



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

(经济管理类)

杨振坤 李寿岭 主编



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

(经济管理类)

主 编 杨振坤 李寿岭

副主编 刘兆梅

参 编 王小克 刘会玲 韩星星



机械工业出版社

本书依据教育部制定的大学物理实验课程基本要求,结合7年多的教学实践,为适应应用型人才培养模式而编写,系面向经济管理类专业大学物理实验所用教材。

本书分为七个部分,包括课程要求、误差及数据处理、物理实验常用仪器设备及其使用、物理实验的基本测量方法、基础实验、演示实验与仿真实验简介和附录。其中基础实验按力学、热学、光学、电磁学以及近代物理学等学科编写,共12个实验。每一个实验的编写,除含有常规的实验目的、实验原理、实验内容和实验报告要求外,还增加了预习提示和课后思考部分。本书还附有误差及数据处理部分的习题参考答案,以利于教与学。

本书可作为高等院校物理实验教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验:经济管理类/杨振坤,李寿岭主编. —北京:机械工业出版社,2013.3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-41569-5

I. ①大… II. ①杨… ②李… 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(2013)第033261号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联 李乐

责任校对:樊钟英 张晓蓉 封面设计:马精明

责任印制:张楠

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2013年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 13印张·249千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41569-5

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

“地球村”这个使人充满想象的名词，已成为现代人们生活的骄傲。无论你在何处，所有需要交流或经营的事情，都不必再受时空和地域的限制，均可以在短时间内进行研讨或敲定。这正是人们常说的，只有想不到的，没有做不到的。

而所有的这一切，均源于现代科学技术突飞猛进的发展。物理学作为研究和分析物质的本质及其运动规律的学科，被引入到了经济领域：静电场由于电荷的引入而影响了它的分布；载流导体由于集肤效应，被用来分析资金流向；甚至有人说金钱（收入和利润）成了经济管理领域的万有引力……是的，过去那些在工程技术及其管理范畴中枯燥的名词、公式和定律，现在成了撬动经济运行和提高管理效率的有力杠杆，要想只用算盘来算清和盘活一个运转呆滞的经济体，或只靠几个人拍拍脑门式的发号施令，就能达到一个部门或一个系统的高效运转，是无法以有限的物质资源去最大限度地满足人类的无限需求这一经济与管理最核心的课题的。

诚然，生活和命运向人们提出了一系列新的课题和难题，虽然人们还无法一一解决，但必须努力，跟上时代的发展。物理学对于学习经济管理的学生来说虽然有些生疏，不过好在它是一门实验科学，只要认真地学和实实在在地做下去，就有可能从一个新的视角——至少可以多一个分析方向，去研究经济管理领域的“花花世界”。

在自然科学的海洋里掌握“喝水”和防止“呛水”的能力，勇敢地游出一条泳道来，人们一定会登上成功的彼岸。

本书是在7年面向经济管理类学生独立开设大学物理实验课，且由李寿岭、王小克、刘会玲编写出版的相关教材的基础上编写的。

本书由杨振坤、李寿岭教授主编，刘兆梅为副主编。其中，第1章由李寿岭编写，第2章、第3章和第5章的5.1、5.7、5.10及附录C由刘兆梅编写，第4章、第5章的5.6和第6章的6.1由杨振坤编写，第5章的5.2、5.4、5.5、5.8和第6章的6.2由刘会玲编写，第5章的5.3和附录A、B由王小克编写，第5章的5.9和5.11由韩星星编写，第5章的5.12由赵丽华编写，梁颖亮做了部分资料的整理工作。

