

普通物理实验



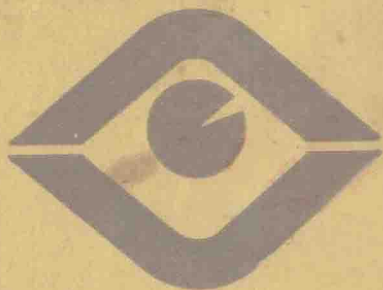
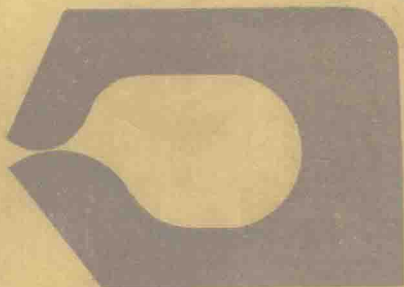
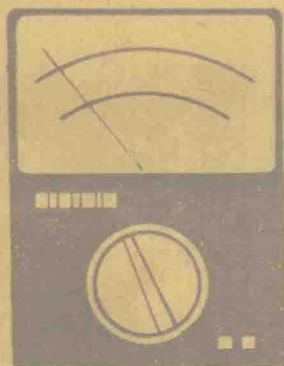
广播电视大学补充教材

黄东 主编

PUTONG WULI SHIYAN

HUANGDONG ZHUBIAN

河南科学技术出版社



广播电视大学补充教材

普通物理实验

黄 东 主编

河南科学技术出版社

广播电视大学补充教材

普通物理实验

黄 东 主编 责任编辑 刘嘉

河南科学技术出版社出版

河南省邮电印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 4.75印张 110千字

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数 1 — 10,000册

统一书号7245.84定价1.25元

前 言

物理学是一门实验科学。做好物理实验不仅对学习物理理论有很大帮助，对培养学生的实践能力来说也是一种重要的基本训练。尤其是对电大这样一类培养应用型专门人材的新型大学来说，做好物理实验更是培养能力的基础环节。将物理实验从附属于理论课的位置提高到先于理论课单独开设，并单独考核的位置，这不只是一种变革，而且还是在高等教育中要强调实践环节的呐喊，其意义在后续课程的学习和将来的工作中会越来越明显地反映出来。

利用电视（卫星）播出电大的实验课，不仅教学形式生动活泼，容易使实验课教学达到规范的要求，而且在扩展实验的深度和广度方面起了良好的指路作用。听电视课对学生来说是一个看实验的过程，这只能给学生指了一个路，更重要的是学生用自己的仪器动手去做实验。电视课中密集了许多教学信息，这些学生在看了一遍电视课后是不可能都理解的，还需要在自己的实验中去逐步体会。

操作考式是实验单独设课后顺理成章的教学环节。仪器的安装和接线，操作的正确步骤，合理的读数和恰当的技巧等，常常只有通过操作考核才能发现问题。缺乏正规操作技能的训练是我们学生的弱点，要使广大的学生进行正规化的教育是我们面临的艰巨任务。

当然，物理实验提前单独设课也给教学带来了许多困难。首先是学生的理论知识在某些方面没跟上。要在建立微分的概念之前讲误差传递；要在没学刚体的转动之前去使用转动惯量

仪，要在学干涉理论之前去做牛顿环实验等等。因此要求有关教师在做这些实验之前深入浅出地补充有关内容。

实验现象的千差万别要求带实验的教师不仅要有扎实的理论知识，还要有丰富的实践经验。因此，原来的《普通物理学实验讲义》等教材已不能满足变化了的形势。为此，电大普通物理实验电视课的部分主讲教师和部分省电大的责任教师联合编写了这本《普通物理实验》补充教材。本书适应电大普通物理实验单独设课的需要，对电视课内容作了进一步的阐述和补充。该书结合电大实验课教学的特点，对在实验中常常碰到的一些具体现象和问题作了明确的阐述。对实验中的难点和容易出错的地方都作了具体的说明或提示。书中还特别地列出了每个实验的操作考试试题和给出了答题和评分的要点。当然，这些考题并不只是在复习考试时才有用的。同学在自己实验的过程中对照这些考题的要求，随时可以纠正自己在操作中的失误。实验书中提出来的问题和同学们在实验中碰到的具体问题一般都能在本书的正文中找到答案。本书力图在远距离教育中实践环节的教学上走出一条自己的路。

