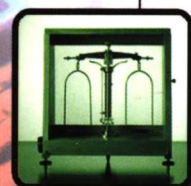


DAXUE WULI SHIYAN

大学物理实验

◆ 邓金祥 刘国庆 主编

◆ 苏丽娅 王丽香 原安娟 等编著



北京工业大学出版社

大学物理实验

邓金祥 刘国庆 主编
苏丽娅 王丽香 原安娟 等编著



北京工业大学出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教育部《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》并结合多年大学物理实验教学经验所编写的教材。

全书共分9章,第1章着重介绍实验误差和不确定度的基本概念和计算方法以及有效数字的概念;第2章介绍物理实验数据处理的基本方法;第3章对物理实验的基本方法和基本操作技术进行归纳和介绍;第4章为力学、热学实验;第5章为电磁学实验;第6章为光学实验;第7章为近代物理、综合和应用性实验;第8章介绍近几年给学生开设的设计性实验;第9章介绍仿真物理实验。

本教材实验目的明确,实验原理叙述清楚,实验内容安排得当,实验步骤详尽,每项实验设有预习思考题和思考题,适用于大学本科生和高职学生的物理实验课程。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/邓金祥,刘国庆主编. —北京:北京工业大学出版社, 2005.2

ISBN 7-5639-1490-0

I. 大… II. ①邓…②刘… 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 (2005) 第 006687 号

大学物理实验

邓金祥 刘国庆 主编

苏丽娅 王丽香 原安娟 等编著

*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

*

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 16 开本 21.25 印张 530 千字

印数: 1~3000 册

ISBN 7-5639-1490-0/G · 762

定价: 34.00 元

前 言

本书根据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合我们多年大学物理实验的教学实践经验编写而成。

全书共分9章。第1章着重介绍实验误差和不确定度的基本概念和计算方法以及有效数字的概念；第2章介绍物理实验数据处理的基本方法；第3章对物理实验的基本方法和基本操作技术进行归纳和介绍；第4章为力学、热学实验；第5章为电磁学实验；第6章为光学实验；第7章为近代物理、综合和应用性实验；第8章介绍近几年给学生开设的设计性实验；第9章介绍仿真物理实验。

从实验项目的选取看，既保留了多年来开设的传统实验，又编入了近几年新开设的实验。对每个实验项目的编写，我们力求做到：实验目的明确，实验原理叙述清楚，实验内容安排得当，实验步骤详尽。大多数实验项目后设有预习思考题和思考题。书后附表给出了常用物理常数、国际单位制简介和我国的法定计量单位。

实验课教学是一项集体的事业，从实验项目的筹备、开出，到教材的编写，都凝聚着实验室全体教师和实验技术人员的智慧和劳动成果。

在编写本书的过程中，我们广泛地参考了兄弟院校的有关教材，吸收了其中许多优秀内容，在此表示衷心的感谢。

本书编写分工如下：邓金祥编写绪论、第1~3章，第4.0，5.0.1，5.12，5.13，5.14，5.15，6.0，7.9节；刘国庆编写第5.1，5.2，5.4，5.5，5.6，5.7，5.9，5.10，7.11，7.12节，除8.2外的第8章和附录；苏丽娅编写第4.1，4.2，4.3，4.5，4.6，4.7，4.8，4.9，4.12，4.13，7.4节；王丽香编写第6.1，6.2，6.3，6.4，6.5，6.7，6.8，7.2节；原安娟编写第4.11，5.8，5.11，5.16，6.6，7.6，7.7，7.8节；杨萍编写第4.4、4.10节；吕春编写第5.0.2，5.0.3，5.3，8.2节；陈颜编写第7.1节；李宝胜编写第7.3节；李宝富编写第7.5节；王吉有编写第7.10节；王玲编写第9章。

