

供医学各专业和理工科相关专业使用

Physics Experiment

物理实验

Physics Experiment

主编：王阿明



第二军医大学出版社

供医学各专业和理工科相关专业使用

物理实验

主 编 王阿明

编 者 (以姓氏笔画为序)

王阿明 牛继杰 仇 康 朱 坤

周柯克 胡传浩 梁寒冰 程 阳

第二军医大学出版社

内 容 简 介

本书内容由基本实验、提高型实验(综合性、设计性、应用性等)、研究创新型实验和仿真实验组成,体现了现代科学技术的发展和应用,注重发挥物理实验在培养学生科学的实验方法、创新思维能力和实践能力等方面的作用。在内容的叙述上,力求做到实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,仪器介绍实用、典型,实验步骤简明扼要。本书可作为高等院校理、工、医、药各专业学生的物理实验课程教材使用,也可供从事生命科学相关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验/王阿明著. —上海:第二军医大学出版社,2008.9

ISBN 978-7-81060-866-4

I. 物… II. 王… 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(2008)第 133665 号

物理实验

主 编:王阿明

责任编辑:孙立杰

第二军医大学出版社出版发行

(上海市翔殷路 818 号 邮政编码:200433)

全国各地新华书店销售

徐州医学院印刷厂印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:10.5 字数:268 千字

2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81060-866-4/O·009

定价:21.80 元

前 言

大学物理实验是医学和理工科学生必修的一门重要的基础实验课。根据高等学校物理实验课程教学基本要求,在从事物理学理论和实验课教学 20 多年的基础上,精心编写了《物理实验》。

本书在体系编排上,突破了力、热、声、电、光的传统体系,按由浅入深、由简到繁、循序渐进的认识规律编排实验内容,由基本实验、提高型实验(综合性、设计性、应用性等)、研究创新型实验和仿真实验组成,体现了现代科学技术的发展和应用,注重发挥物理实验在培养学生科学的实验方法、创新思维能力和实践能力等方面的作用。

在内容的叙述上,考虑到学生基础和物理实验课的独立性,力求做到实验原理叙述清楚,计算公式推导完整,仪器介绍实用、典型,实验步骤简明扼要。为满足不同专业学生的需要,有些实验可以作为选做内容和实验室开放实验内容。

实验教学是一项集体的事业,离不开实验室的建设和发展。经过 20 多年的教学实践,实验教材经过多次调整和修订,才达到现在的规模和水平,其中凝聚了许多教师和实验技术人员(包括已退休和调离的同志)的智慧和劳动。

在本书的编写、出版过程中,徐州医学院教务处、基础学院、影像学院、学报编辑部、教材科和校领导给予了热情指导和大力支持。

在此,对为本书做出贡献的所有同志和部门表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免有缺点,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

二〇〇八年七月

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 基本实验	12
实验一 基本测量	12
实验二 液体黏滞系数的测定	17
实验三 万用电表的原理和使用	21
实验四 示波器的原理和使用	25
实验五 超声诊断原理	30
实验六 静电场测绘	33
实验七 惠斯登电桥的原理和使用	39
实验八 电位差计测电源电动势	42
实验九 阿贝折射仪测定液体折射率	45
实验十 衍射光栅测光波波长	48
实验十一 听力曲线的测定	53
实验十二 伸长法测钢丝杨氏模量	56
实验十三 热敏电阻器的电阻温度特性测量	59
实验十四 磁场的测量与描绘	64
第三章 提高型实验	67
实验十五 电振音叉频率的测定	67
实验十六 普朗克常数的测定	69
实验十七 电表设计与校准	73
实验十八 夫兰克-赫兹实验	78
实验十九 信号频率的测定	84
实验二十 硅压阻力敏传感器测液体表面张力系数	87
实验二十一 单缝、单丝衍射实验	91
实验二十二 单缝和单丝衍射光强分布测量	94
实验二十三 电路元件伏安特性的测绘	99
实验二十四 整流滤波电路	102
实验二十五 声速的测定	104
实验二十六 水的比汽化热测定	110
实验二十七 集成电路温度传感器的特性测量及应用	113

第四章 研究型实验..... 116

实验二十八	医用换能器原理及其在脉搏波、呼吸波测量中的应用	116
实验二十九	利用传感器测定人体血压.....	119
实验三十	热敏电阻温度计的制作.....	122
实验三十一	溶液浓度的测定.....	126
实验三十二	人体阻抗的研究.....	130
实验三十三	光偏振现象的研究.....	134
实验三十四	心电信号的测量与处理.....	139
实验三十五	方波的傅里叶分解与合成.....	147
实验三十六	模拟心电.....	151

第五章 仿真实验..... 155

参考文献..... 162

23	.....	162
48	.....	162
62	.....	162
66	.....	162
68	.....	162
69	.....	162
70	.....	162
71	.....	162
72	.....	162
73	.....	162
74	.....	162
75	.....	162
76	.....	162
77	.....	162
78	.....	162
79	.....	162
80	.....	162
81	.....	162
82	.....	162
83	.....	162
84	.....	162
85	.....	162
86	.....	162
87	.....	162
88	.....	162
89	.....	162
90	.....	162
91	.....	162
92	.....	162
93	.....	162
94	.....	162
95	.....	162
96	.....	162
97	.....	162
98	.....	162
99	.....	162
100	.....	162
101	.....	162
102	.....	162
103	.....	162
104	.....	162
105	.....	162
106	.....	162
107	.....	162
108	.....	162
109	.....	162
110	.....	162
111	.....	162

