

大学 物理 实验

陈春彩 陈源福 林二妹 编著

第2版

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是依照《理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2023年版)》,根据应用型本科院校的特点,结合编者多年大学物理实验教学经验所编写的教材。

全书共分5章,包含27个实验,按照“基础性实验、提高性实验和综合设计性实验”三个层次的课程体系构筑了本书的框架。书中除了一些经典的实验,还编入适量的设计性、应用性和探索性的综合实验。此外,书中给出相应的物理实验的关键英文词汇,有意识地融入物理实验术语汉英对照,以帮助学生更好地阅读英文文献。每个实验给出了操作演示视频,方便学生学习。

本书可作为应用型本科高等院校工科各专业的大学实验物理课教材,也可作为相关人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 陈春彩, 陈源福, 林二妹编著. -- 2版. -- 北京: 清华大学出版社,
2026. 7. -- ISBN 978-7-302-72195-6

I. O4-33

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026SK3267 号

责任编辑: 朱红莲

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 欧 洋

责任印制: 宋 林

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市天利华印刷装订有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 12.25 字 数: 295 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版 2026 年 7 月第 2 版 印 次: 2026 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 元

产品编号: 116910-01

第2版 前言

FOREWORD

本书出版以来,得到了广大师生和读者的支持与关注。作为高等院校理工科类专业学生的基础实验教材,我们始终致力于构建科学合理、循序渐进、适应应用型人才培养需求的物理实验教学体系。本书所确立的“基础性实验—提高性实验—综合设计性实验”三个层次模块化课程结构,在教学中取得了良好效果,有效促进了学生实验技能与科学素养的阶梯式提升。

为深入贯彻落实新时代全国高等学校本科教育工作会议精神,顺应教育教学数字化、信息化发展趋势,并进一步强化课程育人功能,我们对教材进行了修订与升级,推出第2版。本次修订在保持第1版核心体系与特色的基础上,重点进行以下几方面的充实与优化。

1. 推动信息技术与实验教学深度融合。为帮助学生更好地预习实验、理解关键操作与复杂现象,我们在相关实验项目中新增了配套的实验操作演示视频资源。通过扫描书中二维码,学生可观看实验原理动画、仪器操作演示、现象观察等重点环节视频,使学习过程更加直观、灵活,便于课内外自主学习,提升教学效率与效果。

2. 彰显课程育人价值。本次修订力求实现知识传授、能力培养与价值引领的有机统一。通过在实验背景介绍、科学家故事、科学方法论述、工程应用案例等环节中,自然融入科学精神、工匠精神、创新意识、家国情怀与社会责任等内容,引导学生体会物理实验在科技强国历程中的重要作用,激发探索未知、追求真理的内在动力。

3. 强化学习过程评价与知识巩固。为帮助学生及时检验学习成效,加深对实验原理、方法及数据处理的理解,我们在第2版新增了“综合练习”板块。习题设计注重基础性与启发性相结合,涵盖核心概念辨析、误差分析、数据处理实践及现象解释等,为学生提供自我检测与巩固提升的平台。

4. 拓展实验教学的深度与广度。为满足学有余力及对物理学有浓厚兴趣学生的需求,部分实验项目后设置了“课后延展”内容。该部分介绍与实验相关的现代应用、技术前沿、交叉学科联系或更深入的探究问题,旨在开阔学生视野,激发创新思维,培养主动探究和解决复杂问题的能力。

5. 保持并优化教材原有特色。第2版继续保留分层次、模块化的课程体

系,以及详细的实验叙述与清晰的数据处理指导。同时,对第1版中深受好评的物理实验关键英文词汇渗透特色予以保留并加以完善,继续以“沐浴式”分散呈现,服务于有国际化学习需求的学生,且保持其作为可选拓展内容的灵活性。

本次修订工作凝聚了编者团队近年来在教学改革实践中的新思考与新经验,也汲取了使用本教材的众多师生所反馈的宝贵建议。我们衷心希望《大学物理实验》(第2版)能够更好地服务于应用型本科院校的物理实验教学,助力学生扎实掌握实验基本技能,系统训练科学思维方法,逐步养成严谨求实的科学态度与开拓创新的探索精神。

全书第1、2章和第3章的实验一~实验八由陈春彩修订;第3章的实验十~实验十六和综合练习由陈源福修订;第3章的实验九、实验十和第4、5章及附录由林二妹修订。

限于作者水平,书中难免存在疏漏与不足之处,恳请各位专家、老师和同学继续提出宝贵意见,以便我们不断完善。

作 者

2026年3月

于闽南理工学院

第1版 前言

FOREWORD

本教材依照《非物理专业大学物理实验课程教学基本要求》，根据应用型本科院校的特点，结合编者多年大学物理实验教学经验编写而成。

全书共5章。第1章系统地介绍了大学物理实验课程的基本要求、任务及其考核方式；第2章较为全面地阐述了测量误差、不确定度及数据处理的基础知识；第3章是基础性实验；第4章是提高性实验；第5章则是综合设计性实验。

本教材编写的主要特点是：

1. 结合应用型本科院校学生文化基础知识差异较大的特点，为满足对基础不同的学生的培养需求，构建了面向非物理学类专业工科本科生的分层次、组合式、模块化的大学物理实验课程体系，突破传统的力、热、电、磁、光及近代物理的排列顺序，把整个实验教学过程分为基础性实验、提高性实验和综合设计性实验三个层次。从简单到复杂，由浅到深，从学习知识到培养综合能力，逐步提高学生的实验技能。

2. 在内容叙述上，力求做到实验目的明确，原理叙述清楚，实验内容安排得当，步骤详尽。在每个基础性实验项目后设有数据处理要求和思考题，着重训练学生的物理实验数据处理方法。

3. 教材中给出了相应的物理实验的关键英文词汇，有意识地进行英语专业词汇的渗透，每堂课所渗透的词汇量是分散式的，学生习得的方式是沐浴式的，既能丰富学习内容，又加深学生对物理知识的理解和记忆。英语词汇内容还可作为学生拓展内容，删除也不影响整本书的完整性和连续性。

实验课教学是一项集体的事业，从实验内容的确定、项目的建设、实验讲义的编写，到实验教学内容的完成，都凝聚着大学物理教研室全体教师和实践中心相关实验技术人员的智慧和劳动成果。本书的编写得到了闽南理工学院领导的大力支持，得到了陈春荣老师的悉心指导。全书由陈春彩担任主编，陈源福、林二妹为副主编，对本书出版付出努力和提出宝贵建议的人有：陈春荣、骆明辉、陈荣泉、施一峰、郑亚玉、彭川来、王丽君、章进炳等，编者在此表示深深的感谢！对本书内容沉淀做出贡献的所有教师表示衷心的感谢！本书的编写工作得到了外国语学院郑小娟老师的大力支持，在此一并表示深深的谢意！

同时,向本书编写过程中参阅的书籍、文献的作者表示感谢!

本书的作者分工如下:

陈春彩负责统稿和编写前言、第1、2、3章的实验一~实验八;陈源福编写第3章的实验十一~实验十六;林二妹编写第3章的实验九、实验十和第4、5章及附表部分。

限于编者水平,加上时间仓促,书中不足之处在所难免,恳请有关老师和读者批评指正,以便今后再版时订正,使我们的教材不断完善。

编 者

2018年5月

于闽南理工学院

目 录

CONTENTS

第 1 章	绪论	1
1.1	物理实验的地位和作用	1
1.2	物理实验课的教学目的	2
1.3	物理实验的基本环节	2
1.4	物理实验室规则	4
第 2 章	测量误差与数据处理	5
2.1	测量与误差	5
2.1.1	测量	5
2.1.2	测量的误差	6
2.1.3	误差的处理	6
2.2	测量不确定度简介	7
2.2.1	测量不确定度的分类	8
2.2.2	不确定度的合成与相对不确定度	9
2.3	测量结果表示	9
2.4	直接测量结果与不确定度的估算	10
2.4.1	单次直接测量的不确定度	10
2.4.2	多次直接测量的不确定度	10
2.4.3	直接测量结果的表示方法	10
2.4.4	直接测量的数据处理举例	11
2.5	间接测量结果与不确定度的估算	11
2.5.1	间接测量的最佳值	11
2.5.2	间接测量的不确定度	12
2.5.3	间接测量的结果表达式	13
2.5.4	间接测量的数据处理举例	13
2.6	有效数字及其运算法则	14
2.6.1	有效数字的基本概念	14
2.6.2	测量结果有效数字的确定法则	15
2.6.3	有效数字的运算法则	16
2.7	实验数据处理的基本方法	17

2.8 实验报告书写样板	20
习题	23
附录 1	24
第3章 基础性实验	25
实验一 固体密度的测量	25
实验二 刚体转动惯量的测量	32
实验三 杨氏模量的测定	38
实验四 惠斯通电桥法测电阻	43
实验五 用电位差计测量电动势	47
实验六 电表改装与校正	52
实验七 磁悬浮动力学实验	59
实验八 示波器的使用	66
实验九 霍尔效应	77
实验十 牛顿环的干涉	85
实验十一 分光计的调整和折射率的测定	90
实验十二 用衍射光栅测波长	97
实验十三 迈克耳孙干涉仪	101
实验十四 空气中声速的测量	106
实验十五 液体黏滞系数的测量	112
实验十六 不良导体导热系数的测定	116
第4章 提高性实验	124
实验十七 模拟法描绘静电场	124
实验十八 菲涅耳双棱镜干涉	129
实验十九 单缝衍射实验	133
实验二十 偏振光的研究	136
实验二十一 硅光电池的偏置电路与特性参数测量	140
第5章 综合设计性实验	146
实验二十二 三线摆法测量物体的转动惯量	146
实验二十三 电表内阻的测量	148
实验二十四 用分立器件设计电表的扩大量程实验	150
实验二十五 研究光栅的特性	151
实验二十六 细丝直径的测量和工件表面平整度的检验	153
实验二十七 光敏电阻光电特性的研究	156
综合练习(一)	158
综合练习(二)	160
综合练习(三)	163
综合练习(四)	165
综合练习(五)	167

综合练习参考答案	170
参考文献	175
附录 1 中华人民共和国法定计量单位	176
附录 2 一些常用基本物理常数	180

绪论

1.1 物理实验的地位和作用

物理学是一门基础自然科学,它研究物质存在的基本形式及其内部结构和物质运动的基本规律。物理学的基本理论渗透到自然科学的许多领域,应用于生产技术的各个部门,它是自然科学的许多领域和工程技术的基础,对人类未来的进步起着关键的作用。纵观整个近代文明史,物理学的每一次重大突破,都对社会生产力的发展产生决定性的影响。热力学的创立与应用,促进了以蒸汽机为代表的第一次工业革命;电磁学的发展与完善,产生了以电气化为特征的第二次工业革命;20世纪以来,物理学的一系列重大进展和突破,把人类社会带入了计算机、激光、太空、核能、生物工程等高新技术领域。可以说,人类生活和物理学息息相关。

“物理学是以实验为本的科学。”这一精辟论述来自诺贝尔物理学奖获得者、理论物理学家杨振宁教授的一则题词,它表达了物理学界的共同见解,抓住了物理学的根本特征。在物理学的发展中,无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都要取决于实验。例如,伽利略用实验否定亚里士多德“力是维持物体运动的原因”的论断;杨氏双缝干涉实验验证了光的波动性;赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得人们的普遍认可;卢瑟福的 α 粒子散射实验揭开了原子的秘密;迈克耳孙-莫雷实验证实了“以太”的不存在。这些事例中,实验都起了决定性的作用。另外,实验还是物理理论演变、发展的动力。例如,20世纪初,迈克耳孙-莫雷实验的零结果不能很好地被经典物理学所解释,在此基础上爱因斯坦建立了相对论;黑体辐射和光电效应等一系列实验事实与经典物理理论严重矛盾,导致了量子力学的产生。同时,实验也是理论付诸应用的桥梁。热核聚变理论指出,通过热核聚变可以获得巨大的能量,但是想要很好地利用它,还需要通过许多艰苦的实验才能实现。当然,科学实验不仅是理论研究活动的基础,也离不开理论的指导。实验研究课题的选择,实验的构思和设计,实验方法的确定,实验数据的处理,以及由实验结果中提出的科学假设和科学结论,等等,都始终受理论支配。物理学的发展是在实验和理论相互推动、密切结合下进行的,实验和理论在物理学中具有同等重要的地位。

物理实验是实验科学的重要组成部分,它的方法具有一定的普遍性,今后在探索和开拓新的科技领域的过程中,物理实验仍然是一个有力的工具。所幸的是,在物理学发展过程

中,人类积累了丰富的实验方法,创造出各种精巧的仪器设备,涉及广泛的物理现象,这就使物理实验课有了充实的教学内容。“大学物理实验”是理工科学生进行科学基础训练的重要实践环节,是和“大学物理”并行开设的一门独立的必修的基础课程,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。理工科学生学好物理学和物理实验,将会观察到许多生动的自然现象,获得进行科学实验的基本技能和经验,提升分析问题和解决实际问题的能力,对后继专业课程的学习以至于从事科学技术工作将起到重要的作用。

1.2 物理实验课的教学目的

物理实验课是一门实践性课程,它的教学培养目标是:

(1) 通过物理实验现象的观察、分析和对物理量的测量,使学生进一步掌握物理实验的基本知识、基本方法和技能,并能运用物理原理、物理实验的方法来研究物理现象,总结物理规律,加深对物理原理的理解。

(2) 培养和提高学生科学实验能力。包括:①自学能力。要求学生能够自行阅读教材或参考资料,正确理解实验内容,做好实验前的准备。②动手能力。要求学生能够借助教材和仪器说明书,正确调整和使用常用仪器设备。③表达书写能力。要求学生能正确记录和处理实验数据,绘制表格,说明实验结果,撰写合格的实验报告。④初步具备运用物理学理论,对实验现象进行初步的分析和判断的思维能力。⑤初步的设计能力。对学有余力的学生,要求能够根据课题的需要,对简单的实验题目,确定实验方法和实验条件,合理选择仪器,拟定实验步骤,写出实验注意事项。

(3) 培养和提高学生从事科学实验的素质。包括理论联系实际和实事求是的科学作风;严肃认真的工作态度;不怕困难,主动进取的探索精神;遵守操作规程,爱护公共财物的优良品德。

实验能力和良好的工作作风是通过每一个具体实验逐步培养起来的,因此要求每个学生应认真对待每一次实验,认真做好每一个实验。

1.3 物理实验的基本环节

物理实验是学生在教师指导下独立进行实验的一种实践活动,要求学生投入较大的精力,并且具有较强的独立工作能力。学好物理实验课的关键在于把握以下几个基本环节。

1. 课前预习(preparation before experiment)

首先根据每学期学校下发的课程表,找到自己所在实验组对应轮次应该做的实验项目,仔细阅读实验教材的相关内容,也可借助计算机网络事先对相关知识进行预习和实验前的准备,并把预习报告事先写在实验报告的相关栏目上。预习报告的内容包括以下几部分:

(1) 实验名称。

(2) 实验目的。简要说明实验所要解决的主要问题。

(3) 实验原理。简要阐述实验所依据的物理定律或主要公式,包括必需的文字叙述、原理图、公式及其推导或说明。

(4) 实验仪器。说明所用仪器的型号、规格和量程。

(5) 实验注意事项。实验前必须牢记该实验的注意事项,否则,可能造成仪器损坏,甚至发生人身伤害事故。

(6) 实验步骤和主要内容。清楚实验的操作程序,对所测的内容尽量做到心中有数。

(7) 数据记录表格。根据实验操作步骤,提前设计好测量数据记录表格,并绘制在实验报告上,以便实验过程中随时将实验数据按顺序填入表中。也方便随时观察和分析数据的规律性。

另外,由于实验课的课内时间有限,而熟悉仪器和测量数据的任务一般都比较繁重,因此,进入实验室前,教师将对预习报告进行检查。预习情况不合格者或未做预习报告者,将被取消该次实验资格。

2. 课堂实验(classroom experiment)

实验开始前,首先要结合仪器实物,对照实验教材或仪器说明书,认识和熟悉仪器,了解仪器的工作原理和使用方法;其次要全面且仔细地想一想实验的操作程序,不要急于动手。依照确定的实验步骤,按照要求安装和调整好仪器。使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件(如天平调水平和平衡)。测量时,应集中精力、细心操作、仔细观察,并即时将实验数据记录在设计好的实验数据表格内。要根据仪器的最小刻度单位或准确度等级来定实验数据的有效数字位数和单次测量误差,以免丢失有效数字位数。如果确实是记错了或者重做测量时,不要将原记录涂涂改改,而是用笔在原记录上画一横线,更改后的数据应填写在清晰的空位上,或另画表格记录。记录数据要实事求是,不得弄虚作假。抄袭别人的记录,或为凑合“理想”的结果而修改测量数据,是一种反科学的行为,一经发现,该次实验成绩按不合格处理。

实验数据是否合理,学生应首先自查,然后交给指导老师审阅、签字。实验完毕,应自觉整理好仪器,并做好清洁工作。

3. 实验报告的书写(writing the experiment report)

书写实验报告的目的是培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力。实验报告要求文字通顺、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确。

一份完整的实验报告应包括:①实验名称;②实验目的;③实验原理;④实验仪器;⑤注意事项;⑥实验步骤;⑦原始实验数据记录;⑧数据处理与讨论等内容。以上①~⑥都是预习的内容,要求在实验前写好,必要时在实验课后进行修正和补充。原始实验数据记录是现场记录的原始凭证,不允许课后在它上面做任何修改,也不允许将它作为计算表格。实验报告纸上必须重新列出数据表格,将记录的实验数据重新列于表中,并将原始记录单附在实验报告中。数据处理要写出数据计算的主要过程、误差分析和最终的实验结果,有些实验还需绘制图表等。对实验过程和结果的讨论内容一般不限,可以是实验中现象的分析,对实验关键问题的研究体会,实验的收获和建议,也可以是回答教材里的思考题。

大学物理实验课程的实验报告应在该实验后的下一次实验课交给指导老师进行批改。

4. 考试(examination)

大学物理实验成绩由两部分组成,即平时成绩和期末考试卷面成绩。平时成绩由预习、实验课堂纪律、操作技能、实验报告的成绩确定,占总成绩的70%。期末考试卷面成绩占总成绩的30%,但是不参加期末考试者,总成绩为不合格。期末考试形式是抽签开卷考试,考

试时间每人 40 分钟,内容一般是所有必修实验中随机抽取一个并按考试卷面要求进行现场实验操作和相关数据处理等。

1.4 物理实验室规则

(1) 学生进实验室前需带上预习报告,经教师检查同意后,方可进行实验。

(2) 遵守课堂纪律,不得无故旷课,不得迟到,不得随意串组、换位置,注意保持实验室的安静和卫生。如遇到仪器发生故障,应及时报告教师。

(3) 爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器,实验中严格按照实验教材或仪器说明书操作,如仪器有损坏,应填写损坏报告。公用工具用完后,应随手放回原处。

(4) 做完实验,实验结果应交给指导教师检查。教师在原始记录上签字后,才能整理仪器,离开实验室。

(5) 及时提交实验报告。

测量误差与数据处理

研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量,测量是物理实验的基础。然而,任何测量都存在一定误差,要评价测量结果的可信程度,必须对测量误差做出评定。误差理论及数据处理是一切实验结果中不可缺少的内容,是不可分割的,因此,误差分析和数据处理是物理实验课的基础。由于这部分内容牵涉面较广,对学生来说,其难度较大,而且这方面问题的深入探讨和详细证明是数理统计学的任务,所以这里仅限于简要介绍这方面的初步知识,引用几个重要概念及最一般情况下的处理方法,并作简化处理,不进行严密的数学论证,以减少学生学习的难度,这样处理也有助于学生学好物理实验这门基础课程。

2.1 测量与误差

2.1.1 测量

测量是把被测量的物理量与选定的同类单位量进行比较。例如,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 17.65%,则书的长度为 17.65cm,或 0.1765m。测量结果的数值大小和选择的单位有密切关系。同一个量,测量时选择的单位越小,结果数值就越大,所以任何测量结果都必须标明单位。测量值用一个没有单位的纯数表示是毫无意义的。

测量分为直接测量与间接测量。

直接测量(direct measurement)是指能用仪器直接将待测量与选定的同类单位进行比较,即直接在仪器上读出待测量的值。例如,用米尺测量长度,用天平称质量,用秒表测时间等。

间接测量(indirect measurement)是指不能用仪器直接测量出结果,而是由若干直接测量量通过一定的函数关系(公式、定律)进行计算,从而求出待测量。如直接测出摆长 l 及周期 T ,通过公式 $T=2\pi\sqrt{l/g}$,求出重力加速度 g 。

等精度测量(measurement for equal precision): 在同一条件下,对同一物理量的多次测量称为等精度测量。若测量条件发生变化,则为不等精度测量。本书所讨论的测量均为等精度测量。

2.1.2 测量的误差

真值(truth-value)是指待测量客观的真实值。**测量值(measured value)**是指通过测量得到的待测量的数值。测量值与真值之间总是存在着差异,我们把这个差异称为测量误差。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度。测量误差可用绝对误差表示,也可用相对误差表示。

测量值 x 与真值 X 之差称为**绝对误差(absolute error)** Δx ,简称误差。绝对误差=测量值-真值,用公式表示如下:

$$\Delta x = x - X \quad (2-1)$$

相对误差(relative error)指绝对误差 Δx 与真值 X 的比,用 E_r 表示,即

$$E_r = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \quad (2-2)$$

测量的误差按产生的原因和性质分为两类:系统误差、随机(偶然)误差。

系统误差(systematic error): 公式与定律不严格,仪器本身的缺陷,实验者自身的不良习惯等原因而产生的误差。

随机(偶然)误差(random error): 由许多不稳定的偶然因素产生的误差。例如,测量环境温度、气压的偶然变化,电流或电压的起伏波动等偶然因素引起的误差。在测量次数足够多的情况下,随机误差服从一定的统计规律,测量结果总是在真值附近。

2.1.3 误差的处理

要进行测量,就会有误差存在;要测量得准确,就需要减少或消除测量误差。

1. 系统误差的处理

可以通过修订公式或定律,改进仪器,纠正不良测量习惯等来消除或减小系统误差。

2. 随机误差的处理

1) 随机误差的统计规律

理论与实践均表明,一组等精度测量数据的随机误差服从一定的统计规律,常见的统计规律是正态(高斯)分布,如图 2-1 所示。横坐标为误差 Δx ,纵坐标为误差出现的概率密度 $f(\Delta x)$,则有

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n}}, \quad n \rightarrow \infty \quad (2-3)$$

这里, σ 称为测量列 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 的标准误差。

图 2-1 中阴影部分的面积是测量列 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 中的任意测量值落在区间 $(X-\sigma, X+\sigma)$ 中的概率,其值的大小为 68.3%。

式(2-3)是测量次数为无限次时的标准误差公式。由于实际测量中,测量次数只能是有

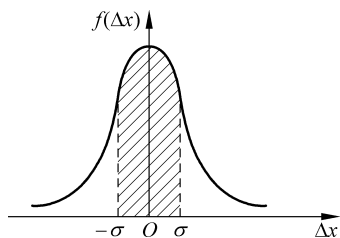


图 2-1 正态分布的误差曲线

限次,而且被测量的真值也不可能准确知道,因此这一标准误差公式只具有理论意义。

2) 随机误差的实际估算

设在一组测量中, n 次测量的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$,其真值的最佳估计值是它们的**算术平均值(arithmetic mean value)**,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-4)$$

从统计意义来说,算术平均值最接近真值。

各次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差称为各次测量的**偏差(deviation)**或**残差(residual)**,即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (2-5)$$

偏差 v_i 是在有限次测量的情况下,用算术平均值代替真值计算出现的误差。偏差与误差不同,标准误差多用于理论分析,而实际的误差估算通常使用偏差。

由于 v_i 可知,而 $\Delta x_i (\Delta x_i = x_i - X)$ 不可知,因此只能用偏差代替误差计算,测量列 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 标准误差的估计值称为**标准偏差(standard deviation)**,用 S 表示,即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-6)$$

式(2-6)称为**贝塞尔公式(Bessel Formula)**,它是求实验标准偏差的常用计算公式。

可以证明,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-7)$$

3) 算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差

从统计意义来说,算术平均值 $\bar{x}$ 比每一测量值更接近真值,但算术平均值 $\bar{x}$ 也是一个随机变量,即完全相同的条件下,进行 m 组有限的 n 次重复测量的平均值不尽相同,也具有离散性,因此也存在标准偏差。可以证明,算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $S(\bar{x})$ 为

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2-8)$$

$S(\bar{x})$ 表示在 $[\bar{x} - S(\bar{x}), \bar{x} + S(\bar{x})]$ 范围内包含真值 X 的概率为68.3%。在实际中,常用 $S(\bar{x})$ 作为测量结果随机误差的估算式。

2.2 测量不确定度简介

测量始终存在误差,被测量的真值实际上是无法知道的,因此根据误差的定义,测量误差是测量值与真值之差,自然也无法求出。测量不但要得到被测量的最佳估计值,而且要对其可靠性做出评价。

不确定度(uncertainty)是指由于误差的存在而对被测量不能肯定的程度,是对被测量

的真值以一定概率落在某一量值范围内的一个评定。也就是说,不确定度是与测量相联系的一种参数,用于表征测量值的可能的分散情况。显然,不确定度小,测量结果可信程度高;不确定度大,测量结果可信程度低。

误差与不确定度的区别:误差定义为测量值与真值之差,真值不可知,则误差也就无法知道。通过估算,可以得到标准偏差等量,但它们并不能表示测量结果误差数值的大小,只是表示测量结果的不确定性。与误差的定义不同,不确定度是可观测量,误差是不可观测量。

2.2.1 测量不确定度的分类

测量不确定度按评定方法的不同分为两大类。

1. A 类不确定度(type A uncertainty)

凡是可以通过统计方法计算的不确定度称为 A 类不确定度,用 u_A 表示。在物理实验中,约定 A 类不确定度取算术平均值的实验标准偏差,即

$$u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-9)$$

2. B 类不确定度(type B uncertainty)

凡是不能通过统计方法计算,只能通过其他方法估算的不确定度称为 B 类不确定度,用 u_B 表示。在物理实验中,约定 B 类不确定度是将测量仪器的误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 折合成等价的标准偏差。仪器的误差限一般在仪器的说明书中注明(见表 2-1),并约定仪器误差均匀分布,则仪器的 B 类不确定度 u_B 为

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} \quad (2-10)$$

表 2-1 物理实验中的仪器误差限(正确使用仪器) $\Delta_{\text{仪}}$

仪 器	$\Delta_{\text{仪}}$ 或其计算参数	备 注
米尺(最小刻度 1mm)	0.5mm	
游标卡尺(20 分度,50 分度)	最小分度值(0.05mm,0.02mm)	
螺旋测微计(0~50mm)	0.004mm	
物理天平(0.1g)	0.05g	
各类数字仪表	仪器最小读数	
分光计	最小分度值(30',1')	
电磁仪表(指针式)	(AK)%	A——量程,K——准确度等级

仪器的误差限在仪器出厂时会在说明书中标注或可在某些技术标准中查到:

(1) 在仪器上直接标出或用准确度表示;如 50 分度的游标卡尺的分度值为 0.02mm,其 $\Delta_{\text{仪}}=0.02\text{mm}$;

(2) 给出仪器的准确度级别,然后算出 $\Delta_{\text{仪}}$ 。如常用电学指针式仪表所用的量程为 A ,准确度等级为 K ,则 $\Delta_{\text{仪}} = A \cdot K\%$ 。例如,0.5级 mA 表的量程为 10mA 时,仪器的误差限为

$$\Delta_{\text{仪}} = 10\text{mA} \times 0.5\% = 0.05\text{mA}$$

若未注明仪器误差限或仪器误差限不清楚,则按如下规定:能连续读数(可对最小分度下一位进行估计)的仪器,取最小分度的一半作为仪器的误差限,如米尺、读数显微镜等;不能连续读数或指针跳跃式移动的仪器,其最小分度为仪器误差限,如机械秒表、数字仪表等。

2.2.2 不确定度的合成与相对不确定度

测量不确定度一般包括若干分量,将这些分量合成后的不确定度称为合成标准不确定度,用符号 u_x 表示,下标 x 为测量物理量的符号。正确反映测量的不确定度,不能简单地将 u_A 和 u_B 代数相加,最合理的合成方法是方和根合成法。

若两类不确定度各分量 $u_{A1}, u_{A2}, \dots, u_{Ai}$ 和 $u_{B1}, u_{B2}, \dots, u_{Bi}$ 彼此独立,则测量结果的合成标准不确定度(combined standard uncertainty) u_x 为

$$u_x = \sqrt{\sum_i (u_{Ai})^2 + \sum_i (u_{Bi})^2} \quad (2-11)$$

对正态分布而言,合成标准不确定度的置信概率只有 68.3%。

实际测量中经常用扩展不确定度来表达测量的不确定度。对不确定度进行适当的扩大后可以达到更大的置信概率。扩展不确定用符号 U_x 表示,它是合成不确定度的倍数,即 $U_x = k u_x$,式中 k 为置信因子,可取 1、2 或 3。

对于测量结果,有时根据需要也有用相对不确定度补充说明测量的不确定度。相对不确定度(relative uncertainty)用符号 E_x 表示,定义为

$$E_x = \frac{u_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2-12)$$

即相对不确定度等于合成不确定度与被测量的算术平均值之比。

2.3 测量结果表示

测量的目的是确定被测量的值或获取测量结果,测量结果的完整表述应包括估计值、测量值单位及测量不确定度。众所周知,没有测量单位的数据不能表征被测量的大小,没有测量不确定度的测量结果不能评定测量的质量,从而失去或削弱了测量结果的可用性和可比性。按照国际计量局 1980 年的建议,被测量 x 的测量结果表示成

$$x = \bar{x} \pm u_x (\text{单位}) \quad (2-13)$$

式中, x 为测量结果; $\bar{x}$ 为被测量的算术平均值; u_x 为测量的不确定度。因此,被测量的测量结果表示式由 3 部分组成,即被测量的算术平均值、不确定度和单位。