由于编者水平有限，书中错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2005年1月

目 录

绪论	1
0.1 物理学与物理实验	1
0.2 要重视物理实验	2
0.3 物理实验课的教学目的	3
0.4 物理实验课的主要环节	3
0.5 严格基本训练, 培养科学实验素养	4
0.6 实验室规则	5
第1章 测量误差和不确定度	6
1.1 测量的误差和不确定度	6
1.2 随机误差的统计处理方法	9
1.3 仪器误差限和灵敏阈	12
1.4 直接测量结果的表示和总不确定度的估计	13
1.5 间接测量的结果和不确定度的合成	15
1.6 有关不确定度的数据处理过程与实例	15
1.7 有效数字	18
附录 1.1 系统误差的发现和消减	20
习题	22
第2章 物理实验数据处理的基本方法	24
2.1 列表法	24
2.2 作图法	25
2.3 最小二乘法	27
2.4 逐差法	29
附录 2.1 Origin 数据处理软件简介	30
附录 2.2 用函数计算器处理实验数据	33
习题	36
第3章 物理实验的基本方法和基本操作技术	37
3.1 基本的实验测量方法	37
3.2 基本的实验操作技术	42
第4章 力学和热学实验	44
4.0 概述	44
4.1 长度的测量	51
4.2 物体密度的测定	56
4.3 在气垫导轨上测定滑块的速度和加速度	61
4.4 气轨上动量守恒定律的研究	65
4.5 金属弹性模量的测量	67
4.6 用扭摆法测定物体转动惯量	74

4.7	刚体转动实验	78
4.8	三线悬盘实验	82
4.9	用自由落体测定重力加速度	86
4.10	弦的振动实验	90
4.11	用波尔共振仪研究受迫振动	93
4.12	落球法测定液体的粘滞系数	99
4.13	气体比热容比 c_p/c_v 的测定	102
第 5 章	电磁学实验	105
5.0	概述	105
5.1	电学实验基础	112
5.2	电表的改装与校准	115
5.3	万用表的原理和初步使用	118
5.4	测量二极管的伏安特性	121
5.5	用惠斯登电桥测电阻	123
5.6	用双臂电桥测低电阻	127
5.7	用电位差计测量电动势	133
5.8	灵敏检流计的研究	136
5.9	PN 结正向压降与温度关系的研究和应用	142
5.10	霍尔效应	146
5.11	铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	152
5.12	静电场的模拟	158
5.13	示波器的原理和使用	163
5.14	非均匀磁场的测量	173
5.15	交流电路的谐振现象	178
5.16	交流电桥	182
第 6 章	光学实验	189
6.0	概述	189
6.1	薄透镜焦距的测定	193
6.2	分光计的调节和使用	199
6.3	用极限法测固体的折射率	206
6.4	用阿贝折射仪测液体的折射率	210
6.5	用牛顿环测透镜的曲率半径	214
6.6	单缝夫琅和费衍射	219
6.7	衍射光栅及其特性	227
6.8	用椭偏光法测量薄膜的厚度和折射率	231
第 7 章	近代物理与综合性、应用性实验	236
7.1	全息照相	236
7.2	钨逸出电位的测量	239
7.3	夫兰克 - 赫兹实验	244

7.4	微波布拉格衍射	249
7.5	声速的测定	254
7.6	迈克尔逊干涉实验	261
7.7	光谱观测	268
7.8	光速的测定	275
7.9	音频信号光纤传输技术实验	281
7.10	X 射线衍射实验	285
7.11	验证快速电子的动量与动能的相对论关系	290
7.12	非线性电路的混沌现象	295
第 8 章	设计性实验	299
8.0	设计性实验的性质、特点和过程	299
8.1	测量钢球的转动惯量	303
8.2	用补偿法测电阻	303
8.3	电表内阻的测量	304
8.4	用电位差计校准电流表和电压表	305
8.5	谐振—示波器法测量空心自感线圈的自感和电阻	305
8.6	利用利萨如图形测定 RL 串联电路的相频特性	306
8.7	在分光计上用平行光反射法测量三棱镜的顶角	306
8.8	用单缝衍射原理测光波长	306
第 9 章	计算机模拟物理实验	308
9.1	计算机模拟实验及内容组成	308
9.2	计算机模拟实验运行举例	310
附录 1	物理常数表	322
附录 2	中华人民共和国法定计量单位	327
参考文献		329

