



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

Experiments of
University Physics

夏云波 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

主 编 夏云波
副主编 胡同瑞 夏遵义
主 审 王景聚



机械工业出版社

本书是根据教育部颁布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合我校近几年的教学改革实践，为适应新的教育教学的发展而编写的。

全书共分五章，第一章讲述了实验的基本知识，涉及的内容为实验的基本要求、测量误差、不确定度以及数据的处理等。第二章为力热实验。第三章为电磁学实验，涉及的内容有电磁学的基础知识、电磁学数据处理的基本方法和要求、电磁学实验所使用的电表、电阻器和电源等常用设备的介绍。第四章为光学实验。第五章是近代物理实验。每章还安排了适量的设计性实验。

全书的编写力求时代性和先进性相结合，注重学生动手能力的提高。本书可作为综合性大学或师范院校物理类专业普通物理实验教材，也可作为理科非物理专业和工科类专业的物理实验教材使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/夏云波主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-42921-0

I. ①大… II. ①夏… 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 (2013) 第 132708 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈立辉

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

涿州市京南印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·446 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-42921-0

定价: 36.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来，随着应用型本科院校的发展，实验教学越来越受到关注。普通物理实验对于培养应用型人才、为国家培养适应社会需要的技术力量起到越来越重要的作用。就普通物理实验本身而言，从内容到技术也在不断更新变化。实验的新概念、新方法、新的实验设备及新的实验技术等层出不穷。

普通物理实验是高等学校理工类专业的学生进行实践教育的重要组成部分，是当今培养应用型人才的必修课之一，是大学生学习其他相关理论和实验课程的基础。它既能加深学生对物理知识和物理规律的理解，也能培养学生理论联系实际、实事求是的科学态度，以及严肃认真的工作作风，提高学生分析问题和解决问题的能力。

为了便于学生进行实验操作，本书对于基本实验的编写，力求在实验原理上论述清楚，公式的推导也详尽完整，在内容和方法以及步骤的编写上也力求具体，使学生在实验前预习时，能更好地复习物理学理论知识，掌握实验的理论依据，在实验的具体操作过程中，也注重加强对基本实验技能的训练和对实验方法的指导。有些实验对本校新购置的仪器进行了简要介绍，便于学生在实验过程中掌握常用仪器设备的调试和使用方法，利于学生顺利进行实验操作。本书所有的基础性实验都经过实际验证，学生按书中所提供的内容和步骤即可顺利进行操作。

全书共分五章。第一章主要讲述实验的基本知识，涉及的内容为普通物理实验的基本要求、测量误差、不确定度以及数据的处理等。第二章为力热实验部分。第三章为电磁学实验部分，包括电磁学的基础知识、电磁学数据处理的基本问题、电磁学实验所使用的电表、电阻器和电源等常用设备的介绍。第四章是光学实验。第五章是近代物理实验。

本书由具有多年讲授物理实验课经验的老师编写，参编人员有高级实验师、实验师、实验员、讲师，职称结构合理，有着丰富的物理理论知识和实际操作经验。

本书第一章基础知识和第二章力热实验由李秀明和吴广涛老师编写；第三章电磁学实验基础知识部分及实验 3.1~3.10 和实验 3.22 由夏遵义老师编写；绪论和第三章实验 3.11~3.18 由胡同瑞老师编写；第四章光学实验由李玉春老师编写；第五章近代物理实验 5.1~5.7 由任艳东老师编写。第三章实验 3.19~3.21 和第五章实验 5.8~5.13 由夏云波老师编写，同时负责全书的统稿工作。在编写过程中，刘永皓、李兆安、谭淑梅三位老师协助了编写工作，在此表示感谢。

本实验教材是我们在多年教学实践的基础上，经过多位专家教授不断改进、反复实践、逐步充实完善而成的，是集体经验和智慧的结晶。本书可作为综合性大学或师范院校物理类专业普通物理实验教材，也可作为理科非物理专业和工科类专业的物理实验教材使用。

本书承蒙哈尔滨师范大学王景聚教授悉心审阅，谨此表示衷心感谢。本书的出版得到了

我校领导的大力支持，是大庆师范学院新世纪规划教材；我们非常感谢出版社的大力帮助，也感谢有关院校的老师 and 领导对我们工作的大力支持、帮助和鼓励；更感谢物理与电气信息工程学院的所有领导给予的帮助和支持。

