

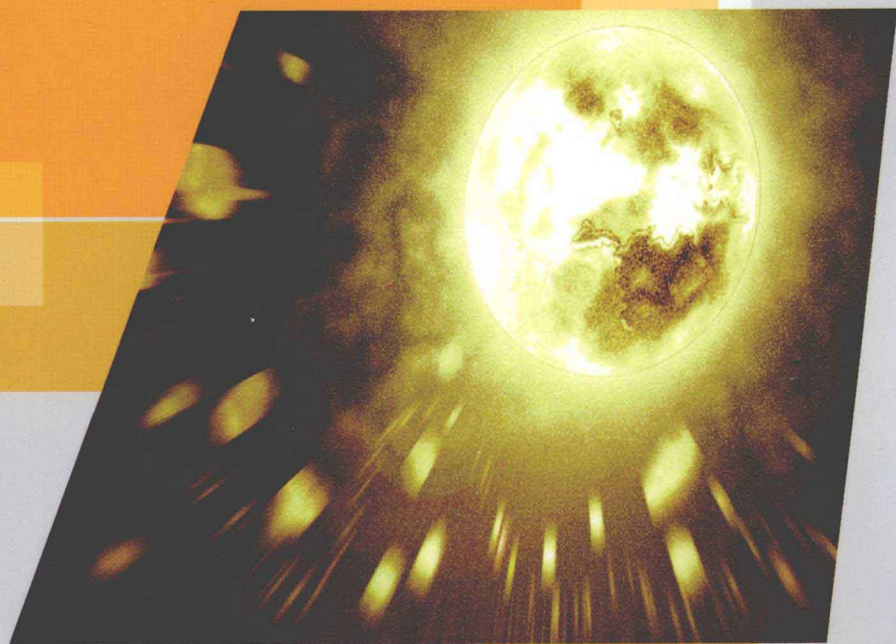


21世纪高等学校规划教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

主 编 孙文斌



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



21世纪高等学校规划教材

大学物理实验

孙文斌 主编

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本教材共分七章,共编写了30多项实验。在绪论后,首先阐述了测量与误差及数据处理的基础知识,所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主。为了方便学生预习,对各项实验的原理和实验方法都做了简明扼要的论述;对主要仪器都进行了详细地介绍。某些实验中给出了完整的数据记录表格及具体的误差分析方法,以作示范。

收入教材的30多项实验项目中的15~20项是必做项目,学生根据教学安排来实验室完成实践训练;其他项目可以由学生根据自己的兴趣,通过预约进实验室,自行设计、搭建实验方案,独立完成实验。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/孙文斌主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2011.8

ISBN 978-7-5635-2635-2

I. ①大… II. ①孙… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第110890号

书 名	大学物理实验
主 编	孙文斌
责任编辑	张雪祥
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京联兴华印刷厂
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	15
字 数	374千字
版 次	2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-2635-2

定价:27.00元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

大学物理实验是理工科学生必修的一门重要的基础实验课程。本书是按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2004 年颁布的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》和安徽工业大学普通物理实验室现有实验仪器的实际情况,在多次编写实验讲义和以往出版教材基础上编写而成。

本教材共分七章,共编写了 30 多项实验。在绪论后,首先阐述了测量与误差及数据处理的基础知识,所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主。为了方便学生预习,对各项实验的原理和实验方法都做了简明扼要的论述;对主要仪器都进行了详细地介绍。某些实验中给出了完整的数据记录表格及具体的误差分析方法,以作示范。

收入教材的 30 多项实验项目中的 15~20 项是必做项目,学生根据教学安排来实验室完成实践训练;其他项目可以由学生根据自己的兴趣,通过预约进实验室,自行设计、搭建实验方案,独立完成实验。

实验教材不可能脱离实验室的建设和发展,经过多年的教学实践,在前辈的实验讲义基础上做过多次修改、更新和扩充,这里面凝聚了全体物理实验中心的每位教师的辛勤劳动和聪明智慧。参加编写和校稿工作的人员有孙文斌、刘义、吴大艳、孙云、汪文明、光明、贾虎等,全书中的插图由孙文斌制作。

