



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

(第三版)

主编 李坤



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验 (第三版)

主 编 李 坤

副主编 王建荣 吕播瑞 魏国东

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十三五”规划教材，是编者在多年实验讲义的基础上增加了研究性实验的内容编写而成的。全书共6章，包括物理实验方法论、20个基础性实验、16个综合性实验、8个设计性实验、22个研究性实验及15个计算机仿真实验。这81个实验涵盖了物理学领域内力学、热学、电磁学、光学及近代物理的各个范畴。

本书由理论到实验，由基础到应用，难度由浅入深，系统地讲述了物理实验中的各个环节，可作为普通高等学校物理实验的教材，也可以供相近专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/李坤主编. —3版. —北京:科学出版社, 2018.1
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-03-056192-3

I. ①大… II. ①李… 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(2017)第331017号

责任编辑:任俊红 / 责任校对:桂伟利
责任印制:霍兵 / 封面设计:华路天然工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

石家庄继文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年1月第三版 印张:26

2018年1月第一次印刷 字数:666 000

定价:49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大学物理实验课是理工科学生进入大学后接触到的第一门实验课程,是接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是理工科专业对学生进行科学实验训练的重要基础。通过大学物理实验课,学生将会学习到基本实验仪器的使用、基本物理量的测量方法、基本的实验技能、基本的数据处理方法,更重要的是学会科学实验的基本思想。这对于学生将来在工作和学习中所需要具备的独立工作能力和创新能力等素质来讲是十分必要的。因此,大学物理实验课是一门对所有的理工科学生来讲都很重要的基础课程。

本书是编者在多年实验教学的基础上,依据“高等教育学校物理实验教学基本要求”编写而成的。本书的目的就是让学生通过学习书中的实验方法、实验内容、实验设计而初步获得进行科学研究的基础能力。

本书在整体编排上,遵循由浅入深、循序渐进的原则,打破了传统的力、热、光、电、近代物理实验的界限,将大学物理实验划分为基础性实验、综合性实验、设计性实验、研究性实验和计算机仿真实验,形成从低到高、从基础到前沿、从接受知识到培养综合能力的分层次课程体系。第1章物理实验方法论,主要讨论了物理实验中常用的实验方法,尤其是对误差理论与数据处理方法进行了详细的讨论。第2章基础性实验,主要为基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能的训练和基本测量方法与误差分析等,涉及力、热、电、光和近代物理各个学科,是大学物理实验的入门实验,也是适合于各专业的普及性实验。第3章综合性实验,主要涉及力、热、电、光和近代物理技术的综合应用,目的在于培养学生综合思维与综合应用知识和技术的能力。第4章设计性实验,是由以前教师排好实验、准备好仪器、学生来做实验的状态,过渡到学生在教师指导下自己设计方案来完成实验,从而培养学生的综合思维和创造能力。第5章研究性实验,是让学生在具备一定的物理学和物理实验知识的基础上,进一步了解现代物理实验技术的思想、方法、技术和应用,以科研探究的方式进行实验,培养他们的创新思维、能力及合作精神。第6章计算机仿真实验,是将一些设备昂贵或有相当危险性的实验,以虚拟仿真的形式展现,开拓学生的视野。此外,书中在绪论和重点实验环节配备了详细的视频资源,扫描书中二维码即可观看、学习。

实验教学是一项集体事业,本书是经过物理系全体同仁多次修订和改编逐步积累而成的。本书的第1章和第6章由李坤编写,第2章由王建荣编写,第3章由魏国东编写,第4章由李传亮编写,第5章由吕播瑞编写,最后由李坤统稿、修改和定稿。

本书在编写过程中,借鉴了许多兄弟院校的相关资料和经验;太原科技大学物理系的李晋红老师和刘淑平老师审阅了本书并提出了许多宝贵意见;太原科技大学教务处和应用科学学院对本书的编写和出版给予了极大的支持和鼓励;科学出版社的领导和编辑们为本书的出版也做了很多工作。在此,向他们表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中难免会有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2017年6月

目 录

前言

第 1 章 物理实验方法论	1
1.1 物理实验方法的兴起与发展	1
1.2 物理实验中的实验方法	4
1.3 测量误差与数据处理	8
第 2 章 基础性实验	35
2.1 力学基本测量	35
2.2 用拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量	50
2.3 弦线上的驻波研究	55
2.4 多普勒效应的验证	58
2.5 转动惯量的测定	61
2.6 热功当量的测定	67
2.7 测量金属的比热容	71
2.8 金属线胀系数的测量	74
2.9 液体黏滞系数的测量	78
2.10 空气的比热容比的测量	82
2.11 液体表面张力系数的测量	85
2.12 电学基本测量 电磁学实验基础知识	88
2.13 用模拟法测绘静电场	96
2.14 用惠斯通电桥测电阻	100
2.15 示波器的使用	107
2.16 测绘铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	113
2.17 硅光电池特性实验	119
2.18 薄透镜焦距的测量	121
2.19 分光计的调整与玻璃折射率的测定	127
2.20 用牛顿环测量透镜的曲率半径	134
第 3 章 综合性实验	140
3.1 共振法测量声波声速	140
3.2 波尔共振实验	142
3.3 动力学共振法测固体材料的杨氏模量	149
3.4 霍尔效应及磁场强度的测量	155
3.5 亥姆霍兹线圈磁场的测量	164
3.6 谐振频率的测量	166
3.7 半导体 PN 结的物理特性研究	169
3.8 测量非线性原件的伏安特性	173

