◀钻采机械▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.06.023

旋转磁场定向测距随钻测量仪的研制与试验

宗艳波[1,2]

(1.中国石化石油工程技术研究院,北京 100101;2.北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100191)

摘　要:采用水平对接连通井开发煤层气时,为了确保水平井能够与洞穴井准确连通,需要给司钻人员提供准确的导向信息,即需要精确测量 2 口井的相对距离和方向。通过研究旋转磁场信号强度与相对位置关系,根据正交磁偶极子模型,提出了一种旋转磁场定向测距方法,研制了旋转磁场定向测距仪样机,进行了样机的地面试验和现场试验。该样机主要包括近钻头强磁短节、井下数据采集系统和地面解算系统 3 部分。地面试验装置包括转速可调的永磁短节台架、姿态可调的数据采集系统台架和轨道正交的 50 m×30 m 试验场地。地面试验结果表明,30 m以内的定位误差不超过 0.1 m。现场试验结果表明,钻头距离洞穴井 80 m 时就可以探测到有效信号,偏航角平均误差小于 1.5°,能够用于连通井的引导钻进。试验结果说明,利用旋转磁场将钻头与洞穴井靶点耦合为一个闭环系统,进行 2 口井的相对定位是可行的。

关键词:连通井 旋转磁场 随钻测量 定向测距

中图分类号:TE927^{+}.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001-0890(2012)06-0110-05

Development and Field Test of Rotating Magnetic MWD Range Finder

Zong Yanbo[1,2]

(1. *Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering*, *Beijing*, 100101, *China*; 2. *School of Electron & Information Engineering*, *BeiHang University*, *Beijing*, 100191, *China*)

Abstract: During the drilling of horizontal intersection wells for developping coalbed methane, the relative distance and direction between two wells should be measured in real time and accurately to ensure the horizontal well trajectory being intersected with the cave wells, and provide precise geosteering information for the driller. By studying the relationship of signal strength of rotating magnetic field and relative position, a rotating magnetic directional range finding method is proposed according to the model of orthogonal magnetic dipole, and a directional range finding device prototype is developed. It has been tested on surface and at wellsite. This prototype includes near bit permanent magnet sub, downhole data acquisition system and surface interpreting computer. The surface testing device includes a permanent magnet sub bench that can adjust rotating speed, an attitude adjustable bench to fix the data acquisition system, 50 m×30 m testing site with orthogonal track. The ground test result shows that the positioning error is less than 0.1 m within a distance of 30 meters. The downhole data acquisition system can receive effective signals when the bit is 80 meters far from the cave well, and the mean direction error is less than 1.5°, it can direct horizontal intersection well drilling. The testing result proves that the distance and direction measurement technique is feasible by coupling the bit and target point of cave well into a closed-loop system with rotating magnetic field.

Key words: horizontal intersection well; rotating magnetic field; measuring while drilling; distance and direction measurement

1　概　述

井眼轨迹的高精度测量是复杂结构井井眼轨迹精确控制的关键[1]。随着特殊油气井开采和定向钻井技术应用范围的日益扩展,对井眼轨迹控制的要求越来越高,这对于单井眼轨迹的传统随钻测量技术

收稿日期:2012-05-29;**改回日期**:2012-10-08。

作者简介:宗艳波(1979—),男,河南内黄人,2002 年毕业于大庆石油学院应用地球物理专业,2009 年获天津大学检测技术与自动化装置专业博士学位,工程师,主要从事随钻测量与控制方面的研究工作。

联系方式:(010)84988627,zongyb.sripe@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目"钻井轨迹近钻头有源交变磁场随钻测量方法研究"(编号:51104006)部分研究内容。

提出了严峻挑战，因为其无法满足非常规油气开采中特殊结构井对钻井轨迹的精确测量需求。如在煤层气开发水平对接连通井中，为了确保水平井能够与洞穴井准确连通，需要给司钻人员提供准确的导向信息，即需要精确测量 2 口井的相对距离和方向。

