

电导率张量测量及仪器设计

陈延军^{1,2†}, 张智韬¹, 仵杰^{1,2}

(1. 西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710000;

2. 陕西省光电传感测井重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要: 岩石电各向异性以电导率张量表征, 实验室中多采用四极法与六极法测得岩石电导率, 但难以一次实验完全获得电导率张量的 9 个分量, 若多次实验易造成较大的测量误差。为此本文基于文献研究成果, 针对方样岩芯设计电导率张量测量仪, 该方案也适用于柱塞岩芯。通过氮气驱替完全水饱和的岩芯, 温控系统和围压控制系统控制岩芯夹持器内部的温度和压力, 可运用上位机控制电极测量不同含水饱和度时岩芯电导率张量的 9 个分量。该仪器亦可用于柱塞岩芯的岩电实验, 通过测得的电导率数据, 确定阿尔奇公式的未知系数。通过理论与实验数据分析, 验证了该电导率张量测量仪设计方案的可行性。

关键词: 电各向异性; 电导率张量; 阿尔奇公式; 电阻率指数

中图分类号: TE151

文献标志码: A

Conductivity Tensor Measuring and Instrument Design

CHEN Yanjun^{1,2†}, ZHANG Zhitao¹, WU Jie^{1,2}

(School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710000, China;

2. Key Laboratory of Shaanxi Province for Photoelectric Sensing Logging, Xi'an 710065, China)

Abstract: The electrical anisotropy of rock is characterized by conductivity tensor. The four-pole method and six-pole method are mostly used to measure rock conductivity in the laboratory, but it is difficult to fill the nine components of conductivity tensor in one experiment. And multiple experiments are easy to cause large measurement errors. For this reason, based on the existing document, this paper designs a conductivity tensor measuring instrument for square sample cores. This solution is also suitable for plunger cores. The completely water-saturated core is replaced by nitrogen. The temperature control system and the confining pressure control system control the temperature and pressure inside the core holder. The upper computer control electrode can be used to measure the core conductivity tensor at different water saturations. The instrument can also be used for rock electrical experiments of plunger cores. Through the measured conductivity data, the unknown coefficients of Archie's formula can be determined. Through the analysis on theoretical and experimental data, the feasibility of the design scheme of the conductivity tensor measuring instrument is verified.

Key words: electrical anisotropy; conductivity tensor; Archie formula; resistivity index

* 收稿日期: 2020-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41474108), National Natural Science Foundation of China(41474108); 陕西省教育厅专项科研项目(14JK1577)

作者简介: 陈延军(1977—), 男, 河南焦作人, 西安石油大学讲师, 博士

† 通信联系人, E-mail: allexist@126.com

岩石物理参数测量是岩石物理学的重要内容,也是测井学科的基础。针对不同油田岩芯岩性、物性、含水性不同的特点,用岩电实验进行地层电机理分析研究,对各储层参数变化规律进行探讨,确定不同含水矿化度下岩石电阻率变化以及阿尔奇公式参数变化规律,可以提高解释精度并且对水饱模型优选及参数的正确选取提供理论依据^[1-8]。一般的测量仪工作频率为几赫兹到1兆赫兹,在不同储层环境下,可测量岩芯的电导率、介电常数、流体饱和度和岩芯结构参数。现有的电阻率测量仪器中,Noured-dine 等人^[9-10]利用敏感交流电桥中的搜索线圈、采用冲击的方法测定岩芯的电阻率;童小龙等人^[11]、陈兴生等人^[12]通过电化学理论结合复电阻率实验测量高浓度溶液含量岩芯的电阻率;Blackham 等人^[13]用雷达探测仪结合双端阻抗分析仪和四端阻抗分析仪测量不同流体饱和度下的电阻率^[14-16],以上文献所涉及到的仪器均未能一次性获取电导率的9个分量。

目前实验室同时测得电导率张量9个分量的仪器尚不存在,本文针对这一情况设计的电导率张量测量仪适用于特定条件下的低频段测量,对3对电极进行控制,测得9个方向的电导率张量。相比其他仪器须通过反复调整岩芯测量不同方向的电导率张量,本仪器可以一次固定岩芯同时测得电导率张量的9个分量,大幅度提高测量效率与精确度。利用该电导率张量仪,首先测量用以标定的各向同性方样岩芯的9个分量电导率,然后测量具有倾斜夹层各向异性方样岩芯的电导率张量,均验证该仪器设计方案的可行性与仪器性能的鲁棒性。通过测量采自伊通盆地某区域柱塞岩芯 zz 方向的电导率 σ_{zz} ,确定阿尔奇公式的系数 a 、 b 、 m 、 n ,其结果与油田数据基本吻合。

