

基于放射性气体源体积的虚拟源刻度技术

田自宁 陈伟 韩斌 田言杰 刘文彪 冯天成 欧阳晓平

Study on the virtual source calibration technology based on the volume of radioactive gas source

Tian Zi-Ning Chen Wei Han Bin Tian Yan-Jie Liu Wen-Biao Feng Tian-Cheng Ouyang Xiao-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 062901 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.062901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.062901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

积分中值定理在放射性氙样品 γ 谱效率刻度技术中的应用

[Application of mean value theorem of integrals in the efficiency calibration technology of radioactive xenon sample](#)

物理学报.2013, 62(16): 162902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.162902>

基于压缩感知理论的非线性 γ 谱分析方法

[A non-linear analysis for gamma-ray spectrum based on compressed sensing](#)

物理学报.2013, 62(11): 112901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.112901>

基于放射性气体源体积的虚拟源刻度技术*

田自宁[†] 陈伟 韩斌 田言杰 刘文彪 冯天成 欧阳晓平

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2015年8月27日收到; 2015年11月10日收到修改稿)

大气中放射性气体氙同位素的活度浓度值是判断核裂变反应的关键数据, 长期以来其准确测量一直是个难题. 针对该问题, 本文提出和定义了虚拟点源的概念, 并使用 LabSOCS 软件模拟了不同尺寸气体体源和不同高度点源的探测效率, 根据计算的数据建立了气体源体积和虚拟点源位置的函数关系. 理论上证实了气体源体积和虚拟点位置有良好的线性关系, 在理论上为解决虚拟源刻度技术提供了新的途径.

关键词: 气体源, LabSOCS, 效率刻度, 虚拟点源

PACS: 29.30.Kv, 29.40.Wk, 29.25.Rm

DOI: 10.7498/aps.65.062901

1 引言

大气中惰性气体氙放射性同位素的监测是当前国际上关注和研究的重点. 对于气体状态的样品, 一般采用内充气正比计数管的测量方法测量其放射性活度^[1]. 高分辨的 HPGe γ 谱仪适用于惰性气体的 γ 射线分析测量^[2-4], 效率刻度是 γ 谱仪的关键技术^[5]. 首先考虑相对法刻度, 放射性氙气体源会有许多形状, 每一种形状源会有不同的探测效率, 需要制作与待测样品相同形状的标准源进行相对法刻度. 而目前的刻度技术存在不确定度大和难以实验刻度的问题, 主要原因有: 气态样品从取样、分样、分离纯化到制备规范的测量样品, 都必须在特殊的气体操作系统中进行, 由体积来度量样品的定量, 并且要由体积、温度、压强相关的理想气体方程来确定, 有时还要做非理想气体的修正; 最后在制作样品的过程中, 系统的任何漏气和操作步骤上的差错都可能导致样品制作的失败, 标准源的不确定度会传递给最终结果. 其次是无源效率刻度软件^[5], 该软件的缺点是探测器内部参数一旦表征就不会改变, 而实际情况是探测器的死层参数随着时间推移会变化, 因此无源效率刻度软件的准确性和

质量无法保证. 而基于虚拟源的无源效率刻度则用简单的点源和面源在测量前进行简单刻度加上部分无源效率刻度软件计算就可以得到体源的刻度因子, 既借用无源效率刻度软件的功能, 又有准确性和质量保证的实验部分. 本文主要针对 ^{133}Xe 气体源展开虚拟源刻度研究, 选用的是平面 HPGe γ 谱仪系统测量其活度浓度, 所得研究成果对于其他探测器及体源也具有一定的适用性. 综上所述, 本文发展新的刻度原理解决了原有惰性气体的 γ 射线效率刻度存在的不足.

