大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

杨虹 主编

科学出版社
www.sciencep.com

内 容 提 要

本书是参照全国工科物理实验课程指导组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》,结合北京信息工程学院近几年开设的物理实验内容和学生特点,编写的物理实验教材。全书分为绪论、力学热学实验、电磁学实验、光学实验和近代及综合物理实验五大部分,共选入 24 个实验,内容比较全面,可以满足一般工科院校的教学要求。

本书可以作为普通高等工科院校、综合大学及师范类非物理专业的大学物理实验教学用书,也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/杨虹主编. —北京:科学出版社,2004
ISBN 7-03-012791-9

Ⅰ. 大… Ⅱ. 杨… 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(2004)第 003761 号

责任编辑:李 瑾/责任校对:连秉亮
责任印制:刘 学/封面设计:木 子

科学出版社出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
http://www.sciencep.com
江苏省句容市排印厂印刷
南京理工出版信息技术有限公司照排
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2004 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1 000)
2007 年 1 月第二次印刷 印张:11¼
印数:3 201—7 400 字数:216 000

定价:17.80 元

《大学物理实验》编委会

前　言

本书是参照全国工科物理实验课程指导组制定的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合北京信息工程学院近几年开设的实验，编写的物理实验教材。

本书分为五个部分：绪论介绍了误差理论基本知识以及基本的数据处理方法；力学热学实验介绍了一些基本物理量的测量、基本量具的正确使用和一些常用的实验方法，考虑到初做实验的学生可能对实验的全过程缺乏应有的认识，在相关实验中分别提出了具体的要求；电磁学实验和光学实验分别介绍了电磁学/光学实验的操作规范和各种典型的电磁/光学测量方法；近代及综合物理实验选编了 3 个近代物理实验内容、2 个内容比较综合的新实验以及 1 个包含 6 项简单设计性实验的内容。全书共有 23 个实验，内容比较全面，可以满足一般工科院校的教学要求。

在编写时，我们注重教材的科学性、系统性以及它的实用性。考虑到物理实验课程面向低年级学生的特点，对于基本实验，我们做到实验原理清晰，实验方法、内容明确具体；实验数据表格依内容不同，有的在书中给出，有的要求学生自拟；设计性实验则只提出实验任务和基本要求，给予适当的提示，主要让学生自主完成。

参加本书编写的有杨虹（第一部分，实验十四、十五、十六、二十、二十二），沈端（实验三、五、十七、十八），张苍山（实验六、九、十、十一、二十一），王彩霞（实验二、十九、二十三），黄小丽（实验十二），陈颖聪（实验七），肖玮（实验一），郑永红（实验四），何光（实验八），郭钦（实验十三）。实验二十四由沈端、张苍山、杨虹和王彩霞共同完成。

在编写本书时参阅了许多兄弟院校的相关教材，在此对教材作者表示衷心的感谢。

由于编者的知识水平和教学经验不足，再加上编写时间仓促，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编　者

2003 年 11 月

目　录

第四部分　近代及综合物理实验

绪　论

一、物理实验课的地位、目的和任务

1. 物理实验课的地位

物理学从本质上说是一门实验科学。物理学中每个概念的确立,原理和定律的发现,都有坚实的实验基础。纵观整个物理学的发展史,许多新的突破,常常是通过新的实验技术和方法的发展而促成的,同时,建立起来的理论正确与否也必须通过实验来验证。在科学技术高度发展的今天,物理实验的思想、方法、技术、仪器已经普遍地用在自然科学的许多领域和工程技术的许多部门,并日益向生产和生活的各个领域渗透。因此可见物理实验的重要性。

大学物理实验是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修课程,是大学生接受系统的实验方法和实验技能训练的开端。学习物理实验应该按照循序渐进的原则,学习物理实验的方法、了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作打下良好的实验基础。

2. 物理实验课的目的和任务

物理实验课的目的是为学生今后系统地进行实验方法和实验技能的训练打下一个良好的基础,基本任务是:

1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,加深对物理学原理的理解。

2) 培养与提高学生从事科学实验的基本素质:理论联系实际、实事求是的科学作风,遵守操作规程、爱护公共财物的优良品德,不怕困难、主动进取的探索精神。

3) 培养与提高学生的多种能力:自学能力、动手能力、思维判断能力、书写表达能力以及初步的实验设计能力。

二、物理实验课的基本程序和规则

1. 物理实验课的基本程序

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段:实验前的预习、实验的进行、写实

验报告。

(1) 实验前的预习

预习的要求:理解所做实验的实验原理、了解实验的过程,以便实验时抓住关键,能够较好地控制实验的物理过程和物理现象,迅速、准确地获得需要测量的数据,并根据要求写出预习报告。预习报告应写以下内容:简单实验原理(基本原理图、线路图、公式等)、实验内容及数据表格、注意事项。

(2) 实验的进行

实验开始前熟悉仪器,了解仪器的工作原理和使用方法,然后将仪器按要求安装调整好;在观察到相应的实验现象后,测量有关物理量,测量数据记入预习报告的数据表格内,并记录所用仪器;记录的数据要实事求是,不要按臆想的“规律”改变数据。

(3) 写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简洁的形式将实验结果完整又真实地表达出来。写报告要求:字迹端正、文字通顺、公式清楚、图表规矩、结果正确、讨论认真。完整的实验报告通常包括下列部分:

①实验名称;②实验目的;③简要的实验原理、计算公式和必要的线路图;④仪器设备及其量程、级别、号码;⑤实验内容、数据记录;⑥数据处理;⑦误差分析;⑧明确的实验结果表达式;⑨思考题及其他实验问题的讨论。

2. 物理实验课的规则

1) 实验前必须认真预习,了解实验目的、原理、测量方法、使用仪器、实验内容、注意事项等,并按要求写出预习报告,预习不符合要求者不准进行实验。

2) 准时到实验室上课。

3) 做实验时要严肃认真,积极思考。

4) 仪器操作按有关规程和注意事项进行,损坏仪器要赔偿。

5) 实验完毕应经教师检验数据、签字后,再整理仪器,然后离开实验室。

三、误差理论基本知识

实验是在理论指导下,利用科学仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,使之以比较纯粹和典型的形式表现出来,然后再通过观察与测量去探索自然界客观规律的过程。

实验离不开对物理量的测量,由于实验方法、条件等因素的影响,测量是有误差的。因此,在实验中除了测得应有的数据外,还需要对测量结果的可靠性进行合理评价,对测量结果的误差范围做出合理的估计。否则,测得的数据就毫无意义。

1. 基本概念

(1) 测量

测量可分为直接测量和间接测量两大类。

直接测量　实验中将待测量与标准量直接进行比较，得到待测量的大小。如用米尺测量长度，用天平称质量，用停表测时间等。

间接测量　待测量由若干直接测量的物理量经过一定的函数关系运算后获得。如用单摆测量重力加速度 g，应先测出摆长 L 和周期 T，再由公式 $g=4\pi^2L/T^2$ 计算出 g，这样 g 的测量就称为间接测量。

(2) 误差

由于实验仪器不可能无限准确，测量所依据的理论和实验方法往往具有某种程度的近似，人的感觉器官也有一定的局限，所以测量的结果必定带有一定的误差。误差存在于一切测量过程之中。误差的定义为

$$\Delta = X - a$$

其中 X 为测量结果，a 为待测量的客观真值。

作为科学实验的结果，不仅要知道测量所得的结果，而且还要知道其误差的范围。测量值永远不是真值，那么如何才能使测量值是真值的最佳近似呢？又如何估算测量的误差范围呢？这就需要研究误差的规律。

根据误差产生的原因和它对实验结果的影响，误差可分为三类：系统误差、随机误差、疏失误差。

系统误差　是指在多次重复测量中，其大小和正负不变或按确定规律变化的误差。如天平零点不准、电表刻度不均匀、热胀冷缩尺子长度变化等，给测量所带来的误差就属于系统误差。

