

文章编号: 0253-2697(2012)04-0692-05

垂直钻井工具测斜仪精确校正理论与实验

邵佩¹ 刘白雁¹ 苏义脑² 张磊²

(1. 武汉科技大学机械自动化学院 湖北武汉 430081; 2. 中国石油集团钻井工程技术研究院 北京 100195)

摘要:针对自动垂直钻井工具因测斜仪(其核心部件为二轴或三轴重力加速度计)的安装误差而导致小井斜测量精度不高的问题,通过建立测斜仪的实际安装坐标系与其理想坐标系之间的映射关系,推导出利用测斜仪的实际输出信号计算真实井斜角的函数关系,从而在理论上实现了对测斜仪的精确校正。对基于二轴重力加速度计的测斜仪提出了只需要获取测斜仪的两个测量轴与其理想坐标系对应轴的夹角参数,即可对测斜仪进行精确校正的工程方法,并借助自行研发的某型号自动垂直钻井原理样机,对相应夹角参数提取及测斜仪的精确校正进行了实验分析。实验结果表明,利用该方法对测斜仪进行校正可保证测斜仪的测量精度不受测斜仪安装误差的影响。

关键词:垂直钻井;井斜测量;测斜仪;重力加速度计;静态测斜;安装误差;精确校正

中图分类号:TE249.5

文献标识码:A

Theoretical and experimental study on precise calibration of the inclinometer in vertical drilling tools

SHAO Pei¹ LIU Baiyan¹ SU Yiniao² ZHANG Lei²

(1. College of Machinery & Automation, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081, China;

2. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China)

Abstract: The automatic vertical drilling tool may have a poor precision problem in small deviation survey due to an installation error of the inclinometer, of which the core component is a gravity accelerometer with two or three axes. Through the establishment of an image correlation between the actual mounting coordinate system of the inclinometer and its ideal coordinate system, we deduced a function to calculate the real angle of inclination by using actual output signals of the inclinometer and theoretically achieved the precision calibration of the inclinometer. As for the inclinometer based on a gravity accelerometer with two axes, we proposed an engineering method for accurate calibration only by obtaining included angle parameters between the two measuring axes of the inclinometer and the corresponding axes of the ideal coordinate system. In addition, corresponding included angle parameters and the precision calibration of the inclinometer were experimentally examined by using the schematic prototype of a certain automatic vertical drilling tool self-developed recently, which showed that the application of this approach to calibrating the inclinometer can ensure the measuring accuracy free from the influence given by installation errors of the inclinometer.

Key words: vertical drilling; deviation survey; inclinometer; gravity accelerometer; static deviation survey; installation error; accurate calibration

自动垂直钻井中井斜控制的精度取决于井斜(尤其是小井斜)的实时、准确测量,井斜的实时测量又分为静态与动态测量两种。由于井斜动态测量难度较大^[1,2],因此目前投入商业运行的各种垂直钻井工具(如Power V、VTK、ZBE等)基本上都采用静态测斜方法,如采用不旋转活动外套或滑动钻进模式^[3],或采用惯性平台等。虽然用于垂直或定向钻井中的测斜仪器有磁性测斜仪、陀螺测斜仪等多种类型^[4,8],但这些

测斜仪中用于测量井斜的部分均为重力加速度计。对于垂直钻井而言,利用一个二轴重力加速度计即可实现井斜的精确测量与控制^[9-13]。虽然当井斜角较小时,由重力加速度计算出的重力工具面角会有较大误差^[14],但对于垂直钻井而言,特别是一些采用依靠式^[15]纠斜方法的垂直钻井,由于导向推力块数量有限(3或4个),因此只需要判断出井斜相对方位落在哪个区域即可^[11,16]。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50574070, No. 51175386)和国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A102)资助。

第一作者:邵佩,女,1986年11月生,2009年获武汉科技大学学士学位,现为武汉科技大学硕士研究生,研究方向为井下控制工程。Email: shaopei1203h@163.com

通讯作者:刘白雁,男,1957年4月生,1990年获西安交通大学博士学位,现为武汉科技大学教授,研究方向为复杂机电液系统的测控理论与技术。Email: wustlby@163.com

