

文章编号: 1001 - 6112 (2005) 06 - 0630 - 05

# 多层合采产能配比的算法研究及应用

王跃文<sup>1</sup>, 卢双舫<sup>1</sup>, 方伟<sup>2</sup>, 张居和<sup>2</sup>, 黄修平<sup>3</sup>

(1. 大庆石油学院 地科院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆油田公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712; 3. 大庆油田有限责任公司第六采油厂, 黑龙江 大庆 163110)

**摘要:** 针对气相色谱指纹技术目前还难以被应用到 3 层及 3 层以上合采油层的局限, 作者提出了一套人工神经网络学习算法, 该算法具有非线性、精度高、适用于多层合采的优点。应用此方法, 在实验室通过原油的全烃气相色谱和色谱-质谱分析, 确定反映单层和配比的原油特征气相色谱指纹, 建立特征指纹数据库, 用人工神经网络算法对数据进行分析处理, 找出内在规律, 就可以对实际合采的原油进行分析应用。通过对喇嘛甸油田及萨尔图油田试验区合采油井的单层产量进行实验室配比计算和实际合采油层原油分析验证, 计算结果具有很高的精度并与单井实际产量 MFE 测试结果吻合很好。该项计算技术为油田利用地球化学方法进行多层合采的单层产能配比计算提供了一个经济适用的途径。

**关键词:** 人工神经网络; 色谱指纹; 非线性; 产能配比; 合采

**中图分类号:** TE3

**文献标识码:** A

自从 Kaufman 等 (1987) 首次应用原油色谱指纹的峰高比参数计算北海某油田 2 层合采油藏各单层的产能配比、建立两层图版模型<sup>[1~3]</sup>, 实现油藏开发动态的地球化学监测技术的突破以来, 国内不少石油地球化学家开始探讨这一方法在我国油田 (主要是陆相油田) 中应用的可行性, 如林壬子 (1996—2000) 在辽河油田和大港油田、王铁冠 (1998) 在大庆油田、梅博文 (1995) 在塔里木油田、王培荣 (1995) 在中原油田先后开展过探索性的研究工作; 金晓辉<sup>[4,5]</sup>、冯子辉<sup>[6]</sup>、付晓泰<sup>[7]</sup>、王振平<sup>[8]</sup>、邹宇峰<sup>[9]</sup> 等也进行了理论及应用性研究。与现行的诸多生产测井方法相比, 色谱指纹技术具有周期短、成本低、测试控制范围大、适合稠油等非常规油藏和不影响原油正常生产等优点。不过, 迄今为止, 这一方法更多应用在“科研”中, 并未在油田生产中得到广泛的推广应用。其中的重要原因之一在于现有的成功报道主要局限于解决 2 层合采问题, 而我国陆相油田绝大多数都是 3 层以上的合层开采, 迄今尚没有解决 3 层以上合采问题的成功报道见诸文献; 原因之二是峰高比值和产量分配百分比并不具有线性叠加关系, 前人也曾用内标法和偏最小二乘法解决这一问题, 但是当应用于 3 层时, 求解精度不够, 甚至有负数出现, 即便对实验室定量配比的样品, 求解所得的相对偏差也较大。因

此, 本文着力探讨了在许多领域都已得到成功应用的神经网络算法在解决 3 层以上合采油层产能配比中应用的可能性。

## 1 气相色谱指纹参数的选择

### 1.1 实用性标准

色谱指纹参数是指色谱流出曲线中不同化合物相应的峰高或峰面积, 它是表征各单油层非均质性的一个不随其贡献量 (体积或重量) 变化的量, 对同一指纹化合物, 混合样中该化合物的量取决于各单层中该化合物的相对贡献率。一般来说, 表示各单层的特征指纹化合物的色谱指纹数据组之间要有一定的离散度, 以避免产生非奇异系数矩阵和共线性问题出现。一般在应用时选取色谱指纹峰的浓度参数 (内标) 或峰高比参数。在实施动态监测时, 数学模拟的参数应该是具有明确地球化学意义的可有效观察的地球化学变量, 从而确保可获得最佳的产能动态监测结果, 因此在进行实验室配比分析时, 需要做一定量的色谱-质谱分析, 以确保选取的特征指纹峰具有一定的地球化学意义, 而且在一定时期内基本不随时间变化的化合物, 也就是所选取的特征指纹峰既具有一定的地球化学意义, 又具有相对的

