

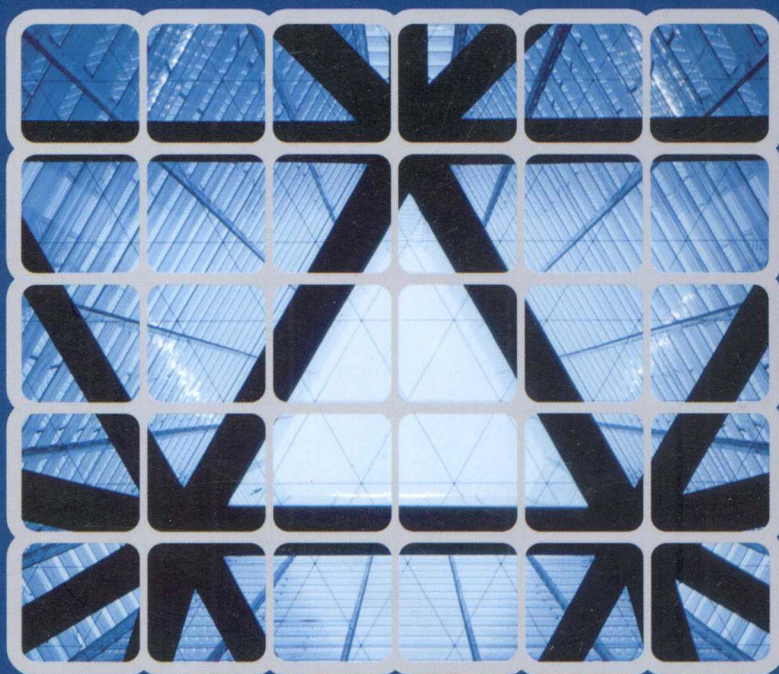


面向应用型高校“十二五”规划教材

大学物理实验

(第2版)

主 编 杨 渭 孔祥洪
副主编 郭阳雪 梁雪飞



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

面向应用型高校“十二五”规划教材

大学物理实验

(第2版)

主 编 杨 渭 孔祥洪

副主编 郭阳雪 梁雪飞

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是根据高等学校理工科大学物理实验课程教学的基本要求编写而成的。全书共分 6 章,第 1 章为绪论;第 2 章讲述测量误差和实验数据处理的基本知识;第 3 章给出物理实验的基本知识,可供学生随时查看;第 4 章共有 14 个基础性实验,以巩固和加强学生的物理实验基本能力训练;第 5 章编写了 7 个综合性实验;第 6 章提供了 7 个设计性实验。在这些实验中,既有经过长期教学实践、内容比较成熟的实验,又有自行研发的新实验,有利于训练学生的实验方法和实验技术,以及培养学生的个性发展和创新能力。

本书可作为高等学校工科各专业和理科非物理专业大学物理实验课程的教材或参考书,也可以供其他专业及一般工程技术人员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/杨渭,孔祥洪主编. —2 版. —北京:电子工业出版社,2012.8

面向应用型高校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-18000-2

I. ①大… II. ①杨… ②孔… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 194505 号

策划编辑:章海涛

责任编辑:章海涛 文字编辑:路 璐

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 13 字数: 332 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定 价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

依据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导委员会发布的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和《高等工业学校物理学教学大纲》，结合上海海洋大学新世纪人才培养方案和大学物理实验课程标准，我们组织编写了本书。本书吸收了国内外优秀物理实验教材的精华，融入了编者多年来对物理实验教学改革的经验，并涉及海洋物理知识。

物理实验是科学实验的先驱，体现了大多数科学实验的共性，在实验思想、实验方法及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。物理学是一门实验科学，它的理论是通过观察、实验、抽象、假说并通过实践检验而建立起来的。早在 300 多年前，从伽利略和牛顿等学者以科学实验方法研究自然规律开始，逐渐形成了一门物理科学，从此，一切物理概念的确立、物理规律的发现、物理理论的建立都有赖于实验，并受实验的检验。实验与理论是相辅相成的：实验是物理学的基础，理论是实验的总结，任何物理理论都必须依靠实验提供精确的数据来验证。

作为培养高级工程技术应用型人才的高等工科学校，不仅要让学生掌握比较深广的理论知识，还需要使学生能够具有较强的从事科学实验的能力。物理实验是一门对高等工科学校学生进行科学实验基本训练的基础课程，是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去发现、观察、分析和研究解决问题的能力方面，以及在提高学生科学实验素质方面，都有重要的作用。同时，它也为学生今后的学习、工作奠定了良好的实验基础。