本书由姬秉正教授审阅。

在编写过程中，编者借鉴了大量有关参考资料。在此，对参考资料的作者、西安交通大学城市学院物理教学实验中心的各位同仁以及帮助此书出版的单位表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，且时间仓促，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 经济与管理类专业开设物理实验课程的必要性	1
1.2 物理实验课程的基本程序	2
1.3 实验须知和实验室守则	2
第2章 实验数据处理的基本知识	4
2.1 测量与误差	4
2.2 测量不确定度	8
2.3 有效数字及其运算	15
2.4 数据处理的基本方法	19
习题	23
第3章 物理实验常用仪器设备及其使用	25
3.1 长度测量器具	25
3.2 质量测量仪器	33
3.3 时间测量仪器	35
3.4 温度测量仪器	37
3.5 电磁学实验仪器	39
3.6 普通物理实验室常用光源	60
3.7 气压计	62
第4章 物理实验的基本测量方法	64
4.1 比较法	64
4.2 平衡法	65
4.3 放大法	65
4.4 补偿法	66
4.5 模拟法	67
4.6 干涉法	68
4.7 光谱法	68
4.8 转换测量法	69
4.9 其他测量方法	70
第5章 基础实验	71
5.1 物质密度的测定	71
5.2 用三线摆研究物体的转动惯量	73

5.3 用落球法测液体的动力黏度	77
5.4 固定均匀弦振动实验	83
5.5 金属材料的弹性模量	87
5.6 小灯泡伏安特性的研究	94
5.7 分压电路及分压特性研究	99
5.8 模拟法测绘静电场	103
5.9 光电效应	107
5.10 透镜焦距的测定	111
5.11 等厚干涉	117
5.12 用旋光仪测糖溶液的浓度	123
第6章 演示实验和仿真实验	131
6.1 物理演示实验介绍	131
6.2 物理仿真实验简介	159
附录	186
附录 A 我国法定计量单位	186
附录 B 常用物理数据	188
附录 C 第2章习题参考答案	199
参考文献	200

第1章 绪 论

1.1 经济与管理类专业开设物理实验课程的必要性

物理学是以研究物质结构及其运动规律为内容的学科，经济学则是以有限资源去实现人们的无限需求为目的，管理则是以人的最大主观努力去追逐最小投入、最高效率为愿望的，它们都被自然的客观世界所包容，密切地结合在一起。随着近现代科学技术的发展，人们认识到，人的智商和情商也遵循着自然世界的一些客观规律。改变某个地区的经济政策，它就像万有引力一样改变投资方向；而投资的取向又会影响市场及金融的分布，又会再次引导管理形式的变更，并直接更改该地区的性质及 GDP。

在经济活跃的条件下，我们只有不断地采集数据，不断地分析、调整、寻找它的规律，才有可能适应它，从而去驾驭它。否则，我们有可能被滚滚前进的经济车轮所抛弃，甚至被碾碎。

大学物理实验课程试图以有限的时间，通过一些最基本、最常用的实验环节，学习如何观察某一客观事物的运动过程（或决定它属性的基本参数），记录和分析那些有价值的数据和环境条件，从而达到能够比较客观、真实地认识事物（过程）的本质，而后进一步控制、改进以及创造条件。

参照国家教育部对高等工科院校颁布的大学物理实验课程教学基本要求，我们提出如下目的和要求：

第一，通过若干具体的实验，学习如何独立地组织一个实验，即完整地掌握一个实验从选题、原理、操作到完成实验报告的全过程；

第二，学习一些基本和常用的实验方法和测试技术（含常用仪器的使用）；

第三，研究和掌握一个实验过程的现象观察、数据采集和记录；

第四，了解和学习数据处理、误差及测量不确定度的表示；

第五，独立地完成一份实验报告。

对于我国现行的教育制度，对非理工科学生而言，学习和掌握上述要求是有一定难度的，但是，为了学生们在未来的经济管理领域中，尽早占领制高点，并能做到游刃有余，这些实实在在的训练是必要的。

1.2 物理实验课程的基本程序

大学物理实验是一门在教师指导下，通过一系列实验以学生自学为主独立完成的课程，它由以下三个环节实现：

1. 预习

这是进行实验前必须做好的工作。学生应通过阅读实验教材，参考实验仪器（实验室将逐步创造这一条件）及相关资料，明确这一实验的目的、任务和所依据的理论知识，了解所用仪器、工具及器材的性能、特征及使用，准备好实验所需记录的数据表格。

