

21世纪

高等院校创新课程规划教材

21SHIJI GAODENG YUANXIAO CHUANGXIN KECHENG GUIHUA JIAOCAI

新编大学物理实验

XINBIAN DAXUE WULI SHIYAN

主编 马春生 郑水泉 杜娟

主审 石永锋 张晓波



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn



高等院校创新课程规划教材

21SHIJI GAODENG YUANXIAO CHUANGXIN KECHENG GUIHUA JIAOCA

新编大学物理实验

主编 马春生 郑水泉 杜娟
主审 石永锋 张晓波



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书精选 35 个实验项目,按照不同的训练内容和层次分为两大模块,即基础性、综合及设计性实验和应用性、研究性、创新性试验。各个实验既相互独立,又循序渐进,形成了较为合理的知识结构。书中有很多反映现代技术的实验仪器,提供了多种实验方法和要求,实验手段更加丰富多样,可适应不同层次的教学要求。

本书可作为高等理工院校、独立学院和高等职业技术学院教学用书,也可作为相关教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理实验 / 马春生, 郑水泉, 杜娟主编

— 北京: 中国水利水电出版社, 2010.2

21世纪高等院校创新课程规划教材

ISBN 978-7-5084-7241-6

I. ①新… II. ①马… ②郑… ③杜… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第027157号

书 名	21世纪高等院校创新课程规划教材 新编大学物理实验
作 者	主编 马春生 郑水泉 杜娟 主审 石永锋 张晓波
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座, 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 17印张 403千字
版 次	2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《新编大学物理实验》是根据教育部关于“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”，并结合独立学院的特点，在总结独立学院物理实验教学经验的基础上，融合了浙江理工大学张晓波主编的《大学物理实验》（浙江大学出版社，2008）和浙江工业大学郑水泉主编的《新编大学物理实验》（上海科学普及出版社，2004）的精华。突出了独立学院培养目标的要求，由浙江理工大学科技与艺术学院和浙江工业大学之江学院根据独立学院要求，立足于现有仪器修订编写而成。

大学物理实验是对大学本科学生进行科学实验及基本训练的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法、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应用能力等方面，具有其他实践类课程不可替代的作用。

本书按照课程自身的体系和学生的特点，遵照循序渐进的原则，在实验内容的选择和实验方法、实验手段的改进等方面突出独立学院的特色，既有丰富的基本实验技能和实验方法训练，也融合了现代先进的实验技术，使学生能够在基础与创新两方面都得到培养。本书在实验内容的编排上分为两大模块：一是基础性、综合及设计性实验，可使学生掌握基本物理量的测量方法，了解常用的物理实验方法，熟练掌握测量误差的基本知识，具有正确处理实验数据的基本能力；二是应用性、研究性、创新性试验，此模块侧重物理实验在现代科学技术中的应用，注重培养学生的独立实验能力、分析与研究能力、理论联系实际能力和创新能力。其实验内容融合了激光技术、传感器技术、信息存储和光电技术应用及模块组合类实验等。

考虑到独立学院学生的实际情况，对于各实验内容的数据处理部分，均给出了相对完整的数据记录表格及具体的误差分析方法等，使学生不至于陷入繁杂的数据处理中，有利于突出实验自身的培养功能。

本书在编写过程中得到了浙江理工大学理学院物理系和浙江工业大学老师的大力支持和无私帮助，特别感谢浙江工业大学郑水泉老师、浙江理工大学石永锋老师为本书绘制了大量的插图。本书由浙江理工大学理学院石永锋、

张晓波老师负责全书的审定，石永锋、张晓波、李晓云、陈晖、金立等老师参加了本书的编写和文字校对。在此，谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不当之处，恳请读者提出宝贵意见和建议。