本书的实验数据与处理由王祥麟；长度测量实验由陈克理；密度的测量和操作考试题由高予玲；单摆实验由张科军；刚体转动实验由雁峰；热学实验由黄振平；电表的扩程与校准由廖基熙、黄顺田；电位差计实验由王奉怀；惠斯登电桥实验和双棱镜实验由李家炯；薄透镜焦距的测量由吴晓芷；牛顿环实验由王其瑞；伏安法测电阻由陈荣立；弹簧振子实验由王金贵、周广雁同志写稿。河南电大物理实验室各位老师集体审稿，由黄东负责主编。

本书尽量避免与其它实验讲义雷同，可以与其它物理实验讲义配合使用，但本书又保持着自身的独立与完整。本书力求

条理清楚，重点突出，论述精细，涉及面广，对学生掌握实验理论和操作技巧能有重要帮助。

本书作为电大教材建设中的一种尝试，得到了广西电大、河北电大、河南电大、湖北电大、湖南电大、山西电大及大连电大、沈阳电大(以省、市拼音为序)等有关方面的大力支持，在此一并表示感谢。由于时间较紧，加上编者水平有限，错误与不妥之处在所难免，欢迎各位老师和同学们批评指正。

一九八七年七月

目 录

I 实验数据与处理	(1)
II 基本实验	(14)
实验一 长度测量	(14)
实验二 固体密度的测定	(19)
实验三 单摆实验	(29)
实验四 刚体转动实验	(39)
实验五 热学实验	(44)
实验六 电表的扩程和校准	(55)
实验七 惠斯登电桥	(61)
实验八 学生式电位差计	(66)
实验九 薄透镜焦距的测量	(78)
实验十 光的干涉实验	(90)
III 设计性实验	(102)
实验一 弹簧振子的振动	(102)
实验二 伏安法测电阻	(110)
IV 物理实验操作试题	(118)

I 实验数据与处理

一、实验中的测量误差:

(1) 测量误差: 测量方法大致为直接测量和间接测量两种, 例如物体长度可用米尺、卡尺等做直接测量, 而光的波长虽是长度, 但无法用尺子直接测量, 只能用间接测量求得。当然, 这种区分不是绝对的。

测量仪器的精度总是有限的, 它的最小刻度不可能无限划分, 有时虽能进一步划分刻度, 但已超过了仪器的感应或分辨的能力, 更细的刻度已是无效的; 某被测量不可能总是恰与仪器某刻度线重合; 环境条件变化或被测量自身的变化; 测量者主观因素等都可能影响测量结果。总之, 测量值 X 不可能真实地反应被测量 X_0 , 它们之间总有一定的、几乎无法消除的差异, 即误差 ΔX : $\Delta X = X - X_0$ 。或平均误差 $\overline{\Delta X} = \overline{X} - X_0$ 。

真值 X_0 是在某一时刻、某一位置或状态下测量的效应体现出的实际值。它是一个理想的概念。由于受测量仪器的精度和技术条件所限, 无法测得真值, 所以一般说真值是未知的。有的情况下真值作为已知的量, 比如:

① 理论真值: 三角形内角和为 180° ; 同一量自身之差为零, 自身之比为 1; 水的沸点为 100°C ; 规定的常数值 π , e 或其它常数。

② 计量学约定的真值: 长度、质量、时间的国际计量大会

的决定值。

③标准器相对真值：高低级别的标准器的标称值，在相比较时应用。

一般情况下 X_0 总是未知量，于是 ΔX 无法求得，只能按一定方式给出估计值。直接测量与间接测量的误差值的估计方法是完全不同的。

(2)误差分系统误差与偶然误差两大类，具体地说：

①系统误差：因仪器构造、测量应用的原理、人的习惯性等造成这类误差叫系统误差。从它的来源决定了它总是使测量结果向某一方向偏离，其值较稳定或有一定的变化规律。

属于定值的系统误差，如：游标尺、千分尺、秒表、电表等仪器的零点不准，使测量结果有固定数量的偏大或偏小。

属于积累性的系统误差，如：钢板尺受热膨胀、电表受外磁场干扰、温度计受日光或热辐射照射，使测量值中混入上述影响造成的附加量。

属于周期性变化的系统误差，如：秒表的指针轴中心不对称，使秒针在不同位置的系统误差不同。

由于这类误差被产生的原因所决定，便不能用多次测量求平均值的方法消除。

②偶然误差：是因个人或环境条件等不确定的偶然原因引起，使每次测量值发生无规则的涨落，有时偏大、有时偏小。当进行大量次数的测量时，偶然误差有统计规律性。

例如，测单摆摆动周期，因关启秒表动作的快慢造成测量时间的误差是时大时小的。用温度计多次测液体温度，因插入位置、搅拌、环境温度波动等偶然原因，使测量值受到偶然机遇性的影响。

某些偶然误差难于消除，如室温波动对测量温度值的影响

响。只能用多次测量取平均值的方法减小它的影响。但有的测量可用改善实验条件来消除，如用光电门控制数字毫秒计自动记录时间就避免了用手开启秒表快慢的影响。

系统误差与偶然误差有根本区别，但有时它们同时存在于一个测量值中，难于区分开。如在测量小钢球的直径时，测量时对于尺或球的某固定位置来说，尺的刻度不均匀、球不圆，所得测量结果与准确值或平均值的偏差是确定的，属于系统误差；当尺或球取任意位置测量时，又有偶然误差。所以具体测量中对误差的性质要作具体分析。

(3) 测量值的表示方法：绝对误差和相对误差。

直接测量和间接测量的结果都要表示为普遍的形式，即： $X \pm \Delta X$ 。

直接测量值 X 从测量仪器的读数得到。应按有效数字规定读取数据，它与仪器的分度值有关，误差值也与仪器分度值有关。

分度值按 1，2，3 …… 连续刻度的，如米尺，其分度值为 1 mm，测量值应读取到十分之一毫米位，即可能有 0.1 mm 读数。即使恰好待测物端沿与整毫米刻线对齐，没有十分之一毫米位的读数，也要用 0 补写该数字位。如图中 ① 为 22.6 mm，② 22.0 mm，③ 20.0 mm。

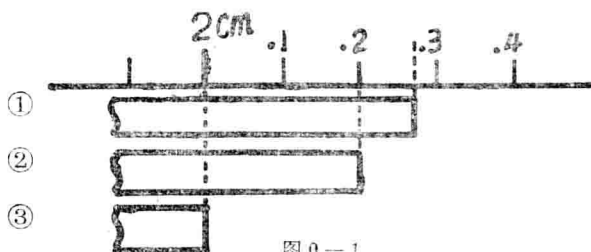


图 0-1

刻线较密的仪器很难估读十分之一刻度时，可按二分之一

分度值估读。

分度值非连续进位的，不能估读到分度值以下的位数，如分度值为20毫克的天平，横梁上的最小刻度是0.02克，即刻度按0.02, 0.04, 0.06, 0.08划分，没有奇数刻线位。对两刻线之间的估读数只能是百分之一克数位，而不能估读出千分之一克数字。实际上天平的性能已不能反应千分之一克的差异。

如图0—2所示：①按游码位置读数为： $\times\times.14$ 克（按游码的左边缘指示位置读数）当游码位置略不足0.04刻线或略超过0.04线时，如图0—2中虚线位置，仍读取0.04读数，而不能估读出第三位小数值。

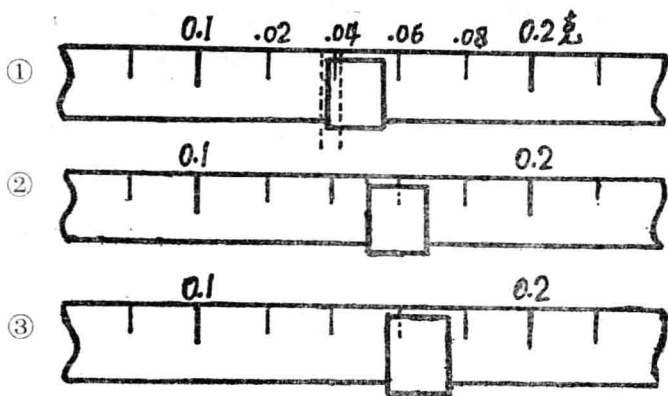


图0—2

②应读为： $\times\times.15$ 克，同①述，0.05线附近也取0.05数。

③应读为： $\times\times.16$ 克，同①述，即在刻线附近仍读刻线标值。

注意：读数 $\times\times.14$ 的末位是可靠数字，而 $\times\times.15$ 的末位是估读数，是可疑数，按有效数字读数规定不能再估读第三位小数，为保持本仪器的有效数字位数一致，即使 $\times\times.14$ 的末