物理实验课有其自身的规律和特点，学生应遵循这些规律，采取与物理理论课程不同的学习方法，充分重视上好实验课的三个环节（预习、操作、总结），能够举一反三，做到边操作边思考，理论联系实际，及时总结，并不断培养对实验的兴趣。切忌轻视实验，对实验课程采取敷衍了事、得过且过的错误做法。否则，学生不仅学不到科学实验的有关知识，甚至还会出现损坏仪器、危及安全的各种事故。

为保证教学质量，确保物理实验课程正常的教学秩序，请同学们自觉遵守以下规定：

（1）在规定时间内进行实验，不得无故缺席、迟到、早退。因故不能按时进行实验者，必须事先请假，并约定补做日期，否则做旷课论。

（2）实验前认真阅读书中的有关内容，明确所做实验的目的、原理、仪器及步骤，写好预习报告。未按要求预习者，不得进行实验操作。

（3）实验时先熟悉仪器设备，了解其使用方法和注意事项，严格遵守操作规程，切实注意安全。对需要使用电源的实验，必须经教师检查线路并同意后方可接通电源。另一方面，也反对学生过分依赖教师，机械地按讲义操作。

（4）一旦发生事故应立即报告教师，控制现场，并根据情况按有关规定处理。

（5）进入实验室必须衣冠整洁，并注意保持实验室安静、清洁。不准随地吐痰、乱扔纸屑，不准吃零食、饮料，不准在实验室内嬉闹喧哗，不准穿拖鞋、背心进入实验室，要爱护仪器设备，非本组实验器材未经同意不准动用。

(6) 实验完毕, 原始数据及实验装置经教师检查认可后, 方可切断电源, 拆除线路并整理仪器。

(7) 离开实验室前, 应将原始数据填写在“实验数据存档卡”上并交给教师。撰写实验报告时, 应以此数据为依据。实验数据不得篡改, 不得互相抄袭, 一经发现, 该次实验成绩按不及格论处。如果实验后发现数据有误, 应到实验室申请重做实验。

(8) 实验报告应按时、按要求认真完成并送交指导教师批阅。

本书的编写得益于多位曾经共事的物理实验前辈们, 他们一丝不苟的努力探索和精心指教, 使得本书能够吸收国内外优秀物理实验教材的精华。此外, 本书也融入了我们多年来物理实验教学改革的经验, 在 2010 版的基础上, 又添加了新的设计实验和创新实验。物理实验是科学实验的先驱, 体现了大多数科学实验的共性, 在实验思想、实验方法及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

本书在编写过程中也参考了部分兄弟院校的相关实验教材, 在此对他们表示衷心的感谢。

本书编写的分工如下: 杨渭编写绪论, 第 4 章 4.10 节、4.11 节, 附录; 孔祥洪编写第 3 章, 第 6 章 6.3 节、6.5 节、6.7 节, 第 4 章 4.7 节、4.8 节; 郭阳雪编写第 4 章 4.9 节、4.12~4.14 节, 第 5 章 5.5~5.7 节; 梁雪飞编写第 2 章, 第 6 章 6.1~6.2 节、6.4 节、6.6 节; 王蕊丽编写第 4 章 4.7~4.8 节, 第 5 章 5.2~5.4 节; 常英立编写第 5 章 5.1 节; 张建军编写第 4 章 4.1 节; 洪鹏程编写第 4 章 4.6 节; 李雪莹编写第 4 章 4.2~4.4 节; 贾凌春编写第 4 章 4.5 节。全书由杨渭统稿。

由于时间仓促及编者水平有限, 教材中缺点和错误在所难免, 敬请使用和阅读本书的同行、同学和技术人员不吝指教, 以便再版时修订和改正。

杨渭

2012 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 物理实验课的目的与任务	1
1.2 大学物理实验的基本要求	2
1.3 大学物理实验的主要教学环节	4
第 2 章 误差和实验数据处理的基本知识	6
2.1 测量与误差的概念	6
2.2 误差来源与分类	7
2.3 误差分析的应用	8
2.4 实验不确定度的评定	13
2.5 有效数字及其运算	15
第 3 章 物理实验的基本知识	19
3.1 物理实验的基本测量方法	19
3.2 基本物理量的测量及常用仪器	22
3.2.1 力学、热学基本物理量和测量及常用测量仪器	22
3.2.2 电学基本物理量的测量及常用测量仪器	27
3.2.3 光学基本仪器	34
3.3 实验室常用电源与光源	40
3.3.1 实验室常用电源	40
3.3.2 实验室常用光源	42
3.4 常用的处理实验数据的基本方法	44
第 4 章 基础性实验	50
4.1 长度测量	50
4.2 非电量测量——温度电测法	57
4.3 物体密度的测量	60
4.4 杨氏弹性模量的测定	63
4.4.1 拉伸法杨氏弹性模量的测定	64
4.4.2 悬挂法杨氏弹性模量的测定	68
4.4.3 霍尔位置传感器杨氏弹性模量的测定	72
4.5 超声声速测定	75
4.6 电学元件伏安特性的测量	80
4.7 电桥测电阻	84
4.7.1 电桥的基本原理	84

