

大学物理实验

EXPERIMENTS OF COLLEGE PHYSICS

主 编 方立新



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

大学物理实验

方立新 主编

中国海洋大学出版社
• 青岛 •

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/方立新主编. —青岛: 中国海洋
大学出版社, 2017. 7
ISBN 978-7-5670-1536-4

I. ①大… II. ①方… III. ①物理学—实验—高等学
校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 201344 号

出版发行 中国海洋大学出版社
社 址 青岛市香港东路 23 号
邮政编码 266071
出 版 人 杨立敏
网 址 <http://www.ouc-press.com>
电子信箱 2586345806@qq.com
订购电话 0532-82032573(传真)
责任编辑 矫恒鹏
印 制 日照报业印刷有限公司
版 次 2017 年 8 月第 1 版
印 次 2017 年 8 月第 1 次印刷
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 16.75
字 数 387 千
印 数 1~3 000
定 价 39.00 元

电 话 0532-85902349

编委会

顾 问 元 光

主 编 方立新

编 委 (按姓氏笔画排序)

亓夫军 王桂忠 牟 冰 李冬萍

杨国仁 姜永清 赵培刚 栾晓宁

徐炳明 唐 璐 康 颖 盖 磊

主 审 李 春

前 言

大学物理实验作为一门实践性课程,是理工科学生在本科阶段所必修的公共基础课。在提倡素质教育、培养工程应用型人才的今天,大学物理实验课程有着不可替代的重要地位。

教材是教学的基本依据。本书是在王金城、方立新等编写的《大学物理实验》(2011年版)基础上,结合实验仪器的更新换代、实验方法的改进,并总结了7年来所发现的问题修改、编写而成。为了能通过强化课前预习的质量,提高实验课上的效率和效果,新加了“预习导读”章节的内容。本着“传授物理知识、培养科学精神、训练实践技能、鼓励探索创新”的教学理念,新教材仍然将实验分为力学和热学、电磁学、光学三类,共包含了32个实验,可根据学生专业和学时的不同进行选择。

本书在编写、修改过程中得到物理实验教学中心的各位同仁,尤其是李冬萍、姜永清、赵培刚、栾晓宁、徐炳明等老师的支持和帮助。特别要感谢元光教授的大力支持和所给出的建设性意见。

实验教学的探索是一个精益求精、永无止境的任务,所以教材的编写也是一个不断改进、完善的过程。由于大学物理实验内容较丰富,涉及的知识点较多,限于编者水平,疏漏不足之处难免,恳请读者、师友指正。

编 者

2017年6月

目 次

绪 论	1
0.1 物理实验课教学的任务	2
0.2 物理实验课教学的特点	2
0.3 物理实验课遵守规则	3
第 1 章 测量误差和数据处理	4
1.1 测量与误差	4
1.2 系统误差	8
1.3 随机误差	9
1.4 函数误差	13
1.5 不确定度与测量结果表示	14
1.6 有效数字及其运算	20
1.7 实验数据的处理方法	21
第 2 章 物理实验的基本方法	28
2.1 物理实验中的基本测量方法	28
2.2 物理实验中的基本调整与操作技术	29
第 3 章 力学、热学实验	31
实验一 拉伸法测定金属丝的杨氏模量	42
实验二 牛顿第二定律的验证	50
实验三 扭摆法测定物体的转动惯量	53
实验四 简谐振动实验	56
实验五 声速的测定	59
实验六 测定冰的溶解热	63
实验七 空气比热容比的测定	67
实验八 准稳态法测比热和导热系数	69
实验九 拉脱法测定水的表面张力系数	76
实验十 落球法测定液体在不同温度的黏度	80
第 4 章 电磁学实验	85
电磁学实验基础知识	85

