

高 等 学 校 教 材

基础物理实验

主编/何 捷 陈继康 金昌祚

JICHU WULI SHIYAN

南京师范大学出版社

高等学校教材

基础物理实验

主 编 何 捷 陈继康 金昌祚

南京师范大学出版社

内 容 提 要

本书从国内外高等院校基础物理实验课程所开设的一百多个课题中精选了近 50 个实验选题。内容涉及力学、热学、电磁学、光学以及近代物理学等各个领域。选题具有一定的代表性及知识覆盖面,适应大学理工科各专业基础物理实验课程的教学要求。本书可作为高等院校基础物理实验课程的教材,还可作为中学物理教师以及物理工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

基础物理实验 / 何捷, 陈继康, 金昌祚主编. —南京: 南京师范大学出版社, 2003. 8

ISBN 7-81047-925-3/O · 18

I. 基... II. ①何...②陈...③金... 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(2003)第 073330 号

书 名	基础物理实验
主 编	何 捷 陈继康 金昌祚
责任编辑	周海忠
出版发行	南京师范大学出版社
地 址	江苏省南京市宁海路 122 号(邮编:210097)
电 话	(025)3598077(传真) 3598412(营销部) 3598297(邮购部)
网 址	http://press.njnu.edu.cn
E-mail	nnuniprs@public1.ptt.js.cn
照 排	江苏兰斯印务发展有限公司
印 刷	南京大众新科技印刷厂
开 本	787×960 1/16
印 张	18.75
字 数	346 千
版 次	2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷
印 数	1—5100 册
书 号	ISBN 7-81047-925-3/O · 18
定 价	26.00 元

南京师大版图书若有印装问题请与销售商调换

前 言

基础物理实验是高等学校理、工、农、医等专业以及部分文科专业重要的基础课程,也是这些专业的学生进入大学后的第一门实践课程。该课程既与基础(普通)物理学课程有着密切的联系,又在实验的理论、方法、技能以及实验的数据处理等方面有着相对独立的体系,因此,目前国内各高校均按照教育部的要求,独立设置基础物理实验课程。基础物理实验教学不仅有助于学生真正理解和掌握物理学理论,而且是提高学生的分析问题和解决问题能力的不可缺少的实践教学环节。

随着高等学校的教学改革与科学技术的发展,该课程面临着两个问题:一是如何在课时较少的情况下保证和提高教学质量,二是课程的内容如何适应当前科学技术发展的形势。因此,一本尽可能采用最新实验技术、实验仪器及实验数据处理方法编写的内容精当的实验教材对该课程教学的重要性是不言而喻的。本书就是基于这一目的编写的。书中精选了基础物理实验近 50 个,内容涉及力学、热学、电磁学、光学以及近代物理学等各个领域,以适应大学理工科各专业的教学要求。除可作为大学基础物理实验课程的教材外,本书还可作为中学物理教师及物理工作者的参考书。

为适应基础物理实验课程的教学要求,本书的编写注重了以下几个方面:

1. 在每个实验选题的开头均增加了全面介绍有关该实验的人物概况、历史背景、现实意义、应用前景等有关人文知识的内容,以提高学生的知识面及阅读兴趣。
2. 除注重加强基础部分的要求外,大多数的实验附有提高要求供学生选做(书中以 * 号标出),以便于因材施教。
3. 尽量避免繁琐的数学推导,注重实验的物理思想、方法及操作技能的阐述,重点放在提高学生实践能力的培养上。
4. 在精选实验课题的基础上,书中尽量采用较新的实验仪器及实验方法,以适应基础物理实验教学改革的形式。
5. 在实验数据处理的内容及要求中,为了与国际惯例接轨,引入了不确定度的有关知识,以适应未来工作的需要。

参加本书编写工作的有陈继康、金昌祚、汪长明、郑新仪、陈屏屏、曾毓敏、高蓉、狄云松、黄石松、柯惟中、何捷等,各实验选题文末均有署名,不再赘述。本书

第一、三章由何捷统稿,第二章由陈继康统稿,第四章由金昌祚统稿,最后由何捷负责将全书按出版社的要求定稿。

在本书的编写过程中,我们参考了高等教育出版社、科学出版社以及有关院校出版社出版的物理实验教材(详见书末所附参考书目),在此向作者及出版社谨致谢意。

由于我们的学识水平以及教学经验的限制,书中缺点甚至错误在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

