

文章编号:1671-8585(2007)06-0463-05

歧离率在油气藏勘探中的应用研究

张继锋¹,冯兵²,汤井田¹,吴迪³,王焯¹,杜华坤¹

(1. 中南大学信息物理工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 长安大学地质工程与测绘工程学院, 陕西西安 710054; 3. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北涿州 072751)

摘要:利用有限元数值模拟方法,构建了油气藏理论模型。采用井中供电地表测量的井地二极装置形式进行了正演模拟计算。当地下存在油气藏时,分别在油气藏上、下方供电,求出参数歧离率,利用该参数,可增强微弱的油气藏异常,提高油气藏的分辨能力;如果油气藏上方有地层的干扰,参数歧离率可以消除或大大减弱地层的影响。最后,通过水槽模拟实验证明了该方法的有效性。

关键词:油气藏;有限元;数值模拟;歧离率

中图分类号:P631.3

文献标识码:A

近年来,对石油资源的需求越来越大,国际市场油价暴涨,国内油气资源后备不足,具有丰富石油和天然气资源远景的碳酸盐地区,地形和地质条件都非常复杂,地震反射或是难以涉足或是无法取得良好记录^[1]。电法勘探由于快速方便、成本较低,加之含油气异常所引起的电阻率变化要比地震波的速度变化显著得多^[2],所以其在油气藏直接检测和高速层屏蔽区的应用是越来越受到人们的重视^[3]。

在油气藏埋藏比较深时,地面电法不能很好地发挥作用^[4],而井中地球物理由于激发点更接近探测目标,采集到的资料具有较高的分辨率,探测范围和探测对象的尺度远远大于测井技术^[5,6],因此,本文采用井地电阻率法^[7,8],通过参数歧离率^[9]探测油气藏分布。该方法能够探测钻孔周围的不均匀体,获得丰富的地下信息^[10~12]。Alfano 和 Snyder 等相继研究了地下供电时,层状介质模型的地表电位分布^[13,14];Wilt 采用 Dey 和 Morrison 开发的程序模拟了理想状况下地热的再注入过程^[15];Bev 等用井地电阻率法进行了盐水注入监测试验^[16];张天伦等用井中三极梯度法在新疆等地发现了小块油气藏^[17~20]。

由于许多地球物理问题都没有解析解,所以有限元法成为该领域应用比较广泛和有效的数值模拟方法。本文针对不同的油气藏模型,对其稳恒电流场进行了数值模拟。

1 歧离率概念的提出

图 1 是井地电阻率法基本原理图。它是将点电源沿井筒沉放到油层之上或之下的适当位置,在

地面以井口为中心的辐射状测线上测量电位。该方法是利用油气层对电场的屏蔽或排斥作用在地表所产生的视电阻率异常,进行油气勘探。

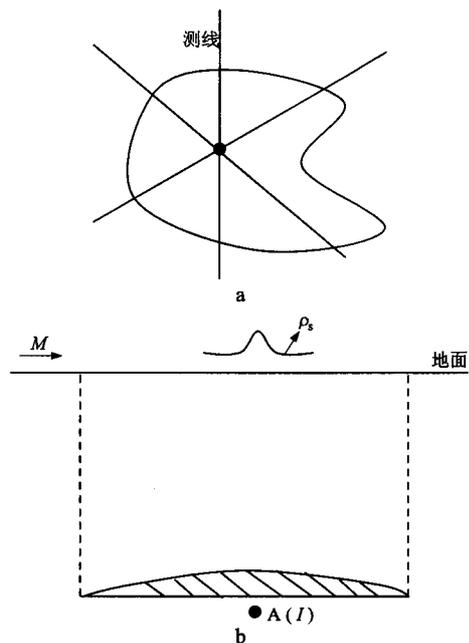


图 1 井地电阻率法装置原理示意
a 平面测线; b 模型断面

本文主要采用参数歧离率突出油气藏异常,削弱地层的影响,歧离率定义为

$$Q = \frac{\rho_{su} - \rho_{sd}}{\rho_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ_{su} 是点电源位于油气藏上方的视电阻率; ρ_{sd}