实验一	元件伏安特性的测定	91
实验二	用惠斯通电桥测电阻	95
实验三	用电视显微密立根油滴仪测量电子电荷	99
实验四	电位差计的应用	106
实验五	静电场的描绘	110
实验六	霍尔效应及其应用	113
实验七	RLC 电路的暂态过程	119
实验八	示波器应用	124
实验九	电子束的电偏转和磁偏转研究	132
实验十	铁磁材料动态磁滞回线和磁化曲线的测量	137
实验十一	指针式电表的改装与校准	145
第 5 章 光学实验		152
光学实验基础知识		152
实验一	薄透镜焦距的测定	158
实验二	分光计的调整和使用(一)	163
实验三	分光计的调整和使用(二)	169
实验四	单缝衍射光强的分布测量	172
实验五	组合干涉仪	179
实验六	测旋光性溶液的旋光率和浓度	183
实验七	等厚干涉——牛顿环	187
实验八	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	191
实验九	偏振光的研究	196
实验十	全息照相	201
实验十一	光栅衍射及光波波长的测定	208
第 6 章 实验预习导读		213
6.1	课前预习的必要性	213
6.2	课前预习的要求	213
6.3	实验报告的书写	226
附录		
I	国际单位制	233
II	常用物理参数	235
III	物理实验和诺贝尔物理学奖	242
IV	世界十大经典物理实验	250
参考文献		257

绪 论

物理学是工程技术学科的理论基础,它本质上是一门实验科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都必须以严格的科学实验为基础,并为以后的科学实验所验证,物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切配合下进行的。

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辨,代之以注重观察、勤于实验,并把物理实验作为物理学理论的基础、依据和发展物理学必不可少的手段,从而使物理学走上真正的科学道路。在物理学发展史上,这方面的例子不胜枚举。如对光的本性认识中,牛顿倡导的微粒说和惠更斯主张的波动说进行了一个多世纪的争论,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,结果才使波动说得到了确认。然而,到了 19 世纪末 20 世纪初,由于光电效应实验又揭示了光的粒子性,从而使人们认识到光具有波粒二象性。又如 19 世纪初,多数物理学家对光和电磁波的传播不需要媒质的观点是不能接受的,因此假设宇宙空间存在着一种称之为“以太”的媒质,它具有许多异常而又不合理的特性。正是在这种情况下,迈克尔逊和莫雷合作,用干涉仪进行了有名的“以太风”实验,实验的“零结果”否定了“以太”的存在。

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,如现代的核技术是建立在铀、钚和镭等元素天然放射性的发现、 α 粒子散射实验、重核裂变和核的链式反应的实现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,如激光通讯、激光熔炼、激光切割、激光钻孔、激光全息术、激光外科手术和激光武器等几乎都是从物理实验室中走出来的。而信息技术则是在量子力学和固体能带理论的建立与验证的基础上,于 1974 年在物理实验室中研制出晶体管,并发展成现在的大规模集成电路、超大规模集成电路,集成度以每 10 年 1 000 倍的速度增长。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,创造出了各种精密巧妙的仪器设备;同时,用于实验的数学方法以及计算机科学在实验中的应用等,使物理测量技术不断得到发展。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。它不仅加深了对理论的理解,更重要的是能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扎实的基础。

0.1 物理实验课教学的任务

作为一门独立的基础课程,物理实验具有自身独特的教学内容、教学方法及教学目的。物理实验课程对学生能力和素质的培养不仅包括一般的实验技能,也包括实验过程中发现问题和解决问题的能力、综合分析的能力、创造性思维的能力、总结表达的能力,还包括实验者的科学态度和求是精神,以及爱护实验仪器,节省实验材料的良好品德和科学习惯。这是理论思维能力所不能替代的。物理实验课程的主要任务具体如下。

(1) 通过对物理实验现象的观察、测量和分析,学习物理实验知识,理论与实验相互补充,以加深和巩固对物理学一些基本概念和规律的认识和理解。

(2) 培养和提高学生的科学实验能力。其中包括:

