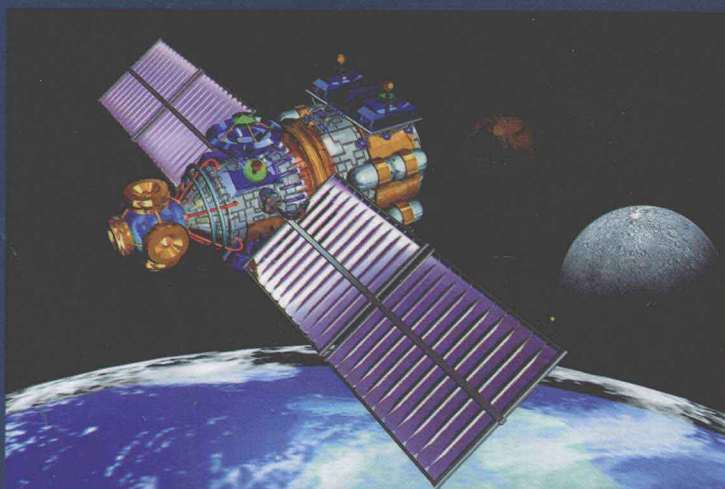


# 大学物理实验

责任编辑 周建兰 封面设计 刘俊



ISBN 978-7-81137-646-3



9 787811 376463 >

定价：34.50元

# 大学物理实验

主 编 董正超 方靖淮  
朱兆青 凌邦国

苏州大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 董正超等主编. —苏州: 苏州大学出版社, 2011. 1  
ISBN 978-7-81137-646-3

I. ①大… II. ①董… 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(2011)第 013982 号

## 内 容 简 介

全书包括绪论、误差理论、基础性实验、综合性实验、设计(研究)性实验、拓展性实验(新能源篇)、大学物理仿真实验等内容。

本书注重了教学内容的系统性,并在精选基本实验的基础上,增加了具有强烈现代意识和高新技术色彩的、给学生留有较大发展空间的实验项目,特别是新能源和计算机仿真实验具有鲜明的时代特征,计算机技术在本书实验中的推广应用,有效地发挥了计算机辅助教学的积极功效。

本书可作为本科院校各专业的物理实验教学用书,也可供高等职业院校、业余大学、专科学校等选用。

## 大学物理实验

董正超、方靖淮 主编  
朱兆青、凌邦国  
责任编辑 周建兰

---

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市十梓街1号 邮编:215006)

宜兴市盛世文化印刷有限公司印装

(地址:宜兴市万石镇南漕河滨路58号 邮编:214217)

---

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 20 字数 496 千

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81137-646-3 定价:34.50 元

---

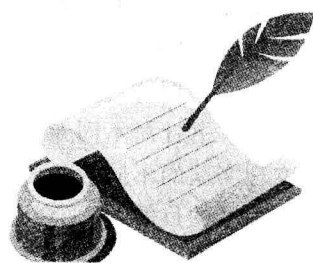
苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话:0512-65225020

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

## 《大学物理实验》编委会

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 董正超 | 方靖淮 | 朱兆青 | 凌邦国 |
| 副主编 | 缪世群 | 龚 斌 |     |     |
| 编 委 | 董晓燕 | 范利平 | 黄云霞 | 兰燕娜 |
|     | 刘 勇 | 罗礼进 | 潘宝珠 | 邵旭萍 |
|     | 王 全 | 薛同莲 | 于忠卫 | 张建国 |
|     | 赵永林 | 周 玲 | 周晓燕 |     |



# 前 言

物理学是研究物质的基本结构和运动规律的一门科学,它在人的科学素质培养中具有重要的地位.实验是物理学的基础,物理实验课程曾经为培养 20 世纪的优秀人才作出了卓越的贡献.新世纪对物理实验的课程体系、教学内容、教学方法提出了更高的要求.为此,我们组织具有丰富教学、科研经验的教授编写了《大学物理实验》,希望本教材的出版能为培养 21 世纪的合格人才作出贡献.

本教材具有以下特点:

1. 根据国际计量局和我国国家技术监督局关于“测量不确定度”的规定,结合物理实验教学的实际水平,本书以不确定度评定实验与结果.

2. 本书内容按照基础性实验、综合性实验、设计(研究)性实验、拓展性实验(新能源篇)、大学物理仿真实验的顺序来编排,充实细化了设计性和研究性的项目层次,突出了实验项目内容和要求的开放性,以培养学生团队协作开展实验研究的能力,满足不同层次、不同专业学生的学习需要.

