

大学物理实验

编著 曹正东
何雨华
孙文光

21世纪网络版系列教材

同济大学出版社

21 世纪网络版系列教材

大学物理实验

曹正东 何雨华 孙文光 编著

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/曹正东等编著. —上海:同济大学出版社, 2003. 7

(21 世纪网络版系列教材)

ISBN 7-5608-2645-8

I. 大… II. ① 曹… ② 何… ③ 孙… 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(2003)第 030880 号

大学物理实验

曹正东 何雨华 孙文光 编著

策划编辑 孙一风 责任编辑 司徒妙龄 责任校对 郁 峰 封面设计 陈益平

出 版	同济大学出版社
发 行	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店
印 刷	同济大学印刷厂印刷
开 本	787mm×960mm 1/16
印 张	19.75
字 数	395 000
印 数	1—3 000
版 次	2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5608-2645-8/O · 235
定 价	25.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

《21 世纪网络版系列教材》编委会

主 任 李国强

副主任 薛喜民 张大也 周 箴 凌培亮

编 委 孙其明 肖蕴诗 周 俭 顾 牡

崔子钧 童学峰 郑惠强 徐鸣谦

吴泗宗 郭 超 周克荣

序

21 世纪,将是中华民族复兴的世纪。肩负着这一空前历史重任的人民,要求必须具有与之相适应的素质。这也将是新世纪对教育提出的新任务和新要求,也就是说,教育必须适应大众化和终身化的要求。所谓“大众化”,是指人们有着更多的机会接受教育,包括高等教育在内;所谓“终身化”,是指人生过程都伴随着接受教育的机会。

在某种意义上说,网络教育正是为适应教育大众化和教育终身化的要求而产生的。信息技术和网络技术的空前发展,为网络教育的实施提供了切实可行的手段和方式,也可以说,信息和网络技术催生了网络教育。它可不受人力、地域、场地和时空的限制。网络教育方式的出现,在提升教育使命、丰富教育理念、扩大教育规模、革新教育手段、优化教育资源和提高教育质量等方面起着重要的作用。

网络教育采用的是借助现代信息技术的一种全新的教学形式,这就为网络教育的教材编写工作提出了新的要求。它更需要以其视听性、自学性、选择性、层次性、灵活性的特点去满足读者的需要,让每一个学习者都可以寻求到适应自己层次的知识。我高兴地看到,参加这套网络系列教材编写工作的教师,都具有深厚的专业学识、丰富的教学经验,以及对现代教育技术的理解,这是整套教材的质量水平的可靠保证。

我期望,这套教材的出版,将会有助于推动教育大众化和教育终身化的进程,有利于促进网络教学的发展,有助于满足人们日益追求知识的愿望,有助于创造一个学习型社会的氛围,为中华民族的复兴作一点贡献。



2002 年 8 月 8 日写于同济园

前 言

本书是根据高等工业学校物理实验课程教学基本要求,结合同济大学网络教育学院物理实验教学的需要而编写的。网络教育是信息社会的产物,网络大学为千千万万人实现了上大学的理想,网络教育事业也正在前进和发展。

大学物理实验作为一门独立设置的必修基础课程,并不是单纯为了验证大学物理课程中学到的一些定律而开设的,而必须更重视通过实验获得正确答案的过程,以及独立思考的能力。正如爱因斯坦所说:“发展独立思考和独立判断的一般能力,应当始终放在首位。如果一个人掌握了他自己的道路,而且比起那种主要以获得细节知识为其培训内容的人来说,他一定会更好地适应进步和变化。”这一段话,无论是对于教师,还是对于学生,都是很有教益的。对于网络或函授教学方式的学生,独立思考是尤其重要的。

为适应时代的发展和教学改革的要求,我们在编写本书时,对同济大学所开设的工科实验、理科实验和开放实验作了挑选和修改,同时也吸收了兄弟院校的许多宝贵经验,最后形成的书稿。在数据处理方面,不再沿用过去的误差传递公式,而采用了不确定度的概念和表达方法。为便于学生理解和操作,有些地方作了简化处理。在实验内容方面,选用了一些具有同济大学特色的实验,如转动惯量测定、空气比热容比测定、受迫振动实验和相对论实验等,这些实验所用的仪器都是同济大学自制的,是经多年使用教学效果优良的仪器。在力学、热学、电磁学和光学实验的前面部分介绍了有关预备知识,并考虑到各院校所用仪器有所不同,因此,在某些实验中列出了不同的实验方法,以供选择。

