

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

主 编 张 平

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN

 南京大学出版社

21世纪应用型高等院校示范性实验教材

大学物理实验

主 编	张 平		
编 委	王丽娟	邵初寅	陈忠良
	顾利萍	魏 江	

 南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张平主编. —南京: 南京大学出版社,
2008. 8

21 世纪应用型高等院校示范性实验教材

ISBN 978 - 7 - 305 - 05207 - 1

I. 大… II. 张… 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(2008)第 129538 号

出版者 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093
网 址 <http://press.nju.edu.cn>
出版人 左 健

丛 书 名 21 世纪应用型高等院校示范性实验教材
书 名 大学物理实验
主 编 张 平
责任编辑 蔡文彬 编辑热线 025 - 83686531

照 排 南京紫藤制版印务中心
印 刷 常熟华通印刷有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 362 千
版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
印 数 1—6000
ISBN 978 - 7 - 305 - 05207 - 1
定 价 25.00 元

发行热线 025 - 83594756
电子邮箱 sales@press.nju.edu.cn(销售部)
nupress1@public1.ptt.js.cn

-
- * 版权所有,侵权必究
 - * 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

序

进入新世纪,随着社会经济的发展,各行各业对人才的需求呈现出多元化的特点,对应用型人才的需求也显得十分迫切,因此我国高等教育的建设面临着重大的改革。就目前形势看,大多数的理、工科大学,高等职业技术学院,部分本科院校办的二级学院以及近年来部分由专科升格为本科层次的院校,都把办学层次定位在培养应用型人才这个平台上,甚至部分定位在研究型的知名大学,也转为培养应用型人才。

应用型人才是能将理论和实践结合得很好的人才,为此培养应用型人才需理论教学与实践教学并行,尤其要重视实践教学。

针对这一现状及需求,教育部启动了国家级实验教学示范中心的评审,江苏省教育厅高教处下达了《关于启动江苏省高等学校基础课实验教学示范中心建设工作的通知》,形成国家级、省级实验教学示范体系,意在促进优质实验教学资源的整合、优化、共享,着力提高大学生的学习能力、实践能力和创新能力。基础课教学实验室是高等学校重要的实践教学场所,开展高等学校实验教学示范中心建设,是进一步加强教学资源建设,深化实验教学改革,提高教学质量的重要举措。

我们很高兴地看到很多相关高等院校已经行动起来,除了对实验中心的硬件设施进行了调整、添置外,对近几年使用的实验教材也进行了修改和补充,并不断改革创新,使其有利于学生创新能力培养和自主训练。其内容涵盖基本实验、综合设计实验、研究创新实验,同时注重传统实验与现代实验的结合,与科研、工程和社会应用实践密切联系。实验教材的出版是创建实验教学示范中心的重要成果之一。为此南京大学出版社在为“示范中心”出版实验教材方面予以全面配合,并启动“21世纪应用型高等院校示范性实验教材”项目。该系列教材旨在整合、优化实验教学资源,帮助示范中心实现其示范作用,并希望能够为更多的实验中心参考、使用。

教学改革是一个长期的探索过程,该系列实验教材作为一个阶段性成果,提供给同行们评议和作为进一步改革的新起点。希望国内广大的教师和同学能够给予批评指正。

孙尔康
2006年3月

前言

大学物理实验是为理工科学生开设的一门必修的,也是十分重要的实验课程。为贯彻落实教育部颁发的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,适应 21 世纪高科技发展的需求,培养高素质、能力型的多层次人才的新形势,努力体现把我校建设成为一所特色鲜明,质量著称的应用技术型品牌大学的办学理念,我们编写了这本适合于本二培养层次、具有广阔覆盖面和足够实验项目的大学物理实验教材。实施本教材的教学内容,具有以下几个特点:

在实验选材上,保留了大学物理实验的大部分基本内容,又适当增添了部分内容较简单的近代物理实验和能体现科技发展的新技术、新方法等内容。

在内容的编排上,突破了传统的以力、热、电、光、近代物理知识为顺序且各成系统的课程框架结构,建立了按学生能力培养、素质训练的要求,建立多模块、多层次的大学物理实验课程体系。因而教材由基础理论;基本、基础性实验;综合性实验和设计性、研究性实验共四个模块分层次编排,每个实验都含有“必做内容”和“选做内容”两部分,这样既保证了基本训练,又提高了大学物理实验的综合性以及与现代高科技发展的衔接性。

在教学实施上,除四分之一的基本实验为开始阶段的必做训练外,其余均为分层次的先简单后复杂的模块化开放性实验。这样实施,学生既能自由支配自己的实验时间,又能以查阅实验中心网站的实验资料(如设备图片、说明书等)、体验实验过程(仿真实验)为依据,自主地按其专业特点、个人兴趣在网络上预约选做实验;这样实施,不但适应了不同专业、不同年级、不同能力的学生因材施教的教学需求,也有利于学生个性的发展和优秀学生的脱颖而出;同时,也培养了学生将来独立从事科学研究的能力。

在激励机制上,为了调动学生从事物理实验的积极性,培养学生挑战自我、勇攀高峰的创新精神,实验成绩的评定采用了“学分”制,根据实验的难易不同,完成不同的实验所得的“学分”是不同的,学生必须完成一定数量的学分,才能获得合格、良好或优秀的实验成绩。这样能鼓励学生多选实验,并且选择难度大的实验。

物理实验教学改革是一项长期而复杂的工作,我们虽然采用了模块化、分层次、网络、书籍、说明书、“学分”制和学生自主选择实验等措施,试图以此来扩展实验室的时空,激励学生积极动手、提高实验兴趣,从而达到预期的教学目标。但由于处于刚开始的探索阶段,不足之处在所难免。特别在实验教材的编写过程中,由于水平有限、时间紧迫,肯定存在着许多疏忽,对书中出现的缺点和错误,敬请读者批评指正。

本书由张平主编并统稿,参加本书编写的有王丽娟*(实验 5.1、实验 5.10、实验 5.11、实验 5.12、实验 6.1、实验 6.3、实验 6.6、实验 6.13、实验 6.14、实验 6.15、实验 6.16、实验 6.18)、邵初寅(实验 4.7、实验 4.8、实验 4.9、实验 4.10、实验 4.11、实验 5.3、实验 5.4、实验 5.5、实验 6.10、实验 6.11、实验 6.12)、魏江(实验 5.2、实验 5.8、实验 6.4、实验 6.5、实验 6.8、实验 6.9、实验 6.17)、顾利萍(实验 4.4、实验 4.5、实验 4.13、实验 5.7、实验 5.9)、陈忠良(实验 4.2、实验 4.3、实验 4.6、实验 6.2、实验 6.7)、张平(第 1 章、第 2 章、第 3 章,实验 4.1、实验 4.12、实验 5.6)。本书的编写,得到了本校教务处领导的大力支持,南京大学出版社蔡文彬编辑也提出了很多建设性的建议,并做了大量细致的工作。在此,我们向他们表示诚挚的敬意和衷心的感谢!

编 者
2008 年 8 月

* 王丽娟,常熟理工学院物理与电子工程学院 06 级优秀本科生。由学生参与科研和教材编写,是一种尝试,希望得到示范效应,让更多的学生积极参与进来。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 物理实验课的目的和任务	1
§ 1.2 物理实验课程的主要教学环节	1
§ 1.3 物理实验课程学生须知	2
第 2 章 测量误差与数据处理基础	4
§ 2.1 测量与误差	4
§ 2.2 测量结果的评定和不确定度	7
§ 2.3 有效数字及其运算法则	11
§ 2.4 实验数据的处理方法	12
第 3 章 物理实验中常用的测量方法	19
§ 3.1 比较法	19
§ 3.2 放大法	20
§ 3.3 平衡法	21
§ 3.4 补偿法	21
§ 3.5 模拟法	22
§ 3.6 干涉法	23
§ 3.7 转换法	23
第 4 章 基础性实验	26
§ 实验 4.1 基本测量	26
§ 实验 4.2 刚体转动惯量的实验研究(用三线摆)	32
§ 实验 4.3 弦线振动的研究	37
§ 实验 4.4 CCD 伸长法测定金属丝杨氏模量	41
§ 实验 4.5 液体表面张力测定	45
§ 实验 4.6 金属的比热容的测定	49
§ 实验 4.7 用模拟法测绘静电场	52
§ 实验 4.8 电路元件伏安特性的研究	56
§ 实验 4.9 用惠斯登电桥测电阻	61
§ 实验 4.10 模拟示波器的使用	68
§ 实验 4.11 用霍尔传感器测螺线管的磁场分布	76
§ 实验 4.12 光路的调整和薄透镜焦距测定	82
§ 实验 4.13 分光计的调整和使用	86
第 5 章 综合性实验	95
§ 实验 5.1 刚体转动定律的研究	95

