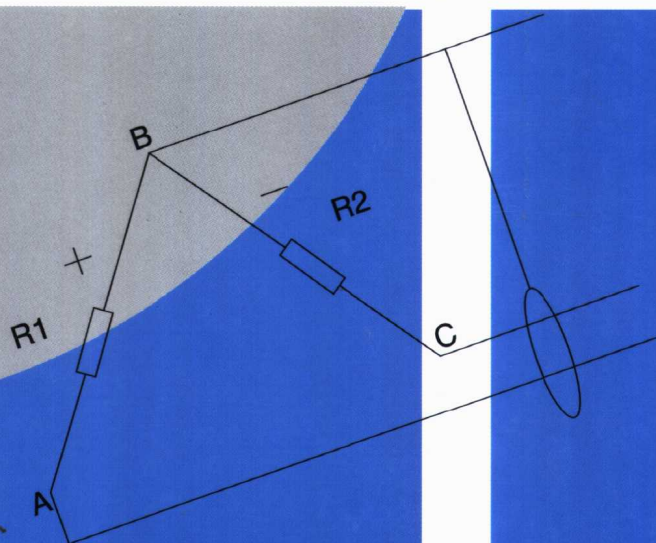


主 编 郑庚兴 王和平
副主编 黄水平 颜飞彪

大学物理实验



上海科学技术文献出版社

大学物理实验

主 编 郑庚兴 王和平
副主编 黄水平 颜飞彪

上海科学技术文献出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 郑庚兴等主编. —上海: 上海科学技术文献出版社, 2004.2
ISBN 7-5439-2249-5

I. 大… II. 郑 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(2003)第 123285 号

责任编辑: 忻静芬

封面设计: 徐兰琴

大学物理实验

主 编 郑庚兴 王和平

副主编 黄水平 颜飞彪

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路 2 号 邮政编码 200031)

全国新华书店经销

上海市崇明县裕安印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 455 000

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 1-5 500

ISBN 7-5439-2249-5/O·148

定 价: 24.00 元

内 容 提 要

根据高等学校物理学与天文学教学指导委员会实验物理教学小组 1999 年制订的《高校非物理专业基础物理实验教学基本要求》和实验室的实际情况编写了本书。全书共分六章,第一章物理实验基础知识,介绍了物理实验课的特点与内容、误差与不确定度的概念及计算、有效数字和实验数据的处理方法等。第二章基础性物理实验,包括力、热、电、光共 12 个内容。第三章选择性物理实验,共 18 个项目,可供不同专业的学生选择。第四章光学自组与设计性实验,共 7 个项目。第五章传感器综合实验和第六章近代物理实验各 6 个。最后还编制了 19 张附表,供实验时查阅。

书中所选的实验题目大多经过实验室长期教学实践精选出来,具有典型性、系统性,又考虑到先进性和应用性。其中第四、五两章是为了充分培养学生的独立工作能力及创造能力而编排的新内容。每个实验要求明确,理论依据充分,物理思想清楚。书中还编制了大量的实验数据表及部分数据处理示例,以帮助初学者尽早入门。每个实验都附有思考题,是该实验提高、深入或拓展的内容,以利实行因材施教。

本书共有 49 个实验,内容丰富,可作为综合性大学和其他工科院校非物理专业学生的物理实验教材或教学参考书。

前 言

大学物理实验教学是物理教学中的一个重要环节,也是对学生进行能力培养和素质教育的重要手段。要搞好实验教学,必须有一本适合宁波大学实际情况的教材,这就是我们编写本书的思想动机。

长期以来,我校实验教师在进行教学改革和教学研究方面做了许多有益的工作,对实验讲义曾做了多次编写、修正,这些资料就是本书的主要依据。近年来,实验室建设速度很快,引入了不少新的设备和教学仪器,充实了许多新的实验内容,如第四章、第五章,以及光电效应、气体比热容比的测定、CCD 技术、高温超导等。同时也淘汰了一些在现代科学研究和生产实践中已经过时的实验内容。

本书除了在教学内容上有所更新,在课程体系方面也进行了适当调整。第二章 12 个实验为各专业必修课程,第三章 18 个实验作为不同专业学生有选择性的必修课程,而第四、五、六章为各专业学生的选修课程。我们认为这样安排比较合理、灵活。

