

高等学校教材



大学 物理 实验

赵青生 马书炳 编著

安徽大学出版社

高等学校教材

04-33

109

-2

大学物理实验

(第二版)

赵青生 马书炳 编著

赵学民 主审

张健

安徽大学出版社

林蓬对学善高

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/赵青生,马书炳编著. -合肥:安徽大学出版社,1999

ISBN 7-81052-212-4

I.大… II.①赵…②马… III.物理-实验-高等学校-教材 IV.04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 16809 号

(第二版)

著者 赵青生 马书炳

审主 另书

大学物理实验

赵青生 马书炳 编著

出版发行 安徽大学出版社

(合肥市肥西路3号 邮编 230039)

联系电话 总编室 0551-5107719

发行部 0551-5107784

责任编辑 李虹

封面设计 孟献辉

经 销 新华书店

印刷 肥西县印刷有限责任公司

开本 787×1092 1/16

印张 22

字数 504千

版次 1999年6月第1版

印次 1999年6月第1次印刷

印数 5500册

ISBN 7-81052-212-4/0·17 定价 26.40 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

内容提要

本书是《大学物理实验(中国科技大学出版社,1993年5月版)》的第二版。

本书是以《综合性大学与高等师范院校普通物理实验课程教学基本要求》和《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》为依据,结合近年来在大学物理实验教学改革中的经验,并参考了国内外众多院校的有关教材编撰而成。本教材删除了部分与中学实验内容重复或相近的传统实验项目及少数验证性实验项目,保留了多年来行之有效的物理实验内容,新增加的实验课题的在选取上注意立足基础、着眼现代,加强学生现代实验技术和创新意识的培养。全书起点适中,落点较高,共分5章,在误差与数据处理中引入了不确定度的应用,所选择的50个实验,按实验的性质、层次进行分类,各个实验既互相独立,又循序渐进,相互配合,组成了一个较为合理的知识结构,能收到较好的总体教学效果。

全书比较系统地阐述了与大学物理实验有关的数据处理知识,详细介绍了物理实验中的基本方法、基本调节技术、常用仪器、常用的测量技术和实验设计中的一些基本问题,是一本新型的具有比较完整、独立的课程体系的教材。

本书可以作为高等理工院校各专业不同层次的“大学物理实验”的教材或教学参考书,也可以作为涉及物理学实验的广大科技工作者的参考书。

前言

(第二版)

本书是以《综合性大学与高等师范院校普通物理实验课程教学基本要求》和《高等学校物理实验课程教学基本要求》为原则,并在总结了安徽大学、合肥炮兵学院近年来教学改革和课程建设经验的基础上编著而成的。

本书为《大学物理实验》(中国科技大学出版社 1993 年 5 月版)的第二版。在本书编写过程中,基本上维持了原版本的教学体系,但提高了课程教学起点,注重从提高学生的科学实验能力上选择课程的教学内容,删除了部分与中学实验内容重复或相近的传统的实验项目,改变了原版教材验证性实验项目过多的现象;对于一些经典的实验项目,尽可能使用在工程技术上已普遍使用的较新的仪器设备;应用性和综合性实验项目有所增加,并注重学生综合实验能力的培养;在实验课题的选取上注意立足基础、着眼现代,加强学生现代实验技术和创新意识的培养。对每一个实验项目的编写则力求叙述清楚,层次分明,联系实际,便于自学,引导思考。在误差理论的介绍中,侧重于基本概念의阐述与应用,适当的引入了不确定度的概念,以求与当前在这方面的要求与发展接近。在修订版中还进一步明确了设计性实验的教学要求,充实了有扩展性和应用价值的设计性实验项目和实验内容。

全书共分五章。第一章属于共性的基础知识,包括实验误差理论及有效数字、数据处理和作图等基本知识;第二章为物理实验的基础训练,比较系统地阐述了物理实验中的基本方法、基本调节技术和常用的基本仪器,并编入了预备性实验等 14 个实验项目;第三章为物理实验的测量技术,介绍了物理实验中常用的一些测量技术,并编入了力学、热学、声学、电磁学、光学、近代物理实验技术和综合性实验等实验项目;第四章在概括地阐述了设计性实验的教学要求和进行设计性实验的一般程序的前提下,编入了 7 个设计性实验项目。第五章介绍的大学物理实验仿真系统,是 CAI(计算机辅助教学)的一个重要组成部分,借助计算机可以仿真诸多物理实验。

