

普通物理实验

PUTONGWULI

SHIYAN

主 编 金 哲
副主编 韩德万
王玉兰
孙 龙

51

图 5100(910) 目 录 五 十 五

普通物理实验

(非物理专业)

主 编 金 哲

副主编 韩得万 王玉兰 孙 龙

31

黑龙江朝鲜民族出版社

14.00元

许
宝

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验/金哲主编;韩得万,王玉兰,孙龙编.
牡丹江:黑龙江朝鲜民族出版社,2001.11

非物理专业用

ISBN 7-5389-1008-5

I.普... II.①金...②韩...③王...④孙... III.
普通物理学-实验-高等学校-教材 IV.04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 082017 号

书 名/ 普通物理实验
编 者/ 金 哲 韩得万 王玉兰 孙 龙
责任编辑/ 金水山
责任校对/ 宋纪文
封面设计/ 尹 豪
出版发行/ 黑龙江朝鲜民族出版社
印 刷/ 牡丹江书刊印刷厂印刷
开 本/ 850×1168 毫米·1/32·8.25 印张·210 千字
版 次/ 2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷
印 数/ 1-2 000 册
书 号/ ISBN 7-5389-1008-5/G·266
定 价/ 14.00 元

前 言

本书是根据 1999 年 8 月高等学校物理学与天文学教学指导委员会实验物理教学指导组“高校理科非物理专业基础物理实验教学基本要求”和本校实验室实际情况并参考兄弟院校的讲义编写而成。

编书的主要目的是因本校理科非物理专业种类繁多加之没有合适、统一的物理实验讲义。因此组织一些多年从事物理实验教学的老师精心研究、重新选定项目和内容后编写的。选定实验项目和内容中力求反映有些先进实验技术并有关各学科后续实验课程和用物理方法解决本学科问题打好基础做了努力。

选定实验项目、内容以及编写过程时间比较仓促,加之水平有限,难免存在很多不足和错误,诚恳希望各位同行和学生提出宝贵意见。

编 者

2001 年 2 月

目 录

绪论	(1)
力、热学实验部分	
1. 力学、热学基本仪器	(40)
2. 实验	
实验 L-1 物体密度的测定	(59)
实验 L-2 扬氏模量的测定	(62)
I. 伸长法	(62)
II. 弯曲法	(64)
实验 L-3 自由落体运动	(68)
实验 L-4 牛顿第二运动定律的验证	(71)
实验 L-5 刚体转动的研究	(75)
实验 L-6 三线摆	(83)
实验 L-7 声速的测量(超声)	(88)
实验 L-8 液体粘滞系数的测量	(92)
实验 L-9 金属线胀系数的测量	(96)
实验 L-10 不良导体导热系数的测定	(99)
(附)热电偶测温	
电磁学部分	
电磁学仪器符号	
实验 D-1 电表的扩程与校准	(108)
实验 D-2-I 伏安法测二极管的特性	(113)
实验 D-2-II 半导体 PN 结的物理特性 及弱电流测量	(118)

实验 D-3	用板式电势差计测电池的 电动势和电阻	(127)
实验 D-4	用箱式电势差计校正电表	(133)
实验 D-5	用惠斯通电桥测电阻	(139)
实验 D-6	磁场的测量	(143)
	I. 圆线圈磁场的测量	(143)
	II. 用霍尔元件测量磁场	(150)
实验 D-7	LRC 电路的串联谐振	(156)
实验 D-8	电子示波器的使用	(162)
光学部分		
实验 G-1	薄透镜焦距的测定	(189)
实验 G-2	分光计的调节及棱镜 玻璃折射率的测定	(195)
实验 G-3	用双棱镜测定光波波长	(206)
实验 G-4	用牛顿环测定透镜曲率半径	(210)
附:劈尖		
实验 G-5	光栅的衍射	(215)
实验 G-6	偏振现象的观察与分析	(219)
实验 G-7	迈克耳孙干涉仪的调节和使用	(229)
实验 G-8	利用光电效应测定普朗克常数	(237)

附录

物理常数表	(244)
-------------	-------

绪 论

(误差及数据处理基本知识)

物理学是一门重要的基础科学,是整个自然科学的基础,物理学的发展不仅推动了整个自然科学,而且对人类的物质观、时空观、宇宙观,对整个人类文化都产生了极深刻的影响.物理学又是当代技术发展的最主要的源泉.物理学是实验的科学,物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在各个自然科学领域和技术部门以及其他学科领域.