1 电导率张量测量原理

1.1 岩芯电各向异性的表征

对于边长为 Δx 、 Δy 、 Δz 的方样岩芯,如图1所示,分别在 x 、 y 、 z 三个方向施加电压 ΔV ,利用不同方向测得的电流 I ,得到电导率张量的9个分量为

$$\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 第一个下标 i 表示在该方向施加电压 ΔV ,第二个下标 j 表示电流密度的方向。

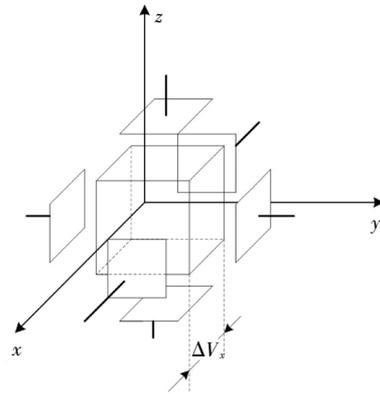


图1 方样岩芯电各向异性表征方法示意图
Fig.1 Schematic diagram of electrical anisotropy characterization method for square rock samples

以 x 方向施加电压为例,若该方向岩芯平面的电压分别为 V_x^+ 和 V_x^- ,则 x 方向电场强度 E_x 为

$$E_x = \frac{\Delta V_x}{\Delta x} \quad (2)$$

若 x 方向所测得的电流为 I_x ,则其电流密度为

$$J_x = \frac{I_x}{\Delta y \Delta z} \quad (3)$$

由电磁场理论本构关系 $J = \hat{\sigma} \cdot E$ 可得

$$\sigma_{xx} = \frac{J_x}{E_x} = \frac{\frac{I_x}{\Delta y \Delta z}}{\frac{\Delta V_x}{\Delta x}} = \frac{\Delta x I_x}{\Delta V_x \Delta y \Delta z} \quad (4)$$

y 方向所测得的电流为 I_y ,对应的电流密度为

$$J_y = \frac{I_y}{\Delta x \Delta z} \quad (5)$$

同上由电磁场理论本构关系可得

$$\sigma_{xy} = \frac{J_y}{E_x} = \frac{\frac{I_y}{\Delta x \Delta z}}{\frac{\Delta V_x}{\Delta x}} = \frac{\Delta x I_y}{\Delta V_x \Delta x \Delta z} \quad (6)$$

同理可得方岩样9个分量电导率。

1.2 岩芯电各向异性的测量

选取电导率张量主轴分量为地层坐标系,如图2(c)所示,在此坐标系下,电导率张量可表示为

$$\hat{\sigma}_D = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于取芯及实验条件等多种原因,造成仪器测量坐标系不同于地层坐标系,见图2(a),图2中仪器坐标系(a)经两次旋转变换至地层坐标系(c)。

在仪器坐标系 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} \neq \sigma_{zz}$ 中,由电磁场本构方程可知,通过(a)→(b)、(b)→(c)两次坐标系旋转可至地层坐标系 (x'', y'', z'') ,在此坐标系下,电流密度

J'' 与电导率张量 $\hat{\sigma}_D$ 的关系为

$$J'' = \hat{\sigma}_D \cdot E'' \quad (8)$$

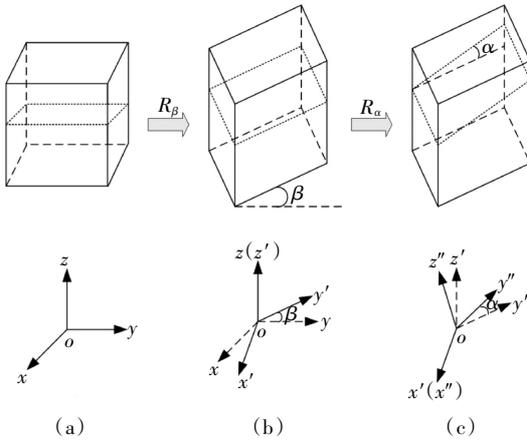


图2 仪器坐标系(a)与地层坐标系(c)的旋转变换关系

Fig.2 The rotation transformation relationship between the instrument coordinate system (a) and the medium coordinate system (c)

