

高等学校教学用书

普通物理实验教程

曾贻伟 龚德纯 编
王书颖 汪顺义

北京师范大学出版社

高等学校教学用书
普通物理实验教程
曾贻伟 龚德纯 编
王书颖 汪顺义
责任编辑 李桂福

北京师范大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
天津宝坻黎明印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：27.125 字数：680千

1989年11月第1版

1989年11月第1次印刷

印数：1-9 000

ISBN 7-303-00652-4/O·108

定价：5.05元

前 言

本书是根据北京师大物理系多年使用的“普通物理实验讲义”编撰而成的。全书含82个实验题目，其中多数已为物理系和外系学生多年做过的，个别题目是近年开出的。

“普通物理实验”作为一门独立课程，在北京师大物理系始于1962年，其间曾中断10年之久，自1977年又恢复至今。由于本课程是为物理专业学生开设的第一门实验基础课，自然便成为对学生进行物理实验教育的入门课。通过本课程使学生在经典物理范畴内的物理实验的基本原理、方法和技能得到较系统的、严格的培养和训练。同时将使学生在运用所学理论解决实际问题的能力、正确的实验习惯和严谨的科学作风等方面受到初步而又正确的培育。

全书分六篇，前四篇分别为绪论、力学热学实验、电磁学实验和光学实验。与传统有关教材不同的是增加了典型的、基本的原子物理实验，并将该部分作为第五篇，因这部分内容从传统观点看属于近代物理实验部分，我们也只是在近年将其中的部分题目移到本课程中，尚缺乏足够的教学经验。

为适应近代计算机技术的发展和普及，近年来在应用微机处理实验数据方面取得了一些经验，这便于学生对自己的实验结果进行自检，也利于学生对有关算法语言的掌握，为此增设了第六篇。本篇基本上囊括了本课程范围内主要的数据处理的类型。不仅对不同类型数据处理给出了数学模型和框图，而且提供了用BASIC语言编写的典型程序。相信会激起学生在这方面的兴趣，从而编出有关的更多更好的程序。

第一篇“绪论”主要是误差和数据处理的最基本内容，毋庸置疑，在本课程内占相当重要的地位。对本部分教学内容，据我们多年教学实践，不宜在学习本课程的开始就全部教给学生；而应根据学生的实际情况（如高等数学和物理实验的基础）分别在力学热学实验和电磁学实验中分段进行讲授。为了使学生更好掌握有关习题和在各实验中具体要求，在有关的实验中都有所反映。而且对不同篇的要求的侧重点也有不同。

第二、三和四篇的实验内容，分为基本实验仪器、实验和小结三部分。之所以将基本仪器和装置单成一章，是为了使学生对该部分用到的基本仪器和装置及工作原理，基本结构和使用方法有一较系统的和清楚的了解。这对师范院校学生显得尤为重要。在这几篇中都增加了有关实验部分的小结，以期使学生在逐个做完有关实验后，对该部分的重点和难点有一概括的认识。这不仅对学生较系统地掌握本课程内容有帮助，对任课教师也会有所裨益。

所列的实验题目，多数为必做内容，一般需3~4学时。有些实验给出了两种以上的测量方法和装置，这样便于因材施教，并起到扩大学生眼界的作用，少数带“*”号的为选作题目，它们有的难度大，有的内容综合性较强，一般需4~6学时。对这部分内容，有些可放在本篇的最后，有些则可放在各部分必做实验做完后再做。它们既有利于锻炼学生解决实际问题的能力，也可激发学生对本课程的兴趣。

对每个具体实验，除着重阐明有关原理外，对“步骤与要求”部分，为了循序渐进和更好地培养学生的独立工作能力，在第二篇中多数实验对步骤写得详细些，而在第三、四篇，

则着重于将实验要求交待清楚，并引导学生自己拟定实验步骤。为了使學生自行检查预习实验效果，每个实验都附有“预习思考题”，通过它能使学生在实验前，对实验原理、该实验主要关键及有关仪器装置使用要点有一掌握，利于学生更好地进行实验。

为了使學生较深入地掌握有关内容，扩大學生眼界和培养解决实际问题的能力，在多数实验后面编入了复习题，其中有相当部分是需要學生亲自动手实践才能得到正确答案，希望它们能激起广大學生的兴趣。

与其它课程明显不同的是实验课程教学是一集体性很强的事业，本教材所编入的82个题目，就是我们教研室全体人员经过多年工作，无论从仪器装置选取和制作，教学内容及要求的提出，直至预习思考题和复习题等，都是这个教学集体（教师和工程技术人员）多年辛勤劳动的结晶。

本书的基础——力学热学实验讲义是孟韵池同志负责编写的，电磁学实验讲义是曾贻伟、龚德纯和杨春元三同志编写的，光学实验讲义则是由王书颖、汪顺义同志编写的，其中有关数据处理和误差理论是由曾贻伟同志编写的。

上述各讲义又经过多年教学实践，在此基础上，由曾贻伟同志负责组织实验室部分教师完成了本书的编写工作。其中第一、三篇由曾贻伟同志编写，第二篇由龚德纯同志编写，第四篇由王书颖、汪顺义同志编写（以王书颖同志为主），第五篇由汪顺义同志编写，第六篇由曹惠贤同志编写，最后由曾贻伟同志统稿完成。在本书编写期间，因孟韵池、杨春元二同志正在国外工作故未参加，但孟韵池同志还是为本书提供了一些实验题目的编写。至于教研室其他同志参与本书中的一些实验题目的编写将在该实验后注明，这里不再列出。