虽然准备很充分,但仍需不断学习、不断研讨、不断修改和更新,少量差错在所难免,恭请同行和读者不吝指正。

孙文斌



目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 测量误差及数据处理	4
2.1 测量与有效数字	4
2.2 测量的误差	7
2.3 测量结果的不确定度	10
2.4 实验中几种数据处理方法	18
第 3 章 实验方法	28
3.1 比较法	28
3.2 放大法	29
3.3 转换测量法	30
3.4 补偿法	31
3.5 模拟法	31
3.6 控制变量法	32
第 4 章 基础实验	33
实验 4.1 基本测量	33
实验 4.1.1 长度测量	33
实验 4.1.2 物体密度的测定	38
实验 4.2 金属杨氏模量测量	44
实验 4.3 三线摆法测量转动惯量	50
实验 4.4 示波器的使用	55
实验 4.4.1 测量电压信号特性	59
实验 4.4.2 RC 串联电路暂态过程研究	66
实验 4.5 电表改装及校准	70
实验 4.6 电桥的使用	77
实验 4.6.1 惠斯通电桥测电阻	77
实验 4.6.2 双臂电桥测金属的电阻温度系数	82
实验 4.7 补偿法在电学中的应用	89
实验 4.7.1 电压补偿及电流补偿实验	89
实验 4.7.2 电位差计应用	92
实验 4.8 分光计调整与使用	100
实验 4.8.1 测定三棱镜顶角	105
实验 4.8.2 测定三棱镜折射率	109
实验 4.8.3 光栅衍射与波长测定	113

实验 4.9	等厚干涉的应用	117
实验 4.10	迈克耳孙干涉仪的应用	124
第 5 章	综合性实验	131
实验 5.1	霍耳效应测量磁感应强度	131
实验 5.2	超声声速的测量	139
实验 5.3	空气比热容比的测定	146
实验 5.4	固体线膨胀系数测定	151
实验 5.5	铁磁材料居里点温度测定	155
实验 5.6	密立根油滴实验	164
实验 5.7	夫兰克-赫兹(F-H)实验	172
实验 5.8	光电效应测量普朗克常数	177
实验 5.9	液体光栅与声速测定	183
实验 5.10	固体材料的杨氏模量测量	187
实验 5.11	空气折射率测量	192
实验 5.12	综合传感器系统实验	196
实验 5.13	电学综合实验	214
第 6 章	设计性实验	222
实验 6.1	金属丝的电阻率测量	222
实验 6.2	欧姆表的设计及调试	222
实验 6.3	数字电压表改装	223
实验 6.4	利用电桥法测定电阻	223
实验 6.5	利用电桥法微安表内阻测定	224
实验 6.6	利用补偿原理测量微安表内阻	224
实验 6.7	测量玻璃砖的折射率	225
实验 6.8	热敏电阻测温仪的制作	225
实验 6.9	测量光敏电阻的光电特性	226
实验 6.10	发光二极管的光电特性研究	226
实验 6.11	用棱镜分光计测量里德伯常数	227
实验 6.12	压电陶瓷的电致伸长系数测定	227
实验 6.13	测定密度比水小物质(蜡块)的密度	228
实验 6.14	测定金属小颗粒的密度	229
第 7 章	物理单位及常数表	230



第 一 章

绪 论

物理学是一门重要的基础学科,是研究物质结构和相互作用及其运动基本规律,是整个自然科学的基础。它从自然现象开始,具体到力、热、声、光、电等各个领域,从庞大的地球、天体、宇宙到细微的分子、原子内部的所有的自然学科范畴,发展到后来的历史、人文、经济等各个领域,对人类的物质观、时空观、宇宙观和对整个人类文化都产生了极其深刻的影响。

