

21世纪

高等学校规划教材



物理实验

鲁刚 主编



化学工业出版社

21 世纪高等学校规划教材

物 理 实 验

鲁 刚 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书分四个层次编排了 38 项实验,涵盖力、热、光、电磁、量子等内容,可供不同专业学生选择,既有培养学生基本技能、提高学生动手能力的基础性项目,又有开阔学生眼界和思路,提高学生对实验方法和技能的综合运用能力,以发挥学生最大潜能的综合性与设计性实验。每个实验开头都介绍一些背景知识,便于学生理解有关概念或方法,有助于提高他们对物理实验的兴趣和热情。

本书可作为高等院校各专业的大学物理实验用书,也可供高等职业技术学院工科学生使用,还可作为实验教学和技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

物理实验/鲁刚主编. —北京:化学工业出版社,
2009.8
21 世纪高等学校规划教材
ISBN 978-7-122-06093-8

I. 物… II. 鲁… 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 (2009) 第 105224 号

责任编辑:唐旭华
责任校对:吴 静

文字编辑:荣世芳
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 266 千字 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:19.80 元

版权所有 违者必究

前 言

大学物理实验课是高等理工科院校一门独立的必修基础课程,是理工科大学生入学后接受系统实验训练的开端。通过这门课程的学习,使学生在实验的基础理论、方法和技能等方面受到系统而严格的训练,不断提高实验技能和创新能力。

本书按照循序渐进的原则,分四个层次,由浅入深地编排实验内容。每个实验项目的开头都介绍了一些背景知识,这些内容可以帮助学生理解有关概念或方法,激发学生对物理实验的兴趣和热情。

本书共分5章。第1章为大学物理实验基础理论,包括绪论和数据处理等内容;第2章为预备性实验,共9个实验项目,目的是弥补中学物理实验训练不足的缺陷,为后续实验打下良好基础,起到承上启下的作用;第3章为基础性实验,共19个实验项目,通过这些实验,使学生在实验观察、分析和对物理量的测量中学习物理实验的基本方法和基本技能,了解科学实验的一般方法与特点,培养和提高学生的独立动手能力;第4章为综合性实验,共6个实验项目,目的是巩固学生基础性实验阶段的学习成果,开阔学生的眼界和思路,提高学生对实验方法和实验技能的综合运用能力;第5章是设计性实验,安排4个项目供学生选择,一般由指导教师给出实验项目和要求,实验室提供实验条件,由学生自己拟定实验方案,并独立完成实验,以发挥学生最大的学习潜能。附录部分有3项内容,附录1为“用Ms Excel绘制实验曲线”,用实例介绍了用Ms Excel的图表功能绘制实验曲线的方法;附录2为“大学物理实验报告式样”,以帮助并规范学生撰写实验报告;附录3为“大学物理实验练习题”,帮助学生复习和巩固所学过的大学物理实验基础理论、方法等内容。

本书凝聚了沈阳工业大学基础教学部物理实验教学中心全体教师多年教学的智慧和成果。参加本次教材编写的教师有:鲁刚、谷玉亭、李欣、杨松、李玉洁、杨艳、王智勇、陆大伟、刘扬、孙阳、樊柏村、李纪树、王莉、杨全成、李云飞、姜翠等。本书借鉴了相关文献,并参阅了兄弟院校的部分资料,在此深表感谢。

因编写时间和水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,诚请广大读者不吝指正。

编者
2009年5月

目 录

第 1 章 大学物理实验基础理论	1
1.1 绪论	1
1.1.1 物理实验课的作用	1
1.1.2 物理实验课的要求	2
1.1.3 物理实验课的过程	2
1.2 数据处理	3
1.2.1 测量及其分类	3
1.2.2 误差理论	4
1.2.3 测量结果的表示	7
1.2.4 有效数字	8
1.2.5 其他数据处理方法	10
第 2 章 预备性实验	14
2.1 仪器设置	14
2.2 长度测量	15
2.3 密度测量	20
2.4 单摆实验	23
2.5 变温曲线测绘	25
2.6 压缩空气	27
2.7 电表使用	29
2.8 回路接线法	33
2.9 随机现象	35
第 3 章 基础性实验	38
3.1 转动惯量测量	38
3.2 简谐振动研究	41
3.3 拉伸法测杨氏模量	44
3.4 液体黏度测量	48
3.5 气体摩尔热容比测定	51
3.6 固体线胀系数测量	54
3.7 热管传热特性研究	58
3.8 模拟法测绘静电场	62
3.9 电桥法测电阻	66
3.10 示波器使用	70
3.11 电位差计的使用	75

