

大学物理实验

《大学物理实验》编写组

厦门大学出版社

大学物理实验

《大学物理实验》编写组

厦门大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/《大学物理实验》编写组编. —厦门:厦门大学出版社,1998.1(2000.7重印)
ISBN 7-5615-1332-1

I. 大… II. 大… III. 物理-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 039665 号

厦门大学出版社出版发行

(地址:厦门大学 邮编:361005)

<http://www.xmupress.com>

xmup@public.xm.fj.cn

福建二新华印刷有限公司印刷

1998年1月第1版 2004年1月第4次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:23.25

字数:595千字 印数:8 001-11 000册

定价:25.00元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换

前 言

本书根据国家教委颁发的综合性大学物理专业的物理实验大纲,同时参考非物理专业的物理实验大纲以及作者多年的物理实验教学实践而编写的。它不仅可作为物理专业学生的物理实验教材,也可供理工医农各专业的学生使用。

为了使学生能系统地掌握物理实验的基本知识和基本方法,本书将实验中有关的必要知识集中在三章里介绍,即:第一章的实验误差及数据处理;第三章的电磁测量基本知识;第五章的光学实验基本知识。实践经验证明,这样处理,有利于组织教学,并能取得较好的教学效果。

实验误差及数据处理是物理实验课的重要教学内容。本书第一章用了较多的篇幅进行介绍,并且在不同的实验题目中对测量误差的估计和数据处理方法提出不同的要求。第一章末附录一所介绍的测量误差理论,将给学有余力的学生进一步理解、掌握误差理论提供方便。

第七章编入了一些设计性实验的推荐题目。每个题目仅提出实验要求及实验室提供的有关仪器用具;而实验原理及具体实验步骤则由学生自己通过查找资料和阅读参考书,并根据已掌握的物理实验基本知识和基本方法独立进行设计。这些推荐题目有难有易,要适当安排。多年来,设计性实验的实践表明,它对提高学生的实验素质、培养独立工作能力很有帮助。

考虑到物理实验课要求学生独立阅读教材,本课程承担着培养学生自学能力的任务,我们在编写时力求做到了每个实验题目的实验目的要求明确,使学生容易掌握重点,仪器介绍及实验原理的叙述突出实验设计思路和实验方法。此外,每个实验教材的后面都提供若干个思考题。其中,有些题目是为促进学生积极思考加深理解而设计的,而有些题目则是为帮助学生掌握重点而提供的。

本书是由集体合作编写而成。主要原则等经过集体讨论取得共识,具体内容由个人分工负责撰写。编写组由潘庄成、林坤英、李文裕、许淑恋、许乔蕻、李俊达

组成,组长李文裕。具体编写分工如下:

林坤英:第一章及附录一,第二章的实验一、二、三、四、五、八、九、十一、十二、十三、十四,书后之附录。

许乔蓁:第二章的实验六、七、十、十五、十六、十七及附录二。

潘庄成:第三章,第四章的实验一、二、三、四、五、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十五、十七、十八,第七章的实验一、二、三、四、五、六、七、八。

李俊达:第四章的实验六、十六、十九。

李文裕:绪论,第五章,第六章的实验一、二、三、四、六、十、十二、十六,第七章的实验十四。

许淑恋:第六章的实验五、七、八、九、十一、十三、十四、十五、十七,第七章的实验九、十、十一、十二、十三。

众所周知,实验室建设(包括教材建设)是一项凝聚集体劳动的工程。我们在编写本教材时,吸收了我系几十年来在基础物理实验室工作的许多同志的智慧及成果,同时我们也参考了兄弟院校的有关教材。本书初稿完成后,本系黄献烈教授仔细审阅了书稿并提出了许多宝贵意见;本书的出版,得到学校、系、教研室和厦门大学出版社的大力支持;学校和系资助了部分出版经费。在此,我们一并表示衷心的感谢!

由于时间短促,水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者谨识

1997年11月

绪 论

一、物理实验课的地位及任务

物理学是自然科学的重要学科之一,是一门建立在实验基础上的科学。物理实验是物理学的基础,物理概念的建立、物理定律的发现、物理理论的形成无不以物理实验为基础;反之,理论又对实验具有重要的指导作用。物理实验课与物理理论课之间具有密切的内在联系。然而,物理实验课作为一门课程又具有独立的、教学目的、教学内容及教学方法,因此,同学们在学习物理学时,必须同时重视理论课及实验课,不可偏废一方。