编 者

2003年3月

目 录

绪论	(1)
§ 1 物理学与物理实验	(1)
§ 2 物理实验课的目的和要求	(2)
§ 3 如何学好物理实验课程	(3)
第一章 测量的不确定度与实验数据处理方法	(5)
§ 1.1 测量的误差与不确定度	(5)
§ 1.2 常用实验数据处理方法	(13)
第二章 力学、热学实验	(23)
力学、热学实验基础知识	(23)
实验 2.1 物体密度的测量	(27)
实验 2.2 杨氏模量的测定	(31)
实验 2.3 速度和加速度的测量	(37)
实验 2.4 动量守恒定律的验证	(43)
实验 2.5 简谐振动的研究	(47)
实验 2.6 阻尼常数的测定	(50)
实验 2.7 弦振动的研究	(54)
实验 2.8 阻尼振动与受迫振动	(57)
实验 2.9 复摆	(63)
实验 2.10 用三线摆测量转动惯量	(66)
实验 2.11 声速的测定	(70)
实验 2.12 液体粘度的测定	(74)
实验 2.13 液体表面张力的测定	(77)
实验 2.14 热电偶温度系数的定标	(81)
实验 2.15 固体导热系数的测定	(84)
第三章 电磁学实验	(88)
电磁学实验基础知识	(88)
实验 3.1 电表的改装和校准	(98)
实验 3.2 信号波形的观察与测量	(101)
实验 3.3 用稳恒电流场模拟静电场	(105)

实验 3.4	电学元件的“电流—电压”特性的测定	(109)
实验 3.5	灵敏电流计	(113)
实验 3.6	用惠斯通电桥测电阻	(119)
实验 3.7	热敏电阻温度计的设计与定标	(124)
实验 3.8	用双臂电桥测量低值电阻	(127)
实验 3.9	组装电势差计	(133)
实验 3.10	霍耳效应	(138)
实验 3.11	交流电桥	(142)
实验 3.12	RLC 电路的谐振特性	(151)
实验 3.13	RLC 电路的稳态特性	(158)
实验 3.14	RLC 电路的暂态过程	(167)
实验 3.15	电子射线的电聚焦与磁聚焦	(176)
实验 3.16	法拉第电解定律和法拉第常量的测定	(182)
第四章	光学及近代物理学实验	(186)
	光学实验基础知识	(186)
实验 4.1	薄透镜焦距的测量	(195)
实验 4.2	透镜组基点的测定	(200)
实验 4.3	分光计的调节与使用	(205)
实验 4.4	用最小偏向角法测定棱镜折射率	(213)
实验 4.5	光栅常量和光波波长的测定	(216)
实验 4.6	用双棱镜测定光波波长	(220)
实验 4.7	牛顿环	(224)
实验 4.8	单缝衍射	(229)
实验 4.9	单色仪的定标	(234)
实验 4.10	光的偏振	(238)
实验 4.11	油滴法测定元电荷	(242)
实验 4.12	迈克耳孙干涉仪	(248)
实验 4.13	光电效应及普朗克常量的测量	(253)
实验 4.14	弗兰克—赫兹实验	(258)
实验 4.15	核磁共振	(265)
附录 1	实验报告举例	(275)
附录 2	中华人民共和国法定计量单位	(277)
附录 3	物理量表	(280)
表 3-1	基本物理常量	(280)

表 3-2	各种物体的密度	(281)
表 3-3	1 大气压下一些元素的熔点和沸点	(282)
表 3-4	常见固体的线胀系数 σ	(283)
表 3-5	常见固体的弹性模量	(283)
表 3-6	部分液体的表面张力系数	(284)
表 3-7	部分液体的粘度系数	(285)
表 3-8	部分金属和合金的电阻率及其温度系数	(286)
表 3-9	部分物质的折射率	(287)
表 3-10	几种纯金属的“红限”波长及脱出功	(288)
表 3-11	光在有机物中偏振面的旋转	(288)
表 3-12	1 毫米厚石英片的旋光率	(289)
表 3-13	常用光源的谱线波长	(289)
主要参考书目		(290)