- ① 通过阅读教材或资料,做好实验的准备。
- ② 正确使用基本仪器设备,掌握基本物理量的测量方法和测量技术。
- ③ 运用物理理论对实验现象进行初步分析判断。
- ④ 正确记录和处理实验数据、分析实验结果、撰写合格的实验报告。
- ⑤ 完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养和提高学生的科学实验素养。要求学生具有对待科学实验一丝不苟的严谨态度,理论联系实际和实事求是的工作作风,勇于探索、创新的精神,以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

0.2 物理实验课教学的特点

物理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,独立或相互协作完成实验任务。一般地,物理实验课的基本程序一般可分为以下3个阶段。

1. 课前预习

为了保证在规定的课时内高质量地完成实验课的任务,学生在做实验前必须进行预习。预习时应仔细阅读实验教材,理解教材所叙述的实验原理,明确实验操作的大体步骤,必要时还需查阅有关参考资料,在此基础上写好实验前的预习报告。在预习报告中应简单扼要地叙述实验原理,列出实验所依据的主要公式,作出必要的原理图示(或线路图示),并画好数据记录表格。

物理实验的预习工作是以学生自习为主的,它是学生了解实验和学习实验的第一步,同学们应在思想上引起重视,自觉地抓好这一环节。

2. 课堂实验

课堂实验是实验课的重要环节。开始实验前,要熟悉有关仪器的性能及操作规程,进一步明确本实验的具体要求。做实验时,应按实验步骤和要求,认真调试仪器,仔细观察测量有关的物理量,并正确、如实地记录测量数据填在预习报告的数据记录表格内。此

外,还应记录必要的实验条件,仪器编号、规格以及实验现象等。在与他人合作做实验时,应分工协作,各司其职,互相配合。

实验完毕,应将测量的数据记录交给指导教师审阅,经教师认可签字后,整理好仪器方可离开实验室。

3. 完成实验报告

写实验报告是对实验全过程进行总结和深入理解的一个重要步骤。实验报告的书写具体参见第6章第3节内容。

0.3 物理实验课遵守规则

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,须遵守下列规则。

(1) 参加实验的同学,要遵守纪律,进入实验室后,将背包等物品放在柜子里,按指定座位就座。

(2) 动手实验前,应先检查仪器是否齐全,如有缺损,及时报告老师请求补发或调换,不得任意到其他桌上拿取。

(3) 实验前要了解本次实验的内容、实验目的和操作步骤,严格遵照老师指导去做实验。

(4) 实验必须按步骤进行,仔细观察现象,如实记录数据,周密思考分析,一丝不苟写好实验报告;不得弄虚作假,伪造数据凑答案。

(5) 使用电器要严格按操作顺序,在老师许可下才可接通电源,使用完毕立即将电源切断,杜绝违章操作。

(6) 实验完毕,应整理好所用仪器。如有损坏及时向老师报告,根据具体情况,追究赔偿责任。

(7) 实验室内的一切物品,未经老师许可,不得带出实验室。离席时将凳子摆放整齐,置于实验桌下,并不得大声喧闹。

第 1 章 测量误差和数据处理

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

在物理实验中,不仅要观察物理现象,而且要定量地测量物理量的大小。所谓测量就是采取一定的方法,利用某种仪器将被测量与标准量进行比较,确定被测量的量值。按测量方法可将测量分为两类。

(1) 直接测量(简单测量):直接用计量仪器读出被测量值的测量过程。例如,用直尺测量物体长度、用天平称物体的质量、用秒表测时间、用电流表测电路中的电流强度等。这些由直接测量获得的未经任何处理的数据称作原始数据。

(2) 间接测量(复合测量):多数物理量,不便或不能直接测量。但是我们可以先对可直接测量的相关物理量进行测量,然后依据一定的函数关系,计算出待测的物理量,这称为间接测量。例如,要测量一圆柱体的体积 V ,可以先用米尺(或卡尺)对直径 d 和高度 h 进行直接测量,然后根据公式计算出它的体积。