§ 实验 5.2	声速的测量	100
§ 实验 5.3	RLC 电路特性的研究	105
§ 实验 5.4	交流电桥	115
§ 实验 5.5	铁磁物质磁化曲线与磁滞回线的研究	124
§ 实验 5.6	单丝和单缝衍射实验	136
§ 实验 5.7	牛顿环和劈尖干涉实验	140
§ 实验 5.8	液体折射率的测定	146
§ 实验 5.9	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	149
§ 实验 5.10	光电效应和普朗克常量的测定	155
§ 实验 5.11	夫兰克-赫兹实验	159
§ 实验 5.12	密立根油滴法测定电子电荷	164
第 6 章	设计性、研究性实验	169
§ 实验 6.1	用三线摆研究刚体的转动惯量	169
§ 实验 6.2	拉伸法测钢丝的杨氏弹性模量	171
§ 实验 6.3	动态法测定材料的杨氏模量	173
§ 实验 6.4	谐振动与物体的碰撞研究	175
§ 实验 6.5	磁阻尼系数和动摩擦系数的测量	177
§ 实验 6.6	切变模量和刚体转动惯量的研究	179
§ 实验 6.7	落球法测量液体的粘滞系数	181
§ 实验 6.8	粘度系数随温度变化的研究	183
§ 实验 6.9	压强与沸点关系的研究	185
§ 实验 6.10	非线性电路混沌	187
§ 实验 6.11	直流电阻测量的研究	189
§ 实验 6.12	非平衡电桥	191
§ 实验 6.13	金属电子逸出功的测定	192
§ 实验 6.14	太阳能电池基本特性的研究	194
§ 实验 6.15	用数码相机的超高速连拍功能研究小球在蓖麻油中下落 的运动规律	197
§ 实验 6.16	利用超声光栅研究液体中的声速与温度的关系	199
§ 实验 6.17	用分光计对光谱作定性分析	201
§ 实验 6.18	用激光椭圆偏振仪探究偏振光反射率与入射角的关系	203
附录		205
附录 1	世界十大经典物理实验	205
附录 2	百年诺贝尔物理学奖与物理实验	211
附录 3	中华人民共和国法定计量单位	217
附录 4	物理学常用数表	220
参考文献		224

第 1 章 绪 论

§ 1.1 物理实验课的目的和任务

物理学是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一,物理学理论和实验的发展哺育着近代高新技术的成长和发展,物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。

物理实验课程是大学理工科各专业学生的科学实验课程,也是学生进入大学后受到系统的实验思想和实验技能训练的第一门实践性课程,是各门后续实验课的基础。所以本课程在培养学生观察、分析、发现问题的能力,以及培养学生动手能力和创新精神等方面都起着重要的作用。

物理实验的作用不仅在于实验的内容上,更重要的是实验进行的过程,在实验过程中,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,才能为将来的工作和学习打下坚实的基础。物理实验课程作为一门独立设置的基础课程,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,加深对物理学基本原理的理解。

