



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验 (上册)

主 编 詹卫伸

副主编 王 硕



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

(上册)

主 编 詹卫仲

副主编 王 硕

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十三五”规划教材,分为上下册。上册包括大学物理实验规范、基础性物理实验和著名物理实验简介,下册为综合设计性物理实验。第一篇大学物理实验规范,包括有效数字及其运算规则、测量与误差、测量的不确定度、物理实验数据处理方法以及物理实验与物理实验报告,不确定度的处理符合国家规范。第二篇基础性物理实验,包含与力学、热学、光学、电磁学、量子物理等相关的经典物理实验。第三篇介绍了若干著名物理实验,激发学生的学习兴趣,拓宽学生的视野。第四篇综合设计性物理实验,涉及力学、热学、电磁学、光学、原子物理以及材料、传感、通信等与物理相关的综合设计性实验。本书内容翔实,层次清晰,结构合理,每个实验都有详细背景资料及在工程技术中的应用,并且对每个实验的理论、使用的仪器设备、操作、数据处理等都作了详细的介绍,具有很强的实用性。

本书可作为理工类本科生大学物理实验教材,也可作为从事物理实验教学的教师和工程技术人员的教学参考书以及物理类本科生普通物理实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验.上册 / 詹卫伸主编. —北京:科学出版社,2016.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-049369-9

I. ①大… II. ①詹… 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(2016)第 160000 号

责任编辑:昌盛 罗吉/责任校对:张凤琴

责任印制:白洋/封面设计:速底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

大厂书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:13

字数:308 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

为了适应国家中长期教育改革和发展规划纲要对新时期人才培养的需求,根据理工科大学物理实验课程教学基本要求,我们组织编写了这部普通高等教育“十三五”规划教材.其目的在于培养学生严谨的科学思维 and 创新能力,培养学生理论联系实际,特别是与科学技术发展相适应的综合能力.使学生对知识的应用和迁移能力得到提升,从而提高学生提出问题、分析问题和解决问题的能力.通过创新设计性实验培养学生创新意识和创新思维,并且为学生提供一部实用的大学物理实验讲义,学生可以通过阅读实验讲义独立完成实验项目.在内容安排上以把握住综合性、探索性为原则,为了反映实验教学内容的时代特色和新学科的实验内容,增加了近代科学研究与工程技术应用广泛的现代物理技术,强化了物理实验与工程应用学科的密切联系,拓宽了应用和创新的思维空间.

本书力图为读者提供既符合国家测量标准又非常实用的物理实验指导书.全书包括:大学物理实验规范(有效数字及其运算规则、测量与误差、测量的不确定度、物理实验的数据处理方法、物理实验与物理实验报告)、大学物理实验(24个实验,分为基础性物理实验和综合设计性物理实验,上册有8个实验,下册有16个实验)、著名物理实验简介(20项).

本书的写作特点如下:

(1) 不确定度.本书有关“不确定度”的处理问题,尽量符合国家质量技术监督局发布的“规范”,使学生对国家的“测试规范”有一个全面的了解.同时,考虑到学生物理实验的特点,力图达到“国家规范”与本科生物理实验相结合的目的.

(2) 实用性.我们根据多年的实践,认为给学生提供尽量多的资料是必要的.本书对每个实验的理论、使用的仪器设备、操作、数据处理等都作了详细的介绍,以方便学生预习及对课后的数据进行处理,真正达到教学目的,同时对每个实验还提供了相关参考文献.

(3) 实验数据处理提示.由于本书要求物理实验的数据处理特别是不确定度的处理要与国家规范接轨,对低年级的本科生来说是很困难的,如果不加以引导,将难以达到教学目的.因此,本书每个实验都有针对该实验的数据处理的详尽指导.

(4) 背景材料.本书在每个实验题目的开始就介绍实验的详细背景资料和该实验以及相关实验在工程技术中的应用知识,以开阔学生的视野.

(5) 著名物理实验简介.为了提高学生的学习兴趣,我们组织编写了著名物理实验简

介(20个题目),供学生阅读.

