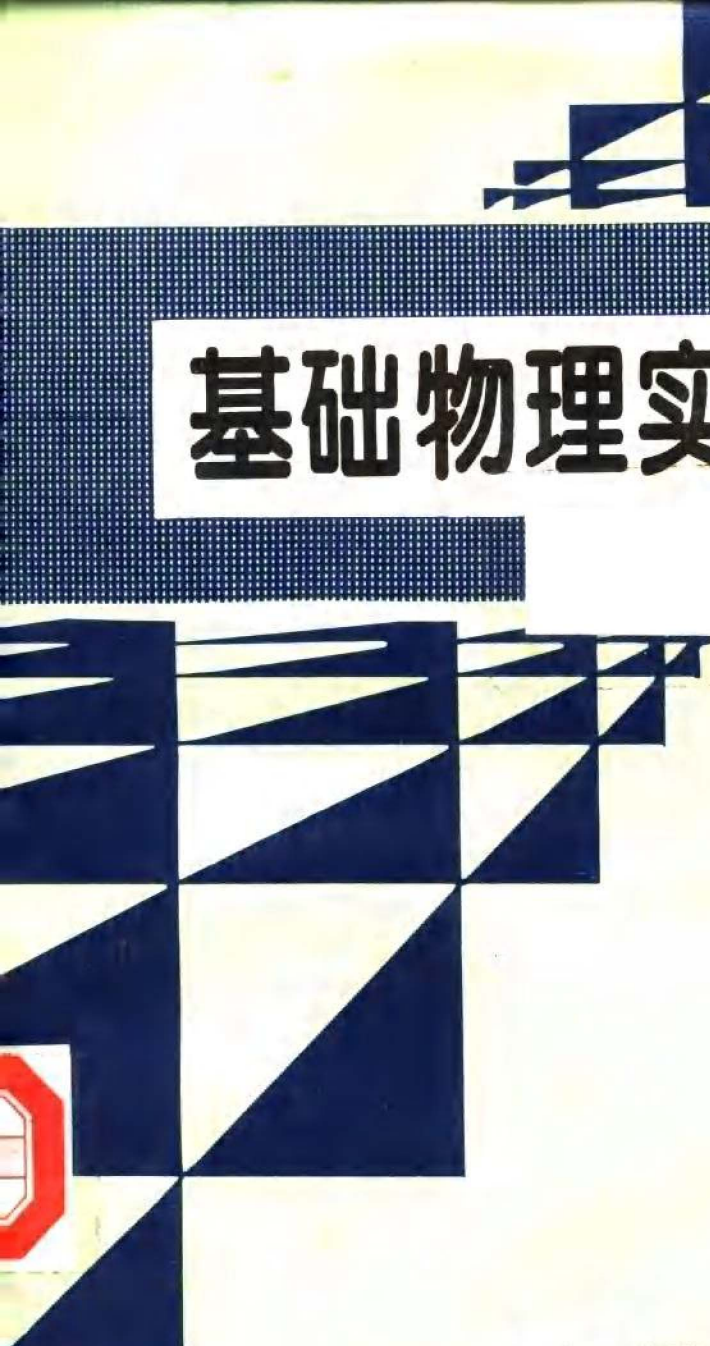




基础物理实验

邬铭新 等编
李朝荣

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以《高等学校工科物理实验课程教学基本要求》为指导编写而成。

全书共分八章,前三章介绍物理实验的基本理论与方法;第四章为预备实验;第五章和第六章为基本实验;第七章为设计性实验兼做考试实验;第八章为选作的综合性实验。实验课分阶段进行,逐步提高。

本书可供工科院校作教材,也可作为专科、成人教育的教学参考书。

图书在版编(CIP)数据

基础物理实验/邬铭新等编著 -北京:北京航空航天大学出版社,1998.8

ISBN 7-81012-783-7

I. 基… II. 邬… 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 (98) 第 16285 号

基 础 物 理 实 验

邬铭新 李朝荣 等编

责任编辑 郭维烈

责任校对 张韵秋

*

北京航空航天大学出版社出版发行

(北京市学院路 37 号 邮编: 100083, 发行部电话 62015720)

