



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

大学物理实验

(修订版)

钱 锋 潘人培 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

大学物理实验

(修订版)

钱 锋 潘人培 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是参考了教育部 2004 年制订的“大学物理实验课程教学基本要求(讨论稿)”,在潘人培教授主编的《物理实验》的基础上,总结近 10 年东南大学物理实验课程教学改革的成果修订而成的。

全书除测量误差与数据处理内容外,仍以实验项目为线条进行编写,力求保持原书教学实用性、可操作性强的特色。为适应新时期实验教学对学生学习、实践、创新相互促进的教育理念,同时适应对不同层次的学生进行因材施教,本书在具体实验内容上按预备实验、基础实验和课题实验进行编制,共 32 个实验。

本书可作为高等院校工科类专业和应用物理专业的基础物理实验教学用书,也可作为其他专业的基础物理实验教学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/钱锋,潘人培主编.—2 版(修订本).—北京:高等教育出版社,2005.11

ISBN 7-04-017776-5

I. 大… II. ①钱…②潘… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 119101 号

策划编辑 庞永江 责任编辑 耿承延 封面设计 张楠 责任绘图 朱静
版式设计 马静如 责任校对 尤静 责任印制 孔源

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landraco.com.cn
印 刷	河北新华印刷一厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	1986 年 9 月第 1 版
印 张	17.5		2005 年 11 月第 2 版
字 数	320 000	印 次	2005 年 11 月第 1 次印刷
		定 价	20.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17776-00

修订版前言

本书是潘人培主编的《物理实验》(东南大学)的修订版.此次修订力图将近10年东南大学物理实验课程教学改革成果融入于教材之中.修订工作主要体现在如下几个方面:

1. 全书仍以实验项目为线条进行编排,但在实验内容的设计上是从培养大学低年级学生的科学实验基本素质、营造自主学习环境、提高创新学习能力等几方面综合考虑,按预备实验、基础实验和课题实验进行编制.

2. 将在中学物理知识基础上可进行的部分传统实验列为预备实验.此类实验适宜在开放的实验室环境中开设,既可以为部分中学实验条件较弱的同学提供补课机会,又可以为一年级新生提供自主学习的实验环境.实验过程中辅以计算机TA教学辅导与管理信息系统,教学效益更为突出.

3. 在预备实验基础上,基础实验的教学起点适当地提高了.基础实验按基本内容、选做内容和小课题分层次编写,以适应因材施教的教学需求.

4. 课题实验的项目设计力求将设计性、研究性、综合性的教学内容有机结合,为低年级学生提供开放研究性学习的实践环境.书中的课题实验仅摘选了东南大学课题实验的部分项目,更多的课题应该是来自于学生或教师的立项.

5. 考虑到大学低年级学生的数理基础,采用简化的不确定度估计方法评定测量结果的误差.

本书由钱锋、潘人培主编.参加此次修订工作的有陈小凤、熊宏齐、孔祥翔、孙贵宁、石然、朱桐华、丁冬、陈乾、谷云曦、黄兆聪、寇朝霞、关健慧.

南京大学的沙振舜教授和哈尔滨工业大学的耿完桢教授对本书做了全面审阅和修改,谨向他们以及在本书修编过程中提出过宝贵意见的校内外老师致以衷心的感谢.

由于编者水平有限,书中错谬之处,在所难免,谨希读者批评指正.

