


DAXUE WULI SHIYAN

# 大学物理实验

■ 主编 张晓波 李小云

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

# 大学物理实验

主 编 张晓波 李小云  
主 审 史建君 陈 晖



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 张晓波, 李小云主编. —杭州: 浙江大学出版社, 2008. 8  
ISBN 978-7-308-06152-0

I. 大… II. ①张…②李… III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 126000 号

## 内容提要

本书依据教育部颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》, 在多年教学改革实践的基础上, 结合面向 21 世纪高等教育教学改革发展的需要而编写的。

全书分四章, 共三十二个实验项目, 由绪论、基础实验、近代物理与综合实验、设计性实验四大板块组成。全书内容的编写力求体现时代性和先进性, 注重拓宽学生知识面, 发展学生个人兴趣, 提高学生知识创新能力, 以适应时代发展的需要。

本书可以作为工科高等院校实验物理课程教材和教师教学参考书, 也可供相关成人教育教学选用。

## 大学物理实验

张晓波 李小云 主编

责任编辑 徐素君

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>

<http://www.press.zju.edu.cn>)

电话: 0571—88925591, 88273066(传真)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 杭州浙大同心教育彩印有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 12.25

字数 300 千

版印次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-308-06152-0

定价 24.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

# 前 言

大学物理实验是为高校理工科学生开设的一门基础实验课程,它是大学生进校后接触到的第一门实验课程,是大学生进入科学实验殿堂的向导,在培养学生运用实验手段分析、观察、发现以至研究、解决问题的能力方面,以及培养学生的创新能力和创新精神方面起着重要的作用。

随着科学技术的飞速发展,一些老的基本知识、方法和技能已经退出历史舞台,一些原本属于近代物理实验的内容已经成为普通物理实验,如低温、真空、光谱等;同时传感器、CCD、计算机等现代化科学技术手段已广泛地应用于物理实验中,进一步丰富了实验方法和实验手段。浙江理工大学物理实验在近几年的实验教学改革中,对原有的普通物理实验进行了调整和补充,对一些陈旧落后的仪器设备进行了更新换代,增加了一些新颖的、综合的现代物理实验;并在传统实验中引入了美国 PASCO 公司的物理组合实验,加入了传感器和数据采集接口,利用计算机进行控制和数据处理,同时为了加强培养学生的创新能力,增加了一些设计性实验。

随着物理实验课程教学内容和体系的发展,原有的教材已经不能满足目前的教学要求,为了保证教学质量,我们依据教育部颁发的《高等学校物理实验课程教学基本要求》和面向 21 世纪高等教育教学改革发展的需要,结合本校的多年实验教学改革实践,编写了这本既能反映本校近年来在普通物理实验课程改革中取得的成果,又能满足物理实验教学的教材。

全书共分四章,共三十二个实验项目,由绪论、基础实验、近代物理与综合实验、设计性实验四大块组成,本书由张晓波、李小云主编,史建君、陈晖主审。参加编写的有:张晓波、李小云、史建君、陈晖、张为权、金立、石永峰、罗一平、祝华、施沈阳、马春生。

本教材在编写过程中,得到了浙江理工大学理学院领导的热情鼓励 and 大力支持。同时,一些兄弟院校的教材也为本教材的编写提供了很好的借鉴,对此一并表示衷心感谢。

由于编者的水平有限,加之编写时间仓促,教材中难免有不足和错误之处,恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2008 年 8 月于浙江理工大学

## 目 录

第一章 绪 论	1
第一节 怎样学好物理实验课程	1
第二节 测量误差与数据处理的基本知识	7
第三节 物理实验的基本方法	16
第四节 设计性实验的实验过程与设计原则	19
第二章 基本实验	21
实验一 长度测量	21
实验二 电学实验基本知识	30
实验三 用拉伸法测金属材料的杨氏模量	38
实验四 用动态悬挂法测金属材料的杨氏模量	42
实验五 用扭摆法测定物体的转动惯量	45
实验六 用三线摆测定物体的转动惯量	51
实验七 气体比热容比的测定	54
实验八 用稳恒电流场模拟测绘静电场	57
实验九 电表改装及校准	60
实验十 直流电桥测电阻	64
实验十一 示波器的原理和使用	69
实验十二 声速的测量	82
实验十三 铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线的测量	86
实验十四 用霍尔效应法测磁场分布	94
实验十五 温度传感器的原理与应用	100
实验十六 玻尔共振	105
实验十七 光的等厚干涉	111
实验十八 分光计的调整及光栅衍射实验	116
实验十九 光的偏振及其应用	124
第三章 近代物理与综合实验	126
实验二十 密立根油滴实验	126
实验二十一 迈克尔逊干涉仪的调节与使用	131

