

21

世纪高等院校教材

物理实验

主 编 江兴方

副主编 谢建生 唐 丽

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

按照工科物理实验基本要求,本书分为物理实验绪论、仪器概述、基础实验、基本实验、综合性实验、设计性实验六大模块,系统地介绍物理实验的基本方法、实验原理、数据处理的方法、实验结果正确表达的方法,同时注重实验教学中的启发性教学,适当引入现代信息技术,包括传感器、数字化实验、计算机应用软件等,将物理实验与现代科学技术相结合。

本书适合于高等学校工科各专业学生使用,也可作为应用物理专业基础物理实验使用。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验/江兴方主编. —北京:科学出版社, 2005

21 世纪高等院校教材

ISBN 7-03-015882-2

I. 物… II. 江… 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 076790 号

责任编辑:昌 盛/责任校对:赵桂芬

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 9 月第一次印刷 印张:18

印数:1—4 000 字数:342 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

12

前 言

本书是在江苏工业学院 20 多年来使用的物理实验讲义基础上不断改进、不断完善的教学成果。同时也是按照教育部工科物理课程教学指导委员会所颁布的物理实验基本要求,特别是采用国际通用的测量不确定度来描述实验结果,结合信息技术,经过大幅修改后编写完成的。

全书包括预备性基础实验 4 个,达到基本要求的基本实验 14 个,综合性实验 12 个以及设计性实验 10 个。

考虑到当前中学物理实验的状况,而来自不同地区的生源其基础不一样,开设了预备性基础实验,这样可以弥补中学物理实验基础不足的缺陷,同时也可以加强对实验基本技能的训练。开设设计性、综合性实验正是目前教改的方向,也是我们近年来的尝试成果,通过这些实验项目,有利于培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力,为今后创造性地开展科研工作打好基础。这样就把整个物理实验教学按照不同的难度要求分成了层次鲜明的基础实验、基本实验、综合性实验、设计性实验四个模块。

物理实验是一门独立开设的实验课,在编写时我们力求做到:实验原理叙述清晰,计算公式推导完整,实验步骤简洁明了。实验中列出的注意事项能使学生在实验中少走弯路,设置的思考题、讨论题启发学生创造性思维。

全书在汤汉森、李金华教授指导下完成。谢建生编写第一篇和第二篇以及实验 3.2、4.10、4.11、4.12,唐丽编写实验 3.1、3.4、4.8、5.6,蒋美萍编写实验 4.13、4.14、5.3、5.4、5.5,沈小明编写实验 4.6、5.1,陈宪锋编写实验 3.3、4.4、4.7、5.9、5.10,倪重文编写实验 5.2,江兴方编写其他部分并负责全书统稿、修改和插图工作。在编写过程中,得到了南京大学柯善哲和潘元胜教授、华中科技大学是度芳教授的热情指导,袁宁一博士和陈汉松、周懿、黄正逸等老师也提出了宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

由于我们水平所限,经验不足,错误在所难免,恳请师生们不吝赐教。

编 者

2003 年 12 月

符号说明

现将本书中出现的符号以及其物理意义(页码)归纳如下.

A	顶角(15);振幅(126, 217, 232);	N	电功率(14, 23)
	逸出功(190, 209)	N	力的单位——牛顿(271);mN 毫牛(275)
A	电流强度单位——安培(14, 25, 162, 215);	O	光心(64, 66, 69, 255);坐标原点(127)
	mA 毫安(27, 30, 56);	O	Origin 作图软件(260)
	μ A 毫安(27, 141, 166;254);	P	概率(242, 247)
	AC 表示交流(23)		能级(200);Pa 帕斯卡(271)
B	磁感应强度(159, 162)	P	Gpa 表示 109 帕斯卡(274)
B	照相机中的 B 门(36)		μ pa 表示 106 帕斯卡(276)
C	比率臂(144)	Q	热量(96, 267);电量(158)
C	库仑(190, 207, 271);	R	电阻(14, 20, 23, 55, 107, 240)
	CCD 电荷耦器件(208, 225);CHI 通道 1(117)		半径(75, 77, 149, 151)
D	直径(44, 46, 87, 89, 268)	S	面积(2, 85, 97, 127);位置坐标、位移(93, 95)
D	DC 表示直流(22, 191);DIV 格(118)		能级(200)
E	弹性模量(85, 87, 90, 274);电场强度(102);	T	周期(19, 21, 77, 113);热力学温度(128)
	光矢量(154);期望值(244);能级(210);		时间(218, 269)
	电动势(106, 110, 135, 163, 254);	T	照相机中的 T 门(36)
	E_p 势能(74); E_k 动能(74, 190, 209)		不确定度(2, 5, 76, 153);
F	力(73, 85, 91);焦点(64, 169)	U	U_r 相对不确定度(5, 57);
F	F 值, 相机中的镜头与透光孔径的比值(36);		U_s 截止电压(190);USB 接口(230)
	电容单位——法拉(271)	V	体积(2, 37);电动势(20);
G	检流计(103, 108, 135, 254)		电压(14, 55, 101, 106;111, 133, 201, 215)
H	磁矢量(154);曝光量(218)	V	电压单位——伏(23, 53, 99, 104, 141, 148, 163, 192);mV
H	亨利(271);Hz 频率的单位——赫兹(23, 128)		毫伏(30, 56, 99, 164)
I	电流强度(14, 23, 30, 55, 107, 158, 162, 215);		
	光强(155, 218)	W	功率单位——瓦(270, 277);mW 毫瓦(219)
J	转动惯量(73, 75, 80, 82)	X	x 轴(111)
J	能量的单位——焦耳(193, 210, 271)	Y	y 轴(111)
K	开关(24, 56, 57, 106, 108);灵敏度(159)	a	真值(5, 7);加速度(73, 113)
K	温度的国际单位——开尔文(96, 248, 270, 275)	b	直线截距(258)
	K_r 比率臂(146)	c	光速(154,);比热(267)
L	长度(11, 19);LCD 液晶显示器(224)	c	σ 协方差(245)
M	力矩(73, 81);质量(43)		

