

高等学校教材

大学物理实验

主编 夏湘芳 刘 归

高等教育出版社

高等学校教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主编 夏湘芳 刘 归

编者（按姓名总笔画数排序）

文 景	王国友	邓志宏	陈光伟
杜方炳	侯季平	李伦皋	李陵伶
许建潮	贺靖勇	彭柯铭	

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),总结湖南工业大学物理实验中心多年教学经验编写而成的。

全书共分为5章,第一章是绪论,介绍物理实验课程的意义、任务及教学环节,实验报告的格式要求,实验应注意的原则和事项以及实验课成绩考核办法。第二章介绍测量误差、不确定度与数据处理知识。第三、第四、第五章分别编入了基础性实验、综合应用性实验、设计研究性实验项目共37项。

本书可作为普通高等院校理工科各专业大学物理实验课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/夏湘芳,刘归主编.--北京:高等教育出版社,2015.2

ISBN 978-7-04-041866-8

I. ①大… II. ①夏… ②刘… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 015182 号

策划编辑 张海雁

责任编辑 张海雁

封面设计 杨立新

版式设计 童丹

插图绘制 尹文军

责任校对 刘莉

责任印制 刘思涵

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 山东鸿杰印务集团有限公司

开本 787mm×960mm 1/16

印张 15.75

字数 280千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landracom.com>

<http://www.landracom.com.cn>

版次 2015年2月第1版

印次 2015年2月第1次印刷

定价 28.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 41866-00

前 言

物理实验是理工科学生必修的一门重要实验课程。本书是依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版),结合湖南工业大学物理实验中心的实际情况,在多年教学实践的基础上,对原实验讲义进行改编而成的。原实验讲义曾供多届学生使用并多次修订。

为满足对基础不同的学生的培养需要,实验中心构建了面向各专业本科生的分层次的大学物理实验课程体系。本教材在编写时,相应地将实验从内容上分成三个层次,即基础性实验层、综合应用性实验层、设计研究性实验层,形成从低到高、从基础到前沿、从接受知识到培养创新能力的逐级提高,既能适应低年级学生的接受能力,又能达到较高的教学培养目标的特点。

全书分为5章,第一章是绪论,介绍物理实验课程的意义、任务及教学环节,实验报告的格式要求,实验应注意的原则和事项以及实验课成绩考核办法。第二章介绍测量误差、不确定度与数据处理知识。第三章为基础性实验,共编入11个实验,这一层次主要使学生了解基本物理实验方法的分类和应用,着重物理实验预备性知识和技能的训练。第四章为综合应用性实验,共编入19个实验,这一层次着重基本物理实验方法应用能力的训练。第五章为设计研究性实验,着重实验设计、研究和创新能力的培养,共编入7个实验。这一层次学生可根据自己的专业特色和专业兴趣选修。

本书的编写和出版是与近些年我校对物理实验中心投资力度加大、实验中心的建设和发展密不可分的,此书是物理实验中心全体教师和实验技术人员(包括现已离开的)十多年来智慧和经验的结晶,是一项集体的创作。多数实验项目包含了许多老师先后的贡献,这里难以逐一记载。

本书作者分工如下:王国友(实验3、13、22),邓志宏(实验4、19、29),侯季平(实验8、9、17),陈光伟(绪论、测量误差与数据处理知识、实验20、25、30、35),文景(实验15、16、24、27),杜方炳(实验7、21、28、33),李陵伶(实验6、12、

14), 许建潮(实验 2、11、26), 刘归(实验 18、23、32、34、36、37), 夏湘芳(实验 1、5、10、31), 李伦皋、彭柯铭、贺靖勇、夏湘芳负责本书的录排及绘图, 全书由夏湘芳统稿。

本书除总结了物理实验中心的教学经验外, 还参考和吸取了兄弟院校的有关资料和经验; 本书在编写和出版过程中得到了湖南工业大学教务处、理学院和高等教育出版社的大力支持, 在此表示由衷的感谢!

