

基于瞬变电磁法的过套管电阻率测井技术

李晓蕾^{1*}, 徐菲^{1#}, 魏鲲鹏¹, 张舒²

¹中国石化中原油田分公司石油工程技术研究院, 河南 濮阳

²西南石油大学计算机与软件学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月23日

摘要

针对普光高含硫气井水侵问题, 脉冲中子类饱和度测井技术探测深度浅、因素影响大, 传统电极推靠式过套管电阻率仪器外径大, 无法在普光应用的现状, 本文研究了一种基于瞬变电磁原理的非接触式小直径过套管电阻率测井系统设计, 形成了电阻率预测模型及计算方法, 实现了过套管电阻率测井技术在高含硫气井一体化管柱条件下的应用, 现场应用测试成功率100%, 电阻率计算准确率大于80%。结果表明: 基于瞬变电磁的过套管电阻率测井技术可有效表征地层信息, 达到识别地层界面的目的, 为气水分布奠定良好基础。

关键词

高含硫气井, 过套管, 瞬变电磁, 电阻率, 定量计算

Through-Casing Resistivity Logging Technology Based on Transient Electromagnetic Method

Xiaolei Li^{1*}, Fei Xu^{1#}, Kunpeng Wei¹, Shu Zhang²

¹Research Institute of Oil Engineering and Technology, Zhongyuan Oil Field Company, SINOPEC, Puyang Henan

²School of Computer and Software, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Received: March 9, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 23, 2026

Abstract

To address the water invasion issue in high-sulfur gas wells in the Puguang field, conventional

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李晓蕾, 徐菲, 魏鲲鹏, 张舒. 基于瞬变电磁法的过套管电阻率测井技术[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(2): 241-251. DOI: 10.12677/jogt.2026.482028

pulsed neutron saturation logging technologies suffer from shallow detection depth and significant influencing factors, while traditional electrode-based through-casing resistivity tools have large diameters and cannot be applied in Puguang. This paper presents the design of a non-contact, small-diameter through-casing resistivity logging system based on transient electromagnetic principles. A resistivity prediction model and calculation method were developed, enabling the application of through-casing resistivity logging technology in high-sulfur gas wells with integrated tubing conditions. Field tests achieved a 100% success rate, with resistivity calculation accuracy exceeding 80%. The results demonstrate that transient electromagnetic-based through-casing resistivity logging can effectively characterize formation information, identify formation boundaries, and provide a solid foundation for gas-water distribution analysis.

Keywords

High-Sulfur Gas Well, Through-Casing, Transient Electromagnetic, Resistivity, Quantitative Calculation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

普光气田是我国最大的高含硫气田，也是国家重点工程“川气东送”的重要气源，自开发以来已稳产十余年。“十二五”后期，随着高含硫气田[1]产能建设和生产运行的逐步推进，普光气田主体出现“边水内侵”现象，已存在水淹停产或带液生产情况，产能断崖式下滑。气田边底水整体推进，部分沿裂缝(高渗通道)突进，局部存在横向突进、纵向串流现象，并筒纵向气层产出状况和轴向水锥推进状况认识难度增大，亟需在高含硫永久式完井管柱条件下对剩余气资源状况进行准确监测和精细描述，以确定储层剩余气饱和度，评价气井水淹情况，寻找剩余气富集区，指导气田控水及剩余气挖潜，为普光气田长期稳产提供技术支撑[2]。

目前评价储层剩余气的测井方法主要有两类，一类是脉冲中子类饱和度测井[3]，主要包括 C/O、PNN、全谱等，脉冲中子类测井受核测井原理限制，其探测深度较浅，一般在 30~50 cm，且受井筒流体、孔隙度、矿化度等因素影响大，随着高含硫气井边底水上淹加剧，产层越来越薄，其应用效果难以保障；另一类是过套管电阻率测井，该技术探测深度大，一般在 2~10 m，受扩径或井眼流体影响较小，更适用于低孔低渗及水淹层评价。

现有成熟的过套管电阻率测井技术主要是利用电极法原理，基于传输线方程，测量时将电极扎进套管，通过供入大功率电流，在套管壁检测由套管流入地层的“漏电流”形成的微弱电位差[4]，由此来确定储层的电阻率。该技术定点测量，井况测试条件苛刻，当套管变形、腐蚀等情况较为严重时，推靠电极与套管接触不良易导致测井数据失真，现场测试前需井下作业洗井。普光气田开发井采用“3 寸油管+7 寸生产套管+永久封隔器”的一体化完井管柱，油管串最小内通径 66.04 mm，油套最大内径 152.4 mm，传统电极推靠式过套管电阻率仪器外径 89 mm，无法在普光一体化管柱条件下应用。

瞬变电磁法[5]是近几年发展起来的一种新方法，其理论依据是瞬变电磁理论(TEM)，一种时间域电磁方法。利用阶跃波或脉冲电流场源作为激励，在一次场的间歇期间测量由地层介质产生的感应电磁场随时间的变化特征，从而探测地层中不均质体的位置，并对其规模和导电性能进行估计。国外对瞬变电磁法的研究起源于矿物资源的探测，研制成功了多种探测仪，并在矿物勘探、水文地质研究、煤田勘探

等领域得到了应用,但现有的研究工作大多局限于地面勘探领域,在生产井过套管测井方面研究应用较少。2010年左右,俄罗斯提出了瞬变电磁过套管电阻率测井 PELRW 仪器的概念样机,由于相关理论研究并未深入开展,至今还未展示出工程样机。

