

高等院校规划教材

Physical
Experiment of University

大学物理实验

■ 主编 丁红旗 张忠厚 公衍梅 ■ 主审 王 皓



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高等院校规划教材

中国标准书号(CIP)数据

大学物理实验 / 丁红旗, 张忠厚, 公衍梅主编. — 杭州: 浙江大学出版社, 2004. 8
ISBN 978-7-309-06172-8

大学物理实验

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2004)第133478号

内 容 提 要

主 编 丁红旗 张忠厚 公衍梅
 编 委 赵 龙 白 静 张永义 王玉宏
 张晓莹 李本喜 刘庆国 王伟丽
 林雪松 陈跃辉 李 丽 张永军
 李 研 赵春光 花 巍 任崇远
 杨 鑫 唐 丹 李国臻 孙雪松
 由继国 张 清 王爱群
 主 审 王 皓

责任编辑 沈国明
 封面设计 刘依华
 出版发行 浙江大学出版社
 杭州体育场路148号 邮政编码310028
 E-mail: zjpress@mail.lz.zj.cn
 网址: <http://www.zjpress.com>
<http://www.press.zju.edu.cn>
 电话: (0571) 8302-3921 8327-0667 传真

排 版 杭州中大图文设计有限公司
 印 刷 浙江新华印刷厂
 开 本 787mm×1092mm 1/16
 印 张 16.75
 字 数 383千字
 版 印 次 2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷
 书 号 ISBN 978-7-309-06172-8
 定 价 28.50元



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

责任编辑

图书在版编目 (CIP)数据

大学物理实验 / 丁红旗, 张忠厚, 公衍梅主编. —杭州:
浙江大学出版社, 2008. 8
ISBN 978-7-308-06172-8

I. 大… II. ①丁…②张…③公… 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 (2008) 第 133478 号

内 容 提 要

本书是根据高等理工科院校“大学物理实验”课程教学的基本要求, 结合辽宁工程技术大学现有的仪器设备和实验资料, 参照多年使用的实验教材整理编写而成的。全书内容包括误差和数据处理的基本知识以及力学、热学、电磁学、光学等方面共 42 个实验。分为基础实验、综合实验和设计性实验三部分。

本书可作为高等理工科院校各专业的“大学物理实验”课程的试用教材。也可以作为业余或其他大学物理实验课程的参考用书。

大学物理实验

丁红旗 张忠厚 公衍梅 主编

责任编辑 沈国明
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>
<http://www.press.zju.edu.cn>)
电话: 0571-88925592 88273066(传真)

排 版 杭州中大图文设计有限公司
印 刷 德清县第二印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 383 千
版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-06172-8
定 价 26.50 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

物理学就其本质来讲是一门实验的科学。在物理学的发展过程中,每一个物理概念的确立,原理和定律的发展,无不需要坚实的实验基础。而且,物理实验有它自身的一套知识、方法、操作技能等独特内容。所以,高等学校在开设大学物理理论课的同时,往往还要开设一定量的大学物理实验课。通过《大学物理实验》这门课的学习,学生学会一些基本的实验方法、基本仪器的使用和基本的数据处理方法,得到规范化训练,养成良好的实验习惯,即在实验能力和实验素养方面得到培养。物理实验是物理工作者和其他科学技术人才不可缺少的一门基础课。

作为独立设课的物理实验,必须有自己的教材。实验教材离不开实验室的建设和发展,为了满足实验教学手段与科学技术进步同步发展的要求,各校实验室都在不断地改善和更新实验教学的软硬件。本书在我校原有设备的基础上,根据近年来新购置的大批设备和仪器对 2005 年的教材进行大量的修改编写而成。同时,在编写本书的过程中广泛参阅了兄弟院校的有关教材,吸收了其中富有启发性的观点和优秀内容。另外,为了适应或接近,对测量结果采用不确定度来评价。对不确定度的描述进行了一些简化,让学生掌握评定不确定度的基本方法而不陷入过于严格的繁琐计算,以适合普通物理实验教学要求。为了适合学生预习和课堂独立操作,在叙述介绍基本原理与实验方法、实验内容与步骤时,力求繁简适当、通俗易懂。本书的内容基本上都是学生未来从事科学研究时经常要用到的基础知识。