2.4 直接测量结果与不确定度的估算

2.4.1 单次直接测量的不确定度

在具体的实验中,有的测量只需测量一次。对于单次测量,其测量不确定度只能进行特殊的简化处理。在简化处理中,一般不考虑不确定度 A 类分量。因此,单次测量的合成不确定度就是不确定度 B 类分量 u_B ,即

$$u_x = u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (2-14)$$

2.4.2 多次直接测量的不确定度

假设对某直接测量物理量 x 进行 n 次重复测量,其不确定度的评定步骤一般如下:

(1) 修订测量数据中的可定系统误差,进行测量数据的检验并剔除所有坏值;

(2) 计算测量的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 作为测量结果的最佳值;

(3) 计算测量的 A 类不确定度 u_A ,其中 $u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$;

(4) 分析测量的条件和测量仪器的极限误差 $\Delta_{\text{仪}}$,以及 B 类不确定度 u_B ,其中 $u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$;

(5) 计算合成不确定度 $u_x = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$ 或扩展不确定度 $U_x = k u_x$ ($k=1, 2, 3$, 对应的置信概率分别为 0.683、0.955 或 0.997)。

2.4.3 直接测量结果的表示方法

一个没有标明不确定度的测量结果是没有科学价值的。一个测量结果的完整和正确表示如下。

1. 直接单次测量结果的表示

测量结果的表示式为

$$x = \bar{x} \pm u_B (\text{单位})$$

其中, $u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$ 。

2. 直接多次测量结果的表示

测量结果的表示式为

$$x = \bar{x} \pm u_x (\text{单位})$$

式中, $u_x = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$, $u_A = S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$, $u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$ 。

2.4.4 直接测量的数据处理举例

例 2-1 用螺旋测微计测小球的直径, 5 次测量值分别为 5.499mm, 5.500mm, 5.499mm, 5.498mm, 5.498mm, 求小球直径。

解: 小球直径的算术平均值为

$$\bar{d} = \left(\sum_{i=1}^5 d_i \right) / 5 = 5.500 \text{ mm}$$

不确定度 A 类分量 $u_A = S(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}{5(5-1)}} = 0.00037 \text{ mm}$

不确定度 B 类分量 $u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = 0.004 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.0023 \text{ mm}$

合成不确定度 $u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00037^2 + 0.0023^2} \text{ mm} = 0.003 \text{ mm}$

小球直径的测量结果 $d = \bar{d} \pm u_d = (5.500 \pm 0.003) \text{ mm}$

例 2-2 用 $\Delta_{\text{仪}} = 0.01 \text{ g}$ 的天平称量某物的质量, 共称 5 次, 数据(单位: g)分别为 57.161, 57.164, 57.168, 57.165, 57.165, 写出结果表达式。

解: 质量的算术平均值为

$$\bar{m} = \left(\sum_{i=1}^5 m_i \right) / 5 = 57.1646 \text{ g}$$

不确定度 A 类分量 $u_A = S(\bar{m}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (m_i - \bar{m})^2}{5(5-1)}} = 0.00224 \text{ g}$

不确定度 B 类分量 $u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = 0.01 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.00577 \text{ mm}$

合成不确定度 $u_m = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00224^2 + 0.00577^2} \text{ g} = 0.007 \text{ g}$

小球直径的测量结果 $m = \bar{m} \pm u_m = (57.165 \pm 0.007) \text{ g}$

2.5 间接测量结果与不确定度的估算

在很多实验中, 我们进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的解析式计算出来的。这样一来, 直接测量结果的不确定度就必然影响到间接测量结果, 这种影响的大小也可以由相应的解析式计算出来。即间接测量的算术平均值与合成不确定度由直接测量结果通过函数式计算得出。

2.5.1 间接测量的最佳值

设间接测量所用的函数式为

$$N = F(x, y, z, \dots)$$

其中, N 是间接测量的结果, x, y, z 是直接测量的结果, 它们是相互独立的量。若按照直接测量量数据处理程序, 求出各直接测量量的结果如下:

$$x = \bar{x} \pm u_x, \quad y = \bar{y} \pm u_y, \quad z = \bar{z} \pm u_z, \dots$$

将各直接测量的最佳估计值代入函数关系式中, 可求得间接测量的最佳值, 即把各参量中的最佳值 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots$ 代入函数中, 便得到间接测量量 N 的算术平均值为

$$\bar{N} = F(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \quad (2-15)$$

2.5.2 间接测量的不确定度

考虑到不确定度合成的统计性质, 在大学物理实验中, 一般采用方和根合成法估计间接测量结果的标准偏差不确定度, 则间接测量量 N 的合成不确定度为

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (2-16)$$

间接测量量的相对不确定度为

$$E_N = \frac{u_N}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots} \quad (2-17)$$

若间接测量量的函数式以和差运算为主, 则先计算不确定度 u_N 比较方便, 详见例 2-3; 若以乘除运算为主, 则先计算相对不确定度 E_N 比较方便, 如例 2-4 所示。

例 2-3 已知 $N = x + y - z$ 为和差关系, 且各直接测量量相互独立, 其结果 $x = \bar{x} \pm u_x, y = \bar{y} \pm u_y, z = \bar{z} \pm u_z$ 。

解: N 的算术平均值为

$$\bar{N} = \bar{x} + \bar{y} - \bar{z}$$

合成不确定度为

$$u_N = \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial z}\right)^2 u_z^2}$$

因为

$$\frac{\partial N}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial N}{\partial y} = 1, \quad \frac{\partial N}{\partial z} = -1$$

所以

$$u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$$

相对不确定度为

$$E_N = u_N / \bar{N}$$

例 2-4 已知 $N = x \cdot y / z$ 为乘除关系, 已知各直接测量量相互独立, 且其各自的结果为 $x = \bar{x} \pm u_x, y = \bar{y} \pm u_y, z = \bar{z} \pm u_z$ 。

解: 算术平均值 $\bar{N} = \bar{x} \cdot \bar{y} / \bar{z}$, 相对不确定度由式(2-17)得

$$E_N = \frac{u_N}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 u_z^2 + \dots}$$

具体计算过程如下：

对 $N = x \cdot y / z$ 两边取对数,得

$$\ln N = \ln x + \ln y - \ln z$$

将 $\ln N$ 分别对 x, y, z 求偏导数,可得

$$\frac{\partial \ln N}{\partial x} = \frac{1}{x}, \quad \frac{\partial \ln N}{\partial y} = \frac{1}{y}, \quad \frac{\partial \ln N}{\partial z} = -\frac{1}{z}$$

则相对不确定度为

$$E_N = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial x}\right)^2 u_x^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial y}\right)^2 u_y^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial z}\right)^2 u_z^2} = \sqrt{[u_x/\bar{x}]^2 + [u_y/\bar{y}]^2 + [u_z/\bar{z}]^2}$$

合成不确定度为

$$u_N = \bar{N} \cdot E_N$$

附：常用函数的不确定度 u_N 传递公式见表 2-2。

表 2-2 常用函数的不确定度传递公式

函数式	不确定度传递公式
$N = x + y$	$u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$
$N = x - y$	$u_N = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$
$N = ax + by + cz$	$u_N = \sqrt{au_x^2 + bu_y^2 + cu_z^2}$
$N = xy$	$u_N / N = \sqrt{(u_x/x)^2 + (u_y/y)^2}$
$N = x/y$	$u_N / N = \sqrt{(u_x/x)^2 + (u_y/y)^2}$
$N = x^a y^b z^{-c}$	$u_N / N = \sqrt{a^2 (u_x/x)^2 + b^2 (u_y/y)^2 + c^2 (u_z/z)^2}$
$N = \sin x$	$u_N = \cos x u_x$
$N = \ln x$	$u_N = u_x / x$

在应用不确定度传递公式估算间接测量量的不确定度时,应注意：如果间接测量量中的某几个直接测量量是单次测量,那么直接用单次测量的结果及不确定度代入不确定度传递公式进行计算。

2.5.3 间接测量的结果表达式

间接测量结果的完整表示与直接测量类似,写成以下形式：

$$N = \bar{N} \pm u_N (\text{单位}) \quad (2-18)$$

式中, $\bar{N}$ 是间接测量量的最佳值。

2.5.4 间接测量的数据处理举例

例 2-5 用螺旋测微计测圆柱体的体积,已知其直径的算术平均值 $\bar{d} = 1.008\text{cm}$, d 的不确定度 $u_d = 5.88 \times 10^{-4}\text{cm}$, 圆柱体高度的算术平均值 $\bar{h} = 1.0110\text{cm}$, h 的不确定度 $u_h =$

$3.47 \times 10^{-4} \text{ cm}$, 求圆柱体的体积。

解: 圆柱体的体积 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$, 为乘除关系, 则应先计算相对不确定度。

算术平均值为

$$\bar{V} = \frac{1}{4}\pi \bar{d}^2 \bar{h} = 0.8064 \text{ cm}^3$$

对 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ 两边取对数, 可得

$$\ln V = \ln \frac{\pi}{4} + 2 \ln d + \ln h$$

则

$$\frac{\partial \ln V}{\partial d} = \frac{2}{d}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h}$$

相对不确定度为

$$E_V = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln V}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial \ln V}{\partial h}\right)^2 u_h^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2 u_h^2} = 0.12\%$$

则合成不确定度为

$$u_V = E_V \cdot \bar{V} = 0.8064 \text{ cm}^3 \times 0.12\% = 0.001 \text{ cm}^3$$

圆柱体体积的测量结果为

$$V = \bar{V} \pm u_V = (0.806 \pm 0.001) \text{ cm}^3$$

2.6 有效数字及其运算法则

任何物理量的测量都存在误差, 所以表示测量结果的数值位数不能任意取位, 应该能正确地反映测量的准确程度。由于数值计算都有一定的近似性, 这就要求计算的准确性既不超过测量的准确性, 但也不能使测量的准确性受到损害; 计算的准确性与测量的准确性必须相适应。

2.6.1 有效数字的基本概念

有效数字(significant figure)的定义: 能正确有效地表示测量和实验结果的数字, 称为有效数字。

有效数字由可靠的几位数字加上一位可疑数字组成, 即由仪器最小分度以上的若干位的准确数值(可靠数字)与最小分度的下一位估读数值(可疑数字)构成。有效数字的最后一位虽然是可疑的、有误差的, 但在一定程度上反映了客观实际, 因此是有效的。

例如, 用毫米尺测量物体长度。如图 2-2 所示, 读出的数值为 3.59 cm , 其中前两位 3.5 cm 是由尺上准确读出的, 是可靠数字, 最后一位 0.09 cm 是在最小分度间估计出的, 存在误差, 因此是可疑数字。

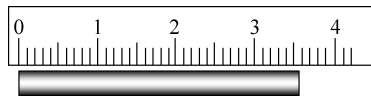


图 2-2 长度的测量

使用有效数字应注意的问题:

(1) 在非零数字当中和数字后面的“0”都是有效数字,整个数字前的“0”不是有效数字。

有效数字当中和数字后面的“0”都是有效数字,但整个数字前面的“0”不计为有效数字。如,0.026010 是 5 位有效数字;20.0401 为 6 位有效数字。若把 73.0mm 换算成 0.0730m,也还是 3 位有效数字。即在第一位非零数字之前的“0”不是有效数字。

(2) 有效数字的位数与小数点及单位换算无关。

例如,1.20m=1.20×10³mm=1.20×10⁻³km,仍为 3 位有效数字;如果把 1.0km 换算成以米为单位,就不能写成 1000m,因为这样就变成了 4 位有效数字,虽然数值大小相等,但有效数字位数不一样,反映的测量精度也不同了,应写成 1.0×10³m。

(3) 有效数字的科学表示法。为了方便测量结果的表达,特别是书写较大或较小的数字时,通常用 10 的方幂来表示其数量级,即写成×10^{±n} 的标准形式(n 为正整数)。用这种方法表示数值时,常在小数点前取一位数字。例如 0.0678cm,写成标准形式为 6.78×10⁻²cm。

2.6.2 测量结果有效数字的确定法则

1. 有效数字尾数的取舍法则

过去对有效数字的尾数采用“4 舍 5 入”的规则来修约,但是这样处理“入”的机会总是大于“舍”的机会,不甚合理。为了弥补这一缺陷,目前有效数字尾数的取舍法则普遍采用“四舍六入五凑偶”。即尾数小于 5 则舍,大于 5 则入,等于 5 时,若前一位是偶数则舍,前一位是奇数则入。

例如,4.8554 取 4 位有效数字时为 4.855;取 3 位有效数字时为 4.86;取 2 位有效数字时为 4.8;再如 45.365354 在取 3 位、4 位、5 位和 6 位有效数字时的结果分别为:45.4, 45.36, 45.365, 45.3654。

2. 不确定度的有效数字保留方法

作为最后测量结果的不确定度一般只保留一位有效数字,不确定度的取舍法则是“只进不舍”(非零即进)。如 $u_x=0.41\text{cm}$,应保留为 $u_x=0.5\text{cm}$ 。

3. 测量结果中的有效数字

最后的测量结果只能保留一位可疑数字,不确定度只保留一位有效数字。因此,被测量的算术平均值末位数的位置由不确定度决定。根据不确定度的大小可以判断表示测量结果的数字中可疑数字的位置。例如, $I=(38.2\pm0.3)\text{mA}$ 是正确的,而 $m=(320.15\pm0.6)\text{g}$,不确定度为 0.6,表达式中 3、2、0 是可靠的,“1”开始是可疑的,式中多了一个可疑数字“5”,所以表达式中的有效数字是错的,应改写成 $m=(320.2\pm0.6)\text{g}$ 。又如 $F=(12.80\pm0.002)\text{N}$,不确定度为 0.002,表达式 12.80 中 1、2、8、0 都是可靠数字,所以表达式中少了一个可疑数字,所以该表达式是错误的,应该改成 $F=(12.800\pm0.002)\text{N}$ 。而表达式 $L=(28.32\pm0.024)\text{mm}$,不确定度为 0.024,显然是错的,前面讲到不确定保留一位有效数字,取舍法则是非零则进,所以应该把 0.024 改成 0.03,再来判断平均值的末尾取舍,所以改成 $L=(28.32\pm0.03)\text{mm}$ 。总之,用不确定度来确定有效数字个数,是判断一切测量结果有效数字问题的最好办法。

2.6.3 有效数字的运算法则

物理实验中的测量大多是间接测量,因此需要经过一系列函数的运算才能得到最后的测量结果。计算结果也应该用有效数字表示,所得结果也只有保留一位可疑数字。其运算过程依照下列定则来判断数字性质。

