



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理实验

DAXUEWULI SHIYAN

杨强 周晶 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理实验

主 编 杨 强 周 晶

副主编 孙鹏凯 谭 芳

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会编制的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)为编写依据,结合应用型人才的培养目标,根据不同专业课程的内容特点和实验室实验设备的具体情况编写而成。本书在内容上力求体现多层次、综合性、应用性的特点;应用上注重培养学生的实践能力、分析与研究能力、理论联系实际的能力,以此提高学生创新意识的综合素质。该书适用于高等院校理工科各专业学生选用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 杨强, 周晶主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5635-5551-2

I. ①大… II. ①杨… ②周… 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172922号

书 名	大学物理实验
主 编	杨 强 周 晶
责任编辑	刘国辉
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	中煤(北京)印务有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	13
字 数	314千字
版 次	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5551-2

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

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法、手段，同时能提供综合性很强的基本实验技能训练，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

本书遵照教育部高等学校物理基础课程教学指导分委会制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)，以培养应用型人才为目标，结合教学对象的专业设置特点和实验仪器设备的具体情况，在汲取省级实验教学示范中心教学改革和品牌课程建设成果的基础上编写而成，在注意课程内容的基础性、实践性和相对稳定性的同时，内容上力求体现多层次、综合性、应用性的特点。

本书共编入 27 个实验项目，分为绪论、基本仪器的使用、基础性实验、提高性实验、综合性实验、设计性实验六部分。实验内容一般包括实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容与步骤以及实验数据处理、不确定度估算、测量结果等部分，绪论的内容为具有共性的物理实验基础知识，包括误差理论、不确定度概念以及物理实验方案的制定、物理实验的基本测量方法等；基本仪器的使用包括游标卡尺、螺旋测微器、数字万用表等基本仪器的使用；基础性实验使学生在物理实验知识、掌握实验方法和实验基本技能等方面受到系统的基本训练，实验能力得以逐步提高；提高性实验和综合性实验是学生经过一段课程的学习，在已具备一定的实验基础知识和技能的情况下要学习的内容。一方面考虑进一步加强学生分析和解决实际问题的能力，另一方面考虑教材应该体现学科发展的新动向，使教学更好地适应现代科技的发展；设计性实验项目，只给出实验目的、要求和方法的提示，更多的工作需要学生自己独立完成。

本书在编写过程中，对历年所使用的实验讲义进行了深入研究、反复修改，对数年的教学实践予以认真总结，同时广泛参阅了国内、外同类教材和相关资料，吸收其优点和精华，本书是全体教师集体的智慧。本书具体分工为：杨强（实验五、九、十一、十二、十四）、周晶（实验三、十五、十七、十八、二十七）、沈延群（实验十三、十九、二十、二十二）、李延根（基本仪器的使用、实验四、二十六）、谭芳（实验一、

六、七、八、二十三)、孙鹏凯(绪论、实验二、十)、刘淑杰(实验十六、二十一、二十四、二十五、附表)。韩也老师为本书简图绘制提供了宝贵的支持,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏与谬误之处,恳请读者批评指正。

编者
2018.5

目 录

绪论	(1)
第一部分 基本仪器的使用	(27)
第二部分 基础性实验	(44)
实验一 气体比热容比的测定	(44)
实验二 伏安法测电阻	(49)
实验三 分光计的调整与使用	(59)
第三部分 提高性实验	(68)
实验四 固体密度的测定	(68)
实验五 杨氏弹性模量的测定	(74)
实验六 不良导体导热系数的测量	(79)
实验七 固体线热膨胀系数的测定	(83)
实验八 用三线摆测量物体的转动惯量	(88)
实验九 电表的改装与校准	(94)
实验十 惠斯通电桥	(98)
实验十一 灵敏电流计的研究	(109)
实验十二 RLC 串联电路暂态特性的研究	(116)
实验十三 比较法测低值电阻	(122)
实验十四 磁阻传感器测量地磁场实验	(127)
实验十五 衍射光栅	(131)
实验十六 等厚干涉实验——牛顿环与劈尖	(138)
实验十七 迈克耳孙干涉仪的调整和使用	(144)
实验十八 用分光计测三棱镜的折射率	(150)
实验十九 光电效应法测定普朗克常数	(155)

