

Research on Formation Damage Diagnosis During the Production

LIU Shuai (Oil & Gas Well Engineering)

Directed by Professor JIANG Guan-cheng

Abstract

Formation damage has significant influences during the production. Because of complex reasons it is difficult to diagnose the damage. Expert system, which can solve damage problems quickly, has been mainly used in drilling, but it can't solve the problem effectively, so it is urgent to develop a new technique for damage diagnosis during production. According to data analysis and research on mechanism of formation damage, sensitivity degree and fine particle migration, solid invasion, hydration expansion and scaling problem are focused on. Main influencing factors and their relationship with main damage type are found and models with expert system are set up for those damage problems. Also, fuzzy mathematics is used here and the new technique for formation damage diagnosis was propounded with the result from expert system model. Field application indicates that two methods are available for formation damage diagnosis. The damage type, reason and degree can be diagnosed effectively, and proportion of every damage type can be quantitatively obtained by integrating two models. The result is useful for proposing broken down and optimization measures, and it's also important to guide the field operation on production.

Key words : Formation damage, Diagnosis, Expert system, Fuzzy mathematics

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国石油大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名： 刘冲 2007 年 5 月 20 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国石油大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件及电子版，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

学生签名： 刘冲 2007 年 5 月 20 日

导师签名： 李守德 2007 年 5 月 20 日

第 1 章 前言

本章在大量文献调研的基础上，对油田开发过程中地层损害机理和影响因素、油气层损害研究方法和油气层损害专家系统研究状况进行了系统的总结和分析，指出了存在的问题，提出本文的研究内容和总体框架。

1.1 研究的目的和意义

开发过程中的地层损害对于油水井的正常生产、石油采收率的提高、开发生产成本的降低等有着重要的影响。近年来的实践证明，防止地层损害、保护油层是稳产、增产、实现少投入多产出、获得较好经济效益的重要措施之一。

由于地层损害的原因是复杂的，认识油气层损害需要多学科的知识。综合评价损害需要大量的室内实验，所以如何快速的认识、诊断、评价、处理以及预防地层损害是亟待研究的重要课题。在已经开发的地层损害专家系统中，国外对石油开采各个过程进行了研究^[1]。国内开发的专家系统主要是针对钻井过程^[2,3]；对注水和采油等开发过程的地层损害专家系统则研究较少。随着计算机信息科技的发展，早期的诊断与预测软件已经不能完全适应现在的需要，诊断技术的更新和完善不可避免。

为了促进油气层保护技术在油气田开采中的进一步发展和应用、满足技术攻关的需要，开展在开发过程中的油气层保护的理论和综合性的诊断系统的研制是十分有意义的。

本论文目的就是研制和建立针对开发过程中油气层损害诊断的集成系统。它将应用基于神经网络工具的专家系统诊断开发过程中储集层敏感性伤害，为油田注水工艺、采油工艺的设计和和实施提供依据；诊断微粒运移、固相入侵、水化膨胀、结垢等主要损害类型，与后续解堵技术

相结合，全面解决油气层损害问题。

1.2 开发过程中的油气层损害机理研究

建立开发过程中油气层保护专家系统首先需要对地层损害有深入的理解和认识，然后才能比较准确地归纳该领域专业知识和专家经验。本节将总结这一过程中地层损害的特征、类型和本论文涉及到的敏感性伤害和主要的几种损害类型的损害机理及影响因素。

1.2.1 开发过程中油气层损害的特点和特殊性

(1) 开发过程中的地层损害的概念

在油气田开发过程中，由于地层流体的采出、外来流体的注入以及外来流体与地层流体、储层岩石发生的物理化学作用，从而导致储层温度、压力、应力、油水分布不断变化，油藏状态将从一个状态向另一个状态转化。状态发生变化后，油藏的性质也将发生相应的变化，例如，油藏渗透能力和可开采能力，而这也是油藏工程师和采油工程师十分关注的问题。凡是能够引起储层有效渗透率降低的现象，都称为地层损害。相应地，在采油、注水、酸化、压裂、修井、蒸汽驱、化学驱等生产环节中有效渗透率的降低现象都属于开发过程地层损害^[4]。

(2) 开发过程中油气层损害的特点

开发生产过程中的油气层损害带来的直接危害是产量下降，甚至停产。

油田一旦投入开发生产，油层压力、温度及其储渗特性都在不断地发生变化。同时，各个作业环节带给油层的各类入井流体及固相颗粒也参与以上变化。

与钻井、完井过程的油气层损害相比，开发过程油气层损害的特点^[4]主要是：

① 损害周期长：钻井、完井作业时间短，而开发过程地层损害几乎

贯穿整个开发过程。

②损害范围宽：损害不仅发生在近井地带，而且涉及油层深部，主要是指注水过程。

③损害更具有复杂性：油藏类型不同，完井方式不一样，地层孔隙结构、物性参数不一样，先期损害程度各异，同时，开发作业设备多，流程长，工艺措施种类多而复杂，容易造成二次损害。

④损害更具叠加性：每一个作业环节产生的油气层损害都是在前一作业环节损害的基础上叠加进行的，加上开发过程作业频率高，所以，损害更具叠加性。

⑤损害更具动态性：在开发过程中，油藏温度、压力必然发生变化，从而波及到油藏岩石应力状态、油水分布状态的不断变化。同时，影响油藏储渗能力的因素比较多，在较长的开发过程中，地层损害将不断发生变化，使得开发过程地层损害更加复杂，预测难度更大。因此，应该重视油藏生产动态变化。

(3)开发过程油气层损害类型

开发过程油气层损害类型与钻井、完井过程的损害类型具有相似性，根本的原因在于，他们的内因是相似的，只是外因不尽相同。

地层损害分类标准不同，分类形式不一样。根据损害的类型，可以分为物理损害、化学损害和生物损害。根据物理化学机理分类，可以分为润湿性改变、渗流空间减小、渗流通道减少等，见表 1-1。根据生产环节可分为在采油、修井、注水、酸化、压裂、注蒸汽、碱驱、聚合物驱、表面活性剂驱、复合驱等生产环节中的损害，如表 1-2。

1.2.2 油气层损害的主要机理

开发过程中损害类型主要有：酸敏、水敏、外来颗粒侵入、细菌堵塞、微粒运移、无机沉淀、有机垢的析出、润湿性反转、乳化堵塞、脱

表 1-1 地层损害分类及原因

损害类型	损害表现形式	产生原因
润湿性改变	接触角变化	表面活性剂接触原油中沥青、石蜡析出沉积等
	相对渗透率变化	
渗流空间减小	孔隙液锁、气锁	流体浸入、气体脱出
	粘土水化膨胀	离子环境改变 孔隙流动速度不合理 结垢
	颗粒表面沉积	
	无机沉淀、有机沉淀	
渗流通道减少	孔隙内表面沉积及喉道堵塞	有机或无机微粒侵入 机械杂质侵入

气。由于开发过程损害类型复杂、众多，暂时不能全部考虑，本文主要考虑水敏、速敏、盐敏三种敏感性损害及微粒运移、固相入侵、水化膨胀、结垢四种主要的损害类型，下面阐述这七种损害类型的基本机理。

(1)水敏

①定义

水敏性是指与储层不配伍的外来流体进入储层后，引起粘土膨胀、分散、运移，从而导致渗透率下降的现象^[4]。水敏在开发过程比较常见，研究也比较深入，其实质是由于粘土矿物的特殊结构引起的储层渗透率的变化。

②水敏影响因素

水敏是在内因和外因作用下而发生的。内因包括粘土矿物的种类、粘土矿物的含量、分布、形态，储层的孔隙度、渗透率，外因主要包括外来流体的矿化度、矿化度改变速度，以及外来流体中阳离子类型等。粘土类型：对于不同的粘土矿物，其晶体结构不同，在发生晶格取代时，取代的位置，取代的数量不一样，以及平衡负电荷的无机阳离子不同，则他们的水化膨胀的程度和对储层水敏性的影响情况也有所不同。

例如，蒙脱石晶层之间只存在分子间引力，水分子很容易进入层间；

表 1-2 开发过程对油层损害情况简表

生产作业	损害原因	损害方式	预防、解堵措施
采油过程 (没有外来流体和固相微粒流入油层)	生产压差过大; 采油速度过高。	发生速敏, 出砂; 过早出水, 乳化堵塞结垢; 气体脱出, 产生两相流动导致渗透率下降。	控制生产压差; 保持压力采油; 控制采油速度一口堵塞, 解除方法有热洗, 酸洗, 现代物理方法(磁化, 震荡超声波)。
注水(注入水流入地层)	注入速度不当; 注入水与岩石及流体不配伍; 机杂, 含氧, 含菌, 矿化度, 含 Fe^{3+} 等注入水指标超标。	水敏损害; 速敏损害; 机杂堵塞; 细菌堵塞; 有机垢, 无机垢析出, 堵塞损害; 乳化堵塞。	控制注入水水质, 健全适合本地层的水质保障体系; 注入速度在临界流速之下; 选优良的添加剂(与地层配伍, 添加剂自身互相配伍)。
酸化(酸液流入地层)	酸与岩石不配伍; 酸与地层流体不配伍。	粘土膨胀; 岩石微粒脱落运移; 生成二次沉淀堵塞地层; 沥青质原油与酸反应生成酸渣, 堵塞地层, 生成化学沉淀堵塞地层。	选用优良的酸液, 添加剂; (与地层流体配伍); 使用前置液; 使用合理的酸浓度; 及时排残酸液。
压裂(压裂液, 支撑剂入井)	不良的压裂液, 支撑剂, 添加剂引起的损害; 冷却效应。	机杂堵塞 粘土膨胀; 原油乳化堵塞; 支撑剂导流能力损害; 沥青质, 蜡析出, 生成有机垢, 堵塞地层。	选用优良的压裂液; 选用合理的添加剂; 优选支撑剂。
修井	不合格的修井液; 排量过大或无控制放喷; 作业频繁。	乳化堵塞, 沉淀堵塞, 微生物堵塞; 速敏。	选用优质修井液; 选用合理的解堵, 除蜡剂; 优化施工设计。
注蒸汽(热蒸汽和凝析液入井到油气层)	不合理的注入速度; 高温水化学反应。	速敏损害, 微粒运移堵塞; 粘土膨胀; 导致油层松散, 垮塌; 生成硅盐, 凝胶状物质堵塞地层; 乳化堵塞。	控制注入速度; 控制注入蒸汽的 pH 值; 采取防砂措施; 提高蒸汽的干度; 加入适当的添加剂; 过滤、清除机杂。

并且由于其比面积大，阳离子交换量高，因而是典型的膨胀性粘土矿物，它的存在对储层水敏性影响最大。

粘土矿物含量：在其它因素相近的情况下，膨胀性粘土含量越高，则水敏性越强。

粘土矿物形态及分布位置：水敏性的强弱不仅与粘土矿物含量有关，而且与水敏性粘土矿物的形态和分布位置有关。如果水敏性粘土矿物处于与外来流体接触较少的位置，则水敏性较弱，如果水敏性粘土矿物处于与外来流体接触程度较多的位置，如位于喉道位置，对渗透率影响较大，则水敏性较强。有时水敏性矿物含量不多，却表现出强的水敏性，其原因就在于粘土分布在孔喉处，或以网状分布在孔穴，一旦膨胀，渗透能力就急剧下降。

油藏岩石的孔渗性质：一般地，在低渗、特低渗油藏中，孔喉尺寸较小，即使只存在少量的水敏性粘土矿物，也可能对储层渗透率造成较大的影响；在中高渗透率的油气藏中，少量水敏性粘土矿物的存在对渗透率的影响相对较小。

外来流体矿化度及其降低速度：当外来流体矿化度低于岩石临界矿化度时，由于存在渗透水化，导致粘土矿物急剧膨胀。并且，外来流体矿化度与地层水矿化度差异越大，则膨胀越严重，水敏性越强。

外来流体中阳离子类型：外来流体中阳离子价态越高，该阳离子与粘土负电荷中心作用力越强，使粘土表现出弱水敏性。对于同价阳离子，阳离子的水化离子半径越小，该阳离子与粘土表面负电荷中心的作用力也越强，它所引起的储层水敏性也较弱。相反，如果是溶液中低价阳离子置换粘土矿物表面和晶层之间的高价阳离子，则将增加粘土表面的负电性，从而从溶液中吸附更多的等电量的阳离子，这些无机阳离子的水化以及晶片上表面水化，使粘土矿物晶层间的引力减弱，导致吸水膨胀

和分散，加剧粘土渗透水化，从而表现强的水敏性。

(2)速敏

可移动微粒是速敏性的内因，水动力学变化则是引起速敏性的外因。可移动微粒一方面来自地层本身，一方面由外来流体引入。碎屑岩储层中均存在可移动微粒，这些微粒可能是粘土矿物，也可能是非粘土矿物。与此同时，勘探开发过程本身始终伴随着水动力学的变化。因此，速敏性贯穿于储层勘探开发中的每个过程，是油气层保护研究的一项重要内容。

速敏是指因流体流动速度变化引起地层中微粒运移，堵塞喉道，造成渗透率下降的现象。

储层中的外来流体或地层流体一开始流动，地层微粒便立即随之移动，即使小于临界流速。由于移动微粒的量不足以产生桥堵，或者桥堵不够严密，不足以影响渗透率。也就是说，流体的运动始终伴随着微粒的移动。此时，随流体移动的首先是那些与基质结合力最弱、粒径最小的微粒，较大的微粒则仍是静止的，即粘上微粒总是最先开始运移。但是这些细小的地层微粒几乎无法形成堵塞，因而不会增加流动阻力。此时，岩石的渗透率还不会下降。随着流速的逐渐增加，启动的微粒数目增多，运移微粒的粒径也逐渐增大，微粒开始在喉道处堆积或架桥。由于粒径较小，成桥所需微粒数目较多，因而堵塞的稳定性较差，在流体的冲击下，桥堵很容易解体。

当流速增至某值时，与喉道直径较匹配的微粒开始移动。一方面这部分微粒可以在喉道处形成较稳定的桥堵或卡堵，另一方面由于此时流速较大，成桥过程中流体对微粒的冲击力也较低速时为强。因此，导致岩石中的喉道在较短时间内大量地被堵塞，造成多孔介质渗流能力骤然减小。这时的流速即为临界流速。临界流速后将有一段渗透率随流速的

增加而急剧下降的区间，此时，流速增加将引起渗透率的大幅度下降，渗透率损害率可达原来渗透率的 20%~50%，有时甚至在 50%以上。此后，随着流速的增加，渗透率只有很缓慢的下降。

速敏实质上是储集层微粒脱落和运移引起的储集层伤害。它与储集层埋深、岩石压实程度、作用在岩石微粒上的水动力大小、粒径小于 37 μm 的非粘土矿物微粒的含量、胶结强度、蒙脱石和伊利石等的含量、地层流体粘度等因素有关。

(3)盐敏

由于液体盐度的递减引起粘土矿物水化膨胀，储层岩样在不同盐度系列盐溶液中，将出现渗透率下降的现象，这一现象与储层的水敏性有关。

当不同盐度的流体流经含粘土的储层时，随着盐度的下降，粘土发生缓慢的水化膨胀，岩样渗透率变化不大。但当盐度减小到某一临界值时，随着盐度的继续下降，粘土发生快速的渗透膨胀，此阶段粘土的体积膨胀率将会大幅度减小，此临界点成为临界矿化度，它是粘土膨胀过程中的一个重要转折点。

产层被打开后的渗透率下降，在很多情况下可能由于施工用水的盐度与地层不配伍所致。这类损害与淡水引起粘土矿物膨胀和分散的机理相同。由于粘土矿物表面的负电荷中心与地层流体中的阳离子之间的相互吸引，使这些阳离子水化，并在负电性的粘土表面形成了正电性的离子氛。这些交换性的阳离子之间存在着斥力，使粘土颗粒具有分散的倾向。在较强的电解质溶液中，这个离子氛受到溶液中其它离子的屏蔽，这种斥力相对较小并已达到了一种平衡。溶液盐度变化引起渗透率损害的主要机理。因此，盐度冲击引起的地层损害主要是由地层中的粘土矿物和流体盐度的变化引起的^[4]。

盐敏是由于液体从高含盐量到低含盐量发生粘土堵塞而引起的储集层伤害，影响盐敏性地层损害的主要因素有粘土含量、地层水矿化度、钙离子和镁离子含量等。

(4)微粒运移

微粒运移是指地层中固有的或入侵的微粒在一定的水动力作用下，从骨架颗粒上面脱落，随流体运移，在较小的喉道处沉积堵塞，降低渗透率的现象。

①微粒运移堵塞机理

微粒运移堵塞常常有三种机理：表面沉积、架桥、单颗粒卡堵。表面沉积是指当微粒失去动能，或者微粒与孔壁表面相互吸引而逐渐沉积在孔隙的表面，它对孔隙介质的渗透率影响不大。架桥堵塞是指两个或多个微粒先后或同时在孔喉处聚集而形成架桥状，阻止随后的微粒通过，它对孔隙介质的渗透率影响较大。架桥堵塞的稳定性与颗粒形状、大小、压力激动等因素有关。单颗粒堵塞是指一个微粒在孔喉处发生滞留，同时阻止随后的颗粒通过多孔介质，它对孔隙介质的渗透率影响也比较显著。当微粒平均半径小于平均孔喉半径的十分之一时，常常发生表面沉积，微粒在水动力作用下侵入油层深部；当微粒半径在平均孔喉半径的三分之一到十分之一之间则容易发生架桥堵塞；当微粒半径大于平均孔喉半径的三分之一时，将发生单颗粒堵塞。

②微粒运移堵塞影响因素

堵塞影响因素有：地层微粒种类、数量；微粒所处位置；微粒形状；表面电荷；颗粒表面润湿性；流体粘度、流动速度；外来流体的矿化度及矿化度下降梯度；外来流体的 pH 值；微粒尺寸等。其中，颗粒尺寸和流体速度影响显著。颗粒在启动、运移和沉积堵塞过程中启动是最关键的一步。它的描述参数为临界流速，临界流速越大，说明微粒启动越

不容易, 储层速敏性弱, 反之, 临界流速低, 储层速敏性强。颗粒大小与堵塞类型相关, 不同的颗粒与孔喉尺寸比例形成不同的堵塞类型。

(5) 固相侵入

① 基本概念

固相侵入是指在入井流体中含有一些有害的固体颗粒, 如机械杂质、管线腐蚀产生的沉淀颗粒, 它们随流体侵入地层, 进入到油气层孔道、裂缝和射孔孔眼等, 并在渗滤介质表面或储层深部喉道沉积, 或在恰当的孔喉处产生单颗粒堵塞或架桥堵塞, 从而减少储渗空间, 降低油气层渗透率。

② 损害机理

Barkman、Davidson^[5]从地层受到悬浮颗粒损害影响注水能力角度提出入侵颗粒造成损害的四种机理:

- a. 由于滤饼的形成, 使得井径缩小;
- b. 微粒侵入到油层多孔介质中;
- c. 井筒被沉淀充填;
- d. 衬管完井法的缝隙及井眼射孔孔道被微粒堵塞。

③ 影响因素

固相颗粒入侵造成堵塞的影响因素主要有: 固相颗粒粒度、水动力、颗粒电荷、地层物性(包括孔隙大小、孔喉比、孔隙度、渗透率等)、油滴的作用等。

(6) 水化膨胀

膨胀性页岩的水化会引起岩石垮塌和井眼扩大, 从而造成地层损害。粘土的水化膨胀分为两个阶段。一是表面水化膨胀阶段, 由于粘土晶面表层的硅氧键或氢氧键都具有极性, 它们可以吸附极性的水分子(即使干粘土也要吸附), 此时起主要作用的是粘土表面的水化能。粘土在表面水

化过程中最多可吸附四层水分子, 大约为 $10 \times 10^{-10} \text{m}$ 。第一层水分子靠与粘土矿物表面的氧原子形成氢键而稳定存在, 这层吸附水最稳定, 吸附也最易发生。随后, 第二层、第三层、第四层水分子也会依次以氢键形式吸附在粘土表面。氢键的强度随着水分子离粘土表面距离的增加而减弱。平衡粘土晶面负电荷的阳离子也可引起表面水化。

第二渗透水化膨胀阶段。粘土表面水化使晶层间的距离超过 $10 \times 10^{-10} \text{m}$ 厚, 表面水化能对水化的作用大大削弱, 表面水化也告结束, 紧接着进入由渗透压引起的第二阶段水化, 即渗透水化阶段。

无论是表面水化膨胀, 还是渗透水化膨胀, 其结果都是缩小孔道, 引起渗透率降低^[6]。

(7) 结垢

油气田开发过程中的结垢问题可以分为无机垢和有机垢。下面就分别阐述这两种结垢的机理和影响因素。

① 无机结垢

无机结垢是因矿物水溶液(称为盐水)的热力学和化学平衡状态的变化, 而变化过饱和时, 垢从中沉淀的一种过程。结垢主要是井开发作业如钻井、完井和修井酸化过程中, 混合了不配位流体引起的。结垢也可以通过油层流体开采过程中压力和温度的降低引起^[7]。

结垢主要和以下因素有关^[8-11]:

a. 成垢离子浓度: 水中成垢离子含量越高, 形成垢的可能性就越大。当水中成垢离子含量高时, 其在外界环境变化(如压力和温度变化)时生成垢的概率就增大。当不同水源的两种水混合时, 成垢离子发生变化, 趋于达到一种新的平衡, 于是可能导致垢的产生。

b. 矿化度: 水中矿化度, 通常能增大垢的溶解度, 这是一种盐效应。

c. 压力和温度: 碳酸钙的溶解度随着温度的升高和 CO_2 的分压降低而

减小。在系统内的任何部位, 压力降低都可能促使碳酸钙沉淀产生。硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)的溶解度随温度的升高而增大, 可是当达到 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 以上时, 溶解度又随温度的升高而减小^[12]。硫酸钙的溶解度随压力升高而增大。硫酸钡的溶解度随温度与压力的升高而增大, 因此常发生在采油井中。硫酸锶的溶解度随温度和压力的降低而减小。事实上硫酸钡与硫酸锶常常同时沉淀, 使得较难正确预测含有这些混合离子的水的结垢。

d. pH值: 降低pH值使溶解度增大, 减弱了成垢倾向, 这种作用对 CaCO_3 垢的影响非常明显, 而对硫酸盐的影响不大, 特别是对硫酸钡(锶)的影响甚小。

e. 润湿与粘附: 在油田生产过程中使用不同材质, 其表面有不同的润湿物性。润湿角越小, 成核所需能量越小, 晶核形成越容易, 则结垢趋势越大。

此外, 管输流动状态、结晶过程、油藏因素等都对结垢有影响。

②有机结垢

石蜡、沥青质和胶质是石油开采过程中油井、管线和油层内典型的有机沉淀源。有机沉淀可以发生在油管表面, 也可以发生在地层孔隙中, 从而降低流动速率, 最终完全阻塞流动通道。有机垢形成的机理包括分子扩散、布朗扩散、剪切分散和流动势。

结蜡是有机垢中最主要的一种, 蜡晶粒子以布朗运动和剪切分散两种方式横向迁移。布朗运动的影响相对较小。由于井筒中速度梯度场的存在, 悬浮在油流中的蜡晶颗粒会以一定的角速度进行旋转运动, 并出现横向局部平移即产生剪切分散。当流速增加到某一数值时结蜡量达到最高值。如果流速继续增加, 靠近管壁处原油的流速相应增大, 剪切作用相对加强。当剪切作用增加到足以使沉积在管壁外层的疏松蜡层崩塌时, 蜡的沉积量随流速的增加而开始下降, 结蜡量迅速减少。

影响蜡沉积的因素^[13]有:

a.温度与生产时间:油井结蜡主要出现在靠近井口的地方。从初始结蜡点开始向上,井筒中的结蜡厚度逐渐增厚。这是因为井筒流体在向上流动过程中,由于流体和管壁的温度降低,且流体与管壁的温度差逐渐增大,径向温度梯度增大;同时管壁的温度与蜡的初始结晶温度差增大,所以蜡分子的扩散沉积速度和蜡晶的剪切沉积速度加快,结蜡厚度增加。另一方面,生产时间越长,结晶厚度越大。

b.生产气油比:生产气油比越大,井筒结蜡厚度就越大。这是因为在流体向上流动过程中,其压力低于饱和压力后,气体发生分离,产生焦耳-汤姆逊效应,使流体温度降低。生产气油比越大,即原油中溶解的气体组分越多,在同一压力(低于饱和压力)下分离出来的气体越多,流体温度降低的越多,且原油对蜡的溶解能力下降,这有利于蜡的结晶和析出。

c.含水率:含水率越高,井筒结蜡厚度越小。由于水的比热大于油,含水油井相同产油量下的总产液量增大,减小了井筒中流体温度降低的幅度,且单位体积流体中含蜡量亦少;同时,水在管壁上易形成连续的水膜,所以,不利于蜡的沉积。

d.井筒油压:随着油压减小,井筒中的流体压力减小,轻质成分和溶解气容易逸出,使得井筒流体温度降低,原油中的含蜡量增加,且原油对蜡的溶解能力下降。这有利于蜡晶的析出,使结蜡速度逐渐增大。

e.油井的产液量:随着产液量的增加,流体的流动速度加快,流体向上流动时能够保持较高的温度,使得处于溶解状态的蜡含量增高,而析出的蜡相对减少,所以使井筒结蜡厚度减小。

1.3 基于神经网络工具的专家系统的诊断技术概况

近些年来,人工智能技术(AI)已经在很多大型复杂系统中得到了应

用，然而没有一种单独的方法可以得到广泛而有效的应用。现在用于诊断的技术主要有神经网络、专家系统、模糊逻辑、遗传算法等。在实际应用中，这些方法是互相补充而不是相互竞争的^[14]。

专家系统可以被定义为一种程序，可以根据专家知识描绘和推断某个领域内的问题。专家系统的特点是基于符号而不是数字特征的。专家系统是基于详尽的专家的知识建造的。

神经网络是由内部相连接的神经元组成。人工神经网络以其高度的并行处理、联想记忆、自学习以及极强的非线性映射能力，在各个领域得到了广泛应用，显示了极强的生命力。因此，我们想借助于神经网络的极强的非线性映射能力，实现由故障征兆或者说故障特征参量空间向故障模式空间的映射，从而达到对故障模式的识别。

当然，专家系统与神经网络各有其优点和缺点，如果我们能够充分利用每一种方法的优点去克服另一种方法的缺点，将使诊断结果和诊断效率得到很大的改进。Patriicia R.S Jota^[15]等人将神经网络和专家系统相结合运用于电力系统的故障诊断；刘振凯^[16]等人在基于神经网络专家系统的电力智能 CAD 研究中将二者结合运用于电机智能的研究；Satio Kd^[17]等人将二者结合运用于医学疾病的诊断上；邱忠宇^[18]等人将二者混合应用于大型旋转机械的诊断上。诊断结果表明，基于神经网络专家系统的诊断方法确实将神经网络和专家系统进行了有效的互补，得到了较满意的诊断结果。

本文将研究基于神经网络专家系统的诊断方法在油气层损害方面的应用。

1.4 研究内容

由前面的文献调研我们得到以下认识：

国内外关于油气层损害诊断的技术有很多，但还没有研制出专门针

对开发过程的系统定量诊断技术；由于油气层保护技术是一门复杂的工程，涉及内容广泛，目前的诊断技术还不能准确全面地诊断出地层伤害，随着计算机技术的发展，诊断软件的更新不可避免。

所以，本论文研究内容确定为油田开发过程中油气层损害综合诊断技术的研究。在研究过程中，运用神经网络推理工具建立敏感性和主要损害类型专家系统，同时结合模糊数学方法，对油气层损害进行综合诊断。

本论文的研究内容主要围绕以下几个方面开展：

(1)现场资料的收集与整理；

(2)开发过程潜在损害因素分析，确定主要损害类型，研究油气层损害机理；

(3)运用基于人工神经网络的专家系统建立开发过程中油气层损害诊断系统，确定油气层损害的程度和类型；

(4)建立基于模糊数学理论的诊断模型，对专家系统模型进行补充和验证；

(5)综合专家系统模型和模糊数学理论诊断方法进行现场验证和测试；

(6)初步开发油气层损害诊断软件。

第2章 基于神经网络工具的专家系统的原理

本系统采用径向基网络信息的分布存储、并行处理、自学习和自组织等功能,及其强大的映射功能,设计了知识获取机制和并行推理机。

在基于人工神经网络来构造专家系统工具中,神经网络作为前端的知识获取器,其获取的知识存储在网络的权值和阈值当中,并由网络的并行计算而得到网络的输出结果,此结果根据专家的经验判断转换成可描述的知识规则,输入到专家系统的推理机里面。专家系统的推理机处理的是各个神经网络输出结果转换后的知识及以面向对象方式存储在知识库中的专家经验知识,最后,由专家系统的推理机得到领域问题的最后结果。

2.1 系统的总体结构

基于神经网络工具的专家系统主要由知识库、知识获取模块、并行推理机、解释模块及人机界面等部分组成,其结构图如图2-1所示。

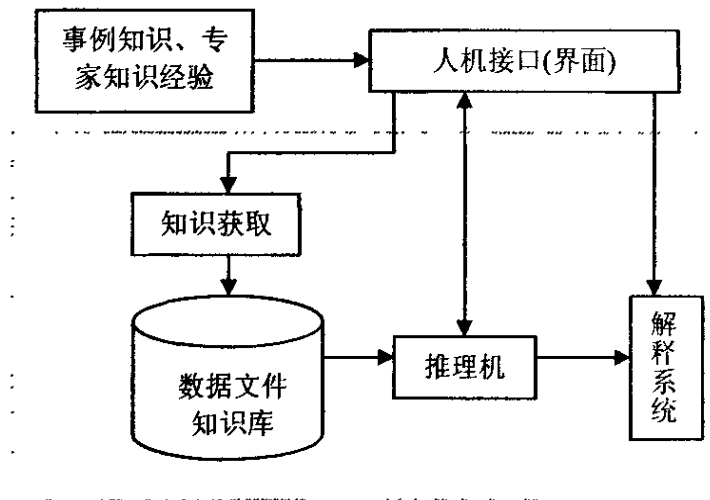


图 2-1 基于神经网络的专家系统的总体结构

2.2 系统组成及整体功能

系统由知识库、数据文件、并行推理机、知识获取模块、解释系统及人机接口界面等部分组成。

系统分别提供两种界面给领域专家和领域用户。首先,系统将领域专家提供的存放实例知识的数据文件进行预处理;人工神经网络作为知识获取机制,从处理后的数据文件中学习专门的领域知识,并将其存储在网络权值和阈值中,以数据文件的形式保存。通过知识录入界面,领域专家可以总结领域内的经验知识,对神经网络输出结果进行分类判断处理,并给出专家建议或对不同结果的问题的解决方案。对于应用的专家系统,专家可以为其创建个性化界面,使得不同的专家系统拥有不同界面。领域用户将问题数据输入建造成功的系统中,经过并行推理机的计算,得到问题的数值性结果。系统将此结果传输进对象推理机,对象推理机自动和知识库连接,得到与此问题相关的问题描述性回答及专家建议或解决措施。系统结构如图 2-2 所示。

