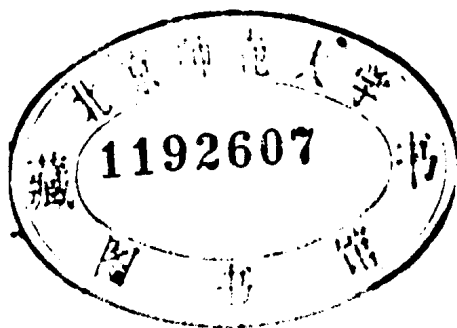


# 普通物理实验指导

(力学、热学、分子物理部分)

林润生 卓乐茵

11/56/25



甘肃人民出版社

## 内 容 提 要

本书分两编：第一编，实验的误差和数据处理；第二编，力学、热学、分子物理实验共二十一个题目。在第一编中，结合实例比较系统地介绍了偶然误差的统计规律、系统误差的消除方法、间接测量中误差的传递以及曲线的线性拟合等基础知识。在第二编中，每个题目均有理论的论述、测量技术的讨论、结果的误差分析等方面阐述，力求给读者以确切的指导；同时在题目的讲述中，还附了教学组织与教学要求的内容，并且对教学的重点、难点和贯彻因材施教等方面的问题进行了一些探讨。

本书对高等学校学习普通物理实验课的学生将起指导作用，还可以作为普通物理实验教学的青年教师和中学教师的参考书。

### 普通物理实验指导

(力学、热学、分子物理部分)

林润生 卓乐茵

甘肃人民出版社出版

(兰州第一新村51号)

甘肃省新华书店发行 兰州新华印刷厂印刷

开本850×1168毫米1/32 印张9 插页1 字数227,000

1984年2月第1版 1984年2月第1次印刷

印数：1—5,280

书号：13096·91 定价：0.94元

# 序

## 段一士

建国以来，我国教育事业有了很大的发展。

为了适应“四化”建设和培养高质量物理学专门人材的需要，进一步提高专业课、理论课和基础课的教学质量，仍是摆在我们面前十分迫切的任务。

多年来，由于我们把物理实验课的教学摆在其它理论课和基础课的从属地位，使物理实验课教学质量的提高受到了一定程度的影响。因此，努力提高作为物理系学生的一门重要基础课——普通物理实验课的教学质量更是当务之急。近年来综合性大学物理系的毕业生中，从事纯理论工作的是少数，而多数都将从事实验物理的科学实践工作。从这个意义上说，要求物理实验课有更高的教学质量也是不言而喻的。

进行任何一门课程的教学，都需要有教材和教学参考书，否则提高教学质量将无所遵循。解放三十多年来，各门学科都出了不少教材和教学参考书，而普通物理实验课除了各校自用的讲义外，一本国内自己出的参考教材和教学参考书也没有。林抒、龚镇雄同志编写的《普通物理实验》一书刚刚问世，这和我国迅速发展的教育事业是很不适应的。

林润生、卓乐茵二同志的《普通物理实验指导》（力学、热学、分子物理部分）的出版是值得欢迎的；它必将有助于普通物理实验课教学质量的提高。

《普通物理实验指导》一书的特点是，不仅重视学生实验技能、动手能力的培养，还把培养学生实验物理研究方法的素养摆

到了应有的地位。实验物理的任务是观察物理现象，定量测量有关的物理量；通过误差的数学处理而使测量得到的物理量更接近于真值；然后通过理论分析，总结出这些物理量之间的相互关系，以求得对物理现象和本质的认识。本书作者在实验的误差和数据处理，以及对每一个题目的分析、讨论中都贯申了这一思想。这对学生学好物理实验课将起指导作用，对他们将来从事实验物理的科学实践工作会很有补益，对从事实验物理教学工作的青年教师，也是一本很好的参考书。

一九八二年八月于兰州大学

# 前 言

本书内容为两部分：实验的误差和数据处理；力学、热学、分子物理实验。

在普通物理实验课的教学中，实验的误差和数据处理是一个很重要的内容。教学实验的目的不仅要求学生在实验技能、测量方法等方面得到必须的训练，还必须使学生在实验数据的处理，测量结果的中肯分析、正确评价以及消除各种因素对测量结果的影响等实验物理研究方法方面得到基本的素养。为此，本书除在第一编中介绍了偶然误差的统计规律，系统误差的消除方法，在间接测量中误差的传递，曲线的线性拟合等基础知识外，还在每个题目中结合具体实验内容从理论上、方法上消除系差的影响，从数据处理和误差计算中对测量结果可信赖程度进行了分析和讨论。

