

DAXUEWULISHIYAN

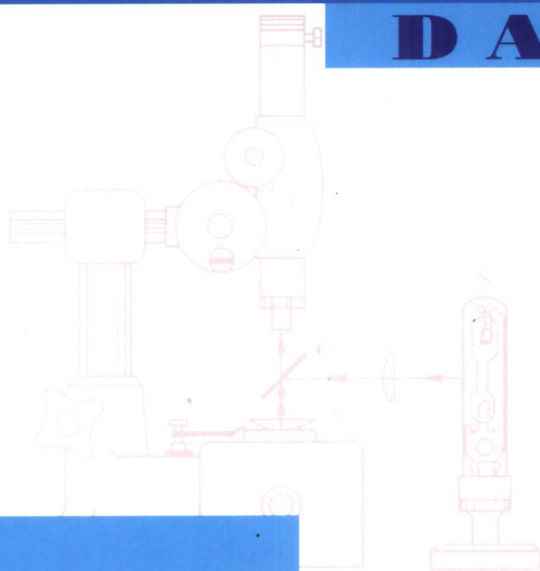
DAXUEWULISHIYAN

大学物理实验

DAXUEWULISHIYAN

徐扬子 丁益民 主编

D A X U E W U



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本教材是遵照教育部颁发的工科本科物理实验课程教学要求编写而成的。全书共七章,系统介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识,全面阐述了物理实验中常用的七种实验测量方法,安排了基础性实验 12 个、应用性和设计性实验 11 个、综合及近代物理实验 12 个,并介绍了物理实验的计算机模拟。附录一、附录二等编入了与物理实验有关的知识性内容,其目的是吸引和引导学生学好本课程,培养学生全面的科学素质。

本教材可作为高等院校非物理类专业各层次学生的物理实验教学用书或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/徐扬子,丁益民主编. - 北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-017768-1

I. 大… II. ①徐…②丁… 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(2006)第 089412 号

责任编辑:杨瑰玉/责任校对:王望容

责任印制:高 嵘/封面设计:宝 典

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>

武汉大学出版社印刷总厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006 年 8 月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1~5 000 字数:330 000

定价:22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本教材遵照教育部颁发的工科本科物理实验课程教学要求,以培养面向 21 世纪具有创新精神和实验能力高素质人才模式的需求为目标,根据“加强基础,重视应用,拓宽口径,培养能力”的教改精神,结合我校各专业设置特点和实验室仪器设备情况,并吸取了许多兄弟院校的宝贵意见编写而成。

大学物理实验课是大学理工科学生必修的一门重要基础实验课程,也是相关专业的选修课,是培养学生创新精神和实验能力、提高学生科学素质、打下扎实基础的极其重要的教学内容和环节。随着物理实验教学改革的不断深入,近年来我们对大学物理实验选题做了多次的调整、更新和扩充。全书除了注意保留必要的基础性实验外,增设了若干应用性、设计性和综合性实验,以提高物理实验的综合性 and 实用程度。此外,还根据物理学的发展和教学需要,编入了一些最重要、最基础的近代物理实验内容,把它们“普物化”,使得非物理专业的学生能够了解到一些近代物理实验技术,同时大力引进新技术,排出新实验,使大学物理实验紧跟时代发展步伐而不断更新,其中不少实验采用了计算机记录、采集和绘图,提高了大学物理实验的现代化水平。

在实验内容的编排上,充分考虑各专业的设置特点和要求,全书共分七章。第一章绪论,介绍了物理实验教学的重要性、教学目的和具体要求,引导学生尽快地进入实验课的规范学习。第二章测量与不确定度,系统地介绍了与大学物理实验有关的数据处理知识,让学生更好地掌握实验中的误差处理和评定不确定度的基本方法。第三章全面地阐述了物理实验中常用的七种实验测量方法,重视培养学生掌握实验观察、分析与研究的基本方法。第四章基础性实验,本章内容力求原理叙述清楚,推导公式完整,实验内容和要求具体,部分实验给出了数据表格,以便初学者学习,掌握实验规范,但选做内容部分要求学生自拟实验步骤(表格),独立完成。第五章应用性和设计性实验,主要提出实验的具体任务、要求和条件,由学生自拟实验方案在教师指导下完成实验。第六章综合及近代物理实验,可作为非物理专业不同层次学生的选做实验,以更好地体现分类指导与因材施教的原则,也有利于学生的个性发展和优秀学生的深造。第七章为物理实验的计算机模拟。教材中编入了附录一、附录二等相关内容,其目的是吸引和引导学生学好本课程,培养学生全面的科学素质和科学的世界观。