虽然我们投入了全部的心血和热情，但由于时间仓促，加之我们水平有限，书中难免出现不当之处，衷心希望广大读者、专家和师生给予批评指正，以便今后进一步修订完善。

编 者

目 录

前言

绪论	1
第一章 测量误差与不确定度	3
1.1 测量	3
1.2 误差	3
1.3 测量不确定度	10
1.4 常用数据处理方法	13
练习题	18
第二章 力热实验	20
实验 2.1 长度的测量	20
实验 2.2 固体密度的测定	26
实验 2.3 惯性秤测物体的惯性质量	31
实验 2.4 用伸长法测量金属丝的弹性模量	34
实验 2.5 自由落体运动	37
实验 2.6 倾斜气垫导轨上滑块运动的研究	38
实验 2.7 碰撞规律的研究	42
实验 2.8 气垫导轨上碰撞瞬间的测量	44
实验 2.9 刚体转动惯量的测定	47
实验 2.10 用三线摆测量转动惯量	52
实验 2.11 单摆	55
实验 2.12 复摆法测重力加速度	57
实验 2.13 弦振动的研究	61
实验 2.14 空气、液体及固体介质的声速测量	64
实验 2.15 水的表面张力系数的测定	69
实验 2.16 液体黏度的测量	72
实验 2.17 金属线胀系数的测定	75
实验 2.18 测定冰的溶解热	77
实验 2.19 导热系数的测量	79
实验 2.20 弹簧劲度系数测量(设计性实验)	84
第三章 电磁学实验	85
电磁学实验基础知识	85
3.1 磁电型仪表的基本结构	85
3.2 磁电型仪表的工作原理	85
3.3 常用测量仪器	85
3.4 其他常用仪器简介	89
实验 3.1 制流电路和分压电路	91
实验 3.2 伏安法测电阻	95

实验 3.3	伏安法测二极管的特性	97
实验 3.4	静电场的描绘	99
实验 3.5	用惠斯登电桥测电阻	101
实验 3.6	用板式电势差计测量电池的电动势和内阻	104
实验 3.7	用箱式电势差计校正电表	107
实验 3.8	电子示波器的使用	110
实验 3.9	低电阻测量	114
实验 3.10	霍尔效应测磁场	117
实验 3.11	圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场的描绘	120
实验 3.12	毫安表改装为万用表及其校准方法	125
实验 3.13	半导体热敏电阻特性的研究	132
实验 3.14	热电偶定标实验	137
实验 3.15	电子束的电偏转和电聚焦	141
实验 3.16	电子束的磁偏转和磁聚焦	147
实验 3.17	用示波器测动态磁滞回线	153
实验 3.18	用万能电桥测电阻电感和电容	157
实验 3.19	RC 和 RL 电路的暂态过程	161
实验 3.20	RLC 电路的暂态过程	164
实验 3.21	小功率直流稳压电源的制作 (设计性实验)	168
实验 3.22	总结用不同方法测电阻的优缺点 (综合性)	169
第四章	光学实验	170
实验 4.1	薄透镜焦距的测定	170
实验 4.2	分光计的调节和使用	173
实验 4.3	用牛顿环干涉测透镜曲率半径	176
实验 4.4	用透射光栅测定光波波长	179
实验 4.5	迈克尔逊干涉仪的调节和使用	182
实验 4.6	偏振现象的观察与研究	185
实验 4.7	掠入射法测透明介质的折射率	189
实验 4.8	用双棱镜干涉测钠光波长	192
实验 4.9	单色仪的定标和滤光片光谱透射率的测定	194
实验 4.10	光具组基点的测定	197
实验 4.11	利用光电效应测定普朗克常量	199
实验 4.12	全息照相	202
实验 4.13	旋光度的测定	205
实验 4.14	衍射光强实验	207
实验 4.15	望远镜与显微镜的组装 (设计性实验)	210
第五章	近代物理实验	213
实验 5.1	氢氘原子光谱的测量	213
实验 5.2	钠原子光谱	218
实验 5.3	密立根油滴实验	222
实验 5.4	塞曼效应实验	226
实验 5.5	夫兰克-赫兹实验	235
实验 5.6	椭圆偏振仪测量薄膜厚度和折射率	239