对于理工科学生来说,物理实验课是一门必修的、独立的基础课程。它之所以是必修的基础课,因为它不仅是学生进入大学后接受系统的物理实验知识、实验方法和实验技能训练的开端,也为后继的理论和实验课程打下必备的基础。它之所以是独立的基础课,因为物理实验有着固有的一套实验知识、实验方法和实验技能,是其他实验课程替代不了的。

物理实验课的主要任务是:

1. 通过对物理现象的观察、物理量的测量,使学生在物理实验的基本知识、基本方法和实验技能等方面受到系统而严格的训练,其中包括物理实验基本仪器的使用、实验方案的确定、实验数据的处理、测量误差的分析、实验结果的评价等。

2. 学习运用实验方法,研究某个物理问题,加深对物理概念、规律和原理的理解;学习探索研究问题的方法,锻炼科学实验的能力。

3. 培养学生具有严肃认真、勇于创新、实事求是、理论联系实际的科学精神,遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

二、如何学好物理实验

物理实验课是学生在教师指导下独立进行实验的一项实践活动,在实验过程中同学们应以严谨的态度对待实验的每一个环节。现将实验三个环节的主要要求说明如下。

1. 预习

实验前认真阅读实验教材,这是做好实验的前提。通过阅读实验教材,要求同学们弄清该实验根据什么原理、应用什么公式、使用什么仪器设备、运用什么方法测量等。在充分预习的基础上写出预习报告。预习报告的内容应包括实验原理、公式(符号意义),画出实验的电路图(或光路图)及数据记录表格。

进实验室做实验前,教师将检查学生的预习情况。没有预习、未做预习报告或达不到要求者,不允许进行实验。

2. 实验观测

对实验用的仪器设备进行调试,并在此基础上进行观察测量,这是整个实验教学中最重要

的一环。动手能力、分析问题和解决问题能力的培养,主要在实验观测阶段进行。

进实验室后同学们动手安装调试仪器设备前,应认真阅读实验桌上的实验提示板,注意听取指导教师的简要讲解,防止盲目蛮干。安装调试仪器设备时,应合理布局,细心调试,使仪器设备处于正常工作状况(如水平、铅直、共轴、工作电压、光照……等),电路实验的仪器安排应按“人身安全、操作妥当、走线短捷、读数方便”的原则进行。通电前经教师复查无误后,方可接上电源。

实验观测时应仔细操作、细心观测、认真思考,善于捕捉和分析实验现象,自觉地应用理论知识指导实验操作。若发现异常和仪器故障,应报告指导教师。

记录实验数据应当用钢笔或圆珠笔,不要用铅笔。测得数据应直接填入预习报告的表格中,书写整齐清楚,注意有效数字的应有位数及物理量的单位。原始记录应如实完整,包括所用仪器的型号、编号、参数及实验时的主要条件等。

测试完毕,记录数据应送教师审阅,认为完整合理,教师签名后,方可整理仪器设备及实验桌椅,离开实验室。

3. 书写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,书写实验报告是培养科学表达能力的主要环节。实验报告上要将原始记录数据重新列在正式报告纸上,并对数据进行整理计算。实验报告要求文字工整、语句简练、层次清楚、图表规范、结论确切、分析中肯。一份完整的实验报告应包括以下内容:

(1)实验题目、实验者姓名、实验日期。

(2)目的要求。

(3)仪器用具,包括型号、编号、参数等。

(4)实验原理。用自己的语言简要叙述,不要照抄教材。画出必要的电路、光路图。

(5)实验数据及处理。数据及其处理应尽可能用列表法表达,作图须用坐标纸,画线须用直尺或曲线板,待测物理量的结果须给出完整的量化表达式,观察现象或验证定律时,要给出确切的结论。

(6)讨论。可供讨论的内容很多,如对实验中观察到现象的解释、改进实验的建议、误差分析、实验后的体会、教师指定回答的思考题等等。讨论时应做到有感而发,言之中肯,切忌面面俱到,浮华无实。