本教材是湖北大学基础物理实验教学示范中心近年来实验教学改革成果之一,凝集了广大教师和实验技术人员的智慧和劳动。参加这次编写工作的有丁益民(第一章,第二章,第七章,实验 2、4、14、15、24、25、26)、王仁琦(实验 5、6、22)、方振慈(实验 1、3、13)、潘瑞琨(实验 33、34、35)、王玮(实验 9)、徐扬子(第三章,实验 7、8、10、11、12、16~21、23、27~32,附录),教材的框架、统稿由徐扬子承担,最后由徐扬子、丁益民、成元发修改定稿。

在编写本教材过程中,我们参阅了清华大学、北京大学、复旦大学、南京大学、武汉大学、苏州大学、华中科技大学、中国科学技术大学等许多兄弟院校的教材,吸取了宝贵经验,并得到了科学出版社的大力协助与支持,编者谨向这些教材的作者和科学出版社表示深深的谢意。

由于编者水平有限，教材中难免有缺点和错误之处，敬请广大师生给予批评指正，并在使用过程中把您的感受和意见及时告诉我们，以利于我们进一步的修订。

编 者
2006 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 物理实验课的目的和任务	1
第二节 物理实验课的基本程序	1
第二章 测量与不确定度	3
第一节 测量	3
第二节 误差	4
第三节 误差的计算	8
第四节 不确定度和测量结果的表示	10
第五节 有效数字	14
第六节 实验数据的处理方法	17
第三章 物理实验中常用的测量方法	26
第一节 比较法	26
第二节 放大法	27
第三节 平衡法	28
第四节 补偿法	28
第五节 模拟法	29
第六节 干涉法	30
第七节 转换法	30
第四章 基础实验	33
实验 1 长度测量和物质密度的测定	33
实验 2 用三线摆法测定物体的转动惯量	37
实验 3 拉伸法测金属丝的杨氏模量	41
实验 4 气体比热容比的测定	43
实验 5 电阻元件的伏安特性	46
实验 6 用惠斯通电桥测电阻	49
实验 7 用模拟法测绘静电场	54
实验 8 圆线圈和亥姆霍兹线圈的磁场	58
实验 9 示波器的使用	61
实验 10 薄透镜焦距的测定	69
实验 11 等厚干涉的应用	74
实验 12 用双棱镜干涉测钠光波长	78
第五章 应用性和设计性实验	82
实验 13 气垫导轨上弹簧振子振动的研究	82
实验 14 液体表面张力系数的测定	88
实验 15 导热系数的测量	90

实验 16	补偿原理的应用	94
实验 17	电表的改装与校准	97
实验 18	滑线电阻的限流特性和分压特性的研究	102
实验 19	测量导体的电阻率	104
实验 20	RLC电路的暂态过程研究	106
实验 21	望远镜与显微镜的组装	111
实验 22	光栅的特性分析和应用	114
实验 23	光学材料折射率的测定	120
第六章	综合性及近代物理实验	126
实验 24	空气、液体及固体介质的声速测量	126
实验 25	干涉法测定金属的线膨胀系数	132
实验 26	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	135
实验 27	电子束的电偏转与磁偏转研究	140
实验 28	光电效应和普朗克常量的测定	147
实验 29	CCD微机密立根油滴实验	154
实验 30	全息照相与观察	160
实验 31	非线性电路振荡周期的分岔与混沌实验	164
实验 32	用磁阻传感器测量地磁场	167
实验 33	光谱分析	169
实验 34	核磁共振	173
实验 35	真空镀膜	177
第七章	物理实验的计算机模拟	180
第一节	计算机仿真模拟的过程	180
第二节	物理模拟实验实例	181
附录一	世界十大经典物理实验	188
附录二	诺贝尔物理学奖与物理实验	194
附录三	中华人民共和国法定计量单位	200
附录四	物理学常用数表	202
参考文献		206

第一章 绪 论

第一节 物理实验课的目的和任务

物理实验是大学理工科专业学生的一门专业基础课,也是他们进入大学后的第一门实验性课程,是各门实验课的基础,对培养学生在实验中观察、分析和发现问题的能力以及培养学生动手能力和创新精神等方面都起着重要的作用。

物理实验的目的不仅在于掌握实验的内容,更重要的是注重实验进行的过程。在物理实验的过程中,学生不仅掌握了知识,培养了能力,而且能通过实验过程了解科学研究的方法,树立严谨的科学态度和一丝不苟的工作作风,为将来的工作和学习打下坚实的基础。物理实验课程作为一门独立的基础课程,它有如下三个方面的目的和任务:

(1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能;同时通过对物理原理的运用、物理实验方法的训练加深学生对物理学基本原理的理解。

