

文章编号:1673-5005(2007)04-0144-05

基于证据理论的信息融合储层损害诊断技术研究

王江萍

(西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要:在分析了储层损害多源信息的特征后,构造了基于决策层融合与证据理论、针对储层损害诊断识别的信息融合数学模型,给出了决策层融合的实现算法。通过对储层水敏损害程度的诊断识别,融合模型从多方面将反映储层损害类型的多源信息进行综合分析和决策融合处理,系统地对储层损害类型进行了识别和特征判断,有效地提高了储层损害诊断的准确性和可靠性。

关键词:储层损害; 诊断和保护; 信息融合; 证据理论

中图分类号:TE 353.3 **文献标识码:**A

Information fusion technology for formation damage diagnosis based on evidence theory

WANG Jiang-ping

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: A mathematical merge model based on decision level data fusion and evidence theory was developed for formation damage diagnosis by analyzing the features of multiple source information of formation damages. The concrete algorithm of the data fusion in decision level was presented. By analyzing and diagnosing the water sensitivity of a reservoir, the reservoir information from multi-sources which reflects the formation damage types was processed comprehensively by the model, and the formation damage types were judged systemically. The accuracy and reliability of formation damage diagnosis can be effectively improved.

Key words: formation damage; diagnosis and protection; information fusion; evidence theory

储层损害诊断和保护技术的应用决策已成为油气藏勘探、开发领域一个十分重要的研究课题。多年来,由于储层及其损害信息的多源性和不确定性,使得该课题的研究始终未能取得突破性进展。近年来,虽然许多研究者试图通过建立油气层保护信息资料库、使用室内和矿场评价资料及应用计算机技术建立预测储层敏感性来判别储层堵塞、损害类型和损害程度^[1,2],然而由于研究对象的复杂性、储层信息和数据的多源性及其相对严重的不确定性,其应用效果仍不够理想。为此,笔者采用信息融合理论探索和研究储层保护技术。综合储层损害的众多确定性因素及不确定性因素,结合室内评价与矿场测试资料,应用信息融合技术与不确定性决策理论构建储层损害识别、

诊断、评价和预测信息融合模型,为有效地利用储层多源信息,及时、准确和系统地保护储层提供一种新的方法。

1 决策层信息融合基本概念

图1说明了决策层融合的基本概念。来自不同信源的各种不同类型信息描述同一个目标或状态,每个信源信息各自完成变换和处理,其中包括预处理、特征提取、识别或判决,以建立对所监测目标或状态的初步结论。而后通过关联处理、决策层融合判决,最终获得联合推断结果。决策层融合输出是一个联合决策结果,在理论上这个联合决策比任何单一信息决策更精确或更明确。决策层融合所采用

收稿日期:2006-12-05

基金项目:国家自然科学基金(50274059)和中石油青年创新基金(2002F70123)

作者简介:王江萍(1959-),女(汉族),陕西西安人,教授,硕士,从事状态监测与故障诊断、信息融合理论与模式识别技术研究。

的主要方法^[3,4]有 Bayesian 推理、Dempster-Shafer 证据理论、模糊集合理论、专家系统等,其中 Dempster-Shafer 证据理论由于在处理不确定性问题方面具有独特优势,所以它应用最广泛。作为 Bayesian 推理的延伸,Dempster-Shafer 证据理论无须预先知道有关先验概率和条件概率的确切数据,即可进行证据融合,用信任测度与似然测度刻画不确定性,由确定性和可能性区分不确定与不知道。在建立命题和集合间一一对应关系的基础上,将命题的不确定性问题的不确定性问题转化成集合的不确定性问题进行处理。

