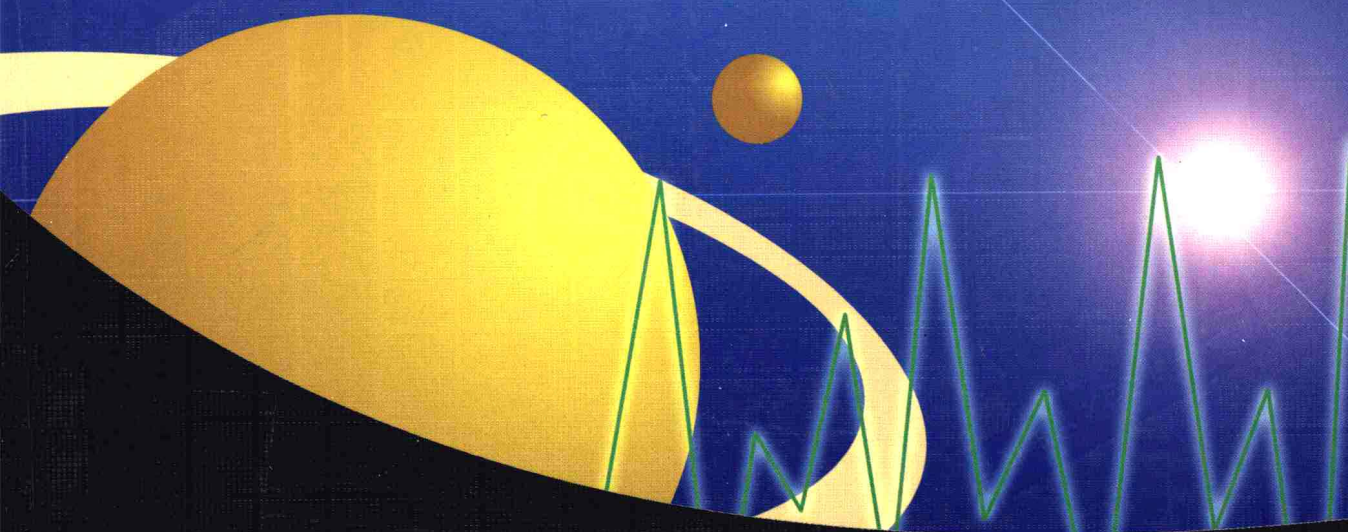


DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

(第2版)

主编 郝邦元



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

大学物理实验

(第2版)

主 编 郝邦元

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 郝邦元主编. —2 版. —成都:
西南交通大学出版社, 2010.8
ISBN 978-7-5643-0798-1

I. ①大… II. ①郝… 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 162040 号

大学物理实验

(第 2 版)

主编 郝邦元

*

责任编辑 牛 君

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 15.125

字数: 379 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0798-1

定价: 22.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第2版前言

物理实验课程是教育部确定的六门主要基础课之一，是高等学校工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程。本教材是根据全国工科物理课程教学指导委员会制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，并结合中国民航飞行学院已使用多年的实验教材和现有的实验条件而编写的物理实验教材。

在2002年6月成稿试用3年的基础上，进行了修改、校正和补充，并适当增加了部分设计性实验项目，使教材更加完善。本教材的主要特色有：

(1) 教材主体部分设置为基础性实验、综合及应用性实验和设计性实验三个不同的层次，有利于培养学生的科学实验能力和创新思维能力，有利于因材施教，适应个性化教育。

(2) 在实验数据的处理及实验结果的表述上，强调了“不确定度”概念，测量结果的最终表示形式用总不确定度或相对不确定度表达，符合国家颁布的计量技术规范(JJG1027—91《测量误差及数据处理(试行)》)的规定。

(3) 在实验内容、实验技能技术的选择以及设备匹配上，充分考虑了民航飞行学院的实际，较好地协调了我校各专业对实验要求的不一致性。

本书由中国民航飞行学院郝邦元主编。2004年参加第1版编写的有郝邦元(第一章、第二章、实验8、29、31、32，统稿审稿)、吴晓轩(实验4、5、20、21、30、33)、杨繁荣(实验22、28、34、35、36、37、38)、但有权(实验7、9、13、14、15)、赵忠芹(实验1、2、11)、程敏(实验3、10、18)、安康(实验6、12、16、17、23、24、25、26、27)、吴小娟(实验19)。其中，实验12、18、19、22为2010年新增实验项目。