基于瞬变电磁法的过套管电阻率测井技术作为一种新的测井方法,测试过程对套管质量等条件的要求较低,可连续测量,比电极法具有更大的优越性,是过套管测试技术的一个重要发展方向。因此,针对普光气水精确识别的需要,本文提出基于瞬变电磁原理的非接触式小直径过套管瞬变电磁测井系统设计及研发,克服探针接触式仪器大尺寸和定点测量的缺点,实现在高含硫永久式完井管柱条件下对剩余气资源状况进行准确监测和精细描述,准确评价气水分布,指导堵水控水措施制定。

2. 过套管瞬变电磁测井仪器设计

2.1. 技术原理

瞬变电磁法是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域人工源电磁探测方法。它利用不接地回线(磁源)或接地线源(电偶源)向地下发送一次脉冲磁场(一次场),在其激发下,地下地质体中激励起的感应涡流将产生随时间变化的感应电磁场(二次场),见图 1。二次场随时间衰减的规律主要取决于地质体的导电性、体积规模和埋深,以及发射电流的形态和频率。由于二次场包含有地下地质体丰富的地电信息,在一次脉冲磁场的间歇期间[6],利用线圈或接地电极观测二次场(或称响应场),通过对这些响应信息的提取和分析,从而达到探测地下地质体的目的。过套管瞬变电磁测井技术是一种非接触式的过套管电阻率测井技术,利用接收线圈实现地层二次场信号的测量。

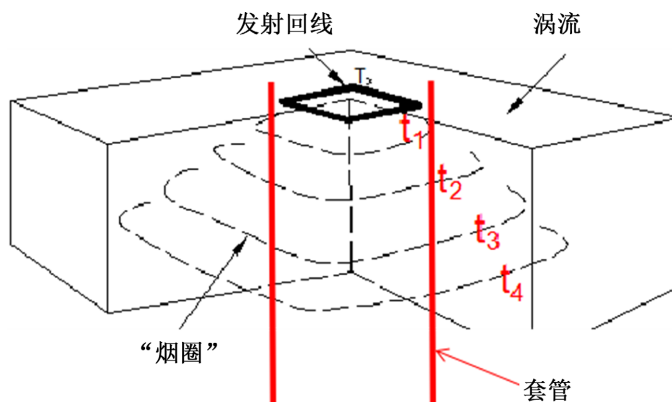


Figure 1. Mechanism of eddy current ring propagation
图 1. 涡流环传播机理

2.2. 试验分析

为进一步验证过套管瞬变电磁测井方法的可行性,利用发射接收线圈系,模拟普光高含硫气井实际工况条件开展了正演仿真及物模试验[7],不同储层技术参数见表 1。

(1) 过套管瞬变电阻率正演仿真计算

针对普光镍基套管高电导、低磁导特性,开展正演仿真证明了发射线圈透过镍基合金套管发射脉冲信号后,磁场能穿透套管产生二次感应电流,理论上验证了瞬变电磁过套管测井方法的可行性,见图 2。

(2) 瞬变电磁过镍基合金套管发射室内测试实验

普光气田 H_2S 平均含量 15.2%, CO_2 平均含量 8%,为满足抗腐蚀要求,封隔器以下产层套管采用镍基合金材质,属于高电导、低磁导特性。因此针对普光气田在役管材开展了镍基套管的瞬变电磁响应试验研究。

Table 1. Puguang gas field technical parameters of the characteristic reservoirs

表 1. 普光气田特征储层技术参数

储层类型	储层分类	层厚范围 (m)	电阻率范围($\Omega \cdot m$)	围岩电阻率范围($\Omega \cdot m$)	孔隙度范围(%)	渗透率范围 ($\times 10^{-3} \mu m^2$)
气层	一类层	0.3~50	200.0~20,000	3000~40,000	10~20	10~150
	二类层	0.1~50	100~30,000	3000~40,000	5~10	0.25~20
	三类层	0.1~50	100~40,000	3000~40,000	2~5	0.002~4
边水侵入	气水同层	0.5~30	100~300	2000~40,000	5~10	1~20
底水	水层	0.5~100	10~100	2000~40,000	5~15	1~30

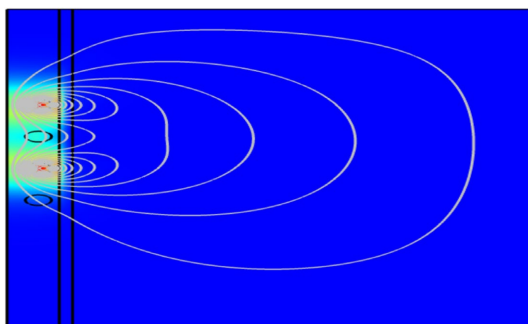


Figure 2. Simulation of magnetic field distribution
图 2. 磁场分布情况仿真示意图

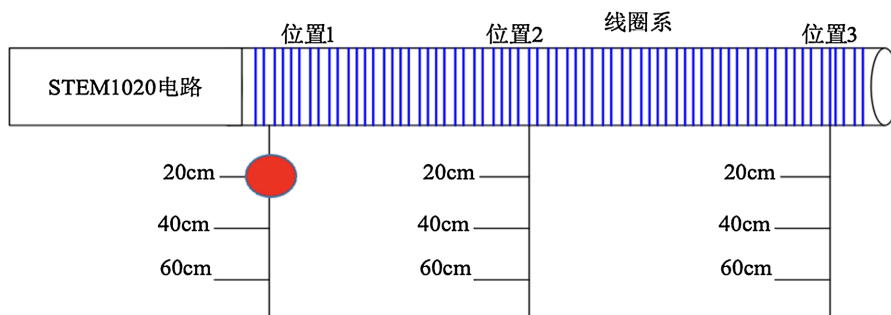


Figure 3. Schematic of the electromagnetic response test for the nickel-based casing.
图 3. 镍基套管电磁响应特征试验示意图