3.12	铁磁材料磁滞研究	79
3.13	夫兰克-赫兹实验	84
3.14	等厚干涉	87
3.15	棱镜折射率测定	91
3.16	光栅衍射	97
3.17	迈克尔逊干涉仪	100
3.18	微波光学实验	105
3.19	光纤传输实验	109
3.19.1	信息光纤传输	110
3.19.2	光纤传感器位移特性	112
3.19.3	光纤传感器转速特性	113
第4章	综合性实验	116
4.1	声速测量	116
4.2	温度传感器特性研究	119
4.3	霍尔效应实验	126
4.4	密立根油滴实验	131
4.5	光电效应实验	135
4.6	光电池基本特性研究	139
第5章	设计性实验	144
5.1	电学元件伏安特性研究	144
5.2	电阻率测量	144
5.3	电表改装与校准	145
5.4	用电位差计校准电表	145
附录		147
附录1	用 Ms Excel 绘制实验曲线	147
附录2	大学物理实验报告式样	150
附录3	大学物理实验练习题	156
参考文献		166

第 1 章 大学物理实验基础理论

在大学物理实验过程中，学生根据每一个实验的目的与要求，按照实验原理和内容进行实验，测量物理量的数值，从中学习具体的实验方法和技能。通过一系列不同层次实验的系统而严格的训练，不断提高自身的实验能力。

如何进行实验、规范地使用仪器、记录实验数据、正确处理数据并独立撰写实验报告等，都是学生必须掌握的实验基础理论。本章的绪论和数据处理等内容就是大学物理实验课的基础理论，要求学生在实验操作前修读，并伴随大学物理实验课的进程，进一步深入地学习。

1.1 绪论

1.1.1 物理实验课的作用

物理学是一门高度定量化的实验科学。在物理学发展过程中，实验起着决定性的作用。从发现物理现象、寻找物理规律到验证物理定律，都离不开实验。

伽利略通过自由落体实验和斜面实验发现并总结出自由落体定律与惯性定律。焦耳通过大量的、精确的实验结果论证了机械能和电能与热能之间的转化关系，他在实验中测定的热功当量的一致性，为能量守恒定律奠定了不可动摇的基础。库仑用扭称测量了电荷之间的作用力，开始了电磁学的定量研究。牛顿的万有引力定律被海王星的发现和哈雷彗星的准确观测等实验所证明，而他关于光的微粒学说却被托马斯·杨所做的光的干涉实验所否定。

经典物理学的基本定律几乎都是实验结果的总结与推广，并且经过实验的检验。

进入 20 世纪，一些实验现象与经典物理学定律相悖，特别是所谓的“两朵乌云”和“三大发现”。前者是指黑体辐射实验规律和迈克尔逊-莫雷实验；后者是指 X 光、放射性和电子的发现。由于用经典物理学不能解释上述实验现象或规律，导致了现代物理学的两大支柱理论——相对论和量子力学的诞生。尽管相对论和量子力学主要是由理论物理学家所创立，不过这两个理论的正确性却是由实验确定的。在相对论和量子力学建立以后，大量实验证实了它们的正确性。

物理实验不仅对于物理学的研究工作非常重要，对于物理学在其他学科中的应用也十分重要。当代物理学的发展使我们的世界发生了惊人的变化，而这些变化正是物理学在其他领域应用的结果。

以物理学为基础或建立在物理学应用基础上的工程学科有无线电电子学、电工学、热工学等。许多新材料的发现及其制备方法的研究，都离不开物理学的应用。在化学领域，从光谱分析到量子化学，从放射性测量到激光分离同位素，皆是物理学的应用。在生物学发展过程中，更离不开各类显微镜的贡献，生命科学同样离不开物理学的应用，DNA 的双螺旋结构是由美国生物学家沃森和英国物理学家克里克共同建立并为 X 光衍射实验所证实。在医

学方面,从X光透视、B超诊断、CT诊断、核磁共振诊断到各种理疗手段,包括放射性治疗、激光治疗、 γ 刀等都是物理学的应用。

物理学正在渗透到各个学科领域,这种渗透无不与实验密切相关。显然,实验是物理理论到其他应用学科的桥梁和纽带,只有掌握大学物理实验的基础理论和基本技能,才能顺利地将物理学原理应用到其他学科。

1.1.2 物理实验课的要求

在大学物理实验教学中,应使学生在实验的基本知识、基本方法和基本技能三个方面受到系统而严格的训练。不断提高学生的实验能力,即让学生通过阅读实验教材及相关文献、掌握实验原理与方法、规范使用实验仪器、准确记录并正确处理实验数据,客观分析实验结果,独立撰写实验报告等。

