

周瑞华 主编

大学物理实验教程

DAXUE WULI SHIYAN JIAOCHENG



国防工业出版社

National Defense Industry Press

大学物理实验教程

周瑞华 主编

汤 照 副主编

陈春雷 王 慧 李慎德 李长明 编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书依据 2004 年教育部制定的《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》,借鉴国内外物理实验教学内容和课程体系改革的研究成果编写而成,并力图在“基本要求”的指导下,构建出一个分层次、模块化、点面结合的开放的物理实验课程体系。

全书内容分为七部分,包括绪论、误差理论与数据处理、基础性实验、近代物理和综合性实验、设计性(或研究性)实验,考虑到现代实验技术中,计算机仿真已经日益成为一种重要的实验方法,还列入了部分计算机仿真物理实验的内容。

本书可作为理、工科高等院校各专业大学物理实验教学用书及其他专业的教学参考书,也可作为广大实验工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程/周瑞华主编. —北京:国防工业出版社,2010.1

ISBN 978-7-118-06629-6

I. ①大... II. ①周... III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 234255 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19½ 字数 450 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 32.00 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

为适应当前高等院校教学改革的需要,根据教育部《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》和《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,遵循“加强基础、重视应用、开拓思维、培养能力、提高素质”的指导思想,我们结合近年来国内外大学物理实验课程教学实践和改革成果编写了本教程。本书共包括实验项目约 54 个,涵盖了力、热、电、光和近代物理学的大量内容,涉及范围比较广泛,内容比较详尽而且深入浅出,并体现了当前物理实验技术一些较新的成果和方法。

大学物理实验是高等理工科院校对学生进行科学实验训练的必修基础课。为了使学生在较短时间内学习丰富的实验思想,接受系统实验方法和技能的训练,培养严谨的治学态度和活跃的创新意识,提高科学实验能力和素质,为后续课程奠定基础,本教程在编写过程中,打破了传统实验教学体系,采用基础性实验、近代物理和综合性实验、设计性(或研究性)实验的三级模式。此外,还列入了部分计算机仿真实验,为充分利用多媒体教学软件等现代教育技术、丰富教学资源、拓宽教学时间和空间提供了条件。多年的教学实践证明,采取这种教学模式,既能使学生理论联系实际,更好地理解和掌握理论知识;同时又能开展个性化教学、倡导自主学习、提高学生科学实验素质提供一个有效的教学平台。

本教程主要内容包括绪论、测量误差与实验不确定度、实验数据处理的基本方法、基础性实验、近代物理与综合性实验、设计性(或研究性)实验和计算机仿真实验等。教程列入的实验内容,能基本满足学生未来从事科学研究和工程技术工作时所需的基本知识和基本技能,为培养厚基础、宽口径、高素质、强能力的复合型人才提供科学知识、方法和能力的保证。

绪论简要介绍了大学物理实验课程地位、任务和要求;介绍了课程主要教学环节和实验室规则,帮助学生对“为什么要上大学物理实验课”,“怎么上好这门课”建立正确的感性认识。

第 1 章、第 2 章主要介绍误差理论及数据处理的基础知识。以较大篇幅重点介绍了不确定度理论,此外,还列入较多例题供学生阅读和思考。通过对测量误差的估计、数据记录和处理、误差分析方法的运用,能培养学生严谨的工作态度和实事求是的科学精神。

第 3 章是基础性实验。涉及力、热、电、光、近代物理等各个领域的内容,对基本实验仪器、基本实验技能和基本测量方法作了系统介绍,在每个实验项目中都对教学目标和原理作了简要论述,并提出了误差估计与不确定度计算的要求,使学生容易理解重点、明确思路、掌握方法,加深对物理理论知识的理解,提高学生独立分析和解决问题的能力。

第 4 章是近代物理与综合性实验。在同一个实验中涉及到力学、热学、电磁学、光学、

近代物理等多个领域,综合应用了多种方法和技术。目的在于巩固基础性实验阶段的学习成果、进一步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。