井斜测量精度除取决于测斜仪的精度和测量方法外,还受振动、信号干扰、测斜仪的安装质量等诸多因素影响,其中有些已有不少研究报道^[17-18],但测斜仪在钻具上的安装误差对测斜精度影响的研究却不多见。虽然通过提高钻具的制造、装配精度或通过采用惯性平台^[19]实现加速度计自动对中等方法可以保证传感器的安装精度,但笔者希望从理论上探讨测斜仪的安装误差与井斜测量误差之间的关系,以便对一个已存在安装误差的测斜仪通过软件修正来实现井斜的精确测量。

1. 测斜仪安装误差对井斜测量精度的影响

由于二轴重力加速度计对于小井斜更为敏感,因此笔者重点分析基于二轴重力加速度计的测斜仪的安

装误差问题。设测斜仪无安装位置误差的坐标系为 $OXYZ$ (称之为理想坐标系或井眼参考坐标系),此坐标系的 Z 轴与钻具(或井眼)的轴线平行(为便于作图,设 Z 轴的正向朝上,下同),而测斜仪所在的坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ (简称为安装坐标系)则相对于 $OXYZ$ 有某个方向的倾斜,如图 1(a)所示。现假定井眼未发生倾斜,则 $OX_1Y_1Z_1$ 与 $OXYZ$ 的关系可用以下方法得到(旋转方向的规定仅为了作图方便):①以坐标系 $OXYZ$ 的 Y 轴为旋转轴,顺时针旋转 γ ,得到坐标系 $OX'Y'Z'$ (轴 Y 与 Y' 重合),如图 1(b)所示;②以坐标系 $OX'Y'Z'$ 的 X' 轴为旋转轴,顺时针旋转 β ,得到坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ (轴 X_1 与 X' 重合),如图 1(c)所示。图 1(c)中 Z 轴与 Z_1 轴间的夹角 θ 即为由于加速度计的安装误差所导致的伪井斜角(对试验台架而言即为伪倾角)。

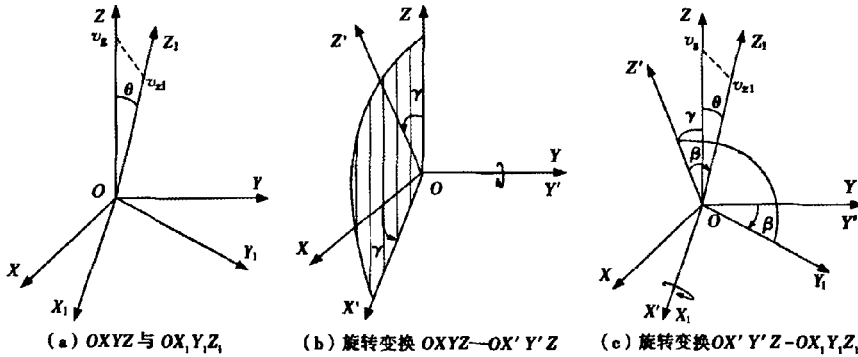


图 1 重力加速度计安装误差图示

Fig. 1 The diagram for installation error of gravity accelerometer

由于 $OX_1Y_1Z_1$ 是 $OXYZ$ 经两次旋转而得到,则有

$$\begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ -\sin\beta\sin\gamma & \cos\beta & -\sin\beta\cos\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\beta & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: v_{x1}, v_{y1}, v_{z1} 和 v_x, v_y, v_z 分别为同一点在坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 和 $OXYZ$ 中各轴的坐标。

则重力矢量在坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 各轴的投影为

$$\begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\gamma \\ -\sin\beta\cos\gamma \\ \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} v_g \quad (2)$$

式中: v_g 为重力矢量在 Z 轴上的投影(图 1 中重力矢量与 Z 轴重合)。

设 $\theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}$ 分别为坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 各轴的倾

角,由重力矢量在各轴上的投影可得

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_{x1} \\ \sin\theta_{y1} \\ \cos(90^\circ - \theta_{z1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\gamma \\ -\sin\beta\cos\gamma \\ \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可知

$$\cos\theta = \cos(90^\circ - \theta_{z1}) = \cos\beta\cos\gamma$$

即

$$\theta = \arccos(\cos\beta\cos\gamma) \quad (4)$$

或

$$\theta = \arcsin \sqrt{\sin^2\theta_{x1} + \sin^2\theta_{y1}} \quad (5)$$

设真实井斜角为 ϕ , 即重力矢量与井眼参考坐标系 Z 轴的夹角为 ϕ , 而由重力加速度计测得的井斜角为 ϕ_1 (以下称实测井斜角或实测倾角), 如图 2 所示。