普通物理实验课是一门实践的课程。它在内容和方法等方面都受到设备条件的制约，目前各高校在题目开设上也不尽统一。本书以教育部推荐大纲为依据，并对各高校多数都普遍开设的一些基本题目进行了选择，作为本书的实验题目。

本书在各实验题目中还加进了教学组织与要求的内容。根据本课程的性质和大纲的精神，结合每个具体题目的特点对教学的重点、难点、基本要求，贯彻因材施教等方面的问题进行了一些探讨。

本书是作为高等学校普通物理实验课的一本辅助读物，可供学生及青年教师参考。

由于水平的限制，时间比较仓促，肯定会有不少谬误和不足之处。欢迎读者批评指正。

段一士教授对本书的编写十分关注，对我们的工作给予了热情的支持和指导，在百忙之中为本书写了序。万天成同志给了我们很多鼓励和帮助，青年教师卞晓平同志还参加了部分题目数据的采集工作，还有许多同志对本书的编写给予了多方面的支持和帮助。在此，表示衷心的感谢。

**编 者**

一九八二年八月

# 目 录

## 第一编 实验的误差与数据处理

第一章 误差理论的基础知识.....	( 1 )
§ 1.1—1 真值与平均值.....	( 2 )
§ 1.1—2 误差及其分类.....	( 4 )
§ 1.1—3 系统误差的限制与消除.....	( 6 )
§ 1.1—4 随机误差的正态分布、高斯定律.....	( 10 )
§ 1.1—5 最小二乘法原理与算术平均值.....	( 17 )
§ 1.1—6 精密度指数的物理意义, 精密度、准确度、 精确度.....	( 19 )
§ 1.1—7 测量精密度的估计.....	( 21 )
§ 1.1—8 有限测量次数中的误差公式.....	( 24 )
§ 1.1—9 统计上允许的合理误差范围.....	( 27 )
§ 1.1—10 仪器的精密度和测量的极限误差.....	( 30 )
附录1.1或然率积分表.....	( 31 )
第二章 间接测量中误差的传递.....	( 34 )
§ 1.2—1 误差传递的一般公式.....	( 34 )
§ 1.2—2 误差传递公式在基本运算中的应用.....	( 35 )
§ 1.2—3 误差传递中标准误差的一般公式.....	( 38 )
§ 1.2—4 标准误差传递公式在基本运算中的应用 .....	( 40 )
§ 1.2—5 算术平均值的标准误差.....	( 41 )
§ 1.2—6 间接测量中误差理论的应用.....	( 42 )

### 第三章 非等精度测量 ..... (51)

§ 1.3—1 不等权观测值的平均值 ..... (51)

§ 1.3—2 不等权观测值的权数与误差大小的关系 ... (53)

§ 1.3—3 不等权观测值中平均值的误差 ..... (56)

§ 1.3—4 平均值间符合程度的检验 ..... (59)

### 第四章 实验数据的运算和表示方法 ..... (61)

§ 1.4—1 实验数据的运算规则 ..... (61)

§ 1.4—2 实验数据的列表表示法 ..... (65)

§ 1.4—3 实验数据的图形表示法 ..... (69)

§ 1.4—4 曲线的拟合 ..... (71)

§ 1.4—5 线性拟合中的图解法 ..... (76)

§ 1.4—6 线性拟合中的最小二乘法 ..... (82)

§ 1.4—7 实验数据的方程表示法 ..... (84)

## 第二编 力学、热学、分子物理

实验一 随机误差的正态分布 ..... (88)

实验二 单摆法测重力加速度 ..... (97)

实验三 自由落体运动规律的研究 ..... (116)

实验四 静力平衡法测物体的密度 ..... (127)

实验五 空气密度的测定 ..... (135)

实验六 伸长法测金属的杨氏模量 ..... (146)

实验七 梁的弯曲 ..... (154)

实验八 气垫实验(一) 直线运动的研究 ..... (164)

实验九 气垫实验(二) 牛顿运动定律 ..... (177)

实验十 气垫实验(三) 碰撞 ..... (180)

实验十一 可倒摆 ..... (188)



实验十二	用扭摆测定金属的切变模量.....	(197)
实验十三	三线摆.....	(203)
实验十四	弹簧的振动.....	(217)
实验十五	弦振动的研究.....	(229)
实验十六	空气中的声速.....	(236)
实验十七	金属线膨胀系数的测定.....	(244)
实验十八	混合法测良导体的比热容.....	(248)
实验十九	冰的熔解热.....	(255)
实验二十	液体的表面张力系数.....	(259)
实验二十一	液体的粘滞系数.....	(271)
主要参考文献	.....	(279)

