

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

油气水三相流动生产测井方法 及信息处理技术研究

郭海敏 吴锡令 金振武 钟兴福
(江汉石油学院)

1994 年 9 月 北京

油气水三相流动生产测井方法及信息处理技术研究

摘 要

为了提高油气水三相流动生产测井解释精确度,在研究集流式流量计、密度计、持水率计测试原理的基础上,本文提出并实现了用优化方法和神经网络技术处理油气水三相流动生产测井信息的设想。油田应用表明,这一方面可以处理薄夹层、低产井的实测资料,显示具有克服传统方法局限的优势。

引 言

油藏压力小于饱和压力时,溶解气从油中析出,形成油气水三相共存的多相流动。油气水密度、粘度及流量大小的差异使得三相流动的变化复杂,具体表现为同时存在两个独立的滑脱速度和不同形态的流型。这些问题使得利用生产测井信息确定油气水产出剖面变得尤为困难。针对这一问题,研究了用 Powell 方法及神经网络技术对集流式测井仪器所测信息进行处理的方法。神经网络方法主要用于确定初值。Powell—D. S. C 方法用于寻找使非相送函数达到最小时的油气水流量,即所要得的解释结果。由于不需要输入地面产量等参数,这一方法显示具有常规方法不可比拟的优势。

集流式测量仪器

集流式测量仪器测量时,集流伞将套管截面封隔,迫使油气水从集流伞中央的小通道流入。从而使总的流速在流量不变时提高 25 倍以上(集流前后的管径变化为 5:1),因此滑脱速度的影响将大大削弱,可以提供更为可靠的测井信息。国内研究三相流动测井仪器的厂家主要是大庆生产测井研究所。仪器系列由集流式流量计、低能源持水率计、放射性密度计、温度计和压力计组成。持水率和密度是由同一支仪器在不同能级处分别测得的。下面给出主要仪器的响应方程。

1. 流量计

流量计的理论响应方程为:

$$RPS = K \left[V - K' V^{0.5} \left(\frac{\mu}{\rho_m} \right)^{0.5} \right] \quad (1)$$

式中: V 为视流速; RPS 为涡轮转数; K 为仪器常数; K' 为与结构相关的校正系数; μ 为粘度系数; ρ_m 为密度。(1)式说明,启动速度受动力粘度和 V 制约,密度增大,斜率减小。在模拟井中进行刻度实验,得出的实验方程为:

$$Q_m = \frac{RPS}{K} + Q_i \quad (2)$$

$$Q_i = \rho_w / \rho_m$$

$$K = 4.626 + 234.6\rho_m - 702.7\rho_m^2 + 1252\rho_m^3 - 1039\rho_m^4 + 317.9\rho_m^5$$

式中: Q_m 为总流量; Q_i 为启动流量; ρ_w 为水的密度; K 为仪器灵敏度。图 1 是与实验结果相应的图版,变化规律与理论分析结果相符合。图中 K 是实验用的密度。

2. 持水率计

持水率计也采用集流式,该仪器是基于放射性原理设计的。主要是利用在光电效应范围内,油与水的质量吸收系数有较大差异这一特性测量持水率的。响应方程表示为

$$Y_w = \frac{L\mu_o\rho_m - \ln \frac{I_o}{I}}{L\rho_w(\mu_o - \mu_w)} \quad (3)$$

式中: L 为探测器长度; μ_o 、 μ_w 为油、水的质量吸收系数; I_o 、 I 为源及探测器处的计数率。这一方法要求源在 22.2keV 和 88.8keV 能级处强度有显著异常。不满足这一条件时,令气体的质量吸收系数为零,测量能级选在光电效应范围内进行测量(能量小于 88keV,相应的响应方程为:

$$Y_w = \frac{\mu_{1o} \ln \frac{I_{2g}}{I_2} - \mu_{2o} \ln \frac{I_{1g}}{I_1}}{\rho_w(\mu_{1o}\mu_{2w} - \mu_{1w}\mu_{2o})L} \quad (4)$$

$$Y_w = \frac{\mu_{2w} \ln \frac{I_{1g}}{I_1} - \mu_{1w} \ln \frac{I_{2g}}{I_2}}{\rho_o (\mu_{1o} \mu_{2w} - \mu_{1w} \mu_{2o}) L} \quad (5)$$

$$Y_g = 1 - Y_w - Y_o$$

式中: μ_{1o} 、 μ_{2o} 为能级 1、2 处油的质量吸收系数; μ_{1w} 、 μ_{2s} 为能级 1、2 处水的质量吸收系数; I_{1g} 、 I_{2g} 探头处对应于 1、2 的放射性强度; I_1 、 I_2 为源处能级 1、2 的放射性强度。用取得的测试数据作出的持水率图版如图 2 所示。