绪 论

§ 1 物理学与物理实验

物理学是研究自然界基本规律的科学,它的英文词 physics 来源于希腊文,原意为自然的规律。现代观点认为物理学研究宇宙间物质存在的各种主要的基本形式,揭示物质的性质和结构以及其间相互作用、运动和转化的基本规律。按物质不同的存在形式和不同的运动形式,物理学又可分为许多的分支学科,例如基础物理学课程就是按力学、热学、电磁学、光学、原子物理学进行划分的,这只是一种粗略的划分。随着物理学的发展,新的分支学科还将不断地出现。相对于其他科学而言,物理学是一门基础的科学,表现为在其他自然及工程技术学科中都包含着物理学的过程或现象,在这些学科中用到不少物理学的概念和术语,更重要的是这些学科中的任何理论都不能和物理学的基本定律相抵触。

物理学研究的内容决定了物理学是一门以实验为基础的科学。物理学史上的许多事实均说明物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于反复的实验。从牛顿的三定律、麦克斯韦的电磁场理论、爱因斯坦的相对论、卢瑟福和玻尔的原子模型到薛定谔和海森堡的量子力学等等,物理学定律的发现和理论的形成无一不是以物理实验为依据,而又都被进一步的实验所证实的。

在牛顿时代,物理学是纯粹的实验科学,当时力学中的理论问题被认为是数学家的事。随着人类认识能力的逐步提高,20 世纪初建立了狭义和广义相对论以及量子力学等思想深刻的物理理论,逐渐地,物理学发展成为实验和理论紧密结合的科学。20 世纪后半叶,由于电子计算机的发展,既改变了理论物理的研究方式,也扩大了物理实验的涵义,从而推动了物理学研究的进一步发展。目前物理学已经成为实验物理、理论物理、计算物理三足鼎立的科学。

物理实验技术新的突破和发展,常常促成科学技术的革命,形成新的生产力。第一届诺贝尔物理学奖得主伦琴发现 X 射线后,X 射线技术很快就在医学、晶体结构分析、无损探伤等多个领域得到广泛应用;1956 年诺贝尔物理学奖得主,美国的肖克莱、布拉顿、巴丁三人在半导体研究的基础上发明了晶体管,大大缩小了广播、通信、电子计算机等电子设备的体积,极大地减小了电能消耗,为现代微电子技术的发展奠定了基础。这类实例在物理学发展的历史上不胜枚

举。物理实验的思想、方法和技术已经被普遍地应用在自然科学的各个领域和工程技术的各个部门,对于其他科学领域也有着深刻的影响。

§ 2 物理实验课的目的和要求

基础物理实验是高等学校理工科各专业(本科)开设的第一门实验基础课;从我国大部分中学的物理教学情况来看,它也是对大学生进行实验教育的入门课程,着重给学生以严格的实验基础训练。虽然物理实验与物理学讲授课程的相应内容有着紧密的联系,但在实验方法、设计思想、理论条件、仪器装置、操作技术、实验的数据处理及误差分析等方面均有其自身的指导思想和内容,因此基础物理实验应作为一门独立的课程开设。本课程的主要目的是:使学生在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能方面得到较系统的训练;理论联系实际,培养学生初步的实验能力、良好的实验习惯以及严谨的科学作风,使学生具备良好的实验素质,为后继的实验课程乃至走向社会后的工作打好基础。

本课程通过完成一定数量的力学、热学、分子物理学、电磁学、光学以及其他方面的实验,达到以下基本目的和要求:

(1)训练学生使用基本物理实验仪器和装置,包括了解其原理和精度等级,学会正确调节操作和读数等。特别要注意加强实验操作技能等实践能力的培养。

(2)学习用实验去观察、分析、研究物理现象和物理规律以及减小实验误差的方法。

(3)学习一些物理量的常用测量方法。

(4)树立实验也是学习物理知识的重要途径的思想,通过实验加深对某些物理现象和规律的认识和理解,以达到与物理学讲授课程相辅相成,相互促进的目的。

(5)在测量误差方面,要求了解随机误差的统计性质、系统误差的性质及其对实验的影响,学会直接测量和间接测量不确定度的初步计算方法,正确表达实验结果,了解由误差评价实验结果的方法。会分析某项误差对实验结果的影响,了解发现和减小系统误差的途径。要注意了解误差的物理内容,初步建立误差分析的思想。