第一章 绪 论

一、物理实验课程的任务和要求

物理实验是物理学的基础,任何物理定律、物理理论都是建立在实验基础上,并由实验得到验证的。从物理学的发展史可以清楚地看出:物理学的发展,需要借助于实验技术的提高,而实验技术也只有物理学理论发展的基础上才有可能提高。因此,物理实验和物理理论都是科学地认识、研究自然现象过程中必要的组成部分。

物理实验是一切自然科学的基础。现代自然科学中,既广泛地应用着物理学的理论,也同样广泛地应用着物理学实验的方法。通过物理实验的学习,使学生在科学实验的能力、方法等方面得到较系统的培养和训练,为学习专业课程和将来从事科学研究打下良好的基础。

(一)物理实验的教学任务

1. 培养学生观察、分析物理现象及规律的能力,巩固和加深对物理学的基本概念、规律和理论的理解。

2. 使学生在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能方面得到较系统的培养和训练。具体要求是:掌握基本的物理量的测量原理和方法;熟悉常用仪器的一般原理及使用方法;了解实验误差的基本概念,分析误差产生的原因;能正确按照有效数字的运算规则对实验数据进行记录和运算,绘制实验曲线;分析实验结果,写出实验报告等。

3. 培养学生严谨的工作作风、实事求是的科学态度和科学的工作方法,使学生初步具有进行科学实验的能力。

(二)物理实验中对学生的要求

1. 实验前做好预习 预习时应明确实验目的,理解实验原理,初步了解实验中所用仪器的结构、性能和使用方法,了解实验步骤和应注意的事项。

2. 认真做好实验 进入实验室,学生须对自己所使用的实验仪器进行检查,然后将仪器合理排列、安放。实验过程中应保持室内安静,养成清洁整齐、有条不紊、爱护仪器的习惯。应认真进行实验,操作必须按正规方法进行。实验结束后应整理好仪器,经指导教师检查后,方可离开实验室。

3. 写好实验报告 实验报告的内容包括:实验名称、目的、器材、原理、步骤、数据记录与处理(数据表格、运算结果、误差分析、作图等)和问题讨论等。

实验报告要字迹清楚,段落分明。实验目的、原理、步骤要用自己的语言简练地写成;表格设计要合理、清楚;数据记录要齐全、真实;作曲曲线应光滑;问题讨论要反映出自己在实验中的切身体会。

二、误差与数据处理的基础知识

物理实验,就是用仪器对待测量进行测量,并用正确的形式将实验结果(数值和单位)表达出来。可见,测量是实验中一项不可缺少的重要工作。由于测量仪器的精度不同,将测量结

果和待测量的“真值”(该物理量在一定条件下的客观真实值)相比较时,必然存在一定的“误差”。同时,测量数据应按照“有效数字”和误差处理的规定进行正确的运算和处理,才能得出正确的表达形式。

为能正确地进行实验,在实验前了解并掌握有关这方面的基础知识是必要的。

(一) 测量与误差

1. 测量及其分类 测量就是将待测量与同类的选作为标准单位的物理量进行比较,获得待测量的测量值。显然,每一个测量值,都由数值和单位构成。

测量分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量 直接测量就是直接从仪器或量具上读出待测量的大小。如用米尺测出某物体的长度,用天平测出某物体的质量,用秒表测出某过程进行所需的时间,用电流表测出某回路的电流强度等。

(2) 间接测量 在大多数情形下,待测量并不能用仪器直接测量得到,而必须先测出与所求物理量有关的一些待测量,然后通过一定的函数关系,用公式将待测量计算出来,这类测量称为间接测量。例如,测量圆柱体的密度时,可以先用游标卡尺测出它的高度 H 、直径 D 、用天平测出它的质量 M ,然后根据公式 $\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\pi R^2 H} = \frac{4M}{\pi D^2 H}$,求得其密度。

2. 误差 不论是直接测量还是间接测量,都是期待获得待测量的真值。但由于测量仪器的局限性、测量方法或理论公式的不完善、实验条件的不理想、操作者的不熟练等原因,不可能使测量值与客观存在的真值完全相同,测量结果与真值之间必然存在一定的偏差,该偏差就称为测量的误差。设某待测量的真值(被测量在其所处的确定条件下,客观具有的量值)为 X_0 ,测量值为 X ,则测量误差(测量值与真值之差)为:

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1)$$

误差 ΔX 可正可负,当 ΔX 为正时,称为正误差; ΔX 为负时,称为负误差。误差反映了测量值偏离真值的程度。

当待测量有公认标准值或理论值时,在实验结果的数据处理中,还常常把测量值与其公认值进行比较,用相对误差(E)来表示,定义为绝对误差与真值之比,并用百分误差表示实验结果:

$$E = \frac{|\bar{X} - X_{\text{公认}}|}{X_{\text{公认}}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, $X_{\text{公认}}$ 为公认值或理论值,也可以是另一种高精度仪表的测量值; $\bar{X}$ 为待测量的平均值。

