



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

文科物理实验

马世红 童培雄 赵在忠 编著



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

文科物理实验

马世红 童培雄 赵在忠 编著

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是文科类专业本科生的物理实验教材。书中的实验涵盖力学、热学、电磁学和光学等物理学的主要领域,选取的物理实验项目有明显的基础性、通用性和代表性,所涉及的实验仪器在各个学校实验室都很常见。本书针对文科类专业学生的特点,营造了宽松自主的学习环境(允许失败、允许重做、鼓励探索、鼓励创新),让学生有机会自行设计实验装置,自行准备实验器材,自行拟定实验步骤,甚至自行提出实验方案。“中国高校物理课程网”上建设了本书的网上课程,读者可查阅到与本书有关的一些阅读资料、常量表以及这些资料的更新内容。本书可供普通高等学校文科类各专业本科生使用,也可供有兴趣的社会读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

文科物理实验/马世红,童培雄,赵在忠编著. —北京:
高等教育出版社, 2008. 5

ISBN 978-7-04-023612-5

I. 文… II. ①马…②童…③赵… 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 (2008) 第 035692 号

策划编辑	陶 铮	责任编辑	张海雁	封面设计	张申申
责任绘图	尹 莉	版式设计	王 莹	责任校对	胡晓琪
责任印制	朱学忠				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 人民教育出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 15
字 数 270 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 5 月第 1 版
印 次 2008 年 5 月第 1 次印刷
定 价 19.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号: 23612-00

前 言

“文科物理实验”作为复旦大学的一门全校公共选修课，其目的在于培养学生的实践能力和创新精神，进而提高学生自身的自然科学素质。

文科物理实验课要求学生在实验室中动脑动手、设计和完成实验，在实践中增长知识、能力和才干。科学实验是检验科学理论真伪的唯一标准，是科学技术发展的不尽源泉和动力。科学实验中，到处体现出唯物主义的观点和科学辩证的思想方法。实验课能够提高学生的思想水平，训练从实践中发现问题、分析问题和解决问题的能力，增强科学洞察能力和判断能力，培养创新意识和创造能力。

这门物理实验课内容涉及力学、热学、电磁学和光学等物理学各主要领域。物理学是最基础的自然科学，是自然科学发展的先导。物理实验具有明显的基础性、通用性和典型性。现代物理学向化学、生物学等学科的渗透导致了这些领域的革命性进展，而物理学中所阐明的对物质世界基本规律的认识，对哲学和各人文社会科学的发展也有着极其重要的作用。在物理学教学中，学习者不仅要知道规律本身，还要知道规律是如何被发现、被证实的，这方面的训练在物理实验中能得到很好的体现。物理工作者在物理实验中所体现出来的追根寻源的精神、一丝不苟的作风和实事求是的态度，正是自然科学、人文社会科学工作者在科研工作中都需要的基本科学素质。

这门物理实验课的教学方法是以自学为主。在本课程中，学生不是在已安排好的仪器上照教材上规定的步骤按几下按钮，读几个数据，从而顺利完成实验，而是在自学教材的基础上，自主地进行探索性的实验。学生有机会自行设计实验装置，自行准备实验器材，自行拟定实验步骤，甚至自行提出实验方案，在教师同意和没有危险的情况下，进行独立的实验。这门实验课的教学理念是：允许失败、允许重做、鼓励探索、鼓励创新。每个实验有不同的要求，每个学生可以用不同的时间做到不同的深度（可以一个实验做几周，也可以一周做几个实验），这都由学生根据自己的基础和兴趣爱好自行掌握。

本教材共收入 30 个实验，是在物理教学实验中心相关实验讲义的基础上，经修改和补充后编写而成的。教材中的大多数实验都分为“概述”、“实验器材”、“实验步骤”、“思考题”和“讨论”五部分。其中，“概述”介绍该实验的背景、原理及有关辅助知识；“讨论”是可从该实验得到的一些启示和它的某些现代应用；“实验器材”中只列出了最基本的实验器材，学生可根据要

