

# 井中三分量磁测误差分析与精度提高方案

郭文建<sup>1</sup>, 丰莉<sup>1</sup>, 郝广成<sup>2</sup>

(1. 山东省第五地质矿产勘查院, 山东 泰安 271000; 2. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014)

**摘要:**金属矿产勘查“攻深找盲”的开展,使得井中物探工作成为深部找矿的重要方法之一,尤其是井中三分量磁测在勘查磁铁矿等磁性矿产中发挥着较大的作用。但是由于目前井中三分量磁测系统测量精度较低,只能用于寻找磁性较强的矿床,在实际应用中受到一定的限制。为了提高测量精度,该文通过对现有实际测量数据的分析,找出影响系统误差与随机误差的因素,提出井中三分量磁测精度提高的实施方案。

**关键词:**井中三分量磁测;精度分析;转向差;改进方案

**中图分类号:** P631.2

**文献标识码:** B

井中三分量磁测作为一种磁铁矿等磁性矿产的勘探手段,利用其所测的井孔位置处的磁场垂直分量、水平分量,结合地面磁异常判断磁异常地质体的性质及其形态、位置,对预测井孔旁侧及深部盲矿体起到较重要的作用<sup>[1-3]</sup>。但是由于现有井中三分量磁测系统测量精度较低,只能用于寻找磁性较强的矿床,使其在实际应用中受到一定的限制<sup>[4-5]</sup>。为了扩大井中三分量磁测系统的应用范围,笔者在多年从事井中三分量磁测工作的基础上,根据自己对该系统的了解和掌握程度,提出精度提高的改进实施方案。

## 1 井中三分量磁测原理及测量仪器

### 1.1 系统测量原理

井中三分量磁测系统探管通常使用3个相互垂直的磁通门测量元件作为传感器。在测量空间矢量场时,需要对自身方位进行定位。目前,主要利用探管在钻孔中的倾向,依据重力方向确定测磁方位。取得三分量数据后,使用防磁的陀螺测斜手段,求得井孔位置轨迹。再将二者数据结合起来,解算得到地理坐标下的 $X, Y, Z$ 各方向的磁矢量数值。所以在磁三分量测量中,测量元件的即时定位一直是阻碍提高井中磁三分量测量精度的主要因素<sup>[6-7]</sup>。

### 1.2 仪器设备发展与现状

较早时期使用较多的是依据重力定位的单向垂直分量自定位系统,可对井孔内垂直分量进行测量。20世纪70年代重庆地质仪器厂生产的具有2个自由度的测量探管,其 $Z$ 分量指向铅垂方向,水平 $X, Y$ 分量分别指向探管倾斜方向或与之垂直的方向,完全依靠精密机械系统保持测量传感器的空间坐标位置。测量数据比较可靠,但仪器本身结构复杂,受震动易损坏。2005年,重庆地质仪器厂对三分量磁力仪进行了改进,完全舍去了机械定位方式,依靠单片机即时解算固定在探管上的三分量磁测元件与井孔方位之间的关系,换算后直接给地面主机输出相当于原来定位方式下的 $X, Y, Z$ 分量数值。按照厂方给出的参数:分辨力 $\leq 5$  nT,转向差 $\leq 300$  nT<sup>[8]</sup>。2010年,中色地科矿产勘查股份有限公司对三分量测量系统进行了误差自动校正,温度校正等,测量精度达到转向差 $\leq 25$  nT。近年来重庆地质仪器厂与上海地学仪器研究所也分别生产了较高精度的磁三分量仪器,标称转向差 $\leq 50$  nT。

## 2 误差分析

在井中磁三分量测量中,一般钻孔设计为斜孔并保持一定倾向。受钻杆刚度影响,同一钻孔内不

收稿日期:2014-07-25;修订日期:2014-09-05;编辑:陶卫卫

作者简介:郭文建(1972—),男,山东菏泽人,工程师,主要从事地球物理勘探工作;E-mail:guowenjian2009@163.com。

同深度处的倾向与倾角变化不大。传统的机械定位方式在测量时,定向元件空间位置变化幅度也不大。在仪器转向差为 300 nT,仪器转向一周时,其误差大致成正弦曲线形态变化。在转向 180°时,最大差值为 ±300 nT,具有系统误差的特点。而实际钻孔空间轨迹变化较小时,其转向差就可明显减小,有时要比仪器标定的误差小 1 个数量级。从原理上说此种转向差应称为“倾向差”。因空间轨迹变化较小时的转向差又具有随机误差的特点,所以可通过多点数据平均的方式提高测量精度。该种设备的工程应用效果较好,由于故障率高,维护不便,目前已停产。

