

李明 陈焯 王建中 编著

大学物理实验教程

浙江大学出版社

大学物理实验教程

李明 陈 焯 王建中 编著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程 / 李明, 陈焯, 王建中编著. — 杭州: 浙江大学出版社, 2004. 1
ISBN 7-308-03575-1

I. 大... II. ①李...②陈...③王... 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(2003)第 119629 号

内 容 提 要

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》, 结合作者多年来物理实验课程建设的实践经验编写而成的。全书包括绪论(有效数字与误差理论)、物理量测量与力学实验、电磁学实验、光学实验、综合性与近代物理实验、设计性与课题物理实验及计算机仿真物理实验等七章内容。本书实验原理叙述清楚, 计算公式推导完整, 实验步骤简明扼要。注重实验内容的系统性、对学生实验技能的严格训练和创新能力的培养。

本书可作为高等学校各专业的物理实验教学用书, 也可供电视大学、高职院校、成人大学等选用。

出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 徐素君
排 版 者 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 浙江大学印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 12
字 数 245 千
版 印 次 2004 年 1 月第 1 版 2004 年 8 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 7-308-03575-1/O·304
定 价 22.00 元

前 言

本书是根据《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》，结合作者多年来物理实验课程建设的实践经验编写而成的。全书内容包括绪论(有效数字与误差理论)、物理量测量与力学实验、电磁学实验、光学实验、综合性与近代物理实验、设计性与课题物理实验、计算机仿真物理实验等七章三十五个实验。多年来,我们遵循教学改革精神,努力探索实验理论与实践的有机结合,注重对学生实验技能和创新能力的培养。在教材编写时,对有效数字及误差理论的处理坚持以形象直观的描述,将深奥难懂的误差理论深入浅出地进行阐述,便于学生理解和掌握。在基础性实验编写时,注重实验目的突出,实验要求明确,实验原理叙述清楚,即基础性实验写得比较详细,设计性实验着重引导学生自己拟定实验方案和步骤,采用循序渐进的方式,逐步培养学生独立工作的能力。

本书编写了较多的综合性、设计性实验,并把设计性实验与课题物理实验、计算机仿真实验各专列一章,旨在扩大学生的知识面,提高学生的创新能力和综合素质。

本书由李明(第一章、第二章及部分第六章)、陈焯(第五章、第七章及部分第六章)、王建中(第三章、第四章)等编写。全书由李明组织编写并统稿。

在本书的编写过程中,浙江大学诸葛向彬教授提出了许多建设性建议,并由诸葛向彬教授负责审稿;袁哲峰做了大量的文字打印和图像处理工作;在编写过程中,参考了一些兄弟院校的教材,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,实践经验不足,书中的缺点和错误在所难免,诚恳希望使用本书的读者批评指正。

编 者
2004.1

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、大学物理实验课程概述	(1)
二、有效数字与误差理论	(4)
第二章 物理量测量与力学实验	(15)
实验一 长度和密度的测量	(15)
实验二 金属丝杨氏弹性模量的测定	(24)
实验三 刚体转动惯量的测定	(29)
3-1 三线悬摆测定刚体的转动惯量	(29)
3-2 扭摆法测定刚体的转动惯量	(35)
实验四 液体表面张力系数的测定	(39)
实验五 液体黏滞系数的测定	(43)
5-1 落球法液体黏滞系数的测定	(43)
5-2 落针法液体黏滞系数的测定	(47)
实验六 空气中声速的测定	(51)
第三章 电磁学实验	(55)
实验七 伏安特性曲线的测绘	(55)
实验八 电表的改装和校准	(59)
实验九 万用表的使用	(63)
实验十 直流电桥测电阻	(72)
实验十一 模拟静电场	(77)
实验十二 用电势差计测量温差电动势	(81)
实验十三 磁场的测量	(85)
13-1 霍尔效应法测磁场	(85)
13-2 感应法测绘磁场	(90)
实验十四 示波器的调整和使用	(95)