位是可靠数字，也不再加第三位数字。这是非连续进位的度刻尺读数时的特殊情况。

分度值为50毫克的天平，与前者的读数方法相似，即末位数只能在百分之一克位上。

游标尺类的读取数字方法也不同于一般刻度的读法。游标卡尺中，20分和50分的只读到最小分度值位，分度值以下位数实际上已无法估读。

当一次测量不可靠时采用多次测量。多次测量时应用平均值表示测量结果，即用 $\bar{X} \pm \Delta\bar{X}$ 表示。其中 $\bar{X}$ 的有效数字是由 $\Delta\bar{X}$ 值的数字位决定的。计算 $\bar{X}$ 的过程中可按原读数的有效数字多保留一位，当求出 $\Delta\bar{X}$ 后按 $\Delta\bar{X}$ 的大小来确定 $\bar{X}$ 的位数和取舍尾数。

例如，多次测量某电压的数据得：1.425，1.423，1.427，1.426，1.424，1.425，1.426，1.424，1.424（单位伏特）。

测量值是四位有效数字。

$$\bar{U} = \frac{\sum U_i}{9} = 1.424888\cdots\cdots \text{ (伏)}$$

$$\Delta\bar{U} = \frac{\sum \Delta U_i}{9} = \frac{0.0091}{9} = 0.0010111\cdots \doteq 0.001 \text{ (伏)}$$

$\Delta\bar{U}$ 是取第三位小数的一位数，于是 $\bar{U}$ 也要取到第三位小数， $\bar{U}$ 值的第四位小数按四舍五入处理，则 $\bar{U}$ 取为：1.425伏。测量结果为：

$$U = 1.425 \pm 0.001 \text{ (伏)}$$

用一次测量值表示测量结果时，只能用 $X \pm \Delta X$ 表示。其中绝对误差 ΔX 值是按各种仪器和测量情况给出的。某些仪器已规定了或标示出 ΔX 值，或标出了仪器等级便可算出 ΔX 。如量程25mm的千分尺仪器误差为0.004mm。1.0级电压表，用10伏量程测电压时的绝对误差 $\Delta U = 10.0 \text{伏} \times 1.0\% = 0.1 \text{伏}$ 。

一般情况下取仪器最小分度值的一半作为一次测量的绝对误差，如温度计、米尺；游标尺类一般是取分度值；数字式仪表取末位数1。

多次测量的 $\overline{\Delta X}$ 由平均计算得到，运算过程中可取两位数，给出最后结果时要取成一位数，尾数按四舍五入处理。

求 $\overline{\Delta X}$ 值是估计误差的一个步骤，用平均值方法算出 $\overline{\Delta X}$ 后要与仪器误差比较后再确定是否采用此 $\overline{\Delta X}$ 值。当求得的 $\overline{\Delta X}$ 值比仪器误差小一个数量级以下时，则不用算得的 $\overline{\Delta X}$ ，而改用仪器误差作为 $\overline{\Delta X}$ 值。如电压测量的 $\overline{\Delta U} = 0.004 \text{伏}$ ，仪器误差为 $\Delta U = 0.01 \text{伏}$ ，那么测量结果表示的误差项要取0.01伏。

估算 $\overline{\Delta X}$ 时不能随意进位或舍位。如有人求得某量 $\overline{\Delta X}_1 = 0.13 \text{mm}$ ，舍掉末位后 $\overline{\Delta X}_1 = 0.1 \text{mm}$ ，再按四舍五入，则 $\overline{\Delta X}_1 = 0$ ；又如某量 $\overline{\Delta X}_2 = 0.46 \text{mm}$ 末位进位 $\overline{\Delta X}_2 = 0.5 \text{mm}$ ，再四舍五入，则 $\overline{\Delta X}_2 = 1 \text{mm}$ 。以上作法显然都是错误的。因为不顾实际情况不断地进舍，会使数字失去实际意义，调整数位时要考虑到实验测量时的读数取有效数字位的情况。若 $\overline{\Delta X}$ 值确实太小，就要用仪器误差代替。

