

# 放射性同位素及辐射的应用

## 确定放射性辐射吸收式仪器源的最佳强度的方法和计算公式

歐 緒 貴

放射源的选择,在研究设计放射性同位素工业检测仪器中占有极其重要的地位,而放射源强度的选择,在放射源的选择中又占据了主要的地位。苏联在这方面曾作了不少工作,但大多是对具体对象进行的分析,虽然也有几篇文章作了概括性的分析,但其推导方法有所不同,其结果从形式上看不大一样,就其结果本身来看,也有值得补充的地方。本文的目的是想在分析这些文章的基础上,根据自己的见解和初步工作,对确定放射源最佳强度的方法和计算公式,提出我的一些肤浅的看法,以供讨论。因为在大多数情况下,都能作到仪器的精度仅受统计误差的限制,故本文讨论的范围,限于精度受统计误差限制的仪器所需放射源的最佳强度。

### 1. 两种推导方法和两个计算公式

从国外发表的一些文献<sup>[1-3]</sup>来看,虽然每篇文献的提法和重点都不同,但归纳起来有两种推导方法和两个计算公式。

第一种方法是利用被测辐射通量的相对误差和被测参数的相对误差间的关系<sup>[1,2]</sup>。求得的放射源强度的公式为:

$$A = 3.4 \times 10^{-7} \frac{R^2 \eta^2 e^{D\xi}}{D^2 \xi^2 \left(\frac{d\xi}{\xi}\right)^2 t \epsilon S K} \text{ 毫居里,} \quad (1)$$

其中  $R$ ——放射源和探测器间的距离,厘米;  $\eta$ ——由于送到积分部分去的每个被记录的脉冲幅度和宽度不一样,而引出的误差修正系数;  $D$ ——某系数(当被测参数为厚度时,  $D$  为被测介质对辐射的线性吸收系数;当被测参数为密度时,  $D$  为质量吸收系数乘上厚度.);  $\xi$ ——被测参数;  $\frac{d\xi}{\xi}$ ——被测参数的相对测量误差;  $t$ ——测量时间,秒;  $\epsilon$ ——探测器对辐射的接收效率;  $S$ ——辐射接收器的工作面积,厘米<sup>2</sup>;  $K$ ——一次蜕变所产生的粒子或量子数。

第二种方法,以被测介质发生灵敏度阈值变化所引起的输出信号的变化,应不小于辐射涨落所引起的输出信号的绝对均方根偏差为基础<sup>[3]</sup>,由此推出一秒内被记录的最少脉冲数为

$$n_m = \frac{3.1 P^2 B}{D^2 \xi_m^2}, \quad (2)$$

其中  $B$ ——被测参数的变化速度;  $P$ ——安全系数;  $D$ ——某系数(与上一公式中的  $D$  相同);  $\xi_m$ ——被测参数的灵敏度阈值。因为  $n_m$  是在一定的  $P$  值下所需的最少脉冲数,当  $P$  还未选定为某数值时,  $n_m$  亦为一变数。为了讨论方便起见,(2)式可改写成

$$n = \frac{3.1P^2B}{D^2\xi_m^3}, \quad (3)$$

若将(3)式代入基本公式

$$n = A \frac{S_0K}{4\pi R^2} \times 3.7 \times 10^7 e^{-D\xi},$$

(其中  $n$ ——被探测器在一秒内记录的脉冲数。)则得

$$A = \frac{3.35 \times 10^{-7} \pi P^2 B R^2 e^{D\xi}}{D^2 \xi_m^3 S_0 K} \text{ 毫居里.} \quad (4)$$

从文献[1], [2], [3]和公式(1), (4)可看出, 不仅推导的方法不一样, 而且其公式在形式上也不一样.

分析公式(1), (4)的推导过程即可知道: 它们是在简单的测量线路下得出的. 为了深入地分析比较, 我们作了如下的推导.