由坐标系旋转变换可知

$$\begin{cases} J'' = R_\alpha \cdot R_\beta \cdot J \\ E'' = R_\alpha \cdot R_\beta \cdot E \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_β, R_α 分别为仪器坐标系 (x, y, z) 至中间坐标系 (x', y', z') 、中间坐标系 (x', y', z') 至地层坐标系 (x'', y'', z'') 的旋转变换矩阵:

$$R_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: β, α 分别为层状地层的方位角和倾角. 将公式(9)代入(8),联合考虑式(8),可知

$$\hat{\sigma} = [R_\alpha \cdot R_\beta]^{-1} \cdot \hat{\sigma}_D \cdot [R_\alpha \cdot R_\beta] \quad (11)$$

令

$$R = R_\alpha \cdot R_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

则测量坐标系中岩芯的电导率张量与地层坐标系电导率实验中的电导率之间的关系如下:

$$\hat{\sigma} = R^T \cdot \hat{\sigma}_D \cdot R \quad (13)$$

为了研究 α, β 对电导率张量 $\hat{\sigma}$ 各分量的影响,设置地层倾角 $\alpha = 0^\circ$ 及地层坐标系下的电导率张量

$$\hat{\sigma}_D = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将(13)代入公式(12)计算得到测量坐标系的电导率张量 $\hat{\sigma}$,其结果如图3所示,实线为正数电导率分量,虚线为负数电导率分量.

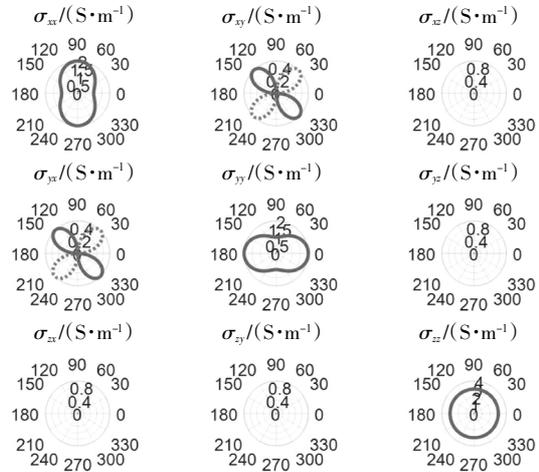


图3 地层方位角 β 对电导率张量 $\hat{\sigma}$ 的影响($\alpha = 0^\circ$)

Fig.3 Effect on the conductivity tensor $\hat{\sigma}$ about the formation azimuth β ($\alpha = 0^\circ$)

$\hat{\sigma}_D$ 固定不变,设置地层方位角 $\beta = 0^\circ$,改变地层倾角 α ,计算测量坐标系下的电导率张量 $\hat{\sigma}$,其结果如图4所示.

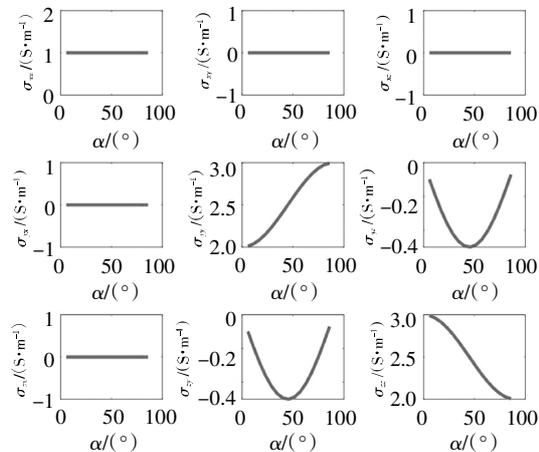


图4 地层倾角 α 对电导率张量 $\hat{\sigma}$ 的影响($\beta = 0^\circ$)

Fig.4 Effect of formation dip angle α on conductivity tensor $\hat{\sigma}$ ($\beta = 0^\circ$)

对于方样岩芯的 x, y 方向电流测量,通过对岩芯外接电压源,测量流过剩余两方向电极的电流,从而取得电导率张量的9个分量.例如对9方向电极连接电压源,测量 y, z 两方向电极的电流,通过公式(4)计算电导率张量的交叉分量 σ_{xy}, σ_{xz} .由图3和图4可知,测量岩芯的选取对电导率分量的测量具有很大的影响.

