

# 随钻测斜仪中传感器信号处理技术研究

张玉波<sup>1</sup>, 孟耀华<sup>2</sup>, 魏春明<sup>3</sup>, 信秋礼<sup>4</sup>

(1. 大庆石油学院, 黑龙江 大庆 163318 2. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319

3. 大港油田集团定向井公司, 天津 大港区 300270 4. 大庆采油四厂三矿测试队, 黑龙江 大庆 163511)

**摘要:** 传感器信号处理的好坏会直接影响随钻测斜仪的测量精度和井眼控制水平. 通过选取适当的拟合函数构造电路对传感器的非线性信号进行处理, 实现其线性化; 从测斜仪的原理出发, 采用误差补偿算法和数字滤波技术减少随钻测斜仪的测量误差. 确保随钻测斜仪的井斜角的误差  $\leq \pm 0.1^\circ$ , 方位角的误差  $\leq \pm 1^\circ$ , 满足高精度随钻测斜仪的设计要求.

**关键词:** 随钻测斜仪; 实时测量; 信号处理

**中图分类号:** TP202 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)02-0072-04

## Research on Signal Processing Technique of Sensors in MWD

ZHANG Yu-bo<sup>1</sup>, MENG Yao-hua<sup>2</sup>, WEI Chun-ming<sup>3</sup>, XIN Qiu-li<sup>4</sup>

(1. Daqing Petroleum Institute, Daqing Heilongjiang 163318, China 2. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing

Heilongjiang 163319, China 3. Dagang Directional Drilling Company, Tianjin 300270, China 4. No. 3 Mine Test Team,

No. 4 Oil Producing Factory, Daqing Heilongjiang 163511, China)

**Abstract** The precision of sensors in MWD and the control of hole trajectory are influenced directly by the quality of signal processing. Nonlinear signals of sensors are processed by choosing appropriate fitting functions and constructing circuit to make it linear. Error compensation algorithm and digital filtering technique are adopted to reduce measurement error departed from principle of MWD. The method makes sure that the NC error is lower  $\pm 0.1^\circ$  and the Az error is lower  $\pm 1^\circ$  in MWD, which meet the requirements of designing high-accuracy MWD.

**Key words** MWD, real-time, signal processing

## 0 引言

目前国内各油田使用的高精度随钻测斜系统大多是从国外引进的, 价格昂贵, 生产周期长, 维修不便<sup>[1]</sup>. 针对国内各大油田现场的实际情况, 研制高精度随钻测斜仪的国产化迫在眉睫, 对传感器信号处理的好坏会直接影响整个随钻测斜仪后继系统的工作状态及井眼轨迹控制的精度和水平. 对传感器来说, 输出信号是非线性的, 这势必难以保证系统的精度与准确度, 有时甚至不得不为了提高仪器和系统的精度, 扩大其使用范围和提高系统的性价比. 本文通过对传感器输出信号进行线性化处理与非线性补偿, 可以实现随钻测斜仪的井斜角的最大误差  $\leq \pm 0.1^\circ$ ; 方位角的最大误差  $\leq \pm 1^\circ$ .

## 1 随钻测斜仪的测量参数

定向钻井过程中, 为了能有效控制井眼轨迹, 必须对井斜、方位、工具面等参数有精确的测量. 随钻测斜仪传感器的输出数据要转化为钻井工程技术人员需要的角度参数, 必须经过坐标变换, 变换后的参数形式才为井斜、方位、重力工具面和磁性工具面<sup>[2]</sup>. 具体定义如下:

收稿日期: 2009-12-04 基金项目: 黑龙江省科技攻关项目 (GZ07A102).

第一作者简介: 张玉波 (1982-), 女, 硕士, 助教. 主要研究方向: 单片机及传感器技术. E-mail: zyb666@126.com

1) 井斜角  $\beta$  井眼中心线与垂线之间的夹角如图 1 所示, 垂直方向井斜角是  $0^\circ$ , 水平方向井斜角是  $90^\circ$ . 井斜角从  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$ , 乃至  $180^\circ$ , 它的范围在  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  之间.

2) 方位角  $\alpha$  地球磁北方向和井眼水平投影方向的夹角, 如图 1 所示. 磁北方向和真北方向不同, 并且各地区的磁偏角也不是一样. 方位角在  $0^\circ$  到  $360^\circ$  之间变化. 当井斜是  $0^\circ$  时, 方位角也就无法确定.

