

物理 实验 方法

吴 智 主编

国防科技大学出版社



附有

历届国际物理奥林匹克

竞赛实验题及解答

WULI SHIYAN FANGFA

WULI SHIYAN FANGFA

物理实验方法

吴 智 主编

国防科技大学出版社

[湘]新登字009号

内 容 简 介

本书包括力学、热学、电磁学、光学及历届奥林匹克竞赛的实验题，可作为大、中、专教师及学生的参考书。

本书的特点是：综合各类实验题，根据不同的实验条件，适应多变的实验方法，正确分析和解决实验中的各类问题，按照实验教材内容编写。

物理实验方法

吴 智 主编

责任编辑 王松林 何 晋

*

国防科技大学出版社出版发行

湖南省新华书店经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本：787×1092 1/32 印张：11.75 字数：274千

1991年10月第1版第1次印刷 印数：1-3000册

ISBN 7-81024-149-4

0·12 定价：4.00元

前 言

物理实验是学生进行科学实验基本训练的基础，也是培养与提高学生实验素养的重要手段。而实验方法又是解剖实验中各类问题的钥匙，也是提高能力的重要途径。作为一个学生和教师，实验方法显然是他的一种基本功，审慎的思考，精确的测量，有效的取舍，熟练的技能，必然来自熟练方法的掌握，而多种物理量测量方法的掌握，也必然会在他一生的科技生涯中显现出绚丽的远景。

本书的特点，在于介绍一个物理量的多种测量方法。选题新颖，方法多样，着重基础，概括全面，分析严谨，思路灵活，同时对数据处理，仪器的选择与使用，均作了较为详细的介绍。既别于一般的实验教材，又有助于不同实验条件下实验的开设与考题的选择，因此是大、中、专教师及学生开拓思维、提高能力的一本很好的实验参考书。

本书由吴智主编，并组织了中南工业大学、湖南大学、长沙铁道学院、国防科学技术大学等院校长期从事物理实验教学，并具有丰富的教学经验的教师编写而成。全书共分三章，第一章为力学、热学实验，并简要介绍了实验数据的处理方法。第二章为电磁学实验。第三章为光学实验。附录为历届国际物理奥林匹克竞赛实验。在编写过程中，得到了全国中学生物理竞赛委员会，中国物理学会，上海师范大学等单位许多同志的大力支持与帮助，在此特致谢意。

由于时间仓促，水平有限，缺点和错误在所难免，敬希广大读者批评指正。

编 者

1990年11月于长沙

目 录

第一章 力学、热学实验	1
1.1 物理实验数据处理方法	1
1.2 力学、热学实验基础	17
1.3 观察与思考	22
1.4 实验题	27
第二章 电磁学实验	64
2.1 直流电实验基础	64
2.2 交流电实验基础	83
2.3 观察与思考	95
2.4 实验题.....	113
第三章 光学实验	240
3.1 光学实验基础.....	240
3.2 观察与思考.....	248
3.3 实验题.....	254
附录一 历届国际物理奥林匹克竞赛实验题及其解答 ...	297
附录二 全国中学生物理竞赛章程	361
附录三 国际物理奥林匹克竞赛章程	365

第一章 力学、热学实验

1.1 物理实验数据处理方法

学生在完成一个实验的过程中，要观察现象、测量和给出结果。这些实验结果往往用数字或图线的形式表示。为了获得较好的实验结果，除了深刻理解实验原理、条件和正确地使用仪器外，还要学会正确读数（包括正确记录数据）和进行数据处理。下面简单介绍有关数据处理的基本知识。

1. 测量与误差

用米尺测量物体的长度，用电表测量电路中的电流或电压等等，都是从仪器上直接读出该量的大小，这种测量方法称为**直接测量**。还有一类物理量，不能用仪器直接测出其大小，而需要先测定一些其他的物理量，然后通过一定的关系式计算求出，这种测量方法称**间接测量**。例如测量圆柱体的体积 V 时，先直接测量圆柱体的高 H 和外径 D ，再通过关系式 $V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot H$ 计算而求出体积 V 。

