

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2018015

井下射频电磁识别影响因素研究

胡亮^{1,2}, 肖莉², 赵建军^{1,2}, 尹慧博^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100101;2. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘要:与井下工具常用的压差和投球控制方式相比,射频识别技术具有控制灵活、施工过程中不改变钻井液排量和钻柱内通径等优点;但在实际应用中,井下复杂工况对射频识别系统的电磁干扰很大,其稳定性得不到保证。为解决这一问题,开展了井下射频电磁识别影响因素研究。通过分析,确定井下工具金属外壳和钻井液类型是主要影响因素;根据无线射频控制系统的工作环境和结构特点,建立了电磁通讯环境的有限元仿真模型,分析了其影响程度和变化规律,并通过室内试验对其进行了验证。研究发现,井下工具金属外壳所产生涡流的影响随井下天线与工具外壳间距增大而减小;钻井液的影响随其电导率增大而增大。研究认为,设计工具时可以合理增大井下工具金属外壳内壁与井下天线的间距;而钻井液的影响可通过优化射频控制电路方式解决。

关键词:射频识别;电磁仿真;影响因素;井下工具;金属外壳;钻井液

中图分类号:TE927 文献标志码:A 文章编号:1001-0890(2018)02-0063-06

Study on the Downhole Influence Factors of Radio Frequency Identification Technology

HU Liang^{1,2}, XIAO Li², ZHAO Jianjun^{1,2}, YIN Huibo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Compared with the conventional control method of measuring differential pressure or pitching, the radio frequency identification technology is flexible, and drilling fluid displacement and borehole diameter can be maintained constant during the operation process. However, due to the complexity of down-hole conditions, electromagnetic interference affects the stability of a radio frequency identification system in practical application. In order to solve this problem, the electromagnetic influence of radio frequency identification in the underground environment was carried out. Through analysis, it was determined that downhole metal and different types of drilling fluid were the main factors of influence or interference. According to the working environment and structure characteristics of radio frequency control system, the finite element simulation model of electromagnetic environment was established, the influence degree and variation rule of downhole metal environment and different types of drilling fluid were analyzed and verified by means of lab test. The simulation results showed that the eddy current effect of downhole metal decreased as the space of the antenna and the casing of downhole tools increased, and the influence of drilling fluid would increase with its electro-conductibility increasing. Therefore, the space between the antenna and the inner wall of downhole tool casing should be increased properly during the design of downhole tools. The influence of drilling fluids could be solved by control circuit optimization.

Key words: RFID; electromagnetic simulation; influence factor; downhole tool; metal casing; drilling fluid

采用射频识别技术(radio frequency identification, RFID)控制井下工具,与传统的投球或压差控制方式相比具有明显的技术优势^[1-2],控制过程中不会改变管柱内通径和井底压力,不需要磨铣憋压球,还可以通过不同编码的标签实现井下工具的复合控制。当前国外已研制出多种应用RFID技术的钻井

收稿日期:2017-08-03;改回日期:2018-01-16。

作者简介:胡亮(1984—),男,河北任丘人,2007年毕业于北京理工大学探测制导与控制技术专业,2015年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,工程师,主要从事井下工具的研发工作。
E-mail:hl9788@sina.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“基于RFID控制随钻扩眼器技术研究”(编号:P15007)资助。

完井工具，并取得了良好的效果^[3-4]。威德福公司在加拿大某区块应用采用了RFID技术的智能滑套进行了10段压裂，滑套打开成功率达到86%，与常规滑套相比经济性优势明显^[5-6]。但井下复杂工况如高温、高压、振动及复杂的井下电磁环境都会对RFID井下系统的稳定性造成影响。毛博^[7]研究发现，井下工具金属外壳上的涡流对RFID系统的电磁性能影响较大，可以采用在井下天线和仪器外壳之间添加铁氧体屏蔽层的方法消除涡流的影响，但在设计井下工具时，由于铁氧体的加工和安装固定比较困难，难以实现工程化。张哲^[8]研究了不同类型钻井液的影响，但选取的钻井液代表性不强，没有考虑实际应用中可能影响较大的饱和盐水钻井液。针对以上研究的不足，笔者结合井下工具的结构特点，进行了井下射频电磁识别影响因素分析，研究分析了井下工具金属外壳与钻井液类型对电磁的影响程度及影响规律，并提出了工程化的建议。

