石油钻探技术
PETROLEUM DRILLING TECHNIQUES
中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》（CA）收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊（美）
AAPG协会期刊出版平台收录期刊（美）
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度及影响因素研究

蒲文学 范光第 朱建建 赵国山

Research on the Length of Non-Magnetic Drilling Tools for MagneticInclinometer while Drilling and Its Influence Factors

PU Wenxue, FAN Guangdi, ZHU Jianjian, ZHAO Guoshan

在线阅读 View online: http://doi.org/10.11911/syztjs.2022090

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁力随钻测斜仪轴向磁干扰校正方法

Correction Methods for Axial Magnetic Interference of the Magnetic Inclinometer while Drilling

石油钻探技术. 2017, 45(4): 121–126 http://doi.org/10.11911/syztjs.201704021

非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验

The Finite Element Simulation and Test of Rock Breaking by Non–Planar PDC Cutting Cutter

石油钻探技术. 2019, 47(5): 69–73 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019043

利用随钻电磁波测井探测直井水力裂缝的正演模拟

Forward Modeling in Hydraulic Fracture Detection by Means of Electromagnetic Wave Logging While Drilling in Vertical Wells

石油钻探技术. 2020, 48(2): 123–129 http://doi.org/10.11911/syztjs.2019133

超高阻盐膏层随钻电磁中继传输特性研究

Research on Downhole Electromagnetic Repeater Transmission Characteristics in Ultra High Resistivity Gypsum–Salt Layers

石油钻探技术. 2018, 46(3): 114–119 http://doi.org/10.11911/syztjs.2018092

阵列侧向测井曲线极化角影响因素研究

The Influencing Factors on the Polarizing Angle of Array Laterolog Curves

石油钻探技术. 2018, 46(2): 120–126 http://doi.org/10.11911/syztjs.2018017

螺绕环激励式随钻侧向测井仪测量强度影响因素及响应特性

Influence Factors of Measured Signal Intensity and the Response Characteristics of the Toroidal Coil Excitation LWD Laterolog Instrument

石油钻探技术. 2018, 46(1): 128–134 http://doi.org/10.11911/syztjs.2018025

扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2022090

引用格式：蒲文学，范光第，朱建建，等. 磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度及影响因素研究 [J]. 石油钻探技术，2022, 50(4)：129-134.
PU Wenxue, FAN Guangdi, ZHU Jianjian, et al. Research on the length of non-magnetic drilling tools for magnetic inclinometer while drilling and its influence factors [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 129-134.

磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度及影响因素研究

蒲文学， 范光第， 朱建建， 赵国山

（中石化经纬有限公司胜利定向井公司，山东东营 257064）

摘　要：钻井过程中，磁性随钻测斜仪需要放置在无磁钻具中，以避免铁磁钻具磁化后感应磁场的干扰，但针对无磁钻具长度选取及影响因素的理论研究较少。为此，利用 ANSYS 有限元软件，建立了三维静态均匀强磁场，模拟得到了磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的长度，并分析了井斜角、方位角、铁磁钻具壁厚和铁磁钻具长度等因素对磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度的影响。分析结果表明，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度与井斜角、方位角无明显的相关关系，与铁磁钻具壁厚、长度正相关；根据模拟数据，分析了井斜角和方位角对方位角偏差的影响，认为当存在固定轴向干扰磁场时，方位角偏差随井斜角、方位角变化而变化，这与施工经验相吻合。无磁钻具长度的优化方法和优化结果，为实际工程应用中磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度的优选提供了理论依据和参考。

关键词：随钻测斜仪；磁干扰；无磁钻具；临界长度；影响因素；有限元法

中图分类号：P631.8^{+}19　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001–0890(2022)04–0129–06

Research on the Length of Non-Magnetic Drilling Tools for Magnetic Inclinometer while Drilling and Its Influence Factors

PU Wenxue, FAN Guangdi, ZHU Jianjian, ZHAO Guoshan

(*Shengli Directional Drilling Service Company, Sinopec Matrix Corporation, Dongying, Shandong,* 257064*, China*)

