

一种便携式天然伽马能谱测量仪及其稳谱原理

张健雄 张 进 姚洪略

(广东技术师范学院工业中心 广州 510665)

摘要 介绍了一种便携式天然伽马能谱测量仪的框图原理。在稳谱方面,首先利用刻度过的温度与光电倍增管负高压的关系曲线,控制光电倍增管的负高压,使仪器系统增益稳定,达到稳谱粗调的目的;其次利用天然伽马射线特征峰的固定谱位,对采集到的数据曲线的能量轴重新标定,实现了把脉冲幅度计数率曲线直接转换为伽马射线能谱曲线,省去了同类仪器稳谱细调的过程。因此,在同样的统计涨落误差条件下,该方法大大地提高了仪器的数据采集速度。

关键词 天然伽马能谱,放射性测量,稳谱技术

中图分类号 TL822, P631.6

众所周知,自然环境中的放射性主要是由地层岩石中的放射性核素的类型及其含量决定的。和 ^{238}U 、 ^{232}Th 相关的放射性系以及放射性核素 ^{40}K 是不稳定的天然放射性核素,它们衰变时会放出 α 、 β 和 γ 射线。它们和它们的子系放出的 γ 射线具有特定的能量。图1为NaI探测器检测到的 γ 射线能谱图。由图1我们知道, ^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 在衰变的过程中放出的天然伽马射线能谱图是不一样的。伽马射线能谱仪器可用来探测和评价放射性矿藏(钾和铀矿)、分析和研究地层沉积环境、进行岩性鉴别、监测环境的放射线污染等。目前国内外研制的天然伽马能谱测量仪种类很多,绝大多数需要“参考源”进行稳谱。考虑到本设计的仪器是便携式天然伽马能谱测量仪,携带“参考源”对环境、操作者和行人都会构成安全隐患,为此,我们放弃了“参考源”的稳谱方案。首次提出了利用刻度过的温度与光电

倍增管负高压的关系曲线,控制光电倍增管的负高压,使其系统增益基本稳定,达到稳谱粗调的目的。在实现稳谱粗调的基础上进行数据的采集,再利用天然伽马射线特征峰的固定峰位,对采集到的数据进行能量重新标定,实现了把脉冲幅度计数率曲线直接转换为伽马射线能谱曲线,省去了同类仪器稳谱细调的过程。

1 仪器框图原理

仪器框图见图2所示。伽马射线探测器由NaI闪烁晶体、光电倍增管 and 前置放大器构成。当伽马射线射入到NaI闪烁晶体中时,会使NaI闪烁晶体产生荧光。射入的伽马射线的能量越高、产生的荧光光子数目也越多。荧光进入光电倍增管后,在其阳极形成电流脉冲,经电阻取样得到一个电压脉冲信号,该脉冲信号的幅度与射入到NaI闪烁晶体的天然伽马射线能量成正比。脉冲信号经放大后被送到脉冲峰值采样电路进行峰值采样。当脉冲下降沿到来时,峰值采样电路输出一个峰值采样完毕信号,该信号触发12位高速A/D转换器,对该脉冲进行模/数转换,转换完毕发出转换结束信号通知嵌入式系统读取数据。

温度探头是用来探测光电倍增管温度,以便嵌入式系统根据温度与光电倍增管高压的关系曲线(见稳谱部分说明),确定高压控制量。高压控制量通过I/O接口,由D/A输出 e_{DAC} ,控制光电倍增管的负高压。光电倍增管的负高压由(1)式表示:

$$-V_h = 1346 + 72e_{\text{DAC}} \quad (1)$$

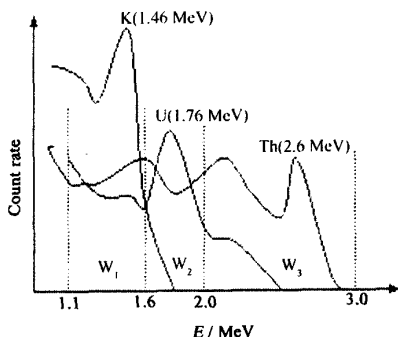


图1 天然伽马射线能谱

Fig. 1 Natural gamma spectra

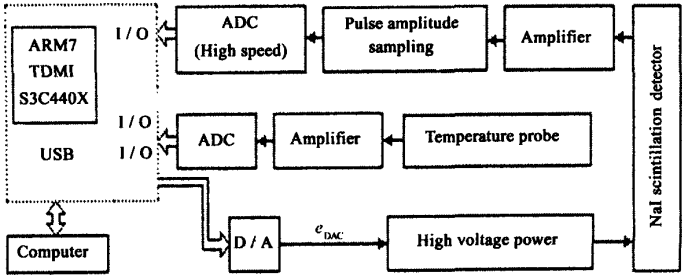


图 2 便携式自然伽马能谱测量仪框图

Fig. 2 Block diagram of the portable natural gamma spectrometer

(1)式中的 V_h 、和 e_{DAC} 单位为伏, 由该式可知, 只要建立 e_{DAC} 和光电倍增管温度 T 的关系曲线, 嵌入式系统就可以根据所测量到的光电倍增管温度对其负高压进行实时调节, 达到基本稳定增益的目的。

微机和嵌入式系统通过 USB 接口实现信息的交换。微机完成的主要工作有: 1) 提供良好的人机交互平台; 2) 通过 USB 向嵌入式系统发出各种控制命令和参数设置命令; 3) 读取嵌入式系统传送来的脉冲幅度—计数率数据; 4) 对脉冲幅度—计数率数据的幅度轴进行标定, 使其变成伽马射线能谱—计数率数据曲线; 5) 计算 ^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的含量, 输出计算结果, 绘制 U、Th 和 K 含量随测量位置变化的曲线或绘制伽马射线全谱图。

嵌入式系统可工作在以下 4 种工作状态: 1) 正常运行。该状态下, 嵌入式系统主要完成读取脉冲幅度数据并按脉冲幅度累积各幅度的脉冲个数, 实现脉冲幅度—脉冲计数率数据的转换。每个采样周期结束后, 把脉冲幅度—脉冲计数率数据传送给微机处理并清除现有数据缓冲区以便新的数据采集; 根据高压—温度控制关系曲线控制光电倍增管的工作高压使其增益基本保持不变, 实现稳谱的粗调。2) 构造高压—温度控制关系曲线。该状态下, 仪器借助放在 NaI 晶体旁的 ^{241}Am 源和调节环境温度来完成构造控制曲线的任务。3) 刻度状态。采集人工环境数据, 并将采集到的数据传送给微机, 微机对数据处理得到 U、Th 和 K 含量的计算方程进行运算, 得到各参数值。4) 停止工作状态。

为了减少统计涨落误差, 每次采样时间应比较长。系统中可供选择的采样时间有 5、10、20、50、100、200、300 和 500 s 这 8 个档位。

2 核素含量的计算及仪器刻度

符号说明: x 表示 γ 射线的能量; y 表示脉冲幅度值, $y=ax$, 其中 a 为转换系数; $n(y)$ 表示计数率,

单位时间某一幅度的电脉冲 (或某一能量的伽马射线) 计数值, 即: $n(y)=C/T$, 其中, C 为 T 时间内幅度为 y 的脉冲计数值, T 为一个采样周期的时间间隔; W 为脉冲幅度窗 (或伽马射线能量窗), 表示某一脉冲幅度区间 (或某一伽马射线能量区间); N 为落入能量窗 W 内的伽马射线计数率:

$$N = \int_{x_0}^{x_{0+W}} n(x)dx。$$

由图 1 可知, ^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 这些放射性核素的能谱在高能区存在明显峰, 因此能量分析主要集中在高能区。我们将伽马射线按能量分成如下几个窗口 (见表 1)。

