

测量原理 – 衰变计数统计 – 测量规划

版本：2008.3

氡活性浓度的测定属于辐射测量，这就意味着它是一个计数统计过程。当使用者在实施测量任务时，他必须把很多特殊情况以及因素考虑在内。对于这些特性的了解，使得我们可以正确的进行设置以及在处理测量结果过程中，避免出现错误。

请认真阅读下一章“工作原理”及“统计误差”，以便更加熟悉这类辐射操作。

工作原理

氡-222 的浓度是通过在测量腔中对其衰变所产生的短效氡子体进行测量而得出的，其衰变产物钋-218 在短时期内会带正电的离子形式存在，这是由于 α 粒子带走了一些核外电子。而这些离子在电场力作用下被收集在半导体探头表面。收集到的钋-218 离子数量与测量腔中氡的气体浓度成对应比例关系。

被吸附在半导体表面的钋-218，半衰期是 3.05 分钟，衰变过程中同样释放阿尔法粒子，其中 50%(对半空间)的阿尔法粒子能够被半导体探头所采集。氡和钋 218 的活度平衡可在 5 个钋-218 半衰期后得到，即大约 15 分钟。这个时间长度被定义为氡浓度变化的最低响应时间。

衰变链在历经铅-214 和铋-214 的 β 放射后，得到钋-214。这意味着每一个在探头表面的钋-218 都将衰变成一个钋-214，大约 3 小时后钋 218 与钋 214 将达到平衡。钋-218 和钋-214 放射出的阿尔法粒子能量是不同的，因此从能谱图上，能够根据不同的能量区间进行核素识别。

能谱法连续氡测量提供两种氡浓度的计算模式，一种（慢速）模式根据钋-218 和钋-214 两种衰变，另一种（快速）模式只包含钋-218。快速模式的优点是对于浓度的快速反应，而

慢速模式则相对于快速模式来说,能够提供更高的灵敏度(双倍)。而更高的灵敏度意义在于,减少了测量过程中由于衰变计数所产生的动态误差。用户应根据实际的要求谨慎的选择计算模式。(见下一章)。

对于钍($Rn-220$)而言,直接的衰变产物是钋-216(其分离过程与钋-218一样),所以同样被用于钍活性浓度的计算。钋-216的半衰期小于1秒,因此,钍与钋-216两者之间的活性浓度平衡状态会瞬间达到。钋-216衰变所产生的铅-212(β 衰变)和铅-212/铋-212(α 衰变)由于时间太长,尽管在能谱上,它们各自的阿尔法衰变也会被记录下来,但是在钍的活性浓度计算中,并未加入参考计算。钍子体同样是由 α 能谱法来检定的。

统计误差 (适用于非数学专业人士)

放射性衰变是一个统计过程。这意味着,即便氡浓度在一定时间内是恒定的,在不同的等长周期内,被观察到的衰变次数 N 也是不同的。由所有测量周期,我们可以得到一个平均值,而 N 则是在这个平均值上下震荡。理想状态下,如果我们进行无穷多个周期的测量,则可以得到一个 N 的“真”值。而单个测量周期所测量到的实际衰变次数,也是围绕着这个“真”值上下波动的。这个波动震荡范围我们称之为放射性测量的“统计误差”。

因此,每一个测量结果必须包含氡浓度值,置信区间以及误差带。最常用的置信区间是 $1\sigma, 2\sigma$ 或 3σ (σ), 各自代表的概率为

$1\sigma \rightarrow 68.3\%$,

$2\sigma \rightarrow 95.45\%$

$3\sigma \rightarrow 99.73\%$

例如,测量结果氡浓度为 780 Bq/m^3 当统计误差是 $1\sigma \pm 15\%$ 时,其正确表述为:

这个浓度“真”值有 68.3% 的可能性,落在 663 Bq/m^3 (由 $780 \text{ Bq/m}^3 - 15\%$ 得出) 到 897

Bq/m³ (由 780 Bq/m³ + 15%得出)这个区间内。

误差估计

对于已选择的 k-sigma 的置信区间，相对统计误差 E 可从有关于计数 N 的公式得出：

$$E[\%] = 100\% * k * \sqrt{N} / N$$

简而言之：计数值越高，测量的精准性就越高。从另一个角度看：我们需要测量到多少个计数才可获得到预期的误差值呢？有两个因素会影响衰变计数：一是仪器的灵敏度，二是计数过程所持续的时间长短（积分区间），其中灵敏度被设置为仪器的常数特征值。所以，在满足测量计划时间的前提下，测量周期可以任意延长。测量到的氡浓度 C_{Rn} 与计数值 N 以及测量周期 T 三者之间的关系如下：

$$C_{Rn} = N / (T * S)$$

其中 S 表示仪器的灵敏度，其单位是[cts/(min*kBq/m³)]。慢速模式的灵敏度是快速模式的 2 倍（参见“工作原理”章节）同时，当用户要求的最快响应时间无需小于 2 小时的时候，推荐尽量使用慢速模式。

对于以下的举例说明，使用参数为：仪器快速模式灵敏度为 4 cts/(min*kBq/m³)，慢速模式则为 8 cts/(min*kBq/m³)。

问题 1：

若氡浓度的期望值或者说预判值是 200 Bq/m³，如何设置采样周期 T，才能使统计误差（不确定性）在置信度为 1σ 时小于 10%呢？

对应 1 个 Sigma 置信度，最大误差不超过 10%，则单采样周期内要求捕捉到 100 个计数 (100% * 1 * √(100) / 100 = 10%)。

