

大学物理实验

赵述哲 尹树明 编

University Physics Experiment



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

大学物理实验

赵述哲 尹树明 编



化学工业出版社

·北京·

本书主要包括五章,第一章为测量、误差及数据处理;第二章至第五章包括力学、热学、电磁学、光学、近代物理及综合性实验等的实验项目。这些比较成熟的实验项目,能使学生在基本实验方法、基本实验技术和常用仪器使用方面得到较为全面而系统的训练。

本书适合作为高等工科院校物理实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/赵述哲,尹树明编. —北京:化学工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-122-26033-8

I. ①大… II. ①赵…②尹… 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 (2016) 第 010831 号

责任编辑:闫敏石磊

文字编辑:王新辉

责任校对:宋夏

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张12 字数302千字 2016年2月北京第1版第1次印刷

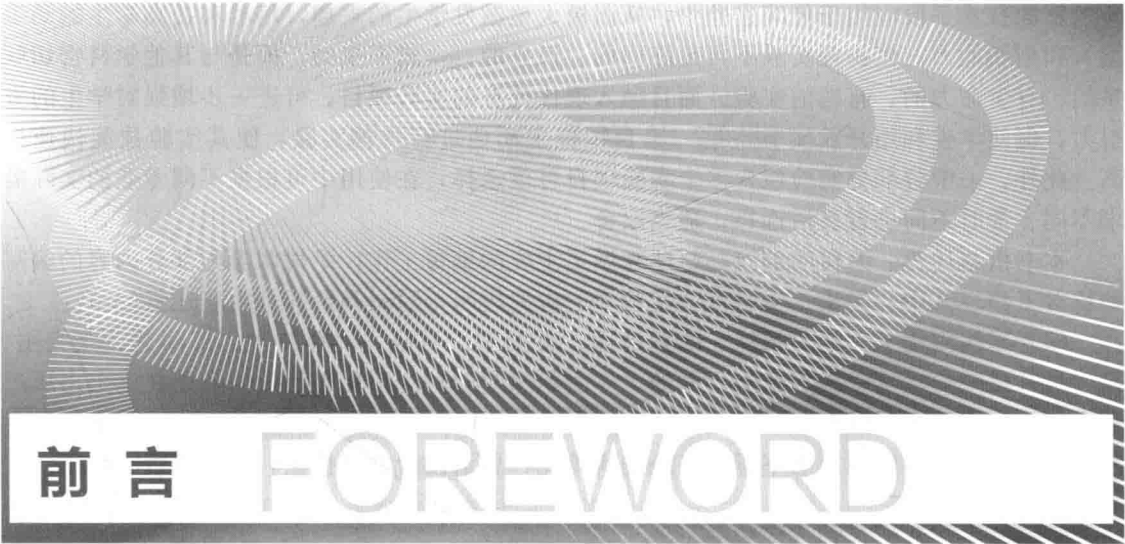
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

在我国由工程教育大国向工程教育强国迈进的过程中,要求造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才。因此,面向社会需求培养人才,全面提高工程教育人才培养质量成为高等教育的重要内容。

物理学是理工科院校的基础学科,物理实验则是物理学科必不可少的实践环节。大学物理实验为学生提供了一个将所学基本理论应用于实践的平台,便于学生在实践中检验物理学基本理论的正确性及局限性,加深对理论的理解,也有利于应用型人才的培养。当前,信息科学、材料科学、生命科学及空间科学等各学科之间的联系进一步加强,各学科之间的交叉渗透,已经成为主要的发展趋势。因此,大学物理实验教学也要与时俱进。

本书是结合普通理工科院校的特点,对使用多年的大学物理实验讲义进行大量修改编写而成的。本书编者由长期致力于大学物理实验教学、具有丰富经验的教师担任。大学物理实验讲义是在教学实践中日积月累、逐步完善的。在实际中,实验内容的确定、实验项目的建设、实验讲义的编写及实验教学的完成,都是在实验教学第一线辛勤耕耘的老师共同努力的结果。所以,本书的完成源于教学实践。