图 2 中, v_x, v_y, v_z 和 v_{x1}, v_{y1}, v_{z1} 分别为重力矢量在坐标系 $OXYZ, OX_1Y_1Z_1$ 上的投影, α, α_1 分别为坐标系 $OXYZ, OX_1Y_1Z_1$ 上的重力工具面角。设 δ 为由

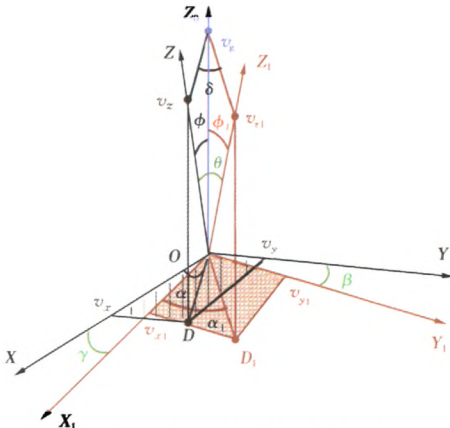


图2 真实井斜角与实测井斜角

Fig. 2 Measured deviation angle and real deviation angle

Z、Z₀ 轴构成的平面与由 Z₁、Z₀ 轴构成的平面的夹角，由图 2 可知，对于不同的井斜方向，即在 0° ≤ δ ≤ 180° 范围内，真实井斜角与实测井斜角存在以下关系

$$|\phi_1 - \theta| \leq \phi \leq \phi_1 + \theta \quad (6)$$

尤其是，当 δ = 90° 时，根据式(3)可得

$$\phi = \arccos \frac{\cos \phi_1}{\cos \beta \cos \gamma} = \arccos \frac{\cos \phi_1}{\cos \theta} \quad (7)$$

由式(7)可知，只有当 β → 0、γ → 0 时，才有 φ ≈ φ₁。设 β = γ = 1° (此时 θ = 1.414°)，φ₁ = 2°，则由式(7)求得真实的井斜角 φ 仅约为 1.414°，实测井斜角误差约为 30%；而如果取式(6)给出的极端情况，真实井斜角的取值范围将为 [0.581°, 3.414°]。由此可知，如不考虑测斜仪的安装误差，则实测的井斜角将会与真实的井斜角有较大差别，这就必将导致垂直钻井的井斜控制精度受到较大程度的影响。

2 真实井斜角与实测井斜角之间的函数关系

文献[20]虽然讨论了测斜仪安装误差的校正问题，但由于难以得到相应的修正系数，因此该文献中提出的校正方法并不适用于垂直钻具。笔者尝试在重力加速度计安装坐标系 OX₁Y₁Z₁ 与井眼坐标系 OXYZ 各轴的夹角(γ, β, θ)已知的前提下，通过已知的测斜仪两个测量轴的输出信号，计算出真实的井斜角。

设 OX₀Y₀Z₀ 为地面参考坐标系，当井眼未发生倾斜时，OX₀Y₀Z₀ 与 OXYZ 重合；当井眼有倾斜且井斜角为 φ 时，如图 2 所示(图 2 中未绘出轴 X₀、Y₀)，则由式(1)可得

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \beta \sin \gamma & \sin \gamma \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \gamma & -\sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{z1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

或写成

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_x \\ \sin \theta_y \\ \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \beta \sin \gamma & \sin \gamma \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \gamma & -\sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_{x1} \\ \sin \theta_{y1} \\ \cos \phi_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可得真实井斜角 φ 与实测井斜角 φ₁ 的关系式为

$$\phi = \arccos(-\sin \gamma \sin \theta_{x1} - \sin \beta \cos \gamma \sin \theta_{y1} + \cos \beta \cos \gamma \cos \phi_1) \quad (10)$$

3 加速度计安装误差信息的确定

测斜仪一旦装配到垂直钻井工具上后，重力加速度计各测量轴与理想坐标系 OXYZ 各轴之间的夹角 θ、β、γ 就已经确定，虽然这些角度信息并不能人为设置，但可通过实验加以确定。

