



新世纪基础实验系列教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

丁菲 刘平安 主编

河南大学出版社
开封

新世纪基础实验系列教材

大学物理实验

DA XUE WU LI SHI YAN

(供物理、化学、医学、药学、建筑、材料等专业使用)

主 编 丁 菲 刘平安

副主编 唐文春 马孝贤 郭彦杰 李平生

河南大学出版社

• 开封 •

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/丁菲,刘平安主编. —开封:河南大学出版社,2009.2

ISBN 978-7-81091-037-8

I. 大… II. ①丁…②刘… 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(2009)第 022597 号

责任编辑 张 震

责任校对 余建国

装帧设计 王四朋

出 版 河南大学出版社

地址:河南省开封市明伦街 85 号

邮编:475001

电话:0378-2825001(营销部)

网址:www.hupress.com

排 版 郑州市今日文教印制有限公司

印 刷 河南郑印印务有限公司

版 次 2009 年 3 月第 1 版

印 次 2009 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17.75

字 数 432 千字

印 数 1—5000 册

定 价 28.00 元

(本书如有印装质量问题,请与河南大学出版社营销部联系调换)

序 言

自 2003 年 8 月基础实验教学中心成立以来,普通物理实验设备不断充实与更新。编写一套切合自身实际,既利于教学同时又利于学生自学的教材,成为我们此时的一项重要工作。

本书是在吸收了近年来物理实验课教学的新理念、新方法及课程内容、课程体系不断改革的主流成果,并结合多年的教学实践、试用讲义,多次讨论修改后定稿的。

本书主要分为五章,第一章介绍测量与不确定度相关知识,第二章介绍物理实验中常用的测量方法,第三、四、五章分别介绍基础实验、综合性实验和设计性实验。

本书有以下几个特点:

1. 注重基础。较系统地介绍了误差理论与数据处理的基础知识;对物理实验中常用的测量方法做了细致的介绍;基础实验 34 个,占全部实验课目的 2/3 左右。

2. 切合实际。本书几乎包含了普通物理实验教学中心当前所能开设的所有课目,在许多传统的实验中,也编入了新的实验内容和方法,例如钢丝杨氏模量的测定、液体表面张力系数的测定、万用表使用等实验;对于数据处理量较大的实验则介绍推荐利用计算机进行数据处理。

3. 循序渐进。按照人才培养和学科发展的规律,将过去的力、热、电、光等实验整合为基本实验、综合性实验和设计性实验,实现了实验教学内容从基本技能训练到创新能力培养的有机结合。

4. 适当延伸。对每个实验的意义及现实应用都做了一定的介绍,另外还编入了应用 EWB 进行仿真实验以及计算机进行数据处理等相关内容。

本书由丁菲、刘平安主编。参加编写的同志有丁菲(绪论、第一章第四节、第五节、第二章);唐文春(第一章第一节、第二节、第三节、实验 5(约利氏秤法)、9、17、42);刘越峰(实验 1、6、12、15、23、26、30、33、35、43、45、46);马孝贤(实验 2、4);李平生(实验 3、10);佟晓林(实验 5(力敏传感器法)、37、52);徐晓波(实验 7、8、21、32、44、附录);王晓娟(实验 11、13、25、29、31、47、48、49、50、51、56、57);吴永辉(实验 14、16、24、36);杨锋(实验 18、19);刘平安(实验 20、22、38、39、40、41、53、54、55);郭彦杰(实验 28、27、34)。全书由丁菲、刘平安统稿。

本书编写过程中,参阅了有关院校所编的同类教材,从中受益良多,谢持中、王顺才两位老教授提出了许多建设性的意见。本教材的出版,得到了河南大学教材出版基金的资助。在此一并致谢!由于编者水平有限,书中缺陷、错误在所难免,恳请各位读者和专家批评指正。