第5章是设计性(或研究性)实验。这类实验给定题目、要求和条件,由学生(或组成团队)独立查阅资料、设计方案、选择仪器并完成实验。目的是使学生初步了解科学实验全过程、逐步掌握科学思想和科学方法、运用科学理论解决实际问题。这类训练可以充分调动学生学习积极性,培养学生解决问题的综合能力、创新意识和创新精神。

第6章是计算机仿真实验。这类实验借助计算机软件或计算机网络进行。在现代实验技术迅速发展的今天,仿真实验无疑代表了一种趋势。仿真实验能模拟真实实验场景,人机交互功能强大,能有效调动学生学习兴趣,有助于学生综合实践能力的提高。

本书编写组的成员中,周瑞华承担了前言、绪论、第1章、第2章和附录的编写;汤照编写了3.17节~3.22节、4.14节、4.16节、5.3节~5.5节、5.10节,并仔细核对了部分实验的原理、步骤、方法和数据;陈春雷编写了3.11节~3.16节、4.1节、4.4节、4.5节、5.9节;王慧编写了4.6节~4.13节、4.15节、5.8节;李慎德编写了3.2节、3.9节、3.10节、4.3节、5.2节、5.7节、6.1节~6.5节;李长明承担了3.1节、3.3节~3.8节、3.23节、4.2节、5.1节、5.6节的编写工作。周瑞华对全书修改定稿。

本教程在编写过程中,编写组全体同仁认真总结教学实践经验,积极探讨实验教学规律,经过反复讨论后形成了现在的框架,实验中心老师们为本书编写提供了全面协助。同时,我们还参阅了许多兄弟院校的物理实验工作者编著的相关教材、著作、研究成果以及仪器生产厂家的说明书,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中错误、疏漏之处在所难免,恳请各院校的老师及广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差与实验不确定度	6
1.1 测量与测量误差	6
1.2 不确定度及其有关概念	11
1.3 B 类不确定度的估算	13
1.4 直接测量结果与不确定度的估算	16
1.5 间接测量结果与不确定度的合成	21
1.6 有效数字与近似计算	25
第 2 章 实验数据处理的基本方法	30
2.1 实验数据处理的基本方法之一——列表法	30
2.2 实验数据处理的基本方法之二——作图法	31
2.3 实验数据处理的基本方法之三——逐差法	34
2.4 实验数据处理的基本方法之四——线性回归法	37
第 3 章 基础性实验	44
3.1 固体和液体密度的测量	44
3.2 液体黏滞系数的测量(落球法)	52
3.3 速度和加速度的测量	56
3.4 验证牛顿第二定律	61
3.5 动量守恒定律的实验研究	64
3.6 金属丝杨氏弹性模量的测量	68
3.7 转动惯量的测量(扭摆法)	72
3.8 转动惯量的测量(转动法)	76
3.9 准稳态法测导热系数及比热容	81
3.10 空气比热容比的测量	86
3.11 模拟法测量静电场的分布	91
3.12 电表的改装与校正	98
3.13 电子束在电场和磁场中的运动	101
3.14 示波器的使用	108

