

物理实验教程

(普通物理实验部分)

丁慎训 张孔时 主编

清华大学出版社

04-33

358643

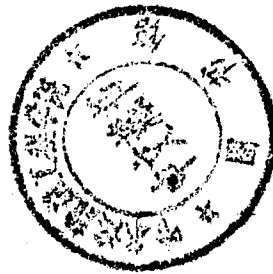
1761

物理实验教程

普通物理实验部分

清华大学实验物理教研组

丁慎训 张孔时 主编



清华大学出版社

内 容 简 介

本书是在清华大学现代应用物理系为其他系开设的普通物理实验课程的基础上编写的。全书内容广泛，共收入44个实验，分布在力学、热学、电磁学、光学和近代物理等方面，其中有些是综合性的。书中介绍了误差（不确定度）及数据处理的基本知识，还包括了12个附表。附表中概括地介绍了与各种基本物理量的测量有关的一般知识以及物理常数值和SI单位。本书对有关的实验方法及其原理的叙述力求繁简适当和深入浅出。

本书适合作为高等工业学校各专业的普通物理实验课程的教材或教学参考书，也可作为涉及物理学的广大实验工作者的参考书。

D326/4007

(京) 新登字158号



物 理 实 验 教 程

普通物理实验部分

丁慎训 张孔时 主编

☆

清华大学出版社出版

(北京 清华园)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：18.25 字数：433千字

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数：0001-8000

IS BN 7-302-00978-3/O·126

定价：4.40元

序

物理学是一门实验科学。在物理学的发展进程中，无可置疑的是理论物理学曾起过重要的作用，如Maxwell的电磁理论、Einstein的相对论、Rutherford和Bohr的原子模型、Schrödinger和Heisenberg等人的量子学说等等，都使本世纪的物理学大放异彩。但是我们必须看到，这些无一不是以实验中的新发现为依据，而又都被进一步的实验所验证的。所以实验与理论是相辅相成，而从根本上讲物理是一门实验科学。

从事物理学的工作以侧重实验者居多，专攻理论者为少。实验物理学家必须谙练理论，理论物理学家也必须对实验工作有较深的了解，否则其工作就是无源之水和无本之木。因此物理实验是一切物理学家的基本训练。

本书根据先简后繁、先易后难和循序渐进的原则，将物理实验分为普通物理和近代物理两部分。前者包括各种量测的基本训练，有力学、热学、电磁学、光学及综合性的各种实验。它们一般都比较基本、直观、或多或少地牵涉能感受到的宏观现象和直接量测。而近代物理实验部分涉及物理学中各项专门知识，有一些则是20世纪中著名的、开拓物理学新发展方向和方法的实验。这些开拓者都因而获得过诺贝尔物理奖。这些实验最初都经过若干年的精心计划、探索、甚至是几经失败而后成功的。即使是在我们准备这些实验时，也是经过教师和实验技术人员的长期努力而置备起来的。这样才使得同学们在几个小时或稍长的时间内学习和领悟所用方法和所得结果的要领。可以说这些实验都是“高度浓缩的”。学生在做实验时要特别领会和珍惜这一点。学生们有时使用的是一些比较复杂的、昂贵的、甚至是娇嫩的仪器，因此要特别小心和加以爱护。学生们所用的观察和测量方法是从宏观进入微观，从直接进入间接，包含着种种推理和计算。实际上这也正是现代物理学实验的一般趋势。我们希望同学们在经过这样的实验以后，能够在方法论和认识论上有一个质的演进和变化。

完成物理学实验的正常程序是通过观察、测量、推理等多次循环来寻求物质运动（包括能量变化）的内在联系和规律。但是在学生做实验时，这个程序正好被颠倒过来，即先已知道了这些规律，然后用实验对它们进行验证。我们了解到这一点就可以深刻地体会实验的理论背景，特别是前人的思路和解决问题的方法。“吃透”这些以后，再以严肃认真客观的态度进行观察与测量。切不可有成见在胸，等待（甚至“编造”）预期的结论。这样才能学到前人的长处，培养出独立思考的能力。

普通物理实验与近代物理实验将为以后做科学研究提供非常好的训练，因此可说是以后从事科学研究的先行准备工作。

清华大学是一个以理工科为主的综合性大学。因此物理实验必须适应不同系列和专业的具体培养目标。除了必修的实验以外还安排有一些供选修的，可按学生的专业、个人兴趣和富裕时间等而定。为了节省学生的时间，绝大部分实验的仪器设备都已事先调好，但在可能条件下也让学生自己配置、安装和调整仪器，以培养他们的动手能力和使

