

# 螺线管磁定位技术初探

陈剑垚<sup>1</sup>, 岳刚<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 东北煤田地质局一五五勘探队, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**随着钻探工艺的不断发展,对井身轨迹的要求不断增加。一般依靠地磁定位的仪器已无法满足精度要求,于是研发出了多种近场磁导向系统,如 MGT、RMRS 和慧磁中靶仪等。以发射源种类为依据,可分为主动测量技术和被动测量技术。螺线管磁定位系统属于主动测量技术,它具有数据传输量小、耐高温等优点。目前国外已经商用化,而国内研究不多。本文简单介绍了螺线管测量的理论模型,着重阐述了室内实验和误差分析。实验共测量了 144 个点数据,总距离平均误差为 4.9%,平面距离平均误差为 5.6%,初步验证了螺线管磁定位系统的可行性。

**关键词:**定向钻进;螺线管;定位技术;磁场;导向

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)08-0053-05

**Discussion on the Solenoid-location System/CHEN Jian-yao<sup>1</sup>, YUE Gang<sup>2</sup>** (1. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. No. 155 Exploration Team of Northeast Coalfield Geology Bureau, Jinzhou Liaoning 121000, China)

**Abstract:** Requirements for wellbore trajectory are increasing along with the continuous development of drilling technology. Normal instruments based on geomagnetic positioning has been unable to meet the accuracy requirements, so a variety of near field magnetic guide system, such as MGT, RMRS and SmartMag target instrument, etc. are developed. On the basis of the type of emission source, this system can be divided into active measurement technology and passive measurement technology. Solenoid location system belongs to active measurement technology with the advantages of small data quantity and high temperature-resistance, this technology has been commercialized abroad, but there is no much research on it in China. The paper briefly introduces the theoretical model of solenoid measurement and explains the indoor experiment and error analysis. 144 points data were measured totally with the average total distance error of 4.9% and average plane projected distance error 5.6%; the feasibility of solenoid-location system is validated preliminarily.

**Key words:** directional drilling; solenoid; location technology; magnetic field; guidance

## 0 引言

磁定位技术在钻井导向领域占据着重要的位置,特别是在轨迹要求严格的工程中,一般依靠地磁的仪器无法达到精度要求,于是开发出了多种近场磁导向技术。常用磁定位技术从发射源类型上来分共有 2 类:一类是被动测磁测量技术,如以套管或钻具本身的剩磁为信号源,由于磁场强度过小,可测量距离近,一般不超过 30 m,经过磁化的套管能达到 42 m<sup>[1]</sup>,此类技术常用于侧钻、救援井和防碰井施工,国内研究较少,国外有科学钻探公司的 MagTraC MWD Ranging 和壳牌公司的 PWT 技术<sup>[2]</sup>;第二类是主动磁测量技术,即以人工营造的磁场为发射源,如使用永磁接头、通电螺线管、通电电缆或通电套管等,此类发射源可以人为控制场强,传输距离较远,常用于对接、绕障作业,国内应用较多,市场上常用

的有,美国矢量公司的 RMRS 和 SWG 导向系统<sup>[3]</sup>,中国地质科学院勘探技术研究所的慧磁钻井中靶系统<sup>[4]</sup>和哈里伯顿公司的 MGT 技术等<sup>[5]</sup>。螺线管定位技术属于主动测量技术,它以通电螺线管为发射源,磁传感器为接收源,通过分析通电前后传感器的磁场变化<sup>[6]</sup>,得出两者之间的相对空间位置关系。相比于其它同类仪器,螺线管定位技术具有传输数据量小、耐高温等优点。国内有文献曾介绍过类似的测距技术<sup>[7]</sup>,但仅局限于原理公式,没有相关实验和应用分析。本文将着重讲解室内实验和误差分析,用结果验证螺线管磁定位方法的可行性。

## 1 理论模型

### 1.1 原理介绍

图 1 所示为螺线管通电时的磁力线示意图。螺

收稿日期:2016-06-01; 修回日期:2016-07-07

作者简介:陈剑垚,男,汉族,1982 年生,工程师,从事定向钻进和磁导向技术研究工作,河北省廊坊市金光道 77 号,chen86813995@163.com;岳刚,男,汉族,1972 年生,从事地质勘查钻探工作,103yuegang@163.com。