续表

d	光栅常数(184);直径(45, 87, 89);	s	时间单位——秒(77, 193)
d	微分符号(7, 38, 73, 80, 127, 243, 246);		温度(21, 96, 215);
	db 分贝数(123, 138);	t	时间(60, 82, 113, 126, 158, 197, 207, 210, 267);
	最小分度(10);电子电量(111, 190, 203, 209);		t 分布(248)
e	微小厚度(149)		物距(34, 66);波速(126);
e	e 指数(144, 246)	u	uc(合成)标准不确定度(9, 12);
	焦距(34, 65, 68, 70, 72, 225);力(92, 201);		us 未定系统不确定度(12);
f	洛伦兹力(158);频率(114, 129)		平均值标准不确定度(12, 262)
g	重力加速度(19, 21, 60, 201, 207, 239, 273)	v	象距(34, 66);
	质量单位——克(16, 221);		速度(60, 111, 113, 128, 158, 190, 201)
g	kg 千克(16, 89, 208);mg 毫克(42);	α	线胀系数(iv, 239, 274);角度(178, 180)
	kgf 千克力(274, 276)	β	角加速度(73, 81);底片感光度(218)
h	普朗克常量(190, 193, 210)	γ	定压摩尔热容与定容摩尔热容之比(128)
h	小时(47)	δ	偏差(178, 258);光程差(195);
i	序数(5)		最小偏向角(15, 179, 181)
i	i 虚数单位(218);in 英寸(51)	ϵ	精度(10);电动势(21);介电常数(102, 271)
	包含因子(9);仪表等级(11);	η	黏性系数(201, 207)
	直线斜率(190, 193, 257);		角度(74, 87, 91, 156, 177, 219);
k	倔强系数(93);玻耳兹曼常量(128);	θ	温度(96, 99, 267)
	条纹级数(150, 153, 184, 187)		导热系数(96, 98, 211, 270);
k	kJ 千焦耳(275);kcal 千卡(275)	λ	波长(126, 129, 149, 151, 184, 195, 199, 271)
m	质量(11, 14, 19, 37, 73, 82, 89, 111, 190, 201)	μ	分子质量(128);期望值(244);磁导率(271)
	长度单位——米(16, 19, 62, 152, 270);	ν	频率(190, 193, 209, 211);自由度(248, 250)
	μm 微米(221);	π	圆周率(2, 37, 74, 98, 201)
m	cm 厘米(11, 204);mm 毫米(39, 40, 196, 225);		π 弧度(126, 234, 238);“ π ”形状(92, 94)
	nm 纳米(33, 182, 187, 212, 279);min 分(220);	ρ	密度(14, 16, 37, 126, 272)
	ml 毫升(221);mol 摩尔(271)	σ	标准差(7, 18, 246, 260); σ^2 方差(245)
n	折射率(15, 16, 179, 182, 194);浓度(158)	τ	表面张力系数(91, 92,);电荷线密度(101);
n	n 型半导体(139)		周期(234)
p	压强(207);概率密度(244, 246)	φ	角度(173, 177, 180, 184, 273);初相位(126);
p	p 型半导体(139)		相位(217, 232)
q	电量(113, 158, 201);热量(97)	ω	圆频率、角速度(74, 126, 232, 238)
r	半径(77, 150)	Δ	绝对误差(5, 18);光程差(149)
r	rad 弧度(15, 74)		增加(43, 71, 85, 93, 96, 144, 177, 197, 199, 257, 267, 269)
	样本不确定度(8, 17, 260);	Σ	表示求和(17, 243, 259)
s	s_s 标准不确定度(10);	Ω	电阻单位——欧姆(135, 138, 143, 148, 167, 278)
	s_1 已定标准不确定度(13)	Γ	Γ 函数(248, 250)
		$^{\circ}\text{C}$	表示摄氏温度(3, 31, 53, 128, 144)
		$\sim$	交流电(23)
		$^{\circ}$	角度单位——度(257);“'”分;“''”秒