实验二十 弗兰克-赫兹实验	(160)
第四部分 综合性实验	(169)
实验二十一 空气中声速的测定	(169)
实验二十二 电磁感应摆实验	(173)
实验二十三 温度传感器特性研究	(179)
实验二十四 超声光栅测液体声速	(184)
第五部分 设计性实验	(191)
实验二十五 表头内阻的测定	(191)
实验二十六 蜡块密度及未知液体密度的测定	(192)
实验二十七 用分光计测溶液浓度	(193)
第六部分 附表	(196)
附表 1 常用物理常量表	(196)
附表 2 20 °C 时部分金属 (或合金) 的弹性模量	(197)
附表 3 20 °C 时某些金属 (或合金) 的杨氏模量	(197)
附表 4 部分金属 (或合金) 的电阻率及其温度系数	(198)
附表 5 部分物质的导热系数	(198)
附表 6 常用光源谱线波长表	(199)
附表 7 20 °C 时部分固体和液体的密度	(200)
附表 8 标准大气压下不同温度时水的密度	(200)
附表 9 某些物质中的声速	(201)

绪 论

物理学本质上是一门实验科学。物理实验是科学实验的先驱，体现了大多数科学实验的共性，在实验思想、实验方法及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。

一、物理实验课的地位、作用和任务

（一）地位和作用

物理实验课是高等理工科院校对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法、手段，同时能提供综合性很强的基本实验技能训练，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要基础。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合应用能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

（二）主要任务

（1）培养和提高学生的基本科学实验技能和素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力。

（2）培养和提高学生的科学实验素养。培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的科学态度，积极主动的探索精神，遵守纪律，团结协作，爱护公共财产的优良品德。

二、教学内容的基本要求

大学物理实验应包括普通物理实验（力学、热学、电学、光学）和近代物理实验，具体的教学内容基本要求如下所述。

（1）掌握测量误差的基本知识，具有正确处理实验数据的基本能力：

①测量误差与不确定度的基本概念，能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估；

②处理实验数据的一些常用方法，包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及，应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。

例如，长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量等常用物理量及物性参数的测量，注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法，并逐步学会使用。

例如，比较法、补偿法、放大法、模拟法、转换法、平衡法和干涉、衍射法，以及在近代科学研究和工程技术中的广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能，并能够正确使用。

例如，长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器，以及在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术，如激光技术、传感器技术、微弱信号检测技术、光电子技术、结构分析波谱技术等。

(5) 掌握常用的实验操作技术。

例如，零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整，根据给定的电路图正确接线，简单的电路故障检查与排除，以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

三、能力培养的基本要求

(一) 独立实验的能力

能够通过阅读实验教材、查询有关资料和预习思考题，掌握实验原理及方法、做好实验前的准备；正确使用仪器及辅助设备、独立完成实验内容、撰写合格的实验报告；培养学生独立实验的能力，逐步形成自主实验的基本能力。

(二) 分析与研究的能力

能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法，具有初步的分析与研究的能力。

(三) 理论联系实际的能力

能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法，逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

（四）创新能力

能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，完成初步的具有研究性或创意性内容的实验，激发学生的学习主动性，逐步培养学生的创新能力。

四、物理实验课的基本程序

物理实验课的基本程序一般分为三个阶段：预习、实验和撰写实验报告。

（一）预习

预习需要在上课前完成。预习的要求如下所述。

（1）首先认真阅读本实验教材的全部内容，明确实验目的、原理，了解使用哪些仪器，测量什么物理量，采用什么方法，基本步骤是什么，有什么注意事项，看懂预习思考题。

（2）写出书面预习报告，内容包括：

- ①实验名称；
- ②实验目的；
- ③实验原理，包括简要的实验理论依据、实验方法、主要计算公式及公式中各量的物理意义，画出原理简图；
- ④实验仪器；
- ⑤实验步骤；
- ⑥数据记录表格。