本书由詹卫伸担任主编,王硕担任副主编,程大海、孙宏恩、刘边卓、李睿、王小风参加编写.其中,大学物理实验规范由詹卫伸编写;上册的基础性物理实验由詹卫伸主笔,王硕、刘边卓、程大海、王小风参与编写;下册的综合设计性物理实验由詹卫伸、王硕、刘边卓、程大海、孙宏恩、李睿编写;著名物理实验简介由王硕、刘边卓、程大海、王小风、孙宏恩编写.本书由詹卫伸制定写作大纲,由詹卫伸和王硕统稿,物理实验中心全体人员集体讨论编写.

本书在编写过程中参考了兄弟院校大量的教材,在此一并表示感谢.

本书的编写和出版得到了大连理工大学盘锦校区教学事务部和基础教学部的大力支持,在此表示感谢.

编 者

2016年5月

目 录

前言

第一篇 大学物理实验规范	1
第1章 有效数字及其运算规则	5
第2章 测量与误差	10
第3章 测量的不确定度	14
第4章 物理实验的数据处理方法	29
第5章 物理实验与物理实验报告	39
练习题	55
参考文献	56
第二篇 基础性物理实验	57
实验1 杨氏模量测量实验	59
实验2 热效应实验	70
实验3 霍尔效应实验	82
实验4 磁阻和巨磁阻效应实验	102
实验5 光的干涉衍射实验	115
实验6 迈克耳孙干涉实验	131
实验7 声速测量实验	146
实验8 光量子实验	161
第三篇 著名物理实验简介	177
阅读材料1 扫描隧道显微镜	179
阅读材料2 理查森定律	180
阅读材料3 威尔逊云室	181
阅读材料4 引力波探测	182
阅读材料5 激光冷却实验	183
阅读材料6 α 粒子散射实验	184
阅读材料7 迈克耳孙-莫雷实验	185
阅读材料8 傅科摆	186
阅读材料9 斯特恩-盖拉赫实验	187
阅读材料10 正电子的发现	188

阅读材料 11	磁共振实验	189
阅读材料 12	拉曼光谱的发现	190
阅读材料 13	X 射线晶体衍射	191
阅读材料 14	塞曼效应	192
阅读材料 15	赫兹的电磁波实验	193
阅读材料 16	石墨烯的发现	194
阅读材料 17	电子衍射实验	195
阅读材料 18	运动电子质量测量实验	196
阅读材料 19	引力场中的光线偏折实验	197
阅读材料 20	宇称不守恒实验验证	198

第一篇

大学物理实验规范

测量是科学研究、工农业生产、国内外贸易乃至日常生活各个领域不可缺少的一项工作。测量的目的是确定被测量的值或获取测量结果。测量结果的质量(品质)往往会直接影响企事业单位乃至国家的经济利益。例如,如果对出口货物称重不准就会造成很大的损失,多了就会白白送给外商,少了则要赔款。测量结果的质量还是决定科学实验成败的重要因素之一。例如,对卫星的质量或对运载火箭燃料的质量若测量不准,就有可能导致卫星发射因推力不准而失败。测量结果的质量也会影响健康和安全。例如,在使用放射线检查和治疗疾病时,若对剂量测量不准,过少则达不到治病的目的,延误治疗;过多则会对人体造成伤害。测量结果和由测量结果得出的结论还可能成为执法和决策的重要依据。因此,当报告测量结果时,必须对其测量质量给出定量的说明,以确定测量结果的可信程度。测量不确定度就是对测量结果质量的定量表征,测量结果的可用性在很大程度上取决于其不确定度的大小,所以测量结果必须附有不确定度说明才是完整并有意义的。

