



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

主 编 孙茂珠 张建军



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理实验

主 编 孙茂珠 张建军
副主编 刘云虎 曹海宾

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 提 要

本书依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)》，结合多年的大学物理实验教学经验以及我校新购置的物理实验设备而编写的。

全书分为“绪论”“实验数据处理基本知识”“基础实验”“综合实验”“研究型实验”“虚拟实验”六章，共34个实验。本教材在内容安排上充分考虑到有关专业特点及基础课教学的需要，突出对学生基本能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养，可分层次教学。本书可作为普通高等院校理、工、农、医类专业大学物理实验教材或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验/孙茂珠,张建军主编. —北京:北京邮电大学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5635-5387-7

I. ①大… II. ①孙… ②张… 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020722号

书 名	大学物理实验
主 编	孙茂珠 张建军
责任编辑	马 飞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路10号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	14
字 数	339千字
版 次	2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5387-7

定价: 35.00元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

大学物理实验是高等学校理工科、农医类专业学生必修的一门基础实验课程，不仅具有丰富的实验思想、方法和手段，而且能提供综合性很强的基本实验技能训练，对培养学生的创新能力和实践能力，提高学生的科学素质至关重要。

近年来，石河子大学理学院物理系积极改革大学物理实验课程教学内容和体系，提高教学效果。我校目前每年上大学物理实验课的学生多达 5000 人，该课程在创建高水平大学和培养高素质人才中发挥着重要作用。大学物理实验教学影响面广，也引起了学校的重视。在“一省一校”资金的支持下，2016 年新的基础实验大楼启用，物理实验仪器更新达到 90%。为了使实验教材符合我校的实验仪器，保证教学质量和教材质量，根据一年来对新仪器的使用情况，物理系组织教学一线实验老师，结合我校新进的仪器设备进行实验教材的编写。

本书依据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2010 年版）》，结合多年的大学物理实验教学经验以及我校新购置的物理实验设备而编写的。全书分为“绪论”“实验数据处理基本知识”“基础实验”“综合实验”“研究型实验”“虚拟实验”六章，共 34 个实验。本教材在内容安排上充分考虑到有关专业特点及基础课教学的需要，突出对学生基本能力的训练和创新思维、创新方法、创新能力的培养。

本书第一章和第二章讲述大学物理实验的目的和要求，以及测量误差、不确定度和数据处理的基础知识。接下来的“第三章基础实验”“第四章综合实验”“第五章研究型实验”的每一章内容中都包含力、热、电磁、光学的内容，这三章的内容是分层次的，循序渐进的，可进行分层次教学。学生在做了一定数量的基本实验后，进一步学习物理实验的综合知识、综合性实验方法和实验手段。研究型实验是在已有的实验基础上，让学生对实验问题进行深入研究，进行知识的拓展和探究，学生可自行确定实验方法、仪器和步骤，对结果进行分析处理。“第六章虚拟实验”通过两个实验，让学生体会虚拟仿真实验的过程和方法，主要是为了加强开放性学习，将“互联网+”的教学手段引入大学物理实验，进一步丰富实验方法和实验手段。本书每个实验项目中都给出了一些思考题或习题，用于指导学生预习实验或进一步理解该实验项目的意义，便于知识的拓展。