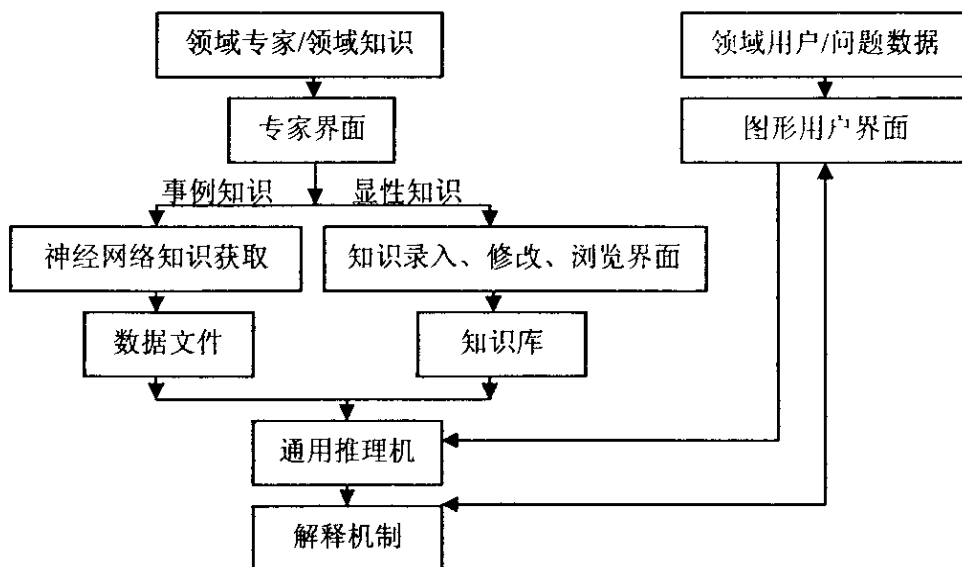


图 2-2 基于神经网络的专家系统的系统结构图

2.3 知识表示

知识表示就是知识的形式化,是研究用机器表示知识的可行的、有效地原则和方法^[19]。知识表示的目的在于通过知识的有效表示,是专家系统能够利用这些知识进行推理和做出决策。对于同一种知识,可以采用不同的知识表达方法,但在解决某一问题时,不同的表示方法可能会产生不同的效果。因此,对于不同领域的求解问题,选择合适的知识表达方法是非常重要的^[20]。

知识表示的任务是把欲在智能系统中使用的知识变换为一定形式的数据结构及其说明程序,组织成易于利用的形式或过程。

2.3.1 传统的知识表达方法^[21]

专家系统对知识表示的形式是基于形式化的符号,通常采用显式的、描述行的表达方式。传统的表示方法主要有语义网络表示、产生式表示、逻辑表示、框架表示、过程表示等。其中,语义网络表示抓住了符号计算中符号和指针两个本质的东西,且具有联想的特性,所以在人工智能中是重要的知识表达方法,但这种用弧代表事物间的任何联系,则形式过于简单,表达受到限制,当增加联系时会增大网络的复杂度。框架适合于表示典型的概念、时间和行为,但其各知识表示单位间缺乏清晰的语义。而且上述这些表示方法存在着推理效率低、非渗透性、与推理机不能独立存在、易于出现组合爆炸等缺点,不适合建造专家系统。

2.3.2 面向对象的知识表示^[22-26]

面向对象的知识表示方法将多种单一的知识表示方法(规则、框架等)按照面向对象的程序设计原则组织成一种混合知识表达方式,即以对象为中心,将对象的属性、动态行为、领域知识和处理方法等有关知识“封装”在表达对象的结构中。这种方法将对象的概念和对象的性质结合在一起,符合专家对领域对象的认知模式。因此,对于本专家系统工具的

显性知识的表示,采用面向对象的知识表达方法。

面向对象程序设计的基本思想是根据采用数据抽象和信息隐藏技术,将数据及对数据的操作放在一起,作为一个相互依存、不可分割的整体来处理,并将这个整体抽象成一个新的数据类型一类,同时考虑不同对象之间的联系和对象类的重用性。面向对象的知识表示方法除具有传统知识表示方法的知识灵活性、可扩充性、推理的高效性等优点外,还具有以下特性:①它直接模拟人类思维,消除了问题领域概念与计算机概念之间的语义间隙;②面向对象的知识表示使得建造专家系统过程中知识获取、知识表示、知识运用三者概念上、形式上统一起来;从系统开发的角度,面向对象的思想将程序分析、设计、编程统一起来,中间无需任何转换。因此,这种知识表示方法非常适合表示复杂的系统知识。

2.3.3 本文的知识表示

在本文研究的领域问题中包括两大类知识:一类是领域专家能用自然语言描述的知识,这类为显性知识,主要包括专家的书面知识及实践中的经验知识;另一类是隐含在大量数据及关系中,难以用语言描述的知识,这类为隐性知识,只要是实验及调研得到的数值型数据。对于隐性知识,本文采用神经网络对数据进行学习,知识获取和知识表示同时进行,信息被存储在网络结构当中。对于显性的描述性知识,本文采用面向对象的知识表示方法。

神经网络的知识以网络的权值和阈值的形式表示的。神经网络对知识的表示是隐式的,当确定了网络的结构参数、神经元的激活函数及学习算法后,网络的知识获取和知识表示是同时进行、同时完成的。对网络的训练学习成功后,样本数据中存在的知识信息都以连接权值和阈值的形式分布存储在整個网络当中。

面向对象的知识表示直接模拟人类思维,消除了问题领域概念与计算机概念之间的语义间隙,并且,使得建造专家系统过程中知识获取、知识表示、知识运用三者概念上、形式上达到了统一。

2.4 知识获取^[27]

知识获取就是把用于求解专门领域问题的知识从拥有这些知识源中抽取出来,并转换为一种特定的计算机表示^[28]。

专家系统的核心是知识,因而在一个专家系统建造中,解决知识如何获取是一个十分重要的课题。专家系统的创始人之一 Feigenbaum 说过“知识获取是人工智能的中心问题中最重要的”,“知识获取是人工智能研究关键性的难点”。在专家系统开发过程中,知识获取是最难解决的一道工序,被公认为是专家系统建造中的“瓶颈”问题。只有当知识获取的手段自动化、智能化后,才可以说专家系统有了真正的智能。

2.4.1 知识获取的方法简述^[29]

知识获取的方法可以分为三类:

(1)手工知识获取:就是通过计算机知识工程师和领域专家频繁而深入的交谈获得的。知识库中的知识便是由知识工程师把挖掘来的专家经验知识按规定的知识表示形式加工并输入到计算机的。如图 2-3。

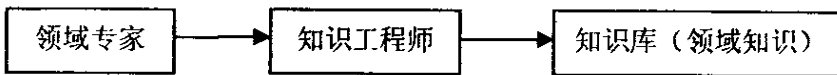


图 2-3 手工知识获取

(2)半自动知识获取:利用具有一定知识编辑能力和知识库求精能力的知识工程语言和知识获取工具来进行的知识获取方法。如图 2-4。

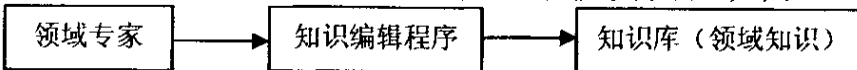


图 2-4 半自动知识获取

(3)自动知识获取:也称机器学习。自动的知识获取机制能通过专家直接同系统的对话而无需知识工程师介入,对话内容便可自动变换成知

识库中的知识，或进行知识库的修改。具有自适应学习功能的系统能通过用户对求解结果的大量的反馈信息自动修改和完善知识库，并能在问题求解过程中自动积累和形成各种有用的知识。如图 2-5。

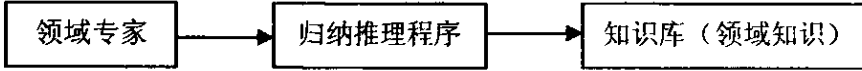


图 2-5 自动知识获取

传统的知识获取方法，要求领域专家能够对制定决策过程进行准确描述，但对于决策过程的描述往往比制定决策更为困难，因为某些决策制定经常依赖于经验的“直觉”，而无法阐明理由；人工抽取需要领域专家和知识工程师大量的时间和经历：不同专家对领域知识的理解和概括不同，所做决策也不同。因此意见很难统一；另外，对于有些领域内部知识、规则隐式地存在于大量的数据联系之中，需要专家对这些数据进行大量实验性分析，才能获取领域知识，对于这样的系统，人工实现知识获取更为困难。

基于上述原因及本系统的设计目的，对于领域中的隐性知识采用神经网络的数据学习替代专家分析，实现系统知识获取自动化。本文涉及到两部分知识的获取：一是传统描述性知识获取；二是从实例样本中获取隐含性知识。第一部分采用半自动化的知识获取工具，领域专家可以根据界面向导，不需要知识工程师帮助，方便地将领域知识及经验录入到知识库中；第二部分用人工神经网络进行知识的自动获取。通过神经网络对样本数据的学习，将其中隐含的知识存储到整个网络中，并用数据文件的形式保存网络的权值和阈值。知识获取机制的结构如图 2-6 所示。

2.4.2 人工神经网络知识获取方法^[30]

人工神经网络是生理学上的真实人脑神经网络的结构和功能，以及若干基本特性的某种理论抽象、简化和模拟而成的一种信息处理系统。

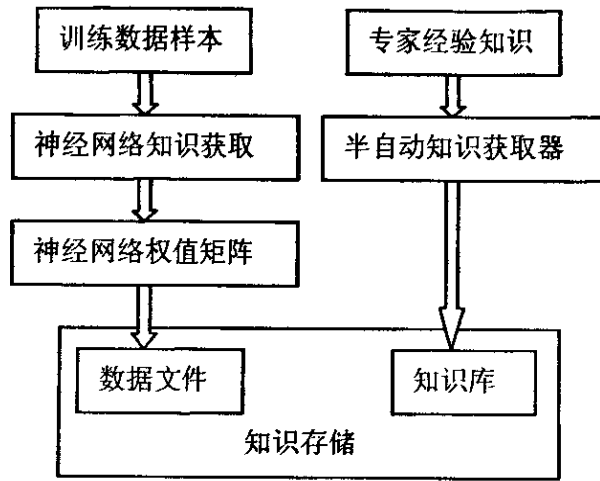


图 2-6 知识获取模型

它是一种大规模的并行联接机制，它有一些像神经元的处理单元，通过把问题表达成单元间的权来解决问题的。

神经网络的学习过程也就是知识获取的过程。一般来说，神经网络要从领域的大量实例中获取知识。虽然网络的学习过程是可以自动完成的，知识获取相对较简单。但是，即使有大量的实例作为样本对神经网络进行训练，也不能保证网络一定能概括出精确的领域知识。这主要是由于三方面的原因造成的，一方面是作为知识源的样本集并不能覆盖到整个知识领域。在缺乏样本集的领域，神经网络学习后只能得到比较粗略的知识，即由于样本不完全性造成的误差；另一方面是由于对实例样本的预处理造成的，样本经过归一化处理后往往会丢失一部分信息，或加入一部分噪声信号，从而影响学习效果；还有一种可能是网络拓扑结构或参数选择不恰当，网络并没有学习到样本蕴涵的知识的本质特征。通过借鉴神经网络计算理论的研究成果，可以改善神经网络的学习效果。本文通过动态调整学习率、加入动量项及合理配置网络参数等措施来改造 RBF 网络，以使网络学习效果更好，输出更加准确合理。

2.4.2.1 人工神经网络算法优选

误差反向传播(Error Back Propagation)网络(BP网络)是目前应用最为广泛的神经网络模型,它的理论基础很强,数学演绎严谨,同时易于学习,且工作效果好,主要应用于模式识别和分类^[31]。但是由于BP算法是用梯度法导出的,因此优化过程可能陷入局部极限,网络训练的质量没有保证。学习的目标是分类误差对所有可能的点都达到极小,而推导出BP算法的目标函数是经验风险,它只能保证分类误差对于有限个样本是极小,因此BP网络的泛化能力不强。同时神经网络的结构设计(例如隐结点数目的选择)依赖于设计者的先验知识和经验,缺乏理论依据。

径向基网络是将多变量插值的径向基函数(Radial-Basis Function, RBF)方法应用于神经网络设计构成了RBF网络,他的基本思想是用径向基函数(RBF)作为隐单元的“基”,构成隐含层空间,隐含层对输入矢量进行变换,将低维的模式输入数据变换的高维空间内,使得在低维空间内的线性不可分问题在高维空间内线性可分。RBF神经网络结构简单、训练简洁而且学习收敛速度快,能够逼近任意非线性函数。因此RBF网络有较为广泛的应用。如时间序列分析,模式识别、非线性控制和图像处理等,但是目前还没有应用于油气层损害诊断方面。

这里分别使用BP的L-M(Levenberg-Marquardt)优化算法和径向基算法对储集层临界流速进行预测,采用相同样本数据进行训练和仿真,以此来比较两种算法的收敛速度、精度和预测结果。

(1)模型的训练结果比较

根据收集到的现场资料,整理出了77组样本数据,这里选用57组样本作为训练样本,用另外20组样本来检验模型的仿真结果。原始数据进行标准化处理。

L-M优化学习算法和径向基学习算法设计的模型结构如图2-7和图2-8所示。

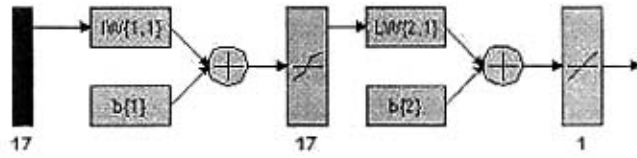


图2-7 L-M优化算法的网络模型结构图

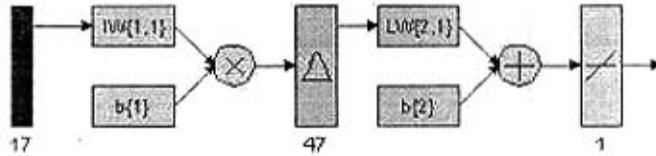


图2-8 径向基的网络模型结构图

分别采用上面的模型对 57 组样本进行学习训练，过程如图 2-9 和图 2-10 所示。

从图中可以看出，两种算法都能够在较少的迭代次数内将网络训练到给定的目标误差内，径向基的收敛速度和精度均高于 L-M 优化学习算法。

(2)网络模型的仿真预测结果比较

用训练好的网络模型对 20 组样本进行预测，并将预测结果与实际值进行比较，如表 2-1 所示。

经过计算，径向基网络的预测绝对误差平均值为 13.89%，L-M 优化算法网络的预测绝对误差平均值为 32.63%。从预测结果的误差可以看出，径向基模型的预测结果明显要好于 L-M 优化算法模型的预测结果。

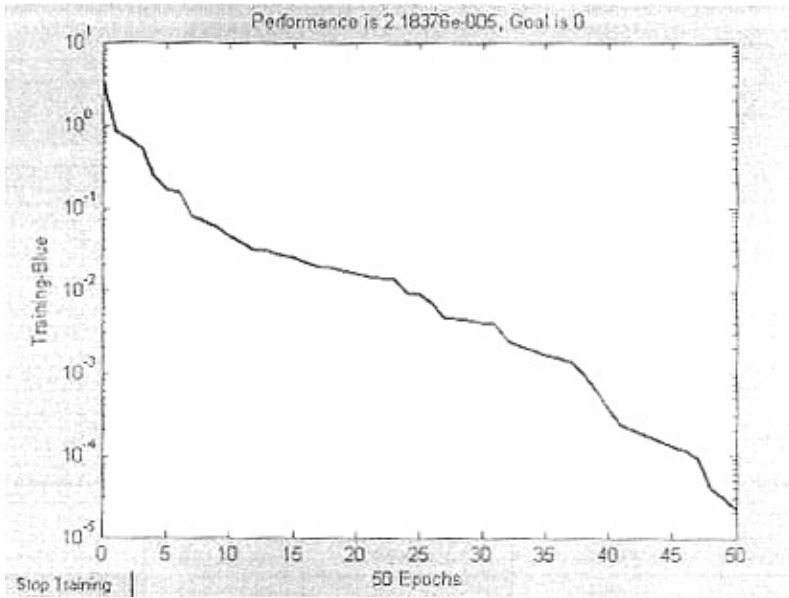


图2-9 L-M优化学习算法的训练迭代效果图

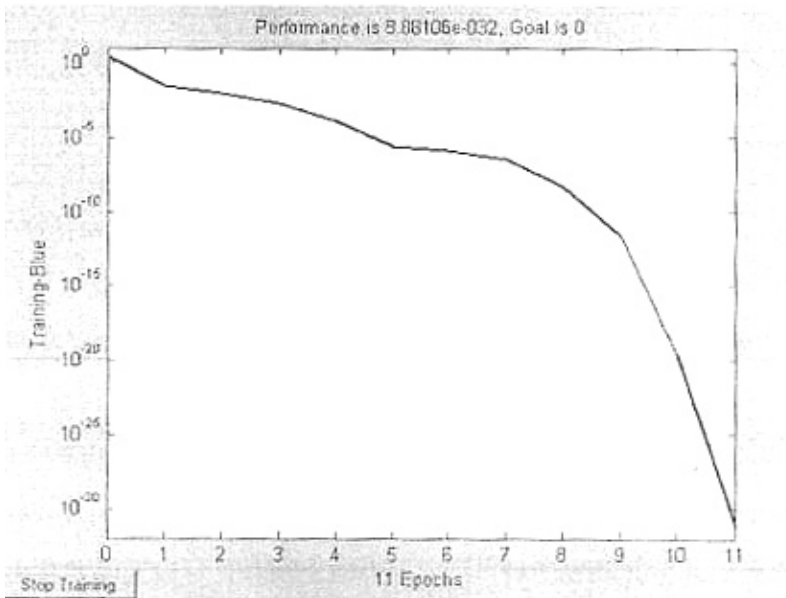


图2-10 径向基的训练迭代效果图

表 2-1 L-M 优化学习算法和径向基算法的预测结果比较

实际值 (临界流速)	L-M 算法网络的 预测值	L-M 预测结果的 相对误差	径向基网络的 预测值	径向基预测结果的 相对误差
0.140086	0.15134	0.08034	0.14256	0.017658
0.140086	0.1706	0.21785	0.13867	0.01011
0.249238	0.25271	0.01395	0.25003	0.003176
0.249238	0.28032	0.12471	0.2431	0.02463
0.249204	0.31764	0.27461	0.27906	0.119807
0.140086	0.16529	0.17994	0.14158	0.010662
0.249204	0.29064	0.16627	0.2838	0.138827
0.249238	0.30568	0.22647	0.22376	0.10222
1.348713	0.79363	0.41157	1.0345	0.232972
0.140258	0.17087	0.21827	0.1245	0.11235
0.140258	-0.06449	1.459741	0.1245	0.11235
0.140258	0.096808	0.309787	0.18233	0.299963
0.140052	0.25622	0.82948	0.082821	0.40864
0.140086	0.25202	0.79908	0.08293	0.40801
0.249238	0.26255	0.05341	0.23793	0.04537
0.249238	0.26001	0.04322	0.25004	0.003217
0.249238	0.28432	0.14075	0.24525	0.016
0.249238	0.34598	0.38813	0.19412	0.22115
0.249238	0.38496	0.54454	0.13009	0.47805
0.249238	0.238	0.045085	0.24621	0.01215

通过以上比较,综合考虑训练中网络的迭代收敛速度和预测的精确度,本文选择人工神经网络的径向基算法作为学习算法来建立模型。

2.4.2.2 径向基算法学习过程

从结构上看,RBF神经网络属于多层向前神经网络。它是一种三层向前网络:第一层是输入层,由信号源节点组成;第二层为隐含层,隐单元的个数由所描述的问题而定,隐单元的变换函数是对中心点径向对称且衰弱的非负非线性函数;第三层为输出层,它对输入模式作出响应。它的基本思想是用径向基函数(RBF)作为隐单元的“基”,构成隐含层空间,隐含层对输入矢量进行变换,将低维的模式输入数据变换的高维空

间内,使得在低维空间内的线性不可分问题在高维空间内线性可分。

(1)RBF 神经网络模型^[32]

RBF 网络是单隐层的向前网络,根据隐单元的个数,RBF 网路有两种模型:正规化网络(Regularization Network)和广义网络(Generalized Network)。在实际应用中,为使 RBF 网络的实现方便,我们多选用广义的 RBF 网络。

广义网络的输入层有 M 个神经元,其中任一神经元用 m 表示;隐层有 $I(I < N)$ 个神经元,任一神经元用 i 表示,第 i 个隐单元的激励输出为“基函数”,其中 $t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}, \dots, t_{iM}] (i = 1, 2, \dots, I)$ 为基函数的中心;输出层有 J 个神经元,其中任一神经元用 j 表示。隐层与输出层突触权值用 $w_{ij} (i = 1, 2, \dots, I)$ 表示。在输出单元还设置了阈值 φ_0 ,其做法是令隐含层的一个神经元 G_0 的输出恒为一,而令输出单元与其相连的权值为 $w_{0j} (j = 1, 2, \dots, J)$ 。

设训练样本集为 $X = [X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_N]^T$,则其中的任一训练样本 $X_k = [X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{km}, \dots, X_{kM}] (k = 1, 2, \dots, N)$,这时,对应的实际输出就为 $Y_k = [y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kj}, \dots, y_{kJ}] (k = 1, 2, \dots, N)$,相应的,此时的期望输出为 $d_k = [d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kj}, \dots, d_{kJ}] (k = 1, 2, \dots, N)$ 。

当网络输入训练样本 X_k 时,网络第 j 个输出神经元的实际输出为:

$$y_{kj}(X_k) = w_{0j} + \sum_{i=1}^I w_{ij} \varphi(X_k, t_i), j = 1, 2, \dots, J \quad (2-1)$$

当“基函数”为高斯函数时,可如下表示:

$$\begin{aligned} \varphi(X_k, t_i) &= G(\|X_k - t_i\|) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \|X_k - t_i\|^2\right) \\ &= \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \sum_{m=1}^M (x_{km} - t_{im})^2\right) \end{aligned} \quad (2-2)$$

其中 $t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}]$ 为高斯函数的中心, σ_i 为高斯函数的方差。

(2)RBF 神经网络学习算法

RBF 网络要学习的参数有三个: 基函数的中心和方差以及权值。根据径向基函数中心选取方法的不同, RBF 网络有多种学习方法, 在这里, 我们选用自组织选取中心法。这种方法由两个阶段构成: 一是自组织学习阶段, 即学习隐层基函数的中心与方差的阶段; 二是有监督学习阶段, 即学习输入层权值阶段。

a. 学习中心 $t_i (i = 1, 2, \dots, I)$

自组织学习过程要用到聚类算法, 常用的聚类算法是 K -均值聚类算法。假设聚类中心有 I 个(I 的值由先验知识决定), 设 $t_i(n) (i = 1, 2, \dots, I)$ 是第 n 次迭代时基函数的中心, K -均值聚类算法具体步骤如下:

第一步: 初始化聚类中心, 即根据经验从训练样本集中随机选取 I 个不同的样本作为初始中心 $t_i(0) (i = 1, 2, \dots, I)$ 设置迭代步数 $n=0$ 。

第二步: 随机输入训练样本 X_k 。

第三步: 寻找训练样本 X_k 离哪个中心最近, 即找到 $i(X_k)$ 使其满足

$$i(X_k) = \arg \min_i \|X_k - t_i(n)\|, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (2-3)$$

式中 $t_i(n)$ 是第 n 次迭代时基函数的第 i 个中心。

第四步: 调整中心, 用下式

$$t_i(n+1) = \begin{cases} t_i(n) + \eta[X_k(n) - t_i(n)], & \text{当 } i = i(X_k) \\ t_i(n), & \text{其它} \end{cases} \quad (2-4)$$

调整基函数的中心。 η 是学习步长且 $0 < \eta < 1$ 。

第五步: 判断是否学完所有的训练样本且中心的分布不再变化, 是则结束, 否则 $n = n + 1$ 转到第二步。

最后得到的 $t_i(i=1,2,\dots,I)$ 即为RBF网络最终的基函数中心。

b.确定方差 $\sigma_i(i=1,2,\dots,I)$

中心学完后就固定了,接着要确定基函数的方差。当RBF选用高斯函数,即:

$$G(\|X_k - t_i\|) = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \frac{\|X_k - t_i\|^2}{\sigma_i^2}\right), i=1,2,\dots,I \quad (2-5)$$

方差可用下式计算,

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_I = \frac{d_{\max}}{\sqrt{2I}} \quad (2-6)$$

I 为隐单元的个数, d_{\max} 为所选取中心之间的最大距离。

c.学习权值 $w_{ij}(i=1,2,\dots,I, j=1,2,\dots,J)$

权值的学习可以用LMS方法,因此RBF网络的实际输出为:

$$Y(n) = G(n)W(n) \quad (2-7)$$

其中

$$Y(n) = \{y_{kj}(n)\}, k=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,J \quad (2-8)$$

权值的学习可以用LMS方法,也可以直接用伪逆的方法求解,即:

$$W = G^+ D \quad (2-9)$$

式中 $D = [d_1, \dots, d_k, \dots, d_N]^T$ 是期望响应, G^+ 是矩阵 G 的伪逆。

$$G^+ = (G^T G)^{-1} G^T \quad (2-10)$$

矩阵 G 由 $G = \{g_{ki}\}$ 式确定:

$$g_{ki} = \exp\left(-\frac{1}{d_{\max}^2} \|X_k - t_i\|^2\right), k=1,2,\dots,N; i=1,2,\dots,I \quad (2-11)$$

权矩阵 W 为:

$$W = \{w_{ki}\}, i=1,2,\dots,I; j=1,2,\dots,J \quad (2-12)$$

W 即为所求。

由于 RBF 网络能够逼近任意的非线性函数,可以处理系统内在的难以解析的规律性,并且具有极快的学习收敛速度。

2.4.3 其它知识的获取

这部分知识获取针对问题领域中专家所掌握的书本知识以及能用自然语言描述的显性知识和对神经网络输出结果的分析、判断和处理的描述性信息。采用半自动的知识获取器,领域专家系统可以将知识录入到数据库中。

此部分知识采用面向对象的知识表示方法。系统提供领域专家录入知识的向导界面,主要包括知识录入、知识编辑、知识修改删除及增加等部分。

2.4.4 知识存储、维护及更新

(1)神经网络知识存储

系统存储的知识主要是神经网络从实例中自动学习到隐含知识及神经网络模型参数和传统的显性的描述性知识两部分知识的存储。

①神经网络获取的隐形知识以权值和阈值的形式及网络参数存储在数据文件中。对于解决不同问题的网络结构参数及权值、阈值以不同的数据文件名保存。

②对于显性知识,存储在知识库中。系统采用 Access 数据库管理机制对知识库进行组织和管理,其组织的优点在于:

- 1) 知识库和推理机相互独立,知识库内部知识及组织方式改变不会影响推理机的工作;
- 2) 方便地进行知识库扩充、维护和修改;
- 3) 便于知识的运用和输入、输出,以及知识库内容的一致性和完整性检查及维护。

(2)知识维护更新^[33 34]

知识库的建立过程是知识经过一系列变换进入计算机系统的过程,在这个过程中存在着各种导致知识不健全的因素。例如:领域专家提供的知识存在某些不一致、不完整,甚至错误的信息;对知识库的增加、修改及删除时产生的影响,以至产生的知识库的不完备情况等。还有随着经验知识的增加,科学的发展,原有知识库中知识的变得陈旧需要更新。基于以上原因,知识库都需要更新维护。

对于显性知识的维护,系统提供给领域专家半自动的知识获取及编辑界面,由于采用面向对象的知识表示方法,更接近人类的思维模式,因此,专家利用此界面便可以对知识中的知识进行浏览、增加、修改或者删除。

神经网络知识的更新,是网络再学习的过程。系统提供给专家对神经网络进行二次学习的界面,学习过程和第一次学习过程相同。二次学习可以在原来权值和阈值的基础上,进行修正,更加接近事物原来的本质规律。

2.5 推理机制及解释机制

知识推理是知识工程的基本技术之一。根据知识推理方法与策略,设计推理机制是专家系统设计的重要过程。推理是指从已有事实推出新事实或结论的过程。在专家系统中,推理以知识库中的已有知识为基础,是一种基于知识的推理。基于知识的推理过程的计算机实现构成了推理机,推理机的设计是专家系统设计的核心内容。

2.5.1 神经网络推理机制

神经网络专家系统的推理过程和传统专家系统的逻辑演绎推理不同,由于神经网络同一层各个神经元之间完全是并行关系,而同层内神经元的数目远大于层数,因此,从整体上看,它是一种并行计算过程。

其推理步骤如下:

(1)将输入数据加到神经网络输入层的各个神经元;

(2)按照已确定的网络传递特性和输入数据计算输入层各神经元的输出,并把它们作为隐层单元的输入;

(3)由此再分别计算隐层神经元及输出层神经元的输出。

由于神经网络的计算机制的独特特点,更加适合于进行对不确定性问题的推理。

2.5.2 神经网络输出结果向描述性知识的转换

在整个领域问题中可能存在许多小问题由神经网络来进行解决,这些小问题的输出结果通过分析后可以得到此问题的结论,在整个问题中,对这些问题结论的分析处理过程,本文采用面向对象的推理机来完成最后整个问题的推理。但是,神经网络的输出结果一般都是数值的形式,为了将神经网络的输出结果输入到推理机里面进行基于知识的推理,需将此结果进行分析处理。处理的方法是专家利用经验和知识,给出对结果的分析判断依据,根据这些规则,将网络输出结果转变成和面向对象知识表示方法中类的属性类型相同的数据类型,即布尔型、数值型和枚举型。以下以水敏程度为例,说明神经网络结果向描述性知识的转换。

预测水敏指数的神经网络输出节点有一个,就是损害后油气层的水敏指数。对预测指标进行标准分级,规定发生程度重、偏重、中、偏轻和轻的归一化数值分别为 0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.05。专家可以输入判断条件,即当结果值 $x \geq 0.9$ 时,水敏程度为重;当 $0.9 > x \geq 0.7$ 时,水敏程度为偏重;当 $0.7 > x \geq 0.5$ 时,水敏程度为中;当 $0.5 > x \geq 0.3$ 时,水敏程度为偏轻;当 $0.3 > x \geq 0.05$ 时,水敏程度为轻;当 $x \leq 0.05$ 时,水敏程度为无。因此,转换后的数据类型为枚举型,枚举属性选择共有 5 个,即重、偏重、中、偏轻、轻和无。

转换后得到的知识, 将和专家录入的显性的经验知识一起输入到专家系统的面向对象的推理机。

2.5.3 专家系统推理机制^[35]