本教材的学生实验守则、绪论、第一章由张清编写;实验一至六由张忠厚编写;实验七至十二由孙雪松编写;实验十三至十八由王爱群编写;实验十九至二十四由张永义编写;实验二十五至三十由公衍梅编写;实验三十一至四十二、附录由丁红旗编写,最后由丁红旗统稿。由于编写时间仓促,编者水平有限,难免有不当和错误,希望读者指正,以便于今后的修订。

编者

2008 年 6 月

大学物理实验课教学守则

一、上课前必须认真钻研教材,充分备课,预做实验,写好教案,做到上课时心中有数。

1. 明确所指导实验的目的和要求;
2. 熟练掌握实验原理、步骤、注意事项、仪器规程;
3. 测试实验数据,分析数据规律,以便判断学生实验数据正确与否;
4. 计算实验结果,估计误差,以便判断学生结果的优劣;
5. 尽量分析学生在实验中容易产生的错误,设备容易发生的故障及相应处理措施和方法,以便在学生实验中及时排除;
6. 分析误差产生的原因,以便改进实验,提高实验效果;
7. 了解供电、照明系统,以便及时排除事故。

二、通过提问等方式,严格检查学生预习情况,不预习者不准做实验。提问的目的在于使学生明确实验目的、原理、注意事项。依实验内容,可多讲、少讲或不讲,提问和讲解的时间一般不超过 30 分钟。

三、学生操作时必须全面认真指导,不得做其他工作。对学生提出的问题,要启发诱导学生独立思考,独立分析,独立解决,切勿包办代替,在学生不能解决时,予以帮助。

四、对学生的实验情况,操作能力,必须仔细观察,准确记录,以便考查学生的实际能力。操作水平都一样的情况是不存在的,如果听之任之,是教学不负责任的表现。

五、能够及时排除学生实验中常见故障,进行仪器的简单修理(指不开机壳能短时间恢复实验的修理)。

六、督促学生按时完成实验,发现学生违章、违纪情况,除记录外,应及时妥善处理。

七、认真、细致检查学生的实验数据,发现不合理时必须让学生重做,不得帮助学生修改数据,以免造成不良影响。学生的实验数据要教师签字,教师对签过字的数据要负责任。

八、课堂上必须管理好仪器,学生实验后必须认真核实验收。如有缺件、损坏、失灵、丢失,必须填写仪器损失记录,以便实验技术人员维修、增补,不得影响下一次实验,否则为教学事故。

