



普通高等院校应用型人才培养“十三五”规划教材

大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 明庭尧 张 丰 谢金利
副主编 谢治军 吴钰涵



西南交通大学出版社

普通高等院校应用型人才培养“十三五”规划教材



大学物理实验

DAXUE WULI SHIYAN

主 编 ◎ 明庭尧 张 丰 谢金利

副主编 ◎ 谢治军 吴钰涵

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理实验 / 明庭尧, 张丰, 谢金利主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2018.8
普通高等院校应用型人才培养“ 十三五” 规划教材
ISBN 978-7-5643-6320-8

I. ①大... II. ①明... ②张... ③谢... 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 (2018) 第 177259 号

普通高等院校应用型人才培养“ 十三五” 规划教材
大学物理实验

主编 明庭尧 张 丰 谢金利

责 任 编 辑	张宝华
助 理 编 辑	赵永铭
封 面 设 计	何东琳设计工作室
出 版 发 行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都中永印务有限责任公司
成 品 尺 寸	185 mm× 260 mm
印 张	13
字 数	323 千
版 次	2018 年 8 月第 1 版
印 次	2018 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-6320-8
定 价	38.00 元

课件咨询电话: 028- 87600533
图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

大学物理实验课程是高校理工科学生接受系统实验方法与基本实验技能的开端，覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法和手段，在激发学生的创新意识和培养应用型人才等方面具有其他课程不可替代的作用。

本书是根据理工科类大学物理实验课程教学基本要求，以重庆大学城市科技学院多年的实验讲义为基础，并参考部分兄弟院校相关教材编写而成的。具有以下特点：

- (1) 教材内容传承了传统实验项目的精华。
- (2) 理论联系实际，推出了一些具有时代感，与生产实践紧密相连的实验项目。
- (3) 突出了实用性、针对性和可行性。

本书共分绪论、测量误差与数据处理的基本知识、预备物理实验、基础物理实验、近代物理实验、设计性实验 6 个部分。每个实验均对学生提出了相应要求，并留有思考题，以提高学生对该实验的认知水平。本书可作为相关专业的应用型本科和部分专科的大学物理实验教材。

本书是该校和兄弟院校结合学校实际，在使用实验讲义的过程中，多次修订逐步积累而成。参加编写的老师有明庭尧、张丰、谢金利、谢治军、吴钰涵、王丽娇、李芑等。在这里我们还要感谢西南大学已退休的郑瑞伦，重庆文理学院的龙晓霞和杜一帅等同志，他们也为本书提供了不少的素材和建议。本书的出版得到了西南交通大学出版社的关心和支持，在此表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，疏漏和不妥之处在所难免，望读者和各位同仁批评指正！

编 者

2018 年 5 月

目 录

绪 论	1
0.1 大学物理实验的地位和作用	1
0.2 大学物理实验课的目的和任务	1
0.3 能力培养的基本要求	2
0.4 大学物理实验课的基本环节	2
0.5 实验室学生遵守的实验规则	3
第 1 章 测量误差与数据处理的基本知识	5
1.1 测量及其误差	5
1.2 误差的估算	7
1.3 有效数字及其运算	9
1.4 实验数据的处理方法	11
习题	14
第 2 章 预备物理实验	16
实验 1 常用方法测长度	16
实验 2 物理天平测质量	19
第 3 章 基础物理实验	23
3.1 力学实验	23
实验 3 杨氏模量的测量	23
实验 4 声速测量	30
实验 5 单摆实验	35
实验 6 三线摆测物体的转动惯量	37
实验 7 扭摆法测物体的转动惯量	42
实验 8 牛顿第二运动定律的验证	45
实验 9 导轨实验中系统误差的分析与补正	47
3.2 热学实验	54
实验 10 PN 结正向压降与温度关系的研究	54
实验 11 导热系数的测量	59
实验 12 空气比热容比的测量	65
实验 13 热温变化测量实验	69
实验 14 电热法测定热功当量	74