在物理实验过程中,使学生逐步养成爱护公物的习惯,遵守安全制度,具有良好的实验习惯和实事求是的工作作风。

1.1.3 物理实验课的过程

一堂物理实验课包括:课前预习、实验操作与记录,撰写实验报告。

1.1.3.1 课前预习

详细了解实验室的各项规章制度和相关实验的注意事项。

仔细阅读实验教材及相关文献,了解实验目的与要求、实验原理与方法、实验仪器的结构与操作方法等,然后用自己的语言写好预习报告。

撰写预习报告是有计划并顺利进行实验的保证,是工程技术人员应具备的素养之一。预习报告内容大致包括:

- ① 实验报告封面信息。
- ② 实验目的——应学会的实验方法或预期的实验结果。
- ③ 实验原理——简要的实验理论和方法,主要计算公式,必要的实验装置示意图,注意事项等。
- ④ 实验仪器——实验用到的主要仪器、量具、元器件等(应到实验室后填写)。
- ⑤ 实验步骤——实验的关键步骤和注意要点。
- ⑥ 实验表格——依据实验要求设计、用于记录原始数据的表格。

1.1.3.2 实验操作

- ① 学生进入实验室后,应按要求签名,并根据分组情况找到自己的位置。
 - ② 进一步了解所用仪器的操作规程、使用方法和注意事项。
 - ③ 按实验内容和要求,合理布置实验仪器,包括电路连接、光路布置等。
 - ④ 请指导教师检查实验仪器布置情况,符合要求后进行下一步。
 - ⑤ 对各个仪器进行零点调节或校准。
 - ⑥ 测量第一个数据后,请教师检查,合格后进行下一步。
 - ⑦ 按照实验要求,依次测量其余数据,将数据正确记录到数据表格内。
 - ⑧ 实验数据测取完毕后,请指导教师审阅数据。
 - ⑨ 数据经指导教师审阅签字后,整理还原仪器,并将实验凳归位。
- 注意,若仪器发生故障时,应及时报告教师,并在教师指导下排除故障;仪器规整后,

经指导教师检查合格后，方可离开实验室。

1.1.3.3 实验报告

实验报告应在预习报告基础上续写。

实验报告应依据数据处理方法与要求，进行数值和误差计算，正确表达实验结果，对实验结果进行分析、讨论，给出合理的评价，并进行实验总结。

实验报告内容包括：

- ① 实验目的（同上）。
- ② 实验原理（同上）。
- ③ 实验仪器——实验用到的主要仪器、量具、元器件等。
- ④ 实验步骤——实验的关键步骤和主要注意事项。
- ⑤ 实验数据——未经改动、完整并经指导教师签字的原始记录。
- ⑥ 数据处理——计算公式及简要计算过程，误差计算，作图，实验结果的表达。
- ⑦ 分析讨论——对误差的评定，对实验结果的分析与讨论。
- ⑧ 实验总结——对实验的分析、评价、体会和建议等。

1.2 数据处理

测量误差、数值计算和测量结果的表示等数据处理方法不仅在物理实验中需要，在其他学科实验中也会用到。这些内容包括记录实验数据、数值与误差计算、测量结果的表示以及列表法、作图法、逐差法等知识。

数据处理知识是大学物理实验课的重要基础理论内容，需要认真阅读实验教材和相关文献，结合具体实验项目的学习，逐步掌握。

1.2.1 测量及其分类

测量是指用仪器、量具等手段确定被研究量数值的过程。测量是一个比较过程，即将被研究量与标准量进行比较，其倍数就是被研究量的**测量值**。测量值应包括测量数值和相应的单位，如 36.0s、3.35m、4.500kg 等。

1.2.1.1 直接测量与间接测量

依据获得测量值的途径或方法，可将测量分为直接测量和间接测量。

使用仪器或量具等手段直接读取**被测量**数值的过程称为**直接测量**，如用米尺测量长度、用天平称量质量等。

在物理实验中，大多数物理量的测量是通过直接测量值与其存在某种函数关系而得到的。比如测量圆柱体的体积，可通过测量圆柱体的直径 D 和高 H ，根据公式 $V = \pi D^2 H / 4$ 计算得到。这种测量叫做**间接测量**。

直接测量与间接测量不仅取决于被测量本身，还取决于实验仪器。比如，测量一个电器的电功率，用电流表和电压表测量就是间接测量，用功率表测量就是直接测量。

1.2.1.2 等精度测量与非等精度测量

根据测量条件是否相同，可将测量分为等精度测量与非等精度测量。

如果对某物理量重复测量多次，各次测量条件相同，即环境、仪器、测量者等均相同，无法判别其中哪一次测量优于其他次测量；或者在间接测量中，测量各个直接测量量的**准确**

程度相同, 这样的测量称为等精度测量。

为了更精确地测量, 比如在科学研究或高精度测量中, 对某物理量往往用不同的测量方法, 不同的仪器, 不同测量次数, 由不同测量者进行测量与比较, 这样的测量叫做非等精度测量。

