

普通高等教育基础课规划教材

# 大学物理实验

◆ 刘文军 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育基础课规划教材

# 大学物理实验

(供医药类高等院校各专业使用)

主 编 刘文军

副主编 龚 剑

参 编 陈亚明 刘国庆

主 审 邓亲恺



机械工业出版社

本书是根据 2004 年教育部对医学院校物理实验教学的基本要求, 并参考有关高等院校物理实验教材, 同时结合南方医科大学(原第一军医大学)多年来的物理实验教学经验编写而成的。

本书在物理实验教学实践及教学改革的基础上, 既保证了物理实验学科体系不变, 又增加了很多趣味性很强的新实验; 既包含了基础物理实验的内容, 又交叉了医学内容, 并针对生物医学工程专业还编排了一些近代物理实验。为使学生进一步深入理解物理实验的设计思想和实验方法, 培养他们的创新思维和理论与实践相结合的能力, 本书在以上三部分实验基础上还编入了若干综合应用物理学各领域实验方法和技术的设计性实验。

本教材为高等医药院校各专业的教科书和参考书, 可适合不同层次的教学要求。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/刘文军主编. —北京: 机械工业出版社, 2005.2

普通高等教育基础课规划教材

ISBN 7-111-16110-6

I. 大... II. 刘... III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4—

33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 008868 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李永联 版式设计: 张世琴 责任校对: 王欣

封面设计: 饶薇 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·4.375 印张·168 千字

定价: 13.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

# 前言

本书是根据 2004 年教育部对医学院校物理实验教学的基本要求，并参考有关高等院校物理实验教材，同时结合南方医科大学（原第一军医大学）多年来的物理实验教学经验编写而成的。

本书在物理实验教学实践及教学改革的基础上，既保证了物理实验学科体系不变，又增加了很多趣味性很强的新实验。本书按内容共分五部分：绪论、基础物理实验、医学物理实验、近代物理实验及设计性物理实验。基础物理实验的主要内容为基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能的训练和基本测量方法与误差及数据处理理论与方法等，涉及到力、热、电、光各个学科，为普及性实验。医学物理实验结合医药科学与技术的物理基础或物理技术在医药学中的应用而开设，包含有“人体参数测量与相关分析”、“液体粘滞系数的测定”、“医学数码摄影”、“人的肢体电阻和皮肤电阻测量”、“人耳听阈曲线的测定”等实验，它们既涉及普通物理实验的内容，又交叉了医学内容，对医学专业学生今后的工作、学习有很大的帮助。近代物理实验涉及现代物理技术和实验方法。为使学生进一步深入理解物理实验的设计思想和实验方法，了解物理实验技术的应用，培养学生的创新思维和理论与实践相结合的能力，在此三部分实验基础上还编入了综合应用力、热、电、光、近代物理各领域的物理实验方法和技术的设计性实验。

本书由刘文军主编，参加编写的其他作者有龚剑、陈亚明、刘国庆等。本书的绘图由刘文军、龚剑负责。全书由邓亲恺教授担任主审。

本书是南方医科大学医学物理教研室同志们长期教学实践的结晶。在编写过程中，还参阅了许多兄弟院校的教材和讲义，从中得到许多启迪和帮助；在此一并表示衷心的感谢。

本书适用于高等院校八年制、七年制和五年制的临床、口腔、预防医学、法医学、放射医学、药学、医药信息、医学检验、护理、影像等医药类专业，也可供生物医学工程、生命科学等有关的其他专业的师生参考。教学学时数为 20~40 学时。