收稿日期: 2004 - 06 - 14; 修订日期: 2005 - 09 - 29。

作者简介: 王跃文 (1970—), 男 (汉族), 吉林四平人, 工程师、博士, 主要从事石油地质和应用地球化学研究工作。

基金项目: 黑龙江省杰出青年基金项目 (200003)。

时间稳定性。

### 1. 2 配比实验标准

并非具有一定的地球化学意义和具有相对的时间稳定性的任何一个参数都可以用于计算的, 必须对他们进行严格的筛选和控制, 具体条件是: 1) 同一油样一般做 5 次以上重复性实验, 相对偏差必须  $< 5\%$ , 求平均值用于计算。2) 选择各单层油样参数的线性相关性要  $< 10\%$ , 否则在应用人工神经网络方法计算时, 会因为线性相关性较大而使得计算量明显增大, 精度降低, 甚至根本得不到结果。3) 峰高比值的范围一般要求在一定的范围以内, 一般认为在  $1/3 \sim 3$  之间<sup>[9]</sup>。4) 混层中单层色谱指纹要有可配比性。

实际取样分析表明: 虽然原油中的特征色谱指纹含量也会随时间变化, 但在一定的时期内, 特别是在区块产层地质特征和采出液体的性质相对稳定的情况下, 选择的多数色谱指纹都不会有较大变化。在一些特征指纹发生较大变化后, 可以对它们进行重新标定。

## 2 数学模型

### 2. 1 选择数学模型背景

最初解决 2 层问题, 一般用线性拟和的方法, 鉴于气相色谱中峰高比值并不严格成线性叠加关系的情况, 采用偏最小二乘法进行非线性拟合, 基本上解决了原来气相色谱指纹技术的理论缺陷。对于 3 层合采问题, 峰高比不再满足线性关系, 浓度参数也不一定满足线性关系, 用同样的算法很难达到要求的精度, 甚至可能出现负的贡献率<sup>[4,5]</sup>。因此, 从改进数学模型入手, 选用人工神经网络方法。该算法原理简单, 具有非线性、精度高等优点, 对于 3 层或 3 层以上合采问题, 选择的参数既可以是浓度, 也可以是峰高比。

### 2. 2 人工神经网络算法

人工神经网络是一种智能学习算法, 这里使用的是带惯性项和学习速率启发式调整的多层前向人工神经网络的误差反向传播算法。多层前向神经网络的误差反向传播算法 (Error Back Propagation) 简称 EBP 算法<sup>[10]</sup>。美国学者 Rumelhart 等人于 1985 年提出了误差反向传播学习算法, 该算法是一个非常有效的算法, 许多问题可以用它来解决, 该算法的学习过程由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中, 输入信息从输入层经隐含层逐层处理, 并向输出层传播, 每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期

望的值, 则转入反向传播, 将误差信号沿原来的连接通路逐层返回, 通过误差信号来修改各层神经元的权值, 使得误差减小, 再转入正向传播, 如此往复, 直至误差达到精度要求, 保存此时的权值, 即得到计算“模板”。下面以具有 2 个隐含层的多层神经网络为例 (图 1) 加以说明。