3.9	冲击电流计	175
3.10	测量光栅常数与光波的波长	180
3.11	迈克耳孙干涉仪	183
3.12	偏振光的产生与检测	187
3.13	弗兰克-赫兹实验	193
3.14	密立根油滴实验	198
3.15	光电效应及普朗克常量的测定	202
3.16	光电管的特性研究	206
第 4 章	设计性实验	211
4.1	电表的改装和校验	212
4.2	激光全息照相	215
4.3	旋光法测定蔗糖溶液浓度	220
4.4	望远镜与显微镜的组装	222
4.5	用迈克耳孙干涉仪测透明介质的折射率	224
4.6	测量食盐密度	226
4.7	开尔文滴水起电实验	228
4.8	玻尔兹曼常数测量	231
第 5 章	研究性实验	235
5.1	傅里叶变换红外光谱分析	235
5.2	激光拉曼光谱实验	252
5.3	阿贝成像原理和空间滤波	258
5.4	超级电容器充电效率的测量	263
5.5	充电电池内阻的测量	266
5.6	电涡流传感器实验	272
5.7	光的力学效应及光阱力的测量	277
5.8	黑体辐射实验	282
5.9	EMC 测量实验	284
5.10	太阳能电池伏安特性的测量	288
5.11	LED 物理特性的测量	294
5.12	称重法测量颗粒物(实验室内的 PM _{2.5})	299
5.13	方波信号的分解与合成	301
5.14	频谱分析仪的使用	304
5.15	数字存储示波器的操作	307
5.16	电光调 Q 技术	312
5.17	光束质量分析	314
5.18	光纤光栅传感器实验	316
5.19	光纤熔接及光时域反射仪的使用	320
5.20	光纤数值孔径测量	323
5.21	空间光调制实验	325

5.22 声光调 Q 连续 YAG 倍频激光器实验	328
第 6 章 计算机仿真实验	333
6.1 大学物理仿真实验的基本操作方法	333
6.2 凯特摆测重力加速度	336
6.3 核磁共振	340
6.4 螺线管磁场及其测量	345
6.5 检流计的特性	348
6.6 阿贝比长仪和氦氖光谱的测量	353
6.7 氦氖光谱拍摄	361
6.8 G-M 计数管和核衰变的统计规律	366
6.9 热敏电阻的温度特性实验	370
6.10 塞曼效应实验	374
6.11 γ 能谱	382
6.12 电子自旋共振	384
6.13 法布里-珀罗标准具实验	391
6.14 低真空的获得和测量	394
6.15 油滴法测电子电荷	398
参考文献	402
附录	403

1. 运用科学推理和抽象分析

亚里士多德在他的著作《论天》中阐述：“两个不同质量的物体做自由落体运动时，较重的物体速率比较大，较轻的物体的速率小。”伽利略用著名的逻辑推理反驳了这个论述，他指出：如果亚里士多德的论断成立，即重物比轻物下落的速度大，那么将一轻一重两个物体拴在一起，下落快的重物会由于被下落慢的轻物拖着而减速，而下落慢的轻物会由于被下落快的重物拖着而加速，因而两个拴在一起的物体的下落速度将比两个中较重的物体下落速度小，但两个物体拴在一起又要比原来较重的物体更重，下落速度应更大。”这样亚里士多德的论断陷于自相矛盾的困境。这个流传了千余年的落体运动的谬误终于被伽利略纠正。

亚里士多德的另一论断：“作用于物体上的力一旦终止，物体就随即静止。”伽利略经过独立思考、推理，用抽象方法针对消除摩擦的极限情况说明惯性运动，发现了惯性原理，纠正了统治物理界两千年之久的“力是维持速度的原因”的谬误。

2. 重视观察和实验

以哥白尼为代表的地动论和以亚里士多德为代表的地静论争论的焦点是，地静论认为如果地球是做高速运动，为什么地面上的人一点也感觉不出来呢？为此伽利略亲自到船上作了十分细致的观察、实验，揭示了一条极为重要的真理，即从一个做匀速直线运动的船中发生的任何一种现象，是无法判断该船究竟是在运动还是停着不动。这就是说地球本身的运动对居住在地球上的人们来说是觉察不出来的。这个结论从根本上否定了地静论对地动说的非难，现在人们称这个论断为伽利略相对性原理，这个重要原理后来也成为狭义相对论的两个基本原理之一。

