

大学物理 实验教程

(工科)

主 编 金 重
副主 编 刘金环
编 著 金 重
刘金环
朱建民
王秋芬
李文清

DaxueWuliShiyanJiaocheng

南开大学出版社

UO-23
J544

大学物理实验教程

(工科)

主 编 金 重
副主编 刘金环
编 著 金 重 刘金环
朱建民 王秋芬
李文清

南开大学出版社
天 津

内 容 提 要

本书依据原国家教委颁发的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》编写。

本书收入实验 24 个, 选题不仅有力、热、电、光等传统实验, 也有非电量的电测等应用性综合实验。每个实验均有学习要求和预习自测题; 提供了较丰富的额外学习材料、设计内容和观察内容。书末附有物理实验仪器、实验方法和测量方法、实验装置的调整和操作、设计性实验和观察性实验内容等四个索引。

本书参考国家计量技术规范 (JJF1059—1999), 从不同于传统“误差理论”的一种新的角度引入“不确定度”来评价测量结果。

本书具有普适性, 适合作为高等院校工科各专业物理实验课程教材, 也可供一般工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验教程: 工科/金重主编. —天津: 南开大学出版社,
2000. 11 (2003. 9 重印)
ISBN 7-310-01445-6

I. 大... I. 金... 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(2000)第 27915 号

出版发行 南开大学出版社
地址: 天津市南开区卫津路 94 号 邮编: 300071
营销部电话: (022)23508339 23500755
营销部传真: (022)23508542
邮购部电话: (022)23502200

出版人 肖占鹏
承 印 南开大学印刷厂印刷
经 销 全国各地新华书店
版 次 2000 年 11 月第 1 版
印 次 2003 年 9 月第 2 次印刷
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 17
字 数 430 千字
印 数 3001—6000
定 价 25.00 元

序

高等工业学校物理实验课程仅 60 学时，可纳内容很受限制；加之目前物理课程的讲授体系又挤掉了物性知识，亟缺联系实际；当前新技术发展趋势正日渐光机电算综合化，航空正是竞先采用新技术的部门。这就对物理实验提出了更高的要求。

此教材内容翔实，材料较丰富，文字流畅，表达明晰准确，较以往教材更易于培养学生的自学能力。学生课前仅阅读此教材即能较顺利地理解和完成课堂实验，避免课堂上“教师讲解，学生操作”之弊端。对于 60 学时可纳内容看，是充裕有余，有灵活内容可选：从教材对学生的要求看，能达工科院校“物理实验课程教学基本要求”，且有比较丰富的额外学习材料，以适应对学有余力生因材施教。同时给进一步教改留有较充分的余地，也对实验教师和实验技术人员提出了更高的要求。

本教材完全采用“不确定度”教学的尝试，或可减小以往“误差”教学的概念弯路，给学生早日养成使用不确定度的习惯，使其今后进入技术工作实践时，能尽快适应“技术规范”。因为现在科研和生产计量中，皆已采用不确定度表述实验结果。

随着进校学生水平的提高和实验室建设的进展，非电量电测传感器—计算机测控的触须—将在物理实验中逐步扩展。本教材中，力—电、热—电、磁—电、光—电等变换已有一定覆盖面，并将随计算机引入实验教学，为计算机采集、处理有关物理量等的综合实验作了铺垫。

物性测量（常带综合性）对工科学生是非常重要的，本教材也给予了必要的安排。足见主参编人员确是根据多年教学实践，认真总结舍取的。

本教材能较好地适应当前教学需要，其分块编排体例甚便于增删。相信通过进一步教改和实验条件的不断改善，再版时将能更臻完善。

谭成章

于天津南开大学物理学院

1999 年 4 月 29 日

致 读 者

1. 编写本教材的依据是国家教委 1986 年制定、1993 年修订的《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》(见附录 B, 以下简称《基本要求》)。多年来, 我们反复学习《基本要求》, 不断进行教学改革、不断总结, 形成了物理试验课程的“单元教学体系”, 完成了教育研究项目“物理实验课程的体系、内容、教学手段的研究与实践”, 作为课题研究成果之一的《物理实验教程》已使用两年。本教材就是在这些工作的基础上编写的。