Abstract: While drilling, a magnetic inclinometer should be placed inside the non-magnetic drilling tool to avoid the interference of magnetic fields induced by the magnetization of the ferromagnetic drilling tool. However, only a few theoretical studies focus on the influence and determination of the length of non-magnetic drilling tools. Therefore, with ANSYS, a finite element software, a 3D homogeneous strong static magnetic field was created, and the length for the non-magnetic drilling tools needed by the magnetic inclinometer were simulated, with the influences of inclination angle, azimuth angle, and the thickness and length of ferromagnetic drilling tool, etc. The results show that the critical length of the non-magnetic drilling tool had no obvious relationship with the inclination angle and azimuth angle, however, it had a positive correlation with the thickness and length of the ferromagnetic drilling tool. Based on simulated data, the influence of the inclination angle and azimuth angle on the deviation of the azimuth angle was analyzed. It was found that with a fixed axial interference magnetic field, the deviation of the azimuth angle varied with the change of inclination angles and azimuth angles, which was consistent with field practices. The optimized method and result of non-magnetic drilling tool length can serve as reference and theoretical basis for the length determination of non-magnetic drilling tool for magnetic inclinometer in actual survey practices.

Key words: inclinometer while drilling; magnetic interference; non-magnetic drilling tool; critical length; influence factor; finite element method

收稿日期：2022-03-02；**改回日期：**2022-06-21。

作者简介：蒲文学（1981—），男，山东日照人，2003 年毕业于石油大学（华东）石油工程专业，2012 年获中国石油大学（华东）石油与天然气工程专业工程硕士学位，高级工程师，主要从事定向井、水平井技术研究。E-mail: puwx5.osjw@sinopec.com。

通信作者：范光第，fgd841125@163.com。

基金项目：国家科技重大专项“低渗透油气深层高温高压随钻测控技术”（编号：2016ZX05021-001）资助。

定向井和水平井广泛采用无线随钻测斜仪监测井眼轨迹，但大多数无线随钻测斜仪是磁性测斜仪，其原理是利用井下仪器中的 3 个重力加速度计和 3 个磁通门分别测量重力分量和磁通密度分量，计算得到井斜角和方位角等井眼轨迹参数[1]。由于钻井过程中使用的钻杆、钻铤等均为铁磁材料，铁磁材料被外界磁场磁化后会产生感应磁场，使其周围地磁场发生变化，导致磁性随钻测斜仪测量的地磁场分量失真，计算的方位角出现偏差，影响正常定向施工[2]。为避免铁磁钻具对磁性随钻测斜仪产生干扰，需要将其放置在无磁钻具中，但截至目前针对无磁钻具长度选取的理论研究较少。M. K. Russell 等人[3–5]研究认为，当无磁钻具长度大于 3.05 m 时，铁磁钻具被磁化后产生的感应磁场在径向上对仪器的干扰可以忽略不计。韩志勇等人[6–9]将铁磁钻具用一个集中当量代替，并假设磁性随钻测斜仪上下两端铁磁钻具的磁极强度，根据两端铁磁钻具对测量仪器作用力之和最小，计算出磁性随钻测斜仪处于无磁钻具中的位置。无磁钻具选取过长，会增加钻井成本，也会导致仪器测量点距离钻头较远，给井眼轨迹预测带来一定难度；无磁钻具选取过短，则不能有效避免磁干扰。针对上述问题，笔者利用 ANSYS 有限元软件，模拟研究了磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的长度，分析了井斜角、方位角、铁磁钻具壁厚和长度等因素对无磁钻具临界长度的影响，为现场施工时磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度的优选提供了理论依据和参考。

1　铁磁钻具磁干扰模型的建立

1.1　钻具几何模型

现场施工过程中，无磁钻具的上下两端均接有铁磁钻具，钻具整体上是以无磁钻具为中心上下对称。因此，建立钻具几何模型时，将一定长度的钻具置于以空气为介质的均匀磁场中，只考虑上端或下端铁磁钻具的影响，如图 1 所示。

1.2　ANSYS 有限元模型

ANSYS 有限元软件的模拟分析包括建立分析模型、定义材料属性、划分网格、施加边界条件、求解计算和结果分析等[10–12]。需要建立的三维模型包括钻具和空气区域 2 部分[13]（见图 2）。空气区域模型用于在钻具外部形成均匀强磁场环境，即模拟井下均匀的地磁场。