本书由孙茂珠和张建军担任主编，由刘云虎和曹海宾担任副主编。参加编写的有高艳、郭志荣、范婷、王博、王锐、王雪燕、杨坤、周龙、邵建新等老师。

由于编者的水平有限，加之编写时间仓促，教材中难免有不足之处，恳请读者和同行专家们批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
第 1 节 大学物理实验的地位、作用和任务	(1)
第 2 节 大学物理实验课程的教学程序	(2)
第 3 节 对学好大学物理实验课程的几点建议	(3)
第 2 章 实验数据处理基础知识	(4)
第 1 节 测量及其分类	(4)
第 2 节 测量误差	(5)
第 3 节 测量仪器及其准确度等级	(7)
第 4 节 被测量真值的最佳估计值	(8)
第 5 节 只有随机误差的测量列数据分散程度的描述	(10)
第 6 节 实验中错误数据的剔除	(11)
第 7 节 测量不确定度	(12)
第 8 节 有效数字与数据运算	(16)
第 9 节 测量不确定度评定实例	(18)
第 10 节 实验数据的处理方法	(22)
第 3 章 基础实验	(33)
实验一 基本长度的测量	(33)
实验二 复摆振动的研究	(39)
实验三 金属线胀系数的测定	(42)
实验四 示波器的使用	(46)
实验五 地磁场水平分量的测量	(52)
实验六 薄透镜焦距的测定	(56)
第 4 章 综合实验	(63)
实验七 惯性秤的定标与物体惯性质量的测定	(63)
实验八 碰撞实验	(67)
实验九 杨氏模量的测定	(73)
实验十 三线摆	(80)



实验十一	热功当量实验	(86)
实验十二	液体表面张力系数测定	(89)
实验十三	空气绝热指数的测定	(94)
实验十四	比较法测量金属比热容	(99)
实验十五	电表的改装与校准	(102)
实验十六	霍尔效应实验	(109)
实验十七	惠斯通电桥测量电阻	(116)
实验十八	PN结特性测量	(119)
实验十九	光的等厚干涉及其应用	(129)
实验二十	分光计的调整及用透射光栅测定光波波长	(133)
实验二十一	三棱镜折射率的测定	(140)
实验二十二	旋光仪测旋光液体的浓度	(143)
第5章	研究型实验	(149)
实验二十三	弦振动的研究	(149)
实验二十四	声波在空气、液体及固体介质中的传播研究	(154)
实验二十五	落球法变温液体黏滞系数测量	(161)
实验二十六	准稳态法测定导热系数和比热	(169)
实验二十七	热敏电阻特性研究	(173)
实验二十八	静电场描绘实验	(176)
实验二十九	集成电路温度传感器特性测量及应用	(181)
实验三十	迈克耳孙干涉仪的调整和使用	(185)
实验三十一	光栅单色仪的使用	(190)
实验三十二	自组显微镜、投影仪和望远镜	(194)
第6章	虚拟实验	(202)
实验三十三	能量转换——摩擦	(202)
实验三十四	电阻实验	(205)
附录		(211)

第1章 绪 论

第1节 大学物理实验的地位、作用和任务

物理学从本质上讲是一门实验科学。物理学新概念的确立，新规律的发现和新理论的建立，都要以实验为基础并最终得到实验的检验。物理学新的突破常常是通过新的实验技术得以实现的。物理实验的思想、方法和技术已经被广泛应用在自然科学的各个领域和技术部门。大学物理实验课程是学生进入大学后最早接触到的一门系统的、全面的、理论与实践相结合的课程，是培养学生用理论指导实践、观察问题、发现问题、提出问题、分析问题和解决问题的能力，初步掌握认识自然、研究自然的一般实验方法和技能的有效途径。因此，大学物理实验是一门重要的必修课程。

大学物理实验课程的具体任务包括如下几个方面。

1. 掌握物理实验的基本知识、基本方法和基本实验技能

主要学习如何根据实验思想制定合理的实验方案，正确选择和使用仪器，掌握各种基本测量技术，能对数据进行处理、判断和分析实验结果等。

2. 对物理学原理的认识和理解

通过对实验现象的观察、分析和对物理量的测量，加深对物理学原理的认识和理解

3. 培养和提升学生的科学实验能力

- (1) 信息收集与加工的能力。如自学教材，查阅相关资料，做好实验准备等；
- (2) 正确使用仪器进行观察、测量的能力；
- (3) 在对实验现象进行判断、分析的基础上发现问题、提出问题的能力；
- (4) 进行数据处理、误差分析和正确表达实验结果的能力；
- (5) 拟定实验方案，完成设计性实验的能力；
- (6) 积极主动探究、分析问题、解决问题的能力。

4. 培养学生从事科学工作的基本素养

- (1) 理论联系实际和实事求是的工作作风；
- (2) 严谨认真的工作态度；
- (3) 独立思考、深入钻研的创新精神；
- (4) 团结协作、遵守纪律和爱护公物的优良品德。



