

# 机械式自动垂直钻工具偏重机构角位置测量方法研究

李平飞<sup>1,2</sup>, 王璐<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**机械式自动垂直钻具在实际应用过程中,偏重机构由于自身的惯性以及外部环境的影响,会出现不能稳定在井眼低边的情况,导致纠斜精度降低。为研究偏重机构在钻进过程中角位置的变化规律,本文提出了基于绝对式磁编码器的一种非接触式的角位置测量方法,构建了测量数据采集界面并进行了实验室验证及可靠性分析。该方法可有效地实现偏重机构变化角度的测量,测量误差不超过3°。非接触式的角位置测量方法能够监测角位移且其误差在工程允许的误差范围内,可以为后续的机械式垂直钻井系统的研发实验和改进优化提供可靠的数据。

**关键词:**机械式自动垂直钻具;偏重机构;角位置测量;绝对式磁编码器;数据采集

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)07-0009-05

## Angular position measurement method for the eccentric mechanism of the automatic vertical drilling tool

LI Pingfei<sup>1,2</sup>, WANG Lu<sup>1,2</sup>, LIU Baolin<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The eccentric mechanism of the mechanical automatic vertical drilling tool can not always be held stable on the low side of the wellbore in the actual drilling conditions due to its own inertia and the influence of the external environment, resulting in the reduction of deviation correction accuracy. In order to study the change law of the angular position of the eccentric mechanism in the drilling process, a non-contact angular position measurement method based on the absolute magnetic encoder is proposed in this paper with the measurement data acquisition interface constructed, and the laboratory verification and reliability analysis carried out. The measurement error is less than 3 degrees, indicating that the non-contact angular position measurement method can monitor the angular displacement and the error is within the allowable error range. It can provide reliable data for the subsequent research and development experiment, and optimization of the mechanical vertical drilling system.

**Key words:** mechanical automatic vertical drilling tool; eccentric mechanism; angular position measurement; absolute magnetic encoder; data acquisition

## 0 引言

机械式自动垂直钻具是为及时纠正井眼倾斜而发明的自动垂直钻井设备,当发生井斜时,其偏重机构因其重力作用会始终维持在井眼低边,当垂钻系统旋转至上盘阀的扇形口与下盘阀的导流孔

重合时,高压钻井液通过此通道进入活塞缸中,向高边井壁推出活塞使得钻头产生纠斜力,达到纠斜的效果<sup>[1-2]</sup>。目前国际上已有机械式自动垂钻工具获得了成熟的商业应用,主要为Scout Downhole和Halliburton两家公司的产品<sup>[3-4]</sup>;国内仅有中石化胜

收稿日期:2020-11-24; 修回日期:2021-04-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.07.002

基金项目:国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用”(编号:2018YFC0603400)课题五“智能地质钻探技术及装备仪器研制”(编号:2018YFC0603405)

作者简介:李平飞,女,汉族,1998年生,硕士研究生,地质工程专业,北京市海淀区学院路29号,2002200068@cugb.edu.cn。

引用格式:李平飞,王璐,刘宝林.机械式自动垂钻工具偏重机构角位置测量方法研究[J].钻探工程,2021,48(7):9-13.

LI Pingfei, WANG Lu, LIU Baolin. Angular position measurement method for the eccentric mechanism of the automatic vertical drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2021,48(7):9-13.

利钻井院在该技术领域取得了成功的现场应用<sup>[5]</sup>。多数学者集中于钻具结构的改进<sup>[6-7]</sup>,如宋执武利用千斤顶和不倒翁原理设计了一种自动防斜钻具<sup>[8-9]</sup>,艾才云等研发了一种利用液压的新型垂直钻井工具<sup>[10-11]</sup>等。

国内外的研究多集中在机械结构的优化<sup>[12-13]</sup>,缺乏对偏重机构运动规律的研究。在钻进过程中,对偏重机构的位置进行连续监控,可以为实时监控垂钻工具的几何位置和纠斜效果奠定基础,后续可依据偏重机构的旋转角度数据,提出可提升偏重机构稳定性的方法,以达到增加机械式垂钻工具的防斜纠斜目的。本文提出了基于绝对式磁编码器的一种非接触式的角位置测量方法,为机械式垂钻工具结构的优化改进提供依据,也为机械式自动垂直钻井工具增加电子增力机构奠定了基础。

