

大学物理实验

刘振飞 童明微 主编

· 重庆大学出版社

前 言

本书根据全国工科物理实验课程指导组 1988 年制定的基本要求,结合一般工科院校专业设置特点和实验室仪器设备情况以及学生的现况编写的。可供工科院校各专业作物理实验教材使用。也可供职工大学、业余大学、函授大学、夜大学等选用。

本书共 50 个实验。在 40 个基本实验中,有的实验并列了两种测量方法和实验装置,供选用。设计性实验是在学生做了一定量的基本实验的基础上,为进一步培养学生独立自主地进行科学实验的能力而设置的。设计性实验只提出研究对象、要求及给予适当的提示,让学生自行考虑、确定实验原理、方法、选择合适的仪器和设计一定的实验程序,或解决某一实际问题。综合性实验,是为了进一步提高优秀学生的综合实验能力而编写。物理实验中常用的和学生应该掌握的仪器专章讲述,不常用的仪器设备则放在实验中介绍。在编写常用仪器时,只介绍了仪器的基本性能(包括基本误差)和使用方法,有些仪器是把说明书介绍出来。这样做的目的是为了培养学生查阅资料的习惯和能力。本书的最后一部分列举了 17 个物理常数附表,供查阅。

考虑到物理实验课的独立性和特点,以及大多数学生的现况,为使学生便于预习,教师便于教学,我们在编写时力求做到:实验目的明确、实验原理叙述清楚、计算公式推导完整、实验步骤由详到简。在每个实验后面都列有讨论与思考题,供学生预习和实验后进一步分析讨论、提高用。

实验课教学是一件集体事业,无论是教材的编写,还是实验开设的准备等都是我校物理实验室全体任课教师和实验技术人员长期来辛勤劳动、不断改进、充实提高的结果。同时,在编写本书的过程中,参阅了许多兄弟院校的有关教材并作了个别引用,借此表示衷心的感谢。

本书由重庆大学刘振飞、童明微主编。参加编写的还有陶纯匡、付英振、周寅康、黄荣贵、刘类棠、张明富、罗挺、余丹、周积骏、吴大华、林德华、温维佳;由刘振飞、付英振、卢晟担、蒲长虹等制图。

本书由重庆大学物理系魏大鲁副教授审阅。

由于编者水平有限,实践经验不足,加上时间仓促,书中难免有谬误之处,恳请使用者批评指正。

编者

1991 年 9 月

内 容 提 要

本书系根据全国工科物理实验课程指导组1988年制定的教学基本要求编写成。

本书叙述了误差的基本知识、有效数字的运算以及数据处理的方法,介绍了物理实验常用仪器设备,并安排了40个基本实验和5个设计性实验及5个综合性实验,排列顺序为力学,热学,电磁学,光学与近代物理实验。

本书可作为工科院校各专业物理实验教材,也可供职工大学、业余大学、函授大学、夜大学等选用。

大学物理实验

刘振飞 童明微 主编

责任编辑 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学出版社印刷厂印刷

*

开本:787×10921/16印张:17.75字数:443千

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数: 1—12500

标准书号: ISBN 7-5624-0516-6 定价:8.00元
O·69

(川)新登字 020 号

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 物理实验课的作用、目的和要求	1
§ 1.2 物理实验课的三个教学环节	2
第二章 测量误差与数据处理	4
§ 2.1 测量与误差	4
§ 2.2 系统误差的处理	7
§ 2.3 偶然误差的处理	9
§ 2.4 有效数字及运算	16
§ 2.5 实验数据处理方法	22
练习题	27
第三章 物理实验常用仪器	29
§ 3.1 长度测量器具	29
§ 3.2 质量称衡仪器——天平	33
§ 3.3 时间测量仪器	37
§ 3.4 温度和气压测量仪器	40
§ 3.5 电磁测量仪器	44
§ 3.6 常用电子仪器	65
§ 3.7 常用光学仪器	87
§ 3.8 常用光源	93
第四章 力、热学实验	96
实验 1 长度测量	96
实验 2 物体密度的测定	99
实验 3 测定杨氏弹性模量	100
实验 4 一维碰撞	104
实验 5 用三线摆法测定物体的转动惯量	107
实验 6 切变模量的测定	109
实验 7 声速的测定	112
实验 8 比热容的测定	114
实验 9 液体表面张力系数的测定	119
实验 10 液体粘滞系数的测定	125
实验 11 测金属的导热系数	132
第五章 电磁学实验	135
实验 12 静电场的模拟	135
实验 13 电表的改装和校准	138

