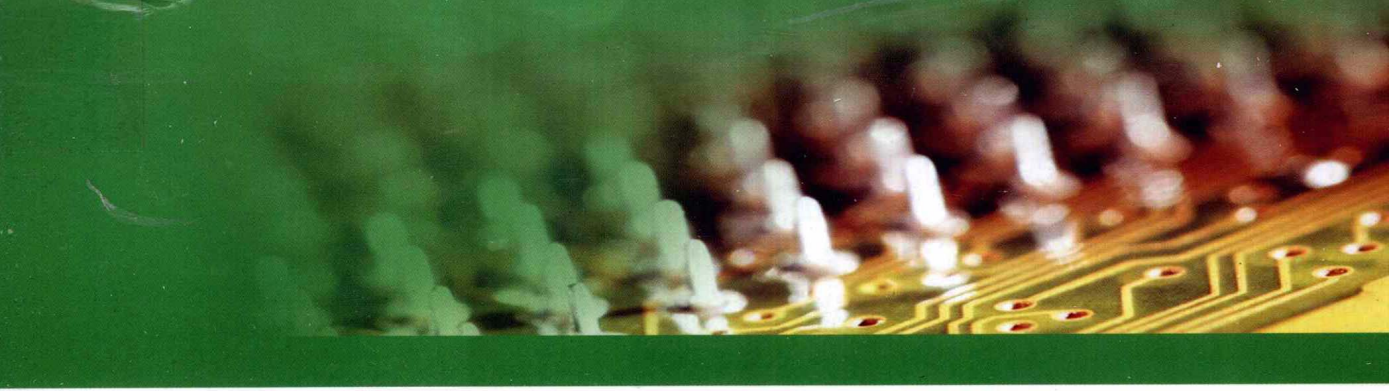




大学物理实验

DAXUE WULI
SHIYAN

主编 王素红 张胜海 王 荣



国防工业出版社

National Defense Industry Press

大学物理实验

主编	王素红	张胜海	王 荣
编者	孙 佳	吴天安	张晓旭
	郭海洋	杨晓娜	平盛朵

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

由王素红等同志编写的《大学物理实验》教材是根据教育部颁布的《高等工业学校物理实验课程教学的基本要求》、军训部颁发的《军队院校基础实验室建设标准》和信息工程大学物理实验课程教学大纲,结合物理实验教学实践编写的。

该书按照标准化建设,采用“单元法”教学的新模式,突出学生基本能力的培养、科学素质的养成、创新思维的激发。全书分为八个单元,内容涉及基础实验、近代综合实验、应用性与设计性实验、传感器综合实验、研究与课题实验等方面。教材着眼于提高学生能力、培养创造性人才,注意拓宽学生的知识面,正确处理传统实验和新实验的关系,注意联系实际应用等方面,具有一定的特色。

本书可作为在校各专业本、专科学生和应用物理专业学生基础实验用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 王素红, 张胜海, 王荣主编. —北京: 国防工业出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-118-07226-6

I. ①大... II. ①王... ②张... ③王... III. ①物理学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 003007 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 字数 342 千字
2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

大学物理实验是学生进入大学后第一门独立开设的基础实验课程,对提高学生的基本能力、培养学生的科学实验素养,激发学生的创新思维起着重要作用,并为后续各专业课程的学习奠定坚实的基础。

本书是根据教育部颁布的《高等工业学校物理实验课程教学的基本要求》、总参军训和兵种部颁发的《军队院校基础实验室建设标准》和大学物理实验课程教学大纲,结合解放军信息工程大学物理实验教学实践,特别是在总结近几年来开放式教学和课程建设经验的基础上编写而成的。

本书按照基础实验室标准化建设的几个模块:基础物理实验、近代与综合物理实验、应用性与设计性物理实验、传感器综合物理实验、研究性与课题实验模块进行编写,模块间循序渐进,单元内循环教学。本书首次将物理实验的基本测量方法、基本的测量技术和物理实验设计的基本知识编为一个独立的单元,使各单元内的实验内容有机地结合在一起,突出一条主线,并适当提高了实验的深度和难度,加强了各单元的系统性和科学性。

全书共分八个单元:第一单元绪论;第二单元物理实验基础理论;第三单元物理实验的基本方法与测量技术;第四单元基础物理实验;第五单元近代与综合物理实验;第六单元应用性与设计性物理实验;第七单元传感器综合实验;第八单元研究性与课题实验。