收稿日期:2007-02-27;改回日期:2007-07-17。

第一作者简介:张继锋(1978—),男,中南大学信息物理学院在读博士,主要从事电法和电磁法方面的数据处理及正反演研究工作。

基金项目:国家高科技发展计划项目(863 计划,2006AA06Z105)资助。

是点电源位于油气藏下方的视电阻率; ρ_b 是背景电阻率。

我们知道,当点电源位于油气藏下方时,由于高阻油气藏的屏蔽作用,地表的电流密度小于均匀背景场下的电流密度,视电阻率曲线呈现极小值;反之,当点电源位于油气藏上方时,由于高阻油气藏的排斥作用,地表的电流密度大于均匀背景场下的电流密度,视电阻率曲线呈现极大值。当上、下供电点之间存在油气藏时,歧离率 Q 可最大限度地提高油气藏异常的幅度;若无油气藏时,歧离率 Q 数值接近于零^[9]。

2 稳恒电流场微分方程的弱解形式

在直角坐标系中,稳定电流场所满足的三维偏微分方程为^[21]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -2I\delta(x_A)\delta(y_A)\delta(z_A) \quad (2)$$

式中: x_A, y_A, z_A 是点 A 的坐标。

边界条件:

1) $r \rightarrow \infty, u = 0$, 无穷远边界电位为零;

2) $j_n = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial u}{\partial n} = 0$, 地表电流密度的法向分量等于零。

内边界条件是自然边界条件,在此不予考虑。

由于除点电源外的求解域满足拉普拉斯方程,所以式(2)可变为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

根据变分原理,式(3)可化为它的弱解积分形式

$$\int_{\Omega} \left[\sigma \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \delta u}{\partial x} + \sigma \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \delta u}{\partial y} + \sigma \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial \delta u}{\partial z} \right] d\Omega = 0 \quad (4)$$

3 有限元数值模拟

3.1 误差的分析

首先选择一个与已知解析解相同类型的问题,求解域尽可能和实际分析的问题相近,并采用相同形式的单元和差不多的网格划分,用求得的有限元解同解析解相比较,从而得出有限元解的误差。我们以各向同性半无限空间为模型,点电源位于地表以下 600 m,采用 2 000 m × 2 000 m × 1 600 m 的

六面体模型,网格单元类型也为六面体,网格大小为 50 m × 50 m × 50 m。经计算其平均相对误差为 0.043%,最大相对误差在 0.18%,满足计算精度要求,地表主剖面电位如图 2 所示。

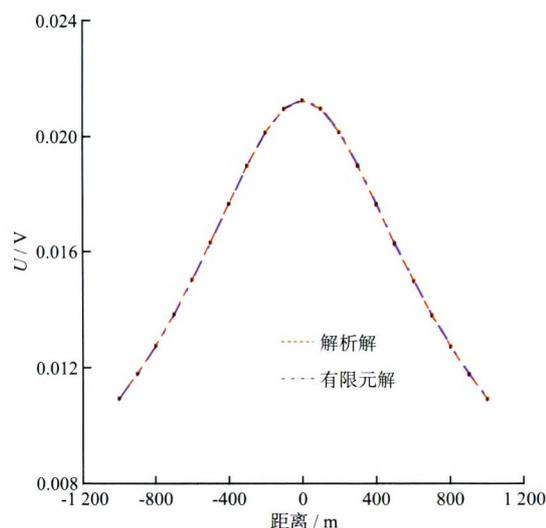


图 2 地下点电源的电位剖面

3.2 油气藏目标歧离率的数值模拟

3.2.1 模型的建立

图 3 中油藏模型长和宽均为 200 m,厚为 10 m,埋深 600 m,油藏以下深 1 000 m, x 和 y 方向各长 2 000 m。我们模拟了油气藏与围岩电阻率对比度 c 分别为 100.00, 10.00, 0.10, 0.01 时的情况,网格单元类型为 50 m × 50 m × 50 m 的立方体单元,在目标体上下方附近网格的大小为 50 m × 50 m × 5 m。