本书除了常规的基础实验,增加了近代与综合实验。选编了富有启迪意义的夫兰克-赫兹实验和密立根油滴实验,并选编了扫描隧道显微镜、高温超导、核磁共振、非线性电路与混沌等实验。这些实验体现了现代科学技术的发展和应用,通过这些实验,可以扩大学生的知识面,增加对现代科技的了解和加强综合能力的培养。

根据网络教育学院的教学特点,本书在实验原理和内容等方面写得较为浅显具体,便于学生自学,并结合实验安排了预习作业,要求学生独立思考,做好预习。为满足不同层次学生的需要,有些实验中的部分内容可作为选做内容,思考题也有难有易,可供选择。书中收录了附表1~附表14,其中有基本物理量的测量(简要介绍了测量器具及其技术性能)、基本物理常数、物理实验常用数据表等,以供参考。全书共分六章,第一、五、六章由曹正东执笔,第二、三章由何雨华、孙文光执笔,第四章由孙文光、曹正东执笔。全书由曹正东统稿。

本书由同济大学物理实验中心主任陈铭南教授主审。在本书编写过程中,得到

陆廷济、胡德敬、费定曜、陈玲燕四位教授以及复旦大学陆申龙教授的关心和指导,并得到章昌奕、倪晨、申幼犁、李佛生、赵敏、查建峰等各位教师的帮助,他们有的提供了部分书稿或资料,有的审阅了部分章节,有的参加讨论并提出了宝贵意见,还有李锐、彭若龙两位研究生也为本书的部分实验提供了帮助。本书的大部分书稿和插图由王慧智打印、编排。

赵敏、申幼犁、汤纯等教师为学生编写了普通物理实验的计算机辅助教学软件,软件图文并茂,内容丰富,有动态演示,有操作练习,十分有益于学生自学,学生可以上同济校园网,利用实验软件进行预习,为正式实验做好充分准备。

总之,在本书的编写过程中,我们得到了同济大学物理系领导和物理实验中心领导的大力支持以及其他各方面的关心和帮助。实验教学是一项集体的事业,离不开实验室多年来的建设和发展,本书的编写凝聚着我们实验室全体教师和实验技术人员(包括这些年来已经退休的同志)长期辛勤劳动的成果,他们长期工作在实验教学第一线,积累了丰富的教学经验,对本书的编写提供了极大的帮助。在此,我们一并对为本书作出过贡献的所有同志表示衷心的感谢。