根据问题领域中各个神经网络输出结果及其他知识, 专家系统推理机可以得到问题的求解结果。本文设计了面向对象的通用推理机。推理方法分为逻辑推理和不确定推理。逻辑性知识是能够确保结论正确无误的知识, 当已知数据完整、准确时, 使用逻辑性知识推理所得的任何结论也必然是完全可靠的, 我们称这种推理为逻辑推理; 不确定性推理就是从不确定性的初始证据出发, 通过运用不确定性的知识, 最终推出具有一定程度的不确定性但却是合理或者近乎合理的结论的思维过程^[36]。由于油气层损害本身的复杂性和不确定性, 以及特定专家系统用户常常无法提供完整可靠的信息, 所以本论文的通用推理机采用了不确定推理的方法及模糊推理技术。

搜索策略可分为盲目搜索和启发式搜索。盲目搜索具有盲目性, 效率不高; 启发式搜索是在搜索中加入了与问题有关的启发性信息, 用以指导搜索朝着最有希望的方向前进, 加速问题的求解过程并找到最优解^[37]。本推理机采用了一个折衷方案: 基于“典型特征”判别的广度优先搜索, 即将“典型特征”作为启发因子, 在一定程度上提高了推理效率。

一般的控制策略又可分为数据驱动(正向推理)、目标驱动(反向推理)和混合驱动(正反向混合推理)。考虑到油气层损害诊断专家系统在实际中的应用情况, 本通用推理机采用了数据驱动的控制策略。

2.5.4 解释机制

解释机制是专家系统中回答用户询问、对自己的问题求解过程或对自己当前的求解状态提供说明的一个重要机构。专家系统对自身推理行为的解释能力被看成是衡量一个专家系统是否完善的重要标准之一, 是

系统能否取得专家和用户信任的重要因素之一,同时也是确保系统正确性的必要手段。对于神经网络专家系统,用户并不会简单地认为系统通过对大量实例集的学习后得到的推理结果就是正确可靠的,解释在神经元知识单元中同样也是必要的。

(1)神经网络推理的解释方法^[38]

传统的基于规则的专家系统的解释通常采用的策略是通过调用黑板结构中推理过程的所有中间步骤,即规则的使用次序来进行。但是,在神经网络知识单元中没有显式、符号化和陈述性的知识表示,知识用数值化的连接权矩阵表示且分布在整个网络中。因此,按照常规的解释策略是行不通的。目前,对于神经网络推理的解释方法主要有以下几种:

①网络压缩法,即利用网络缩减技术删减网络的规模,使网络中仅留下确实对输出结果有较大贡献的结点,从而可以生成简单的规则对输出结果进行解释;

②专家规则解释法,在神经网络知识单元集中有些知识单元中存储的知识是透明的,可以用显式规则表达。

③基于实例法,神经网络的学习是从大量学习样本中学习所得的,因此从样本集中选择相似的样本对输出结果进行解释是可行的。

总之,基于实例的解释方法没有从根本上解决对神经网络推理的解释问题,只是提供了一种可行的解释方法。

(2)专家系统推理的解释方法

包括推理结束时解释为什么会得到此推理结果和得到结论后的专家建议两部分内容。

在推理结束解释界面中,系统逐项调出系统提示问题的用户回答、此问题在知识库中的标准描述以及此属性的可信度,在界面中加以显示。

第3章 基于神经网络工具专家系统的设计与生成

3.1 引言

基于神经网络的专家系统利用神经网络来克服专家系统的不足,如知识获取的瓶颈、推理过程中的匹配冲突等问题。虽然径向基有较强的逼近能力、分类能力和较快的学习速度,但是在实际应用中仍然存在不足,如学习收敛性和精度等。本章根据径向基网络特点,提出了适于本文的基于神经网络专家系统的设计方法。

3.2 径向基神经网络输入数据处理方法

3.2.1 数据预处理方法

本文对各个样本组数据的进行归一化处理^[39,40]。采用该方法后既保证了输入数据在 0-1 之间,又最大可能地拉开了同一组样本中各个数据间的差异,因而是径向基算法用于故障诊断经常采用的方法。

线性归一化方法的表达式为:

$$a'_{ji} = 0.1 + \frac{0.9 - 0.1}{a_{j\max} - a_{j\min}}(a_j - a_{j\min}) \quad (3-1)$$

$$(j=1,2,\dots,i=1,2,\dots)$$

其中 a'_{ji} 、 $a_{j\max}$ 、 $a_{j\min}$ 为各组样本数据中的归一化值、最大值和最小值。

但从如下分析可以看到,这种归一化处理仍存在着一定的问题。设输入样本集为 A 和归一化后样本集为 A' 及对应的输出目标集为 Y , 则有

$$A = [X_1 X_2 \dots X_i \dots X_n]^T$$

$$X_i = [a_{i1} a_{i2} \dots a_{iy} \dots a_{im}]$$

$$A' = [X'_1 X'_2 \dots X'_i \dots X'_n]^T$$

$$X'_i = [a'_{i1} a'_{i2} \dots a'_{iy} \dots a'_{im}]$$

$$Y = [Y_1 Y_2 \dots Y_i \dots Y_n]^T$$

$$Y_i = [b_{i1} b_{i2} \dots b_{ij} \dots b_{im}]$$

其中, a_{im} 、 b_{im} 分别为样本集 A 与 A' 中各个子样本的单个元素。 m 为样本数, n 为节点数。

如果满足 $X_i = kX_j$ ($k \in R$) 时, 则采用常规的线性归一化方法后得出 $X_i' = X_j'$ 时输入到 ANN 中, 并且当 $Y_i \neq Y_j$ 时, 神经网络会出现一对多的不相容情况, 所以线性归一化会使数据的特征信息量有所损失并且可能会使神经网络的学习不能收敛。原因是归一化后不能真实地反映数据大小。如果在输入节点中再引入一个补充输入节点来反映该特征信息量, 那么就会使得上述的不足得到显著改善。

3.2.2 引入补充节点

人工神经网络径向基模型对于输入数据有较高的要求。如果把反映故障诊断特征的大小数据直接输入到人工神经网络中去, 往往会因输入数据太大或太小而造成传递函数输出趋于饱和, 使整个学习精度不理想甚至不收敛。为此本文总结和分析了目前神经网络径向基模型对输入样本数据进行预处理的常用办法, 提出在原有神经网络输入节点的基础上, 改进径向基网络的拓扑结构, 再增加一个输入节点, 以反映输入样本数据的大小, 有效地提高了网络的泛化能力。

本文中由于是针对敏感性主要类型和油气层损害主要类型的综合诊断, 其输入向量部分的数据类型多于单一的损害的数据类型, 所以可以把其它空白数据当作增加的输入节点对待。

图 3-1 描述了引入补充节点以后的神经网络结构, 其输入节点从原来的 n 个增加到 $n+1$ 个。设输入样本集归一化处理后为 $A-A'$, 引入补充输入节点后归一化处理为 $A-A''$, 其中 $A'' = A' | C$,

$$C^T = [a'_{1,n+1}, a'_{2,n+1}, \dots, a'_{m-1,n+1}, a'_{m,n+1}, a'_{i,n+1}] = \frac{\sum_{i=1}^n a_{i,j}}{\|A\|} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

上述 $X_i = kX_j (k \in R)$ 情况时, 虽经归一化后 $X'_i = X'_j$ 。但是 $a'_{i,n+1} \neq a'_{j,n+1}$, 即尽管 A' 的前 n 列的所有元素与 A 的前 n 列的所有元素都相同, 但第 $n+1$ 列的元素因反映各输入数据大小而不同, 所以对对应于不同的样本其输入到 ANN 中的数据(无论输入数据是否成比例或相差过大)是不相同的, 这样就能正确地反映样本之间的差异从而提高了诊断故障准确率。

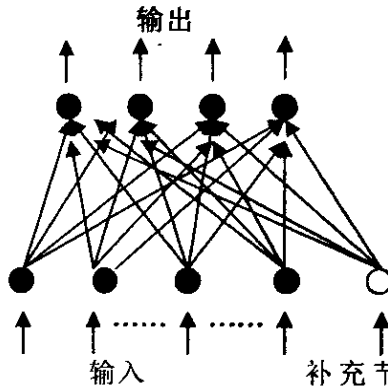


图 3-1 加入补充输入节点后的神经网络

3.3 带有可调参数的径向基神经网络的设计

在进行径向基网络设计时, 一般应从网络的层数、每层中的神经元个数、训练精度和散布常数等几方面来考虑, 下面以敏感性损害诊断为例讨论各项参数的选取原则。

3.3.1 网络的层数

径向基函数网络是一种两层前向型神经网络, 包含一个具有径向基函数神经元的隐层和一个具有线性神经元的输出层。

3.3.2 输入、输出层的神经元数

输入节点与输出节点数的选取是完全根据问题的需要来设计的。由

于敏感性诊断的训练样本中选取了 18 项作为本径向基网络的输入特征向量,故神经网络的输入层神经元共有 18 个,用水敏指数、速敏指数、临界矿化度作为网络的输出。所以,本文可定输入节点为 18,它代表样本中影响因素向量的 18 个分量,取 3 个输出节点,代表样本中的输出。

3.3.3 隐含层的神经元数

为了提高误差精度,在只采用一个隐含层的情况下,通过增加隐层神经元数的方法来获得。那么究竟选取多少个隐层节点才合适?这在理论上并没有一个明确的规定。它与问题的要求、输入节点与输出节点数的多少都有直接的关系,而且隐节点的改变会直接影响网络的内部表达方式。

用径向基函数网络逼近函数时, `newrb()` 函数可自动增加网络的隐层神经元数目,直到均方差满足精度或者神经元数目达到最大为止。由于本文采用 `newrb()` 函数设计网络,所以隐含层的数目是自动生成的。

3.3.4 散布常数的选择

散布常数 *spread* 为径向基函数的扩展系数,默认值为 1.0。合理选择 *spread* 是很重要的,其值应该足够大,使径向基神经元能够对输入向量所覆盖的区间都做出响应,但也不要要求达到所有的径向基神经元都如此,只要部分径向基神经元能够对输入向量所覆盖的区间产生响应就足够了。*spread* 的值越大,其输出结果越光滑;但太大的 *spread* 值会导致数值计算上的困难。若在设计网络时,出现“Rand deficient”警告时,应该减小 *spread* 的值,重新进行设计。

在网络的设计过程中,网络要经过几个不同的散布函数的训练,通过观察每一次的误差平方来判断所选定的学习速率是否合适,图 3-2、图 3-3、图 3-4 所示的就是在相同的输入/输出、隐层节点数及相同的学习精度下,改变散布常数后的训练误差图,根据误差大小,本论文在敏感性

诊断时的径向基网络散布常数取为 0.3。

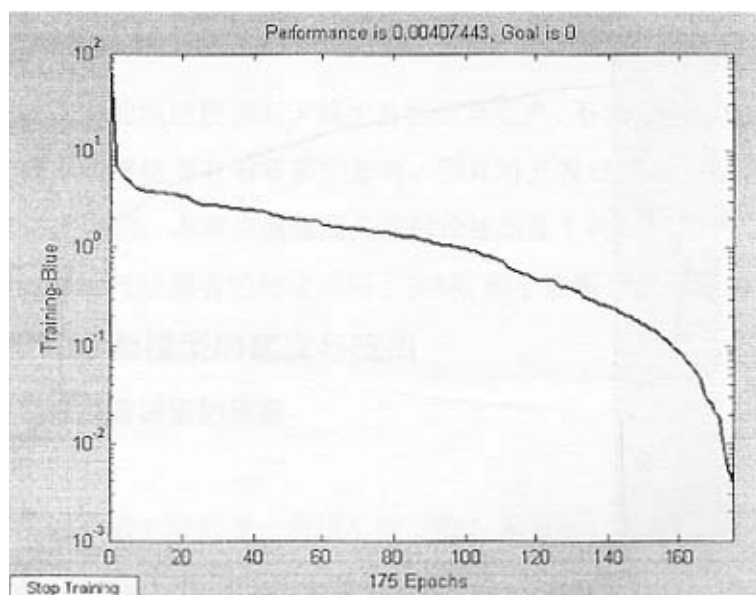


图 3-2 散步常数为 1 时的训练误差图

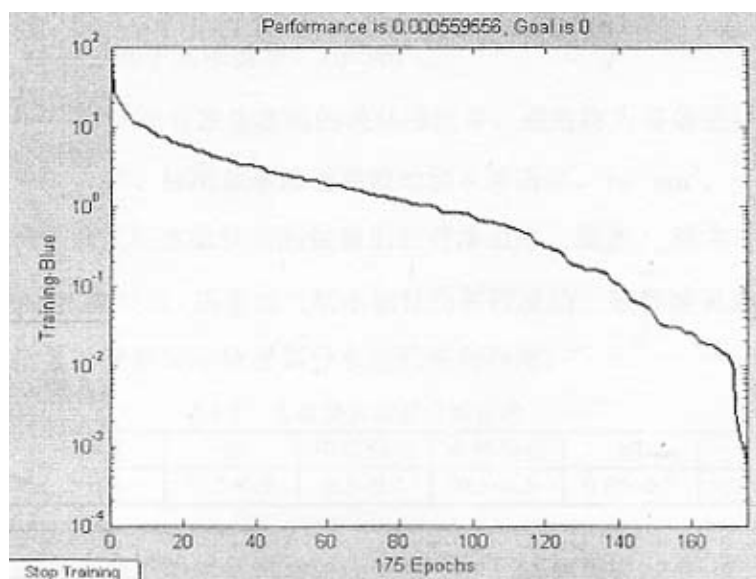


图 3-3 散步常数为 0.3 时的训练误差图

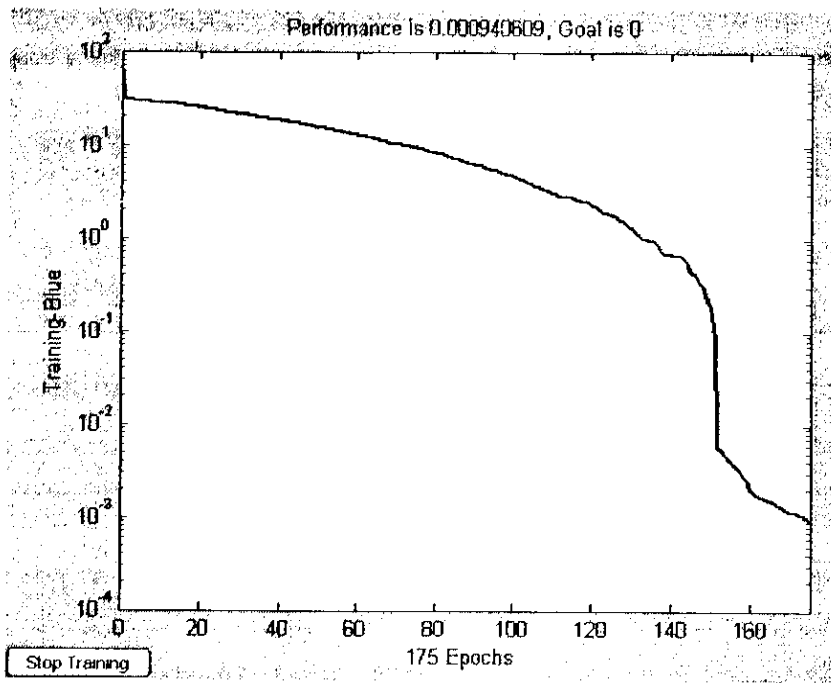


图 3-4 散步常数为 0.1 时的训练误差图

第4章 基于神经网络工具专家系统的诊断与应用

4.1 引言

开发过程中的地层损害对于油水井的正常生产、石油采收率的提高、开发生产成本的降低等有着重要的影响,因此对开发过程油气层损害的诊断是非常重要的。本章将就前面几章所论述的基于神经网络的专家系统及开发过程油气层损害的理论应用于实际,用于诊断开发过程的损害。

4.2 敏感性诊断模型的建立与应用

4.2.1 敏感性损害因素的确定

a. 水敏

油气层岩石的水敏程度一般用水敏指数 I_w 来表示, I_w 的定义为

$$I_w = \frac{k_L - k_w^*}{k_L} \quad (4-1)$$

式中 I_w ——水敏指数;

k_w^* ——去离子水渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

k_L ——岩样没有发生水敏的液体渗透率,通常称为等效液体渗透率、标准盐水渗透率或地层水渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

它反映了油气层水敏伤害后保留的相对渗透率。显然 I_w 越大,水敏伤害就越强。依据经验,描述油气层水敏性伤害程度的一般标准见表 4-1,但是各油田可以根据实际情况划分水敏的强弱程度。

表4-1 水敏损害程度诊断标准

伤害程度	极强	强	中等偏强	中等偏弱	弱	无
水敏指数	>0.9	0.7~0.9	0.5~0.7	0.3~0.5	0.05~0.3	<0.05

通过机理研究与现场资料调研的结果,我们将储层水敏性主要影响因素确定为:

- ① 油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量;
- ② 油气层岩石的孔隙度、渗透率;
- ③ 油气层的总矿化度;
- ④ 油气层岩石的泥质含量, 与岩石的胶结强度有关;
- ⑤ 颗粒粒度中值、颗粒分选系数。

b. 速敏

速敏指数指速敏伤害后岩心渗透率的最小值与临界流速下的渗透率比值, 是速敏性强弱的量度。即:

$$D_k = \frac{k_i - k_{\min}}{k_i} \quad (4-2)$$

式中 D_k ——速敏指数;

k_i ——临界流速之前岩样渗透率的平均值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$;

k_{\min} ——临界流速之后岩心渗透率的最小值, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

速敏程度与速敏指数的关系见表 4-2。

表4-2 速敏损害程度诊断标准

伤害程度	强	中等偏强	中等偏弱	弱	无
速敏指数	>0.70	0.40~0.70	0.10~0.40	0.05~0.10	<0.05

油气层的速敏指数与储层物性、岩石结构、孔隙结构、岩石基本组成、地层流体性质密切相关。通过机理研究与现场资料调研的结果, 我们将其主要影响因素确定为:

- ① 油气层岩石的孔隙度、渗透率, 与作用在岩石微粒上的水动力大小有关;
- ② 油气层的埋深, 它与岩石的压实程度有关;
- ③ 油气层岩石的蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石含量;
- ④ 油气层岩石的泥质含量, 与岩石的胶结强度有关;

- ⑤ 油气层的总矿化度;
- ⑥ 地层流体粘度和油气比;
- ⑦ K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量;
- ⑧ 地层压力;
- ⑨ 含水率。

c. 盐敏

随着含盐量的下降, 粘土矿物晶层扩张增大, 膨胀增加, 地层渗透率不断下降。通过诊断岩心渗透率最敏感的临界矿化度, 并以此为依据对油气层盐敏损害程度进行判断, 诊断标准见表 4-3。

表4-3 盐敏损害程度诊断标准

伤害程度	弱	中等偏弱	中等	中等偏强	强	极强
临界矿化度(mg/L)	≤ 1000	1000~ 2500	2500~ 5500	5500~ 8000	8000~ 25000	≥ 25000

通过机理研究与现场资料调研的结果, 我们将储层盐敏性主要影响因素确定为:

- ① 油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量;
- ② 油气层岩石的孔隙度、渗透率;
- ③ 油气层流体的总矿化度;
- ④ 油气层的钾、钠、钙、镁离子含量;
- ⑤ 油气层岩石的泥质含量;
- ⑥ 氯离子含量;
- ⑦ 颗粒分选程度。

综合以上三种敏感性损害的主要影响因素, 对敏感性损害进行综合诊断, 即输入敏感性数据后判断其发生水敏、速敏、盐敏损害的程度, 得出需要输入的诊断数据包括: 蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石含量, 孔隙度, 总矿化度, 渗透率, 泥质含量, 颗粒粒度中值, 颗粒分选系数,

原油粘度, 油气比, 钾离子、钠离子、钙离子、镁离子、氯离子含量, 含水率和地层压力; 输出数据包括水敏指数, 速敏指数和临界矿化度。

4.2.2 敏感性损害诊断数据的归一化处理

在建立模型前首先对数据进行处理, 将定性数据定量化, 将定量数据归一化, 归一化公式如下:

$$a'_{ji} = 0.1 + \frac{0.9 - 0.1}{a_{jmax} - a_{jmin}} (a_j - a_{jmin}) \quad (4-3)$$

式中 a_{jmax} 、 a_{jmin} 分别为该组数据的最大值、最小值。

在训练样本数据中, 将据标准化处理。在后面建立的模型中, 相对应的附表所列出的样本集也同样对这些参数进行了标准化处理。

敏感性数据共有 66 组样本, 取 50 组作为训练数据, 16 组作为预测数据。表 4-4 列举了部分归一化训练数据, 完整的敏感性诊断样本集见附录中的附表 1。

4.2.3 敏感性诊断模型的建立与训练

在储层敏感性研究过程中, 我们能够获取的信息主要是储层敏感性的影响因素, 但是, 敏感性与各因素之间的关系不确定。对于这种情况, 我们可以建立如下的非线性系统表达式:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4-4)$$

式中 x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 个影响因素。

相应的神经网络模型描述为:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, w) \quad (4-5)$$

式中 w 为神经网络参数。

将水敏指数、速敏指数和临界矿化度值作为径向基网络的输出层, 其 18 种影响因素为输入层, 共有 66 组样本, 取 50 组作为训练样本, 用其余的 16 组样本对所建立模型的预测结果进行检验。

表 4-4 敏感性模型诊断部分数据

井号	蒙脱石含量(%)	伊利石含量(%)	高岭石含量(%)	绿泥石含量(%)	孔隙度	总矿化度(mg/L)	泥质含量	颗粒粒度中值(mm)	原油粘度(mPa·s)	油气比	[K ⁺ +Na ⁺](mg/L)	渗透率(μm^2)	水敏指数	速敏指数
枣1340井	63.3	7.09	25.17	3.09	0.857143	601.76	0.15072	0.096	62.77	1	0.10216	0.2972	0.77	0.31234
枣43井	63	7.09	25.07	2.3	0.857143	516.671	0.21112	0.0965	3.34	0.75	0.089541	0.241352	0.8	0.26103
枣1272-1	63	7.09	25.07	2.3	0.857143	516.671	0.18536	0.096	9.4	0.75	0.089541	0.2482	0.68	0.26411
枣1286	63	7.09	25.07	2.3	0.857143	516.671	0.19336	0.097	85.49	0.75	1	0.28024	0.82	0.1451
枣116井	63	7.09	25.07	2.3	0.857143	516.671	0.6264	0.096	16.85	0.75	1	0.832	0.35	0.59965
F29-19	63.3	7.09	25.17	3.09	0.857143	384.102	0.7568	0.096	55.21	0.55	0.275176	0.136088	0.61	0.119699
枣40-20	63.3	7.09	25.17	3.75	0.857143	404.108	0.15976	0.096	135.2	0.65	0.877214	0.68	0.56	0.578317
F37-17	58.5	7.09	25.17	3.09	0.81	277.407	0.16936	0.096	65.77	0.317	0.213055	0.1448	0.79	0.22637
枣1141井	63	7.75	28	3.09	0.81	277.407	0.17296	0.096	89.45	0.317	0.204562	0.1712	0.65	0.378422
F30-15	63.3	7.75	25.17	2.3	0.857143	516.671	0.258804	0.097	43.07	0.75	0.404271	0.169806	0.82	0.214779
F33-1	63.3	7.75	25.07	2.3	0.857143	384.102	0.340531	0.096	134.6	0.55	0.245814	0.415399	0.35	0.102967
F10-1	63.3	7.09	25.07	2.3	0.857143	384.102	0.351661	0.097	68.55	0.55	0.275176	0.209271	0.61	0.119699
F15-5	63.3	7.09	25.07	3.09	0.857143	273.406	0.196844	0.098	46.9	0.275	0.069401	0.376054	0.56	0.019584
枣1236井	63.3	7.09	25.17	3.09	0.857143	535.609	0.1	0.15	126.57	0.8	0.136375	0.404555	0.79	0.044766
枣121井	58.5	7.09	25.17	3.75	0.857143	404.108	0.15072	0.096	7.85	0.65	0.042708	0.2972	0.65	0.010781
枣1320井	58.5	7.09	25.17	3.75	0.571429	416.644	0.21112	0.15	12.77	0.55	0.107741	0.241352	0.89	0.033429
枣40-21井	58.5	7.09	25.17	3.09	1	194.185	0.18536	0.096	96.5	0	0.230527	0.2482	0.86	0.093004
枣30-6井	63.3	7.75	25.17	2.3	1	194.185	0.19336	0.148	78.07	0	0.107741	0.28024	0.79	0.033429
枣21井	63.3	7.75	25.17	2.3	0.857143	384.102	0.6264	0.096	135.2	0.55	0.275176	0.832	0.86	0.119699

径向基网络的第二层为线性神经元层,其权值和阈值的调整需要满足输出向量和期望值相等的要求。

$$[W\{2,1\}b\{2\}] * [A\{1\},ones] = T \quad (4-6)$$

其中 $A\{1\}$ 为第一层输出, $W\{2,1\}$ 为第二层权值, $b\{2\}$ 为第二层阈值, T 为期望值。如果计算第二层的权值和阈值,需要使得均方误差最小,计算调用方式如下:

$$Wb = T / [P;ones(1,Q)] \quad (4-6)$$

其中 Wb 包含了权值和阈值向量。

在 Matlab 数学计算软件中,应用 newrb 函数生成的径向基网络: $net = newrb(P, T, goal, Spread)$ 。其中 $Spread$ 为径向基层的散布常数,这里取 0.3,训练 $goal$ 为 0.0001, P 为输入向量, T 为期望输出向量,即目标值。

生成的网络结构如图 4-1。

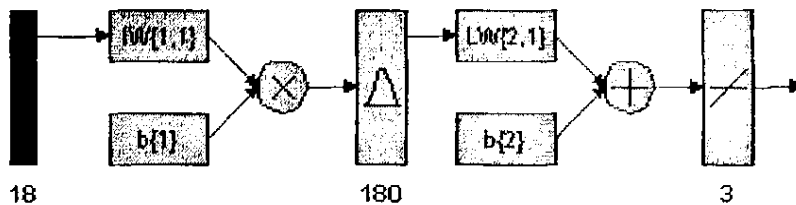


图 4-1 敏感性诊断模型的网络结构图

网络模型输入层为 18 个神经元节点,输出层 3 个节点,一个隐层,节点数为 180 个。用训练样本集对网络模型进行训练,训练的结果误差随着迭代步数的变化过程如图 4-2 所示。

通过训练,网络达到了目标误差要求。

4.2.4 模型的仿真预测

用训练好的网络模型对 16 组样本的水敏指数、速敏指数和临界矿化

度值进行预测，并将结果与实际值进行比较，如表 4-5 所示。

由表4-5得出径向基网络预测的水敏、速敏和盐敏诊断得误差平均值分别为7.22%、9.88%、11.63%；在预测的16组样本中，除了个别得误差较大外，绝大部分得预测结果正确率达到90%以上预测效果较好，满足实际应用的要求，说明采用径向基网络建立的敏感性预测模型是有效的。要使网络具有较好的泛化能力，样本的覆盖面必须要广，而且样本的数量要足够多。

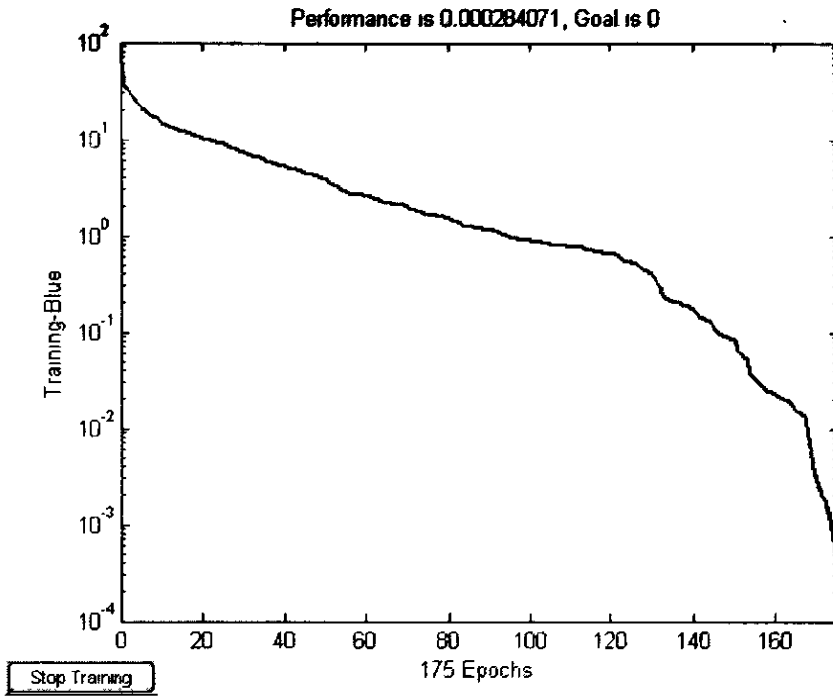


图 4-2 敏感性诊断模型的训练结果

4.2.5 模型的现场应用

对孤东 17 口井的参数资料进行整理，得到网络模型的输入样本集见附表 3。这些井分别位于七区、二区和八区这三个区块。由于模型的建立和仿真应用过程与前面介绍的相同，这里就不再重复。表 4-6 中列出了各敏感性损害的模型诊断结果。

表 4-5 敏感性诊断模型预测结果比较

井号	水敏指数 样本值	水敏指数 预测值	相对误差 (%)	速敏指数 样本值	速敏指数 预测值	相对误差 (%)	临界矿化度 样本值(mg/L)	临界矿化度 预测值(mg/L)	相对误差 (%)
港 10-28	0.605643	0.605755	0.0185	0.309524	0.309654	0.042	13000	13252	1.9385
港 11-30	0.686907	0.687026	0.0173	0.274164	0.270246	1.4291	13000	13245	1.8846
港 1-60	0.894582	0.493688	44.8136	0.273635	0.274458	0.3008	12000	12066	0.55
港 16-73-1	0.809707	0.814458	0.5868	0.485482	0.480242	1.0793	7000	7025	0.3571
港 213	0.490068	0.492568	0.5101	0.785841	0.18612	76.3158	7000	7021	0.32
港 2-27	0.79526	0.79632	0.1333	0.785841	0.18624	76.3005	5000	5220	4.4
港 246	0.416027	0.416235	0.05	0.843259	0.843446	0.0222	5000	5215	4.3
东 4-17	0.336569	0.336662	0.0276	0.707589	0.7025	0.7192	13000	12860	1.0769
东 8-29-1	0.605643	0.613652	1.3224	0.485482	0.485685	0.0418	10000	10525	5.25
港 10-23	0.840406	0.841246	0.1	0.485482	0.485685	0.0418	10000	25538	155.38
港 10-28	0.659819	0.660654	0.1265	0.485482	0.486234	0.1549	13500	13525	0.1852
港 11-30	0.655305	0.658632	0.5077	0.485482	0.486325	0.1736	10000	10208	2.08
港 1-60	0.511738	0.512135	0.0776	0.785841	0.788825	0.3797	13000	13438	3.3692
港 16-73-1	0.896388	0.898654	0.2528	0.785841	0.78882	0.3791	13000	13346	2.6615
港 213	0.894582	0.294655	67.0623	0.785747	0.78868	0.3733	10000	9845	1.55
港 2-27	0.894445	0.841449	0.00042	0.485482	0.48324	0.4618	10000	9886	1.14

