

DaXue
Wuli
ShiYan

大学 物理实验



《大学物理实验》是高等院校的一门重要基础科学实践课程，对于培养和提高学生的科学素养和实践动手能力具有重要的作用。本教材按照循序渐进、重在实用和培养技能的原则，通过“基础性实验”、“综合性实验”和“设计性实验”，把理论和实践有机融合起来，通过物理实验知识、方法和技能的训练，使学生掌握科学实验的主要过程和基本方法，为今后的学习和工作奠定良好的基础。



山东科学技术出版社
www.lkj.com.cn

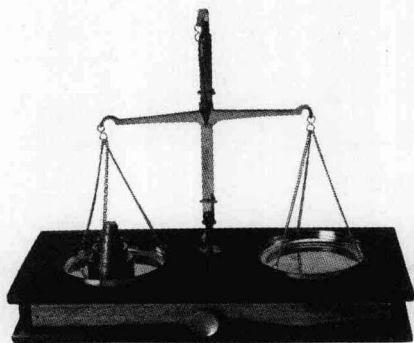




大学 物理实验

DaXueWuLiShiYan

主编 张晓红 刘延利
主审 王蕴珊



图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/刘延利主编. — 济南: 山东科学技术出版社,
2009

ISBN 978-7-5331-5202-4

I. 大… II. 刘… 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(2009)第 033446 号

大学物理实验

主 编 张晓红 刘延利

出版者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)82098088

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: sdkj@sdpress.com.cn

发行者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531)82098071

印刷者: 济南华东彩印有限公司

地址: 济南市商河彩虹路 2 号

邮编: 251600 电话: (0531)84872167

开本: 850mm×1168mm 1/32

印张: 6.5

版次: 2009 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-5331-5202-4

定价: 12.00 元

前言

《大学物理实验》是高等院校的一门重要基础科学实践课程,对于培养和提高学生的科学素养和实践动手能力具有重要的作用。《大学物理实验》课程是对理工类学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础课程,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是理工科类各专业(非物理类)对学生进行科学实验训练的重要基础。本课程按照循序渐进的原则,通过物理实验知识、方法和技能的训练,使学生了解科学实验的主要过程与基本方法,为今后的学习和工作奠定良好的实验基础。

物理实验课覆盖面广,具有丰富的实验思想、方法、手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面,具有其他实践类课程不可替代的作用。

本教材分为“理论基础”和“普通物理实验”两大部分。“理论基础”部分由测量及测量误差、有效数字及有关处理、随机误差、系统误差和粗大误差、实验结果的处理和表示等五章,以及三个实验组成。“普通物理实验”部分由基础实验、综合性实验和设计性实验组成。

1. 基础性实验:主要强调学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差与不确定度及数据处理的理论与方法等,此类实验为适应各专业的普及性实验。

2. 综合性实验:是指在同一个人实验中涉及到力学、热学、电磁学、光学、近代物理学等多个知识领域,综合应用多种方法和技术



的实验。此类实验的目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果、开阔学生的眼界和思路,提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。

3. 设计性实验:根据给定的实验题目、要求和实验条件,由学生自己设计方案并基本独立地完成全过程的实验。

全书由张晓红、刘延利主编,山东大学王蕴珊教授主审。在教材编写过程中,参考了一些其他院校的实验教材,得到了许多从事实验教学工作的教师的大力支持,在此表示衷心地感谢。本教材难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第一部分 理论基础

第一章 测量及测量误差	(3)
§ 1-1 关于测量的一些概念	(3)
§ 1-2 测量误差	(4)
第二章 有效数字及有关处理	(13)
§ 2-1 有效数字及其修约	(13)
§ 2-2 数据的有关运算及有效数字的截取	(15)
第三章 随机误差	(18)
§ 3-1 随机误差的分布	(18)
§ 3-2 随机误差参数的实验估计值	(21)
第四章 系统误差、粗大误差	(23)
§ 4-1 系统误差及其处理	(23)
§ 4-2 粗大误差及其处理	(27)
§ 4-3 间接测量误差的传递	(27)
第五章 实验结果的处理和表示	(31)
§ 5-1 列表法	(31)
§ 5-2 图示法	(31)
§ 5-3 逐差法	(36)
§ 5-4 回归分析	(37)
实验一 随机误差统计规律	(44)
实验二 固体密度的测定	(50)
实验三 伏特计—安培法测电阻	(53)



