



应用型本科规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

陈兰莉 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

应用型本科规划教材

大学物理实验

主 编 陈兰莉

副主编 罗鹏晖 石明吉 王生钊

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》和《基础课实验教学示范中心建设标准》，融入近年来大学物理实验教学改革的科研成果，结合南阳理工学院大学物理实验教学的实践，在我们原有的已经使用多年的教材的基础上编写而成的。

全书共分5章，即测量误差及数据处理、基本物理量的测量、基础实验、设计性或研究性实验、综合与近代物理实验。本书列出了42个实验项目，内容覆盖力学、热学、声学、光学、电磁学和近代物理等各分支学科领域。

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教材或教学参考书，也可作为其他相关教学、研究和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/陈兰莉主编. —上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-09795-8

I. 大... II. 陈... III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 112230 号

大学物理实验

陈兰莉 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17.75 字数:439 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

印数:1~3030

ISBN 978-7-313-09795-8/O 定价:38.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-54742979

前 言

大学物理实验是面向理工科各专业本科生的重要基础课之一,是理工科大学生进入大学后最早接受到的实验方法和实验技能的训练。物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱,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。该课程教学在人才培养过程中的作用非常重要,不仅能教给学生一些后续学习必需的物理基础知识和基本技能,更能引导学生在学习这些基础知识和基本技能的过程中,逐渐形成正确的科学观念,掌握科学方法,培养科学精神。

本书是根据教育部颁发的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》和《基础课实验教学示范中心建设标准》,结合当前大学物理实验教学改革的实际,充分考虑南阳理工学院实情,融入编者多年来在大学物理实验教学中的研究成果编写而成。

内容上,本教材包括普通物理实验(力学、热学、电磁学、光学实验)和近代物理实验,具体包括:①测量误差的基本知识:测量误差与不确定度的基本概念;②实验数据处理的一些常用方法;③基本物理量的测量方法,并引入数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用;④介绍常用的物理实验方法,融入近代科学研究和工程技术中的广泛应用的各类实验方法;⑤涉及众多物理实验室常用仪器;⑥介绍常用的实验操作技术,普及近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的调节方法;⑦穿插介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

设置上,本书为适应分层次教学的基本要求,按基础性实验、设计性或研究性实验、综合性与近代物理实验三大类进行设置,并加入了多个实验拓展与研究专题,展现编者多年来在大学物理实验教学改革中的研究成果。①基础性实验:主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、误差与不确定度及数据处理的理论与方法等,涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等各个领域的内容。此类实验为适应各专业的普及性实验。②设计性实验:根据给定的实验题目、要求和实验条件,由学生自己设计方案并基本独立完成全过程的实验。设计性或研究性实验的目的是使学生了解科学实验的全过程、逐步掌握科学思想和科学方法,培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决给定问题的能力。③综合性实验:在同一个实验中涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等多个知识领域,综合应用多种方法和技术的实验。此类实验的目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果、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。

本书主编是南阳理工学院陈兰莉老师。全书共分5章,其中绪论、第1章、第5章和第3章(3.1到3.5、3.10、研究与拓展1、3.19到3.21)由陈兰莉老师编写;第2章、第3章(3.16到3.18)和附录由王生钊老师编写;第3章(3.6到3.8)由罗鹏晖老师编写;第4章和第3章(3.9、3.11到3.15研究与拓展2)由石明吉老师编写。

本书的编写融入了教研室全体老师的教学实践与探索,是集体智慧的结晶。同时本书还获得了南阳理工学院优秀教材建设项目资助。该书的出版,得到了南阳理工学院和电子

与电气工程学院领导的大力支持,在此对各位领导和同事表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中存在的疏漏和不妥之处,敬请广大师生提出意见建议,以利于改进我们的工作。

编 者

2013年4月

目 录

绪论	1
第 1 章 测量误差及数据处理	4
1.1 测量与误差	4
1.2 随机误差的处理	10
1.3 系统误差的处理	20
1.4 测量结果的评定和不确定度	25
1.5 有效数字及运算	31
1.6 实验数据处理方法	36
第 2 章 基本物理量的测量	45
2.1 长度	45
2.2 时间	50
2.3 质量	58
2.4 电流	67
2.5 温度	72
2.6 发光强度	83
第 3 章 基础实验	88
3.1 金属杨氏模量的测量	88
3.2 金属线胀系数的测量	93
3.3 物体转动惯量的测量	99
3.4 液体表面张力系数的测量	103
3.5 电桥测电阻	107
3.6 用十一线电位差计测电动势	113
3.7 用电位差计测电阻	116
3.8 用电位差计校准电表	121
3.9 电表的改装与校准	123
3.10 用模拟法描绘静电场	127
[研究与拓展 1] 用模拟法描绘静电场的实验研究	131
3.11 电子束的聚焦和偏转	135
3.12 示波器的原理和应用	140
3.13 RLC 电路谐振特性的研究	151

