

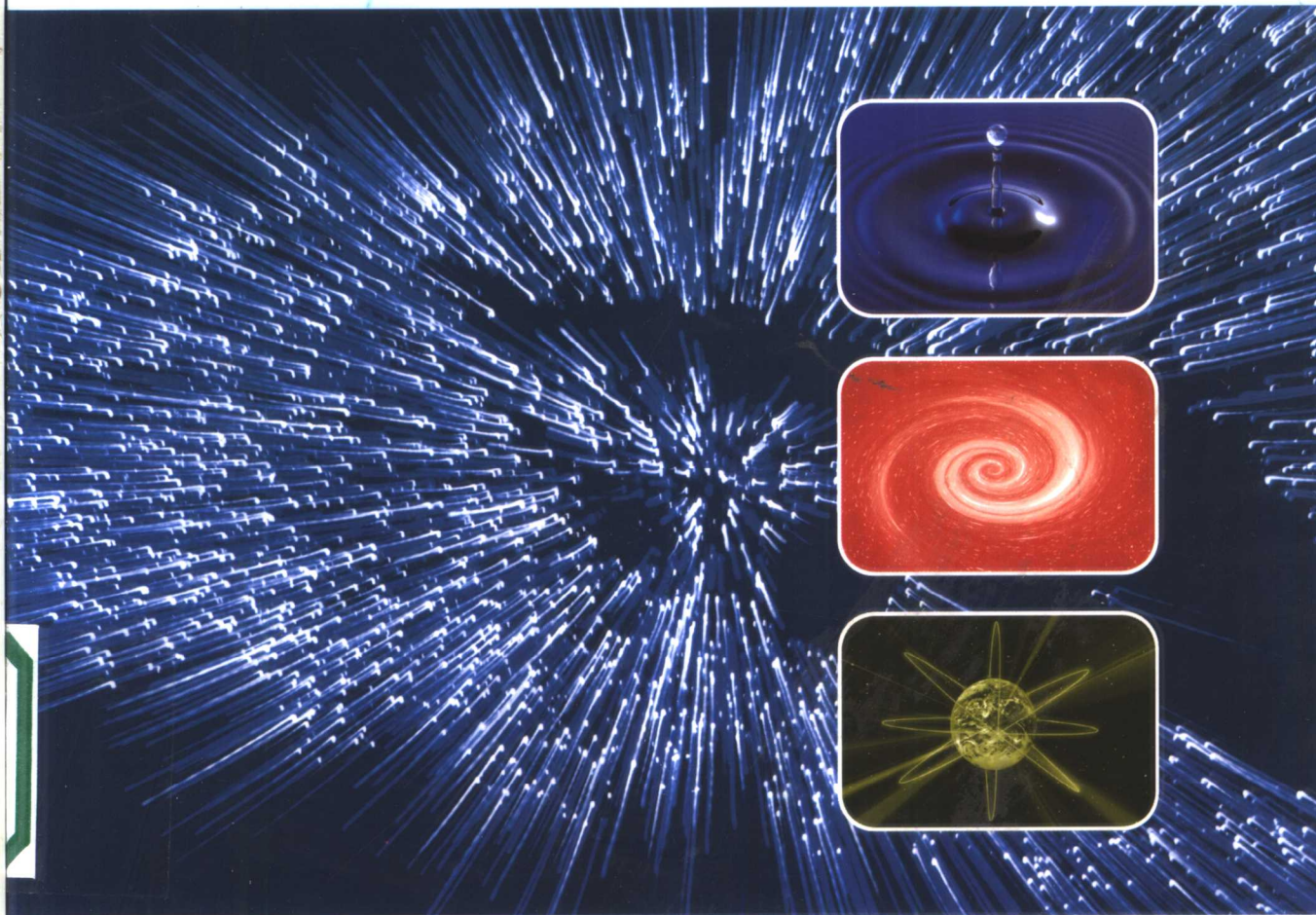
///

高等学校理工科规划教材

物理实验教程

WULI SHIYAN JIAOCHENG

詹卫伸 丁建华/主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校理工科规划教材

物理实验教程

主 编	詹卫伸	丁建华	
副主编	单 明	王艳辉	戴忠玲
	秦 颖		
编 著	李晓光	陶凤璠	刘 渊
	王茂仁	白冬雪	
审 校	孙井方		

大连理工大学出版社

© 詹卫伸,丁建华 2004

图书在版编目(CIP)数据

物理实验教程 / 詹卫伸,丁建华主编. — 大连: 大连理工大学出版社,
2004.8

ISBN 7-5611-2642-5

I.物… II.①詹…②丁… 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(2004)第 079726 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-84708842 传真:0411-84701466 邮购:0411-84707961

