浙江省“十一五”重点教材建设项目

大学物理实验

主　编 ◎ 阮世平
副主编 ◎ 李　明



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

浙江省“十一五”重点教材建设项目

大学物理实验

主　编　阮世平
副主编　李　明

ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/阮世平主编. —杭州：浙江大学出版社，2011.8
ISBN 978-7-308-09034-6

Ⅰ.①大… Ⅱ.①阮… 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（2011）第 172450 号

大学物理实验
主编　阮世平

责任编辑　邹小宁
文字编辑　王　蕾
封面设计　王聪聪
出版发行　浙江大学出版社
（杭州市天目山路 148 号　邮政编码 310007）
（网址：http://www.zjupress.com）
排　　版　杭州大漠照排印刷有限公司
印　　刷　浙江国广彩印有限公司
开　　本　787mm×1092mm　1/16
印　　张　12.25
字　　数　299 千
版 印 次　2011 年 8 月第 1 版　2011 年 8 月第 1 次印刷
书　　号　ISBN 978-7-308-09034-6
定　　价　22.00 元

版权所有　翻印必究　印装差错　负责调换

前　言

《大学物理实验》是理工科学生进入大学后必修的一门重要基础实验课程。通过该课程的学习，学生们将系统地学习基本的物理实验技能和数据处理的方法，掌握常用物理仪器的使用，为以后的专业实验打下基础。根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2010 年版）》，结合编者们多年从事大学物理实验教学的实践经验编写了本书，所用的实验仪器尽可能是本省高校相对通用的。

全书分三篇。第一篇为实验理论与基础知识，明确物理实验的意义及基本要求，介绍了实验中一些常用的数据处理方法。第二篇为 18 个比较常见的基础物理实验，按力学、热学、电学和光学排列。第三篇为综合性、设计性和研究性实验。其中综合性实验要求运用多个物理知识点。设计性和研究性实验主要是通过给学生一个简单的提示、要求，由学生自行设计，完成整个实验；要求学生自主设计，通过研究探索达到实验的目的。为方便同学们完成实验，最后书末列出一些常用数据，供参考。

本书由阮世平担任主编，李明担任副主编。第一篇由阮世平执笔，第二篇由冯元新、袁哲峰、许森东、胡炜、徐弼军、李祖樟和潘卫清执笔，第三篇由陈烨、徐弼军和阮世平执笔。阮世平和李明完成附录的编写，并对全书进行统稿。

本书被列入浙江省高校重点教材建设项目。在编写过程中得到浙江科技学院教务处罗朝盛教授和理学院教师的帮助，在出版过程中得到浙江大学出版社的帮助，在编写过程中参考了大量的文献和物理实验教材，在此一并表示衷心感谢！

鉴于编者水平所限，不妥和疏漏之处难免，恳请读者批评指正。

作者

2011 年 6 月

目　　录

第一篇　实验理论与基础知识 / 1

第一章　绪论 / 1
一、物理实验的作用、目的和任务 / 1
二、大学物理实验的基本要求 / 2

第二章　物理实验基本技能 / 3
一、测量与误差的基本概念 / 3
二、有效数字的记录及其运算 / 5
三、实验数据处理基本方法和结果表示 / 6
四、物理实验的基本测量方法 / 9
本篇参考文献 / 10

第二篇　基础物理实验 / 11

第三章　力学和热学实验 / 11
实验 1　长度测量 / 11
实验 2　拉伸法测金属杨氏模量 / 17
实验 3　液体表面张力系数的测定 / 23
实验 4　转动惯量测量(一)——三线悬摆法 / 27
实验 5　转动惯量测量(二)——扭摆法 / 31
实验 6　落球法测量液体的粘滞系数 / 35

第四章　电学实验 / 39
实验 7　示波器原理和使用 / 39
实验 8　万用表原理和使用 / 44
实验 9　电子元器件伏安特性测量 / 48
实验 10　磁场测量(霍尔效应) / 52
实验 11　模拟静电场实验 / 57
实验 12　电桥法测量电阻值 / 62

第五章　光学实验 / 67
实验 13　薄透镜焦距测量 / 67
实验 14　分光计的使用和折射率测量 / 74
实验 15　液体折射率测量 / 81
实验 16　光栅衍射实验 / 84
实验 17　光的等厚干涉实验 / 88
实验 18　迈克耳孙干涉仪的调节与使用 / 94
本篇参考文献 / 100

