



放射性同位素大、中含沙量计的研究

刘雨人 郭呈林 孙乐岭

(黄河水利委员会水利科学研究所)

王 铁 成

(国营 261 厂)

本文简要总结了关于放射性同位素含沙量计的研究工作。本含沙量计的放射源为¹³⁷Cs γ 辐射源, 探测放射 γ 粒子, 源与探测器最佳距离为 45 厘米, 测量含沙量的精度为 ± 0.56 公斤/米³。利用晶体管猝灭电路配合 G-M 计数管作探头, 其分辨时间可达 2~3 微秒, 长时间稳定性良好, 温度效应也很小。记录仪器采用晶体管定标电路(测量石英晶体振荡频率的精度 $\leq 1 \times 10^{-4}$)。所定型的大、中含沙量计可测量 15 公斤/米³ 以上的含沙量, 野外测量精度能满足国家水文规范要求。当把¹³⁷Cs 源改为²⁴¹Am 低能源, 可测量 5 公斤/米³ 以上的含沙量。

一、引 言

黄河含沙量很大, 淤积严重。准确、及时地测报河水含沙量, 并掌握其变化规律, 对兴建水库、电站, 开发农田水利, 防洪、防凌, 整治河道等方面有着十分重要的意义。

过去测量黄河含沙量一直沿用横式采样器取样, 测量程序繁复, 需时又长, 含沙量受水流脉动影响大, 取样代表性差, 沙峰过程也难以控制, 而且在深水急流中取样, 容易发生人身事故。我们在利用 γ 射线测量淤泥密度工作^[1]的基础上开展了测量含沙量的研究工作。

二、测 量 原 理

利用中等能量的 γ 射线的散射测定河水含沙量的原理与测量淤泥密度的原理相似, 即利用不同浓度的水-泥沙介质对 γ 粒子的散射, 造成 γ 射线强度的衰减不等, 测量 γ 射线的散射强度来确定含沙量的大小。

利用散射法测量泥沙含量的特点是:

1. 黄河泥沙的化学成分主要是由轻元素组成，它与中等能量 γ 射线相互作用主要为康普顿-吴有训效应(等效原子序数与等效原子质量数比值接近 1/2)。
2. γ 射线在水-泥沙二元介质中的散射系数为介质密度的单值函数。
3. 水-泥沙介质是具有良好的加和性的二元体系，含沙量与介质密度为线性关系。
4. 对于 ^{137}Cs γ 放射源，泥沙的颗粒大小对测量的影响可以忽略。
5. 探头外壳做成鱼形(流线型)，放入河水中对流速的干扰而引起的含沙量变化很小，在测量中所引起的误差可以忽略。

散射法测量密度的半经验公式^[1]为：

$$I = \frac{AQ}{R} \rho^h e^{-Bk\rho}$$

式中， I 为散射强度； A 为仪器常数， Q 为放射源强度； R 为源距； ρ 为介质密度； h 为指数常数； B 为与放射源、初始能量及探头几何条件有关的常数。

应当指出，水的密度 $\rho_{\text{水}}$ 与温度有关，并影响介质等效原子序数与等效原子质量数的比值，也就是影响公式中一些常数值，故当温度变化较大时需进行温度校正。

三、探头及放射源

利用放射性同位素测量河水含沙量，通常有两种形式的探头：一为利用吸收法；一为利用散射法。探头的选择可从灵敏度和对测量现场的适应性两个角度来考虑。所谓灵敏度，就是每单位含沙量(或密度，或浓度)变化量的情况下仪器读数(即散射强度)的相对变化量。

灵敏度 S 可用下式表出：

$$S = \frac{dI/I}{dW}$$

式中， I 为散射强度(可用每 100 秒钟定标器读数来表示)； W 为含沙量，公斤/米³。

很显然，探头的灵敏度越高，测量含沙量的精度也越高，可测最小含沙量越小。在国际上定义可测最小含沙量为 3 倍标准误差^[2]；而测量含沙量的标准误差等于仪器读数的相对标准误差除以灵敏度。