4.7.2 平衡电桥测电阻	86
4.7.3 非平衡电桥测电阻	88
4.8 温差电偶的定标和测量	91
4.9 示波器的调节与使用	96
4.10 霍尔效应实验	101
4.11 光的干涉——牛顿环	103
4.12 用旋光测糖溶液的浓度	110
4.13 迈克耳孙干涉仪——测波长	116
4.14 液体表面张力系数的测定实验	125
第 5 章 综合性实验	130
5.1 刚体转动惯量测定	130
5.1.1 扭摆法测物体转动惯量	130
5.1.2 转动惯量仪测刚体的转动惯量	135
5.2 密立根油滴实验	141
5.3 光电效应法测量普朗克常数	144
5.4 测定铁磁材料的磁化曲线	147
5.5 分光计实验	158
5.5.1 分光计的调整与使用	158
5.5.2 三棱镜顶角的测定	160
5.5.3 折射率的测定	163
5.5.4 光栅常数的测定	165
5.5.5 谱线波长的测定	169
5.6 液体黏滞系数的测定	171
5.7 导热系数的测定	178
第 6 章 设计性实验	186
6.1 重力加速度的测定	186
6.2 杨氏模量测量方法的研究	187
6.3 非线性伏安法特性研究	188
6.4 流体力学特性研究——硬币“起飞”	192
6.5 太阳能电池特性的研究	193
6.6 磁电阻元件的研究	195
6.7 自组望远镜	196
附录	198
参考文献	202

第1章 绪 论

1.1 物理实验课的目的与任务

物理学是一门实验科学，任何物理现象、物理概念、物理定律都是建立在实验基础之上的。随着科学技术的进步，当今物理实验综合了科学技术的成就，发展形成了自身的科学体系，成为系统性较强的独立学科——实验物理学。物理实验在物理学这座宏伟的科学大厦中占有十分重要的地位和作用，物理学的发展历史表明，物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下进行的。

人们要揭示宇宙的奥妙，探索物质的存在形式、运动规律及相互作用，首先要进行的就是物理实验。牛顿创立万有引力定律，并不是从一次苹果落地而悟出的道理，而是通过无数次观测实验和研究，并在总结大量前人研究成果的基础上所得出的结论。伽利略在著名的比萨斜塔上所做的自由落体实验否定了亚里士多德的“落体的速度与重量成正比”的错误结论，得出了在同地点，不同的物体具有相同的重力加速度这一科学论断。我们周围的空间不仅有上述引力相互作用的引力场，而且还存在着电磁相互作用的电磁场，我们日常所熟悉的光就是波长在一定范围内的电磁场。

大学物理实验课与大学物理理论课一起构成了高等学校工科学生必修的基础物理学知识统一的整体。理论课主要注重对物理概念、物理规律的讨论和学习，训练学生的理论思维方法；实验课则主要以实际动手实验为教学手段，对学生进行全面而系统的实验方法和实验技能训练。它们具有同等重要的地位，具有深刻的内在联系。

2008 年国家教育部颁布的《理工科大学物理实验课教学基本要求》，明确了本课程的教学任务是：使学生在中学物理实验的基础上，按照循序渐进的原则，学习物理实验知识和方法，得到实验技能的训练，从而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实验基础。其具体任务是：

(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) 培养和提高学生的科学实验能力。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，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）培养和提高学生科学实验的作风和素养。

主要是理论联系实际、实事求是的工作作风，一丝不苟、严肃认真的工作态度，积极主动的探索精神，遵守纪律、团结协作、爱护公共财物的优良品德。比如，伦琴在研究阴极射线的时候，偶然观察到阴极射线管附近的荧光板发光，正是他实事求是、一丝不苟、严肃认真的工作作风，才使他认识到了X射线的存在；开普勒（Kapler）在其老师第谷大量的天文观测资料（700多颗星体）的基础上，经过近二十多年的不懈研究、分析计算，才总结出了行星三大定律。在近现代物理学研究中，如果一位物理学工作者没有高度的合作精神，他是很难取得成就的。

1.2 大学物理实验的基本要求

科学的发展历史已经证明：科学的理论来源于科学的实践，并指导我们的实践；科学理论要受到实践的检验，并在实践中不断地得到修正、补充和完善。对于科学研究来讲，科学实验是最重要、最基本的实践活动。而且随着社会的发展和研究的深入，科学实验的重要性和基本性将会越来越突出。