目 录

前言

符号说明

第一篇 物理实验绪论	1
1.1 测量与有效数字	2
1.2 实验数据的分析与结果表述	5
第二篇 仪器概述	22
2.1 电磁学实验常用基本仪器	22
2.2 光学实验基本仪器	32
第三篇 基础实验	37
实验 3.1 固体密度的测定	37
实验 3.2 欧姆定律的应用	54
实验 3.3 用光电控制计时法测重力加速度	60
实验 3.4 薄透镜焦距的测定	64
第四篇 基本实验	73
实验 4.1 用三线扭摆测定物体的转动惯量	73
实验 4.2 用转动惯量仪研究刚体的转动	80
实验 4.3 金属弹性模量的测量	85
实验 4.4 用拉脱法测定液体的表面张力系数	91
实验 4.5 导热系数的测定	96
实验 4.6 静电场的描绘	101
实验 4.7 用补偿法测定电池的电动势	106
实验 4.8 示波器的使用	111
实验 4.9 声速测定	126
实验 4.10 多用表的使用	132
实验 4.11 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	139
实验 4.12 惠斯通电桥及其应用	143
实验 4.13 等厚干涉——牛顿环	149
实验 4.14 偏振光的研究	154
第五篇 综合性实验	158
实验 5.1 用霍尔元件测量磁场	158

实验 5.2	电表的改装和校准	165
实验 5.3	分光计的调整	168
实验 5.4	用最小偏向角法测量三棱镜折射率	178
实验 5.5	光栅常数的测定	184
实验 5.6	用光电效应测定普朗克常量	189
实验 5.7	迈克耳孙干涉仪	194
实验 5.8	密立根油滴实验	201
实验 5.9	弗兰克-赫兹实验	210
实验 5.10	全息照相	216
实验 5.11	数码相机照相实验	223
实验 5.12	用计算机研究振动的合成	232
第六篇 设计性实验		239
实验 6.1	用单摆测重力加速度	239
实验 6.2	用焦利氏秤测弹簧的有效质量	239
实验 6.3	测定金属铜棒的线膨胀系数 α	239
实验 6.4	良导体的导热系数的测定	240
实验 6.5	用半偏法测定电流计的内阻 R_g	240
实验 6.6	音叉共振观测	240
实验 6.7	用惠斯通电桥给光敏二极管定标	241
实验 6.8	热电偶定标	241
实验 6.9	测量光线通过三棱镜的最小偏向角	241
实验 6.10	用双棱镜测量钠光的波长	241
附录		242
附录 1	随机变量的概率分布	242
附录 2	判别粗大误差——格拉布斯(Grubbs)准则	251
附录 3	实验的测量方法	252
附录 4	实验数据的处理方法	256
附录 5	学生实验报告范例	267
附录 6	物理实验常数表	271

第一篇 物理实验绪论

一、物理实验的地位和作用

实践是检验真理的唯一标准。实验是人类实践活动的一种特殊形式,是专门为了验证一个想法、一个理论,或尝试某种方法,探索未知领域,而进行的有目的、有预期的实践活动。通过实验,可以加快自然规律的发现和理论的形成,也只有通过实验,才能确定科学理论。通过实验来发展科学已成为几个世纪以来科学发展的基本形式之一,而且是非常普遍和非常重要的形式。任何其他形式发展起来的理论都需要经过实验的检验才能确立。

物理学是一门实验科学,任何物理规律和理论都必须经受实践的反复检验,由此而不断发展。

今天,通过学习物理实验这门课程,既可以重现重要的物理定理、定律的发现过程,又可以从中学学习探索未知领域的科学思想方法,在实验中培养动手能力,提高观察和分析问题的能力,形成理论联系实际的作风和实事求是、严肃认真的科学态度。

通过学习,学生受到基本的实验技能训练,学会一些基本的测量方法,熟悉常规仪器的基本原理、性能和用法,学会正确记录实验数据和处理实验数据,分析实验结果,以及书写实验报告,进而培养探索创新精神。