采用磁标量法分析该三维模型时，选用 SOLID96

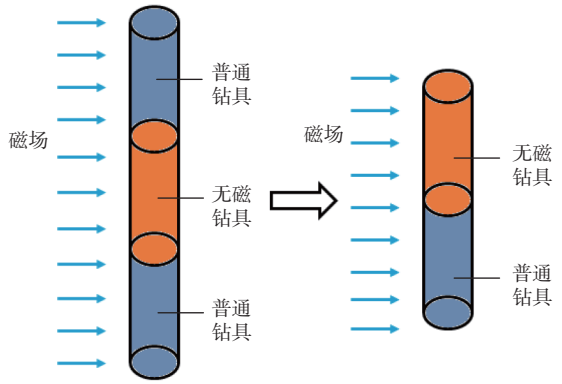

图 1　钻具几何模型

Fig.1　Geometric model of drilling tool

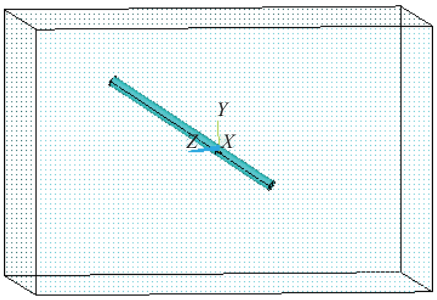

图 2　有限元三维模型

Fig.2　3D finite element model

单元，该单元为 8 节点六面体，自由度只有标量磁位（MAG）。磁标量法中，外加磁场激励和边界条件均用标量磁位来表示，当标量磁位不为零时，表示有外加磁场[14]。采用该方法在模型上添加约束边界条件，同时建立三维均匀强磁场。计算后，利用 ANSYS 有限元软件中的后处理器，建立沿钻具轴向的路径，并将计算结果转换到磁性随钻测斜仪的三磁通门坐标系中进行对比分析，得到该条件下所需的无磁钻具临界长度。

利用 ANSYS 有限元软件进行模拟时，不考虑钻具接头的影响，也不考虑方位修正角，方位角为钻具与磁力线之间的夹角。模拟过程中，保持钻具倾角（即井斜角）不变，选取不同方位角进行模拟；或保持方位角不变，选取不同钻具倾角（即井斜角）进行模拟，计算得到不同条件下磁通密度的 3 个分量，通过对比分析得到铁磁钻具被磁化后沿轴向的最大影响值，该值的 2 倍即为该条件下所需无磁钻具的临界长度。

模拟时，选取现场经常使用的 ϕ139.7 mm 普通铁磁钻杆、ϕ177.8 mm 普通铁磁钻铤和 ϕ203.2 mm 普通磁铁钻铤。井斜角选取具有代表性的 0°，30°，60°和 90°，方位角选取具有代表性的 0°，30°，60°和

90°。空气的磁导率$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ H/m；无磁钻具的相对磁导率$\mu_w = 1$；铁磁钻具的长度为 3～20 m，相对磁导率$\mu_r = 300$；施加均匀磁场的磁倾角为 0°，磁通密度 B=50.0 μT。

2　无磁钻具长度优化与影响因素分析

2.1　无磁钻具长度优化

由于地磁场的磁通密度是矢量[15−18]，既有大小又有方向，因此判断是否存在干扰时，必须从这 2 个方面进行分析。磁性随钻测斜仪的 3 个磁通门传感器放置在 3 个相互正交的坐标系中，判断是否存在磁干扰时，必须分析测得 3 个磁通密度分量的和是否与地磁场磁通密度相同。

ANSYS 有限元软件模拟过程中，由于 3 个坐标轴的方向固定，只需要确定 3 个磁通密度分量是否稳定唯一，就可以判断是否存在磁干扰。以井斜角 30°、方位角 60°为例，得到 3 个磁通密度分量B_x，B_y和B_z沿钻具轴向的变化曲线（见图 3，图中的横坐标为无磁钻具的某一点距铁磁钻具与无磁钻具连接点的长度）。

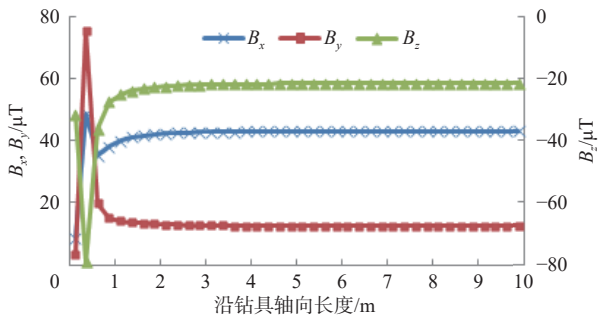

图 3　磁通密度分量沿钻具轴向的变化

Fig.3　Magnetic flux density component variation along the axial direction of drilling tool