实验二十二	摄影技术	135
实验二十三	数码相机与图像处理	142
实验二十四	夫兰克-赫兹实验	146
实验二十五	光电效应测普朗克常数	150
实验二十六	Pasco 动力学实验	154
实验二十七	Pasco 固体线膨胀系数的测量	161
实验二十八	Pasco 基础光学实验	164
<b>第四章</b>	<b>设计性实验</b>	<b>169</b>
实验二十九	纺织品介电常数的测定	169
实验三十	玻璃折射率的测量	173
实验三十一	电阻温度计的设计	175
实验三十二	万用表的设计和制作	177
<b>附 录</b>		<b>181</b>
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	181
附录 B	常用物理数据	183
附录 C	重要物理实验年表	187

# 第一章 绪论

物理学是一门基础学科,它的发展已经改变了并正在继续改变着整个世界的面貌。物理学又是一门实验科学,它本身的发展和创新的无不与物理实验密切联系。物理学中的任何创新成果都源自实验,而且都必须经过实验的检验。同时物理实验又是大学生进校后的第一门科学实验课程,是大学生进入科学实验殿堂的向导,它在培养学生运用实验手段分析、观察、发现以至研究、解决问题的能力方面,以及培养学生的创新能力和创新精神方面都起着重要的作用。

物理实验的作用不仅在于它实验的内容,更重要的是实验进行的过程。在这个过程中,学生们不仅掌握了知识,而且了解到知识创造的过程,从而学会学习,为他们的终身教育打下一个坚实的基础。因为 21 世纪是一个知识激增的时代,任何一个学生都不可能在学校里学到他所学专业的全部知识,他们毕业后都必须不断学习,否则就会落后于时代。因此,终身教育将成为本世纪最具革命性的观念。

## 第一节 怎样学好物理实验课程

### 1. 明确物理实验课程的教学目的

(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,提高对科学实验重要性的认识。

(2)培养学生良好的实验习惯,爱护公共财物,遵守安全卫生制度,树立良好的学风。

(3)掌握测量误差的基本知识,具有正确处理实验数据的初步能力。其中包括下列内容:测量误差的基本概念,直接测量量的不确定度计算,间接测量量的不确定度计算以及处理实验数据的一些重要方法,如:列表法、作图法、逐差法和一元线性函数的最小二乘法等。

(4)能够自行完成预习、进行实验和撰写实验报告等主要实验程序。能够调整常用实验装置,并基本掌握常用的操作技术,如:零位调整,水平、铅直调整,光路的共轴调整,消视差调节,逐次逼近调节,根据给定的电路图正确接线等。了解物理实验中常用的实验方法和测量方法,例如:比较、放大、转换、模拟、补偿、平衡和干涉等方法。能够进行常用物理量的一般测量,例如:长度、质量、时间、热量、温度、电流强度、电压、电动势、电阻、磁感应强度、折射率等的测量。了解常用仪器的性能,并学会使用方法,例如:测长仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、直流电桥、直流电位差计、通用示波器、低频信号发生器、分

光计、常用电源和常用光源等。

(5) 开设一定数量的应用性或综合性物理实验,初步了解物理实验的技术应用,提高进行综合实验的能力。

(6) 开设适量的设计性实验,使同学们在实验方法的设计、测量仪器的选择和配合、测量条件的确定等方面受到初步的训练。

## 2. 掌握物理实验课程的学习特点

实验课与理论课不同,它的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立地完成实验任务。要上好一次物理实验课,要做好以下三个环节的工作。

第一个环节:做好预习。实验课前要把讲义上的实验内容仔细阅读一遍,弄明白这次实验的目的要求、原理、仪器、操作步骤以及应该注意的问题等,写好预习报告。有些实验还要课前自拟实验方案,自己设计电路图、光路图、自拟数据表格等。因此,课前预习是否充分是实验中能否取得主动的关键。