本书按照循序渐进的认识规律,内容编排由浅入深,结合学校开放式教学的实际情况,教材突显了对学生基本能力的培养、科学素质的养成及创新思维的激发。如在大多数实验项目中,以实验简介的形式介绍了该实验的历史背景、实验技术、方法和应用前景等知识。使学生能够了解实验的历史,学会科学思维的方法和一般规律。

本书着眼于提高学生能力、培养创造性人才,在注意拓宽学生的知识面,正确处理传统实验和新实验的关系,注意联系实际应用等方面具有一定的特色。本书可作为高等工科院校各专业本、专科学生和物理专业学生基础实验用书,也可作为教师参考书。

实验教学是一项集体的事业,无论是实验的编排,实验仪器的维护与维修,还是教材的编写,都是实验中心全体人员的劳动成果。特别近几年来,实验中心全体教员不断进行实验教学改革、课程建设、实验内容的改革,在此基础上编写的新教材,反映

了物理实验中心全体教员的智慧和成果。

参加本书编写的人员有:王素红(第一单元,第三单元,第五单元的实验9~实验14,第六单元,第七单元,第八单元实验3~实验9,附录);张胜海(第二单元,第四单元的实验4、实验7、实验11,第五单元的实验3、实验5、实验6);王荣(第四单元实验1、实验2、实验5、实验9、实验10,第五单元实验7);孙佳(第四单元实验6、实验8、实验12,第五单元实验4);郭海洋(第四单元的实验3,第五单元的实验2);吴天安(第五单元的实验1、实验8);张晓旭(第八单元的实验1、实验2、实验10)。本书的图由郭海洋、吴天安、张晓旭、平盛朵、杨晓娜绘制。全书由王素红统稿。

本书在编写过程中,参考了许多兄弟院校的教材,甚至引用了某些内容,在此表示衷心感谢!由于编写时间仓促,编者水平所限,教材中难免存在缺点和错误,欢迎使用本书的教师、学生、技术人员提出宝贵意见,以便我们改进。

编 者

2010年12月

目 录

第一单元 绪论	1
1.1 大学物理实验课的地位和任务	1
1.2 物理实验课的基本环节	2
1.3 如何学好物理实验课	3
第二单元 物理实验基础理论	5
2.1 测量和误差	5
2.1.1 测量和有效数字	5
2.1.2 测量误差	7
2.1.3 误差的处理	15
2.2 测量结果的表述和不确定度	19
2.2.1 测量结果的表述和不确定度的概念	19
2.2.2 不确定度的计算(或估计)方法	20
2.3 数据处理的基本方法	24
2.3.1 列表法	24
2.3.2 作图法	24
2.3.3 逐差法	25
2.3.4 最小二乘法线性拟合	25
练习题	26
第三单元 物理实验的实验方法与测量技术	29
3.1 物理实验的基本测量方法	30
3.1.1 比较法	30
3.1.2 补偿法	31
3.1.3 放大法	31
3.1.4 模拟法	32
3.1.5 振动与波动方法	33
3.1.6 光学实验方法	34
3.1.7 非电量的电测法	34
3.2 物理实验的基本测量技术	35
3.3 物理实验设计的基础知识	36
第四单元 基础物理实验	37
实验4-1 长度的测量与数据处理练习	37
实验4-2 物体密度的测量	43