实验 14	用电桥测电阻	141
实验 15	非线性元件伏安特性的测定	147
实验 16	用电位差计测电动势	149
实验 17	用电位差计测电表内阻和校准电表	151
实验 18	灵敏电流计的研究	153
实验 19	用冲击电流计测螺线管磁场	158
实验 20	用冲击电流计测高电阻	162
实验 21	电子示波器的使用	164
实验 22	铁磁材料磁化曲线和磁滞回线的测绘	169
实验 23	交流电桥	173
实验 24	RLC 串联电路的暂态过程	176
实验 25	霍耳效应	182
实验 26	基本电荷的测定	187
第六章	光学和近代物理实验	192
实验 27	分光计的调整和玻璃折射率的测定	192
实验 28	薄透镜焦距的测定	196
实验 29	透镜象差的研究与观察	198
实验 30	等厚干涉——劈尖和牛顿环	202
实验 31	单缝衍射	205
实验 32	光栅衍射	209
实验 33	迈克尔逊干涉仪	212
实验 34	光学介质透过率和吸收系数的测定	214
实验 35	光的偏振现象的研究	217
实验 36	光度和照度测量	221
实验 37	照相技术	225
实验 38	全息摄影	229
实验 39	光电效应和普朗克常数的测定	233
实验 40	盖革—米勒计数器	237
第七章	设计性实验	243
实验 41	实验仪器的选择和误差分配	243
实验 42	冰熔解热的研究	245
实验 43	热电偶定标	246
实验 44	万用电表的研制	247
实验 45	望远镜组装	249
第八章	综合性实验	251
实验 46	真空的获得及测量	251
实验 47	测定超导材料的临界温度	256
实验 48	观察迈斯纳效应	258
实验 49	氟里昂制冷技术	260

实验 50 高真空镀膜技术 265

附表..... 268

主要参考书..... 275

第一章 绪 论

§ 1.1 物理实验课的作用、目的和要求

科学实验是自然科学研究的主要手段。自然科学的理论要靠实验来验证;新的规律要靠实验来发现;工程设计和生产要靠实验来推动和完善。

物理学是一门自然科学。物理学的研究方法包括实验和理论两个方面。所谓实验的方法是根据实验的目的(或问题),利用特定的仪器或装置,在人为控制条件下重演或模拟所研究的物理现象,并对这些物理现象加以观察和测量,以便深入揭示物理现象的本质。在大量实验事实和测量结果中找出某一物理现象的变化规律及其与另一些物理现象之间的内在联系。理论的方法虽不直接进行实验,但物理学从概念的建立到原理和定律的概括都必须以大量的实验为基础,并受到实验检验。从这种意义上来说,物理学本身就是一门实验科学。

物理实验本身有它一套知识、方法、技能和习惯,实验中的基本知识、方法、技能和习惯是高等工程技术人员所必须具备的。要掌握好这套知识、方法、技能和习惯,需要由浅入深,由简到繁加以培养和锻炼。物理实验是理工科院校各专业一门必修的独立设置的基础实验,是学生进入大学受到系统实验技能训练的开端,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重要作用;也为学生独立地进行科学实验研究、设计实验方案,选择、使用仪器设备和提出新的实验课题,为进一步学习后续实验课程打下良好的基础。

本课程的目的与要求是:

(1)学习和运用实验原理、方法去研究某些物理现象并进行具体测试,得出某些结论(重点在具体测试)。

(2)进行实验技能的基本训练,熟悉常用仪器的基本原理、结构性能、调整操作、观测、分析和排除故障。

(3)学习处理数据的方法,以及分析实验方法、测量仪器、周围环境、测量次数和操作技能对测量结果的影响。

(4)培养学生进行科学实验的能力,即如何从测量目的(研究对象)或课题要求出发,依据哪项原理,通过什么方法,选用哪种合适的仪器与设备,确定合理的实验程序去获得准确的实验结果;

(5)通过实验培养学生严肃认真、细致踏实、一丝不苟、实事求是的科学态度和克服困难、坚韧不拔的工作作风,培养良好的实验习惯、遵守纪律、爱护国家财产的美德。

§ 1.2 物理实验课的三个教学环节

物理实验是一门独立课程,在教师指导下由学生独立进行,在整个实验教学过程中,学生必须主动、自觉、创造性地获得知识和技能,决不是仅仅通过实验获取几个数据,而是要通过实验去探索研究问题,将知识转化为技能。为此,可把物理实验课分为三个阶段。

(1)实验前的预习 实验能否进行,能否获得预期的结果,很大程度上取决于预习是否充分。因此,每次做实验前一定要预习。预习时主要阅读教材,了解实验目的、弄清实验内容,要测试什么;弄懂原理,采用什么实验方法。对实验中使用的仪器或装置要阅读教材中有关仪器部分,了解使用方法和注意事项,在此基础上写出预习报告。预习报告内容包括:实验名称、目的、原理、仪器、数据记录表格和初步拟定的实验步骤。不清楚的问题也可写在预习报告中。

(2)课堂实验 进入实验室应遵守实验室的规章制度。在教师讲解前,首先查点所用实验仪器是否齐全(但不允许动用仪器)。每次实验课开始时,一般由指导教师交待有关注意事项,学生要结合自己的预习逐一领会,特别要注意实验中容易引起失误的地方。

