

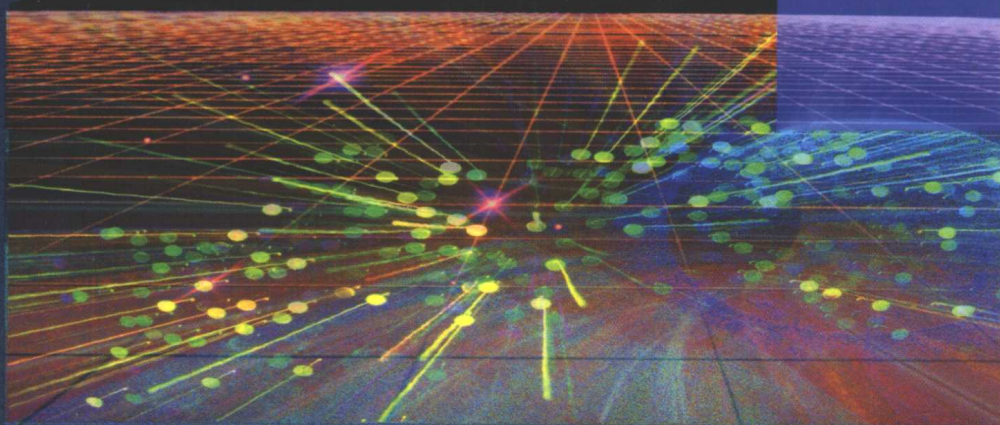
高等学校教材

普通物理实验

(四、综合及设计部分)

杨述武 主编

杨述武 朱世国 马霞生 乔双 编



高等教育出版社

高等学校教材

普通物理实验

(四、综合及设计部分)

杨述武 主编

杨述武 朱世国 马葭生 乔双 编

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 (4):综合及设计部分/杨述武主编.
北京:高等教育出版社,2000
高等学校教材
ISBN 7-04-007948-8

I. 普… II. 杨… 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 (1999) 第 67321 号

普通物理实验(四、综合及设计部分)
杨述武 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010-64054588 传 真 010-64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 850×1168 1/32 版 次 2000 年 5 月第 1 版
印 张 7.875 印 次 2000 年 5 月第 1 次印刷
字 数 190 000 定 价 7.90 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究



内 容 提 要

《普通物理实验》一套共 4 册,分别为力学及热学部分,电磁学部分,光学部分,综合及设计部分,是在第 2 版前 3 册的基础上增订而成的. 全书保持了原书通用性好、可读性强及注重能力培养的特色. 同时,为了更好地适应教学需要,修改了前 3 册部分实验的论述;并增加了第 4 分册,专门推出一批较成熟、易推广的综合及设计性实验. 本次修订时还改正了原书中的一些错误,并根据最新的有关国家标准和规范统一了有关名词、单位和符号,从而使全书更加科学化和规范化.

本书是这套书的第 4 分册,为综合及设计部分,共计 35 个实验,其中:综合性实验 14 个,着重对学生进行综合性训练,同时也引入一些新的实验技术;设计性实验 15 个,每个实验都提出了设计要求,并给出一定的提示和说明;计算机辅助实验 6 个,分别为利用计算机接口的实验和计算机模拟实验.

本书可作为高等学校本科物理及相近专业普通物理实验课的教材,也可供师专及卫电使用.

前 言

物理实验课是非常重要的课程。当学生系统地学习过普通物理实验课之后,一般来说,掌握了基本实验方法和相关设备,懂得了如何处理数据,同时操作技能也得到一定的训练,但是从人才全面培养的角度考虑,这还不够,因为对学生的创造性思维能力的培养方面还比较欠缺。

创造性思维能力有很广泛的内涵,但是其主要方面有:(1)能综合运用学过的知识和技能去解决实际问题;(2)能提出疑问,发现问题,特别是能透过现象深入到实质问题;(3)能提出有说服力的论据,支持自己的论点;(4)能在全面研究问题之后,作出科学的评价;(5)能从已知的现象和规律出发,预测事物的发展,提出新的设想。

我们编写此书,旨在为开拓培养提高学生的创造性思维能力的的环境方面有所贡献。

本书分三部分:

A. 综合性实验

对学生进行综合性训练的同时引入一些新的知识和技术。另外,在实验中又对学生提出一定的设计要求。

B. 设计性实验

对学生提出设计要求的同时给出一定的提示或说明。

读者还可以从期刊上选择一些很有价值的选题^①。

C. 计算机辅助实验

① 可参阅:

