

数控核测井仪中的实时稳谱程序设计

李勇平 方建国

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 详细地讨论了实现数字四能窗稳谱技术的算法程序, 结合 γ 射线测井仪, 从原理、方法、测井实际需求等方面进行了较深入的分析、研究和实际检测, 提出了较完整的实时稳谱控制流程和程序实现方法, 并在 γ 射线测井系统中得到较好的验证。结果可见, 四能窗稳谱方法较两能窗稳谱方法具有寻峰速度快、稳谱精度高、抗干扰能力强等优点。

关键词 自适应数字滤波, 稳谱, 核测井, PID算法

核测井仪器已广泛采用能谱分析技术来获取多种参数^[1], 但所测能量的范围有严格规定。测井时, 井下仪器要连续测量很长时间, 要适应在井下测量井段从几百m到几km、环境温度差超过100℃, 并且始终处于动态测量过程中, 这就要求测量系统有很好的稳定性。但是由于探测器本身及其高压的不稳定、放大器的不稳定、ADC的零点和变换系数的不稳定等原因, 必须采用专门的稳谱技术以保证系统能量刻度曲线的稳定性。

采用外加精密脉冲作为参考信号时, 不能消除探测器的漂移, 而用稳谱源的特征峰作为参考信号时则可以稳定包括探测器在内的整个测量系统。目前已广泛采用在稳谱源特征峰两边对称地开设四个能窗的稳谱技术。本文即讨论该技术的程序实现方法及其在 γ 射线测井系统中的具体应用。

1 稳谱机制、数字滤波函数及控制算法的选取

1.1 稳谱机制

采用稳谱源的特征峰作为参考信号时, 稳谱源的选取、控制信号电路的设计等是保证稳谱执行的先决条件。但正确合理的处理机制和控制方法则是确保稳谱正确实施的关键因素, 四能窗稳谱技术的优点必须要靠有效的算法程序来实现。

如图1所示, 在稳谱峰的两侧均匀对称地设置四个计数窗口, 这四个能窗的计数率分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 。

当系统处于稳定状态时, 这四道计数率满足特定的关系; 当系统发生漂移时, 必然要破坏这一关系。四能窗稳谱的目的就是利用这四个能窗的计数率变化来及时调整系统的有关参数数值, 使 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 始终向满足特定关系的方向发展, 从而使整个系统对 γ 射线的能

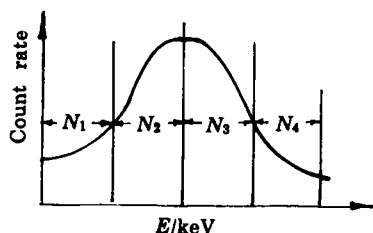


图1 稳谱峰的四能窗

Fig.1 Four energy-windows of stabilized spectrum peak

量刻度保持稳定不变。

在两能窗稳谱方案中(也就是相当于只有 N_2 、 N_3 两道计数),用形状因子 FF 作为控制调节的参考量

$$FF = (N_2 - N_3) / (N_2 + N_3) \quad (1)$$

并且认为,当系统处于稳定状态时,应有 $N_2 = N_3$,因而有 $FF = 0$,稳谱控制的目的是使形状因子 FF 最小。

然而,由于在能量递增方向上等间隔地采样计数 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 时,本底计数率并不是个常数,因此,这个判据是不精确的。显然,由于本底计数随着能量的增加而减小,因而当系统真正处于稳定状态时, N_2 应比 N_3 大些。

一般考虑线性本底近似,则可以利用能窗1、4的计数率值 N_1 和 N_4 得到一个 N_2 的校正值 N_{2cor}

$$N_{2cor} = N_2 - (N_1 - N_4) / 3 \quad (2)$$

经实验检测表明,当 N_2 的校正值与 N_3 相等时,系统才处于准确的稳定状态, $(N_1 - N_4) / 3$ 为应当从 N_2 中扣除的本底效应计数。

这样我们定义一个校正了的形状因子 cFF

$$cFF = \{ [N_2 - (N_1 - N_4) / 3] - N_3 \} / \{ N_2 - (N_1 - N_4) / 3 + N_3 \} \quad (3)$$

