

物理实验

邓剑平 主编

青岛海洋大学出版社

WULI SHIYAN
物 理 实 验

主 编 邓剑平
副主编 王春香 秦兆海
 王众臣 孙 瑛

青岛海洋大学出版社

• 青 岛 •

图书在版编目(CIP)数据

物理实验/邓剑平主编. —青岛:青岛海洋大学出版社, 2001. 3

ISBN 7-81067-222-3

I. 物... II. 邓... III. 物理学—实验—高等学校—教材 IV. 04—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 03222 号

青岛海洋大学出版社出版发行

(青岛市香港东路 23 号 邮政编码:266071)

出版人:王曙光

日照报业印刷有限公司印刷

新华书店经销

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:17.25 字数:366 千字

2001 年 3 月第 1 版 2006 年 12 月第 4 次印刷

印数:14001~15000 定价:19.80 元

前 言

科学实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础。作为培养德、智、体全面发展的高级工程技术人才的高等工科院校,不仅要培养学生掌握理论知识,还要培养学生具有较强的从事科学实验的能力,这样才能适应科学技术的不断进步和社会建设的需要。

本书是依据中华人民共和国教育部编发的《工科物理实验课程教学基本要求》,针对工科院校《大学物理实验》课程涉及的力学、电磁学、光学、近代物理实验等内容,编写的一本大学(工科)物理实验教材。为了适应物理实验教学的需要,本书配备了大量物理实验仪器的图片和使用说明,从实验目的、实验原理、实验方法、实验数据处理等不同角度讲述了物理实验和实验数据处理的基本方法,其中也汇集了我们近 10 余年的物理实验教学经验和实验教学研究成果。

本书由青岛建筑工程学院物理实验室邓剑平主编,邓剑平、秦兆海、周鑫华、王春香、于勤芝、王淑梅、李冉、王众臣、孙瑛、李良国、刘敏羨、兰秀玲参加了有关实验项目的编写,全书由邓剑平、周旭波、马鸿洋负责统稿审定、制作插图。

本书的顺利出版还要感谢青岛建筑工程学院现已退休的刘扬仁、李恒昌老先生,正是他们多年辛勤工作和积累的经验,给了我们极大的帮助。

本书中所用物理公式除特别说明外,均采用国际单位制单位。

由于时间仓促、作者水平有限,本书错漏之处在所难免,欢迎读者指正。

编 者

2000 年 11 月 6 日

于青岛建筑工程学院

目 录

绪 论	(1)
第一章 误差和数据处理的基本知识	(5)
第二章 力学实验	(25)
实验一 长度的测量	(25)
实验二 物体密度的测定	(31)
实验三 用单摆测定重力加速度	(36)
实验四 气轨上测滑块的速度和加速度	(41)
实验五 气轨上动量守恒定律的实验研究	(49)
实验六 光电控制计时法测重力加速度	(54)
实验七 刚体转动实验(一)	(58)
实验八 刚体转动实验(二)	(66)
实验九 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	(71)
第三章 电磁学实验	(78)
电磁学实验基础知识简介	(78)
实验十 欧姆定律的应用	(87)
实验十一 线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线	(93)
实验十二 电表的改装和校正	(97)
实验十三 直流单臂电桥及其使用	(103)
实验十四 电位差计及其使用	(109)
实验十五 电子束的电偏转和磁偏转	(116)
实验十六 示波器的应用	(126)
实验十七 用模拟法测绘静电场	(134)
实验十八 霍耳元件测磁场	(139)
第四章 光学实验	(147)
光学实验基础知识简介	(147)
实验十九 薄透镜焦距的测定	(150)
实验二十 分光计的调整和使用	(156)
实验二十一 光栅衍射	(165)