编者

2005 年 2 月于广州

# 目 录

## 前言

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 绪论 .....                  | 1   |
| 一、物理实验课程的任务和程序 .....      | 1   |
| 二、数据处理的基本知识 .....         | 3   |
| 物理实验部分 .....              | 12  |
| 实验一 物体尺寸的测量 .....         | 12  |
| 实验二 静电场的测绘 .....          | 16  |
| 实验三 示波器的使用 .....          | 22  |
| 实验四 用电位差计测量电动势（或电压） ..... | 26  |
| 实验五 透镜曲率半径的测量 .....       | 31  |
| 实验六 激光实验 .....            | 34  |
| 实验七 利用气轨测量滑块的速度和加速度 ..... | 40  |
| 实验八 动量守恒定律和简谐振动的研究 .....  | 44  |
| 实验九 转动惯量的测量 .....         | 50  |
| 实验十 分光仪的调整 .....          | 55  |
| 实验十一 分光仪的使用 .....         | 60  |
| 实验十二 用极限法测固体和液体的折射率 ..... | 65  |
| 实验十三 测定液体的旋光率和浓度 .....    | 68  |
| 实验十四 光的干涉实验 .....         | 70  |
| 实验十五 全息成像实验 .....         | 75  |
| 实验十六 霍尔效应法测定磁场 .....      | 80  |
| 实验十七 电子电量与荷质比测定 .....     | 84  |
| 实验十八 光电效应研究 .....         | 87  |
| 实验十九 夫兰克-赫兹实验 .....       | 91  |
| 实验二十 生物膜电位的研究 .....       | 95  |
| 实验二十一 人体参数测量与相关分析 .....   | 99  |
| 实验二十二 液体粘滞系数的测定 .....     | 105 |
| 实验二十三 变温度液体粘滞系数的测量 .....  | 109 |

---

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 实验二十四 | 医学数码摄影 .....           | 113 |
| 实验二十五 | 人的肢体电阻和皮肤电阻的测量 .....   | 118 |
| 实验二十六 | 热敏电阻温度计的制作 .....       | 121 |
| 实验二十七 | 利用压力传感器测定人体血压 .....    | 124 |
| 实验二十八 | 人耳听阈曲线的测定 .....        | 128 |
| 附录    | PASCO 物理实验教学系统介绍 ..... | 132 |
| 参考文献  | .....                  | 134 |

# 绪 论

## 一、物理实验课程的任务和程序

大学物理实验是对高等院校学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修通识基础实验课程，是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端，是培养和提高学生科学实验素质，重点突出实验设计思想、方法培养和实验创新意识训练的重要基础。

### （一）物理实验课程的任务

大学物理实验的具体任务是：

（1）通过对物理实验现象的观测、分析和对物理量的测量，学习物理实验思想、原理及方法，加深对物理实验设计创新思维的理解。

（2）培养与提高学生科学实验基本素质，其中包括：

1）能够通过阅读实验教材或资料（含网上资源），基本掌握实验原理及方法，为进行实验做准备。

2）能够借助实验材料和仪器说明书，在老师指导下，正确使用常用仪器及辅助设备，完成各分层次的实验内容，尤其是对实验设计思想和实验方法的理解。

3）能够融合实验原理、思想、方法及相关的物理理论知识，对实验现象能进行初步的分析判断，逐步学会提出问题、分析问题和解决问题的方法。

4）能够正确记录和处理实验数据、绘制曲线，分析实验结果，撰写合格的实验报告。

### （二）物理实验课程的程序

要完成上述任务，必须做好三个环节：预习、实验操作和写实验报告。

#### 1. 实验前的预习

为了在规定时间内高质量地完成实验任务，达到预期的目的，学生在上实验课前必须做好预习，包括仔细阅读实验教材，了解本实验的原理、方法和步骤，并基本了解测量仪器的使用方法，要明确哪些物理量是间接测量值，哪些是直接测量值，用什么方法和测量仪器来测量等，并在实验报告纸上写出预习记录（包括做实验时需要的记录表格）。

#### 2. 实验操作

遵守实验室规则。在操作前，先检查一下本实验所需的仪器用具是否齐备

完好。在实验室遵守操作规程,小心使用仪器;在做电学实验时,更应先连接好电路,经教员检查无误后,方可接通电源。测量的原始数据应整齐地记录在实验笔记本上,数据的有效位数应由仪器的精度或分度值加以确定,一般而言,直接测量的数据要估计到仪器最小分度的十分之一,并写单位。多人同做一个实验时,既要分工又要协作,以便共同完成实验。要爱护仪器,不得任意拆散和玩弄仪器,损坏仪器要立即报告,并检查原因,填好仪器使用登记表,如属人为损坏,视情节轻重决定赔偿责任。

### 3. 写实验报告

实验报告是实验工作的总结。测量出结果之后要尽快对数据进行整理运算,如发现问题,作出必要的补充测量,待教员检查签名后,方可离开实验室。

实验报告要力求简单明了、字迹清楚、文理通顺、图表准确、结果正确、讨论认真,逐步培养分析、总结问题的能力。报告中的原理图、电路图可以随手画出,而不一定使用规尺,但对实验结果的图解表示则必须仔细认真,力求准确,并利用规尺或曲线板画在坐标纸上。