3. 本书的设计(研究)性实验与基础性和综合性实验相关性较强,可以让学生结合已学的知识和实验来完成设计(研究)性实验,从而促进学生创新能力的培养和锻炼,达到培养学生科学实验素质、实验设计思想和实验创新意识的目的.

4. 本书注重了物理实验的时代性与先进性,引进了一些反映科技新成果的实验,特别是增加了新能源的相关实验项目,充分反映了当今时代的要求.本书还引入了计算机辅助类实验,以培养学生利用计算机技术采集、处理和分析实验数据,模拟物理实验场景和过程,进行大学物理仿真实验,掌握数字化实验的技术和技能.

本书针对不同专业人才,设置了不同平台的实验.在实验教学过程中,可根据各学科对物理实验的不同教学要求,选择不同层次的实验,以达到因材施教和开阔学生眼界、拓宽学生思维的目的.各平台必做的实验按难易程度进行编排,依照认知规律,对学生进行阶梯式的强化训练;在学生实验能力达到一定要求后,可再开设各种综合设计性提高实验,让学生根据自己的专业、能力、兴趣和爱好,上网自由预约选做自己感兴趣的实验,使物理实验逐步实行开放式和网络化管理.

参加编写本教材的人员有:董正超、方靖淮、朱兆青、凌邦国、缪世群、龚斌、董晓燕、范利平、黄云霞、兰燕娜、刘勇、罗礼进、潘宝珠、邵旭萍、王全、薛同莲、于忠卫、张建国、赵永林、周玲、周晓燕等.董正超、方靖淮、朱兆青、凌邦国为本书主编,朱兆青、凌邦国负责全书的统稿工作.

在编写本教材的过程中,我们参考了一些其他高校编写的物理实验教材,在此向有关作者谨致谢意,同时感谢在本书编写过程中提供帮助的所有老师.

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正.

编 者

2010 年 10 月

# 目录

## 第 1 章 绪论

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| § 1-1 物理学对社会发展的重要性 .....   | (1) |
| § 1-2 物理实验课的作用、目的和要求 ..... | (2) |
| § 1-3 如何做好物理实验 .....       | (3) |

## 第 2 章 测量误差和实验数据处理

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| § 2-1 测量和测量误差 .....               | (5)  |
| § 2-2 偶然误差的高斯分布与标准偏差 .....        | (8)  |
| § 2-3 不确定度及其传递 .....              | (12) |
| § 2-4 测量结果的表示方法 .....             | (15) |
| § 2-5 有效数字及其运算规则 .....            | (17) |
| § 2-6 实验数据处理方法 .....              | (20) |
| § 2-7 利用 Excel 软件处理实验数据方法简介 ..... | (27) |
| 习 题 .....                         | (30) |

## 第 3 章 基础性实验

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 实验 3.1 长度测量和固体密度的测定 .....     | (32)  |
| 实验 3.2 研究弹性碰撞与完全非弹性碰撞 .....   | (40)  |
| 实验 3.3 测量物体的转动惯量——三线扭摆法 ..... | (48)  |
| 实验 3.4 静态拉伸法测定金属丝的杨氏模量 .....  | (51)  |
| 实验 3.5 声速测定实验 .....           | (56)  |
| 实验 3.6 金属线膨胀系数的测量 .....       | (61)  |
| 实验 3.7 空气比热容比的测量 .....        | (65)  |
| 实验 3.8 混合法测定金属的比热容 .....      | (68)  |
| 实验 3.9 静电场的模拟测量实验 .....       | (70)  |
| 实验 3.10 测定电学元件的伏安特性 .....     | (74)  |
| 实验 3.11 惠斯顿电桥测电阻 .....        | (86)  |
| 实验 3.12 示波器的使用和相位差的测定 .....   | (90)  |
| 实验 3.13 薄透镜焦距的测定 .....        | (100) |
| 实验 3.14 三棱镜顶角和折射率的测定 .....    | (103) |