北京朝阳科普印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:12.25 字数:327 千字

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月第一次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81012-783-7/O · 042 定价:14.00 元

代 编 者 序

物理实验是高等工科院校中一门独立的基础课程。它的重要性在于:从小的方面讲,工程技术科学虽然有它自己的发展途径和规律,但它的基础从来离不开物理学和物理实验方法。最明显的例子如质量、长度、时间、电、光等测量的基本方法以及测量的误差和不确定度等,都是工程技术不可缺少的概念和经常使用的方法。从大的方面讲,每一新的工程技术的发展,基本上都来源于物理学的新发现。纵观科学历史的发展,我们可以了解到:物理学研究中的新突破,常转化为技术上的重大变革,继而发展成为新的生产力,推动整个社会的发展。这样的例子在科学史上是屡见不鲜的,所以,我们说,“科学技术是第一生产力”。法拉第发现了电磁感应定律,才有今天的电力;哈恩发现了原子核裂变,才有今天的核动力;现代无线电通信,是基于麦克斯韦电磁理论的预见和赫兹对于无线电波的成功实验;半导体的基础研究,导致晶体管的发明,才有今天的超大规模集成电路和超高速电子计算机,才有现代的信息科学技术,使人们进入一个信息时代;微波波谱学对分子结构的研究,导致微波激射器和激光器的发明,把光在许多科学技术和工程部门和应用,推向一个完全新的历史阶段;最近高温超导体的发现与研究,无疑地将对下一个世纪的科学技术发展以及它在工程技术领域的应用产生重大影响。这样五光十色、绚丽多彩的画卷,真是令人目不暇接。但追溯其起源,可能在外人看起来是一种单调的、枯燥的、反复重复的、屡经失败的物理研究的实验工作。由于发现电子而获得诺贝尔物理奖、在物理学领域曾作出多方面巨大贡献的英国物理学家J·J·汤姆逊,曾用“失败”两字概括了他一生的最大收获。在物理实验的工作中应当经常体会汤姆逊这句概括

了物理实验规律的话。

我们应当认识到,一门课程的实验与讲课是有根本区别的。讲课是传授间接知识,手段是教师解释一门教材的内容,而教材内容是死的。实验包括直接的实践,虽然实验原理也是死的,但实验是在一定条件下实现一个物理过程,找出它的规律,关键是用什么方法来实现这些“条件”。在讲课的过程中教师只是提出这些条件,可用极其简单的语言或公式表达出来,如当外力为零时,物体保持其静止状态或匀速直线运动。在物理实验中要实现“外力为零”的条件是非常复杂的,即使在气轨实验中也无法排除重力对物体的作用,我们知道,在实验中实现一个物理过程的条件,是要靠仪器的运用,而实验者对仪器性能的掌握和运用的技巧总带有不少随机因素。这些随机因素来源于实验者的观察与操作能力、经验以及仪器本身的性能和稳定性。要能熟练地处理这些随机因素以获得理想的实验结果,则要依赖实验者长期积累的经验 and 技巧。所以,学生在实验课程中不仅是学习实验原理、仪器的性能和操作方法,更重要的是要靠自己的积极思维,在实验中发现问题的,从教师的丰富经验中学习回答和处理这些问题的本领,从而积累自己做实验的能力,提高实验素养。

上面谈到的是物理实验的特点和在工科院校的教学计划中所占地位和重要性。工科院校学生学好《物理》和《物理实验》,获得做实验的基本技能和经验,对后继的工程技术课程的学习以至毕业后走向工作岗位从事技术工作,将起重要的作用。学生得益多少,取决于个人在学习中学会真正领会和得到的而不是教材中所能查到的东西。若能更深入一步,把物理思想和物理实验方法与工程技术内容融合起来,将极有利于他们应用物理学上的新成就在工程技术上进行革新与创造。

这本实验书,是根据《高等学校工科物理实验课程教学基本要求》,结合编者多年教学经验编写的。它是教学实践的产物,强调培养学生的独立工作能力和实验的素养,特别是在物理实验成绩的