随机误差　对同一量进行多次重复测量，每次测量的误差时大时小、时正时负，既不可预测又无法控制，这种误差叫随机误差。随机误差从表面上看纯属偶然，但偶然中存在着必然，即随机误差遵从一定的统计规律。正是利用这种规律，我们可以对实验结果做出随机误差的误差估算。

疏失误差　实验中由于仪器失常、人过度疲劳或马虎读错数据等原因所引入的误差叫疏失误差。实验中应该避免。

一般实验中总是同时存在着系统误差和随机误差。关于系统误差产生的原因、性质及消除方法，将在后面加以讨论。这里先介绍随机误差。

2. 随机误差

为讨论方便，假设实验中已经消除了系统误差，不存在疏失误差，且各个误差

相互独立。

(1) 随机误差的统计知识

对某物理量进行少数几次测量时，由于误差是随机的，因此很难找出规律，要寻找随机误差的规律，必须对某一个物理量进行大量等精度的重复测量，并运用概率论等数学知识进行处理，这就是随机误差的统计处理方法。

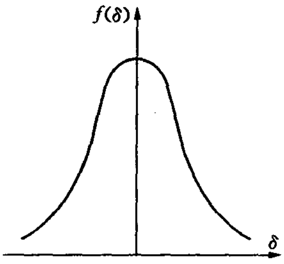

图 0-1　随机误差分布曲线

实践和理论都已证明，大部分随机误差遵从如图 0-1 所示的统计分布规律。

图中的曲线称为正态分布曲线，横坐标 δ 表示误差，纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数 $f(\delta)$。

$$f(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma}} \tag{0-1}$$

从图 0-1 的曲线中，可以看出该曲线具有单峰、对称、有界的特点，表现出随机误差具有下列性质：

1) 单峰性　　小误差(绝对值)出现的机会比大误差出现的机会(概率)大。

2) 对称性　　大小相同，符号相反的误差出现的机会相等。

3) 有界性　　大于某一界限的误差出现的机会趋于零。

(2) 算术平均值

设对某物理量 X 进行 n 次等精度直接测量，得到如下数据：$X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n$，各次测量所对应的随机误差为：$\delta_1=X_1-a,\delta_2=X_2-a,\delta_3=X_3-a,\cdots,\delta_n=X_n-a$，式中 δ_i 为第 i 次测量的随机误差，a 为物理量 X 的真值。现在我们来看算术平均值

$$\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$$

当 $n\to\infty$时，由上述随机误差性质 2)可知，正负误差相互抵消，可以得到

$$\sum_{i=1}^{n}\delta_i=\sum_{i=1}^{n}(X_i-a)=0$$

由此可得：无限多次测量所得数据的算术平均值趋近于真值。

而当 n 为有限次测量时，因为误差也能抵消一部分，所以算术平均值仍比任何一个测量值更接近于真值。因此，算术平均值是多次测量的最佳值，常用来表示测量结果。当然，算术平均值毕竟还不是真值，因此用算术平均值作为实验结果的同时，还必须指出它的误差有多大。

(3) 算术平均值的误差

1) 均方根误差(标准误差)

标准误差通常用 $\sigma_{\overline{X}}$ 表示。

根据数理统计理论可知：

$$\sigma_{\overline{X}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}{n(n-1)}} \tag{0-2}$$

其中的 n 为测量次数。

2）最大误差

定义 $3\sigma_{\overline{X}}$ 为平均值的最大误差。

3）平均值平均绝对误差

用 $\eta_{\overline{X}}$ 表示

$$\eta_{\overline{X}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}|X_i-\overline{X}|}{n\sqrt{n-1}} \tag{0-3}$$

(4) 几种误差的概率

根据概率论，误差落在某区间的概率为

$$P=\int_{-\delta}^{+\delta}f(\delta)\mathrm{d}\delta$$

则平均值的标准差的概率为

$$P=\int_{-\sigma_{\overline{X}}}^{\sigma_{\overline{X}}}f(\delta)\mathrm{d}\delta$$