第三篇　综合性、设计性、研究性实验 / 101

第六章　综合性实验 / 101
实验 19　旋转液体综合实验 / 101
实验 20　动态法测金属杨氏模量 / 108
实验 21　夫兰克—赫兹实验 / 113

需要全本请访问 www.ertongbook.com

实验 22　发光二极管光电特性研究　/ 121
实验 23　发光二极管光强分布特性测量　/ 123
实验 24　计算机仿真物理实验　/ 126
实验 25　铁磁材料的磁滞回线测量　/ 133
实验 26　单缝衍射的光强分布测量　/ 138
实验 27　照相与暗室技术　/ 142
实验 28　声速测定　/ 145
实验 29　多普勒效应实验　/ 151
实验 30　冷却法金属比热容测量　/ 158
实验 31　液晶的电光效应实验　/ 162

第七章　设计性、研究性实验　/ 173
设计性实验介绍　/ 173
实验 32　单摆法/自由落体测重力加速度　/ 174
实验 33　欧姆表的设计　/ 175
实验 34　电表改装　/ 176
实验 35　气垫导轨实验　/ 177
实验 36　焦利秤测不规则固体密度　/ 178
实验 37　电子温度计的设计与制作　/ 179
实验 38　线胀系数的测量　/ 180
实验 39　电位差计测温差电动势　/ 181
实验 40　太阳能电池特性研究　/ 182
实验 41　电光源起亮特性研究　/ 183
本篇参考文献　/ 184

附录　/ 185
附录 1　基本物理常数　/ 185
附录 2　国际单位制(SI)　/ 186
附录 3　20℃时常见固体和液体的密度　/ 187
附录 4　我国部分城市重力加速度　/ 187
附录 5　在 20℃时部分金属的杨氏弹性模量　/ 188
附录 6　不同温度下与空气接触的水的表面张力　/ 188
附录 7　常用光源的谱线波长　/ 189
附录 8　色环电阻表示　/ 189

第一篇　实验理论与基础知识

第一章　绪　　论

一、物理实验的作用、目的和任务

物理学孵育了许多的新兴学科，如电子技术、通信技术、半导体技术、光电技术和材料学科等. 作为自然科学的带头学科，物理学的发展对科技革命起了极大的推动作用. 实验和理论是物理学的两大支柱，物理学发展所遵循的基本规律就是“实验—理论—再实验”的模式.

在前人对大量自然现象进行观察、实验的基础上，牛顿总结了三大运动定律和万有引力定律，产生了经典力学理论，人类对自然的认识也提升到了一个新的高度. 理论又对实践产生巨大的促进，1846 年，勒弗里埃(U. Le verrier)和戈勒(J. C. Galle)等人利用牛顿的万有引力理论对天王星运动的某些极小的不规则性进行计算，结果发现了海王星. 1930 年，汤姆波夫(C. W. Tambaugh)同样运用万有引力理论对海王星的细微不规则进行计算，预言了冥王星的存在，并在实际的观测中发现了冥王星. 一个个成功的预言和证实将牛顿及其学说推上了当时学术界的顶峰.

电磁理论的发展也是实验与理论完美结合的成果. 19 世纪中叶，经过大量的实验研究，总结出一系列重要规律，如库仑定理、安培定律、毕奥—萨伐尔定律和电磁感应定律等. 随后，英国物理学家麦克斯韦(C. Maxwell)在总结前人成果的基础上，大胆地提出了“涡旋电场”和“位移电流”的假设，建立了经典电磁场理论. 该理论预言了以光速传播的电磁波的存在，提出了光是一种电磁波的思想. 彻底推翻了电和磁的“超距作用”观点，从而使电、磁、光三者得以统一. 20 多年后，德国物理学家赫兹(H. Hertz)从实验上证实了电磁波的存在，证明了光是一种电磁波的预言，为人类利用电磁波奠定了基础. 今日无线通信技术的普及正是得益于这一系列的成就.

理工类大学生不仅需要掌握坚实的基础理论、专业理论，同时也要具备较强的科学实验能力. 学习《大学物理实验》，就是为了进行科学实验基本训练，开始系统地接受实验技能训练；对培养学生良好的科学实验素养、掌握基本物理量的测量方法和实验数据处理方法具有非常重要的作用.