3. 密度计

简化油气水混合物分布呈层状。则可写出测量密度值与计数率的关系为:

$$\rho_m = \frac{1}{\rho_m L} \ln \frac{I_o}{I} \quad (6)$$

式中 I_o 、 I 分别为源、探头处的计数率(能级大于 88keV), 能级大于 88keV 后, $\mu_o = \mu_w = \mu_m$, 因此, 只要测出 I_o 、 I 的值, 即可确定出混合物的密度。用取得的数据确定图版如图 3 所示。

油气水三相流动滑脱模型

三相流动中, 油水、气水、气油之间同时存在着滑脱速度, 其中两项是独立的, 依据这一特点, 作者提出下列滑脱速度模型

$$C_w = K_w + X_w \quad (7)$$

$$C_o = K_o + X_o \quad (8)$$

$$C_g = K_g + X_g \quad (9)$$

$$X_w = -Y_w \left(\frac{Y_g V_{sgw} + Y_o V_{sow}}{V_m} \right)$$

$$X_g = -Y_g \left(\frac{Y_o V_{sow} - (1 - Y_o) V_{sgw}}{V_m} \right)$$

$$X_o = -Y_o \left(\frac{Y_g V_{sgw} - (1 - Y_o) V_{sow}}{V_m} \right)$$

(7)、(8)、(9)式说明, 含水率(C_w)、含油率(C_o)、含气率(C_g)与持水率(Y_w)、持油率(Y_o)、持气率(Y_g)间存在一校正系数, 校正系数与滑脱速度相关。式中 X_o 、 X_g 、 X_w 分别表示油气水的校正系数, V_{sgw} 、 V_{sow} 表示气水、油水的滑脱速度。

常规解释方法没有考虑滑脱速度的影响, 直接把 Y_o 、 Y_g 、 Y_w 作为 C_o 、 C_g 、 C_w 处理, 显然是不合理的。

优化解释方法

用优化方法处理油气水三相流动测井信息的过程主要分两步实现: 第一步是利用响应方程建

立一个反映测井值与理论值大小的误差逐数作为目标函数(也叫非相关函数); 第二步是利用优化方法求解函数值最小时的解。

1. 目标函数

对测井仪器的理论值和测量值的差引入校正因子, 建立下列目标函数

$$f(Q_o, Q_g, Q_w) = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{C_i (M_i - T_i)}{R_i} \right| \quad (10)$$

式中: M_i 为仪器测量值; T_i 为仪器理论响应值; R_i 为仪器分辨率; C_i 为仪器可信度校正因子; N 为仪器数。

进行三相流动测井时, 除深度控制参数之外, 必测的参数有流量、压力、温度、密度、持水五个参数。流量计的响应方程前文已给出, 密度计的理论响应方程为

$$\rho_m = \rho_w Y_w + \rho_o Y_o + \rho_g Y_g \quad (11)$$

ρ_o 、 ρ_g 为油、气的密度。持水率由下式估算

$$Y_w = \frac{V_{sw}}{Y_m - Y_g V_{sgw} - Y_o V_{sow}} \quad (12)$$

$$Y_g = \frac{Y_w (\rho_w - \rho_o) + \rho_o - \rho_m}{\rho_o - \rho_g} \quad (13)$$

$$Y_o = 1 - Y_w - Y_g$$

V_m 为平均流速, v_w 为水的表观速度, (13)式中右侧的 Y_w 值由持水率计给出。温度、压力的理论响应方程作者在文献[1]中给出。(13)式中

$$V_{sow} = \frac{Q_o}{P_c Y_o} - \frac{Q_w}{P_c Y_w}$$

$$V_{sgw} = \frac{Q_g}{P_c Y_g} - \frac{Q_w}{P_c Y_w}$$

P_c 为管子常数; Q_o 、 Q_g 、 Q_w 为中间值。

2. Powell 算法

为了确定目标函数的最小值, 通过尝试, 选用 Powell 方法进行三维搜索, 确定 Q_o 、 Q_g 、 Q_w 值, 该方法的特点是不需要计算导数的共轭方向, 对于二次凸函数, 可以在有限步内找到极小点对于非二次函数, 收敛速度也较快, 是直接法中最有效的算法。对于三相流动, 计算步骤为:

①取(Q_o 、 Q_g 、 Q_w)的初值为($X(1)$, $X(2)$, $X(3)$), 用 X^1 表示, 3 个初始方向为 $Z^1 = (1, 0, 0)$, $Z^2 = (0, 1, 0)$, $Z^3 = (0, 0, 1)$, 允许误差 $\epsilon > 1$, 令 $i = 1$;

②调用子程序求步长 λ

$$\min f(X^i + \lambda Z^i) = f(X^i + \lambda Z^i)$$

$$X^{i+1} = X^i + \lambda Z^i$$

$$f_{i+1} = f(X^{i+1})$$

从初值出发,沿 Z^1, Z^2, Z^3 方向,依次得到 X^2, X^3, X^4 ;

③如果 $i=3$,则转(4),若 $i<3$,则令 $i=i+1$ 转(2);

④若 $\|X^4 - X^2\| \leq \epsilon$,则停止搜索,最小值 $X^* = X^4$,否则转(5);

⑤令 $\Delta = \max_{i=1,2,3} (f_i - f_{i+1}) = f_m - f_{m+1}, f^* = f(2X^4 - X^1)$;

⑥若 $f_1 - 2f_4 + f^* \geq 2\Delta$,则令 $X^1 = X^4, f_1 = f(X^1), i=1$ 转(2)否则转(7);

⑦令 $Z^i = Z^{i+1}, i=m \sim n-1, Z^3 = X^4 - X^1$,调用子程序求 λ ,令 $X^2 = X^4 + \lambda Z^3, f_1 = f(X^4 + \lambda Z^3), i=1$ 转②。

用 Powell 法计算 Q_0, Q_4, Q_w 时,搜索步长 λ 利用 D. S. C 方法确定,该方法的特点是逐步加倍步长,一直到超过最小值后,作二次插值,计算步骤参见文献 1。

用前馈人工神经网络确定初值

进行三相流动解释时,初值的确定有两种方法,一种是采用不考虑滑脱速度的传统方法,第二种是采用人工神经网络。后者考虑了滑脱速度的影响。

1. 功能函数

前馈网络是一种单向多层结构,每一层包含有若干个神经元,同一层的神经元相互独立,层间信息只沿一个方向传送,单个神经元的功能函数表示为:

$$Y = f(I) \quad (14)$$

$$I = \sum_{j=0}^{N-1} W_j X_j - \theta$$

式中: N 为输入信息的个数(测井响应); Y 为输出特性, (14) 式中的函数 f 通常采用 S 形函数,表示为

$$f_s(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (15)$$

对整个网络进行培训是采用误差反向传播方式进行的,具体步骤是,首先对权值 W_j 随机设置一级初值,学习开始后,依次逐个向神经网络送入已知的测量信号及输出信号;然后根据误差大小从输出层至输入层反向逐个修正权值,直到满足所要求的精度为止。

2. 方法的实现

利用模拟实验中的测量值及含水率和含油率作为学习样本,对网络进行培训,确定出权值,然后即可对实测值进行预测和计算。本研究采用网络结构为三层,功能函数为 S 形,神经元个数可调。对应于这一结构的网络如图 4 所示。输入是一个 N 维矢量 $N = [X_0, \dots, X_{N-1}]$, 输出是一个 M 维矢量 $Y = [Y_0, \dots, Y_{M-1}]$, 网络的结构是:

第一层(隐含层); J 个神经元, 输出为 $g_0, \dots, g_{N-1}$;

第二层(隐含层); K 个神经元, 输出为 $h_0, \dots, h_{K-1}$;

第三层(输出层); M 个神经元, 输出为 $y_0, \dots, y_{M-1}$;