在精度仅受统计误差限制的条件下, 简单的测量线路在稳定时测量辐射的相对误差为

$$\frac{dn}{n} = \frac{\eta}{\sqrt{2n\tau}}$$

其中  $\tau$ ——等于积分部分的  $RC$ . 将(3)式代入上式, 得

$$\frac{dn}{n} = \eta \left( \frac{6.2P^2 B \tau}{D^2 \xi_m^3} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

由文献[3]得知,  $\tau = 0.5 \frac{\xi_m}{B}$ , 故(5)式变为

$$\frac{dn}{n} = 0.58 \frac{D \xi_m \eta}{P}. \quad (6)$$

根据

$$\left| \frac{d\xi}{\xi} \right| = \frac{dn}{D \xi n},$$

则(6)式变为

$$P = 0.58 \frac{\xi_m \eta}{\xi \left( \frac{d\xi}{\xi} \right)}. \quad (7)$$

将(7)式代入(4)式, 并利用  $\frac{\xi_m}{B} = 2\tau$ , 则得

$$A = \frac{1.74 \times 10^{-7} \eta^2 R^2 e^{2D} \tau S_0 K}{D^2 \xi^2 \left( \frac{d\xi}{\xi} \right)^2} \text{ 毫居里.} \quad (8)$$

因为, 对于简单线路, 在稳定时测量时间  $t = 2\tau$ , 若将  $t = 2\tau$  代入(1)式, 则(1)式即变为(8)式. 由此, 我们得出了这样的结果: 采用这两种推导方法所推出的计算放射源强度的公式, 尽管在形式上不相同, 但实际上却一样. 也就是说, 无论采用公式(1)或公式(4), 只要选取对应的  $\frac{\xi_m}{P}$  和  $\frac{d\xi}{\xi}$  值, 则计算出的放射源强度是相等的.

## 2. 求放射源的最佳强度

在仪器精度受统计误差限制的情况下, 选择放射性同位素时除了注意半衰期、获得同位素

的难易和蜕变状况等因素外,主要应根据  $\xi D = 2$  来进行。在选好同位素后,选择放射源强度就成为最重要的问题了。放射源强度选得过弱,则仪器性能不好;选得太强,则在辐射防护、经济性和探测器方面就将出现问题,为了选择源的最佳强度,我们作了如下分析。

在前面所述的第二种推导方法中是以下面的式子为根据式的:

$$\Delta u_{\text{H}} \geq P \sigma_u$$

其中  $\Delta u_{\text{H}}$ ——被测介质发生灵敏度阈值变化时所引起的积分部分输出电压的变化;  $\sigma_u$ ——辐射涨落引起的积分部分输出电压的绝对均方根偏差。

根据几率理论知道,若上式中取  $P$  为  $3\eta$ , 则根据

$$\Delta u_{\text{H}} = 3\eta \sigma_u \quad (9)$$

设计的仪器,其放射性辐射涨落所引起的指示偏移,大于由被测介质发生灵敏度阈值变化所引起的指示偏移的几率只有 0.27%。由此导出的计算放射源强度的公式为

$$A = \frac{15.3 \times 10^{-7} \pi \eta^2 R^2 e^{D\xi}}{D^2 \xi_{\text{H}}^2 \epsilon S \epsilon K} \text{ 毫居里。} \quad (10)$$

考虑到仪器非稳定情况和射线从源到探测器要通过几种非测量介质的情况,则(10)式可写成普遍形式:

$$A = \frac{30.6 \times 10^{-7} \pi \eta^2 R^2 e^{D\xi + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i}}{D^2 \xi_{\text{H}}^2 \epsilon S \epsilon K} \text{ 毫居里。} \quad (11)$$