本书的插图由裴纯礼同志负责，张琳、李兰秀和黄灿等同志参与了绘图与描图工作。

在此需要对本书所列题目中的仪器装置做出贡献的朱雨村、毛金英、黄灿、宋源源、所广斌、平澄、温孝东、张琳等同志表示谢意。

同时借此向曾对本课程做过贡献现已离开本室或本系的贾荣谊、陈毓芳、古松和、孙志铭、韩继岭、李蓉和王亚非等同志表示谢意。

本书的审定由林振金教授负责完成，本书的编写自始至终得到林振金教授热情地支持和鼓励，并一直得到北京师范大学出版社特别是戴俊杰副编审的热心支持和合作。借此向他们表示由衷的谢意。

由于编者水平所限，全书中定有不少不当甚至错误之处，诚恳欢迎读者提出批评和指正。

编者

1988.6

目 录

第一篇 绪 论

第一章 物理实验简介..... (1)	第三节 图示及图解法..... (11)
第一节 普通物理实验的地位和作用... (1)	第四节 偶然误差规律及其处理..... (18)
第二节 普通物理实验的进程和要求... (2)	第五节 系统误差的处理..... (22)
第二章 误差理论及其应用..... (3)	第六节 直接测得量的数据处理..... (25)
第一节 物理量的测量和实验误差..... (3)	第七节 间接测得量的数据处理..... (29)
第二节 测量结果的一般表示 有效数字及其近似计算法则..... (9)	第八节 误差传递公式应用简介..... (33)
	第九节 最小二乘法简介 曲线拟合... (37)

第二篇 力学 热学实验

第一章 实验基本仪器..... (45)	实验十二 阻尼振动与受迫振动..... (98)
第一节 长度测量基本仪器..... (45)	实验十三 驻波法测声速..... (101)
第二节 质量测量基本仪器..... (49)	实验十四 粘滞系数的测定..... (105)
第三节 时间测量基本仪器..... (51)	实验十五 伯努利方程的验证..... (109)
第四节 气垫装置..... (54)	实验十六 空气密度的测定..... (110)
第五节 温度计..... (56)	实验十七 空气温度计..... (113)
第六节 福廷气压计..... (56)	实验十八 液体表面张力系数的测定... (116)
第七节 普通量热器..... (57)	实验十九 用混合法测固体比热..... (118)
第二章 力学 热学实验..... (58)	实验二十 金属热导率的测定..... (121)
实验一 长度测量的基本练习..... (58)	实验二十一 不良导体热导率的测定... (123)
实验二 固体和液体密度的测定..... (59)	实验二十二 水的汽化热的测定..... (126)
实验三 单摆与重力加速度的测定..... (62)	实验二十三 测定空气比热比 γ (128)
实验四 杨氏模量的测定..... (66)	实验二十四 金属线胀系数的测定..... (130)
实验五 惯性质量的测量..... (70)	实验二十五 刚体转动规律的研究..... (131)
实验六 落体运动的研究..... (74)	*实验二十六 可逆摆..... (134)
实验七 斜面运动的研究..... (78)	实验二十七 焦耳热实验..... (136)
实验八 牛顿第二定律的验证..... (82)	*实验二十八 热力学第二定律的验证... (138)
实验九 验证动量守恒定律..... (84)	*实验二十九 斯忒藩常数的测量..... (141)
实验十 转动惯量的测定..... (88)	力学、热学实验小结..... (143)
实验十一 简谐振动的研究..... (94)	

第三篇 电磁学实验

第一章 基本仪器和用具..... (148)	第四节 数字电测仪表..... (159)
第一节 工作度量器..... (148)	第五节 示波器..... (160)
第二节 较量仪器..... (152)	第六节 辅助设备和用具..... (163)
第三节 指针式仪表..... (153)	第二章 电磁学实验..... (166)

实验一	静电场的描绘	(166)		及高阻	(211)
√实验二	安伏法测非线性电阻	(169)	实验十四 (b)	用冲击电流计测铁磁物质的磁化曲线	(216)
√实验三	惠氏桥测电阻	(171)	*实验十五	磁致伸缩系数的测定	(219)
√实验四	灵敏电流计工作特性的研究	(176)	√实验十六	示波器的使用	(222)
实验五 (a)	用电位差计测量电池的电动势和内阻	(182)	实验十七	电子束线的偏转	(227)
实验五 (b)	用箱式电位差计校正电表	(184)	实验十八	电子束线的聚焦	(232)
实验六	万用电表的安装、校正和定标	(187)	√实验十九	交流电桥	(236)
实验七	开尔文双电桥测量低电阻	(192)	√实验二十	LRC电路的稳态研究	(242)
实验八	磁场的描绘	(195)	√实验二十一	LRC电路谐振特性的研究	(245)
实验九	冲击电流计工作特性的研究	(199)	√实验二十二	LRC电路的暂态过程研究	(249)
实验十	冲击法测螺线管内轴向磁场分布	(202)	实验二十三	交流电路中阻抗和功率的测定	(254)
实验十一	热电偶的校准	(205)	实验二十四	电化当量的测量	(258)
*实验十二	半导体热敏电阻特性的研究	(208)	*实验二十五	周期函数的付立叶分解与合成	(259)
√实验十三	霍尔效应	(211)	实验二十六	非线性RLC电路	(262)
实验十四 (a)	用冲击电流计测电容		电磁学实验小结		(264)