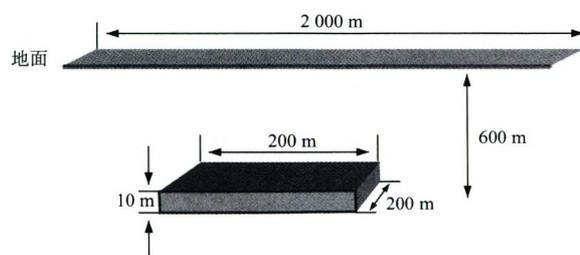


图 3 模型示意

3.2.2 视电阻率异常

从图 4 可以看出,在油藏下方供电时,视电阻率有极小值。当 c 为 10 时, ρ_s 百分幅度约为 4%;当 c 为 100 时, ρ_s 百分幅度约为 8%;当 c 小于 1 时, ρ_s 百分幅度只有不到 1%。从图 5 可以看出,在油藏上方供电时,低阻油藏出现极小值,幅度在 2% 以内,这是由于其对电流向下的吸引作用造成的;高阻油藏出现极大值,最大百分幅度接近 8%。可见,该方法对低阻油藏的发现能力较弱,对高阻油藏的发现能力较强。

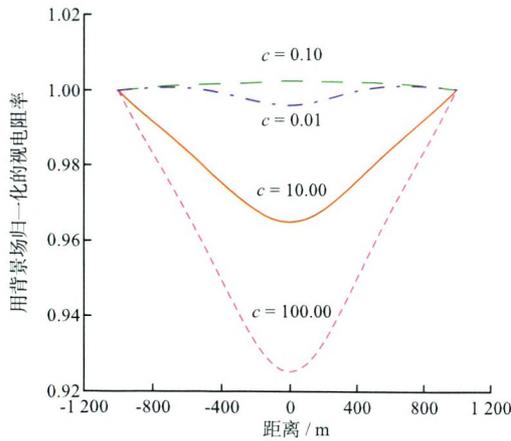


图 4 点电源在油藏下方时的视电阻率曲线

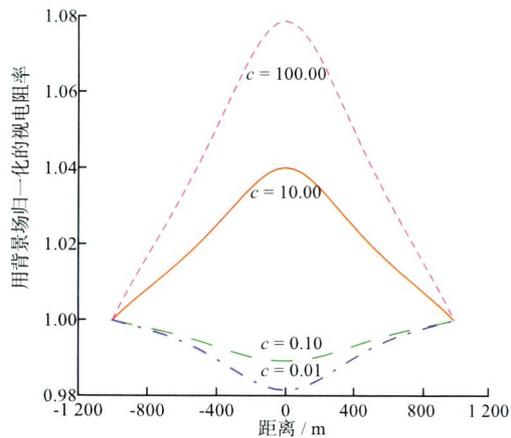


图 5 点电源在油藏上方时的视电阻率曲线

3.2.3 歧离率异常分析

如图 6 所示,我们画出歧离率曲线,它表示的是异常的百分幅度。由图可知,歧离率最大值约为 16%,比单独在油藏上方或下方供电时的异常幅度增加了一倍左右,在同样对比度下,高阻油藏要比低阻油藏的幅度大得多。由此可见,利用歧离率参

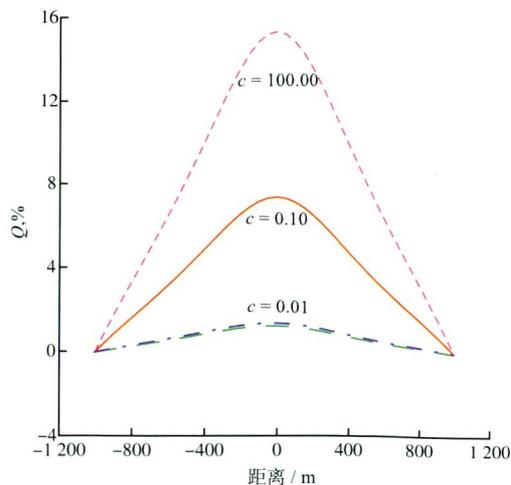


图 6 歧离率曲线

数可突出油气藏的异常幅值,提高对油气藏的勘探能力。

3.3 油藏上方存在高阻或低阻地层时的数值模拟

3.3.1 模型的建立

如图 7 所示,在电阻率为 $80 \Omega \cdot m$ 的均匀介质中,有一 100 m 厚地层,油藏厚度 10 m,宽和长均为 200 m,电阻率为 $500 \Omega \cdot m$ 。油藏以下区域深 1000 m, x 和 y 方向各长 2000 m,采用均匀网格划分,网格单元类型为 $50 m \times 50 m \times 50 m$ 的立方体单元,在目标体上、下方附近网格的大小为 $50 m \times 50 m \times 5 m$ 。