输入矢量各分量为 X_i 至第一层各神经元之间的加权系数,用 W_{ij}^1 , 第二层至第三层之间的加权系数用 W_{jk}^2 表示,层号用 l 表示。

为了便于说明 BP 算法修正权值的方法,图 4 中的任一层可以用一通用层来表示(图 5)。参考文献 2,可以写出三层网络中所有权系数调整量的计算公式

$$l = 3$$

$$\Delta_p W_{ij}^{(3)} = 2\alpha(d_{pi} - O_{pi}^{(3)})O_{pi}^{(3)}(1 - O_{pi}^{(3)})O_{pi}^{(2)}$$

$$\delta_{pi}^{(3)} = 2\alpha(d_{pi} - O_{pi}^{(3)})O_{pi}^{(3)}(1 - O_{pi}^{(3)})$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1$$

$$j = 0, 1, \dots, K$$

$$l = 2$$

$$\Delta_p W_{ij}^{(2)} = \alpha \delta_{pi}^{(2)} O_{pi}^{(1)}$$

$$\delta_{pi}^{(2)} = \left(\sum_{k=0}^{M-1} \delta_{pk}^{(3)} W_{ki}^{(3)} \right) O_{pi}^{(2)} (1 - O_{pi}^{(2)})$$

$$i = 0, 1, \dots, K-1$$

$$j = 0, 1, \dots, J$$

$$l = 1$$

$$\Delta_p W_{ij}^{(1)} = \alpha \delta_{pi}^{(1)} O_{pi}^{(0)}$$

$$\delta_{pi}^{(1)} = \alpha \left(\sum_{k=0}^{J-1} \delta_{pk}^{(2)} W_{ki}^{(2)} \right) O_{pi}^{(1)} (1 - O_{pi}^{(1)})$$

$$i = 0, 1, \dots, J-1$$

$$j = 0, 1, \dots, N$$

式中: $O_{pi}^{(3)} = Y_{pi}, i=0, 1, \dots, M-1, O_{pi}^{(0)} = X_{pi}, j=0, 1, \dots, N$

由上述分析可知,这一算法的计算过程是首先计算第三层各项的误差分量 $\delta_{pi}^{(3)}$, 然后用 $\delta_{pi}^{(3)}$ 计算第二层的等效误差分量 $\delta_{pi}^{(2)}$, 最后再用 $\delta_{pi}^{(2)}$ 计算第一层(隐含层)的等效误差分量 $\delta_{pi}^{(1)}$ 。只要算出误差分量,即可求得系数调整量。这是一种从输出

层逐步向输入层反推的学习算法,简称“逆推”算法或 BP 算法。

利用上述方法设计了专用软件,并对实测资料进行了处理(图 6),发现考虑滑脱速度并采用这一方法后,可以识别小层,薄层及低产层的三相产出动态,不需要知道地面油气的产量。在测井信息局部出现问题时,也可得出较为可靠的结果。

结 论

对于饱和油藏呈三相流动的生产井,本文主要得出以下结论:

(1)采用集流式仪器,可以消除滑脱速度在一定范围内对解释结果的影响。

(2)优化和人工神经网络的组合可以解决生产测井信息监测小层,薄层及低产层的生产动态

问题。

(3)本文提出的方法适用于三相井,也适用于两相井,是一种与传统方法不同的处理技术。

参加本研究的还有大庆生产测井研究所的张宝群、吴世旗、于跃、蔡军、王昌雄等。感谢 CNPC 刘风惠、姜文达高级工程师所给予的大力支持。

参 考 文 献

- 1 郭海敏. 三相流动生产测井测量、信息处理及应用. 北京,北京航空航天大学博士后流动站博士后论文, 1993,6
- 2 杨行峻,郑群里. 人工神经网络. 北京:高等教育出版社,1992
- 3 陈开周. 最优化计算方法. 西北电讯工程学院出版社,1985