实验报告内容一般应包括:

#### (1) 预习记录

##### 1) 实验题目。

##### 2) 实验目的。

##### 3) 实验器材:包括主要仪器名称、型号及精度(分度值),主要材料。

##### 4) 实验原理和公式:用自己的语言简要地叙述,并列出主要公式、电路或光路图。

##### 5) 实验步骤:应扼要说明,一目了然。

#### (2) 实验记录与结果

1) 实验记录及数据处理:测量的原始数据应以表格形式列出,并正确地表示出有效数字和单位。数据的处理要根据要求计算出最后的测量结果,或采用列表和作图法。

2) 实验结果及讨论:表达实验结果时,一般包括不可分割的三部分,即结果的测量值  $N$ , 绝对误差  $\Delta N$  和相对误差(百分误差)  $E$ , 综合起来可写为

$$N = \bar{N} \pm \Delta N \quad \text{单位:}$$

$$E = \frac{\Delta N}{N} \times 100\%$$

如果实验是观察某一物理现象或验证某一物理规律,则只需扼要地写出实验的结论。

最后讨论的内容应包括误差原因、现象分析、改进实验建议、心得体会、存在问题及回答实验思考题等。



## 二、数据处理的基本知识

### (一) 物理量的测量及测量误差

#### 1. 测量及分类

物理定律和定理反映了物理现象的规律性。这些定律、定理是由各种物理量的数值关系表达的, 要研究物理定律和定理就必须对物理量进行正确测量。所谓测量就是将待测的物理量与选定的同类单位量相比较。测量是人类认识世界和改造世界的基本手段。通过测量, 人们对客观事物可以获得定量的概念, 总结出它们的规律性, 从而建立起定律和定理。

测量分为直接测量与间接测量两种类型, 直接测量是用仪器直接将待测量与选定的同类单位量进行比较, 即直接在仪器上读出待测量的数值。例如, 用米尺测量物体的长度, 用秒表测量时间, 用温度计测量温度等。间接测量是由几个直接测量出的物理量, 通过已知的公式、定律进行计算从而求出待测量, 例如直接测量出摆长  $l$  及其振动周期  $T$  的值, 可借助公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  求出重力加速度  $g$ , 大多数物理量都是通过间接测量得到的。

#### 2. 测量的误差及分类

物理量在客观上存在着绝对准确的数值, 称为真值。实际测量得到的结果称为测量值。由于测量仪器、实验条件以及观察者的感官和环境的限制等诸多因素的影响, 测量不可能无限精确, 因此测量值只是近似值。测量值与客观存在的真值之间总有一定的差异, 这就是测量的误差。误差存在于一切测量之中, 存在于测量过程的始终。讨论误差的来源, 消除或减少测量的误差, 是提高测量的准确程度、使测量结果更为可信的关键。

测量误差按其产生的原因和性质可分为系统误差和偶然误差两类。

系统误差: 这种误差是由于仪器本身的缺陷 (如刻度不均匀, 零点不准等)、公式和定律本身不够严密、实验者自身的不良习惯等原因而产生的。系统误差可以通过校正仪器、改进测量方法、修正公式和定律、改善实验条件和纠正不良习惯等办法加以消除或减小。

偶然误差: 这种误差是由许多不稳定的偶然因素引起的。例如, 测量环境的温度、湿度和气压的起伏, 电源电压的波动, 电磁场的干扰, 不规则的机械振动, 以及测量者感觉器官的限制等偶然因素产生的误差。由于偶然误差的存在, 使得每次的测量值具有偶然性, 即每一次测量时产生的误差大小和正负是不确定的, 是一种无规则的涨落, 看不出它们的规律性。对于同一待测量, 在相同条件下进行多次测量, 当测量的次数足够多时, 则正负误差出现的机会或概率是相等的, 或者说在测量的次数足够多的情况下, 偶然误差服从一定的统