# 第一编 实验的误差与数据处理

## 第一章 误差理论的基础知识

物理实验必须进行一定的测量，而测量又可以分为直接测量和间接测量，直接测量就是利用一定的仪器，直接把物理量测量出来，所谓间接测量就是某物理量根据可直接测量的其它物理量的数值通过一定的函数关系计算出来，不论是直接测量还是间接测量，最终目的都是要获得物理量的真值。但任何物理量的测量都必须使用一定的仪器，通过一定的方法，在一定的环境下，由某一观测者去完成，由于仪器、方法、环境和观测者都必然存在某种不理想的情况，所以在大多数情况下，测量结果并非真值。这种测量结果与真值之间的偏差、就是误差。

某一物理量误差的定义为该量的测量值 $x$ 与真值 $a$ 之差，即

$$\delta = x - a \quad (1.1-0-1)$$

由于测量中误差是不可避免的，而真值又是测不出来的，所以测量的目的应当是尽量消除误差之后求出在该条件下被测量的最可信赖值，以及对它的准确度给予正确的估计。误差理论就是适应这一需要发展起来的。只有掌握和正确运用误差处理方法，才能确定接近真值的测量结果，并判断结果的可靠性。误差理论还可以帮助我们正确地组织实验和测量，合理地设计仪器、选用仪器和测量方法，使测量的误差减至最小，获得最好的结果。由此可见，了解误差的性质，误差出现的规律，掌握误差的处理方法，是每个实验者必备的基础知识。

## §1.1—1 真值与平均值

真值是指在一定时刻，或一定位置，或一定状态下，某物理量的客观实际值。由于测量误差的存在，一般来说真值是不可知的，但从相对意义上说，真值又是可知的。真值可知的情况有以下几方面：

1. 理论真值 或称为定义值。例如用理论安培作为电流的计量标准，其定义是：真空中两根截面无限小的相距 2 米的无限长平行导体，在其上通过 1 安培的恒定电流时，则在两导体间产生  $10^{-7}$  牛顿/米的相互作用力；又如平面三角形三内角之和为  $180^\circ$ ，还有理论设计值，理论公式表达值等。

这种真值实际上也是不可知的。你要知道它就必须测量它。为此必须设立各种尽可能维持不变的实物基准和标准器，指定它的数值作为参考标准。

2. 指定值 或约定值。如长度单位米等于氪原子的  $2P_{10}$  和  $5d_5$  能级之间跃迁辐射在真空中波长的  $1650763.73$  倍；又如质量单位千克等于铂铱合金的国际千克原器（保留在巴黎附近的色弗尔国际度量衡标准局）的质量；再如时间单位秒等于铯  $1_{33}$  原子基态的二个超精细能级之间跃迁辐射周期的  $9192631770$  倍的持续时间等。

3. 实际值 或标准器相对真值。高一标准器的误差与低一级标准器或普通仪器的误差相比可以略去时，则可认为前者是后者的相对真值。

4. 平均值 我们还可以从另一角度来定义物理测量中的相对真值。设在测量中观测次数为无限多时，根据误差分布定律正负误差出现的几率相等，故将各观测值加以平均，在无系统误差的情况下，可能获得极近于真值的数值。故真值是指观测次数无限多时所得的平均值。而我们实际的观测次数总是有限的，因此，

用有限观测次数所求出的平均值，只能是近似真值，或称为最佳值。在物理实验中常用的平均值有以下几种：

(1) 算术平均值 算术平均值是常用的一种平均值。它是在一组等精度测量中的最佳值或最可信赖值。

设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  代表各观测值， $n$  代表观测次数，则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.1-1-1)$$

由此得

$$\sum x_i - n\bar{x} = 0 \quad (1.1-1-2)$$

(2) 均方根值

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \quad (1.1-1-3)$$

(3) 加权平均值 或称广义平均值。设对同一物理量用不同方法去测定，或对同一物理量由不同的实验者去测定，计算平均值时，常对比较可靠的观测值予以加重平均，称为加权平均。加权平均值的定义为

