



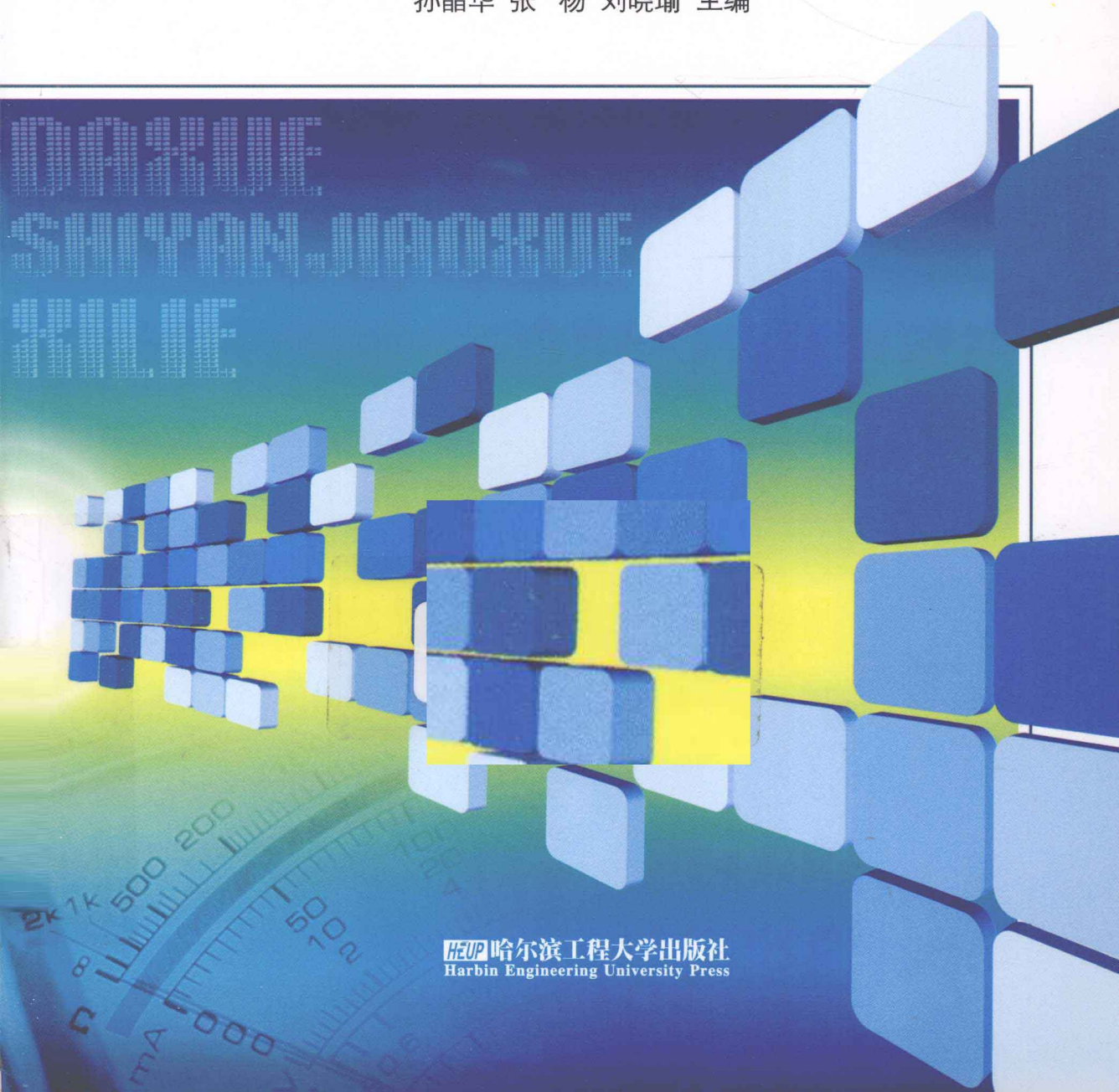
大学实验教学系列
DAXUESHIYANJIAOXUEXILIE

国家级实验教学示范中心建设教材

全国高等学校《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008年版)配套教材

预备性物理实验

孙晶华 张 杨 刘晓瑜 主编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



大学实验教学系列
DAXUESHIYANJIAOXUEXILIE

国家级实验教学示范中心建设教材

全国高等学校《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008年版)配套教材

预备性物理实验

孙晶华 张 杨 刘晓瑜 主编

 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

“物理实验”是学生进入大学后接受系统实验方法和实验技能训练的开端,是对学生进行科学实验训练的重要基础。对于刚进入大学的新生来说,大部分学生在中学没有接触到物理实验。由于学生的实验基础参差不齐,势必会影响物理实验的正常授课。

本书介绍了物理实验的前导知识、电磁学实验和光学实验的预备知识,精选了9个最基本的实验,作为“物理实验”正规训练前的预备练习。其目的是为了缩小来自不同地区和学校的学生对基本物理实验掌握程度的差别,使学生掌握最基本仪器的使用方法和最基本的测量方法,培养学生最基本的实验能力,使学生能更顺利地进入下一阶段“物理实验”课程的学习,保证“物理实验”课程的教学质量。

本书可作为理工科院校物理实验的前导教材,也可供文科专业和专科院校选用。

图书在版编目(CIP)数据

预备性物理实验/孙晶华,张杨,刘晓瑜主编.