从钻头与目标井靶点构成的闭环系统角度出发，国内外先后提出几种直接测量钻头与目标靶点之间相对位置与方向的方法：A. F. Kuckes[2] 提出了旋转磁场测距系统（RMRS），在成对平行井和水平对接连通井的引导定位中取得了较好的效果，其有效测距范围为 40～50 m；N. M. Rache，S. AI-Khodhori，R. T. Oskarsen 和胡汉月等人[3-6] 将该方法用于引导水平井对接连通，随着两井对接技术服务的市场需求，该技术得到进一步发展，目前已被视为精确钻井轨迹导向定位的行业标准。美国科学钻井公司的被动磁测距系统（MagTraC）用于防碰钻进时，其有效测距范围为 15～25 m[7]；针对井间距测量，该公司还提出了磁场导向系统（MGT）和单芯电缆导向（SWG）技术。王以法等人[8] 总结了地下 GPS、地下雷达和地下 CT 等 3 种可能的地下定位系统，指出发射波段严重制约着地下定位系统的性能；李子丰等人[9] 提出一种利用声波进行井下雷达钻头定位的方法，以测量近钻头和目标靶点间的相对位置；王德桂等人[10] 通过研究管柱形磁源空间的磁场分布规律，初步研究了磁场矢量引导系统的有效测量范围。

但水平对接连通井的洞穴井直径一般不超过 1 m，而传统 MWD 钻井的靶区半径一般为 20～30 m，无法满足技术要求。交变磁场能够将正钻井和洞穴井耦合为一个闭环系统，其中磁场信号强度由相对位置决定，磁场信号频率由钻铤的转速确定，因此根据交变磁场信号能够确定井间相对位置，国外 RMRS 技术和 MGT 技术是这一思想的成功应用。国内还没有相关仪器。为此，笔者在对旋转磁场信号传播模型和导向定位模型进行机理研究的基础上[11]，研制了旋转磁场导向测量仪样机，并进行了地面和现场试验。

2　旋转磁场定向测距原理

2.1　旋转磁场空间传播特性

根据毕奥-萨伐尔定律[2]，假设磁偶极子位于坐标原点 O，其远场 $P(r,\theta,\varphi)$ 的磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 为：

$$\boldsymbol{H}=\frac{3M}{8\pi r^3}\sin 2\varphi\cos\theta\boldsymbol{i}+\frac{3M}{8\pi r^3}\sin 2\varphi\sin\theta\boldsymbol{j}+\frac{M}{8\pi r^3}(3\cos 2\varphi+1)\boldsymbol{k} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{H}$ 为 $P(r,\theta,\varphi)$ 的磁场强度，A/m；r 为目标位置 P 到坐标系原点 O 的距离，m；M 为磁矩，A · m²；θ 为原点 O 到远场 P 的矢量 $\overrightarrow{OP}$ 在 xy 平面的投影与 x 轴的夹角，(°)；φ 为原点 O 到远场 P 的矢量 $\overrightarrow{OP}$ 与 y 轴的夹角，(°)；符号 $\boldsymbol{i},\boldsymbol{j},\boldsymbol{k}$ 分别代表 x，y 和 z 轴向分量。

式(1)为静态磁偶极子的空间任意点磁场强度表达式。

实际钻井过程中，永磁短节随钻头处于钻进与旋转的复合运动状态，所产生的磁场为椭圆极化磁场，其磁场空间信号方向如图 1(a)所示。由于椭圆极化磁场信号表现为交变信号，其幅度随距离变化，而频率随钻铤转速变化，这与常规 MWD 所测地磁信号为直流信号有很大区别。需要设计专用测量电路。由于旋转磁场的方向不同于静磁场，需要构建基于椭圆极化磁场的定位算法。