第四篇 光学实验

第一章	实验基本仪器	(269)		布	(322)
第一节	光源	(269)	实验十一	偏振现象的观测和分析	(324)
第二节	常用光学仪器简介	(271)	√实验十二	光电效应	(329)
第二章	光学实验	(293)	√实验十三	迈克尔逊干涉仪的调整和使用	(332)
√实验一	薄透镜焦距的测量及象差的观察	(293)	实验十四	透镜组基点的测定	(335)
实验二	分光计的调整及棱镜折射率的测定	(299)	√实验十五	衍射光栅	(337)
实验三	液体折射率的测定	(301)	√实验十六	单色仪定标和滤色片透射曲线的测定	(340)
实验四	平行光管的调整和使用	(303)	*实验十七	法布里-珀罗干涉仪	(341)
√实验五	幻灯片的制备	(307)	√实验十八	全息照片的摄制	(345)
实验六	显微镜	(310)	实验十九	发光强度的测量	(350)
实验七	等厚干涉现象的研究	(313)	√实验二十	阿贝成像及空间滤波	(352)
实验八	用小型棱镜摄谱仪测光波波长	(317)	*实验二十一	微波的干涉 衍射和偏振	(358)
实验九	用菲涅耳双棱镜测波长	(319)	光学实验小结		(358)
√实验十	测量单缝和双缝衍射的光强分布	(322)			

第五篇 原子物理实验

实验一	基本电荷的测定	(362)	*实验四	塞曼效应	(371)
实验二	夫兰克-赫兹实验	(365)	实验五	盖革-米勒计数管的特性	(375)
实验三	氢原子光谱	(369)	*实验六	放射性测量的统计规律	(380)

第六篇 处理实验数据的典型程序

第一节 单变量统计检验及误差计算子程序..... (382)	第三节 逐差法子程序..... (387)
第二节 双变量统计计算子程序..... (385)	第四节 线性回归程序..... (387)
	第五节 非线性拟合..... (400)

附 录

一 基本物理常数..... (404)	十 固体的线胀系数和液体的体胀系数 (418)
二 密度..... (404)	十一 空气的相对湿度与干湿泡温度计 温差的关系..... (419)
三 重力加速度..... (407)	十二 液体的表面张力..... (420)
四 固体的各向同性弹性模量..... (408)	十三 液体的粘性..... (421)
五 固体的摩擦系数..... (408)	十四 元素的电阻率..... (422)
六 声速..... (409)	十五 温差电动势..... (422)
七 蒸气压..... (411)	十六 各种物质的折射率..... (425)
八 比热容、熔化热和汽化热..... (413)	十七 常用谱线波长..... (426)
九 物质的热导率..... (416)	

第一篇 绪 论

第一章 物理实验简介

第一节 普通物理实验的地位和作用

物理学是一门实验科学。任何物理概念的确立，物理规律的发现，都必须以严格的科学实验为基础；人们所提出的理论是否正确，又必须通过科学实验和生产实践来检验。这一观点可以用物理学发展史中一系列的生动事实所证明。

地心说的破产：公元2世纪以后的天文学，在相当长的时间内被托勒密的地心说所统治。直到16世纪初，哥白尼第一个提出了日心说，但由于当时没有精密的观测仪器，他的观点没能立即被人们接受。直到1610年，由于伽利略用新发明的望远镜观察到木星有四个卫星。这一重要发现粉碎了“地球是宇宙唯一中心”的观点，从而宣告了地心说的彻底破产。

比萨斜塔实验：伽利略在著名的比萨斜塔上所做的落体实验否定了亚里士多德的“落体的速度与重量成正比”的错误论点，得出了在同一地点，不同的物体具有相同的重力加速度这一科学论断。

量子论的发展：普朗克在关于黑体辐射问题的研究中，于1900年首先提出了量子化的假说：物质辐射的能量是不连续的，是某个最小能量单位的整数倍。并考虑到了鲁宾和克尔包姆做的一些仔细的测量，经过理论推断，提出了后来称做普朗克常数的数值 $h=6.5 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ （现代公认为 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ）。但是由于他的假说在人们看来太离奇，而且当时也没有更为令人信服的事实来证明，因此这个假说未能引起人们足够的重视。后来爱因斯坦以光电效应的实验事实为依据，进一步对量子论进行了有力的论证，从此量子论才得以发展起来。

正负电子的湮没：在基本粒子领域内，也可举出很有说服力的事例。在本世纪30年代发现正电子之后，布拉开特（P. M. S. Blackett）用实验证明，能量足够大（大于1022 Mev）的 γ 射线光量子，在轰击某些原子核时，可以在核的周围形成正负电子对。后来有人设想，如果正负电子相遇，会不会在它们消失的同时产生 γ 射线光量子呢？它们的波长也应该能够根据电子的能量计算出来。这一设想到1949年由迪蒙特设计的晶体分光计加以证实。他不仅证实了正负电子对在湮没时产生 γ 射线光量子，而且测出的波长值与理论计算的数值十分吻合。

物理学发展到当今的时代，与实验的关系就更为密切，而且在许多边缘科学的建立过程中，物理实验也起了重要的桥梁作用。因此现代世界各先进国家都很重视实验技术的发

展和实验技术队伍的培养。在我国也是这样，不仅在科研机构中，而且在各级学校的物理教学中，物理实验也越来越占有重要的地位。现行高等院校物理专业教学计划，将物理实验单独设课，其中“普通物理实验”列为物理专业的一门重要基础课。通过这门课程的学习，将使 学生掌握基本的实验思想和方法。为以后接受“近代物理实验”以至专业实验课奠定坚实的基础；并成为学生在校期间培养理论联系实际、独立工作的能力和良好的科学作风的重要途径之一。