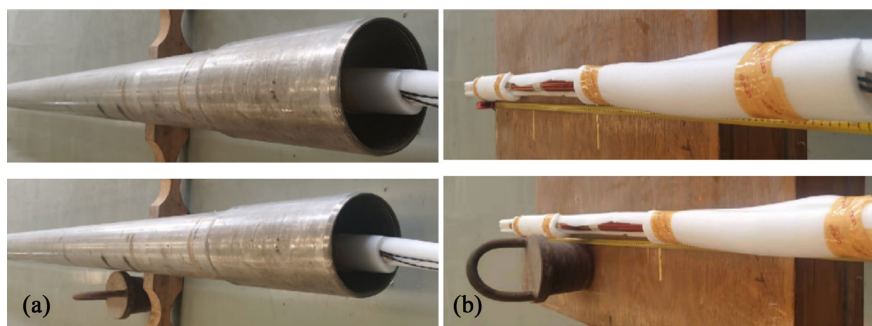


Figure 4. Photograph of the experimental model for transient electromagnetic response. (a) Nickel-alloy casing with and without anomalies. (b) Casing with and without anomalies in air

图 4. 瞬变电磁响应试验模型实物图。(a) 过镍基管有、无套管异常体；(b) 空气中有、无套管异常体

设计加工了发射接收线圈系，开展了仪器在合金套管内、碳钢套管和空气中，无异常体以及异常体在不同线圈位置、不同距离的试验，试验设计及物模实物见图 3、图 4。获取了不同条件下的响应数据，其中套管中上线圈异常体不同位置处响应脉冲波形见图 5。

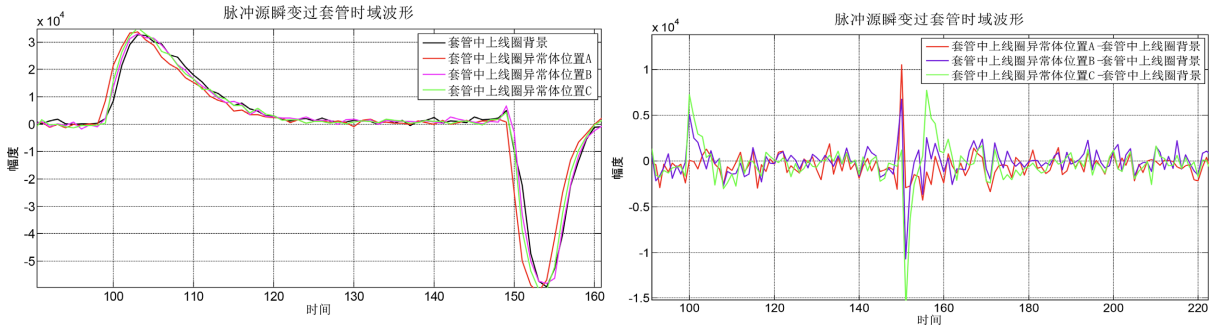


Figure 5. Test results of the transmitter chamber for nickel-based alloy casing
图 5. 过镍基合金套管发射室内测试实验结果图

通过试验数据分析，验证了瞬变电磁透过镍基合金套管可以检测到套管外的铁磁性异常体。相比碳钢套管，透过镍基合金套管检测到的电压信号幅值更大，时域衰减更慢[8]，说明镍基合金套管对过套管瞬变电磁测试是有利条件。

2.3. 瞬时大功率脉冲源发射技术

由于套管具有一定的屏蔽作用，同时透过套管探测的时间域上电磁二次场信号呈指数式衰减，随着观测时间增加，噪声波为主，微弱地层响应信息识别难度大，因此，在仪器设计上，通过提高发射线圈的功率来进一步增大探测深度和接收信号的信噪比。利用闪光灯原理，创新了“小电流长效充电——短时放电”的大功率脉冲源发射技术[9]，产生瞬间大功率电磁拟高斯脉冲场，瞬时发射电流 100 A，探测深度可达 1~10 m。相比传统阶跃电流发射装置，脉冲源瞬时功率大，可达数十倍，更适合单芯电缆场景，探测范围也更广。脉冲波频谱宽，可以全程连续采集，时间利用率提高一倍。脉冲场源工作原理及脉冲波发射波形见图 6。