大学物理实验课所涉及的测量绝大多数属于等精度测量。

1.2.2 误差理论

1.2.2.1 误差概念

在任何测量中, 被测量都存在着由自身性质所规定的确定数值, 称为真值。由于种种原因, 实际测量的数值——测量值, 只能是真值的一个近似值, 它与真值永远存在着一定的差值, 这个差值叫做误差, 也叫绝对误差。

多数情况下, 真值是未知的, 从而误差也是未知的。通常用约定真值代替真值, 约定真值包括一次测量的测量值、多次测量的算术平均值, 等等。而误差取所有可能误差的最大值。

若用 A 、 x 和 Δx 分别表示约定真值、测量值和误差, 则它们之间的关系为

$$\Delta x = x - A \quad (1.1)$$

对同一个物理量来说, 绝对误差越小, 测量越准确。而对不同的物理量而言, 单凭绝对误差不能判断测量的准确程度。例如, 由实验测量得到时间和重力加速度两个测量结果分别为 $t = (100.31 \pm 0.05)\text{s}$ 和 $g = (9.81 \pm 0.01)\text{m/s}^2$, 它们中哪个量测得更准确呢? 显然, 由绝对误差不能回答这个问题。

准确度是测量结果与被测量真值之间的一致程度。通常用**相对误差**表示测量的准确度。

绝对误差 Δx 与约定真值 A 的比值, 叫做相对误差, 一般表示为百分误差形式

$$E_x = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.2)$$

相对误差越小, 测量越准确。**相对误差**是**测量准确度**的数值表示。在上例中, $\Delta t/t = 0.05\% < \Delta g/g = 0.1\%$, 可见时间 t 比加速度 g 测得准确。

引起误差的因素包括实验方法、仪器缺陷、环境影响、人的感官不完善和一些未知因素等。根据误差的来源和性质, 误差可以分为**系统误差**与**随机误差**两大类。

1.2.2.2 系统误差

系统误差是由实验系统的不完善引起的, 它或是不变的, 或是按一定规律变化的。系统误差一般分为:

① **仪器误差**。由仪器某种固定缺陷引起的。如电流表的零点未校准、天平的两臂不等长等。

② **理论误差**。也称实验方法误差, 由于对实验方法研究不充分, 或是由于对影响实验准确性的因素不了解所致。比如, 用分析天平称质量, 没有考虑空气浮力的影响。

③ **人为误差**。因人的生理和心理特点而产生的误差。例如, 用秒表计时, 有些人失之过长, 有些人失之过短。

④ **环境误差**。由实验场所而引起的误差。如测量普通晶体管的电流放大系数, 在冬季偏小, 而在夏季偏大。

对于定值系统误差, 应该对其进行修正, 例如用修正值、修正公式、校准曲线等修正测

量值。

对于一些未定系统误差,只要清楚其存在的因素,便可以采取相应的措施予以消除,比如交换测量法、对称测量法、正反向测量法等。

还有一些系统误差,既不能修正,也不能消除,需要合理估算。在确定测量不确定度时,作为不确定度的一个分量,按照某种方式与不确定度的其他分量进行合成。

1.2.2.3 随机误差

实际上,即使不考虑系统误差,也还是存在着一定的误差,它们是由一些独立因素作用的结果,是必然存在的,其特点是多次测量结果偏大与偏小不确定,这种误差叫做随机误差。如仪器示值的微小变化等。

就单次测量而言,随机误差表现为偶然的,没有规律性,其大小和方向都不能预知。但对同一物理量进行多次等精度测量,随机误差服从一定的统计分布规律。常见的一种分布叫做正态分布,如图 1.1 所示。图中横坐标为测量值 x ,纵坐标为概率密度函数 $p(x)$, σ_x 为标准偏差。通过对正态分布曲线的分析可知,随机误差具有以下特点。

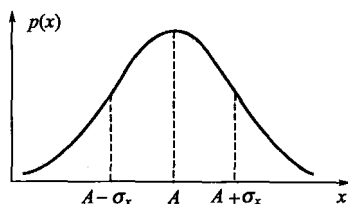


图 1.1 正态分布曲线

① **有界性**。所有测量值分布在一定范围内,过大或过小的测量值不会出现,即过大的正误差或负误差出现的机会趋近于零。

② **单峰性**。曲线在约定真值附近出现峰值,表明靠近约定真值的测量值出现的机会多,远离约定真值的测量值出现的机会少。

③ **对称性**。曲线近似以通过约定真值且平行于纵轴的直线对称,它表明绝对值相等的正、负误差出现的机会相等。

对同一个物理量进行多次等精度测量,一般用多次测量值的算术平均值代替约定真值,用标准偏差表示随机误差。

对某一物理量 x 进行 n 次等精度测量,得到一组测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 其算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3)$$

每次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差叫做残差,即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.4)$$

