

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

普通物理实验

郑友进 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校物理实验教学示范中心系列教材

普通物理实验

PUTONG WULI SHIYAN

郑友进 主编

赵立萍 胡 巍 吴春雷 吴同华 编
陈薇薇 黄海亮 尹龙承 王嘉奇



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS · BEIJING

内容提要

本书分为力学、热学、电磁学、光学和创新实验等内容。全书结构紧凑,内容丰富,编入基础实验、综合设计实验和创新实验共计 56 个。全书重点阐述普通物理实验的思想和方法,力求繁简共容、深入浅出,注重培养学生实验能力,提高其科学素质。

本书可作为高等学校理工科各专业基础物理实验课程的教材或参考书,也可供有关专业的技术人员和中学物理教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验 / 郑友进主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-04-033785-3

I. ①普… II. ①郑… III. ①普通物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第273304号

策划编辑 缪可可 责任编辑 胡凯飞 封面设计 赵阳 版式设计 马敬茹
插图绘制 尹莉 责任校对 殷然 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	北京鑫丰华彩印有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开本	787mm×960mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印张	16.75	版次	2012年2月第1版
字数	300千字	印次	2012年2月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	25.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 33785-00

前 言

普通物理实验是高等学校理工科大学生的必修基础课程。物理实验是一个严谨而系统的过程,从物理模型的建立、数学模型的推演到实验方案的确立,从仪器的选取、具体的操作、现象的观测、数据的处理,到结果的得出、理论的验证,无论哪一个环节无不蕴涵丰富的物理实验方法和物理思想,都需要学生参与其中进行独立的分析思考和感悟。大学物理实验对于提高大学生的观察能力和分析解决问题能力,掌握系统的实验方法和基本的实验技能,培养科学思维和创新能力,适应科技发展与社会进步对人才的需求方面有着不可替代的作用。

普通物理实验教材的编写如何能依据物理实验自身的特点及其作用,更有助于学生学会实验方法、形成实验技能、感悟物理思想,激发学习兴趣的同时提高学习的效果?这是编者长期以来苦苦思考的问题。几年来经过理论上的不断探索和实践中的不断总结,我们对这一问题有了更深的认识和体会。鉴于对此问题的不断探索和在教学实践中的不断总结,我们编写了这部普通物理实验教材。

全书除绪论外共分4章,第一章为力学、热学实验,编入22个实验,第二章为电磁学实验,编入16个实验,第三章为光学实验,编入12个实验,第四章为创新实验,编入6个实验,全书共56个实验。本教材在内容安排上充分考虑到理工科高校有关专业特点及基础课教学的需要,每项实验由实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容及数据处理表格、注意事项、思考题和重点仪器介绍等部分组成,尽量做到系统完整。另外,还对实验过程中可能会遇到的问题,实验的难点等做了适当的提示;作为实验的延伸,每个实验后面都留有一些思考题,由学生独立思考完成。

为了培养学生的实验创新能力,结合教学实践,本书第四章为创新实验专题,通过对6个创新实验的深入剖析,希望能够让学生认识到实验创新的可行性,树立创新的意识,掌握一定的实验创新方法,体会实验创新的快乐,希望能对提高大学生的创新思维和创新能力起到抛砖引玉的作用。

本书由牡丹江师范学院郑友进主编,是物理实验中心集体工作的结晶。本书绪论由赵立萍、黄海亮执笔,第一章由胡巍、吴春雷、黄海亮执笔,第二章由陈薇薇、尹龙承执笔,第三章由赵立萍、王嘉奇(黑龙江农垦职业学院)执笔,第四章

由吴同华执笔,郑友进参与了第一章、第二章、第三章的编写及最后定稿的工作,张军、左桂鸿老师在编写过程中提出了宝贵的意见,编写中我们参考了许多兄弟院校的相关教材,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,本书难免有缺点与不足,恳切希望读者批评指正。

