

(修订版)

大学物理实验

梁华翰 朱良铤 张立 主编

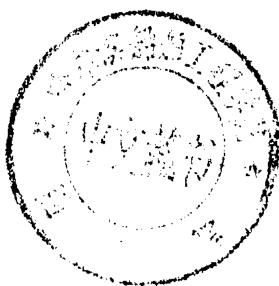


上海交通大学出版社

大学物理实验

(修 订 版)

梁华翰 朱良铗 张 立
陈新雷 乔卫平 蔡美娟
王文珍 编 著



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是《大学物理实验》(上海交通大学出版社1988年2月版)的修订版。

全书共分四篇。第一、二篇介绍实验基础理论和数据处理,以及常用物理量测量方法;第三篇列出32个实验项目,内容包括力学、热学、声学、电磁学、光学和近代物理;第四篇则列出了13个设计性实验项目。书末附有常用实验仪器仪表及有关物理常数,可供查阅参考。

本书可作为高等理工科院校各非物理专业类学生的实验教材,也可供物理专业类学生和有关专业教师、实验技术人员等参考。

DULBS/02

责任编辑 李柏盛

封面设计 刘 伟

大学物理实验(修订版)

上海交通大学出版社·出版

(上海市华山路1954号 邮政编码200030)

新华书店上海发行所·发行

上虞市科技外文印刷厂·印刷

开本: 787×1092(毫米) 1/16 印张: 25 字数: 632000

版次: 1996年2月 第1版 印次: 1996年3月 第1次

印数: 1—6000

ISBN 7-313-01607-7/O·096

定价: 19.30元

前 言

本书按照国家教委高等学校工科物理课程教学指导委员会物理实验课程教学指导小组制订的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编写，它是上海交通大学应用物理系普通物理实验学科组长期从事物理实验教学的经验总结和进行实验教改的成果结晶。考虑到实验教材的适用性，本书也照顾到一般工科院校专业设置的特点和实验室仪器设备的现状。

本书是《大学物理实验》(上海交通大学出版社1988年2月版)的修订版。在本书的修订改编过程中，基本维持了原版本的教材体系，但对每一个实验项目的编写则力求叙述清楚，层次分明、联系实际、便于自学、引导思考。在误差理论的介绍中，侧重于基本概念的阐述与应用，适当地引入了不确定度的概念，以求与当前在这方面的要求与发展接近。书中所用名词术语也尽可能与国家计量局颁布的技术规范(JJG-91)一致。特别要指出的是，在修订版中进一步明确了设计性实验的教学要求，充实和增补了不少有扩展性和一定应用价值的设计性实验项目和实验内容，大部分的设计性实验都已重新改写。对书末的附录和附表也进行了充实和补充，以期与目前逐步更新的仪器设备同步一致。

全书共分四篇。第一、二篇属于共性的基础知识，包括初学者实验须知、实验误差理论及有效数字、数据处理、计算机使用和作图的基本知识，还介绍了几个常用物理量的测量方法。第三篇编入了力学、热学、声学、电磁学、光学和近代物理实验技术应用共32个实验项目。第四篇在概括地阐述了设计性实验教学要求和进行设计性实验的一般程序的前提下，编入了13个设计性实验项目。书末的附录和附表列出了本书涉及的常用实验仪器、仪表设备和有关物理常数，可供读者自行查阅参考。

本书由梁华翰、朱良铤、张立、陈新雷、乔卫平、蔡美娟、王文珍等分工修改编写，其中，梁华翰编写实验9~10、13、20~21、26、30~32、37~39、41、43~45；朱良铤编写实验5、16、22；张立编写实验8、34；陈新雷编写实验1~2、4、12、14、17~18、23、27、33、40；乔卫平编写实验3、7、15、25、35、42；蔡美娟编写实验28~29；王文珍编写实验6、11、19、24、36。全书由梁华翰、朱良铤统稿。全体改编者一致认为，实验教学是一门集体的事业，无论是实验教材的编写，还是实验仪器设备的准备和开出都是实验室全体任课教师和技术人员、管理人员长年辛勤耕耘、不断改进、充实和完善的结果。一本实验教材的出版，也离不开以往历届教材编者的努力。本书在改编过程中，得到校内外不少同仁的帮助，借鉴和参阅了兄弟院校的有关教材和经验，特此深表谢意。编者水平有限，书中如有不当之处，恳请斧正。

本书可用作高等工科院校及师范院校各非物理专业类学生的物理实验教材，也可供职工大学、业余函授大学等有关专业学生参考选用，或作为有关教师、实验技术人员进修培训的参考资料。