第二部分 普通物理实验

第一章 基础实验	(61)
实验一 杨氏弹性模量的测定	(61)
实验二 液体黏滞系数测定	(67)
实验三 液体表面张力系数的测定	(71)
实验四 刚体转动惯量的测定	(76)
实验五 弹簧倔强系数和有效质量的测定	(81)
实验六 固体导热系数的测定	(85)
实验七 热敏电阻温度系数的测定	(91)
实验八 导体电阻率的测定	(96)
实验九 衍射光栅测波长	(102)
实验十 密立根油滴实验(仿真实验)	(111)
实验十一 用谐振子测量重力加速度	(117)
实验十二 示波器的原理与使用(仿真实验)	(122)
第二章 综合性实验	(126)
实验十三 电路故障分析	(126)
实验十四 霍尔元件测磁场	(136)
实验十五 迈克耳逊干涉仪实验(仿真实验)	(144)
实验十六 等厚干涉	(149)
实验十七 光的偏振特性的研究	(154)
实验十八 碰撞和动量守恒(仿真实验)	(161)
第三章 设计性实验	(165)
实验十九 弹簧振子周期公式的研究	(171)
实验二十 制作简易万用电表	(175)
实验二十一 声速的测量	(179)
附表	(184)

第一部分

LI LUN JI CHU

理 论 基 础

第一章

测量及测量误差

§ 1-1 关于测量的一些概念

对客观事物进行探索、认知、研究和检验等,就要对其进行观测和测量,并给出尽可能恰当和精确的描述。

以确定量值为目的的一组操作即为测量。测量就是要获得被测系统可测量的量,即可描述现象、物体或物质的可以定性区别和定量确定的属性。实质上,测量过程是一种实验,即将被测的“量”与量器的单位量相比较的过程。所测得的量值可由一个数乘以计量单位来表示。

测量方法可依测量方式、精度和被测物状态等进行分类。如按数据处理方式不同可分为:直接测量、间接测量和组合测量;按测量的精度不同又可分为:等精度测量与非等精度测量;还有诸如:绝对测量和相对测量;单项测量与综合测量;接触测量与非接触测量;主动测量与被动测量;静态测量与动态测量等等。

由于测量方法、测量仪器、环境条件及测量者的局限性等因素的限制,除了计数测量之外,一般的测量都不可避免地存在误差。所以,在实际测量中不应一味追求高精确度,而是要依据实际情况和具体要求设计,并实施最佳的测量方案。

由测量所得的赋予被测量的值,即为测量结果。由于测量误差的存在,测量结果应包括测量误差的说明,有的还要给出置信概率的评价。



§ 1-2 测量误差



一、测量误差

1. 误差

测量误差可简称为误差,即测量结果减去被测量的真值。记某被测量 X 的测得值为 x , 其真值为 a , 则误差 δ 为:

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

上述误差与被测量的单位相同,所以也称为绝对误差。

2. 真值

真值是与给定的特定量的定义一致的量值。

被测量的真值是客观存在的,可由完善的测量获得。但通常完善的测量是不存在的,则被测量的真值也是不可测得的。所谓可知的真值是指“理论真值”和“计量学约定真值”。像理论设计值、理论公式表达值等就是理论真值,如:三角形的内角之和为 180° , 理想的 LC 回路中电压与电流位相差为 90° 等等,都是理论真值。认为是特定量的,有时是约定所取的值为约定真值,约定真值有时称为“指定值、最佳估计值、约定值或标准值”。实际问题中常将对一个量的多次测量结果用以确定约定真值,它也可以是由参考计量标准所复现的赋予的量值、由权威机构推荐的常数、已修正过的被测量的算术平均值等。可见,约定真值就给定目的而言,具有相当的不确定性。

3. 测量不确定度

由于测量的不完善性,被测量的真值不可测得,则测量误差也不可测得。所以,通过实验或测量,对所得的有限多的测量数据等信息进行处理、计算,只能给出被测量的最佳估计值和测量误差的实验估计值,也就是只能对被测量真值及其不确定范围做出近似估计。所以,实际上我们测不出、也算不出误差,但却可以算出测量不确定度。

二、误差的来源

误差的来源可归纳为以下几个方面:

1. 仪器、装置误差

标准器误差:标准器是提供某个被测参数标准量值的器具。如标准电池提供电势的标准数值;标准电阻提供标准阻值等等。这些标准器提供的约定真值仍存在误差,一般用于测量的仪器需用标准器进行分度或校验,显然,标准器的误差必会传给测量仪器。

仪器误差:用于参数测量的仪器、仪表无论设计得多么完善,制造得多么精密,终究会有不足之处,使仪器、仪表性能不够完善,从而产生误差。同时,仪器在使用过程中因磨损、老化、零点漂移等也会产生误差。

附件误差:附件是指保证仪器、仪表正常工作所需的附属器件。如连接导线、切换开关、电源等。附件的质量问题、使用不当等原因也会引起误差。在实际工作中,附件的影响易被忽视。

2. 测量环境误差

环境因素的变化引起仪器示值的变化,由此产生的测量误差称为环境误差。如环境温度的改变会使仪器的工作受到影响;电磁干扰、外力冲击与震动等使仪器表示值改变。此外还有湿度、大气压力、重力加速度的变化等因素。