(2) 培养和提高科学实验的能力。

① 信息处理能力:通过自行阅读实验教材或网上资料,正确理解实验内容,在实验前作好实验准备,在实验后运用计算机处理实验数据。

② 动手实践能力:借助教材或仪器说明书,正确调整和使用常用仪器。

③ 思维判断能力:运用物理理论,对实验现象进行分析和判断。

④ 书面表达能力:正确记录和处理数据,撰写合格的实验报告。

⑤ 综合设计能力:根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择实验仪器,拟定具体的实验步骤。

⑥ 科技创新能力:通过研究性实验和设计性实验,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) 培养学生的科学素养。在物理实验过程中,培养学生实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、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,为后续课程的学习,乃至终身教育奠定良好的基础。

§ 1.2 物理实验课程的主要教学环节

科学实验的全过程通常包括:① 确定课题;② 根据课题内容收集资料;③ 制定研究方案;④ 设计实验程序;⑤ 选择合适的仪器设备;⑥ 实验研究:包括操作、观测、记录、分析、进

一步实验;⑦ 撰写实验研究报告(论文)。物理实验课程将在基础性实验和综合性实验教学中对学生最后两项的训练,在选做的小课题实验和设计性、研究性实验教学中,将让学生体验到科学实验的全过程,并得到初步的训练。物理实验课程的教学环节大致可分为以下三个部分:

1. 实验预习

实验前要仔细阅读实验教材与有关资料,了解实验的目的、要求、原理和方法,初步了解实验所需测量仪器的主要性能、使用方法和注意事项,认真做好预习报告。

如果实验是选做的小课题实验或设计性、研究性内容,则需要制定初步的实验方案,提出对仪器设备的要求等。

2. 实验操作

实验时应遵守实验室规章制度,以进行科学研究的态度,井井有条地布置实验仪器,安全操作,细心观察实验现象,认真思考和探索实验中出现的問題。特别是设计性、研究性实验,在遇到困难时,应看作是进一步学习的机会,认真分析,找出问题所在,不断修正实验方法甚至可以重新设计实验方案。仪器设备发生故障时,应在教师指导下学习排除故障。实验中要正确记录数据(特别是单位和有效数字位数),如发现数据有疑问时,可以重新实验,并对原来数据做好标记,以备查考,没有重新测量绝不允许修改实验数据。

3. 实验总结

实验报告是对整个实验工作的全面总结。实验结束后,要将实验结果真实地在实验报告中表达出来。内容既要完整,又要避免繁琐,力求简明扼要,这也是培养科学实验素质的内容之一。

实验报告要求文字通顺,书写端正,数据齐全,图表规范,结果表示正确(包括误差),分析讨论认真。实验报告的内容应包括以下几个方面:① 实验名称;② 实验目的;③ 主要仪器设备;④ 实验原理和计算公式;⑤ 实验步骤(简要)和实验数据记录;⑥ 数据处理(包括计算、必要的图表、误差分析等);⑦ 实验结果;⑧ 分析讨论。

对于设计性、研究性实验,则应对实验原理、公式推导、仪器设备的选择、实验方案的设计、操作步骤、数据结果的分析等有比较详细的叙述。

§ 1.3 物理实验课程学生须知

(1) 实验课前应充分做好预习工作,真正了解本次实验“做什么、怎么做、为什么这样做”,并设计好数据表格,完成“实验报告册”上“预习部分”内容。教师上课时将检查学生预习情况,凡未预习或预习不充分的学生,教师可责令其充分预习后再进行实验。

(2) 实验时应严肃认真,养成严谨求实的工作作风,不得伪造实验数据或相互抄袭实验结果。

(3) 实验课应注意安全,爱护仪器,如有遗失或损坏仪器等情况发生,请及时向指导教师报告,教师将酌情按有关规章制度处理。实验结束应将仪器、桌凳等整理好后再离开实验室。

(4) 每次实验必须携带实验讲义、实验报告本、图纸、计算器及必备的文具。

(5) 每次实验的数据,请记录在“实验报告册”的“实验部分”,实验完毕须经指导教师审核实验结果(包括数据处理)并签阅后方可结束实验。

(6) 选做内容可网上自行选择,在规定的范围内,可自由选择实验内容和实验时间。由于选择了实验时间,即占用了实验资源,因此,选了实验却没有做的同学,后果自负。

(7) 设计性、研究性实验,可根据选择的内容自行组成不超过 3 人的小组,在 6 学时(分 2 次)内完成,以小论文的形式撰写实验报告。内容为网上提供的设计性、研究性实验或本年度所做实验的研究性内容。若学生需要做其他内容的研究,必须经指导老师同意,并由指导老师了解、关注研究过程。