计规律,测量的结果总是在真值附近涨落。由于这种误差的偶然性,因此它是不可消除的,但是增加重复测量的次数可以减少测量的偶然误差。

这里要指出的是,误差和错误是两个完全不同的概念,错误是实验者对仪器使用不正确,或者实验方法不合理,或者违犯操作规程,或者粗心大意读错数据、运算不准等。误差可以设法减少,但是错误必须避免。

## (二) 仪器的精密度和有效数字

### 1. 仪器的精密度

仪器的精密度(又称精度)是指在正确使用测量仪器时所能测得的最小的准确值,它一般由仪器的分度(仪器所标示的最小分划单位)决定,例如,用毫米分度尺测量物体的长度,其精密度就是1mm。

### 2. 有效数字

由于仪器精密度和误差的限制,测得的任何一个物理量的数值的位数只能是有限的,例如,用毫米分度尺测量物体的长度,量得其长在45mm与46mm之间,经估计后读为45.5mm,其中前两位是准确测出的,是可靠数字;最后一位即十分位是估计的,显然是可疑数字,也就是说在十分位上出现了误差。尽管十分位上有误差存在,但它在一定程度上还是反映了客观实际,因此是有效的。由于十分位上已出现了误差,所以再往下写去,如45.56...mm就不再具有意义,一般的可疑数字只估计一位,即估计出仪器分度值以下的一位数字,我们将测量结果中可靠的几位数字加上一位可疑数字统称为有效数字。例如, $L = 564.4\text{cm}$ 是4位有效数字, $\rho = 2.35\text{g/cm}^3$ 是3位有效数字。用有效数字记录测量值,不但反映了测量值的大小,而且反映了测量的准确程度。对同一事物的测量,仪器的精密度越高,测量值的有效数字的位数就越多。一个物理量的数值与数学上的数值有着不同的意义。数学上 $1.47 = 1.470 = 1.4700\cdots$ ;而物理上 $1.47 \neq 1.470 \neq 1.4700\cdots$ ,因为它们是用不同精密度的仪器得出的测量值,所以物理量测量值的有效数字的位数不能随便增减,少记会损害测量的准确程度,带来不必要的附加误差,多记则夸大了准确性,使人产生错误印象。

关于有效数字还应注意以下几点:

(1) 数字当中的“0”与数字后面的“0”都是有效数字 有效数字的位数与小数点无关,数字当中的“0”和数字后面的“0”均记入有效数字,而数字前面的“0”不是有效数字,如0.026010是5位有效数字,20.0401是6位有效数字。

(2) 有效数字的位数与单位换算无关 进行单位换算不能改变有效数字的位数。如, $2\text{km} \neq 2000\text{m}$ ,否则改变了测量的准确程度。前者是1位有效数字,而后者是4位有效数字。正确的写法应是 $2\text{km} = 2 \times 10^3\text{m}$ ,其中 $10^3$ 不计为有效数字,只用于定位表明单位。

(3) 有效数字的四舍五入 有效数字通常采用四舍五入。如, 取 1.526 为 3 位有效数字, 应写作 1.53, 取 2 位有效数字, 应记为 1.5。还有一种经常采用的方法, 即“尾数小于五则舍, 大于五则入, 等于五则把尾数凑成偶数”的法则, 又称四舍六入, 如, 1.615 取 3 位有效数字为 1.62; 14.205 取 4 位有效数字为 14.20; 3.035 取 3 位有效数字为 3.04; 0.76 取 1 位有效数字为 0.8。本书采用四舍五入法。

(4) 常数 (如  $\pi$ 、 $e$ 、 $\sqrt{5}$ 、 $\frac{1}{3}$  等) 的有效数字 常数的有效数字为无限位, 可根据具体问题适当选取, 一般比测量值至少要多保留一位。

### 3. 有效数字的运算法则

实验结果往往需要通过对直接测量的物理量进行计算才能得到。一般参加运算的各量数值的大小及有效数字的位数不同, 经常会遇到中间数的取位问题。因此, 根据有效数字中可疑数字只许保留一位以及尽量使计算简洁的原则, 规定以下有效数字的运算法则:

(1) 加减法 诸数相加减时, 所得结果的有效数字应以保留诸数中最高可疑的位数为标准 (以下按四舍五入), 例如

$$58.62 + 0.234 + 586.0 = 644.9$$

$$3.25 - 0.0187 = 3.23$$

(2) 乘除法 诸数相乘除时, 所得结果的有效数字的位数应以诸数中有效数字位数最少的作为保留标准 (以下四舍五入)。例如

$$4.236 \times 1.2 = 5.1$$

$$6.421 \div 0.825 = 7.78$$

(3) 乘方与开方 有效数字进行乘方或开方运算时, 所得结果的有效数字的位数与底数的位数相同。例如

$$\sqrt{14.6} = 3.82$$

$$5.25^2 = 27.6$$

(4) 三角函数 三角函数的有效数字的位数与角度的位数相同。例如

$$\cos 32.7^\circ = 0.842$$

(5) 对数 对数的有效数字的位数与真数的位数相同。例如

$$\lg 19.28 = 1.285$$

### (三) 直接测量误差的计算

由于测量误差的存在, 所以在直接测量中不可能确切地测出物理量的真值。为了测量得准确, 往往需要进行反复多次的测量, 各次测得的结果不同, 那么什么量最接近真值, 测量的准确程度怎么样。这些都是我们要讨论的问题。

#### 1. 算术平均值

偶然误差虽然具有偶然性,但是在测量的次数足够多时,其整体服从一定的统计规律,这是前面已经讨论过的,具体地说,就是:

(1) 各次测量之间没有直接关系,互相独立。

(2) 各次测量的结果都落在真值附近,与真值偏离较大的机会很少。

(3) 由于误差的偶然性,测量结果比真值大的机会与比真值小的机会相等。当测量的次数足够多时,所得测量结果比真值大的和比真值小的数目相同。

设某物理量的真值为  $n$ , 对其进行了  $k$  次测量。各次的测量结果分别为  $N_1, N_2, \dots, N_k$ , 则各次测量值与真值之间的差分别为

$$\Delta n_1 = N_1 - n, \Delta n_2 = N_2 - n, \dots, \Delta n_k = N_k - n$$

(它们可能为正,也可能为负)

根据偶然误差的规律性,当测量次数足够多时,某次测量的结果比真值大了多少,会在另外一次测量中得到比真值小多少的测量结果,因此,当测量次数无限增多时,各次测量的结果与真值的差数可以成对互相抵消,即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\Delta n_1 + \Delta n_2 + \dots + \Delta n_k) = 0 \quad (0-1)$$

或

$$\lim_{k \rightarrow \infty} [(N_1 - n) + (N_2 - n) + \dots + (N_k - n)] = 0$$

可得

$$n = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_k}{k} \quad (0-2)$$

式 (0-2) 表明无限多次测量结果的算术平均值就是该量的真值。

实际上,任何物理量的直接测量都只能进行有限次。在  $k$  为有限次的情况下,式 (0-1) 不再为零,而是等于一个很小的数。所以算术平均值最接近真值,称为近真值或最佳值。我们常将算术平均值作为测量结果,用  $\bar{N}$  表示

$$\bar{N} = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_k}{k} \quad (0-3)$$

## 2. 绝对误差与相对误差

将算术平均值  $\bar{N}$  可作为测量结果,则算术平均值  $\bar{N}$  与各次测量值  $N_1, N_2, \dots, N_k$  之差的绝对值为

$$\Delta N_1 = |\bar{N} - N_1|, \Delta N_2 = |\bar{N} - N_2|, \dots, \Delta N_k = |\bar{N} - N_k|$$

称为各次测量的绝对误差。它近似地表示出各次测量值与真值间最大可能的偏离范围。

各次测量的绝对误差的算术平均值称为平均绝对误差,用  $\Delta N$  表示

$$\Delta N = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_k}{k} \quad (0-4)$$

$\Delta N$  越小,表示算术平均值与各次测量值之间差得越小,说明测量值在真值

附近散布的范围小。 $\Delta N$  越大, 说明这一散布范围大。因此,  $\Delta N$  近似地表示了测量结果与真值间最大可能的偏离范围, 可将  $\Delta N$  作为测量结果的绝对误差, 它表示了测量结果的准确程度。则最后的测量结果应表示为

$$n = \bar{N} \pm \Delta N \quad (0-5)$$

这里要说明的是, 式 (0-5) 的形式表示真值  $n$  在算术平均值  $\bar{N}$  的附近正、负  $\Delta N$  这一范围内, 但并不排除某次测量值在此范围之外的可能性。