2. 本教材的特点和使用方法

(1) 做成实验、测得数据并算出结果, 是实验课题本身的目的, 而不是作为一门课程的物理实验的教学目的。本门课程的目的、任务见《基本要求》。《基本要求》中的各项内容是通过一个个实验的累积来达到的, 因而通过完成每个实验具体学到哪些理论、方法、技能, 不仅教师要清楚, 而且学生在实验前就应明了, 这样才能学得主动。为此, 本教材的每一个实验都列出了学习要求, 我们希望他们在明确了学习要求的基础上预习实验和完成实验。

(2) 翻开目录的实验篇, 可以看到实验是分组编排的。做完了一、二两组实验, 学生已熟悉了实验课的程序以及电学实验、光学实验的基本操作和规则, 这是基础。三、四、五组的实验并列进行, 每组实验都是先易后难, 且后面的实验很可能用到前面的知识和技术, 我们尽量写出它们的前后联系, 希望读者注意和思考。第六组是应用性、综合性和近代物理实验, 目的是提高综合实验能力和了解物理实验技术的某些应用。大多数实验末还附有设计性实验并带有提示, 供有兴趣的同学选做。

(3) 某些仪器的使用方法或调整步骤写得十分详细。我们不主张在预备课或实验课上教师讲解, 而是希望学生自己看懂、自己操作, 就像将来工作时应读懂说明书正确使用仪器那样。并且进一步希望他们通过自己的思考, 理解这些操作的道理。这是培养实验能力的一个重要方面。

(4) 本教材把物理量的测量、仪器介绍、装置调整、操作技术等各方面的内容分别写在相应的实验项目里, 并适当拓宽了知识面。这种写法虽然对学习每一个实验提供了方便, 但使得实验知识分散、缺乏条理和系统。为弥补这一不足, 书末附有物理实验仪器、实验方法和测量方法、实验装置调整和操作技术三个索引, 这些索引可以作为学生总复习时的部分参考提纲。此外还把设计性实验和实验观察内容列出作为索引四。

3. 本教材的编写和出版是和近几年来我院对物理实验室投资力度加大、设备更新、条件改善、实验室的建设和发展紧密相连的, 本书的出版不仅是直接参加编写人员的劳动成果, 也是教研室全体同志(包括现已离开教研室的同志)多年辛勤工作的积累。参加本书编写的同志有: 刘金环(实验 1-1、2-1、3-2、3-3、3-4、4-3、6-1、6-2), 朱建民(实验 1-2、4-4、4-5、5-1、5-2、5-3、6-4、6-5), 王秋芬(实验 4-2), 李文清(实验 3-5、3-6)和金重(不确定度及数据处理篇、实验 1-3、2-2、3-1、4-1、6-

3)。全书由金重统稿。

4. 承蒙南开大学谭成章教授仔细校订全稿并为本书作序，国家技术监督局李慎安研究员审阅测量不确定度一章的第二稿；本教材的编写中，我们还学习了兄弟院校的物理实验教材和教学参考资料，从中吸收了有益的经验以及引用了清华大学、北京航空航天大学、西安交通大学、天津大学教材中的有关内容，在此致以深深的谢意。

大学物理实验这门课程虽已开设了几十年，但工科院校独立设课时间并不长，随着科技进步，它还在不断地改革；随着实验室的建设、发展，它也在不停地前进。也许这本教材几年后将会再版，真诚地欢迎各位同行和使用本教材的教师、学生提出宝贵意见，以利再版时修改。

编 者

1999年5月

于中国民航学院理学院

地 址：天津机场

邮政编码：300300

目 录

序

致读者

绪论..... (1)

不确定度及数据处理篇

第一章 测量和有效数字..... (4)

§ 1-1 测量..... (4)

§ 1-2 有效数字..... (5)

§ 1-3 测量结果的有效位..... (9)