教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》中规定了大学物理实验课的任务：

1. 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法. 培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力.

2. 提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的科学态度，积极主动的探索精神，遵守纪律，团结协作，爱护公共财产的优良品德.

二、大学物理实验的基本要求

为了达到满意的教学效果，同学们要在教师指导下，充分发挥主动性，努力培养独立工作能力和严谨的工作作风. 在实验的各个过程中，要做到以下几点：

1. 实验前要先预习. 明确实验目的和原理，初步了解将要使用的仪器和注意事项. 并写出预习报告.

2. 实验时要遵守实验室规章制度. 先要阅读有关的仪器使用说明，了解各注意事项，熟悉仪器，调整好仪器. 必要时经指导教师检查后接通和开启电源，并注意安全. 实验过程中按步骤操作，认真测量并读取数据，正确记录填入数据表格，记录时要注意物理量的单位和有效位数. 发现测量结果可疑或有误，可重新测量，但不允许编造和抄袭.

数据记录须经指导教师审查、签名后才能结束本次实验操作；学生在整理完仪器和现场后方能离开实验室.

3. 实验后运用误差理论分析处理实验数据；要及时、认真撰写实验报告，得出本次实验的结论.

通过本课程的训练，同学们应能借助说明书，独立正确使用常用的物理实验仪器，掌握常用物理量的基本测量方法，并能正确运用误差理论分析处理实验数据.

第二章　物理实验基本技能

测量是物理实验的基本操作，只有在精确的实验基础上才能得出正确的结论.但是所有的测量都会有一定的误差，我们有必要认识误差，并分析、处理误差，以得出正确的结果.

一、测量与误差的基本概念

1. 测量

测量就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较，确定它是标准的多少倍.这个标准量称为该物理量的单位，倍数称为待测量的数值.

2. 误差的概念

测量所得的结果(测量值)x与被测物理量真实的量值(真值)X之间的差值Δx称为误差.即：

$$\Delta x = X - x \tag{2-1}$$

误差产生的原因相当复杂，有些是实验仪器、测量方法和测量环境造成的，也有些是人为因素造成的.根据误差的性质，可分类如下：

(1) 系统误差.在同一条件下对同一物理量进行等精度测量，误差呈现的符号、数值不变或按照一定的规律变化，这类误差称作系统误差.如用天平测量质量时，因天平两臂不等长，使测量值偏大或偏小，与实际值相比产生定向的偏离.

产生系统误差的可能原因有：测量仪器本身有缺陷，如计量标准偏差、零点偏移等；实验理论和方法不完善，如测量回路电流时忽略了所串联的电流表内阻；受环境影响或仪器使用条件不符合规定，如温度、湿度等；或受实验人员读数时的习惯偏差.

(2) 随机误差(也称偶然误差).在同一条件下对同一物理量进行等精度测量，消除系统误差后剩余的误差符号和数值变化不定，依照随机规律变化，这类误差称作随机误差.

产生随机误差的可能原因有：观察者的分辨能力或心理能力的限制，如在估读某一测量值时多次的估读值会不同；实验环境、电源和电信号背景噪声的随机变化，如用数字万用表测量日光灯的工作电流，电流表显示读数的末位不断闪烁变化，表明电流的随机起伏.

随机误差的特点是随机性，误差的大小和符号以不可预定的方式变化.尽管在一次测量值中，随机误差的数值和符号无法确定，但是当测量次数增加时，随机误差服从一定的统计分布规律，最常见的是正态分布.根据随机误差服从的统计分布规律，可对随机误差的大小和测量结果的可靠性作出合理的评价.

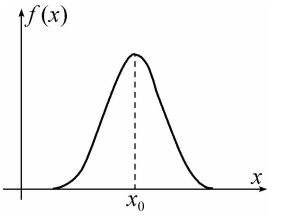


图 2.1　正态分布曲线

以被测量值x为变量，正态分布误差函数$f(x)$的曲线如图2.1所示.估读数引起的误差通常呈正态分布，估读数偏大和偏小出现的概率相同.正态分布的误差具有下列特点：

① 单峰性.在多次测量中误差绝对值小的测量值出现的概率比误差绝对值大的出现的概率大.