实验 4-3	转动惯量的测量	45
实验 4-4	用拉伸法测量金属的杨氏模量	48
实验 4-5	变阻器的使用和特性研究	51
实验 4-6	电表的改装和校准	56
实验 4-7	补偿法和电位差计的应用	60
实验 4-8	用惠斯登电桥测电阻	63
实验 4-9	用模拟法测绘静电场	66
实验 4-10	电子束实验	72
实验 4-10-1	电子束的聚焦与荷质比的测定	72
实验 4-10-2	电子束的偏转	79
实验 4-11	示波器的使用	83
实验 4-11-1	模拟示波器的使用	83
实验 4-11-2	数字示波器的使用	95
实验 4-12	分光计的调整和使用	100
第五单元	近代与综合物理实验	109
实验 5-1	利用霍耳法测量磁感应强度	109
实验 5-2	光电效应测量普朗克常数	113
实验 5-3	铁磁材料磁滞回线的观测	118
实验 5-4	光栅衍射测波长	124
实验 5-5	迈克尔逊干涉仪	126
实验 5-6	超声波在空气中传播速度的测量	131
实验 5-7	超声波在液体中传播速度的测量	134
实验 5-8	牛顿环与劈尖干涉	136
实验 5-9	液晶电光效应特性研究	141
实验 5-10	夫兰克—赫兹实验	145
实验 5-11	激光全息照相技术	150
实验 5-12	多普勒效应及其应用	156
实验 5-13	温度传感器温度特性研究	166
实验 5-14	弦驻波实验研究	178
第六单元	应用性与设计性物理实验	181
实验 6-1	粉粒状固体密度的测量	181
实验 6-2	表头内阻的测量	181
实验 6-3	多量程电流表的改装	182
实验 6-4	多量程电压表的改装	183
实验 6-5	长直螺线管中心磁场的测量	184
实验 6-6	电位差计测量电源电动势	185
实验 6-7	薄透镜焦距的测量	186
实验 6-8	平凸透镜曲率半径的测量	188
实验 6-9	自组显微镜	189

实验 6-10	自组望远镜	190
实验 6-11	热敏式温度传感器特性研究	191
实验 6-12	利用光纤传感器测量转速	192
实验 6-13	利用涡流传感器测重	194
实验 6-14	应变式传感器的性能研究	194
第七单元	传感器综合实验	196
7.1	传感器基础知识	196
7.2	CSY 传感器实验仪使用说明	199
实验 7-1	金属应变式传感器	202
实验 7-2	电涡流式传感器	205
实验 7-3	霍耳传感器	206
实验 7-4	光纤位移传感器	209
实验 7-5	热敏式温度传感器特性研究	211
实验 7-6	压电加速度式传感器	212
第八单元	研究性与课题实验	215
实验 8-1	双棱镜干涉实验研究	215
实验 8-2	用分光计进行偏振光实验研究	216
实验 8-3	光栅分辨本领的测定	217
实验 8-4	棱镜色散率的测量	218
实验 8-5	透明薄片折射率和厚度的测量	219
实验 8-6	全息光栅的制作	220
实验 8-7	光栅光谱和光栅常数的测定	221
实验 8-8	电振动的合成与示波器的应用	221
实验 8-9	桥式电路及金属材料的温度系数	223
实验 8-10	混沌通讯的观测	224
附录		228

第一单元 绪 论

1.1 大学物理实验课的地位和任务

科学实验是人们研究自然规律和改造客观世界的基本手段。科学实验的任务是人们根据一定的研究目的,通过科学的抽象,使自然现象和实际生产中的问题以抽象的、典型的形式表现出来,从而利用科学仪器进行实验观察,定性或定量地测量有关物理量,并通过数学处理和理论分析,总结出这些量之间的相互关系,以求得对自然现象及规律本质的认识。

人们对自然的认识是一个逐步深入的过程,人们根据科学实验结果,在一定的局限范围内,提出科学理论,再回到实践中去检验,通过实践又提出新的理论,进行新的认识,如此反复,促进了科学的发展。因此,科学实验是科学理论的源泉,是自然科学的根本,同时,科学理论对实验起着指导作用。我们既要重视理论,也要重视科学实验。

物理学是建立在实验基础上的一门科学。物理规律的发现和物理理论的建立,都必须以严格的物理实验为基础,并受到实验的检验;同时,物理学研究中的一些新的假设、预言,最终要在实验中进行验证,以判断它们的正确性。例如十八世纪,有关光的本性问题存在着两种学说——微粒说和波动说,两派意见分歧,争论不休。1802年,英国物理学家托马斯·杨发表了双孔太阳光干涉实验和有关叠加原理的论文,使光的波动说在当时占据了统治地位。1864年,英国剑桥大学实验物理教授麦克斯韦在奥斯特、法拉第和亨利等人有关电与磁关系大量实验探索的基础上,建立了著名的麦克斯韦方程组,光的电磁理论诞生了,使人们确信光是一种电磁波。但是,当解释光和物理相互作用所表现出来的种种现象时,当时的电磁理论却无能为力,首先表现在黑体辐射问题上。随后,许多科学家制造出各种各样的黑体光源,准确地对他们的辐射分布进行测量,得出了大量的实验曲线。终于在1900年,德国柏林大学教授普朗克在大量实验的基础上,划时代地提出了能量子假设,成功地解释了黑体辐射规律,使人们进一步认识到光的波粒二象性。能量子假设作为一把金钥匙,打开了通向近代物理学的大门,使人们开始探索微观世界的运动规律。黑体辐射实验是人们跨向近代物理学的里程碑。