实验是一切认识的开始,又是它的终结。人们通过对大量的客观现象的观察和分析,再经过深入地思考,建立物理量之间的关系,形成一种认识,这种认识一般先停留在假设这一初级阶段。为了得到确切而肯定的结论,人们积极主动利用先进的技术和手段去再现欲知的物理过程,去验证其认识和结论的正确性,这就是实验的初衷。实验之所以有旺盛的生命力,是因为一旦欲知过程再现和发生,就把人们的思维和认识提高一个崭新和充满希望的境界。在这里不仅可以思考过去,还可以展望未来;既可以验证某些待定的结论,更可以发现新的问题;不仅可以修正错误或不足,更可以找到更好、更新的实验和研究方法。这就推动物理学不断获得新的发展。正因为物理实验如此重要,而其本身又具有一套实验知识、实验方法、实验技术等独特的内容,所以在高等学校开设《大学物理》课的同时,还独立开设了《大学物理实验》课。这两门课程虽有联系,但又有明显的区别,它们反映了人们研究物理学的两个不同的侧面。

1. 物理实验课的特点

物理实验课的一个显著的特点是它的实践性,是用实验的方法去研究物理学的规律。做实验的时候,要充分考虑到各种实际情况,得出的结论要尽量符合实际,注重动手能力的培养和锻炼,这在实验课中占有重要的地位。

实验课不像物理理论课程有系统性、逻辑性,两个不同实验项目之间可能很少有直接的内在联系,所以有时先做哪一个实验无关紧要。而一个物理实验可能涉及到的知识是广泛的,常常涉及到电学、光学、热学和计算机等方面知识,因此可以看出实验课是一门综合性较强的课程,要求实验者在做实验时,根据具体情况灵活应用自己所掌握的知识。一个优秀的实验工作者,他的知识面必须很宽广,不仅有丰富的理论知识,还要有丰富的实践经验;不仅在某一学科有较深的造诣,还要在其它学科领域也有一定的修养。

有的同学重理论、轻实验,错误地认为做理论高深复杂,做实验低级简单。甚至认为只要把实验原理、仪器装置、实验方法都看明白了,不必动手测量和计算,或者只粗略地测量和估算一下,就算完成了实验。他们对实际的操作和计算缺乏兴趣,这些同学往往是眼高手



低,“一看就懂,一做就糊涂”,根本不能理解开设实验课的意义。

因此,实验必须进行实际操作,光说不练是不行的。

2. 开设物理实验课的目的

(1) 让学生学到物理实验的基本知识、基本方法和基本技能。包括学会使用各种测量仪器,了解各种物理量的测量方法,学会观察分析各种实验现象。还要了解测量误差的理论知识,学会正确记录数据和处理数据,正确表达实验结果,对实验结果进行正确的分析评价。并在扎实的基本训练基础上,进一步设计实验,让学生通过自己设计的实验方案,独立进行实验观测过程,去发现新现象、研究新问题,并总结出规律性实验结果,提高实验能力,为以后科学研究工作打下良好的基础。

(2) 培养严肃、认真、实事求是的科学态度和工作作风,养成良好的实验习惯。

(3) 通过实验的观察和测量,加深对物理理论知识的理解和掌握,激发学生对学习物理的兴趣。

3. 物理实验课的基本程序

物理实验是一门最大限度的要求学生独立探求知识的课程。为了确保课程顺利的进行,应按以下三个环节依次进行。

(1) 做好预习

在进入实验室之前,认真阅读教材和相关实验资料,明确本次实验的目的及要求、依据什么原理、使用什么方法、再现物理过程的条件和要求;要用到哪些仪器;可能观察到何种现象;记录哪些数据。在实验报告本上预先写好实验原理、基本方法、测量公式,并准备好记录数据的表格。

(2) 做好实验

到实验室后要遵守有关的规章制度,爱护仪器设备,注意安全。动手之前要先了解仪器的性能、规格、使用方法及其操作规范。调节仪器时要仔细认真,一丝不苟。注意满足测量公式所要求的实验条件。

在整个实验中要求手脑并用。实验中不要只是机械地按照教材上要求的实验步骤做完了就了结,要积极主动,着重注意培养自己的动手能力,实验操作要做到准确、熟练。

实验中遇到仪器故障,可以在老师的指导下自己动手解决,学习老师如何判断仪器故障,如何修复仪器。

实验中还要养成记录好原始数据的习惯,要求一边测量、一边记录,要记得准确、有次序。

做完实验,将数据交给指导教师检查,得到指导老师认可后,再将仪器整理归位,清理实验台面,方可离开实验室。

(3) 写好实验报告

实验报告是实验者对实验的全面总结,一般包括实验名称、实验原理、实验仪器、实验步骤(实验内容)、数据处理、实验结果(结论)、实验小结(讨论)等。报告要求:字迹清楚、文理通顺、图表正确、准确、完整而简明地表述实验报告的各部分。