第二个环节:做好实验。到实验室后要遵守有关的规章制度,爱护仪器设备,注意安全。动手之前要先了解仪器的性能、规格、使用方法和操作规则,不要乱动仪器。调整仪器装置时要仔细认真,一丝不苟,还要注意满足测量公式所要求的实验条件。在整个实验过程中,要手脑并用,注意培养和锻炼自己的动手能力。实验操作要做到准确、熟练、快速,如在力学实验中如何调水平、调铅垂,在电学实验中如何连接电路,在光学实验中如何调节共轴等,都是一些很基本的操作,都应该熟练掌握。动手能力还表现在能否及时发现并排除实验中可能遇到的某些故障。实验中还要记录好原始数据(就是在测量时直接从仪器上读出来的数据),要一边测量,一边及时记录,记录须准确、清楚、有次序。做完实验,要将实验数据交给教师检查,得到签字认可后,再将仪器收拾复原好,方可离开实验室。

第三个环节:写好实验报告。实验报告是对实验的全面总结,其内容除实验名称外,一般包括:实验目的、实验仪器、原理公式、数据处理、结果表示、讨论等。要用指定的实验报告纸按规定的格式书写实验报告,字迹要清楚,文理要通顺,图表要正确。准确地、完整而简明地表述实验报告中各部分内容,是实验课训练的重要目的之一。另外,要按时交实验报告。

上述三个环节中,第二个环节虽然是主要的,但是对第一、第三个环节也绝不应忽视,这三个环节都做好了,才算是上好了物理实验课。

## 3. 写好实验报告

通常,实验报告分为四部分。

### 第一部分:预习报告

它作为正式报告前面的部分,要求在正式做实验之前写好。内容包括:

(1) 实验目的 说明本实验的目的。

(2) 实验原理摘要 在理解的基础上,用简短的文字和公式扼要地阐述实验原理,切忌整篇照抄,力求做到图文并茂(图是指原理图、电路图或者光路图)。写出实验所用的主要公式,说明式中各物理量的意义和单位以及公式的适用条件(或实验的必要条件)。

(3) 简要的实验步骤。



**第二部分:实验记录**

实验的原始数据先记录在专用的“原始数据记录”纸上,实验完毕后再进行整理。内容包括:

(1)实验仪器 记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯,便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学们逐步地熟悉各种仪器类型,以培养选用仪器的能力。

(2)实验内容和现象的观测记录。

(3)数据 数据记录应做到整洁清晰而有条理(不可用铅笔),尽量采用列表法。在根据数据特点设计表格时,力求简单明了,分类清楚而有条理,便于计算与复核。在标题栏内要求注明单位,数据不得任意涂改。

**第三部分:数据处理与计算**

此部分在实验后进行,包括:

(1)作图 按图解法要求绘制图线。

(2)计算结果与误差估算 计算时,要写出公式,再代入数值进行运算。误差估算要预先写出误差公式,要有详细的计算过程。

**第四部分:结果讨论与分析**

实验后可供讨论与分析的问题很多,如:

(1)实验中遇到的困难的处理;

(2)实验设计的特点是什么?普遍意义何在?

(3)对实验设计改进的设想和问题;

(4)对实验中出现的异常现象的分析与判断,等等。

学生实验一般是按指定的方法,使用指定的仪器进行的。由于实验方法与仪器是经过仔细设计和反复实验检验过的,一般均可获得较好的结果。对于学生实验,虽然希望实验有好的结果,但从根本上讲,重要的不是结果如何好,而是对实验设计的认识,是实验全过程对学生的锻炼。

实验报告格式见浙江理工大学《物理实验报告册》。

**4. 遵守实验室规则**

(1)必须按课程安排的规定时间准时参加实验,不得迟到、早退、无故缺席。实验前应认真预习。

(2)进入实验室,必须衣着整洁、保持安静,严禁闲谈喧哗、吸烟、随地吐痰。不得随意动用与本次实验无关的仪器设备。

(3)遵守实验室规则,服从教师指导,按规定和步骤进行实验。认真观察和分析实验现象,如实记录实验数据,不得抄袭他人的实验结果。

(4)注意安全,严格遵守操作规程。爱护仪器设备,节约用水、电和药品、试剂、元器件等。凡违反操作规程或不听从教师指导而造成仪器设备损坏等事故者,必须写出书面检查,并按学校有关规定赔偿损失。

(5)在实验过程中若仪器设备发生故障,应立即报告指导教师及时处理。

(6)实验完毕,应主动协助指导教师整理好实验用品,切断水、电、气源,清扫实验

场地。

(7)按指导教师要求,及时认真完成实验报告。凡实验报告不合格者,均须重做。平时实验成绩不合格者,不得参加本门课程的考试。

## 附:实验报告范例

实验报告不是写给指导教师的,而应是学习的足迹。同时实验报告是写给同行看的,所以必须反映自己的工作收获和结果,反映自己的能力和水平。报告要有自己的特色,要有条理性,并注意运用科学术语,一定要有实验的结论和对实验结果的讨论、分析或评估(成败之初步原因)。这里给出范例,供初学者参考。