科学实验是根据研究目的，通过积极的构思，利用科学仪器设备等物质手段，人为地控制和模拟自然现象，使自然过程或生产过程以比较纯粹的或典型的形式表现出来，从而在有利条件下，探索自然规律的一种研究方法。

科学实验的主要任务，是研究人类尚未认识或尚未充分认识的自然过程，发现未知的自然规律，创立新学说、新理论，研发新材料、新方法、新工艺，为生产实践提供科学的理论依据，促进生产技术的进步和革命，提高人们改造自然的能力。

物理理论的建立也遵循这一过程，是通过由物理实践到物理理论，再由物理理论到实践的辩证过程建立和发展起来的。通过对物理学历史地、全面地考察可以发现，物理学本质上是一门实验科学。首先，物理概念的建立、物理规律的发现依赖于物理实验，是以实验为基础的，物理学作为一门科学的地位是由物理实验予以确立的；其次，已有的物理定律、物理假说、物理理论必须接受实验的检验，如果正确就予以确定，如果不正确就予以否定，如果不完全正确就予以修正。例如，普朗克在黑体辐射实验的基础上提出了能量子概念；爱因斯坦通过分析光电效应现象提出了光量子；伽利略用新发明的望远镜观察到木星有4颗卫星后，否定了地心说；杨氏双缝干涉实验证实了光的波动假说的正确性。可以说，物理学的每一次进步都离不开实验。

在进行物理实践的过程中，由于所涉及的研究对象、实践的目的、采用的研究方法、获得的结论的层次等方面特征的不同，我们通常将物理学的实践活动分为观察和实验两种基本类型。下面简述其概念和特征。

1. 观察

所谓观察，就是对自然界中发生的某种现象，在不改变其自然条件的情况下，按照原来的样子加以研究的过程。比如，我们对天空观察后发现，晴朗无云的天空是蓝色的；通过对

气候的观察发现,一年可以分为春、夏、秋、冬四季。观察的特征是:

(1)现象是在自然状态下发生的,通常没有人为限制。因此,一般地讲,观察这种实践活动是简便易行的,是一种可以经常进行的实践活动,也是对现象进行深入研究的基础。在科学实践中,养成观察的习惯,掌握观察的方法,对一位科学研究者来说是极其重要的素质之一。

(2)一般来讲,影响自然现象的因素是多而复杂的,通过观察一般只需对现象做定性研究,即了解影响现象的主要因素及大致关系,其研究是不够准确、不够深刻的。

2. 实验

所谓实验,则是在人工控制的条件下,抑制次要因素,突出主要因素,使现象能够向着更加直接、更加单纯的方向进行,并能反复重演,从而借助仪器设备对影响现象的因素进行测量的研究过程。实验的特征是:

(1)可以按照研究的需要和目的人为地简化和控制现象发生和进行的条件,其目的是为了突出主要因素,排除或减少次要因素的干扰和影响,使过程的进行更直接、更纯粹,以获得明确的结果。可见,实验也是物理学中一种重要的研究方法,实验对物理学的发展起着十分重要的作用,过去是这样,现在是这样,将来也一定是这样。比如,伽利略用落体实验驳倒了亚里士多德的“重的物体落得快,轻的物体落得慢”的说法,他在斜面实验的基础上指出:力不是维持运动的原因,物体的运动不需要力来维持。我们知道是伽利略开创了物理学的实验方法,也正是因为实验方法的引入才使物理学真正成为一门科学。牛顿“最伟大的宇宙定律”的正确性,是因为它能计算出哈雷彗星的运行周期(约76年),解释了潮汐现象,指出了(当时)太阳系中还应有所谓冥王星、海王星的存在。伟大的詹姆斯·克拉克·麦克斯韦于1864年将电和磁“合”在了一起,把描述电学规律和磁学规律的关系式总结为优美的麦克斯韦方程组,他由此预言了电磁场和电磁波,指出光是一种电磁波。而这一结论的正确性是在经过了24年——也是麦克斯韦逝世(1879年)9年之后的1888年,才由赫兹实验向世界宣布的。

我们现在的粒子物理学理论是以物质的夸克模型为基础的,即是说,如果找不到这6种组成物质的夸克——上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克、顶夸克,或者说,即使找到了其中的5个,粒子物理学的现行理论也将重建。因此,从1964年提出夸克模型之后,许多著名的物理学家都开始致力于寻找夸克的工作。到1976年,就已经找到了前5种夸克,而顶夸克却不见踪迹,但科学家们并不气馁。幸运的是,在1993—1994年间,科学家们终于找到了顶夸克的踪迹,1995年3月2日美国科学家正式向世界宣布了顶夸克已被捉到。此外,值得一提的是,世界科学界最崇高的奖励——诺贝尔奖,一般都授予与实验有关的科学发现。