实验二十二 光的等厚干涉及应用·····	(170)
第五章 近代物理实验 ·····	(177)
实验二十三 迈克耳逊干涉仪·····	(177)
实验二十四 夫兰克-赫兹实验 ·····	(183)
实验二十五 用光电效应测普朗克常数·····	(192)
实验二十六 氢原子光谱·····	(200)
实验二十七 微波光学实验·····	(208)
第六章 设计性实验 ·····	(215)
第一节 设计性实验的基本要求·····	(215)
第二节 设计性实验项目·····	(217)
附录 I 实验不确定度的研究进展及有关资料介绍 ·····	(223)
附录 II 物理测量中的不确定度表示指南 ·····	(229)
附录 III 物理实验数据处理系统 ·····	(237)
附录 IV 附表 ·····	(238)
附录 V 新增实验 ·····	(247)
 参考文献 ·····	 (269)

绪 论

一、物理实验的地位和作用

物理学是自然科学的基础,是研究物质运动最一般的规律和物质的基本结构的科学。物理规律的发现与物理概念的确立都来源于实验的观察和研究。例如:“开普勒三定律”是依据第谷所积累的大量观测资料总结出来的;在伽利略、开普勒、胡克等人的实验观测及其工作的基础上,牛顿总结归纳出“万有引力定律”,建立了经典力学体系;电磁学中的一系列定律如“库仑定律”、“欧姆定律”、“安培定律”、“毕奥-萨伐尔定律”、“法拉第电磁感应定律”等都是对相应实验的科学总结;氢原子光谱中的“巴尔末公式”和“里德堡公式”也是从大量的摄谱实验数据中分析归纳得出的。

物理理论的建立以物理实验为基础,并受到实验的检验。麦克斯韦在大量实验的基础上,于1873年就建立了电磁场理论,但直到1887年赫兹的电磁波实验才使“麦克斯韦电磁场理论”获得普遍承认;1956年著名物理学家李政道、杨振宁以K介子衰变事实为依据,提出了“在弱相互作用中宇称不守恒理论”,1957年这个理论被吴健雄等人用“ β 放射实验”证实后,才得到物理学界的公认,从而获得了1957年诺贝尔物理学奖。

现代物理实验技术的飞速发展,不断揭示和发现各种新的物理现象,日益加深了人们对自然界变化规律的认识,从而推动了整个物理学体系的发展。在实验技术的发展过程中还产生了许多影响人们生活方式的重大发明创造,因此,一批国际著名的科学实验室也成为历史上许多重大技术革命的发源地。

科学实验是科学理论的源泉,是工程技术的基础。作为培养德、智、体全面发展的高级工程技术人才的高等工科院校,不仅要培养学生掌握较深广的理论知识,还要培养学生具有较强的从事科学实验的能力,这样才能适应科学技术的不断进步和社会建设的需要。

物理实验是学生入学后接受系统的实验方法和实验技能训练的开端。同时,物理实验又是一系列后续专业实验课的重要基础。

二、物理实验课的目的和任务

物理实验课是学生接受系统的科学实验方法教育和实验技能训练的一门基础课程,设置物理实验课的目的和任务是:

1. 学习并初步掌握物理实验的基本知识、基本方法和实验操作的基本技能,具体包括:

(1) 熟悉基本物理量的测量原理及常用的测量方法;

(2) 熟悉常用仪器的基本原理和性能,掌握仪器的使用方法,包括安装、调节、正确操作和读取实验数据;

(3) 实验数据的记录和处理、实验结果的分析判断,以及实验报告的书写。

2. 培养和提高学生观察、分析实验现象的能力。通过对实验中特定的物理现象的反复观察、定量测量和数值分析,加深对相关物理概念和物理规律的理解。

3. 培养和提高学生的科学实验素养。培养学生理论联系实际和实事求是的科学态度,严肃认真的工作作风,主动研究的探索精神和爱护公物、遵守纪律、团结合作的优良品德。

上述任务是物理理论课教学所不能完成的。所以物理实验作为一门重要的技术基础课独立开设。

三、物理实验课的规则和要求

物理实验课是在教师的指导下,学生独立进行物理实验的学习过程。因此,要求学生在实验的整个过程中都要有意识地培养和锻炼自己的独立工作能力,这将为学生在今后的实际工作中,独立的设计实验方案,选择、使用新的测量仪器,解决新的理论或应用课题打下一定的基础。