设置普通物理实验课的主要目的是：

1. 学习物理实验的基本知识、基本方法和培养实验的基本技能（包括有关仪器的选择和使用，基本测量技术和方法，实验数据的处理，对结果的误差做出分析和判断，完成实验报告等）。
2. 通过实际观测和分析，加深对物理概念和规律的认识，为后继课打下基础。
3. 培养严肃认真，实事求是的科学态度和严谨的工作作风。
4. 培养学员能居高临下地组织有关中学物理教学并具有指导中学物理实验的基本能力。

第二节 普通物理实验的进程和要求

实验进程一般可分为三个阶段：

1. 实验前准备：了解实验目的，看懂实验原理，并对所要用的实验仪器的性能、基本工作原理和使用时的注意事项做到心中有数。为此对每个实验中所列的预习思考题应该清楚，在此基础上写出预习报告，预习报告主要应包括实验中要观察的物理现象和对要测量的物理量列出实验记录表格。

2. 实验：实验时对所要使用的仪器及工具是否完好和可用应进行检查，经过一定的练习达到正确操作。在此基础上正确地组装和调整仪器得以进行实验（包括电路的正确连接，光路的调节等）。实验时一定要先观察现象，通过观察对被验证的定律或被测的物理量有个定性了解。而后再进行精确的测量，测量时一定要如实地记录数据。有条件可进行重复测量。实验完成后，对获得的数据或观察到的现象进行分析，在肯定结果基本合理后再整理仪器和工具。

3. 写出实验报告。整理和分析所获得的实验数据，从而得出合理的实验结果，并对所得结果进行一定分析。

为保证课程正常进行，提出以下要求：

- (1) 课前预习实验讲义，明确实验目的，了解实验原理，弄清实验步骤，初步了解仪器的使用方法，画好记录表格。未做预习，不得动手做实验。

- (2) 上课时，首先检查和熟悉仪器，根据操作规程正确安装和调整仪器，然后按实验程序进行实验。

- (3) 在实验时，一定要先观察欲研究的物理现象，在观察的基础上，再对被研究的现象进行定量测量。测量时，应如实、即时做好记录（记录要整洁，字迹清楚，避免错记），不可事后凭回忆“追记”数据，更不可为拼凑数据而将记录做随心所欲的涂改。

- (4) 在有关测定进行完毕后，要及时整理实验数据。经指导教师检查后，方可结束实

验。

(5) 实验结束后，应把实验仪器整理清点好，注意保持实验室的整洁，经指导教师同意后，方可离开实验室。

(6) 严格遵守实验室规则，爱护实验仪器，仪器如有损坏，应及时报告指导教师。凡属学生责任事故者根据情节，要赔偿部分或全部损失。

(7) 实验报告应认真按时完成。

怎样写好一份合格的实验报告，也是实验课的一项重要基本功训练。实验报告要用统一印制的实验报告纸书写，除填写实验名称日期、姓名、班级、组别等项外，实验报告的内容一般包括以下几部分。

实验目的

实验仪器：注明仪器名称、编号。必要时画出仪器简图。

实验原理：一般只需写出原理概要（包括原理图）或测定公式，注明公式中各量的物理意义。

实验步骤：讲义上已具体给出时，可略去不写，但要求自己设计安排实验时，应写出简要步骤及注意事项。

实验记录：实验数据一般应采用表格形式记录。在预习时，就应当设计好记录表格。记录数据时，要注意用有效数字正确表示各测得量，并应注明测得量的单位。

实验数据处理：包括计算实验结果及其误差，给出实验结果的图示等等。

实验讨论及作业：对实验结果进行分析讨论，完成作业题等。

第二章 误差理论及其应用

第一节 物理量的测量和实验误差

对物理量进行测量，是物理实验的极其重要的组成部分。而对某物理量的大小进行测定，实际上就是将此物理量与规定作为标准单位的同类物理量或可借以导出的异类物理量相比较。例如，物体的质量可通过与规定用千克作为标准单位的标准砝码相比较而测得；物体运动速度的测定则必须通过与二个不同的物理量，即长度和时间的标准单位相比较而获得。

国际上规定了长度（米）(m)，质量（千克）(kg)，时间（秒）(s)，电流（安培）(A)，热力学温度（开尔文）(K)，发光强度（坎德拉）(cd)和物质的量(摩尔)(mol)共七个物理量的单位为基本单位。其它物理量的单位则是由以上基本单位按一定的计算关系式导出的，因此称它们为导出单位。如以上提到的速度及经常遇到的力、电压、电阻等物理量的单位都是导出单位。

一个被测物理量，除了用数值和单位来表征它外，还有一个很重要的表征它的参数，这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数却往往容易为人们所忽视。设想如果得到一个测量结果的可靠性近乎为零，那么这种测量结果还有什么价值呢？！因此，从表征

被测量这个意义说，其结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义，三者是缺一不可的。本绪论相当主要的部分就是讨论有关测量结果可靠性的定量估计，及其表示方法。

按测量结果获得的手段来分，可将测量分为直接测量和间接测量，而就测量条件是否相同来分，又有所谓等精度测量和不等精度测量。

直接测得量：是指一些物理量可以通过相应的测量仪器直接测得，凡由此获得的物理量统称为直接测得量。

间接测得量：是由一些直接测得量通过一定的数学关系式计算出来的量。

譬如：某段距离能用米尺测得。那么由此而得到的距离值即为直接测得量。某圆柱体的体积 V 可以分别测定该圆柱体的高度 H 和它的横截面直径 D ，然后再由公式 $V = \frac{1}{4}\pi D^2 H$