第四章 光学实验	(104)
实验十五 分光计的调整和使用	(104)
实验十六 光的等厚干涉	(110)
实验十七 迈克尔孙干涉仪	(115)
实验十八 光栅衍射法测定光波的波长	(122)
实验十九 光的偏振	(124)
第五章 综合性与近代物理实验	(130)
实验二十 全息摄影	(130)
实验二十一 光电效应和普朗克常量的测定	(133)
实验二十二 密立根油滴实验	(136)
实验二十三 弗兰克-赫兹实验	(145)
实验二十四 动态杨氏模量的测定	(149)
实验二十五 金属电子逸出功的测定	(152)
实验二十六 核磁共振实验	(159)
第六章 设计性与课题物理实验	(163)
实验二十七 用焦利秤测不规则固体密度	(163)
实验二十八 碰撞实验设计	(164)
实验二十九 弹簧振子运动	(164)
实验三十 测定电振音叉振动频率	(165)
实验三十一 简易欧姆表设计	(166)
实验三十二 设计组装电势差计	(167)
实验三十三 用双棱镜测量光的波长	(168)
实验三十四 单缝衍射的光强分布	(168)
实验三十五 光偏振现象的研究	(169)
第七章 计算机仿真物理实验	(171)
附 录	(180)
主要参考书目	(186)

第一章

绪 论

大学物理实验课程是学生进行科学实验基本训练的一门独立设置的必修课,是学生进入大学后受到系统实验方法和实验技能训练的开端,是对学生进行科学实验训练的重要基础。它可培养学生对物理现象的观察、分析能力,引导学生运用理论去指导实践,解决实践中的问题,大学物理实验为学生的专业实验和将来的工程实验打下了不可取代的坚实基础。

一、大学物理实验课程概述

1. 大学物理实验课程的基本情况

大学物理实验课程是学生进行科学实验基本训练的一门独立设置的必修课,是学生进入大学后学习系统实验方法和接受实验技能训练的开端。通过一定数量的力学、电磁学、光学等基础物理实验和近代物理实验以及误差与数据处理理论、CAI实验教学课程的学习,培养学生对物理现象的观察、分析能力,引导学生运用理论去指导实践,解决实践中的问题。

2. 大学物理实验课程的教学目的和任务

通过大学物理实验课程的学习,使学生掌握实验误差与数据处理的知识,了解并掌握常用物理量的基本实验方法、测量方法和物理实验的基本知识,为专业实验和工程实验打好基础;使学生学会常用仪器的调整及正确使用方法;培养学生分析处理实验结果,撰写实验报告的能力;提高学生的计算机应用能力;同时,培养学生对待科学实验一丝不苟的严谨态度和实事求是的工作作风。

3. 大学物理实验课程的基本要求

实验指导教师在大学物理实验课程教学过程中的职责为:

(1)在教学过程中适当介绍物理实验史,特别是介绍近代首创物理实验的学者,对学生进行辩证唯物主义世界观和方法论的教育。

(2)通过大学物理实验课程的学习,使学生了解并掌握常用物理量的基本实验方法、测量方法和大学物理的基本知识,培养学生分析处理实验结果、撰写实验报告的能力。

(3)在教学过程中,要教育学生爱护实验仪器设备,培养学生对待科学实验一丝不苟的严谨态度和实事求是的工作作风。

通过大学物理实验课程对学生能力的初步训练,要求学生做到:

(1)通过实验前的预习,能明确实验原理、条件和步骤,弄清需要记录和处理的实验数据,能独立完成实验和写出合格的实验报告。

(2)借助仪器说明书能独立正确安装、调整常用实验装置,并能掌握实验操作技术(如零点核准、消除视差等)。

(3)掌握基本实验方法(如换测法、静态与动态研究法、模拟法、干涉法等)。

(4)能较熟练地掌握常用物理量的基本测量方法(如比较法、线性放大法、平衡位置互易法、测量宽度展延法等)。

(5)了解常用仪器的性能,掌握使用方法,认真完成实验的操作过程。

(6)能正确运用误差理论分析处理实验数据,撰写实验报告,得出实验结论。

4. 大学物理实验课程基本内容

(1)误差与数据处理。理解与掌握测量数据处理的基本知识:误差概念、有效数字及运算规则、数据处理的基本方法(列表法、图示法、图解法、逐差法、最小二乘法等)。

(2)物理量测量与力学实验。长度密度测量、金属丝杨氏弹性模量的测定、扭摆法测转动惯量、三线悬摆测转动惯量、液体表面张力系数的测定、液体黏滞系数的测定、声速的测定等实验。