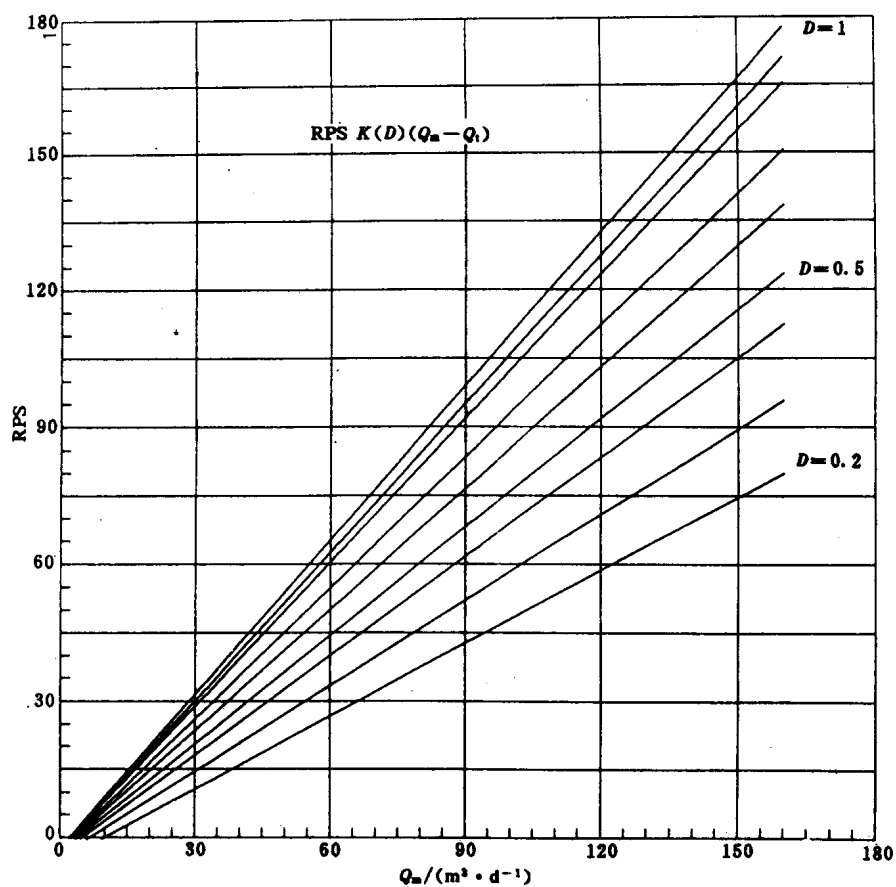


图 1 流量与涡轮转数及密度的关系

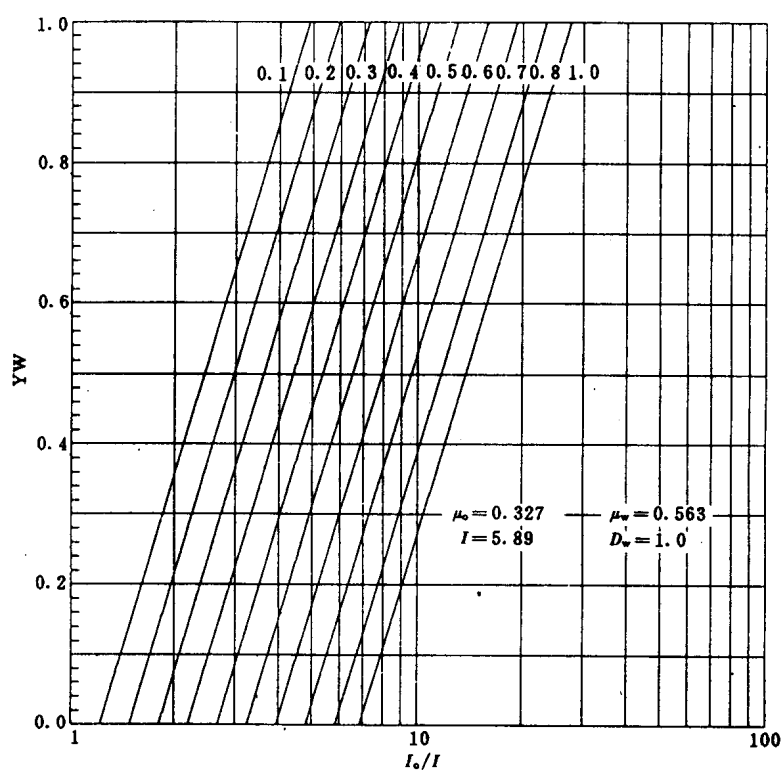


图 2 持水率与计数率 I_0/I_1 的关系