根据文献^[2]及我们用 ^{137}Cs 源所做的工作，为了尽量满足低含沙量测量的需要，在 γ 射线为中等能量的情况下，利用散射法的探头灵敏度可做得较高。另外，散射法探头容易做成流线型，对水流干扰较小，且可减少挂草机会，这对洪水期间挟有大量杂草的黄河现场测量更为有利。

探头示意图见图 1。为满足黄河水文测量的要求，鱼形探头脊部和腹部都用铅屏蔽，两侧面有 4.5 厘米宽的窗口。实践证明，上、下探测范围分别为 25 和 35 厘米。

选用 ^{137}Cs 放射源是由于：

- (1) γ 射线能量等于 0.66 兆电子伏，比较适当，并且泥沙化学成分、粒径对测量影响较小；
- (2) 半衰期比较长，为 30 年；
- (3) 放射源容易做成固体密封源。

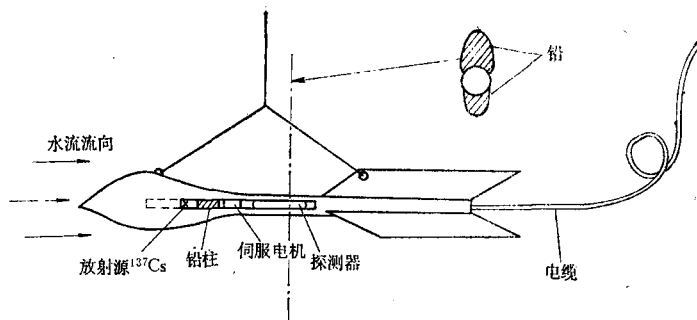


图 1 铅鱼探头示意图

但 ^{137}Cs 源对测量低含沙量来说, 其灵敏度还不够高, 仅适用于大、中含沙量的测量。

源强的选择是从精度、经济、安全几个角度考虑的。源强增加会使放射性计数统计涨落误差降低, 但增加源强对安全防护造成困难, 并受到探测器本身计数率的限制。针对测量黄河大、中含沙量的需要, 我们选用的 ^{137}Cs 源强度为 200 毫居。

采用上述探头时, 源到探测器的距离存在着一个最佳值。源强一定时, 源距加大可使灵敏度增高, 但同时计数率减小, 计数统计误差增大。实验求源到探测器的最佳距离的方法是: 选所需要的某几种含沙量的浑水介质。改变不同的源距 R , 测得仪器读数 I , 从不同 R 值的 $I \sim W$ 关系图上求出相应的灵敏度 S 和 $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{统计}}$ 值。又根据 $dW = \frac{1}{S} \frac{dI}{I}$ 的关系, 取 $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{统计}} \cdot \frac{1}{S}$ 为纵坐标, R 值为横坐标作图,

找出 ΔW 最小值时的 R_m 值。很显然, 源距为 R_m 时, 含沙量的测量误差最小。 R_m 即为所求的最佳几何条件 (如图 2 所示)。本含沙量计 $R_m = 45$ 厘米。在这个源距下, 实验测得的散射强度 I 与含沙量 W 的关系曲线示意图见下述图 4。以放大座标的实际图中求出含沙量在 10 公斤/米³时, 200 毫居 ^{137}Cs 探头灵敏度 $S = 2.8\% / \text{公斤/米}^3$ 。