九、离开教室时,必须断电、断水、断火,关好门窗,否则为教学事故。

十、实验报告要及时批改,对其中存在的问题要给以批示,下次实验时发给学生,不得拖延。报告中的共性问题,发报告时向学生集体讲解。不合格的报告退给学生重做。

十一、保管好学生实验卡片,对学生的成绩要准确登记。发现成绩不准确者要及时处理,不得拖至期末。

十二、使用教室上课时,必须保持卫生,爱护仪器,保持原教室仪器整齐。

十三、模范地遵守实验室制度,不仅严格要求学生,更要严格要求自己,做到言传身教。指导学生要耐心、诚恳,要有一丝不苟的科学态度,做学生的楷模。

十四、学期末认真总结教学经验,要写出教学论文。

学生实验守则

一、必须按时上课，无故不上课者，该实验无成绩。病、事假需正当手续，口头带信无效。迟到超过 20 分钟者取消该次实验资格。

二、实验前必须预习，预习情况不好者，任课教师有权决定是否让其做实验。

三、进入实验室后，未了解仪器性能前不准乱动仪器。做实验前要核对仪器，如有缺损及时报告指导教师。

四、实验完毕，原始记录数据经教师审查签字方有效，随同实验报告于下次实验时交指导教师，否则报告无效。

五、离开实验室前必须整理好仪器，放好凳子，抹干净桌子，经教师验收后才能离开实验室。

六、爱护仪器，如有损坏，必须填写损坏报告，要查明原因，并酌情赔偿。不得隐瞒，否则加重处理。

七、一学期因违章扣分超过平时成绩的 20% 者，不能参加期末考试，本学期成绩为不及格。

八、一学期有五分之一实验报告不交者，有一个实验不做者，不能参加期末考试，成绩为不及格。

目 录

绪 论	(1)
第一章 测量误差和不确定度	(4)
第一节 物理量的测量及分类	(4)
第二节 测量的误差和不确定度	(5)
第三节 直接测量结果与不确定度的估算	(14)
第四节 间接测量结果与不确定度的估算	(18)
第五节 测量的有效数学及其运算规则	(24)
第六节 数据处理	(26)
第二章 基础实验	(35)
实验一 测量固体的密度	(35)
实验二 用单摆测重力加速度	(43)
实验三 用拉伸法测钢丝的杨氏模量	(47)
实验四 用转动惯量仪测圆盘的转动惯量	(51)
实验五 用焦利秤测液体的表面张力系数	(54)
实验六 用转筒法测定液体的黏滞系数	(59)
实验七 测定不良导体的导热系数	(63)
实验八 电桥测电阻	(66)
实验九 测晶体二极管伏安特性	(70)
实验十 用直流电位差计测电动势	(76)
实验十一 固体线胀系数的测定	(80)
实验十二 示波器的使用	(83)
实验十三 声速的测量	(92)
实验十四 牛顿环	(95)
实验十五 气垫导轨上的实验	(100)
(一)气垫导轨实验的预备知识	(100)
(二)测匀变速直线运动的加速度	(104)
(三)动量守恒定律的验证	(106)
(四)阻尼振动	(109)

实验十六	驻波	(114)
实验十七	测量薄透镜的焦距	(117)
实验十八	弹簧振子周期经验公式总结	(120)
实验十九	霍尔效应	(123)
实验二十	霍尔效应测定螺线管轴向磁感应强度分布	(131)
实验二十一	分光仪的调整与光栅测波长	(138)
实验二十二	用分光仪测定棱镜的顶角及折射率	(148)
实验二十三	偏振现象的观察与布儒斯特角的测定	(153)
实验二十四	光电效应伏安特性及光电特性	(158)
实验二十五	单缝衍射的光强分布	(162)
第三章	综合实验	(167)
实验二十六	电表的改装与校正	(167)
实验二十七	用模拟法测绘静电场	(173)
实验二十八	用双臂电桥测低电阻	(178)
实验二十九	传感器综合实验	(183)
实验三十	应用示波器的测试与观测	(189)
实验三十一	密立根油滴法测电子电荷	(194)
实验三十二	用光电效应测定普朗克常数	(199)
实验三十三	钨的逸出电位的测定	(205)
实验三十四	迈克尔逊干涉仪	(211)
实验三十五	照相技术	(218)
实验三十六	匀变速直线运动的瞬时速度、平均速度和加速度的测量	(223)
第四章	设计性实验	(225)
实验三十七	重力加速度的研究	(230)
实验三十八	简谐振动的研究	(231)
实验三十九	测量小灯泡的伏安特性曲线	(233)
实验四十	测量给定电阻丝的电阻	(234)
实验四十一	用电位差计测电阻	(235)
实验四十二	电表的改装研究	(236)
附表		(237)
参考文献		(242)
(301)		(二)
(801)		(三)
(901)		(四)

大学物理实验

绪论

一、大学物理实验的重要性

物理学的研究工作有实验的方法和理论的方法。实验的方法是一种人类有意识的、自觉的科学实践活动,以实验结果为依据,归纳出一定的规律;在理论的指导下,通过一定的手段向新的认识领域探索。理论研究虽然不进行实验,但是研究课题的提出和结论的检验,必须通过实验。物理实验在物理科学的创立和发展中占有十分重要的地位。物理学是一门实验科学也早已成为定论。历史上自从伽利略用实验方法否定了亚里士多德“力是速度的原因”的论断以后,实验逐渐为人们认识,并形成了自己独立的体系。物理实验课和物理理论课一样,是最普遍、最基本的课程。其内容包括力、热、电、光、声等,是其他实验的基础。把现代高、精、尖的实验拆分开来,绝大部分是常见的物理实验内容。

