doi:10.3799/dqkx.2017.567

基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位方法

邓国庆,姚爱国*,龚 正,邱 敏

中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

摘要:为提高非开挖水平定向钻进定位的精度和适用范围,提出一种基于地面永磁体信标的定位导向方法,在地面布置 Φ50 mm×300 mm 永磁体信标,永磁体轴线与水平面平行,利用钻具上安装的由 5 个三轴磁强计、1 个三轴加速度计和 1 个三 轴陀螺仪构成的传感器阵列测量磁信标在钻头附近的磁梯度张量解算钻头的位置.对该定位模型进行仿真实验表明该定位方 法在深度和水平方向的定位精度均较高,理论上通过调整磁信标位置、永磁体数量、磁强计精度和基线长度在足够大的钻进 深度和距离内保持定位误差小于 1%,同时证明在有限钻具空间内基线相对越长,定位精度越高.实测实验表明环境干扰磁场 对该方法的影响非常小,具有良好的实际效果.该定位方法满足非开挖水平定向钻进施工时的实时定位导向要求,操作简单, 对场地条件要求低,大大提高了水平定向钻进定位的效率和适用范围.

关键词:水平定向钻;实时定位;永磁体信标;磁梯度张量;三轴磁强计;基线长度;钻探;工程地质. **中图分类号:** P634 **文章编号:** 1000-2383(2017)12-2336-09 **收稿日期:** 2016-11-07

Real-Time Positioning Method for Horizontal Directional Drilling Based on Ground Magnetic Beacon

Deng Guoqing, Yao Aiguo*, Gong Zheng, Qiu Min

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Determining the dynamic position of the drill bit is the key to the successful implementation of horizontal directional drilling (HDD). To improve the accuracy and the scope of application of HDD positioning technology, a new method is proposed to detect the position of the drill bit. A cylindrical permanent magnet with 50 mm in diameter and 300 mm height is placed on the ground as a magnetic beacon and the magnet axis is parallel to the horizontal plane. A sensors array which consists of five tri-axial magnetometers, a tri-axial accelerometer and a tri-axial gyroscope is attached to the bottom hole assembly and measures the magnetic gradient tensor of the magnetic beacon. Then, the position of the drill bit can be solved by the localization algorithm based on magnetic gradient tensor. The simulation analysis shows that. The simulation analysis shows that this method has high positioning accuracy in vertical direction and horizontal direction, and the position errors can be controlled within 1% through adjusting the beacon position, the number of the permanent magnets, the sensitive of magnetometers and the baseline distance. Besides, in the limited space of drilling tools, the longer the baseline is, the higher the position accuracy is. The outdoor experiment demonstrate that this method totally avoids the impact of the environmental magnetic field and has good practical effect. Conclusion can be made that this new method can be applied in trenchless HDD positioning with better effect and wider application range than other methods.

Key words: HDD; real-time positioning; permanent magnet beacon; gradient tensor; tri-axial magnetometer; baseline distance; drilling; engineering geology.

近年来非开挖水平定向钻进技术发展迅速,应 用越来越广泛.实时获取地下钻头的姿态参数和钻 头的空间位置是实现水平定向钻进精确导向的技术 关键,其一直是研究的热点.传统的导向技术是利用

基金项目:国土资源部公益行业基金项目(No.201011002-09).

作者简介:邓国庆(1989-),男,博士研究生,主要从事地质工程、定向钻井方面的研究.ORCID:0000-0002-6180-9677.E-mail:iandeng@cug.edu.cn * 通讯作者:姚爱国,ORCID:0000-0001-6517-0690.E-mail:a.yao@cug.edu.cn

引用格式:邓国庆,姚爱国,龚正,等,2017.基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位方法.地球科学,42(12):2336-2344.





