

伽马阵列选矿探测系统设计及其一致性校正方法

严远桐^{1,3}, 王冬阳^{1,3}, 王仁波^{1,2,3}, 刘琦^{1,3}, 邱欢^{1,3}, 张雄杰^{1,2,3}

- (1. 东华理工大学 核技术应用教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013;
2. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西 南昌 330013;
3. 东华理工大学 核物理与核技术江西省重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 为提高中低品位铀矿石的分选效率与精度, 基于 64 个 NaI 探测器研发了伽马阵列选矿探测系统, 并建立了可靠的一致性校正方法。该系统采用 8 列×8 行阵列布局, 集成数字化单道脉冲幅度分析器、FPGA 数据处理模块与 STM32 控制模块, 可实现对皮带输送铀矿石伽马射线信号的同步采集与实时处理。针对多探测器工艺差异可能导致的计数率偏差问题, 构建了计数率一致性分析数学模型, 采用单因素方差分析进行一致性评价。测试结果显示, 校正前探测器组间 F 值达 3 654.41, $P=0$, 显著偏离一致性标准; 采用 t 检验定位异常探测器, 并对异常探测器校正后, F 值降至 0.64, $P=0.98>0.05$, 各探测器计数率无显著差异。该系统有效提升了伽马射线信号采集的准确性与稳定性, 为低品位铀矿石入磨前的预选提供了技术支撑, 对拓展矿产资源利用边界、降低后续加工成本具有重要工程价值。

关键词: 铀矿预选; 放射性分选; γ 射线分选; 阵列探测系统; 一致性校正; NaI 探测器; 单因素方差分析; t 检验

中图分类号: TL81; TD925.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0001-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2026.01.13

核能具有污染性低、能量密度高、无间歇性、运行稳定且受气候条件约束小等显著优势, 是关乎国家发展全局的核心战略资源^[1]。铀矿作为核工业的核心基础原料, 其稳定与可靠的供给, 是保障核电中长期发展战略目标顺利推进的关键前提^[2]。然而, 中国铀矿床以中小型为主, 矿体形态复杂且连续性差, 矿石形状随机性大, 开采过程中矿石贫化率偏高^[3]。同时, 铀矿床成矿类型多样, 导致矿石性质差异大, 且矿床中常伴生多种元素; 矿化分布不均, 中低品位矿床占比高, 铀含量波动大, 废石夹带较多, 进一步增加了资源开发利用的难度。为降低后续矿石处理的成本与难度, 需要对铀矿石进行分选预处理。在矿石入磨前开展定量预选, 能够有效剔除废石, 直接提升矿石整体品位, 为后续加工环节提质增效奠定基础^[4-6]。

放射性分选技术以矿石的放射性信号为核心分选依据, 通过探测器捕获该信号, 可实现铀矿石

与废石的高效精准分离。其适用于处理 20~300 mm 粒级的粗粒铀矿石^[7], 能有效提升矿石品位, 大幅提高采矿效率, 具有极高的实际应用价值^[8-9]。分选系统的准确率与探测器的信号采集效能直接相关, 但单个探测器在信号采集范围与探测效率上均存在局限。

自然伽马选矿技术依据铀矿石的天然放射性特征, 通过探测器捕捉其辐射的 γ 射线, 实现矿石与废石的在线快速识别^[10]。该技术可在矿石入磨前完成预选, 从而显著降低后续处理负荷。该技术的核心在于探测器^[11]。单个 NaI 探测器 ($\phi 38\text{ mm} \times 38\text{ mm}$) 的探测效能受限于其狭小的探测范围, 通常需要配备复杂的铅屏蔽结构, 且对低品位矿石的 γ 射线信号捕捉能力弱; 阵列探测器虽可通过多通道并行采集而提升检测效率, 但由于晶体均匀性、光电倍增管灵敏度等硬件参数存在离散性, 导致探测器间计数率偏差较大, 严重影响分选精度^[12-14]。因此, 本研究开发高性能阵

收稿日期: 2026-01-19; **修回日期:** 2026-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22B2077); 国家自然科学基金项目(42564010); 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1003004); 江西省重大科技研发专项(20224AAC01012); 东华理工大学核地学部“揭榜挂帅”项目(2024HDX03)