1 RFID井下系统电磁影响因素

RFID井下系统主要包括RFID井下天线和读取控制系统2部分，其结构如图1所示。开始工作时，井下天线两端持续通一定频率的交变电流，从而在天线内部和周围产生一定强度的电磁场。电子标签随着钻井液流经天线内部时，通过电磁耦合获得激励能量，将携带的控制信息以频率载波的形式发送出来，读取控制系统接收并解读这些信息，再控制相应的井下执行机构动作。

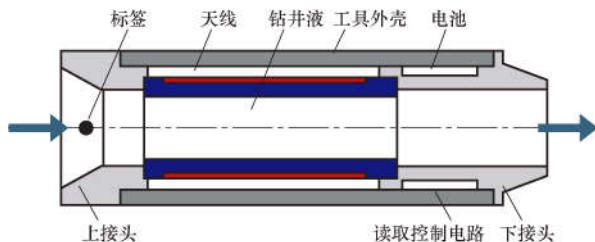


图1 RFID井下通讯短节结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of RFID downhole communication system

上述过程中，井下天线产生磁场的强弱直接影响标签通过时的读取成功率，决定控制信息传输的成功率。根据电磁波传播影响机理，对各种井下工况进行分析，确定了2个主要影响因素：井下工具的金属外壳和钻井液类型。

1) 井下工具的金属外壳。井下工具的外壳多采用钢制材料，其电阻率较低。当RFID井下天线

通以高频交流电时，工具的金属外壳处于交变磁场中，在金属内部形成闭合回路，从而形成旋涡状的感应电流（涡流），如图2所示。根据法拉第电磁定律，涡流又会产生一个反向的附加磁场，叠加后会削弱天线原有的磁场强度。由于金属外壳产生的涡流强度与激励电流频率的平方成正比，因此为了减小金属涡流的影响，RFID井下控制系统多采用行业标准中相对较低的频率，如笔者设计的RFID系统的频率为125 kHz。

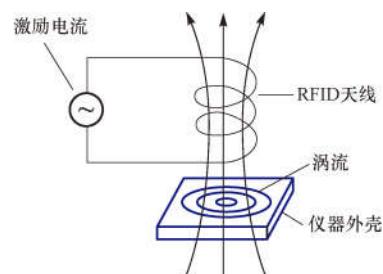


图2 井下工具金属外壳涡流产生机理

Fig. 2 Generation mechanism of eddy currents on down-hole instrument casing

2) 钻井液类型。不同工况下采用的钻井液不同，对RFID系统电磁性能的影响程度也不同。理论分析认为，钻井液所含电离子浓度越高，电导率就越大，置于交变电流产生的磁场中的影响也越大。因此，需要考虑可能出现电导率极端情况的钻井液，如饱和盐水钻井液。

基于上述认识，在RFID井下电磁系统仿真和影响因素分析中，重点分析井下工具金属外壳和钻井液类型对RFID井下系统电磁识别的影响程度和影响规律，为RFID井下系统的稳定性设计提供依据。

2 RFID天线轴线处磁场强度的计算

计算理想情况下所设计的RFID天线内部轴线处的磁场强度，是为了与随后的仿真模型结果进行对比，作为判断仿真模型正确性的依据；同时，与井下环境影响仿真的系统磁场强度进行对比，可反映井下环境因素对RFID系统电磁的影响程度。RFID井下天线可等效为空心载流螺线管，其结构如图3所示。

将RFID天线等效为长度为L、半径为R、总匝数为N的空心载流密绕直螺线管，如图4所示（图4中：R为空心载流密绕直螺线管半径，m； β_1 为天线

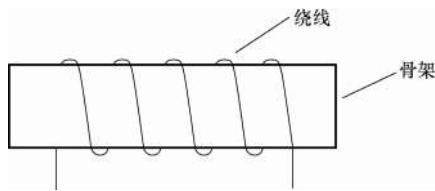


图 3 RFID 井下天线结构示意

Fig. 3 Schematic diagram of an RFID Downhole antenna

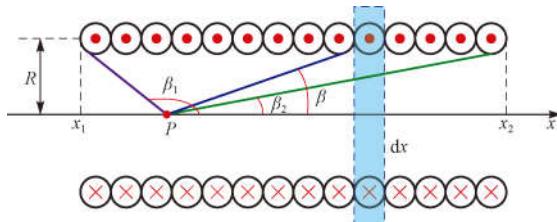


图 4 空心载流螺线管纵向剖面

Fig. 4 Longitudinal profile of hollow solenoid with current

两端到 P 点的夹角, ($^{\circ}$); β_2 为 P 点到天线一端与天线轴线的夹角, ($^{\circ}$); β 为 P 点到天线轴线的夹角, ($^{\circ}$)。