其中,  $\mu_i$ ,  $x_i$  分别为射线穿过非测量介质的线性吸收系数和厚度。

(11) 式即为采用最简单的测量线路时,仪器所需的放射源最佳强度的计算公式。

当采用不同线路时,仪器所需放射源的最佳强度,则不能直接用(11)式求得,必须对(11)式进行修改。

利用放射性同位素的工业检测仪器,虽然品种甚多,但所采用的线路根据我们所知有下面九种(参考文献[2]): 1. 最简单的测量线路; 2. 双探头差示线路; 3. 双探头补偿线路; 4. 单探头差示线路; 5. 单探头补偿线路; 6. 动态补偿线路; 7. 自动校准线路; 8. 信号控制线路; 9. 自动稳定接收系统线路。但就其统计误差的大小而言,归纳起来可分为五类: 第一类,线路 1, 7. 以这种线路的统计误差为基准,设为 1。第二类,线路 2, 3. 与第一类线路相比其统计误差相对值为  $\sqrt{2}$ 。第三类,线路 4, 5. 其统计误差相对值为 2。第四类,线路 8, 9. 其统计误差相对值接近于 1。第五类,线路 6. 其统计误差相对值比 1 大,并随具体情况而变化。

为了讨论方便起见,我们令变量  $Z$  表示各类线路的统计误差相对值  $\sqrt{2}$ , 2, 1, 则(11)式对于各类线路讲,可改写成下面最普遍的形式:

$$A = \frac{30.6 \times 10^{-7} \pi Z^2 \eta^2 R^2 e^{D\xi + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i}}{D^2 \xi_{\text{H}}^2 \epsilon S \epsilon K} \text{ 毫居里。} \quad (12)$$

我们也可以采用由第一种推导方法所得出的公式来求最佳强度,不过要注意下列二点:

1. 考虑到仪器可能采用各种测量线路和射线从射线源到探测器要通过几种非测量介质的情况,则(1)式变为

$$A = \frac{3.4 \times 10^{-7} Z^2 R^2 \eta^2 e^{\xi D + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i}}{D^2 \xi^2 \left(\frac{d\xi}{\xi}\right)^2 \epsilon S \epsilon K} \text{ 毫居里。} \quad (13)$$

2. 要使采用(13)式计算出的放射源强度为最佳强度, 即和采用(12)式计算出的放射源强度相等, 则需选择与  $P = 3\eta$  对应的  $\frac{d\xi}{\xi}$ . 根据(7)式我们得到

$$\frac{d\xi}{\xi} = 0.2 \frac{\xi_{\text{H}}}{\xi} \tag{14}$$

公式(12)和满足(14)式的(13)式即为计算放射源最佳强度的两个不同形式的最普遍的公式. 不难看出: 它们对于采用除线路 3, 5, 6 外的各种线路和探测器的  $\gamma$  射线或  $\beta$  射线厚度计、密度计和部分液位计都是适用的.

在(12)式和(13)式中,  $t, S$  和  $R$  的单位与(1)式的相同,  $D$  和  $\xi$  的单位这样选择: 使其  $D, \xi$  无单位.  $\eta$  值的选择, 应根据具体情况决定. 它与探测器和辐射种类, 按电流法输出或脉冲法输出以及有否整形电路有关. 它的数值一般在 1—1.4 范围内<sup>[2]</sup>.

### 3. 采用多能射线和宽束射线时公式的修改

在放射性同位素工业检测仪器中, 因为测量对象不同, 有时须选用一次蜕变放出多种能量, 且能量相差较大的  $\gamma$  射线源(例如, 在仪器精度受统计误差限制的前提下, 设计测量 12—80 毫米范围的钢板厚度的厚度计时, 须选用铯-137 作为射线源). 由于能量很不一致, 若不用实验方法求  $D, \mu_i$  和  $\epsilon$ , 而想用查图表法求这几个数据, 那末, 使用前面推出的公式就不方便, 必须作进一步地分析和修改.

根据

$$\begin{aligned} n_1 &= A \frac{S\epsilon_1 a_1}{4\pi R^2} \times 3.7 \times 10^7 e^{-(D_1 t + \sum_{i=1}^h \mu_{1i} x_i)}, \\ n_2 &= A \frac{S\epsilon_2 a_2}{4\pi R^2} \times 3.7 \times 10^7 e^{-(D_2 t + \sum_{i=1}^h \mu_{2i} x_i)}, \\ &\dots\dots\dots \\ n_k &= A \frac{S\epsilon_k a_k}{4\pi R^2} \times 3.7 \times 10^7 e^{-(D_k t + \sum_{i=1}^h \mu_{ki} x_i)}, \end{aligned}$$