当然一个物理量应直接测量还是间接测量,不是绝对的。要根据所用的仪器和测量方法来定。如上例中的圆柱体投入盛有一定量水的量筒中,从液面的上升即可直接得到体积。

1.1.2 测量误差

测量的目的是要获得待测物理量的真值。所谓真值是指在一定条件下,某物理量客观存在的真实值。但由于测量仪器的局限,理论或测量方法的不完善,实验条件的不理想及观测者欠熟练等原因,所得到的测量值与真值之间总存在着一定的差异,这种差异称为测量误差,简称误差。任何测量都有误差,误差贯穿于测量的全过程。

某一物理量的误差,定义为该量的测量值 x 与真值 μ 之差,即

$$\delta = x - \mu$$

它反映了测量值偏离真值的大小和方向,故又被称为绝对误差。一般来说,真值仅是一个理想的概念。实际测量中,一般只能根据测量值确定测量的最佳值,通常取多次重复测量的平均值作为最佳值。由于真值测不出来,误差又不可避免,所以测量的目的就是,在给定的条件下,求出被测量的最可信赖值,并对它的精确程度给予正确的估计。

在我们的实验中,最可信赖值取多次测量的算术平均值,它是真值的最好近似,也称近似真值。用公式表示为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

由于前边近似真值是采用多次测量的方法得出的,所以误差我们使用平均绝对误差。用公式表示为

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

至此,测量的结果可表示为

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}$$

绝对误差可以评价某一测量的可靠程度,但若要比较两个或两个以上的不同测量结果时,它就无能为力了,这就需要用相对误差来评价测量的优劣。例如,测量两个物体的长度,结果分别为

$$l_1 = (100.00 \pm 0.05) \text{ cm}$$

$$l_2 = (1.00 \pm 0.05) \text{ cm}$$

从绝对误差看,对两者的评价是相同的。但前者的误差占测量值的 0.05%,后者则占 5%。显然前者的相对精密度比后者高得多。因此,我们有必要引入相对误差:即

$$E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\%$$

如果被测量有公认值或理论值,还可用“百分差”来表征:

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

绝对误差、相对误差和百分差通常只取 1~2 位数字来表示。

既然测量中的误差是不可避免的,因此实验者应根据实验要求和误差限度来制定或选择合理的测量方案和仪器,分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差做出估计。

1.1.3 误差分类

在物理实验中,根据误差的性质及其来源,我们通常把误差分为系统误差、随机误差和粗大误差 3 大类。

1. 系统误差

实验系统的组成包括:实验仪器、环境、实验的理论和方法以及实验人员。由这四种组成所引起的有规律的误差称之为系统误差。

2. 随机误差

由某些偶然的、不确定的因素所造成的误差称之为随机误差,又称偶然误差。若从一次测量来看,随机误差是随机的,没有确定的规律,也不能预测。但当测量次数足够多时,随机误差遵从一定的统计分布。因此,增加测量的次数,可以明显地减少随机误差。

3. 粗大误差(过失误差)

凡是明显歪曲测量结果,又无法根据测量的客观条件做出合理解释的误差,都称为粗

大误差。产生粗大误差的原因是多方面。主要原因是观测者的缺乏经验,或过于疲劳而造成的,出现测错、读错、记错、算错等测量过失。此外,外界的突发性干扰使实验条件发生不能容许的偏离而未被发现等,也是粗大误差产生的原因。

需要注意的是,系统误差和随机误差之间并不存在绝对的界限。随着对误差性质认识的深化和测试技术的发展,有可能把过去作为随机误差的某些误差分离出来作为系统误差处理,或把某些系统误差当作随机误差来处理。

1.1.4 评价测量的结果

在实验中,常用到精密度、准确度和精确度三个不同的概念来定性地评价测量结果的好坏。

(1) 精密度:反映测量结果中随机误差的影响程度。精密度高说明测量数据集中,随机误差小。

(2) 准确度:反映测量结果中系统误差的影响程度。准确度高说明测量结果的近似真值与真值非常接近,系统误差小。

(3) 精确度:反映测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度。精确度高说明随机误差和系统误差都小。测量数据集中在真值附近。我们希望获得精确度高的测量结果。