编 者

2009年11月28日

于浙江理工大学科技与艺术学院

目 录

前言

第1章 绪论及误差理论	1
1 如何做好物理实验	1
2 误差理论与数据处理	4
3 实验数据处理方法	15
4 物理实验基本方法	21
5 实验报告范例	24
6 练习题参考答案	28
第2章 基础性、综合及设计性实验	31
实验1 气垫导轨实验	31
实验2 用拉伸法测定金属丝的弹性模量	37
实验3 用扭摆法测定物体的转动惯量	41
实验4 用三线摆法测定物体的转动惯量	47
实验5 电学元器件的伏安特性测量	52
实验6 电学组合实验	66
实验7 用直流电桥测电阻	76
实验8 用稳恒电流场模拟静电场	81
实验9 电位差计的原理及应用	85
实验10 霍尔效应原理及霍尔元器件基本参数的测定	96
实验11 用电磁感应法测交变磁场	102
实验12 声速测量	106
实验13 光的等厚干涉	111
实验14 分光计的调整和棱镜材料折射率的测定	115
实验15 光栅衍射实验	123
实验16 示波器的原理和使用	127
实验17 用迈克尔逊干涉仪测波长	139
实验18 电子荷质比测量	144
实验19 气体比热容比的测定	147
实验20 光电效应实验及普朗克常数的测定	151
实验21 弗兰克-赫兹实验	158
实验22 光速测量	164

实验 23 密立根油滴实验	169
第 3 章 应用性、研究性、创新性试验	178
实验 24 多普勒效应实验	178
实验 25 光的偏振及其应用	186
实验 26 用动态法测定物体的弹性模量	189
实验 27 用霍尔效应法测螺线管轴向磁场分布	194
实验 28 用双臂电桥法测低电阻	201
实验 29 GPS 声纳定位实验	207
实验 30 玻尔共振	212
实验 31 激光全息技术及应用	218
实验 32 旋转液体综合实验	226
实验 33 传感器综合实验	231
实验 34 Pasco 综合实验	241
实验 35 空气热机实验	251
附录	255
附录 A 中华人民共和国法定计量单位	255
附录 B 常用物理数据	258
附录 C 用计算器计算 S_x 和 \bar{x} 值	263
参考文献	264

第1章 绪论及误差理论

1 如何做好物理实验

1.1 正确认识大学物理实验课程的地位和作用

实验是科学理论的源泉，是工程技术诞生的摇篮。学好物理实验对于高校理工科学生是十分重要的。

在物理学史上，16世纪意大利物理学家伽利略首先摒弃了形而上学的空洞的思辩，而以敏于观察、勤于实验为信仰，并把物理实验作为物理系统理论的基础、依据和手段，从而使物理学走上真正的科学道路。从此，不论在物理学发展的任何阶段，无论是物理概念的建立还是物理规律的发现，物理实验都起着重要的和直接的作用。在物理学发展史上，这方面的例子不胜枚举。例如，在对光的本质认识中，牛顿倡导的微粒说和惠更斯主张的波动说进行了长期的争论，孰是孰非，莫衷一是，最后托马斯·杨在1800年发表了双缝干涉实验，才使波动说得到了确认，摒弃微粒说。然而，到了19世纪末20世纪初，由于光电效应实验证实了光的粒子性，从而使人们认识到光具有波粒二象性。又如19世纪初，绝大多数物理学家都具有经典的物理学思想，对光和电磁波的传播不需要媒质的观点是不能接受的，为了固守经典理论的正确性，假设了宇宙空间存在着一种极其抽象和理想化“以太”媒质，但是美国实验物理学家迈克尔逊和莫雷合作，用干涉仪进行了著名的“以太风”实验，否定了“以太”的存在，揭开了近代物理学发展的新篇章。

物理实验也是推动科学技术发展的有力工具。20世纪科学技术是建立在实验的基础上的，如现代核技术是建立在天然放射性的发现、 α 粒子散射实验、重核裂变和轻核聚变等物理实验基础之上的，才有后来的原子弹、氢弹的爆炸、核电站的建立。激光技术也是从物理实验室中走出来的。而信息技术则是依赖于晶体管、大规模集成电路、超大规模集成电路的飞速发展。可见，现代技术的突破大多是从实验室中诞生的。