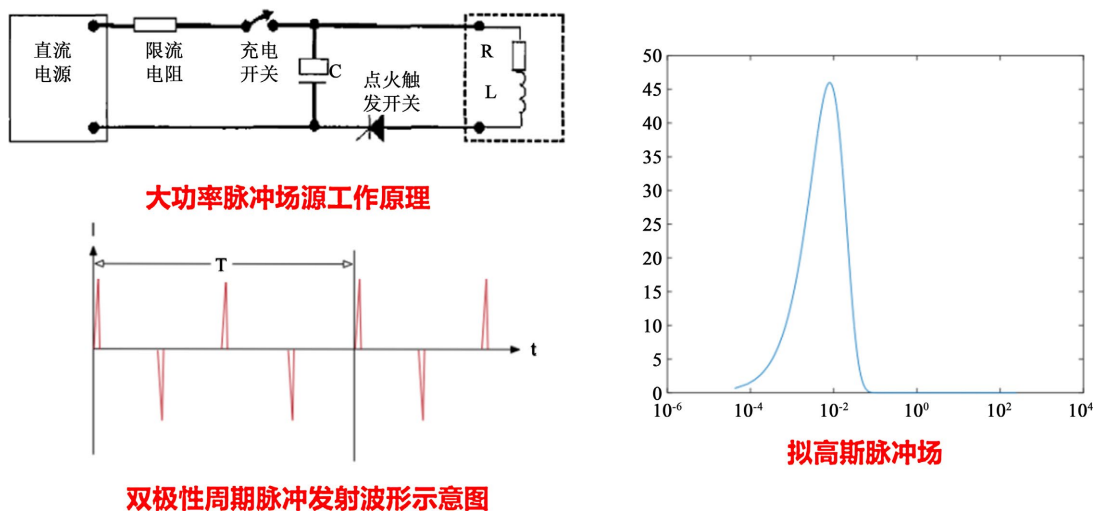


Figure 6. Schematic of the transmitted pulse waveform
图 6. 脉冲波发射波形示意图

2.4. 仪器整体方案设计

过套管瞬变电磁测井仪整体架构包括地面便携系统、遥测短节、三参短节、接收短节(内置伽马晶振)、线圈系、发射短节和储能短节，主要结构设计见图7。

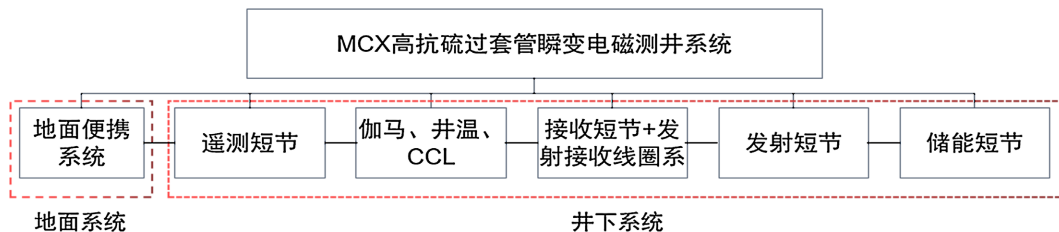


Figure 7. Schematic of the through-casing transient electromagnetic logging tool
图7. 过套管瞬变电磁测井仪结构示意图

为了提高地层微弱信号的探测能力，创新了反向对偶磁源耦合线圈系设计[10]，见图8，有效隔离了一次场与二次场的响应，实现了发射与接收的近乎解耦，降低了发射场对接收线圈的影响和套管信号对地层信号的干扰，提高了信噪比，增强了对气水界面的探测能力，见图9。

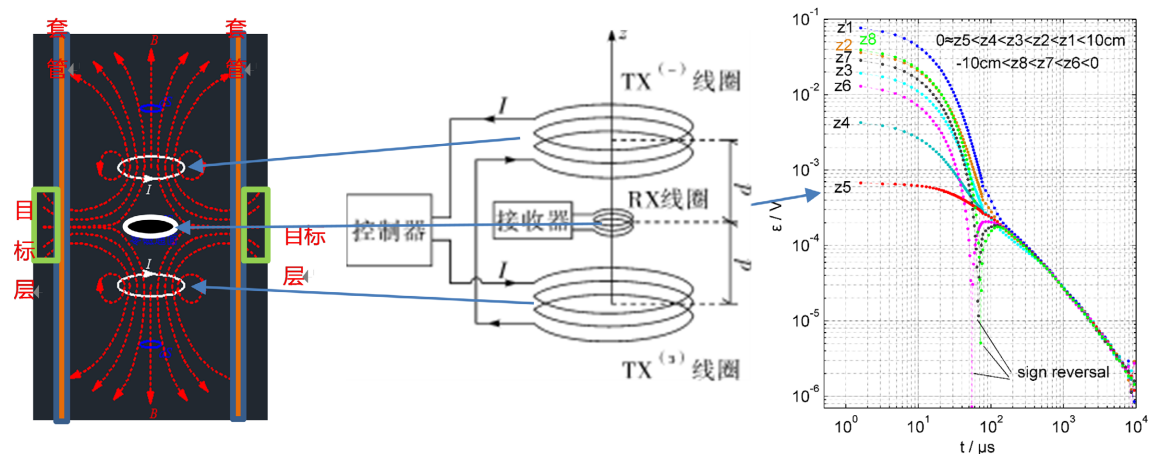


Figure 8. Inverse dual magnetic source coupled coil system
图8. 反向对偶磁源耦合线圈系

为了实现高稳定性大功率发射[11]，研制了高低压电路磁耦隔离可控增益放大电路，高低压电路磁耦隔离可控增益放大电路设计，实现早期强信号低增益、晚期弱信号高增益采集，产生DC-DC逆变的高压(800 V)，发射间隔 ≤ 100 ms，发射稳定性 $\geq 98\%$ ，有效降低了800 v高压发射与5 V低压控制的互相影响，保证了电路的稳定性。

为了保障高温高压储能，研制了钽电容环形阵列串并联组合设计，实现井下150℃高温环境持续储能及放电，瞬间供电电压800 V，放电电流30~100 A。

为了保证数据通讯高速传输，基于DSP芯片编解码[12]通讯技术创新设计了双缆芯耦合变压复用模块，保证了井下大电流供电与高速全双工通讯，现场实测7000 m电缆标准遥传速率可达200 kbps，降低了电路功耗与误码率。