上好物理实验课要认真掌握以下三个环节:

(一) 课前预习

课前预习是物理实验的准备环节。实验操作能否顺利进行,整个实验能否得到预期的结果,很大程度上取决于预习的质量。因此,要求每个同学必须在实验操作前认真阅读有关教材及相关资料,要求做到:

1. 明确该实验项目的实验目的、实验要求,掌握实验的物理理论依据;
2. 要了解为达到实验目的所采用的具体操作方法的物理原理;
3. 对本次实验具体要测量的物理量、使用的测量仪器及测量过程等问题要做到心中有数。

预习时要仔细阅读实验讲义,重点抓住实验的物理方法、控制物理过程的关键因素,以及必要的实验条件。预习后要写出预习报告。预习报告包括实验报告中的“实验目的”、“实验原理”、“实验方法及其原理”、“实验步骤”及“注意事项”等项目,并要事先设计好“实验数据记录表格”。

学生的实验预习报告经实验指导教师检查合格后方能进行该实验项目的实验操作。

(二) 实验操作

这是学生在实验室中动手操作、调试实验仪器,观察物理现象,测取实验数据的过程,是物理实验的主要环节。

物理实验是一种有目的的科学实践活动,因而严格遵守实验室的有关规定和要求是保证物理实验正常进行所必不可少的。学生进入物理实验室后要自觉遵守实验室规章制度,听从实验指导教师的安排。

1. 进入实验室要按事先排定的组次对号入座,对照“实验登记卡”检查本组仪器是否完备;
2. 认真听取实验指导教师的讲解,进一步明确本次实验的要求、操作要领及注意事项等;
3. 安装调试实验仪器是实验成败的关键。要合理安排、细心调试,调试过程中必然会

遇到各种困难和问题,这就要求利用所学过的知识,结合实验的实际情况加以分析判断,找出解决问题的办法,将所用实验仪器装置调整到最佳工作状态。调试过程有时要占去大部分的实验时间,这是十分正常的,因此必须耐心、细心,而且调试过程中既要勤于动手,也要勤于动脑。在特殊情况下,即使仪器不能正常使用,也不应私自拆卸实验仪器,这时必须向指导教师请示解决。

4. 测取实验数据:在实验操作过程中,要仔细观察物理现象并进行分析,应及时地、准确地读取实验数据。测取实验数据的过程中,必须正确地使用实验仪器,必须采用正确的读数方法。测取实验数据后必须将实验原始数据及时、准确地记录在预先设计好的“实验数据记录表格”内。

实验原始数据不可随意涂改,更不许随意编造。遇有可疑之处要反复测试,加以验证。遇有反常现象,必须通过推理分析找出其原因,排除各种因素对实验测量的干扰,必要时应请实验指导教师帮助解决。

5. 凡是与实验结果有关的数据和现象都必须准确地记录下来,这些实验数据对分析实验结果是必不可少的。

6. 操作实验完毕,“实验原始数据”经过实验指导教师审阅认可后,将实验仪器和用具整理摆放整齐,并逐项填写“实验登记表”,而后方能离开实验室。

(三) 实验报告

书写实验报告的过程就是对实验数据进行科学处理,对实验结果进行综合分析,对实验工作进行分析总结的过程,是培养学生独立从事科学实验工作能力的一个重要环节,因此要求物理实验课后要及时完成物理实验报告,并在指定的时间内交实验指导教师批阅。

实验报告要用统一格式的物理实验报告纸书写,数据要齐全,处理要准确,叙述讨论要简要,字迹要清晰、整洁。严格禁止抄袭他人实验报告的行为。实验报告的内容主要包括:

1. 实验目的。
2. 实验仪器:要注明该实验所使用的主要实验仪器的规格、型号及编号。
3. 实验原理和方法:原理应写得简明扼要,如列出实验所依据的主要公式,说明式中各物理量的意义及公式的适用条件等,包括实验用仪器的原理图、电路图、光路图,以及必要的实验操作说明。
4. 数据记录及处理:数据一定要列表记录,原始数据要齐全,处理数据一定要列出计算式(主要公式),写出计算过程(列出数字式),并按要求绘制必要的实验图线等。
5. 分析与讨论或回答实验问题:分析实验中的误差,讨论实验中观察到的异常现象,对实验方法或实验装置进行改进的建议,回答教师指定的思考题等。

四、物理实验室实验学生守则

1. 物理实验课前,学生必须认真预习,并按要求写好“预习报告”。预习不合格者不得进行实验操作。
2. 严格遵守实验室纪律,不迟到、不早退,学生请假必须由所在系出具证明。实验学生应听从实验指导教师的安排,并按时上交物理实验报告。

3. 讲文明、讲礼貌,不高声喧哗、不打闹嬉戏,保持实验室安静,不随地吐痰、不乱扔纸屑、不乱涂乱画,实验室严禁吸烟。参加实验的学生应注意保持实验室整洁,每次课后都要安排值日,作好实验室的清洁工作。

4. 严格遵守实验操作规程,确保人身及仪器设备的安全。非本组本次实验所用仪器,不得随便动用。准许使用的仪器,必须严格按规程操作,严禁乱扳硬扭。仪器发生故障,要立即报告实验指导教师。损坏仪器设备要填写“仪器设备损坏报审表”,听候处理。

5. 凡是涉及用电的实验项目都必须经实验指导教师检查同意后才可接通电源。在实验操作过程中发现不正常的现象(如打火、冒烟、出焦味等)时,应立即切断电源,并向实验指导教师报告情况。

6. 实验测试完毕,实验原始数据经实验指导教师审核合格后,再将仪器设备整理复原,并认真填写“实验登记表”,请实验指导教师检查认可后方可离开实验室。

第一章 误差和数据处理的基本知识

一、测量及其误差

(一) 物理测量的概念

我们进行普通物理实验时,不仅要定性地观察各种物理变化的过程,而且还要测定相关物理量的数值,以便于定量地研究各相关物理量之间的变化关系。为了使我们的测量结果具有普遍意义,在进行实际测量中我们必须采用统一的单位作为确定各个物理量的标准。按照现行国家标准,物理实验中物理单位采用“国际单位制”:国际单位制中质量的单位为千克(kg),时间的单位为秒(s),长度的单位为米(m),电流的单位为安培(A)等。

物理测量就是观测者将待测物理量与选作为标准单位的物理量进行比较的过程。

测量的结果就是得出待测物理量是标准单位物理量的多少倍,这个倍数注明标准单位就构成实验测量数据。

(二) 物理测量的分类

按照获得实验测量数据方式的不同,一般物理测量过程可分为直接测量和间接测量。

1. 直接测量。直接测量就是观测者将待测物理量直接与测量工具或测量仪器上的标准单位物理量相比较,获得实验测量数据的过程。

例如:用米尺测量物体的长度;用物理天平称量物体的质量;用温度计测定物体的温度;用电流表测量流过导体的电流等。在这些测量过程中所用的测量仪表都是按照标准国际单位或其倍数设置度盘刻度的,待测物理量的大小可以从测量仪表上的度盘上直接读出。

2. 间接测量。大多数待测物理量无法或不便于直接与标准单位物理量进行比较,即不能通过测量仪表直接测出。因此,只能利用物理公式、物理定律和计算关系,通过间接的方法进行定量测量。