绪 论

0.1 物理学与物理实验

物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科，对人类未来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，并扩展着我们认识大自然知识的疆界。

(2) 物理学发展着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运转。

(3) 物理学有助于技术的基本建设，它为科学进步和发明的利用，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、计算机科学家以及物理学科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、正电子发射层析术、超声波成像和激光手术等，提高了我们生活的质量。

以上是 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) 代表大会通过的关于物理学对社会的重要性所作的决议。

为了体会决议的意义，让我们来回顾一下 20 世纪物理学与技术发展的几个史实。

当今，廉价的计算机单块芯片可以容纳数十万只晶体管，一块指甲大小的芯片具有二三十年前一台房间大小的计算机那样的计算能力。如此辉煌的成就应归功于 1948 年晶体管的诞生。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。因此他们获得了 1956 年诺贝尔物理学奖。

1958 年肖洛(A.Schawlow)和汤斯(G.Townes)在研究光对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设想和建议，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，也是整个科学史上一个伟大的里程碑。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。

物理学家利用激光在一种材料上记录图形，它提供了一种存储和取用信息的技术，可以将相当于数百万卷百科全书内容的信息存储在糖块大小的材料之中。

激光光脉冲的宽度窄,持续时间可以做到几个飞秒(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光脉冲的技术相结合,有可能实现接近每秒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来传递信息,以代替由现在使用的较为缓慢的电子来传递信息。物理学家利用光学双稳态现象能够使一个光束将另一个光束接通或者切断,这展现了一种光学型晶体管的可能性,它为光学计算机的出现打开了大门。

由于玻璃纤维比金属导体重量轻、价格低和抗干扰能力强,光纤通信发展迅速。技术专家展望本世纪光纤传输技术的新进展:一对细如头发丝的光纤可以传递近2 000万路电话。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社会的影响更大,如果说20世纪是电子时代,那么21世纪就可能是光子时代。

1895年德国物理学家伦琴(W. K. Rontgen)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。从20世纪70年代开始,医学专家利用物理学原理发明了计算机辅助的X射线层析摄影术(CT)等一些新技术,利用它们可以确定人体内部结构而无需将器械插入人体内。CT可以给医生显示一幅人体的内部器官的三维图像。它是用一连串X射线束穿透人体,每一束射线给出了透过人体的一个线条,借助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。

回眸20世纪,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、等离子体和流体、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,物理学是高新技术发展的源泉。

物理学研究方法通常是在观察和实验的基础上对物理现象进行分析、抽象和概括,建立物理模型,探索物理规律,进而形成物理理论。可见,物理规律是实验事实的总结,而物理理论的正确与否需要实验来验证。

“大学物理”和“物理实验”原来是一门课程。由于历史的原因,为了纠正重理论、轻实验的偏向,为了加强实验能力训练,在20世纪70年代末,物理实验从原来的物理课程中分离出来,独立形成一门课程——物理实验。它与物理理论课是关系密切的两门课程。实验需要理论指导,在实验过程中,通过理论的运用与现象的观测、分析,又可以加深和扩大学生对物理知识的理解。

0.2 要重视物理实验

物理实验是理工院校学生进行科学实验基本训练的一门独立的基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端。理工科学生学好物理学和物理实验,获得进行科学实验的基本技能和经验,对后继工程技术课程的学习以至从事科学技术工作将起到重要作用。

科学实验是人们按照一定的研究目的,借助特定仪器设备,在预先安排和严格控制的条件下对自然事物和现象进行精密、反复的观察和测试,以探索其内部的规律性的过程。这种对自然有目的、有控制、有组织的探索活动是现代科学技术发展的源泉。如果没有科学实验,现代科学技术永远不会达到目前的成就。

