

文章编号:1673-5005(2012)03-0093-05

捷联式旋转导向井斜方位动态解算方法

薛启龙¹, 王瑞和¹, 孙 峰^{1,2}, 韩来聚², 倪红坚¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 胜利油田 钻井工艺研究院, 山东 东营 257000)

摘要:针对捷联式垂直钻井现场试验,对测量系统井下存储数据进行回放分析,提出捷联式旋转导向井斜方位动态解算方法,即在钻柱不旋转的情况下同时采用三轴实时滤波信号计算井斜方位并存储滤波后的 x, y 轴信号,在钻柱旋转的情况下采用滤波后的实时 z 轴信号,不旋转情况下采用存储的 x, y 轴信号进行计算。将井下钻具的黏滑状态也看作是一种不旋转的“静止”状态,提出利用井下测量数据实时判断钻柱旋转状态的方法,给出井斜方位角解算公式以及动态解算方法流程,并在 Matlab 软件中编制程序进行仿真验证。结果表明:钻柱旋转过程中的振动是引起井斜方位测量误差的主要原因;所提出的动态测量算法能够有效提高测量精度,减少钻柱振动对井斜方位解算结果的影响。

关键词: 钻井; 旋转导向; 动态解算; 黏滑; 加速度计; 磁通门; 捷联式

中图分类号: TE 21

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.015

Dynamic solution approach to inclination and azimuth of strap-down rotary steerable system

XUE Qi-long¹, WANG Rui-he¹, SUN Feng^{1,2}, HAN Lai-ju², NI Hong-jian¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

Abstract: According to strap-down vertical drilling field test, the playback analysis on underground storage of the measurement system was carried out. A dynamic resolution approach to inclination and azimuth of strap-down rotary steerable system was proposed, that is, with non rotating string, filtered real time signals on three-axis was all used for calculation, at the same time, filtered signals on x -axis, y -axis were stored. On the condition of rotation string, real time filtered signals on z -axis and stored signals of x -axis, y -axis with non-rotating string were adopted. In addition, stick-slip state of the downhole drilling tools was seen as a non-rotating "stationary" state. Real-time judgement method of string rotation state based on downhole survey data was proposed, and solution equation and dynamic solution process of deviation azimuth were given. And simulation in Matlab was done. The results show that the drill string vibration caused by rotation is the main reason for measurement error of deviation azimuth. The recommended dynamic survey approach could effectively enhance measurement precision, and deduce the effect of vibration on resolving results.

Key words: drillings; rotary steerable; dynamic resolution; stick-slip; accelerometers; flux gate; strap-down

旋转导向钻井技术发展至今已形成十余种可商业化应用的工具^[1-7]。在钻柱旋转的方式下测量井下工具空间姿态是其技术难点之一,和普通随钻测量(MWD)仪器静态测量方法^[8-9]不同,旋转导向系统需要在底部钻具动态旋转的情况下实时测量井斜和方位,然而井下钻具的振动严重影响了传感器的

测量精度,Aboelmagd 等^[10]采用加速度计和光纤陀螺实现了井下钻具的连续测量,采用室内试验的方式研究了钻井工具的冲击振动对测量传感器的影响,并提出了相应的滤波算法。刘白雁等^[11]初步研究了井斜动态测量问题,并进行了简单的试验分析。

收稿日期:2012-02-28

基金项目:国家“863”计划项目(2009AA093501);中石化“十条龙”科技攻关项目(JP11006);中央高校基本科研业务费专项课题(11CX06024A)

作者简介:薛启龙(1983-),男(汉族),甘肃静宁人,博士研究生,主要从事自动垂直钻井以及旋转导向系统的测控技术研究。

乐识非等^[12]讨论了陀螺罗盘与加速度计组合测量工具面角的校正问题。胜利油田钻井研发的捷联式垂直钻井系统采用的捷联式算法适用于小角度倾斜动态旋转条件下的井斜、方位及工具面角的动态测量,现已成功应用于多口试验井^[13]。笔者通过对捷联式垂直钻井系统井下数据的回放分析,设计一种新的基于加速度计和磁通门传感器的井斜方位动态解算方法,并进行仿真分析。