考虑到大学物理实验课程的独立性和特点,本书在编写过程中力求做到:“实验目的”简练突出,使学生明确实验要求,完成预定任务;“实验原理”部分叙述清楚,尽量避免烦琐的数学推导,着眼于物理概念及实验方法的阐述,使学生在实验预习时掌握理论依据;“实验内容”按由详到简的顺序编写,旨在逐步提高学生的实验技能和动手能力;部分实验还安排了一些选做内容,既保证绝大部分学生能够达到教学的基本要求,又可以让一部分学有余力的学生得到进一步提高。每个实验前都附有一段提要,概述本实验的主要内容及扩充有关知识面;每个实验后均配有预习思考题和讨论题,前者引导学生预习,后者供学生实验后分析讨论和巩固提高。在涉及仪器介绍时,尽可能突出仪器的基本原理和使用方法,在有关实验的附录中适当介绍常用仪器的外型特征和生产厂家,以增强适用性和配置实验时参考。

本书由赵青生、马书炳组织编写和统稿,参加本书编写工作还有阚涛、汪洪、戴玮、刘春云、张永胜。赵学民审阅了全部书稿。参加编写工作的同志一致认为:实验教学是一项

集体的事业,无论是实验教材的编写,还是实验的开设和准备都凝聚着全体任课教师和实验技术人员的智慧和劳动成果。本书在改编的过程中,得到了姜明连教授的热心指导和帮助,借鉴和参阅了兄弟院校的有关教材和经验,甚至引用了某些内容,在此深表谢意。编者水平有限,书中定有不当之处,恳请指正。

本书是根据《教育部关于在中等职业学校中开设《金属材料》课程的通知》(教高[1998]10号)和《教育部关于在中等职业学校中开设《金属材料》课程的通知》(教高[1998]10号)的要求,在广泛征求有关院校意见的基础上,由有关院校教师共同编写而成的。本书可作为中等职业学校金属材料专业及相关专业的教材,也可供从事金属材料工作的工程技术人员参考。

本书共分五章。第一章为绪论,主要介绍金属材料的发展概况、分类、性能、应用及金属材料的选择原则。第二章为金属的晶体结构,主要介绍金属的晶体结构、金属键、金属的力学性能、金属的塑性变形、金属的强化、金属的腐蚀与防护。第三章为金属的力学性能,主要介绍金属的力学性能、金属的塑性变形、金属的强化、金属的腐蚀与防护。第四章为金属的腐蚀与防护,主要介绍金属的腐蚀与防护、金属的腐蚀与防护、金属的腐蚀与防护。第五章为金属材料的选择原则,主要介绍金属材料的选择原则、金属材料的选择原则、金属材料的选择原则。

本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了有关院校的支持。由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

绪论

——致学习本课程的同学

大学阶段物理实验课程的学习,不同于中学阶段的实验课。因为中学里的物理实验主要是为了扩大视野、丰富感性知识和增加动手机会,进而帮助同学了解和巩固课堂上所学的理论知识。它仅是物理课程教学的一个附属教学环节。但是,在大学阶段开设的物理实验课程是独立于《大学物理》之外,对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修基础实验课程,单独记分,是学生在高等学校受到系统实验技能训练的开端。它在培养学生运用实验手段去分析、观察、发现乃至研究、解决问题的能力方面,在提高学生科学实验素质方面,都起着重要的作用。同时,它也将为学生今后的学习、工作奠定良好的实验基础。

1. 大学物理实验课的基本教学环节

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,实验课的教学安排不可能象书本教学那样使所有的学生按照同样的内容以同一进度进行,教学方式主要是学生自己动手,完成实验内容规定的任务去学习,教师只是在关键的地方给予提示和指导,因此学习物理实验就要求同学们花比较大的功夫,有较强的独立工作能力。学好物理实验课的关键,在于把握住下列三个基本教学环节:

(1) 实验前的预习 实验教材是进行实验的指导书。它对每个实验的目的与要求,实验原理都作了明确的阐述。因此,在上实验课前都要认真阅读,必要时还应阅读有关参考资料。对于所涉及的测量仪器,在预习时可阅读教材中有关对仪器的介绍,了解其构造原理、工作条件和操作规程等,必要时可到实验室去观察实物,并在此基础上写好预习报告,回答预习思考题。预习报告内容主要包括以下几个方面:①实验名称;②实验目的;③原理摘要(包括主要原理公式、列出有关测量的条件和将要被验证的规律。其中要明确哪些物理量是直接测量量,哪些物理量是间接测量量,用什么方法和测量仪器等;电学实验应绘出电原理图、光学实验应绘出光路图);④主要仪器设备;⑤在实验记录本上列出数据记录表格;⑥回答预习思考题。

上课时,指导教师将检查学生的预习情况,对于没有预习和未完成预习报告的学生,指导教师有权停止该生本次实验。

(2) 实验中的操作 实验操作是实验的主要内容。实验时应遵守实验室规章制度;仔细阅读有关仪器使用的注意事项或仪器说明书;在教师指导下正确使用仪器,注意爱护,稳拿妥放,防止损坏,对于电磁学实验,必须由指导教师检查电路的连接正确无误后,方可接通电源进行实验。对于严重违反实验室规则者,指导教师应停止其实验,并按有关规定处理。

做好实验记录是科学实验的一项基本功。在观察、测量时,要做到正确读数,实事求是地记录客观现象和数据。在编好页码的实验记录本上,写明实验名称、实验日期、同组

人,必要时还要注明天气、室温、大气压、温度等环境条件。接着要记下实验所用仪器装置的名称型号、规格、编号和性能情况以及被测量的号码或者其它标记,以便以后需要时可以用来重复测量和利用仪器的准确度校核实验结果的误差,切勿将数据随意记录在草稿纸上,不可事后凭回忆“追忆”数据,更不可为拼凑数据而将实验记录做随心所欲的涂改。

要逐步学会分析实验,排除实验中出现的各种较简单的故障。实验最后一般总会有数据结果,这些数据是否正确靠什么去判断?数据的好坏又说明什么?实验结果是否正确?这些问题主要是靠分析实验本身来判断,即必须分析实验方法是否正确,它带来多大误差?仪器带来多大的误差?实验环境有多大的影响等等。实验后的讨论发挥同学们才智,是提高学生分析问题和解决问题能力重要环节,应努力去做。但要注意,不要空发议论,应力求定量地分析问题,做到言之有据。往往有些同学,当实验数据和理论计算一致时,就会心满意足,简单地认为已经学好了这次实验;而一旦数据和计算差别较大,又会感到失望,抱怨仪器装置甚至拼凑数据,这两种态度都是实验教学和一切实验研究活动所不可取的。实际上,任何理论公式都是一定的理论上的抽象和简单化,而客观现实和实验所处的环境条件要复杂得多,实验结果必然带来和理论公式的差异,问题在于差异的大小是否合理。所以不论数据好坏,都应逐步学会分析实验,找出成败的原因。

误差与数据处理知识是物理实验的特殊语言。实验做得好与差;两种方法测量同一物理量其结果是否一致;实验验证还是没有验证理论等,这不能凭感觉,而必须用实验数据和实验误差来下断言。领悟并运用这种语言,才能真正置身于实验之中,亲身感受到成功的喜悦和失败的困惑。

实验结束,要把测得的数据交给指导老师检验通过,对不合理的或者错误的实验结果,经分析后还要补做或重做。离开实验室前要整理好使用过的仪器,做好清洁工作。

(3) 实验后的报告 写实验报告的目的是为了培养和训练学生书面形式总结工作或报告科学成果的能力。报告是实验成果的文字报告,所以最起码应该做到字迹清楚、文理通顺、图表正确、数据完备和结论明确。报告应予同行以清晰的思路、见解和新的启迪才算得上一份成功的报告。一般应写在专用的实验报告纸上,下次实验时交指导教师批阅。实验报告的内容应包括:实验名称、实验目的、原理简述、实验内容、数据记录、数据处理与结果分析、讨论等8个部分。

下面分别对“报告”中各部分的写法提出一些要求:

关于“实验名称”和“实验目的”,一般应与教材中提法一致。

关于“原理简述”,应该在对原理理解的基础上用自己的语言简要叙述,要求做到简明扼要,图(原理图、光路图、电路图)文并茂,并列测量和计算所依据的公式,注明公式中各量的物理意义及公式的适用条件。

