



# 大学物理实验教程

主 编:黄瑞强 邹文强  
副主编:刘维清 罗 飞  
参 编:刘 云 刘志勇 刘燕勇  
夏英英 刘超飞



江西高校出版社

# 大学物理实验教程

主 编:黄瑞强 邹文强  
副主编:刘维清 罗 飞  
参 编:刘 云 刘志勇 刘燕勇  
夏英英 刘超飞

江西高校出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/黄瑞强等主编. —南昌: 江西高校出版社, 2010. 11

ISBN 978 - 7 - 5493 - 0109 - 6

I. ①大... II. ①黄... III. ①物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①O4 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 213155 号

出版发行	江西高校出版社
社址	江西省南昌市洪都北大道 96 号
邮政编码	330046
总编室电话	(0791) 8504319
销售电话	(0791) 8513417
网址	www.juacp.com
印刷	南昌市光华印刷有限责任公司
照排	江西太元科技有限公司照排部
经销	各地新华书店
开本	787mm × 1092mm 1/16
印张	17.5
字数	360 千字
版次	2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
印数	1 ~ 3100 册
书号	ISBN 978 - 7 - 5493 - 0109 - 6
定价	30.00 元

赣版权登字 - 07 - 2010 - 249

版权所有 侵权必究

## 学生实验守则

1. 学生必须在规定时间内按实验室安排的循环表中所规定的房间、组次及实验项目进行实验,不得无故缺席或迟到,实验时间若需要变动,须按学院教务处有关规定办理。

2. 实验前学生对实验内容必须进行预习,明确实验目的、原理、步骤、操作方法和注意事项,写好预习报告,设计记录表格,经教师检查后,方可进行实验。

3. 实验开始前根据讲义所列仪器进行核对,如有缺损,应及时向教师报告。不准擅自挪用别组的仪器。实验过程中,若遇仪器发生故障,须立即向教师报告。

4. 实验前细心观察仪器构造,操作时应谨慎细心,严格遵守操作规程及注意事项,尤其是电学实验,线路接好后要仔细检查,经教师许可后方可接通电源,以免发生意外。

5. 在实验进行中,学生必须严肃认真、一丝不苟地做实验,仔细观察,认真分析实验现象,总结实验规律,培养分析问题和解决问题的能力。

6. 在实验过程中,必须爱护仪器、设备,注意节约实验材料,培养爱护国家财产的优良品德。

7. 在实验中要培养实事求是的科学态度,独立完成实验,决不允许假造、拼凑和抄袭数据。

8. 注意保持实验室整洁、肃静,严禁在室内吸烟和随地吐痰,实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐,并轮流打扫实验室。

9. 实验完毕将实验记录交教师审阅签字,此记录连同实验报告在下次上实验课时交给教师批改。

10. 仪器损坏时应及时向教师报告,说明损坏原因,并写出书面说明,根据学院规定办法赔偿。

11. 凡因病、因事不能参加实验者,应事先请假,病假要有医生证明,事假要持学院证明交任课教师备案。

12. 学生实验必需佩带校徽,严禁穿拖鞋、背心进实验室。

## 前 言

本书根据教育部对非物理类理工科物理实验课程教学的基本要求,结合我校的专业特点以及实验室仪器设备具体情况,在不断探索教学改革与总结教学经验的基础上编写而成。

物理学是整个自然科学的支柱,是人类文明、现代科技和工业的根基。实验作为物理学的基础,它反映了理工科实验的共性和普遍性的问题,在人才科学素质培养中起着不可替代的重要作用。20世纪中叶以来,以计算机信息科学技术、生命科学、空间科学、材料科学等为代表的科学技术革命,极大地推动了科学技术的发展。各学科之间的相互交叉和渗透,新的综合化趋势已成为科学发展的主流。为适应时代的发展,物理实验课程体系在教学内容、教学方法和教学手段上应向开放型和创新型转变。大学物理实验作为大学生进校后的第一门科学实验课程,在让学生掌握科学实验的基本知识、方法和技巧的同时,更重要的是培养学生严谨的科学思维、创新精神,提高理论联系实际、分析和解决问题的能力。