3. 误差的分类 按误差的性质和产生的原因,可将误差分为系统误差和随机误差两类。

(1) 系统误差 在同一条件下多次测量同一物理量时,误差的大小和方向保持恒定,或在条件改变时,误差的大小和方向按照一定规律变化,这种误差称为系统误差。系统误差主要来源于仪器误差(如仪器的零点不准、刻度不准,天平两臂不等,应竖直使用的电表却平放使用等),理论方法的不完善(如用伏安法测电阻时,没有考虑电表内阻的影响等),以及个人某些不良习惯或实验技术不够熟练(如按动秒表计时时,习惯性提前或滞后等)。

系统误差可以通过改进测量方法、修正计算公式、减小仪器误差、提高实验技能等方法减小或部分地加以消除。

(2) 随机误差 在同一条件下多次测量同一物理量时,每次出现的误差时大时小、时正时负,没有确定的规律,但就总体来说其服从一定的统计规律,这种误差称为随机误差。随机误差的特征是误差的数值(大小)和方向(正负)是随机变化的,没有确定规律,但总体服从一定

的统计规律,它是由许多不可预测的偶然因素造成的。例如,电源电压的波动,环境温度、湿度的变化,外界电磁场的干扰,外界环境不规则的振动、噪声,观察者的感官灵敏度和估读能力不一致等。

大量实验证明,虽然每次测量的随机误差不可预测,但多次测量的随机误差的分布,却表现出严格的统计规律性。因此,可用概率统计的方法处理随机误差。

由随机误差产生的原因和性质可知,增加重复测量的次数可以减小随机误差。

应当指出,由于实验者在读数记录或操作时出现的错误而引起的实验结果偏离真值的现象,不属于误差的范畴,而是错误。误差应该设法减少,但不可能全部消除;而错误是完全可以避免的。

实验结果的随机误差常用平均绝对误差、标准误差和极限误差等表示。本书仅用平均绝对误差和相对误差表示实验结果。

4. 直接测量误差的估算

(1) 单次直接测量误差的估算 在实验中,有的物理量是在动态中测量,不允许做重复测量,有的实验精度要求不高,或某一测量量的误差相对于总误差可以忽略,在这些情况下,可对待测量只进行一次测量,称为单次测量。对单次测量的误差估算,应根据仪器的精度和当时的具体条件,作出合理的估计。一般地说,仪器的误差在出厂鉴定书上或仪器上已经注明,这个误差可以作为单次直接测量误差的估计值。如果没有注明,也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。例如,用米尺测量长度,米尺的最小分度是 1 mm,单次测量的误差可估计为 0.5 mm。

(2) 多次直接测量的误差估算 多次直接测量的误差估算步骤一般可归纳如下:

1) 求出 n 次测量的算术平均值。设对某一待测物理量进行 n 次测量,各次测量数值分别为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 求出算术平均值($\bar{X}$):

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1-3)$$

由随机误差性质可以证明,多次测量值的算术平均值是接近于真值的最佳测量值,因此,常将算术平均值称为近真值,用以代替真值。

2) 求出各次测量的绝对误差。各次测量的绝对误差($|\Delta X_i|$)为该次测量值 X_i 与 $\bar{X}$ 之差的绝对值,即

$$|\Delta X_i| = |X_i - \bar{X}| \quad (1-4)$$

3) 求出平均绝对误差。平均绝对误差定义为 n 次测量的绝对误差的平均值:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n}(|\Delta X_1| + |\Delta X_2| + \dots + |\Delta X_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta X_i| \quad (1-5)$$

5. 间接测量的误差估算 在实验中,由于间接测量量都是通过一定的函数关系式由各直接测量量计算得到,而各直接测量量都存在误差,所以,计算出的间接测量量也必然存在误差。间接测量的误差由误差传递公式进行估算。表 1-1 给出了常用函数(间接测量量)的平均绝对误差传递公式(推导过程略)。

从表 1-1 可以看出:和、差的平均绝对误差,等于各量的平均绝对误差之和;积、商的相对误差,等于各量的相对误差之和,这叫做最大误差的传递规律。同时还可得出结论:对于和、差运算式,先求平均绝对误差,后求相对误差比较方便;对于乘、除运算式,先求相对误差,后求平均绝对误差比较方便。

表 1-1 常用函数的绝对误差传递公式

函数表达式	误差传递公式
$N = X \pm Y$	$\Delta N = \Delta X + \Delta Y$
$N = XY$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$
$N = \frac{X}{Y}$	$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$
$N = \frac{X^k Y^m}{Z^n}$	$\frac{\Delta N}{N} = k \frac{\Delta X}{X} + m \frac{\Delta Y}{Y} + n \frac{\Delta Z}{Z}$
$N = \sin X$	$\Delta N = |\cos X| \Delta X$
$N = \cos X$	$\Delta N = |\sin X| \Delta X$
$N = \ln X$	$\Delta N = \frac{\Delta X}{X}$

表中测量量 X, Y, Z, N 均为平均值, 误差 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta N$ 均为平均绝对误差