在四能窗稳谱控制处理中,用 FF 因子作“粗调”控制参考变量,然后计算 cFF 因子,并用它作精细控制变量,使系统处于稳定状态。由于 cFF 因子较之 FF 因子更加合理精确,这就保证其稳谱精度和准确性都优于两能窗稳谱。

由于 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 受统计涨落影响,必须采取一定的抗干扰措施才能保证系统工作的连续平衡性。因此在稳谱处理过程中,采用了数字滤波和计数率平滑,同时使用跳变输出的延迟。假定 FF 和 cFF 因子用于控制某单一参变量 v (可以是探测器高压、ADC的零点或变换系数等),则其影响关系秩序为

$$\rightarrow v \rightarrow \xi(N_1, N_2, N_3, N_4) \rightarrow \eta(FF, cFF) \rightarrow \delta v \rightarrow$$

跳变输出的延迟就是指某一 v 值在允许作较大的改变之前,必须得到满足条件一定次数的认可,这样不仅可以消除一些随机因素的干扰,而且可以避免系统作频繁而无效的调节,同时又避免了振荡现象的产生。

1.2 数字滤波函数的选取

时间延迟的长短与数字滤波函数的选择密切相关,两者的关系反映在具体的数字滤波函数中。一般情况下最常用且效果较明显的方案是采用低通数字滤波器,对每一道的计数率都进行数字滤波。在时间序列上必须采用延迟输出方式,对应于采样次数序列,选取如下形式的数字滤波器算法

$$Y(n) = K \cdot X(n) + (1 - K) \cdot Y(n-1) \quad (4)$$

式中, $X(n)$ 是第 n 次采样时滤波器的输入; $Y(n-1)$ 及 $Y(n)$ 分别为第 $(n-1)$ 次采样和第 n 次采样时滤波器的输出; K 为滤波系数,一般情况下 $K < 1$ 。

可以证明^[2],这个数字滤波器具有由 R 、 C 组成的模拟低通滤波器的滤波效果,两者之间的参数具有如下关系

$$K = T / \tau \text{ 或 } K = 2\pi f T \quad (5)$$

式中, $\tau = RC$, 为模拟低通滤波的时间常数; f 为截止频率; T 为采样周期。

考虑到在 T 时间内的计数率受统计涨落的影响较大, 因此必须使用时间延迟的扩展, 引入时间延迟扩展系数 K_t , 只要保证在 $(K_t \cdot T)$ 时间内的采样计数率受统计涨落的影响可以忽略不计, 因此在稳谱处理中采用的数字滤波器的函数具体形式是

$$Y(n) = (1 - K) \cdot Y(n-1) + K \cdot [K_t \cdot X(n)] \quad (6)$$

经过实际应用检测, 稳谱源计数率在 400—800 时, 取 $K = 0.5$, 适应性比较广, 这时(6)式变为

$$Y(n) = 0.5 \cdot Y(n-1) + 0.5 \cdot [K_t \cdot X(n)] \quad (7)$$

可以求出^[3]该滤波函数持续作用的极限时间为 $K_t \cdot T$ 。

从(6)式可以看出^[4], 这是一种自适应递归数字滤波函数, 能适应信号的非平稳性, 而我们处理的稳谱能窗的计数信号正是一种非平稳性信号。

1.3 稳谱控制算法的选取

根据上面讨论分析的情况, 结合系统控制理论, 可以看出采用数字PID控制方法来进行稳谱处理是有效可行的。

依照PID控制理论^[5], 我们选取 FF 和 cFF 因子作为输出控制量 v 的自变量, 即输出控制量 v 是 FF 和 cFF 的函数; 输入量 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 又是控制变量 v 的函数。采用增量式积分分离数字PID控制算法, 对于上述单一控制变量的情况, PID控制算法可表示为