本书要求学生了解测量误差的基本知识和理论,掌握正确处理实验数据的基本技巧。包括:1. 测量与误差的基本概念,初步学会区分误差性质,了解随机误差的统计意义;2. 掌握直接测量结果误差表示和间接测量的误差计算;3. 明确有效数字的概念,掌握有效数字的运算法则,正确用有效数字记录实验数据;4. 掌握处理实验数据的一些重要方法,如列表法、作图法、逐差法及一元线性函数的最小二乘法等。

通过物理实验的基本训练,要求学生做到:1. 能够自行完成预习、进行实验和撰写实验报告;2. 了解并掌握物理实验中基本的实验方法和测量手段;3. 掌握常用实验装置的基本操作技术,并熟练测量一些常用的物理量。如:力、长度、质量、时间、温度、速度、介电常数、电流、电压、电动势、电阻、磁感应强度、光波波长、折射率等。

在进行上述各项基本训练的过程中,要重视对物理现象的观察和分析,引导学生运用已掌握的物理理论知识,借助现有仪器设备自行设计实验方案,完成实验任务。同时鼓励学生在实验中运用计算机知识,拓展实验手段。

本书由黄瑞强、邹文强主编,刘维清、罗飞副主编。具体分工为:第一部分实验8、9、14、15、19、23及第二部分实验7、绪论及附录由黄瑞强编写;第一部分实验7、10、11、13、18及第二部分实验4、实验5由邹文强编写;第一部分实验27及第二部分实验1、实验2、实验3、实验6由刘维清编写;第一部分实验6、20、24、25、26由罗飞编写;第一部分实验12、21由刘云编写;第一部分实验4、5由刘志勇编写;第一部分实验2、22由夏英英编写;第一部分实验16、17由刘燕勇编写;第一部分实验1、3由刘超飞编写。全书由黄瑞强统稿。

本书的编写凝聚着江西理工大学物理教研室及实验室全体教师与技术人员长期辛勤劳动成果,并参考了许多兄弟院校的同类教材,在此一并表示感谢。

由于编者的认识水平有限,时间较仓促,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2010年10月

# 目 录

## 绪论

### 0 测量误差与数据处理

#### 第一部分

- 实验 1 杨氏弹性模量的测定
- 实验 2 气轨上守恒定律的研究
- 实验 3 固体热膨胀系数的测定
- 实验 4 用扭摆法测定物体的转动惯量
- 实验 5 单双臂两用直流电桥测电阻
- 实验 6 用直流电位差计测热电偶温差电动势
- 实验 7 电子束实验
- 实验 8 示波器的调节及应用
- 实验 9 气体中声速的测定
- 实验 10 冲击电流计测定铁磁介质的磁滞回线
- 实验 11 整流滤波电路的设计
- 实验 12 应变式传感器
- 实验 13 电容式传感器的位移特性实验
- 实验 14 密立根油滴实验测电子电荷
- 实验 15 波尔共振实验
- 实验 16 干涉法测微小量
- 实验 17 分光计的调节与使用
- 实验 18 用透射光栅测定光波波长
- 实验 19 超声光栅测声速实验
- 实验 20 冷却法测量金属的比热容
- 实验 21 静电场的模拟
- 实验 22 气轨上简谐振动的研究
- 实验 23 电表的改装
- 实验 24 霍尔传感器
- 实验 25 光电效应——普朗克常数的测定
- 实验 26 夫兰克——赫兹实验
- 实验 27 偏振光的研究

## 第二部分

- 实验 1 电视信号的采集与处理
- 实验 2 信号的传送(流媒体网络传输)
- 实验 3 非线性混沌电路实验
- 实验 4 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线
- 实验 5 二阶电路的响应研究
- 实验 6 卫星电视信号的地面接收
- 实验 7 迈克尔逊干涉仪的调节和使用