相对误差的定义式是 $\delta X = \Delta X / X$ 或 $\delta \bar{X} = \overline{\Delta X} / \bar{X}$ 。 δX 值一般取一位至两位数，如电表的精度等级有1.0，1.5等，表示相对额定误差为1.0%，1.5%。

计算相对误差数字过程中可多留一位，最后结果写成一位或两位数字。

相对误差主要用来比较测量结果的优劣。如表示电表的等级，当合理使用时显然0.5级比1.0级电表精度高。例如用满量程10 V档测电压：

$$0.5 \text{ 级} \quad \Delta V = 10(\text{V}) \times 0.5\% = 0.05(\text{V})$$

$$1.0 \text{ 级表} \quad \Delta V = 10(\text{V}) \times 1.0\% = 0.1(\text{V}),$$

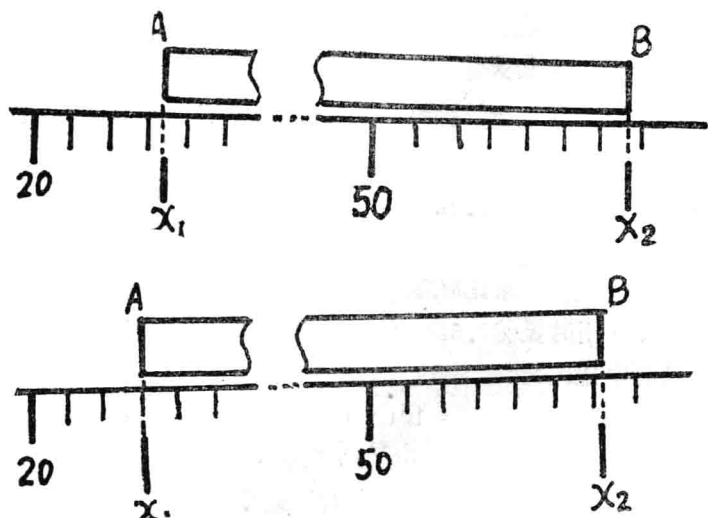
可看出0.5级比1.0级测量结果的误差要小。

δX 值也可作不同物理量测量结果之间的比较。在单摆实验中，用秒表测摆动周期为 2.0 ± 0.2 秒，用米尺测摆长为 100.0 ± 0.5 mm，则有 $\delta t = 10\%$ ， $\delta L = 0.5\%$ ，表明摆长的相对误差比时间的相对误差小很多。本实验中摆长的测量较时间测量的精度要高。

顺便谈谈误差计算中两个应注意的问题：

其一，测量端点的选择问题：

如用米尺测物长，取物体两端坐标值的方法测得： $X_1 = 23.3 \pm 0.5$ mm， $X_2 = 56.7 \pm 0.5$ mm，物长为 $L = X_2 - X_1 = 33.4$ mm。绝对误差 ΔX 值应按和的传递公式估算。则有 $\Delta L = |0.5| + |0.5| = 1$ mm。最后结果应写为 $L = 33 \pm 1$ (mm)。显得误差偏大了。这种处理是基于物体A、B端点都没与尺的任一刻线对正，于是 X_1, X_2 都有估读数字，自然都含有读数误差。便使结果的误差扩大。为避免这种情况，可取物的一端与尺的某刻线对正，则可认为这一端没有读数误差，如取A端对



(图 0-3)

正刻线有: $X_1 = 23.0\text{mm}$, 认为它的误差为 0, 只有 X_2 有读数误差, 那么和的误差为 $\Delta L = 0.5\text{mm}$, 对多段长度测量相加时都采用类似作法。如测透镜焦距时, 可将物体放在米尺的刻度线上。

其二, 应用乘除的传递公式计算时要注意先合并微分元的同类项, 然后对每一微分元项取绝对值后作相加运算。

如: 流体静力称衡法测固体密度公式: $\rho = \frac{m}{m - m_1} \rho_0$ 得

到微分式: $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dm}{m} - \frac{dm}{m - m_1} + \frac{dm_1}{m - m_1}$, 如先取各项绝对值