本书在课程体系上按照普通物理(力学、热学、电磁学、光学及近代和综合性物理实验)顺序编排,保持了大学物理实验与普通物理教学的同步性,使学生通过实验环节加强对理论知识的理解。每一部分实验项目的编排在难度上循序渐进,由浅入深。总体上以基础性实验为主,辅以一定量的近代及综合性实验。其中,物理量的测量、误差、不确定度的估算、有效数字的运算及实验数据处理方法等基础性的知识介绍得比较详尽,便于各层次的学生掌握这些基础知识。此外,多数实验的末尾附以该实验不确定度估算的参考公式,以便学生检查其不确定度的估算公式推导是否正确,有利于学生正确处理实验数据,书写规范的实验报告。在内容上保留了电表改装、线式电位差计等传统的实验项目,既可以充分锻炼学生的电路连接能力这一基本技能,又培养学生分析问题和解决问题的能力。在内容的安排上,既大力加强基础,特别注重实验原理的介绍,又在实验环节中适当融入现代化的“元素”。在“三线摆测量转动惯量”、“导热系数测定”等实验中,用智能计数、计时取代了传统的人工计数、计时过程。同时,倡导学生开动脑筋,大胆尝试,对传统的实验进行适当的改进,以便逐步将现代的一些科技成果应用于传统的物理实验的记录、观察等过程中,或将交叉学

科的新的技术手段应用于传统实验中，从而极大地激发学生的兴趣，培养和提高学生的动手能力和创新能力，使物理实验不再是陈旧的、孤立的、一成不变的，而是与其他学科密切联系的、有生命力的、有趣的实验。而且融入现代气息的实验项目，可进一步增强对学生的吸引力，促使学生利用开放实验室这一平台积极主动地进行物理实验，使其实验技能快速提高。此外，书中各部分实验包含多个实验项目可供选择，在使用中可根据不同专业的实际需求不同、学时不同进行灵活选择，适当取舍。

本书由赵述哲、尹树明编写。赵述哲做了主要的编写工作，尹树明参与部分内容的编写和校对工作。其中，绪论、实验八、实验十七由尹树明编写，其余部分由赵述哲编写。

编者对沈阳化工大学的杨坤、欧阳淑丽、钟国宁、石晓飞、孙树生、王丽芝、张宪刚、葛崇员、贾维烨、李青云等老师所做的工作表示感谢；对沈阳化工大学教务处在本书出版过程中的大力支持表示感谢。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时校正。

编者

2015 年 12 月于沈阳

物理实验课学生守则

1. 学生应在课表规定时间内进行实验，迟到 10min 以上，以缺课处理，不得正常参加本次实验。
2. 学生在每次实验前对排定要做的实验进行预习，掌握实验原理，明确预习任务，写好预习报告。经指导教师检查后方可参加本次实验。
3. 学生在做实验之前，应先检查自己所要使用的仪器设备是否缺少或损坏。若发现问题要及时向指导教师提出，否则责任自负。
4. 实验时要严肃认真，实事求是地记录数据，不得抄袭他人的实验数据。实验室内要保持安静，不准吸烟、吃零食和做一切与实验无关的事情。
5. 实验记录必须经指导教师审核。实验数据合格者由指导教师签字，不合格者必须重做。
6. 实验结束后要把仪器物品整理放齐，并向指导教师报告，经指导教师检查无缺损后方可离开实验室。如果发现损坏仪器设备，要及时登记并根据具体情况按规定酌情赔偿。
7. 全班实验结束后，要安排值日生清扫实验室。
8. 课后认真独立完成实验报告，按时将实验报告与原始实验数据一并交指导教师批阅。
9. 学生要以学为主，不得无故或借故缺课。因故缺课必须履行请假手续。缺做一次实验，本课程以不及格处理。



目录 CONTENTS

绪论 /

一、物理实验课的地位和作用	1
二、物理实验课的任务	1
三、物理实验课的基本程序	2

第一章 测量、误差及数据处理 /

第一节 物理量的测量、误差与不确定度的基本知识	4
一、物理量的测量	4
二、测量值的确定	5
三、误差的定义	6
四、误差的分类	6
五、不确定度的概念及结果表示	9
第二节 不确定度的估算方法	9
一、测量结果的正确度、精密度、准确度、精度和不确定度	9
二、直接测量不确定度的估算	10
三、间接测量不确定度的估算	11
四、测量值相对于其公认值（或理论值）的百分差	13
第三节 有效数字及其运算	13
一、有效数字的定义	13
二、直接测量有效数字的读取	14
三、间接测量有效数字的运算	14
第四节 数据处理的基本方法	15
一、列表法	15
二、图示法	16
三、逐差法	18
四、最小二乘法	18