3.14	交流电桥	157
3.15	磁场描绘	161
	[研究与拓展 2] 载流圆线圈及亥姆霍兹线圈轴线上磁场的探究	172
3.16	铁磁物质动态磁滞回线的测试	175
3.17	灵敏电流计的实验研究	180
3.18	分光计的调节和使用	186
3.19	等厚干涉——牛顿环、劈尖	193
3.20	单缝衍射实验	198
3.21	偏振光实验	201
第 4 章	设计性或研究性实验	207
4.1	实验设计基础知识	207
4.2	固体密度的测定	213
4.3	伏安法测电阻和二极管的伏安特性	217
	[研究与拓展 3] 单晶硅太阳能电池在黑暗和恒定光照下的正向伏安特性	221
4.4	电阻的分压特性和限流特性	224
4.5	电表内阻的测量与欧姆表的改装	227
4.6	用钢尺测量激光的波长	229
4.7	非平衡电桥的原理和设计应用	231
	[研究与拓展 4] 基于非平衡电桥的热敏电阻数字温度计的设计	240
第 5 章	综合与近代物理实验	245
5.1	声速的测定	245
5.2	霍尔元件基本参数测量	250
5.3	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	256
5.4	光电效应及普朗克常数的测定	262
5.5	弗兰克-赫兹实验	266
附录		271
附录 1	国际制基本单位及辅助单位	271
附录 2	基本物理常量	272
附录 3	在 20℃ 时固体和液体的密度	273
附录 4	固体的线膨胀系数	273
附录 5	常见材料的各向同性杨氏模量	274
附录 6	不同温度时干燥空气中的声速	274
附录 7	某些金属和合金的电阻率及其温度系数	275
附录 8	常用电气测量指示仪表和附件的符号	275
附录 9	常用光源的谱线波长表	277
参考文献		278

绪 论

0.1 物理实验的地位和作用

科学的理论来源于科学的实验,并受到科学实验的检验。物理学的理论就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法,并通过实验的检验而建立起来的。

观察和实验是物理学中的重要研究方法。观察就是对自然界中发生的某种现象,在不改变自然条件的情况下,按照原来的样子加以观察研究。而实验则是人们按照一定的研究目的,借助规定的仪器设备,人为地控制或模拟自然现象,使自然现象以比较纯粹或典型的形式表现出来,进而对其进行反复的观察和测试,探索其内部规律的一种方法。

物理学从本质上说是一门实验科学,无论是物理规律的发现,还是物理理论的验证,都与实验密不可分。

物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位,而且在推动其他自然科学、工程技术的发展中也起着重要作用。特别在不少交叉学科中,物理实验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果。此外,物理实验还是众多高技术发展的源泉、原子能、半导体、激光、超导和空间技术等最新科技成果,都是与物理实验密切相关的。

0.2 物理实验课的教学目的

大学物理实验课是为理工类专业学生开设的一门独立的必修基础课,是对学生进行系统实验方法和实验技能训练的开端,也是学生学习相关后继课程的实验和进行工程实验的基础。根据《高等学校工程专科物理实验课程教学的基本要求》,结合我校的实际,针对各专业不同的需要,选取一定数量和实用的实验项目。

物理实验课的任务是:

- (1) 通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量,学习并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能,并加深对物理学原理的理解。
- (2) 使学生学会常用物理仪器的调整及正确的使用方法。
- (3) 使学生初步具备处理数据、分析结果、撰写实验报告的能力。
- (4) 培养学生科学系统的思维方式、一丝不苟的严谨态度、实事求是的工作作风和团结协作的精神。