不论直接测量还是间接测量，由于测量仪器、测量方法、测量条件和人员素质种种因素的限制，不可能做到结果与客观真值完全一致。测量结果只能是某种近似值，即它总会和真值有或多或少的差别。实验上把这种差别称为**误差**。误差存在于一切测量之中，而且贯穿测量过程的始终。测量误差的大小反

映我们的认识接近于客观真实的程度。

2. 误差分类

误差按产生原因和其基本性质可分为系统误差和偶然误差两大类。

系统误差总是使测量结果向一个方向偏离，其数值一定或按一定规律变化，它来源于实验仪器本身缺陷（如尺的长度刻度不准确，天平砝码未校准等）；测量方法有近似性（如伏安法测电阻时，表头内阻的影响）；测量人员习惯性偏差以及环境因素等原因引起的。它的特点是在同一条件下多次测量同一物理量时，测量结果均出现固定的偏差。此时误差的符号始终不变，误差大小可以不变也可以按一定规律变化。由于系统误差数值符号的单向性，即使多次重复测量也无法通过数据处理予以消除。要消除或减小它，只能靠实验前认真审查方案、校正仪器、实验进行中注意满足实验成立的前提条件（如单摆实验时摆角不能过大等）、实验完成后对数据进行必要修正等办法来达到。

偶然误差是由测量过程中的一些偶然的和不确定的因素引起的误差。如外界环境的干扰、测试人员感官灵敏程度等，包括主观、客观两方面因素。它们一般无法预知并难以控制。因此带有随机性，也可称为**随机误差**。由于它的存在，就每次测量来说误差的大小和符号都是无规律的。但当测量次数相当多时，它又必然遵循一定的规律。

实践证明多数物理量若多次予以重复测量时，绝对值相等的正负误差出现的机会相同；绝对值小的误差出现的机会大。因此各次测量偶然误差的总和将近似为零。这也就意味着多次测量值的算术平均值将近似等于这一测量值的真值。

除上述两种误差外，还可能在测量中由于操作不当、读数

错误等原因产生一种纯属人为性的误差。此种误差称**过失误差**。它和前两种误差性质截然不同。实验中应尽力避免它的出现。

3. 有效数字及其运算

(1) 有效数字的一般概念

任何物理量的测量结果都是用数字来表示的。这个数字不但反映该量的大小，而且也 and 所用测量仪器和实验方法，即误差情况有关。所以测量值读数位数不能随意取位，必须按规定的方法取位。

对某一段长度用数字表示时，从数学上来说，下面的式子是绝对正确的。

$$35\text{毫米} = 35.0\text{毫米}$$

但从实验测量的角度来分析，该式并不成立。由于实际测量时35毫米的读数只要用最小刻度是厘米的尺就能得到。如图1-1。而35.0毫米的读数必须用最小刻度是毫米的尺来测量时才能读到。如图1-2。也就是说两次测量值的最后一位数“5”和

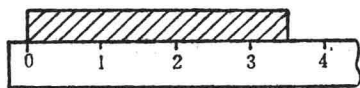


图 1-1

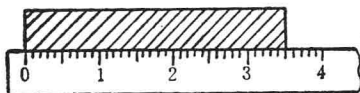


图 1-2

“0”都是观测者通过估计而得到的，属于**可疑数字**。我们把测量结果中可靠的几位数字加上可疑的一位数字，统称为**测量结果的有效数字**。但当“0”出现在数字的末尾和中间时是有效数

字。如2.20厘米,有效数字是三位,10.602毫米,有效数字是五位。如果“0”出现在数字前面时不是有效数字。如0.56米,有效数字是二位,0.034米,有效数字是二位。将它们的单位变换一下后,这三个“0”都将不再出现。(0.56米=56厘米;0.034米=34毫米)。实验时可以用标准形式来表示测量结果。即用10的方幂表示数值的数量级,用小数点前只有一位数的数字表示有效数字的大小。如 $0.056\text{米}=5.6\times 10^{-2}\text{米}=5.6\times 10^4\text{微米}$ 。