例如:测定一个圆柱体的体积 V 时,我们可以利用游标卡尺测量其高度 H 和直径 D ,再根据圆柱体体积的计算关系:

$$V = \frac{\pi}{4} HD^2$$

求得圆柱体体积 V ,像这样一类的测量过程就称为“间接测量”。

对一个特定的物理量而言,我们所使用的测量方法并不是一成不变的。随着科学技术的发展,物理实验仪器的功能也在不断完善,一些原来只能利用间接测量方法测量的物理量,现在也可以直接用测量工具或仪器进行直接测量了,例如:电阻阻值 R 的测量,以前要使用电流表、电压表,利用伏安法关系:

$$R = \frac{U}{I}$$

来间接测量获得电阻阻值 R , 而现在则可以使用电阻表直接测量电阻阻值 R 。

(三) 测量误差的定义和分类

物理测量是我们定量研究客观世界中物质运动规律和物质相互作用的唯一的手段, 所以物理测量是否准确, 将直接影响到我们对客观世界的认识水平。

1. 误差的定义。任何待测物理量都有其自身所特有的物理性质, 反映这些特性的物理量所具有的客观的真实数值称为真值。物理实验测量的目的就是希望通过实验来确定待测物理量的真值。

但是, 在实验测量中, 由于受到测量仪器、测量方法、测量时间、观测者的感觉器官的分辨率以及环境条件的限制, 测量的结果都只能是被测物理量的近似值, 也就是说物理量的测量值和真值之间总存在差异。

我们把测量值 N_i 与被测物理量的真值 N_0 之差的绝对值 ΔN_i 定义为测量的绝对误差, 简称误差。即:

$$\Delta N_i = |N_0 - N_i|$$

2. 误差的分类。根据在实际测量过程中对测量误差来源的综合分析, 我们将测量误差分为系统误差和偶然误差两类:

(1) 系统误差。系统误差的特点: 在相同条件下(指观测者、测量仪器和测量方法等完全相同), 多次测量同一待测物理量时, 测量的误差始终保持恒定, 或按照一定的规律变化。

系统误差的主要来源有:

1) 仪器误差: 由于实验仪器本身的设计缺陷, 或没有严格按照规定条件使用仪器, 而给测量结果带来的误差。例如: 在电学实验中仪器仪表的刻度不准、零点失准; 在“刚体转动实验”中, 计时器基准的偏差; 在“欧姆定律的应用”实验中, 安培表接错位置。

2) 理论或方法误差: 由于测量所依据的理论公式本身的近似性, 或实验条件和测量方法不能达到理论所规定的要求而给测量结果带来的误差。例如, 在“测重力加速度”实验中, 单摆的周期公式:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

的成立条件是摆角趋于零, 这在实际测量过程中是无法达到的, 而在小角度摆角的情况下, 以上关系式只是一个近似公式, 因此, 测出的重力加速度 g 也只能是一个近似值;

在“欧姆定律的应用”实验中, 利用了欧姆定律的关系式:

$$R = \frac{U}{I}$$

如果没有考虑电流表和电压表的内阻的影响, 测得的电阻就会存在一定的系统误差。

3) 环境误差: 测量过程中, 由于测量工作现场周围的温度、气压、电磁场等环境条件发生变化(偏离规定条件)而产生的误差。例如: 在“电位差计及其使用”实验中, 在 20°C 时标定的标准电池, 在非标准情况下使用。

4) 人身误差: 由于测量者缺乏必要的基本训练、实验经验不足或不正确的心理习惯而给测量结果带来的误差。例如: 在“刚体转动实验”中, 用秒表测定砝码的下落时间时, 有

人总习惯于提前(或迟后)按表;在一些实验中,测量读数时,有人总习惯性地按实验数据读得偏大(或偏小)。

实验中系统误差的发现和清除有时比较简单,有时又相当复杂和困难,但原则上讲总可以通过改善(或校准)仪表、改进测量方法、修正测量结果、改善实验环境以及通过训练纠正观测者本身的习惯偏向等方法来减少系统误差,直到其对实验测量结果的影响可以忽略不计为止。

(2) 偶然误差。在实验中即使消除了系统误差,实验者在相同条件下对同一物理量进行多次测量时,各次测量值之间也往往不相同,即测量值仍存在误差。

这类误差主要是由于观测者在对测量数据进行接近于、或低于测量工具最小分辨率的一位估读时,感官分辨能力有限,以及环境条件无规律的起伏变化所造成的。尽管,低于测量工具最小分辨率的一位估读的数值是不准确的,但是,这一位估读的测量数值却是有着特殊的意义的。