编者

2009 年 2 月

目 录

绪 论	(1)
一、物理实验的作用	(1)
二、物理实验课的意义和目的	(1)
三、物理实验课的基本程序	(2)
四、怎样学好物理实验	(3)
第一章 测量与不确定度	(5)
第一节 测 量	(5)
一、测量	(5)
二、测量分类	(5)
三、测量过程	(6)
第二节 误 差	(7)
一、误差的概念及表示	(7)
二、误差的分类	(9)
三、误差分布	(10)
四、测量的精密度、准确度和精确度	(11)
第三节 不确定度和测量结果的表示	(12)
一、不确定度	(12)
二、测量结果的评价	(14)
第四节 有效数字及其运算法则	(16)
一、有效数字的概念	(17)
二、有效数字的运算法则	(18)
第五节 实验数据的处理方法	(20)
一、列表法	(20)
二、图示法	(21)
三、图解法	(23)
四、逐差法	(24)
五、最小二乘法	(26)
第二章 物理实验中常用的测量方法	(31)
第一节 比较法	(31)
一、直接比较法	(31)

二、间接比较法	(32)
第二节 放大法	(32)
一、累积放大法	(32)
二、机械放大法	(33)
三、光学放大法	(33)
四、电学放大法	(33)
第三节 平衡法	(34)
第四节 补偿法	(34)
第五节 模拟法	(35)
一、物理模拟法	(35)
二、数学模拟法	(35)
第六节 干涉法	(36)
第七节 转换法	(36)
一、转换测量的定义与意义	(36)
二、两种基本的转换测量法	(37)
三、转换法测量与传感器	(38)
第三章 基础实验	(39)
实验一 基本测量	(39)
实验二 牛顿第二定律的验证	(45)
实验三 动量守恒定律的验证	(52)
实验四 用落体法测定重力加速度	(56)
实验五 液体表面张力系数的测量	(61)
实验六 金属杨氏弹性模量的测量(光杠杆法)	(69)
实验七 刚体转动惯量的测定	(73)
实验八 弦线上波的传播规律的研究	(79)
实验九 落球法测量液体的粘滞系数	(83)
实验十 金属线胀系数的测定	(88)
实验十一 冷却法测量金属比热容	(90)
实验十二 不良导体导热系数的测量	(94)
实验十三 混合法测量液体比汽化热	(96)
实验十四 万用表的使用	(100)
实验十五 电桥法测电阻	(102)
实验十六 电子束的聚焦与偏转	(105)
实验十七 示波器的原理与使用	(112)
实验十八 霍尔效应及磁场的测定	(123)
实验十九 亥姆霍兹线圈磁场的测定	(127)
实验二十 非线性元件伏安特性的测量	(132)
实验二十一 静电场的描绘	(138)
实验二十二 交流电桥测电容和电感	(141)

实验二十三	铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	(145)
实验二十四	磁阻效应	(150)
实验二十五	薄透镜焦距的测定	(153)
实验二十六	阿贝折射计测液体折射率	(157)
实验二十七	光的等厚干涉实验	(160)
实验二十八	分光计的调整和使用	(162)
实验二十九	光的夫琅禾费衍射研究	(168)
实验三十	用透射光栅测定光的波长及光栅角色散率	(171)
实验三十一	用菲涅耳双棱镜测光波波长	(174)
实验三十二	旋光法测糖溶液浓度	(177)
实验三十三	阿贝比长仪的结构和使用原理	(183)
实验三十四	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(186)
第四章	综合性实验	(193)
实验三十五	伸长法测钢丝杨氏模量(CCD 法)	(193)
实验三十六	声速测定	(196)
实验三十七	多普勒效应综合实验	(199)
实验三十八	周期电信号的傅里叶分析	(202)
实验三十九	RLC 电路的暂态过程研究	(205)
实验四十	RLC 串联电路谐振特性研究	(210)
实验四十一	硅光电池特性研究	(214)
实验四十二	非平衡电桥的原理与应用	(219)
实验四十三	集成电路温度传感器的特性测量及应用	(222)
实验四十四	非线性电路混沌	(224)
实验四十五	普朗克常数的测定	(227)
实验四十六	单色仪的定标	(232)
实验四十七	超声光栅测液体中的声速	(235)
实验四十八	椭圆偏振仪测量薄膜厚度和折射率	(238)
实验四十九	阿贝成像原理和空间滤波	(245)
实验五十	偏振光的观测与研究	(248)
第五章	设计性实验	(254)
	设计性实验简介	(254)
实验五十一	微安表内阻的测定	(255)
实验五十二	电表的改装与校准	(256)
实验五十三	滑线电阻的限流特性和分压特性的研究	(256)
实验五十四	黑盒子问题的研究	(258)
实验五十五	应用 EWB 进行设计性系列实验	(260)
实验五十六	显微镜和望远镜的组装	(262)
实验五十七	杨氏双缝干涉实验	(262)
附 录		(264)