4. 物理实验课的基本要求

(1) 大学物理实验课是必修课

总共 48 学时,3 学分;分两轮,共开设 20 个项目开展教学。



(2)第一轮按课表到实验室上课

①实验基础理论课3学时;②必须完成30学时的实验项目。

(3)第二轮实验室提供10实验项目

每个学生通过网上预约,至少要选做5个实验项目,按自己预约的时间地点做实验。
每周只做一个实验。

(4)网上预约步骤

登录物理实验中心网 <http://physics.ahut.edu.cn>,点击“网上预约”进入登录界面,按提示输入用户名和密码进行实验预约。

(5)办理档案

如果数据库里没有自己的档案,请到物理实验中心办公室办理。

(6)交实验报告

实验报告必须在完成实验操作后一周内交到相应指导教师的实验报告箱内。



第 2 章

测量误差及数据处理



章前导读

本章介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等内容。这些内容牵涉面较广,通过一两次学习是不可能掌握得了的。不仅在每个实验中都要用到,而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。要求学生对所涉及到的问题有个初步的了解,然后结合每个实验再仔细阅读相关章节,通过运用加以掌握。对这些内容的深入讨论是计量学和数理统计学的任务,本教材只能引用其中的结论和计算公式。

2.1 测量与有效数字

物理学是一门实验科学,以测量为基础,研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理。所谓测量,就是被测量的物理量和选为标准的同类量(即,单位)进行比较,确定出它是标准量的多少倍。如测量一本书的长度,将书与米尺进行比较,书的长度是米尺的 18.85%,则书的长度为 0.188 5 m。测量结果的数值大小和选择的单位密切相关。同样一个量,测量时选择的单位越小,测量结果数值就越大,所以任何测量结果都必须标明单位。如 273.15 K, 3.0×10^8 m/s 等等。

根据获得数据的方法不同,测量可分为直接测量和间接测量两类。“直接测量”是指使用量具或仪表等标准量具经过比较可直接读数获取数据,相应测得量称为“直接测量量”。如:米尺测量长度、温度计测量温度、天平测量质量、电流表测电路中电流等。“间接测量”是指不能直接测量出结果,而必须先直接测量与它有关的一些物理量,然后利用函数关系而获取被测量数据的测量,相应的测得量称为“间接测量量”。如:物质的密度、物体运动的速度、光的波长等。

2.1.1 有效数字的读取

测量的结果因所用单位不同而不同,但在某一单位(量具)下,表示该测量值的数值位数

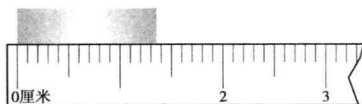


图 2-1-1 用毫米尺测量工件的长度

不应随意取位,而是要用有确定意义的表示法。

图 2-1-1 是用毫米尺测量一段工件长度的示意图。此工件的长度介于 13 mm 和 14 mm 之间,其右端点超过 13 mm 刻度线处,估计为 6/10 格,即工件的长度为 13.6 mm。从获得结果看,前两位 13 是直接读出,称为可靠数字,而最末一位 0.6 则是从尺上最小刻度间估计出来的,称为可疑数字。

定义:由几位可靠数字加上一位可疑数字在内的读数,称为有效数字。

如上读数 13.6 mm 共有三位有效数字,这里的第三位数“6”已是估计出来的,因此用这种规格的尺子不可能测量到以毫米为单位小数点后第 2 位。

注:

①有效数字的多少,表示了测量所能达到的准确程度,这与所用的测量工具有关。

②当被测物理量和测量仪器选定后,测量值的有效数字位数就可以确定了。

③仪器的读数规则,测量就要从仪器上读数,读数包括仪器指示的全部有意义的数字和能够估读出来的数字。在测量中,对可估读的仪器(如米尺、螺旋测微计、指针式电表等等)估读时,根据最小分格大小、指针的粗细等具体情况来确定把最小分格分成几分来估读,通常读到格值的 1/10, 1/5 或 1/2;对不可估读的仪器(如游标卡尺、数字式仪表等)不需要估读。