二、实验的基本程序

1. 预习

任何实验都是在明确的目的和充分的理论指导下进行的。没有无目的的实验,更没有无理论思想指导的实验,所以在实验前要理解实验原理、了解实验过程和步骤、主要仪器的使用方法和注意事项,写好实验预习报告。预习报告要求完成实验报告的四个部分,包括实验原理、实验步骤、列出相关数据表格、回答预习思考题。只有写好预习报告才允许进入实验室进行实验。实验前的充分准备是做好实验的前提。

2. 操作

在了解仪器的工作原理与用法及注意事项的基础上,根据实验原理与要求调整仪器,进行实验观察和测量,并将原始数据记录在预先设计的数据表上,实验结束后将其整理写入报告。

操作是做好实验的关键,操作中能否善于观察和分析实验现象,能否采用合适的实验手段和方法,能否正确使用仪器,能否真实准确地记录好实验数据,都是至关重要的.对异常现象要特别关注,遇到一些不能解释的现象要多加探讨.

如果操作中出现不正常现象(如烧焦味、异常声音等)要及时向指导老师报告.

操作完毕,得到指导老师对所测数据签字认可,并把所用的实验仪器整理好以后,方可离开实验室.

3. 报告

完成实验报告是一个实验成功的最后一步,仅有完整的测量数据不一定能顺利地得出预期的结果.不具备分析处理数据的能力,同样不能得出良好的实验结果.例如,第谷·布拉赫(Tycho Brahe, 1546~1601)对行星运动所作的观察记录,非常准确,但没有分析出行星运动规律;开普勒(J. Kepler, 1571~1630)正是用了第谷观察的数据,分析总结得出了开普勒行星运动三定律.

实验报告是实验的书面文件.包括实验名称、实验者姓名、实验日期和实验正文.实验正文包括实验目的、实验原理(包括原理图、电路图、装置图、计算公式)、实验内容和步骤、实验仪器、数据处理、实验结论,回答思考题和讨论题.

实验原理要在自己理解的基础上,简单地进行概括,切忌连篇照抄.测量原理要理解透彻,实验内容和步骤要明白无误.

对实验中所用的主要仪器设备、规格和编号要作好记录,这样可以培养选用仪器的能力.在必要时也方便对实验作重复观测.

写报告时要把记录的实验数据整理后写入报告.对实验数据的处理(计算或作图)、不确定度的分析(分析不确定度范围及产生的主要原因)要首先列出主要计算公式,然后再把数据代入计算,对得到的实验结果要作出适当的讨论,以 $A = \bar{A} \pm U_A$ 形式表示实验结果,其中 U_A 为物理量 A 的不确定度(参阅 1.2 节),并计算相对不确定度 $U_r = \frac{U_A}{\bar{A}} \times 100\%$. 最好能把在实验中观察到的异常现象记录在实验报告上,并作出可能的解释,对实验方法和仪器提出改进建议,写出实验心得.

1.1 测量与有效数字

测量分为直接测量和间接测量.直接测量是把待测量与同类的标准量进行比较的过程,得到待测量值的大小和单位,例如用游标卡尺测物体的长度、用天平测物体的质量等;间接测量的待测量则是由若干直接测量的量经过一定的函数关系

运算后获得,例如,圆柱体的体积 $V = \frac{\pi}{4} d^2 h$, 梯形面积 $S = \frac{a+b}{2} h$.

那么,一个测量结果究竟应该给出多少位数字呢? 经常有学生把数据保留两位小数,也有许多学生把计算器(机)算出的一大串数字全部抄写在实验报告上,这

样做都是错误的。其实,当一个实验方案确定后,所选用的测量仪器就已经决定了实验结果的数位,这些数位不能由主观随意而定。

一、有效数字

实验结果给出的数字叫做**有效数字**。有效数字给出测量的有效信息,是由不确定度(参阅 1.2 节)决定的。有效数字的第一个影响因素就是有效读数。那么如何进行有效读数呢?下面举例说明。

用两把分度分别为毫米(钢卷尺)和厘米(皮尺)的尺,测量一段木杆的长度。用厘米分度的尺测量的读数为 6.7 cm,其中 6 是准确读数,7 是估计读数;估计读数也叫欠准数字。用毫米分度的尺测量的读数为 6.77 cm,其中 6.7 为准确读数,最后一个 7 为估计读数。如图 1.1.1 所示。

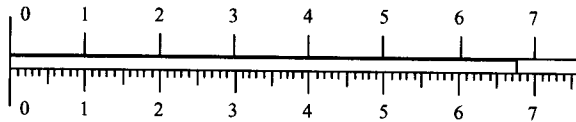


图 1.1.1 标尺读数图

准确数与估计数构成有效数字,也就是说有效读数在末位上的数字是有可疑的,具有不确定性。但它能使测量结果更准确,没有这一位数字,测量值与待测量的实际值偏差就更大,所以测量时都要在末位估读。

