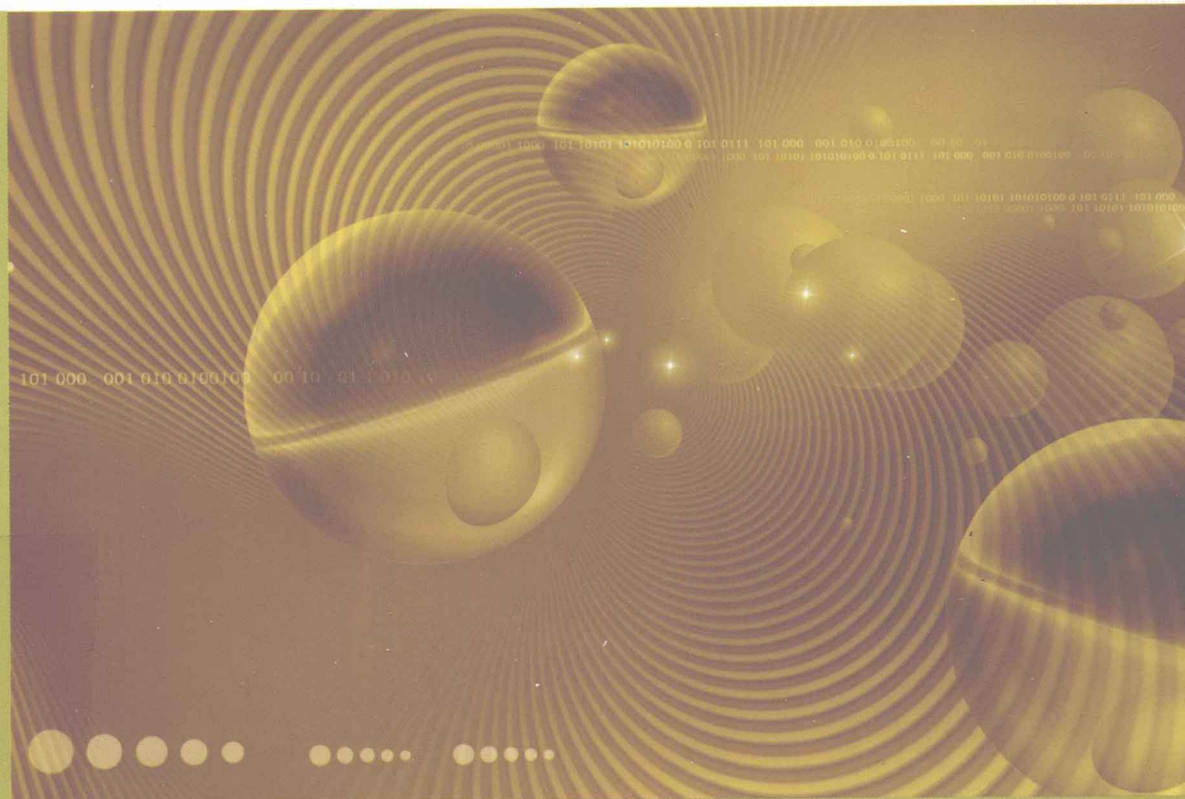


高等职业教育“十二五”规划教材

高等职业教育精品课程配套教材

高职物理 实验教程

主 编 高永慧 耿小丕
副主编 杨 洋



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高等职业教育“十二五”规划教材
高等职业教育精品课程配套教材

高职物理实验教程

主 编 高永慧 耿小丕
副主编 杨 洋
参 编 李仁芮 杨瑞臣
冯法军 赵 毅

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是根据当前物理实验教学改革的特點和高等职业院校物理实验课程的教学要求,吸收国内外同类教材的精华,在总结编者多年教学改革经验的基础上,按照“教、学、做”的教学理念编写的。全书共分3章。第1章是实验误差与数据处理;第2章是教学性实验;第3章是设计与制作性实验。全书内容涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理学等领域的27个实验。本书内容丰富,知识涵盖面广,側重阐述实验物理思想和测量方法,强调实验教学与职业技术需求相结合,有较强的启发性和实用性,注重培养学生的独立思考能力、创新能力、实践能力和综合应用能力,从而提高学生的综合素质。

本书可作为高等职业院校、独立学院理工类专业的物理实验课程教材,也可供成人教育院校、职工大学等作为物理实验课程教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高职物理实验教程/高永慧,耿小丕主编. —北京:国防
工业出版社,2011.2

