

储层油气产能的预测模型和方法

谭成仟¹, 马娜蕊², 苏超³

(1. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 长安大学 理学院 陕西 西安 710054;

3. 中原油田 油藏监测研究中心, 河南 濮阳 457001)

[摘要] 从达西渗流产量公式出发, 通过以相对渗透率与含水饱和度的函数关系为纽带, 导出油气储层产能与储层有效孔隙度、渗透率以及电阻率之间的理论模型。在此基础上, 结合测井学的基本理论, 探讨了利用测井资料进行储层产能预测的基本思想, 采用人工神经网络技术建立了储层产能预测系统, 该方法用于新疆克拉玛依油田八区克上组储层的油气产能预测, 效果良好。

[关键词] 测井资料; 储层油气产能预测; 神经网络; 克拉玛依油田; 新疆

[中图分类号] TE122.2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)02-0042-05

[作者简介] 谭成仟(1964—), 男, 陕西大荔人, 长安大学教授, 西北大学博士研究生, 现从事测井资料解释和储层评价工作。

油气储层产能评价和预测是编制油田开发方案的重要组成部分。一般说来, 产能是油气储层动态特征的一个综合指标, 它是油气储层生产潜力和各种影响因素之间在互相制约过程中达到的某种动态平衡。利用测井储层评价手段所获取的储层参数, 主要反映的是储层的静态特征, 而对其动态特征极少直接反映。利用测井资料进行储层产能预测研究工作的主要目的, 就是力图利用这种静态的储层参数来预测动态的油井初始产能。

目前对油气储层的产能预测还没有一套成熟的方法, 国内外许多专家学者对该问题进行了探讨。欧阳健等人提出用岩石渗透率和含水饱和度来评价油气层产能指数^[1]; Cheng 等人则用原状地层电阻率和冲洗带电阻率表征储层流体流动能力, 进而评价储层产能^[2]; 毛志强等人基于大量试油、测井解释及岩心分析资料, 建立了在塔里木盆地利用储层有效渗透率预测油层产能的数学模型^[3]。笔者在前人工作的基础上, 从平面径向流产量理论公式出发, 通过相对渗透率与含水饱和度的复杂函数关系的分析以及阿尔奇公式, 建立了储层油气产能与储层渗透率、孔隙度和电阻率之间的统计关

系, 探讨了利用测井资料进行储层油气产能预测的原理和方法, 采用神经网络技术, 编制了一套油气储层产能预测处理系统, 并应用于克拉玛依油田八区克上组储层的产能预测工作中, 取得了良好的效果。

1 油气储层产能的理论方程及影响因素分析

1.1 影响储层产能的主要因素分析

在油田开发过程中, 油气储层的生产能力受到诸多因素的影响, 所以产能是各种影响因素的综合反映。归纳起来, 影响产能的因素大致可分为两大类, 一类是储层因素, 它包括储层的岩性、物性、含油气性和流体性质; 另一类是工程因素, 它包括表皮系数和油井半径等, 其中表皮系数是一个综合参数, 它是钻井、井下作业过程中对油层的污染, 射孔的完善程度, 酸化、压裂改造油层等因素的综合反映。

由此可见, 储层产能是由储层的自身条件与外部环境以及油气性能等共同决定的。然而, 在矿场实际生产中, 受特定的开采区块内开发井网和作业方式的限制, 外部环境条件和油气性能等都是相对固定不变的。此时, 储层的产能高低就取决于油气储层的自身性质。

[收稿日期] 2003-06-19

[基金项目] 中国石油天然气集团公司九五科技示范工程项目(990510-02)

1.2 储层产能的理论方程

在油气田开采过程中, 油井投产后稳定生产和压差符合平面径向流产量公式^[4]

$$Q = \frac{CK_o H \Delta P}{\beta_o \mu_o \lg \left[\frac{r_e}{r_w} + S \right]}, \tag{1}$$

式中: Q 为油井的稳定日产量(m^3); C 为单位换算系数(0.542×10^8); K_o 为原油的有效渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$); H 为油层有效厚度(m); ΔP 为油井生产压差(MPa); μ_o 为地层原油粘度($\text{mPa} \cdot \text{s}$); β_o 为原油体积系数(无因次); r_e 为油井供油半径(m); r_w 为油井半径(m); S 为表皮系数(无因次)。

由于 $K_o = KK_{ro}$, 式中: K_{ro} 为原油的相对渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$), 代入式(1), 则

$$Q = \frac{CKK_{ro} H \Delta P}{\beta_o \mu_o \lg \left[\frac{r_e}{r_w} + S \right]}, \tag{3}$$

通常, 把单位压差下每米采油指数定义为储层的产能

$$J_o = \frac{Q}{\Delta PH} = \frac{CKK_{ro}}{\beta_o \mu_o \lg \left[\frac{r_e}{r_w} + S \right]}. \tag{4}$$

由式(4)可以看出, 油气储层产能主要与储层性质、原油性质以及供油半径等因素有关, 在矿场实际生产中, 受油田开发井网限制, 不同的油井供给半径不会有太大差异, 因此在同一油田,

$C/(\beta_o \mu_o \lg(\frac{r_e}{r_w} + S))$ 可以认为是常数。

令 $A = C \left[\beta_o \mu_o \lg \left[\frac{r_e}{r_w} + S \right] \right], \tag{5}$

则 $J_o = AKK_{ro}. \tag{6}$

各国学者对岩性、湿润性和胶结性不同的岩石, 通过模拟实验, 根据相关因素分析, 建立了各种有效的相关公式, 如常用的皮尔逊方程、琼斯方程、乘方公式等, 一种较为普遍的形式为

$$K_{rw} = \left[\frac{S_w - S_{wb}}{1 - S_{wb}} \right]^{am}, \tag{7}$$
$$K_{ro} = \left[1 - \frac{S_w - S_{wb}}{1 - S_{wb} - S_{hr}} \right]^{an},$$

式中: am, an 为地区经验系数, 它们与岩性、岩石湿润性和流体粘度比值有关, 一般 $am = 3 \sim 4, an = 1 \sim 2$; S_w, S_{wb}, S_{hr} 分别为含水饱和度、束缚水饱和度和残余油饱和度。

从实际的相对渗透率曲线来看, K_{ro} 与 S_w 之间存在着复杂的幂次形式的函数关系, 取其函数形式为

$$K_{ro} = eS_w^f, \tag{8}$$

式中: e 和 f 分别为指数函数的常数项和指数项常数。

利用测井资料计算含水饱和度的阿尔奇公式

$$S_w = \left[\frac{abR_w}{R_t \phi^m} \right]^{1/n}, \tag{9}$$

式中: a 和 b 为与岩性有关的比例系数; m 为岩石胶结指数; n 为饱和度指数。则有

$$K_{ro} = \frac{e(abR_w)^{f/n}}{R_t^{f/n} \phi^{mf/n}}. \tag{10}$$

在一个油区深度变化不大的同一层系地层中, 地层水电阻率 R_w 基本为一定值, 因此式(10)的分子为常数。

令 $A_1 = e(abR_w)^{\frac{f}{n}}, A_2 = \frac{f}{n}, A_3 = \frac{mf}{n},$

式中: e, f 分别为相对渗透率和含水饱和度指数关系中的常数项和指数项, 通常由相渗实验确定; a, b, m, n 为阿尔奇公式中的系数, a 和 b 为与岩性有关的比例系数; m 为胶结指数, 随岩石胶结程度不同而变化; n 为饱和度指数, 仅与岩性有关。在一个油区, 这些系数通常由岩电实验确定, 在一个地区工作时, 测井解释常将其作为常数, 因此在此为了公式的简化, 简单地将 A_1, A_2, A_3 看作为常数。

综合以上各式, 储层油气产能(每米采油指数)的数学方程可表示为

$$J_o = \frac{AA_1K}{R_t^{A_2} \phi^{A_3}}. \tag{11}$$

从式(11)可以看出, 储层的产能可表达为有效孔隙度、储层渗透率以及储层电阻率的复杂函数关系, 因此储层的有效孔隙度、渗透率以及电阻率是影响储层产能的主要因素。

2 实际应用

2.1 储层的产能分级

八区克上组属断裂遮挡的单斜油藏, 处于克-乌断裂的下盘, 为一东南方向倾斜的单斜构造, 地层岩性主要为细小砾岩、含砾粗砂岩、细砂岩、粉砂岩以及泥质砂岩和泥岩交互层, 其中细小砾岩、含砾粗砂岩是该地区油气主要储集层, 细砂岩个别可

含油。储层的储集空间以原生孔隙为主, 其次还有次生孔隙, 微观孔隙比大, 连通性差。根据 3 口探井 8 个试油层位统计, 产能变化范围较大, 每米采油指数变化为 0.012 ~ 1.5, 根据实际生产的需要, 把油气储层产能的大小分为高、中、低产能和无产能 4 个等级。

表 1 克拉玛依油田八区克上组
储层油气产能等级划分

Table 1 Productivity classification of the
Keshang formation reservoir, Kelamayi oilfield

产 能	类 别	每米采油指数
高产能	A	> 1.40
中产能	B	0.70 ~ 1.40
低产能	C	0.05 ~ 0.70
干 层	D	< 0.05

2.2 具体实现过程

2.2.1 储层产能预测的 ANN 模型拓扑结构

人工神经网络(ANN)是对人脑部分智慧的一种模拟, 是一种具有人类智慧的信息处理系统。具体表现在:

(1)具有一定的学习能力, 它不像传统的预测识别方法那样需要建立预测识别规则, 而是像人脑一样在实际工作中不断学习、逐步适应, 从而掌握模式变换的内在规律, 获得预测识别知识。因而, 这种知识是智能化的知识。

(2)具有高度的容错性。容错性是根据不完全的、有错误的信息作出正确、完整结论的能力。人的大脑具有高度的容错性, 大脑的容错性与大脑的分布式存储的组织方式有极为密切的关系。神经网络由于采用了大脑的分布式存储方式, 因而具有较好的容错性, 使得神经网络预测识别方法是一种智能的预测识别方法。

神经网络的预测识别知识是在一定的神经网络结构基础上, 根据一定的学习方式, 通过向示例自动学习而获得的。

神经网络是由广泛互连的神经元构成的系统。神经网络不同的类型与功能是由其具体网络结构, 即神经元的数目和连接方式来实现的。

用于文中产能预测的神经网络是一个三层网络, 其拓扑结构如图 1, 它由输入层、隐含层和输出层构成。输入层由测井评价参数组成, 输出层则代表预测的产能大小, 隐含层节点根据输入、

输出层的节点数而设置, 每个神经元都收到来自各输入神经元送来的信息, 并将其输出传送给输出神经元。

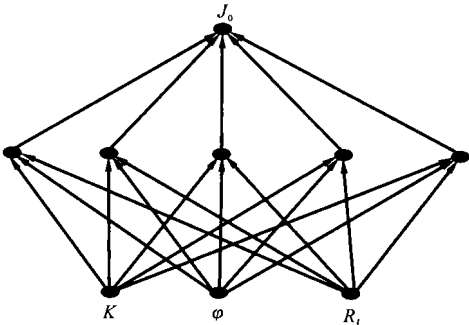


图 1 神经网络拓扑结构

Fig. 1 Topology of neural network

具体采用有效孔隙度、渗透率以及储层电阻率 3 个产能预测参数作为输入结点, 产能大小作为输出结点, 通过经验选择 5 个隐层结点, 来构成储层产能预测的 ANN 模型拓扑结构见图 1。用神经网络预测储层油气产能, 在一定程度上, 避开了式 (11)中经验系数 A, A_1, A_2, A_3 确定的复杂工作。

2.2.2 网络训练过程

选用该油区 150, 151, 152 三口探井作为样本井, 利用该软件系统从测井资料中提取储层的有效孔隙度、渗透率以及储层电阻率等 3 个评价参数作为输入参数, 将 150, 151, 152 三口探井 8 个试油层位的产能大小作为期望输出, 组成训练样本集。

对上述建立的 3-5-1 储层产能预测的 ANN 模型拓扑结构, 进行网络初始化, 选择适当的 η 和 α , 给定允许误差 ϵ , 用构造好的网络对训练集中的 8 个样本进行学习。

2.2.3 储层产能的预测识别过程

通过网络训练得到适合于全地区的连接权重和阈值后, 即可应用上述建立的储层产能预测的 ANN 模型, 对该地区进行储层的产能预测。

2.3 实际应用与效果评价

应用前述所建立的神经网络产能预测模型, 针对克拉玛依油田八区克上组储层, 实际处理了 16 井的测井资料(包括建立网络训练集的 3 口探井), 预测内容包括产能级别、单层产能等, 表 2 列举了部分预测井的预测结果和油井测试结论的对比, 可以看出, 预测的单井产能与测试结果吻合良好, 在 21 个测试层中, 仅有 152, 8 227 和 8 211 三个井层预测类别有误, 符合率达到 85.7%, 充分证明了该方法的有效性和实用性。

表 2 神经网络储层产能预测模型的产量预测与测试产量对比

Table 2 Comparison of the tested productivity and the predicted productivity from the neural network model

井名	井段 <i>h</i> /m	层厚 <i>d</i> /m	测井评价参数			预测结果			试油结果		符
			ϕ / %	k / ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	R_i / ($\Omega\cdot\text{m}$)	每米采油 指数	产能 类别	日产量 $Q/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	每米采 油指数	产能 类别	合
150	1 794.0~1 810.0	12.0	15.7	32.0	20.0	0.208	C	9.500	0.126	C	✓
150	1 832.0~1 839.0	7.0	16.2	40.1	25.5	0.502	C	8.550	0.224	C	✓
150	1 878.5~1 880.5	2.0	10.3	3.4	21.5	0.010	D	0.480	0.048	D	✓
150	1 926.0~1 934.0	6.0	17.5	67.7	26.0	1.226	B	25.270	1.121	B	✓
151	2 073.0~ 275.5	2.5	19.2	143.1	65.0	1.431	A	12.090	1.469	A	✓
151	2 101.0~2 110.6	5.5	17.0	54.1	28.0	1.125	B	13.280	0.892	B	✓
152	2 111.0~2 112.5	1.5	15.7	32.0	23.0	0.428	C	3.225	0.716	B	✕
152	2 161.0~2 165.0	4.0	11.2	4.9	13.0	0.030	D	0.100	0.012	D	✓
8239	2 055.0~2 073.0	8.0	16.1	37.2	9.0	0.464	C	12.600	0.504	C	✓
8217	2 070.5~2 079.0	5.0	17.2	58.3	43.0	0.863	B	14.00	0.926	B	✓
8252	2 016.5~2 022.5	4.0	15.7	32.0	5.0	0.466	C	7.900	0.553	C	✓
8259	2 132.5~2 138.5	6.5	15.7	32.0	26.0	0.470	C	5.500	0.351	C	✓
8211	2 043.4~2 075.5	16.0	17.2	58.3	36.0	1.103	B	9.700	0.191	C	✕
8227	2 099.0~2 104.0	5.0	15.7	32.0	17.0	0.665	C	13.300	0.971	B	✕
8271	1 926.0~1 930.0	4.0	14.8	22.0	25.0	0.376	C	5.600	0.312	C	✓
8220	2 116.0~2 118.0	2.0	18.1	84.7	40.0	1.738	A	9.700	1.870	A	✓
8235	2 070.2~2 074.8	4.6	16.6	46.6	24.0	1.163	B	18.100	1.295	B	✓
8228	2 104.2~2 107.2	3.0	10.1	3.2	28.0	0.003	D	0.100	0.012	D	✓
8247	209.6~2 062.8	3.2	8.5	1.6	20.0	0.006	D	0.100	0.010	D	✓
8241	1 992.0~1 994.2	2.2	18.4	98.4	40.0	1.551	A	12.000	1.423	A	✓
8201	2 133.0~2 134.8	1.8	17.2	58.3	30.0	1.094	B	5.400	1.236	B	✓

效射孔层位的选取以及老井挖潜层位的确定等提供直接依据。

3 结语

研究开发利用神经网络技术进行测井储层的产能评价与预测技术,可以评价和预测单层的产能,也可以在多层测试或混合开采的油井中评价和预测产能,同时,神经网络预测模型是通过网络中连接权的调整匹配来描述储层产能与储层参数之间的复杂关系,具有很强的适应能力与灵活性,而且避免了产能方程中经验系数确定的繁杂工作。通过研究区内 16 口井实际资料的应用,取得了良好的效果,是一种较为成功的储层产能预测方法。这套研究思路,为我们开拓了一种储层油气快速定量评价的方法,其评价结果不仅能确定储层的产出能力和开发前景,还能为单井及分层储量计算、有

[参 考 文 献]

[1] 欧阳健. 石油测井解释与储层描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 87~90, 148~152.

[2] Cheng M L. Productivity prediction from well logs in variable grain size reservoir cretaceous qishn formation, republic of yemen [J]. Log Analyst, 1999, 40(1): 24~34.

[3] 毛志强, 李进福. 油气层产能预测方法及模型[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 58~61.

[4] 陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 23~28.

[5] 雷胜林, 刘哲. 用储层电性、物性参数预测油层产出能力[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(6): 67~70.

[6] 王代国, 孔繁征. 杭锦旗区块二叠系气层序能影响因素分析[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(3): 38~40.

Model and method for oil and gas
productivity prediction of reservoir

TAN Cheng-qian¹, MA Na-rui², SU Chao³

(1. Dept. of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Research Center of Reservoir, Zhongyuan Oilfield, Puyang Henan 457001, China)

Abstract In this paper, the theoretical equation of the reservoir productivity is studied from the Darcy's two-dimensional production formula. The complicated relation between the productivity and the effective porosity, permeability, resistivity are deduced according to the functional relationship between relative permeability and water saturation. On the basis of the achievements above, the fundamental strategies of predicting the reservoir productivity are discussed. Finally the prediction system of reservoir productivity is established by neural network technique. This system has been successfully applied for the oil-gas productivity prediction of the Keshang Formation in the District 8 of Kelamayi Oil-field and proved to be effective.

Key words log data; oil-gas productivity prediction; neural network; Kelamayi Oil-field

(英文审定:苏生瑞)

(上接第 37 页)

Advances and discussion about the study on deep
basin gas in western Sichuan province depression

PU Jun¹, ZHANG Jin-chuan², WANG Zhi-xin¹, ZHANG Jie³

(1. Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Petroleum Exploration and Development Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China)

Abstract: Western Sichuan province depression has geological conditions similar to Alberta basin of Canada in which deep basin gas most probably was formed. However, detailed study showed that the intensity of structural reversion, pressure attributes of gas-bearing strata, and the time of gas generation of source rocks of these two basins are quite different. So it is not reasonable to compare it with an available model. It is thought that the gas pools in western Sichuan province depression have the feature of reversed gas-water contact. As only a few data of formation pressure are available, this point of view needs further study. It is considered that the fault system in western Sichuan province depression has a strong influence on the accumulation of deep basin gas pools, and has led to a peculiar distribution pattern of deep basin gas in that basin. In terms of comprehensive study of the controlling factors including burial depth of source rocks, organic matter maturity, gas generation intensity, reservoir property, structural pattern, etc., a rough prospecting of deep basin gas distribution of western Sichuan province depression was made.

Key words deep basin gas (source-contacting gas accumulation); western Sichuan province depression; Xujiache Formation; assessment of gas reservoir

(英文审定:苏生瑞)