物理实验离不开对物理量的测量,由于测量方法、测量仪器、测量人员、测量条件等因素的限制,对某一物理量的测量不可能是无限精确的,即测量中的误差是不可避免的。没有测量误差的基本知识,就不可能获得正确的测量值;不会计算测量结果的不确定度,就不能正确表达和评价测量结果;不会处理数据或处理数据方法不当,就得不到正确的实验结果。由此可见,测量误差、不确定度与数据处理的基本知识在整个实验中占有非常重要的地位。本篇从实验教学的角度出发,主要介绍误差和不确定度的基本概念、测量结果不确定度的计算、实验数据处理和实验结果表达等方面的基本知识。这些知识不仅在每个物理实验中要用到,而且对于今后从事科学实验也是必须要了解和掌握的。由于这部分内容涉及面较广,如果进行深入的讨论,需要具备丰富的实践经验和较多的数学知识,因此不能指望通过一两次学习就完全掌握。我们要求实验者首先对提到的问题有初步的了解,以后结合每一个具体实验再仔细阅读有关内容,通过实际运用逐步加以掌握。

误差分析、不确定度计算以及数据处理贯穿于实验的全过程,它表现在实验前的实验设计与论证,实验进行过程中的控制与监视,实验结束后的数据处理和结果分析。

本篇的内容尽量保持与国家计量技术规范《JJG 1027—91 测量误差及数据处理》和《JJF 1059—2012 测量不确定度评定与表示》一致,力图使实验者通过“普通物理实验”这门重要的基础课的学习,掌握测量技术的国家规范;力图为读者在学习其他实验课以及将来从事科学研究实验和工程技术测量工作中贯彻国家技术规范打下良好的基础。

考虑到国家技术规范是适合于全部计量测试行业的规范,而不同行业又有自身的特点,尤其考虑到学生物理实验,测量的重复次数和测量的条件都达不到国家规范的要求,我们在测量的数据处理中增加了一些内容;考虑到教学的需要,对国家规范的有些方面进行了一些简化处理。这些在本篇的各章节中都将加以说明,以引起读者注意。

通过本篇的学习和今后各个实验中的运用,要求达到:

(1)掌握有效数字的概念及其运算规则，了解有效数字与不确定度的关系.

(2)建立误差和不确定度的概念，正确估算不确定度，懂得如何正确完整地表示实验测量结果.

(3)了解系统误差对测量结果的影响，学习发现某些系统误差、减小系统误差及削弱其影响的方法.

(4)掌握列表法、作图法、逐差法和回归法等常用的数据处理方法.

第 1 章 有效数字及其运算规则

由于物理测量中总存在误差,因而直接测得量的数值只能是一个近似数并具有某种不确定性,由直接测得量通过计算求得的间接测得量也是一个近似数并具有某种不确定性,而测量不确定度决定了测量值的数字只能是有限位数,不能随意取舍.因此,在物理量测量中,必须按照下面介绍的“有效数字”的表示方法和运算规则来正确表达实验结果.

一、有效数字的一般概念

测量结果都是含有误差的,因此表示测量结果的数都是有一定准确度的近似数,对这些数值的记录和计算应当与一般的数字运算有区别.表示测量结果的数字是有严格要求的,在测量中,测量结果值的取位应根据误差来确定.在有误差的位数以前的各位数字叫可靠数字,都应当记;有误差的位数叫欠准数字(或可疑数字),也应当记;而误差以后的数字则是不可靠的,用任何数字表示都是无效的,这些数字就不应当记.因此,我们把测量结果中可靠的几位数字加上欠准的一位数字,统称为测量结果的有效数字.有效数字的个数称为有效数字的位数.例如,4.35 cm 是三位有效数字,而 4.350 cm 是四位有效数字.

需要指出的是,一个物理量的数值和数学上的一个数有着不同的意义.在数学上,4.35 和 4.350 是没有区别的;但在测量的意义上,4.35 cm 和 4.350 cm 是不同的,前者表示 cm 百分位上的数字 5 是估读的欠准数,它有可能不是 5;而后者表示 cm 的百分位这个数准确测量出来就是 5,cm 的百分位这个“0”才是欠准的.可见,对于同一个物理量的测量来说,有效数字的位数越多,表示测量精度越高.

关于有效数字应注意几个问题:

(1)有效数字的位数与十进制单位的变换无关,即与小数点的位置无关.有效数字的位数不随单位的变化而变化.例如,1.36 mm 是三位有效数字,写成 0.00136 m,仍是三位有效数字.

