

用不确定度理论指导设计性实验教学*

朱世坤, 聂宜珍

(三峡大学 理学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 文章结合具体的物理实验实例, 阐述了不确定度理论在设计性实验的仪器选择、条件确定、结果评价各教学环节中的指导作用, 以期对开设设计性实验教学提供一定的参考。

关键词: 不确定度; 设计性实验; 仪器选择

中图分类号: G642.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4305(2009)04-0090-03

Use uncertainty theory to guide the design experiment teaching

ZHU Shi-kun, NIE Yi-zhen

(College of Science, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Combining with specific examples of physics experiments, the teaching aspects guiding roles using Uncertainty theory to guide the design experiment teaching are expounded, such as choosing the equipments, determining the conditions and evaluating the results. The references are provided with a creation view to the design experiment teaching.

Key words: uncertainty theory; design experiment teaching; choosing the equipments

设计性实验教学已在全国各高校蓬勃开展, 因为它在培养学生创新意识和创新能力方面具有不可替代的作用。但是设计性实验是新时期教学改革的产品, 目前没有形成系统的教学体系。设计性实验的选题、教学组织方法、质量评价体系等方面仍处于探索之中^[1]。笔者在教学实践中深刻地体会到, 用不确定度理论指导设计性实验教学非常重要, 对于学生合理地选择测量仪器、确定恰当的实验方案、科学地评价实验结果等都会有很大的帮助^[2]。

1 用不确定度知识指导测量仪器的选择

设计性实验内容之一, 就是在进行实际测量之前, 先给定间接测量量的总不确定度要求, 如何合理确定各个直接测量量的不确定度来满足总不确定度的要求, 实际上就是对各直接测量量的测量仪器进行选择, 以保证间接测量量的测量精度。

若间接测量量 $y = f(x_i)$, $i=1 \cdots n$, x_i 为相互独立的直接测量量, 则不确定度和相对不确定度的表示式为^[3]:

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_i^2} \quad (1)$$

$$E_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right)^2 u_i^2} \quad (2)$$

其中 u_i 为直接测量量的不确定度。

根据不确定度等作用原则, 如果间接测量量 $y = f(x_i)$ 的不确定度 E_y 或相对不确定度已经确定, 则按照 n 个分项对不确定度或相对不确定度的贡献相同进行分配, 则有:

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| u_i \leq \frac{u}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$\left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right| u_i \leq \frac{E_y}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

例1: 根据欧姆定律求电阻, 由于电压表和电流表受到仪器准确度的限制, 会给测量结果引进不确定度。如果首先对电阻测量结果的不确定度大小提出要求, 如何正确地选择仪器并确定测量条件, 以满足总的测量要求。

解: 根据欧姆定律

$$R = \frac{U}{I}$$

由(2)式有:

* 基金项目: 三峡大学新世纪本科教育教学改革工程项目 (编号: B2005005)。

$$\frac{\mu_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln R}{\partial U}\right)^2 \mu_U^2 + \left(\frac{\partial \ln R}{\partial I}\right)^2 U_I^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\mu_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2}$$

$$\left(\frac{\mu_R}{R}\right)^2 = \left(\frac{\mu_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2$$

$$\text{根据不确定度等作用原则:} \left(\frac{\mu_U}{U}\right)^2 = \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2$$

则有:

$$\left(\frac{\mu_R}{R}\right)^2 = 2\left(\frac{\mu_U}{U}\right)^2 = 2\left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2$$

若要满足测量条件,必须

$$\frac{\mu_U}{U} = \frac{\mu_I}{I} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\mu_R}{R}$$

$$\text{若 } \frac{\mu_R}{R} \leq 1.5\%, \text{ 则:}$$

$$\frac{\mu_U}{U} = \frac{\mu_I}{I} \leq 1.06\%$$

由电表的准确度等级规定:

$$\frac{\mu_U}{U} = \frac{\mu_I}{I} \leq \alpha\%$$

式中 α 为电压表和电流表的以标度尺量限的百分数表示的准确度等级,显然电压表和电流表都应该选 1.0 级的电表。

如果用 1.5V 的电源供电,电压表的量程为: 0/1.5/3.0/7.5V,为了使电压表的指示值尽可能满偏,则应选 1.5V 的量程档,因而:

$$\mu_U \leq 1.0\% \times 1.5 = 0.015V$$

为满足 $\frac{\mu_U}{U} \leq 1.06\%$, 测量时必须使电压满足:

$$U \geq \frac{\mu_U}{1.06\%} = \frac{0.015}{0.0106} = 1.42V$$

为了选定电流表的量程和确定测量条件,可先粗测电阻的阻值,假设被测电阻的阻值约为 30 Ω ,则可估算出 $I_{\max} = \frac{1.5}{30} = 0.05A$,故选用 1.0 级,50mA 量程的电流表。电流测量值的不确定度应满足:

$$\mu_I \leq 1.0\% \times 50 = 0.50mA$$

为了满足 $\frac{\mu_I}{I} \leq 1.06\%$, 测量时必须使电流表满

$$\text{足: } I \geq \frac{\mu_I}{1.06\%} = \frac{0.50}{0.0106} = 47.2mA$$

由上述分析可见,若用 1.5V 的电源供电,被测电阻约 30,选择 1.0 级,1.5V 量程的电压表,1.0 级,50 量程的电流表进行测量,就可以满足总的相对不确定度 $\frac{\mu_R}{R} \leq 1.5\%$ 的要求。

2 用不确定度理论选择最有利的测量条件

确定最有利的测量条件时,多从相对不确定度着手。从数学角度看无异乎寻求某一函数的极小值。如果间接测量的函数关系是单元函数,则只需求一阶和二阶导数,令一阶导数为零,解出相应的自变量之值代入二阶导数,如此时二阶导数为正,则所求得者即是函数为极小值的条件,亦即最有利的测量条件。如果间接测量的函数关系是多元函数,则应分别对各自变量求一阶偏导数,并使之等于零,然后联立求解这许多个方程式,以求得函数为极小值的条件。但对多元函数,这种计算往往是很繁的,而且并不都能获得确定的答案,要根据具体情况灵活处理^[4]。

例 2:用衍射光栅来测定光的波长时,由实验测得的衍射光线的方向与所求的波长有如下的关系:

$$b \sin \varphi = k \lambda$$

式中 b 为光栅常数, k 是衍射光谱的级数, φ 是衍射角, λ 是被测光的波长^[5]。可见,从不确定度的角度亦可视为为的单元函数,则有:

$$k \mu_\lambda = b \cos \varphi \mu_\varphi$$

$$\frac{\mu_\lambda}{\lambda} = \operatorname{ctg} \varphi \mu_\varphi$$

由此可见,在衍射角的不确定度一定的情况下,

所观测的衍射角 φ 愈大, $\frac{\mu_\lambda}{\lambda}$ 愈小,即最有利的测量条件就是在可能的情况下尽量增大衍射角,这样测量结果的不确定度才会最小。目前,有些教材要求学生测定单色光一级条纹的衍射角是值得商榷的。

通过求间接测量函数的极小值的方法,确定最有利的测量条件可以举出很多例子,这里不再赘述。

3 用不确定度理论评价实验结果

不确定度在设计性实验中另一重要应用是分析实验数据和评价实验结果。例如用驻波共振法测量超声波在空气中传播速度的实验,依次测量十次共振时的位置,得到十个原始数据,应用对半分组依序逐差处理后 $L_i = (x_{i+5} - x_i)/\text{mm}$: 22.63; 22.72; 22.66; 22.73; 22.65, 平均值 $\bar{L} = 22.68\text{mm}$, 首先对 \bar{L}

估算不确定度, A 类分量 $U_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (L_i - \bar{L})^2}{5(5-1)}}$, 代入数

据计算得 $U_A = 0.02\text{mm}$, B 类分量 $U_B = \frac{\Delta}{C_j} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} =$

0.006mm, 合成不确定度 $\mu_{\bar{L}} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$, 代入数据计算得 $\mu_{\bar{L}} = 0.02\text{mm}$ 。波长 $\bar{\lambda} = \frac{2}{5} \bar{L} = 9.07\text{mm}$, 波



长的不确定度量 $\mu_{\lambda} = \frac{2}{5} \mu_{\bar{\lambda}} = 0.008$ 。声波传播速度 $\bar{v} = \lambda f$, 频率 f 由 SV5 型声速测定专用信号源单次读取 $\bar{f} = 37660 \text{ Hz}$, 波动值 $\Delta f = 1 \text{ Hz}$, 则 $\bar{v} = 341.580 \text{ ms}^{-1}$ 。频率的不确定度只有 B 类分量 $\mu_f = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.6 \text{ Hz}$ 。声速的相对不确定度由(2)式有:

$$\begin{aligned} \frac{\mu_{\bar{v}}}{\bar{v}} &= \sqrt{\left(\frac{\mu_{\lambda}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\mu_f}{f}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.008}{9.07}\right)^2 + \left(\frac{0.6}{37660}\right)^2} \\ &= \sqrt{0.77 \times 10^{-6} + 0.25 \times 10^{-9}} \end{aligned}$$