在一组测量中,精密度高,准确度不一定高,准确度高的精密度也不一定高,但精确度高,则精密度和准确度都高。

为了进一步说明精密度与准确度的区别,可用下述打靶的例子来说明。如图 1-1-1 所示。

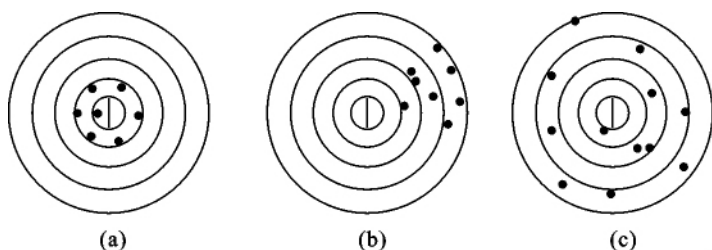


图 1-1-1 精密度和准确度的关系

图 1-1-1(a)中表示精密度和准确度都很好,则精确度高;图 1-1-1(b)表示精密度很好,但准确度却不高;图 1-1-1(c)表示精密度与准确度都不好。在实际测量中没有像靶心那样明确的真值,而是设法去测定这个未知的真值。

学生在实验过程中,往往满足于实验数据的重现性,而忽略了数据测量值的准确程度。绝对真值是无可知的,人们只能订出一些国际标准作为测量仪表准确性的参考标准。随着人类认识运动的推移和发展,可以逐步逼近绝对真值。

1.1.5 测量仪表的精确度

测量仪表的精确等级是用最大引用误差(又称允许误差)来标明的。它等于仪表示值

中的最大绝对误差与仪表的量程范围之比的百分数。

$$\delta_{\max} = \frac{\text{最大示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d_{\max}}{X_n} \times 100\%$$

式中, $\delta_{\max}$ 为仪表的最大测量引用误差; $d_{\max}$ 为仪表示值的最大绝对误差; X_n 为标尺上限值一标尺下限值。

通常情况下是用标准仪表校验较低级的仪表。所以,最大示值绝对误差就是被校表与标准表之间的最大绝对误差。

测量仪表的精度等级是国家统一规定的,把允许误差中的百分号去掉,剩下的数字就称为仪表的精度等级。仪表的精度等级常以圆圈内的数字标明在仪表的面板上。例如某台压力计的允许误差为 1.5%,这台压力计电工仪表的精度等级就是 1.5,通常简称 1.5 级仪表。

仪表的精度等级为 a ,它表明仪表在正常工作条件下,其最大引用误差的绝对值 $\delta_{\max}$ 不能超过的界限,即

$$\delta_{n\max} = \frac{d_{\max}}{X_n} \times 100\% \leq a\%$$

由上式可知,在应用仪表进行测量时所能产生的最大绝对误差(简称误差限)为

$$d_{\max} \leq a\% \cdot X_n$$

而用仪表测量的最大值相对误差为

$$\delta_{n\max} = \frac{d_{\max}}{X_n} \leq a\% \cdot \frac{X_n}{X}$$

由上式可以看出,用只是仪表测量某一被测量所能产生的最大示值相对误差,不会超过仪表允许误差 $a\%$ 乘以仪表测量上限 X_n 与测量值 X 的比。在实际测量中为可靠起见,可用下式对仪表的测量误差进行估计,即

$$\delta_m = a\% \cdot \frac{X_n}{X}$$

例 1 用量限为 5 A,精度为 0.5 级的电流表,分别测量两个电流, $I_1 = 5$ A, $I_2 = 2.5$ A,试求测量 I_1 和 I_2 的相对误差为多少?

$$\delta_{m1} = a\% \times \frac{I_n}{I_1} = 0.5\% \times \frac{5}{5} = 0.5\%$$

$$\delta_{m2} = a\% \times \frac{I_n}{I_2} = 0.5\% \times \frac{5}{2.5} = 1.0\%$$

由此可见,当仪表的精度等级选定时,所选仪表的测量上限越接近被测量的值,则测量的误差的绝对值越小。

例 2 欲测量约 90 V 的电压,实验室现有 0.5 级 0~300 V 和 1.0 级 0~100 V 的电压表。问选用哪一种电压表进行测量为好?