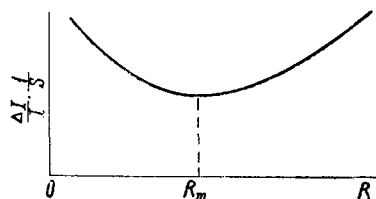


图 2 最佳源距 R_m 求解图

四、测量电路

我们采用 G-M 计数管探测器, 并采用快猝灭电路 (见图 3), 使测量装置的分辨时间减小到 2~3 微秒左右。

1. 原理 自制晶体管猝灭电路实际上相当于一个两管互补单稳态触发器。第二个晶体管 (BG_2) 用于构成单稳态触发器的第一级; 第三个 (BG_3) 和第四个 (BG_4) 为串联放大电路, 用于构成单稳态触发器的第二级。 BG_1 用于构成射极跟随器, BG_6 用于隔离计数管的阳极与 BG_4 的集电极。当计数管发生放电时, 产生一个脉冲信号触发这个电路, 输出一个约 190 伏的负脉冲, 作用于 G-M 计数管的阳极。在脉冲宽度期间, 阳极电压下降 190 伏, 这时 G-M 计数管停止放电, 电路经过一定的恢复时间, 又重新等待计数。

上述作用于 G-M 计数管阳极的大幅度负脉冲, 称为猝灭脉冲, 起阻止 G-M 计数管放

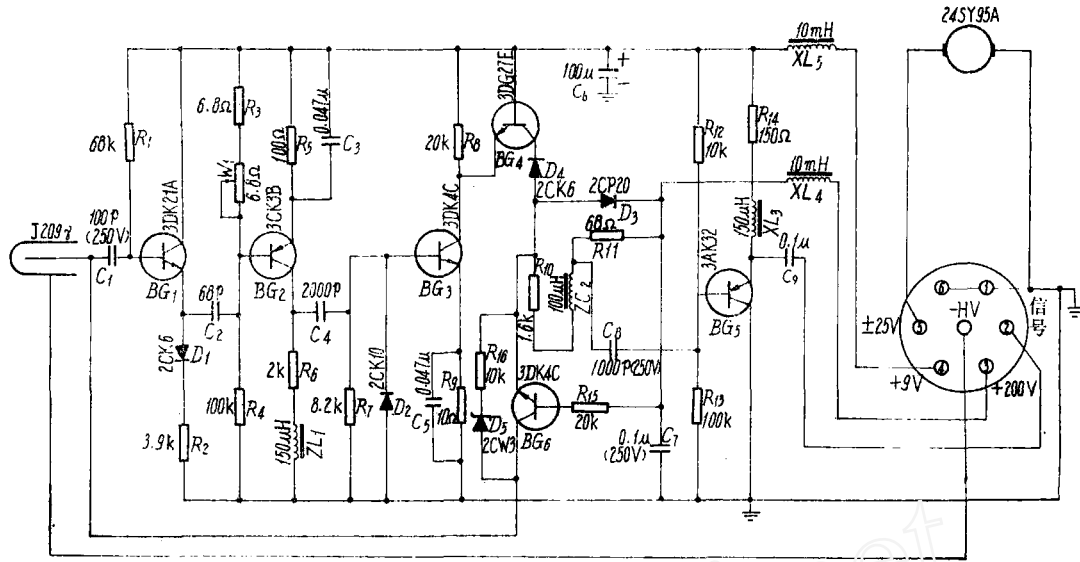


图 3 晶体管猝灭电路

电作用。根据文献介绍，一般 G-M 计数管放电现象沿阳极伸展的速度为 0.1~1 米/微秒，从触发电路到猝灭脉冲反馈到 G-M 计数管的阳极的时间小于放电伸展完毕的时间，则能起到限制放电的作用。经计算，我们的电路从触发到反馈的时间约为 5.9×10^{-9} 秒，并具有足够高的灵敏度。

2. 电路性能指标

(1) 晶体管猝灭式 G-M 计数管探头分辨时间（即死时间）：示波器观察与双 γ 射线源测量结果均为 2~3 微秒。

(2) 猝灭电路阻止放电效果：一般用每次放电的平均电流值表示。在工作电压加到适当位置时，加猝灭电路与不加猝灭电路每次平均电流的比值为 $\frac{1}{21}$ 。