1. 刘雪林. 北京大学物理系部分力学、热学设计实验题目选编. 物理实验, 1995, 15(6):278~279
2. 北大物理系. 北京大学物理系电学设计性实验选题介绍. 物理实验, 1995, 15(1):23
3. 孔宪生等. 东北师大物理系光学设计性实验选题介绍. 物理实验, 1995, 15(4):181

此部分有两类实验,一类是利用接口的实验,目的是使学生初步了解计算机和物理实验的结合;另一类是计算机模拟,目的是开阔学生的视野.

本书列出的实验,在难度上、分量上有较大的差别,以给学生较多的选择余地.

本书编写的分工如下:

朱世国(四川大学物理系):实验 A(7,8,12,13,14),实验 C-4;

马葭生(华东师大物理系):实验 A(1,2,5,6,10,11),实验 B(1,8);

乔双(东北师大物理系):绪论 §5, §6,实验 B(7,11),实验 C(1,3,5,6);

杨述武(东北师大物理系):绪论 §1~§4,实验 A(3,4,9),实验 B(2,3,4,5,6,9,10,12,13,14,15);

胡险峰(四川大学物理系):实验 C-2.

在编写本书过程中参阅了很多有关书刊的文章,并得到有关实验室各位同事的协助,在此表示诚挚的谢意.

由于作者水平所限,书中不免有缺点甚至错误,希望读者提出批评和建议.

编者

1998年10月

责任编辑	张思孳
封面设计	王 睢
责任绘图	李维平
版式设计	史新薇
责任校对	胡晓琪
责任印制	韩 刚

目 录

前言	(1)
绪论	(1)
§ 1 实验课与学生的实验修养	(1)
§ 2 数据处理	(4)
§ 3 实验实施与设计	(18)
§ 4 问题与分析	(22)
§ 5 计算机辅助实验	(25)
§ 6 基于 ISA 总线的 8 位 A/D、D/A 接口简介	(29)
A. 综合性实验	(40)
实验 A-1 用实验方法寻求弹簧振子振动周期的经验公式	(40)
实验 A-2 气垫导轨实验中系统误差的分析与校正	(47)
实验 A-3 用共振法测量杨氏模量	(53)
实验 A-4 弦振动与方波的谐波分析	(60)
实验 A-5 粘性阻尼、磁阻尼、压差阻尼特性的研究	(66)
实验 A-6 高温超导体的临界温度和临界电流的测量	(75)
实验 A-7 温度传感器非线性误差的理论分析及实验研究	(82)
实验 A-8 半导体光电二极管伏安特性的测定	(91)
实验 A-9 密立根油滴实验	(98)
实验 A-10 压电陶瓷的电致伸缩系数的测量	(108)
实验 A-11 隔热玻璃光学特性参量的测试	(113)
实验 A-12 音频信号光纤传输技术实验	(119)
实验 A-13 自聚焦透镜及其光学参量的实验测量	(127)
实验 A-14 数字式光信号检测和再生电路的理论分析 及实验研究	(136)
B. 设计性实验	(146)
实验 B-1 液体密度的实时测量	(146)
实验 B-2 船漏水下沉时间的分析与模拟实验	(152)

实验 B-3	倾斜槽中球的运动	(153)
实验 B-4	照相机快门的检测	(155)
实验 B-5	用振动法测量杨氏模量	(156)
实验 B-6	扭摆受迫振动相-频特性的测量	(158)
实验 B-7	音叉声场的研究	(161)
实验 B-8	热敏电阻的特性测试和温度的实时测量与控制	(162)
实验 B-9	液体在毛细管中上升的速率与液体表面张力系数、 粘度的测量	(170)
实验 B-10	用伏安法测低电阻	(171)
实验 B-11	示波器作为交流电桥平衡指示器的研究	(172)
实验 B-12	磁铁穿过线圈时产生的感应电动势极大值的测量 ..	(173)
实验 B-13	粉末状玻璃折射率的测量	(174)
实验 B-14	用光纤进行双孔干涉实验与分析	(175)
实验 B-15	白炽灯与热辐射	(177)
C.	计算机辅助实验	(179)
实验 C-1	非金属固体材料导热系数的计算机辅助测量	(179)
实验 C-2	用微机观测交流磁滞回线	(193)
实验 C-3	狭缝衍射的研究	(203)
实验 C-4	计算机在温度检测系统中的应用	(213)
实验 C-5	微机与物理过程模拟	(222)
实验 C-6	蒙特卡罗试验	(231)

绪 论

§ 1 实验课与学生的实验修养

1. 实验课的重要性

我们学习物理学,要认识各种物理现象,要掌握物理现象形成与演变的规律,要了解各种实验方法.