## 第4章 综合性实验

|         |                        |       |
|---------|------------------------|-------|
| 实验 4.1  | 工程材料的杨氏模量电测法 .....     | (112) |
| 实验 4.2  | 测定电介质材料的介电常数 .....     | (118) |
| 实验 4.3  | 电表的改装和校准 .....         | (125) |
| 实验 4.4  | 用电位差计测量电池的电动势和内阻 ..... | (128) |
| 实验 4.5  | 用精密电位差计校正电表 .....      | (132) |
| 实验 4.6  | 交流电桥 .....             | (136) |
| 实验 4.7  | 直流双臂电桥的应用 .....        | (141) |
| 实验 4.8  | 牛顿环和劈尖实验 .....         | (145) |
| 实验 4.9  | 迈克尔孙干涉仪 .....          | (153) |
| 实验 4.10 | 夫兰克-赫兹实验 .....         | (159) |
| 实验 4.11 | 密立根油滴实验 .....          | (164) |
| 实验 4.12 | 全息照相 .....             | (171) |
| 实验 4.13 | 普朗克常数的测定——光电效应 .....   | (176) |
| 实验 4.14 | 传感器在表面张力系数测定中的应用 ..... | (182) |
| 实验 4.15 | 用霍尔效应法测量螺线管磁场分布 .....  | (185) |
| 实验 4.16 | 用透射光栅测定光的波长 .....      | (190) |
| 实验 4.17 | 单缝衍射 .....             | (192) |
| 实验 4.18 | 塞曼效应 .....             | (196) |
| 实验 4.19 | 快速电子动量-能量的相对论效应 .....  | (202) |

## 第5章 设计(研究)性实验

|         |                       |       |
|---------|-----------------------|-------|
| 实验 5.1  | 利用单摆研究重力加速度 .....     | (206) |
| 实验 5.2  | 热功当量电热法研究 .....       | (209) |
| 实验 5.3  | 光纤音频信号传输实验研究 .....    | (212) |
| 实验 5.4  | 测定铁磁材料的居里点 .....      | (216) |
| 实验 5.5  | 光栅莫尔条纹测试方法 .....      | (218) |
| 实验 5.6  | 数字多用表的设计和定标 .....     | (221) |
| 实验 5.7  | 调光灯的设计与制作 .....       | (229) |
| 实验 5.8  | 稳压电源的设计与制作 .....      | (231) |
| 实验 5.9  | 设计制作全息光栅 .....        | (236) |
| 实验 5.10 | 研究非线性电路的混沌现象 .....    | (239) |
| 实验 5.11 | 阿贝成像原理和空间滤波实验 .....   | (244) |
| 实验 5.12 | 用动态悬挂法测定材料的杨氏模量 ..... | (248) |
| 实验 5.13 | 串联电路暂态过程的研究 .....     | (253) |
| 实验 5.14 | 用双棱镜测定光波波长 .....      | (257) |
| 实验 5.15 | 半导体热敏电阻温度特性的研究 .....  | (259) |

实验 5.16 非平衡电桥的原理和应用研究 ..... (261)

实验 5.17 扫描电子显微镜的应用 ..... (267)

实验 5.18 声光衍射及其应用研究 ..... (271)

实验 5.19 超声波换能器的应用研究 ..... (273)

第 6 章 拓展性实验(新能源篇)

实验 6.1 硅光电池基本特性的研究 ..... (279)

实验 6.2 太阳能电池光谱响应测试研究 ..... (283)

实验 6.3 太阳能电池组件发电路灯系统设计 ..... (285)

实验 6.4 模拟风力发电实验研究 ..... (287)

实验 6.5 测量压电陶瓷的特性及压电能量收集 ..... (289)

实验 6.6 燃料电池综合特性的测定 ..... (291)

第 7 章 大学物理仿真实验

实验 7.1 G-M 计数管特性仿真实验研究..... (298)

实验 7.2 塞曼效应仿真实验研究 ..... (302)

附表..... (308)

## § 1-1 物理学对社会发展的重要性

## 一、物理学推动了三次工业革命

人类社会已经跨入了 21 世纪,进入了信息化时代.回顾科学技术发展史,人们发现历史上每次重大的技术革命都来源于物理学上的重大突破.

热学、热力学研究(18 世纪下半叶)导致蒸汽机的发明和广泛应用,引发了第一次工业革命,使人类进入了热机、蒸汽机时代.电磁感应的研究、电磁学理论的建立(19 世纪中叶)导致发电机、电动机的发明及无线电通信的发展,从而引发了第二次工业革命,人类从此跨入了电气化时代.相对论、量子力学的建立(1900~1930 年)使物理学进入了高速、微观领域;核物理的研究和发展导致核能的释放和应用成为现实;原子、分子物理的研究和发展导致了激光的发明和应用;半导体、固体物理、材料科学的研究和发展导致了晶体管、大规模集成电路、新材料、电子计算机的发展和广泛应用.人们把新能源、新材料、激光技术、信息技术的发展称为第三次工业革命.