第二章 力学、热学实验

第一节 力学、热学实验常用仪器	23
一、长度测量仪器	23
二、质量测量仪器——物理天平	26
三、时间测量器具	27
四、温度测量器具	29
第二节 力学、热学实验	31
实验1 长度的测量	31
实验2 物理密度的测定	33
实验3 气垫导轨上测滑块的速度和加速度——验证牛顿第一、第二定律	35
实验4 用自由落体测定重力加速度	39
实验5 转动惯量的测定	40
实验6 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	45
实验7 用电流量热器法测定液体比热	49
实验8 导热系数的测量	51
实验9 固体的线热膨胀系数的测量	56

第三章 电磁学实验

第一节 电磁学实验常用仪器介绍	60
一、电源	60
二、电阻	61
三、电表	62
第二节 仪器布置和线路连接	64
第三节 电磁学实验	65
实验10 欧姆定律应用	65
实验11 电表改装与校准	69
实验12 用惠斯登电桥测电阻	72
实验13 模拟静电场	76
实验14 电位差计	79
实验15 灵敏电流计研究	84
实验16 冲击法测量直螺线管内部磁场	90
实验17 霍尔效应的应用	93
实验18 示波器的使用	102

第四章 光学实验

第一节 光学实验的一般操作原则和实验室常用光源	107
一、光学实验的一般操作原则	107
二、实验室常用光源	108
第二节 光学实验	109
实验19 分光仪的调整和三棱镜折射率的测定	109

实验 20	用牛顿环测量透镜的曲率半径	114
实验 21	用光栅测量光波的波长	116
实验 22	照相技术	118

第五章 近代物理及综合性实验

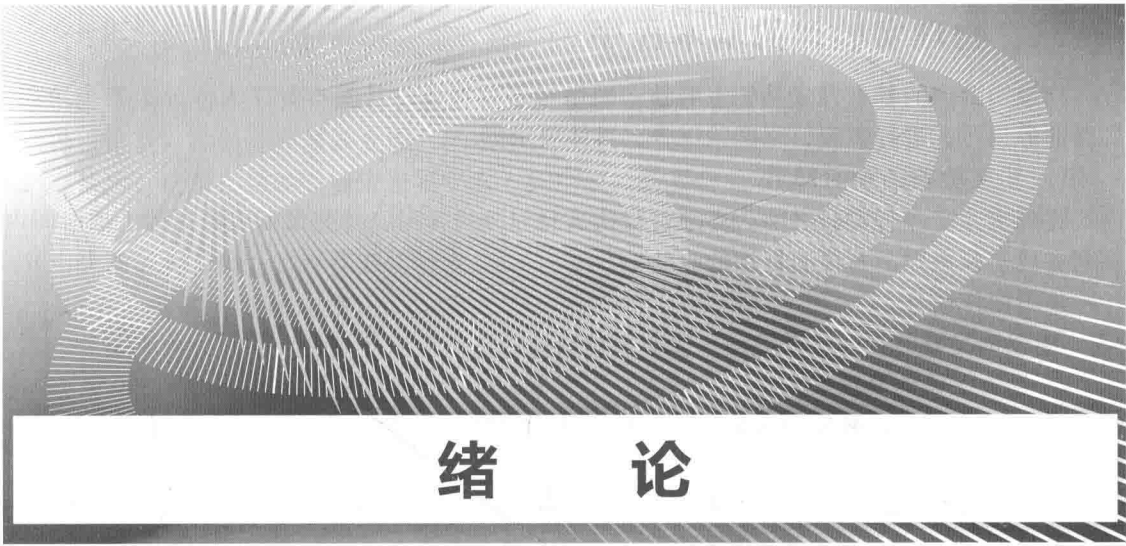
实验 23	声速的测定	125
实验 24	迈克尔逊干涉仪	129
实验 25	全息照相技术	134
实验 26	电子自旋共振	136

附录

附录 1	气垫导轨简介	140
附录 2	重力加速度	142
附录 3	冲击电流计	143
附录 4	示波管的基本原理	144
附录 5	SB-10 示波器使用说明	145
附录 6	XFD-6 低频信号发生器	148
附录 7	最小偏向角与折射率的关系	148
附录 8	照相技术的有关资料	149
附录 9	YB4320 系列双踪四迹示波器	152
附录 10	YB1600 系列函数信号发生器使用说明	164
附录 11	YB-3000 型等精密度智能频率计使用说明	168
附录 12	DH4512 型霍尔效应实验仪使用说明	172
附录 13	YBF-3 型导热系数测试仪使用说明	176

