:一类是直接测量,如用尺量长度,以表计时间,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,根据一定的公式,通过运算,得出所需要的结果,例如直接测出单摆的长度 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,都需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。

二、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,使得测量值与客观上存在的真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,简称误差,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这

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三大类。

1. 系统误差

系统误差的特点是有规律性的,测量结果都大于真值,或者都小于真值。或在测量条件改变时,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正确,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、缺乏经验等而引入的误差。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的关系。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,对同一物理量进行多次重复测量,即使系统误差减小到最小程度之后,测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的起伏,而且测量值误差的绝对值和符号在随机地变化着。这种误差称之为随机误差。

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、电源电压的起伏、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,可以用概率理论来估算它。

3. 错误(过失误差)

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,还可与另一次测量结果相比较的办法进行纠正,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。

三、正确度、精密度和准确度

正确度、精密度和准确度是评价测量结果好坏的三个术语。

测量结果的正确度是指测量值与真值的接近程度。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。

四、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 $x - \Delta x$ 至 $x + \Delta x$ 区间内。仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要看测定值本身的大小,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%,所以我们认为前者较后者更可靠。

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差来表示测量的好坏,即

$$\text{百分差 } E_0 = \frac{\text{测量值 } x - \text{公认值 } x'}{\text{公认值 } x'} \times 100\%。$$

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。

第二节 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,对某一次测量值来说,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、均匀分布以及反正弦分布,等等。按照教学要求,这里仅简要地介绍随机误差的高斯分布。

一、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四大特征。

- (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 当测量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消,于是,误差的代数和趋向于零。

高斯分布的特征可以用高斯分布曲线形象地表述出来,见图 1-1(a)。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

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

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

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

式中, n 为测量次数, 各次测量值的随机误差为 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。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。

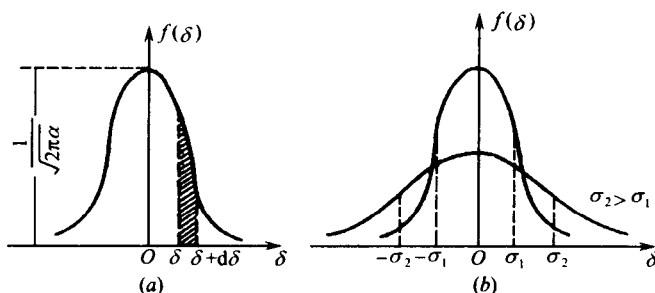


图 1-1 随机误差的正态分布曲线

二、标准误差的物理意义

由式(1-1)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 1-1(b) 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。

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, 其测量值误差出现在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 区间内的可能性(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 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 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的误差就是 $\pm\sigma$, 也不表示误差不会超过 $\pm\sigma$ 的界限。标准误差只是一个具有统计性质的特征量, 用以表示测量值离散程度的一个特征量。

三、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, 其任意一次

测量值的误差落在 -3σ 到 3σ 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,测量值误差超出 $\pm 3\sigma$ 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需要采用另外的判别准则。

第三节 近真值——算术平均值

尽管一个物理量的真值是客观存在的,然而,即使对测量值已经进行了系统误差的修正,但是,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,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,测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 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。根据误差点定义有

$$\delta_1 = x_1 - T_x$$

$$\delta_2 = x_2 - T_x$$

...

$$\delta_n = x_n - T_x$$

将以上各式相加,得

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

或

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

用 $\bar{x}$ 代表算术平均值,即

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

式(1-3)写为

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \bar{x} - T_x \quad (1-5)$$

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、负误差相抵消,各个