当今,计算机中廉价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五十多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,发明了晶体管,为集成电路、微电子学和整个计算机革命开辟了道路,为此他们获得了 1956 年度诺贝尔物理学奖.

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(Laser)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红宝石激光器,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.物理学家利用激光光波干涉技术在一种材料上记录图形——全息摄影技术,它提供了一种存储和取用信息的新技术,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,



持续时间可以达到几飞秒( $10^{-15}$  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变化等.

由于光导玻璃纤维比金属导体重量轻、价格低和抗干扰能力强,因而基于光学原理和激光技术的光纤通信技术发展迅速.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,利用 X 射线、计算机重建等物理学原理,美国科学家科马克、英国科学家豪斯费尔德发明了计算机断层摄影技术(Computer Tomography,简称 CT),借助它们可以确定人体内部结构而无需将器械插入人体内.他们两人因此而共同获得了 1979 年度诺贝尔生理学或医学奖.

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.可以说,物理学是高新技术的源泉.物理学是有生命力和富有成果的学科,它对社会发展具有极大的影响力.

## 二、物理实验推动了科学的发展

实践是检验真理的唯一标准,物理学上任何成功的理论都应该建立在坚实的实验基础上.著名物理学家杨振宁教授和李政道教授名扬于世是从 1956 年夏天开始的,他们一起提出了“在弱相互作用引起的过程前后宇称可能不守恒”的假定.与此同时,他们建议可以用  $\beta$  衰变等实验来证实或否定他们的推测.几个月后,哥伦比亚大学美籍华裔物理学教授吴健雄与美国华盛顿国家标准局的四位物理工作者一起,用钴 60 的衰变实验证实了在这种  $\beta$  衰变的过程中宇称确实不守恒.此后还有其他的实验也证实了这个结论的正确性.于是,在弱相互作用下的宇称守恒定律终于被推翻了.正是由于这一震惊世界物理学界的杰出贡献,杨振宁与李政道共同获得了 1957 年度诺贝尔物理学奖.

### § 1-2 物理实验课的作用、目的和要求

科学实验是研究自然规律与改造客观世界的“基本手段”.自然科学的理论要靠实验来验证,新的现象和新的规律要靠实验来发现,工程设计和生产要靠实验来推动和完善.物理学本身就是在实验基础上发展起来的,不论是理论的建立还是对于理论的检验,都离不开实验.而实验应在已被确立的理论指导下,作为人们探索科学规律的强有力的杠杆,在新的领域里发挥作用.坚持实验与理论相结合、相互促进,这就是物理学发展所走过的道路.任何轻视实验或轻视理论的思想都是错误的,实验研究和理论研究同样是科学研究的重要手段.要把基础研究、应用研究、开发研究和生产实践这四方面很好地、有机地结合起来,必须有一条贯线,这条贯线就是科学实验.这里要强调的是,实验科学本身有自己一整套理论、方法和技能,要掌握好这套实验知识是很不容易的,需要由浅入深和由简到繁地逐步学习、训练和提高.

实验的目的在于了解各因素之间的关系及其所遵循的规律等.实验课的主要目的是使



学生能独立进行科学实验研究.物理实验是理工院校各专业学生第一门必修的独立设置的基础实验课程,是学生进入大学接受系统实验技能训练的开端.它在培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题、最终解决问题的能力方面起着重要的作用,也为学生独立地进行科学实验研究,设计实验方案,选择、使用仪器设备和提出新的实验课题,以及进一步学习后继的实验课程打下良好的基础.

本课程的目的与要求具体是:

第一,学习和掌握运用实验原理、方法去研究某些物理现象和进行具体测试,得出某些结论(着重具体测试).

第二,初步培养学生进行科学实验的能力,即懂得如何从测量目的(研究对象)或课题要求出发,依据哪项原理,通过什么方法,选用哪种合适的仪器与设备,如何确定合理的实验程序去获取准确的实验结果(着重获取准确的实验结果).

第三,进行实验技能的基本训练,熟悉常用仪器的基本原理、结构、性能、调整操作、观测分析和故障排除等(着重调整操作).

第四,学习处理实验结果数据的方法,以及分析实验方法、测量仪器、周围环境、测量次数和操作技能等对测量结果的影响(着重处理实验数据的方法).

第五,通过实验培养严肃认真、细致踏实、一丝不苟、实事求是的科学态度和克服困难、坚忍不拔的工作作风(着重“三严”,即操作要认真严格、态度要踏实严谨、思维要活跃严密).