2 原理

HPGe 探测器晶体一般为圆柱状, 射线与晶体的作用可以认为是射线与晶体内一虚拟点探测器作用, 即将晶体等效为一个虚拟的点. 首先, 定义虚拟点探测器^[6-8]: 对于辐射探测器, 在探测器中心对称轴线上存在一个唯一的代表点位置, 其点探测器对参考点位置点源的探测效率与探测器对点源的探测效率相等且满足平方反比定律, 即该点探测器叫探测器的虚拟点探测器. 其计算模型如图 1 所示.

虚拟点探测器刻度方法首先用于点源探测效

* 国家自然科学基金 (批准号: 11405134) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: tzn1019@126.com

率的刻度, 主要用参考点标准点源的探测效率值通过平方反比定律来计算不同位置处点源的探测效率, 虚拟点距离晶体上表面的距离为 h_0 , 又称有效作用深度.

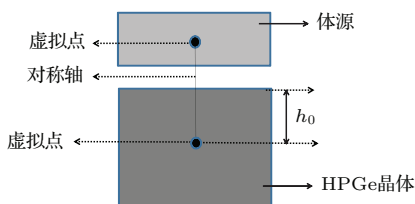


图1 虚拟点测量示意图

Fig. 1. The schematic diagram of the virtual point measurement.

其次, 根据虚拟点探测器的理论, 有理由认为对于放射体源同样存在虚拟点源, 因此可以定义虚拟点源概念. 虚拟点源: 对于辐射探测器测量对象为体源的情况下, 在探测器中心对称轴线上存在一个惟一的代表点位置, 该位置的放射性点源全能峰探测效率与所对应的放射性体源的探测效率相等, 即该点源叫做它们的虚拟点源. 本文中虚拟源指的是和体源探测效率相等的点源, 而在角响应、自吸收等其他方面不具有等效性, 等效源则要求探测效率和角响应等其他方面都要相等. 本文是在研究大量效率刻度方法的基础上提出的虚拟源刻度方法, 该方法利用虚拟源原理建立一定的函数关系, 实际应用中, 通过这个关系式找到体源的虚拟源位置, 再将点源放置在虚拟源位置刻度体源探测效率.

最后, 测量对象气体源一般为体源形状, 且大部分为圆柱形状. 对于体积为 $V(\text{cm}^3)$ 的大体源, 将其分割, 各个分割部分体积为 $V_n(\text{cm}^3)$ 、效率为 ε_n , 则大体源和各个分割部分满足如下关系式:

$$\varepsilon = \frac{1}{V} \cdot (V_1 \cdot \varepsilon_1 + V_2 \cdot \varepsilon_2 + V_3 \cdot \varepsilon_3 \cdots V_n \cdot \varepsilon_n), \quad (1)$$

其中 ε 为大体源的探测效率. (1) 式表明大体源的探测效率与其体积成反比例的线性关系, 体积越大探测效率越小. 各个分割部分小体源效率不是简单相加得到大体源效率, 而是各个分割部分小体源效率乘以体积相加再除以总体积.

总之, 虚拟点的位置可以用标准体源确定. 由于蒙特卡罗方法和 LabSOCS 软件可以很好地计算 HPGe 探测器的探测效率 [9,10], 因此, 也可以用蒙特卡罗模拟和 LabSOCS 软件模拟来确定, 下面以 LabSOCS 软件模拟计算例证来阐述整个刻度过程.

3 计算模拟

由于 LabSOCS 模拟软件具有模拟计算探测效率速度快、省时省力等特点, 因此本文使用该软件进行模拟计算研究. 仪器为 CANBERRA 公司生产的 Ultra-Low Background (尺寸 $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, BE3830, P 型) HPGe 探测器, 相对效率为 35.6%, 对 ^{60}Co 的 1332.5 keV γ 射线的能量分辨率为 1.79 keV. 首先模拟点源在探测器对称轴线上不同高度位置的点源探测效率, 射线输入能量为 81 keV (^{133}Xe 放射性气体源的特征能量射线, 下文计算射线输入能量都为 81 keV) [11], 计算结果如图 2 所示.