(3)电磁学实验。包括伏安特性曲线的测绘、电表改装和标程、万用表的使用、直流电桥测电阻、模拟静电场、用电位差计测温差电动势、磁场的测量(霍尔效应法测磁场、感应法测螺线管磁场)、示波器的调整和使用等实验。

(4)光学实验。包括分光计的调整和使用、光的等厚干涉、迈克尔孙干涉仪、光栅衍射法测定光波的波长、光的偏振等实验。

(5)综合性与近代中级物理实验。包括全息摄影、光电效应法测普朗克常量、密

立根油滴实验、弗兰克-赫兹实验、动态杨氏模量、金属逸出功实验、核磁共振等实验。

(6)设计性与课题物理实验。包括用焦利秤测固体密度、碰撞实验设计、弹簧振子运动、测定电振音叉振动频率、简易欧姆表设计、设计组装电位差计、用双棱镜测量光的波长、单缝衍射的光强分布、光偏振现象的研究等实验。

(7)计算机仿真实验(CAI)。通过计算机仿真物理实验的模拟操作,对学生理解实验原理和剖析仪器的性能和构造,了解实验的设计思想与方法有很大帮助,同时也在一定程度上也提高了学生的计算机应用能力。

5. 大学物理实验课程教学的基本步骤

(1)指导教师必须严格按照大学物理实验课程教学大纲要求,进行实验教学与指导;学生必须严格遵守“学生实验守则”进行实验操作。

(2)指导教师实验前必须对所进行的实验认真备课,并做好备课笔记;对实验仪器进行调试、安排。学生必须根据教材对将进行的实验认真预习,并写好实验预习报告。

(3)上课时,指导教师首先对所指导实验的实验目的、原理、内容进行讲解,再对实验仪器设备进行介绍,并对学生提问,以检查学生预习情况,并记录在册。

(4)学生在指导教师的指导下按步骤进行实验,并在实验原始数据表上记录实验原始数据,不得抄袭与臆造。

(5)学生实验操作完毕后,指导教师现场对原始数据的真实性和准确性进行考评,认可后在原始数据表上签名。

(6)学生在实验情况登记表上签名,教师在检查学生实验仪器完好后,根据学生实验能力的评分标准打分并签名。

(7)学生根据实验原始数据表记录的实验数据认真完成实验报告,并及时上交;指导教师根据实验报告评分标准进行评分,并记录在学生实验报告成绩记录册上。

(8)实验课程结束后,指导教师按照实验课程学生成绩评分细则对学生的实验预习情况、实验纪律情况、实验动手能力成绩、实验报告成绩、实验考试成绩(包括理论考试和操作考试)进行总评,成绩分成优秀、良好、中等、及格、不及格五个等级。

(9)实验指导教师在学期末根据学生的考查成绩,对学生成绩进行分析。

6. 大学物理实验报告的撰写

大学物理实验报告主要由三部分组成:实验预习报告、实验原始数据表、实验数据处理和实验结果。

(1)实验预习报告:学生通过预习将进行实验的内容,归纳并写出该实验的实验目的、实验原理(包括原理图与实验公式)、实验仪器和实验步骤等等。

(2)原始数据表:经指导教师认可并签名的原始数据表。

(3)实验数据处理和实验结果:根据原始数据表记录的实验数据,运用有关误差概念、有效数字及运算规则与采用列表法、图示法、图解法、逐差法、最小二乘法等基本方法进行数据处理,得出实验结果,并对结果进行分析与思考。

7. 大学物理实验学生守则

(1)学生实验前必须认真预习实验内容,未经预习或无故迟到者,指导教师有权停止其实验。

(2)学生进入实验室不得高声喧哗,不得随便窜走,在实验操作前不准搬弄仪器设备。

(3)学生必须以实事求是的科学态度进行实验,严格要求,认真测定实验数据,不得草率从事,并及时送交实验报告,不得抄袭或臆造。

(4)必须严格遵守操作规程,服从实验指导老师的指导,如违反操作规程或不听从指导而造成仪器设备损坏等事故,应按有关规定进行处理。

(5)在实验过程中,仪器设备如发生故障,应立即报告指导老师及时处理。不得擅自进行处置,以免发生意外。

(6)实验完毕后,应将仪器、工具及实验场地等进行归还和清理,经指导老师同意后,方可离开实验室。

二、有效数字与误差理论

1. 有效数字

(1)有效数字的定义。在量值的测量中,测量的读数是有近似性的,读数中一部分数字是准确、可靠的,称为可靠数字,而另一部分数字是欠准确、可疑的,称为可疑数字。可靠数字加一位可疑数字的全部称为有效数字,即量具的最小分度值与一位估读值。