在整个物理实验教学过程中,学生必须主动、自觉、创造性地获得知识和技能,决不能仅仅通过实验获取几个数据,而是要通过实验去探索、研究问题.因此,在观察实验现象时,要事先明确做什么,应该怎样去做,而且还要懂得为什么要这样做.在做实验过程中,要正确简明、有条有理地记录数据,要做到在做第100次测试时仍像第1次测试那样认真,并对测试结果完全负责.在写报告时,要确切地分析、评定自己的工作.

### § 1-3 如何做好物理实验

大学物理实验课程的目的和要求,概括起来有:掌握“三基”(即物理实验的基本知识、基本技能和基本方法);培养“四种能力”(即动手能力、分析能力、表达能力和综合运用设计能力);初步养成实事求是的科学态度和严肃认真的实验作风,为今后进行系统的理工科学研究打下基础.在整个学习过程中,不但要去理解和体会实验中反映出来的规律,而且要通过思考自己的实验结果,发现新规律,获得新的见解,并以适当的表现方式,写成书面实验报告.

为达到上述目的,就必须认真完成大学物理实验课程的三个主要教学环节.

#### 一、实验前的预习

预习是正确进行实验的基础.预习时首先要认真阅读教材中的有关章节及附录,明白实验的目的、要求,正确理解实验所依据的原理和采用的方法,初步了解实验仪器的主要性能、使用方法和操作注意事项.

要做好预习报告.学生应事先准备一本练习本作为“实验预习报告本”,预习报告的内容应包



括:实验名称、目的;原理摘要(包括主要原理、公式及扼要说明,电学实验应画出电路图,光学实验应画出光路图);实验步骤、注意事项摘要;预先要处理的数据、列出记录数据的表格。

上课时,教师应检查学生的预习情况.对于没有预习和未完成预习报告的学生,教师有权停止其该次实验。

## 二、实验中的操作

实验操作是实验的主要内容,是培养学生科学实验能力的主要环节.学生进入实验室后,必须遵守实验室规则,服从实验室工作人员和教师的指导.对于严重违反实验室规则者,教师应停止其实验,并按有关规定处理。

实验时,首先应了解所有将使用的仪器、装置的主要功能、量程、级别、操作方法和注意事项.连接电路或排设光路时都必须认真检查,经确认准确无误后,才能开始实验.起初可作试验性探索操作,粗略地观察一下实验过程和数据状况,若无异常现象,便可正式进行实验.如有异常现象,应立即切断电源,认真思考、分析原因,并向教师反映,待异常情况排除后,再开始进行实验。

实验中,必须如实、及时地记录数据和现象,其中包括主要仪器的名称、型号、级别及实验环境条件等,记录数据必须注意有效数字和单位.必须用钢笔或圆珠笔将数据记录在“原始数据记录表”中,不可使用铅笔.如记录的数据有错误,可用一斜线划掉后,把正确的数据写在其旁,决不允许涂改数据。

数据记录应做到整洁、清晰和有条理,尽量采用列表法.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,便于计算与复核,达到省工省时的目的.在标题栏内要求注明单位。

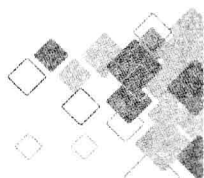
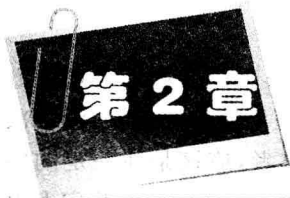
操作完成后,应将实验数据交教师审阅,经教师签字后,方可整理复原仪器,老师允许后才可以离开实验室。

## 三、实验后的报告

实验报告是实验工作的简明总结,要求使用统一规格的实验报告纸书写,字体要端正,文句要简练,图表要按规定格式绘制.“原始数据记录表”作为附件,随报告一起在下次实验时交教师批阅。

实验报告一般包括以下几个部分:

- (1) 实验名称;
- (2) 实验目的;
- (3) 实验仪器(包括名称、规格型号);
- (4) 实验原理(包括主要原理、公式及扼要说明,电学实验应画出电路图,光学实验应画出光路图);
- (5) 操作步骤;
- (6) 实验数据表格、数据处理计算过程(先将文字公式化简,再代入数值进行运算;测量结果不确定度估算要预先写出公式再代入数据计算;作图时及书写实验结果时,要特别注意有效数字和单位的正确表达);
- (7) 实验现象分析、误差的评估及讨论等,讨论可以包括思考题、改进建议及心得体会等。



# 测量误差和实验数据处理

## § 2-1 测量和测量误差

### 一、测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的,测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作.测量操作是一种比较过程,是把被测量和体现计量单位的标准量作比较,确定出被测量是计量单位的若干倍,这个倍数和单位一起表示被测量的值.一个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,便具有了一种特定的物理意义,这时,它才可以称之为一个物理量.也就是说,测量数据只有赋予了单位,才能有具体的物理意义.