附表

附表 1	物理学基本常数	179
附表 2	国际单位制的基本单位	179
附表 3	国际单位制的辅助单位	180
附表 4	国际单位制中具有专门名称的导出单位	180
附表 5	国际制词头	180
附表 6	在 20℃ 时常用固体和液体的密度	181
附表 7	在标准大气压下不同温度水的密度	181
附表 8	在 20℃ 时某些金属的弹性模量 (杨氏模量)	181
附表 9	某些液体的比热	182
附表 10	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	182
附表 11	不同金属或合金与铂 (化学纯) 构成热电偶的热电动势 (热端在 100℃, 冷端在 0℃ 时)	183
附表 12	在常温下某些物质相对于空气的光的折射率	183
附表 13	常用光源的谱线波长表	183



绪 论

一、物理实验课的地位和作用

工科大学的物理实验课是一门极为重要的基础实验课程,一方面就物理学而言,要真正学好物理课程,就必须重视理论与实践的结合。大学物理实验课的主要任务不在于对物理理论的验证,而是为了对大学生进行系统的实验理论、实验技能和科学研究能力的培养训练。因而它已经成为一门独立的、必修的基础课程,不再是物理理论课的一部分。它们之间没有“同步”的直接关系,当然它们之间还是相互联系,并在一定程度上互相配合的。另外,就实验科学而言,它是学生进入大学后进行系统实验技能训练的开端,物理实验的知识、方法、习惯和技能是学生进行后续实验训练课的基础。学生通过物理实验,不但学习科学实验的基本原理、基本方法,还接受科学作风、实验技能的严格培训,为科学实验能力打下牢固的基础。在此基础上,再经过技术的、专业的实验训练,使学生成为具有较为深广的理论知识和较强的近代科学实验能力的大学毕业生,真正成为受当代社会欢迎的科技人才。

二、物理实验课的任务

(1) 通过对实验现象分析和对物理量的测量,使学生逐步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技术;学习如何将所掌握的物理理论与科学实践相结合的科学研究方法;加深对物理学原理的认识与理解。

(2) 培养与提高学生从事科学实验应具有素养;培养学生严肃认真一丝不苟的工作态度;培养学生理论联系实际、实事求是的科学态度,遵守纪律、爱护公共财产的优良品德;培养学生在实验过程中相互协作、共同探索的协作心理。在科技工作中,要有所发现、有所发明、有所创造、有所前进,缺乏这些素养是很难成功的。

(3) 培养与提高学生科学实验能力,主要包括:自学能力、动手实践能力、思维研究能力、书写表达能力和简单的实验设计能力。

以上三个任务,只有在学生主动、自觉的学习中才能完全达到。每个学生都应认识到:在实验中,不仅要完成实验任务,更重要的是获得实验本领,培养从事科学研究的能力。只有这样,才能适应科学技术飞速发展的需要,担负起建设现代化社会主义祖国的重任。

三、物理实验课的基本程序

物理实验课的基本方式是学生的独立操作与书写报告。其基本程序大体分为三个阶段：实验前的预习、进行实验、写实验报告。具体要求如下。

(一) 实验前的预习环节

在到实验室进行实验之前，必须进行认真且充分的预习，才能保证在短短的上课时间内顺利完成实验操作，并得到较多的收获。

预习的作用是：

① 明确实验的目的、任务；

② 搞清实验的原理；

③ 初步了解实验装置与实验步骤，拟订实验操作与观测记录的计划，做好回答预习思考题的准备。

为此，首先要仔细阅读，尽量弄懂与该实验有关的实验教材中的内容（必要时还应读一些参考资料），在此基础上写好预习报告。其内容包括：

① 实验名称；

② 实验目的；

③ 实验原理或实验内容（要求简要列出主要的计算公式、电路图、光路图等）；

④ 列出有特色的主要仪器设备；

⑤ 关键的实验步骤（要求突出关键性的调整方法和测量技巧，其他内容只要求简单列出）；

⑥ 在实验记录栏内画好记录的表格。

总之，预习报告要图文并茂、内容全面、简明扼要。

(二) 实验环节

学生应带着实验预习报告与其他资料提前进入实验室，并将预习报告放在桌上供教师检查。实验课进行的程序及要求大致如下。

(1) 检查预习情况 教师在实验课开始时通过提问和逐个审查，检查学生的预习情况。

(2) 教师作指导性讲解 学生应注意听讲，做好记录。

(3) 实验操作 实验前要熟悉仪器，了解仪器的工作原理和用法，然后将仪器安装调整好。在实验过程中，应认真操作，注意观察，仔细进行分析和判断，正确地、实事求是地读取和记录测量数据。如果不合理或有显著错误，应加以分析或重作。