伽利略还用自身的脉搏跳动作计时器(当时无计时工具)证明了摆的等时性，计算了摆的周期，并证明了摆的周期与摆的长度的平方根成正比，而与摆锤的重量无关。这个实验的结论纠正了亚里士多德的“摆幅小需时少”的错误说法。

此外，伽利略还研究了匀加速运动，并用实验来验证他推出的公式，即从静止开始的匀加速运动，运动距离和时间的平方成正比，还把这一结果推广到自由落体运动。

3. 把实验探索和理论有机地结合起来

伽利略所发现的许多最基本的定理，都是通过了实验和理论的双重证明并把两者有机地结合起来，从而既克服了实验不精确的缺陷，又摒弃了“万物皆数”的唯心主义对科学研究的不良影响。值得指出的是，在伽利略的著作里所描述的实验都是理想化的，他所写出的实验数据都同理论有很好的符合，这很可能是因为他对数据进行了筛选。这表明伽利略并没有被实验的表面现象束缚，能正确地对待和解释实验误差。在他看来，实验结果与理想的简单规范之间的偏差，只是某些次要因素干扰的结果。

综上所述，伽利略把科学的实验方法发展到了一个完全新的高度。从此，物理学的一个新时代开始了，物理学走上了真正科学的道路。

1.1.2 物理实验在物理学发展中的作用

在物理学发展的历程中，实验和理论互为依赖，相辅相成。下面，我们从它们的相互关系来讨论物理实验在物理学发展中的作用。

1. 物理学理论是实验事实的总结

有许多物理学的理论规律是直接大量实验事实中总结概括出来的。例如，经典物理学中的开普勒三定律是依据第谷·布拉赫所积累的大量观测资料，采纳了哥白尼体系，又把哥白尼体系中的圆轨道修改为椭圆轨道而得到的。牛顿是在伽利略、开普勒、胡克、惠更斯等的工作基础上，经过归纳总结，提出了牛顿三大定律的。

不仅经典物理的规律是这样，近代物理的发展中也不乏这种例子。例如，粒子物理中的奇异粒子就是1947年首先在宇宙射线中被观察到的。后来，20世纪50年代在加速器实验中发现了一批粒子，它们协同产生，非协同衰变，而且是产生快、衰变慢。经研究，需要引进一个新的守恒量来对其进行概括，于是提出了一个新的量子数——奇异数。普通粒子的奇异数为零，奇异粒子的奇异数不为零。这是完全从实验规律中总结而来的。

2. 物理学中的争论需要用实验去判定

在物理学中，对某一问题的看法常常会产生几种不同意见。而这些意见的对错往往并不直观，最终还要靠实验做出判断。

在对光本质认识的历史过程中，微粒说和波动说的争论持续过很长一段时间。最初，由于光的成像和直线传播的事实，人们很自然地支持了微粒说。可是，光的独立传播，即两束光交叉后，还是各自按原来的方向和强度传播，又给惠更斯的波动说提供了有力的佐证。杨氏双缝干涉实验证明光是一种波，马吕斯发现的光的偏振也证明光是一种横波。光电效应及康普顿效应又给爱因斯坦的光量子论以有力的支持。最后，以波粒二象性结束了这一场旷日持久的争论，解释了全部实验事实。

3. 实验是修正错误的依据和发展理论的起点

实验常常成为纠正错误理论的依据和发展理论的新起点。例如，古希腊的亚里士多德曾经断言：体积相等的两个物体，较重的下落较快。他认为，物体下落的快慢精确地与它们的重量成正比。这种理论曾经影响了人们1800多年。但以后的无数实验事实以及伽利略的逻辑分析，都无可争辩地否定了亚里士多德的观点。

1911年，昂内斯在观察低温下水银的电导变化时，在4.2 K附近发现电阻突然消失的现象，后来又观察到许多金属在低温下都存在超导状态(即电阻率为0)。由此产生了一个新的物理学分支领域——超导物理。

以上我们强调了实验在物理学发展中的重要作用，但是，并没有丝毫轻视理论的意思。在物理学的发展史上，理论的发展往往有其相对的独立性。在一个相当长的时期内，理论可以独立于实验而发展，而且这种独立的趋势还可能随着物理学的进一步发展而扩展。然而，归根结底新理论的提出还是需要一定的实验事实来支撑，并且绝不能违背已有的实验事实。

物理学发展到今天，在理论指导下进行实验就变得更加重要了。因为除了天文现象以外，已经很少有在一般条件下就可以观察到的新的、具有前所未有的理论价值的实验现象了。现代物理实验往往要用大型或非常精密的仪器，花费很多人力、物力和时间，在一定的特殊条件下去探索，并且经过大量数据处理才可能获得结果。

1.2 物理实验中的实验方法

在物理学中,基本物理量包括长度、质量、时间、温度、电流强度与发光强度等.除此之外,电动势、电压及电阻也是物理实验中十分重要的物理量.本章将分别介绍上述这些物理量的基本实验方法.