6. 测量结果的表示法 设平均绝对误差为 $\overline{\Delta X}$, 平均值为 $\bar{X}$, 则测量结果可表达为

$$X = \bar{X} \pm \overline{\Delta X} \quad (1-6)$$

应当指出, (1-6) 式中的 $\overline{\Delta X}$ 并不是测量值的实际误差, 也不是误差范围, 它只是对一组测量数值离散性的估计。按照高斯误差理论, 测量的平均绝对误差为 $\overline{\Delta X}$ 时, 则一组测量值中有 57.5% 的误差分布在 $-\overline{\Delta X} \sim +\overline{\Delta X}$ 区间内, 也就是说, 每一测量误差落入在 $-\overline{\Delta X} \sim +\overline{\Delta X}$ 之间的可信率为 57.5%。至于具体测得的一个值, 误差是否在 $-\overline{\Delta X} \sim +\overline{\Delta X}$ 之间就不一定了。 $\overline{\Delta X}$ 越小, 测量值的离散性就越小。

相对误差 (E) 在此可定义为平均绝对误差与算术平均值之比, 即:

$$E = \frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} \quad (1-7)$$

也可用百分数表示, 即:

$$E = \frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1-8)$$

(二) 测量结果的有效数字及其运算法则

对于任何物理量的测量, 都不可避免地存在误差, 所以表示该测量量值的数值位数不能随意取位, 其取位应该能正确反映测量的精度。

1. 有效数字的基本概念 能够正确且有效地表示测量和实验结果的数字叫做有效数字。有效数字是指测量结果中可靠的几位数字及最后一位的欠准数字, 有效数字的个数就称为有效数字的位数。例如, 用厘米刻度的米尺测量某物体的长度, 如图 1-1(a) 所示, 读数为 4.3 cm, 其中 4 为可靠数字, 3 为估读的欠准数字。有效数字的最后一位虽然是欠准的, 但它一定程度上反映了待测量的客观实际大小, 因此它也是有效的。4.3 cm 具有 2 位有效数字。

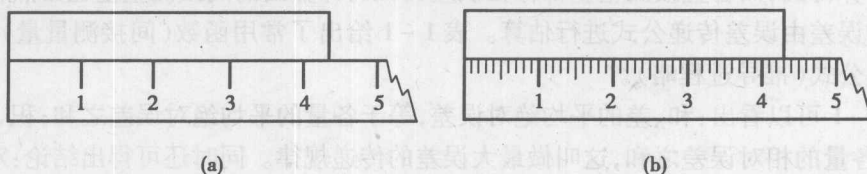


图 1-1 有效数字读数

有效数字的位数不仅可以表示测量结果的大小,而且表示了测量结果的精确度,或者反映了测量仪器的精度。例如,图 1-1(a)中的物体如用毫米刻度尺测量,见图 1-1(b),则其读数为 4.35 cm,为 3 位有效数字。显然,后者的精度比前者高。

一般从仪器直接读数时,读出的有效数字中可靠数字部分是由待测量的大小与所用仪器的最小分度所决定,欠准数字是对介于 2 个最小分度之间的数值进行估读(用视觉估读的方法一般为最小分度的 1/10、1/5 或 1/2),估读数取 1 位(这一位是有误差的)。

在用有效数字表示待测量的大小时,应注意以下几点:

(1) 有效数字的位数是从第 1 个不为零的数字数起,数字前面的“0”只表示小数点位置,不是有效数字。例如“0.040 5”、“0.405”、“4.05”均为 3 位有效数字。

(2) 有效数字的欠准位如为“0”,则记数时一定要记上而不能遗忘。如图 1-2(a)的读数应为 4.0 cm,而不应记作 4 cm;图 1-2(b)的读数应记作 4.00 cm,而不能记作 4 cm 或 4.0 cm。可见,在有效数字后面不能随意增加或减少“0”。

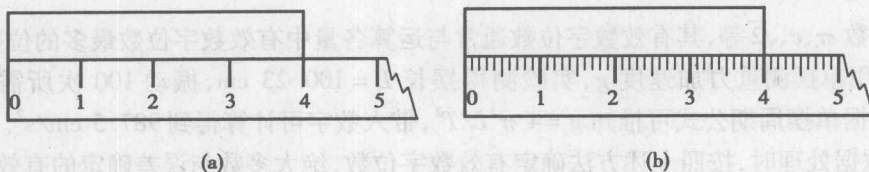


图 1-2 有效数字读数

(3) 在变换单位和小数点的位置时,有效数字的位数不能任意增减。例如,11 cm 不能写成 110 mm 而只能写成 1.1×10^2 mm,100 cm 不能写成 1 m,而应写作 1.00 m。

(4) 如果有效数字的数值很大或很小时,可用科学计数法表示,即表示成 $k \times 10^n$ (n 可正可负)的形式。例如:0.004 05 m 可写成 4.05×10^{-3} m,30 586 m 可写成 $3.058 6 \times 10^4$ m。

2. 有效数字的运算法则 当几个有效数字在一起运算时,其结果取几位有效数字,应根据误差计算来确定。但是,在没有进行误差计算之前,可以根据有效数字的运算法则粗略地给出运算结果的有效数字位数,将能使运算简单而不致因计算带来附加“误差”。