重庆地质仪器厂的磁测 JCX-3 三分量型,在元件固化后,降低了故障率。但在厂方标称转向差 300 nT 情况下,探管本身一方面受到不同倾向的影响,产生了转向差;另一方面,探管在井下呈自由状态,受电缆张力等多方面因素影响,产生随机的自身转动与摆动,也使固化在仪器体内的测量敏感元件产生了坐标位置变化,进一步增大了测量误差,此部分误差应称为“自转差”。较高精度的磁三分量系统由于测量敏感元件的固化,也同样会受到自转差的影响。为了分析误差来源,使用 JCX-3 磁三分量探管与 JCS-1 型测斜探管,分别对石膏矿区钻孔进行测量,分析对比两类探管的测量数据(非磁矿区,可排除磁异常干扰,易于观测误差变化)。图 1 为 JCS-1 测斜探管在测量过程中自转情况:钻孔倾角小于 1°,X 分量测量元件近于水平,显示 X 分量数值随机的周期变化,表明探管处于不规则自转和摆动状态,约 40~60 m 自转一周,在使用 30 点数据平均后,仍存在原有幅度的波动。

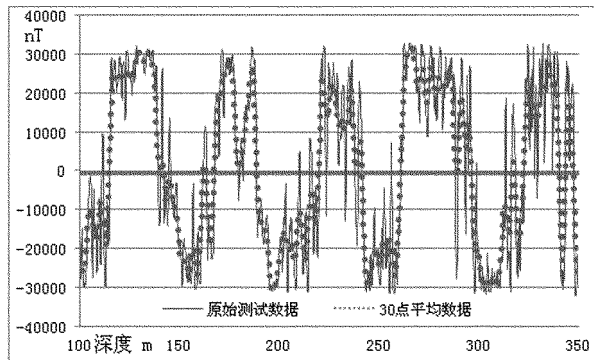


图1 JCS-1 测斜探管 X 分量数据

在使用 JCX-3 磁三分量探管对该钻孔进行测量时,显示的钻孔倾向、倾角状态如图 2 所示:100~300 m 深度范围内,倾角 0.5°~0.7°,而倾向存在 0°

~200°的周期变化,周期约 40~50 m,与 JCS-1 测斜探管自转周期基本一致。从另一方面来说,钻孔本身的轨迹不可能出现多重拐尺状态,所以基本判定这种倾角变化应是探管自身转动和摆动所致。具体机理是因为探管的重力定向元件与探管外部轴线不重合,导致探管在自身转动时,重力定向元件产生不同倾向变化,地面主机输出井孔倾向数据呈周期变化的假象。

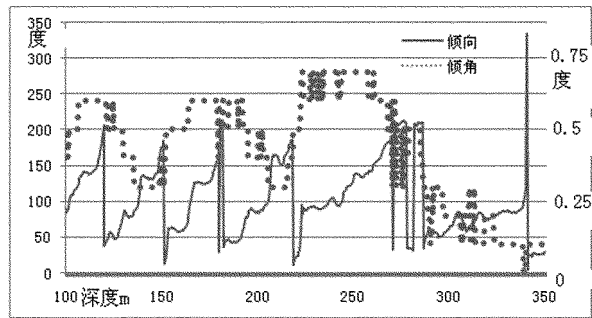


图2 JCX-3 磁三分量探管倾向、倾角数据

该 JCX-3 磁三分量探管的磁场 X 分量与水平 H 分量如图 3 所示:受探管倾向数据变化影响,磁 X 分量数据也呈 40~50 m 的周期变化。由于仪器对与倾向对应的磁场矢量数据进行了重新解算,只能从水平 H 分量数值上看出与波动周期基本同步的误差变化,其变动幅度在 8000 nT 左右。这说明,JCX-3 磁三分量探管较大的自转差是受探管转动直接影响的,并且由于探管的转动周期较长,无法使用多点平均法降低这种随机误差。

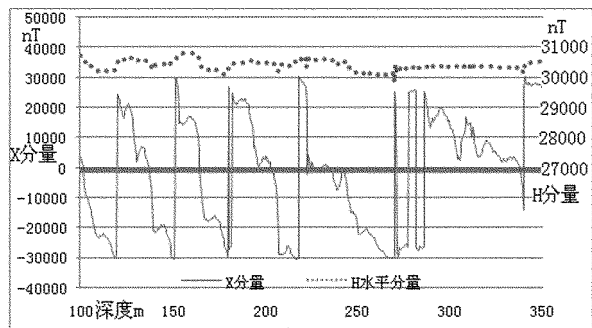


图3 JCX-3 磁三分量探管 X 分量、H 分量

### 3 改进方案

为了提高磁三分量测量精度,减小测量误差,利于资料分析。借鉴系统误差校正原理与机械无缆测斜设备结构,提出对磁测斜探管进行改造的方案,以达到测量精度提高的目的。

### 3.1 方案

将原有 JCS-1 型测斜探管进行调整。其仪器原测量数据为磁三分量  $X, Y, Z$  数据、与探管所处的倾角、倾向(相对磁北方向)数据。其磁测元件完全固化在探管中,随探管自转及倾向变化而变化。该方案将测斜探管敏感测磁元件独立起来,并安装在可以沿探管轴向转动的非磁性单元上,两端利用非磁轴承支撑,并使该单元保持一侧动偏心。在探管倾斜超过一定角度时,靠重力定向即可将测量元件基本稳定在与钻孔倾向、倾角相关的空间坐标上。