(4) 有效位数的认定

1) 数字中无零的情况和数字间有零的情况:全部给出的数均为有效数。如:56.14 mm, 50.007 mm 有效位数分别为四位、五位。

2) 对于小数末尾的零:有小数点时,小数点后面的零全部为有效数字。如:50.140 mm, 2.204 500 的有效位数分别为五位、七位。

3) 对于第一位非零数字左边的零:第一位非零数字左边的零称为无效位零。如:0.05 mm, 0.001 55 m 有效位数分别为一位、三位。

4) 科学计数法:计量单位的不同选择可改变量值的数值,但决不应改变数值的有效位数。因此,在变换单位时,为了正确表达出有效位数,实验中常采用科学计数法(10 的幂次方)。如:

$$4.30 \text{ cm} = 4.30 \times 10^{-2} \text{ m} = 4.30 \times 10^4 \mu\text{m} = 4.30 \times 10^{-5} \text{ km}$$

2.1.2 有效数字的运算规则

(1) 数值的舍入修约规则

①确定需要保留的有效数字和位数。

②舍入后面多余的数字。取舍原则为“四舍六入五凑偶”。如:

$$\underline{2.717} 29 \rightarrow 2.7173 \quad \underline{7.691} 4 \rightarrow 7.691$$

$$\underline{3.141} 5 \rightarrow 3.142 \quad \underline{4.510} 5 \rightarrow 4.510$$

③测量结果的不确定度取 1 位有效数,且采用“只进不舍”原则。如某测量不确定度的



计算结果为 0.32, 结果表示中取 0.4 (参见本章的 2.6 节)。

(2) 加减法运算

和差运算的结果, 其小数点以后的位数和参与运算各分量中小数点后位数最少者相同。如:

$$\begin{array}{r} 217.4\bar{6} \\ 31.\bar{2} \\ + 5.71\bar{4} \\ \hline 254.3\bar{7}4 \end{array} \quad \rightarrow (254.4) \quad \begin{array}{r} 57\bar{6} \\ - 61.7\bar{2} \\ \hline 514.2\bar{8} \end{array} \quad \rightarrow (514)$$

式中带下划线的数字为估读数字(或可疑数字)。

(3) 乘除法运算

乘除运算结果的有效位数一般和参与乘除运算各分量中有效数位最少者相同。如:

$$24\ 320 \times 0.341 = 8.29 \times 10^3 \quad 85\ 425 \div 125 = 683$$

注:

① 乘法: 若两因子的最高位的积大于或等于 10, 其结果就要多保留一位有效数字。如:

$$8.3\bar{2} \times 43.2\bar{6} = 359.\bar{9}$$

② 除法: 若被除数有效数字的位数小于(等于)除数的有效数字位数, 并且它的最高位的数小于除数的最高位的数, 其结果的有效数字位数应比被除数少 1 位。如:

$$12\bar{7} \div 36\bar{1} = 0.3\bar{5}$$

在以上四则运算中, 确定计算结果的有效数取位的原则概括为: 可靠数与可靠数运算的结果仍为可靠数; 可靠数与可疑数运算的结果为可疑数; 可疑数与可疑数运算的结果仍为可疑数; 运算进位的数字是可靠数字。

(4) 乘方、开方运算

此类运算规则和乘法运算法则相同。如:

$$(4.256)^2 = 18.114 \quad (54.39)^{1/2} = 7.37$$

(5) 对数、指数、三角函数运算

1) 对数函数

对数运算结果的有效数字, 其小数点后面部分的位数与真数的位数相同。如:

$$\lg 56.7 = 1.753$$

若真数的第一位数大于 5, 运算结果的有效数字可以多取 1 位。如:

$$\lg 6.78 = 0.8312$$

2) 指数函数

指数运算结果的有效数字位数与指数的小数点后的位数相同(包括小数点后的 0)。如: $e^x \Big|_{x=6.25} = 1\ 778\ 279$, 由于 6.25 的小数点后只有 2 位, 则 $e^x \Big|_{x=6.25} = 1.8 \times 10^6$, 而当 $x=0.000\ 092\ 4$, 小数点后有 7 位, 则 $e^x \Big|_{x=0.000\ 092\ 4} = 1.000\ 092$ 。