3. 测量方法误差

测量方法误差是指测量原理、测量方法及计算方法不完善或不合理等原因引起的误差。这类误差普遍存在于测量中。如对测量数据进行处理时数学模型的近似性和公式中各系数的近似性带来的误差。测量方法误差可能比仪器误差大得多,对此应有足够的重视。

4. 人员误差

人员误差是由测量人员素质条件而引起的误差。如:人类自身生理功能的局限性、责任心和技术业务水平上的欠缺、分辨力有限、反应迟缓、以及一些不利的固有习惯等都会导致误差的产生。



三、三类误差

根据误差的性质和表现形式不同,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类,它们也被称为误差的三个分量。

1. 系统误差

在重复测量条件下对同一被测量进行无限多次测量结果的平均值减去被测量的真值,即为系统误差。

系统误差是在同一被测量的多次测量过程中,保持恒定或可以预知方式变化的测量误差的分量。按其变化规律,系统误差又可分为两种:① 定值系统误差:即量值恒定的系统误差。如用天平称量,标准砝码误差引起的测量误差。② 变值系统误差:其量值以确定的、并且通常是已知的规律随某些测量条件变化的系统误差。如随温度周期性变化引起的温度附加误差。

在测量前和测量过程中,应首先注意消除或减小系统误差,尤其是定值系统误差。另外,由于影响测量的因素或误差来源的复杂性,系统误差的产生是不可能或不易于完全知道的,因而完全消减系统误差也是不可能的。即使是完全已知的系统误差,若消除它需付出的代价太高时,根据实际要求消减到可忽略的程度即可。

2. 随机误差

测量结果减去在重复条件下对同一被测量进行无限多次测量结果的平均值,即为随机误差。显然测量结果含有随机误差和系统误差,而无穷多次测量结果的平均值已不含随机误差分量了,所以二者之差即为随机误差。

随机误差是在同一量的多次测量过程中,以不可预知的方式变化的误差分量。在每一次的测量中,其数值是随机的,但进行多次重复测量时,随机误差就会明显的呈现出服从一定的统计规律的性质来。因此可用统计方法估计其对测量结果的影响,通常是用标准差来表征随机误差的。在实际测量中测量次数总是有限的,因而得到的应是标准差的实验估计值。

随机误差存在于一切测量中,主要由一些随机性因素引起。由于不存在理想的测量,因而随机误差是必然存在的,只能通过改

进测量在一定程度上减小随机误差。

3. 粗大误差

明显超出规定条件下预期的误差即为粗大误差。

粗大误差的量值大都明显偏大,是统计的异常值。粗大误差可能产生于:错误读取示值;使用有缺陷的计量器具或不正确地使用计量器具;环境条件突然变化或突发的干扰等。

对粗大误差首先应正确的判定,然后按一定的规则予以剔除。

四、测量的精密度、正确度和准确度

在测量中常用于表达测量结果优劣的名词有:测量的精密度、正确度和准确度。

1. 精密度

表示测量结果中随机误差大小的程度,简称精度。它是指在规定的条件下对被测量进行多次测量时,所得结果之间符合的程度。精密度高则各次测得值彼此接近,测得值分散性小;反之,则分散性大。

2. 正确度

表示测量结果中系统误差大小的程度。

测量正确度反映了在规定的条件下,测量结果中所有系统误差的综合。正确度高表示测得值接近真值,即系统误差小;反之,表示测得值偏离真值程度大。

3. 准确度

表示测量结果与被测真值之间的一致程度。

准确度是一个定性的概念,反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合。准确度高,表示精密度和正确度皆高,二者中只要有一个低,则准确度就低。

五、误差的表示形式

误差用绝对误差和相对误差两种形式表示。前面的系统误差、随机误差和粗大误差都有各自的绝对表示形式和相对表示形式。

1. 绝对误差

前述(1-1)式的误差 $\delta = x - a$ 即为绝对表示形式。在实际测



量中,因为被测量的真值不可得,而多次重复测量的算术平均值(记为 $\bar{x}$)是可得的,则引入剩余误差:

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-2)$$

其中 x_i 是被测量 X 的第 i 次测得值, v_i 就是第 i 次测量的剩余误差。显然 v_i 是可得的,并也是绝对形式的误差。

2. 相对误差

测量误差除以被测量的真值即为相对误差,记为 r

$$r = \frac{\delta}{a} = \frac{x - a}{a} \quad (1-3)$$

相对误差可正可负,是无量纲的,一般用百分数表示。

因为真值 a 不可测得,实际上常用约定真值替代 a ,如用多次重复测量的算术平均值 $\bar{x}$ 替代 a ,则相对误差为

$$r = \frac{x - \bar{x}}{\bar{x}} \quad (1-4)$$

也称其为实用相对误差。

评价测量结果的优劣,尤其是在不同的测量之间进行时,采用绝对误差是不合适的,应用相对误差才能合理评价。例如在测量工具、人员等测量条件相同的情况下,对两个长度进行测量:一个长约为1 m,测量绝对误差不超过2 mm;另一个约为100 m,绝对误差不超过5 cm。可见后者的绝对误差远大于前者,但二者的相对误差可估算为 $r_1 \leq 0.2\%$, $r_2 \leq 0.05\%$,显而易见后者的测量比前者要好得多。