又如1919年,英国的爱丁顿拍出日全食照片,用于分析光线在太阳附近的弯曲情况,从而为爱因斯坦在1915年提出广义相对论提供了有力的证据;著名的物理学家杨振宁、李政道提出了弱相互作用宇称不守恒理论,经实验物理学家吴健雄实验验证后,在1957年获得了诺贝尔物理学奖。

物理学的发展史是理论和实验相辅相成的历史。作为培养高级工程技术人员的高等理工院校,不仅要使学生具有深广的基础理论知识,而且要有从事现代化科学实验的较强的能力,以适应“面向现代化、面向未来”的要求。本课程的具体任务是:

1. 学习和掌握物理实验的基本知识

通过对物理实验现象的观察、分析和物理量的测量,学习和掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技术;掌握如何运用实验原理和方法去研究某个物理问题;熟悉常用仪器的基本原理、结构性能及使用方法。

2. 培养和提高学生的科学实验能力

(1) 自学能力:通过提前阅读实验教材或说明书、参考资料等,做好实验前的准备,培养学生的自学能力。

(2) 动手能力:熟悉一些常用仪器的使用;掌握一些基本的实验技能,如水平、垂直的调节,光路的共轴、视差消除的调节,电路中分压、限流方法的使用以及如何排除实验故障等。

(3) 分析表达能力:能够正确合理地列出实验数据表格,记录和处理实验数据,绘制实验曲线,分析实验结果,撰写一定水平的实验报告。

(4) 设计能力:对于简单问题,能够从研究对象或课题要求出发,自己查阅资料,依据某个原理,设计实验方案,确定实验参数,选配仪器,拟定实验程序。

(5) 研究创新能力:能够完成符合规范要求的研究性的课题实验,进行初步的具有研究性和创新性的实验,激发学生的学习主动性,培养学生的创新能力。

3. 培养和提高学生的科学实验素质

通过实验培养学生实事求是、理论联系实际的科学作风;严肃认真、不怕困难、艰苦努力的科学态度;勇于探索、创新的科学精神;以及遵守纪律、团结协作,爱护公共财产的良好品德。

1.2 物理实验课的基本环节

大学物理实验课涉及的内容,多数是测量某一物理量,或研究某一物理量随另一物理量变化的规律性。在本课程中,为了加强科学实验能力的培养,将实验内容划分成若干个独立的单元,每个实验单元中内容循序渐进且程序大致相同,一般可分为以下三个环节。

1. 实验前的预习

由于实验课时间有限,为保证顺利且高质量地完成实验,实验前必须认真阅读实验教材,明确实验目的、原理、方法和条件,了解实验步骤并写出预习报告。每次上课前教师将检查预习情况,没有达到要求者,将不允许做实验。学生可以借助于校园网资源,在物理实验中心开放式实验教学管理系统中进行预习或仿真练习。根据自己的预习情况进行选课。

2. 实验中的观测

观测是实验课的中心环节,教师用一定的时间讲解有关的实验内容和要求,使用仪器的方法和注意事项,对实验中的难点做提示。要求学生严格按照仪器设备和操作规程进行实验,掌握正确的调整和操作方法,实验中要善于多观察、多分析,反对盲目蛮干。若发现异常现象或仪器故障,应立即向教师报告。

把实验测量的原始数据和实验现象及时记录下来,如实验的条件,仪器的规格、型号、参数等,注意按有效数字规则记录实验数据并注意标明物理量的单位。如要更改数据,需

注明原因,以便实验结束后分析核对。测量结束后,数据用钢笔或圆珠笔书写整齐,并经教师检查合格后签名。实验结束后须整理好仪器,方可离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是对实验工作的全面总结,实验报告一律采用统一的方式书写。要求:字体工整、语句简练、阐述清楚、图表规范、结果正确、分析认真。一份完整的实验报告应包括以下几个方面:

(1)实验名称。

(2)实验目的。

(3)实验仪器:包括型号、规格、参数等。

(4)实验原理:写出简要的实验理论依据、实验方法及公式,画出电路图、光路图等。设计性实验要求写出自拟的实验方案、设计的实验线路、选择的仪器等。注意:不要照抄讲义,应用自己的语言叙述。

(5)实验步骤:扼要说明实验的关键步骤和主要注意事项。

注:以上各项均写在预习报告中。

(6)实验数据、表格、作图及计算:表格要简单明了,分类清楚而有条理。

(7)误差与不确定度估计:包括确定实验结果的误差范围、相关的不确定度计算、分析产生误差的原因及减小误差可采取的措施。

(8)实验结果:包括测量值 N 、绝对误差 ΔN 、不确定度 u_N 和相对误差 E ,并写成 $N = \bar{N} \pm \Delta N$ 或 $N = \bar{N} \pm u_N$ 的形式。若有观察某现象或验证某些物理规律的内容时,要写出实验结论。

(9)问题讨论:包括对实验中的现象解释、对实验方法的改进及建议、作业题、实验后的体会等。

1.3 如何学好物理实验课

由于实验课的学时和内容有限,要打下坚实的实验基础和具有较强的科学实验能力,学生必须主动地、积极地、创造性地去学习。必须认识到,实验不仅仅是得到几个实验数据,而是要通过实验去学习探索研究问题的方法,培养与锻炼科学实验的能力。在学习过程中,应该注意以下几点:

(1)要重视实验教学的每一个环节。

(2)要掌握所采取的实验方法:物理实验课中的每个实验内容,都是经过精心安排,实验结果已有定论。因此通过学习,在弄清原理的基础上,着重掌握实验采取了什么样的实验方法和测量方法,了解这些方法在现代工程上有什么样的应用,思考自己可以对这种实验方法提出什么好的改进建议等。通过对每个实验的深入研究,达到融会贯通,学以致用。

(3)注意养成好的习惯:物理实验课是学生进入大学后的第一门实验必修课,是对学生进行科学训练的起点。因此,要带着问题去做实验,善于捕捉实验中的实验现象,对现象认真分析,对实验中出现的简单故障,在不损坏仪器的基础上,逐步学会自己排除。要养成多动手、多动脑的习惯,使每个实验的学习,确实学有所获;使自己的动手能力、科学

分析问题的能力、创新能力得到提高。

(4) 注意培养自己的科学素质和创新精神：不轻易放过实验中的每一个现象，不怕挫折和失败。实验数据要真实可靠，不要抄袭数据，更不允许编造数据。对实验中的误差，要认真分析研究，找出产生误差的原因，还可以提出自己对实验的改进意见。

第二单元 物理实验基础理论

本单元主要介绍大学物理实验所必需的基础知识,包括测量、有效数字、误差理论和不确定度等基本概念,以及实验数据的处理方法。

2.1 测量和误差

2.1.1 测量和有效数字

1. 测量及其分类

物理实验离不开测量,不论是研究物理现象、验证物理原理,还是研究物质特性等都要进行测量。所谓测量,就是用一定的量具或仪器,通过一定的方法,与被测量的规定单位进行比较,求其倍数的操作。而被测量的规定单位有基本单位和导出单位之分。根据不同的分类标准,测量可进行如下分类:

1) 直接测量与间接测量

根据测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量是指能在仪器或量具上直接读出待测物理量量值的测量,例如:用直尺测量长度,用天平测量质量,用万用表测量电阻等。而间接测量是指按一定的函数关系由若干个直接测量量经过运算后获得被测物理量的值,例如:测量金属球的密度,需先测出金属球的直径和质量,再利用公式计算出金属球的密度。物理实验中的大多数测量都是间接测量。

2) 等精度测量和不等精度测量

根据测量的条件可以分为等精度测量和不等精度测量。每次测量都在相同的条件下使用相同的仪器设备进行的测量叫等精度测量,否则就是不等精度测量。在物理实验中选用相同的测量设备对被测量进行多次测量一般可以看作等精度测量。