3.3 电磁学实验	77
实验 15 静电场的描绘	77
实验 16 制流电路与分压电路	83
实验 17 惠斯通电桥测电阻	87
实验 18 用电位差计测电动势	89
实验 19 电子示波器的使用	92
实验 20 磁滞回线的测绘	96
实验 21 霍尔效应	100
实验 22 霍尔效应测螺线管磁场	104
实验 23 电子束实验	109
3.4 光学实验	117
实验 24 薄透镜焦距的测量	117
实验 25 分光计的调整与三棱镜玻璃折射率的测量	121
实验 26 等厚干涉——劈尖干涉和牛顿环	129
实验 27 光栅衍射	134
实验 28 光偏振现象的研究	137
实验 29 固体折射率实验	141
实验 30 单缝、单丝衍射光强分布实验	143
第 4 章 近代物理实验	147
实验 31 RLC 串联电路暂态过程的研究	147
实验 32 光电效应法测普朗克常数	151
实验 33 用密立根油滴仪测定基本电荷	156
实验 34 多普勒效应综合实验的研究	160
实验 35 光敏电阻特性实验	166
实验 36 太阳能电池基本特性测定	171
实验 37 超声 GPS 三维定位实验	175
实验 38 气体放电等离子体特性实验	178
第 5 章 设计性实验	187
实验 39 万用表的设计与定标	187
实验 40 望远镜的设计及检测	190
附表	192
参考文献	201

绪 论

0.1 大学物理实验的地位和作用

物理学是一门实验科学，它的基础是实验，无论是物理理论的建立、物理定律的发现还是对物理理论的检验，都必须以严格的科学实验为基础。实验是一种人们更有意识的更自觉的实践活动，它总是与理论相结合，并在已确定的理论指导下向认识的新的领域探讨，它是人们探索物理世界规律性的必不可少的手段和武器。在当前物理学各个领域的发展中，实验更占着特别重要的地位。以实验为基础，坚持实验与理论相结合，便是物理学发展走过的道路。

物理规律的发现与物理理论的建立必须以实验为基础，并受到实验的检验。例如：杨氏的双缝干涉实验使光的波动学说得以验证；赫兹的电磁波实验使麦克斯韦的电磁场理论获得普遍承认；爱因斯坦的光量子假说建立在光电效应实验的基础上；伽利略从自己大量的实验结果中总结出力学基本原理；开普勒的三大定律是依据第谷等人所积累的大量观测资料总结出来的；在伽利略、开普勒、胡克等人的实验观测及其工作的基础上，牛顿总结归纳出“万有引力定律”，建立了经典力学体系，海王星的发现是牛顿理论最光辉的证明。物理学的每一次重大进步都离不开实验的推动。正是 19 世纪末，黑体辐射、光电效应、原子光谱、放射性等实验的研究，引起了经典热物理的危机，最终导致了近代物理学的诞生。

大学物理实验是专业基础课“大学物理”的配套实验课程，是进行实验基本训练的必修基础课，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端，是培养实验能力、提高科学素质的重要基础，在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际等方面具有不可替代的作用。

0.2 大学物理实验课的目的和任务

物理实验已发展为一门独立的科学实验课程，是学生进入大学后接受系统的实验方法和实验技能训练的一门基础课程。同时，物理实验又是一系列后续专业实验课的重要基础。设置物理实验课的目的和任务是：

(1) 学习并初步掌握物理实验的基本知识、基本方法和实验操作的基本技能。

(2) 培养和提高学生观察、分析实验现象的能力。通过对实验中特定的物理现象的反复观察、定量测量和数值分析，加深对相关物理概念和物理规律的理解。

(3) 培养和提高学生的科学实验素养。培养学生理论联系实际和实事求是的科学态度, 严肃认真的工作作风, 主动研究的探索精神和爱护公物、遵守纪律、团结协作的优良品德。

0.3 能力培养的基本要求

(1) 独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题, 掌握实验原理及方法、做好实验前的准备; 正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告; 培养学生独立实验的能力, 逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法, 具有初步的分析与研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法, 逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验, 进行初步的具有研究性或创意性内容的实验, 激发学生的学习主动性, 逐步培养学生的创新能力。

0.4 大学物理实验课的基本环节

物理实验课是在老师的指导下, 学生独立进行物理实验的实践活动。因此, 在实验的整个过程中应当发挥学生的主观能动性, 有意识地培养和锻炼他们的独立工作能力和严谨的工作作风。通常每个实验的学习都要经历三个环节。

1. 实验的准备预习

实验前必须认真阅读实验相关内容, 做好必要的预习, 才能按质按量按时完成实验。同时, 预习也是培养自学的一个重要环节。

预习时重点解决以下三个问题:

- (1) 本次实验最终要得到什么样的结果?
- (2) 本次实验的理论依据是什么?
- (3) 采用什么方法、哪些步骤去完成这个实验?

