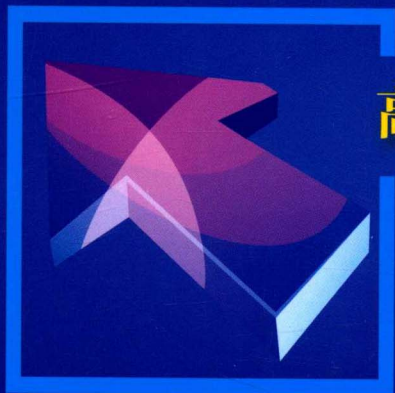
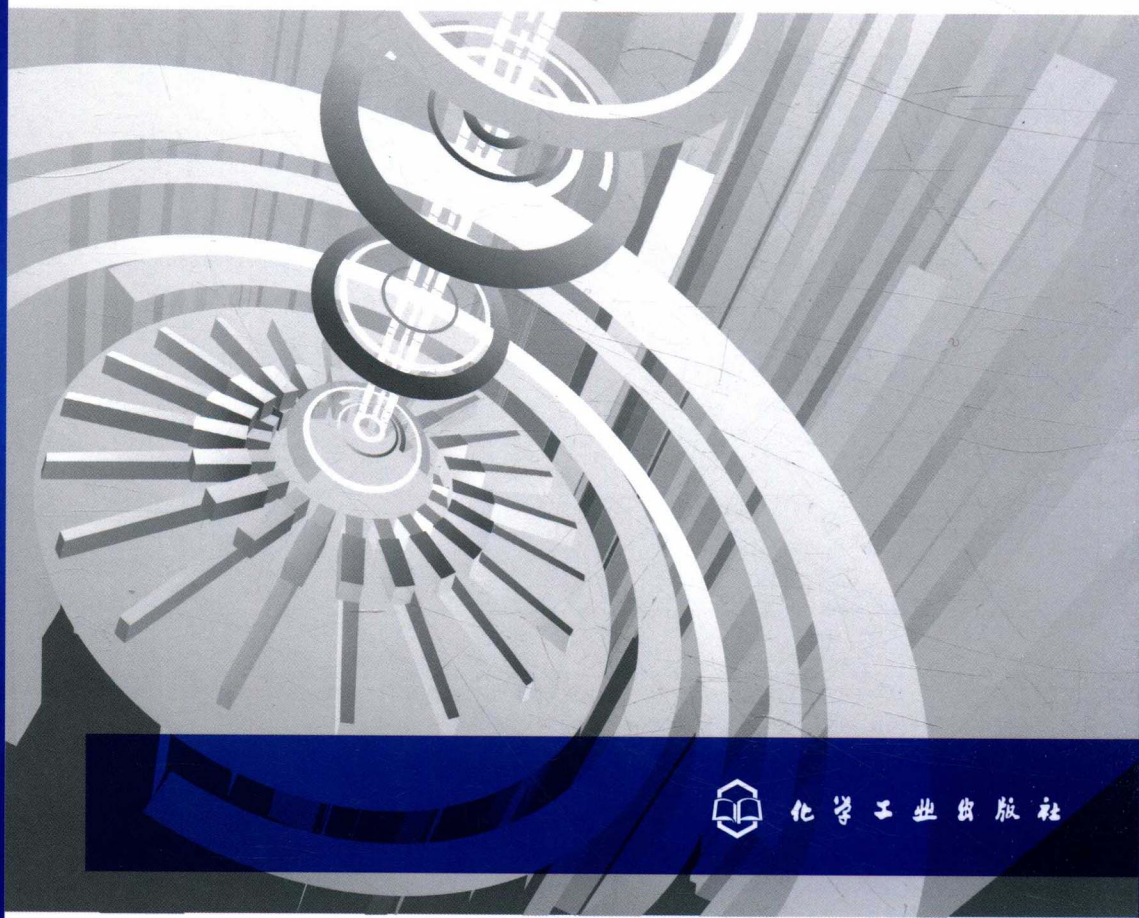




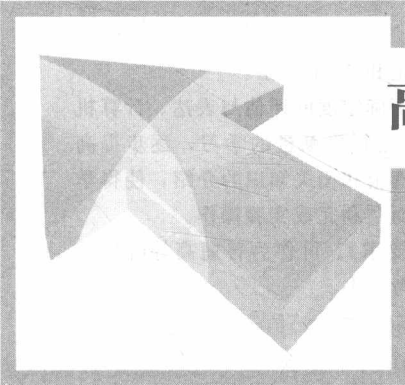
高等学校“十三五”规划教材

大学物理实验

彭玉平 主编



化学工业出版社



高等学校“十三五”规划教材

大学物理实验

彭玉平 主编

朱小飞 李庆容 余冬 刘卫平 刘向绯 参编



化学工业出版社
北京

本实验教材共分为四个部分，主要包括实验基础理论和 32 个实验。

实验基础理论中介绍了关于有效数字处理的基本方法、不确定度的评估与表达、计算机辅助数据处理的基本方法。32 个实验分为三个层次，方便学生循序渐进的学习，逐步提高动手能力。教材在编写中对传统的做法稍作变化，注重加强理论和相关知识的介绍，使得学生能够在没有接受理论学习的情况下也能顺利阅读教材，从而顺利完成实验操作。