0.3 大学物理实验课的基本程序

科学实验大体有以下几个步骤:提出测量任务、设计实验方案、仪器安装调试、取得数

据、处理数据、分析结果、写出报告或论文。本课程所开设的实验项目是人为地创造出一种条件,按照预定计划,以确定顺序重现一系列物理现象。因此,本课程对多数实验着重于方法和技能上的严格训练,一般并不看重“结果”。实验课的基本程序为课前预习、课上进行实验、课后整理分析数据并写出实验报告。

1. 实验前的预习

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容,学生在实验前必须做好预习工作。实验讲义是实验的指导参考,它对每一个实验目的、要求、实验原理都作了明确的阐述,因此,在上实验课前必须认真地阅读。还需查阅有关参考资料,实验中涉及的仪器,有许多是从未见过的,在预习时就需认真阅读讲义中的仪器介绍,弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等,特别是注意事项,不仅要看,还要牢记,否则会造成仪器损坏,甚至人身事故。对仪器的构造,应尽可能地去理解、去想象,必要时可到我校精品课程网站上下载相关内容,或去实验室观察实物。

在预习的基础上,写好预习报告,其内容包括实验名称、实验目的、实验原理和数据记录表格。在报告中画出必要的简图(如电路图、光路图),设计好数据记录表格,注明所有文字符号的物理量和单位。此预习报告就作为整个实验报告的前半部分,待实验做完后再续写出后半部分。此外,根据实验内容,准备好实验中所需的绘图工具和计算器等。

2. 课上实验操作

通过教师对预习的检查后,方可进行实验。

实验时应严格遵守实验室的规章制度。在实验正式进行前,首先要结合仪器实物,对照实验讲义或仪器说明书,认识和熟悉仪器的结构和使用方法;其次要全面考虑实验的操作程序,怎样做更为合理,不要急于动手。因为对于操作程序中某些关键步骤而言,哪怕是很小的错误,都有可能使实验前功尽弃。

1) 仪器的安装和调整。

仪器的安装和调整是决定实验成败的关键一环,使用仪器进行测量时,必须满足仪器的正常工作条件。首先由说明书或挂图熟悉各主要仪器,了解其工作原理和使用方法及注意事项。然后进行安装和调试仪器,使其处于正常工作状态(如水平、铅直等)。未把仪器仔细地调到正常状态,而忙于测量是不会得到正确的实验结果的。仪器使用中须按操作规程进行。如果不是测量要求,在不明确操作规程情况下,切勿乱动用仪器。还要详细地注意以下几点:

- (1) 仪器的量程要符合实验要求,弄清最小分度的读数;注意仪器零点,必要时应调零。
- (2) 拧动仪器上的旋钮或转动部分时,不要用力过猛,应缓慢匀速进行,受阻碍则立即停止。
- (3) 灵敏度高的仪器(如分析天平、灵敏检流计等)都有制动器,不测量时应使仪器处于制动状态。
- (4) 对透镜、光栅等光学元件及砝码等,为了保持其性能和光洁,不许用手直接摸其表面,也不许随使用布或纸去擦。
- (5) 使用电学仪器时,要注意额定电源电压、连接时的极性和人身安全,并必须经教师允许后方可接通电源。

(6) 实验结束后要整理仪器,并恢复到实验前的状态。

2) 观测与记录。

实验测量应遵循“先定性、后定量”的原则。即先定性地观察实验全过程,确认整个实验装置工作是否正常,对所测内容要做到心中有数。在可能的情况下,对数据的数量级和趋势作出估计后,再定量地读取和记录测量数据。

观测时要精力集中,不受外界干扰,也不要影响别人。对实验中出现的不同现象要勤于动脑,用所掌握的物理学规律和原理给予解释,能查找出异常现象的原因。

记录就是如实地记录所观察到的现象、过程和测量的数据。必须将数据记录在预习报告的数据表内或实验记录本上。数据之间要留有间隙,以便补充。要求记得简单、清楚,标明单位,不得随便涂改,更不允许按标准数据或他人数据修改自己的数据。若发现记录的数据有误应用笔划掉,并将正确数据写在旁边,不要在原数据上涂改。原始数据是宝贵的第一手资料,是以后计算和分析问题的依据,应按有效数字的规则正确记录。