1 测量系统安装结构及井下数据回放

在钻柱旋转的同时动态测量井斜和方位主要有两条途径:一是在钻铤内部建立一种伺服滚动稳定平台,使测量传感器不随钻具旋转,而是按一定的规律运动或保持静止;二是将测量传感器同钻具“捷联”在一起,跟随钻柱一起旋转,采用特定的“捷联式”算法实时解算底部钻具的空间姿态。这里的“捷联”就是“捆绑”的意思,意指测量传感器同测量本体联接在一起,具有相同的运动状态。相对来说第二种方案结构设计简单,而且可以借鉴已经成功应用于航空航天领域的“捷联式”算法,成为旋转导向底部钻具空间姿态动态测量技术的重点发展方向。

图1所示为胜利油田钻井工艺研究院研发的捷联式垂直钻井系统现场试验场景和测量原理简图。通过在钻柱中心安装三轴加速度计和三轴磁通门来完成对井斜和方位的测量,测量短节和钻柱捷联在一起,跟随钻柱等速旋转,测量系统通过一定的频率采样传感器数据,经DSP芯片进行实时处理解算。在试验过程中,井下测控系统还实时记录各个传感

器的测量值并存储在井下存储器内,以备试验完毕后进行分析。本文中采用某一井场的现场试验数据进行数据回放处理分析,工作时间约为53.26 h,进尺282 m。

抽取回放数据中的9万个采样点,相当于钻进0.25 h。图2所示为加速度计和磁通门的回放数据,图2(a)中波动较小的部分为钻柱不旋转的状态下所测加速度值,可以看出加速度值在 $\pm 1g$ (g 为重力加速度)范围内变化,然而当进入旋转钻进状态后,测量值在 $\pm 7g$ 之间,而 $\pm 7g$ 为加速度计传感器的最大量程,可见井下钻柱在钻进的过程中振动剧烈,振动加速度淹没了需要测量的重力加速度值。由图2(b)可以看出,磁通量测量值在钻柱不旋转的情况下噪声较小,钻柱旋转的情况下呈正弦规律变化,受井下振动冲击的影响较小。 y 轴测量值的变化规律与 x 轴类似。

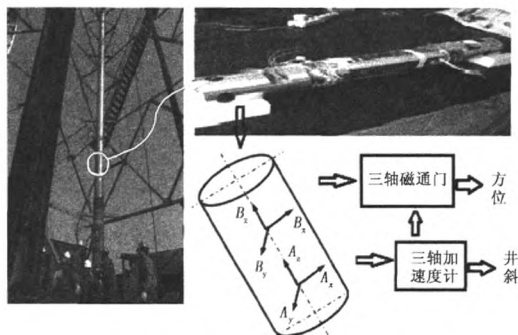


图1 捷联式垂钻现场试验场景和测量系统
Fig.1 Strap down vertical drilling field test and measurement system

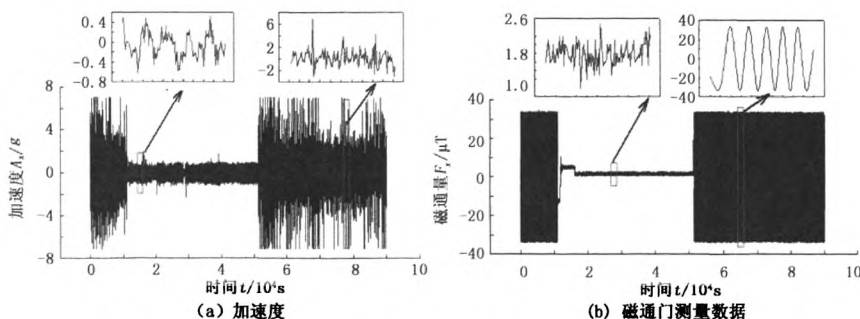


图2 x 轴加速度计和磁通门时序图

Fig.2 Accelerometers and fluxgate timing domain in x axis

在旋转导向钻井过程中,底部钻具有横振、纵振、涡动、黏滑等多种运动形式,相对来说,水平方向 x 、 y 轴振动幅度较大, z 轴主要受纵振影响,幅度较小。 z 轴方向的加速度、磁通门测量时序图如图3

所示,区域A以内为钻柱不旋转状态。可以看出 z 轴磁通(F_z)基本不受钻柱旋转的影响,变化一直保持在 $2 \mu\text{T}$ 左右, z 轴加速度(A_z)略微受到旋转时振动的影响,但相对于 x 、 y 轴来说,其影响幅度已经大