3.15	铁磁材料动态磁滞回线的观测与研究	113
3.16	霍耳效应法测量磁感应强度	119
3.17	薄透镜焦距的测量	124
3.18	平行光管法测量薄透镜的焦距及分辨力	130
3.19	棱镜角和材料折射率的测量	136
3.20	光栅常数及角色散率的测量	144
3.21	等厚干涉的实验研究	148
3.22	双棱镜干涉测量光波波长	154
3.23	弦线上波的传播规律的实验研究	158
第4章	近代物理与综合性实验	163
4.1	声速的测量	163
4.2	多普勒效应	167
4.3	半导体热敏电阻特性的研究	173
4.4	电位差计测量温差电动势	177
4.5	电子电荷的测量(密立根油滴法)	182
4.6	夫兰克-赫兹实验	191
4.7	液晶的电光效应	198
4.8	迈克尔逊干涉仪	203
4.9	全息照片的拍摄	210
4.10	小型棱镜摄谱仪的使用	217
4.11	用光栅光谱仪测量氦灯波长	226
4.12	光电效应和普朗克常量的测量	231
4.13	超声光栅测量液体中的声速	236
4.14	光速测量	242
4.15	玻尔共振实验	247
4.16	单缝衍射相对光强分布及缝宽的测量	256
第5章	设计性(或研究性)实验	262
5.1	气垫导轨上简谐振动的实验研究	262
5.2	电路元件伏安特性的研究	263
5.3	偏振光的研究	268
5.4	衍射法测量细丝直径	268
5.5	全息光栅的设计制作与检测	269
5.6	重力加速度的实验研究	269
5.7	光敏电阻光电特性的研究	271
5.8	自动聚光太阳能充电器的研究	273
5.9	超声波技术应用设计	276
5.10	硅光电池光照伏安特性的测量与研究	277

第 6 章 计算机仿真实验 278

6.1 凯特摆测重力加速度 278

6.2 示波器实验 283

6.3 法布里-泊罗标准具实验 287

6.4 核磁共振(NMR) 292

6.5 半导体温度计的设计 299

参考文献 303

绪 论

物理学是一门实验科学。在研究物质结构、物质运动形式及相互作用的过程中,物理概念的建立、物理规律的发现,都以严格实验事实作基础,并且不断地受到实验事实的检验。可以毫不夸张地说,实验是物理学的基础,是物理知识的源泉,是物理科学理论的试金石。不仅如此,物理实验还是科学实验的先驱,它充分体现了大多数科学实验的共性,在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

纵观物理学发展的历程不难发现,实验不仅为物理科学开拓新理论、新领域奠定基础,同时也为拓展物理学应用领域提供了有力武器。最近几十年来,物理学在各个领域发展迅速,尤其在核物理、新能源、激光、传感与自动控制、新型材料、电子技术和计算机技术等方面,更是反映了物理实验技术发展的新水平。

科学技术发展越来越体现出物理实验技术的重要性,基于以上原因,在高等理工院校开设《大学物理实验》课程,可以使本科生系统接受丰富的实验思想、方法和技能训练;提高获取知识的自学能力、运用知识的综合分析能力、动手实践能力、设计创新能力;培养严肃认真的作风、实事求是的科学态度、理论联系实际和适应科技发展的综合素质。学好《大学物理实验》课程,是新一代科技工作者培养良好科学素养、树立正确科学世界观的重要途径。

一、大学物理实验的主要任务

《大学物理实验》是高等理工院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课,是学生接受系统实验方法和技能训练的开端。它有如下的主要任务。

1. 培养科学实验的基本素质

要求学生在学习过程中,通过了解或使用仪器,正确地进行测量、处理数据、分析结果以及撰写实验报告等环节,以获得必要的实验知识和操作技能;掌握实验研究的科学思想和基本方法;培养科学思维和创新意识;提高分析能力和创新能力。

2. 培养实事求是的科学作风

要求学生在学习过程中,严格细致、实事求是、刻苦钻研和一丝不苟,培养认真严谨的科学态度,积极主动的探索精神;培养遵守纪律,团结协作,爱护公共财产的优良品德。

3. 加强理论联系实际

要求学生在学习过程中,认真学习与实验相关的基础理论;深刻体会经典实验的物理思想;掌握常用的实验方法,如电磁学实验中的模拟法、伏安法、电桥法、补偿法及冲击法等;理论联系实际,加强思维与创造能力的培养。

4. 培养良好的科学实验习惯

要求学生在学习过程中,善于动脑、乐于动手、尊重事实、讲究科学方法、遵守操作规

程和注意安全,培养良好科学实验习惯。

二、《大学物理实验》课的主要教学环节

《大学物理实验》与理论课学习不同,《大学物理实验》是学生在教师的指导下,自己动手,独立完成实验任务。因此,无论实验研究对象、要求和项目有何不同。实验的主要程序都是相同的。一般都有以下三个主要环节。