编者
1995.9

目 录

前 言	1
实验守则	1
致学习本课程的实验者	2
第一篇 测量、误差和数据处理	5
第一章 物理实验课的作用、目的和要求	5
第二章 测量与误差	6
第三章 偶然误差的处理	9
第四章 系统误差的处理	15
第五章 误差、偏差和不确定度	17
第六章 有效数字及其运算规则	21
第七章 实验数据处理与作图要求	24
练习题	32
第二篇 常用物理量的测量	37
第一章 长度的测量	37
第二章 质量的测量	43
第三章 时间的测量	49
第四章 温度的测量	53
第五章 电流的测量	56
第六章 电压的测量	61
第七章 电阻的测量	62
第八章 发光强度的测量	64
第三篇 基本实验	67
第一章 力学和热学实验	67
实验一 实验仪器选择和误差分配	
——长度和密度测量	68
实验二 偶然误差的统计分布规律	
——脉冲重复频率的精密测定	75
实验三 用图解法确定经验公式	
——弦线驻波实验数据处理	82
实验四 最小二乘法实验数据处理	
——弹簧的倔强系数测定	87
实验五 用气垫导轨研究滑块的直线运动	92
实验六 用三线扭摆测量转动惯量	97
实验七 用冷却法测比热容	101

实验八	用光杠杆测微小长度变化 ——杨氏弹性模量测定	105
实验九	用混合法测量冰的熔解热 ——热量散失的修正	110
实验十	用稳态法测量不良导体导热系数 ——最佳实验条件和参数的确定	114
实验十一	用共振干涉法测超声波波速	118
第二章	电学和磁学实验	123
实验十二	系统误差的发现与消除 ——伏安法测量电阻	124
实验十三	灵敏电流计的特性	130
实验十四	用电桥测量电阻 I. 用惠斯登电桥测量中值电阻 II. 用开尔文电桥测量低值电阻	136 136 139
实验十五	用模拟法测绘静电场	141
实验十六	十一线电位差计及故障分析	146
实验十七	示波器的使用	151
实验十八	霍耳效应法测量磁场	158
实验十九	测绘铁芯的磁化曲线和磁滞回线	162
实验二十	用纵向磁聚焦法测定电子荷质比	167
实验二十一	用冲击电流计测量电容	171
第三章	光学和近代综合实验	176
实验二十二	光路调整和薄透镜焦距测量	177
实验二十三	光学测角仪的调整与使用	182
实验二十四	光的干涉现象应用 ——用牛顿环测平凸透镜的曲率半径	189
实验二十五	单缝衍射相对光强分布的测量	194
实验二十六	迈克耳逊干涉仪的调整与使用	199
实验二十七	照相技术 I. 黑白照相的拍摄、冲洗和晒印 II. 彩色照片的扩印技术	206 206 210
实验二十八	频闪照相技术及应用	219
实验二十九	光学介质折射率的测定	222
实验三十	静物全息照片的摄制与观察	226
实验三十一	全息干涉技术(I) ——二次曝光法测量微小形变	236
实验三十二	全息干涉技术(II) ——用时间平均法检测扬声器的振动	241
第四篇	设计性实验	247

第一章 设计性实验的基础知识	247
第二章 设计性实验题选	256
实验三十三 简谐振动的研究	256
实验三十四 重力加速度测定的研究	259
实验三十五 液体中扩散系数的测定	262
实验三十六 变阻器在电路中的应用 ——限流和分压特性	265
实验三十七 电源(电池)特性的研究	268
实验三十八 非线性电阻特性的研究	272
实验三十九 RC 串联电路暂态过程的研究	276
实验四十 光栅特性的研究	279
实验四十一 硅光电池特性的研究	282
实验四十二 用模拟法测绘恒温度场和流场	287
实验四十三 非电量的电测法 ——晶体凝固点的测定研究	290
实验四十四 铁磁材料居里点测定方法的研究	295
实验四十五 亥姆霍兹线圈内磁场分布的研究	299
附录	303
附录 1 工科物理实验课程(60学时)安排表	303
附录 2 工科基本实验的教学要求	304
附录 3 实验室微机终端使用方法及上机数据表格	306
附录 4 杨氏弹性模量仪	307
附录 5 水银气压表	309
附录 6 检流计	311
附录 7 万用电表	314
附录 8 四端电阻	319
附录 9 直流电桥	319
附录10 兆欧表	324
附录11 换能器	325
附录12 电位差计	329
附录13 标准电池	331
附录14 实验室常用直流电源	332
附录15 旋转式电阻箱	335
附录16 示波器	336
附录17 低频信号发生器	343
附录18 调压变压器	346
附录19 晶体管毫伏表	347
附录20 晶体管图示仪	348
附录21 多用信号发生器	349