(6)学会运用有效数字,掌握实验数据记录表格的设计以及实验数据的正确记录的方法。学会用作图法及简单情况下的一元线性回归处理数据。建立数量级的观念,会估算。

(7)在整个课程中,要着重注意培养学生的实验能力,尤其是进行实验时的

动手能力。例如:认识和正确使用仪器装置,安排实验顺序,把握主要的实验条件,判断故障等。

(8)通过整个课程,使学生初步养成良好的实验习惯。例如:在实验前了解实验的目的和特点,在实验中认真地、有条理地调节和测量,遵守操作规程,注意安全,爱护仪器,如实地、正确地做实验记录,注意观察实验中出现的现象,判断实验现象和数据的合理与否,写出整洁的实验报告等。特别要培养学生在实验的全过程中进行积极思考的习惯。

(9)在完成实验的必做内容后,教师往往还会安排一定的选做内容,这些内容往往具有一定的深度和难度,有的还具有设计性和综合性。有能力的学生应积极选做,充分利用实验学习时间,进一步提高实验能力。

§ 3 如何学好物理实验课程

为了达到上述目的和要求,学好物理实验课程,为后继课程打好基础,学生应该做到以下几点:

1. 做好实验前的准备工作。

与一般的讲授课程不同,实验课是以学生自己动手为主,完成一定的实验内容,教师只是在关键的地方给予必要的提示和指导。因此要在有限的课时内完成规定的内容,就必须在实验前做好必要的准备工作,即实验预习。这方面的主要内容有:课前仔细阅读实验教材及有关资料,了解实验目的,掌握实验的原理、方法,对仪器的性能、特点以及实验的关键所在有一个初步的印象。在此基础上写好简要的预习报告,其内容应包括:实验的原理,有关的原理图及公式的推导,测量数据的记录表格以及实验中的注意事项等。

2. 认真对待实验操作过程。

实验操作是物理实验课程学习中最重要的一环,这部分学习内容通常在课表安排的时间内在实验室完成。学生进入实验室前应了解实验室的有关规章制度并注意严格遵守,特别是对于学生实验守则应该达到能背诵的程度。

学生进入实验室后,首先,应对照实验教材检查实验仪器,看仪器是否齐全或有没有损坏,如有缺损,应及时向实验指导教师报告,请求补齐或更换。其次,按实验内容要求进行仪器的搭配和调试。仪器的组合要布局合理、清晰。仪器装备完毕不能急于测试,而应先进行安全检查,通过后方能进入测试阶段。如果对安全检查没有把握(特别是初次实验者),应在教师指导下进行安全检查。测试分两个阶段,第一阶段粗测,观察实验现象。当对整个实验过程及测试要求有了定性的了解后,再进入第二阶段的精确测量。

在实验过程中,不要期望总是一帆风顺,出现故障是常有的事。遇到这种情况,首先应把它看作是学习的好机会,然后冷静分析、沉着处理。遇到对人身安全和仪器安全没有把握的情况,应在教师的指导下分析处理故障。排除故障的过程也是培养分析问题和解决问题能力的过程,是物理实验课程学习的重要内容之一。

实验中的测量数据要及时、如实地记录在事先设计好的表格内,不允许用零散的纸片作草记,事后再誊写到数据表格里;更不允许凭回忆,作“追记”、“更改”。从实验操作到数据记录的各个环节,都要注意培养科学的作风和良好的习惯。

测试结束,应先将实验数据交教师审阅,经获准后方可将仪器设备还原归整。经教师签字认可后才能离开实验室。

3. 撰写好实验报告。

实验操作后,获得的数据应及时进行处理。其内容包括:计算、作图、误差分析,并得到最后结果。这些应归纳写成一份实验报告。实验报告应简捷、明了、工整、有见解。

实验报告内容应包括:

- (1)实验名称。
- (2)实验目的。
- (3)简要原理。它包括简要的文字叙述、主要公式、图表以及必要的说明等。
- (4)实验步骤。一般教材上已给出的不必重复,自行设计的实验则应有关键的步骤及注意事项。
- (5)数据表格及数据处理。数据表格要标明物理量和单位。数据要注意有效数字的正确读取和记录。数据处理包括:计算、作出图线、误差分析,并得出实验结果。
- (6)讨论或作业。实验讨论要有感而发,不要求面面俱到,但切忌泛泛而谈。作业则可根据教师的安排而定。