实验 5.7 电子衍射实验	245
实验 5.8 激光拉曼效应及荧光光谱实验	250
实验 5.9 微波传输特性和基本测量	259
实验 5.10 真空的获得和测量	266
实验 5.11 脉冲核磁共振	271
实验 5.12 电子自旋共振	274
实验 5.13 原子力显微镜 (设计性实验)	277
参考文献	281

绪 论

1. 物理实验课的地位和作用

当今世界科学技术突飞猛进，高等学校实验教学的改革也不断深入。普通物理实验在内容、方法、技术上也发生着前所未有的变化。新思维、新概念、新设备、新方法和新技术在普通物理实验中得到充分体现。科学技术的迅猛发展离不开物理学，物理学是各类科学技术发展的基础。物理学理论的发展推动着各个学科的发展。

物理学是一门实验科学，物理学概念的建立、物理学规律的发现都是以严格的实验为基础的，离开了实验，一切科学技术的发展都不可能实现。

物理实验课是高等学校理工类各专业学生的必修课，是学生毕业以后，从事各类技术工作和科学实验的基础，它可以使学生系统地掌握各种实验的原理和实验技能，了解进行各种科学实验的基本过程和基本方法，为培养应用型人才，提高学生的综合素质打下良好的基础。通过实验设计和实验测量，可以提高学生的思维能力和动手能力，对培养学生的创新意识，特别是对学生智力的开发都大有益处，对提高学生严谨的学风、科学的态度、唯物主义观念、品德修养都将起到积极的作用。

2. 物理实验课的目的和任务

实践是检验真理的唯一标准，任何理论都需经过实践的检验才能确定其正确性。学生通过物理实验课，通过对物理实验现象的观察、测量，对获得的数据结果进行分析、运算，可加深对所学物理学概念、物理学规律的认识和理解，加深和巩固从书本上所学到的知识。物理实验课能培养和提高学生的科学实验能力和技巧，确立正确的科学思维和科学方法。通过实验，使学生自觉地预习实验教材和实验资料，能够利用教材和讲义或说明书，掌握实验仪器的性能、特点、使用方法、使用注意事项、仪器误差。通过实验，学生能够学会误差分析、数据处理的基本理论和手段。

在实验过程中，测量的方法要得当，测量的数据要准确，计算过程要细致，获得的结论要正确。

通过实验，还能够培养学生勇于探索、坚韧不拔的钻研精神和理论联系实际、实事求是的科学态度，严谨踏实的工作作风以及团结协作、遵章守纪、爱护公物的优良品格。

3. 物理实验的程序

物理实验大致分为三个环节：

(1) 课前预习

在做某一个实验之前，学生一定要进行相关知识的预习，了解实验目的、实验内容、实验方法、实验原理和实验的知识点、实验仪器设备的使用、需要获得的数据，明确实验步骤及注意事项。在此基础上写出预习报告，做到心中有数。预习报告包括实验目的、实验所使用的仪器、实验原理、实验内容及步骤、数据的记录、数据的分析及处理、做好实验的思考题等相关事宜。有些设计型实验还需要自己根据实验原理，拟定实验方案，选择实验仪器，绘出实验原理图，确定实验步骤，学会如何获得实验数据，怎样进行数据处理等。

(2) 进行实验

学生经过认真的预习后，对实验的目的、原理、所使用的仪器以及实验内容有了一个明确认识。学生进入实验室后，首先要交预习报告，经实验老师检查合格后，方可进行实验。进入实验室以后，要认真听取实验老师对实验的要求、方法、重点和难点以及实验注意事项的讲解。

