



核测井信号数字滤波器的设计与实现

摘要：核测井信号的统计特性，使原始测井数据必须经过一定的数字滤波处理才能应用。为了设计性能良好的数字滤波器，本文简述了加权平均滤波方法、中值滤波方法、以及自适应滤波方法的算法和设计方法，提出了适合核测井信号的混合滤波方案和软硬结合的数字滤波新模式，并给出了混合滤波方案的实现流程。应用实例证明了混合滤波方案的有效性。

关键词：核测井信号；数字滤波方法；设计与实现；混合滤波方案；流程

中图分类号：TN911.72 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-883X(2003)06-0011-06

任晓荣

一、引言

统计特性是核测井信号的共性，因此，可依据测量得到的计数率高低选择适当的数字滤波方法^[1]消除统计误差。有文献认为测井数据是深度驱动的，仪器对地层的响应和噪声信号的频率都将随电缆起放的速度及深度不同而变化，因而滤波方法也需相应的改变^[2]。这些特点要求核测井信号的数字滤波方法具有某种自适应性质，为此本文选择易于实现、实时性好、应用面广的加权平均滤波方法^[3]，具有边缘检测能力的中值滤波方法^[4]，以及性能优越发展前景好的自适应滤波方法^[5]，建立适合核测井信号而又灵活可选的数字滤波系统。通过各种数字滤波方法在功能上的相互补充，对核测井信号进行精细化处理。

二、核测井信号数字滤波器的设计

在设计核测井信号数字滤波器时，以下结论已得到公认：

- 1) 滤波器的阶数越高，高频核统计起伏变化被抑制的越多，低频地层信号表现的越明显。处理后的曲线就越光滑。获取地层真值效果愈好。
- 2) 当滤波器的阶数过高时，也会把薄层的有用信息抑制乃至平滑掉。跟踪地层突变的能力变差。
- 3) 数字滤波算法的复杂度太高将难以实时应用。

因此，一般应根据实际需要确定合理的滤波器阶数。原则是在满足资料要求的前提下，兼顾获取地层真值、跟踪地层突变、实时性三个方面，尽可能减少滤波点数^[2,6]

1、加权平均滤波方法中加权因子的确定方法

石油测井行业采用的加权平均数字滤波器具有非递归的性质，通常可以用公式(1)的数学形式^[6]加以表示：

$$y_i' = \sum_{j=i-\frac{w-1}{2}}^{i+\frac{w+1}{2}} a_{ij} y_j \quad (1)$$

式中, y_i' —经滤波后的在深度点 i 处的估值;

y_j —未经滤波的在深度点 j 处的估值;

j —表示滤波间隔内的深度值, 滤波间隔内的中心点为 i ;

w —该滤波间隔内深度的点数, 即参与加权平均的计数率个数;

a_{ij} —与每一个 y_i 有联系的加权系数。

加权数字滤波器设计与实现的关键是如何确定参与加权平均的计数率个数和各自的加权系数, 滤波效果的好坏也取决于加权系数 a_{ij} 的选取是否合理。

(1) 确定加权系数的基本理论

加权平均数字滤波的思想实质是当前测量点的测量值受前、后测量点测量值的影响, 而影响的程度用权值体现出来。根据这一思想, 当 N_i 的统计涨落符合高斯分布时, 确定 a_{ij} 的计算公式为:

$$a_{ij} = \frac{F_c(Z_{ij})}{\sum_{j=i-\frac{w-1}{2}}^{i+\frac{w+1}{2}} F_c(Z_{ij})} \quad (2)$$

式中, $F_c(Z_{ij})$ — N_i 落在区间 $N_i \pm |N_i - N_j|$ 之外的概率。

$F_c(Z_{ij})$ 实际上代表了 N_j 为真平均值 N_i 的最大可信度, 因此选择 $F_c(Z_{ij})$ 作为滤波器中 j 点对其中心点 i 的加权因子:

$$F_c(Z_{ij}) = 1 - F(Z_{ij}) \quad (3)$$

式中, $F(Z_{ij})$ — N_i 的真平均值 N 落在 $N_i \pm |N_i - N_j|$ 区间内的概率:

$$F(Z_{ij}) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Z_{ij}} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (4)$$