(4) 观测与记录 实验中对物理现象的观察与对物理量的测量记录通常是实验操作的中心任务，也是实验报告的主要依据，因而必须予以高度重视。

① 观察测量：观察测量要求及时、系统、准确、细致。许多物理现象与物理量是在动态过程中反映出来的，因而要抓住本质，测量要精确定量，切忌马虎、粗糙。对每次测量结果要进行及时的初步分析判断。当发现不够理想时，应找出原因，并适当安排重复观测。

② 记录：记录要求完整、清晰，并一律写在记录栏的表格内，其内容包括以下方面。

a. 实验的条件。例如：实验时间、地点、组别、同组人、室温、气压、湿度……

b. 仪器、设备、元器件的规格、精度、已知参数等。实验中经教师同意更换仪器、物品时，应重新登载有关数据。

c. 测量的数据。要力求清晰、准确地记载在事先设计的记录表格内。如若表格考虑不周，也应很有规律地顺次记载，并马上注明这是哪一个物理量、使用的物理单位及测量序号等。切忌乱记，以免事后分辨不清。记载数据要严肃认真，来不得半点马虎。要尽可能地反

映测量的最高精确程度，不允许无谓地丢失有效数字位数。字迹要工整，尤其是数字要分明。

d. 物理现象与物理过程。记载实验中所观察记录的一切现象与过程（包括图形），力求准确（定量）描述。提倡勤观察、善思考、多记录的实验风格。

最后，记录必须经教师审查签字后方能生效。有不合要求处，应予以改正乃至重做。

(5) 清理 操作、记录经教师签字认为合格后，进行实验仪器的清理，检查其完好程度并向教师报告，经允许再离开实验室。

(三) 写实验报告环节

实验报告是实验工作的总结，也是实验成果的书面反映。报告中应有清晰的思路、齐全的数据和图表以及科学的结论。其内容包括以下几方面。

(1) 实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器设备、实验步骤，这些都是预习报告的内容，已要求在实验课前写好，但在实验课后应根据实际情况进行修正。

(2) 测试记录。实验记录纸上的现场记录是（必须保留的）原始凭证。课后，不允许再作任何修改，也不允许将它作为计算表格。实验报告纸上必须重新列出计算表格，将所需的数据列入其中。

(3) 对实验数据进行处理。这是实验报告的重点，要求写出数据处理的主要过程、图线、结果（解析表达式或其他论断）。

(4) 对实验误差进行分析，估算实验结果的不确定度。鼓励学生讨论引起误差的主要原因，提出切实可行的减少误差、提高实验水平的措施。

(5) 回答每次实验所留的作业题，其解答要写在实验报告的末尾。

最后，实验报告连同原始实验记录一并交教师审阅。

第一章 测量、误差及数据处理

第一节 物理量的测量、误差与不确定度的基本知识

一、物理量的测量

进行物理实验时，不仅要定性观察物理变化的过程，而且还要定量测定物理量的大小。为了进行测量，必须规定一些标准单位，如选定质量的单位为千克（kg），长度的单位为米（m），时间的单位为秒（s），电流强度的单位为安培（A）等。所谓测量，就是将待测量与这些选作为标准单位的物理量进行比较，其倍数即为物理量的测量值。一般用米尺测长度，用天平称质量，用停表测时间，用电表测电压、电流，用温度计测温度等，像这样可以用测量器具直接测出物理量量值的测量称为直接测量，相应的物理量称为直接测量量。但对于大多数物理量来说，没有直接读数的仪器，只能用间接的办法进行测量。例如：测量圆柱形铜棒的密度时，可以用米尺量出它的高（ h ）和直径（ d ），算出体积 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ ，然后用天平称出它的质量（ M ），则圆柱形铜棒的密度 $\rho = \frac{M}{V} = 4M/\pi d^2 h$ 。像这样由直接测得的物理量经过函数运算间接算出该物理量的量值；该物理量的测量过程称为间接测量，相应的物理量称为间接测量量。如果设 $x, y \cdots$ 为直接测量值， W 为由它们所确定的间接测量值，它们之间的函数关系表达式为：

$$W = f(x, y \cdots) \quad (1-1)$$

可见，直接测量是获得一切物理量的基础，间接测量依赖于直接测量。但是，并非采取基本单位的物理量在一切情况下都必然是直接测量值，而用导出单位的物理量就必然是间接测量值。在实践中，它取决于所使用的测量工具，还与测量方法有关。例如：用米尺无法直接测得（图 1-1）