(3) 在猝灭脉冲作用下，坪的特性有所改善：不加猝灭电路的坪斜为 6%/100 伏；加入猝灭电路后坪斜小于 1%/100 伏，坪长小于猝灭脉冲高度 190 伏。

(4) 探头的温度效应：在严格的实验条件下（几何位置固定），当温度从 -5——+45°C 变化时，在足够的计数下，测量偏差不超过 $\pm 0.5\%$ （实测为 $\pm (0.2 \sim 0.3)\%$ ）。

(5) 长时间稳定性及重复性：探头与记录仪器连配测量 γ 射线强度，8 小时的初读和末读的偏差值都在放射性统计误差范围内。如测 100 秒累积计数大于 6×10^5 次时，变化系数（即相对均方根差）约为： $\pm 0.13\%/8$ 小时，不超过 $\pm 0.2\%/8$ 小时的设计指标。整套测量装置在重新开机后读数重复性良好。每测 100 秒的累积计数大于 6×10^5 次时，半月内的变化系数（即相对均方根差），约为 $\pm 0.13\%$ ，不超过原订 $\pm 0.2\%$ 的指标。其前后的读数偏差值均与放射性统计误差相一致。

通过以上的实验来看，这种外加猝灭电路的 G-M 计数管型的探头比现行用的闪烁型探头，具有温度系数小，稳定性较高，没有疲劳现象，又不需要稳定度较高的高压电源等优点。

五、记录仪器及其他装置

记录仪器在研究过程中试制了几种，最后定型的原理和性能见 FH-422 型 γ - γ 含沙量计说明书^[3]。现将几项主要技术性能介绍如下。

1. 分辨时间：2 微秒；
2. 最大计数容量：999999；
3. 定标器测量石英晶体标准频率的精度： $\pm 0.01\%$ ($+20^{\circ}\text{C}$)；
4. 直流高压瞬时稳定度： $\pm 0.1\%$ (输入电压变化 $\pm 10\%$)；
5. 直流高压长时间 (8 小时) 稳定度： $\pm 0.05\%$ (1000 伏)。

考虑到安全防护问题，我们利用探头外壳——铅鱼的头部作屏蔽体，试制了一套自动进源、出源的装置，该装置由伺服可逆电机、变速齿轮和丝杆组成。每次进源、出源的位置重复性误差小于 0.1 毫米。

在水下测量时，探头的密封是一个很重要的问题。我们将放射源、计数管、伺服电机等装在一个外表镀铬的环氧树脂塑料套管中，其末端联接电缆处采用专门设计的密封结构，经 4 个大气压的水压检验，证明不漏。

铅鱼探头与记录仪器之间需要一根长电缆联接。这种电缆是专门设计的，要求抗拉断力较大，以免被河水冲断；又要求信号衰减小，外界信号干扰小。所用的电缆有 7 芯。其中一芯为信号线即同轴芯，其特性阻抗为 50 欧。电源线用高压聚乙烯绝缘，耐压大于 2000 伏，内有加强钢丝一条。总抗拉断力大于 200 公斤。有铜线和钢丝编织的屏蔽层，以防止电场和磁场变化的干扰。

为了探索低浓度含沙量的测定方法，扩大本含沙量计的测量范围，我们将 ^{137}Cs 放射源改为 ^{241}Am 低能 γ 源，强度为 1 居。为了使计数管阴极全部暴露于较强的辐照区，我们又将放射源安装在直对探测器的位置。实验表明，这样做，提高了灵敏度和计数率，含沙量测量范围的下限可达 2~5 公斤/米³。但尚待解决高计数率下的长寿命探测器和把探头做成流线型后才能正式投入生产。

六、河水含沙量的测量和误差分析

1. 工作曲线的率定和现场校正 所谓工作曲线，即预先实验建立的仪器读数与含沙量的关系曲线。一般用 10 个样品池，配成 0~800 公斤/米³ 的不同等级的样品。在实验时应随时搅拌防止泥沙下沉。为了获得精度较高的工作曲线，我们取 10 次实验的平均值绘图，所得典型工作曲线见图 4。