第二章 测量的不确定度..... (10)

§ 2-1 测量的不确定度..... (10)

§ 2-2 标准不确定度的 A 类评定 (13)

§ 2-3 标准不确定度的 B 类评定 (19)

§ 2-4 合成标准不确定度和扩展不确定度..... (23)

第三章 数据处理方法..... (30)

§ 3-1 列表法..... (30)

§ 3-2 作图法..... (31)

§ 3-3 逐差法..... (35)

§ 3-4 最小二乘法和一元线性回归..... (38)

实 验 篇

第一组..... (46)

实验 1-1 用落球法测定液体的粘滞系数 (46)

实验 1-2 气垫导轨上的实验 (51)

1-2-1 气垫导轨 (51)

1-2-2 用极限法测定瞬时速度 (54)

1-2-3 动量守恒和机械能守恒 (57)

1-2-4 简谐振动的研究 (61)

实验 1-3 刚体转动惯量的测定 (66)

第二组..... (71)

实验 2-1 基本电学仪器的使用 (71)

2-1-1 电学实验基本知识 (71)

2-1-2	电阻的分压特性和限流特性	(75)
2-1-3	电阻的伏安特性	(79)
实验 2-2	透镜焦距的测量	(82)
2-2-1	光学实验基本知识	(82)
2-2-2	透镜焦距的测量	(86)
第三组		(95)
实验 3-1	霍尔效应及霍尔元件基本参数的测量	(95)
实验 3-2	自组直流单臂电桥	(103)
实验 3-3	电桥的应用	(109)
实验 3-4	用模拟法研究静电场	(118)
实验 3-5	自组电位差计	(125)
实验 3-6	电位差计的使用	(130)
第四组		(139)
实验 4-1	用测高仪测量长度	(139)
实验 4-2	等厚干涉实验	(147)
实验 4-3	菲涅耳双棱镜干涉实验	(157)
实验 4-4	分光计的调整和使用	(163)
实验 4-5	衍射光栅	(170)
第五组		(181)
实验 5-1	线胀系数的测定	(181)
实验 5-2	固定均匀弦振动的研究	(184)
实验 5-3	用拉伸法测定材料的杨氏模量	(189)
第六组		(198)
实验 6-1	声速测量和示波器的使用	(198)
实验 6-2	用非平衡电桥测量应变	(208)
实验 6-3	迈克尔逊干涉仪	(213)
实验 6-4	光的偏振	(221)
实验 6-5	全息照相	(228)
附件 A	国际单位制	(237)
附件 B	高等工业学校物理实验课程教学基本要求	(240)
附表一	长度测量	(242)
附表二	时间和频率测量	(244)
附表三	质量测量	(244)
附表四	温度测量	(245)
附表五	直流电流测量	(247)
附表六	直流电压测量	(249)
附表七	直流电磁感应强度的测量方法简介	(250)
附表八	常用光探测器	(252)

索引一 基本物理实验仪器·····	(254)
索引二 物理实验常用实验方法和测量方法·····	(255)
索引三 常用实验装置的调整和实验基本操作技术·····	(256)
索引四 设计性实验和观察性实验·····	(258)
主要文献和参考书·····	(260)
后记·····	(261)

绪 论

实验是人们研究自然规律、改造客观世界的一种特殊的实践形式和手段。通过实验发现自然规律、检验自然科学理论，工程设计和生产实际中的问题也要靠实验来解决。

实验不同于对自然现象的直接观察，也不同于生产过程中的直接经验。其特有的优点是：首先，可以利用实验方法控制实验条件，排除外界因素的干扰，从而能有效地突出被研究诸事物之间的某些重要关系；其次，可以把复杂的自然现象或生产过程分解成若干独立的现象和过程，进行个别的和综合的研究；第三，可以对现象和过程进行满足预期准确度要求的定量测量，以揭示现象和过程中的数量关系；第四，可以进行重复实验，或改变条件进行实验，便于对事物的各方面作广泛的比较和分析等。