根据教学实际，参加2010年第2版编写工作的有郝邦元(第一章、实验8、29、31、32，统稿审稿)、吴晓轩(实验30、33)、杨繁荣(第二章、实验6、13、21、22、28、34、35、36、37、38)、但有权(实验7、9、14、15)、赵忠芹(实验2)、程敏(实验1、3、4、10、18)、安康(实验12、16、17、23、24、25、26、27)、吴小娟(实验11、19、20)、吴华(实验5)。

实验教材的编写是全体从事实验教学的教师和实验技术人员共同辛勤劳动的成果，是历年来实验教学工作的总结。在编写本书过程中参阅了许多兄弟院校的相关教材，在此我们表示衷心的感谢。

由于编者的知识水平和教学经验有限，书中难免有疏漏之处，望读者提出宝贵意见和建议。

编者

2010年5月

第 1 版前言

实验物理课程是教育部确定的六门主要基础课之一，是高等学校工科学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程。本教材是根据全国工科物理课程指导组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，并结合中国民航飞行学院已使用多年的实验教材和现有的实验条件而编写的物理实验教材。

在 2002 年 6 月成稿试用 3 年的基础上，进行了修改、校正和补充，并适当增加了部分设计性实验项目，使教材更加完善。该教材的主要特色有：

① 教材主体部分设置为基础性实验、综合及应用性实验和设计性实验三个不同的层次，有利于培养学生的科学实验能力和创新思维能力，有利于因材施教，适应个体化教育。

② 在实验数据的处理及实验结果的表述上，强调了“不确定度”概念，测量结果的最终表示形式用总不确定度或相对不确定度表达，符合国家颁布的计量技术规范 (JJG1027-91《测量误差及数据处理(试行)》) 的规定。

③ 在实验内容、实验技能、技术的选择及其设备匹配上，充分考虑了飞行学院的实际，较好地处理了我院各专业对实验要求的不一致性。

本书由中国民航飞行学院郝邦元同志主编。参加编写的有郝邦元（第一章、第二章、实验 9、27、29、30，统稿审稿）、吴晓轩（实验 4、5、6、18、19、28、31）、杨繁荣（实验 25、26、32、33、34、35、36）、但有全（实验 8、10、13、14、15）、赵忠芹（实验 1、2、12）、程敏（实验 3、6、11）、安康（实验 7、16、17、20、21、22、23、24）。

实验教材的编写是全体从事实验教学的教师和实验技术人员共同辛勤劳动的成果，是历年来实验教学工作的总结。同时在编写本书时参阅了许多兄弟院校的有关教材，在此我们表示衷心的感谢。

由于编者的知识水平和教学经验有限，加之编写时间仓促，书中难免有谬误之处，望读者提出宝贵意见和建议。

编 者

2004.3 于中国民航飞行学院

目 录

1 绪 论

1.1 物理学对社会的重要性	1
1.2 物理实验课的目的和任务	2
1.3 物理实验课的学习特点	3
1.4 怎样写实验报告	3
1.5 遵守实验规则	4

2 误差分析和数据处理方法

2.1 测量与误差	6
2.2 随机误差的高斯分布与标准误差	8
2.3 近真值——算术平均值	10
2.4 标准误差的估算——标准偏差	11
2.5 误差传递公式	12
2.6 不确定度与测量结果表述	14
2.7 有效数字	18
2.8 数字取舍规则和简算方法	19
2.9 数据处理方法	22
2.10 习 题	30

3 基础物理实验

实验 1 基本测量	34
实验 2 刚体转动实验	41
实验 3 测定液体的黏度系数	46
实验 4 用模拟法描绘静电场	50
实验 5 电子束的电磁偏转及荷质比测定	55
实验 6 用霍尔元件测量磁场	62
实验 7 伏安法测电阻	67
实验 8 电位差计测量热电动势	70
实验 9 伏安法测非线性电阻	74

