大学物理实验学习指导与题解

DAXUE WULI SHIYAN XUEXI ZHIDAO YU TIJIE

●主　编　牟其伍

●副主编　刘燕玲　吴世春　赵　艳

●主　审　向　红

重庆大学出版社

http://www.cqup.com.cn

大学物理实验学习指导与题解

主　编　牟其伍
副主编　刘燕玲　吴世春　赵　艳
主　审　向　红

重庆大学出版社

内 容 提 要

全书共分为18个部分,其中有如何学好物理实验课程,实验误差及处理、试卷解答和15个实验。全书突出指导与题解这个主题,每个实验都有背景知识、例题、填空题、选择题或计算题、设计题并逐个作了解答。本书中所有题都是老师们经过长期的实验教学凝练出来的,具有很强的针对性和指导意义。有些内容还考虑到各大类专业知识衔接与应用,考虑到学生毕业后工作实践的需求,因此,此书对从事物理实验教学的老师和工程技术人员也有参考、借鉴意义。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验学习指导与题解/牟其伍主编.—重庆:重庆大学出版社,2013.2

高等学校实验课系列教材

ISBN 978-7-5624-7228-5

Ⅰ.①大… Ⅱ.①牟… Ⅲ.①物理学—实验—高等学校—教学参考资料 Ⅳ.①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第026167号

大学物理实验学习指导与题解

主 编 牟其伍

副主编 刘燕玲 吴世春 赵 艳

主 审 向 红

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:杨粮菊 版式设计:杨粮菊

责任校对:陈 力 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:http://www.cqup.com.cn

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

自贡兴华印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:262千

2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-7228-5 定价:24.00元

大学物理实验学习指导与题解编委

（以姓氏笔画为序）

叶　青　牟其伍　许世杰　刘燕玲　李　田　向　黎
向　红　何光宏　吴世春　吴晓波　吴　芳　汪　涛
陈　莹　欧小锋　赵　艳　赵及则　韩　忠　彭　华
戴心锐

前言

近年来出版的大学物理实验教材种类繁多，但是能引导学生自学和具有一定指导意义的实验教材却不多见。学生们在有限的时间内匆忙地完成一个实验项目，对实验中涉及的理论深度、历史背景和应用前景了解甚少；对实验中的重点不清晰，难点无从解答。针对这种情况，本书与学生所要完成的实验项目一一对应，对每个实验项目，通过对重点、难点举例并进行解析，精选提炼出具有一定深度、难度的习题，进行填空、选择、设计、操作、计算练习、解答。其内容广泛、深入、针对性强，对学生在学习和实验中遇到的疑难问题逐一进行解答，使学生获得事半功倍的效果。

本书由18个部分组成，其中“测量误差、不确定度与数据处理”由吴世春编写；“固体杨氏弹性模量的测定”由陈莹编写；“用直流电桥测量电阻温度系数”由戴心锐编写；“铁磁材料磁化曲线与磁滞回线的测绘”和“大学物理实验试卷练习”由刘燕玲编写；“电子示波器的使用”由何光宏、欧小锋编写；“密立根油滴法测定基本电荷”由李田编写；“如何学好大学物理实验课程和光电效应法测定普朗克常量”由牟其伍编写；“分光计的调整与玻璃三棱镜的折射率的测量”由向红、叶青编写；“等厚干涉—劈尖和牛顿环”由韩忠、牟其伍编写；“迈克尔干涉仪”由王涛编写；“全息摄影”由彭华编写；“传感器系列实验”由向黎、许世杰编写；“声波衍射与液体中声速的测定”由赵及则编写；“三用电表的设计、制作与校正”由吴晓波编写；“显微镜、望远镜的设计与组装”由吴芳编写；“夫兰克—赫兹实验”由赵艳编写。王蜀霞、刘高斌、胡华、曾代敏、丛杨、马全

之、王小勇、唐红兵、陈渝等也参与了相关工作,特表谢意。

本书是20余位老师经数年的实验教学(理论知识和教学经验)的凝结,经过多届学生使用修改而成的。它不仅可为各理工科学生提供学习指导,也可为各院校从事大学物理实验教学的教师们提供借鉴与参考。

目录

1

如何学好大学物理实验课程

(1)课程的重要性

物理学经历了几百年的发展历史,对人类文明史的发展作出了巨大的贡献。从牛顿力学的建立与完善到人类诞生出第一台蒸汽机;从麦克斯韦电磁理论的建立到电灯、电话、发电机、电动机的诞生;从玻尔的原子理论,爱因斯坦的狭义相对论、广义相对论的建立到核能的应用、新材料的迅猛发展、信息时代的到来等,人类科技的发展因此经历了一个辉煌的历程。在这个过程中涌现出了一大批物理学家,如:牛顿、麦克斯韦、居里夫人、爱因斯坦、玻尔、霍金等。在当今众多的著名物理学家中也不乏有中华血统的有影响的物理学家,如:杨振宁、李政道、丁肇中等。丁肇中在1976年接受诺贝尔物理学奖时说:“自然科学的理论不能离开实验的基础,特别是物理学,它是从实验中产生的,我希望由于我这次得奖能够唤起在发展中国家学生的兴趣而注意实验工作的价值”。

物理学是一门实验科学,没有实验的基础,没有实验对理论的证明,物理学的发展是不可思议的。物理实验课是一门量大面广的公共基础课,它以16余个实验项目为基本,涉及各个领域、各个层面向学生传授物理知识,从动手能力的培养、科学素质的培养到创新思维的建立,激发出学生强烈的好奇心和求知欲,为后续专业知识的学习打下了坚实的基础,为学生今后的深造、工作提供更多的知识、更好的技能与创新能力。

(2)任务

这门课要完成15个实验和误差理论知识，共计16次实验课，每次3学时，共计48学时。大家在学习的过程中，完成16个实验课的同时，要完成16份报告（含绪论中误差理论），在期中每个同学要接受一次操作考试，期末要完成一次笔试。这门课学完后的成绩由3部分组成，即平时成绩（根据16次报告的评分）占40%，操作考试占10%，笔试成绩占50%，总计100分。

(3)学好大学物理实验的4个环节

1)预习

在做每一个实验前，大家通过在网上、图书馆查阅相关资料，认真阅读教材上将做实验的内容，弄清将做的实验项目的目的、原理、要测试的实验数据，了解实验仪器的测试原理、使用方法及注意事项，做好将做实验的全部准备事项，做到心中有数，掌握完成实验的主动性，达到事半功倍的效果。

2)完成实验

进入实验后，认真听取老师讲解，熟悉仪器及实验的操作步骤，仔细观察实验的现象，准确无误地按要求测试实验数据并将数据记录入表格之中。在进行实验的过程中，是培养大家动手能力，观察与思考能力的最佳时机，你在这个过程中可能会迸发出新思维，新想法，在潜移默化中锻炼出创新能力，综合解决问题的能力。

3)完成实验报告

实验报告对完成所做实验的总结，对实验数据进行处理，讨论并得出结论的重要环节，我们的实验报告分为：实验目的、实验原理、数据记录、数据处理、结果讨论5大部分，不能缺失每个部分的内容。应该在认真总结、思考、准确计算的基础上完成实验报告并附上原始实验

数据记录和用坐标纸画出的相关图。在每次完成实验报告后,经老师批阅评定成绩后认真保存,课程结束后,共计16份报告,缺一不可,装订成册后上交给老师,作为平时成绩的依据。实验报告的样本见附录。

4)复习与考试

①操作考试　在这门课程学习的期间将进行一次操作考试,检查学生的动手能力情况。

②笔试　实验考试是检查学生对这门课学习掌握情况的测试,学生们在考试复习期间,加深对每个实验的理解融会贯通。这对学生综合知识的学习,操作动手能力和处理问题的综合能力培养有极大的好处,学生会受益匪浅,收获感受颇多。

2

测量的不确定度和数据处理

(1)实验背景

统计学家与测量学家一直在寻找合适的方法来正确表达测量的结果,譬如以前常用“误差”概念来表示测量结果。国内外对测量结果的表述、计算规则都不尽统一。1992 年国际计量大会上,由国际标准化组织(ISO)起草制定了具有国际指导性的《测量不确定度表示指南》(简称 GUM),1993 年以 7 个国际组织的名义联合发布了这个指南,这些组织包括国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)、国际计量局(BIPM)、国际法制计量组织(OIML)、国际理论物理与应用物理联合会(IUPAP)、国际理论化学与应用化学联合会(IUPAC)等。我国计量标准部门随后也明确要求采用不确定度来表示测量结果,并在 JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》中定义测量不确定度为:表征合理的赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数。在测量结果的完整表示中,应该包括测量不确定度。测量不确定度用标准偏差表示时称为标准不确定度,如用说明了置信水准的区间的半宽度的表示方法则成为扩展不确定度。本书根据我国高校物理实验教学的实际情况讲述测量不确定度的基本原理与具体应用。

物理实验离不开物理量的测量,由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,对一个物理量的测量不可能是无限精确的,即测量中的误差是不可避免的。没有测量误差知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度就不能正确表达和评

价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。由此可知不确定度和数据处理等基本知识在整个实验过程中占有非常重要的地位。

(2)重点

1)直接测量值的A类、B类不确定度及合成不确定度的计算

①A类不确定度是指可以用统计方法计算的不确定度分量,按贝塞尔法计算公式为:

$$u_A = t_p \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K}(x_i - \bar{x})^2}{K(K-1)}} \tag{2.1}$$

式中 t_p——修正因子;

K——测量次数;

$\bar{x}$——测量值 x_i 的算术平均值。

t_p 因子与测量次数 K 及置信概率 p 的关系见表2.1。

表2.1 t_p 与测量次数 K 及置信概率 p 的关系

p \ t_p \ K	3	4	5	6	7	8	9	10
0.68	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06
0.95	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26
0.99	9.92	5.84	4.60	4.03	3.71	3.50	3.36	3.25

②B类不确定度是指用非统计方法获得的不确定度分量,在仅涉及仪器误差 $\Delta_{仪}$ 与估计误差 $\Delta_{估}$ 时,可以按下式计算:

$$u_B = \sqrt{\Delta_{仪}^2 + \Delta_{估}^2} \tag{2.2}$$

③合成不确定度的计算公式为:

$$u_{\bar{x}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{2.3}$$

④测量结果的完整表达:

$$x = (\bar{x} \pm u_{\bar{x}})\ 单位 \qquad (p = 0.95) \tag{2.4}$$

式中　$p=0.95$，表示置信概率为95%。

2）常用数据处理方法

①列表法

常用于数据记录及大量同样的数据计算时，其特点是简单明确地表示出物理量之间的对应关系，便于及时检查结果，发现问题。列表的内容包括：表格的名称，物理量的代号及单位，测量的数据，数据要用测量值的有效数字。

②作图法

用坐标纸上的曲线表示物理量之间对应的关系，其特点是直观地表示数据之间的关系；同时，可以从图上利用内插法和外推法读出没有测量的点的数据。

作图的步骤及规则如下：

a. 作图一定要用坐标纸，画图不能太小，否则不能保证精度；

b. 横轴为自变量，纵轴为因变量，轴上标明物理量的代号及单位；

c. 用有效数字整数定标；

d. 用＋、⊙、⊡等符号描点，不用圆点，不同曲线用不同符号；

e. 曲线分为趋势线和校正曲线，应注明其名称；

f. 写出图名及备注。

对于直线，需要求出直线的截距和斜率，截距可以从图上直接读出，读取数据要按有效数字读出。求斜率时从直线上读取两点的坐标值计算得出斜率，注意取点不应使用直接测量得到的点，应从作出的直线上去取点。

③逐差法

自变量与因变量作等差变化的，可采用逐差法。逐差法计算简便，可充分利用已测的数据对数据取平均，可减小系统误差和扩大测量范围。

逐差法的方法如下：测得数据 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_k$，共 k 个（偶数个），把这 $k=2n$ 个数据分成两组，取两组数据对应项之差，再求平均，得相邻数据间距离的值为：

$$\bar{x}=\frac{1}{n\times n}[(x_{n+1}-x_1)+\cdots+(x_{2n}-x_n)] \tag{2.5}$$

④最小二乘法

最小二乘法能从一组等精度的测量值中确定其函数关系，其原理是：测量值的拟合曲线和各测量值之偏差的平方和为最小。

线性拟合方法如下：设两物理量之间存在函数关系 $y = mx + b$，测得数据为 $(x_i, y_i, i = 1, 2, 3, \cdots, k)$

可以求得：

$$\left.\begin{aligned} m &= \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \overline{xy}}{(\bar{x})^2 - \overline{x^2}} \\ b &= \bar{y} - m\bar{x} \end{aligned}\right\} \tag{2.6}$$

式中 $\bar{x} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i, \bar{y} = \frac{1}{k} = \sum_{i=1}^{k} y_i, \overline{x^2} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i^2, \overline{xy} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} x_i y_i$。

y 的标准误差：

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}(y_i - mx_i - b)^2}{k - 2}} \tag{2.7}$$

斜率 m 值的标准误差：

$$\sigma_m = \frac{\sigma_y}{\sqrt{k[\overline{x^2} - (\bar{x})^2]}} \tag{2.8}$$

截距 b 值的标准误差：

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{\overline{x^2}}}{\sqrt{k[\overline{x^2} - (\bar{x})^2]}} \cdot \sigma_y \tag{2.9}$$

相关系数 γ 为：

$$\gamma = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{[\overline{x^2} - (\bar{x})^2] \cdot [\overline{y^2} - (\bar{y})^2]}} \tag{2.10}$$

(3)难点

1)间接测量值不确定度的计算及其结果的表示

①间接测量值的计算：

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots) \tag{2.11}$$

②间接测量值的不确定度

设 $U_x, U_y, U_z, \cdots$ 分别为 $x, y, z, \cdots$ 等直接测量值的不确定度，则间接测量值的绝对不确定

度为:

$$U_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \cdots} \tag{2.12}$$

间接测量值的相对不确定度为:

$$E_N = \frac{U_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \cdots} \tag{2.13}$$

③间接测量值的完整表达式:

$$N = (\overline{N} \pm U_N)\ \text{单位} \quad (p = 0.95) \tag{2.14}$$

式中 $p=0.95$,表示置信概率为95%。

2)不确定度均分原理

在不确定度进行分解时,将间接测量值的总不确定度均匀分配,如上面式(2.12)中,如果仅有 x,y,z 三个直接测量值,则将总量 U_N 均匀分配给 x,y,z。

(4)例题

例题1 用螺旋测微仪测量一钢珠直径,得到数据如下,已知仪器误差 $\Delta_{仪}=0.004$ mm,求钢珠直径的测量结果,要求完整表达其结果(置信概率取95%)。

测量次数	1	2	3	4	5	6
直径 d/mm	3.302	3.304	3.301	3.302	3.301	3.300

解:

①直径的算术平均值

$$\overline{d} = \frac{\sum_{i=1}^{6} d_i}{6} = 3.302\ (\text{mm})$$

②直径的A类不确定度:根据 $p=95\%$ 及测量次数 $n=6$ 次,查出 $t_p=2.57$

$$u_A = t_p\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i-\overline{d})^2}{n(n-1)}} = 2.57\times 0.000\,56 = 0.001\,43\ (\text{mm}) \approx 0.001\,5\ (\text{mm})$$

③直径的 B 类不确定度

$$u_B = \sqrt{\Delta_{仪}^2 + \Delta_{估}^2} = \sqrt{0.004^2 + 0.001^2} = 0.004\ 12\ (\text{mm}) \approx 0.004\ 2\ (\text{mm})$$

④直径的总不确定度

$$u_{\bar{d}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.001\ 5^2 + 0.004\ 2^2} = 0.004\ 5\ (\text{mm}) \approx 0.005\ (\text{mm})$$

⑤测量结果 $d = \bar{d} \pm u_{\bar{d}} = (3.302 \pm 0.005)\text{mm} \quad (p = 95\%)$

注:此题中不确定度的中间结果保留了 2 位有效数字,而最后结果保留了 1 位有效数字。

例题 2 测出一个铅圆柱体的直径 $d = (2.04 \pm 0.01)\text{cm}$,高度 $h = (14.20 \pm 0.02)\text{cm}$,质量 $m = (519.18 \pm 0.05) \times 10^{-3}\text{kg}$,置信概率皆为 95%,试求出铅圆柱密度 ρ 的测量结果,并完整表达(要求保留一位可疑数字)。

解:

①铅圆柱密度的算术平均值

$$\bar{\rho} = \frac{4\bar{m}}{\pi(\bar{d})^2\bar{h}} = \frac{4 \times 519.18 \times 10^{-3}}{3.14 \times 0.020\ 4^2 \times 0.142} = 11\ 191.79\ (\text{kg/m}^3)$$

②密度的不确定度

$$E_{\bar{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{m}}u_{\bar{m}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\bar{d}}u_{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\bar{h}}u_{\bar{h}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.05}{519.18}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.01}{2.04}\right)^2 + \left(\frac{0.02}{14.20}\right)^2} = 0.009\ 9$$

$$u_{\bar{\rho}} = E_{\bar{\rho}} \times \bar{\rho} = 0.009\ 9 \times 11\ 191.79(\text{kg/m}^3) = 111 \approx 2 \times 10^2(\text{kg/m}^3)$$

③密度的完整表达式

$$\rho = \bar{\rho} \pm u_{\bar{\rho}} = (1.12 \pm 0.02) \times 10^4\ \text{kg/m}^3 \quad (p = 95\%)$$

例题 3 一圆柱体,用 50 分度游标卡尺测量其直径和高度各 5 次,数据如下表,求其侧面积的测量结果,要求完整表达(置信概率取为 95%)。

测量次数	1	2	3	4	5
d/mm	20.42	20.34	20.40	20.46	20.44
h/mm	41.20	41.22	41.32	41.28	41.12

解:

①计算直径的算术平均值

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{5} d_i}{5} = 20.412\ (\text{mm})$$

②直径的 A 类不确定度：根据 $p=95\%$ 及测量次数查出 $t_p=2.78$

$$u_A = t_p\sigma_{\bar{d}} = t_p\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i-\bar{d})^2}{n(n-1)}} = 2.78\times0.020\,6 = 0.058\ (\text{mm})$$

③直径的 B 类不确定度 $u_B=\sqrt{\Delta_{仪}^2+\Delta_{估}^2}=\sqrt{0.02^2+0.02^2}=0.029\ (\text{mm})$

④直径的总不确定度

$$u_{\bar{d}} = \sqrt{u_A^2+u_B^2} = \sqrt{0.058^2+0.029^2} = 0.065\ (\text{mm})$$

⑤直径的测量结果 $d=\bar{d}\pm u_{\bar{d}}=(20.412\pm0.065)\,\text{mm}\quad(p=95\%)$

⑥计算高度的算术平均值

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{5}h_i}{5} = 41.228\ (\text{mm})$$

⑦高度的 A 类不确定度

$$u_A = t_p\sigma_{\bar{h}} = t_p\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i-\bar{h})^2}{n(n-1)}} = 2.78\times0.034\,4 = 0.096\ (\text{mm})$$

⑧高度的 B 类不确定度 $u_B=\sqrt{\Delta_{仪}^2+\Delta_{估}^2}=\sqrt{0.02^2+0.02^2}=0.029\ (\text{mm})$

⑨高度的总不确定度

$$u_h = \sqrt{u_A^2+u_B^2} = \sqrt{0.096^2+0.029^2} = 0.10\ (\text{mm})$$

⑩高度的测量结果 $h=\bar{h}\pm u_{\bar{h}}=(41.23\pm0.10)\,\text{mm}\quad(p=95\%)$

⑪计算侧面积的算术平均值

$$\bar{s} = \pi\overline{dh} = 3.141\,6\times20.412\times41.23 = 2\,643.929\ (\text{mm}^2)$$

⑫计算侧面积的不确定度

$$E_{\bar{s}} = \sqrt{\left(\frac{u_{\bar{d}}}{\bar{d}}\right)^2+\left(\frac{u_{\bar{h}}}{\bar{h}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.065}{20.412}\right)^2+\left(\frac{0.10}{41.23}\right)^2} = 0.004\,0$$

$$u_{\bar{s}} = E_{\bar{s}}\times\bar{s} = 2\,643.929\times0.004\,0 = 10.6\ (\text{mm}^2)$$

⑬侧面积的完整表达式

$$s = \bar{s}\pm u_{\bar{s}} = (2\,644\pm11)\,\text{mm}^2\quad(p=95\%)$$

或

$$s = \bar{s}\pm u_{\bar{s}} = (2.644\pm0.011)\times10^3\,\text{mm}^2\quad(p=95\%)$$