测量所得的值(数据)应包括数值(大小)和单位.

测量从形式上可分为直接测量和间接测量两类.用量具或仪表直接读出测量值的,称为直接测量.然而对于大多数物理量来说,没有直接读数用的仪表或量具,只能用间接的办法进行测量.例如,测量铜圆柱的密度时,可以直接用尺量出它的直径  $d$  和高度  $h$ ,用天平称出它的质量  $m$ ,则铜圆柱的密度可通过公式  $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$  计算出来.像这样被测量是由直接测量值经过物理公式计算得出的,称为间接测量.

### 二、真值和测量误差

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以及种种因素的局限,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——最佳值.

我们把被测物理量在一定条件下的真实大小,称为该物理量的“真值”,记作  $a$ ;而把某次测量得到的值称为该物理量的“测量值”,记作  $x$ ,测量值  $x$  与真值  $a$  之间总会或多或少地存在一定的差,将其称为该测量值的“测量误差”,它的大小反映了测量的准确程度.



测量误差可以用绝对误差  $\delta$  表示:

$$\delta = x - a \quad (2-1)$$

也可以用相对误差  $E_r$  来表示

$$E_r = \frac{x - a}{a} \times 100\% \quad (2-2)$$

测量总存在着一定的误差,但实验时应该根据要求和误差限度来制订或选择合理的方案和仪器.不能盲目要求仪器总是越高级越好,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,这样的要求是不切合实际的.一个优秀的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的结果.要做到:既保证必要的实验精度,又合理地节省人力与物力.总之,误差存在于一切测量之中,而且自始至终贯穿于整个测量过程之中.

测量结果应包括数值、误差和单位,三者缺一不可!

### 三、误差的分类

误差的产生有多方面的原因,从误差的性质和来源上可分为“偶然误差”和“系统误差”两大类.

#### 1. 偶然误差

在同一条件下对某一量进行多次测量时,每次测量之间均会有差异,从表面上看差异大小即观测误差的大小和正负没有任何规律性,纯属偶然发生,这种误差称为“偶然误差”,也称“随机误差”.

偶然误差主要来自于以下三个方面:

第一,主观方面.例如,由于人们的感官灵敏程度和仪器的精密程度有限,操作不熟练,估计读数误差等.

第二,测量仪器方面.例如,测量器具精度不够高,指针向左或向右偏转,不固定.

第三,环境方面.例如,气流扰动,温度的微小起伏,杂散电磁场的不规则脉动等均会影响测量精度.

偶然误差的存在使每次测量值偏大或偏小,它是无规则的,但若大量增加测量次数,则能发现在一定的观测条件下,它服从一定的统计规律:一是比真值大或比真值小的测量值出现的概率相等;二是误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率要大得多;三是在多次测量中绝对值相等的正误差或负误差出现的机会是相等的,全部可能的误差的总和趋于零.因此,增加测量次数可以减小偶然误差,即

$$\sum_{i=1}^{\infty} \text{偶然误差} \rightarrow 0 \quad (2-3)$$

#### 2. 系统误差

系统误差的特点是:在同样条件下,对同一量进行多次测量时,误差的大小和正负总保持不变,或按一定的规律变化,或是有规律地重复.

系统误差主要来自三个方面:

##### (1) 仪器误差.

这是由测量仪器本身的缺陷或没有按规定使用而引起的,如尺子本身长了或短了一点,



等臂天平不等臂或使用的是三等砝码等. 按国家计量局规定, 50 g 的砝码允许有  $\pm 2$  mg 的误差, 当一个砝码的实际量值为 49.998 g 时, 它是符合国家三等砝码规定的, 是合格品. 但当实验者使用这一标称值为 50 g 的砝码进行称量时, 它将引入的系统误差是:

$$\text{系统误差} = 50.000 \text{ g} - 49.998 \text{ g} = +0.002 \text{ g} = +2 \text{ mg}$$

所以, 凡用该砝码称量时, 均有  $+2$  mg 的系统误差. 在使用时, 需经高级仪器对该砝码进行校验之后, 引入一个校正量来消除该砝码的系统误差.