编 者

2005年6月

前 言

本书是根据高等工业学校物理学实验教学大纲,并参照1985年10月重庆会议和1986年5月杭州会议讨论的工科物理实验课程教学基本要求,结合南京工学院物理教研组开设的普通物理实验课程和使用的教材,整理编写而成的。

本书内容包括实验绪论、力学和热学实验、电磁学实验、光学实验、近代和综合物理实验等五部分,共33个实验。鉴于目前大多数高等工业学校的现状各异,本书在编写时注意了以下几个方面的问题:

1. 本书的总学时约为90学时,较工科物理实验课程教学基本要求规定的60学时多50%的内容,以便各校在使用本书时可根据实际情况和实验总学时数予以取舍。

2. 按照循序渐进的原则,本书由浅入深,逐步提高。在各实验的编写上为“前详后略”,并注意使各实验相对独立,便于不同循环的安排。

3. 本书着重加强基本技能的培养和实验方法的训练。对大多数实验都包括基本内容和选做内容(带*号)两部分,以适应不同课时(2学时或3学时)的学校和不同水平学生的需要,便于因材施教。在各部分实验后面,又安排了设计性或综合性实验(实验9、21、28、33)。最后安排了四个近代物理实验(实验29、30、31、32),以便于进一步培养和提高学生的实验能力。

4. 书后提供了全部实验仪器的配置表。所用的仪器既注意到了目前大多数高等工业学校的现有条件,又考虑到了新建院校筹建物理实验室的需要。

本书由潘人培主编。参加本书编写的有李士微(实验19、20、31、32)、董宝昌(绪论,实验4、7)、钱锋(实验16、17)、朱桐华(实验10)、赵念泽(实验14)、胡建华(实验6)、潘人培(其余22个实验)。胡光鲁为本书部分实验编写了计算机程序,李士微为本书绘制了全部插图。

叶善专、朱桐华对本书作了全面审阅和修改,我们谨向他们以及对在本书使用过程中提出过宝贵意见的同志,一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错谬之处,在所难免,谨希读者批评指正。

编 者

1986年8月

目 录

绪论.....	1
---------	---

测量误差与数据处理

I 测量与测量误差.....	5
一、直接测量与间接测量	5
二、测量误差	5
三、测量误差的分类	6
四、随机误差的统计特征	7
II 测量结果的表示与不确定度	9
一、测量结果的表达形式与不确定度	9
二、直接测量结果的不确定度	10
三、误差的传递 间接测量结果的不确定度合成	11
III 有效数字及其运算	13
一、有效数字的概念	13
二、正确书写有效数字	13
三、有效数字的运算规则	13
IV 实验数据处理	16
一、列表法表达实验数据和结果	16
二、图示和图解法处理实验数据	18
三、最小二乘法求实验的直线方程	21
四、逐差法处理实验数据	23
附录 1 物理实验中常用的仪器误差限	26
附录 2 计算器计算平均值和标准偏差的操作方法	27
附录 3 用计算器作一元线性回归计算的操作方法	27

实 验 部 分

实验 1 长度的测量与数据处理练习	29
实验 2 物体密度的测定	38
实验 3 液体表面张力的测定	46

实验 4	用三线扭摆法测定物体的转动惯量	51
实验 5	弦线上的振动研究(课题实验)	57
实验 6	利用气垫导轨研究物体的运动	59
6-1	速度和加速度的测定	63
6-2	验证牛顿第二定律	67
6-3	物体的碰撞(课题实验)	69
实验 7	碰撞打靶(课题实验)	71
实验 8	弹簧振子周期公式的研究	73
实验 9	材料弹性模量的测定	77
9-1	静态拉伸法测弹性模量	77
9-2	动力学法测定金属的弹性模量	83
实验 10	受迫振动的研究	87
实验 11	液体比热容的测定	95
实验 12	电冰箱制冷状态的研究	99
实验 13	电磁学实验中的常用基本仪器的使用	105
13-1	滑线电阻的分压特性研究	113
13-2	滑线电阻的制流特性研究	115
实验 14	补偿法和电位差计	117
实验 15	惠斯通电桥的原理和应用	124
实验 16	金属电阻温度系数的测定	130
实验 17	用模拟法测绘静电场	136
实验 18	灵敏电流计与电磁阻尼	142
实验 19	电磁聚焦与电子比荷的测定	151
实验 20	示波器的使用	160
20-1	模拟示波器	160
20-2	数字存储示波器	174
实验 21	霍尔效应的研究	191
实验 22	利用霍尔效应测磁场	198
实验 23	薄透镜成像及其焦距的测定	203
实验 24	牛顿环和劈尖干涉实验	210
实验 25	分光计及其应用	216
25-1	分光计的调节和棱镜材料折射率的测定	216
25-2	用分光计进行光谱定性分析(课题实验)	223
25-3	光栅光谱和光栅常数的测定(课题实验)	225
实验 26	迈克耳孙干涉仪	227