基础物理实验课程是为高校理科非物理专业一二年级开设的一门基础实验课,着重进行严格的实验基础训练.学习物理实验的实验方法和思想、物理实验技术、实验的数据处理及误差分析等方面的知识,提高分析问题、解决问题的能力 and 创新能力.它与物理讲授课程既有紧密的联系,但又有所不同,是一门独立的实验课.

本课程的主要目的是:使学生在物理实验的基本知识、基本方法和基本技能方面受到一定的训练,理论联系实际,培养学生初步的实验能力、良好的实验习惯以及严谨求实的科学作风.使学生具有良好的实验素质.并为有关各学科的后续实验课程和今后用物理方法解决本学科问题打好基础.

本课程的基本要求是通过完成一定数量的力学、热学、分子物理、电磁学、光学方面的实验,达到:

1. 培养学生实事求是的精神.如实地记录实验出现的物理现象和实验数据,能根据实验要求设计数据表格与作图,并写出正规的实验报告;
2. 初步学会用实验方法观察、分析、研究物理现象和规律.通

过实验加深对某些重要物理现象和规律的认识和理解；

3. 掌握一些常用物理量(如长度、时间、质量、温度、电流、电压、电阻、电感、电容、磁场强度、频率、波长、折射率等)的测量方法和技术.能正确使用常用物理实验仪器和量具.培养学生按实验要求选择仪器的能力,了解计算机在实验中的一些基本应用；

4. 培养学生正确处理实验数据、正确表达和评价实验结果的初步能力；

5. 培养学生的实验能力,尤其是进行实验时的动手能力.使学生初步养成良好的实验习惯.

第一节 物理实验与测量误差

物理实验离不开对物理量进行测量.各被测量在实验当时条件下均有不以人的意志为转移的真实大小.由于测量仪器、实验条件和种种因素的局限以及观测者的操作和读数、理论的近似性等因素,测量是不能无限精确的.测量结果与客观存在之间总有一定差异,也就是说存在着测量误差.测量误差的大小反映我们的认识接近于客观真实的程度.

测量误差问题与物理实验的各个方面都有密切的关系.

实验总是根据所要求的精确度,也就是对测量结果误差限度的一定要求,来制订方案并选用仪器的.在一定的要求下,还要以最小的代价来取得最好的结果.不能要求仪表越高级越好,环境条件(如恒温、恒湿)越稳定越好,测量次数越多越好等等.这样要求是不切实际或是浪费的.测量结果的误差是各个因素所引起的误差的总和.减小某些因素所引起的误差,代价较小;而减小另一些因素所引起的误差,所需的代价可能很大.为了提高测量的精确程度,往往是着力于减小某一二项主要的误差.于是,就要根据要求和误差合理地设计实验方案和选择仪器.

在设计实验方案、选择实验装置时,总是要突出所要研究或测

量的对象,排除干扰,也就是要尽量地提高“讯噪比”,更不能使待测量淹没在误差之中。

例如:现代实验中一些高灵敏度的测量装置放在超低温条件下进行工作,其原因之一是为了降低热噪声(一种由于分子热运动而引起的测量误差),以利于提取所需的信息。

在设计实验时,可以对一些误差进行修正,但修正项太大了是不好的,其无法消除的残余影响会较大。

在确定实验方法时,常常采用一种相对测量法即比较法。只要保持在同样条件下进行实验,就可以消除许多项误差的影响。设法采用这种或者那种的测量方法,如替代法、天平的复称法等等,无非也是为了减小测量误差。对测量公式进行这种或者那种的修正,也是为了排除某些误差的影响。

在调节仪器时,如调铅直、水平,要考虑调到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以略去不计。在考虑实验条件时(如恒流、稳压),也要考虑保证到什么程度。在使用仪表时,如用伏特计测电压,就要考虑接入电表后引起电路改变所带来的误差,以及对结果是否有影响等。仪表量程的选用也与误差考虑有关。

在做实验的时候,要心中有数。根据误差分析,对于对结果影响大的关键量就要努力围绕它把它测准;有的量测的不太准确对结果没有影响,就不必花大力气做徒劳的工作。要在现有的条件下使实验得出最好的结果来。要精心测量,合理安排,选择适宜的参量。如用混合量热法做实验时,初温、终温如何选择可以减少误差等。