全面熟悉各种实验仪器的使用方法和注意事项、仪器的放置要求及合理的位置摆放、仪器的安装调试，还要注意仪器的零点调节以及仪器参数对实验结果的影响。

实验中要认真操作，正确分析。安装调试仪器要正确无误，出现故障要冷静处理，及时请教老师，不可盲目操作，以防出现事故。

认真观察实验中的数据。读取数据时一定要认真仔细，不可从两侧斜方向读取数据，要正面对准仪表或设备的盘面，垂直读取数据。

要认真记录实验所获得的数据。实验数据是计算实验结果和分析问题的依据，要把实验数据记录在事先设计好的表格里，记录数据要有条理性和规律，不要随意记录在任何地方，防止进行数据处理时发生混乱。还要记录实验时的环境温度、湿度和气压等。

(3) 写实验报告

通过实验得到的实验数据，需要分析总结，得出合理的结论，需要写出实验报告。实验报告是对实验的全面总结，要求学生必须认真完成。字迹要工整，文理要通顺，公式推导要规范，图形图表要合乎要求，结论要明确。

实验报告的内容包括：实验名称、实验目的、仪器设备、实验原理、实验步骤及内容、数据的记录、数据分析、实验结论。最后还要对实验提出改进措施和意见。

第一章 测量误差与不确定度

1.1 测量

在科学实验中，一切物理量都是通过测量得到的。测量是指用实验方法确定被测对象的量值的实验过程。测量分为直接测量和间接测量。直接测量是指被测量和同类单位的标准物或计量器具直接比较，得出被测量量值的测量。例如，某桌子的长度与米尺相比，得出长度为 1.245 m；某铁块的质量与砝码相比，得出铁块质量为 26.23 g。间接测量是指由一个或几个直接测得量，经已知函数关系得到被测量。例如，测量单摆的摆长 l 和周期 T ，由已知公式 $g=4\pi^2 l/T^2$ 算出重力加速度 g 值的过程就是间接测量。

测得的数据不同于数学中的数值，它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位，便具有了一种特定的物理意义，这时它才可以称为一个物理量。因此，在实验中经测量所得的数据应包括数值和单位，二者缺一不可。

1.2 误差

1.2.1 真值与误差

各被测量在实验当时条件下均有不以人的意志为转移的真实大小的量值。真值是测量的理想结果，但是它是不能确知的。首先，测量仪器只能准确到一定程度；其次，受环境条件的影 响，加之观测者操作和读数不能十分准确，理论也有近似性，所以测得值和真值之间总是或多或少地存在一定的差值，这种差值称为该测量值的测量误差，简称误差，即

$$\text{测得值}(x) - \text{真值}(a) = \text{误差}(\epsilon)$$

误差 ϵ 是一个代数值，当 $x \geq a$ 时， $\epsilon \geq 0$ ；当 $x < a$ 时， $\epsilon < 0$ 。误差存在于一切测量中，而且贯穿于测量过程的始终。

在实际测量中，为了减小误差，常常对某一物理量 x 进行多次等精度测量，得到一系列测量值 x_1, x_2, \dots, x_n ，则测量结果的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2.1)$$

算术平均值并非真值，但它比任一次测量值的可靠性都要高。系统误差忽略不计时的算术平均值可作为最佳值，称为近真值。我们把测量值与算术平均值之差称为偏差（或残差），即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.2.2)$$

设被测量 X 的测量值为 x ，其真值为 a ，则绝对误差为

$$\epsilon = x - a \quad (1.2.3)$$

绝对误差可以用来比较不同测量仪器测量同一被测物理量测量准确度的高低。

测量的绝对误差和真值的比称为测量的相对误差，一般用百分比来表示，即

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{a} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

相对误差可以用来比较不同被测物理量测量准确度的高低。

由于真值是不能确知的，所以测得值的误差也不能确切知道，在此情况下测量的任务是：

- (1) 给出被测量真值的最佳值；
- (2) 给出真值最佳值的可靠程度的估计。

研究误差的目的是：

- (1) 尽量减少测量值中的误差；
- (2) 对残存的误差的大小给出某种估计值。

1.2.2 系统误差和随机误差

正常测量的误差，按其产生的原因和性质可分为系统误差和随机误差两类，它们对测量结果的影响不同，对这两类误差处理的方法也不同。

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下（方法、仪器、环境和观测者都不变），多次测量同一量时，误差的大小和方向保持恒定；或在条件改变时，大小和方向按一定规律变化的误差。