$$\bar{x}_w = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad (1.1-1-4)$$

式中  $w_1, w_2, \dots, w_n$  代表各观测值对应的权数。

(4) 几何平均值 将一组  $n$  个观测值连乘后再开  $n$  次方求得的值，即

$$\bar{x}_g = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (1.1-1-5)$$

或以对数表示之，有

$$\lg \bar{x}_g = \frac{\sum \lg x_i}{n} \quad (1.1-1-6)$$

当一组观测值取对数所得的图形曲线更为对称时，常用几何

平均值。

## §1.1—2 误差及其分类

由(1.1—0—1)式

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

所表示的误差是与测量值同单位的，它反映了测量值偏离真值的大小，故又称为绝对误差。

为了说明测量的精确程度常引入相对误差的概念，其定义如下：

$$\text{相对误差} = \text{误差} \div \text{真值}$$

在仪器仪表中常用一种实用方便的相对误差，称为引用误差。其定义为

$$\text{引用误差} = \text{示值误差} \div \text{满刻度值}$$

而且常用它来划分仪器仪表精确度的等级。如某仪表的精确度等级分别为0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5和5.0七级，则说明合格仪表最大引用误差不会超过0.1%, 0.2%, ..., 5.0%。设某仪表的引用误差为S%，满刻度值为 $x_m$ ，则该仪表在某测量值 $x$ 附近的示值误差为

$$\text{绝对误差} \leq x_m \times S\%$$

$$\text{相对误差} \leq x_m / x \times S\%$$

一般 $x < x_m$ ，由上可见，当 $x$ 越接近于 $x_m$ 时，测量的精确度越高；当 $x$ 越远离 $x_m$ 时，其测量的精确度越低。因此，利用这类仪表测量时，尽可能在仪表满刻度值2/3以上的量程内使用。

误差按其性质又可分为系统误差，偶然误差（又称随机误差）和过失误差（又称为粗差）。

1. 系统误差 在一定条件下（指仪器、方法、环境和观测者），对同一物理量进行多次测量时，其测量误差的符号与数值总保持不变，或者按照一定的规律变化的，这种误差称为系统误

差。系统误差是带有系统性和方向性的误差。

系统误差来源于仪器（未经校准，制造时的误差，安装不正常，元件的老化等），方法（公式的近似，操作不当等），环境（温度、湿度、气压等）和观测者（某些固有习惯）。系统误差中有的能够确定其符号和大小，可对观测值加以修正；有些系统误差的大小和符号都不知道，则应在实验中采取一些办法去限制和消除它对测量结果的影响。系统误差是测量误差的重要组成部分，因此，发现系统误差的存在，弄清其产生的原因，消除它对测量结果的影响是每个物理实验观测者的一项重要任务。

2. 偶然误差 或称随机误差。在测量中，如果已经消除引起系统误差的一切因素后，而测量结果的量值仍然无规律地弥散在一定的范围内，这说明测量仍然存在着误差，这种误差称为偶然误差，或称随机误差。或者说，在相同的条件下对同一物理量进行多次测量，其误差的量值和符号的变化，时大时小，时正时负，没有确定的规律，也不可能预知，这种误差就称为偶然误差。

偶然误差顾名思义纯属偶然，无一定的规律性。其实，偶然误差的产生仍然是有其根源的，只不过现阶段我们还未认识或无法控制罢了。或者是由于变化的因素太多，或者是各种影响的因素太微小、太复杂以致无法掌握。但从偶然误差的分布上说，在相同的条件下，对同一物理量进行多次测量时，它的出现却表现出严格的统计规律性。因此，对于偶然误差可以用概率统计的方法来处理。

3. 过失误差 又称粗差。它是明显的歪曲测量结果的误差。粗差主要是由于粗枝大叶，过度疲劳或操作不正确等引起的。含有粗差的测量值称为异常值或坏值。正确的测量结果中不应当含有粗差，即所有坏值都应剔去。因此，误差分析的主要任务是限制和消除系统误差，估量和计算偶然误差。

## §1.1—3 系统误差的限制与消除

系统误差的限制和消除一般没有固定不变的方法，要具体问题具体分析具体解决。为了找出消除和限制系统误差的方法，必须了解它在实验中产生的原因，出现的规律，针对具体情况或是在实验前排除其产生系统误差的各种因素，或是在实验过程中，限制系统误差对测量结果的影响，或是在测量结果中予以修正。

### 一、消除产生系统误差的根源

消除产生系统误差的原因，使它在实验过程中不再出现，是避免系统误差影响实验结果的有效方法。如果系统误差的出现是由于仪器使用不当或仪器本身有问题，就应该把仪器调好并按照规定的条件去使用；如果系统误差来源于环境因素的影响，可以排除这种环境因素；如果系统误差是由于测量者的操作不善或读数的不良习惯引起的，这就应该对观测者进行必要的训练，改进操作和读数方法；这样，由此而产生的系统误差也就可以避免了。例如，伸长法测定金属丝的杨氏模量时，由于金属丝不直给伸长量的测量带来较大的系差，我们就在测量前先给金属丝下端加上一二个砝码，使其伸直后再进行测量。又如，在单摆法测重力加速度的实验中，当摆角 $\theta > 3^\circ$ 时，给测量结果带来了不可忽视的恒系负差，在测量时我们就让摆角 $\theta < 3^\circ$ 等。