2. 课堂操作

进入实验室后不要急于动手，要先清点实验仪器及器材，并准备回答教师的提问，在全部明确之后，按实验内容布置仪器，调整装置，连接电路或光路，并全部调整至正常使用状态。

按实验内容，测试并记录数据（数据记录用规定的记录纸，不能用铅笔书写原始数据，错误和笔误等处可用细线划掉重写，不许涂改，不得使用涂改液等来覆盖），并请教师确认和签字。

实验完成后，要将仪器设备复原，将实验台收拾干净、整洁，然后方可离开实验室。

3. 报告

实验做完后，用规定的纸张、格式书写正式的实验报告，实验报告应有如下内容：

（1）实验名称、实验目的、使用仪器（名称、型号、规格、数量）、实验原理、主要步骤；

（2）数据记录与处理、实验结果与评价（含误差、不确定度的计算与分析、实验心得及建议）；

（3）按规定的时间和方式将实验报告交任课教师审阅。

1.3 实验须知和实验室守则

物理实验课程要求在特定的环境条件下，即由课表排定的时间、地点，使用专用的仪器设备，由实验者在教师的指导下，独立完成每个实验。在实验中，做实验者必须诚实做人，遵纪守法，认真操作，如实记录，独立思考并努力克服困难，良好地完成实验。

实验室守则摘抄：

1. 按时上课，迟到超过 10min，不能做本次实验，按课内不及格登记；
2. 每个实验要有预习报告，交任课教师评阅，无预习报告者不准进行实验；
3. 所有实验均按每人一套独立进行，有问题可向任课教师询问，不允许同学之间讨论，更不允许私自更换仪器和样品；
4. 上课时必须自带文具（纸、笔、尺、函数计算器等），不允许随意走动及讲话，保持室内安静、整洁。
5. 实验完成后，须经任课教师审核数据签字，且将所用实验仪器、仪表整理复原，相关电源关闭、桌面整理整洁、所坐凳子归位后，方可离开实验室。

第2章 实验数据处理的基本知识

大学物理实验中，测量误差、不确定度理论和数据处理方法占有非常重要的地位，是正确处理实验数据、准确表达测量结果的理论基础。由于这部分理论涉及面广，数学计算要求高，已经超出本课程的教学范畴。因此，本章仅就测量误差、不确定度和数据处理的基本知识作介绍，有些结论和计算公式是直接引用的。

2.1 测量与误差

本节介绍测量和误差的基本概念，包括测量和误差的定义与分类、随机误差和系统误差的消除和减小方法。

2.1.1 测量与真值

测量是指以确定被测对象量值为目的的全部操作。按照测量值获得方法的不同，测量分为直接测量和间接测量两种。直接从仪器或量具上得出待测量的量值，称为直接测量。例如，用米尺测量物体的长度，用量筒测量液体的体积，用天平测量物体的质量等都是直接测量，相应的被测物理量称为直接测量量。如果待测量的量值是由若干个直接测量量通过函数运算得到的，则称为间接测量，相应的被测物理量称为间接测量量。例如，通过直接测量金属立方体的质量 m 、长 l 、宽 b 、高 h ，再根据公式 $\rho = \frac{m}{lbh}$ 计算出立方体内金属的密度，这就是间接测量， ρ 为间接测量量。

任何一个物理量在一定条件下都有一个客观存在的值，叫做真值。根据国家计量技术规范《JJF 1001—1998 通用计量术语及定义》，真值的定义为：与给定的特定量的定义一致的值为真值。同时注明了三点：① 真值只有通过完善的测量才有可能获得；② 真值按其本性是不确定的；③ 真值不一定只有一个。