1. 实验预习

预习既是培养阅读能力的学习环节,也是按质、按量、按时完成实验的保证。在实验前,必须认真阅读教材或相关的参考资料,重点解决“要做什么?为什么能做?要怎样做”三个问题。预习的主要要求如下。

(1) 明确实验目的;理解实验原理(包括测量公式)和方法;理解实验使用的物理模型和数学模型;了解由理论引起的系统误差;理解数据处理公式的物理意义和方法,使实验始终有明确理论作指导。

(2) 了解主要实验仪器的工作原理;熟悉实验仪器(或装置)的面板布置、各旋钮作用、功能;仪器组合方法(或光路、电路的连接、调整方法等)。

(3) 熟习实验操作步骤和注意事项;安全操作实验仪器(装置)要注意的主要事项。

(4) 写出实验预习报告,内容包括:实验目的和原理(包含实验原理图、电路图或光路图);实验使用的主要公式;主要的实验仪器及仪器简要的工作原理、实验内容、实验操作步骤、数据记录表格等。

2. 实验操作

在实验室进行实际操作,开展实验研究是实验的主要环节之一。实验操作的主要要求如下。

1) 认真听取实验指导教师的讲解

理解实验要求、重点、难点和注意事项;对照仪器实物,仔细阅读仪器的使用说明和操作要领,进一步理解实验的具体要求。

2) 做好测量前准备

严格按照操作规程布置仪器,连接线路(或组装光路);要仔细调节仪器零点(或水平状态、或垂直状态、或光路准直共轴),对无法调零的仪器,要记录零点值;要记录实验环境(气压、温度和湿度等);进行电学实验时,一定不能带电连接电路,连接完毕仔细检查后,要经指导教师批准,方可通电操作;光学实验仪器工作状态的调节尤其重要(如迈克尔逊干涉仪、分光计等),如果调节不当,则实验就无法继续。

3) 实验测量

在实验中,要注意细心操作、仔细观察、积极思考、防止急躁;数据的读取和记录要实事求是;遇到问题要独立思考、冷静分析、找出问题和排除故障;不要急于取得他人的帮助,要有意识培养自己独立处理问题的能力。

4) 数据记录

实验数据是计算实验结果和分析实验规律的依据。测量数据要细心记录在预习报告的数据表格内,不要随意涂改;如果确信记录发生了错误,可在错误数据上用红笔划上一横杠,然后在该数据上方重新写上正确的数据;切忌在数据表格上乱涂乱画。

5) 异常实验现象的处理

在实验中,可能会观察到与实验教材不一致的实验现象和数据。对于这些异常实验现象,首先应检查实验仪器组合(或连接)、仪器工作状态、实验环境等是否正常;其次应检查实验步骤与操作有无错误,如果确信这些都没有问题,应该记录这些异常情况,并作出分析;也可以与实验指导教师和同学展开讨论,不要轻易放过这些现象。

实验完毕后,应填写仪器使用记录,做好仪器设备的整理和实验室的清洁工作。

3. 完成实验报告

完成实验报告,是完成实验的最后环节,是对实验结果进行全面总结、分析的过程,必须予以充分重视。一份完整的实验报告分为四个部分。

1) 实验目的和原理(应在实验预习时完成)

(1) 目的和要求:明确提出实验教学的目标,以及对学生知识、能力方面的具体要求。

(2) 原理:用简短文字扼要地阐述实验原理;切忌整篇照抄,力求做到图文并茂(绘出原理图、电路图或光路图);写出实验的主要公式;说明各物理量的意义和单位及公式适用条件(或实验必要条件)。

2) 实验数据记录(应在实验过程中完成)

(1) 仪器:记录主要仪器的型号及规格。

(2) 过程:实验内容及步骤、观测现象记录和数据记录(记录数据时,一定要在标题栏内注明单位)。

3) 数据处理与计算(在实验后完成)