编者

2011年9月15日

目 录

绪论	1
§ 1 测量与误差	1
§ 2 测量不确定度	3
§ 3 有效数字及其运算法则	5
§ 4 实验数据处理的几种常用方法	8
§ 5 物理实验中常用的测量方法	12
第一章 力学 热学实验	15
实验一 长度测量	15
实验二 精密称量	23
实验三 物体密度的测定	31
实验四 用光电控制法测量重力加速度	34
实验五 用单摆测重力加速度	37
实验六 复摆振动的研究	40
实验七 可倒摆	42
实验八 刚体转动的研究	45
实验九 三线摆法测刚体的转动惯量	48
实验十 扭摆法测刚体的转动惯量	53
实验十一 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	58
实验十二 用梁弯曲法测量杨氏模量	63
实验十三 倾斜气垫导轨上滑块的运动研究	67
实验十四 碰撞实验	74
实验十五 验证牛顿第二定律	78
实验十六 金属线胀系数的测定	81
实验十七 用落球法测液体的黏度	84
实验十八 声速的测量(超声)	88
实验十九 固体比热容的测量(混合法)	93
实验二十 冰的比熔解热的测定	97
实验二十一 表面张力系数的测定(拉脱法)	100
实验二十二 良导体导热系数的测定	104
第二章 电磁学实验	108
实验一 制流电路与分压电路	108

实验二	伏安法测电阻	115
实验三	伏安法测二极管的特性	118
实验四	电表的改装与校正	120
实验五	用惠斯通电桥测电阻	126
实验六	十一线式电势差计测未知电动势	131
实验七	示波器的使用	137
实验八	低电阻测量	142
实验九	半导体热敏电阻特性的研究	146
实验十	灵敏电流计特性的研究	150
实验十一	冲击电流计特性的研究	156
实验十二	用冲击电流计测螺线管内轴线上磁场的分布	160
实验十三	磁场的描绘	163
实验十四	霍尔效应及其应用	168
实验十五	交流电桥	175
实验十六	RLC 串联交流电路谐振特性的研究	179
第三章	光学实验	184
实验一	薄透镜焦距的测定	184
实验二	光具组基点的测定	190
实验三	望远镜和显微镜	192
实验四	分光计的调节与玻璃棱镜折射率的测定	198
实验五	用掠入射法测定透明介质折射率	201
实验六	用透射光栅测光波波长	204
实验七	单色仪的定标	207
实验八	用双棱镜干涉测钠光波长	213
实验九	等厚干涉——牛顿环	217
实验十	劈尖干涉	220
实验十一	迈克耳孙干涉仪的调整及使用	224
实验十二	光电效应法测普朗克常量	232
第四章	创新实验	237
实验一	滑动变阻器的非常规用法探析	237
实验二	利用气垫导轨测定刚体转动惯量	241
实验三	利用气垫导轨验证角动量守恒定律	245
实验四	用气垫导轨测液体的黏度	249
实验五	用气垫导轨描绘李萨如图形	253
实验六	对利用霍尔效应测量磁场实验的方法改进	256
参考文献	260

绪 论

物理学是实验的科学. 在科学研究和生产实践过程中, 往往离不开对某个物理量的测量. 普通物理实验不仅要定性地观察物理现象, 还需要对物理量进行定量测量, 并确定各物理量之间的关系. 然而由于测量设备、环境、人员、方法等方面诸多因素的影响, 使得测量值与真实值并不完全一致, 这种差异在数值上表现为误差. 虽然人们可以通过各种方法来减小误差, 但却始终不能把它消除, 因此对测量的数据要选择合适的方法进行处理, 并对其可靠性做出评价, 否则测量结果是没有价值的. 为此, 在具体操作实验之前, 我们先介绍误差与数据处理等常用的基本知识.

§ 1 测量与误差

一、测量

1. 定义

所谓测量, 就是用计量仪器对被测物理量进行量度, 量度所得的数值就是测量值.

2. 分类

按照获得测量结果方法的不同, 测量可分为直接测量和间接测量.

直接测量: 直接从计量仪器上读出待测量的大小, 例如, 用米尺测量长度、用天平测量质量和用秒表测量时间都是直接测量.

间接测量: 待测量是由若干个直接测量量经过一定的函数关系运算后获得的, 如测量长方体体积时, 需先直接测量出其长、宽和高, 再用公式计算出长方体的体积, 体积就是间接测量量.