偶然误差的特点是:对多次测量中某一次测量值而言,测量结果的绝对误差的大小完全不可预料,即完全是偶然的(随机的),因而也将这类误差称为随机误差。

对一个特定物理量的测量过程而言,偶然误差的“偶然性”并不意味着测量结果是完全无规律的。当进行多次测量时,由偶然误差影响产生的测量结果服从统计规律,因此可用概率统计的方法来处理偶然误差。

对大多数物理实验而言,多次测量结果的偶然误差呈正态分布。如图 1-1 所示。

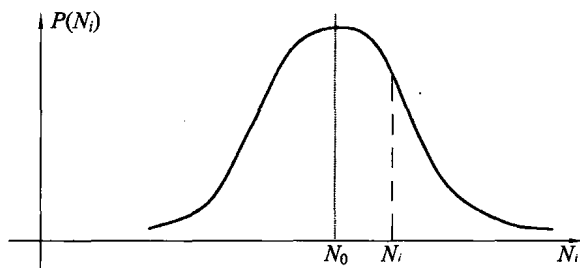


图 1-1 多次测量结果的偶然误差特征

图中横坐标表示测量结果 N_i , 纵坐标表示测量结果 N_i 出现的相对概率密度 $P(N_i)$, 由图可知偶然误差遵从如下规律:

- 1) 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- 2) 对称性: 绝对值相等的正负误差出现的概率基本相等。因而当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时将多次测量的偶然误差相加, 则正负误差将成对抵消, 误差总和趋于零, 即当 $n \rightarrow \infty$ 时

$$\sum_{i=1}^{\infty} \Delta N_i = 0$$

- 3) 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率趋于零, 即在一定条件下, 误差的绝对值不超过一定限度。

由于偶然误差是由某些不能完全控制的偶然因素所引起的, 所以不能通过改善仪器、改进测量方法等办法来减小和消除它, 但由于其遵从上述统计规律, 可采取适当增加测量

次数取其算术平均值的方法使测量值更接近真值。

(四) 误差的表述形式

误差又分为绝对误差和相对误差两种表述形式。

1. 绝对误差。根据前面的叙述,我们把测量值 N_i 与被测物理量的真值 N_0 之差的绝对值 ΔN_i 定义为测量的绝对误差。即:

$$\Delta N_i = |N_0 - N_i|$$

由于从原则上讲,可以通过改善(或校准)仪表、改进测量方法、修正测量结果、改善实验环境以及纠正观测者本身的习惯倾向等方法来减少系统误差,使其对实验测量结果的影响可以忽略不计。而偶然误差遵从统计规律,故可采取适当增加测量次数取其算术平均值的方法使测量值更接近真值。

如果在相同实验条件下对某个待测物理量 N_0 进行了 n 次重复测量,其测量值分别为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$,用 $\bar{N}$ 表示平均值,则

$$\bar{N} = \frac{1}{n}(N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

根据误差的统计理论,在一组 n 次测量的实验数据中,算术平均值 $\bar{N}$ 最接近于真值,称为测量的近真值。

假定系统误差可忽略不计,当测量次数无限增加时,算术平均值就将无限接近于真值,即

$$N_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

在实际的实验数据处理过程中,由于我们只能进行有限次的实验测量,所以只能用测量结果的算术平均值近似地代替待测物理量的真值。因此,有

$$N_0 \Rightarrow \bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

而每一次测量数据的绝对误差为

$$\Delta N_i = |N_0 - N_i| \doteq |\bar{N} - N_i|$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{N} - N_i|$$

由高斯误差理论对正态分布曲线的分析可以证明,在相同实验条件下进行的多次测量中,任一测量结果 N_i 出现在 $(\bar{N} - \overline{\Delta N})$ 到 $(\bar{N} + \overline{\Delta N})$ 范围内的概率约为 57.5%,而真值 N_0 在这一区间内的概率就更大了。所以实验测量结果最后表示为:

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} \quad (\text{单位})$$

2. 均方根误差(标准误差)。如果在相同条件下对某物理量 N 进行了 n 次重复测量,其测量值分别为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$,则算术平均值 $\bar{N}$ 均方根误差(标准误差)的定义是

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{N} - N_i)^2}$$

实验测量结果最后表示为:

$$N = \bar{N} \pm \sigma \quad (\text{单位})$$

对正态分布曲线的分析可以证明,在相同实验条件下进行的多次测量中,任一测量结果 N_i 出现在 $(\bar{N} - \sigma)$ 到 $(\bar{N} + \sigma)$ 范围内的概率为 68.3%。而测量数据出现在 $(\bar{N} - 3\sigma)$ 到 $(\bar{N} + 3\sigma)$ 范围内的概率高达 99.7%,因此我们又称 $\pm 3\sigma$ 为极限误差。在我们进行的有限次测量中,如果某个测量值的误差超过了 $\pm 3\sigma$,则我们可以判定该测量值为非正常值,并予以剔除。

绝对误差中算术平均误差与均方根误差都可作为确定测量结果误差的量度,它们都表明了在一组多次测量的实验数据中各个测量数据之间的分散程度。

3. 相对误差。为了评价一个实验测量结果的优劣,不仅需要确定测量数据的绝对误差的大小,还需要看被测物理量本身的大小。为此,我们引入相对误差的定义:

$$E_r = \frac{\Delta N}{N} \times 100\%$$

为了说明相对误差的物理意义,下面举例:在“长度测量”实验中,我们分别用游标卡尺和螺旋测微计测量一金属片的边长 L ,得出如下的测量结果:

$$L_{\text{用游标卡尺}} = 18.36 \pm 0.02 \text{ mm}$$

$$L_{\text{用螺旋测微计}} = 18.356 \pm 0.005 \text{ mm}$$

则其相对误差分别为

$$E_{\text{用游标卡尺}} = \frac{0.02}{18.36} \times 100\% \approx 0.1\%$$

$$E_{\text{螺旋测微计}} = \frac{0.005}{18.356} \times 100\% \approx 0.02\%$$

通过二者的分析对比,我们应该认识到测量结果的相对误差与实验所使用的测量工具的测量范围和测量最小分辨率相关。

二、误差的估算

实验中过失和错误应该完全避免,系统误差原则上可以设法减小到可以忽略不计,因而在此只讨论偶然误差的估算。

(一) 单次直接测量量误差的估算

在物理实验中,由于实验条件不许可,或对测量准确度要求不高等原因,对一个物理量 N_0 只进行了一次测量,测量结果为 N 。这时,我们应该根据实际情况,对测量值的误差进行具体合理的估算。

在一般情况下,对于偶然误差很小的测量值,可按仪器仪表上注明的仪器精度等级 K ,并利用精度等级 K 的定义:

$$K = \frac{|\Delta N_{\max}|}{N_{\text{量程}}} \times 100$$

来估计测量结果的误差 $\Delta N \approx \Delta N_{\max}$,测量结果可以表示为:

$$N = N \pm \Delta N$$

例题:在“欧姆定律的应用”实验中,用精度级数 $K=0.5$ 级的 C31-V 型直流电压表的 15 V 量程测量电阻两端的电压为 12.50 V,测量的绝对误差为:

$$\Delta U = \frac{1}{100} \times K \times U_{\text{量程}} = 0.075 \approx 0.08 \text{ (V)}$$

测量的最后结果为:

$$U = U \pm \Delta U = 12.50 \pm 0.08 \text{ V}$$

注意:在测量结果的最后表达式中,绝对误差只能保留一位有效数字,而测量近真值的最低一位应与绝对误差保留位取齐。

对于没有特别注明精度等级的测量工具和仪表,也可以取测量工具最小刻度的一半作为单次测量的误差来估计。

例题:在“长度测量”实验中,用最小刻度为 mm(毫米)的钢尺,测量金属片的边长 L 一次,测量结果为 7.58 cm,测量的绝对误差为:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \times N_{\text{最小刻度}} = 0.5 \text{ mm} = 0.05 \text{ cm}$$