其了解实验各部的组成。即使是准备好的实验，也尽量要求学生亲自操作，如安装样品、摄取谱线、显像、定影等。还有几个“大实验”，可供有兴趣和条件的学生选做。这些实验皆由学生提出方案和设计、仪器选择和安排、实验步骤等，经指导教师同意后进行。这样的实验自然要求相当多的时间，但对于学生则是更全面和深入的训练，为他们将来做科学研究打下一定基础。

清华大学物理系向来重视实验教学。在抗日战争以前，本科的物理实验就已达到了相当的规模。院系调整时曾取消物理系，只保留了物理教研组和普通物理实验室。当时从原有的实验设备中留下了基础部分的教学仪器。1957年又重建中级物理实验室，后改名为近代物理实验室。直到1978年之后，特别是在1984年成立了现代应用物理系之后，这两个实验室才有了较大和较快的发展。经过许多教师和实验技术人员的辛勤劳动，现在已能开出普通物理实验四十多个和近代物理实验三十多个。我们希望通过这些实验，能培养出手脑并用、思维缜密、观察详尽、分析精湛的物理实验家来。为将来从事物理学或高级工程学的科研打下一个扎实的基础。

孟昭英

1989年9月于清华园

编者前言

普通物理实验是理工科学生必修的一门重要基础实验课程。按照《高等工业学校物理实验课程教学基本要求》和实验实际情况，目前共开设出实验题目四十多个。编写的讲义曾多次修改和铅印。本书就是以原讲义为基础改编的。

普通物理实验是学生进入大学后较早遇到的一门系统全面的实验课程。它既要以学生实际做过的中学物理实验为起点，又要与后续实验课程适当配合。为此，我们近年来对实验选题作了一些调整。首先，注意保留那些对物理学本身来说是基本的内容。在此前提下或者将与中学重复且过于简单的若干实验删去，或者将其中必要的基本训练编入其他题目内。其次，为了培养现代理工科人才，一方面适当增添一些近代物理的内容，另一方面增设若干在工程技术中有用的物理实验内容和方法。这样，既保证了基本训练，又提高了普物实验的综合性和实用程度，促使学生更积极地完成实验。

本书对各实验的原理都作了简明扼要的论述。即使是某些较深的内容，也力求深入浅出地阐明物理意义。这样，通过实验课学生能较好地掌握和运用理论知识。在大多数实验中适当地介绍了主要仪器，并且比较详细地说明了实验方法。这样，可使学生进入实验室后能很快独立地拟定合理的实验步骤，通过实践提高自己的实验技能。在每一篇的开头简明地叙述了该实验的意义或提供一些背景知识。在篇末给出了思考题。其中的课前思考题一般都反映了该实验的要领，可以促使学生认真准备，积极思考。课后思考题则可帮助学生比较深入地进行总结，加深了解。有些实验除基本要求外还附有一些较灵活的提高内容，供有潜力的学生作进一步的钻研，以利于因材施教。实践证明，对教材作这样的安排比较适合广大学生的需要，使他们能在指定时间内基本上独立地完成所有必作实验。

本书在绪论之后，首先阐述了测量误差和数据处理的基础知识，所涉及的内容以本课程必须掌握的基本要求为主，稍为有所扩充。某些实验中给出了完整的数据记录表格及具体的误差分析方法，以作示范。每次实验课上都要求学生作出完整的原始数据记录，力求整齐清楚。课后要求学生认真处理数据，或者算出测量结果及其误差（或不确定度），或者绘制成实验曲线。本书对每一次实验结果的准确程度都有明确要求。在大多数实验的课后，要求写出完整报告。通过以上各环节来培养学生在实验方法、实验技能、误差分析和总结报告等各方面的能力以及对科学作风的重视。

收入本书的题目中一大半是有关物理学基本内容的必作实验，在两学期内修完。必作实验中包括了个别设计性实验，其中只提出实验任务和必需仪器，要求学生独立地分析问题和解决问题。上课时必作实验的仪器基本上做到了一人一套，这将有助于实验能力的培养。我们希望通过这些多样化的安排使普通物理实验室成为一个既有严格要求又生动灵活的实践课堂。