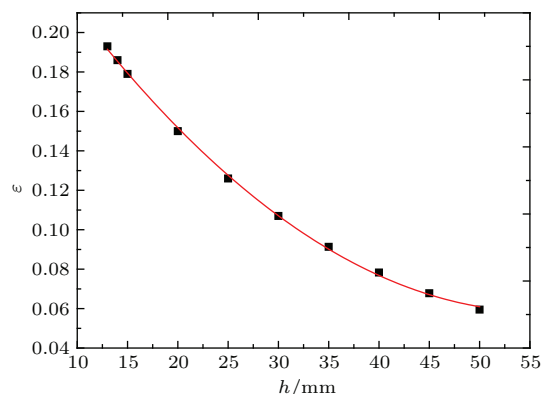


图2 点源在对称轴线上不同高度的探测效率

Fig. 2. The detection efficiency of point source on the axis line at different height.

图 2 中的曲线拟合公式为

$$\varepsilon_p(h) = 7.20 \times 10^{-5}h^2 - 8.06 \times 10^{-3}h + 0.284, \quad R^2 = 0.999. \quad (2)$$

计算时标准气体源尺寸为 $\phi 75 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 圆柱状体源, 源盒底和侧壁都为 1 mm 厚的聚乙烯. 首先体源高度不变, 都为 25 mm, 改变体源直径, 计算其探测效率. 其次, 体源直径不变, 改变高度, 计算其探测效率. 体源一般是贴近探测器测量, 由于都为圆柱状样品, 因此测量时要求它们和探测器同轴, 同轴情况下测量效率最高, 计算数据及结果列于表 1.

根据体源探测效率 ε_v 等于点源效率, 可推出其虚拟点源位置, 用公式表示为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_p(h) \\ &= 7.20 \times 10^{-5}h^2 - 8.06 \times 10^{-3}h + 0.284 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow h_v \tag{3}$$

式中, h_v 表示体源的虚拟点源位置. 计算结果见表 1 和表 2.

表 1 不同直径体源的效率及虚拟点位置计算结果
Table 1. The calculation efficiency of different diameter body source and the calculation virtual point location.

源的 V/mm^3	直径/mm	ε	h_v/mm
7850	20	0.183	14.4
24041	35	0.176	15.6
49063	50	0.165	17.5
110391	75	0.137	22.9
158963	90	0.120	26.7
216366	105	0.103	31.1
282600	120	0.0872	36.0
357666	135	0.0744	41.1
441563	150	0.0648	46.6

表 2 不同高度体源的效率及虚拟点位置计算结果
Table 2. The calculation efficiency of body source at different height and calculation virtual point location.

源的 V/mm^3	高度/mm	ε	h_v/mm
44156	10	0.171	17.3
66234	15	0.158	19.7
110391	25	0.137	23.9
154547	35	0.121	27.6
198703	45	0.08	30.9
242859	55	0.0971	34.0
287016	65	0.0882	37.0
331172	75	0.0808	39.8
375328	85	0.0745	42.6
419484	95	0.0691	45.5

4 结果与讨论

将表 1 和表 2 中的体积与探测效率及虚拟点位置进行曲线拟合作图, 如图 3 和图 4 所示, 拟合结果见 (4) 和 (5) 式.

$$\varepsilon = 5.23 \times 10^{-13}V^2 - 5.04 \times 10^{-7}V + 0.188, \tag{4}$$

$$R^2 = 0.998.$$

$$h_v = -4.25 \times 10^{-11}V^2 + 9.35 \times 10^{-5}V + 13.5, \tag{5}$$

$$R^2 = 0.999.$$

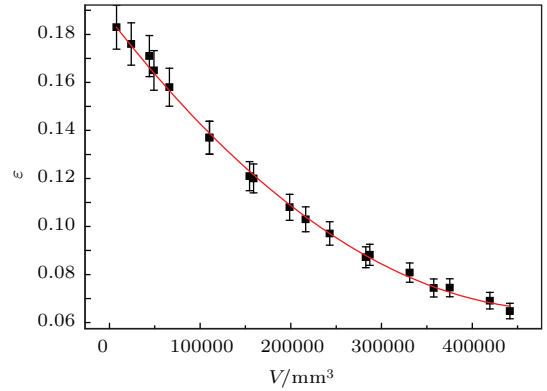


图 3 源的体积与其探测效率的函数关系曲线
Fig. 3. A function curve of the volume of the source and detection efficiency.