实验 10 牛顿环与劈尖干涉 78

实验 11 光栅衍射 84

实验 12 光的偏振 93

实验 13 惠斯通电桥 99

实验 14 双臂电桥测低值电阻 107

实验 15 阴极射线示波器的使用 114

4 综合及应用性实验

实验 16 照相实验 127

实验 17 暗室技术基础 137

实验 18 密立根油滴实验 145

实验 19 夫兰克-赫兹实验 151

实验 20 光电效应及普朗克常量的测定 167

实验 21 半导体光电二极管伏安特性的测定 174

实验 22 光导纤维中光速的测定 181

实验 23 激光全息摄影实验 189

实验 24 热敏电阻的应用 193

实验 25 温度检测 199

实验 26 AD590 的应用 204

实验 27 P-N 结伏安特性的测量和温度-电压变换 208

实验 28 非平衡电桥与压力传感器特性研究 212

5 设计性实验

5.1 设计性实验概述 220

实验 29 重力加速度的研究 223

实验 30 电阻特性的研究 224

实验 31 RC 串联电路充、放电过程的研究 225

实验 32 光栅特性的研究 227

实验 33 电表的改装 229

实验 34 测微安表内阻 231

实验 35 利用半导体元件设计、制作温度计 232

实验 36 高电阻的测定 233

实验 37 制作全息光栅 234

实验 38 测定透明液体的折射率 235

参考文献 236

1 绪 论

1.1 物理学对社会的重要性

1999 年 3 月在美国亚特兰大市召开的第 23 届国际纯粹物理和应用物理联合会(IUPAP)代表大会的决议指出:

物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科——是一项国际事业，它对人类的进步起着关键的作用。对物理教育的支持和研究，在所有国家都是重要的，这是因为:

(1) 物理学是一项激动人心的智力探险活动，它鼓舞着年轻人，并扩展着我们关于大自然知识的疆界。

(2) 物理学发展提供未来技术进步所需的基本知识，而技术进步将持续驱动“世界经济发动机的转动”。

(3) 物理学有助于技术的基本建设，它为科学进步和新发明的利用，提供所需的训练有素的人才。

(4) 物理学在培养化学家、工程师、计算机科学家以及其他物理科学和生物医学科学工作者的教育中，是一个重要的组成部分。

(5) 物理学扩展和提高了我们对其他科学的理解，诸如地球科学、农业科学、化学、生物学、环境科学以及天文学和宇宙学——这些学科对世界上所有民族都是至关重要的。

(6) 物理学提供了发展应用于医学的新设备和新技术所需的基本知识，如计算机层析术(CT)、磁共振成像、正电子层析术、超声波成像和激光手术等，提高了我们的生活质量。

20 世纪，物理学与技术发展的史实为 IUPAP 的决议提供了有力的例证。在此仅举几例献给读者。

肖克利(W. Shockly)、巴丁(J. Bardeen)和布拉顿(W. Brattain)通过研究不同条件下电流流过半导体的方式，发现了晶体管效应，为集成电路、微电子学和整个计算机革命开辟了道路。他们因此获得了 1956 年诺贝尔物理学奖。

1958 年，肖洛(A. Schawlow)和汤斯(G. Townes)在研究光分子和固体作用的基础上，提出了制造光波受激发射放大器的具体建议，为研制激光器奠定了基础。1960 年，梅曼(T. H. Maiman)研制成功了世界上第一台激光器，它的发明是光学发展史上的伟大里程碑，也是科学史上一个伟大里程碑。激光器让许多原子、分子同时在同一方向发光，光束在颜色上的纯度比以往可能产生的高 100 万倍，在月球上可以看到地球上仅为几瓦的激光。激光一问世，就获得迅速发展，应用极其广泛。

物理学家利用激光技术在一种磁性材料上记录各种数据，它提供了一种存储和取用信息的技术，可以将 74 集(5 万余幅图片、1.264 亿汉字)的中国大百科全书刻录在 4 张光盘内。

激光的光脉冲宽度窄，持续时间仅为几个飞秒(10^{-15} s)。飞秒激光可用来拍摄瞬间的照

片，如拍摄化学反应中分子的影片等。新的计算机技术与产生飞秒激光脉冲技术相结合，可实现接近 1 拍次（ 10^{15} 次）的逻辑运算。未来新型的高速计算机可能采用短的光脉冲代替现在使用的较缓慢的电子来传递信息。物理学家借助光学双稳态现象能够用另一光束将一个光束接通或切断，这展现了制造一种光学型晶体管的可能，它为光学计算机的出现开辟了技术之路。