(2)有效数字的科学表示法.在书写很大或很小的数字,而数字的有效位数又不多时,通常写成 $\times 10^n$ (n 可正可负)的标准形式,称为有效数字的科学表示法.

(3)计算公式中的常数,如 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 及 $1/3$ 等,其有效位数可根据需要任意选取.计算中,一般应比参加运算的各数中有效数字位数最多的还要多取一位.

二、有效数字的修约规则

为了简化运算过程,在进行运算以前,需要对各直接测量量的有效数字进行适当的取位和数值的进舍修约.数字的修约、变换、运算等基本上不应增大测量值最后结果的不确定度,这是一条基本原则.测量值的数字的舍入,首先要确定需要保留的有效数字位数,

保留数字的位数确定以后,后面多余的数字就应予以舍入修约,其规则如下:

(1)拟舍弃数字的最左一位数字小于5时,则舍去,即保留的各位数字不变;

(2)拟舍弃数字的最左一位数字大于5,或者是5而其后跟有非0的数字时,则进1,即保留的末位数字加1;

(3)拟舍弃数字的最左一位数字为5,而右边无数字或皆为0时,若所保留的末位数字为奇数则进一,为偶数或0则舍弃,即“单进双不进”;

(4)负数的修约,取绝对值,按上述规则修约,然后再加上负号;

(5)不允许连续修约.在确定拟舍弃位后,应当一次修约获得结果,不得逐次修约.

例如:可疑位为 mm,则舍弃位应为 mm 的十分位,对 15.4546 mm 进行修约.

正确做法:15.4546 mm 一次修约为 15 mm.

错误做法:15.4546 mm→15.455 mm→15.46 mm→15.5 mm→16 mm.

可见,错误做法会导致错误结果.

上述规则也称为数字修约的偶数规则,即“四舍六入五凑偶”规则.

根据上述规则,要将下列各数保留四位有效数字,修约后的数据为:

①3.14159→3.142(拟舍去的第五位为5,其后有不为0的数字,故进1);

②2.71729→2.717(拟舍去的第五位为2,小于5,后面全舍);

③4.51050→4.510(拟舍去的第五位为5,其后全为零,且第4位为0,舍弃);

④3.21550→3.216(拟舍去的第五位为5,其后全为零,但第四位为5,是奇数,应进1,即第四位加1);

⑤6.378501→6.379(拟舍去的第五位为5,但其后有不为0的数字,进1,即第四位加1);

⑥7.691499→7.691(拟舍去的第五位为4,小于5,应舍弃).

三、有效数字的一般运算规则

间接测量量是由直接测量量经过一定函数关系计算出来的,而各直接测量量的大小和有效数字位数一般都不相同,这就要求对有效数字的运算有一个统一的规则,使得不同的实验者处理同一组数据,得到相同的结果.有效数字运算取舍的原则是运算结果保留一位可疑数字.

1. 加减法运算

几个数相加减时,最后结果的可疑数字与各数之中最先出现的可疑数字对齐.

【例 1-1】求 $Y_1 = A + B$, $Y_2 = A - C$, 其中 $A = 103.\underline{3}$, $B = 13.56\underline{1}$, $C = 1.65\underline{2}$.

$$\begin{array}{r} \text{解} \quad \quad \quad 103.\underline{3} \quad \quad \quad 103.\underline{3} \\ \quad \quad \quad + \quad 13.56\underline{1} \quad \quad \quad - \quad 1.65\underline{2} \\ \hline \quad \quad \quad 116.86\underline{1} \quad \quad \quad 101.\underline{648} \end{array}$$

由此: $Y_1 = 116.\underline{9}$, 4 位有效数字; $Y_2 = 101.\underline{6}$, 4 位有效数字.

2. 乘除运算

几个数相乘除,计算结果的有效数字位数一般与各数值中有效数字最少的位数相同

(或最多再多保留一位); 有进位或退位时有可能多一位或少一位.

【例 1-2】 计算 $X_1 = 1.111\underline{1} \times 1.1\underline{1}$, $X_2 = 4821\underline{6} \div 123$, $X_3 = 8.654 \times 4.6$, $X_4 = 3.98 \div 8.65\underline{1}$.

