21世纪高等学校规划教材

大学物理实验

主　编　满玉春　陶荟春　宋晓东

Daxue Wuli ShiYan

北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

21世纪高等学校规划教材

大学物理实验

主　　编　满玉春　陶荟春　宋晓东
副 主 编　权　松　李效峰　艾淑平
　　　　　贾福全
编写人员　邓　宇　申芳芳　张晶莹
　　　　　段学智　付沙威　沈　璐

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 提 要

本书是遵照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》及编者在多年物理实验教学实践的基础上编写而成的，本书共有34个实验项目，包括力学实验、热学实验、电磁学实验、光学实验、设计性实验和近代物理实验。

本书可作为普通高等院校大学物理实验课程教材使用，根据不同专业的要求，可有选择地从中挑选实验项目开设。教师在使用本教材开设实验时，不一定要按本书顺序进行，也可按实验原理、实验方法和手段的难易程度分层次进行教学安排。在实际教学过程中，教师可以指定必做教材中的部分内容，另根据实验室的条件，让学生自己选择实验题目。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/满玉春，陶荟春，宋晓东主编. -- 北京：北京邮电大学出版社，2011.1

ISBN 978－7－5635－2526－3

Ⅰ.①大… Ⅱ.①满… ②陶… ③宋… Ⅲ.①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(2010)第255180号

书　　名 大学物理实验
主　　编 满玉春　陶荟春　宋晓东
责任编辑 苏文刚
出版发行 北京邮电大学出版社
社　　址 北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真 010－82333010　62282185(发行部)　010－82333009　62283578(传真)
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经　　销 各地新华书店
印　　刷 北京市梦宇印务有限公司
开　　本 787 mm×1 092 mm　1/16
印　　张 13
字　　数 299千字
版　　次 2011年1月第1版　2011年1月第1次印刷

ISBN 978－7－5635－2526－3　　定价：30.00元

前　言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》，结合物理实验课程的改革和实践，特别是面对 21 世纪对人才培养的新要求，以培养“基础扎实，视野开阔，动手能力强，富有创新精神”的应用型人才为目的，在原有出版教材的基础上，经过精心的选材编写而成。

20 世纪中叶以来，以计算机信息科学、生命科学、空间科学、材料科学等为代表的新的科学技术革命，极大地加速了科学技术的发展和各学科之间的相互交叉和渗透，新的综合化趋势已成为科学发展的主流，因此，在本教材的编写中，既保留了经长期教学实践证明对培养学生实践能力行之有效的典型实验的同时，又增加了与近现代科学技术接轨，更能激发学生学习积极性和热情的近代实验（如计算机仿真、核磁共振实验和传感器实验等）。每个实验提供了实验背景介绍、实验原理、实验装置、实验过程以及实验过程可能遇到的问题等信息，便于学生自学，给学生更多的自主探索空间。

本教材第一部分为绪论，介绍了实验数据的处理方法和测量误差的分析，并引用了不确定度的概念。实验项目内容涵盖了力学、热学、电磁学、光学和近代物理。书末的附表列出了常用有关物理常数，以便读者查阅。

参加本书编写的人员有：宋晓东、陶荟春（绪论、实验 1、实验 2、实验 4、实验 10、实验 11、实验 18、实验 23、实验 24）、艾淑平、权松（实验 3、实验 6、实验 9、实验 12、实验 19、实验 25、实验 31）、申芳芳、满玉春、贾福全（实验 7、实验 8、实验 13、实验 14、实验 16、实验 21、实验 26、实验 28、实验 29、实验 32）、邓宇、李效峰、（实验 15、实验 17、实验 20、实验 22）、张晶莹、沈璐、付沙威、段学智（实验 5、实验 27、实验 30、实验 33、实验 34）。

在本教材的编写过程中，参考了我国一些物理实验教学工作者编著的教材和著作，在此向他们表示衷心的感谢。同时，对关心和支持本教材编写的院、系领导表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，教材中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编　者

目 录

第1章 绪 论

1.1 物理实验课的地位和作用

物理学是实验的科学。在物理学的发展中物理实验一直起着重要的作用。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术得以实现的。物理实验的方法、思想和技术已经普遍地应用在自然科学的各个领域，物理实验对高等学校理工类学生是十分重要的。