首先, 逐个输入每个配比样品气相色谱分析选取的指标 (浓度参数或峰高比参数)  $X_K$  ( $K=1, 2, \dots, N$ ), 经过一系列 Sigmoid 函数的作用及矩阵运算、加权、平均, 输出到第一个隐层  $H_{1K}$  ( $K=1, 2, \dots, P$ ), 经过同样原理的一系列运算, 输出到第二个隐层  $H_{2K}$  ( $K=1, 2, \dots, Q$ ), 再经过同样原理的一系列运算, 最后输出到输出层  $Y_K$  ( $K=1, 2, \dots, M$ ), 输出层即是合采各油层的产量百分比。和实际配比的数值进行比较, 把误差按原来路径逐层反馈回去, 在反馈的过程中, 按误差的大小, 依次调整各个节点的权向量矩阵, 再输入同样的参数值, 循环往复, 直至各个输出值与实际配比之间的误差达到精度要求。其中 Sigmoid 函数为神经元的非线性作用函数, 非对称 Sigmoid 函数为  $f(x) = 1 / (1 + e^{-x})$ , 函数值为  $0 \sim 1$ , 对称 Sigmoid 函数  $f(x) = (1 - e^{-x}) / (1 + e^{-x})$ , 函数值为  $-1 \sim 1$ 。由于合采各油层的产量百分比范围为  $0\% \sim 100\%$ , 因此这里采用非对称 Sigmoid 函数。

这时, 存储各层各个单元的权值矩阵及相关参数, 就是所选区块相应油层合采的参数模板, 在应用的时候, 只需要把实际合采原油色谱分析的相应参数导入, 应用此模板即可计算出此合采并各层原油的产能配比关系。

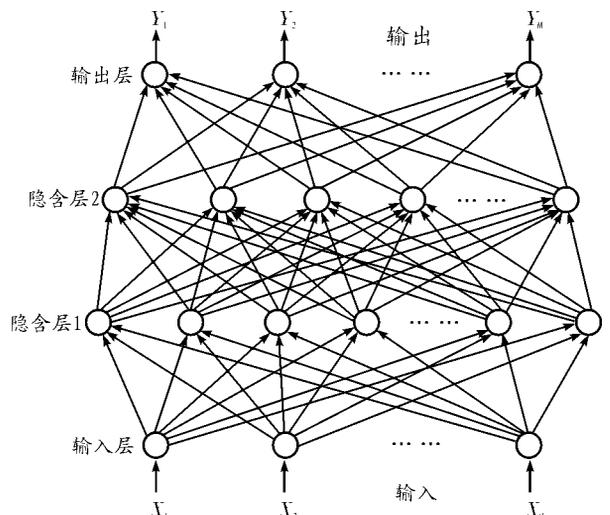


图 1 具有 2 个隐含层的神经网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of artificial nerve network with two hide layers

上述的 EBP 算法存在如下的缺点：1) 为了极小化总误差，学习速率应选的足够小，但是小的学习速率将导致学习过程很慢；2) 大的学习速率虽然可以加快学习速度，但又可能导致学习过程的振荡，从而收敛不到期望解；3) 学习过程可能收敛于局部极小点或在误差函数的平稳段停滞不前。因此，单纯的 EBP 算法不能适应实际的需要，下面介绍 2 种常用的改进方法。

### 2.3 EBP 算法学习速率的调整

在 EBP 算法中，连接权的调整取决于学习速率和梯度，但是，学习速率是固定不变的，实际上学习速率对收敛速度的影响也是很大的，通过对它的在线调整，可以大大提高收敛速度。

学习速率的调整原则上是使它在每一步保持尽可能大的值，而又不致使学习过程失稳。学习速率可以根据误差变化的信息和误差函数对连接权梯度变化的信息进行启发式调整，也可以根据误差函数对学习速率的梯度直接进行调整。

可以根据总误差变化的信息进行启发式调整，其规则是：1) 若总误差  $E$  减小，则学习速率增大；2) 若总误差增加到一定程度，则学习速率减小；3) 若总误差  $E$  少量增加，则学习速率不变。上述规则可以在学习过程的每一步对学习速率进行调整。这里采用如下启发式调整

$$a_k = \begin{cases} a a_{k-1} & \text{若 } E_k < E_{k-1} \\ b a_{k-1} & \text{若 } E_k > c E_{k-1} \\ a_{k-1} & \text{其它} \end{cases}$$