随着物理学的发展，人类积累了丰富的实验思想和实验方法，创造出各种精密巧妙的仪器设备；同时测量技术，用于实验的数学方法以及计算机科学在实验中的应用等，都不断得到发展。这实际上已赋予物理实验以极其丰富的、不同于物理学本身的特有的内容，并逐步形成一门单独开设的具有重要教育价值和教育功能的实验课程。它不仅可以加深对理论的理解，更重要的是使同学们获得基本的实验知识、技能和科学创新的能力，为今后从事科学研究和工程实践打下坚实基础。

物理实验是一门独立的必修基础实验课程，是同学们进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。本课程的目的和任务如下。

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解，提高对科学实验重要性的认识。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括：①能够通过阅读实验教材或资料，做好实验前的准备工作；②能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器；③能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断；④能够正确记录和处理实验数据，绘制实验曲线，说明实验结果，撰写合格的实验报告；⑤能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养，要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃认真的工作态度，主动研究的探索精神，遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

1.2 掌握物理实验课的学习特点

大学物理实验课程的教学主要由3个环节构成。

1.2.1 实验前的预习——实验的基础

实验前的预习是一次“思想实验”的练习，即在课前认真阅读实验教材（讲义）和有关资料，弄清实验原理、方法和实验目的，然后在脑子中“操作”这一实验，拟出实验步骤，思考可能出现的问题和得出怎样的结论，最后写出预习报告。预习报告内容包括以下几个方面：①实验名称；②实验目的；③实验原理摘要：主要原理公式及简要说明，画出必要的原理图、电路图或光路图；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，各用什么仪器和方法来测量，哪些是间接测量量，结果的不确定度如何估算等；⑥列出记录数据表格。

未完成预习和预习报告者，教师有权停止其实验或成绩降档。

1.2.2 实验中的操作——实践的过程

实验中要遵守以下条款：①遵守实验室规则；②了解实验仪器的使用及注意事项；③正式测量之前可作试验性探索操作；④仔细观察和认真分析实验现象；⑤如实记录实验数据和现象。

在实验操作中要逐步学会分析实验，排除实验中出现的各种故障，而不能过分地依赖教师。对所得结果要作出粗略的判断，与理论预期相一致后，再交教师签字认可。

离开实验室前，要整理好所用的仪器，做好清洁工作，数据记录须经教师审阅签名。

1.2.3 实验后的报告——实验的总结

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、数据完备和结论明确。一份好的实验报告还应给同行以清晰的思路、见解和新的启迪。要养成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。

预习报告、数据记录和实验报告均书写在实验室编制的实验报告册上。

1.3 写好实验报告

实验报告通常分 3 个部分。

1.3.1 预习报告

它为正式报告的前面部分，要求在实验前写好。内容包括：

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 实验原理摘要。在理解的基础上，用简短的文字扼要阐述实验原理，切忌照抄。力求图文并茂。图是指原理图、电路图或光路图；写出实验所用的主要公式，说明各物理量的意义和单位，以及公式的适用条件等。
- (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”。
- (6) 列出记录数据的表格。

1.3.2 实验记录

此部分在实验课上完成，内容包括：

- (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。
- (2) 内容和实验现象记录。
- (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。要根据数据特点设计表格，应力求简单明了，达到省工省时的目的。在表格栏内要注明单位。要实事求是地记录客观现象和实验数据，切勿将数据记录在草稿纸上，而应记录在已准备的实验记录本上，不能只记结果而略去原始数据，更不可为拼凑数据而将实验记录作随心所欲的修改。

实验记录是进行实验的一项基本功，要养成良好的学习习惯。

1.3.3 数据处理与计算

数据处理及计算在实验后进行。内容包括：

- (1) 作图、计算结果和作不确定度估算。
- (2) 结果：按标准形式写出实验结果（测量值、不确定度和物理单位），有必要时注明实验条件。
- (3) 作业题：完成教师指定的思考题。
- (4) 对实验中出现的问题进行说明和讨论，以及实验心得或建议等。
范例中给出 3 个实验报告，供同学们参考。