本教程以物理实验知识、方法和技能为基点，选编了24个实验，旨在学生能通过实验实践来体验和熟悉科学实验的过程和特点。

一、物理实验的特点

学生在物理实验课中主要是通过自己独立的实验实践来学习物理实验知识、培养实验能力和提高实验素养，这个学习任务决定了作为实验课程的物理实验有以下几个特点：

1. 实验带有很强的目的性。无论是应用性实验、验证性实验还是探索性实验，几乎都是在已经确立的理论指导下的实践活动，在有限的时间内，不仅要完成实验课题（实验目的），而且还要完成学习任务（学习要求）。那种把实验课程看成是摆弄摆弄仪器、测测数据就达到目的的单纯实验观点是十分有害的。

2. 实验要采取恰当的方法和手段，以使所要观测的物理现象和过程能够实现，并达到符合一定准确度的定量测量要求。虽然方法和手段会随着科学技术和工业生产的进步而不断改进，但历史积累的方法仍是人类知识宝库精华的一部分，有了积累才能有创新，因此，从一开始就应十分重视实验方法知识的积累。

3. 实验中所包括的技能，其内容十分广泛。仪器的选择、使用和保养，设备的装校、调整和操作，现象的观察、判断和测量，故障的检查、分析和排除、……，它有众多的原则和规律，可以说它是知识、见解和经验的积累。唯有实践、既动手又动脑地不断实践，才有可能获得这种技能，单凭看书是不可能学到的。

4. 实验需要用数据来说明问题，数据是实验的语言。物理实验中数据处理有各种不同的方法和特定的表达方式。测量结果、验证理论、探索规律和分析问题，无一不用数据，它是学术交流和报告技术成果最有力的工具和最准确的语言。

实验集理论、方法、技能和数据于一个整体，它不但要实验者弄懂实验内容与实验方法的道理，而且还要实验者根据这些道理付诸实现，最后还要从获得的数据结果中得出应有的结论，这就是物理实验的特点。

二、物理实验的基本程序和要求

在做任何一个实验时，必须把握住以下三个重要环节。

1. 实验预习：预习至关重要，它决定着实验能否取得主动和收获的大小。预习包括阅读资料、熟悉仪器和写出预习报告。

仔细阅读实验教材和有关的资料，重点解决三个问题。

- (1) 做什么：这个实验最终要得到什么结果；
- (2) 根据什么去做：实验课题的理论依据和实验方法的道理；
- (3) 怎么做：实验的方案、条件、步骤及实验关键。

然后利用预备课熟悉仪器：了解仪器的结构、使用方法、调整方法以及注意事项。

预习报告至少应该包括记录数据的表格、电路图或光路图，设计性实验要拟出实验方案。

2. 实验的进行：学生进入实验室按照编组使用相应的指定仪器。像一个科学工作者那样要求自己，井井有条地布置仪器，根据事先设想好的步骤演练一下，然后再按确定的步骤开始实验。要注意细心观察实验现象，认真钻研和探索实验中的问题。不要期望实验工作会一帆风顺，要把遇到问题看作是学习的良机，冷静地分析和处理它。仪器发生故障时，也要在教师指导下学习排除故障的方法。总之，要把着重点放在实验能力的培养上，而不是测出几个数据就以为完成了任务。

要做好完备而整洁的记录：例如研究对象的编号，主要仪器的名称、规格和编号；原始数据要用钢笔或圆珠笔记入事先准备好的表格中，如确系记错，也不要涂改，应轻轻划上一道，在旁边写上正确值（错误多的，须重新记录），使正误数据都能清晰可辨，以供在分析测量结果和误差时参考。不要用铅笔记录，给自己留有涂抹的余地；也不要先草记在另外的纸上再誊写在数据表格里，这样容易出错，况且，这也不是“原始记录”了。希望同学们注意纠正自己的不良习惯，从一开始就不断培养良好的科学作风。