解

$$\begin{array}{r}
 1.111\underline{1} \\
 \times \quad 1.1\underline{1} \\
 \hline
 11111 \\
 11111 \\
 11111 \\
 \hline
 1.233321 \\
 \\
 X_1 = 1.23 \\
 \\
 \begin{array}{r}
 8.654 \\
 \times \quad 4.6 \\
 \hline
 51924 \\
 34616 \\
 \hline
 398084 \\
 \\
 X_3 = 39.8 \text{ (多一位)}
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r}
 392 \\
 123 \overline{) 48216} \\
 \underline{369} \\
 1131 \\
 \underline{1107} \\
 246 \\
 \underline{246} \\
 0 \\
 \\
 X_2 = 392 \\
 \\
 \begin{array}{r}
 0.460 \\
 8.654 \overline{) 3.9800} \\
 \underline{34616} \\
 51940 \\
 \underline{51924} \\
 16 \\
 \\
 X_4 = 0.46 \text{ (少一位)}
 \end{array}
 \end{array}$$

3. 函数运算的有效数字取位

在进行函数运算时, 不能搬用四则运算的有效数字运算规则, 而是应对函数取全微分, 由直接测量量(自变量)的误差或不确定度计算函数的全微分, 在取函数的全微分的有效数字位数为一位数的前提下, 修约函数值的有效数字位数. 若直接测量量没有标明误差或不确定度, 则在直接测量值的最后一位数取 1, 作为误差或不确定度, 代入公式进行运算.

1) 对数

【例 1-3】 已知 $x = 25.4$ 求 $y = \ln x$.

解

$$\Delta(\ln x) = \frac{\Delta x}{x}$$

取直接测量量 x 的最后一位为 1, 作为 Δx , 即 $\Delta x = 0.1$, 则

$$\Delta(\ln x) = \frac{0.1}{25.4} = 0.003937007$$

根据修约规则: $\Delta(\ln x) = 0.004$, 故 $\ln x$ 的尾数应保留到小数点后三位, 即

$$y = \ln x = \ln 25.4 = 3.234749174$$

根据修约规则为

$$\ln x = 3.235$$

若给出 Δx ，已知 $x = 25.4 \pm 0.5$ ，求 $y = \ln x$ 。

由 $\Delta x = 0.5$ ，可得

$$\Delta(\ln x) = \frac{0.5}{25.4} = 0.019685039$$

根据修约规则： $\Delta(\ln x) = 0.02$ ，故 $\ln x$ 的尾数应保留到小数点后两位，即

$$y = \ln x = \ln 25.4 = 3.234749174$$

根据修约规则为

$$\ln x = 3.23$$

2) 指数

【例 1-4】 已知 $x = 9.34$ 求 $y = e^x$ 。

解

$$\Delta y = e^x \cdot \Delta x$$

取 $\Delta x = 0.01$ ，则

$$\Delta y = e^{9.34} \times 0.01 = 113.8440824$$

根据修约规则为

$$\Delta y = 1 \times 10^2$$

而

$$y = e^x = 11384.40824$$

故 $y = 114 \times 10^2 = 1.14 \times 10^4$ ，共有三位有效数字。

3) 开方

【例 1-5】 已知 $n = 14$ ， $x = 9.34$ ，求 $y = x^{\frac{1}{n}}$ 。

解

$$\Delta y = \frac{1}{n} \cdot x^{\frac{1-n}{n}} \cdot \Delta x$$

取 $\Delta x = 0.01$ ，则

$$\Delta y = \frac{1}{14} \times 9.34^{-\frac{13}{14}} \times 0.01 = 0.00009$$

而

$$y = \sqrt[14]{9.34} = 1.173033706$$

修约为： $y = 1.17303$ ，共六位有效数字。

4) 三角函数

【例 1-6】 已知 $x = 9^\circ 24'$ ，求 $y = \cos x$ 。

解

$$\Delta y = -\sin x \cdot \Delta x$$

自变量 x 的最小单位为分，取

$$\Delta x = 1' = \frac{\pi}{180} \times \frac{1}{60} = 0.0003 \text{ (rad)}$$

$$\Delta y = -\sin x \cdot \Delta x = -\sin 9^{\circ} 24' \times 0.0003 = -0.000048997 = -0.00005$$

$$y = \cos x = \cos 9^{\circ} 24' = 0.986572161$$

修约为

$$y = 0.98657$$

四、测量结果的有效数字位数

1. 测量结果的表示

测量结果通常表示为

被测量量=(测量结果的值 $\pm$ 不确定度)单位 (置信度)