对于任何一个工程技术人员来讲,没有较强的科学实验能力,就只能做平庸的工作,不可能作出重大贡献。对于一个工科学生来讲,不论什么专业,物理实验技能的培养是必不可少的。

因此,物理实验是一门重要的必修科目。

二、大学物理实验的目的和任务

1. 进行物理实验基本功的训练

(1) 学习物理实验的基本知识,如力、热、电、光、声等的基本知识及误差理论等。

(2) 掌握物理实验的基本方法,如比较法、交换法、补偿法、放大法等。

(3) 掌握物理实验的基本仪器使用,如卡尺、天平、千分尺、电表等。

(4) 培养物理实验的基本实验技能,如再现物理现象的观察与分析,实验条件的控制(恒温,绝热,低压,平衡态,磁干扰),实验方案的初步设计,有关实验数据的处理和结果评价(误差、有效数字、作图法、线性回归、撰写实验报告)。

2. 培养严肃认真、实事求是、勇于探索的科学态度;注意安全、团结合作、爱护国家财产的优良品德和工作作风。

3. 通过观察、测量和分析,加深对理论的认识,巩固与应用所学知识,扩大知识面。

物理实验课虽然是在教师指导下的学习环节,但在实验过程中,同学们有较大的独立性,同学们应以一个研究者的态度去组装仪器,进行观测与分析,探讨最佳的实验方案,从中积累经验,锻炼技巧和机智,为以后独立设计实验方案,选择并使用新的仪器设备和解决新的实验课题打下良好的基础。

三、大学物理实验的基本过程

物理实验的过程包括准备、观测与记录、数据的整理与分析这三大步骤。

1. 实验前的准备(预习)

实验前的准备是保证实验顺利进行,并能取得满意结果的重要步骤。

(1)理论的准备: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,预习思考题。

(2)实验仪器的准备:了解可用仪器的工作原理、工作条件和操作规程。

(3)观测的准备:掌握实验步骤和注意事项,设计记录表格。

2. 实验的观测与记录

(1)仪器的安装和调整:使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件(水平、铅直、工作电压、光照等);必须按操作规程进行,不明确操作规程,千万不要动用仪器。

以下举出几点共同性的注意事项:

①安排仪器时,应尽量做到便于观察读数 and 便于记录。

②灵敏度高的仪器(如天平、灵敏电流计)都有制动器,不进行测量时,应使仪器处于制动状态。

③拧动仪器上的旋钮或转动部分时,不要用力过猛。

④使用电学仪器时要注意电源电压、极性,并需经教师允许后方可接通电源。

⑤不要乱动别组仪器,实验后将仪器整理、恢复到实验前的状态。

(2)观测:在明确了实验目的和测量内容、步骤,并能正确使用仪器之后,才可以进行正式观测。观测时要精神集中,尽量排除外界的干扰,注意不要影响别人。

观测时要养成实事求是、严肃认真的良好观测习惯。

(3)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。记录应记在专用的记录用纸上,初学者往往都记得很乱,想着先记下来,后面再整理抄在记录纸上,这样不好,记录就是如实地记下各观测数据、简单的过程以及观测的现象。要记得简单、整洁、清楚,数值记在表格中,注明单位,不允许用铅笔记录。发现某数据记录有误不能擦掉此数据,应用单斜线划掉,以便参考,记录应留有补充记录空间。