实验报告的具体格式可参考本书的附录。

第一章 测量的不确定度与实验数据处理方法

§ 1.1 测量的误差与不确定度

一、测量及测量的分类

1. 测量和测量值的单位。

测量是物理实验的重要工作,研究物理现象、发现物理规律、验证物理原理都离不开测量。测量的实质是将待测的物理量与相应的已知物理量做定量的比较,用已知物理量来表示待测的物理量,这些已知的物理量被称为计量单位。本来,计量单位的选择具有一定的任意性。中国历史上,在秦始皇统一六国前,各诸侯国均有自己的度量(计量)单位;秦始皇统一六国后,为便于商贸交流,废除了各诸侯国的度量单位,建立起了全国统一的度量衡,推动了社会的进步。当然,历史上世界各国对于同一物理量的计量单位就更多了,就长度而言,就有码、英尺、市尺、米等。为了便于国际贸易及科学文化的交流,世界性计量单位的统一就成为众望所归,因此国际计量大会于1960年制定了国际单位制,简称SI。

国际单位制中有七个基本单位,它们是长度单位米(m),质量单位千克(kg),时间单位秒(s),电流单位安培(A),热力学温度单位开尔文(K),物质的量单位摩尔(mol)以及发光强度单位坎德拉(cd)。还有两个辅助单位,即平面角单位弧度(rad)、立体角单位球面度(sr)。其他物理量的单位均可根据定义的方程式由国际单位制的基本单位和辅助单位导出。国际单位制中还包含一些具有专门名称的导出单位,如频率单位赫兹(Hz),力与重力单位牛顿(N)等,详见本书附录。

测量时,待测物理量与已知物理量比较得到的结果称为测量值。例如,某一物体的长度是单位米的1.645倍,则该物体长度的测量值为1.645 m。由此可见,一个测量值应包含数值及单位。

2. 测量的分类。

测量有不同的分类方法,从获得测量结果的手段来分,测量可分为直接测量和间接测量。可以通过相应的测量仪器直接得到测量结果的测量称为直接测量。例如,用米尺测物体的长度,用天平和砝码测物体的质量,用电桥或欧姆表测导体的电阻等,这些都是直接测量。间接测量是指利用直接测得量与被测量

之间已知的函数关系,通过计算而得到被测量值的方法。例如,为了测定物体的密度,先测出物体的质量 m 和体积 V ,然后用公式 $\rho=m/V$ 计算出密度。再如,要测量导体的电阻 R ,可用伏特表测得导体两端的电压 U ,用电流表测得通过该导体的电流 I ,然后用公式 $R=U/I$ 计算出导体的电阻。类似这样的测量方法都是间接测量。从上面所举的测量导体电阻的例子可以看出,有的物理量既可以直接测量,也可以间接测量,这取决于使用的仪器和实验的方法。随着科学技术的进步,用于直接测量的仪器越来越多,但在物理实验中,相当多的物理量仍需间接测量。

从测量条件是否相同的角度来看,测量又可分为等精度测量与非等精度测量。对同一被测量,在相同的实验条件下(指同一实验仪器,同一实验方法,同一实验环境,同一实验者等),进行多次重复测量,各次测得结果又有所不同。对于这类测量,没有理由能说其中某一次测量比另一次测量更精确,只能认为每次测量的精确程度是相同的,这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量。反之,在多次重复测量中,只要上述诸实验条件中任何一个发生了变化,那么,这种测量便是非等精度测量。非等精度测量的情况比较复杂,限于课程的教学时数及教学要求,本教材只讨论等精度测量的数据处理问题。

3. 测量值的有效数字。

正确记录测量值是测量的最基本要求,对于标有刻度的量具及实验仪器,测量值应记录能够读到的可靠数字再加上最小刻度以下的一位估计数字,这就是通常所说的有效数字。例如,用米尺测量一张 A4 纸的边长,应能估读到最小刻度(1 mm)的十分之一,所以测量结果应保留到零点几毫米。有效数字末位的最小间隔称位修约间隔,一般取 10 的整数次幂,即测量单位的 $10^{\pm n}$ 倍。有些仪器的最小刻度间隔并不是测量单位的 $10^{\pm n}$ 倍,这给测量结果有效数字的一致带来了困难。例如,一只电压表的最小刻度间隔为 0.2 V 或 0.5 V,那么 0.1 V 就是估读数了,如果只保留到这一位,则估计数字与可靠数字保留的位数就相同了,从而产生矛盾。对于这种情况,可以采用其他修约间隔,根据国家标准《GB8170—87》,修约间隔还可取 $10^{\pm n}$ 的 0.2 或 0.5 倍,这样矛盾就解决了。对于上述例子,可以根据电表指针的宽窄及刻度的疏密确定修约间隔,选取 0.02 V 或 0.05 V 为估读的最小间隔,但不论如何选取,末位应保留到零点零几伏特。