本书符合国家教委制定的《高等学校物理实验教学基本要求》。可作为普通高等院校非物理类专业学生的学习教材，也可作为教师和相关人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验/彭玉平主编. —北京: 化学工业出版社, 2015.2

高等学校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-22653-2

I. ①大… II. ①彭… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 304424 号

责任编辑: 陶艳玲 甘九林

装帧设计: 刘剑宁

责任校对: 边 涛

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 312 千字 2016 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是在符合国家教委制定的《高等学校物理实验教学基本要求》精神的前提下，考虑到物理实验是在大学中第一门开出的实践环节教学课程，而且是不再依附于大学物理课的独立基础课程，以及一年级学生的物理概念与实验基础知识水平等特点，以武昌首义学院所开设的物理实验项目为依托进行编写的。教材重点强调实验的技能与方法训练，同时也兼顾知识的拓展，编入了大学物理课程中不曾讲到的知识点，增加了各个实验相关知识的简介，使得学生能够通过此类内容更好的理解教材，从而顺利完成各种技能的训练。

本教材一共编入了 32 个实验项目，总体编排基本上仍按通行的三层次结构，即分为基本技能训练实验；综合技能训练实验；提高、近代及设计性实验三部分。每一部分内容，尽量与物理理论教学体系保持一致，便于学生系统地掌握知识。在第一层次中尽量选择那些物理概念与高中物理学习相联系的项目，相关知识的阅读和理解不会使学生感觉陌生和困难，从而可以将主要精力集中在基本实验技能训练、主要实验方法学习和对实验基础理论知识的掌握和运用上。第二部分，所涉及的知识点内容将有所加深，训练的内容也向综合性过渡。第三部分，技能训练要求更进一步提高，要求学生能进一步训练简单的实验设计能力，从而进一步提高综合能力。

本教材相较于传统教材编写方法有所变化，编写时重点加强了对理论知识理解的要求，为帮助学生在还不具备实验相关物理知识的情况下顺利阅读和理解教材，我们在每个实验的开头都介绍了实验中所用到的主要理论和概念，从而帮助学生顺利掌握教材进而完成实验。

参加编写的人员为彭玉平（绪论，实验基础理论，实验 9、实验 11、实验 16、实验 23、实验 24、实验 25、实验 26）、赵惟义（实验 4、实验 18、实验 20）、朱小飞（实验 1、实验 2、实验 3、实验 5、实验 6、实验 7、实验 8、实验 10）、李庆容（实验 12、实验 13、实验 14、实验 15、实验 17、实验 19、实验 21、实验 22）、余冬（附录一～三，实验 27、实验 30、实验 31、实验 32）、刘向绯（实验 28）、刘卫平（实验 29）。姜大华教授参与了本教材早期筹划工作，审阅了绪论、误差理论及部分实验，提出了一些合理化建议，在此深表感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者提出宝贵意见与建议。

编者
2015 年 12 月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 实验基础理论 3

一、有效数字及其基本知识	3
二、常用数据处理方法	4
三、测量与误差	9
四、测量不确定度的计算方法	13
五、数据的计算机辅助处理	20

第二篇 基本技能训练实验 25

实验 1 用扭摆法测量刚体的转动惯量	25
实验 2 用光杠杆测定金属的线膨胀系数	31
实验 3 示波器的调节与使用	35
实验 4 直流电路基本实验	44
实验 5 用补偿法测电源的电动势	48
实验 6 平衡直流电桥及其应用	52
实验 7 薄透镜焦距的测定	56
实验 8 分光计的调节与使用	61
实验 9 液体表面张力系数的测量	69
实验 10 等厚干涉——牛顿环、劈尖干涉	73

第三篇 综合技能训练实验 79

实验 11 硅光电池伏安特性研究及其应用	79
实验 12 动态法测定材料的杨氏模量	86
实验 13 声速的测量	91
实验 14 非平衡直流电桥及其应用	96
实验 15 RC 串联电路的暂态过程	100
实验 16 热电偶温差电动势的测量与定标	104
实验 17 霍尔效应研究	108
实验 18 用电子积分器测量通电螺线管轴向磁场及其分布	114
实验 19 平行光管的调节与应用	119
实验 20 光的偏振现象	125

实验 21	衍射光栅特性与光波波长测量	131
实验 22	迈克尔逊干涉仪	135
第四篇	提高、近代及设计性实验	141
实验 23	光电效应与普朗克常数测定	141
实验 24	激光全息照相	146
实验 25	用纵向磁聚焦法测定电子荷质比	152
实验 26	弗兰克-赫兹实验	156
实验 27	磁悬浮导轨实验	161
实验 28	核磁共振	166
实验 29	用单摆法测重力加速度	173
实验 30	用示波器测量铁磁材料的磁滞回线	177
实验 31	电表的改装	180
实验 32	望远镜的改装及放大倍率的测定	181
附录		183
附录一	中华人民共和国法定计量单位	183
附录二	基本常数表	185
附录三	常用物理量数据表	187
参考文献		195