(2)有效数字的运算法则。

①总法则

可靠数字	{	与可靠数字运算→可靠数字
	}	与可疑数字运算→可疑数字
可疑数字	{	与可靠数字运算→可疑数字
	}	与可疑数字运算→可疑数字

②加减法运算法则 诸数相加或相减时,其小数位对齐,然后进行运算,我们可

用如下格式加以说明。根据上述总法则与有效数字的定义,可推算出应取的位数。

	有效数字位数	小数位
□. □ □ □ □ □	6	5
+) □ □ . □ □ □ □ □ □	8	6
-) □ . □ □ □	4	3
□ □ . □ □ □ □ □ □	5	3

根据定义,结果只能保留一位估量数,故应保留三位小数位。其结果应写成:

$$\square \square . \square \square \square$$

结果中,有效数字的位数为 5 位,小数位数为 3 位。

结论:在有效数字的相加减运算时,取小数位最少的。

③乘法运算法则 诸数相乘或相除时,有效数字末位对齐,然后进行运算,我们可用如下格式加以说明。

$$\begin{array}{r}
 \square \square . \square \square \square \\
 \times) \quad \square \square . \square \square \\
 \hline
 \square \square \square \square \square \square \\
 \square \square \square \square \square \square \\
 \square \square \square \square \square \square \\
 \square \square \square \square \square \square \\
 \hline
 \square \square \square \square . \square \square \square \square \square
 \end{array}$$

其结果可写成: $\square \square \square \square$ 或 $\square . \square \square \square \times 10^3$ 。

由此得出结论:有效数字相乘或相除时,有效数字无论多少位数,乘积或商的有效位数与乘除因子中有效数字位数最少的数相同。

④乘开方运算法则 我们可用如下格式加以说明:

$$\square . \square \square \square ^n = \square \square \square \square . \square \square \square \square \square \square$$

结果表示为: $\square . \square \square \square \times 10^m$ 。

由此得出结论:对乘开方运算取底的有效位数,实质就是用乘法多次进行运算。

⑤常数无可疑 对于 π 、 e 等常数,可取任意值,在实际运算时,比所有有效数字中位数最多的再多取一位。

例如: $V = \frac{\pi H(D^2 - d^2)}{4}$ 式子中如有有效数字位数最多的为 4 位,则 π 至少取 5 位,就是要取 3.1415;当然,取 6 位、7 位甚至更多,则更好。

⑥前零不算,后零必计。

a. 0.000387 不是 6 位有效数字, 而是 3 位有效数字, 可采用科学记数法写成 3.87×10^{-4} 。

b. 0.00185100 不是 8 位有效数字, 也不是 4 位有效数字, 而是 6 位有效数字, 可采用科学记数法写成 1.85100×10^{-3} 。

因此, 在实验测量中, 如遇到测量值为整数时, 0 的估读值仍需记上, 表明仪器的精度值。

(3) 有效数字的取舍。中学的时候我们所学的取舍法则是四舍五入, 而在我们物理实验中的取舍法则为: 四舍六入, 而五呢, 则要看奇偶了, 五前面为奇数则进位; 相反, 五前面是偶数的话就舍去。

该法则具有一定的合理性、科学性和系统性。

例如: $4.26 + 4.22 + 4.25 + 4.35 = 17.08$, 取三位有效数字为 17.1。

如果直接把每个数字进行取舍然后相加, 四舍五入得到的结果是: 17.2, 而利用四舍六入进行取舍得到的结果是: 17.1。

假如把式子中的 4.25 改成 4.35 或者把 4.35 改成 4.25, 那么用四舍五入和四舍六入进行取舍得到的结果(误差大小相等、方向可能相反)是一样的。总而言之, 在大学物理实验数据处理中, 不管在怎样的数据结构中, 四舍六入比四舍五入要来得先进、合理, 计算误差更小。