第2节 大学物理实验课程的教学程序

大学物理实验课是在教师指导下,由学生独立进行的,运用实验手段研究物理问题的学习过程,其教学程序可分为以下三个阶段进行。

1. 实验预习

实验前,必须认真阅读教材,查阅有关资料,明确实验原理、实验目的、测量方法和主要实验步骤,在此基础上写出预习报告。预习报告的内容应包括实验名称、目的、原理、电路图或光路图、记录表格等。未做好实验预习者不得进行实验。

2. 实验操作

首先应根据教材或仪器说明书进一步熟悉仪器,了解仪器的正确使用方法,检查实验仪器及配件是否齐全、完好,记录主要实验仪器的规格、型号,然后进行仪器调试。实验时应按照“先定性观察、后定量测量”的原则,先仔细观察并认真记录所研究的实验现象,按实验要求做检验性操作,待结果正常,方可正式开始测量。把测量数据记入记录表格内,并应特别注意有效数字和单位,要重视实验现象的观察、记录与分析。原始数据记录需经教师检查认可,实验结束后应整理好实验仪器,搞好室内卫生,方可离开实验室。

3. 实验报告

实验报告是学生实验结果的书面汇报。通过撰写实验报告,可培养学生的归纳和分析能力以及文字表达能力。实验报告一律用统一的实验报告纸书写,要求书写工整,图表规范,文字简练通顺,数据齐全合理。一份完整的实验报告,一般应包括以下内容。

- (1) 实验名称;
- (2) 实验目的;
- (3) 实验原理(用简练的文字写出实验的基本原理、基本公式,画出电路图或光路图等实验装置示意图);
- (4) 实验仪器(包括仪器名称、型号、规格等);
- (5) 实验内容(简述实验测量的主要内容);
- (6) 实验数据(应记入表格中);
- (7) 数据处理(包括主要运算过程、不确定度评定、完整实验结果报告等,若用绘图法处理数据时,应严格按作图规则,画出规范的实验图线,并求出实验结果);
- (8) 问题讨论(包括回答思考题;对实验现象的观察、分析;对实验方法及装置的改进意见;其他心得体会等)。



第3节 对学好大学物理实验课程的几点建议

大学物理实验课程学习的最大特点是“既动脑，又动手”，在教师的指导下，学生应积极发挥在实验过程中的主体作用，亲身实践每一个实验的全过程，循序渐进地达到培养与提升科学实验素养和能力的目的。

在具体学习过程中，应注意做到以下几点。

(1) 坚持对实验原理、实验方法和仪器装置进行深入的理解与分析，在提高动手能力的基础上注重实验设计思想的学习与研究。因为只有这样，才能不仅仅以获得实验数据为目的，而是从实验方法的构思与实验装置的设计等方面进行综合分析，掌握实验理论与方法的精髓，从而为能力培养和今后进行科学实验打下坚实的基础。

(2) 养成良好的实验习惯，重视实验课各个环节的学习。良好实验习惯的形成，来源于平时一点一滴的积累。例如，每次实验之前，都要认真预习，充分查阅资料，对实验内容和要求做到心中有数；实验时，首先要安排好仪器装置或线路的布局，选择适宜的操作方式进行测量；实验中，要善于观察各种现象并及时记录，测量数据时要细心，数据要准确；实验结束后，应有一份完整而真实的原始数据记录，并及时撰写实验报告。大学物理实验课的每一个环节都是密切相关的有机系统，只有每个环节的工作都细致到位，才能保证整个实验顺利进行。

(3) 注意培养一丝不苟、勤奋求实的实验作风。实验是科学，科学的东西来不得半点马虎，是否具有严谨的实验作风，是科学实验研究成败的关键。因此，对每一次实验、每一种实验现象、每一组数据，都要以严肃的态度进行观察并详细记录，并要注意观察异常现象，努力分析产生异常的原因并找到解决的方法。

(4) 养成善于对实验内容进行反思的习惯。在实践的基础上，积极探索新的测量方法和实验方案，并设法予以验证。这一过程实质上是活跃思想、启发思维的过程，它能加深对实验内容的理解与掌握，对提高自身的实验素质和创新能力十分有益。