### 长度测量

#### 一、实验目的

1. 掌握游标、螺旋测微装置的原理和使用方法。
2. 了解读数显微镜测长度的原理,并学会使用。
3. 巩固误差、不确定度和有效数字的知识,学习数据记录、处理及测量结果表示的方法。

#### 二、实验仪器

游标卡尺,螺旋测微计,读数显微镜,待测物体等。

#### 三、预习报告(包括实验原理、实验内容及主要步骤)

##### 1. 实验原理

##### (1)游标卡尺

游标卡尺是由米尺(主尺)和附加在米尺上一段能滑动的副尺构成的。它可将米尺估计的那位数较准确地读出来,其特点是游标上  $N$  个分格的长度与主尺上  $(N-1)$  个分格的长度相等,利用主尺上最小分度值  $a$  与游标上最小分度值  $b$  之差来提高测量精度。

因为  $Nb = (N-1)a$

所以  $a - b = \frac{1}{N}a$

$a$  往往为 1mm,  $N$  越大,则  $a - b$  越小,游标精度越高。 $a - b$  称为游标最小读数或精度。例如 50 分度( $N=50$ )的游标卡尺,其精度为  $1/50\text{mm} = 0.02\text{mm}$ 。这也是游标尺的示值误差。

读数时,根据游标“0”线所对主尺的位置,可在主尺上读出毫米位的准确数,毫米以下的尾数由游标读出。

##### (2)螺旋测微计

螺旋测微计(又名千分尺)主要由一根精密的测微螺杆、螺母套管和微分筒构成,利用螺旋推进原理而设计的。螺母套管的螺距一般为 0.5mm(即为主尺的分度值),当微分筒(副尺)相对于螺母套管转一周时,测微螺杆就向前或向后退 0.5mm。若在微分筒的圆周上均分 50 格,则微分筒(副尺)每旋一格,测微螺杆进、退  $0.5/50\text{mm} = 0.01\text{mm}$ ,主尺上读数变化 0.01mm,可见千分尺的最小分度值为 0.01mm,再下一位还可以再做估计,因而能读到千分之一位,其示值误差为 0.004mm。

读数时,先在螺母套管的标尺上读出 0.5mm 以上的读数;再由微分筒圆周上与螺母套管横线对齐的位置读出不足 0.5mm 的整刻度数值和毫米千分位的估计数字。三者之和即为被测物之长度。

### (3) 读数显微镜

读数显微镜是将显微镜和螺旋测微计组合起来,作为测量长度的精密仪器。显微镜由目镜和物镜组成,目镜筒中装有十字叉丝,供对准被测物用。把显微镜装置与测微螺杆上的螺母套管相连,旋转测微鼓轮(相当于千分尺的微分筒),即转动测微螺杆,就可以带动显微镜左右移动。常用的读数显微镜测微螺杆螺距为 1mm,测微鼓轮圆周上刻有 100 分格,则最小分度值 0.01mm,读数方法与千分尺相同,其示值误差为 0.015mm。

## 2. 实验内容及主要步骤

### (1) 用游标卡尺测量圆环的体积

① 校准游标卡尺的零点,记下零读数。

② 用外量爪测外径  $D_1$ ,高  $H$ ;用内量爪测内径  $D_2$ ,重复测量 5 次。测量时注意保护量爪。

③ 求体积和不确定度。

### (2) 用千分尺测量小球的体积

① 校准零点,记下零读数。

② 重复测量直径五次,测量时注意保护测砧与测杆。

③ 求体积和不确定度。

### (3) 用读数显微镜测量毛细管的直径

① 调整显微镜,对准待测物,消除视差。

② 测量时,测微鼓轮始终在同一方向旋转时读数,以避免回程差,重复测量五次。

## 三、数据与结果

### 1. 用游标卡尺测圆环体积(见表)

表 游标卡尺数据

仪器:游标卡尺;示值误差: $\Delta_{\text{仪}}=0.02\text{mm}$ ,零点误差  $D_0=0.00\text{mm}$

次数	项目	外径 $D_1$ /mm	内径 $D_2$ /mm	高 $H$ /mm
1		48.04	34.96	21.88
2		48.06	35.02	21.90
3		47.98	34.98	21.96
4		47.96	34.94	21.94
5		48.00	35.04	21.86

$$\bar{D}_1 = 48.008\text{mm}$$

$$S_{D_1} = \sqrt{\frac{\sum (D_{1i} - \bar{D}_1)^2}{5-1}} = 0.041\text{mm}$$

$$\Delta D_1 = \sqrt{S_{D_1}^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} = 0.046 \approx 0.05\text{mm}$$