由拉普拉斯积分表查得：$P=68.3\%$，它表示在 $(\overline{X}-\sigma_{\overline{X}},\overline{X}+\sigma_{\overline{X}})$ 范围内包含真值的可能性为 68.3%。

平均值的最大误差的概率为 99.7%，它表示在 $(\overline{X}-3\sigma_{\overline{X}},\overline{X}+3\sigma_{\overline{X}})$ 范围内包含真值的可能性为 99.7%。

平均值的平均绝对误差的概率为 58%，它表示在 $(\overline{X}-\eta_{\overline{X}},\overline{X}+\eta_{\overline{X}})$ 范围内包含真值的可能性为 58%。

(5) 绝对误差和相对误差

绝对误差　上面所提到的标准差、最大误差和平均绝对误差，它们表示一定大小的数值，叫做绝对误差。

相对误差　定义为绝对误差除以算术平均值（或理论值或公认值）再乘以 100%，用 E_r 表示。

$$E_r=\frac{\Delta_{\overline{X}}}{\overline{X}}\times100\%$$

相对误差 E_r 的大小表示测量的质量，E_r 越小表示测量越好。

(6) 测量结果的表示

当我们算出了算术平均值及误差后，则多次直接测量量 X 的结果可表示为

$$X = (\overline{X} \pm \Delta_{\overline{X}}) \qquad (P = ?\%)$$

$$E_r = \frac{\Delta_{\overline{X}}}{\overline{X}} \times 100\%$$

这里的 $\Delta_{\overline{X}}$ 可以取标准误差或最大误差或平均绝对误差，注明相应的概率是多少即可。目前，经常用的是标准误差。

(7) 仪器误差和单次测量的误差

仪器误差指的是在正确使用条件下仪器可能出现的最大误差。仪器误差分不同情况，可按以下几种方法算出误差近似值：

有刻度的仪器仪表　如果未标出精度等级或精度(如米尺)取其最小分度值的一半为测量的最大误差。

标有精度的仪器仪表　取精度作为测量的最大误差。如精度为 0.02 mm 的卡尺，最大误差为 0.02 mm。

标有精度等级的仪器仪表　按精度等级计算误差(如电压表、电流表等，详见电学基本训练)。

数字显示的仪器仪表　以显示末位的±1 为测量的最大误差。

单次测量的误差是当测量次数 $n = 1$ 时的测量误差，这时取仪器误差作为测量误差。

值得指出的是：对任何物理量进行单次测量时，务必在测量值后面记下误差值。

在科学实验中应根据对测量精度的要求合理地选用仪器。一般来说所选仪器的误差要比所要求的误差小一些。特别是对测量结果影响较大的量，所选仪器要求误差更小。

当所选仪器的误差太大时，会出现多次测量的标准误差趋近于零的情况(各次测量读数基本不变)，这属于仪器选择不当。如无法找到误差更小的仪器，测量结果应该用仪器误差为测量误差。

当所选仪器恰当时，多次测量的平均值的标准差会大于仪器误差，这时可略去仪器误差，只用平均值的误差作为测量误差。

3. 间接测量的误差传递

间接测量的误差可以由直接测量误差用传递公式来计算。设间接测量的物理量 Y：

$$Y = f(x_1, x_2, \cdots, x_m)$$

其中 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 是直接测量量，其最佳估计值为 $\overline{x}_1, \overline{x}_2, \cdots, \overline{x}_m$，对应的误差分别为 $\Delta_{\overline{x}_1}, \Delta_{\overline{x}_2}, \cdots, \Delta_{\overline{x}_m}$，则 Y 的最佳估计值为

$$\overline{Y} = f(\overline{x}_1, \overline{x}_2, \cdots, \overline{x}_m)$$

Y 的误差可由最大误差传递法与方和根传递法两种方法得出。

(1) 最大误差传递法

$$\Delta_{\bar{Y}} = \left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|\Delta_{\bar{x}_1} + \left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\right|\Delta_{\bar{x}_2} + \cdots + \left|\frac{\partial f}{\partial x_m}\right|\Delta_{\bar{x}_m} \tag{0-4}$$