物理实验课是对学生进行科学实验基础训练的入门课程，它可以使学生在学习物理实验基础知识的同时，受到较系统、严格的训练，培养初步的实验能力，养成良好实验习惯和科学的世界观。

实验能力应包括动脑能力和动手能力，这些能力的培养是学生在教师的指导下，阅读教材或资料，根据实验原理和方法，正确使用基本实验仪器，掌握基础物理量的测量方法和实验操作技能；正确记录和处理数据；分析实验结果和撰写实验报告；自行设计和完成一些不太复杂的实验任务，等等。物理实验在人才素质的培养中起着重要的作用。

1.2 物理实验课的基本环节

一、实验前的预习

课前要认真预习好教材，通过阅读实验教材和有关的参考资料，弄清实验的目的、原理，所用的仪器和测量方法，了解实验的主要步骤，根据实验任务画好记录数据的表格等。在此基础上写出预习实验报告，预习实验报告应简明扼要地写出：

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理(包括主要公式、原理图、线路图或光路图)。

(4)关键的实验步骤，并画好原始数据的记录表格。

二、实验操作

学生进入实验室后要遵守实验室规则。做实验不是简单测量几个数据，计算结果就行。通过实验要有意识地培养自己使用和调节仪器的本领，观察和分析实验现象的科学素养，整洁清楚地做实验记录的良好习惯。在遇到问题时，应看做是学习的良机，冷静地分析和处理它。仪器发生故障时，在教师的指导下学习排除故障的方法。珍惜独立操作的机会，记录实验数据时，不要用钢笔。实验完毕，实验数据应交教师审查签字，整理还原仪器后，方可离开实验室。

三、实验总结

实验后要对实验数据及时进行处理。数据处理包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式，代入的数据要有根据，便于别人看懂，也便于自己检查，作图要按作图规则，使图线美观、规矩。数据处理后要给出实验结果。最后在预习报告基础上撰写一份清晰、工整、简洁的实验报告。在此过程中，可以训练写科学技术报告和总结工作的能力。实验报告要用实验报告纸书写，内容包括：

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理。用自己的语言简明扼要地写出实验原理和测量方法的要点，说明实验中必须满足的条件。写出数据处理中必须要用的一些主要公式，标明公式中的物理量的意义(不推导)。要画出原理图、测量电路图或光路图。

(4)实验仪器。写出主要仪器的名称、规格及编号。

(5)实验步骤。根据实际的实验过程写明关键步骤和注意要点。

(6)数据表格和数据处理。在数据表格(表格要有标题)中列出全部原始测量数据。按先写出的公式，再代入数据计算，给出测量结果。要求作图的，标明图题，按作图规则作图。

(7)实验讨论。必要时对实验观察到的现象、实验结果进行分析和讨论，回答教师指定的思考题。

1.3 实验室规则

(1)学生进入实验室须带上预习报告(包括记录数据的表格)，经教师检查同意后方可进行实验。

(2)进入实验室不能擅自搬弄仪器，实验中应严格按仪器操作规则操作，如有粗心大意违反操作规程而损坏设备的，照章赔偿。

(3)使用电源时，务必经教师检查线路后才能接通电源。

(4)遵守课堂纪律，注意保持安静的实验环境。

(5)做完实验后，学生应将仪器整理还原，桌面收拾整洁，凳子摆放整齐，经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字后，方可离开实验室。

(6)按要求交实验报告。

1.4 误差和测量数据的处理

一、测量

测量是指将待测物体的某物理量与相应的标准做定量的比较的实验过程。按测量方法测量分为直接测量和间接测量。

1. 直接测量

直接测量是将待测物理量与作为标准的物理量直接比较，得出被测量的量值，得到的被测

量的量值叫做直接测量量。例如，用米尺测量桌子长度，用温度计测量温度，用电压表测量电压等。

2. 间接测量

间接测量是指按一定的函数关系，用一个或多个直接测量量计算出被测量的量值，相应的被测量的量值叫做间接测量量。例如，测量长方体的密度，应先测出它的长、宽、高及质量，然后再进行运算得出密度。

二、误差

任何物质都有自身的各种各样的特性，在一定的客观条件下，反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值叫做真值。测量的目的就是要力图得到真值。然而在实验过程中，由于各种原因，使得测量值与真值之间存在着一定的差异，误差就是指测量值与真值之差。