记录内容包括:时间、地点、合作者、指导教师、仪器的名称和编号、室温、气压、仪器及其编号、简图、简单的过程、原始数据、有关现象等。

实验数据是否合理,学生应首先自查,然后交给指导老师审查。对不合理的和错误的实验结果,应分析原因,及时补测或重做。离开实验室前,应听从实验管理员和指导老师的指挥,自觉整理好仪器,并做好清洁工作。总之,观测和记录实验数据时要特别仔细,以保证读数和记录准确无误,它决定着本次实验工作的成败。

3. 实验报告的书写

书写实验报告的目的是为了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。

实验报告应包括:实验名称、目的、原理摘要及计算公式、简图、仪器、实际的主要步骤、记录及数据表格、数据处理(必要时可编程序上微机处理)、不确定度估计、实验结论和讨论、回答思考题。

实验报告要求一律使用统一印制的报告用纸,画曲线须用坐标纸。对于实验原理应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述,做到简明扼要。实验步骤只要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧,一般不要完全照抄讲义中的内容。原始测量数据一般要求以列表形式出现。数据处理要写出数据计算的主要过程、图表的最后结果的误差分析。对实验过程和结果的讨论要具体深入、有分析、有见解,不要泛泛而谈,其内容一般不受限制,可以是对观察到的实验现象进行分析,对结论和误差原因进行分析,也可以对实验方案提出改进意见。

第1章 测量误差及数据处理

物理学是以实验为本的科学,从经典的伽利略自由落体实验、库仑定律的验证、法拉第电磁感应现象的发现到现代的X射线的发现、广义相对论的建立及实验检验等,都建立在实验基础上。在实验中需要对各种物理量进行测量,如长度、质量、杨氏模量、电流、电阻、居里温度等。由测量所得的一切数据,都毫无例外地包含有一定数量的测量误差,没有误差的测量结果是不存在的。随着科学技术事业的发展,近年来误差理论的基本概念和处理方法也有很大发展。误差理论是以数理统计和概率论为其数学基础,研究误差性质、规律及如何消除误差的理论,如今已成为一门独立的学科。实验中的误差分析,其目的是对实验结果做出评定,最大限度地减小实验误差,或指出减小实验误差的方法,提高测量精度,提高测量结果的可信程度。本章主要介绍误差分析的初步知识,重点放在一些重要概念和最基本的误差处理方法,而不着力于严密的数学论证,以减小学习难度,有利于学生掌握好基础实验的误差处理方法。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量

在科学实验中,一切物理量都是通过测量得到的,所谓测量就是将待测物理量与规定作为标准单位的同类物理量(或称为标准量)或可借以导出的其他物理量进行比较,得出测量结果,这个比较的过程就叫做测量。例如,物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码进行比较而得出测量结果;物体运动速度的测定则必须通过与两个不同的物理量,即长度和时间的标准单位进行比较而获得。

1. 直接测量与间接测量

根据测量时所用方法不同,可以将测量分为两类:直接测量和间接测量。直接测量是用已知的标准单位与待测量直接进行比较,或者从已用标准量较准的仪器仪表上直接读出测量值。例如,用米尺量得物体的长度为 0.7300m ,用停表测得单摆周期为 1.05s ,用毫安表读出电流值为 12.0mA 等,这类测量称直接测量(或简单测量)。间接测量,则不是直接把待测量的大小测出来,而是依据待测量和几个直接测得量的函数关系求出待测量。例如,测量铜(圆柱体)的密度,首先用游标卡尺和千分尺测出它的高 h 和直径 d ,用天平称出它的质量 M ,然后再通过函数关系式 $\rho = \frac{4M}{\pi d^2 h}$ 计算出铜的密度来,我们把这类测量称为间接测量(或称复合测量)。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展和测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量,现在可以直接测量了。例如功率的测量,现在都是利用功率表直接测量,又如速度用速率表来直接测量等。物理量的测量,大多数是间接测量,但直接测量是

一切测量的基础。

2. 等精度测量与不等精度测量

根据测量的条件来分,有等精度测量和不等精度测量。所谓等精度测量,是指在相同的测量条件(包括测量仪器、测量人员、测量方法及环境条件等)下,对某一被测量进行的多次测量。相反,在测量过程中上述全部或部分因素发生改变,称为不等精度测量。非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。

物理实验中大多采用等精度测量。应该指出:重复测量必须是重复进行测量的整个操作过程,而不是仅仅为重复读数。不同的实验室在相同的条件下对相同的试样进行的多次重复测量,或同一个人在相同的试验条件下,在较长的时间内对同一试样进行的多次重复测量,有可能是等精度测量,亦可能是不等精度测量。

