

● 高等学校教学用书 ●

工科大学普通物理实验

● 周开学 ● 杨作朋 ● 李正开 ● 编

石油大学出版社

前 言

物理实验课自作为一门独立设置的必修基础课程以来，在教学目的、教学思想、教学内容和方法等方面有了很多改革和变化。尤其是高等工业院校物理实验课程教学指导委员会颁发了《高等工业学校物理实验课教学基本要求》，在若干方面提出了新的要求。原来的实验教材已不适应教学需要。因此我们在总结教学经验和改革尝试的基础上编写了这本教材。

本书在传统教材的基础上较大幅度地增加了实验基础理论的内容，较系统地阐述了随机误差、系统误差、数据处理等内容，编入了实验方法简介、基本物理量及其测量等有关知识。这些内容既是实验的基础，又必须在整个实验课程中始终注意它才能学好。希望读者给以足够的重视。

书中简单介绍了设计实验的思路，安排了一定数量的设计性实验供读者学习和练习。除此之外，希望读者在每个实验中除掌握该实验涉及的基本知识、基本仪器和基本方法之外，还要注意体会该实验的物理思想及设计思想，这样才能逐步培养自己的实验能力。切不可有取得数据了事的任务观点。

实验选题适当照顾了物理的各领域、不同实验方法及常用仪器训练。基本按由浅入深循序渐进的原则安排实验内容和实验要求。各实验中列出了思考题以便读者作自学参考。

本书由周开学同志组织编写并统稿，分工是：杨作朋同志编写第一至四章、周开学同志编写第五章，李正开同志编写第六章。显然，实验教学工作是一项集体的事业，本书不但吸收了石油大学物理教研室和若干专业教研室许多同志的宝贵意见，并且反映

了十年来从事物理实验的实验室全体同志的劳动成果。本书在编写过程中得到多方面的关怀和支持，在此一并致谢。

编写一本适用的实验教材，是一项艰巨而又复杂的任务，需要在不断进行教学改革和仪器改进的基础上，做长时间的研究和努力才能完成。我们的工作仅是一步尝试。由于业务水平有限，加之时间仓促，许多问题处理很不成熟，错误也在所难免。敬请使用本书的同行和读者批评指正。

编者

1990年5月

目 录

绪 论	1
一、物理实验课的地位和作用.....	1
二、物理实验课教学目的和任务.....	2
三、物理实验规则.....	3
四、物理实验课的基本程序.....	4
第一章 实验的基础理论	7
一、误差理论基本知识.....	7
二、随机误差.....	9
三、间接测量的误差传递.....	16
四、系统误差.....	23
第二章 数据处理	32
一、有效数字.....	32
二、列表与作图.....	34
三、线性函数的逐差法.....	38
四、线性函数的最小二乘法.....	41
第三章 物理实验方法简介	47
一、物理实验方法.....	47
二、测量方法.....	48
三、物理实验基本设计方法简介.....	51
第四章 力学和热学实验	55
概 述.....	55
实验一 基本量度.....	55
实验二 验证牛顿第二定律.....	67

附录	气垫导轨使用说明	72
实验三	液体比热的测定	76
实验四	落球法测定液体的粘滞系数	80
实验五	测量钢丝的杨氏弹性模量	85
实验六	用乔里秤测量弹簧的有效质量——设计性实验（一）	93
实验七	三线摆测物体的转动惯量	94
实验八	用乔里秤测量液体的表面张力系数	98
实验九	测定金属棒的线膨胀系数	104
实验十	用气轨验证动量守恒定律	108
第五章	电磁学实验	113
概述		113
实验一	基本训练	116
实验二	改装电表	132
实验三	伏安法测电阻——设计性实验（二）	141
实验四	用电桥测量电阻	153
附录 1	箱式惠斯登电桥说明	161
附录 2	双臂电桥说明	164
实验五	用模拟法研究静电场	166
实验六	灵敏电流计的研究	173
附录	光点反射式检流计	178
实验七	研究螺线管轴线上的磁感应强度分布	180
附录	冲击电流计	190
实验八	电位差计	193
附录	UJ-21型高阻直流电位差计使用说明	198
实验九	电子束的偏转和聚焦	203
实验十	示波器的使用	214
附录 1	音频信号发生器使用方法	224