(1) 系统误差的来源

1) 理论和方法的误差：这是由于测量所依据的实验原理或公式本身的近似性，或实验方法不完善带来的误差。例如，单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋近于零，这实际上是达不到的，用它来计算周期必然带来误差。

2) 仪器误差：这是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。例如，用未经校准零位的螺旋测微计（又叫千分尺）测量零件长度就会引起误差。

3) 环境误差：这是由于环境条件变化所引起的误差。如温度、气压、湿度等环境因素的变化引起的误差。

4) 个人误差：这是由于观测者生理或心理特点造成的。例如，用肉眼在米尺刻度线上读数时，习惯地偏向一个方向从而带来的误差。

由于系统误差在实验条件不变时有确定的大小和方向，因此，在同一实验条件下多次测量求平均值并不能减小或消除它，必须找出产生系统误差的原因，针对具体原因去消除或引入修正值，对测量值加以修正。

(2) 发现系统误差的方法

要发现系统误差，就必须研究测量理论和方法的每一步推导，校验或校准每一件仪器，分析每一个因素对实验的影响等。下面介绍几种常用的发现系统误差的方法。

1) 对比的方法

① 实验方法的对比。用不同方法测量同一个量，看结果是否一致。

② 仪器的对比。例如，将标准电流表和被检测电流表串联于同一电路中，若读数不一致，说明被测电流表不准，即可找出其修正值。

③ 改变测量方法。例如，把电流反向进行读数；在增加砝码过程中和减少砝码过程中读数等。

④ 改变实验中某些参量的数值。例如，改变电路中电流的数值，如果测量结果单调或有规律地变化，说明有某种系统误差存在。

⑤ 改变实验条件。例如，在电路中将某个元件的位置变动一下。

⑥ 两个人对比观测，可发现个人误差。

2) 理论分析的方法

① 分析测量所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异。例如，在“单摆”实验中，周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ，这是做了 $\theta \approx 0$ 的近似，公式把摆球看做质点了，忽略了摆线质量、空气浮力与阻力等因素。

② 分析仪器是否达到了所要求的使用条件。例如，用测高仪测量物体高度时，要求支架垂直、望远镜平移，否则测量结果不能反映物体的实际高度。

3) 分析数据的方法：测量所得数据明显不服从统计分布规律时，则可将测量数据依次排列，如偏差大小有规则地向一个方向变化，则测量中存在线性系统误差；如偏差符号有规律地交替变化，则测量中存在周期性系统误差。

(3) 系统误差的消除与修正

消除系统误差的方法，首先是使它不产生。如果做不到，那么就修正它，或在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种消除系统误差的方法。

1) 消除产生系统误差的根源

① 采用符合实际的理论公式。

② 消除仪器的零位误差。例如，在使用螺旋测微计前要先检查零位，并记下零位误差，以便对测量值进行修正。

③ 保证仪器装置及测量满足规定条件。

④ 采用适当方法在理论公式中消去某个量，就可能避免它的系统误差。例如，在测定液体比热容实验中，若能保证两个量热器系统完全相同，温升也相同，就能消除因散热而引起的系统误差。

2) 找出修正值，对测量结果进行修正

① 用标准仪器校准一般仪器，得出修正值或校准曲线。例如，经过长期使用的电表、电阻箱在使用前必须经过校准或得出校准曲线。

② 对理论公式进行修正，找出修正值。例如，用 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 测单摆周期时，若考虑摆球的体积大小及空气的浮力和阻力，则此公式必须修正。

3) 从测量方法上或仪器设计上抵消系统误差影响

① 对称测量可以抵消系统误差的影响。例如，在分光计上读出刻度盘相隔 180° 处的两组数据，以消除偏心差。

② 保持实验或仪器一定，可以抵消某种系统误差。例如， $m=m_1-m_0$ ，测量 m_1 及 m_0 时用同一砝码可以抵消砝码的系统误差。

③ 线性观测法可以抵消某种线性变化的系统误差。例如，电源电动势随时间线性降低，则使用电位差计时可隔相等时间轮流测标准量和待测量，即第一次、第三次测标准量，将两次平均值与第二次所测的待测量对应。