$$\begin{aligned} \delta v(FF, cFF) = & K_p \cdot \eta(FF, cFF) + K_i \cdot \sum_{j=1}^k j \cdot \eta(FF, cFF) \\ & + K_d \cdot [\eta(FF_n, cFF_n) - \eta(FF_{n-1}, cFF_{n-1})] \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 角标 n 、 $n-1$ 表示采样次数, 系数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例控制因子、积分控制因子和微分控制因子, $\eta(FF, cFF)$ 是 FF, cFF 的函数。

由于对输入量采取了时间延迟的扩展, 增大比例控制因子 K_p 可以使系统的稳态误差降到很小, 同时考虑到上式中的积分项占用调节时间较长, 而在实际使用中, 发现采用PID控制和只采用PD控制的效果几乎相同。因此, 在稳谱处理过程中, 只采用PD控制算法, 这时(8)式简化为

$$\delta v(FF, cFF) = K_p \cdot \eta(FF, cFF) + K_d \cdot [\eta(FF_n, cFF_n) - \eta(FF_{n-1}, cFF_{n-1})] \quad (9)$$

其中, 比例控制用于减小稳态误差, 提高系统的响应速度; 微分的控制作用与 FF 、 cFF 偏差的变化率有关系, 能够预测偏差, 产生超前的校正作用, 因而可以较好地改善动态性能。

2 数控 γ 射线测井仪中的实时稳谱程序设计

数控 γ 射线测井仪中, 井下电子线路的温度漂移要求做得很小, 系统的主要漂移来自探测器。稳谱处理就是利用稳谱峰左右能窗的平衡分布, 通过对探测器高压的校正来达到稳谱的目的。

在以前的仪器中采用两能窗稳谱处理技术时, 稳谱时间过长, 在测井过程中高压值不稳定, 特别是在一些特殊地层和不规则井况条件下, 高压值易跟踪在伪准平衡点上。采用四能窗稳谱处理技术, 原则上可以解决上述问题, 关键要设计好稳谱处理程序。根据上述理论, 结合具体的硬件控制线路和稳谱源情况, 考虑到测井时对地层分辨率、测速、计算机处理速

理程序要满足系统需求,必然要作些快速近似计算,但这丝毫不影响系统的测量精度。对于静态测量或离线分析处理,则还可以作一些更精确的计算,从而可以更准确地确定各项稳谱参数。

致谢 本工作得到杨少琪、沈天健、黄振光、钟振千等同志的热情帮助和支持,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 庞巨丰. 核电子学与探测技术, 1993; 13(1):40
- 2 U.梯策, Ch.胜克著. 高级电子线路. 北京:人民邮电出版社, 1984:597
- 3 李勇平, 方建国, 杨衍明. 核电子学与探测技术, 1991; 11(1):1
- 4 潘士先编. 谱估计和自适应滤波. 北京:航空航天出版社, 1991:231
- 5 何克忠, 郝忠恕编著. 计算机控制系统分析与设计. 北京:清华大学出版社, 1988:144
- 6 李勇平. 数控 γ 测井系统的实时软件设计. 硕士论文, 中国科学院上海原子核研究所, 1989

Real-time program design of spectrum stabilization for the computerized nuclear logging instruments

Li Yongping Fang Jianguo

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract

A digital spectrum stabilization technique with four energy-windows has been generally used in the modern computerized nuclear logging instruments. The algorithm program applied in this technique is presented. A rather integrated real-time control flow of spectrum stabilization and its implementation by program have been put forward, and verified finely in the gamma-ray logging system. The distinctive advantages of the four energy-windows spectrum-stabilization technique, such as fast speed for identifying peak, high precision and strong anti-interference ability over the two energy-windows one have been discussed.

Key words Adaptive digital filtering, Spectrum stabilization, Nuclear logging, Proportional-Integral-Differential algorithm