图 4a 表示为原有的机械定向结构,图 4b 表示为改进后的单个自由度的定向结构,取消了一个自由度约束和配重块,将磁通门元件固定在单自由度体上,取消了吊篮式的垂向定向方式后,增加了承受震动的能力,提高了稳定性。 $Z$  分量始终指向探管轴向, $X, Y$  为与之垂直的方向,由于探管内部的倾角传感器精度较高,达  $0.2^\circ$  左右,解算后仍可得到较精确的磁分量数据。为了进一步减小误差,采用高精度的陶瓷轴承作为径向约束体。在轴向下端采用针式结构作为轴向约束,减少转动阻力。在探管震动条件下,为保证轴针处不出现应力过大损坏,轴针下部设置带预紧弹簧的缓冲装置。

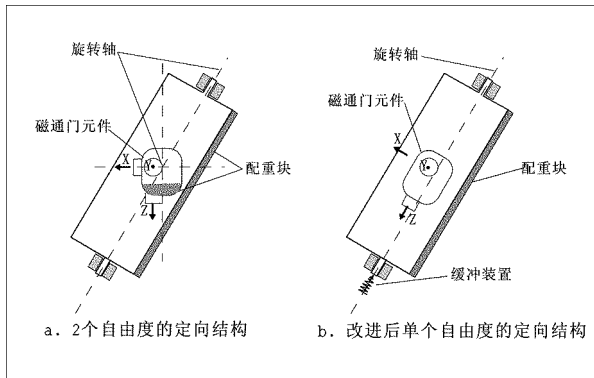


图 4 定向结构改造前后对比图

#### 3.1.1 合理可行性

(1)原有固态元件结构稳定,易于改造成为单轴回转体,刚度较大,稳定性好。

(2)原有固态元件体重量约  $500 \sim 600$  g,重量较小,易于采用微型轴承支撑,且保证较小的磨擦阻力。

(3)固态元件采用可旋转结构后,其电源与信号引用线可用测井系统电缆中的集流环连接,静态

阻力小,动态存在阻尼力,可减小随机摆幅度,提高定位精度。

(4)单个固态磁通门元件测量精度可达  $5$  nT 的分辨能力。

(5)可以使用现场模拟,求取测量元件误差,在实际测量时,利用计算程序补偿误差,达到精度最优化,且试验与实测条件的数据分析可逆。

#### 3.1.2 实施步骤与方法

(1)构建测试调试平台,首先依据质子磁力仪,寻找磁力梯度较小的地点,而后利用非磁材料组合可达要求精度的,全方位,可微调,可记录位置的测试装置,霍姆赫兹线圈均衡场建立等。

(2)在构建的不同场强条件下,校验  $X, Y, Z$  轴磁测元件的线性特征,给出相应的分段放大系数。

(3)校正敏感元件  $X, Y, Z$  相互之间的垂直度,并将测得的微小数值计入误差校正程序。

(4)不同温度条件下,根据  $X, Y, Z$  元件的响应给出误差系数。

(5)建立误差分析模型,将(2)(3)(4)项以系统误差的形式,予以计算补偿。

(6)在不同的角度下将测得的磁三分量  $X, Y, Z$  数据的模值与质子磁力仪校验,如精度不够,则重复(2)(3)(4)(5)步骤。

### 3.2 改进后效果试验

通过实验室对已构建好的单自由度定向体进行多次试验,在探管倾向  $6^\circ$  时,定向体本身方位变化较小,在  $\pm 0.5^\circ$  范围内;探管倾向  $10^\circ$  试验时,定向体本身方位变化在  $\pm 0.3^\circ$  范围内。多次重复观测数据的统计分析证明,定向体的方位变化数据呈正态分布,具有测量上的随机误差特点。