由于编者水平有限、时间仓促, 书中难免有不妥之处, 恳请使用本书的教师、学生和读者不吝批评指正。

编 者

2014 年 6 月 23 日于株洲

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 物理实验课的意义、任务及教学环节	1
§ 2 实验报告的格式要求	3
§ 3 实验室规则	3
§ 4 物理实验课成绩考核办法	4
第二章 测量误差与数据处理知识	5
§ 1 测量与有效数字	5
§ 2 误差的基本知识	6
§ 3 算术平均值 偏差	9
§ 4 不确定度及直接测量结果的表示	12
§ 5 间接测量结果及不确定度的合成	13
§ 6 处理实验数据的常用方法	17
第三章 基础实验	23
实验 1 长度和密度的测量	23
实验 2 气轨上测量速度与加速度	32
实验 3 动量守恒定律的研究	40
实验 4 基本电学量和时间的测量	44
实验 5 模拟法描绘静电场	54
实验 6 分光计的调节及三棱镜折射率的测定	61
实验 7 薄透镜焦距的测量	69
实验 8 光的干涉的应用	76
实验 9 非良导体导热系数的测量	81
实验 10 用气垫摆测物体的转动惯量	86
实验 11 用光杠杆测微小长度的变化	91
第四章 综合应用实验	97
实验 12 超声声速的测定	97

实验 13	简谐振动的研究	103
实验 14	动态杨氏模量	107
实验 15	弦振动的研究	114
实验 16	压力传感器特性的研究和液体表面张力系数的测量	122
实验 17	冷却法测量金属比热容	130
实验 18	落球法测量液体黏度	134
实验 19	用电热法测量水的汽化热	138
实验 20	温度传感器的标定与测温	142
实验 21	空气比热容比的测定	149
实验 22	电桥的使用与温度的测量	153
实验 23	RLC 电路的暂态过程的研究	159
实验 24	磁阻效应	166
实验 25	霍尔效应	170
实验 26	光电效应测普朗克常量	173
实验 27	太阳能电池	178
实验 28	迈克耳孙干涉仪的调整和应用	184
实验 29	用衍射光栅测光波波长	193
实验 30	测量单缝衍射的光强分布	197
第五章	设计研究实验	201
实验 31	重力加速度测量方法的研究	201
实验 32	光速的测量	205
实验 33	设计组装望远镜和显微镜	211
实验 34	偏振光的研究	217
实验 35	电表的改装与校准	223
实验 36	弗兰克-赫兹实验	229
实验 37	磁性材料特性参量的测定	234
附表		240
附表 1	国际单位制 (SI) 的基本单位及定义	240
附表 2	包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位	240
附表 3	常用物理常量	241
附表 4	国际单位制的词头	242
附表 5	水在不同温度时的密度	243
附表 6	海平面上不同纬度的重力加速度	243



绪 论

§1 物理实验课的意义、任务及教学环节

物理学是一门实验科学。首先,物理学中已知的成熟的理论都有严格的实验基础,或者说都能用实验进行验证。另外,通过实验人们将不断发现新的问题,从而促进理论的进一步发展。当然,人们在物理理论的研究中也会作出一些新的假设,预言一些新的结果,这些假设和结果最终还是要在实验中进行验证以判断它们的正确性。由此可见物理实验是物理这门学科的基础和重要组成部分。回顾物理学发展史,不论是经典物理学还是近代物理学,都有许多由于对实验的研究而有力地推动了学科发展的光辉事例。可以说物理学的每一次发展都与实验联系在一起。例如,由法国物理学家库仑测量电荷之间作用力的扭秤实验而得出的库仑定律是整个电磁学的基础;英国的托马斯·杨和法国人菲涅耳的干涉实验及衍射实验为光的波动学说奠定了基础;由于对黑体辐射的实验事实的研究,法国物理学家普朗克给出了黑体辐射定律并提出了能量量子化的概念,从而也就诞生了量子力学;又如 1919 年英国的爱丁顿拍出日全食照片用来分析光线在太阳附近的弯曲情况从而证实了爱因斯坦在 1915 年提出的广义相对论;著名的美籍华裔科学家杨振宁、李政道提出了弱相互作用宇称不守恒;也是由于实验物理学家吴健雄用实验验证以后才获得 1957 年度的诺贝尔物理学奖;科学巨人牛顿、爱因斯坦等都具有十分高超的实验技术……可以说物理学的发展史也就是一部物理实验的发展史。在过去的年代中特别是近 300 年以来,物理学的前辈们为物理学的发展作出了巨大贡献,有的为此耗尽了毕生精力。例如英国的焦耳为了测定热功当量的值,前后用了近 40 年的时间。有的甚至还献出了自己的生命,例如俄国的李赫曼在 1753 年进行大气电实验时触电身亡。我们学习大学物理实验这门课程时不仅可以学习前辈们创造的丰富巧妙的实验方法,接触各种各样的实验仪器,掌握一些基本的实验技能,还可以培养自己脚踏实地、实事求是的科学研究作风。不仅能使学生获得物理实验这门课程完整系统的知识,还可使他们为其他学科的学习打下良好的基础。