2. 误差理论

(1) 测量与误差。

① 测量 物理学是一门量度的科学, 在物理实验中, 它的大部分内容都要涉及到物理量的测量, 如: 长度、时间、质量、密度、速度等等。按照测量方式的不同可以把测量分为直接测量和间接测量。所谓直接测量, 就是用测量仪器直接测量物理量的量值。例如用米尺测量长度, 用天平称物体的质量等。而间接测量的被测物理量的量值是用直接测量得到的物理量量值通过有关物理公式的运算, 间接得到的。例如测量物体的密度等。

② 误差 对于一个被测的物理量来说, 客观上存在一个真实的量值, 称为真值。但是, 测量时不管使用多么高级精密的仪器, 实际得到的测量值只是真值的近似值, 实际测量值与真值之间总是存在差异。为了衡量这种差异的程度, 我们把实际测量值 x 与真值 X 之间的差值称为误差, 记为 Δx 。用公式表示为

$$\Delta x = X - x \quad (1)$$

(2) 误差的分类。测量时产生的误差按产生的原因和性质可分为三大类。

① 过失误差 过失误差是在不正常的实验情况下造成的。具体地说是由于测量者在测量过程中操作、读数、记录等方面的差错造成的误差。其测量结果会出乎我们

意料之外,测量数据缺乏正常的规律性。由于这类误差与人的过失有关。故避免过失误差的办法就是实验者要集中精力,认真进行实验。

②系统误差 在相同实验条件下,多次测量同一个物理量时,若每次的测量值总是比真值偏大或偏小一个恒定的量值,或者按一定的规律变化的,具有这种特点的误差,称为系统误差。测量仪器的缺陷,仪器安装不当,周围环境温度的影响,实验理论和方法不完善,以及测量者在测量时的不良习惯等因素均会引起系统误差。我们必须根据产生系统误差的不同原因来采取措施,消除系统误差。

③偶然误差(又称随机误差) 在相同的实验条件下,多次测量同一个物理量时,测量结果各不相同,时大,时小,在一定范围内上下波动,且不可预测而随机出现,这种误差称为偶然误差。偶然误差是由许多不稳定因素造成的,如人眼估计读数的波动,环境温度上下波动、电源电压的不稳定等因素均会产生偶然误差。

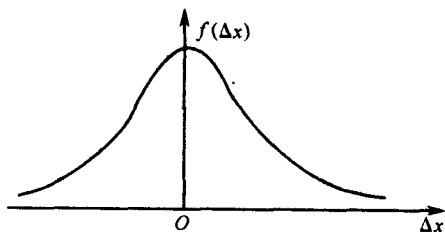


图 偶然误差高斯分布规律

偶然误差的重复测量结果虽然是随机的,但是对大量的偶然误差而言却具有一定的统计规律性,通常偶然误差遵循高斯分布规律。若以偶然误差为横坐标,偶然误差出现的概率密度为纵坐标,其高斯分布曲线如图所示。我们从该图中不难看出,偶然误差具有如下特点:

我们从该图中不难看出,偶然误差具有如下特点:

- a. 有界性——误差的绝对值不会超过其最大值 $(\Delta x)_{\max}$ 。
- b. 单峰性——绝对值小的误差出现概率大,绝对值大的误差出现概率小。
- c. 对称性——绝对值相同的正、负误差出现的概率相等。
- d. 抵偿性——误差的算术平均值随着测量次数的不断增加而趋于零。

由此可见,偶然误差虽然不可预测也无法避免,但可以通过多次测量求算术平均值而相互抵消。

(3)误差的估计。误差的表示形式分绝对误差和相对误差。上述(1)式所定义的误差反映了测量值偏离真值的大小和正负,它是指测量值 x 与真值 X 的差值,因此又称 Δx 为绝对误差。绝对误差显然有正负之分,不应将它与误差的绝对值相混淆,后者是误差的模。绝对误差可以表示某一测量结果的优劣,但在比较不同测量结果时则不适用,需要用相对误差表示。

相对误差表示绝对误差 Δx 与真值 X 之比,一般用百分比表示,考虑到一般情况下测量值与真值相差不会很大,故可把绝对误差与测量值的平均值之比作为相对误差,即

$$E = \frac{\Delta x}{X} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (2)$$

在实际测量中,系统误差和偶然误差是同时存在的,有时系统误差突出,有时偶然误差突出,有时两者差不多,这就要求我们在实验时认真做好误差分析。在评估误差时,把偶然误差小的评估为精密度高,把系统误差小的评估为准确度高,而把两者误差都小的评估为精确度高。