## 1 机械式自动垂钻工具结构

机械式自动垂钻工具结构主要为偏重机构、盘阀式液压导向机构、推靠巴掌。在垂钻过程中扭矩通过钻杆进行传递,因此磁编码器的安装使用不可以对钻杆进行破坏,选用大口径磁编码器可以将磁栅盘套在偏重机构连接的钻杆外进行固定,既不会影响扭矩的传递,又可以监测偏重机构的角位置变化情况,如图1所示。

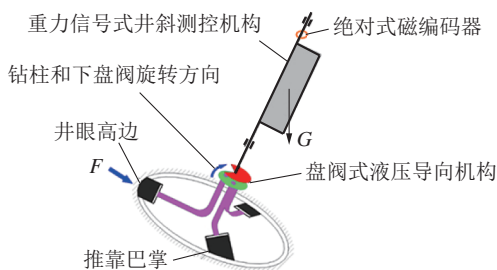


图1 机械式自动垂钻工具结构  
Fig.1 Structure of the mechanical automatic vertical drilling tool

## 2 绝对式磁编码器工作原理

编码器是将与被测机械量相关的数据或信号转换为可以用于传输、通信和存储的信号形式的重要工具。绝对式编码器的每一个位置提供一个独一无二的编码器数值,在利用绝对式编码器进行位置测量时能够减少电子电路设备的运算过程,减轻计算任务<sup>[14-15]</sup>。

磁编码器是基于霍尔效应的电子器件<sup>[16]</sup>。绝对式磁编码器一般由磁栅盘、霍尔元件和单片机组成,其中磁栅的充磁具有一定规律<sup>[17]</sup>,工作时磁栅作为转子,霍尔元件固定在磁栅附近。磁栅为轴向充磁,S极与N极成对交替排列,磁栅每转动一格,磁场的方向便发生一次变化,霍尔传感器产生的霍尔电压方向便变化一次,如图2所示。通过对霍尔电压周期性变化的信号进行转换和解算就可以得知磁栅转过的角度。

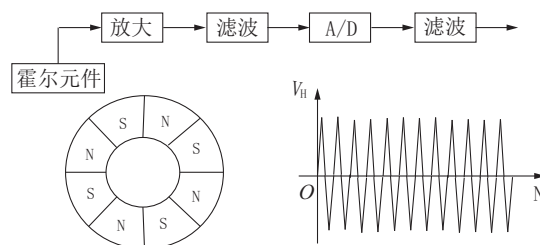


图2 霍尔电压周期性变化

Fig.2 Cyclic change of Hall voltage

若磁栅上的磁极总数为 $X$ ,则霍尔元件与磁栅每发生一个磁极大小的相对位移,就代表磁极转过的角度为:

$$\Delta\theta = \frac{1}{X} \times 360^\circ \quad (1)$$

式中: $\Delta\theta$ ——磁栅角度的变化量, ( $^\circ$ )。

当读数头的二进制分辨率为 $n$ ,霍尔电压变化次数为 $N$ 时,磁栅转过的角度为:

$$\Delta\theta = \frac{N}{2^n} \times 360^\circ \quad (2)$$

## 3 磁编码器系统的选型

磁编码器中的磁栅盘、读数头以及电缆线共同组成了AksIM-2磁编码器系统,该磁编码器具备大中孔、真正的绝对式功能和高速运行的特点,具有SSI、BiSS和异步串行通信接口。

### 3.1 磁栅盘

磁栅盘外径尺寸 $80 \pm 0.1$  mm,内径 $55 \pm 0.03$  mm,厚度 $2 \pm 0.05$  mm,质量26 g,转动惯量 $31.8$  kg·mm<sup>2</sup>,其外形如图3所示。