二、误差

1. 真值

任何一个物理量都有它的客观大小, 这个客观量称为真值(X). 真值是某一

物理量在一定条件下所具有的客观的、不随测量方法改变的真实数值. 最理想的测量就是能够测得真值, 但由于测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员等多种因素不可避免地存在着局限, 使得待测量的真值是不可测得的.

2. 误差

测量值和真值之间总会存在或多或少的偏差, 这种偏差称为测量值的误差 Δx , 也称绝对误差, 即

$$\Delta x = x - X \quad (0-1-1)$$

误差可正可负, 反映了测量值偏离真值的程度.

3. 相对误差

绝对误差 (Δx) 与真值 (X) 的比值为相对误差 (E_r), 即

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \quad (0-1-2)$$

三、误差的分类

误差按其特征和表现形式, 可分为系统误差、偶然误差(随机误差)和粗大误差三类.

1. 系统误差

在同一条件(观察方法、仪器、环境、观察者不变)下, 多次测量同一物理量时, 符号和绝对值保持不变的误差叫系统误差. 当条件发生变化时, 系统误差也按一定规律变化. 系统误差反映了多次测量总体平均值偏离真值的程度. 系统误差来源有仪器误差、方法误差、环境误差和读数误差等.

(1) 仪器误差: 由测量仪器、装置不完善而产生的误差. 如用天平测量物体质量, 当天平不等臂时, 测出物体质量总是偏大或偏小.

(2) 方法误差(理论误差): 由于实验方法本身或理论不完善而导致的误差.

(3) 环境误差: 由外界环境(如光照、温度、湿度、电磁场等)影响而产生的误差.

(4) 读数误差: 由观察者在测量过程中的不良习惯而产生的误差.

2. 偶然误差

在同一条件下多次测量同一个物理量时, 每次出现的误差时大时小, 时正时负, 没有确定的规律, 但就总体来说服从一定的统计规律, 这种误差叫偶然误差或随机误差. 由于引起偶然误差的因素复杂, 又往往交叉在一起, 不能分开, 因此偶然误差是无法控制的, 是无法从实验中完全消除的. 在一定测量条件下, 增加测量次数, 可以减小测量结果的偶然误差, 使算术平均值趋于真值. 因此, 可以取算术平均值为直接测量的最佳值.

3. 粗大误差

粗大误差是由于观测者疏失、仪器失灵等原因造成的超出规定条件下引起的不正确的误差。含有粗大误差的测量值明显偏离被测量的真值，在数据处理时，应首先检验，并将含有粗大误差的数据剔除。

§ 2 测量不确定度

一、不确定度的定义

测量值不等于真值，对测量结果的质量进行定量评定时，往往给出误差以一定的概率出现的范围。这个用来定量评定测量结果质量的参数，称为测量不确定度。测量不确定度用标准差表示，称为标准不确定度，用符号 u 表示。

测量不确定度与测量结果相联系，完整的测量结果表达中，应包括测量不确定度。例如，某一被测量 x 最佳估计值为 \bar{x} ，测量的标准不确定度为 u ，则结果表示为 $x = \bar{x} \pm u$ ，该式表示真值可能在量值范围 $(\bar{x} - u, \bar{x} + u)$ 中。显然，此量值范围越窄，测量不确定度越小，用测量值表示真值的可靠性就越高。

二、不确定度的分类

测量不确定度按评定方法的不同一般分为两大类。

1. A 类不确定度 u_A

A 类不确定度是指可以采用统计方法评定与计算的不确定度。在物理实验教学教学中，我们约定 A 类不确定度取平均值的实验标准偏差，即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) \quad (0-2-1)$$

若对被测量 X 的多次重复测量值为 x_1, x_2, \dots, x_n ，则可用统计方法求出平均值的标准偏差，即

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

\bar{x} 是测量值的算术平均值，即

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (0-2-3)$$

按照误差理论的高斯分布，如果不存在其他误差影响，则量值范围 $[\bar{x} - u_A(x), \bar{x} + u_A(x)]$ 中包括真值的概率为 68.3%，如扩大量值范围到