绪 论

大学物理实验课是对高等学校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程，它是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开始。物理实验不仅可以为今后学习、从事科学实验工作打下基础，而且还是学校对学生进行能力和素质全面培养的一个重要手段，是培养高素质科学工作者的一个不可缺少的环节。

一、物理实验课的目的

① 学习常用的物理量的基本测量方法，掌握常用仪器的原理及使用方法。如基本测量方法有比较法、放大法、转换法、模拟法、补偿法、干涉法等，常用仪器如测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光计、常用电源和常用光源等。

② 学习正确分析实验误差和正确处理实验数据，学习如何提高测量精度和减少实验误差的常用方法与技巧。例如，学会分析哪些误差是主要的，哪些误差可以减小或忽略，在满足精度要求的前提下什么方法最简便、最经济。

③ 通过实验训练增强理论联系实际、增强分析和处理实际问题的能力。通过实验训练学生了解理论知识的有关应用以及了解一些新技术，扩大知识面。

④ 培养学生实事求是的科学态度，严谨、认真的工作作风，勇于探索与钻研的精神。

二、如何学好物理实验课

要达到上述实验课的目的，并不是件容易的事。实验可分为三大步。

1. 预习，写出实验预习报告（课前完成）

实验前，认真阅读实验指导书，弄懂实验原理、实验方法以及操作的大致步骤、仪器调试的要点及关键所在，切记注意事项及安全操作规程。由于实验时间有限，因此课前预习的好坏是能否顺利完成实验、能否取得较好效果的前提。在预习好的基础上总结性地写出预习报告，包括：实验名称、实验目的、实验原理、仪器设备、实验内容与步骤等。

2. 实验操作，记录数据（课堂完成）

进入实验室后，应带上预习报告和数据记录纸（或坐标纸），实验时要注意实验过程，认真观察，独立思考，手脑并用。设计好数据表，采集数据要注意有效数字的有关规定；原始数据必须是真实的，不允许抄袭和任意涂改。完成实验后，应将全部数据交指导老师检查签字，及时切断电源，整理好仪器，方能离开实验室。

3. 数据处理，完成实验报告（课后完成）

数据处理包括计算、绘图、绘制表格、误差分析、结果表达等内容。实验报告要字迹清楚，条理清晰，不要把报告当作草稿，胡乱涂写，而应该看作是一种科学记录及一篇让他人能看懂的科学文献。

一份完整的实验报告应包括下面几个部分：

实验名称；

实验目的；

实验原理——给出实验所依据的定律、公式、电路、光路或其他依据；

实验仪器；

实验内容——用什么方法、仪器、步骤完成实验内容，必要时可以论证其可行性；

数据处理——计算待测物理量的大小，绘制曲线，误差评估等；

结果表达——规范写出本次的实验结果；

误差分析——可以对实验中的现象分析讨论，对结果进行评价，也可以提出更好的实验方案以及实验体会等。

第一篇 实验基础理论

一、有效数字及其基本知识

1. 有效数字的概念

物理实验中取得的结果中能够正确、有效地反映被测量物理量大小的所有数字称为有效数字，它由若干位准确数字和最后一位可疑数字组成。即有效数字从性质上分类为准确数字和可疑数字：前者从仪器上准确读取，是确定的；后者则是估读的，是不确定的、有疑问的，它只保留一位。

构成测量结果的所有有效数字的个数称为有效数位。有效数位取决于两个方面，即被测量物理量的大小和测量工具的精度。用同样的测量工具测量不同的物理量，其有效数字个数不同，例如，用同一米尺测量书本的长度为 22.50cm，测量银行卡的长度为 8.56cm，前者结果比后者多一个有效数字，这反映了被测量值大小的不同。而用不同的测量工具测量同一物理量，其有效数字个数也不同，例如，用米尺和游标卡尺测量同一长度，米尺测量结果为 25.5mm，而游标卡尺测量结果为 25.52mm，游标卡尺测量结果的有效数字个数要多一个，它反映了测量仪器的精度。有效数字要反映被测量值的大小和测量工具的精度，是不能随意取舍的。

注意：实验中我们记录和运算得到的结果必须满足有效数字的要求，不能随意取舍，需根据仪器精度或相应的规则得到。

2. 有效数字的运算法则

在进行数据运算时，可能涉及多个分量，涉及的运算也多种多样，加减法、乘除法、乘方、开方等，计算中会导致出现很多位数，甚至出现无限多的情况。我们不可能全部记下来，这样的工作既繁琐也无实际意义，因此我们必须掌握恰当的数字的保留方法。我们保留得到的结果应满足有效数字构成的规则，即只有一位可疑数字，而无需保留太多。

有效数字运算的基本原则是：准确数字与可疑数字运算得可疑数字。显然两可疑数字相互运算仍是可疑数字，两准确数字运算仍为准确数字。

(1) 加减运算

要求运算结果的可疑数字的位置与参加运算的数中可疑数字位置最靠前的位置保持一致。例如

$$1. \quad \begin{array}{r} 356 \\ + 11.2 \\ + 22.82 \\ \hline \end{array} = 35.376 = 35.4$$
$$\begin{array}{r} 107 \\ - 11.4 \\ \hline \end{array} = 95.6 = 96$$