② 对称性.在多次测量中测量值大于或小于真值的概率相等.

③ 有界性.在多次测量中测量值远大于或远小于真值的概率趋于零.

由于呈正态分布的随机误差正负出现的概率相同，而小误差出现的概率又较大，因而当消除系统误差后多次测量的算术平均可以减小随机误差.但是在大多数情况下，需要通过随机误差的统计规律对测量值的误差和真实性做出判断.

完整的测量结果包括数值、单位和结果的可信程度.

3. 误差的估计

(1) 直接测量的误差

① 多次测量：对一个物理量测量了 n 次，测量值分别为 x_1，x_2，x_3，…时，其测量结果可表示为：

$$x = \overline{x} \pm \Delta x . \tag{2-2}$$

其中，$\overline{x} = \dfrac{x_1 + x_2 + x_3 \cdots + x_n}{n}$，是测量结果的算术平均值；

$\Delta \overline{x} = \dfrac{|x_1 - \overline{x}| + |x_2 - \overline{x}| + |x_3 - \overline{x}| + \cdots |x_n - \overline{x}|}{n}$，是测量结果的算术平均误差.

② 单次测量：对允许多次测量或要求不高的物理量可只进行一次测量，这时估计其最大的误差.

如果仪器给出最小分度 d，则 $x = x_{测} \pm \dfrac{d}{2}$，即用分度的一半表示误差.

如果仪器给出精度级别[①]，可用仪器误差作为测量误差.即 $x = x_{测} \pm \Delta x_{仪}$.其中 $\Delta x_{仪}$ 为仪器最大误差：$\Delta x_{仪}$ = 量程 × 级别 %.

(2) 间接测量的误差

设间接测量的量 N 与各独立的直接测量的量 x，y，z，…有下列关系：

$$N = f(x, y, z, \cdots)$$

用算术平均误差表示各独立的直接测量值为：

$$x = \overline{x} \pm \Delta x,\ y = \overline{y} \pm \Delta y, z = \overline{z} \pm \Delta z, \cdots$$

可以估算得到，间接测量值的最大绝对误差为：

$$\Delta N = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| \cdot \Delta \overline{x} + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right| \cdot \Delta \overline{y} + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right| \cdot \Delta \overline{z} + \cdots \tag{2-3}$$

间接测量结果可表示为：

$$N = \overline{N} \pm \Delta N . \tag{2-4}$$

(3) 相对误差

引入相对误差 E 的概念来描述测量的精密程度，定义为：

$$E = \frac{\Delta \overline{x}}{\overline{x}} \times 100\% \tag{2-5}$$

---

① 仪器的精度级别可分为 5.0，2.0，1.5，1.0，0.5，0.2，0.1 等，表示仪器在正常使用时，每一量程的最大误差的百分比.如一电流表最大量程 100mA，级别为 1.0 时，该量程的最大允许误差为 100×1.0%=1.0mA.

在处理间接测量量的误差时，如果函数关系是乘除关系，往往先求相对误差，再根据相对误差公式求出绝对误差.

二、有效数字的记录及其运算

1. 有效数字及记录

任何一个实验结果都存在着误差，由准确数字加上最后一位可疑数字合称为有效数字. 例如 13.27，有四位有效数字，其中最后一位的 7 是可疑位，而前三位应该是精确的，是可靠数字. 有效数字越多，精度就越高，因此，有效位数的多少不可以随意取舍.

对于标刻度的量具和仪器，根据仪器的刻度，要估读到最小刻度的几分之一（如 1/10，1/5，1/2）. 这最小刻度的几分之一，即为测量值的估计误差. 如用米尺测量书本上两条平行细线之间的距离，应能估读到最小刻度（1mm）的 1/10. 能读准的数字为可靠数字，估读的一位数字是可疑数字，测量值的误差往往在这最后一位.

用数字式仪表测量，凡是能稳定显示的数值都应记录下来. 其数值的位数就是该测量值的有效数字. 如果测量值的末位或末两位数字变化不定，应当记录稳定的数值加下一位正在显示的值，或者根据其变化规律，四舍五入到读数稳定的那一位. 如果两位以上的数字都变化不定，应考虑选择更合适的量程或更合适的仪器.