4.3 损害类型诊断模型的建立与应用

4.3.1 各种损害类型损害因素的确定

a. 微粒运移

通过对油气层微粒运移损害的机理研究,确定了它的影响要素,因此可以建立由于微粒运移损害而造成的渗透率损害程度模型。我们将模型输入层中的影响因素确定为:①临界流速;②注入流体 pH 值;③孔喉直径;④粒度中值;⑤生产压差;⑥原始渗透率;⑦注入速度。

b. 固相颗粒侵入

通过对固相颗粒侵入损害机理的研究,确定了8种影响因素:①工作液与地层的接触时间;②固相含量;③注入速度;④颗粒粒度中值;⑤孔喉直径;⑥原始渗透率;⑦临界流速;⑧生产压差。

c. 水化膨胀

通过对水化膨胀损害机理的研究结果,确定了8种影响因素:①水敏指数;②临界矿化度;③原始渗透率;④遇水时间;⑤生产压差;⑥泥质含量;⑦外来流体总矿化度;⑧温度。

d. 无机垢

通过对无机垢损害的机理研究结果,确定了9种影响因素:①注入水矿化度;②注入速度;③结垢离子的浓度;④注入流体 pH 值;⑤原始渗透率;⑥临界矿化度;⑦生产时间;⑧温度;⑨地层流压。

e. 有机垢

通过对有机垢损害的机理研究,我们确定10种影响因素:①温度;②临界流速;③生产时间;④生产油气比;⑤含水率;⑥井底流压;⑦原始渗透率;⑧原油粘度;⑨原油密度;⑩原油含蜡量。

为了诊断更加方便、快捷,我们把四种损害类型综合起来进行诊断,得到需要输入的数据包括孔喉直径、流体 pH 值、粒度中值、注水压差、

渗透率、临界流速、注入速度、固相含量、遇水时间、温度、临界矿化度、泥质含量、总矿化度、水敏指数、结垢离子的平均浓度、生产时间、地层压力、含水率、井底流压、原油含腊量、原油胶质和沥青质含量、原油密度、原油粘度、油气比；输出数据为四种损害的损害后渗透率降低值。

4.3.2 各种损害类型主要损害因素数据的归一化处理

同样的方法对输入数据进行归一化处理，输入数据见附表2，诊断模型部分数据见表4-7。

4.3.3 损害类型诊断模型的建立与训练

基于敏感性诊断的专家系统原理和方法，将微粒运移、固相入侵、水化膨胀和结垢损害后的损害后渗透率的降低值作为径向基网络的输出层，其24种影响因素为输入层，共有70组样本，取50组作为训练样本，用其余的20组样本对所建立模型的预测结果进行检验。

在Matlab数学计算软件中，应用newrb函数生成的径向基网络： $net = newrb(P, T, goal, Spread)$ 。其中 $Spread$ 为径向基层的散布常数，经过优选后，这里取0.1，训练 $goal$ 为0.0001， P 为输入向量， T 为期望输出向量，即目标值。

生成的网络结构如下图：

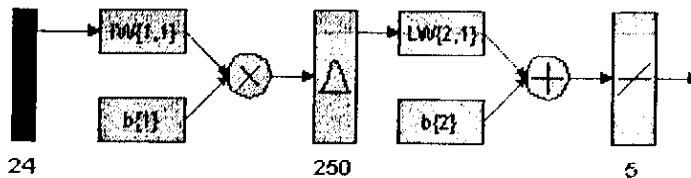


图 4-3 主要损害类型诊断的网络结构图

网络模型输入层为24个神经元节点，输出层5个节点，一个隐层，节点数为250个，训练的结果误差变化过程如图4-4所示。

表 4-6 基于神经网络的专家系统对孤东 17 口井敏感性诊断的结果

井号	水敏指数	水敏程度	速敏指数	速敏程度	临界矿化度 (mg/L)	速敏程度
7-26-395	0.486214	中等偏弱	0.653546	中等偏强	5358	中等
7-34-3406	0.475632	中等偏弱	0.682305	中等偏强	4850	中等
8-19-8	0.573625	中等偏强	0.602158	中等偏强	5982	中等偏强
8-20N2008	0.532534	中等偏强	0.532658	中等偏强	6125	中等偏强
2-15-262	0.531422	中等偏强	0.645545	中等偏强	6205	中等偏强
2-15-61	0.394655	中等偏弱	0.635438	中等偏强	5425	中等
7-98-375	0.515368	中等偏强	0.542308	中等偏强	5752	中等偏强
7-28-5375	0.462355	中等偏弱	0.503588	中等偏强	4858	中等
7-30-3355	0.422516	中等偏弱	0.533235	中等偏强	5200	中等
7-30-365	0.462352	中等偏弱	0.525048	中等偏强	4800	中等
7-40-395	0.325416	中等偏弱	0.546825	中等偏强	4626	中等
8-19-N11	0.500145	中等偏强	0.621455	中等偏强	5636	中等偏强
8-20-2016	0.425328	中等偏弱	0.594812	中等偏强	5853	中等偏强
8-22-12	0.502575	中等偏强	0.642852	中等偏强	5998	中等偏强
8-26-16	0.512536	中等偏强	0.623658	中等偏强	6248	中等偏强
8-26-N8	0.585318	中等偏强	0.612278	中等偏强	6326	中等偏强
8-32-K10	0.485332	中等偏弱	0.582564	中等偏强	5550	中等偏强

表4-7 主要损害类型诊断部分输入数据

井号	孔隙直径 (μm)	粒度中值 (mm)	注水压差 (MPa)	渗透率 (μm^2)	临界流速 (mL/min)	注入速度 (m/s)
东4-17	60	0.11	4.8	0.10739	0.31234	2
东8-29-1	56	0.11	2	0.40761	0.26103	1
港10-23	35	0.07	5.2	0.15563	0.26411	2
港10-28	65	0.09	4.8	0.35951	0.1451	1
港11-30	17	0.22	4.5	0.39435	0.59965	4
港1-60	16	0.26	4.2	0.35829	0.119699	6
港16-73-1	14	0.39	3.6	0.32251	0.578317	3
港213	13	0.42	3.5	0.32251	0.22637	3
港2-27	19	0.09	2.6	0.28025	0.378422	4
港246	63	0.08	2.9	0.35829	0.214779	3
港250	69	0.14	3.9	0.35829	0.102967	3
港250K	26	0.13	4.3	0.35829	0.119699	4
港2-55	28	0.17	4.1	0.115	0.019584	5
港276	36	0.11	3.2	0.50234	0.044766	3
港30	15	0.11	3.4	0.26945	0.010781	2
港3-25-1	13	0.26	2.8	0.115	0.033429	4
港3-29	19	0.16	2.7	0.07484	0.093004	5
港339	18	0.09	2	0.115	0.033429	3
港34	16	0.12	3.6	0.35829	0.119699	3
港34	17	0.12	4.8	0.35829	0.102967	4
港3-61	16	0.25	4.5	0.35829	0.117671	3
港3-61-2	14	0.15	2.5	0.10576	0.031251	2
港3-61-2	13	0.09	3.6	0.17427	0.03112	4
港3-72	19	0.11	4.1	0.34106	0.044977	5
港4-26	71	0.11	2.9	0.115	0.049866	3
港4-39	63	0.11	3.7	0.3947	0.02612	2
港4-63	69	0.07	3.6	0.35829	0.048837	6
港4-64-1	26	0.09	2.5	0.35829	0.053986	4
港5-17	28	0.22	4.8	0.28025	0.147847	6
港5-25	36	0.26	4.6	0.28025	0.104045	4
港5-28	15	0.12	4.2	0.28025	0.026908	3
港5-28	13	0.12	3.5	0.07484	0.093004	2
港5-39	19	0.25	2.6	0.02205	0.03163	3
港6-18	29	0.15	3.5	0.50234	0.044766	4
港6-23	65	0.09	3.6	0.35634	0.161185	2
港6-36	71	0.11	4.1	0.02205	0.03163	6
港6-69	63	0.11	2.9	0.34106	0.026167	4

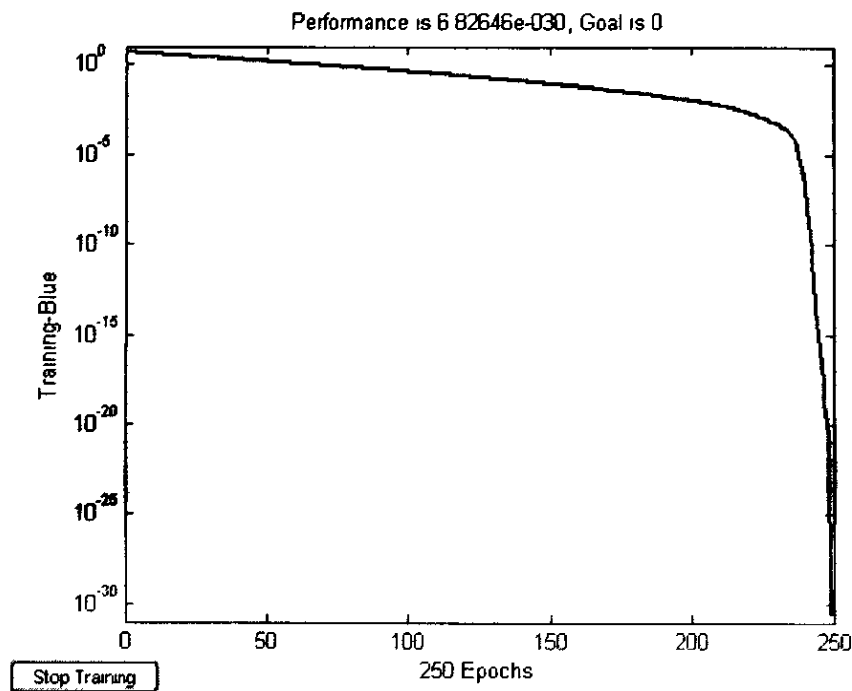


图 4-4 主要损害类型诊断模型的训练结果

通过训练误差图 4-4，我们看出训练精度达到了要求。

4.3.4 模型的仿真预测

用训练好的网络模型对 20 组样本的损害后渗透率值进行预测，并将结果与实际值进行比较，如表 4-8 所示。

由表 4-8 可以看出，微粒运移、固相入侵、水化膨胀、无机垢和有机垢损害的预测结果误差平均值分别为：11.48%、18.2%、18.14%、10.96% 和 20.11%，总的误差平均值为 15.78%；经过分析，该组样本中绝大部分井的预测结果误差值小于 3%，只有个别井误差较大，整体预测效果较好，说明建立的损害类型诊断模型是有效的。

4.3.5 模型的现场应用

对孤东 17 口井的参数资料进行整理，得到网络模型的输入样本集见附表 3。这些井分别位于七区、二区和八区这三个区块。由于模型的建

立和仿真应用过程与前面介绍的相同,这里就不再重复。表4-9中列出了主要损害类型损害的模型诊断结果。

这里我们考虑微粒运移、固相入侵、水化膨胀和结垢四种主要损害类型,并认定为油气层损害的所有来源。由表4-9各井四种损害类型专家系统诊断结果,可以得出各井及该区块四种损害所占的比例,见表4-10和表4-11。

表4-11 孤东17口井各损害类型导致损害程度的专家系统诊断结果

损害类型	微粒运移 (%)	固相入侵 (%)	水化膨胀 (%)	结垢损害	
				无机垢 (%)	有机垢 (%)
各损害因素导致损害程度的比例(%)	26.89	22.33	20.62	20.17	9.98

从表4-11可知,该区各损害类型的损害程度的排序为:微粒运移>固相入侵>水化膨胀>无机垢>有机垢,但损害程度比例有所不同。

表 4-8 四种主要损害类型诊断模型预测结果比较

井号	微粒运移 样本值 (μm^3)	微粒运移 预测结果 (μm^3)	相对误差 (%)	固相入侵 样本值 (μm^3)	固相入侵 预测结果 (μm^3)	相对误差 (%)	水化膨胀 样本值 (μm^3)	水化膨胀 预测结果 (μm^3)	相对误差 (%)	无机垢 样本值 (μm^3)	无机垢 预测结果 (μm^3)	相对误差 (%)	有机垢 样本值 (μm^3)	有机垢 预测结果 (μm^3)	相对误差 (%)
港 9-26	0.06742	0.06735	0.1038	0.05364	0.05258	1.9761	0.03214	0.03215	0.0311	0.025697	0.025568	0.502	0.024155	0.024386	0.9563
港新 3-28	0.07235	0.07225	0.1382	0.04568	0.04526	0.9194	0.01523	0.06525	328.4307	0.013692	0.013685	0.0511	0.021458	0.021465	0.0326
港新 7-27	0.06232	0.05845	6.2099	0.02364	0.02455	3.8494	0.00832	0.00835	0.3606	0.035714	0.035726	0.0336	0.012547	0.012864	2.5265
浅 1-5	0.02365	0.02355	0.4228	0.02482	0.02385	3.9081	0.02547	0.02585	1.492	0.012478	0.012565	0.6972	0.021014	0.021242	1.085
浅 2-11	0.04358	0.04328	0.6884	0.03587	0.03585	0.0558	0.02415	0.02425	0.4141	0.021445	0.022552	5.162	0.014178	0.014248	0.4937
浅 2-13-1	0.03682	0.03625	1.5481	0.01769	0.01762	0.3957	0.01458	0.01452	0.4115	0.042547	0.042586	0.0917	0.014753	0.014755	0.0136
浅 2-5	0.01357	0.01855	36.6986	0.01354	0.01352	0.1477	0.01244	0.01245	0.0804	0.024125	0.023625	2.0725	0.012586	0.012598	0.0953
浅 2-5	0.00425	0.00415	2.3529	0.00523	0.00535	2.2945	0.00152	0.00152	0.0004	0.001452	0.001462	0.6887	0.004822	0.004845	0.477
浅 3-11	0.03528	0.03525	0.085	0.02417	0.02415	0.0827	0.04452	0.04448	0.0898	0.014521	0.014625	0.7162	0.014778	0.014855	0.521
浅 3-3	0.06272	0.06205	1.0682	0.05425	0.05412	0.2396	0.02143	0.02125	0.8399	0.012247	0.012346	0.8084	0.012472	0.012872	3.2072
浅 3-4	0.02134	0.02122	0.5623	0.02475	0.02258	8.7677	0.03247	0.03258	0.3388	0.024711	0.025015	1.2302	0.028963	0.028536	1.4743
浅 4-10	0.03978	0.03928	1.2569	0.03938	0.03926	0.3047	0.01452	0.01455	0.2066	0.034124	0.034128	0.0117	0.038526	0.038546	0.0519
浅 7-8	0.00234	0.00235	0.4274	0.00142	0.00546	284.507	0.01142	0.01148	0.5254	0.000124	0.000132	6.4516	0.000175	0.000179	2.2857
浅 8-8	0.03675	0.03652	0.6259	0.03455	0.03455	0.0002	0.02418	0.02462	1.8197	0.012475	0.012485	0.0802	0.024125	0.024133	0.0332
羊 10-13-2	0.01215	0.01214	0.0823	0.01425	0.01425	0.0011	0.03248	0.03285	1.1392	0.001045	0.001225	17.2249	0.001425	0.001435	0.7018
羊 10-29	0.03215	0.08215	155.521	0.05422	0.05215	3.8178	0.02134	0.02135	0.0469	0.034125	0.095875	180.9524	0.012525	0.012555	0.2395
羊 10-29	0.03685	0.03685	0.00004	0.01355	0.01358	0.2214	0.02425	0.02822	16.3711	0.024512	0.024536	0.0979	0.032022	0.032088	0.2061
羊 10-29-2	0.00365	0.00326	10.6849	0.00535	0.00256	52.1495	0.00478	0.00488	2.0921	0.001462	0.001486	1.6416	0.001425	0.001435	0.7018
羊 10-29-2	0.06305	0.06255	0.793	0.05402	0.05412	0.1851	0.00132	0.00122	7.5758	0.001252	0.001255	0.2396	0.054185	0.084228	55.4452

表 4-9 基于神经网络的专家系统对孤东 17 口井主要损害类型诊断的结果

井号	微粒运移损害后渗透率 降低值(μm^2)	固相入侵损害后渗透率 降低值(μm^2)	水化膨胀损害后渗透率 降低值(μm^2)	无机垢损害后 渗透率降低值 (μm^2)	有机垢损害后 渗透率降低值 (μm^2)
7-26-395	0.058648	0.049365	0.066358	0.050132	0.020368
7-34-3406	0.053259	0.042218	0.060259	0.046256	0.018256
8-19-8	0.050025	0.039685	0.060248	0.039569	0.014238
8-20N2008	0.055635	0.042356	0.060235	0.042535	0.015239
2-15-262	0.076858	0.072582	0.059369	0.058254	0.022205
2-15-61	0.067254	0.054125	0.057869	0.042534	0.021458
7-38-375	0.052694	0.039758	0.057258	0.042355	0.020369
7-28-5375	0.058785	0.048582	0.057012	0.050124	0.040235
7-30-3355	0.048526	0.038259	0.055254	0.044253	0.021425
7-30-365	0.042689	0.035529	0.052368	0.050126	0.032012
7-40-395	0.042154	0.032515	0.050014	0.036525	0.032142
8-19-N11	0.095526	0.080258	0.048528	0.062618	0.031545
8-20-2016	0.095485	0.080215	0.048218	0.062452	0.024136
8-22-12	0.096858	0.080265	0.045715	0.062658	0.025148
8-26-16	0.098255	0.083685	0.045825	0.061289	0.039568
8-26-N8	0.095568	0.083568	0.044218	0.068568	0.028629
8-32-K10	0.095478	0.080259	0.039254	0.067825	0.032568

表 4-10 单井各损害类型导致损害程度的专家系统诊断结果

井号	微粒运移(%)	固相入侵(%)	水化膨胀(%)	结垢	
				无机垢(%)	有机垢(%)
7-26-395	23.95	20.16	27.1	20.47	8.32
7-34-3406	24.18	19.17	27.36	21	8.29
8-19-8	24.55	19.48	29.57	19.42	6.99
8-20N2008	25.76	19.61	27.89	19.69	7.06
2-15-262	26.57	25.09	20.52	20.14	7.68
2-15-61	27.65	22.25	23.79	17.49	8.82
7-38-375	24.8	18.72	26.95	19.94	9.59
7-28-5375	23.08	19.07	22.38	19.68	15.8
7-30-3355	23.36	18.42	26.6	21.3	10.3
7-30-365	20.07	16.7	24.62	23.56	15
7-40-395	21.8	16.82	25.87	18.89	16.6
8-19-N11	29.99	25.2	15.24	19.66	9.91
8-20-2016	30.75	25.83	15.53	20.11	7.77
8-22-12	31.18	25.84	14.72	20.17	8.1
8-26-16	29.9	25.47	13.94	18.65	12
8-26-N8	29.81	26.07	13.79	21.39	8.93
8-32-K10	30.27	25.45	12.45	21.51	10.3

第5章 基于模糊数学理论的油气层损害诊断技术研究

5.1 前言

模糊数学是用数学方法研究和处理模糊性现象的数学。所谓模糊性是指客观事物中的不分明性,模糊性的根源在于客观事物的差异之间存在着中介过度。这样的事例在日常生活中屡见不鲜,如说一个人的身材是“高个”、“中等个”或“矮个”,这就是一种模糊概念,人们很难确切地说究竟多高算“高个”等等。又如区分一个人的学习成绩是“好”、“一般”或“差”等等。这些有差异的或对立的概念,都没有绝对分明的界限。

精确数学是建立在集合论的基础上的,根据集合论的要求,一个对象对于一个集合,要么属于它,要么不属于它,二者必居其一,且仅居其一,绝不允许模棱两可。因此一个集合所包含的事物(叫做集合的“外延”)必须明确,由于集合论本身的这个要求,就大大地限制了它的应用范围,而使它无法处理日常生活中大量的模糊现象与概念。我们把这种由于概念外延的模糊,而造成的划分上的不确定性,称作模糊性。

现实世界中有很多事物之间的关系是模糊的,如胖和瘦、高和矮、年老和年轻、大和小等,都没有明确的界限,具有模糊性。对客观事物的评价,也往往不能以一种指标决定,而要进行多指标综合评价。评价涉及多指标的事物,从某一种指标出发可以对它做出一种评判,而从另一种指标出发又可对它做出另一种评判。这样,就有一个综合各方面的指标做出一个更接近实际的评价的问题,以避免仅从一个指标就做出评判而带来的片面性。因此,可以利用模糊集理论对某一考核系统的各指标的实现程度进行综合,然后根据指定的标准,得出综合性的评价意见。模糊集理论就是模糊评价的原理^[41]。

5.2 基于模糊数学理论油气层敏感性诊断模型的建立与应用

5.2.1 水敏损害程度诊断模型的建立与应用

当与地层不配伍的外来流体进入地层后,引起岩石中粘土矿物变化,粘土矿物出现絮凝、膨胀、收缩、分散、流失、运移、沉降和堵塞等过程,并最终使岩石渗透率下降的现象,称为水敏。水敏诊断需要考虑多种因素。由于对这些因素进行定性分析,受主观因素和经验评价的影响较大;而定量分析具有一定模糊性。因此,本项目应用模糊数学的原理,选择油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量,油气层岩石的孔隙度、渗透率,油气层的总矿化度这些因素,建立用于诊断水敏程度的最优化模型。

5.2.1.1 诊断选择指标

(1)油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量

蒙脱石晶层之间只存在分子间引力,水分子很容易进入层间;并且由于其比面积大,阳离子交换量高,因而是典型的膨胀性粘土矿物,它的存在对储层水敏性影响最大。伊利石虽与蒙脱石同属 2:1 层型粘土,但加入水时,晶层不分开,层间的钾离子对交换作用是无效的,只有在外表面的钾离子能同其他阳离子产生交换作用。因此,伊利石只产生晶体的表面水化,其膨胀率和阳离子交换量均远远小于蒙脱石。在其它因素相近的情况下,膨胀性粘土含量越高,则水敏性越强。即蒙脱石、伊利石的含量越高,水敏越严重。

(2)油气层岩石的孔隙度、渗透率

一般地,在低渗、特低渗油藏中,孔喉尺寸较小,即使只存在少量的水敏性粘土矿物,也可能对储层渗透率造成较大的影响;在中高渗透率的油气藏中,少量水敏性粘土矿物的存在对渗透率的影响相对较小。在其它条件相同的情况下,油气层渗透率越低,敏感性矿物对油气层造成损害的可能性和损害程度就越大。以此可以看出,在其它条件相同时,

油气层岩石的孔隙度、渗透率越小,水敏越严重。

(3)油气层的总矿化度

当外来流体矿化度低于岩石临界矿化度时,由于存在渗透水化,导致粘土矿物急剧膨胀。并且,外来流体矿化度与地层水矿化度差异越大,则膨胀越严重,水敏性越强。由此看来,外来流体的矿化度越低,引起油气层的水敏行损害越强。

5.2.1.2 隶属度的求取

从定性的角度,利用上述指标可以判断水敏损害的严重程度,但是当指标与指标之间出现矛盾时,就必须将定性概念转化为定量数据,用专家系统知识的不确定性表示方法,将这些诊断指标表示成判断水敏损害的决策因子。

利用隶属函数(μ)求得每项指标的决策因子(F)的大小,根据现场实际问题的特点,我们采用简化的梯形分布(如图5-1所示),油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量指标采用升半梯形分布(油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量越大、水敏损害越严重),而油气层岩石的孔隙度、渗透率和总矿化度指标采用降半梯形分布(油气层岩石的孔隙度、渗透率越小,总矿化度越低,水敏越严重)。

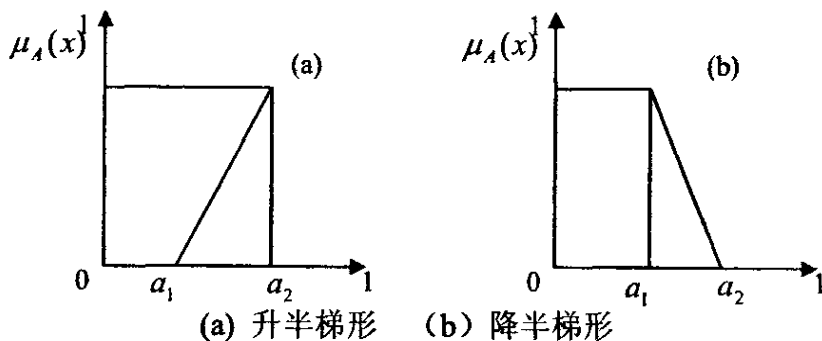


图5-1 梯形分布图

简化的升半梯形的数学模型为:

$$\mu_A(x) = \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} (a_1 \leq x \leq a_2) \quad (5-1)$$

式中 a_1 、 a_2 为单项指标的最小值与最大值。

简化的降半梯形的数学模型为:

$$\mu_A(x) = \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} (a_1 \leq x \leq a_2) \quad (5-2)$$

式中 a_1 、 a_2 为单项指标的最小值与最大值。

(1) 油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量决策因子的求取

利用简化的升半梯形分布表示成以蒙脱石、伊利石含量来诊断水敏损害程度的决策因子 $F(i)$ ，计算公式如下:

$$F(i) = \frac{X(i) - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5-3)$$

式中 $X(i)$ ——第 i 口井的蒙脱石含量和伊利石含量值;

$F(i)$ ——第 i 口井的蒙脱石和伊利石含量的隶属度;

n ——参与决策的总注水井数;

$X_{\max} = \max(X(1), X(2), \dots, X(n))$;

$X_{\min} = \min(X(1), X(2), \dots, X(n))$ 。

$F(i)$ 值越大，水敏损害程度越严重。

(2) 油气层岩石的孔隙度、渗透率和总矿化度决策因子的求取

利用降半梯形分布求得油气层岩石的孔隙度、渗透率和总矿化度决策因子 $F(i)$ ，计算公式如下:

$$F(i) = \frac{X_{\max} - X(i)}{X_{\max} - X_{\min}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5-4)$$

式中 $X(i)$ ——第 i 口井的孔隙度、渗透率和总矿化度值;

$F(i)$ ——第 i 口井的决策因子;

X_{\max} 、 X_{\min} ——最大、最小的孔隙度、渗透率和总矿化度值。

求得每口井的 $F(i)$ 后, 根据决策因子的大小诊断水敏损害的严重程度。

5.2.1.3 多因素综合诊断

假设有 i 口井参与诊断, 需考虑因素有 j 个, 利用隶属函数求出的隶属度 F_{ij} 构成一个模糊矩阵:

$$F = \begin{pmatrix} F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1n} \\ F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2n} \\ \vdots \\ F_{n1}, F_{n2}, \dots, F_{nn} \end{pmatrix} \quad (5-5)$$

根据实际情况确定各因素的权数 λ_i , 满足归一化条件

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 (0 \leq \lambda_i \leq 1) \quad (5-6)$$

全部 λ_i 构成一个模糊向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, 利用线形交换方法, 求出各井的综合决策因子 $F_Z(i)$:

$$F_Z(i) = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \bullet \begin{pmatrix} F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1n} \\ F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2n} \\ \vdots \\ F_{n1}, F_{n2}, \dots, F_{nn} \end{pmatrix} = (F_Z(1), F_Z(2), \dots, F_Z(n)) \quad (5-7)$$

通常根据 $F_Z(i)$ 值大小诊断水敏损害的严重程度。

5.2.1.4 水敏诊断实例分析

以孤东油田 17 口井的资料为例, 我们选择油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量, 油气层岩石的孔隙度、渗透率, 油气层的总矿化度作为选择指标, 利用现场资料收集的数据求取用于诊断水敏损害严重程度的综合决策因子。根据所得的水敏决策因子的大小, 诊断各井的损害程度, 其平均值大小可以反映该区块的水敏损害严重程度。

这里,分别用 F_M , F_Y , F_ϕ , F_k , F_C 表示为油气层岩石的蒙脱石含量、伊利石含量,岩石的孔隙度、渗透率,油气层的总矿化度的隶属度。根据现场经验设置各个隶属度的权值,附录B中以7-26-395井为例,说明了 F_M 、 F_Y 、 F_ϕ 、 F_k 、 F_C 和 F_{Z1} 的计算过程,所有井的计算结果见表5-1。

对基于模糊数学理论的水敏损害诊断结果与基于神经网络工具的专家系统诊断结果进行分析,发现两个模型诊断的水敏损害程度的排列顺序基本相同。因此,基于模糊数学理论的诊断不仅是基于神经网络工具的专家系统诊断结果的有效补充,而且可以充分验证基于神经网络工具的专家系统诊断的准确性,结果对比如表5-2。

5.2.2 速敏损害程度诊断模型的建立与应用

速敏指数可以全面、客观和定量地描述岩心的速敏性质,速敏指数与临界流量是一种互补的关系,临界流量仅说明了当流量超过它时底层将发生速敏伤害,而速敏指数则可以综合表示出底层对流速的敏感性程度和伤害程度的大小^[42]。

同理,我们选择油气层岩石的孔隙度,蒙脱石和伊利石含量,油气层岩石的泥质含量,地层流体的粘度作为诊断指标,其中蒙脱石、伊利石和泥质含量以及地层流体的粘度的隶属度的求取采用升半梯形分布,油气层岩石的孔隙度的隶属度的求取采用降半梯形分布。

以孤东17口井的数据为例,计算结果如表5-3,计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果非常吻合,见表5-4,从而证明了基于神经网络的专家系统诊断的正确性。

附录B中以7-26-395井为例,说明了 F_M 、 F_Y 、 F_N 、 F_μ 、 F_ϕ 和 F_{Z2} 的计算过程,以及设置的各隶属度的权值大小。

表 5-1 基于模糊数学理论水敏损害诊断结果

井号	蒙托石含量 (%)	伊利石含量 (%)	孔隙度 (%)	渗透率 k (μm^2)	总矿化度 (mg/l)	F_M	F_Y	F_ϕ	F_k	F_C	F_{Z1}
7-26-395	0.83838	0	34	0.028698	737	0.83838	0	0.4	0.976085	0.263	0.596869
7-34-3406	0.83838	0	23	0.205456	742	0.83838	0	0.675	0.828787	0.258	0.594409
8-19-8	1	0.0232	23	0.18039	742	1.00000	0.0232	0.675	0.849675	0.258	0.667875
8-20N2008	1	0.0232	34	0.028698	737	1.00000	0.0232	0.4	0.976085	0.263	0.666157
2-15-262	0.98989	0	34	0.028698	737	0.98989	0	0.4	0.976085	0.263	0.657473
2-15-61	0.98989	0	34	0.573232	737	0.98989	0	0.4	0.522307	0.263	0.566717
7-38-375	1	0	34	0.252973	742	1.00000	0	0.4	0.789189	0.258	0.623638
7-28-5375	0.838383	0	33	0.028698	800	0.83838	0	0.425	0.976085	0.2	0.59307
7-30-3355	0.98989	0	34	0.49112	737	0.98989	0	0.4	0.590733	0.263	0.580403
7-30-365	1	0	37	0.594193	500	1.00000	0	0.325	0.504839	0.5	0.583468
7-40-395	1	0	34	1	737	1.00000	0	0.4	0.166667	0.263	0.499633
8-19-N11	1	0	34	0.144304	737	1.00000	0	0.4	0.879747	0.263	0.642249
8-20-2016	0.838383	0	34	0.144304	737	0.83838	0	0.4	0.879747	0.263	0.577603
8-22-12	0.989898	0	34	0.144304	737	0.98990	0	0.4	0.879747	0.263	0.638209
8-26-16	0.989898	0	34	0.066945	737	0.98990	0	0.4	0.944213	0.263	0.651102
8-26-N8	0.989898	0	35	0.066945	500	0.98990	0	0.375	0.944213	0.5	0.672302
8-32-K10	0.838383	0	36	0.144304	500	0.83838	0	0.35	0.879747	0.5	0.596303