(8) 物理实验课程的总成绩由学生选做的实验内容和实验个数决定。每个实验根据其难易程度的不同,获得满分(平均分为 9 分)的分数亦不同。指导教师根据学生的实验预习情况、实际操作能力、实验报告书写、实验态度等因素对学生所选的实验(单个)进行综合评定,给予一定的成绩。当学生选做若干个实验后,累计成绩达 60 分时,即为合格,累计成绩达 75 分以上(含 75 分)时为良好,累计成绩达 90 分以上(含 90 分)时为优秀。

第2章 测量误差与数据处理基础

物理实验的任务不仅是定性地观察各种自然现象,更重要的是定量地测量相关物理量。而对事物定量地描述又离不开数学方法和进行实验数据的处理。因此,分析和处理实验数据是物理实验课的基础。本章将从测量及误差的定义开始,逐步介绍有关误差和实验数据处理方法的基本知识。实验中的误差分析,其目的是对实验结果做出评定,通过分析指出减小实验误差的方向,提高测量质量,最大限度地减小实验误差,提高测量结果的可信赖程度。对低年级大学生,这部分内容难度较大,本课程仅限于介绍误差分析与数据处理的基础知识,着重点放在几个重要概念及最简单情况下的误差处理方法,不进行严密的数学论证。

§ 2.1 测量与误差

一、测量与仪器

1. 测量

物理实验不仅要定性地观察物理现象,更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。因此就需要进行定量的测量,以取得物理量数据的表征。对某些物理量的大小进行测定,实验上,就是将此物理量与规定的作为标准单位的同类量或可借以导出的其他物理量进行比较,得出结果,这个比较的过程就叫做测量。例如,物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而得出测量结果;物体运动速度的测定则必须通过与两个不同的物理量,即长度和时间的标准单位进行比较而获得。比较的结果记录下来就叫做实验数据。测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位,两者是缺一不可的。

测量可以分为两类。按照测量结果获得的方法来分,可将测量分为直接测量和间接测量;从测量条件是否相同来分,又有所谓等精度测量和不等精度测量。

直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。如用米尺测量物体的长度,用天平称量物体的质量,用电流表测量电流等,都是直接测量。

间接测量则需要借助函数关系由直接测量的结果计算出的物理量。例如已知路程和时间,根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展,测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量,现在也可以用电表来进行直接测量。物理量的测量,大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

根据测量条件来分的等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量,如同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法改变,这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量。非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。应该指出:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数。

2. 仪器

测量仪器是用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具,是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能,掌握仪器的使用方法及正确进行读数,是每个测量者必备的基础知识。以下简单介绍仪器精密度、准确度和量程等基本概念。

仪器精密度是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小的分度越小,所测量物理量的位数就越多,仪器精密度就越高。对测量读数最小一位的取值,一般来讲应在仪器最小分度范围内再进行估计读出一位数字。

仪器准确度是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在仪器说明书上。如电学仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取仪器最小的分度数值或最小分度数值的一半,一般对连续读数的仪器取最小分度数值的一半,对非连续读数的仪器取最小的分度数值。在制造仪器时,其最小的分度数值是受仪器准确度约束的。

量程是指仪器所能测量物理量的最大值和最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称量程)。测量过程中,不能测量超过仪器量程的相应物理量,否则,会降低仪器准确度,缩短使用寿命,甚至损坏仪器。