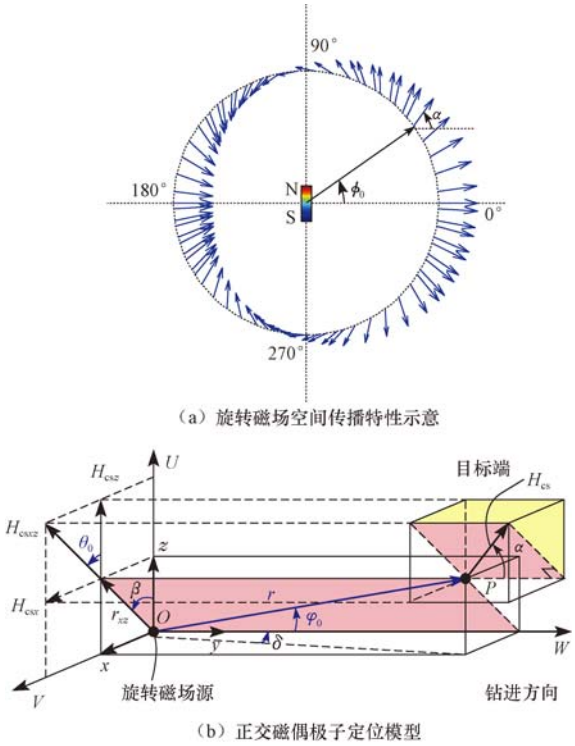

图 1　旋转磁场空间传播方向与正交磁偶极子定位模型

Fig. 1　Direction of rotating magnetic field propagation and positioning model of orthogonal magnetic dipole

2.2　旋转磁场定位测距算法

为利用可测交变磁场信号计算远场点 $P(r,\theta_0,$

φ_0)坐标，建立如图 1(b)所示的近钻头旋转磁场端与目标端的定位模型。其中 P 为此空间远场任意一点，即目标井测量单元传感器所在位置。正交磁偶极子 M_c，M_s 分别与 U 轴和 V 轴重合，所以 M_c，M_s 与 W 轴构成直角坐标系，则 M_c，r，H_c 共面，M_s，r 和 h_s 共面。根据毕奥-萨伐尔定律，目标井靶点 P 的磁场强度 H_t 为 H_c 与 H_s 之和。

由于 M_c 和 M_s 随旋转速度 ω 正弦变化，且相位相差 $\pi/2$，所以由正交磁偶极子所产生的磁场强度 H_c，H_s 大小变化而方向不变，则定义参考场 $H_{cs}=H_c\times H_s$，其方向与转速 ω 无关，可用来表征正交磁偶极子的固有特征，其表达式为：

$$H_{cs}=\frac{M_cM_s}{(4\pi r^3)^2}[3\sin\varphi_0\cos\varphi_0\sin\theta_0\boldsymbol{i}+(3\cos^2\varphi_0-2)\boldsymbol{j}+3\sin\varphi_0\cos\varphi_0\cos\theta_0\boldsymbol{k}] \quad (2)$$

式中：M_c 为余弦方向的磁矩，A·m^2；M_s 为正弦方向的磁矩，A·m^2；φ_0 为 $\overrightarrow{OP}$ 与 y 轴之间的夹角，称为相对方位角，(°)；θ_0 为 $\overrightarrow{OP}$ 在 xz 平面的投影与 z 轴的夹角，称为相对工具面角，(°)。

定义 H_{cs} 与 W 轴的夹角为特征方位角 α，则有：

$$\tan\alpha=\frac{\sqrt{H_{csx}^2+H_{csz}^2}}{H_{csy}}=\frac{3\sin2\varphi_0}{3\cos2\varphi_0-1} \quad (3)$$

式中，H_{csx}，H_{csy} 和 H_{csz} 分别代表参考场 H_{cs} 在 x，y，z 方向的分量。

由式(2)可计算出特征方位角 α 及所需的相对方位角 φ_0。

相对工具面角 θ_0 与特征磁场信号 B_{cs} 在 UV 平面的投影与 U 轴的夹角 β 一致，可表示为：

$$\tan\theta_0=\frac{H_{csx}}{H_{csz}} \quad (4)$$

另一方面，由于动态旋转，P 点磁场被椭圆极化，其磁场强度的最小值与距离 r 的关系为：

$$H_{\min}=\min(\sqrt{H_x^2+H_y^2+H_z^2}) \quad (5)$$

$$r=\sqrt[3]{\frac{M}{4\pi H_{\min}}} \quad (6)$$

式中，H_x，H_y 和 H_z 分别代表测量信号 H 在 X，Y，Z 方向的分量。

定义目标靶点 P 在 VW 平面上与钻进方向 W 轴的夹角 δ 为方位偏差角，则：

$$\delta=\arctan(\tan\varphi_0\sin\theta_0) \quad (7)$$

由式(2)、(3)、(5)可测得目标井靶点 P 在源端坐标系的坐标(r，θ_0，φ_0)，进一步由极坐标系与直角坐标系之间的关系可得 P 点的直角坐标：

$$\begin{cases}x=r\sin\varphi_0\sin\theta_0\\ y=r\cos\varphi_0\\ z=r\sin\varphi_0\cos\theta_0\end{cases} \quad (8)$$