附录22	函数发生器	350
附录23	常用电池	351
附录24	光学测角仪	354
附录25	眼睛和基本光学仪器	361
附录26	测微目镜	366
附录27	实验室常用光源	367
附录28	频闪光源	368
附录29	照度计	370
附录30	单镜头反光照相机	371
附录31	幸福 G-70 放大机	373
附录32	全息干板使用说明	374
附表		377
附表 1	常用物理量常数	377
附表 2	液体的粘滞系数	377
附表 3	20℃时常用固体和液体的密度	377
附表 4	标准大气压下不同温度的水的密度	378
附表 5	水的沸点(℃)随压强 $P(\text{mmHg})$ 的变化表	378
附表 6	海平面上不同纬度处的重力加速度	378
附表 7	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	379
附表 8	不同金属或合金与铂(化学纯)构成热电偶时的热(温差)电动势(热端在100℃,冷端在0℃时)	379
附表 9	标准化热电偶	379
附表10	20℃时常用金属的杨氏弹性模量	380
附表11	固体的线膨胀系数	380
附表12	常用光谱灯和激光器的可见谱线波长	381
附表13	干湿球温度计测定空气中实有水蒸气压	381
附表14	某些物质的折射率	382
附表15	某些物质中的声速	383
附表16	不同温度下干燥空气中的声速	384
主要参考书目		385

实 验 守 则

一、实验前应认真预习，按时上实验课。

二、进入实验室或实验场地，必须衣着整洁、保持安静，严禁闲谈喧哗、吸烟、随地吐痰。不得随意动用与本次实验无关的仪器设备。

三、遵守实验室规则，服从教师指导，按规定和步骤进行实验。认真观察和分析实验现象，如实记录实验数据，不得抄袭他人的实验结果。

四、注意安全，严格遵守操作规程。爱护仪器设备，节约用水、电和药品、试剂、元器件等。凡违反操作规程或不听从教师指导而造成仪器设备损坏等事故者，必须写出书面检查，并按学校有关规定赔偿损失。

五、在实验过程中若仪器设备发生故障，应立即报告指导人员及时处理。

六、实验完毕，应主动协助指导教师整理好实验用品，切断水、电、气源，清扫好实验场地。

七、按指导教师要求，及时认真完成实验报告。凡实验报告不合格者，均须重做。平时实验成绩不及格者，不得参加本门课程的考试。

致学习本课程的实验者

一、明确要求,端正态度,改进学习方法

大学阶段物理实验课程的学习,不同于中学阶段的实验课。因为中学里的物理实验主要是为了扩大视野、丰富感性知识和增加动手机会;进而帮助同学了解和巩固课堂上所教的理论知识。它仅是物理课程教学的一个附属教学环节。但是,在大学阶段开设的物理实验课程,首先,它是独立于《普通物理学》之外的一门实验课程,单独记分;其次,它还作为培养未来工程师的工程教育中一系列实践教育的先导和基础实验课程而存在。《大学物理实验》肩负着对学生“进行系统实验方法和实验技能训练”的重任;它要求学生通过本课程的学习,了解“从事科学实验的主要过程及基本方法”,而得到“从事科学实验的基本训练”。要实现这一切,就要求学生由浅入深、由简到繁、主动积极、有重点地去培养和锻炼自己,而且从一开始学习就要注意打下一个良好的基础,有一个好的开端。

鉴于我国目前中学阶段对学生实验的训练普遍比较薄弱的现状,在大学阶段想学好物理实验课程,不仅要多花力气、下苦功夫;还应当特别注意改进自己的学习方法,即:

1. 要注意掌握基本的实验方法和测量技术

基本的方法与技术是复杂的方法和技术的基礎,学习时不但要搞清楚它们的基本道理,还应该逐步地熟悉和记牢它们。而且,任何一种实验方法和测量技术都有着它应用的条件、优缺点和局限性,只有亲自做了一定数量的实验后,才会对这些条件、优缺点和局限性有切身的体会。