—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-81133-886-7

I. ①预… II. ①孙…②张…③刘 III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 194289 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 7.5
字 数 168 千字
版 次 2011 年 1 月第 1 版
印 次 2011 年 1 月第 1 次印刷
定 价 19.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

物理实验是本科生入学后,最先开始的实践课程。对于刚刚入学的大学生,大部分学生没有接触过物理实验,一些最基本的物理仪器,如游标卡尺、螺旋测微器、电表、电阻箱、示波器等在中学也没有见过。对于那些高考不是参加物理加试的学生,他们的物理概念及物理实验基础几乎没有。鉴于此,根据教育部物理教学指导委员会 2008 年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》中“为一些实验基础较为薄弱的学生开设预备性实验以保证实验课教学质量”的要求,为了缩小来自不同地区和学校的学生对基本物理实验掌握程度的差别,使学生掌握最基本仪器的使用方法和最基本的测量方法,培养学生最基本的实验能力,使学生能更顺利地进入下一阶段“物理实验”课程的学习,保证“物理实验”课程的教学质量,我们编写了本书。

为了具有更好的可读性,在编排方面,本书版式灵活、图文并茂;在内容的叙述上,力求做到生动形象、通俗易懂,避免出现复杂的数学公式;在每个实验中,以各种物理现象、历史为背景,增加了对应的实验在生产实践、生活和科研方面的应用。

本书的物理实验前导知识,电磁学实验预备知识,光学实验预备知识,实验 2、实验 7、附录 1、附录 2 由张杨编写。实验 1、实验 3~6、实验 8~9 由刘晓瑜编写。孙晶华对全书进行了统稿,并对个别部分进行了修改。

建议本课程作为新生入学第一学期的选修课程,课时为 16 时。其中物理实验的前导知识安排 2 学时,各学校可以根据现有的条件,从中选择 7~8 个实验。

限于编者的学术水平,书中难免存在错误和不妥之处,望同行老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将会在今后的再版中加以纠正,使本书不断完善。

编者

2010 年 6 月于哈尔滨

物理实验学生守则

1. 按时到达指定实验室(尽量提前 10 分钟),按实验台号就坐,迟到者不允许参加本次实验;
2. 上课时需带校园一卡通、计算器、直尺等必备用具;
3. 课前应做好预习,没有预习报告或预习不合格者不能做实验;
4. 认真听老师讲解实验的注意事项、实验原理、实验内容、实验操作的要领和基本要求;
5. 实验之前,结合老师所讲注意事项以及书中的仪器介绍,初步掌握仪器的正确操作方法,切忌盲目操作实验仪器;
6. 进入实验室必须遵守实验室的各项规章制度,不得大声喧哗,保持室内卫生,正确使用仪器设备,注意安全;
7. 在记录数据前,先观察相应实验现象,确认无任何异常后,开始记录数据;
8. 遇到问题(缺少仪器,仪器故障,数据异常)及时请教老师,不得擅自更换仪器或改动数据;
9. 凡使用电源的实验,必须经过教师检查线路并同意后,方可接通电源;
10. 实验完成后,所记录数据要经老师检查并签字;
11. 离开实验室前,应将仪器整理还原,桌面收拾整洁,凳子摆放整齐;
12. 实验报告连同教师签字的原始数据应在做实验后一周内交到任课教师的专有实验报告箱中。

大学物理实验选课方法及选课记录

哈尔滨工程大学“预备性物理实验”和后续的“大学物理实验”课程均采用网上预约实验的方式,学生可根据自己的时间,灵活安排上课时间。

选课方法:

- 1. 选课网址: <http://lab.hrbeu.edu.cn>;或登陆学校主页: <http://www.hrbeu.edu.cn>/→信息化校园→实验室管理;
- 2. 用户名为学生完整的学号,初始密码为 88888,用户类型选学生,登录后务必重新设定自己的密码;
- 3. 在开课周内可以随时进行网上预约和取消预约,但课前 4 小时内不能预约和取消该实验项目;
- 4. 不按时到课,又没有取消预约的,按旷课处理;
- 5. 所有的实验要在开课周内完成,逾期不补;
- 6. 网上预约实验后,可将预约情况记录于下表,以便随时查询。