### 3.2 读数头

读数头外径尺寸 $90 \pm 0.15$  mm,内径 $64.4 \pm 0.15$  mm,厚度 $5 \pm 0.30$  mm,质量3.97 g,读数头到磁环的距离为 $0.8 \pm 0.15$  mm。

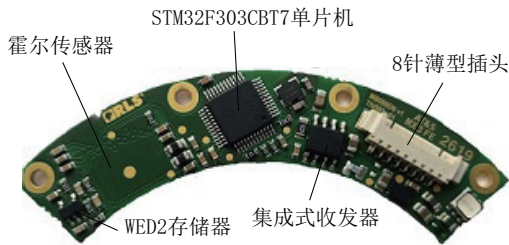


图 3 MRA080BC055DSE00 磁栅盘

Fig.3 MRA080BC055DSE00 magnetic grid disc

读数头电路组成如图 4 所示。选用的 MB080 SFA17BDNA05 读数头可达到 20 位的二进制分辨率,当霍尔电压变化次数为  $N$  时,磁栅转过的角度为:

$$\Delta\theta = \frac{N}{2^{20}} \times 360^\circ \quad (3)$$



(a) 读数头正面



(b) 读数头背面

图 4 读数头电路组成

Fig.4 Composition of the reading head circuit

#### 4 基于 VS 的测量数据采集界面设计

测量数据采集界面采用 C++ 中的 MFC 平台进行构建<sup>[18]</sup>,利用 MSComm 控件建立与串口的连接<sup>[18]</sup>,再经过串口连接绝对式磁编码器。采集界面如图 5,该界面可实现的功能为:

(1)搜索计算机可使用的所有 COM 口序号,并将其显示在下拉框中,该下拉框可以识别观测者选中的 COM 并进行数据的接收与发送。

(2)COM 口收到的数据并实时显示在当前值一栏中,同时可以显示接收到的数据的最大值、最小值以及平均值。



图 5 测量数据采集界面

Fig.5 Measurement data acquisition interface

(3)画出接收数据值的变化趋势图。

(4)计录数据开始采集的时间并显示在界面上。

(5)将接收到的当前值都存储在一个 txt 文件中。

#### 5 实验测试及误差分析

实验室中利用三轴转台模拟垂钻过程中的钻具转动,仪器连接如图 6 所示。

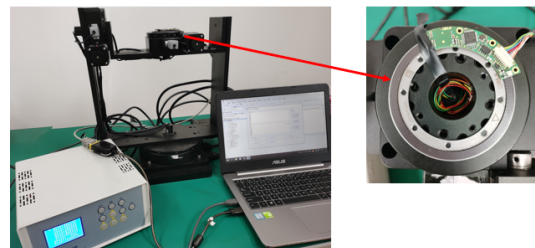


图 6 实验装置连接

Fig.6 Experimental device connection diagram

垂直钻井过程中,偏重机构的变化可以概括为两种情况,即逆时针方向旋转和顺时针方向旋转变。在模拟实验过程中,分别模拟了偏重机构逆、顺时针旋转 360°及小角度摇摆的情况,实验中设定逆时针作为角位置变化的正方向,利用 Matlab 将界面采集的数据与三轴转台的实际角增量进行对比,得到误差分析结果如下。