最后写出预习报告。

2. 实验的进行

实验的进行是学生在实验室中动手操作、认真实验、观察实验现象、测取实验数据的过程, 是物理实验的主要环节。

(1) 学生进入物理实验室后要自觉遵守实验室规章制度, 认真听取实验指导教师的讲解, 进一步明确本次实验的要求、操作要领及注意事项等。

(2) 熟悉实验仪器后,要合理安排、细心调试,将所用实验仪器装置调整到最佳工作状态。

(3) 在实验过程中,仪器可能会出现故障,在教师的指导下,分析故障的原因,学会排除故障。

(4) 在实验操作过程中,必须正确地使用实验仪器,仔细观察实验现象并进行分析,应及时、准确地读取实验数据。实验原始数据不可随意涂改,更不许随意编造。遇到可疑之处要反复测试,加以验证。

(5) 操作实验完毕,“实验原始数据”经过实验指导教师审阅认可后,将实验用品和用具整理摆放整齐,而后方能离开实验室。

3. 实验总结

实验后,要及时对实验数据、实验现象进行分析、处理。数据处理后,应给出实验结果,最后写出一份实验报告。

书写实验报告的过程是对实验数据进行科学处理,对实验结果进行综合分析,对实验工作进行分析总结的过程,是培养学生独立从事科学实验工作能力的一个重要环节。因此要求物理实验课后要及时完成物理实验报告,并在指定的时间内交实验指导教师批阅。

实验报告要用统一格式的物理实验报告纸书写,数据要齐全,处理要准确,叙述讨论要简要,字迹要清晰、整洁。严格禁止抄袭他人实验报告的行为。实验报告的内容主要包括:

(1) 实验目的。

(2) 实验仪器:要注明该实验所使用的主要实验仪器的规格、型号和编号。

(3) 实验原理和方法:原理应用写得简明扼要,如列出实验所依据的主要公式,说明式中各物理量的意义及公式的适用条件等,包括实验用仪器的原理图、电路图、光路图,以及必要的实验操作说明。

(4) 数据记录及处理:数据一定要列表记录,原始数据要齐全,处理数据一定要列出计算公式,写出计算过程,并按要求绘制必要的实验图线等。

(5) 分析与讨论或回答实验问题:分析实验中的误差,讨论实验中观察到的异常现象,对实验方法或实验装置进行改进的建议,回答教师指定的思考题等。

0.5 实验室学生遵守的实验规则

(1) 学生实验前要认真预习实验指导书,明确实验目的和操作规程后方可进行实验,不做预习和无故迟到者不得进入实验室。

(2) 学生进入实验室,要严格遵守实验室的规章制度,服从教师指导,在指定地点进行实验。

(3) 在实验室内不得大声喧哗、打闹,不得吸烟、随地吐痰、乱扔纸屑及其他杂物。未经允许,不得操作、摆弄与本实验无关的仪器设备。

大学物理实验

(4) 学生按照实验要求做好准备，经指导教师检查许可后，方可接通电源或启动设备；实验过程中要精心使用仪器设备，严格遵守操作规程，注意节约水、电及实验原材料，因违反操作规程而损坏仪器设备要赔偿。

(5) 实验过程中，必须注意安全，防止人身和设备事故的发生。若仪器设备发生故障或损坏时，首先要切断电源并报告指导教师及时处理。

(6) 实验完毕后，应将仪器设备、用具及场地整理复原，经指导教师检查合格后，方可离开实验室。

(7) 学生课外时间到实验室做实验，须经实验室相关管理人员同意。

第 1 章 测量误差与数据处理的基本知识

1.1 测量及其误差

1.1.1 物理测量的概念

进行物理实验时，不仅要定性地观察各种物理变化的过程，而且还要定量地测定相关物理量的大小，便于定量地研究各相关物理量之间的变化关系。在进行实际测量时，必须采用统一的单位作为确定各个物理量的标准。按照现行国家标准。物理实验中物理单位采用“国际单位制”：国际单位制中质量的单位为千克（kg），时间的单位为秒（s），长度的单位为米（m），电流的单位为安培（A）等。测量就是将待测量与标准单位的物理量进行比较，测量的结果就是标准单位物理量的倍数。