表 5-2 基于模糊数学理论水敏诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	水敏损害 诊断因子(F_{Z1})	水敏指数
7-26-395	0.596869	0.486214
7-34-3406	0.594409	0.475632
8-19-8	0.667875	0.573625
8-20N2008	0.666157	0.532534
2-15-262	0.657473	0.531422
2-15-61	0.566717	0.394655
7-38-375	0.623638	0.515368
7-28-5375	0.59307	0.462355
7-30-3355	0.580403	0.422516
7-30-365	0.583468	0.462352
7-40-395	0.499633	0.325416
8-19-N11	0.642249	0.500145
8-20-2016	0.577603	0.425328
8-22-12	0.638209	0.502575
8-26-16	0.651102	0.512536
8-26-N8	0.672302	0.585318
8-32-K10	0.596303	0.485332

5.2.3 盐敏损害程度诊断模型的建立与应用

对于盐敏损害程度的诊断，我们选择蒙脱石、伊利石含量、泥质含量和钾、钠、钙、镁离子浓度作为诊断指标，隶属度的求取采用全部采用升半梯形分布，单因素决策因子依次表示为 F_M 、 F_Y 、 F_N 、 F_{K+Na} 、 F_{Ca} 、 F_{Mg} ，根据经验分别设定这些隶属度的权值，可得到诊断速敏损害程度的决策因子 F_{Z3} 。

我们以孤东 17 口井的数据为例，计算结果如表 5-5，计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果非常吻合，见表 5-6，从而证明了基于神经网络的专家系统诊断的正确性。

附录 B 中以 7-26-395 井为例，说明了 F_M 、 F_Y 、 F_N 、 F_{K+Na} 、 F_{Ca} 、 F_{Mg} 和 F_{Z3} 的计算过程，以及设置的各隶属度的权值大小。

表 5-3 基于模糊数学理论速敏损害诊断结果

井号	蒙托石含量 (%)	伊利石含量 (%)	孔隙度 (%)	泥质含量 (%)	原油粘度 (mPa·s)	F_M	F_Y	F_ϕ	F_N	F_μ	F_{Z2}
7-26-395	0.83838	0	34	0.198505	62.77	0.83838	0	0.66	0.198505	0	0.405377
7-34-3406	0.83838	0	23	0.198505	62.77	0.83838	0	0.66	0.198505	0	0.438377
8-19-8	1	0.0232	23	0.314576	85.49	1.00000	0.0232	0.66	0.314576	0.851574	0.583713
8-20N2008	1	0.0232	34	0.314576	85.49	1.00000	0.0232	0.66	0.314576	0.851574	0.550713
2-15-262	0.98989	0	34	0.300042	65.77	0.98989	0	0.66	0.300042	0.112444	0.467231
2-15-61	0.98989	0	34	0.300042	65.77	0.98989	0	0.66	0.300042	0.112444	0.467231
7-38-375	1	0	34	0.198505	89.45	1.00000	0	0.66	0.198505	1	0.537701
7-28-5375	0.838383	0	33	0.198505	89.45	0.83838	0	0.66	0.198505	1	0.508378
7-30-3355	0.98989	0	34	0.198505	89.45	0.98989	0	0.66	0.198505	1	0.535679
7-30-365	1	0	37	0.198505	89.45	1.00000	0	0.66	0.198505	1	0.528701
7-40-395	1	0	34	0.198505	89.45	1.00000	0	0.66	0.198505	1	0.537701
8-19-N11	1	0	34	0.300042	68.55	1.00000	0	0.66	0.300042	0.216642	0.479673
8-20-2016	0.838383	0	34	0.300042	68.55	0.83838	0	0.66	0.300042	0.216642	0.447349
8-22-12	0.989898	0	34	0.300042	68.55	0.98990	0	0.66	0.300042	0.216642	0.477652
8-26-16	0.989898	0	34	0.300042	68.55	0.98990	0	0.66	0.300042	0.216642	0.477652
8-26-N8	0.989898	0	35	0.300042	68.55	0.98990	0	0.66	0.300042	0.216642	0.474652
8-32-K10	0.838383	0	36	0.300042	68.55	0.83838	0	0.66	0.300042	0.216642	0.441349

表 5-4 基于模糊数学理论速敏诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	速敏损害 诊断因子(F_{22})	速敏指数
7-26-395	0.405377	0.653546
7-34-3406	0.438377	0.682305
8-19-8	0.583713	0.602158
8-20N2008	0.550713	0.532658
2-15-262	0.467231	0.645545
2-15-61	0.467231	0.635438
7-38-375	0.537701	0.542308
7-28-5375	0.508378	0.503588
7-30-3355	0.535679	0.533235
7-30-365	0.528701	0.525048
7-40-395	0.537701	0.546825
8-19-N11	0.479673	0.621455
8-20-2016	0.447349	0.594812
8-22-12	0.477652	0.642852
8-26-16	0.477652	0.623658
8-26-N8	0.474652	0.612278
8-32-K10	0.441349	0.582564

5.3 基于模糊数学理论主要损害类型诊断模型的建立与应用

5.3.1 微粒运移损害诊断模型的建立与应用

大多数油气层都含有一些细小的矿物微粒，它们的成分是粘土、非晶质硅、石英、长石、云母和碳酸盐岩石等，其粒径小于 $37\mu\text{m}$ ，是可运移微粒的潜在物源。这些微粒在流体流动作用下发生运移，并且单个或多个颗粒在孔喉处发生堵塞，造成渗透率下降，这就是微粒运移损害。

影响微粒运移并引起堵塞的因素有很多，想要获得全面的数据非常困难，因此我们探寻快速诊断微粒运移造成的油气层损害的方法。因为从现场获得数据比较困难，所以我们只考虑影响油气层损害的最直观、最有规律的因素；但是这些影响因素与微粒运移造成的损害的定量关系很难确定，这时我们采用模糊数学的方法建立这些因素与油气层损害严

表 5-5 基于模糊数学理论盐敏损害诊断结果

井号	蒙托石含量 (%)	伊利石含量 (%)	泥质含量 (%)	[K ⁺ +Na ⁺] (mg/L)	[Ca ²⁺] (mg/L)	[Mg ²⁺] (mg/L)	F _M	F _Y	F _N	F _{K+Na}	F _{Ca}	F _{Mg}	F _{Z3}
7-26-395	0.83838	0	0.198505	149	44	30	0.83838	0	0.198505	0.666667	0.376471	0.306122	0.426141
7-34-3406	0.83838	0	0.198505	125	30	34	0.83838	0	0.198505	0.533333	0.211765	0.387755	0.4045
8-19-8	1	0.0232	0.314576	143	26	35	1.00000	0.0232	0.314576	0.633333	0.164706	0.408163	0.488175
8-20N2008	1	0.0232	0.314576	142	65	36	1.00000	0.0232	0.314576	0.627778	0.623529	0.428571	0.535543
2-15-262	0.98989	0	0.300042	150	89	38	0.98989	0	0.300042	0.672222	0.905882	0.469388	0.561725
2-15-61	0.98989	0	0.300042	41	20	44	0.98989	0	0.300042	0.066667	0.094118	0.591837	0.432238
7-38-375	1	0	0.198505	46	44	45	1.00000	0	0.198505	0.094444	0.376471	0.612245	0.448017
7-28-5375	0.838383	0	0.198505	86	12	51	0.83838	0	0.198505	0.316667	0	0.734694	0.396352
7-30-3355	0.98989	0	0.198505	29	66	19	0.98989	0	0.198505	0	0.635294	0.081633	0.408361
7-30-365	1	0	0.198505	52	56	15	1.00000	0	0.198505	0.127778	0.517647	0	0.404243
7-40-395	1	0	0.198505	74	23	16	1.00000	0	0.198505	0.25	0.129412	0.020408	0.379683
8-19-N11	1	0	0.300042	86	54	34	1.00000	0	0.300042	0.316667	0.494118	0.387755	0.479862
8-20-2016	0.838383	0	0.300042	189	48	35	0.83838	0	0.300042	0.888889	0.423529	0.408163	0.483581
8-22-12	0.989898	0	0.300042	152	47	38	0.98990	0	0.300042	0.683333	0.411765	0.469388	0.513426
8-26-16	0.989898	0	0.300042	209	97	39	0.98990	0	0.300042	1	1	0.489796	0.605957
8-26-N8	0.989898	0	0.300042	140	14	64	0.98990	0	0.300042	0.616667	0.023529	1	0.520997
8-32-K10	0.838383	0	0.300042	149	44	34	0.83838	0	0.300042	0.666667	0.376471	0.387755	0.454613

表 5-6 基于模糊数学理论盐敏诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	盐敏损害 诊断因子(F_{23})	临界矿化度 (mg/L)
7-26-395	0.426141	5358
7-34-3406	0.4045	4850
8-19-8	0.488175	5982
8-20N2008	0.535543	6125
2-15-262	0.561725	6205
2-15-61	0.432238	5425
7-38-375	0.448017	5752
7-28-5375	0.396352	4858
7-30-3355	0.408361	5200
7-30-365	0.404243	4800
7-40-395	0.379683	4626
8-19-N11	0.479862	5636
8-20-2016	0.483581	5853
8-22-12	0.513426	5998
8-26-16	0.605957	6248
8-26-N8	0.520997	6326
8-32-K10	0.454613	5550

重程度的诊断模型，以达到快速诊断的目的。

由前面章节关于微粒运移损害的机理分析，我们选择颗粒尺寸和颗粒浓度、临界流速、流体的粘度、油气层岩石的渗透率作为诊断的指标。

(1)颗粒尺寸和颗粒浓度

颗粒尺寸和颗粒浓度是影响颗粒堵塞的主要因素，当颗粒尺寸接近于孔隙尺寸的 1/3 到 1/2 时，颗粒很容易形成堵塞；颗粒浓度越大，越容易形成堵塞。

(2)临界流速

使油气层微粒开始蕴意的流体速度叫临界流速，只有流体超过临界流速后，微粒才开始运移，发生堵塞。临界流速越小，微粒越容易启动运移，即微粒运移造成的损害越严重。

(3) 流体粘度

油田生产过程中,常向油层中注入一些高粘度的流体,这些流体对微粒的冲击较大,使微粒在很低的流速下就开始运移,引起地层渗透率降低。因此,流体粘度越大,微粒运移造成的损害越严重。

(4) 油气层岩石的渗透率

油气层岩石的渗透率越大,在相同的水动力下,微粒运移的阻力变小,发生堵塞的可能性就越小,造成的损害程度也越小。

诊断指标确定后,利用隶属函数(μ)求得每项指标的决策因子(F)的大小,根据现场实际问题的特点,我们采用简化的梯形分布(如图 5-1 所示),颗粒尺寸、颗粒浓度和流体粘度指标采用升半梯形分布(颗粒尺寸、颗粒浓度和流体粘度越大、微粒运移造成的损害越严重),而临界流速和油气层岩石的渗透率指标采用降半梯形分布(临界流速和油气层岩石的渗透率越小,水敏越严重)。

根据隶属函数计算各指标的隶属度得到各指标的决策因子,然后采用多因素综合决策技术可以得到判断微粒运移造成的损害程度的综合决策因子,根据综合决策因子的值来诊断损害的严重程度。同样,我们以孤东油田 17 口井的资料为例,因为没有临界流速和流体粘度的数据,这里我们只考虑其它的诊断指标。颗粒尺寸和颗粒浓度分别用粒度中值和固相含量表示,其隶属度的求取采用升半梯形分布公式,油气层岩石的渗透率采用降半梯形分布,分别用 F_{M_d} , F_g 和 F_k 表示各指标的隶属度。根据现场经验设置各隶属度的权值,计算结果见表 5-7。计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果非常吻合,见表 5-8,证明专家系统诊断模型是可行的。附录 B 中以 7-26-395 井为例,说明了 F_{M_d} 、 F_g 、 F_k 和 F_{Z4} 的计算过程,以及设置的各隶属度的权值大小。

表 5-7 基于模糊数学理论微粒运移损害诊断结果

井号	粒度中值 (mm)	固相质量 (mg/L)	渗透率 (μm^2)	F_{M-d}	F_g	F_k	F_{Z4}
7-26-395	0.09	0.7	0.028698	0.071429	0.583333	0.976085	0.496397
7-34-3406	0.09	0.7	0.205456	0.071429	0.583333	0.828787	0.452207
8-19-8	0.07	0.7	0.18039	0	0.583333	0.849675	0.429903
8-20N2008	0.07	0.7	0.028698	0	0.583333	0.976085	0.467826
2-15-262	0.22	0.75	0.028698	0.535714	0.625	0.976085	0.694611
2-15-61	0.22	0.75	0.573232	0.535714	0.625	0.522307	0.558478
7-38-375	0.09	0.74	0.252973	0.071429	0.616667	0.789189	0.450328
7-28-5375	0.09	0.7	0.028698	0.071429	0.583333	0.976085	0.496397
7-30-3355	0.09	0.7	0.49112	0.071429	0.583333	0.590733	0.380791
7-30-365	0.09	0.7	0.594193	0.071429	0.583333	0.504839	0.355023
7-40-395	0.09	0.7	1	0.071429	0.583333	0.166667	0.253571
8-19-N11	0.35	0.8	0.144304	1	0.666667	0.879747	0.863924
8-20-2016	0.35	0.8	0.144304	1	0.666667	0.879747	0.863924
8-22-12	0.35	0.8	0.144304	1	0.666667	0.879747	0.863924
8-26-16	0.35	0.8	0.066945	1	0.666667	0.944213	0.883264
8-26-N8	0.35	0.8	0.066945	1	0.666667	0.944213	0.883264
8-32-K10	0.35	0.8	0.144304	1	0.666667	0.879747	0.863924

表 5-8 基于模糊数学微粒运移损害诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	微粒运移损害 诊断因子(F_{Z4})	渗透率降低值 (μm^2)
7-26-395	0.496397	0.058648
7-34-3406	0.452207	0.053259
8-19-8	0.429903	0.050025
8-20N2008	0.467826	0.055635
2-15-262	0.694611	0.076858
2-15-61	0.558478	0.067254
7-38-375	0.450328	0.052694
7-28-5375	0.496397	0.058785
7-30-3355	0.380791	0.048526
7-30-365	0.355023	0.042689
7-40-395	0.253571	0.042154
8-19-N11	0.863924	0.095526
8-20-2016	0.863924	0.095485
8-22-12	0.863924	0.096858
8-26-16	0.883264	0.098255
8-26-N8	0.883264	0.095568
8-32-K10	0.863924	0.095478

5.3.2 固相颗粒侵入损害诊断模型的建立与应用

结合前面的机理研究和现场经验,按照前面介绍微粒运移损害程度的诊断方法,我们选择颗粒大小、流体流速、固相含量和油气层岩石的渗透率作为诊断指标,颗粒大小和流体流速分别用粒度中值、注入速度表示,其和固相含量的隶属度的求取采用升半梯形分布,油气层岩石的渗透率的隶属度的求取采用降半梯形分布。且依次表示为 F_{M_j} 、 F_v 、 F_g 和 F_k ,根据经验分别设定这些隶属度的权值,可得到诊断速敏损害程度的决策因子 F_{Z5} 。我们以孤东17口井的数据为例,计算结果如表5-9,计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果非常吻合,见表5-10,从而证明了基于神经网络的专家系统诊断的正确性。

附录B中以7-26-395井为例,说明了 F_{M_j} 、 F_v 、 F_g 、 F_k 和 F_{Z5} 的计算过程,以及设置的各隶属度的权值大小。

5.3.3 水化膨胀损害诊断模型的建立与应用

根据第一章关于水化膨胀的机理研究和现场经验知识,采用前面介绍的诊断方法,我们选择蒙脱石含量、伊利石含量、油气层的总矿化度和油气层岩石的渗透率作为诊断指标,其中蒙脱石含量、伊利石含量的隶属度的求取采用升半梯形分布,油气层的总矿化度和油气层岩石的渗透率的隶属度的求取采用降半梯形分布;且依次表示为 F_M , F_Y , F_C 和 F_k ,根据经验分别设定这些隶属度的权值,可得到诊断速敏损害程度的决策因子 F_{Z6} 。我们以孤东17口井的数据为例,计算结果如表5-11,计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果非常吻合,见表5-12,从而证明了基于神经网络的专家系统诊断的正确性。

附录B中以7-26-395井为例,说明了 F_M , F_Y , F_C 、 F_k 和 F_{Z6} 的计算过程,以及设置的各隶属度的权值大小。

表5-10 基于模糊数学固相入侵损害诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	固相入侵移损害 诊断因子(F_{Z5})	渗透率降低值 (μm^2)
7-26-395	0.507712	0.049365
7-34-3406	0.470887	0.042218
8-19-8	0.458252	0.039685
8-20N2008	0.489855	0.042356
2-15-262	0.6492	0.072582
2-15-61	0.535755	0.054125
7-38-375	0.469321	0.039758
7-28-5375	0.507712	0.048582
7-30-3355	0.411374	0.038259
7-30-365	0.3899	0.035529
7-40-395	0.305357	0.032515
8-19-N11	0.776603	0.080258
8-20-2016	0.776603	0.080215
8-22-12	0.776603	0.080265
8-26-16	0.79272	0.083685
8-26-N8	0.79272	0.083568
8-32-K10	0.776603	0.080259

表 5-12 基于模糊数学水化膨胀损害诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	水化膨胀损害 诊断因子(F_{z6})	渗透率降低值 (μm^2)
7-26-395	0.496397	0.066358
7-34-3406	0.452207	0.060259
8-19-8	0.429903	0.060248
8-20N2008	0.525631	0.060235
2-15-262	0.494671	0.059369
2-15-61	0.551975	0.057869
7-38-375	0.578757	0.057258
7-28-5375	0.571084	0.057012
7-30-3355	0.480328	0.055254
7-30-365	0.535238	0.052368
7-40-395	0.506732	0.050014
8-19-N11	0.494014	0.048528
8-20-2016	0.550968	0.048218
8-22-12	0.412233	0.045715
8-26-16	0.554849	0.045825
8-26-N8	0.506364	0.044218
8-32-K10	0.551819	0.039254

5.3.4 结垢损害诊断模型的建立与应用

(1)无机垢损害诊断模型的建立与应用

由前面的机理分析得出：降低 pH 值使溶解度增大，可以减弱成垢倾向；对砂岩地层来说，渗透率低时孔隙较大的地方渗流速度缓慢，是流体储存或停留的主要场所，地层结垢容易在此发生；相混液体的总矿化度升高，会降低可沉淀离子的活度，或增加沉淀物的溶解度，沉淀的趋势相对于低矿化度情况有所降低；不配伍的流体相互接触时间越长，生成的沉淀颗粒越大，沉淀的数量越多，沉淀引起的损害越严重。

因此，我们选择流体 pH 值、渗透率、总矿化度和遇水时间作为诊断指标，其中 pH 值、遇水时间采用升半梯形分布来求取隶属度，渗透率和总矿化度采用降半梯形分布公式，诊断隶属度分别表示为： F_{pH} 、 F_K 、 F_C 和 F_t 。以孤东 17 口井的数据为例，根据现场经验分配各指标的

权值, 计算结果如表 5-13, 计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果基本吻合, 见表 5-14, 从而证明了基于神经网络的专家系统诊断的正确性。

附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 F_{pH} 、 F_K 、 F_C 、 F_i 和 F_{Z7} 的计算过程, 以及设置的各隶属度的权值大小。

(2) 有机垢损害诊断模型的建立与应用

由前面关于有机垢形成的机理分析, 我们可以得到以下结论: 原油中石蜡含量越高, 越易结蜡; 生产时间越长, 结晶厚度越大; 生产油气比越大, 井筒结蜡厚度就越大; 含水率越高, 井筒结蜡厚度越小。

因此, 诊断指标确定为原油含蜡量、遇水时间、油气比和含水率, 其中原油含蜡量、遇水时间采用升半梯形分布公式求取隶属度, 油气比和含水率采用降半梯形分布, 其诊断隶属度分别表示为 F_L 、 F_i 、 F_r 和 F_S , 以孤东 17 口井的数据为例, 根据现场经验分配各指标的权值, 计算结果如表 5-15, 计算结果与基于神经网络的专家系统诊断结果基本吻合, 见表 5-16, 从而证明了基于神经网络的专家系统诊断的正确性。

附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 F_L 、 F_i 、 F_r 、 F_S 和 F_{Z8} 的计算过程, 以及设置的各隶属度的权值大小。

5.4 小结

由模糊数学与专家系统的主要损害类型诊断结果对比表, 我们可以看出两种诊断方法所得到的各井损害严重程度的排序基本相同, 说明两种方法的都有一定可行性, 且可以相互验证和补充。同样的这里我们考虑微粒运移、固相入侵、水化膨胀和结垢四种主要损害类型, 并认定为油气层损害的所有来源。由前面模糊数学方法诊断结果, 可以得出各井及该区块四种损害所占的比例, 见表 5-17 和表 5-18。

表 5-14 基于模糊数学无机垢损害诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	无机垢损害 诊断因子(F_{Z7})	渗透率降低值 (μm^2)
7-26-395	0.52805	0.050132
7-34-3406	0.504357	0.046256
8-19-8	0.457535	0.039569
8-20N2008	0.479117	0.042535
2-15-262	0.581617	0.058254
2-15-61	0.46642	0.042534
7-38-375	0.49791	0.042355
7-28-5375	0.524216	0.050124
7-30-3355	0.462056	0.044253
7-30-365	0.528803	0.050126
7-40-395	0.376228	0.036525
8-19-N11	0.663239	0.062618
8-20-2016	0.664941	0.062452
8-22-12	0.664889	0.062658
8-26-16	0.655957	0.061289
8-26-N8	0.728176	0.068568
8-32-K10	0.712437	0.067825

表 5-16 基于模糊数学有机垢损害诊断与基于神经网络专家系统诊断结果对比

井号	有机垢损害 诊断因子(F_{Z8})	渗透率降低值 (μm^2)
7-26-395	0.26269	0.020368
7-34-3406	0.213357	0.018256
8-19-8	0.177452	0.014238
8-20N2008	0.182252	0.015239
2-15-262	0.280367	0.022205
2-15-61	0.275725	0.021458
7-38-375	0.250094	0.020369
7-28-5375	0.396821	0.040235
7-30-3355	0.279632	0.021425
7-30-365	0.377857	0.032012
7-40-395	0.376817	0.032142
8-19-N11	0.352819	0.031545
8-20-2016	0.307122	0.024136
8-22-12	0.31167	0.025148
8-26-16	0.383044	0.039568
8-26-N8	0.328163	0.028629
8-32-K10	0.380118	0.032568

表 5-18 孤东 17 口井各损害类型导致损害程度的模糊数学理论诊断结果

损害类型	微粒运移 (%)	固相入侵 (%)	水化膨胀 (%)	结垢损害	
				无机垢 (%)	有机垢 (%)
各损害因素导致损害程度的比例(%)	23.38	22.54	20.73	21.65	11.71

从表 5-18 可知, 各损害类型的损害程度的排序为: 微粒运移>固相入侵>无机垢 >水化膨胀>有机垢, 从结果可以看出基于模糊数学方法诊断与基于专家系统诊断得出的损害程度排序基本相同, 所占比例也基本吻合, 更进一步的说明了两种方法的正确性。

基于专家系统诊断模型考虑因素较多, 数据收集比较麻烦, 但是可以不用考虑损害因素与损害类型间的具体关系, 只要与损害类型相关的因素都可以作为诊断的指标, 在现场所收集的数据较充足时, 优先考虑此种方法。

基于模糊数学方法诊断模型考虑的因素较少, 但是这些因素必须与损害类型之间有密切的线性关系, 因此, 当现场数据较少, 但是包括这些关键因素的数据时, 优先考虑此种方法进行诊断。

从上面的分析可以看出, 两种方法各有优缺点, 对两种诊断方法所得结果进行综合运用, 可以更加准确的对油气层损害程度进行诊断。

表 5-9 基于模糊数学理论固相入侵损害诊断结果

井号	粒度中值 (mm)	注入速度 (m/s)	固相质量 (mg/L)	渗透率 (μm^2)	F_{M_d}	F_v	F_g	F_k	F_{zs}
7-26-395	0.09	2	0.7	0.028698	0.071429	0.4	0.583333	0.976085	0.507712
7-34-3406	0.09	2	0.7	0.205456	0.071429	0.4	0.583333	0.828787	0.470887
8-19-8	0.07	2	0.7	0.18039	0	0.4	0.583333	0.849675	0.458252
8-20N2008	0.07	2	0.7	0.028698	0	0.4	0.583333	0.976085	0.489855
2-15-262	0.22	2.3	0.75	0.028698	0.535714	0.46	0.625	0.976085	0.6492
2-15-61	0.22	2.3	0.75	0.573232	0.535714	0.46	0.625	0.522307	0.535755
7-38-375	0.09	2	0.74	0.252973	0.071429	0.4	0.616667	0.789189	0.469321
7-28-5375	0.09	2	0.7	0.028698	0.071429	0.4	0.583333	0.976085	0.507712
7-30-3355	0.09	2	0.7	0.49112	0.071429	0.4	0.583333	0.590733	0.411374
7-30-365	0.09	2	0.7	0.594193	0.071429	0.4	0.583333	0.504839	0.3899
7-40-395	0.09	2	0.7	1	0.071429	0.4	0.583333	0.166667	0.305357
8-19-N11	0.35	2.8	0.8	0.144304	1	0.56	0.666667	0.879747	0.776603
8-20-2016	0.35	2.8	0.8	0.144304	1	0.56	0.666667	0.879747	0.776603
8-22-12	0.35	2.8	0.8	0.144304	1	0.56	0.666667	0.879747	0.776603
8-26-16	0.35	2.8	0.8	0.066945	1	0.56	0.666667	0.944213	0.79272
8-26-N8	0.35	2.8	0.8	0.066945	1	0.56	0.666667	0.944213	0.79272
8-32-K10	0.35	2.8	0.8	0.144304	1	0.56	0.666667	0.879747	0.776603

表 5-11 基于模糊数学理论水化膨胀损害诊断结果

井号	蒙托石 (%)	伊利石 (%)	总矿化度 (mg/l)	渗透率 (μm^2)	F_M	F_Y	F_C	F_k	F_{z6}
7-26-395	0.83838	0	737	0.028698	0.83838	0	0.263	0.976085	0.525631
7-34-3406	0.83838	0	742	0.205456	0.83838	0	0.258	0.828787	0.494671
8-19-8	1	0.0232	742	0.18039	1.00000	0.0232	0.258	0.849675	0.551975
8-20N2008	1	0.0232	737	0.028698	1.00000	0.0232	0.263	0.976085	0.578757
2-15-262	0.98989	0	737	0.028698	0.98989	0	0.263	0.976085	0.571084
2-15-61	0.98989	0	737	0.573232	0.98989	0	0.263	0.522307	0.480328
7-38-375	1	0	742	0.252973	1.00000	0	0.258	0.789189	0.535238
7-28-5375	0.838383	0	800	0.028698	0.83838	0	0.2	0.976085	0.506732
7-30-3355	0.98989	0	737	0.49112	0.98989	0	0.263	0.590733	0.494014
7-30-365	1	0	500	0.594193	1.00000	0	0.5	0.504839	0.550968
7-40-395	1	0	737	1	1.00000	0	0.263	0.166667	0.412233
8-19-N11	1	0	737	0.144304	1.00000	0	0.263	0.879747	0.554849
8-20-2016	0.838383	0	737	0.144304	0.83838	0	0.263	0.879747	0.506364
8-22-12	0.989898	0	737	0.144304	0.98990	0	0.263	0.879747	0.551819
8-26-16	0.989898	0	737	0.066945	0.98990	0	0.263	0.944213	0.564712
8-26-N8	0.989898	0	500	0.066945	0.98990	0	0.5	0.944213	0.635812
8-32-K10	0.838383	0	500	0.144304	0.83838	0	0.5	0.879747	0.577464

表 5-13 基于模糊数学理论无机垢损害诊断结果

井号	流体 pH 值	渗透率 (μm^2)	总矿化度 (mg/l)	遇水时间 (d)	F_{pH}	F_1	F_c	F_i	F_{z1}
7-26-395	8.1	0.028698	737	367	0.68333	0.976085	0.263	0.244667	0.52805
7-34-3406	8.2	0.205456	742	384	0.70000	0.828787	0.258	0.256	0.504357
8-19-8	7.5	0.18039	742	264	0.58333	0.849675	0.258	0.176	0.457535
8-20N2008	7.5	0.028698	737	225	0.58333	0.976085	0.263	0.15	0.479117
2-15-262	7.8	0.028698	737	881.25	0.63333	0.976085	0.263	0.5875	0.581617
2-15-61	7.3	0.573232	737	885.44	0.55000	0.522307	0.263	0.590293	0.46642
7-38-375	8.2	0.252973	742	395.04	0.70000	0.789189	0.258	0.26336	0.49791
7-28-5375	8.2	0.028698	800	442.49	0.70000	0.976085	0.2	0.294993	0.524216
7-30-3355	8.2	0.49112	737	412.57	0.70000	0.590733	0.263	0.275047	0.462056
7-30-365	8.4	0.594193	500	433.76	0.73333	0.504839	0.5	0.289173	0.528803
7-40-395	8.2	1	737	404.96	0.70000	0.166667	0.263	0.269973	0.376228
8-19-N11	8.4	0.144304	737	1412.92	0.73333	0.879747	0.263	0.941947	0.663239
8-20-2016	8.5	0.144304	737	1388.19	0.75000	0.879747	0.263	0.92546	0.664941
8-22-12	8.6	0.144304	737	1350.3	0.76667	0.879747	0.263	0.9002	0.664889
8-26-16	8.1	0.066945	737	1374.11	0.68333	0.944213	0.263	0.916073	0.655957
8-26-N8	8.1	0.066945	500	1382.5	0.68333	0.944213	0.5	0.921667	0.728176
8-32-K10	8.1	0.144304	500	1361.16	0.68333	0.879747	0.5	0.90744	0.712437