在处理数据时,有如何充分利用、合理取舍测量数据的问题。个别异常的数据根据一定判据可以舍去,但又不能随意乱来。对于实验所取得的有限的的数据,怎样最充分地发挥其作用?对于记录仪器所提供的大量数据,如何取样才恰到好处?例如从衰减曲线求相邻两个振幅比,选用哪一段?隔一个振幅还是隔多个振幅来求?怎样充分利用这段记录曲线等。又如数据尾数的舍入法则采

取“小于五则舍,大于五则入,等于五则末位凑成偶数”的法则等,都是与误差考虑有关的。

处理数据时既不能引进“误差”来,也不必做白费力气的工作。如计算时常数取到哪一位上?运算过程中及结果写下几位?近似公式用到哪一级近似?作图时坐标比例尺大小的选取等。怎样做到既不影响结果,又能节约时间及工具?由图上求直线的斜率,怎样做误差最小等?都需要予以考虑。

实验结果精确程度的正确表达,当然是误差计算及分析的结果。实验结果验证了理论还是推翻了理论假设,都要看它是否在测量误差范围之内还是超出了测量误差范围。如迈克耳孙-莫雷实验,就是先确定了实验可能产生的误差限度。如果根据旧的概念,即认为光速相对于不同的、相互作用匀速直线运动的参照系是不同的这个前提,实验中光的干涉条纹就会表现出有一定的移动,这个移动不会被测量误差所掩盖。然而,实验结果没有发现干涉条纹的移动,于是就可以用“在真空中相互作用匀速直线运动的两个参照系中光速不变”来解释实验结果。又如要用观测地下自然电位变化来反映地下应力变化,必须有根据地排除仪器的零点漂移、天电干扰、由于下雨或附近施工引起地下水变化所致的效应等。不然会得出错误的结论。

第二节 测量误差的基本知识

一、什么是测量误差

对于某一个物理量在实验当时的条件下都具有自己的客观大小,这一客观大小称真值。

但是,在任何测量中,由于前面所述的各种因素,测量值与真值之间总是存在着差异,我们把测量值 x 与真值 a 之差就称为测量误差,即

$$\text{测得值}(x) - \text{真值}(a) = \text{误差}(\epsilon) \quad (1)$$

误差 ϵ 是一代数值, 当 $x \geq a$ 时, $\epsilon \geq 0$; $x < a$ 时, $\epsilon < 0$. 由于真值是不能确知的, 所以测得值的误差也不能确切知道, 在此情况下, 测量的任务是:

- (1) 给出被测量真值的最佳估计值;
- (2) 给出真值的最佳估计值的可靠程度的估计.

关于什么是最佳估计值留给后面去讨论, 但是可以想到最佳估计值必定误差较小. 为了减小误差就要分析误差的来源. 实际上任何测量的误差都是多种因素引入误差的综合效应.

现在以用单摆测重力加速度为例做些分析.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 是物理理论 0 中的单摆公式. 它是摆角 $\theta \rightarrow 0$, 并用一无质量无弹性的线, 挂起一质点时, 摆长 l 和周期 T 之间存在的关系, 其中 g 为当地的重力加速度.

在分析中除指出引入误差的原因, 还要对误差给出“确定的”或“随机的”的估计. “确定的”是指误差有必然的大小和符号部分, “随机的”则指误差值是不可预测的部分.

	误差来源	误差是确定的或随机的
1	米尺和停表本身不准确	确定的
2	对仪器的操作不准确	确定的和随机的
3	仪器读数不准确	确定的和随机的
4	摆线质量不为零	确定的
5	摆锤体积不为零(不是质点)	确定的
6	摆角大小不为零	确定的
7	存在空气浮力和阻力	确定的
8	支点状态	确定的和随机的
9	支架震动或空气流动	随机的

以上误差的来源可以概括为五个方面: ① 理论, ② 仪器, ③ 实验装置, ④ 实验条件, ⑤ 观测者和监视器等.

在重复测量中,如果误差是“确定的”,则误差的影响是定向的.例如用停表测时间长度,假如停表走得快,则用它测出的数值,总比真值大(假设测量没有其他误差).有时,在同一情况下,反复测量同一物理量时,绝对值和符号保持不变或按某一确定规律变化.如上表中第1、4、5、6、7项.

有时,在同一情况下,反复测量同一物理量,测得值总有差异,并在消除定向误差后,差异依然存在.其绝对值和符号变化不定或不可预测和随机.如上表中第2、3、8、9项.因此,我们必须对误差进行必要的分析和研究,其研究的目的是:

- (1) 尽量减小误差;
- (2) 对残存的误差给出适当的估计值.