记录的内容包括:日期、时间、地点、合作者、室温、气压、仪器、数据等。

原始数据:原始数据是指从仪器上直接读出的,未经任何运算的数值。

观测时,从仪器上读出数值后,不要记忆数据,以后补记,应立即进行记录,减少差错。

除有明确理由肯定某一数据有错误不记录外,其他数据一律记录,出现异常数据时,应增加测量次数。

3. 数据的整理和实验报告

测量结束后要尽快整理好数据,计算出结果并绘出必要的图线。数据整理工作尽量在实验课上完成,并根据数据整理中出现的問題作必要的补充测量。

撰写一份合格的实验报告,也是实验课的一项基本训练。实验报告要力求简洁明了,用词确切,字迹清楚。实验报告格式一律采用“标准报告”格式。

(1)实验“标准报告”的内容

- ①实验名称
- ②实验目的
- ③实验仪器:注明仪器名称、编号,必要时画出仪器简图。
- ④实验原理:应包括原理摘要,测定公式、方法等。
- ⑤实验步骤:教材指导书中已具体给出的步骤,可简略写出,如果是设计性实验,步骤应具体。
- ⑥实验数据记录:实验数据一般采用表格形式记录,包括原始数据和处理数据,误差列表等。
- ⑦实验数据处理:包括计算实验结果及其不确定度,作出图线或经验公式,对实验结果进行评价或给出实验结果的图示等。
- ⑧回答问题及讨论:对实验结果进行误差分析,提出自己的看法或改进意见,回答思考题。

(2)实验讨论的内容

实验的讨论是培养学生分析能力的一个非常重要的环节,应当努力去做好它。实验后可供讨论的问题是多方面的,以下几点仅供参考:

- ①实验的原理、方法、仪器给你留下什么印象,实验目的完成得如何?
- ②实验的系统误差表现在哪些地方?怎样改进测量方法或装置可以减少误差?对实验的改进有何设想?
- ③实验步骤怎样安排更好?
- ④观察到什么反常现象,遇到过什么困难,能否提出可供以后实验人员借鉴的东西?
- ⑤测量结果是否满意,如果未达到可能达到的结果,是何缘故?
- ⑥对实验的安排(目的、要求、方法和仪器的配置等)和教师的指导有何希望?

第一章 测量误差和不确定度

第一节 物理量的测量及分类

一、测 量

在生产、科学实验以及人们的生活中,都离不开测量。在物理实验中,要用实验的方法研究各种物理规律,常常要定量地测量出有关物理量的大小。例如,测出一摆线长为 0.9867m,某物体质量为 6.87kg,某电路的电流强度为 1.56A,某地的重力加速度为 9.796m/s^2 等等。所谓测量就是使用一定的量具或仪器,通过一定的方法,用同类量的单位把待测量表示出来的过程。或者说,测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来,即待测量是计量单位的多少倍。数据应包括数值(大小)和单位,缺一不可,否则就没有物理意义。

二、测量的分类

(一)直接测量和间接测量

按测量采用的手段和方法,测量分直接测量和间接测量两种。

1. 直接测量

用计量仪器或标准量具直接与待测量进行比较的过程就是直接测量,比较的结果就是测量值。如用米尺测长度,用天平测质量,用秒表测时间等等。

2. 间接测量

间接测量是指在不能直接用计量仪器把待测量的大小测出来的情况下,依据待测量和某几个直接测量值的函数关系求出待测量的过程,运算结果就是间接测量值。如圆柱体的体积,是通过直接测量直径 d 和高 h ,代入函数关系式 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ 而求出来的。

物理量多数是间接测量值,一般通过几个直接测量值而求出。一个物理量的测量是否能直接测量,决定于测量的手段和方法。随着科学技术的发展,能够直接测量的物理量必将越来越多。

(二)等精度测量和非等精度测量

按测量条件是否相同,测量分等精度测量和非等精度测量两种。

1. 等精度测量

等精度测量是指对某一物理量,在同样的实验条件下,即同一实验者、同一实验仪器、

同一实验方法、同一实验环境等,进行多次重复测量。各次测量结果虽有所不同,但我们没有任何理由说某次测量一定比另一次更精确,只能认为每次测量的精确度相同。

2. 非等精度测量 在多次重复测量时,只要实验条件中的任何一个发生变化,那么在这种情况下进行的测量便是非等精度测量。严格地讲,在实验中保持实验条件完全相同而进行多次测量是极其困难的,但当某一条件变化时,如果真对测量结果影响不大,甚至可以忽略时,这种测量仍可视为等精度测量。