通信作者: 张雄杰

列探测器,采用多组 NaI 探测器协同工作模式,对皮带输送过程中的矿石进行放射性信号同步采集,并建立可靠的一致性校正方法^[15],进而完成铀矿的初步分选,以推动低品位铀矿的高效利用。

1 伽马阵列选矿探测系统设计

1.1 阵列结构设计

本阵列探测系统(图1)由64个NaI探测器以8列×8行矩阵形式排布构成,用于采集皮带上传输的铀矿石所释放的放射性信号。铀矿石置于传送带上,从探测器的正上方通过,每个探测器独立捕捉铀矿石发出的 γ 射线信号,并同步获取同一时刻不同空间位置的信号强度,从而构建出二维矩阵数据集。选用的NaI闪烁体探测器主要参数:晶体尺寸 $\phi 38\text{ mm} \times 38\text{ mm}$,能量分辨率 $\leq 8\%$,工作电压600~800 V,前置放大器的稳压电源为+12 V;该探测器兼具较高的探测灵敏度与结构紧凑性,适合阵列化部署。

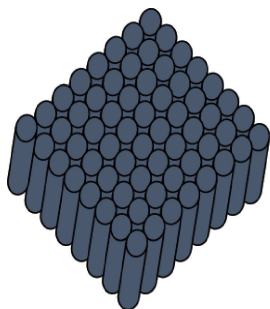


图1 阵列探测系统8列×8行排布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the array detection system arranged in 8 columns and 8 rows

1.2 系统集成设计

伽马阵列选矿探测系统以“信号采集—数据处理—控制调节—结果输出”为逻辑主线,由NaI探测器阵列、多路数字化单道脉冲幅度分析器、FPGA数据处理模块、STM32控制模块及上位机构成^[16],各模块功能分工明确且能够协同工作。

1) NaI探测器阵列。由64个NaI探测器按8列×8行排列,横向8个探测器覆盖传送带宽度,纵向8个探测器可提升纵向分辨率。每个探测器独立捕捉铀矿石发出的 γ 射线信号,并将放射性信号转换为负指数脉冲电

信号^[17]。

2) 多路数字化单道脉冲幅度分析器。64路数据采集电路分别对应64个探测器,每路负责对单个探测器输出的脉冲信号进行预处理,先通过反向放大器将负指数脉冲转换为正脉冲并放大至可处理范围,再通过上下甄别器过滤低于下阈值与高于上阈值的噪声信号^[18],最后通过反符合电路将有效信号转换为标准方波。

3) FPGA数据处理模块。采用并行计数架构,对64路信号进行高速计数,并将每10 ms的计数数据整合为 64×1 二维矩阵,通过SPI接口传输至STM32。

4) STM32控制模块。作为系统控制中枢,STM32控制模块实现两大功能:一是参数控制,通过I2C接口驱动DAC芯片输出高压控制信号与阈值电压信号,调节探测器工作状态;二是数据通信,通过USB接口与上位机双向通信,上传计数数据并接收参数调节指令^[19]。

5) 上位机。基于C++开发上位机操作界面(图2)。支持用户设置相关探测参数、高低阈值电压、采集时间间隔等,可实时显示64通道的计数曲线和每个探测器每10 ms采集到的计数。

2 一致性分析体系构建

在电压阈值和工作高压相同的情况下,探测器制作工艺差异会导致不同探测器FPGA采集到的计数结果出现差异^[20]。这种差异会影响系统采集数据的准确性,因此需对64个探测器进行一致性校正。伽马阵列探测系统的一致性,即不同探测器在相同时间内计数率的一致程度,是评价该系统性能的重要指标。64个探测器的一致性会直接影响后续选矿机对铀矿石分选的准确性。

目前,针对铀矿石辐射计数结果,已有学者对由4个探测器组成的线阵探测系统进行了初步的一致性分析,并给出了一个局部评价体系^[21];但缺乏全面而系统的评价框架,需进一步完善。本研究基于64个NaI探测器阵列,构建了一套完整的一致性分析体系。该体系通过整合统计学方法和数据处理流程,能够全面评估探测器的一致性,并引入t检验作为核心工具,实现对异常探测器的精确定位和判断。