3) 静态测量和动态测量

根据测量量的状态可以分为静态测量和动态测量。当被测量的量值随时间变化时,对它的测量可视为动态测量,反之为静态测量。

4) 工程测量和精密测量

根据测量精度测量可以分为工程测量和精密测量。工程测量通常是以满足一定的工程设计误差为准的测量,一般不需要给出测量结果的不确定度(有关不确定度的知识见2.2节);精密测量是为满足科学研究需要的测量,常常要做到尽可能的精确,并且还要评价测量结果的不确定度。物理实验课中的测量都是精密测量。

2. 有效数字及其运算规则

测量结果一般是由一系列数字表示出来的,物理实验要求表示测量结果的数字既能表示出物理量的大小,又能反映出测量仪器的精度。实验数据的记录、运算以及实验结果的

表达,都应遵从有效数字的规则。

1)有效数字的概念

测量结果的可靠数字(或称准确数字)加上一位可疑数字,统称为测量结果的有效数字。例如:用直尺测量木棒长度(图2-1),可以读出棒长为2.12cm或2.13cm。前两位数字2、1是从直尺整、分度数直接读出来的数字,称之为“可靠(或准确)数字”,最后一位数字2(或3)是测量者在直尺上最小刻度之间估读出来的,其数值会因人而异,是一位有疑问的数字,因此它是不确定的,是可疑的,称为“可疑数字”,但这位估读数字仍然是测量的客观存在,所以它是“有效”的。可疑数字只有一位。对于有效数字,应注意以下几个问题:

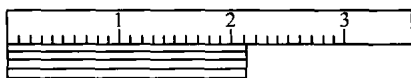


图2-1 直尺测长

(1)有效数字的位数是从测量结果的第一位(最高位)非零数字到最后一位数字间的所有数字的个数。例如:0.057与0.0057的有效数字位数是一样的,都是两位有效数字。

(2)数字结尾的0不应随便取舍,因为它也是有效数字。例如:23000与 2.3×10^4 是不一样的,前者是5位有效数字,后者只有2位有效数字。

(3)遇到那些很大或很小的数,而它们的有效位数又不多时,应当使用科学记数法,即用10的幂来表示。如:0.00035,可以写成 3.5×10^{-4} 。

(4)换算单位时,有效数字的位数应保持不变。例如: $38\text{mm} = 3.8\text{cm} = 3.8 \times 10^{-5}\text{km}$,但是, $38\text{mm} \neq 38000\mu\text{m}$,因为两者的有效数字位数不同,左边表示测量精确到1mm,右边表示测量精确到 $1\mu\text{m}$ 。

2)有效数字的读取

对于直接测量量,测量结果可以从仪器或量具上直接读出,其有效数字的位数由被测量的大小和仪器的精度决定。不同的仪器读取方式也不同,游标类器具(游标卡尺、分光计读数盘、大气压计等)一般读至最小分度的整数倍;数显仪表及有十进式标度盘的仪表(电阻箱、电桥、电位差计、数字电压表等)一般应直接读取仪表的示值;指针式仪表及其他器具,读数时估读到器具最小分度的 $1/2 \sim 1/10$ 。尽管不同仪器,读取方式不同,但读出数据的最末一位,都是估读数字,也就是可疑数字,例如:数显仪表,尽管我们读取数据时,没有进行估读,但是,仪器进行模数变换时做了近似处理,因此其最末一位仍是可疑数字;游标类器具,虽然读至最小分度的整数倍,但最末一位仍是可疑数字,因为游标上的某一刻线与主尺上的某刻线是否完全地、绝对地重合,我们并不能分辨出来,我们也只是近似地认为游标上的某一刻线与主尺上的某刻线重合,所以,最末一位仍是可疑数字。

3)有效数字的运算规则

间接测量量是通过直接测量量和一定的函数关系计算出来的,其结果也应由有效数字组成,首先应确定结果的有效数字的位数,其次确定最末一位有效数字后面数字的取舍,取舍的规则是:最末一位有效数字的下一位数字小于等于4的舍去;大于等于6的向前进1;等于5的把最末一位有效数字凑成偶数,归纳成一句口诀就是:“4舍6入5凑偶”。下面给出有关运算法则。

(1)和差运算:在同一单位条件下,结果的有效数字的最末一位与各有效数字中可疑数字位数最高的相同。

例2-1 设 $A = 12.34\text{cm}$, $B = 2.6\text{cm}$, $C = 0.255\text{cm}$,求 $N = A + B - C$ 。