所以

$$D = 48.01 \pm 0.05\text{mm}$$

同理可得

$$D_2 = 34.96 \pm 0.05 \text{ mm}$$

$$H = 21.91 \pm 0.05 \text{ mm}$$

$$\bar{V} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}_1^2 - \bar{D}_2^2) \bar{H} = 18575.179 \text{ mm}^3$$

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} \bar{H} \bar{D}_1 \Delta D_1\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2} \bar{H} \bar{D}_2 \Delta D_2\right)^2 + \left[\frac{\pi}{4} (\bar{D}_1^2 - \bar{D}_2^2) \Delta H\right]^2}$$

$$= 88.494 \text{ mm}^3 \approx 0.009 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$V = (1.858 \pm 0.009) \times 10^4 \text{ mm}^3$$

用千分尺测小球直径(略)。

2. 用读数显微镜测毛细管直径(见表)

表 读数显微镜数据

仪器: 读数显微镜, 示值误差:  $\Delta_{\text{仪}} = 0.015 \text{ mm}$

次数 项目	1	2	3	4	5
$D_2/\text{mm}$	27.373	27.237	27.389	27.270	27.384
$D_1/\text{mm}$	27.270	27.377	27.284	27.388	27.288
$D =  D_2 - D_1 /\text{mm}$	0.103	0.104	0.105	0.108	0.104

$$\bar{D} = 0.1048 \text{ mm}$$

$$S_D = 0.0017 \text{ mm}$$

$$\Delta D = \sqrt{S_D^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \approx 0.015 \text{ mm}$$

$$D = 0.105 \pm 0.015 \text{ mm}$$

#### 四、讨论与分析

(1) 测定圆环体积时, 分别测了外径  $D_1$ , 内径  $D_2$  和高  $H$ , 利用公式:

$$V = \frac{1}{4} \pi H (D_1^2 - D_2^2)$$

求得体积。这一公式虽然简单, 但求不确定度时却较繁琐。若作如下变换:

$$V = \frac{1}{4} \pi H (D_1 + D_2)(D_1 - D_2) = \pi H \frac{D_1 + D_2}{2} \cdot \frac{D_1 - D_2}{2} = \pi H Q P$$

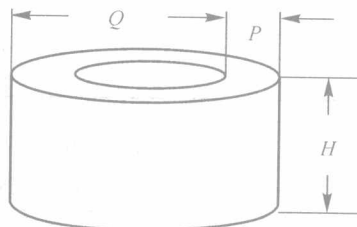
其中  $P, Q$  如右图所示。这时有

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2}$$

这样, 求  $\Delta V$  就简单多了。

本方法的缺点是用游标卡尺不易测准  $Q$  值, 可以采用多次测量来减小测量的随机误差分量。

(2) 圆环、钢球直径的多次测量结果表明偶然误差比较大, 可能是被测物件形状不理想所致, 比如球不圆



圆环体积的测量

等。在这种情况下,只有从不同方位多次测量取平均值才能得到接近真值的体积测量值。

(3)用统计方法求得偶然误差分量  $S_D$ ,它同仪器的误差是相互独立的,在求总不确定度时,用方和根合成。如果其中一个远比另一个小时(如  $S_D < \frac{1}{3} \Delta_{ix}$ ),根据微小误差原理,小误差的影响可以忽略不计,在求总不确定度时可以简化计算。

(4)用读数显微镜测量毛细管直径  $D$ ,测量结果的相对不确定度  $E = \frac{\Delta D}{D} \times 100\% = 14\%$ 。检查测量过程无误,这说明精度为  $0.01\text{mm}$ ,示值误差为  $0.015\text{mm}$  的读数显微镜测量如此微小的长度,显然不太合适。建议用更加精密的仪器或其他方法来测量。