计算 Th、U、K 含量的公式为:

$$^{232}\text{Th}=a_1 N_K+a_2 N_U+a_3 N_{Th}；$$

$$^{238}\text{U}=b_1 N_K+b_2 N_U+b_3 N_{Th}；$$

$$^{40}\text{K}=c_1 N_K+c_2 N_U+c_3 N_{Th}。$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 为仪器常数。把仪器放在已知 Th、U、K 含量的人工环境中对其刻度并联立求解就可得到这 9 个仪器常数。人工环境 Th、U 和 K 的含量分别为 35.7 $\mu\text{g/g}$ 、14.2 $\mu\text{g/g}$ 和 1.06 g/100g。

3 稳谱原理

天然伽马能谱测量中脉冲幅度 y 与所测的伽马射线能量 x 之间有线性关系 $y=ax$ 。但在实际应用中至少存在以下几个方面原因使仪器在测量过程中比例系数 a 发生变化: 1) 光电倍增管的放大倍数随环境温度的变化而变化; 2) 电子线路的传输增益受温度的影响。由于以上原因, 使测量到的伽马射线谱线漂移, 造成测量误差。为了确保测量过程中 a 的稳定, 伽马能谱测量仪均采取了稳谱措施。通常通过放在 NaI 晶体旁的“参考源”来协助完成。“参考源”放出单一能量的伽马射线, 当系统增益随温度变化时, 检测的“参考源”谱峰会发生漂移,

表 1 伽马射线能量窗
Table 1 Energy windows of gamma rays

计数率 Count rate	窗宽 Window width	窗宽范围 Range of window width	说明 Illustration
N_{1Am}		40—60 keV	构造温度—高压控制关系曲线, 用于稳谱粗调 Constructing the temperature vs. the high voltage curve, which is used to get rough adjusted spectrum stabilization
N_{2Am}		60—80 keV	
N_K	W_1	1.1—1.6 MeV	计算 K、U、Th 含量的能量窗
N_U	W_2	1.6—2.0 MeV	Energy windows used for calculating content of
N_{Th}	W_3	2.0—3.0 MeV	K, U and Th
N_1	W_{1Th}	2445—2515 keV	寻特征峰窗口, 用于“稳谱细调”
N_2	W_{2Th}	2515—2610 keV	Window for finding characteristic peaks, which
N_3	W_{3Th}	2610—2740 keV	are used to get fine adjusted spectrum stabilization
N_4	W_{4Th}	2740—2880 keV	

仪器根据漂移情况, 调整光电倍增管的高压, 稳定系统增益, 达到稳定谱线的目的。但为了不造成对测量数据的干扰, “参考源”一般选择放出较低能量伽马射线的核素, 因此调节光电倍增管的高压对低端谱线起到较好的稳定作用。我们称这一稳谱过程为稳谱粗调。由于伽马射线能谱仪器的测量范围很宽 (100 keV—3 MeV), 对光电倍增管高压调节的一点点偏差就会造成高能端谱线的较大漂移, 因此还必须进行稳谱细调。斯仑贝谢公司生产的 NGT 天然伽马能谱测量仪利用高能区 Th 放出的伽马射线特征峰 (能量为 2610 keV) 的漂移, 调节脉冲幅度分析器的参考电压, 达到稳定谱线的目的, 这一稳谱过程称为稳谱细调。目前, 无论是稳谱粗调还是稳谱细调大多数仪器都须通过负反馈的调节过程。其明显的缺点是: 为获得一个稳定的采样数据, 需对多次的采样数据处理 (如 PID 算法) 后才能使“参考源”和 Th 特征峰稳定。显然测量一个具有规定要求的统计误差的能谱数据需要较长的时间, 而且一旦负反馈调节发生偏差, 还是会造成测量误差。