1.4 遵守实验室规则

- (1) 实验前应认真预习，按时上实验课。
- (2) 进入实验室，必须衣着整洁、保持安静，严禁闲谈喧哗、吸烟、随地吐痰。不得

随意动用与本次实验无关的仪器设备。

(3) 遵守实验室规则，服从教师指导，按规定和步骤进行实验。认真观察和分析实验现象，如实记录实验数据，不得抄袭他人的实验结果。

(4) 注意安全，严格遵守操作规程。爱护仪器设备，节约用水、电和药品、试剂、元器件等。凡违反操作规程或不听从教师指导而造成仪器设备损坏等事故者，必须写出书面检查，并按学校有关规定赔偿损失。

(5) 在实验过程中若仪器设备发生故障，应立即报告指导人员及时处理。

(6) 实验完毕，应主动协助指导教师整理好实验用品，切断水、电、气源，清扫实验场地。

(7) 按指导教师要求，及时认真完成实验报告。凡实验报告不合格者，均需重做。1/3实验报告未交者或有两个实验不做者，不得参加本门课程的考试。

2 误差理论与数据处理

2.1 测量与误差的基本概念

2.1.1 测量和单位

所谓测量，就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较，确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为该物理量的单位，这个倍数称为待测量的数值。可见，一个物理量必须由数值和单位组成，两者缺一不可。

选作比较用的标准量必须是国际公认的、唯一的和稳定不变的。各种测量仪器，如米尺、秒表、天平等，都有合乎一定标准的单位和与单位成倍数的标度。

本教材采用通用的国际单位制（SI），在附录中列出了国际单位制的基本单位、辅助单位和部分导出单位，供读者查阅。

2.1.2 测量分类

根据获得测量结果与方法不同，测量可以分为直接测量和间接测量。

直接比较 —— 直接测量	}	—— 量数和单位(物理量值)
间接比较 —— 间接测量		

由仪器或量具直接与待测量进行比较读数，称为直接测量，如用米尺测量物体的长度、用安培表测量电流强度等。所得到的相应物理量称为直接测量量。

在大多数情况下，需要借助一些函数关系由直接测量量计算出所要求的物理量，这样的测量称为间接测量，相应的物理量称为间接测量量。例如，钢球的体积 V 可由直接测得的直径 D ，由公式 $V = \frac{1}{6}\pi D^3$ 计算得到，这里 D 为直接测量量， V 为间接测量量。在误差分析和估算中，要注意直接测量量与间接测量量的区别。

2.1.3 测量误差

物理量在客观上存在确定的数值，称为真值。然而，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限制,使得测量值与客观上存在的真值之间有一定的差异。为描述测量中这种客观存在的差异性,可以引进测量误差的概念。

误差就是测量值与客观真值之差,即

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

被测量量的真值是一个理想概念,一般来说真值是不知道的(否则就不必进行测量了)。为了对测量结果的误差进行估算,我们用约定真值来代替真值求误差。所谓约定真值就是被认为是非常接近真值的值,它们之间的差别可以忽略不计。一般情况下,常把多次测量结果的算术平均值、标称值、校准值、理论值、公认值、相对真值等均可作为约定真值来使用。

上面定义的误差是绝对误差。在没有特别指明时,误差就是用绝对误差来表示。设测量值的真值为 X , 则测量值 x 的绝对误差为

$$\delta = x - X \quad (2-1)$$

但有些问题往往需要用相对误差表示。例如,用同一仪器测量 10m 长相差 1mm 与测量 100m 相差 1mm,其绝对误差相同。显然,只有绝对误差还难以评价测量结果的可靠程度,因此引入相对误差的概念。相对误差是绝对误差与真值之比,真值不能确定则用约定真值。在近似情况下,相对误差也往往表示为绝对误差与测量值之比。相对误差常用百分数表示,即

$$E = \frac{|\delta|}{X} \times 100\% \approx \frac{|\delta|}{x} \times 100\% \quad (2-2)$$