一般的, 绝对误差可以大致表明测量结果的准确程度, 但不能确切反映测量质量的好坏。例如, 测量 1m 长的物体误差为 1mm, 测量 1mm 长的物体误差为 0.1mm。两者比较, 显然前者测量质量优于后者, 但是前者的绝对误差却大于后者。所以不能单从绝对误差的大小来说明测量质量的优劣, 需要采用其他方法来表示测量结果的准确程度, 为此引入相对误差的概念。

将各次测量的绝对误差与各次测量值之比

$$\frac{\Delta N_1}{N_1}, \frac{\Delta N_2}{N_2}, \dots, \frac{\Delta N_k}{N_k}$$

称为各次测量的相对误差, 平均绝对误差与算术平均值的比称为平均相对误差, 用  $E$  表示, 即

$$E = \frac{\Delta N}{\bar{N}} \times 100\% \quad (0-6)$$

相对误差常以百分数表示。有了相对误差之后, 测量结果也可写作

$$n = \bar{N}(1 \pm E) \quad (0-7)$$

#### (四) 间接测量的绝对误差与相对误差

大多数情况下, 实验结果都是通过间接测量得到的, 也就是说先对诸多量进行直接测量, 然后根据一定的公式进行数学运算得到间接测量的结果。直接测得的量都含有误差, 因此间接测量的结果也必然有误差。所以, 有必要研究各直接测得量的误差对结果的影响, 并根据直接测得量的误差求得间接测量结果的绝对误差和相对误差。

为方便起见, 只讨论由两个直接测量的量得出的间接测量结果的误差。设  $A$ 、 $B$  为两个直接测得量,  $N$  为间接测得量。它们之间的函数关系为

$$N = f(A, B)$$

各直接测得量为  $A = \bar{A} \pm \Delta A$ ,  $B = \bar{B} \pm \Delta B$

间接测得量的结果表示为  $N = \bar{N} \pm \Delta N = \bar{N} (1 \pm E)$

式中,  $\bar{N} = f(\bar{A}, \bar{B})$  是间接测得量的算术平均值, 是将各直接测得量的平均值代入公式后计算得出的;  $\Delta N$  是间接测得量的平均绝对误差, 其平均相对误差也为

$E = \frac{\Delta N}{\bar{N}} \times 100\%$  的形式。

下面根据  $N$  与  $A$ 、 $B$  的不同函数关系，来讨论间接测得量的  $\Delta N$  与  $E$ 。

若间接测得量是两个直接测得量的和或差 ( $N = A \pm B$ )，将  $A = \bar{A} \pm \Delta A$ ， $B = \bar{B} \pm \Delta B$  代入  $N = A \pm B$ ，得

$$N = \bar{N} \pm \Delta N = (\bar{A} \pm \Delta A) \pm (\bar{B} \pm \Delta B)$$

显然有

$$\bar{N} = \bar{A} \pm \bar{B} \quad (0-8)$$

$$\Delta N = \Delta A + \Delta B \quad (0-9)$$

取  $\Delta N = \Delta A + \Delta B$  是考虑到测量的准确性最差的情况，是最大可能偏差。因此，间接测得量  $N$  的绝对误差等于直接测得量  $A$  与  $B$  的平均绝对误差之和。

间接测得量  $N$  的相对误差由下式表示：

当  $N = A + B$ ，则

$$E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A + B} \quad (0-10)$$

当  $N = A - B$ ，则

$$E = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A + \Delta B}{A - B} \quad (0-11)$$