本仪器稳谱也分为粗调和细调。但粗调是通过探测器光电倍增管温度的检测, 利用刻度过的温度—光电倍增管控制关系曲线, 实时控制光电倍增管的负高压, 以实时补偿因温度变化而造成的光电倍增管增益变化, 确保系统增益在整个测量过程中基本稳定。其优点是: 1) 不必携带参考源; 2) 仪器工作时, 光电倍增管负高压与温度之间是一一对应的关系, 无须负反馈的调节过程, 因此, 调节过程快、在相同的统计误差下数据采集时间短。当然, 这种粗调比直接由“参考源”参与的稳粗调更“粗”一些, 但可以通过稳谱细调加以矫正。仪器正常使用时, 系统中必须有一个温度与光电倍增管负高压的关系控制曲线。该关系控制曲线的建立是借助临

时安放在 NaI 闪烁晶体旁的“参考源” ^{241}Am 来实现的。过程为: 1) 给定初始温度 T ; 2) 通过 ^{241}Am 峰漂移情况调节光电倍增管负高压直到 ^{241}Am 峰位稳定; 3) 记录此时的温度 T 和 e_{DAC1} (高压控制量); 4) 改变温度 $T = T + \Delta T$; 5) 温度覆盖完? 没有到 2), 否则到 6); 6) 温度与光电倍增管负高压控制关系曲线建立完毕, 拆除 ^{241}Am 源, 将其放置在安全地方。

仪器在使用时, 嵌入式系统 S3C440X 会根据所测量到的温度, 直接由控制曲线确定负高压的控制量 e_{DAC} , 从而达到基本稳定系统增益、实现粗调稳谱的目的。

如前所述, 经嵌入式系统初步稳谱得到的数据, 还需进行稳谱细调才能使用。本文提出了一种只需对采集的数据进行换算就可以达到稳谱细调效果的方法。该方法的前提条件是对脉冲幅度进行高分辨率的幅度分析, 设计中我们用的是 12 位高速 A/D 转换, 对脉冲幅度的分析可达到 4096 道。各伽马射线能量窗口的计数值用公式 $N = \int_{x_0}^{x_0+W} n(x)dx$ 计算,

式中 N 为落入伽马射线能量窗 W 中的计数率值、 $n(x)$ 表示能量为 x 的伽马射线能谱曲线、 x_0 表示伽马射线能量窗的起始能量。微机接收到的来自嵌入式系统的数据是 $n(y)$, 即脉冲幅度为 y 的计数曲线。谱漂表现为能谱曲线在能量轴上按比例地压缩或拉伸, 也反映在幅度分布曲线 $n(y)$ 上。只要计算出比例系数就可以由 $n(y)$ 曲线直接计算出 U、Th、K 的含量。对 $n(y)$ 的幅度坐标进行重新标定, 可以转换为天然伽马能谱曲线。

伽马射线能谱图上, 最明显的 Th 特征峰出现在 2610 keV 上。在脉冲幅度计数率图 $n(y)$ 上, 假定与之对应的峰出现在脉冲幅度为 y_i 处 (如图 3 所示), 按以下过程计算压缩 (或放大) 比例系数:

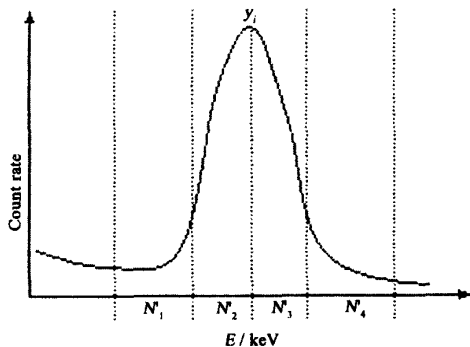


图 3 寻找特征峰

Fig. 3 Finding characteristic peaks

1) 设定初值 $y_i = 3600$; 2) 计算 $a = 2610/y_i$; 计算伽马射线能量窗 W_{1Th} 、 W_{2Th} 、 W_{3Th} 、 W_{4Th} (见表 1) 所对应的脉冲幅度窗宽 W'_{1Th} 、 W'_{2Th} 、 W'_{3Th} 、 W'_{4Th} ($W'_{jTh} = W_{jTh}/a$, $j=1,2,3,4$); 分别计算脉冲窗 W'_{1Th} 、 W'_{2Th} 、 W'_{3Th} 、 W'_{4Th} 内的计数值 N'_1 、 N'_2 、 N'_3 、 N'_4 。当满足 $(N'_2 + N'_3)/(N'_1 + N'_4) > 1.4$ 关系时找到特征峰到 3); 否则 $y_i = y_i - 1$ 到 2); 3) 当满足 $|(N'_2 - N'_3)/(N'_2 + N'_3)| < 0.1$ 时寻到峰位置, 记录这时的 a 值, 到 5); 否则到 4); 4) 如果 $N'_2 > N'_3$, 则 $y_i = y_i - 1$ 到 3); 否则 $y_i = y_i + 1$ 到 3); 5) 求 $W'_j = W_j/a$, ($j=1,2,3,4$); 计算各窗新的起始位置 $x'_j = x_j/a$, ($j=1,2,3,4$); 6) 求落入窗口 W'_j , ($j=1,2,3,4$) 的计数值 N_K , N_U , N_{Th} ; 7) 计算 U、Th、K 的含量; 8) 结束。

实际编程时还需考虑到如果在一定的幅度范围内未能找到 Th 峰, 则转换为寻找 K 峰。原理方法

相同不再复述。比例系数 a 确定后, 就可实现 $n(y) \Rightarrow n(x)$ 的转换。为了减少伽马射线穿越被测地层与探头间空间产生的康普顿散射而形成的康普顿本底, 探头应尽可能与被测地层接触, 以确保能谱峰位的正确计算。上述“稳谱细调”是通过软件计算实现的, 无须硬件的负反馈调节过程, 因此, “稳谱细调”几乎不占用测量时间, 加快了仪器的测量速度。

4 结束语

我们用所设计的仪器对广东花都—40 m 高的垂直地质剖面进行天然 γ 射线能谱曲线 (随测量位置变化的 U、Th、K 含量曲线) 的测量, 在设定采样计数时间为 5 s、每 10 cm 采集一个样点的测试条件下, 测量完这一地质剖面总共用时为 37 min。在同样的测试条件下, 测量速度比同类型仪器快了近 4 倍。证明在相同的统计涨落误差下, 用本文的方法进行“稳谱”可大大提高仪器数据的采集速度。仪器性能稳定、可靠、达到了预期的设计要求。

参考文献

- 1 黄隆基. 地球物理学报, 1997, 40(2): 272—279
HUANG Longji. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(2): 272—279
- 2 Ruckebusch G, Kalman A. IEEE Transaction on Automatic Control, 1981, AC-28: 368—376
- 3 Schlumberger Training Book: Natural Gamma Ray Spectroscopy Tool, 1982

A portable natural gamma spectrometer with a special spectrum-stabilization technique

ZHANG Jianxiong ZHANG Jin YAO Honglue

(Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract The paper introduces the frame principle of a portable natural gamma spectrum. In order to realize spectrum stabilization, a scaled related curve of temperature and negative high voltage of photo-multiplier-tube (PMT) is used to control negative high voltage of PMT to get stable gain of the instrument system and to realize rough adjusting of spectrum stabilization. Then the energy axis of gathered data curve is re-demarcated by using positions of natural gamma radial characteristic peaks to obtain gamma spectra from the curves of pulse-amplitude-count-rate without the process of refine stabilizing spectra in the similar instruments. So, the method in this paper can greatly improve the speed of data acquisition on the same condition of error due to statistical.

Key words Natural gamma energy spectrum, Radioactivity measurement, Spectrum stabilization technique

CLC TL822, P631.6