对于理工科院校学生,物理实验课的主要任务可以大致归纳如下。

(1) 通过对实验现象的观测和分析,学习物理实验知识,加深对物理理论的

理解。

(2) 培养与提高学生独立思考和初步的科学研究能力。如:阅读实验教材或说明书、参考资料等;作好实验前的准备;能够借助教材和仪器说明书正确使用常用仪器;运用物理学理论对实验现象进行初步的判断与分析;正确记录和处理实验数据、绘制曲线、说明实验结果;撰写合格的实验报告、建立有效数字和误差处理的正确概念以及自行设计和完成某些不太复杂的实验任务等。

(3) 培养学生实事求是的科学态度、严谨踏实的工作作风、勇于探索的钻研精神以及养成在实验室工作的良好习惯。

(4) 通过实验课使学生具备一定的动手能力。例如:熟悉一些常用仪器的使用;掌握一些基本的实验技能,如水平、垂直的调节,光路的共轴、视差消除的调节,电路中的限压、分流方法的使用等;以及实验中遇到的一些问题和故障的处理和排除等。

为完成以上任务,学生应重视物理实验学习的三个重要环节。

(1) 实验预习环节。课前要仔细阅读实验讲义有关章节和其他参考资料,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,并设计数据记录表格,在此基础上简单明了地写出预习报告。预习报告使用统一的预习报告纸书写。预习报告内容包括:实验名称、目的、原理、仪器、数据记录表格和拟定的实验步骤。预习思考题要做在预习报告上。不清楚的问题也可写在预习报告上。

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。每次实验前,教师将检查预习报告,没有达到要求者,将不允许做实验。

(2) 实验的课堂环节。学生进入实验室后应遵守实验规则。大学物理实验是一门独立的课程,每次上课时教师都对本次实验的原理、内容、操作、数据处理、误差的分析比较等作一简短的讲述,学生应认真听讲,并应尽量将该注意的事项记下来。动手做实验时要按要求布置仪器,有些实验可能要经老师检查后才能继续进行。对于电磁学实验要注意连线正确,特别要注意电源正负极,电流表在电路中连接的正确性。要按规定步骤操作仪器、注意细心观察实验现象。遇到问题时先要判断、思考、找出解决问题的办法,或者报告教师而得到帮助。应小心爱护各种仪器,不得擅自处理仪器故障,记录数据时要求用钢笔或圆珠笔填在预习报告的表格中。不得随意涂改数据,对于错误的数字,应将其轻轻划上一道杠,将正确的写在旁边。不要将数据乱记后再誊写,因为这样就不是真正的原始数据了。实验完毕后,一定要先交教师检查签字后再整理仪器离开实验室。

(3) 写出合乎要求的实验报告。每个实验结束后,要及时写出实验报告,报告一律采用学校统一的实验报告纸书写。实验报告的格式要求见下节。报告应简明整洁,严禁抄袭他人的文字、数据及结果,报告中要对数据重新列表并将其誊写清楚。要将教师签字后的预习报告和实验报告一并交来。实验报告应在实验后一周内交任课教师。