线管使用直流电源,并有一个可以变换进出极性的开关。磁传感器连接电脑,可实时读取数值。测量时,磁传感器会在通电前后分别捕捉到地磁场及地磁场与螺线管磁场叠加之和两个数据,通过简单的计算即可获得螺线管产生的真实磁场。当磁环境不稳定时,可以改变螺线管通电的两极,对3个结果进行对比,减小外部干扰值。

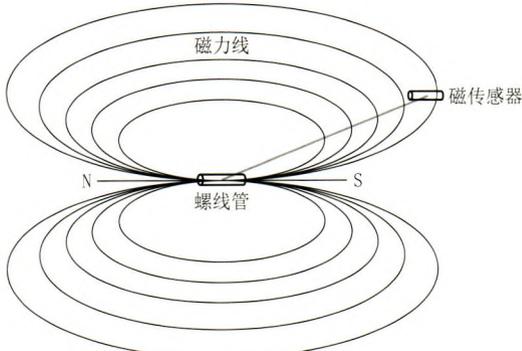


图1 螺线管磁力线示意图

1.2 数学模型(参见图2)

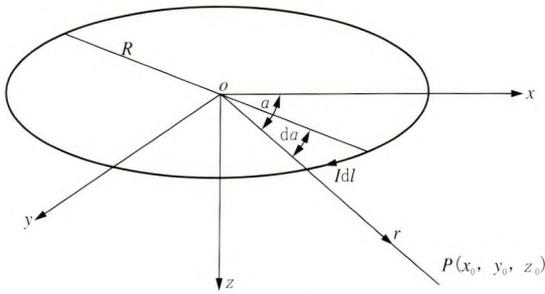


图2 螺线管空间模型

图2所示为螺线管多个线圈中的一个, *o* 为圆心,也是坐标原点,坐标轴 *xy* 与线圈共面,*z* 轴垂直向下,下面推测通电线圈在空间任意点  $P(x_0, y_0, z_0)$  产生的磁场。

$$Idl = IR(-\sin\alpha i + \cos\alpha j + 0k) d\alpha \quad (1)$$

式中:*I*——通电电流, A; *R*——线圈半径, m;  $\alpha$ ——*oP* 与 *x* 轴的夹角, rad; *i*、*j*、*k*——分别为3个坐标轴的单位矢量。

导线元的坐标为  $(R\cos\alpha, R\sin\alpha, 0)$ , 导线元在场点  $P(x_0, y_0, z_0)$  产生的磁场为<sup>[8]</sup>:

$$H_x = \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z_0 R \cos\alpha d\alpha}{[(x_0 - R\cos\alpha)^2 + (y_0 - R\sin\alpha)^2 + z_0^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$H_y = \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z_0 R \sin\alpha d\alpha}{[(x_0 - R\cos\alpha)^2 + (y_0 - R\sin\alpha)^2 + z_0^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$H_z = \frac{I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(R^2 - x_0 R \cos\alpha - y_0 R \sin\alpha) d\alpha}{[(x_0 - R\cos\alpha)^2 + (y_0 - R\sin\alpha)^2 + z_0^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)通过数值方法求得近似解,用传感器捕获到磁场的变化值,代入计算公式,经过解析程序推导出两者的相对坐标。

2 室内实验

2.1 实验工具

如图3所示,实验工具主要包括螺线管、磁传感器(在探管内,下称探管)和笔记本等器材。

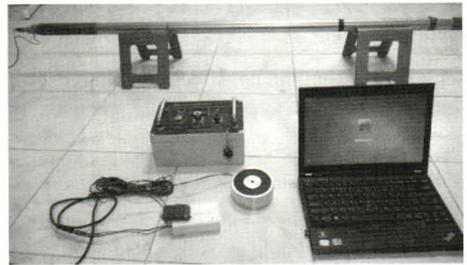


图3 实验工具

2.2 实验方法

螺线管定位系统主要以测量地磁和发射源叠加场为数据源,对磁环境的要求并不高,本次室内实验存在一些固定的干扰,可以通过简单的数值处理过滤掉。此外,为了增强信噪比,实验时选用大功率的信号源,并在近距离内测试,提高数据的准确度。图4所示为实验平面示意图,探管固定在中间位置,不断改变螺线管位置,每个点的间隔为 0.5 m × 0.5 m。在每个测点,探管顶角变化3次,分别是上仰,水平和下倾,螺线管方位变化2次,共144个数据。测量时,依次启动正反开关,使螺线管线路中电流处于开、关和反向开的位置,保存后对数据进行分析。图5为实验实物照片,图6为部分波形截图。