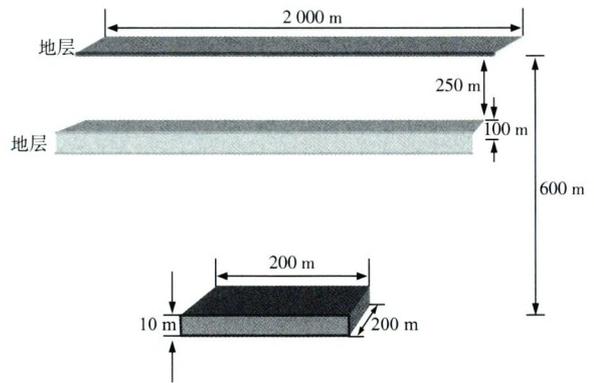


图 7 模型示意

3.3.2 歧离率分析

图 8 和图 9 分别是在油藏上方有高阻和低阻地层时的歧离率曲线。由图 8 可知,当油藏上方有高阻地层时,歧离率变化很小,极值增加幅度不到 1%,说明上覆高阻地层对歧离率参数有很强的抑制作用。如果油藏上方有一低阻地层时,由于低阻体对电流的吸引作用,点电源在油藏下方或上方供电得到的视电阻率异常几乎全是低阻地层异常,这

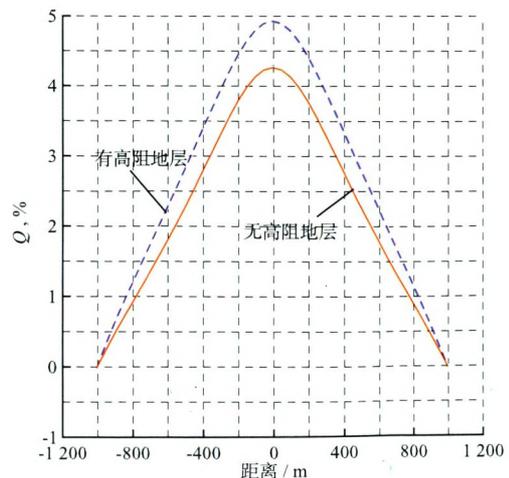


图 8 上覆高阻地层的歧离率曲线

就淹没了目标体异常,影响了数据的解释。由图 9 可知,利用歧离率参数可减弱低阻地层的影响,得到目标体异常,但其幅值要比无低阻地层时小,在实际生产中应该引起注意。

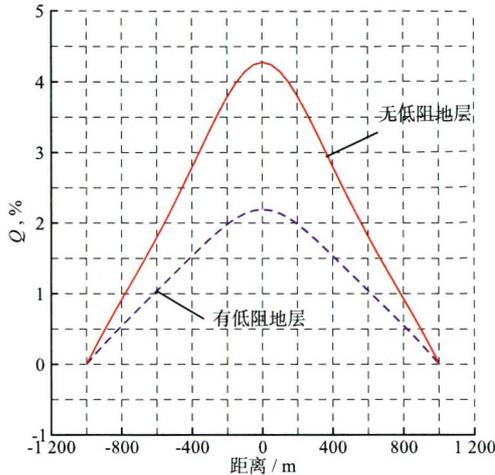


图 9 上覆低阻地层的歧离率曲线

4 物理模拟结果分析

4.1 模型示意图

图 10 和图 11 中,水槽深 1.5 m,长和宽分别为 1.75 m 和 1.46 m;测线长 1.00 m;模型为薄胶木板,其厚度为 4 cm,长和宽分别为 17.6 cm 和 5.4 cm;测量和供电的 2 个无穷远极分别在水槽的 2 个角上。

