

Attitude Extraction Method of Gyro Inclinometer at Small Angles of Inclination Measurement^{*}

LONG Dafeng^{1*}, LIU Jun², ZHANG Xiaoming¹

(1. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the fact that the small angle of inclination measurement exists in low accuracy measurement of gyro inclinometer system. The generation mechanism and formation cause were analyzed in detail, and a new extraction method was deduced to suited to the measurement of the small angles of inclination of attitude. The MWD product prototype was built based on dynamic and high precision of tuned Gyro, and the use of high precision of three axes turntable table repeatedly simulated the actual drilling logging process to the drill processing. Experimental results show that this method can effectively improves accuracy of gyro inclinometer at the measurement of small angles of inclination.

Key words: gyro inclinometer; small angle of deviation; attitude calculation; measurement error

EEACC: 7210 doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.06.025

陀螺测斜仪小角度井斜角测量的姿态提取方法^{*}

龙达峰^{1*}, 刘俊², 张晓明¹

(1. 中北大学电子测试技术重点实验室, 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对陀螺测斜仪系统在小角度井斜角测量时存在测量精度低的问题, 对其产生机理和形成原因作了详细分析, 并推导了新的小角度井斜角测量的姿态提取方法。搭建基于高精度动调陀螺的随钻测斜仪产品原理样机, 并利用高精度三轴转台反复多次模拟实际钻井施工中随钻测井过程, 结果表明该方法可有效的提高陀螺测斜仪小角度井斜角随钻测量的解算精度。

关键词: 陀螺测斜仪; 小井斜角; 姿态解算; 姿态误差

中图分类号: TH763; TD175

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)06-0883-04

陀螺测斜仪可以用于解决地磁异常环境下的井眼轨迹测量, 可以实时准确的掌握钻井施工中的工程地质情况, 以便以工程作业人员及时调整钻头, 避免钻孔盲目性而造成事故的发生, 并为井下找孔、旧井及老井的二次开发带来极大的便利, 不仅减小了开发的难度, 还大大节省了人力和物力量^[1-7]。就目前市面上的陀螺测斜仪系统, 在针对大井斜角时测量时精度比较高(井斜角 α , 定义为测斜仪纵轴线与井眼轴线之间的夹角, 它反映井眼的倾斜程度), 但在小角度井斜角(特别是 $\alpha < 3^\circ$)测量时, 普遍存在方位角 φ 和横滚角 γ 测量精度差, 产生较大测量误差原因除了有惯性器件本身精度所致, 还有姿态提取方法的影响^[8-9]。目前的陀螺测斜仪系统基于惯性导航技术, 利用姿态变换矩阵元素间的关系得

到不同导航坐标系下的姿态角提取公式^[10-11]。实际上, 在井斜角接近垂直测井时, 方位角和横滚角的姿态提取计算公式中分子和分母都将同时趋于零, 使方位角和横滚角的计算变得不确定, 而且井斜越接近垂直变得愈发严重, 甚至无法正确分辨 φ 和 γ 。针对陀螺测斜仪系统在小角度井斜角测量时普遍存在的精度差的问题, 本文推导了新的适用于小角度井斜角测量时的陀螺测斜仪系统的姿态测量与解算方法, 以期解决上述所存在的问题。

1 随钻陀螺测斜仪基本原理

将三轴陀螺仪和加速度计沿钻具的基本轴线安装, 构成基于以钻具为载体的随钻陀螺测斜仪基本结构, 如图1所示^[11-12]。

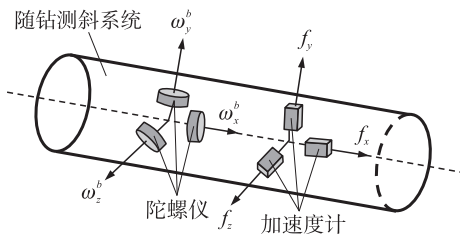


图1 基于陀螺仪和加速度计的随钻陀螺测斜仪

矿井钻孔施工中, 钻具不仅可以沿3个坐标轴平动, 亦可以沿3个坐标轴转动。利用三轴加速度计实时测量沿钻具3个坐标轴的比力信息, 三轴陀螺仪测量沿钻具3个坐标轴的角速度信息, 于是, 随钻陀螺测斜仪就可以视为基于地下钻具这个特殊载体的捷联惯性导航系统, 其关键在于如何解算出钻具的姿态和钻井轨迹。