##### 5.1 逆时针旋转测量

三轴转台逆时针旋转,转速 1.012°/s,旋转角度 360°,重复测试三组,误差如图 7 所示。

##### 5.2 顺时针旋转测量

三轴转台参数同上,旋转方向逆时针,重复测试三组,界面显示如图 8 所示。

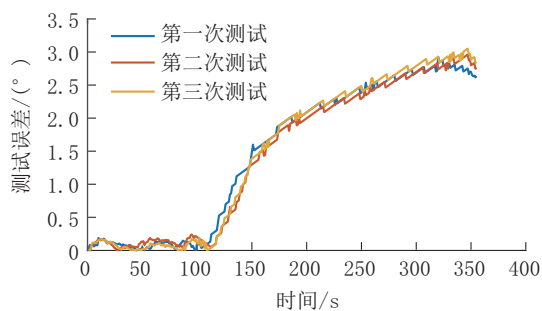


图7 逆时针旋转误差分析结果

Fig.7 Analysis results of counter clockwise rotation errors

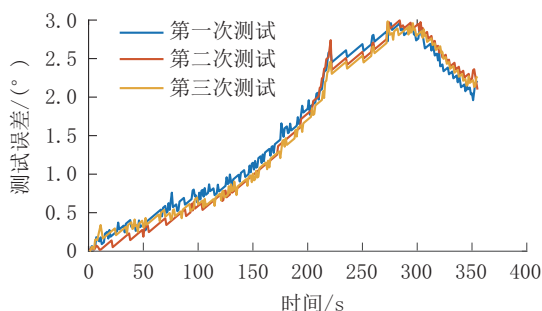


图8 顺时针旋转误差分析结果

Fig.8 Analysis results of clockwise rotation errors

### 5.3 小角度摇摆测量

实验过程中模拟垂直钻井过程中偏重块小角度摇摆,每次摇摆角度相对初始位置为 $-5^{\circ}\sim+5^{\circ}$ ,测试3组,每组实验重复3个周期,此时界面显示测量结果如图9所示。

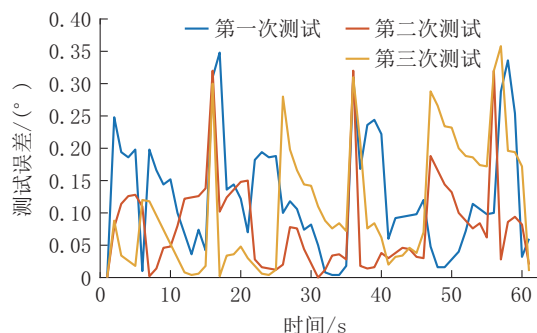


图9 小角度摇摆测量误差分析结果

Fig.9 Error analysis results of small angular swing measurement

经磁栅盘逆、顺时针旋转实验误差分析,在旋转角度较小时角位移的误差也偏小,后误差随旋转角度逐渐增大,呈时域上的积累,最大测量误差为 $3^{\circ}$ 。小角度摆动实验时,测量系统的误差波动较大,最大

角位移误差为 $0.35^{\circ}$ ,实际使用时可以准确反映偏重机构的角位置信息。误差的大小除与磁编码器自身仪器精度有关外,还受到三轴转台磁场的影响。

综上,测量数据采集界面监测偏重块时角位移的误差在工程允许的误差范围内,能够相对准确地监测到偏重机构的角位置变化情况。

## 6 结论

利用绝对式磁编码器的工作原理提出了基于霍尔效应的磁编码器角位置测量方案,并构建了测量数据采集界面,在钻井作业中可将磁编码器系统固定在偏重机构的一端进行数据的收集,观测者通过采集界面实时监测偏重机构的角位置变化信息。经过实验测试及误差分析,验证了测量数据采集界面在钻进情况下的功能使用情况,经分析实验结果测量系统的精度可达 $3^{\circ}$ ,确定了实验数据的可靠性。

本文构建的非接触式偏重机构测量系统可以测量出偏重机构的实时角位置信息,可为机械式垂直钻井系统的研发实验和改进优化提供数据和依据,也为机械式自动垂直钻具增加电子增力机构奠定了基础。

## 参考文献(References):

- [1] 邓江洪. 自动垂直钻井导向工具关键技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.  
DENG Jianghong. The key technology research on steerable unit of automatic vertical drilling tool[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2016.
- [2] 李立鑫. 自动垂直钻具机械式稳定平台动力学及优化方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.  
LI Lixin. Research on dynamics and optimization method of mechanical stable platform in automatic vertical drilling tool[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [3] Scout Downhole Inc. Vertical scout solution: keeping vertical in crooked hole country [EB/OL]. <http://www.scoutdownhole.com>. [2017-11-30].
- [4] Halliburton Energy Services Inc. Case study: Canadian operator saves over 27 days of rig time drilling gas wells in difficult shale formation [EB/OL]. <http://www.halliburton.com>. [2010-10-H07977].
- [5] 韩来聚, 倪红坚, 赵金海, 等. 机械式自动垂直钻井工具的研制[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 766-768.  
HAN Laiju, NI Hongjian, ZHAO Jinhai, et al. Development of mechanical tool for automatic vertical drilling [J]. Acta Petroleum Sinica, 2008, 29(5): 766-768.