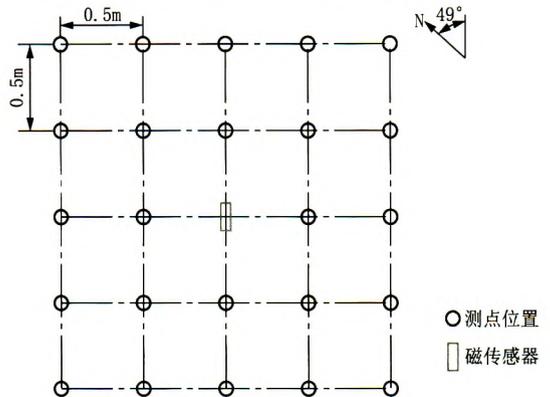


图4 平面实验示意图

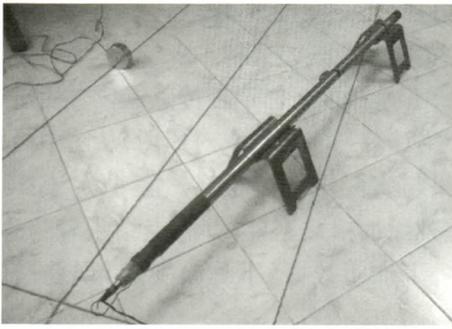


图 5 实验实物照片

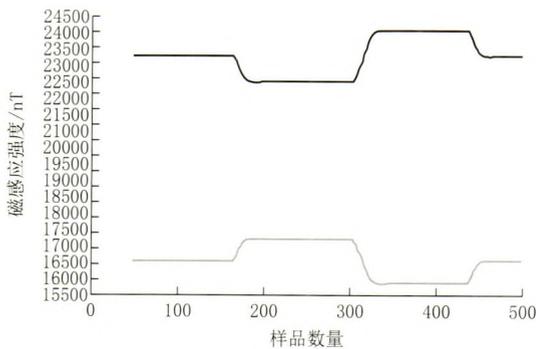


图 6 部分波形截图

### 2.3 实验结果及分析

实验共测量 6 组 144 个点,表 1 所示为 6 组结果的距离误差统计。

表 1 距离误差统计表

项目	探管顶角/ (°)	螺线管方位/ (°)	平面误差/ %	总误差/ %
实验一	90	229	5.1	6.1
实验二	90	319	4.5	4.9
实验三	100	229	5.3	6.2
实验四	100	319	5.9	7.0
实验五	78	229	4.2	4.8
实验六	78	319	4.2	4.6

注:修正结果后统计。

从整体上看,实验结果比较理想。下面通过介绍 2 组典型数据,分析在实验中出现的问題和误差产生的原因。

#### 2.3.1 实验三及误差分析

表 2 所示为探管顶角 100°、螺线管方位 229°时的计算结果。测量时探管固定不动,螺线管在平面上移动,高程差设为不变。

图 7 是以探管为坐标原点,计算点与实际坐标平面对比图。从图中容易看出,计算坐标整体有规律的偏移,推测有一个固定的因素影响结果。经过排查和反复校核,发现探管内磁传感器假想位置比

真实位置下移了 11 cm,即实际坐标应为每个计算点坐标加上(8.1,7.2,-1.9)。表 3 所示为修正前后,两次误差对比,从平均值一行中可看出,修正后的平面距离误差大幅下降,仅为原值的 1/3。图 8 是修正后平面对比图,与图 7 相比重合度有明显提高。当测试距离很近时,磁传感器坐标精确度会影响计算结果。