$[\bar{x} - 1.96u_A(x), \bar{x} + 1.96u_A(x)]$, 则其中包括真值的概率为 95%。

2. B类不确定度 u_B

B类不确定度是指不可以采用统计方法评定与计算的不确定度. 在物理实验教学中, B类不确定度可由极限误差 Δ (或容许误差或示值误差) 得到, 即

$$u_B(x) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (0-2-4)$$

其中极限误差 Δ 的获得有的是依据计量仪器的说明书或鉴定书, 有的是依据仪器的准确度等级, 有的则粗略的依据仪器分度值或经验, 此类误差一般可视为均匀分布, 而 $\Delta/\sqrt{3}$ 为均匀分布的标准偏差。

三、合成不确定度 u_C

当 A 类不确定度和 B 类不确定度彼此独立时, 则合成不确定度 u_C 为

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_{Ai})^2 + \sum_i (u_{Bi})^2} \quad (0-2-5)$$

相对不确定度为不确定度与测量平均值的比值, 即

$$E_r = \frac{u_C}{\bar{x}} \quad (0-2-6)$$

1. 直接测量的合成不确定度

对于等精度多次测量, 其测量值的不确定度来源不止一个, 可由 A 类不确定度和 B 类不确定度的“方和根”得到, 即

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (0-2-7)$$

对于单次测量, 由于不存在采用统计方法计算的 A 类不确定度, 所以其合成不确定度就等于 B 类不确定度, 即

$$u_C(x) = u_B(x) \quad (0-2-8)$$

2. 间接测量的合成不确定度

间接测量的最佳估计值和合成不确定度是由直接测量结果通过函数式计算出来的, 设间接测量的函数式为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

即间接被测量 y 由 m 个直接被测量 x_1, x_2, \dots, x_m 算出, 其中

$$x_1 = \bar{x}_1 \pm u_C(\bar{x}_1), x_2 = \bar{x}_2 \pm u_C(\bar{x}_2), \dots, x_m = \bar{x}_m \pm u_C(\bar{x}_m)$$

则间接被测量 y 的最佳估计值为

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$$

其合成不确定度为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_c^2(x_i)} \quad (0-2-9)$$

对于幂函数 $y = Ax_1^a \cdot x_2^b \cdots x_m^k$, 利用上式可以得到其合成不确定度为

$$u_c(y) = y \sqrt{\left(a \frac{u_c(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(b \frac{u_c(x_2)}{x_2}\right)^2 + \cdots + \left(k \frac{u_c(x_m)}{x_m}\right)^2} \quad (0-2-10)$$

四、测量结果的报道

测量结果包括测量值、合成标准不确定度和单位三部分, 可表示为

$$y = [\bar{y} \pm u_c(y)] \text{ 单位} \quad (0-2-11)$$

相对不确定度为

$$E_r = \frac{u_c(y)}{\bar{y}} (\text{或} \times 100\%) \quad (0-2-12)$$

测量后, 一定要计算不确定度. 如果实验时间较少, 不便于比较全面地计算不确定度时, 对于偶然误差为主的情况下, 可以只计算 A 类不确定度作为总的 uncertainty, 略去 B 类不确定度; 对于系统误差为主的测量情况下, 可以只计算 B 类标准不确定度为总的 uncertainty.

§ 3 有效数字及其运算法则

实验中总要记录很多数值, 并且进行计算, 但是记录是应取几位数字, 运算后应留几位数字, 这涉及有效数字的内容, 是实验数据处理的重要问题, 必须有一个明确的认识.

一、有效数字的基本概念

有效数字是指能正确表达某物理量数值和精度的一个近似数, 由准确数字和最后一位可疑数字组成. 一般从仪器上读出的数字均为有效数字, 它和小数点的位置无关, 有效数字的尾数是由测量仪器的精度确定的.