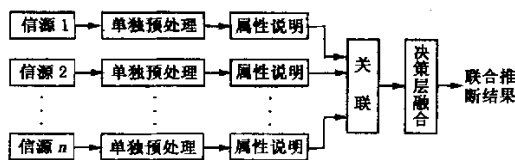


图1 决策层信息融合基本概念

2 数学模型

在储层损害诊断数据融合系统中,用于决策的信息来自于室内岩心评价的许多不同的分析技术和矿场测试评价的各种方法,如各种显微镜、射线衍射数据分析、射线扫描、核磁共振技术、能谱技术、流体研究和随钻测井技术以及井下电视观测技术等,这些技术、方法所提供的数据包含了实时和非实时两类数据信息,它们一般是不完整、不精确、模糊的,甚至是相互矛盾的。储层损害诊断数据的上述特征,增加了储层损害数据融合诊断的难度。通常用于储层损害类型识别的知识源很多,如储层孔隙压力、地应力、地层塌陷和破裂压力,储层岩石矿物的组成结构、储层敏感性参数、孔喉特征参数、孔渗特性参数和储层流体性能参数等,这些知识源构成了储层类型识别的样本空间 S_0 ,不同的储层评价技术在自己特定级别上提供了关于储层类型识别的信息,它包含于 S_0 ,即为 S_0 的子集。一般说来,由上述知识源到目标类型的映射所得到的结果往往是一个目标类型集合,因此,不同评价技术是在不同层次上提供信息,即各种评价技术提供的信息具有层次化的特征。

令 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 表示由储层损害所有可能类型组成的集合,称为论域,则第 k 种评价技术提供的目标类型信息是 U 的一个层次,称为一个命题,表示为 $U_k = \{u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{k_j}, \dots, u_{k_n}\}$,其中对于任意 $j = 1, 2, \dots, n, u_{kj} \subset U$ 是第 k 种评价技术所提供的第 j 个特征参数对目标类型的属性信息描述。由于不同评价技术提供的信息具有不同的不确定程

度,可用一个二元组 (U_k, m) 来描述第 k 种评价技术提供的关于类型识别的决策信息,其中 m 是对 U_k 的确信程度,它是一种概率测度,称为基本概率分配^[5,6],是满足 $m(\emptyset) = 0, \sum_{U_k \subseteq U} m(U_k) = 1$ 的映射 $m: U_k \rightarrow [0, 1]$,其中 $\emptyset$ 表示空集。

对假设命题 U_k 的支持程度及可能性,分别定义为信任测度 $Bel(U_k)$ 和似然测度 $Pl(U_k)$,设 $\forall U_k \subseteq U$,则

$$Bel(U_k) = \sum_{D \subseteq U_k} m(D), \quad (1)$$

$$Pl(U_k) = \sum_{U_k \cap D \neq \emptyset} m(D). \quad (2)$$

假设两种评价技术提供类型识别的信息证据 S_{a1} 和 S_{a2} 关于某一假设命题 U_k 的基本概率分配分别为 m_1 和 m_2 ,利用 Dempster-Shafer 证据合成规则^[5] 可将其融合为新的基本概率分配 m ,即

$$m(U_k) = m_1 \oplus m_2 = \frac{1}{N} \sum_{A_i \cap B_j = U_k} m_1(A_i) m_2(B_j). \quad (3)$$

式中正则常数

$$k = \frac{1}{N} = \frac{1}{\sum_{A_i \cap B_j \neq \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)} > 0.$$

基本概率分配 $m(U_k)$ 表示对命题 U_k 的精确信任程度;似然测度 $Pl(U_k)$ 反映可能性,它是概率上限函数;信任测度 $Bel(U_k)$ 反映必然性,它是概率下限函数。由式(2),(3)得到 $Pl(U_k) \geq Bel(U_k)$,称 $[Bel(U_k), Pl(U_k)]$ 为 U_k 的置信区间,因此置信区间就描述了命题 U_k 的不确定性。