求提出增添或更换;“实验步骤”写得相当简单,学生应在了解原理的基础上,根据各自情况予以补充,在有些实验中,还列出了数据记录表格,这只是供参考的,学生们可以设计更适合自己情况的表格;“思考题”是一些与该实验有关的问题,有些可在实验前考虑,大多只能在实验中或实验后考虑和解答。为了验证所考虑的结论是否正确,学生可提出自己设计的新实验,并在条件允许时进行这些实验。当然,并不要求每个学生回答所有的思考题,只要挑选那些有兴趣的问题即可。更希望学生通过实验,自己提出更多的问题来思考和解决。

本教材是复旦大学物理教学实验中心近年来教学改革成果的具体表现,是实验中心教职员辛勤工作的结晶。除了编著者外,参加教材编写的教师还有沈元华、刘贵兴教授等。复旦大学教务处、物理学系等领导和许多资深教授,对教材的编写给予了极大的鼓励和支持,提出了许多指导性的意见和建议。复旦大学物理学系陆申龙教授、华东理工大学理学院张兆奎教授,对本教材初稿提出了具体的审阅意见和修改建议。近年来选修这门课程的同学积极参与了有关实验讲义的讨论,实验教学中心的同事们也给予了关心和支持,并提出了他们的建议和看法。同时,高等教育出版社物理分社的编辑们均为本教材的顺利出版做出了巨大的贡献。在此,笔者向他们表示衷心的感谢和诚挚的敬意!

由于笔者的水平有限且时间紧迫,书中一定还有不足和错误之处,祈望广大教师和读者大胆斧正。希望能够在教学实践中不断修改、充实、发展、提高,使其不断完善起来,以适应全面提高学生综合素质的需要。

编著者

2007年10月26日

目 录

绪论	1
实验误差和数据处理	5
实验一 真空中的自由落体	18
实验二 水滴自由下落时的重力加速度的测量	21
实验三 碰撞打靶实验	24
实验四 磁阻尼系数和动摩擦因数的测量	29
实验五 表面张力趣味实验	33
实验六 傅科摆	38
实验七 “汽车”行驶速度的测量 ——声多普勒效应的应用	42
实验八 铜喷洗	49
实验九 用激光测量水波振动频率及传播速度	54
实验十 人的发音频率和脉搏频率的测量 ——数字式示波器与信号发生器的使用	60
实验十一 压电陶瓷传感器	67
实验十二 蜡烛熄灭后水面升高原因的实验探究	71
实验十三 热空气发动机	73
实验十四 红外检测	81
实验十五 “温差电效应”制冰	87
实验十六 静电“电动机”与静电“乒乓球”的系列实验	94
实验十七 电风车与静电除尘等的系列实验	101
实验十八 基本电工安装	106
实验十九 电磁悬浮	114
实验二十 自制“无线电发射台” ——电磁波的传播	118
实验二十一 光源闪烁揭秘	128
实验二十二 海市蜃楼	133
实验二十三 奇妙的圆孔与圆盘衍射	137
实验二十四 激光监测	140
实验二十五 小魔术：“变色”水	145

实验二十六	“旋光效应”测糖溶液的浓度	150
实验二十七	“五彩缤纷”的液晶	155
实验二十八	使用计算机测量转盘的角速度	161
实验二十九	数码照相在物理实验中的应用	170
实验三十	趣味小实验	178
“历史上最美的”物理学实验		193
附录	基本物理常量和天文数据	227
其他参考资料网络地址		231

绪 论

物理学是当代科学技术最主要的源泉。物理学是一门建立在实验基础上的重要学科，无论是物理概念的建立还是物理规律的发现，都必须以严格的科学实验为基础，并通过以后的科学实验来证实。也就是说，物理实验在物理学的发展过程中起着重要的和直接的推动作用。

在物理学史上，16世纪的意大利物理学家伽利略，首先把科学的实验方法引入到物理学研究中来，从而使物理学走上了真正的科学道路。例如，在他所设计的斜面实验中，就蕴藏着极为丰富的实验思想。首先，他在斜面实验中有意识地忽略了空气阻力的影响，以便抓住问题的主要方面，撇开一些次要的因素，这正是科学实验不同于自然观察之处。其次，他还变更一些实验条件（如改变斜面的倾角），观测实验结果的变化，这是科学实验区别于自然观察的又一特点。他选择斜面做实验，是为了延长物体在它上面下滑的时间，以适应当时的测量条件，这种实验构思极为巧妙，使原来在自由落体运动中难以测量的量（时间）变得容易测量了。再者，他在实验的基础上，充分运用推理概括的方法，得到了超越实验本身的更为普遍的规律，即在光滑的水平平面上，物体的运动是匀速直线运动，因为这里并不存在引起运动变化的原因；而在竖直情况下，他推论出各种物体的自由下落均做匀加速直线运动，且它们的加速度相同。伽利略的这种卓越的实验思想和实验方法，对我们当前进行物理实验仍有着重要的启示。