因此,在测量过程中,我们要建立起误差永远伴随测量过程始终的实验思想。

2.1.4 测量值与有效数字

测量总是有误差的,它的值不能无止境地写下去。例如,用米尺测量一物体长度,如图 2-1 所示,其长度 $L=24.3\text{mm}$, 最后一位“3”是估读出来的,是可疑数字,也即在该位上出现了测量误差(小数点后第 1 位上)。如果用精度更高的游标卡尺测量同一长度,结果为 $L=24.30\text{mm}$, 此时小数点后第 2 位上的“0”是估读位即误差所在位。在数学上, $24.3=24.30$, 但对测量值来说, $24.3 \neq 24.30$, 因为它们有着不同的误差,测量的准确度不同。为此,引入有效数字概念,即规定测量数值中可靠数字与估读的 1 位(或 2 位)可疑数字,统称为有效数字。因此,在记录实验数据时要切记读数的有效数字。

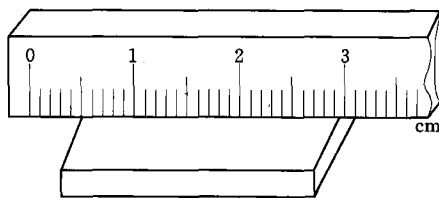


图 2-1 测量与有效数字

$$\text{测量值} = \text{读数值(有效数字)} + \text{单位}$$

$$\text{有效数字} = \text{可靠数字} + \text{可疑数字(估读)}$$

有效数字位数的多少,直接反映实验测量的准确度:有效数字位数越多,测量准确度越高。如上例的长度测量结果: 24.30mm 比 24.3mm 的测量准确度要高一个数量级(因为误差出现在最后一位的可疑位上,前者最大误差 $\delta=0.09\text{mm}$, 后者最大误差 $\delta=0.9$,

显然它们的相对误差要相差一个数量级)。因此,实验结果的有效位数既不能多写一位,也不能少取一位,而应根据测量结果的误差来确定。

在十进制单位换算中,只涉及小数点位置改变,而不允许改变有效位数。例如,1.3m为两位有效数字,在换算成km或mm时应写为

$$1.3\text{m} = 1.3 \times 10^{-3}\text{km} = 1.3 \times 10^3\text{mm}$$

而1.3m=1300mm的写法是错误的。

2.1.5 有效数字的运算

在数据运算中,首先应保证测量的准确度,在此前提下,尽可能节省运算时间,免得浪费精力。运算时应使结果具有足够的有效数字,不要少算,也不要多算。少算会带来附加误差,降低结果精度;多算没有必要,算的位数很多,但绝不可能减少误差。

有效数字运算取舍的原则是,运算结果保留1位(最多3位)可疑数字。

(1) 加、减运算。

$$\begin{array}{r} \text{例:} \quad 20.1 \\ +) \quad 4.178 \\ \hline 24.278 \quad \rightarrow 24.3 \end{array}$$

结论:诸量相加(相减)时,其和(差)值在小数点后所应保留的位数与诸数中小数点后位数最少的一个相同。

(2) 乘、除运算。

$$\begin{array}{r} \text{例:} \quad 4.178 \\ \times) \quad 10.1 \\ \hline 4.178 \quad \rightarrow 42.2 \text{ (3位)} \end{array}$$

结论:诸量相乘(除)后其积(商)所保留的有效数字,只需与诸因子中有效数字最少的一个相同。

(3) 乘方开方的有效数字与其底的有效数字相同。

(4) 对数函数、指数函数和三角函数运算结果的有效数字必须按照不确定度传递公式来决定(详见2.4.3节)。

2.1.6 有效数字尾数修约规则

在计算数据时,当有效数字位数确定以后,应将多余的数字舍去,其舍去规则为:

(1) 若舍去部分的数值小于所保留的末位数单位的1/2,末位数不变。

(2) 若舍去部分的数值大于保留的末位数单位的1/2,末位数加1。

(3) 若舍去部分的数值恰好等于保留的末位数单位的1/2,当末位数为偶数时,保持不变;为奇数时,末位数加1。

$$\begin{array}{l} \text{例:} \quad 4.32749 \rightarrow 4.327 \quad 4.32750 \rightarrow 4.328 \\ \quad \quad 4.32751 \rightarrow 4.328 \quad 4.32850 \rightarrow 4.328 \end{array}$$