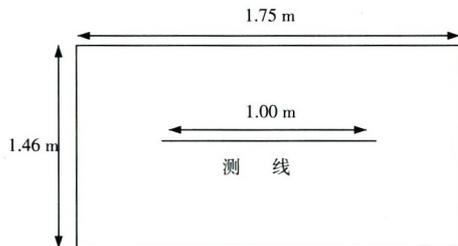


图 10 水槽平面示意

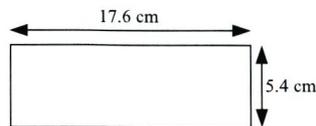


图 11 模型俯视图

4.2 视电阻率及歧离率曲线

图 12 中,S1 表示点电源在模型下方 1 cm 处,S2 表示点电源在模型下方 2 cm 处,S3 表示点电源在模型上方 2 cm 处。由图 12 可见,当点电源在模型上方时,视电阻率曲线有极大值;当点电源在模型下方时,视电阻率曲线有极小值,这与理论计

算结果一致。由于实验条件的限制,无穷远极并非无穷远,它对测量数据造成的影响很大,加之各种不可避免的误差等原因,幅值差异可能比较大。图 13 是歧离率变化规律,幅值较大,基本规律与理论模型的数值模拟一致。

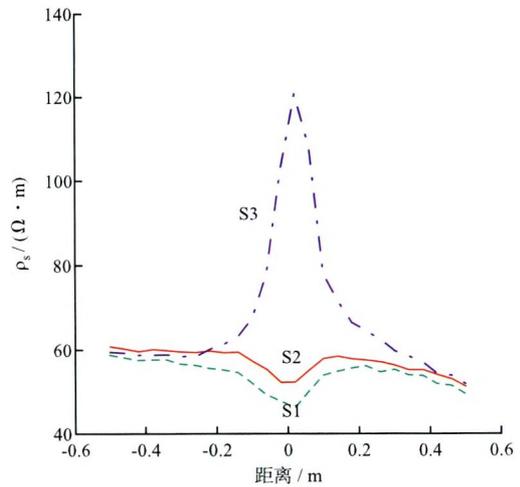


图 12 点电源位置不同时的 ρ_s 曲线

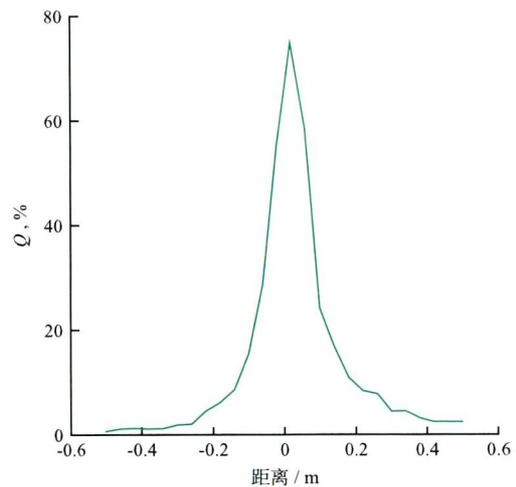


图 13 歧离率变化规律

5 结论

本文通过油气藏理论模型的有限元数值模拟和水槽模拟实验,得出以下结论:

1) 采用井地电法装置,通过在油气藏上、下方分别供电,利用歧离率参数,可突出油气藏的影响,提高分辨率,尤其是对高阻油气藏反映比较明显,而实际中的油气藏大多是高阻的,所以具有一定的实用价值;