真值只有通过完善的测量才有可能获得，但实际测量是不完善的。因此，实际测量不能获得真值，即从测量的角度讲，真值不可能确切获知。虽然通过测量不能获得真值，但是，通过定义使量值符合定义则是可能的。例如：在国际单位制中，定义保存在巴黎国际计量局的铂-铱合金的国际千克原器的质量为 1kg、光在真空中的速度为 $c = 299\,792\,458\text{m/s}$ 、标准大气压 $1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$

等, 这些与定义一致的值就是真值。还有一种真值是理论真值, 如四边形四个内角之和恒为 360° , 此值也可表述为 $2\pi(\text{rad})$ 。随着科学技术的进步, 测量误差可以被控制得越来越小。但实践证明, 任何测量的误差都不可能降为零, 这个结论被称为误差公理。也就是说, 除了与特定量的定义一致的值为真值外, 通过测量不可能获得真值。为了计算测量误差, 对于给定目的具有适当不确定度、赋予特定量的值, 有时该值是约定采用的, 为约定真值。因此, 被认为充分接近真值、可以替代真值的量值有: 国际常数委员会推荐值 (如 2006 年的阿伏伽德罗常数值为 $6.022\,141\,79(30) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$, 相对标准不确定度为 5.0×10^{-8})、最佳估计值、已修正过的算术平均值、计量标准器所复现的值等, 它们都可作为约定真值。

2.1.2 误差的定义及分类

1. 绝对误差和相对误差

测量结果减去被测量的真值, 称为测量误差。如果用 x 表示测量结果, x_0 表示真值, 则测量误差 Δx 表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2-1-1)$$

测量误差可为正值, 也可为负值。当测量结果大于真值时为正, 否则为负。测量误差也可以用相对误差表示, 相对误差 E 定义为

$$E = \Delta x / x_0 \quad (2-1-2)$$

为了将以上两式加以区别, 通常称式 (2-1-2) 定义的误差为相对误差, 称式 (2-1-1) 定义的误差为测量的绝对误差。注意, 绝对误差可正可负, 不是误差的绝对值。

2. 随机误差和系统误差

根据误差出现的不同特点, 可分为随机误差和系统误差两类。

(1) 随机误差 “在重复测量中, 以不可预知的方式变化的测量误差的分量。” 对此定义可这样理解: 在相同测量条件下 (在短时间内测量的程序、观测者、仪器、地点都相同, 这些条件称为重复性条件) 多次测量同一量时, 每次测得的值为 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 每次测量的随机误差 $\Delta x_i = x_i - x_0$ 的大小和正负以不可预知的方式变化, 是随机的。

随机误差产生的基本原因是还没有被人们所认识 and 无法控制的运动中的物质世界对测量的影响, 如温度的不均匀、微小的振动、电磁场、各种射线等环境因素对测量的既不能消除又无法估量的影响, 这种影响称为随机效应, 它们导致重复观测中的分散性。当测量次数 n 足够多时, Δx_i 就显示出统计规律。随机误差的最本质的统计规律是, 它的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (2-1-3)$$

上述特性称为抵偿性。将式 (2-1-1) 代入式 (2-1-3), 得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_0 = 0$$

$$\text{则} \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_0 \quad (2-1-4)$$

即仅存在随机误差的情形下, 测量次数无限多时的算术平均值就是真值。

在计算随机误差时, 重复测量次数应取 6 ~ 10 次, 由于重复测量次数不是无限多, 故只可能确定随机误差的估计值, 并在随机误差起主导作用的测量中,

以算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为约定真值。其中第 i 次测量值 x_i 与算术平均值 $\bar{x}$ 的差为

$$\Delta v_i = x_i - \bar{x} \quad (2-1-5)$$

式中, Δv_i 称为残余误差 (简称残差)。

(2) 系统误差 “在重复测量中, 保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量。”