(其中  $k$ ——在多次蜕变中出现各种不同能量量子的总数目.) 得到

$$\sum_{f=1}^k n_f = A \frac{S}{4\pi R^2} \times 3.7 \times 10^7 \sum_{f=1}^k \epsilon_f a_f e^{-(D_f t + \sum_{i=1}^h \mu_{fi} x_i)}$$

其中  $a_f$ ——在一次蜕变中放出第  $f$  个量子的几率;  $n_f$ ——探测器在一秒内记录的由每次蜕变中放出的第  $f$  个量子的脉冲数;  $\epsilon_f$ ——探测器对每次蜕变中放出的第  $f$  个量子的接收效率;  $\mu_{fi}$ ——第  $i$  个非测量介质对每次蜕变中放出的第  $f$  个量子的线性吸收系数. 故

$$A = \frac{1.08 \times 10^{-7} \pi R^2 \sum_{f=1}^k n_f}{S \sum_{f=1}^k \epsilon_f a_f e^{-(D_f t + \sum_{i=1}^h \mu_{fi} x_i)}} \tag{15}$$

经过推导, 得到与(12)式相当的普遍性公式:

$$A = \frac{30.6 \times 10^{-7} \pi Z^2 \eta^2 R^2}{D^2 \xi_{\text{eff}}^2 \epsilon S \sum_{f=1}^k \epsilon_f a_f e^{-(D_f \xi + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i)}} \text{ 毫居里.} \quad (16)$$

根据

$$J = \sum_{f=1}^k J_{0f} e^{-D_f \xi},$$

(其中:  $J$ ——穿过物质后总的辐射通量;  $J_{0f}$ ——穿过物质前第  $f$  个量子的辐射通量.) 得到

$$D = -\frac{1}{\xi} \ln \left[ \sum_{f=1}^k \frac{J_{0f}}{J_0} e^{-D_f \xi} \right]. \quad (17)$$

不难看出

$$\frac{J_{0f}}{J_0} = \frac{a_f}{\sum_{f=1}^k a_f}.$$

故(17)式变为

$$D = \frac{1}{\xi} \left[ \ln \sum_{f=1}^k a_f - \ln \sum_{f=1}^k a_f e^{-D_f \xi} \right]. \quad (18)$$

将(18)式代入(16)式, 则得我们需要的表示形式

$$A = \frac{30.6 \times 10^{-7} \pi Z^2 \eta^2 R^2 \xi^2}{\left[ \ln \sum_{f=1}^k a_f - \ln \sum_{f=1}^k a_f e^{-D_f \xi} \right]^2 \xi_{\text{eff}}^2 \epsilon S \sum_{f=1}^k \epsilon_f a_f e^{-(D_f \xi + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i)}} \text{ 毫居里} \quad (19)$$

(19)式即为我们要求的计算多能  $\gamma$  射线源最佳强度的普遍公式。

当为了提高射线的利用率而采用宽束射线时, 则利用以上所有公式的计算结果, 其放射源强度都将偏大。关于利用宽束射线, 在当前还是一个值得继续研究的问题, 对于宽束的  $\gamma$  射线, 别尔曼(М.Л. Берман)和伏罗连采夫(В. И. Флоренцев)作了一些工作<sup>[5]</sup>。

我们知道, 宽束  $\gamma$  射线穿过大多数物质时的衰减按下式确定:

$$J = J_0 e^{-D\xi} (1 + k_1 D\xi + k_2 D^2 \xi^2). \quad (20)$$

其中  $k_1, k_2$  是  $\gamma$  量子能量的函数。由文献[6]知道

$$k_1 = 0.487 e^{-(E-10.098)},$$

$$k_2 = \frac{0.03}{E^{1.22}}.$$

根据(20)式, 在忽略了射线穿过的非测量介质对射线的多次散射之后, (12), (13)式分别变为

$$A = \frac{30.6 \times 10^{-7} \pi Z^2 R^2 \eta^2 e^{\xi D + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i}}{D^2 \xi_{\text{eff}}^2 \epsilon S \epsilon K [1 - k_1 + (k_1 - 2k_2) D\xi + k_2 D^2 \xi^2]^2} \text{ 毫居里,} \quad (21)$$

$$A = \frac{3.4 \times 10^{-7} Z^2 R^2 \eta^2 e^{\xi D + \sum_{i=1}^h \mu_i x_i}}{D^2 \xi^2 \left( \frac{d\xi}{\xi} \right)^2 \epsilon S \epsilon K [1 - k_1 + (k_1 - 2k_2) D\xi + k_2 D^2 \xi^2]^2} \text{ 毫居里.} \quad (22)$$