对于 10^x 的有效数字取法与 e^x 的取法相同。

3) 三角函数

三角函数运算结果的有效数字位数通常是由角度的有效数字位数决定的。



通过改变角度值的末位的1个单位,由函数值的变化来决定三角函数值的有效数字取位。如: $\sin 35.58^\circ = 0.581\bar{8}391$, 而 $\sin 35.59^\circ = 0.581\bar{9}810$, 两结果在小数点后第四位产生差别,即 $\sin 35.58^\circ = 0.5818$

(6)非测量常量的有效位数是无限的

1)自然数是准确的,运算中不考虑它们的位数(或者说有效位数无限)。

2)运算中无理常数(如 $e, \sqrt{2}$ 等)的位数:

①若是手工计算,此类常数有效位比参加运算的各分量中有效位最少者多取一位。

②若是计算器,可以直接利用计算器相应的“键”。

2.2 测量的误差

测量的目的是为了得到测量结果,但在许多场合下仅给出测量结果往往还不充分。任何测量都存在缺陷,所有的测量结果都会或多或少地偏离被测量的真值,因此在给出测量结果的同时,还必须同时指出所给测量结果的可靠程度。在各种测量领域,经常采用诸如测量误差、测量准确度和测量不确定度等术语来表示测量结果的好坏。

附:真值是指在一定条件下,任何物理量的大小都是客观存在的,不以人的意志为转移的客观量值。

2.2.1 测量误差的定义

测量误差常常简称为误差(ϵ):测量值(x)减去被测量的真值(a)。

$$\epsilon = x - a$$

注:

①由于真值不能确定,实际上用的是约定真值。严格意义上的误差也无法得到,因而得到的只是误差的估计值。

②误差只有通过测量才能得到。通过误差分析所得到的测量结果的所谓“误差”,实际上并不是真正的误差,而是被测量不能确定的范围。

测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可以用绝对误差、相对误差、百分误差表示。

绝对误差 = 测量量值 - 真值

相对误差 = $\frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\%$

百分误差 = $\frac{\text{测量最佳值} - \text{公认值}}{\text{公认值}} \times 100\%$

附:最佳值是指测量结果中的报告值。如直接多次测量中测量最佳值为算术平均值。

设在—组测量值中, n 次测量的值分别为: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。由统计原理可知,其真值的最佳值 x_0 是能使各次测量值与该值之差的平方和为最小的那个值。即存在 x_0 值使得

$f(x_0) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2$ 有最小值。令



$$\frac{df(x_0)}{dx_0} = -2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = 0$$

则得：

$$x_0 = \sum_{i=1}^n x_i / n = \bar{x}$$

即，算术平均值最接近于真值。

2.2.2 误差的分类

在测量过程中，测量误差是客观存在的，按其性质可分为系统误差、随机误差两种。

1) 系统误差

在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。系统误差的特点是恒定性，不能用增加测量次数的方法使它减小。

注：

- ① 由于真值不确定，则能确定的只是系统误差估计值。
- ② 对测量仪器而言，其系统误差也称为测量仪器的偏差。
- ③ 在重复性条件下得到的不同测量结果应该具有相同的系统误差。
- ④ 系统误差可以通过对测量结果进行修正而消除。

系统误差产生的原因有：

- ① 仪器结构不完善：如量尺的刻度不准，天平的两臂不等长，示零仪表存在灵敏阈；
- ② 环境条件的改变：如在室温下校准的仪器拿到高温环境中使用；
- ③ 测量者的测量习惯：如捕获某一信号时有滞后或提前的倾向，对标志线读数时总是偏左或偏右、偏上或偏下等。
- ④ 理论的缺陷：如利用单摆测量重力加速度 g 时，使用的测量公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 是近似公式，而且 π 是个无理数。