大学教育,不仅要求学生掌握已知,更要培养学生探索未知的能力。近年来随着物理实

验教学体系与内容的改革，物理实验课在高素质人才培养中越来越显示其独特的地位和重要性。

“物理学是以实验为本的科学”，这一精辟论述出自诺贝尔物理学奖获得者、著名理论物理学家杨振宁教授的一则题词。这是物理学界的共识。无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证都要靠实验。在物理学发展过程中，人类积累了丰富的实验方法，创造出各种精巧的仪器设备，涉及广泛的物理现象，这就使物理实验课有了充实的教学内容。学生从中可以学到许多基本实验方法和实验技能，观察到许多生动的自然现象，物理实验在客观实际的事物与抽象模型化的物理理论之间架起桥梁，使学生在应用理论于实践的过程中，加深对理论的理解，提高分析和解决实际问题的能力。

0.3 物理实验课的教学目的

物理实验课将使学生得到系统实验方法和实验技能的训练，使学生初步了解科学实验的主要过程和基本方法，为今后的学习和工作奠定良好的基础。

物理实验课是一门实践性课程。学生在教师指导下，通过自己独立完成实验课题增长知识，提高能力。整个教学活动的进行也将有助于学生作风、态度及品德的培养和素质的提高。

本课程要完成三项具体任务。

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习物理实验知识，加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括：①能够通过阅读实验教材或资料，做好实验前的准备；②能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器；③能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断；④能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果和撰写合格的实验报告；⑤能够完成简单的、具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风，严肃、认真的工作态度，主动研究的探索精神，遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

0.4 物理实验课的主要环节

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段。

(1) 课前预习。每次实验课前要做好实验准备工作。通过阅读实验教材和参考资料，弄清本次实验的目的、原理和所要使用的仪器，明确测量方法，了解实验要求及实验中特别要注意的问题等。在此基础上写出简要的预习报告。预习报告包括：实验名称、目的、仪器、简要的原理及计算公式、简单的电路图和光路图以及记录测试数据的表格。

预习的好坏将决定能否主动、顺利地进行实验。

(2) 实验操作。在动手操作前应首先认识和熟悉仪器，了解使用方法，记录仪器的规格型号，然后进行仪器的安装（或连接电路）、调试。实验要按步骤井井有条地进行。在正式获取实验数据之前，要把仪器设备调试到最佳工作状态。要明确每步操作的意义，要掌握正

确的调整操作方法,要认真观察实验现象,正确记录实验数据。实验中若出现不正常情况要及时请教教师,不要自己随意处理。如果对实验有新的想法或想进一步深入研究,需向指导教师说明并经同意后,再进行。实验完毕,实验数据需经教师审阅、签字,再将仪器整理好。

实验操作是物理实验基本程序中的核心,是学生主动研究、积极探索的好时机。每一实验收获的大小,主要取决于学生主观能动性的发挥程度。

(3) 整理实验报告。实验报告是实验成果的文字报道,是实验过程的总结。要写好一份实验报告,应做到:认真学习和掌握实验原理和方法,正确进行数据处理和误差分析,记录并分析实验中观察到的现象,正确表示出测量结果,并对结果作出合理分析和讨论。

实验报告内容包括:

①实验名称。

②实验目的。

③实验仪器。写明主要仪器的规格,型号和被测样品编号。

④实验原理。简要叙述有关物理内容(包括电路图、光路图或实验装置示意图)及测量中依据的主要公式,式中各量的物理含义及单位,公式成立所应满足的实验条件等。

⑤实验步骤。根据实际的实验过程写明关键步骤和 safety 注意要点。

⑥数据表格与数据处理。记录中应有仪器编号、规格及完整的实验数据。要完成数据计算、曲线图绘制及误差分析。最后写明实验结果。

⑦必要的讨论。内容不限,可以是实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可解答教师指定的思考题。