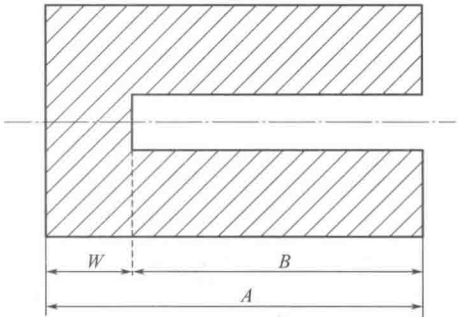


图 1-1 直接与间接测量

中所示的尺寸 W ，它只能由 $W=A-B$ 获得。这时，(厚度) 尺寸 W 就成了间接测量值。另外，如果用速率表测汽车行驶的速率，这时所测得的速率就是直接测量值。

二、测量值的确定

1. 直接测量

先给一个最简单的测量：用米尺(最小分度值为 1mm)测量钢棒的长度(图 1-2)。将尺的始端对准钢棒的一端，钢棒的另一端所对米尺上的刻度数值即为棒长。从图 1-2 中看到棒的长度在 3.2~3.3cm 之间。但究竟是多少呢？不同的人可以读出不同的数，如 3.26cm、3.27cm、3.28cm 等。这三个数中最后一位数是估计出来的，称为存疑数字。实际上，我们很难判断哪个读数更准确，因而也就不能确定钢棒长度的真值。所谓真值，就是指反映物质自身各种各样特性的物理量所具有的客观的真实数值。而测量的目的就是力图得到真值。

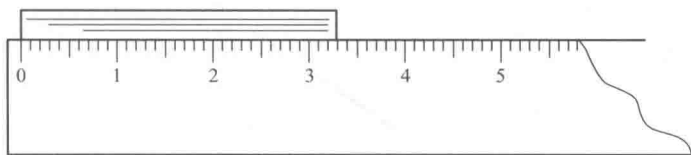


图 1-2 直接测量值的获得

为了提高测量的可靠程度，常常对同一物理量进行多次测量。如对于物理量 x ，各次测量值为 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)。通常，各次测量值并不完全一致，而且也不可能判断出哪一次的测量值恰好是真值。那么，如何确定测量值呢？一般在测量没有错误及符合统计规律的情况下，可以“期望”诸测量值的算术平均值：

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

算术平均值是较为接近真值 x 的，因而把它叫做真值 x 的最佳近似值，即用 $\bar{x}$ 代表 x 比采用任何一次测量值都更准确。

如果量具有未消除的零点偏差 δ_0 ，则应予以扣除，即令：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \delta_0) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) - \delta_0 \quad (1-3)$$

2. 间接测量

对间接测量值 $W=f(x, y, \dots)$ ，它由诸直接测量值 $x, y, \dots$ 所确定。当多次测量时，有两种可能情况：①各直接测量值是分别独立进行测量的，且测量条件变化幅度很小；②每次都是在差不多同时或同一条件下对各量测量一遍，而各次测量之间又都是相互独立的。严格说来，在这两种不同的情况下，计算间接测量算术平均值的方法是不同的。

对于情况①，各直接测量值 $x, y, \dots$ 是相互独立测量的。首先分别求出它们各自的算术平均值 $\bar{x}, \bar{y}, \dots$ ，然后将其代入函数关系式(1-1)中求得 W 的测量值：

$$\bar{W} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots) \quad (1-4)$$

对于情况②，每次测量得一组 $x_i, y_i, \dots$ ($i=1, 2, \dots, k$)，相应地 $W_i=f(x_i, y_i, \dots)$ ，而以其多次测量的算术平均值 $\bar{W}$ 作为测量值。

$$\bar{W} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k W_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f(x_i, y_i, \dots) \quad (1-5)$$

通常，当测量条件没有大幅度变化时，两种计算方法所得结果是相近的。所以，除非测量条件变化幅度过大时必须采用式(1-5)外，不论何种情况，都可以用较为简便的式(1-4)计算。

三、误差的定义

测量误差 ΔN 为测量值 N 与其真值 N_0 之差，即：

$$\Delta N = N - N_0 \tag{1-6}$$

真值 N_0 一般未知，因而误差不能确定，它只具有理论上的意义。

随着科学水平的提高和人们经验、技巧、知识的不断丰富，误差被控制得愈来愈小，但由于理论或方法、测量器具、环境影响以及人的分辨能力的限制，绝不会使误差降为零，这已为大量实践所证实，也为一切从事科学实验的人们所公认。实验结果都存在误差，误差自始至终地存在于一切科学实验的整个过程中，这条结论称为误差公理。