为了使问题简化,本章只限于研究等精度测量的数据处理问题,今后在我们的实验中也只限于等精度测量。

第二节 测量的误差和不确定度

测量的目的是希望获得待测量的客观真值,但测量是由操作人员在一定的环境,使用一定的测量仪器,依据一定的理论或方法来进行的,操作人员的操作、调整和读数不可能是完全准确的;测试环境、条件也不可能是理想不变的;测量方法与测试技术又受科学发展程度的限制;理论也有一定的缺陷或只是近似,这样就必然导致测量值不可能百分之百准确。换句话说,待测量的客观真值是永远也不可能测得的,测量结果和被测量真值之间总会存在或多或少的偏差,我们只能获得一个最接近真值的量,所以测量的任务就是:

- (1) 设法把测量时的偏差减至最小;
- (2) 求出被测量的最近真值(最佳值);
- (3) 对最近真值的可靠程度进行评价,也就是估计误差的不确定度范围。

所有的误差理论都是为了这一目的建立起来的,随着科学的发展,误差理论已经形成了自己特有的一套体系。概率、数理统计等理论的建立,都是建立在实验科学的基础上的,反过来又为科学实验提供了有力的数学工具。下面只介绍这些理论的最基本部分。

一、真值与误差

(一) 真值 每一个物理量都是客观存在的,在一定的条件下,具有不以人的意志为转移的客观大小,这个客观大小称为该物理量的真值。因此,物理量的真值是一个理想概念,一般是不可能确切知道的,我们用符号 A 表示。

(二) 测量误差 测量值与真值之差就定义为误差。

设被测量的真值为 A , 测得值为 x , 误差为 Δx , 则其数学形式为

$$\Delta x = x - A$$

测量所得的一切数据,毫无例外地都包含有一定的误差,上式所定义的误差,反映的是测量值偏离客观真值的大小和方向,因此又常称为绝对误差,应特别注意“绝对误差”具有符号,不应与误差的绝对值相混淆。

二、误差的分类

按照误差产生的原因,误差可分为系统误差、随机误差(也称偶然误差)、过失误差(也称粗大误差)三类。实验数据中,三类误差是混杂在一起出现的,但必须分别讨论其产生规律,以便采取相应的措施去减少误差。为了对误差性质进行深入了解,以便有助于实验结果的分析改进,我们做如下具体讨论。

(一) 系统误差

在同一测量条件下(方法、仪器、环境和观测者不变等),多次测量同一物理量时,其误差的绝对值和符号保持不变或误差按某一确定规律变化,这种误差称为系统误差。

1. 系统误差的分类

(1) 定值系统误差与变值系统误差

从系统误差特性来分,可将系统误差分为定值系统误差与变值系统误差两大类。

①定值系统误差。在测量过程中误差的大小和符号保持不变。如分析天平上用的三等砝码,50g砝码允许有2mg的极限误差,引入系统误差值为2mg。这类系统误差可经高一等级仪器校验,定其误差值,以便在实际测量中加以修正。

②变值系统误差。在测量条件变化时,按一定规律变化的系统误差。其变化规律有线性变化、周期性变化等。如:电位差计测量电动势 E_x 时,先用标准电阻 R_s 上的电压去补偿标准电池的电动势 E_s ;再用 R_x 上的电压去补偿待测电动势 E_x ,当前后两次检流计G中电流均为零时,有 $\frac{E_x}{E_s} = \frac{R_x}{R_s}$ 成立,成立条件为工作回路中电流 I_0 保持不变。但实际上电池电压随放电时间而降低,带来非线性系统误差。又如,分光计刻度盘中心(即角游标中心)有偏心差 e ,则任一转角 φ 的读数误差是 $e \sin\varphi$,此为周期性系统误差。