大减小。

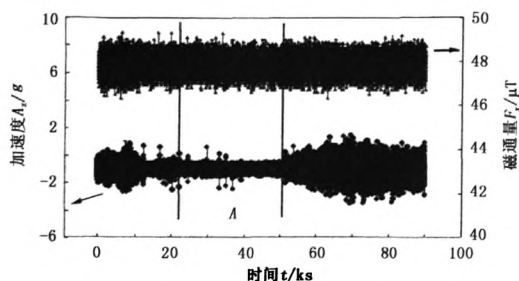


图3 z轴加速度计和磁通门时序图

Fig.3 Accelerometers and fluxgate timing domain in z axis

井下钻具时刻处于随机非线性运动状态,在纵振、横振、涡动、黏滑振动等众多运动状态的联合作用下,表现出复杂的动力学特性。加速度计受到这种工作环境的影响,会产生很大的动态误差,以致最终的空间姿态测量结果严重偏离真实值。

2 动态解算井斜方位算法

欲在钻柱旋转的情况下动态测量井斜和方位,就必须减少井下振动对测量信号的影响,可由于井下钻具运动情况复杂,研究相应的滤波算法相当困难,由于z轴信号受到影响相对较小,可以考虑在钻柱旋转的情况下只使用z轴信号进行计算,x、y轴信号使用不旋转情况下的存储值代替。在钻柱旋转状态的判断上,可以将井下钻具的黏滑状态也看作是一种不旋转的静止状态,在黏滑的瞬间捕捉测量信号并计算,动态测量算法流程如图4所示。

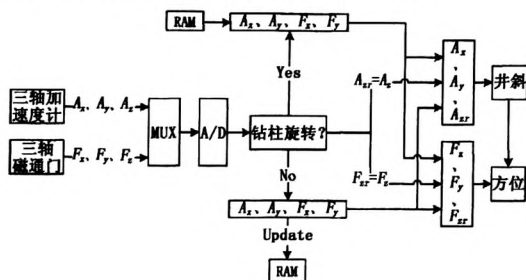


图4 动态测量算法流程

Fig.4 Flow chart of dynamic measurement algorithm

2.1 井斜方位角的解算

对于井斜方位角的解算^[14],通常是基于如图5所示的三轴坐标系,如图5中正东(E)、正北(N)、和正下方(D)组成了一个笛卡尔坐标系,井眼或钻井工具的方向表示矢量Z,井斜角I表示为矢量Z和矢量D之间的夹角。

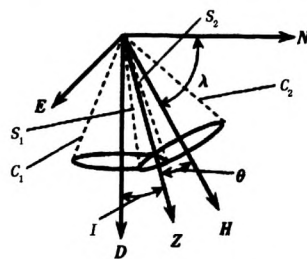


图5 井斜方位测量原理

Fig.5 Inclination and azimuth measurement principle

在没有确定方位角之前,井斜角I的方向是不确定的,将有可能落在如图5所示C₁锥面的任意一条母线上,同理,磁场方向H和井眼方向Z也存在夹角θ,θ的测量也是不确定的,将有可能落在如图5所示C₂锥面的任意一条母线上,两个锥面C₁和C₂产生交线S₁和S₂。

将井下传感器所测量的三轴加速度分别表示为A_x、A_y、A_z,三轴磁通分别表示为F_x、F_y、F_z,则

$$A_0 = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}, \quad (1)$$

$$F_0 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (2)$$

其中A_x、A_y、F_x、F_y为钻柱不旋转时存储的值,A_z、F_z为工作过程中的动态实时取值,则井斜角I和角θ、λ分别由下式确定:

$$\cos I = A_z / A_0, \quad (3)$$

$$\cos \theta = F_z / F_0, \quad (4)$$

$$\sin \lambda = \frac{A_x F_x + A_y F_y + A_z F_z}{A_0 F_0}. \quad (5)$$

联合式(3)~(5),确定方位角A为

$$A = \arccos \frac{\cos \theta - \cos I \sin \lambda}{\sin I \cos \lambda}. \quad (6)$$

从式(6)可以看出:当井眼完全垂直时,井斜角I=0°,sin I=0,方位角无法计算;当井眼处于东西方向时,S₁和S₂在水平面的投影重合在一条直线上,方位角为90°,此时cos λ≠0,方位角依然可以采用式(6)计算。

2.2 底部钻具旋转状态判断

如何准确判断底部钻具的旋转状态是该动态解算方法的关键。由于磁通门传感器受到井下振动的影响较小,将磁通门的测量数据作为判断旋转状态的依据,由于测量频率较高,选择100个测量点为一个数据处理窗口,判断旋转状态。