(5) 自觉培养独立分析和解决问题的能力。由于各种因素的影响，实际的实验结果与理论结果总有误差，要善于分析产生误差的原因及类型，研究消除和修正误差的方法。在实验过程中，仪器装置不可避免地会出现故障，遇到这种情况，首先要力求自己分析，自己动手去解决。即使请教师帮助解决，也要留意观察，细心体会教师是如何解决的。可以说，能否发现和排除仪器故障，是实验能力强弱的重要体现，一定要注重这方面的锻炼。

总之，只要勤于动手、善于动脑、严谨求实、深入钻研、理论联系实际、善于发现问题和解决问题，就一定能学好大学物理实验这门课程。

第 2 章 实验数据处理基础知识

第 1 节 测量及其分类

一、测量

测量就是以确定被测对象的量值为目的的全部操作，也就是借助仪器用某一计量单位把被测量的大小表示出来的过程。

二、测量的分类

按照测量方法、测量条件的不同，可以将测量分为以下几类。

1. 直接测量

直接测量是指用测量仪器直接读出被测量数值的测量。相应的物理量称为直接测量量。如用米尺测长度，等臂天平测质量，电表测电流、电压等。

2. 间接测量

间接测量是指那些不能直接用测量仪器把待测量的大小测出来，而需依据被测量和某个或某几个直接测量量的函数关系计算出被测量的测量。相应的物理量称为间接测量量。如先测出钢球的直径 D ，再利用公式 $V = \pi D^3 / 6$ 算出钢球的体积等。物理实验中多数是间接测量。

3. 等精度测量

在相同测量条件下对同一物理量进行的多次重复性测量。例如，在相同环境下，同一个测量者用同样的仪器和方法，对同一个被测量作重复测量。由于各次测量的条件相同，因此测量结果的可靠性是相同的，这种测量就是等精度测量。

4. 非等精度测量

在不同的测量条件下对同一物理量进行的多次测量。由于在测量的过程中，测量环境、测量者、测量仪器、测量方法等都有所不同，因此在测量条件变更前后，测量结果的可靠性会不相同。这样的测量称为非等精度测量。

所谓测量条件，是指一切能影响测量结果、本质上又可控制的全部因素。包括：测量者、测量仪器、测量方法、环境条件等。环境条件是指测量过程中环境的温度、湿度、大气压力、气流、光照、振动、辐射强度等。



第2节 测量误差

一、误差的定义及其表示方法

1. 误差的定义

每个物理量都是客观存在的，在实验当时的条件下均有不随人的意志为转移的真实大小，称此值为该物理量的真值。测量的理想结果是得到真值，但真值是个理想概念，只在极少数的情况下真值才是确知的。例如：三角形三个内角之和为 180° ；一个整圆周角为 360° 。通常真值是不能确知的，因为，一是测量仪器只能准确到一定程度；二是受测量环境的影响；三是理论上不完备而做的近似，加上读数不能十分准确等因素，这样导致测量值和真值总是不一致。

为了反映测得值偏离真值的程度，定义测得值减去被测量真值的差为测得值的误差，即

$$\text{误差} (\epsilon) = \text{测得值} (x) - \text{真值} (a) \quad (2-1)$$

误差 ϵ 是一代数值，当 $x \geq a$ 时， $\epsilon \geq 0$ ； $x < a$ 时， $\epsilon < 0$ 。测量误差可以用绝对误差表示，也可以用相对误差表示。

2. 绝对误差

某量值的测得值减去真值的差为绝对误差，通常简称为误差，即

$$\text{绝对误差} (\Delta x) = \text{测得值} (x) - \text{真值} (A) \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 可知，绝对误差是一个代数值，可正可负。

3. 相对误差

绝对误差与被测量的真值之比值称为相对误差。即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} = \frac{\Delta x}{A} \quad (2-3)$$

由上述定义可见，绝对误差、相对误差是个理想概念，因为被测量真值在绝大多数情况下是不知道的，所以，测量的误差也不能确知。但实际测量工作中如果用约定真值来代替真值，则可以对测量误差进行估计。也就是

$$\text{绝对误差} (\Delta x) \approx \text{测得值} (x) - \text{约定真值} (\bar{A}) \quad (2-4)$$

$$\text{相对误差} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{约定真值}} = \frac{\Delta x}{\bar{A}} \quad (2-5)$$