图 1 足位示玑示息 Fig.1 Localization system

1.水平定向钻机;2.钻杆;3.探管;4.钻头;5.设计钻孔轨迹;6.河流(障碍物);7.信标移动设备;8.永磁体;9.地面接口箱;10.计算机

测得的钻具倾角、方位角等进行演算得到钻孔轨迹, 该方法累积误差大,实时性差,计算繁琐(Xu et al., 2005;罗武胜等,2007;Liu et al.,2012).目前在水平 定向钻进领域中,较先进定位导向技术包括有线导 向系统和无线导向仪.有线导向系统是在地面设计 钻孔上方铺设栅格线圈产生人工磁场,通过测量人 工磁场强度和方位确定钻头的位置(Roberts and Walters,1989;刘金祯等,2003).无线导向仪是在钻 头上安装磁偶极子发射源,向地表发射低频电磁场 信号,地面雷达根据检测信号的强度和相位信息计 算钻头的位置,主流导向仪如美国数字控制公司的 DigiTrack、Eclipse 系列和英国雷迪公司的 Drill Track 系列等都是基于这种方式开发的(Mercer, 1997;徐涛,2006).

有线导向技术要求在设计钻孔上方铺设线圈, 且设计轨迹位于线圈轴线正下方,对施工场地要求 高,很多场地实施不便,定位效率低.无线导向定位 方式需要手持定位仪在施工场地来回探测,对场地 条件要求高,且受地层及环境磁场干扰明显,定位深 度浅,可靠性低,对操作人员的专业素质要求高.针 对这些问题,提出了基于地面磁信标磁梯度张量测 量的定位方式,只需利用封装在钻具中的测量阵列 测量地面永磁体磁信标在测点位置的磁梯度信息即 可实时解算钻头的位置坐标,对施工场地要求低,方 便易行,且受干扰磁场的影响小.通过仿真分析和实 测实验验证了该方法的有效性,该方法提高了水平 定向钻进定位的效率和适用范围.图 1 为该定位方 法的示意图.

1 磁梯度张量定位算法

在地面放置 Φ 50 mm×300 mm 的圆柱形永磁 体作为磁信标,通过钻具中的磁传感器阵列测量磁 信标在测点处的磁场分布,并计算磁场分量在相应 方向上的变化率,最终得到该点相对于磁信标的位 置坐标实现定位.

1.1 磁梯度张量

位场(磁/重力场)梯度是位场变化率最大的方向,在直角坐标系中由 3 个坐标轴的方向导数表示 (刘鹏飞等,2015).磁梯度张量是由磁感应强度的三 分量 (B_x , B_y , B_z)在直角坐标系 3 个方向 (x,y,z)的方向导数构成的一个二阶张量,共 9 个 元素,记作G,如下式:

$$G = \nabla B = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix}.$$
(1)

磁传感器阵列在无源空间中,由 Maxwell 方程 组知道磁场强度的散度和旋度均为 0,故有:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0, \qquad (2)$$
$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} = 0,$$

$$B_{xy} = B_{yx}$$

$$\textcircled{D} : \quad B_{yz} = B_{zy} , \qquad (3)$$

$$B_{xz} = B_{zx}$$

由方程(2)(3)可知磁梯度张量 G 中只有 5 个元素 是独立的.

1.2 定位算法

该定位算法是基于磁偶极子的磁场分布模型推 导得到的,一般的磁源到场点的距离大于 2.5 倍磁 源的最大尺寸,即可视磁源为磁偶极子,满足工程精 度要求(张朝阳等,2010).李金等(2009)也指出,当 永磁体到场点的距离大于 10 倍的永磁体尺寸的前 提下,可将永磁体作为磁偶极子.定位用 Φ50 mm× 300 mm 的圆柱形永磁体作为磁信标,定位点到信 标的距离大于 10 倍的永磁体尺寸,可将永磁体信标 视为磁偶极子源.

由 Biot-Savart 定律可知,距离磁偶极子源 r 处 的空间磁场分布模型为:

$$\boldsymbol{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{p}}{r^3} , \qquad (4)$$

式中:μ₀ 为真空磁导率; **p** 为磁偶极子源的磁矩; **r** 为磁源到测点的距离; **n** 为**r** 的单位矢量.