关于“实验内容”,概括性地写出实验进行的主要过程,设计型实验应该写出关键性的步骤和注意事项。

关于“数据记录”,一般要求以列表形式来反映完整而清晰的原始测量数据。

关于“数据处理与结果分析”,要求写出数据处理的主要过程、图线、误差分析等。在计算处理完成以后,必须以醒目的方式完整地表示出实验结果。

关于“讨论”(包括回答讨论题),一般讨论内容不受限制,可以是对观察到的实验现象

进行分析,对结果和误差原因进行分析,也可以对实验方案及其改进意见进行讨论评述。这是实验报告中最开放、最灵活的部分,重在说理,所以能反映实验者观察和分析能力的高低。

报告无疑应该按照自己的思路来写,特别受赞赏的是自身体会的经验之谈。

2. 如何学好大学物理实验课

大学物理实验是一门实践性课程,学生是在自己独立工作的过程中增长知识、提高能力。因而上述教学目的能否达到,在很大程度上取决于学生自己的努力。鉴于我国目前中学阶段对学生实验的训练普遍比较薄弱的现状,在大学阶段想学好物理实验课程,不仅要多花力气、下苦工夫,还应当特别注意改进自己的学习方法。

(1) 要注意掌握基本的实验方法和测量技术

基本的实验方法和测量技术在实际工作中会经常用到,并且是复杂的方法和技术的基础。学习时不但要搞清它们的基本道理,还应该逐步地熟悉和记牢它们,且能运用这些方法和技术设计一些简单的实验。任何一种实验方法和测量技术都有着它应用的条件、优缺点和局限性,只有亲自做了一定数量的实验后,才会对这些条件、优缺点和局限性有切身的体会。

(2) 要有意识地培养良好的实验习惯

在开始做实验之前,应当先认真阅读实验教材和有关仪器资料,这样你才有可能对将要做的实验工作有具体而清楚的了解;而当你完成一个实验的同时,一定要有一份完整而真实的实验记录,这样,你才有可能在需要时随时查阅这些记录,从而在处理数据、分析结果时,有足够的第一手资料;才能帮助你正确地去理解,你到底在做什么实验。在实验过程中,凡有必要,应重复测量若干次,多测读几次,一般总要比只读一次为好(至少能确保不读错!)。要注意记录实验的环境条件(如室温、气压、温度、仪表名称、规格、量程和精度等),注意实验仪器在安置和使用上的要求和特点,有时甚至还要注意纠正自己不正确的操作习惯和姿势。良好的习惯需要经过很多次实验后的总结、反思和回顾以后才能形成。而良好的实验习惯,对保证实验的正常进行,确保实验中的安全,防止差错的发生,都有很好的作用。如果就单个实验习惯而言,由于比较易于理解,又不难掌握,反而容易被初学者所忽视。无数实践证明,良好习惯的养成,只有在实验的过程中有意识地去锻炼自己才行。

在具体的实验课题中,有些实验的完成需要两个或多个同组实验者的合作,与他们共同讨论、分析实验的结果,将会使你获得比你独自分析有着更多的收益。有时,你在做实验时,如果受时间或条件的限制,仅来得及完成实验任务的二分之一或更少,但只要坚持认真去做,也将比仓促而马虎地赶完全部实验任务获益更多。

(3) 要注意养成善于分析的习惯

实验中要善于捕捉和分析实验现象,力争独立地排除实验中各种可能出现的故障,并锻炼自己自主发现问题、分析问题和解决问题的能力。如:实验数据是否合理、正确?靠什么去判断?数据的“好”或“坏”又说明了什么?实验结果的可靠性和正确性又如何?这些问题的解决,主要依靠分析实验的本身和实验的过程去判断;换言之,就是实验方法是