附录 2	真空管毫伏表的使用说明	226
实验十一	电阻温度系数——设计性实验 (三)	226
实验十二	用热电偶研究炉温分布——设计性实验 (四)	228
第六章	光学实验	232
概述		232
实验一	基础知识及训练	236
实验二	薄透镜焦距的测定	244
实验三	分光计的调节和固体折射率的测定	249
实验四	用衍射光栅测量单色光的波长	260
实验五	等厚干涉——牛顿环、劈尖	265
实验六	偏振光的研究——旋光仪的使用	272
实验七	照相技术	278
附录	几种常用的显影液和定影液配方	285
实验八	双棱镜的干涉	286
实验九	固体与液体折射率的测定	290
总附录		294
一、中华人民共和国法定计量单位		294
二、一些常用的物理数据表		297
参考文献		307

绪 论

一、物理实验课的地位和作用

物理学是一门建立在实验基础上的科学。任何物理规律的发现和物理理论的建立都是以严格的实验为基础，并受到实验的检验证实。显然，物理实验在物理学发展过程中起着重要和直接的推动作用。

在经典力学发展之初，伽利略首先把科学的实验方法引入到物理学研究中来，从而使物理学走上了真正的科学道路。牛顿正是在伽利略的研究基础上，亲自反复地观察与实验，经历了二十年不懈的努力，最后才建立了牛顿力学三定律和万有引力定律，从而成为伟大的经典力学奠基人。

物理学在发展过程中经历了多次变革。实验在每次变革中都直接起着推动作用。例如杨氏双缝实验揭示了光的波动性质；光电效应实验导致了光量子理论的建立。奥斯特在一次课堂实验中发现了电流的磁效应；法拉第长达十年之久的实验回答了磁也可以产生电的问题。正是这许多电磁学实验现象的发现，实验规律的产生，再加上理论研究的艰苦努力，最后才由麦克斯韦建立了电磁学理论这一完善而优美的大厦。类似的例证在物理学史中俯拾皆是。

现代科学技术已得到了高度的发展。物理实验的构思、方法和技术极广泛地渗透到了各自然科学学科和工程技术领域。它们与非物理学科自身的实验技术互相结合，互相推动，促进了各学科的完善与进步。例如地震探矿、声波测井、光谱法分析物质的

化学成分、晶体管乃至电路性能的测试、岩石孔隙度和渗透率的研究、原油或油品流动性质的研究等等，都不过是一些用于专业的物理实验而已。正是把物理实验及其实验方法运用于专业，才使其专业得到了迅速的发展。今后，物理实验仍将起到促进各学科进一步发展的作用。

高等工业大学的学生毕业后将从事自然科学研究和生产技术研究工作，解决科研与生产实际中遇到的问题。这些问题往往要通过实验来解决。即使用到从理论出发提出的解决问题的方法，也要先做实验来验证其可行性。因此，单凭书本知识显然是很不够的，而必须具备一定的实验知识，掌握一系列实验方法，熟悉并会运用必要的实验仪器，知道怎样对实验所得的数据进行总结归纳、加工处理从而找出对解决问题有用的规律与结论，懂得怎样计算误差，判断所得规律与结论的可靠性。这就是所谓实验能力。在大学阶段，物理实验课是各其它专业实验课程训练的开端与基础，学生对实验的学习将从这里开始。对学生一系列实验能力的培养，物理实验课担负着重要的基础任务。打不好基础，大厦是无法建好的。

二、物理实验课教学目的和任务

物理实验课的目的是为今后系统地进行实验方法和实验技能的训练打下一个良好的基础，基本任务是：

1. 通过对实验现象的观察分析和对物理量的测量，使学生进一步掌握物理实验的基本知识，基本方法和基本技能，并能运用物理学原理，物理实验方法研究物理现象，总结物理规律，加深对物理学原理的理解。

2. 培养与提高学生从事科学实验的素质。包括：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；不怕困难，