(1) 实验结果计算:写出计算公式,代入数值运算。

(2) 误差计算:写出误差公式(或不确定度公式);确定仪器误差(或 B 类不确定度);计算标准差(或 A 类不确定度);合成不确定度。

(3) 写出测量结果:按标准形式表达实验结果(或测量结果)。

4) 画出实验曲线(必要时进行回归分析)

5) 误差分析与实验结果讨论

(1) 误差分析。对实验产生误差的原因进行分析讨论。如果有系统误差,用何种方法减小误差?如果有粗大误差(过失误差),应采取何种措施消除误差?

(2) 实验讨论。对实验结果分析讨论,主要是对实验中产生的物理现象、实验环境条件的影响、实验总结出的物理规律、实验中出现的問題进行分析和讨论,并写出实验心得或建议等。

(3) 完成教师指定的作业。撰写实验报告有助于加深对物理规律的理解,有助于锻炼逻辑思维能力。因此,撰写实验报告应做到书写清晰、字迹端正、数据记录整洁、图表合适、文理通顺、内容简明扼要。

三、实验室规则

为了培养学生严谨的科学态度和良好的实验素质,保证实验正常进行,特制定下列实验规则。

(1) 学生应在课程表指定时间内进行实验,不得无故缺席或迟到;进入实验室应携带必要物品(如文具、计算器、草稿纸、毫米方格纸和铅笔等),但不得携带食品和其他无关物

品进入实验室。

(2) 在每次实验前,必须对实验进行预习,写出预习报告;进入实验室后,应将预习报告交实验指导教师检查,并回答教师的提问,经教师确认合格后,方可进行实验。

(3) 进行实验前,要核对自己使用的仪器是否缺少或损坏;若发现问题,应及时向实验指导教师报告。向实验管理员借用的仪器,实验完毕后要及时归还。

(4) 要严格遵守实验操作规程。实验前,应细心观察仪器构造,操作时应谨慎细心。电学实验线路连接完毕,经指导教师检查,合格后才可接通电路;做光学实验时,严禁用眼睛直视激光光源,以免发生意外。

(5) 实验完毕前,应将实验数据交给指导教师检查,经检查合格后由指导教师签字确认;余下时间可在实验室内进行实验计算,下课铃响后方可离开实验室。

(6) 应注意保持实验室整洁、安静;实验完毕应将仪器、桌椅恢复原状,放置整齐。

(7) 仪器如有损坏,应及时报告指导教师,并填写损坏单,注明损坏原因;根据学校规定进行赔偿。

(8) 在下一实验前,由班干部收齐实验报告统一交实验室。

附实验报告参考格式:

大学物理实验报告

实验者班级_____ 姓名_____ 学号_____ 实验时间_____

检查预习报告签名:_____ 实验成绩_____

一、实验名称

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

二、实验目的和要求(主要明确“做什么? 要达到什么目标”的问题)

三、实验原理(需要解决“为什么能做”的问题)

简明扼要写明实验原理、必要计算公式、原理图、电路图或光路图等。

四、实验仪器(需要解决“用什么来做”的问题)

仪器型号、规格、精度或最小分度值等。

五、实验操作的主要步骤(主要解决“怎么做”的问题)

(1) XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX;

(2) XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX;

(3) XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX。

六、实验数据记录表格

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

七、实验数据处理(主要解决“做出了什么结果”的问题)

(1) 理论计算公式与必要的计算。

(2) 误差估算公式与详细的计算过程。

(3) 测量结果的表达。

(4) 绘出必要的实验曲线(或进行回归分析)。

八、实验结果分析(主要解决“做得怎么样”的问题)