四、误差的分类

按照误差的性质，误差可分为三类，不过在具体实验中，它们往往是混在一起出现的。

1. 系统误差（非统计性误差）

在相同条件下，多次重复测量同一物理量所对应的各次测量误差，如果其符号和大小保持不变或随着条件的改变而有规律地发生变化，这样的误差称为系统误差。这样的误差都不符合统计学中随机函数的规律，亦称非统计性误差。

系统误差的特征是具有确定性。产生系统误差的原因常常是：①设备误差。如仪器的固有缺陷，如制造偏差、刻度不准、安装不正、零点未调准、元件不标准、受过损伤等。②理论方法误差。例如，测量方法的不当或偏差，包括间接测量中函数关系式（计算公式）的简化（如忽略电表内阻或电压表分流等）。③环境误差。如测量环境条件温度、湿度、气压、电源电压、地磁等的改变。④个人误差。如观测者操作方法欠妥；升温、降温过快，不待指针停稳就读数；千分尺螺旋杆拧得过紧等。⑤读数偏差。如斜视读数、一律抹去尾数等。

系统误差按其掌握程度分为以下两种。

① 可定系差：能够确定其数值的系统误差。一经发现，要从结果中修正掉（即：测量值=示值+修正值）。

② 未定系差：无法确定其数值的系统误差。例如：仪表的基本允许误差主要属于未定系统误差。

系统误差按其是否会发生变化分为以下两种。

① 定值系差：指符号与大小不变的系统误差。例如：千分尺密合时就已有了一个微小示数，则每次重复测得的值都会出现同样的偏离，称为零点误差。

② 变值系差：指测量条件改变时，按某种规律变化的系统误差。这种变化，有的可能随着时间变化，有的可能随着位置变化。例如：分光计刻度盘中心 O 与望远镜转轴 O' 如有偏心差 e ，如图 1-3 所示，则当转盘角位置为 φ 时，测量误差为：

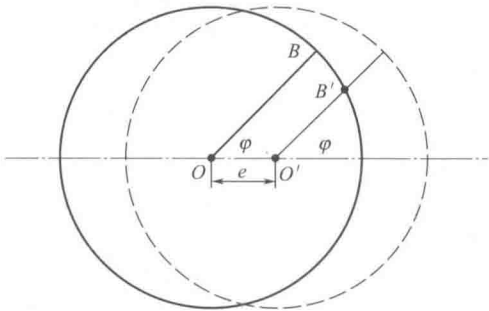


图 1-3 偏心差

$$\Delta = BB' = e \sin \varphi \quad (1-7)$$

这便是周期变化的系统误差，称为偏心差。

系统误差常常是影响测量结果的主要因素，实验水平的高低往往决定于对系统误差处理水平的高低。

2. 随机误差（统计性误差）

在相同条件下，多次测量同一物理量所对应的各次测量的误差，其符号和绝对值以不可预定的方式变化，这种误差称为随机误差。它通常是符合统计学规律的，所以也称为统计性误差。

随机误差具有随机变化的性质。产生的原因通常是某些偶然的、不确定因素的影响，比如由于操作者视觉和仪器精度的限制使平衡点确定不准或估读数有起伏（读数误差）；由于环境因素的随机起伏而导致读数的微小变化等。这些影响一般是微小的，很难确定影响的具体大小，故不能予以排除或修正其影响。

尽管随机误差不能完全消除，但可通过改进测量方式或进行多次重复测量减少其影响。

随机误差虽然在大小和符号上不确定，但当测量次数较多时，会发现存在某种统计规律。分析表明，大部分随机误差服从正态分布（或称为高斯分布）。令 $f(\Delta N)$ 代表单位误差间隔内出现某误差值的概率，即：

$$f(\Delta N) = \lim_{\Delta N \rightarrow 0} \frac{\Delta N \text{ 内误差出现的概率}}{\Delta N} \quad (1-8)$$

$f(\Delta N)$ 称为概率密度函数，当测量次数 k 趋于无限多次时， $f(\Delta N)$ 可表达为：

$$f(\Delta N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times e^{-(\Delta N)^2 / (2\sigma)^2} \quad (1-9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (N_i - N_0)^2}{k}} \quad (k \rightarrow \infty) \quad (1-10)$$