26-1 光的干涉基本现象和单色光波长的测定	229
26-2 光场的时间相干性研究(课题实验)	236
实验 27 光的偏振和旋光(课题实验)	239
实验 28 密立根油滴法测定电子电荷	241
实验 29 光电效应和普朗克常量的测定	248
实验 30 金属电子逸出功的测定	255
实验 31 夫兰克-赫兹实验	261
实验 32 激光多普勒效应(课题实验)	266

绪 论

一、物理实验课程的任务

物理学是自然科学中最重要、最活跃的带头学科之一。物理学理论和实验的发展哺育着近代高新技术的成长和发展,物理实验的思想、方法、技术和装置常常是自然科学研究和工程技术发展的生长点。

物理实验课程是独立设置的大学生科学实验课程,是学生受到系统的实验思想和实验技能训练的开端,在培养学生的基本科学实验能力和素质等方面具有特殊的重要作用。它的具体任务是:

1. 巩固、扩展、加深学生的物理学知识。通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,巩固和应用物理学原理。

2. 培养与提高学生的科学实验能力。包括通过阅读实验教材和查阅参考资料,正确理解实验内容;借助教材或仪器说明书,正确使用仪器;运用物理学理论对实验现象进行合理分析;正确记录、分析和处理实验数据,撰写合格的实验报告;独立完成适当的综合设计性实验任务等能力。

3. 培养与提高学生的科学实验素养。包括理论联系实际、实事求是的科学作风;严肃认真、一丝不苟的工作态度;勤奋钻研、积极创新的探索精神以及遵守纪律、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课程的主要教学环节

一般说科学实验的全过程包括:① 确立课题;② 收集资料;③ 制订方案;④ 策划实验程序;⑤ 选择与准备仪器;⑥ 实验操作,包括实验、观测、记录、分析、再实验;⑦ 撰写论文报告。物理实验课程将在预备实验和基础实验教学中着重对学生进行后两项的训练,在课题实验教学中,则将适当进行包括科学实验全过程的基本训练。物理实验课程具体分为三个主要教学环节:

1. 实验预习

仔细阅读实验教材或有关资料,明白实验的目的要求、原理和方法,初步了解有关测量仪器的主要性能、使用方法和注意事项。

如果是课题实验或设计性实验内容,需制定初步实验方案,提出对仪器设备的要求。

2. 实验操作

实验时应遵守实验室规章制度,犹如一个科学工作者那样,井井有条地布置仪器,安全操作,细心观察实验现象,认真钻研和探索实验中的问题.不要期望实验工作始终一帆风顺,尤其是课题实验.在遇到问题时,应看作是学习的良机,冷静地分析和处理,直到修改甚至推翻你的实验方案.仪器发生故障时在教师指导下学习排除故障.实验中要正确记录数据(注意单位和有效数字位数),如发现数据有疑问时,可以重新实验,并对原来数据标上特殊符号以备查考.未重新测量绝不允许修改实验数据.

3. 实验总结

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明扼要的形式,将实验结果完整而又真实地表达出来,这也是进行科学实验素质培养的必要内容之一.

实验报告要求文字通顺,字迹端正,数据齐全,图表规范,结果表示正确(包括误差),分析讨论认真.

实验报告的内容包括下列几部分:

1. 实验名称;
2. 实验目的;
3. 仪器设备;
4. 简要原理(或定律)及计算公式(光学、电磁学等实验,还有光路图或电路图);
5. 实验简要步骤和实验数据记录;
6. 数据处理(包括计算、图表、误差分析等);
7. 实验结果(结论);
8. 分析讨论.