为便于理解陀螺测斜仪姿态测量原理, 在表示陀螺测斜仪的姿态时, 测斜仪系统采用北东地 NED 地理坐标系为导航坐标系, 用 $o-x_n y_n z_n$ 表示, 测斜仪坐标系三轴分别指向载体的前部、右部和下部, 用 $o-x_b y_b z_b$ 表示, 其中 $X、Y、Z$ 为加速度计和陀螺仪的敏感方向, 井下随钻测斜仪的姿态也就是井管的姿态。测斜仪的姿态所对应的方位角 φ 、俯仰角 θ 、横滚角 γ 所确定的导航坐标系与载体坐标系变换矩阵可通过如下坐标系三次旋转的得到, 即:

$$o-x_n y_n z_n \xrightarrow[\text{旋转 } \varphi]{\text{绕 } Z_n \text{ 轴}} o-x_1 y_1 z_1 \xrightarrow[\text{旋转 } \theta]{\text{绕 } Y_1 \text{ 轴}} o-x_2 y_2 z_2 \xrightarrow[\text{旋转 } \gamma]{\text{绕 } X_2 \text{ 轴}} o-x_b y_b z_b$$

上式中: $o-x_1 y_1 z_1、o-x_2 y_2 z_2$ 为坐标系变换过程中间坐标系, $o-x_b y_b z_b$ 为测斜仪载体坐标系, 所以地理坐标系到载体坐标系的变换矩阵为:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi & \sin\theta \\ -\sin\gamma\sin\theta\cos\varphi - \cos\gamma\sin\varphi & -\sin\gamma\sin\theta\sin\varphi + \cos\gamma\cos\varphi & \sin\gamma\cos\theta \\ -\cos\gamma\sin\theta\cos\varphi + \sin\gamma\sin\varphi & -\cos\gamma\sin\theta\sin\varphi - \sin\gamma\cos\varphi & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

姿态矩阵的 C_b^n 定义为:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

又因为 $C_b^n = (C_n^b)^T$, 则:

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & -\sin\gamma\sin\theta\cos\varphi - \cos\gamma\sin\varphi & -\cos\gamma\sin\theta\cos\varphi + \sin\gamma\sin\varphi \\ \cos\theta\sin\varphi & -\sin\gamma\sin\theta\sin\varphi + \cos\gamma\cos\varphi & -\cos\gamma\sin\theta\sin\varphi - \sin\gamma\cos\varphi \\ \sin\theta & \sin\gamma\cos\theta & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

比较式(2)和式(3)所表达的姿态变换矩阵元素之间的关系可得到陀螺测斜仪姿态角的解算公式为:

$$\begin{cases} \gamma = \arctan(C_{32}/C_{33}) \\ \theta = \arcsin(C_{31}) \\ \varphi = \arctan(C_{21}/C_{12}) \end{cases} \quad (4)$$

当陀螺测斜仪在越接近垂直测井时(小角度井斜角测量状态), 因 $\cos\theta \rightarrow 0$, 姿态变换矩阵中元素 $C_{32}、C_{33}、C_{21}$ 和 C_{12} 也将同时趋于 0, 若利用式(4)提取姿态角, 方位角和横滚角的计算结果变得不确定, 即便陀螺仪微小的数据测量误差会造成很大的姿态角提取误差, 且很容易出现无解, 在 $\theta = \pm\pi/2$ 的极端情况下, 根本无法正确分辨 φ 和 γ , 这就是传统的陀螺测斜仪在小井斜角测量时会有出现较大的测量误差的原因所在。

2 小角度井斜角测量与姿态提取方法

针对上述问题, 推导新的适用于小角度井斜角测量随钻陀螺测斜仪姿态提取方法。实际上, 当小角度井斜角测井或接近垂直测井时, 俯仰角 $\theta \approx \pi/2$, 式(3)姿态变换矩阵 C_b^n 退化为:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} 0 & -\sin(\varphi+\gamma) & -\cos(\varphi+\gamma) \\ 0 & \cos(\varphi+\gamma) & -\sin(\varphi+\gamma) \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

此时, 不能利用式(4)直接解算姿态阵 C_b^n 解算方位角和横滚角, 只能得到出 $\varphi+\gamma$ 的值。由式(2)和式(3)所表达的矩阵元素之间的关系可进一步推导得到:

$$\begin{cases} C_{22} - C_{31} = (1 + \sin\theta) \cos(\varphi + \gamma) \\ C_{21} + C_{32} = -(1 + \sin\theta) \sin(\varphi + \gamma) \end{cases} \quad (6)$$