高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-118-07325-6

I. ①高... II. ①高... ②耿... III. ①物理学—
实验高等学校:技术学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 019861 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 13 字数 218 千字

2011年2月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

物理实验课是学生进入高校后所接触到的第一门比较完整和系统的实践性课程,它在传授基本实验技能和基础科学实验知识、培养学生实践能力、激发创新精神、掌握科学研究方法、提高素质等方面具有不可替代的作用.为了适应我国高等职业教育的快速发展,充分发挥物理实验在应用型人才培养过程中的作用,编写一本适应当前高等职业教育特点的物理实验教材是十分必要的.本书是编者多年教学改革经验的积累和结晶,以提高学生科学素质为主线,以培养学生创新能力、应用能力为重点,以学生掌握物理实验的基本测量方法为核心,构建与“教、学、做”的教学理念相适应的教学内容,为学生终生学习和在职业生涯中继续发展奠定必要的基础.本书有以下几方面的特点.

(1) 在课程结构上,按照“教、学、做”的教学理念,把实验内容分为3章,即实验误差与数据处理、教学性实验、设计与制作性实验.实验误差与数据处理一章主要包括误差计算、误差分析、有效数字运算、实验数据处理、数据处理软件的使用等内容,培养和提高学生的误差计算与分析能力、有效数字运算能力、实验数据处理能力等;教学性实验一章包括19个实验项目,涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理学等内容,重点是让学生掌握物理实验的各种测量方法在不同实验项目中的应用,掌握实验的物理思想和测量方法,培养和提高学生独立思考问题的能力、实践动手能力等;设计与制作性实验一章包括8个实验项目,目的是让学生根据在教学性实验中学到的实验方法和测量技术,“设计”出新的实验内容或“制作”出小作品(如光纤传感器、简易超声液位仪、电子秤等),强调自主学习,突出能力培养,从而使整个实验教学过程是在“学”中“做”、“做”中“学”完成的.

(2) 在实验内容上,按照实验采用测量方法的类型编排实验项目,让学生掌握实验的本质,达到举一反三,强调从掌握实验方法到掌握测量技术,将基础实验教学与职业技术需求相结合,突破传统的物理实验以力学、热学、电学、光学、近代物理学为顺序编排的框架.

(3) 在实验项目上,增添了一些能反映现代科学技术发展的应用性实验,

如非平衡电桥、光电效应、声速测量等作为基本技能训练的项目,删除了动量守恒定律的验证、透镜焦距的测定、伏安法测电阻等明显落后于现代技术发展的实验项目。

(4) 在实验目的上,以正确、熟练地掌握基本仪器、仪表的使用方法及基本实验手段、测量方法为主要教学目的,突破了传统的以验证物理学基础为主要教学目的的框框,强调为学生职业技能学习奠定良好的基础,凸显了基础物理实验教学,为培养应用型人才目标服务。

(5) 在数据处理方面,专门介绍了数据处理软件 Excel 和科学作图软件 Origin 在物理实验中的应用,增加了用专业软件处理实验数据的训练,以替代手工用坐标纸作图的方式。

(6) 在编写思路,突出实验背景和设计思路,淡化实验过程与操作步骤,促进学生主动学习、思考与实验,提高学生的创新意识。

(7) 在实验预习上,设置了“预习提示”栏目,使学生能够较快地明了整个实验内容;对于一些著名的实验,增加了“相关科学家介绍”栏目,从而激发学生学习热情,提高学生完成实验的主观能动性。

其中,* 标出内容为选学内容。

本书由高永慧、耿小丕担任主编,杨洋担任副主编. 参加本书编写工作的有李仁芮、杨瑞臣、冯法军、赵毅. 杨瑞臣绘制了本书的插图。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 实验误差与数据处理	5
第 1 节 测量与误差	5
一、测量	5
二、误差	5
三、测量的精密度、准确度和精确度	7
四、随机误差的正态分布与标准误差	8
第 2 节 直接测量结果随机误差的估算	10
一、直接测量结果的最佳值	10
二、多次测量误差	11
三、单次测量误差	12
四、重复测量所得结果相同时的误差	13
五、测量结果的表示	13
六、绝对误差和相对误差	13
第 3 节 间接测量结果误差的估算	14
一、最大误差传递公式	14
二、标准误差传递公式	15
三、* 用实验不确定度表示测量结果	16
第 4 节 有效数字及其计算	18
一、有效数字简介	18
二、有效数字的运算法则	19
第 5 节 实验数据处理的方法	21
一、列表法	21
二、作图法	21
三、差值法	23