1.2.1 实验方法

物理学是一门实验科学.包罗万象的物理规律,是通过对现象的观察分析,对物理量的反复测量而建立的.物理量的测量方法种类繁多,在大学物理实验中,归纳起来,可以概括出以下基本实验方法,分别为:比较法、模拟法、放大法、补偿法、混合法和仿真法等.

1. 比较法

比较法是将被测量与标准量进行比较而得出测量值的测量办法.例如,用米尺测量长度,就是将被测长度与标准长度(m、cm、mm等)进行比较;用天平测质量,就是将被测质量与标准质量(kg、g、mg等)进行比较;又如测量光栅衍射的各级衍射角,也是用比较法通过分光计上已刻好分度的圆游标测出结果的.

2. 模拟法

模拟法是一种间接的测量方法.这里,以电流场模拟静电场为例对模拟法加以说明.直接对静电场进行测量是相当困难的.为此,可联想到,电流场与静电场虽然是两种不同的场,然而它们所遵循的规律在形式上相似.而且,对电流场的测量相对来说容易很多.那么,利用其相似性,对电流场进行研究以代替对静电场的研究,这就是一种模拟的方法.

3. 放大法

在物理量测量中,对那些难以用普通测量仪器进行准确测量的微小量,常采用放大的方法将其放大,也是一种基本测量方法,称为放大法.例如,利用螺旋测微器测量长度时,实际上就是把螺杆的位移放大成鼓轮的转动;又如测量钢丝的杨氏模量时,用光杠杆法放大钢丝在拉力作用下的微小伸长量.

4. 补偿法

补偿法是将种种原因使测量状态受到的影响尽量加以弥补.例如,可用电压补偿法弥补用电压表直接测量电压时而引起被测支路工作电流的变化;用温度补偿法可弥补因某些物理量(如电阻)随温度变化而对测试状态带来的影响;用光程补偿法可弥补光路中光程的不对称等.

5. 仿真法

在现代物理实验中,利用计算机进行仿真实验是一种新兴的实验方法.随着计算机的迅速发展及普及,计算机提供了强大的数学运算能力、绘图能力及存储空间,对于一些物理实

验,可以在计算机上进行模拟,调节各实验参数,综合数据进行结果分析,从而找出其中的一般规律.

1.2.2 基本物理量的测量方法

1. 长度的测量方法

长度的国际标准从1795年法国颁布米制条例以来一直在不断地完善.

最早,科学家设想从自然界选取长度标准,把从北极通过巴黎到赤道的地球子午线长度的千万分之一作为长度的基本单位,称为“米”,并用纯铂制成了米的基准器.显然,这种基准器(称为自然基准器)的准确度受到对地球子午线的测量程度的限制.

在1889年巴黎第一届国际计量大会上规定长度的国际标准是一根横截面呈X形的铂铱(90%铂和10%铱)合金棒,保存于巴黎附近的塞弗尔市的国际计量局中,叫做国际米原器.把刻在棒两端附近的两条细线之间的距离定义为1 m.

由于国际米原器及其复制品的长度可能由于外界的作用而随时间发生微小的变化,所以对于极精密的测量工作来说,国际米原器不是理想的长度标准.任何大块物质都不可能保持本身的物理性质永久不变,而单个原子的性质可以合理地假定为基本上不随时间而变化.所以许多年来,科学家们企图把长度的标准和原子的性质联系起来.由于实验技术的发展,人们已经能够极精密地测定光的波长.1960年第十一届国际计量大会决定,以氩的一种纯同位素——氩-86原子在 $2p_{10}$ 和 $5d_1$ 能级间跃迁所对应的辐射,在真空中的波长作为长度的新标准,并规定1 m等于该波长的1650763.73倍.新标准一方面提高了测量的准确度,另一方面比旧标准方便得多,因为在任何设备比较完善的实验室里都能够获得氩-86发出的橙红色光.

用氩-86波长复现长度单位“米”时,在最好的复现条件下,其准确度为 $\pm 4 \times 10^{-9}$,要继续提高存在着困难,因为原子受激跃迁时,总要受外部电磁场作用和其他干扰的影响.这些影响会使谱线产生偏移,就限制了长度计量的测量精确度的进一步提高.

20世纪70年代初,有些国家在研究光速方面投入了很大的力量.因为当时的时间频率测量精度已经比较高了,如果能准确测量光速,必然会提高长度测量的精度.

1983年10月7日在巴黎召开的第十七届国际计量大会上,审议并批准了米的新定义.决定:

(1) 米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ s的时间间隔内行程的长度.

(2) 废除1960年以来使用的建立在氩-86原子在 $2p_{10}$ 和 $5d_1$ 之间能级跃迁的米的定义.

新定义用词简单,含义明确、科学,又能够为广大非科技人员所理解.这个定义带有开放性,随着科学技术的发展,复现程度可不断提高,并且复现方便,即使是经济不很发达的国家,也有能力复现,并有足够的精确度.

在国际单位制(SI制,简称国际制)中,长度单位是“米(m)”.