由图 3 可知：无磁钻具与铁磁钻具的距离小于 1.00 m 时，3 个磁通密度分量变化剧烈，且没有规律性；与铁磁钻具的距离为 1～4 m 时，磁通密度径向分量 B_x 由 40.01 μT 逐渐增至 42.99 μT，磁通密度径向分量 B_y 由 14.17 μT 逐渐减至 12.57 μT，磁通密度轴向分量 B_z 由−25.09 μT 逐渐增至−21.74 μT；与铁磁钻具的距离大于 4 m 时，3 个磁通密度分量保持不变。因此，在该条件下，铁磁钻具沿轴向的最大影响范围为 4 m。由于无磁钻具上下两端均接有铁磁钻具，故磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度为 8 m。如果 3 个磁通密度分量稳定到某一值所需要的无磁钻具长度不一致，则取最大值作为铁磁钻具产生轴向磁干扰的范围。

2.2　无磁钻具长度影响因素分析

2.2.1　井斜角

保持方位角不变，计算不同井斜角条件下的 3 个磁通密度分量，分析井斜角对无磁钻具临界长度的影响，得到不同井斜角条件下的无磁钻具临界长度（见图 4）。

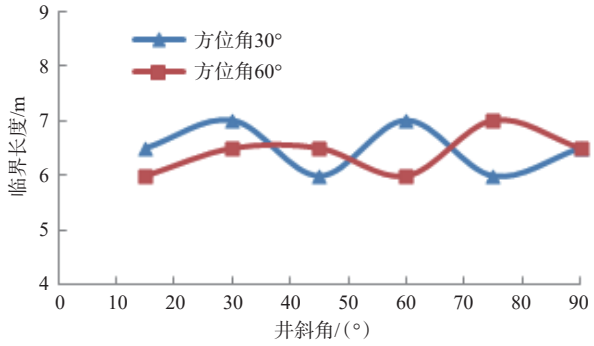

图 4　井斜角对临界长度的影响

Fig.4　Influence of the inclination angle on critical length

由图 4 可知，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度为 6～8 m，且没有随着井斜角变化而发生明显变化。根据现场施工经验，铁磁钻具对方位角测量误差的影响随着井斜角增大而增大，井斜角越大，所需的无磁钻具越长，但 ANSYS 有限元软件的模拟结果并没有体现这一规律。

2.2.2　方位角

保持井斜角不变，分别计算不同方位角条件下的 3 个磁通密度分量，分析方位角变化对无磁钻具临界长度的影响，得到不同方位角条件下无磁钻具的临界长度（见图 5）。

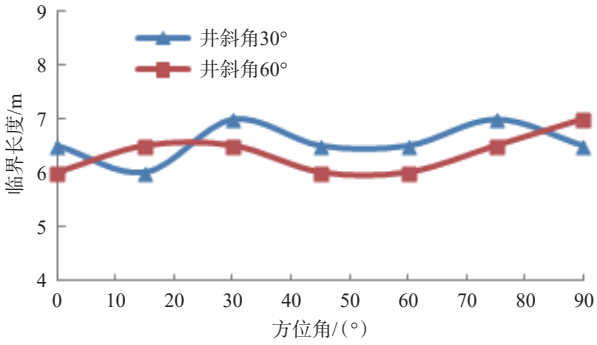

图 5　方位角对临界长度的影响

Fig.5　Influence of the azimuth angle on critical length

由图 5 可知，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度为 6～8 m，且未随着方位角的变化发生明

显变化。根据现场施工经验，不同方位角条件下铁磁钻具对方位角测量误差的影响不同，井眼轨迹方位越靠近南北方向（即方位角为 0°或 180°），铁磁钻具对磁性测斜仪的影响越小；井眼轨迹方位越靠近东西方向（即方位角为 90°或 270°），铁磁钻具对磁性测斜仪的影响越大。但是，ANSYS 有限元软件的模拟结果并没有体现这一规律。