- [6] 李立鑫,薛启龙,刘宝林,等.机械式自动垂直钻具的纠斜行为及研究进展[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(1):90-97.  
LI Lixin, XUE Qilong, LIU Baolin, et al. Straightening behavior analysis and research progress of mechanical automatic vertical drilling tools[J]. Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition), 2018, 33(1):90-97.
- [7] 管洪图.自动垂直钻井技术发展及应用现状[J].吉林地质,2019,38(4):82-89.  
GUAN Hongtu. Development and application of automatic vertical drilling technology[J]. Jilin Geology, 2019, 38(4):82-89.
- [8] 宋执武,高德利.自动防斜钻井钻具设计[J].钻采工艺,2007,30(3):1-2.  
SONG Zhiwu, GAO Deli. Design of a drilling tool for vertical drilling automatically [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3):1-2.
- [9] 宋执武,高德利.不倒翁式偏心防斜钻具的设计[J].石油机械,2006,34(8):19-20.  
SONG Zhiwu, GAO Deli. Design of a tumbler eccentric and deviation-controlled drilling tool [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(8):19-20
- [10] 艾才云,王雄鹰,费维新.一种新型垂直钻井工具[J].钻采工艺,2006,29(5):82-83.  
AI Caiyun, WANG Xiongying, FEI Weixin. A new type of vertical drilling tool [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(5):82-83.
- [11] 陈若铭,穆总结,艾才云,等.Φ311垂直钻井系统的研制[J].石油钻采工艺,2010,32(1):31-33.  
CHEN Ruoming, MU Zongjie, AI Caiyun, et al. Research for Φ311 automatic vertical drilling system [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1):31-33.
- [12] 王闻涛,王进全,王小通,等.全旋转推靠式自动垂直钻井工具的研制[J].石油机械,2015,43(8):47-50.  
WANG Wentao, WANG Jinquan, WANG Xiaotong, et al. Development of full rotation and push-the-bit type automatic vertical drilling tool [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(8):47-50.
- [13] 柴麟,张凯,刘宝林,等.自动垂直钻井工具分类及发展现状[J].石油机械,2020,48(1):1-11.  
CHAI Lin, ZHANG Kai, LIU Baolin, et al. Classification and development status of automatic vertical drilling tools [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1):1-11.
- [14] 赵映川.编码器原理与应用分析[J].无线互联科技,2018,15(22):67-69,78.  
ZHAO Yingchuan. Analysis on the principle and application of encoder device [J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(22):67-69,78.
- [15] 袁野.绝对式磁编码器设计及其在伺服系统的应用[J].传感技术学报,2019,23(4):625-630.  
YUAN Ye. Design of absolute magnetic encoder and its application in servo system [J]. Journal of Sensing Technology, 2019, 23(4):625-630.
- [16] 梁珊珊,何志伟.基于霍尔效应的磁场测量方法的研究[J].电测与仪表,2013,50(10):98-101.  
LIANG Shanshan, HE Zhiwei. Research of magnetic field measurement based on Hall-effect [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2013, 50(10):98-101.
- [17] 李斐然.基于霍尔原理的绝对式磁编码器的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.  
LI Feiran. Research of an absolute magnetic encoder prototype based on Hall Effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [18] 李邢凡,陈培新,郭雷.基于MSComm的GPS回转性能软件系统的设计[J].科技创新与应用,2020(6):18-20.  
LI Xingfan, CHEN Peixin, GUO Lei. Design of GPS rotation performance software system based on MSComm [J]. Technology Innovation and Application, 2020(6):18-20.

(编辑 荐华)