式(1)~(3)给出了数据的综合模型,它们实际上是储层评价域上的空间信息融合模型,在数据融合时,首先在各层次上使各个评价技术当前的决策信息与其历史累积信息进行融合,以得到当前各评价技术的累积信息,然后再在整个储层评价域上对各个评价技术的累积信息进行空间融合,以得到总的累积融合信息,以此作为储层损害诊断和智能决策的依据,实现对储层的有效诊断。

3 基于 Dempster-Shafer 证据理论的决策层信息融合的实现

决策层信息融合的具体实现包括三大步骤:

(1) 多源信息的有效性确定。借助一定的方法判断某一或某些信源信息是否可靠,在此基础上寻找误差小于某一阈值的所有信源,将其作为信源融合链。

(2) 基本概率分配的确定。根据证据体特征信

息,对识别框架中每一子集进行基本概率分配赋值。

(3) 信息融合与决策。依照 Dempster-Shafer 合成规则,融合信源融合链中的所有信息,完成对目标状态类型的识别与决策判断。

具体的实现过程见图 2。

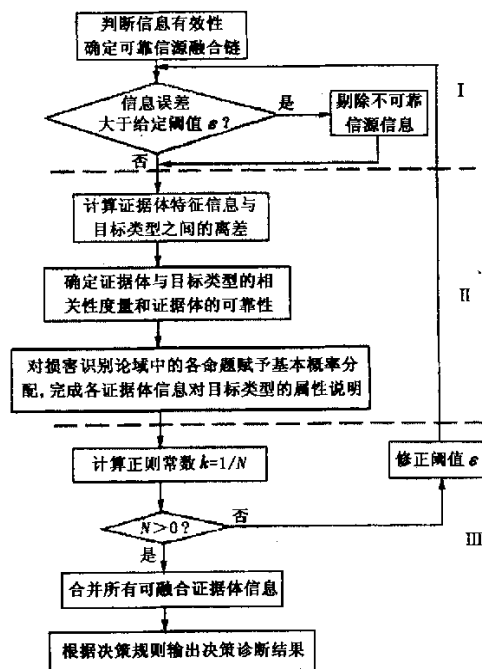


图 2 决策层信息融合算法框图

如何通过监测信息的特征度量对所有的命题赋予一个可信度,Dempster-Shafer 证据理论中没有具体的描述,即没有给出对命题的基本概率分配赋值

表 1 苏里格气田上古石盒子组储层岩心水敏实验评价结果

井号	岩心号	深度 h/m	层位	孔隙度 φ/%	气体渗透率 $k_g/10^{-3} \mu\text{m}^2$	地层水渗透率 $k_w/10^{-3} \mu\text{m}^2$	纯水伤害率 η/%	水敏 程度
苏 22-15	7	3301.38	P ₁₋₂ sh	17.57	0.961	0.2957	69.83	中偏强
苏 22-15	4	3300.91	P ₁₋₂ sh	19.73	2.99	1.0156	71.64	强
苏 40-16	19	3290.83	P ₁₋₂ sh	8.60	0.335	0.0519	70.13	强
苏 22	27	3521.91	P ₁₋₂ sh	11.42	0.364	0.0138	80.58	强
苏 38-14	40	3305.49	P ₁₋₂ sh	7.79	0.8022	0.0396	96.72	极强
苏 22-15	11	3300.49	P ₁₋₂ sh	14.81	1.548	0.543	69.43	待检
苏 22-15	9	3301.49	P ₁₋₂ sh	18.71	1.474	0.544	77.57	待检
苏 35-15	28	3318.00	P ₁₋₂ sh	10.03	0.72	0.0656	92.53	待检

选择孔隙度、气体渗透率和地层水渗透率 3 个参数为基本特征数据证据体,以纯水伤害率作为检验参考特征。对 3 个待检岩心预处理,诊断系统按融合算法(图 2)中模块 I 和 II,对水敏伤害评价信息进行分析,计算出 3 个基本特征参数对水敏伤害类型的属性信息,见表 2;然后按证据体信息基本概率分配函数式(4)和(5)、Dempster-Shafer 证据合成公

的一般函数形式。因此,作为一个证据体的信源信息,要使它所获得的信息(或证据)能和其他的证据体进行融合,关键是根据所获得的证据构造一个基本概率分配函数,这需要具体问题具体分析,以给出其具体形式,但它必须满足条件: $\sum_i m_i(A_i) = 1$ 。

本研究构造的证据体 S_{ai} 赋予待判断目标 A_j 及识别框架 U 的基本概率分配,即信源的不确定性概率值的函数形式为

$$m_i(A_j) = \frac{w_i C_i(A_j)}{\sum_j w_i C_i(A_j) + N_i(1 - R_i)(1 - \alpha_i \beta_i)}, \quad (4)$$

$$m_i(\theta) = \frac{N_i(1 - R_i)(1 - \alpha_i \beta_i)}{\sum_j w_i C_i(A_j) + N_i(1 - R_i)(1 - \alpha_i \beta_i)} \quad (5)$$

式中, N_i 为信源数目; w_i 为加权系数,根据相关系数 $C_i(A_j)$ 取值,且 $0 < w_i < 1$; R_i 为证据体 S_{ai} 的可靠系数; α_i 为证据体 S_{ai} 与目标的最大相关性; β_i 为证据体 S_{ai} 与各目标相关系数的分布系数。

式(4)和(5)既满足基本概率分配函数的定义条件,又能达到对储层损害正确诊断与评价的要求。

4 实例分析

长庆苏里格气田水敏实验的评价结果如表 1 所示^[7]。由于篇幅所限,表中仅列出 5 块岩心的测试结果,其呈现出 3 种水敏伤害类型,即中偏强、强和极强;选择 3 块岩心作为诊断检验样本。

式(3),配合一定的加权系数进行信息融合,其结果如表 2 中各待检样本最后一行所示。加权系数的大小是根据特征参数结构、以及待检样本与目标类型离差的大小自动调整的。最后系统按置信度最大法则输出诊断结果,即样本苏 22-15(岩心 11)、苏 22-15(岩心 9)和苏 35-15(岩心 28)所代表的储层的水敏伤害分别为中偏强、强和极强,与实验结果吻

合;3 块岩心的不确定性分别为 0.081,0.257 6 和 0.009 7,由此看出,第 2 个待检样本苏 22-15(岩心 9) 决策诊断出现较大不确定性。

表 2 水敏伤害属性信息与信息融合结果

井号 (岩心号)	特征参数与 融合信息	伤害类型与属性信息		
		中偏强	强	极强
苏 22-15 (岩心 11)	孔隙度	0.666 7	0.665 9	0.178 8
	气体渗透性	0.361 1	0.252 0	0.150 2
	地层水渗透性	0.361 1	0.256 1	0.671 2
	融合信息	0.724 7	0.146 3	0.000 9
苏 22-15 (岩心 9)	孔隙度	0.297 3	0.278 3	0.300 5
	气体渗透性	0.330 6	0.157 4	0.059 4
	地层水渗透性	0.744 7	0.720 1	0.601 1
	融合信息	0.137 9	0.323 2	0.016 1
苏 35-15 (岩心 9)	孔隙度	0.028 5	0.184 7	0.379 5
	气体渗透性	0.096 7	0.116 4	0.385 0
	地层水渗透性	0.657 8	0.621 4	0.668 3
	融合信息	0.007 8	0.012 3	0.926 1

同理,油气层的岩性分析和物性分析特征信息

可按类似的方法进行处理。对苏里格气田盒 8 段砂岩进行储层岩石学特征分析,储层骨架颗粒主要成分为石英、钾长石、方解石,而储层粘土矿物主要由伊利石、高岭石及绿泥石构成,两者含量和定量分析数据如表 3 所示^①。根据储层全岩矿物成分 X 衍射数据分析,诊断决策采用储层骨架颗粒石英、钾长石、方解石以及储层粘土矿物伊利石、高岭石及绿泥石共 7 个特征参数,计算结果见表 4(3 块岩心的不确定性从上到下依次为 0.145 3,0.757 5,0.050 9)。从表 4 看出,2 个待检样本苏 22-15(岩心 13) 和苏 35-15(岩心 37) 的诊断输出结果分别为水敏伤害中偏强和极强,但由于第 2 个待检样本苏 24-15(岩心 14) 计算出的不确定性远远大于其信任测度,无法判断储层的伤害类型,所以系统将调用融合规则,对储层岩心水敏实验评价和储层岩石全岩矿物成分 X 衍射分析数据进行融合处理,对储层的伤害类型给出最终的决策诊断,融合诊断结果见表 5。

表 3 苏里格盒 8 储层岩石全岩矿物成分 X 衍射分析数据

井号	岩心号	深度 h/m	矿物成分 ω/%							水敏 程度
			石英	钾长石	斜长石	方解石	伊利石	高岭石	绿泥石	
苏 22-15	15	3 302.62	91.59			1.47	3.72	2.2	6.94	中偏强
苏 22-15	17	3 302.93	91.29				5.11	1.29	8.25	强
苏 40-16	38	3 293.88	92.12	1.16		0.37	1.85	3.06	6.27	强
苏 22	60	3 527.98	80.23		0.92	1.93	1.18	3.4	11.9	强
苏 38-14	53	3 309.48	73.13	12.03		0.44	2.8	7.94	14.4	极强
苏 22-15	13	3 302.21	88.97			2.35	3.74	3.18	8.17	待检
苏 24-15	14	3 302.37	90.72				1.95	2.89	9.28	待检
苏 35-15	37	3 319.44	96.23	1.24		0.25	0.53	0.2	2.28	待检

表 4 岩石全岩矿物成分 X 衍射分析水敏伤害属性信息与信息融合结果

井号 (岩心号)	特征参数与 融合信息	伤害类型与属性信息			井号 (岩心号)	特征参数与 融合信息	伤害类型与属性信息		
		中偏强	强	极强			中偏强	强	极强
苏 22-15 (岩心 13)	石英	0.559 9	0.276 1	0.173 9	苏 24-15 (岩心 14)	伊利石	0.806 5	0.890 5	0.644 3
	钾长石	1.000 0	1.000 0	0.217 0		高岭石	0.653 2	0.812 3	0.796 8
	斜长石	1.000 0	0.783 7	1.000 0		绿泥石	0.828 5	0.867 3	0.397 6
	方解石	0.791 1	0.888 1	0.635 7		融合信息	0.045 0	0.105 6	0.005 3
	伊利石	0.935 5	0.954 2	0.580 4	苏 35-15 (岩心 37)	石英	0.418 1	0.172 4	0.126 1
	高岭石	0.994 0	0.565 6	0.780 0		钾长石	0.728 9	0.728 9	0.236 0
	绿泥石	0.772 8	0.938 1	0.411 9		斜长石	1.000 0	0.783 7	1.000 0
	融合信息	0.674 1	0.134 61	0.000 8		方解石	0.732 1	0.664 9	0.946 1
苏 24-15 (岩心 14)	石英	0.793 0	0.241 1	0.159 3		伊利石	0.862 8	0.959 7	0.612 4
	钾长石	1.000 0	1.000 0	0.217 0		高岭石	0.511 0	0.836 8	0.594 9
	斜长石	1.000 0	0.783 7	1.000 0		绿泥石	0.625 0	0.510 2	0.301 0
	方解石	0.694 0	0.633 3	0.883 4		融合信息	0.007 5	0.036 6	0.887 6

根据储层岩心水敏实验评价和储层岩石全岩矿物成分 X 衍射分析数据进行决策融合处理,给出的储层伤害类型最终决策结果不但正确,而且判断的信任测度提高了,不确定性下降了,尤其是第 2 个样本苏 24-15(岩心 14) 在储层岩心水敏实验评价基本正确、岩石全岩矿物成分 X 衍射分析评价无法做出决策判

① 王长宁,张宁生,杨呈德,等.苏里格低压渗气藏保护技术研究[R].大庆石油勘探局工程技术研究院,西安石油大学,2003.