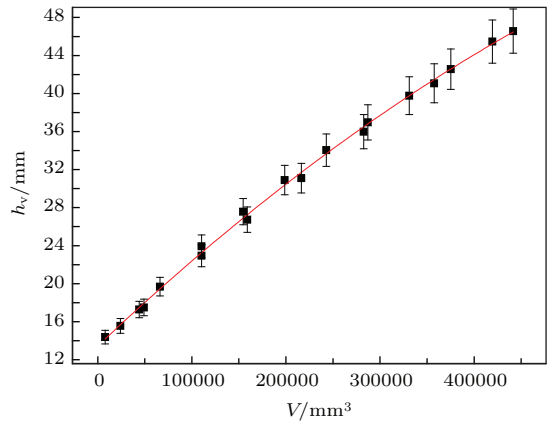


图 4 源的体积与其虚拟点位置的函数关系
Fig. 4. A function curve of the volume of the source and its virtual point location.

图中误差棒值是数据的 5%. 对于气体体源, 体积与探测效率及虚拟点位置满足很好的线性关系, 一旦建立这些关系式, 以后的测量只要知道气体体积就可以直接利用关系式 (4) 计算得到气体体源的探测效率, 或者利用关系式 (5) 找到体源的虚拟点位置, 将点源放置在该位置刻度即可, 而不用购置大量的不同形状的标准气体源, 从而大大节省了开支, 方便了刻度测量工作. 实际操作时可用大家普遍使用的蒙卡软件模拟计算探测器对不同大小气体源和点源发射射线的效率 [12-14], 根据以上过程建立关系式 (5), 该方法的前提条件是蒙卡计算模型的准确性, 但实际情况是探测器内部死层等参数很难保证其准确性. 因此, 还是通过实验的方法刻度较为准确, 主要使用混合点源表征出探测器上方空间不同位置处的点效率, 利用这些点效率进行曲

线拟合获得点源效率函数参数, 进行点源效率函数的半径和高度积分可以获得不同大小体积的气体源效率^[15], 进而可以建立关系式(5).

参考文献

- [1] Xiang Y C, Gong J, Li W, Bian Z S, Hao F H, Wang H X, Wang Q, Xiong Z H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 784 (in Chinese) [向永春, 龚建, 李伟, 卞直上, 郝樊华, 王红侠, 王茜, 熊宗华 2008 物理学报 **57** 784]
- [2] Schulze J, Auer M, Werzi R 2000 *Appl. Radiat. Isot.* **53** 23
- [3] Zhang W, Mekarski P, Ungar K 2010 *Appl. Radiat. Isot.* **68** 2377
- [4] Petit G L, Jutier C, Gross P, Greiner V 2006 *Appl. Radiat. Isot.* **64** 1307
- [5] Tian Z N, Ouyang X P, Zeng M, Cheng Z W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 162902 (in Chinese) [田自宁, 欧阳晓平, 曾鸣, 成智威 2013 物理学报 **62** 162902]
- [6] Mohammadi M A, Abdi M R, Kamali M, Mostajabod-davati M, Zare M R 2011 *Appl. Radiat. Isot.* **69** 521
- [7] Presler O, Peled O, German U, Leichter Y, Alfassi Z B 2002 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **484** 444
- [8] Presler O, German U, Pelled O, Alfassi Z B 2004 *Appl. Radiat. Isot.* **60** 213
- [9] Boson J, Göran Å, Johansson L 2008 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **587** 304
- [10] Tian Z N, Ouyang X P, Yin J P, Zhang Y, Yang W J 2013 *Atomic Energy Sci. Technol.* **47** 1411 (in Chinese) [田自宁, 欧阳晓平, 殷经鹏, 张洋, 杨文静 2013 原子能科学技术 **47** 1411]
- [11] Fontaine J P, Pointurier F, Blanchard X, Taffary T 2004 *J. Environ. Radioact.* **72** 129
- [12] Wang L, Jin Y J, Fan R Y, Ouyang X P, Lü F X, Zhang Z B, Pan H B, Liu L Y, Bu R A 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3644
- [13] Jia P X, Zhang F, Yan B, Bao S L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 087802
- [14] Han H T, Wang Q S, Xia L B, Guan X Y, Zhang Z C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4777
- [15] Tian Z N, Ouyang X P, Huang X L, Zhou C Y, Zhang Y, Shen M Q, Yang X Y 2011 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 832 (in Chinese) [田自宁, 欧阳晓平, 黄雄亮, 周崇阳, 张洋, 申茂泉, 杨晓燕 2011 核技术 **34** 832]