负责本书编写的有 4 位教师,王和平编写实验 7、8、9、10、19、20、21、22、23、24、38、39、40,电磁学实验基本仪器和传感器实验基础知识以及附表 14、15、16;黄水平编写实验 1、2、5、14 及第六章;颜飞彪编写实验 41、42、43 及该章附录;其余部分由郑庚兴编写并负责全书统稿。熊永建教授、张家皋副教授负责全书审稿。

实验教材是许多实验教师长期从事实验教学工作的结晶,是实验室集体的教学成果。这里特别需要提出的是上一版该教材的编写者张志梁、李振升两位教师所付出的辛勤劳动,同时教材编写过程中,作者参阅了许多兄弟院校的有关资料并加以适当引用,在此,一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不少错误和欠缺,敬请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 12 月

绪论	1
第一章 物理实验基础知识	2
第一节 物理实验课的特点与内容	2
第二节 物理量的测量与测量中的误差	6
第三节 系统误差的处理	7
第四节 随机误差的处理	9
第五节 不确定度	15
第六节 有效数字与运算法则	16
第七节 实验数据的处理方法	19
第八节 物理实验的规范化操作要求	25
第九节 物理实验课的基本程序	26
练习题	28
第二章 基础性物理实验	30
实验 1 物体密度的测量	30
实验 2 PN 结正向压降与温度关系的研究	34
实验 3 验证动量守恒定律	39
实验 4 用拉伸法测金属丝的杨氏弹性模量	45
实验 5 用扭摆法测定物体转动惯量	49
实验 6 密立根油滴法测定电子电荷	55
电磁学实验基本仪器	60
实验 7 惠斯登电桥	65
实验 8 电表的改装和校正	71
实验 9 示波器的使用	74
实验 10 用电位差计测量电动势	80
光学实验的特点及操作守则	86
实验 11 薄透镜焦距的测定	86
实验 12 分光计调整和三棱镜折射率的测量	90
第三章 选择性物理实验	97
实验 13 受迫振动的研究	97
实验 14 液体表面张力系数的测定	103
实验 15 气体比热容比的测定	107
实验 16 弦振动的研究	110
实验 17 简谐振动的研究	113
实验 18 金属线膨胀系数的测定	117

实验 19	声速的测定	119
实验 20	用霍尔元件测量磁场	122
实验 21	用磁聚焦法测电子荷质比	126
实验 22	静电场的描绘与测量	131
实验 23	RLC 电路谐振特性的研究	135
实验 24	传感器的原理和应用	139
实验 25	迈克耳逊干涉仪的调整和使用	143
实验 26	单缝衍射的相对光强分布	149
实验 27	衍射光栅	152
实验 28	等厚干涉——牛顿环、劈尖	155
实验 29	偏振现象的观察与研究	159
实验 30	根据光电效应测定普朗克常数	164
第四章	光学自组与设计性实验	169
实验 31	几何光学实验	169
实验 32	光的干涉	173
实验 33	光的衍射	177
实验 34	阿贝成像原理与空间滤波	180
实验 35	全息照相	187
实验 36	空气折射率的测定	193
实验 37	全息光栅的制作	195
第五章	传感器综合实验	197
	传感器实验基础知识	197
实验 38	金属箔式应变片实验	200
实验 39	差动变压器(互感式)的性能及应用	204
实验 40	温度传感器的特性测量与控温	207
实验 41	霍尔式传感器实验	211
实验 42	光纤传感器	216
实验 43	电涡流传感器的性能及应用	219
	附录:传感器实验仪软件 V7.0 版使用说明简介	223
第六章	近代物理实验	235
实验 44	夫兰克—赫兹实验	235
实验 45	光速测量	239
实验 46	核磁共振	247
实验 47	CCD 技术基本原理和应用	251
实验 48	高温超导材料特性测试和低温温度计	257
实验 49	用 β 粒子验证狭义相对论的动量—动能关系	267
	附表	273
	附表 1 基本物理常量	273
	附表 2 常用物理量的代号和国际制导出单位	273