E-mail: dulp@dulp.cn URL: http://www.dulp.cn

大连海事大学印刷厂印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm

印张:22

字数:489千字

印数:1~6000

2004年8月第1版

2004年8月第1次印刷

责任编辑:赵 静

责任校对:王 义

封面设计:宋 蕾

定 价:26.00元

前 言

本书是根据高等学校工科本科生物物理实验课程教学的基本要求,结合目前高等学校的实际教学情况与仪器设备现状,特别是结合世界银行贷款更新改造了大量的物理实验教学仪器设备的现实以及近年来物理实验教学改革成果编写而成。

全书包括:绪论(有效数字、测量与误差、测量的不确定度、数据处理方法)、基础型实验(12个实验)、设计与研究型实验(6个实验)、近代与综合型实验(14个实验)、综合研究型实验(4个实验)。

本书力图给读者提供符合国家测量标准又非常实用的学生物理实验指导书。本书的写作特点:

●**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”与本科生物物理实验具体实验相结合。

●**实验的数据处理提示。**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细指导。

●**背景材料。**根据教育部的要求:在教学中要适当地介绍一些物理实验的史料和物理实验在工程技术中的应用知识。本书在每个实验题目的开始就介绍实验的详细背景史料和该实验以及相关实验在工程技术中的应用知识,开阔学生的视野。

●**设计性、研究型实验资料丰富。**本书对“设计性和研究型实验”,不是提供“要求和仪器”,而是提供更多的更详实的资料,包括理论和仪器,以及实验仪器的使用和操作提示,使学生能够合理地设计实验。

●**实用。**教育部要求:物理实验讲课不宜过多。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,方便了学生预习及课后的数据处理,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。

●**英文题目和关键术语。**目前,双语教学在物理实验中还不是很适合,但有一些初步的训练还是能够做到的。因此,本书对每个实验的名称、关键词(术语)给出了中英文对照和标注。

本书由詹卫伸、丁建华担任主编,单明、王艳辉、戴忠玲、秦颖担任副主编。其中:绪论、

实验 1、3、4、6、7、9、12、13、15~18、20、29、30、32、33~36 由詹卫仲编写,实验 21、23、28 由单明编写,实验 31 由孙井方和戴忠玲编写,实验 10、22、26 由王艳辉和王茂仁编写,实验 2、14、19 由戴忠玲编写,实验 27 由秦颖编写,实验 5、11、25 由李晓光和白冬雪编写,实验 8 由陶凤翥编写,实验 24 由刘渊编写。詹卫仲修改实验 5、8、22、31,孙井方和单明修改绪论。丁建华、孙井方、单明、秦颖、戴忠玲、陶凤翥、李晓光、杨华参加了全书的审校工作。本书初稿经基础物理实验中心全体人员集体讨论多次,最后由詹卫仲负责统稿。

本书在编写过程中,参考了多年来在大连理工大学为理工科本科生开设的物理实验课程的讲义和教材;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教务处和物理系的大力支持,还得到了“大连理工大学教改基金”重点支持和“大连理工大学教材建设基金”的资助。

本书是我们近年来教学改革的结晶。由于编者水平有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 6 月

目 录

Catalogue

第 1 篇 绪论 Introduction

第 1 章 有效数字及其运算规则 Significant Figure and its Algorithm	3
第 2 章 测量与误差 Measurement and Error	8
第 3 章 测量的不确定度 Uncertainty of a Measurement	12
第 4 章 物理实验的数据处理方法 Data Treatment Method of Physical Experiments	26

第 2 篇 基础型实验 Fundamental Experiments

实验 1 振动法测量刚体转动惯量实验 Measurement of the Moment Inertia of Rigid Body by the Vibration Method	37
实验 2 拉伸法测量杨氏弹性模量 Measurement of Young's Modulus by Elongation due to Tension	43
实验 3 落球法测量液体材料粘滞系数实验 Measurement of the Coefficient of Viscosity of Liquid by Falling Sphere Method	49
实验 4 水的表面张力系数测定 Measurement of Surface Tension Coefficient of Water	56
实验 5 空气比热容比的测定 Measurement of Ratio of Specific Heat of Air ...	61
实验 6 直流平衡电桥实验 Experiment of Balanced D. C. Bridge	66
实验 7 示波器的使用 Application of Oscillograph	79
实验 8 霍尔效应实验 Experiment of Hall Effect	92
实验 9 螺线管磁场分布测量 Measurement of Magnetic Field of Solenoid	96
实验 10 分光计的调节与使用 Adjustment and Application of Spectrometer	105
实验 11 光的等厚干涉实验 Experiment of Light Equal Thickness Interference	113
实验 12 液体旋光率的测定 Measurement of Rotatory Power of Liquid	119