(2)实验需要对现象进行定量研究。实验一般都需要对影响现象发生的因素进行测量,以获得较为精确的结论或规律。现在,几乎所有物理问题最终都要被定量化。正因为如此,物理学才成为一门定量的、精确的科学。物理学家们在长期的研究实践中,不仅创造了巧妙而丰富的实践方法,而且在进行物理问题的定量化过程中,还创造了许多物理学特有的研究方法。所有这些,不仅对物理学,而且对自然科学的其他学科,以及工程技术和社会科学、社会生活等各个方面,都具有重要的作用和意义。

物理实验在探索和研究新科技领域,在推动其他自然科学和工程技术的发展中,同样起

着重要的作用。自然科学迅速发展，新的科学分支层出不穷，但基础学科就是数学和物理两门，物理实验是研究物理测量方法与实验方法的科学，物理实验的实验技术和测量方法具有特殊的基本性和普遍性：力、热、电、光等所有的自然现象。其基本性是指它是其他一切实验的基础。同时，它还具有通用性——实用于一切领域，很多工程技术问题或研究课题，如果把它们分解开来，实质上就是一些物理问题。在工程技术领域中，研制、生产、加工、运输等过程都普遍涉及物理量的测量及物体运动状态的控制，这正是成熟的物理实验的推广和应用。现代高科技的发展，其设计思想、方法和技术也来源于物理实验，因此，物理实验也是工程技术和现代高科技发展的基础。

综上所述，对一个高等工科学校的学生来讲，不论专业如何，大学物理实验都是一门重要的基础课程。对所有高等工科学校的学生来讲，了解和掌握这些进行实验研究的方法和技巧，不仅对物理学理论的学习是重要的，而且对于后续课程的学习，尤其是对将来所从事的实际工作所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质来讲，也是十分必要的，这是大学物理理论课不能做到也不能取代的。因此，大学物理实验应该是工科学生的一门独立且重要的必修基础课程。

1.3 大学物理实验的主要教学环节

1. 预习

(1) 实验理论知识准备：从实验指导书和有关参考书中充分了解实验的理论依据和条件。

(2) 实验仪器的准备：了解所有实验仪器的工作原理，工作条件和操作规程；了解实验室为何选用这样的装置和仪表，是否还有其他的实验装置可用。

(3) 实验观测的准备：掌握实验步骤和注意事项，设计记录表格，记录表格既要便于记录，又要便于整理数据。

2. 实验观测与记录（实验）

(1) 仪器的安装和调整：按操作规程调整仪器以达到正常的工作条件。

(2) 实验观测：在明确了实验目的和测量内容、步骤，并能正确使用仪器后，可以进行正式观测。

(3) 实验记录：实验记录是以后计算与分析问题的依据，在实际工作中则是宝贵的资料，记录应记在专用的实验数据记录卡上，要如实地记下各观测数据、简单的过程及观测到的现象，交实验教师签字后方可。测量结束后，要整理摆放好设备。

3. 实验数据的整理与完成实验报告

实验过程中要随时整理数据，测量结束后要尽快整理好实验数据，计算出结果并绘出必要的图线。数据整理工作，应尽可能地在实验课上完成，并且要根据整理中的问题做必要的补充测量。

4. 实验报告的格式

实验报告要求写在专业的实验报告纸上，简单明了，用语确切，字迹清楚。如发现原始

数据有错、漏等情况，应予以重测或补测。实验报告书应字迹工整、书写规范、措辞简练、步骤完整、数据真实、图表齐全。实验报告包括：

(1) 实验名称、实验者姓名、合作者姓名、实验日期等信息。

(2) 实验目的。

(3) 实验仪器（写出实验所用的仪器设备名称）。

(4) 实验原理（不要抄书，简要叙述相关的物理实验所依据的理论，画出原理图、装置示意图或电路图、光路图，写出主要计算公式及公式中各量的物理含义和公式限定的条件等）。

(5) 实验步骤（简述实验的主要步骤）。

(6) 实验数据记录、实验数据整理及结论（包括物理量名称、单位、简单的公式）。数据处理要有完整的计算、作图和不确定度的估算，而且计算要有简洁的计算式子；代入的数据要有根有据，作图要美观、规范。

(7) 结果及讨论，明确给出实验结果，得出实验结论，并对结果进行讨论（例如，现象分析，误差来源分析、实验中存在问题的讨论，回答实验思考题。亦可对实验本身的设计思想、实验仪器的改进提出建设性意见）。