(2) 可定系统误差与未定系统误差

系统误差按掌握程度来分,则可分为可定系统误差与未定系统误差。

①可定系统误差。这类误差在测量过程中,能确定其大小和方向,可以进行修正和消除。

②未定系统误差。这类误差在实验中不能确定其大小和方向。在数据处理中,常用估计误差限的方法得出,并与随机误差相似,用统计方法处理。如一个0.5级电流(压)表,最大值误差为: ΔI (或 ΔU) = 量程 $\times 0.5\%$,这属于未定系统误差,表示指针在任何刻度处的示值误差不会超过 $\pm \Delta I$ (或 $\pm \Delta U$)。

2. 系统误差的来源

(1) 理论和方法误差

这种误差是由实验理论和方法本身不完善导致的,如理论公式的近似,实验条件或方法不满足理论公式的要求。如单摆周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件是摆角 $\theta \rightarrow 0^\circ$,摆球的体积 $V \rightarrow 0$,摆线的质量 $m \rightarrow 0$,且长度无变化,空气无阻力等。这些在实验中都不可能达到,只能取其近似。

(2) 仪器装置误差

这种误差是由于实验所用仪器装置不完善而产生的。如仪器在制造时有缺陷;使用
前未经校准;装置的安装、布置、调整不当等。

(3) 环境误差

这种误差是由外界各种环境因素造成的,如温度、湿度、光照、气压、振动、电磁场等因
素与实验要求的理想状态不一致。

(4) 人员误差

这种误差是由观测人本身的生理特点、心理因素、固有习惯等引起的,如色盲、色弱、
计时中习惯于超前或滞后、反应速度快和慢等。

3. 系统误差的发现方法

系统误差的出现一般都有较明确的原因,因此可采取适当措施使之降低到可忽略的
程度。找到产生系统误差的原因,从而采取恰当的对策,需要我们在实验过程中逐渐积累
经验,锻炼机智,提高实验素养。下面简单介绍几种发现系统误差的方法。

首先,要发现系统误差,必须仔细地研究测量理论和方法的每一步推导,检验和校准
每一件仪器,分析每一种实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一种因素对实验的
影响。

其次,运用一些常用的方法。

(1) 对比法

① 实验方法对比

用不同方法测量同一物理量,看其结果是否一致。如用单摆测重力加速度和用自由
落体测重力加速度,看其在随机误差内是否重合。

② 仪器对比

用两个同类仪器测同一物理量,看其结果是否一致。如用两个电表接入同一电路,若
读数不一致,说明其中至少有一个是不准的。如果其中一个为标准表,则可以找出另一个
表的修正值。

③ 测量方法对比

如用正反电流测量;用增减砝码的顺序测量;用度盘旋转 180° 测量等。

④ 测量条件对比

如改变电路中某元件的位置;磁测量中磁性物质的远与近;热测量中热源的远与近;
实验中某个量的改变等。

⑤ 人员对比

由不同人进行测量,观察是否有误差。

(2) 分析法

① 分析理论公式所要求的条件是否满足。如单摆实验用到的周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$,
 $\theta \neq 0, v \neq 0$ 必然产生误差。

② 分析仪器所要求的条件是否满足。

③ 分析环境因素是否与要求一致。

④ 数据分析法(残差观察法)

1) 图解分析(观察法) 将测量数据依次排列, 如果残差(偏差) $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 以 x_i 作

图, 分析是否存在系统误差或系统误差的变化规律。

2) 列表分析 列表分析时, 可用下列两个准则进行判断:

准则 1 将测量数据依次排列, 如果残差(偏差 $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$) 大小有规则地向一个方

向变化, 说明测量中有线性系统误差存在。

准则 2 将测量数据依次排列, 如果残差符号呈现出有规律的交替变化, 则测量中有

周期性系统误差存在。

3) 计算法 方法之一是阿贝(Abble)公式检验法。对测量列 $x_1, x_2, \dots, x_n, \Delta x_i = x_i - \bar{x}$, 若

$$\left| 1 - \frac{\sum_{i=2}^n (\Delta x_i - \Delta x_{i-1})^2}{2 \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \right| > \frac{1}{\sqrt{n}},$$