对于课题实验,则应对实验原理的阐述、实验公式的推导、电路或光路的设计、操作步骤的安排、仪器设备的选择、数据结果的分析等有比较详尽的探讨.

三、学生物理实验课须知

1. 物理实验课前应充分做好预习工作,真正了解本次实验“做什么,怎样做,为什么这样做”,并设计好数据表格.教师上课时将检查学生的预习情况,凡未预习或预习不充分的学生,教师可责令其充分预习后再进行实验.

2. 实验时应严肃认真,养成严谨求实的工作作风,不得伪造实验数据或相互抄袭实验结果.

3. 实验课应注意安全,爱护仪器,如有遗失或损坏仪器等情况发生,请及时向指导教师报告,教师将酌情按有关规章处理.实验结束应将仪器、桌凳等整理后再离开实验室.

4. 严肃课堂纪律.实验课不得无故缺席、迟到、早退.

5. 实验课后一周内完成实验报告.

6. 物理实验课程的总成绩由平时成绩与理论统考或操作考核成绩以及课程论文综合评定.每学期平时成绩占总分 60% 以上,平时成绩由实验预习、实验操作、实验报告综合评定.

测量误差与数据处理

在科学实验的观测中,由于实验方法、实验设备、实验条件等种种因素的局限,测量结果总存在着误差.进行误差分析对科学实验有两方面的指导作用:其一是通过分析误差产生的原因及其具有的性质,采用合理的方法减少或消除误差的影响,并对测量结果作出合理的评价;其二是优化实验设计,根据实验结果的误差要求,选择测量方法、测量器具和测量条件,以最经济的方式,获得合理的实验结果.因此,进行数据处理和误差分析是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作.

本篇仅介绍误差分析和实验数据处理的初步知识,给出一些结论和简化的计算方法.这些知识在物理实验课程学习和今后科学研究工作中都会用到,希望同学们认真学习,学会正确地进行实验数据处理.

I 测量与测量误差

一、直接测量与间接测量

物理实验是以测量为基础的.所谓测量是以确定被测对象量值为目的的全部操作.测量可分为两类:一类是用计量仪器直接与待测量进行比较的操作,称为直接测量;另一类是对几个直接测量结果按一定的函数关系求出待测量的操作,称为间接测量.例如,用单摆测定重力加速度,可以通过对摆长和周期的直接测量,根据周期公式算出.因为许多物理量难以用计量仪器实现直接测量,或者直接测量的精度不高,所以物理实验中大量的测量是间接测量.

二、测量误差

由于实验条件、实验方法等限制,任何测量都不会绝对精确,即测量结果与

被测量真值^①之间总存在着偏差,这就是测量误差.测量误差可以用绝对误差^②表示,也可以用相对误差表示.

绝对误差是一个有量纲的代数值,它表示测量值偏离真值的程度.相对误差反映了测量的准确程度,是一个无量纲的量,通常用百分数表示.

三、测量误差的分类

根据测量误差的来源和性质,一般可将其分为系统误差、随机误差和粗大误差三类.通常前两类误差是混杂在一起出现的.

1. 系统误差

系统误差指在对同一被测量的多次测量过程中,保持恒定或以可预知方式变化的测量误差分量.系统误差的来源有以下几方面:

- (1) 方法误差 由于实验方法本身或测量原理的近似性导致的.
- (2) 环境误差 由于实际环境条件与规定条件不一致引起的.
- (3) 人员误差 由于测量人员主观因素和操作技术所引入的.
- (4) 仪器误差 由于仪器本身的不完善而产生的.它包括仪器的零值误差、仪器的示值误差、仪器的机构误差和测量附件误差等.