由式(6)、(7)或式(8)即可获得目标靶点与磁短节的相对距离和方位等位置关系。

2.3 坐标系转换

目标探管坐标系 xyz 与地理坐标系 XYZ 的转换矩阵为：

$$\mathbf{C}=\mathbf{C}_3\mathbf{C}_2\mathbf{C}_1=\begin{bmatrix}\cos T & -\sin T & 0\\ \sin T & \cos T & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos I & 0 & \sin I\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin I & 0 & \cos I\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos A & -\sin A & 0\\ \sin A & \cos A & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad (9)$$

式中，A，I，T 分别为目标探管的方位、井斜和工具面角，可以由目标探管直接测量得到。

源端坐标系 UVW 与地理基准坐标系 XYZ 之间的转换矩阵为：

$$\mathbf{C}'=\mathbf{C}_1'\mathbf{C}_2'=\begin{bmatrix}\cos A' & -\sin A' & 0\\ \sin A' & \cos A' & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos I' & 0 & \sin I'\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin I' & 0 & \cos I'\end{bmatrix} \quad (10)$$

式中，A′，I' 为磁短节的方位和井斜角，可通过近钻头端的 MWD 配合提供。则：

$$[\mathbf{U}\quad\mathbf{V}\quad\mathbf{W}]^{\mathrm{T}}=\mathbf{C}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_1^{-1}\mathbf{C}_2^{-1}\mathbf{C}_3^{-1}[x\quad y\quad z]^{\mathrm{T}} \quad (11)$$

通过目标端 P 点的三轴磁通门可测得目标端感应到的 3 个轴向上的磁场 H_x，H_y 和 H_z 的大小，再通过坐标转换可得到源端产生的磁场在源端坐标系 UVW 中的三轴分量 H_U，H_V 和 H_W 的大小。利用这三轴分量，结合模型分析，即可得目标点坐标。

3 样机研制

3.1 近钻头永磁短节

在仿真分析 ANSYS 电磁场的基础上，设计了 ϕ120.6 mm和 ϕ171.4 mm 2 种尺寸的近钻头强磁短节。为了提高磁场强度，采用多个高强度永磁体平行放置；为便于和钻铤、钻头对接安装，磁短节两头分别设计为凹凸型螺纹；为使钻井液流过，该磁短节设计有中空水眼；为保证磁力线分布的有效性，磁

短节母体采用无磁不锈钢材料;钻铤内嵌入多组磁钢,通过旋转钻进形成交变磁场。其中,ϕ120.6 mm 近钻头永磁短节如图 2 所示。

图 2　ϕ120.6 mm 近钻头永磁短节

Fig. 2　ϕ120.6 mm near bit permanent magnetic sub

理论上永磁体数量越多,所产生的磁场强度越大,目标端测量系统越容易检测到交变磁场信号。目前,常规 MWD 短节对磁信号的分辨率一般为 2 nT左右。为了满足 50 m 范围内的定位需求,要求永磁短节在 1 m 处的磁场强度达 25 μT 以上。经过计算,采用 18 组中心磁场强度为 0.56 T 的永磁体可以满足上述磁场强度要求。

3.2　目标端测量系统结构

目标端测量系统结构如图 3(a)所示,包括传感器单元、数据采集单元和数据通信单元 3 部分,其中传感器单元由 3 轴高灵敏度磁传感器、3 轴加速度传感器和温度传感器构成。数据采集单元在实现多路同步采集的基础上,还需要对交变磁场信号和地磁信号进行交直流分离,实现最高增益达 80 dB 的程控增益放大。

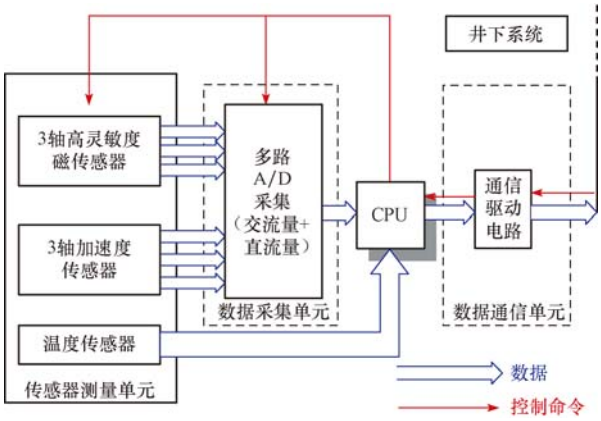

图 3　旋转磁场定向测距仪井下系统结构

Fig. 3　Structure of rotating magnetic downhole device for direction and distance measurement