四、逐差法	23
第6节 Excel 软件处理实验数据	25
一、物理实验中常用的 Excel 函数	26
二、Excel 软件中直线拟合的方法	27
第7节 Origin 软件绘制实验图表	28
一、数据处理	29
二、绘图及曲线的拟合	30
思考与练习题	32
第2章 教学性实验	34
第1节 比较测量法	34
实验 长度和密度的测量	35
第2节 放大测量法	42
实验1 测量钢丝的杨氏模量	44
实验2 测量金属线的膨胀系数	50
实验3 旋光仪的使用	57
第3节 转换测量法	63
实验1 简谐振动的研究	64
实验2 光电效应与普朗克常数的测定	72
实验3 铁磁材料磁滞回线的测定	81
实验4 声速的测量	87
实验5 用电磁感应法测量交变磁场	93
第4节 补偿测量法	98
实验1 电位差计测量电动势	99
实验2 电桥测量电阻	103
实验3 非平衡电桥实验	110
第5节 模拟测量法	120
实验1 模拟法测量静电场	121
实验2 示波器的使用	126
实验3 弗兰克—赫兹实验	141
第6节 干涉测量法	150
实验1 牛顿环实验	150
实验2 迈克耳逊干涉仪的调节与使用	156

第7节 稳态测量法	160
实验1 落球法测定液体在不同温度的粘滞系数	160
实验2 基本电荷量的测量	166
第3章 设计与制作性实验	178
第1节 在气垫导轨上测量重力加速度实验	178
第2节 电位差计测量电池内阻实验	180
第3节 非线性电阻伏安特性的研究实验	181
第4节 简易万用表的组装实验	183
第5节 光纤光栅压力传感器的制作实验	184
第6节 超声波物位仪的制作实验	186
第7节 铜电阻温度计的制作实验	187
第8节 电子秤的制作实验	189
附录	192
参考文献	200

绪 论

科学实验是自然科学研究的主要方法和手段,以探索、预测或验证自然科学新现象、新规律为目的.以教学为目的的物理实验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,体现了大多数科学实验的共性,是科学实验的基础.因此,几乎所有高职院校均将物理实验课设置为理工科学生的必修课程,以使高职学生掌握系统的实验方法和实验技能.物理实验课程内容的的基本要求可概括为以下几个方面:

(1) 掌握测量误差的基本知识,学会用误差对测量结果进行评估.掌握处理实验数据的一些常用方法,如列表法、作图法和最小二乘法,以及用科学作图软件处理实验数据的基本方法.

(2) 掌握基本物理量的测量方法.例如,长度、质量、时间、电动势、电阻、声速、磁感应强度、光的波长、电子电荷、普朗克常量等常用物理量及物性参数的测量.

(3) 了解常用的物理实验方法.例如,比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法、干涉法和衍射法等,以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法.

(4) 能够正确使用常用的物理实验仪器.例如,长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、旋光仪、常用电源和光源等常用仪器.

(5) 掌握常用的实验操作技术.例如,零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除,以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节.

物理实验是一门实践性很强的课程,是培养和提高学生科学素质和应用能力的重要课程之一.通过对以上内容的训练,逐步培养学生的以下能力.

1. 独立实验的能力

能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题,掌握实验原理及方法,

做好实验前的准备,正确使用仪器及辅助设备,独立完成实验内容,撰写合格的实验报告。

2. 分析实验结果的能力

能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关理论知识,对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。

3. 理论联系实际的能力

能够在实验中发现、分析问题并解决问题的科学方法。

4. 制作与创新能力

能够完成符合规范要求的制作性实验内容,进行具有创意性、应用性内容的实验。

要实现以上能力的培养,就需要主动、认真地完成每一个实验。一般来讲,每个实验均可分为实验预习、实验过程和撰写实验报告3个环节。也就是说,在以上3个环节中均需要主动、严谨和认真的态度。

1. 实验预习

课前预习是确保学习主动性的措施之一。学生应善于发挥自己的主观能动性,充分利用实验室开放时间,按讲义要求,对照实物进行预习,了解装置、仪器和设备的特点,调节和安装方法,操作步骤、规程及使用注意事项。在明确实验目的、要求、方法和原理的基础上,拟定实验步骤提纲,并绘制数据记录表格。能力较强的学生,还应努力理解某些实验的设计构思。上述基本要求应在实验报告纸上写出书面预习报告备查。