序号	实验名称	实验时间	座位号	实验室	备 注
1		月 日 时 分			
2		月 日 时 分			
3		月 日 时 分			
4		月 日 时 分			
5		月 日 时 分			
6		月 日 时 分			
7		月 日 时 分			
8		月 日 时 分			
9		月 日 时 分			
10		月 日 时 分			

基 础 篇

第1章	绪论	1
第2章	物理实验前导知识	6
第3章	电磁学实验预备知识	22
第4章	光学实验预备知识	31

实 验 篇

实验1	长度测量	37
实验2	物体密度的测定	49
实验3	金属线膨胀系数的测定	55
实验4	示波器的使用	61
实验5	重力加速度的测量	71
实验6	电阻伏安特性的测量	76
实验7	测量电阻的温度系数	84
实验8	薄透镜焦距的测定	89
实验9	平行光管的调整与使用	96
附录1	中华人民共和国法定计量	105
附录2	常用物理常数	107

基 础 篇

第1章 绪 论

1.1 物理实验的意义

物理学是一门实验科学,无论是物理学规律的发现,还是物理学理论的验证,都离不开物理实验。正如我们所知,赫兹(Heinrich Rudolph Hertz)所做的电磁波实验使麦克斯韦(James Clerk Maxwell)的电磁理论获得了普遍承认;杨氏(Thomas Young)干涉实验使得光的波动学说得以确立;卢瑟福(Ernest Rutherford)的 α 粒子的散射实验则揭开了原子的秘密;密里根(Robert Andrews Millikan)设计的油滴实验证明了电荷的不连续性,等等。

实验是根据所研究的目标,利用科学仪器,人为地控制、创造和纯化某种自然过程,使之按照预期的进程发展,同时在尽可能消除或减少干扰的情况下进行观测(定性或定量),来探求自然过程变化规律的一种科学行为。

物理实验又是科学实验的先驱,其实验思想、实验方法和实验手段等是各个学科科学实验研究的基础。目前,国内外绝大部分工科专业都是以物理学作为基础的,因此,大学物理实验是所有工科院校不可或缺的公共基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开始。

大学物理实验中涉及到的知识、方法和技能是学生进行后续实践训练的基础,也是毕业后从事各项科学实践和工程实践的基础。实验课程覆盖面广,它包括力学、热学、电磁学、声学、光学及近代物理学的部分实验,具有丰富的实验思想、方法和手段,同时能提供综合性很强的基本实验技能训练,是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础课程。

大学物理实验对工科学生的培养所起到的作用应该是:加深学生对所学理论知识的理解,促使学生去主动思考,提高学生分析和解决实际问题的能力,更重要的是,通过实验课堂教学,使学生掌握“各种各样的基本物理量的测量方法,基本测量仪器的使用方法,实验数据处理的基本方法和撰写实验报告的基本方法”,学生在实验课上,能够在实验教材(或仪器使用说明书)的指导下独立完成实验,是对学生“阅读文献能力”最好的培养和锻炼。同时,大学物理实验在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合应用能力等方面也具有其他实践类课程不可替代的作用。其直接影响着高校输出的人才是否具有解决实际工程应用中具体问题的能力。这种能力不仅是大学后续课程的学习所需要的,也是工科毕业生走上工作岗位时,所必须具备的最基本的独立的工作能力。



从实验的基本程序上亦可体现对于工科院校学生的培养的重要性。从预习到完成实验报告的整个过程都蕴含着对学生科学素质的培养和训练。实验前预习并撰写预习报告,是读懂文献、凝练知识点的能力培养;实验操作过程,是测量仪器的使用方法、观察和分析实验现象、合理选择实验方案、分析解决实际问题 and 观察思考等能力的培养;撰写实验报告和实验数据处理,是工作总结、实验结果分析处理和撰写科技文章的基本训练。这些是科学素质养成的重要培养环节,在此基础上,才能够进一步培养学生创造性思维 and 创新能力。

1.2 大学物理实验的目的和任务

物理学的发展历程告诉我们,一种科学理论的形成离不开科学思想的指导和科学方法的应用,正确的科学思维和科学方法是我们认识世界的基本手段,掌握了它就能使我们透过现象看清事物的本质,从认识科学的必然王国而跃进到掌握应用科学的自由王国。科学方法是我们学习打开科学大门的钥匙,无论自然科学的各学科或是社会科学的各学科,掌握了研究的科学方法,就有了在未来从事各项工作的“武器”,就能创新,就能发明创造,发挥聪明才智,成为一个有益于人类、造福于人类、贡献于科学的有用人才。