式中, $u = \frac{N_i - N_j}{s}$,

s —变量 N 的均方差

按照数理统计理论, 这样选取加权因子后, 既可合理地滤除测井曲线中统计涨落引起的误差, 又可同时保持对地层变化的响应, 特别是对突变地层具有更好的瞬变响应特征。

(2) 加权系数的计算公式

利用各种窗函数^[3]获取权值得到了广泛应用, 在放射性测井领域常用的是钟形窗和 Hamming 窗。用加权函数代替公式 (2) 的概率函数, 权值的计算公式^[7]如下式所示:

$$g(r) = \frac{w(r)}{\sum_{r=-n}^n w(r)} \quad (5)$$

式中, $g(r)$ —权值;

$w(r)$ —加权函数, 可以为各种窗函数;

r —某一测量点, 取 $[-n, n]$ 之间的数。

2、中值滤波方法的快速算法

中值滤波的快速算法^[4]在测井行业具有很大的应用潜力, 其基本思想是充分利用相邻两次中值滤波窗口内数据的相关性, 在中值滤波中, 除了第一个中值要用排序法求得外, 接着对排序得到的有序序列运用对分查找算法和内插操作, 得到以后的中值, 避免了反复对无序序列排序, 提高了运算效率。

3、自适应滤波方法

目前用自适应滤波方法处理各种时变信号被认为是最有效的方法。因为滤波的参数能够根据输入信号与噪声的变化进行自动调整, 这种自动调整依据实际输出和希望输出的差异用某个自适应控制算法来进行, 从而使恢复误差最小化, 以实现最佳的实时滤波。自适应滤波器一般包括滤波器结构和自适应算法两个部分, 这两部分不同的变化与结合, 可以导出许多种不同形式的自适应滤波器。

自适应滤波器的原理框图^[6]如图 1 所示。

自适应滤波器的 LMS 自适应算法描述如下:

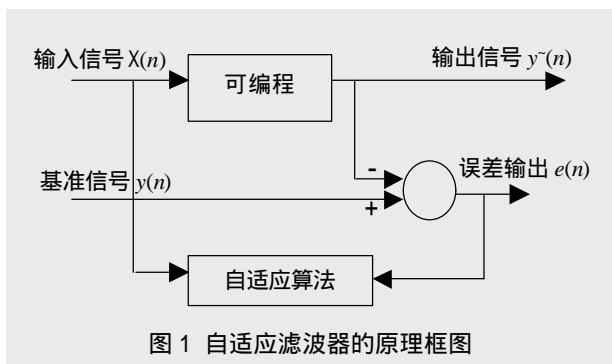
滤波器的输出为:

$$y^-(n) = W_n^T X(n) \quad (6)$$

权系数修正公式为:

$$W_{n+1} = W_n + 2\epsilon(n) X(n) \quad (7)$$

式中, $y^-(n)$ —滤波器的输出;



$e(n)$ —误差输出；

$X(n)$ —输入信号；

W_n —权值；

m —步长；

T —转置。

(1) 固定步长 LMS 自适应算法

文献[8]认为 LMS 算法的研究主要包括算法的收敛性和算法的稳态失调性。对这两方面起着关键作用的是算法步长 m ，步长 m 的大小决定着算法的收敛、收敛速度及收敛性能，并给出了一组步长的计算公式：

$$0 < m < 1/\bar{\epsilon}_m \quad (8)$$

$$0 < m < 1/3\bar{\epsilon}_m \quad (9)$$

$$0 < m < 1/[(1+3/\bar{\epsilon}_m)trR] \quad (10)$$

式中， $\bar{\epsilon}_m$ —输入信号自相关矩阵的最大特征值；

trR —输入信号自相关矩阵的矩阵秩。

(2) 变步长 LMS 自适应算法

文献[5]介绍了变步长 LMS 自适应算法的基本思想，即在权系数递推中采用时变步长，具体做法是：当权系数远离于最佳步长时，使用较大的步长，加速收敛速度；当权系数接近于最佳步长时，使用较小的步长，以获取较小的超量均方误差，从而使整个算法性能较好。经常用均方瞬间误差、输入和误差作为标准来调节步长。

(3) 改进的卡尔曼滤波方法

卡尔曼滤波器是高斯过程最优滤波的一种有效算法，当对像模型足够准确且系统状态和参数不发生突变时，性能较好。但当对像模型存在误差，系统状态和参数发生突变时，这种增长记忆使“过

老”的测量数据对现时的状态估计产生不良影响，甚至可能发散，从而影响滤波器的动态性能。正因为这样，人们一直试图对卡尔曼滤波器进行改进。其基本作法是引入自适应遗忘因子 l ，以限制卡尔曼滤波器的记忆长度，充分利用现时的测量数据，在改善滤波器动态性能的同时，降低计算量和存储量，增强实时性。还可在此基础上引入调整系数 a ，自适应加权因子 d ，自适应调节量 b ，采用次优加权自适应方法，使滤波器的动态性能得到提高。大量的仿真研究表明，这样的滤波器对状态和参数突变具有一定的跟踪能力，并具有良好的鲁棒性。