或

被测量量=测量结果的值(不确定度)单位 (置信度)

关于测量和不确定度,后面要进行详细介绍,这里只说明测量结果表示中数值的有效位。

2. 不确定度的有效数字位数

不确定度的值通常只取一位(最多取两位)有效数字。本书规定,不确定度只取一位有效数字。如果表示成相对不确定度的形式,取两位有效数字。

不确定度在计算过程中要多保留一位,即运算过程中的数值取两位有效数字,直到算出最终的不确定度,才修约成一位有效数字(只进不舍)。

3. 测量结果的有效数字位数

测量结果的修约与其不确定度的修约相等,即不确定度给到哪一位,测量结果也应给到哪一位。通俗的说法是,测量结果的有效数字的位数要根据最终不确定度来进行修约。

在数据处理过程中,计算过程中可能弄不清测量不确定度的大小,事先无法确定测量结果给出到哪一位,就先按有效数字的运算处理;直到计算出测量的不确定度,再对测量结果进行有效数字的修约。

第2章 测量与误差

一、测量

1. 测量的定义

物理实验离不开对物理量的测量. 测量就是将待测物理量与选作计量标准的同类物理量进行比较, 并得出其倍数的过程. 倍数称为待测物理量的数值, 选作的计量标准称为单位. 因此, 一个物理量的测量值应由数值和单位两部分组成, 缺一不可.

2. 单位

按照中华人民共和国法定计量单位的规定, 物理量单位均是以国际单位制(SI)为基础的, 其中长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流强度(安培)、热力学温标(开尔文)、物质的量(摩尔)和发光强度(坎德拉)是基本单位, 其他物理量的单位可以由这些基本单位导出, 故称为导出单位.

3. 测量的分类

测量可分为直接测量和间接测量.

直接测量: 可以用测量仪器仪表或量具直接读出测量值的测量, 称为直接测量. 例如, 用米尺测量长度、用温度计测量温度、用电压表测电压等都是直接测量, 所得的物理量(如长度、温度、电压等)称为直接测量量.

间接测量: 有些物理量无法进行直接测量, 而需要依据待测物理量与若干个直接测量量的函数关系求出, 这样的测量就称为间接测量. 大多数的物理量都是间接测量量. 例如, 用单摆测重力加速度 g 时, T (周期)、 L (摆长)是直接测量量, 而 g 就是间接测量量.

从测量条件上, 测量可分为等精度测量和不等精度测量.

等精度测量: 在对某一物理量进行多次重复测量过程中, 每次测量条件都相同的一系列测量称为等精度测量. 例如, 同一个人在同一仪器上采用同样的测量方法对同一待测物理量进行多次重复测量, 每次测量的可靠程度都相同, 这些测量就是等精度测量.

不等精度测量: 在对某一物理量进行多次重复测量时, 测量条件完全不同或部分不同, 各测量结果的可靠程度自然也不相同的测量称为不等精度测量. 例如, 在对某一物理量进行多次测量时, 选用的仪器不同, 或测量方法不同, 或测量人员不同等都属于不等精度测量.

一般来讲, 在实验中, 保持测量条件完全相同的多次测量是极其困难的. 但当某一条件的变化对测量结果影响不大时, 仍可视这种测量为等精度测量. 等精度测量的数据处理比较容易, 所以绝大多数实验都采用等精度测量.

4. 测量的读数和记录

在进行测量时, 正确的读数和记录是关键. 对于不同仪器有多种读数方法, 将在以后的实验中具体进行介绍, 在此仅谈一般规则.