2 电导率张量测量仪器的设计

根据以下技术指标设计电导率张量测量仪:

- 1) 岩芯加热温度不超过 108 °C, 误差: +0.1 °C;
- 2) 岩芯承压不超过 90 MPa, 误差: 1.5%;
- 3) 岩芯电阻率测量的范围: 0.1~1 000 Ω·m;
- 4) 柱状岩芯尺寸: $\Phi = 25.4 \text{ mm}$, 高度 $h = 30 \sim 60 \text{ mm}$;
- 5) 方样岩芯尺寸: 50 mm × 50 mm × 50 mm.

张量电阻率测量系统包含 7 个模块, 分别为: 岩芯夹持器、数字电桥、上位机控制台、数字天平、驱替系统、围压控制系统、控温系统, 如图 5 所示.

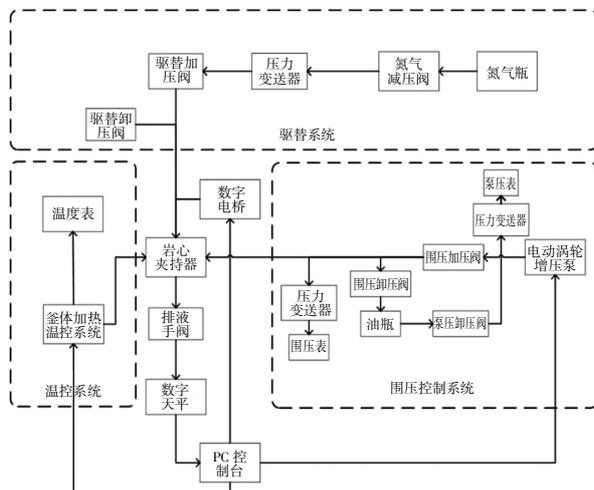


图 5 仪器工作原理框图

Fig.5 Block diagram of working principle of instrument

仪器设备之间通过不锈钢管线连接. 岩芯夹持器与特制的密封胶套配合, 将岩芯固定; 夹持器中, 设有 4 根导线连接至密封胶套, 并与岩芯电极接通, 通过上位机控制数字电桥仪与岩芯夹持器电极的连通, 完成电导率张量分量的测量, 电路原理如图 6 所示. V^+ 、 V^- 为电压源提供电源, I^+ 、 I^- 为测量电流, 通过上位机控制, 切换开关来实现对张量电阻率的测量.

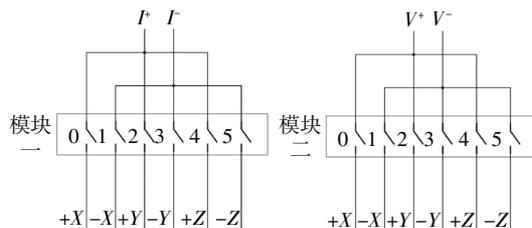


图 6 电导率张量测量电路原理图

Fig.6 Electrical conductivity tensor measurement circuit schematic diagram

在上位机中设置釜体温度和压力预定值, 根据预定值可通过釜体外壁加热管进行加热, 外壁的隔热保温层能够防止意外烫伤和稳定釜体内温度. 在釜体中安装温度传感器, 连接温度表可显示实时的釜体内温度.

围压控制系统的涡轮增压泵控制内部釜体压力. 将围压加压阀打开, 油瓶中的油被增压泵吸到釜体中, 通过改变釜体内油的体积控制内部压力, 使得夹持器中的压力达到预设压力, 并由内压表实时显示夹持器内压力. 再通过上位机设置岩芯的物理参数.

待釜体内温度和压力稳定时, 驱替系统通过氮气将岩芯中的水驱出. 通过氮气减压阀、压力变送器、驱替加压阀, 氮气被输送到夹持器内; 将排液手阀打开, 岩芯中的水流经胶管至干燥杯内, 用数字天平称重记录并计算出在不同含水饱和度下岩芯的电导率. 通过设置稳定时间和精度, 得到不同精度的电导率.