这样处理可使舍和入的机会均等,避免在处理较多数据时因入少舍多而带来的系统误差。

2.2 误差分类及其处理方法

按误差产生的原因和性质的不同,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

2.2.1 系统误差

误差值的大小和正负总保持不变,或按一定的规律变化,或是有规律的重复。

系统误差有多种来源,从基础物理实验教学角度出发,主要有以下几种。

(1) 仪器的示值误差。例如,一电压表的示值不准,用它测量某一电压 U 时,得 $U = 8.00\text{V}$; 设以一只高一级的电表校准此读数,得 $U_A = 8.100\text{V}$ (U_A 即为 U 的相对真值),则系统误差为 $\delta_U = U - U_A = -0.10\text{V}$ 。对于有示值误差的仪器,一般应对示值进行修正。修正值 $C_x = -\delta_x$ (设待测量为 x),上例中 $C_U = -\delta_U = 0.10\text{V}$ 。所以,

$$\text{实际值} = \text{示值} + \text{修正值} = 8.00 + 0.10 = 8.10(\text{V})$$

在“电表改装与校准”实验中将讨论校准电表示值的方法。

(2) 仪器的零值误差。例如,电表的指针不指在零位,即产生零值误差。所以在使用电表前,应先检查指针是否指零,否则需旋动零位调节器使指针指零。又如,在使用千分尺测长度之前,也要先检查零位,并记下零读数(即零值误差),以便对测量值进行修正。

(3) 仪器机构误差和测量附件误差等。前者由于等臂天平的两个臂事实上不全相等,或者惠斯顿电桥两个比例臂示值虽然相等但实际上不相等等原因所致,这类误差可用诸如交换测量法来消除;后者如电学线路中开关、导线等剩余电阻所引入的误差,有时可用替代法来巧妙地避免这些因素的影响。

(4) 理论和方法误差。由于实验理论和实验方法不完善,所引用的理论与实验条件不符等产生的误差。如在空气中称重而没有考虑空气浮力的影响;测量长度时没有考虑热胀冷缩使尺子长度的改变;用伏安法测未知电阻,由于电表内阻的影响,使测量值比实际值总是偏大或总是偏小(详见“电阻元件伏安特性研究实验”,该实验介绍了减小或消除此项误差的途径)。

(5) 系统误差也包括按一定规律(指非统计规律)变化的误差。例如,在一直流电路中,可分别精确地测出两串联电阻电压 U_1 、 U_2 ,并由 U_1/U_2 求得此两电阻之比。但由于干电池在工作时,其电动势随时间均匀地略有下降,依次测定 U_1 、 U_2 时的电路电流有些不同。因此,可等时间隔地依次测定 U_1 、 U_2 和 U'_1 (即再测一次 U_1 的值),将 U_1 的平均值与 U_2 相比即可。再如“分光计的使用和调整”实验中角度的测量存在周期性的误差,此误差可通过对称设置双读数游标来解决(详见该实验)。

从上述的介绍可知,我们不能依靠在相同条件下多次重复测量来发现系统误差的存在,也不能藉此来消除它的影响。原则上,系统误差均应予以改正,但系统误差的发现和估计,是个实验技能问题,常取决于实验者的经验和判断能力。在基础物理实验教学中,处理系统误差的通常做法是:首先对实验依据的原理、方法、测量步骤和所用仪器等可能引起误差的因素一一进行分析,查出系统误差源;其次,通过改进实验方法和实验装置、校准仪器等方法对系统误差加以补偿、抵消;最后在数据处理中对测量结果进行理论上修正,以消除或尽可能减小系统误差对实验结果的影响。在本书中,我们把处理系统误差的思想和方法结合到每个实验中进行讨论。比如在长度测量实验中对零值误差进行修正,牛

顿环实验中,用逐差法消除了中心难以确定和因附加光程差而引起的系统误差等。希望同学们重视对系统误差的学习,并在实践中不断总结提高。

2.2.2 随机误差(偶然误差)