§2 实验报告的格式要求

实验报告包含以下内容。

(1) 实验名称。

(2) 实验目的(注意不要将通过本实验应达到的实验要求作为实验目的。例如杨氏模量的测定这一实验的目的就是测量钢丝的杨氏模量)。

(3) 实验仪器、器材等(仪器应写明型号规格、计量用的仪器应标明精度等级)。

(4) 实验原理(用自己的语言简明扼要地叙述本实验的原理及依据,该作图时应作图)。

(5) 实验步骤及注意事项。

(6) 实验数据及处理(写数据时应列表,制表的原则是“成行成列,一目了然”。同一量的数据应成纵列以便于比较。处理数据时要求写出关键公式,最后要以正确的方式写出实验结果)。

(7) 体会(讨论或答思考题)。

§3 实验室规则

(1) 必须认真预习实验讲义。上课前应带好事先完成的预习报告,经教师检查后才可进行实验。检查不合要求者不允许做实验。

(2) 按时进入实验室,按编定组次就位,将上次实验报告交给老师,按配物单检查实验设备,器具物品不符或短缺即请教师更换补齐。

(3) 爱护仪器,实验中严格按照规定方法使用仪器,未经教师允许,不得挪用其他组器具,更不得携出室外,如有损坏照章赔偿。

- (4) 使用电源时,须经教师检查线路后才能接通电源。
- (5) 严肃认真,一丝不苟地完成每一实验。
- (6) 实验完毕,经教师审查数据并签字后,整理好仪器,方可离开实验室。
- (7) 实验室不许大声喧哗、闲谈、抽烟、随地吐痰。每次最后离开的两名学生应将室内卫生打扫干净。

§4 物理实验课成绩考核办法

(1) 物理实验是高校工科各专业学生必修的主要基础课之一。凡参加本课程学习的学生,必须通过严格的考核,考核成绩由实验室上报教务处。

(2) 本课程所有实验项目完成以后,进行抽考。每班抽 5 人左右,参加考试的同学最终成绩以考试成绩为准;未参加考试同学的最终成绩以平时单个实验的平均成绩计算(但其中有三个实验不及格或缺做一个实验者均不及格),考核成绩均以优、良、中、及格与不及格等区分。

(3) 单个实验成绩的考核按照预习情况(10%)、实验操作(35%)、实验结果(15%)、回答问题(10%)、实验报告(25%)、文明卫生纪律(5%),等等,分步逐项考核计分。其方式可灵活多样,但必须统一要求和标准。

(4) 抽考的内容分实验操作和有关实验的基本理论知识两部分。范围为已做过的实验项目和绪论课内容。抽考方法采取随机抽签。



§1 测量与有效数字

一、测量

测量是把待测量与体现计量单位的标准量作比较的过程。可分为直接测量和间接测量。直接测量是指从器具和仪器上直接读取该物理量的测量。间接测量是指利用直接测量的量与被测量之间的已知函数关系,通过计算而获得该被测量的值。例如要测半径 R ,可由直接测量的直径 d ,根据 $R=d/2$ 得到。又如测长方形面积 S 时,先测出其长 a 、宽 b ,由 $S=a \cdot b$ 得出面积。

二、有效数字

1. 有效数字的基本概念

有效数字的概念对一个科研工作者十分重要。下面我们从一实例引入有效数字的知识。

图 2-1-1 是用直尺对一杆的长度进行测量,长度在 3.4 cm 至 3.5 cm 之间。例如我们将其记为 $L=3.44$ cm。这个数据的前两位是准确的,叫准确数字。最后一位是估计的,叫可疑数字,不同的测量者可能估计出不同的可疑数字。上述的准确数字和可疑数字都叫做有效数字。任何仪器读数都要读到最小刻度的下一位。记录的数据当且只能保留一位可疑数字,决不允许随意增减有效数字的位数。对于图 2-1-1 的测量,将结果写成 3.4 cm、3.5 cm、3.450 cm 或 3.440 cm 都是错误的。如杆长恰好压在直尺的 3 cm 这条线上应将其记为 3.00 cm。注意小数点之前定位所用的零不是有效数字。一个数从左至右遇到的第一个非零数字本身及以后所有的数字(包括零)都为有效数字。从测量数据的有效数字的位数上一看就可以大体判断测量仪器的精度。例如三个测量数据分别为 12.4 mm、12.46 mm、12.463 mm。可以判断第一个数据很可能是用最小刻度为 mm 的米尺测量而得,第二个可能是精度为 0.02 mm 的游标尺所测。第三个则可能是由螺旋测微器所测。