(1) 误差分析(实验结果可靠度的判断、分析产生误差的各种因素、减小误差应采取的措施等)。

(2) 实验结果分析(物理现象或物理规律的表述、适用范围、改变实验条件对实验结果的影响等)。

(3) 实验中异常情况的分析或解释。

(4) 改进实验的建议或实验的心得体会。

(5) 回答实验的思考题。

注意:预习时,完成内容 一~六(即表格设计);实验过程中,主要完成内容六中表格的填写;实验操作结束后,再完成内容七、八。

第 1 章 测量误差与实验不确定度

1.1 测量与测量误差

1.1.1 测量

从自然科学发展历程中可以发现,科学实验是一种极其重要的科学研究手段,是自然科学理论发展的源泉,也是工程技术的基础。物理实验不仅是科学实验的先驱,同时也在有“自然科学之母”美誉的物理学中占有举足轻重的地位。

进行物理实验,不仅要定性观察物理现象,更重要的是要通过对物理量的测量,找出有关物理量之间的定量关系,因此测量是物理实验的主要工作之一。所谓测量,就是将待测物理量与规定的作为标准单位的同类物理量(或称为标准量)通过一定的方法进行比较(或与可借以导出的异类物理量进行比较),得出比较的倍数,这个比较的倍数即为待测物理量的测量值。这个比较的过程就叫做测量。

1960 年,第十一届国际计量大会决定:把以米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)和坎德拉(cd)为基本单位的实用计量单位制命名为“国际单位制”,规定其符号为[SI]。1974 年,第十四届国际计量大会决定:增加物质的量的单位摩尔(mol)作为基本单位。至此,国际单位制就有七个物理量的单位为基本单位。其他物理量的单位则由七个基本单位按一定的计算关系式导出。因此,除基本单位之外的其余单位均称为导出单位,如速度、力、电压和电阻等物理量的单位都是导出单位。

1984 年 2 月 27 日,中华人民共和国国务院公布的《中华人民共和国法定计量单位》规定,我国采用国际单位制和以国际单位制单位为基础的法定计量单位。

有了统一的基本单位,物理量的测量结果才具有互换性和可比性。

按物理实验测量方法不同,可分为直接测量和间接测量。将待测量与同类物理量直接进行比较而得出测量结果,这种测量叫直接测量,基本量测量都属于此类。例如,用米尺测量物体长度(如 $l=0.0256\text{m}$);用天平称铜块质量(如 $m=0.0135\text{kg}$);用秒表测量单摆周期(如 $T=2.43\text{s}$)等,凡从仪表所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测量的量值。

在物理实验中,能够直接测量的量毕竟是少数,大多数待测量都是由直接测量所得数据,根据一定公式,通过运算得出所需结果,这种测量称为间接测量。例如,直接测出单摆的长度 l 和单摆的周期 T ,应用公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,可以得出单摆所在位置的重力加速度 g ;

又如,直接测出物体运动距离 s 和运动时间 t ,应用公式 $v=\frac{s}{t}$,可以测量出物体运动速度

(如 $v=23.5\text{m/s}$)。

按物理实验测量条件不同,可分为等精度测量和不等精度测量。对某一量 x 进行多次测量,得 k 个数值: $x_1, x_2, \dots, x_k$ 。如果每次测量都是在相同的条件下进行,在这种情况下所进行的测量称为等精度测量。所谓相同条件是指同一个人,用同一台仪器,每次测量的环境条件都相同(如测量时的环境、气温、照明情况等未变动)。

若对某一量 x 进行了 k 次测量,得到 k 个值: $x_1, x_2, \dots, x_k$,如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度不能认为是相同的。在这种情况下所进行的测量叫做不等精度测量。例如,同一实验者用精度不同的三种天平称量某物体质量 m ,得到三个值 m_1, m_2, m_3 ,或者用三种不同的方法测量某物质的密度 ρ ,得到三个值 ρ_1, ρ_2, ρ_3 ,这都是不等精度测量。

将测量结果记录下来叫做实验数据。实验数据并不简同于数学中的一个数,它应包含测量值的大小和单位,一个数值有了单位以后,才具有特定的物理意义,才可以称为是一个物理量。因此,在实验中测量得到的数据,必须包括数值和单位,二者缺一不可。