求得。显然，这样得出来的体积便是间接测得量。不过，直接测得量和间接测得量的划分，对某一确定的物理量来说并非绝对的，而是随着所使用的测量方法和手段的不同而转化的。如某一电阻的确定：它既可以用电压表和电流表，分别测定加在该电阻上的电压和通过其上的电流，再利用欧姆定律求出。同样，也可使用欧姆表或单臂电桥直接测定，显然，同是一个电阻，当用前一方法测定，便为间接测得量；而用后一方法测定，则为直接测得量。可见，一物理量的测定，究竟是否为直接测得量，这完全取决于所用的测量手段和方法。无可置疑的是，随着科学技术水平的提高，能够直接测定的物理量必将越来越多。

等精度测量：当对某一物理量，在同样的实验条件下（同一实验者，同一实验仪器，同一实验方法，同一实验环境等），进行多次重复测量，各次测得结果又有所不同，对这类测量，没有任何充足的理由说某次测量一定比另一次更精确，这样，只能认为每次测量的精确程度是相同的。于是将这种具有同样精确程度的测量称为等精度测量。

不等精度测量：在多次重复测量时，只要上述诸实验条件中任一个发生了变化，那么在这种情况下进行的测量便是不等精度的测量。

严格说，在实验中，保持实验条件完全相同的多次测量是极其困难的。但当某一条件的变化，对测量结果影响不大，甚至可以忽略时，仍可视这种测量为等精度测量。为了简化问题的讨论，本绪论只限于研究等精度测量的数据处理问题。

测量过程中不可避免地总是存在着误差，这首先表现为，当在同样条件下对同一被测量重复进行测量，得到的结果一般都不会相同；其次因受所用测量仪器准确度及分辨率的限制，获得的结果也不会绝对准确；还有在测量过程中，被测量往往要对测量仪器施加作用，方能获得测量结果，这便意味着测量过程本身会改变被测量的原来的状态等等；总之，这些都会使测量结果与被测量的真值或实际值之间存在着差异。为此，我们定义：

测量结果 X 与真值 A_0 （或实际值）的差为测得量的绝对误差用 Δ 表示，便有

$$\Delta = X - A_0 \quad (1)$$

其中 X 为被测量的实测值， A_0 为被测量的真值。我们将凡是在一定时间内，被测量事实上并不发生变化的真正大小称之为真值。鉴于以上所述的种种原因，一般说来，真值是很难确切测定的。当然用(1)式确定被测量的绝对误差也就成为不可能了。不过，只有以下情况例外：

(1) 理论真值：如平面三角形的三角之和总为 180° ，直角三角形斜边的平方必等于二

直角边的平方和等等。

(2) 由国际计量大会决议约定的值, 可视为近似真值 (可把它们作为真值为已知的情况处理)。如前面介绍的基本物理量的单位标准, 以及大会决议约定的基本物理常数值等, 都可视为近似真值。需要指出的是, 由于这些基本常数是大会决议通过的, 只能反映大会当时的测量水平, 显然, 这些基本常数也是含有一定的误差的, 只不过因为它们的误差较一般实验室测得结果的误差小得多, 故而将它们作为公认的近似真值。随着时间的推移, 科学技术水平不断的提高, 这些基本常数值必会日臻完善而更加接近它们的真值。

(3) 因为通常进行测量时, 不可能将所使用的测量仪器逐一去直接与国家的或国际的标准相校对, 而是经过多级计量检定网进行一系列逐级校对。对每一级校对, 则常用比被校仪器高一级的标准器的量值 A_0 作为近似真值 (也称为实际值)。通常认为, 高一级的标准器的误差为被校准仪器误差的 $1/3 \sim 1/20$, 则可视此标准器的量值为被校仪器的近似真值。

为了表征测量结果的优劣, 除绝对误差外, 还需要引入相对误差的概念。例如用螺旋测微计分别测定厚为 2mm 和 2cm 的二平板, 测量结果的绝对误差都为 0.005mm。显然, 以绝对误差来评价以上二个测得结果, 优劣程度是相同的。但是如果用绝对误差与测量值本身的比值来评价它们时, 则会发现二者有明显的区别, 即

$$\frac{0.005}{2} > \frac{0.005}{20}.$$

不难判断, 厚为 2cm 的测量结果要比厚为 2mm 的要好。为此我们引入以上述比值来表示测量结果的误差, 称其为相对误差。

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} \quad (2)$$

其中 Δ 为测得值的绝对误差, A_0 为其真值 (或近似真值)。根据以上的讨论, 只有对于具备能求绝对误差的以上三种条件, 才可由 (2) 式求其相对误差。相对误差常用百分数表示, 即有

$$\delta = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (2')$$

于是也常将如 (2') 式表示的相对误差称为百分误差。无论是 (2) 式, 还是 (2') 式表示的相对误差都是不带单位的数。

以上介绍了误差的不同表达方式。若从误差自身的特点和服从的规律来考虑, 则又可将误差分为系统误差, 偶然误差和过失误差。本节只介绍它们的特点, 至于它们 (过失误差除外) 所遵从的规律, 将在后文中进行讨论。

一、系统误差、准确度

系统误差是指实验系统 (测量系统) 在测量过程中和在取得其结果的过程中存在恒定的、或按一定规律变化的误差。如米尺本身刻度划分得不准, 或因环境温度的变化导致米尺本身长度的缩胀; 又如秒表计时有恒定误差, 或是恒快, 或是恒慢等等; 这些均为因仪器本身结构或环境变化导致的恒定的系统误差。又如在测量电阻的阻值时, 电阻上因通过电流而发热, 从而导致了电阻阻值的变化, 这种变化是有一定规律的。因此这类误差便属于按一定规律变化的系统误差。