由于玻璃纤维比金属导体密度小、价格低和抗干扰能力强，因而光纤通信发展迅速。一对头发丝粗细的光纤可以传递近 200 万路电话。光子能够传输的信息量比电子大几百万倍。可以预言，光技术最终可能比电子学对人类社会的影响更大，如果说 20 世纪是电子时代，那么 21 世纪就有可能是光子的时代。

1895 年德国物理学家伦琴（W. C. Rortgen）发现了 X 射线。其后，X 射线透视术逐渐成为医生诊断疾病的一种重要手段。20 世纪 70 年代，医学专家利用物理学原理发明了计算机辅助 X 射线层析摄影（CT）等新技术，借助它们可以确定人体内部结构而无需将器械插入人体内。CT 技术可以给医生显示一幅人体内部器官的三维图像。它是用一连串 X 射线束穿透人体，每一束射线给出了人体的一个线条，借助于计算机可以从这些线条的数据重构出通过人体的一个断层的影像，几幅这样的影像就构成一幅三维图像。

2001 年 4 月 7 日，美国发射了“奥德赛”火星探测器，上面配备了高能中子探测器，对火星表面进行水的探测。探测器的原理是：当宇宙射线撞击火星时，火星的地表会释放出强度很高的中子流，这些中子流穿越火星近地层时会与地层中可能存在于冰中的氢原子核发生碰撞，中子动能降低，同时释放出一定的热能，探测器测出火星地表中子流的动能差，并测出中子释放的热能，进而判断出水的存在。图 1.1.1 为“奥德赛”传回的数据经计算机成像后火星上的冰层图。探测火星地表层的水，这项高技术是物理学中力学、高能粒子等若干物理原理的综合应用。

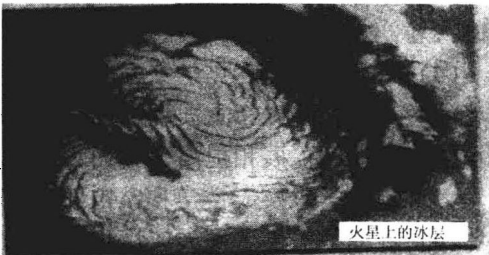


图 1.1.1 火星上的冰层

大量事实说明，高新技术的出现和发展与基本粒子物理学，原子核物理学，原子、分子物理学，光学，等离子体、流体、凝聚态物理学以及引力、宇宙学和宇宙射线物理学等物理学领域及其交叉学科有着密切的关系。可以说，物理学是高新技术的源泉，物理学是有生命力和富有成果的学科，它对社会发展具有极大的影响。

1.2 物理实验课的目的和任务

大学物理实验是理工科大学生进行科学实验、研究能力训练的一门基础课程，也是素质教育的重要环节。它的主要任务是：

- (1) 通过实验，学习运用理论知识指导实验，以及分析和解决问题的科学方法。在学习物理实验的一些典型方法时，尤其要注重学习它的思想方法，以有助于培养思维与创新能力。
- (2) 使学生获得必要的实验知识和操作技能训练，培养学生初步具有以下各方面的科学

实验工作能力，即正确使用仪器进行测量、数据处理、分析结果以及写实验报告等。在此基础上，着重培养学生的探索精神、创新精神、自主学习能力和科学研究方法。

(3) 培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度以及爱护国家财产的道德品质，培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等科学习惯。

总之，教学的重点放在培养学生的科学实验能力与提高学生科学实验素养方面，使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力以及严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度等方面得到训练与提高。

1.3 物理实验课的学习特点

实验课与理论课不同，它的特点是同学们在老师的指导下自己动手，独立完成实验任务。通常，每个实验的学习都要分为三个阶段。

1. 实验准备

实验前必须认真阅读教材，做好必要的预习，才能按质量、按时完成实验。同时，预习也是培养读书能力的重要环节。

在学生预习实验教材的基础上，为了进一步做好实验准备工作，我们教学计划中安排一些“实验准备课”。其目的有两个：一是在同学们自学教材的基础上，教师重点讲解有关实验理论，使学生更好地理解实验原理，体会实验方法的思路 and 适用条件，以及教学的具体要求等；二是教师对仪器设备进行介绍，讲解操作规范，让学生在正式做实验之前，有机会了解实验装置，学会仪器的使用方法，以便进一步考虑如何做好实验。