(2) 培养和提高科学实验的能力。

1) 信息处理能力:通过自行阅读实验教材或网上资料,正确理解实验内容,在实验前做好实验准备,在实验后运用计算机处理实验数据。

2) 动手实践能力:借助教材或仪器说明书,正确调整和使用常用仪器。

3) 思维判断能力:运用物理理论,对实验现象进行分析和判断。

4) 书面表达能力:正确记录和处理数据,撰写合格的实验报告。

5) 综合设计能力:根据课题要求,确定实验方法和条件,合理选择实验仪器,拟定具体的实验步骤。

6) 科技创新能力:通过进行研究性实验和设计性实验,了解知识的发现与创新的过程,强化创新意识,促进创新思维。

(3) 培养学生的科学实验素养。在物理实验过程中,培养学生实事求是的科学作风、严肃认真的工作态度、主动进取的探索精神、相互协作的团队意识和爱护公物的优良品质,为后续课程的学习乃至终身教育奠定良好的基础。

第二节 物理实验课的基本程序

物理实验课与理论课不同,它采用的是开放式教学方式,使学生具有更大灵活性和自由度。实验课的基本程序是实验预约、实验预习、课堂操作与数据记录、数据处理与实验报告。

一、实验预约

每学期开学前,公布本学期的实验项目与时间安排。学生可根据自己的实际情况,预约实验,以后必须按照自己预约的时间,到相关实验室独立完成预约的实验。

二、实验预习

实验课前应该认真预习,仔细阅读教材和实验中心网站上的实验指导,弄清实验目的、实验原理和实验方法,了解仪器的结构和调节要求。在充分预习的基础上设计好实验数据记录表格,写好预习报告,为实验课做好准备。

三、实验操作与数据记录

学生在认真预习的基础上,进行实验操作。在进入实验室后,首先要接受教师对预习情况的检查。实验开始前要仔细阅读实验指导书和仪器使用说明书,务必牢记实验的注意事项,并在教师指导下掌握实验仪器的调整方法。实验课是锻炼实践能力、培养创造精神的极好机会。应注重实验过程,认真观察,独立思考,手脑并用,提高运用理论知识和已有的经验分析解决问题的能力,培养严谨、耐心、实事求是的科学态度和探索、求真的科学精神。

在实验操作过程中,要仔细观察物理现象和测量数据,如实记录原始数据,原始数据必须是真实的,不允许抄袭和任意涂改。完成实验后全部数据应交指导老师检查,通过检查,教师在预习报告和数据记录草稿上签字后,才能切断电源,整理好实验装置,结束本次实验。

四、数据处理与实验报告

实验课后应及时处理数据,完成报告并在规定的时间内交到相关实验室。实验报告要求清洁整齐,重点突出,语言简练,制图制表规范,字迹端正清晰。

实验报告分两次完成,预习报告即实验报告的前半部分(包括实验名称、实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容)应在上实验课前写好,其余部分实验课后再接着完成。

完整的实验报告应包括下列项目:

1. 实验名称

2. 实验目的

简单地写明本次实验的目的。

3. 实验原理

用简洁的语言说明实验原理,给出基本公式并说明公式及其中各物理量的意义,绘制重要的原理图。

4. 实验仪器

主要仪器及其型号、精度等有关参数。

5. 实验内容

简明扼要地写出实验研究的内容和重要步骤,绘制主要的线路图和光路图。

6. 数据处理

按要求设计科学、合理的表格,首先将整理好的原始数据填入表格内,再根据每个实验的具体要求进行数据处理。计算待测量要写明所用公式并代入数据。要求作图的必须用坐标纸;要求计算不确定度的必须给出每个不确定度分量及总不确定度的计算方法、计算过程和计算结果。最后应按教材要求给出完整的结果表述,数据处理提倡采用计算机处理。

7. 结果分析

认真分析、讨论本次实验的结果及问题,并对实验中的问题和实验方法提出改进的设想和建议。

第二章 测量与不确定度

第一节 测 量

一、测量

测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较的过程。其中倍数称为待测物理量的数值，选作的计量标准称为单位。因此，一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成，缺一不可。

作为比较标准的测量单位，其大小是科学地人为规定的。按照中华人民共和国法定计量单位的规定，物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的，它选定了 7 个基本物理量，即长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)、热力学温标(开尔文)、物质的量(摩尔)和发光强度(坎德拉)的单位是基本单位，其他物理量的单位可由这些基本单位导出，故称为导出单位。

二、测量分类

根据获得数据的方法不同，测量可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量。例如用米尺测长度、用温度计测量温度、用电压表测电压等都是直接测量，所得的物理量如长度、温度、电压等称为直接测量量。

2. 间接测量

在物理实验中，大多数物理量没有直接测量的量具，无法进行直接测量，而需依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系求出，这样的测量就称为间接测量。如用单摆法测重力加速度 g 时， T (周期)、 L (摆长)是直接测量量，而 g 就是间接测量量。