主动进取的探索精神；遵守操作规程，爱护公共财物的优良品德；以及在实验过程中同学间相互协作，共同探索的协同心理。

3. 培养与提高学生科学实验的能力。包括：

自学能力——能够自行阅读实验教材与参考资料，正确理解实验原理与方法，在实验前作好实验的各项准备。

动手能力——能借助教材与仪器说明书正确操作仪器，联结与拆除电路，制作必要的简单样品等。

思维判断能力——能够运用物理学理论，对实验现象与实验结果作出分析与判断。

表达书写能力——能够正确记录和处理实验数据，绘制图表，说明实验结果，撰写合格的实验报告。

初步的实验设计能力——能够根据课题要求，对较简单的实验，确定实验方法和实验条件，合理选择与搭配仪器仪表，拟定实验步骤。

三、物理实验规则

1. 实验前必须认真预习，按要求写出预习报告，通过自学弄懂预习思考题。不预习或达不到预习要求者不准进行实验。

2. 准时到实验室上课。迟到者，教师应对其批评教育。超过10分钟者不准进行实验。

3. 做实验态度要严肃认真，积极思考。注意保持实验室安静、整洁。进行实验要对号入座，不得自行调换仪器。如遇仪器发生故障，应及时报告指导教师。

4. 操作仪器、联结线路必须按有关规程和注意事项进行。违犯规程或违犯纪律而损坏仪器时，应填写仪器损坏报告单并按学校规定赔偿。

5. 实验完毕应经教师检验数据、签字，然后整理仪器，方

可离开实验室。每个实验班应安排值日组清扫实验室。

6. 无故缺课不补课。因病(持校医院证明)、因事(持系办公室证明)缺课, 应及时与指导教师联系, 安排补课。一学期缺三个以上实验者, 不得参加本学期考试。

7. 物理实验课不及格者无补考机会, 只能重修。重修要按学校规定交费。

四、物理实验课的基本程序

普通物理实验多数是测定某一物理量的数值。也有研究某一物理量随另一物理量变化的规律性的。对于同一物理量, 可用不同的方法来测定, 而且实验所测定的物理量也是各不相同的。但是无论实验内容如何, 也无论采用哪种方法, 物理实验课的基本程序大都是相同的。一般可以分为如下三个阶段。

1. 实验前的预习

由于实验课的课内时间有限, 而熟悉仪器和测量数据的任务一般都比较繁重, 不允许在实验课内才开始研究实验的原理。如果不了解实验原理, 实验时就不知道要研究什么问题, 要测量哪些物理量, 也不知道将会出现什么现象, 做起来只能是机械地按照教材所规定的步骤进行操作, 离开了教材就不晓得怎样动手。用这种呆板的方式做实验, 虽可得到实验数据, 却不了解它的物理意义, 更不会根据所测数据去推求实验的最后结果。因此, 为了在规定时间内高质量地完成实验课的任务, 学生必须做好实验前的预习。

预习的要求, 应以理解所做实验的原理为主。对于实验的具体过程只要作粗略地了解, 以便能够抓住实验的关键, 做到较好地控制实验的物理过程和物理现象, 及时、迅速、准确地获得需要测量的数据。预习时应根据实验要求画好数据表格, 表格上标

明文字符号所代表的物理量及其单位，并计划好测量次数。

2. 实验的进行

实验开始前熟悉仪器，了解仪器的工作原理和使用方法，然后将仪器按要求安装调整好。例如：调节气垫导轨达到水平，调节粘滞系数测定仪的圆筒铅直，调节光具座上各光学元件共轴等等。

每次测量后，应立即将实验数据记录在预习时准备好的实验数据表格内，切不可随意记在纸头或教材上。要根据仪器的最小刻度单位或准确度等级决定实验数据的有效数字位数和单次测量误差。各个数据之间、数据与图表之间不要太挤，留有空隙，以备必要时补充和更正。发现数据有错时不要乱涂，可在错误的数字上画一条整齐的直线，将正确的写在旁边或补在最后。在情况允许时可以简单地说明为什么是错误的，我们保留“错误”数据，不毁掉它是因为“错误”数据有时经过比较后竟是正确的。当实验结果与温度、湿度和气压有关系时，要记下实验进行时的室温、空气湿度和大气压等。

记录实验数据最要紧的是实事求是，千万不能随意改动，更不能依赖第一、二个测量值按臆想的“规律”改变读数。

在两个人或多个人合做一个实验时，既不要其中一个人处于被动的状态，也不能一个人包办代替，应该分工协作，以便共同达到预期的要求。

总之，测量实验数据时要特别仔细，以保证读数准确，因为数据的优劣，往往决定了实验的成败，计算的错误可以随时更正，但未经重复测试，不允许修改实验数据。

3. 写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结，要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出来，写报告时要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。应养成实验完成后尽早将