2. 要有意识地培养良好的实验习惯

在开始做实验之前,应当先了解一下有关这次实验的全部描述,这样你才有可能对将要做的实验工作有具体而清楚的理解;而当你完成一个实验的同时,一定要有一份完整而真实的实验记录,这样,你才有可能在需要时随时查阅这些记录,从而在处理数据、分析结果时,有足够的第一手资料,才能帮助你正确地去理解,你到底做过些什么实验;在实验过程中,凡有必要,应重复测量若干次,多测读几次,一般总要比只读一次为好(至少能确保不读错!)。当然,你应当能够决定在什么情况下才需要多做几次重复的测量;要注意记录实验的环境条件(如室温、气压、湿度、仪表名称、规格、量程和精度等),注意实验仪器在安置和使用上的要求和特点,有时甚至还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势。

良好的习惯需要经过很多次实验后的总结、反思、回顾以后,才能形成,而良好的实验习惯,对保证实验的正常进行,确保实验中的安全,防止差错的发生,都有很好的作用。但就单个实验习惯而言,由于太易明白,又不难掌握,以至反到会被初学者忽视。无数实践证明,良好习惯的养成,只有在实验中,有意识地去锻炼自己才行。

在完成本课程列出的具体实验课题中,你可以发现,在不少情况下,实验的完成需要两个或多个同组实验者的帮助,与他们共同讨论共同分析实验的结果,将会使你获得比你独自分析有更多的收益;有时,你在做实验时,如果受时间或条件的限制,仅来得及完成实验任务的二分

之一,但只要坚持认真去做,即使只完成了二分之一,甚至更少,但它也将比仓促而马虎地赶完全部实验任务获益更多。

3. 要能科学地分析一个实验,力争独立地排除实验中各种可能出现的故障;并锻炼自己自主发现问题、分析问题和解决问题的能力。如:实验数据是否合理、正确?靠什么去判断?数据的“好”或“坏”,又说明了什么?实验结果的可靠性和正确性又如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验的本身和实验的过程去判断;换言之,就是实验方法是否正确、合理?它可能引入多大的误差?实验仪器又会带来多少误差?实验环境、条件的影响又将如何?

为了帮助初学者克服实验经验少、还没有掌握一整套分析实验的方法等实际情况,作为大学基础教学实验的物理实验室往往在实验教材中给出一些实验结果的标准数据,安排一些已有十分确切理论结论的实验课题,使初学者便于练习和判断实验结果的正确性。但千万不要误认为做实验的目的只是为了得到一个标准的实验结果。如果获得的实验数据与标准数据符合了,就高兴;一旦有所差别,就大失所望,抱怨仪器或装置不好,甚至拚凑数据,这些表现都是不正确的,是违背科学的。事实上,任何理论公式和结论都是经过一定的理论上的抽象和被简化了的,而客观事实与实验所处的环境条件则要复杂得多,实验结果与理论公式、结论之间发生差别是必然会有。问题是差异有多大?是否合理?不论实验结果或数据的好坏,都应养成分析的习惯。当然也不要贸然下结论。首先,要检查自己的操作和读数;注意实验装置和环境条件。若操作和读数经检查正确无误,那末毛病可能出在仪器和装置本身,小的故障、小的毛病实验者应力求自己动手排除,起码也应留意教师或实验室工作人员是怎么动手解决的;仪器失灵,也要学习教师如何去判定仪器失灵或故障所在?怎样修复?在此还应着重指出,能否发现仪器装置的故障,及时迅速修复,这也是一个人实验能力强弱的重要表现,初学者应要求自己逐步提高这方面的能力。

4. 对所参加的每一次实验,都应掌握重点

实验是一项实际工作,除了需重点学习的内容外,总会遇到许多零碎的问题,甚至要去完成一些枝节的工作。这些工作固然也要做好,要学习,但要想在一次有限的实验时间内把它们完全搞清楚,弄懂搞透,时间上不允许,也不一定必要。所以必须注意实验的重点目的,把精力放在重点上,这样可以提高学习效率。

如果时间许可,在做完教材中提出的实验任务后,可以根据自己的具体实际情况,尝试去分析一下实验可能存在的一些问题,如所用仪器的精度、可靠性、实验条件是否已被满足?怎样给予证实?或进一步提出改进实验的建议,试做一些新的实验内容等。当然,不应简单地重复。

总而言之,实验有它固有的特点和学习规律,要想学好实验决不是一件轻而易举的事。相信实验者在实验过程中,会不断提高自己的实验能力,最终培养自己成为一个优秀的大学毕业生,即既懂理论、又能动手,更有较强解决实际问题能力的高级工程技术人才。