测量结束后, 关闭氮气瓶, 将驱替卸压阀打开排出夹持器内剩余的氮气; 打开围压卸压阀控制电动涡轮增压泵, 将釜体中一部分油抽回至油瓶, 使仪器围压降低. 待仪器内围压降低至标准, 取出岩芯和夹持器.

3 测量结果与分析

3.1 柱塞岩芯岩电实验

本文设计的电导率张量测量仪, 能够测得方样岩芯电导率张量, 亦可测量柱塞岩芯 zz 方向电导率 σ_{zz} , 从而确定阿尔奇公式(15)(16)中的系数 a 、 b 、 m 、 n .

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (15)$$

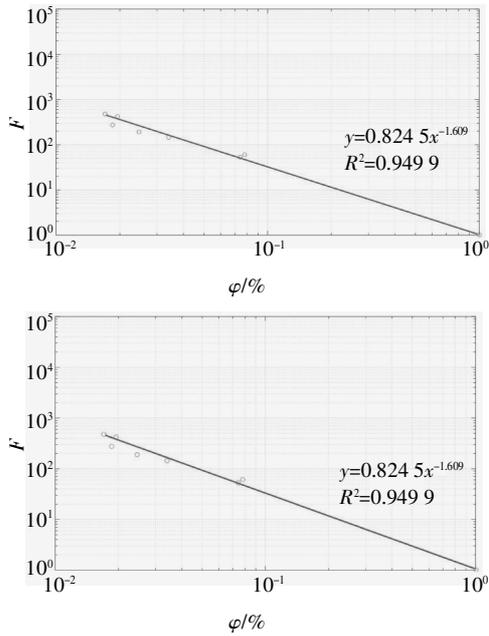
$$I = \frac{R_l}{R_0} = \frac{b}{S_w^n} \quad (16)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{1}{a} \sigma_w \phi^m S_w^n \quad (17)$$

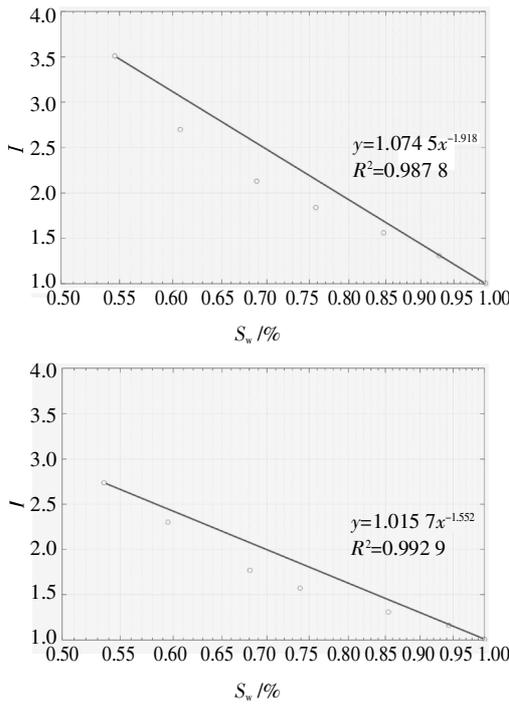
选取某井区的多块柱塞岩芯, 测量不同含水饱和度和 zz 方向的电阻率, 分别绘制地层因数 F 与有效孔隙度 ϕ 、电阻增大系数 I 与含水饱和度 S_w 的实验关系, 如图 7 所示.

由此可知阿尔奇公式中的系数 $a = 0.824 5$ 、 $m = 1.609$, 其中第一块岩芯的 $b = 1.074 5$ 、 $n = 1.918$, 第二块岩芯的 $b = 1.015 7$ 、 $n = 1.552$, 与该区块已有系数基本一致, 只是由于岩芯样本的非均匀性与孔隙

结构复杂导致系数有些变化.



(a)地层因数与有效孔隙度的关系



(b)电阻率增大系数与含水饱和度的关系

图7 柱塞岩芯阿尔奇公式关系图

Fig.7 Relation plots for plunger core based on Archie equation

3.2 方样岩芯电导率张量测量

本仪器还可以用于方样岩芯的电导率张量测量实验.在电导率张量的测量过程中,首先选择标准岩芯用于校准仪器,该方样岩芯电阻率为各向同性,其电阻率是 $3.9 \times 10^3 \Omega \cdot m$,设定温度与压力,待仪器稳

定后,2 h 内对岩芯实时监控并记录电导率,如图8所示.