用 0.5 级 0~300 V 的电压表测量 90 V 的相对误差为

$$\delta_{m0.5} = a_1\% \times \frac{U_n}{U} = 0.5\% \times \frac{300}{90} = 1.7\%$$

用 1.0 级 0~100 V 的电压表测量 90 V 的相对误差为

$$\delta_{m1.0} = a_2 \% \times \frac{U_n}{U} = 1.0 \% \times \frac{100}{90} = 1.1 \%$$

上例说明,如果选择得当,用量程范围适当的 1.0 级仪表进行测量,能得到比用量程范围大的 0.5 级仪表更准确的结果。因此,在选用仪表时,应根据被测量值的大小,在满足被测量数值范围的前提下,尽可能选择量程小的仪表,并使测量值大于所选仪表满刻度的 $2/3$,即 $X > 2X_n/3$ 。这样就可以达到满足测量误差要求,又可以选择精度等级较低的测量仪表,从而降低仪表的成本。

1.2 系统误差

系统误差是由某些固定不变的因素引起的,这些因素影响的结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测量中完全相同。当实验条件一经确定,系统误差就是一个客观上的恒定值,多次测量的平均值也不能减弱它的影响。误差随实验条件的改变按一定规律变化。

系统误差的特点是测量结果向一个方向偏离,其数值按一定规律变化,具有重复性、单向性。我们应根据具体的实验条件,系统误差的特点,找出产生系统误差的主要原因,采取适当措施降低它的影响。

1.2.1 系统误差的来源

系统误差的主要来源有:

(1) 仪器误差:由仪器本身的固有缺陷、校正不完善等引起的。例如:测量仪器本身刻度的偏差、零点不准等。

(2) 环境误差:仪器所处的外界环境的变化引发的误差。例如:温度、湿度、电磁场等环境的变化。

(3) 方法误差:由于计算公式本身的近似,没有完全满足理论公式所给定的条件。

例如:单摆测重力加速度的实验中,公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 采用了 $\sin \theta \approx \theta$ 的近似条件。

(4) 人员误差:由测量者的个人因素造成的误差。例如:按秒表时总是超前或滞后,读数时头总是向一边偏等。

1.2.2 系统误差的分类

(1) 按照误差掌握的程度,分为已定系统误差和未定系统误差。

已定系统误差是指误差绝对值和符号已经确定的系统误差;未定系统误差是指误差绝对值和符号未能确定的系统误差,但通常可估计出系统误差。

(2) 按照误差出现的规律,分为不变系统误差和变化系统误差。

不变系统误差是指误差绝对值和符号为固定的系统误差;变化系统误差是指误差绝对值和符号为变化的系统误差,按其变化规律又可分为线性系统误差、周期性系统误差和

复杂规律系统误差。

1.2.3 系统误差的减小和消除

为了尽量减小或消除系统误差对测定结果的影响,可以用以下方法来减小和消除系统误差。

(1) 对测量仪器仪表进行校正。在准确度要求高的测量中,引用修正值进行修正;对于常用仪表,经过检定,测出标度尺每一刻度点的绝对误差,列成表格或作出曲线,在使用该仪表时,可根据示值和该示值的修正值求出被测量的实际值,这样就可消除由于测量工具引起的系统误差。

(2) 消除产生误差的根源。正确选择测量方法和测量仪器,尽量使测量仪器在规定的使用条件下工作,消除各种外界因素造成的影响。

(3) 采用特殊的测量方法。实际测量中可根据测量仪器仪表和被测量的不同,采用不同的测量方法来达到减小误差的目的,如采用正负误差补偿法、等值替代法、换位消除法、对称观测法等。