解: $N = A + B - C = 12.34\text{cm} + 2.6\text{cm} - 0.255\text{cm} = 14.685$

则 $N = 14.7\text{cm}$

(2) 积商运算: 结果一般与各分量中有效数字位数最少的相同。但应注意的是, 因数的最末一位与另一因数的可靠数字相乘的所有数字都是可疑数字, 为了减少运算误差, 有时允许在中间值或结果中可多保留一位。当然, 根据具体情况, 最终结果必要时可少保留一位或多保留一位。

例 2-2 设 $A = 5.361\text{kg}$, $B = 1.4\text{m/s}^{-2}$, 求 $N = A \cdot B$ 。

解: $N = 5.361\text{kg} \times 1.4\text{m/s}^{-2} = 7.5054\text{N}$

应保留两位有效数字, 则, $N = 7.5\text{N}$

例 2-3 设 $A = 8.654\text{m}$, $B = 4.6\text{m}$, 求 $N = A \cdot B$ 。

解: $N = 8.654\text{m} \times 4.6\text{m} = 39.8084\text{m}^2$

$N = 39.8\text{m}^2$ (因相乘出现进位, 故多保留一位)

例 2-4 设 $A = 3.98\text{m/s}$, $B = 9.654\text{s}$, 求 $N = A/B$ 。

解: $N = 3.98\text{m} \div 9.654\text{s} = 0.41226\text{m/s}$

$N = 0.42\text{m/s}$ (相除时出现退位, 所以少保留一位)

(3) 四则运算: 四则运算的基本原则与加、减、乘、除运算一致。计算一级, 确定一级有效数字, 最后确定结果的有效数字位数。

例 2-5

$$\begin{aligned} N &= (15.6 + 4.412)\text{kg} \times 10.00\text{Ns}^{-2} / 22.100\text{m}^2 \\ &= 20.0\text{kg} \times 10.00\text{Ns}^{-2} / 22.100\text{m}^2 = 9.05\text{Pa} \end{aligned}$$

(4) π 、 e 等常数的有效数字: 当 π 、 e 等常数参与运算时, 其取值位数要求比测量值多取一位。例如, 圆面积 $S = \pi R^2$, 测量值 $R = 3.167\text{mm}$, π 的取值位 3.1416。若面积公式改为 $S = \pi D^2/4$, 测量值 $D = 6.334\text{mm}$, 式中的 $1/4$ 是公式推导过程中出现的纯数字, 并不是测量值, 不存在有效数字问题, 可认为它的位数是任意的, 对有效数字的运算不起作用。

(5) 三角函数及对数运算: 进行普通的对数运算时, 其结果尾数的位数与底的位数相同。进行三角函数运算时, 角度的精度取到 $1'$ 时, 应用 4 位函数表, 角度的精度取到 $10''$ 时, 应用 5 位函数表, 其余类推, 使用计算器时, 其取位也要参照上述约定。

需要说明的是上述有效数字的运算规则, 适宜于不要求计算测量结果的不确定度 (在 2.3 节中讲解) 的情况下进行的简单运算。通常情况下, 测量结果的有效数字的位数应由测量结果的不确定度来决定, 测量结果的不确定度保留 1 位 (最多 2 位) 有效数字, 测量结果的末位应与不确定度对齐, 从而确定测量结果的有效数字的位数。

2.1.2 测量误差

1. 绝对误差

每一个待测物理量在一定条件下都具有确定的值, 称为待测物理量的真值。测量的目的就是测量这个真值。但事实上, 测量时由于理论的近似性、实验仪器性能的局限性、测量方法的不完善、环境的不稳定、测量人员感官的功能局限等, 使测量结果不可能绝对