2. 实验过程

实验过程是整个实验教学中最核心的环节。在这个过程中,要独立完成实验仪器的安装或调整,按正确步骤完成测量全过程,并对实验数据完整记录。在这个过程中,应注意以下几点:

(1) 不要急于记录数据。在实验过程中建议先观察或练习,之后再行测量,也可以先粗测再细测,否则可能在测量进行到一半或快结束时才发现,某个调节参数因为初始值选择不合理而超出量程或无法调节,导致无法完成整个实验,只好再重新进行测量。

(2) 要注意掌握实验中所采取的实验方法,特别是一些基本的测量方法。因为它是复杂测量的基础,在今后的学习与工作中可能会经常用到。在学习时不仅要掌握它的原理,而且要知道它的适用条件及优、缺点,这些知识只有通过亲身实践才能真正体会到。

(3) 要有意识地培养良好的实验习惯。例如,正确记录原始数据和处理数据,注意记录实验的客观条件,如温度、气压、湿度、日期等。认真学习操作程序,培养操作习惯。良好的实验习惯是科学素质的具体表现,也是保证实验安全、避免差错的基础。

(4) 不要单纯追求实验数据的正确性。实验能力的快速提高往往发生在实验过程不顺利时。要逐步学会分析、排除实验中出现的某些故障。当实验结果不理想时,要考虑实验方法是否正确,仪器可能带来多大误差,实验环境等因素对实验有多大影响等问题。

(5) 要遵守实验室操作规程和安全规则。随着实验项目的进行,将逐步接触到各种测量仪器,它们有不同的使用要求与工作环境,操作不当可能会损坏仪器,甚至对实验人员的身体造成伤害。因此,要求学生遵守实验的具体操作规程,养成良好的实验习惯。

(6) 在实验结束后,由指导教师当场在实验登记卡上打出成绩,并在原始数据上签字。

3. 撰写实验报告

撰写实验报告的过程实际上是对学生的综合思维能力和文字表达能力的训练过程,是今后学生在工作中撰写标书、项目申请书、研究报告、学术论文的基础训练。撰写一份合格的实验报告应注意以下几个方面:

(1) 保证实验报告的完整性。一份完整的实验报告应包括实验名称、实验目的、实验仪器、简要的实验原理(用自己的语言扼要说明实验所依据的原理和公式,包括简单的原理图)、实验步骤、数据处理(包括实验原始数据记录,按讲义要求内容计算,公式要有代入数据的过程)、误差分析、实验改进设想、解答教师指定的思考题等9部分内容。

(2) 实事求是撰写实验报告的基本要求。在撰写实验报告中不得随意对实验数据及其有效数字进行增删。

(3) 对实验数据的处理及对实验结果的误差分析是撰写实验报告的重点,也是学生归纳与分析问题能力的具体体现。

(4) 实验报告要求做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明。

物理实验课程所涉及的实验项目,绝大多数是经过多年的改进与调整,已非常适合锻炼学生对某一实验技术或某一重要物理实验方法的掌握。从统计学的角度来看,学生在进行物理实验的过程中,利用现有实验设备发现新的物

理现象或规律的概率是非常小的。然而,具有批判与怀疑精神,是实验工作者的一个基本素质。希望每个学生去探讨最佳实验方案、改装实验装置、分析操作步骤、注意测量方法应用、提出实验改进与设想,从而提高自己独立分析问题和解决问题的能力。

第1章 实验误差与数据处理

第1节 测量与误差

一、测量

所谓测量,就是利用科学仪器用某一度量单位将待测量的大小表示出来.也就是说,测量就是将待测量与选作标准的同类量进行比较,得出倍数值,称该标准量为单位,倍数值为数值.因此,一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成,缺一不可.按测量方法进行分类,测量可分为直接测量和间接测量两大类.

可以用测量仪器或仪表直接读出测量值的测量称为直接测量.例如,用米尺测长度,用温度计测温度,用电表测电流、电压等都是直接测量,所得的物理量如长度、温度、电流、电压等称为直接测量值.

有些物理量很难进行直接测量,需依据待测量和某几个直接测量值的函数关系求出,这样的测量称为间接测量.例如,单摆法测重力加速度 g 时, $g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$, T (周期)、 L (摆长)是直接测量值,而 g 是间接测量值.

随着实验技术的进步,很多原来只能间接测量的物理量,现在也可以直接测量,例如电功率、速度等的测量.