二、遵守制度、认真完成实验课的各个环节

1. 每次实验前均应牢记《实验守则》,并严格遵守各项规章制度。

2. 关于课前预习,实验操作和撰写实验报告:

《大学物理实验》课程的目的要求,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,不但要像一般的实验课一样,去理解和体会实验中反映出来的规律;而且还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:

(1) 实验前的预习

预习是进行实验的基础。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。预习报告的内容应包括:①实验名称;②原理摘要(包括主要原理公式及扼要说明词,电学实验应画出电原理图,光学实验应画出光路图);③主要仪器设备;④注意事项摘要;⑤回答部分预习思考题;⑥列出记录数据用表格。

上课时,教师将检查学生预习情况。对于没有预习和未完成预习报告的学生,教师有权停止该生本次实验。

(2) 实验中的操作

实验操作是实验的主要内容,是培养科学实验能力的主要环节。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预习报告的数据表格中,不要使用铅笔。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,但不允许涂改数据。

操作完成后,应将预习报告交教师审阅,经教师签字后,方可整理复原仪器,离开实验室。

(3) 实验后的报告

实验报告是实验工作的简明总结,要求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。预习报告和上机表格作为附件,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简要原理及计算公式;④实验数据表格、数据处理计算过程、作图及实验结果等,其中要特别注意有效数字和单位的正确表达;⑤实验现象分析、误差的评估及讨论等,讨论可以包括讨论思考题、提出改进建议及心得体会等。

第一篇 测量、误差和数据处理

第一章 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是:

(1) 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)。

(2) 初步培养学生进行科学实验的能力,即如何从测量目的(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,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)。

(3) 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、观测分析和排除故障等(着重调整操作)。

(4) 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)。

(5) 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、坚韧不拔的工作作风(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,决不是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,要做到在做第一百次测试时仍像第一次测试那样认真,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。

请记住:我们不是要一个塞满东西的脑袋,而是要一个善于分析的头脑!我们不仅要有知识,更重要的是将知识转化为能力!

著名科学家培根有一句名言:“知识就是力量”。社会实践告诉我们,在世界的进步和发展中,起决定作用的不只是我们具有的知识,更重要的是如何去运用知识。我们相信,经过认真、刻苦、勤奋地学习和努力,大家一定能获得成功。

第二章 测量与误差

1. 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;小到原子、分子。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。在定量地验证理论方面,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极其重要的一环。在测量工作中,要充分熟练地掌握一些基本的实验技能,如长度怎么“量”?天平怎么“称”?仪表怎么“用”?望远镜、显微镜怎么“看”?量值怎么“读”?数据怎么“记”?电路怎么“联”?……。这些都是最基本的东西,看来也是很容易的东西,但必须引起足够重视。实际上,它是非常重要的,是进行科学研究工作的“基本功”。基本功是学习和掌握高、精、尖技术的基础,没有这个牢固的基础,就不可能达到高水平。所以,一定要从低年级开始,就重视和掌握好这些基本功。

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。两者缺一不可!

2. 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。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,称为该测量值的测量误差,简称“误差”,即

$$\text{测量值} - \text{真值} = \text{误差} \quad (\text{I}-1)$$

测量总是存在着一定的误差,但实验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。请记住: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!

3. 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”。

偶然误差主要来自下述三个方面:

① 主观方面。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。

② 测量仪器方面。测量器具精度不够高,指针或向左或向右偏转,不固定。

③ 环境方面。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的精度。

偶然误差的存在使每次测量值偏大或偏小,它是无规则的。但如大量增加测量次数,则能发现在一定的观测条件下,它具有一定的规律,即服从一定的统计规律。常见的规律一是比真值大或比真值小的测量值出现的几率相等;二是误差较小的数据比误差较大的数据出现的几率要大得多;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,全部可能的误差总和趋于零。因此,增加测量次数,可以减小偶然误差。

$$\text{测量值} \pm \text{偶然误差}^{\text{①}} = \text{真值。} \quad (\text{I}-2)$$

(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,或是有规律的重复。

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叁等砝码等。按国家计量局规定,50g的砝码允许有 $\pm 2\text{mg}$ 的误差,当一个砝码的实际量值为49.998g时,它是符合国家叁等砝码规定的,是合格品。但当实验者使用这一标称值为50g的砝码进行称量时,它将引入的系统误差是

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

所以,凡用该砝码称量时,均有 $+2\text{mg}$ 的系统误差。在使用时,需经高一等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。

又如秒表指针没有准确地安装在盘中心,会使秒表指示值出现周期性误差。再如某测角仪,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