约定真值有时称为指定值、最佳估计值、约定值或参考值。通常指权威机构推荐的值或是被测量的多次测量结果的最佳估计值。例如，国际科学技术数据委员会 (CODATA) 1986 年推荐的阿伏伽德罗常数数值 $6.022\ 136\ 7 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ，按定义规定的国际千克基准的值可认为是约定真值 1 kg，以及实际测量某个量时的多次测得值的算术平均值等。



相对误差是个无名数，通常用百分数（%）表示。

对相同的被测量，我们可以用绝对误差的大小评价测量结果的优劣。但当被测量不同时，单凭绝对误差则难以对测量结果的优劣进行评价。例如，测量甲、乙两个物体的质量，最终的测量结果是甲物体的质量是 10.0 g，乙物体的质量是 100.0 g，如果测量的绝对误差都是 0.1 g，那么，从绝对误差来看，对二者测量结果的优劣评价是相同的，但甲物体的测量误差占测量值的 1%，而乙物体的测量误差仅占 0.1%，当然乙物体的可靠性比甲物体大得多。

所以，比较不同测量结果的可靠性时，应当用该量的绝对误差与约定真值（这里就是指最终的测量结果）之比即相对误差来评价。

在实际工作中，经常使用修正值。为消除系统误差而用代数法加到测量结果上的值称为修正值。将测得值加上修正值后可得到近似的真值，即

$$\text{真值} \approx \text{测得值} + \text{修正值} \quad (2-6)$$

也即

$$\text{修正值} \approx \text{真值} - \text{测得值} \quad (2-7)$$

修正值与误差值的大小相等而符号相反，测得值加修正值后可以消除该误差的影响。但需要注意，因为一般情况下难以得到真值，而且修正值本身也有误差，修正后只能得到较测得值更为准确的结果。

二、误差的分类

按照误差的特点与性质，误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

(1) 系统误差的定义

系统误差是指在对同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可预知的方式变化的测量误差分量。例如标准量值的不准确、仪器刻度的不准确而引起的误差。

(2) 系统误差产生的原因

产生系统误差的原因很多，最常见的有：①测量仪器没有达到相应的准确度等级。如米尺形变，秒表走时过快等；②实验装置或实验方法没有（或不可能）完全满足理论上的要求。如电学实验中电表的接入误差是无法避免的，电表内阻选择不当，电路设计不合理都会引入系统误差；③理论方法本身的不完善。如单摆的周期公式，薄透镜的高斯公式都是在一定条件下才近似成立的；④环境因素未控制在预定范围内，如温度、湿度、光照、电磁场等对实验结果的影响；⑤实验者自身的感觉器官、运动器官不完善也会造成系统误差。

(3) 分析系统误差的目的

为了减小系统误差，我们首先是要发现其产生原因，找出规律，然后对结果加一修正值进行修正，使其减小或消除。只有将系统误差控制在测量要求精度等级的范围内，测量才有意义。因此，分析系统误差的目的是：

- ①探索系统误差的来源，设计实验方案减少或消除该项误差。
- ②估计残存系统误差的可能的范围。



2. 随机误差

(1) 随机误差的定义

如果实验中已理想地消除了系统误差, 在相同的条件下多次重复测量同一物理量时, 还是发现各次测量值之间有差异, 并且在测量之前不可预知测量值是偏大还是偏小, 此类误差称为随机误差. 如用手按秒表在相同条件下测摆的振动周期每次结果不尽相同的情形就是随机因素造成的.

(2) 随机误差产生的原因

产生随机误差的原因是多方面的, 如观测时眼睛与被观测物对得不准, 平衡点确定得不准, 读数不准确, 实验仪器由于环境温度、湿度、电源电压的起伏而引起的微小变化, 振动的影响等. 这些因素的影响一般是微小的, 并且是随机混杂出现的, 因此难以确定某个因素对测量产生的具体影响大小, 所以对待随机误差必须进行数据处理.