通过开展各功能短节调试联试及性能测试，研发制造了首套高抗硫小直径过套管瞬变电磁测井仪，仪器外径43 mm，发射电压800 V，发射电流100 A，探测范围1~10 m，纵向分辨率0.5 m，核心性能指

标全面领先，实现了过套管电阻率测井技术在高含硫气井一体化管柱条件下的应用。

3. 应用与分析

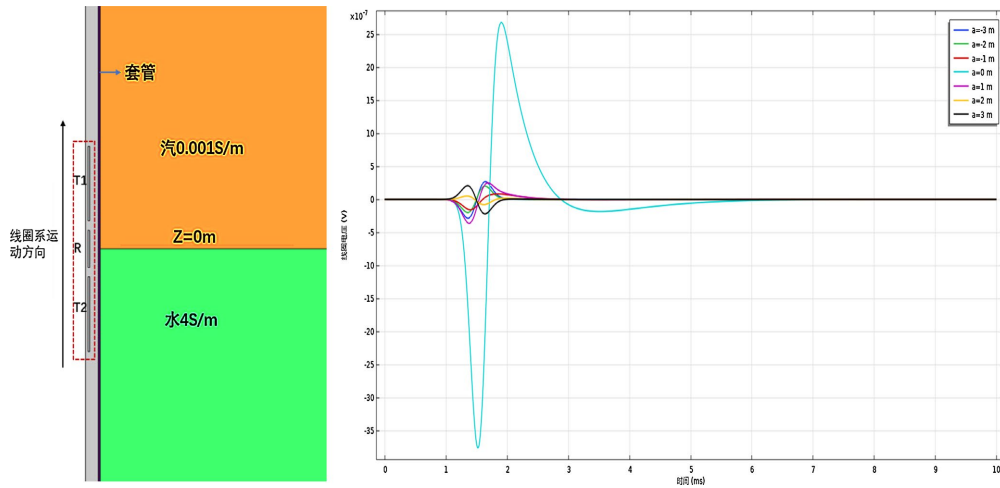


Figure 9. Gas-water interface detection
图 9. 气水界面探测

过套管瞬变电磁测井技术不受孔隙度影响，探测深度大，可为老井挖潜、储层重新评价、油藏开发的动态监测、以及剩余油气资源评价提供有力的科学依据，指导油田精细开发，具有良好的推广应用前景，社会效益显著。

在标准井开展了刻度实验，获取不同储层特性条件下的测井响应信息，通过对测量信号处理分析，建立了空气中、镍基管、碳钢管的瞬变电磁测井响应标准样本库。利用刻度实验数据预处理建立的标准样本库为数据驱动，提取信号特征，采用深度学习的人工智能算法建立过套管瞬变电磁信号对小层分层识别的解释方法，特征提取流程见图 10。

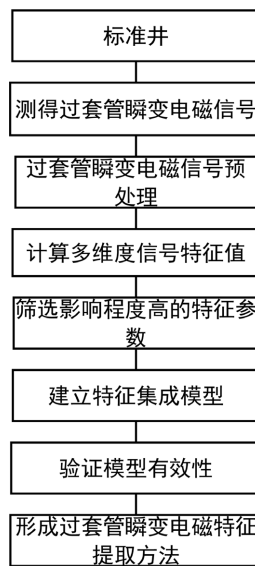


Figure 10. Flowchart of transient electromagnetic signal feature extraction.
图 10. 瞬变电磁信号特征提取流程

(1) 刻度井数据处理

针对地层的电磁响应信号，采用克里金、反距离加权、线性插值三角网法、最小曲率、自然邻点插值法、局部多项式法和径向基函数法分别对标准井瞬变电磁响应信号进行成像分析[13]，最终考虑连续深度之间的信号空间关系，优选克里金插值预处理方法，能更好地捕捉感应电压信号的空间变化，具有精度高，灵活性好的优势。通过对地层响应剖面进行处理分析，分层界面能够识别，响应明显，见图 11。

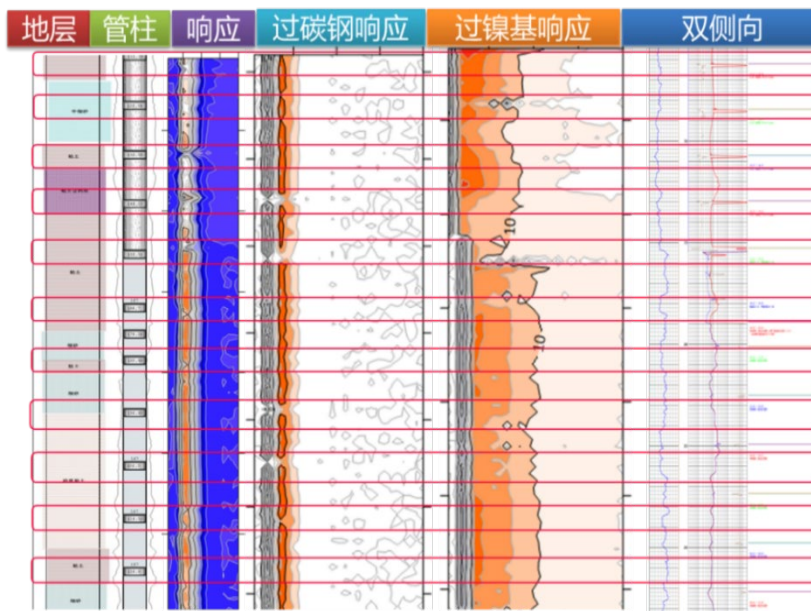


Figure 11. Imaging-based analysis of response signals from standard scale wells
图 11. 标准刻度井响应信号成像分析