4、混合滤波方法

也有人提出了混合滤波的思想^[9]，即利用“统计边缘检测算法”将“移动窗递推卡尔曼滤波”与“梯度中值滤波”自适应结合起来，在图像边缘处，为了避免损失边缘信息，仅使用中值滤波，而不用卡尔曼滤波；在无边缘区域，则先用中值滤波，再用卡尔曼滤波，以提高滤波效果。该混合滤波方案应用的关键是确定何时使用中值滤波的判据。

5、核测井信号数字滤波方案设计

在综合分析的基础上，本文作者提出如表 1 所示 7 种混合滤波方案，对核测井信号进行数字滤波处理。

表 1 核测井信号混合滤波方案

| 混合滤波方案编号 | 方案内容 | | 备注 |
|----------|-----------------------|--------|---------|
| | 获取平稳段真值 | 跟踪地层突变 | |
| 方案 1 | 中值滤波 | 无 | 不检测地层边界 |
| 方案 2 | 加权平均滤波 | 无 | 不检测地层边界 |
| 方案 3 | 复合滤波方法 1 中值滤波+加权滤波 | 无 | 不检测地层边界 |
| 方案 4 | 复合滤波方法 2 中值滤波+加权滤波 | 无 | 不检测地层边界 |
| 方案 5 | 一阶递推滤波方法 | 强制输出 | 检测地层边界 |
| 方案 6 | 新的变步长 LMS 自适应算法(NVSS) | 中值滤波 | 检测地层边界 |
| 方案 7 | 改进的卡尔曼滤波方法 | 中值滤波 | 检测地层边界 |

其中复合滤波方法是指把两种或两种以上不同功能的滤波方法组合起来使用,以改善数字滤波效果,具体说明如下:

(1) 复合滤波方法1(中值滤波+加权滤波)

这种复合滤波的思想是先用中值滤波给数据排队,取掉最大值和最小值后,再对剩下的数据进行加权滤波。很明显,这种处理方法具有抗脉冲干扰的能力。

(2) 复合滤波方法2(中值滤波+加权滤波)

这种复合滤波的思想是先用中值滤波给数据排队,再按排队的次序用加权滤波处理数据,确定最终的输出数据。经过这样处理,可以改善加权滤波淹没薄层的缺陷。

(3) 滤波方案

检测到地层边界,问题是此时如何处理才能使地层边界免受前面、后面地层的影响而清晰可见。方法是将检测到的地层边界点直接作为输出,如果紧接着无地层边界,则用一阶递推数字滤波器滤波,因为每次得到一个测量值就可以有一个处理结果;反之仍将检测到的点直接作为输出。

三、核测井信号混合滤波方案的实现方法

数字滤波器设计,其实质是完成了描述数字滤波器的算法设计或线性差分方程设计^[6],在实现以前要尽可能的对线性差分方程进行简化、归并,使实现成本最低。数字滤波器的实现途径包括:硬件实现,软件实现和软硬结合的数字滤波实现模式。本文只对后两种途径进行具体探讨。

1、软硬结合的数字滤波模式

在以往的滤波实践中,模拟滤波主要用硬件实现,数字滤波主要用软件实现。随着实现电路的数字化和集成化、处理信号的离散化,硬件形式的数字滤波器体积小、动态范围大,工作可靠、受外界温度、环境及老化影响小,能实现陡峭的频响,还能对信号实施极其灵活的处理,如 FIR 滤波、IIR 滤波、自适应滤波、FFT 及 DFT。因此,利用 DSP 芯片的优良特性,探索软硬结合的数字滤波模式,对于改善最优数字滤波方法的实时性具有重要意义。

义。

目前,高速实时 DSP 芯片的各种并行处理技术、多种自适应 FIR 滤波器并行实现的方案、基于可编程门阵列(FPGA)的 FIR 滤波器高效实现技术等,都能够满足高速实时信号处理的需要,为实现性能优良的自适应滤波器,提供了技术途径和条件。因此,软硬结合的数字滤波模式实现思路可具体论述如下:

(1) 井下 DSP 滤波器

井下 DSP 滤波器完成信号的预处理,包括奇异值剔除、地层边界检测,并在传输的帧数据中加进一位作为地层边界标识位,以便地面仪器作进一步处理。

(2) 地面 DSP 滤波器

地面 DSP 滤波器实现能够满足实时需要的自适应滤波器,或者并行运行若干种滤波方法,通过对比择优输出,最终的输出则是这些“择优输出”的有机整合。

2、混合滤波方案实现流程

(1) 单一滤波方法人工选取方案

实现流程如图2所示,主要是依据实时监测的计数率选用相应的数字滤波方法^[1]。这一方案的优点是成本低,实时性好。它是对传统滤波方案的集成,给现场应用提供了较大的灵活性,改善了以往

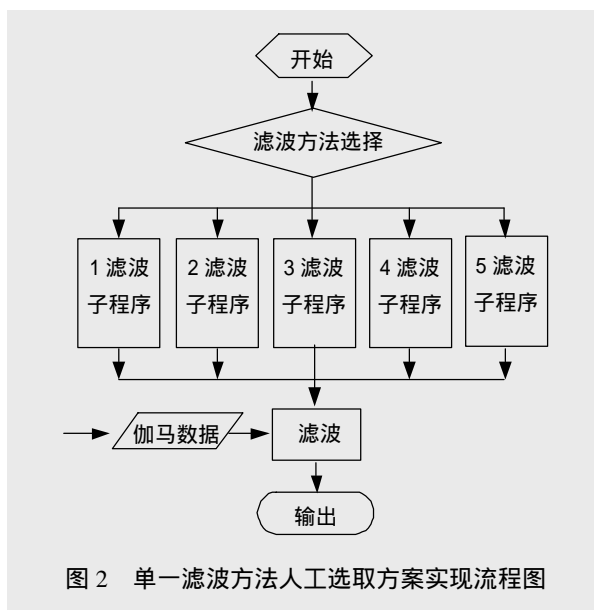


图2 单一滤波方法人工选取方案实现流程图



图3 复合滤波方案实现流程图

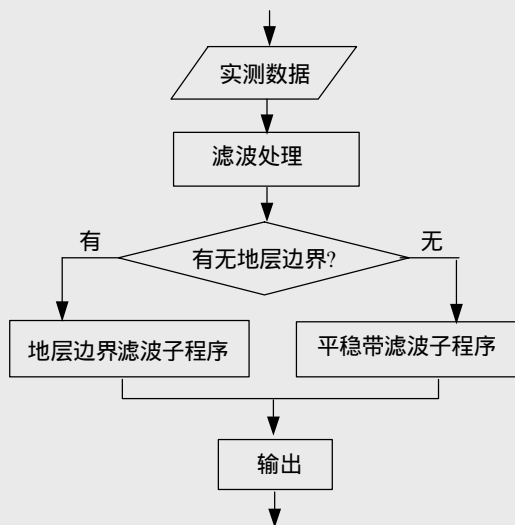


图4 检测到地层边界时的滤波方案实现流程图

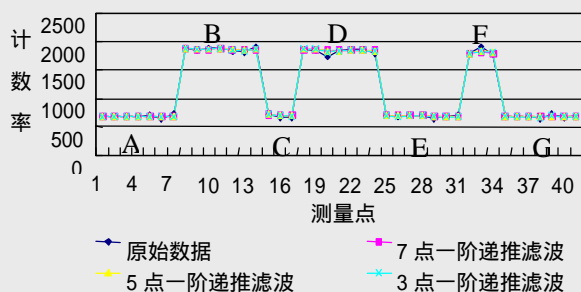


图5 数字滤波方案5处理结果

“以不变应万变”的僵化处理方式。

(2) 复合滤波(中值滤波+加权滤波)

复合滤波是指采用两种或两种以上不同功能的滤波方法,达到相互补充\改善滤波效果的目的。实现流程如图3所示。

(3) 混合滤波方案

实现流程如图4所示,该流程可以实现混合滤波方案5、6、7,实现的关键在于地层边界识别判断的有效性和整个处理过程的实时性。地层边界滤波子程序主要用中值滤波;平稳带滤波子程序主要

用一阶递推滤波方法、新的变步长 LMS 自适应算法(NVSS)改进的卡尔曼滤波方法。

四、应用效果

以滤波方案5为例,结果如图5所示。可见滤波方案5具有良好的地层突变跟踪能力。

滤波前后图5中6段数据的均方根误差比较如表2所示,可以看出滤波方案5的降噪效果非常明显。

表2 滤波方案5的降噪效果

| | 数据段对应的 RMSE | | | | | |
|-------|-------------|------|------|------|------|------|
| | A | B | C | D | E | F |
| 原始数据 | 21 | 36.7 | 33.4 | 48.7 | 22.6 | 74.6 |
| 滤波方案5 | 3.1 | 9.5 | 11.7 | 14.1 | 6.5 | 14.3 |