上述两个例题结果的可疑数字位置都是与参加运算的最高位可疑数字对齐。运算时可对参加运算的数进行修约，可比最高的可疑位多保留一位，运算后再保留到需要的位置上。

(2) 乘除运算

要求结果的有效数字的个数与参加运算的数中有效数字个数最少的保持一致。例如

$$22.33 \times 12.3 = 275$$

$$105.5 \div 2.8 = 38$$

该法则可以通过竖式演算, 利用有效数字的构成原则和基本运算原则得到。

(3) 乘方、立方、开方运算

$$(3.22)^2 = 10.4 \quad \sqrt{15.6} = 3.95$$

乘方、立方、开方运算法则与乘除运算规则相同, 乘方和开方运算的有效数字的位数应与低的有效数字位数保持一致。

(4) 运算中的系数和常量的处理

运算中我们经常会遇到系数或常量等问题, 例如: 三角形面积计算公式中的 $1/2$ 、圆锥体体积公式中 $1/3$ 、圆面积计算中的 π 、电子电量 e 等问题, 它们的位数可能有无限多。实际处理中, 这些量参与运算, 但不涉及结果的有效数字个数的确定, 运算时它们的有效数字位数可适当多取一位。当然, 我们必须准确判断所处理的是否为系数或常量, 若不是, 则不能这样处理。

(5) 其他运算

① 对数运算 例如: $\lg x$, 当 $x=10.5$ 时, $\lg x=1.021$, 结果小数点前的称为首数, 不算有效数字, 小数点后有效数字个数与 x 的有效数字个数相同。

② 自然对数 例如: $\ln x$, 当 $x=10.5$ 时, $\ln x=2.351$, 结果小数点前的称为首数, 不算有效数字, 小数点后有效数字个数与 x 的有效数字个数相同。

③ 指数函数 例如: e^x , 当 $x=2.55$ 时, $e^x=12.81$, 结果小数点后的有效数字个数与 x 小数点后的有效数字个数一致。

④ 正、余弦函数 $\sin x$ 、 $\cos x$, 当角度的误差为 $1'$ 时, 函数值取小数点后 4 位; 角度误差为 1° 时, 函数值取小数点后 3 位。

3. 应用科学记数法和单位变换时, 注意保证有效数字的位数不能改变, 后面的零不能随意取舍, 否则将改变有效数位

例如:

$$13.00\text{cm} = 1.300 \times 10^{-2}\text{m} = 1.300 \times 10^2\text{mm} = 1.300 \times 10^5\mu\text{m}$$

4. 有效数字的舍、入规则

对于运算结果按照有效数字要求进行取舍保留时, 如果按照近似运算中常用的 4 舍 5 入的法则, 所有的 5 都进行了进位处理, 这将导致运算过程中的系统误差。为此, 应当采用较为科学的方法, 即“四舍六入、五的前位配偶数”的法则, 使 5 的舍入机会各占一半, 以减小运算过程中的系统误差。此方法也称为“四舍六入五凑偶”。例如, 5 在末尾

$$\begin{aligned} 22.35 &\rightarrow 22.4 & 22.25 &\rightarrow 22.2 \\ 15.375 &\rightarrow 15.38 & 15.385 &\rightarrow 15.38 \end{aligned}$$

但是对于需要舍、入的 5 的后面还有非零数字, 那么 5 仍然需要进位处理; 5 后面若是零, 则按上述“四舍六入五凑偶”法则处理。例如

$$22.254 \rightarrow 22.3 \quad 22.2501 \rightarrow 22.3 \quad 22.250 \rightarrow 22.2 \quad 22.350 \rightarrow 22.4$$

使用该法则时注意判断 5 的前后情况, 综合考虑, 不能一概而论。

二、常用数据处理方法

实验数据的科学处理是实验成败的一个关键环节, 科学合理的处理分析数据能够帮助我

们发现其内在规律,得出较为明确的实验结果。因此我们必须重视数据的科学处理方法。实验中的数据、记录、整理、计算、作图分析都必须具有条理性和严密的逻辑性。我们常用的数据处理方法一般有四种:列表法、作图法、逐差法和最小二乘法。正确合理的利用这些方法能够帮助我们分析得到数据关系,找到实验的规律,从而发现物理现象的内在本质。同时也能帮助我们分析总结实验操作中的经验,进而提高实验技能。

1. 列表法

列表法就是将数据列成表格的形式来分析、处理数据的方法。实际上,在实验工作中,不仅进行数据处理时才列表,而在进行测量时,甚至在预习准备阶段,就应该对待测的数据准备记录用的表格。

在记录和处理数据时,将数据排列成表格形式,既可以有条不紊,又能简明醒目。可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系,便于随时检查和发现实验中的问题,并有助于找出有关物理量之间的规律。

用列表法处理数据时,应遵循下列原则。

① 要求简单明了,便于看出有关量之间的关系,便于数据处理,必要时给出物理量之间的函数关系;

② 表格须有名称,各栏目(纵或横)均应标明名称、单位,若名称用自定义的符号,则需加以说明。单位只写在标题栏中,不要重复地记在表中各数字的后面,但各数字应与所用单位相符合;