## 第二节 测量误差与数据处理的基本知识

这一部分我们介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等内容。所介绍的都是初步知识,这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到,而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。这部分内容牵涉面较广,这里只是向大家作综合的介绍,然后再结合具体的实验,通过运用加以掌握。应该说明的是:对这些内容的深入讨论是普通计量学和数理统计学的任务,我们只是引用了其中的某些结论和部分相关的计算公式。

### 一、测量的误差

#### 1. 误差和误差的分类

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象,了解物质特征,验证物理原理都要进行测量。测量分直接测量和间接测量。直接测量指无需对被测的量与其他的实测的量进行函数关系的辅助计算而直接得到我们需要的量。例如用米尺测量长度,用天平测量物体的质量,这都是直接测量。间接测量指利用直接测量的量与被测的量之间已知的函数关系,从而得到我们需要的量。例如测量物体的密度,我们先是测出物体的体积和质量,再利用公式计算出物体的密度。在物理实验中,有许多都是间接测量。

从本质上讲,测量是一个获得事物真实数值的过程。但事实上,虽然人们努力获得事物的真实数值,但由于各种干扰因素(如测量仪器的精度,人们设计的实验方法的不可避免的缺陷,测量环境的不可控,测量者自身的观察能力的限制等)的存在,人们测量所得到的数值和真实数值之间总是有差异的。从某种意义上讲,人们是不可能通过测量来获得事物的真实值的,人们通过测量所获得的只不过是对真实数值的一个估计,一个近似,或者说是一个替代。既然测量值和真实值之间存在差异,那么为了评估人们获得的测量值的真实性,就要考虑测量值和真实值之间差异的大小。所谓误差,就是用来衡量真实值和测量值之间差异的物理量。这里要特别强调的是,我们这里所说的测量值是建立在正确、科学,或者说是人们在人们现有技术水平上的合适的测量手段下所获得的测量数值。对那些使用错误的测量手段,没有按规范的测量方式所获得的数值与真实值之间的差异我们不能称之为误差,而只能把它们叫做错误。

既然实践证明,测量结果都存在误差,并且误差自始至终存在于一切科学实验和测量

的过程中,那么我们就有必要分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计。为此我们必须了解误差的概念、特征、产生的原因和估计方法等有关知识。

测量误差就是测量值与真实值之间的差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示。

$$\text{绝对误差} = |\text{测量值} - \text{真实值}|$$

$$\text{相对误差(习惯上用 } E \text{ 来表示)} = (\text{绝对误差} / \text{真实值}) \times 100\%$$

真实值是一个理想的概念,一般来说,实验者是不知真实值的具体数值的。在实际测量中,人们常用被测量的量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值,称为约定真值。

测量中的误差主要分为两种,即系统误差和随机误差。它们的性质不同,需分别处理。

#### (1) 系统误差

系统误差是指在多次测量的过程中,保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的部分。例如实验装置和实验方法没有(或不可能)完全满足理论上的要求,有的仪器没有达到应有的准确程度,环境因素(温度,湿度等)没有控制到预计的情况等。只要这些因素与正确的要求有所偏离,那么在测量结果中就会出现其绝对值和符号均为恒定的或可以预知方式变化的误差分量。只要造成该偏差的因素存在,该因素产生的系统误差就同样存在。

例如用秒表测运动物体通过某段路程所需的时间,若秒表走得快,那么即使测量多次,测得的时间  $t$  总会偏大,而且总是偏大一个固定的值,这就是仪器不准确造成的。又如落球法测重力加速度时,由于空气阻力的影响,得到的结果总是偏小,这就是测量方法不完善造成的。

对实验中系统误差该如何处理呢?可以通过校准仪器,改进实验装置和实验方法,或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。发现和减小实验中的系统误差通常是一件困难的事情,需要对整个实验所依据的原理、方法、测量步骤及所用仪器等可能引起误差的各种因素分别进行分析。一个实验结果是否正确,往往就在于系统误差是否已被发现并有效地消除,因此对系统误差不能轻易地忽视。

#### (2) 随机误差

随机误差是指在多次测量同一被测量值的过程中,绝对值和符号以不可预知的方式变化着的测量误差的部分。这种误差是实验中各种因素的微小变动性引起的。例如实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性,测量仪器指示数值的变动性,以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性等等。这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化,这些变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现,就某一测量值来说是没有规律的,其大小和方向都是不能预知的。但对一个量进行足够多次数的测量,则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的。常见的一种情况是:正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等,数值较小的误差出现的次数较多,数值很大的误差在没有错误的情况下通常不出现。这一规律在测量次数越多时表现得越明显,它就