三、测量过程

为了在实验过程中正确地进行测量，我们要遵循以下过程。

1. 熟悉仪器

熟悉仪器的性能，掌握正确的使用方法和读数是每个学生必备的基本素质。例如：仪器的级别、量程、稳定性以及对环境的要求等。

2. 选择适当的测量仪器和测量方法

根据对实验测量精度的要求和测量范围，合理地选择仪器和方法。例如对长度、温度测量，我们可根据实验对测量精度的要求选取恰当的测量仪器，如表 2-1 所示。

3. 选择实验方法

在实验中不仅要了解仪器的级别、量程、稳定性等技术参数，而且还要学会采用正确的实验方法。

表 2-1 测量仪器的测量精度与测量范围

长度测量精度要求	1mm	0.02mm	0.005mm	0.0001mm	0.0000001mm
仪器	米尺	卡尺	千分尺	激光干涉仪	电子显微镜
温度测量范围(度)	<300	<600	>1600		
仪器	半导体或液体温度计	热电偶	红外高温计		

例如用电压表测电路中的电压时, 如果电表的内阻不变, 无论使用级别多高的电压表, 由测量方法引起的测量误差都不可避免。要减小上述测量方法引入的误差, 可采用补偿法进行测量, 或改用内阻很大($R_V \geq 200M\Omega$)的数字电压表。

4. 读数与记录

在进行测量时, 正确的读数和记录是关键。对于不同仪器有多种读数方法, 在以后的实验中将分别介绍, 在此仅谈一般规则。

(1) 如实记录仪器上显示的数值, 作为原始数据。对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪器, 通常在直接测量时, 要求估读一位(该位是有效数字的可疑位)。估读数一般取最小分度的 $1/10 \sim 1/2$ 。

(2) 若仪表的示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的, 如数字式显示仪表, 则只要记录全部数据即可。

(3) 需要指出的是有一些仪表, 虽然也有指针和刻度盘, 但指针跳动是以最小分格为单位的, 例如最常用的钟表, 有以秒为最小分度的时钟, 也有以 $1/10$ 或 $1/100$ 秒为最小分度的秒表, 因此, 对此类仪表不需要估读。

(4) 对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置, 是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的, 这时一般记下对齐线的数值, 不必进行更细的估读。

第二节 误 差

一、误差的概念及表示

1. 真值

任何量在一定客观条件下都具有不以人的意志为转移的固定大小, 这个客观大小称为该物理量的真值。

由于“绝对真值”的不可知性, 人们在长期的实践和科学研究中归纳出以下几种“真值”:

- (1) 理论真值: 包括理论设计值、公理值、理论公式计算值。
- (2) 约定真值: 国际计量大会规定的各种基本常数和基本单位标准。
- (3) 算术平均值: 指多次测量的平均结果, 当测量次数趋于无穷时, 算术平均值趋于真值。

2. 误差

测量结果与真值之间总是有一定的差异, 这种差异称为误差。

3. 误差公理

误差自始至终贯穿在一切科学实验之中。

4. 误差的表示

(1) 绝对误差是指测量值与被测量的真值的差, 即

$$\varepsilon = x - a \quad (1)$$

由于真值不可能知道,所以绝对误差也是不可知的,于是研究分析误差应从“残差”着手。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为某物理量 x 的测量值, $\bar{x}$ 为其算术平均值,则各测量值 x_i 和 $\bar{x}$ 之间的差称为残差,即

$$\delta_i = x_i - \bar{x} \quad (2)$$

(2) 相对误差是指绝对误差与被测量的真值的比值。由于真值是一理想量,实验中用测量的平均值来代替真值,即

$$E = \frac{\varepsilon}{a} \quad \text{或} \quad E = \frac{\varepsilon}{\bar{x}} \quad (3)$$

二、误差的分类

测量误差按其产生的原因与性质可分为系统误差、偶然误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下,多次测量同一物理量时,误差的大小和符号均保持不变,或当条件改变时,按某一确定的已知规律而变化的误差。