实验报告写出来的习惯。因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告，通常包括下列部分：

①实验名称；②实验目的；③简要的实验原理、计算公式和必要的线路图；④仪器设备及其量程、级别、号码；⑤实验内容、数据记录；⑥计算过程或图示、图解处理；⑦误差分析；⑧明确的实验结果表达式；⑨讨论。

前面几部分的写法可参考本教材。现仅就最后三项略作说明。

误差分析包括两部分内容：一是确定实验结果的误差范围，因为在精确测量中，确定实验结果的不精确范围跟获得实验结果具有同等的重要性；二是找出影响实验结果的主要因素，从而采取相应的措施（例如更换仪器，实现更有利的实验条件等）以减小误差，改进实验。显然，对于不同的实验，因所用的实验方法、仪器及所测物理量不同，误差分析的方式也不尽相同，这要针对具体实验具体考虑。误差过大时，应分析原因，对误差作出合理解释。

在表达实验结果时，一般包括不可分割的三部分：即结果的测量值 \bar{A} ，绝对误差 ΔA （以及获得 ΔA 的计算方法）和相对误差 B ，综合起来可以写为：

$$A = (\bar{A} \pm \Delta A) \text{ 单位 } (P = \quad)$$

$$B = \frac{\Delta A}{\bar{A}} \times 100\%$$

这就是完整的结果表达式。如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理定律，则需根据误差判定出实验是否验证了理论，写出明确的结论。

在最后讨论中应包括回答实验的思考题，实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释，对于实验仪器装置和实验方法改进的建议等。还可以记下实验者印象特别深的心得体会。但不要求每个实验都要写体会，有则写，无则不要勉强写。

第一章 实验的基础理论

一、误差理论基本知识

实验是在理论指导下，利用科学仪器设备，人为地控制或模拟自然现象，使它以比较纯粹和典型的形式表现出来，然后再通过观察与测量去探索自然界客观规律的过程。由于自然界条件千变万化，错综复杂，即使在实验室已作了充分的控制也难免不受影响。所以我们所观察和测量的结果也就不可能完全是客观世界的真实反映。为此，在实验中除了测得应有的数据外，还需要对测量结果的可靠性作出合理评价，对测量结果的误差范围作出合理的估计。否则，我们所测得的数据就毫无价值。

1. 测量

测量可分为两大类：直接测量和间接测量。

直接测量：实验中将待测量与标准量（直接从仪器或量具中读出的量）进行比较，得到待测量的大小。例如：用米尺测量长度；用天平称质量；用秒表测时间等。

间接测量：待测量由若干直接测量的物理量经过一定函数关系运算后获得。例如：用单摆测量重力加速度 g ，先测出摆长 L 和

周期 T ，再由公式 $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ 计算出 g 。 g 的测量就称为间接测量。

2. 误差及其分类

由于实验的仪器不可能无限准确，测量所依据的理论和实验方法往往具有某种程度的近似，人的感觉器官也有一定的局限。

所以测量的结果必定带有一定的误差。误差存在于一切测量过程之中。这已成为一条公理。

设某待测量 x 的客观真值为 a ，测量结果为 x ，则测量误差定义为：

$$\Delta = x - a$$

作为科学实验的结果，不仅要知道测量所得的结果，而且还要知道其误差的范围。

测量值永远不是真值，那么如何才能使测量值是真值的最佳近似值呢？又如何估算测量的误差范围呢？这就需要研究误差的规律，误差理论包括下列内容：

(1) 误差的性质、分类、出现的规律、对误差大小的估算方法；

(2) 减小或消除误差的实验方法与数据处理方法；

(3) 误差的传递方法与合成方法；

(4) 用误差理论指导选择实验方案，搭配实验仪器等。

3. 误差的分类

根据误差产生的原因和它对实验结果的影响，误差可分为三类：

(1) 系统误差：系统误差是指在多次重复测量中，其大小和正负不变或按确定规律变化的误差。例如：因天平零点不准、电表刻度不均匀，因热胀冷缩尺子长度变化等，给测量所带来的误差就属于系统误差。关于系统误差产生的原因、性质及消除方法，将在后面加以讨论。

(2) 随机误差：它的特点是随机性。在没有系统误差和相同的条件下，对同一量进行多次重复测量，每次测量的误差时大时小，时正时负，既不可预测又无法控制，这种误差即所谓随机误差，常用 δ 表示。