考核方法上进行了改革。这种考试方法的改革,能够调动学生对实验的积极性和兴趣,培养学生独立思考、敢于动手的能力,这是值得向同行教师推荐的。这本书的其他方面的特点,编者已在《编者的话》中阐明,不在此代序中重复。

虞福春

注 虞福春同志为北京大学教授、博士生导师,历任北京大学物理系主任、国家教委物理教材编审委员会主任兼物理实验小组组长、《物理实验》杂志主编,专长于实验物理学。在原子物理、放射性、磁共振、原子核物理、加速器技术方面均有研究。特别是他发现了磁共振“化学位移”和“自旋耦合劈裂”,为磁共振应用于物质结构分析作出了奠基性的贡献。

编者的话

一、本着由高等学校工科物理课程教学指导委员会制定的“加强基础、重视应用、提高素质、培养能力、开拓创新”的教改精神,本版在保留《三阶段一考试》的模式下,对原教材的内容做了较大修改,主要改动有:

1. 将几个简单的实验归入《预备实验》。这几个实验由学生在课外完成,起填平补齐的作用。增加《综合性实验》一章,由几个内容、技术或手段比较新颖的综合实验组成,供部分优秀学生选做,为全面、深入地进行课程改革积累经验。

2. 重新编写了《实验误差与不确定度评定》一章,贯穿于各个实验中的数据处理也相应地做了改动。如何处理这部分内容,尚无一套为大家所公认的成熟的做法,我们现在的处理方法只是再一次的尝试。

3. 在《基本实验》第五、六章中增写了“操作思考题”,旨在改变部分学生只按教材机械操作、不注意观察实验现象、不分析原因、理论与实际脱节等不良实验习惯,调动他们的学习主动性。

4. 第五、六章的实验报告,对少数几个典型实验要求按实验总结的方式来完成,以培养学生书面表达和撰写科学论文的初步能力。其余大多数的实验预习报告,只要求回答“预习思考题”,个别还可采用口头报告的形式。希望这样做能改变部分学生不搞清原理而只会大段抄书的毛病,把功夫下到提高实验素质和能力上来。

二、国际不确定度工作组成员、中国计量科学院刘智敏研究员审阅了《实验误差与不确定度评定》一章,北京大学龚镇雄教授对本书的编纂给予了帮助和关心,提出了许多中肯的、宝贵的意见。特在此表示深深的谢意。

三、本版修改是在原教材的基础上进行的,对前次参与编写的同志们所做的贡献表示谢意。

四、本版修改工作由邬铭新、李朝荣主持,梁家惠修改第一、二、三章,苗明川修改第四章,邬铭新、李朝荣、苗明川等修改第五、六、七章,张士欣和梁家惠增写第八章。由于编者水平所限,定有不妥和错误之处,恳请批评指正。

五、书中凡标有“*”的部分,均为阅读教材,不作为本课程的基本要求。

编者

1997年10月于北航

前 言

一、开设物理实验课程的目的

物理实验课是对高等工科院校学生进行科学实验基本训练的基础课程。它将使学生得到系统实验方法和实验技能的训练,并了解科学实验的主要过程和基本方法,给今后的科学实验活动奠定初步基础。同时它的思想方法、数学方法及分析问题与解决问题的方法也将对学生的智力发展大有裨益。整个教学活动的进行也将有助于学生的作风、态度及品德的培养和素质的提高。

二、物理实验课程的任务^①

本课程的具体任务是:

1. 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,加深对物理学原理的理解。
2. 培养与提高学生的科学实验能力。其中包括:
 - (1) 能够自行阅读实验教材或资料,作好实验前的准备;
 - (2) 能够借助教材或仪器说明书正确使用常用仪器;
 - (3) 能够运用物理学理论对实验现象进行初步的分析判断;
 - (4) 能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果、撰写合格的实验报告;
 - (5) 能够完成简单的具有设计性内容的实验。
3. 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神,遵守纪律、团结协作和爱护公共财产的优良品德。

三、怎样做好物理实验

1. 做好实验要抓好三个环节

^①引自《高等学校工科本科物理实验教学基本要求》(1995年修订版)