如某测角仪, 转动时的读数标线  $C'$  没有正确地通过角度盘的中心  $C$ , 当读数标线向上时, 它不指零而右偏, 读数值大于零, 系统误差为  $+\theta$ , 如图 2-1 所示; 读数标线水平右指时, 读数值准确为  $90^\circ$ , 系统误差为零; 读数标线向下指时, 读数标线不指  $180^\circ$  而右偏, 读数将小于  $180^\circ$ , 系统误差为  $-\theta$ ; 读数标线水平向左指时, 读数值准确为  $270^\circ$ , 系统误差也为零. 可见, 由于仪表装置的偏心 (即角度盘中心  $C$  与读数标线的转轴  $C'$  不同心), 将造成周期性变化的系统误差. 这种测量仪器的系统误差可采用在直径方向上各装一个读数装置来加以消除, 称为“对径测量法”, 在分光仪中就采用了该种消除系统误差的方法.

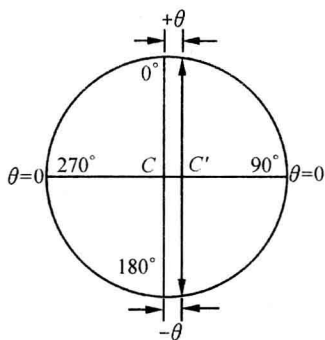


图 2-1 周期性系统误差示例

### (2) 方法误差.

这是由于测量所依据的实验理论、实验方法或实验条件不合要求而引起的. 如用伏安法测电阻, 采用不同的连接方法, 电表内阻的影响, 环境条件的影响, 均会带来一定的系统误差. 例如, 电阻与温度的关系为

$$R = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (2-4)$$

式中,  $R$  为温度  $t$  时的电阻,  $R_{20}$  为温度  $20^\circ\text{C}$  时的电阻,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为电阻的一次及二次温度系数. 在实验中不测温度或温度未加控制就用  $20^\circ\text{C}$  时的电阻值作为任意温度下的电阻值, 则将带来系统误差  $\Delta R = \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$ , 它是一种多项式误差, 又称“抛物线误差”. 消除它的方法是进行温度修正.

### (3) 人员误差.

这是由于观测人员的生理或心理特点所造成的, 通常与观测人员的反应速度或固有习惯等有关. 如记录信息或计时的滞后, 对准目标时始终偏左或偏右, 估计读数时始终偏大或偏小等.

除上述各种系统误差外, 很多系统误差的变化是极其复杂的. 如刻度盘刻得不准确而引起的测量示值的误差, 就是一种规律比较复杂的系统误差. 对于系统误差, 一般要在实验前对测量设备仪器进行校正, 在实验时对实验方法、观测数据的系统误差加以补偿或消除, 使其对实验结果的影响尽量降低到最小. 请注意: 当没有考虑到会有系统误差存在时, 系统误差是最危险的.

综上所述, 偶然误差与系统误差的性质不同、来源不同, 处理方法也不同. 影响测量结果的精确度, 有时主要因素是偶然误差, 有时主要因素是系统误差. 因此, 对每个实验要作具体分析, 但实验结果的总误差是偶然误差和系统误差的总和.



在精密测量时,对偶然误差与系统误差必须加以区别,分别处理.有时为了说明总误差限度,就不加以区别,有时也难于划分或区别它们.在基础实验中,一般我们仅要求考虑偶然误差.

### 3. 过失误差

在整个测量过程中,除了上述两种性质的误差以外,还可能发生读数、记录上的错误,仪器损坏、操作不当等造成的测量上的错误.错误不同于误差,它是不允许存在的,同时,也是完全可以事先发现和避免的.

实验人员必须一丝不苟、严格仔细地操作,及时发现错误,保证在实验过程中不发生错误.

## § 2-2 偶然误差的高斯分布与标准偏差

偶然误差也称随机误差,随机性是随机误差的特点.也就是说,在相同条件下,对同一物理量进行多次重复测量,每次测量值的误差时大时小,对某一次测量值来说,其误差的大小与正负都无法预先知道,纯属偶然.但是,如果测量次数相当多的话,随机误差的出现仍服从一定的统计规律.根据实验情况的不同,随机误差出现的分布规律有高斯分布(又称正态分布)、 $t$ 分布、均匀分布以及反正弦分布等.按照教学要求,这里仅简要地介绍随机误差的高斯分布.

### 一、高斯分布的特征与数学表述

遵从高斯分布规律的随机误差具有下列四大特征.