二、测量与误差

测量的目的就是得到了被测物理量所具有的客观真实数据,但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,只能获得该物理量的近似值,也就是说,一个被测量值 N 与真实值(简称真值) N_0 之间总是存在着这种差值,这种差值称为测量误差,即

$$\Delta N = N - N_0 \quad (2.1-1)$$

显然误差 ΔN 有正负之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差。(注意,绝对误差不是误差的绝对值!)绝对误差是一个有量纲的代数值,它表示测量值偏离真值的程度。除此之外,误差还可以用相对误差表示,定义为绝对误差的值与真值的比,用 E 表示:

$$E = \frac{|\Delta N|}{N_0} \times 100\% \quad (2.1-2)$$

相对误差反映了测量的准确度,是一个无量纲的量,通常用百分数表示。

三、测量误差的分类

根据测量误差产生的原因和性质,一般可将其分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。通常前两种误差是交织在一起出现的。

1. 系统误差

(1) 系统误差的来源

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化的测量误差分量。系统误差的特征是具有一定的规律性,系统误差的来源具有以下几个方面:

① 仪器误差 它是由于仪器本身的不完善或没有按规定条件使用仪器而造成的误差,包括仪器的零值误差、示值误差、机构误差和测量附件误差等。

② 理论误差 它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性、或实验条件不能达到理

论公式所规定的要求、或测量方法等所带来的误差。

③ 观测误差 它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差。

④ 环境误差 它是实际环境条件与规定的实验条件不一致所引起的。

例如,用“落球法”测量重力加速度,由于空气阻力的影响,多次测量的结果总是偏小,这是测量条件不完善造成的误差;用停表测量运动物体通过某一段路程所需要的时间,若停表走时偏快,那么即使测量多次,测量的时间总是偏大,这是仪器不准确造成的误差;在测量过程中,若环境温度升高或降低,使测量值按一定规律变化,是由于环境因素变化引起的误差。

(2) 消除或减少系统误差的方法

在任何一项实验工作和具体测量中,必须要想尽一切办法,最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差,或者对测量结果进行修正。系统误差的消除或减小是比较复杂的一个问题,没有固定不变的方法,要具体问题具体分析,要各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个,一般应找出影响的主要因素,有针对性地消除或减小系统误差。常用的方法有:

① 检定修正法 将仪器、量具送计量部门检验取得修正值,以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

② 替代法 指用测量仪器测定被测量后,在测量条件不变的情况下,用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。如消除天平的两臂不等对被测量的影响可用此办法。

③ 异号法 有时,在两次测量中能出现符号相反的误差,如果取两次测量的平均值,则有可能消除这种误差。例如在外界磁场作用下,仪表读数会产生一个附加误差,若将仪表转动 180° 再进行一次测量,外磁场将对读数产生相反的影响,引起负的附加误差。两次测量结果平均,正、负误差可以抵消,从中可以减小系统误差。

2. 随机误差

在一定测量条件下,多次测量同一物理量时,误差的绝对值变化,时大时小、时正时负,以不可预定的方式变化着的测量误差分量称为随机误差,有时也叫偶然误差。随机误差的特点是,当测量次数很多时,随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布),其特征是:绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大(单峰性);绝对值相等的正负误差出现的概率相同(对称性);绝对值很大的误差出现的概率趋于零(有界性);误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零(抵偿性)。因此,增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除。

引起随机误差的原因也很多,如观察者感官灵敏度、测量环境扰动变化以及其他不能预测、不能控制的因素。如仪器显示数值的估计读数位偏大和偏小;仪器调节平衡时,平衡点确定不准,如空间电磁场的干扰、电源电压波动引起测量的变化等。

3. 粗大误差

粗大误差是由于测量者过失(如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值、记错数据)或较强的外界干扰、测量条件的意外变化等引起的误差,是一种人为的过失误差,不属于测量误差,只要测量者采用严肃认真的态度,过失误差是可以避免的。一旦在测量结果中出现粗大误差,则应按一定规则剔除。

四、随机误差的估算

对某一被测量进行多次重复测量,其测量结果服从一定的统计规律,当测量次数 n 很大时(理论上是 $n \rightarrow \infty$),测量列(在等精度测量中得到的一组数据)接近于正态分布(即高斯分布)。在进行随机误差的估算时,算术平均值和标准偏差是两个重要的数字特征量。设在某一物理量的等精度测量中,测量列为: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ 。