系统误差是不能通过重复测量消除的,只能通过消除系统误差所产生的根源,来消除系统误差。若系统误差已经消除到小于偶然误差了,就可以忽略不计。下面我们仅对测量中的偶然误差进行估计。

①直接测量中偶然误差的估计和测量结果表示式 对物理量的量值进行直接测量的测量值,应视实际情况进行合理的误差估计。一般情况下,对于偶然误差小的测量值,可取仪器最小刻度的一半或仪器极限误差作为绝对误差;对于偶然误差大的测量值,可采用仪器的最小刻度甚至更大的合理数值作为绝对误差。

为了减小偶然误差的影响,在可能的情况下,总是采用多次测量。设在相同的实验条件下对某一物理量进行 n 次重复的测量,其测量值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。设真值为 X ,则各次测量值的绝对误差分别为

$$\Delta x_1 = x_1 - X, \Delta x_2 = x_2 - X, \dots, \Delta x_n = x_n - X \quad (3)$$

我们也可以把(3)式写成

$$x_1 = X + \Delta x_1, x_2 = X + \Delta x_2, \dots, x_n = X + \Delta x_n \quad (4)$$

于是得 n 次测量的算术平均值 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (X + \Delta x_i)}{n} = X + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \quad (5)$$

根据偶然误差的抵偿性,当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时,有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0$$

则(5)式变成 $\bar{x} = X$ 。即无限多次重复测量的算术平均值恰好等于被测无量的真值。在实际测量中,测量次数总是有限的,但当测量次数 n 足够大时,则有

$$\lim_{n \rightarrow \text{足够大}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \approx 0, \text{ 则 } \bar{x} = X \quad (6)$$

即只要测量次数足够多(一般在物理实验中取 10 次就可以了)时,算术平均值就是真值的最好近似,是多次测量值的最佳值。

在多次重复测量的情况下,直接测量的误差可用算术平均误差表示出来。

为了估计误差,我们定义测量值 x_i 与算术平均值 \bar{x} 的差值为偏差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, i = 1, 2, \dots, n$$

在实验中,测量的偏差是可以准确知道的,于是可以定义算术平均误差为

$$\overline{\Delta x} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \cdots + |\Delta x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n} \quad (7)$$

在大学物理实验范围内的误差分析中,我们可用算术平均误差来描述测量结果的精确程度。

衡量测量结果的好坏,不但要看绝对误差的大小,还要看被测物理量本身量值的大小,为此我们引入相对误差的概念。平均相对误差被定义为平均绝对误差与真值(或算术平均值)之比,常用百分比表示

$$E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (8)$$

由上述可知,测量的目的是为了找到物理量的真值,但实际上我们只能找到真值的近似值(即算术平均值 \bar{x}),然后估计误差存在的范围为 $\pm \overline{\Delta x}$,因此我们将直接测量结果用如下形式表示

$$x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad (9)$$

直接测量结果的平均相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta x}}{\bar{x}} \times 100\%$$

最后附带说明一下,直接测量中也可用均方根差(标准偏差)来估计偶然误差的范围,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n-1}} \quad (10)$$

②间接测量中偶然误差的估计和测量结果的表示式 在物理实验中,许多物理量只能进行间接测量。设间接测量量值 N 是直接测量量值 x, y, z, \cdots 的函数,即

$$N = f(x, y, z, \cdots) \quad (11)$$

式中,各直接测量量值的表示式为: $x = \bar{x} \pm \overline{\Delta x}, y = \bar{y} \pm \overline{\Delta y}, z = \bar{z} \pm \overline{\Delta z} \cdots$ 当我们取直接测量量值为算术平均值 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots$ 时,可得间接测量量值的平均值为

$$\bar{N} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \cdots) \quad (12)$$

对(11)式进行全微分,并以误差取代微分,以及考虑误差的最大情况,可估算间接测量量值的最大绝对误差为

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \overline{\Delta x} + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot \overline{\Delta y} + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \cdot \overline{\Delta z} + \cdots \quad (13)$$

相应地得到间接测量结果的表示式为

$$N = \bar{N} \pm \overline{\Delta N} \quad (14)$$

间接测量值的最大相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta N}}{\bar{N}} \times 100\% \quad (15)$$