二、误差

1. 真值与误差

物理量在客观上有着确定的数值,称为该物理量的真值.由于实验理论的近似性、实验仪器灵敏度和分辨能力的局限性、环境的不稳定性等因素的影响,待测量的真值是不可能测得的,测量结果和真值之间总有一定的差异,这种差异称为测量误差.测量误差的大小反映了测量结果的准确程度.测量误差可

以用绝对误差表示,也可以用相对误差表示.

$$\text{绝对误差}(\Delta X) = \text{测量值}(X) - \text{真值}(X_0) \quad (1-1-1)$$

$$\text{相对误差}(E_x) = \frac{\text{绝对误差}(\delta)}{\text{真值}(X_0)} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

测量所得的一切数据,都有一定的误差.因此,误差存在于一切科学实验过程中,并会因主观因素的影响、客观条件的干扰、实验技术及人们认识程度的不同而不同.

注意:绝对误差不同于误差的绝对值,它可正可负.绝对误差不仅反应了测量值偏离真值的大小,也反应了偏离真值的“方向”.数据处理中常用误差的绝对值代替绝对误差,但其实二者在物理意义上是不同的.

2. 误差的分类

根据误差性质和产生原因,可将误差分为以下几类.

1) 系统误差

在相同的测量条件下多次测量同一物理量,其误差的绝对值和符号保持不变,或在测量条件改变时,按确定的规律变化的误差称为系统误差.

系统误差的来源有以下几个方面:

(1) 由于测量仪器的不完善、仪器不够精密或安装调试不当而造成系统误差.如刻度不准、零点不准、砝码未经校准、天平不等臂等.

(2) 由于实验理论和实验方法不完善,导致理论与实验条件不符.如在空气中称质量而没有考虑空气浮力的影响,测电压时未考虑电表内阻的影响,标准电池的电动势未作温度修正等.

(3) 由于实验者缺乏经验或生理、心理变化等所造成的误差.如每个人的习惯不同,有的人读数偏高,而有的人读数偏低.

多次测量并不能减小系统误差.系统误差的消除或减小是实验技能问题,应尽可能采取各种措施将其降低到最小程度.例如,将仪器进行校正,改变实验方法或在计算公式中列入一些修正项以消除某些因素对实验结果的影响,纠正不良的实验习惯等.

2) 随机误差

随机误差也被称为偶然误差,它是指在极力消除或修正了一切明显的系统误差之后,在相同的测量条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号的变化时大时小、时正时负,以不可预定的方式变化着的误差.

随机误差是由于人的感观灵敏程度和仪器精密程度有限、周围环境的干扰

以及一些偶然因素的影响而产生的。如用毫米刻度的米尺去测量某物体的长度时,往往将米尺对准物体的两端并估读到毫米以下一位读数值,这个数值就存在一定的随机性,也就带来了随机误差。由于随机误差的变化不能预先确定,所以对待随机误差不能像对待系统误差那样找出原因排除,只能作出估计。

虽然随机误差的存在使每次测量值偏大或偏小,但是,当在相同的实验条件下,对被测量进行多次测量时,其大小的分布服从一定的统计规律,可以利用这种规律对实验结果的随机误差作出估算。这就是在实验中往往对某些关键量进行多次测量的原因。

3) 粗大误差

凡是测量时客观条件不能合理解释的那些突出的误差,均可称为粗大误差。

粗大误差是由于观测者不正确地使用仪器、观察错误或记录错数据等不正常情况下引起的误差。它会明显地歪曲客观现象,一般不应称为测量误差,在数据处理中应将其作为坏值予以剔除。它是可以避免的,也是应该避免的。所以,在作误差分析时,要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

三、测量的精密度、准确度和精确度

对测量结果做总体评定时,一般应把系统误差和随机误差联系起来看,精密度、准确度和精确度都是评价测量结果好坏的,但是这些概念的含义不同,使用时应加以区别。

1. 精密度

精密度表示测量结果中的随机误差大小的程度。它是指在一定的条件下进行重复测量时,所得结果的相互接近程度,是描述测量重复性的。精密度高,表示测量数据的重复性好,随机误差较小。

2. 准确度

准确度表示测量结果中的系统误差大小的程度。用它来描述测量值接近真值的程度。准确度高,表示测量结果接近真值的程度高,系统误差较小。

3. 精确度

精确度是对测量结果中系统误差和随机误差的综合描述。它是指测量结果的重复性及接近真值的程度。对于实验和测量来说,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,精确度才高。

现在以打靶结果为例,形象说明3个“度”之间的区别。图1-1-1中,(a)