 $B_1 - B =$

$$\frac{\mu_{0}}{4\pi} [3(\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{p}] \left(\frac{1}{(r+\mathrm{d}r)^{3}} - \frac{1}{r^{3}}\right)$$
$$= \frac{\mu_{0}}{4\pi} [3(\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{p}] \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r^{3}}\mathrm{d}r\right)\right]$$
$$= -\frac{3}{r} \left[\frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{3(\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{n})\boldsymbol{n} - \boldsymbol{p}}{(r+\mathrm{d}r)^{3}}\right] \mathrm{d}r = -\frac{3}{r} \boldsymbol{B} \mathrm{d}r,$$

又因为:

$$\boldsymbol{B}_{1} - \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \nabla B_{x} \cdot \boldsymbol{n} \, \mathrm{d}r \\ \nabla B_{y} \cdot \boldsymbol{n} \, \mathrm{d}r \\ \nabla B_{z} \cdot \boldsymbol{n} \, \mathrm{d}r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix}.$$

 $\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\mathrm{G}\boldsymbol{\cdot}\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}\boldsymbol{r}\,,$

所以有:
$$-\frac{3}{r}\mathbf{B}\,\mathrm{d}r = G \cdot \mathbf{n}\,\mathrm{d}r$$
,

最终计算出传感器阵列的位置坐标:

$$\boldsymbol{r} = \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{n} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = -3G^{-1}\boldsymbol{B} = -3G^{-1} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}. (5)$$

由公式(5)可知,测点的位置坐标与磁偶极子在 测点处的磁场三分量和磁场梯度张量呈线性关系, 即在不考虑环境干扰磁场时,通过测量磁偶极子在 测点处的磁场矢量和磁场梯度张量可以得到测点的 位置坐标(*x*,*y*,*z*),实现实时定位.

2 测量阵列

测量阵列中磁传感器之间的基线距离相比磁源 到测点的距离很小,因此可用差分近似微分来计算 梯度张量.磁梯度测量中常用弱磁探测仪,如精度较 高的超导量子磁力仪、磁通门传感器等.鉴于钻具空 间有限,定位方法利用 MEMS 三轴磁强计来构成磁 梯度测量阵列进行磁梯度测量.常见的用来测量磁 梯度张量的测量阵列有三角形、十字形、四面体形和 六面体形等结构形式(刘丽敏,2012),三角形和十字 形测量阵列能够满足钻具狭小空间要求,刘丽敏 (2012)证明十字形测量阵列相比其他形式精度高, 系统误差小,满足水平定向钻进的要求,本文基于十 字形传感器阵列进行定位方法的研究.图 2 为十字 形测量阵列结构图,S1、S2、S3、S4 为三轴磁强计,各 磁强计的 *x、y、z* 轴互相平行,S1 和 S3(或 S2 与 S4)的距离为磁梯度张量测量单元的基线长度.

由于水平定向钻进过程中,测量阵列的姿态一 直在变化,知道阵列的姿态可计算坐标轴的旋转系 数,从而得到阵列坐标系与地面参考坐标系的关系 (王卫平等,2015),最终得到参考坐标系下的磁场分 量和磁梯度张量.为此在磁场梯度张量测量阵列中 捷联随钻测量单元,由一个三轴磁强计 S5,一个三 轴加速度计 S6 和一个三轴陀螺仪 S7 构成,安装在 磁场梯度张量测量阵列的中心,各传感器三轴与其 他磁强计的三轴对应平行.利用三轴陀螺仪测量钻 具姿态不受环境磁场的干扰,磁强计 S5 除了和加速 度计 S6 组合对陀螺仪 S7 计算的姿态进行修正和补



图 2 十字形测量阵列结构 Fig.2 Structure of cross measurement array

偿以保证获取准确的钻具姿态,还可以测量阵列中 心的磁感应强度.为了减小干扰,测量阵列安装在无 磁钻铤中.

3 基于差分处理的水平定向钻进定位模型

在地面磁信标位置建立参考坐标系 O-XYZ, 其中原点 O 位于永磁体轴心,X 轴指向北,Y 轴指 向东,Z 轴竖直向下,永磁体轴线沿 X 轴,如图 3 所 示.在测量阵列处建立钻具坐标系 O'-X'Y'Z',原点 O'在阵列中心,X'轴沿钻具轴线方向,三轴与传感 器的三轴对应平行(刘元元等,2013).