目 录

前 言	
绪 论	(1)
第一章 实验误差及数据处理	(1)
§ 1-1 测量与误差	(1)
一、测量 二、测量误差 三、测量的精密度、准确度和精确度	
§ 1-2 直接测量结果及其偶然误差的估计	(6)
一、以算术平均值代表测量结果 二、多次测量偶然误差的估计 三、单次测量误差的估计 四、误差的其他表示	
§ 1-3 间接测量结果误差的估计	(11)
一、算术合成 二、几何合成 三、误差传递公式的应用例子	
§ 1-4 有效数字及其运算	(19)
一、有效数字的一般概念 二、有效数字的运算法则 三、有效数字计算例子	
习题	(23)
§ 1-5 实验数据处理方法	(24)
一、列表法 二、作图法 三、逐差法 四、直线拟合	
附录一 一些误差式子的推导	(33)
一、偶然误差概率密度分布函数——高斯分布函数 二、标准误差 σ 与精密度常数 h 的关系 三、平均绝对误差 ΔN 与标准误差 σ 的关系 四、概率积分 五、算术平均值的标准误差 六、贝塞尔公式	
第二章 力学、热学实验	(38)
实验一 长度和固体密度的测量	(38)
实验二 用自由落体仪测定重力加速度	(50)
实验三 分析天平	(53)
实验四 伸长法测定杨氏弹性模量	(59)
实验五 弦线上波的传播	(65)
实验六 验证牛顿第二定律	(68)
实验七 气垫弹簧振子的简谐振动	(71)
实验八 声速的测定	(76)
实验九 刚体转动惯量的测定	(79)
实验十 验证动量守恒定律	(83)
实验十一 液体粘滞系数的测定	(87)
实验十二 金属线膨胀系数的测定	(90)
实验十三 电热当量的测定	(93)

实验十四 测量冰的溶解热	(97)
实验十五 混合法测不良导体的比热	(101)
实验十六 测定金属的导热系数	(106)
实验十七 水的汽化热	(110)
附录二 气垫实验基本知识	(114)
第三章 电磁测量基本知识	(118)
§ 3-1 电磁测量的作用和特点	(118)
一、电磁测量的作用 二、电磁测量的特点	
§ 3-2 电磁测量的内容	(118)
§ 3-3 电磁测量的方法	(119)
一、测量方法的分类 二、选择测量方法的原则	
§ 3-4 电磁测量仪器	(121)
§ 3-5 电学实验中常见的仪表	(122)
一、电流计 二、直流电流表 三、直流电压表 四、电表的正确使用 五、万用表	
§ 3-6 数字仪表概述	(128)
一、数字仪表的结构原理 二、数字仪表的特点 三、数字仪表的主要规格 四、数字仪表的误差表示	
§ 3-7 电阻器	(130)
一、电阻箱 二、滑线变阻器	
§ 3-8 实验室中常用电源	(137)
一、直流电源 二、交流电源	
§ 3-9 电学度量器	(139)
一、电学度量器一般知识 二、标准电池 三、标准电阻 四、标准电感 五、标准电容	
§ 3-10 电磁学实验操作规程	(144)
第四章 电磁学实验	(146)
实验一 灵敏电流计	(146)
实验二 电表的扩程和校准	(154)
实验三 电阻元件伏安特性的测定	(161)
实验四 惠斯登电桥	(166)
实验五 用双电桥测低电阻	(173)
实验六 非平衡电桥——半导体热敏电阻温度计(点温计)	(181)
实验七 直流电位差计的原理及其使用	(187)
实验八 用直流电位差计校准电压表和电流表	(192)
实验九 温差电偶的定标和测温	(197)
实验十 示波器的原理和使用	(201)
实验十一 用示波器观测动态磁滞回线和磁化曲线	(210)
实验十二 用冲击电流计测量磁感应强度	(217)
实验十三 应用霍尔效应测量磁场	(223)
实验十四 交流电桥	(230)

实验十五	RLC 串联谐振特性的研究	(238)
实验十六	并联谐振及交流电功率的测量——日光灯电路的研究	(243)
实验十七	RLC 串联电路的稳态特性	(249)
实验十八	RLC 串联电路的暂态特性	(257)
实验十九	三相交流电路	(267)
第五章	光学实验基本知识	(274)
§ 5-1	光学实验的特点	(274)
§ 5-2	实验室常用光源	(275)
	一、热辐射光源 二、气体放电光源 三、氦-氖激光器	
§ 5-3	光电探测器的简单介绍	(280)
	一、光电探测器的主要性能 二、光电池 三、光电管 四、光敏电阻	
§ 5-4	光学实验的一些基本调整技术	(283)
	一、光学元件光轴的共轴等高调节 二、消除视差调节 三、自准直法	
第六章	光学实验	(286)
实验一	薄透镜焦距的测定	(286)
实验二	透镜组基点的测定	(290)
实验三	灯泡发光强度和发光效率的测定	(293)
实验四	分光计调节及三棱镜折射率的测量	(296)
实验五	用阿贝折射计测量折射率	(303)
实验六	平行光管的调整及使用	(308)
实验七	用牛顿环测定透镜的曲率半径	(314)
实验八	用双棱镜测定光波波长	(317)
实验九	迈克耳逊干涉仪	(319)
实验十	衍射光栅	(322)
实验十一	单缝衍射光强分布的测量	(325)
实验十二	旋光现象和旋光仪	(327)
实验十三	偏振光现象的观察	(330)
实验十四	椭圆偏振光的产生和检测	(334)
实验十五	单色仪的标定和滤光片光谱透射曲线的测定	(336)
实验十六	小型摄谱仪的调整及波长的测量	(339)
实验十七	全息照相及再现	(343)
第七章	设计性实验推荐题目	(347)
实验一	用伏安法测量电源的输出特性	(347)
实验二	测电阻	(347)
实验三	将 μA 表改为欧姆表	(348)
实验四	用谐振电桥测量信号发生器频率及电感器的直流电阻	(348)
实验五	利用单线示波器测量相移	(349)