有效数字有如下的性质：

（1）出现在数值前面的“0”不是有效数，而中间与末尾的“0”均为有效数；

（2）有效数字与小数点的位置无关，如长度为 1.234mm，也可记为 0.1234cm. 都是四位有效数字. 当数值太小或太大时，应当采用科学记数法，如 1.234×10^{-7}km 等.

（3）任何有效数字位数是由绝对误差来决定的，有效数字的最末位应与误差（只取一位）所在位对齐. 如 2.34 ± 0.02m，小数点后都是两位数.

（4）有效数字的位数与测量方法有关. 例如，如果用最小分度为 0.1s 的秒表测一个周期，得 $T=1.9$s；但如果连续测 100 个周期，得 $100T=194.2$s，则 $T=1.942$s，前者为两位有效数字，后者为四位有效数字，精度提高.

2. 有效数字的运算

（1）有效数字的加减

几个数相加（减），其和（或差）在小数点后所应保留的位数与参与运算的诸数中小数点后位数最少的一个相同.

（2）有效数字的乘除

几个数相乘（除），所得的结果的有效数字位数，一般与诸数中有效数字位数最少的一个相同，有时也可多一位或少一位.

（3）乘方与开方

某数的乘方（或开方）的有效数字位数，应与其底数的有效数字相同.

（4）常数运算

在运算中，常数 e、π 可认为其有效数字是无限的，但一般仅比测量值多取一位有效数字参与运算.

在取舍过程中，不用日常生活中的“四舍五入”，而改用 GB 8017—1987 规定的“四舍六入五凑偶”. 如果碰到舍去位是“5”时，前面为奇数则进位，前面为偶数则舍去.

需要全本请访问 www.ertongbook.com

如：1.23＋1.145＝2.375，应取 3 位有效数字，“5”前面为奇数，结果：2.38.

如：1.23＋2.415＝3.645，应取 3 位有效数字，“5”前面为偶数，结果：3.64.

三、实验数据处理基本方法和结果表示

测量数据的处理包含十分丰富的内容，例如数据的记录、描绘，从带有误差的数据中提取参数，验证和寻找经验规律，外推实验数据等. 下面介绍几种数据处理的方法.

1. 列表法

列表法就是将测量的原始数据依照已定规律列成表格，其优点是简明和条理清楚，有助于找出物理量之间的对应关系，也有助于检验和发现实验中的差错. 因此，用列表法记录数据是应该培养的一种良好的科学方法.

数据记录表格应根据各实验测量的要求在实验前设计. 设计记录表格要注意：

(1) 首先应详尽记录实验条件、实验仪器，例如环境温度、湿度，仪器的规格型号、等级等，以利于对结果进行复查.

(2) 表格中所列物理量均应标明其名称和单位.

(3) 表格中应标明测量顺序，各物理量的排列应与测量顺序一致. 对于有函数关系的数据表，则应按自变量由小到大或由大到小顺序排列.

(4) 表格中所列的数据主要是原始数据，表格的大小应考虑到记录数据的有效数字长度. 重要的中间计算结果也可列入表中.

2. 作图法

为了形象地表示相关量之间的关系，或者需要通过绘制曲线外推求出相关量，都需要采用作图法处理原始实验数据. 随着计算机软件技术的成熟，可以借助软件(例如 Microsoft Excel)由计算机绘制曲线.

手工绘制合格的实验图线，如图 2.2 所示，步骤包括图纸的选择、坐标分度值的选取、实验点的标记、曲线的描绘、注解和说明等.

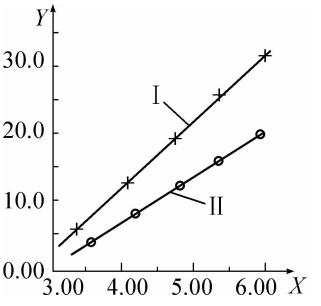


图 2.2　一张图绘两条曲线

图纸的选择：最常用的作图纸为毫米方格纸、单对数坐标纸、双对数坐标纸或极坐标纸. 图纸的大小可根据测量量数据变化范围和其有效位数共同决定.

坐标分度值的选取：绘图时通常取自变量作横坐标，因变量作纵坐标，必须注明坐标轴所代表物理量的符号和单位. 坐标最小分度的选择原则应该是保证作图不会引入额外的误差. 坐标轴的起点坐标不一定为零，以使图线充满整个图纸为佳.