式(5)的定位算法易受到环境磁场(包括地磁 场、钻具磁场、管线等等)的干扰,本文在进行水平定 向钻进定位时采取差分处理消除地磁场等环境磁场 的影响,过程如下:

(1) 在进行水平定向钻进定位时,用磁屏蔽罩将 永磁体罩住(属于被动磁屏蔽技术,屏蔽罩用软铁或 坡莫合金等高磁导率材料制成,对恒定磁场具有良 好的屏蔽效果,屏蔽罩的厚度以其不被饱和磁化来 确定),启动第一轮测量,得到磁强计 S1、S2、S3、S4 和结联在测量阵列中心的随钻测量单元里的磁强计 S5 的磁感应强度三分量为 (B_{ix}^{1} , B_{iy}^{1} , B_{iz}^{1}),其中 i=1,2,3,4,5,测量结果为环境磁场在钻具坐标系 下的三分量.

(2)去掉屏蔽罩,启动第二轮测量,得到磁强计 S1、S2、S3、S4 和 S5 的 磁 感 应 强 度 三 分 量 为 $(B_{ix}^2, B_{iy}^2, B_{iz}^2)$,其中 i=1,2,3,4,5,此部分测量的 磁感应强度是由地面磁信标在测点处的磁场和环境 磁场的叠加值.

(3)将两次测量结果进行差分处理,即:

 $(B_{ix}^{'}, B_{iy}^{'}, B_{iz}^{'})^{T} = (B_{ix}^{2}, B_{iy}^{2}, B_{iz}^{2})^{T} - (B_{ix}^{1}, B_{iy}^{1}, B_{iz}^{1})^{T}, \qquad (6)$



图 3 坐标系示意图 Fig.3 Reference coordinate system

式中i=1,2,3,4,5, $(B'_{ix},B'_{iy},B'_{iz})$ 即为消除环境干扰 磁场后得到的磁信标在钻具坐标系下各磁强计位置的 磁感应强度分量,该过程极大程度的消除了包括地磁 场、钻具磁场等其他环境磁场对定位算法的干扰.

由本文设计的测量阵列测量钻具的姿态,包括倾角 φ 、工具面角 α 和方位角 θ ,得到坐标旋转矩阵:

$$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix},$$
$$R_{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix},$$
$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & o \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

利用旋转矩阵对式(6)中的 $(B'_{ix}, B'_{iy}, B'_{iz})$ 进行坐标转换,得到磁信标在参考坐标系 O-XYZ 下各磁强计处的磁感应强度为:

 $(B_{ix}, B_{iy}, B_{iz})^{T} = R_{\varphi}^{T} R_{\theta}^{T} R_{a}^{T} (B_{ix}^{'}, B_{iy}^{'}, B_{iz}^{'})^{T}, \qquad (7)$ $\vec{x} \oplus i = 1, 2, 3, 4, 5.$

根据设计的测量阵列结构,利用式(7)得到的各 磁强计的磁感应强度计算磁信标在阵列处的磁梯度 张量G的5个独立元素为:

$$B_{xx} = \frac{\partial B_x}{\partial x} = \frac{1}{d} (B_{1x} - B_{3x}),$$

$$B_{xy} = \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{1}{d} (B_{2x} - B_{4x}),$$

$$B_{xz} = \frac{\partial B_x}{\partial z} = \frac{1}{d} (B_{1z} - B_{3z}),$$

$$B_{yy} = \frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{1}{d} (B_{2y} - B_{4y}),$$

$$B_{yz} = \frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{1}{d} (B_{2z} - B_{4z}).$$
(8)