是一种最典型的分布规律:正态分布规律。

### 1) 误差的正态分布规律

大量的测量误差服从正态分布(或高斯分布)规律。标准化的正态分布曲线如图 0-1 所示。

图中  $x$  代表某一物理量的实验测量值,  $P(x)$  为测量值的概率密度, 且

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

其中

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x}{n}, \quad \sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x-\mu)^2}{n}}$$

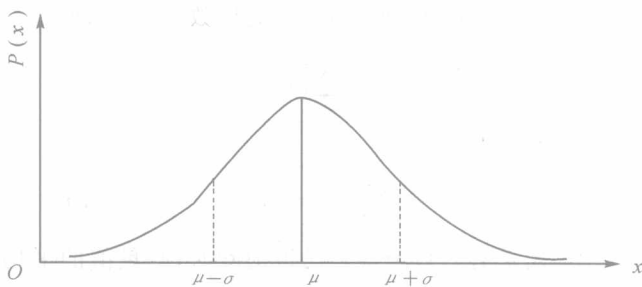


图 0-1

从曲线可以看出,被测量值在  $x=\mu$  处的概率密度最大,曲线峰值处的横坐标相应于测量次数  $n \rightarrow \infty$  时被测量的平均值  $\mu$ 。横坐标上任一点到  $\mu$  值的距离  $(x-\mu)$  即为与测量值  $x$  相应的随机误差分量。随机误差小的概率大,随机误差大的概率小。 $\sigma$  为曲线上拐点处的横坐标与  $\mu$  值之差,它是表征测量值分散性的重要参数,称为正态分布的标准偏差。这条曲线是概率密度分布曲线,当曲线和  $x$  轴之间的总面积定为 1 时,其中介于横坐标上任何两点间的某一部分面积可以用来表示随机误差在相应范围内的概率。如图 0-1 中左右两条虚线之间部分  $(\mu-\sigma \sim \mu+\sigma)$  的面积就是随机误差在  $\pm\sigma$  范围内的概率(又称置信概率),即测量值落在  $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$  区间中的概率,由定积分计算得为  $P=68.3\%$ 。如将区间扩大到  $(\mu-2\sigma \sim \mu+2\sigma)$ ,则  $x$  落在  $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$  区间中的概率就提高到  $95.4\%$ ;  $x$  落在  $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$  区间中的概率为  $99.7\%$ 。

从分布曲线可以看出:①在多次测量时,正负随机误差常可以大致相消,因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响;②测量值的分散程度直接体现随机误差的大小,测量值越分散,测量的随机误差就越大。因此,必须对测量的随机误差作出估计才能表示出测量的精密度。

### 2) 随机误差的处理

#### a. 最小二乘法原理与测量平均值

对测量中的随机误差如何处理呢?对随机误差作出估计的方法很多,科学实验中常常用标准偏差来估计测量的随机误差。实验中不可能作无限多次测量,测量次数只能是有限的,因此,应研究这种情况下的随机误差估计方法。

设对某一物理量在测量条件相同的情况下进行  $n$  次无明显系统误差的独立测量,测得  $n$  个测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。当无系统误差分量存在时,应该用有限次测量值的平均值作为真值的最佳估计值,这是由最小二乘法原理推导出来的。

根据最小二乘法原理,一系列等精度测量的最佳估计值是能够使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值。设真值的最佳估计为  $x_0$ ,则差值平方和可写为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2$$

若要使它最小,则它对  $x_0$  的导数应为 0,即

$$\frac{df(x)}{dx_0} = -2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = 0$$

由上式可得

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

上式说明当系统误差已被消除时,测量值的平均值可以作为被测值的真值。测量次数越多,两个值接近的程度越好(当  $n \rightarrow \infty$  时,平均值趋近真值)。因此,可以用平均值表示测量结果。以后为了简洁,常略去求和号上的求和范围,例如上式中的分子可以写为  $\sum x_i$ 。

### b. 标准偏差

每一次测量值  $x_i$  与平均值之差称为残差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

显然,这些残差有正有负,有大有小。常用“方均根”法对它们进行统计,得到的结果就是单次测量的标准偏差,以  $S_x$  表示为

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

这个公式又称为贝塞尔公式。可以用这一标准偏差表示测量的随机误差,它可以表示这一列测量的精密度。标准偏差小就表示测量值很密集,即测量的精密度高;标准偏差大就表示测量值很分散,即测量的精密度低。现在很多计算器上都有统计计算功能,实验者可直接用计算器求得  $S_x$  等统计数据。