这里,还要感谢同济大学历年来上物理实验课的诸多学生,正是他们的学习、钻研和对实验课提出了不少宝贵的意见,极大地鞭策着我们不断进取。

限于编者水平,书中难免有缺点和不妥之处,恳请批评指正,以便我们改进和提高。

编 者

2003 年 1 月于同济大学

目 录

前 言

绪 论	(1)
-----	-----

1 不确定度表达和数据处理方法	(6)
-----------------	-----

1.1 测量与误差	(6)
-----------	-----

1.2 随机误差的正态分布与标准误差	(8)
--------------------	-----

1.3 算术平均值	(10)
-----------	------

1.4 标准偏差	(11)
----------	------

1.5 不确定度与测量结果表述	(12)
-----------------	------

1.6 有效数字及其运算规则	(19)
----------------	------

1.7 数据处理方法	(21)
------------	------

练习题	(26)
-----	------

2 力学实验	(29)
--------	------

2.1 预备知识	(29)
----------	------

2.2 密度的测定	(38)
-----------	------

2.3 刚体转动惯量的测定	(46)
---------------	------

2.4 杨氏弹性模量的测定	(57)
---------------	------

2.5 液体表面张力系数的测定	(66)
-----------------	------

2.6 耦合摆的研究	(72)
------------	------

2.7 用玻尔共振仪研究受迫振动	(76)
------------------	------

2.8 空气中声速的测量	(83)
--------------	------

2.9 力学实验小结	(87)
------------	------

3 热学实验	(90)
--------	------

3.1 预备知识	(90)
----------	------

3.2 液体粘滞系数的测定	(96)
---------------	------

3.3 气体比热容比 C_p/C_v 的测定	(104)
--------------------------	-------

3.4 液体的饱和蒸气压力和温度测定	(107)
--------------------	-------

3.5 不良导体导热系数的测量	(112)
-----------------	-------

3.6 热学实验小结	(117)
------------	-------

4 电磁学实验	(118)
4.1 预备知识	(118)
4.2 电表的改装	(129)
4.3 模拟法测绘静电场	(132)
4.4 补偿法与十一线电位差计	(139)
4.5 集成霍尔传感器测量磁场	(144)
4.6 示波器的使用	(149)
4.7 直流电桥	(162)
4.8 双电桥	(170)
4.9 交流电桥	(178)
4.10 RLC 串联电路的暂态过程	(181)
4.11 RLC 串联电路的稳态特性	(189)
4.12 RLC 电路的串联谐振	(193)
4.13 电磁学实验小结	(196)
5 光学实验	(200)
5.1 预备知识	(200)
5.2 薄透镜焦距的测量	(210)
5.3 牛顿环	(216)
5.4 迈克尔逊干涉仪的应用	(220)
5.5 衍射光栅	(226)
5.6 光的偏振现象	(234)
5.7 全息照相	(240)
5.8 光学实验小结	(247)
6 近代物理实验与选做实验	(250)
6.1 夫兰克-赫兹实验	(250)
6.2 密立根油滴法测定电子电荷	(254)
6.3 相对论验证实验	(260)
6.4 核磁共振	(268)
6.5 高温超导材料特性测试	(273)
6.6 扫描隧道显微镜	(277)
6.7 非线性电路与混沌	(283)

附表 1	长度测量	(289)
附表 2	时间和频率测量	(291)
附表 3	质量测量	(291)
附表 4	温度测量	(293)
附表 5	常用光探测器	(295)
附表 6	常用物理量的国际单位制	(296)
附表 7	基本物理常数	(297)
附表 8	20℃时常见固体和液体的密度	(298)
附表 9	标准大气压下不同温度的纯水密度	(298)
附表 10	在海平面上不同纬度处的重力加速度	(299)
附表 11	部分金属的杨氏弹性模量	(299)
附表 12	部分金属合金的电阻率及温度系数	(300)
附表 13	常温下部分物质相对空气的折射率	(300)
附表 14	常用光源谱线波长	(301)

绪 论

1. 物理学对社会的重要性

物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科——是一项国际事业，它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，并扩展着我们关于大自然知识的疆界。

(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着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、计算机科学家以及其他物理科学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等——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，改善了我们的生活质量。

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，廉价计算机的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 年的诺贝尔物理学奖。

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纯度高 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。

激光的光脉冲宽度窄,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。物理学家藉助光学双稳态现象能够用另一个光束将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,因而光纤通信发展迅速。技术专家展望下一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 2000 万路的电话。这就是说,上海全体市民即使在同一时间通话,光纤的传递能力还绰绰有余。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. C. Rortgen)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。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,藉助它们可以确定人体内部结构而无需将器械插入人体内。CT 术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,借助于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、分子物理学和光学、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。可以令人信服地确信,物理学是高新技术的源泉。物理学是富有生命力的和富有成果的学科,它对社会发展具有极大的影响力。

2. 物理实验课的任务

物理学发展史证明,实验在其发展过程中起着非常重要的作用。物理定律的建立要依靠实验,使人们抛弃头脑中长期存在的错误观念要依靠实验;指出旧理论的局限性要依靠实验,当物理学停步不前,打破沉闷空气,使人们的思想进入一个崭新的天地也要依靠实验。物理学工作者中从事实验的占 90% 以上。作为一年一度最高

科学奖励的诺贝尔物理学奖,自 1901 年伦琴因发现 X 射线而获奖以来,直到 1999 年,共有 159 位获奖者,其中,因实验获奖的有 110 人,占 69%,这也说明了实验的重要地位。

我国一位物理学家指出,我国古代的科学技术远远领先于西方,但近 300 年来,却远远落后于西方,这主要是由于西方自伽利略和牛顿等人倡导科学实验以来,大力发展了科学实验,而我国却始终处于停滞状态,轻视实验是我们的不良传统之一,也是科学不发达的重要原因。

通过以上的论述,师生们都应该认识到物理实验课的重要性,要满怀热情地上好实验课。作为学生,更要注重在实验课中学习方法,磨炼意志,培养较强的动手能力和敏锐的观察力,逐渐养成严谨踏实的科学作风和不断进取的创新精神。

物理实验是理工科大学生进行科学实验训练的一门基础课程,也是素质教育的重要环节。它的主要任务是:

(1) 通过实验,学习运用理论指导实验以及分析和解决问题的科学方法。在学习物理实验的一些典型方法时,尤其要注重学习它的思想方法,以有助于思维与创新能力的培养。

(2) 使学生获得必要的实验知识和操作技能的训练,培养学生初步具有以下各方面的科学实验工作能力,即正确使用仪器、进行测量、处理数据、分析结果以及写实验报告等。在此基础上,着重培养学生的探索精神、创新精神、自主学习能力和科学研究方法。