用统计方法对残差进行处理,得标准偏差 σ_x 为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.5)$$

标准偏差大,随机误差就大,表示测量值比较分散;标准偏差小,随机误差就小,表示测量值比较集中。

系统误差与随机误差是两类性质不同的误差,在一定条件下,它们各有其内涵和界限。但当条件改变时,彼此又可能相互转化。例如,由于温度变化造成的误差,在短时间内可以视为系统误差,而在长时间内则宜作随机误差处理。

1.2.2.4 误差估算

(1) 多次直接测量的误差估算

在不考虑系统误差时,一般用多次测量值的算术平均值表示约定真值。算术平均值和标准偏差分别由式(1.3)和式(1.5)表示。

(2) 单次直接测量的误差估计

有时对物理量多次测量是不可能的,比如测量一个逐渐冷却的物体不同时刻的温度;有时也非必要,如单摆实验中摆线长度的测量。在这些情况下,约定真值 A 由单次测量值 x_m 表示,即

$$A = x_m \quad (1.6)$$

其误差估计为仪器精度等级所限定的误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 或仪器分度值 $N_{\min}$ 的一半,即

$$\Delta x = \Delta_{\text{仪}} \quad (1.7)$$

或

$$\Delta x = \frac{N_{\min}}{2} \quad (1.8)$$

(3) 间接测量值的误差估算

间接测量值是通过一定函数关系由直接测量值计算得到。由于直接测量值存在误差,间接测量值也必然存在误差,这种影响可由相关的函数关系式计算得到。

① 一般函数关系 设间接测量值 φ 与直接测量值 $x, y, z, \dots$ 有如下函数关系

$$\varphi = f(x, y, z, \dots)$$

$x, y, z, \dots$ 是互相独立的物理量,其误差分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$, 由于误差是微小量,相当于微分学中的增量,可借用求全微分的方法求间接测量的误差。误差又具有统计性质,由各分量用方和根法合成误差 $\Delta\varphi$, 有

$$\Delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (1.9)$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (1.10)$$

式(1.9)适用于和、差函数关系,式(1.10)适用于积、商函数关系。

② 常用函数关系

a. 和差函数

$$\varphi = x \pm y, \quad \Delta\varphi = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (1.11)$$

【例1】 一个盛装空气的瓶质量 $M = (90.1425 \pm 0.0005)\text{g}$, 如将空气抽出后称量,其质量 $m' = (90.0105 \pm 0.0005)\text{g}$, 求瓶中空气的质量 m 。

解 根据公式(1.11), $m = M - m' = (90.1425 - 90.0105)\text{g} = 0.1320\text{g}$

$$\Delta m = \sqrt{(\Delta M)^2 + (\Delta m')^2} = \sqrt{0.0005^2 \times 2} = 0.0007\text{g}$$

$$m \pm \Delta m = (0.1320 \pm 0.0007)\text{g}$$

b. 积商函数

$$\varphi = xy \text{ 或 } \varphi = \frac{x}{y}, \quad \frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (1.12)$$

【例2】 圆的面积公式 $S = \pi D^2/4$, 测得直径 $D = (13.016 \pm 0.002)\text{cm}$, 求面积 S 。

解 由公式(1.12), $S = \pi D^2/4 = 3.1416 \times 13.016^2/4 = 133.059\text{cm}^2$

$$\frac{\Delta S}{S} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 \times 2} = 0.02\%, \quad \Delta S = S \left(\frac{\Delta S}{S}\right) = 133.059 \times 0.02\% \approx 0.03\text{cm}^2$$

$$S \pm \Delta S = (133.06 \pm 0.03) \text{ cm}^2$$

c. 指数函数

$$\varphi = \frac{x^k y^m}{z^n}, \quad \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \sqrt{k \left(\frac{\Delta x}{x} \right)^2 + m \left(\frac{\Delta y}{y} \right)^2 + n \left(\frac{\Delta z}{z} \right)^2} \quad (1.13)$$

【例 3】在单摆实验中，由 $g = 4\pi^2 L / T^2$ 计算重力加速度。设摆长和周期的测量值分别为 $L = (100.00 \pm 0.05) \times 10^{-2} \text{ m}$ 和 $T = (2.0062 \pm 0.0009) \text{ s}$ ，试计算重力加速度。

解 由式(1.13)， $g = 4\pi^2 L / T^2 = 4 \times 3.1416^2 \times 1.0000 / 2.0062^2 = 9.8087 \text{ m/s}^2$

$$\frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + 2 \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.05}{100.00} \right)^2 + 2 \left(\frac{0.0009}{2.0062} \right)^2} = 0.08\%$$

$$\Delta g = g \left(\frac{\Delta g}{g} \right) = 9.8087 \text{ m/s}^2 \times 0.08\% = 0.008 \text{ m/s}^2$$

$$g \pm \Delta g = (9.809 \pm 0.008) \text{ m/s}^2$$

1.2.3 测量结果的表示

1.2.3.1 不确定度

根据《中华人民共和国国家计量技术规范》(JJF 1059—1999)关于“测量不确定度评定与表示”的定义，不确定度表征合理地赋予被测量之值的分散性，是与测量结果相联系的参数。此参数可以是诸如标准差或说明了置信水准的区间的半宽度。