演示实验可以真实地展现物理现象及其演变,对加强物理概念的理解,加深印象十分重要.在实验课上,学生将亲自动手组成一测量系统,在观察、测量、记录与分析之后,得到被测量的具体量值及其变化规律,加强了对被测量的认识.著名物理学家开尔文(Kelvin)曾讲:“我常说,当你能把所讲的东西测量出来并用数字表示时,那末你对这个东西已有所认识.但是如果不能用数字表示,那末你的认识是不够的,不能令人满意的,可能只是初步的认识,在你的思想上,还没有上升到科学的阶段,不论你所讲的是什么东西”.^①

我们学习物理学不只是学习物理学理论,而且还要加以应用和发展,因此学习前人创造的实验方法就十分重要,因为掌握前人的实验方法并加以发展、创新,是促使物理学发展的重要条件.

2. 关注实验的物理思想

对于每一个物理实验,不仅应重视其原理、实验装置和数据处理方法等问题,更应着重了解其物理思想,这对于我们设计新的实验往往能提供很多启示和可借鉴之处.

^① 瑞斯尼克,哈里德.物理学 第一卷第一册.李仲卿等译.北京:高等教育出版社,1965.1

例如,在用单摆测重力加速度的实验中,将数值很大的落下加速度的测量,转变为数值很小的摆动加速度的测量,从而延缓了所要观测的运动的进程,而且又由于可以测多个周期,使测量的精度提高了很多.

又如,在密立根油滴实验中,是利用一个小油滴的自由下落来求出其半径 r_i 的,然后再利用油滴在电场中的上升测量油滴上的电荷量 q_i ,当测量了大量的不同量值的 q_i 之后,由统计、分析将发现存在着最小的电荷.

3. 实验装置与仪器

使用一仪器必然要了解它的原理,作为一实验者还要了解设计的独创性之所在. 例如,测低电阻的双桥的创造性就在于它消除了导线电阻和接触电阻的影响,使低电阻的测量成为可能. 又如,测重力加速度的可倒摆,它解决了一般的物理摆等值摆长测量的精度不高的问题.

仪器的改进可以减小某些误差,但是不论设计如何精良,加工如何精细,都不可能制造出没有误差的仪器,因之在使用仪器时都会给测量引入误差. 测量时有必要考虑这种误差,一是采取适当的方法削减其误差的影响,二是将其估计值作为测量不确定度的一部分去统计.

使用仪器在精度的选择上要适当,精度低将达不到测量的要求,精度过高则是浪费,因为在反复使用过程中仪器的精度必然降低.

使用仪器要充分发挥它的性能,一是要满足它的环境条件,二是要将其调节到正常使用状态. 为此,要了解什么是正常使用状态,怎样判断它是否达到正常使用状态. 天平、电势差计、分光计和迈克耳孙干涉仪是很有代表性的仪器.

使用仪器时,要遵守仪器的操作规程,这是取得客观数据所必须的,也是保护仪器所必须的. 因此什么是仪器操作规程,为什么制定这样的操作规程,对于一实验者在使用仪器之前就应该明确,

如果不明确,就要查一下资料.

实验后,不要立即拆散测量系统,要对记录做初步分析,在不需补测数据时才可结束.实验结束时,仪器要恢复到使用前的状态,这是保护仪器的必要条件.

4. 及时发现问题

实验者一般都是细心安排实验的,实验的进程可能比较顺利,但是由于某种原因实验出现问题也是常见的,作为一实验者应能及时发现问题,及时进行处理,防止精力与物资的浪费.

出现问题的原因是多方面的,如:理解上的偏差,仪器调节不到位,电路接错,参量取值不当,看错了现象,数错了数,实验装置有变动,等等.

实验时,要边观察现象,边审查数据,边思考分析,看看有否不正常的现象或数据,如果不加思索地埋头测量,那可能在实验结束了才发现测错了!