因此, 由式(6)可知 φ 和 γ 之间的约束关系为:

$$\varphi + \gamma = \arctan \frac{-(C_{21} + C_{32})}{C_{22} - C_{31}} \quad (7)$$

若可以通过其他辅助测量方法, 先确定 φ 和 γ 其中之一, 再利用式(7)也能实现测斜仪全部姿态角的正确提取。

由欧拉角关系可知, 陀螺测斜仪的方位角 φ 、俯仰角 θ 和横滚角 γ 随时间的变化率与测斜仪载体坐标系相对于地理坐标系转动的角速度分量 $\omega_{nbx}^b、\omega_{nby}^b$ 和 ω_{nbz}^b 之间的关系可表示为^[13]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{nbx}^b \\ \dot{\omega}_{nby}^b \\ \dot{\omega}_{nbz}^b \end{bmatrix} = R_x(\gamma)R_y(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + R_x(\gamma) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & 0 & 1 \\ \sin\gamma\cos\theta & \cos\gamma & 0 \\ \cos\gamma\cos\theta & -\sin\gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (8)$$

而角速度分量 ω_{nb}^b 的另一种表达方式(9):

$$\omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - \omega_{in}^b = \omega_{ib}^b - C_n^b(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \quad (9)$$

通常,陀螺测斜仪可采用随钻动态测斜和多点静态测斜工作方式,若测斜仪采用多点静态测斜的工作方式时 ω_{en}^n 为零,当随钻动态测斜的工作方式时,钻具钻进的速度很慢, ω_{en}^n 也可以近似为零处理。从前面的分析可知,在接近垂直测井时,姿态阵 C_b^n 退化为式(5)所表示形式,因此,把(5)代入式(9)可整理得:

$$\begin{bmatrix} \omega_{nbx}^b \\ \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ibx}^b + \omega_{ie} \sin L \\ \omega_{iby}^b + \omega_{ie} \sin(\varphi + \gamma) \cos L \\ \omega_{ibz}^b + \omega_{ie} \cos(\varphi + \gamma) \sin L \end{bmatrix} \quad (10)$$

则比较式(8)和式(10)可得横滚角姿态变化率与陀螺输出值之间的关系:

$$\dot{\gamma} = \omega_{ibx}^b + \omega_{ie} \sin L - \dot{\varphi} \sin \theta \quad (11)$$

式中 ω_{ie} 和 L 分别是当地地球自转速率和纬度,矿井钻孔施工中,特别是接近垂直钻进过程中,方位的变化率 $\dot{\varphi}$ 很小, $\dot{\gamma}$ 由式(11)可近似为:

$$\dot{\gamma} \approx \omega_{ibx}^b + \omega_{ie} \sin L \quad (12)$$

从上式可知,在小角度井斜角测量时(接近垂直测井状态),横滚角变化率 $\dot{\gamma}$ 跟测斜仪纵轴向(X 轴)陀螺输出数据和地速分量有关。若钻井测量过程中判断出是小角度井斜角测井时,利用安装在测斜仪纵轴向的高精度陀螺仪 G_x 的输出 ω_{ibx}^b 按式(12)积分计算出横滚角,然后按式(7)计算方位角 φ 值,俯仰角 θ 按式(4)提取,其解算的精度主要取决于姿态变换阵 C_b^n 的准确度。井斜状态的判断以计算所得的俯仰角是否 $\theta \rightarrow \pi/2$,若是,利用上述所推导的方法进行姿态角提取,当判断不是小角度井斜角测量状态,按式(4)公式计算全部姿态角。

3 实验验证

为了验证本文所指出的小角度井斜角测量的姿态提取方法情况下偏航角和滚动角会出现提取误差的问题,同时验证第2部分所给出的抑制该提取误差方法的有效性,采用动力调谐陀螺仪搭建随钻测斜仪产品原理样机,陀螺随机漂移为 0.03 ($^\circ$)/h,漂移稳定性 0.2 ($^\circ$)/h,通过高精度三轴转台上模拟小角度井斜角测井过程,验证所述姿态提取方法的可行性及解算精度,原理样机模拟测井过程如图2所示。

首先进行小角度井斜角测井实验,将样机安装高精度三轴转台,控制转台令其旋转不同的姿态位置,并采集不同姿态下的三轴向陀螺输出数据,以初始姿态角为 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$,初始速度为 $(0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s},$