(3) 培养学生严格、细致、实事求是、刻苦钻研、一丝不苟的科学态度以及爱护国家财产的道德品质,培养学生善于动脑、乐于动手、讲究科学方法、遵守操作规程、注意安全等科学习惯。

总之,教学的重点放在培养学生科学实验能力与提高学生科学实验素养方面,使学生在获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力以及严肃认真的工作作风、实事求是的科学态度方面得到训练与提高。

3. 如何进行物理实验

(1) 做好预习报告

预习是做好实验的基础和前提,预习的基本要求是仔细阅读教材,了解实验目的、原理、方法和仪器设备等。预习报告内容包括:

1) 目的:说明本实验的目的。

2) 原理摘要:在理解的基础上,简要阐述实验原理,切忌整段照抄。力求做到图文并茂,图系指原理图、电路图或者光路图,并应写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位以及公式的适用条件,画好有关数据表格。

3) 完成预习作业。

(2) 实验操作与记录

实验室中有大量的仪器设备和实验材料,在不同的实验室中,还分别有大功率电源、自来水源、煤气、压缩空气以及放射性物质、激光、易燃易爆物品等,因此,进入实验室前,必须详细了解并严格遵守实验室的各项规章制度。这些规章制度是为保护人身安全和仪器设备安全而规定的,违反了就可能酿成事故,这是必须首先牢记的。

做实验时,要严肃认真、一丝不苟,要有计划、有步骤,要胆大心细,而不是盲目操作。在电学实验中,必须经教师检查无误后才可接通电源。在使用仪器前,必须先看注意事项或说明书;在调节时,应先粗调后微调;在测量时,应先取大量程后取小量程,以防超出量程甚至损坏仪表;实验完成后,应先关电源后拆线,并整理好仪器设备,这些都是一个实验工作者的基本素质和良好习惯。实验中要积极动手动脑才能触类旁通,学到从实践中发现问题和分析解决问题的能力。实验过程中,要十分注意各种实验现象,积极观察和如实记录。

记录内容包括:

1) 仪器:记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使学生逐步地熟悉它,以培养选用仪器的能力。

2) 实验内容和现象观测记录:实验过程中,要随时记下现象、问题和想法,特别是当实际情况与预期不同时,要记下有何不同,分析为何不同。

3) 数据:数据记录应做到整洁清晰而有条理,尽量采用列表法(注意不能用铅笔记录)。在根据数据特点设计表格时,力求简单明了,分类清楚而有条理,表格中物理量要注明单位。实验中确实测错而无用的数据,可在旁边注明“作废”字样,或用笔在无用数据上划一条斜线,而不要乱涂乱擦而影响整洁。

特别要重视的是数据记录必须真实、严肃,决不可任意伪造或修改。这是一个科学工作者的基本道德素养。教学实验与科学实验不同,在教学实验中,实验结果往往是预知的,有公认值的。实验结果与公认值不一致的情况是经常会发生的。学生操作失误、概念理解不当或计算错误,或仪器设备不正常等,都可能导致这种结果。这时,实验教师会帮助学生分析错误的原因,下次就会得到改正。决不可认为实验结果与公认值越接近,就表明实验做得越好,得分也会越高。实际上,教师的评分标准是多方面的。实验态度与作风,能否在实验中发现、分析问题,都是重要的评分标准之一。如果实验结果与公认值不符,恰好为发现问题、分析问题提供了机遇。教师一般都相信学生记录本上的数据是真实的,但也能发现数据的伪造或篡改。当发现这样的问题时,就必须严肃处理,因为这是一种欺骗行为,它比任何操作错误、理解错误或计算错误都要严重得多,其性质与考试作弊相当。

(3) 数据处理与讨论分析

1) 作图、计算结果与不确定度估算:作图要按图解法要求,绘制图线要用铅笔。计算结果时,先将文字公式化简,再代入数值进行运算。不确定度估算要写出公式,并写出计算过程,以便检查复核。

- 2) 实验结果:按标准形式写出实验的结果。在必要时,注明结果的实验条件。
- 3) 思考题:思考题有难有易,可自行选做或由教师指定做哪些。
- 4) 分析实验不确定度的主要原因和改进方法。
- 5) 附注:对实验中出现的说明和讨论,或写出实验心得和建议等。

完成一个物理实验必须包含有文字总结材料,这份总结是实验成果的具体体现,是实验者的心血结晶,所以,实验者自己首先应该珍惜它。那种潦草马虎、涂鸦式的实验报告丧失的是自珍和自重,是绝对不可取的。实验报告如同一份科学小论文,必须认真严肃地完成,文中每一项论证必须是真实的、可信的、合理的,每一个结论必须是明确的、有根据的,绝不允许臆测和杜撰。