不要忘记完成“实验后回答问题”中需要观察或测量的实验。

实验结束时，先将实验数据交教师审阅签字，然后再整理还原仪器，经教师验收后，方可离开实验室。

3. 实验总结：实验后要对实验数据及时进行处理。如果原始记录删改较多，应加以整理，对重要的数据要重新列表。数据处理过程包括计算、作图、误差分析等。计算要有计算式（或计算举例），代人的数据都要有根据，便于别人看懂，也便于自己检查。作图要按作图规则，图线要规矩、美观。数据处理后应给出实验结果。最后要求撰写出一份简洁、明了、工整、有见解的实验报告。这些是每一个大学生必须具备的报告工作成果的能力。

实验报告内容包括：

- (1) 实验名称
- (2) 实验目的
- (3) 实验原理 简要叙述有关物理内容（包括电路图或光路图或实验装置示意图）及测量中依据的主要公式，式中各量的物理含义及单位，公式成立所应满足的实验条件等。
- (4) 实验步骤 根据实际的实验过程写明关键步骤和注意要点。
- (5) 数据报告与数据处理 列表报告数据，完成计算、曲线图、不确定度计算或误差分析，最后写明实验结果。
- (6) 小结和讨论 内容不限。可以是实验中现象的分析，对实验关键问题的研究体会，实验的收获和建议，也可以是解答“实验后回答问题”。

不确定度及数据处理篇

第一章 测量和有效数字

在物理实验中，不仅要定性地观察物理现象，而且还需要定量地测量有关物理量。测量就要取得数字、记录数据、计算和报告数据，这里都存在有效数字取位问题，因此从实验课一开始，我们就要建立有效数字的概念，并强调通过练习达到熟练掌握和运用于每一个数据。

§ 1-1 测 量

一、测量

以确定量值为目的的一组操作称为测量（或计量）。

测量的过程就是把被测物理量与选作计量标准单位的同类物理量进行比较的过程。选作计量单位的标准必须是国际公认的、唯一的、稳定不变的。例如真空中的光速是一个不变的量，国际单位制由此规定以光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内所经路径的长度作为长度单位——1米。

我们测量一个物体的长度，就是找出该被测量是1米的多少倍，这个倍数称为测量的读数。数值连同单位记录下来便是数据，称为量值。量值用数值和单位的乘积来表示。

例如，钠光的一条谱线的波长为 $\lambda = 589.6 \times 10^{-7} \text{m}$ ，它是单位 m 和数值 589.6×10^{-7} 的乘积。在图表和表格中正确的表示是 $\lambda/\text{m} = 589.6 \times 10^{-7}$ 。

二、直接测量和间接测量

根据获得数据的方法不同，测量可分为直接测量和间接测量两类。

1. 直接测量

把被测量直接与标准量（量具或仪表）进行比较，直接读数、直接得到数据，这样的测量就是直接测量，相应的物理量称为直接测量量。例如用米尺测量长度、用天平测量质量、用欧姆表测量电阻等。

直接测量是测量的基础。

2. 间接测量

大多数物理量没有直接测量的量具或仪表，不能直接得到测量数据，但能够找到它与某些直接测量量的函数关系。测出直接测量量，通过函数关系得到被测量的测量数据，这种测量称为间接测量，相应的物理量就是间接测量量。

例如：圆的半径 r ，若圆心不能确定就不能直接测量，测量直径 d ，通过公式 $r = d/2$ 算出半径，这就是间接测量。这时半径 r 就是间接测量量。实际上间接测量远远多于直接测量。实验中的原理、方法、步骤、计算等，大都是间接测量的内容；实验方法、实验技术

也主要在间接测量范围内。

三、基本单位和导出单位

众多的不同物理量有各自不同的单位，幸而各物理量不是相互独立，而是由许多物理定义和物理规律联系起来的，所以只需要规定少数几个物理量的单位，其它物理量的单位则根据定义和物理规律推导出来。独立定义的单位叫做基本单位，相对应的物理量叫做基本量；由基本单位推导出的单位叫做导出单位，相对应的物理量叫做导出量。