### 二、用适当的实验方法限制系统误差

系统误差产生的原因在事前不能消除，它必然要在实验过程中出现。如果能够知道它出现的规律，就可以采用适当的实验方法，使系统误差在测量过程中互相抵消而不致带入测量结果中去。

1. 固定系差限制法 对测量中固定不变的系统误差其限制方法有下列几种：

(1) 交换抵消法 将测量中某些条件（如被测物的位置等）互相交换，使产生系统误差的原因对测量结果起相反的影响，

从而抵消了系统误差。

如等臂天平称衡。如图(1-1)(a)所示,在左盘中放被测物  $x$ , 右盘放置砝码  $p$  使之平衡。这时,被测物的质量为

$x = \frac{l_2}{l_1} p$ 。当两臂相等时,  $x = p$ 。如果两臂存在微小的不等,仍

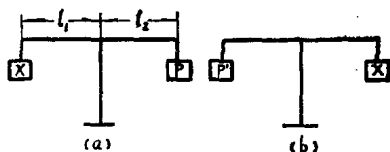
以  $x = p$  作为测量结果,就给观测值引入了不等臂系差。为了消除这一系差,我们将被测物与砝码互换位置,如图(b)所示,改变

砝码质量使之重新平衡,这时被测物的质量变为  $x = \frac{l_1}{l_2} p'$ 。将

两次称衡的结果相乘后开方

$$x = \sqrt{pp'} \quad (1.1-3-1)$$

就消除了不等臂系差。



图(1-1)

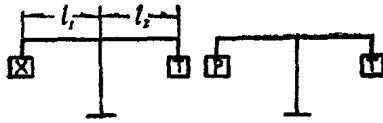
(2)代替消除法 就是在其它测量条件不变的情况下,用一已知量替换被测量以达到消除系统误差的目的。

例如,在用交流电桥作精密测量时,可先使电桥与接入电路的被测量达到平衡,然后用一已知量替换被测量使电桥再次达到平衡,如果这种替换在电桥内没有引起任何其它变化,那么,就几乎可以全部地消除由一系列因素(如电流、电容、电感等)所造成的系差。

再如图(1-1)中的例子,我们可先用一平衡物  $T$  与被测物  $x$  平衡,如图(1-2)所示。有  $x = \frac{l_2}{l_1} T$ , 然后取下  $x$  用砝码  $p$  使之与  $T$  平衡,又得  $p = \frac{l_2}{l_1} T$ , 这时砝码的质量即为被测物的质



量。在这个测量结果中，已不再有由于  $l_1 \neq l_2$  所引起的测量系差了。



图(1-2)

(3) 异号法 改变测量中的某些条件(例如测量方向等), 使两次测量中的符号相反, 取平均值以消除系统误差。

例如: 为了消除测微仪空行程所带来的系统误差, 可以从两个不同的方向对线。第一次顺时针旋转对准标志读数为  $d$ , 设不含系统误差的值为  $a$ , 空行程引起的误差为  $\zeta$ , 则有

$$d = a + \zeta$$

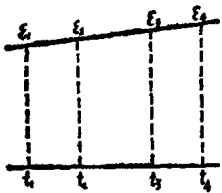
逆时针旋转对准标志的读数为  $d'$ , 亦有

$$d' = a - \zeta$$

将两次测量结果取平均

$$a = (d + d') / 2 \quad (1.1-3-2)$$

就消除了系统误差。



图(1-3)

2. 线性系差消除法 消除线性系差常用对称观测法。若有随时间作线性变化的系统误差  $e$ , 可对时间作对称观测, 其测量程序如图(1-3)所示, 即可以达到消除线性系差的目的。

例如: 为了求得被检仪表示值  $x$  的修正量  $\zeta$ , 先用标准仪表  $a$  去测量过渡量值  $b$ , 所得的结果用  $a$  表示, 然后再用被检仪表  $x$  去测量过渡量值  $b$ , 所得的结果用  $x$  表示, 若随时间作线性变化的系统误差用  $e$  表示, 我们采用  $a$ 、 $x$ 、 $x'$ 、 $a'$  的测量程序有