设天线中心轴线为 x 轴, 天线两端坐标设为 x_1 和 x_2 , 根据已有的计算公式^[9], 其上任一 P 点处的磁场强度为:

$$H = \frac{R^2}{2} \int_{\beta_2}^{\beta_1} \frac{R \csc^2 \beta d\beta}{R^3 \csc^3 \beta} = \frac{nI}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (1)$$

式中: H 为 RFID 天线轴线任一 P 点处的磁场强度, A/m; I 为向空心载流螺线管所通电流强度, A; n 为单位长度空心载流螺线管上的线圈匝数。

将设计的 RFID 井下天线相关参数代入式(1)进行求解, 可得到天线内部轴线处的磁场强度分布曲线, 如图 5 所示。

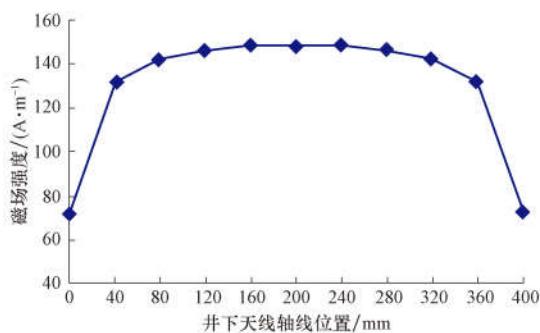


图 5 井下天线内部轴线处磁场强度的分布

Fig. 5 Distribution curve of magnetic field intensity inside the downhole antennae

从图 5 可以看出, 磁场强度峰值为 148 A/m, 位于中心轴中点处。

3 RFID 井下电磁环境仿真

3.1 模型的建立

根据 RFID 井下系统的结构特点, 需要仿真的磁场环境主要集中在井下天线周围, 与其相关的主要因素为工具金属外壳和整个系统中充满的钻井液。因此, 选用 ANSYS 软件的 Electromagneti 模块, 采用节点法磁矢量位进行三维仿真^[10]。整个仿真环境由工具金属外壳、RFID 天线和钻井液组成, 钻井液充满天线内部和天线与工具外壳之间, 其等效结构图及尺寸参数如图 6 所示(图 6 中: d_0 为天线内径, mm; d_1 为天线外径, mm; d_2 为工具外壳内径, mm; d_3 为工具外壳外径, mm; L 为天线等效长度, mm; W 为天线与仪器外壳内壁的间距, mm)。

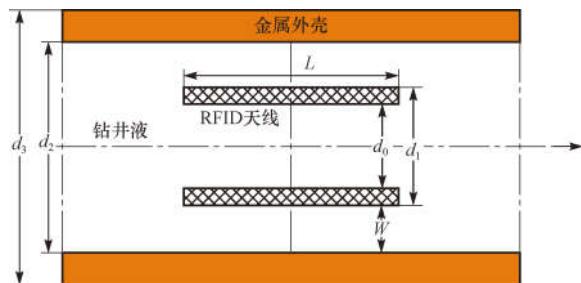


图 6 RFID 井下天线结构等效图

Fig. 6 Equivalent diagram of the RFID antennae structure

假设仿真模型的材料为各向同性, 由于仿真模型是轴对称形式, 为减小计算量, 取实物的 1/4 建模, 建立的三维模型如图 7 所示(图 7 中, 蓝色部分为 RFID 天线外部环境, 红色为 RFID 天线, 绿色为天线内部钻井液环境)。

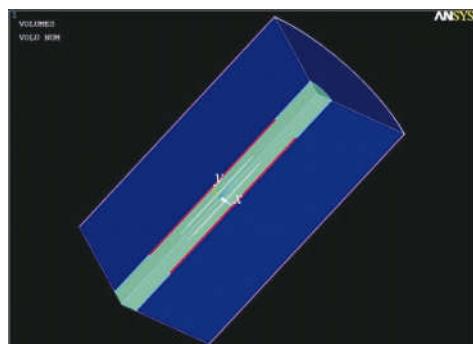


图 7 RFID 井下天线仿真模型

Fig. 7 Simulation model of RFID antennae

模型的边界条件和激励条件: 对称模型的感应涡流处边界电压为 0 V; 模型外边缘的磁通量平行;