2. 实验过程

内容包括仪器的安装与调试，观察实验现象与选择测试条件，读数与数据记录，计算与分析实验结果，以及估算误差等。

进入实验室后，要注意遵守实验规则（见 1.5 节）。实验过程中，对观察到的现象和测得的数据要及时进行分析，判断它们是否正常与合理。实验过程中可能会出现故障，在教师的指导下，分析故障产生的原因，学会排除故障的本领。实验完毕，做好仪器的整理工作。

实验过程中遇到挫折不是坏事，坚持探索，认真分析研究，找出原因，解决问题，就可以得到更大的收获。

3. 书写实验报告

撰写实验报告是为了训练学生具有以书面形式汇报实验工作成果的能力，培养编写科学研究报告的初步能力。

1.4 怎样写实验报告

通常，实验报告分为三部分。

1. 预习报告

它作为正式报告的前面部分，要求在正式做实验前写好。内容包括：

(1) 目的：说明本实验的目的。

(2) 原理摘要：在理解的基础上，用简短的文字扼要地阐述实验原理，切忌整篇照抄。力求做到图文并茂，图指原理图、电路图、光路图。写出实验所用的主要公式，作好记录数据的准备。

2. 实验记录

实验的原始数据先记录在专用的“物理实验原始记录单”上，实验完毕再进行整理。内容包括：

(1) 仪器：记录实验所用主要仪器的型号和编号。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。记录仪器型号可以使同学逐步熟悉它，以培养选用仪器的能力。

(2) 实验内容和现象观测记录。

(3) 数据：记录数据要做到整洁清晰而有条理，尽量采用列表法。在根据数据特点设计表格时，力求简单明了，分类清楚而有条理，便于计算与复核，达到省工省时的目的。另外，在标题栏内要注明单位。

数据不得任意涂改。确实测错而无用的数据，可在旁边注明“作废”字样，不要任意划去。

3. 实验报告

此部分在实验后进行，包括：

(1) 实验目的。

(2) 使用仪器：仪器名称、型号、编号、台（套）数。

(3) 实验原理：在理解的基础上，用简短的文字扼要地阐述实验原理，力求做到图文并茂，图指原理图、电路图、光路图。写出实验所用的主要公式。

(4) 实验步骤：写出自己的实际操作步骤，切忌照抄。

(5) 数据及处理：

① 用表格形式将原始数据重新记录，

② 作图、计算结果与估算误差：按图解法要求绘制图线（详见 2.9 节数据处理方法一节中的图解法）。计算时，先将文字公式化简，再代入数字进行计算。估算误差要预先写出误差公式。

③ 结果：按标准形式写出实验结果。在必要时，注明结果的实验条件。

④ 作业题：完成教师指定的作业。

⑤ 附注：对实验中出现的说明和讨论，或写出实验心得和建议等。

实验报告要求学生做到书写清晰，字迹端正，数据记录整洁，图表合格，文字通顺，内容简明扼要。实验报告一律用专用的物理实验报告单书写。

1.5 遵守实验规则

为了保障实验正常进行，以及培养严肃认真的工作作风和良好的实验工作习惯，特制订

学生实验守则^①，望同学们遵守执行。

一、实验室是开发学生智力、培养独立工作能力的重要场所。学生要以严格、严谨、严肃的态度和作风，遵守实验室的各项规章制度，认真上好实验课。

二、遵守纪律、尊重师长、讲究文明，衣着整洁。保持实验场所清洁、安静，禁止打闹、说笑、吸烟、吃零食、随地吐痰、乱扔杂物等。

三、实验前，学生应按实验教材（或指导书）规定的内容做好预习，仔细阅读教材，明确实验原理、目的、内容和方法步骤，做好实验前的准备工作。

四、听从教师的指导与安排，不得自行其是。实验中要严格遵守操作规程，正确使用仪器设备，细心观察、认真记录，不擅离岗位，不抄袭别人的数据，独立完成实验报告。实验中若有创见，实施前应请示指导教师，经同意后方能进行。

五、爱护国家财产，不得动用与实验室无关的设备。仪器设备发生故障或异常时，应立即关闭电源，停止实验，并向指导教师报告。实验中要注意实验材料的节约，减少浪费。因擅自动用或违反操作规程造成仪器设备、器材损坏时，按规定予以赔偿。