可以证明平均值的标准偏差  $S_{\bar{x}}$  是一列测量中单次测量的标准偏差  $S_x$  的  $\frac{1}{\sqrt{n}}$  倍,即

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

## 2. 直接测量结果的表示和总不确定度的估计

### (1) 总不确定度

完整的测量结果应给出被测量的量值  $x_0$ , 同时还要标出测量的总不确定度  $\Delta$ , 写成  $x_0 \pm \Delta$  形式, 这表示被测量的真值在  $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$  的范围之外的可能性(或概率)很小。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度, 是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。

直接测量时被测量的量值  $x_0$  一般取多次测量的平均值  $\bar{x}$ 。若实验中有时只能测量一次或只需测量一次, 就取该次测量值为  $x_0$ 。最后表示被测量的直接测量结果  $x_0$  时, 通常还必须将已定系统误差分量(即绝对值和符号都确定的已估算出的误差分量)从平均值  $\bar{x}$  或一次测量值  $x$  中减去, 以求得  $x_0$ , 即就已定系统误差分量对测量值进行修正。如螺旋



测微器的零点修正,伏安法测电阻中电表内阻影响的修正等。

根据国际化标准组织等七个国际组织联合发表的《测量不确定度表示指南 ISO1993 (E)》的精神,普通物理实验的测量结果表示中,总不确定度  $\Delta$  从估计方法上也可以分为两类分量: A 类指多次重复测量用统计方法计算出的分量  $\Delta_A$ , B 类指用其他方法估计出的分量  $\Delta_B$ , 它们可用“方,和,根”法合成(下面我们所说的不确定度及其分量一般都是指总不确定度及其分量),即有

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2}$$

### ①总不确定度的 A 类分量 $\Delta_A$

在实际测量中,一般只能进行有限次测量,这时测量误差不完全服从正态分布规律,而是服从称之为  $t$  分布的规律。这种情况下,对测量误差的估计,就要在贝塞尔公式的基础上再乘上一个因子。在相同条件下对同一被测量作  $n$  次测量,若只计算总不确定度  $\Delta$  的 A 类分量  $\Delta_A$ ,那么它等于测量值的标准偏差  $S_x$  乘以一因子  $t_p/\sqrt{n}$ ,即

$$\Delta_A = \frac{t_p}{\sqrt{n}} S_x$$

式中  $t_p$  是与测量次数  $n$ 、置信概率  $P$  有关的量。概率  $P$  及测量次数  $n$  确定后,  $t_p$  也就确定了。因子  $t_p$  的值可以从专门的数据表中查得。当  $P=0.95$  时,  $t_p/\sqrt{n}$  的部分数据可以从下表查得。也可由式子  $t_{p=0.95} \approx 1.959 + \frac{2.406}{v-1.064}$  ( $v \geq 3$ ) 算出,式中  $v=n-1$ ,称自由度。

测量次数 $n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_p/\sqrt{n}$ 因子的值	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72

### ②不确定度的 B 类分量 $\Delta_B$

在物理实验中,经常碰到仪器的误差或误差限值,它是参照国家标准规定的计量仪表,器具的准确度等级或允许的误差范围,由生产厂家给出或由实验室结合具体测量方法和条件简化的约定,用  $\Delta_{\text{仪}}$  表示。仪器的误差  $\Delta_{\text{仪}}$  在普通物理实验教学中是一种简化表示,通常取  $\Delta_{\text{仪}}$  等于仪表、器具的示值误差限或基本误差限。许多计量仪表、器具的误差产生原因及具体误差分量的计算分析,大多超出了本课程的要求范围。用普通物理实验室中的多数仪表、器具对同一被测量在相同条件下作多次直接测量时,测量的随机误差分量一般比其基本误差限或示值误差限小不少。另一些仪表、器具在实际使用中很难保证在相同条件下或规定的正常条件下进行测量,其测量误差除基本误差或示值误差外还包含变差等其他分量。因此我们约定,在普通物理实验中的大多数情况下,把  $\Delta_{\text{仪}}$  简化地直接当作总不确定度中用非统计方法估计的 B 类分量  $\Delta_B$ ,即  $\Delta_B = \Delta_{\text{仪}}$ 。

### ③总不确定度的合成

由上面的结果,我们可以得

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} = \sqrt{\left(\frac{t_p}{\sqrt{n}} S_x\right)^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$$