总之，课前对所要进行的实验做到心中有数。教师上课首先检查预习报告，无预习报告或报告不合要求者，不得进入实验室进行实验操作，同时还要针对预习思考题的内容进行提问。

（二）实验

（1）先熟悉仪器，在了解仪器的工作原理、使用方法及注意事项的基础上进行仪器的安装和调整，千万不要盲目乱动仪器。

（2）在电学实验中，接好线路，必须经教师检查后，方可接通电源。

（3）按实验步骤进行测量。

将测得的数据记录在准备好的数据表格内（注意：标明有效数字位数和单位）。实验结束后，要经教师检查实验数据和仪器，然后整理仪器和实验台，在仪器使用记录本上签字后方可离开实验室。

(三) 撰写实验报告

在预习报告的基础上进行。

(1) 数据处理：作图、计算测量结果及不确定度，写出正确的结果表达式。

(2) 讨论：包括分析产生误差的原因，回答课后思考题，也可对实验仪器的装置和实验方法提出建议、总结等。

预习报告与课后报告构成一份完整的实验报告。

五、测量与误差

(一) 测量

物理实验的目的，是通过对某些物理量的测量，寻找物理规律，或根据已知的物理规律去设计新的实验方法。任何一项物理实验都离不开对物理量的测量，测量是物理实验的基本手段。所谓测量，就是用一定的工具或仪器，通过一定方法，直接或间接地与被测对象进行比较。伽利略有句名言：“凡是可能测量的，都要进行测量，并且要把目前无法度量的东西，变成可以测量的。”从基本粒子的微观世界，到庞大星系的广阔空间；从粒子碰撞、蜕变的瞬间，到宇宙演变的漫长过程，都属于测量的范围。

物理实验的测量可分为两类：一类是用量具或仪器直接读出测量的结果，这类测量为直接测量，相应的物理量称为直接测得量。如米尺测长度，秒表测时间，电表测电流、电压等。另一类是间接测量，由直接测得量代入公式进行计算得出测量结果的情形称为间接测量，相应的物理量称为间接测得量。例如，测量铝柱的密度时，可以用卡尺测出它的高 h 和直径 d ，算出体积 $V = \frac{1}{4}\pi d^2 h$ ，然后用天平称出它的质量 m ，

则铝柱的密度 $\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ ， V 和 ρ 都是间接测得量。

(二) 误差

人们用仪器对某一物理量进行测量时，由于仪器、实验条件等各种因素的限制和影响，使得测量值总是与客观存在的实际值即真值之间有一定的偏差，这个偏差称为测量的误差。

误差 = 测量值 - 真值。它的大小反映了人们的认识与客观真实的接近程度。误差存在于一切测量之中，而且贯穿于测量的始终。被测量的真值是指在一定时间、一定状态下，被测量客观存在的真实大小，它是个理想的概念。它包含理论真值、公认真值、计量学的定真值和标准器的相对真值。但在大多数情况下，被测量的真值往往是未知的。实验的目的就是采用科学方法测得其“真值”。

测量中要绝对消除误差是不可能的,只能设法在测量时减小测量误差,尽可能得到被测物理量的最接近值,并估计测量的误差。为此必须研究误差的性质、来源和规律,以便达到测量的目的。

根据误差的性质和产生的原因,误差可分为系统误差、随机误差、过失误差三种。

1. 系统误差

系统误差的特征是其具有确定性。在同一条件下进行多次测量时,误差的大小和正负或保持不变,或在条件改变时按一定的规律变化。增加测量次数并不能减少这种误差对测量值的影响。

系统误差主要来自于以下几个方面。

1) 仪器误差

测量是用仪器进行的,有的仪器较粗糙,有的仪器较精确,但任何仪器都存在误差。所不同的是,粗糙的仪器其仪器误差大,精确的仪器其仪器误差小。因此,仪器误差对实验结果的影响是不可忽略的。

仪器误差用 $\Delta_{\text{仪}}$ 表示,它是指在正确使用仪器下,测量值和被测物理量的真值之间可能产生的最大误差。

仪器误差通常是由制造厂家或计量机关确定,一般写在仪器的标牌上或说明书中。对于未标明误差的仪器,可取其最小分度值作为其仪器误差,或者根据仪器的准确度等级进行计算,如电表示值的最大仪器误差为

$$\Delta_{\text{仪}} = \pm \text{量程} \times \text{准确度等级} (\%)$$

仪器误差往往包括系统误差和随机误差,其中何者为主,对于不同仪器不尽相同。例如,0.2级以上的仪表主要是随机误差;级别低的和工业用仪表主要是系统误差;实验室常用仪表(如0.5级表)两种误差都有。