写出一份文字简练、通顺,字迹清楚,数据齐全,图表规范、正确的实验报告是对学生基本的要求,也是学生应具备的基本能力。

0.5 严格基本训练,培养科学实验素养

进行科学实验训练是为成才练基本功。实验能力的提高是一点一滴积累起来的,严格的科学实验训练是从一招一式做起的。例如正确使用仪器就涉及怎样使仪器有最合理布局,按什么顺序调节仪器最便捷,还有调零、消视差等在操作中都需要考虑到。

实验不能只为测得几个数据,要充分利用实验的机会来培养自己的动手能力;遇到困难或在实验中出现不理想的情况不要一概归咎于仪器,而是要认真分析观察到的现象,找出原因,自己动手排除障碍,使实验顺利进行。其实,在实验中遇到困难是正常的,也是一件好事,使我们有更多思考问题和处理问题的机会。

物理实验中所选择的实验项目,集中了许多科学实验的训练内容,其中包含许多具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能。初学实验者必须在每一个实验后进行归纳、总结,这样就能不断积累实验知识,提高实验技能。例如一个实验的实际环境条件是否满足实验涉及的物理原理,作了哪些简化,实验体现了哪些基本实验方法,用了哪些数据处理方法等。

好奇心是一名优秀科技人员必须具有的心理特征之一。学生在实验时也要有好奇心。这样就会发现更多的实验现象,就会体会到更多的实验设计和仪器设计中的妙处,就有更多思考问题的机会和更多实验知识的积累。

“千里之行,始于足下。”同学们要以培养自己成为严谨的科技工作者的远大志向,认真

做好每一个实验，加速提高自己的实验能力和实验素养。

0.6 实验室规则

(1) 学生进入实验室需带上预习报告和记录实验数据的表格，经教师检查同意后，方可进行实验。

(2) 遵守课堂纪律，保持安静的实验环境。

(3) 使用电源时，务必经过教师检查线路后才能接通电源。

(4) 爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器，实验中严格按教材或仪器说明书操作，如有损坏，照章赔偿。公用工具用完后应立即放回原处。

(5) 做完实验，经教师审查测量数据并签字后，学生应将仪器整理还原，将桌面和凳子收拾整齐，然后离开实验室。

(6) 要及时交实验报告。

第 1 章 测量误差和不确定度

本章介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等内容。所介绍的都是初步知识，这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。这部分内容牵涉面较广，不可能在一两次学习中掌握。要求学生首先通过本章的学习，对提到的问题有一个初步的了解，然后结合每一个具体实验，通过运用加以掌握。应当说明的是：对这些内容的深入讨论是普通计量学以及数理统计学的任务，本书只能引用其中的某些结论和计算公式，更详细的探讨和证明留到数理统计课程中解决。

1.1 测量的误差和不确定度

1.1.1 误差的分类

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量分为直接测量和间接测量等。“直接测量”是无需对被测的量与其他实测的量进行函数关系的辅助计算而直接测出被测量的量。例如用米尺测物体的长度，用天平和砝码测物体的质量，用电流计测线路中的电流，都是直接测量。“间接测量”指利用直接测量的量与被测的量之间已知的函数关系，从而得到该被测量的量。例如测物体密度时，先测出该物体的体积和质量，再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量，有许多是间接测量。

实践证明，测量结果都存在误差，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、测量环境、测量者的观察力等都不能做到绝对严密，这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此，分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差作出估计，就是物理实验和许多科学实验必不可少的工作。为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识。

测量误差就是测量结果与被测量的真值（或约定真值）之间的差值，测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

$$\text{绝对误差}(\delta) = \text{测量结果}(x) - \text{被测量的真值}(a)$$

$$\text{相对误差}(E_r) = \frac{\text{测量的绝对误差}(\delta)}{\text{被测量的真值}(a)} \times 100\%$$

一般情况下，测量误差总是较小，因此可以把绝对误差与测量值的比作为相对误差。显然，对于两个不同的测量结果，绝对误差大的其相对误差不一定大，相对误差大的其绝对误差也不一定大。