(1) 算术平均值

即测量结果的最佳估计值。根据最小二乘法原理可以证明,测量结果的最佳估计值是该测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1-3)$$

称 $\bar{x}$ 为近似真实值,以后将用 $\bar{x}$ 来表示多次测量的近似真实值。

(2) 标准偏差

即随机误差的离散程度。根据误差理论可以证明,标准偏差 S 定义为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (2.1-4)$$

它表示测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ 及其随机误差的离散程度。标准偏差 S 越大,表示测量值 x_i 越分散,测量的精密度就越低;标准偏差 S 越小,表示测量值 x_i 越密集,测量的精密度就越高。

(3) 算术平均值的标准偏差

$\bar{x}$ 是被测量的最佳估计值,但它与真值之间仍存在误差。由随机误差的低偿性可知, $\bar{x}$ 的误差应比任何一次单次测量的误差更小些。所以可用算术平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 来表示测量列算术平均值的随机误差的大小,用数理统计理论可以证明,当测量次数 n 有限时,其算术平均值的标准偏差为:

$$S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.1-5)$$

其意义是在 $[(\bar{x} - S_{\bar{x}}) \sim (\bar{x} + S_{\bar{x}})]$ 内包含真值 x_0 的概率为 68.3%。因此 $S_{\bar{x}}$ 反映了算术平均值 $\bar{x}$ 接近真值的程度。同时,由上式可知 $S_{\bar{x}}$ 随着测量次数的增加而减小,似乎 n 越大算术平均值越接近于真值。事实上,在 $n > 10$ 以后, $S_{\bar{x}}$ 的变化相当缓慢,另外测量精度主要还取决于仪器的精度、测量方法、环境和测量者等因素。因此在实际测量中,单纯地增加测量次数是没有必要的,在物理实验课程中通常取 6~10 次。

§ 2.2 测量结果的评定和不确定度

测量的目的是不但要通过测量得到待测物理量的近似真实值,而且要对近似真实值的可靠性做出评定(即指出误差范围)。

按照国家计量技术规范(JJG1027-91),测量结果的最终表达形式为:

$$x = \bar{x} \pm u \quad (2.2-1)$$

式中: x 为被测量; $\bar{x}$ 为被测量的算术平均值; u 为总不确定度, 它们具有相同的单位。

不确定度是一个新的概念。下面将结合对测量结果的评定, 对不确定度的概念、分类、合成等问题进行介绍。

一、不确定度的含义

在物理实验中, 常常用不确定度来对测量结果的可靠程度作出评定。不确定度是被测物理量的真值在某个量值范围内的一个评定, 表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度, 是测量质量的表征。对一个物理实验的具体数据来说, 不确定度小, 测量结果可信赖程度高; 不确定度大, 测量结果可信赖程度低。用不确定度来评定实验结果的误差时, 其中包含了各种来源不同的误差, 表达了它们对结果的综合影响。而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律, 这是更准确地表述了测量结果的可靠程度。

二、不确定度的分类与合成

物理实验中的不确定度, 一般主要来源于测量方法、测量人员、环境波动、测量对象变化等等。在计算不确定度的问题中, 是将可修正的系统误差修正后, 将各种来源的误差按计算方法分为两类, 即用统计方法计算的不确定度(A类)和非统计方法计算的不确定度(B类)。

1. A类不确定度 u_A

指在同一条件下多次测量, 可以对测量列采用统计方法(即具有随机误差性质)分析评定的不确定度。当测量次数无限时, 这类不确定度通常认为它是服从正态分布规律的。但在实际测量中, 一般只能进行有限次测量, 这时测量误差不完全服从正态分布规律, 而是服从所谓的 t 分布规律。在这种情况下, 算术平均值为测量结果的最佳值, 它的 A 类不确定度可表示为:

$$u_A = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (2.2-2)$$

式中的 t 称为“ t 因子”, 它与测量次数和“置信概率”有关(所谓“置信概率”是指真值落在 $\bar{x} \pm u_A$ 范围内的概率)。 t 因子的数值可以根据测量次数 n 和置信概率查表得到, 当测量次数较少或置信概率较高时, $t > 1$; 当测量次数 $n \geq 10$ 且置信概率为 68.3% 时, $t \approx 1$; 在大多数物理实验教学中, n 通常取 6~10, 置信概率也取 68.3%, 此时对应的“ t 因子”值如表 2.2-1 所示, 但为了方便, 一般就近似地取 $t = 1$ 。