例如,实验室中测量微小长度的螺旋测微器,将 0.5 mm 分成 50 格,每格 0.01 mm,再估计 1 位,可读到 0.001 mm 数位上,故称螺旋测微器为千分卡。

分度为 1 ° 的温度计,可以读到 0.1 ° 数位上。

用电流表、电压表测量电流强度和电压时,可以按最小刻度的十分之一估读 1 位。

用电子表测量物理量时,如电子秒表能读出“××分××秒××”,即能读到 1/100 s,最后一位为欠准数字。数字表读数的最后一位都是欠准数字。

对于 50 分度的游标卡尺,因为主尺上 49 mm 在辅尺(游标)上分成 50 格,故称 50 分度游标卡尺,其精度为 0.02 mm,读数时按游标零点处读出主尺上的毫米数,再找到主尺和游标对齐的位置,读数的末位是 0.02 mm 的倍数,与主尺上的毫米数相加,得有效数字。注意末位不会出现奇数,末位就是欠准数。

在一次测量中,数字前面的“0”不作为有效数字,它通常由选取的单位所决定,而数字后面的“0”则是有效数字,它反映了所取的实验工具的精度和测量的精度。

二、有效数字的运算规则

影响有效数字的第二个因素就是有效数字的运算. 有效数字运算规则如下:

(1) 加减规则.

$$N = A - B + C - D$$

在同一单位下, 各因子中欠准数位最高的那个数字就决定了结果的有效数字的最后一位数. 例如 $N = 15.43 - 4.263 + 503.2 - 87 = 427$.

$$\begin{array}{r} 15.4\bar{3} \\ - 4.26\bar{3} \\ \hline 11.1\bar{67} \end{array} \quad \begin{array}{r} 11.1\bar{67} \\ + 503.\bar{2} \\ \hline 514.\bar{367} \end{array} \quad \begin{array}{r} 514.3\bar{67} \\ - 8\bar{7} \\ \hline 427.3\bar{67} \end{array}$$

在上面的竖式中, 有上划线的数字表示欠准数, 最后结果欠准数保留 1 位.

(2) 乘除运算.

$$N = \frac{AB}{C}$$

各因子中有效数字位数最少的因子决定结果的有效数字位数. 例如

$$N = \frac{\pi}{4} \times (4.326)^2 \times \frac{5.64}{32.44} = 2.55$$

(3) 准确数与常数及一些系数不影响有效数字, 但在具体运用时所取数字的位数不得少于测量所得的各因子中有效数字最少的那个因子的数位.

(4) 四则混合运算.

按先进行括号内的运算, 在括号内以先乘除后加减的顺序一步步地按有效数字运算规则进行计算.

注: 其他函数有效数字运算参阅有关书籍, 这里不再详述.

三、不确定度对有效数字的影响

影响有效数字的第三个因素就是不确定度的分析.

在测量结果中, 结果的有效数字应当与不确定度相符. 一般的不确定度数字最多保留 2 位. 在普通物理实验中只要求保留 1 位不确定度数字, 所以有效数字的最后 1 位是测量的不确定度所在的数位.

【本书要点】

测量得到的实验值反映测量仪器的精度, 不同测量仪器测量同一个物理量得到的有效数字位数是不一样的. 也就是说, 有效数字位数反映出测量的精度.

有效数字的运算规则, 按优先级顺序进行运算, 欠准数字与准确数字相加减乘

除得欠准数字,欠准数字与欠准数字相加减乘除得欠准数字.有效数字相加减时,小数点位数要对齐后进行加减运算,计算结果只保留1位欠准数字.有效数字相乘除时,各因子中有效数字位数最少的因子决定结果的有效数字位数.注意:常数因子的位数应取得不少于最少位数的那个因子的位数.准确数不影响有效数字运算的位数.

1.2 实验数据的分析与结果表述

作为一个测量结果,不仅应当提供被测对象的量值大小和单位,还应该对量值本身的可靠程度作出判断.不知道可靠程度的测量值,是没有多大意义的.不确定度就是用于表征测量值可靠程度的一个定量指标.

在确定的条件下,待测量具有的客观实际值叫真值.当被测量对象和测量过程完全确定,且所有测量的不完善性完全排除时,则测量值就等于真值.但是,严格的完善测量难以做到,故真值也不可达.由于受到测量的环境、方法、仪器以及观测者等诸多因素的影响,使得测量值偏离真值,这种偏差叫做**误差**(error).设被测量的真值为 a ,测量值 x 的绝对误差 Δ 定义为

$$\Delta = |x - a|$$

由于真值不可及,因此,误差只是一个理想概念,无法通过测量来给出.