断的情况下,通过决策层信息融合得到了正确的结果,信任测度从0.1056提高到0.3507,而不确定性从0.7575下降到0.2235,提高了储层损害诊断的准确性。

表5 岩心水敏实验评价与岩石全岩矿物成分X衍射分析数据融合结果

井号	样号	评价方法	水敏程度	信任测度	似然测度	不确定性	诊断结果
苏25-15	13	水敏实验	中偏强	0.7247	0.7328	0.081	中偏强
		X衍射	中偏强	0.6741	0.8195	0.1453	中偏强
		融合结果		0.8953	0.9115	0.0162	中偏强
苏22-15	14	水敏实验	强	0.3232	0.5808	0.2576	强
		X衍射	强	0.1056	0.8631	0.7575	不确定
		融合结果		0.3507	0.5742	0.2235	强
苏35-15	17	水敏实验	极强	0.9261	0.9358	0.0097	极强
		X衍射	极强	0.8876	0.9385	0.0509	极强
		融合结果		0.9932	0.9938	5.5977×10^{-4}	极强

5 结束语

储层损害类型诊断与保护问题是一个比一般模式识别更富挑战性的课题,而国内外信息融合高层部分的理论研究与系统建模研究较少,要给出一个可信度很高的模型非常困难。在分析了储层损害多源信息的特征后,就储层损害诊断多源信息融合方法进行了研究与分析,提出的基于决策层融合与证据理论的融合数学模型与处理框架针对储层损害诊断的实际情况,给出的决策层融合算法的具体实现合理,该模型以储层多源信息构成储层类型识别的样本空间,以储层损害所有可能类型构成目标类型论域,利用证据合理理论进行多层次空间信息融合,并以置信区间作为各类可能损害的不确定性度量,以此作为智能诊断和决策的依据。通过应用本融合系统对储层水敏损害程度的决策融合处理,从多方面将反映储层损害类型的多源信息,如孔隙度、气体渗透率和地层水渗透率及储层骨架颗粒石英、钾长石、方解石和储层粘土矿物伊利石、高岭石及绿泥石等进行综合处理与分析,系统地对储层损害类型进行了识别和特征判断,为准确判断储层损害成因和类型,指导储层保护技术及时、准确和系统地应用提供了一种新方法。

参考文献:

[1] 张绍槐,罗平亚. 保护储集层技术[M]. 北京:石油工

业出版社,1993.

- [2] 法鲁克 西维. 油层伤害——原理、模拟、评价和防治[M]. 杨凤丽,侯中昊,译. 北京:石油工业出版社,2003.
- [3] REN C Lou, MICHAEL G Kay. Multisensor integration and fusion in intelligent systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1989,19(5):901-931.
- [4] 郁文贤,雍少为,郭桂蓉. 多传感器信息融合技术述评[J]. 国防科技大学学报,1994,16(3):1-11.
YU Wen-xian, YONG Shao-wei, GUO Gui-rong. Comments on multisensor information fusion[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1994,16(3):1-11.
- [5] WANG Hong-fei, WANG Jiang-ping. Fault diagnosis theory: method and application based on multisensor data fusion[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2000,28(6):513-518.
- [6] 王江萍. 基于多传感器融合信息的故障诊断[J]. 机械科学与技术,2000,19(6):950-952.
WANG Jiang-ping. Fault diagnosis using multisensor fused information[J]. Mechanical Science and Technology, 2000,19(6):950-952.

(编辑 修荣荣)