表 2.2-1 置信概率为 0.683 时, 不同测量次数下“ t 因子”的值

测量次数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	∞
$t(0.683)$	1.84	1.32	1.2	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	1.02	1.01	1.00

2. B类不确定度 u_B

指用非统计方法求出或评定的不确定度, 一般情况下应根据经验或其他非统计信息估计。在测量中往往采取一些必要的措施, 使系统误差减到最低的程度或对系统误差进行修正。此时就可以只考虑测量仪器的误差或测试条件不符合要求而引起的附加误差所带来的

B类不确定度分量。如测量仪器不准确、量具磨损老化等等。评定B类不确定度常作简化处理,即采用估计的方法,本书中B类不确定度的估计为仪器误差,即

$$u_B = u_{\text{仪}} = a/\sqrt{3} \quad (2.2-3)$$

式中: $u_{\text{仪}}$ 为仪器不确定度,是由仪器本身的特性所决定的; a 是仪器说明书上所标明的“最大误差”或“不确定度限值”。当仪器说明书上未标明 a 值或仪器说明书遗失的情况下, a 值可取仪器的最小分度值。而电表类的 a 值,要根据电表的准确度等级和量程进行计算,才可以得到。如指针式电表的不确定度限值等于其满量程值乘以等级;又如电阻箱的不确定度限值等于示值乘以等级再加上零值电阻,由于电阻箱各挡的等级是不同的,因此要分别计算,例如常用的 ZX21 型电阻箱,当其示值为 360.5Ω 时,零值电阻为 0.02Ω ,则其不确定度限值 $a = (300 \times 0.1\% + 60 \times 0.2\% + 0 \times 0.5\% + 0.5 \times 5\% + 0.02) \Omega = 0.47 \Omega$ 。有时也可由实验室结合具体情况给出 a 的近似约定值。

3. 合成不确定度 u

合成不确定度 u 就是由不确定度的两类分量(A类和B类)求“方和根”计算而得,即

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.2-4)$$

三、直接测量结果的不确定度

1. 多次测量

在直接对某一物理量 x 进行等精度多次测量后,测量值采用测量列的算术平均值 $\bar{x}$ (不含应修正的系统误差)表示,而总不确定度则是A、B两类的合成不确定度,可用(2.2-4)式计算。其中A类不确定度用(2.2-2)式计算(t 取1即可),而B类不确定度用(2.2-3)式估算。最后将测量结果写成标准形式: $x = \bar{x} \pm u$ 。因此,实验结果应包括待测量近似真实值 $\bar{x}$, A、B两类不确定度的合成不确定度 u 。

2. 单次测量

实际工作中,有时由于条件的限制不能进行多次测量,或由于仪器的精度较低,或被测对象不稳定,多次测量的结果并不能反映随机性,此时多次测量已失去意义。在这种情况下,测量结果也应表达为 $x = x' \pm u$ 的形式,其中 x' 为单次测量值,测量不确定度 u 应根据对仪器精度、测量方法和测量对象的分析,估计它的最大误差,其估计值不得小于仪器不确定度限值 a 。

四、误差的传递 间接测量结果的不确定度合成

间接测量的近似真实值和不确定度合成是由直接测量结果通过函数式计算出来的,既然直接测量有误差,那么间接测量也必有误差,这就是误差的传递。由直接测量值及其误差来推算间接测量值及误差之间的关系式称为误差的传递公式。设间接测量的函数式为:

$$N = F(x, y, z, \dots) \quad (2.2-5)$$

N 为间接测量的量,它有 K 个直接测量的物理量 $x, y, z, \dots$, 各直接测量的测量结果分别为:

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} \pm u_x \\ y &= \bar{y} \pm u_y \end{aligned}$$