(1)绝对误差：

$$\delta = x - x_0$$

其中，δ 为测量误差，x 表示测量值，x_0 表示被测量的真值。

(2)相对误差：

$$E = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% \text{（用百分数表示）}$$

被测量的真值是一个理想概念，常常不能知道，所以常用约定真值来代替真值。约定真值是指理论上指定或给出的或经国际权威组织认定的值。大学物理实验的实际测量中，常简单地以被测量的实际值或修正过的算术平均值来代替真值。

三、误差的分类及其处理方法

测量误差按性质可分为系统误差和随机误差两大类。

1. 系统误差

在同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差称为系统误差。系统误差包括已定系统误差和未定系统误差。

1)已定系统误差

已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的误差分量。例如，电流表使用前未调零位，电流表中无电流流过时示值已是 0.003 mA，测量将产生+0.003 mA 的系统误差。测量中应尽量消除已定系统误差，或对测量结果进行修正。

2)未定系统误差

未定系统误差是指符号和绝对值未经确定的误差分量。例如，测量时温度等影响量偏离额定值，会产生一定的误差分量。实验中一般只能估计出未定系统误差的限值或其分布范围。

3)产生系统误差的主要原因

(1)仪器本身有缺陷或安装、使用不当。例如，仪器标尺刻度不均匀、仪器零点不准、使用条件不符合要求等。

(2)理论公式本身有一定的近似性，或者实验条件不完全满足理论公式，或者实验方法不够完善。

(3)实验人员在操作经验和习惯、分辨能力、反应速度等方面的差异。

实验中一些系统误差，要设法找出原因，并努力消除或尽量减少它对测量结果的影响。要对已定系统误差进行修正，还可通过方案选择、参数设计、环境条件控制、计算方法改进等环节来减少未定系统误差。

2. 随机误差

随机误差是在同一量的多次测量中以不可预知的方式变化的测量误差分量。随机误差主要来源于人们感官（听觉、视觉、嗅觉）的分辨能力的限制和实验环境的偶然因素的干扰（如温度不均匀、噪声、气流等）。随机误差分量是测量误差的一部分，就某一次测量值来说是没有规律的，其大小和符号都是不可预知的，但在同一个量的多次测量中，它们的分布常常满足一定的统计规律。常见的一种情况是：正态分布（高斯分布）。

对物理量 x 做 n 次等精度测量（在测量条件相同的情况下的一系列测量），得到 n 个测量值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的一个测量列，概率论可以证明，其平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ 为最佳值，是最可以信赖的。

该测量列的标准差为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}}$$

其统计意义是指当测量次数足够多时，测量列中任一测量值与平均值的偏离落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为 68.3%，记为 $P=0.683$，表示置信概率为 68.3%，这一公式称为贝塞尔公式。

当 $n\to\infty$ 时，物理量 x 成为连续型随机变量，其正态分布的概率密度函数为

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

其中，δ 为绝对误差，$\delta = x - \bar{x}$，其曲线为一连续曲线（见图 1-4-1）。

正态分布具有以下特点：

(1)对称性。大小相等的正负误差出现的概率相等。

(2)单峰性。与平均值相差越大，出现的概率越小。

(3)有界性。在一定条件下，标准差的绝对值有一定限度。

(4)抵偿性。当 $n\to\infty$ 时，误差的代数和趋近于零。

图 1-4-2 给出了 σ 值不同的正态分布曲线。由图可见，σ 值越小，随机变量的分布越集中，分散性越小；σ 值越大，随机变量分布越分散。

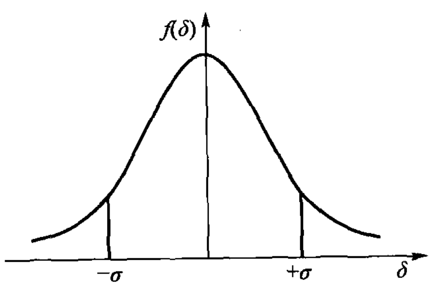

图 1-4-1　正态分布曲线

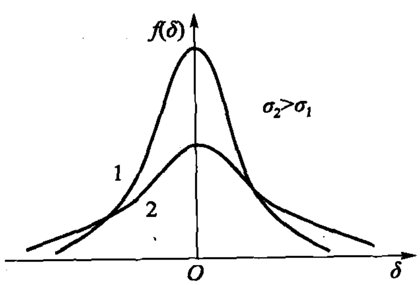

图 1-4-2　不同 σ 值的正态分布曲线

由积分表可以得到

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta)\mathrm{d}\delta = 1, \quad \int_{-\sigma}^{+\sigma} f(\delta)\mathrm{d}\delta = 68.3\%$$

$$\int_{-2\sigma}^{+2\sigma} f(\delta)\mathrm{d}\delta = 95.4\%, \quad \int_{-3\sigma}^{+3\sigma} f(\delta)\mathrm{d}\delta = 99.7\%$$