目标端测量系统由电源舱、CPU 电路舱和传感器舱 3 部分组成,除具有定向测距功能外,还具备常规的连续测斜功能。原理样机全长 1.76 m,外径 48.1 mm。

4　试验与结果分析

4.1　室内地面试验

为模拟钻进过程中钻头与目标井靶点的相对位置关系,建立了地面试验装置。该装置包括 3 部分,分别为转速可调的永磁短节台架,姿态可调的数据采集系统台架及轨道正交的 50 m×30 m 试验场地。其中,正交的 2 个轨道采用激光器进行定位,定位间隔 1 m。永磁短节台架的转速可稳定在 30～300 r/min 之间,覆盖了实际钻铤可能的转速区间。试验中设定旋转磁场转速为120 r/min。

试验方案为:针对水平对接连通井,固定源端永磁体旋转轴方向与目标端测量系统在同一个轨道上相距不同距离,目标端与源端之间只存在东西偏移,没有南北偏移。试验结果如图 4 所示。

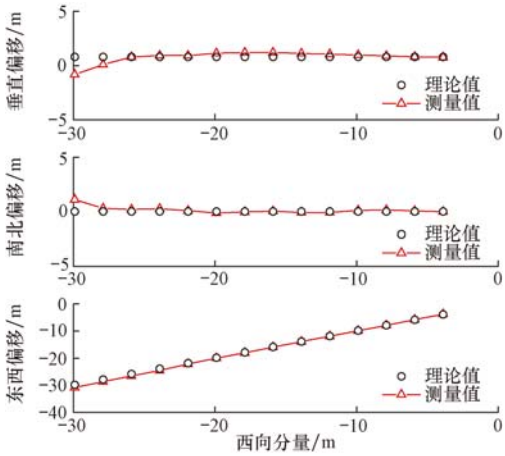

图 4　定位试验结果

Fig. 4　Results of positioning test

从图 4 可以看出,在试验范围 30 m 以内,3 个方向的测量定位结果与实际值一致。表明样机在室内地面试验中的定位准确可靠。

4.2　现场试验

为进一步验证所研制的旋转磁场定向测距仪在实钻井中的引导能力,在某口水平对接连通井内利用国外 RMRS 仪器和自制样机进行了对比,井身结构如图 5 所示。

试验中首先使用国外探管进行定向,约每 3 m 测量一次,控制钻头方位。钻头每钻进约 10 m,将国外探管取出,放入自制探管,钻头位置回撤,在已钻井眼轨迹下,每隔约 3 m 的距离进行定点测量,试验数据与引进的 RMRS 数据一一对应。试验结果对比如图 6 所示。由于引进的 RMRS 仪器在精

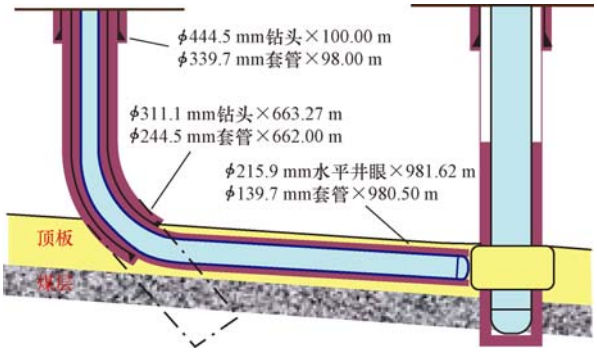

图 5 试验井井身结构示意

Fig. 5 Casing program sketch

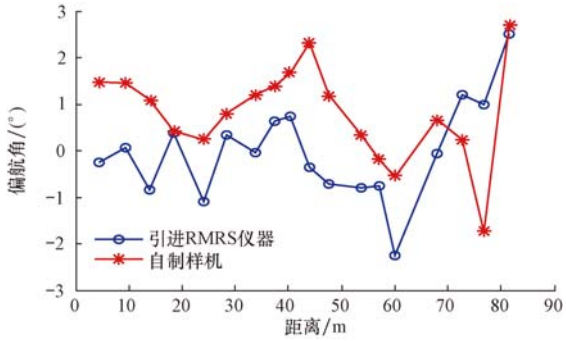

图 6 自制样机与引进仪器测量结果对比

Fig. 6 Comparison of measurement results with homemade device and imported device