2.2.3　铁磁钻具壁厚

选取现场施工时经常使用的 3 种铁磁钻具，钻具 1 为 ϕ139.7 mm 铁磁钻杆（壁厚 25.4 mm），钻具 2 为 ϕ177.8 mm 铁磁钻铤（壁厚 53.2 mm），钻具 3 为 ϕ203.2 mm 铁磁钻铤（壁厚 65.8 mm），并选取不同井斜角和方位角，模拟分析铁磁钻具壁厚对无磁钻具临界长度的影响，结果如图 6 所示。

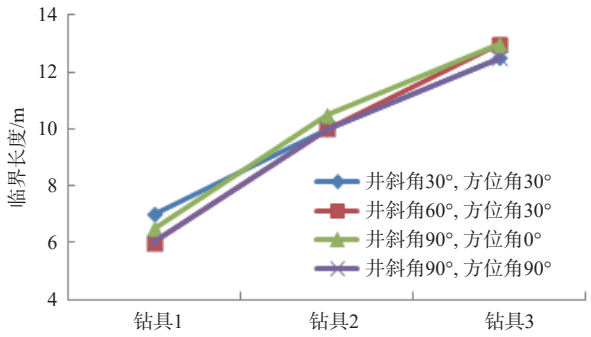

图 6　铁磁钻具壁厚对临界长度的影响

Fig.6　Influence of the thickness of the ferromagnetic drilling tool on critical length

由图 6 可知，随着铁磁钻具壁厚增大，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度增大，即铁磁钻具壁厚增大，其产生的磁干扰范围也扩大。

2.2.4　铁磁钻具长度

现场施工过程中，无磁钻具上端承接的铁磁钻具长度达几千米，其下端挂接的铁磁钻具长度也接近 20 m。为了进一步模拟分析铁磁钻具长度对磁性随钻测斜仪所需无磁钻具临界长度的影响，选取井斜角为 30°、方位角为 30°，铁磁钻具分别为 ϕ139.7 mm 钻杆、ϕ177.8 mm 钻铤和 ϕ203.2 mm 钻铤，其长度为 3～20 m，模拟结果如图 7 所示。

由图 7 可知，随着铁磁钻具长度增大，其轴向磁干扰影响范围也在增大。铁磁钻具长度由 3 m 增至 13 m 时，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度迅速增大；铁磁钻具长度大于 13 m 时，无磁钻具的临界长度基本不变。这说明铁磁钻具的轴向磁干扰影响范围并未随其长度增加而增大，3 种铁磁钻具沿轴向的最大影响范围分别为 3.25，5.25 和

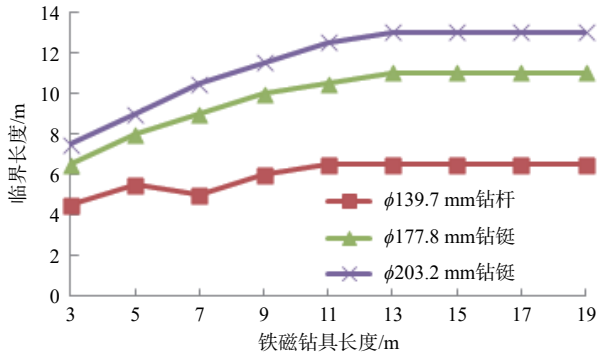

图 7　铁磁钻具长度对临界长度的影响

Fig.7　Influence of the length of ferromagnetic drilling tool on critical length

6.50 m，即 3 种铁磁钻具条件下磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度分别为 6.50，10.50 和 13.00 m。

3　无磁钻具长度模拟结果分析

模拟分析结果表明，井斜角、方位角与所需无磁钻具的临界长度不存在明显的相关关系。这种现象与现场施工经验相矛盾，为此进行了探讨分析。

根据现场施工经验，当井眼轨迹方位角为 90°或者 270°时，测量得到方位角的准确度降低。同时，随着井斜角增大，方位角的偏差增大，因此需要增大无磁钻具长度，减小方位角偏差。磁性随钻测斜仪的测量原理是，通过安装在其内部的重力加速度计和磁通门传感器测得重力加速度分量 g_x，g_y，g_z 和磁通密度分量 B_x，B_y，B_z，其中 x 轴和 y 轴为钻具的径向，z 轴为钻具的轴向。利用上述 6 个分量及其之间的几何关系，得到方位角计算公式：

$$\tan\varphi = \frac{-(B_x\sin\phi + B_y\cos\phi)}{\cos\alpha(B_x\cos\phi - B_y\sin\phi) + (B_z + B_{\mathrm{m}})\sin\alpha} \quad (1)$$