物理学是研究物质基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的学科。物理学的研究方法包括实验和理论这两个方面。而物理现象的发现和解释,物理规律的揭示以及物理学理论的验证都依赖于实验。就物理实验而言其最基本的方法有定性分析法、定量分析法、因果分析法、比较分析法和过程分析法等。

物理实验的目的就是让学生学习和掌握科学研究的基本思想和科学方法。在物理学的发展中,人类积累了丰富的实验思想、实验方法及实验手段。它们不但是人类文明的宝贵财富,更是人类探索未来的重要武器。因此,物理实验的目的又是培养大学生严肃认真的工作作风、一丝不苟的学习精神、实事求是的科学态度,激发学生不怕困难、勇于探索自然的开拓创新意识 and 理论联系实际以及综合应用科技知识的能力。

工科物理实验任务是使学生掌握研究各种不同自然现象的基本实验方法、各种基本测量仪器的使用方法、实验结果的科学处理方法和归纳总结实验结果,以及撰写总结报告的基本要领;是培养学生自学能力、思维判断能力、综合运用教材和资料的能力、理论联系实际的能力、科学实验能力、表达书写能力、创新和实验设计能力,提高学生的科学素质。

1.3 预备性物理实验的目的和任务

物理实验中,涉及到很多不同的实验方法,以及不同的测量工具或仪器。一些基本的实验方法或测量工具,部分同学在高中甚至初中物理实验环节中已经接触过并且能够较好的掌握,而还有些同学可能在进入大学物理实验室之前,还没有真正接触过实验相关知识。所以在必修的大学物理实验课程之前,我们增设了预备性物理实验的选修课程,主要开设物理学的一些基础实验,以备同学们根据自己的实际情况适时选修。其目的重在让同学们了解物理实验相关的一些基础知识,以及基本测量仪器或工具的使用。

1.4 大学物理实验的基本环节

1. 实验前的预习

撰写预习报告时,不能盲目地照搬实验教材中的内容,而是需要基于自己对实验内容的理解,提炼文字内容和相应要点。与理论课程不同,实验课程的特点是学生在教师的指导下自己动手,独立完成实验任务。所以实验预习尤其重要。上课时教师要检查实验预习情况,评定实验预习成绩。没有预习或预习不合格的学生不能参与本次实验。

实验预习的目的是全面认识和了解所要做的实验项目。因此,要求在预习时,仔细阅读教材或上网查看该实验的预习指南,根据预习指南确认该实验的具体内容;认真领会实验目的,读懂实验原理,了解实验仪器的使用方法和实验方法;在了解实验相关要点的基础上,写出简练的预习报告。



实验预习的要点

(1)明确实验任务:要明确实验中需要测量哪些物理量,每个待测量又分别需要什么实验仪器和采用什么实验方法来测量。

(2)清楚实验原理:要理解实验基本原理。例如,电位差计精确测量电压实验用到补偿法原理进行定标,应该理解补偿电路的特点,什么是定标,定标的作用以及如何利用补偿电路定标;电位差计测量的主要误差来源,怎样减小误差。

(3)了解实验仪器:根据书中相关实验仪器的介绍,初步了解实验仪器,并对仪器的相关知识进行初步学习,特别是仪器的结构功能、操作要领、注意事项等。

(4)了解误差来源:实验前,依据自己对相关实验的原理、仪器以及操作步骤的了解,初步思考该实验中误差的主要来源有哪些,在实验时应当怎样减小误差。

(5)总结实验预习:尝试归纳实验所体现的基本思想,总结自己在预习过程中做了哪些工作,遇到了哪些问题,解决了哪些问题,怎么解决的,还有哪些问题不清楚,等等。

(6)撰写预习报告:实验预习时要认真阅读实验教材,积极参考网上实验预习的指南,必要时主动查阅相关资料,明确实验目的和要求,理解实验原理,掌握测量方案,初步了解仪器的构造原理和使用方法,在此基础上写好预习报告。撰写预习报告时要注意以下要点:按预习报告的具体要求逐项填写。实验原理图部分,根据具体实验内容的不同,原理图形式可能有所不同。例如,电学实验要有所用的电路图,光学实验则要有相应的光路图,而对于某些基本测量工具练习类的实验科目,原理图也有可能是测量工具本身的结构图(可参照教材中相应的介绍)。充分理解实验目的,提炼出基本实验原理和实验步骤,画出或设计实验数据记录表格。