否正确、合理？它可能引入多大的误差？实验仪器又会带来多少误差？实验环境、条件的影响又将如何？

为了帮助初学者克服实验经验少、还没有掌握一整套分析实验的方法等实际情况，作为大学基础教学实验的物理实验往往在实验教材中安排少数已有十分确切理论结论的实验课题，使初学者便于联系和判断实验结果的正确性。但千万不要误认为做实验的目的只是为了得到一个标准的实验结果。如果获得的实验数据与标准数据符合了就高兴，一旦有所差别，就大失所望，抱怨仪器或装置不好，甚至拼凑数据，这些表现都是不正确的，是违背科学的。事实上，任何理论公式和结论都是经过一定的理论上的抽象并被简化了的，而客观事实与实验所处的环境条件则要复杂得多，实验结果与理论公式、结论之间发生差别是必然会有，问题是差异有多大？是否合理？不论实验结果或数据的好坏，都应养成分析的习惯。当然也不要贸然下结论。首先要检查自己的操作和读数，注意实验装置和环境条件。若操作和读数经检查正确无误，那么毛病可能出现在仪器和装置本身。小的故障、小的毛病，实验者应力求自己动手去排除，起码也应留意教师或实验室工作人员是怎么着手解决的。仪器失灵，也要学习教师如何去判定仪器失灵或故障所在？怎样修复？在此还应着重指出，能否发现仪器装置的故障，及时迅速修复，这也是一个人实验能力强弱的重要表现，初学者应要求自己逐步提高这方面的能力。

(4) 要掌握好每个实验的重点

每个实验中都有较多的内容，首先应完成基本内容，这既是基础，也是重点。所以必须注意实验的目的，这样可以提高学习效率。完成基本内容后，如果时间许可，可以根据自己的具体实际情况，尝试去分析以下实验可能存在的一些问题，如使用仪器的精度、可靠性、实验条件是否已被满足？怎样给予证实？或进一步提出改进实验的建议，试做一些新的实验内容等。当然，不应简单地重复。

总之，物理实验课有着自己的特点和规律，要学好这门课不是一件容易的事情。希望同学们在学习过程中不断提高对它的兴趣，打好基础，注意培养自己成为优秀科学技术人材。

目 次

1 物理量的测量、测量误差和数据处理	(1)
1.1 测量与误差	(1)
1.2 误差的处理	(6)
1.3 直接测量结果的表示和总不确定度的评定	(10)
1.4 间接测量的结果及不确定度的评定	(14)
1.5 处理系统误差的一般知识	(18)
1.6 实验中的错误与错误数据	(22)
1.7 常用仪器的仪器误差	(24)
1.8 数据处理的基本方法	(28)
练习题	(40)
2 物理实验的基本训练	(43)
2.1 物理实验的基本测量仪器	(43)
2.2 物理实验的基本测量方法	(64)
2.3 物理实验中的基本调整与操作技术	(68)
2.4 计算机在物理实验中的应用	(69)
实验 1 预备实验	(72)
实习 1 物体密度的测量	(73)
实习 2 万用电表的使用	(76)
实习 3 光路调整与薄透镜焦距的测定	(82)
实验 2 单摆实验	(86)
实验 3 金属杨氏模量的测量	(91)
实验 4 气垫技术	(97)
实验 5 用三线摆测定物体的转动惯量	(103)
实验 6 液体粘滞系数的测定	(107)
实验 7 测定冰的熔解热	(110)
实验 8 多量程电表的设计与校准	(112)
实验 9 模拟静电场	(118)
实验 10 直流电桥测电阻	(120)
实习 1 用惠斯登电桥测量中值电阻	(121)
实习 2 用双臂电桥测量低电阻	(124)
实验 11 补偿原理与电位差计	(129)
实习 1 用自组补偿电路测电动势	(132)
实习 2 热电偶温差系数的测量	(135)
实验 12 灵敏电流计的特性研究	(138)

实验 13	望远镜和显微镜放大率的测量	(144)
实验 14	分光计的调整及棱镜折射率的测定	(148)
实习 1	分光计的调整与三棱镜顶角的测定	(148)
实习 2	棱镜折射率的测定	(153)
3	物理实验的基本技术	(156)
3.1	非电量测量技术	(156)
3.2	测磁技术	(161)
3.3	测量结果的动态显示与记录	(163)
3.4	光学测量基本技术	(164)
实验 15	空气比热容比的测定	(167)
实验 16	物体导热系数的测定	(169)
实验 17	示波器的使用	(173)
实验 18	用纵向磁聚焦法测定电子荷质比	(186)
实验 19	用冲击电流计测量电容	(189)
实验 20	用示波器观察铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线	(194)
实验 21	霍尔效应	(199)
实习 1	测量通电螺线管内部磁场	(200)
实习 2	霍尔效应及应用	(204)
实验 22	RLC 串联电路的暂态过程	(207)
实验 23	阿贝折射仪	(213)
实验 24	光的干涉现象应用	(216)
实验 25	双棱镜干涉实验	(221)
实验 26	衍射光栅	(224)
实验 27	激光衍射法测量微小长度	(228)
实验 28	偏振光的观察与应用	(231)
实习 1	偏振光的研究	(231)
实习 2	小型旋光仪的使用	(237)
实验 29	迈克尔逊干涉仪的调整与使用	(240)
实验 30	法布里—珀罗干涉仪	(246)
实验 31	黑白摄影与放大	(249)
实验 32	全息照相	(255)
实验 33	小型棱镜摄谱仪	(260)
实验 34	阿贝成像与空间滤波	(265)
实验 35	PN 结正向压降与温度关系的研究与应用	(271)
实验 36	传感器的特性及应用	(275)
实习 1	电阻应变片特性测试	(278)
实习 2	电容传感器的特性	(282)
实习 3	电压传感器的特性	(285)