(2) 数据预处理

通过瞬变电磁数据噪声来源分析，采用数学与深度神经网络建模方法建立电磁信号去噪模型[14]，进行了信号离群异常点识别及剔除，形成了针对性的自适应电磁信号预处理方法，提高了数据质量。

(3) 数据解释处理

以刻度实验标准井样本库和普光、东濮老区现场试验井为数据驱动，采用 Adaboost 集成算法完成信号特征提取，构建了基于 K-means 算法模糊聚类分类模型[15]，实现对不同储层及特征的智能识别，信号验证识别准确率达 83.17%。基于特征响应信号的提取和相关性分析，建立基于 XGBoost 算法电阻率预测模型，标准井电阻率预测符合率大于 85%。

W**井，东濮老区一新钻井，过套管瞬变电磁测井电阻率预测曲线与完井电阻率对比良好，符合率 > 85%，测井解释成果见图 12。

B1-*井，东濮老区一开发生产井，过套管瞬变电磁测井测量井段内，全井段电阻率预测准确率 79.19%，非射孔层段预测准确率 85.89%，射孔层段预测准确率 77.26%，电阻率对比见图 13。

该井泥岩层段地层电阻率变化不大，储层电阻率均有下降。其中 5 号层、6 号层下部、14 号层电阻率值下降，为水淹特征，综合分析解释 5 号层上部三级水淹，中部一级水淹，下部二级水淹；6 号层上部油层，下部电阻率下降明显，为水层；14 号层上部一级水淹，中部二级水淹，下部一级水淹，测井解释成果见图 14。

主力储层经过多年注水开发，测量电阻率有明显下降，水淹严重，结论与脉冲中子类 RDT 测井解释结果相互吻合，进一步印证了对该层段剩余油潜力的判断。

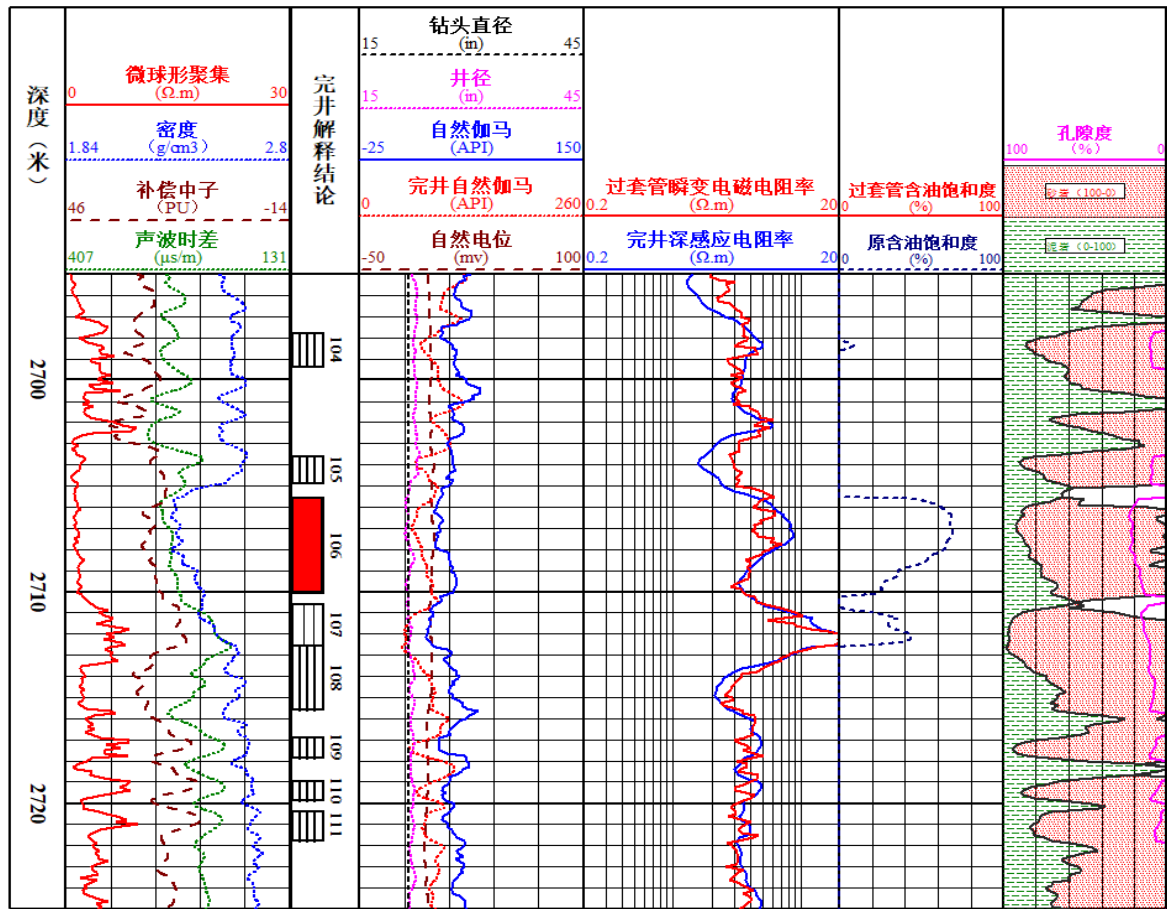


Figure 12. Interpretation results of through-casing transient electromagnetic logging for Well W**
 图 12. W**井过套管瞬变电磁测井解释成果图