截取磁通门F_x的1000个测量数据点,将横坐标下移使所有测量数据均为正值,如图6所示。

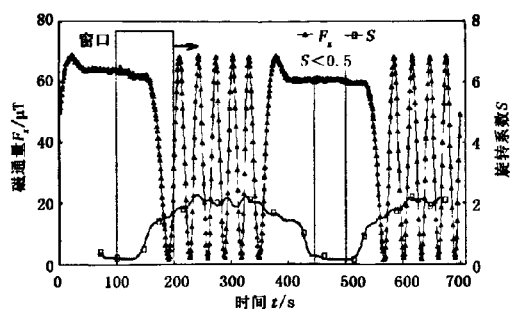


图6 旋转状态判断方法

Fig. 6 Determining method of rotary state

底部钻具处于黏滑、旋转状态下,其状态判断可以由旋转系数 S 来完成, S 的计算式为

$$S = \frac{F_{x_{\max}} - F_{x_{\min}}}{F_{x_{\text{ave}}}} \quad (7)$$

式中, $F_{x_{\max}}$ 、 $F_{x_{\min}}$ 、 $F_{x_{\text{ave}}}$ 分别表示在数据窗口范围内 F_x 的最大值、最小值和平均值。可以看出,当钻具处于黏滑(准静态)状态时, $S \leq 0.5$ 。将数据处理窗口从左至右移动,依次计算 S 值,可以得到 S 值的变化曲线(图6)。可以看出,只要判断 S 是否小于 0.5,就可以有效判断钻具是否处于静止状态,这里的静止

状态包括了黏滑时刻的准静态。钻具在完全旋转状态下, S 值近似等于 2。

2.3 测量数据滤波处理

与模拟滤波器相比,数字滤波器具有成本低、性能稳定和易于控制等优点。FIR 滤波器是较为常用的一种数字滤波器,具有线性的相位延迟,易于硬件实现,适合实时的信号处理^[15]。长度为 m 、输入为 $x(n)$ 、输出为 $y(n)$ 的 FIR 滤波器可用差分方程描述为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{m-1} b_k x(n-k) \quad (8)$$

式中, b_k 为滤波器系数。

滤波器也可用系统函数表征为

$$H(z) = \sum_{k=0}^{m-1} h(k)z^{-k} \quad (9)$$

将其视为变量 z^{-1} 的 $m-1$ 次多项式,该多项式的根构成了滤波器的零点。

在 Matlab 中设计滤波器,图 7 所示为滤波器的幅频特性与相频特性。在解算程序执行过程中,首先对测量数据进行预处理,使用滤波器对测量数据进行滤波,由图 8 对比可以看出,滤波后噪声信号得到明显抑制。

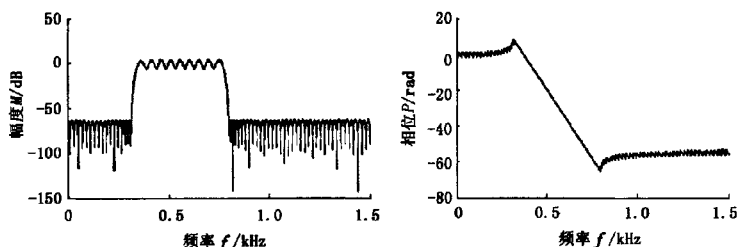


图7 滤波器幅频特性与相频特性

Fig. 7 Filter amplitude-frequency characteristics and phase-frequency characteristics

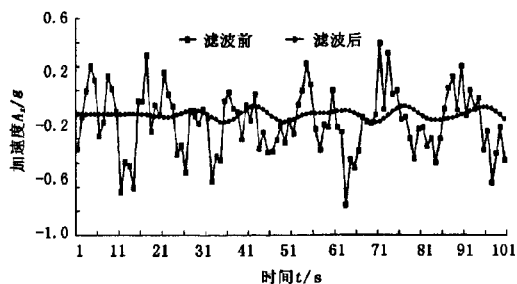


图8 滤波前后对比图

Fig. 8 Comparison chart before and after filter

在钻柱旋转的情况下,对于 x 、 y 轴的测量数据不作处理,每次滤波处理选取历史数据 100 个采样

点,滤波处理后取平均值进行姿态解算。

3 仿真分析

根据图 4 所示动态测量算法流程,井斜、方位角按照式(3)~(6)计算,在 Matlab 中编写仿真程序,选取回放数据分析中的若干数据点,仿真计算后和原有井下试验计算的井斜方位计算结果作对比分析,如图 9 所示。由图 9 可以看出,本文中所提出的动态测量算法能有效抑制井下钻柱振动对测量结果的影响,井斜方位在钻柱旋转状态下的测量结果得到了明显改善。由于选取的仿真数据点较少,在短时间内井斜方位近似保持不变,仿真计算的井斜方位为两条近似平行于 x 轴的直线。

