

# 钻井利器故事之“慧磁”高精度定向中靶导向系统

刘 聘<sup>1,2,3</sup>, 陈剑奎<sup>1,2,3</sup>, 侯 岳<sup>1,2,3</sup>, 何 楠<sup>1,2,3</sup>, 周绍武<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;  
2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北 廊坊 065000;  
3. 中国地质调查局定向钻井技术创新中心, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**磁导向对接井技术的出现,大大提升了对接连通率,目前广泛应用在天然碱等可溶性矿产的开采中。随着该技术的不断发展,作为地下“穿针引线”导航利器的优秀代表——“慧磁”高精度定向中靶导向系统,以其出色的测量精度、稳定性及可靠性已在国内外对接井中取得数百次的好成绩。本文从科普的角度介绍了井下对接导航的必要性、“慧磁”系统的组成及技术原理、“慧磁”系统发展历程及近年来取得的成果,以此提高大家对“慧磁”系统的认识,达到相互交流、相互促进的目的,最终推动以“慧磁”系统为代表的主动磁测系统的技术持续发展和应用领域的不断拓展。

**关键词:**定向钻井;对接井;磁导向;钻井导航;“慧磁”系统;中靶导向系统

**中图分类号:**P634.7;TD87;TE243 **文献标识码:**C **文章编号:**2096-9686(2023)04-0155-05

## The story of a drilling weapon—SmartMag drilling target-hitting guide system

LIU Dan<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jianyao<sup>1,2,3</sup>, HOU Yue<sup>1,2,3</sup>, HE Nan<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Shaowu<sup>1,2,3</sup>

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*  
2. *Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China;*  
3. *Directional Drilling Technology Innovation Center, CGS, Langfang Hebei 065000, China*)

**Abstract:** The emergence of magnetic guided butted well technology has greatly improved the connectivity of docking. Now the technology is widely used in the mining of natural alkali and other minerals. With the continuous development of this technology, as an excellent representative of the underground “thread the needle” navigation tool—SmartMag drilling target-hitting guide system, with its excellent measurement accuracy, stability and reliability, has made hundreds of good achievements in the water solution mining butted wells at home and abroad. From the perspective of science popularization, this paper introduces the necessity of downhole docking navigation, the composition and principle of SmartMag system, the development process of SmartMag system and the achievements made in recent years, so as to improve everyone’s understanding of the SmartMag system, achieve the purpose of mutual exchange and mutual promotion, and finally promote the continuous development of the technology and the continuous expansion of the application field of the active magnetic measurement system represented by SmartMag system.

**Key words:** directional drilling; butted well; magnetic guidance; drilling navigation; SmartMag system; drilling target-hitting guide system

## 0 引言

太空中两个航天器实现轨道交会对接的过程,

可谓是“万里穿针”才实现的“惊天一吻”。殊不知上天不易入地更难,在地下数百甚至数千米的岩石

收稿日期:2022-11-30; 修回日期:2023-04-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.021

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号:DD20221721)

第一作者:刘聘,男,汉族,1991年生,工程师,地质资源与地质工程专业,硕士,从事定向钻探技术研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,260659112@qq.com。

引用格式:刘聘,陈剑奎,侯岳,等.钻井利器故事之“慧磁”高精度定向中靶导向系统[J].钻探工程,2023,50(4):155-159.

LIU Dan, CHEN Jianyao, HOU Yue, et al. The story of a drilling weapon—SmartMag drilling target-hitting guide system[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):155-159.

中,也存在着一种“穿针引线”的技术——钻井导向技术。该技术可以使井眼轨迹沿着预先设计的井斜和方位钻达目的层,从而保证因地面或地下条件受到限制的矿产资源得到经济、有效的开发,再者大幅增加单井资源产量、还可对井下事故实施救援等。

钻井导向技术按照技术分类可以分为旋转导向、地质导向、岩心定向取心钻探及磁导向钻井等技术。其中旋转导向技术是井下钻具在旋转钻进时,随钻实时完成导向功能的一种导向式钻井系统,是20世纪90年代以来一种具有高科技含量的自动化钻井新技术<sup>[1-2]</sup>。地质导向技术是实时测得钻头处的地质数据、井斜数据从而及时调整井眼轨迹的测量控制技术,最终有效提升矿层钻遇率<sup>[3-4]</sup>。两者相比,前者是通过工程手段实现地质目标,后者是根据地质资料追踪储层。岩心定向取心钻探技术则是通过定向取心工具来实现的一种特殊取心技术,与常规取心技术相比,它能够获得地层裂缝的倾角、倾向等众多地层要素<sup>[5-6]</sup>。