实验教材不可能脱离实验室的建设和发展。经过我们近四十年的教学实践，作过多

次调整、更新和扩充，才达到现在的规模和水平。这里面凝聚了近百位教师和实验技术人员的智慧和劳动。本书实际上是一项集体创作。几乎每一个题目都含有许多同志先前的贡献，这里难以完全记载他们的功绩。1979年以来参加过原实验讲义编写工作的主要人员，除这次参加改编者以外，还有王文鉴、刘鑫森、张泊静、邬淑婉、杜毓良、李世权、李功平、吴振一、吴粟英、陈跃、陈福华、林世珩、周铁英、柯伟平、侯华生、贺东、黄敏南、傅云翎、虞昊等同志。这次出版，对全部内容和文字都作了修订和补充。参加这次改编和修订工作的是丁慎训（实验12, 17, 18, 19, 20, 22, 32, 44, 附表1, 2, 3）；马兴坤（实验4, 6, 25, 27, 31, 36, 37, 38, 39, 42）；田德芳（绪论, 测量误差, 实验1, 2, 3, 5, 41, 43, 附表4, 5）；朱鹤年（测量误差, 电学基本仪器, 实验7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 21, 40, 附表6, 7, 8）；钱启予（光学预备知识, 实验23, 24, 26, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 附表9, 10）。

1990年11月

目 录

序	(iii)
编者前言	(V)
绪论	(1)
I 测量误差及数据处理的基础知识	(3)
II 力学和热学	(15)
实验一 气垫导轨实验	(15)
实验二 弹性模量的测量	(20)
实验三 线胀系数的测量	(26)
实验四 三线摆和扭摆	(32)
实验五 比热容的测量	(36)
实验六 用传感器测空气相对压力系数	(41)
附表一 长度测量	(48)
附表二 时间和频率测量	(50)
附表三 质量测量	(51)
附表四 温度测量	(52)
附表五 压力测量	(54)
III 电磁学	(56)
电磁学实验基本仪器	(56)
实验七 电学元件伏安特性的测量	(59)
实验八 灵敏电流计	(65)
实验九 直流电桥测电阻	(72)
实验十 电位差计的原理和使用	(80)
实验十一 用恒定电流场模拟静电场	(88)
实验十二 设计性实验	(95)
实验十三 磁场分布测量	(98)
实验十四 霍耳效应实验	(103)
实验十五 用霍耳元件测磁场	(106)
实验十六 冲击电流计测 $B-H$ 曲线	(110)
实验十七 用示波器测动态磁滞回线	(117)
实验十八 示波器的原理和使用	(121)
实验十九 设计和组装欧姆表	(132)
实验二十 设计和组装热敏电阻温度计	(137)
实验二十一 电子积分器测电容	(140)

实验二十二	装调阶梯波发生器及观察晶体管特性	(143)
附表六	直流电流测量	(147)
附表七	直流电压测量	(149)
附表八	直流磁感应强度的测量方法简介	(151)
IV	光学	(153)
	光学实验预备知识	(153)
实验二十三	透镜焦距的测定	(156)
实验二十四	装调透射式幻灯机	(165)
实验二十五	望远镜和显微镜	(169)
实验二十六	分光计的调节和色散曲线的测定	(174)
实验二十七	阿贝折射仪	(184)
实验二十八	用牛顿环测曲率半径	(187)
实验二十九	双棱镜干涉实验	(193)
实验三十	光栅衍射实验	(198)
实验三十一	观测光的偏振	(203)
实验三十二	黑白摄影与放大	(210)
附表九	常用光源	(217)
附表十	常用光探测器	(219)
V	近代物理与综合性实验	(221)
实验三十三	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	(221)
实验三十四	迈克耳孙干涉仪测空气折射率	(227)
实验三十五	F-P干涉仪测波长差	(232)
实验三十六	激光点光源干涉法测量微小平行差	(236)
实验三十七	用单色仪测定介质的吸收曲线	(239)
实验三十八	硅光电池相对光谱响应的测量	(243)
实验三十九	偏振片和波片性能的测试	(247)
实验四十	He-Ne激光器纵横模频率间隔的测量	(252)
实验四十一	声速测量	(258)
实验四十二	声光效应实验	(263)
实验四十三	光电效应测定普朗克常数	(269)
实验四十四	夫兰克-赫兹实验	(273)
附表十一	基本物理常数1986年推荐值	(279)
附表十二	国际单位制简介	(282)