附录 A	中华人民共和国法定计量单位	(264)
附录 B	常用物理数据	(266)
附录 C	常用电气测量指示仪表和附件的符号	(273)

绪 论

一、物理实验的作用

物理学是自然科学中的基础学科,历史上每次重大的技术革命都发端于物理学的发展,而它又是建立在实验基础上的.物理实验不仅在物理学的产生、发展和应用过程中有着重要作用,而且在推动各自然科学、工程技术的发展中也起到了重要的作用.大家知道,经典物理学规律是从实验事实中总结出来的,并受实验的检验;近代物理学是从实验事实与经典物理学的矛盾中发展起来的;尤其是近代各学科相互渗透,发展了许多交叉学科,物理实验的原理、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了很大的成果.

二、物理实验课的意义和目的

物理实验课作为大学理工科专业学生的一门专业基础课程,在通过实验培养学生观察、分析和发现问题的能力以及培养学生的动手能力和创新精神等方面都起着重要的作用.物理实验的重要性不仅在于实验的内容上,更重要的是实验的过程.在物理实验的过程中,学生不仅掌握了知识、培养了能力,而且通过实验过程了解了科学研究的方法、树立了严谨的科学态度和一丝不苟的工作作风,为将来的工作和学习打下坚实的基础.物理实验课作为一门独立的基础课程,它有如下三个方面的目的和任务:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;同时通过对物理原理的运用、物理实验方法的训练加深了对物理学基本原理的理解.

(2) 培养和提高学生科学实验的能力.

① 阅读理解能力:训练学生自行阅读实验教材和参考资料、正确理解实验的要求和内容的能力,从而让学生做好实验前的准备.

② 动手实践能力:借助教材或仪器说明书,正确使用常用仪器,实施实验方案.

③ 思维判断能力:运用所学的物理理论,对实验现象进行分析和判断,作出结论.

④ 书面表达能力:正确记录和处理实验数据,绘制图线,计算实验结果,分析实验误差,撰写合格的实验报告.

⑤ 简单的实验设计能力:根据课题要求,确定实验方法和实验条件,合理选择实验仪器,拟定具体的实验步骤.

⑥ 科技创新能力:通过进行设计性实验,了解知识的发现与创新的过程,强化创新意识,促进创新思维.

(3) 培养学生的科学实验素养.

在物理实验过程中,培养学生实事求是的工作作风、严肃认真的科学态度、主动进取的探索精神、相互协作的团队意识和爱护公物的优良品质.同时,在培养科学工作者的良好素

质及科学世界观方面,物理实验课程也具有潜移默化的作用。

三、物理实验课的基本程序

物理实验和其他科学实验一样,一般可以分为如下几个阶段:① 确定研究课题;② 制订研究计划和方案;③ 选择与准备实验装置和仪器设备;④ 进行实验测量与观察,获得实验数据与结果;⑤ 分析处理数据,得出结论;⑥ 撰写实验报告或论文。

应该说,一项实验研究工作最重要的部分是前面三个阶段。科学实验发展史证明,杰出的科学实验要以杰出的构思为基础。但是,立题和制订实验方案,要有扎实的基础和优良的科学素养,要有经验的积累,对于初学者而言,不是马上就可以掌握的。本课程作为初学者的入门指导,主要进行后面三个阶段的学习和训练,但在课程的末尾阶段,适当安排了具有研究性的设计性实验,使学生在制订实验方案、进行仪器的选择和合理配置等方面得到初步的训练。

物理实验课的基本程序主要由三个环节构成:

1. 实验预习 —— 实验的基础

在课前认真阅读实验教材(讲义)和有关资料,弄清实验原理、实验方法和实验目的,然后在脑子里“操作”这一实验,拟出实验步骤,思考可能出现的问题和能够得出怎样的结论,最后写出预习报告,为实验课做好准备。预习报告内容包括如下几方面:① 实验名称;② 实验目的;③ 实验原理简述,要求写出测量公式,画出有关电路图、光路图或实验装置图,并用自己的语言对图和公式作必要的说明(如各符号的物理意义、公式应满足的实验条件等);④ 主要仪器设备(型号、规格等);⑤ 实验内容及注意事项,重点写出“做什么,怎么做”,哪些是直接测量量,哪些是间接测量量,各用什么仪器和方法测量,以及结果的不确定度如何估算等;⑥ 画好记录数据表格,为防止实验中漏测数据,并使测量结果一目了然,预习时应根据实验要求设计好数据记录表格,表格上标明物理量符号、单位及测量次数等。另外,对预习中不清楚的问题,也可写在预习报告中,以便在实验过程中及时解决。

2. 实验操作与数据记录 —— 实验最重要的环节

学生在认真预习的基础上,可以进行实验操作。进入实验室后,首先要接受教师对预习情况的检查。实验中应遵守实验室规则,按照一个科学工作者的标准要求自己。实验开始前要仔细阅读仪器使用说明书,务必牢记实验的注意事项。实验中井井有条地布置仪器,安全操作,注意观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题,独立思考,提高运用理论知识和已有的经验分析解决问题的能力,培养严谨、耐心、实事求是的科学态度和探索、求真的科学精神。在实验课学习过程中要逐步学会分析实验,排除实验中出现的常见故障。

开始实验前,要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。实验数据要严肃对待,要用钢笔或圆珠笔记录原始数据,严禁抄袭。即使实验数据确系记错了,也不要涂改,应在错误数据上轻轻划一道,在旁边写上正确值(错误多的,需重新记录),使正误数据都能清晰可辨,以供在分析测量结果和计算误差时参考。不要用铅笔记原始数据,并在记录实验数据时留有涂改的余地,也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里。希望同学们在实验中注意纠正自己的不良习惯,从一开始就不断培养良好的科学作风。

实验结束后,要认真填写实验仪器记录本,并将实验数据一并交教师审阅签字. 离开实验室前,要整理复原好所用的仪器,断开电源,做好清洁工作.

3. 数据处理与实验报告 —— 实验的简明总结

实验报告是实验工作的总结,要求文字通顺、字迹端正、图表规范、数据完备以及结论明确. 一份好的实验报告还应具有清晰的思路、见解和新的启迪. 要养成在实验操作后在预习报告的基础上尽早写出实验报告的习惯,即对原始数据进行处理和分析,得出实验结果并进行不确定度评估和讨论.

完整的实验报告应包括下列项目:

- ① 实验名称:实验项目或实验选题.
- ② 实验目的:简单地写明本次实验的目的.
- ③ 实验仪器:主要仪器及其型号、精度等有关参数.
- ④ 实验原理:用简洁的语言说明实验原理,给出基本公式并说明公式及其中各物理量的意义,绘制重要的原理图.
- ⑤ 实验内容:简明扼要地写出实验研究的内容和重要步骤,绘制主要的线路图、光路图以及其他类型的示意图.
- ⑥ 数据记录及处理:按要求科学、合理地设计表格,首先将整理好的原始数据填入表格内,再根据每个实验的具体要求进行数据处理. 计算待测量时要写明所用公式并代入数据. 要求作图的必须用坐标纸;要求计算不确定度的必须给出每个不确定度分量及总不确定度的计算方法、计算过程和计算结果. 最后应按教材要求给出完整的结果表述,数据处理提倡采用计算机处理.
- ⑦ 结果分析:认真分析、讨论实验的结果及问题,并对实验中的问题和实验方法提出改进的设想和建议.

四、怎样学好物理实验

要学好物理实验不但要花力气、下工夫,而且要有一定的学习方法. 那么,怎样才能学好这门课程呢?

第一,注意掌握实验方法,特别是基本的测量方法. 基本的测量方法往往是复杂的测量方法的基础,要弄明白它的道理,达到逐步熟悉以至于牢记. 任何实验方法都有优缺点和适合本实验的特定运用条件,只有亲自认真做过实验才能对实验方法本身的优缺点和适用条件有较深的印象.

第二,培养良好的实验习惯,从实验仪器、装置的安排到操作姿势、读数习惯等都应严格训练,不可轻视. 良好的实验习惯是建立在很多次实验经验总结的基础上的,它能保证实验安全,避免差错. 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.