磁导向钻井技术是我们此次故事的主角,它能够利用磁性导向仪器测量人工旋转信号源而获得钻头位置的距离和方位信息,引导钻头像“贪吃蛇”一样,在矿层中不断游弋穿梭,准确吃到一个个“靶点”而构成对接井组,是现有钻井导向技术的有效补充。当前该技术广泛应用在盐、天然碱、芒硝等可溶性矿产和煤层气资源的开采中。磁导向钻井技术的成功实施离不开井下钻井导航系统,下面我带大家认识一下地下“穿针引线”导航利器优秀代表——“慧磁”高精度定向中靶导向系统(以下简称“慧磁”系统)。

### 1 为什么要给“贪吃蛇”装上导航系统?

早期的盐卤井多采用自然溶通或地层压裂连通的方式开采,存在产量低、成本高、连通率低、容易破坏地层等问题,定向对接井开采工艺应运而生<sup>[7]</sup>。对接井开采技术的核心是利用先进的钻井和测井技术使地面相距一定距离的两口井或多口井在地下几百米甚至几千米深处实现对接连通形成开采通道,向其中一口井注入淡水,从其余井采出高浓度卤水<sup>[8]</sup>(参见图1)。通过增大开采面积,有效地提高可溶性固体矿产或可溢出性气体矿产的产出效率,如今已广泛应用在天然碱、芒硝、盐等可溶性矿产和煤层气的开采中<sup>[9-13]</sup>。

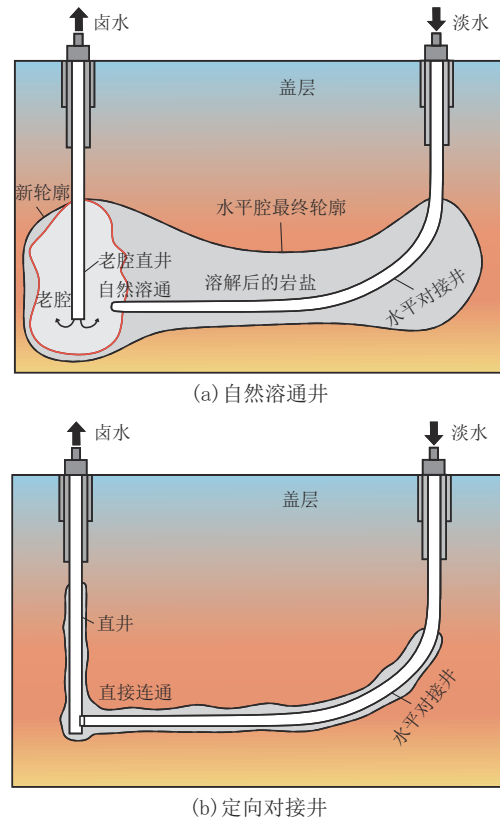


图1 自然溶通井和定向对接井对比

Fig.1 Comparison between natural dissolution well and directionally butted-wells

定向对接井开采工艺的核心在于井下连通,自MWD随钻测量系统、陀螺测斜仪等仪器问世后钻井导向技术取得了突破性的进展。但建立水平通道时因MWD随钻测量技术本身存在测量误差的固有缺陷<sup>[14]</sup>,随着井深的增加,产生的累计偏差越来越大。故对于靶区小于5 m的对接工程,通常面临连通率偏低的问题<sup>[15]</sup>。所以我们需要给这只近视“贪吃蛇”装上钻井导航系统引导它精准吃到靶点(见图2)。

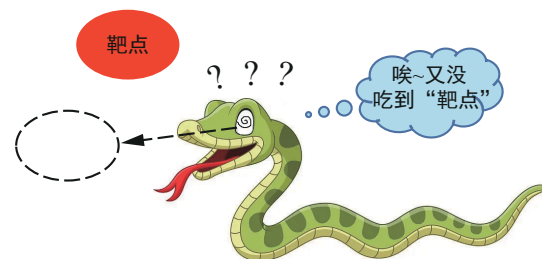


图2 缺失导航系统的“贪吃蛇”