五、结束语

技术的发展使精细化测井成为可能,特别是进入开发后期的油田更需要各种精细化测井技术,因此展开精细化技术研究具有广阔的市场应用前景。核测井的独特性使其应用越来越广泛,但其信号的统计特性又使其难以进行精细化测井。本文提出的混合滤波方案,有助于对核测井信号进行精细化处理,从而提高核测井的测井效果。文中所设计的数字滤波方案应该是开放的,任何数字滤波方面的新成果,只要适用于核测井信号的数字滤波处理,并满足实时性要求和成本控制原则,都可以成为其中的滤波方案。

参考文献

- [1]任晓荣,王利宁,赵树国.自然伽马测井的数字滤波方法[J].石油仪器,2001,15(6):8~10.
- [2]苏克晓,刘红波,安瑞兴等.数字滤波在测井曲线中的应用[J].国外测井技术,1998,13(5):65~68.
- [3]任晓荣.提高自然伽马测井质量的技术途径[J].石油仪器,2003,17(1):32~35.
- [4]叶晓东,朱兆达.中值滤波的快速算法[J].信号与处理,1997,13(3):270~230.

- [5]蒋明峰, 郑小林, 彭承林. 一种新的变步长 LMS 自适应算法及其在自适应噪声对消中的应用[J]. 信号与处理, 2001, 17(3):282 ~ 286
- [6]任晓荣. 500kbps 遥传自然伽马测井仪研制[D]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002-12.
- [7]雍世和. 用平滑滤波法消除核测井曲线上的统计起伏变化[J]. 测井技术, 1983(4):1 ~ 8.
- [8]邓记才, 史百舟, 裴炳南. LMS 算法收敛步长的精确求解[J]. 信号与处理, 2000, 16(1):50 ~ 53.
- [9]翟正军, 赵荣椿, 郑政谋. 二维卡尔曼中值混合自适应滤波[J]. 信号与处理, 1997, 13(2):119 ~ 125.

Designing and realization of digital filters in nuclear logging signals

Abstract: The raw data should be used after some kind of filtering because of the statistical properties of nuclear logging signals. The algorithm and the designing method of the weighted coefficient filter, media value filter and adaptive filter are formulated in order to design better digital filters. The mixing filter

scheme is presented for nuclear logging signals, and a new mode of filtering to use hardware and software is presented as well. The realizing flow charts of mixing filter scheme are given out. The example verifies the validation of the mixing filter scheme.

Keywords: nuclear logging signal ; digital filter method ; designing and realization ; mixing filter scheme ; Flow chart

作者简介:

任晓荣: 中国石油集团测井有限公司技术中心高级工程师, 长期从事中子测井仪器、伽马测井仪器、生产测井仪器的研发工作。曾完成石油科技中青年创新基金资助项目 1 项, 已发表多篇研究论文。研究领域为核测量方法、信号处理方法、可靠性保障技术。

通信地址: 西安市西影路 53 号 邮编: 710054

电话: 13186067967

E-mail: Rhr9368@pub.xaonline.com

读者服务卡编号 002

(上接 30 页)

参考文献:

- [1]赖庆波. 基于整体优化的状态维修策略与实践[J]. 电力设备, 2000.1
- [2]黄雅罗, 黄树红. 发电设备状态维修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 年
- [3]吕红兵. 变电设备状态分析的信息融合方法[C]. 江苏省电机工程学会论文集, 2001 年第 1 辑
- [4]陈化钢, 张开贤. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998
- [5]刘君华. 现代检测技术与测试系统设计[M]. 陕西: 西安交通大学出版社, 1999
- [6]董费国. 电力变压器故障与诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002

Predictive maintenance technology based on the states monitoring and diagnosing center

Abstract: Monitoring and diagnosing technology of electric power equipment states is analyzed. The composing outline of the states monitoring and diagnosing center is put forward. The working thought of predictive maintenance is draw out and the evaluating work-model of the transformer states is proposed based on monitoring and diagnosing center .

Keywords : electric power equipment; states monitoring; diagnosing technology; predictive maintenance

作者简介:

徐德凤: 工程师, 工学学士, 工商管理硕士, 主要从事变电检修管理、工程管理及设计规划工作。

电话: 0516-3962226, 13852470940

Email: xdf_163.com@263.net

读者服务卡编号 005