根据系统误差产生的原因, 大致可分为:

1. 测量仪器误差: 即因受仪器本身准确度及分辨率限制而导致的误差。

2. 方法或理论误差：此乃因使用的实验方法或原理不完备而引起的误差。

3. 环境误差：由于外界环境如温度、湿度、电场、磁场和大气压强等因素的影响而造成的误差。

4. 人身误差：此乃由测量者的感官，特别是眼睛和其它器官不够完善而导致的习惯性误差。而且这种误差的产生和它对测量结果的影响往往因人而异。

5. 装置误差：这是由于测量设备安装得不尽合理，或线路布置不够妥贴，或接线和仪器调整不当而产生的误差。

应该说明，以上分类并不很严谨，更不要把以上分类绝对化。因为如何划分各种系统误差，对实验结果的分析并不是至关重要的，而掌握这类误差出现的原因及其所遵从的规律，以便设法减小或消除它们对实验结果的影响，才是实验者更应关心的事情。

由于系统误差的存在直接影响着测量结果的准确性，减弱或消除这类误差才能使测量结果更加接近真值。因此我们用“准确度”一词来描述测量结果系统误差的大小。所谓某一测量结果的准确度高；就是说该测量结果的系统误差小，反过来说，若某一测量结果的准确率低，其系统误差必然大，显然，欲提高实验结果的准确度，就需要研究系统误差的规律和产生的原因，从而采取相应的措施，对它加以限制、削弱直至消除。而欲达此目的，需要有一定的实验技巧和经验，这里就不做进一步的阐述了。

二、偶然误差、精密度

在测量过程中，即使是消除了一切可以消除的系统误差，或是对一切能够改正的系统误差进行了改正，也还会存在一些不确定的因素，如受人们感官灵敏度的限制，在使用指示仪表，重复测同一量时，很难做到每次的读数都完全一样，如受仪器分辨率的制约；在测量过程中周围环境会有起伏的变化；此外，还有一些很难避免的偶然因素的干扰，这些都有可能使重复测量的结果不尽相同，一般说，彼此总会略有差异的，对于上述因偶然因素引起的误差称为偶然误差。

这类误差的存在使每次测量结果与真值相比，总是有偏离的，偏大偏小都是可能的。但随着测量次数的增多，便会发现它们却服从一定的统计规律，对此类误差是可以用严格的数学理论和方法——概率论的理论和方法去解决的。

偶然误差反映的是一组测量结果的重复性和弥散性，对此我们用“精密度”一词来形容。如果某被测量经多次重复测量，其值彼此间很接近，差异甚小，说明此组测量重复性好，或者说测量的精密度很高；反之，若对同一量进行多次测量，所得结果数值极为分散，则彼此相差很大，则说明该组测量重复性差，也即精密度低。

三、过失误差。

这种误差纯属因实验者的粗心，而在测量或计算过程发生错误所致。所以这类误差也称为粗差。显然，只要实验者细心测量，记录和处理数据要正确，这种误差是完全可以避免的。

第二节 测量结果的一般表示 有效数字及其近似计算法则

一、测量结果的一般表示

原则上测量结果可表示为：

测量结果值 \pm 系统误差 \pm 偶然误差

对上面表示的三个部分简要说明如下：

1. 测量结果值的表示按单次及多次测量分，有以下两种不同表达方法：

(1) 单次测量结果即用该次测得值来表示。

(2) 多次测量结果则以各次测量结果的算术平均值来表示。这可由严格的数学理论证明，等精度多次测量结果的最可信赖值，就是各次测量结果的算术平均值（证明此处从略）。若用 X_1, X_2, \dots, X_n 表示该组测量的 n 次测得结果，则由上结论知这组测量的最可信赖值可写成

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

这里 \bar{X} 为该组测量的算术平均值。可以证明测量次数趋于无穷多，且在测量过程中不存在系统误差及过失误差。则由(3)式表示的算术平均值将趋近于被测量的真值。因此常以算术平均值作为真值未知的一组测量的近似真值。为说明各次测得值与其算术平均值的偏离，并与(1)式给出的绝对误差相区别，引入绝对偏差（有的书也称为残差）；以 v_i 表示，则有

$$v_i = X_i - \bar{X} \quad (4)$$

此处的 X_i 表示某次测量的测得值， \bar{X} 为该组测量的算术平均值。同样也可定义相对偏差，以 δ_i 表示，则有

$$\delta_i = \frac{v_i}{\bar{X}} \quad (5)$$

若以百分数表示，便称其为百分偏差。

2. 关于偶然误差的表达：偶然误差的表达方式有多种，做为初次接触，本节只介绍其中一种最简易的表达方式——以平均绝对偏差表示多次测量的偶然误差。对一组 n 次测量，我们定义平均绝对偏差为各次测量值的绝对偏差的绝对值的平均值，以 η 表示即：

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{n} \quad (6)$$

有关误差理论指出，在测量次数 n 不是很小的情况下（ $n \geq 15$ ）， η 相当于算术平均值的偶然误差的最大误差（或极限误差）。需要指出，(6)式给出的平均绝对偏差并不是严格由概率论推出的结果，引入此式完全是为了初学者便于接受，在测量次数较少时，如 $n = 5$ ，经计算知它表示结果在此范围内的可信程度约有80%。