绪 论

物理学从本质上说是一门实验科学，物理规律的研究都以严格的实验事实为基础，并且不断受到实验的检验。在物理学的发展中物理实验一直起着重要作用，今后在探索和开拓新的科技领域中，物理实验仍然是有力的工具。在大学里物理实验课是对学生进行科学实验基础训练的一门重要课程，是继物理学讲课之后单独开设的一门实验课程。它不仅加深了对理论的理解，更重要的是使学生获得基本的实验知识，在实验方法和技能诸方面得到较为系统、严格的训练。可以说，物理实验课是大学里学习或从事科学实验的起步。同时，在培养科学工作者的良好素质及科学世界观方面，物理实验也起着潜移默化的作用。因此，学好物理实验对于高等理工院校的学生是十分重要的。

一、物理实验课的目的

1. 通过对物理实验现象的观测和分析，学习运用理论指导实验、分析和解决实验中问题的方法。从理论和实际的结合上加深对理论的理解。
2. 培养学生从事科学实验的初步能力。这些能力是指：通过阅读教材或资料，能概括出实验原理和方法的要点；正确使用基本实验仪器，掌握基本物理量的测量方法和实验操作技能；正确记录和处理数据，分析实验结果和撰写实验报告；以及自行设计和完成某些不太复杂的实验任务等等。
3. 培养学生实事求是的科学态度、严谨踏实的工作作风，勇于探索、坚韧不拔的钻研精神以及遵守纪律、团结协作、爱护公物的优良品德。

二、物理实验课的主要教学环节

为达到物理实验课的目的，学生应重视物理实验教学的三个重要环节。

1. 实验预习：课前要仔细阅读实验教材或有关的资料，并学会从中整理出实验所用原理、方法、实验条件及实验关键，根据实验任务画好记录数据的表格。有些实验还要求学生课前自拟实验方案，自己设计线路图或光路图，自拟数据表格等。因此，课前预习的好坏是实验中能否取得主动的关键。
2. 实验操作：学生进入实验室后应遵守实验室规则，象一个科学工作者那样要求自己，井井有条地布置仪器，安全操作，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，在遇到问题时，应看作是学习的良机，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。对实验数据要严肃对待，学生要用钢笔和圆珠笔记录原始数据。如确系记错了，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，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，这已不是“原始记录”了。希望同学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。实验结束时，将实验数据交教师审阅签字，整理还原仪器后方可离开实验室。

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），代入的数据都要有根据，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安全注意要点。

(5) 数据表格与数据处理。记录中应有仪器编号、规格及完整的实验数据。要完成计算、曲线图、误差分析。最后写明实验结果。

(6) 小结或讨论。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，也可解答思考题。

三、实验室规则

1. 学生进入实验室须带上记录实验数据的表格及完成指定的课前预习内容，经教师检查同意方可进行实验。

2. 遵守课堂纪律，保持安静的实验环境。

3. 使用电源时，务必经过教师检查线路后才能接通电源。

4. 爱护仪器。进入实验室不能擅自搬弄仪器，实验中严格按仪器说明书操作，如有损坏，照章赔偿。公用工具用完后应立即归还原处。

5. 做完实验，学生应将仪器整理还原，将桌面和凳子收拾整齐。经教师审查测量数据和仪器还原情况并签字后，方能离开实验室。

6. 实验报告应在实验后一周内交实验室。

I 测量误差及数据处理的基础知识

本篇是自学材料，介绍测量误差估计、实验数据处理和实验结果的表示等问题。所介绍的都是初步知识，这些知识不仅在每一个物理实验中都要用到，而且是今后从事科学实验必须了解和掌握的。由于这部分内容牵涉面较广，不可能在一两次学习中掌握。我们要求同学首先阅读一遍，对提到的问题有一个初步的了解，以后结合每一个具体实验再细读有关的段落，通过运用加以掌握。应当说明的是：这方面问题的深入讨论是普通计量学以及数理统计学的任务，本书只引用它的某些结论和计算公式，其详细的探讨和证明留待在数理统计课中学习。

一、测量的误差

物理实验是以测量为基础的。研究物理现象、了解物质特性、验证物理原理都要进行测量。测量分直接测量和间接测量等。“直接测量”指无需对被测量的量与其它实测的量进行函数关系的辅助计算而直接得到被测量值的测量。例如用米尺测物体的长度，用天平和砝码测物体的质量，用电流计测线路中的电流，都是直接测量。“间接测量”指利用直接测量的量与被测量的量之间的已知函数关系、从而得到该被测量值的测量。例如测物体密度时，先测出该物体的体积和质量，再用公式算出物体的密度。在物理实验中进行的测量，有许多是间接测量。