测量不确定度由多个分量组成。其中一些分量可以用测量列结果的统计分布估算，并用实验标准差表征；另一些分量则可用基于经验或其他信息的假定概率分布估算，也可用标准差表征。测量结果应理解为被测量值的最佳估计，全部不确定度分量均分配给了分散性，包括那些由系统效应引起的分量。

广义而言，测量不确定度意为对测量结果正确性的可疑程度，表征被测量的真值所处范围的评定，是由测量结果给出的被测量估计值的可能误差的量度。

当给出完整的测量结果时，应报告其测量不确定度。表示一个测量结果 x ，包括约定真值 A 、不确定度 u 和单位三部分，即

$$x = (A \pm u) \text{ 单位} \quad (1.14)$$

式(1.14)表示被测量以一定的概率落在区间 $(A-u, A+u)$ 范围内。

在测量结果表示中，不确定度 u 可分为 A 、 B 两类分量。 A 类分量是指由随机效应导致的不确定度分量，用 u_A 表示； B 类分量指由系统效应导致的不确定度分量，用 u_B 表示。于是合成标准不确定度表示为

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1.15)$$

(1) 不确定度的 A 类分量 u_A

在实际测量中，测量次数是有限的，测量误差不完全服从正态分布，而是服从大分布（即学生分布）规律。因此，对测量误差的估计，就要在公式(1.15)的基础上再乘以一个因子。在等精度条件下对同一个被测量作 n 次测量，若只计算不确定度的 A 类分量 u_A ，则它等于测量值的标准偏差 σ_x 乘以一个因子 t ，即

$$u_A = t \sigma_x \quad (1.16)$$

式中， t 是与测量次数 n 、概率密度函数 $p(x)$ 有关的量。 $p(x)$ 及 n 确定后， t 也就确定了。 t 的值可以从数据表中查得。表 1.1 是当 $p(x) = 0.95$ 时 t 的部分数值。

表 1.1 $t \sim n$ 关系

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	8.98	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72

在物理实验中, 测量次数 n 一般不大于 10。由表 1.1 可以看出, 当 $5 < n < 10$ 时, 因子 $t \approx 1$, 这时式(1.16) 可以化简为

$$u_A = \sigma_x \quad (1.17)$$

由此可以将 σ_x 作为测量结果的 A 类分量 u_A 。当然, 测量次数 n 不在上述范围内, 要求误差估计比较精确时, 要从有关数据表中查出相应的因子 t 的值。

(2) 不确定度的 B 类分量 u_B

不确定度的 B 分量 u_B 是由系统效应导致的, 包括仪器、环境、测量方法或近似计算等引起的不确定度分量。在大学物理实验中, 测量条件、测量方法和数据处理方法都是统一设定的, 因此为简化计算, 常将仪器误差作为 B 类分量, 即

$$u_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (1.18)$$

(3) 不确定度的合成 由公式(1.15)~式(1.18) 可得

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{(t\sigma_x)^2 + (\Delta_{\text{仪}})^2} \quad (1.19)$$

当测量次数 $5 < n \leq 10$ 时, 上式可化简为

$$u = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\Delta_{\text{仪}})^2} \quad (1.20)$$

式(1.20) 是实验中估算不确定度的常用公式。

1.2.3.2 测量结果的不确定度估算

(1) 多次测量的不确定度估算

对于多次直接测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 进行数据处理的一般步骤为:

- ① 计算被测量的算术平均值 $\bar{x}$, 将其作为被测量的约定真值;
- ② 求出测量值的标准偏差 v_x ;
- ③ 求出 A 类不确定度分量 u_A ;
- ④ 确定 B 类不确定度分量 u_B ;
- ⑤ 求出合成不确定度 $u = \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2} = \sqrt{(t\sigma_x)^2 + (\Delta_{\text{仪}})^2}$;
- ⑥ 表示测量结果为

$$x = \bar{x} \pm u, \quad E_x = \frac{u}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1.21)$$