式中，一般取  $a = 1.05$ ， $b = 0.7$ ， $c = 1.04$ <sup>[10]</sup>， $a_k$  和  $a_{k-1}$  分别表示本次和前次的学习速率， $E_k$  和  $E_{k-1}$  分别表示本次和前次的误差。

### 2.4 EBP 算法加入惯性项

20 世纪 80 年代中期以来，多层前向网的反向传播算法一直备受人们的关注。事实上，传统的基于标准梯度下降法的 EBP 算法，在求解实际问题时，常因收敛速度太慢而影响求解质量。牛顿法虽然收敛速度比较快，但是它对初始点要求过于苛刻，并且在迭代公式中要计算  $[\nabla^2 f(x^{(k)})]^{-1}$ ，而导致计

算复杂性增加。

为此，需要在标准 EBP 算法以及牛顿法的基础上进行改进，这里选择了一种简单有效的“带惯性项”的方法。即：每一步计算都把前一次计算的结果按一定的比例加权考虑进去，这样可以比较有效地避免一些陷入局部优解的可能性，从而增加实用性。

$$W_k = W_{k-1} + \mu W_k + \mu W_{k-1}$$

式中  $\mu W_{k-1}$  为惯性项， $\mu$  为惯性因子，一般取  $0.45$ <sup>[10]</sup>。

### 2.5 实用性问题

首先，实际结论是各合采油层的产量百分比，范围为  $0\% \sim 100\%$ ，控制相对误差应该更具有实际意义。考虑到仪器系统误差、人为配比误差及现场实际应用精度的需要，也没有必要使得精度太高。因此，采取分段控制相对误差的方法（表 1）。

其次，在逐个学习多组配比数据内在规律时，可能在某组数据的学习过程中出现平稳状态而“停滞”不前，这时，采取综合评估、优先选取的方法，对其它组数据先进行学习，而后再对此组数据学习，既减少了时间和舍入误差，又避免了陷入“死循环”。

## 3 实际应用

据前人的研究成果<sup>[4,5,9]</sup>，按照上述要求及这里使用的人工神经网络模型特征，对松辽盆地北部喇嘛甸和萨尔图油田的研究区块选取多口探井和生产井的单层和合采层原油样品，进行全油色谱和色谱—质谱分析，用重复性实验减小人为及仪器误差，分析对比，优选 10~20 个浓度或峰高比参数，用于 2~4 层合采的配比计算，结果如表 2~4。表中层位 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 和 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 分别表示萨尔图第 1、2 油层组和葡萄花第 1、2 油层组；S<sub>1-5</sub> 等表示各油层组中的小层，S<sub>4+5</sub> 等表示小层分不开，P<sub>5</sub> 表示临近第 5 小层的另一层。

从表中可以看出，计算所得结果具有一定的精度，而且和 MFE 测试结果吻合较好，但是随着合采层数的增加，相对偏差有增大的趋势，这与配比分析样品数量的增加而使得各项误差的增加有关，也与

表 1 分段控制相对误差

Table 1 Control relative error in different subsection

产量百分比, %	<1	1~5	5~10	10~25	25~50	50~75	75~100
可调相对误差, %	不加控制	15	10	8	6	5	3

表 2 萨尔图油田北 1—42—563 井 2 层合采原油产能配比计算与实测对比

Table 2 The contrast between MFE test and production allocation calculations of double layers oil in well North 1 - 42 - 563 of the Saertu oilfield

层位	MFE 测试分层产量比, %	本方法计算分层产量比, %	绝对偏差, %	相对偏差, %
S	8. 4	8. 7	0. 3	1. 75
P	91. 6	91. 3	- 0. 3	- 0. 16

表 3 喇嘛甸油田 3 层原油实验室配比与模拟计算对比

Table 3 The contrast between laboratory proportioning and computational allocation of three layers oil in the Lamadian oil field