表 2 实验三结果表

编号	实际坐标值/cm			计算坐标/cm		
	北	东	高	北	东	高
1.1	9.85	-141.08	-33.00	0.42	-147.44	-31.41
1.2	42.65	-103.34	-33.00	30.84	-110.28	-30.91
1.3	75.45	-65.61	-33.00	59.41	-73.51	-37.93
1.4	108.26	-27.87	-33.00	95.12	-36.97	-29.59
1.5	141.06	9.87	-33.00	124.55	-4.92	-30.84
2.1	-27.89	-108.27	-33.00	-37.02	-114.89	-31.61
2.2	4.92	-70.54	-33.00	-8.92	-77.71	-30.95
2.3	37.72	-32.80	-33.00	26.54	-42.95	-27.51
2.4	70.52	4.93	-33.00	57.53	-6.28	-28.64
2.5	103.32	42.67	-33.00	88.93	28.03	-29.58
3.1	-65.62	-75.47	-33.00	-74.14	-80.64	-31.35
3.2	-32.82	-37.73	-33.00	-41.88	-45.08	-29.93
3.4	32.79	37.74	-33.00	25.08	27.88	-29.99
3.5	65.59	75.47	-33.00	51.18	62.84	-28.38
4.1	-103.36	-42.67	-33.00	-107.56	-49.60	-32.51
4.2	-70.55	-4.93	-33.00	-77.45	-14.16	-31.71
4.3	-37.75	32.80	-33.00	-46.70	26.68	-25.30
4.4	-4.95	70.54	-33.00	-12.54	58.60	-30.87
4.5	27.85	108.27	-33.00	14.45	94.77	-28.17
5.1	-141.09	-9.86	-33.00	-147.60	-24.73	-36.71
5.2	-108.29	27.87	-33.00	-116.55	17.84	-33.03
5.3	-75.49	65.61	-33.00	-84.24	59.31	-14.46
5.4	-42.68	103.34	-33.00	-50.12	91.27	-34.17
5.5	-9.88	141.08	-33.00	-23.60	125.85	-30.81

注:以探管为原点,磁北坐标系。

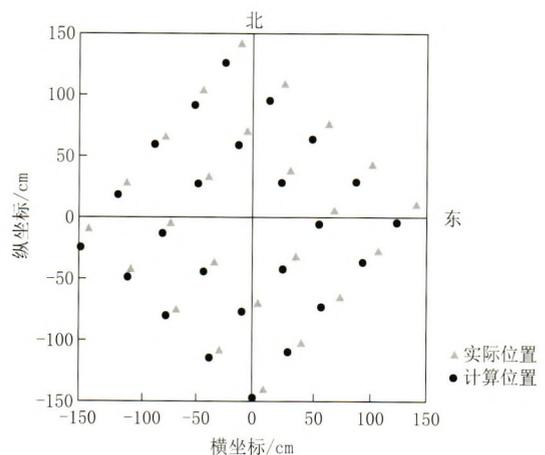


图 7 实验三平面对比图

表3 误差对比情况

编号	原始误差/%		修正后误差/%	
	平面误差	总误差	平面误差	总误差
1.1	8.0	7.9	1.1	1.1
1.2	12.3	11.9	3.3	3.2
1.3	17.9	17.6	8.0	10.0
1.4	14.3	14.0	4.8	4.8
1.5	15.7	15.3	8.0	7.8
2.1	10.1	9.8	1.1	1.1
2.2	22.0	20.1	8.1	7.4
2.3	30.2	26.8	8.5	9.3
2.4	24.3	22.7	9.0	8.7
2.5	18.4	17.9	8.7	8.5
3.1	10.0	9.6	2.1	2.0
3.2	23.3	20.1	1.9	2.5
3.4	25.0	21.5	5.4	4.8
3.5	19.2	18.7	8.3	8.3
4.1	7.3	7.0	3.5	3.6
4.2	16.3	14.9	3.3	3.1
4.3	21.7	22.2	2.7	10.0
4.4	20.0	18.3	6.7	6.1
4.5	17.0	16.8	7.4	7.5
5.1	11.5	11.5	5.5	6.6
5.2	11.6	11.1	2.5	2.9
5.3	10.8	20.4	1.1	15.8
5.4	12.7	12.2	4.4	5.0
5.5	14.5	14.2	6.9	6.7
平均值	16.4	15.9	5.1	6.1