- ① 可靠数字与可靠数字运算,结果为可靠数字。
- ② 可疑数字与可靠数字(或可疑数字)运算,结果为可疑数字。

以下根据定则给出四则运算中运算结果有效数字的确定方法。

1. 加减法

诸数相加减时,所得结果的有效数字的位数按最高可疑位保留。

例 2-6 $12.34 + 2.3574 = 14.70$

例 2-7 $26.25 - 3.9257 = 22.32$

2. 乘法

两数相乘除时,所得结果有效数字的位数按最少的保留。

例 2-8 $3.523 \times 18.6 = 65.5$

但两数相乘时,若两数最高位的积大于或等于 10 时,则积的有效数字多保留一位。

例 2-9 $8.32 \times 43.26 = 359.9$

例 2-10 $4.5254 \div 5.47 = 0.827$

注意:两数相除时,若被除数有效数字的位数小于或等于除数有效数字的位数,且其最高位的数小于除数最高位的数,则商的有效数字应比被除数少一位。

例 2-11 $127 \div 361 = 0.35$

3. 乘方与开方

乘方按乘法法则,开方所得结果有效数字的位数一般与底数的有效数字位数相同。

如: $2.8^2 = 7.8, 4.256^2 = 18.114, \sqrt{54.39} = 7.375$

4. 函数运算

1) 对数

所得结果中尾数有效数字的位数与真数的位数相同。

如: $\lg 56.7 = 1.754, \ln 82.6 = 4.414$

2) 指数

所得结果有效数字的位数与指数小数点后的位数相同。

如: $10^{6.25} = 1.8 \times 10^6, e^{0.0000924} = 1.000092$

3) 三角函数

所得结果有效数字的位数由角度决定。当角度精确到 0.1° 或 $1'$ 时,取 4 位有效数字;当角度精确到 $1''$ 时,取 5 位有效数字;如: $\cos 7.26^\circ = 0.9920, \cos 9^\circ 24' = 0.9866$ 。

5. 常数有效数字的位数

$\pi, e, \sqrt{5}, 1/3 \cdots$ 常数的有效数字的位数根据具体问题适当选取,一般比测量值多保留

一位。

以上这些结论,在一般情况下是成立的,有时会有一位的出入。为了防止数字取舍后运算引入新误差,在中间过程,参与运算的数据可多取一位有效数字。合成不确定度时,也可按此原则处理,最后得到的总不确定度按不确定度的取位规则来确定。必须指出,测量结果的有效数字位数取决于测量,而不取决于运算过程。

2.7 实验数据处理的基本方法

由实验测得的数据,必须经过科学的分析和处理,才能找出各个物理量之间的变化关系及其服从的物理规律。我们把从获得原始数据起到得出结论为止的加工过程称为数据处理。

常用的实验数据主要处理方法有列表法、作图法、逐差法、最小二乘法(不要求掌握)等。

1. 列表法(tabulation method)

列表法是记录和处理实验数据的基本方法,也是其他实验数据处理方法的基础。列表法可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系,即有助于及时发现和检查实验中存在的问题,判断测量结果的合理性;同时,也有助于分析结果,找出有关物理量之间存在的关系,为作图奠定基础。

数据在列表处理时,应注意以下事项:

- ① 表的上方应有表头标题,写明所列表格的名称。
- ② 表格力求简单明了,便于看出有关物理量之间的关系。
- ③ 表格中应标明所记录的物理量的名称和单位。单位写在标题栏中,一般不重复地记在各个数字上。
- ④ 表格中的数据要正确地反映测量结果的有效数字。
- ⑤ 表格中除列入原始测量数据外,根据需要处理过程的一些重要的中间结果也可列入表格中。

2. 作图法(graphing method)

作图法可把一系列数据之间的关系或其变化情况用图线直观地表示出来。作图法是研究物理量之间的变化规律,找出对应的函数关系,求出经验公式的最常用方法之一。作图法有多次测量取平均的效果,并易于发现测量中的错误,还可以把复杂的函数关系简化。

1) 图示法(graphic method)

利用实验数据,将实验中物理量之间的函数关系用几何图线表示出来,这种方法称为图示法。图示法简明直观,易显示数据的极值点、转折点、周期性等。也可以从图线中求出某些实验结果,如直接读出没有进行观测的对应于某 x 和 y 值(称为内插法)。在一定条件下,还可以从图线的延伸部分读到测量数据范围以外的点(称为外推法)。

图示法应注意以下作图规则:

- (1) 选坐标纸。作图需要合适的坐标纸,最常用的是直角坐标纸。其大小应根据测量范围、有效数字和结果需要来定。原则上,数据中的可靠数字在图中是可靠的,可疑的一位

(2) 标明坐标轴。一般以横轴代表自变量,纵轴代表因变量,用粗细适当的线画出坐标轴及方向,并在末端近旁标明所代表的物理量及单位。

(3) 定标尺。定标尺是确定坐标轴的起点读数及每一小格表示的数值,要合理地布局和充分利用坐标纸,坐标的起点不一定从变量的“0”开始,横轴和纵轴的标度也可以不同。要尽量使图线比较对称地充满整个图纸,避免使图偏于一角或一边。标度数值的位数应与实验数据的有效数字位数一致。为便于读数和描点,选定比例时,应使最小分格代表“1”“2”“5”“10”等,而不要用“3”“6”“7”“9”。另外,根据每一小格的值在轴上每隔一定距离的位置标上对应的数值。

(4) 描点。根据测量数据,用适当的符号如“○”“□”“△”“+”“×”等,在坐标纸上清楚地描绘出对应的数据点。一张图要画几条曲线时,不同曲线需用不同的符号。

(5) 连线。应当根据数据点的分布特征用直尺或曲线板等把点连接成光滑的线,由于测量误差的必然性,所以曲线不一定要通过所有的点,而应该尽可能地接近大多数的测量点,并使测量点大致均匀地分布在曲线的两边。个别偏离过大的点应该舍弃,并重新测量校对。

(6) 图注。在图纸的明显处写出图线的名称,作者姓名、日期。

2) 图解法(graphical method)

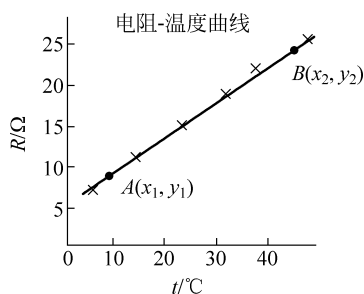
根据已经作好的图线,应用解析的方法,求出对应的函数和有关参量,这种方法称为图解法。当实验图线是直线时,采用此法最方便。

(1) 求直线的斜率和截距

在实验数据范围内,在尽量靠近直线的两端处任取两点 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$,其 x 坐标最好为整数,并注意不要取原始实验数据点。用与实验数据点不同的符号将它们标示出来,并在旁边注明其坐标读数,如图 2-3 所示。为了减少误差, A, B 两点的距离应尽量选得远一些。设图线的直线方程 $y = kx + b$,将 A, B 两点的坐标值代入直线方程,得到斜率

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

(2-19) 图 2-3 求直线的斜率和截距示意图



直线的截距为

$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \quad (2-20)$$

(2) 曲线改直线

由于在许多实际问题中,物理量之间的关系不是线性关系,但是可以通过适当的变换,使它们成为线性关系,即把曲线改成为直线。举例如下:

① 将函数 $y = ax^b$ (其中 a, b 为常量) 两边取对数得 $\lg y = b \lg x + \lg a$, 则 $\lg y - \lg x$ 图是直线,斜率为 b ,截距为 $\lg a$ 。

② 将函数 $y = ae^{-bx}$ (其中 a, b 为常量) 两边取自然对数得 $\ln y = \ln a - bx$, 则 $\ln y - x$ 图是直线,斜率为 $-b$,截距为 $\ln a$ 。

除此之外,还有很多函数形式,如 $y^2 = 2px$ (p 为常量), $y = \frac{x}{a+bx}$ (其中 a, b 为常量) 等

经过适当变换,均可得到相应的线性关系。这样方便我们对实验数据的处理,也容易得到有关参数。

3. 逐差法(method of successive difference)

逐差法是数据处理中的一种常用方法,特别是在被测变量之间存在多项式函数关系,自变量等间距变化的实验中,更加具有独特的优点。本节中有多个实验用到逐差法。

1) 逐差法的适用条件:

(1) 自变量 x 是等间距变化;

(2) 被测量 x, y 之间的关系可表达为多项式,即

$$y = a_0 + a_1 x$$

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$

⋮

2) 应用方法

将等间距测量的 n (为偶数) 个数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 分成前后两组, 每组 $\frac{n}{2}$ 项, 即

$$(x_1, x_2, \dots, x_{n/2}) \quad \text{和} \quad (x_{n/2+1}, x_{n/2+2}, \dots, x_n)$$

然后对应项相减得出逐差量, 即

$$\Delta x_i = (x_{n/2+i} - x_i), \quad \text{其中} \quad i = 1, 2, \dots, n/2$$

则逐差量的算术平均值为

$$\overline{\Delta x_{\text{逐}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |\Delta x_i|}{n/2}$$

$\overline{\Delta x}$ 的值为

$$\overline{\Delta x} = \frac{\overline{\Delta x_{\text{逐}}}}{n/2} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |\Delta x_i|}{(n/2)^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} |x_{n/2+i} - x_i|}{(n/2)^2} = \frac{\left| \sum_{i=n/2}^n x_i - \sum_{i=1}^{n/2} x_i \right|}{(n/2)^2}$$

例 2-12 用受力拉伸法测弹簧的劲度系数 k 。已知弹性限度内弹簧的伸长量 x 与拉力 F 满足 $F=kx$ 关系。现等间距地改变拉力 ΔF , 测得一组数据见表 2-3。

表 2-3 弹簧受力伸长的测量数据

次数	拉力 $F/(10^{-3}\text{N})$	伸长量 x/cm
1	0	0.00
2	2×9.8	1.50
3	4×9.8	3.02
4	6×9.8	4.50
5	8×9.8	6.01
6	10×9.8	7.50
7	12×9.8	9.00
8	14×9.8	10.50

(1) 验证 Δx 与 ΔF 的线性关系

按 $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ 逐项相减分别得出 1.50, 1.52, 1.48, 1.51, 1.49, 1.50, 1.50。可判断出 Δx_i 基本相等, Δx 与 ΔF 为线性关系。

(2) 用逐差法求弹簧的劲度系数 k

将实验数据分成前组 (x_1, x_2, x_3, x_4) 和后组 (x_5, x_6, x_7, x_8) , 对应项相减后求平均值, 可得

$$\begin{aligned}\overline{\Delta x} &= \frac{(x_8 - x_4) + (x_7 - x_3) + (x_6 - x_2) + (x_5 - x_1)}{(8/2)^2} \\ &= \frac{(10.50 - 4.50) + (9.00 - 3.02) + (7.50 - 1.50) + (6.01 - 0.00)}{16} \text{ cm} \\ &= 1.50 \times 10^{-2} \text{ m}\end{aligned}$$

由于每隔 1 个数据的拉力为 $\Delta F = 2 \times 9.8 \times 10^{-3} \text{ N}$, 则得

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{2 \times 9.8 \times 10^{-3}}{1.5 \times 10^{-2}} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} = 1.31 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

2.8 实验报告书写样板

科技实验报告是描述、记录某项科研课题实验的过程和结果的报告, 具有纪实的特征。它是科技报告中应用范围广泛的一种报告形式。科学实验报告主要是科学工作者撰写的实验报告, 要求有所发现, 有所发明, 有所创造, 不是简单重复和再现别人的成果。这种复杂而新颖的实验报告, 内容丰富, 需要谋篇成文, 有时就是以“报告”实验全过程为主的科技论文, 具有文献价值。

实验报告种类繁多, 尽管各类实验报告从内容上看千差万别, 但是从写作的角度来看, 所有实验报告是否合格, 却存在着共同标准原则, 即: 正确性 (accuracy)、客观性 (objectivity)、公正性 (impartiality)、确证性 (verifiability)、可读性 (readability)。

科技实验报告主要包含以下主要内容, 即实验名称、实验目的、实验原理及实验方法、实验器材、实验步骤、实验条件、实验数据及处理、误差分析与不确定度评定、实验结果或结论、讨论。科技报告内容组成并非千篇一律, 不同学科的实验其报告也有所差异, 以下举一个实例介绍物理实验报告的格式和书写规范。

范例 1

形状规则的固体密度的测量

一、实验目的

1. 了解游标卡尺的原理和构造及其使用方法;
2. 了解螺旋测微器的原理和构造及其使用方法;
3. 了解物理天平的原理和构造及其使用方法;
4. 学习形状规则物体的密度测量方法。

二、实验原理及方法

物体密度定义为物体的质量除以物体的体积, 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中, ρ 为物体的密度, m 为物体的质量, V 为物体的体积。

对于需要测定密度的物体, 可以把它做成形状规则样品(如球体、柱体、立方体等形状), 形状规则的物体在数学上都有对应的体积计算公式, 所以只要采用长度测量的仪器测出物体的几何尺寸便可确定它的体积。对于形状为圆柱体的物体, 其密度计算公式为

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} \quad (2)$$

式中, m 为物体的质量, d 为铁圆柱体的直径, h 为铁柱的高。实验时用物理天平测量物体质量, 考虑到物理天平两臂可能存在偏差, 测量时采用互易测量法来测量铁圆柱体的质量。测量时先把待测样品放在左盘, 右盘放砝码, 测出质量 m_1 ; 然后把样品放在右盘, 左盘放砝码再测出其质量 m_2 。容易证明, 质量的测量结果可由式(3)确定

$$m = \sqrt{m_1 m_2} \quad (3)$$

把式(3)代入式(2)得

$$\rho = \frac{4\sqrt{m_1 m_2}}{\pi d^2 h} \quad (4)$$

至于圆柱体的直径和高度的测量, 可分别用螺旋测微器和游标卡尺测量。

三、实验器材

铁圆柱体, 螺旋测微器, 游标卡尺, 物理天平。

四、实验步骤

1. 用螺旋测微器重复测量圆柱体的直径(注意: 重复测量时, 应考虑圆柱体机械加工可能存在不够圆的因素, 选取不同位置进行测量)。

2. 用游标卡尺重复测量圆柱体的高度。

3. 铁圆柱体质量的测量。首先进行天平的水平调节, 再进行天平的平衡调节。调节完毕才能进行质量测量, 最后用互易测量法测量质量。正确记录数据并填写在原始表格中, 如表 2-4 所示。

五、实验数据及处理

表 2-4 铁圆柱体的质量、直径和高度的测量数据

m_1/g	m_2/g	d/mm	h/mm
77.46	77.52	19.880	31.76
		19.882	31.74
		19.880	31.72
		19.878	31.76
		19.876	31.74
		19.881	31.76
		19.883	31.78
		19.879	31.74
		19.880	31.76
		19.881	31.74

1. 铁圆柱体的质量测量值和不确定度分别为

$$m = \sqrt{m_1 m_2} = 77.49 \text{ g}$$

$$u_{m_1} = u_{m_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{ g} = 0.029 \text{ g}$$

2. 铁圆柱体的直径测量平均值及其不确定度分别为

$$\bar{d} = 19.880 \text{ mm}, \quad \Delta_{\text{仪}} = 0.004 \text{ mm}$$

测量次数 $n=10$, 则

$$u_A = S(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}} = 0.00071 \text{ mm}$$