在前面所有的计算公式中, 放射源强度  $A$  是在忽略了放射源的反散射、自吸收以及计数器的失效时间所引起的计数损失(若用计数管或闪烁计数器且用脉冲法输出)的条件下求出的,

当这些因素不能忽略时,那么公式的右端必须用这几个因素的修正系数除之。

#### 4. 关于计算公式中 $\xi$ 、 $\xi_{\text{阈}}$ 和 $\frac{d\xi}{\xi}$ 的选定问题

因为测量仪器都有一个测量范围,放射性同位素工业检测仪器设计者常以被测量的最大值为选择放射源强度的标准,即前面所推导出的公式中

$$\xi = \xi_{\text{最大}}; \quad \xi_{\text{阈}} = (\xi_{\text{最大}})_{\text{阈}}; \quad \frac{d\xi}{\xi} = \frac{d\xi_{\text{最大}}}{\xi_{\text{最大}}}$$

计算放射源强度时,  $(\xi_{\text{最大}})_{\text{阈}}$  或  $\frac{d\xi_{\text{最大}}}{\xi_{\text{最大}}}$  应该是已知的,但测量范围中任一点的  $\xi_{\text{阈}}$ ,  $\frac{d\xi}{\xi}$  并不分别等于  $(\xi_{\text{最大}})_{\text{阈}}$  和  $\frac{d\xi_{\text{最大}}}{\xi_{\text{最大}}}$ 。当给定测量范围中某点的  $\xi_{\text{阈}}$  或  $\frac{d\xi}{\xi}$  时(这在工作中是常有的),  $(\xi_{\text{最大}})_{\text{阈}}$  或  $\frac{d\xi_{\text{最大}}}{\xi_{\text{最大}}}$  应是多少呢?

除线路 3, 5, 6 外的各种线路仪器,即非线性刻度仪器,在精度受统计误差限制时,被测参数的相对误差  $\frac{d\xi}{\xi}$  和  $\frac{d\xi_{\text{最大}}}{\xi_{\text{最大}}}$  的关系;被测参数灵敏度阈值  $\xi_{\text{阈}}$  与  $(\xi_{\text{最大}})_{\text{阈}}$  的关系,我们可以用下法求出。设

$$\xi_x = F \xi_{\text{最大}}$$

其中,  $0 < F \leq 1$ 。因为

$$\begin{aligned} |d\xi_x| &= \frac{Z\eta}{D\sqrt{n_x t}} \\ &= \frac{Z\eta}{D\sqrt{n_0 e^{-F\xi_{\text{最大}} D t}}} \end{aligned}$$

其中,  $n_x$ ——当被测参数为  $\xi_x$  时探测器一秒内记录的脉冲数。令

$$F = 1 + H,$$

则上式变为

$$\begin{aligned} |d\xi_x| &= \frac{Z\eta}{D\sqrt{n_0 e^{-\xi_{\text{最大}} D} e^{-H\xi_{\text{最大}} D t}}} \\ &= \frac{d\xi_{\text{最大}}}{\sqrt{e^{(1-F)\xi_{\text{最大}} D}}}, \end{aligned} \quad (23)$$

故

$$\left| \frac{d\xi_x}{\xi_x} \right| = \frac{d\xi_{\text{最大}} e^{(F-1)\xi_{\text{最大}} D/2}}{\xi_{\text{最大}} F}. \quad (24)$$