从上式右边根号下两项比较可见, 频率的相对不确定度远小于波长的相对不确定度, 也就是说, 影响速度测量结果的主要因素是波长的不确定度。略去频率不确定度的影响, $\frac{\mu_{\bar{v}}}{\bar{v}} = 0.0009$, 速度的绝对不确定度 $\mu_{\bar{v}} = 0.0009 \times \bar{v} = 0.0009 \times 341.580 = 0.4 \text{ ms}^{-1}$ 。结果为:

$$v = \bar{v} \pm \mu_{\bar{v}} = (341.6 \pm 0.4) \text{ ms}^{-1}$$

$$E_v = \frac{\mu_{\bar{v}}}{\bar{v}} \times 100\% = 0.09\%$$

通过对测量结果的分析, 找到了影响声速测量结果的主要因素是波长的测量, 若要提高速度测量的精度, 就要设法提高波长测量的精度, 这是改进实

(上接 89 页)

拥挤而影响实验。时间安排上, 在学生完成理论课及实验基本理论和仪器使用学习后, 利用课余时间完成幼苗培养、溶液配制、预习报告等, 具体实验内容安排 12 学时。其中 2 个学时介绍原理和仪器使用, 8 学时用来完成实验内容的测定, 2 学时进行总结分析。实验中注意酶提取液和其它溶液在冰箱保存。

传统的实验教学体系多以理论教学为主^[7], 学生掌握的是孤立的实验技术, 本次实验教学改革中, 我们试图建立一个具有基础性、综合性和研究性实验内容的多层次实验体系, 根据实际问题设立实验模块, 如逆境条件下植物的保护酶的变化、膜透性和膜脂过氧化的变化。这样我们就把原来孤立测定膜透性、膜脂过氧化、糖含量、POD、CAT、SOD 等几个独立的实验技术串联了起来, 让学生学会如何针对具体的生理问题而进行研究。

经过近两年的实践, 增强了学动手、动眼和动脑能力, 培养了学生的主动学习、综合问题、设计实验

实验的着眼点。

4 结束语

设计性实验要考虑的问题很多, 其主要目的就是要培养学生的创新意识和创新能力, 只要能达到目的任何方法都是有效的。但是, 作为教师应该有自己的教学计划, 如何有效地开设设计性实验, 循序渐进, 让学生学有所获, 这是我们要考虑的首要问题。通过教学实践说明, 不确定度理论对设计性实验的指导作用不可忽视, 它可以帮助我们合理地选择仪器、确定实验方法、分析评价实验结果, 还可以指出实验改进的方向。

参考文献 (References):

- [1] 朱世坤, 聂宜珍. 物理实验示范中心建设的研究与实践[J]. 实验室科学, 2007(6): 10-11.
- [2] 朱世坤, 聂宜珍. 以专题研究为载体, 推动综合性实验的开设[J]. 实验室科学, 2008(2): 17-18.
- [3] 吴泳华. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [4] 林润生. 普通物理实验指导[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1984.
- [5] 朱世坤. 二级物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

收稿日期: 2008-08-18

作者简介: 朱世坤 (1955-), 男, 湖北宜昌人, 高级实验师, 长期从事实验物理教学与研究工作。

及发现与分析解决问题的能力。

参考文献 (References):

- [1] 叶尚红, 林春. 植物生理生化综合实验类型的设计与探讨[J]. 中国农业教育, 2004(4): 36-37.
- [2] 陈洪国. 水分胁迫对植物膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(10): 38-40.
- [3] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [4] 侯福林, 安利国, 刘家尧, 等. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 于爽, 李春艳. 盐分胁迫对不同番茄品种生理生化指标的影响[J]. 北方园艺, 2007(4): 10-13.
- [6] 王学征, 韩文灏, 于广建. 盐分胁迫对番茄幼苗生理生化指标影响的研究[J]. 北方园艺, 2004(3): 48-49.
- [7] 李小方, 张晓玲, 孙越. 植物生理学实验课教学改革探索[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(5): 937-938.

收稿日期: 2009-04-08

作者简介: 张秀玲 (1966-), 德州学院副教授, 从事植物生理学的教学研究。