被测量的真值是一个理想概念，一般来说，实验者对真值是不知道的。在实验测量中，

常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值，称为约定真值。

测量中的误差主要分为两种类型，即系统误差和随机误差。它们的性质不同，需分别处理。

1.1.2 系统误差

在相同条件下，对同一被测量的多次测量中，误差的绝对值和符号（正、负）保持恒定或在条件改变时，误差的绝对值和符号（正、负）按一定的规律变化，这种误差称为系统误差。

系统误差的特征是它确定的规律性，这种规律性可表现为定值，如未经零点校准的仪器造成的误差；也可表现为累加，如用受热膨胀的钢尺测量长度，其示值小于真实长度，并随待测长度成正比增加；也可表现为周期性规律，如测角仪圆形刻度盘中心与仪器转动中心不重合造成的偏心差。系统误差的规律性在于测量条件一经确定，误差也随之确定。因此，原则上说，这类误差能够针对产生的原因进行消减或修正。对于操作者来说，系统误差的规律和其产生原因可能知道，也可能不知道，因此又可分为可定系统误差和未定系统误差。对于可定系统误差，可以找出修正值对测量结果加以修正；而对于未定系统误差一般难以作出修正，只能对它作出估计。

1.1.3 随机误差

在相同条件下多次重复测量同一个量时，每次测量出现的误差的绝对值和符号以不可预知的方式变化。这类误差称为随机误差。

随机误差的特点是单个测量误差表现出不可预知的随机性，而从总体来看，这类误差服从统计规律。这就使人们有可能在确定的条件下，通过多次重复测量，用统计方法得出随机误差的分布范围进而研究它对测量结果的影响。

系统误差和随机误差虽然是两种不同类型的误差，但它们又有着内在联系。在确定条件下，两者有着各自的含意和区别，但有时又可以相互转化。例如一支米尺刻度不均匀，如果固定用尺的某一部位测量一物体长度，这时米尺刻度不均匀就表现为系统误差；若用尺的不同部位多次测量这一物体长度，这时米尺刻度不均匀带来的误差就会显示出随机性。又如砝码的允差（极限误差），在制造砝码的生产单位是作为随机误差测定的，但在砝码的使用单位这个允差却是固定化了。根据系统误差与偶然误差的这种关系，对于一些未定系统误差，可以通过改变测量状态使之随机化。有时也可以通过改进仪器设备而使某些随机因素造成的误差转化成可定系统误差。事物的这种内在的对立统一性，使我们有可能在消减和修正可定系统误差后，用统一的方法对其余的误差部分作出估计和评论。

除上述两类误差外，还有一种误差是由于测量条件的突发性变化或由于读错、记错等原因引起数据异常造成的，称为粗大误差，简称粗差。应该避免出现这类误差。具有粗差的数据必须剔除。必须指出，判断一个观测值是否异常，需要以实验理论与技术上的理由为依据，原因不明时可用统计方法作出判断，不能无依据地贸然处理。有关用统计方法判断一个观测值是否具有粗差，可参阅有关误差理论的专著。

习惯上常用“精密度”这个词来反映随机误差的大小程度；用“正确度”来反映系统误差的大小程度；用“准确度”综合评定测量结果重复性以及与其真值一致性的程度。“准确度”有时也称“精确度”。“精度”一词通常是“精密度”的简称，但有时也用来作为“准确度”的简称。

如以射击打靶的结果与测量的结果进行类比，图 1-1 (a) 的弹着点明显偏离靶心，存在着系统误差。这种情况说明测量的正确度不高，但弹着点比较集中，离散程度不大，因此可以说它的精密度还是很高的。图 1-1 (b) 则相反，弹着点比较分散，因此精密度不高。但是从弹着点分布情况来看，并没有明显的固定偏向，因此可以认为它的正确度还是很高的。图 1-1 (c) 则不仅精密度高，而且正确度也高。我们说这一测量结果“准确度”高。