六、测量仪器的引用误差

1. 测量仪器的示值误差

测量仪器的示值与被测量真值之差即为示值误差。记示值误差为 x ,真值为 a ,则示值误差为

$$\delta = x - a \quad (1-5)$$

实际测量中,用约定真值替代被测量的真值。示值误差可正可负,也是绝对误差形式。如某量器的容量标称值为1 000 ml,而其实容量为1 005 ml(即约定真值,可由高等级的量器测得),则示值误差 $\delta = 1\,000 - 1\,005 = -5$ ml,即该量器的标称值偏小了5 ml。

2. 引用误差

测量仪器的示值误差除以该仪器的特定值,即为测量仪器的引用误差。

其中的特定值也称为引用值,记为 A 。例如 A 可以是测量仪器的量程值或标称范围的限值。如一支温度计,标称范围为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$, 则其 $A=100^{\circ}\text{C}$;若标称范围为 $10\sim 100^{\circ}\text{C}$, 则 $A=100^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C}=90^{\circ}\text{C}$ 。

记引用误差为 R , 则

$$R = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 $\delta = x - a$ 为示值误差。 R 可正可负,为相对误差。

例:用标称范围为 $0\sim 150\text{ V}$ 的电压表测某电压时,读得示值为 100.0 V ,被测电压实际值应是 99.4 V 。试计算电压表的引用误差。

解: $A = 150\text{ V}$, $\delta = 100.0\text{ V} - 99.4\text{ V}$,

$$\therefore R = \frac{\delta}{A} \times 100\% = \frac{100.0 - 99.4}{150} \times 100\% = 0.4\%$$

特别指出:此测量的相对误差为

$$r = \frac{100.0 - 99.4}{99.4} \times 100\% = 0.6\%$$

可见 R 与 r 是不同的,请勿混淆。

3. 基本误差

测量仪器在标准条件下所具有的误差即为基本误差。其中标准条件是指:为测量仪器性能实验而规定的使用条件或为测量结果相互对比而规定的使用条件。

测量仪器的基本误差又称为固有误差,记为 R_m 。它用仪器的最大引用误差表示:

$$R_m = \left| \frac{\delta_{\max}}{A} \right| \times 100\% \quad (1-7)$$

其中 $\delta_{\max}$ 是最大示值误差, R_m 只取正值。 R_m 是计量仪器在规定的正常工作条件下所具有的质量指标之一。



4. 允许误差

在技术标准、计量检定规程等技术规范上所规定的允许误差的极限值即为允许误差。

显然,测量仪器的基本误差不得超过该允许误差极限值。所以,也可以用仪器的基本误差作为其允许误差的大小。

5. 准确度等级(或级别)

准确度等级是指符合一定的计量要求,使误差保持在规定极限以内的测量仪器的等级或级别。

许多测量仪器都可以按其允许误差大小划分准确度等级。为保证其不超出允许误差,对于仪器的每个级别都应有计量特性和使用该仪器时标准工作条件的规定。

记仪表的准确度等级为 s , 国家标准规定工业用仪表的准确度等级有七个

s	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

对于具体的仪表,可以用其允许误差确定 s , 即去掉允许误差的正负号和百分号后,所剩的数字即可作为该仪表的准确度等级。如某仪表的允许误差为 $\pm 1.5\%$, 则该仪表的等级 $s=1.5$ 。再如某仪表的基本误差即引用误差限为 R_m , 因 R_m 可作为允许误差, 则可确定 $s=100R_m$; 或知仪表的特定值 A , 最大示值误差 $\delta_{\max}$, 则

$$R_m = \left| \frac{\delta_{\max}}{A} \right| \times 100\%, \quad \therefore s = 100 \left| \frac{\delta_{\max}}{A} \right|.$$

例如:一压力表的测量范围为 $0 \sim 25 \text{ MPa}$, 准确度等级为 1.5。现有检定数据如表所示,试计算该压力表的基本误差,并判断其是否合格。

压力(MPa)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
压力表示值(MPa)	2.2	3.9	5.8	8.1	9.6	11.7	13.9	16.1	18.1	19.9

解:压力表的特定值为: $A=25 \text{ MPa}$

最大值误差为: $\delta_{\max} = 9.6 - 10 = -0.4 \text{ (MPa)}$