第2章 误差和实验数据处理的基本知识

2.1 测量与误差的概念

一、直接测量与间接测量

在科学实验中，一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量，就是用一定的工具或仪器，通过一定的方法，直接或间接地与被测对象进行比较。著名物理学家伽利略有一句名言：“凡是可能测量的，都要进行测量，并且要把目前无法度量的东西变成可以测量的”，物理测量的内容很多，大至日、月、星辰，小到分子、原子。现在人们能观察和测量到的范围，在空间方面已小到 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ cm}$ ，大到百亿光年，大小相差在 10^{40} 倍以上。在时间方面已短到 $10^{-23} \sim 10^{-24} \text{ s}$ 的瞬间，长到百亿年，两者相差也在 10^{40} 倍以上。在定量的验证理论方面，也需要进行大量的测量工作，因此可以说，测量是进行科学实验必不可少的重要一环。

测量分直接测量和间接测量。直接测量是指把待测物理量直接与认定为标准的物理量相比较，例如用直尺测量长度和用天平测物体的质量。间接测量是指按一定的函数关系，由一个或多个直接测量量计算出另一个物理量，例如测物体的密度时，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，大多属于间接测量。

测量数据不同于一个数值，它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位，才具有特定的物理意义，这时它才可以称为一个物理量。因此测量所得的值（数据）应包括数值（大小）和单位，两者缺一不可。

为确定被测对象的测量值，首先要选定一个单位，然后用这个单位与被测对象进行比较，求出它对该单位的比值——倍数，这个数即为数值。表示一个被测对象的测量值时，必须包含数值和单位两个部分。

目前，在物理学上各物理量的单位，都采用中华人民共和国法定计量单位，它是以国际单位制（SI）为基础的单位。国际单位制以米（长度）、千克（质量）、秒（时间）、安培（电流强度）、开尔文（热力学温度）、摩尔（物质的量）和坎德拉（发光强度）作为基本单位，称为国际单位制的基本单位；其他量（如力、能量、电压、磁感应强度等）的单位均可由这些基本单位导出，称为国际单位制的导出单位。

二、测量误差及其表示方法

（一）误差的定义

从测量的要求来说，人们总希望测量的结果能很好地符合客观实际。但在实际测量过程

中, 由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平及种种因素的局限, 不可能使测量结果与客观存在的真值完全相同, 我们所测得的只能是某物理量的近似值。

也就是说, 任何一种测量结果的量值与真值之间总会或多或少地存在一定的差值, 我们将其称为该测量值的测量误差, 简称“误差”, 误差的大小反映了测量的准确程度。

测量总是存在着一定的误差, 但实验者应该根据要求和误差限度来制订或选择合理的测量方案与仪器。不能不切合实际地要求: 实验仪器的精度越高越好; 环境条件总是恒温、恒湿, 越稳定越好; 测量次数总是越多越好。一个优秀的实验工作者, 应该在一定的要求下, 以最低的代价来取得最佳的实验结果。要做到既保证必要的实验精度, 又合理地节省人力与物力。误差自始至终贯穿于整个测量过程之中, 为此必须分析测量中可能产生各种误差的因素, 尽可能消除其影响, 并对测量结果中未能消除的误差做出评价。

每个所要测量的量总有一个客观的真实大小。这个反映物理量真实大小的数值就称为真值。测量值 x 与真值 X 之差称为测量误差 Δx , 简称误差:

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}, \quad \text{即} \quad \Delta x = x - X \quad (1-1-1)$$

误差 Δx 常称为绝对误差。绝对误差使用符号 $\pm \Delta x$, 表示测量结果 x 与真值 X 之间的差值以一定的可能性(概率)出现的范围, 即真值以一定的可能性(概率)出现在 $x - \Delta x$ 至 $x + \Delta x$ 区间内。

相对误差使用符号 E 。由于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, 还需要看测定值本身的大小, 故用相对误差能更直观地表达测定值的误差大小。绝对误差、相对误差和百分误差通常只取 1~2 位数字来表示。

同一个人, 用同样的方法, 使用同样的仪器并在相同的条件下对同一物理量进行的多次测量, 称为等精度测量。以后说到对一个量的多次测量, 如无另加说明, 都是指等精度测量。