第 3 篇 设计与研究型实验 Designing and Research Experiments

实验 13 动力学共振法测量固体材料的弹性模量实验 Measurement of Solid	
--	--

	Material Elastic Modulus by Means of Dynamic Resonance	127
实验 14	热敏电阻温度计的设计 Design of Thermistor Thermometer	137
实验 15	热电偶测温技术 Technology of Temperature Measurement Using Thermocouple	141
实验 16	非平衡直流电桥的设计与应用 Designing and Application of the Unbalanced Direct Current Bridge	146
实验 17	光的衍射实验研究 Experiment Study of Light Diffraction	151
实验 18	光栅衍射实验研究 Experiment Study of Grating Diffraction	157

第 4 篇 近代与综合型实验 Modern and Integrative Experiments

实验 19	迈克尔逊干涉仪的调节和使用 Adjusting and Using of Michelson Interferometer	164
实验 20	空气中的声速测定 Measurement of Sound Velocity in Air	171
实验 21	温度传感器综合实验 Integrated Experiments of Temperature Sensors	181
实验 22	介电频率谱的测量 Measurement of Dielectric Frequency Spectrum	186
实验 23	线阵 CCD 驱动电路研究 Study of Drive Circuit of CCD Linearity Array	193
实验 24	全息照相 Holograph	200
实验 25	弗兰克-赫兹实验 The Frank-Hertz Experiment	206
实验 26	电阻应变式传感器 Resistance Strain Sensor	210
实验 27	密立根油滴实验测定电子电荷 Measurement of Electron Charge by the Experiment of Millikan Oil-drop	217
实验 28	居里温度测量 Measurement of Testing Curie Temperature	222
实验 29	光电效应实验 Experiment of Photoelectric Effect	226
实验 30	光速测量实验 Measurement of Light Speed	232
实验 31	光电器件特性测试 Measurement of Characteristics of Photoelectric Device	240
实验 32	磁电阻效应实验 Experiment of Magnetoresistance Effect	249

第 5 篇 综合研究型实验 Integrative Research Experiments

实验 33	摆振动实验研究 Experimental Study of Pendulum Vibration	254
实验 34	RLC 电路研究 Research on RLC Circuit	266
实验 35	交流电桥实验 Experiment of AC Bridge	280
实验 36	光的偏振综合研究系列实验 Series Study Experiments of Polarization of Light	286
附录	实验数据记录 Appendix: Data Tables of Experiments	297

第 1 篇 绪论

Introduction

测量是科学技术、工农业生产、国内外贸易以及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)往往会直接影响企业乃至国家的经济利益。例如,对出口货物称重不准就会造成很大的损失,多了白白送给外商,少了则要赔款。测量结果的质量还是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足而失败。测量结果的质量也会影响到人身的健康和安全。例如,在使用放射线治疗疾病时,若对剂量测量不准,过少达不到治病的目的,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,必须对其测量结果的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,由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,对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;没有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了解和掌握的。由于这部分内容涉及面较广,深入的讨论需要有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。

本篇的内容我们力图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 1059-1999 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;力图为实验者今后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,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法律,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;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。这些我们在本篇的各章节中都将加以说明,以期引起读者注意。

通过本篇的学习和本篇内容在各个实验中的运用,要求达到:

- (1)掌握有效数字的概念及运算规则,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和减小系统误差及其影响的方法。
- (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

Significant Figure and its Algorithm

由于物理测量中存在误差,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,在物理测量中,必须按照下面介绍的“有效数字(significant figure)”的表示方法和运算规则来正确表达和计算结果。

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。在有误差的那位数以前的各位数字叫可靠数字,都应当记;有误差的那位数叫欠准数字(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 4.35cm 是三位有效数字,而 4.350cm 是四位有效数字。

这里需要指出的是,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,但从测量的意义上,4.35cm 和 4.350cm 是不同的,前者表示 cm 的百分位上的数字 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 的千分位这个“0”才是欠准的。可见,对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以下几个问题:

(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 1.36mm 是三位有效数字,写成 0.00136m,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 而其后跟有并非为 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,而右面无数字或皆为 0 时,若所保留的末位数字为奇数,则进 1,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 15.4546mm 进行修约。

正确做法:15.4546mm 一次修约为 15mm。

错误做法:15.4546mm $\rightarrow$ 15.455mm $\rightarrow$ 15.46mm $\rightarrow$ 15.5mm $\rightarrow$ 16mm