系统误差的特征是它的确定性,即实验条件一确定,系统误差就获得了一个客观上的确定值,一旦实验条件改变,系统误差也按一种确定的规律变化。

造成系统误差的原因有以下几个方面。

(1) 仪器误差:是指测量时由于所用的测量仪器、仪表不准确所引起的误差。

(2) 环境误差:是指因外界环境(如灯光、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。

(3) 方法误差:是指由于测量所依据的理论、实验方法不完善或实验条件不符合要求而导致的误差。

(4) 个人误差:是指由实验者的分辨能力、感觉器官的不完善以及生理变化、反应速度和固有习惯的不同等引起的误差(如估计读数始终偏大或偏小)。

系统误差的出现一般有较明确的原因,因此只要采取适当的措施对测量值进行修正,就可以使之减至最小。但是,在实验中仅靠增加测量次数并不能减小这种误差。

2. 偶然误差

偶然误差是指在相同条件下多次重复测量同一物理量时,测量结果的误差大小、符号均发生变化,其值时大时小,其符号时正时负,无法控制。

偶然误差的特征是随机性,即误差的大小和正负无法预计,但却服从一定的统计规律。在对某一物理量进行大量次数的重复测量时,发现它服从正态分布(高斯分布),如图 2-1 纵坐标表示概率,横坐标表示误差。

服从正态分布的偶然误差具有以下一些特性:

(1) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

(2) 对称性:绝对值相等的正负误差出现的概率相等。

(3) 有界性:在一定测量条件下,误差的绝对值不超过一定的范围。

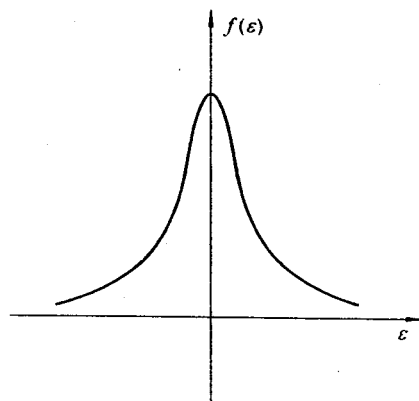


图 2-1 随机误差正态分布曲线

(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近于零，即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \varepsilon_i = 0 \quad (4)$$

可见，可用多次测量的算术平均值作为直接测量的近真值。

偶然误差的产生主要是由于人们的感官灵敏程度和仪器精密程度有限，各人的估读能力不一致，外界环境的干扰等，这些因素不尽全知，无法估计。由于偶然误差的出现服从正态分布规律，因此我们可以通过用多次测量求平均值的办法来减小偶然误差。

3. 粗大误差

粗大误差是由于测量者的过失(如使用方法不正确，实验方法不合理，粗心大意等)而引起的误差，简称粗差。

粗大误差的特征是人为性，初学者容易产生这种误差，但是若采取适当的措施，这种误差完全可避免。例如，采取细心检查、认真操作、重复测量、多人合作等措施都可有效地避免这类误差。粗大误差一般使实验结果远离物理规律，它的出现必将明显地歪曲测量结果，我们应当努力将其剔除。对于什么样的数据可以认为是有过失误差的坏数据而必须加以剔除，我们可以依据一些粗差判别准则来鉴别。

系统误差和偶然误差并不存在绝对的界限，其产生的根源均来自测量方法、设备装置、人员素质和环境的不完善。在一定条件下，这两种误差可以相互转化。例如：按一定基本尺寸制造的量块，存在着制造误差，对某一具体量块而言，制造误差是一确定数值，可以认为是系统误差，但对一批量块而言，制造误差属于偶然误差。掌握了误差转化的特点，可以将系统误差转化为偶然误差，用统计处理方法减小误差的影响，或将偶然误差转化为系统误差，用修正的方法减小其影响。

三、误差的判别与处理

(一) 粗差的判别与处理

在前面已谈过粗差及其生成的原因，这里主要谈谈粗差的鉴别和消除的方法。在判别某测量值是否包含粗差时，应做出详细的分析和研究。一般采用粗差判别准则来鉴别。

例 1 3σ 准则。

设 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是对某量的一组等精度测量，而且服从正态分布，由正态分布理论可知，真误差落在 $\pm 3\sigma$ 内的概率为 99.73%，即误差 $> \pm 3\sigma$ 的概率是 0.27%，属于小概率事件。如果发现在测量列中有：

$$|\delta_i| \geq 3\sigma \quad (1 \leq i \leq n) \quad (5)$$

式中 $\delta_i = x_i - \bar{x}$ ，为测量值 x_i 的残差则认为该测量值 x_i 包含粗大误差，通常将它称为异常值，应剔除。

对于粗差除了设法从测量结果中鉴别和剔除外，首先是强化测量者严谨的科学态度和实事求是的工作作风，其次要注意保证实验条件和环境的稳定性，尽可能避免实验环境和条件的突变导致粗差的产生。

(二) 系统误差的判别与处理

在测量过程中，发现有系统误差存在时，我们要对产生系统误差的因素做进一步分析比

较，找出减小系统误差的方法。

1. 分析产生系统误差的主要原因

从产生误差根源上消除系统误差是最有效的办法，但前提条件是必须预先知道产生误差的因素。如前所述，系统误差具有确定性和有规律性，所以导致系统误差产生的因素也是可确定的或有规律可循的，我们可从导致系统误差产生的仪器、环境、方法和个人等因素入手，弄清产生系统误差的主要原因。