式中：α 为井斜角，（°）；φ 为方位角，（°）；ϕ 为高边工具面角，（°）；B_{m} 为干扰磁场轴向磁通密度，μT。

在没有任何磁干扰的情况下，B_{m} 为 0。当井眼轨迹方位角为 90°或 270°时，井眼轨迹方向与地磁场的磁力线基本处于垂直状态，因此钻具轴向磁通门传感器测得磁通密度轴向分量 B_z 非常小，当其受到较小干扰时，即会对方位角产生较大影响。同时，从式（1）可以看出，因为磁通密度轴向分量 B_z 与井斜角的正弦值相乘，当井斜角增大时，其正弦值也增大，导致磁通密度轴向分量 B_z 的影响增大，如果此时存在干扰磁场，则干扰磁场轴向磁通密度 B_{m} 对方位角产生的影响增大。因此，这种分析结果

与现场施工经验基本一致。

为了更加直观地解释这种现象，通过构造模拟数据分析上述情况。现场施工过程中，钻具长达几千米，而钻具的内外径尺寸相对较小，因此可认为钻具是轴线对称。同时，磁性随钻测斜仪器放置在无磁钻具中，上下两端铁磁钻具相对于仪器中的测量传感器距离较远，所以可认为上下两端铁磁钻具造成的干扰磁场是沿钻具轴线方向。因此，在模拟磁干扰时，可以忽略径向磁干扰，只考虑轴向磁干扰的影响，即所测磁通密度径向分量是准确的。取干扰磁场轴向磁通密度 B_m = 10.0 μT，大地磁场磁通密度 B =53.0 μT，磁倾角为 55°，计算不同井斜角、方位角下的方位角偏差，结果如图 8 所示。

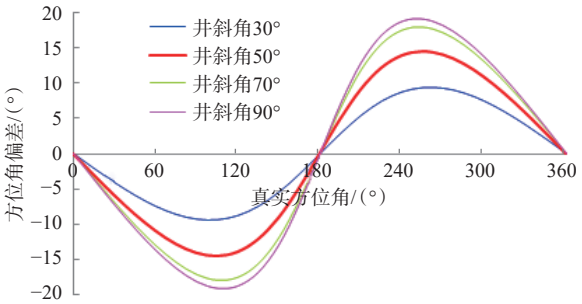

图 8　方位角偏差随井斜角、方位角变化的规律

Fig.8　Variation law for deviation of azimuth angle with well inclination angle and azimuth angle

图 8 中的方位角偏差为实测方位角减去真实方位角，可见在存在轴向磁干扰的条件下，取某一真实方位角，计算不同井斜角下的方位角偏差，发现方位角偏差随着井斜角增大而增大。在同一井斜角条件下，真实方位角为 0°～180°时，方位角偏差为负值，即真实方位角大于实测方位角，方位角偏差先增大后减小；真实方位角为 100°左右时，方位角偏差达到最大；真实方位角为 180°～360°时，方位角偏差为正值，即真实方位角小于实测方位角，方位角偏差先增大后减小；真实方位角为 260°时，方位角偏差达到最大。

上述模拟结果表明，当干扰磁场轴向磁通密度不变时，模拟结果与现场施工经验一致，但出现这种情况的前提条件是干扰磁场轴向磁通密度不变，此时方位角偏差随井斜角、方位角变化而变化。即磁通密度轴向分量越小，干扰磁场不变情况下产生的影响越大，通过测量数据计算得到的方位角偏差越大；井斜角越大，干扰磁场不变情况下产生的影响越大，通过测量数据计算得到的方位角偏差也越大。但在 ANSYS 有限元软件模拟过程中，铁磁钻具所产生感应磁场的影响范围随其与无磁钻具距离增大而减小，当两者距离大于 4 m 以后，感应磁场的影响基本可以忽略，即 B_m 为 0，因此未表现出与现场施工经验相似的规律。