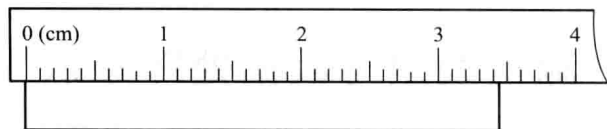


图 2-1-1

有效数字位数不多但又要表示较大的数时,应采用科学计数法。例如以下都是三位有效数字且表示同一长度:

3.44 cm, 34.4 mm, 0.344 m, $3.44 \times 10^8 \text{ \AA}$, $3.44 \times 10^{-5} \text{ km}$ 。

2. 有效数字的运算

原则:① 只有两个参加运算的数字都为准确数字时,结果才为准确数字;
② 任何结果只需保留一位可疑数字,多余的位按四舍五入处理,但运算的中间过程可以多保留一位可疑数字。下面给出一些例题,为便于阅读,将可疑数字下面划一短横标记,实际处理数据时不必如此。

例 1 $98.754 + 1.3 = 100.1$

$$\begin{array}{r} 98.754 \\ + 1.3 \\ \hline 100.054 \end{array}$$

例 2 $78.36 - 4.4 = 73.96 = 74.0$

结论:和与差的可疑数字所在位置与参加运算诸量中可疑位置最大的一个相同。

例 3 $4.178 \times 10.1 = 42.1978 = 42.2$

例 4 $3764.3 + 21.7 = 173.470 \dots = 173$

结论:积或商的有效位数与参加运算诸量中有效位数最少的相同。不难证明,乘方开方运算结果有效数字的位数与其底的有效位数相同。

对于指数、对数、三角函数运算结果的有效数字可用下法确定:当参加运算数据的最末位稍作改变时,看影响至结果的哪位则取哪位为可疑位。对于自然数,不是测量而得,故无限准确,在书写时不写出小数点及后面的位。

§2 误差的基本知识

因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力都不可能做到绝

对严密和理想,所以测量结果都有误差。对测量中可能产生的误差进行分析,尽可能减小误差并消除其影响,以及对测量结果的可信程度进行估计就是物理实验和其他科学实验必不可少的工作。由于系统的、严密的误差理论需要较多的数学知识,而且对许多问题目前大家意见还未达成一致,所以我们对误差问题只着重于介绍概念和结论,不作过深的讨论。下面先介绍一些最基本的定义:

定义 1:真值 x_0 :被测对象的客观存在值。

定义 2:绝对误差 ε : $\varepsilon = x - x_0$,其中 x 为测量值。

定义 3:相对误差 E_0 : $E_0 = \varepsilon / x_0 \times 100\%$

无论绝对误差还是相对误差,我们常常统称为误差。误差主要分为三类:系统误差、随机误差、过失误差。过失误差是由于操作者操作不当或产生错误引起的,实验中不允许有过失误差出现。下面主要讨论前两种误差。

一、系统误差

系统误差是指在同一个被测量的多次测量中保持恒定或以可预知方式变化着的测量误差部分。例如实验装置和方法没有或不可能完全满足理论上的要求,有的仪器没有达到应有的准确程度,环境因素(温度、湿度等)没有控制到预计的情况。只要这些因素与正确要求有偏离,那么测量结果中就会出现系统误差。可将系统误差大致分为可定系统和未定系统误差,先讨论可定系统误差。

例如用秒表测某运动物体通过某段路程所需要的时间。若秒表走时较快,那么即便测多次,测得的时间总是会偏大。又如千分尺、游标尺不对零、天平不等臂等这些都是仪器不准造成的,使结果总是偏大或偏小一个固定的量。又如用落球法测重力加速度,由于空气阻力,测得 g 值总是偏小,这就是测量方法不完善造成的。又如由于实验者的色盲或色弱,他们作颜色分析时总是出错误,这就是实验者所带来的误差。这些误差叫可定系统误差。

仪器精度不可能无限制地提高,环境条件也不可能绝对理想,因此所带来的误差我们常将其归为未定系统误差。例如,直尺刻度不可能绝对均匀,指针式仪表的指针不能完全跟随待测量的变化,数字式仪表其电路中由 A/D 转换带来的误差,还有其他一些未知因素引起的误差等。