系统误差产生的基本原因有: 仪器因素 (如零点未校准、仪器未放置水平、砝码不准等)、理论因素 (如用落体法测重力加速度时, 忽略空气阻力等)、环境因素 (如量热器系统的温度高于环境温度, 系统散热等) 及人员因素 (如记录某一信号时, 总是习惯滞后或超前等) 等。来源于影响量的已识别的效应称为系统效应。由于通过测量不可能获得真值, 故系统效应的获知也是有限的, 只可能根据有限次数的测量平均值与约定真值之差来确定系统误差的估计值。根据有限次数的测量结果确定了系统误差的估计值后, 取系统误差的负值为修正值, 修正值与测量结果以代数和相加, 系统误差的模会比修正前的要小, 但不可能为零。也就是说, 由于系统误差及其原因不能完全获知, 因此, 通过修正值对系统误差的补偿也是有限的。

下面介绍几种系统误差的处理方法:

1) 可定系统误差的消除。这类误差多是直接明显地表现出来, 应针对其产生的原因来消除。

【例题 2.1.1】 伏安法测电阻。它依据的是欧姆定律, 实验中要求电压表内阻无穷大, 电流表内阻为零, 这是做不到的。如果将电路图进行一定的变换, 由图 2.1.1a 变换为图 2.1.1b, 即用补偿法测量电压, 当调节 R_2 到检流计 G 示值为 “0” 时, 相当于做到了电压表内阻 $R_v = \infty$, 电流表读数就是流过电阻 R 的电流, 从而消除了系统误差。

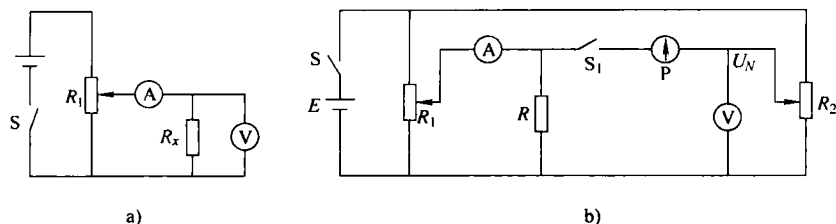


图 2.1.1 伏安法测电阻

a) 电流表外接电路 b) 补偿法测电压电路

【例题 2.1.2】 天平的不等臂误差也是一种可定系统误差。如果用交换法，将被测物分别放在左右两盘，称得其质量为 m_1 和 m_2 ，将两次质量值先相乘再开方作为测量值，或近似用 m_1 和 m_2 的平均值表示测量值

$$m = \sqrt{m_1 m_2} \approx \frac{1}{2}(m_1 + m_2)$$

同样的情况还可以用别的方法处理。在例题 2.1.1 中，若保证电路图 2.1.1a 中电压值和电流值不变，将被测电阻 R 换成另一个标准电阻箱，调节电阻箱之阻值，实现测量 R 时的条件，即电流表和电压表示值不变，则电阻箱的示值就是被测电阻的阻值。

至于各种量具或仪表的零值不对，则应在使用前尽量予以校正，实在无法完全校正，则可作为零点读数在数据处理时予以消除。

综上所述，对于可定系统误差的消除，应该在正确校正仪器仪表的前提下，采用替代法（又叫做代换法）和交换法实现，对于原理中要求的各种理想条件，不能从仪器或装置本身去消除（如伏安法测电阻中尽量增加电压表内阻），而应该从方法上（如用补偿法测电压）加以解决。

2) 未定系统误差的处理。这类误差多数以仪表或量具的准确度级别给出，它在整个测量过程中始终存在且处处存在，如量程在 50mm 以内的外径千分尺的误差限（示值误差）为 0.004mm，从它的分布规律来看，一般多视为均匀分布，无法消除，只能在总体误差计算时，把它作为后一个分量予以考虑。

“测量结果与被测量的真值之间的一致程度为测量准确度。”准确度反映了随机误差与系统误差的合成误差的大小，合成误差越小，准确度越高。

在实际测量过程中，除了上述系统误差与随机误差外，测量时由于粗心大意、操作错误、仪器有缺陷或环境干扰等因素造成的误差称为过失误差（或粗大误差），过失误差是完全可以避免的。含有过失误差的测量值称为坏值。测量结果中不能包含过失误差，即所有的坏值都应剔除。