实验六	交流三表法测量铁芯线圈的电感	(349)
实验七	周期函数的付里叶分解	(350)
实验八	用冲击电流计测量电容和高电阻	(350)
实验九	用折射极限法测量水的折射率(不用阿贝折射计)	(351)
实验十	乳胶感光特性曲线的测定	(351)
实验十一	测量干涉滤光片的中心波长及半宽值	(352)
实验十二	望远镜和显微镜放大率的测量	(352)
实验十三	用干涉法测量头发丝直径	(353)
实验十四	空间相干性的测量	(353)
附录	常用物理数据表	(354)
表 1	基本物理常数	(354)
表 2	20℃时常用固体和液体的密度	(355)
表 3	标准大气压下不同温度的水的密度	(355)
表 4	我国一些重要城市的重力加速度	(356)
表 5	固体的线膨胀系数	(356)
表 6	20℃时某些金属的弹性模量(杨氏模量)	(357)
表 7	一些常用固体的比热	(357)
表 8	一些常用液体的比热	(358)
表 9	某些液体的粘滞系数 η 与温度的关系	(358)
表 10	水的粘滞系数 η 与温度的关系	(359)
表 11	水的表面张力与温度的关系	(359)
表 12	不同温度时干燥空气的声速	(360)
表 13	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	(360)
表 14	常温下某些物质相对于空气的光的折射率	(361)
表 15	水和乙醇对钠光的折射率	(361)
表 16	常用光源的谱线波长	(362)

第一章 实验误差及数据处理

§ 1-1 测量与误差

一、测量

物理学是建立在实验基础上的科学。物理实验包括两方面内容：定性观察物理现象和定量测量物理量的大小，进而研究建立物理规律。

所谓测量，就是将待测量与定作单位的同类量进行比较，以确定待测量是单位量的多少倍。大多数的测量结果不但有数值，而且有单位。比如一支铜棒的长度是被选为长度单位“米”的 0.6054 倍，则记棒长为 0.6054 米。

1. 直接测量与间接测量(按测量方法分)

凡是用计量仪器和待测量进行比较，便可获得测量结果，该测量称为直接测量。如用米尺测长度，用天平称衡质量，用伏特表测电压，用欧姆表测电阻，用勒克斯计测照度等。

凡是不能直接用计量仪器将待测量的大小测出来，而需依据某几个直接测量值的函数关系求出待测量，则该待测量的测量称为间接测量。如从测量物体的长度计算面积或体积，从测量电流、电压计算电阻或电功率等。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展，测量仪器的改进，很多原来只能间接测量的量，现在可以直接测量了。比如电能的测量本来是间接测量，也可以用电度表直接测量。

物理量的测量，绝大部分是间接测量，但直接测量是一切测量的基础。

2. 等精度测量与不等精度测量(按测量条件分)

任何物理量的测量都必须由某一观察者使用一定的仪器，通过一定的方法，在一定的环境下去完成。某一物理量 A ，由同一观察者、用同一仪器、在同一环境下，以同一方法重复测量 n 次，它们的测量值分别为 A_1, A_2, \dots, A_n ，我们没有理由认为所得的某一个值比其他值更准确或更不准确。因此，测量条件完全相同(同一观察者、同一仪器、同一方法、同一环境)的重复测量称之为等精度测量。

对同一物理量进行测量条件不同(如观察者不同，或仪器不同，或方法不同，或环境不同)的测量，则各次所得值的准确度是不同的，因而称测量条件不同的多次测量为不等精度测量。比如用游标尺和螺旋测微计测同一平板玻璃的厚度，因为两仪器的精度不同，故所测结果为不等精度测量。

应当指出：重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程，而不是仅为重复读数。比如用米尺重复测量铜棒长度五次，每次测量都必须包括重新对准铜棒的一端点在某条刻线上，然后读另一端点位置的读数，而不是米尺与铜棒相对不动，重复读后一个端点位置读数五次。