系统误差的发现主要是采用对比法。例如采用不同的仪器,不同的测量方法,不同的实验条件,不同的实验人员等。对于可定系统误差可以针对误差产生的原因采取改进、校准仪器或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。对于未定系统误差当仪器精度级别和测量环境确定以后,一般是不能消除的。其对结果可信程度或不确定度的影响将在本章第 4 节中进行简要介绍。

发现和减少测量中的系统误差是较困难的工作,在很多情况下系统误差对测量结果的影响起着关键性的作用。

注意,随着人类认识能力的提高,可以将未定系统误差逐渐减小,但始终不能完全消除。人们可以将低等级的仪器用高等级的仪器来检验,将原来低等级仪器中视为未定系统误差的量用一个确定的数值表示出来。测量者在测量结果中加上该确定的值,这样就把未定系统误差转换成了可定系统误差。但是不论是现在还是将来,仪器精度再高也仍然有误差存在,或者由于条件局限有时不得不用低精度等级的仪器进行测量。在这个意义上我们说测量结果中不可避免地含有未定系统误差部分。

二、随机误差

注意,在下面的讨论中忽略了系统误差的影响。讨论随机误差之前我们先来看一看当我们对某一物理量进行测量时,所得到的测量值有什么特点。在测量时由于实验装置在各次调整操作时的变动性,测量者在各次判断时的不一致性,以及其他各种因素的不可避免的微小变化使所得到的测量结果每一次都不完全一样。例如可以用电子秒表测某一小球从固定的高度自由落下时经过空间固定的两点所用的时间来进行验证。此例中设想测量了 n 次,分析这 n 个数据可知测量值落在各个相等的时间段中的概率不一样,取定一个时间段例如 0.01 s (或其他值) 为单位, t 在 $0 \sim \infty$ 范围内。将各个相等时间段内出现的次数除以总的测量次数 n 就得到单位时间间隔内测量值出现的概率 $f(t)$ 。以时间为横坐标,以 $f(t)$ 值为纵坐标,将各点连成光滑曲线如图 2-2-1。图 2-2-1 也叫做概率密度曲线,确切地说叫做正态分布概念密度曲线。对物理量的测量由于受到随机因素的影响,其测量值到底是多少事先不可预知,但它们的分布都符合统计规律。物理实验中以及自然界中大量的事物

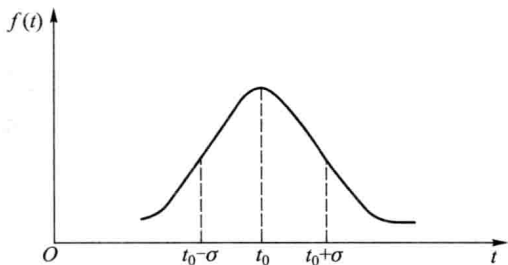


图 2-2-1

出现的规律都符合正态分布规律,数理统计课程中已对这种分布作出了详细的研究。该曲线峰值对应的 t 值 $t=t_0$ 为真值。 $t_0-\sigma$ 和 $t_0+\sigma$ 值对应曲线的两个拐点,其物理意义为用相同的方法作一次测量时,得到的 t 值落在 $t_0 \pm \sigma$ 内的概率为 68.3%。如果能通过测量得到光滑的数据分布曲线就可以得到真值,也就没

有误差而言了。可是要得到图 2-2-1 这样光滑的曲线要求测量无限多次即 $n \rightarrow \infty$, 这是不现实的。摆在我们面前的任务是如何用有限次测量得到真值的估计值。既然是估计值就不可避免地有误差存在, 这个误差就叫随机误差。换句话说随机误差是其大小与符号以不可预知的方式变化着的测量误差, 由于其大小与符号不可预知也就不可能消除。随机误差的分布也符合统计规律, 主要有以下特点: ① 正负误差出现的概率大致相等, 于是用多次测量的平均值表示测量结果时可以减少随机误差的影响; ② 大误差出现概率小, 小误差出现概率大, 很大的误差几乎不出现。

