

电磁波传播测井解释模型

唐为清^{*} 冯启宁 尚作源

(石油大学 北京)

提 要

利用数学物理方法导出了一种新的电磁波传播测井(EPT)解释模型;实验室岩心测量结果验证了该模型。用它对实际测井资料进行解释,在一定范围内有效,求出的残余油饱和度与实验室相分析计算的残余油饱和度(S_w)相符。

主题词 电磁波 测井 解释 模型

1 前 言

测井模型可分为测量模型和解释模型。测量模型解决的问题是由测井仪器测量的信号求地层的物理参数。而电磁波传播测井,是通过求解井周围的电磁场分布给出公式得出仪器测量得到的衰减和相位差转换成介电常数和电导率^[1]。解释模型所要解决的问题是:由物理参数确定地层的地质参数,如孔隙度、渗透率、含油饱和度等。确定解释模型的方法有两种:一是利用实验室测量结果给出拟合公式(如阿尔奇公式);另一种就是在一定简化条件下利用数学物理方法导出模型。本文的第一部分是用数学物理方法导出解释模型;第二部分利用实验室测量的岩样数据验证解释模型;第三部分是利用新模型解释 EPT 测井资料,确定残余油饱和度,并与油田相分析确定的残余油饱和度相比较,结果两者符合很好。

2 EPT 测井资料解释模型数学推导

沉积岩是一种多组分的多孔介质,为简化讨论,可考虑由固体颗粒、水和残余油三种物质均匀混合成的均匀介质。现取岩石中某一小体积元,该小体积元在外电场 \vec{E} 作用下的极化强度 \vec{P} 可写为

$$\vec{P} = \vec{P}_m + \vec{P}_w + \vec{P}_h \quad (1)$$

式中 \vec{P}_m 为固体颗粒极化强度; \vec{P}_w 为水分子的极化强度; \vec{P}_h 为残余油分子的极化强度。

沉积岩孔隙中残余油分子极化可看成是非极性分子的极化,由电介质物理^[2]知, \vec{P}_h 可写成

$$\vec{P}_h = N_h \alpha_h \vec{E} \quad (2)$$

$$\alpha_h = \frac{\epsilon_h (n_h^2 - 1)}{2\epsilon_h + n_h^2} \cdot 4\pi \epsilon_0 \alpha_h^3$$

* 唐为清,1990年毕业于石油大学,获硕士学位。现任石油大学讲师。通讯处:北京市902信箱。邮政编码:100083。

固体颗粒分子极化可看成非极性分子极化。由克劳休斯方程

$$\begin{aligned}\vec{P}_m &= N_m \alpha_m \vec{E}_i & (3) \\ \alpha_m &= \alpha_e + \alpha_a \\ \alpha_e &= 4 \pi \epsilon_0 a_m^3 \\ \alpha_a &= 4 \pi \epsilon_0 C a_m^3\end{aligned}$$

式中 N_h 为单位体积内残余油分子数; N_m 为单位体积内固体颗粒分子数; α_h 为残余油分子等效极化率; α_m 为固体分子极化率, 由原子极化率 α_a 和电子极化率 α_e 组成; a_h 为残余油分子半径; (假设油分子为球形); a_m 为固体颗粒分子半径(假设固体颗粒分子为球形); ϵ_0 为空气的介电常数; C 为与固体晶体结构有关的常数。

又由克—莫方程

$$\vec{E}_i = \frac{\epsilon_m + 2}{3} \vec{E}$$

$$\text{则 } \vec{P}_m = \frac{4\pi a_m^3}{3} N_m \epsilon_0 C' (\epsilon_m + 2) \vec{E} \quad (4)$$

$$C' = C + 1$$

式中 ϵ_m 为固体颗粒的介电常数; \vec{E}_i 为作用在固体颗粒上的内电场; \vec{E} 为外加电场。

水分子的极化是极性分子的极化, \vec{P}_w 可写成

$$\vec{P}_w = \frac{\mu_1^2}{3KT} \cdot \frac{2\epsilon_w}{2\epsilon_w + 1} \vec{E} + N_w \alpha_w \vec{E} \quad (5)$$

$$\mu_1^2 = \frac{(n_w^2 + 2)(2\epsilon_w + 1)}{3(2\epsilon_w + n_w^2)} \mu_0^2$$

$$\mu_0^2 = \frac{q\epsilon_0 KT}{N_w} \cdot \frac{(\epsilon_w - n_w^2)(2\epsilon_w + n_w^2)}{\epsilon_w(n_w^2 + 2)^2}$$

式中 N_w 为单位体积内水分子的个数; α_w 为等效水分子的极化率; K 为波尔兹曼常数; T 为温度($^{\circ}K$); ϵ_w 为水的介电常数; μ_1 为偶极矩。

$$\text{其中 } \alpha_w = \frac{\epsilon_w(n_w^2 - 1)}{2\epsilon_w + n_w^2} \cdot 4\pi\epsilon_0 a_w^3$$

式中 a_w 为水分子的半径; n_w 为水的折射率。

又小体积元总的极化强度 \vec{P} 可写成

$$\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\vec{E} \quad (6)$$

式中 ϵ 为地层的介电常数。

将(4)、(5)、(6)式代入(1)式中, 并考虑到(假设体积单元孔隙中只有水和残余油)

$$\frac{4}{3} \pi a_h^3 N_h = V_h = \phi(1 - S_w) = \phi S_{or}$$

$$\frac{4}{3} \pi a_w^3 N_w = V_w = \phi S_w$$

$$\frac{4}{3} \pi a_m^3 N_m = V_m = 1 - \phi$$

式中 V_h 、 V_w 和 V_m 分别是单位体积元中油、水和固体颗粒所占的体积； ϕ 为体积元的孔隙度； S_w 为含水饱和度； S_{or} 为残余油饱和度。

又有关系
$$n_i^2 = \epsilon_i \quad (i = m, h, w) \quad (7)$$

整理得到 EPT 测井资料解释的数学模型

$$\epsilon = (1 - \phi)(C'\epsilon_m + 2C' + 1) + \epsilon_h(1 - S_w)\phi + \phi\epsilon_w S_w \quad (8)$$

3 岩心的实验室测量

采用 TM_{010} 谐振腔测量岩心的介电常数，测量系统见图 1。

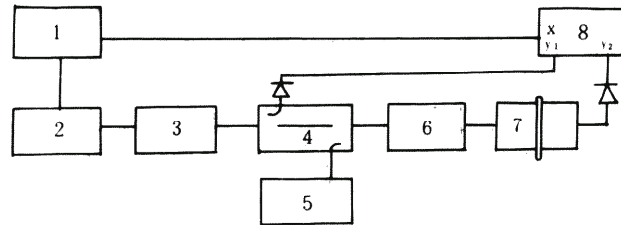


图 1 谐振腔测量系统

Fig. 1 A measuring system for resonator cavity

- 1—扫频信号源；2—隔离器；3—可变衰减器；4—双向定向耦合器；
- 5—数字频率计；6—标准可变衰减器；7— TM_{010} 谐振腔；8—示波器

测量原理见参考文献 3。根据电磁场理论，求解腔内场分布，即可求得岩心的复介电常数。

$$-\left. \frac{dE_z}{E_z} dr \right|_{r=R_1} = F^*(K_2, \epsilon_2, R_1, R_0) \quad (9)$$

式中 E_z 为 z 方向电场强度； R_1 为岩心(园柱状)的半径； R_0 为谐振腔半径； K_2 为岩心的复传播常数； F^* 为某已知函数。通过解方程(9)即可求得岩心的复介电常数。

利用本方法测量了某油田的岩心，测量方法采用 10kppm (注：1ppm = 1g/1 × 10⁶g) 的 NaCl 盐水饱和不同含水饱和度的岩心，测量同一岩心在不同含水饱和度下岩心的复介电常数。测量数据见表 1。

利用测量数据给出了介电常数实数 ϵ 与含水饱和度 S_w 关系曲线。拟合曲线见图 2。由该曲线拟合得到以下关系式

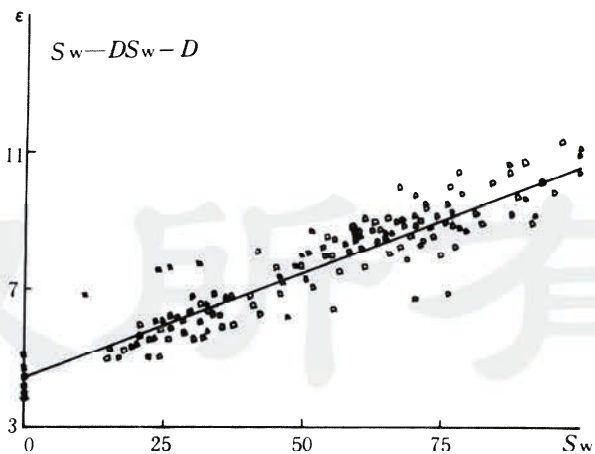


图 2 实验关系拟合曲线

Fig. 2 Matching of experimental results

$$\epsilon = \lambda \phi S_w + \epsilon_m - (\epsilon_w - \epsilon_h) \phi \quad (10)$$

式中 ϵ 为地层的介电常数; ϕ 为孔隙度; ϵ_w 为骨架的介电常数; λ 为与孔隙结构、岩性等因素有关的常数。 λ 值地区差别比较大,由实验室岩心测量结果确定。

表1 不同 S_w 下岩心测量结果

Table 1 The results of dielectric constant of rock cores measured under different S_w

岩样 46/17 [#]		岩样 71 [#]		岩样 293 [#]	
S_w	介电常数	S_w	介电常数	S_w	介电常数
0.0	4.1337-j0.057	0.0	3.7716-j0.032	0.0	3.8196-j0.038
26.3	5.5165-j1.048	14.98	4.9195-j0.841	16.9	4.9447-j0.702
35.4	6.2093-j1.466	19.5	5.2543-j1.041	23.4	5.4946-j1.143
41.3	6.4835-j1.636	22.7	5.5169-j1.205	29.0	5.7103-j1.170
46.0	6.8001-j1.829	26.4	5.8029-j1.309	31.6	5.9828-j1.330
67.52	8.2133-j2.538	58.5	8.0491-j2.403	60.9	8.1315-j2.397
77.0	8.8065-j3.970	60.6	8.5237-j2.758	65.1	8.6058-j2.657
81.2	9.1826-j3.041	65.4	9.0468-j2.982	70.0	9.1061-j2.904
90.4	9.6347-j3.282	71.7	9.4347-j3.272	84.1	10.1003-j3.581
100.0	11.0834-j3.964	76.5	9.9512-j3.615	90.1	10.7092-j3.773

岩样 921 [#]		岩样 114 [#]		岩样 317 [#]	
S_w	介电常数	S_w	介电常数	S_w	介电常数
0.0	4.1778-j0.077	0.0	4.4152-j0.059	0.0	4.6494-j0.087
21.0	5.6216-j1.022	23.7	6.0257-j1.2554	56.8	7.5157-j2.510
33.6	6.2465-j1.457	30.3	6.7536-j1.208	63.6	8.3861-j3.062
40.0	6.7786-j1.758	46.1	7.5310-j2.341	69.2	8.5515-j3.139
46.6	7.1489-j1.970	49.9	7.9334-j2.561	73.1	8.7912-j3.305
50.7	7.2636-j2.064	54.6	8.4973-j2.971	95.2	9.8200-j3.456
65.1	8.3952-j2.676	59.6	8.8424-j3.109		
69.5	8.5281-j2.707				
70.4	8.7923-j2.789				
93.0	10.1035-j3.192				

比较(8)、(10)两式,两者的形式完全一样,由此可知,导出的数学解释模型在一定范围内是正确的。

4 EPT 资料解释

为了验证以上模型的正确性,使用以上模型(以实验模型为主)做了实际资料处理,处理结

果见图 3。并将实验模型处理结果和相分析资料做了对比(表 2)。

表 2 实验模型处理结果和相分析资料对比
Table 2 A comparison of treatment results of experiment model and phase analysis

深度(m)	相分析 $S_{or}(\%)$	EPT 模型解释 $S_{or}(\%)$
3232.97	20.3	19.0
3352.00	15.3	
3352.00	6.3	10.3*
3275.84	29.2	28.3
3303.20	17.7	13.5
3300.71	15.2	17.7
3522.11	16.4	13.50
3345.23	21.8	18.6

* 取该层的平均值。

以上给出了一口井的对比资料,另外,还解释了其他几口井,解释结果所得的残余油饱和度与实验相分析残余油饱和度有很好的 consistency。

5 结 论

1. 解释模型既可以由数学模拟得到,也可以由实验室岩心测量结果获得,数学模型只能在一定的简化条件下得到,且一些经验关系系数必须由实验测量结果修正。

2. EPT 资料解释是求准残余油饱和度的一种可靠方法,求取的参数是可信的,可为油田二次、三次开发提供有用的资料。

3. 以上模拟关系只在一定范围内有用,也就是说,以上 $\epsilon-S_w$ 的关系只在均匀介质中适合,并且是中等孔隙度范围内、泥质含量较少的砂岩层段,对其它地层必须先做泥质含量和其它校正。

致谢 测量所需岩心、解释资料都是由胜利油田测井公司提供,特别感谢曾文冲总工程师、刘振宇高级工程师、朱留芳工程师的协助,以及胜利油田计算中心隋志强工程师的帮助。

参 考 文 献

- [1] 冯启宁,唐为清,尚作源. 电磁波测井混合波模型. 地球物理学报,1993,36(2).
- [2] 陈季丹,刘子玉. 电介质物理学. 北京:机械工业出版社,1982.
- [3] 冯启宁,尚作源,宋磊. 谐振腔法测量高损耗岩石的介电常数. 地球物理测井国际讨论会论文集. 中国北京,1990.

(本文收到日期 1993-03-17)
 (修改稿收到日期 1994-03-23)
 (编辑 杨 茁)

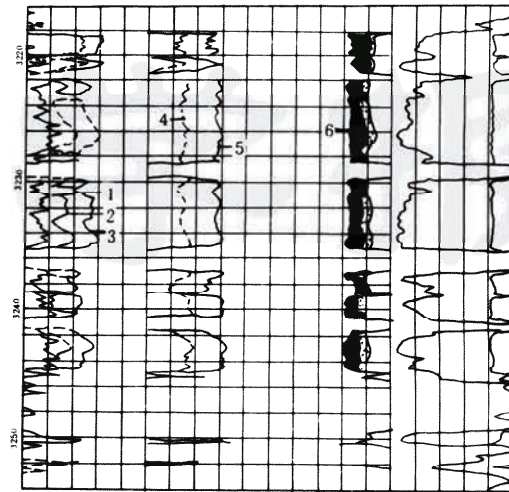


图 3 用各种方法处理结果

Fig. 3 Interpretation results by using various methods

1—EPT 资料解释求得 $S_{or}(\%)$; 2—常规测井求得 $S_{or}(\%)$; 3—常规测井求得 $S_{or}(\%)$; 4—其它方法确定的 $S_{or}(\%)$; 5—其它方法求得的束缚水饱和度; 6—综合成果图的残余油饱和度

AN INTERPRETATION MODE OF ELECTROMAGNETIC PROPAGATION TOOL (EPT)

Tang Weiqing Feng Qining Shang Zuoyuan

(University of Petroleum, Beijing)

Abstract

This paper presents a new interpretation model of electromagnetic propagation that is derived with math-physical method. The new model has been confirmed by the results of experiment. Logging data is interpreted with this new model. It is shown that the model is valid in certain range. The residual oil saturation computed with this new model is in good agreement with those from phase analysis.

Key words electromagnetic log interpretation model

应用新方法首次确定孤东油田的含水饱和度和可采储量

如何确定一个油田的可采储量,这是我们研究的最终目的。由于油田的地质情况和含水情况不同,直接影响到油田的可采储量。

中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院油气田开发研究所,应用数值模拟的方法,对孤东油田七区西 6^{3+4} 层系的 144 口井的不同含水饱和度下的采出程度与时间关系、束缚水饱和度与渗透率的关系,进行了生产拟合,含水误差小于 10%,拟合符合率为 60.4%,确定了孤东油田的原始含油饱和度。应用历史拟合方法,确定了油层的含水饱和度分布。采用广义水驱特征曲线法,分年度、分区块标定了该油田的可采储量。分析了影响油田采收率的主要因素,对可采储量和采收率的计算结果进行了评价,并提出了该油田的挖潜方向。

该项研究,应用先进的数值模拟方法,首次绘制出了含水饱和度分布图,标定了油田的可采储量。

(文思 供稿)