测量结果系统误差的大小用正确度表示, 测量结果随机性的大小用精密度表示, 精确度则是用来综合反映测量的系统误差与随机性误差大小的。

2.2 误差来源与分类

一般将误差分为系统误差、随机误差、人为误差和误差转化四类。

一、系统误差

在相同的测量条件下多次测量同一物理量时, 误差的绝对值和符号保持恒定, 当测量条件改变时, 它也按某一确定的规律而变化, 这样的误差称为系统误差。

二、随机误差

在相同的测量条件下多次测量同一物理量时产生的时大时小、时正时负、以不可预知的方式变化的误差, 称为随机误差。

随机误差产生的原因主要是由于各种不确定的因素所造成的测量值的无规则的涨落。

服从正态分布的随机误差具有如下特性:

单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

有界性: 在一定测量条件下, 误差的绝对值不超过一定限度。

抵偿性: 随机误差的算术平均值随着测定次数的增加而越来越趋向于零。

三、人为误差

用当时的测量条件不能解释为合理的误差称为粗大误差。其产生的主要原因是实验者在操作、读数、记录、计算等方面的粗心而造成的。含有粗大误差的测量值会明显歪曲客观事实, 因而必须用适当的方法将其剔除。

四、误差转化

由于系统误差和随机误差有时难以分辨, 并在一定的条件下可以相互转化, 因此, 现代误差理论已使用不确定度来评价测量结果, 在误差分类上也不再使用系统误差这个名词, 而是根据其来源及是否能用统计方法进行处理, 分别归类于 A 类不确定度和 B 类不确定度。

2.3 误差分析的应用

误差的表示及计算一般有算术平均偏差表示法和标准误差表示法。

一、算术平均偏差表示法

(一) 单次直接测量值的误差估计

有时由于条件限制或测量精度要求不高, 对一个物理量只进行一次直接测量, 则该次直接测量的误差可按仪器出厂鉴定书或仪器上注明的误差来定。若没有注明, 一般可取仪器最小分度值的一半作为单次测量的误差。例如, 以毫米为最小分度值的米尺和以百分之一毫米为最小分度的螺旋测微计, 它们的单次直接测量值的误差可分别定为 0.5 mm 和 0.005 mm。对于数值仪表, 可取仪表的最小读数为单次测量的误差。

(二) 多次直接测量的平均值及误差

1. 多次测量值的算术平均值

设在相同条件下对某物理量 X 进行了 n 次重复测量, 共得到 n 个测量值, 分别为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 则其平均值 $\bar{X}$ 可表示为

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

根据误差理论, 多次测量值的平均值比各个测量值更接近真值。我们可以将多次测量值的平均值视为该物理量的最近真值。

2. 算术平均偏差

算术平均值比较接近真值,但它仍非真值。它与真值之间的误差可以这样估算:设各次测量值与平均值的偏差为 ΔX_i ,其中 $i=1,2,3,\dots,n$,即 $\Delta X_1 = X_1 - \bar{X}$, $\Delta X_2 = X_2 - \bar{X}$, $\dots$, $\Delta X_n = X_n - \bar{X}$,于是多次直接测量结果的偏差可用算术平均偏差来表示,其定义是

$$\eta = \frac{1}{n}(\Delta X_1 + |\Delta X_2| + \dots + |\Delta X_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta X_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}| \quad (2-3-1)$$

式中, η 为多次直接测量值的算术平均偏差。

算术平均偏差可用来表示一组多次测量的数据中各个数据之间的离散程度。如果各个数据之间差别较大,那么,其算术平均偏差 η 较大,说明测量不精密,偶然误差大。

按照高斯误差理论,测量列中任一测量值的误差 ΔX_i 有57.5%的可能性落在 $\pm\eta$ 区间内,而平均值的误差 $\Delta\bar{X}$ 落在 $\pm\eta$ 区间内的可能性就更大。因此,我们可以认为真值在 $\bar{X} - \eta$ 与 $\bar{X} + \eta$ 之间。

严格地讲,误差是测量值与真值之差,而测量值与平均值之差称为偏差,两者有区别。但由于真值是无法测到的,所以实际计算时常用偏差来代替误差。

(三) 绝对误差和相对误差

上述几种误差都是有单位的。它们的单位和测量值的单位相同,反映测量值偏离真值的范围,这种误差称为绝对误差。

评价不同测量结果的优劣,还要看所测量本身的大小。因此引入相对误差概念。

相对误差是绝对误差与最佳值(平均值、标准值等)的比值,没有单位,常用百分数表示。相对误差是用来比较不同测量对象可靠程度的指标。

对于两个测量结果,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。一般地,我们认为相对误差小的测量结果更精确一些。

在表示测量结果时,既要写出绝对误差,又要写出相对误差。因为两者从不同角度反映了测量的误差特征。一般地,测量结果应该表示为

$$X = \bar{X} \pm \eta \text{ 单位}, E = \frac{\eta}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2-3-2)$$