3. 系统误差的表达：在最后结果表达式中的系统误差一般应包括以下两部分：

(1) 数值和符号可以确定的系统误差。这类系统误差是可以通过计算或测量得到其数值和符号的，从而可对测得结果直接加以改正，因此也将这类系统误差称为改正值。

(2) 误差范围能够确定的系统误差。这类系统误差的具体数值和符号难以确定，但其误差范围是可以确定的。我们称它为仪器最大系统误差（或称为系统不确定度），而这最大系统误差往往可以通过所用仪器的准确度加以确定。

4. 测量结果的精确度：前已指出，准确度是表征测量结果中存在的系统误差大小的量；精密度则是表征测量结果的偶然误差大小的量。准确度和精密度是从不同的侧面描述测量结果的量，若要对测量结果作出全面评价，二者是缺一不可的。因为任一测量结果总会

存在系统误差和偶然误差，所以必须将二者综合起来，方能全面描述测量结果，故引入精确度来全面评价一组测量结果。

5. 测量结果的数字表示：此问题乍一看，似乎感到很简单，把被测结果用数字写出来不就行了吗？何需花费笔墨进行讨论呢？但仔细推敲，便会提出问题，当用不同计算工具（如四位或五位数学用表、六位或八位数字显示的计算器等）对同一测量数据进行运算，所得结果的数字表示的数位显然是不同的。应选择哪个数字表示做为实验结果的正确表示呢？一个实验结果的数字表示应取决于该结果的误差。而计算工具的选择也应以此为准，不得由于计算工具选择不当而扩大结果的误差。计算结果的数字表示亦应由误差的大小来确定。如某一测量结果，用六位数字显示的计算器求出的值是21.3204，又如其误差为 ± 1.4 。由此得该结果数字表示的数位不应取6位，而应取3位或者2位；即写作 21.3 ± 1.4 ，或 21 ± 1 ，又如另一测量结果为123，其误差为 ± 0.05 ，显然，它应表示成 123.00 ± 0.05 ，而不能写成123。对前一例，若以计算器给出的读数做为最终结果的数字表示，（即写成21.3204），这无疑夸大了测量结果的精确度；而对后例，把结果写成123，而不是以123.00表示，则大大降低了测量结果的精确度，因此必须以结果的误差来确定其数字表示的数位。

由以上讨论使我们懂得，欲正确无误地用数字表示最后测量结果，必须要对最后测量结果的误差进行计算。

二、有效数字

由上所述，当以数字表示测量结果时，其数位的多寡应由测量值本身的误差来确定。我们定义：若测量结果从第某位数起开始有误差，则自第一位非零数位算起，直到开始有误差的该位为止（包括该位）的各数位均称为有效数字。

仍以前面所举的数字为例，该测量结果应写成 123.00 ± 0.05 。我们可以看出，结果的误差发生在小数点第二位上，因此该测量结果应认为有5位有效数字。

又例如某测量结果为 0.00234 ，其绝对误差为 ± 0.00002 ，我们认为它有3位有效数字，因为根据有效数字的定义，2以前的三个0都不是有效数字；此外，从结果的误差可见，从小数点后第5位就开始有误差，因此结果中小数点后第6位的4就不应算作有效数字，所以我们只能认为结果有三位有效数字。

再如一测得结果为 2.3×10^3 ，而其绝对误差为 ± 0.2 ，那么此测量结果的有效数字应有几位？为回答此问题，先将测量结果表示成： $(2.3000 \pm 0.0002) \times 10^3$ 。（这里需要说明的是：当将测量结果用误差形式表示时，结果的最后一位应与误差的数位对齐）。根据以上定义，不难确定该结果的有效数字为5位。

从以上讨论可知，当“0”这个数字出现在测量结果数值的前面，则只是表示该结果的数量级，并不表示有效数位；若在测量结果数值表示的中间则为有效数字；而在数值表示的最后时，则有可能是有效数字，不得无根据的舍弃或添加。

在直接测量中，如何根据使用的测量仪器，正确地用有效数字表示测得结果呢？总括以上讨论我们得到以下两种结论：

1. 对于一次直接测得量，一般情况下，应按仪器或量具的最小分度决定该结果的有效数字位数。对于长度量或可化为长度量的测量，一般要估读到该测量仪器的最小刻度的下一位。如用米尺测量，则应估读到 $1/10\text{mm}$ ，用最小刻度为 1°C 的温度计读数时应估读

到 $1/10^{\circ}\text{C}$ 。至于在使用附有副尺的量具时，则应视副尺刻线间距离确定如何估读。如使用最小分度为 $1/10\text{ mm}$ 的卡尺，至少还可以估读到 0.05 mm ；而若使用最小分度为 $1/50\text{ mm}$ 的卡尺，因副尺刻线较密，便可以其最小分度，作为估读的范围。从对测量结果产生误差的影响来说，最小分度为 $1/10\text{ mm}$ 的卡尺（其误差可认为是 $\pm 0.05\text{ mm}$ ）与最小分度为 $1/50\text{ mm}$ 的卡尺（其误差可认为是 $\pm 0.02\text{ mm}$ ）是无甚区别的。因为，用它们去测同一被测对象时，所得结果的有效数字位数是相同的。

但在一些特殊情况，一次测量的有效数字需根据具体条件加以确定，如在测一较长距离，且实际情况不允许正确放置米尺而后读数，在这种情况下，测量误差显然超过仪器的最小刻度，其结果的有效数字位数应按实际测量的误差确定。