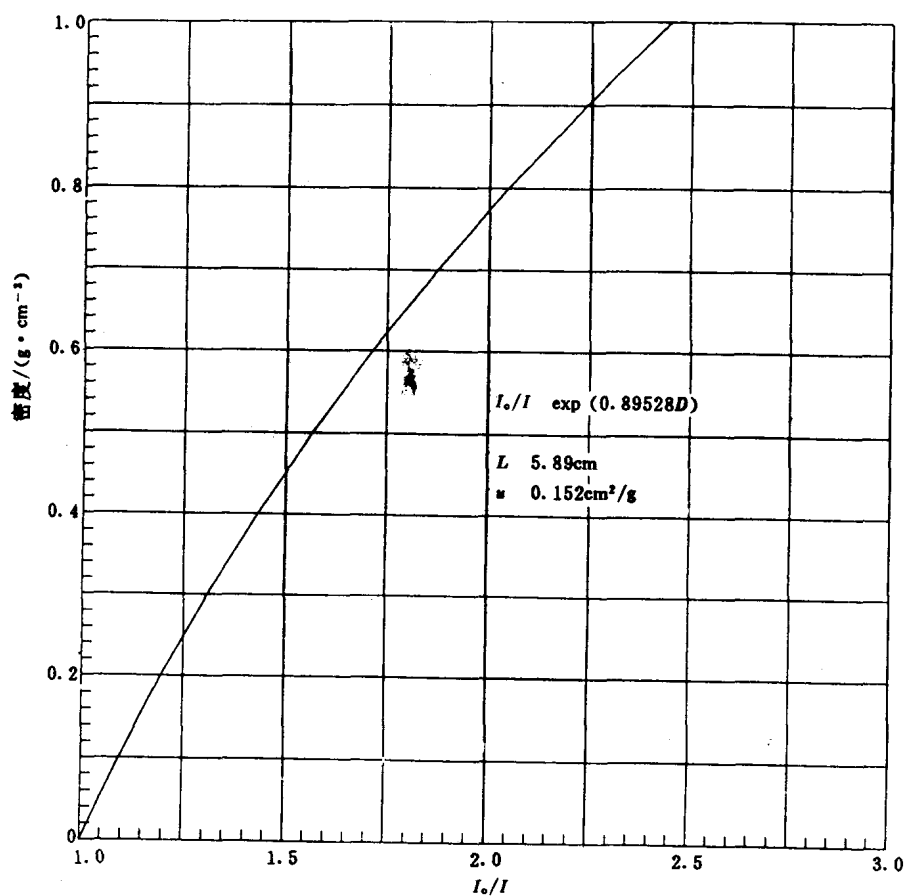


图3 密度与计数率 I_0/I 的关系

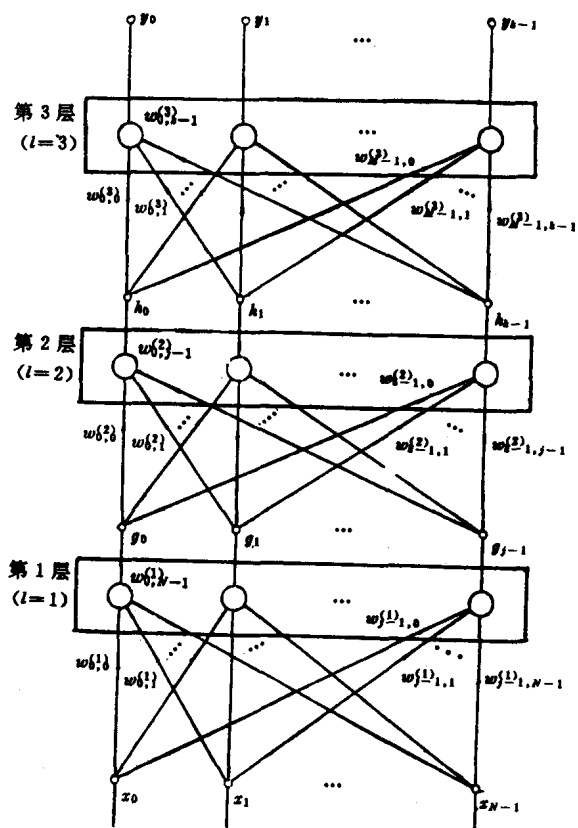


图4 采用S形函数的前馈型三层神经网络