实验点的标记：图上的数据点要用符号标记. 常用来标记实验点的符号有“＋”、“⊙”、“×”和“＊”等. 如果同一张图上绘制两条以上的曲线，且共用一个坐标轴，则必须用不同的标记符号加以区分.

曲线的描绘：当将实验值组成的点用曲线连接起来时，所得到的不是一条光滑曲线，这是因为每个点代表的实验值均含有一定的误差. 我们假设测量值的可定系统误差已经被修正，则其余误差分布在曲线两侧的机会是均等的. 拟合曲线不可能通过每个数据点，而是让实验值所代表的点大体均匀分布在图线两侧. 以得到一条光滑的曲物线.

注解和说明：在图的下面写出图线的名称及必要的条件，并利用图中的空白位置注明参数.

3. 逐差法

这是物理实验中常用的一种数据处理方法，特别是当两个物理量之间存在 $y=a+bx$ 这样的线性关系，用逐差法求斜率 b 和截距 a 时有充分利用测量数据的优点，使结果更可靠.

比如，在拉伸法测杨氏模量实验中，要测量每次在金属丝上悬挂质量相等的砝码后，测量表示金属丝被拉长的光杠杆标尺读数 r. 如果共测量了 6 次的结果为 r_1、r_2、r_3、r_4、r_5 和 r_6，测每加一个砝码后读数变化的平均值 $\Delta\bar{r}$ 为：

$$\Delta\bar{r}=\frac{(r_2-r_1)+(r_3-r_2)+(r_4-r_3)+(r_5-r_4)+(r_6-r_5)}{5}=\frac{r_6-r_1}{5}.$$

上述的计算结果是只与首尾测量的二次相关，而中间过程全消去，失去多次测量的优点. 为了避免这种情况，平等地运用各次测量量，可把它们按顺序分成相等数量的两组，如上述例子中 r_1、r_2、r_3 和 r_4、r_5、r_6，并分别计算出它们的相应差值，r_4-r_1，r_5-r_2，r_6-r_3，这样由逐步计算出的差值的平均值为：

$$\Delta\bar{r}=\frac{\frac{r_4-r_1}{3}+\frac{r_5-r_2}{3}+\frac{r_6-r_3}{3}}{3}=\frac{(r_4-r_1)+(r_5-r_2)+(r_6-r_3)}{9}. \tag{2-6}$$

以上处理保持了多次测量的优越性. 注意逐差法要求自变量等间隔变化而函数关系为线性.

4. 最小二乘法

直观、简便的作图法所得结果因人而异，缺少严密性，直线拟合求最佳经验公式的一种数据处理方法是最小二乘法（又称作一元线性回归），它可克服用作图法求直线公式时图线的绘制引入的误差，结果更精确，在科学实验中得到了广泛的应用.

最小二乘法的理论基础是最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配，利用最小二乘法可简便地求得未知的数据，并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小.

若两物理量 x、y 满足线性关系，并由实验等精度地测得一组实验数据 $(x_i,\ y_i,\ i=1,2,3,\cdots,n)$，且假定实验误差主要出现在 y_i 上，设拟合直线公式为 $y=f(x_i)$，当所测各 y_i 值与拟合直线上各估计值 $f(x_i)$ 之间偏差的平方和最小，即 $s=\sum[y_i-f(x_i)^2]$ 趋向最少值（min）时，所得拟合公式即为最佳经验公式.

设由实验数据 $(x_i,\ y_i,\ i=1,2,3,\cdots,n)$ 求得最佳经验公式为 $y=a+bx$，根据最小二乘法原理有：

$$s=\sum_{i=1}^{n}[y_i-(a-bx_i)]^2=\min. \tag{2-7}$$

即

$$\frac{\partial s}{\partial a}=-2\sum_{i=1}^{n}[y_i-(a-bx_i)]=0. \tag{2-8}$$

$$\frac{\partial s}{\partial b}=-2\sum_{i=1}^{n}[y_i-(a-bx_i)]x_i=0. \tag{2-9}$$

由上式得：

$$\sum_{i=1}^{n}y_i-na-\sum_{i=1}^{n}bx_i=0.$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i - b\sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2} = 0.$$

其解为：
$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i \sum_{i=1}^{n} x_i - \sum_{i=1}^{n} y_i \sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2}}{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2 - n\sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2}}. \tag{2-10}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i - n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2 - n\sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2}}. \tag{2-11}$$

上述 a、b 值代入 $y = a + bx$，可得最佳经验公式.

a、b 的误差与实验数据的多少、实验数据之间的关系与直线关系的符合程度、实验数据的分散度等有关，在此不作介绍.

5. 不确定度表示法

长期以来，人们用误差来表征测量结果可信程度的好坏. 定义误差为测量值与“真值”的偏差. 但“真值”是无法确定的，它只是一个理想值. 为此人们采用测量平均值加不确定度来表示测量的值和可信度. 以前国内外对于测量结果的不确定度的表述、运算规则都不尽统一. 1992 年国际计量大会以及相关组织制定了具有指导性的《测量不确定度表达指南》. 我国的计量标准部门也已明确采用不确定度作为误差数字指标的名称.

测量不确定度分为 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度. 前者由观测列统计分析评定，也称为统计不确定度；后者不按统计分析评定，也称非统计不确定度.

(1) 直接测量量的不确定度

如果对一个物理量测量 n 次，得 x_1，x_2，x_3，…，x_n 的一个测量列，其平均值

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2-12}$$

为该物理量的最佳值.

x 值的不确定度由 A 类标准不确定度 u_A 和 B 类标准不确定度 u_B 合成得到：

$$u_x = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{2-13}$$

其中 A 类分量为：
$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n(n-1)}}. \tag{2-14}$$

其中 B 类分量为：
$$u_B = \frac{\Delta}{K} \tag{2-15}$$

u_B 由仪器的误差引起，Δ 为仪器的最大允差，K 为置信度，根据概率统计理论，对于均匀分布函数的 B 类标准差，K 可取 $\sqrt{3}$，即 $u_B = \dfrac{\Delta}{\sqrt{3}}$.

因此直接测量量可表示为：$x = \overline{x} \pm u_x$

(2) 间接测量量的不确定度

设 $Y = f(x_i)$，当测量了 x_1，x_2，x_3，…，x_i 后可得：

$$Y = \overline{Y} \pm u_Y \text{。} \tag{2-16}$$

其中：　$\overline{Y}=f(\overline{x_i})$；不确定度

$$u_Y=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\partial f}{\partial x}u_{x_i}\right)^2}. \tag{2-17}$$

需要特别说明的是根据国家技术规范，测量结果不确定度的数值通常只取 1～2 位. 精要求高时，最多不超过 3 位，并且修约规则是“只进不舍”. 不过在计算过程中，中间结果的有效数字可保留多位. 如

$T=(9.8765\pm0.0321)\text{s}=(9.88\pm0.04)\text{s}$

6. 用 Excel 软件进行数据处理

微软公司的 Excel 软件是一个功能较强的电子表格软件，操作便捷，容易掌握. 可帮助进行数据的处理、分析数据和产生图表. 利用该软件可计算测量列的平均值与标准偏差；计算直线方程的斜率、截距和相关系数；可以十分方便地绘制 $X-Y$ 图，并拟合方程.

Excel 软件已经广泛应用于数据处理和图表制作，本书不作专门介绍，详细内容可参考相关书籍.

四、物理实验的基本测量方法

随着科学技术的飞速发展，待测物理量的内容越来越广泛，测量方法和手段也越来越丰富，越来越先进. 常用的测量方法有：比较法、放大法、转换法和模拟法.

1. 比较法

测量就是将被测物理量与一个被选作计量标准单位的同类物理量进行比较，找出被测量是计量单位多少倍的过程. 比较法就是将被测量与标准量进行比较而得到测量值的方法. 可见，所有的测量广义上来讲都属于比较测量.

直接比较法：将被测量与已知的同类物理量或标准量直接进行比较.

间接比较法：借助中间量，或将被测量进行某种变换，来间接实现比较测量的方法.

2. 放大法

借助一些方法将待测量放大后再进行测量. 解决因被测量很小，甚至无法被实验者或仪器直接感觉和反应时的测量. 常用的放大法有累积放大法、机械放大法、电学放大法和光学放大法等.