3) 重力工具面也叫高边工具面 (GTF)  $\gamma$ . 是俯视井眼方向仪器斜口朝向相对于井眼高边顺时针方向旋转的角度. 高边工具面角 (GTF) 在  $0^\circ$  到  $360^\circ$  之间变化, 当井斜为  $0^\circ$  时, 高边工具面角不确定.

4) 磁性工具面角. 是俯视井眼方向仪器斜口朝向与磁北方向之间的夹角. 磁性工具面角 (MTF) 在  $0^\circ$  到  $360^\circ$  之间变化. 当井眼轴线方向恰好在地球的极点, 磁工具面角也就无法测出.

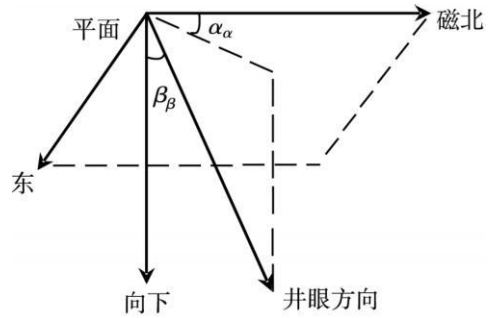


图1 传感器参数方向示意图  
Fig.1 The direction diagram of sensor

## 2 随钻测斜仪的误差分析及补偿

随钻测斜仪的测量误差主要包括传感器 (加速度计和磁通门) 本身的误差, 传感器在探管坐标系上的安装误差, 以及后续信号处理与传输电子线路的误差等<sup>[3]</sup>. 其中, 安装误差主要由传感器本身的敏感轴与壳体之间的失调角、探管结构件的加工误差以及传感器在探管上的安装误差等组成. 由于机械加工和装配水平的限制, 各个传感器敏感轴和探管壳体坐标轴之间总存在一定的失调角, 要进一步提高测斜仪的精度, 需要对安装误差进行补偿.

本系统采用高性能微处理器和 A/D 变换器芯片, 在程序控制下完成数据采集、存储和读取, 减少人工参与, 其精度主要取决于 A/D 的位数, 故处理误差可以控制在很低水平. 从测斜仪的原理出发, 采用误差补偿算法和数字滤波技术可以减少随钻测斜仪的测量误差<sup>[2]</sup>.

### 2.1 传感器的误差补偿算法

传感器输出常带有一定的非线性信号, 当无法用线性化处理的方法来消除非线性误差时, 为保证系统测试的精度, 应对输出信号进行非线性补偿. 通过选取适当的拟合函数, 并把能实现拟合函数关系的电路作为传感器信号处理电路的一部分, 则在补偿范围内, 传感器的非线性可基本线性化. 对所选择的拟合函数的要求是: 能将剩余的误差限制在要求的范围内, 且对于输入信号是单值性的. 一般应采用连续函数来做拟合函数, 虽然要进行较多的数学运算, 但其误差函数是平滑、连续的, 故结果易于观测分析.

假定以  $X_p$  轴为基准, 令  $Y_p$  轴与  $X_p$  轴不正交角为  $w_{xy}$ ,  $Y_p$  轴与  $Z_p$  轴的不正交角为  $w_{yz}$ ,  $Z_p$  轴与  $X_p$  轴的不正交角为  $w_{xz}$ . 考虑到  $w_{xy}, w_{yz}, w_{xz}$  均为小角度, 则可得出不正交角校正关系为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -w_{xy} & 1 & 0 \\ w_{xz} & -w_{yz} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $X', Y', Z'$  为校正后的仪器测量值;  $X_p, Y_p, Z_p$  表示  $G_{xp}, G_{yp}, G_{zp}$  或  $H_{xp}, H_{yp}, H_{zp}$ .

进行变换位置的  $N$  次测量, 由:

$$g = \sqrt{G_{xp}^2 + G_{yp}^2 + G_{zp}^2} \quad (2)$$

$$H = \sqrt{H_{xp}^2 + H_{yp}^2 + H_{zp}^2} \quad (3)$$

得:

$$D_i = \sqrt{X_{pi}'^2 + Y_{pi}'^2 + Z_{pi}'^2} \quad (D_i = g_i \text{ 或 } D_i = H_i, i = 1, 2, \dots, N)$$

若传感器敏感轴正交, 则  $D_1 = D_2 = \dots = D_N$ . 由于不正交使  $D_i$  不相等, 按 (1) 式进行不正交校正, 使

$$D_i' = \sqrt{X_{pi}'^2 + Y_{pi}'^2 + Z_{pi}'^2} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \text{ 均相等.}$$

取  $DP = \sqrt{\sum D_i'^2 / N}$  建立目标函数:

$$Q_1(w_{xy}, w_{yz}, w_{zx}) = \sum (D_i' - DP)^2 N \tag{4}$$

通过多变量函数寻优方法变量轮换法优选出  $w_{xy}, w_{yz}, w_{zx}$  使  $Q_1$  最小.