整个物理学的发展经历了积累和变革的交替发展过程，不论在哪一个阶段，物理实验都起着不可忽视的作用。大家知道，电与磁之间相互联系的突破性实验是1820年由奥斯特在一次课堂实验中完成的，他发现通电导线会引起附近小磁针的偏转。这个实验几乎轰动了整个世界，安培很快就重复了奥斯特的实验，并潜心设计和研究了载流导线之间的相互作用，在1820年终于建立了安培定律。既然电能够产生磁，那么磁是否能够产生电呢？法拉第为了回答这一问题，进行了十年之久的实验，终于在1831年首次发现电磁感应现象，并总结出电磁感应定律。这时，电磁学已相继在实验基础上建立了库仑定律、高斯定律、安培定律和法拉第定律，并确立了场的概念，最后由麦克斯韦集其大成，统一为完整的电磁场理论。他不仅预言了电磁波的存在，而且指出光也是一种电磁波，完成了物理学史上一次重大的变革。但是，新理论在没有得到实验证实之前，只能被看成是一种假说，问题的焦点又回到了实验。1878年

夏季,在柏林大学任教的亥姆霍兹向他的学生们提出一个物理竞赛题,希望有人用实验来证实电磁波的存在。这一实验课题终于由他自己的学生赫兹在九年之后完成了,这从一个侧面反映了物理实验的重要性。

物理学中的任何理论,都必须经过实验的验证,正确的就会得到发展,而错误的就会被摒弃。如在对光的本性认识中,牛顿倡导的微粒说和惠更斯主张的波动说就进行了长期的争论,孰是孰非,莫衷一是。后来,托马斯·杨在1800年发表了双缝干涉实验,才使波动说得到了确认,由于托马斯·杨和菲涅耳等人的大量的实验和理论工作,使光的波动说战胜了微粒说。然而到19世纪末、20世纪初,由于光电效应实验揭示了光的粒子性,从而使人们认识到光的本质具有波粒二象性。

在物理学的发展过程中,常常出现由于旧理论不能解释新的实验现象,从而促使新理论诞生的情况。如19世纪以来,对黑体辐射的电磁波能量的测量,人们找不到适当的理论说明实验结果,用经典理论导出的维恩公式只在短波区与实验相符,但不能解释长波区,而瑞利-金斯公式只在长波区与实验一致,在短波区却与实验相背离。为了克服经典理论的危机,普朗克才提出了能量量子化的概念,圆满地解释了实验结果,这就是量子论的开端。又如在赫兹证实电磁波存在的实验中,还发现了光电效应现象,但电磁波理论却不能解释它,这就促使爱因斯坦提出了光量子假说。

所以,实践—理论—再实践的法则同样适用于物理学的发展。物理学的基础是实验,然而强调实验的重要性,绝不意味着轻视理论,特别在物理学发展到今天,用已经确立的理论来指导实验向新的未来领域探索,就显得更加重要。任何轻视实验或轻视理论的想法都是错误的。

文科物理实验是高等学校实施综合素质教育的重要基础课程之一,是体现自然科学教育与人文科学教育融合的一个组成部分。尤其是在现阶段,中学时期的文理分班带来了人才成长中思维的偏颇和综合素质的不足,而大学文、理、工、农、医分科办学,学生接受的是过窄的专业教育,又影响了人才的知识结构和思维方式,所以需要大学生进行通识教育。

文科物理实验旨在帮助文科学生通过亲手实践,学习探索自然科学现象、规律的思维方式和研究方法。因此,为文科学生开设一门物理实验课,在内容上要体现科学性、趣味性和先进性的特点,选题上要顾及一般的物理规律的观测,所使用的仪器也是较为简单而基本的,其目的是培养文科学生的实践能力和创新精神,训练文科学生从实践中发现问题、分析问题和解决问题的能力,增强文科学生的科学洞察力和判断力,提高文科学生今后从事本职工作的科学素质。概括起来,这门课程的教学要求是:

(1) 使文科学生在物理实验的基本知识、基本方法和实验技能诸方面受

到初步的科学训练。其中,主要学习如何根据物理实验思想确定合理的实验方案,正确选择和使用基本仪器,掌握一定的物理测量技术和实验方法,能初步掌握对实验数据进行处理(包括有效数字运算、误差分析等),判断和分析实验结果等。

(2) 学习用实验方法探求物理规律、观察和分析物理现象,通过实验加深对一些重要的物理规律的认识和理解,并分析实验中存在的问题。

(3) 通过实验培养严肃认真、实事求是的科学态度和工作作风,以提高文科学生的科学文化素质。

物理实验是学生在教师指导下独立进行的一种实践活动,因此在实验过程中应当发挥学生的主观能动性,有意识地培养他们独立的工作能力和严谨的工作作风。每一个实验都有三个环节:做好预习、做好实验和写好实验报告。

(1) 做好预习:仔细阅读实验教材,了解本实验的原理和方法,并基本了解有关的实验仪器的使用方法。在事先所准备好的实验记录本上,预先正确写出理论测量公式、实验步骤,画好实验电路图、光路图、数据记录表格,以备实验实践时使用。

(2) 做好实验:实验时应遵守实验室规章制度,仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书,在教师指导下正确使用仪器,注意爱护,稳拿妥放,防止损坏,注意安全。在整个实验过程中,应认真思考,仔细观察,合理操作,要脑手并用:一要多动脑筋,头脑中要有清晰的物理图像,对实验原理有比较透彻的理解,对实验过程中出现的各种现象要仔细观测;二要注意培养和锻炼自己的动手能力,除了应该熟练掌握一些基本的操作技能,动手能力还表现在能否及时发现并排除实验中所遇到的某些故障。实验进行时,要养成记录好原始数据的习惯,把实验数据细心地记录在预习报告的数据表格内。记录时用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔。如需要删去已记入的数据,可用笔划掉,同时注明原因。切勿先将数据随意记在草稿纸上,然后再誊写在表格内,这是一种不科学的习惯。此外,还要记下所用仪器的型号、编号、规格,并写进正式的实验报告,便于在以后核对数据时查用。

(3) 写好实验报告:实验报告是对实验的全面总结。首先要对数据进行整理和计算,然后用简洁的文字撰写实验报告。报告应字迹清楚、文理通顺、图表正确,逐步培养分析、总结问题的能力。对实验结果的图解表示,应利用规矩或曲线板仔细绘制在坐标纸上,力求准确。

实验报告的内容一般应包括:实验名称、实验者姓名、实验日期、实验目的、实验原理和方法(要用自己的语言简要地叙述,不要照抄书本)、实验仪器(型号、编号、规格)及装置、数据记录(将预习报告所记录的数据仔细

地转记于此)及计算(包括误差分析与不确定度计算)和实验结果及讨论(如实验中观察到的现象的分析、改进实验的建议、实验后的体会、实验中存在的问题、回答实验思考题,等等)。

上述三个环节,虽然第二个环节是主要的,但是对第一、第三个环节同样不能忽视。只有这三个环节都做好了,才算真正完成了科学实验的完整训练。

实验误差和数据处理

一、物理实验与测量误差

物理学是一门实验科学，对它的研究离不开对各种物理量进行测量。做物理实验主要也是进行各种测量。测量分为两种：由仪器直接读出测量结果的叫直接测量；由直接测量结果经过公式计算才能得出结果的叫间接测量。每一个待测物理量在一定实验条件下具有确定的大小，称之为该物理量的真值。当我们进行测量时，由于理论的近似性、实验仪器分辨率或灵敏度的局限性、环境条件的不稳定性等因素的影响，测量结果总不可能绝对准确。待测物理量的真值同我们的测量值之间总会存在某种差异，这种差异就称为测量误差，定义为

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

由测量所得的一切数据，都毫无例外地包含有一定数量的测量误差。没有误差的测量结果是不存在的。测量误差存在于一切测量之中，并贯穿于测量过程的始终。随着科学技术水平的不断提高，测量误差可以被控制得越来越小，但是却永远不会降低到零。