## 附录

## 绪 论

### 1. 物理实验课的目的和任务

物理学从本质上说是一门实验科学,尽管物理学本身可以在一定限度内从理论上用逻辑推理的方法获得新理论,但最终还要靠实验提供的精确材料来验证。如果新理论与实验事实不一致,则无论理论体系本身在数学上多么严密,都不能不进行修正,甚至被否定。

事实也是如此,在物理学史上,许多关键问题的解决,最后都诉诸于实验。例如杨氏的光干涉实验对于证实光的波动说;迈克尔逊—莫雷实验对于证实“以太”不存在;赫兹实验对于证实麦克斯电磁场理论,等等,实验都起了决定性的作用,近代物理的例子就更多了。

对于从事科学的工作者来说,物理实验的知识和技能是必不可少的,物理学的原理、物理实验的方法以及物理测量仪器已被广泛地运用到几乎一切现代的科学、生产技术领域。

大学物理实验课是高等工科院校的一门独立开设的必修基础课程。它是物理理论为指导,以实践为基础,以实验操作为手段,以能力培养为主要目的的课程。它将使学生得到系统实验方法和实验技能的训练,了解科学实验的主要过程和基本方法,给今后的学习和工作奠定良好的基础。

大学物理实验课的具体任务是:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习物理实验知识,加深对物理学原理的理解。

(2) 培养与提高学生的科学实验能力,其中包括:

- ① 能够通过阅读实验教材或资料,做好实验前的准备;
- ② 能够借助教材或仪器说明书,正确使用常用仪器;
- ③ 能够运用物理学理论,对实验现象进行初步分析判断;
- ④ 能够正确记录和处理实验数据,绘制曲线,说明实验结果,撰写合格的实验报告;
- ⑤ 能够完成简单的具有设计性内容的实验。

(3) 培养与提高学生的科学实验素养。要求学生具有理论联系实际和实事求是的科学作风,严肃认真的工作态度,主动研究的探索精神,遵守纪律,团结协作和爱护公物的优良品质。

### 2. 物理实验课的基本程序

#### (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,充分发挥每位学生的主观能动性,一定要做好实验前的预习。

认真阅读实验教材,搞清实验内容、目的、要求,实验原理(包括主要计算公式)和注意事项,实验步骤和操作方法。

写好预习报告,也就是正式报告的前面部分,包括:实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容和步骤,注意事项以及原始数据记录表格,以便上课前教师检查。

为了使测量数据条理清楚,明确测量哪些物理量,要求预习时设计好原始数据记录表格。

### (2) 实验操作

进入实验室首先要了解实验规则及注意事项,其次就是熟悉仪器和安装调整仪器(例如天平调水平和平行光路调同轴等)。

准备就绪后,按实验内容及步骤开始测量,测量的原始数据(一定不要加工或修改)应用钢笔或圆珠笔如实地记录在原始数据表上。有效位数表示要正确,数据之间适当留有间隙,以便补充,如确是记录错误,应用单划线划掉,在旁边写上正确值,不允许涂改数据,更不允许抄袭他人数据,不要忘记记录有关实验环境条件、仪器的精度、规格及测量量的单位。原始数据的优劣,决定着实验的成败,读数时务必认真仔细。实验一人一组仪器,如需两人同做一组实验,要互相配合,分工协作,既不要其中一人处于被动,更不要一人包办代替。

不要用铅笔记记录,给自己留有涂抹的余地。切忌将数据记录在草稿纸上或书上,然后再抄写在记录表格内,这样容易出错,况且,这已不是原始记录了。要注意纠正自己的不良习惯,不断养成良好的科学作风。实验结束时,暂不要破坏测试条件,将记录的数据请教师审阅签字,如发现错误数据时,要重新进行测量。最后整理好仪器,经教师同意后才能离开实验室。

### (3) 实验报告

实验报告是实验工作的总结,要用简明的形式将实验工作完整而又准确地表达出来。实验报告要求文字通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确、讨论认真。应养成实验完成后尽早写出实验报告的习惯,因为这样做可以收到事半功倍的效果。

完整的实验报告应包括下面几部分内容:

① 实验名称。

② 实验目的。

③ 实验原理:简明扼要地说明实验原理,并列出现实验所要用的主要公式、电路图或光路图,若教材内容与实际有所不符,应采用实际的。

④ 实验仪器:列出主要仪器名称及其型号、规格、精度(或分度值)。

⑤ 实验步骤:按实验过程,扼要地说明实验的关键步骤和安全注意事项。

⑥ 实验数据记录:实验中全部有用的原始数据要尽量以表格的形式列出,并正确地表示出有效数字和单位。

⑦ 数据处理:根据要求计算出最后的测量结果,可采用列表法和作图法,在计算过程中,应写出相应的计算公式,然后代入相应数据进行运算。

⑧ 实验结果:最后的结果应包括测量值、误差和单位。如果实验是为了观察某一物理现象或者观察某一物理规律,可只扼要地写出实验结论。

⑨ 讨论与分析:回答实验思考题;描述实验中观察到的异常现象及可能的解释;分析实验误差的主要来源;对实验仪器和实验方法的建议等,还可以谈谈实验的心得体会。

以上是对报告的一般要求,不同实验可根据具体情况有所侧重和取舍,不必千篇一律。上述三部分为物理实验课的三个基本程序,也是物理实验课三个教学环节。

## 0 测量误差与数据处理

### 0.1 测量与误差

#### 0.1.1 测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量就是将被测的物理量与规定作为标准单位的同类物理量(或称为标准量)通过一定方法进行比较,其倍数即为被测物理量的测量值。

根据获得测量结果的方法不同,测量分为直接测量和间接测量。

由仪器或量具可以直接进行读数的,称为直接测量。例如:用米尺测量物体的长度,用天平测量物体质量,用电流表测量电路中的电流等都是直接测量。

在大多数情况下需要借助一些函数关系式用直接测量的结果计算出所要求的物理量,这样的测量称为间接测量。例如,测量钢球的密度时,我们首先要用游标卡尺或千分尺测量出它的直径  $D$ ,用天平称出它的质量  $M$ ,然后再通过函数关系式  $\rho = 6M/(\pi D^3)$  计算出钢球的密度来,我们把这种测量称为间接测量。

一个测量数据不同于一个数值,它是由数值和单位两部分组成的,一个数值有了单位,便具有了一定的物理意义,这时它才可以为一物理量。因此,在实验中测量所得的值(数据)应包括数值和单位。

#### 0.1.2 误差

任何物质都有自身的各种各样的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值称为这些物理量的真值。测量的目的就是要力求得到真值,但测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人进行的。在实验测量过程中,由于受到测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及种种因素的限制,使测量结果与客观存在的真值不可能完全相同,我们所测得的只能是某些物理量的近似值,也就是说,任何一种测量结果的测量值与客观存在的真值之间总会或多或少地存在一定的差值。这种差值称为测量值的测量误差,或称测量值的绝对误差,简称误差,即

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

测量误差也可用相对误差来表示,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{误差}}{\text{真值}} \times 100\%$$

如果用  $x_0$  表示真值, $x$  表示测量值,则绝对误差  $\Delta x$ (或  $\Delta$ ) 可表示为

$$\Delta x = |x - x_0| \quad (0-1)$$

绝对误差可以比较不同仪器测量同一物理量的准确度的高低。

相对误差  $E$  可表示为

$$E = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\%$$

相对误差可以比较不同被测物理量的测量的准确度的高低。

绝对误差与相对误差之间的关系是

$$\Delta x = x_0 \cdot E$$

被测量的真值是一个理想概念,一般说来真值是不知道的,在实际测量中常用被测量的实际值或算术平均值代替真值,称为约定真值。测量的结果记为

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad (0-2)$$

它表示真值是在至区间内,越小,测量值与真值越接近,测量的准确度也就越高。没有单位的物理量是没有意义的,测量结果包括测量值、误差和单位,三者缺一不可。

### 0.1.3 偏差

由于真值不知道,所以测量的绝对误差在大多数情况下是不知道的,研究分析误差都是从偏差着手。

设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为某量  $x$  的  $n$  次重复测量值,  $\bar{x}$  为该测量列的算术平均值,则称各个测量值和  $\bar{x}$  之间的差值为偏差。即

$$\text{偏差} = \text{测量值} - \text{算术平均值}$$

$$\text{记为} \quad v_i = x_i - \bar{x} \quad (0-3)$$

$$\text{其中} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (0-4)$$

由后面的进一步讨论可知,该测量列算术平均值的标准差(简称标准差)为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n(n-1)}} \quad (0-5)$$