图表示子弹相互之间比较靠近,但偏离靶心较远,即精密度高而准确度较差;
(b)图表示子弹相互之间比较分散,但没有明显的固定偏向,故准确度高而精密度较差;
(c)图表示子弹相互之间比较集中,且都接近靶心,精密度和准确度都很高,亦即精确度高。

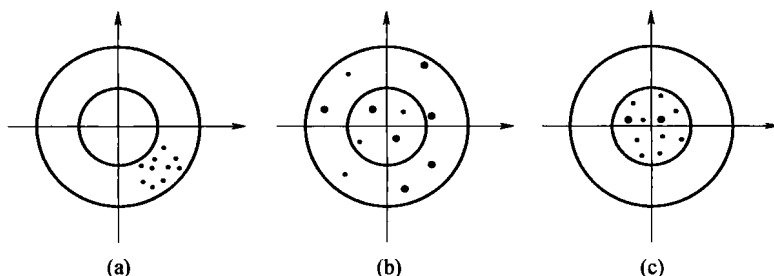


图 1-1-1 测量的精密度、准确度和精确度图示

(a) 精密度高;(b) 准确度高;(c) 精确度高。

四、随机误差的正态分布与标准误差

1. 随机误差的正态分布规律

随机性是随机误差的特点。在相同的测量条件下,对同一物理量进行多次重复测量,假设系统误差已减弱到可以忽略的程度,由于随机误差的存在,测量结果 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 一般存在着一定的差异。如果该被测量的真值为 x_0 ,则根据误差的定义,各次测量的随机误差为

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

大量的实验事实和统计理论都证明,在绝大多数物理测量中,当重复测量次数足够多时,随机误差 δ_i 服从或接近正态分布(也称高斯分布)规律。正态分布的特征可以用正态分布曲线形象地表示出来,如图 1-1-2(a)所示,横坐标为误差 δ ,纵坐标为误差的概率密度分布函数 $f(\delta)$ 。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,此曲线完全对称。正态分布具有以下性质:

(1) 单峰性。绝对值小的误差出现的可能性(概率)大,绝对值大的误差出现的可能性(概率)小;

(2) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的机会均等,对称分布于真值的两侧;

(3) 有界性。绝对值非常大的正误差或负误差出现的可能性几乎为零;

(4) 抵偿性。测量次数非常多时,正误差和负误差相互抵消,于是,误差的

代数趋向于零。

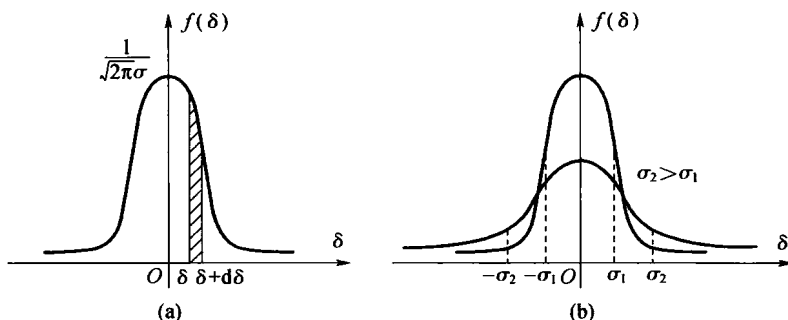


图 1-1-2 随机误差的正态分布曲线

根据误差理论,可以证明函数 $f(\delta)$ 的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1-3)$$

测量值的随机误差出现在 $(\delta, \delta + d\delta)$ 区间的可能性为 $f(\delta) d\delta$, 即图 1-1-2 (a) 中阴影线所包含的面积元。上式中的 σ 是一个与实验条件有关的常数, 称为标准误差, 其值为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1-1-4)$$

式中, n 为测量次数; δ_i 为各次测量值的随机误差, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

可见, 标准误差是将各个随机误差的平方取平均值, 再开方得到的, 所以, 标准误差又称均方根误差。

2. 标准误差的物理意义

按照概率理论, 误差 δ 出现在区间 $(-\infty, +\infty)$ 的事件是必然事件, 所以, $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1$, 即曲线与横轴所包围的面积恒等于 1。当 $\delta=0$ 时, 由式 (1-1-3) 得

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (1-1-5)$$

由式 (1-1-5) 可见, 若测量的标准误差 σ 很小, 则 $f(0)$ 很大。由于曲线与横轴间围成的面积恒等于 1, 所以如果曲线中间凸起较大, 两侧下降较快, 测量的数据比较集中, 即测得值的离散性小, 说明测量的精密度高, 则测量值较为