(1) 预习 预习是做实验的准备工作。首先要明确本次实验要达到的目的,以此为出发点,弄明白实验所依据的理论、所采用的实验方法;搞清控制物理过程的关键及必要的实验条件;知道实验要进行的内容和实施的步骤,仪器如何选择、安排和调整;预料实验中可能出现的问题等。在此基础上写出实验预习报告。

预习的好坏至关重要,它将决定能否主动地、顺利地进行实验。

(2) 实验 在实验中要努力弄懂为何要这样安排实验、如此规定实验步骤的道理;要掌握正确的调整操作方法;要注意观察实验现象:什么现象说明调节已达到规定的要求?观察到的现象是否与预期的一致?这些现象说明什么问题?出现故障如何根据现象来分析产生的原因等;应正确地记录数据:正确地设计出数据表格,正确地判断数据的科学性,如实地、清楚地记录下全部原始实验数据和必要的环境条件、仪器型号与规格以及正确的有效数字等。

实验中要作到四多(多观察、多动手、多分析、多判断),三反对(反对侥幸心理、反对机械地操作、反对实验的盲目性)。

实验环节是物理实验的中心,内容非常丰富,是学生主动研究、积极探索的好时机,一堂课收获的大小,将取决于个人主观能动性的发挥程度。

(3) 实验报告 实验报告是实验成果的文字报道,是实验过程的总结。为了写好实验报告,应该做到:认真学习实验数据的处理方法;有根据地、具体地去进行误差分析;正确地表示出测量结果,并对结果作出合乎实际的说明和讨论;记录并分析实验中发生的现象;认真回答思考问题等。

书写出一份字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备、结果明确的报告是对大学生的起码要求,也是大学生应具备的基本能力。

2. 严格基本训练,培养动手能力

基础实验训练是成才的基本功。“不积水流,无以成江海”。严

格训练要从一点一滴、一招一式做起。例如基本仪器的正确使用,就涉及仪器位置的安放、连线与拆线的方法、开关顺序、调零、消视差等等最基本的步骤。

实验不能仅满足于测几个数据。要充分利用实践机会来培养自己的动手能力。可以通过重复实验、改变实验条件或参量数值以及作对比分析来判断测量结果的正确性;遇到困难或数据超差,不要一味埋怨仪器不好或简单重做一遍,而要做认真地分析,找出原因,自己动手排除障碍,尽力把实验做好。

经典的传统实验,集中了许多科学实验的训练内容,每个实验都包括一些具有普遍意义的实验知识、实验方法和实验技能。实验以后,可结合该实验的目的和要求进行必要的归纳总结,提高自己驾驭知识的能力。例如不同实验中体现出来的基本实验方法——比较法、放大法、模拟法、补偿法、干涉法及转换测量法等;实验中用到的数据处理的一些基本方法——列表法、作图法、逐差法、回归法等。在积累消化知识的基础上,还要注意培养自己获取和应用知识的能力,这可以结合对每个实验的分析、讨论及对思考题的探讨来进行。有兴趣者还可以对一些实验课题进行研究。

四、实验报告的内容

为了教学方便,我们将实验报告分为预习报告和课后报告前后两部分。

1. 预习报告的内容有:

(1) 实验名称;

(2) 实验目的;

(3) 实验原理 包括:简要的实验理论依据,实验方法,主要计算公式及公式中各量的意义,电路图、光路图和实验装置示意图以及注意事项,有些实验还要求写出自拟的实验方案、设计的实验线路、选择的仪器等;

(4) 实验步骤 扼要地说明实验的关键步骤和主要注意事项;

(5) 数据表格;

(6) 预习思考题。

预习报告在上课前交教师审阅,经教师认可后方得做实验。

2. 课后报告的内容有:

(1) 测量数据记录;

(2) 数据处理 包括计算公式、简单计算过程、作图、不确定度计算及最后测量结果;

(3) 实验后思考题。

课后报告与预习报告构成一份完整的实验报告。

目 录

前言

第一章 实验误差与不确定度评定

§ 1-1 误差和不确定度	(1)
§ 1-2 随机误差的统计处理	(6)
§ 1-3 仪器误差(限)	(11)
§ 1-4 不确定度的分量评定和方差合成	(17)
§ 1-5 系统误差的发现和消除	(28)
§ 1-6 有效数字及其运算法则	(34)
§ 1-7 * 几种主要的统计分布和置信概率	(37)
§ 1-8 * 方差合成公式和不确定度的传播	(41)
§ 1-9 * 总不确定度的计算	(43)
练习题	(45)

第二章 物理实验数据处理的基本方法

§ 2-1 列表法	(49)
§ 2-2 作图法	(51)
§ 2-3 最小二乘法和一元线性回归	(55)
§ 2-4 逐差法	(63)
练习题	(66)

第三章 基本的实验测量方法和操作技术

§ 3-1 基本的实验测量方法	(68)
-----------------------	------

§ 3-2 基本实验操作技术	(74)
----------------------	------

第四章 预备实验

§ 4-1 长度测量(游标卡尺与千分尺的使用)	(78)
§ 4-2 混合法测固体的比热容(量热器与温度计的使用)	(84)
§ 4-3 测电阻的伏安特性(电压表、电流表与滑线变阻器的使用)	(88)
§ 4-4 电表的扩程与校准	(101)
§ 4-5 模拟法测绘静电场	(106)

第五章 基本实验一

§ 5-0 数据处理示例	(113)
§ 5-1 光杠杆法测定钢丝的弹性模量	(122)
§ 5-2 振动法测转动惯量	(130)
§ 5-3 流体静力称衡法测物体的密度	(137)
§ 5-4 气轨上研究简谐振动	(144)
§ 5-5 气轨上研究碰撞	(155)
§ 5-6 薄透镜的焦距测定与自组望远镜	(160)
§ 5-7 电热法测热功当量	(172)
§ 5-8 惠斯通电桥测电阻	(177)
§ 5-9 充放电法测高电阻	(188)
§ 5-10 双电桥测低电阻	(198)
§ 5-11 电位差计测电动势	(209)
§ 5-12 声速测量和示波器的使用	(220)

第六章 基本实验二

§ 6-1 灵敏电流计的研究	(238)
§ 6-2 冲击法测螺线管轴线上磁感应强度	(249)

§ 6-3	利用霍尔效应测磁感应强度	(259)
§ 6-4	分光仪的调整和使用	(267)
§ 6-5	光的干涉实验 I —— 双棱镜	(280)
§ 6-6	光的干涉实验 II —— 牛顿环	(288)
§ 6-7	迈克尔逊干涉仪的调整与使用	(294)
§ 6-8	全息照相	(303)

第七章 设计性实验(考试实验)

§ 7-1	单量程三用表的设计与校准	(317)
§ 7-2	伏安法的应用	(319)
§ 7-3	电位差计的应用	(320)
§ 7-4	非平衡电桥的应用	(322)
§ 7-5	角度法测量折射率	(324)
§ 7-6	衍射光栅	(326)
§ 7-7	光的偏振	(329)
§ 7-8	迈克尔逊干涉仪的应用	(332)

第八章 综合性实验(选做实验)

§ 8-1	动量定理和冲击过程的瞬态测量	(337)
§ 8-2	声波特性的综合测量	(344)
§ 8-3	模拟电冰箱	(348)
§ 8-4	微弱信号的检测	(351)
§ 8-5- I	两次曝光法测金属板的弹性模量	(361)
§ 8-5- II	散斑照相测位移	(364)
§ 8-6	磁共振	(367)

附录	基本实验一览表	(372)
----	---------------	-------

第一章 实验误差与不确定度评定

§ 1-1 误差和不确定度

物理实验离不开测量。测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作。例如用直(钢板)尺去测量某钢丝的长度,把直尺作为标准的长度量具,使钢丝伸直与之对齐并记录钢丝两端相应的读数之差就是所需要的结果。但每个从事过测量工作的人几乎都会认识到:或由于作为比较标准的直尺本身不准,或难以读准毫米以下尾数,或钢丝两端不能和直尺严格对齐,或来自环境例如温度对测量的影响,或由于实验人员的操作水平等等原因,钢丝的实际长度和测量结果并不完全一致,即存在误差。因此,作为一个测量结果,不仅应当提供被测对象的量值大小和单位,还应该对量值本身的可靠程度作出判断。不知道可靠程度的测量值是没有多大意义的。