需要注意的是，在测量中区分的直接测量量和间接测量量，与在计量单位中规定的基本量和导出量，两事件之间没有对应关系。例如：物体的质量，它的单位千克是基本单位。若用天平测量，它是直接测量量；若把它浸设在量筒中的水里测出体积 V ，从手册中查出该物质的密度 ρ ，再用公式 $m = \rho V$ 计算，则该质量就是间接测量量了。

在物理学发展过程中，曾建立过各种不同的单位制，各单位制选取的基本量和规定的单位各不相同，使用中常造成混乱，带来诸多不便。1960年国际计量大会正式通过了一种适用于一切计量领域的单位制——国际单位制，用符号“SI”表示。SI规定的基本单位有7个。SI基本单位和有专门名称的SI（包括SI辅助单位）导出单位见附录A。为了保证单位量值的统一，国际计量局设有复现单位标准的专门实验室，每个国家又都有自己的计量组织。任何工厂生产的量具、仪表都要经过计量单位检验鉴定才能出售使用，以保证量具能在规定的准确度标准下体现出量度单位。现在，我国已建立了与国际计量单位一致的米、秒、千克、开尔文、安培、坎德拉等六个基本单位的基准，其中有的基准完成了实物基准向自然基准过渡的工作。如实现米的新定义的碘稳频 He-Ne 激光器，实现'90国际温标中用的中、高温固定点及铂电阻温度计，绝对重力仪等，主要技术指标都达到国际先进水平，有的还处于国际领先地位。在开展国际量值比对中我国的国际地位不断提高，计量科学技术水平在国际上声誉和威望越来越高。在50多个物理量中，我国现已建立起142项国家基准和标准，并相应建立了各级计量（技术监督）部门、量值传递系统、管理制度和专门的计量人员队伍。我国计量科学的水平在世界上已步入领先的行列之中。

§ 1-2 有效数字

一、有效数字和仪器读数规则

1. 有效数字

实验数据是通过测量得到的。读数的数字有几位，在实验中的含义是明确的。例如，用厘米分度的尺去测量一铜棒的长度（见图1-1）。我们先看到铜棒的长度大于4cm，小于5cm，进一步估计其端点超过4cm刻线3/10格，得到棒长为4.3cm。不同的观察者估读不尽相同，可能读成4.2cm或4.4cm。这样，同一根棒的长度得到了三个测量结果，它们都应当是正确的。比较三个读数，我们看到最后一位数字测不准确，称之为欠准数字或可疑数字，前面的“4”是可靠数字。

上例中得到的全部可靠数字和欠准数字都是有意义的，总称为有效数字。当被测物理量和测量仪器选定以后，测量值的有效数字的位数就已经确定了。我们用厘米分度的尺测量铜

棒的长度，得到的结果 4.2cm、4.3cm 或 4.4cm 都是 2 位有效数字，它们的测量准确度相同。若换以毫米分度的尺子测量上例中的铜棒（如图 1-2），从尺的刻度可以直接读出 4.2cm，再估读到 1/10 格值，测定铜棒的长度为 4.27cm（当然，不同的观察者还可能得到 4.26cm 或 4.28cm），测量结果有 3 位有效数字，准确度高于上例。

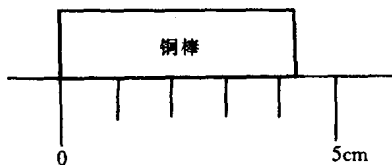


图 1-1 用厘米分度尺测量铜棒的长度

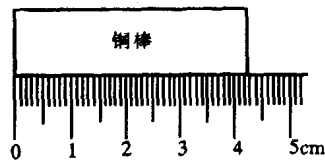


图 1-2 用毫米分度尺测量铜棒的长度

可见，用不同的量具或仪器测量同一物理量，准确度较高的量具或仪器得到的测量结果有效位较多。另一方面，如果被测铜棒的长度是十几厘米或几十厘米，那么用厘米分度尺测量的结果变为 3 位有效位，用毫米分度尺测量的结果变为 4 位有效位。可见，有效位的多少还与被测量的大小有关。