测量的最后结果为:

$$L = L \pm \Delta L = 7.58 \pm 0.05 \text{ cm}$$

注意:一般情况下,测量结果必须要估读到测量工具最小刻度的 1/10 位,在测量结果的最后表达式中,绝对误差只能保留一位有效数字,而测量近真值的最低一位应与绝对误差保留位取齐。

(二) 多次测量量误差的估计

在一般情况下,我们总是采用增加测量组数的方法来减小实验测量结果的偶然误差。

如果在相同实验条件下对某个待测物理量 N_0 进行了 n 次重复测量,其测量值分别为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$, 用 $\bar{N}$ 表示多次测量结果的平均值,则

$$\bar{N} = \frac{1}{n} (N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

当测量次数足够多时,算术平均值就将接近于真值,即

$$N_0 \Rightarrow \bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

每一次测量数据的误差为

$$\Delta N_i = |\bar{N} - N_i|$$

平均绝对误差为

$$\overline{\Delta N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{N} - N_i|$$

严格来讲,误差是测量值与真值之差,而测量值与平均值之差称为偏差,这两者是有差别的。当测量次数很多时,多次测量的平均值 $\bar{N}$ 最接近于真值,因此各次测量值与 $\bar{N}$ 的偏差也就很接近于它们与真值的误差。这样,我们就不去区分偏差与误差的细微区别,我们把多次测量值的结果表示为

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} \quad (\text{单位})$$

这组测量数据的相对误差为

$$E_r = \frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} \times 100 \%$$

例题:在“长度测量”实验中,用游标卡尺将一待测金属圆柱体的直径 D 测量 5 次,得到的测量值分别列入表 1-1。

表 1-1 测量金属圆柱体的直径

游标卡尺精度:0.02 mm

次 数	D (cm)	ΔD (cm)
1	3.998	0.001 2
2	4.002	0.002 8
3	3.996	0.003 2
4	3.996	0.003 2
5	4.004	0.004 8
平 均	3.999 2	0.003 04

则这组测量数据的平均值为

$$\bar{D} = \frac{1}{5} \times (3.998 + 4.002 + 3.996 + 3.996 + 4.004) = 3.999\ 2\ (\text{cm})$$

由于多次测量可以提高实验数据的测量精度,所以,计算结果应多保留一位。根据误差理论中偶然误差的特征,令

$$D_0 \approx \bar{D}$$

根据测量数据的绝对误差的定义

$$\Delta D_i = |\bar{D} - D_i|$$

则各次实验测量的绝对误差分别为

$$\Delta D_1 = |3.999\ 2 - 3.998| = 0.001\ 2\ (\text{cm})$$

$$\Delta D_2 = |3.999\ 2 - 4.002| = 0.002\ 8\ (\text{cm})$$

$$\Delta D_3 = |3.999\ 2 - 3.996| = 0.003\ 2\ (\text{cm})$$

$$\Delta D_4 = |3.999\ 2 - 3.996| = 0.003\ 2\ (\text{cm})$$

$$\Delta D_5 = |3.999\ 2 - 4.004| = 0.004\ 8\ (\text{cm})$$

平均绝对误差为

$$\begin{aligned} \overline{\Delta D} &= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta D_i = \frac{1}{5} \times (0.001\ 2 + 0.002\ 8 + 0.003\ 2 + 0.003\ 2 + 0.004\ 8) \\ &= 0.003\ 04\ (\text{cm}) \end{aligned}$$

所以,待测金属圆柱体的直径可表示为

$$D = \bar{D} \pm \overline{\Delta D} = 3.999 \pm 0.003\ \text{cm}$$

注意:在测量结果的最后表达式中,平均绝对误差只能保留一位数字,测量的近真值保留的最低一位应与误差保留位取齐。

金属圆柱体直径的测量相对误差为

$$E_r = \frac{\overline{\Delta D}}{\bar{D}} \times 100\% = \frac{0.003}{3.999} \times 100\% = 0.075\% \approx 0.08\%$$