(2) 有效数字运算法则

直接测量量的数字记录是只有一位可疑数的有效数字,由若干直接测量量通过一定运算得到的间接测量量无疑也应是仅有一位可疑数的有效数字。为简化计算并避免运算而额外引进可觉察的误差,制定了若干条近似运算法则。此处仅介绍加、减的法则。即使是用计算器进行运算,仍需遵循这些法则。

① 尾数的取舍法则

尾数取舍法则最初采用的是四舍五入的法则。即尾数是“4”或小于“4”的数时舍去,是“5”或大于“5”的数时进到上一位数。这样做的结果进大于舍。现在通用的是:尾数“小于五则舍,大于五则进;等于五则把尾数凑成偶数”的法则。这种取舍法则可以使尾数进与舍的机会相等。

例如:

3.14159 取四位有效数字为3.142

7.694 取三位有效数字为7.69

6.3760 取三位有效数字为6.38

5.725 取三位有效数字为5.72

3.15 取二位有效数字为3.2

② 有效数字的运算规则

有效数字是由可靠数字和可疑数字组成的。当两个或两个

以上有效数字进行数学运算时，一般应遵循这样几个原则。

a. 可靠数字与可靠数字运算，其结果仍为可靠数字。

b. 可靠数字与可疑数字，或可疑数字之间相运算，其结果均为可疑数字。

c. 运算的结果一般只保留一位可疑数字。

d. 运算中的常数、无理数、自然数等，如 π 、 $\sqrt{2}$ 、1、2等的位数可以认为是无限的。在计算中一般应比参与运算各量中有效数字位数最多的值多取一位。

根据以上原则，我们通过实例讨论有效数字怎样加、减运算。

$$\begin{array}{r} \text{例 1} \qquad 20.\underline{1} \\ +) 4.\underline{178} \\ \hline 24.\underline{278} \end{array}$$

此结果中小数点后的三个数字均为可疑数字，但“2”在十分位，其他二数均在比它小的百分位和千分位。显然结果的可疑数字只要保留十分位的“2”，其后面的可疑数字应按尾数取舍法则进行处理。这里应将百分位的“7”进位到十分位，即可疑数字变为3。

故

$$20.\underline{1} + 4.\underline{178} = 24.\underline{3}$$

例 2

$$\begin{array}{r} 19.\underline{7} \\ -) 5.\underline{868} \\ \hline 13.\underline{832} \end{array}$$

与例一同理将差处理后有

$$19.\underline{7} - 5.\underline{868} = 13.\underline{8}$$

一般情况下有效数字作加、减或乘、除法运算时应遵循的规则是：

a. 几个数相加、减时，最后结果的有效数字末位的位置和参与运算数中最前面的末位位置相同。

b. 几个数相乘、除时，最后结果在小数点后的位数和参加运算各数中小数点后位数最少的相同。

4. 测量结果与误差计算

以下只讨论偶然误差的计算，而假定系统误差已经消除或修正。

(1) 单次直接测量结果与误差估算

在物理实验中，对某一个物理量的测量精确度要求不高，只需进行一次测量时，可按仪器出厂检定出或仪器上注明的仪器误差作为单次测量的误差。如果没有注明，也可取仪器最小刻度的一半作为单次测量的误差。

(2) 多次直接测量结果与误差计算

进行某物理量的测量时，最好不用单次测量，而采用多次重复测量。仪器适当时，这种多次测量值将不会完全相同。我们可通过运算求到最接近真值的最佳值，并对此组测量值进行误差分析和计算。

在相同条件下对某物理量 N 进行了 k 次重复测量，如每次测量值分别为 $N_1, N_2, \dots, N_k$ ，用 $\bar{N}$ 表示算术平均值，则

$$\bar{N} = \frac{1}{k} (N_1 + N_2 + \dots + N_k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i$$