既然测量误差的存在是一切测量中的普遍现象，那么，分析测量误差的性质和产生的原因，研究如何有效地减小测量误差对实验结果的影响，分析如何科学地表达含有误差的测量结果，以及对实验结果如何评价等，这一部分的研究就显得十分重要。要想深入地讨论测量误差，需要有丰富的实验经验和较多的数学知识，作为入门知识，这里只能对其基本方面作些简单的介绍。

一个物理实验自始至终都与测量误差理论有密切的关系。

第一，测量误差理论可以帮助我们正确地设计实验方案，合理地选择实验仪器，以使用最小的代价取得最好的结果。不能片面地认为仪器越高级越好、环境条件越稳定越好、测量次数越多越好等。

第二，测量误差理论可以帮助实验者正确地进行实验操作，从而减小误差对实验结果的影响。要正确地调整仪器装置，注意满足理论所要求的实验条件，正确地使用仪器，合理安排操作步骤等。特别值得指出的是，一个比较复杂的实验，往往只有少数几个物理量是主要的，它们的准确与否对结果影响很大，测量误差理论可以帮助实验者抓住主要矛盾，把精力用在关键的地方。可以说，实验过程的每一步操作都与测量误差理论密切相关。

第三, 测量误差理论可以帮助实验者正确处理数据, 科学地表达实验结果。在表达实验结果时, 给出的不确定度要力求符合实际, 既不能太小, 也不能太大。如果不确定度太小, 由于夸大了实验结果的准确度, 有可能对实际工作造成危害; 如果不确定度太大, 由于过分保守, 有可能造成浪费, 比如它可能导致拒绝使用一台本来可以使用的仪器。

第四, 测量误差理论可以帮助实验者对实验结果进行分析判断, 从而得出适当的结论。例如 1894 年英国物理学家瑞利测定空气中氮气的密度为 $1.256\ 5\ \text{g/L}$, 而他从分解氨气得到的氮气的密度为 $1.250\ 7\ \text{g/L}$, 他肯定两者的差异超出了实验的误差范围 (当时普遍认为空气中除了氧都是氮)。后来进一步的研究, 则导致了空气中氢气的发现。历史上这一类例子很多, 判断实验结果是验证了还是推翻了理论假设, 就要看实验结果与理论值的差异是否落在实验的误差范围之内。

按照习惯的分类方法, 根据误差的性质, 可以把测量误差分为系统误差和随机误差。

1. 系统误差

在相同条件下, 多次测量同一物理量时, 其误差的绝对值与符号保持不变, 或按其确定规律变化, 这类误差称为系统误差。系统误差的来源大致有以下几种:

实验方法不完善或理论公式的近似性: 例如采用伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响; 单摆的周期公式成立的条件之一是摆角趋于零, 而在实验中, 摆角为零的条件是不能实现的, 等等。

仪器结构的固有缺陷: 例如温度计的刻度不准, 天平的两臂不等长, 示零仪表存在灵敏阈, 仪器水平或铅直未调整, 砝码未校准等。

环境的影响或没有按规定的条件使用仪器: 例如在 $23\ ^\circ\text{C}$ 条件下校准的仪器拿到 $-20\ ^\circ\text{C}$ 的环境中使用。

测量者生理或心理因素的影响: 例如记录某一信号时有滞后或超前的倾向, 对准标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

系统误差的特点是恒定性, 不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的, 因为它常常是影响实验结果准确程度的主要因素。能否用恰当的方法发现和消除系统误差, 是测量者实验水平高低的反映, 但是又没有一种普遍适用的方法去消除误差, 主要是靠对具体问题作具体的分析与处理, 要靠实验经验的积累与丰富。如果我们能够确定系统误差的数值, 就应该把它从实验结果中扣除, 消除它的影响, 或者说, 把系统误差的影响减小到随机误差的范围以内, 这种数值已知的系统误差称为“已定系统误差”。

还有一类系统误差，只知道它存在于某个大致范围，而不知道它的具体数值，它被称之为“未定系统误差”，例如仪器说明书上所标明的“允差”或“不确定度限值”就属于这一类。以砝码为例：一个名义质量为 100 g 的三等砝码，它的允差为 ± 2 mg。这意味着，凡是质量在 99.998 g 到 100.002 g 之间的砝码都被当作 100 g 砝码的合格产品。对于这个 100 g 砝码，在没有经过校准以前，不能知道这一系统误差的数值，但是可以说它含有“未定系统误差”。“未定系统误差”随实验条件的变化往往具有一定程度的随机性质，因而它也是随机误差，可以对它进行概率估计。