附表 3	国际单位制的基本单位和辅助单位	274
附表 4	国家选定的非国际单位制单位	274
附表 5	国际单位制所用的词头	275
附表 6	海平面上不同纬度处的重力加速度	275
附表 7	20℃时物质的密度	275
附表 8	标准大气压下不同温度时纯水的密度	276
附表 9	物质中的声速	277
附表 10	20℃时常用金属的杨氏模量 $Y(\text{N/m}^2)$	277
附表 11	物质的比热容	277
附表 12	20℃时与空气接触的液面的表面张力系数	278
附表 13	固体的线膨胀系数	278
附表 14	工业用铂热电阻分度表	278
附表 15	E 型热电偶分度表	279
附表 16	K 型热电偶分度表	280
附表 17	物质的折射率 n	280
附表 18	常用光源的谱线波长/nm	281
附表 19	几种纯金属的“红限” ν_0 及逸出功 W	281
主要参考文献		282

绪 论

物理学是一门以实验为基础的自然科学,物理学的规律和理论都是实验事实的总结,必要时还要通过实验来检验和修正理论。例如,麦克斯韦的电磁场理论,是建立在法拉第等科学家长期实验基础上,而赫芝电磁波实验的成功,才使这一理论得到普遍的承认和广泛的应用。又如,物理学家杨振宁、李政道在 1956 年提出了基本粒子在弱相互作用下宇称不守恒的理论,只是在物理学家吴健雄用实验证实以后,才得到国际上的公认。整个物理学的发展史都证明,物理学的发展是在实验和理论两方面的互相推动和紧密结合下进行的。

实验是在人工控制下模拟自然现象,使现象重现,从而进行仔细地观察和研究。借助实验,可以突破感观的局限,扩展认识的境界,大到天体,小到基本粒子,都可以通过各种仪器进行直接或间接地观察和测量。科学技术越进步,科学实验就显得越重要。任何一种新技术、新材料、新工艺、新产品,都必须通过科学实验才能获得。作为研究自然界物质运动最普遍形式的手段的物理实验,正在科学实验中充当铺路石的作用。

现在人类社会已进入高科技的时代,高科技是知识和技术的集成。而高科技的竞争,最终是人才的竞争,培养高质量的人才,是当今世界面临的共同课题。随着社会主义市场经济的建立,社会对人才的选择意识日益强化,需要智能型、创造型人才,需要既有丰富的理论知识,又有扎实实验技能的全面发展的人才。

物理实验课是学生进入大学以后系统学习科学实验知识和技能的开端,是后继实验课程的基础,它在培养学生用实验手段去发现、观察、分析和研究问题,最终解决问题的能力方面起着至关重要的作用。因此,该课程正受到各级教育部门的关心和支持。

鉴于物理实验的重要地位,对于一个 21 世纪的未来建设者而言,进行坚实的实验训练是必不可少的。其主要任务是:

- (1) 加强对物理概念和规律的认识,能全面、深入地分析物理问题。
- (2) 获得科学实验的基本知识和基本技能,掌握实验数据的正确记录、处理,撰写完整、规范的实验报告。
- (3) 善于发现问题、分析问题、解决问题,培养自己的创新意识和独立工作能力。
- (4) 培养严肃认真、一丝不苟和实事求是的科学态度和工作作风。

第一章

物理实验基础知识

第一节 物理实验课的特点与内容

物理实验是一门与物理学密切相关的综合性课程。任何物理实验都必须以物理理论为依据,从而获得与理论相一致的实验结果;当实验结果与理论相矛盾时,就应继续进行实验,找出理论与实验结果不一致的原因,从而对物理理论进行修正和完善,获得更具普遍意义的物理规律。其综合性是指进行物理实验光有物理知识是不够的,还必须具备以下几方面的知识。

一、物理实验仪器知识

我们知道物理实验包含的内容很广,所用到的仪器种类繁多,各种仪器的结构、工作原理、使用及维护等知识都是每一个实验者必须掌握的内容。常用的物理仪器可分为以下几类:

1. 机械类仪器

如:物理天平、焦利天平、游标卡尺、千分尺、刚体转动仪、杨氏模量测定仪、导热仪、抽气机、静电计、气垫导轨、光具座等。

2. 电子仪器

如:示波器、音频信号发生器、数字毫秒计、频率计、稳压电源等。

3. 仪表类仪器

如:电流表、电压表、万用表、温度表、气压表、电位差计、箱式电桥等。

4. 光学类仪器

如:分光计、读数显微镜、读数望远镜、迈克尔逊干涉仪、偏振仪、平行光管及各种光源等。

需要说明的是将以上仪器分成4类只是相对的,因为好多仪器实际上没有明确的界线,如迈克尔逊干涉仪,它既是一台光学仪器,又是一台精密的机械类仪器。在原子物理、近代物理实验中,这类仪器就更为普遍,如光栅光谱仪、相对论效应谱仪等等。在这些仪器中,不但有精密的机械传动系统,还有光学系统、复杂的电路系统、磁路系统,甚至还有数据采集与运算系统。它们是集光、机、电、计算机于一体的一种综合类实验仪器。

二、物理实验的基本测量方法

物理实验测量方法名目繁多,如按测量内容来分,可分为电量测量和非电量测量;按测量数据获得的方式来分,可分为直接测量、间接测量和组合测量;按测量方式来分,可分为直读法、比较法和差值法;按被测量与时间的关系来分,可分为静态测量、动态测量和积算测量等等。下面,将物理实验中最常用的几种测量方法作概要介绍一下。

1. 比较法

比较法是将相同类型的被测量与标准量直接或间接地进行比较,测出其大小的测量方法。比较法可分为直接比较法和间接比较法两种。

(1) 直接比较法

将被测量直接与已知数值进行比较,测出其大小的测量方法,称为直接比较测量。它所使用的测量仪表,通常是直读指示式仪表,它所测量的物理量一般为基本量。例如,用米尺、游标卡尺和螺旋测微器测量长度;用秒表或数字毫秒计测量时间;用伏特表测量电压等。仪表刻度预先用标准测量仪进行分度和校准,在测量过程中,指示标记在标尺上相应的刻度值就表示被测量的大小。对测量人员来说,除了将其指示值乘以测量仪器的常数或倍率外,无需做附加的动作或计算。由于测量简单方便,因此应用十分广泛。

(2) 间接比较法

当一些物理量难以用直接比较法测量时,可以利用物理量之间的函数关系将被测量与同类标准量进行间接比较测出其数值。如图 1-1 所示,将被测电容 C_x 与标准电阻 R_0 串联后接入音频信号发生器,在输出电压 U 及频率 f 一定的情况下,用内阻较高的电压表分别测出 U_0 、 U_x 。

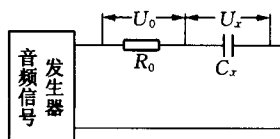


图 1-1

则

$$\frac{U_0}{U_x} = 2\pi f C_x R_0$$

从而可以算出被测电容的电容量。

又如,在示波器 x 偏转板和 y 偏转板上分别输入正弦电压信号,其中一个为待测频率的电信号,另一个为频率可调的标准电信号。调节标准电信号的频率,当两个电信号的频率相同或成简单的整数比时,则可以利用示波器在荧光屏上呈现的利萨如图形比较两个电信号的频率。设 N_x 、 N_y 分别为 x 方向和 y 方向切线与利萨如图形的切点数,则

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_x}{N_y}$$

2. 替代法

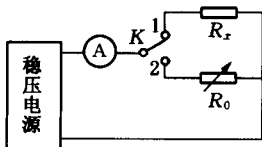


图 1-2

图 1-2 为应用欧姆定律将一个可调节的标准电阻 R_0 代替待测电阻 R_x 的测量示意图。若稳压电源输出电压不变,调节标准电阻 R_0 ,使开关 K 在“1”和“2”位置时,电流表指示值相同,则 $R_x = R_0$ 。

3. 放大法

物理实验中常遇到一些微小量的测量,为提高测量精度,可以选用相应的测量装置,将被测量进行放大后,再进行测量。常用的

放大方法有机械放大法、光学放大法和电子放大法 3 种。

(1) 机械放大法

螺旋测微放大法是一种典型的机械放大法。螺旋测微器、读数显微镜和迈克尔逊干涉仪等测量系统的机械部分都是采用螺旋测微装置进行测量的,常用的读数显微镜的测微丝杆的螺距是 1 mm,当丝杆转动一圈时,滑动平台就沿轴线前进或后退 1 mm。在丝杆的一端固定一测微鼓轮,其周界上刻成 100 分格,因此当鼓轮转动一分格时,滑动平台移动了 0.01 mm,从而使沿轴线方向的长度测量精度大为提高。