注意:在计算时,各直接测量量的误差必须统一概率。

(2) 方和根传递法

$$\Delta_{\bar{Y}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2(\Delta_{\bar{x}_1})^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2(\Delta_{\bar{x}_2})^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2(\Delta_{\bar{x}_m})^2} \tag{0-5}$$

其中 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)\Delta_{\bar{x}_i}$ 称为部分误差, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$ 称为误差传递系数,部分误差的大小说 明该直接测量量的误差对间接测量量的误差的影响,它不仅与该量的误差大小有关,还与传递系数有关。

最大误差传递法的优点是简便易行,在简单的实验中,为了对误差进行粗略的估计,可以用它计算误差。但各直接测量量的误差的合成有各种可能性,既可能互相加强,也可能互相抵消或部分抵消,最大误差传递取了各直接测量量误差合成最不利的情况,往往会把误差扩大。而方和根传递法可以克服这一缺点。

具体计算时,当一个量为其他几个量的和或差时,可直接使用上述公式计算出它的绝对误差;而当一个量为其他几个量的积或商时,可先求出相对误差,再求出绝对误差的大小。具体方法是:先对函数取对数,再求全微分,得出它的相对误差为各直接测量量的相对误差的和(或方和根),然后求出绝对误差,这样比较方便。下表列出了几种常见函数的标准差。

几种常见函数的标准差

函数式	标准差
$N = X+Y$	$\sigma_N = \sqrt{(\sigma_X)^2 + (\sigma_Y)^2}$
$N = X-Y$	
$N = XY$	$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2}$
$N = X/Y$	
$N = X^K Y^m / Z^n$	$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{K^2\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 + m^2\left(\frac{\sigma_Y}{Y}\right)^2 + n^2\left(\frac{\sigma_Z}{Z}\right)^2}$
$N = KX$	$\sigma_N = K\sigma_X$
$N = X^{\frac{1}{K}}$	$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{1}{K}\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)$
$N = \sin X$	$\sigma_N = \lvert \cos X \rvert \sigma_X$
$N = \ln X$	$\sigma_N = \frac{\sigma_X}{X}$

如果需要计算的是平均值的标准差，只要将表中相应的 N、X、Y、Z 符号上加平均值符号即可。

例 1　用停表反复测一单摆的周期共 10 次，得到如下数据：$T=1.38$ s，1.33 s，1.32 s，1.35 s，1.37 s，1.32 s，1.38 s，1.34 s，1.36 s，1.35 s。求测量的误差并表示出测量结果。

解：1) 求周期的平均值(当 $n>4$ 时，平均值的有效数字可比测量值多一位)

$$\overline{T}=\frac{\sum_{i=1}^{n}T_i}{n}=1.350\ \text{s}$$

2) 求各次测量的误差 $T_i-\overline{T}$，得各次测量的误差为：0.03 s，−0.02 s，−0.03 s，0 s，0.02 s，−0.03 s，0.03 s，−0.01 s，0 s。

3) 求平均值的标准误差及相对误差

$$\sigma_{\overline{T}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_i-\overline{T})^2}{n(n-1)}}=\sqrt{\frac{0.004\,2}{10(10-1)}}=0.007\ \text{s}$$

$$E_r=\frac{\sigma_{\overline{T}}}{\overline{T}}\times 100\%=\frac{0.007}{1.350}\times 100\%=0.5\%$$

4) 表示实验结果

$$T=(1.350\pm 0.007)\ \text{s}\qquad (P=68\%)$$

$$E_r=0.5\%$$

注：计算实验误差时，可根据需要选择标准误差或最大误差或平均绝对误差。

例 2　欲测某电阻上消耗的电功率 N。直接测得其两端电压为 $V=(1.42\pm 0.02)$ V，($P=99.7\%$)，通过 R 的电流为 $I=(2.15\pm 0.03)\times 10^{-4}$ A，($P=99.7\%$)。试计算 N 的最大误差并写出结果表达式。