不同的量具、量仪,其仪器误差有不同的规定。例如,1/10秒的秒表,仪器误差为 $\pm 0.1 \text{ s}$;游标卡尺、温度计等的仪器误差与其最小分度相等,如50分度的游标卡尺的仪器误差为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。

2) 方法误差

这是由于实验方法或理论不完善而导致的。如采用伏安法测电阻时,由于用不同的连接方法,导致引入不同的电表内阻产生的接入误差。采用单摆周期公式 $T =$

$2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 测量周期时,摆角引起的误差。

3) 环境误差

这是由周围环境(如温度、压力、湿度、电磁场等)的影响而引起的误差。

4) 人身误差

这是由观测人生理或心理特点所造成的误差，如个人的习惯与偏见等造成的误差。

系统误差一般都有较明显的原因，因此可以采用适当的措施加以限制或消除它对测量结果的影响。系统误差是测量误差的重要组成部分，所以发现系统误差，弄清其产生的原因，进而消除它对测量结果的影响是十分必要的。

2. 随机误差

随机误差又称偶然误差，它的特征是其具有随机性。在同一条件下多次测量某一物理量时，即使消除了一切引起系统误差的因素，测量结果也仍然存在着误差，这就是随机误差。

随机误差产生的原因是由于人的感官灵敏程度和仪器精密度的限制，周围环境的干扰及随测量而来的其他不可预测的偶然因素的影响。如测量目的物对的不准，平衡点定的不准，温度、湿度、电源电压的起伏涨落等引起的误差都属于随机误差。这些影响一般是很微小的，而且是混乱的、无规律的，不像系统误差那样可以找出明显的原因并加以限制或消除。

随机误差使测量值有时偏大，有时偏小，不可预知。但对一物理量进行多次测量时，这些测量结果将呈现出一定的统计规律性，即随机误差服从一定的统计分布。随机误差在测量次数很多时，基本上都可以认为近似遵从正态分布规律，即其绝对值相等的正、负误差出现的机会（概率）相等，绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会（概率）大。因此可以通过多次测量，取测量值的算术平均值的方法来减小或消除随机误差，提高测量结果的可靠度。

从统计规律角度讲，测量次数越多，所得到的平均值越接近真值。但在实验中并不是测量次数越多越好。因为增加测量次数就要延长测量时间，这将会给保持稳定的测量条件增加困难。同时增加测量次数也会给测量者造成疲劳，这又可能引起较大的观测误差。另外，增加测量次数只能减少随机误差而不能减少系统误差，也就是说，只有当个别测量的随机误差超过该测量的系统误差时，多次测量才有意义，所以实际观测次数并不太多。一般在科学研究当中，取 10~20 次，在物理实验课中取 5~10 次。当随机误差小于系统误差时，多次测量没有意义，可以只取单次测量。

3. 过失误差

过失误差即实验过程中由于过失、错误引起的误差。凡是用测量时的客观条件不能解释为合理的那些明显歪曲测量结果的误差，均称为过失误差，也称为粗差。过失误差是由于实验者在观测、记录和整理数据过程中缺乏经验、粗心大意、疲劳等原因引起的。

刚开始进行实验时，可能会出现过失误差，但在教师的指导下不断地总结经验，提高实验素养，过失误差是可以防止出现的。含有过失误差的测量值称为异常值或坏

值。在正确的测量结果中不应当含有过失误差。测量时如发现某一数值与同样条件下的其他数值有明显的差别，可怀疑为过失误差所致，应立刻把它删除，并重新再取一次数据。

总之，系统误差、随机误差由于它们的性质不同、来源不同、处理的方法也不同。对于系统误差和过失误差，只要我们不断积累经验，培养实验技能，把握实验条件是可以加以限制和消除的。对于随机误差可以通过取算术平均值的方法加以限制或减小。