表 5-15 基于模糊数学理论有机垢损害诊断结果

井号	原油含蜡量 (%)	遇水时间 (d)	油气比	含水率 (%)	F_L	F_k	F_r	F_s	F_{z8}
7-26-395	23.23	367	0.814815	0.581	0.23230	0.244667	0.185185	0.419	0.26269
7-34-3406	23.23	384	0.814815	0.839	0.23230	0.256	0.185185	0.161	0.213357
8-19-8	21.55	264	0.740741	0.979	0.21550	0.176	0.259259	0.021	0.177452
8-20N2008	21.55	225	0.740741	0.929	0.21550	0.15	0.259259	0.071	0.182252
2-15-262	19.2	881.25	0.666667	0.903	0.19200	0.5875	0.333333	0.097	0.280367
2-15-61	19.2	885.44	0.666667	0.929	0.19200	0.590293	0.333333	0.071	0.275725
7-38-375	21.4	395.04	0.493889	0.947	0.21400	0.26336	0.506111	0.053	0.250094
7-28-5375	22.2	442.49	0.493889	0.261	0.22200	0.294993	0.506111	0.739	0.396821
7-30-3355	23.9	412.57	0.493889	0.861	0.23900	0.275047	0.506111	0.139	0.279632
7-30-365	20.6	433.76	0.493889	0.318	0.20600	0.289173	0.506111	0.682	0.377857
7-40-395	21.3	404.96	0.493889	0.318	0.21300	0.269973	0.506111	0.682	0.376817
8-19-N11	20.8	1412.92	0.851852	0.742	0.20800	0.941947	0.148148	0.258	0.352819
8-20-2016	21.6	1388.19	0.851852	0.97	0.21600	0.92546	0.148148	0.03	0.307122
8-22-12	21.6	1350.3	0.851852	0.922	0.21600	0.9002	0.148148	0.078	0.31167
8-26-16	21.6	1374.11	0.851852	0.581	0.21600	0.916073	0.148148	0.419	0.383044
8-26-N8	21.6	1382.5	0.851852	0.861	0.21600	0.921667	0.148148	0.139	0.328163
8-32-K10	21.6	1361.16	0.851852	0.587	0.21600	0.90744	0.148148	0.413	0.380118

表 5-17 单井各损害类型导致损害程度的模糊数学诊断结果

井号	微粒运移(%)	固相入侵(%)	水化膨胀(%)	结垢	
				无机垢(%)	有机垢(%)
7-26-395	21.39	21.88	22.65	22.76	11.3
7-34-3406	21.18	22.05	23.16	23.62	9.99
8-19-8	20.72	22.08	26.6	22.05	8.55
8-20N2008	21.29	22.29	26.33	21.8	8.29
2-15-262	25.01	23.38	20.57	20.94	10.1
2-15-61	24.11	23.13	20.73	20.13	11.9
7-38-375	20.44	21.3	24.3	22.6	11.4
7-28-5375	20.41	20.88	20.84	21.56	16.3
7-30-3355	18.78	20.29	24.36	22.79	13.8
7-30-365	16.12	17.7	25.01	24.01	17.2
7-40-395	14.71	17.71	23.91	21.82	21.9
8-19-N11	26.9	24.18	17.28	20.65	11
8-20-2016	27.7	24.9	16.24	21.32	9.85
8-22-12	27.26	24.51	17.41	20.98	9.84
8-26-16	26.93	24.17	17.22	20	11.7
8-26-N8	26.22	23.54	18.88	21.62	9.74
8-32-K10	26.1	23.46	17.44	21.52	11.5

第6章 油气层损害综合诊断技术研究

导致油井减产、水井注水压力上升的主要原因是油气层被损害,而油气层损害的原因是复杂多样的,往往采取一个诊断技术难以得到准确的诊断结论,而且给油气层损害解堵决策带来一定的误差,影响解堵效果,为此进行了油层损害类型和程度的综合诊断技术研究。

上面介绍的专家系统模型诊断结果和模糊数学理论诊断结果都可以看作是诊断油气层损害类型和程度的指标,为了更全面的对油气层损害进行评价,我们利用模糊数学方法对两个指标进行综合评判,根据现场资料和专家经验,赋予其不同的权重,从而建立敏感性和主要损害类型的综合诊断模型。

6.1 敏感性程度综合诊断模型的建立与应用

6.1.1 水敏损害程度的综合诊断模型的建立与应用

由水敏指数的定义,水敏指数越大,水敏损害越严重;根据最大隶属度原则,水敏诊断因子越大,损害越严重。因此,我们对孤东17口井水敏损害程度进行综合诊断,运用模糊数学方法,采用梯形分布公式,得到水敏指数和水敏诊断因子的隶属度函数分别为:

$$\mu(I_w) = \begin{cases} 0 & I_w = 0 \\ \frac{I_w - 0}{1 - 0} & 0 < I_w < 1 \\ 1 & I_w = 1 \end{cases} \quad (6-1)$$

$$\mu(F_{z1}) = \begin{cases} 0 & F_{z1} \leq 0.1 \\ \frac{F_{z1} - 0.1}{0.9 - 0.1} & 0.1 < F_{z1} < 0.9 \\ 1 & F_{z1} \geq 0.9 \end{cases} \quad (6-2)$$

分别用 R_{I1} , R_{F1} 作为水敏指数和水敏诊断因子的决策因子,用 R_{z1} 表示为水敏损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值

分别为 0.6、0.4，附录 B 中以 7-26-395 井为例，说明了 R_{f1} 、 R_{F1} 和 R_{z1} 的计算过程，所有井的计算结果见表 6-1。

表 6-1 基于模糊数学理论水敏损害程度综合诊断结果

井号	I_w	F_{z1}	R_{f1}	R_{F1}	R_{z1}
7-26-395	0.486214	0.596869	0.486214	0.621086	0.540163
7-34-3406	0.475632	0.594409	0.475632	0.618012	0.532584
8-19-8	0.573625	0.667875	0.573625	0.709844	0.628113
8-20N2008	0.532534	0.666157	0.532534	0.707696	0.602599
2-15-262	0.531422	0.657473	0.531422	0.696841	0.59759
2-15-61	0.394655	0.566717	0.394655	0.583397	0.470152
7-38-375	0.515368	0.623638	0.515368	0.654547	0.57104
7-28-5375	0.462355	0.59307	0.462355	0.616338	0.523948
7-30-3355	0.422516	0.580403	0.422516	0.600503	0.493711
7-30-365	0.462352	0.583468	0.462352	0.604335	0.519145
7-40-395	0.325416	0.499633	0.325416	0.499542	0.395066
8-19-N11	0.500145	0.642249	0.500145	0.677812	0.571212
8-20-2016	0.425328	0.577603	0.425328	0.597003	0.493998
8-22-12	0.502575	0.638209	0.502575	0.672761	0.570649
8-26-16	0.512536	0.651102	0.512536	0.688877	0.583072
8-26-N8	0.585318	0.672302	0.585318	0.715377	0.637342
8-32-K10	0.485332	0.596303	0.485332	0.620378	0.53935

这里我们根据 R_{z1} 值的大小定义水敏损害的严重程度： $0.9 \leq R_{z1} < 1$ 时为极强， $0.7 \leq R_{z1} < 0.9$ 时为强， $0.5 \leq R_{z1} < 0.7$ 时为中等偏强， $0.3 \leq R_{z1} < 0.5$ 时为中等偏弱， $0.05 \leq R_{z1} < 0.3$ 时为弱， $R_{z1} \leq 0.05$ 时为无。因此，通过 R_{z1} 值的大小不仅可以得到各井水敏损害严重程度的量化值，而且可以定性判断水敏损害程度，其平均值的大小可以反应该区块的水敏损害情况，达到了诊断的目的。表 6-2 列出了水敏损害程度与综合诊断因子的对应情况。

6.1.2 速敏损害程度的综合诊断模型的建立与应用

同理，速敏指数越大，速敏损害越严重；根据最大隶属度原则，速敏诊断因子越大，损害越严重。因此，我们对孤东 17 口井速敏损害程度

表 6-2 水敏损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	水敏损害综合诊断因子	水敏损害程度
7-26-395	0.540163	中等偏强
7-34-3406	0.532584	中等偏强
8-19-8	0.628113	中等偏强
8-20N2008	0.602599	中等偏强
2-15-262	0.59759	中等偏强
2-15-61	0.470152	中等偏弱
7-38-375	0.57104	中等偏强
7-28-5375	0.523948	中等偏强
7-30-3355	0.493711	中等偏弱
7-30-365	0.519145	中等偏强
7-40-395	0.395066	中等偏弱
8-19-N11	0.571212	中等偏强
8-20-2016	0.493998	中等偏弱
8-22-12	0.570649	中等偏强
8-26-16	0.583072	中等偏强
8-26-N8	0.637342	中等偏强
8-32-K10	0.53935	中等偏强

进行综合诊断, 运用模糊数学方法, 采用梯形分布公式, 得到速敏指数和速敏诊断因子的隶属度函数分别为:

$$\mu(I_v) = \begin{cases} 0 & I_v = 0 \\ \frac{I_v - 0}{1 - 0} & 0 < I_v < 1 \\ 1 & I_v = 1 \end{cases} \quad (6-3)$$

$$\mu(F_{Z_2}) = \begin{cases} 0 & F_{Z_2} \leq 0.1 \\ \frac{F_{Z_2} - 0.1}{0.92 - 0.1} & 0.1 < F_{Z_2} < 0.92 \\ 1 & F_{Z_2} \geq 0.92 \end{cases} \quad (6-4)$$

分别用 R_{I_2} , R_{F_2} 作为速敏指数和速敏诊断因子的决策因子, 用 R_{Z_2} 表示为速敏损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4, 附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 R_{I_2} 、 R_{F_2} 和 R_{Z_2}

的计算过程,所有井的计算结果见表6-3。

表6-3 基于模糊数学理论速敏损害程度综合诊断结果

井号	I_V	F_{Z_2}	R_{I_2}	R_{F_2}	R_{Z_2}
7-26-395	0.653546	0.405377	0.653546	0.372411	0.541092
7-34-3406	0.682305	0.438377	0.682305	0.412655	0.574445
8-19-8	0.602158	0.583713	0.602158	0.589893	0.597252
8-20N2008	0.532658	0.550713	0.532658	0.54965	0.539455
2-15-262	0.645545	0.467231	0.645545	0.447842	0.566464
2-15-61	0.635438	0.467231	0.635438	0.447842	0.5604
7-38-375	0.542308	0.537701	0.542308	0.533782	0.538897
7-28-5375	0.503588	0.508378	0.503588	0.498021	0.501361
7-30-3355	0.533235	0.535679	0.533235	0.531316	0.532467
7-30-365	0.525048	0.528701	0.525048	0.522806	0.524151
7-40-395	0.546825	0.537701	0.546825	0.533782	0.541608
8-19-N11	0.621455	0.479673	0.621455	0.463015	0.558079
8-20-2016	0.594812	0.447349	0.594812	0.423597	0.526326
8-22-12	0.642852	0.477652	0.642852	0.460551	0.569932
8-26-16	0.623658	0.477652	0.623658	0.460551	0.558415
8-26-N8	0.612278	0.474652	0.612278	0.456893	0.550124
8-32-K10	0.582564	0.441349	0.582564	0.416279	0.51605

这里我们根据 R_{Z_2} 值的大小定义速敏损害的严重程度: $0.7 \leq R_{Z_2} < 1$ 时为强, $0.4 \leq R_{Z_2} < 0.7$ 时为中等偏强, $0.1 \leq R_{Z_2} < 0.4$ 时为中等偏弱, $0.05 \leq R_{Z_2} < 0.1$ 时为弱, $R_{Z_2} \leq 0.05$ 为无。因此,通过 R_{Z_2} 值的大小不仅可以得到各井速敏损害严重程度的量化值,而且可以定性判断速敏损害程度,其平均值的大小可以反应该区块的速敏损害情况,达到了诊断的目的。表6-4列出了速敏损害程度与综合诊断因子的对应情况。

6.1.3 盐敏损害程度的综合诊断模型的建立与应用

临界矿化度越高,盐敏损害越严重;根据最大隶属度原则,盐敏诊断因子越大,损害越严重。因此,我们对孤东17口井盐敏损害程度进行综合诊断,运用模糊数学方法,采用梯形分布公式,得到临界矿化度和

表 6-4 速敏损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	速敏损害综合 诊断因子	速敏损害 程度
7-26-395	0.541092	中等偏强
7-34-3406	0.574445	中等偏强
8-19-8	0.597252	中等偏强
8-20N2008	0.539455	中等偏强
2-15-262	0.566464	中等偏强
2-15-61	0.5604	中等偏强
7-38-375	0.538897	中等偏强
7-28-5375	0.501361	中等偏强
7-30-3355	0.532467	中等偏强
7-30-365	0.524151	中等偏强
7-40-395	0.541608	中等偏强
8-19-N11	0.558079	中等偏强
8-20-2016	0.526326	中等偏强
8-22-12	0.569932	中等偏强
8-26-16	0.558415	中等偏强
8-26-N8	0.550124	中等偏强
8-32-K10	0.51605	中等偏强

盐敏诊断因子的隶属度函数分别为:

$$\mu(I_c) = \begin{cases} 0 & I_c \leq 2500 \\ \frac{I_c - 2500}{8000 - 2500} & 2500 < I_c < 8000 \\ 1 & I_c \geq 8000 \end{cases} \quad (6-5)$$

$$\mu(F_{z3}) = \begin{cases} 0 & F_{z3} \leq 0.2 \\ \frac{F_{z3} - 0.2}{0.8 - 0.2} & 0.2 < F_{z3} < 0.8 \\ 1 & F_{z3} \geq 0.8 \end{cases} \quad (6-6)$$

分别用 R_{I_3} , R_{F_3} 作为盐敏指数和盐敏诊断因子的决策因子, 用 R_{z_3} 表示为盐敏损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4, 附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 R_{I_3} 、 R_{F_3} 和 R_{z_3} 的计算过程, 所有井的计算结果见表 6-5。

表 6-5 基于模糊数学理论盐敏损害程度综合诊断结果

井号	I_C (mg/L)	F_{Z3}	R_{I3}	R_{F3}	R_{Z3}
7-26-395	5358	0.426141	0.408286	0.376902	0.395732
7-34-3406	4850	0.4045	0.335714	0.340834	0.337762
8-19-8	5982	0.488175	0.497429	0.480292	0.490574
8-20N2008	6125	0.535543	0.517857	0.559238	0.53441
2-15-262	6205	0.561725	0.529286	0.602874	0.558721
2-15-61	5425	0.432238	0.417857	0.387063	0.405539
7-38-375	5752	0.448017	0.464571	0.413362	0.444088
7-28-5375	4858	0.396352	0.336857	0.327253	0.333016
7-30-3355	5200	0.408361	0.385714	0.347268	0.370336
7-30-365	4800	0.404243	0.328571	0.340406	0.333305
7-40-395	4626	0.379683	0.303714	0.299472	0.302017
8-19-N11	5636	0.479862	0.448	0.466437	0.455375
8-20-2016	5853	0.483581	0.479	0.472636	0.476454
8-22-12	5998	0.513426	0.499714	0.522377	0.508779
8-26-16	6248	0.605957	0.535429	0.676596	0.591895
8-26-N8	6326	0.520997	0.546571	0.534996	0.541941
8-32-K10	5550	0.454613	0.435714	0.424354	0.43117

这里我们根据 R_3 值的大小定义盐敏损害的严重程度： $0.8 \leq R_{Z3}$ 时为强， $0.5 \leq R_{Z3} < 0.8$ 时为中等偏强， $0.2 \leq R_{Z3} < 0.5$ 时为中等偏弱， $R_{Z3} \leq 0.2$ 为弱。因此，通过 R_{Z3} 值的大小不仅可以得到各井盐敏损害严重程度的量化值，而且可以定性判断盐敏损害程度，其平均值的大小可以反应该区块的盐敏损害情况，达到了诊断的目的。表 6-6 列出了盐敏损害程度与综合诊断因子的对应情况。

6.2 主要损害类型损害程度综合诊断模型的建立与应用

6.2.1 微粒运移损害程度的综合诊断模型的建立与应用

由于微粒运移造成的渗透率降低值越大，损害就越严重；根据最大隶属度原则，微粒运移损害程度诊断因子越大，损害越严重。因此，我们对孤东 17 口井微粒运移损害程度进行综合诊断，运用模糊数学方法，采用梯形分布公式，得到专家系统诊断的渗透率降低值和微粒运移诊断

表 6-6 盐敏损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	盐敏损害综合诊断因子	盐敏损害程度
7-26-395	0.395732	中等偏弱
7-34-3406	0.337762	中等偏弱
8-19-8	0.490574	中等偏弱
8-20N2008	0.53441	中等偏弱
2-15-262	0.558721	中等偏弱
2-15-61	0.405539	中等偏弱
7-38-375	0.444088	中等偏弱
7-28-5375	0.333016	中等偏弱
7-30-3355	0.370336	中等偏弱
7-30-365	0.333305	中等偏弱
7-40-395	0.302017	中等偏弱
8-19-N11	0.455375	中等偏弱
8-20-2016	0.476454	中等偏弱
8-22-12	0.508779	中等偏弱
8-26-16	0.591895	中等偏弱
8-26-N8	0.541941	中等偏弱
8-32-K10	0.43117	中等偏弱

因子的隶属度函数分别为:

$$\mu(K_1) = \begin{cases} 0 & K_1 \leq 0 \\ \frac{K_1 - 0}{0.12 - 0} & 0 < K_1 < 0.12 \\ 1 & K_1 \geq 0.12 \end{cases} \quad (6-7)$$

$$\mu(F_{Z_4}) = \begin{cases} 0 & F_{Z_4} \leq 0.05 \\ \frac{F_{Z_4} - 0.05}{0.93 - 0.05} & 0.05 < F_{Z_4} < 0.93 \\ 1 & F_{Z_4} \geq 0.93 \end{cases} \quad (6-8)$$

分别用 R_{K_1} 、 R_{F_4} 作为渗透率降低值和微粒运移诊断因子的决策因子，用 R_{Z_4} 表示为微粒运移损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4，附录 B 中以 7-26-395 井为例，说明了 R_{K_1} 、 R_{F_4} 和 R_{Z_4} 的计算过程，所有井的计算结果见表 6-7。

表 6-7 基于模糊数学理论微粒运移损害程度综合诊断结果

井号	$K_1(\mu\text{m}^2)$	F_{Z_4}	R_{K1}	R_{F_4}	R_{Z_4}
7-26-395	0.058648	0.496397	0.488733	0.507269	0.496148
7-34-3406	0.053259	0.452207	0.443825	0.457054	0.449117
8-19-8	0.050025	0.429903	0.416875	0.431707	0.422808
8-20N2008	0.055635	0.467826	0.463625	0.474802	0.468096
2-15-262	0.076858	0.694611	0.640483	0.732513	0.677295
2-15-61	0.067254	0.558478	0.56045	0.577816	0.567396
7-38-375	0.052694	0.450328	0.439117	0.454918	0.445437
7-28-5375	0.058785	0.496397	0.489875	0.507269	0.496833
7-30-3355	0.048526	0.380791	0.404383	0.375899	0.39299
7-30-365	0.042689	0.355023	0.355742	0.346617	0.352092
7-40-395	0.042154	0.253571	0.351283	0.231331	0.303302
8-19-N11	0.095526	0.863924	0.79605	0.924914	0.847595
8-20-2016	0.095485	0.863924	0.795708	0.924914	0.84739
8-22-12	0.096858	0.863924	0.80715	0.924914	0.854255
8-26-16	0.098255	0.883264	0.818792	0.946891	0.870031
8-26-N8	0.095568	0.883264	0.7964	0.946891	0.856596
8-32-K10	0.095478	0.863924	0.79565	0.924914	0.847355

这里我们根据 R_{Z_4} 值的大小定义微粒运移损害的严重程度：
 $0.8 \leq R_{Z_4} < 1$ 时为极强， $0.6 \leq R_{Z_4} < 0.8$ 时为强， $0.4 \leq R_{Z_4} < 0.6$ 时为中等偏强，
 $0.2 \leq R_{Z_4} < 0.4$ 时为中等偏弱， $0.05 \leq R_{Z_4} < 0.2$ 时为弱， $R_{Z_4} \leq 0.05$ 为无。因此，通过 R_{Z_4} 值的大小不仅可以得到各井微粒运移损害严重程度的量化值，而且可以定性判断微粒运移损害程度，其平均值的大小可以反应该区块的微粒运移损害情况，达到了诊断的目的。表 6-8 列出了微粒运移损害程度与综合诊断因子的对应情况。

6.2.2 固相颗粒侵入损害程度的综合诊断模型的建立与应用

由于固相颗粒侵入造成的渗透率降低值越大，损害就越严重；根据最大隶属度原则，固相颗粒侵入损害程度诊断因子越大，损害越严重。因此，我们对孤东 17 口井固相颗粒侵入损害程度进行综合诊断，运用模糊数学方法，采用梯形分布公式，得到专家系统诊断的渗透率降低值和

表 6-8 微粒运移损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	微粒运移损害综合诊断因子	微粒运移损害程度
7-26-395	0.496148	中等偏强
7-34-3406	0.449117	中等偏强
8-19-8	0.422808	中等偏强
8-20N2008	0.468096	中等偏强
2-15-262	0.677295	强
2-15-61	0.567396	中等偏强
7-38-375	0.445437	中等偏强
7-28-5375	0.496833	中等偏强
7-30-3355	0.39299	中等偏弱
7-30-365	0.352092	中等偏弱
7-40-395	0.303302	中等偏弱
8-19-N11	0.847595	极强
8-20-2016	0.84739	极强
8-22-12	0.854255	极强
8-26-16	0.870031	极强
8-26-N8	0.856596	极强
8-32-K10	0.847355	极强

固相颗粒侵入诊断因子的隶属度函数分别为:

$$\mu(K_2) = \begin{cases} 0 & K_2 \leq 0 \\ \frac{K_2 - 0}{0.12 - 0} & 0 < K_2 < 0.12 \\ 1 & K_2 \geq 0.12 \end{cases} \quad (6-9)$$

$$\mu(F_{Z_4}) = \begin{cases} 0 & F_{Z_5} \leq 0.05 \\ \frac{F_{Z_5} - 0.05}{0.92 - 0.05} & 0.05 < F_{Z_5} < 0.92 \\ 1 & F_{Z_5} \geq 0.92 \end{cases} \quad (6-10)$$

分别用 R_{K_2} 、 R_{F_5} 作为渗透率降低值和固相颗粒侵入诊断因子的决策因子，用 R_{Z_5} 表示为固相颗粒侵入损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4，附录 B 中以 7-26-395 井为例，说明了 R_{K_2} 、 R_{F_5} 和 R_{Z_5} 的计算过程，所有井的计算结果见表 6-9。

表 6-9 基于模糊数学理论固相颗粒侵入损害程度综合诊断结果

井号	$K_2 (\mu\text{m}^2)$	F_{Z5}	R_{K2}	R_{F5}	R_{Z5}
7-26-395	0.049365	0.507712	0.411375	0.526105	0.457267
7-34-3406	0.042218	0.470887	0.351817	0.483778	0.404601
8-19-8	0.039685	0.458252	0.330708	0.469255	0.386127
8-20N2008	0.042356	0.489855	0.352967	0.50558	0.414012
2-15-262	0.072582	0.6492	0.60485	0.688735	0.638404
2-15-61	0.054125	0.535755	0.451042	0.558339	0.493961
7-38-375	0.039758	0.469321	0.331317	0.481978	0.391581
7-28-5375	0.048582	0.507712	0.40485	0.526105	0.453352
7-30-3355	0.038259	0.411374	0.318825	0.415372	0.357444
7-30-365	0.035529	0.3899	0.296075	0.39069	0.333921
7-40-395	0.032515	0.305357	0.270958	0.293514	0.279981
8-19-N11	0.080258	0.776603	0.668817	0.835176	0.73536
8-20-2016	0.080215	0.776603	0.668458	0.835176	0.735145
8-22-12	0.080265	0.776603	0.668875	0.835176	0.735395
8-26-16	0.083685	0.79272	0.697375	0.853701	0.759905
8-26-N8	0.083568	0.79272	0.6964	0.853701	0.75932
8-32-K10	0.080259	0.776603	0.668825	0.835176	0.735365

这里我们运用微粒运移损害程度的定义方法，通过 R_{Z5} 值的大小得到各井固相颗粒侵入损害严重程度的量化值，并定性判断固相颗粒侵入损害程度，其平均值的大小可以反应该区块的固相颗粒侵入损害情况，达到了诊断的目的。表 6-10 列出了固相颗粒侵入损害程度与综合诊断因子的对应情况。

6.2.3 水化膨胀损害程度的综合诊断模型的建立与应用

对孤东 17 口井水化膨胀损害程度进行综合诊断，运用模糊数学方法，采用梯形分布公式，得到专家系统诊断的渗透率降低值和水化膨胀诊断因子的隶属度函数分别为：

$$\mu(K_3) = \begin{cases} 0 & K_3 \leq 0 \\ \frac{K_3 - 0}{0.12 - 0} & 0 < K_3 < 0.12 \\ 1 & K_3 \geq 0.12 \end{cases} \quad (6-11)$$

$$\mu(F_{Z_6}) = \begin{cases} 0 & F_{Z_6} \leq 0.05 \\ \frac{F_{Z_6} - 0.05}{0.9 - 0.05} & 0.05 < F_{Z_6} < 0.9 \\ 1 & F_{Z_6} \geq 0.9 \end{cases} \quad (6-12)$$

表 6-10 固相颗粒侵入损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	固相颗粒侵入损害综合诊断因子	固相颗粒侵入损害程度
7-26-395	0.457267	中等偏强
7-34-3406	0.404601	中等偏强
8-19-8	0.386127	中等偏弱
8-20N2008	0.414012	中等偏强
2-15-262	0.638404	强
2-15-61	0.493961	中等偏强
7-38-375	0.391581	中等偏弱
7-28-5375	0.453352	中等偏强
7-30-3355	0.357444	中等偏弱
7-30-365	0.333921	中等偏弱
7-40-395	0.279981	中等偏弱
8-19-N11	0.73536	强
8-20-2016	0.735145	强
8-22-12	0.735395	强
8-26-16	0.759905	强
8-26-N8	0.75932	强
8-32-K10	0.735365	强

分别用 R_{K_3} , R_{F_6} 作为渗透率降低值和水化膨胀诊断因子的决策因子, 用 R_{Z_6} 表示为水化膨胀损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4, 附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 R_{K_3} , R_{F_6} 和 R_{Z_6} 的计算过程, 所有井的计算结果见表 6-11。

这里我们运用微粒运移损害程度的定义方法, 通过 R_{Z_6} 值的大小得到各井水化膨胀损害严重程度的量化值, 并定性判断水化膨胀损害程度, 其平均值的大小可以反应该区块的水化膨胀损害情况, 从而可以达到诊断的目的。表 6-12 列出了水化膨胀损害程度与综合诊断因子的对应情况。

表 6-11 基于模糊数学理论水化膨胀损害程度综合诊断结果

井号	$K_3 (\mu\text{m}^2)$	F_{Z6}	R_{K3}	R_{F6}	R_{Z6}
7-26-395	0.066358	0.635812	0.552983	0.68919	0.607466
7-34-3406	0.060259	0.578757	0.502158	0.622067	0.550122
8-19-8	0.060248	0.577464	0.502067	0.620546	0.549458
8-20N2008	0.060235	0.571084	0.501958	0.61304	0.546391
2-15-262	0.059369	0.564712	0.494742	0.605543	0.539062
2-15-61	0.057869	0.554849	0.482242	0.59394	0.526921
7-38-375	0.057258	0.551975	0.47715	0.590559	0.522514
7-28-5375	0.057012	0.551819	0.4751	0.590375	0.52121
7-30-3355	0.055254	0.550968	0.46045	0.589374	0.51202
7-30-365	0.052368	0.535238	0.4364	0.570868	0.490187
7-40-395	0.050014	0.525631	0.416783	0.559566	0.473896
8-19-N11	0.048528	0.506732	0.4044	0.537332	0.457573
8-20-2016	0.048218	0.506364	0.401817	0.536899	0.45585
8-22-12	0.045715	0.494671	0.380958	0.523143	0.437832
8-26-16	0.045825	0.494014	0.381875	0.522369	0.438073
8-26-N8	0.044218	0.480328	0.368483	0.506269	0.423597
8-32-K10	0.039254	0.412233	0.327117	0.426157	0.366733

6.2.4 结垢损害程度的综合诊断模型的建立与应用

(1) 无机垢损害程度综合诊断模型的建立与应用

由于无机垢造成的渗透率降低值越大，损害就越严重；根据最大隶属度原则，无机垢损害程度诊断因子越大，损害越严重。因此，我们对孤东 17 口井无机垢损害程度进行综合诊断，运用模糊数学方法，采用梯形分布公式，得到专家系统诊断的渗透率降低值和无机垢诊断因子的隶属度函数分别为：

$$\mu(K_4) = \begin{cases} 0 & K_4 \leq 0 \\ \frac{K_4 - 0}{0.12 - 0} & 0 < K_4 < 0.12 \\ 1 & K_4 \geq 0.12 \end{cases} \quad (6-13)$$

$$\mu(F_{Z7}) = \begin{cases} 0 & F_{Z7} \leq 0.05 \\ \frac{F_{Z7} - 0.05}{0.92 - 0.05} & 0.05 < F_{Z7} < 0.92 \\ 1 & F_{Z7} \geq 0.9 \end{cases} \quad (6-14)$$

表 6-12 水化膨胀损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	水化膨胀损害综合诊断因子	水化膨胀损害程度
7-26-395	0.607466	强
7-34-3406	0.550122	中等偏强
8-19-8	0.549458	中等偏强
8-20N2008	0.546391	中等偏强
2-15-262	0.539062	中等偏强
2-15-61	0.526921	中等偏强
7-38-375	0.522514	中等偏强
7-28-5375	0.52121	中等偏强
7-30-3355	0.51202	中等偏强
7-30-365	0.490187	中等偏强
7-40-395	0.473896	中等偏强
8-19-N11	0.457573	中等偏强
8-20-2016	0.45585	中等偏强
8-22-12	0.437832	中等偏强
8-26-16	0.438073	中等偏强
8-26-N8	0.423597	中等偏强
8-32-K10	0.366733	中等偏弱

分别用 R_{K4} , R_{F7} 作为渗透率降低值和无机垢诊断因子的决策因子, 用 R_{Z7} 表示为无机垢损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4, 附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 R_{K4} 、 R_{F7} 和 R_{Z7} 的计算过程, 所有井的计算结果见表 6-13。

这里我们运用微粒运移损害程度的定义方法, 通过 R_{Z7} 值的大小得到各井无机垢损害严重程度的量化值, 并定性判断无机垢损害程度, 其平均值的大小可以反应该区块的无机垢损害情况, 从而可以达到诊断的目的。表 6-14 列出了无机垢损害程度与综合诊断因子的对应情况。