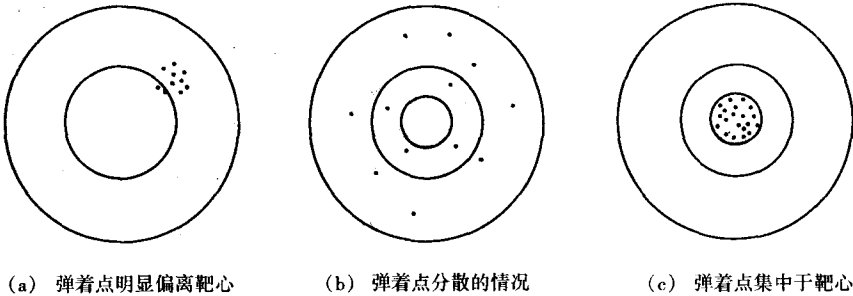


图 1-1 测量结果准确程度与射击打靶的类比

1.1.4 测量不确定度

测量误差存在于一切测量中，虽然通过提高实验技术和改进实验仪器，测量误差可以控制在较小范围里，但它不能完全消除。

一个测量值必须说明其可靠程度。而根据测量误差的定义，一般可以认为误差愈小测量值愈准确。但是测量误差通常是无法知道的，因此测量误差不能直接用作测量结果准确度的量化表示。为了对测量值的准确程度给出一个量化表述，有必要在测量误差的基础上给出一个“测量不确定度”的概念。

测量不确定度是测量结果必须具有的一个参数。测量不确定度反映了对被测量真值不能肯定的程度，或者说测量值作为被测量真值和估计值可能存在的一个分布范围并在这个分布范围内以一定的概率（如 $P = 95\%$ ）包含被测量真值。这个范围可表述为

$$\text{测量结果} = x \pm \Delta \quad (P = 95\%)$$

式中， x 是测量值； Δ 是测量不确定度； P 是包含真值的概率。

依照相对误差的定义，可以定义相对不确定度

$$U_r = \frac{\Delta}{x} \times 100\%$$

测量不确定度一般包含几个分量，按其数值评定的方法，可分为两大类：采用统计方法评定的 A 类不确定度分量和采用其他方法评定的 B 类不确定度分量。

1.2 随机误差的统计处理方法

1.2.1 随机误差的正态分布与标准误差

1. 随机误差的正态分布规律

在相同的测量条件下，对某一被测量进行多次重复测量，假设系统误差已被减弱到可以被忽略的程度，由于随机误差的存在，测量结果 $x_1, x_2, \dots, x_n$ （测量列）一般存在着一定的差异。如果该被测量的真值为 a ，则根据误差的定义，各次测量的误差 δ_i 为

$$\delta_i = x_i - a \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{1.1}$$

大量的实验事实和统计理论都证明，在绝大多数物理测量中，当重复测量次数足够多时，随机误差 δ_i 服从或接近正态分布（或称高斯分布）规律。正态分布的特征可以用正态分布曲线形象地表示出来，见图 1-2，横坐标为误差 δ ，纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，此曲线完全对称，正态分布具有以下性质：

- ①单峰性。绝对值小的误差出现的可能性（概率）大，绝对值大的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，误差的代数和趋向于零。

根据误差理论可以证明函数 $f(\delta)$ 的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{1.2}$$

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 1-2 中阴影的面积。式 (1.2) 中的 σ 是一个与实验条件有关的常数，称之为正态分布的标准误差。 $\pm \sigma$ 是曲线两个拐点的横坐标位置。

2. 标准误差的物理意义

按照概率理论，误差 δ 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的事件是必然事件，因此 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta)d\delta = 1$ ，即曲线与横轴所包围的面积恒等于 1。当 $\delta = 0$ 时，由式 (1.2) 得