③ 表中的数据主要包括原始测量数据(从原始记录纸上整理过来)和一些重要的中间计算结果。有时也可以给出最后实验结果。所有数据都要正确反映测量结果的有效数字;

④ 若是存在函数关系的测量数据,则应按自变量由小到大或由大到小的顺序排列。例如表1中半导体热敏电阻的电阻与温度的关系。

表1 半导体热敏电阻的电阻与温度的关系

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
电阻 R/Ω	2198	1869	1530	1267	1034	890
$T=273.2+t/\text{K}$	293.2	298.2	303.2	308.2	313.2	318.2
$1 \times 10^{-3}/T/(1/\text{K})$	3.411	3.353	3.298	3.245	3.193	3.143
$\ln RT$	7.695	7.533	7.333	7.144	6.941	6.79

2. 作图法

用作图法处理数据主要是利用所测的数据画出两个物理量的平面关系曲线,所用数据可以是直接测量的数据,也可以是经过一定的计算所得中间数据。作图法处理数据的作用有两个:一是用来直观而形象地对实验进行描述,即从图上便可看出测的量是什么物理量、所用仪器的精度、误差的大小、数据的分布特点、期望值以及变量间的函数关系等;二是利用所作的关系曲线进行有关的计算。作图法是广泛应用的实验数据处理基本方法,是实验课程中的重点训练内容。

(1) 作图法的基本原则

a. 选用恰当的坐标纸 作图一定要用铅笔、直尺等工具在坐标纸上完成,因为我们作图的目的不仅是定性地观察,还要进行定量的计算,求出有关结果。不用坐标纸,就不能保证结果的准确程度。一般用得较多的是直角坐标纸,其横、纵方向的画格线都是均匀的,最小画格间距的大小为1mm,在厘米格的格线较粗。除了直角坐标纸以外,还有对数坐标纸

和半对数坐标纸,其画格线在两个方向或在一个方向上间距是不均匀的。我们现阶段实验作图都采用直角坐标纸,对于实验中出现的对数关系可以通过合适的转换后尽量采用直角坐标纸作图。下面介绍的是直角坐标纸的作图要领。

用直尺画出坐标轴,标出其正方向,横轴一般表示自变量,纵轴一般表示因变量。坐标纸的大小和坐标轴的比例选取要合适,原则上实验数据中的可靠数字在图中也应是可靠的,要使图线比较匀称地充满整个图纸,不要缩在一边或一角,同时也不能超出图纸范围。坐标轴最好与坐标纸的粗格线重合。

b. 对坐标轴进行分度 标出各坐标轴的物理量符号、单位,在两轴线均匀标注出整分度。一般以两坐标轴交点为起点,在坐标轴上每间隔相等长度标注分度,即指出图纸上的每单位长度表示多少实际的物理量。坐标比例选择要恰当,例如可选取 $1:1$ 、 $1:2$ 、 $1:5$ 、 $1:10$ 等比例以方便作图,尽量避免选择 $1:3$ 、 $1:7$ 这类的比例。例如图纸上实际的 1cm 可表示实际电压 1V 、 2V 、 10V 等。

注意:坐标轴尽量不要标 x 、 y ,而是要根据实际的物理量的常用符号来标注;对于带有科学记数法的数据,可在坐标轴的箭头处带上 $\times 10^n$ 等;对于部分数据起点不为零的情况,应在两坐标轴交点处标明各自的起点值,无需从零开始标注,例如,动态法测金属杨氏模量实验中的共振频率起点即为几百赫兹,作图时可将略低于最低频率的某个整数频率值作为起点。

c. 描坐标点 一般用符号“+”在图中标记相应的坐标点(当同一个图上有多条图线时,为了区别不同的关系曲线,或不同条件下测得的曲线,可分别采用“○”,“×”,“□”,“△”等符号),要使数据对应的坐标准确地落在符号的中心。符号的大小(如“+”的横、竖线的长度)应能大致反映出测量值的误差。如用米尺测量长度的数据,“+”画线的长度应为 1mm 左右。只用铅笔在图中点一个很小的黑点的做法是绝对错误的。实际操作中所描的点既不能太大也不能太小,描点的位置要准确。

d. 曲线拟合 这是作图成败的一个关键,很多初学者都易犯错。首先我们要明确所做曲线的类型,认真观察点的分布特点;然后,以所描出的坐标点为基准,用直尺或曲线尺(板)画出平滑图线。画曲线时要注意几点:曲线要平滑,直线要直,要充分考虑曲线的走势。切忌依次用直线连接成折线;所画线的宽度不能超出所描点的直径;不可反复描画曲线;由于每一个点都存在误差,所以曲线不一定要通过所有的数据点,而是应尽可能地通过或接近大多数数据点,并使不在线上的数据点尽可能均匀对称地分布在曲线的两侧。有些点不在曲线上,是测量误差的表现,是正常现象。对于个别偏离过大(大于 $3S_x$)的数据点应当舍去并进行分析或重新测量核对。

作图线分两种情况:一类为变量间有函数关系时,需画出连续、平滑的曲线;另一类为变量之间没有因果关系,图线可以用直线逐点连接起来的折线,如我们熟知的股票走势图,某公司一年12个月的业绩走势图,它们都不存在函数关系,故可用直线依次连接。前一类是我们重点要研究的。

e. 图名和图注 应在图的上方或下方标明图的名称,并在适当的空处工整地标注必要的实验条件和说明,例如注明所用不同的描点符号各代表的意义。必要时,在图中适当的地方写上作者的名字和作图日期。