进行实验时,首先是布置、安装(或接线)和调试仪器。仪器的布置是否合理,直接影响到操作、读数是否方便。对仪器装置进行调试(水平、铅直、正常的工作电压、光照等)使仪器装置达到最佳工作状态,调制必须细致、耐心地进行,切忌急躁。要合理选择仪器的量程。如果在调试中遇到困难,不能解决,可以请教师指导。在电磁学实验中,接线完毕后,自己作一次检查,再请教师检查,确认正确无误才能接通电源。

调试准备就绪后,开始进行测量。每次测量所得的原始数据要整齐地记录在自己准备好的记录表格中,要特别注意数据的有效数字和单位。切忌将数据记录在草稿纸或书上,然后再抄写在表格内。如实验结果与环境条件(如温度、湿度、气压等)有关时,就一定要记录有关数据。记录实验过程中观察到的现象,特别是观察到的异常现象,以便分析讨论。最后,把实验中使用的主要仪器的型号、规格、精度、组别记录下来。总之,一份完整的原始实验记录,一般应包括:实验数据,实验时周围环境条件的有关数据,观察到的现象,以及使用仪器的型号、组别。

在测量过程中要尽量保持实验条件不变,要注意操作姿势,身体不要靠近桌子,不要使仪器发生移动,受到振动。如果遇到仪器、装置出现故障,应力求自己动手解决,或留意观察教师怎样分析判断仪器的毛病,怎样排除故障。

实验完后,暂不要破坏测试条件,将记录的数据请教师审阅签字,如发现错误数据时要重新进行测量。最后,整理好仪器才能离开实验室。

(3)写实验报告 实验报告是实验工作的总结,是交流实验经验和推广实验结果的媒介。因此,写实验报告应字迹清楚、文理通顺、简明扼要、图表正确。写实验报告是逐步培养学生分析、总结问题能力的一个重要方面。

实验报告的内容应包括:

①实验名称。

②实验者姓名,实验日期。

③实验目的:写明为什么做这个实验。要用自己的语言来写,不要照抄教材。

④实验原理:应简明扼要、文理通顺、不要照抄教材(应包括必要的计算公式、原理图、电路

图或光路图等)。

⑤实验仪器(型号、编号、规格、精度、最小分度值)及装置。

⑥实验操作步骤:按实际操作情况写出。

⑦实验数据记录:把预习报告所记录的原始数据仔细地转记下来,并尽可能列出表格,把数据处理的最后结果转记在表格内。

⑧数据处理:计算或作图,对结果进行误差分析,写出最终结果。

⑨问题讨论:找出影响结果的主要因素,减小误差应采取的措施,对实验中观察到的现象(特别是异常现象)的解释,改进实验的建议和心得体会,回答实验的思考题等。

第二章 测量误差与数据处理

§ 2.1 测量与误差

§ 2.1.1 测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的。所谓测量就是将待测物理量与规定作为标准单位的同类物理量(或称为标准量)通过一定方法进行比较,其倍数即为待测物理量的测量值。在物理实验中,测量可分为两类,一类是用已知的标准单位与待测量直接进行比较,或者从已用标准量校准的仪器仪表上直接读出测量值,例如,用米尺量得物体的长度为 0.7300m ,用停表测得单摆周期为 1.05s ,用毫安表读出电流值为 12.0mA 等,这类测量称直接测量(或简单测量)。另一类测量,它不能直接把待测量的大小测出来,而是依据待测量和几个直接测得量的函数关系求出待测量。例如,测量铜(圆柱体)的密度时,我们首先用游标卡尺或千分尺测出它的高 h 和直径 d ,用天平称出它的质量 M ,然后再通过函数关系式 $\rho = 4M/\pi d^2 h$ 计算出铜的密度 ρ 来,我们把这类测量称为间接测量(或称复合测量)。

一般说,大多数测量都是间接测量、但随着科学技术的发展,很多原来只能间接测量的物理量,现在都可以直接测量了。例如电功率的测量,现在都是用功率表直接测量,又如速度可用速率表来直接测量等。

一个数据(即测量值)不同于一个数值,它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位,便具有了一种特定的物理意义,这时,它才可以称为一个物理量,因此,在实验中测量所得的值(数据)应包括数值和单位,二者缺一不可。

§ 2.1.2 误差

任何物质都有自身的各种各样的特性,反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值称为这些物理量的真值。测量的目的就是要力求得到真值。但测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人进行的,在实验测量过程中,由于受到测量仪器、测量方法、测量条件和测量人员的水平以及种种因素的限制,情况比较复杂,使测量结果与客观存在的值不可能完全相同,我们所测得的只能是某物理量的近似值。也就是说,任何一种测量结果的测量值与客观存在的真值之间总会或多或少地存在一定的差值,这种差值称为该测量值的测量误差(又称测量值的绝对误差),简称“误差”,即

$$\text{测量值}(N') - \text{真值}(N) = \text{误差}(e) \quad (2-1-1)$$

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程的始终,每使用一种仪器,进行一次测量都会引起误差。测量所根据的方法和理论越繁多、所用仪器越复杂、所经历的时间越长,引进误差的机会就越多。弄得不好,就不一定能达到提高测量精确度的目的,因此实验应该根据要求和