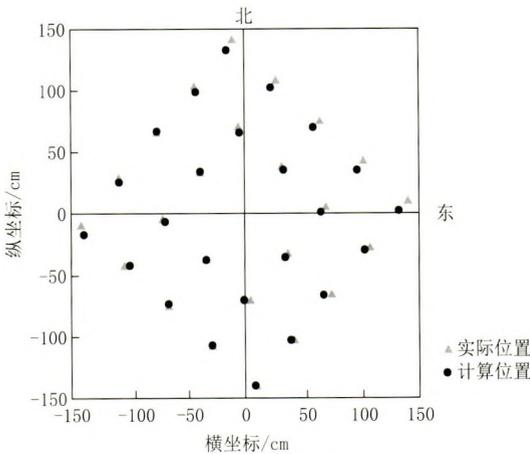


图8 修正后平面对比图

在实际应用中,探管或螺线管都可以作为已知点,计算另一点的相对位置。对于已知点坐标测量误差会带入到计算结果当中,但两者的相对坐标不会改变。信号源自身的大小也应该引起注意。本实验使用的螺线管为直径10 cm、长度5 cm的圆柱体,在近距离内还不能视为一个点源,为了减少误差,摆放时尽量让中心点与标记点重合。只有当测量距离远远大于探管和磁螺线管自身长度时,发射源和接

收源才可视为一个点来处理。

### 2.3.2 实验五及误差分析

实验五是在重新标定磁传感器位置后进行的测试,图9为计算与实际结果对比图,从图中可以看出计算结果与实际重合度很高。表4为计算结果汇总,误差列除加粗数据外,其它点结果较为理想,下面分析一下加粗数据(下称畸变点)误差产生的原因。

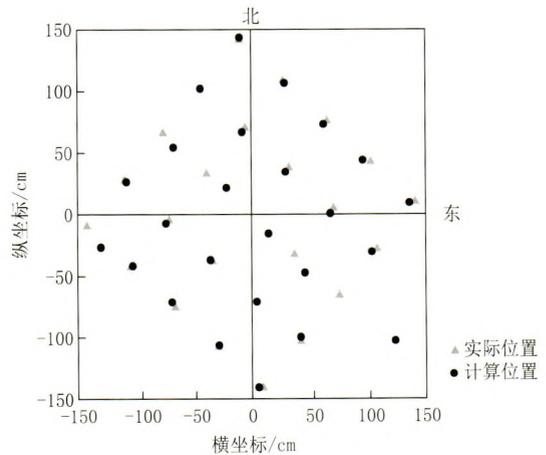


图9 计算与实际结果平面对比图

表4 实验五结果表

编号	实际坐标值/cm			计算坐标/cm			误差/%	
	北	东	高	北	东	高	平面误差	总误差
1.1	9.85	-141.08	-51.00	6.06	-140.42	-48.10	2.7	3.2
1.2	42.65	-103.34	-51.00	41.84	-99.97	-47.14	3.1	4.2
1.3	75.45	-65.61	-51.00	45.53	-47.53	-93.27	<b>35.0</b>	<b>48.9</b>
1.4	108.26	-27.87	-51.00	103.60	-30.43	-45.05	4.8	6.5
1.5	141.06	9.87	-51.00	136.07	8.92	-47.80	3.6	4.0
2.1	-27.89	-108.27	-51.00	-28.00	-106.83	-48.63	1.3	2.3
2.2	4.92	-70.54	-51.00	4.25	-71.27	-47.59	1.4	4.1
2.3	37.72	-32.80	-51.00	14.25	-16.36	-65.57	<b>57.3</b>	<b>45.0</b>
2.4	70.52	4.93	-51.00	67.71	0.77	-46.92	7.1	7.4
2.5	103.32	42.67	-51.00	96.11	43.65	-49.29	6.5	6.1
3.1	-65.62	-75.47	-51.00	-68.83	-71.35	-47.72	5.2	5.5
3.2	-32.82	-37.73	-51.00	-35.01	-37.14	-47.96	4.5	5.3
3.4	32.79	37.74	-51.00	29.35	34.11	-48.00	10.0	8.2
3.5	65.59	75.47	-51.00	62.36	72.99	-47.99	4.1	4.5
4.1	-103.36	-42.67	-51.00	-102.05	-42.46	-48.41	1.2	2.4
4.2	-70.55	-4.93	-51.00	-73.76	-7.43	-51.03	5.7	4.7
4.3	-37.75	32.80	-51.00	-67.07	54.33	-25.66	<b>72.7</b>	<b>62.1</b>
4.4	-4.95	70.54	-51.00	-8.01	66.59	-47.83	7.1	6.8
4.5	27.85	108.27	-51.00	28.54	106.36	-49.33	1.8	2.1
5.1	-141.09	-9.86	-51.00	-129.36	-26.67	-52.87	<b>14.5</b>	<b>13.7</b>
5.2	-108.29	27.87	-51.00	-107.40	25.79	-52.17	2.0	2.1
5.3	-75.49	65.61	-51.00	123.07	-103.01	-87.97	<b>260.5</b>	<b>234.4</b>
5.4	-42.68	103.34	-51.00	-43.75	101.63	-48.80	1.8	2.4
5.5	-9.88	141.08	-51.00	-9.72	143.60	-44.84	1.8	4.4