(2) 作图法的应用

利用所作的图线,定量地求得待测的物理量或得出经验方程,是作图法的一个重要用

途，称此为图解法。求得经验公式的工作，要用到相关的理论知识，针对数据（图线）的变化趋势，根据理论进行推断，应用解析几何的知识，建立起经验公式的形式（如拟合多项式或指数函数式），求出经验公式中的待定常数，再用实验数据进行检验。这已超出本教材范围。此处仅重点讲述定量求待测物理量的值的问题。这时一般针对的图线为直线，主要任务是求直线的斜率和截距，对于不是直线关系的函数，可以用适当的方法将其化为直线关系。

下面以用伏安法测线性电阻为例来说明作图法的典型应用（见表 2，图 1）。

表 2 伏安法测线性电阻数据表

U/V	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
I/mA	0.00	2.00	4.01	6.05	7.85	9.70	11.83	13.75	16.02	17.86	19.94

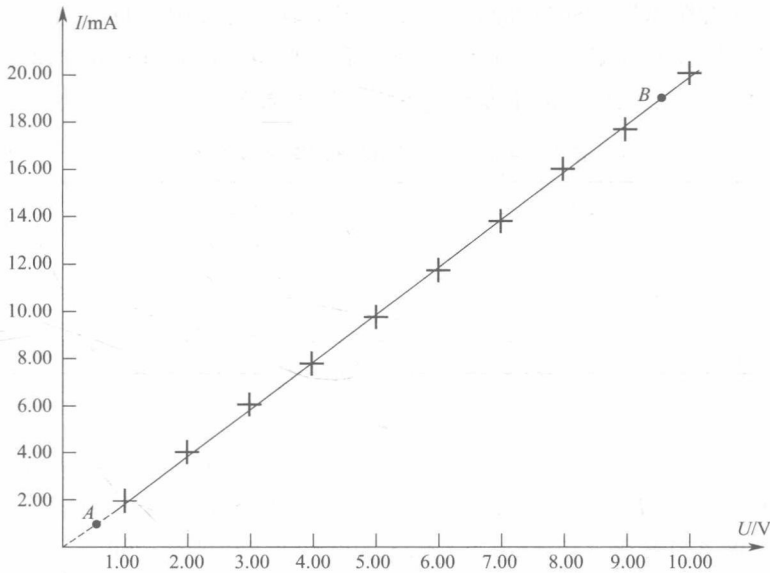


图 1 电阻伏安特性曲线

从图中选择直线与坐标格点相交、又相距较远的两点（A、B），它们的坐标分别为 A(0.50,0.95)，B(9.50,18.85)，用两点法求出直线斜率为

$$k = \frac{(18.85 - 0.95)\text{mA}}{(9.50 - 0.50)\text{V}} = \frac{17.90\text{mA}}{9.00\text{V}}$$

则

$$R = \frac{1}{k} = \frac{9.00\text{V}}{17.90 \times 10^{-3}\text{A}} = 503\Omega$$

对于函数关系为 $y=a+bx$ 的直线方程，除了求直线的斜率以外，还要求截距。若坐标起点为零，则可将直线用虚线延长，得到与纵坐标轴的交点，即可求得截距 a ；若起点不为零，求截距的计算公式为

$$a = \frac{x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1}(\text{单位})$$

式中， (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 为直线上任意两点的坐标。当函数关系为非线性时，图像不是直线，而是曲线。此时，可以通过变量代换的方法化为新变量间的线性关系，即新变量间的关系为直线，称此方法为“曲线改直”或“曲线直化”例如：单摆的周期 T 与摆长 L 的关系在零级近似下为

$$L = \frac{g}{4\pi^2} T^2$$

令

$$x = T^2, \quad m = \frac{g}{4\pi^2},$$

得到新的关系式

$$L = mx$$

L 与 x 之间的关系为线性的, 分别用 x 和 L 为横、纵坐标得到的关系曲线即为一条直线。利用两点法求出直线的斜率 m , 即可求出重力加速度 g

$$g = 4\pi^2 m$$

3. 逐差法

逐差法主要应用在测量数据为等间距变化的实验数据处理中。将数据按大小平均分为两组, 求每两组相应位置的数据差, 然后对全部差值取平均, 可充分利用全部数据。

例 1 在超声声速测量中, 取得共振干涉法数据见表 3。

表 3 共振干涉法测量超声声速数据表

测量系列	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
坐标/mm	35.760	40.355	45.334	50.013	54.858	59.522
测量系列	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}
坐标/mm	64.090	68.734	73.711	78.505	83.220	87.782
逐差($6\Delta L$)	$L_7 - L_1$	$L_8 - L_2$	$L_9 - L_3$	$L_{10} - L_4$	$L_{11} - L_5$	$L_{12} - L_6$
	28.330	28.379	28.377	28.492	28.362	28.260