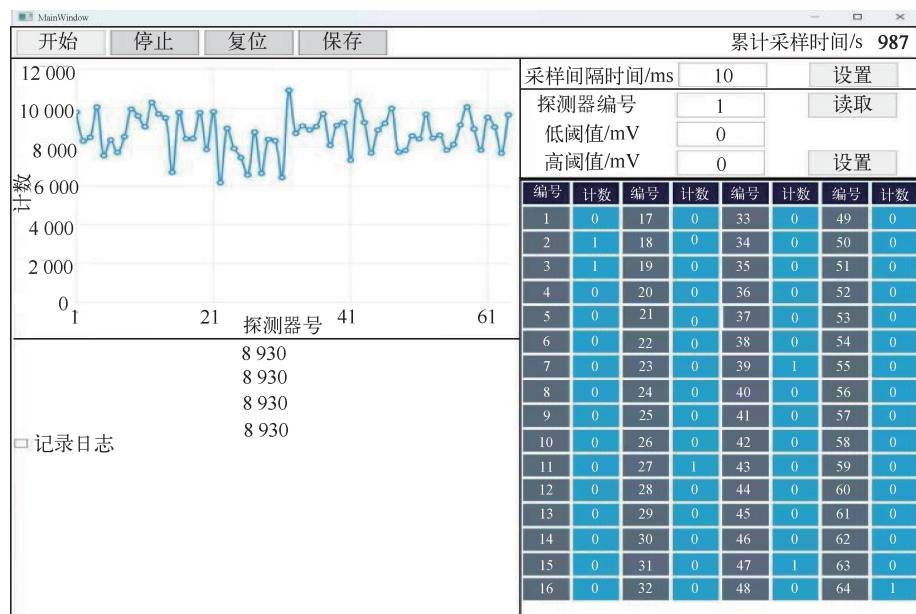


图 2 上位机界面

Fig. 2 Upper computer interface

2.1 一致性分析的数学模型

NaI 探测器的计数率服从泊松分布,多次重复测量下的随机误差可近似满足正态分布。结合阵列探测器的计数特性,构建计数率一致性分析模型。该模型的核心是将“工艺差异导致的系统性偏差”与“测量过程的随机误差”分离,实现偏差的量化评估^[22]。通过建立数学模型来分析阵列探测器计数率的一致性,见式(1)。

$$\begin{cases} R_{ij} = R_0 + \Delta_j + \xi_{ij} \\ \xi_{ij} \sim N(0, \sigma^2), \text{且相互独立} \\ i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 64; \\ \sum_{j=1}^{64} \Delta_j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{ij} —第 j 个探测器第 i 次测量的计数率, cps; R_0 —64 个探测器的目标参考计数率(所有探测器调试前的全局均值,已除去异常), cps; Δ_j —第 j 个探测器的计数偏差,调整之后整体偏差抵消; ξ_{ij} —第 j 个探测器第 i 次测量的随机误差。

模型核心:一致性评价的本质是检验各探测器的计数率偏差 Δ_j 是否显著不为 0,若所有 Δ_j 无统计显著性,则认为计数率一致。

2.2 一致性分析的评价方法

为了避免非工艺因素(如辐射场、电压、测量时间)干扰计数,采取以下校正措施:1)保证测量

条件统一,将稳定的铀矿石标准源置于每个 NaI 探测器中心正上方,铀矿石标准源的具体参数见表 1,确保每个探测器所处的辐射场条件一致;2)每个探测器连续测量 5 次,每次测量时间均为 120 s,通过增加测量次数以减小随机误差,提高统计可靠性;3)用每次测量的原始总计数除以测量时间,得到计数率。

表 1 铀矿石标准源参数

Table 1 Uranium ore standard source parameters

标准源 质量/g	标准源铀 质量分数/%	标准源比 活度/(Bq/g)	活度/ Bq
53.98	0.12	30.48	1 645.31

采用单因素方差分析(ANOVA)判断 64 个探测单元的计数率是否“整体一致”,其核心是通过对比探测器间的系统性偏差与探测器内的随机误差^[23-24],量化工艺差异对测量结果影响的显著性。