根据误差理论，在一组 k 次测量的数据中，算术平均值 $\bar{N}$ 最接近于真值，称为“测量的最佳值”。当测量次数无限增加时，算术平均值就将无限接近于真值。

多次测量值的误差可用多种方法计算，中学阶段目前一般

采用算术平均绝对误差的方法。用 $\overline{\Delta N}$ 代表算术平均绝对误差，则

$$\Delta N_1 = N_1 - \bar{N}, \Delta N_2 = N_2 - \bar{N}, \Delta N_3 = N_3 - \bar{N}$$

$$\overline{\Delta N} = \frac{1}{k} (|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + \cdots + |\Delta N_k|)$$

$$= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |\Delta N_i|$$

实验时多次测量的次数不能太少，至少要有5次以上。算术平均值 $\bar{N}$ 的有效数字位数应与各测量值 N_i 的有效数字位数一致。算术平均绝对误差一般用一位数表示。测量最佳值的可疑数位置应与误差的位置对齐。

例 3 某物体长度，用毫米刻度的尺测量5次后得到5次测量值分别为3.42, 3.44, 3.43, 3.44, 3.43厘米。其算术平均值和算术平均绝对误差分别为多少？

[解]

次 数	1	2	3	4	5
长度 $l(\text{cm})$	3.42	3.44	3.43	3.44	3.43
平均值 $\bar{l}(\text{cm})$	$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^5 l_i = \frac{1}{5} (17.16) = 3.432 \text{ 取 } 3.43$				
$ \Delta N_i (\text{cm})$	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
算术平均绝对误差 $\overline{\Delta N}(\text{cm})$	$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^5 \Delta N_i = \frac{1}{5} (0.03) = 0.006 \text{ 取 } 0.01$				

如果算术平均绝对误差小于仪器误差，如上例中 $\overline{\Delta N} = 0.006 < 0.01$ ，则仍应以单次测量值的误差即仪器误差作为最后结果的误差值，故上例中仍取0.01cm作为最后结果的误差。

测量结果的表示方法：

由前面的介绍知道，多次测量物理量 N 得到的一系列测量值 $N_1, N_2, \dots, N_k$ 应当用其算术平均值 $\bar{N}$ 表示近真值，误差可用算术平均绝对误差 $\overline{\Delta N}$ 表示。这表示 N 的真值应该在 $\bar{N} + \overline{\Delta N}$ 和 $\bar{N} - \overline{\Delta N}$ 之间。实验时应将最后结果表示为

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} \text{ 单位}$$

如上例的最后结果是

$$L = 3.43 \pm 0.01 \text{ cm}$$

结果的上述表示式包括近真值、误差、单位三要素，缺一不可。

绝对误差不能明显地反映出测量的相对精度。如用同一量具第一次测甲棒结果为 $L_1 = (100.00 \pm 0.05)$ 厘米。第二次测乙棒结果为 $L_2 = (10.00 \pm 0.05)$ 厘米。两次测量用尺都是有毫米刻度的尺，所以绝对误差都是 0.05 厘米。为了能反映测量的精度，需要引入相对误差。

$$\text{相对误差 } E = \frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} 100\%$$

由于它是用百分数表示的，所以也称**百分误差**。

$$\text{上述两次测量的相对误差 } E_1 = \frac{0.05}{100.00} 100\% = 0.05\%; E_2$$

$$= \frac{0.05}{10.00} 100\% = 0.5\%; \text{第二次测乙棒的相对误差 } 0.5\% \text{ 比第一次测甲棒的相对误差 } 0.05\% \text{ 大了十倍, 说明第一次测量的相对精度比较高。}$$

计算相对误差时应注意一般用一位数表示。对 $l = 3.43 \pm 0.01$ 厘米，其相对误差 $E = \frac{0.01}{3.43} 100\% = 0.291545\%$ ，应取为