注意:因绝大多数实验都采用等精度测量,故在本教程中主要讨论等精度测量。

1.1.2 误差

1. 误差的概念

在物理实验中,需要对物理量进行测量。在一定条件下,任何物理量都具有一个客观真实的数据,这个客观真实的数据叫真值(在本书中用 X_0 表示)。真值是客观存在的,但却只是一个理想的概念,因为我们无法准确地知道真值的数值。但在某些具体问题中,可以认为真值是已知的。例如,用伏安法测量电阻,在估计误差时,可以用可靠性更高的电桥的测量结果作为“真值”;又例如,对氦氖激光器的波长,可以使用大家公认、同时又被大量文献采用的 632.8nm 作为“真值”。像这类与真值非常接近、在一定条件下能代替真值的给定值,我们称之为约定真值。

物理实验总是在一定的测量环境和仪器条件下进行,由于测量环境(气压、温度及湿度等)的变化和仪器精度的不同,也由于受测量方法和测量人员等因素的制约,测量结果是不可能绝对准确的。

因此,在任何测量中,测量结果 X 与待测量客观存在的真值 X_0 之间总存在着一定的差异。测量值 X 与真值 X_0 的差值叫做测量误差 ΔX ,简称误差。即

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1-1)$$

误差存在于一切测量之中,也贯穿于整个测量过程。因此,在确定实验方案、选择测量方法或选用测量仪器时,都必须要考虑如何使测量误差更小一些,测量的精度更高一些。同时,也需要对测量结果的可靠性做出评价,对误差的范围做出估计,正确地表达实验结果。从表征被测量这个意义上来说,对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位具有同等重要的意义,三者缺一不可。

本章主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、有效数字处理和实验结果表达等方面的基本知识。这些知识不仅在每个实验中都要用到,而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

2. 误差的表示

1) 绝对误差

在公式(1-1-1)中,测量值与真值之间的差异反映了测量值对真值的绝对偏离,通常把它叫做绝对误差。显而易见的是,绝对误差除了大小以外,还有正负(方向)。注意:绝对误差不是误差的绝对值!

2) 相对误差

绝对误差的大小可反映对同一待测量的测量效果。例如:对质量为 1kg 左右的物体进行测量,绝对误差为 0.1g 的比绝对误差为 0.6g 的测量效果要好。

但是,对于不同的待测量,用绝对误差很难反映出测量的效果(或精度)。例如:对质量为 1kg 左右的物体进行测量,绝对误差是 0.6g;对质量为 0.1kg 左右的物体进行测量,绝对误差是 0.1g。两次测量,究竟哪次的测量效果好一些呢?这时,需要引入相对误差。

相对误差是绝对误差与真值(一般用约定真值或算术平均值来代替)的比值再乘以 100%。如果用 E 表示相对误差,其定义式为

$$E = \frac{X - X_0}{X_0} \times 100\% = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

有了相对误差,对不同待测量的测量效果,很容易就可以判断出来。显然,在上例中,第一次测量的效果要优于第二次。

3. 误差的分类

根据误差产生的原因及其性质,误差主要分为系统误差、随机误差(偶然误差)和粗大误差(过失误差)。

1) 系统误差

在同一测量条件下,多次重复测量同一量时,测量误差的绝对值和符号都保持不变,或在测量条件改变时按一定规律变化的误差,称为系统误差。

显然,系统误差的特点是具有恒定性。产生系统误差的主要因素如下。

(1) 仪器误差。如仪器机构设计原理的缺陷(如尺子刻度偏大、表盘刻度不均匀等);仪器零件制造偏差和安装不正确;电路的原理误差和电子元器件性能不稳定等。

(2) 环境误差。测量时的实际环境条件(温度、湿度、大气压、电磁场等)对标准环境条件的偏差,测量过程中温度、湿度等按一定规律变化引起的误差。

(3) 理论误差。采用近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差,例如用单摆测量重力加速度时,所用公式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的近似性;又如在实验中一般忽略摩擦、散热、电表的内阻等引起的误差都属于这一类。