单峰性:绝对值小的误差出现的可能性(概率)大,大误差出现的可能性小.

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.

有界性:非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零.

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.

根据以上统计规律,可以从数学上推导出随机误差出现的概率密度函数.这个函数首先是由德国数学家和理论物理学家高斯(Karl Friedrich Gauss)于1795年导出的,因而称为高斯分布,又称正态分布.高斯分布的特征可以用高斯分布曲线形象地表述出来,见图2-2(a).横坐标为误差 $\delta$ ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ .根据误差理论可以证明该分布函数的数学表述为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2-5)$$

测量值的随机误差出现在 $\delta$ 到 $\delta+d\delta$ 区间的可能性(概率)为 $f(\delta)d\delta$ ,即图2-2(a)中阴影线所包含的面积元.上式中的 $\sigma$ 是一个与实验条件有关的常数,称之为标准误差.

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (2-6)$$

式中,  $n$  为测量次数, 各次测量值的随机误差为  $\delta_i, i=1, 2, 3, \dots, n$ . 可见标准误差是将各个误差的平方取平均值, 再开方得到, 所以标准误差又称为“方均根误差”。

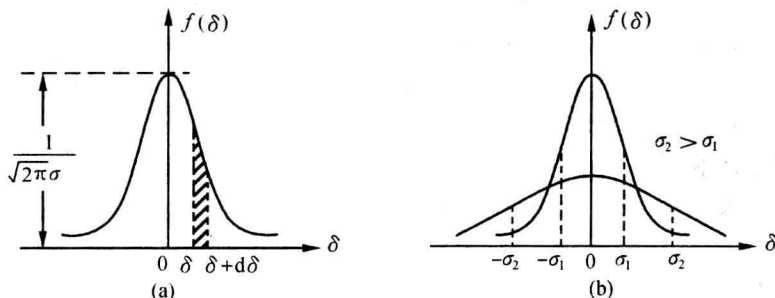


图 2-2 随机误差的正态分布

## 二、标准误差的物理意义

由式(2-5)可知, 随机误差正态分布曲线的形状取决于  $\sigma$  值的大小, 如图 2-2(b) 所示.  $\sigma$  值愈小, 分布曲线愈陡峭, 峰值  $f(\delta)$  愈高, 说明绝对值小的误差占多数, 且测量值的重复性好, 分散性小; 反之,  $\sigma$  值愈大, 曲线愈平坦, 峰值愈低, 说明测量值的重复性差, 分散性大. 标准误差反映了测量值的离散程度。

由于  $f(\delta)d\delta$  是测量值随机误差出现在小区间  $(\delta, \delta+d\delta)$  的可能性(概率), 那么, 测量值误差出现在区间  $(-\sigma, \sigma)$  内的可能性(概率)就是

$$P(-\sigma < \delta < \sigma) = \int_{-\sigma}^{\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 68.3\% \quad (2-7)$$

这说明对任一次测量, 其测量值误差出现在  $(-\sigma, \sigma)$  区间内的可能性(概率)为 68.3%. 也就是说, 假如我们对某一物理量在相同条件下进行了 1 000 次测量, 那么, 测量值误差可能有 683 次落在  $(-\sigma, \sigma)$  区间内. 这里要特别注意标准误差的统计意义, 它并不表示任一次测量值的误差就是  $\pm\sigma$ , 也不表示误差不会超出  $\pm\sigma$  的界限. 标准误差只是一个具有统计性质的特征量, 是用以表征测量值离散程度的一个特征量。

## 三、极限误差

与上述相仿, 同样可以计算, 在相同条件下对某一物理量进行多次测量, 其任意一次测量值的误差落在  $(-3\sigma, 3\sigma)$  区域之间的可能性(概率), 其值为

$$P(-3\sigma < \delta < 3\sigma) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 99.7\% \quad (2-8)$$

也就是说, 在 1 000 次测量中, 可能有 3 次测量值的误差绝对值会超过  $3\sigma$ . 在通常的有限次测量情况下, 测量次数很少超过几十次, 因此, 测量值误差超出  $\pm 3\sigma$  范围的情况几乎不会出现, 所以把  $3\sigma$  称为极限误差。

在测量次数相当多的情况下, 如果出现测量值误差的绝对值大于  $3\sigma$  的数据, 可以认为这是由于过失引起的异常数据而加以剔除. 但是, 对于测量次数较少的情况, 这种判别方法就是不可靠的, 而需要采用另外的判别准则。