六、测量的不确定度及结果表示

(一) 测量的不确定度

根据国际标准化组织等 7 个国际组织联合发表的《测量不确定度表示指南 ISO9003 (E)》的提法，普通物理实验的测量结果表示中，不确定度 U 从讨论方法上可分为 A、B 两类分量：一是用统计方法计算出来的 A 类分量，记为 U_A ；二是指非统计方法计算出来的 B 类分量，记为 U_B 。

不确定度是建立在误差理论基础上的一个新概念，是误差的数字指标，它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能肯定的程度，即测量结果不能肯定的误差范围，不确定度是一个恒为正值的可以计算的量。总不确定度：

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (0-1)$$

(二) 测量结果的正确表达式

按照我国国家计量技术规范 (JJG 1027—91) 要求：测量结果的最后表达式为

$$N = \bar{N} \pm U \quad (0-2)$$

式中： N 为被测量， \bar{N} 为测量结果， U 为不确定度，它们具有相同的单位。

有时为了评价测量的优劣，还需要考虑被测量本身的大小，可用相对不确定度来表示，即

$$E = \frac{U}{\bar{N}} \times 100\% \quad (0-3)$$

为了说明相对不确定度的意义，下面举一个例子。

例如，测得两个物体的长度为 $L_1 = (23.50 \pm 0.03) \text{ cm}$ ， $L_2 = (2.35 \pm 0.03) \text{ cm}$ ，则其相对不确定度分别为

$$E_1 = \frac{0.03}{23.5} \times 100\% = 0.1\%$$

$$E_2 = \frac{0.03}{2.35} \times 100\% = 1\%$$

从不确定度来看，两者相同，但从相对不确定度来看，后者比前者大 10 倍，我们

自然认为第一个测量更准确些。

当被测量值有公认的标准值或理论值时，在实验结果的数据处理中，还常常把测量值与其公认值或理论值进行比较，并用百分差来表示实验结果：

$$E_{\text{百}} = \frac{|\text{测量值} - \text{理论值}|}{\text{理论值}} \times 100\% \quad (0-4)$$

七、直接测量结果的表示和不确定度的估计

(一) 直接测量结果不确定度及结果表示

1. 单次测量

实际工作中，有时由于条件的限制不能进行多次测量或由于仪器的精度较低，或被测对象不稳定，多次测量的结果并不能反映随机性，此时多次测量已失去意义，在这种情况下，测量结果的不确定度 U_x 主要由仪器误差限 $\Delta_{\text{仪}}$ 的绝对值决定，此时测量结果表达式为

$$x = x_{\text{测}} \pm U_x \quad (U_x = \Delta_{\text{仪}}) \quad (0-5)$$

$\Delta_{\text{仪}}$ 的大小可参照测量器具的有关标准，由准确度等级或允许误差范围得出，也可由实验室结合具体情况下给出。一般来说， $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器最小刻度所对应的物理量的数量级，通常注明在仪器出厂的质量说明书、鉴定书、校准证书或仪器铭牌上。

2. 多次测量

在同一条件下，对某一物理量进行 n 次测量，其测量结果为测量列的算术平均值 \bar{x} ，而总不确定度应是 A、B 两类不确定度分量的方和根，即

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (0-6)$$

(1) U_A 的计算：

$$U_A = \frac{t}{\sqrt{n}} S \quad (0-7)$$

式中： S 称为任一测量值的标准偏差，其大小可用误差理论中的贝塞尔公式计算，即

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-8)$$

式中： n 为测量次数； t 为测量结果在置信概率 p 的情况下的置信因子，它与 n 有关，如表 0-1 所示为 t 及 $\frac{t}{\sqrt{n}}$ 的参考值。

表 0-1 t 及 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 的参考值

$p = 0.95$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30
t	12.7	3.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.21	2.03
$\frac{t}{\sqrt{n}}$	8.99	2.48	1.59	1.24	1.05	0.93	0.84	0.77	0.72	0.47	0.37
$\frac{t}{\sqrt{n}}$ 的近似值	9.0	2.5	1.6	1.2	$\frac{t}{\sqrt{n}} \approx 1$					$\frac{t}{\sqrt{n}} \approx \frac{2}{\sqrt{n}}$	