4　现场实例分析

桩海 26-斜 X 井是胜利油田部署的一口探井，设计井斜角 26°，方位角 99°，完钻井深 4 280.00 m。由于设计方位角基本接近东西方向，依据现场施工经验，需要较长无磁钻具为磁性随钻测斜仪提供足够的无磁环境，尽可能减少干扰以提高方位角测量精度。因此，二开 ϕ241.3 mm 井段施工过程中，采用钻头+动力钻具+浮阀+无磁钻铤×9.32 m+无磁悬挂器×4.50 m+无磁承压钻杆×9.45 m+加重钻杆的钻具组合，磁性随钻测斜仪放置在无磁悬挂器中，仪器测点距离下端浮阀 10.82 m，距离上端加重钻杆 12.45 m。二开中完井深 3 709.00 m，中完前 100.00 m 井段采用复合钻进方式，并未进行定向施工，最后 5 组测斜数据见表 1。从表 1 可以看出，复合钻进时井斜角和方位角均减小。

表 1　二开中完最后 5 组测斜结果

Table 1　Inclination survey data at the last five points during the second section

测深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)
3 632.52	24.30	104.10
3 642.18	24.30	103.90
3 651.81	24.10	103.90
3 661.47	24.10	103.70
3 690.16	24.00	103.05

三开 ϕ152.4 mm 井段施工过程中，由于井眼尺寸变小，故更换测斜仪，钻具组合为钻头+动力钻具+浮阀+无磁钻铤×9.12 m+无磁悬挂器×0.50 m+普通钻铤，仪器测点距离下端浮阀 4.00 m，距离上端普通钻铤 5.62 m。下钻到底复合钻进至井深 3 743.81 m，测点 3 730.83 m 处的井斜角为 22.99°、方位角为 101.43°，仪器测点距离套管 20.17 m，所测轨迹参数与设计基本一致，故认为测量得到的轨迹参数准确。同时，井斜角和方位角均减小，符合井眼轨迹预测趋势。三开钻至井深 3 974.00 m 时，随钻测斜仪出现问题，无法查出原因，更换另一种随钻测斜仪，钻具组合未改变，测点略有不同，下钻到底复测，井斜角和方位角与上一趟钻所测结果一致。

对比该井的施工数据发现，虽然方位角基本接近东西向，但二开采用足够长无磁钻具所测井眼轨迹参数与三开采用较短无磁钻具所测结果基本一致。同时，三开随钻测量仪器的无磁环境为 9.62 m，

与 ANSYS 有限元软件模拟得到的理论结果基本一致。但是，由于仅分析了一口井的测量数据，并不能完全验证模拟结果，还需大量实测数据的验证。

5　结论与建议

1）ANSYS 软件模拟结果表明，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的长度与井斜角和方位角没有明显的相关关系。当干扰磁场不变时，模拟结果与现场施工得出的结论一致。

2）随着铁磁钻具长度增大，其轴向磁干扰范围增大，达到某一值后基本保持不变，该值的 2 倍即为磁性随钻测斜仪所需无磁钻具的临界长度。

3）现场实例数据分析表明，磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度的影响因素与施工经验得出的结论并不一致，与 ANSYS 软件模拟结果基本一致。

4）现场施工过程中，建议根据不同钻具组合选择无磁钻具的长度，尽可能缩短仪器测点到钻头的距离，提高井眼轨迹的预测精度，同时降低无磁钻具的使用成本。

参　考　文　献

References

[1] 许昊东，黄根炉，张然，等. 磁力随钻测量磁干扰校正方法研究 [J]. 石油钻探技术，2014，42（2）：102–106.
XU Haodong, HUANG Genlu, ZHANG Ran, et al. Method of magnetic interference correction in survey with magnetic MWD[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 102–106.

[2] 孟庆威，姜天杰，刘泳敬，等. 基于有限元分析的方位角误差计算和修正 [J]. 石油钻探技术，2022，50（3）：66–73.
MENG Qingwei, JIANG Tianjie, LIU Yongjing, et al. Calculation and correction of azimuth errors based on finite element analysis[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 66–73.

[3] 张苏，管志川，王建云，等. 邻井套管对井斜方位角的影响 [J]. 石油钻探技术，2013，41（6）：51–55.
ZHANG Su, GUAN Zhichuan, WANG Jianyun, et al. Impact of casing on adjacent well azimuth[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 51–55.