(2) 有机垢损害程度综合诊断模型的建立与应用

同无机垢损害诊断方法一样, 我们对孤东 17 口井有机垢损害程度进行综合诊断, 得到专家系统诊断的渗透率降低值和有机垢诊断因子的隶

表 6-13 基于模糊数学理论无机垢损害程度综合诊断结果

井号	$K_4 (\mu\text{m}^2)$	F_{Z7}	R_{K4}	R_{F7}	R_{Z7}
7-26-395	0.050132	0.52805	0.417767	0.549483	0.470453
7-34-3406	0.046256	0.504357	0.385467	0.52225	0.44018
8-19-8	0.039569	0.457535	0.329742	0.468431	0.385217
8-20N2008	0.042535	0.479117	0.354458	0.493238	0.40997
2-15-262	0.058254	0.581617	0.48545	0.611054	0.535692
2-15-61	0.042534	0.46642	0.35445	0.478644	0.404127
7-38-375	0.042355	0.49791	0.352958	0.514839	0.417711
7-28-5375	0.050124	0.524216	0.4177	0.545075	0.46865
7-30-3355	0.044253	0.462056	0.368775	0.473628	0.410716
7-30-365	0.050126	0.528803	0.417717	0.550348	0.470769
7-40-395	0.036525	0.376228	0.304375	0.374975	0.332615
8-19-N11	0.062618	0.663239	0.521817	0.704872	0.595039
8-20-2016	0.062452	0.664941	0.520433	0.706829	0.594992
8-22-12	0.062658	0.664889	0.52215	0.706769	0.595998
8-26-16	0.061289	0.655957	0.510742	0.696502	0.585046
8-26-N8	0.068568	0.728176	0.5714	0.779512	0.654645
8-32-K10	0.067825	0.712437	0.565208	0.761422	0.643694

隶属函数分别为:

$$\mu(K_5) = \begin{cases} 0 & K_5 \leq 0 \\ \frac{K_5 - 0}{0.12 - 0} & 0 < K_5 < 0.12 \\ 1 & K_5 \geq 0.12 \end{cases} \quad (6-15)$$

$$\mu(F_{Z8}) = \begin{cases} 0 & F_{Z8} \leq 0.05 \\ \frac{F_{Z8} - 0.05}{0.95 - 0.05} & 0.05 < F_{Z8} < 0.95 \\ 1 & F_{Z8} \geq 0.9 \end{cases} \quad (6-16)$$

分别用 R_{K5} , R_{F8} 作为渗透率降低值和有机垢诊断因子的决策因子, 用 R_{Z8} 表示为有机垢损害程度的综合决策因子。根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4, 附录 B 中以 7-26-395 井为例, 说明了 R_{K5} 、 R_{F8} 和 R_{Z8} 的计算过程, 所有井的计算结果见表 6-15。

表 6-14 无机垢损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	无机垢损害综合诊断因子	无机垢损害程度
7-26-395	0.470453	中等偏强
7-34-3406	0.44018	中等偏强
8-19-8	0.385217	中等偏弱
8-20N2008	0.40997	中等偏强
2-15-262	0.535692	中等偏强
2-15-61	0.404127	中等偏强
7-38-375	0.417711	中等偏强
7-28-5375	0.46865	中等偏强
7-30-3355	0.410716	中等偏强
7-30-365	0.470769	中等偏强
7-40-395	0.332615	中等偏弱
8-19-N11	0.595039	中等偏强
8-20-2016	0.594992	中等偏强
8-22-12	0.595998	中等偏强
8-26-16	0.585046	中等偏强
8-26-N8	0.654645	强
8-32-K10	0.643694	强

这里我们运用微粒运移损害程度的定义方法，通过 R_{Z_8} 值的大小得到各井有机垢损害严重程度的量化值，并定性判断有机垢损害程度。表 6-16 列出了有机垢损害程度与综合诊断因子的对应情况。

6.3 小结

综合专家系统和模糊数学两种方法诊断结果所得出的综合诊断因子的大小，可以反映油层损害的严重程度，其与油层渗透率降低值之间存在着线性关系，当然不同油田和区块之间的线性关系式存在着差别，可以根据现场应用的反馈资料，得到该线性关系式。

同样的这里我们考虑微粒运移、固相入侵、水化膨胀和结垢四种主要损害类型，并认定为油气层损害的所有来源。由前面模糊数学方法得到的综合诊断因子的值，得出该区 and 单井四种损害所占的比例，分别见

表 6-15 基于模糊数学理论有机垢损害程度综合诊断结果

井号	$K_s (\mu\text{m}^2)$	F_{Z8}	R_{Ks}	R_{F8}	R_{Z8}
7-26-395	0.020368	0.26269	0.169733	0.236323	0.196369
7-34-3406	0.018256	0.213357	0.152133	0.181508	0.163883
8-19-8	0.014238	0.177452	0.11865	0.141613	0.127835
8-20N2008	0.015239	0.182252	0.126992	0.146947	0.134974
2-15-262	0.022205	0.280367	0.185042	0.255963	0.21341
2-15-61	0.021458	0.275725	0.178817	0.250806	0.207612
7-38-375	0.020369	0.250094	0.169742	0.222327	0.190776
7-28-5375	0.040235	0.396821	0.335292	0.385357	0.355318
7-30-3355	0.021425	0.279632	0.178542	0.255146	0.209183
7-30-365	0.032012	0.377857	0.266767	0.364285	0.305774
7-40-395	0.032142	0.376817	0.26785	0.36313	0.305962
8-19-N11	0.031545	0.352819	0.262875	0.336466	0.292311
8-20-2016	0.024136	0.307122	0.201133	0.285691	0.234956
8-22-12	0.025148	0.31167	0.209567	0.290744	0.242038
8-26-16	0.039568	0.383044	0.329733	0.370049	0.34586
8-26-N8	0.028629	0.328163	0.238575	0.30907	0.266773
8-32-K10	0.032568	0.380118	0.2714	0.366797	0.309559

表 6-16 有机垢损害综合诊断因子与损害程度对比表

井号	有机垢损害综合诊断因子	有机垢损害程度
7-26-395	0.196369	弱
7-34-3406	0.163883	弱
8-19-8	0.127835	弱
8-20N2008	0.134974	弱
2-15-262	0.21341	中等偏弱
2-15-61	0.207612	中等偏弱
7-38-375	0.190776	弱
7-28-5375	0.355318	中等偏弱
7-30-3355	0.209183	中等偏弱
7-30-365	0.305774	中等偏弱
7-40-395	0.305962	中等偏弱
8-19-N11	0.292311	中等偏弱
8-20-2016	0.234956	中等偏弱
8-22-12	0.242038	中等偏弱
8-26-16	0.34586	中等偏弱
8-26-N8	0.266773	中等偏弱
8-32-K10	0.309559	中等偏弱

表 6-17 和表 6-18。

表 6-18 各损害类型导致损害程度的模糊数学理论诊断结果

损害类型	微粒运移 (%)	固相入侵 (%)	水化膨胀 (%)	结垢损害	
				无机垢 (%)	有机垢 (%)
各损害因素导致损害程度的比例(%)	25.36	22.56	20.94	20.93	10.2

从表 6-18 可知, 各损害类型的损害程度的排序为: 微粒运移>固相入侵> 水化膨胀>无机垢 >有机垢。

因此, 根据综合诊断因子不仅可以定量判断单井损害程度的大小, 对区块内各井损害程度进行排序; 而且可以得到该区块内主要损害类型损害程度所占的比例, 并进行排序, 实现了油田开发过程中油气层损害的全方位诊断。

表 6-17 单井各损害类型导致损害程度的综合诊断结果

井号	微粒运移(%)	固相入侵(%)	水化膨胀(%)	结垢	
				无机垢(%)	有机垢(%)
7-26-395	22.27	20.53	27.27	21.12	8.81
7-34-3406	22.37	20.15	27.4	21.92	8.16
8-19-8	22.59	20.63	29.36	20.58	6.83
8-20N2008	23.72	20.98	27.69	20.77	6.84
2-15-262	26.01	24.52	20.7	20.57	8.2
2-15-61	25.79	22.45	23.95	18.37	9.44
7-38-375	22.63	19.9	26.55	21.22	9.69
7-28-5375	21.65	19.75	22.71	20.42	15.5
7-30-3355	20.88	18.99	27.2	21.82	11.1
7-30-365	18.03	17.1	25.1	24.11	15.7
7-40-395	17.89	16.51	27.95	19.61	18
8-19-N11	28.95	25.12	15.63	20.32	9.98
8-20-2016	29.54	25.63	15.89	20.74	8.19
8-22-12	29.81	25.66	15.28	20.8	8.45
8-26-16	29.01	25.34	14.61	19.51	11.5
8-26-N8	28.93	25.64	14.31	22.11	9.01
8-32-K10	29.19	25.33	12.63	22.18	10.7

第7章 油气层损害诊断软件的生成

7.1 油田开发过程中油气层损害诊断软件研制开发目的

油气层损害诊断软件目的主要是将形成的用于油气层损害诊断的数学模型与诊断方法的综合进行计算机化,利用计算机的速度快、精度高、能够实现一些较为复杂的数学运算与逻辑判断等特性,实现最终的预测结果的数字化,数据管理的批量化,生产管理的科学化。

7.2 软件需求分析与功能说明

7.2.1 软件的需求

(1)接受输入若干口损害井的参数建立一个数据库,以实现数据的批量化管理;

(2)接受输入的油井参数,根据诊断模型对该油井损害进行诊断,并给出诊断结果,同时输出这些结果;

(3)软件要便于操作和使用。

鉴于此,我们对软件的功能进行了如下设计:

(1)能够接受油井的数据输入,根据诊断模型进行诊断和计算;

(2)预测和计算后的结果分别通过计算机屏幕和打印机输出;

(3)每项功能都提供菜单、工具按钮和键盘等三种操作方式,简化软件的使用和操作。

7.2.2 开发环境的选择

软件采用 Windows 窗体界面与目前流型软件接轨,以既实用又具备一定的先进性为原则,本软件开发环境如下:

(1)操作系统为 Microsoft Windows XP。微软的操作系统具有极大的用户群,而且操作界面具有同一性,极易操作。Windows XP 具有较好的运行性能,而且目前大多数计算机上(包括许多品牌机在内)安装的依然是

该版本的操作系统。

(2)编程环境为 Borland C++ Builder 6.0。该产品是微软专门针对起操作系统而推出的编程环境，因此与其操作系统本身具有天生的良好结合性，除此之外别无选择。

(3)编程语言为 Borland C++ Builder 6.0。具有先进的可视化编程工具和面向对象的编程工具，便于本软件的各项功能的实现。

7.3 软件的使用

(1)软件的安装

将安装盘放入驱动器，运行其中的 Setup.exe 文件，软件即会自动安装在您的计算机中。并在“开始/程序”菜单建立快捷方式。

(2)进入系统

在 Windows 桌面上，点击“开始”，选择“程序”，找到“油田开发过程中油气层损害诊断软件”，打开本程序。首先显示一个进入窗体，然后进入软件的工作平台。

(3)输入初始数据

选择“专家系统”菜单后，出现“敏感性诊断”和“主要损害类型诊断”窗体；选择其一，修改默认值或通过“打开”数据文件进行油井初始数据的输入，如果不修改则默认该参数。选择“模糊数学诊断”菜单后，出现“敏感性诊断”和“主要损害类型诊断”窗体；选择其一，修改默认值或通过“打开”数据文件进行油井初始数据的输入，如果不修改则默认该参数。选择“综合诊断”菜单后，出现“专家系统诊断和模糊数学诊断结果”窗体，修改默认值进行油井初始数据的输入，如果不修改则默认该参数。

点击菜单栏下面的快捷按钮图标或者点击鼠标右键弹出菜单，也可以达到相同的目的。

(4) 计算结果

对于进行损害诊断的井，初始参数输入完毕，点击“诊断预测”按钮，预测计算进行，结束后，弹出“损害诊断结果”窗体，即可显示本次的诊断结果。如果您需要进行其它井号或条件的计算，类似进行即可。

对于综合诊断，输入初始参数之后，点击“计算”，进行综合计算。结束后，在本窗体内显示综合计算结果，可以根据需要打印出优选结果。

(5) 退出

进入“系统”菜单后，选择“退出”或者点击主窗体右上角的“×”，即可退出系统。

7.4 软件界面

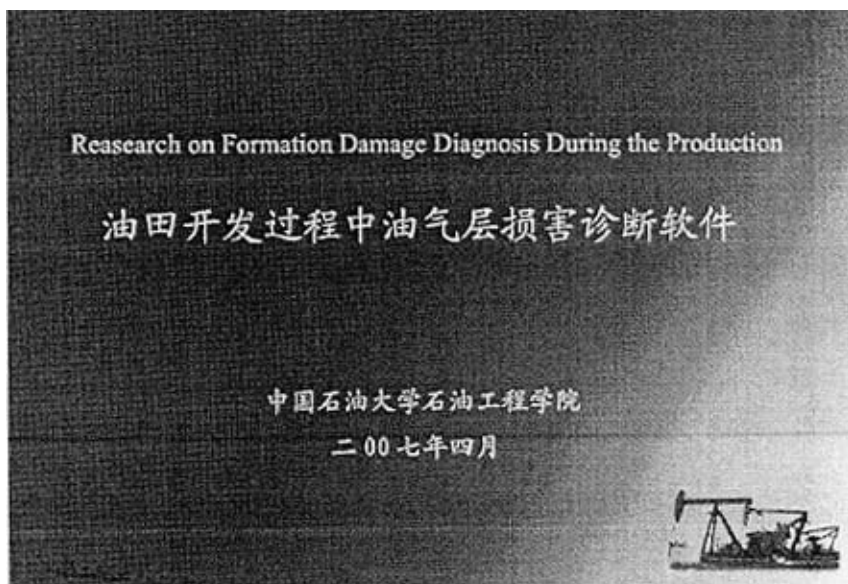


图 7-1 软件欢迎界面



图 7-2 软件主界面



图 7-3 敏感性诊断界面



图 7-4 主要损害类型诊断界面

第 8 章 结论

(1) 由于油气层损害原因复杂, 且单一诊断方法有其局限性, 所以本文采用专家系统和模糊数学两种方法进行油气层损害诊断, 以提高诊断的精确性。

(2) 由于油气层损害因素众多, 本文重点针对目前比较常见的损害类型进行研究, 包括三种敏感性类型(水敏、速敏和盐敏)和四种主要的油气层损害类型(微粒运移、固相入侵、水化膨胀和结垢), 其它损害类型的诊断可以现有模型基础上进行扩展。

(3) 针对基于神经网络的专家系统进行算法优选、网络参数调整后, 建立了诊断开发过程中油气层损害的专家系统模型, 模型预测相对误差小于 10%, 现场应用效果理想, 基本满足了实际需要。

(4) 首次提出应用模糊数学理论对油气层损害进行诊断, 并建立了损害诊断模型。现场应用表明, 其与专家系统模型的诊断结果相吻合, 表明基于模糊数学理论诊断模型的可行性。

(5) 运用模糊数学方法, 对专家系统和模糊数学诊断结果进行综合评判, 可以实现油田开发过程中的各损害类型、原因和程度的定量诊断, 并且可以定量计算出各井及该区块主要损害所占比例。相比其它诊断方法, 更加全面和有效的实现了开发过程中油气层损害的诊断, 达到了研究的目的, 可以进一步推广和应用。

对孤东 17 口井进行诊断后, 得到该区主要损害类型损害程度排序为: 微粒运移>固相入侵> 水化膨胀>无机垢 >有机垢。

(6) 采用 C++ 语言和 Borland C++ Builder 6.0 工具编制了油田开发过程中油气层损害诊断软件。

参考文献

- [1] Alegre L. An Investigation of The Applicability of Expert Systems to Diagnose Formation Damage Problems. JPT, 1979: 13-15
- [2] 董海峰. 复杂条件下储集层保护智能集成系统理论研究: [博士论文], 西安石油学院, 西安: 1995
- [3] 李淑白. 预测低渗特低渗储层损害方法及专家系统研究: [博士论文], 中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院, 北京: 1997
- [4] 罗英俊. 油田开发生产中的保护油层技术. 北京: 石油工业出版社, 1997: 12-23
- [5] Barkman, J.H. and Davidson, D.H. Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment. JPT, 1972: 865-873
- [6] 蒋官澄, 黄春, 张国荣. 疏松砂岩油藏保护新技术. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 58-238
- [7] 法鲁克, 西维. 油层伤害——原理、模拟、评价和防治. 北京: 石油工业出版社, 2003: 4-8
- [8] 尹先清, 伍家忠, 王正良. 油田注入速碳酸钙垢结垢机理及分析与结垢预测. 石油勘探与开发, 2002; 29(3): 85-87
- [9] 朱义吾, 赵作滋, 巨全义. 油田开发中的结垢机理及其防治技术. 陕西科学技术出版社, 1995: 69-147
- [10] 吴新民, 康有新, 张宁生. 吉林油田注入速碳酸钙垢结垢机理分析与结垢预测. 西安石油学院学报, 2001; 16(5): 29-32
- [11] 贾红育, 曲志浩. 注速开发油田油层结垢机理及油层伤害. 石油学报, 2001; 21(1): 58-62

- [12] Todd A C, et al. The Value and Analysis of Core-Based Water Quality Experiments as Related to Water Injection Schemes. SPE 17148 presented at the SPE Formation Damage Control Symposium, Bakerfield CA, 1988: 8-9
- [13] 徐同台, 赵敏. 保护油气层技术. 北京: 石油工业出版社, 1995: 1-301
- [14] 齐永欣. 基于神经网络的专家系统工具: [硕士学位论文], 河北农业大学, 保定: 2002
- [15] Patricia R.S Jota, Syed M Islam, Tony Wu, Gerard Ledwich. A class of Hybrid Intelligent System for Fault Diagnosis in Electric Power Systems. Neurocomputing, 1998: 207-224
- [16] 刘振凯, 贵忠华, 蔡青. 基于神经网络专家系统的电机智能 CAD 研究. 技术研究, 1996: 30-32
- [17] Satio K, Nakano R. Medical Dianostic Expert System Based on Model. Proceedings of the IEEE Internation at Conference on Neural Network, San Diego, 1998: 66-67
- [18] 邱忠宇, 史挺进, 张芳界等. 基于规则的模糊神经网络故障诊断专家系统. 机械科学与技术, 1999: 18(4): 612-614
- [19] 王耀南. 智能控制系统. 长沙: 湖南大学出版社, 1996: 1-21
- [20] 陈丽萍. 基于知识和数学模型的农业专家系统生成工具: [硕士学位论文], 河北农业大学, 保定, 2000
- [21] 徐明. 面向对象知识库系统 CAOBS/V1.2 的设计与实现. 计算机研究与发展, 1998: 35(8): 678-683
- [22] 陈新中, 蔺丽华, 王道平. 面向对象的知识表示方法研究. 西安矿业学院学报, 1999: 19(4): 363-357

- [23] 贾洞, 杨小锋. 面向对象技术中若干问题的探讨. 小型微型计算机系统, 1998; 19(3): 40-42
- [24] 何家峰, 叶虎年, 李柱. 面向对象的专家系统的研究. 华中理工大学学报, 1999; 27(8): 16-18
- [25] 陈新中, 蔺丽华, 王道平. 面向对象的知识表示方法研究. 西安矿业学院学报, 1999; 19(4): 363-367
- [26] 王绍华, 于洪思, 佟杰新等. 面向对象的混凝土泵车臂架设计混合型专家系统. 机械设计与制造, 1999; 1(4): 20-21
- [27] 岳桂兰, 赵明远, 杜艳艳等. 速稻育种专家系统的知识获取. 计算机农业应用, 1995; 3(1): 14-16
- [28] 马玉祥, 武波. 专家系统. 北京: 电子科技大学出版社, 1994: 3-5
- [29] 吴泉源, 刘江宁. 人工智能与专家系统. 北京: 国防科技大学出版社, 1995: 2-4
- [30] 袁曾任. 人工神经网络及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1999: 1-6
- [31] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例. 北京: 机械工业出版社, 2003: 44-80
- [32] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例. 北京: 机械工业出版社, 2003: 44-80
- [33] 周桂红. 基于面向对象知识表示的农业专家系统生成工具中知识库管理器的研制: [硕士学位论文], 河北农业大学, 保定, 1999
- [34] 徐明. 面向对象知识库系统 CAOBS/V1.2 的设计与实现. 计算机研究与发展, 1998; 35(8): 678-683
- [35] 梅铄娥, 仲伟俊, 徐南荣. 面向对象技术在专家系统中的应用研究. 系统工程学报, 1996; 11(1): 91-97

- [36] 王永庆, 陈莹. 一种不精确推理模式的研究与实现. 西安交通大学学报, 1993; 27(1) : 20-21
- [37] J. Pearl. Readings in Uncertain Reasoning. Morgan Kaufmann Publishers, Inc, 1990: 30-33
- [38] 梁静. 神经网络专家系统一体化理论与实现: [博士学位论文], 北京科技大学, 北京: 1997
- [39] 丁小群, 周玲, 袁宇波. 再论人工神经网络应用于电力变压器的故障诊断. 高电压技术, 1997; 2(3): 21-22
- [40] 丁小群. 神经网络应用于电力变压器的故障诊断. 电力系统自动化, 1996; 3(5): 32-35
- [41] 任昊利. 人工神经网络、模糊数学方法在储层评价中的应用研究——以轮南奥陶系储层为例: [硕士学位论文], 中国石油勘探开发科学研究院, 北京: 2002
- [42] 李琪. 人工智能与油气储集层保护. 北京: 石油工业出版社, 1998: 13-14

附录 A

附表 1 敏感性诊断源数据

井号	蒙托石 (%)	伊利石 (%)	孔隙度	总矿化度 (mg/L)	渗透率 (μm^2)	泥质含量 (%)	颗粒粒度中值 (mm)	颗粒分选系数	原油粘度 (mPa·s)	油气比	渗透率 (μm^2)	[K ⁺ , Na ⁺] (mg/L)	[Ca ²⁺] (mg/L)	地层压力 (MPa)	泥质含量 (mg/L)	含水率	[Mg ²⁺] (mg/L)
枣1340井	63.3	7.09	0.8229	90.15	0.2465	0.0634	0.096	1.675	62.77	1	0.10739	0.10216	0.011236	15.8	0.198505	0.580749	0.010127
枣43井	63	7.09	0.72285	90.15	0.17669	0.1389	0.0965	1.68	3.34	0.75	0.40761	0.089541	0.02809	17.85	0.300664	0.838503	0.007595
枣1272-1	63	7.09	0.6229	109.09	0.18525	0.1057	0.096	1.69	9.4	0.75	0.15563	0.089541	0.02809	17.85	0.314576	0.97861	0.007595
枣1286	63	7.09	0.65285	851.69	0.2253	0.1167	0.097	1.675	85.49	0.75	0.35951	1	1	10.1	0.121055	0.929412	1
枣116井	63	7.09	0.6257	732.15	0.915	0.658	0.096	1.65	16.85	0.75	0.39435	1	1	12.17	0.198505	0.902674	1
F29-19	63.3	7.09	0.5204	732.19	0.04511	0.821	0.096	1.72	55.21	0.55	0.35829	0.275176	0.042135	18.08	0.300042	0.929412	0.093671
枣40--20	63.3	7.09	0.8226	384.1	0.725	0.0747	0.096	1.7	135.2	0.65	0.32251	0.877214	0.525281	18.08	0.117525	0.946524	0.131646
F37--17	58.5	7.09	0.56236	384.1	0.056	0.0867	0.096	1.73	65.77	0.317	0.32251	0.213055	0.008427	11.4	0.117525	0.260963	0.037975
枣1141井	63	7.75	0.25	535.6	0.089	0.0912	0.096	1.72	89.45	0.317	0.28025	0.204562	0.11236	15.8	0.117525	0.860963	0.053165
东4-17	63.3	7.75	0.857143	601.76	0.087257	0.198505	0.097	1.91	43.07	0.75	0.35829	0.404271	0.014045	18.08	0.300042	0.317647	0.088608
东8-29-1	63.3	7.75	0.857143	516.67	0.394249	0.300664	0.096	1.91	134.6	0.55	0.35829	0.245814	0.353933	18.08	0.300042	0.317647	0.086076
港10-23	63.3	7.09	0.857143	516.67	0.136589	0.314576	0.097	1.69	68.55	0.55	0.35829	0.275176	0.042135	15.8	0.300042	0.742246	0.093671
港10-28	63.3	7.09	0.857143	516.67	0.345068	0.121055	0.098	1.675	46.9	0.275	0.115	0.069401	0.042135	18.08	0.147841	0.970053	0.073418
港11-30	63.3	7.09	0.857143	516.67	0.380694	0	0.15	1.65	126.57	0.8	0.50234	0.136375	0.050562	17.85	0.117525	0.921925	0.050633
港1-50	58.5	7.09	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.096	1.72	7.85	0.65	0.26945	0.042708	0.008427	17.85	0.198505	0.580749	0.005063
港16-73-1	58.5	7.09	0.857143	404.1	0.307232	0.117525	0.15	1.7	12.77	0.55	0.115	0.107741	0.042135	15.8	0.147841	0.860963	0.01519
港213	58.5	7.09	0.81	277.4	0.307232	0.117525	0.096	1.73	96.5	0	0.07484	0.230527	0.042135	15.8	0.117525	0.587166	0.022785

续附表 1

井号	冀托石 (%)	伊利石 (%)	孔隙度	总矿化度 (mg/L)	渗透率 (μm^2)	泥质含量 (%)	颗粒粒度中值 (mm)	颗粒分选系数	原油粘度 (mPa·s)	油气比	渗透率 (μm^2)	[K ⁺ +Na ⁺] (mg/L)	[Ca ²⁺] (mg/L)	地层压力 (MPa)	泥质含量 (mg/L)	含水率	[Mg ²⁺] (mg/L)
东 4-17	58.5	7.75	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.098	1.73	158.3	0.55	0.35829	0.245814	0.353933	12.17	0.300042	0.342246	0.086076
东 8-29-1	63	7.75	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.148	1.68	163.56	0.55	0.35829	0.272264	0.014045	12.17	0.300042	1	0.022785
港 10-23	63	7.75	0.857143	273.4	0.095045	0.147841	0.098	1.72	93.6	0.66	0.10576	0.10216	0.011236	18.08	0.144311	0.031016	0.010127
港 10-28	58.5	7.09	0.857143	535.6	0.49112	0.117525	0.098	1.72	89.56	0.66	0.17427	0.10216	0.011236	18.08	0.096138	0.031016	0.010127
港 11-30	63.3	7.09	0.857143	404.1	0.252973	0.198505	0.15	1.75	149.8	0.65	0.34106	0.136375	0.050562	18.08	0.117525	0.913369	0.050633
港 1-60	63.3	7.75	0.571429	416.64	0.095045	0.147841	0.148	1.73	236.4	0.317	0.115	0.146809	0.02809	17.85	0.147841	0.298396	0.01519
港 16-73-1	58.5	7.75	0.435622	194.18	0.05398	0.117525	0.096	1.68	254.6	0.75	0.3947	0.089541	0.02809	17.85	0.300664	0.950802	0.007595
港 213	55.5	7.75	0.435622	194.18	0.095045	0.147841	0.097	1.72	86.4	0.55	0.35829	0.145353	0.008427	17.85	0.300042	1	0.01519
港 2-27	63.3	7.09	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.148	1.72	45.66	0.55	0.35829	0.156515	0.022472	15.8	0.300042	1	0.050633
港 246	58.5	7.09	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.096	1.68	76.56	0	0.28025	0.316913	0	12.17	0.117525	0.958289	0.053165
东 4-17	63.3	7.09	0.857143	384.12	0.343815	0.300042	0.097	1.75	89.56	0	0.28025	0.249939	0.014045	12.17	0.117525	0.961497	0
东 8-29-1	58.5	7.09	0.435622	1000	0.085589	0.144311	0.148	1.72	268.77	0	0.28025	0.090997	0.014045	18.08	0.117525	0.860963	0
港 10-23	58.5	7.09	0.435622	1000	0.155652	0.096138	0.096	1.72	255.12	0	0.07484	0.230327	0.042135	18.08	0.117525	0.13369	0.022785
港 10-28	63.3	7.09	0.857143	404.1	0.326204	0.117525	0.096	1.68	132.6	0.73	0.02205	0.10216	0.011236	12.17	0.198505	0.580749	0.010127
港 11-30	63.3	7.75	0.81	277.4	0.095045	0.147841	0.15	1.65	222.5	0.8	0.30234	0.136375	0.050562	12.17	0.117525	0.957219	0.050633
港 1-60	63	7.75	0.857143	516.67	0.381051	0.300664	0.096	1.63	163.4	0	0.35634	0.334385	0.252809	17.85	0.117525	0.883422	0.139241
港 16-73-1	63	7.75	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.097	1.68	239.4	0.73	0.02205	0.10216	0.011236	17.85	0.198505	0.580749	0.010127
港 213	63.3	7.09	0.857143	384.1	0.343815	0.300042	0.096	1.54	51.55	0.65	0.34106	0.089541	0.022472	12.17	0.117525	0.946524	0.005063
港 2-27	63.3	7.09	0.435622	194.18	0.264015	0.117525	0.142	1.86	87.5	0.8	0.63441	0.136375	0.050562	18.08	0.117525	0.921925	0.050633

续附表 1

井号	蒙托石 (%)	伊利石 (%)	孔隙度	总矿化度 (mg/l)	渗透率 (μm^2)	泥质含量 (%)	颗粒粒度中值 (mm)	颗粒分选系数	原油粘度 (mPas)	油气比	渗透率 (μm^2)	[K ⁺ Na ⁺] (mg/L)	[Ca ²⁺] (mg/L)	地层压力 (MPa)	泥质含量 (mg/L)	含水率	[Mg ²⁺] (mg/L)
港 246	63	7.09	0.435622	194.18	0.264015	0.117525	0.096	1.75	236.4	0.8	0.13547	0.136375	0.050562	18.08	0.117525	0	0.050633
东 4-17	58.5	7.09	0.435622	194.18	0.264015	0.117525	0.097	1.91	254.6	0	0.07484	0.230527	0.042135	18.08	0.117525	0.13369	0.022785
东 8-29-1	58.5	7.09	0.435622	194.18	0.05398	0.117525	0.096	1.65	86.4	0.75	0.35951	0.089541	0.02809	15.8	0.121055	0.649198	0.007595
港 10-23	58.5	7.09	0.857143	336.35	0	0.198505	0.0965	1.72	42.66	0.75	0.3947	0.089541	0.02809	15.8	0.300664	0.950802	0.007595
港 10-28	58.5	7.09	0.857143	535.6	0.49112	0.117525	0.096	1.7	76.56	0.75	0.39435	0.089541	0.02809	17.85	0.198505	0.902674	0.007595
港 11-30	63.3	7.09	0.435622	194.18	0.341827	0.117525	0.0965	1.73	89.56	0.75	0.35829	0.089541	0.02809	17.85	0.300042	0.317647	0.007595
港 1-60	63.3	7.75	0.857143	336.35	0	0.198505	0.142	1.72	268.77	0.75	0.39435	0.089541	0.02809	12.17	0.198505	0.902674	0.007595
港 16-73-1	63	7.75	0.857143	404.1	0.326204	0.117525	0.0965	1.75	55.21	0.75	0.27815	0.089541	0.02809	18.08	0.109012	0.945455	0.007595
港 2-13	63	7.75	0.857143	535.6	0.626173	0.117525	0.096	1.73	135.2	0.75	0.27811	0.089541	0.02809	18.08	0.109012	0.486631	0.007595
港 2-27	63.3	7.75	0.857143	535.6	0.115975	0.117525	0.096	1.68	65.77	0.75	0.27809	0.089541	0.02809	15.8	0.109012	0.259893	0.007595
港 246	58.5	7.09	0.435622	194.18	0.05398	0.117525	0.15	1.72	89.45	0.75	0.27815	0.089541	0.02809	15.8	0.109012	0.945455	0.007595
东 4-17	58.5	7.09	0.857143	516.67	0.345068	0.121055	0.097	1.72	43.07	0.75	0.35829	0.404271	0.014045	17.85	0.300042	0.317647	0.088608
浅 1-5	58.5	7.09	0.857143	516.67	0.381051	0.300664	0.15	1.75	134.6	0.75	0.28077	0.089541	0.02809	17.85	0.399086	0.486631	0.007595
浅 2-11	63.3	7.09	0.857143	516.671	0.380694	0	0.15	1.73	68.55	0.55	0.57278	0.227615	0.02809	18.08	0.117525	0.013904	0.03038
浅 2-13-1	63.3	7.09	0.857143	516.67	0.343815	0.300042	0.096	1.68	46.9	1	0.07801	0.10216	0.011236	18.08	0.198505	0.580749	0.010127
浅 2-5	63.3	7.75	0.857143	516.67	0.380694	0	0.0965	1.72	126.57	0.275	0.05012	0.069401	0.042135	18.08	0.198505	0.014973	0.073418
浅 2-5	63.3	7.75	0.857143	516.671	0.261875	0.109012	0.0965	1.75	7.85	0.25	0.222983	0.120359	0.014045	12.17	0.230897	0.893048	0
浅 3-11	58.5	7.75	0.857143	516.67	0.261832	0.109012	0.096	1.73	163.56	0.25	0.19847	0.20893	0.014045	17.85	0.117525	0.040642	0.022785

附表 2 油田开发过程中主要损害类型诊断数据

井号	孔喉直径 (μm)	粒度中值 (mm)	注水压强 (MPa)	渗透率 (μm^2)	临界流速 (mL/min)	固相含量 (mg/L)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	临界矿化度 (mg/L)	泥质含量 (mg/L)	总矿化度 (mg/L)	水敏指数	结垢离子的 平均浓度(mg/L)	生产时间 (d)	含水率 (%)
东 4-17	60	0.11	4.8	0.10739	0.31234	7.3	68	888.8889	0.198505	601.76	0.65	20	86.5	0.580749
东 8-29-1	56	0.11	2	0.40761	0.26103	39.4	75	888.8889	0.300664	516.671	0.82	25.32	301.5	0.838503
港 10-23	35	0.07	5.2	0.15563	0.26411	7.14	65	518.5185	0.314576	516.671	0.35	21.05	248.4	0.97861
港 10-28	65	0.09	4.8	0.35951	0.1451	32.5	63	370.3704	0.121055	516.671	0.61	23	701.6	0.929412
港 11-30	17	0.22	4.5	0.19435	0.59965	7.68	59	962.963	0.198505	516.671	0.56	26.15	233	0.902674
港 1-60	16	0.26	4.2	0.35829	0.119699	37.6	53	962.963	0.300042	384.102	0.79	35	946	0.929412
港 16-73-1	14	0.39	3.6	0.32251	0.578317	77	61	888.8889	0.117525	404.108	0.65	31.56	256	0.946524
港 213	13	0.42	3.5	0.32251	0.22637	33.8	46	518.5185	0.117525	277.407	0.89	31	266.4	0.260963
港 2-27	19	0.09	2.6	0.28025	0.378422	12	48	518.5185	0.117525	277.407	0.86	18.6	268	0.860963
港 246	63	0.08	2.9	0.35829	0.214779	48.6	95	370.3704	0.300042	516.671	0.79	19.64	264	0.317647
港 250	69	0.14	3.9	0.35829	0.102967	3	93	370.3704	0.300042	384.102	0.86	23.25	298	0.317647
港 250K	26	0.13	4.3	0.35829	0.119699	38.43	68	962.963	0.300042	384.102	0.882	24.6	812	0.742246
港 2-55	28	0.17	4.1	0.115	0.019584	36.73	62	740.7407	0.147841	273.406	0.88	23.5	568	0.970053
港 276	36	0.11	3.2	0.50234	0.044766	42.41	53	740.7407	0.117525	535.609	0.62	26.23	566.5	0.921925
港 30	15	0.11	3.4	0.26945	0.010781	7.24	68	1000	0.198505	404.108	0.51	25.3	265.5	0.580749
港 3-25-1	13	0.26	2.8	0.115	0.033429	7.16	94	740.7407	0.147841	416.644	0.45	20.56	568	0.860963
港 3-29	19	0.16	2.7	0.07484	0.093004	7.56	76	962.963	0.117525	194.185	0.42	20.35	703	0.587166
港 339	18	0.09	2	0.115	0.033429	33.6	72	962.963	0.147841	194.185	0.45	19.6	205	0.298396
港 37	16	0.12	3.6	0.35829	0.119699	32.5	81	740.7407	0.300042	384.102	0.47	23.5	268	0.33369
港 34	17	0.12	4.8	0.35829	0.102967	31.5	83	740.7407	0.300042	384.102	0.82	24.56	298	0.342246

续附表 2

井号	孔喉直径 (μm)	粒度中值 (mm)	注水压强 (MPa)	渗透率 (μm^2)	临界流速 (mL/min)	固相含量 (mg/L)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	临界矿化度 (mg/L)	泥质含量 (mg/L)	总矿化度 (mg/L)	水敏指数	结垢离子的 平均浓度(mg/L)	生产时间 (d)	含水率 (%)
东 4-17	16	0.25	4.5	0.35829	0.117671	32.6	85	888.8889	0.300042	384.102	0.85	21.6	548	1
东 8-29-1	14	0.15	2.5	0.10576	0.031251	7.65	95	888.8889	0.144311	1000	0.78	27.56	568	0.031016
港 10-23	13	0.09	3.6	0.17427	0.03112	37.5	85	888.8889	0.096138	1000	0.56	31.5	535.4	0.031016
港 10-28	19	0.11	4.1	0.34106	0.044977	36.4	85	1000	0.117525	404.108	0.45	35.1	299.5	0.913369
港 11-30	71	0.11	2.9	0.115	0.049866	7.23	94	962.963	0.147841	277.407	0.56	40.15	816	0.298396
港 1-60	63	0.11	3.7	0.3947	0.02612	34.21	75	370.3704	0.300664	516.671	0.51	29.6	454	0.950802
港 16-73-1	69	0.07	3.6	0.35829	0.048837	3.26	96	370.3704	0.300042	384.102	0.78	28.5	262.5	1
港 213	26	0.09	2.5	0.35829	0.053986	6.59	85	518.5185	0.300042	384.102	0.88	27.45	235.5	1
港 2-27	28	0.22	4.8	0.28025	0.147847	25.6	75	518.5185	0.117325	194.185	0.886	29.56	235.4	0.958289
港 246	36	0.26	4.6	0.28025	0.104045	24.16	65	962.963	0.117525	194.185	0.63	23.56	265.5	0.961497
港 250	15	0.12	4.2	0.28025	0.026908	36.45	87	370.3704	0.117525	194.185	0.57	18.62	855	0.860963
港 250K	13	0.12	3.5	0.07484	0.093004	7.62	89	518.5185	0.117525	336.356	0.56	31.05	945	0.13369
港 2-55	19	0.25	2.6	0.02205	0.03163	8.56	54	1000	0.198505	535.609	0.57	35.2	784	0.580749
港 276	29	0.15	3.5	0.50234	0.044766	26.59	86	740.7407	0.117525	194.185	0.65	31.5	268	0.957219
港 30	65	0.09	3.6	0.35634	0.161185	21.6	94	888.8889	0.117525	336.356	0.52	27.2	264	0.883422
港 3-25-1	71	0.11	4.1	0.02205	0.03163	34.5	94	962.963	0.198505	404.108	0.58	27.6	298	0.580749
港 3-29	63	0.11	2.9	0.34106	0.026167	29.5	98	1000	0.117525	535.609	0.68	28.5	812	0.946524
港 339	69	0.12	2.5	0.63441	0.044704	7.9	95	888.8889	0.117525	535.609	0.45	19.6	568	0.921925
港 34	16	0.26	4.8	0.13547	0.045308	16.5	45	888.8889	0.117525	194.185	0.46	23.5	566.5	0
港 34	14	0.12	4.6	0.07484	0.093004	23.48	46	888.8889	0.117525	516.671	0.58	24.56	265.5	0.13369

续附表 2

井号	孔隙直径 (μm)	粒度中值 (mm)	注水压强 (MPa)	渗透率 (μm^2)	临界流速 (mL/min)	固相含量 (mg/L)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	临界矿化度 (mg/L)	泥质含量 (mg/L)	总矿化度 (mg/L)	水敏指数	结垢离子的 平均浓度(mg/L)	生产时间 (d)	含水率 (%)
东 4-17	13	0.12	4.2	0.35951	0.026138	24.6	48	518.5185	0.121055	516.671	0.515	21.6	568	0.649198
东 8-29-1	19	0.25	3.5	0.3947	0.2612	7.65	49	888.8889	0.300664	516.671	0.568	27.56	703	0.950802
港 10-23	63	0.15	2.6	0.39435	0.026113	7.91	43	888.8889	0.198505	516.671	0.882	31.5	205	0.902674
港 10-28	69	0.15	3.5	0.35829	0.26158	23.6	65	1000	0.300042	516.671	0.584	35.1	268	0.317647
港 11-30	26	0.09	3.6	0.39435	0.26113	32.5	68	518.5185	0.198505	516.671	0.886	40.15	298	0.902674
港 1-60	28	0.11	4.1	0.27815	0.26254	39.5	67	370.3704	0.109012	516.671	0.599	29.6	548	0.945455
港 16-73-1	36	0.11	2.9	0.27811	0.26252	34.5	62	370.3704	0.109012	516.671	0.68	28.5	568	0.486631
港 213	15	0.11	3.7	0.27809	0.26252	26.5	69	1000	0.109012	516.671	0.45	27.45	535.4	0.259893
港 2-27	13	0.07	3.6	0.27815	0.026254	21.56	53	370.3704	0.109012	516.671	0.42	29.56	568	0.945455
港 246	19	0.09	2.9	0.35829	0.214779	29.56	61	370.3704	0.300042	516.671	0.46	23.56	535.4	0.317647
港 250	18	0.22	3.7	0.28077	0.02625	26.5	46	518.5185	0.399086	416.644	0.865	29.56	299.5	0.486631
港 250K	16	0.26	3.6	0.57278	0.090536	7.14	48	518.5185	0.117525	601.76	0.89	23.56	816	0.013904
港 2-55	17	0.12	2.5	0.07801	0.031409	18.6	95	962.963	0.198505	273.406	0.56	18.62	454	0.580749
港 276	16	0.12	4.8	0.05012	0.19812	13.5	93	1000	0.198505	416.644	0.65	31.05	262.5	0.014973
港 30	14	0.25	4.6	0.222983	0.038276	17.5	68	888.8889	0.230897	416.644	0.88	35.2	235.5	0.893048
港 3-25-1	13	0.15	4.2	0.19847	0.080575	16.23	62	888.8889	0.117525	273.406	0.786	31.5	235.4	0.040642
港 3-29	19	0.09	3.5	0.05012	0.11266	13.4	53	888.8889	0.198505	273.406	0.432	27.2	265.5	0.014973
港 339	71	0.11	2.6	0.05012	0.034101	7.14	68	962.963	0.198505	194.185	0.77	27.6	855	0.968984
港 34	63	0.11	3.5	0.58264	0.10781	7.6	94	888.8889	0.027201	273.406	0.35	28.5	945	0.968984
港 34	69	0.11	3.6	0.26945	0.01895	7.5	76	888.8889	0.198505	273.406	0.262	19.6	784	0.983957

附表3 孤东17口井的油气层损害部分诊断数据

井号	粒度 中值 (mm)	生产 压差 (MPa)	结垢离 子的平 均浓度(%)	固相 含量 (mg/L)	遇水 时间 (d)	温度 (℃)	井底 流压 (MPa)	原油 含 蜡量 (%)	原油粘 度 (mpa·s)	蒙托石 含量(%)	高岭石 含量(%)	绿泥石 含量(%)	孔隙度 (%)	[K ⁺ +Na ⁺] (mg/L)	[Ca ²⁺] (mg/L)	[Mg ²⁺] (mg/L)	油层 中深 (m)
7-26-395	0.09	4.8	21.05	0.7	367	68	15.8	23.23	62.77	83.838	34.19414	10.57377	34	149	44	30	0.0233189
7-34-3406	0.09	4.8	21.05	0.7	384	75	17.85	23.23	62.77	83.838	34.19414	15.98361	23	125	30	34	0.159615
8-19-X	0.07	5.2	21.05	0.7	264	65	10.1	21.55	85.49	100	39.37729	15.98361	23	143	26	35	0.7851559
8-20N2008	0.07	5.2	21.05	0.7	225	63	11.4	21.55	85.49	100	39.37729	15.98361	34	142	65	36	0.7851559
2-15-302	0.22	4.5	21.05	0.75	881.25	59	12.17	19.2	65.77	98.989	34.01099	15.98361	34	150	89	38	0.284025
2-15-61	0.22	4.5	21.05	0.75	885.44	53	12.17	19.2	65.77	98.989	34.01099	2.377049	34	41	20	44	0.6390414
7-38-375	0.09	4.8	21.05	0.74	395.04	61	17.85	21.4	89.45	100	34.19414	10.57377	34	46	44	45	0.4663781
7-28-3375	0.09	4.8	21.05	0.7	442.49	46	17.85	22.2	89.45	83.8383	39.37729	15.98361	33	86	12	51	0.2647761
7-30-3355	0.09	4.8	21.05	0.7	412.57	48	18.08	23.9	89.45	98.989	34.01099	2.377049	34	29	66	19	0.0727989
7-30-365	0.09	4.8	21.05	0.7	433.76	95	18.08	20.6	89.45	100	34.19414	10.57377	37	52	56	15	0.0886893
7-40-395	0.09	4.8	21.05	0.7	404.96	93	18.08	21.3	89.45	100	34.19414	10.57377	34	74	23	16	0.0224145
8-19-N11	0.35	4.3	21.05	0.8	1412.92	68	18.08	20.8	68.55	100	34.19414	4.098361	34	86	54	34	0.0439894
8-20-2016	0.35	4.3	21.05	0.8	1388.19	62	18.08	21.6	68.55	83.8383	39.37729	4.098361	34	189	48	35	0.7186228
8-22-12	0.35	4.3	21.05	0.8	1350.3	53	18.08	21.6	68.55	98.9898	34.01099	4.098361	34	152	47	38	0.0291324
8-26-16	0.35	4.3	21.05	0.8	1374.11	68	11.4	21.6	68.55	98.9898	34.01099	4.098361	34	209	97	39	0.3271752
8-26-N8	0.35	4.3	21.05	0.8	1382.5	94	11.4	21.6	68.55	98.9898	34.01099	4.098361	35	140	14	64	0.3271752
8-32-K10	0.35	4.3	21.05	0.8	1361.16	76	18.08	21.6	68.55	83.8383	39.37729	4.098361	36	149	44	34	0.4822685

附录 B

1. 基于模糊数学理论的油气层损害程度诊断(7-26-395 井)

(1)水敏损害程度诊断

以油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量，油气层岩石的孔隙度、渗透率，油气层的总矿化度作为诊断指标，利用简化的升半梯形分布表示成以蒙脱石、伊利石含量来诊断水敏损害程度的决策因子 $F(i)$ ，计算公式如下：

$$F(i) = \frac{X(i) - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中 $X(i)$ ——第 i 口井的蒙脱石含量和伊利石含量值；

$F(i)$ ——第 i 口井的蒙脱石和伊利石含量的隶属度；

n ——参与决策的总注水井数；

$X_{\max} = \max(X(1), X(2), \dots, X(n))$ ；

$X_{\min} = \min(X(1), X(2), \dots, X(n))$ 。

这里我们依次定义该区块蒙脱石、伊利石含量的最大值为 1，最小值为 0，因此，

$$F_M = \frac{X(i) - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} = \frac{0.83838 - 0}{1 - 0} = 0.838$$

$$F_Y = \frac{X(i) - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} = \frac{0 - 0}{1 - 0} = 0$$

利用降半梯形分布求得油气层岩石的孔隙度、渗透率和总矿化度决策因子 $F(i)$ ，计算公式如下：

$$F(i) = \frac{X_{\max} - X(i)}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中 $X(i)$ ——第 i 口井的孔隙度、渗透率和总矿化度值；

$F(i)$ ——第 i 口井的决策因子；

X_{\max} 、 X_{\min} ——最大、最小的孔隙度、渗透率和总矿化度值。

这里我们依次定义该区块油气层岩石的孔隙度、渗透率和总矿化度的最大值分别为 50、1.2 和 1000，最小值分别为 10、0、0，因此得到：

$$F_{\phi} = \frac{X_{\max} - X(i)}{X_{\max} - X_{\min}} = \frac{50 - 34}{50 - 10} = 0.4$$

$$F_k = \frac{X_{\max} - X(i)}{X_{\max} - X_{\min}} = \frac{1.2 - 0.0287}{1.2 - 0} = 0.976$$

$$F_c = \frac{X_{\max} - X(i)}{X_{\max} - X_{\min}} = \frac{1000 - 737}{1000 - 0} = 0.263$$

分别设定油气层岩石的蒙脱石、伊利石含量，油气层岩石的孔隙度、渗透率，油气层的总矿化度的隶属度的权值为：0.4、0.2、0.1、0.2、0.1，满足归一化条件，因此：

$$\begin{aligned} F_{Z1} &= F_M \times 0.4 + F_Y \times 0.2 + F_{\phi} \times 0.1 + F_k \times 0.2 + F_c \times 0.1 \\ &= 0.838 \times 0.4 + 0 \times 0.2 + 0.4 \times 0.1 + 0.976 \times 0.2 + 0.263 \times 0.1 \\ &= 0.597 \end{aligned}$$

(2) 速敏损害程度诊断

选择油气层岩石的孔隙度，蒙脱石和伊利石含量，油气层岩石的泥质含量，地层流体的粘度作为诊断指标，其中蒙脱石、伊利石和泥质含量以及地层流体的粘度的隶属度的求取采用升半梯形分布，油气层岩石的孔隙度的隶属度的求取采用降半梯形分布，同理得到：

$$F_M = \frac{0.83838 - 0}{1 - 0} = 0.838$$

$$F_Y = \frac{0 - 0}{1 - 0} = 0$$

$$F_N = \frac{0 - 0}{100 - 0} = 0.199$$

$$F_{\mu} = \frac{62.77 - 62.77}{89.45 - 62.77} = 0$$

$$F_{\phi} = \frac{100 - 34}{100 - 0} = 0.66$$

$$F_{Z2} = 0.838 \times 0.2 + 0 \times 0.2 + 0.199 \times 0.3 + 0 \times 0.2 + 0.66 \times 0.1 = 0.405$$

(3) 盐敏损害程度诊断

对于盐敏损害程度的诊断，我们选择蒙脱石、伊利石含量、泥质含量和钾、钠、钙、镁离子浓度作为诊断指标，隶属度的求取采用全部采用升半梯形分布，单因素决策因子依次表示为 F_M 、 F_Y 、 F_N 、 F_{K+Na} 、 F_{Ca} 、 F_{Mg} ，同理得到：

$$F_M = \frac{0.83838 - 0}{1 - 0} = 0.838$$

$$F_Y = \frac{0 - 0}{1 - 0} = 0$$

$$F_N = \frac{0 - 0}{100 - 0} = 0.199$$

$$F_{K+Na} = \frac{149 - 29}{209 - 29} = 0.667$$

$$F_{Ca} = \frac{44 - 12}{97 - 12} = 0.376$$

$$F_{Mg} = \frac{30 - 15}{64 - 15} = 0.306$$

$$F_{Z3} = 0.838 \times 0.3 + 0 \times 0.2 + 0.199 \times 0.2 + 0.667 \times 0.1 + 0.376 \times 0.1 + 0.306 \times 0.1 = 0.426$$

(4) 微粒运移损害程度诊断

选择颗粒尺寸和颗粒浓度、临界流速、流体的粘度、油气层岩石的渗透率作为诊断的指标。因为没有临界流速和流体粘度的数据，这里我们只考虑其它的诊断指标。颗粒尺寸和颗粒浓度分别用粒度中值和固相

含量表示，其隶属度的求取采用升半梯形分布公式，油气层岩石的渗透率采用降半梯形分布，分别用 F_{M_d} 、 F_g 和 F_k 表示各指标的隶属度。同理得到：

$$F_{M_d} = \frac{0.09 - 0.07}{0.35 - 0.07} = 0.071$$

$$F_g = \frac{0.7 - 0}{1.2 - 0} = 0.583$$

$$F_k = \frac{1.2 - 0.029}{1.2 - 0} = 0.976$$

$$F_{Z_4} = 0.071 \times 0.4 + 0.583 \times 0.3 + 0.976 \times 0.3 = 0.496$$

(5) 固相入侵损害程度诊断

选择颗粒大小、流体流速、固相含量和油气层岩石的渗透率作为诊断指标，颗粒大小和流体流速分别用粒度中值、注入速度表示，其和固相含量的隶属度的求取采用升半梯形分布，油气层岩石的渗透率的隶属度的求取采用降半梯形分布。且依次表示为 F_{M_d} 、 F_v 、 F_g 和 F_k ，根据经验分别设定这些隶属度的权值，可得到诊断速敏损害程度的决策因子 F_{Z_5} 。

$$F_{M_d} = \frac{0.09 - 0.07}{0.35 - 0.07} = 0.071$$

$$F_v = \frac{2 - 0}{5 - 0} = 0.4$$

$$F_g = \frac{0.7 - 0}{1.2 - 0} = 0.583$$

$$F_k = \frac{1.2 - 0.029}{1.2 - 0} = 0.976$$

$$F_{Z_5} = 0.071 \times 0.25 + 0.4 \times 0.25 + 0.583 \times 0.25 + 0.976 \times 0.25 = 0.508$$

(6) 水化膨胀损害程度诊断

选择蒙脱石含量、伊利石含量、油气层的总矿化度和油气层岩石的渗透率作为诊断指标，其中蒙脱石含量、伊利石含量的隶属度的求取采用升半梯形分布，油气层的总矿化度和油气层岩石的渗透率的隶属度的求取采用降半梯形分布；且依次表示为 F_M ， F_Y ， F_C 和 F_k ，根据经验分别设定这些隶属度的权值，可得到诊断速敏损害程度的决策因子 F_{z6} 。

$$F_M = \frac{0.83838 - 0}{1 - 0} = 0.838$$

$$F_Y = \frac{0 - 0}{1 - 0} = 0$$

$$F_C = \frac{1000 - 737}{1000 - 0} = 0.263$$

$$F_k = \frac{1.2 - 0.029}{1.2 - 0} = 0.976$$

$$F_{z6} = 0.838 \times 0.3 + 0 \times 0.2 + 0.263 \times 0.3 + 0.976 \times 0.2 = 0.526$$

(7) 结垢损害程度诊断

a. 无机垢损害诊断

选择流体 pH 值、渗透率、总矿化度和遇水时间作为诊断指标，其中 pH 值、遇水时间采用升半梯形分布来求取隶属度，渗透率和总矿化度采用降半梯形分布公式，诊断隶属度分别表示为： F_{pH} 、 F_k 、 F_C 和 F_t 。

$$F_{pH} = \frac{8.1 - 4}{10 - 4} = 0.683$$

$$F_k = \frac{1.2 - 0.029}{1.2 - 0} = 0.976$$

$$F_C = \frac{1000 - 737}{1000 - 0} = 0.263$$

$$F_t = \frac{367 - 0}{1500 - 0} = 0.245$$

$$F_{z7} = 0.683 \times 0.3 + 0.976 \times 0.2 + 0.263 \times 0.3 + 0.245 \times 0.2 = 0.528$$

b. 有机垢损害诊断

诊断指标确定为原油含蜡量、遇水时间、油气比和含水率，其中原油含蜡量、遇水时间采用升半梯形分布公式求取隶属度，油气比和含水率采用降半梯形分布，其诊断隶属度分别表示为 F_L 、 F_t 、 F_r 和 F_s 。

$$F_L = \frac{23.23 - 0}{100 - 0} = 0.232$$

$$F_t = \frac{367 - 0}{1500 - 0} = 0.245$$

$$F_r = \frac{1 - 0.815}{1 - 0} = 0.185$$

$$F_s = \frac{1 - 0.581}{1 - 0} = 0.419$$

$$F_{z7} = 0.232 \times 0.4 + 0.245 \times 0.2 + 0.185 \times 0.4 + 0.419 \times 0.2 = 0.263$$

2. 油气层损害程度综合诊断(7-26-395 井)

(1) 水敏损害综合诊断

由水敏指数的定义，水敏指数越大，水敏损害越严重；根据最大隶属度原则，水敏诊断因子越大，损害越严重。因此可以，运用模糊数学方法，采用梯形分布公式，得到水敏指数和水敏诊断因子的隶属度函数分别为：

$$\mu(I_w) = \begin{cases} 0 & I_w = 0 \\ \frac{I_w - 0}{1 - 0} & 0 < I_w < 1 \\ 1 & I_w = 1 \end{cases}$$

$$\mu(F_{z1}) = \begin{cases} 0 & F_{z1} \leq 0.1 \\ \frac{F_{z1} - 0.1}{0.9 - 0.1} & 0.1 < F_{z1} < 0.9 \\ 1 & F_{z1} \geq 0.9 \end{cases}$$

分别用 R_{I1} , R_{F1} 作为水敏指数和水敏诊断因子的决策因子, 根据现场经验设置决策因子的权值分别为 0.6、0.4, 用 R_{Z1} 表示为水敏损害程度的综合决策因子。

$$R_{I1} = \frac{0.486 - 0}{1 - 0} = 0.486$$

$$R_{F1} = \frac{0.599 - 0.1}{0.9 - 0.1} = 0.621$$

$$R_{Z1} = 0.486 \times 0.6 + 0.621 \times 0.4 = 0.54$$

(2) 速敏损害综合诊断

同理分别用 R_{I2} , R_{F2} 作为速敏指数和速敏诊断因子的决策因子, 用 R_{Z2} 表示为速敏损害程度的综合决策因子。

$$R_{I2} = \frac{0.654 - 0}{1 - 0} = 0.654$$

$$R_{F2} = \frac{0.405 - 0.1}{0.92 - 0.1} = 0.372$$

$$R_{Z2} = 0.654 \times 0.6 + 0.372 \times 0.4 = 0.541$$

(3) 盐敏损害综合诊断

同理分别用 R_{I3} , R_{F3} 作为盐敏指数和盐敏诊断因子的决策因子, 用 R_{Z3} 表示为盐敏损害程度的综合决策因子。

$$R_{I3} = \frac{5358 - 2500}{8000 - 2500} = 0.408$$

$$R_{F3} = \frac{0.426 - 0.2}{0.8 - 0.2} = 0.377$$

$$R_{Z3} = 0.408 \times 0.6 + 0.377 \times 0.4 = 0.396$$

(4) 微粒运移损害综合诊断

同理分别用 R_{K1} , R_{F4} 作为渗透率降低值和微粒运移诊断因子的决策

因子, 用 R_{Z_4} 表示为微粒运移损害程度的综合决策因子。

$$R_{K1} = \frac{0.059 - 0}{0.12 - 0} = 0.489$$

$$R_{F4} = \frac{0.496 - 0.05}{0.93 - 0.05} = 0.507$$

$$R_{Z_4} = 0.489 \times 0.6 + 0.507 \times 0.4 = 0.496$$

(5) 固相入侵损害综合诊断

同理分别用 R_{K2} , R_{F5} 作为渗透率降低值和固相颗粒侵入诊断因子的决策因子, 用 R_{Z_5} 表示为固相颗粒侵入损害程度的综合决策因子。

$$R_{K2} = \frac{0.049 - 0}{0.12 - 0} = 0.411$$

$$R_{F5} = \frac{0.508 - 0.05}{0.92 - 0.05} = 0.526$$

$$R_{Z_5} = 0.411 \times 0.6 + 0.526 \times 0.4 = 0.457$$

(6) 水化膨胀损害综合诊断

同理分别用 R_{K3} , R_{F6} 作为渗透率降低值和水化膨胀诊断因子的决策因子, 用 R_{Z_6} 表示为水化膨胀损害程度的综合决策因子。

$$R_{K3} = \frac{0.067 - 0}{0.12 - 0} = 0.553$$

$$R_{F6} = \frac{0.636 - 0.05}{0.9 - 0.05} = 0.689$$

$$R_{Z_6} = 0.553 \times 0.6 + 0.689 \times 0.4 = 0.607$$

(7) 结垢损害综合诊断

a. 无机垢损害综合诊断

同理分别用 R_{K4} , R_{F7} 作为渗透率降低值和无机垢诊断因子的决策因子, 用 R_{Z_7} 表示为无机垢损害程度的综合决策因子。

$$R_{K4} = \frac{0.05 - 0}{0.12 - 0} = 0.418$$

$$R_{F7} = \frac{0.528 - 0.05}{0.92 - 0.05} = 0.549$$

$$R_{Z7} = 0.418 \times 0.6 + 0.549 \times 0.4 = 0.47$$

b. 有机垢损害综合诊断

同理分别用 R_{K5} , R_{F8} 作为渗透率降低值和有机垢诊断因子的决策因子, 用 R_{Z8} 表示为有机垢损害程度的综合决策因子。

$$R_{K5} = \frac{0.02 - 0}{0.12 - 0} = 0.17$$

$$R_{F8} = \frac{0.263 - 0.05}{0.95 - 0.05} = 0.236$$

$$R_{Z8} = 0.17 \times 0.6 + 0.236 \times 0.4 = 0.196$$

致谢

本文是在导师蒋官澄教授的精心指导和严格要求下完成的，在此对尊敬的导师表示衷心的感谢。

在论文完成期间，得到罗平亚老师和张亚老师的热心帮助，在此表示诚挚的谢意。

谨向所有关心和帮助笔者完成学业的人们表示诚挚的谢意。

个人简历、在学期间的科研成果

个人简历:

刘帅,男,生于1982年4月。2004年毕业于中国石油大学(华东)石油工程学院,获工学学士学位。

在学期间的科研成果:

(1)油田开发过程中油层保护及解堵技术研究获2006年山东高等学校优秀科研成果奖自然科学奖二等奖。

(2)孤东油田注水井出砂机理与对策及纤维复合防砂技术研究获石油大学2005年优秀科技成果奖二等奖。

(3)油田开发过程中油层保护及解堵技术研究获2005年教育部科技成果完成者证书。