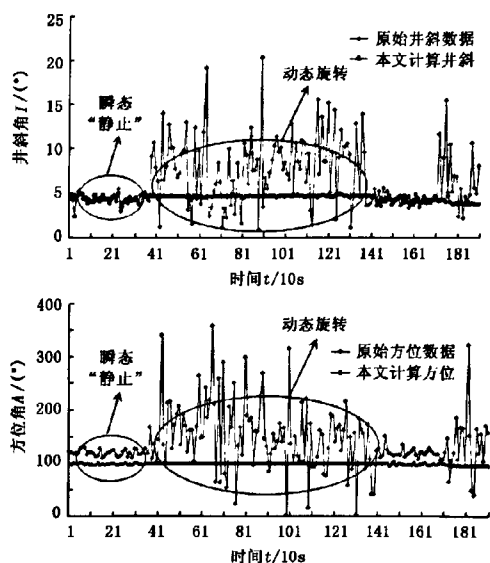


图9 井斜方位动态解算结果与原有
测量数据对比

Fig.9 Contrast inclination and azimuth dynamic
measurement results with original data

4 结 论

(1) 井斜、方位的计算频率为 1 Hz, 完全能够满足捷联式旋转导向钻井系统的现场工程应用。

(2) 捷联式动态解算方法的难点在于底部钻具旋转时, 复杂的井下振动严重影响了 x, y 轴加速度计的测量精度, 相对来说, z 轴和磁通门数据受井下振动影响较小。

(3) 提出的动态解算方法能够有效减小底部钻具振动所带来的测量误差, 为旋转导向钻井的可靠控制提供了保证。但是, 该算法在钻具旋转的情况下只采用了 z 轴信号进行计算, 降低了解算精度, 当钻速较快并且黏滑效果不明显时, 该算法在钻具旋转的时段内将出现较大的解算误差, 此问题还需要在底部钻具运动状态分析以及滤波处理方面做进一步的研究。

参考文献:

- [1] TOMMY Warren. Rotary steerable technology conclusion: implementation issues concern operators [J]. Oil & Gas Journal, 1998, 96(12): 23-24.
- [2] KEVIN McMullin. Rotary steerable technology extends well in difficult geology [J]. Offshore Journal, 1999, 59(12): 11-12.
- [3] TETSUO Yonezawa. Robotic controlled drilling: a new rotary steerable drilling system for the oil and gas industry [R]. SPE 74458, 2002.
- [4] SANDRO Poli, FRANCO Donaco, FRANCO, et al. Advanced tools for advanced wells: rotary closed-loop drilling system-results of prototype field testing [J]. SPE Drilling & Completion, 1998, 13(2): 67-72.
- [5] 张家希. 连续旋转定向钻井系统——AutoTrack RCLS [J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(2): 4-9.
- [6] ZHANG Jia-xi. A novel directional drilling system—AutoTrak RCLS [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(2): 4-9.
- [7] JOHNSTONE John A, GRUENHAGEN Hartmut, INTEQ Baker Hughes, et al. Using rotary closed-loop drilling to increase operation efficiency and reduce operation risk [R]. SPE 71840, 2001.
- [8] STUART Schaaf, DEMOS Pafitis, ERIC Guichemerre, et al. Application of a point the bit rotary steerable system in directional drilling prototype well-bore profiles [R]. SPE 62519, 2000.
- [9] 吕妍红, 万民, 崔中兴. 石油钻井倾斜及方位测量的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(2): 131-133.
- [10] LÜ Yan-hong, WAN Min, CUI Zhong-xing. The research of oil drilling angle test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(2): 131-133.
- [11] XU T, LUO W S, LU H B, et al. Design of underground sonde of a directional drilling locator system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 119(2): 427-432.
- [12] MAHMOUD Eigizawy, ABOELMAGD Nouredin, JACQUES Georgy. Wellbore surveying while drilling based on kalman filtering [J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 3(2): 240-259.
- [13] 刘白雁, 苏义脑, 陈新元, 等. 自动垂直钻井中井斜动态测量理论与实验研究 [J]. 石油学报, 2006, 27(4): 105-109.
- [14] LIU Bai-yan, SU Yi-nao, CHEN Xin-yuan, et al. Theoretical and experimental investigation on dynamic measurements of hole inclination in automatic vertical drilling process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 105-109.
- [15] 乐识非. 陀螺罗盘定向测量中工具面角计算方法探讨 [J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2001, 16(4): 68-71.
- [16] YUE Shi-fei. Discussion on calculation of tool face angle in gyrocompass measuring angle [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2001, 16(4): 68-71.