根据式(2)、(3)和(8)得到磁梯度张量G的9 个元素.磁体的尺寸越大其磁场的二阶张量越小(于 振涛等,2014),地球作为一个尺寸巨大的磁体,总场 的梯度大约为0.02 nT/m(张光等,2013),与一般磁 性物体相比,其二阶张量远小于人造磁源磁场的二 阶张量,且测量阵列中的基线距离很小,地磁场对磁 梯度张量测量的影响很小,同时通过经差分处理的 定位模型,很大程度消除了地磁场、钻具磁场等干扰 磁场对各磁强计测量磁信标磁感应强度的影响,所 以干扰磁场对磁梯度张量测量的影响可以忽略.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = -3G^{-1} \begin{bmatrix} B_{5x} \\ B_{5y} \\ B_{5z} \end{bmatrix}, \qquad (9)$$

其中:(B_{5x},B_{5y},B_{5z})是经差分处理消除了环境干 扰磁场后的磁信标在阵列中心的磁感应强度;x 和 y 即为钻头的水平位置坐标;z 为钻头的深度.

经过差分处理最终得到的式(9)定位公式消除 了环境干扰磁场对磁场梯度张量和定位算法的影 响,同时设计的测量阵列消除了干扰磁场对钻具姿 态测量的影响,所以地磁场和钻具等干扰磁场对定 位精度影响很小.

4 仿真计算与分析

根据提出的针对水平定向钻进定位的算法模型 进行了计算仿真分析,具体分析了该定位算法在水平 定向钻进中应用的适用性,包括影响定位精度的因素 (不考虑噪声、系统的误差等):(1)地下测量阵列与地 面磁信标的位置距离关系;(2)永磁体个数;(3)磁强 计测量精度;(4)基线长度;(5)姿态测量误差.在水平 定向钻钻进领域关注的空间主要是地层中,公式中的 磁导率为真空磁导率,由隋吉东等(1998)证明如果是 非强磁性地层,真空磁导率与地层磁导率基本相同, 所以在仿真过程中基于真空磁导率计算.

仿真初始条件设置如下:

地面作为磁偶极子的永磁体选用高磁的烧结圆 柱形汝铁硼永磁体,沿轴向均匀磁化,磁体各参数如 表 1.根据水平定向钻进特点设定两条钻进路径,第 一条为在x=5 m,y=5 m 平面,沿Z 轴(深度)(1~ 40 m)钻进,间距 1 m 取一个定位点,共 40 个定位 点;第二条为Z=10 m,y=5 m,沿X 轴(-60~60 m)间距 1 m 取一个定位点;磁传感器测量精度 为 1 pT;基线长度为 10 cm,阵列姿态角均为 0°.

4.1 测量阵列与磁信标的空间位置对定位的影响

根据初始条件进行仿真分析得到图 4 所示的结果,(a)为钻进路径沿 Z 轴方向时的定位误差,(b) 为钻进路径沿 X 轴方向时的定位误差.在第一条钻 进路径中,深度定位(Z 方向)的中误差为 0.009 m, 最大误差为 0.040 m,最大相对误差 0.11%;X 方向 定位的中误差为 0.017 m,最大误差为 0.052 m,相 对误差为 1.04%;Y 方向定位误差相对偏大,中误差 为 0.042 m,最大误差为 0.129 m,相对误差为

表1 永磁体信标参数

牌号	长度 L(m)	直径 D(m)	剩磁 $B_r(T)$	矫顽力 H _{cj} (kA/m)
52M	0.3	0.05	1.4	1 035

2.58%.Y方向的定位误差相对偏大,是因为信标磁 矩沿 X 轴,当测点位置沿 Z 轴变化,而 Y 坐标值不 变,远距离测点的 Y 方向磁场分量比 X 和 Z 方向小 很多,导致在固定精度的磁强计下 Y 方向的定位误 差相对偏大.可用一个永磁体与现有永磁体信标呈 轴向正交并沿水平方向布置来增加 Y 方向磁矩,从 而增加远距离测点 Y 方向的定位精度.当钻头沿第 二条路径钻进时,X 方向定位的中误差为 0.038 m, 最大误差为 0.117 m,其相对误差为 0.23%;Y 方向 定位的中误差为 0.081 m,最大误差 0.150 m,其相 对误差为 3%;Z 方向定位的中误差为 0.085 m,最 大误差 0.280 m,相对误差为 2.8%.仿真结果说明地 下测量阵列离地面磁源越远定位误差越大,且该定 位算法能够满足水平定向钻进的定位精度要求.