误差限度来制订或选择合理的方案和仪器。不能盲目要求仪器总是越高级越好,环境条件总是恒温、恒湿,且越稳定越好,测量次数总是越多越好,一个优秀的实验工作者,应该是在一定的要求下,以最低的代价来取得最佳的结果。要做到既保证必要的实验精确度又合理地节省人力与物力。

§ 2.1.3 误差的分类

误差的产生原因是多方面的。根据误差的性质和来源,可将误差分为两类;系统误差和偶然误差。

1. 系统误差

在一定实验条件下(方法、仪器、环境和观测人都不变)多次测量同一量时,误差的大小和正负号保持不变,或按一定规律变化,或是有规律的重复的误差,称为系统误差。它主要来自以下几个方面:

(1)理论(方法)误差 这是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或由于所采用测量方法或数据不完善而引起的误差。例如,用伏安法测电阻,采用不同的联接方法,电表内阻的影响,环境条件的影响,都会带来一定的误差。测量物体的长度时,没有考虑物体热胀冷缩带来的误差。单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋近于零,这实际上是达不到的,用它来计算周期必然引起误差。用单臂电桥测电阻时,没有考虑接线电阻和接触电阻的存在,而引起误差等。

(2)仪器误差 这是由于测量仪器本身的固有缺陷或没有按规定使用而引起的。例如,用未经校准零位的千分尺测量零件长度。用不十分等臂的天平称衡物体的质量,都会引起误差。

(3)环境误差 由于环境条件变化所引起的误差。如温度、气压、湿度的变化等。

(4)个人误差 这是由于观测人的生理或心理特点所造成的。通常与观测人员反应速度和观测习惯有关。例如,用肉眼在刻线上估读数时,习惯地偏向一个方向;按动秒表时,习惯地提前或落后。

总之,系统误差是在一定实验条件下由一些确定的因素引起的,它使测量结果总是偏向一边,即偏大或偏小。因此,试图在相同条件下用增加测量次数来减小或消除它是行不通的,只有找到某个系统误差产生的原因,才能采取一定的方法减小或消除它的影响,或对测量结果进行修正。

2. 偶然误差

在同一条件下对某一量进行多次测量时,测量值总有稍许差异,而且变化不定,并在消除系统误差(实际上不可能完全消除)之后依然如此。从表面上看差异大小,即观测误差的大小和正负没有任何规律性,纯属偶然发生。这种数值大小和正负号经常变化的误差称为“偶然误差”,也称“随机误差”或“统计误差”。

偶然误差主要来自以下几方面:

(1)主观方面 由于人们的感官灵敏度和仪器的精度有限,操作不熟练,估计读数不准等。

(2)客观方面 外界环境干扰如温度的微小起伏、气流扰动、振动、杂散电磁场的不规则脉动等,既不能消除,又无法估量。

(3)其他不可能预测的次要因素 偶然误差是无法控制的,它的存在使每次测量的测量值

偏大或偏小是不定的,无规则的,但在一定的观测条件下,测量次数足够多时便能发现,它服从统计分布规律。以偶然误差 ϵ 为横轴,以某误差出现的机率为纵轴画图,可得到一曲线,如图 2-1-1 所示,此曲线为正态分布(高斯分布)曲线。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,此曲线完全对称。由图可知,偶然误差有下列性质:

- (1)有界性 绝对值很大的误差出现的机率为零,即误差的绝对值不会超过一定的界限。
- (2)单峰性 绝对值小的误差出现的机率比绝对值大的误差出现的机率大。
- (3)对称性 绝对值相等的正、负误差出现的机率相同。
- (4)抵偿性 偶然误差的算术平均值随测量次数的

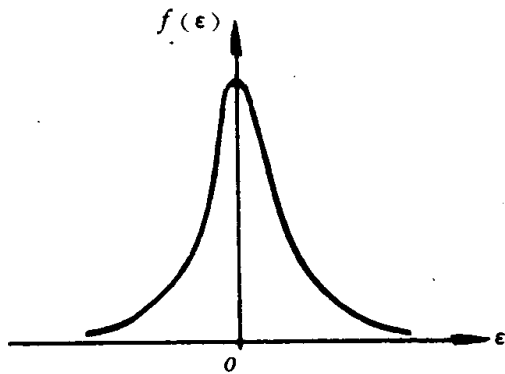


图 2-1-1 正态分布线

的增加而越来越趋向于零。即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum \epsilon_i = 0$ 。由此可见,可用增加测量次数的方法来减小偶然误差,但测量次数不可能无限多,故不能完全消除。

综上所述;系统误差与偶然误差性质不同、来源不同、处理方法不同。在实验中系统误差和偶然误差往往是并存的。影响测量结果的精确度,有时主要因素是系统误差,有时主要因素是偶然误差。因此,对每个实验要作具体分析,但实验结果的总误差是偶然误差和系统误差的总和。