随机误差(习惯上又常称为偶然误差)是指在同一被测量量的多次测量过程中,测量误差的绝对值与符号以不可预知(随机)的方式变化,并具有抵偿性的测量误差分量。

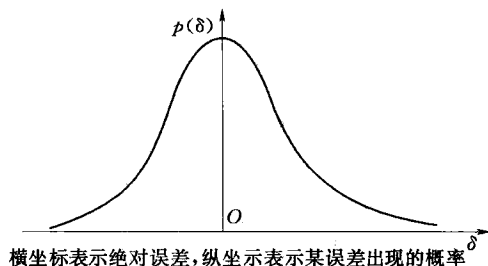


图 2-2 随机误差分布特点

随机误差的分布特点如图 2 所示,随机误差是实验中各种因素的微小变动性引起的。例如,实验周围环境或操作条件的微小波动,测量对象的自身涨落,测量仪器指示数值的变动性,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化,这变化量就是各次测量的随机误差。可见随机误差的来源是非常复杂而且是难以确定的。因而不能像

处理系统误差那样去查出产生随机误差的原因,然后通过一定的方法予以修正或消除。正像处理大量分子作无规则运动时,难以确定每个分子的具体运动规律,但大量的分子运动却表现出统计规律来一样,实验中发现,就某一测量值的随机误差来说是没有规律的,其大小和方向都是不可预知的。但对某一量进行足够多次的测量,则会发现其随机误差服从一定的统计规律分布。

(1) 单峰性。测量值与真值相差越小,这种测量值(或误差)出现的概率(可能性)越大,与真值相差大的,则概率越小。

(2) 对称性。绝对值相等、符号相反的正、负误差出现的概率相等。

(3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率趋近于零。也即是说,总可以找到这样一个误差限,某次测量的误差超过此限值的概率小到可以忽略不计的地步。

(4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随测量次数的增加而减小。

根据随机误差分布的这一特点,可从数学上推导随机误差出现概率的分布函数。这个函数首先由德国数学家和理论物理学家高斯于 1795 年导出,因而称为高斯误差分布函数,也称正态分布函数,这一分布规律在数理统计中已有充分的研究,读者可参阅相关书籍。

对测量中的随机误差如何处理呢?可以利用正态分布理论的一些结论来进行处理。

现设对某一物理量在测量条件相同的情况下,进行 n 次无明显系统误差的独立测量,测得 n 个测量值为

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

往往称此为一个测量列。在测量不可避免地存在随机误差的情况下,处理这一测量列时必须回答下列两个问题:

(1) 由于每次测量值各有差异,那么怎样的测量值是最接近于真值的最佳值?

(2) 测量值的差异性即测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大,那么怎样对测量的随机误差做出估算才能表示出测量的精密程度?

在数理统计中,对此已有充分的研究,下面只引用它们的结论。

结论一：当系统误差已被消除时，测量值的算术平均值最接近被测量的真值，测量次数越多，接近程度越好（当 $n \rightarrow \infty$ 时，平均值趋近于真值），因此用算术平均值表示测量结果的最佳值。

算术平均值的计算式是

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-3)$$

以后为了简洁，常略去求和号上的求和范围，例如式 (2-3) 中简写为 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$

结论二：一测量列的随机误差用标准偏差来估算。标准偏差的计算公式为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (2-4)$$

其中 $\Delta x_i = x_i - \bar{x} (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 称为每一次测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 之差，称之为偏差。显然，这些偏差有正有负，有大有小，不能全面体现一列测量值的离散性。因此，常用“均方根”法对它们进行统计，于是得到上述称之为标准偏差的统计公式。它可以表示这一列测量值的精密度，反映出测量值的离散性。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，即测量精密度低。现在很多计算器上都有这种统计计算功能，可以直接用计算器求得 S_x 和 \bar{x} 等数值。

值得指出的是，在多次测量时，正、负随机误差常可以大致相消，因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响。但多次重复测量不能消除或减小测量中的系统误差。

2.2.3 粗大误差

明显超出规定条件下预期值的误差称为粗大误差。这是在实验过程中，由于某种差错使得测量值明显偏离正常测量结果的误差，如读错数、记错数、或者环境条件突然变化而引起测量值的错误等。在实验数据处理中，应按一定的规则来剔除粗大误差。