1.1.2 物理测量的分类

按照获得实验测量数据方式的不同，一般物理测量过程可分为直接测量和间接测量。

1. 直接测量

直接测量就是观测者将待测物理量直接与测量工具或测量仪器上的标准单位物理量相比较，获得实验测量数据。例如：用米尺测量物体的长度；用天平测量物体的质量；用温度计测量物体的温度；用电流表测量流过导体的电流等。

2. 间接测量

大多数待测量物理量无法或不便于直接与标准单位物理量进行比较，即不能通过测量仪表直接测出。因此，需要利用物理公式、物理定律和计算公式，通过间接的方法进行定量测量。例如：单摆法测重力加速度，先测出单摆的摆长 L 和周期 T ，再根据计算公式求得重力加速度 $g = 4\pi^2 L / T^2$ ，这一测量过程就称为“间接测量”。

1.1.3 测量误差的定义和分类

1. 误差的定义

在实验测量中，由于受到测量仪器、测量方法、测量时间、测量者的感觉器官的分辨力以及环境条件的限制，测量的结果都只能是被测物理量的近似值。

（1）真值：待测物理量所具有的客观的真实数值称为真值。

(2) 测量值：通过测量而得到的待测物理量的值。

(3) 绝对误差：物理量的测量值和真值之间总存在差异，把测量值 N 与被测物理量的真值 N_0 之差的绝对值 ΔN 定义为测量的绝对误差，简称误差。即

$$\Delta N = |N - N_0| \quad (1.1)$$

(4) 相对误差：为了评价一个实验测量结果的优劣，不仅需要确定测量数据的绝对误差的大小，还需要知道被测物理量本身的大小。为此，引入相对误差的定义：

$$E_r = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

(5) 测量结果的表示：

$$N = N \pm \Delta N (\text{单位}), E_r = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\% \quad (1.3)$$

2. 误差的分类

根据在实际测量过程中对测量误差来源的综合分析，将测量误差分为系统误差、偶然误差和过失误差三类。

(1) 系统误差。

系统误差的特征是具有确定性。在相同条件下（把观测者、测量仪器和测量方法等完全相同），多次测量同一待测物理量时，测量的误差始终保持恒定，或按照一定的规律变化。

系统误差的主要来源有：

① 仪器误差：由于实验仪器本身的设计缺陷，或没有严格按照规定条件使用仪器，而给测量结果带来的误差。例如：在电学实验中仪器仪表的刻度不准、零点失准等。

② 理论或方法误差：由于测量所依据的理论公式本身的近似性，或实验条件和测量方法不能达到理论所规定的要求而给测量结果带来的误差。例如：单摆的周期公式的成立条件是摆角趋于零，而在小角度摆动的实验条件下，周期关系式只是一个近似公式，因此，测出的重力加速度 g 也只是一个近似值；用伏安法测电阻，利用了欧姆定律的关系式，如果没有考虑电流表和电压表的内阻的影响，测得的电阻就会存在一定的系统误差。

③ 环境误差：测量过程中，由于测量工作现场周围的温度、气压、电磁场等环境条件发生变化（偏离规定条件）而产生的误差。例如：精确测定某物件的体积时，未考虑物体因受热而膨胀的影响；精密测定某物体的重力时，忽略了空气浮力产生的影响等。

④ 人身误差：由于测量者缺乏必要的基本训练、实验经验不足或不正确的心理习惯而给测量结果带来的误差。

实验中系统误差的发现和清除有时比较简单，有时又相当复杂和困难，但原则上讲总可以通过改善（或校准）仪表、改进测量方法、修正测量结果、改善实验环境以及通过训练纠正观测者本身的习惯偏向等方法来减少系统误差。直到其对实验测量结果的影响可以忽略不计为止。

(2) 偶然误差。

在实验中即使消除了系统误差，实验者在相同条件下对同一物理量进行多次测量时，各

次测量值之间也往往不相同，即测量值仍存在误差。

这类误差主要是由于观测者在对测量数据进行接近于或低于测量工具最小分辨率的一位估读时，感官分辨能力有限，以及环境条件无规律的起伏变化所造成的。尽管这是一位估读的测量数值却有着特殊的意义的。