即

$$\begin{aligned} & (L_7 - L_1) + (L_8 - L_2) + (L_9 - L_3) + (L_{10} - L_4) + (L_{11} - L_5) + (L_{12} - L_6) \\ &= (L_7 + L_8 + L_9 + L_{10} + L_{11} + L_{12}) - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6) \end{aligned}$$

$$6\Delta L = \frac{28.330 + 28.379 + 28.377 + 28.492 + 28.362 + 28.260}{6} = 28.367 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 4.7278 \text{ mm}$$

若将相邻的两个量相减再求和, 则只有首尾两数据被使用, 其他数据均两两相消了, 不能有效使用测量的所有数据。

4. 最小二乘法 (线性拟合)

此方法又叫一元线性回归, 是一种以最小二乘法为基础的实验数据处理方法, 仅针对两变量满足线性关系时处理的。其基本原理是: 对于一条最佳的拟合直线, 其上各点的值与测量值之差的平方和, 在所有的拟合直线中应该是最小的。

假设两变量 x, y 之间满足线性关系

$$y = a + bx \quad (1)$$

并设自变量 x 在测量中误差极小可以忽略, 只考虑函数 y 的误差。对于一组测量值 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 可以定义一个函数

$$Q = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (2)$$

对于最佳的拟合直线 (正确的待定系数 a 和 b), Q 应取极小值。按照函数取极小值的条件, 应有

$$\frac{\partial Q}{\partial a}=0, \frac{\partial Q}{\partial b}=0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial a^2}>0, \frac{\partial^2 Q}{\partial b^2}>0 \quad (4)$$

由式(4)得到一个关于 a 和 b 的二元一次方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)x_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

注意现在的方程组中, x_i, y_i 均为已知常数, 而 a 和 b 是未知数。解此方程组, 求得

$$b = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}, a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i & \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ \overline{xy} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i & \overline{x^2} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{aligned} \quad (7)$$

都是在解方程组过程中整理归纳出的结果。可以证明, 求出的 a, b 可以保证式(4)成立。

例 2 利用最小二乘法处理伏安法测线性电阻的实验数据。实验的原始数据记录如表 2 所示。注意在伏安法中, 选用的自变量为电压 U 、 I 为函数。所以对应于最小二乘法的函数关系应为

$$I = bU$$

由表 2 中的数据 (去除原点) 求出

$$\bar{U} = 5.50 \text{ V}, \bar{I} = 10.95 \times 10^{-3} \text{ A}, \overline{U^2} = 38.50 \text{ V}^2, \overline{IU} = 76.36 \times 10^{-3} \text{ VA}$$

$$\overline{IU} = 76.36 \times 10^{-3} \text{ VA}, \overline{U^2} = 30.25 \text{ V}^2, \bar{I} \cdot \bar{U} = 60.23 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

代入式(6)的第一式中, 求得

$$b = \frac{I}{U} = \frac{(76.36 - 60.23) \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{A}}{(38.50 - 30.25) \text{ V}^2} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$$

电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{b} = 510 \Omega$$

值得说明的一点是: 用伏安法测电阻, 因电流表和电压表有内阻而使测量结果带有系统误差, 必要时, 应对结果进行修正, 这时要知道电表的内阻, 具体做法在相应的实验中再详细描述。

三、测量与误差

1. 测量及其分类

测量是将待测物理量与标准物理量比较得出其量值的过程。测量得到的任何一个物理量必须包含数值和单位, 两者缺一不可, 缺少任何一个将没有物理意义。国际上规定了七个基本物理量, 分别是: 长度、时间、质量、电流、热力学温度、物质的量和发光强度。其他物理量的单位均由基本单位导出, 称为导出单位, 一般导出单位也有专门的名称和符号, 例

如, 功的单位为“牛顿·米”, 也叫“焦耳”。

测量的分类可以按方式和条件分类。

测量按方式分类, 可分为直接测量和间接测量。直接测量, 就是用测量工具直接得到测量结果的一种测量方式, 其测量结果称为直接测量量, 比如用直尺测量书本长度、用电子秤称量砝码质量等。间接测量, 是将直接测量的结果通过函数关系运算得到的, 称为间接测量量, 比如伏安法测电阻时, 我们通过测得电阻两端的电压除以通过的电流得到的。直接测量和间接测量不是固定不变的, 我们使用不同的测量方法, 待测物理量有时是直接测量量, 而有时它又是间接测量量。比如: 我们用欧姆表测量电阻时它是直接测量量, 而用伏安法测量时它是间接测量量; 电功率的测量, 我们用电功率表测量时, 其结果为直接测量, 用测量电流和电压, 然后相乘计算时, 则为间接测量。实际实验中我们要得到的物理量大多数是间接测量量, 但它们是以直接测量为基础的, 我们必须能分清楚哪些是直接测量, 哪些是间接测量, 从而便于我们进行数据处理分析。

按条件分类, 测量可分为等精度测量和不等精度测量。测量的条件包含测量的人、仪器、方法、环境等等一切与测量相关的东西, 只有当所有条件完全相同时我们的测量结果才是等精度测量, 有任何一个发生改变时, 即为不等精度测量。我们进行处理的数据必须是等精度测量结果, 实际实验室测量中, 在条件改变对测量结果影响不大或要求不高时我们可以认为是等精度测量。