国际上规定了七个物理量的单位为基本单位。其他物理量的单位则是由以上基本单位按一定的计算关系式导出的。国际单位制中有七个基本的物理量单位:长度单位“米”(m),质量单位“千克”(kg),时间单位“秒”(s),温度单位“开尔文”(K),电流单位“安培”(A),物质的量的单位“摩尔”(mol),发光强度单位“坎德拉”(cd)。除基本单位之外的其余单位均称它们为导出单位。如以上提到的速度以及经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

在实验中测量所得的测量值(数据)应包括数值和单位,两者缺一不可。测量值(即数据)不同于数值,它是由数值和单位两部分组成的。一个数值有了单位,便具有一种特定的物理意义,这时,它才可以称为一个物理量。

1.1.2 有关量值的几个基本概念

1. 真值

真值是指在一定的时间和空间条件下,能够准确反映某一被测量真实状态和属性的量值,也就是某一被测量客观存在的、实际具有的量值。

2. 理论真值和约定真值

真值有理论真值和约定真值两种。

理论真值是在理想情况下表征某一被测量真实状态和属性的量值。理论真值是客观存在的,或者是根据一定的理论所定义的。例如,三角形三内角之和为 180° 。由于测量误差的普遍存在,一般情况下被测量的理论真值是不可能通过测量得到的,但却是实际存在的。

由于被测量的理论真值不能通过测量得到,为解决测量中的真值问题,只能用约定的办法来确定真值。约定真值就是指人们为了达到某种目的,按照约定的办法所确定的量值。约定真值是人们定义的,得到国际上公认的某个物理量的标准量值。例如,光速被约定为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$;以高精度等级仪器的测量值约定为低精度等级仪器测量值的约定真值。

3. 实际值

在满足实际需要的前提下,相对于实际测量所考虑的精确程度,其测量误差可以忽略的测量结果,称为实际值。实际值在满足规定的精确程度时用以代替被测量的真值。例如,在标定测量装置时,把高精度等级的标准器所测得的量值作为实际值。

4. 测量值和指示值

通过测量所得到的量值称为测量值。测量值一般是被测量真值的近似值。

由测量装置的显示部件直接给出来的测量值,称为指示值,简称示值。

5. 标称值

测量装置的显示部件上标注的量值称为标称值。因受制造、测量条件或环境变化的影响,标称值并不一定等于被测量的实际值,通常在给出标称值的同时,也给出它的误差范围或精度等级。

1.1.3 测量误差的基本概念

测量的目的就是得到了被测量物理量所具有的客观真实数据,但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,只能获得该物理量的近似值,也就是说,一个被测量值 N 与真值 N_0 之间总是存在差值,这种差值称为测量误差(即下文所述的绝对误差):

$$\Delta N = N - N_0 \quad (1-1-1)$$

误差公理认为:在测量过程中各种各样的测量误差的产生是不可避免的,测量误差自始至终存在于测量过程中,一切测量结果都存在误差。因此,误差的存在具有必然性和普遍性。

随着科学技术的发展和人们认识水平的不断提高,可以将测量误差控制得越来越小,但是测量误差的存在仍是不可避免的。

误差存在于一切测量之中,而且贯穿测量过程的始终,每使用一种仪器,进行一次测量都会引起误差。测量所依据的方法和理论越繁多,所用仪器越复杂,所经历的时间越长,引起的误差的机会越多。分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差做出估计,是实验中的一项重要工作,也是实验的基本技能。实验总是根据对测量结果误差限度的一定要求来制订方案和选用仪器的,不要以为仪器精度越高越好。因为测量的误差是各个因素所引起的误差的总和,为了用最小的代价来取得最好的结果,需要合理的设计实验方案,选择仪器,确定采用适合的测量方法。如比较法、替代法、天平复称法等,都是为了减小测量误差;对测量公式进行这样或那样的修正,也是为了减少某些误差的影响;在调节仪器时,使其处于铅直、水平状态,要考虑到什么程度才能使它的偏离对实验结果造成的影响可以忽略不计;电表接入电路和选择量程都要考虑到引起误差的大小。在测量过程中某些对结果影响大的关键量,就要努力想办法将它测准;有的测量不太准确对结果没有什么影响,就不必花太多的时间和精力去对待,在进行处理数据时,某个数据取到多少位,怎样使用近似公式,作图时坐标比例、尺寸大小怎样选取,如何求直线的斜率等,都要考虑到引入误差的大小。