以上各式表示，当 $n \to \infty$ 时，任一次测量值与平均值之差落在 $(-\infty, +\infty)$ 区间的概率为 1，称为归一化条件；而落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为 68.3%；落在 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 区间的概率为 95.4%；落在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率为 99.7%。在通常的有限次测量中，测量误差的绝对值大于 3σ 的概率很小，可以认为是测量失误，该测量值是“坏数据”，应予以剔除，在分析多次测量数据时可作为 3σ 判据。

四、测量不确定度

测量的理想是获得被测量在测量条件下的真值，但由于实验方法和测量仪器的不完善、测量环境的不稳定等原因，都将使测量值偏离真值。在实际工作中，人们往往关心的不是测量列的数据散布特性，而是测量结果，即算术平均值的离散程度。为了有一个能够在所有行业和部门中通用的，在国际上统一的对测量结果评定的方法和理论，国际标准化组织(ISO)、国际计量委员会(CIPM)等 7 个国际组织制定了通用指导性文件：ISO1993(E)，即“测量不确定度表示指南”。我国国家质量技术监督局在此基础上发布了《测量不确定度评定及表示》计量规范，自 1999 年 5 月 1 日起实施。在实验教学中，由于测量不确定度涉及内容较多，在保证科学性的前提下，本课程尽量简化。

1. 不确定度(U)

不确定度是表征被测量的真值所处的量值范围的评定，它表示由于测量误差的存在而对测量值不能确定的程度，根据估算的方法不同分为 A 类不确定度和 B 类不确定度。

1) A 类不确定度(U_A)

A 类不确定度是指用统计方法计算的不确定度分量。被测量 x 在等精度条件下进行 n 次测量，得到算术平均值 $\bar{x}$ 作为最佳值。这一测量列的标准差为 σ_x。如果增加测量次数，如 $(n+m)$ 次，可得另外一个最佳值 $\bar{x}'$ 和相应的标准差 σ'_x。随着测量次数的增加 $\bar{x}$ 也会是一个随机变量。那么由概率论可以得到算术平均值的标准差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

当 $n \to \infty$ 时，算术平均值将无限接近待测物理量的客观值。$\sigma_{\bar{x}}$ 的统计意义为：待测物理量落在 $[\bar{x}-\sigma_{\bar{x}}, \bar{x}+\sigma_{\bar{x}}]$ 区间的概率为 68.3%；落在 $[\bar{x}-2\sigma_{\bar{x}}, \bar{x}+2\sigma_{\bar{x}}]$ 区间的概率为 95.4%；落在 $[\bar{x}-3\sigma_{\bar{x}}, \bar{x}+3\sigma_{\bar{x}}]$ 区间的概率为 99.7%。当测量次数减少时，要保持同样的置信概率，要扩大区间，将 $\sigma_{\bar{x}}$ 乘以一个大于 1 的因子 t，t 与测量次数有关。A 类不确定度记为

$$U_A = t \cdot \sigma_{\bar{x}}$$

表 1-4-1 中给出不同的置信概率下 t 与测量次数 n 的对应关系。

表 1-4-1　A 类不确定度的因子

t \ n P	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	∞
0.68	1.32	1.20	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1
0.95	4.30	3.18	2.78	2.57	2.46	2.37	2.31	2.26	2.15	2.09	1.96
0.99	9.93	5.84	4.60	4.03	3.71	3.05	3.36	3.25	2.98	2.86	2.58

根据测量次数 n，从表 1-4-1 中查出 t 值代入上式可得到不同置信概率的 A 类不确定度。本课程实验中可采用 $P=0.95$。

2)B 类不确定度(U_B)