在实际测量中,保持测量条件相同,对一个被测量量进行多次测量,得到的一组数据,叫做一组等精度的测量值,即一个测量列.这些测量值的算术平均值叫做这个测量列的最佳估计值(或者叫做数学期望).设被测量量 x 的测量值为 x_1 ,

$x_2, x_3, \dots, x_n$,则最佳估计值为 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.最佳估计值只能逼近真值.所以,

实验中用**不确定度**(uncertainty) U 表示测量值与最佳估计值的偏差

$$U = |x - \bar{x}|$$

这样定义的不确定度是绝对不确定度,在没有特别指明时,不确定度就是用绝对不确定度来表示.而有些问题往往需要用相对不确定度来表示,相对不确定度是绝对不确定度与测量列的最佳估计值 $\bar{x}$ 之比.相对不确定度常用百分数表示,即

$$U_r = \frac{U}{\bar{x}} \times 100\%$$

例如,某物体的长度测量值为10 cm,不确定度为1 cm与另一物体的长度测量值为100 cm,不确定度也为1 cm,它们的绝对不确定度相同,而相对不确定度则不同,前者是后者的10倍.所以相对不确定度更能反映出测量的精度,例如某测量值的相对不确定度为0.01%时,则说其精度为 10^{-4} .

不确定度是说明测量结果的一个参数,用于表征合理赋予被测量值的分散性;

也就是表征被测量量所处量值范围的一个评定。它是说明测量结果可靠程度的一个定量指标。由此可见,误差与不确定度是有区别的,误差是一个理想的概念,不能准确知道,但不确定度反映误差存在分布的范围,可由不确定度理论求得。

不确定度并不是实际值的误差,也不代表误差的绝对值,它只提供了在概率含义下的误差可能取值范围的一种估计。在许多情况下,测量值可能相当接近于(约定)真值,两者之间的差值明显地小于不确定度。真值落在不确定度提供的范围之外的可能性很小。

表达测量不确定度的大小,有两个常用的术语。其一是精密度(precision),用来描述重复测量的离散程度,它反映随机不确定度的大小,精密度高则离散小,重复性好;另一个是准确度(accuracy),用来描述测量结果与被测量真值之间的一致程度,它反映系统不确定度和随机不确定度综合的结果。准确度越高,则测量值越接近于真值。另外还有一些教科书中用正确度来反映系统不确定度的大小。

作为一种形象的说明,可参照图 1.2.1 来帮助理解。

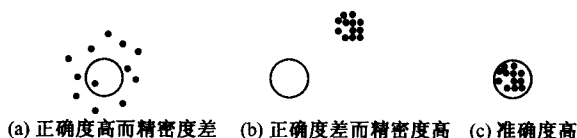


图 1.2.1 精密度、正确度和准确度图例

1. 误差的分类

当我们分析导致测量值偏离其真值的原因时,可以根据误差出现的不同特点,把误差分为系统误差和随机误差。

1) 系统误差

在一定的实验条件下,对同一被测量量进行多次测量时,保持恒定或以预知的方式变化的测量误差称为系统误差。它有两类:一类是固定值的系统误差,其值(包括正负号)恒定;二是随条件变化的系统误差,其值以确定的、已知的规律随某些测量条件变化。系统误差来源于测量装置(标准器、仪器、附件和电源等)、环境(温度、湿度、气压、振动和电磁辐射等)、方法(理论公式的近似限制或测量方法不完善)以及人员(测量者感官不完善、具有某种习惯和偏向)等方面。

在测量之前,测量者要对可能产生系统误差的环节作仔细的分析,从产生根源上加以消除。例如,若系统误差来自于仪器不准确或使用不当,则应该把仪器校准并按规定的使用条件去使用;若理论公式是近似的,则应在计算时加以修正;若测量方法上存在着某种因素会带来系统误差,则应估计其影响的大小或改变测量方法以消除其影响;若外界环境条件急剧变化,或存在某种干扰,则应设法稳定实验

条件,排除有关干扰;另外,有些物理现象存在着统计涨落,测量仪器产生零点漂移,控制的实验条件随时间而明显变化等,这些因素都带来系统误差,总之,对实验本身的分析研究,往往使我们能直接找出系统误差的来源并估计其大小.

2) 随机误差

在一定条件下对被测量进行多次测量时,以不可预知的随机方式变化的测量误差称为随机误差,这种误差时大时小,时正时负,没有规律性,任何计量性测量中随机误差总是存在的.

随机误差来源于许多不可控因素的影响,例如环境的无规则起伏,仪器性能的微小波动,观察者感官分辨本领的限制,以及一些尚未发现的因素等. 这种误差对每一次测量来说没有必然的规律性,但进行多次重复测量时会呈现出统计规律性. 虽然无法消除或补偿测量结果的随机误差,但增加观测次数可使它减小,并可用统计方法估算其大小.