有效位的多少，是测量实际的客观反映，不能随意增减测得值的有效位。

2. 仪器的读数规则

测量就要从仪器上读数，读数应包括仪器指示的全部有意义的数字和能够估读出来的数字。

(1) 估读 有一些仪器读数时需要估读，估读时首先根据最小分格的大小、指针的粗细等具体情况确定把最小分格分成几份来估读，通常读到格值的 1/10、1/5 或 1/2。前述图 1-1 就是估读到最小格值的 1/10。这样的仪器和量具很多，如米尺、螺旋测微计、测微目镜、读数显微镜、指针式电表等等。图 1-3 是估读到 1/5 格值的例子。

(2) “对准”时的读数 对于已选定的仪器，读数读到哪一位是确定的。例如，用 50 分度的游标卡尺测一物的长度，游标恰与主尺 3cm 刻线对准，如图 1-4。50 分度游标卡尺的分度值是 0.002cm，这类仪器不估读，读数应读到厘米的千分位，测得值为 3.000cm，有效位为 4 位，不可以读成 3cm。反过来，如果以为“对准”是准确无误，3 后面的 0 有无穷多个也是错的，因为游标卡尺有一定的准确度，且“对准”也是在一定分辨能力限制下的对准。

由此可见，在每次测量之前，首先应记录所用仪器刻度的最小分度值，然后根据具体情况确定是否应当估读或估读到几分之一格值，必要时还要加以说明，使记录清楚明白。

3. 有效位的概念

(1) 数字中无零的情况和数字间有零的情况 全部给出的均为有效数。例如：56.147 4mm 这个量值，其有效数字共有 6 位；50.007 4mm，其有效数字也有 6 位。

(2) 小数末尾的零 有小数点时，末尾的零全部为有效数字。例如：50.140 0，有效位为 6 位。

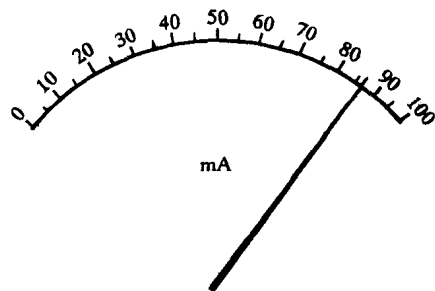


图 1-3 估读到 1/5 格值



图 1-4 游标对准主尺 3cm 刻线

(3) 第一位非零数字左边的零 第一位非零数字左边的零称为无效零。例如：0.0504700，有效位为6位；0.000018只有2位有效数字。

(4) 变换单位 变换单位而产生的零都不是有效数字。计量单位的不同选择可改变量值的数值，但决不应改变数值的有效位。例如： $4.30\text{cm} = \underline{0.0430}\text{m} = 43\ \underline{000}\mu\text{m} = \underline{0.0000430}\text{km}$ 带有横线的0是因为单位变化而出现的，它们只反映小数点的位置，都不是有效数字。上例中的 $43\ 000\mu\text{m}$ 还错误地反映了有效位。为了正确表达出有效数字，实验中常采用科学计数法，即用10的幂次表示，如

$$4.30\text{cm} = 4.30 \times 10^{-2}\text{m} = 4.30 \times 10^4\mu\text{m} = 4.30 \times 10^{-5}\text{km}$$

这种写法不仅简洁明了，特别当数值很大和很小时突出了有效数字，而且还使数值计算和定位变得简单。

二、有效数字的运算规则和修约规则

1. 有效数字的运算规则

从仪器上读出的数值经常要经过运算得到实验结果，运算中不应因取位过少而丢失有效数字，也不能凭空增加有效位。规范的做法是用测量结果的不确定度来确定测量结果的有效位。看来计算过程中只要不少取位，最后根据不确定度来截取结果的有效位，就不会出错。但也有一些不计算不确定度的情况，例如用作图法处理数据时。下面给出有效数字的运算规则。如果计算不确定度，则比规则规定再多取1~2位，最后再根据不确定度去掉多余的数字。