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = 0.004 / \sqrt{3} \text{ mm} = 0.0023 \text{ mm}$$

$$u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.00071^2 + 0.0023^2} \text{ mm} = 0.0024 \text{ mm}$$

3. 铁圆柱体的高度测量平均值及其不确定度分别为

$$\bar{h} = 31.75 \text{ mm}, \quad \Delta_{\text{仪}} = 0.02 \text{ mm}$$

测量次数 $n=10$, 则

$$u_A = S(\bar{h}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}} = 0.0059 \text{ mm}$$

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = 0.02 / \sqrt{3} \text{ mm} = 0.0115 \text{ mm}$$

$$u_h = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0.0059^2 + 0.0115^2} \text{ mm} = 0.013 \text{ mm}$$

4. 铁圆柱体的密度测量平均值及其不确定度分别为

$$\bar{\rho} = \frac{4\sqrt{m_1 m_2}}{\pi \bar{d}^2 \bar{h}} = \frac{4 \times 77.49}{3.14 \times (19.880)^2 \times 31.75} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$= 7.867 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3} = 7.867 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$E_\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_1}\right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_2}\right)^2 u_{m_2}^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial h}\right)^2 u_h^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{2m_1}\right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{1}{2m_2}\right)^2 u_{m_2}^2 + \left(\frac{2}{\bar{d}}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{1}{\bar{h}}\right)^2 u_h^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.029}{2 \times 77.46}\right)^2 + \left(\frac{0.029}{2 \times 77.52}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 0.0024}{19.880}\right)^2 + \left(\frac{0.013}{31.75}\right)^2}$$

$$= 0.00054$$

$$u_\rho = E_\rho \cdot \bar{\rho} = 0.00054 \times 7.867 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 0.0043 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

六、实验结果

铁圆柱体的直径 d : $d = \bar{d} \pm u_d = (19.880 \pm 0.003) \text{ mm}$

铁圆柱体的高度 h : $h = \bar{h} \pm u_h = (31.75 \pm 0.02) \text{ mm}$

铁圆柱体的密度 ρ : $\rho = \bar{\rho} \pm u_\rho = (7.867 \pm 0.005) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

七、讨论

对于形状规则的物体,密度测量采用此方法会比较简单,但是要求样品的制作和加工精确度要好,测量工具的精确度也要求要精确。毕竟要作精确的加工还是存在一定困难的。因此,有必要研究出测量形状不规则的物体的密度测量方法,这更有实际应用意义。



习题

1. 用游标卡尺测量长度时,由于下面原因产生测量误差,请说明误差的种类。

- (1) 环境温度引起的热胀冷缩;
- (2) 视差;
- (3) 本身刻度不均匀;
- (4) 零点不准。

2. 指出下列各测量结果有效数字的位数:

- (1) 4.20g; (2) 3.00×10^{-2} ms; (3) 0.005mA; (4) 16.04mm。

3. 判断下列结果对错,并改正错误。

- (1) $d = (10.45 \pm 0.01)\text{cm}$;
- (2) $I = (4.6 \pm 0.03)\text{mA}$;
- (3) $l = (13.85 \pm 0.24)\text{mm}$ 。

4. 用单摆测量重力加速度,可应用式 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 测出 g , 式中 l 为摆长, T 为周期。已知 $l = (97.69 \pm 0.02)\text{cm}$, $T = (1.9842 \pm 0.0002)\text{s}$, 求重力加速度 g 。

附录 1

实验数据检验与坏值的剔除方法

在大量的测量数据中,有时可能会混有过大或过小的“可疑值”;“可疑值”的存在可能会影响测量结果,这些“可疑值”可能是坏值,应剔除。另外,当一组正确测量值的分散性较大时,出现个别偏差较大的数据,尽管概率很小,但也是有可能的。如果人为地将这些正常值也一起剔除,也是不合理的。因此要有一个合理的判断标准,下面介绍两种常用的准则。

1. 拉依达准则

假设对被测量进行等精度测量,得到一组数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。算出这组数据的算术平均值 $\bar{x}$ 及偏差(也叫残差) $v_i = x_i - \bar{x} (i=1, 2, \dots, n)$, 并按照贝塞尔公式算出标准偏差 S , 若某个测量值 x_b 的偏差 $v_b (1 \leq b \leq n)$, 满足 $|v_b| = |x_b - \bar{x}| > 3S$, 则认为 x_b 是含有粗大误差值的坏值, 应予剔除。对剔除后的测量列, 应再次重复进行上述步骤, 直到没有坏值为止。应当指出, 拉依达准则只有在测量次数 n 较大时才适用。

2. 肖维涅准则

设重复测量的次数为 n , 任一次测量值的标准偏差为 S , 肖维涅准则指出, 凡是测量值 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 满足 $|x_i - \bar{x}| > c_n S$, 则认为 x_i 是坏值, 应剔除。式中 c_n 称为肖维涅系数, 其值与测量次数 n 有关, 表 2-5 给出了各种测量次数对应的 c_n 值。可见, 测量次数越多, c_n 值就越大; 当 $n > 100$ 时, c_n 值接近于 3, 其结果和拉依达准则相当。但当 $n \leq 4$ 时, 准则无效, 所以表中的系数 n 从 5 开始。

值得注意的是, 按以上准则判别时, 若测量数据中存在两个以上测量值需要剔除, 只能先剔除偏差最大的测量值, 然后重新计算平均值 $\bar{x}$ 及标准偏差 S , 再对剩下的测量值进行判断, 直至所有的测量值均不是坏值为止。

表 2-5 肖维涅系数表

n	c_n	n	c_n	n	c_n
5	1.65	14	2.10	23	2.30
6	1.73	15	2.13	24	2.31
7	1.80	16	2.15	25	2.33
8	1.86	17	2.17	30	2.39
9	1.92	18	2.20	40	2.49
10	1.96	19	2.22	50	2.58
11	2.00	20	2.24	75	2.71
12	2.03	21	2.26	100	2.81
13	2.07	22	2.28	200	3.02

基础性实验

实验一 固体密度的测量

本实验是物理实验中的基础实验,介绍了物理天平、游标卡尺和螺旋测微器 3 种常用测量仪器的测量方法、使用技巧、注意事项,以及其对今后应用的帮助,说明了密度测量在物理实验课中的重要性。

一、实验目的(experimental purpose)

1. 掌握物理天平、游标卡尺、螺旋测微器的基本原理及使用方法。
2. 学会测量质量均匀分布且形状规则的固态物体密度的方法。
3. 学会正确由仪器上读取数据,初步掌握直接测量和间接测量不确定度的计算法则,以及正确处理实验数据和表达测量结果。

二、实验原理(experimental principle)

设物体的质量为 m , 体积为 V , 则物体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-1-1)$$

密度的单位为千克每立方米,符号是 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。物体的密度与物体的状态有关,同样的物质,其气态、液态、固态的密度各不相同,同时与温度也有关系。若已知待测物体是一直径为 D , 高度为 h 的规则圆柱体,那么其体积为 $\frac{1}{4}\pi D^2 h$, 密度为

$$\rho = \frac{4m}{\pi D^2 h} \quad (3-1-2)$$

实验中只需测出圆柱体的质量 m 、外径 D 及高 h , 代入式(3-1-2)便可计算出圆柱体的密度 ρ 。

三、实验仪器(experimental device)

待测金属圆柱体,物理天平,游标卡尺,螺旋测微器。

1. 物理天平(physical balance)

天平是一种等臂杠杆,用来测量质量的仪器,常用的有物理天平、药物天平和分析天平,其中分析天平的精度最高,物理天平的精度最低。物理天平的外形和构造如图 3-1-1 所示。天平的横梁上有 3 个刀口,中刀放在支柱顶端的中刀承上,左右两边的刀口(又叫边刀)用来悬挂秤盘。横梁下面固定一个指针,当横梁摆动时,指针尖端会在分度盘前来回摆动。分度盘下方有一个制动旋钮,可使横梁上升或下降;横梁下降时,制动架会把它托住,以免磨损刀口。横梁两端的两个平衡螺母用于天平空载时调整平衡。横梁上装有游码,用于 1g 以下的称量。天平底座下的调平螺钉和支柱上的重锤(有些仪器是底座上装水准气泡)用于调节天平底座的水平。

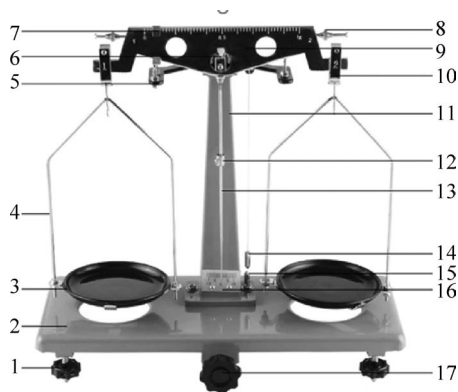


图 3-1-1 物理天平结构示意图

- 1—调平螺钉(2个); 2—底座; 3—托盘(2个); 4—吊篮(2个); 5—托架; 6—中刀承; 7—游码;
8—平衡螺母; 9—横梁; 10—吊耳(2个); 11—立柱; 12—感量砣; 13—指针; 14—重锤; 15—重锤对尖;
16—分度盘; 17—开关旋钮

物理天平的操作方法如下:

(1) 调节底座水平。调节天平底座下的两个调平螺钉,使底座上水准器的气泡位于圆环中心,或者观察到重锤尖端与底座上尖端对准。

(2) 调节天平平衡。把游码移到左端的“0”处,再把制动旋钮顺时针旋转,支起天平横梁,观察指针的摆动情况。当指针在分度盘的中线左右等振幅摆动时,天平即平衡。如不平衡,应逆时针旋转制动旋钮放下横梁,再调节横梁两端的平衡螺母,然后再次升起横梁,观察天平的平衡状态。如此反复,直到天平平衡为止。

(3) 称量。先放下横梁,将待测物体放在左盘内,砝码放在右盘内,再升起横梁,观察天平是否平衡,若不平衡,按操作程序反复增减砝码,直至天平平衡为止。

(4) 复原。放下横梁,使天平复原,砝码放回砝码盒。

注:实验时,用物理天平测量物体的质量,考虑到物理天平两臂可能存在偏差,测量时

采用互易测量法称量待测样品的质量。测量时,先把待测样品放在左盘,右盘放砝码,测出此时的质量 m_1 ,然后把样品放在右盘,左盘放砝码,测出此时的质量 m_2 ,则样品的质量 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 。

注意事项:

- ① 天平需调节水平后,方能使用;
- ② 天平的负载量不能超过最大称量值,以免损坏刀口或横梁;
- ③ 取放物体和砝码、移动游标或调节天平时,都应使天平制动,以保护刀口;
- ④ 只有在判断天平是否平衡时,才能转动制动旋钮,抬升横梁启动天平;
- ⑤ 加减砝码时,需用镊子取放,严禁直接用手;
- ⑥ 称量完毕,应将天平横梁放下,以保护刀口。

2. 游标卡尺(vernier caliper)

游标卡尺简称卡尺,是测量长度的精密工具之一。常用的卡尺有三种分度,即 $n = 50, 20, 10$,对应的精度分别为 $0.02\text{mm}, 0.05\text{mm}, 0.10\text{mm}$,其外形和结构如图 3-1-2 所示。游标卡尺一般由主尺、副尺(含游标)、量爪和深度尺等组成。副尺紧贴着主尺滑动,游标固定在副尺上。外量爪用来测量物体的长度和外径,内量爪用来测量内径,深度尺用来测量深度。

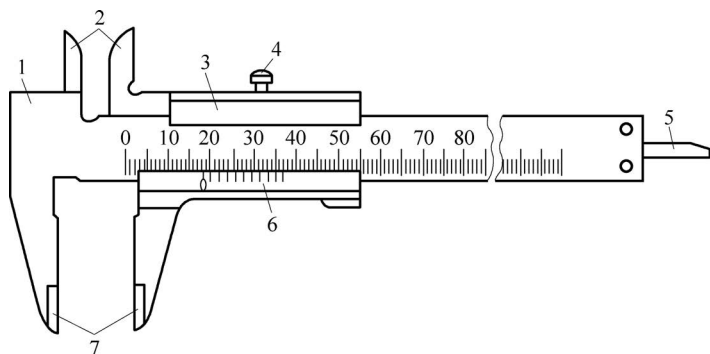


图 3-1-2 游标卡尺示意图

1—主尺; 2—内量爪; 3—副尺; 4—紧固螺钉; 5—深度尺; 6—游标; 7—外量爪

游标卡尺的使用方法如下:

(1) 测量前,应先把内外两侧的量爪合拢。检查副尺的“0”线和主尺的“0”线是否对齐。若不对齐,应先记下零点读数,以便对读取的测量值加以修正。

(2) 测量时,右手握尺,左手拿物体。将待测物体夹于卡尺的刀口间(注意不要放在凹处),旋紧紧固螺钉。

(3) 读数,先读主尺,再读副尺(游标)。即先读出主尺上在游标零线以左的那条线上毫米级以上的读数 l_0 ,即为整数值。然后仔细找到副尺游标上与主尺刻线对齐最佳的那一条刻线,数出这条刻线是副尺上的第 k 条,则待测物体的长度为

$$l = l_0 + k \frac{a}{n}$$

其中, a 代表主尺的最小分度值(通常情况下 $a = 1\text{mm}$), n 指游标的总分格数。

图 3-1-3 是分度 $n=10$ 的游标卡尺的刻度及读数举例。图上读数：主尺上在游标零线以左的那条线上毫米级以上的读数 $l_0=22.00\text{mm}$ ，游标尺上与主尺刻线对齐最佳的那一条刻线是第 6 条，即 $k=6$ ，所以待测物体的长度为

$$l = l_0 + k \frac{a}{n} = 22.00\text{mm} + 6 \frac{1}{10}\text{mm} = 22.60\text{mm}$$

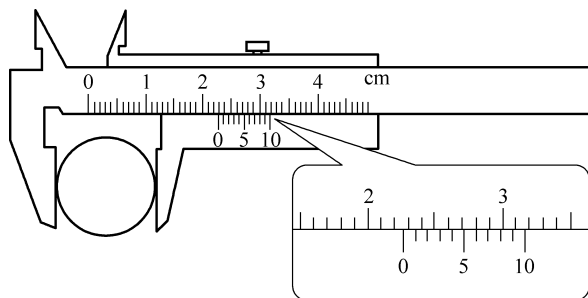


图 3-1-3 游标卡尺读数示意图

3. 螺旋测微器(micrometer caliper)

螺旋测微器又称千分尺，它是比游标卡尺更精密的长度测量仪器，其分度值可在 $0.01 \sim 0.001\text{mm}$ 。常用的一种如图 3-1-4 所示，它的量程是 25mm ，精确度为 0.01mm 。螺旋测微器的主要结构由一根精密的测微螺杆和有毫米刻度(即固定刻度)的固定套筒组成。固定套筒外有一活动套筒，活动套筒上沿圆周刻有 50 个等分格(可动刻度)，当活动套筒旋转一周，即 50 分格，测微螺杆正好沿轴线方向移动一个螺距 0.5mm 。因此，活动套筒每转动一分格，螺杆沿轴向移动 $\frac{0.5}{50} = 0.01\text{mm}$ ，这就是所谓的机械放大原理。