4.2 永磁体数量对定位的影响

永磁体体积越大,其磁矩越大,磁矩大小对定位 精度影响很大.考虑到实用性和永磁体制造工艺,单 个永磁体的尺寸不能太大,需要通过增加永磁体数量 来增大磁矩,定量分析永磁体数量对定位精度的影响 规律能够根据水平定向钻进定位距离和现场条件选 择合适的磁体数量以满足施工要求.永磁体数量增加 到4个和8个,其他条件不变,仿真结果如图5.

从仿真结果中可以看出,当永磁体数量增加到4 个时,最大误差都在厘米级,最大相对误差为1.18%, 随着磁体数量增加到8个,定位最大相对误差为 0.58%.当钻进达到较大深度或测点距磁信标较远时, 可以增加磁体数量以提高远距离的定位精度,增加有 效定位距离.

4.3 磁传感器的精度对定位的影响

为分析磁传感器精度对定位的影响,仿真时将传 感器的分辨率提高到 0.1 pT,其他条件不变,仿真结 果如图 6 所示.

对比图 4 和图 6 可知,磁传感器精度提高到 0.1 pT时,定位误差显著减小,有效定位距离明显增 加.磁传感器的精度对定位误差影响明显,精度越高, 其定位效果越好.

4.4 基线长度对定位的影响

在水平定向钻进时,磁传感器阵列封装在近钻 头钻具中,空间狭窄,基线距离 d 一般小于 0.2 m.其



初始条件下的定位误差 Fig.4 Position errors at initial conditions a.沿 Z 轴(深度)方向钻进的定位误差;b.沿 X 轴方向钻进时的定位误差

图 4









Fig.6 Position errors with the magnetic sensor of 0.1 pT's precision

他条件不变,将基线长 d 变为 0.05 m 和 0.15 m 时, 对应的定位结果如图 7.

由仿真结果可知,当d = 0.05 m 时的定位精度 最低,当d=0.15 m 时的定位精度最高,有效定位距 离最大.随着基线距离越来越大,定位精度提高的幅 度逐渐减小,说明在一定距离内都存在一个最优基 线距离,使得定位精度最高.在非开挖钻井时基线距 离较小的前提条件下,基线距离相对越大,定位精度









越高,定位有效距离越大.这是由于基线较短的前提下,基线相对越长,磁场梯度信息的准确度越高,所 以定位精度越高.

4.5 姿态测量误差对定位的影响

目前在钻井领域姿态测量误差的精度在±0.5° 以内(朱荣和周兆英,2002;王瑞等,2010),利用高精 度陀螺仪进行姿态测量的精度达到±0.004°(Griffin,2009).为分析姿态测量误差对定位精度影响的 程度,姿态角增加0.5°的误差,得到的定位结果如图 8 所示.比较图4 与图8可知,姿态传感器的姿态测 量误差小,对定位精度的影响非常有限.

5 实测实验

为验证该定位方法的实际效果,利用霍尼韦尔

的 HMC2003 三轴磁强计和 MPU6050 模块构成定 位测量阵列进行了初步的实测实验.HMC2003 三轴 磁强计的量程为±2Gs,分辨率为4nT,比仿真设置 的磁强计精度低,但满足初步的实测实验要求. MPU6050 模块包括一个三轴加速度计和一个三轴 陀螺仪,并集成了数据处理子模块,内置了动态卡尔 曼滤波算法,姿态测量精度达到 0.01°,试验时对几 个测点处的阵列姿态进行测量是不连续测量,不考 虑时间漂移误差,满足初步实验要求.设置一个磁信 标,其参数与仿真设置的参数相同.