[4] 孟卓然. BHA 轴向磁干扰对方位测量误差的影响：基于人工磁场模拟方法 [J]. 石油学报，2020，41（8）：1011–1018.
MENG Zhuoran. Effect of BHA axial magnetic interference on the azimuth measurement error: a simulation method based on artificial magnetic field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8): 1011–1018.

[5] 李永慧，张晓明，龙达峰，等. 基于 ANSYS 的油井套管感应磁场有限元仿真 [J]. 石油机械，2012，40（1）：44–46.
LI Yonghui, ZHANG Xiaoming, LONG Dafeng, et al. Finite element simulation of oil well casing induced magnetic field based on ANSYS[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(1): 44–46.

[6] RUSSELL M K, RUSSELL A W. Surveying of boreholes: US 4163324[P]. 1979-08-07.

[7] 范光第，隋海东，黄根炉，等. 基于 ANSYS 的邻井套管磁干扰有限元仿真 [J]. 石油机械，2013，41（8）：1–4.
FAN Guangdi, SUI Haidong, HUANG Genlu, et al. ANSYS-based finite element simulation of magnetic disturbance of casing in adjacent well[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(8): 1–4.

[8] 郑德帅. 可旋转钻柱定向钻进工具设计及测试 [J]. 石油钻探技术，2021，49（6）：81–85.
ZHENG Deshuai. Design and test for rotary slide drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 81–85.

[9] 范光第，蒲文学，赵国山，等. 磁力随钻测斜仪轴向磁干扰校正方法 [J]. 石油钻探技术，2017，45（4）：121–126.
FAN Guangdi, PU Wenxue, ZHAO Guoshan, et al. Correction methods for axial magnetic interference of the magnetic inclinometer while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 121–126.

[10] 郝希宁，王宇，党博，等. 救援井电磁探测定位方法及工具研究 [J]. 石油钻探技术，2021，49（3）：75–80.
HAO Xining, WANG Yu, DANG Bo, et al. Research on electromagnetic detection and positioning methods and tools for relief wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 75–80.

[11] van DONGEN J C M, MAEKIAHO L B. Method for determining the azimuth of a borehole: US4682421[P]. 1987-07-28.

[12] 王锐，崔朋波，刘培军. MWD 独立误差源的确定分析 [J]. 特种油气藏，2011，18（5）：120–123.
WANG Rui, CUI Pengbo, LIU Peijun. Determinative analysis of MWD independent error sources[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(5): 120–123.

[13] 李翠，高德利，刘庆龙，等. 邻井随钻电磁测距防碰计算方法研究 [J]. 石油钻探技术，2016，44（5）：52–59.
LI Cui, GAO Deli, LIU Qinglong, et al. A method of calculating of avoiding collisions with adjacent wells using electromagnetic ranging surveying while drilling tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 52–59.

[14] 鲁港，钟晓明，李胜中，等. 井眼轨迹单根控制的新计算方法 [J]. 石油钻采工艺，2021，43（2）：146–150.
LU Gang, ZHONG Xiaoming, LI Shengzhong, et al. A new calculation method of well trajectory of joint control[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 146–150.

[15] FINLAY C C, MAUS S, BEGGAN C D, et al. International geomagnetic reference field: the eleventh generation[J]. Geophysical Journal International, 2010, 183(3): 1216–1230.

[16] 车卫勤，谭勇志，叶伟娟，等. 套管坐标截面法推算磁干扰轨迹的研究与应用 [J]. 石油钻采工艺，2021，43（2）：170–176.
CHE Weiqin, TAN Yongzhi, YE Weijuan, et al. Study and application of calculating the magnetic interference track by means of casing coordinate section method[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 170–176.

[17] 宋晓健，郑邦贤，谭勇志，等. 基于数据融合的近钻头井眼轨迹参数动态测量方法 [J]. 石油钻探技术，2022，50（1）：38–44.
SONG Xiaojian, ZHENG Bangxian, TAN Yongzhi, et al. Dynamic measurement method of near-bit borehole trajectory parameters based on data fusion[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 38–44.

[18] 胡斌，马鸿彦，黄秉亚，等. 近钻头方位伽马随钻测量系统的研制与应用 [J]. 石油钻采工艺，2021，43（5）：613–618.
HU Bin, MA Hongyan, HUANG Bingya, et al. Development and application of near-bit azimuth Gamma MWD system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(5): 613–618.

［编辑　滕春鸣］