式中，

称为标准误差，意义是任一次测量误差 ΔN_i 落在 $[-\sigma, \sigma]$ 间的概率为 0.68，它代表了一系列测量数据的离散程度。

$f(\Delta N) \sim \Delta N$ 曲线形状如图 1-4 所示，称为正态分布曲线。由曲线形状看出，遵守正态分布的随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零，即：

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta N_i = 0 \quad (1-11)$$

由该式得：

$$N_0 = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i = \bar{N} \quad (1-12)$$

即在系统误差可以忽略的情况下，当 $k \rightarrow \infty$ 时测量值的平均值等于真值。

实际测量总是有限次的，不难理解，此时测量值的平均值最接近真值，即平均值是测量的最佳值。

在有限次测量的情况下，称测量值 N_i 与平均值 $\bar{N}$ 之差为偏差或残差，即

$$\Delta N_i = N_i - \bar{N} \quad (1-13)$$

此时，用标准偏差 S 作为标准误差 σ 的最佳描述。可以证明，测量列中任一次测量值

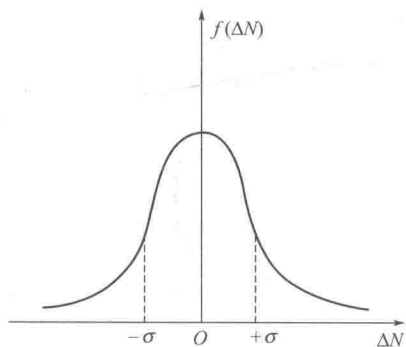


图 1-4 随机误差的正态分布

的标准偏差为：

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2}{k-1}} \tag{1-14}$$

该式称为贝赛尔公式。平均值 $\bar{N}$ 的标准偏差为：

$$S_{\bar{N}} = \frac{S_N}{\sqrt{k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2}{k(k-1)}} \tag{1-15}$$

S_N 或 $S_{\bar{N}}$ 的意义是，当测量次数较多时（一般要求 $k \geq 5$ ），任一个 ΔN_i 落在 $[-S_N, S_N]$ 之间或 $\bar{N}$ 的误差落在 $[-S_{\bar{N}}, S_{\bar{N}}]$ 之间的概率约为 0.68。

上面所得到的概率称为置信概率（用 P 表示），置信概率 $P=0.997$ 所对应的误差称为极限误差（或称为误差限），对于正态分布的随机误差，可以证明极限误差近似为：

$$\Delta_{\text{lim}} = 3S \tag{1-16}$$

3. 粗大误差

定义：误差列 ΔN_i ($i=1, 2, \dots, k$) 中，有个别的误差明显超出规定条件下的预期值，这样的误差称为粗大误差。粗大误差具有反常性质。

产生原因：常由于各种过失所造成，比如读错、记错、测量条件或操作不符合要求等。

粗大误差对应的测量值称为坏值。应按一定规则判断测量值是否是坏值；一旦发现，应将其从测量列中剔除。

一般常用的几种判断坏值的方法有以下两种。

(1) 多次等精度直接测量的情形

① 3S 准则：如果测量次数足够大，那么其中任一测量值 N_i 落在 $[\bar{N}-3S, \bar{N}+3S]$ 内的概率几乎是百分之百，所以如某测量值的偏差大于 3S，可认为该测量值为坏值。

该准则适合于测量次数 k 较大 ($k \geq 10$) 的情形，否则该准则失效。

② 肖维勒准则：如果测量值 N_i ($i=1, 2, k$) 中 N_j 满足

$$|N_j - \bar{N}| > w_k S \tag{1-17}$$

则 N_j 为坏值。式中， w_k 称为肖维勒系数，其值与测量次数 k 有关，见表 1-1。

表 1-1 w_k 数值表

k	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
w_k	1.38	1.53	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.00	2.03
k	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
w_k	2.07	2.10	2.13	2.15	2.17	2.20	2.22	2.24	2.26	2.28
k	23	24	25	30	40	50	75	100	200	500
w_k	2.30	2.31	2.33	2.39	2.49	2.58	2.71	2.81	3.02	3.20

由表 1-1 可知，测量次数越少 w_k 越小，说明测量值容许的范围越小。另外，3S 准则相当于测量次数 $k \approx 200$ 次的情形。

注意，某坏值剔除后，还应该再用上述准则继续判断还有没有坏值。

(2) $y_i = f(x_i)$ 的情形