B 类不确定度是指用其他方法(非统计方法)来计算的不确定度分量。一般来说，在对已定系统误差进行消减或修正后，列出测量值的全部误差因素并作出不确定度估计。在分析实验误差时，误差来源主要包含仪器误差、原理方法误差、环境误差、调整误差和个人误差。本课程约定 B 类不确定度主要由仪器误差引起。

教学中所使用的仪器仪表，在说明书中给出了该仪器的允许误差极限 Δ_{ins}(仪器误差限)，在没有仪器准确资料情况下也可采用仪器的最小分度值作为仪器误差限。在某些测量中测量的误差远大仪器误差限，可根据实际情况来估计误差限。

为了从仪器的误差极限 Δ_{ins} 计算出 B 类不确定度，可以将仪器误差极限 Δ_{ins} 除以与仪器误差分布特性有关的常数 K，得到

$$U_B=\frac{\Delta_{ins}}{K}$$

对于正态分布 $K=3$，对于均匀分布 $K=\sqrt{3}$，对于梯形分布 $K=2$。确定仪器误差属于哪一种分布需要有丰富的实验经验，本课程约定仪器误差极限均按均匀分布近似处理，即

$$U_B=\frac{\Delta_{ins}}{\sqrt{3}}$$

本课程常用仪器的误差极限：如量程为 0～25 mm 的螺旋测微计为 0.004 mm；游标分度值为 0.02 mm 和 0.05 mm 的游标尺，可取其最小分度值；机械停表在较短时间测量时误差极限可取 0.2 s；直流电表的仪器误差极限 $\Delta_{ins}=A_m\cdot a\%$ (A_m 为量程，a 表示等级指数)。

3)测量结果的合成不确定度

A 类不确定度和 B 类不确定度如果相互独立，则测量结果的合成不确定度可表示为

$$U=\sqrt{U_A^2+U_B^2}$$

4)测量结果的相对不确定度

$$U_r=\frac{U}{\bar{x}}\times 100\%$$

5)测量结果的表达

$$x=\bar{x}\pm U$$

$$U_r=\frac{U}{\bar{x}}\times 100\%$$

6)间接测量结果的不确定度

对于间接测量,间接测量量 y 是若干个相互独立的直接测量量 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 的函数

$$y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$

则有

$$U(y)=\sqrt{\left[\frac{\partial y}{\partial x_1}u(x_1)\right]^2+\left[\frac{\partial y}{\partial x_2}u(x_2)\right]^2+\cdots+\left[\frac{\partial y}{\partial x_n}u(x_n)\right]^2}$$

或

$$U^2(y)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2\cdot u^2(x_i)$$

其中,$u(x_i)$为各直接测量 x_i 的合成不确定度。

当 $y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$为乘除或方幂的函数形式,采用相对不确定度可以简化运算过程:

$$\frac{U(y)}{y}=\sqrt{\left(\frac{\partial \ln y}{\partial x_1}\right)^2u^2(x_1)+\left(\frac{\partial \ln y}{\partial x_2}\right)^2u^2(x_2)+\cdots+\left(\frac{\partial \ln y}{\partial x_n}\right)^2u^2(x_n)}$$

7)测量结果的表述规范

(1)对最终结果的不确定度一般可用一位或两位有效数字(参看有效数字)表示。当修约前不确定度的第一位数较小时(如为 1、2、3)取两位,其余可取一位或两位(首位不小于 5 时通常取一位)。本课程实验中对测量结果的不确定度约定保留一位有效数字。相对不确定度用百分数表示,取一位或两位。

(2)不确定度截尾采取“只入不舍”的方法,以保证其置信概率不降低。

(3)测量结果的最末位应与不确定度末位对齐,修约时采用“小于 5 舍,大于 5 入,等于 5 凑偶”的原则。

五、有效数字及其运算

1. 有效数字

实验中要记录很多数据,并进行计算,最后得到一个具体的测量结果。测量结果总是要存在误差,因此在对数据记录、运算和测量结果表示时不应该随意取位,而应遵从有效数字规则。

从仪器上读取数据时,要尽可能地估计到仪器最小分度的下一位。例如,用最小分度为 1 mm的米尺测量一物体的长度为 5.18 cm,其中 5 和 1 是从米尺上直接读出的,是确切数字,第三位数 8 是测量者估读出来的,它近似地反映这一位大小的信息,称为存疑数字。把仪器上直接读出的确切数字和最后一位存疑数字,通通记录下来,称为有效数字。上述物体长度的测量中,测量值包含三位有效数字。