使用快速模式，采样周期的算法如下：

$$T(\text{快}) = N / (C_{Rn} * S) = 100 \text{ cts} / (0.2 \text{ kBq/m}^3 * 4 \text{ cts}/(\text{min*kBq/m}^3)) = 125 \text{ 分钟.}$$

从这个计算结果我们又产生了新的问题，既然在快速模式下，要达到以上要求，单个采样周期就已经超过了 2 小时，那么我们为什么不使用慢速模式呢？如果使用慢速模式，又会是怎样的结果呢？同样，用计算结果来帮助选择：

$$T(\text{慢}) = N / (C_{Rn} * S) = 100 \text{ cts} / (0.2 \text{ kBq/m}^3 * 8 \text{ cts}/(\text{min*kBq/m}^3)) = 62.5 \text{ 分钟.}$$

根据之前章节的描述，由慢速模式的物理特性所决定，慢速模式的采样周期应该设定在 2 小时以上。根据这些条件，先计算所需的计数值：

$$N(\text{慢}) = C_{Rn} * T * S = 0.2 \text{ kBq/m}^3 * 120 \text{ min} * 8 \text{ cts}/(\text{min*Bq/m}^3) = 192 \text{ cts}$$

$$\text{Error : } E(1\sigma) = 100 \% * 1 * \sqrt{N} / N = 100 \% * 1 * \sqrt{192} / 192 = 7,22 \%$$

由这个结果，可以知道，在 1xSigma 置信区间所对应的 68.5%的概率下，统计误差已经低于所要求的 10%。所以，我们尝试使用 2xSigma 的置信区间，来计算一下结果：

$$E(2\sigma) = 100 \% * k * \sqrt{N} / N = 100 \% * 2 * \sqrt{192} / 192 = 14,44 \%$$

相关表述说明参见本章节开始。

观察到的浓度变化是否真实？

在观察测量结果的时间分布时，浓度是点到点的变化关系。现在的问题是：这是氡浓度的真实变化还是仅仅是统计误差所带来的浮动？要想知道这一点，可以做一个简单的测试：定义一个所需要的置信水平并观察在感兴趣区域统计误差带的两点。如果误差带中的这两点互不重合，则表明是氡的浓度在变化，否则，它有可能仅仅是统计浮动。

例 1:

读数 1: $1500 \text{ Bq/m}^3 \pm 10\%$ 误差带[1350 ... 1650 Bq/m^3]

读数 2: $1300 \text{ Bq/m}^3 \pm 13\%$ 误差带[1131 ... 1469 Bq/m^3]

读数 2 的误差带的上限比读数 1 的误差下限还要高, 2 笔读数的误差带有一个重叠区间, 而那个“真”值有可能位于 1350 Bq/m³ 和 1469 Bq/m³ 之间。因此, 这 2 笔数据并不能足够充分表示一个明确的氡浓度变化。

例 2:

读数 1: 1500 Bq/m³±10% 误差带 [1350 ... 1650 Bq/m³]

读数 2: 1000 Bq/m³±15% 误差带 [850 ... 1150 Bq/m³]

两个读数的误差带不重合, 因此, 就可得出一个确定意义上的浓度变化。测量结果中的任意两点都可以用来判定现场浓度的变化, 两点无需在时序上相邻。

测量下限

测量下限的定义是: 在给定置信区间范围, 以及测量采样周期长度的前提下, 仪器所能显示的最小非零 (每个测量区间至少有一次衰变被捕捉到) 测量值。

什么时候会遇到测量下限的问题?

所采用的测量周期比较短, 以及现场氡浓度相对偏低, 导致所期待的那个“真”值, 其所对应的数据, 在单个周期中, 被记录到的衰变事件次数为 1 甚至更低。由于统计误差的影响, 那些一次衰变事件都没有被捕捉到的测量周期会频繁发生。例如极端情况下, 一连串的测量结果序列, 都为零值, 而其中只有在一个周期中, 捕捉到了一次衰变事件。而一次衰变事件是无法拆分的 (不存在 0.5 次的衰变事件)。在使用既定公式计算氡浓度时 (测量周期时长 T 已定), 当其它区间读数为零, 则那个非零次衰变事件区间就会被过高的赋值。为了得到一个有效可用的测量结果, 通常对一次测量的所有区间求平均值, 目的是使那次被捕捉到的衰变事件, 在时间的连续性上有意义。为此, 使用者应该尽量使用比较长的测量周期方案, 目的是使探测下限降低到满足现场氡浓度的要求, 最终得到有效的测量结果。

当被记录到的衰变事件次数其平均值（“真”值）小于 16 的时候，我们可以用泊松分布的模型来替代统计震荡的宽度。

给定置信区间与其相对应的概率，与单周期内被记录捕捉到的非零衰变事件次数，关系如下：

置信区间	所需要的期望值 N
63.2 %	1
95 %	3
99.75 %	6

例:

判定仪器使用“快速模式”以及测量周期为 60 分钟时的测量下限。置信区间应为 95%（可理解为 100 个测量周期中有 95 个周期的读数为非零）:

必须的期望值(由上表得) N=3.

利用公式可计算出测量下限：

$$C = N / (T * S) = 3 \text{ cts} / (60 \text{ min} * 8 \text{ cts}/(\text{min} * \text{kBq}/\text{m}^3)) = 0.00625 \text{ kBq}/\text{m}^3 = 6.25 \text{ Bq}/\text{m}^3$$

这种情况下，测量下限为：6.25 Bq/m³.