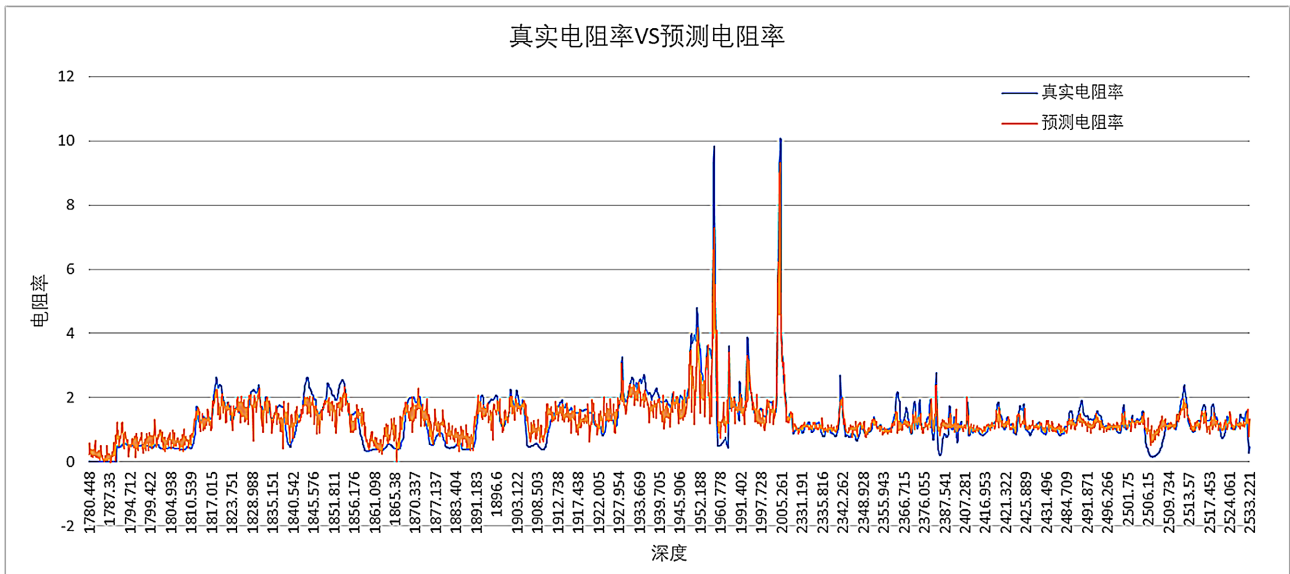


Figure 13. Resistivity prediction results for Well B**.
 图 13. B**井电阻率预测结果

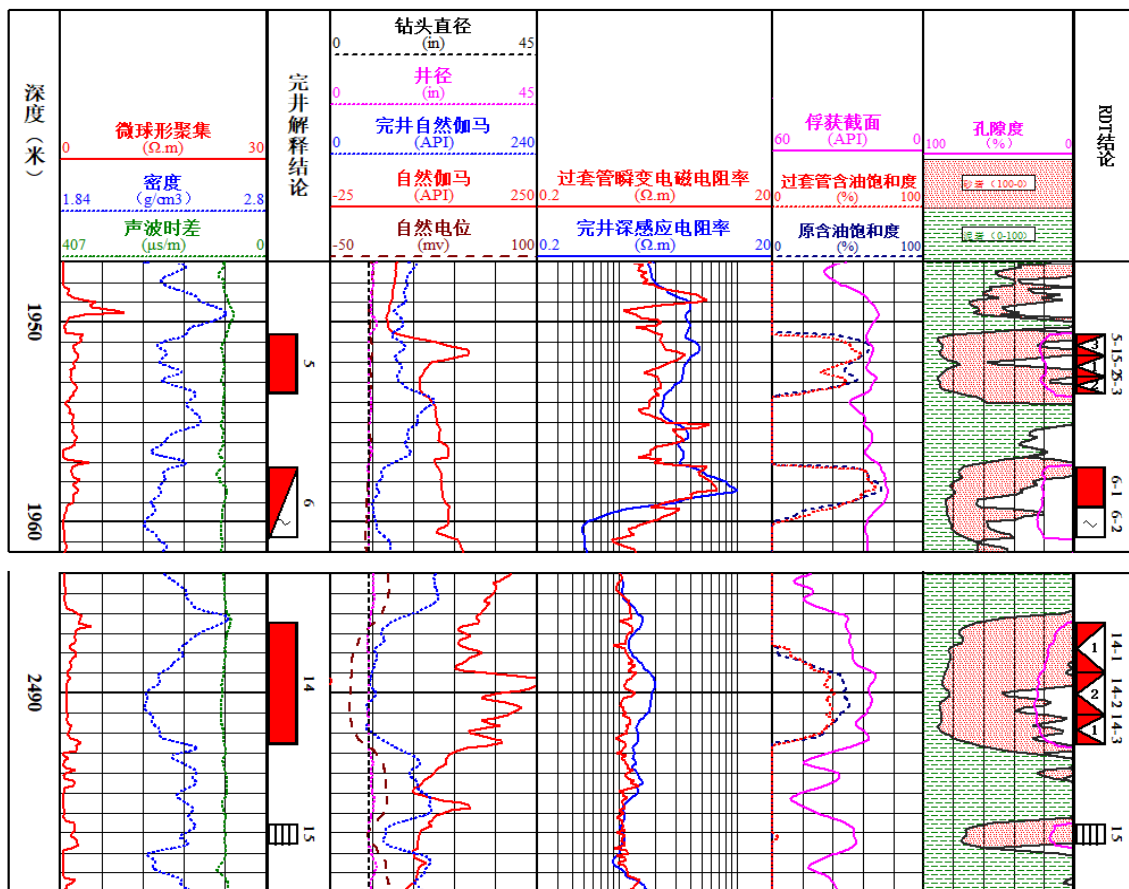


Figure 14. Through-casing transient electromagnetic logging results for Well B1-*