除了“米”以外,在国际制中还可使用“米”的十进倍数或分数作长度单位.符号及其与“米”的关系如下:

$$1 \text{ 千米(km)} = 10^3 \text{ m}$$

$$1 \text{ 厘米(cm)} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$1 \text{ 毫米(mm)} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$1 \text{ 微米}(\mu\text{m}) = 10^{-6} \text{ m}$$

1 纳米(nm)= 10^{-9} m

天文学中计量天体之间的距离时,常用“天文单位”及“光年”作为长度单位.1天文单位就是地球和太阳的平均距离,等于 1.496×10^8 km.1光年就是光在真空中1年所走过的路程.光的速度约为 3×10^8 m/s,所以1光年等于 9.46×10^{15} m.

在物理实验中常用的长度测量仪器有米尺、游标卡尺、螺旋测微器、读数显微镜、百分表等.选用时要注意仪器的量程和分度值(一般分度值越小,仪器越精密).在工程技术和科学研究中经常需要测量不同量值、不同精度要求的长度,针对不同情况需使用不同的长度测量仪器.此外,有许多物理量的测量也经常转化为长度测量,如温度、压力、电流和电压等,因此掌握长度测量十分重要.

2. 质量的测量方法

物体的质量可以用两种不同的方法来测量.

一种方法是利用牛顿第二定律中关于质量的关系式,即物体的质量是作用在该物体上的力与物体加速度的比值.将已知力作用在一个物体上,测出该物体的加速度,那么用这个力除以加速度,就可得到该物体的质量.

另一种方法就是用被测物体的质量和标准质量进行比较.例如,天平就是利用这一方法来测量质量的,所谓的标准质量实际上就是砝码.

天平作为一种计量仪器,很早就出现在世界上了.我们勤劳智慧的祖先早在周朝时期已在我国不少地方利用天平做仪器进行称衡了.如果追究我国第一次使用这种天平的时间,应当比这还早.我国是世界上使用天平最早的国家.

质量的国际单位,在1889年以前经历了与长度的国际单位相类似的完善过程.1795以后,把千克作为质量单位,它等于 1 dm^3 的纯水在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的质量,并且用纯铂制成了千克的基准器.随着测量技术的提高,经过反复的精确测量,发现质量为1 kg的纯水,在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 的体积并不是 1 dm^3 ,而是 1.00028 dm^3 ,即千克基准器的质量和理论之间存在很大的差别.

自1889年起,国际单位制将千克的大小定义为与国际千克原器(在专业度量衡学中很多时候会把它缩写为IPK)的质量相等.IPK由一种铂合金制成,这种合金叫“90Pt10Ir”,即90%铂及10%铱(按质量比),然后把这种合金用机器制造成 39.17 mm 的直立圆柱体(高度=直径),被放置在双层玻璃罩内的石英托盘上,与国际米原器一起保存于国际计量局.

常用的质量单位及其换算关系如下:

$$1 \text{ 克(g)}=10^{-3} \text{ kg}$$

$$1 \text{ 毫克(mg)}=10^{-6} \text{ kg}$$

$$1 \text{ 微克}(\mu\text{g})=10^{-9} \text{ kg}$$

实验室中测量质量常用的仪器有物理天平、分析天平以及电子天平等.

3. 时间的测量方法

关于时间的测量,可能遇到两类问题:第一类是测定某一现象开始的真正时刻,这主要是在天文和地球物理研究中有它的意义;第二类是测定两个时刻之间的时间间隔,例如,某一现象的开始和终止之间的时间间隔,这是在物理学的研究中经常遇到的问题.

1960年以前,人们是利用地球的自转来定义时间的,那时国际上对时间的标准定义为太

阳连续两次出现在子午面的时间间隔, 取其一年中的平均值, 称为平均太阳日, $1 \text{ 秒} = \text{平均太阳日} / 86400$. 1960~1967年, 为了提高时间单位的准确度, 出现了秒的第二次定义, 即用历书秒代替平均太阳秒作为秒的定义. 历书秒是以地球公转为基础的, 因为地球公转的周期比自转周期更加稳定. 历书秒的定义为 1900 年 1 月 1 日 0 点开始的一个回归年的 31556925.9747 分之一.

1967 年 10 月, 第十三届国际计量大会决定, 把时间的标准改为“秒是铯-133 原子在其基态两个超精细能级间跃迁时辐射的 9192631770 个周期所持续的时间”, 按照此定义, 复现秒的精准度已超过十亿分之一秒.