5. 关于实验记录与实验报告

实验要做记录是人所共知的,但是如何记录以及记录的价值如何对于学生来讲不一定都清楚.

记录是整理实验结果以及分析问题的依据,这要求记录的是原始数据,即从仪器上读出的未经任何运算的量值.记录应做到日后自己能够看懂,别人也能看懂的程度.记录又是资料,它对日后的工作会有参考价值,因此记录应有固定的本子.

记录不仅记下实验数据,还应包括实验的环境条件,仪器的型号和编号,此外实验中遇到的问题、故障及可疑现象等也应如实记录.

对实验报告首先应明确,报告是工作的总结,是实验课学习的足迹,是日后可供参考的资料,而不仅是供教师评成绩的资料.因此实验报告要对实验过程和结果有分析和评价,要有自己的思考,所以实验报告是实验课学习的重要组成部分.

6. 做实验的主人

实验课是在教师指导下的学习过程,但是学生在实验课上有较大的独立性,应当把教师的要求,变成自己的追求. 实验前应想一想,我应如何去做? 我期望什么结果? 实验后应对实验进行评价,并认真思考实验使自己想到了哪些问题. 总之,在实验过程中一定要动手又动脑,使自己的独立实验能力一步步提高.

要主动去做实验,就要深入地预习,而不是依赖教师的一般性介绍. 在预习时如能提出和教师要讨论的问题以及自己要探索的问题,并准备在实验中做些探索和分析,其作用将是巨大的.

§ 2 数据处理

一、测量结果及其标准差

1. 算术平均值

对某一物理量在同一条件(指实验方法、实验装置、计量器具、实验环境和操作人一定)下重复测量,由于各次测量的误差来源相同,称其为等精度测量. 设 n 次测量所得测量值为 x_1, x_2, \dots, x_n , 其算术平均值 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (0-2-1)$$

由于各测量值的误差正、负不定,求和过程的抵偿作用,算术平均值的误差的绝对值将随 n 的增加而减小,因而将算术平均值取为直接测量的最佳结果. 但是应注意测量值中如有坏数据,要在剔除后重新平均.

2. 标准差

一系列测量值按下式计算可得测量列标准差 $s(x)$

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (0-2-2)$$

而算术平均值标准差 $s(\bar{x})$ 则为

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (0-2-3)$$

一系列测量值分散在较大的范围中,其标准差就大,若分散的范围较窄标准差就小,即标准差表征了测量值分散的情况. 在没有或可忽略系统误差的情况下,标准差是评价测量质量的依据.

3. 可疑值的取舍

在一组测量值中,有的测量值可能偏大或偏小,如果没有确切的理由说明它是有粗差的测量值,就要依据统计规律对测量值的取舍进行判断. 在误差理论中对可疑值取舍的判据有几种,在此选用格罗布斯判据. 在该判据中给出对应不同 n 值的系数 g_n (表 0-2-1),而可以保留的测量值 x 的范围为

$$(\bar{x} - g_n \cdot s) \leq x \leq (\bar{x} + g_n \cdot s) \quad (0-2-4)$$

式中 \bar{x} 为算术平均值, s 为测量列标准差.

表 0-2-1 g_n 表(显著水平 $\alpha = 0.05$)

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
g_n	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.24	2.29
n	13	14	15	16	17	18	19	20	22	25
g_n	2.33	2.37	2.41	2.44	2.47	2.50	2.53	2.56	2.60	2.66

4. 间接测量的结果

设 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_m 测得后, 可由此函数求出物理量 y 之值. 如果 x_1, x_2, \dots, x_m 各有 n 个测量值, 则有两种计算 y 的方法.

(1) 先平均法

先求各 x_i 的平均值, 然后将它们代入函数求 y , 即

$$y = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (0-2-5)$$

(2) 后平均法

分别从各 x_i 中取一值求 y_i , 可得 n 个 y 值, 再求 y_i 的平均值, 即

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{\sum y(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi})}{n} \quad (0-2-6)$$

对于线性函数,两方法计算结果是一致的,对于非线性函数则有差异,但是一般差异很小,而后平均法要求各 x 的测量次数相同,这很不方便,所以一般均用先平均法。

5. 标准差的传递与合成

已知 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 当由各 x_i 的测量值代入函数式求 y 值时,各 x_i 的误差也随之传递给求出的 y 值. 对函数进行全微分,得