配比次序	油层	实际配比, %	用峰高比计算, %	绝对偏差, %	相对偏差, %	用浓度计算, %	绝对偏差, %	相对偏差, %
1	S	39. 78	38. 38	- 1. 40	- 1. 79	39. 44	- 0. 34	- 0. 43
	S	20. 24	21. 44	1. 20	2. 88	22. 35	2. 11	4. 95
	P	39. 98	40. 18	0. 20	0. 25	38. 2	- 1. 78	- 2. 28
2	S	20. 2	21. 68	1. 48	3. 53	18. 57	- 1. 63	- 4. 20
	S	40. 2	39. 35	- 0. 85	- 1. 07	41. 03	0. 83	1. 02
	P	39. 92	38. 98	- 0. 94	- 1. 19	40. 38	0. 46	0. 57
3	S	19. 72	19. 25	- 0. 47	- 1. 21	21. 24	1. 52	3. 71
	S	56. 68	56. 34	- 0. 34	- 0. 30	53. 69	- 2. 99	- 2. 71
	P	23. 59	24. 42	0. 83	1. 73	25. 05	1. 46	3. 00
4	S	53. 63	52. 99	- 0. 64	- 0. 60	53. 71	0. 08	0. 07
	S	26. 19	26. 00	- 0. 19	- 0. 36	27. 56	1. 37	2. 55
	P	20. 27	21. 01	0. 74	1. 79	18. 72	- 1. 55	- 3. 98
5	S	19. 78	19. 07	- 0. 71	- 1. 83	17. 57	- 2. 21	- 5. 92
	S	20. 78	21. 37	0. 59	1. 40	20. 64	- 0. 14	- 0. 34
	P	60. 14	59. 57	- 0. 57	- 0. 48	61. 77	1. 63	1. 34
6	S	40. 02	40. 39	0. 37	0. 46	40. 81	0. 79	0. 98
	S	39. 72	40. 26	0. 54	0. 68	37. 96	- 1. 76	- 2. 27
	P	20. 26	19. 35	- 0. 91	- 2. 30	21. 23	0. 97	2. 34

表 4 萨尔图油田北 1—50—检 562 井 4 层合采原油产能配比计算与实测对比

Table 4 The contrast between MFE test and production allocation calculations of four layers oil in well North 1 - 50 - J562

层位	MFE 测试分层产量比, %	本方法计算分层产量比, %	绝对偏差, %	相对偏差, %
S 1- 4+5	28. 69	25. 87	- 2. 82	- 5. 17
S 8- 8- 9	32. 66	30. 08	- 2. 58	- 4. 11
P 2- *5	22. 53	25. 65	3. 12	6. 48
P 8- 10	16. 12	18. 40	2. 28	6. 60

计算量的大幅增加有关。

#### 4 结语

对不同区块多口井的实际采样分析和模拟计算表明: 通过原油的全烃色谱和色谱-质谱分析, 确定反映单层和混层的原油特征气相色谱指纹参数, 应用人工神经网络计算的结果与实验室配比、井口实际 MFE 测试结果吻合很好。此方法主要具有 4 个特点: 1) 放宽了对指纹参数选择的要求, 只要大部分特征指纹化合物的数组之间有一定的离散度, 即使少部分

出现共线性问题, 也不会有太大的影响; 2) 不需要检查数据之间是否具有线性关系; 3) 本算法所选择的参数可以是浓度, 也可以是峰高比; 4) 理论上, 在计算量允许的情况下, 可以是任意多层合采, 只要原油本身满足前面提到的条件, 参数选择合适, 可以达到相当高的精度, 而且绝对不会出现负值。

该项计算技术的应用为油田利用地球化学方法进行多层合采的单层产能配比计算提供了一个经济适用的途径, 而且具有周期短、成本低、测试控制范围大、适合稠油等非常规油藏、不影响油井正常生产、适用于多层合采和精度高的优点, 同时可以实现