激励交变电流强度为 0.3 A, 频率为 125 kHz。

3.2 电磁影响因素分析

3.2.1 仿真结果分析

通过仿真得到了 RFID 井下天线空间磁场强度分布, 如图 8 所示; 天线轴线处的磁场强度分布曲线如图 9 所示。

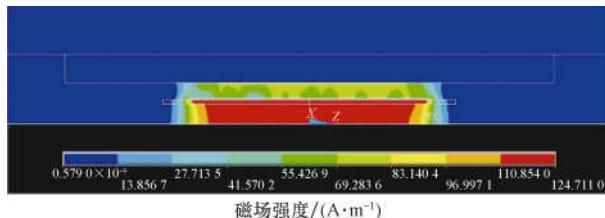


图 8 仿真 RFID 井下天线磁场强度

Fig. 8 Magnetic field intensity inside RFID antennae

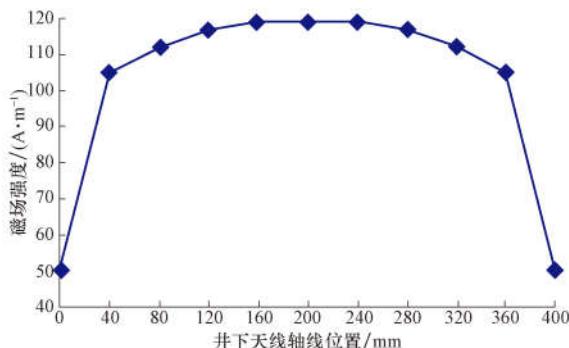


图 9 RFID 天线轴线上磁场强度的分布

Fig. 9 Distribution curve of magnetic field intensity on the axis of RFID antennae

图 9 所示天线轴线上的磁场强度分布曲线与图 5 所示理论分析的磁场强度分布曲线相吻合, 验证了仿真模型的正确性。但受到井下环境影响的仿真磁场强度(119 A/m)小于理想状态下的理论磁场强度(148 A/m), 说明 RFID 系统磁场受井下环境的影响较大。

3.2.2 井下工具金属外壳影响分析

RFID 井下天线所产生的磁感线分布在一定空间范围内(如图 10 所示), 在井下天线外围, 越靠近天线磁力线越密集, 越远离越稀疏。因此, 从理论上讲, 井下工具金属外壳与井下天线距离越远, 穿过工具外壳的磁力线就越少, 产生的感应涡流也就越小, 对天线内部磁场强度的影响越小。

井下天线与工具内壁不同间距下的磁场强度变化仿真结果如图 11 所示。

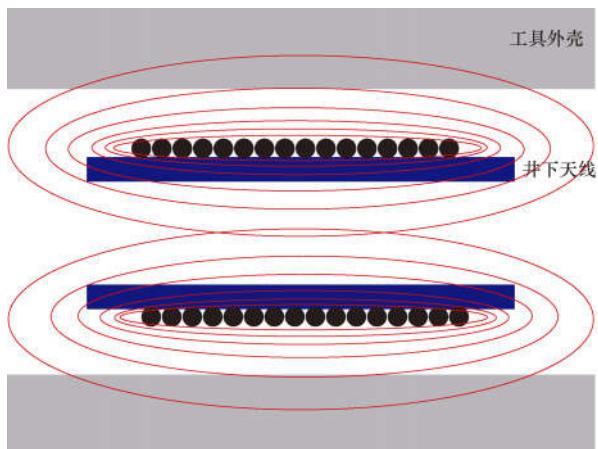


图 10 井下天线的磁力线分布

Fig. 10 Magnetic lines distribution of downhole antennae

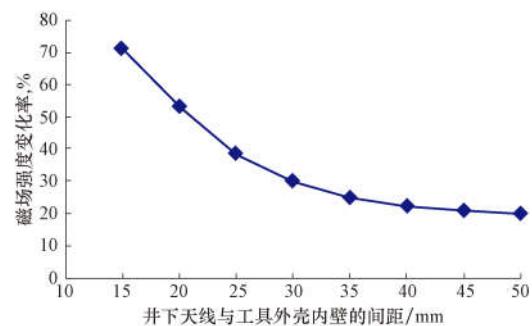


图 11 井下天线与工具内壁不同间距下的磁场强度变化曲线

Fig. 11 Simulation influence curve of magnetic field intensity on different distances between downhole antennae and tool casing