表 0-1 为几种常用函数关系的误差公式。

表 0-1 几种常用函数关系的误差公式

| 函数关系 $N = f(A, B, \dots, C)$ | 绝对误差 $\Delta N$                            | 相对误差 $E$                                  |
|------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $N = A + B$                  | $\Delta A + \Delta B$                      | $\frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}$       |
| $N = A - B$                  | $\Delta A + \Delta B$                      | $\frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$       |
| $N = AB$                     | $A\Delta B + B\Delta A$                    | $\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$ |
| $N = \frac{A}{B}$            | $\frac{A\Delta B + B\Delta A}{B^2}$        | $\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$ |
| $N = KA^R$                   | $KR \frac{\Delta A}{A} A^R$                | $R \frac{\Delta A}{A}$                    |
| $N = R\sqrt{A}$              | $\frac{1}{R} \frac{\Delta A}{A} R\sqrt{A}$ | $\frac{1}{R} \frac{\Delta A}{A}$          |
| $N = \ln A$                  | $\frac{\Delta A}{A}$                       | $\frac{\Delta A}{A \ln A}$                |
| $N = \sin A$                 | $ \cos A  \Delta A$                        | $ \cot A  \Delta A$                       |
| $N = \cos A$                 | $ \sin A  \Delta A$                        | $ \tan A  \Delta A$                       |
| $N = \tan A$                 | $\frac{\Delta A}{\cos^2 A}$                | $\frac{2\Delta A}{ \cos^2 A }$            |
| $N = \cot A$                 | $\frac{\Delta A}{\sin^2 A}$                | $\frac{2\Delta A}{ \sin^2 A }$            |

## (五) 实验数据的列表与图示

### 1. 列表

处理数据时常要列表记录。数据列表能够简单明了地表示出有关物理量之间的对应关系,便于检查测量结果是否合理,有助于分析物理量之间的规律性。

列表要简单明了,便于看清楚有关物理量间的对应关系;表中各符号代表的物理意义要交代清楚并标明单位,单位应写在标题栏内,一般不要重复地记在表内各个数字上;表中的数据要正确反映出测量结果的有效数字,以表明测量的准确程度;表中不能说明的问题,可在表下附加说明。

### 2. 图示法处理实验数据

实验数据进行处理时也常采用作图的方法。这种方法,可以把测量结果直观地表示出来。作图法是研究物理量之间的规律,找出对应的函数关系,以及求经验公式的最常用的方法之一。通过作图,有助于方便地求出所需要的某些实验结果。比如,对直线  $y = ax + b$ ,由图上的斜率可求出  $a$ ,由截距可求出  $b$ 。作图还易于发现实验中的测量错误,由于图线是依据许多数据点描出的平滑曲线,因此对测量的数据有修正作用,具有多次测量取平均值的意义。此外,在图线上能够直接读出没有进行测量的点,而且在一定条件下,可以从图线的延伸部分读到测量范围以外的点。因此,作图法处理数据具有许多优点。

### 3. 作图规则

(1) 将测量的数据按一定的规律列成相应的表格。

(2) 决定了作图的参量后,根据情况选用合适的坐标纸,如直角坐标纸、对数坐标纸等。

(3) 确定坐标纸的大小及坐标轴的比例。图纸的大小应根据测量数据的有效数字来选择,使测量数据中的可靠数字在图上也是可靠的,即图中的一个小格对应数据中可靠数字的最后一位,数据中的一位可疑数字在图中应是估计的。坐标轴相对比例的选择不必强求一致,以图线不沿某一坐标轴延伸或缩在图上一角为原则,使整个图线比较匀称地充满整个图纸。横轴与纵轴的比例可以不同,坐标轴的起点也不一定非取零值。

(4) 图纸与坐标轴的比例选定后,要标出坐标轴的方向,标明其代表的物理量或符号以及单位,在坐标轴上每隔一定间距标出该物理量的数值。在图纸上适当位置写明图的名称及必要的说明。

(5) 标点与连线。根据测量的数据,用“ $\times$ ”或“ $\cdot$ ”等符号在图上标出各点的坐标。符号要用尺和尖笔清晰而准确地标出,符号的中心对应实验点的准确位置,同一图纸上不同的曲线应使用不同的符号。即使图纸画好后,符号也不应擦去,以便复核及保留数据的记录。各点标出后,应用直尺或曲线尺把各点连成光滑的曲线。由于误差的影响,曲线不一定通过所有的点,只是要求曲

线两边的偏差点有比较均匀的分布,个别偏离较大的点应舍去或重新测量。图线不宜画得过粗,以致看不清标出的点,更不能为使每个标出的点都在图线上而把它们连成折线。

(6) 曲线的直线化。对于较复杂的函数关系,由于它们是非线性的,所以图形都是曲线。不仅由曲线上求值不方便,而且难以从图中判断结果是否正确。因此,常选用不同的变量来代替原来的变量(称为变量置换法),将曲线改直,例如,对  $xy = k$  可以将  $x-y$  曲线改为以  $y$  和  $\frac{1}{x}$  为轴的  $y-\frac{1}{x}$  图线,则曲线变为直线。