2. 科学记数法

书写有效数字时必须应注意“0”的位置。例如,某物体质量为 0.080 20 kg,前面两个“0”不表示有效数字,它们的出现是因为选用的单位大,如果以 g 为单位,则物体质量写作 80.20 g,前面的“0”没有了。但最后一个“0”不能略去,否则就不能反映数据的确切程度和存疑数字的位置。如果描述上述物体质量以 mg 为单位时,应写成 8.020×10^4 mg,而不应写成 80 200 mg。因为测量数据不能因单位换算而改变其有效数字位数,所以为了解决这种矛盾,应采用科学记数法——把数据写成小数点前只有一位,再乘以 10 的幂来表示。

3. 有效数字的运算规则

当用直接测量量计算间接测量量时,间接测量量的有效数字位数,在求出不确定度后,可

以确定下来。若实验后不计算不确定度，测量结果的有效数字位数可按以下规则粗略确定。

1)加减运算后的有效数字

加减运算的存疑数字的位置，应当和参与加减各数中最先出现的存疑数字一致。例如：

$$23.\underline{1}+5.26\underline{7}=28.\underline{3}6\underline{7}=28.\underline{4}$$

$$26.6\underline{5}-3.92\underline{6}=22.7\underline{2}\underline{4}=22.7\underline{2}$$

2)乘除运算后的有效数字

乘除运算后的有效数字位数，可估计与参加运算的各数中有效数字位数最少的相同。例如：

$$325.7\underline{8}\times 0.014\underline{5}\div 789.\underline{2}=0.005\,9\underline{9}$$

不难证明，乘方或开方的有效数字位数与其底的有效数字位数相同。

3)三角函数、对数值的有效数字

三角函数或对数的有效数字位数，可由改变量确定。例如，$43°26'$的存疑数字是$6'$，$\sin 43°26'=0.687\ 510\ 098$，而$\sin 43°27'=0.687\ 721\ 305$，可取$\sin 43°26'=0.687\ 5$。

4)数值的修约规则

运算后的结果只保留有效数字，其他数字应舍去，舍去时可按“4 舍 6 入，遇 5 凑偶”的原则。例如，4.234 2 和 4.236 8，要保留三位有效数字应为 4.23 和 4.24。“遇 5 凑偶”是指保留的最后一位是奇数，则舍去 5 进 1，要保留的最后一位是偶数，则舍去 5 不进位，如果 5 的下一位不是零时仍需进位。例如，4.235 0、4.245 0 和 4.245 1 要保留三位有效数字应写作 4.24、4.24 和 4.25。

六、实验数据处理的基本方法

正确地处理实验数据是实验过程中一个非常重要的环节。实验数据的测量是实验的开始和基础，实验数据的分析是实验的深入。实验数据处理包括多方面内容和多种方法，如数据的记录、整理、作图、计算、分析等。这里结合物理实验的基本要求，介绍几种基本的较常用的实验数据处理方法。

1. 列表法

在实验数据的记录和处理时，设计一份清晰、合理的表格。表格的设计要求对应关系清楚，有利于发现相关量之间的物理关系；在标题栏中应注明物理量的名称、符号、数量级和单位等；根据需要列出除原始数据以外的计算栏目和统计栏目，标明仪器型号、量程和准确定等级和有关环境条件等。

2. 作图法

把测量的一系列相互对应的实验数据在坐标纸上用曲线表示出来，即用曲线描述各物理量之间的关系，称为作图法。采用作图法处理数据应使图线能清晰准确地反映物理现象的变化规律，并能准确地从图线上确定物理量值的同时符合准确度要求。

1)作图的要求

(1)作图要选择坐标纸。根据不同的函数关系选择不同的坐标纸，如直角坐标纸、对数坐标纸等。

(2)选坐标轴。标明坐标轴代表的物理量名称(或符号)和单位。一般用横轴代表自变量，用纵轴代表因变量。

(3)确定坐标分度。标明坐标轴单位长度代表的物理量值,即确定坐标分度。在确定坐标分度时应考虑测量数据的有效数字。两坐标轴之间单位长度的比例要适当。

(4)描点与连线。在坐标纸上用“×”或“+”等符号标出数据点的位置,用直尺或曲线板把数据点连成直线或光滑曲线,连线不能通过偏差较大的数据点,而是使数据点靠近曲线两侧而均匀分布。

