

基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性 融合约简方法及其应用

刘涛平^① 刘宏杰*^② 娄兵^② 高新峰^②

(^①西安交通大学机械工程学院,陕西西安 710049;

^②中国石油新疆分公司勘探开发研究院地球物理研究所,新疆乌鲁木齐 830013)

刘涛平,刘宏杰,娄兵,高新峰. 基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法及其应用. 石油地球物理勘探,2016,51(4):774-781.

摘要 石油地震勘探中主要采用地震属性进行油气预测,但需针对不同预测对象从众多地震属性中优选敏感属性、剔除冗余属性,以确保预测结果的准确性。为此,在充分研讨粗糙集理论和极化矩阵的基础上,提出一种基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法。通过稀疏极化矩阵组合计算,找到所有的地震属性融合约简;同时还从理论上证明了粗糙极化稀疏矩阵地震属性融合约简方法的可行性。仿真试验和实际资料应用的结果表明:该方法简单、便捷;对地震属性约简处理后,不仅可降低预测的多解性,提高预测精度,而且还可提高预测处理的效率和综合应用效果。

关键词 粗糙集 极化矩阵 地震属性融合 属性约简 油气预测

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.04.020

1 引言

随着油气勘探、开发难度的加大,岩性油气藏、隐蔽油气藏等已成为油气勘探的主要对象。因此,需要不断地创新技术,从现有地震资料中最大限度地提取最佳信息进行储层含油气预测。近年来,地震属性^[1-4]在地层岩性解释、储层评价、构造解释、油藏特征描述及油藏流体检测等方面得到了广泛应用,并在油气勘探开发中起着越来越重要的作用。提取隐藏于地震资料中的有用信息,可提高储层有利区预测的准确度。然而由于地震属性种类的持续增加,导致储层油气预测结果的不确定性也在加剧。为此,如何从几十种甚至上百种地震属性中挑选出更有效信息,优化地震属性,即地震属性约简,从而减少含油气性预测结果的多解性,提高含油气预测的可靠性,已成为当今研究的热点问题。现今试用过的地震属性约简方法有许多种,如搜索法^[5]、K-L

变换法^[6]、聚类分析法^[7,8]、优化组合灰关联分析法^[9]、逐步判别分析法^[10]、支持向量机法^[11]、与粗糙集相结合的遗传算法和微粒群算法^[12]、主成分分析法^[13]、最小属性约简法^[14]、覆盖粗糙集方法^[15]等,且都取得了一定效果。虽然地震属性种类的增多促进了储层含油气预测技术的进步和发展,但由于地质结构的复杂性及各向异性等特征,使得含油气预测结果的误差常常较大,难以达到工程需要的误差范围要求。

粗糙集(Rough sets)理论^[16,17]是波兰数学家Pawlak于20世纪80年代初提出的数据分析的理论,由于该理论能分析和处理不精确、不协调和不完备信息,因此作为一种有效的知识获取工具受到人工智能研究者的青睐。当前,对粗糙集理论的研究主要集中在其数学性质、粗糙集模型的推广、有效算法及其应用等方面。粗糙集理论的核心之一是属性约简,不少学者研究了不同信息系统下的属性约简理论和方法^[18-20]。即在确定的形式背景下,在保持

* 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新疆油田勘探开发研究院地球物理研究所,830013。Email:lhjie@petrochina.com.cn
本文于2015年10月23日收到,最终修改稿于2016年6月17日收到。

本研究受国家自然科学基金青年科学基金项目(41504093)和河北省引进留学人员基金课题(C2012003038)联合资助。

属性集的分类能力不变的前提下,使参与知识表达的属性相对较少,从而使系统知识的表达更简单。本文描述的地震属性“约简”即为地震属性“优化”,尽管国内外众多专家对其关注,且在地震属性约简理论研究方面已取得较大进展,但鲜见推出属性约简的具体实现方法,因此这方面有待深入研究。文献[14]讨论的是最小地震属性约简,而不是最佳地震属性融合约简;同时文献[15]给出的约简方法的计算效率也有待提高。

为此,根据粗糙极化矩阵^[14]的思路,本文提出基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法,计算出所有的融合约简,还从理论上证明了粗糙极化矩阵地震属性融合约简的可行性。本文方法机理简单,实现过程便捷。实际应用结果表明,该地震属性约简方法可有效提高油气预测精度。