(4) 个人误差。因测量者生理上的最小分辨力、感觉器官的反应速度和个人固有习惯,导致在读数时总是偏大或偏小;或在动态测量时,记录快速变化信号总是有滞后的倾向。

系统误差越小,测量就越准确。所以,系统误差经常用来表征测量准确度的高低。

产生系统误差的原因是可以发现的,原则上也可以通过修正、改进加以消除或减小。但消除或减小系统误差比较复杂,没有固定不变的方法,要具体问题具体分析。常用的分析方法有实验对比法、理论分析法和数据分析法。消除或减小系统误差常用的方法:①从

产生系统误差的根源上消除;②引入修正项消除系统误差;③采用能消除系统误差的方法进行测量。

2) 随机误差

在相同测量条件下,多次测量同一物理量时,误差的绝对值符号的变化,时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差称为随机误差(或偶然误差)。

随机误差的显著特点是:在任意一次测量之前,测量者都无法事先预计误差的大小和方向,随机误差具有不可控制性和无法预测性。

随机误差来源于各种偶然的和不确定的因素。例如实验仪器受到温度变化、湿度变化、气压起伏、噪声干扰、照度变化、实验台微小震动等环境因素的影响;电源电压的波动;外界电磁场的干扰;零件摩擦和配合间隙导致实验仪器精密度的波动;测量者注意力转移和感官灵敏度的变化等都可以引起测量值的变化。通常这些因素的影响是微小的,而且很难确定其中某个因素产生的具体影响。因此,找出随机误差的原因并加以排除是极为困难的。

当测量次数很多时,随机误差就呈现明显的规律性,服从一定的统计规律。随机误差最典型的统计分布是正态分布(或高斯分布)。

以某物理量的测量值 x 为横轴,以测量值的概率密度 $p(x)$ 为纵轴,标准化的正态分布曲线如图 1-1-1 所示。

标准化的正态分布曲线的函数关系为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2 / 2\sigma_0^2} \quad (1-1-3)$$

其中

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum x_i}{n} \quad (1-1-4)$$

$$\sigma_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x - \mu)^2}{n}} \quad (1-1-5)$$

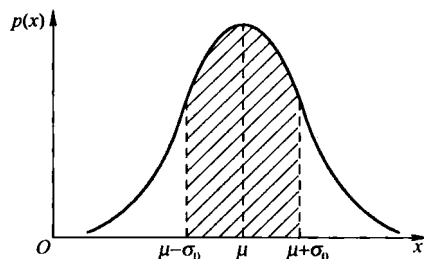


图 1-1-1 正态分布曲线

式中: μ 是被测量量的算术平均值; σ_0 是测量列的标准误差。

对分布曲线进行研究:曲线在 $x = \mu$ 处有一个峰值,这表明被测量值在 $x = \mu$ 处概率密度最大。曲线峰值的横坐标对应于测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时被测量的平均值 μ 。

在横坐标上任一点到 μ 的距离 $(x - \mu)$ 就是与测量值 x 对应的随机误差分量。从图 1-1-1 不难看出:随机误差比较小的概率较大;随机误差比较大的概率较小。

曲线拐点的横坐标与 μ 值之差叫正态分布曲线的标准误差(用 σ_0 表示,标准误差与单次测量值的标准偏差不同,请注意它们之间的差别,详见本教程 1.4.2 多次直接测量随机误差的统计估计),它是表征测量值分散性的重要参数。标准误差 σ_0 的统计意义在于:测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,任何一次测量值与真值之差落在区间 $(-\infty, +\infty)$ 时的概率是 1 (满足归一化条件);落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 时的概率是 0.683 (即置信概率为 $P = 0.683$);落在区间 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 时的概率是 0.954;落在区间 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 时的概率是 0.997。因此,标准误差 σ_0 是一个统计特征值,反映了一定条件下等精度测量随机误差的概率分布情况。