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,都会引进误差.测量所根据的方法和理论越繁多,所用的仪器装置越复杂,所经历的时间越长,引进误差的机会可能就越多,弄得不好,就不一定能达到提高测量精确度的目的.

下面介绍有关误差方面的基础知识.

二、误差的性质

误差根据其来源和性质分为两类:系统误差和偶然误差.

1. 系统误差

系统误差总是使测量结果向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化(如第二节单摆实验中的确定的误差).因此,在同一情况下,反复测量同一个物理量时,绝对值和符号保持不变或按某一确定的规律变化的误差称系统误差.

(1) 系统误差的来源

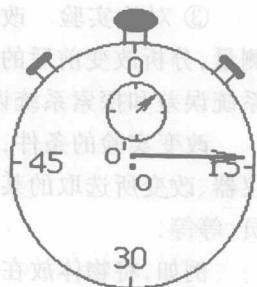
① 仪器误差.这是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的.如仪器零点不准,放大器的非线性,照相底板的收缩,在 20°C 下标定的标准电阻在 30°C 下使用等.

② 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,或实验条件下不能达到理论公式所规定的要求,或测量方法所带来的.如理论公式中没有把散热考虑在内;没有把接线电阻和接触电阻考虑在内;单摆的周期公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零,这在实际上是达不到的;用伏安法测电阻时电表内阻的影响等.

③ 个人误差.这是由于观测者本人生理或心理特点造成的.如用停表计时,有人常失之过长,有人常失之过短.

系统误差有些是定值的,如游标尺的零点不准;有些是积累性的,如用受热膨胀的钢质米尺进行测量,其指示值就小于真实长度,误差值随待测长度成比例增加;还有些是周期性变化的,如仪器的转动中心读数与刻度盘的几何中心不重合造成的偏心差就是一种周期性变化的系统误差.如图(一)所示,停表秒针的转轴 O 与表盘中心 O' 不重合,秒针转过 $1/4$ 圈时指示 14.8 秒,转过半



图(一)

圈时指 30.0 秒.显然秒针在不同位置时系统误差数值不同,它是周期性变化的,但对于指针的一定位置,它是定值的;还有些系统误差是按其他一些特定的规律变化的.

系统误差总是使测量结果偏向一边,即或者偏大,或者偏小,因此,多次测量求平均值并不能消除系统误差.

(2) 系统误差的发现

① 对仪器的分析

主要有:

示值误差 显示值与真值的差值.

零值误差 被测的量为零时,显示值偏离零位的示值.

调整误差 仪器调整不当引入的示值的变化.

回程误差 在相同条件下,仪器正反行程在同一点上测量值

之差的绝对值。

② 理论分析 从实验装置、实验条件与理论条件是否一致去发现系统误差。例如，单摆的摆锤不是质点而理论假设为质点；气轨上测得的是平均速度，而计算加速度的公式要求的是即时速度；用伏安法测电阻时，不论内接法还是外接法均与理论约定不同，等等。

理论分析是研究系统误差的重要方法，但是要分析恰当，既要熟悉理论和实验，又要有丰富的经验以及敏锐的目光。

③ 对比实验 改变实验的部分条件甚至全部重新安排被测测量，分析改变前后的测得值是否有显著不同？从中去分析有无系统误差和探索系统误差的来源。

改变实验的条件，可以是仪器的位置、仪器的布置、换掉某件仪器、改变所选取的某个参数、改变实验方法乃至改换实验操作人员，等等。

例如，将物体放在天平左、右盘上，分别称衡可以发现天平不等臂引入的误差；精密测量同一单摆在不同摆角时的周期值，可以发现周期与摆角有关。

以上讨论主要是针对取固定值的系统误差，对于在测量过程中逐渐变化的系统误差，主要从数据分析去发现，这里不仔细讨论。

(3) 系统误差的处理

对待系统误差应当是“消除”或“减小”，主要做法有：

抵消 在两次测量中使系统误差的大小相等而符号相反，通过平均去抵消（如天平的交换称衡）；在一次测量中，给实验系统增加一附加物，使之产生和要处理的系统误差有相反的作用（如为了抵消滑轮阻力矩影响而给运动系统加上的附加质量）。