④ 周期性系统误差的消除。对按正弦规律变化的周期性系统误差，可采取在每半个周期进行偶数次测量的方法予以消除。

(4) 研究系统误差的主要任务

- 1) 探索系统误差的来源，设计实验方案消除或削减该项误差；
- 2) 估计残存系统误差的可能的范围。

2. 随机误差

在同一条件下对某一物理量进行多次测量时，测量值总有少许偏差，而且数值大小和正负号经常变化，这种误差称为随机误差。

(1) 随机误差的来源

1) 主观方面：由于人的感官灵敏度和仪器的精度有限，实验者操作不熟练，估计读数不准等原因而带来的随机误差。

2) 客观方面：外界环境干扰。例如，温度的微小起伏、气流扰动、杂散电磁场的不规则脉动等，这些因素既不能消除，又无法估量。

(2) 随机误差及其分布

实验中随机误差不可避免，也不可能消除。但是，可以根据随机误差的理论来估算其大小。为了简化起见，在下面讨论随机误差的有关问题中，假设系统误差已经减小到可以忽略的程度。

1) 标准误差与标准偏差：前面已经提到，算术平均值可作为近真值，就是因为采用算术平均值可以削弱随机误差。

设 n 次测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 的误差为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ ，真值为 a ，则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n$$

将上式展开后，两侧除以 n ，得

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n)$$

它表示算术平均值的误差，等于各测量值误差的平均，随机误差有正有负，相加时可以抵消一些，所以 n 越大，算术平均值越接近真值。因此，可以用算术平均值作为被测量真值的最佳值。

但是，算术平均值只是真值的估计值，不能反映各次测量值的分散程度。采用标准误差来评价测量值的分散程度是既方便又可靠的。对物理量 x 进行 n 次测量，测量值为 x_i ，真值为 x_0 ，其标准误差（标准差）定义为

$$\sigma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} \quad (1.2.5)$$

在实际测量中，测量次数 n 总是有限的，而且真值也不可不知。因此标准误差只有理论上的价值。对标准误差 $\sigma(x)$ 的实际处理只能进行估算。估算标准误差的方法很多，最常用的是贝塞尔法，它用实验标准（偏）差 $S(x)$ 近似代替标准误差 $\sigma(x)$ 。实验标准差的表达式为

$$S(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.2.6)$$

2) 平均值的实验标准差：如上所述，在我们进行了有限次测量后，可得到算术平均值

\bar{x} 。 \bar{x} 也是一个随机变量。在完全相同的条件下，多次进行重复测量，每次得到的算术平均值本身也具有离散性。由误差理论可以证明，算术平均值的实验标准差为

$$S(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.2.7)$$

由此式可以看出，平均值的实验标准差比任一次测量的实验标准差小。增加测量次数，可以减少平均值的实验标准差，提高测量的准确度。但是，单纯凭增加测量次数来提高准确度的作用是有限的。如图 1.2.1 所示，当 $n > 10$ 以后，随测量次数 n 的增加， $S(\bar{x})$ 减小得很缓慢。所以，在科学研究中测量次数一般取 10~20 次，而在物理实验教学中一般取 6~10 次。

3) 随机误差的正态分布规律：随机误差的分布是服从统计规律的。首先，我们用一组测量数据来形象地说明这一点。例如，用数字毫秒计测量单摆周期，重复 60 次 ($n = 60$)，将测量结果统计在表 1.2.1 中。

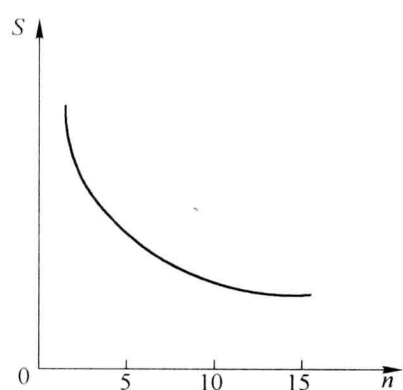


图 1.2.1 实验标准差 S 随测量次数 n 变化关系

表 1.2.1

时间区间/s	出现次数 Δn (频数)	相对频数 $\frac{\Delta n}{n}$ (%)	时间区间/s	出现次数 Δn (频数)	相对频数 $\frac{\Delta n}{n}$ (%)
2.146~2.150	1	2	2.166~2.170	15	25
2.151~2.155	3	5	2.171~2.175	9	15
2.156~2.160	9	15	2.176~2.180	5	8
2.161~2.165	16	27	2.181~2.185	2	3