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

① 3.14159 $\rightarrow$ 3.142

(拟舍去的第五位为 5,其后有不为 0 的数字,故进 1)

② 2.71729 $\rightarrow$ 2.717

(拟舍去的第五位为 2,小于 5,后面全舍)

③ 4.51050 $\rightarrow$ 4.510

(拟舍去的第五位为 5,其后全为零,且第 4 位为 0,舍弃)

④ 3.21550 $\rightarrow$ 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)

⑤ 6.378501 $\rightarrow$ 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)

⑥ 7.691499 $\rightarrow$ 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,使得不同的人,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】 求 $Y_1 = A + B, Y_2 = A - C$, 其中 $A = 103.\underline{3}, B = 13.56\underline{1}, C = 1.65\underline{2}$ 。

解

$$\begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.56\underline{1} \\ \hline 116.86\underline{1} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ - 1.65\underline{2} \\ \hline 101.64\underline{8} \end{array}$$

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2】 计算 $X_1 = 1.111\underline{1} \times 1.1\underline{1}, X_2 = 4821\underline{6} \div 123$ 。

$$X_3 = 8.65\underline{4} \times 4.\underline{6}, X_4 = 3.98 \div 8.65\underline{1}$$

解

$$\begin{array}{r} 1.11\underline{11} \\ \times 1.1\underline{1} \\ \hline 1\underline{1111} \\ 11\underline{111} \\ 1\underline{111} \\ \hline 1.23\underline{3321} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 392 \\ 123 \overline{) 4821\underline{6}} \\ \underline{369} \\ 1131 \\ \underline{1107} \\ 246 \\ \underline{246} \\ 0 \end{array}$$

$$X_1 = 1.2\underline{3}$$

$$X_2 = 392$$

$$\begin{array}{r} 8.65\underline{4} \\ \times 4.\underline{6} \\ \hline 51\underline{924} \\ 346\underline{16} \\ \hline 39.8\underline{084} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 0.46 \\ 8.65\underline{1} \overline{) 3.980\underline{0}} \\ \underline{34604} \\ 519\underline{60} \\ 519\underline{06} \\ 54 \end{array}$$

$$X_3 = 39.8(\text{多一位})$$

$$X_4 = 0.46(\text{少一位})$$

3. 函数运算的有效数字取值

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, 来计算函数的全微分, 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, 带入公式运算。

(1) 对数

【例 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 , 如已知 $x = 25.4 \pm 0.5$, 求 $y = \ln x$ 。

则 $\Delta x = 0.5$

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

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 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 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 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 $\Delta x = 1' = \frac{\pi}{180} \times \frac{1}{60} = 0.0003$ 弧度

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

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

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 ± 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。本课程规定,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,才可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,即不确定度给到了哪一位,测量结果也应给出到哪一位。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,那就先按有效数字的运算处理;直到计算出测量的不确定度,再对运算结果进行有效数字的修约。

第 2 章 测量与误差

Measurement and Error

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(measurement)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)、发光强度(坎得拉)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(direct measurement)和间接测量(indirect measurement)。

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、用电压表测量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。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就不同的一系列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介绍,在此仅谈一般规则。

(1) 如实纪录仪器上显示的数值,作为原始数据。对指针式仪表和有刻度盘或标尺的仪

器,通常在直接测量时,要求估读一位(该位是有效数字的可疑位)。估读数一般取最小分度的 $1/10 \sim 1/2$ 。

(2) 若仪表的示值不是连续变化而是以最小步长跳跃变化的,如数字式显示仪表,则谈不上估读,只要纪录全部数据即可。

(3) 需要指出的是有一些仪表,虽然也有指针和刻度盘,但指针跳动是以最小分格为单位的,例如最常用的钟表,有以秒为最小分度的时钟,也有以 $1/10$ 或 $1/100$ 秒为最小分度的秒表。因此,对此类仪表不需要估读。

(4) 对于各类带有游标(或角游标)的仪器装置,是依靠判断两个刻度中哪条线对齐来进行读数的,这时一般记下对齐线的数值,不必进行更细的估读。

二、测量误差

在一定条件下,任何一个物理量的大小都是客观存在的,都有一个实实在在、不以人的意志为转移的客观量值,称为真值(true value)。在测量过程中,我们总希望准确地测得待测量的真值。但是,任何测量总是依据一定的理论和方法,使用一定的仪器,在一定的环境中,由一定的人员进行的。由于实验理论的近似性,实验仪器的灵敏度和分辨能力的局限性,实验环境的不稳定性和人的实验技能以及判断能力的影响等,使测量值与待测量的真值之间总存在着差异,我们把这种差异称为测量误差(error of measurement)。