测量结果一般可表示为

$$x = \bar{x} \pm \sigma_x \quad (\text{单位}) \quad (0-6)$$

它表示真值出现至区间内的概率为 68.3%。

在大学物理实验中,我们要求用标准差来估算实验误差。

### 0.1.4 误差的分类

误差按其来源和性质可分为两大类:系统误差和随机误差。

(1) 系统误差的特点是它的确定规律性。系统误差在一定的实验条件下(方法、仪器、环境和观测人都不变)多次测量同一量时,误差的大小和正负号保持不变,或按一定规律变化,或是有规律重复的误差,称为系统误差,它主要来自以下几个方面:

理论(方法)误差:这是由于测量依据的理论公式本身的近似性;实验条件或测量方法

不能达到理论公式所规定的要求等而引起的误差。例如：用伏安法测电阻，采用不同的联接方法，电表内阻的影响等所带来的误差。

**仪器误差：**这是由于测量仪器本身固有缺陷或没有按规定使用而引起的。例如，用未经校准零位的千分尺测量零件的长度，用不十分精确的天平称物体的质量等引起的误差。

**环境误差：**由于环境条件变化所引起的误差。例如温度、气压、湿度的变化等。

**个人误差：**这是由于测量者本身的生理和心理特点，或因个人习惯所带来的误差。例如测量者反应速度的快慢、分辨能力的高低、读数习惯和精神状态等原因造成的误差。

总之，系统误差是在一定实验条件下由一些确定的因素引起的，它使测量结果总是偏向一边，即偏大或偏小。因此，试图在相同的条件下用增加测量次数来减少或消除它是行不通的，只有找到某个系统误差产生的原因，才能采取一定的方法减少或消除它的影响，或对测量结果进行修正。

(2) 随机误差的特点是它出现的随机性。在相同条件下，多次测量同一量值，每一次测量误差的大小符号，时大时小，时正时负，没有确定的变化规律，呈现无规则的涨落，且无法控制和预测，这样的误差称为随机误差，也称为偶然误差。

随机误差是由于偶然的或不确定的因素引起的，它主要来自以下几个方面：

**主观方面：**由于人们的感官灵敏度和仪器的精密度有限，操作不熟练，估计读数不准等。

**客观方面：**外界环境干扰，如温度的微小起伏、气流的扰动、杂散的磁场的不规则脉动等。在相同条件下，对同一物理量作多次测量，随机误差较小的数据比误差较大的数据出现的概率要大得多；在多次测量中绝对值相同的正误差或负误差出现的机会是相等的，全部的误差总和趋于零。因此增加测量次数，可以减少随机误差。

系统误差与随机误差性质不同，来源不同，处理方法不同。但系统误差和随机误差往往是并存的，影响测量结果的准确度，有时主要因素是系统误差，有时主要因素是随机误差，因此对每个实验要作具体分析，实验的结果是系统误差和随机误差的总和。但在具体实验中，我们一般只考虑随机误差。

需要强调指出的是：在整个测量过程中，除了上述两种误差外，还可能发生读数记录上的错误、仪器损坏、操作不当等造成测量上的错误。错误不同于误差，它是不允许存在的，实验者必须严肃认真、细心观察和记录，及时分析所得数据，错误是可以发现和避免的。