国际单位制中, 时间的单位是“秒(s)”. 除“秒”以外, 国际制还可使用其他的时间单位. 常用的时间单位及其与“秒”的关系如下:

$$1 \text{ 日(d)} = 86\,400 \text{ s}$$

$$1 \text{ 时(h)} = 3600 \text{ s}$$

$$1 \text{ 分(min)} = 60 \text{ s}$$

$$1 \text{ 毫秒(ms)} = 10^{-3} \text{ s}$$

$$1 \text{ 微秒}(\mu\text{s}) = 10^{-6} \text{ s}$$

$$1 \text{ 纳秒(ns)} = 10^{-9} \text{ s}$$

$$1 \text{ 皮秒(ps)} = 10^{-12} \text{ s}$$

$$1 \text{ 飞秒(fs)} = 10^{-15} \text{ s}$$

实验室中测量时间常用的仪器有停表(机械停表、电子停表)、数字毫秒计和光电计时器等.

4. 温度的测量方法与仪器

温度是表征物体冷热程度的物理量. 要定量地确定温度, 必须对不同的温度给以数量标志. 温度的数量表示方法叫做温标. 为使温度的测量统一, 就必须建立统一的温标. 人们总结了生产和科学研究中测量温度的经验, 并由理论分析得出热力学温标是最科学的温标. 因此国际上规定热力学温标为基本温标. 热力学温度单位是国际单位制中的温度单位. 1954 年第十届国际计量大会将它的定义规定为选取水的三相点为基本点, 并定义其温度为 273.16 K . 1967 年第十三届国际计量大会以开尔文的名称(符号 K)代替“K 氏度”(符号 K), 并对热力学温度定义如下: “热力学温度单位开尔文是水的三相点热力学温度的 $1/273.16$.”

实验室中测量温度常用的仪器有: 气体温度计、水银温度计、电测温度计以及光测温度计等.

5. 电流的测量方法与仪器

在国际单位制中, 电流是基本物理量之一. 电流的测量不仅是电学中其他物理量测量的基础, 也是许多非电量测量的基础. 安培的定义为“若保持在处于真空中相距 1 m 的两无限长、而圆截面可忽略的平行直导线内, 通以相等的恒定电流, 当两导线之间产生的力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7} \text{ N}$ 时, 各导线上的电流为 1 A ”. 该定义在 1948 年第九届国际计量大会上得到批准, 1960 年第十一届国际计量大会上, 安培被正式采用为国际单位制的基本单位之一. 安培是为纪念法国物理学家 A. M. 安培而命名的. 利用电流的各种物理效应, 可以制成各种

各样测量电流的仪器。

在实验中最常用的是磁电式电流表。

1.3 测量误差与数据处理

1.3.1 测量与误差

物理实验不仅要定性观察物理量的变化过程,更重要的是要定量地测定物理量的大小。

1. 测量的基本概念

图 1-3-1 是用米尺测量 AB 的长度. 这是一个最简单、最基本的测量. 由此例可知,“测量”就是将待测量与选为单位的标准量进行比较的过程。

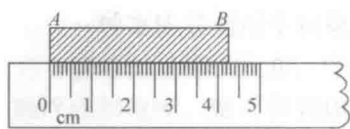


图 1-3-1 用米尺测量 AB 的长度

此例中, AB 的长度就是待测量(更确切地说是“给定的测量目标”),米尺(测量设备)上每一分格的长度就是标准量. 比较的结果(测量所得的信息),即待测量与标准量比较所得的倍数(此倍数可能是整数、分数或无理数)称为“测得值”或“测定值”。

图 1-3-1 中 AB 的长度是 4.25 cm 或 42.5 mm.

2. 直接测量和间接测量

“直接测量”是指能用仪器或仪表直接测出测量值的测量过程. 由直接测量所得的测量值为“直接测量值”. 例如,用米尺量得 AB 的长度是 4.25 cm; 用电压表测得电路中两点的电势差是 3.20 V 等。

“间接测量”是指测量的最终结果(测得值)需将一些直接测量值代入一定的函数式,通过计算才能得出的测量过程. 例如,圆柱体的密度 ρ 需将圆柱截面的直径 D 、圆柱体的高 H 和质量 m 这三个直接测量值代入函数式 $\rho = 4m / (\pi D^2 H)$ 中进行计算才能得出. 物理实验大都是由直接测量得出某些物理量的值,然后通过已确定的函数关系求另一物理量,或通过对一些直接测量数据的分析研究建立其与待测量间的函数关系。

3. 真值、最佳值与误差

1) 真值

物体有各种各样的性质,我们可以用一些物理量来表示这些性质. 这些物理量所具有的客观真实值称为它的“真值”,也可更确切、更具体地给真值下一个定义,即当待测量和测量过程完全确定,且所有测量的不完善性可以排除时,由测量所获得的一个值称为此量的真值。

测量的目的是得到待测量的真值,但通过有限次测量能测得真值吗?让我们再来分析一下图 1-3-1 所示的测量. 我们把 AB 的一端 A 和米尺“0”刻线对齐,另一端 B 所对的米尺的位置即为 AB 的长度. 从图中可以看到 B 是在 4.2 cm 到 4.3 cm 之间. 但究竟是 4.2 几 cm 呢? 不同的人可以读出不同的数来(对同一个人,在不同的时候来测,读数也可能不同),如读成 4.28 cm、4.27 cm、4.24 cm 等. 这些读数中,最后一位数是估计出来的,称为“估计数字”(也称为“可疑数字”“欠准数字”等). 我们很难判断哪个读数更准,因而也就不能确定物长