用数字式仪表测量,凡是能稳定显示的数字都应记录,其数值的位数就是测量值的有效数字。如果测量值最末位或末两位数字变化不定,则应记录稳定的数值加上一位正在显示的数值。如果有两位以上的数字都变化不定,则应考虑选择更合适的量程或更合适的仪器。

二、测量的误差与不确定度

凡是被测量均有客观存在的实际值,称之为真值。测量值 x 与真值 μ 之差被定义为误差。数学表达式为:

$$\delta = x - \mu \quad (1.1-1)$$

无数事实证明,测量结果都有误差,且误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。因为,任何测量仪器、测量方法都不可能绝对正确,测量环境不可能绝对稳定,测量者的观察能力和分辨能力也不可能绝对精细和严密,这就使得测量过程中必然伴随有误差产生。因此,分析测量中可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,这是科学实验中不可缺少的重要工作。为此,了解和掌握误差的有关知识,学会用有关的误差理论正确分析和处理实验中的测量数据,是学习基础物理实验课程的重要内容之一。

1. 测量的正确度、精密度和精确度。

对同一物理量进行多次的等精度测量,其测量结果也会不同。用枪打靶就是一个很好的例子。瞄准就好比是测量,图 1.1-1 是不同的射击结果。其中图 1.1-1(a)显示弹孔的分布比较分散,但基本上对称于靶心,这说明正确度较高而精密度不足。图 1.1-1(b)显示弹孔的分布比较集中,但明显整体偏离靶心,这种情况我们称为精密度较高而正确度不足。图 1.1-1(c)则显示正确度和精密度均很高,这在测量上称为精确度高。在误差分析时正确度的高低对应于测量的系统误差的大小;精密度的高低对应于测量的随机误差的大小;而精确度的高低则对应于测量结果系统误差和随机误差的综合反映。

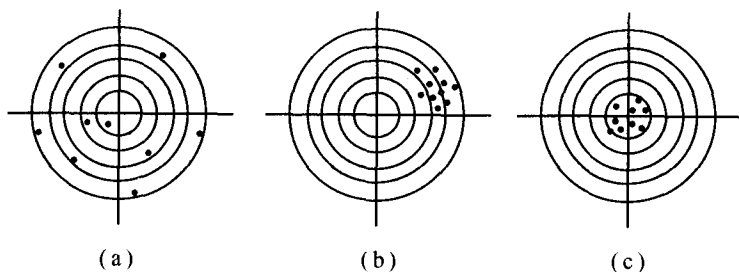


图 1.1-1

2. 测量的系统误差。

图 1.1-1(b)所显示的结果,可能是枪的准星不正所引起的。与此类似的情况常见于实际的测量中。例如,米尺本身刻度划分得不准或因环境温度的变化导致米尺本身长度的伸缩带来的测量误差;仪表指针在测量前没有调准到零位

而带来的测量误差;用伏安法测量电阻,由于没有考虑电流表或电压表内阻带来的测量误差等等,这种类型的误差称之为系统误差。产生系统误差的原因,大致有以下几个方面:

(1)仪器误差。由于仪器本身的缺陷或未按规定条件使用仪器而造成的误差。如上面举例中米尺和电表没有校零则属于这一类型。

(2)理论或方法的误差。由于测量时未能达到公式理想化的条件或实验方法不完善而带来的误差。例如,用单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 测量重力加速度时摆角过大;用伏安法测导体电阻时未考虑到电表内阻的影响等。

(3)环境误差。外界环境,如温度、湿度、电场、磁场和大气压强等因素的影响而带来的误差。

(4)个人误差。这是由于观测者本身的感官,特别是眼睛或其他器官的不完善以及心理因素而导致的习惯性误差。这种误差,往往是因人而异的。

系统误差产生的原因需要对具体的实验进行具体的分析,并没有一个统一的方法。消除或减小系统误差的主要途径有:

(1)通过对测量原理与方法的比较和选择,尽可能选择系统误差小的实验方案。

(2)校准或调整实验仪器、改进实验装置和实验方法。

(3)分析系统误差的来源,推导出修正公式,对测量结果进行理论上的修正。

当然发现和减小实验中的系统误差并非是轻而易举的事。这需要实验者深入了解实验的原理、方法与步骤,熟悉使用仪器的特点和性能,还要在实验中不断积累理论知识和实践经验,才能找出产生系统误差的原因以及消除、减小系统误差的方法。

3. 随机误差。

我们再来看图 1.1-1,即使枪经过校准,发射的子弹也不可能总是从一个弹孔中穿过。每次发射的子弹击中的位置具有随机性,这就是射击的随机误差。在测量中,随机误差与测量的精密度紧密相关,精密度高则随机误差小,精密度低则随机误差大。

随机误差是在对同一被测量进行多次测量过程中,绝对值与符号都以难以预知的方式变化着的误差。这种误差是由于实验中各种因素的微小变化而引起的,如温度、气流、光照强度、电磁场的变化引起的环境变化;观测者在判断、估计读数上的偏差等使得多次测量值在某一数值附近有涨落。就某一次测量而言,这种涨落完全是随机的,其大小和方向都是难以预测的。但对某个量进行足够多次的测量,随机误差总是按着一定的统计规律分布。

大量的测量实践表明,多数的随机误差的分布具有如下特点:

(1) 绝对值相同的随机误差出现的概率相同,即它们的分布具有对称性。

(2) 当测量次数 n 趋向于无穷大时,各测量值随机误差的和趋向于零。其数学表达式为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (1.1-2)$$

式中 Δx_i 为第 i 次测量的随机误差。这说明它们的分布具有抵偿性。

(3) 绝对值小的随机误差出现的概率大,绝对值大的随机误差出现的概率小,即分布具有单峰性。

(4) 绝对值很大的随机误差出现的概率趋向于零,说明其分布是有界的。

具有上述特点的随机误差遵循高斯分布,其标准化的表达式为:

$$p(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/2\sigma^2} \quad (1.1-3)$$

式中 δ 为测量的误差, $p(\delta)$ 称为误差的概率密度函数,其分布曲线如图 1.1-2 所示, σ 为曲线上拐点处的横坐标,是表征测量值分散性的重要参量,称为高斯分布的标准偏差。

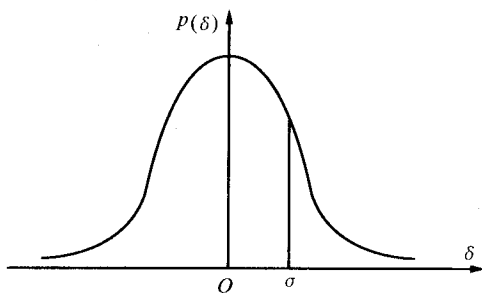


图 1.1-2

概率密度函数 $p(\delta)$ 对随机误差区间 $[-Z, Z]$ 的积分为随机误差在该区间出现的概率 $P(Z)$, 表达式为

$$P(Z) = \int_{-Z}^Z p(\delta) d\delta \quad (1.1-4)$$

在图线上表示为 δ 轴上区间 $[-Z, Z]$ 与曲线围成的面积。如图 1.1-3 所示。

由图中可见,区间 $[-Z, Z]$ 不同,测量值的随机误差出现的概率也不同。若 $|Z| = \sigma$, 则置信概率 P_Z 为 0.683; $|Z| = 2\sigma$, P_Z 为 0.954; $|Z| = 3\sigma$, P_Z 为 0.997。置信概率 P_Z 又称为置信度,区间 $\pm Z$ 又称为置信限或置信区间。

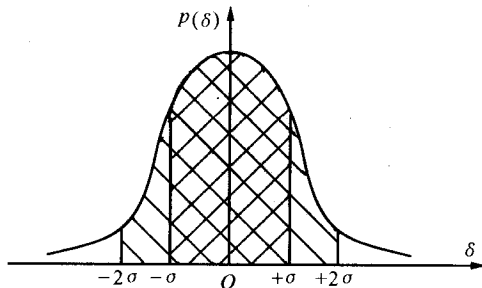


图 1.1-3

事实上,高斯分布只是随机误差分布的一种,常见的误差分布还有 t 分布、均匀分布、 χ^2 分布等。

由于随机误差的上述特点,减小随机误差的有效方法是进行多次测量,用统