2.2 测量不确定度

用误差来评估测量的结果显然是不完善的,因为测量的过程比较复杂,随机因素只占其中的一部分,而且也只能用概率来表示随机误差落在某一区间的可能性。测量中的系统误差则无法在测量结果中反映出来。另外,误差是一个理想的概念,一般情况下误差是不能准确得知的。为了全面、准确地评估测量结果,引入“不确定度”的概念。

2.2.1 测量不确定度的概念

既然将测量结果与被测量真值之差定义为测量误差,那么,在根据式(2-1-1)和式(2-1-2)的定义计算误差时,就需要知道真值。而真值却不能通过次数有限、存在误差的实际测量获得,为了解决这个困难,在传统误差理论中引入了约定真值,测量的目的是为了刻意追求通过测量又不可能得到的真值,这可以说是传统误差理论的缺陷。如果换个思路,使测量的目的变为合理地评估出真值以多大的概率存在于某个量值区间,这个区间反映了测量结果的不确定性,只要这个区间符合测量要求就行,而不必刻意追求真值的具体量值,这是现实的,也是在实际测量中完全可以实现的。例如,某人在市场上买了一包塑料袋包装的食盐,标称净质量为 $1000\text{g} \pm 5\text{g}$ 、包装袋质量为 10g 。此人在市场监督的电子秤上称得此包食盐总质量为 1008g ,包装袋质量充其量为 10g ,虽然此包食盐净质量不少于 998g ,但仍符合标称值,他认为质量合格,而没有必要再去追求此包食盐净质量的真值到底是多少,就是这个道理。

1980年,国际计量局提出了实验不确定度建议书,建议用不确定度来评定测量结果。自1993年国际标准化组织、国际计量委员会、国际电工委员会、国际法制计量组织、国际纯物理及应用物理联合会等7个国际权威组织发布和实施《测量不确定度表示指南(1993)》以来,用不确定度来评价测量结果在我国国民经济和科学的各领域都得到全面推广和应用。1999年,我国还颁布并实施了技术规范《JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示》,以便规范不确定度评定与表示中的具体问题。因此,对传统误差理论进行变革,用不确定度评定与表示物理实验结果也就成为必然。

表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数为测量不确定度。不确定度恒取正值。不确定度一词指可疑的程度。广义而言,测量不确定度意为对测量结果正确性的可疑程度,也就是说,要对被测量的真值所处范围作出评定。测量不确定度可以包括许多分量,这些分量按其数值的评定方法可归并为两类:

不确定度的 A 类评定——在重复性条件下, 对同一被测量量进行多次测量的结果用统计分析的方法来评定其不确定度。用统计分析的方法计算出的那些分量, 称为不确定度的 A 类分量 u_A (如随机误差中的标准偏差)。

不确定度的 B 类评定——用非统计的方法来评定的不确定度。用非统计的方法计算出的那些分量, 称为不确定度的 B 类分量 u_B (如用估算方法评定的仪器误差)。

在测量结果不确定度的两类分量中, 每类分量一般又含有几个分量。为了简单起见, 本教材中 u_A 只涉及用统计方法评定的随机误差中的标准偏差, u_B 只涉及用估算方法评定的仪器误差和单次测量时的估读值所引起的误差, 其他分量不予考虑。

2.2.2 仪器误差

在国家计量技术规范中定义, 对给定的测量仪器, 由规范、规程等所允许的误差极限值为最大允许误差。在物理实验中, 常将规定条件下正确使用仪器时, 仪器的最大允许误差作为仪器误差, 用 Δ_m 表示。仪器误差是由仪器本身的缺陷和性能的局限性、环境的影响等综合因素造成的, 因此, 仪器误差中既包含有系统误差, 也包含有随机误差。在直接测量中, 若多次测量的不确定度的 A 类分量远小于由仪器误差产生的 B 类分量, 就没有必要进行多次测量, 只测量一次并以仪器误差来估算不确定度; 若多次测量的不确定度的 A 类分量与仪器误差产生的 B 类分量相比不可忽略, 则可按以下所述的不确定度原理来处理。