假设有一个物理量的测量值为 x , 真值为 a , 横坐标表示误差 $\Delta = x - a$, 纵坐标表示误差出现的概率密度 $f(\Delta)$, $f(\Delta) - \Delta$ 关系曲线具有左右对称性,称为正态分布曲线,如图 1.2.2 所示.

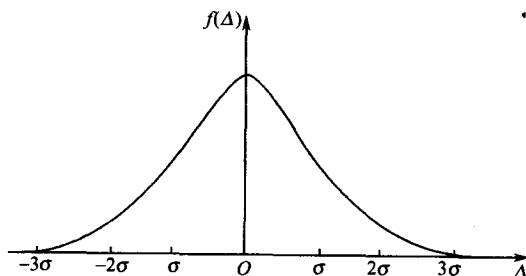


图 1.2.2 正态分布

由数理统计理论可知

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

式中,特征量 σ 定义为

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \Delta^2 f(\Delta) d\Delta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2}$$

σ 称为标准差. 数理统计理论证明,测量值 x_i 落在 $[a - \sigma, a + \sigma]$ 范围内的可能性达到 68.3%, 落在 $[a - 2\sigma, a + 2\sigma]$ 范围内的可能性达到 95.5%, 落在 $[a - 3\sigma, a + 3\sigma]$ 范围内的可能性达到 99.7%. 详细参阅附录 1.

值得注意的是,在实验中测量的次数不可能是无穷多次,一般只进行8~10

次,所以,常用标准差的估计值 $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 来表示有限次测量值的标准差,叫**样本不确定度**.

3) 随机误差与系统误差的关系

随机误差与系统误差是两种不同性质的误差,但它们又有着内在联系. 在一定的实验条件下,它们有自己的内涵和界限,但当条件变化时,彼此又可能互相转化. 随机误差本身正是许多微小的、独立的、难以控制的、不可分解的系统误差的随机组合. 随着测量技术的发展和实验设备的改进,使有些造成随机误差的因素能够得到控制,某些随机误差就可确定为系统误差,并得到改善或修正(参阅实验5.1中的实验原理),而有些规律复杂的未定系统误差,也可以通过改变测量状态使之随机化,这种系统误差又可当作随机误差处理. 事实上,对那些微小的未定系统误差,很难做到在测量时保证其确定的状态,因此它们就会像随机误差那样,呈现出某种随机性.

在实际测量中,虽然尽可能地设法限制和消除系统误差,通过多次测量来减小随机误差,但两种误差还会同时存在,这时需按其测量结果的影响分别对待.

(1) 若系统误差经技术处理后已消除,或远小于随机误差,可按纯随机误差处理;

(2) 若系统误差的影响远大于随机误差,可按纯系统误差处理.

(3) 若系统误差与随机误差的影响差别不大,两者均不可忽略,则应按不同的方法分别处理并综合两种误差.

4) 粗差

还有一种由于环境或人为因素导致的错误叫做粗差. 在数值上粗差表现为明显超出规定条件下预期值的不确定度. 在实验过程中,由于某种差错使得测量值明显偏离正常测量结果,例如读错数、记错数或者环境条件突然变化而引起测量值的错误等,在对同一被测量进行多次测量中,个别带有过失粗差的测量值可用统计方法鉴别出来. 凡是带有过失粗差的测量值称为坏值,虽然在测量时没有被发现,但我们应把测量值中这种含有粗差的值剔除. 这是实验数据处理中首先要进行的一项工作. 在实验数据处理中,应按一定的规则来剔除含有粗差的测量值. 必须指出,对原始数据的处理应持极为慎重的科学态度,绝不应该把因测量的随机波动性而含有正常偏差的数据剔除掉,随意舍弃偏差较大的数据而造成实验结果的虚假是绝对不允许的.

判别测量值中是否含有应该剔除的异常值,在统计学中已经建立了多种准则. 当重复测量次数较多时,拉伊达(paiita)准则(即3倍样本不确定度准则)是一种最

为简便的方法. 这种判别方法是先求出测量值的平均值 $\bar{x}$ 和样本不确定度 $s =$

$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, 若某可疑数据 x_d 与平均值 $\bar{x}$ 的偏差满足 $|x_d - \bar{x}| > 3s$ 时, 则 x_d 应该剔除. 因为前面提到测量值与平均值的偏差在 $\pm 3s$ 范围内的置信概率已达 99.7%, 超出这个范围以外的概率只有 0.3%. 该异常值剔除后, 还应对其余下的测量值的数据用同样的方法检验是否存在异常值.

应当指出拉伊达准则对于重复测量次数较少 ($n < 5$) 的情况来说, 其判别可靠性是不够好的. 更可靠的剔除可疑数据的方法有格拉布斯 (Grubbs) 准则 (参阅附录 2) 等.