### 0.1.5 精密度、正确度、准确度

精密度、正确度和准确度是评价测量结果好坏的三个术语。

**精密度：**反映随机误差的大小，它表示在规定的条件下重复测量的结果之间相互接近的程度。

**正确度：**反映系统误差的大小，它表示在规定条件下，测量结果中所有系统误差的综合。

**准确度：**反映随机误差和系统误差、综合误差的大小，它表示测量结果与真值的符合程度，准确度又称为精确度。

作为一种形象的说明，可以参照图 0-1 帮助理解。

由此可见，对于具体的测量，精密度高的正确度不一定高，正确度高的精密度不一定高，

只有两者都高才能保证准确度高。准确度高和误差的大小相对应,误差大则准确度低,误差小则准确度高。测量要求的是准确度高。

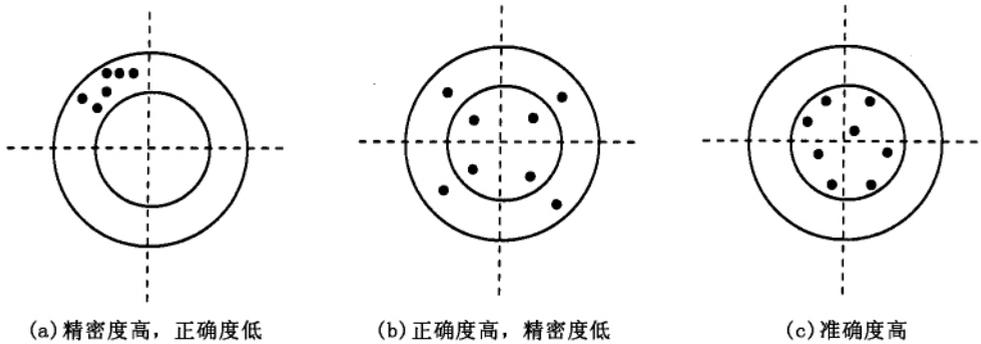


图 0-1

## 0.2 系统误差的处理

### 0.2.1 系统误差的发现

要发现系统误差就必需仔细研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析每一个实验条件,考虑每一步调整和测量,注意每一个因素对实验的影响等,下面简述几种常用的方法。

#### (1) 实验对比法

包括实验方法的对比,即用不同方法测同一个量,看结果是否一致;仪器的对比,如用两个电流表接入同一电路对比;改变测量步骤对比,如测量某物理量与温度的关系可升温测量与降温测量,看读数是否一致;改变测量中某些参量的数值,即改变实验条件以及换人测量等方法进行对比。在对比中如果发现实验结果的差异,即说明实验中存在系统误差。

#### (2) 理论分析法

包括分析实验所依据的理论公式要求的条件与实际情况有无差异,分析仪器所要求的使用条件是否达到了等等。

#### (3) 分析数据法

这种方法的理论依据是随机误差服从一定统计分布规律,如果结果不遵从这种规律,则说明存在系统误差。在相同条件下得到大量数据时,可用这种方法。

例如:按顺序记录的测量数据的偏差是单向或周期性变化,说明存在固定的或变化的系统的误差。因为按照随机误差的统计分布理论,测量值的散布在时间和空间上均是随机的。

以上只是从普遍的意义介绍了几种发现系统误差的途径,实验工作中,会有许多具体办法。

### 0.2.2 系统误差的修正和限制

能掌握系统误差就能引入修正值加以修正。例如对千分尺的零点修正;利用较高能级的

电表对低级的电表测出修正曲线等。但实际中,有时不易找出确切的系统误差值,也常在测量中设法抵消它的影响。下面介绍几种典型的从测量方法上抵消系统误差的方法。

### (1) 替换法

在测量装置上对待测量进行测量后,立即用一个标准量替换待测量,再次进行测量,并调到同样的情况,从而得出待测量等于标准量。例如在天平上称物体质量,如果采用通常测法,即左盘放待测物,右盘放砝码,会把天平两臂不等长的系统误差带入测量值。要用替换法,就可避开这一系统误差。具体方法是:设待测物质量为  $X$ ,先利用中介物  $T$ (例如干净的细砂)与之平衡,若天平两臂长分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,则平衡时有  $X = (L_2/L_1) \cdot T$ ,移去待测物,换之以标准砝码  $P$  再与中介物  $T$  达平衡,则有  $P = (L_2/L_1) \cdot T$ ,于是,得  $X = P$ 。