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_m} dx_m \quad (0-2-7)$$

此式表示各 x_i 有微小变化时, y 也将有微小变化,这是误差传递的基本关系式. 将此式两侧平方,得

$$dy^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 dx_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 dx_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m}\right)^2 dx_m^2 + 2\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right) dx_1 dx_2 + \dots$$

如果测量 n 次,可有 n 个如上的关系式,两侧分别相加则得

$$\sum_{i=1}^n dy_i^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sum dx_{1i}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sum dx_{2i}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m}\right)^2 \sum dx_{mi}^2 + 2\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right) \sum dx_{1i} dx_{2i} + \dots$$

在此取 $dx_i^2 \approx (x_i - \bar{x}_i)^2$, 则上式两侧分别除以 $(n-1)$, 即为标准差的合成式:

$$s^2(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 s^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 s^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m}\right)^2 s^2(x_m) + 2\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right) \sum (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)/(n-1) + \dots \quad (0-2-8)$$

上式中右侧的后一项为交叉项乘积之和,当各 x_i 为独立测量时,

此交叉项乘积之和由于抵偿作用而变小,而且随 n 的增大将趋于零. 因而对于各 x_i 为相互独立测量时,可略去交叉乘积各项,得常用的标准差合成式为

$$s(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 s^2(x_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 s^2(x_2) + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m}\right)^2 s^2(x_m)} \quad (0-2-9)$$

二、测量不确定度^①

由于测量不可避免要有误差,所以用一测量结果作为被测量真值的估计值自然要有偏差,现在讨论的测量不确定度就是对测量结果 x 的偏差做全面的评估. 测量不确定度 U 是测量结果附近的量值范围($\bar{x} - U, \bar{x} + U$),在此量值范围中可能涵盖被测量真值,显然测量不确定度的范围越窄,测量结果就越可靠.

1. 不确定度的来源

任何测量结果的不确定度均是几个不同来源的不确定度的综合效应,评定不确定度首先要明确它的不同来源. 实际上不确定度的来源可能有如下一些方面:

- (1) 原理、方法、实施方案不理想;
- (2) 实验装置体现实验原理、方法不完善;
- (3) 读数的偏差;
- (4) 仪器的基本误差;
- (5) 仪器的不稳定;
- (6) 调整、操作上不完善;
- (7) 环境及其它偶然变化;
- (8) 借用值的不确定度;
- (9) 标准物的不确定度.

分析测量不确定度要参考一些资料,要有经验,但重要之点是

^① 刘智敏. 不确定度原理. 北京:中国计量出版社,1993

对实验有深入的了解。

2. 标准不确定度的评定

实验不确定度的来源可有多个,但评定不确定度的方法只有两种,即 A 类评定和 B 类评定。当评定的不确定度表现为标准差时,称为标准不确定度。

(1) 标准不确定度的 A 类评定

由于各种偶然效应使重复测量的测量值分散开,标准差是这些测量值的统计值,它表现了测量值分散的情况,亦即表达了由于偶然效应引入的不确定度,这时的评定为 A 类评定,这也说明前述标准差是不确定度的一部分。

标准不确定度的 A 类评定 $u_A(x)$,就取算术平均的标准差 $s(\bar{x})$,即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (n(n-1))} \quad (0-2-10)$$

(2) 标准不确定度的 B 类评定

不是由于偶然效应引入的不确定度,不能用统计方法去计算,这时的不确定度评定为 B 类评定。

标准不确定度的 B 类评定,是参照有关资料(比如国家计量技术规范(代号 JJG)中有关资料)给出一极限值 Δ ,再由此极限值 Δ 除一系数 k ,得出等价于标准差的标准不确定度 $u_B(x)$,即

$$u_B(x) = \Delta / k \quad (0-2-11)$$

系数 k 的取值和分布有关,若为高斯分布,对应 Δ 的置信概率为 95%,则取 $k=2$;对于均匀分布则取 $k=\sqrt{3}$ 。一般仪器基本误差引入的不确定度,不是高斯分布也不是均匀分布,但比较接近均匀分布,取 $k=\sqrt{3}$ 。在我们的实验中,一般可取 $k=\sqrt{3}$ 。

(3) 合成标准不确定度

测量结果的不确定度是各来源不确定度的综合效应,各来源标准不确定度的综合就称为合成标准不确定度 $u_c(x)$ 。由于各来