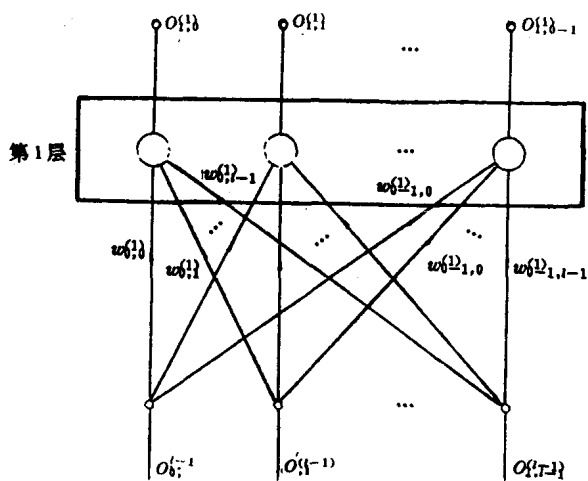


图5 前馈型三层神经网络中的通用层结构

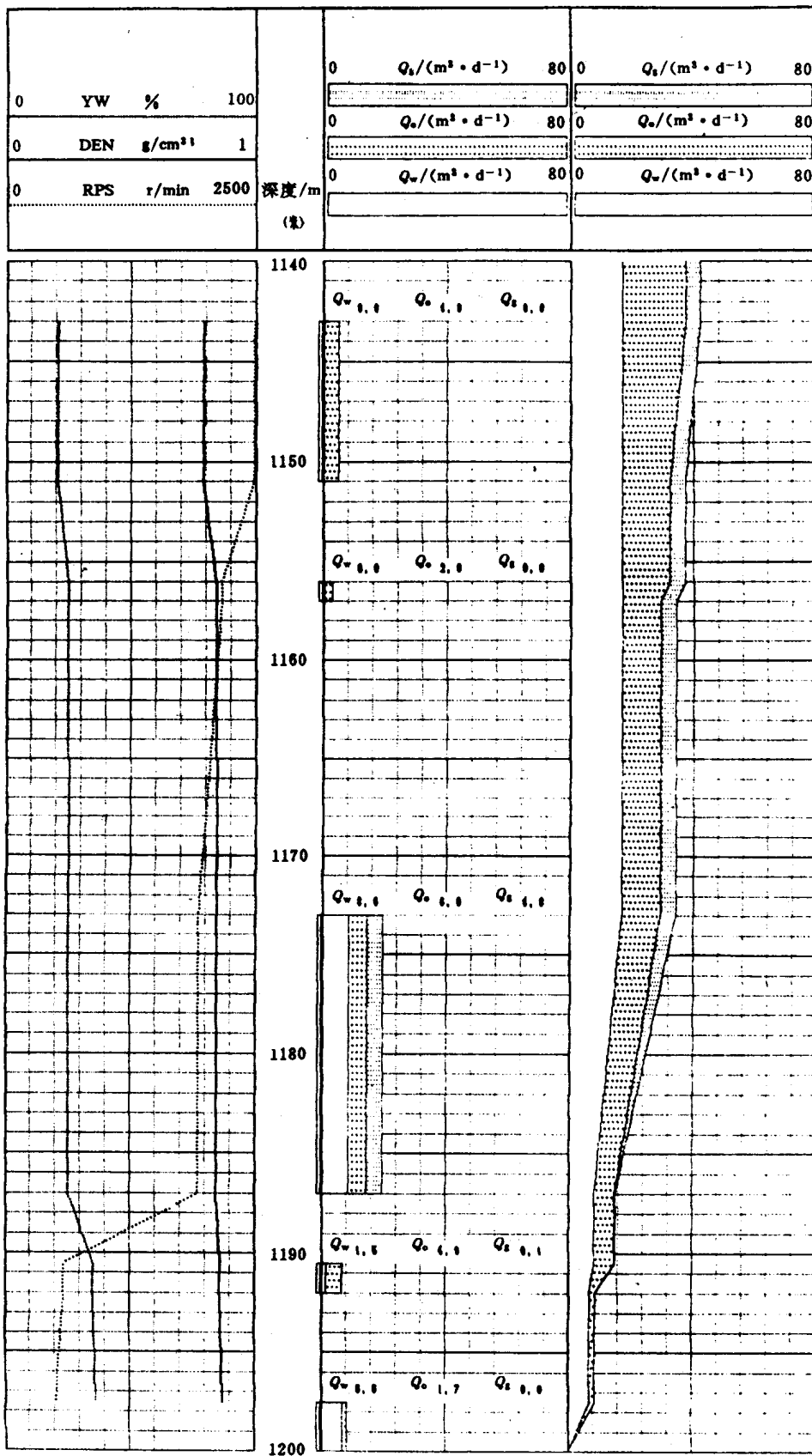


图 6 Z11-B130 井的解释结果

石油物探局制图印刷厂
照排印刷