以时间 T 为横坐标，相对频数 $\Delta n/n$ 为纵坐标，用直方图将测量结果表示出来，如图 1.2.2 所示。如果再进行一组测量（如 100 次），作出相应的直方图，仍可以得到与前述图形不完全吻合但轮廓相似的图形。随着次数的增加，曲线的形状基本不变，但对称性越来越明显，曲线也趋向光滑。当 $n \rightarrow \infty$ 时，上述曲线变成光滑曲线。这表示测量值 T 与频数 $\Delta n/n$ 的对应关系呈连续变化的函数关系。显然，频数与 T 的取值有关，连续分布时它们之间的关系可以表示为

$$\frac{dn}{n} = f(T) dT$$

函数 $f(T) = \frac{dn}{n dT}$ 称为概率密度函数，其含义是在测量值 T 附近、单位时间间隔内测量值出现的概率。可见，当测量次数足够多时，其误差分布将服从统计规律。在许多物理测量中，当 $n \rightarrow \infty$ 时，随机误差 ϵ 服从正态分布（或称高斯分布）规律。可以导出正态分布概率密度函数的表达式为

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2.8)$$

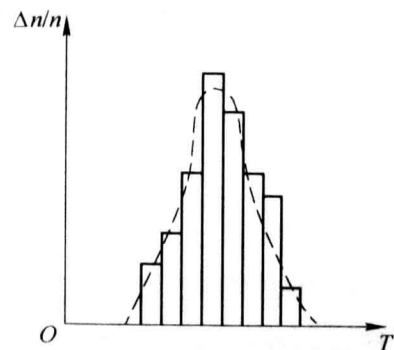


图 1.2.2 统计直方图

图 1.2.3 是正态分布曲线。该曲线的横坐标为误差 ϵ ，纵坐标 $f(\epsilon)$ 为误差分布的概率密度函数。 $f(\epsilon)$ 的物理含义是：在误差值 ϵ 附近、单位误差间隔内，误差出现的概率。曲线下阴影面积元 $f(\epsilon)d\epsilon$ 表示误差出现在 $\epsilon \sim \epsilon + d\epsilon$ 区间内的概率。按照概率理论，误差 ϵ 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 范围内是必然的，即概率为 100%。所以，图中曲线与横轴所包围的面积应恒等于 1，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\epsilon) d\epsilon \equiv 1$$

由概率理论可以证明， σ 就是标准差。在正态分布的情况下，式 (1.2.8) 中 σ 的物理意义是什么呢？首先定性分析一下：从式 (1.2.8) 可以看出，当 $\epsilon=0$ 时，

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

可见， σ 值越小， $f(0)$ 的值越大。由于曲线与横坐标轴所包围的面积恒等于 1，所以曲线峰值高，两侧下降就较快。这说明测量值的离散性小，测量的精密度高。相反，如果 σ 值大， $f(0)$ 就小，误差分布的范围就较大，测量的精密度低。这两种情况的正态分布曲线如图 1.2.4 所示。

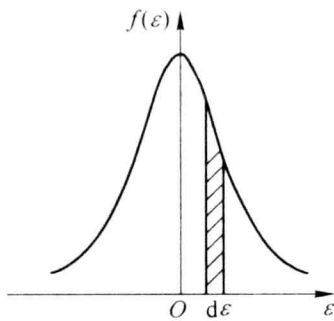


图 1.2.3 正态分布曲线

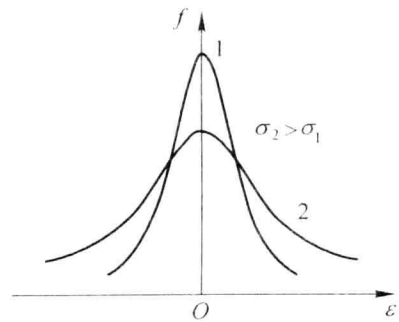


图 1.2.4 σ 的物理意义

4) 置信区间与置信概率：我们还可以从另一个角度理解 σ 的物理意义。计算一下测量结果分布在 $-\sigma \sim \sigma$ 之间的概率，可得

$$P_1 = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = 0.683 = 68.3\%$$

这就是说，在所测的一组数据中平均有 68.3% 的数据测值误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 之间。同样也可以认为在所测的一组数据中，任一个测值的误差落在区间 $[-\sigma, \sigma]$ 内的概率为 68.3%。我们把 P_1 称作置信概率， $[-\sigma, \sigma]$ 就是 68.3% 的置信概率所对应的置信区间。