0.3%。

对某些有理论值或公认值的测量相对误差，有另外的定义。即

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{理论值} - \text{测量值}|}{\text{理论值}} 100\%$$

(3) 间接测量量误差的估算

实际工作中，多数物理量是通过间接测量得到的。如伏安法测电阻实验，直接测量的是电流 I 和电压 U ，电阻值可通过欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ 求出。直接测量量 I 和 U 都有一定的误差，由它们求出的 R 也必然有误差。实验中把直接测量量误差与间接测量量误差间数值关系称**误差传递公式**。不同实验有不同计算公式，对千变万化的物理公式总可以归纳为若干种基本数学运算关系。下面介绍几种简单运算关系时相应的误差传递公式。

① 加、减法运算

设直接测量量用符号 A 、 B 表示，间接测量量用符号 N 表示。

$$N = A \pm B$$

N 值绝对误差 ΔN 和 A 、 B 值绝对误差 ΔA 、 ΔB 间的关系是：

$$\Delta N = \Delta A + \Delta B$$

求出绝对误差 ΔN 后再由相对误差的定义式

$$E = \frac{\Delta N}{N}$$

计算间接测量量 N 的相对误差。

② 乘、除法运算

此时间接测量量 N 和直接测量量 A 、 B 间运算关系是：

$$N = A \cdot B \quad \text{或} \quad N = \frac{A}{B}$$

相对误差 E_N 和 E_A 、 E_B 间满足如下关系

$$E_N = E_A + E_B$$

即

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

求出间接测量量相对误差 $\frac{\Delta N}{N}$ 后再由绝对误差的定义式

$\Delta N = E_N \cdot N$ 计算其绝对误差。

由上述讨论可知，加减法先求绝对误差方便些，然后再求相对误差；乘除法则先求相对误差方便些，然后再求绝对误差。

例4 伏安法测电阻实验，直接测量负载端电压及电流值为 $U = 2.50 \pm 0.01$ 伏， $I = 35.2 \pm 0.2$ 毫安，求负载电阻阻值及其误差。

[解] 由 $R = \frac{U}{I}$ ，求电阻值 R ，代入数值得

$$R = \left(\frac{2.50}{35.2 \times 10^{-3}} \right) = 71.0 \text{ 欧}$$

此处因 U 、 I 均为三位有效数字，故 R 也取三位有效数字。

利用公式再求 R 的相对误差 E_R 。

$$\begin{aligned} E_R = \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{0.01}{2.50} + \frac{0.2}{35.2} \\ &= 0.004 + 0.006 \div 0.01 \end{aligned}$$

最后求 R 的绝对误差

$$\Delta R = E_R \cdot R = 0.01 \cdot 71.0 = 0.7 \text{ 欧}$$

故间接测量电阻的最后结果为

$$R = 71.0 \pm 0.7 \Omega$$

$$E_R = 1\%$$

5. 数据处理

中学阶段数据处理工作指的是完成操作后如何整理、记录测量值；如何通过作图求出最后结果。它与实验质量高低有重要关系。下面将分别加以介绍。

(1) 列表法

实验得到的一系列数据一般应当用表格的方式加以记录，切忌用一堆数字加以记录。中学物理实验内容，测量数据比较简单，概括起来不外有下面两种情况：一种是多次对某一个物理量重复进行测量。这时根据测量次序有多个测量数值，可以将测量次序和测量值对应列成表。如表一

表一：铜柱长度 l 测量记录

次 序	1	2	3	4	5
$l(\text{cm})$	3.024	3.028	3.024	3.026	3.026
$\bar{l}(\text{cm})$	3.026				

另一种为存在函数关系的某两值的测量，此时通常将甲量调为一系列指定值，乙量也将有一系列对应的测量值。可以按甲、乙两量的值对应列表。如表二

表二：伏安法测电阻实验记录

$V(\text{V})$	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
$I(\text{mA})$	0.00	3.85	8.15	12.05	15.80	19.90

列表法的优点是简捷清晰，便于比较和查找数据，也有助