有效数字的运算应遵循以下两条准则:①一欠准数字与准确数字(或欠准数字)之间的运算结果仍为欠准数字,但它们运算进位的数字可以是准确数字。②运算后的结果只保留一位欠准数字,按舍入规则去掉第 2 位及其后的欠准数字。

在科学实验中,为了减小舍入误差,一般不采用“四舍五入”而采用“整五凑偶”的舍入规则,即要舍去部分的数值小于 5 则舍,大于 5 则入,等于 5 时把欠准位凑成偶数。由于在多次舍入过程中,末位出现奇偶的概率相同,因而使舍入规则成为随机误差而不造成系统误差。例如,计算结果为 34.35 和 34.45(数字下加横线者为欠准数字,下同),最终结果均为 34.4。

根据上述准则,有效数字的运算法则如下:

(1) 当几个有效数字相加减时,其运算结果的欠准位与运算各数中欠准位最高的一位数相同。

例如: $243.\underline{3} + 30.\underline{05} + 4.\underline{076} = 277.\underline{426} = 277.\underline{4}$

$658.\underline{6} - 21.\underline{35} = 637.\underline{25} = 637.\underline{2}$

(2) 当几个有效数字相乘除时,其运算结果的有效数字位数与运算各数中有效数字位数

最少者相同。在特殊情况下,有时会多一位或少一位。

$$\text{例如: } 15.\underline{6} \times 4.\underline{8} = 74.\underline{88} = 75$$

$$6.\underline{58} \div 1.\underline{2} = 5.\underline{5}$$

为了简化运算,作加减运算之前,以欠准位最高的位数为基准,先进行取舍,取齐各数的欠准位,然后加减;作乘除运算前,以运算各数中有效数字位数最少者为基准,其余各数多保留一位,然后进行计算,在运算结果中将多保留的一位数字按舍入规则去掉。这样对计算结果不会有影响。

(3) 乘方、开方的有效数字位数与其底数的有效数字相同。

$$\text{例如: } (2.356)^2 = 5.551, (25.25)^{1/2} = 5.02$$

(4) 三角函数的有效数字位数与其角度的有效数字位数相同。

$$\text{例如: } \cos 32.7^\circ = 0.842$$

(5) 对数结果中小数点后面的有效数字位数与其真数的有效数字位数相同。

$$\text{例如: } \lg 1.983 = 0.2973$$

(6) 常数 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等,其有效数字位数通常与运算各量中有效数字位数最多的位数相同。

例如:用单摆测重力加速度 g ,实验测得摆长 $L = 100.23 \text{ cm}$,振动 100 次所需时间 $T = 200.2 \text{ s}$,根据单摆周期公式可推知 $g = 4\pi^2 L/T^2$,带入数字可计算得到 987.5 cm/s^2 。

进行数据处理时,按照上述方法确定有效数字位数,绝大多数与误差确定的有效数字位数相一致。

对于相对误差的有效数字位数,一般当 $E < 10\%$ 时,取 1 位;当 $E > 10\%$ 时,取 2 位。

对于测量结果的有效数字位数,由误差确定。表示测量结果的误差一般只取 1 位(特殊情况下不超过 2 位),测量结果的有效数字的最后一位与误差所在的一位对齐。如 $L = (1.32 \pm 0.02) \text{ cm}$ 是正确的, $I = (36.1 \pm 0.05) \text{ mA}$ 或 $g = (980.125 \pm 0.03) \text{ cm/s}^2$ 都是错误的。

例:用精度为 0.1 mm 的游标尺,测一圆柱体的高度 H 和直径 D ,其表达式分别为 $H = (10.00 \pm 0.01) \text{ cm}$, $D = (5.00 \pm 0.01) \text{ cm}$,计算该圆柱体体积的平均绝对误差和相对误差,并写出测量结果表达式。

解:根据圆柱体的体积公式 $V = \frac{\pi}{4} D^2 h$,可计算得到圆柱体体积的平均值:

$$\bar{V} = \frac{\pi \bar{D}^2 \bar{H}}{4} = \frac{3.142}{4} \times 5.00^2 \times 10.00 = 196 (\text{cm}^3)$$

圆柱体体积为直接测量量 H 、 D 的乘积函数式,为间接测量量,根据误差传递公式,应先求相对误差,后求平均绝对误差。

圆柱体体积的相对误差为:

$$E = \frac{\Delta \bar{V}}{\bar{V}} = 2 \frac{\Delta \bar{D}}{\bar{D}} + \frac{\Delta \bar{H}}{\bar{H}} = 2 \times \frac{0.01}{5.00} + \frac{0.01}{10.00} = 0.005 = 0.5\%$$

圆柱体体积的平均绝对值误差为:

$$\Delta \bar{V} = E \cdot \bar{V} = 0.005 \times 196 = 1 (\text{cm}^3)$$

圆柱体体积的结果表达式为:

$$V = \bar{V} \pm \Delta \bar{V} = 196 \pm 1 = (1.96 \pm 0.01) \times 10^2 (\text{cm}^3)$$