将磁信标依次布置在不同楼层窗户口,分别在 楼外空旷地带选取4个定位点1#(3m,3m, 3.2m)、2#(3m,3m,10.3m)、3#(10m,3m, 10.3m)和4#(20m,3m,10.3m)进行定位实验.利 用本文的定位方法得到4个定位点的定位误差如图 9所示.4个定位点的实测结果显示最远的4#点定



Fig.9 Position errors of experiment

位精度最低, X 方向误差为 0.610 m, 相对误差为 3.05%, Y 方向最大误差为 0.261 m, 相对误差为 8.70%, Z 方向的最大误差为 0.513 m, 相对误差为 4.98%, 与仿真结果相比误差较大, 是因为实验的磁强计精度较低, 且未进行严格的误差补偿, 但初步实测结果表明该定位方法的实际效果基本满足水平定向钻进定位的要求.

6 结论

(1)本文提出一种基于地面磁信标的水平定向 钻进定位方法,通过在地面设置永磁体信标,利用封 装在钻头附近的传感器阵列测量地面磁信标在钻头 处的磁场分量和磁梯度张量,通过经差分处理的定 位算法解算钻头与地面信标的相对位置关系实现钻 具的定位.

(2)实验分析说明该定位方法对非开挖水平定 向钻进的定位具有较高实时性和精度,且不受地磁 场、钻具磁场等干扰磁场的影响,在深度方向和水平 方向均能满足实际施工时的定位导向要求;其沿水 平方向的有效定位距离大于深度方向(若要求深度 方向定位距离大,将磁体沿轴向竖直向下放置);通 过增加永磁体信标数量能在较大的钻进深度和距离 内保持定位误差小于 1%;磁传感器的精度对定位 影响明显,其精度越高,有效定位距离越大.同时,由 于钻具空间的限制,测量阵列基线相对越长,定位精 度越高;姿态传感器的姿态测量误差小,对定位精度 的影响可忽略.

(3)该定位算法结构简单,与其他水平定向钻进 定位方法比较,不需要在现场来回探测,也不需要在 设计钻孔上方布置线圈,实施定位时操作简单,定位 效率高,且不受环境干扰磁场的影响,对场地条件要 求低,适用范围更广.

该定位方法仍需要从数学上严格讨论磁噪声对 测量定位的影响并给予补偿,同时还需进行钻进现 场的实测实验,这些都有待在下一阶段的研究工作 中完成.

References

- Griffin, J., 2009. New Gyropilot for Horizontal Directional Drilling. *Trenchless Technology*, 26(1-2):97-98(in Chinese).
- Li, J., Zheng, X. L., Hou, W. S., et al., 2009. Simulation and Experimental Research of Magnetic Field Produced by Permanent Magnet Used in Magnetic Localization. Journal of System Simulation, 21(18):5919-5922(in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Z., Jin, J., Chen, X. H., et al., 2003. Application of Ground Beacon Directional Control System in Pipeline Crossing through Haihe River. *Petroleum Engineering Construction*, 29(6):58-60(in Chinese).
- Liu, L. M., 2012. Configuration Design, Error Analysis and Underwater Target Detection of Fluxgate Tensor Magnetometer (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. F., Liu, T. Y., Yang, Y. S., et al., 2015. An Improved Tilt Angle Method and Its Application: A Case of Weigang Iron-Ore Deposit, Jiangsu. *Earth Science*, 40 (12):2091-2102 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T., Wang, B.X., Cui, Y.Y., et al., 2012. Direction and Position Measurement in HDD Using Two Magnetic Fields. Sensors and Actuators A: Physical, 185:168-172.doi;10.1016/j.sna.2012.08.005
- Liu, Y.Y., Wang, S.C., Zhang, J.S., et al., 2013. Research on the Eleventh Generation IGRF. Acta Seismologica Sinica, 35(1):125-134(in Chinese with English abstract).
- Luo, W. S., Xu, T., Du, L. B., 2007. Directional Drilling Attitude Measurement and Azimuth Correction with Accelerometers and Magnetometers. *Journal of National University of Defense Technology*, 29(1):106-110(in Chinese with English abstract).
- Mercer, J. E., 1998. Walkover Locating Technology. *Pipeline* & Gas Journal, 255(6): 58-60.
- Rpberts, G. F., Walters, P. H., 1989. System and Method for Locating an Underground Probe Having Orthogonally Oriented Magnetometers, US004, 875, 014.
- Sui, J.D., Liu, Z.Z., Cai, D.L., et al., 1998. The Study of Low Frequency Electromagnetic Wave Rapidly Measuring Soil Moisture Content. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 29(1): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R., Wang, B.X., Kang, J., et al., 2010. Attitude Measurement and Error Compensation for Horizontal Direc-

tional Drilling. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 50(2):215-218 (in Chinese with English abstract).