解：1) 求 N 值

$$N=IV=2.15\times 10^{-4}\times 1.42=3.05\times 10^{-4}\ \text{W}$$

2) 求误差

该测量是间接测量，所以要用误差传递公式求 N 的误差。由于题目中给出的直接测量量 V，I 的误差是最大误差，所以结果 N 的误差也求最大差，这样比较方便。

用方和根误差传递法：

$$3\sigma_N=\sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial V}\right)^2(3\sigma_V)^2+\left(\frac{\partial N}{\partial I}\right)^2(3\sigma_I)^2}$$

其中：

$$\frac{\partial N}{\partial V}=I=2.15\times10^{-4},\qquad \frac{\partial N}{\partial I}=V=1.42$$

$$3\sigma_V=0.02\ \mathrm{V},\qquad 3\sigma_I=0.03\times10^{-4}\ \mathrm{A}$$

代入传递公式得

$$3\sigma_N=\sqrt{(2.15\times10^{-4})^2(0.02)^2+(1.42)^2(0.03\times10^{-4})^2}=0.06\times10^{-4}\ \mathrm{W}$$

所以 $E_r=\dfrac{3\sigma_N}{N}=\dfrac{0.06\times10^{-4}}{3.05\times10^{-4}}\times100\%=1.97\%\approx2\%$

3) 写出结果：

$$N=(3.05\pm0.06)\times10^{-4}\ \mathrm{W}\qquad (P=99.7\%)$$

$$E_r=2\%$$

注：一般在计算间接测量量的误差时，大多用方和根误差传递法。

4. 系统误差

随机误差和系统误差是误差的两个不同方面，随机误差表示结果的离散性，而系统误差则表示测量结果的正确性。

系统误差是指：在同一测量条件下，多次测量同一物理量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时按某一确定的规律变化的误差。

在正确度不高的实验中，特别是在基础的或专业的教学实验中，系统误差有时要比随机误差大得多。因此，讨论系统误差是很有必要的。

(1) 系统误差的分类

系统误差的分类是相当复杂的，从不同的角度有不同的分法。

1) 按产生误差的原因来分，可分为：

工具误差　是由于计量工具的不完善引起的。如电表的等级限制引入的误差，对一块 0.5 级的电压表，当使用 3 V 的量程时，有

$$\Delta S_V=3\times0.5\%=0.015\ \mathrm{V}$$

的表级误差。电表表级误差公式：$\Delta S=$ 量程 $\times$ 级别 %。

调整误差　由于仪器仪表使用不当或使用条件不满足，致使其零点不对，指针偏角不正确等等而引入的误差。如规定水平放置的电表，若竖直放置就会引入这种误差。

个人倾向误差　如：某人使用仪器或测量工具时不注意，使视线不与刻度面

垂直而总是从某一倾斜角度读数而引入的误差。

理论与方法误差　实验所依据的理论不完善，公式具有近似性或实验方法不恰当而引入的误差。如：用伏安法测电阻未考虑电表内阻的影响所引入的误差；单摆摆角较大（大于5°）的情况下，测量周期按公式 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 求重力加速度 g 引入的误差等。

其他的因素如环境温度改变、湿度改变、杂散电磁场的影响等都可能引入系统误差。

2）按系统误差对结果的影响来分，可分为：

恒定的系统误差　如仪器的零点不对造成的误差或刻度不准造成的误差。这类误差的符号和大小是固定不变的。

累进的系统误差　如温度变化引起钢尺热胀冷缩、温度改变使电阻值改变等给测量带来的误差等，这种误差的大小随被测量改变，被测量值越大误差也越大。

周期变化的系统误差　如电表的转轴与刻度盘的圆心不重合、停表的轴偏心等，使得某些角度读数偏大，而某些角度读数又偏小，产生周期性的变化而引入的误差。

规律复杂的系统误差　如用热电偶测量温度时，如果其冷端温度取的是变化不定的室温，就会引入规律复杂的系统误差。

3）按对系统误差掌握的程度来分，可分为：

已定系统误差　系统误差的大小和符号已知或可以计算。如零点误差或理论方法误差，有时其大小和符号是已知的，这些误差可引入修正量进行修正，从而消除这些误差，所以也称之为可消除系统误差。