2) 随机误差

测量结果在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。随机误差的特点是随机性，具有单峰性、对称性、有界性、抵偿性。实践表明，大多数随机误差可以认为近似服从正态分布。

注：

- ① 随机误差等于误差减去系统误差。
- ② 测量结果为无限多次测量结果的平均值，根据随机误差的性质（对称性、抵偿性）可知，随机误差为零。只存在系统误差。
- ③ 实际测量只能进行有限次数，测量结果中随机误差和系统误差都存在。
- ④ 在重复性条件下得到的不同测量结果具有不同的随机误差，但有相同的系统误差。

根据定义，误差、系统误差和随机误差均表示两个量值之差，因此随机误差和系统误差也都应该具有确定的符号，不应当以“±”号的形式出现。由于随机误差和系统误差都是对应于无限多次测量的理想概念，而实际上无法进行无限多次测量，只能用有限次测量的结果作为无限多次测量结果的估计值，因此可以确定的只是随机误差和系统误差的估计值。



2.2.3 系统误差的处理

(1) 系统误差的发现 发现系统误差是消除和修正系统误差的前提。

① 理论分析法: 测量过程中因理论误差公式的近似等原因造成的系统误差常常可以从理论上作出判断并估计其量值, 如伏安法测电阻。

② 实验比较法: 对被测量的测量量采用实验方法对比、测量方法对比、仪器对比及测量条件对比来研究其测量结果的变化规律, 从而发现可能存在的系统误差。

③ 数据分析法: 分析多次测量的数据分布规律来发现系统误差。

(2) 系统误差的减小和修正

① 通过公式引入修正值。

② 消除系统误差产生的因素。

③ 改进测量原理和测量方法。

(3) 系统误差包括已定系统误差和未定系统误差

1) 已定系统误差是指符合和绝对值已经确定的误差分量。实验中应尽量消除已定系统误差, 或对测量结果修正, 得到已修正结果。修正公式为:

$$\text{已修正测量结果} = \text{测得值(或其平均值)} - \text{已定系统误差}$$

预先进行仪表零点调整等操作能减小测得值的误差。在电流表内接测电阻的实验中, 用 $R = V/I - R_I$ 代替 $R = V/I$ 的简单算法, 就基本上消除了电流表内阻对测量结果的影响。

2) 未定系统误差是指符号或绝对值未经确定的系统误差分量。实验中一般只能估计出未定系统误差的限值或其分布范围, 这些和下面介绍的 B 类测量不确定度分量有对应关系。

2.2.4 随机误差的处理

根据随机误差的分布特征, 可知:

1) 在多次测量时, 正负随机误差常可以大致相消, 因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减少随机误差的影响;

2) 测量值的分散程度直接体现随机误差的大小, 测量值越分散, 测量的随机误差就越大, 因此必须对测量的随机误差做出估计才能表示出测量的精密度。

对随机误差估计的方法有多种, 科学实验中, 常用标准偏差来估计测量的随机误差。

(1) 残差 Δx_i 、偏差 Δx_m 和误差 ϵ

设 a 为被测量真值, m 为总体平均值(无限多次测量结果的平均值), \bar{x} 为测量平均值(有限次测量的平均值), x_i 为单次测量值。

1) 残差 Δx_i : 单次测量值 x_i 与测量平均值 \bar{x} 之差。

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$$

2) 偏差 Δx_m : 单次测量值 x_i 与总体平均值 m 之差。

$$\Delta x_m = x_i - m$$

3) 误差 ϵ : 单次测量值 x_i 与真值 a 之差。

$$\epsilon = x_i - a$$

(2) 标准偏差 σ 、实验标准误差 S_x

① 标准偏差 σ :

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n}}$$

σ 不是测量值中任何一个具体测量值的随机误差; σ 的大小只说明, 在一定条件下等精度测量列随机误差的概率分布情况(即测量值的分散程度)。标准偏差小表示测量值很密集, 精密度高; 标准偏差大表示测量值很分散, 精密度低。

② 实验标准误差 S_x :

由于实验测量次数是有限的, 实验中用测量最佳值(即平均值 \bar{x})代替真值总体平均值 m , 测量值的分散性用实验标准误差 S_x 表征, S_x 可按式(贝塞尔公式)算出。