准确,也就是说,测量结果绝不可能是待测物理量的真值,那么,测量值与真值之间总会存在某些差异,该差异属于测量误差,通常称作绝对误差。即

$$\text{绝对误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

绝对误差存在于一切测量数据当中,没有误差的测量结果是不存在的。随着科学技术的进步,绝对误差可以被控制得越来越小,但永远不会为零。

绝对误差表示为

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

式中 Δx 为绝对误差, x 是测量值, x_0 是真值。

2. 真值

由于真值是一个理想的概念,一般不可能准确知道,所以上式的绝对误差将无法计算,因此有必要对真值的概念做以下的规定,以便计算绝对误差。

1) 理论真值

理想条件下的理论导出值可以作为真值。例如:理想电容和电感通过交流电时,其上的电压与电流相位相差 90° 。

2) 约定真值

公认的一些常数,如:普朗克常数等。

3) 相对真值

精确度更高的仪器测得值相对精确度低的仪器测得值被称为相对真值。

4) 近真值

对同一物理量等精度多次(n 次)重复测量结果的算术平均值可视为真值的最佳近似值,称为近真值,即

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

其中, x_i 表示第 i 次测量值。

可以证明在理想条件下, $n \rightarrow \infty$ 时测量值的平均值即为真值。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_0 \quad (2-3)$$

所以当用 $\bar{x}$ 代替 x_0 计算 Δx 时,常称 Δx 为偏差 δ ,而不是称为误差。

3. 相对误差

有了误差(偏差)的概念,我们就能评价测量结果的好坏,但是仅以绝对误差来评价测量结果是不全面的。例如,用米尺测量两个物体的长度,得出一个是 5.00cm ,一个是 25.00cm ,测量的绝对误差为 0.05cm ,二者的绝对误差相同,但前者误差占测量值的 $\frac{0.05}{5.00} = 1\%$,后者占 $\frac{0.05}{25.00} = 0.2\%$,显然测量误差的严重程度不同。为了全面评价测量的优劣,必须同时表示出测量结果的相对误差 E ,即误差占整个测量值的比值。

绝对误差与被测量的真值之比称为相对误差,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{被测量的真值}} \times 100\%$$

因此测量误差通常叫作绝对误差。绝对误差和相对误差均反映单次测量结果与真值之间的差异。而相对误差更能反映测量的精确程度。

相对误差表示为

$$E = (\Delta x / x_0) \times 100\% \quad (2-4)$$

相对误差通常用百分数来表示,一般情况下,相对误差取一位有效数字,只有相对误差超过 10% 时,才保留两位有效数字。

根据相对误差中分母的取值不同,相对误差分成如下形式:

1) 百分误差

分母是真值

$$E = (\Delta x / x_0) \times 100\% \quad (2-5)$$

2) 相对误差

分母是近真值

$$E = (\Delta x / \bar{x}) \times 100\% \quad (2-6)$$

如果分子用偏差 $\Delta \bar{x} = x - \bar{x}$ 代替,称为相对偏差。实际中有时也不加区分。

3) 示值相对误差

$$E_{\text{示}} = (\Delta x / x_{\text{示}}) \times 100\% \quad (2-7)$$

分母是仪器示值。这个指标常用来校准仪器。分母是仪器的刻度示值,显然在不同的示值上 $E_{\text{示}}$ 不同。

4) 满度相对误差

$$E_{\text{满}} = (\Delta x / x_{\text{满}}) \times 100\% \quad (2-8)$$

分母是仪器的最大示值即满刻度值。显然当 Δx 一定时 $E_{\text{满}}$ 一定。

5) 相对误差限(最大示值相对误差)

$$E_{\text{m}} = (\Delta x_{\text{m}} / x_{\text{示}}) \times 100\% \quad (2-9)$$

分子为最大误差,分母为示值。显然它表征了仪器的最大相对误差。一些电工仪表精度级别按照相对误差限规定:

$$(\Delta x / x_{\text{满}}) \times 100\% \leq \alpha\% \quad (2-10)$$

根据 α 的大小,可以把一些电工仪表分为七个准确度等级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0,由式(2-10)可得

$$E_{\text{m}} \leq \alpha\% \times x_{\text{满}} / x_{\text{示}} \quad (2-11)$$

用此式可以估计仪表的最大示值误差。

例 2-6 用一个量程为 5A、0.5 级的电流表,测量 $I_1 = 5.0\text{A}$, $I_2 = 2.5\text{A}$,求两种情况下的相对误差限。

解: $E_{\text{m}_1} = \alpha\% \cdot I_{\text{满}} / I_1 = 0.5\% \times 5 / 5.0 = 0.5\%$

$$E_{\text{m}_2} = \alpha\% \cdot I_{\text{满}} / I_2 = 0.5\% \times 5 / 2.5 = 1.0\%$$

可见虽然是同一个电表,不同的示值相对误差不同,愈接近满度,测量相对误差愈小。