预习报告的主要内容

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验原理图:电路图、光路图、相关文字说明等。

(4)实验内容和主要操作步骤:依据教材内容,简明扼要地写出实验内容以及其主要的操

作步骤。

(5)数据记录表格:根据实验测量要求,设计出所有需要记录的数据的记录表格。

2. 实验操作

在实验课上,要“动手之前先动脑”。就是说,操作之前,必须知道自己要做什么,为什么要这样做。实验课重在实验操作的过程,但“动手”的过程一定要结合“动脑”的过程,才能更加有效地培养主动思考、提高分析和解决实际问题的能力。

实验课最忌讳的是“盲目伸手”,“盲目伸手”至少有两个问题:一是容易损害仪器,二是可能会危及你自身的安全。实验课中“动手”的环节,即切实的操作,很重要,但一定要做到有目的、有计划地进行实验操作。

很多同学都有同样的感受,坐在教室里预习实验课时,对于绝大多数的实验内容看不懂。这就是实验课有别于理论课学习的特点,实验不到实验室里是学不会的。实验的内容,特别是实验仪器的使用,通常需要仪器放在你面前,对照着仪器再结合书上的仪器介绍,才能够掌握其使用方法。所以要上好实验课,需抓住以下几个重要环节:

(1)认真听老师讲解实验的注意事项、实验原理、实验内容、实验操作的要领和实验的基本要求。

(2)动手实验之前,对照仪器认真读书上的仪器介绍,正确掌握仪器的操作方法。

(3)在记录数据前,先观察实验所要记录的实验现象,确认无任何异常后,开始记录数据。遇到问题及时请教老师,不得擅自改动数据。

(4)实验完成,请老师确认数据、签字后,整理实验仪器。

此外,在实验过程中要遵守操作规程,注意安全。

3. 实验报告



撰写实验报告的目的

科学地总结自己的实验研究工作,通过对实验课题、内容、方法的科学表述,阐明实验的结论。不要忽视一份实验报告的撰写,它是撰写科技文章的基本训练,一份好的完整的实验报告就可以扩展成一篇好的科技文章。因此,认真总结实验报告是将来撰写科技文章的基础。



撰写实验报告的一般要求

按每个实验的具体要求认真处理实验数据,在处理数据的过程中,头脑中要时刻想着物理实验数据处理相关的要求。例如有效数字的概念、有效数字的运算规则、实验结果的完整表示方法以及所得物理量的单位等。如需要作图表示实验结果时,要写清楚坐标轴名称、坐标轴的分度、单位以及实验图线的物理含义。实验报告要字迹工整,具有可读性,逻辑性要强,实验结果分析要切合实际。

实验报告是实验工作的最后环节,是整个实验工作的重要组成部分。通过撰写实验报告,可以锻炼科技报告的写作能力和总结工作的能力,这是未来从事任何工作都需要的能力。



实验报告的基本内容

(1) 实验名称。

(2) 实验者姓名、学号,实验台号,实验日期。

(3) 实验目的。

(4) 实验原理:应简明扼要、文理通顺,特别要注意实验原理部分的提炼,不要照抄教材。一般实验原理包括实验所依据的物理学的原理公式及其简要推导,公式中各个物理量含义、相关原理的文字阐述,实验涉及的原理图(电路图、光路图或其他形式)等。

(5) 实验仪器:所用仪器名称、型号、规格、精度或最小分度值等。

(6) 实验数据记录:把所记录的原始数据仔细地转记下来,并尽可能列出表格。

(7) 数据处理:含计算测量结果、不确定度计算、作图等,并正确表示测量结果(数据处理部分涉及到的计算一定要包含完整的计算过程)。

(8) 实验总结及问题讨论:给出实验结论;通过分析,找出影响本次实验结果的主要原因;减小误差应采取的措施;对实验中观察到的现象(特别是异常现象)的解释;改进实验的建议和心得体会;本实验可能的应用;回答实验的思考题等。

第2章 物理实验前导知识

2.1 测量和误差的基本概念

在人类的生产、生活和科学研究的过程中,经常需要对各种量(物理量、化学量等)进行测量以获得客观事物的定量信息。物理实验不仅要定性地观察物理现象,通常更需要找出各种物理量之间的定量关系。任何一个量值的大小都是一种客观存在,人们要想获取其量值大小的相关信息,就需要借助某种工具或仪器,于是就产生了所获得信息的可信度问题。因此,测量(Measurement)和误差(Error)的概念也就由此而诞生了。