第三,逐步学会分析实验,进而能够排除实验中的各种故障,以及判断实验数据是否可靠、实验结果是否正确. 这些问题主要靠分析实验本身来判断,即分析实验方法是否正确、实验方法带来多大误差、仪器带来多大误差、实验环境有多大的影响等. 当发现数据出现问题时,千万不要根据理论值去拼凑数据,而要真实地去检查自己的操作和读数,进而去检查仪

器与装置,找出错误和故障.要力求自己动手解决,如解决不了,需要教师帮助解决时,要留意观察教师如何判断仪器的故障及修复的方法,以提高自己的实验能力.

第四,掌握好重点.抓紧时间,认真做完辅助性工作,然后将主要精力放在重点学习的内容上,避免在枝节问题上浪费时间.

第五,认真写好实验报告.实验报告是本次实验的成果总结,认真写好实验报告,会加深对本次实验的理解,对思路的整理、实验的分析、印象的加深、结果的总结等方面都是有益的.甚至通过实验报告,还可能进一步发现问题,使学习更加扎实、牢固.

总之,学好物理实验不是一件容易的事情,大家要不断提高对实验现象探索的热情,不断总结经验,提高自己的动手能力和解决实际问题的能力.

第一章 测量与不确定度

第一节 测 量

一、测量

测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较并求出其比值的过程。其中倍数称为待测物理量的数值，选作计量标准的物理量称为单位。通常，物理量的测量值应由数值和单位两部分组成，但也有些物理量不含单位，如相对密度、相对强度等。完整的讲，测量结果还应包含不确定度，这个在后边会讲到。

作为比较标准的测量单位，其大小是按一定科学依据人为规定的。按照我国法定计量单位的规定，物理量单位是以国际单位制(SI)为基础的，它选定了七个基本物理量，即长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)、热力学温度(开尔文)、物质的量(摩尔)和发光强度(坎德拉)的单位为基本单位，平面角(弧度)、立体角(球面度)两个辅助单位，其他物理量的单位可由基本单位导出，故称为导出单位。

二、测量分类

根据获得数据的方法不同，测量可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。例如用米尺测长度、用温度计测量温度、用电压表测电压等都是直接测量，所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量量。

2. 间接测量

在物理实验中，大多数物理量没有直接测量的量具，无法进行直接测量，而需依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系求出，这样的测量就称为间接测量。如用单摆法测重力加速度 g 时， T (周期)、 L (摆长)是直接测量量，而 g 就是间接测量量。

根据测量条件的不同，测量又可分为等精度测量和不等精度测量。

(1) 等精度测量

在测量条件相同的情况下(如同一个人，用同一台仪器，每次测量时周围环境条件相同)，进行的多次测量称为等精度测量。等精度测量每次测量结果的可靠程度相同。

(2) 不等精度测量

在诸多测量条件中，只要有一个发生了变化，这时所进行的测量，就称为不等精度测量。不等精度测量每次测量的结果，其可靠程度自然也不相同。

物理实验操作过程中进行多次测量时，一般都采用等精度测量。

三、测量过程

为了在实验过程中正确地进行测量,我们要按照以下过程进行.

1. 熟悉仪器

熟悉仪器的性能,掌握正确的使用方法和读数是每个学生的必备基本素质.例如:仪器的级别、量程、稳定性以及对环境的要求等等.

2. 选择适当的测量仪器和测量方法

根据对实验测量精度的要求和测量范围,合理地选择仪器和方法.例如:长度、温度的测量我们可根据实验对测量精度的要求选取恰当的测量仪器,如表 1-1 所示.

表 1-1 常见仪器的测量精度与测量范围

长度测量精度要求	1mm	0.02mm	0.005mm	0.0001mm	0.0000001mm
仪 器	米尺	卡尺	千分尺	激光干涉仪	电子显微镜
温度测量范围(℃)	< 300			< 600	> 1600
仪 器	半导体或液体温度计			热电偶	红外高温计

3. 选择实验方法

在实验中不仅要了解仪器的级别、量程、稳定性等技术参数,而且还要采用正确的实验方法.

例如用电压表测电路中的电压时,因电表内阻的影响,测量误差不可避免.要减小上述测量方法引入的误差,可采用补偿法进行测量,或改用内阻很大($R_i \geq 200\text{M}\Omega$)的数字电压表.