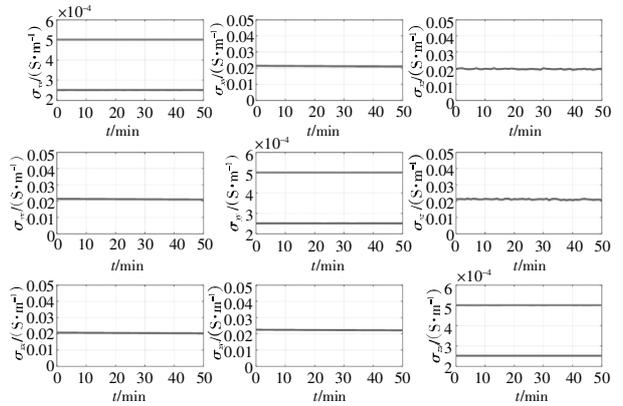


图8 标准方样岩芯电导率张量测量

Fig.8 Measurement of conductivity tensor for the standard square sample

图8中,岩芯接触面 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 测得的电导率张量的值小于接触面 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 测得的电导率张量的值.由结果可知,当电极与岩芯接触面积减小时,测得的电导率张量值偏大.由公式(4)、(6)可知,当电极接触面变小时电导率张量值偏大,实验数据与公式规律一致.因此实验时所取电极尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 时,测得的电导率张量接近真实值.

为进一步验证仪器测量的准确性,5次测量无倾角松木、樟木及有10度倾角夹层樟木的电导率分量 σ_{zz} ,其结果见表1.选取电极尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 时,具有倾角夹层方样岩芯电导率张量,如图9所示.

表1 多组方样木块电导率测量值

Tab.1 The electrical conductivity measurement value of multi-group square block

测量对象	数据一 $I/(S \cdot m^{-1})$	数据二 $I/(S \cdot m^{-1})$	数据三 $I/(S \cdot m^{-1})$	数据四 $I/(S \cdot m^{-1})$	数据五 $I/(S \cdot m^{-1})$
松木	0.025 1	0.022 5	0.021 4	0.020 5	0.021 6
樟木	0.012 8	0.012 8	0.012 4	0.012 1	0.012 2
带倾角的樟木	0.017 4	0.016 6	0.015 7	0.015 4	0.016 1

从图9可知,由于倾角夹层的存在导致电导率张量的主轴分量 $\sigma_{xx} \neq \sigma_{yy} \neq \sigma_{zz}$,验证该仪器可同时测得各向异性方样岩芯电导率张量的9个分量.以上两组实验数据说明所设计电导率张量测量仪具有较高的鲁棒性,能够同时准确测量不同方向的电阻率分量.

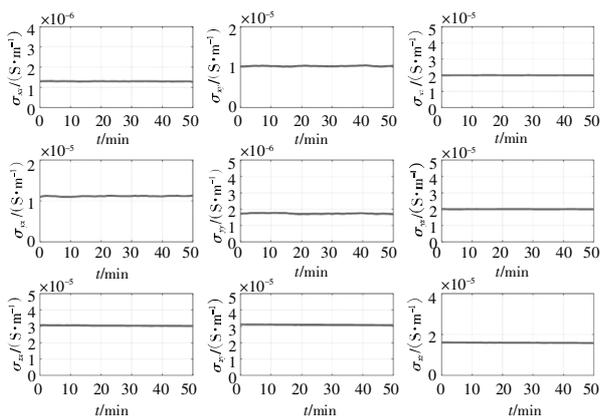


图9 夹层方样岩芯电导率张量测量

Fig.9 Measurement of conductivity tensor of interlayer square rock sample

4 总结

本文所设计的电导率张量测量仪具有较高的测量精度与鲁棒性,在预设温度与围压条件下,通过氮气驱替完全水饱的岩芯,能够同时测量方样岩芯电导率张量的9个分量.该仪器亦可用于柱塞岩芯的岩电实验,求得阿尔奇公式的未知系数.在实际测量过程中,由于测量坐标系与地层坐标系难以一致,其测量结果受岩层产状影响很大,后续拟对测量结果处理取得岩芯层界面倾角 α 及方位角 β ,并由电导率张量反推岩芯含水饱和度 S_w .