如图 0-3-1 所示, 用最小刻度为 1 mm 的米尺测量一物体的长度. 根据米尺的刻度可以准确读出前两位数即 2.5, 不随观测者变化, 是可靠的, 称之为准确数字. 在 2.5 和 2.6 两个刻度之间估读出最后一位数, 称为可疑数字, 它随观测者个人情况可能略有不同, 有的估读 5, 有的估读 6 或 7, 这显然是不准确的. 尽管可疑数字不准确, 但它能客观、合理地反映出该物体比 2.5 cm 长, 比 2.6 cm 短的事实, 是有效的. 不同的测量者测得的结果可能不同, 可能为 2.55 cm、

2.56 cm 或 2.57 cm.

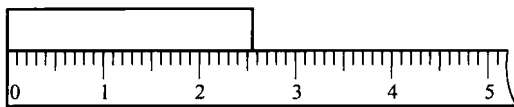


图 0-3-1 长度测量示意图

1. 有效数字与测量条件的关系

测量结果的有效数字位数是由测量条件和待测量的大小共同决定的. 对于大小已定的物理量, 测量仪器的精度越高, 有效数字位数就越多, 因此, 有效数字可以在某种程度上反映出测量仪器的精度. 如某物体长度用米尺测量结果为三位有效数字 1.28 cm, 游标卡尺测量结果为四位有效数字 1.282 cm, 螺旋测微器测量结果为五位有效数字 1.2821 cm.

2. “0”在有效数字中的作用

“0”的位置不同, 其性质也不同. 有效数字的位数从第一个不是“0”的数字开始算起, 末位“0”和数字中间出现的“0”都属于有效数字.

注意, 末位的“0”是有效数字, 不能随意增加或去掉, 否则物理意义发生变化. 一个物理量的测量值和数学上的一个数意义是不同的. 数学上, 0.0506 m 与 0.05060 m 没有区别. 但在物理上, $0.0506\text{ m} \neq 0.05060\text{ m}$, 因为 0.05060 m 中的“6”是准确测量出来的, 是可靠的, 而 0.0506 m 中的“6”则是可疑数字, 是不准确的.

在十进制单位进行换算时, 有效数字的位数不应发生变化. 如上例中, 由于数字“5”前面的两个“0”只用来表示小数点位置, 不是有效数字, 那么数字 0.05060 m、5.060 cm、50.60 mm 的有效数字都是 4 位. 有效数字作单位换算时, 一般采用科学记数法表示, 即

$$5.060\text{ m} = 5.060 \times 10^2\text{ cm} = 5.060 \times 10^3\text{ mm}$$

二、有效数字尾数的取舍法则

在有效数字的运算过程中, 有效数字尾数的取舍法则是“四舍六入五凑偶”法则. 当保留数字末位之后的第一个数, 小于 5 则舍, 大于 5 则入, 等于 5 则把保留数字的末位凑为偶数. 如 3.7754 取四位有效数字是 3.775, 取三位有效数字是 3.78, 取两位有效数字是 3.8.

三、不确定度的有效数字

一般情况下, 测量结果的合成不确定度只取 1 位有效数字, 若这位有效数字

为“1”时可取至两位;对重要的、比较精密的测量或其他特殊情况,也可取2位或2位以上有效数字,相对不确定度可取1~2位.不确定度的取舍法则为“只进不舍”(非零即进).本教材如无特殊说明,合成不确定度取1位有效数字,若这位有效数字为“1”时可取至两位,相对不确定度取2位有效数字.例如, $u_c(\bar{x}) = 0.174 \text{ cm}$,应保留为0.17 cm.若 $u_c(\bar{x}) = 0.417 \text{ cm}$,则应保留为0.5 cm.

四、有效数字的运算规则

物理实验在数据处理过程中,间接测量量往往要通过一系列的数学运算才能得到最后的测量结果,这就必然会涉及有效数字的运算问题.为了避免因为运算而增加或损失有效数字位数,一般可采用以下规则进行运算.

1. 加减法运算规则

加减运算后的末位,应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致.