§3 算术平均值 偏差

本节仍然忽略系统误差的影响。

由于测量时必然存在误差, 于是有两个问题在测量的结果中不可回避: ① 测量结果的最佳值是什么? ② 测量结果的可信程度是什么? 我们分析定义 2 和定义 3, 测量值可以得到但不可避免地存在误差, 真值事实上不可能得到, 所以误差也不可能得到。这样, 定义 2 和定义 3 只有理论上的意义。下面我们将通过对多次测量值的分析而得到一些有实际意义的结果。

设想对物理量在同一测量条件下用某种方法进行了 n 次独立测量, 各次测量值为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。由于各种随机因素的影响, 每个 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 取值是随机的。我们将该物理量所有可能的取值叫做总体, 记为 X , 显然 X 是个变量, 称为随机变量, 这个随机变量符合正态分布规律。把 X 的一部分有限个数的值叫做样本, 样本与总体符合相同的正态分布规律, 即描述样本分布规律的参数与总体的相同。我们的任务是要从样本中找出这些参数从而回答什么是测量结果的最佳值和它的可信程度。

定义 4: 算术平均值 $\bar{x}$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-3-1)$$

算术平均值也叫样本平均值, 可以证明, $\bar{x}$ 可以作为真值 x_0 的最佳估计值, 有时称为近真值。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\bar{x} \rightarrow x_0$ 。要说明的是 $\bar{x}$ 也是一个随机变量。因为当我们将该物理量作另一组 n 次测量得到的算术平均值可能是另外一个值了。可以证明 $\bar{x}$ 也符合正态分布规律, 只是其参数与 X 的参数不同而已。

定义 5: 标准偏差 S_x

$$S_x = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-3-2)$$

上式中省略了求和指标,下同。标准偏差也叫样本标准偏差,它描述了样本内各个观察值即各个测量值 x_i 的数据密集程度。 S_x 值越小说明各个 x_i 值数据越接近。值得指出的是 S_x 也是一个随机变量,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, S_x 的极限记为 σ_x :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_x = \sigma_x$$

$x_0 \pm \sigma_x$ 值为 X 总体概率密度曲线 $f(x)$ 上两个拐点位置(图 2-3-1)。可以证明,用同样的仪器采用同样的方法对该物理量作任意一次测量所得的值 x_i 落在 $x_0 \pm \sigma_x$ 区间内的概率为 68.3%,落在 $x_0 \pm 2\sigma_x$ 内的概率为 95.4%,落在 $x_0 \pm 3\sigma_x$ 内的概率为 99.7%。这就说明了大的随机误差出现概率小这一事实。如果在一组测量数据中有一两个偏差很大的数据,如果不是由于某种过失产生,应保留在原始记录

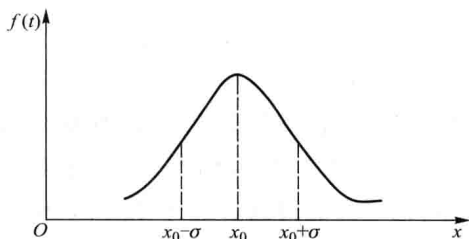


图 2-3-1

上,但计算时可以按 3 倍标准差原则进行剔除。实际测量中 n 不可能取得太大,一般 $n > 5$,这时只能把 S_x 当作 σ_x 的估计值。现在所有的函数计算器都有直接计算 $\bar{x}$ 和 S_x 的功能(统计功能),用起来很简便。

定义 6: 平均值的标准偏差 $S_{\bar{x}}$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (2-3-3)$$

定义 6 在估计 $\bar{x}$ 值与 x_0 值接近程度时特别有用,对它的理解是误差理论教学中的难点。下面我们来对它进行讨论。

前面述及 $\bar{x}$ 是个服从正态分布的随机变量, $S_{\bar{x}}$ 则是描写不同组的 n 个测量值的平均值数据的密集程度的。 $S_{\bar{x}}$ 值越小,各个平均值数据彼此越接近,反之亦然。 $S_{\bar{x}}$ 也是一个随机变量,当 $n \rightarrow \infty$ 时 $S_{\bar{x}}$ 的极限为 $\sigma_{\bar{x}}$: