普通高等教育“十五”国家级规划教材
(高职高专教育)

物理实验教程

第　二　版

李寿松　主编
李寿松　苏　平
王晓耕　李　平　编

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》
追究刑事责任。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

现公布举报电话及通讯地址：

电　　话：

传　　真：

E - mail：dd@hep.com.cn

地　　址：北京市东城区沙滩后街 55 号

邮　　编：100009

责任编辑　董洪光
封面设计　杨立新
责任绘图　黄建英
版式设计　王艳红
责任校对　尤　静
责任印制

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材，也是普通高等教育“十五”国家级规划教材，本书是在第一版的基础上，结合高职高专
括绪论、测量误差和数据处理、前导实验、物理实验中的基本调节与操作技术、基本实验、物理实验中的实验方法和测量方法、提高实验、设计性实验和测量不确定度等九章。选编32个实验项目，其中前导实验6个，基本实验15个，提高实验6个，设计性实验5个。书末备有有关附表和实验仪器插图。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校各专业的物理实验教材，也可供工科本科物理实验课程学时数较少的专业选用。

图书在版编目(CIP)

物理实验教程/李寿松主编.—2版.—北京:高等教育出版社，2003.4
ISBN 7-04-012414-9

Ⅰ.物… Ⅱ.李… 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

出版发行 高等教育出版社　　购书热线 010-64054588
社　　址 北京市东城区沙滩后街55号　　免费咨询 800-810-0598
邮政编码 100009　　网　　址 http://www.hep.edu.cn
传　　真 010-64014048

经　　销 新华书店北京发行所
印　　刷

开　　本 787×1092 1/16　　版　　次 1998年5月第1版
印　　张 10.5　　年　月第　版
字　　数 240　　印　　次　　年　月第　次印刷
插　　页 2　　定　　价 13.30元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出 版 说 明

为加强高职高专教育的教材建设工作，2000 年教育部高等教育司颁发了
专教育教材建设的若干意见》
版 500 本左右高职高专教育规划教材”的目标，并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施：先用 2 至 3 年时间，在继承原有教材建设成果的基础上，充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验，解决好高职高专教育教材的有无问题；然后，再用 2 至 3 年的时间，在实施
教学内容体系改革与建设项目计划》
专教育教材。根据这一精神，有关院校和出版社从 2000 年秋季开始，积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据 1999 年教育部组织制定的

案)
部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002 年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题，将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略，抓好重点规划”为指导方针，重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设，特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材；同时还要扩大教材品种，实现教材系列配套，并处理好教材的统一性与多样化，基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系，在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材
校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002 年 11 月 30 日

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第二版前言

本书是教育部高职高专规划教材，也是普通高等教育“十五”国家级规划教材，本书在第一版的基础上，结合高职高专
全面的修改。教材内容的主要变动如下：

1．在国际计量局
布了
定度表示体系进入一个日臻完善、全面推广的新阶段。为此，本书增加“测量不确定度”一章。各校可根据具体情况进行讲解或供学生阅读。

2．以
性实验和简单设计性实验”为原则，调整原书中的部分实验内容。删去“气轨上测简谐振动的周期”等三个实验，增加“声速的测定”、“用旋光仪测糖溶液的质量浓度”两个实验。

本书由李寿松主编。各参编作者分工如下：苏平
实验六、实验八、实验二十、实验二十一、第四章)
十三、实验 14 - Ⅰ、实验十七、实验二十八、实验二十九、实验三十一)
7 - Ⅱ、实验十、实验十五、实验十六、实验十八、实验十九、实验二十二、实验二十三、实验二十四、实验二十五、实验二十六)
验二十七、实验三十、实验三十二、附表、插图)

由于编者水平有限，书中一定存在不少错误和不妥之处，敬请使用本书的教师和读者批评指正。

编　者

2003 年 1 月

第一版前言

本书根据
程专科物理课程教学委员会指导下完成的。

本书内容包括绪论、测量误差和数据处理、前导实验、物理实验中的基本调节与操作技术、基本实验、物理实验中的实验方法和测量方法、提高实验和设计性实验等八章，并附有有关附表。编者在编写时，注意了以下几个方面：

1. 在教材的体系上，突破传统的力、热、电、磁、光到近代物理的排列顺序，根据逐步提高学生的实验技能，由浅入深、由简单到复杂的原则，实验项目按前导实验、基本实验、提高实验和设计性实验的次序排列，各部分内容之间有明显的阶梯性。

2. 物理实验课程是对学生进行科学实验基本训练的一门独立的必修的实验基础课，为了加强课程自身的基本理论和基本方法，本书将测量误差和数据处理、物理实验中的基本调节与操作技术、物理实验的实验方法和测量方法分别立章。

3. 在
鉴于目前工科院校、高等工业专科学校和职业大学的现状各异，本书选编了 33 个实验项目，有的项目还列出几种不同的实验方法，以便各校在使用本书时根据自身的实际情况和实验总学时数选用。

4. 在内容叙述上，力求做到实验目的明确，实验原理叙述清楚，仪器介绍实用、典型，实验步骤简明可行。

本书采用以国际单位制
词审定委员会公布的
表示物理量的符号和科学符号。需要说明的是，考虑到现行使用仪器面板上符号的实际情况，有些符号字体作了灵活处理。

本书由李寿松主编。各参编作者分工如下：苏平
实验七、实验九、实验二十三、第四章)、
十九、实验二十九、实验三十、实验三十二)、
验二十、实验二十一、实验二十二、实验二十四、实验二十五、实验二十六、实验二十七)、
二章、第六章、实验十二、实验 15 - Ⅱ、实验十八、实验二十八、实验三十一、实验三十三、附表)。

本书在编写和审稿过程中，得到教育部高等教育司和高等教育出版社以及编者所在学校的关心和支持。本书由吕卫星主审，参加审稿的有怀国桢、孙日新、洪林和胡经国，他们对本书的编写提出了许多宝贵的意见。此外，王宝杏、李锦英、冯宜信、周岚、王伟、朱淑梅、陶玉荣和李倚云等对本书的编写给予了许多帮助。编者谨向他们表示深切的谢意。

编　者

1997 年 5 月

目　录

第一章　绪论 …… 1
§1-1　物理实验的地位和作用 …… 1
§1-2　物理实验课的教学目的 …… 2
§1-3　物理实验课的基本程序 …… 2
第二章　测量误差和数据处理 …… 4
§2-1　测量与误差 …… 4
§2-2　直接测量结果误差的估算 …… 6
§2-3　间接测量结果误差的估算 …… 10
§2-4　有效数字及其运算 …… 11
§2-5　数据处理的基本方法 …… 15
第三章　前导实验 …… 20
实验一　物体密度的测定 …… 20
实验二　气轨上测滑块的速度和加速度 …… 25
实验三　测绘线性电阻和非线性电阻的伏安特性曲线 …… 29
实验四　多用电表的使用 …… 35
实验五　用惠斯通电桥测电阻 …… 39
实验六　薄透镜焦距的测定 …… 43
第四章　物理实验中的基本调整与操作技术 …… 48
§4-1　仪器调整与操作技术 …… 48
§4-2　电磁学实验基本规则 …… 50
§4-3　光学实验基本规则 …… 51
§4-4　用计算器计算标准偏差 …… 51
第五章　基本实验 …… 53
实验七　转动惯量的测量 …… 53
7-Ⅰ　三线扭摆法 …… 53
7-Ⅱ　转动惯量仪 …… 55
7-Ⅲ　气垫转盘 …… 58
实验八　用拉伸法测金属丝的弹性模量 …… 60
实验九　用落球法测液体的粘度 …… 65
实验十　用拉脱法测液体的表面张力系数 …… 67
实验十一　导热系数的测定 …… 69
实验十二　用模拟法描绘静电场 …… 72
实验十三　电表的改装和校正 …… 75
实验十四　电势差计的使用 …… 78
14-Ⅰ　用线式电势差计测电池的电动势 …… 78
14-Ⅱ　用箱式电势差计测温差电动势 …… 81
实验十五　示波器的使用 …… 83
实验十六　用霍耳元件测磁场 …… 91
实验十七　光的干涉 …… 93
实验十八　分光计的调节和使用　用光栅测波长 …… 97
实验十九　用最小偏向角法测折射率 …… 102
实验二十　用旋光仪测糖溶液的质量浓度 …… 106
实验二十一　摄影技术 …… 109
第六章　物理实验中的实验方法和测量方法 …… 116
§6-1　比较法 …… 116
§6-2　放大法 …… 117
§6-3　平衡法 …… 118
§6-4　补偿法 …… 118
§6-5　转换法 …… 119
§6-6　模拟法 …… 120
§6-7　干涉法 …… 121
第七章　提高实验 …… 123
实验二十二　声速的测定 …… 123
实验二十三　灵敏电流计的使用 …… 125
实验二十四　迈克耳孙干涉仪的使用 …… 129
实验二十五　全息照相 …… 133
实验二十六　用光电效应法测普朗克常量 …… 135
实验二十七　弗兰克-赫兹实验 …… 138
第八章　设计性实验 …… 142

实验二十八　气轨上测重力加速度 …… 142
实验二十九　用驻波法测振动频率 …… 143
实验三十　用电势差计校正电表 …… 144
实验三十一　用干涉法测微小量 …… 144
实验三十二　氢原子里德伯常量的测定 … 144
第九章　测量不确定度 …… 146
§9-1　测量不确定度及其分类 …… 146
§9-2　直接测量结果不确定度的估算 … 148
§9-3　间接测量结果不确定度的估算 … 151
附表 …… 152
附表Ⅰ　基本物理常量 …… 152
附表Ⅱ　国际单位制 …… 152
附表Ⅲ　20℃时常用固体和液体的密度 … 153
附表Ⅳ　常用金属的弹性模量 …… 154
附表Ⅴ　在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数 α …… 154
附表Ⅵ　液体的粘度 …… 154
附表Ⅶ　部分材料的导热系数 …… 155
附表Ⅷ　热电偶电动势的基本值 …… 155
附表Ⅸ　常温下某些物质的折射率 …… 156
附表Ⅹ　常用光源的谱线波长 …… 156
附表Ⅺ　海平面上不同纬度处的重力加速度 …… 157
附表Ⅻ　显影、定影、漂白液的配方 …… 157
插图

第一章 绪　论

§1-1　物理实验的地位和作用

科学的理论来源于科学的实验，并受到科学实验的检验，物理学的理论，就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法，并通过实验的检验而建立起来的．

观察和实验是物理学中的重要研究方法．观察就是对自然界中发生的某种现象，在不改变自然条件的情况下，按照原来的样子加以观察研究．而实验则是人们按照一定的研究目的，借助特定的仪器设备，人为地控制或模拟自然现象，使自然现象以比较纯粹或典型的形式表现出来，进而对其进行反复地观察和测试，探索其内部规律的一种方法．

物理学从本质上说是一门实验科学．无论是物理规律的发现，还是物理理论的验证，都要有待于实验．在物理学的发展史上，伽利略用实验否定亚里士多德“力是维持物体运动的原因”的论断；麦克斯韦根据电磁学的实验定律建立电磁场理论，并预言了电磁波的存在，但这些也只有在赫兹进行了电磁波的实验后才被人们所公认．实验还是物理理论演变、发展的动力．20 世纪初光电效应、黑体辐射等一系列的物理实验事实与经典理论发生了矛盾，导致了相对论和量子力学的产生．实验又是理论付诸于应用的桥梁．热核聚变理论指出，通过热核聚变可以获得巨大的能量，但是要想很好地利用它，还需要通过许多艰苦的实验才能实现．当然，科学实验既是理论研究活动的基础，又离不开理论的指导．实验研究课题的选择，实验的构思和设计，实验方法的确定，实验数据的处理，以及由实验结果中提出的科学假设和科学结论等等，都始终受理论所支配．总之，历史表明，物理学的发展是在实验和理论两方面相互推动和密切结合下进行的．

物理实验不仅在物理学的发展中占有重要的地位，而且在推动其它自然学科、工程技术的发展中也起着重要的作用．特别在不少交叉学科中，物理实验的构思、方法和技术与化学、生物学、天文学等学科的相互结合已取得丰硕的成果．此外，物理实验还是众多高新技术发展的源泉．原子能、半导体、激光、超导和空间技术等最新科技成果，都是与物理实验密切相关的．

1976 年 12 月 10 日，丁肇中在斯德哥尔摩获得诺贝尔物理奖时的一段话，给予我们很大的启迪．他说：“我是在旧中国长大的，因此想借此机会向发展中国家的青年强调实验工作的重要性．中国有一句古话，‘劳心者治人，劳力者治于人’，这种落后的思想，对发展中国家的青年们有很大的害处．由于这种思想，很多发展中国家的学生都倾向于理论的研究，而避免实验工作．事实上，自然科学理论不能离开实验的基础，特别，物理学是从实验中产生的．”

§1-2　物理实验课的教学目的

根据

验基本训练的一门独立的必修的实验基础课，是学生进入大学后，受到系统的实验方法和实验技能训练的开端，是学生学习后继课程的实验和进行工程实验的基础．

物理实验课的任务是:

一、通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，学习并掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本技能，并加深对物理学原理的理解．

二、使学生学会常用物理仪器的调整及正确的使用方法．

三、使学生初步具备处理数据、分析结果、撰写实验报告的能力．

四、培养学生科学系统的思维方式、一丝不苟的严谨态度、实事求是的工作作风和团结协作的精神．

§1-3　物理实验课的基本程序

物理实验课通常分下列三个阶段进行:

一、实验前的预习

为了在规定的时间内保质保量地完成实验内容，学生在实验前必须做好预习工作．

实验教材是实验的指导书，它对每一个实验的目的、要求、实验原理都作了明确的阐述，因此，在上实验课前必须认真地阅读．在做设计性实验时，根据实验的要求，还需查阅有关参考资料．实验中涉及的仪器，不少是从未见过的，在预习时就需认真阅读教材中的仪器介绍，弄清仪器的原理、构造、操作规程和注意事项等．特别是注意事项，不仅要仔细看，还要牢记，否则会造成仪器损坏，甚至人身事故．对仪器的构造，应尽可能地去理解、去想像，必要时还需去实验室观察实物．

在预习的基础上，写好预习报告，其内容包括实验名称、实验目的、实验原理和数据记录表格．此外，根据实验内容，准备好实验中所需的绘图工具、计算器等．

二、实验操作

实验时应严格遵守实验室的规章制度．在实验正式进行前，首先结合仪器实物，对照实验教材或仪器说明书，认识和熟悉仪器的结构和用法；其次要全面地想一想实验的操作程序，怎样做更为合理，不要急于动手．因为对于操作程序中某些关键步骤而言，哪怕是作微小改变，都有可能使实验前功尽弃．

仪器的安装和调整是决定实验成败的关键一环．使用仪器进行测量时，必需满足仪器的正常工作条件

于进行测量，是初学者易犯的毛病，应予纠正．

实验测量应遵循“先定性、后定量”的原则．即先定性地观察实验全过程，确认整个实验

需要全本请访问 www.ertongbook.com

装置工作是否正常，对所测内容做到心中有数．在可能的情况下，对数据的数量级和走向作出估计之后，再定量地读取和记录测量数据．测量时，观测者应集中精力、细心操作、仔细观察，并积极发挥主观能动性，以获得所用仪器可能达到的最佳结果．

原始数据是宝贵的第一手资料，是以后计算和分析问题的依据，应按有效数字的规则正确记录．实验记录的内容应包括：日期、时间、地点、合作者、仪器的编号、名称和规格、原始数据及有关现象．

实验数据是否合理，学生应首先自查，然后交给指导教师审查．对不合理的和错误的实验结果，应分析原因，及时补测或重做．离开实验室前，应自觉整理好仪器，并做好清洁工作．

三、实验报告的书写

书写实验报告的目的是为了培养学生以书面形式总结工作和报告科学成果的能力．实验报告要求文字通顺、字迹端正、数据完整、图表规范、结果正确．

一份完整的实验报告应包括实验名称、实验目的、实验原理、实验步骤、原始数据、数据处理和讨论等内容．对于实验原理应在理解教材内容的基础上用自己的语言来阐述，做到简明扼要．实验步骤只要写出关键性的仪器调整方法和测量技巧，不要照抄教材中的操作步骤．原始测量数据一般要求以列表形式出现．数据处理要写出数据计算的主要过程、图表和最后结果的误差分析．对实验过程和结果的讨论要具体深入，有分析、有见解，不要泛泛而谈，其内容一般不受限制，可以是对观察到的实验现象进行分析，对结论和误差原因进行分析，也可以对实验方案提出改进意见．

应当指出，实事求是的科学态度和严肃认真的工作作风是科学工作者应具备的品德．在处理数据和书写实验报告时，严禁伪造实验数据．

第二章　测量误差和数据处理

一切物理量的测量都不可能是完全准确的，这是因为在科学技术发展和水平提高的过程中，人们的认识能力和测量仪器的制造精度都受到相应的限制，测量误差的存在是一种不以人们意志为转移的客观事实．当今误差理论及其应用已发展成为一门专门的学科．作为对学生进行科学实验基本训练的物理实验课程，必须赋予学生最基本的误差理论知识．为此，本章主要讲述：误差的基本概念，误差的估算方法，有效数字及其运算和数据处理的基本方法．

§2-1　测量与误差

一、测量和单位

进行物理实验时，不仅要定性地观察所发生的物理现象，而且要定量地测量物理量的大小，找出物理量之间的定量关系，因此物理实验离不开对物理量的测量．测量就是将待测量与一个选作单位的同类量进行比较，其倍数与单位的乘积即为该待测量的量值．显然数值的大小与选用的单位有关，对同一对象测量时，选用的单位越大，数值就越小，反之亦然．因此，在表示一个被测对象的量值时，就必须包含数值和单位两个部分．

根据
计量单位，即以米
(物质的量)
国际单位制的导出单位．

二、直接测量和间接测量

测量分直接测量与间接测量两种．直接测量就是直接用仪器测出待测物理量的量值．例如用米尺测量物体的长度，用天平称量物体的质量等都是直接测量．在物理实验中还有不少物理量不能或者不便于直接用仪器测出，而要根据可直接测量的物理量量值，通过一定的函数关系计算出来，这种测量称为间接测量．例如，用千分尺测出钢球的直径 d，然后根据公式 $V=\frac{1}{6}\pi d^3$ 计算出钢球的体积；用电压表量出电阻两端的电压 U，用电流表测出电阻中通过的电流 I，继而根据欧姆定律计算出电阻 $R=\frac{U}{I}$ 等都是间接测量．

对于同一物理量，有时既可用间接测量测得，亦可用直接测量测得，这在很大程度上取决于实验的方法和选用的仪器．如上所述，用伏安法测量电阻值是间接测量，而用多用电表的欧姆挡测量电阻值就成为直接测量了．

三、误差

不论是直接测量或间接测量，其最终目的都是要获得物理量的真值，所谓真值就是被测量所具有的、客观的真实数值．然而实际测量时，总是由具体的观测者，通过一定的测量方法，使用一定的测量仪器和在一定的测量环境中进行的．由于受到观测者的操作和观察能力、测量方法的近似性、测量仪器的分辨率和准确度、测量环境的波动等因素的影响，其测量结果和客观的真值之间总有一定的差异，我们把测量结果与真值之间的偏离称为误差．

测量值 x 与真值 μ 之差称为测量误差．以 Δ 表示，即

$$\Delta = x - \mu \tag{2-1}$$

误差自始至终存在于一切科学实验的过程之中，虽然随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高，误差可能被控制得越来越小，但始终不可能消除．

四、误差的分类

误差按其性质和产生原因，可分为系统误差、随机误差和疏失误差三种：

1. 系统误差

在相同的条件下，多次测量同一物理量时，若误差的大小和正负总保持不变或按一定的规律变化，这种误差称为系统误差．系统误差是带有系统性和方向性的误差．

系统误差的来源主要有：测量方法的因素，如单摆的周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 是近似公式，伏安法测电阻时没有考虑电表内阻的影响等；仪器的因素，如天平的两臂不等长，游标卡尺的零点不准等；环境的因素，如测磁体磁场时受到地磁场的影响，在 30 ℃时使用 20 ℃时标定的标准电池等；还有观测者的因素，如有人读数时有偏大
后等．

系统误差有些是定值的，如游标卡尺的零点不准；有些是积累性的，如用受热膨胀的钢卷尺进行测量时，其测量值就小于真值，误差随测量长度成比例地增加；还有些是周期性变化的，如停表指针的转动中心与表面刻度的几何中心不重合，造成偏心差，其读数的误差就是一种周期性的系统误差．

系统误差是测量误差的重要组成部分，发现、估计和消除系统误差，对一切测量工作都是非常重要的．因此，观测者测量前必须对影响结果的各种因素进行分析研究，预见、发现、估算、检验一切可能产生系统误差的来源，并设法予以消除或修正．