测量的基本概念

所谓测量,就是将待测的物理量与某种作为标准的同类量进行直接或间接的比较,得出它们之间的倍数关系,然后相乘的结果就是待测量的测量值。而用来作为这个标准的同类量就称之为“单位(Unit)”。例如,我们用一个标准米尺来测量运动场上跑道的距离,从起点到终点刚好是100个标准米尺的长度,于是跑道的长度就等于 $1\text{ m} \times 100 = 100\text{ m}$,这里100就是作为单位的1 m的倍数。更具体地讲,测量就是人们借助专门设备,通过实验方法,对客观事物取得测量结果的认识过程。它是通过物理实验把一个量(被测量)和作为比较单位的另一个量(标准)相比较的过程。根据需要,测量结果通常有几种表达方式:具有确定单位的数值,在确定的坐标上的曲线,按一定比例画出的图形,采集到的波形或图像等。



测量的分类

测量从方法上通常可以分成两类:直接测量(Direct measurement)和间接测量(Indirect measurement)。

所谓直接测量是指,使用测量工具或测量仪器直接测得(或读出)被测量数值的测量过程。如图1-2-1所示,用米尺直接测量儿童的身高、用温度计测量温度、用秒表测量时间、用万用表直接测量电流和电压以及电阻等。直接测量又包括单次直接测量和多次直接测量。

而间接测量是指,对于有些物理量仅靠直接测量不能完成,而必须通过对几个物理量进行直接测量后,再利用公式进行计算才能够得到所需要的测量结果的测量过程。如图1-2-2所示,测量一个圆柱体的密度 ρ ,我们可以先直接测量圆柱体的高度 h 、直径 d 和称出它的质量 m ,然后将它们代入公式计算出圆柱体的密度 ρ 。

在物理测量中,绝大部分测量都属于间接测量,但直接测量是一切物理测量的基础。无论是直接测量还是间接测量,都必须在一定的实验条件下,按照正确的测量方法和正确的仪器使用方法,才可以得到正确的测量结果。因此,在实验的过程中,一定要清楚实验的目的、正确的仪器使用方法、认真地进行实验操作、细心地读取和记录实验数据,才能够得到正确的实验结果,达到巩固理论知识和实验技能训练的目的。



图 1-2-1 直接测量示意图

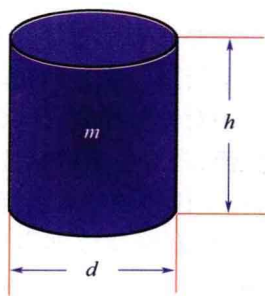


图 1-2-2 间接测量示意图

根据测量条件的不同,又可将测量分为等精度测量(Equal observations)和非等精度测量(Unequal observations)。等精度测量是指在参与测量的五个基本要素即测量仪器、测量人员、测量方法、测量环境和被测量均不发生改变的条件下的多次重复测量。等精度测量又称为重复性测量。

多次重复测量过程中,测量的五个要素保持绝对不变是不可能的,所以说等精度测量是一个理想的概念。对某一固定被测量作等精度测量时,所得测量数据允许有一定范围的大小变化,但对偏大或偏小的数值,不能判定哪个数值更加接近被测量的真实值,只能取一视同仁的态度,同等对待,即认为测得的数据的可信程度是相同的。

非等精度测量是指参与测量的五个要素除被测对象不能改变外,其他四个因素全部或任何一个因素发生改变所进行的测量。不等精度测量又可称为复现性测量。

在测量过程中,由于改变测量条件,如由不同的观测者、用不同仪器、不同方法、在不同环境条件下对被测量进行不同次数的测量,使影响和决定测量结果的因素各异,测得的数据的可信程度不相同。不等精度测量常用于高准确度的测量问题。



误差的基本概念

测量过程通常都是人在一定测量环境下,利用某种特定的测量仪器进行的经常性的科学实验研究工作。任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等都不可能做到绝对严密和准确,这就使测量总是不可避免地伴随着误差。因此,误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。分析测量可能产生的各种误差,尽可能地消除其影响,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,这是物理实验和许多科学实验中都必须涉及到的问题,于是就有了误差理论和数据处理方法。

测量实际上就是依据客观事物的规律或物理现象所进行的工作,而测量值(Measured value)就是把被测量值的量直接或间接地与同一类的已知量相比较而得到的量值。测量的量值是客观事物的某种特性的定量表征,但不能完全准确地反映客观存在,只能无限地趋近于反映客观事物某种量值特征。而真实值(简称真值,记为 x_0)是指某一被测量,在一定条件下客观存在的量值。由于测量误差的普遍存在,要想通过测量得到某些被测量的真值是不可能的。通过测量得到的只能是真值的最佳估计值或称测量值(记为 x)。

测量值与真值(True value)的差就称为测量误差(Measurement error),并表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-2-1)$$