则测量中存在系统误差。

方法之二是用逐差法处理数据而未得到预期结果时, 一般可以认为存在系统误差。

4. 消除系统误差影响的途径

从原则上讲, 消除系统误差影响的途径, 首先是设法使它不产生。如果做不到, 就应在测量中设法去抵消或减少它的影响, 或者进行修正。对可定系统误差, 可以在确定其误差值后, 对结果进行修正。对未定系统误差, 则应确定其误差限, 与随机误差一起作统计合成处理。

(1) 消除系统误差产生的根源

首先要从理论方法、仪器装置、环境条件和人员等方面进行仔细分析, 对于可能产生系统误差的各种因素, 在实验前加以处理, 消除其产生的根源。

(2) 利用修正公式对结果进行修正。如作校准曲线, 找出修正项, 零点修正等。

(3) 测量过程中采用消除或减少系统误差的典型技术措施。例如:

① 比较法 与标准量在同一条件下进行比较。

② 补偿法 如迈克尔逊干涉仪的光程补偿, 气轨验证牛顿第二定律时的质量补偿。

③ 替换法 对未知量进行测量后, 再用标准量代替未知量进行测量, 但要注意保证其他条件

不变。

④ 交换法 在测量过程中将某些条件进行交换, 使产生的系统误差对测量结果起相反作用, 以消除系统误差。如天平测量的复称法, 可消除天平不等臂引入的误差。

⑤ 倒号法

改变测量条件,使两次测量结果中的误差符号相反,取其平均值。

如用拉伸法测杨氏模量实验中,沿伸长和收缩两个方向增减砝码,取相应读数的平均值,可消除阻力或形变不均匀引入的系统误差。

⑥ 消去法

通过某种方法,在测量公式中消去某些不易测准的物理量。如测透镜焦距时采用的共轭法,即可消去由于透镜光心不易确定而不能测准的物距与像距。

⑦ 线性观测法

如电源电动势随时间降低,可用电位差计以等时间间隔,交替测标准量与待测量,那么可有第一、三次标准量的平均值与第二次待测量相对应,修正待测量,消除线性系统误差的影响。

⑧ 半周期偶数法(也叫对径测量法)

在相差 π 角的位置上读两个数,取平均值,这可消去按正弦曲线变化的周期性系统误差。

如分光计读数盘的双窗读数,可消除因度盘中心与转盘中心不重合引起的周期性系统误差。

⑨ 一次倍测法(积累放大测量法)

延伸测量范围,可提高测量精度。如测单摆周期时,通常不是测一个周期,而是测多次摆动的时间来求周期。

(二) 随机误差(偶然误差)

在同一条件下多次测量同一物理量时,测得值总是有稍许差异而且变化不定,并在消除系统误差之后依然如此,这部分绝对值和符号经常变化的误差,称为随机误差。

这种误差产生的原因很多,不可预测,具有一定的随机性。不像系统误差那样,可找出具体原因加以消除,但随机误差并非毫无规律,它的规律性只有在大量观测数据或多次测量中才显现出来。正是因为随机误差遵循这种规律性,我们才可以通过多次测量来减小随机误差,并进行误差估计,得出其可能出现的大小。

1. 随机误差的统计规律

(1) 随机误差的正态分布

对某一物理量进行多次测量,可以发现,物理实验中的误差遵守正态分布规律。

如某一长度的测量共 64 次,其数据如表 1 所示。以长度 x_i 为横坐标,以出现次数 n 为纵坐标,作直方图,可得一接近于对称的图形,如图 1 所示。

表 1 长度测量数据

测量值 x_i/cm	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11
出现次数 n	1	3	6	10	15	11	8	4	3	2	1

若同样再测 64 次,也作相应的图形,所得图形一般来说不会与第一次完全吻合,但轮廓相似,因为它们具有相同的规律。

如果把测量次数增至 5000 次,甚至 10000 次,同时用宽度更小的间距 Δx ,就会得到非常接近的光滑曲线。当测量次数无限增加,直方图间距宽度无限减小时,得到的图形是