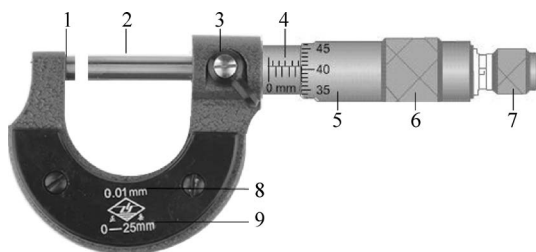


图 3-1-4 螺旋测微器示意图

1—测砧；2—测微螺杆；3—锁紧手柄；4—固定套筒；5—可动刻度；6—活动套筒；7—微调旋钮；8—精度；9—量程

螺旋测微器的使用方法：

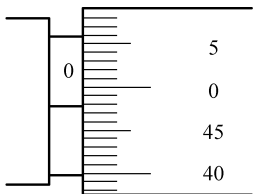
(1) 使用前，必须先搞清楚量程和分度值，以及各部件之间的相互关系。

(2) 测量前必须读取初读数 l_0 。转动微调旋钮，使测微螺杆和测砧刚好接触，并听到“咔、咔、咔”三次声响，即停止转动微调旋钮，读取固定套筒上横线在活动套筒上的示值，即为初读数 l_0 ，如图 3-1-5 所示。注意初读数的正、负值。

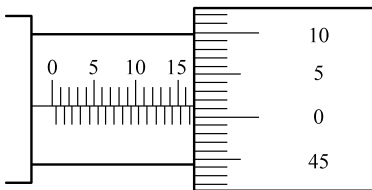
(3) 读数时，应先从固定套筒上读出整数格(每格 0.5mm)，再以固定套筒上的水平线为读数准线，读出可动刻度上的分格数(每格 0.01mm)，估计到最小分格的 $1/10$ ，即 0.001mm 这一位。螺旋测微器读数举例如图 3-1-6 所示，则待测物体的实际长度 $L = l - l_0$ ，其

中 l 指末读数, l_0 指初读数。

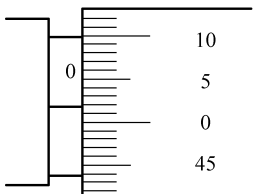
(4) 测量完毕, 应使测砧和测微螺杆间留一点间隙, 以免因热膨胀而损坏螺纹。



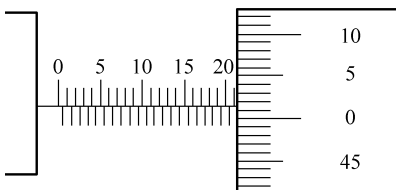
(a) 初读数 <0 $l_0=-0.021\text{mm}$



(a) $16+0.5+0.013=16.513\text{mm}$



(b) 初读数 >0 $l_0=+0.018\text{mm}$



(b) $21+0.013=21.013\text{mm}$

图 3-1-5 千分尺初读数的正和负

图 3-1-6 千分尺读数举例

四、实验内容(experimental content)

(1) 首先进行天平的水平调节, 再进行天平的平衡调节。调节完毕, 才能进行质量测量, 最后用互易测量法测量金属圆柱体的质量, 测量数据填入表 3-1-1。

(2) 用游标卡尺测量金属圆柱体的高度 h (在不同部位共测 5 次), 测量数据填入表 3-1-2。

(3) 用螺旋测微器测量金属圆柱体的直径 D (在不同部位共测 5 次), 测量数据填入表 3-1-3。

(4) 计算圆柱体的密度 ρ 。



固体密度的测量

五、数据记录及处理(data recording and processing)

1. 数据记录(data recording)

表 3-1-1 测量金属圆柱体的质量

$\Delta_{\text{秤}}=0.05\text{g}$

质量	样品材质		
	铜	铁	铝
m_1/g			
m_2/g			
m/g			

表 3-1-2 测量金属圆柱体的高度 h/mm 卡尺零点读数 $h_0 =$ _____ mm $\Delta_{\text{仪}} = 0.02\text{mm}$

金属	次数 i					平均值 $\bar{h}/\text{mm}$
	1	2	3	4	5	
铜						
铁						
铝						

表 3-1-3 测量金属圆柱体的直径 D/mm 螺旋测微器零点读数 $D_0 =$ _____ mm $\Delta_{\text{仪}} = 0.004\text{mm}$

金属	次数 i					平均值 $\bar{D}/\text{mm}$
	1	2	3	4	5	
铜						
铁						
铝						

2. 数据处理(data processing)

按下列步骤对铜、铁和铝三种材质的样品逐一进行计算,此仅以铜圆柱体为例。

(1) 分别算出 $m, \bar{h}, \bar{D}$ 的值,代入公式 $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 h}$, 计算出 $\bar{\rho}$ 。

(2) 铜圆柱体的质量测量值和不确定度分别为

$$m = \sqrt{m_1 m_2}$$

$$u_{m_1} = u_{m_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{g} = 0.029\text{g}$$

(3) 计算铜圆柱体 h 的不确定度 u_h

$$\text{A 类不确定度: } u_A = S(\bar{h}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}}, \quad n=5$$

$$\text{B 类不确定度: } u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$$

$$\text{铜圆柱体 } h \text{ 的不确定度: } u_h = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

(4) 计算铜圆柱体 D 的不确定度 u_D

$$\text{A 类不确定度: } u_A = S(\bar{D}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}}, \quad n=5$$

$$\text{B 类不确定度: } u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$$

$$\text{铜圆柱体 } D \text{ 的不确定度: } u_D = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

(5) 计算铜圆柱体 ρ 的不确定度 u_ρ

相对不确定度为

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_1}\right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial m_2}\right)^2 u_{m_2}^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial h}\right)^2 u_h^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial D}\right)^2 u_D^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{2m_1}\right)^2 u_{m_1}^2 + \left(\frac{1}{2m_2}\right)^2 u_{m_2}^2 + \left(\frac{2}{d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2 u_h^2}$$

不确定度 $u_\rho = \bar{\rho} \times E_r$, 单位为 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$

(6) 写出测量结果

金属铜圆柱体的高度 h : $h = \bar{h} \pm u_h$

金属铜圆柱体的直径 D : $D = \bar{D} \pm u_D$

金属铜圆柱体的密度 ρ : $\rho = \bar{\rho} \pm u_\rho$

六、注意事项(cautions)

1. 测量前,应先检查并记录仪器的零点读数。
2. 游标卡尺使用时要注意保护量爪,轻拿轻放,不允许用游标卡尺测量表面粗糙的物体,不允许把被夹紧的物体在卡口内挪动。
3. 严格按使用方法操作仪器,以免损坏仪器。

七、思考题(exercises)

1. 根据游标原理,说明分度分别为 20 和 50 的游标卡尺在读数上的区别。
2. 使用物理天平应注意哪些问题? 所用天平单次测量的不确定度为多少?
3. 游标卡尺与螺旋测微器应如何校准零点?

关键词(key words)

天平(balance), 游标卡尺(vernier caliper), 螺旋测微器(micrometer caliper), 物体密度(density of the object), 物体的质量(mass of the object), 物体的高度(height of the object), 物体的直径(diameter of the object), 固体密度的测量(measurement of solid density)

实验二 刚体转动惯量的测量

刚体是在外力作用下形状和大小都不发生改变的物体,是力学中的一个理想模型。

刚体的基本运动可以用转动定律 $M = J\alpha$ 来描述,其中 J 为刚体绕相应的转轴的转动惯量。转动惯量是刚体转动惯性大小的量度。工程技术及机械制造的生产实践中都要考虑物体转动惯量的大小,测量刚体的转动惯量具有十分重要的实际意义。

刚体的转动惯量与刚体的质量、形状、大小和转轴的位置有关,对于形状规则、质量分布均匀的刚体可以通过公式计算得出。然而,对于形状复杂、质量分布不均匀的刚体,其转动惯量用数学方法计算往往十分困难,一般用实验方法来测定。测定转动惯量的实验方法很多,本实验利用智能刚体转动惯量测定仪测定刚体转动惯量。

一、实验目的(experimental purpose)

1. 学习用扭摆法测定刚体的转动惯量;
2. 研究刚体的转动惯量与其质量、形状和转轴位置的关系;
3. 研究刚体转动惯量的叠加原理及应用。

二、实验原理(experimental principle)

1. 基本原理(basic principle)

扭摆的结构示意图如图 3-2-1 所示,在垂直轴上装有一个薄片状的螺旋状弹簧,用来产生恢复力矩。在轴的上方可以装上各种待测物体。若将物体在水平面内转过一定角度后,在弹簧回复力矩的作用下,刚体将绕竖直轴作往返的扭转运动。根据胡克定律,弹簧受扭转而产生的回复力矩 M 与所转过的角度 θ 成正比,即

$$M = -k\theta \quad (3-2-1)$$

式中, k 称为弹簧的扭转常数, θ 称为扭转角。根据转动定律

$$M = J\alpha \quad (3-2-2)$$

式中, J 为刚体绕该轴的转动惯量, $\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ 为刚体转动的角加速度。

由式(3-2-1)、式(3-2-2)得 $-k\theta = J \frac{d^2\theta}{dt^2}$,又可写为 $\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{k}{J}\theta$,若令 $\omega^2 = k/J$,则有

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\omega^2\theta \quad (3-2-3)$$

式(3-2-3)称为扭摆运动的角简谐振动方程,表示刚体的角加速度与角位移 θ 成正比,且方

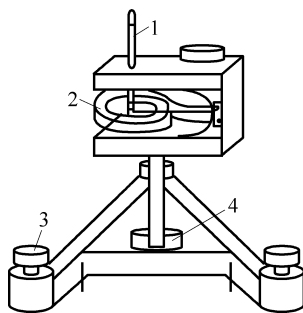


图 3-2-1 扭摆结构图

1—转轴; 2—弹簧;
3—底座螺钉; 4—支架

向相反,其解为

$$\theta = A \cos(\omega t + \varphi)$$

式中, A 称为角简谐振动的振幅, ω 称为角频率, φ 称为初相位。此简谐振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}} \quad (3-2-4)$$

由式(3-2-4),可得

$$J = \frac{kT^2}{4\pi^2} \quad (3-2-5)$$

由此可知,通过实验测得刚体的扭摆周期 T 及扭转常数 k ,则可计算出刚体的转动惯量 J 。

2. 测定弹簧的扭转常数 k (determining the torsional constant k of springs)

由式(3-2-5)可知,我们可以用一个形状规则的标准圆柱体来测定弹簧的扭转常数 k ,其绕圆柱体轴线的转动惯量可根据其质量和几何尺寸用理论公式计算求得,即

$$J_0 = \frac{1}{2} m_0 R^2 = \frac{1}{8} m_0 D^2$$

式中, J_0 为标准圆柱体的转动惯量, m_0 为圆柱体的质量, D 为圆柱体的直径。

首先将金属载物盘放到扭摆上,测出其周期 T' ,则金属载物盘的转动惯量为

$$J' = \frac{kT'^2}{4\pi^2} \quad (3-2-6)$$

再将标准圆柱体固定在金属载物盘上,测出其周期 T_0 ,则有

$$J' + J_0 = \frac{kT_0^2}{4\pi^2} \quad (3-2-7)$$

由式(3-2-6)和式(3-2-7)可得

$$\begin{cases} J' = \frac{J_0 T'^2}{T_0^2 - T'^2} \\ k = 4\pi^2 \frac{J_0}{T_0^2 - T'^2} \end{cases} \quad (3-2-8)$$

可见,只需将其他待测刚体固定在金属载物盘中,测定其周期,便可求出待测刚体绕竖直轴转动时的转动惯量。

三、实验仪器(experimental device)

智能刚体转动惯量测试仪、游标卡尺、电子天平、米尺、标准圆柱体、待测转动惯量的不同形状刚体等。

1. 智能转动惯量测试仪基本原理

图 3-2-2 是测量摆动周期的装置。当挡光杆通过光电门时,遮住光电门发射至光电探头的光路。光电门输出低电压,触发计时计数器。计时计数器递减计数,当计数值为零时,计时自动停止,由此可计算测量周期 T 。



图 3-2-2 测量摆动周期的装置

2. 智能转动惯量测试仪的使用方法

- (1) 开启主机电源,摆动指示灯亮,参量指示为“ P_1 ”。
- (2) 按“功能”键,可以选择摆动、转动两种功能。开机后默认为摆动。
- (3) 本机默认扭摆的计数值为 10,如需更改,选择“置数”键并上下调节。切断电源后再开机或按“复位”键,便恢复默认设置。
- (4) 按“执行”键,仪器显示“ $P_1, 000.0$ ”,表示仪器已经处在等待测量状态。挡光杆通过光电门时,计数器开始计数。当计数达到预设值,显示屏上显示时间读数。
- (5) 按“查询”键,可知每次测量的周期平均值。
- (6) 按“返回”键,系统无条件回到默认状态。
- (7) 按“复位”键,实验所得数据全部清除,恢复初始默认状态。

四、实验内容(experimental content)



刚体转动
惯量的
测量

1. 调整扭摆底座螺钉,使水平仪的气泡位于中心。装上金属载物盘,并调整光电探头的位置使载物盘上挡光杆处于其缺口中央且能遮住从小孔发射、接收红外线的光路。为维持弹簧的扭转常数 k 值不变,摆角在 90° 左右为宜。将支架套入扭摆主轴,并旋紧制动螺钉。

2. 测量金属载物盘的转动惯量 J' 和弹簧的扭转常数 k 。

- (1) 测量金属载物盘的摆动周期 T' ,测 3 次,求平均值;
- (2) 测量标准圆柱体的质量 m_0 ;
- (3) 测量标准圆柱体的直径 D_0 ,测 3 次,求平均值;
- (4) 将标准圆柱体垂直放在载物盘中,测量其摆动周期 T_0 ,测 3 次,求平均值;数据记录于表 3-2-1。

3. 测量硬塑圆柱体的转动惯量 J_1 。

- (1) 测量硬塑圆柱体的质量 m_1 ;
- (2) 测量硬塑圆柱体的直径 D_1 ,测 3 次,求平均值;
- (3) 将硬塑圆柱体垂直放在载物盘中,测定其摆动周期 T_1 ,测 3 次,求平均值;数据记

录于表 3-2-1。

4. 测量金属圆筒的转动惯量 J_2 。

(1) 测量金属圆筒的质量 m_2 ；

(2) 测量金属圆筒的内径 $D_{\text{内}}$ 和外径 $D_{\text{外}}$ ，各测 3 次，求平均值；

(3) 将金属圆筒垂直放在载物盘中，测定其摆动周期 T_2 ，测 3 次，求平均值；数据记录于表 3-2-1。

5. 分别测量金属细杆的转动惯量 J_3 (转轴在中心) 和 J_4 (转轴在一端)。

(1) 测量金属细杆的长度 l 和质量 m_3 ；

(2) 取下金属载物盘，换上金属细杆，并旋紧制动螺钉，测量金属细杆转轴在中心的转动周期 T_3 ，测 3 次，求平均值；

(3) 测量金属细杆转轴在一端的转动周期 T_4 ，测 3 次，求平均值；数据记录于表 3-2-1。

五、数据记录及处理(data recording and processing)