六、实验结束时，必须对仪器、设备、工具、材料进行整理，并轮流值日打扫卫生，关闭电源、水源，经指导教师检查合格后方可离开。

① 摘自民航飞行学院文件〔1998〕122号。

2 误差分析和数据处理方法

2.1 测量与误差

2.1.1 测量

物理实验不仅要定性观察各种物理现象，更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。为此，就需要进行测量。测量指的是将待测的物理量与一个选来作为标准的同类量进行比较的过程。通过比较得出它们的倍数关系，进而认识待测量的一些未知属性。可以认为测量就是一种研究方法。选做标准的同类量称为单位，倍数称为测量数值。由此可见，一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积。一个物理量的大小是客观存在的，选择不同的单位，相应的测量数值就有所不同。单位越大，测量数值越小，反之亦然。

测量可分为两类。一类是直接测量。如用尺量长度，用表计时间，用天平称质量，用温度计量温度等；另一类是间接测量，是根据直接测量所得的数据，根据一定的公式，通过运算，得出所需要的结果，例如：直接测出单摆的长度 l 和周期 T ，应用公式 $g = 4\pi l / T^2$ ，求出重力加速度 g 。在物理的测量中，绝大部分是间接测量，但直接测量是一切间接测量的基础。不论直接测量或间接测量，都需要满足一定的实验条件，按照严格的方法及正确地使用仪器，才能得出应有的结果。因此，在实验过程中，一定要明白实验目的，正确地使用仪器，细心地进行操作、读数和记录，以达到巩固理论知识和加强实验技能训练的目的。

2.1.2 误差

物理量在客观上有着确定的数值，称为真值。然而在实际测量时，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和经验等原因，使得测量值与客观存在的真值之间有一定的差异。测量值 x 与真值 T_x 的差值称为测量误差 δ ，简称误差。即

$$\delta = x - T_x$$

任何测量都不可避免地存在误差，所以，一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两部分。既然测量不能得到真值，那么怎样才能最大限度地减小测量误差并估算出误差的范围呢？要回答这些问题，首先要了解误差产生的原因及其性质。

测量误差按其产生原因与性质可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

1. 系统误差

系统误差的特点是有规律，测量结果都大于真值或小于真值，或在测量条件改变时，误差也按一定规律变化。

系统误差的产生有以下几方面的原因：

(1) 由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不妥，如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平放置的仪器未放水平等。

(2) 由于实验理论和实验方法的不完善，所引用的理论与实验条件不符，如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响，测微小长度时没有考虑温度变化使尺长的改变，量热时没有考虑热量的散失，测量电压时未考虑电压表内阻对电压的影响，标准电池的电动势未作温度校正等。

(3) 由于实验者生理或心理特点、缺乏经验等而产生误差。例如，有些人习惯侧坐斜视读数，眼睛辨色能力较差等，使测量值偏大或偏小。

减小系统误差是实验技能问题，应尽可能采取各种措施将它减小到最低程度。例如，将仪器进行校正，改变实验方法或者在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响，纠正不良习惯等。

能否识别或降低系统误差与实验者的经验和实际知识有密切的关系。学生在实验过程中要逐步积累这方面的感性知识，结合实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。因在设计实验仪器和实验原理时，系统误差已被减小到最低程度，所以大学物理实验课中不要求学生实验系统进行修正。

2. 随机误差（又称偶然误差）

在相同条件下，对同一物理量进行重复多次测量，即使系统误差减小到最低程度，测量值仍然出现一些难以预料和无法控制的起伏，而且测量值误差的绝对值和符号在随机地变化着。这种误差称为随机误差。

随机误差主要来源于人们视觉、听觉和触角等感觉能力的限制以及实验环境偶然因素的干扰，如温度、湿度、电源电压的起伏、气流波动以及振动等因素的影响。从个别测量值来看，它的数值带有随机性，似乎杂乱无章。但是，如果测量次数足够多的话，就会发现随机误差遵循一定的统计规律，可以用概率理论进行估算。

3. 过失误差

在测量中还可能出现错误，如读数错误、记录错误、估算错误、操作错误等因素引起的误差，称为过失误差。过失误差已不属于正常的测量工作范畴，应当尽量避免。克服错误的方法，除端正工作态度，严格工作方法外，可用与另一次测量结果相比较的办法发现纠正，或者运用异常数据剔除准则来判别因过失而引入的异常数据，并加以剔除。