某些常用的实验仪器的允差（不确定度限值）已列于表 0-1 中。

表 0-1 某些实验仪器的允差（不确定度限值）

仪器名称	量程	分度值	允差
木尺（竹尺）	30 ~ 50 cm	1 mm	± 1.0 mm
	60 ~ 100 cm	1 mm	± 1.5 mm
钢板尺	150 mm	1 mm	± 0.10 mm
	500 mm	1 mm	± 0.15 mm
	1 000 mm	1 mm	± 0.20 mm
钢卷尺	1 m	1 mm	± 0.8 mm
	2 m	1 mm	± 1.2 mm
游标卡尺	125 mm	0.02 mm	± 0.02 mm
		0.05 mm	± 0.05 mm
螺旋测微器 （千分尺）		0.01 mm	± 0.004 mm
七级天平 （物理天平）	500 g	0.05 g	满量程 0.08 g
			二分之一量程 0.06 g
			三分之一量程 0.04 g
三级天平 （分析天平）	200 g	0.1 mg	满量程 1.3 mg
			二分之一量程 1.0 mg
			三分之一量程 0.7 mg
普通温度计 （水银或有机溶剂）	0 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$	± 1 $^{\circ}\text{C}$
精密温度计（水银）	0 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$	± 0.2 $^{\circ}\text{C}$
电表（0.5 级）			0.5% $\times$ 量程
电表（1.0 级）			1.0% $\times$ 量程

续表

仪器名称	量程	分度值	允差
数字万用电表			$\alpha\% \cdot U_x + \beta\% \cdot U_m$ 。(其中 U_x 表示测量值即读数, U_m 表示满度值即量程, α 和 β 对不同的测量, 功能有不同的数值。通常将 $\beta\% \cdot U_m$ 用“字数”表示, 如“2个字”等)

2. 随机误差

在相同的实验条件下, 多次重复测量同一物理量时, 发现各次测量值之间有差异, 由此而产生的误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化着, 这类误差称为随机误差。

造成随机误差的因素是多方面的, 如仪器性能和测量者感官分辨力的统计涨落, 环境条件(如温度、湿度、气压、气流、微震……)的微小波动, 测量对象本身的不确定性(如气压、放射性物质单位时间内衰变的粒子数、小球直径或金属丝直径……), 等等。

随机误差的特点是它的随机性, 如果在相同的条件下, 对某一物理量进行多次测量, 当测量次数足够多时, 便可以发现这些测量值呈现出一定的规律性。

实践表明, 在多次重复测量某一物理量时, 随机误差(其中包括经常遇到的多次测量的算术平均值的随机误差以及间接测量结果的随机误差)可以

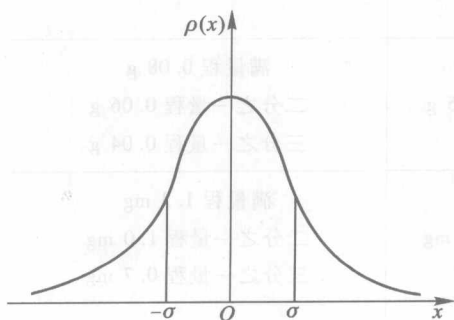


图 0-1 正态分布

认为服从或近似服从正态分布。正态分布的图形如图 0-1 所示, 其中 $\rho(x)$ 为误差分布函数, x 代表测量误差。这一图形表示, 对于服从正态分布的随机误差 x , 在没有系统误差的条件下, 当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 绝对值小的随机误差出现的概率比绝对值大的随机误差出现的概率大(单峰性), 绝对值相等的正误差与负误差出现的概率相同(对称性)。

3. 系统误差和随机误差的关系

系统误差和随机误差的区别不是绝对的, 在一定条件下, 它们可以相互转化。比如前面曾经提到的砝码误差, 对于制造厂家来说, 它是随机误差; 对于

使用者来说,它又是系统误差。又如测量对象的不均匀性(如小球直径、金属丝的直径等),既可以当作系统误差,又可以当作随机误差。有时系统误差和随机误差混在一起,也难于严格加以区分。例如测量者使用仪器时的估读误差往往既包含有系统误差,又包含有随机误差。这里的系统误差是指读数时总是有偏大或偏小的倾向,随机误差是指每次读数时偏大或偏小的程度又是互不相同的。