偶然误差的特征是具有随机性。对多次测量中某一次测量值而言，测量结果的绝对误差的大小完全不可预料，即完全是偶然的（随机的），因而也将这类误差称为随机误差。

对大多数物理实验而言，多次测量结果的偶然误差服从统计规律，呈正态分布。因此可用概率统计的方法来处理偶然误差。

偶然误差遵从如下规律：

- ① 单峰性：绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- ② 对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率基本相等。因而当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，将多次测量的偶然误差相加，则正负误差将成对抵消，误差总和趋于零。
- ③ 有界性：绝对值很大的误差出现的概率趋于零，即在一定条件下，误差的绝对值不超过一定限度。

由于偶然误差是由某些不能完全控制的偶然因素所引起的，所以不能通过改善仪器、改进测量方法等办法来减小和消除它，但由于其遵从上述统计规律，可采取适当增加测量次数取其算数平均值的方法使测量值更接近真值。

（3）过失误差。

由于实验者使用仪器的方法不正确，实验方法不合理，粗心大意，过度疲劳，记错数据等引起的。这种误差是人为的，只要实验者采取严肃认真的态度，具有一丝不苟的作风，过失误差是可以避免的。

1.2 误差的估算

实验中过失误差应该完全避免，系统误差原则上可以设法减小到可以忽略不计，因而在此只讨论偶然误差的估算。

1.2.1 单次直接测量量误差的估算

在物理实验中，由于实验条件不许可，或对测量准确度要求不高等原因，对一个物理量 N_0 只进行了一次测量，测量结果为 N ，这时应该根据实际情况，对测量值的误差进行具体合理的估算。

在一般情况下，对于偶然误差很小的测量值，可利用仪器仪表上注明的仪器精度等级 $K = \frac{|\Delta N_{\max}|}{N_{\text{量程}}} \times 100$ 来估计测量结果的误差 $\Delta N \approx \Delta N_{\max}$ 。测量结果表示为 $N = N \pm \Delta N$ （单位）， $E_r = \frac{\Delta N}{N_0} \times 100\%$ 。

对于没有标明精度等级的测量工具和仪表，也可以取测量工具最小刻度的 1/10 位，在测

量结果的最后表达式中，绝对误差只能保留一位有效数字，而测量真值的最低一位应与绝对误差保留位取齐。

1.2.2 多次测量量误差的估计

在一般情况下，我们总是采用增加测量组数的方法来减小实验测量结果的偶然误差。如果相同实验条件下对某个待测物理量 N 进行了 n 次重复测量，其测量值分别为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ ，则多次测量结果的算术平均值为

$$\bar{N} = \frac{1}{n}(N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (1.4)$$

绝对误差中算术平均误差与均方根误差都可作为确定测量结果误差的量度，它们都表明了在一组多次测量的实验数据中各个测量数据之间的分散程度。

$$\text{算术平均误差为 } \overline{\Delta N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{N} - N_i| \quad (1.5)$$

$$\text{均方根误差为 } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{N} - N_i)^2} \quad (1.6)$$

由正态分布曲线的分析可以证明，在相同实验条件下进行的多次测量中，任一测量结果 N_i 出现在 $N \pm \sigma$ 范围内的概率为 68.3%，而测量数据出现在 $N \pm 3\sigma$ 范围内的概率高达 99.7%，因此又称 $\pm 3\sigma$ 为极限误差。在进行的有限次测量中，如果某个测量值的误差超过了 $\pm 3\sigma$ ，则可以判定该测量值为非正常值，并予以剔除。

正式的误差分析和计算中都采用均方根误差作为偶然误差的量度，又称其为标准误差。对于初学者来说，主要是树立误差的概念，为简单起见，一般采用算术平均误差进行实验误差分析。多次测量值的结果表示为 $N = N \pm \Delta N$ （单位）， $E_r = \frac{\Delta N}{N} \times 100\%$ 。

1.2.3 间接测量量误差的估计

由于间接测量的测量结果，是由一些直接测量量代入特定的物理定律、物理公式和数学计算关系通过数学计算得出来的，既然计算关系中所包含的直接测量量都是存在误差的，那么间接测量量也必然有误差。

设 N 为一间接测量量，而 $A, B, C, \dots$ 分别为直接测量量，它们之间满足一定数学计算关系，即 $N = f(A, B, C, \dots)$

如果各直接测量量可以表示为

$$\left. \begin{aligned} A &= A \pm \Delta A \\ B &= B \pm \Delta B \\ C &= \pm \Delta C \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

将这些测量结果代入计算公式，便可求得间接的近真值 $\bar{N} = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \dots)$ ，当测量次数