Study on the virtual source calibration technology based on the volume of radioactive gas source*

Tian Zi-Ning[†] Chen Wei Han Bin Tian Yan-Jie Liu Wen-Biao
Feng Tian-Cheng Ouyang Xiao-Ping

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 27 August 2015; revised manuscript received 10 November 2015)

Abstract

The calibration methods for the radioactive Kr and Xe gases produce the key data for the judgment of nuclear fission reaction, whose accurate measurement has always been a difficult problem in operation for a long time. In order to obtain the accuracy, it is very important to calibrate the efficiencies of these gas sources, especially for proficiency test exercise of the laboratory, to analyze the CTBT samples of radioactive xenon, which are used to judge the nuclear test of the country and the measurement system. The relative measurement method has not realized in the experimental calibration, and the Monte Carlo method has large uncertainty also. Therefore, a new measurement method and experimental technology is needed. In order to avoid the above shortcomings, we need to develop a source-less efficient calibration method based on the virtual point source (VPS). In the past, it was suggested that for point sources placed on the symmetry axis, a Ge(Li) or an HPGe cylindrical detector can be changed to an virtual point detector (VPD), where all γ -ray interactions are considered to occur. This is not a real physical model but only a mathematical description. Aiming at the VPD, we put forward an innovative approach and define the concept of VPS. But, the concept is introduced in a volume source. In this concept, it is assumed that the total photons emission has occurred in a distance within the source described, and it is from the whole source to an imaginary point. If there is really a point located on the symmetry axis of the detector, whose efficiency is similar to that of the whole real volume source, the geometrical considerations used in calibrations of the source will be much simpler. The calibration process of the VPS is: firstly, a standard point source is placed at different position on the symmetry axis to obtain its full-energy peak efficiency. Secondly, the relationship between the height and the efficiency can be established. The position of the VPS can be deduced according to the full-energy peak efficiency of the volume source. Finally, a standard point source, instead of a volume source, is placed at the virtual point position to finish the efficiency calibration work. In this study, the LabSOCS software is used to simulate the detection efficiencies including different volumes of gas source and point source at different points on the symmetry axis. According to the calculated data, a function relationship between the volume of gas source and the virtual point source position is established. It has been proved theoretically that the volume of gas source and the virtual point location have a good linear relationship. This provides a new way in theory to solve the virtual source calibration technology. The VPS efficiency calibration technology is very important in the field of verification of nuclear test-ban, nuclear emergency measurement and environmental radioactivity measurement.

Keywords: gas source, LabSOCS, efficiency calibration, virtual point source

PACS: 29.30.Kv, 29.40.Wk, 29.25.Rm

DOI: 10.7498/aps.65.062901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11405134).

[†] Corresponding author. E-mail: tzn1019@126.com