1.1.4 误差的表示方法

误差常用的表示方法有三种:绝对误差、相对误差和引用误差。

1. 绝对误差 (absolute error)

我们把被测量的测量值与真值之差叫绝对误差:

$$\Delta N = N - N_0$$

绝对误差具有与被测量相同的单位。其值可为正,亦可为负。由于被测量的真值往往无法得到,因此常用近似真实值来代替真值。为了估计误差,定义测量值与近似真实值的差值为偏差(亦称“残差”)。实验中真值得不到,因此误差也无法知道,而测量的偏差可以准确知道,实验误差分析中要经常计算这种偏差,用偏差来描述测量结果的精确程度。

采用绝对误差来表示测量误差往往不能很确切地表明测量质量的好坏。例如,温度测量的绝对误差 $\delta = \pm 1^\circ\text{C}$, 如果用于人的体温测量, 这是不允许的; 但如果用于炼钢炉的钢水温度测量, 就是非常理想的情况了。

2. 相对误差(relative error)

绝对误差与真值之比的百分数叫做相对误差。用 E 表示:

$$E = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

由于真值无法知道, 所以计算相对误差时常用 N 代替 N_0 。在这种情况下, N 可能是公认值, 或高一级精密仪器的测量值, 或测量值的平均值。相对误差用来表示测量的相对精确度, 相对误差用百分数表示, 保留两位有效数字。

相对误差又称百分误差, 可以表明测量的精确程度。例如, 测得两个长度分别为:

$L_1 = (23.50 \pm 0.03)\text{cm}$ 和 $L_2 = (2.35 \pm 0.03)\text{cm}$ 则其相对误差分别为:

$$E_1 = \frac{0.03}{23.50} \times 100\% = 0.13\%$$

$$E_2 = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 1.3\%$$

从绝对误差来看, 两者相等, 但从相对误差来看, 后者比前者大 10 倍, 当然认为第一个测量要准确些。

3. 引用误差(满度相对误差)

引用误差可以看做是相对误差的一种简便而实用的形式。它主要在多档或连续刻度的仪表中得到广泛应用。为了减少误差计算中的麻烦和划分仪表正确度等级的方便, 一律取仪表的量程或测量范围上限值作为误差计算的分子(即基准值), 而分子一律取用仪表量程范围内可能出现的最大绝对误差值。于是, 定义引用误差为:

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

在热工、电工仪表中, 正确度等级一般都是用引用误差来表示的, 通常分成 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 和 5.0 七级。上述数值表示该仪表最大引用误差的大小, 但不能认为仪表在各个刻度上的测量都具有如此大的误差。例如, 某仪表正确度等级为 R 级(即引用误差为 $R\%$), 满量程的刻度值为 X , 实际使用时的测量值为 x (一般 $x \leq X$), 则

$$\left. \begin{aligned} \text{测量值的绝对误差} &\leq X \cdot R/100 \\ \text{测量值的相对误差} &\leq \frac{X \cdot R}{x} \% \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

通过上面的分析, 可知为了减少仪表测量的误差, 提高正确度, 应该使仪表尽可能在靠近满量程刻度的区域内使用。这正是人们利用或选用仪表时, 尽可能在满刻度量程的三分之二以上区域内使用的原因。

1.1.5 测量误差的类型

误差的产生原因是多方面的, 根据误差的性质和来源, 可将误差分为两类: 系统误差和偶然误差。

1. 系统误差

在一定的实验条件下(方法、仪器、环境和观测人都不变)多次测量同一量时, 误差的大

小和正负号保持不变,或按一定的规律变化,或是有规律的重复的误差,称为系统误差。系统误差的主要特性是规律性。

系统误差的来源很多,归纳起来有如下几个方面:

(1) 理论(方法)误差是用近似公式、经验公式或简化的电路模型作为测量依据而引起的误差。由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或物理实验条件下不能达到理论公式所规定的要求,或者说是由于所采用测量的方法不完善而引起的误差。例如,单摆周期公式

$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的成立条件是摆角趋于零,摆绳质量为零等,这样的实验条件是不能完全满足的,势必要带来误差;通过测量圆的半径来计算其周长,因所用圆周率 π 为近似值而引起的误差,都是测量方法误差。