$0 \text{ m/s})$ 分别进行了以下姿态变化测试:(1)调节转台使测斜仪初始方位角为 45° ,然后调节转台中框,使测斜仪俯仰角 89° ,然后控制三轴转台内框以 200 ($^\circ$)/s 转速旋转,模拟井斜角为 1° 时测井,以 100 Hz 频率采集存储陀螺输出数据;(2)与上述姿态变化(1)相似的方法模拟井斜角分别为 $(2^\circ, 3^\circ$ 和 $4^\circ)$ 时的测井状态,调节转台姿态,具体为控制转台使其初始方位角和初始俯仰角姿态分别为 $(135^\circ, 88^\circ)$ 、 $(225^\circ, 87^\circ)$ 和 $(315^\circ, 86^\circ)$,然后控制三轴转台内框以 200 ($^\circ$)/s 转速旋转,采集存储输出数据用于进行事后解算。解算结果与高精度转台反馈姿态数据相比较,分析算法的解算精度,下图3为井斜角 3° 时采样点时刻所对应的方位角解算误差,其方位角误差的标准差仅为 0.35° ,均值为 -0.31° ,短时间内误差的累积不严重,姿态角具有较高的解算精度。

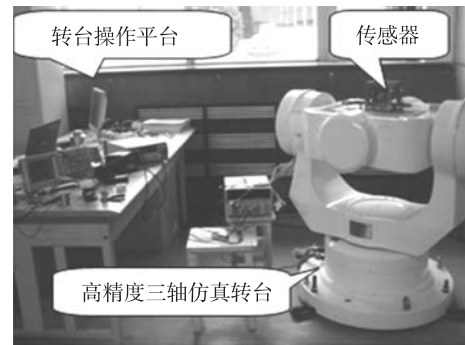


图2 原理样机模拟随钻测井

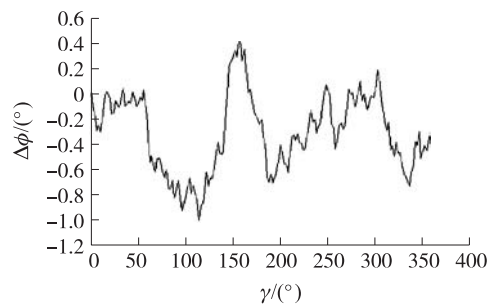


图3 方位角解算误差标准差

为进一步验证算法的正确性,利用转台模拟 600 m 井深随钻测井测过程,钻具姿态由转台控制,采集陀螺测斜仪输出角速率信息用于事后解算;因转台无法模拟钻井过程中钻具的加速度信息,本文采用理想钻井轨迹结合钻具的姿态由MATLAB仿真生成钻具的加速度信息。利用所推导方法进行姿态解算,并与高精度三轴转台反馈姿态数据相比较,解算后三维可视化钻井轨迹如图4所示,其中蓝色为理想钻孔轨迹,红色为实测解算钻孔轨迹,图5是三维轨迹在地理系下各分量,图6为陀螺测斜仪测量解算后的钻井轨迹位置误差。