图 14. B1-*井过套管瞬变电磁测井成果

4. 结论与认识

(1) 基于瞬变电磁原理,创新了非接触式过套管电阻率测井方法,研发了瞬时大功率脉冲源发射技术,探测深度 1~10 m, 实现了过套管电阻率测井技术在高含硫气井一体化管柱条件下的应用。

(2) 基于模拟计算和室内实验,研发的小直径、深探测过套管瞬变电磁测井仪主要功能模块,为实现透过高电导、低电磁镍基套管进行电阻率测量提供技术支撑。

(3) 过套管瞬变电磁测井技术可有效表征地层信息,达到识别地层界面的目的,为气水分布奠定良好基础。但是由于时间域二次场响应受地层、套管磁导率、电导率等多个参数的影响,储层特征信号的识别及提取难度大,部分井存在高阻油气层电阻率计算准确率较高,低阻水层电阻率计算准确率较低的问题,对于影响因素校正及特征信号提取技术需进一步深入研究。

(4) 针对高含水期零散剩余油(气)的精准评价,建议开展过套管瞬变电磁及脉冲中子综合饱和度监测技术研究,利用大数据解析处理方法,融合裸眼井、瞬变电磁测井、脉冲中子测井、生产动态资料等多源异构数据,形成储层饱和度综合定量计算方法,准确评价剩余油(气)分布,指导精细挖潜。

参考文献

[1] Zeng, D.Q., Zhang, Q.S., Li, T., *et al.* (2023) Key Technologies for Long-Period High and Stable Production of the Puguang High-Sulfur Gas Field, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, **43**, 65-75.

- https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=zrrIaO_S-zun0fleQldCOVLVlheFzAr5Ci-UOG11Wa9N5A83DBODqCFNBZu-19C8UDN1nUSjL7kJ_wWgfuCc1Ej9XeDHNEbmbFFvkbS0ztrLtsaduJbqD91F0BvO3t5U_ccMx57X1PakO4mUJFHezL8N6z36Anea3hgraS5SgQ=&uniplatform=NZKPT
- [2] Hu, Y., Hui, D., Peng, X., *et al.* (2022) Key Development Technologies for High-Sulfur Gas Reservoirs: New Progress, Challenges and Key Research Directions. *Natural Gas Industry*, **42**, 23-31.
<https://kns.cnki.net/reader/flowpdf?invoice=F9y4bA7hSwN9%2FQyMGLyEyuwvmopo1ZhPdwxg4YcT0cbtcVGO-DUON%2BofA07HMJeXcTUY4DeUurbYm8J%2Bh7bU8N210zZBtxXb4i3D0nf4J45cA1DEJh4RECP2TT641CRs-FNH3ADhxxGda690OVKc99M0lhzoix2ktAOLvBzN0Su0Vw%3D&platform=NZKPT&sourcetype=nxgp&product=CJFQ&filename=TRQG202212002&tablename=cjfdlast2023&type=JOURNAL&scope=trial&cflag=overlay&dflag=pdf&pages=&language=CHS&trial=&nonce=91E5700A35D84ADEA9D580086804C76E>
- [3] 付新月, 吴文圣, 张恒荣, 等. 基于三维空间响应分布函数的脉冲中子孔隙度测井快速模拟[J]. 天然气工业, 2022, 42(3): 41-49.
- [4] 范宜仁, 胡云云, 李虎, 等. 随钻电磁波测井仪器偏心条件下响应模拟与分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 59-66.
- [5] 殷长春, 刘斌. 瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J]. 地球物理学报, 1994(S2), 486-492.
- [6] 闫述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 275-284.
- [7] 王华军, 罗延钟. 中心回线瞬变电磁法 2.5 维有限单元算法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 855-862.
- [8] 陈晓芬, 盖建宾, 高文明. 套管及环形水泥对自然伽马测井曲线的影响[J]. 城市地质, 2021, 16(2): 237-240.
- [9] 马俊鹏, 宋文胜, 冯晓云. 基于瞬时功率观测器的单相三电平脉冲整流器直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 837-844.
- [10] 闫卓, 王天凤, 张晓晨. 带 E 类功放的磁耦合谐振无线输电系统源线圈优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 162-167.
- [11] Srinivas, S.A., Cauley, S.F., Stockmann, J.P., Sappo, C.R., Vaughn, C.E., Wald, L.L., *et al.* (2021) External Dynamic Interference Estimation and Removal (EDITER) for Low Field MRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, **87**, 614-628.
<https://doi.org/10.1002/mrm.28992>
- [12] 赵斌, 曹旭东, 黄华, 等. 基于 DSP 曼彻斯特编解码的过套管电缆通信系统设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(8): 188-193.
- [13] 高斌, 赵葶, 王华杰, 等. 基于克里金插值法的天然气水合物分布评价与预测[J]. 技术与市场, 2024, 31(12): 15-26.
- [14] Li, G., He, Z.S., Tang, J., Deng, J.T., Liu, X. and Zhu, H. (2021) Dictionary Learning and Shift-Invariant Sparse Coding Denoising for Controlled-Source Electromagnetic Data Combined with Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition. *Geophysics*, **86**, E185-E198. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0246.1>
- [15] 王玲娣, 徐华. 一种基于聚类和 AdaBoost 的自适应集成算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(4): 917-924.