2) 利用歧离率参数,可消除或削弱上覆地层的影响,提高对油气藏的分辨能力,有助于发现有微弱异常反映的油气藏。

参 考 文 献

- 王家映. 我国石油电法勘探评述[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(2): 77~81
- 徐义贤, 王槐仁. 电和电磁法探测油气的回顾与展望[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 25(6): 18~22
- 李智宏. 非地震方法油气勘探进展[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(5-6): 469~474
- Bevc D, Morrison H F. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment[J]. Geophysics, 1991, 56(6): 769~777
- 曹辉. 井中地球物理技术综述[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(4): 236~240
- 王永刚, 曹丹平, 刘磊等. 井间地球物理资料的综合显示及其应用[J]. 石油物探, 2004, 43(5): 462~465
- Daniels J J. Hole-to-surface resistivity measurements[J]. Geophysics, 1983, 48(1): 87~97
- Yang F W, Ward S H. On sensitivity of surface-to-borehole resistivity measurements to the attitude and the depth to center of a three-dimensional spheroid[J]. Geophysics, 1985, 50(7): 1 173~1 178
- 汤井田, 张继锋, 冯兵等. 井地电阻率法歧离率确定高阻油气藏边界[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 926~931
- Le Masne D, Poirmeur C. Three-dimensional modeling of a hole-hole electrical method: Application to the interpretation of a field survey[J]. Geophysics, 1988, 53(1): 85~103
- Dobecki T L. Borehole resistivity curves near spheroidal masses[J]. Geophysics, 1980, 45(10): 1 513~1 522
- Merkel R H. Resistivity analysis for plane-layer half-space models with buried current sources[J]. Geophysical Prospecting, 1971, 19(4): 626~639
- Alfano L. Geoelectrical prospecting with underground electrodes[J]. Geophysical Prospecting, 1962, 10(3): 290~303
- Snyder D, Merkel R M. Analytic models for the interpretation of electrical surveys using buried current electrodes[J]. Geophysics, 1973, 38(3): 513~529
- Wilt M J, Pruess K, Bodvarsson G S, et al. Geothermal injection monitoring with DC resistivity methods[J]. Geothermal Resources Council's annual meeting, 1983, 7: 477~282
- Bevc D, Morrison H F. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment[J]. Geophysics, 1991, 56(6): 769~777
- 张天伦, 张白林, 聂荔. 采用钻井套管作电极的非无穷远三级剖面法寻找剩余油[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(1): 29~34
- 张天伦, 张白林, 聂荔. 用地-井工作方式的三极梯度法寻找小块油气藏[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(4): 520~531, 574
- 张天伦, 聂荔, 张白林. 用三极梯度法确定复合型油气藏各单层的边界位置[J]. 西南石油学院学报, 1997, 19(1): 14~19
- 张天伦, 张白林, 聂荔等. 非无穷远三极剖面法在新疆油田的试验效果[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(1): 5~10
- 徐世浙. 地球物理中的有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 308

(上接第 462 页)

2) 复电阻率测井虽然能够在一定程度上弱化岩性的影响, 较好地反映地层的含油饱和度, 在解释水淹层方面具有优势, 但是还不能完全克服岩性影响;

3) 研究了复电阻率解释方法, 建立了相应的解释图版, 解释水淹层的符合率较高, 图版在实际测井资料评价中得到了较好的应用, 可以用于大庆油田长垣内部调整井水淹程度的定性解释, 显示了复电阻率良好的应用前景。

参 考 文 献

- 童茂松. 激发极化测井的谱采集与分析技术研究: [博士后出站报告][D]. 长春: 吉林大学, 2004
- 陈序三, 赵文杰, 朱留方. 复电阻率测井及其应用[J]. 测井技术, 2001, 23(5): 327~331
- 柯式镇, 冯启宁, 孙艳茹. 岩石复电阻率频散模型及其参数的获取方法[J]. 测井技术, 1999, 23(6): 416~418
- 韩学辉, 戴诗华, 王雪亮等. 油藏润湿性评价方法研究[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(1): 19~24
- 柯式镇, 刘迪军, 冯启宁. 线圈法岩心复电阻率扫频测量系统研究[J]. 勘探地球物理进展, 2003, 26(4): 309~312, 328
- 高杰, 冯启宁, 孙友国. 电极型复电阻率测井方法及其应用[J]. 石油学报, 2003, 24(1): 62~68
- 童茂松, 丁柱. 岩石复电阻率频谱模型参数的反演[J]. 测井技术, 2006, 30(4): 303~305
- 张辉, 伍伟杰, 刘军利等. 复电阻率测井在陆相沉积油田的应用前景[J]. 断块油气田, 2002, 9(6): 32~35
- 柯式镇, 何亿成, 邓友明等. 复电阻率测井响应的数值模拟[J]. 测井技术, 2002, 26(6): 446~448
- 姜恩承, 令狐松, 叶青竹等. 频率域复电阻率数学模型研究[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 98~100