参考文献

[1] KENNEDY W D, HERRICK D C, YAO T. Calculating water saturation in electrically anisotropic media [J]. *Petrophysics*, 2001, 42 (2): 118—136.

[2] 敖德達, 赵青艺, 孙善超. 利用岩电实验确定 Archie 公式参数变化规律的研究[J]. *白城师范学院学报*, 2009, 23(3): 39—43.

AO D K, ZHAO Q Y, SUN S C. A study of the change regularity of archie formula parameter through rock electric experiment [J]. *Journal of Baicheng Normal College*, 2009, 23 (3): 39—43. (In Chinese)

[3] 卢艳, 杨清山, 刘传平. 水驱油岩石物理响应特征实验研究[J]. *测井技术*, 2018, 42(4): 371—376.

LU Y, YANG Q S, LIU C P. Experimental study on petrophysical response characteristics of water flooding [J]. *Well Logging Technology*, 2018, 42(4): 371—376. (In Chinese)

[4] 刘之的, 夏宏泉, 陈福煊, 等. 岩电实验过程中误差产生的原因及校正方法研究[J]. *测井技术*, 2003, 27(4): 274—277.

LIU Z D, XIA H Q, CHEN F X, *et al.* Causes leading to errors in

core electricity experiments and their corrections [J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(4): 274—277. (In Chinese)

[5] 邓少贵, 范宜仁, 段兆芳, 等. 多温度多矿化度岩石电阻率实验研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(6): 763—767.

DENG S G, FAN Y R, DUAN Z F, *et al.* Experiment study of rock resistivity with multi-temperature and multi-salinity [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2000, 35(6): 763—767. (In Chinese)

[6] 沈爱新, 王黎, 陈守军. 油层低电阻率及阿尔奇公式中各参数的岩电实验研究[J]. *江汉石油学院学报*, 2003, 25(S1): 24—25.

SHEN A X, WANG L, CHEN S J. Low reservoir resistivity and litho-electric experiment of each parameter in Archie equation [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2003, 25 (S1): 24—25. (In Chinese)

[7] ZOHRA-HADJADJ F, LAREDJ N, MALIKI M, *et al.* Laboratory evaluation of soil geotechnical properties via electrical conductivity [J]. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, 2019(90): 101—112.

[8] KHASBUR RAHMAN B M, MIAH M I. Reservoir rock properties analysis using core data of Begumganj gas field [J]. *Journal of Nature Science and Sustainable Technology*, 2019, 13(1): 1—12.

[9] BEN AOUN N, KOUKI A, AOUINA N, *et al.* Radial electrical resistivity measurements of rocks on laboratory core samples using an electromagnetic sensor: macro and micro eddy currents [J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018: 1—12.

[10] KUMAR M. Variations in the archie's exponent: probing wettability and low S_w effects [C]//SPWLA 51st Annual Logging Symposium, 2010.

[11] 童小龙, 严良俊, 郭琦. 岩石复电阻率测量中的电极效应[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(13): 5046—5051.

TONG X L, YAN L J, GUO Q. Electrode effect in rock complex resistivity measurement [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(13): 5046—5051. (In Chinese)

[12] 陈兴生, 陈儒军, 申瑞杰, 等. 一种便携式岩矿石复电阻率测试仪的研制[J]. *中国科技信息*, 2020(12): 69—70.

CHEN X S, CHEN R J, SHEN R J, *et al.* Development of a portable complex resistivity tester for rock ores [J]. *China Science and Technology Information*, 2020(12): 69—70. (In Chinese)

[13] BLACKHAM D V, POLLARD R D. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, 46(5): 1093—1099.

[14] SHARIFI G H, SAADAT K, KAZEMZADEH E. Measurement of Archie parameters of some carbonate cores at full reservoir conditions [J]. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2012, 46 (1): 63—72.

[15] VENKATARAMANAN L, HUERLIMANN M D, TARVIN J A, *et al.* Experimental study of the effects of wettability and fluid saturation on nuclear magnetic resonance and dielectric measurements in limestone [J]. *Petrophysics*, 2014, 55(6): 572—586.

[16] FORGANG S, CORLEY B, GARCIA A, *et al.* A new multi-frequency array—dielectric logging service: tool physics, field testing, and case studies in the Permian basin wolfcamp shale [C]//SPWLA 60th Annual Logging Symposium Transactions. Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2019.