例如下列算式,其有效数字运算结果为230.1(为说明问题方便,数字下有横线的是可疑数,仍算有效数字).

$$\begin{array}{r} 213.2\bar{5} \\ 16.7\bar{ } \\ + 0.12\bar{4} \\ \hline 230.07\bar{4} \end{array}$$

2. 乘除法运算规则

乘除运算过程中,以参与运算各数据中有效数字位数最少的为准,其余数字在中间运算过程中可多取一位有效数字,最后结果的有效数字与有效数字位数最少的那个数相同.例如, $39.5 \times 4.08437 \times 0.0013 = 39.5 \times 4.08 \times 0.0013 = 0.21$.

乘方和开方运算规则与乘除法运算规则相同,即结果的有效数字与被乘方、开方数的有效数据位数相同.例如, $1.40^2 = 1.96$, $\sqrt{200} = 14.1$.

3. 函数运算的有效数字位数

函数运算的有效数字一般可根据间接测量不确定度计算公式来确定.通常对常用的函数也可按简单规则确定.对数函数运算结果的有效数字中,小数点后面的位数与真数的有效数字位数相同,如 $\lg 1.983 = 0.2973$.指数函数运算结果的有效数字中,小数点后面的位数与指数中小数点后面的位数相同,如 $10^{6.25} = 1.79 \times 10^6$.三角函数运算结果的有效数字位数由角度的有效数字决定,如 $\sin 43.43^\circ = 0.6875$.

五、测量结果表示中的有效数字问题

1. 直接测量量的有效数字问题

直接测量量的有效数字应是由若干位准确数字和一位可疑数字组成的.从

测量仪器上读取数据时,除了读取整刻度准确数值外,还应估读两个整刻度之间的一位可疑数字.注意,当读取的数据数值恰好为整数时,该测量结果有效数字的末位应是“0”.例如,物体的末端恰好与刻度 12 mm 对齐时,则测量结果应记为 12.0 mm,而不能写为 12 mm;若记为 12 mm,则表示末位 2 是可疑数字,这是与实际不符的.总之,直接测量读数的原则是:应读到仪器产生误差的那一位,并注明单位.

2. 间接测量量的有效数字问题

间接测量量有效数字的确定,原则上应由不确定度的有效数字来确定,即间接测量量有效数字的末位与不确定度的末位对齐.例如, $L=(28.32\pm 0.024)\text{mm}$ 的写法是不正确的,应为 $L=(28.32\pm 0.03)\text{mm}$; $m=(320.35\pm 0.6)\text{g}$ 的写法也是不正确的,应改为 $m=(320.4\pm 0.6)\text{g}$.

在书写测量结果时,提倡用科学计数法表示测量结果,并且要使结果中前两部分所乘的 10 的幂次相同.例如 $L=(2.735\pm 0.003)\times 10^{-3}\text{m}$.

注意,计算过程中的有效数字可暂保留两位可疑数字,但最终计算结果仍要按前面的规定处理有效数字.

§ 4 实验数据处理的几种常用方法

数据处理是实验的重要组成部分,它贯穿于实验的自始至终,包括记录、整理、计算、作图、分析等方面.本节主要介绍列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等常用的数据处理方法.

一、列表法

列表法是实验中常用的记录数据、表示物理量之间关系的一种方法.它具有记录和表示数据简单明了,便于表示物理量之间的对应关系,也有助于检验和发现实验中的问题,及提高处理数据效率等优点.列表法是最基本的数据处理方法.列表的要求如下:

- (1) 力求简明、有条理,便于表示物理量的对应关系,处理数据方便.
- (2) 表的上方写明表的序号和名称,表头栏中表明物理量、所用单位和量值的数量级等.
- (3) 表中所列数据主要是原始测量数据和数据处理过程中重要的中间计算结果,应正确反映测量结果的有效数字.
- (4) 对数据表格应提供必要的说明和参数,包括测量日期、测量仪器的规格

和必要的实验条件等.

二、作图法

作图能有效地帮助人们形象地、有联系地“看到”这些数据,从而更有效地进行处理分析与推理,这正是使数据可视化.用作图来分析物理量间的关系,能够把数据间的函数关系形象又直观,有利于发现个别不服从规律的数据,通过描点作图具有取平均的效果,由曲线图可较容易地得出某些实验结果.作图时应注意以下问题:

(1) 根据各量之间的变化规律,选择相应类型的坐标纸,如毫米直角坐标纸、双对数坐标纸、单对数坐标纸、极坐标纸等.