从图 11 可以看出, 井下工具外壳涡流对天线内部磁场强度的影响很大; 随着间距增大, 其影响程度变小, 且影响变化率呈现递减的趋势。

3.2.3 钻井液影响分析

将所建模型中的填充溶液设置不同的电阻率和相对磁导率, 可以模拟 RFID 井下天线在不同钻井液工况下的电磁场情况。考虑钻井液的电磁影响机理和实际工况需要, 采用了饱和盐水钻井液、某水基钻井液、1 号原油(80% 脱水原油与 20% 某水基钻井液混合)和 2 号原油(100% 脱水原油)等 4 种不同的溶液进行仿真, 各溶液的电磁参数见表 1。考虑溶液主要成分为水或原油, 为顺磁性物质, 相对磁导率等于或略大于 1.0, 钻井液中所含铁磁性物质较少, 不足以对钻井液整体的相对磁导率产生影响。因此, 相对磁导率都取 1.0, 电导率为实际测量值。

表 1 仿真溶液电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of simulation solution

溶液	电导率/(S·m ⁻¹)	相对磁导率
饱和盐水钻井液	20.00	1.0
某水基钻井液	1.46	1.0
1号原油	6.25×10 ⁻²	1.0
2号原油	4.00×10 ⁻⁴	1.0

不同溶液中 RFID 天线内部轴线磁场强度仿真结果:饱和盐水为 140.8 A/m,某水基钻井液为 144.6 A/m,1 号原油为 147.5 A/m,2 号原油为 147.5 A/m。

由仿真结果可知,随着溶液电导率减小,其对 RFID 井下天线轴线上磁场强度的影响逐渐减小,且总体影响不大。

4 地面试验

为了验证理论分析结果和仿真结论,进行了地面试验。因为要用专门的测量仪器直接测量 RFID 天线上 125 kHz 交变电流产生的磁场强度,笔者所在的实验室不具备这样的条件,但根据螺线管磁场强度理论,天线内部的磁场强度与天线的电感呈正相关关系,外界环境对天线磁场强度的影响也表现为天线受外界影响后产生互感,造成天线电感变小,因此通过 LCR 表测量天线电感的变化来间接反映天线内部磁场强度的变化。

4.1 工具外壳内壁与井下天线间距影响试验

选用长度、壁厚相同但内径不同的 1 组非金属套筒和 5 组金属套筒,将 RFID 天线放入其中,用 LCR 表测试其天线电感,分析不同材质和不同间距对 RFID 天线电感的影响。试验套筒的相关参数见表 2。

表 2 试验套筒的参数

Table 2 Parameters of ground test sleeves

套筒	材质	工具外壳内壁与井下天线的间距/mm
非金属套筒	聚四氟乙烯	5.5
1号金属套筒	35CrMo	13.0
2号金属套筒	35CrMo	28.0
3号金属套筒	35CrMo	40.0
4号金属套筒	35CrMo	53.0
5号金属套筒	35CrMo	65.5

通过测量天线电感变化,可以表征不同间距对井下天线电感的影响。试验过程分为 2 步:1)作为

工具外壳金属涡流影响的对比试验,将天线放入非金属套筒测量,此时的间距很小,而测试结果表明天线电感值与未加套筒时几乎相同;2)将 RFID 天线依次放入 1—5 号金属套管中间,测量的天线电感变化率如图 12 所示。

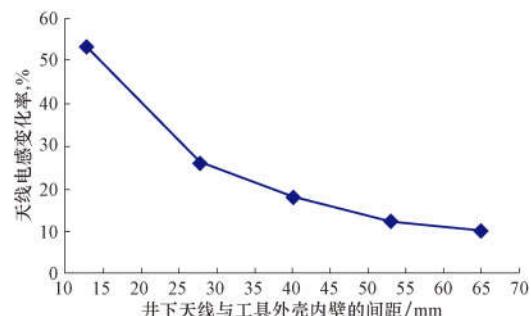


图 12 工具外壳内壁与井下天线间距对天线电感的影响

Fig. 12 Influence of different distances between tool casing and downhole antennae on magnetic field intensity

由于天线电感与天线内部磁场强度呈正相关关系,因此,可以用天线电感变化率表征天线内部磁场的变化率。由图 12 可以看出:1)井下天线放入金属套筒内,天线的电感减小,说明井下工具外壳金属涡流是影响井下天线电感(内部磁场强度)的重要因素;2)随着井下工具金属外壳内壁与井下天线间距增大,金属涡流对天线电感(内部磁场强度)的影响逐渐减小,试验结论与仿真结论相符。