减小 在设计实验方案时适当选择条件，减小要处理的系统误差的影响。例如：单摆用密度大的金属作锤以减小空气浮力的作用。

修正 计算出要处理的系统误差之值,取其反号为修正值,加到测量结果上,或在计算公式中加入修正项去消除该项系统误差。例如,仪器的零值误差均采用修正值去处理。

如何处理系统误差是实验的重要问题之一,以上只是举出几点常见的做法,在具体实验中应当留意它是怎样处理的。

(4) 系统误差的估算

处理系统误差时主要针对其中影响比较大的,因此先要对它们作粗略地估算,大体上确定出其数量级,这种估算要结合理论与实验的分析。

系统误差处理之后,不可能将其完全消除,在最后结果中必然包括未经处理或未完全消除的系统误差,应对这些系统误差做出适当地估值,并参与对实验结果的评价。

2. 偶然误差

在同一条件下,对同一物理量进行重复测量,各次测得值一般不完全相同,这是由于在测量时存在偶然误差。也就是即使排除了产生系统误差的因素,但由于人的感官灵敏程度和仪器精密程度有限、周围环境的干扰以及随测量而来的其他不可预测的偶然或不确定的因素造成每一次测量值的无规则的涨落,这种误差称偶然误差,也叫随机误差。

一个测得值的偶然误差是多项偶然因素综合作用的结果,在测量前不能得知测得值将偏大或偏小。有如投掷一硬币,在投掷前不知道哪一面在上,哪一面在下。这是似乎没有规律的偶然现象。既然每一个事件是不可预测和确定的,但实际上大量发生的事件中可以找到一定规律,即表现出某种必然规律。这一规律就是所谓的统计规律。

投掷硬币的一些统计

次数	出现正面次数	出现背面次数
10	3	7
10	4	6
100	61	39
100	55	45
500	270	230
1000	478	522
10000	4964	5036

从上表可以看出,试验次数多时,出现正面或背面的次数,都接近 50%,这就是投掷硬币的统计规律。

在一定的条件下对某一物理量进行大量独立测量,测量的偶然误差基本服从的统计规律为正态分布或高斯分布(有关偶然误差的正态分布问题,请看有关资料)。

即:

- ① 每一次测量值的偶然误差是不确定的;
- ② 绝对值相等,符号相反的偶然误差出现的机会相近;
- ③ 绝对值小的偶然误差出现的机会比绝对值大的偶然误差出现的机会多;
- ④ 超过某一限度的误差出现的机会甚小。

既然偶然误差的存在使每次测量值偏大或偏小是不确定的,但它服从一定的统计规律。即:多次测量中比真值大或比真值小的测量值出现的几率相等,而且误差较小的值出现几率比误差较大的值出现的几率大,同时,绝对值很大的误差出现的几率趋于零。因此,增加测量次数,可以减小偶然误差,这就是我们在实际工作中常常采取重复多次测量的依据。但是,偶然误差是可以减小而不

能消除的。

根据偶然误差的这一性质,有多种处理偶然误差的理论和方
法。

总之,系统误差与偶然误差性质不同,来源不同,处理方法也
不同。

$$x_1 + \dots + x_n = (x_1 - \bar{x}) + \dots + (x_n - \bar{x}) + (x_1 + \dots + x_n) - n\bar{x}$$

$$\frac{1}{n}(x_1 + \dots + x_n) = \frac{1}{n}[(x_1 - \bar{x}) + \dots + (x_n - \bar{x})] + \bar{x}$$

1. 下列的误差哪些属于系统误差? 哪些属于偶然误差?

- (1) 米尺的刻度有误差;
- (2) 未通电时,伏特计的指针不指零;
- (3) 水银温度计毛细管不均匀;
- (4) 手按停表测时间控制不准;
- (5) 测量值总不一样;
- (6) 在任何计算中, π 均取 3.14;
- (7) 测质量的天平,两臂长不完全相等;
- (8) 天平摆动后指针的止点每次不同;

第三节 直接测量结果及其偶然误差的估计

这一节里,我们假定在没有系统误差存在的情况下,来讨论直接测量偶然误差问题。

1. 算术平均值代表测量结果

前已说过,由于测量误差的存在,一切测量中,真值总是不能确切知道的;对于某一物理量进行多次测量的结果不会完全一样,那么怎样最好地表示测量结果,使它最合理地代表真值呢?常用的是,在测量条件不变的情况下,以多次(n 次)独立测量的算术平均值作为测量结果,是真值的最好近似,也就是说测量值的最佳估