1)假设设定

原假设 $H_0: \Delta_j = 0$ (所有探测器的计数率期望值等于目标值 R_0 ,整体一致)。

备择假设 $H_1: \Delta_j$ 并非全为 0 (至少 1 个探测器的计数率存在显著偏差,整体不一致)。

2)统计量计算

组间平方和(SS_B)反映探测器间的系统性偏

差(工艺差异主导),见式(2)~式(3)。组内平方和(SS_w)反映单个探测器多次测量的随机误差,见式(4)。

$$SS_B = n \sum_{j=1}^{64} (R'_j - R_0)^2, \quad (2)$$

$$R'_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ij}, \quad (3)$$

$$SS_w = \sum_{j=1}^{64} \sum_{i=1}^n (R_{ij} - R'_j)^2, \quad (4)$$

式中: R'_j —第 j 个探测器的平均计数率, cps, n —每个探测器的重复测量次数。

3) 自由度定义

组间自由度:共有 64 个探测器,扣除 1 个整体约束条件,见式(5)。

$$df_B = 64 - 1 = 63. \quad (5)$$

组内自由度:每个探测器重复测量 n 次,自由度为 $n-1$,见式(6)。

$$df_w = 64 \times (n-1). \quad (6)$$

4) F 统计量

F 统计量通过量化系统性偏差与随机误差的比值,用于判断工艺差异的显著性,见式(7)。

$$F = \frac{SS_B/df_B}{SS_w/df_w}. \quad (7)$$

5) 判断标准

在统计检验中,显著性水平是用于判断样本数据与原假设之间差异是否具有统计学意义的一个重要指标。它表示在原假设为真的情况下,拒绝原假设的概率上限。本研究选定显著性水平 $\alpha=0.05$,这一标准在统计学中被广泛采用^[25],已成为众多领域研究中的一种常规标准,它较好地平衡了发现真实效应与避免假阳性结论的风险。

若 $F < F_\alpha(df_B, df_w)$:即计算的 F 统计量小于给定显著性水平 α 下的临界值,则接受 H_0 ,认为探测器之间的系统性偏差未显著大于随机误差,各探测器的计数率一致。

若 $F \geq F_\alpha(df_B, df_w)$:即计算的 F 统计量大于或等于给定显著性水平 α 下的临界值,则拒绝 H_0 ,认为各探测器计数率不一致,需进一步去定位和调试异常的探测器。

2.3 异常探测器定位

采用全局修剪均值作为参考值基准(R_0),将各探测器的计数率从小到大排序,去除最大值

10%和最小值 10%的极端计数率后计算均值^[26],以此降低少数异常探测器计数率对参考值的干扰,见式(8)。

$$R_0 = \frac{1}{52n} \sum_{j=1}^{52} \sum_{i=1}^n R_{ij}. \quad (8)$$

1) 假设设定

原假设 $H_{t0}: R_{j0} = R_0$ (第 j 个探测器的计数率期望值与参考值一致,无异常)。

备择假设 $H_{t1}: R_{j0} \neq R_0$ (第 j 个探测器存在显著偏差,为异常探测器)。

2) t 检验计算

t 检验计算在于复用 ANOVA 得到的随机误差 SS_w 和 df_w ,这样可以降低统计检验的误差,见式(9)。

$$t_j = \frac{|R'_j - R_0|}{\sqrt{\frac{2}{n} \times \frac{SS_w}{df_w}}}, \quad (9)$$

式中:分子为第 j 个探测器计数率与参考值的绝对偏差,分母为随机误差导致的偏差阈值。

3) 判断标准

由于异常探测器可能表现为计数率偏高或者偏低,所以可以采用双侧检验。

若 $t_j \leq t_{\alpha/2}(df_w)$:即 t 检验值小于或等于双侧检验中给定显著性水平 α 的临界值,则接受 H_{t0} ,可以判定第 j 个探测器无异常。

若 $t_j > t_{\alpha/2}(df_w)$:即 t 检验值大于双侧检验中给定显著性水平 α 的临界值,则拒绝 H_{t0} ,可以判定第 j 个探测器为异常探测器,需要对其进行调整。