图 2 中，令 φ = 0，即钻杆未发生倾斜或钻具调试平台处于水平状态(井眼参考坐标系 OXYZ 与地面参考坐标系 OX₀Y₀Z₀ 重合，也即 θ_x = θ_y = 0)，由测斜仪两个测量轴的实测输出 v_{x1}、v_{y1}，可计算出此时重力加速度计 X、Y 向测量轴的倾角

$$\theta'_{x1} = \theta_{x1} |_{\phi=0} = \arcsin \frac{v_{x1}}{v_g} |_{\phi=0} \quad (11)$$

$$\theta'_{y1} = \theta_{y1} |_{\phi=0} = \arcsin \frac{v_{y1}}{v_g} |_{\phi=0} \quad (12)$$

由式(2)可知

$$\gamma = -\theta'_{x1} \quad (13)$$

$$\beta = \arcsin \frac{-\sin \theta'_{y1}}{\cos \gamma} \quad (14)$$

也可利用已知的 θ'_{x1}、θ'_{y1} 直接对式(9)进行简化得：

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_x \\ \sin \theta_y \\ \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \beta \sin \gamma & \sin \gamma \cos \beta \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \theta'_{x1} & \sin \theta'_{y1} & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_{x1} \\ \sin \theta_{y1} \\ \cos \phi_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

4 实验分析

首先应确定测斜仪在钻具上的安装误差信息。为此借助电子水平仪将自行研发的某型号垂直钻具原理样机的调试台架相应装配平面调整成水平面，测取此时重力加速度计的 X、Y 向测量轴输出信号 v_{x1} 和 v_{y1}，由式(11)、式(12)计算出加速度计各轴的倾角：θ'_{x1} = -0.0355°，θ'_{y1} = 0.2773°；再利用式(13)和式(14)，可得计算井斜角及重力工具面角所需的测斜仪的安装误差信息：γ = -θ'_{x1} = 0.0355°，β = -0.2773°，再由式(4)求出 θ = 0.2796°。

下面分别将调试台架设置成不同角度(可用电子水平仪观察,水平仪各轴测量精度为 0.0028°),然后测取在台架不同倾角下测斜仪各轴的输出并

转换成相应的倾角值,再利用相关公式计算出实验台实际的倾角值并与电子水平仪的测量结果进行比较(表 1)。

表 1 倾斜角的实测与校正结果

Table 1 Measured values and correction values of inclination angle

序号	实测计算值/(°)			修正值/(°)			真实值/(°)	实测误差 ($\phi - \phi_1$)/(°)	修正误差 ($\phi - \phi'$)/(°)
	θ_{x1}	θ_{y1}	ϕ_1	θ'_x	θ'_y	ϕ'	ϕ		
1	-1.4359	-0.0391	1.4364	-1.4004	-0.3163	1.4357	1.4448	0.0084	0.0091
2	1.3381	0.4929	1.4260	1.3736	0.2157	1.3904	1.3941	-0.0320	0.0037
3	-0.5112	1.5385	1.6214	-0.4757	1.2612	1.3482	1.3378	-0.2836	-0.0104
4	0.9772	0.3844	1.0501	1.0127	0.1071	1.0184	1.0209	-0.0292	0.0025
5	-0.5136	-0.5545	0.7558	-0.4781	-0.8318	0.9594	0.9655	0.2097	0.0061
6	-0.8480	0.0481	0.8493	-0.8125	-0.2292	0.8441	0.8463	-0.0030	0.0022
7	0.6488	0.0890	0.6549	0.6843	-0.1883	0.7098	0.7208	0.0659	0.0110
8	0.3957	-0.1173	0.4127	0.4312	-0.3946	0.5844	0.6021	0.1894	0.0176
9	-0.5087	0.0768	0.5145	-0.4732	-0.2005	0.5141	0.5196	0.0051	0.0056
10	0.2302	-0.0840	0.2451	0.2657	-0.3613	0.4485	0.4328	0.1877	-0.0157
11	-0.3197	0.4154	0.5242	-0.2842	0.1381	0.3160	0.2970	-0.2272	-0.0190
12	-0.2136	0.2242	0.3097	-0.1781	-0.0531	0.1858	0.1717	-0.1380	-0.0142