根据间接量与直接量的函数关系,由误差的传递公式,可找出哪些分误差是影响总误差的主要因素。为了减小测量总误差,对于影响总误差的主要因素的直接测量仪器,要将其精度选

择得高一些。从上例求圆柱体体积的相对误差公式中可以看出,直径的分误差在总误差中比高度的分误差影响大,为了减小总误差,如果改用精度更高的游标尺或千分尺测量直径,则可使测量结果误差减小。

(三) 实验数据处理的基本方法

实验中所测得的大量数据,需要进行整理、分析和计算,并从中得到实验的最后结果和寻找出实验的规律,这个过程称为数据处理。数据处理的方法很多,这里仅介绍常用的列表法和图示法。

1. 列表法 列表法就是将实验中的直接测量量、间接测量量和计算过程中的数值按照一定的顺序列成表格。列表可以简明地表示有关物理量之间的对应关系,便于随时检查测量结果是否合理,及时发现和分析问题;列表还有助于找出有关物理量之间的关系和变化规律,得出正确的结论或获得经验公式等。

列表处理数据的时候,要遵循以下原则:

(1) 表格设计要简单明了,便于看出有关量之间的关系。

(2) 表中各符号所代表的物理量的意义要清楚,并写明其单位,数据栏中的数值不必写上单位。

(3) 表格中的数据要正确反映所测物理量的有效数字。

(4) 在表中不能说明的问题,可在表下加以说明。

例:伸长法测钢丝杨氏模量-钢丝直径的测量值见表1-2。

表1-2 伸长法测钢丝杨氏模量-钢丝直径的测量值

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
直径(mm)	0.196	0.200	0.204	0.198	0.198	0.202	0.198	0.198	0.204	0.198	0.200

2. 图示法 物理实验中得出的一系列数据,若用图线表示,可以比较直观地表达所测物理量之间的函数关系,有时还可以不通过计算就能读得在某种情况下物理量之间的对应值。因此,图示法是研究物理量之间的变化规律,找出对应的函数关系,求得经验公式的最常用方法之一。

作图的步骤一般如下:

(1) 选择坐标纸 作图前应根据图线所表示的内容及函数的形式而确定用什么坐标纸(如直角坐标纸、对数坐标纸或极坐标纸等),坐标纸的大小要根据实验数据的有效数字而定,即应能在坐标纸上读出实验数据的有效数字。

(2) 确定坐标轴和分度值 通常以横轴代表自变量,纵轴代表因变量。每个轴应标明方向及所代表的物理量名称(用符号标明)和单位。确定分度值(坐标轴每格所代表的物理量数值)的原则一般应使其对应于有效数字的最后一位可靠位。坐标原点应根据实际情况,可取为零,也可不取为零。坐标轴上每隔一定间距(如5格或10格)标明代表的物理量值,对于直角坐标纸,常使一大格(10小格)所代表的值为1、2、5,而不宜代表3、7、9。坐标轴的比例选择要合适,使曲线倾斜度接近于 45° (或 135°),不要偏于一角或一边,横轴和纵轴可以选取不同的分度值,以使曲线尽可能布满坐标纸。

(3) 标点 用削尖的硬铅笔,将每对实验数据在坐标纸上用符号清晰而准确地标出,常用的符号有“ $\times$ ”、“ $+$ ”、“ $\triangle$ ”、“ $\odot$ ”等,符号中心与实验点对应,同一条图线上的数据点要用同

一种符号,2条图线用2种不同的符号以示区别。

(4)连线 各数据点标出后,一般能大体上看出实验曲线的形状(个别点偏离较远应进行复核),描绘曲线时,可用细硬铅笔沿直尺或曲线板画出一条直线或光滑的曲线。连线时,应尽量使图线紧贴所有的实验点,并使实验点尽可能均匀分布于图线的两侧,切忌将原本是光滑的图线画成折线形状,如图1-3所示。

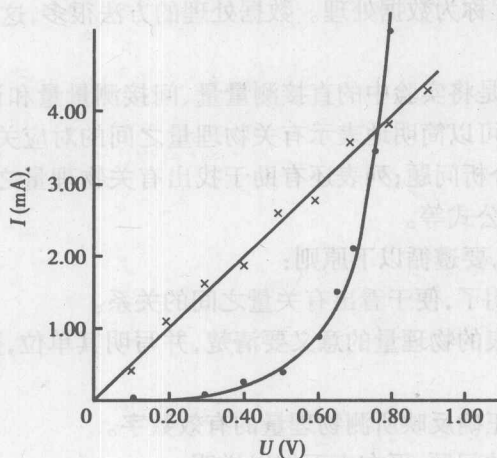


图1-3 伏安特性曲线

物理实验中由实验图线找出物理量之间的关系,确定其函数关系式,这个过程称为由实验图线求经验公式。通常遇到的图线是直线、抛物线、指数曲线等。下面以直线为例说明如何由实验图线求经验公式。

设实验图线为一直线,根据解析几何知识,对应的经验公式的函数式为:

$$y = ax + b \quad (1-9)$$

式中 a 、 b 分别为待求的直线斜率和截距。在直线上任选两点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) (一般所选两点应分隔较远,且不得用原始实验数据),列出方程组:

$$y_1 = ax_1 + b$$

$$y_2 = ax_2 + b$$

解得:

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

将 a 值代入上式中的任一式,即可求得 b 值,便可得到与实验图线相对应的经验公式。

3. 曲线改直 由于能将直线高度精确地画出,并由此判断物理量之间的线性函数关系。因此,对于非线性的函数关系,可以通过变量代换,变换成为线性关系,即把曲线改成直线,称为曲线改直。

例如,若物理量 y, x 之间满足指数方程 $y = ae^{-bx}$ (a, b 为常量),则通过方程两边取对数, $\ln y = -bx + \ln a$, $\ln y$ 和 x 间满足线性函数关系。实验图线为直线, $-b$ 为斜率, $\ln a$ 为截距。斜率和截距通过实验图线求得后,即可求得 y 和 x 之间的经验公式 $y = ae^{-bx}$ 。

例:热敏电阻的电阻温度特性研究实验,热敏电阻和温度存在以下的函数关系:

$$R_T = Ce^{B/T}$$

对等式两边取自然对数,可得:

$$\ln R_T = \ln C + B/T$$

处理前后的曲线分别如图 1-4、1-5 所示。

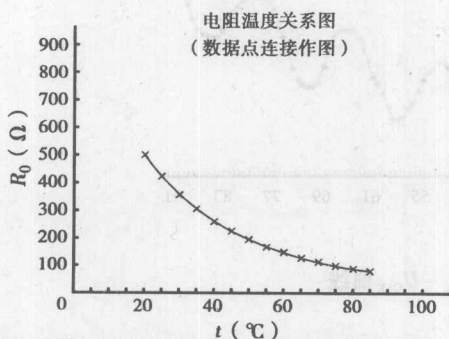


图 1-4 电阻温度关系图

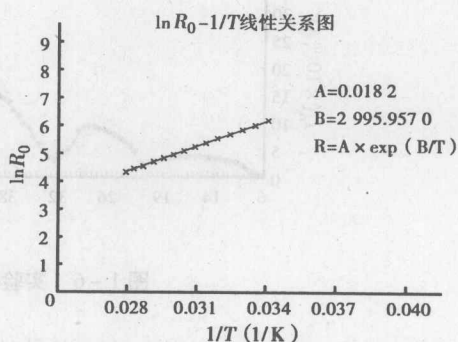


图 1-5 线性关系图

4. 最小二乘法直线拟合 在图示法中已讲到,若变量 y 与 x (如欧姆定律中的电流强度 I 与电压 U) 之间存在着线性关系,对应的函数式改为:

$$y = ax + b$$

实验时若测得一组数据: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 。由这组数据确定一条直线与这些实验点 (x_i, y_i) 作最佳配合,称为直线拟合。

最小二乘法认为:若拟合的直线为 $y = ax + b$,则所测各 y_i 值与拟合直线的相应值(对同一 x_i) $y_i' = ax_i + b$ 之间的误差的平方和为极小,即:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i') \rightarrow \min(\text{极小})$$

这时,所拟合的直线是最佳的。所以,解决直线拟合的问题,也就成为如何由实验数据 (x_i, y_i) 确定系数 a, b 的问题。经数学推导(推导略),可得:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1-10)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1-11)$$

将 a, b 值代入式(1-9),便得到了用最小二乘法拟合的直线方程 $y = ax + b$,由此方程作出的直线,就能使误差的平方和为最小,并使各实验点均匀分布在直线的两侧。

5. 用 Excel 软件进行实验数据处理 Excel 软件是一种功能强大的电子表格软件,可以应用于处理数据、分析数据以及绘制图表等方面。下面就夫兰克-赫兹实验简单介绍 Excel 软件在实验数据处理中的应用。

(1) 绘制 $I_A - U_{G_2K}$ 曲线 将原始数据键入工作区,使 V_{G_2K} 在 A 列, I_A 在 B 列。选择菜单中“插入”→“图表”,在弹出的对话框中选择“数据点折线图”,“系列产生在”列,“数据区域”选择 B 列,填写好后续相关选项,点击“完成”会生成 I_A 曲线图。但这时的 X 轴并不是 U_{G_2K} ,在图上右击,在出现的选项中选择“源数据”,选择“系列”选项卡,最下方的“分类 X 轴标志”选

择 A 列,这样就得到了 $I_A - U_{G2K}$ 曲线。如图 1-6 所示。

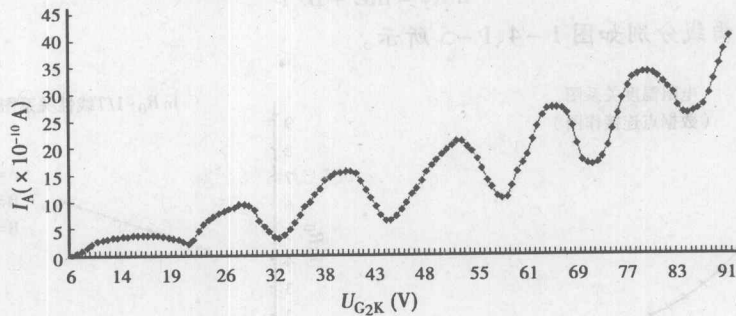


图 1-6 实验测量数据 $I_A - U_{G2K}$ 曲线

(2) 第一激发电势和接触电势差的计算 弗兰克-赫兹管的阴极和栅极是由不同的金属材料制成,由于逸出功不同会产生接触电势差;同时因为空间电荷对加速电压的屏蔽作用,加在电子上的加速电压是 U_{G2K} 与这些因素电压的代数和,这将使得整个实验曲线平移。峰位序数 n 和对应加速电压具有线性关系,即 $U_{G2K} = a + bn$ (其中 a 为接触电势差等因素引起的电势差, b 为氩原子的第一激发电位)。