在精确测量时,对系统误差和偶然误差必须加以区别,分别处理。有时只为了说明总误差的限度,则不加区分,许多不太精密的仪器的最大允许误差(如电表的精度级别)就包括系统误差和偶然误差。有时候,也难于划分或区别它们。

需要强调指出的是:在整个测量过程中,除了上述两种性质的误差外,还可能发生读数记录上的错误,仪器损坏、操作不当等造成测量上的错误,错误不同于误差,虽然有时称它为过失误差,但它不是测量误差,只要实验者采取严肃认真的态度、细心观察和记录,及时分析所得数据,并根据一定的准则(如 3σ 准则),剔除可能错误的的数据,以上错误是可能发现和避免的。

3. 精密度、准确度、精确度

在工业生产和科学实验中,经常遇到评价测量结果好坏的三个概念,精密度、准确度、精确度(或精度)。所谓精密度,是指偶然误差大小的程度(亦即是测量值互相接近的程度——离散

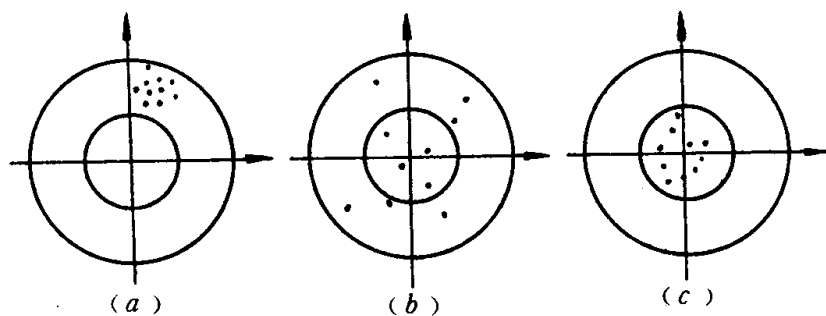


图 2-1-2 精密度、准确度、精确度

程度)。准确度是指系统误差大小的程度(靠近真实值的程度)。精确度是指系统误差和偶然误差的总和大小的程度。我们以打靶为例来说明这三个概念的意义和区别。

图 2-1-2a 弹击中靶子的点比较集中,但都偏离靶心,表示精密度较高而准确度较差;图 2-1-2b 虽然弹点较分散,但平均值较接近靶心,表示准确度较高而精密度较差;图 2-1-2c

则表示精密度和准确度均较好,即精确度较高。

* § 2.2 系统误差的处理

在科学实验中,在许多情况下,系统误差是影响实验结果准确度的主要因素,然而它又常常不明显地表现出来,有时会给实验结果带来严重影响,因此,发现系统误差,估算它对实验结果的影响,设法修正、减小或消除它的影响是误差分析的一个很重要内容。本书只作一般性介绍,供设计性实验用。

§ 2.2.1 系统误差的发现

要发现系统误差,就必须仔细地研究测量理论和方法的每一步推导,检验或校准每一件仪器,分析每一个因素对实验的影响等。下面从普遍意义上介绍几种发现系统误差的途径。

1. 对比的方法

(1)实验方法的对比 用不同方法测同一个量,看结果是否一致,如用一个单摆测得 $g=980\pm 1\text{cm/s}^2$,用复摆测得 $g=983.0\pm 0.3\text{cm/s}^2$,用自由落体法测得 $g=977.63\pm 0.05\text{cm/s}^2$,三者结果不一致,即它们在偶然误差容许范围内不重合,这就说明至少其中两个存在系统误差。

(2)仪器的对比 如用两个电流表串联于同一个电路,读数不一致,则说明至少有一个不准。如果其中一个为标准表,就可以找出另一个的修正值了。

(3)改变测量方法 例如,把电流反向进行读数;在增加砝码过程中与减少砝码过程中读数;分光计测角盘转 180° 读数等。

(4)改变实验中某些参量的数值 例如,改变电路中电流的数值,如果测量结果有单调的或有规律的变化,则说明有某种系统误差存在。

(5)改变实验条件 例如在电路中将某个元件的位置变动一下;磁测中使带有铁磁性的物体靠近或远离;把一个热源移开等看看是否有影响。

(6)两个人对比观测,可发现个人误差,等等。

2. 理论分析方法

(1)分析测量所依据的理论公式所要求的条件与实际情况有无差异,能否忽略。如“单摆”实验中,用了公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,这是作了 $\theta\approx 0$ 的近似;公式把摆球看作质点,忽略摆线的质量,实际摆球体积不等于零,是一个复摆;公式忽略了空气浮力与阻力,实际是存在的。

(2)分析仪器所要求的条件是否达到了。例如用测高仪测高度,要求支架铅直,望远镜平移,不然测出的结果不反映实际。又如标准电池给出的电动势值是工作温度 20°C 条件下的值,看看室温是否与要求一致。又如用天平称质量,要求天平水平放置,用拉伸法测金属丝的杨氏模量时要求支架垂直,使放置光杠杆前二脚的平台与放置后脚的和金属丝固定在一起的可上下移动的圆柱之间不能紧密接触,避免产生摩擦或其它阻力等。