系统误差按掌握程度分类^③,可分为已定系统误差和未定系统误差.已定系统误差的符号和绝对值可以确定,一般在实验中通过修正测量数据和采用适当的测量方法(如交换法、补偿法、替换法、异号法等)予以消除.未定系统误差的符号和绝对值未能确定,实验中常用估计误差限的方法得出(这与后面引出的B类不确定度有大致对应关系).

系统误差虽有其规律性,但要准确找出其误差的原因却无一定的规律可循.减小和消除系统误差是比较复杂的问题,也是培养学生科学实验能力的一个重要方面.实验者应通过方案的选择、参数的设计、器具的校准、条件的控制和对测量结果的修正等方式,尽量消除已定系统误差,减小未定系统误差.

2. 随机误差

在极力消除或修正一切明显的系统误差之后,在同一条件下多次测量同一

① 所谓真值是指被测量的真实大小,它是一个理想的概念.从测量角度讲,真值是不可能确切获知的.实用上,真值常用约定真值来代替.约定真值是指为了给定的目的,可以替代真值的量值.通常用已修正过的算术平均值、满足规定准确度的量值(实际值)、计量标准器所复现的量值作为约定真值.

② 测量结果与被测量(约定)真值之差称为绝对误差,测量的绝对误差与被测量(约定)真值之比为相对误差.

③ 系统误差按数值特征分类,可分为定值系统误差和变值系统误差(线性变化的系统误差、周期变化的系统误差和复杂规律变化的系统误差等).

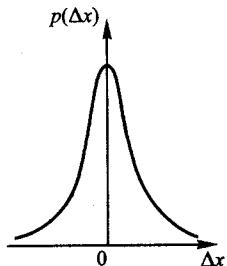
物理量时,测量结果仍会出现一些无规律的起伏.这种在同一量的多次测量过程中,以不可预知的方式变化的测量误差分量称为**随机误差**.随机误差是由实验中许多难以确定的因素(如温度、湿度、电源电压的起伏、空气流动、震动等的影响)引起的.从表面上看,似乎杂乱无章,但若测量次数足够多,随机误差就显示出明显的统计分布规律.

3. 粗大误差(过失误差)

粗大误差指明显超出规定条件下预期的误差.粗大误差是在测量过程中某些突然发生的不正常因素,如较强的外界干扰、测量条件的意外变化、测量者的疏忽大意等造成.它是统计的异常值,属于失控或人为的错误,应尽量避免.如果在测量结果中出现粗大误差则应按一定规则剔除.

四、随机误差的统计特征

实践证明,等精度测量中^①,当测量次数 n 很大时(理论上是 $n \rightarrow \infty$),测量列^②的随机误差多接近于正态分布(即高斯分布).正态分布曲线如图 1 所示.图中横坐标表示随机误差 Δx ,纵坐标表示对应的误差出现的概率密度 $p(\Delta x)$.服从正态分布的随机误差具有如下统计特征:



(1) **单峰性** 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大.

(2) **有界性** 绝对值很大的误差出现的概率很小,甚至趋近于零.

(3) **对称性** 绝对值相等的正负误差出现的概率相同.

图 1 正态分布曲线

(4) **抵偿性** 随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值越来越趋近于零.也就是说,若测量误差只有随机误差分量,则随着测量次数的增加,测量列的算术平均值越来越趋近于真值.因此增加测量次数,可以减小随机误差影响.抵偿性是随机误差最本质的特征,原则上凡具有抵偿性的误差都可以按随机误差的方法处理.

实际测量总是在有限次内进行,如果测量次数 $n \leq 20$,误差分布明显偏离正态分布而呈现 t 分布形式. t 分布函数已算成数表,可在数学手册中查到, t 分布曲线如图 2 所示.数理统计中可以证明,当 $n \rightarrow \infty$ 时, t 分布趋近于正态分布(图 2 中的虚线对应于正态分布曲线).由图可见, t 分布比正态分布曲线变低变宽

① 等精度测量是指在相同条件下进行的多次测量.物理实验中大多采用等精度测量.

② 测量列是指在等精度测量中所得的一组测量值.