实践证明：测量结果都具有误差，误差自始至终存在于一切科学实验和测量的过程之中。因为任何测量仪器、测量方法、测量环境、测量者的观察力等等都不能做到绝对严密，这些就使测量不可避免地伴随有误差产生。因此分析测量中可能产生的各种误差，尽可能消除其影响，并对测量结果中未能消除的误差作出估计，就是物理实验和许多科学实验中必不可少的工作。为此我们必须了解误差的概念、特性、产生的原因和估计方法等有关知识。

测量误差就是测量结果与待测量的真值（或约定真值）之差值。测量误差的大小反映了测量结果的准确程度，测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

绝对误差 = 测量结果 - 被测量的真值

相对误差 $E = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{被测量的真值}}$ (用百分数表示)

被测量的真值是一理想概念，一般说来真值是不知道的。在实际测量中常用被测量的实际值或已修正过的算术平均值来代替真值，称为约定真值。

二、误差的分类及其处理方法

测量中的误差主要分为两种类型，即系统误差和随机误差。它们的性质不同，需要

分别处理。

1. 系统误差：系统误差是在同一被测量的多次测量过程中保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量。例如实验装置和实验方法没有（或不可能）完全满足理论上的要求，有的仪器没有达到应有的准确程度，环境因素（温度、湿度等）没有控制到预计的情况……只要这些因素与正确的要求有所偏离，那么在测量结果中就会出现绝对值和符号恒定或以可预知方式变化的误差分量，因素不变，系统误差也就不变。

例如用停表测运动物体通过某段路程所需的时间，若停表走时较快，那么即便测量多次，测得的时间 t 总会偏大，而且总是偏大一个固定的量，这就是仪器不准确造成的。又如用落球法测重力加速度时，由于空气阻力的影响，得到的结果总是偏小，这就是测量方法不完善造成的。

对实验中的系统误差应如何处理呢？可以通过校准仪器、改进实验装置和实验方法，或对测量结果进行理论上的修正加以消除或尽可能减小。发现和减小实验中的系统误差是一个困难任务，需要对整个实验依据的原理、方法、测量步骤、所用仪器等可能引起误差的因素一一进行分析。一个实验结果是否正确，往往就在于系统误差是否已被发现和尽可能消除，因此对系统误差不能轻易放过。

2. 随机误差：随机误差是在对同一被测量的多次测量过程中，绝对值与符号以不可预知的方式变化着的测量误差的分量。这种误差是实验中各种因素的微小变动性引起的。例如实验装置和测量机构在各次调整操作上的变动性，测量仪器指示数值的变动性，以及观测者本人在判断和估计读数上的变动性……这些因素的共同影响就使测量值围绕着测量的平均值发生有涨落的变化，这变化量就是各次测量的随机误差。随机误差的出现，就某一测量值来说是没有规律的，其大小和方向都是不能预知的，但对一个量进行足够多次的测量，则会发现它们的随机误差是按一定的统计规律分布的。常用的一种情况是：正方向误差和负方向误差出现的次数大体相等，数值较小的误差出现的次数较多，很大的误差在没有错误的情况下通常不出现；这一规律在测量次数越多时表现得越明显，它就是称之为正态分布律的一种最典型的分布规律。在数理统计中对它有充分的研究。

对测量中的随机误差如何处理呢？根据随机误差的分布特性，我们知道：1)在多次测量时，正负随机误差常可以大致相消，因而用多次测量的算术平均值表示测量结果可以减小随机误差的影响；2)测量值的分散程度直接体现随机误差的大小，测量值越分散，测量的随机误差就越大。因此，必须对测量的随机误差作出估计才能表示出测量的精密度。

对随机误差作估计的方法有多种。科学实验中常用标准偏差来估计测量的随机误差。设对某一物理量在测量条件相同的情况下进行 n 次无明显系统误差的独立测量，测得 n 个测量值 x_1, x_2, \dots, x_n 。那么，它们的算术平均值是

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

以后为了简洁，我们常略去总和号上的求和范围，例如上式中的分子可写为 Σx_i 。

可以证明：当系统误差已被消除时，测量值的平均值最接近被测量的真值，测量次

数越多, 接近的程度越好 (当 $n \rightarrow \infty$ 时, 平均值趋近真值)。因此我们可以用平均值表示测量结果。每一次测量值 x_i 与平均值 \bar{x} 之差称为残差, 即