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \tag{1.3}$$

由式 (1.3) 可见，若测量的标准误差 σ 很小，则必有 $f(0)$ 很大。由于曲线与横轴间围

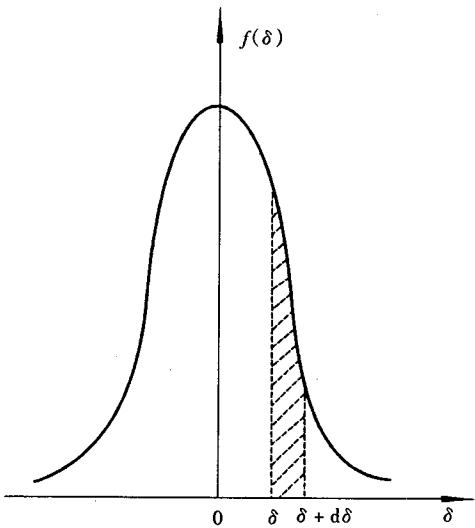


图 1-2 随机误差的正态分布曲线

成的面积恒等于1，所以如果曲线中间凸起较大，两侧下降较快，相应的测量必然是绝对值小的随机误差出现较多，即测得值的离散性小，重复测量所得的结果相互接近，测量的精密度高；相反，如果 σ 很大，则 $f(0)$ 就很小，误差分布的范围就较宽，说明测得值的离散性大，测量的精密度低。这两种情况的正态分布曲线如图1-3所示，因为 σ 反映的是一组测量数据的离散程度，所以常称它为测量列的标准误差。它的数学表达式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}{n}} \quad (1.4)$$

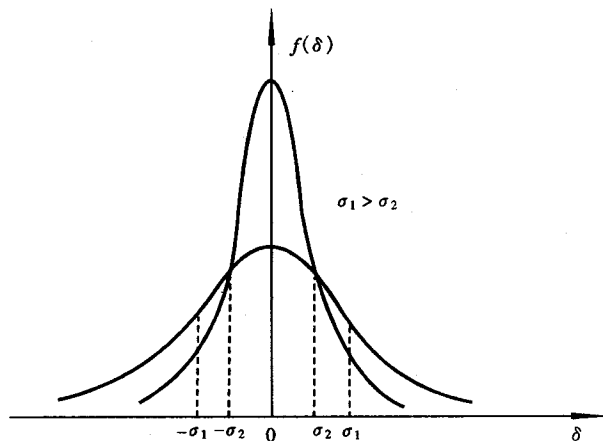


图1-3 σ 与 δ 的离散性关系

可以证明, $P(|\delta| < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = 0.628\ 689 \approx 68.3\%$, 即由 $-\sigma$ 到 σ 之间正态分布曲线下的面积占总面积的68.3%。这就是说, 如果测量次数 n 很大, 则在所测得的数据中, 将有占总数68.3%的数据的误差落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之内; 也可以这样讲, 在所测得的数据中, 任一个数据 x_i 的误差 δ_i 落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之内的概率(又称置信概率)为68.3%。

也可证明, $P(|\delta| < 3\sigma) = 0.997\ 3 \approx 99.7\%$ 。这表明, 在1000次测量中, 随机误差超过 $\pm 3\sigma$ 范围的测得值大约只出现3次。在一般的十几次测量中, 几乎不可能出现。依据这点, 可对多次重复测量中, 由于过失引起的异常数据加以剔除。这被称为剔除异常数据的“3 σ ”准则。它只能用于测量次数 $n > 10$ 的重复测量中, 对于测量次数较少的情况, 需要采用另外的判别准则。

同时, 由概率积分表可得如下一些典型数据:

$$\begin{aligned} P(|\delta| < 1.96\sigma) &= 0.950\ 0, & P(|\delta| < 2\sigma) &= 0.954\ 5 \\ P(|\delta| < 2.58\sigma) &= 0.990\ 1, & P(|\delta| < 4\sigma) &= 0.999\ 9 \end{aligned}$$

1.2.2 算术平均值和标准偏差

1. 算术平均值

由于测量误差的存在, 真值实际上是无法测得的。根据随机误差的正态分布规律, 测得