了; n 越小, t 分布越偏离正态分布。

在进行随机误差的估计时, 算术平均值和标准偏差是两个重要的数字特征量。设在某一物理量的等精度测量中, 测量列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$

算术平均值——测量结果的最佳估计值

最小二乘法原理可以证明, 测量结果的最佳估计值是该测量列的算术平均值 $\bar{x}$ ①

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

标准偏差——随机误差的离散程度

根据误差理论, 标准偏差 S ②为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n-1}} \quad (\text{贝塞尔公式}) \quad (2)$$

它表示测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 及其随机误差的离散程度。 S 大, 测量值 x_i 分散; S 小, 测量值 x_i 密集。

$\bar{x}$ 是被测量的最佳估计值, 但它与真值之间仍存在误差。由随机误差的抵偿性可知, $\bar{x}$ 的误差理应比任何一次单次测量值的误差更小些。

用平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$ 表示测量列算术平均值的随机误差的大小程度, 数理统计理论可以证明

$$S_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} S \quad (3)$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

由上式可知, $S_{\bar{x}}$ 随着测量次数的增加而减小, 似乎 n 越大, 算术平均值越接近于真值。实际上, 在 $n > 10$ 以后, $S_{\bar{x}}$ 的变化相当缓慢, 另外测量精度主要还取决于仪器的精度、测量方法、环境和测量者等因素, 因此在实际测量中, 单纯地增加测量次数是没有必要的。在本课程中一般取 6~10 次。

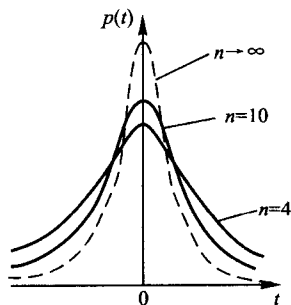


图2 t 分布曲线

①② $\bar{x}$ 和 S 的数值可以用具有统计功能的计算器计算, 见附录 2。

II 测量结果的表示与不确定度

一、测量结果的表达形式与不确定度

一般情况下,科学实验中的测量结果应该体现出测量值和与之对应的测量误差的评定两个方面。

按照我国国家计量技术规范(JJG1027-91),测量结果的最终表达形式为

$$w = W \pm U \quad (5)$$

式中, w 为被测量, W 为测量值(不含应修正的系统误差), U 为总不确定度,它们具有相同的单位。

不确定度是对被测量的真值所处量值范围的评定,即是对测量误差的一种评定方式。不确定度是一个恒为正值,它表示由于存在测量误差,导致被测量的真值不能确定的程度。应当指出,不确定度具有概率的概念,式(5)表示被测量的真值位于区间 $[W-U, W+U]$ 内的概率为 $P=0.95$ ^①。

为了更直观地检查实验中测量结果的准确程度,有时还用相对不确定度 U_r 来评定,即

$$U_r = \frac{U}{W}$$

不确定度 U 及相对不确定度 U_r 只取1~2位有效数字,测量值 W 的末位数与不确定度 U 的所在位数对齐, W 与 U 的数量级、单位要相同。

由于误差来源很多,测量结果的不确定度一般包含几个分量,按其数值评定方法,不确定度可归并为两类:

A类分量:根据一系列测量值的统计分布进行估计,用标准偏差来表征,记作 U_A ;

B类分量:根据经验或其他信息进行估计,用非统计方法评定,记作 U_B 。

A、B两类不确定度与随机误差、系统误差不存在简单的对应关系。

不确定度的评定方法需要数理统计和误差处理的知识,对于大学低年级的

① 当测量结果的表达形式采用了不同于 $P=0.95$ 的概率时,在结果中应加以括号注明,例如:

$$w = W \pm U(P=0.68)$$

$$w = W \pm U(P=0.99)$$

② 有时待测量有理论值或公认值 W_0 ,用百分误差来表示测量的优劣。 $E = \frac{|W_0 - W|}{W_0} \times 100\%$