在测得的实验数据基础上,可以得到峰位序数和对应加速电压的实验数据。具体做法:将鼠标放至 Excel 图的相应峰位上时,会出现该数据点的横、纵坐标。得到相应的数据如表 1-3 所示。

表 1-3 峰位序数和对应的加速电压实验值

峰位序数 n	1	2	3	4	5	6
U_{G2K} (V)	13.0	27.0	40.5	53.0	65.5	79.0

将 U_{G2K} 输入到工作区的 D1:D6,峰位序数输入到工作区的 E1:E6,分别与 $U_{G2K} = a + bn$ 中的 U_{G2K} 和 n 对应。应用 Excel 中的函数,在工作区的某一空白单元格中输入函数:“= LINEST (D1:D6,E1:E6,,FALSE)”,可求得斜率 b ,即氩原子的第一激发电势;输入函数:“= INTERCEPT(D1:D6,E1:E6)”可求得截距,即接触电势差;输入函数:“= CORREL(D1:D6,E1:E6)”可计算相关系数。计算结果如表 1-4 所示。

表 1-4 Excel 对弗兰克-赫兹实验数据处理结果

b (第一激发电势)	a (接触电势差)	相关系数
13.085 71	0.5333 33	0.999 799

【练习题】

1. 用游标卡尺测量时产生偶然误差的原因为:
 - (1) 环境因素引起的热胀冷缩
 - (2) 视差
 - (3) 本身刻度不均匀

(4)零点不准

2. 比较下列 3 个不同测量结果的好坏:

(a) $l_1 = (75.80 \pm 0.05) \text{ cm}$

(b) $l_2 = (1.525 \pm 0.005) \text{ cm}$

(c) $l_3 = (0.0485 \pm 0.0005) \text{ cm}$

试问:哪一个测量结果的精密度高? 哪一个测量结果的准确度高? 为什么?

3. 某一圆柱体的高度在 1 cm 到 2 cm 之间,若分别用精度为 0.1 mm、0.02 mm 的游标尺和 0.01 mm 的螺旋测微计测量该圆柱体的高,其测量值的有效数字分别为几位?

4. 甲、乙、丙三人,分别用螺旋测微计测量同一钢丝的直径,各人所得的结果表达式为: $L_{\text{甲}} = (0.2852 \pm 0.0002) \text{ cm}$, $L_{\text{乙}} = (0.285 \pm 0.0001) \text{ cm}$, $L_{\text{丙}} = (0.28517 \pm 0.0003) \text{ cm}$ 。哪一个表达式正确? 其他人的错在哪里? 应怎样改正?

5. 改正下列结果中的错误:

(1) $d = (10.45 \pm 0.01) \text{ cm}$

(2) $l = (4.6 \pm 0.03) \text{ mA}$

(3) $l = (13.85 \pm 0.24) \text{ mm}$

6. 某同学测量液体的黏滞系数和表面张力系数时,将测量结果表达式分别写成:

$\eta = 1.78250 \pm 0.01123 (\text{Pa} \cdot \text{s})$, $\alpha = 0.07053 \pm 0.00219 (\text{N/m})$, 试指出其错误,并给出正确的表达式。

7. 试用有效数字运算规则计算下列各式的结果:

(1) $85.436 - 6.67 + 3.2$

(2) 321.5×0.65

(3) $2.1 \div 3.412$

(4) $2.14^2 \times 64.85$

(5) $\frac{45.6}{5.60 - 2.4}$

(6) $\frac{50.00 \times (18.10 - 16.3)}{(103 - 3.0) \times (1.00 + 0.001)}$

8. 对金属圆柱体的直径 D 、高度 H 、质量 M 进行直接测量,其结果表达式分别为 $D = 2.510 \pm 0.005 (\text{cm})$, $H = 4.010 \pm 0.005 (\text{cm})$, $M = 155.953 \pm 0.005 (\text{g})$ 。试根据上述数据计算金属圆柱体密度的平均绝对误差、相对误差,并写出测量结果的表达式。

9. 用伏安法测某电阻,得数据如下:

$U(\text{V})$	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$I(\text{mA})$	4.01	6.05	7.85	9.70	11.83	13.75	16.02	17.86	19.94

(1) 用图示法直接绘出电阻的伏安特性曲线(U 为横坐标, I 为纵坐标),由直线求经验公式 $I = f(U)$ 及电阻的阻值。

(2) 用最小二乘法求出拟合直线方程 $I = f(U)$, 由该方程求出电阻的阻值,绘出校正的伏安特性曲线。

试分析上述 2 种处理数据的方法中哪一种方法较精确。

(程 阳)