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

显然, 这些残差有正有负, 有大有小。常用“方均根”法对它们进行统计, 得到的结果就是单次测量的标准偏差, 以 S_x 表示为

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

我们可以用这一标准偏差表示测量的随机误差, 它可以表示这一列测量值的精密度。标准偏差小就表示测量值很密集, 即测量的精密度高; 标准偏差大就表示测量值很分散, 即测量的精密度低。现在很多计算器上都有这种统计计算功能, 实验者可直接用计算器求得 S_x 等数值。

三、直接测量结果的表示和总不确定度的估计

表示完整的测量结果, 应给出被测量的量值 x_0 , 同时标出测量的总不确定度 Δ , 写成 $x_0 \pm \Delta$ 的形式, 这表示被测量的真值在 $(x_0 - \Delta, x_0 + \Delta)$ 的范围之外的可能性 (或概率) 很小。不确定度是指由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度, 是表征被测量的真值所处的量值范围的评定。

直接测量时被测量的量值 x_0 一般取多次测量的平均值 \bar{x} ; 若实验中有时只能测一次或只需测一次, 就取该次测量值 x 。最后表示直接测量结果中被测量的 x_0 时, 通常还必须将已定系统误差分量 (即绝对值和符号都确定的已可估算出的误差分量) 从平均值 \bar{x} 或一次测量值 x 中减去, 以求得 x_0 , 即对已定系统误差分量进行修正。如螺旋测微计的零点修正, 伏安法测电阻中电表内阻影响的修正, ……。

参考国际计量委员会通过的《BIPM 实验不确定度的说明 建议书 INC-1 (1980)》的精神, 普通物理实验的测量结果表示中, 总不确定度 Δ 从估计方法上也可分为两类分量; A. 多次重复测量用统计方法计算出的分量 Δ_A ; B. 用其它方法估计出的分量 Δ_B , 它们可用方和根法合成 (下文中的不确定度及其分量一般都是指总不确定度及其分量)

$$\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} \quad (3)$$

在普通物理实验中对同一量作多次直接测量时, 一般测量次数 n 不大于 10, 只要测量次数 $n > 5$, 就可直接取 $\Delta_A = S_x$, 把单次测量的标准偏差 S_x 的值当作多次测量中用统计方法计算的总不确定度分量 Δ_A (说明见附录)。标准偏差 S_x 和总不确定度中 A 类分量 Δ_A 是两个不同的概念, 在普通物理实验中当 $5 < n \leq 10$ 时取 S_x 的值当作 Δ_A ; 这是一种最方便的简化处理方法, 因为当 Δ_B 可忽略不计时, 有 $\Delta = \Delta_A = S_x$, 这时被测量的真值落在 $x_0 \pm S_x$ 范围内的可能性 (概率) 已大于或接近 95%。下文中出现的 S_x , 如非特别注明, 均表示 Δ_A 的取值大小。

我们在普通物理实验中常遇到仪器的误差, 它是参照国家标准规定的计量仪表、器具的准确度等级或允许误差范围, 由生产厂家给出或由实验室结合具体测量方法和条件简化的约定, 由 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示。仪器的误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 在普通物理实验教学中是一种简化表示, 通常取 $\Delta_{\text{仪}}$ 等于仪表、器具的示值误差限或基本误差限。许多计量仪表、器具的误差产生原

因及具体误差分量的计算分析,大多超出了本课程的要求范围。用普通物理实验室中的多数仪表、器具对同一被测量在相同条件下作多次直接测量时,测量的随机误差分量一般比其基本误差限或示值误差限小不少;另一些仪表、器具在实际使用中很难保证在相同条件下或规定的正常条件下进行测量,测量误差除基本误差或示值误差外还包含变差等其它分量。因此我们约定,在大多数情况下普通物理实验中把 $\Delta_{\text{仪}}$ 简化地直接当作总不确定度 Δ 中用非统计方法估计的分量 Δ_B ,于是由(3)式可得

$$\Delta = \sqrt{S_x^2 + \Delta_{\text{仪}}^2} \quad (4)$$

如果因 $S_x < \frac{1}{3}\Delta_{\text{仪}}$,或因估计出的 Δ 对实验最后结果的影响甚小,或因条件受限制而只进行了一次测量时, Δ 可简单地用仪器的误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示,这时(3)式中用统计方法计算的A类分量 Δ_A 虽然存在,但不能用(2)式算出。当实验中只要求测量一次时 Δ 取 $\Delta_{\text{仪}}$ 的值并不说明只测一次比测多次时 Δ 的值变小,只说明 $\Delta_{\text{仪}}$ 和用 $\sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{\text{仪}}^2}$ 式估算出的结果相差不大,或者说明整个实验中对该被测量的 Δ 的估算要求能够放宽或必须放宽。测量次数 n 增加时,用(4)式估算出的 Δ 虽然一般变化不大,但真值落在 $x_0 \pm \Delta$ 范围内的概率却更接近100%(见附录中的数表)。这说明 n 增加时真值所处的量值范围实际上更小了,因而测量结果更准确了。