的真值是多少. 那么图 1-3-2 中所示的两个测量是否就很准了呢? 其实不然. 图 1-3-2(a) 中长度应记为 4.20 cm, 即 AB 的长度可能是 4.19 cm、4.20 cm、4.21 cm 等. 而图 1-3-2(b) 中 AB 应记为 4.00 cm, 即它可能是 4.01 cm、4.00 cm 或 3.99 cm 等. 要注意的是, 这两个读数中的“0”, 并不表示绝对正确, 而是表示在我们测量时边缘“ B ”似乎与米尺的某一刻线对齐了, 即把估读的那位数估成“0”了. 还要注意的: AB 测得值的最后一位应比米尺的最小分格还小一位. 例如, 图 1-3-2(b) 中 AB 一定要记为 4.00 cm, 而不能记为 4 cm 或 4.0 cm.

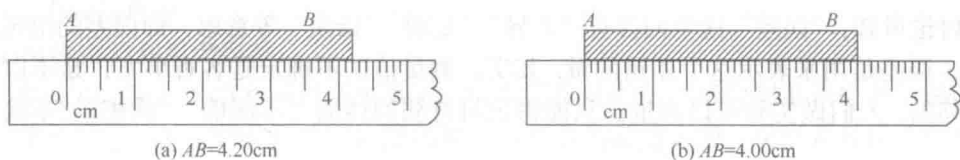


图 1-3-2 米尺测量 AB 长度对比

以上的例子是由主观因素(估计读数不能确定)造成的测量值与真值有差异, 其实还有许多客观因素(例如, 待测物与测量设备的材料不同, 在温度变化时, 它们的膨胀情况也不一样)以及难以预料的因素也会造成测量值与真值的差异. 所以, 通过有限次测量是不能测得真值的.

2) 最佳值

在相同条件下(即等精度)对某一物理量进行 N 次测量, 其测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, 算术平均值为 \bar{x} , 则

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1-3-1)$$

理想情况下, 在一组 N 次测量的数据中, 算术平均值最接近于真值, 称为测量的“最佳值”. 当测量次数 $N \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x} = X$ (真值).

3) 误差

由以上分析可知, 任何测量都包含欠佳成分(可疑成分), 也就是说, 任何测量值与真值之间都存在差异, 这种差异就是测量的误差.

1.3.2 误差定义和分类

由于各种主观的、客观的、可以预见和不可预见的原因都对测量有影响, 测量值偏离了真值而造成误差. 为了能定量地估算这种偏离程度, 人们定义了绝对误差和相对误差.

1. 绝对误差和相对误差

绝对误差是测量值与真值之差, 即

$$\Delta x = x - X \quad (1-3-2)$$

式中, x 是测量值, X 是待测量的真值, Δx 则是 x 的绝对误差. 注意: 绝对误差可以取“+”或“-”(不是误差取绝对值), 即 Δx 可表示测量值 x 偏离真值 X 的程度(即“大小”), 也可表示偏离的方向(如 $\Delta x > 0$, 表示 x 偏大于 X ; $\Delta x < 0$, 则表示 x 偏小于 X).

但是, 绝对误差并不能反映测量的准确程度, 即测量的好坏. 例如, 多级弹道火箭在射程为 12 000 km 时, 能击中直径为 2 km 的圆面积目标; 而优秀射手在距离为 50 m 远处, 能

准确地射中直径为 2 cm 的圆形靶心. 如只考虑绝对误差, 则火箭的误差比射手的要大 10 万倍. 但是, 火箭的误差与射程之比为 0.01%, 而射手的误差与射程之比却是 0.02%, 可见火箭击中目标的准确率比优秀射手要高. 为了能正确地表达测量的好坏, 还应引入相对误差的概念.

相对误差是绝对误差与测量值(对某一次测量而言)或近真值(对多次测量而言)之比(常用百分率来表示), 即

$$E_x = (\Delta x / x) \times 100 \quad (1-3-3)$$

从以上讨论可知, “误差”这个词含有“差异”“差别”“错误”等意思, 即误差的出现几乎是人为的, 误差是用来表示这个差错的量. 其实, 测量值的不确定是客观事实, 是不以人的意志为转移的. 人们做实验可以测量, 只能得出对待测物体的“不明确”“模糊”“不确定”的认识.

2. 误差的分类

传统的分类法就是着重于误差的产生原因和误差值的规律性质, 一般把误差分为如下三类.

1) 系统误差

在同一测量条件下, 多次测量同一值时, 其误差的绝对值和符号恒定(定制系统误差), 或按一般的规律变化(变质系统误差)的误差称为系统误差. 系统误差产生的原因主要有以下三个方面:

(1) 理论和实验方法方面——实验所依据的理论不够充分, 或未考虑到影响所求结果的全部因素. 例如, 精确测定某物体的重量时, 忽略了空气浮力产生的影响; 计算真实气体的状态变化时, 采用了理想气体状态方程; 在简化运算公式时, 略去的部分所占比例过大等. 若能充分探讨其理论, 并将校正项引入到测量结果中去, 这种误差是可以部分避免的.