如果设敏感轴与理想的仪器坐标系不重合角为  $\alpha', \beta', \gamma'$ , 由于  $\alpha', \beta', \gamma'$  为小角度, 则由空间坐标变换, 可以得出:

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha' & \beta' \\ \alpha' & 1 & \gamma' \\ -\beta' & \gamma' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:  $X'', Y'', Z''$  为不重合角校正和正交角校正后的仪器测量值.

进行不同倾斜参数的  $N$  次测量, 设给定倾斜参数为  $\lambda_i$  (可以是井斜角或磁方位角), 建立目标函数:

$$Q_2(\alpha', \beta', \gamma') = \sum (\lambda_i - \lambda_i')^2 N \tag{6}$$

用多变量函数寻优方法单纯形加速法<sup>[4]</sup>使  $Q_2$  最小, 确定  $\alpha', \beta', \gamma'$ .

求得  $w_{xy}, w_{yz}, w_{zx}, \alpha', \beta', \gamma'$  后, 即可由 (1) 式、(5) 式实现正交和不重合误差校正.

### 2.2 实时数字滤波器的设计

数字滤波技术主要有限幅滤波, 其基本思想是将 2 次相邻采样数据之差与被测数据的允许偏差进行比较, 若小于则录用本次测量结果, 若大于则舍去被测量结果. 除上述方法外, 还有算术平均滤波、中值滤波和加权滤波, 从原理上讲均具有一定的可行性, 但实际使用效果都不够理想. 使用限幅滤波法效果较好, 尤其对尖峰脉冲达到很好的滤波效果, 但容易出现毛刺, 对于周期性干扰的消除不是很好. 通过大量的实验验证, 采用限幅滤波和低通滤波相结合的方法效果比较理想.

根据大港油田的实际情况, 本文设计了基于窗函数法的实时数字低通滤波器, 结合限幅滤波可以达到很好的滤波效果.

根据现场的参数可知, 信号采集时间间隔为 50ms, 由此可得采样频率为 20Hz 另外, 根据数据信号的中心频率  $f_0$  (可取 0.5 ~ 0.7), 过渡带宽系数  $C_t$  (可取 0.2 ~ 0.8), 以及  $n$  (可取 0.5 ~ 0.7): 通带边频  $f_p = (1+n) \times f_0$ , 通带截止频率  $w_p = f_p \times 2 \times p_i / 20$ , 阻带边频  $f_s = f_p \times (1+C_t)$ , 阻带截止频率  $w_s = f_s \times 2 \times p_i / 20$ , 过渡带宽  $bandwidth = w_s - w_p$ .

为了得到平坦的通带幅度响应和较小的阻带波纹, 在选用不同形状的窗函数时, 根据现场阻带衰减 > 50dB 以及阶数的要求, 通过实际编程比较, 选择海明窗.

将所设计的 FR 低通滤波器结合限幅滤波应用到随钻测斜仪, 对所采集的理想信号进行实时滤波, 得到的滤波效果如图 2 图 3 所示.

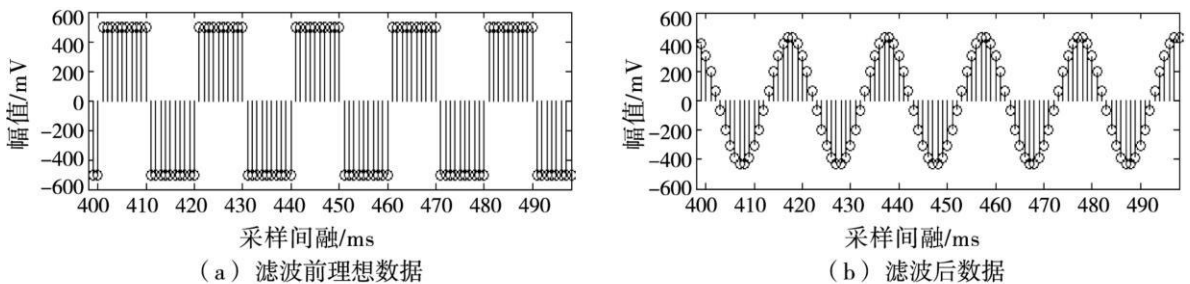


图2 理想数据的滤波前后效果比较

Fig.2 The comparison between ideal data before and after filter

在图 2 中, 输入的数据为理想数据, 当参数  $n = 0.5, f_0 = 0.5, C_t = 0.8$  选取 hamming 窗时, 结果如图 (图 2(a) 为理想数据, 图 2(b) 为滤波后结果). 由图可以看出, 滤波的效果和理论分析完全一致, 证实了设计的滤波器的合理性.