1. 数据记录(data recording)

表 3-2-1 扭摆法测刚体转动惯量的实验数据

样品	物理量/单位	次数 i			平均值
		1	2	3	
金属载物盘	T'/s				$\overline{T'} =$
标准圆柱体	$D_0/10^{-2} m$				$\overline{D}_0 =$
$m_0 = \text{kg}$	T_0/s				$\overline{T}_0 =$
硬塑圆柱体	$D_1/10^{-2} m$				$\overline{D}_1 =$
$m_1 = \text{kg}$	T_1/s				$\overline{T}_1 =$
金属圆筒	$D_{\text{内}}/10^{-2} m$				$\overline{D}_{\text{内}} =$
	$D_{\text{外}}/10^{-2} m$				$\overline{D}_{\text{外}} =$
	T_2/s				$\overline{T}_2 =$
金属细杆	T_3/s				$\overline{T}_3 =$
$m_3 = \text{kg}$ $l = m$	T_4/s				$\overline{T}_4 =$

2. 数据处理(data processing)

(1) 计算标准圆柱体的转动惯量 $J_0 = \frac{1}{8} m_0 \overline{D}_0^2$ ；

(2) 计算金属载物盘的转动惯量 $J' = \frac{J_0 \overline{T}'^2}{\overline{T}_0^2 - \overline{T}'^2}$ ；

(3) 计算出扭转常数 $k = 4\pi^2 \frac{J_0}{\overline{T}_0^2 - \overline{T}'^2}$ 。

(4) 分别计算金属圆筒、硬塑圆柱体，以及金属细杆等样品的转动惯量实验值和理论值，将实验值与理论值比较，并分析误差的大小。参见表 3-2-2。

表 3-2-2 转动惯量的实验测量值与理论计算值对照表

样品		转动惯量理论值/ ($10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)	转动惯量实验值/ ($10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)	相对误差 $E_r = \frac{ J_{\text{实}} - J_{\text{理}} }{J_{\text{理}}} \times 100\%$
硬塑圆柱体		$J'_1 = \frac{1}{8} m \bar{D}_1^2$	$J_1 = \frac{k \bar{T}_1^2}{4\pi^2} - J'$	
金属圆筒		$J'_2 = \frac{1}{8} m (\bar{D}_{\text{内}}^2 + \bar{D}_{\text{外}}^2)$	$J_2 = \frac{k \bar{T}_2^2}{4\pi^2} - J'$	
金属细杆	转轴在中心	$J'_3 = \frac{1}{12} m l^2$	$J_3 = \frac{k \bar{T}_3^2}{4\pi^2}$	
	转轴过一端	$J'_4 = \frac{1}{3} m l^2$	$J_4 = \frac{k \bar{T}_4^2}{4\pi^2}$	

六、注意事项(cautions)

1. 实验前,应调整测定仪的支脚螺钉,使水平仪保持水平状态。
2. 光电探头不能置于强光下,实验室应采用窗帘遮光,以确保计时准确。
3. 弹簧的扭转常数 k 不是固定常数,与摆角有关,当摆角在 90° 左右时基本相同,而在小角度时会变小。为降低由于摆动角度变化过大而带来的系统误差,在测量各物体的摆动周期时,摆角不宜过小,摆幅也不宜变化过大。
4. 安装待测物体时,其支架必须全部套入扭摆主轴,并旋紧制动螺钉,以保证扭摆正常工作。
5. 在称金属细杆的质量时,必须将支架取下,否则会带来极大误差。

七、思考题(exercises)

1. 如何测定扭转常数 k ?
2. 如何减少实验误差?
3. 将金属细杆转动惯量的实验值与理论值比较,说明产生误差的原因。
4. 通过实验结果,分析影响转动惯量的相关因素。

关键词(key words)

转动惯量(moment of inertia), 扭转常数(torsion constant), 扭摆法(torsion-pendulum method), 质心轴(center-of-mass axis), 测量直径(measurement of the diameter), 周期(period), 刚体转动惯量的测量(measurement of rigid body's moment of inertia)

实验三 杨氏模量的测定

杨氏模量是工程材料的重要参数,是表征固体材料抵抗纵向形变能力的一个重要物理量,它反映了材料弹性变形与内应力的关系。杨氏模量与外力、物体的长度、截面积的大小等无关,而只取决于物体材料本身的性质。杨氏模量是选择机械构件和建筑材料的重要依据,因此对工程材料的杨氏模量的准确测量具有重要意义。

一、实验目的(experimental purpose)

1. 学会测量杨氏模量的一种方法;
2. 学会用逐差法处理数据。

二、实验原理(experimental principle)

设有一根粗细均匀,长为 L 、截面积为 S 的金属丝。将其上端固定,下端悬挂砝码,金属丝受外力 F 的作用而发生形变,伸长了 ΔL 。根据胡克定律,在弹性限度内,其相对伸长量 $\Delta L/L$ (称为应变)与外力使其单位截面积所受力 F/S (称为应力)成正比,即在弹性限度内,应力与应变成正比。胡克定律的数学表达式为

$$\frac{F}{S} = Y \frac{\Delta L}{L} \quad (3-3-1)$$

式中, Y 称为金属丝的弹性模量,即杨氏模量,单位是 Pa 或 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

由式(3-3-1),可得

$$Y = \frac{F/S}{\Delta L/L} \quad (3-3-2)$$

若金属丝的直径为 d ,其截面积 $S = \pi(d/2)^2 = \pi d^2/4$,则式(3-3-2)可改写为

$$Y = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} \quad (3-3-3)$$

由式(3-3-3)可知,只要能测出 F, L, d 和 ΔL ,就能计算出金属丝的杨氏模量。式(3-3-3)还表明,相同的长度 L 、直径 d 和外力 F ,杨氏模量大的金属丝,其伸长量较小。 F, L 和 d 都比较容易测量,唯有 ΔL 因为十分微小,不容易测量准确。为了能够准确测量出这样微小的伸长量,本实验采用读数显微镜,调节使用方便,实验装置示意图如图 3-3-1 所示。在悬垂的金属丝下端相继连接有“十字叉丝”板(在金属框内)和砝码盘,当砝码盘中加上质量为 M 的砝码时,金属丝受力增加了 $F = Mg$,金属丝相应伸长了 ΔL ,“十字叉

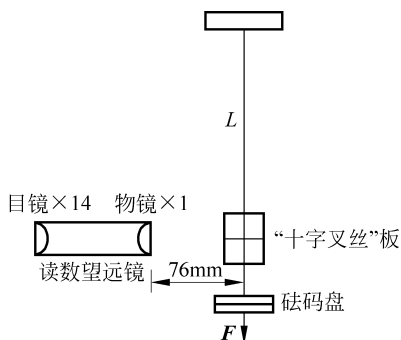


图 3-3-1 实验装置示意图

丝”也随着下降 ΔL 。“十字叉丝”通过读数显微镜的物镜成像在最小分度为 0.05mm 的分划板标尺上,经目镜放大,在望远镜目镜视场中可以观察并直接测量金属丝的伸长量 ΔL 。

三、实验仪器(experimental device)

螺旋测微器、米尺,待测金属丝、砝码等。

四、实验内容(experimental content)

1. 调整杨氏模量测定仪(adjusting Young's modulus tester)

1) 调节支架

先调节仪器底脚螺钉,使底座水平。调节上梁微调旋钮使调节夹板水平,以保证穿过夹板的金属丝不贴靠小孔内壁。然后调节下梁一侧的防摆动装置,将两螺钉分别旋进金属连接框两侧的 V 形槽内,并与框体之间形成两个很小间隙,以使金属框既能随金属丝一起上下自由移动,又避免发生扭转和摆动。

2) 调节读数显微镜

将安装有读数显微镜的磁性底座紧紧靠住仪器底座表面上的定位板直边,根据读数显微镜的工作距离(76mm)要求大致确定显微镜的物镜与“十字叉丝”板的距离。眼睛对准目镜,并转动目镜,对分划板标尺进行调焦,使视场中能观察到清晰的分划板标尺。在定位板上稍微移动磁性底座,在视场中的分划板标尺上找到清晰的“十字叉丝”的像,再稍微调整磁性底座上的升降微调旋钮(读数显微镜横向及升降可微调),使分划板标尺的零线(可在 $0\sim 1\text{mm}$ 选择)对准“十字叉丝”的横线(见图 3-3-2),并微调目镜,消除视差,之后将磁性底座的旋钮向前扳动,以锁住磁性底座。

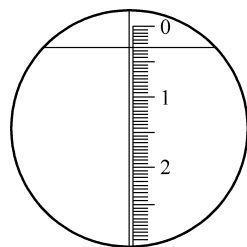


图 3-3-2 “十字叉丝”与分划板标尺



杨氏模量的测定

2. 观测细丝伸缩变化(observation of changes in wire scaling)

1) 调整好仪器并在监视器屏幕呈现清晰的图像后,记下此时(待测细丝下的砝码盘在未加砝码时)“十字叉丝”对准的分划板标尺的零点值 n_1 。

2) 在砝码盘上每次增加 200g 砝码,加到 1400g 为止,即依次放入 $200\text{g}, 400\text{g}, 600\text{g}, 800\text{g}, 1000\text{g}, 1200\text{g}, 1400\text{g}$ 砝码,观察监视器屏幕并逐个记录每增加 200g 砝码相应“十字叉丝”对准的分划板标尺的刻度值 $n_2, n_3, \dots, n_7, n_8$ 。读数应该估读到标尺最小刻度的下一位,标尺最小分度为 0.05mm 。然后按相反顺序逐个减少砝码数,记录相应“十字叉丝”对准的标尺刻度 $n'_8, n'_7, \dots, n'_2, n'_1$ 。数据填入表 3-3-1。

3) 用螺旋测微器测量金属丝的直径 d_i ,考虑到金属丝各处可能存在的不均匀性,应在不同部位测量。共测 10 次取其平均值。数据填入表 3-3-2。

五、数据记录及处理(data recording and processing)

1. 数据记录(data recording)

表 3-3-1 金属丝受力伸长的测量数据

$\Delta_{\text{标}} = 0.05\text{mm}$

次数 i	砝码 质量 M/g	拉力 F/N	标尺刻度值		平均伸长量/ mm	每增加一个砝码时 金属丝的伸长量 $\Delta L/\text{mm}$
		$F_i = Mg$	增加砝码 过程 n_i	减少砝码 过程 n'_i	$L_i = \frac{1}{2}(n_i + n'_i) \times 0.05$	$\Delta L_i = (L_{i+1} - L_i)$
1	0	0				
2	200	1.96				
3	400	3.92				
4	600	5.88				
5	800	7.84				
6	1000	9.80				
7	1200	11.76				
8	1400	13.72				

表 3-3-2 金属丝的直径

螺旋测微计零点读数 $d_0 =$ _____ mm

$\Delta_{\text{仪}} = 0.004\text{mm}$

	次数 i										平均值 $\bar{d}/\text{mm}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
直径 d/mm											

2. 数据处理(data processing)

- 1) 计算伸长量的平均值 $L_1, L_2, \dots, L_8$, 填入表 3-3-1。
- 2) 计算出每次增加一个砝码时金属丝的伸长量 ΔL_i , 填入表 3-3-1。
- 3) 用逐差法计算平均每增加(减少)一个砝码时, 金属丝平均伸长量 $\overline{\Delta L}$, 数据填入表 3-3-3。

表 3-3-3 用逐差法计算金属丝的平均伸长量 $\overline{\Delta L}$

次数 i	L_{4+i}	L_i	$L_{4+i} - L_i$	$\overline{\Delta L}$
1				$\overline{\Delta L} = \frac{\sum_{i=1}^4 (L_{4+i} - L_i)}{4^2} =$
2				
3				
4				

4) 计算金属丝的平均伸长量 $\overline{\Delta L}$ 的不确定度 $u_{\overline{\Delta L}}$:

$$\text{A类不确定度: } u_A = S(\overline{\Delta L}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_i - \overline{\Delta L})^2}{n(n-1)}}, \quad n=7$$

$$\text{B类不确定度: } u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}, \Delta_{\text{仪}} = 0.05 \text{ mm}$$

$$\text{合成不确定度: } u_{\overline{\Delta L}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$\text{测量结果: } \Delta L = \overline{\Delta L} \pm u_{\overline{\Delta L}}$$

5) 计算细丝直径的平均值 $\bar{d}$ 和不确定度 u_d :

$$\text{A类不确定度: } u_A = S(\bar{d}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}}, \quad n=10$$

$$\text{B类不确定度: } u_B = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$$

$$\text{合成不确定度: } u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$\text{测量结果: } d = \bar{d} \pm u_d$$

6) 拉力增量 $\Delta F = 1.96 \text{ N}$,按 OIML 砝码规定等级 M3^①, $\Delta_{\text{砝}} = 100 \text{ mg}$,则拉力增量 ΔF 的不确定度 $u_{\Delta F} = \frac{\Delta_{\text{砝}}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta M} = \frac{0.1 \times 1.96}{200\sqrt{3}} \text{ N} = 0.001 \text{ N}$ 。

7) 本实验给定金属丝的长度 $L = 0.800 \text{ m}$,由于金属丝被夹紧的位置难以准确判定,一般可认为 $\Delta_{\text{夹}} = 5 \text{ mm}$,则长度 L 的不确定度 $u_L = \frac{\Delta_{\text{夹}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \text{ m} = 0.0029 \text{ m}$ 。

8) 根据公式 $Y = \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L} = \frac{4MgL}{\pi \bar{d}^2 \Delta L}$,计算出金属丝的杨氏模量,其中 $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

9) 计算金属丝杨氏模量的不确定度 u_Y ,并正确表示出实验测量结果。

$$\text{相对不确定度: } E_r = \sqrt{\left[\frac{u_{\Delta F}}{\Delta F}\right]^2 + \left[\frac{u_L}{L}\right]^2 + \left[\frac{u_{\overline{\Delta L}}}{\overline{\Delta L}}\right]^2 + \left[\frac{2u_d}{\bar{d}}\right]^2}$$

$$\text{不确定度: } u_Y = \bar{Y} \times E_r$$

$$\text{测量结果: } Y = \bar{Y} \pm u_Y$$

六、注意事项(cautions)

1. 进行金属丝受力伸长的测量时,需等望远镜中标尺成像稳定后再进行读数。
2. 测量过程中,切勿改变光学系统。
3. 增加砝码时,砝码槽口要交替放置。
4. 加减砝码时必须轻拿轻放,以防止砝码盘摆动过大和使金属丝受到冲击作用,且应待砝码盘和标尺成像稳定后再进行读数。

① OIML 是“国际法定度量衡组织”的法文缩写,M3 是砝码规范最低等级。

七、思考题(exercises)

材料相同,但长短粗细不同的两根钢丝的杨氏模量是否相同,为什么?