(2) 仪器设备方面——仪器设备常由于制造不够精密或安装不妥, 测量结果不够准确. 例如, 米尺的刻度不均匀或弯曲, 天平的两臂不等距, 螺旋测微器的螺距不均匀等. 虽然仪器设备不可能绝对完好, 但设法改进仪器的设计和制造, 可尽量减小这种误差.

(3) 个人原因——因观察者感觉的敏钝或生理上某些缺陷引起. 这种误差往往因人而异, 若矫正生理上的缺陷, 并经过一段时间的实验技术训练, 这种误差也可以减小.

系统误差的特点是使测量的结果总是偏向一边, 不是偏大, 就是偏小. 一般来说, 这类误差有规律可循, 往往可预先设法消除或减小. 在物理实验中, 前两个因素应在实验室设计和准备实验时加以考虑. 第三个因素要靠实验者自己努力克服.

2) 随机误差

在相同条件下, 对同一量进行多次重复测量时, 在极力消除或修正一切明显的系统误差之后, 每次测量值仍会出现一些随机起伏, 由这些起伏所造成的误差称为随机误差.

随机误差产生的原因主要有以下两种:

(1) 剩余的——系统误差虽然可以设法减少, 但不能完全消除. 一般来讲, 经过精心校正后的测量值, 其误差残余已不再有系统误差的性质, 而成为随机性的误差. 例如, 对真实气体使用范德瓦耳斯方程比采用理想气体方程准确, 但仍然只是近似准确, 在某些状态范围内它和真实气体之间仍有偏离.

(2) 意外的——在测定过程中, 观察者的生理状态以及外界条件, 如温度、气流等发生变

化(实际上总是在不断地改变着)而引起的误差,这种影响往往不是人力所能控制的。

随机误差又被称为“偶然误差”。它的特征是“随机性”,即每一个单独误差值的大小和正负是没有规律性的、不固定的,但多次测量就会发现绝对值相同的正负误差出现的概率大致相等,因此它们之间常能互相抵消。所以随机误差可以通过增加测量次数取平均值的办法来减小。

值得注意的是,随机误差是无法消除的,但我们可以研究它的分布情况,估算它的大小,并探讨它出现的概率。

3) 过失误差和粗大误差

过失误差是指人为事故所造成的误差。粗大误差是指在一定的测量条件下,超出规定条件下预期的误差。这两类误差产生的原因均是观察者的疏忽大意。观察者对仪器的使用方法不当,或对实验原理不甚理解,或记错数据均会造成这类误差。这类误差毫无规律可循,有时可能造成极大的差错。因此,这类误差实际上可称为“错误”,它是完全可以避免的,而且应该避免的。

1.3.3 测量的准确度、精密度,仪器准确度与仪器误差

1. 多次测量误差分布的直方图、分布曲线和分布函数

表 1-3-1 中所列的数据是测量某钢球直径所得的值。表中列了两组数据, I 组总共做了 $N=150$ 次测量, I A 组做了 $N=50$ 次测量。为了便于比较,我们列出的数据是以测量值 S_i 为中心值,间隔 $\Delta S=0.01$ 的出现次数。例如,表 1-3-1 中 7.320 出现的次数 $n_i=3$ (对应于 $N=150$),是指 S_i 的测量值在 7.315~7.325 这一区间内出现的次数为 3。表中的相对出现次数 n_i/N 在统计学上称为频率。当 $N \rightarrow \infty$ 时,频率的极限就是概率。图 1-3-3 是以 n_i 为纵坐标, S_i 为横坐标所作的直方图(在横轴上依次按间隔 ΔS 截出各组距,并以此组距为底,以 ΔS 间隔中纵坐标的中心值为高作一长方形。用这种方法所作的统计图称为“直方图”)。图 1-3-4 是以 S_i 为横坐标,频率 n_i/N 为纵坐标的频率直方图。图 1-3-5 是以 S_i 为横坐标,以 $(n_i/N) \times (1/\Delta S)$ (此乘积称为“频率密度”)为纵坐标的频率密度直方图。

表 1-3-1 钢球直径测量数据表

测量值(S_i)	出现次数		相对出现的次数	
	I 组 $N=150$	I A 组 $N=50$	I 组 $N=150$	I A 组 $N=50$
7.310	1	0	0.007	0
7.320	3	1	0.020	0.02
7.330	8	3	0.058	0.06
7.340	18	6	0.120	0.12
7.350	28	9	0.187	0.18
7.860	34	11	0.227	0.22
7.370	29	10	0.198	0.20
7.380	17	6	0.113	0.12
7.390	9	2	0.060	0.04
7.400	2	1	0.013	0.02
7.410	1	1	0.007	0.02