(下转第 107 页)

- from well logs [R]. SPE 5544, 1975.
- [4] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data; accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. SPE Drilling & Completions, 1995 (2):89-95.
- [5] 樊洪海. 利用声速检测欠压实泥岩异常高压的简易方法与应用[J]. 石油钻探技术, 2001,29(5):9-11.
FAN Hong-hai. A simple pore pressure estimation method for disequilibrium compaction shale formation using sonic data [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001,29(5): 9-11.
- [6] 樊洪海. 利用层速度预测砂泥岩地层孔隙压力单点算法模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002,21(增刊): 2037-2040.
FAN Hong-hai. Single point algorithm for pore pressure prediction of sand-shale formation using seismic interval velocity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(sup):2037-2040.
- [7] 樊洪海. 地层孔隙压力预测检测新方法研究[D]. 北京:石油大学石油工程学院,2001.
FAN Hong-hai. Investigation of new methods for pore pressure prediction and determination [D]. Beijing: School of Petroleum Engineering in University of Petroleum, China, 2001.
- [8] TOSAYA C A. Acoustical properties of clay bearing rocks [D]. American: Stanford University, 1982.
- [9] SWARBRICK R E, OSBORNE M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview [R]. AAPG Memoir, 1998,70:13-34.
- [10] BOWERS G L. Detecting high pressure [J]. The Leading Edge, 2002,21(2):174-177.
- [11] CARSTENS H, DYPVIK H. Abnormal formation pressure and shale porosity [J]. AAPG Bulletin, 1981,65 (2):344-350.
- [12] GRAULS D, CASSIGNOL C. Identification of a zone of fluid pressure-induced fractures from log and seismic data-a case history [J]. First Break, 1993,11(2):59-68.
- [13] HERMANRUD C, WENSAAS L, TEIGE G M G, et al. Shale porosities from well logs on Haltenbanken (off-shore mid-Norway) show no influence of overpressure; abnormal pressure in hydrocarbon environment [R]. AAPG Memoir, 1998,70:65-85.
- [14] BOWERS G L, JOHN Katsube T. The role of shale pore pressure on the sensitivity of wire-line logs to overpressure; pressure regimes in sedimentary basins and their prediction[R]. AAPG Memoir, 1998,76:43-60.
- [15] 马启富, 陈斯忠, 张启明, 等. 超压盆地与油气分布 [M]. 北京:地质出版社,2000.
- [16] 易平, 黄保家, 黄义文, 等. 莺-琼盆地高温超压对有机质热演化的影响[J]. 石油勘探与开发, 2004,31 (1):32-35.
YI Ping, HUANG Bao-jia, HUANG Yi-wen, et al. Influence of high temperature and overpressure on the thermal evolution of organic matter in the Yingqiong Basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31 (1):32-35.

(编辑 李志芬)

(上接第97页)

- [13] 吕官云, 孙峰. 捷联式自动垂直钻井系统并斜方位动态测量算法研究与应用[J]. 测井技术, 2011,35 (1):93-97.
LÜ Guan-yun, SUN Feng. Dynamical measurement algorithm and application of inclination and azimuth in strap-down automatic vertical drilling system[J]. Well Logging Technology, 2011,35(1):93-97.
- [14] DIPERSIO Richard D, COBERN Meriden E. Method for measurement of azimuth of a borehole while drilling: US 4813274[P/OL]. http://www.google.com.hk/patents?id=OKduAAAAEBAJ&printsec=frontcover&dq=4813274&hl=en&sa=X&ei=L21MT7P2KcetiAFw5_1Y&ved=0CDUQ6AEwAA.
- [15] PROAKIS John G, MANOLAKIS Dimitris G. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

(编辑 李志芬)