2.1.3 正确度、精密度和准确度

正确度、精密度和准确度是评价测量结果优劣的三个术语。

(1) 测量结果的正确度是指测量值与真值的接近程度。正确度高，说明测量值接近真值程度好，即系统误差小。可见，正确度是反映测量结果系统误差大小的术语。

(2) 测量结果的精密度是指重复测量所得结果相互接近的程度。精密度高，说明重复性好，各个测量误差的分布密集，即随机误差小。可见，精密度是反映测量结果随机误差大小的术语。

(3) 测量结果的准确度是指综合评定测量结果重复性与接近真值的程度。准确度高，说明精密度和正确度都高。可见，准确度反映随机误差和系统误差的综合效果。

在实验中，系统误差已被减小到最低程度，所以误差计算主要是估算随机误差，因此往往不再严格区分精密度和准确度，而泛称精度。

2.1.4 绝对误差、相对误差和百分差

误差的表示形式，有绝对误差和相对误差之分。绝对误差 $\pm \Delta x$ 表示测量结果 x 与真值 T_x 之间的差值以一定的可能性（概率）出现的范围，即真值以一定可能性（概率）出现在 $(x - \Delta x, x + \Delta x)$ 区间内。仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度，还需要看测量值本身的大小，为此引入相对误差的概念。相对误差

$$E = \frac{\Delta x}{T_x} \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

表示绝对误差在整个物理量中所占的比例，一般用百分比表示。例如，一长度测量值为 1 000 m，而绝对误差为 1 m。另一长度测量值为 100 cm，而绝对误差为 1 cm。后者的相对误差为 1%，前者的相对误差为 0.1%，所以，前者较后者更可靠。

如果待测量有理论值或公认值，也可用百分差（ E_0 ）表示测量的好坏。即

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

绝对误差、相对误差和百分差通常只取 1~2 位有效数字来表示。

2.2 随机误差的高斯分布与标准误差

随机性是随机误差的特点。也就是说，在相同条件下，对同一物理量进行多次重复测量，每次测量值的误差时大时小，对某一次测量值来说，其误差的大小与正负都无法预先知道，纯属偶然。但是，如果测量次数足够多的话，随机误差的出现仍服从一定的统计规律。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（即正态分布）、 t 分布、均匀分布以及反正弦分布等。按大纲要求，本书仅介绍随机误差的高斯分布。

2.2.1 高斯分布的特征和数学表述

遵从高斯分布规律的随机误差具有下列四大特征：

- (1) 单峰性。绝对值小的误差出现的可能性（概率）大，大误差出现的可能性小。
- (2) 对称性。大小相等的正误差和负误差出现的机会均等，对称分布于真值的两侧。
- (3) 有界性。非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零。
- (4) 抵偿性。当测量次数非常多时，正误差和负误差相互抵消，于是，误差的代数和趋于 0。

高斯分布的特征可以用高斯分布曲线形象地表示出来，见图 2.2.1 (a)。横坐标为误差 δ ，纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。根据误差理论可以证明函数的数学表述式为：