Fig.2 Gluttonous snake without navigation system

## 2 “慧磁”的前世今生

磁导向钻井技术最早可追溯到1980年,C. L. West及A. F. Kuckes等人研发的ELREC(Extended Lateral Range Electrical Conductivity)工具,最初应用在引导救援井与事故井连通<sup>[16-17]</sup>。1985年美国A. F. Kuckes等人成立了Vector Magnetics公司,磁导向技术开始快速发展,1990年该公司申请了SWG(Single Wire Guidance)工具专利,开始应用于定向井邻井防碰中<sup>[18-19]</sup>。1993年,Vector Magnetics公司和Sperry Sun Drilling Services公司合作,研发了MGT(Magnetic Guidance Tool)工具,首次成功应用于SAGD双水平井磁导向钻井中<sup>[20-21]</sup>。2001年A.G.Nekut等人研发了RMRS(Rotating Magnet Ranging System)工具,并成功将该仪器应用到煤层气水平对接钻井中<sup>[22]</sup>。2006年中国地质科学院勘探技术研究所实施在土耳其安卡拉BEYPAZARI的天然碱项目时,因天然碱的可溶性差及当地天然碱矿层较薄,导致靶区很小,中靶难度极大,当时的对接技术水平仅有20%的中靶率。面对严峻的生产压力和棘手的技术难题,中国地质科学院勘探技术研究所不得不引进美国Vector Magnetics公司的RMRS测距仪器解决当下的繁重中靶任务。

面对当时国外旋转磁导向系统只租不售和高昂的租赁费用,为打破受制于人的局面,2007年底,中国地质科学院勘探技术研究所技术团队立项研发具有自主知识产权的高精度钻井地下导航对接技术,为这只“贪吃蛇”装上中国人自己的“导航”系统。历经2年的实验室建模及地面模拟试验研究,自主研发的首台人工磁导航系统终于于2009年10月问世,并命名为“慧磁”(SmartMag),同年在土耳其BEYPAZARI天然碱项目中成功实现一次性对接连通(见图3)。该技术成果一举打破了西方国家同类产品的技术封锁和垄断,使中国地质科学院勘探技术研究所成为国内首家、继美国Vector Magnetics第二家真正掌握该技术的单位。为进一步提高“慧磁”系统的测量距离和测量精度,拓展测量模式,后续相继升级开发出了第二代、第三代、第四代以及第五代产品。

## 3 “慧磁”是如何引导“贪吃蛇”的?

“慧磁”系统结构上分为硬件和软件两个部分。硬件方面,由旋转磁信标、入井探管、地面机等组成(见图4)。软件方面,为磁场信号采集与解析程序、



图3 2009年“慧磁”系统第一台样机对接连通成功

Fig.3 The first SmartMag prototype was successfully tested in 2009

结果分析程序和加密程序等所组成的数据软件包<sup>[23]</sup>(见图5)。



图4 “慧磁”高精度定向中靶导向系统的硬件组成

Fig.4 Hardware composition of SmartMag drilling target-hitting guide system

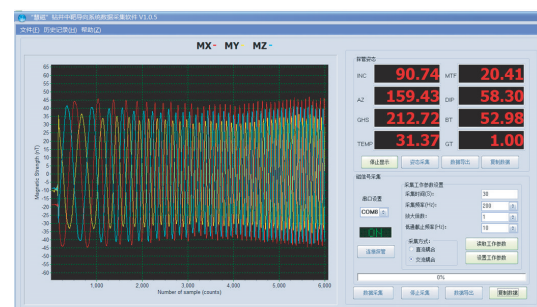


图5 “慧磁”高精度定向中靶导向系统的软件界面

Fig.5 Software interface of SmartMag drilling target-hitting guide system

与传统导航技术不同的是,“慧磁”系统是以旋转的磁信标产生的人工磁场作为参照物<sup>[24]</sup>,使用时将旋转磁信标安装在钻头和螺杆马达之间,在泥浆马达驱动下,带动磁信标和钻头一起旋转营造出人

工旋转磁场,“慧磁”探管由测井绞车下放至目标靶点位置,当磁信标进入“慧磁”系统的测量范围内,置于靶井中的“慧磁”探管开始采集旋转磁信标发出的磁信号,并通过电缆将数据传输到地面,利用软件解析出磁信标与靶点两者之间的空间位置关系<sup>[25-26]</sup>,定向工程师根据获得的空间偏差数据及时调整钻进方向,引导钻头逐步靠近靶点,最终实现中靶连通(见图6)。

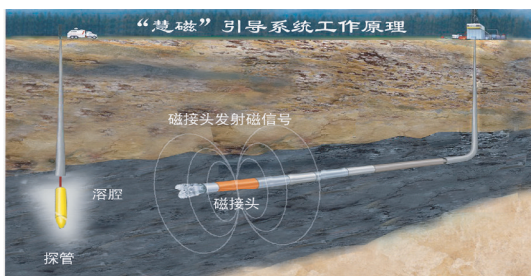


图6 “慧磁”高精度定向中靶导向系统工作原理  
Fig.6 Working principle of SmartMag drilling target-hitting guide system