(2) 坐标纸的大小要适中,一般应根据测量数据的有效数字来确定.坐标轴的分度要和测量的有效数字位数对应.

(3) 正确选择坐标比例,使图线能均匀位于坐标纸中间,两坐标轴的交点可以不为零.坐标的原点,不一定要和变量的零点一致,若变量 x 的变化范围是从 a 到 b ,则将坐标原点取在 a 的附近即可.

(4) 写明图名及各坐标轴所代表的物理量、单位和数值的数量级.

(5) 用削尖的铅笔把对应的数据标在图纸上,描点应采用“ \times ”、“ \triangle ”、“ \circ ”等比较明显的标识符号.

(6) 对变化规律容易判断的曲线用平滑线连接,曲线不必通过每个实验点,各实验点应均匀分布在曲线两边;难以确定规律的曲线可以用折线连接.

作图法主要用来判断各量的相互关系(图示法)和在图上求未知量(图解法).

1. 图示法

在研究两个物理量之间的关系时,把实验测得的一系列相应的对应数据及变化情况用曲线或直线表示出来,这就是图示法.图示法是找出函数关系式并求得经验公式的最常用的方法之一.如二极管的伏安特性曲线、电阻的温度变化曲线等,都可从图上清楚地表示出来.

在图示法中,作图的基本步骤包括:图纸的选择、坐标的分度和标记、实验数据点的标出、作出一条与实验数据点基本拟合的图线、注解和说明等.注意,做实验点连线时,所绘的曲线或直线应光滑匀称,而且要尽可能使所绘的图线通过较多的测量点,其他不在图线上的点应使它们均匀地分布在实验曲线的两侧.

2. 图解法

利用已作好的实验曲线,定量地求得待测量或得出经验方程,称为图解法.直线的图解法一般是求出相应的斜率和截距,进而得出完整的线性方程,求出待测量等,其步骤如下.

从直线上任取两点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 一般应避免使用实验点, 且这两点尽量分开些, 则斜率为

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (0-4-1)$$

截距的求法是: 把图线延长到 $x = 0$, 此时 y 的值即为截距. 如果 x 坐标轴的起点不为零, 则利用图线上第三点的数据 (x_3, y_3) , 代入公式 $y = a + kx$ 求出, 即

$$a = y_3 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_3 \quad (0-4-2)$$

三、逐差法

在物理实验中, 如果测量数据时, 自变量是等间隔变化的, 常采用逐差法处理. 逐差法的基本思想是, 将实验测得的等间隔变化的数据分成两组, 然后对应项逐项相减, 再求所有逐差量的算术平均.

逐差法可以用来验证多项式、通过计算线性函数的斜率求物理量, 还可以用逐差法来发现系统误差或实验数据的某些变化规律. 用逐项逐差来验证多项式的形式, 即若一次逐项逐差值趋于某一常数, 则说明变量间具有线性关系; 若经两次逐项逐差值趋于某一常数, 则变量之间具有二次多项式形式……依此类推.

在具备以下两个条件时, 可以用逐差法处理数据.

(1) 函数为多项式形式或经过变换可以写成多项式形式, 即 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$ 实际上, 由于测量精度的限制, 3 次以上逐差已很少应用.

(2) 自变量 x 等间距变化, 即 $x_{i+1} - x_i = c$ (常量).

四、最小二乘法

最小二乘法是更严格、精度更高的一种数据处理方法. 因为作图法或逐差法都可以用来确定两个物理量之间的定量函数关系, 但都存在着某些缺点和限制, 精度都较低. 不同的人用相同的实验数据作图, 由于主观随意性, 拟合出的直线 (或曲线) 往往是不一致的, 通过斜率或截距计算的结果也是不同的, 逐差法会受到函数形式和自变量变化要求的限制.

所谓最小二乘原理就是在满足各测量误差平方和最小的条件下得到的未知量值为最佳值, 用公式表示为

$$\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{最佳}})^2 = \text{最小值} \quad (0-4-3)$$

最小二乘中的“二”指的是平方.