2. 随机误差

在相同的条件下，多次测量物理量时，若误差的符号时正时负，其绝对值时大时小，没有确定的规律，这种误差称为随机误差．

随机误差的产生，取决于测量过程中一系列随机因素的影响．其来源主要有：环境的因素，如温度、湿度、气压的微小变化等；观测者的因素，如瞄准、读数的不稳定等；测量装置的因素，如零件配合的不稳定性，零件间的摩擦等．

随机误差的存在使得测量值时而偏大，时而偏小，看来似乎没有什么规律．但实际上，随机误差总是服从一定的统计规律的

误差的误差估算．

3. 疏失误差

由于观测者使用仪器的方法不正确，实验方法不合理，读错数据，记错数据等原因，使得测量结果明显地被歪曲，由这些原因引起的误差称为疏失误差．只要观测者具有严肃认真的科学态度，一丝不苟的工作作风，疏失误差是可以避免的．

§2-2　直接测量结果误差的估算

上一节我们讨论误差的产生和分类，下面将讨论如何对直接测量结果的误差进行估计和计算．应当指出，在下面的讨论中，我们是在假定消除或修正了系统误差和没有疏失误差的理想前提下，研究随机误差的问题．

一、随机误差的统计规律

随机误差的出现从某一次测量来看是出于偶然，当测量次数足够多时，就会显示出明显的规律性．大量的实验事实和统计理论都证明，在大多数情形下，随机误差服从正态分布，如图 2-1 所示．图中横坐标为误差 Δ；纵坐标为误差分布概率密度函数 $f(\Delta)$，$f(\Delta)\Delta$ 附近处单位误差间隔内出现的概率．由图可见，随机误差具有以下几个特征：

(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、负误差出现的概率相同．

(3) 有界性　在一定的测量条件下，误差的绝对值不超过一定限度．

(4) 抵偿性　随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而越来越趋向于零，即

$$\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i = 0$$

因此，增加测量次数可以减少随机误差，随机误差是一种具有抵偿性的误差．

图 2-1　正态分布的误差曲线

二、多次测量的平均值

如上所述，增加测量的次数可以减少随机误差，因此，在可能的情况下，总是采用多次测量．如果在相同的条件下，对某物理量 x 进行 n 次测量，其测量值分别是 x_1，x_2，…，x_n．根据误差的统计理论，在一组 n 次测量的数据中，算术平均值 $\bar{x}$ 最接近真值，称为测量的最佳值或近真值．由于测量的误差总是存在的，真值总是不能确切地知道，所以用算术平均值表示测量的结果，即

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (2-2)$$

三、总体标准偏差

在相同的条件下，对某一物理量进行多次测量称为等精度测量．测量列就是等精度测量所

得到的一组测量值．由于随机误差的存在，各测量值有所不同，标准偏差是对一组测量数据可靠性的一种评价．

当测量次数无限增多时，各测量值 x_i 的误差 $\Delta_i = x_i - \mu$ 平方的平均值的平方根，称为总体标准偏差，以 σ 表示，即

$$\sigma = \frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \cdots + \Delta_n^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu)^2}{n} \quad (n \to \infty) \qquad (2-3)$$

式中 Δ_1，Δ_2，…，Δ_n 分别为各测量值 x_1，x_2，…，x_n 的误差，即 $\Delta_1 = x_1 - \mu$，$\Delta_2 = x_2 - \mu$，…，$\Delta_n = x_n - \mu$．

应当指出，总体标准偏差 σ 与各次测量的误差 Δ_i 有着完全不同的含义．$\Delta_i = x_i - \mu$ 表示第 i 次测量时，测量值 x_i 与真值 μ 的差，它是一个实在的误差，亦称真误差．而 σ 并不是一个具体的测量误差，它反映在相同的条件下进行一组测量后，随机误差概率分布情况，只具有统计性质的意义，是一个统计性的特征值．为了说明总体标准偏差 σ 的意义，我们在图 2-1 所示的曲线中标出 -σ 和 σ 位置，如图 2-2 所示．经计算可以得到，在 -σ～σ 范围内，分布曲线所包围的面积

图 2-2　总体标准偏差 σ 的意义

如测量次数 n 很大，则所获数据中，将有 68.3 % 个数据的误差绝对值 $|\Delta_i|$ 将比总体标准偏差 σ 小．由此可见，总体标准偏差 σ 所表示的意义为：在相同条件下进行一组测量时，其中任一测量值的误差落在 -σ～σ 之间的可能性为 68.3 %．