总之,要分析公式推导中每一步所要求的条件与实际是否一致,仪器使用的条件是否合乎规定等。

3. 分析数据的方法

测量所得数据明显不服从统计分布规律时,则可将测量数据依次排列,如偏差大小有规则地向一个方向变化,则测量中存在线性系统误差;如偏差符号作有规律交替变化,则测量中存在周期性系统误差。

§ 2.2.2 系统误差的消除和修正

从原则上来说,消除系统误差的途径,首先是设法使它不产生,如果做不到,那么就修正它;或在测量中设法抵消它的影响。

由于任何“标准”的仪器总是有缺陷的,任何理论模型也只是实际情况的近似,而且系统误差的发现和估

计常取决于实验者的经验和判断能力。因此,对系统误差作修正也只能使被测值比较接近实际值,不能绝对地“消除”误差,这里所说的“消除系统误差的影响”,是把它的影响减小到偶然误差之下。通常是使系统误差不影响有效数字的最后一位(即偶然误差所在这一位),就算是已完全消除它的影响。系统误差的消除和修正一般没有固定不变的方法,要具体问题具体分析。

下面介绍几种消除系统误差的途径:

1. 消除产生系统误差的根源

(1)采用符合实际的理论公式。

(2)消除仪器的零位误差。例如,在用千分尺之前,要先检查零位,并记下零读数(即零位误差),以便对测量进行修正;又如电表的指针未通电时不指零位,可进行机械校零或记下零读数,最后再对测量值进行修正。

(3)保证仪器装置及测量满足规定的条件。

(4)采用某种方法(如比较法),在公式中消去某个量,就可能避免它的系统误差。例如在测定液体的比热实验中,若能保证两个量热器系统完全相同、升温也相同,就能消除因散热而引起的系统误差。对于某些固定不变的系统误差,可采用替换法,在测量装置上对未知参量测量后,立即用一个标准量替换未知量,再进行测量。例如,使用电桥时,用标准电阻代替待测电阻使电桥重新达到平衡,这时标准电阻的数值就是待测电阻值,这方法可避免桥臂的系统误差。又例如用天平称质量时可用一标准砝码代替一般使用的砝码,这就可避免因砝码不准而引起的系统误差。又如用交换法(即在测量过程中,就某些条件,如被测物的位置进行交换),使产生系统误差的原因对测量结果起相反作用,以消除固定的系统误差,例如天平不等臂时,可将待测物与砝码的位置交换。还可采用正、负误差补偿法,改变测量过程中的某些条件,使两次测量结果中的误差符号相反,取其平均值以消除系统误差等等。例如在灵敏电流计研究和利用冲击法测螺线管磁场的实验中就采用了此方法。

2. 找出修正值,对测量结果进行修正

(1)校准仪器 用标准仪器校准一般仪器,得出修正值或校准曲线。如经长期使用过的电表、电阻箱在使用前必须经过校准或得出校准曲线。有些仪表的刻度不均匀,必须逐段校准,作出校正曲线。

(2)对理论公式进行修正,找出修正值 例如用单摆测周期 T 的公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 时,考虑摆球的体积大小及空气的浮力和阻力,则此公式必须修正。

3. 从测量方法上或仪器设计上抵消系统误差影响

(1)对称测量可以抵消系统误差的影响 例如在分光计上读出度盘相隔 180° 处的两组数据,以消除偏心差。

(2)保持实验或仪器一定,可抵消某种系统误差 例如 $m=m_1-m_0$,测 m_1 及 m_0 时用同一个砝码可以抵消砝码的系统误差。

(3)线性观测法可抵消某种线性变化的系统误差 例如电源电动势随时间线性降低,则使用电位差计时可隔相等时间轮流测标准量和待测量,如第一、三次测标准量,将其平均值与第二次所待测量对应。

(4)周期性系统误差的消除 对按正弦曲线变化的周期性系统误差,可采取在每半个周期进行偶数次测量的方法予以消除。

在实际工作中,有时系统误差的大小不易确定或不必要精确计算,这时只要判断它的正负和估计它的数量级,如其中有些误差对测量结果无影响,就可不予考虑了,这对实际工作很有意义。

§ 2.2.3 系统误差的传递和计算

在物理实验中,发现系统误差,就应想法把它消除或加以修正,实际上通常无法把系统误差完全消除或修正。而这些系统误差往往构成实验中的主要误差而不可略去,在间接测量时,直接测量的系统误差必然传递给间接测量值。

1. 系统误差和修正值

不计偶然误差时,系统误差 ΔN 定义为测量值 N' 和真值 N 的差,即

$$\vee N = N' - N \quad (2-2-1)$$

当测量值大于真值时,规定系统误差是正的,当测量值小于真值时,规定系统误差是负的,这个定义及系统误差的规定是测量中被普遍采用的。由于系统误差的存在,就应对测量结果加以修正,即测量结果应加上修正值 δ_N ,

$$N = N' + \delta_N \quad (2-2-2)$$

δ_N 可以是正的,也可以是负的,它在数值上等于系统误差,符号相反,即

$$\delta_N = -\vee N \quad (2-2-3)$$

2. 系统误差的传递和合成

直接测量结果的系统误差会影响间接测量结果,系统误差使直接测量的结果偏大或偏小是一定的。因此,系统误差的传递使间接测量结果偏大或偏小也是一定的,几项系统误差的影响可能加大结果的误差,也可能相互抵消一部分,所以,系统误差传递和合成与偶然误差不同,是代数合成,根据误差传递的基本公式(参见 § 2.3),将微分号改为误差号,就是系统误差的传递公式,即

$$\vee N = \frac{\partial f}{\partial A} \vee A + \frac{\partial f}{\partial B} \vee B + \frac{\partial f}{\partial C} \vee C + \dots \quad (2-2-4)$$

或

$$\frac{\vee N}{N} = \frac{\partial \ln f}{\partial A} \vee A + \frac{\partial \ln f}{\partial B} \vee B + \frac{\partial \ln f}{\partial C} \vee C + \dots \quad (2-2-5)$$

其中 $\vee A$ 、 $\vee B$ 、 $\vee C$ 、 $\vee N$ 及误差传递系数 $\frac{\partial f}{\partial A}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial B}$ 、 $\frac{\partial f}{\partial C}$ 、 $\frac{\partial \ln f}{\partial A}$ 、 $\frac{\partial \ln f}{\partial B}$ 、 $\frac{\partial \ln f}{\partial C}$ 都可以是正或是负值。

§ 2.3 偶然误差的处理

这一节,假定在没有系统误差存在的情况下来讨论偶然误差问题。

§ 2.3.1 多次直接测量结果与误差计算

1. 算术平均值

在相同条件下(即等精度)对某一物理量进行 K 次测量,其测量值为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_K$, 算术平均值为 $\bar{N}$, 则

$$\bar{N} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K N_i \quad (2-3-1)$$

根据统计误差理论,在一组 K 次测量的数据中,算术平均值最接近于真值,称为测量的“最佳值”。当测量次数 $K \rightarrow \infty$ 时, $\bar{N} = N$ (真值)。

测量次数的增加对于提高算术平均值的可靠性是有利的,但不是测量次数越多越好。因为增加测量次数必定延长测量时间,这样给保持稳定的测量条件增加困难,还可能引起大的观测误差。另外,增加测量次数对系统误差的减小不起作用,所以实验测量次数不必过多。一般在科学研究中,取 10 到 20 次,而在物理教学实验中,通常取 6 到 10 次。

2. 偶然误差的计算方法

因为各种原因和条件所限,真值 N 是得不到的,误差是不可避免的。按误差的定义有

$$e_i = N_i - N$$

可见误差也是不可求的,但在多次测量时, $\bar{N}$ 是真值 N 的最好近似值(最佳值)。因此,实际上我们是用 $\bar{N}$ 代替 N 进行计算,把测量值 N_i 与平均值 $\bar{N}$ 之差称为偏差,用 V_i 表示,即有

$$V_i = N_i - \bar{N}$$

误差与偏差是有区别的,但这种区别随测量次数的增多而减小。因此,我们在实际工作中不用把二者加以区别。

根据统计误差的理论,偶然误差的计算方法有很多种,目前最常用的是算术平均误差和方均根误差(标准误差)二种。

(1)算术平均误差 在多次测量中,得到一系列等精度测量的测量值, $N_1, N_2, N_3, \dots, N_K$,某一个测量值的偏差为 V_i ,由于偏差有正有负,为避免直接求和相抵消的情况发生,并考虑到可能出现的最坏情况,先将各个偏差取绝对值再求平均值,则

$$\Delta N = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |V_i| = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |N_i - \bar{N}| \tag{2-3-2}$$

式中, ΔN 代表测量列的各个测量值间由偶然性因素引起的平均离散程度,我们把 ΔN 称为“算术平均误差”。

(2)方均根误差(又称标准误差) 把各测量值的误差平方的平均值再开方,称为“方均根误差”,用 σ 表示,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \varepsilon_i^2} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (N_i - N)^2}$$

式中真值 N 是得不到的,因此, σ 也不可求。但平均值 $\bar{N}$ 是可以得到的,且当 $K \rightarrow \infty$ 时, $\bar{N} = N$ 。由统计误差理论分析可以证明,当测量次数有限时, K 次测量中只有 $K-1$ 次是独立的,故上式可改写成

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (N_i - \bar{N})^2} \tag{2-3-3}$$