2 粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法

以运动学和动力学为基础,地震属性可分为振幅、频率、相位、能量、波形、衰减、相关和比值等几大类型。通常,解释人员根据经验选取单一或组合地震属性做油气预测。但将可能出现:①丢失与实际目标层有关联的地震属性,导致预测精度降低;②使用无关联的地震属性,可能造成难以察觉的错误预测结果。为此,地震属性融合约简方法充分利用数学方法和解释人员的经验,约简得到对所预测目标最敏感、个数最少且最佳的地震属性融合,以提高属性预测精度。本文提出的利用粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法,通过极化稀疏矩阵组合计算,找到所有地震属性融合约简结果。

2.1 极化矩阵基本概念

设地震属性决策表为

$$S = \langle U, A, F, D, G \rangle \quad (1)$$

式中: $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 $x_i \in U (i \leq n)$ 为地震属性样本, n 为样本个数; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 其中 $a_j \in A (j \leq m)$ 为地震条件属性, m 为条件属性个数; F 为 U 与 A 的关系集; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$, 为地震决策属性; G 为 U 与 D 的关系集。

由上述地震属性决策表 S 可知,决策属性 D 将对象集 U 分成了 s 个类型,每个类型含有的样本数

分别用 n_1, n_2, \dots, n_s 表示,则总样本数 n 为 $\sum_{i=1}^s n_i$ 。

若地震属性决策表的极化矩阵^[14]表示为

$$M(a_k) = \begin{bmatrix} c_{11}^k & c_{12}^k & \cdots & c_{1s}^k \\ c_{21}^k & c_{22}^k & \cdots & c_{2s}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{s1}^k & c_{s2}^k & \cdots & c_{ss}^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

则满足:

(1) 当 $i=j$ 时, c_{ij}^k 为 0;

(2) 当 $i < j$ 时, c_{ij}^k 为 0;

(3) 当 $i \neq j, i, j \leq s$ 时

$$c_{ij}^k = \begin{cases} 1, & f_i^k(x_p) = f_j^k(x_q) \quad p \leq n_i, q \leq n_j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $f_i^k(x_j) (i \leq s, j \leq s, k \leq m)$ 表示第 i 个决策类中第 j 个地震属性样本的 k 个属性值。于是有

$$M(a_k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{21}^k & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{s1}^k & c_{s2}^k & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 稀疏极化矩阵概念

设在极化矩阵 $M(a_k)$ 中,若有 t 个非 0 元素,当 t 远远小于矩阵元素的总数,即 $t \ll i \times j$ 时,则称 $M(a_k)$ 为稀疏极化矩阵。

为了节省存储单元,提高运算效率,可只存储非零元素。由于非零元素的分布通常是无规律的,因此在存储非零元素的同时,还须存储非零元素所在的行号和列号,才能迅速确定一个非零元素是矩阵中的哪一个元素。

每一个非零元素所在的行号、列号和值所组成的一个三元组 (i, j, c_{ij}^k) 被称为稀疏极化矩阵三元组。如表 1 所示,将稀疏极化矩阵用三元组表示:稀疏极化矩阵 $M(a_1)$ 的三元组为 $(5, 4, 1)$; 稀疏极化矩阵 $M(a_2)$ 的三元组分别为 $(4, 1, 1)$ 、 $(4, 2, 1)$ 、 $(5, 1, 1)$ 、 $(5, 2, 1)$ 和 $(5, 4, 1)$; 还有 $M(a_3)$ 和 $M(a_4)$ 的三元组等。

表 1 通用决策表

U/A	a_1	a_2	a_3	a_4	D
x_1	1	0	2	1	0
x_2	2	0	2	1	0
x_3	1	1	2	1	0
x_4	0	0	1	2	1
x_5	0	0	2	2	2

2.3 稀疏极化矩阵的融合约简原理

设“*”表示稀疏极化矩阵之间对应元素相乘运算,则表2示意稀疏极化矩阵的乘法运算。利用表2的代数乘积,稀疏极化矩阵 $M(a_1)$ 与 $M(a_2)$ 相乘,即 $M(a_1) * M(a_2)$ 的结果为(5,4,1)。

表2 代数乘积运算

*	0	1
0	0	0
1	0	1

由地震属性决策表(式(1))可得完全稀疏极化矩阵

$$M(a_1) * M(a_2) * \dots * M(a_m) \quad (5)$$

令

$$DM(X) = \prod_{a_i \in X} M(a_i) \quad X \subseteq A, i \leq m \quad (6)$$

则完全稀疏极化矩阵可记作 $DM(A)$ 。

设 $M(a)$ 和 $M(b)$ 都是稀疏极化矩阵,则代数乘积运算 $M(a) * M(b) = M(b) * M(a)$ 成立,显然满足交换律。这可从稀疏极化矩阵间乘法的定义得到证明,即稀疏极化矩阵的乘法实质上是数的乘法,当然存在交换律。