2. 减小系统误差的常用方法

有的实验测量结果存在很大系统误差，只有找到了导致系统误差产生的主要原因，才有可能寻求减小系统误差的方法。但这些方法和具体的测量对象、测量方法、测量人员的经验有关。因此要找出消除系统误差的通用有效方法较难，下面介绍一些常用的减小系统误差的方法。

(1) 定值系统误差的减小法。定值系统误差的最常用的消除方法有：示零法、替代法、抵偿法和交换法。

1) 示零法。要达到减小或消除系统误差的目的，在实验前就必须对测量过程中可能导致系统误差的因素进行分析，最好在测量前将系统误差从产生根源上加以消除。例如：利用电流表测量某电流时，实验前必须检查电流表指针是否指为零，如果不在零位，需将指针调整到零位，这样可消除由于指针零位偏移而产生的系统误差。

2) 替代法。替代法是进行两次测量，第一次测量达到平衡后，在不改变测量条件下，立即用一个已知标准量替代被测量，如果测量装置仍能达到平衡，则被测量就等于已知标准量。如果不能达到平衡，调整使之平衡，这时可得到被测量与标准量间的差值，即

$$\text{被测量} = \text{标准量} + \text{差值}$$

3) 抵偿法。抵偿法也是要求进行两次测量，且要求这两次测量得到的系统误差值大小相等、符号相反。取这两次测量的算术平均值作为测量结果，就可消除系统误差。

4) 交换法。交换法本质上也是抵消，但形式上是将测量中的某些条件，例如被测物的位置相互交换，使产生系统误差的原因对测量的结果起相反的作用，从而抵消了系统误差。

(2) 可变系统误差的消除方法。对称测量法是消除线性系统误差的有效方法，而线性的系统误差有这样的特点：相同的时间间隔内所产生的系统误差增量相等。利用这个特点，可安排对称测量，取各对称点两次读数的算术平均值作为测量值，即可消除线性系统误差。

四、测量的精密度、准确度和精确度

对测量结果的好坏，我们往往用精密度、准确度和精确度来评价，但这是三个不同的概念，使用时应加以区别。

(1) 精密度：表示测量结果中偶然误差大小的程度。它是指在规定条件下对被测量进行多次测量时，各次测量结果之间离散的程度。精密度高则离散程度小，重复性大，偶然误差小，但系统误差的大小不明确。

(2) 准确度：表示测量结果中系统误差大小的程度。它是指在规定条件下，多次测量数据的平均值与真值符合的程度。准确度高则测量接近真值程度高，系统误差小，但对测量的偶然误差的大小并不明确。

(3) 精确度：表示测量结果中系统误差与偶然误差的综合大小的程度。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于测量来说，精密度高，准确度不一定高；而准确度高，精

密度也不一定高；只有精密度和准确度都高时，精确度才高。

下面我们以打靶为例来形象地说明这三个不同概念之间的区别。

图 2-2(a)表示子弹比较集中，但都偏离靶心，说明射出的精密度高，但准确度较低；图(b)表示子弹比较分散，但是它们的中心位置比较接近靶心，说明射击的准确度高，但精密度较低；图(c)表示子弹比较集中靶心，说明射击的精密度和准确度都较高，即精确度较高。

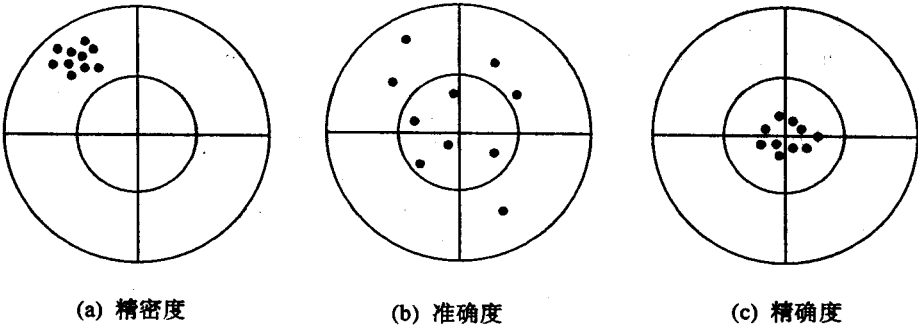


图 2-2 测量的精密度、准确度和精确度图示

第三节 误差的计算

一、单次直接测量误差的计算

在实际工作中，我们有时不可能进行重复的测量，或者在测量精度要求不高的情况下只进行一次测量，称为单次直接测量。在物理实验中，特别是在电学实验中，经常采取单次测量。因此，如何估计单次测量的误差，是物理实验中的一个重要问题。