### (2) 异号法

使误差测量过程中出现一次为正值,另一次为负值,取其平均值以消除系统误差。例如:使用电位差计测微弱电动势  $\epsilon$  的电路中,若有温差电动势  $\epsilon_0$  的干扰,测出的数值  $\epsilon_1$  实为两电动势之差,即  $\epsilon_1 = \epsilon - \epsilon_0$ ,若将  $\epsilon$  反向后,再测量之,则测量值  $\epsilon_2 = \epsilon + \epsilon_0$ ,将两次测量结果平均,温差电动势引入的误差就被消除了。

### (3) 交换法

例如:用滑线式惠斯通电桥测电阻时,把待测电阻与标准电阻交换位置再次测量,取两次测量值的平均值,就可消除滑线电阻丝不均匀引进的误差。

### (4) 对称观测法

若有随时间线性变化的系统误差,可将观测程序在某时刻对称地再做一次。例如,一只灵敏电流计零点随时间有线性漂移,在测量读数前记下一次零点值,测量读数后再记一次零点值,取两次零点值的平均值来修正测量值。又如,测电阻温度系数的实验,测电阻前记录一次温度,测电阻后再记录一次温度,取两次平均值作为该点温度值等。

由于很多时间变化的误差在短时间内均可认为是线性变化,因此对称观测法是一种能够消除随时间变化的系统误差的好方法。

### (5) 半周期偶数观测法

对周期性误差,可以每经过半个周期进行偶数次观测。例如,分光计刻度盘偏心带来的角度测量误差是以  $360^\circ$  为周期,就采取相距  $180^\circ$  的一对游标,每次测量读两个数,则两个角位置之间的夹角是两个游标上分别算出来的夹角的平均角。

以上仅仅是列举了几种减小或消除某些简单的系统误差的方法,实际上,许多系统误差的出现,常常是由于实验所用理论不完善,或理论背后隐藏着未被发现的更精细的规律性。

## 0.3 随机误差的估算

### 0.3.1 随机误差的统计规律

假设系统误差已经消除,而被测量本身是稳定的,在相同的条件下,对同一物理量进行多次重复测量,其结果彼此有差异,这就是随机误差引起的。实验和理论都证明,大部分测量

的随机误差服从统计规律。误差分布如图 0-2 所示,横坐标表示误差  $\Delta = x - x_0$ ,纵坐标为一个与误差出现的概率有关的概率密度函数  $f(\Delta)$ ,应用概率论的数学方法可导出

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (0-7)$$

这种分布称为正态分布,式(0-7)中的特征量  $\sigma$  为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (0-8)$$

称为均方根误差或标准误差。

服从正态分布的随机误差具有下面一些特征:

(1) 有界性 绝对值很大的误差出现的概率为零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。

(2) 单峰性 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

(3) 对称性 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。

(4) 抵偿性 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (0-9)$$

在测量不可避免地存在随机误差的情况下,每次测量值各有差异,那么怎样的测量值是更接近于真值的最佳值呢?

### 0.3.2 测量结果的最佳值 —— 算术平均值

我们可以利用随机误差的上述统计特性来获得实验结果的最佳值 —— 近真值。

设对某一物理量在等精度测量的条件(即实验原理、方法、仪器、环境、人员均相同)下进行多次重复测量,其测量列为  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ,则测量列的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (0-10)$$

容易理解,对于有限次测量,平均值会随着测量次数的不同而有所变动。因而,多次测量的算术平均值,只能称为近真值或最佳值。由随机误差的上述统计特征可以证明,当测量次数无限增多时,算术平均值就将无限接近于真值。

根据误差定义有

$$(x_1 - x_0) + (x_2 - x_0) + \dots + (x_n - x_0) = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \bar{x} - x_0$$

根据随机误差的抵偿性,当  $n \rightarrow \infty$  时,  $\sum_{i=1}^n \Delta_i / n \rightarrow 0$ ,因此有:  $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。