定理1 根据式(1)设定的地震属性决策表 $S = \langle U, A, F, D, G \rangle$, $M(a_i)$ 表示属性 a_i 对应的稀疏极化矩阵,则完全稀疏极化矩阵为

$$DM(A) = \prod_{i=1}^m M(a_i) \quad (7)$$

该式表明:完全稀疏极化矩阵 $DM(A)$ 是 m 个稀疏极化矩阵 $M(a_i)$ 的乘积,其中 m 为条件属性个数。

证明:从稀疏极化矩阵间乘法的定义出发,完全稀疏极化 $DM(A)$ 等于稀疏极化矩阵 $M(a_i)$ 的数乘($i=1, \dots, m$),显然上式是成立的。

稀疏极化矩阵的意义在于,它包含了所有条件属性的分类信息,在实施约简时总是以完全稀疏极化矩阵作为标准。具体地,就是考虑去掉某个属性后的稀疏极化矩阵与完全稀疏极化矩阵比较是否发生了变化,从而确定该属性的取舍。

定义粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简:据已设定的地震属性决策表 $S = \langle U, A, F, D, G \rangle$, $B \subseteq A$,若同时满足 $DM(A) = DM(B)$ 且 $\forall B' \subset B, DM(B') \neq DM(B)$,则称 B 是 A 的约简。

定义粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简的核属性:设 $B_i \subseteq A (i \leq p)$ 为地震属性决策表

$S = \langle U, A, F, D, G \rangle$ 的 p 个约简,则称 $CORE(S) = \bigcap_{i=1}^p B_i$ 为地震属性决策表 S 的核属性。

定理2 据已设定的地震属性决策表 $S = \langle U, A, F, D, G \rangle$,在第1层分解过程中,若 $DM(A_{(i)}) \neq DM(A)$,则其对应的属性 a_i 便是核属性。即若分解后的稀疏极化矩阵 $DM(B_{(i)})$ 不等于完全稀疏极化矩阵 $DM(A)$,则 $DM(A_{(i)})$ 所对应的属性为核属性。

用反证法证明:假设 $\forall B \subseteq A$ 是最小约简,则有 $DM(A) = DM(B)$; 设 $a_i \notin B$, 因为 $A_{(i)} = A - \{a_i\}$, 所以 $B \subseteq A_{(i)}$; 但是 $DM(A_{(i)}) \neq DM(A)$, 这与 $DM(A) = DM(B)$ 矛盾; 因此假设不成立,结论得证。

2.4 约简算法

据已设定的地震属性决策表 $S = \langle U, A, F, D, G \rangle$ 、地震条件属性 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$ 、地震决策属性 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$, 求取稀疏极化矩阵 $M(a_i)$, ($1 \leq i \leq m$), 再求 S 的完全稀疏极化矩阵 $DM(A)$ 。

(1) 利用完全稀疏极化矩阵 $DM(A)$ 对属性集 B (B 初值等于 A) 进行约简。设 $B = \{a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_s}\}$, 其中 k_1, k_2, \dots, k_s 表示 B 中该属性在原属性集 A 中的序号,而下标 k_i 中的 i 表示该属性在属性集 B 中的序号。记 $D = \{i | a_{ki} \in B \wedge a_{ki} \notin C\}$, $1 \leq i \leq s$, C 为当前保留属性集(包括核属性,开始为空)。依据规则,从 B 中依次组合(去掉)非保留属性,即 $B_{(j)} = B - \{a_{k_j}\}$, $j \in D$; 构造集合 B_1, B_2, \dots, B_r , 其中 r 表示 D 中元素个数; 计算 $DM(B_{(1)}), DM(B_{(2)}), \dots, DM(B_{(r)})$ 。

(2) 对 $\forall B_{(i)}, DM(B_{(i)}) \neq DM(A)$ 均成立,则 B 即 $\{a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_s}\}$ 为 A 的约简。返回到(1)。

(3) 令 $C_1 = \phi$, 对所有满足 $DM(B_{(i)}) \neq DM(A)$, 令 $C_1 = C_1 \cup B - B_{(i)}$ 。

(4) 依次用满足 $DM(B_{(i)}) = DM(A)$ 的 $B_{(i)}$ 代替 B, C_1 代替 C , 转向步骤(1), 直到判断完所有的情况。

3 仿真试验与对比

3.1 仿真试验

以参考文献[21]中的气象信息决策表系统为例说明算法,如表3所示。该决策表有4个条件属性,分别为 $A_{\text{outlook}}(a_1)$ 、 $A_{\text{temperature}}(a_2)$ 、 $A_{\text{humidity}}(a_3)$ 和 $A_{\text{windy}}(a_4)$, 即 $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, 决策属性为 D 。令

决策属性 $D = \{d\}$ 被分为 P 和 N 两类。分别对 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 进行极化矩阵处理,得到稀疏极化矩阵 $M(a_1)$ 、 $M(a_2)$ 、 $M(a_3)$ 和 $M(a_4)$ 。通过本文方法,可得 $\{a_1, a_2, a_4\}$ 或 $\{a_1, a_3, a_4\}$ 为约简, $\{a_1, a_4\}$ 为核属性。

表 3 气象信息决策表

U/A	条件属性				决策属性 D
	a_1	a_2	a_3	a_4	
x_1	晴	热	高	错	N
x_2	晴	热	高	对	N
x_3	阴	热	高	错	P
x_4	雨	暖	高	错	P
x_5	雨	凉	正常	错	P
x_6	雨	凉	正常	对	N
x_7	阴	凉	正常	对	P
x_8	晴	暖	高	错	N
x_9	晴	凉	正常	错	P
x_{10}	雨	暖	正常	错	P
x_{11}	晴	暖	正常	对	P
x_{12}	阴	暖	高	对	P
x_{13}	阴	热	正常	错	P
x_{14}	雨	暖	高	对	N

3.2 实际区块应用对比

表 4^[15] 为优选的地震属性决策表。所提取的属性包括弧长(a_1)、瞬时频率(a_2)、瞬时相位(a_3)、瞬时振幅(a_4)、能量半衰时(a_5)、中值振幅(a_6)、均方根振幅(a_7)、能量半衰时的斜率(a_8)、瞬时频率的斜率(a_9)、总振幅(a_{10})和总能量(a_{11})等。编号 $x_1 \sim x_{100}$ 号为油、干井训练样本。 D 为决策属性集,其中 1 代表训练油井或待测油样本、2 代表训练干井或待测干样本。 $x_{21} \sim x_{100}$ 号为待测样本。

首先对表 4 离散化,然后再利用本文基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法对地震属性进行约简,约简出对预测目标所有的地震属性融合;再以这些属性为训练样本,通过基于粗糙极化稀疏矩阵地震属性融合约简的判别分析预测系统,对工区待测样本进行含油气预测,如图 1 所示。其目的是为了提高利用地震属性信息进行含油气预测的精度。

试验中使用的设备是: Intel (R) Xeon (R) CPU,内存为 16G,操作系统为 Windows 7,算法的编写使用 Matlab R 2010B。

表 4 优选的地震属性决策表

U/A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	D
x_1	6.56	20.66	58.67	106.89	64.74	-89.86	85.28	10725.47	295.16	-629	60227	1
x_2	11.30	29.11	-54.87	133.82	37.76	-94.00	95.26	14152.90	370.62	-658	73812	1
x_{20}	8.01	37.48	33.02	60.16	34.81	31.86	36.87	2788.35	-293.26	223	12563	2
x_{21}	6.50	19.13	58.70	95.00	67.05	-81.29	82.65	10137.82	707.84	-569	49967	1
x_{22}	6.34	20.42	14.53	93.30	60.76	-80.71	81.96	9950.28	256.27	-565	47577	1
x_{100}	8.00	37.27	38.44	56.69	31.49	28.86	37.15	2739.98	-99.09	202	11524	2

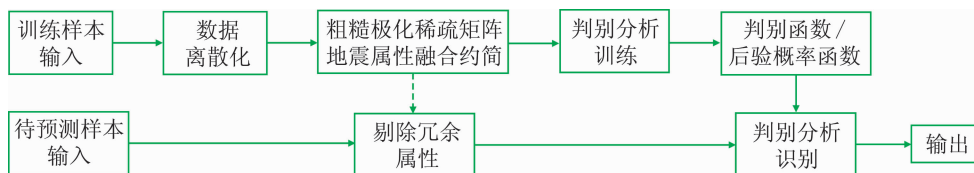


图 1 基于粗糙极化稀疏矩阵地震属性融合约简的判别分析预测系统

表 5 为 4 种约简方法计算时间对比。采用最小地震属性约简时,约简个数只有 1 个,计算时间为 0.00000s,预测正确个数为 63 个,识别正确率为 78.75%;采用主成分地震属性约简时,以 5 个主成分融合为例,约简计算时间为 0.000852s,预测正确个数为 73 个,识别正确率为 91.25%;采用覆盖粗

糙集地震属性约简时,约简计算时间为 10.918795s,预测正确个数为 76 个,识别正确率为 95.00%;采用基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简时,约简计算时间为 0.234000s,预测正确个数为 76 个,识别正确率为 95.00%。

试验结果表明,基于粗糙极化稀疏矩阵的地震

属性融合约简要比最小地震属性约简和主成分地震属性约简时间慢,但预测正确率要高;同时与覆盖粗糙集地震属性约简相比,预测正确个数相同,但约简

计算时间要快,因此在地震属性约简时,采用基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简是一种有效的方法。

表5 地震属性约简计算时间对比

方 法	约简后地震属性个数/个	地震属性约简计算时间/s	预测正确数 个	正确预测率 (%)
最小地震属性约简 ^[14]	1	0	63	78.75
主成分地震属性约简 ^[13]	5	0.000852	73	91.25
覆盖粗糙集地震属性约简 ^[15]	5	10.918795	76	95.00
基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简	5	0.234000	76	95.00

4 约简方法在油气储层预测中的应用

为了验证方法的可靠性和实用性,对准噶尔盆地M区块三维地震资料进行实际应用。研究区内主要勘探层系为侏罗系YY组,沉积相特征为三角洲前缘水下分流河道,已有研究展示该区多期河道呈叠置发育。目前已有探井N口,从已有井的情况分析可知,不同类型的井在该地区具有不同类型的电性和物性特征。从地震资料品质来看,地震响应特征较为清晰,地震反射结构较为丰富,侏罗系目的层段地震资料主频为30~35Hz。从地震剖面的连井对比来看,储层的地震反射特征均表现出中强振幅特征,沉积相为水下分流河道砂体,剖面特征与储层特征对应关系较好。

地震资料的属性分析得知,砂层的地震属性较为一致,表明该区属性受厚度影响较小。在地震属性提取过程中,考虑到研究区储层厚度较薄,在侏罗系ZZ组单层厚度范围是10~30m,砂岩与泥岩交互发育,有利储层砂岩主要集中在YY组底部。同时,YY组底界的下伏地层为大套稳定发育的泥岩,与上伏砂砾岩地层构成一个稳定的波阻抗界面,在

地震剖面上显示为连续的能量均衡的反射同相轴。因此,为消除或减少目的层厚度对地震属性的影响,本次研究以YY组底界的反射同相轴为基础,向上开出30~40ms时窗,在该时窗内延地层切片提取地震属性。通过连井对比分析可以看出,一个时窗内的有效砂体较为单一,所提取的属性主要反映单个砂体的平面属性,较好地消除了研究区储层厚度对地震属性的影响。

表6为M区地震属性决策表,所提取的属性包括弧长(a_1)、平均能量(a_2)、最大绝对振幅(a_3)、瞬时频率(a_4)、瞬时相位(a_5)、最大波峰振幅(a_6)和均方根振幅(a_7)等。编号 $x_1 \sim x_5$ 为训练样本。 D 为决策属性集,其中1代表训练油层或待测油层样本、2代表训练水层或待测水层样本、3代表训练干层或待测干层样本。 $x_6 \sim x_{13}$ 为对应的待测样本。

试验结果如表7所示。当最小约简结果为 $\{a_5\}$ 单个属性时,预测正确个数为2,识别正确率为25%;当约简结果为 $\{a_4, a_7\}$ 两个属性时,预测正确个数为4,识别正确率为50%;当约简结果为 $\{a_1, a_4, a_6\}$ 3个属性时,预测正确个数为6,识别正确率为75%;当约简结果为 $\{a_1, a_2, a_4, a_6\}$ 或 $\{a_1, a_3, a_4, a_6\}$ 4个属性时,预测正确个数为6,识别正确率为

表6 M区块实际地震属性决策表

U/A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	D
x_1	10.060	2309.040	34.340	32.670	36.650	47.510	47.500	1
x_2	12.870	5600.000	65.320	44.210	104.69	54.880	72.350	2
				⋮				
x_5	10.800	2792.530	46.420	34.860	142.92	39.610	52.470	3
x_6	11.500	2450.000	36.550	33.550	45.750	48.630	46.320	1
x_7	15.390	6650.690	70.820	43.220	110.81	66.450	81.660	2
				⋮				
x_{13}	18.720	9685.000	89.570	42.680	-168.5	96.340	98.770	3

75%；当约简结果为 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_6\}$ 或 $\{a_1, a_2, a_4, a_6, a_7\}$ 5 个属性时,预测正确个数为 6,识别正确率为 75%；当约简结果为 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_6, a_7\}$ 6 个属性时,预测正确个数为 5,识别正确率约为 63%；当约简结果为 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$ 7 个属性(约简前或不约简)时,预测正确个数为 2,识别正确率为 25%。

表 7 地震属性约简前后预测对比

方法	约简前 地震属性 个数/个	约简后 地震属性 个数/个	预测 正确 个数/个	正确 预测率 (%)
基于粗糙极化 稀疏矩阵的地 震属性融合约 简方法	7	1	2	25
	7	2	4	50
	7	3	6	75
	7	4	6	75
	7	5	6	75
	7	6	5	63
约简前	7	7	2	25

试验结果表明:随着约简后地震属性个数的增加,其识别正确率也在增加;当增加到 3、4、5 个地震属性融合个数时,其识别正确率不变;但当增加到 6 个地震属性融合个数时,其识别正确率减小;当约简属性个数为 7(约简前)时,其识别正确率下降较大,如图 2 所示。

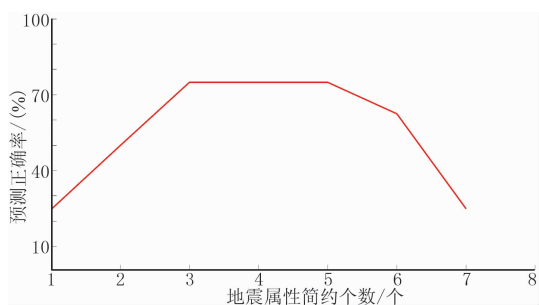


图 2 约简后地震属性个数与预测正确率的关系

经过试验并依据解释人员经验,选取结果 $\{a_1, a_4, a_6\}$ 为最佳地震属性融合,其预测正确率高于单个属性和两个属性融合的预测正确率,同时,约简结果个数为 3~5 个属性融合,其预测正确率高于 6 个和 7 个属性融合的预测正确率。图 3~图 5 分别为弧长(a_1)、瞬时频率(a_4)和最大波峰振幅(a_6)属性平面图。图中训练样本包括: eO1 为油样本、eW1 为水样本、eW2 为水样本、eD1 为干样本和 eD2 为干样本,这些样本分别对应着表 6 中的编号 $x_1 \sim$

x_5 。待测样本包括: tO1 为油样本、tW1 为水样本、tW2 为水样本、tW1 为干样本、tD2 为干样本、tD3 为干样本、tD4 为干样本和 tD5 为干样本,这些样本分别对应表 6 中的编号 $x_6 \sim x_{13}$ 。

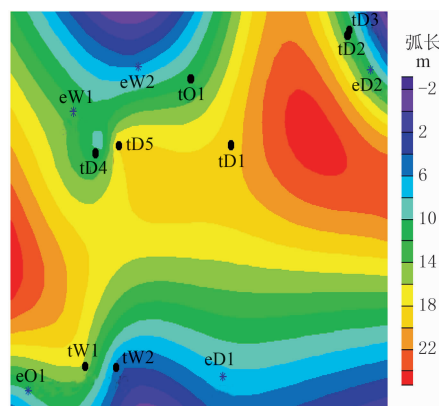


图 3 弧长(a_1)属性

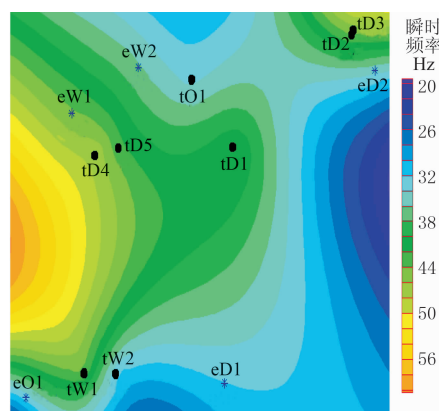


图 4 瞬时频率(a_4)属性

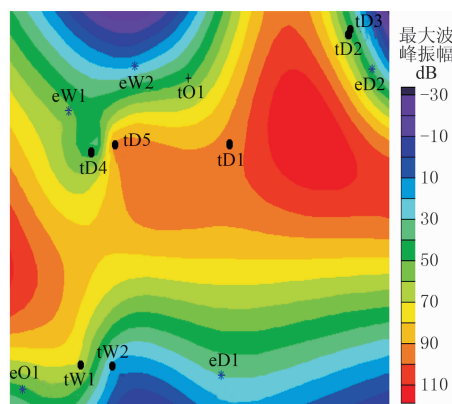


图 5 最大波峰振幅(a_6)属性

由表 8 可知,试验结果与试油结果相比,约简前识别正确率为 $2/8 = 25\%$ 。其中:编号 tW2 应为水层,被识别成油层;编号 tD1 应为干层,被识别成油层;编号 tD2 应为干层,被识别成油层;编号 tD3

应为干层,被识别成油层;编号 tD4 应为干层,被识别成水层;编号 tD5 应为干层,被识别成油层。约简后识别正确率为 $6/8=75\%$ 。其中:编号 tD2 应为干层,被识别成水层;编号 tD3 应为干层,被识别成水层。图 6 和图 7 分别为约简前 $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$ 和约简后 $\{a_1, a_4, a_6\}$ 的地震属性预测成果图,图中蓝色标记为训练样本,黑色(预测正确)和红色(预测出错)标记为测试样本。

色(预测出错)标记为测试样本。

试验结果表明,在实际应用中,并非用到的地震属性越多,预测效果就越好;同时,也并非单属性或最小属性预测效果好,由于计算误差等影响,冗余地震属性反而会使预测的准确率降低。

5 结论与展望

本文提出的基于粗糙极化稀疏矩阵的地震属性融合约简方法,能计算出所有的融合约简结果。试验表明并非单属性、最小属性或多属性约简就是最合适的地震属性融合,解释人员要关联、模拟和了解地震属性,并了解它们的作用,再根据经验从所有的地震属性约简结果中找到最适合的地震属性融合。本方法从众多地震属性中挑选出与研究目标关系最密切,反映敏感,再通过经验找出最合适目标层的地震属性,减少了信息的重复和冗余,大大降低了成本,并且提高了预测精度,为进一步研究与应用地震属性约简方法具有指导意义。同时解释人员要避免滥用或使用存在缺陷的地震属性,草率地将地震属性和地下真实情况相联系,并且要避免过分强调单属性与目标的过度匹配。

如何从所有的约简结果中根据智能方法找出最适合的地震属性仍然是今后需进一步研究的方向。此外,还可将本方法与微粒群算法或遗传算法相结合,通过对适应值的评价进一步提高本方法的处理效率。

参考文献

- [1] Eastwood J. Introduction — The attribute explosion. *The Leading Edge*, 2002, 21(10): 994-995.
- [2] Satinder C, Kurt J M. Emerging and future trends in seismic attributes. *The Leading Edge*, 2008, 27(3): 298-318.
- [3] 姚威, 吴冲龙, 史原鹏等. 利用地震属性融合技术研究洪浩尔舒特凹陷下白垩统沉积相特征. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(4): 634-642.
Yao Wei, Wu Chonglong, Shi Yuanpeng et al. Sedimentary characteristics research on lower Cretaceous in Honghaoershute Depression using seismic multi-attribute fusion. *OGP*, 2013, 48(4): 634-642.
- [4] 韩红涛, 贾敬, 李慧琳等. 应用 GeoEast 解释系统中的地震属性技术预测生物礁滩. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(增刊 1): 160-163.
Han Hongtao, Jia Jing, Li Huilin et al. Organic reef and bank prediction with seismic attribute approaches provided by GeoEast. *OGP*, 2014, 49(S1): 160-163.

表 8 约简前后层位识别结果

编号	试油结论	约简前(不约简)	约简后
		$\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$	$\{a_1, a_4, a_6\}$
		符合情况	符合情况
tO1	油层	符合	符合
tW1	水层	符合	符合
tW2	水层	不符合	符合
tD1	干层	不符合	符合
tD2	干层	不符合	不符合
tD3	干层	不符合	不符合
tD4	干层	不符合	符合
tD5	干层	不符合	符合

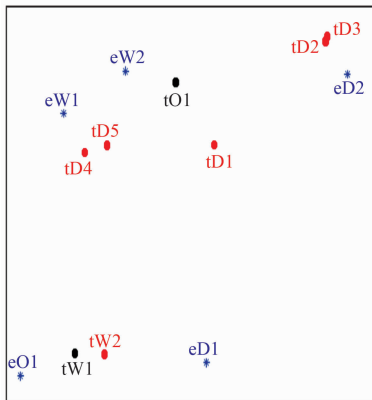


图 6 约简前的地震属性预测成果图

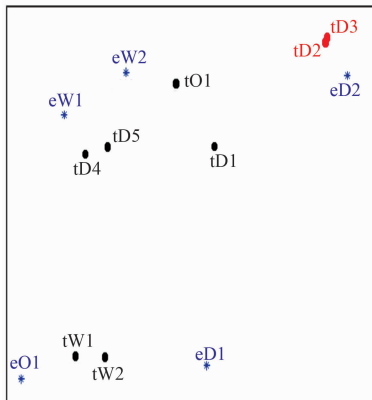


图 7 约简后 $\{a_1, a_4, a_6\}$ 的地震属性预测成果图

- [5] 印兴耀,周静毅. 地震属性优化方法综述. 石油地球物理勘探,2005,40(4):482-489.
Yin Xingyao, Zhou Jingyi. Summary of optimum methods of seismic attributes. OGP, 2005, 40(4): 482-489.
- [6] 王晓阳,桂志先,高刚等. K-L 变换地震属性优化及其在储层预测中的应用. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008,30(3):96-98.
Wang Xiaoyang, Gui Zhixian, Gao Gang et al. Seismic attribute optimization and its application in reservoir prediction by using K-L transform. Journal of Oil and Gas Technology (JJPI), 2008, 30(3): 96-98.
- [7] 王永刚,乐友喜,张军华. 地震属性分析技术. 山东东营:中国石油大学出版社,2007.
- [8] 丁峰,尹成,徐峰等. 一种基于灵敏属性分析的相关聚类属性优化方法. 石油地球物理勘探, 2008, 43(5):568-572.
Ding Feng, Yin Cheng, Xu Feng et al. An optimizing method of correlative cluster attribute based on sensitive attribute analysis. OGP, 2008, 43(5):568-572.
- [9] 宋维琪,刘江华,王小马等. 预测油气的地震属性优化组合、灰关联分析技术. 石油勘探与开发, 2002, 29(5):34-36.
Song Weiqi, Liu Jianghua, Wang Xiaoma et al. Applying optimum combination of seismic attribute and gray correlation analysis technology to the prediction of oil and gas reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5):34-36.
- [10] 刘宏杰,冯博琴,李文捷等. 粗糙集属性约简判别分析方法及其应用. 西安交通大学报, 2007, 41(8):939-943.
Liu Hongjie, Feng Boqin, Li Wenjie et al. Discrimination method of rough set attribute reduction and its applications. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(8):939-943.
- [11] 李艳芳,程建远,王成. 基于支持向量机的地震属性优选及煤层气预测. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6):75-78.
Li Yanfang, Cheng Jianyuan, Wang Cheng. Seismic attribute optimization based on support vector machine and coalbed methane prediction. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(6):75-78.
- [12] Liu H J, Feng B Q, Wei J J. The method of the least reduction in oil reservoir based on rough set particle swarm. Information Technology Journal, 2007, 6(6): 865-871.
- [13] Liu H J, Lou B, Liu T P et al. Seismic attribute reduction method and its application. Information Technology Journal, 2014, 6(6):2326-2333.
- [14] Liu H J, Feng B Q, Li W. An approach to minimum attribute reduction. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, Shandong, China, 2008, 1589-1593.
- [15] 刘宏杰,娄兵,刘涛平等. 基于覆盖粗糙集的地震属性约简及其应用. 石油地球物理勘探, 2012, 47(5):740-746.
Liu Hongjie, Lou Bing, Liu Taoping et al. Seismic attribute reduction based on covering rough set and its applications. OGP, 2012, 47(5):740-746.
- [16] Pawlak Z. Rough sets. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5):341-356.
- [17] Pawlak Z. Rough Sets; Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
- [18] 马希鹭,王国胤,于洪. 决策域分布保持的启发式属性约简方法. 软件学报, 2014, 25(8):1761-1780.
Ma Xi'ao, Wang Guoyin, Yu Hong. Heuristic method to attribute reduction for decision region distribution preservation. Journal of Software, 2014, 25(8):1761-1780.
- [19] Zhao S Y, Eric C C T. On fuzzy approximation operators in attribute reduction with fuzzy rough sets. Information Sciences, 2008, 178(16):3163-3176.
- [20] 陈昊,杨俊安,庄镇泉. 变精度粗糙集的属性核和最小属性约简算法. 计算机学报, 2012, 35(5):1011-1017.
Chen Hao, Yang Jun'an, Zhuang Zhenquan. The core of attributes and minimal attributes reduction in variable precision rough set. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(5):1011-1017.
- [21] 王国胤. Rough 集理论与知识获取. 陕西西安:西安交通大学出版社, 2001.

(本文编辑:朱汉东)

作者简介



刘涛平 硕士,1991年生;2013年本科毕业于中南大学机械设计制造及自动化专业;2016年毕业于西安交通大学机械工程学院,获机械制造及自动化专业硕士学位;学习和研究领域涉及人工智能、机器学习、模式识别、统计分析与地震属性约简等。