再相加将得错误结果, $\frac{d\rho}{\rho} = \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m - m_1} \right) dm + \frac{dm_1}{m - m_1}$ 。

应合并 dm 的同类项, 然后取各项绝对值, 并写成差值号:

$$\left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right| = \left| \frac{1}{m} - \frac{1}{m - m_1} \right| \Delta m + \left| \frac{1}{m - m_1} \right| \Delta m_1$$

二、有效数字和数据处理

(1) 测量结果的有效数字：测量值的最后一位数字应是估计值，因为它是对无刻度线依据的估计读数，也叫“可疑位”，但它是客观存在的量，故不能随意丢弃不计。所以可疑位的值反应了客观存在，但不能表示出实际数值。

分度值为 $1 \mu\text{A}$ 的电流表，表针指示如图 0—4 在 34~35 刻线段内，从刻线指示的读数为 $34 \mu\text{A}$ ，是严格的，超过 34 刻线的部分，已无刻度线可依据，只能主观估计，具体估读数可能因人而异。如读为 $0.4 \mu\text{A}$ ，则测量读数为 $34.4 \mu\text{A}$ 。其中第三位数字是不准确的，但它是存在的，必须计入，所以它是有效值。

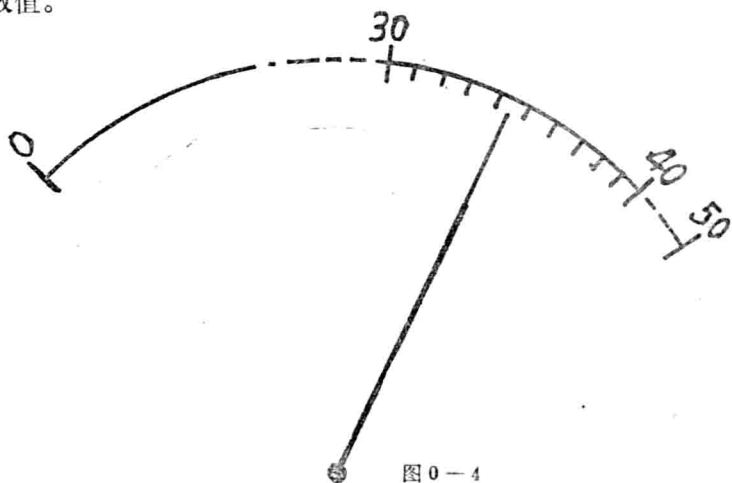


图 0—4

分析数据时要按有效数字处理，即正确的测量数据的末位是不准确的估计值。

(2)有效数字运算：几个数字相加所得的数字，其有效数字位数可能增多。如两物长各为62.3mm，74.8mm，都是三位数，相加得：137.1mm，变为四位有效数字，增加了百位项，它是可靠的，并不受原来数据位数的限制。所以相加数字可能往高位增多位数，而低位不能向后增位，即上面十分之一毫米位之后并没有增多位数。

几个数字相减，有效数字位数可能减少。如图0—5有一槽形物体，测得 $L_2 = 34.5\text{mm}$ ， $L_1 = 32.3\text{mm}$ ，求底厚。需要 $\Delta L = L_2 - L_1 = 2.2\text{mm}$ ，有效数字由三位变为两位，减少了十位数项而末位数没有移动。末位数移动与否是由绝对误差值决定的。

不同位数的有效数字作加减运算时，最后应取的位数应由绝对误差值确定。运算中凡是与估计位作了运算的量都变成可疑数字。

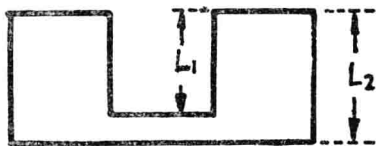


图0—5

乘除运算中要注意常数的应用。如测焦距实验计算四倍物像距离，设 $A = 42.7\text{cm}$ ，则： $4A = 4 \times 42.7\text{cm} = 170.8\text{cm}$ 。系数4不能作为一位数的有效数字处理，是一个具有任意多位有效数字的精确数。

〔附〕综合学习提纲：

以下材料可作为综合复习参考用。

(一)实验中的测量误差：