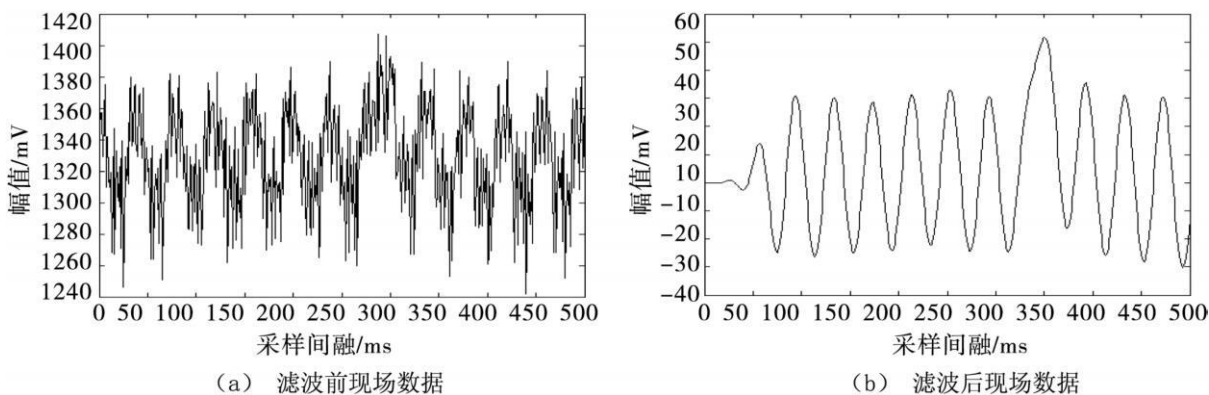


图3 滤波前后现场数据  
Fig.3 The virtual data before and after filter

在图 3(a)中,输入的数据为现场采集的实际信号,为静态信号(直流信号)、高频干扰信号、数据信号(低频交流信号)的叠加。滤波后的数据如图 3(b)所示。

由实验室仿真和现场测试结果可以看出,结合低通滤波器及限幅滤波可滤除频率很低的低频干扰,计算简便,易于实现,具有较强的通用性,具有很高的设计精度,编程方便,并且延迟较小,利于实时应用。

### 3 实验结果分析

在所有的测量参数中,最重要的测量参数是井斜和方位,利用标准测量架进行检测,测得的数据结果如表 1 所示。

表 1 补偿前后井斜、方位结果比较(单位:度)

Tab 1 The comparison between  $INC$ ,  $Az$  before and after compensation (unit degree)

高边	理论 $Az$	补偿前 $Az$	补偿后 $Az$	理论 $INC$	补偿前 $INC$	补偿后 $INC$
0	0	2 35	0 31	10	8 97	9 93
90	45	46 08	45 64	20	21 26	20 03
180	90	89 1	90 16	30	32 56	30 08
270	135	134 07	134 82	40	39 31	39 95
0	180	179 0	179 5	60	60 25	60 04
90	225	224 3	225 34	90	89 87	90 07
180	270	270 25	270 31	120	120 40	120 01
270	315	314 6	315 00	140	140 27	139 96

### 4 结 论

通过实验数据表明,利用本文所采用的补偿算法及所设计的滤波器进行处理后,效果比较理想,误差较小,测量精度满足现场实际的测量要求,达到了本文提出的精度指标:井斜误差  $\Delta INC \leq \pm 0.1^\circ$ ;方位误差  $\Delta Az \leq \pm 1.0^\circ$ 。

#### 参考文献:

[1] 时鹏程. 随钻测井技术在我国石油勘探开发中的应用 [J]. 测井技术, 2002, 26(6): 441-445  
 [2] MG Lee. Single chip' adaptation Styles in Testing Field [J]. Computer and Education, 2001, 36(2): 167-196  
 [3] 刘匡晓. 随钻测斜系统的数学模型分析及应用 [J]. 石油仪器, 1996, 10(2): 37-39.  
 [4] 雍超. 传感器非线性补偿结构的设计 [J]. 机械研究与应用, 2003, 16(4): 42-44  
 [5] 程佩清. 数字信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003, 344-358