(2) 仪器误差是由于测量仪器本身的固有缺陷或没有按规定使用而引起的。例如,用未经校准零位的千分尺测量零件的长度。用不十分等臂的天平称量物体的质量,都会引起误差。

(3) 环境误差。任何测量都有一定环境条件,如温度、湿度、大气压、机械振动、电源波动、电磁干扰等。测量时,由于实际的环境条件与所使用的测量装置要求的环境条件不一致,就会产生测量误差,这种测量误差就是测量环境误差。简言之,环境误差就是由于仪器的使用环境(温度、湿度、电磁场)不符合仪器的原设计要求而产生的。例如要求在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下使用的仪器,放在 -20°C 的环境下使用;磁电式仪表附近有强磁场等均会引起环境误差。

(4) 个人误差是由于观测人员的生理或心理特点所造成的。通常与观测人员反应速度和观测习惯有关。例如,用肉眼在刻线上估读时,习惯性偏向一个方向,按动秒表时,习惯提前或落后。

系统误差按其确定性程度可分为已定系统误差和未定系统误差,前者是变化规律已知的系统误差,后者是误差的变化规律未知的系统误差,但一般情况下可估计出它存在的大致范围,仪器误差就属此类。

系统误差有些是定值的,如某些仪器的零点不准;有些是积累性的,如用受热膨胀的钢尺进行长度测量,随着测量时温度升高指示值就偏小,且误差值随待测长度成比例增加;有些则呈现出周期性或规律化。

总之,系统误差是在一定实验条件下由一些确定的因素引起的,它使测量结果总是偏向一边,或者是有规律的。因此,在相同的条件下,不能用增加次数来减小或消除系统误差的影响,或对测量结果进行修正。在实际工作中,需要对整个实验所依据的原理、方法、测量步骤、使用的仪器仪表等可能引起系统误差的因素进行详尽分析,并通过校准仪器,改进实验装置,完善实验方法,或对测量结果进行理论上的修正来尽可能减少系统误差。

2. 随机误差

在同一条件下对某一量进行多次测量时,测量值总是有少许的差异,而且变化不定,在消除系统误差(实际上不可能完全消除)之后依然如此。从表面上看差异大小,即观测误差的大小和正负没有任何规律性,纯属偶然发生。这种数值大小和正负号经常变化的误差称为“随机误差”,也称“偶然误差”或“统计误差”。这种在相同的条件下,对同一被测量进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号都以不可预知的方式变化的误差,称为随机误差。随机误差的主要特性是随机性。这种误差的来源在于实验中各种偶然因素而随机地波动,

主要来自以下三个方面:

(1) 主观因素是指由于观测人员的感官灵敏程度和操作熟练程度的限制,使得主观判断出现不确定性。

(2) 测量仪器的影响是指测量仪器精度不够高或工作状态不正常,使得示数不重复或不固定。

(3) 环境的影响是指气流扰动、温度起伏、电磁场的不规则干扰等均会影响测量结果。

尽管这种误差是随机的,每次的测量值时而偏大,时而偏小,但它服从一定的统计规律,常见的统计规律是比真值大和比真值小的测量值出现的几率相等;误差小的数据比误差大的数据出现的几率大;误差越大出现的几率越小,出现很大误差的几率趋于零。因此增加测量次数,可以减小随机误差,但是随机误差是不能完全消除的。当测量次数足够多时,随机误差服从正态分布。

综上所述,系统误差与随机误差性质上不同,来源不同,处理的方法也不同。在实验中系统误差和随机误差往往是并存的。影响测量的结果和精度,有时主要因素是系统误差,有时候主要原因是随机误差。因此,对每个实验要做具体的分析,但实验结果的总误差是随机误差和系统误差的总和。

在精确测量时,对系统误差和偶然误差必须加以区别,分别处理。有时候只是为了说明总误差的限度,则不加区分,许多不太精密的仪器的最大允许误差(如电表的精确度级别)就包括系统误差和偶然误差,有时候也难于划分或区别它们。

需要强调指出的是:在实际测量的过程中,除了上述两种误差,还可能会产生由于读数记录上的错误、仪器的损坏、操作不当等造成的测量上的错误。错误不同于误差,虽然有时称它为过失误差,但是它不是测量误差,只要实验者采取严肃认真的态度、仔细观察和记录,及时分析所得的数据,并根据一定的准则,剔除可能错误的的数据,以上错误是可以发现和避免的。