它只表示在有限次(K 次)测量中,其中任一次测量的方均根误差。公式(2-3-3)称为贝塞尔(Bessel)公式。也可以证明, K 次测量值的算术平均值 $\bar{N}$ 的方均根误差为

$$\sigma_{\bar{N}} = \frac{\sigma}{\sqrt{K}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (N_i - \bar{N})^2}{K(K-1)}} \tag{2-3-4}$$

算术平均误差为

$$\Delta N_{\bar{N}} = \frac{\Delta N}{\sqrt{K}}$$

根据误差理论分析可得出,在测量次数较多时,算术平均误差 ΔN 与方均根误差 σ 间的关系如下

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \Delta N \approx 1.25 \Delta N \\ \Delta N &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \approx 0.799 \sigma \end{aligned} \right\} \tag{2-3-5}$$

算术平均误差与方均根误差都可作为测量误差的量度,它们都表示一测量列各个数据之间的离散程度(即精密度)。如果各个数据之间差别较大,那么,其算术平均误差 ΔN 和方均根误差 σ 也都较大,这说明测量不精密。

上述两种误差的计算方法,方均根误差 σ 与误差理论中的高斯分布函数的关系更为直接

和简明。因此,各国都采用它作为测量精密度的评定标准,所以又称为“~~标准误差~~”。对于初学者来讲,主要是树立误差的概念,对实验进行粗略而简明的分析,因此可采用算术平均误差的分析和计算方法,这样要简单得多。

还需特别指出:上述两种误差,都不是测量值的实际误差,也不是误差范围,它只是对一组测量列中各数据的可靠性的估计,误差小,测量的可靠性就较大些;反之,则测量就不大可靠。按照偶然误差的高斯理论,测量列中各测量值的算术平均误差为 Δ_N 时,则这一测量列中任一测量值的误差 ε_i 落在置信区间 $[-\Delta_N, +\Delta_N]$ 内的可能性(概率)为 57.5%。一测量的标准误差为 σ 时,则这一测量列中任一测量值的误差 ε_i 落在置信区间 $[-\sigma, +\sigma]$ 内的概率为 68.3%,一测量列的算术平均值的标准误差为 ε_N 时,则这一测量列算术平均值的标准误差 ε_N 落在置信区间 $[-\sigma_N, +\sigma_N]$ 内的概率为 68.3%,还可以证明,落在区间 $[\pm 2\sigma]$ 内的概率为 95.5%,落在区间 $[\pm 3\sigma]$ 内的概率为 99.7%。

在有限次测量中,有时会遇到每次测得的数据都相同的情况,这不能说测量不存偶然误差,而是由于测量使用仪器的精度不够高的缘故,如果换一种精度较高的仪器就能得到不同的数据。因此,遇到此情况时,应该用仪器误差作为测量结果的误差。

3. 极限误差,异常数据的剔除

由偶然误差的高斯理论可以证明,对某一物理量进行无限多次测量,这一测量列中任一测量值的误差落在区间 $[\pm 3\sigma]$ 内的几率为 99.7%,而超过这个区间范围的只有 0.3%,即偶然误差超过 $[\pm 3\sigma]$ 区间范围的测量值大约在 1000 次测量中,只出现 3 次左右,一般在几十次测量中几乎是不可能出现的。所以人们常把 3σ 当作误差的极限,称 3σ 为极限误差或最大可能误差,用公式 $\Delta_{\text{lim}} = 3\sigma$ 表示,并用它来判断测量所得数据是不是异常数据,是否可信,是否应保留,用 3σ 作为数据的取舍标准,就是常说的“拉依达准则”,也称 3σ 准则。测量值与平均值之间的偏差超过 3σ 的数据肯定是人们的过失而引起的,必须把它剔除(舍去),而后再求平均值和计算标准误差。 3σ 准则要求测量次数 $K \rightarrow \infty$,当 K 较小时,就不可靠,所以它只能粗略地作为异常数据取舍准则。

4. 测量结果的表示

当我们知道了测量值或平均值和绝对误差的区间就可把结果完整表出来。通常把它写成如下形式:

$$N = \bar{N} \pm \Delta_N, \quad N = \bar{N} \pm \sigma_N \tag{2-3-6}$$

如果考虑系统误差,则(2-3-6)式改写成

$$N = (\bar{N} - \Delta_N) \pm \Delta_N, \quad N = (\bar{N} - \Delta_N) \pm \sigma_N \tag{2-3-7}$$

式中 Δ_N 为可确定的系统误差,而不可确定的系统误差应包括在 Δ_N 或 σ_N 中。

5. 相对误差

在评价一个测量结果的精确程度时,不仅要看绝对误差的大小,还需要看被测量本身的大小,为此,引出相对误差的概念。相对误差的定义为

$$\text{相对误差 } E_N = \frac{\text{绝对误差 } \Delta_N}{\text{算术平均值 } \bar{N}} \tag{2-3-8}$$

相对误差也可用百分数来表示,即

$$E_N = \frac{\Delta_N}{\bar{N}} \times 100\% \text{ 或 } E_N = \frac{\sigma_N}{\bar{N}} \times 100\%$$