^① 偶然误差前的“ $\pm$ ”为不确定符号,表示偶然误差的特征,指偶然误差可能出现的范围。

偏,读数值大于零,系统误差为 $+\theta$,如图 I-1 所示;读数标线水平右指时,读数值准确地为 90° ,系统误差为零;读数标线向下时,读数标线不指 180° 而仍右偏,读数将小于 180° ,系统误差为 $-\theta$;读数标线水平向左时,读数值准确地为 270° ,系统误差也为零。可见,由于仪表装置的偏

心(即角度标中心与读数标线的转轴不同心),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各装一个读数装置来加以消除,称为“对径测量法”,在光学测角仪实验中将详加讨论。

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,采用不同的联接方法,电表内阻的影响,环境条件的影响,均会带来一定的误差。如电阻与温度的关系为

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

式中, R 为温度 t 时的电阻, R_{20} 为温度 20°C 时的电阻, α 和 β 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°C 时的电阻值作为任意温度

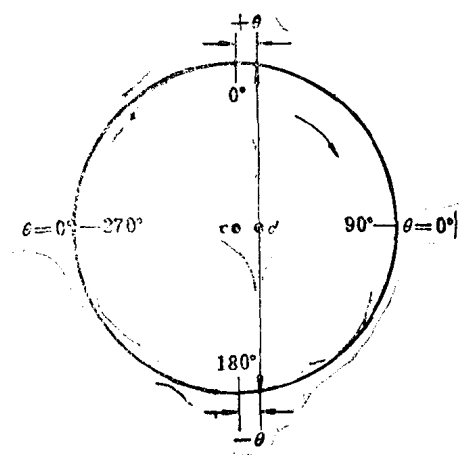


图 I-1 周期性系统误差

下的电阻值,则将带来系统误差 $\Delta = -\alpha(t - 20) - \beta(t - 20)^2$,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合。

测量值 - 系统误差 ± 偶然误差 = 真值。

(I-3)

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的限度,就不加以区别,有时也难于划分或区别它们。请注意:在基本实验中,一般我们仅要求考虑偶然误差,而把系统误差的初步分析放在第四篇的设计性实验中。

需要强调指出的是: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。

要求: 实验人员必须一丝不苟、严格过细地操作,及时发现错误,保证在实验过程中不发生错误!

记住：错误不是误差。

第三章 偶然误差的处理

1. 单次测量结果与误差估算

在物理实验中,若对某一物理量的测量精确度要求不高,只需进行一次测量时,可按仪器出厂检定书或仪器上注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明,也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差(一般根据实际情况,对测量值的误差进行合理的估算,取仪器最小刻度的1/10,1/5或1/2均可)。

2. 多次测量结果与误差计算

当对某一物理量进行测量时,最好不依赖于对一个量的一次测量,而宁可进行多次重复测量。如果仪器选择得适当,这种多次测量将不会得到完全相同的数值,根据多次测量之间的变化,就有可能获得一个最接近真值的最佳值,并对这组测量值进行误差分析与计算。

在相同条件下对某物理量 N 进行了 K 次重复测量,如每次测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_k$,用 $\bar{N}$ 表示算术平均值,则

$$\bar{N} = \frac{1}{K} (N_1 + N_2 + \dots + N_k) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k N_i. \quad (\text{I-4})$$

算术平均值的有效数字位数,一般与原来测量值的位数相同,但在各测量值较接近时,可考虑多取一位数。根据误差理论,在一组 K 次测量的数据中,算术平均值 $\bar{N}$ 最接近于真值,称为“测量的最佳值”。当测量次数无限增加时,算术平均值将无限接近于真值。在这种情形下,多次测量值的最佳值可用算术平均值 $\bar{N}$ 表示,多次测量值的误差可用测量值与算术平均值之差表示,称为“平差”:

$$\Delta N_i = N_i - \bar{N}. \quad (\text{I-5})$$

把各次测量值的平差 ΔN_i 平方的平均值再开方,称为“方均根误差”:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2}. \quad (\text{I-6})$$

当测量次数有限时, K 次测量中只有 $K-1$ 次是独立的,故

$$\sigma_{k-1} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \left[\sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2 \right]}. \quad (\text{I-7})$$

根据统计误差理论,表示偶然误差范围的方法有很多种,我国采用方均根误差 σ 作为精密度的评定标准,因此,也可称为“标准误差”。为了计算方便起见,上式可直接用测量值来表示

① 本节假定在没有系统误差存在的情况下,讨论偶然误差的处理过程和方法。