(5)写图名和图注。注明绘制曲线的名称、绘图日期和绘图人姓名。

2)作图法的应用

(1)分析物理量之间的变化规律。

在物理实验中经常遇到直线、抛物线等各种不同类型的实验曲线,由实验曲线可以建立经验公式,如当实验曲线为一条直线时,经验公式为直线方程

$$y=a+bx$$

求出 a 和 b 便可建立方程,求 a 和 b 可用斜率截距法或端值求解法。

(2)在曲线的两点间或曲线的延长线上求值。

在实验中,当受到其他实验因素的限制时,使某些值不能进行实际测量,可利用实验曲线或曲线的延长线求得这些点的值。

(3)曲线改直。

当物理量之间函数关系比较复杂,实验曲线不是直线时,对物理量分析或建立实验经验公式比较困难。这时可以用变量置换法把曲线改成直线。例如,两物理量之间关系为 $y=a+b\frac{1}{x^2}$,作 y 与 x 的图线为曲线;如用变量 z 置换$\frac{1}{x^2}$,则 $y=a+bz$,y 与 z 有线性关系,作 y 与 z 的图线为直线。

对于较为复杂的情况,读者可参考实验数据处理的专著。

3. *逐差法*

对自变量与因变量成线性关系,且自变量等间距变化的一组数据可采用逐差法处理。例如,用拉伸法测钢丝的弹性模量实验中,每次加载质量相等的砝码,测量得光杠杆标尺读数为 $x_0,x_1,\cdots,x_9$,然后再逐次减砝码,对应标尺读数为 $x'_9,x'_8,\cdots,x'_0$,取相同砝码下标尺读数的平均值$\overline{x_0},\overline{x_1},\cdots,\overline{x_9}$。若求每加(减)一个砝码引起读数变化的平均值,则为

$$\overline{\Delta x}=\frac{\frac{1}{5}\left[\left(\overline{x_5}-\overline{x_0}\right)+\left(\overline{x_6}-\overline{x_1}\right)+\left(\overline{x_7}-\overline{x_2}\right)+\left(\overline{x_8}-\overline{x_3}\right)+\left(\overline{x_9}-\overline{x_4}\right)\right]}{5}$$

这样充分利用全部测量数据。如果对上述数据不采用逐差法,而按实际测量顺序采用逐项逐差求平均值,则有

$$\overline{\Delta x'}=\frac{\left(\overline{x_1}-\overline{x_0}\right)+\left(\overline{x_2}-\overline{x_1}\right)+\cdots+\left(\overline{x_9}-\overline{x_8}\right)}{9}=\frac{\overline{x_9}-\overline{x_0}}{9}$$

显然中间测量数据抵消,而失去了多组测量的意义。

逐差法计算简便,在测量过程中,一般先将实验测量数据逐项相减,用来检验线性变化的优劣,以便及时发现问题。

4. *最小二乘法*

作图法虽然在实验数据的处理中是一种很便利的方法,但是在图线的绘制上往往会引入

附加的误差，为了克服这一缺点，常用一种以最小二乘法为基础的实验数据处理方法。本课程仅讨论实验中常用的一元线性回归。

设某一实验中，获得物理量一系列测量值$(x_i,y_i)(i=1,2,3,\cdots,n)$，假定对$x_i$的观测误差很小，主要误差都出现在$y_i$的观测上，如果从$(x_i,y_i)$中任取两组数据得出一条直线，那么这条直线的误差有可能很大。一元线性回归是用数学分析的方法从这些数据中求出一个最佳的经验式$y=a+bx$。按这一经验式作出的图线虽不一定能通过每一个实验点，但它是以最接近这些实验点的方式平滑地穿过它们。对于每一个x_i，在直线上有一点$y=a+bx_i$，测量值y_i与直线上对应点y的差值$\Delta y_i=y_i-y=y_i-(a+bx_i)$称为$y_i$的偏差。如果$y_i$的误差互相独立且服从正态分布，当测量值$y_i$的偏差的平方和为最小时，得到最佳经验式，由此求出$a$和$b$。