令

$$\frac{e^{(F-1)\xi_{\text{最大}} D/2}}{F} = X, \quad (25)$$

则(24)式变为

$$\left| \frac{d\xi_x}{\xi_x} \right| = \frac{d\xi_{\text{最大}} X}{\xi_{\text{最大}}}. \quad (26)$$

在(26)式中,  $X$  的值大于或小于 1 是我们特别关心的,根据(25)式我们可以绘出在  $\xi_{\text{最大}} D$  为不同数值时  $F$  和  $X$  的关系曲线(见图 1)。

由于  $d\varepsilon$  和  $\varepsilon_{\text{测}}$  存在一定的比例关系,故根据(23)式可写出  $\varepsilon_{\text{测}}$  和  $(\varepsilon_{\text{最大}})_{\text{测}}$  的关系式

$$|\varepsilon_{\text{测}}| = (\varepsilon_{\text{最大}})_{\text{测}} e^{(F-1)\varepsilon_{\text{最大}}D/2} \quad (27)$$

令

$$e^{(F-1)\varepsilon_{\text{最大}}D/2} = Y, \quad (28)$$

同样根据(28)式可以绘出  $F$  和  $Y$  的关系曲线(见图 2)。

从给定的  $\frac{d\varepsilon}{\varepsilon}$  或  $\varepsilon_{\text{测}}$ , 我们可以根据(24)式或(27)式求出  $\frac{d\varepsilon_{\text{最大}}}{\varepsilon_{\text{最大}}}$  或  $(\varepsilon_{\text{最大}})_{\text{测}}$ , 然后, 再将算出的  $\frac{d\varepsilon_{\text{最大}}}{\varepsilon_{\text{最大}}}$  或  $(\varepsilon_{\text{最大}})_{\text{测}}$  代入相应的计算放射源强度的公式, 就可求得所需的放射源的最佳强度。

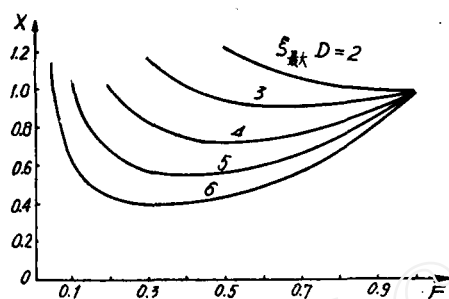


图 1  $X$  和  $F$  的关系曲线

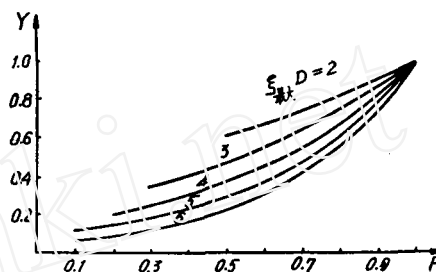


图 2  $Y$  和  $F$  的关系曲线

根据(25)---(28)式和图 1, 图 2, 我们还可以顺便得出这样的结果:

1. 只要  $\varepsilon_{\text{最大}}D \geq 3$ , 则适当选择测量下限可以使仪器测量范围中各点的被测参数的相对误差, 不大于测量上限的相对误差。
2. 测量范围越大, 则测量范围中各点的被测参数的相对误差, 小于上限的相对误差的程度就越大。
3. 测量范围越大, 则测量范围中各点的被测参数的灵敏度阈值小于上限的灵敏度阈值的程度就越大。

### 参 考 文 献

- [1] А. М. Богачев, Б. И. Верховский, А. Н. Макаров, *Заводская лаборатория*, № 7 (1955).
- [2] Н. Н. 舒米洛夫斯基, Л. В. 密里特采尔著朱宝璋译, 利用放射性同位素的自动检查装置理论基础 1961 年。
- [3] М. А. Замельман, *Измерительная техника*, № 1 (1959).
- [4] Л. К. Татаченко, *Радиоактивные изотопы в приборостроении*, М., 1960.
- [5] М. Л. Берман, В. И. Флоренцев, *Измерительная техника*, № 1 (1962).
- [6] Г. В. Горшков 著, 周超凡等译, 放射性物体的  $\gamma$  辐射, 1959 年。

(编辑部收稿日期 1963 年 4 月 29 日)