大面积多井实时连续监测,大幅度提高监测效率。通过及时正确的动态监测,为调整开发方案,提高采收率的施工提供正确决策,减少能耗和人力浪费。

#### 参考文献:

- 1 Kaufman R L, Ahmed A S, Moldowan J M. A new technique for the analysis of commingled oils and its application to production allocation calculations [A]. Proceedings of the 16th Annual Convention of Indonesian Petroleum Assoc [C]. Indonesia Petroleum Association, 1987. 247 ~ 268
- 2 Kaufman R L, Ahmed A S. Gas chromatography as a development and production tool for fingerprinting oils from Individual Reservoirs: Applications in the Gulf of Mexico [A]. In: GCS/SEPM Foundation Ninth Annual Research Conference Proceedings, 1990, 263 ~ 282
- 3 Kaufman R L, Dashti H, Kabir C S, et al. Characterizing the greater Burgan Field: Use of geochemistry and oil fingerprinting [A]. In: SPE Paper No. 37803, 1997. 385 ~ 394
- 4 金晓辉,朱丹,林壬子等.原油气相色谱指纹可配比性实验研究[J].石油实验地质,2003,25(1):53~57
- 5 金晓辉,朱丹,林壬子.油田开发动态色谱指纹监测技术的数学模拟研究[J].石油勘探与开发,2001,28(3):86~89
- 6 冯子辉,张居和,关秋华.用族组成和全烃色谱确定原油单井产能配比[J].石油仪器,1999(2),40~42
- 7 付晓泰,王振平,毕丽飞.用高效液相色谱法预测两油层合采过程中单层的产量分数[J].色谱,2000,18(4):318~321
- 8 王振平,付晓泰,卢双舫等.合采油井产量贡献液相色谱监测法[J].地球化学,2000,29(3):297~301
- 9 邹宇峥,蔡元明,马亭等.如何消除应用于合采井原油产量分配计算的气相色谱指纹技术存在的缺陷[J].石油实验地质,2001,23(2):213~220
- 10 Hagan M T.神经网络设计[M].戴葵译.西安:西安电子科技大学出版社,2002.197~255

## A STUDY AND APPLICATION TO ARITHMETIC OF PRODUCTION ALLOCATION OF MULTILAYER COMMINGLED PRODUCTION

Wang Yuewen<sup>1</sup>, Lu Shuangfang<sup>1</sup>, Fang Wei<sup>2</sup>, Zhang Juhe<sup>2</sup>, Huang Xiuping<sup>3</sup>

(1. Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Daqing Petroleum Research Institute, Daqing, Heilongjiang 163712, China;

3. Daqing Oilfield No. 6 Oil Production Company, Daqing, Heilongjiang 163110, China)

**Abstract:** Aim at the localization of the technique of gas chromatographic fingerprint, which is difficult of being applied to commingled production of three and more layers oil. The authors study and application an arithmetic of artificial nerve network. It has higher precision, and it is nonlinear and applicable to commingled production of more than three layers. Applying this arithmetic, through the analysis of whole hydrocarbon gas chromatographic fingerprint of crude oil in the laboratory, and pick out some characteristic fingerprint which reflect the character of crude oil in single and commingled layer, Setting up characteristic fingerprint data base, and then analyzing and processing them with ANN arithmetic, finding the rules, then the authors apply the arithmetic to the Lamadian and the Saertu oil field. As a result, even to the problem of more than three layers, the results also have high accuracy, and are close to the MFE test results. The application of the arithmetic offers a economical and applied path to production allocation calculations of multilayer commingled production with the geochemistry means

**Key words:** artificial nerve network (ANN); chromatographic fingerprint; nonlinear; production allocation; commingled production

(continued from page 629)

100 larger than that of liquids. A supercritical fluid is easy to penetrate the media and can achieve selective separation on hydrocarbons. Moreover, supercritical fluid extraction can basically remove the harm of organic solvents to human and environment. Generally, the process of supercritical fluid extraction only take 10 to 60 minutes. An existing oil and gas area in a oil field was selected where research on supercritical fluid extraction was made. The result shows that fidelity of the extracted hydrocarbons is high. The comparison between supercritical fluid extraction and the other indicators in petroleum geochemical exploration is possible. Supercritical fluid extraction can supply oil and gas geochemical exploration with reliable information.

**Key words:** supercritical fluid; extraction; aromatic hydrocarbon; geochemical prospecting for oil and gas