#### 4 “慧磁”任重道远

“慧磁”系统自2009年成功连通第一组井以来,在国内外一系列水溶采矿水平对接井施工中得到了大规模应用,累计已成功完成500余井次的高精度中靶对接作业<sup>[27-28]</sup>,随着其应用领域不断扩展,近年又先后在祁连山陆域天然气水合物试采对接水平井和神狐海域天然气水合物二轮试采中得到应用<sup>[29-30]</sup>。与此同时,其技术水平也在不断提升,测量精度已从“分米级”提高到“厘米级”,完全能够实现超高精度中靶,未来将在深海钻探工程、地下井工厂的建设中进一步大放异彩。

中国地质科学院勘探技术研究所研发团队将不断创新、精益求精,为了能让游弋穿梭的“贪吃蛇”始终在矿层内“百步穿杨”,充分结合地质参数和空间位置参数调整优化井轨迹,实现在矿层内的精准对接连通,“慧磁”系统未来将更加紧密结合地质导向等技术,确保一次连通率和矿层钻遇率,既要打得准、又要打得快、还要打得好。未来,“慧磁”系统将朝着测距更远、精度更高、抗干扰能力更强而不断努力,用优良的仪器和精湛的技术为国内外矿产资源的勘探与开发服务。

#### 参考文献(References):

- [1] 薛启龙,丁青山,黄蕾蕾. 旋转导向钻井技术最新进展及发展趋势[J]. 石油机械, 2013, 41(7): 1-6.  
XUE Qilong, DING Qingshan, HUANG Leilei. The latest progress and development trend of rotary steering drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(7): 1-6.
- [2] 雷静,杨甘生,梁涛,等. 国内外旋转导向钻井系统导向原理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 53-58.  
LEI Jing, YANG Gansheng, LIANG Tao, et al. Steering principles of rotary steerable drilling systems in China and abroad[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(9): 53-58.
- [3] 梁斌,任瑞川,程琦,等. 水平井地质导向关键技术研究及应用[J]. 录井工程, 2021, 32(4): 37-42.  
LIANG bin, REN Ruichuan, CHENG Qi, et al. Research and application of key geosteering technology for horizontal wells[J]. Mud Logging Engineering, 2021, 32(4): 37-42.
- [4] 林昕,苑仁国,韩雪银,等. 地质导向钻井井轨迹控制技术研究[J]. 钻采工艺, 2021, 44(2): 5-8.  
LIN Xin, YUAN Renguo, HAN Xueyin, et al. Study on geosteering trajectory control technique [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(2): 5-8.
- [5] 林志强,杨甘生,张建,等. 定向取心技术在松科1井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(10): 69-71.  
LIN Zhiqiang, YANG Gansheng, ZHANG Jian, et al. Application of oriented coring technique in S1core-I [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(10): 69-71.
- [6] 董晨晨. 定向取心技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.  
DONG Chenchen. Research on oriented coring [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [7] 胡汉月. 对接井中靶利器——浅谈近靶点测量技术的发展与应用[J]. 中国井矿盐, 2007, 38(4): 27-31.  
HU Hanyue. An efficient tool in targeting of butted well—Brief discussion on development and application of close target point measurement technology [J]. China Well and Rock Salt, 2007, 38(4): 27-31.
- [8] 胡汉月. 钻孔地下的“导航”神技——高精度对接连通井技术的奥秘[J]. 国土资源科普与文化, 2016(2): 10-16.  
HU Hanyue. Navigation techniques for drilling underground—The secret of high precision intersection well drilling technology [J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2016(2): 10-16.
- [9] 刘志强. 土耳其天然碱矿对接井技术应用[J]. 中国井矿盐, 2011, 42(5): 12-16.  
LIU Zhiqiang. Application of docking well technology in Turkey natural alkaline mine [J]. China Well and Rock Salt, 2011, 42(5): 12-16.
- [10] 洪常久. 水平对接井技术在天然碱矿中的应用[J]. 煤炭技术,