(2) 光学放大法

常用的光学放大法有两种,一种是使被测物通过光学装置放大视角形成放大像,便于判别,从而提高测量精度。例如放大镜、显微镜、望远镜等。另一种是使用光学装置将待测微小物理量进行间接放大,通过测量放大的物理量来获得微小物理量。例如测量微小长度和微小角度变化的光杠杆镜尺法,就是一种常用的光放大法(详见实验 4)。

(3) 电子放大法

在物理实验中往往需要测量微弱的电信号或者利用微弱的电信号去控制某些机构的操作,必须用电子放大器将微弱电信号放大后才能有效地进行观察、控制和测量。电子放大作用是由三极管完成的。最基本的交流放大器如图 1-3 所示的共发射极三极管放大电路。当微弱信号 U_i 由基极和发射极之间输入时,在输出端就可以获得放大了一定倍率的电信号 U_o 。

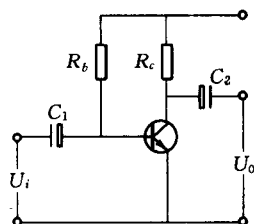


图 1-3

4. 补偿法

补偿法测量是通过调整一个或几个与被测物理量有已知平衡关系的同类标准量,去抵消被测物理量的作用,使系统处于补偿(或平衡)状态。处于补偿状态的测量系统,被测量与标准量具有确定关系,由此可测得被测量,这种测量方法称为补偿法,也称平衡法。

如图 1-4 所示,两个电池与检流计串联成闭合回路,两个电池正极对正极,负极对负极相接。调节标准电池电动势 E_0 的大小,当 E_0 等于 E_x 时,则回路中没有电流通过(检流计 G 指针指零),这时两个电池的电动势相互补偿了,电路处于补偿状态。因此利用检流计就可判断电路是否处于补偿状态,一旦达到补偿,则 E_x 与 E_0 大小相等,这种测量电动势(或电压)的方法就是典型的补偿法。

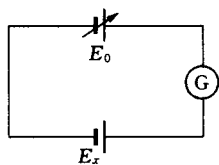


图 1-4

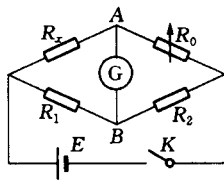


图 1-5

图 1-5 所示是惠斯登电桥电路,图中 R_0 、 R_1 、 R_2 为标准电阻, R_x 为待测电阻,调节 R_0 ,当通过检流计 G 的电流为零时,A、B 两点电位相等,桥臂上的电压相互补偿,此时电桥处于平衡状态,则

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 = CR_0$$

当比较臂 R_0 和比率系数 C 已知时,就可测得 R_x 值。

由上可见,补偿法测量的特点是测量系统中包含有标准量具,还有一个指零部件。在测量时要调整标准量,使标准量与被测量之差为零,这个过程称为补偿或平衡操作。采用补偿法进行测量的优点是,可以获得比较高的精确度,但是测量过程比较复杂,在测量时要进行补偿操作。这种测量方法在工程参数测量和实验室测量中被广泛应用,如用天平测质量,用电位差计测电动势,用电桥测电阻、电容、电感等等。

5. 模拟法

人们在研究各种自然现象、进行科学研究、解决工程技术问题中,常会遇到一些由于研究对象过分庞大,变化过程太迅猛或太缓慢,所处环境太恶劣太危险等情况,以致对这些研究对象难以进行直接研究和实地测量。于是人们以相似理论为基础,在实验室中,模仿实际情况,制造一个与研究对象的物理现象和过程相似的模型,使现象重现、延缓或加速来进行研究和测量,这种方法称为模拟法。模拟法可分为物理模拟和数学模拟两类。

(1) 物理模拟法

物理模拟就是人为的模型与实际研究对象保持相同物理本质的物理现象或过程的模拟。例如,为研制新型飞机,必须掌握飞机在空中高速飞行的动力学特性,通常先制造一个与实际飞机几何形状完全相似的模型,将此飞机模型放入风洞(高速气流装置),创造一个与原飞机在空中实际飞行完全相似的运动状态。通过对飞机模型受力情况的测试,便可方便地在较短的时间内以较小的代价取得可靠的有关数据。

(2) 数学模拟法

数学模拟是指一个对另一个物理本质完全不同,但具有相同数学形式的物理现象或过程的模拟。例如静电场与稳恒电流场本来是两种不同的场,但这两种场所遵循的物理规律具有相同的数学形式。因此,我们可以用稳恒电流场来模拟静电场的电位分布(可参阅实验 22)。

模拟法是一种易行有效的测试方法,在现代科学研究和工程设计中被广泛地应用。随着微机的不断发展和广泛应用,用微机进行模拟实验更为方便,并能将物理模拟和数学模拟两者很好地结合起来。

6. 干涉法

干涉法是应用相干波发生干涉时所遵循的规律进行有关物理测量的方法。通常,利用干涉法来测长度、角度、波长、气体或液体的折射率和检测各种光学元件的质量等。由于干涉法应用的是光的干涉原理,因此要求测量台和测量装置稳定可靠,这样就能达到很好的测量效果,获得很高的测量精度。例如,利用迈克尔逊干涉仪的光干涉原理,可以测定光波的波长和相干长度;利用牛顿环的干涉原理,可以测定透镜的曲率半径等。

以上介绍的是一些最基本的测量方法,还有许多其他方法,如力学实验中的气垫法、驻波法,热学实验中的混合法、恒流法、电热法,电磁学实验中的相位法、谐振法,光学实验中的衍射法,原子物理实验中的磁共振法等等。这许多方法为我们揭示物理世界的奥秘提供了有力的武器,我们应该在各个具体的实验中很好地学习和研究。

三、物理实验的数据处理

数据处理是物理实验基础知识的重要内容,它主要包括:误差的概念及其计算,有效数字及其运算规则,实验数据的表示等,这些内容我们将在下面作具体介绍。

由上可知,物理实验不仅与物理学有关,而且还跟仪器学、测量学、数据处理与误差理论密切联系,所以物理实验是一门综合性的课程。在理论指导下进行有目的的实验,在实践与操作中获得实验技能的训练和提高,在实验研究中检验理论的正确性和局限性,从而进一步加深对物理规律的认识,这就是物理实验的特点。

第二节 物理量的测量与测量中的误差

一、基本概念

测量是人类认识物质世界和改造物质世界的重要手段之一。通过测量,人们对客观事物获得数量的概念,从而得出一般规律,建立起各种定理和规律。

1. 按获得数据的方式分

测量按其获得数据的方式可分为如下3类:

(1) 直接测量

当测量结果直接显示出被测量的量值时,这种测量就称为直接测量,如用米尺量长度、用温度计测温度。

(2) 间接测量

并不直接去测待测量,而是直接测量其他量,通过待测量与其他量的关系算出待测量,这种测量称间接测量。如为了测定圆柱物体的体积 V ,总是先测出它的高 h 及其直径 D ,然后利用公式 $V = \frac{1}{4}\pi h D^2$,求得它的体积。

(3) 组合测量

选择不同的自变量,测得一系列对应的因变量,这样一组多次测量称为组合测量。如用伏安法测定电阻 R_x ,在电阻两端加上不同的电压 $U_i (i = 1, 2, 3, \dots)$,测得通过电阻的一系列电流 I_i ,从而获得被测电阻 R_x 量值。

2. 按测量的形式分

测量按其形式可分为下面两种:

(1) 等精度测量

若对某一量进行多次测量,在多次测量中都使用相同方法,相同仪器,并在相同的条件和环境中由某人以同样细致程度进行工作,那么这一系列多次测量称为等精度多次测量。

(2) 非等精度测量

若是使用不同仪器、不同方法,或是在不同时间、不同温度下,或是使用相同方法由不同测量者对某一量进行多次测量,那么这一系列测量是非等精度测量。

在测量中,由于测量仪器、测量条件及种种因素的局限,测量是不能无限精确的,测量结果与客观真值之间总有一定的差异,也就是说测量总存在误差。我们定义误差 Δx 为:测量值 x 与真值 x_0 之差,即 $\Delta x = x - x_0$ 。由此可知,误差是有正有负的,测量误差的大小直接反映了测量工作的价值,即测量工作的可靠性与测量的技术水平。

二、误差的分类

根据误差的性质与特点可以分为以下3类:

1. 系统误差

在同样条件下多次测量同一量值时,绝对值和符号不变,或者条件改变时,按一定规律改变的误差称为系统误差。系统误差指的是由于仪器本身的准确度和分辨率的限制,使用的实验原理或实验方法不完备、仪器设备安装或调整不尽合理以及环境因素(如温度、湿度、磁场、大气压等)的变化而引起的误差。

系统误差的存在直接影响测量结果的准确性,因此,系统误差的大小反映了测量的准确度。

2. 随机误差(偶然误差)

在测量过程中,必然存在一些随机因素的影响,从而造成具有随机性质的误差称为随机误差。由于测量者感官灵敏度及分辨能力的限制,使估计最后一位读数时出现主观偶然性;测量时周围环境出现随机性变化(如各种无规则震动、电磁场干扰、温度的涨落、空气的扰动……);有时被测物理量本身具有随机性变化的等等。由于上述原因都会产生随机误差。

随机误差的存在直接影响了测量结果的集中性,使一组多次等精度测量值相互离散,因此,随机误差的大小反映了测量的精密度。

3. 粗差(过失误差)

粗差是由于实验者使用仪器方法不正确,实验方法不合理,粗心大意,导致数据读错、记错、算错等引起的误差。所以,严格地讲,粗差是一种错误。它将导致测量毫无价值,使实验完全失败。因此,我们必须树立严肃认真的科学态度,避免在实验中引入粗差。

第三节 系统误差的处理

系统误差反映了测量的准确度,因此,消除或减小系统误差是十分重要的。由于系统误差一般都遵循一定的变化规律,因此我们总可以设法发现它,并采取一定的方法将其消除或减小到最小程度。这是处理系统误差最好的办法。

发现或减小系统误差,要靠实验者坚实的理论基础和丰富的实践经验,处理的好坏,主要取决于实验者对被测量参与测量各环节的性质以及各种影响测量因素的了解深度,取决于对每一具体测量条件下系统误差的研究和分析。所以对系统误差应着重采用个别考察的办法,根据实际问题采取具体方案来解决。这在以后的实验中有具体介绍,请大家注意学习领会。在此只作一些简要介绍。

一、方法或理论误差

分析测量所依据的理论公式,看其所要求的条件在测量过程中是否得到满足。如测重力加速度,若用单摆,是依据单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 。此公式要求的条件为摆角趋于零,摆线质量趋于零,不存在任何阻力等,这在实验中是得不到完全满足的。因此,必然产生系统误差。又如,气轨上简谐振动的研究,用到的实验公式为 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K_1 + K_2}}$,而实际上气轨上运动的滑块由于受到空气阻力等因素的影响,不是作理想的简谐振动,而是作阻尼振动,因此,实验中必定产生系统误差;再如,用电压表测电压时,除非电压表内阻为无穷大,不

然,必定会改变被测电压的原状态,以致造成测量误差。

对这类误差,只要分析出原因,就可以采取一定的办法,根据测量准确度的要求,使要求的条件达到一定程度的满足,或进行修正,使系统误差减小到允许的程度。如,单摆实验中为了减小摆角 θ 不趋于零对测量结果的影响,可采用公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}\left(1 + \frac{1}{4}\sin^2 \frac{\theta}{2}\right)$$

在气轨上简谐振动实验中,为了减小滑块受到阻力对测量结果的影响,引入阻尼系数 β ,其公式为

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K_1 + K_2}{m} - \beta^2}}$$

二、减小系统误差的测量方法

1. 替代法

测量待测量后,立即用已知标准量代替未知量,进行同样的测量,并使仪器指示不变,则已知标准量就等于待测量。如在天平上称量,未知量 m_x 与 m_1 平衡,设天平两臂长为 L_1 和 L_2 ,则有

$$m_x = \frac{L_1}{L_2}m_1$$

若天平两臂 L_1 和 L_2 不严格相等,那么取 $m_x = m_1$ 将带来系统误差。现移去 m_x 代之以标准砝码,若标准砝码值为 m_2 时天平重新平衡,则有 $m_x = m_2$ 。这样就消除了由于天平不等臂而产生的系统误差。

2. 抵消法

这种方法要求在对被测量进行测量时,要进行两次适当的测量使两次产生的系统误差大小基本相等,符号相反,取两次测量结果的平均值作为最后结果,以达到消除系统误差的目的。

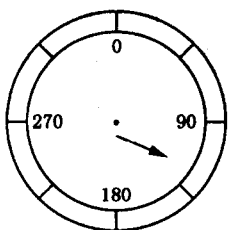


图 3-1

如磁电系仪表在有较强磁场的环境中应用,可将仪表转 180° ,取两次读数的平均值作为测量结果,可消除外界恒定磁场带来的系统误差。又如测角度仪器,若转轴与刻度盘不同心,则会引入读数误差。如图 3-1 所示情况,可知在 0° 、 180° 处误差最小,在 90° 、 270° 处误差最大,在相隔 180° 的两个对应点,误差的大小相等,符号相反。因此,若在测量时在相差 180° 的两对应点处测两个值,并取此两值的平均值作为测量结果,则可消除该仪器的偏心误差。这正是一些测角仪器(如分光计)在刻度盘上相差 180° 的位置上设置两个读数装置的道理。

在热学实验中,为了消除系统对环境的散热而引起的系统误差,则往往采取控制系统温度的方法,使实验中前(或后)一段时间系统温度低于(或高于)室温,后(或前)一段时间系统温度高于(或低于)室温,使系统在整个实验过程中从环境的吸热大致等于对环境的放热,从而消除了系统对环境散热的影响。

3. 交换法

这种方法是将待测量与标准量的位置互换而进行两次测量,以达到消除系统误差的目的。

再以天平不等臂为例,将待测量 m_x 放在左侧,标准量(砝码)放在右侧,平衡时砝码为 m_1 有

$$m_x = \frac{L_2}{L_1} m_1$$

将待测物 m_x 与砝码互换,天平再次平衡时砝码为 m_2 ,则

$$m_2 = \frac{L_2}{L_1} m_x$$

从而得到

$$m_x = \sqrt{m_1 m_2}$$

又如,在自组惠斯登电桥实验中,为了消除导线电阻及连接点接触电阻对测量结果的影响,可以将被测电阻与标准电阻互换位置后再测一次,取两次结果的平均值作为最后结果,就可消除导线电阻及连接点接触电阻引入的系统误差。

三、仪器准确度导致的误差

大多数仪器,尤其是准确度不太高的仪器,由仪器准确度限制产生的误差都属于系统误差。对这类误差不能采用任何方法消除或减小,只能根据仪器的准确度估计出误差的范围。

对一些非数字式测量长度、温度、时间等仪器,一般是以最小分度值作为准确度,其绝对误差视仪器情况取最小分度值或其一半。

指针式电测仪表的准确度,有的以额定相对误差表示,有的以标称相对误差表示,它们的具体含义均可以从附带的仪器说明书上查得(可参阅第二章电磁学实验基本仪器)。数字式仪表的准确度又有其自己的含义。尽管各类仪器的准确度含义不同,但均可由其确切的含义求出由此导致的误差。例如,一量程为 10 V,准确度等级 $a = 0.5$ 的直流电压表,该表的准确度等级定义为 $\frac{\Delta m}{10} = a\%$, Δm 为最大绝对误差。根据准确度等级的含义,用此表测电压时,由准确度限制导致的最大绝对误差为

$$\Delta m = 10 \text{ V} \times 0.5\% = 0.05 \text{ V}$$

总之,对系统误差的处理,应根据对测量提出的要求,在现有技术条件和理论水平基础上,尽可能设法消除它。对于那些不可消除的系统误差,如同对待随机误差那样估算出它的大小。

第四节 随机误差的处理

随机误差是由一些不可抗拒的原因而产生的,因此,我们无法消除它。进一步的研究发现,在单次或少数几次重复测量中,随机误差的大小或正负是无规律的,是随机的,但是在 50 次、100 次等精度多次测量中,我们会发现随机误差服从一定的统计分布规律。当测量次数很多时,随机误差的代数和趋于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = 0$$