一、真值和误差

为了对测量及误差作进一步的讨论,我们引入有关真值和误差的一些基本概念。

真值——被测量在其所处的确定条件下,实际具有的量值。

误差——测量值与真值之差。记为

$$\Delta N = N - A \quad (1-1)$$

式中 N 是测量结果(给出值), A 是被测量的真值, ΔN 为测量误差,又称绝对误差。

真值是客观存在的,但它是一个理想的概念,在一般情况下不

可能准确知道。然而在有些具体问题中,真值在实际上可以认为是已知的。例如为了估计用伏安法测电阻的误差,可以用可靠性更高的电桥的测量结果作为真值。这种与真值非常接近,从而在一定条件下能代替真值的给定值,常被称为约定真值。

按照定义,误差是测量结果与客观真值之差,它既有大小又有方向(正负)。由于真值在多数情况下无法知道,因此误差也是未知的,只能进行估计。

误差与真值之比称为相对误差。考虑到一般情况下,测量值与真值相差不会太大,故可以把误差与测量值之比作为相对误差。

二、误差的分类

误差按其特征和表现形式可以分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

为便于理解,我们先举两个具体的例子。

例一,用天平称衡物体的质量。由于制造、调整及其它原因,天平横梁臂长不会绝对相等,因此测量结果与真值会产生定向的偏离。如果左臂比右臂短,当待测物体放在左盘时,称衡的结果将偏小,反之则偏大。

例二,用停表测单摆周期。尽管操作者作了精心的测量,但由于人眼对单摆通过平衡位置的判断前后不一、手计时响应的快慢不匀以及来自环境、仪器等造成周期测量微小涨落的其它因素,测量结果呈现出某种随机起伏的特点。表 1-1 给出了测量 50 个周期的六个数据。

表 1-1 单摆周期测量记录

测量次数 i	1	2	3	4	5	6
$50T_i$	1'49.70"	1'50.02"	1'49.83"	1'50.12"	1'49.93"	1'49.78"
$T_i(s)$	2.194 0	2.200 4	2.196 6	2.202 4	2.198 6	2.195 6

我们把类似例一的误差称为系统误差,类似例二的误差称为

随机误差。

1. 系统误差

在同一被测量的多次测量过程中,保持恒定或以可以预知方式变化的那一部分误差称为系统误差。

系统误差的特点是它的确定规律性。这种规律性可以表现为定值的,如天平的标准砝码不准造成的误差;可以表现为累积的,如用受热膨胀的钢尺进行测量,其指示值将小于真实长度,误差随待测长度成比例增加;也可以表现为周期性规律的,如测角仪器中刻度盘与指针转动中心不重合造成的偏心差(参见本章习题5);还可以表现为其它复杂规律的。系统误差的确定性反映在:测量条件一经确定,误差也随之确定;重复测量时,误差的绝对值和符号均保持不变。因此,在相同实验条件下,多次重复测量不可能发现系统误差。

对操作者来说,系统误差的规律及其产生原因可能知道,也可能不知道。已被确切掌握了其大小和符号的系统误差,称为可定系统误差;对大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除或在测量结果中进行修正;而后者一般难以作出修正,只能估计出它的取值范围。

2. 随机误差

在实际测量条件下,多次测量同一量时,以不可预知的方式变化的那一部分误差称为随机误差。

随机误差的特点是单个具有随机性,而总体服从统计规律。在相同条件下,每个测量结果的误差是不确定的(绝对值和正负),如表1-1给出的单摆周期测量结果那样,显示出没有确定的规律性;但就总体(大量测量个体的总和)而言,它服从统计规律。随机误差的这种特点使我们能够在确定条件下,通过多次重复测量来发现它,而且可以从相应的统计分布规律来讨论它对测量结果的影响。

系统误差和随机误差是两种不同性质的误差,但它们又有着