(3) 随机误差的特征

大量实验表明, 随机误差具有如下基本特征:

- ① 单次测量的随机误差事先不能预知;
- ② 多次重复测量时, 绝对值相等的正、负误差的出现机率相近;
- ③ 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机率多一些;
- ④ 误差不会超出一定的范围.

需要注意的是, 随机误差是指在某一次具体测量中, 其误差的大小与正负带有很大的随机性, 不能事先估计其值的大小、正负的误差. 但这并不是“在测量中误差只是随机出现”或“它们没有什么规律可循”的意思.

3. 粗大误差

在测量过程中, 有时会出现超出规定条件下预期的过大的误差, 称之为粗大误差. 这样的误差, 明显偏离了准确的测量结果. 这往往是由于实验者粗心大意或实验条件发生突变而引起的. 如测量时对错了标志、读错或记错了数、使用有缺陷的仪器引起的过失性误差等.

需要指出的是, 系统误差和随机误差之间并不存在绝对的界限, 它们在一定条件下可以相互转化. 随着对误差性质认识的深化和测试技术的发展, 有可能把过去作为随机误差的某些误差分离出来作为系统误差处理, 或把某些系统误差当作随机误差来处理.

第3节 测量仪器及其准确度等级

一、测量仪器

测量仪器是指用以直接或间接测出被测对象量值的所有器具, 如游标卡尺、天平、停表、电表、惠斯通电桥等.

测量时是以仪器为标准进行比较, 就对仪器的准确程度有要求, 不过由于测量的



目的不同对仪器的准确程度的要求也不同，如称金戒指的天平必须准确到 0.001 g，而粮店卖粮的台称差几克都无关紧要。

二、测量仪器的引用误差

引用误差指的是一种简化和实用方便的仪器表示值的相对误差，它是以仪器仪表某一刻度点的示值误差为分子，以测量范围上限值或全量程为分母，所得的比值称为引用误差，即

$$\text{引用误差} = \frac{\text{示值误差}}{\text{测量范围上限}} \quad (2-8)$$

例如，测量范围上限为 19 600 N 的工作测力计（拉力表），在标定值为 14 700 N 处的实际作用力为 14 778.4 N，则此测力计在该刻度点的引用误差为

$$\text{引用误差} = \frac{14\,700\text{ N} - 14\,778.4\text{ N}}{19\,600\text{ N}} = \frac{-78.4}{19\,600} = -0.4\%$$

在仪器全量程范围内有多个刻度点，每个刻度点都有相应的引用误差，其中绝对值最大的引用误差称为仪器的最大引用误差。

三、仪器的准确度等级

为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求，国家规定工厂生产的仪器分为若干准确程度等级，并且各类各等级的仪器，又有对准确程度的具体规定。对测量仪器来说，《国际通用计量学基本术语》与《通用计量术语及定义》给出的定义是：符合一定计量学要求，使其误差保持在规定极限以内的测量仪器的等别、级别。级是一种按测量仪器示值误差大小所划分的档次，例如，电压表的准确度级别有：0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0，共七个级别，0.1 级最高，5.0 级最低。

由电压表准确度等级可以得到其最大引用误差，如果知道其测量范围，则可以知道该仪器的极限误差 Δ （又称最大允差）。例如 2.5 级电压表，其最大引用误差不大于 2.5%；1.0 级电流表，测量范围为 0~500 mA，其最大引用误差不大于 1.0%，极限误差 Δ 不超过 $\pm 500\text{ mA} \times 1.0\% = \pm 5\text{ mA}$ 。

实验时要恰当地选取仪器，其基本原则有二：一是保证被测量量值在仪器测量范围之内；二是在满足测量要求的条件下，尽量选用准确度低的仪器，减少准确度高的仪器的使用次数。

第 4 节 被测量真值的最佳估计值

一、只有随机误差时直接测量量真值的最佳估计值

设对某一被测量，在相同的条件下进行 n 次测量（即等精度测量），得到 n 个测得值 x_1, x_2, \dots, x_n ，相应的误差分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ ，真值为 A ，则

$$(x_1 - A) + (x_2 - A) + \dots + (x_n - A) = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n \Rightarrow$$