实习 4 涡流传感器的特性	(286)
实验 37 声速的测量	(288)
实验 38 利用超声光栅测定液体中的声速	(294)
实验 39 密立根油滴实验	(296)
实验 40 夫兰克—赫兹实验	(302)
实验 41 光电效应测普朗克常数	(308)
4 设计性实验的训练	(313)
4.1 设计型实验的基本程序和要求	(313)
4.2 测量过程的设计	(314)
实验 42 金属线胀系数的测量	(318)
实验 43 简谐振动的研究	(320)
实验 44 电表内阻的测定	(322)
实验 45 电位差计校正电表和测定电阻	(323)
实验 46 伏安法的研究与补偿原理的应用	(323)
实验 47 氢原子光谱	(325)
实验 48 用迈克尔逊干涉仪测量白光光源的相干长度	(326)
5 大学物理实验仿真系统	(327)
附表	(333)
主要参考文献	(337)

1 物理量的测量、测量误差和数据处理

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都需要进行测量。实践证明:任何测量结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。这是由于任何测量器具、测量环境、测量人员及测量方法等都不能做到绝对严密,这些就使得测量不可避免地伴随有误差产生。因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。为此,我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识。

本章主要是自学材料,主要介绍了物理量的测量、测量误差理论、实验数据处理、实验结果的表示和实验设计等方面的初步知识,作为进入实验前的基础准备。这些知识不仅在每一个物理实验都要用到,而且是今后从事科学实验工作必须了解和掌握的。由于这部分内容牵涉面较广,新概念又多,深入地讨论它们,已超出了本课程的范围。因此,我们只能注重介绍一些基本概念,引用一些结论和公式,以满足本课程的教学需要。由于同学们还不具备足够的基础知识,学习这一部分内容时会觉得有些困难,再加上内容又比较多,所以不可能通过一两次学习即可掌握。这一部分内容非常重要,要求同学们在认真阅读教材基础上,对提到的问题有一个初步的了解,以后结合每一个具体实验再细读有关的段落,通过运用加以掌握。应当说明的是误差理论的深入讨论是计量学和数理统计学的任务。我们暂时只能引用它们的某些现成结论和计算公式。详细探讨和证明留待在数理统计课中学习。

在本章的学习过程中主要解决:

- (1)正确分析误差,尽可能减小系统误差,合理测量及记录实验数据;
- (2)正确处理测量数据,从而得到接近于真值的最佳结果;
- (3)合理评价测量结果的误差,写出测量结果的完整表达式。
- (4)在设计性实验中,合理选择测量仪器、测量方法和测量条件,从而得到最佳结果。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量和单位

1. 物理量

一切描述物质状态与物质运动的量都是物理量。这些量都只有通过测量才能确定其量值。所谓测量,就是将确定的待测物理量直接或间接地与取作标准的单位同类物理量进行比较,得到比值的过程,称为测量。这个比值就是待测物理量的数值,加上相应的单位就构成了一个完整的“物理量”。

在人类历史上的不同时期、不同国家、乃至不同地区,同一物理量有着许多不同的计量单位。如长度单位就分别有码、英尺、市尺和米等。为了便于国际贸易及科技文化的交流,单位制的统一成为众望所归。因此国际计量大会于1960年确定了国际单位制(SI),它规定了7个基本单位:长度—米(m)、时间—秒(s)、质量—千克(kg)、电流—安培(A)、热力学温度—开尔文(K)、物质的量—摩尔(mol)和发光强度—坎德拉(cd),还规定了两个辅助单位:平面角—弧度(rad)和立体角(sr)。其他一切物理量(如力、能量、电压、磁感应强度等)均作为这些基本单位和辅助单位的导出单位。