3. 测量仪器

仪器是进行测量的必要工具。熟悉仪器性能,掌握仪器的使用方法及正确进行读数,是每个测量者必备的知识。

a. 仪器精密度:是指仪器的最小分度相当的物理量。仪器最小分度愈小,所测物理量的位数愈多,仪器精密度愈高。如具有毫米分度的米尺,其精密度为1毫米;最小步进为0.1欧姆的旋转式电阻箱,其精密度为0.1欧姆。

b. 仪器准确度:是指仪器测量读数的可靠程度。它一般标在仪器上或写在说明书上。如电表所标示的级别就是该仪器的准确度。对于没有标明准确度的仪器,可粗略地取仪器最小分度值的一半^①。因为制造仪器时,其分度值是受仪器准确度约束的。

c. 量程:指仪器所能测量的物理量最大值与最小值之差,即仪器的测量范围(有时也将所能测量的最大值称量程)。测量过程中,超过仪器量程使用仪器是不允许的,轻则仪器准确度降低,使用寿命缩短,重则损坏仪器。

关于测量读数最小一位的取值,一般讲应在仪器最小分度内估读一位数字。到底要估读到 $\frac{1}{10}$ 、 $\frac{1}{5}$ 或 $\frac{1}{2}$ 最小分度,则应根据仪器最小分度的间距、刻度线及指针的粗细、照明条件和各人的分辨能力而定,没硬性规定。

二、测量误差^②

每个物理量都是客观存在的,在一定条件下它具有固定的大小,这个客观存在的确定数值便称为该物理量的真值。人们进行测量时希望能得出被测量在测量条件下的真值。然而,这是不可能的。因为进行测量,是根据一定的理论,使用一定的仪器,在一定的环境中通过观察者去完成的,而测量条件总与理论有差距,仪器总与国际规定标准有偏离,环境总不能完全稳定,人的观察能力也总有限,所以一切测量值总是偏离真值。测量值(A)与真值(A₀)之差称为误差(ε),即误差

$$\epsilon = A - A_0 \quad (1-1-1)$$

从上述分析可知,误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量的全过程。换句话说,误差不可避免,没有误差的测量是不存在的。在误差必然存在的情况下,测量的任务是:

(1)设法将误差减小至最小;(2)求出在测量条件下被测量的最近真值(最佳值);(3)估计最近真值接近真值的程度。为此应当研究误差的来源、性质,以便采取适当措施,尽可能使之减小。

1. 系统误差

等精度条件下,对同一物理量进行多次测量,其测量误差的符号与数值保持不变,或按一定规律变化,这种误差称为系统误差。

(I) 系统误差来源

(a)理论(方法)误差:这是由于理论或方法不完善引入的误差。如高灵敏度的分析天平称衡低密度物体的质量时没有考虑空气浮力的影响;单摆实验中摆球不是质点;伏安法测电阻时

^① 有人主张用最小分度值作为仪器准确度。

^② 1986年中国计量科学研究院参照国际计量局的意见,规定在测量及检定工作中应采用“不确定度”代替“误差”。本书暂仍沿用“误差”一词表示误差限值。

电流表“内接”或“外接”，电表内阻的影响等。

(b) 仪器误差：这是由于仪器本身缺陷或装置调节不善而产生的误差。如等臂天平实际上两臂不等；天平未调整水平；砝码质量不准；螺旋测微计螺距不均匀；分光计转轴偏心等。

(c) 环境误差：这是外界环境（如光照、温度、湿度、电磁场等）的影响而引起误差。如温度的逐渐升高对热量散失的影响。

(d) 个人误差：这是由于观测者的主观原因，如缺乏经验或生理缺陷造成的误差。比如按停表，有人常失之过早或过迟；估计电表读数末位时，习惯性偏大或偏小等。

总之，系统误差是由一些确定的因素引起的，它使测量结果具有固定的倾向。原则上讲，系统误差可以完全消除或减少到人们可以接受的程度。当然实际测量工作中，要发现系统误差的存在，弄清产生的原因，消除或减小它对测量结果的影响，是一项非常复杂的工作。它需要丰富的实践经验和一定的物理知识并付出艰苦细致的劳动，然而这也是物理实验观测者的一项重要任务。

(I) 限制系统误差的主要方法

系统误差的消除和限制一般没有固定不变的方法，要具体问题具体分析各个解决。产生系统误差的原因可能不止一个，一般应找出主要影响的因素，有针对性地消除或减小之。以下介绍几种常用的方法。