二、测量结果的不确定度

1. 不确定度的定义

既然测量结果中不可避免地含有误差,如何表达这种含有误差的实验结果就成为研究误差问题首先遇到的一个问题。对于已定系统误差,应该把它从实验结果中扣除,不存在如何表达的问题。下面讨论包含有未定系统误差和随机误差的实验结果的科学表达方法。

为了估计测量结果的可靠程度,我们把测量结果写成如下形式:

$$Y = N \pm \Delta N \quad (0-1)$$

其中, Y 代表待测物理量, N 为该物理量的测量值,它既可以是单次的直接测量值,也可以是相同实验条件下多次直接测量的算术平均值,还可以是经过公式计算得到的间接测量值。 ΔN 是一个恒正的量,称为“不确定度”,代表测量值 N 不确定的程度,也是对测量误差可能数值的量度,或者说是对待测真值可能存在的范围的估计。不确定度和误差是两个不同的概念。误差是指测量值与真值之差,一般情况下,它是未知的、确定的、可正可负的量;不确定度是表示误差可能存在的范围,它的大小可以按一定的方法计算(或估计)出来。

式(0-1)的含义是,测量结果是一个范围:

$$[N - \Delta N, N + \Delta N]$$

它表示待测物理量的真值有一定的概率落在上述范围内;或者说,区间 $[N - \Delta N, N + \Delta N]$ 以一定的概率包含真值。这里所说的“一定的概率”称为“置信概率”,而区间 $[N - \Delta N, N + \Delta N]$ 则称为“置信区间”。在一定的实验条件下,置信概率与置信区间之间存在单一的对应关系:置信区间大,代表置信概率高;置信区间小,代表置信概率低。

要完整地表示一个物理量,应该有数值、单位、不确定度 ΔN 这三个要素。

为了比较测量结果准确程度的高低,常常使用相对误差和相对不确定度这两个名词。相对误差的定义是

$$\text{测量误差/真值}$$

相对不确定度的定义是

$$\text{不确定度/测量值, 即 } \Delta N/N$$

常用相对不确定度估计相对误差的大小。

2. 不确定度的估计方法

(1) 直接测量结果不确定度的估计

① 单次测量的情况。这大体有三种情况：第一，仪器精度较高，随机误差很小，多次测量读数相同，不必进行多次测量；第二，对测量结果的准确程度要求不高，只测一次就够了；第三，因测量条件的限制，不可能进行多次测量（如测量地震波的强度）。

定性或半定量物理实验中的测量多数只测一次。一次测量的结果也应写成 $N \pm \Delta N$ 的形式。这时 ΔN 常用极限不确定度 e 来表示。极限不确定度 e 的取法一般有两种：一种是取仪器的允差（不确定度限值）；另一种是根据仪器结构、测量对象、环境条件、测量者感官灵敏度作一个估计。两者取一即可。

在计算不确定度时，常常需要在极限不确定度 e 与标准不确定度 σ 之间进行换算。对于只测一次的情况，一般认为可以用均匀分布的模型来处理，即

$$e = \sigma \sqrt{3}$$

② 相同条件下多次测量的情况。

用算术平均值代表多次测量的最佳值：

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (0-2)$$

其中 n 为测量的次数， N_i 为第 i 次测量值。测量列中任一测量值的标准不确定度 σ_N 可以由下列式子近似地给出：

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \quad (0-3)$$

应该说明的是，标准不确定度 σ_N 本来应该是一个与单次测量无关的常数，它只与测量条件有关。可是实际上由于测量次数 n 只能取有限的值，这时按公式计算出来的 σ_N 将是一个与单次测量有关的随机变数，只是标准不确定度的近似值。算术平均值的标准不确定度为

$$\sigma_{\bar{N}} = \frac{\sigma_N}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}} \quad (0-4)$$

其测量结果可以表述为

$$Y = \bar{N} \pm \sigma_{\bar{N}} \quad (0-5)$$

这里看到，适当增加测量次数，可以减小随机误差。

对于文科学生而言，出于教学上由浅入深、由简单到复杂、突出重点等考