(2) U_B 的计算:

一般情况下,
$$U_B = \Delta_{\text{仪}} \quad (0-9)$$

$\Delta_{\text{仪}}$ 由仪器说明提供 (或由实验室提供), 对于多量程电表, 则

$$U_B = \Delta_{\text{仪}} = \text{量程} \times \text{准确度等级} \quad (0-10)$$

讨论:

(1) 在某些物理实验中, 所用仪器精度不高, 测量条件比较稳定, 多次测量同一物理量结果相近, 即随机误差很小 ($U_A < \frac{1}{3} U_B$), 故可对该物理量只做单次测量。

在单次测量中, 取该次测量值作为算术平均值, 总的 uncertainty 主要是 B 类 uncertainty, 并且 B 类 uncertainty 就用仪器误差来表示, 即

$$U = U_B = \Delta_{\text{仪}}$$

单次测量结果表达式

$$x = x_{\text{测}} \pm \Delta_{\text{仪}} \quad (0-11)$$

(2) 在某些物理实验中, 系统误差已经消除, 或减小到最低程度, 并且所用仪器精度较高, 测量条件比较稳定 ($U_B < \frac{1}{3} U_A$) 的情况下, 主要存在随机误差, 即可对该物理量采用多次测量。

总的 uncertainty 主要是 A 类 uncertainty, 并且 A 类 uncertainty 可用标准偏差来表示, 即

$$U = U_A$$

测量结果表达式

$$x = \bar{x} \pm U_A \quad (0-12)$$

八、间接测量结果的表示和不确定度的合成

在间接测量中, 间接测量的结果是由直接测量结果根据一定的数学公式计算出来的。显然, 直接测量结果的 uncertainty 必然影响到间接测量的结果。

设间接测量量 N 与各独立的直接测量量 x, y, z, \dots 等有下列函数关系, 即

$$N=f(x, y, z, \dots) \quad (0-13)$$

设 x, y, z, \dots 的不确定度分别为 U_x, U_y, U_z, \dots , 它们必然影响间接测量结果, 使 N 也有相应的不确定度 U_N , 由于不确定度都是微小的量, 相当于数学中的“增量”, 因此间接测量量的不确定度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 U_x 替代微分 dx 等; ②考虑其最大值, 则在不确定度各项中都取正值。于是, 可以用标准偏差的不确定度传递公式简化地计算 N 的不确定度, 即

$$U_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (0-14)$$

$$\frac{U_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\right)^2 U_x^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\right)^2 U_z^2 + \dots} \quad (0-15)$$

式 (0-14) 适用于和差形式的函数, 式 (0-15) 适用于积商形式的函数。

为了计算方便起见, 将常用的一些标准偏差的传递公式列于表 0-2 中, 以供参考。

由表 0-2 可见, 在计算间接测量量的标准偏差时, 若测量函数关系为加减法, 则用各自标准偏差的平方和来计算比较方便; 乘除法用相对不确定度计算较为方便, 且都取正值。

表 0-2 常用函数的标准偏差传递公式

函数表达式	标准偏差传递公式
$N=x \pm y$	$U_N = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$
$N=xy$ (或 $N=\frac{x}{y}$)	$\frac{U_N}{N} = \sqrt{\left(\frac{U_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{U_y}{y}\right)^2}$
$N=kx$	$U_N = kU_x; \frac{U_N}{N} = \frac{U_x}{x}$
$N=\frac{x^k y^m}{z^n}$	$\frac{U_N}{N} = \sqrt{k^2 \left(\frac{U_x}{x}\right)^2 + m^2 \left(\frac{U_y}{y}\right)^2 + n^2 \left(\frac{U_z}{z}\right)^2}$
$N=\sqrt[n]{x}$	$\frac{U_N}{N} = \frac{1}{n} \frac{U_x}{x}$
$N=\sin x$	$U_N = \cos x U_x$
$N=\ln x$	$U_N = \frac{U_x}{x}$

对于其他函数关系的误差传递, 可按下列步骤计算:

①对函数求全微分 (或先对函数取对数, 再求全微分);