设以S表示Δy_i的平方和，它应满足

$$S=\sum_{i=1}^{n}(\Delta y_i)^2=\sum_{i=1}^{n}[y_i-(a+bx)_i]^2=\min$$

上式中x_i和y_i为测量值，因此S为a和b的函数。令S对a和b的偏导数为零，即可解出满足上式的a,b值。

$$\frac{\partial S}{\partial a}=-2\sum_{i=1}^{n}(y_i-a-bx_i)=0,\quad \frac{\partial S}{\partial b}=-2\sum_{i=1}^{n}(y_i-a-bx_i)x_i=0$$

解以上方程组得

$$a=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-\sum_{i=1}^{n}y_i\sum_{i=1}^{n}x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2-n\sum_{i=1}^{n}x_i^2},\quad b=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{i=1}^{n}y_i-n\sum_{i=1}^{n}x_iy_i}{\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2-n\sum_{i=1}^{n}x_i^2}$$

令$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i,\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i,\bar{x}^2=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2,\overline{x^2}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2,\overline{xy}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_iy_i)$，则

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

将得出的a和b代入直线方程，即得到最佳的经验公式$y=a+bx$。

上面介绍的用最小二乘法求出的回归系数a和b虽然是最佳的，但并不是没有误差，它们的误差计算比较复杂。一般来说，如果实验点对直线的偏离大(Δy_i大)，那么由这列数据求得的a和b的误差也大，由此定出的经验公式可靠程度就低；反之，如果实验点对直线的偏离小(Δy_i小)，那么由这列数据求得的a和b的误差也小，由此定出的经验公式可靠程度就高。

在回归系数a和b确定以后，为了判断所得结果是否合理，通常用相关系数r来检验，对于一元线性回归，相关系数r定义为

$$r=\frac{\overline{xy}-\bar{x}\cdot\bar{y}}{\sqrt{\left(\overline{x^2}-\bar{x}^2\right)\left(\overline{y^2}-\bar{y}^2\right)}}$$

式中，$\bar{y}^2=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i\right)^2,\overline{y^2}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2$。

可以证明，$|r|$总是在0和1之间。如果$|r|$很接近于1，则说明各实验点密集地分布在所拟合的直线附近，用最小二乘法进行线性回归是合适的。相反，$|r|$趋近于零，说明实验数据很分散，无线性关系，用线性回归来推测实验数据的变化规律与实际差异很大。因此用最小二

乘法直线拟合处理数据时要计算相关系数。

练习题

1. 试用有效数字规则计算下列各式的结果。

(1)68.745+1.03　　(2)76.000÷(40.00−2.0)

(3)$\frac{100.0\times(5.6+4.412)}{(78.00-77.0)\times 10.000}+110.0$

(4)$x=2.48$,$\sqrt{x}=?$　　(5)$x=8.48$,$\ln x=?$

(6)$x_1=(231.2\pm0.2)$,$x_2=(22.15\pm0.05)$,$x_1+x_2=?$

2. 纠正下列各式的错误,写出正确结果。

(1)$U=(2.415\pm0.02)$ V　　(2) $m=21\ 550\pm200$ kg

(3)$I=(0.836\pm3.3\times10^{-3})$ A　　(4) 36 cm=360 mm

3. 指出下列数值是几位有效数字,并用科学计数法表示。

(1)589.3　　(2)0.008 654±0.000 002

(3)5 420×10^2　　(4) 0.050 60

4. 用量程为 25 mm 的一螺旋测微计测一圆柱体直径,三次重复测量数据为 14.990 mm、14.987 mm、14.984 mm,试表示测量结果。

5. 用流体静力称衡法测量一铝块密度,计算公式为 $\rho=\frac{m}{m-m_1}\rho_0$,测得铝质量 $m=(27.06\pm0.02)$ g,铝块浸没于浅水中的质量 $m_1=(17.03\pm0.02)$ g,水的密度 $\rho_0=(0.999\ 7\pm0.000\ 3)$ g/cm^3,试求铝块的密度测量结果。

6. 用伏安法测未知电阻,测量数据如下:

U/V	0.00	2.00	4.01	5.90	7.86	9.73	11.80	13.75	15.90	16.86
I/mA	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00

(1)用作图法求 R(画 U-I 曲线)。

(2)用逐差法求 R。