(2) 单次测量的不确定度估计

在单次测量中, 用单次测量值 x_m 作为被测量的约定真值。测量值的不确定度一般只估计不确定度的 B 类分量, 用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为 x_m 的总不确定度, 测量结果表示为

$$x = x_m \pm \Delta_{\text{仪}} \quad (1.22)$$

1.2.4 有效数字

1.2.4.1 有效数字的定义

测量过程中要记录数据, 处理数据时要计算。记录时应取几位数字, 运算后应保留几位, 都应有明确的约定, 这就需要考虑有效数字。

能体现相对误差大小、位数大于和等于绝对误差最后一位的所有数字, 叫做有效数字。

有效数字位数的多少, 不仅体现测量的准确度, 还能反映测量条件的不同。如 1.3400cm 一定不是用米尺测量而得, 可能是用千分尺测得, 而 1.34cm 可能就是由米尺测得的。

1.2.4.2 有效数字的性质

(1) 有效数字反映测量的准确度

有效数字位数越多, 准确度越高。如 $(1.3400 \pm 0.0001)\text{cm}$, 约定真值有五位有效数字, $E_l \approx 0.007\%$; $(1.34 \pm 0.01)\text{cm}$, 约定真值有三位有效数字, $E_l \approx 0.7\%$ 。这一点是有效数字的基本含义。

(2) 有效数字与小数点位置无关

在单位变换过程中有效数字的位数不变。如重力加速度 $g = 0.00981\text{km/s}^2$, 可记为 $g = 981\text{cm/s}^2$, 亦可记为 $g = 9.81\text{m/s}^2$, 都是三位有效数字。

(3) 有效数字与“0”

当“0”不表示小数点位置时, “0”是有效数字。比如在 $(1.3400 \pm 0.0001)\text{cm}$ 中, 1.3400 为五位有效数字, 而 0.0001 仅有一位有效数字。

(4) 有效数字的指数形式

当数值较大或较小, 而有效数字位数又较少时, 常用指数形式表示有效数字, 这种表示数值的方法也叫做科学记数法。例如, $(15000 \pm 1000)\text{cm}$ 可记为 $(1.5 \pm 0.1) \times 10^4\text{cm}$; $(0.00045 \pm 0.00001)\text{kg}$ 可记作 $(4.5 \pm 0.1) \times 10^{-4}\text{kg}$ 。

1.2.4.3 有效数字的运算规则

将数值四舍五入, 使其位数与最不准确的数值位数相符。

(1) 和、差运算

以小数点右边位数最少的数值为基准, 按照四舍五入规则, 将其余数值小数点右边保留与其相同的位数。

【例 4】 求 6.38 、 0.216 、 28.521 与 111.535 的和。

解 按有效数字的舍入原则, 以 6.38 为基准, 将其余数值化简为 0.22 、 28.52 与 111.54 , 然后求和, 得 146.66 , 如下式

$$\left. \begin{array}{r} 6.38 \\ 0.216 \\ 28.521 \\ 111.535 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{r} 6.38 \\ 0.22 \\ 28.52 \\ 111.54 \\ \hline 146.66 \end{array} \right.$$

【例 5】 求 18.406 减去 2.32446 与 8.0745 的和。

解 按四舍五入原则, 将上面数值化简为 18.406 、 2.324 与 8.075 , 计算得 8.007 。

$$\left. \begin{array}{r} 18.406 \\ 2.32446 \\ 8.0745 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{r} 18.406 \\ 2.324 \\ 8.075 \\ \hline 8.007 \end{array} \right.$$

(2) 积、商运算

将数值四舍五入, 使所有数值与含最少有效数字位数的数值具有相同位数。

【例 6】 求 0.4536 、 0.01305 与 217.16 之积, 再除以 0.164 与 3.677 之积。

$$\text{解} \quad \frac{0.4536 \times 0.01305 \times 217.16}{0.164 \times 3.677} \Rightarrow \frac{0.454 \times 0.0131 \times 217}{0.164 \times 3.68} = 2.14$$

在数据处理过程中, 不确定度的有效数字一般取 1 位, 相对不确定度取 1~2 位。

1.2.5 其他数据处理方法

为了正确处理数据, 实验中应使用黑色或蓝黑色钢笔或水性笔全面、准确记录数据, 尽量用表格。不仅要记录被测物理量的数值及单位, 还应记录实验条件、仪器型号与规格、时间等信息。记录数据应实事求是, 不能人为改动, 更不能抄袭他人数据, 离开实验室后不得擅自涂改原始数据。

除了前两节介绍的数据处理方法外, 还有下面几种常用的数据处理方法。

1.2.5.1 列表法

在记录和处理实验数据时, 常常将所测得数据列成表。数据列表后能够简单明确地表示出相关物理量之间的对应关系, 便于检查结果是否合理, 及时发现问题, 减少或避免错误, 有助于找出各个物理量之间的变化规律, 进而求出经验公式等。

列表法就是按照实验要求设计表格, 用于记录原始数据, 便于整理、计算或作图的数据处理方法。列表应注意以下几点:

- ① 表格应便于记录、计算和检查;
- ② 各个物理量的符号及单位要标注清楚、规范;
- ③ 记录数据的有效数字位数要正确, 计算数值和误差的有效数字位数要合理。

表 1.2 是电学元件伏安特性研究实验用到的表格之一。

表 1.2 金属膜电阻的伏安特性曲线

次数/ n	1	2	3	4	5	6
电压 U/V	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	6.00
电流 I/mA						
电阻 R/Ω						

1.2.5.2 作图法

作图法是研究物理量之间变化规律的重要手段之一。它可以直观地表示物理量之间的定量关系, 以便寻找或总结经验公式。测量次数是有限的, 通过图形的延展, 可以推测未测点的情况, 对测量范围以外的变化趋势做出推断。

通过图形还可以方便地得到许多有用的参量, 比如极值、最大值、最小值、直线的斜率和截距、弧形的曲率等。

(1) 常见图形

在物理实验中经常绘制的图形有曲线图 (图 1.2)、折线图 (图 1.3)。

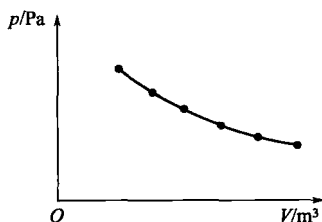


图 1.2 曲线图

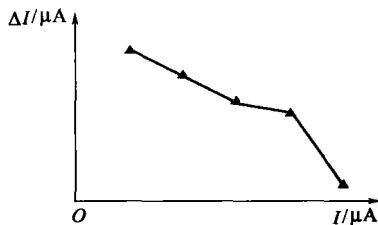


图 1.3 折线图

(2) 作图注意事项

① 根据物理量之间的函数关系，选择合适的坐标纸。坐标纸上选择适当的比例，画出坐标轴的方向，标明物理量及其单位符号与分度值，作图区域应占图纸的一半以上。在图纸上应端正地写上图名、姓名和日期等信息，如图 1.4 所示。

② 数据点用“+”、“×”或“△”等符号表示。数据点应居于符号中心，符号大小应与绝对不确定度大小对应。若在同一图纸上绘制多条曲线，不同曲线的数据点应采用不同符号。

③ 将数据点连成直线或光滑曲线时，不要强求让曲线通过所有数据点，但两侧的点数要大体相当，点到线的距离尽可能近，个别偏离过大的点应重新核对，若系失误应予删去。

④ 坐标原点不一定是数据零点，应根据数据点的范围来选择。坐标轴的比例应与有效数字位数对应。原则上倒数第二位有效数字应与图纸上的最小分格对应。

为了减小作图误差，可以借助某些计算机软件绘图，比如 Ms Excel 的图表功能就能完成许多实验曲线的绘制。图 1.4 就是由 Ms Excel 实现的。

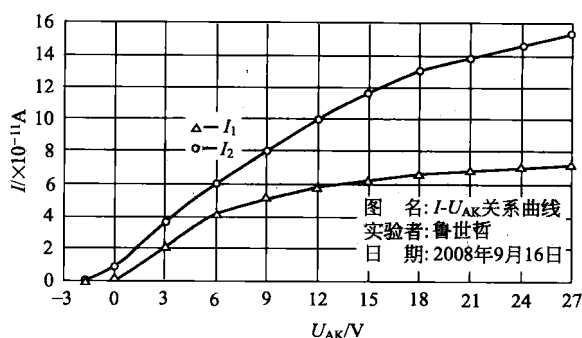


图 1.4 $I \sim U_{AK}$ 关系曲线

1.2.5.3 逐差法

逐差法是数据处理的常用方法，通常用于等间隔线性变化数据的处理。将 n 对测量值分别按次序各分成两组，求各对应序号测量值之差，分别求其算术平均值，并由线性关系确定相关常数，然后求出线性函数。逐差法可以避免作图法的随意性，合理计算误差，计算简便、迅速，因而得到了广泛应用。

下面以拉伸法测杨氏模量为例介绍逐差法。

表 1.3 $r_i \sim m_i$ 关系

次数/ i	1	2	3	4	5	6
m_i/kg	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
$r_i^+ / 10^{-2} \text{m}$	6.25	6.67	7.10	7.50	7.89	8.32
$r_i^- / 10^{-2} \text{m}$	6.30	6.71	7.13	7.52	7.93	8.32
均值 $r_i / 10^{-2} \text{m}$	6.28	6.69	7.12	7.51	7.91	8.32

设钢丝长度变化量与负荷之间的关系为 $r = a + bm$ ，式中， a 、 b 为待定常数，由实验测量得到表 1.3 的数据。

将表 1.3 第 2 行与第 5 行数据按序号大小分为两组：1~3 为一组，4~6 为另一组。计算两组对应序号伸长量之差为 $\Delta r_i = r_{i+3} - r_i$ ，即