在单自由度定向体上安装磁分量测量元件后,进行现场模拟测试。磁场  $X$  分量数据见图 5,磁敏感测量元件方向与磁场水平矢量方向呈约  $45^\circ$  夹角时,所测得的磁场分量数值在  $600$  nT 范围内变动,经计算,测量中误差为  $238$  nT。对该测量数据进行  $30$  点平均后,波动范围降低至约  $100$  nT,测量中误差为  $47$  nT。经计算,更多的数据点平均方式就可以显著提高测量精度。由于该探管测量数据为连续测量,一般在井下  $1$  m 可获得  $10 \sim 15$  个磁三分量数据,多点平均数据进行资料处理一般不会影响异常形态的分析,却可以大幅度减少测量误差,在实际运用中是切实可行的。值得说明的是:在现场井中磁

三分量测量结束后,为求得水平矢量方向,必须对所测井孔进行陀螺测斜。依据陀螺测斜数据,当时在大致同样的倾角倾向条件下,对三分量探管进行地面背景场测定,可以最大程度地减少转向差。

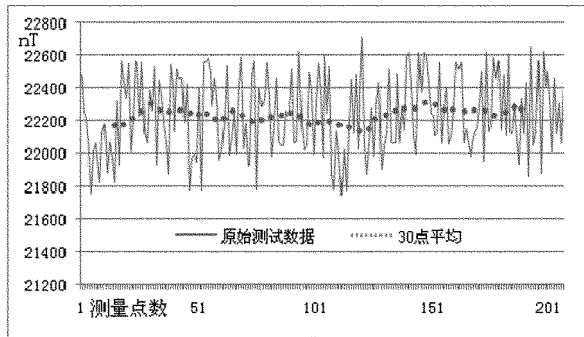


图5 改造后的系统模拟测试数据图

## 4 结论与技术前景展望

通过实测数据的误差分析,指出目前常用磁三分量仪器的主要误差来源与误差特点,转向差主要为测井探管在井下倾向变化和探管自身不规则转动引起,这有利于在数据处理时区分实际异常与误差异常。借鉴不同仪器测试原理,对JCS-1型测斜探管改造后的试验证明,在钻孔倾角 $5^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 以上时,测得的磁场矢量数据可以达到50 nT的精确度。提

高了磁异常体的探测距离,扩大井中磁三分量测量的应用范围,拓展了该系统在弱磁性异常探测中的作用。在钻孔倾角小于 $5^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 时,Z分量数据仍然可靠,只是X,Y定向误差变大,可以设想,依据高精度的倾角传感器解算倾向数据,利用电子伺服系统将磁通门元件维持在与倾向对应的方位上,同样可以达到X,Y磁矢量测量精度。

## 参考文献:

- [1] 马兆同,于钦钟,王玉敏,等. 寿光磁异常区找矿方向探讨[J]. 山东国土资源,2012,28(7):22-27.
- [2] 王赛昕,刘天佑,欧洋,等. 井中磁测资料预处理与弱信号识别[J]. 物探与化探,2014,38(1):90-95.
- [3] 张旭,甘延景,梁栋彬,等. 高精度重力磁法在苍山县沟西铁矿勘查中的应用[J]. 山东国土资源,2009,25(11):28-31.
- [4] 邱钢,徐立忠. JSC-G-10型高精度井中三分量磁测系统的研制[J]. 矿产勘查,2010,1(4):385-388.
- [5] 王庆乙. 高精度井中三分量磁测是矿山深部找矿的有效手段[J]. 物探与化探,2009,33(3):235-244.
- [6] 任振波,贾京柏,苑守成. 关于JCX-3型井磁仪器及其资料整理[J]. 物探与化探,2009,33(1):59-62.
- [7] 战双庆,刘冬节. 利用磁场空间特征对井中磁三分量的有效解释及前景展望[J]. 安徽地质,2009,19(3):190-193.
- [8] 蔡耀泽. 高精度JCX-3型井中三分量磁力仪的研制[J]. 地质装备,2006,7(5):22-23.

## The Scheme for Error Analysis and Precision Improvement of Borehole Three - component Magnetic Survey System

GUO Wenjian<sup>1</sup>, FENG Li<sup>1</sup>, HAO Guangcheng<sup>2</sup>

(1. No. 5 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Tai'an 271000, China; 2. No. 1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Jinan 250014, China)

**Abstract:** The development of metal mineral exploration "explore deep deposit" made borehole geophysical prospecting become one of the important methods for deep prospecting. Borehole three - component magnetic survey play a large role in the exploration of magnetic minerals, such as magnetite. But measurement precision of borehole three - component magnetic survey system is very low at present. It can only be used to prospect strong magnetic ore deposits, and is limited in the practical application. In order to improve measurement precision of the borehole three - component magnetic survey system, through analysis on the available measurement data, effect factors of system error and random error have been it is found ou, implementation scheme to improve the precision of the borehole three - component magnetic survey has been put forward as well.

**Key words:** Boreholes three - component magnetic survey; precision; diversionary error; improvement scheme