称 Δx 为测量的绝对误差 (Absolute error)。

由于绝对误差只表示测量误差的大小,当测量不同数量级的被测量时,利用绝对误差就不能确切地表示出所进行测量的精确程度。例如,对两数量级不同的物理量,分别进行测量,若得到的测量的绝对误差相同,但其测量的精度不同,数量级大的,测量精度高;数量级小的,测量精度低。故而,若对测量的精度或对测量仪器所具有的精度进行比较时,必须引入更为合理的概念,作为相互比较的技术指标。

因此,为了更准确地评价测量结果的好坏,人们引入了相对误差 (Relative error) 的概念,定义为绝对误差与真值的比值,并用百分数表示,即

$$E_r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-2-2)$$

可见,相对误差是一个无量纲的数值。测量结果的相对误差越小,则表示测量结果越接近真实值。



误差的来源

在测量过程中造成的测量误差,一般可以概括为以下几种。

(1) 方法误差 (Method error) 它是由于所采用的测量原理或测量方法本身所产生的测量误差。这类误差产生的主要原因是:对被测量对象的有关知识研究得不够充分,不能全面地考虑影响;受客观条件及技术水平的限制;所采用的测量原理本身就是近似的,或忽略了一些在测量过程中实际起作用的因素;用接触测量方法破坏了被测量对象的原有状况;用静态的测量方法解决动态对象的测量等。

(2) 仪器误差 (Instrumental error) 是指在测量时所使用的测量设备或仪器本身固有的各种因素的影响所产生的误差,如准确度、灵敏度、最小分度值及稳定度的好坏等。其往往取决于测量装置的结构、设计、所用元器件的性能、零部件材料的性能,加工制造和装配的技术水平等因素。而在设计制造各种测量装置时,只能满足一定的条件和实际要求,与理想的要求总会有一定的差距,所以在测量过程中所使用的装置、设备和仪器仪表,在使用时无论怎样满足规定的使用条件,无论怎样细心操作,测量过程中测量值总会存在一定的误差。

(3) 环境误差 (Environmental error) 由于周围环境的影响而产生的误差。这些影响因素始终存在于测量系统之外,对测量系统直接或间接地发生作用,例如温度、湿度、大气压、电场、磁场、机械振动、加速度、地心引力、声响、光照、灰尘、各种射线或电磁波等。这些因素在不同的测量过程中,对测量产生的影响程度可能不同。它们能影响测量系统产生的测量误差,有时也能引起被测量的变化,严重时甚至会造成测量设备的损毁或使测量难于进行。为了区分环境误差和仪器误差,通常采用人为地确定所谓标准环境条件 (基准条件),或在产品标牌及使用说明书上规定测量仪器的使用条件。在基准条件下进行测量所产生的测量误差就认为是测量仪器的固有误差 (仪器误差)。若使用测量仪器在超出基准条件规定的环境下工作,因环境因素的影响,造成测量误差的增大,这种测量误差的增加量,称为仪器的附加误差,也就是环境误差。因此,仪表在满足规定的条件下进行测量,所获测量值的误差大小不应超过标牌或说明书中给出的误差值。有些仪表还给出了随环境条件变化而改变的环境误差值。

(4) 主观误差 (Subjective error) 主观误差也称人员误差,是由进行测量操作人员的素

质条件所引起的误差。其中有一类是难以避免的,如由于测量人员感觉器官的分辨能力、反应滞后、习惯感觉和操作技术水平因素而引起的观测误差;另一类是应当尽量避免的主观误差,如由于测量人员的粗心大意而造成的读数、记录和计算错误,或操作失误所造成的测量误差。

上述四种测量误差的来源是从参加测量的四个环节,即人员、设备、方法和条件概括出来的。在具体测量过程中,各种因素对测量的影响程度有所不同,甚至某一因素造成的测量误差小到可以被忽略的程度,但是由测量得到的测量值总会带有测量误差是不容怀疑的。

误差的分类

为了对测量误差有较为系统和概括的了解,现介绍一种普遍采用的测量误差的分类方法,即根据测量误差所具有的性质和特点进行分类。据此可把测量误差分为随机误差、系统误差和过失误差三大类。

(1) 随机误差(Accidental error) 在测量过程中,必然存在一些随机因素的影响,从而造成具有随机性质的测量误差,称为随机误差。随机误差又称为偶然误差(Fortuitous error)。这种测量误差的大小和方向(误差的正负)是无法预测的。即使在尽可能相同的条件下,对某一指定的物理量重复进行测量,在极力排除和改正一切明显的有规律的偏差后,每次测量得到的测量值总是在一定范围内呈随机性的波动性变化,这就是因为总是存在随机误差的原因所造成的。