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2.1)$$

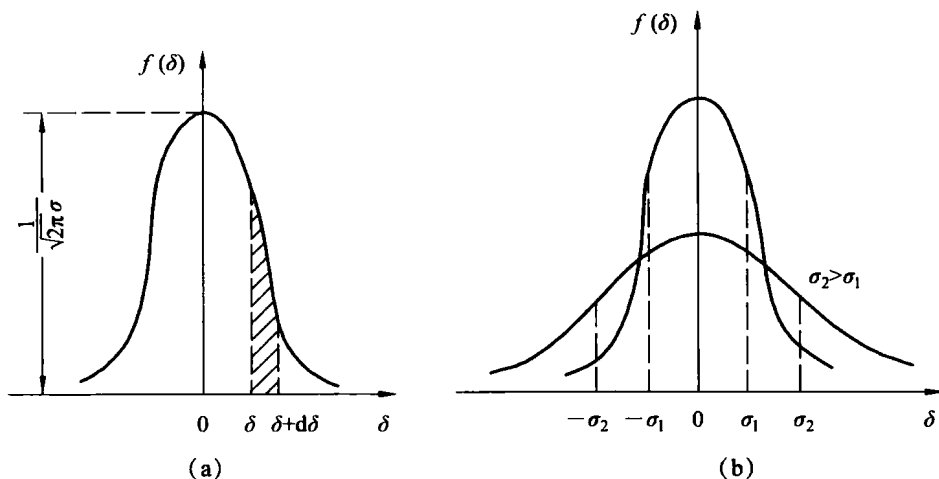


图 2.2.1 随机误差的正态分布曲线

测量值的随机误差出现在 $(\delta, \delta+d\delta)$ 区间内的可能性（概率）为 $f(\delta)d\delta$ ，即图 2.2.1 (a) 中阴影线所包含的面积元。上式中的 σ 是一个与实验条件有关的常数，称为标准误差。其量值为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (2.2.2)$$

式中： n 为测量次数，各次测量值的随机误差为 δ_i ， $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

可见标准误差是将各个误差的平方取平均值，再开方得到。所以，标准误差又称为均方根误差。

2.2.2 标准误差的物理意义

由式 (2.2.1) 可知，随机误差正态分布曲线的形状取决于 σ 值的大小，如图 2.2.1 (b) 所示。 σ 值越小，分布曲线越陡，峰值 $f(\delta)$ 越高，说明绝对值小的误差占多数，且测量值的重复性好，分散小；反之， σ 值越大，曲线越平坦，峰值越低，说明测量值的重复性差，分散大。标准误差反映了测量值的离散程度。

由于 $f(\delta)d\delta$ 是测量值随机误差出现在小区间 $(\delta, \delta+d\delta)$ 的可能性（概率），那么，测量值误差出现在区间 $(-\sigma, \sigma)$ 内的可能性（概率）就是

$$\begin{aligned} P(-\sigma, \sigma) &= \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta)d\delta \\ &= \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \\ &= 68.3\% \end{aligned}$$

这说明对任意一次测量，其测量值误差出现在 $(-\sigma, \sigma)$ 区间内的可能性（概率）为 68.3%。

也就是说,假如我们对某一物理量在相同条件下进行了 1 000 次测量,那么,测量值误差可能有 683 次落在 $(-\sigma, \sigma)$ 区间内。注意标准误差的统计意义,它并不表示任一次测量值的误差就是 $\pm\sigma$,也不表示误差不会超出 $\pm\sigma$ 的界限。标准误差只是一个具有统计性质的特征量,用以表征测量值离散程度的一个特征量。

2.2.3 极限误差

与上述相仿,同样可以计算在相同条件下对某一物理学量进行多次测量,其任意一次测量值的误差落在 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 区域之间的可能性(概率)。其值为

$$\begin{aligned} P(-3\sigma, 3\sigma) &= \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta \\ &= \int_{-3\sigma}^{3\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \\ &= 99.7\% \end{aligned}$$

也就是说,在 1 000 次测量中,可能有 3 次测量值的误差绝对值会超过 3σ 。在通常的有限次测量情况下,测量次数很少超过几十次,因此测量值的误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围的情况几乎不会出现,所以把 3σ 称为极限误差。

在测量次数相当多的情况下,若出现测量值误差的绝对值大于 3σ 的数据,可以认为这是由于过失而引起的异常数据而加以剔除。但是,对于测量次数较少的情况,这种判别方法就不可靠,而需要采用另外的判别准则。

2.3 近真值——算术平均值

尽管一个物理量的真值是客观存在的,然而,即使对测量值已进行了系统误差的修正,也会由于随机误差的存在,使我们想得到真值的愿望不能实现。那么,是否能够得到一个测量结果的最佳值,或者说得到一个最接近真值的数值(近真值)呢?这个近真值又如何来求得?根据随机误差具有抵偿性的特点,误差理论可以证明,如果对一个物理量测量了相当多次,那么算术平均值就是接近真值的最佳值。

设在相同条件下对一个物理量进行了多次测量,测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 各次测量值的随机误差分别为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$, 并用 T_x 表示该物理量的真值。根据误差的定义有

$$\delta_1 = x_1 - T_x, \delta_2 = x_2 - T_x, \delta_3 = x_3 - T_x, \dots, \delta_n = x_n - T_x$$

将以上各式相加,得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nT_x$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - T_x \quad (2.3.1)$$

用 $\bar{x}$ 代表算术平均值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3.2)$$