由于间接测量值 N 的对数的全微分刚好是 $\frac{\partial N}{N}$, 若把微分改为误差, 变为 $\frac{\Delta N}{N}$, 即为相对误差, 计算十分方便, 故在实际应用中往往采用对数的微分性质来演算间接测量的相对误差公式。

我们对(11)式取对数得

$$\ln N = \ln f(x, y, z, \dots) \quad (16)$$

对(16)式求微分, 再把微分符号换成绝对误差符号 Δ , 并考虑到最大相对误差, 故把符号 Δ 前的负号一律改为正号, 间接测量值 N 用平均值 \bar{N} 代入后得间接测量值的最大相对误差为

$$E = \frac{\Delta N}{\bar{N}} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \right| \cdot \overline{\Delta x} + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \right| \cdot \overline{\Delta y} + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial z} \right| \cdot \overline{\Delta z} + \dots \quad (17)$$

间接测量值的均方根差(标准偏差)为

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \quad (18)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为直接测量值的均方根差。

例 1 实验中对某一细棒的长度, 5 次直接测量数据如下:

次 数	长度 l/cm	$\Delta l/\text{cm}$
1	5.52	0.02
2	5.54	0.00
3	5.56	0.02
4	5.53	0.01
5	5.55	0.01
平均值	$\bar{l} = 5.54$	$\overline{\Delta l} = 0.02$

细棒长度直接测量结果表示式为

$$l = \bar{l} \pm \overline{\Delta l} = (5.54 \pm 0.02) \text{cm}$$

平均相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta l}}{\bar{l}} \times 100\% = 0.3\%$$

例 2 求利用单摆测量地球重力加速度的测量结果表示式和相对误差。已知单摆的悬线 l 和周期 T 的直接测量结果分别为

$$l = (0.36 \pm 0.01) \text{m}, T = (1.204 \pm 0.001) \text{s}$$

解 单摆的振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (19)$$

由(19)式可得地球的重力加速度为

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (20)$$

故重力加速度的平均值为

$$\bar{g} = 4\pi^2 \frac{\bar{l}}{\bar{T}^2} = \frac{4 \times (3.1415)^2 \times 0.36}{(1.204)^2} = 9.79 (\text{m/s}^2)$$

本例中由于直接测量值的误差是确定的,所以先计算重力加速度的相对误差方便。

$$\text{对(20)式取对数得} \quad \ln g = \ln 4\pi^2 + \ln l - 2\ln T$$

对上式等式两边求微分得

$$\frac{\partial g}{g} = \frac{\partial l}{l} - 2 \frac{\partial T}{T} \quad (21)$$

把(21)式中微分符号改为误差符号,考虑到最大相对误差,故把误差符号前的负号改为正号得

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T} \quad (22)$$

把(22)式中 g 、 l 、 T 分别用算术平均值 \bar{g} 、 \bar{l} 、 \bar{T} 代入, Δl 、 ΔT 用绝对误差平均值 $\overline{\Delta l}$ 、 $\overline{\Delta T}$ 代入,即得重力加速度的最大相对误差为

$$E = \frac{\overline{\Delta g}}{\bar{g}} \times 100\% = \left(\frac{\overline{\Delta l}}{\bar{l}} + 2 \frac{\overline{\Delta T}}{\bar{T}} \right) \times 100\% = 2.9\%$$

重力加速度的最大绝对误差为

$$\overline{\Delta g} = \bar{g}E = 9.79 \times 0.029 = 0.28 (\text{m/s}^2)$$

最后得重力加速度测量结果表示式为

$$g = \bar{g} \pm \overline{\Delta g} = 9.79 \pm 0.28 (\text{m/s}^2)$$

$$E = \frac{\overline{\Delta g}}{\bar{g}} \times 100\% = 3\%$$

3. 数据处理的基本方法

(1)列表法。列表记录、处理数据是一种最基本的数据处理方法。在记录和处理数据时,将数据列成表格,可使有关物理量之间的关系、数据和处理数据过程中存在的问题等都能在表格中显示出来。

列表的基本要求:

①各栏目均应标注名称和单位。

②列入表中的应是原始数据,计算过程中的一些中间结果和最后结果也可列入表中,但应写出计算公式;从表格中要尽量使人看到数据处理的方法和思路,而不能把列表变成简单的数据堆积。