4. 读数与记录

在进行测量时,正确的读数和记录是关键.对于不同仪器有多种读数方法的情况,将在今后的实验中分别介绍,在此仅谈一般规则.

(1) 如实记录仪器上显示的数值,作为原始数据.对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器,通常在直接测量时,要求估读一位(该位是有效数字的可疑位).估读数一般取最小分度的 $1/10 \sim 1/2$.

(2) 若仪表的示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则谈不上估读,只要记录全部数据即可.

(3) 有一些仪表,虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格为单位的,例如最常用的钟表,有以秒为最小分度的时钟,也有以 $1/10$ 或 $1/100$ 秒为最小分度的秒表.此类仪表不需要估读.

(4) 带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时一般记下对齐线的数值,不必进行更细的估读.

第二节 误差

一、误差的概念及表示

1. 真值

任何量在一定客观条件下都具有不以人的意志为转移的固定大小,这个客观存在的大小称为该物理量的真值.

由于“绝对真值”的不可知性,人们在长期的实践和科学研究中归纳出以下几种真值.

(1) 理论真值:理论设计值,公理值,理论公式计算值.

(2) 约定真值:国际计量大会规定的各种基本常数,基本单位标准.

(3) 算术平均值:指多次测量的平均结果,当测量次数趋于无穷时,算术平均值趋于真值.

2. 误差

测量结果与真值之间总是有一定的差异,这种差异称为误差.

3. 误差公理

误差自始至终存在于一切测量过程中,这一事实已为从事科学实验的人们所公认,故称之为误差公理.

4. 误差的表示

(1) 绝对误差

是指测量值 x_i 与被测量的真值 μ 的差,即:

$$\delta = x_i - \mu \quad (1)$$

(2) 相对误差

是指绝对误差与被测量的真值的比值,一般用百分比来表示.由于真值是理想量,实验中用多次测量的平均值来代替真值,即:

$$E = \frac{\delta}{\mu} \text{ 或 } E = \frac{\delta}{\bar{x}} \quad (2)$$

相对误差 E 可以用来比较被测物理量测量准确度的高低,或者说用相对误差能确切地反映测量的效果.由于被测量的量值大小不同,允许的误差也应有所不同.被测量的量值越小,允许测量的绝对误差也应越小.

(3) 偏差 Δx_i

在多次测量中,测量列内任意一个测量值 x_i 与测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 的差称为偏差或残差 Δx_i ,即:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad (3)$$

式中 $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$. 偏差可正可负,可大可小.

(4) 标准误差 σ

在同一条件下,若对某物理量 x 进行 n 次等精度、独立的测量,则测量列中单次测量标准误差定义如下:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (4)$$

式(4)中 μ 相应于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时测量的平均值. 式(4)是对这一组测量数据可靠性的估计, 标准误差小, 说明这一组测量的重复性好, 精密度高.

(5) 标准偏差 S_x

在有限的 n 次测量中, 单次测量的标准偏差用 S_x 表示, 定义如下:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式(5)又称为贝塞尔公式, 它表示测量的随机误差. 标准偏差小就表示测量值很密集, 即测量的精密度高; 标准偏差大就表示测量值很分散, 即测量的精密度低.

(6) 平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

在进行有限次测量中, 可得一最佳值 $\bar{x}$, $\bar{x}$ 也是一个随机变量, 它随测量次数 n 的增减而变化, 显然它比单次测量值可靠. 可证明平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 与一系列测量中单次测量的标准偏差 S_x 满足如下关系:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (6)$$

(7) 仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$

任何测量过程都存在测量误差, 其中包括仪器误差. 仪器误差限或最大允许误差是指在正确使用仪器的条件下, 测量结果和被测量的真值之间可能产生的最大误差, 用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示. 对照国际标准及我国制定的相应的计量器具的检定标准和规定, 考虑物理实验教学的要求, 下面作简略的介绍或约定.