- 2008,27(6):142-143.
- HONG Changjiu. Application of level docking wells in nature alkaline mine[J]. Coal Technology, 2008,27(6):142-143.
- [11] 戴鑫,苏如海,马建杰,等. 芒硝水平连通井组开采工艺研究[J]. 中国井矿盐,2012,43(4):22-24,30.
- DAI Xin, SU Ruhai, MA Jianjie, et al. Mining technology research on glauber's salt horizontally connected well pairs[J]. China Well and Rock Salt, 2012,43(4):22-24,30.
- [12] 陈霄. 浅析水平对接井技术在盐井中的应用[J]. 中国井矿盐,2012,43(3):14-16.
- CHEN Xiao. Brief analysis on the application of horizontal docking well technology in the salt well[J]. China Well and Rock Salt, 2012,43(3):14-16.
- [13] 高德利,刁斌斌. 复杂结构井磁导向钻井技术进展[J]. 石油钻探技术,2016,44(5):1-9.
- GAO Deli, DIAO Binbin. Development of the magnetic guidance drilling technique in complex well engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(5):1-9.
- [14] 贺德军,栗俊,何建文. 磁定位测量技术在定向对接钻井施工的应用探析[J]. 中国井矿盐,2015,46(1):14-18.
- HE Dejun, SU Jun, HE Jianwen. Application and analysis of the magnetic positioning technology in the directional butted well drilling[J]. China Well and Rock Salt, 2015,46(1):14-18.
- [15] 商敬秋,武程亮,刘汪威,等. 无建槽直井的定向中靶作业[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):13-16.
- SHANG Jingqiu, WU Chengliang, LIU Wangwei, et al. Oriented target-hitting operation for vertical well without cavity building[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(1):13-16.
- [16] WEST C L, KUCKES A F, RITCH H J. Successful ELREC logging for casing proximity in an offshore Louisiana blowout[R]. SPE 11996, 1983.
- [17] KUCKES A F. Plural sensor magnetometer arrangement for extended lateral range electrical conductivity logging: US4323848[P]. 1982-04-06.
- [18] TARR B A, KUCKES A F, AC M V. Use of new ranging tool to position a vertical well adjacent to a horizontal well[R]. SPE 20446, 1990.
- [19] MALLARY C R, WILLIAMSON H S, PITZER R, et al. Collision avoidance using a single wire magnetic ranging technique at Milne point, Alaska[R]. SPE 39389, 1998.
- [20] KUCKES A F. Method and apparatus for measuring distance and direction by movable magnetic field source: US5485089[P]. 1996-01-16.
- [21] KUCKES A F, HAY R T, McMAHON J, et al. New electromagnetic surveying/ranging method for drilling parallel horizontal twin wells[R]. SPE 27466, 1996.
- [22] RACH N M. New rotating magnet ranging systems useful in oil sands, CBM developments[J]. Oil Gas Journal, 2004,102(8):47-49.
- [23] 胡汉月,向军文,陈剑垚.“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.
- HU Hanyue, XIANG Junwen, CHEN Jianyao. The enhanced industrial test research on SmartMag target-hitting guide system[J]. China Well and Rock Salt, 2011,42(3):12-15.
- [24] 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.
- [25] 向军文,胡汉月. 国产定向对接井精确中靶技术在盐矿中的应用[J]. 中国井矿盐,2010,41(5):16-18.
- XIANG Junwen, HU Hanyue. The application of accurate target technology of domestic directional butted-wells in salt mine[J]. China Well and Rock Salt, 2010,41(5):16-18.
- [26] 陈剑垚,胡汉月. SmartMag 定向钻进高精度中靶系统及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):10-12.
- CHEN Jianyao, HU Hanyue. Experience on application of SmartMag high precision drilling guidance system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(4):10-12.
- [27] 刘海翔,刘春生,胡汉月,等. 土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):7-13.
- LIU Haixiang, LIU Chunsheng, HU Hanyue, et al. Review on trona solution mining with intersected well sets in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):7-13.
- [28] 张新刚,涂运中,刘汪威,等. 多分支水平对接井技术在土耳其天然碱溶采中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):43-49.
- ZHANG Xingang, TU Yunzhong, LIU Wangwei, et al. Application of multi-lateral horizontal intersected well drilling technique in Turkish trona solution mining[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):43-49.
- [29] 李鑫淼,张永勤,尹浩,等. 水平对接井技术在天然气水合物试采中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):13-17.
- LI Xinmiao, ZHANG Yongqin, YIN Hao, et al. Application of drilling technology of horizontally butted well for gas hydrate trial-producing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(8):13-17.
- [30] 叶建良,秦绪文,谢文卫,等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. 中国地质,2020,47(3):557-568.
- YE Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea[J]. Geology in China, 2020,47(3):557-568.