通常, 许多仪器和测量工具都是由生产厂家根据国家标准或行业标准生产的, 经质量检验合格后才能出厂。因此, 仪器误差可根据有关的标准、检定规程或仪器说明书来估算。例如:

1) 根据国家标准《GB/T 1216—2004 外径千分尺》, 测量范围为 0 ~ 50mm, 50 ~ 100mm, 100 ~ 150mm 时, 外径千分尺的仪器误差分别为 $4\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$ 。

2) 根据国家标准《GB/T 7676—1998 直接作用模拟指示电测量仪表及其附件》, 电流表和电压表的准确度等级指数分 11 级, 以百分数表示为 $C = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5$ 。如果电流表和电压表的测量范围上限为 $x_{\max}$, 则在参考条件下最大允许误差为

$$\Delta_m(x) = \pm C\% \cdot x_{\max} \quad (2-2-1)$$

由上式可知, 在参考条件下, 电流表和电压表的每个量程所对应的仪器误差 Δ_m 是个定值。因此, 选择电流表和电压表时, 要减小仪器误差, 不仅要考虑仪器的准确度等级, 而且应考虑测量范围上限, 使电流表和电压表的示值应尽量大于量程的 $2/3$, 但不能超过量程。

如果环境温度、相对湿度等影响量在参考条件范围之外, 但在标称使用范

围极限内,那么,电流表和电压表的仪器误差中除包含基本误差的极限外,还应包含由影响量所产生的变差。

2.2.3 不确定度的估算

1. 不确定度的 A 类评定

用统计方法计算出的那些分量都属于不确定度的 A 类评定,统计方法并非只有一种。基本方法是利用贝塞尔公式,即贝塞尔法:在相同条件下对物理量 X 进行 n 次测量,测得值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 算术平均值为 $\bar{x}$, 由贝塞尔公式得到的算术平均值的标准偏差 $s(\bar{x})$ 就是平均值 $\bar{x}$ 的 A 类标准不确定度,即

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

2. 不确定度的 B 类评定

用非统计方法计算出的那些分量都属于不确定度的 B 类评定。既然 B 类评定不按统计方法进行,也就是说不需要重复测量,而是根据对测量装置特性的了解和经验,测量装置生产厂家提供的技术说明文件、产品说明书和鉴定证书,所用仪器提供的检定数据,取自国家标准、技术规范、手册的参数等形成的一个信息集合,来评定不确定度的 B 类分量。信息的来源不同,评定的方法也不同,本书只考虑仪器误差这个主要因素。

由于仪器误差 Δ_m 是允许误差的极限值,即误差在 $[-\Delta_m, \Delta_m]$ 区间内的概率约为 100%,那么, B 类标准不确定度为

$$u_B(x) = \frac{\Delta_m(x)}{k} \quad (2-2-3)$$

式中, k 由仪器误差可能的分布决定:按正态分布、均匀分布、三角分布时, k 分别取 3, $\sqrt{3}$, $\sqrt{6}$; 如果误差的概率分布未知,则 k 可取 $\sqrt{3}$ (宁小勿大)。在本书所述实验中,仪器误差可能的分布一般是未知的, k 应取为 $\sqrt{3}$ 。

3. 直接测量结果的不确定度评定

在对物理量 X 的测量结果中,如果不仅存在若干个由式 (2-2-2) 估算出的标准不确定度的 A 类分量 $u_{A_i}(x)$, 还存在由式 (2-2-3) 估算出 B 类分量 $u_{B_j}(x)$, 在各个不确定度分量互相独立、互不相关的情形下,计算 A 类和 B 类评定的总贡献时,应将各个不确定度分量按“方和根”的方法合成,这时,直接测量结果的标准不确定度的总贡献 $u(x)$ 为

$$u(x) = \sqrt{\sum u_{A_i}^2(x) + \sum u_{B_j}^2(x)} \quad (2-2-4)$$

由 $u(x)$ 和 $\bar{x}$ 就可以认定物理量 X 的量值 x 以一定的置信概率 p 满足

$$\bar{x} - u(x) \leq x \leq \bar{x} + u(x)$$

上式表示, 物理量 X 的置信区间为 $[\bar{x} - u(x), \bar{x} + u(x)]$, 标准不确定度 $u(x)$ 为置信区间的半宽, 如果 $u(x)$ 为正态分布, 则置信概率 $p \approx 68\%$ 。