1.1.6 测量的精确度

在工业生产和科学实验中,经常遇到评价测量结果的三个概念:精密度、准确度、精确度。所谓精密度,是指随机误差大小的程度(亦既是测量值互相接近的程度——离散程度);准确度是指系统误差的大小范围(靠近真实值的程度);精确度是指系统误差和随机误差的总和大小的范围(靠近真实值的程度)。

1. 测量的准确度(correctness)

测量的准确度表征了测量值和被测量真值的接近程度。准确度越高则表征测量值越接近真值。准确度反映了测量结果中系统误差的大小程度,准确度越高,则表示系统误差越小。

2. 测量的精密度(precision)

测量的精密度表征了多次重复对同一被测量进行测量时,各个测量值分布的密集程度。精密度越高则表征各测量值彼此越接近,即越密集。精密度反映了测量结果中随机误差的大小程度,精密度越高,则表示随机误差越小。

3. 测量的精确度(accuracy)

在实验中,常用到准确度、精密度和精确度三个不同的概念来评价测量结果。准确度高是指测量结果与真值的符合程度高,反映了测量结果的系统误差小。精密度高是指重复测

量所得结果相互接近程度高(即离散程度小),反映了随机误差小。精确度高是指测量数据比较集中,且逼近于真值,反映了测量的随机误差和系统误差都比较小。测量的精确度是准确度和精密度的综合。对于具体的测量,精密度高的准确度不一定高;准确度高的,精密度也不一定高;但是精确度高的,精密度和准确度都高。

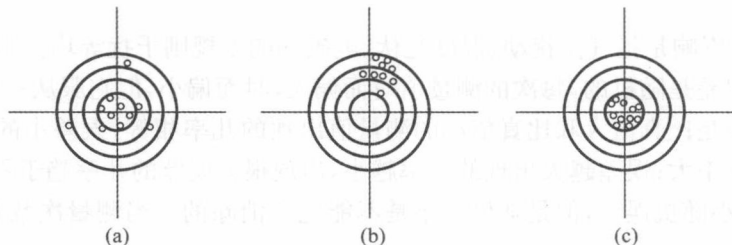


图 1-1-1 (a)精密度高; (b)准确度高; (c)精确度高

下面以图 1-1-1 所示的射击打靶的结果作为例子来加深对准确度、精密度和精确度的理解。在图 1-1-1 中每个点代表弹着点,相当于测量值;圆心位置代表靶心,相当于被测量真值。图 1-1-1(a)的弹着点分散,但比较接近靶心,相当于测量值分散性大,但比较接近被测量真值,表明随机误差大,精密度低;系统误差小,准确度高。图 1-1-1(b)的弹着点密集,但偏离靶心较大,相当于测量值密集,但偏离被测量真值较大,表明随机误差小,测量精密度高;系统误差大,准确度低。图 1-1-1(c)的弹着点密集且比较接近靶心,相当于测量值密集且比较接近被测量真值,表明系统误差和随机误差都小,精确度高。

在应用准确度、精密度和精确度时,应注意:它们都是定性的概念,不能用数值作定量表示。

1.2 随机误差的处理

1.2.1 随机误差的产生和处理原则

随机误差是在测量过程中,因存在许多独立的、微小的随机影响因素对测量造成干扰而引起的综合结果。这些微小的随机影响因素既有测量装置方面的因素,也有环境方面的因素和人员方面的因素。由于人们对这些微小的随机影响因素很难把握,一般也无法进行控制,因而对随机误差不能用简单的修正值来校正,也不能用实验的方法来消除。

单个随机误差的出现具有随机性,即它的大小和符号都不可预知,但是,当重复测量次数足够多时,随机误差的出现遵循统计规律。由此可见,随机误差是随机变量,测量值也是随机变量,因此可借助概率论和数理统计的原理对随机误差进行处理,做出恰当的评价,并设法减小随机误差对测量结果的影响。

1.2.2 随机误差的统计特征和正态分布

1. 随机误差的统计特征

对同一个被测量进行多次等精度的重复测量时,可得到一系列不同的测量值,通常把进行多次测量得到的一组数据称为测量列。若测量列不包含系统误差和粗大误差,则该测量列及其随机误差具有一定的统计特征。