表 1 中的真实倾斜角 ϕ 为电子水平仪的测量值,修正值 $\theta'_x, \theta'_y, \phi'$ 为利用式(15)对实测的 θ_{x1}, θ_{y1} 及根据实测值计算出的 ϕ_1 所进行的校正。考虑到仪器(电子水平仪等)测量精度及其在台架上的装配精度,以及测量、计算误差和电气干扰的影响等因素,可知校正后的倾角值 ϕ' 具有相当高的精度(表 1 中显示的最大修正误差仅为 0.019°)。

表 2 为利用加速度计实测输出及其校正值分别计算的重力工具面角。为避免出现数值问题,重力工具面角按下式进行计算(通过测斜仪各轴输出的正、负符号进行相位判断)

$$\alpha = \arcsin \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} = \arcsin \frac{\sin \theta_y}{\sqrt{\sin^2 \theta_x + \sin^2 \theta_y}} \quad (16)$$

表 2 重力工具面角实测与校正结果

Table 2 Measured values and correction values of gravity tool face angle

序号	实测计算值 α_1 /(°)	校正值 α /(°)	方位误差 ($\alpha_1 - \alpha$)/(°)
1	181.56	192.73	-11.17
2	20.22	8.92	11.30
3	108.38	110.67	-2.29
4	21.47	6.04	15.43
5	227.19	240.11	-12.92
6	176.75	194.54	-17.79
7	7.81	344.6	23.20
8	343.49	317.54	25.95
9	171.41	202.96	-31.55
10	339.95	306.33	33.62
11	127.58	154.08	-26.50
12	133.61	196.60	-62.10

由表 2 可知,由测斜仪测量误差所导致的井斜相对方位的计算误差随倾斜角(或井斜角)的减小而增大(表 2 中显示最大重力工具面角误差为 62.1°)。另外,表 1 中第 3 和第 11 两组实验的倾角的实测计算值与倾角真实值的误差相对较大,而表 2 中相应位置的重力工具面角的误差却相对较小,说明该两组实验对应的台架的倾斜方向与测斜仪安装的倾斜方向比较接近,这与式(6)中左边不等式取等式时的极限情况是一致的。

5 结 论

(1) 垂直钻井工具上测斜仪安装误差所导致的井斜测量误差的实质是测斜仪所在安装坐标系与其理想坐标系的各轴之间存在一定的夹角(即 γ, β, θ),但对于已经固定在钻具上的测斜仪而言,这些夹角参数是确定的,且可以用实验的方法方便地获取。

(2) 在测斜仪安装坐标系与理想坐标系各轴之间夹角确定条件下,笔者提出了利用已知测斜仪两测量轴输出信息计算真实井斜角的方法。该方法可通过软件形式实现对测斜仪的精确校正,从而放宽了对测斜仪在垂直钻井工具上安装精度方面的限制。但该方法在实时计算时还涉及到一些开方、反三角函数等超越函数的运算,如何对其进行简化以减少在线计算量还有待进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 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):105-119.
Liu Baiyan, Su Yinao, Chen Xinyuan, et al. Theoretical and ex-