总之,作图法有许多优点,但作图求得的值准确性不太高,有效数字位数不能太多是它的主要缺点。

#### (六) 逐差法处理数据

逐差法的直观意义是利用代数平均值代替实测值,减少了散点个数。由于偏差有抵偿性,因而降低了相对误差,提高了拟合精度,是一种比较常用的方法。

当直接测量是等间距多次测量时,例如,在测量弹簧倔强系数实验中,在弹性限度内,先测出弹簧的自然长度  $N_0$ ,然后依次在弹簧下端的小钩上加  $2g$ ,  $4g$ ,  $\dots$ ,  $14g$  的砝码,弹簧长度依次为  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $\dots$ ,  $N_7$ 。对应于每增加  $2g$  砝码弹簧相应的伸长为

$$\Delta N_1 = N_1 - N_0, \Delta N_2 = N_2 - N_1, \dots, \Delta N_7 = N_7 - N_6$$

其平均伸长为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{N} &= \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots + \Delta N_7}{7} \\ &= \frac{(N_1 - N_0) + (N_2 - N_1) + (N_3 - N_2) + \dots + (N_7 - N_6)}{7} \\ &= \frac{N_7 - N_0}{7} \end{aligned}$$

从上述结果可知,中间测量值全部抵消了,只有始末两次测量值起作用。

为了保持多次测量的优点,只要在处理数据方法上稍作变化,仍能达到利用多次测量来减少随机误差的目的。通常把这些测量值分成两组,一组为  $(N_0 - N_3)$ ,另一组为  $(N_4 - N_7)$ 。取对应项的差值(称为逐差)

$$\Delta N_1 = N_4 - N_0, \Delta N_2 = N_5 - N_1, \Delta N_3 = N_6 - N_2, \Delta N_4 = N_7 - N_3$$

$\Delta N$  再取平均值,中间测量值全部不能抵消,这就是利用逐差法计算的  $\Delta \bar{N}$  每增加  $8g$  时弹簧的伸长量。

#### (七) 用最小二乘法进行曲线拟合



在物理实验中把测量的结果作成图，可以表示物理规律，若能用数学语言来总结物理模型，那更有实际意义。从实验数据求得经验方程称为方程的回归问题，又称为曲线拟合。但拟合前必须根据理论推断或从测量数据变化趋势推测出函数形式。如果是线性关系，则可以表示为

$$y = a + b \cdot x \quad (a、b \text{ 为常数})$$

若是指数关系，则可以表示为

$$y = Ae^{Bx} + C \quad (A、B、C \text{ 为常数})$$

由一组实验数据找出一条最佳的拟合直线（或曲线），常用的方法是最小二乘法。本书只讨论用最小二乘法进行一元线性回归问题。

最小二乘法是一种常用的数学方法，用此法拟合同一组实验数据时，不论处理的是什么，只要处理过程正确无误，结果都会是相同，这是一种更为客观，结果更为准确的方法。

最小二乘法的应用条件是：

- (1) 各测量数据误差服从正态分布。
- (2) 测量数据误差分布近似服从正态分布；或虽为其他分布，但数据点的测量误差都很小。

最小二乘法的基本原理如下：

在满足上述条件的情况下，在最佳拟合直线上，各相应点的值与测量值之差的平方和为最小。

假设所研究的变量有两个，即  $x$  和  $y$ ，且它们之间存在着线性相关关系是一元线性方程

$$y = a + bx$$

实验测得的一组数据是

$$x: x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

$$y: y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$$

需要解决的问题是，根据所测得的数据，如何确定上式中的常数  $a$  和  $b$ 。实际上，相当于用作图法求直线的斜率和截距。

通过数学运算，得直线的截距  $a$  和斜率  $b$  为

$$b = \frac{\overline{x \cdot y} - \overline{x} \overline{y}}{\overline{x^2} - \overline{x}^2}$$

$$a = \overline{y} - b\overline{x}$$

在实际问题中，当变量间不是直线关系时，可以通过适当的变量变换，使不少曲线问题能够化成线性相关问题。需要注意的是，经过变换最小二乘法限定条件不一定满足，会产生一些新的问题，遇到这类情况应采取更恰当的曲线拟合方法。