2. 不确定度的评定方法

由于测量误差不可避免, 使得真值不能确定; 真值不知道, 也就无法确定误差的大小, 因此实验数据处理就只能求出实验的最佳估计值及其不确定度, 通常把结果表示为

$$\text{测量值} = \text{最佳估计值} \pm \text{不确定度}$$

实验测量中消除了已定的系统误差后仍然存在随机误差和未定系统误差. 通常把系统误差存在的范围叫做系统不确定度, 随机误差存在的范围叫做随机不确定度. 不确定度是对误差可能取值范围的一种估计, 一般包含有多个分量. 用标准差表示的测量不确定度称为标准不确定度. 按其数值评定方法的不同, 可分为 A 类和 B 类标准不确定度.

A 类: 由统计分析方法评定的不确定度分量.

B 类: 由其他方法评定的不确定度分量.

由于不确定度的评定要合理赋予被测量值的不确定区间, 而不同的置信概率所表示的不确定区间是不同的, 因此还应当表明是在多大概率含义下的不确定度. 如果 A 类和 B 类不确定度分量均以 1 个标准差值给定, 则合成不确定度也是一个标准差, 用 u_c 表示, 称为标准不确定度. 如果把合成的标准不确定度 u_c 乘以一个与一定置信概率相联系的包含因子 (又称覆盖因子) k , 则 $U = ku_c$, 称为总不确定度 (或展伸不确定度).

不确定度评定是以统一的观点来对误差进行估计的, A 类和 B 类只说明不确定度数值评定方法有所不同, 并不是随机不确定度和系统不确定度的区分, 把 A 类方法理解为对随机误差的估计而把 B 类方法说成是对系统误差的估计是不妥当的. 实际上, 许多未定系统误差由于测量条件的人为改变或不可能实现严格控制, 同样会表现出随机性, 也可用 A 类方法来估计, 而随机误差有时也会以 B 类方式出现. 对于未能进行 n 次重复测量的情况, 其随机误差就不可能利用统计方法处理, 而要利用被测量可能变化的信息进行判断, 这就属于 B 类不确定度分量.

还有一些 A、B 类分量本身反映了若干随机误差和系统误差作用的综合.

1) A 类标准不确定度的评定

A 类标准不确定度是由统计方法评定的. 统计方法是对于大量可重复事件普遍运用的方法. 对于大量可重复事件, 虽然单个事件出现的状态具有很大的偶然性, 但事件的总体却表现出一定的规律性. 这种规律性就叫做统计规律性.

单个事件表现出来的偶然性就叫做随机性. 我们可以用一个变量代表单个事件, 这样的变量也就叫做随机变量. 由于随机变量受到不同因素的影响, 或者物理现象本身的统计性差异, 使得随机变量的概率分布形式多种多样. 常见的分布有二项式分布、泊松分布、均匀分布和正态分布(又称高斯分布). 实用中最重要的概率分布是正态分布, 参见附录 1.

由正态分布得到样本平均值的标准偏差为

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = u_{\bar{x}}$$

叫标准不确定度, 是 A 类标准不确定度的评定分量.

2) B 类标准不确定度的评定

B 类标准不确定度是用非统计分析的其他方法评定的, 对于那些未能进行多次重复测量的情况, 显然不能进行统计处理, 这时要利用被测量量 x 可能变化的全部可用信息进行科学判断. 作为不确定度的评定依据这些信息包括以前的测量数据、测量中所用装置或材料性能的了解程度、厂商的技术指标、检定证书或其他证书的数据等. 在测量精度要求不高或某个量的测量不确定度的大小对实验结果无大的影响时, 常用仪器的出厂公差或仪器不确定度限作为一次测量的不确定度. B 类标准不确定度常用 $u(x)$ 表示.

仪器不确定度限是指在正确使用条件下, 仪器可能出现的最大不确定度. 通常按以下四种方法确定:

(1) 有刻度的仪器, 如未标出精度(等级)取其最小分度之半为测量不确定度限, 即 $U = e/2$, e 为最小分度.

(2) 标有精度的仪器仪表, 按精度作为测量不确定度. 例如精度 $\epsilon = 0.02 \text{ mm}$ 的卡尺, 取 $U = 0.02 \text{ mm}$.

(3) 有精度等级的仪器仪表, 按精度等级计算不确定度.

在多档连续示值的仪表等计量器具中, 各刻度点的示值和它所对应的真值都不同, 计算相对不确定度时因所有的分母都不同而很不方便, 同时也难以表征仪表的准确度等级. 为此引入一种简化而实用的相对不确定度, 取名为引用不确定度. 它等于计量器具示值的绝对不确定度除以某特定值, 这个特定值通常是仪器测量范围的上限, 或零点两侧测量范围之和. 引用不确定度通常也是以百分数给出. 电工仪表的精度等级分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 等七级, 就是以所属