例如,用电流表测电流时,考虑到外磁场对读数的影响,可以把电流表放置的位置转动 180° ,分别进行两次测量。两次测量中,必然出现一次读数偏大而另一次读数偏小的情况,取两次读数的平均值,作为测量结果,其正、负误差抵消,可以有效地消除外磁场对测量结果的影响。

除此以外,在测量之前,要仔细检查全部量具和仪表的安装及调整情况,合理选择配线方式,防止测量工具互相干扰;选好观测位置,消除视差;并避免外界条件所产生的急剧变化,以消除产生系统误差的来源。

1.3 随机误差

随机误差又称偶然误差,即使在完全消除系统误差这种理想情况下,多次重复测量同一测量对象,仍会由于各种偶然的、无法预测的不确定因素干扰而产生测量误差,称为随机误差。

随机误差的特点是对同一测量对象多次重复测量,所得测量结果的误差呈现无规则涨落,既可能为正(测量结果偏大),也可能为负(测量结果偏小),且误差绝对值起伏无规则。

1.3.1 随机误差的高斯分布

虽然对于某一次测量来说,其误差的大小、正负都无法预知,纯属偶然。但是当测量次数足够多时,随机误差遵从一定的统计规律。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。

如果测量列中不包括系统误差和粗大误差,从大量的实验中发现,遵从高斯分布规律

的随机误差具有如下几个特征：

(1) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多,即误差的概率与误差的大小有关。这是误差的单峰性。

(2) 绝对值相等的正误差或负误差出现的次数相当,即误差的概率相同。这是误差的对称性。

(3) 极大的正误差或负误差出现的概率都非常小,即大的误差一般不会出现。这是误差的有界性。

(4) 随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值趋于零。这是误差的抵偿性。

根据上述的误差特征,可得出误差出现的概率分布图,如图 1-1-2 所示。图中横坐标表示偶然误差,纵坐标表示该误差出现的概率,图中曲线称为误差分布曲线,以 $y = f(x)$ 表示。其数学表达式由高斯提出,具体形式为

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

或

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}$$

上面两式称为高斯误差分布定律,亦称为误差方程。式中, σ 为标准误差, h 为精确度指数, σ 和 h 的关系为 $h = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma}$ 。

若误差按上述函数关系分布,则称为正态分布。 σ 越小,测量精度越高,分布曲线的峰越高且窄; σ 越大,分布曲线越平坦且越宽,如图 1-1-3 所示。由此可知, σ 越小,小误差占的比重越大,测量精度越高。反之,则大误差占的比重越大,测量精度越低。

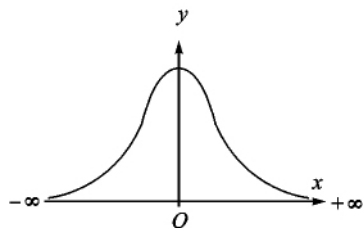


图 1-1-2 误差分布曲线

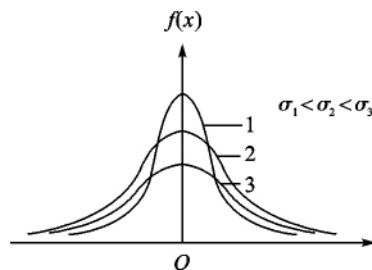


图 1-1-3 不同 σ 的误差分布曲线

1.3.2 测量集合的最佳值

在测量精度相同的情况下,测量一系列观测值 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ 所组成的测量集合,假设其平均值为 M_m ,则各次测量误差为

$$x_i = M_i - M_m, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

当采用不同的方法计算平均值时,所得到误差值不同,误差出现的概率亦不同。若选取适当的计算方法,使误差最小,而概率最大,由此计算的平均值为最佳值。根据高斯分