四、实验标准偏差

总体标准偏差 σ 是在真值已知，且测量次数 $n \to \infty$ 条件下定义的．实际上，测量次数总是有限的，真值也是无法知道的．因此总体标准偏差的精确值无法得到，只能求得其估计值．有几种估计总体标准偏差的方法，下面介绍常用的贝塞尔法．

被测物理量的真值 μ 是未知的，但算术平均值 $\bar{x}$ 最接近于真值．我们将各次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 之差称为该次测量的残差，以 v_i 表示，即

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

设对同一被测量 x 做了 n 次等精度测量，其测量值分别为 x_1，x_2，…，x_n，其残差分别为 $v_1 = x_1 - \bar{x}$，$v_2 = x_2 - \bar{x}$，…，$v_n = x_n - \bar{x}$．经理论推导，总体标准偏差的估计值与残差的关系为

$$s = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \qquad (2-4)$$

式中 s 为总体标准偏差 σ 的估计值，称为实验标准偏差，简称标准偏差．式　　贝塞尔公式，它是求实验标准偏差的常用计算公式．

应当指出，实验标准偏差 s 不应与总体标准偏差 σ 混淆．在计量学领域，对于 σ，其测量

次数 n 为无穷大．当测量次数 n 为有限时，实验标准偏差 s 为总体标准偏差σ的估计值，当测量次数 $n\to\infty$ 时，$s\to\sigma$．

五、平均值的实验标准偏差

我们通过测量获得一组数据 x_1，x_2，…，x_n，并算出平均值 $\bar{x}$ 作为测量结果，如果在完全相同的条件下，我们重复上述实验时，由于随机误差的影响，不一定能得到完全相同的 $\bar{x}$ 值．若干组 n 次测量所获得的平均值之间的差异就表示 $\bar{x}$ 本身亦具有离散性．当然，平均值 $\bar{x}$ 肯定比每次测量值 x_i 更可靠，$\bar{x}$ 的分布比 x 的分布更集中在真值附近，经理论推导得到平均值的实验标准偏差 $s(\bar{x})$

$$s(\bar{x})=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n(n-1)}=\frac{s(x)}{\sqrt{n}} \tag{2-5}$$

上式表明，平均值的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 是 n 次测量中任一次测量值实验标准偏差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍．

从式 $s(\bar{x})$ 数，可以减小随机误差．但是，由于减小是按 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 的比例变化的，当 $n>10$ 时，随着 n 的增大，$s(\bar{x})$ 10 次左右就够了．

应当指出，当被测量本身不稳定时，即此量没有确定的真值，计算平均值的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ $s(x)$ d，由于钢球本身不圆，在各个方向测量后，所得的 $\bar{d}$ 只代表钢球直径的平均效应，而 $s(d)$ 的仅是测量的波动性．多次测量并不减小对象本身的波动性，所以可以不必计算 $s(\bar{d})$ 当被测对象是稳定的，才需计算平均值的实验标准偏差．由于测量误差纯属随机性，所以具有抵偿性，这时算术平均值更接近于被测对象的真值，其平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 一次测量值的标准偏差 $s(x)$

六、仪器的标准误差

测量是用仪器或量具进行的，有的仪器比较粗糙或灵敏度较低，有的仪器比较精密或灵敏度较高，但任何仪器均存在误差．我们把在规定的使用条件下，正确使用仪器时，仪器的示值和被测量的真值之间可能出现的最大误差称为仪器误差，以 $\Delta_{仪}$ 表示．

仪器误差一般由生产厂家在仪器铭牌或说明书中给出，亦可由生产厂家给出仪器准确度级别，由所用仪器的量程和级别
的仪器，可根据具体情况作出合理的估算，例如取仪器最小分度值作为仪器误差．

一般仪器误差概率密度函数遵从均匀分布的规律，由数学计算可得仪器的标准偏差 $s_{仪}$ 为

$$s_{仪}=\frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} \tag{2-6}$$

七、单次直接测量结果的表达

在有的实验中，或者无法对被测物理量进行多次测量，例如被测量本身在变化；或者不必

需要全本请访问 www.ertongbook.com