2. 误差的基本知识

每一个待测物理量在一定条件下都具有确定大小的值, 称其为待测物理量的真值。实验工作主要就是测量这个真值。但事实是, 实验时, 由于理论的近似性, 实验仪器性能的局限性, 测量方法的不完善, 环境条件的不稳定, 测量人员感觉器官的功能限制等, 使测量结果不可能绝对准确, 待测物理量的真值与我们的测量值之间总会存在某些差异, 称之为测量误差。即

$$\text{测量误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

测量误差存在于一切测量数据之中, 没有误差的测量结果是不存在的。随着科学技术水平的不断提高, 测量误差可以被控制得越来越小, 但永远不会降为零。即真值是永远测不出来的, 是我们力求接近的。

称测量误差与被测量的真值之比为相对误差, 即

$$\text{相对误差} = (\text{测量误差} / \text{被测量的真值}) \times 100\%$$

因而测量误差有时又称为绝对误差。绝对误差和相对误差均反映单次测量结果与物理量的真值之间的差异。

由于真值是无法知道的, 为了考查测量结果相对于真值的偏离, 误差理论指出, 可以用对同一物理量等精度多次 (n 次) 重复测量结果的算术平均值来代替物理量的真值 (实际处理中, 我们也可用公认值、理论值、修正值等取代真值进行计算)。相应地, 称测量值与算术平均值之差为残差。用 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示第 i 次的测量值, 用 x_0 表示物理量的真值, $\bar{x}$ 表示 n 次测量结果的平均值, δ_i 表示第 i 次测量值的绝对误差, v_i 表示第 i 次测量值的残差, 则有

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (8)$$

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (9)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

$\bar{x}$ 又叫期望值, 是对测量结果的最佳估计。对于验证性实验, 常用由理论推导出的值(理论值)或公认的标准值为真值 x_0 。

测量的目的就是要尽可能准确地测出待测物理量的值, 而所有的测量结果又都具有误差, 因而人们不能追求绝对准确的测量, 只能设法尽可能地提高测量的准确度, 减小误差。为达到这一目的, 就要对误差产生的原因及各种情况下产生的误差的性质进行分析研究。由此发展起一门以概率论和数理统计理论为基础的科学理论——测量误差理论。大学物理实验教材一般不详细叙述误差理论, 而只对与处理实验数据有关的误差理论内容作简要的介绍。

按照误差产生的原因及其性质, 误差可以分为系统误差和随机(偶然)误差, 下面分别加以介绍, 重点放在随机误差。

(1) 系统误差

此类误差由系统本身产生, 我们的系统包括: 实验的人、环境、仪器、方法等。在相同条件下, 多次重复测量同一物理量时, 测量值对真值的偏离(包括大小和正负)总是相同的, 这类误差称为系统误差, 系统误差的来源大致如下。

理论公式的近似性: 例如单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 成立的条件之一是小角摆动 ($<5^\circ$), 而在实验中, 这个条件是不易实现的。

仪器结构不完善: 如温度计、指针电表的刻度不准、天平两臂的长度不精确相等。

环境条件的改变: 如在 20°C 条件下校准的仪器拿到 -20°C 环境中使用。

测量者的生理、心理因素的影响: 如记录某一信号时有滞后或超前的倾向, 对标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。

系统误差的特点是稳定性, 不能用增加测量次数的方法使它减小。在实验中发现和消除系统误差是很重要的, 因为它常常是影响测量结果准确程度的主要因素。发现与消除系统误差, 靠的是实践经验的积累与丰富。由所积累的经验, 对某一测量任务的系统误差是可以定量估计的, 称之为“已定系统误差”。对于已定系统误差, 一般都有相应的消除和补救办法, 所以在进行误差分析时, 不把它列为讨论的内容。

还有一类系统误差, 只知道它存在于某个大致范围, 而不知道它的具体数值, 称之为“未定系统误差”。测量仪器的误差就属于这一类。以砝码为例: 一个名义质量为 100g 的三等砝码, 它的质量误差为 $\pm 2\text{mg}$, 这意味着: 凡是质量在 99.998g 到 100.002g 之间的砝码都被当作 100g 砝码的合格产品。对于前面的这个 100g 的砝码, 在没有经过校准之前, 你不能知道这一系统误差的数值, 然而它又有稳定不变的误差值。由于其误差值不能确定, 只能取在可正、可负的一个确定的范围区间, 称为该仪表、量具的极限误差, 又称允差, 在厂家出厂时已经给出。对于分度、分量程仪表, 其允差常以仪表的精度等级给出, 对于刻度量具, 一般取其最小刻度值或其最小刻度值的 $1/2$ 作为该仪器的极限误差(允差)。

(2) 随机误差

随机误差又叫偶然误差, 它是由于偶然的不确定或无法控制的因素造成的每一次测量值的无规律涨落, 是随机产生的。测量值对真值的偏离时大时小, 与真值之差时正时负, 但对大量测量数据而言, 误差取值遵从统计规律: 虽然具体取什么值不确定, 但当测量次数 n 足够大时, 取各种值的概率(该值重复出现的次数与测量总次数之比当 $n \rightarrow \infty$ 时的极限)却