未定系统误差　系统误差的存在已知，但其大小和符号不能够确定，称之为未定系统误差。如电表的表级误差，这类误差从某种角度来看是系统误差，从另一角度来看又是随机误差，所以人们也称它为半系统误差或双向系统误差。

（2）系统误差的一般处理方法

为提高实验的正确度，要对系统误差进行处理。处理系统误差一般遵从以下原则：

1）能避免其出现的系统误差，尽可能地做到不让它在实验中出现。

2）难以避免其出现，但可以通过实验技巧消除的系统误差，采取相应的实验方法消除它。

3）上述两种方法无法消除，而能通过计算或实验求得误差的符号和大小的，引入修正量修正实验结果。

4）无法用上述三种方法消除，但知道其存在，可以估计其最大值，估计出大小按随机误差处理。

（3）间接测量时系统误差的传递

设间接测量的物理量为 $Y = f(x_1, x_2, \cdots, x_m)$，其中 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 为直接测量量，它们分别存在可消除系统误差 $Sx_1, Sx_2, \cdots Sx_m$，不可消除系统误差 ΔSx_1，$\Delta Sx_2, \cdots, \Delta Sx_m$，一般来说可以先将可消除系统误差从各直接测量值中消去，不可

消除的系统误差用传递公式求出。

(4) 同时考虑随机误差、系统误差时的实验结果

设待测量为 X,对它进行多次测量,则最后的实验结果表示为:

$$X=(\overline{X}-S)\pm\sqrt{\Delta^2+(\Delta S)^2}$$

其中 S 为可消除系统误差,ΔS 为不可消除系统误差,Δ 为随机误差。

例 3 用一只电压表测量某电压值 6 次,得到如下数据:1.80 V,1.80 V,1.79 V,1.80 V,1.81 V,1.80 V,又知道未通电时表针指示为 0.02 V,使用的电表级别是 0.5 级,选用的量程是 2 V,求测量结果及误差。

解:由题意知:已定系统误差

$$S = 0.02\ \mathrm{V}$$

未定系统误差(表级误差):

$$\Delta S = 量程 \times 级别\ \% = 2 \times 0.5\% = 0.01\ (\mathrm{V})$$

随机误差:

$$\Delta = 3\sigma_{\overline{V}} = 3\sqrt{\frac{\sum(V_i-\overline{V})^2}{6(6-1)}} = 3\sqrt{\frac{0.000\ 2}{6(6-1)}} = 0.008\ (\mathrm{V})$$

而 $\overline{V} = 1.80\ \mathrm{V}$

所以 $V = \overline{V} - S \pm \sqrt{\Delta^2 + (\Delta S)^2} = 1.80-0.02\pm\sqrt{0.008^2+0.01^2}$

最后结果:

$$V = (1.78 \pm 0.01)\ \mathrm{V} \qquad (P = 99.7\%)$$

$$E_r = 0.6\%$$

四、数据处理

1. 有效数字

(1) 基本概念

定义有效数字为末位包含随机误差的数字。

实验中的数据,除常数之外,一般的测量值、运算结果等都是含有误差的近似值。合理的近似,既能反映测量精度,又简单明了,这种数据是有效的。

有效数字与测量所用仪器的精度密切相关,它的位数由仪器精度和待测量大小共同决定。一定大小的量,所用测量仪器的精度越高,有效数字位数越多;而仪器精度一定时,被测量越大,有效数字位数越多。如真值为 16.872 5 cm 的长度,