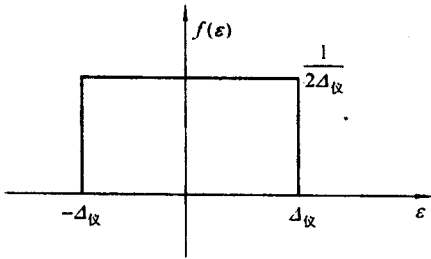


图 2-3 均匀分布曲线

单次直接测量的测得值就作为其最佳值，其测量误差可以用仪器本身的误差(仪器误差)来计算。

仪器误差是指仪器在规定的条件下，正确地使用仪器时可能产生的最大误差，用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示对仪器误差的估计，我们可分以下几种情况进行讨论：

- (1) 有刻度的仪器仪表：如果未标出精度等级或精密度，取其最小分度值的一半作为测量仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 。
- (2) 标有精度的仪器仪表：对于标有精度的仪器，可以取精度的 $1/2$ 作为测量仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 。
- (3) 标有精度等级的仪器仪表：可按仪器的标牌上(或说明书中)注明的精度等级及相关公式计算误差。
- (4) 停表和数字显示的仪器仪表：取末位的 1 为测量人仪器误差。

仪器误差遵从均匀分布规律，即在误差范围 $(-\Delta_{\text{仪}}, +\Delta_{\text{仪}})$ 内，各种误差出现的概率都相

等。而在这个误差范围以外，误差不可能出现。其分布曲线如图 2-3 所示，这与正态分布是不同。根据均匀分布理论，仪器的标准误差和仪器误差有如下关系：

$$\sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

因此，单次测量的标准绝对误差为

$$\sigma_{\text{单}} = \sigma_{\text{仪}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

二、多次直接测量误差的计算

在条件许可的情况下，我们总是采用多次测量，求其算术平均值作为最佳值。

设对一个物理量 x 进行了 n 次等精度测量，测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ，则其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

其绝对误差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

若测量列中 n 次测量结果是唯一值，或测量列算术平均的标准误差相对于仪器的标准误差非常小，则多次直接测量的误差可以用下式表示：

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{\bar{x}} & (\sigma_{\bar{x}} > \sigma_{\text{仪}}) \\ \sigma_{\text{仪}} & (\sigma_{\bar{x}} < \sigma_{\text{仪}}) \end{cases} \quad (5)$$

三、间接测量误差计算

在大量的物理实验中，大多数物理量不是直接测得的，而是由直接测量量通过一定的函数关系计算得出的，这就是所谓的间接测量。由于各直接测量各自有误差，因此这种误差必然要带到间接测量量中去，使间接测量结果也存在着误差，这就是误差的传递性。

设间接测量量 N 是各独立的直接测量量(x, y, z)的函数，即

$$N = f(x, y, z) \quad (6)$$

式中： x, y, z 测量结果的分别为

$$x = \bar{x} + \sigma_x$$

$$y = \bar{y} + \sigma_y$$

$$z = \bar{z} + \sigma_z$$

则 N 的测量结果为 $N = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 。而 N 的误差是由 x, y, z 各量在测量中产生的误差引起的。根据误差理论， N 的标准误差为：

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (7)$$

N 的相对误差公式为

$$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (8)$$

以上两式是标准误差的传递公式的普适形式，由此可以推导各种具体函数的误差公式，见表 2-2。

表 2-2 常用函数的误差公式

函数关系	绝对误差	相对误差
$y = x_1 \pm x_2$	$\sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$	$\frac{\sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}}{x_1 + x_2}$
$y = x_1 \cdot x_2$	$\sqrt{x_2^2 \sigma_{x_1}^2 + x_1^2 \sigma_{x_2}^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{x_2}}{x_2}\right)^2}$
$y = x_1 / x_2$	$\frac{\sqrt{x_2^2 \sigma_{x_1}^2 + x_1^2 \sigma_{x_2}^2}}{x_2}$	$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x_1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{x_2}}{x_2}\right)^2}$
$y = \frac{x_1^k \cdot x_2^n}{x_3^m}$		$\sqrt{k^2 \left(\frac{\sigma_{x_1}}{x_1}\right)^2 + n^2 \left(\frac{\sigma_{x_2}}{x_2}\right)^2 + m^2 \left(\frac{\sigma_{x_3}}{x_3}\right)^2}$
$y = kx$	$k\sigma_x$	$\frac{\sigma_x}{x}$
$y = \sin x$	$ \cos x \sigma_x$	$\frac{\sigma_x}{ \tan x }$
$y = \ln x$	$\frac{\sigma_x}{x}$	$\frac{\sigma_x}{x \cdot y}$