在现场测量时，利用图 1 所示的铅鱼探头沿不同垂线位置 and 不同深度在河道断面上进行含沙量的测量。根据仪器读数从工作曲线上立

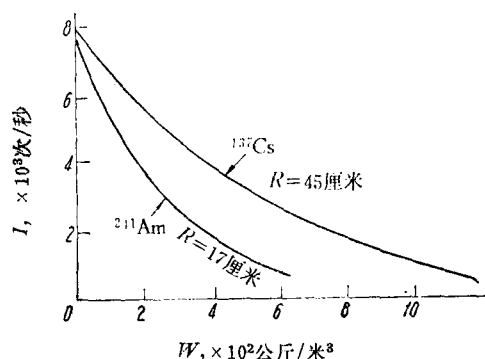


图 4 工作曲线示意图

即查出含沙量的数值, 及时向下游各水文站和中央防汛指挥部门报告。

针对 ^{137}Cs 的半衰期和黄河干流水温变化等情况, 每隔半个月校正工作曲线一次。校正方法是, 在现场水流平稳条件下, 一方面取样称重, 一方面记录仪器读数。利用称重所得含沙量反查出的仪器读数与实测的进行对比, 求出纵座标仪器读数的对比偏差系数, 对工作曲线进行校正, 绘制新的曲线。由于许多因素的变化量与仪器读数成正比, 故可用一种含沙量下的仪器读数的对比系数进行校正。但因仪器读数与含沙量并非线性关系, 故不能用仪器读数查出来的含沙量与取样称重法所得的含沙量的对比系数进行校正。这里特别应当指出, 在探头几何条件变化、更换元件 (使猝灭电路参数改变), 和改用其他同型号的探头时, 不能用一点校正, 须另作工作曲线。

2. 误差分析 测量含沙量的误差主要包括以下各因素:

(1) 放射性计数统计误差。

$$\sigma = \pm \frac{1}{\sqrt{N}} = \pm 1.3\%$$

式中, σ 为放射性计数统计相对误差; N 为总计数, 相当于计数率 (5400 次/秒) 乘测量时间 (100 秒)。

通过工作曲线, 可求出在 10 公斤/米³ 时由放射性计数涨落引起的含沙量的绝对误差为:

$$m_{\text{统计}} = \pm 0.43 \text{ 公斤/米}^3$$

(2) 工作曲线误差。包括率定时取样、称重及制图等误差。经计算, 在 10 公斤/米³ 时, 由绘制工作曲线引起的绝对误差为:

$$m_{\text{曲线}} = \pm 0.05 \text{ 公斤/米}^3$$

(3) 校正工作曲线误差。经计算, 在 10 公斤/米³ 时为:

$$m_{\text{系数}} = \pm 0.014 \text{ 公斤/米}^3$$

(4) 水温变化影响。水温变化对仪器读数的影响是多种因素造成的, 其中主要因素是因水的密度随温度变化而变化。实验测得 ^{137}Cs 探头在常温下水温变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 时, 含沙量的误差为:

$$m_{\text{水温}} = \pm 0.3 \text{ 公斤/米}^3$$

对于 ^{241}Am 探头, 在水温变化 $\pm 10^\circ\text{C}$ 时, 对含沙量的测量没有明显的影响。

综上所述, 总误差为:

$$m_{\text{总}} = \pm \sqrt{m_{\text{统计}}^2 + m_{\text{曲线}}^2 + m_{\text{系数}}^2 + m_{\text{水温}}^2}$$

当含沙量为 10 公斤/米³ 时的测量总标准误差为:

$$\begin{aligned} m_{10\text{总}} &= \pm \sqrt{(0.43)^2 + (0.05)^2 + (0.014)^2 + (0.3)^2} \\ &= \pm 0.56 \text{ 公斤/米}^3 \end{aligned}$$