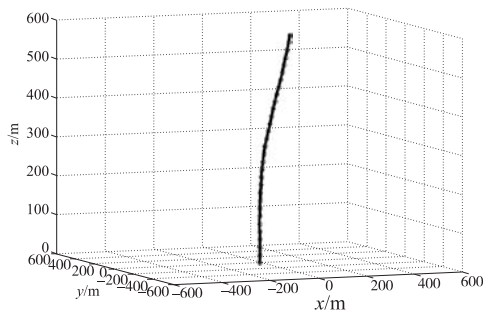


图4 三维可视化钻井轨迹

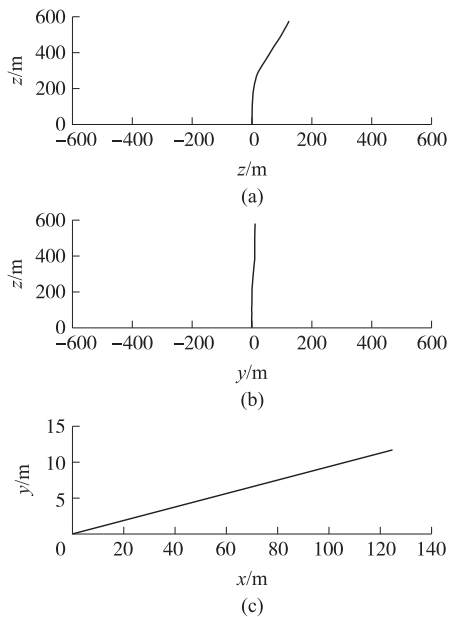


图5 三维轨迹在地理系下各分量

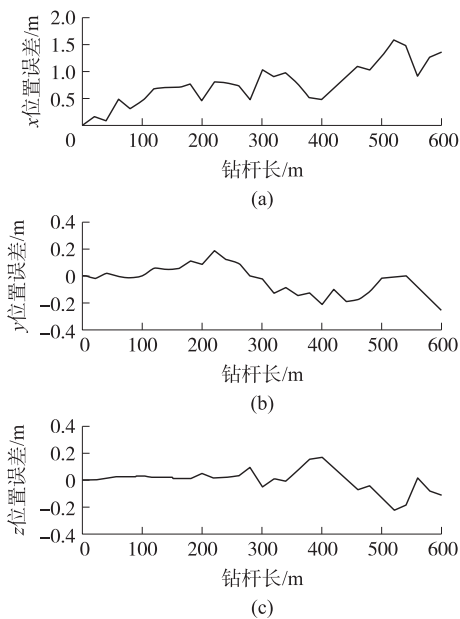


图6 原理样机解算位置误差曲线

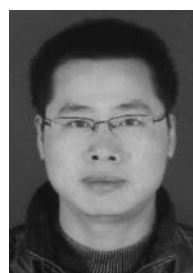
从钻井轨迹三维可视解算的结果来看,基于陀螺测斜仪具有比较高的测量解算精度。通过反复多次的转台模拟测量,姿态角测量误差 $\leq 1^\circ$,600 m位置误差 CEP ≤ 2 m。

4 结论

本文针对陀螺测斜仪系统在小角度井斜角测量时普遍存在姿态解算精度差大的问题,对其产生机理和形成原因作了详细分析,并对其抑制方法作了深入探讨,在此基础上,推导了新的适用于小角度井斜角测量时的姿态解算方法。为了验证本文方法的有效性,搭建了基于高精度动调陀螺的随钻测斜仪产品原理样机,并通过高精度三轴转台上模拟实际随钻测井过程,利用所推导方法解算结果,与高精度三轴转台反馈姿态数据相比较,姿态角具有较高的解算精度,短时间内误差的累积不严重,通过反复多次的转台模拟测量,在模拟600 m井深测井时,姿态角测量误差 $\leq 1^\circ$,600 m位置误差 CEP ≤ 2 m,验证了小角度井斜角测量时姿态提取方法的可行性。

参考文献:

- [1] 朱金荣,段生杰,刘志文. 无线随钻技术在大口径定向工程钻孔中的应用[J]. 土工基础,2009,23(6):85-87.
- [2] 邱成军,卜丹. 定向井轨迹的磁控测量系统[J]. 传感技术学报,2004,12(4):569-571.
- [3] Guido B, Pete L, Mike W. Drilling Straight Down[J]. Oilfield Review 2004 16(3):14-17.
- [4] 史晓锋. 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,2007,37(5):465-468.
- [5] 汪海阁,苏义脑. 直井防斜打快理论研究进展[J]. 石油学报,2004,25(3):86-90.
- [6] Ligrone A, Oppelt J, Calderoni A, et al. The Fastest Way to the Bottom: Straight Hole Drilling Device-Drilling Concept, Design Considerations and Field Experience[R]. SPE 36826,1996.
- [7] Calderoni A, Savini A, Treviranus J, et al. Outstanding Economic Advantages Based on New Straight-Hole Drilling Device Proven in Various Oilfield Location[R]. SPE 5644,1999.
- [8] 郑锋辉,韩来聚,杨利,等. 国内外新兴钻井技术发展现状[J]. 石油钻探技术,2008,36(4):5-12.
- [9] 张辛耘,王敬农,郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. 测井技术,2006,30(1):10-15.
- [10] 朱金冬,任建新,唐品利,等. 一种新型陀螺测斜仪的硬件设计及其误差补偿技术[J]. 测井技术,2006,30(6):580-581.
- [11] 张延顺,王月. 无线随钻技术在大口径定向工程钻孔中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2010,23(6):210-212.
- [12] 季伟峰,李忠,赵燕来. 动力调谐陀螺钻孔测斜仪的开发与应用[J]. 探矿工程,2008,23(6):33-36.
- [13] 秦永元. 惯性导航原理[M]. 北京:航空工业总公司第618所,1994.



龙达峰(1979-),男,中北大学讲师,主要研究方向为惯性感知与测控技术, longdafeng@nuc.edu.cn。