注:以探管为原点,磁北坐标系。

从表 4 中可观察到,除 5.1 数据外,其它畸变点,都位于每组数据的第三点。返回到实验三,表 3 数据也有同样情况,但与实验五相比误差更小。经过观察,发现每组数据第三点探管与螺线管空间位置较为特殊:探管与螺线管空间连线恰好垂直于螺线管轴线,即探管位于螺线管轴线中心线上。从采集到的原始数据观察到,当处于此种特殊位置时,探管径向磁场很小,远小于轴向磁场,程序在计算时会出现不合逻辑的判断,导致一系列问题,得出错误的结果。从图 1 可以看到,当两者处于上述位置,螺线管发出的磁力线恰好平行于自身轴线,径向磁场应为零。不难推测,当探管处于螺线管轴线上时,径向磁场也为零,解析结果也将会很差。在实验三中由于磁传感器的位置错误,反而避开这一特殊位置,故而误差会小些。应用中应尽量避免此类现象的发生,如遇此类情况可以转动螺线管或调整探管位置,改变两者相对姿态,即可减小误差。

点 5.1 附近有一个铁质仪器架子,开始时以为会严重影响结果,但从实验三结果来看误差并不大,实验五却出现增大情况。原因在于变化高程和修正传感器位置后,螺线管发出的磁力线穿过架子,探管捕捉到的磁场被屏蔽了一部分,获得的数值与模型不符,导致上述结果。

### 3 结论

利用螺线管定位的理论在国内外都有相关报道,并且国外一些公司都已成功应用到实际钻井当中,如 MGT 技术和 Beacon Tracking Systems 等。相比之下国内此类技术研究较少。本文通过实验和分析,得出如下结论:

(1)室内实验时,总距离平均误差在 4.9%,平面距离平均误差在 5.6%,证明使用螺线管进行空间定位的方法是可行的;

(2)测量时,螺线管和探管都可以作为已知点,推测出另一点的位置,但已知点的坐标误差会累加到另一点的计算结果中,两者相对坐标不会改变;

(3)测量时,要避免探管处于螺线管轴线或轴线中心线的情况,此时计算结果精度较差,如果无法避免,可以改变探管或螺线管的空间姿态;

(4)测量时,当螺线管或探管周围存在铁磁性物体时,磁场会受到干扰而影响结果;

(5)需要针对某一特定领域,深入开发和研究应用方法。

### 参考文献:

- [1] Roger H. Van Noort, Chip Abrant, James N. Towle. Well Planning Based On Passive Magnetic MWD Ranging And Magnetized Casing[R]. Texas, USA; Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, 2012.
- [2] Tracy L. Grills. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries [R]. Alberta, Canada; SPE international thermal operations and heavy oil symposium and international horizontal well technology conference, 2002.
- [3] Ray Tommy Oskarsen, John Wayne Wright, David Winter, et al. Rotating Magnetic Ranging Service and Single Wire Guidance Tool Facilitates in Efficient Downhole Well Connections [R]. Amsterdam, The Netherlands; Drilling Conference and Exhibition, 2009.
- [4] 胡汉月,向军文,陈剑焱.“慧磁”SmartMag 钻井中靶导向系统加强性工业试验研究[J].中国井矿盐,2011,42(3):12-15.
- [5] AF Kuekes, RT Hay, MM Josep, et al. New Electromagnetic Surveying/Ranging Method for Drilling Parallel Horizontal Twin Wells [J]. Spe Drilling & Completion,1996,11(2):85-90.
- [6] 孙东奎,高德利,刁斌斌,等. RMRS 在稠油/超稠油开发中的应用[J].石油机械,2011,(7):73-76.
- [7] 刁斌斌,高德利.螺线管随钻测距导向系统[J].石油学报,2011,32(6):1061-1066.
- [8] 周耀忠,张国友.舰船磁场分析计算[M].北京:国防工业出版社,2004:141-142.