3 对阵列探测系统进行一致性校正分析

3.1 阵列探测系统一致性测试

对阵列探测系统进行一致性测试。将铀矿石标准源磨成粉末并混合均匀后,置于圆形容容器内。将该样品依次置于每个探测器正上方的相同位置,在本底不产生较大波动的实验室中,采用稳定电源连接 64 个探测器进行测量。实验室辐射剂量率低于 $0.2 \mu\text{Sv/h}$,测量时保持室温恒定在 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 、相对湿度控制在 $40\% \sim 60\%$ 。每个探测器重复测量 5 次,每次测量 120 s,据此计算各探测器的计数率。

对系统中未校正的 64 个探测器进行测试,将 5 次重复测量计数率结果生成二维瀑布图(图 3),

并对计数率结果进行一致性分析(表2)。

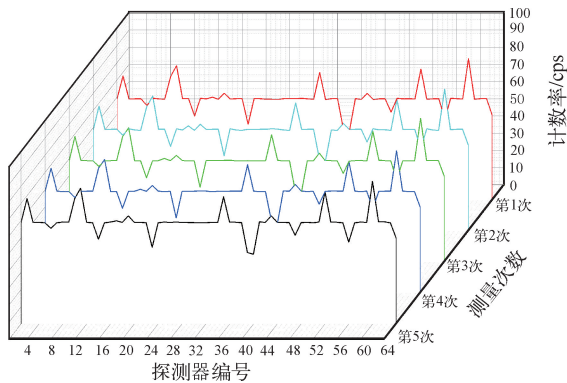


图3 阵列探测系统校正前计数率二维瀑布图

Fig. 3 Two-dimensional waterfall plot of count rate before calibration of array detection system

表2 校正前阵列探测系统一致性分析结果

Table 2 Consistency analysis results of array detection system before calibration

差异源	SS	df	MS	F	P	F_{α}
组间	15 615.91	63	247.87	3 654.41	0	1.36
组内	17.37	256	0.07			

从表2可看出, $F=3\,654.41 > F_{0.05}(63, 256) = 1.36$, $P=0 < \alpha=0.05$,探测器间差异显著,一致性效果不好。需要定位异常探测器,并对其进行调试。

3.2 异常探测器定位及校正

采用异常探测器定位方法,并根据式(9)得到每个探测器的检验统计量 t_j (表3)。

表3 各探测器检验统计量 t_j 值

Table 3 Test statistics t_j of each detector

探测器 编号	t_j	探测器 编号	t_j	探测器 编号	t_j	探测器 编号	t_j	探测器 编号	t_j
1	0.53	11	113.47	21	0.18	31	0.65	41	0.76
2	80.53	12	0.29	22	0.41	32	0.65	42	0.76
3	0.53	13	0.41	23	88.29	33	0.06	43	22.76
4	0.29	14	57.82	24	0.65	34	0.41	44	0.18
5	0.29	15	0.76	25	0.29	35	89.82	45	0.41
6	20.06	16	0.29	26	0.41	36	0.53	46	0.41
7	0.76	17	8.06	27	1.00	37	0.18	47	43.59
8	0.29	18	0.41	28	0.53	38	0.65	48	0.65
9	0.29	19	19.94	29	0.18	39	103.59	49	0.41
10	80.18	20	0.65	30	0.41	40	108.29	50	0.41
								51	0.29
								52	102.88
								53	0.76
								54	0.18
								55	0.29
								56	65.94
								57	0.76
								58	0.41
								59	0.53
								60	139.94
								61	0.65
								62	0.76
								63	0.53
								64	55.35

通过计算可以得到, $R_0=58.95$, $t_{0.025}(256)=1.969$ 。从表3可知,大于 $t_{\alpha/2}(df_w)$ 值的探测器有2、6、10、11、14、17、19、23、35、39、40、43、47、52、56、60、64,一共有17个探测器为异常探测器。

采用标准源测量各异常探测器能谱,通过分析能量分辨率、峰位、计数率及噪声等指标,对异常(如增益偏差、分辨率恶化等)进行分类诊断。然后,根据异常类型采取针对性校正办法:对于增益偏差,主要通过微调放大增益倍数或高压使能量峰位对齐;对于分辨率恶化,则优化高压并检查屏蔽与接地;对于计数率异常,通过调整高低阈值或适度改变高压来校正效率与噪声;对于基线噪声问题,则重新设定合理的阈值并优化滤波参数。每次调整后需立即验证单项指标,并循环诊断-调