总之,实验报告的总体要求是,尽量用自己的语言,简要说明实验目的、原理和方法,真实记录实验过程中得到的全部信息,并认真分析和解释实验结果,得出实验结论。实验报告要做到数据记录整洁、图表合格、文理通顺、内容简明而充实,便于别人看懂。

1 不确定度表达和数据处理方法

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

物理实验不仅要定性观察各种物理现象,更重要的是找出有关物理量之间的定量关系。为此,就需要进行测量。测量的意义就是将待测的物理量与一个选作为标准的同类量进行比较,得出它们之间的倍数关系。选作为标准的同类量的分度值称之为1个单位,倍数称为测量数值。由此可见,一个物理量的测量值等于测量数值与单位的乘积。一个物理量的大小是客观存在的,选择不同的单位,相应的测量数值就有所不同。单位愈大,测量数值愈小,反之亦然。

根据《中华人民共和国计量法》,国家计量局于1987年2月1日发布了国家法定计量单位名称、符号和非国家法定计量单位的废除办法,规定以国际单位制(SI制)为国家法定计量单位,即以米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔、坎德拉作为基本单位,其他量都由以上七个基本单位导出,称为国际单位制的导出单位。

测量可分为两类。一类是直接测量,如用尺量长度,用秒表计时间,用天平称质量,用安培表测电流等;另一类是间接测量,是根据直接测量所得到的数据,根据一定的公式,通过运算,得出所需要的结果,例如,直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ,应用公式 $g=4\pi^2 l/T^2$,以求重力加速度 g 。在物理量的测量中,绝大部分是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。不论是直接测量或是间接测量,都需满足一定的实验条件,按照严格的方法及正确地使用仪器,才能得出应有的结果。

1.1.2 误差

物理量在客观上有着确定的数值,称为真值。然而,在实际测量时,由于实验条件、实验方法和仪器准确度等的限制或者不够完善,以及实验人员技术水平的原因,使得测量值与客观存在的真值之间有一定的差异。测量值 x 与真值 T_x 的差值称为测量误差 δ ,简称误差。即

$$\delta = x - T_x$$

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分。既然测量不能得到真值,那么,怎样才能最大限度地减小测量误差并估算出这误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质。测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

(1) 系统误差

系统误差的特点是有规律的,它是在偏离测量规定条件时或由于测量方法所引入的因素,按某确定规律所引起的误差。系统误差包括已定系统误差和未定系统误差,已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的系统误差,未定系统误差是指符号或绝对值未经确定的系统误差。

系统误差来源有下列几个方面:

1) 由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调整不妥,如刻度不准、零点不对、砝码未经校准、天平臂不等长、应该水平放置的仪器没有放水平等。

2) 由于实验理论和实验方法的不完善,所引用的理论与实验条件不符,如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响,测长度时没有考虑温度使尺长改变,量热时没有考虑热量的散失,测电压时没有考虑电压表内阻对电路的影响,标准电池的电动势未作温度修正等。

3) 由于实验者生理或心理特点、缺乏经验等而引入的误差。例如,有些人习惯于侧坐斜视读数,使测量值偏大或偏小。

系统误差的消除或减小是实验技能问题,应尽可能采取各种措施将它降低到最小的程度。例如,将仪器进行校正,改变实验方法或者在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响,纠正不良实验习惯等。

能否识别和降低系统误差与实验者的经验和知识有密切的关系。学生在学习过程中要逐步积累这方面的感性知识,结合实验的具体情况对系统误差进行分析和讨论。

(2) 随机误差(又称偶然误差)

在相同条件下,对同一物理量进行重复多次测量,即使系统误差减小到最小程度之后,测量值仍然会出现一些难以预料和无法控制的起伏,而且测量值误差的绝对值和符号在随机地变化着。这种误差称之为随机误差。

随机误差主要来源于人们视觉、听觉和触觉等感觉能力的限制以及实验环境偶然因素的干扰。例如,温度、湿度、电源电压的起伏,气流波动以及振动等因素的影响。从个别测量值来看,它的数值带有随机性,好像杂乱无章。但是,如果测量次数足够多的话,就会发现随机误差遵循一定的统计规律,可以用概率理论来估算它。

(3) 粗大误差

超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差。它可能是随机误差的某种极端情况,也可能是由于测量过程中人为过失而产生的错误。如读数错误、记录错误、操作错误、估算错误,等等。这种错误已不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。克服错误的方法,除端正工作态度、严格工作方法外,可用与另一次测量结果相比较的办法发现纠正,或者运用异常数据剔除准则来判别因过失而引入的异常数据,并加以剔除。