3. 转换法

转换法是将某些因条件所限无法直接用仪器测量的物理量，或者为了提高待测物理量的测量精度，将待测量转换成为另一种形式的物理量的测量方法. 传说中曹冲称象，实际上是把大象的质量转换为可测石块的重量；阿基米德测王冠体积时，将其沉入水中测量水体积变化，都是转换法的应用.

4. 模拟法

模拟法是依据相似性原理，对一些过于庞大或微小、十分危险或很缓慢变化的特殊对象，人为地制造一个类似的模型来进行实验. 可将抽象的理论具体化，让自然现象重现，可进行单因素或多因素的交叉实验，可加速或减缓物理过程. 本方法可以节省时间和物力，提高实验效率.

习　题

1. 如果5次测得一物体的质量分别为：2.127，2.122，2.119，2.120，2.125g，求平均质量 $\overline{m}$，和A类不确定度 u_m，计算相对误差 E.

2. 写出下列各数按四位有效数字取舍后的结果：12.395，12.265，9.4808，1.878501.

3. 按照结果表示规则，改正错误：

(1) $L = (82.981 \pm 0.2)$cm

(2) 28cm = 280mm

(3) $a = (1.234567 \pm 0.012345)$m

(4) $\dfrac{400 \times 1500}{12.60 - 11.6} = 60000$

4. 用伏安法测量电阻的实验中，测得结果如下：

U/V	0.00	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
I/mA	0.00	3.96	8.06	11.92	16.10	19.96	24.06

在直角坐标上作图，并根据斜率算电阻 R；再用逐差法计算 R，比较两个结果.

本篇参考文献

1. 张志东等. 大学物理实验. 北京：科学出版社，2007.

2. 张训生. 大学物理实验. 杭州：浙江大学出版社，2004.

3. 李明等. 大学物理实验教程. 杭州：浙江大学出版社，2004.

4. 郭悦韶. Excel在物理实验数据处理中的应用. 实验室科学. 2006，4(2)：67－68.

第二篇　基础物理实验

第三章　力学和热学实验

实验 1　长度测量

长度测量遍及人类活动的所有领域.任何物体都有一定的几何形状,如直线、曲线、平面、曲面、多面棱体、锥体、球体和圆柱体等.表征这些几何形态的参数可归纳为普通参量、形位参量和微观参量.普通参量有长、宽、高、曲率半径、直径及距离.对这些参量的测量称为长度测量,长度测量有两大特点,一是涉及的领域十分广泛,二是量值尺寸段的层次多,既有大尺寸的测量,也有小尺寸的测量,大尺寸大到几米、十几米和几千米,甚至还包括大地和天文测量;小尺寸小到几毫米、几微米,甚至几纳米.

长度是基本的物理量,是构成空间的最基本的要素,是一切生命和物质赖以存在的基础.世界上任何物体都有一定的几何形态,空间或几何量的测量对科学研究、工农业生产和日常生活需求都有巨大的影响.在 SI 制中,长度的基准是米,一旦定义了米的长度,其他长度单位就可以用米来表示.

1791 年法国科学院决定将经过巴黎的子午线周长的一象限的 1 千万分之 1 作为 1 米.再后来,人们用白金制作了米标准原器,并把它保存在法国的国际计量局.世界各国都依照这个原器制作自己的标准原器,并且还要经常到巴黎来与原器进行校准.虽然这个原器已经非常精确了,但随着科技的发展,它也显得越来越不够精确了.于是,科学家又开会决定了新的标准,那就是采用电磁波的波长来定义米.1 标准米定义 Kr86 原子在 2p10 和 5d5 能级之间跃迁时光辐射(橘红色)在真空中波长的 1650763.73 倍.

【实验目的】

1. 理解游标卡尺、螺旋测微计和移测显微镜的原理,掌握它们的使用方法.

2. 掌握有效数字、误差与不确定度运算的基本方法,明确直接测量与间接测量的正确表达方式.

【实验仪器】

游标卡尺(0～125mm, 0.02mm),如图 3.1.1,螺旋测微计(0～25mm, 0.01mm),如图 3.1.2,移测显微镜(JCD_3, 0.01mm),如图 3.1.3,空心圆柱体,薄铁片,小铁圆环.

【实验原理】

1. 游标卡尺构造原理及读数方法

需要全本请访问 www.ertongbook.com