显然，扩大置信区间，置信概率就会提高。可以证明，如果置信区间分别为 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, 3\sigma]$ ，则相应的置信概率为

$$P_2 = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = 95.5\%$$

$$P_3 = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\epsilon) d\epsilon = 99.7\%$$

一般情况下，置信区间可用 $[-k\sigma, k\sigma]$ 表示， k 称为包含因子，对于一个测量结果，只要给出置信区间和相应的置信概率，就表达了测量结果的精密度。

对应于 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 这个置信区间，其置信概率为 99.7%，即在 1 000 次的重复测量

中, 随机误差超出 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 的平均只有 3 次。对于一般有限次测量来说, 测量值超出这一区间的概率非常小, 因此常将 $\pm 3\sigma$ 称为极限误差。

5) t 分布: 根据误差理论, 当测量次数很少时 (例如, 少于 10 次), 测量列的误差分布将明显偏离正态分布, 这时测量值的随机误差将遵从 t 分布。这个分布是 1908 年由戈塞特首先提出来的, 由于他在发表这一成果时使用了笔名 “Student”, 故也称 “学生分布”。 t 分布曲线与正态分布曲线类似, 两者的主要区别是 t 分布的峰值低于正态分布, 而且上部较窄, 下部较宽, 如图 1.2.5 所示。这样, 在有限次测量的情况下, 就要将随机误差的估算值取大一些, 包含因子 k 应转换成 t_p , t_p 值与测量次数有关, 也与置信概率 P 有关, 表 1.2.2 给出了 t_p 与测量次数 n 、置信概率 P 的对应关系, 供查用。

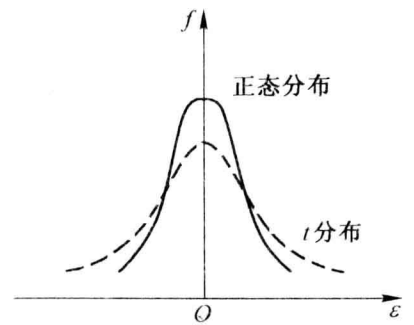


图 1.2.5 t 分布与正态分布比较

由表 1.2.2 可见, 当置信概率 $P=68\%$ 时, t_p 因子随测量次数增加而趋向于 1。当 $n>6$ 以后, t_p 与 1 的偏离并不大, 故在进行误差估算时, 当 $n\geq 6$ 时置信概率取 68.3% , 包含因子可以不加修正。

表 1.2.2

$P \backslash n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	...	∞
0.68	1.84	1.32	1.20	1.41	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.03	...	1.00
0.95	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.09	...	1.96
0.99	63.66	9.92	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.26	2.86	...	2.58

3. 测量的精密度、准确度和精确度

反映测量结果与真实值接近程度的量, 称为精度 (亦称精确度)。它与误差大小相对应, 测量的精度越高, 其测量误差就越小。“精度”应包括精密度和准确度两层含义。

(1) 精密度

测量中所测得数值重现性的程度, 称为精密度。它反映随机误差的影响程度, 精密度高就表示偶然误差小。

(2) 准确度

测量值与真值的偏移程度, 称为准确度。它反映系统误差的影响程度, 准确度高就表示系统误差小。

(3) 精确度 (精度)

它反映测量中所有系统误差和随机误差综合的影响程度。

在一组测量中, 精密度高的准确度不一定高, 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。

为了说明精密度与准确度的区别, 可用下述打靶子例子来说明, 如图 1.2.6 所示。

图 1.2.6a 中表示精密度和准确度都很好, 则精确度高; 图 1.2.6b 表示精密度很好, 但准确度却不高; 图 1.2.6c 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。