可见测量次数越多,测量列的算术平均值越接近于真值。所以,测量结果可用测量列的

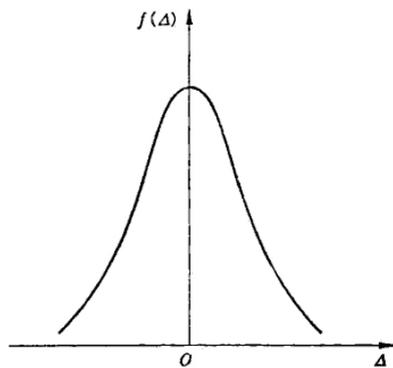


图 0-2

算术平均值作为真值的最佳值。但是测量结果的随机误差究竟有多大?如何表示呢?

### 0.3.3 随机误差的表示法

随机误差的大小常用标准误差、平均误差和极限误差表示。

#### (1) 测量列的标准误差 $\sigma$

随机误差  $\Delta$  为正态分布时, 概率密度函数  $f(\Delta)$  由式(0-7)表示, 其特征量  $\sigma$  物理意义是什么呢?

图 0-3 是不同  $\sigma$  值是的  $f(\Delta)$  曲线。 $\sigma$  越小, 表示绝对值小的误差越占优势, 正态分布曲线越尖, 反映了测量列中各测量值的分散性小, 重复性好。反之,  $\sigma$  值越大, 正态分布曲线较平坦, 测量列中各测量值的分散性大, 重复性差, 所以我们说测量列的标准误差  $\sigma$  是表征同一待测量的  $n$  次测量所得结果的离散性的参数。

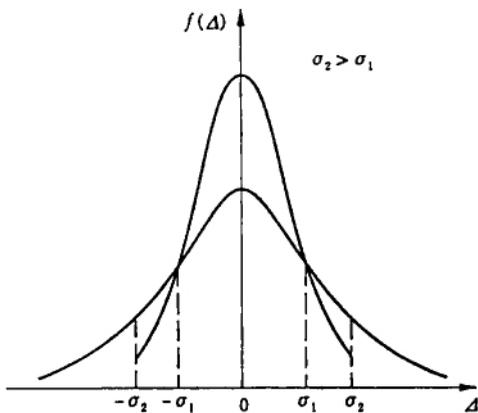


图 0-3

但要注意, 标准误差  $\sigma$  和各测量值的误差  $\Delta_i$  有着完全不同的含义。 $\Delta_i$  是实在的误差值, 亦称真误差; 而  $\sigma$  并不是一个具体的测量误差值, 它反映的是测量列的随机误差概率分布特性, 只具有统计性质的意义, 是一个统计性的特征值。

图 0-4(a) 所示曲线下的总面积表示各种大小(包括正、负)误差出现的总概率, 当然应该是 100%。由  $\Delta = -\sigma$  到  $\Delta = \sigma$  之间的曲线下的面积(图中画斜线部分), 可以计算为总面积的 68.3%, 它表示随机误差落到区间  $[-\sigma, \sigma]$  内的概率。这就是说, 在等精度重复测量时, 如测量次数  $n$  很大, 则所获得的数据中, 将有 68.3% 个数据的误差绝对值  $|\Delta_i|$  将比  $\sigma$  小。

由此可见, 标准误差  $\sigma$  所表示的意义是: 测量列中任一测量值的误差落在区间  $[-\sigma, \sigma]$  内的可能性为 68.3%。

#### (2) 平均误差 $\eta$

$$\eta = \frac{\sum |\Delta_i|}{n}$$

它的概率含义是:  $P(-\eta < \Delta < +\eta) = \int_{-\eta}^{+\eta} f(\Delta) d\Delta = 57.5\%$  (即任作一次测量, 测量值误差落在  $[-\eta, +\eta]$  之间的可能性为 57.5%), 它与标准误差  $\sigma$  的关系为

$$\eta = 0.7979\sigma \approx 0.8\sigma$$