(1) 加减法运算 和或差的末位数字所在的位置，与参与加减运算各量中末位数字位置最高的一个相同。

例 1

$$13.\underline{65} + 1.622\underline{0} = 15.\underline{27}$$

$$16.\underline{6} - 8.3\underline{5} = 8.\underline{2}$$

(2) 乘除法运算 一般情况下，积或商的有效位数，和参与乘除运算各量中有效位最少的那个数值的位数相同，又建议如果所得的积或商的首位数字为1、2或3时，就要多保留一位有效数字。

例 2

$$24\ 320 \times 0.341 = 8.29 \times 10^3$$

$$85\ 425 \div 125 = 683$$

$$12\ 345 \div 98 = 126$$

(3) 对数运算 对数尾数的有效位与真数相同。

例 3

$$\lg 543 = 2.735$$

(4) 一般函数运算 将函数的自变量末位变化1，运算结果产生差异的最高位就是应保留的有效位的最后一位。用这种方法来确定有效位，是一种有效而直观的方法。

例 4

$$\sin 30^\circ 2' = 0.500\ 503\ 748$$

$$\sin 30^\circ 3' = 0.500\ 755\ 559$$

两者差异出现在第4位上，故 $\sin 30^\circ 2' = 0.500\ 5$ 。

其实这正是求微分问题。通过求微分来确定函数的有效数字取位的意义是：设测量值的不确定度在最后一位上是1，求由此而引起函数的不确定度出现在哪一位上。本篇第二章§2-4也是应用求微分的方法进行不确定度的传递。

例5 计算 $\sin 30^\circ 2'$ 。

$$\text{解： } x = 30^\circ 2', \Delta x = 1' = \frac{\pi}{180 \times 60} = 0.00029 \text{ (rad)}$$

$$d(\sin x) = \cos x \cdot \Delta x = 0.00025$$

所以末位有效数末位的位置在小数点后的第4位上： $\sin 30^\circ 2' = 0.5005$ ，它有4位有效数字。直观法和微分法效果是一样的。

(5) 运算中常数和自然数的取位规则

运算中无理常数的位数比参加运算各分量中有效位最少的多取1位，例如 π 等于3.141592654...，在算式中要将所取的数字全部写出来。自然数是准确的，例如自然数2，它后面有无穷多个0，在算式中不必把那些0写出来。

上述运算规则是一种粗略的近似规则，如前所述，由不确定度决定有效位才是合理的。

2. 修约间隔与修约规则

在例4和例5中，我们都从较多的数字中留下了有效数字，去掉了多余的数字，这就是对数字的修约。

(1) 修约间隔

修约间隔可以看成是被修约值的最小单元，它既可以是个数值，也可以是个量值。修约间隔一旦确定，修约后的值即应是修约间隔的整数倍。

例如修约间隔是0.1g，则修约后的量值只能是0.1g的整数倍而不能出现小于0.1g的部分：

$$712.315\text{g 修约成 } 712.3\text{g}$$

$$614.470\text{g 修约成 } 614.5\text{g}$$

例如修约间隔是1000m：85.47km 修约成 85km 或 $85 \times 10^3\text{m}$ 。

(2) 修约中的“进”与“舍”的规则

拟舍弃数值的最左一位小于5时，舍去。拟舍弃数值的最左一位大于5（包括等于5而其后有非零数值）时，进1，即保留的末位加1。拟舍弃数值的最左一位为5，且其后无数值或皆为零时：若所保留的末位为奇数，即进1；若为偶数，则舍去。

例如：
1.23451m 修约成4位有效位，为1.235m
1.23449m 修约成4位有效位，为1.234m
1.23450m 修约成4位有效位，为1.234m
1.23350m 修约成4位有效位，为1.234m

(3) 负数的修约

取绝对值，按上述规则修约，然后再加上负号。

(4) 不允许连续修约 在确定修约间隔后应当一次修约获得结果，不得逐次修约。

例如：修约间隔为1mm，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 → 15.455mm → 15.46mm → 15.5mm → 16mm。