第四节 不确定度和测量结果的表示

用标准误差来评估测量结果可靠程度的做法不是很完善，有可能会遗漏一些影响测量结果准确性的因素，例如系统误差、仪器误差等。为了更准确地表述测量结果的可靠程度，建议采用不确定度的规定。

一、不确定度

1. 不确定度

测量的理想情况是获得被测量在测量条件下的真值，但是实际上在测量时，实验方法和计量器具的不完善，测量环境不理想、不稳定，实验者在操作上和读取数值时不十分准确等原因，都将使测量值偏离真值，因而测得值不能准确表达真值。在报道被测量的测量结果时，因为报道的是被测量的近似值，所以应同时报道对它的可靠性评价，即给出此测量质量的指标，测量不确定度就是测量质量的指标，也即是对测量结果残存误差的评估。

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，是表征对被测量值的真值所处的量值范围的评定。它是测量结果所携带的一个必要的参数，以表征待测量值的分散性、准确性和可靠程度。

测量值不等于真值，可以设想真值就在测量值附近的一个量值范围内，测量不确定度就是评定作为测量质量指标的此量值范围。设测量值为 x ，其测量不确定度为 u ，则真值可能在量值范围 $(x-u, x+u)$ 之中，显然此量值范围越窄，即测量不确定度越小，用测量值表示真值

的可靠性就越高。

2. 标准不确定度

对测量不确定度的评定，常以估计标准偏差去表示大小，这时称其为标准不确定度。

二、不确定度的评定

由于测量有误差，因而才要评定不确定度。误差的来源不同，它对测量的影响也不同。从测量值来看其影响表现可分为两类：一类是偶然效应引起的，使测量值分散开，例如用手控停表测量摆的周期，由于手的控制存在偶然性，每次测量值不会相同；另一类则使测量值恒定地向某一方向偏移，重复测量时，此偏移的方向和大小不变，例如用电压表测一电阻两端的电压，由于这时偶然效应很弱，反复测量其值基本不变，当用更精密的电势差计去测时，可以得知电压计的示值有恒定的偏差，这是电压计的基本误差所致。这两类影响都给被测量引入不确定度，都要评定其标准不确定度，但是评定的方法不同。

1. 标准不确定度的 A 类评定

由于偶然效应，被测量 X 的多次重复测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 将是分散的，从分散的测量值出发，用统计的方法评定标准不确定度，就是标准不确定度的 A 类评定。设 A 类标准不确定度为 $u_A(x)$ ，用统计方法求出平均值的标准偏差为 $\sigma(\bar{x})$ ，A 类评定标准不确定度(又称标准不确定度的 A 类分量)就取为平均值的标准偏差，即

$$u_A(\bar{x}) = \sigma(\bar{x}) \quad (1)$$

按误差理论的高斯分布，如果不存在其他误差影响，则量值范围 $[\bar{x} - u_x(\bar{x}), \bar{x} + u_x(\bar{x})]$ 中包括真值的概率为 68.3%，如扩大量值范围为 $[\bar{x} - 1.96u_x(\bar{x}), \bar{x} + 1.96u_x(\bar{x})]$ ，则其中包括真值的概率为 95%。

2. 标准不确定度的 B 类评定

当误差的影响仅使测量值向某一方向有恒定的偏离，这时不能用统计的方法评定不确定度，这一类的评定就是 B 类评定。

B 类评定，有的依据计量仪器说明书或检定书，有的依据仪器的准确度等级，有的则粗略地依据仪器分度值或经验。从这些信息中可以获得极限误差 Δ (或容许误差或示值误差)，此类误差一般可视为均匀分布，而 $\Delta/\sqrt{3}$ 为均匀分布的标准差，则 B 类评定标准不确定度(又称标准不确定度的 B 类分量) $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = \Delta/\sqrt{3} \quad (2)$$

严格讲，从 Δ 求 $u_B(x)$ 的变换系数与实际分布有关，在此均近似按均匀分布处理。

例 1 使用量程为 0~300mm、分度值为 0.02mm 的游标卡尺测量长度时，按国家计量技术规范 JJG30-84，其示值误差在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内，即极限误差 $\Delta = 0.02\text{mm}$ ，则由游标卡尺引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = 0.02/\sqrt{3} = 0.012(\text{mm})$$

例 2 使用数字毫秒计测一时间间隔 t ，按 JJG602-89 其示值误差在 $\pm$ (晶体频率准确度 $\times$ 时间间隔 $t+1$ 个时标)范围内，频率准确度为 1×10^{-5} 。

当 $t=4.314\text{s}$ 时，则 $\Delta = (1 \times 10^{-5} \times 4.314 + 0.001)\text{s} \approx 0.001\text{s}$ ，则由数字毫秒计引入的标准不确