无限增多时，此近真值与 N 的算术平均值是一致的。

间接测量量的结果表示为 $N = N \pm \Delta N$ (单位), $E_r = \frac{\Delta N}{N} \times 100\%$ 。

但是,间接测量量平均绝对误差 ΔN 的估算是比较麻烦的,在这里我们要借助高等数学多元函数求微分的处理方法,一般运算关系的间接测量量平均绝对误差计算公式可以用以下微分法求得

$$\Delta N = \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial f(A, B, C, \dots)}{\partial C} \right| \Delta C + \dots \quad (1.8)$$

由表 1.1 看出,和差运算的绝对误差等于各直接测量量的绝对误差之和;乘除运算的相对误差等于各直接测量量的相对误差之和;当间接测量量的函数关系中只含加减运算时,先计算绝对误差,再计算相对误差较为方便;当间接测量量的函数关系中含乘除运算时,先计算相对误差,再计算绝对误差较为方便。

表 1.1 常用运算关系的误差计算公式

运算关系 $\Delta N = f(A, B, C)$	绝对误差 ΔN	相对误差 $E_r = (\overline{\Delta N} / \overline{N}) \times 100\%$
$N = A + B + C$	$\Delta N = \Delta A + \Delta B + \Delta C$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots}{\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \dots}$
$N = A - B - C$	$\Delta N = \Delta A + \Delta B + \Delta C$	$\frac{\Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots}{\overline{A} - \overline{B} - \overline{C} - \dots}$
$N = A \cdot B$	$\Delta N = \overline{B} \Delta A + \overline{A} \Delta B$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}} + \frac{\Delta B}{\overline{B}}$
$N = A \cdot B \cdot C$	$\Delta N = \overline{B} \overline{C} \Delta A + \overline{A} \overline{C} \Delta B + \overline{A} \overline{B} \Delta C$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}} + \frac{\Delta B}{\overline{B}} + \frac{\Delta C}{\overline{C}}$
$N = A^n$	$\Delta N = n \overline{A}^{n-1} \Delta A$	$n \frac{\Delta A}{\overline{A}}$
$N = \frac{A}{B}$	$\Delta N = \frac{\overline{B} \Delta A + \overline{A} \Delta B}{\overline{B}^2}$	$\frac{\Delta A}{\overline{A}} + \frac{\Delta B}{\overline{B}}$
$N = \sin A$	$\Delta N = (\cos \overline{A}) \Delta A$	$(\cot \overline{A}) \Delta A$
$N = \cos A$	$\Delta N = (\sin \overline{A}) \Delta A$	$(\tan \overline{A}) \Delta A$

1.3 有效数字及其运算

在实验数据处理中,有效数字是一个重要问题,初学者往往发生错误。

1.3.1 有效数字

正确而有效地表示测量和实验结果的数字,称为有效数字。有效数字是由若干位准确数字和一位欠准确数字(最末一位)构成的。测量结果的有效数字位数的多少,是与测量过程中所使用的测量工具密切相关的。例如:“126.400 mm”这一数据一定不是用米尺测量的,而可能是用游标卡尺测量的;“126.4 mm”则可能是用米尺测定的。

在实际测量过程中，有效数字的最末一位虽然是欠准确的（对测量工具的最小刻度 $1/10$ 位数值所做的估读），但它在一定程度上反映了被测量的实际大小，因此也是有效的，是必不可少的。例如：1.35 的有效数字是 3 位，3 296.399 的有效数字是 7 位，1.230 的有效数字是 4 位。

有效数字的位数与小数点的位置无关。因此，用以表示小数点单位的“0”不是有效数字。例如：1.35 cm 换成以毫米为单位时为 13.5 mm，以米为单位时，则为 0.013 5 m，这三种表示法完全等效，均为三位有效数字。

当“0”不是用作表示小数点位置时，0 和其他数码 1, 2, 3, ... 具有同等地位，都是有效数字。例如：1.003 5 cm 有效数字为 5 位；1.00 cm 有效数字是 3 位；1.000 0 cm 有效数字是 5 位等。显然，测量数据最后的“0”既不能随便加上，也不能随便去掉。

1.3.2 确定测量结果的有效数字的方法

由于测量误差只是我们在测量过程中对测量结果出现的概率达到一定比率的一个范围的估计，因此，在一般情况下。误差的有效数字一般只取一位，两位和两位以上的误差是没有意义的。以后我们一律取偶然误差为一位有效数字。