2. 直接测量与间接测量

按照计量学定义:测量是以确定被测量对象量值为目的的全部操作过程。测量分为直接测量与间接测量。

直接测量是指直接将待测物理量与选定的同类物理量的标准单位相比较直接得到测量值大小的一种测量。它不必进行任何函数计算。例如用钢直尺测量长度,用天平和砝码测量物体的质量,用电流表测量线路中的电流等都是直接测量。

间接测量是指经过测量与被测量有函数关系的其他量,再经运算得到测量值大小的一种测量。例如,通过测量长度确定矩形面积,通过用伏特表测量导体两端的电压,用电流表测量通过该导体的电流,由已知公式 $R = U/I$ 算出导体电阻的过程都属于间接测量。

从上面所举的测量导体电阻的例子可以看出,有的物理量既可以直接测量,也可以间接测量,取决于使用的仪器和测量方法。随着测量技术的发展,用于直接测量的仪器越来越多,但在物理实验中,有许多物理量仍需要间接测量。

测量结果应给出被测量的量值,它包括数值和单位两个部分(不标出单位的数值不是量值)。实际上仪器在测量中是单位的实物体现。

3. 等精度测量与不等精度测量

如果对某一物理量进行重复多次测量,而且设每次测量的条件相同(如同一组仪器、同一种测量方法、同一个观察者及环境条件不变等),测得一组数据分别为: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。尽管各次测得结果并不完全相同,但我们没有任何充足的理由来判断某一次测量更为精确,只能认为它们测量的精确程度是完全相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量;这样的一组数列称为等精度测量列(简称测量列)。在所有的测量条件中,只要有一个发生变化,这时所进行的测量即为不等精度测量。

在物理实验中,凡是要求多次测量均指等精度测量,应尽可能保持等精度测量条件不变。严格地说,在实验过程中保持测量条件不变是很困难的,但当某一条件的变化,对测量结果影响不大时,仍可视为等精度测量。在本章中我们除了特别指明外,都作为等精度测量来讨论。

4. 测量过程中应注意的问题

(1) 测量仪器的量程、精密度和准确度

测量总是通过一定的仪器或量具来完成的。因此,熟悉仪器的性能,掌握仪器的使用方法和准确的读数是完成实验的必要条件。为此,在测量前必须对仪器有一定的认识,这些主要包括:

①量程 仪器的测量范围称为仪器的量程。如 TW-02 物理天平的最大称量是 200g, UJ31 电位差计的量程为 171mV 等。

②仪器的精密度 仪器的精密度是指仪器所能分辨物理量的最小值, 一般与仪器的最小分度值一致, 此值愈小, 仪器的精密度愈高。如千分尺的最小分度值为 0.01mm。可以认为其分辨率为 0.01mm/刻度, 或其仪器的精密度为 100 刻度/mm。

③仪器的准确度等级 测量时是以仪器为标准进行比较, 当然要求仪器准确, 由于测量的目的不同, 对仪器的准确程度的要求也不同。比如测量金戒指的天平必须准确到 0.001g, 而粮店卖粮食的台秤差几克都是无关紧要的。国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级。各类各等级的仪器, 又有对准确程度的具体规定。例如实验室常用的一级螺旋测微计, 测量范围不大于 100mm 时的仪器误差限为 $\pm 0.004\text{mm}$; 又如 1.0 级电流表, 测量范围为 500mA 时的仪器误差限为 $\pm 5\text{mA}$ 。

实验时要恰当选取仪器。仪器使用不当时对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多指标, 最基本的是测量范围和准确度等级。当被测量超过仪器的测量范围时首先对仪器会造成损伤, 其次可能测不出量值(如电流表), 或勉强测出(如天平), 但误差将增大。对仪器的准确度等级的选择也要适当, 一般是在满足测量要求的条件下, 尽量选择准确程度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数, 可以减少在反复使用时的损耗, 延长其使用寿命。