四、间接测量的结果和不确定度的合成

在很多实验中,我们进行的测量都是间接测量。间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的数学式计算出来的。这样一来,直接测量结果的不确定度就必然影响到间接测量结果,这种影响的大小也可以由相应的数学式计算出来。

设间接测量所用的数学式(或称测量式)可以表为如下的函数形式:

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

式中的 φ 是间接测量结果, x, y, z, \dots 是直接测量结果,它们都是互相独立的量。设 x, y, z, \dots 的不确定度分别为 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \dots$,它们必然影响间接测量结果,使 φ 值也有相应的不确定度 Δ_φ 。由于不确定度都是微小的量,相当于数学中的“增量”,因此间接测量的不确定度的计算公式与数学中的全微分公式基本相同。不同之处是:①要用不确定度 Δ_x 等替代微分 dx 等;②要考虑到不确定度合成的统计性质。于是,我们在普物实验中用以下两式来简化地计算不确定度 Δ_φ

$$\Delta_\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 (\Delta_x)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 (\Delta_y)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2 (\Delta_z)^2 + \dots} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta_\varphi}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial x}\right)^2 (\Delta_x)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial y}\right)^2 (\Delta_y)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial z}\right)^2 (\Delta_z)^2 + \dots} \quad (6)$$

(5)式适用于和差形式的函数,(6)式适用于积商形式的函数。

在一些简单的测量问题中也可采用绝对值合成的方法,即

$$\Delta_\varphi = \left| \frac{\partial F}{\partial x} \Delta_x \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial y} \Delta_y \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial z} \Delta_z \right| + \dots \quad (7)$$

$$\frac{\Delta_F}{F} = \left| \frac{\partial \ln F}{\partial x} \Delta_x \right| + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial y} \Delta_y \right| + \left| \frac{\partial \ln F}{\partial z} \Delta_z \right| + \dots \quad (8)$$

这种合成方法所得的结果一般偏大，与实际的不确定度合成情况可能有较大出入。但因其比较简单，在项数较少时可作为一种简化的处理方法。

在科学实验中一般都采用方和根合成来估计间接测量结果的标准偏差不确定度。

例：已知金属环的外径 $D_2 = 3.600 \pm 0.004 \text{cm}$ ，内径 $D_1 = 2.880 \pm 0.004 \text{cm}$ ，高度 $h = 2.575 \pm 0.004 \text{cm}$ ，求环的体积 V 和不确定度 Δ_V 。

解：环体积为

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)h \\ &= \frac{\pi}{4} \times (3.600^2 - 2.880^2) \times 2.575 \\ &= 9.436 \text{cm}^3 \end{aligned}$$

环体积的对数及其微分式为

$$\begin{aligned} \ln V &= \ln \frac{\pi}{4} + \ln(D_2^2 - D_1^2) + \ln h \\ \frac{\partial \ln V}{\partial D_2} &= \frac{2D_2}{D_2^2 - D_1^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial D_1} = -\frac{2D_1}{D_2^2 - D_1^2}, \quad \frac{\partial \ln V}{\partial h} = \frac{1}{h} \end{aligned}$$

代入方和根合成公式 (6)，则有

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta_V}{V}\right)^2 &= \left(\frac{2D_2 \Delta_{D_2}}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 + \left(\frac{2D_1 \Delta_{D_1}}{D_2^2 - D_1^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_h}{h}\right)^2 \\ &= \left(\frac{2 \times 3.600 \times 0.004}{3.600^2 - 2.880^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \times 2.880 \times 0.004}{3.600^2 - 2.880^2}\right)^2 + \left(\frac{0.004}{2.575}\right)^2 \\ &= (3.81 + 24.4 + 2.4) \times 10^{-8} = 64.9 \times 10^{-8} \\ \frac{\Delta_V}{V} &= (64.9 \times 10^{-8})^{\frac{1}{2}} = 0.0081 = 0.81\% \end{aligned}$$

$$\Delta_V = V \frac{\Delta_V}{V} = 9.436 \times 0.0081 \approx 0.08 \text{cm}^3$$