整-验证过程,直至完成所有异常探测器的校正。

3.3 探测器系统整体测试

17个异常探测器校正之后,再对64个探测器组成的探测系统进行整体测试,将5次重复测量的计数率结果生成二维瀑布图(图4),并对计数率结果进行一致性分析(表4)。可以看出, $F=0.64 < F_{0.05}(63, 256) = 1.36$, $P=0.98 > \alpha=0.05$ 。调节校正后,各探测器的一致性无显著差异,一致性效果较好。这表明在经过调节校正后,64个探测器对同一放射源测得的计数率,其组间变异(存在的系统性偏差)与组内变异(随机测量误差)相比,并未出现统计学上的显著差异。各单元之间的性能差异主要来源于随机误差,而无明显的系统性偏差。

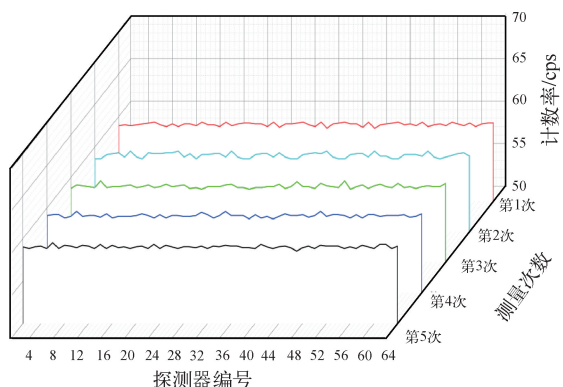


图4 阵列探测系统校正后计数率二维瀑布图

Fig. 4 Two-dimensional waterfall plot of count rate after calibration of array detection system

表4 校正后阵列探测系统一致性分析结果

Table 4 Consistency analysis results of array detection system after calibration

差异源	SS	df	MS	F	P	F_{α}
组间	2.15	63	0.03	0.64	0.98	1.36
组内	13.59	256	0.05			

本研究重点聚焦于阵列探测系统自身结构,以及构建多个探测器的一致性分析体系和异常探测器的精确定位方法。如果探测器一致性较差,即使在测量本底过程中,各探测器采集到的计数也会产生较大的波动,导致难以设置合理且通用的选矿阈值。而选矿阈值是区分矿石是否符合要求的关键指标,统一的阈值能够确保对矿石进行准确、稳定地分选。阵列探测系统在调节校正后表现出良好的一致性,为后续的矿石分选奠定了良好的基础。

4 结论

针对中国铀矿贫化率高、中低品位占比大的分选难题,成功研发了基于64个NaI探测器的伽马阵列选矿探测系统,并建立了可靠的一致性校正方法,主要成果与结论如下:

1) 完成了高性能探测系统的软硬件集成,通过NaI探测器 8×8 阵列布局、多路数字化单道脉冲幅度分析器、FPGA数据处理模块、STM32控制模块及上位机的协同,实现铀矿石 γ 射线信号的同步采集、实时处理与可视化。

2) 针对多探测器工艺差异导致的计数率偏

差,构建了科学的一致性评价体系与校正方案。基于NaI探测器计数率分布特性,建立分离系统性偏差与随机误差的数学模型,以单因素方差分析作为一致性评价标准。通过t检验定位异常探测器,并调节其高压、高低阈值及放大增益倍数,有效修正差异。与校正前的64个探测器组间F值高达3 654.41、 $P=0$ 相比;校正后F值降至0.64、 $P=0.98 > 0.05$,满足 $\alpha=0.05$ 显著性水平,各探测器计数率无显著差异,一致性大幅提升。

3) 该阵列选矿探测系统与校正评价方法显著提高了 γ 信号采集的准确性与稳定性,可为中低品位铀矿的在线预选提供可靠技术支撑,有助于提升入选品位、降低后续处理成本、拓展资源利用边界,对中国铀矿高效开发利用具有重要工程价值。

参考文献:

- [1] 陈润羊,花明.铀矿资源对我国核电发展战略影响的研究[J].矿山机械,2015,43(11):7-11.
Chen Runyang, Hua Ming. Research on influence of uranium resource on national nuclear power development strategy[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(11): 7-11.
- [2] 汪淑慧,汤家骞.铀矿石的放射性选矿[J].矿产综合利用,1980(1):23-26.
Wang Shuhui, Tang Jiaqian. Radioactive beneficiation of uranium ore[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1980(1): 23-26.
- [3] 张晨,候鲜名,侯江,等.矿石形状对放射性分选探测效率的影响[J].铀矿冶,2025,44(3):23-27.
Zhang Chen, Hou Xianming, Hou Jiang, et al. Influence of ore shape on the efficiency of radioactive sorting and detection[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(3): 23-27.
- [4] 张晓,蔡煜琦,林双幸,等.后疫情时代世界天然铀供需结构与我国天然铀供需趋势分析[J].地质论评,2022,68(4):1511-1522.
Zhang Xiao, Cai Yuqi, Lin Shuangxing, et al. Analysis on structure of the world's uranium supply and demand and the trend of China's uranium supply and demand in the post-epidemic era[J]. Geological Review, 2022, 68(4): 1511-1522.
- [5] 葛祥坤,范光,汪波,等.自动矿物分析仪用于砂岩型铀矿床矿物组成的定量分析[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第五卷):中国核学会

- 2017年学术年会论文集:第2册.2017:125-130.
- [6] 张晨,刘志超,李广,等.放射性分选机铀矿石品位核心检测系统研究[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第八卷):中国核学会2023年学术年会论文集:第1册.2023:302-308.
- [7] 田宇晖,刘志超,师留印,等.纳米比亚罗辛铀矿放射性显明度研究[J].铀矿冶,2024,43(2):24-30.
Tian Yuhui, Liu Zhichao, Shi Liuyin, et al. Study on radioactivity visibility of rossing uranium mine in Namibia[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(2):24-30.
- [8] 汪淑慧.铀矿石放射性分选的技术与经济[J].铀矿冶,2009,28(3):126-130.
Wang Shuhui. The technique and economic effect of radiometric sorting of uranium ores [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2009, 28(3):126-130.
- [9] Qiu J, Zhang Y, Fu C Q, et al. Study on photofluorescent uranium ore sorting based on deep learning [J]. Minerals Engineering, 2024, 206:108523.
- [10] 常元智,屈国普,赵越,等. NaI(Tl)闪烁探测器性能实验研究[C]//中国核学会.第十九届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集:核科学技术.2018,160-165.
- [11] 李帮军.碘化钠 NaI(Tl)单晶闪烁探测器的应用[J].光谱实验室,2010,27(2):777-779.
Li Bangjun. Applications of single crystal scintillation detector with sodium iodide NaI(Tl) [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2010, 27(2):777-779.
- [12] 李志远,艾宪芸,谢宇广,等.厚 GEM 探测器对 γ 射线探测效率的研究[J].原子能科学技术,2019,53(11):2267-2274.
Li Zhiyuan, Ai Xianyun, Xie Yuguang, et al. Study on detection efficiency of thick GEM detector for gamma ray [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(11):2267-2274.
- [13] 安少康.NPTool 模拟 NaI(Tl) 和 LaBr₃(Ce) 闪烁体探测器试验研究[J].铀矿冶,2019,38(3):198-203.
An Shaokang. Experimental study on NPTool simulation of NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) scintillator detectors[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(3):198-203.
- [14] Maeng S J, Lee S H, Park S J, et al. Detection efficiency evaluation for low energy of a NaI(Tl) scintillation detector[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 199:110325.
- [15] 赵自然,陈志强,张丽.阵列探测器不一致性校正方法的分析与实现[J].核电子学与探测技术,2002,22(4):320-323.
Zhao Ziran, Chen Zhiqiang, Zhang Li. Analysis and realization of calibration algorithm of the inconsistent of detector array [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002, 22(4):320-323.
- [16] 李海涛,赵修良,周超,等.新型单道脉冲幅度分析电路设计[J].核电子学与探测技术,2015,35(9):875-877.
Li Haitao, Zhao Xiuliang, Zhou Chao, et al. The design of a novel single channel analyzer circuit [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(9):875-877.
- [17] 卢炜煌.核脉冲信号数字成形方法研究与性能分析[D].南昌:东华理工大学,2019.
- [18] Shaker H, Salama S, Kasban H, et al. Developing digital pulse processing unit for the HPGe gamma spectrometer[J]. Journal of Instrumentation, 2025, 20(3):P03007.
- [19] 王水明,雷洁珩,廖亚雄,等.基于视觉检测的二氧化铀原料桶开盖机器人设计[J].铀矿冶,2025,44(2):89-98.
Wang Shuiming, Lei Jieheng, Liao Yaxiong, et al. Design of UO₂ raw material drum opening robot based on visual inspection [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(2):89-98.
- [20] 方晓明,李欣年.碘化钠探测器和高纯锗探测器 γ 能谱仪性能比较[J].上海大学学报(自然科学版),2004(4):389-392.
Fang Xiaoming, Li Xinnian. Comparison of performances of NaI and HPGe detectors [J]. Journal of Shanghai University: Natural Science Edition, 2004(4):389-392.
- [21] 钟浩威,邢吉胜,邓鸿亮,等.用于铀矿石分选的 NaI 线阵探测器系统设计[J].机电工程技术,2023,52(5):96-99.
Zhong Haowei, Xing Jisheng, Deng Hongliang, et al. Design of NaI linear array detector system for uranium ore separation [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(5):96-99.
- [22] Zhang X J, Zhang Y, Liu Y, et al. Evaluation of the uniformity of concentration of radon in a radon chamber [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, 110:183-188.
- [23] 倪峰.单因素方差分析在煤样均匀性检验中的应用[J].煤炭加工与综合利用,2022(6):81-83.