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

2.3 测量结果的不确定度

2.3.1 表征测量结果质量的指标为精密度、准确度和精确度

精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的概念, 但含义不同。

(1) 精密度

表示测量结果中随机误差大小的程度。即指在规定条件下对被测量进行多次测量时, 各次测量结果之间离散的程度。精密度高则离散程度小, 随机误差小, 但系统误差的大小不明确。

(2) 准确度

表示测量结果中系统误差大小的程度。它反应了在规定条件下, 多次测量数据的平均值或实验所得结果与真值符合的程度。准确度高即测量结果接近真值的程度好, 系统误差小, 但数据离散程度, 即随机误差的大小不明确。

(3) 精确度

表示测量结果中系统误差与随机误差综合大小的程度, 也就是对测量的精密度和准确度的综合评定。对于实验测量来说, 精密度高准确度不一定高; 而准确度高精密度也不一定高; 只有精密度和准确度都高时, 也就是说, 只有随机误差和系统误差都小时, 精确度高。

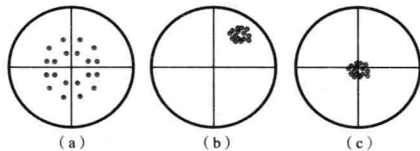


图 2-3-1 精密度、准确度、精确度示意图

为了更好地理解这些概念, 现以打靶为例来形象地说明。图 2-3-1(a) 表示弹着点相互



之间比较分散,但总体来看没有明显的固定偏向,因而随机误差大,系统误差小,即精密度较低,而准确度较高;图(b)表示弹着点比较密集,但总体来看偏离靶心较远,因而随机误差小,系统误差大,即精密度较高,而准确度较低;图(c)表示弹着点比较密集,且总体来看离靶心近,因而随机误差小,系统误差也小,即精密度和准确度都高,这才是精确度高。

以上关于测量结果质量评价的几个术语,能够定性描述测量结果的质量。对测量结果的质量定量描述还得有具体的处理方法。

目前国际上采用测量不确定度来定量评定测量结果。

2.3.2 测量不确定度

(1)为什么要引入不确定度

由于真值一般不可能准确地知道,误差仅是一个理想概念,测量误差也就不可能确切获得。根据现实可行的办法,由实验数据和测量条件推算出来的只能是误差的估计值。将任何一个确定的已知值称为误差是不科学的,因而误差估计值应采用一个专门名称,即测量不确定度。

(2)测量不确定度的概念

测量不确定度:表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数;表征被测量的真值所处的量值范围的评定;表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度。

测量不确定度表示一个区间,即被测量之值可能的分布区间(测量误差仅是一个差值)。为了表征这种分散性,测量不确定度可以用标准偏差,或标准偏差的倍数。

测量不确定度由多个分量组成。其中一些分量可用测量列结果的统计分布估算,并用实验标准偏差表征。另一些分量则可用基于经验或其他信息的假定概率分布估算,也可用标准偏差表征。

测量结果是指被测量之值的最佳估计,而所有的不确定度分量均贡献给了分散性,包括那些由系统效应引起的分量。被测量值是指许多个测量结果,其中不仅包括通过测量得到的测量结果,还应包括测量中没有得到但又可能出现的测量结果。

(3)测量不确定度的表示

1)标准不确定度

测量不确定度用标准偏差 σ 表示。统一规定用小写拉丁字母“ u ”表示。在正态分布情况下,所对应的置信概率仅为 68.27%。

2)扩展不确定度

测量不确定度也可以用标准偏差的倍数 $k\sigma$ 来表示。统一规定用大写拉丁字母 U 表示。即标准不确定度和扩展不确定度之间的关系为:

$$U = k\sigma = ku$$

式中 k 为包含因子。扩展不确定度 U 表示具有较大置信概率。

《测量不确定度评定与表示 JJF1059-1999》规定,除计量学基础研究基本物理常数测量以及复现国际单位制单位的国际比对等领域通常仅给出合成标准不确定度外,在其余领域中一般均要求给出测量结果的扩展不确定度。

误差可以用绝对误差和相对误差两种形式来表示,不确定度也同样可以有绝对不确定