$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (2-9)$$

上式的物理意义是：算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 的误差等于各测量值误差的平均 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$ ，假如各测得值的误差只有随机误差（系统误差已被消除），则根据随机误差的特征可知，相加时可抵消些，而且测量次数越多，算术平均值越接近真值。因此，可以将算术平均值当作该被测量真值的最佳估计值。

二、两类误差都有时被测量真值的最佳估计值

当测量值的误差包含有已知的系统误差时，(2-9) 式的求和不能将其抵消，这时可以用算术平均值加上修正值作为被测量真值的最佳估计值。

以上是直接测量量的最佳估计值的求法，下面讨论间接测量量的最佳估计值的求法。

三、间接测量量的最佳估计值

设被测量 Y 是 m 个直接测量量 (X_1, X_2, \dots, X_m) 的函数

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (2-10)$$

由各 X_i 求 Y 有两种方法。

(1) 将各 X_i 的最佳估计值 \bar{x}_i 代入函数式求 Y 的测量值 y ：

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (2-11)$$

此为“先平均法”。

(2) 将各 X_i 分别求一值 y_i ，再求 y_i 的平均值 \bar{y} ，为 Y 的最佳估计值

$$\bar{y} = \sum_i f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}) / n \quad (2-12)$$

此为“后平均法”。

对于非线性函数，两种方法的结果是不一致的。但在多数物理测量中，二者的差异和测量的误差相比并不显著，因此两种方法均可使用。不过第二种方法要求各 x_i 的测得值的数目 n 相同，因而在使用上有较大的局限性。

四、测量的基本任务

在测量误差不能确知的情况下，测量的基本任务是：

- (1) 设法将测量误差减至最小；
- (2) 给出被测量真值的最佳估计值；
- (3) 给出真值最佳估计值可靠程度的估计。



第 5 节 只有随机误差的测量列数据分散程度的描述

一、测量列的标准偏差

先看下面两组独立重复测量的数据：

A: 2.1 2.6 2.8 2.9 3.0 3.2 3.7

B: 2.1 2.4 2.7 2.9 3.1 3.4 3.7

两组数都在 2.1 到 3.7 之间，算术平均值都是 2.9，但 A 组数比较向中间集中，B 组则较分散。显然，具有随机误差的测得值是分散的，我们用实验标准偏差 s （简称标准偏差）来定量描述数据的分散程度，其定义为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-13)$$

用 (2-13) 式计算上面两组数的标准偏差为 $s_A = 0.50$, $s_B = 0.56$ ，由此表现出它们分散上的差异性。(2-13) 式称作 Bessel 公式。

二、算术平均值的标准偏差

测得值有随机误差，它们的算术平均值也必然有随机误差，由于求和时随机误差的抵偿效应，算术平均值随机误差的绝对值较小，它的标准偏差 $s(\bar{x})$ 也应小于由式 (2-13) 求出的 s 值。可以证明算术平均值的标准偏差为

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2-14)$$

三、标准偏差的统计意义

标准偏差 s 小的测量列，表示分散范围较窄或比较向中间集中，而这种表现又显示出测量值偏离真值的可能性较小，即测量值的可靠性较高。测量列标准偏差 s 的含义是：真值落在以任一测量值为中心，以标准偏差为半径的区间内概率为 68%。

按误差理论的高斯分布可知：

$[\bar{x} - s(\bar{x}), \bar{x} + s(\bar{x})]$ 区间上包含真值的概率为 68%，

$[\bar{x} - 1.96s(\bar{x}), \bar{x} + 1.96s(\bar{x})]$ 区间上包含真值的概率为 95%，

$[\bar{x} - 2.58s(\bar{x}), \bar{x} + 2.58s(\bar{x})]$ 区间上包含真值的概率为 99%。

上述结果是指系统误差已消除的情况。显然， $s(\bar{x})$ 越小，上述各范围越窄，因而用平均值作为真值的估计值就越可靠。

四、测量次数的选取

增加测量次数 n ，计算平均值时的抵偿效果会好些，从式 (2-14) 可知 n 越大 $s(\bar{x})$