式中, $\bar{X}$ 是单次测量值或多次测量的平均值, η 是测量值的绝对误差, E 是相对误差。

(四) 间接测量结果的误差

只需要测量一个物理量即可得到要求的结果,这种情况是很少见的。常见的都是间接测量的情况。间接测量值是由若干直接测量值通过公式计算得到的实验数值。既然公式中包含的直接测量值都含有一定的误差,则间接测量值也必然有误差,这就是误差的传递。例如,长方形边长为 $A = \bar{A} \pm \Delta\bar{A}$, $B = \bar{B} \pm \Delta\bar{B}$,则面积 $S = \bar{S} \pm \Delta\bar{S}$ 就是一个间接测量值。其中, $\Delta\bar{A}$ 和 $\Delta\bar{B}$ 为直接测量值 A 和 B 的绝对误差, $\Delta\bar{S}$ 为间接测量值 S 的绝对误差。

(五) 平均误差的一般传递公式

设 N 为间接测量值, $A, B, C, \dots$ 为间接测量值,它们之间的函数关系是

$$N = f(A, B, C, \dots), \quad N = \bar{N} \pm \Delta\bar{N} \quad (2-3-3)$$

各直接测量值可表示为

$$A = \bar{A} \pm \Delta \bar{A}, \quad B = \bar{B} \pm \Delta \bar{B} \quad (2-3-4)$$

将这些表示式中的平均值代入式 (2-3-3), 即可得 $\bar{N}$ 。对于间接测量值的误差 $\Delta \bar{N}$, 它可由直接测量值的误差、 ΔA 、 ΔB 等通过一定的计算得到。

对于算术平均偏差系统 (即直接测量误差由算术平均偏差方法计算得到), 其间接测量误差可由下述方法得到。

先求间接测量值 N 的全微分:

$$dN = \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial A} dA + \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial B} dB + \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial C} dC + \dots \quad (2-3-5)$$

式中, $\frac{\partial f}{\partial A}, \frac{\partial f}{\partial B}, \frac{\partial f}{\partial C}, \dots$ 为 f 的一阶偏导数, 将上述公式改成误差公式时, 式中的 $dN, dA, dB, dC, \dots$ 分别用 $\Delta \bar{N}, \Delta \bar{A}, \Delta \bar{B}, \Delta \bar{C}, \dots$ 代替。考虑到等式右边各项的偏导数可能为负值, 而间接测量误差只能为正值, 因此在等式右边各项均取绝对值, 于是就得到 N 的绝对误差表达式

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial A} \Delta \bar{A} \right| + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial B} \Delta \bar{B} \right| + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial C} \Delta \bar{C} \right| + \dots \quad (2-3-6)$$

及相对误差表达式

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} = \frac{\left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial A} \Delta \bar{A} \right| + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial B} \Delta \bar{B} \right| + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial C} \Delta \bar{C} \right| + \dots}{\bar{N}} \quad (2-3-7)$$

式中, 各偏导数之值均以 $\Delta \bar{A}, \Delta \bar{B}, \Delta \bar{C}, \dots$ 代入计算。

根据上述结论, 可以得到两种基本运算的间接误差计算。

1. 和与差的误差 $\bar{N} = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots)$

若 $N = A + B + C + \dots$

$$\bar{N} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \dots$$

则 $\Delta \bar{N} = \Delta \bar{A} + \Delta \bar{B} + \Delta \bar{C} + \dots \quad (2-3-8)$

式中, $\Delta \bar{N}$ 即为间接测量值的绝对误差, 而相对误差

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} \times 100\% = \left(\frac{\Delta \bar{A}}{\bar{A}} + \frac{\Delta \bar{B}}{\bar{B}} \right) \times 100\% \quad (2-3-9)$$

对于差的误差, 也可由同样的方法求得, 即若

$$N = A - B - C - \dots$$

$$\bar{N} = \bar{A} - \bar{B} - \bar{C} - \dots$$

则 $\Delta \bar{N} = \Delta \bar{A} + \Delta \bar{B} + \Delta \bar{C} + \dots \quad (2-3-10)$

$$E = \frac{\Delta \bar{N}}{\bar{N}} \times 100\% = \frac{\Delta \bar{A} + \Delta \bar{B} + \Delta \bar{C} + \dots}{\bar{A} - \bar{B} - \bar{C} - \dots} \times 100\% \quad (2-3-11)$$

由此可知, 加减运算的绝对误差等于各直接测量值的绝对误差之和。

2. 积与商的误差

若 $N = AB$

$$\bar{N} = \bar{A}\bar{B}$$

则 $\Delta \bar{N} = \bar{B}\Delta \bar{A} + \bar{A}\Delta \bar{B} \quad (2-3-12)$