(2) 测量的读数规则

①要如实、全部的记录仪器所显示的数值。如仪器的量程、分度值和估读数等。所谓“如实”, 就是直接按刻度的标度数字读出并记录, 作为原始数据, 尔后再作单位换算。例如, 用一电流表进行测量, 首先查明其分度值为 2.5mA/格, 然后读出指针指示的格数, 如 20.4 格, ……等, 测量结束后再逐一换算得到 51.0mA, ……等。这样既可以减少差错, 又可以留待以后适当时换算(如先求出 10 个读数的平均值后再换算)。所谓“全部”, 就是要将仪器显示的全部有效数字读出。一般在直接测量时要求估读出量具最小分度的 $1/10 \sim 1/2$ 。

②如仪表的示数不是连续变化而是以一定的最小步长跳跃变化的(如数字显示仪表), 则只能记录所显示的全部数字, 无需进行估读。尤其需要指出有些仪表, 如停表等, 虽然也有指针和刻度盘, 但其指针的跳动是以最小分度(1/10 秒或 1/100 秒)为单位的, 因此不能估读到 1 格以下。还有游标卡尺是依靠判断两个刻度中哪条线对齐进行读数的, 这时一般应记下对齐(或接近对齐)线的数值, 不进行更细的估读。

1.1.2 误差的定义与分类

1. 误差的定义

待测物理量的大小(即真值)是客观存在的, 在具体测量时, 要经过一定的方案设计, 运用一定的实验方法, 在一定的条件下, 借助于仪器由实验人员去进行和完成。尽管我们千方百计地改进实验方案设计, 提高仪器精度和测量人员水平, 但是仪器精度的提高总有一个限制, 实验方法不可能完美无缺, 测量人员技术水平不可能无限提高, 这就使得测量结果与客观真值有一定的差异。测量误差 Δ_x 等于测量结果(x)与待测量的真值(或约定

真值,用 x_0 表示)之差值。即:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1)$$

待测量的真值是指在一定时间,一定状态下。待测物理量客观上所具有的数值称为真值。它是一个理想的概念,一般是不可知的。为此。我们通常所说的真值一般有如下三种类型:

①理论真值或定义真值,如三角形的三内角和等于 180° 等;

②计量学约定真值:由国际计量大会决议约定的值。如前面所介绍的基本物理量的单位标准,以及大会约定的基本物理常数等。需要指出的是,由于这些基本常数只能反映大会当时的测量水平,显然它们也是含有一定误差的;因为它们的误差比一般实验室测量结果的误差要小的多,所以将它们作为公认的约定真值。随着时间的推移,测量技术的不断提高,这些基本常数值将会日臻完善而更加接近它们的真值;

③标准器相对真值(或实际值):通常进行测量时,不可能将所使用的测量仪器逐一去直接与国家或国际的标准相校对,而是经过多级计量检定网进行一系列逐级校对。所以比被校仪器高一级的标准器的量值作为标准器相对真值(亦称实际值)。例如,用 0.5 级电流表测得某电路的电流为 1.200A,用 0.2 级电流表测得为 1.202A,则后者可视为前者的实际值。

2. 误差的表示方法

测量误差不但反映了测量结果偏离真值的大小(即反映了测量结果的准确程度),而且还反映了测量结果是比真值大还是比真值小,并且具有和被测量相同的单位。由于是与真值相比较,所以又有绝对误差之称,简称误差。

为了全面评价测量结果的优劣,还需要考虑被测量本身的大小。例如要比较两个不同的物理量,如 20mm 和 2mm 厚的平板,用千分尺测得它们的绝对误差均为 0.004mm,若用绝对误差来评价,则测量误差相同。显然,用绝对误差表示没有反映出它们的本质特征。另外,若要比较两类不同物理量的测量优劣,如某物长 20.000mm,绝对误差为 0.005mm,某物重量为 17.03g,绝对误差为 0.02g,因绝对误差与单位均不相同而无法比较。基于上述情况,还需引入相对误差的概念。相对误差 E 定义为绝对误差 Δx 与被测量的最佳值的 $\bar{x}$ 比值,即:

$$E = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

相对误差常用百分数表示。由上式可见,相对误差是不带单位的一个纯数,所以它既可以评价量值不同的同类物理量的测量,也可以评价不同类物理量的测量,从而判断它们之间的优劣。

有时被测量有公认值或约定值,则用百分误差 E_0 来表示,其定义式为:

$$E_0 = \frac{|\text{测量最佳值} - \text{公认值}|}{\text{公认值}} \times 100\% \quad (3)$$

3. 误差的分类

测量误差的产生有多方面的原因,根据测量误差的性质和产生的原因,可将其分为系统误差和随机误差两大类。