- Ni Feng. Application of one-way ANOVA in homogeneity examination of coal samples[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2022(6):81-83.
- [24] Anjana M, Markus P, Somesh K. Testing against ordered alternatives in one-way ANOVA model with exponential errors[J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 2024, 76(4):649-678.
- [25] 张婷, 徐章韬. 高中概率与统计中显著性水平的理论解析与教学建议[J]. 中学数学教学参考, 2025, (16):15-18.
- Zhang Ting, Xu Zhangtao. Theoretical analysis and teaching suggestions on the significance level in high school probability and statistics[J]. Teaching Reference of Middle School Mathematics, 2025, (16):15-18.
- [26] 唐超, 左文涛, 李小飞. 结合修剪均值与高斯加权中值滤波的图像去噪算法[J]. 计算机工程, 2021, 47(9):210-216.
- Tang Chao, Zuo Wentao, Li Xiaofei. Image denoising algorithm combining trimmed mean and Gaussian weighted median filtering[J]. Computer Engineering, 2021, 47(9):210-216.

Design of Gamma Array Beneficiation Detection System and Its Consistency Correction Method

YAN Yuantong^{1,3}, WANG Dongyang^{1,3}, WANG Renbo^{1,2,3}, LIU Qi^{1,3},
QIU Huan^{1,3}, ZHANG Xiongjie^{1,2,3}

(1. Engineering Research Center for Nuclear Technology Application, Ministry of Education, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Nuclear Remote Sensing, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Nuclear Physics and Nuclear Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: To enhance the separation efficiency and accuracy of medium and low-grade uranium ores, we developed a gamma array beneficiation detection system based on 64 NaI detectors and established a reliable consistency correction method. This system adopts an 8-column $\times$ 8-row array layout, integrating a digital single-channel pulse amplitude analyzer, an FPGA data processing module and an STM32 control module, which can achieve synchronous acquisition and real-time processing of gamma-ray signals from uranium ore conveyed by belts. To address the problem of count rate deviation caused by multi-detector process differences, a mathematical model for count rate consistency analysis was constructed, and one-way analysis of variance was used for consistency evaluation. The test results show that before calibration, the F value among the detector groups reached 3 654.41, and the P value was 0, significantly deviating from the consistency standard. Then, the t-test method was adopted to locate the abnormal detectors. After calibrating the abnormal detectors, the F value dropped to 0.64, $P=0.98>0.05$, and there was no significant difference in the counting rates of each detector. This system effectively enhances the accuracy and stability of signal acquisition, providing efficient technical support for the pre-beneficiation of low-grade uranium ore before grinding. It has significant engineering value for expanding the utilization boundaries of mineral resources and reducing subsequent processing costs.

Key words: preliminary beneficiation of uranium ore; radioactive sorting; gamma ray sorting; array detection system; consistency calibration; NaI detector; one-way analysis of variance; t-test