随机误差的出现，从表面上看纯属偶然，但通过人们长期的

实践，在重复测量很多次时，发现偶然中存在必然，即随机误差遵从一定的统计规律。我们正是利用这种规律对实验结果作出随机误差的误差估算。

(3) 疏失误差：实验中有时仪器失常造成指示值不对，有时人过度疲劳或马虎大意读错数据，有时粗心计算错误等等，由于这些原因所引入的误差就叫疏失误差。这类误差往往使实验结果远离物理规律，因此比较容易被发现。

二、随机误差

在测量中，系统误差和随机误差往往同时出现。但在某些实验中，往往以某一种误差为主。为了研究问题的方便，常常忽略另一种误差。

首先讨论随机误差。为方便起见，假设各个误差相互独立，且已消除了系统误差，不存在疏失误差。

1. 随机误差的统计知识——统计直方图

对某物理量进行几次测量时，由于误差是随机的，因此很难找出规律，为此，必须对某一个物理量进行等精度、大量的重复测量，根据测量的结果，作出图形，运用概率论等数学知识进行处理，去寻找随机误差所遵从的规律。这就是随机误差的统计处理方法。为了实现这一目的，首先介绍一下统计直方图。

假设对三角形内角和进行 $n = 358$ 次重复测量，所得数据如表1-1所示，表中 δ 为测量误差。

以 δ 为横坐标， m/n 为纵坐标作图，可以得到一接近于对称的图形（图1-1），实践证明，当测量次数不断增加时，图形对称性会愈来愈好，图1-1就称为统计直方图。 m/n 表示横轴同宽度上的概率，若该宽度取1，则曲线即为概率密度曲线，见图1-2。这个分布曲线通常接近正态分布曲线图1-3（或称高斯曲线）。

表 1-1

误差区间 (s)	δ 为负值		δ 为正值	
	个数(m)	频率($\frac{m}{n}$)	个数(m)	频率($\frac{m}{n}$)
0.00~0.20	45	0.120	46	0.128
0.20~0.40	40	0.112	41	0.115
0.40~0.60	33	0.092	33	0.092
0.60~0.80	23	0.064	21	0.059
0.80~1.00	17	0.047	16	0.045
1.00~1.20	13	0.036	13	0.036
1.20~1.40	6	0.017	5	0.014
1.40~1.60	4	0.011	2	0.006
1.60以上	0	0	0	0
合 计	181	0.505	177	0.495

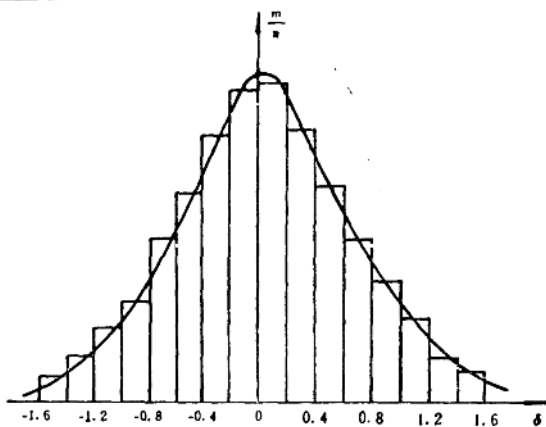


图 1-1

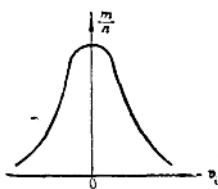


图 1-2

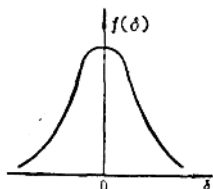


图 1-3

实践和理论都已证明，图1-3是大部分随机误差所遵从的统计规律的曲线。曲线的横坐标表示误差 $\delta_i = x_i - a$ ，纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\delta)$ 。应用概率论可以导出：

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}$$

从图1-3曲线中，可以看出随机误差具有下列性质：

- (1) 小误差（指绝对值，下同）出现的比大误差出现的几率大（概率大）；
- (2) 大小相等，符号相反的误差出现的几率相等；
- (3) 大于某一界限的误差出现的几率趋于零。

2. 算术平均值

设对某物理量 x 进行 n 次等精度直接测量得到如下测量值， $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，定义 \bar{x} 为其算术平均值，即

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

各次测量所对应的随机误差分别为：

$$\delta_1 = x_1 - a, \delta_2 = x_2 - a, \delta_3 = x_3 - a, \dots, \delta_n = x_n - a$$

式中 δ_i 为第 i 次测量的随机误差； a 为物理量 x 的真值。