若某物理量的测量值为 x ,真值为 A ,则测量误差定义为

$$\epsilon = x - A \quad (1)$$

上式所定义的测量误差反映了测量值偏离真值的大小和方向,因此又称 ϵ 为绝对误差(absolute error)。一般来说,真值仅是一个理想的概念,只有通过完善的测量才能获得。但是,严格的完善测量难以做到,故真值就不能确定。实际测量中,一般只能根据测量结果确定测量的最佳值。通常取多次重复测量的算术平均值作为最佳值。

仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要与测定值进行比较,为此,引入相对误差(relative error)的概念:

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量最佳值}} \times 100\% \quad (2)$$

误差存在于一切测量过程的始终。在实验设计、仪器本身的精度、环境条件以及实验数据处理中都可能存在误差,因此分析测量中可能产生的各种误差,尽可能消除其影响,并对最后结果中未能消除的误差做出估计,就是物理实验和许多科学实验中不可缺少的工作。为此,必须进一步研究误差的性质和来源。

误差按其性质和产生的原因可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

1. 系统误差

在一定条件下,对同一物理量进行多次重复测量(等精度测量)时,误差的大小和符号均保持不变;而当条件改变时,误差按某种确定的规律变化(如递增、递减、周期性变化等),这类误差称为系统误差(systematic error),其特点是:确定性、有规律性、可修正性。

(1) 系统误差的来源

① 仪器的结构和标准不完善或使用不当引起的误差。如天平不等臂、分光计读数装置的偏心差、电表的示值与实际值不符等都属于仪器的缺陷,在使用时,可采用适当方法加以

减小或消除。仪器设备安装调整不妥,不满足规定的使用状态,如不水平、不垂直、偏心、零点不准等使用不当的情况应尽量避免。

② 理论或方法误差。它是由测量所依据的理论公式的近似或实验条件达不到理论公式所规定的要求而引起的。如单摆测重力加速度时,所用公式的近似性;伏安法测电阻时,不考虑电表内阻的影响等。

③ 环境误差。它是由外部环境,如温度、湿度、光照等与仪器要求的环境条件不一致而引起的误差。

④ 实验人员的生理或心理特点所造成的误差。如停表计时时,总是超前或滞后;对仪表读数时总是偏一方斜视等。

(2) 系统误差按对其掌握程度可分为已定系统误差和未定系统误差以及变值系统误差

① 已定系统误差。在一定的条件下,采用一定的方法,对误差取值的变化规律及其大小和符号都能确切掌握的系统误差。一经发现,在测量结果中可以修正。

② 未定系统误差。指不能确切掌握误差取值的变化规律及其大小和符号,而仅知最大误差范围(或极值误差)的系统误差。

③ 变值系统误差。这种误差在测量过程中呈现规律性变化。这种变化,有的可能随时间而变,有的可能随位置而变。又可分为线性系统误差:误差按线性规律变化,误差公式是线性函数;周期系统误差:误差按周期规律变化,误差公式是周期函数;复杂规律变化:误差按非线性、非周期的复杂规律变化,误差公式是非线性函数。

系统误差产生的原因往往可知或能掌握,一经查明就应设法消除其影响。对未能消除的系统误差,如它的符号和大小是确定的,则可对测量值加以修正;若它的符号和大小都是不确定的,则可设法减小其影响并估计出误差范围。

(3) 发现系统误差的方法

① 数据分析法。当随机误差比较小时,待测量的绝对误差不是随机变化而呈规律性变化,如线性增大或减小、周期性变化等,则测量中一定存在系统误差。

② 理论分析法。分析实验依据的理论公式所要求的条件在实验测量过程中是否得到满足。分析实验仪器要求的条件是否得到满足。实验不满足仪器的使用条件时也会产生系统误差。

③ 对比法。这种方法适合于固定的系统误差。

a. 实验方法对比。用不同方法测量同一物理量,在随机误差允许的范围内观察结果是否一致。

b. 仪器对比法。例如用两个电表接入同一电路,对比两个表的读数,如果其中一个为标准表,就可得出另一个表的修正值。

c. 改变测量条件进行对比。例如电流正向与电流反向读数;在增加砝码过程与减少砝码过程中读数,观察结果是否一致。

(4) 系统误差的消除与修正

任何实验仪器、理论模型、实验条件,都不可能理想到不产生系统误差的程度。对于系统误差,一是进行修正,二是消除其影响。

① 消除产生系统误差的根源

如果能够找到产生系统误差的根源,无论是理论模型、实验仪器还是实验条件,我们都