① 在长度测量类中, 最基本的测量工具是直尺、游标卡尺、螺旋测微计等. 在基础物理实验中, 除具体实验另有说明外(如游标卡尺、螺旋测微器等), 我们约定: **直尺等测长工具的仪器误差限按其最小分度值的一半估算.**

② 在质量测量类中, 主要工具是天平. 天平的测量误差包括示值变动性误差、分度值误差和砝码误差等. 单杠杆天平按精度分为十级, 砝码的精度分为五等, 一定精度级别的天平要配用相应等级的砝码. 在简单实验中, 我们约定: **取天平的最小分度值作为仪器误差限.**

③ 在时间测量类中, 停表是物理实验中常用的计时仪表. 在本课程中, 对较短时间的测量, 我们约定: **取停表的最小分度值作为仪器误差限.** 对石英电子秒表, 其最大偏差 $\leq \pm (5.8 \times 10^{-6}t + 0.01)\text{s}$, 其中 t 是时间的测量值.

④ 在温度测量类中, 常用的测量仪器包括水银温度计、热电偶和电阻温度计等. 在本课程中, 我们约定: **水银温度计的仪器误差限按其最小分度值的一半估算.**

⑤ 在电学测量类中, 国家标准电学仪器大多是根据准确度大小划分其等级, 其基本误差限可通过准确度等级的有关公式给出.

对电磁仪表, 如指针式电流、电压表

$$\Delta_{\text{仪}} = \alpha\% \cdot A_m \quad (7)$$

式(7)中 A_m 是电表的量程, α 是以百分数表示的准确度等级, 电表精度分为 5.0, 2.5, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 七个级别.

对直流电阻器(包括标准电阻、电阻箱), 准确度等级分为 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.002, 0.001, 0.0005 等级别. 实验室使用的电阻箱, 其优点是阻值可调, 但接触电阻和接触电阻的变化要比固定的标准电阻大. 一般按不同度盘分别给出准确度级别, 同时给出残余电阻(即各度盘开关取零时, 连接点的电阻)的数值. 仪器误差限按不同度盘允许误差限之和加上残余电阻阻值来估算, 即:

$$\Delta_{\text{仪}} = \sum_i \alpha_i \% \cdot R_i + R_0 \quad (8)$$

式中 R_0 是残余电阻阻值, R_i 是第 i 个度盘的示值, α_i 是相应电阻的准确度级别. 对于 ZX21 型 0.1 级电阻箱, 我们约定 $R_0 = 0.005(N+1)$, 式中 N 是实际所用十进制电阻盘的个数, 并且各度盘的准确度等级都取为 0.1, 则其允许误差限为:

$$\Delta_{\text{仪}} = \alpha_i \% \cdot R + R_0 = 0.1 \% \cdot R + 0.005(N+1) \quad (9)$$

式中 R 是各度盘电阻值之和. 由于残余电阻 R_0 很小, 可以舍去, 因此我们直接取:

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.1 \% \cdot R \quad (10)$$

二、误差的分类

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三大类.

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下, 多次测量同一物理量时, 误差的大小和符号均保持不变, 或当条件改变时, 按某一确定的已知规律变化的误差.

系统误差的特征是它的确定性, 即实验条件一确定, 系统误差就获得了一个客观上的确定值, 一旦实验条件改变, 系统误差也按一种确定的规律变化.

造成系统误差的原因有以下几个方面.

(1) 仪器误差: 是指测量时由于所用的测量仪器、仪表不准确所引起的误差.

(2) 环境误差: 是指因外界环境(如灯光、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差.

(3) 方法误差: 是指由于测量所依据的理论、实验方法不完善或实验条件不符合要求而导致的误差.

(4) 个人误差: 是指由实验者的分辨能力、感觉器官的不完善和生理变化、反应速度和固有的习惯等引起的误差(如估计读数始终偏大或偏小).

系统误差的出现一般有较明确的原因, 因此只要采取适当的措施对测量值进行修正, 就可以使之减至最小. 但是, 在实验中仅靠增加测量次数并不能减小系统误差.

2. 偶然误差

偶然误差是指在相同条件下多次重复测量同一物理量时, 测量结果的误差大小、符号均发生变化, 其值时大时小, 其符号时正时负, 无法控制.

偶然误差的特征是随机性的, 也称为随机误差, 即误差的大小和正负无法预计, 但误差的分布却服从一定的统计规律.

偶然误差的来源主要是: 由于人们的感官灵敏程度和仪器精密程度有限、各人的估读能