因此环体积为

$$V = 9.44 \pm 0.08 \text{cm}^3$$

五、有效数字及其表示

在实验中我们所测的被测量都是含有误差的数值，对这些数值不能任意取舍，应反映出测量值的准确度。所以在记录数据、计算以及书写测量结果时，究竟应写出几位数字，有严格的要求，要根据测量误差或实验结果的不确定度来定。例如用300mm长的毫米分度钢尺（实验三给出仪器误差为0.3mm）测量某物体的长度，正确的读法是除了确切地读出钢尺上有刻线的位数之外，还应估计一位，即读到 $\frac{1}{10}$ mm。比如，测出某物的

长度是15.2mm，这表明15是确切数字，而最后的2是估计数字。值得注意的是在读取整刻度值时往往只读出了整数，而忘记读估计的那位“0”。比如，用钢尺测得的物体长度正好是15mm整，应该记录15.0mm，不应写成15mm。又如根据长度和直径的测量值用计算器算出的圆柱体体积为 $V = 6158.3201\text{mm}^3$ ， $\Delta V = \pm 4\text{mm}^3$ 。由不确定度为 4mm^3 可以看出，第四位数字8已经是不精确的，它后面的四位数字3201没有意义。因而圆柱体体积的间接测量值应写作 $V = 6158 \pm 4\text{mm}^3$ 。6158这四位数字前面的三位是准确数字，后面一位是存疑数字。准确数字和存疑数字的全体称为有效数字。上例中15.2mm为三位有效数字， 6158mm^3 为四位有效数字。

有效数字位数的多少，直接反映实验测量的准确度。有效数字位数越多，测量的准确度就越高。例如，用不同精度的量具测量同一物体的厚度 d 时，

$$\text{用钢尺测量 } d = 6.2\text{mm}, \text{ 仪器误差 } 0.3\text{mm}, E = \frac{0.3}{6.2} = 4.8\%$$

$$\text{用50分度游标卡尺测量 } d = 6.36\text{mm}, \text{ 仪器误差 } 0.02\text{mm}, E = \frac{0.02}{6.36} = 0.31\%$$

$$\text{用螺旋测微计测量 } d = 6.347\text{mm}, \text{ 仪器误差 } 0.004\text{mm}, E = \frac{0.004}{6.347} = 0.063\%$$

由此可见，有效数字多一位，相对误差 E 差不多要小一个数量级。因此取几位有效数字是件严肃的事，不能任意取舍。

写有效数字时应注意的要点：

1. 有效数字的位数与小数点位置无关，单位的SI词头改变时，有效数字的位数不应发生变化。例如，重力加速度 980cm/s^2 ，以“ m/s^2 ”表示时记为 9.80m/s^2 ，与记为 9.8m/s^2 是不同的。前者有三位有效数字，而后者只有两位。若写为 0.00980km/s^2 ，则数值前面小数点定位所用的“0”不是有效数字，应从非“0”的第一个数起，仍为三位有效数字。

2. 为表示方便，特别是对较大或较小的数值，常用 $\times 10^n$ 的形式（ n 为一正整数）书写，这样可避免有效数字写错，也便于识别和记忆，这种表示方法叫科学记数法。用这种方法记数值时，通常在小数点前只写一位数字，例如地球的平均半径 6371km 可写作 $6.371 \times 10^6\text{m}$ ，表明有四位有效数字。

3. 表示测量值最后结果的有效数字尾数与不确定度的尾数一般要取齐。普通物理实验中不确定度一般取一位至两位就可以了，当不确定度的第一位数比较小时经常取两位。相对误差一般取两位数。在计算过程中，对中间运算结果适当多保留几位，以免因过多截取带来附加误差。对 π ， $\sqrt{2}$ 等值应直接按计算器上的按键取用。

4. 如果在实验中没有进行不确定度的估算，最后结果的有效数字位数的取法如下：一般来说，在连乘除的情况中它跟参与运算的各量中有效数字位数最少的大致相同；在代数和的情况中，则按参与加减的各量的末位数中数量级最大的那一位为结果的末位。

六、用作图法处理实验数据

某些实验的观测对象是互相关联的两个（或两个以上）物理量之间的变化关系，实