2. 凡是多次测量的直接测得量，其算术平均值的有效数字位数，可由该组测量的平均绝对偏差来确定（以后还将介绍用其它表达方式的偶然误差）。

对于间接测得量的有效数字，则应根据其误差（包括系统误差和偶然误差）来确定。即取最后结果的数字与其相应的误差对齐。而误差的数字，一般取 $1\sim 2$ 位即可。

三、有效数字的近似计算法则

在实验中，大量遇到的是间接测得量，这就不可避免地要对测得量施以各种运算。下面介绍一种近似计算法则，利用它既可以简化计算，也能近似地确定结果的有效数字位数，而这样做同先计算其误差后再确定有效数字位数的办法相比，出入并不大。

1. 加、减运算近似计算法则。

(1) 先找出参与运算的误差最大的数据，并用有效数字表示它。

(2) 以该数据的最后一位为标准，将其它的数据排成竖式进行简化，即按舍入奇偶法则处理，可多保留一位。

(3) 对简化后的各数进行加、减运算。将误差最大的有效数字的末位，做为结果的有效数字的末位，余数按舍入奇偶法则处理。

2. 乘、除运算近似计算法则：

(1) 先找出参与运算的有效数字位数最少的数据。

(2) 以该数有效数字位数为准，简化参与运算的其余各数的有效数字位数（包括常数），可多保留一位，多余位数按舍入奇偶法则处理。

(3) 进行乘除运算，计算结果的有效数字位数和参与乘除的各数据中有效数字位数最少的位数相同，多余位数按舍入奇偶法则处理。

3. 乘方、开方的有效数字位数与底数的有效数字位数相同。

4. 三角函数的有效数字位数与相应的角度（以弧度为单位）的有效数字位数相同。

5. 自然对数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同；而以 10 为底的对数，其尾数的有效数字位数与真数的有效数字位数相同。

在结束有效数字及其近似计算法则的讨论时，仍需强调以下几点：

1. “ 0 ”在数字中间或数字后面都是有效数字。例如： 1.005 ， 125.0 ， 13.00 这些数中的 0 都是有效数字。特别要注意数字 1.0 与 1.00 的意义是不同的，两者误差不同，所反映的精确程度也不同。

2. 有效数字的位数与单位无关。例如 $L=1.2\text{ cm}$ ，若以米做单位，就应表示为 $L=0.012\text{ m}$ ；而以千米做单位时，就应表示为 $L=0.00012\text{ km}$ 。但这样书写很不方便，一般

写成 $L = 1.2 \times 10^{-5} \text{km}$, 同样, 若以微米为单位时, 应写成 $L = 1.2 \times 10^4 \mu\text{m}$. 但决不可写成 $L = 12000 \mu\text{m}$.

由此例可知, 当数字很大或很小, 且有较多数字位数又较少时, 用10的方幂形式来表示比较方便. 例如地球质量 $M = 5.96 \times 10^{24} \text{kg}$, 电子的电荷 $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{C}$ 等等, 其中有效数字的部分是指10的方幂的系数部分, 并且一般规定小数点点在第一位数字后面, 而整个数字的数量级, 则用10的方幂体现出来.

3. 有效数字计算中, 多余位数一律按舍入奇偶法则加以简化. 例如32.1348, 取4位时为32.13, 取5位时为32.135. 又如26.175和26.165, 取四位时分别为26.18和26.16.

4. 参与计算的常数, 如 $\pi, e, \sqrt{2}, \frac{1}{2}$ 等, 其有效数字位数可认为是无限的, 在计算中需要取几位就取到几位.

5. 为了避免由舍入过多而带来附加误差, 在运算过程中的有效数字位数可多保留一位, 但在最后结果中, 一般只保留一位可疑数字. (4) 中所提到的常数, 在运算时可照此处理.

6. 有效数字的第一位数字是8或9的, 在参与运算时可多计一位有效数字.

7. 选取运算工具时, 应使其所给出的数字位数不小于测得值的有效数字的位数. 否则将因计算工具选择不当而损失有效数字位数, 造成测得结果精确度的降低, 这是不允许的. 但随意扩大结果的有效数字位数也是错误的.

习 题

1. 下列各量是几位有效数字?

9.8, 1.0070, 0.0310, 4.90×10^2 , 2.1700×10^{-10} , 3.1 ± 0.02 , 2.54 ± 0.06 , $2.2 \times 10^3 \pm 0.8$

2. 换算下述测定值的单位:

$$23.5 \text{g} = \underline{\quad \quad \quad} \text{kg} = \underline{\quad \quad \quad} \text{mg}$$

3. 指出下列表示式的不妥之处并加以改正.

$$(18.235 \pm 0.02) \text{cm}, (32.1 \pm 0.02) \text{g};$$

$$(2.250 \pm 0.19) \text{s}, g = 980.34 \text{cm} \cdot \text{s}^{-2},$$

且 $\delta g = 0.5\%$.

求出下列各式之结果:

$$101.2 + 53.45 - 0.036 = ?$$

$$1234 - 78.06 - 532 - 0.003 = ?$$

$$\sin 30.2^\circ = ?$$

$$\sin 70.5^\circ = ?$$

$$\lg 102.8 = ?$$

$$\frac{125 - 5.0}{40.00} = ?$$

$$\frac{1}{1000} = ? \quad (\text{其中 } 1 \text{ 为常数})$$

$$\frac{(132.2 \div 0.005) \times 120.8}{5864 - 4927.0} = ?$$

5. 某长方体长10.23cm, 宽5.41cm, 高1.875cm. 质量为241.35g, 求其密度 ρ .

6. 若一钢球的直径为1.590cm, 求其体积为多少? 其中 π 应取几位有效数字?