确导向定位领域具有领先地位，被视为精确钻井轨迹导向定位的行业标准。上述现场试验结果表明，所研制的仪器样机性能接近引进的 RMRS 仪器，能够用于连通井的引导钻进。

5 结 论

1）针对煤层气开发水平对接连通井对井眼轨迹精确测量的迫切需要，通过研究旋转磁场的空间信号传播模型，根据正交磁偶极子模型提出一种旋转磁场定向测距随钻测量技术。

2）研制了旋转磁场定向测距随钻测量仪样机，该样机由近钻头强磁短节、井下数据采集系统和地面解算系统 3 部分组成。地面试验结果表明，钻头与目标探管的距离越近，其定位误差也越小，30 m 以内的定位误差不超过 0.1 m；现场试验表明，原理样机与引进 RMRS 仪器的距离测量结果一致，而偏航角误差平均不超过 1.5°，表明旋转磁场定向测距随钻测量方法可以用于对接连通井的引导钻进。

3）样机在计算过程中仅使用一个钻头深度数据就可进行位置解算，而引进 RMRS 仪器必须使用一段连续深度数据才能进行相对位置解算；偏航角误差对比结果表明，采用单点数据解算结果精度比多点数据解算结果精度稍差，为了提高测量精度，还需进一步研究利用多点数据的相对定位算法。

参 考 文 献

References

[1] 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)：82-85，89.
Zhang Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. Acta Petrolei Sinica，2003，24(3)：82-85，89.

[2] Kuckes A F. Rotating magnet for distance and direction measurements from a first borehole to a second borehole：US，5589775[P]. 1996-11-31.

[3] Rach N M. New rotating magnet ranging systems useful in oil sands，CBM developments[J]. Oil and Gas Journal，2004，102(8)：47-49.

[4] AI-Khodhori S，AI-Riyami H，Holweg P，et al. Connector conductor wells technology in Brunei Shell petroleum：achieving high profitability through multiwell bores and downhole connections[R]. SPE 111441，2008.

[5] Oskarsen R T，Wright J W，Fitterer D，et al. Rotating magnetic ranging service and single wire guidance tool facilitates in efficient downhole well connections[R]. SPE 119420，2009.

[6] 胡汉月，向军文，刘海翔，等. SmartMag 定向中靶系统工业试验研究[J]. 探矿工程：岩土钻掘工程，2010，37(4)：6-10.
Hu Hanyue，Xiang Junwen，Liu Haixiang，et al. Industrial test research on SmartMag target-hitting guidance system[J]. Exploration Engineering：Rock & Soil Drilling and Tunneling，2010，37(4)：6-10.

[7] Grills T L. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries-a comparison of technologies[R]. SPE 79005，2002.

[8] 王以法，管志川. 新一代地下定位系统[J]. 石油学报，2002，23(1)：77-82.
Wang Yifa，Guan Zhichuan. The new underground positioning system[J]. Acta Petrolei Sinica，2002，23(1)：77-82.

[9] 李子丰，戴江. 对接水平井及其井间导航轨道控制技术[J]. 天然气工业，2008，28(2)：70-72.
Li Zifeng，Dai Jiang. Controlling technique on navigating path of horizontal butt well and cross-well[J]. Natural Gas Industry，2008，28(2)：70-72.

[10] 王德桂，高德利. 管柱形磁源空间磁场矢量引导系统研究[J]. 石油学报，2008，29(4)：608-611.
Wang Degui，Gao Deli. Study of magnetic vector guide system in tubular magnet source space[J]. Acta Petrolei Sinica，2008，29(4)：608-611.

[11] 宗艳波，张军，史晓锋，等. 基于旋转磁偶极子的钻井轨迹高精度导向定位方法[J]. 石油学报，2011，32(2)：335-339.
Zong Yanbo，Zhang Jun，Shi Xiaofeng，et al. A high-precision guidance method of wellbore trajectory based on the rotary magnetic dipole[J]. Acta Petrolei Sinica，2011，32(2)：335-339.