4. 间接测量量的合成标准不确定度

设间接测量量 N 与直接测量量 $x, y, z, \dots$ 之间满足函数关系

$$N = f(x, y, z, \dots)$$

各直接测量量的最佳估计值 (或称最佳测得值, 如已修正过的算数平均值、计量标准器所复现的值等) 为 $x_0, y_0, z_0, \dots$; 各直接测量量的标准不确定度为 $u(x), u(y), u(z), \dots$, 它们可得自 A 类评定、B 类评定或 A 类和 B 类评定的总贡献。若各个直接测量量 $x, y, z, \dots$ 是互相独立、互不相关的, 则间接测量量 N 的最佳估计值 (或最佳测得值) 为

$$N_0 = f(x_0, y_0, z_0, \dots) \quad (2-2-5)$$

由于直接测量量具有不确定度, 从而导致间接测量量也具有不确定度。因为不确定度是微小量, 所以就可利用微分学方法来处理。表 2-2-1 中给出了常用函数的合成标准不确定度的计算公式 (又可称为合成标准不确定度的传递公式)。

表 2-2-1 常用函数的合成标准不确定度的计算公式

函数形式	灵敏系数	合成标准不确定度的计算公式
$N = ax \pm by$	$c_x = a, c_y = b$	$u_c(N) = \sqrt{c_x^2 u^2(x) + c_y^2 u^2(y)}$
$N = ax^2 \pm by^2$	$c_x = 2ax$ $c_y = 2by$	$u_c(N) = \sqrt{c_x^2 u^2(x) + c_y^2 u^2(y)}$
$N = x/y$	$c_x = 1/y$ $c_y = -x/y^2$	$u_c(N) = \sqrt{c_x^2 u^2(x) + c_y^2 u^2(y)}$ $\frac{u_c(N)}{N_0} = \sqrt{\left[\frac{u(x)}{x}\right]^2 + \left[\frac{u(y)}{y}\right]^2}$
$N = x^m y^n z^l$	$c_x = mx^{m-1} y^n z^l$ $c_y = nx^m y^{n-1} z^l$ $c_z = lx^m y^n z^{l-1}$	$u_c(N) = \sqrt{c_x^2 u^2(x) + c_y^2 u^2(y) + c_z^2 u^2(z)}$ $\frac{u_c(N)}{N_0} = \sqrt{\left[m \frac{u(x)}{x}\right]^2 + \left[n \frac{u(y)}{y}\right]^2 + \left[l \frac{u(z)}{z}\right]^2}$
$N = \sin x$	$c = \cos x$	$u_c(N) = c u(x), \frac{u_c(N)}{N_0} = \cot x u(x)$

注: 表中 a, b, m, n, l 为常实数。

从表 2-2-1 中给出的计算公式可以看出, 以加减运算为主的函数, 先计算合成标准不确定度 $u_c(N)$, 再用 $u_c(N)/N_0$ 计算相对合成标准不确定度 u_{cr} 比较方便; 以乘除运算为主的函数, 先计算相对合成标准不确定度 u_{cr} , 再用 $u_c(N) = u_{cr} N_0$ 得到合成标准不确定度比较方便。

5. 测量结果的表示及合成标准不确定度的评定

例如, 标称值为 100g 的标准砝码质量 m 的最佳测得值为 100.021 47g, 测量结果的合成标准不确定度 $u_c = 0.00035g$, 根据《测量不确定度表述导则