(a) 检定修正法：将仪器、量具送计量部门检验取得修正值，以便测量时进行修正。修正值 = 正确值 - 测量值（注意与误差 $\epsilon = A - A_0$ 差一负号！），即正确值 = 测量值 + 修正值。

(b) 替代法：测量装置测定待测量后，在测量条件不变的条件下，用一已知标准量替换被测量。如为消除天平不等臂 ($l_1 \neq l_2$) 对待测量的影响，可先用一平衡物 T 与被测物 x 平衡，则有 $x = \frac{l_2}{l_1} T$ ，然后取下待测物 x 以砝码 P 使其重新平衡，又有 $P = \frac{l_2}{l_1} T$ ，则 P 为待测物 x 的质量，它不再受 $l_1 \neq l_2$ 天平不等臂的影响了。

(c) 交换法：将测量中某些测量条件互相交换，使产生系统误差的原因对测量结果起相反的影响。仍举不等臂天平为例。第一次待测物 x 放在左盘，右盘放砝码 P_1 使之平衡，则 $x = \frac{l_2}{l_1} P_1$ ；第二次称衡时， x 与砝码在左右盘交换，这时用 P_2 砝码使之重新平衡，则 $x = \frac{l_1}{l_2} P_2$ 。将两次称衡结果相乘后开方则有 $x = \sqrt{P_1 P_2}$ 。由此法得到的质量便消除了天平不等臂的系统误差。

(d) 异号法：实验时在两次测量中出现符号相反的误差，取平均值后消除。例如在外界磁场作用下，仪表读数会产生附加误差，若将仪表转动 180° 再测一次，外磁场将对读数产生相反的影响，引起负的附加误差。两次测量结果平均，正负误差可以抵消。

(e) 等时距对称观测法：对于随时间作线性变化的系统误差，可应用等时间间隔对称观测法有效地消除。例如用电位差计测电阻，通常是电位差计的工作电流 I 标准后，用电位差计分别测在标准电阻 R_n 及待测电阻 R_x 上电压降，这时有 $U_n = I \cdot R_n$ 及 $U_x = I \cdot R_x$ ，从而得到 $R_x = \frac{U_x}{U_n} R_n$ 。然而电位差计的工作电流 I 不稳定，基本上随时间按直线规律下降，故所得的 R_x 值有系统误差。应用等时距对称观测法可分三步进行测量：第一步在 $t = t_1$ 测标准电阻上压降 $U_{n1} = I_1 \cdot R_n$ ，第二步在 $t_2 = t + \Delta t$ 测得待测电阻上压降 $U_x = I_2 \cdot R_x$ ，第三步在 $t_3 = t + 2\Delta t$ 时再测在标准电阻上的电压降 $U_{n2} = I_3 R_n$ 。由于 $\frac{1}{2}(U_{n1} + U_{n2}) = \frac{1}{2}(I_1 + I_3) R_n = I_2 R_n$ ，所以 $R_x = \frac{U_x}{I_2} =$

$\frac{2U_x}{U_{n1}+U_{n2}} \cdot R_n$,这样求出的 R_x 便消除了因电流直线变化而产生的系统误差。

2. 偶然误差(随机误差)

即使实验中已理想地消除了系统误差,在同样的条件下,由同一观测者,应用同一仪器,以同样的方法(等精度!)重复多次测量同一物理量,测得值也总有稍许差异,某一次测量的误差以不可预期的方式变化,有大有小,有正有负,这种误差称为偶然误差(或随机误差)。

(I)偶然误差来源:偶然误差是由于某些偶然的或不确定的因素引起的,具体原因很多,大致有以下来源:

(a)仪器精密度和观察者感官灵敏度有限。如仪器示值的估读位偏大或偏小;仪器调节平衡时,平衡点确定不准等。

(b)测量环境扰动变化以及其他不能预测不能控制的因素,如杂散电磁场的干扰,电源电压波动引起测量的变化。

(II)偶然误差特性:从某一次测量看偶然误差使测量结果偏大或偏小不定,但若测量次数足够多时,其影响就呈现统计规律,服从正态分布(高斯分布)。若以横坐标表示偶然误差 ϵ ,以纵坐标表示误差出现的概率密度函数 $f(\epsilon)$,正态分布规律如图1-1-1所示。该图表明正态分布具有以下特点:

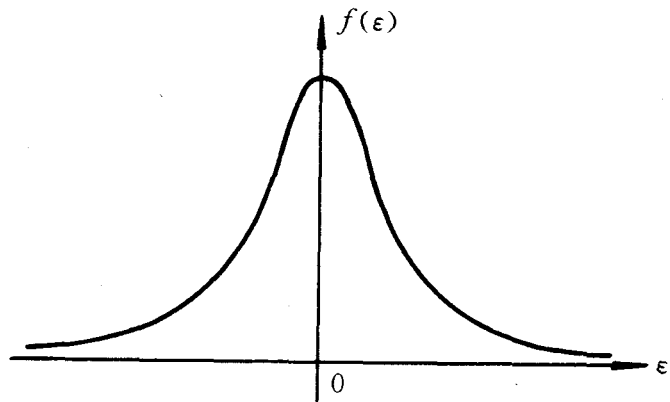


图 1-1-1

(1)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。

(2)有界性:绝对值很大的误差出现的概率近于零。即误差有一定的实际限度。

(3)对称性:绝对值相等的正误差和负误差,出现的概率相等。

(4)抵偿性:误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

偶然误差的上述统计特性告诉我们:①增加重复测量的次数可以减小偶然误差;②重复测量的算术平均值可以作为测量结果的最佳近似值(仍非真值!)

三、测量的精密性、准确度和精确度

测量的精密性、准确度和精确度都是评价测量结果的术语,但目前使用时其涵义并不尽然一致,以下介绍的是现在较为普遍采用的意见。

测量精密性表示在同样测量条件下,对同一物理量进行多次测量,所得结果彼此间相互接近的程度,即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度,因而测量精密性是测量偶然误差的反映。测量精密性高,偶然误差小,但系统误差的大小不明确。

测量准确度表示测量结果与真值接近的程度,因而它是系统误差的反映。测量准确度高,则测量数据的算术平均值偏离真值较少,测量的系统误差小,但数据分散的情况,偶然误差的大小不确定。