随机误差的特性可归纳为三个方面:具有随机性、产生在测量过程中、与测量次数有关。等精度条件下增加测量次数可减小随机误差对测量结果的影响。

(2) 系统误差(Systematic error) 其大小和方向有一定规律,这类测量误差称为系统误差,也称确定误差。根据已知的变化规律,将固定不变的系统误差称恒定系统误差,将按已知规律变化的系统误差称变值系统误差。因此,对系统误差的处理,就是发现它,并设法消除它。

上述确定误差,从其可知性来说是比较典型的系统误差,统称为确定系统误差。与此相对应,若系统误差带有一定的随机性质,则称此系统误差为未定系统误差。

(3) 过失误差(Gross error) 明显歪曲测量值的误差称为过失误差。这类误差是由于操作错误、读数错误、记录错误等原因造成的,即由于疏忽或失误造成的,所以也可叫疏失误差。但有时尽管在测量过程中很细心,操作也很认真,也会因随机性的原因出现较大的误差。这种情况从概率论的观点来分析是可能的,即相对数值较大的误差出现的概率尽管很微小,但不等于绝对不能出现。

过失误差从绝对数值上看,它远远大于在相近条件下一般系统误差值或随机误差值。因此,带有过失误差的测量值与正常测量值相差较大,故称之为异常值或可疑值。

对于包含过失误差的测量值,可以直接从测量数据中把它剔除。但对原因不明的可疑值,在处理时应采取慎重的态度,尽管它对测量的影响较大,但在不能判定为不可信时,绝不能按主观意愿轻易把它剔除,应当根据一定的准则来判断,最后才能决定是否把该数据剔除。

总之,为了提高测量的精确度,就要设法缩小或排除测量误差。但由于系统误差和随机误差的性质不同,按两类误差进行处理所依据的理论与方法也不同,所以对测量误差进行处理之



前,一定要根据误差的性质区分是系统误差还是随机误差。

若按定义来区分测量误差是系统误差还是随机误差是非常明确的,但在实际测量工作中有时这两类误差却不易区别。因为在一定条件下两种误差的性质可以相互转化。例如,原来被看成是随机误差的测量误差,随着科学技术水平的提高,可以发现引起这种误差的原因,从而能够掌握这种误差的变化规律,这样就有可能把这种误差当作系统误差来对待。也会有相反的情况,原来被看作是系统误差的测量误差,造成这种误差的原因及变化规律也能掌握,但由于造成误差的已知因素变化比较频繁或很复杂,同时对测量值的影响又很微弱,若掌握其变化规律所付出的代价较大,在能满足实际需要的条件下,可以把这种误差当作随机误差来处理。也就是说,系统误差与随机误差之间的区分并不是完全绝对的,两者在一定条件下是可以相互转化的。



正确度、精密度和准确度

正确度、精密度和准确度是三个用来评价测量结果好坏的常用术语。

实验测量结果的正确度是指测量值与真值的接近程度。正确度高说明测量值接近真值的程度好,系统误差小,即正确度是反映测量结果系统误差大小的术语。

实验测量结果的精密度是指重复测量所得测量结果相互接近的程度。精密度高说明实验测量的重复性好,各个测量值的误差的分布密集,随机误差小,即精密度是反映测量结果随机误差大小的术语。

实验测量的准确度所描述的是综合评定测量结果的重复性和接近真值的程度。准确度高说明精密度和正确度都高,即准确度反映的是随机误差和系统误差的综合效果。

由于实验中通常要求尽可能地消除或减小系统误差,而所谓误差计算主要是估算随机误差,因此,往往并不严格区分正确度、精密度和准确度,而泛称为测量精度(Certainty of measurement)。

2.2 有效数字

在实际测量和科学工作领域中,用数字表示出来的数值,根据数字占有的位数是否有效,可以分为两大类。一类是有效数位为无限制的数,这类数多为纯数学计算的结果,例如 $\sqrt{2}$, π , $1/3$ 等,在位数上可根据需要取多少位数来表示都是有效的。另一类是有效位数为有限的数。这类数多与实际相联系,不能单凭数学上的运算而任意确定其有效位数,而是要结合实际恰当地表示出所要表示的量值或所具有的精度。这类数的有效位数要受到原始数据所能达到的精度,获取数据的技术水平,获取数据所依据的理论等因素的限制。在测量数据的处理中,掌握有效数字的有关知识是十分重要的。



有效数字的基本概念

由数字组成一个数值,除最末一位是不确切值或可疑值之外,其他数字皆为可靠值或确切值,组成该数的所有数字包括末位数字称为有效数字(Effective figure),即准确数值加一位存疑数,构成有效数字的位数。

如图1-2-3(a)所示,用一根长度为15 cm,最小分度值为1 mm的钢板尺测量某一物体