将有效数字的定义和偶然误差取一位结合起来，便能写出测量结果的数值，即：任何测量结果，其数值的最后一位要与误差所在的这一位取齐，例如： $L = (1.00 \pm 0.02) \text{ cm}$ 。

因此，用测量工具进行测量读数时，必须记读到估读位，即测量工具的最小刻度的 $1/10$ 位。例如：用最小刻度位为 0.01 mm 的螺旋测微计测金属片的厚度 D 时，要记录到估读的 $1/1000 \text{ mm}$ 位，最后结果为： $D = 2.854 \text{ mm}$ 。

我们要养成习惯，在写下测量结果时，最后一位便是误差所在位。看到其他人写出的测量结果时也应这样理解。

1.3.3 有效数字与测量相对误差的关系

根据有效数字的物理含义，有效数字的最后一位就是测量误差所在位。因此，大体上说，有效数字位数越多，测量的相对误差就越小；有效数字位数越少，测量的相对误差就越大。

一般来说，2 位有效数字对应于 $1/10 \sim 1/100$ 的测量相对误差，3 位有效数字对应 $1/100 \sim 1/1000$ 的相对误差，其余类推。因此，我们在进行测量数据精度评价时，有时讲测量相对误差有多大，而有时讲测量结果有几位数字，两者之间是密切相关的。

1.3.4 测量结果的科学表达方式

如果一个测量数据的数值很大，而有效数字位数又不多，则测量数据数值的数字表示就会与有效数字位数发生矛盾。这时，必须将测量数据用科学表示法表示为

$$N = \boxed{} \cdot \boxed{} \boxed{} \boxed{} \times 10^n (\text{单位})$$

准确数

欠准确数(估读数)

例如,测量数据 $L = (0.006\,23 \pm 0.000\,03)\text{ m}$ 可以写成 $L = (6.23 \pm 0.03) \times 10^{-3}\text{ m}$ 。这种科学表示法的写法不仅简洁明了(尤其是当数值很大或很小时),而且可使数字计算及测量结果的有效数字的定位更加科学准确。

1.3.5 测量结果有效数字的计算规则

在对测量数据进行数学运算时,参加运算的分量可能很多,各分量数值的大小及有效数字位数也不尽相同。在运算过程中,经常会遇到计算数字的位数越来越多,或在除法运算中出现除不尽的情况,这将使我们的实验数据的处理不胜繁复。即使用计算器,也会遇到中间数的取位问题。我们规定对实验测量有效数字的计算必须遵循以下的运算规则:

(1) 测量结果的有效数字中准确数与准确数之间的运算结果仍是准确数。

(2) 测量结果的有效数字中欠准确数与准确数之间的运算结果是欠准确数,但是,其运算进位的数将是准确数。

(3) 加减运算时,最后结果的小数点后的位数与参与运算的各数据中小数点后的位数最少的相同。

(4) 乘除运算时,最后结果的有效数字的位数与参与运算的各数据中有效数字位数最少的相同。

(5) 乘方、开方的有效数字与其底的有效数字位数相等。

(6) 在间接测量量的误差运算过程中,绝对误差可取两位有效数字,最后结果保留一位有效数字;间接测量量的近真值有效数字位数由绝对误差决定,最低位与绝对误差的保留位取齐。

(7) 在最后的运算结果中,只能保留一位欠准确数。尾数舍取法则是:对于第二位欠准确数,“大于5则入,小于5则舍去,等于5取偶数”,即将应保留的最末一位凑成偶数。我们要按照这一法则一次性舍取至所需的位置,而不可经多次舍取至所需的位置。

1.4 实验数据的处理方法

数据处理是实验的重要组成部分,它来自实验设计方案,但反过来从某种角度说,整个实验过程无不是在数据处理指导下进行的。数据处理有极其丰富的内容,是实验者的素质、能力、水平的重要体现。现就物理实验中常用的一些基本的数据处理方法做简要介绍。

1.4.1 列表法

列表法就是根据实验方案把有关数据有条理地列成表格,通过表格可以明确地看出有关物理量之间的对应关系,找出有关物理量之间规律性的联系。另外通过数据列表还可发现和避免实验中的错误。列表要求:

(1) 栏目清楚,设计合理,使其便于看出有关物理量之间的对应关系及规律性的联系。

(2) 物理量名称(或符号)和它的单位要写在同一栏目中,不要在每个数据后都写上一个单位。