- perimental investigation on dynamic measurements of hole inclination in automatic vertical drilling process[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(4): 105-119.
- [2] 周春, 刘白雁, 龚勋. 井下实时测斜的理论分析与实验研究[J]. *中国测试*, 2009, 35(6): 1-4.
Zhou Chun, Liu Baiyan, Gong Xun. Theoretical analysis and experimental research on real-time measurement of down-hole inclination[J]. *China Measurement & Test*, 2009, 35(6): 1-4.
- [3] Reich M, Oesterberg M, Montes H, et al. Straight down to success: performance review of a vertical drilling system[R]. SPE 84451, 2003.
- [4] 王锋, 焦同太, 安晓红. 三端式磁通门传感器的数学建模及数值分析[J]. *探测与控制学报*, 2008, 30(5): 22-26.
Wang Feng, Jiao Guotai, An Xiaohong. Mathematical modeling and numerical analysis of the fluxgate sensor with three tips[J]. *Journal of Detection & Control*, 2008, 30(5): 22-26.
- [5] 孙峰, 吕官云, 马清明. 捷联式自动垂直钻井系统[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 360-363.
Sun Feng, Lü Guanyun, Ma Qingming. A strap-down automatic vertical drilling system[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 360-363.
- [6] 谢子殿, 朱秀. 基于磁通门与重力加速度传感器的钻井测斜仪[J]. *传感器技术*, 2004, 23(7): 30-34.
Xie Zidian, Zhu Xiu. Inclinerometer for artesian well based on fluxgate and gravity acceleration sensor[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, 23(7): 30-34.
- [7] 张春熹, 高爽. 自主式光纤陀螺油井测斜仪[J]. *仪表技术与传感器*, 2006(11): 9-11.
Zhang Chunxi, Gao Shuang. Autonomous fiber optic gyroscopes inclinometer for well logging[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(11): 9-11.
- [8] 英格里斯 T A. 定向钻井[M]. 苏义脑, 译. 北京: 石油工业出版社, 1995: 121-152.
Inglis T A. Directional drilling[M]. Translated by Su Yinao. Beijing: Petroleum Industry House, 1995: 121-152.
- [9] 王友隆, 陈福深. 伺服加速度计用于高精度倾角测量的研究[J]. *电子科技大学学报*, 2001, 30(4): 391-395.
Wang Youlong, Chen Fushen. Research on inclination angle measurements with high accuracy using servo-accelerometer[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2001, 30(4): 391-395.
- [10] 史晓峰. 捷联式惯性测向系统及其在石油工程中的应用[J]. *测井技术*, 2007, 31(5): 466-469.
Shi Xiaofeng. Strap-down inertial surveying system and its application in petroleum engineering[J]. *Well Logging Technology*, 2007, 31(5): 466-469.
- [11] 苏义脑, 李松林, 葛云华, 等. 自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法[J]. *石油学报*, 2001, 22(4): 87-91.
Su Yinao, Li Songlin, Ge Yunhua, et al. The design and control ways of the downhole automatic closed loop of vertical drilling tool[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(4): 87-91.
- [12] Ligrone A, Oppelt J, Calderoni A, et al. The fastest way to the bottom: straighthole drilling device-drilling concept, design considerations, and field experience[R]. SPE 36826, 1996.
- [13] Calderoni A, Savini A, Treviranus J, et al. Outstanding economic advantages based on new straight-hole drilling device proven in various oilfield locations[R]. SPE 56444, 1999.
- [14] 黎明, 刘新元, 吕俊平. 测斜仪用磁通门和方位测量技术[J]. *导航与控制*, 2003, 2(1): 69-74.
Li Ming, Liu Xinyuan, Lü Junping. Fluxgate used on the inclinometer and the measurement of azimuth[J]. *Navigation and Control*, 2003, 2(1): 69-74.
- [15] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 82-86.
Zhang Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 82-86.
- [16] 刘白雁, 陈新元, 谢剑刚, 等. 自动垂直钻井工具的理论与技术研究[J]. *武汉科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(1): 6-10.
Liu Baiyan, Chen Xinyuan, Xie Jiangan, et al. Theoretical and technical investigation of automatic vertical drilling tools[J]. *Journal of Wuhan University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2008, 31(1): 6-10.
- [17] 陈福深, 陈国寿. 伺服加速度计用于倾角测量的抗振动实验研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 9(2): 51-54.
Chen Fushen, Chen Guoshou. Experimental research on anti-vibration of servo-accelerometer in inclination-angle measurements[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2001, 9(2): 51-54.
- [18] 满顺强, 丁杨斌, 申功勋. 数字滤波在加速度计中的工程应用[J]. *传感器世界*, 2006(9): 39-41.
Man Shunqiang, Ding Yangbin, Shen Gongxun. Engineering application of digital filter in accelerometer[J]. *Signal Process & System*, 2006(9): 39-41.
- [19] 杨楠, 霍爱清, 汪跃龙, 等. 旋转导向钻井工具稳定平台控制功能试验研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 284-287.
Tang Nan, Huo Aiqing, Wang Yuelong, et al. Experimental study on control function of stabilized platform for rotary steering drilling tool[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 284-287.
- [20] 龚成亮, 龚永萍. 磁性测斜仪安装误差的补偿[J]. *惯导与仪表*, 2000(2): 10-13.
Gong Chengliang, Gong Yongping. The error compensation of inclinometer[J]. *Inertial & Instrument*, 2000(2): 10-13.

(收稿日期 2011-11-29 改回日期 2012-04-20 责任编辑 王秀)