2.3 测量不确定度的基本概念

由于测量误差的不可避免，使得真值也无法确定，而真值不知道，也就无法确定误差的大小。因此，实验数据的处理只能求出实验的最佳估计值及其不确定度，通常把测量结果表示为

$$\text{测量值} = \text{最佳估计值} \pm \text{不确定度(单位)}$$

何为不确定度？不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度，或者说它表征被测量的真值在某个量值范围的一个客观的评定，是一个描述尚未确定的误差的特征量。由此可见，不确定度与误差有区别。误差是一个理想的概念，一般不能精确知道，但不确定度反映误差存在分布的范围，可由误差理论求得。

不确定度一般包含多个分量，按其数值的评定方法可归并为两类。

A类不确定度：多次重复测量时用统计方法计算的那些分量 Δ_A ，比如估算随机误差的标准偏差 S_x 就属于 A 类分量。

B类不确定度：用其他非统计方法估出的那些分量，它们只能基于经验或其他信息作

出评定,如系统误差的估算等。一般用近似的等价标准差 Δ_B 表征,即

$$\Delta_B = \Delta_{\text{仪}} / C \quad (2-5)$$

式中: $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差(意义见下节); C 为修正因子。

在基础物理实验教学中,为简便计算,直接取 $\Delta_A = S_x$, 即把一测量列的标准偏差的值当作多次测量中用统计方法计算的不确定度分量 Δ_A 。标准偏差 S_x 和不确定度中的 A 类分量 Δ_A 是两个不同的概念,在基础物理实验中当 $5 < n \leq 10$ 时,取 S_x 值当作 Δ_A 是一种最方便的简化处理方法,因为当 Δ_B 可忽略不计时,有 $\Delta = \Delta_A = S_x$, 这时可以证明被测量量的真值落在 $(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$ 范围内的可能性(概率)已大于或接近 95%。也即被测量的真值在 $(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$ 的范围之外的可能性(概率)很小(小于 5%)。因此,如果不是特别注明,下文均取

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

那么,在物理实验中 B 类分量 Δ_B 的修正因子如何确定呢?这是一个困难的问题,这需要实验者的经验、知识、判断能力以及对实验过程中所有有价值信息的把握和分析,然后合理地估算出 B 类分量 Δ_B 。但对于一般的教学实验,也作一个简化了的约定,取 $C=1$, 即把仪器误差简单地直接当作用非统计方法估算的分量 $\Delta_{\text{仪}} = \Delta_B$ 。

总不确定度:当各量相互独立时,用方和根法将上述两类不确定度分量合成即得总不确定度 Δ , 简称不确定度:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{仪}}^2 + S_x^2} \quad (2-7)$$

相对不确定度:

$$E_x = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (2-8)$$

其意义与相对误差类似。

测量结果不确定度可表示为

$$\begin{cases} x = \bar{x} \pm \Delta (\text{单位}) \\ E_x = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \end{cases} \quad (2-9)$$

不确定度越小,实验测量的质量越好;不确定度越大,实验测量的质量越差。

由于不确定度的评定要合理赋予被测量值的不确定区间,而不同的置信概率所表示的不确定度区间是不同的,因此,还应表明是多大概率含义的不确定度。在基础物理实验教学中,暂不讨论不确定度的概率含义,而将测量结果不确定度表示简化地理解为测量量的真值在 $(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$ 区间之外的可能性(概率)很小,或者说,被测量量的真值位于 $(\bar{x} - \Delta, \bar{x} + \Delta)$ 区间之内的可能性很大。物理量都有单位,不能不写出。因此,一个完整的测量结果包含有 3 个要素:测量结果的最佳估计值、不确定度和单位。

应该指出,随机误差和系统误差并不简单地对应于 A 类和 B 类不确定度分量。如对于未能进行 n 次重复测量的情况,其随机误差就不能利用统计方法处理,而要利用被测量量可能变化的信息进行判断,这就属于 B 类不确定度分量。要进一步了解两类不确定度分量的评定和合成不确定度的计算问题,读者可参阅其他参考书籍。