测量精确度则是对测量的偶然误差及系统误差的综合评定。精确度高,测量数据较集中在真值附近,测量的偶然误差及系统误差都比较小。

为了更好地理解上述三个术语,现以打靶为例说明。

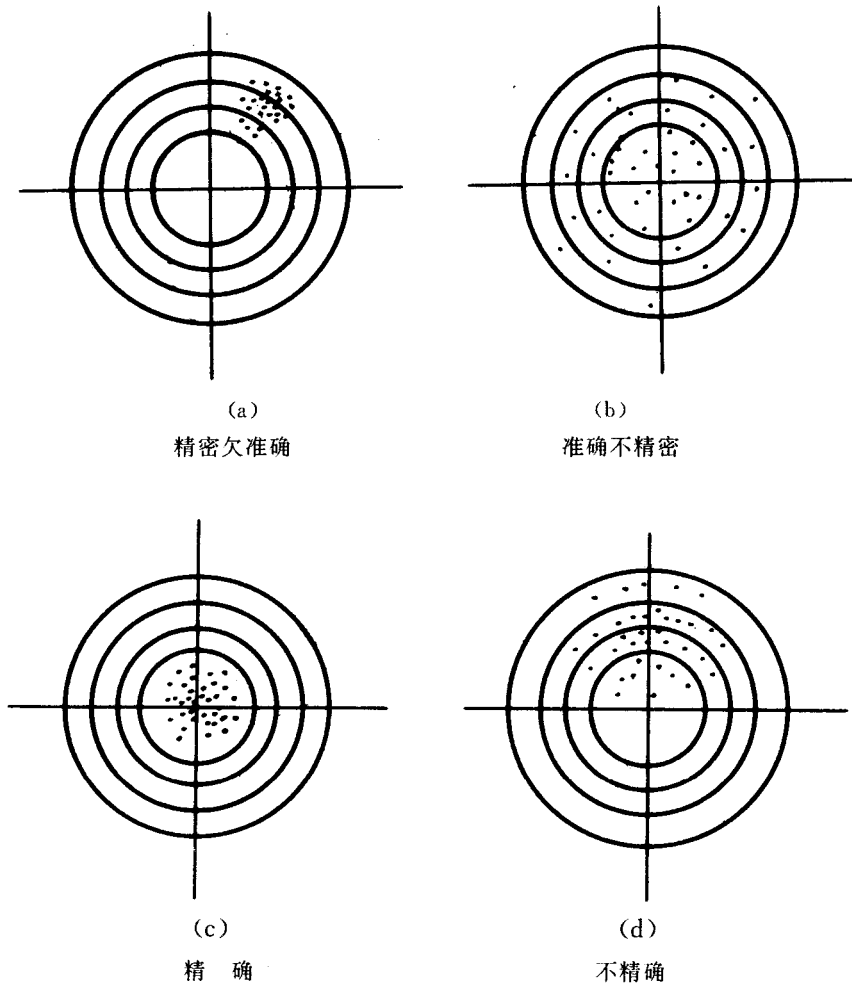


图 1-1-2

图 1-1-2(a)的弹着点比较集中,但都向一侧偏离靶心,反映了偶然误差小而系统误差大,为精密而欠准确。图 1-1-2(b)的弹着点比较分散,但平均值较接近靶心,反映了偶然误差较大,而系统误差较小,为准确而不精密。图 1-1-2(c)为弹着点集中在靶心,反映了偶然误差及系统误差都小,既为准确又精密,即精确度高。而图 1-1-2(d)的弹着点既分散又偏离靶心,偶然误差及系统误差都较大,既不精密又不准确,即精确度低。

任何测量总希望测量结果有较高的精确度,而测量的精确度是由仪器精密度,测量方式是否正确,测量技术好坏等许多因素决定的。应当指出:同一物理量可以用各种不同精密度的仪器来测量,但不应片面强调选用精密度高的仪器。所用仪器精密度高虽然有利于提高测量精确度,但仪器的价格较高,测量方法一般也较复杂。正确的做法是根据测量所要求的精确度来选择仪器,只要精密度合乎要求就可以,用精密度过高或过低的仪器都是不适合的。

§ 1-2 直接测量结果及其偶然误差的估计

一、以算术平均值代表测量结果

以下我们假定系统误差已被消除,仅讨论偶然误差。在等精度条件下,对物理量 A 重复测量 n 次,得一组测量列 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 。根据偶然误差分布规律,当测量次数 n 无限多时,正负误差相抵消,其算术平均值就极其趋近待测量的真值。因而,在无系统误差的情况下,等精度测量无限多次时,其一系列测得值的算术平均值即为待测量的真值,即:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \text{ 则 } \bar{A} = A_0$$

然而,实际测量的次数不可能无限,在有限次数的测量中,所得测量列的算术平均值不等于真值,但各测量值的误差在平均的过程中总会相互抵消一部分,所以用测量列的算术平均值表示被测量的大小仍比测量列中任何一个测量值都更可靠。称算术平均值为被测量的“最佳近似值”或“最近真值”、“最佳估计值”。

某物理量 A 经有限的 n 次测量后,最佳近似值为

$$\bar{A} = \frac{1}{n} (A_1 + A_2 + \dots + A_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (1-2-1)$$

二、多次测量偶然误差的估计

对物理量进行 n 次测量之后,各测量值的误差是多少,算术平均值的误差是多大,我们无法知道,因为该物理量真值的大小不知道。但若不了解这些误差的大小,就不了解它的可靠程度,利用这些测量值时把握就不大,从而降低了它们的实际意义。所以从测量的实用价值看,必须对它们的误差有所估计,下面介绍二种常用的误差评价方法。

1. 平均绝对误差(绝对误差,平均误差)

(1) 测量列的平均绝对误差

某物理量 A 重复测量 n 次的测量列为 A_1, A_2, \dots, A_n 其平均值为 $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$ 。因为 \bar{A} 不是真值 A_0 ,故 $A_i - \bar{A}$ 不是误差,即 $A_i - \bar{A} \neq \epsilon_i$ 。而以 $A_i - \bar{A} = v_i$ 表示,称 v_i 为偏差或残差。

显然,对 A_i 测量列,可得一组偏差数列 $v_1 = A_1 - \bar{A}, v_2 = A_2 - \bar{A}, \dots, v_n = A_n - \bar{A}$,则测量列的平均绝对误差 ΔA 可用各测量值偏差的绝对值的算术平均值表示,即:

$$\Delta A = \frac{1}{n} (|v_1| + |v_2| + \dots + |v_n|) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_i| \quad (1-2-2)$$

根据误差理论,(1-2-2)式求得值的含义为:重复测量次数 n 足够大时,测量列 A_i 中任一测量值的偏差 v_i 落在 $-\Delta A \rightarrow +\Delta A$ 区间的概率有 57.5%。换句话说,若我们在等精度条件下再作一次测量,该测量值有 57.5% 的可能性将处于 $\bar{A} - \Delta A \rightarrow \bar{A} + \Delta A$ 的区间中。^①

(2) 平均值 \bar{A} 的平均绝对误差

^① 严格说具有概率 57.5% 的 $\Delta A = \frac{\sum |v_i|}{\sqrt{n(n-1)}}$,今以 $\Delta A = \frac{\sum |v_i|}{n}$ 代替之,只是近似式。