根据《水文测验规范》^[4] 要求, 须有 75% 的实验点不超过 $\pm 5\%$ 的误差范围为合格。又当可信度为 75% 时, 误差极限范围为 ± 1.15 倍标准误差, 即 $1.15 \times (\pm 0.56) = \pm 0.64$ 公斤/米³, 相应的测量下限为 12.8 公斤/米³。1974 年水电部批准该仪器使用在测量 15 公斤/米³ 以上的大、中含沙量的测量。1973~1974 年野外对比实验结果已证明该仪器测量大、中含沙量时均能满足水文规范要求。1975 年以来, 在黄河各水文站正式投产使用, 效果良

好。及时测报了沙情，为黄河防汛起了一定作用，所得资料对黄河的治理也将是重要的。

在猝灭电路研究中得到鲁智同志帮助，参加此项工作的还有杨王镜、周延年、韩振华等同志。这次研制的 FH 422 型 γ - γ 含沙量计已于 1975 年通过部级生产鉴定会，会后由国营 261 厂生产。

参 考 文 献

- [1] 刘雨人等, γ - γ 法测量淤泥容重, 中华人民共和国原子能科学技术文献, 原 10037/同1001号, 1961年。
 [2] T. Florkowski, Portable Radioisotope Gauges for Suspended Sediment, Isotope Hydrology, Proc of a Symposium, Vienna, IAEA, 1970, p 545-554.
 [3] FH-422 γ - γ 含沙量计说明书, 国营 261 厂, 1974 年 5 月。
 [4] 水文测验规范, 水利电力出版社, 1975 年。

锗-68-镓-68 同位素发生器

王中央 范我牛 芳 張叔鳴 宋爱宝 苏登贵

一、前 言

^{68}Ge - ^{68}Ga 同位素发生器是由母体核 ^{68}Ge ($T_{1/2}$ 为 287 天) 和子体核 ^{68}Ga ($T_{1/2}$ 为 68 分钟) 组成。它具有母体半衰期长, 便于长期使用, 子体核是正电子发射, 在医学诊断中可采用正电子扫描、提高确诊率, 以及子体核半衰期短, 降低病人所受的辐射剂量等优点。因此它越来越受到医学部门的欢迎。

^{68}Ge - ^{68}Ga 发生器最早由格利森(G. I. Gleason)^[1]提出, 他用 25%(v/v) 的乙酰丙酮-环己烷从 pH 4.5 的含 ^{68}Ge 水相中萃取 ^{68}Ga 。后来格林(M. W. Greene) 等人^[2]用色层级 Al_2O_3 吸附 ^{68}Ge , 以 0.005 M EDTA 溶液淋洗 ^{68}Ga , 对格利森的方法作了改进。但由于用 EDTA 淋洗所得的 ^{68}Ga 是 EDTA 络合物的形式, 在实际应用中, 有时还必须经离子交换法或溶剂萃取法把 ^{68}Ga 与 EDTA 分离, 获得离子型 ^{68}Ga 。这样, 增加了操作时间, 降低了 ^{68}Ga 的实际产率。为了克服这些缺点, 科佩基(P. Kopecký) 等人^[3,4]提出了用 HCl 溶液淋洗, 直接得到离子型 ^{68}Ga 的同位素发生器。

本工作利用 1.5 米回旋加速器照射生产无载体放化纯的 ^{68}Ge , 制成离子型 ^{68}Ge - ^{68}Ga 同位素发生器, 并且对发生器的各项指标和性能进行了研究, 找出了操作发生器的合适条件。

二、实 验

1. 试剂和仪器 CCl_4 : 西安化学试剂厂出品, 分析纯。 Al_2O_3 : 酸性, 100—200 目, 色层级, 上海试剂五厂(1968 年)出品。HCl: 分析纯试剂。 ^{68}Ge 放射性纯度用 Ge(Li) 探头, 16384 多道能谱分析仪测定; ^{68}Ga 放射性强度用 NaI 探头百万进位定标器和阱形液体闪烁探头 GP-1 型多道脉冲分析器测定。

2. 靶子及照射 靶子: 天然锌电镀在铜衬底上, 锌厚度为 150 mg/cm^2 , 外包厚度为