试验过程中还发现,如果间距过小,RFID 天线内部磁场强度被削弱 30% 以上,甚至会造成 RFID 系统无法正常工作。因此,在设计 RFID 井下工具时,应适当增大 RFID 天线与工具外壳内壁的间距,以保证 RFID 系统稳定工作。

4.2 钻井液影响试验

选取仿真用的 4 种试验溶液,将 RFID 天线放入金属套管内,并将环空和内部充满试验溶液,天线两端接外部测试仪器,测得不同试验溶液条件下天线的电感为:饱和盐水为 315.56 μH,某水基钻井液为 319.35 μH,1 号原油为 320.62 μH,2 号原油为 320.29 μH。

由试验结果可知:不同类型溶液对天线电感的影响较小;随着溶液电导率减小,对天线电感的影响逐渐减小。

钻井液类型对 RFID 系统磁场强度的影响无法消除,但总体影响程度较小,试验过程中 RFID 系统依然能够工作,只是读取控制信息的成功率

受到一定影响。因此,建议设计 RFID 井下控制系统硬件时添加自适应调节模块,补偿这种较小的影响,以提高 RFID 井下系统工作时的可靠性^[11]。

5 结论与建议

1) 根据 RFID 井下工具的结构特点和电磁工作环境,建立了 RFID 井下系统电磁仿真模型,仿真结果与理论计算结果相吻合,验证了仿真模型的正确性。

2) 井下工具金属外壳产生的涡流是影响 RFID 井下系统电磁性能的重要因素。工具外壳内壁与井下天线的间距越大,对天线内部磁场的影响越小,因此在设计 RFID 井下工具机械结构时,可通过增大天线与工具外壳内壁间距的方式来减小金属涡流的影响。

3) 钻井液类型不同,电导率不同,对 RFID 井下系统电磁性能的影响程度略有差别,但总体影响不大,在设计 RFID 井下控制系统硬件时,可以通过添加自适应调节模块,补偿这种较小的影响,保证系统工作时的可靠性。

4) 建议进行 RFID 井下系统动态钻井工况下的影响因素分析,重点进行高温和流动钻井液试验。

参 考 文 献

References

- [1] 光新军,王敏生,叶海超,等. RFID 在井下工具中的应用[J]. 石油机械,2013,41(5):25-28,32.
GUANG Xinjun, WANG Minsheng, YE Haichao, et al. Application of RFID in downhole tools[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(5):25-28,32.
- [2] SNIDER P M, DOIG T. RFID actuation of self-powered down-hole tools[R]. SPE 113842, 2008.
- [3] LAIRD T, GONZALEZ L, VALVERDE E, et al. RFID provides multiple on-demand activation/deactivation reliability to underreaming[R]. SPE 146033, 2011.
- [4] SAMPAIO J H B Jr, PLACIDO J C R, FERREIRA S N. Using radio frequency identification electronic chips to effectively control the elements of the drillstring[R]. SPE 49203, 1998.
- [5] TOUGH J M, MASON J, BIEDERMANN R B, et al. Radio frequency identification of remotely operated horizontal frac [R]. SPE 143940, 2011.
- [6] 秦金立,戴文潮,万雪峰,等. 无线射频识别技术在多级滑套压裂工具中的应用探讨[J]. 石油钻探技术,2013,41(3):123-126.
QIN Jinli, DAI Wenchao, WAN Xuefeng, et al. Application of radio frequency identification in multistage fracturing sleeve tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41 (3): 123 - 126.
- [7] 毛博. 基于 RFID 的深井油田注水控制系统设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
MAO Bo. The design and implementation of deep well oilfield water injection control system based on RFID[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [8] 张哲. RFID 在智能井中的应用基础研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2013.
ZHANG Zhe. Basic research on application of RFID in intelligent well [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2013.
- [9] 陈红,侯国栋. 长直螺线管的电磁场分析与仿真[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2013,28(1):100-104.
CHEN Hong, HOU Guodong. Analysis and simulation of magnetic field of a long straight solenoid[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry(Natural Science Edition), 2013, 28(1):100-104.
- [10] 谢亚军. 基于 RFID 技术的深井随钻防喷器控制系统设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
XIE Yajun. Design and implementation of deep well while-drilling blowout preventer control system based on RFID [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [11] 倪卫宁,刘建华,张卫,等. 基于无线射频识别的井下工具控制技术[J]. 石油钻探技术,2014,42(6):102-105.
NI Weining, LIU Jianhua, ZHANG Wei, et al. The control technology of downhole tools based on radio frequency identification[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(6):102-105.

〔编辑 令文学〕