- Wang, W.P., Zeng, Z.F., Wu, C.P., 2015. Coil Attitude Influence and Attitude Correction Method for Frequency Domain Airborne Electromagnetic System. *Earth Science*, 40(7):1266-1275 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T., 2006. Research on MWD Surveying Method and Locating Technique of Horizontal Directional Drilling(Dissertation). National University of Defense Technology, Changsha (in Chinese with English abstract).
- Xu, T., Luo, W. S., Lu, H. B., et al., 2005. Design of Underground Sonde of a Directional Drilling Locator System. Sensors and Actuators A: Physical, 119(2):427-432. doi:10.1016/j.sna.2004.10.030
- Yu,Z.T., Lü, J.W., Fan, L.H., et al., 2014. Improved Method of Magnetic Localization Based on Magnetic Gradient Tensor. Systems Engineering and Electronics, 36(7): 1250-1254(in Chinese with English abstract).
- Zhang, G., Zhang, Y. T., Li, Z. N., et al., 2013. Localizing Method of Magnetic Field Gradient Tensor under Carriers Moving Parallelly. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition), 41 (1):21-24(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Y., Xiao, C. H., Gao, J. J., et al., 2010. Experiment Research of Magnetic Dipole Model Applicability for a Magnetic Object. *Journal of Basic Science and Engineering*, 18 (5):862-868(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R., Zhou, Z. Y., 2002. A MEMS-Based Attitude Reference System. Measurement & Control Technology, 21 (10):6-8,13(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

Griffin, J., 2009. 用于水平定向钻进的新型陀螺导向仪. 非开

- 李金,郑小林,侯文生,等,2009.用于磁定位的永磁体磁场仿 真与实验研究.系统仿真学报,21(18):5919-5922.
- 刘金祯,金键,陈雪华,等,2003.地面信标控向系统在海河穿 越中的应用.石油工程建设,29(6):58-60.
- 刘丽敏,2012. 磁通门张量的结构设计、误差分析及水下目标 探测(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 刘鹏飞,刘天佑,杨宇山,等,2015.Tilt梯度算法的改进与应用:以江苏韦岗铁矿为例.地球科学,40(12):2091-2102.doi:10.3799/dqkx.2015.185
- 刘元元,王仕成,张金生,等,2013.最新国际地磁参考场模型 IGRF11研究.地震学报,35(1):125-134.
- 罗武胜,徐涛,杜列波,2007.基于加速度计和磁强计的定向 钻进姿态测量及方位校正.国防科技大学学报,29(1): 106-110.
- 隋吉东,刘振忠,蔡德利,1998.用低频电磁波速测土壤水分的研究.农业机械学报,29(1):42-48.
- 王瑞,王伯雄,康健,等,2010.水平定向钻进随钻姿态测量及 误差补偿.清华大学学报:自然科学版,50(2): 215-218.
- 王卫平,曾昭发,吴成平,2015.频率域航空电磁系统线圈姿态变化影响及校正方法.地球科学,40(7):1266-1275.
- 徐涛,2006.水平定向钻随钻测量方法及定位技术研究(博士 学位论文).长沙:国防科技大学.
- 于振涛,吕俊伟,樊利恒,等,2014.基于磁梯度张量的目标定 位改进方法.系统工程与电子技术,36(7):1250-1254.
- 张光,张英堂,李志宁,等,2013.载体平动条件下的磁梯度张 量定位方法.华中科技大学学报:自然科学版,41(1): 21-24.
- 张朝阳,肖昌汉,高俊吉,等,2010.磁性物体磁偶极子模型适 用性的试验研究.应用基础与工程科学学报,18(5): 862-868.
- 朱荣,周兆英,2002.基于 MEMS 的姿态测量系统.测控技术, 21(10):6-8,13.