关键词(key words)

杨氏模量(Young's modulus),胡克定律(Hooke's law),应力(stress),砝码(weight),伸长量(elongation),弹性(elasticity),望远镜(telescope),目镜(ocular),物镜(object lens)

实验四 惠斯通电桥法测电阻

电桥法测电阻是一种典型的比较测量法,即将被测量与同类标准量进行比较,从而确定被测量的大小。电桥从使用电源性质分为直流电桥和交流电桥;从结构不同又分为单臂电桥和双臂电桥;从指示状态不同分为平衡电桥和非平衡电桥。惠斯通电桥属于直流平衡单臂电桥,用来测量中等阻值(范围为 $1 \sim 11.1 \times 10^6 \Omega$) 的电阻,具有较高的灵敏度和准确度。尽管各种电桥的测量对象、构造各异,但基本原理和使用方法大致相同,所以掌握了惠斯通电桥的原理和使用方法为分析其他电桥的原理和方法奠定了基础。

一、实验目的(experimental purpose)

1. 了解惠斯通电桥的基本原理及电桥测量灵敏度的概念;
2. 学会用惠斯通电桥测量电阻;
3. 能够分析测量的误差。

二、实验原理(experimental principle)

1. 惠斯通电桥平衡条件(condition of Wheatstone bridge balance)

图 3-4-1 为惠斯通电桥原理电路图,它由四个桥臂电阻 R_1, R_2, R_x, R_0 和一个检流计 G 组成桥式电路。其中, R_1, R_2 是已知标准电阻,称为比率臂; R_0 是可变标准电阻(电阻箱),称为比较臂; R_x 是被测电阻,称为测量臂; C, D 间接检流计。接通电路后,检流计一般不为零,说明 C, D 两点的电势不相等,通过调节 R_x 使检流计中无电流通过,即 $I_G = 0$,此时电桥达到平衡状态。

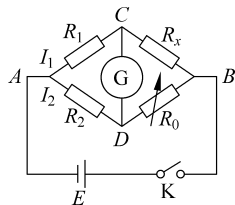


图 3-4-1 惠斯通电桥原理

由图 3-4-1 可知,电桥平衡时, C, D 两点的电势相等,通过检流计 G 的电流为零。即

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$I_1 R_x = I_2 R_0$$

此两式两边相除,可得 R_1, R_2, R_x, R_0 四个电阻的关系,即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_0} \quad (3-4-1)$$

式(3-4-1)称为电桥平衡条件。因此,当电桥平衡时,只需知道四个电阻中的任意三个电阻,就可计算出另外一个电阻的阻值。由式(3-4-1),有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (3-4-2)$$

令 $K_r = R_1/R_2$, 称为倍率,则式(3-4-2)可写为 $R_x = K_r R_0$ 。因此调电桥平衡时,一般是根据待测电阻的大小选好倍率,再调比较臂,只要读出倍率 K_r 和 R_0 值,便可得待测电阻 R_x 。

2. 电桥灵敏度(bridge sensitivity)

惠斯通电桥测电阻的准确度与电桥的灵敏度相关。对同一待测电阻而言,灵敏度的值越大,测量结果越准确。惠斯通电桥灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_x / R_x} \quad (3-4-3)$$

其中, R_x 是待测电阻值, Δn 是 R_x 改变 ΔR_x 时检流计 G 偏转的格数(DIV)。一般 R_x 不可调,所以通常用改变 R_0 来测灵敏度,于是电桥灵敏度也称相对灵敏度

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_0 / R_0} \quad (3-4-4)$$

三、实验仪器(experimental device)

待测电阻和导线、QJ23a 型箱式惠斯通电桥(portable QJ23a-Wheatstone bridge)。

箱式电桥型号较多,现以 QJ23a 型箱式惠斯通电桥(见图 3-4-2)为例介绍电桥各部件的特点和作用。测量盘由 $\times 1\Omega$, $\times 10\Omega$, $\times 100\Omega$, $\times 1000\Omega$ 四组十进制式开关盘组成,在电桥使用中,必须用上第 1 测量盘($\times 1000$),即第 1 测量盘不能置于 0,才能保证测量的准确度。按钮“B”代表电源开关,按钮“G”代表检流计开关。在测量含有电感的电阻器电阻(如电机、变压器)时,必须先按“B”按钮,再按“G”按钮。

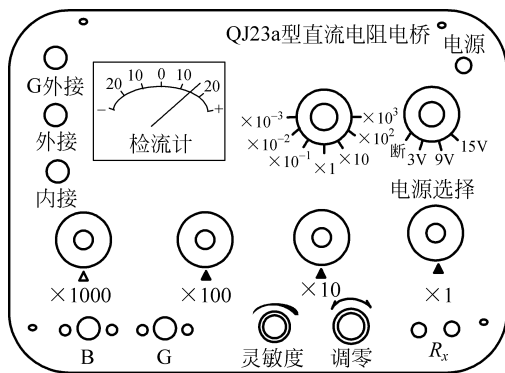


图 3-4-2 QJ23a 型箱式惠斯通电桥面板结构图

QJ23a 型箱式惠斯通电桥的使用方法:

- (1) 接通 220V 市电,并开启电源开关,指示灯亮。并将“G”打向“内接”;
- (2) 将被测电阻接至“ R_x ”接线柱,根据被测电阻的估计值,按表 3-4-1 选择好量程倍率及电源电压,并将“倍率 K_r ”(即 R_1/R_2) 开关及“电源选择”开关打在合适的挡位,调节“调零”旋钮使检流计表头指针指零。
- (3) 按下“B”按钮,然后按“G”按钮,调节测量盘,使电桥平衡(检流计指零)。若电桥无法平衡,检流计指针仍向“+”方向偏转,说明 R_x 值大于该量程的上限值,应将量程倍率调大一挡,再次调节四个测量盘,使电桥平衡。反之,当第 1 测量盘($\times 1000$)打至“0”位,检流计指针仍偏向“+”方向,应将量程倍率减小一挡,再调节测量盘使电桥平衡。所测电阻值:

$R_x = \text{量程倍率} \times \text{测量盘示值之和 (即 } R_0 \text{)}。$

表 3-4-1 量程与倍率及电源电压对照表

倍 率	量 程	准确度等级 K	电 源
$\times 0.001$	$1\sim 11.11\Omega$	0.5	3V
$\times 0.01$	$10\sim 111.1\Omega$	0.2	
$\times 0.1$	$100\sim 1111\Omega$	0.1	
$\times 1$	$1\sim 11.11\text{k}\Omega$		
$\times 10$	$10\sim 111.1\text{k}\Omega$	0.1	9V
$\times 100$	$100\sim 499.9\text{k}\Omega$	0.2	15V
	$500\sim 1111\text{k}\Omega$	0.2	
$\times 1000$	$1\sim 4.999\text{M}\Omega$	0.5	
	$5\sim 11.11\text{M}\Omega$		

四、实验内容(experimental content)

1. 根据实验室提供的电阻板、箱式电桥、导线按图 3-4-1 接好线路。
2. 根据待测电阻值,选择合理的倍率和电源电压,按操作要求(箱式惠斯通电桥的使用方法)分别测电阻板上 $R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}, R_{x4}$ 的阻值,每个电阻只测一次,记下所选倍率和比较臂(测量盘示值)的值并记录到表 3-4-2 中。
3. 测量电桥灵敏度,在步骤 2 中(每次测量一个电阻后,紧接着测量电桥灵敏度)。测量电阻后,在电桥平衡状态下,先后按下“B”和“G”按钮,改变 R_0 ,使指针偏转 $1 \sim 5 \text{ DIV}$ (格),将此偏转格数 Δn 和 R_0 的改变量 ΔR_0 记下,填入表 3-4-2 中。

五、数据记录及处理(data recording and processing)

1. 数据记录(data recording)

表 3-4-2 用惠斯通电桥测电阻所测数据

待测电阻	倍率 K_r (R_1/R_2)	测量盘示值 R_0/Ω	计算电阻测量值/ Ω ($R_x = K_r R_0$)	偏转格数 Δn	R_0 的改变量 ΔR_0	灵敏度 $S = \frac{\Delta n}{\Delta R_0/R_0}$
R_{x1}						
R_{x2}						
R_{x3}						
R_{x4}						

2. 数据处理(data processing)

- 1) 根据表 3-4-2 计算电阻 R_x 的测量值和灵敏度 S 。

- 2) 计算每一组测量值的不确定度 $u_R = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$, 式中 $\Delta_{\text{仪}} = R_x \times \text{准确度等级 } K\%$ 。而 K 为

量程倍率 K_r 所对应的等级,由表 3-4-1 查出。

3) 每一组测量值的最终结果表达式: $R_x = K_r \cdot R_0 \pm u_R$ 。

六、注意事项(cautions)

1. 在用电桥测电阻前,先检查检流计是否调零,如未调零,应先调零后再开始测量。
2. R_0 的第 1 测量盘($\times 1000$)不能调至“0”,以免影响测量的准确度。
3. 在调节 R_0 时,当检流计指针偏转到满刻度时,应立即松开按钮开关“B”和“G”。
4. 实验完毕,应使各按钮开关松开,再关闭电源,以免损坏仪器。

七、思考题(exercises)

1. 惠斯通电桥由哪几部分组成?
2. 应怎样选择比率臂旋钮的倍率? 若选择不当,对结果有何影响?
3. 影响电桥灵敏度因素有哪些?

关键词(key words)

惠斯通电桥(Wheatstone bridge), 电源(electrical source), 电阻(resistance), 检流计(galvanometer), 倍率/比例系数(rate/proportion coefficient), 灵敏度(sensitivity)

实验五 用电位差计测量电动势

电位差计是测量电动势或电势差的主要仪器之一,也用于间接测量电流、电阻和校准各种精密电表等。由于它应用了补偿原理和比较测量法,所以具有较高的精密度,使用也方便。在科学研究和工程技术中,广泛使用电子电位差计进行自动控制和自动检测。通过学习电位差计实验,可以了解电位差计的基本原理、结构和使用方法。

一、实验目的(experimental purpose)

1. 掌握补偿法测电位差计的工作原理与方法;
2. 学会用电位差计测量电动势。

二、实验原理(experimental principle)

1. 补偿原理(compensation principle)

在测量电源的电动势 E_x 时,通常要将电压表并联在电源两端,如图 3-5-1 所示。由于电源内阻 r 未知且不能忽略,则需考虑内阻 r 上产生电压降 Ir ,由闭合电路欧姆定律得

$$U_{CD} = E_x - Ir \quad (3-5-1)$$

可见,只有当 $I=0$ 时,电压表的读数才等于电源电动势的实际值,即

$$U_{CD} = E_x \quad (3-5-2)$$

图 3-5-2 是补偿原理示意图,将被测电动势的电源 E_x 和一个精确可调已知电动势的电源 E_{CD} 并联,调节 E_{CD} 使检流计 G 指零,即电流 $I=0$, $Ir=0$, $E_{CD}=E_x$ 。因为 E_{CD} 是已知的,则 E_x 亦可知,这时,电路达到了电压补偿,我们称这种测电动势的方法为补偿法。这种电路称为补偿电路。我们知道,用电压表测量电压时,总要从被测电路上分出一部分电流,从而改变了被测电路的状态,而用补偿电压时,补偿电路中没有电流,所以不影响被测电路的状态。这就是补偿法最大的优点和特点。

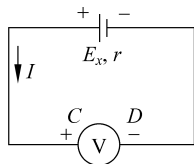


图 3-5-1 测量电源电动势

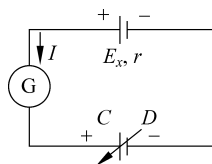


图 3-5-2 补偿原理

2. 电位差计的工作原理(principle of potentiometer)

电位差计就是按照补偿原理制成的测量电动势的仪器,其原理如图 3-5-3 所示。 E 是工作电源, E_x 和 E_s 分别是待测电源和标准电源, G 是检流计, AB 是精密电阻 R_{AB} , 触点 C 、 C' 和 D 可在 AB 上任意移动。整个电路分为三部分: 一个工作回路($E-R-R_{AB}-E$), 两个补偿回路($E_s-R_{C'D}-G-E_s$)与($E_x-R_{CD}-G-E_x$)。

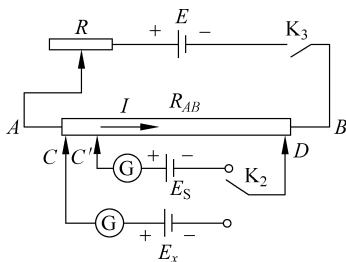


图 3-5-3 电位差计测电动势原理图

工作回路的作用是为补偿回路提供补偿电压。接通开关 K_3 , 调节可变电阻 R , 使工作回路中有一定的工作电流 I ; 将开关 K_2 打到 E_x 接入端, 调节 C, D 两点, 使检流计 G 的指针为零, 即电路得到补偿, 则有

$$E_x = U_{CD} = IR_{CD} \quad (3-5-3)$$

固定可变电阻 R , 即保持工作电流 I 不变; 将开关 K_2 打到 E_s 接触端, 用标准电源 E_s 替换 E_x ; 调节 C', D , 使检流计 G 的指针为零, 电路达到补偿状态; C', D 间的电压用 $U_{C'D}$ 表示, 则有

$$E_s = U_{C'D} = IR_{C'D} \quad (3-5-4)$$

由式(3-5-3)和式(3-5-4), 可得

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{U_{CD}}{U_{C'D}} \quad (3-5-5)$$

则有

$$E_x = \frac{U_{CD}}{U_{C'D}} E_s \quad (3-5-6)$$

由式(3-5-6)可知, 若 E_s 已知, 则只要测出 U_{CD} 和 $U_{C'D}$, 即可得到 E_x 。由于这种结果是在同一工作电流 I 下, E_x 与 E_s 分别对应的补偿电压值 U_{CD} 和 $U_{C'D}$ 进行比较得出的, 所以此方法又称比较法。

3. 校准工作电流(calibration working current)

在图 3-5-2 补偿原理中, E_{CD} 不但可调, 而且要求精确。这就要求在工作回路中流经 AB 的精密电阻的电流必须严格符合精准稳定的要求, 即符合仪器设计时要求的工作电流 I 。因此, 用电位差计测出待测电动势 E_x 之前, 需要事先用标准电源的电动势 E_s 来校准电位差计的工作电流 I 。例如, 温度为 20°C , 查得标准电源的电动势为 1.0186V , 则选取标准电阻 R_s 为 101.86Ω (调节接触点 C', D); 接通开关 K_3 , K_2 打到 E_s 接触端, 调节可变电阻 R 以改变工作电流的大小, 直到检流计 G 的指针为零, 即 $I_G = 0$, 显然, 这时的工作电流为

$$I = \frac{E_s}{R_s} = \frac{1.0186}{101.86} \text{A} = 0.010000 \text{A}$$

工作电流校准后, 若将开关 K_2 打到 E_x 接触端, 调节接触点 C 和 D , 使检流计 G 的指针为零, 则可根据式 $E_x = U_{CD}$ 计算待测电动势 E_x 。在实验中, 为使测量结果准确, 应不时地校准工作电流。