

基于多级框架的不确定知识推理方法研究

李春生,郎 敏,张可佳,周云霞

(东北石油大学 计算机信息与技术学院,黑龙江 大庆 163318)

摘 要:在知识推理应用于智能化方法的过程中,为解决知识并发性匹配及可用性等问题,设计了一种多级框架下的不确定性推理方法。该方法通过采用规则-知识衍生方式、构建产生式模型和设计多级框架结构以有效提高推理精度和准确率,通过引入槽值符合率及隶属度作为确信因子以及实现知识的并发性匹配,选定正向推理作为知识推理方式,应用论据累计的 Bayes 方法消解知识匹配冲突。选用并发异常样本对所提出方法的准确率和并发推理能力进行验证实验。实验结果表明,该算法在准确率和并发推理能力方面具有较大提升,达到了知识结构设计合理、知识抽象化程度明显提高的目的,满足了复杂工业生产等领域对多并发推理的精细化要求。油井生产动态预警应用的实际测试分析表明,所提出的 UnMF 方法较大程度上提高了预警的准确性,降低了生产异常情况的发生,对稳定高效工业生产具有重要的意义。

关键词:框架系统;不确定性推理;FC 规则闭包;反射技术;生产预警

中图分类号:TP312

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)11-0052-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.11.011

Research on Method of Uncertain Knowledge Reasoning Based on Multilevel Framework

LI Chun-sheng, LANG Min, ZHANG Ke-jia, ZHOU Yun-xia

(College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: In the process of knowledge reasoning applied to the intelligent method, in order to solve the problem of concurrency matching of knowledge and usability, a method of uncertainty reasoning under multi-level framework is designed. With introduction of rule-knowledge derivation, establishment of the production model and design of multi-level frame structure, its precision and accuracy of reasoning is improved effectively; introducing slot value coincidence rate and membership degree as confirmation factor as well as knowledge concurrency matching, the forward-based reasoning is adopted as knowledge reasoning and the Bayes method applied to eliminate conflict in knowledge matching. Experiments on its accuracy and concurrent reasoning have been conducted with some concurrent abnormal samples, which show that its accuracy and concurrent reasoning is promoted greatly, achieving the purpose for reasonable design of knowledge structure and significant improvement in knowledge abstraction, meeting the refinement requirements of complex industrial production in the field of multi concurrent reasoning. The analysis on results of practical testing early dynamic warning for oil well production show that the proposed UnMF method has improved accuracy of early warning, which can reduce the occurrence of abnormal production and therefore is of great significance for stable and efficient industrial production.

Key words: frame system; RUU; FC rule closure; reflection technology; productive warning

0 引 言

知识推理作为生物信息学的重要理论成果,经过数十年发展,已经广泛应用于工业生产辅助决策、信息预警及工程监测各领域,并发挥着极大的作用,如 CM-BOSS 系统、PCRC 生产预警监测系统等^[1]。由于信息化的普及,对辅助决策和分析的精细化程度逐步提

高,伴随知识体系的不断完善,于是合理设计领域辅助决策知识库结构,提供切实可行的辅助分析方案成为提高智能化应用准确率和有效性的关键^[2]。不确定推理的提出以框架形式设计多层次知识结构,以置信度和确信因子为基础实施多向并发同步推理,突破确定性推理的瓶颈,解决工程领域内知识结构繁冗,复杂度

收稿日期:2016-09-19

修回日期:2017-01-05

网络出版时间:2017-07-19

基金项目:黑龙江省自然科学基金面上项目(F2015020);黑龙江省教育科学技术研究项目(12511010);黑龙江大庆市指导性项目(zd-2016-010);黑龙江省高教学会 2016 年教育科研课题(16Q117)

作者简介:李春生(1960-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为人工智能及其应用、模式识别与人工智能。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170719.1108.012.html>

高,并发处理困难等问题,使多决策树及并行计算的可行性和高效性更有意义^[3]。

领域决策者和专家的经验及思维方式对于智能化应用至关重要^[4]。虽然通过不确定性推理的手段可以很好地进行多因素并发分析,较好地解决相关领域内的故障认定、风险评价、措施优选等问题^[5],但是依旧存在以下缺陷:决策性知识具有片段性,基于产生式规则的不确定推理无法描述知识簇或规则集合的涵盖关系,降低了推理结果的可靠性^[6];知识描述缺乏抽象性描述,复用性差,导致推理过程运算冗余较大,响应时间较长;工程预警、异常诊断等推理存在故障并发、复合异常等情况,倾向性和置信度计算不够准确^[7]。

针对上述问题研究基于多级框架的不确定推理方法(UnMF),定义 FC 规则闭包,采用规则-知识衍生方式,构建产生式模型,并设计多级框架结构,引入槽值符合率^[8]及隶属度作为确信因子,完成不确定性知识库模型(UnM)设计;选定正向推理作为知识推理方式,提出反射定位推理算法,应用论据累计的 Bayes 方法^[9]消解知识匹配冲突,完成基于 UnM 的 UnMF 的研究,同时为该方法的的确信因子计算提出一套较为科学的算法,以此达到合理设计知识体系结构、提高知识抽象化描述、实现多并发推理精细化分析的目的。

1 FC 规则闭包的产生

专家组对于领域内与事务相关的知识界定和分类较为准确,知识的结构具有一定通用性。将知识的表达转化为抽象的逻辑表示形式是实现高效推理的基础。

规则是知识依据相同算法聚类抽象形成的闭包,由规则主体 R_c 和扩展集 R_e 组成,其中 R_c 算法实体由 D-Ag 算法库提供。

以 n 位专家组成的专家组,领域内存在某事务 W ,给出与 W 相关的规则闭包的一般表述形式为: $R = \{R_c, R_e \mid \text{pre}(R_c) \notin \text{null}\}$ 。

1.1 规则主体结构

定义规则导向函数 $T(n)$,给出规则主体 R_c 的一般表述形式为:

$$R_c = \{\text{ID}, \text{Desc}, T(\text{Frame}), T(\text{An}), T(\text{Value}), T(\text{Model}), \text{Ot} \mid T(n) \notin \text{null}\} \quad (1)$$

其中,Desc 表示该规则的自然语言描述;规则门类 $T(\text{Frame})$ 包括环切型和值切型; $T(\text{An})$ 表示规则映射算法实体;权值 $T(\text{Value})$ 表示该规则的隶属程度,反应该规则满足结论的程度;Ot 表示规则结论。

其中,ID 反应规则唯一性,标准表达结构如下:

$$\text{ID} = \text{Str}(\text{time}) + \text{Str}(T_Frame) + \text{str}(T_An) \\ \text{万方数据} \quad (2)$$

1.2 规则扩展集结构

规则的扩展集 R_e 由描述支持规则推理和拟合运算的参数集合构成。参数集以数据实例形式存储,并以链表形式反应参数间关系。

扩展集包括必备线性因素和非必备线性因素。定义规则导向函数 $F(n)$,给出其一般表示形式:

$$R_e = \{\text{ID}, F(\text{kind}), F(\text{order}), F(\text{Value}), F(\text{desc}), \text{bz}\} \quad (3)$$

其中,ID 与 R_c 存在唯一映射关系; $F(\text{kind})$ 标注扩展类型,反应扩展集递推方法; $F(\text{order})$ 表示扩展集的指针序列; $F(\text{Value})$ 表示规则槽值; $F(\text{desc})$ 表示规则的自然语言描述。

在一个规则内, R_c 与 R_e 的对应关系可描述为:

$$R = \{R_c \rightarrow U(R_e \mid n)\} = \\ R_c \rightarrow \begin{pmatrix} T(\text{An}) & T(\text{Value}) & T(\text{Model}) \\ F_{k1}(\text{An}) & F_{v1}[T(v)] & F_{d1}[T(m)] \\ F_{k2}(\text{An}) & F_{v2}[T(v)] & F_{d2}[T(m)] \\ \dots & \dots & \dots \\ F_{kn}(\text{An}) & F_{vn}[T(v)] & F_{dn}[T(m)] \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中, $U(R_e \mid n)$ 表示 n ($n > 1$) 维 R_e 子集;对应关系表达式满足 $T(R_{cn}) = U(R_e \mid n)$ 。

运算复杂度如下:

$$o(n) = T^2(R_{cn}) + \text{avg}\left(\sum_{i=0}^n U(R_e \mid i)\right) \quad (5)$$

其中, $U(R_e \mid i) = \exp(T^2(R_{cn})) + \text{Min}(T(R_{cn}))$,所以运算复杂度可表示为:

$$o(n) = T(R_{cn}) \times (T(R_{cn}) + \text{avg}\left(\sum_{i=0}^n (T(R_{cn}))\right)) \quad (6)$$

1.3 知识的表达方式

知识作为规则的实例化,除继承 FC 规则闭包的全部元素外,包括事务类型 W_k ,框架对象 Fr 及用于计算槽值隶属度的 G ,给出知识的一般表示形式:

$$K = R \oplus \{W_k, \text{Fr}, G \mid \text{pre}(k) \notin \text{null}\} \quad (7)$$

其中, W_k 包括反应事务发生类型及发生定级;Fr 反应该知识所隶属框架对象; G 用于计算框架匹配程度及规则满意度,用以进一步计算该知识满足推理后事件的概率。

2 不确定性知识库模型设计

UnM 采用多级框架-产生式结构。框架系统反应业务分类情况,产生式系统直接参与知识推理过程。

2.1 基于规则-知识的产生式系统(RK-PS 系统)结构

RK-PS 系统借鉴面向对象的设计思想,即规则是知识的抽象化表述,知识是规则的实例。知识将继承

所隶属规则的全部属性和行为。产生式系统由算法库、基于 FC 闭包结构的规则库和 FC 结构衍生知识库三部分组成。其结构如图 1 所示。

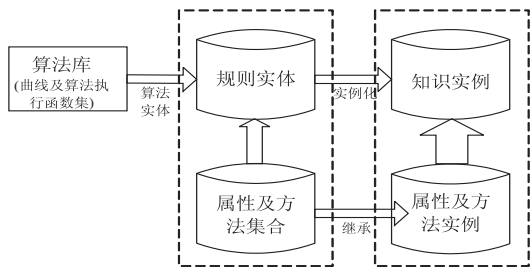


图 1 产生式系统结构

其中,算法库用于存储各类拟合曲线、函数及算法集合,具体包括线性回归函数、普朗克曲线、高斯方程等;规则库采用 FC 规则闭包描述单体规则,并由一组数据实体(数据表)描述;知识库结构继承 FC 规则闭包,由规则库提供知识实例。实例化步骤描述如下:

- Step1:选择规则 R , 创建 R 的知识实例 K ;
- Step2:加载算法库 D-Ag 索引,获取算法实体;
- Step3:有效化知识实例 K (过程赋值);
- Step4:建立 K 扩展集及映射关系。

完成实例化后,知识实例 K 称为片段知识或不完全知识。由多组知识实例组成的知识集称为描述型知识。

2.2 多级框架结构设计

多级框架由多个单体框架构成。单体框架反应领域内与事务相关的推理描述;基本逻辑结构由槽集 Kn 、社会性关系 Cm 及行为信息 $U(f)$ 组成。给出一般描述形式:

$$F = \{Kn, Cm, count(K)\} \oplus U(f) \quad (8)$$

槽集 Kn 由多个槽构成。单体槽由知识 K 、槽值 Kv 、默认槽值 Kv' 和槽值域 $Km \subset \{0, 1\}$ 组成,知识由 RK-PS 知识库提供,反应不同斜面的倾向度。

行为信息,也称守护程序,表示在槽值未指定时指向的修改动作,通常以 WHEN CHANGED 形式记录。

多级框架结构的级联关系由单体框架的社会性关系 Cm 描述。 Cm 反应框架本体与其他框架的子父类情况,标识其在多级框架的位置。定义单体框架 Fm , 其社会性关系 Cm 的一般表述形式如下:

$$Cm = \{son_Fm, P_Fm, Is_End, F_Level\} \quad (9)$$

其中, son_Fm 表示 Fm 的子框架,定义标记变量 sf_n , 则反映 Fm 在多级框架的位置标记方式如下:
 $Son_Frame = \{begin - sf_1 - sf_2 - \dots - sf_n - end\}$

$$(10)$$

P_Fm 表示 Fm 的父类框架,用于校验子框架 son_Fm 的表述完整性,由于多级框架采用 $1-N$ 映射,所以 $count(P_Fm) = 1$ 。

Is_End 反应框架终结情况,也是区分框架实体行为发生标准。当 $Is_End = 0$,则继续索引子框架;当 $Is_End = 1$,执行守护程序 WC 。

F_Level 描述框架的级别位置。 F_Level 与框架遍历算法的复杂度 $o(n)$ 的关系如下:

$$o(n) = e^{F_Level} - n \quad (11)$$

由此可知,通常情况下, $F_Level \leq 4$;同时,对于高阶高级框架系统可以采用经验分解法(EMD)或聚类算法拆解,降低其计算复杂度。

3 基于 UnM 的不确定性推理方法

不确定性推理方法以 UnM 知识库为基础,引入隶属度和槽值作为确信因子,采用正向推理方式,分析高幅变化数据,对可能框架实施推理并计算最优解。主要推理算法如下所述:

- Begin:递归多级框架的一级框架(父类框架);
- Step1:获取高幅变化数据实例,递归多级框架;
- Step2:开始遍历分析终结节点框架 Fz ;
- Step3:遍历框架 Fz 内槽集 T ,分析知识前件;
- Step4:根据衍生规则,反向定位父类规则集 R ;
- Step5:搜索规则内算法集,通过反射推理方法定位匹配算法;

Step6:通过匹配算法计算,判断规则 R 的符合程度;

Step7:返回知识匹配权重,返回 Step3,逐一分析槽集 T 内的各项知识符合率,计算框架满意度;

Step8:框架满意度高于框架阈值,判定 W 发生;

Step9:返回 Step2;

Result:给出所有超过阈值的框架 $U(Fz)$,分析其并发原因。

最终,返回域 $U(Fz)$ 即为框架的匹配结果。其中,通过反射推理方法定位匹配算法是实现触发式运算实体主动运算的关键。

3.1 反射推理方法

拟合算法或函数是规则 R 前件条件匹配计算的主体内容。通过规则 R 内描述的拟合算法,在算法库中搜索算法实体并实施条件匹配,是知识推理的关键步骤。反射推理方法是实现这一关键步骤的核心技术。

反射推理方法的作用对象是元数据,本质是一种定位、捕获和使用元数据的方法。元数据由算法库内算法实体构成。支持反射推理的组件由输入接口、定位模块、反射执行模型和校验模块组成。

对各组件的行为说明如下。

- (1)信息接收:接收目标元数据信息。
- (2)定位搜索:搜索并定位目标算法。
- (3)反射执行:创建反射对象并执行目标算法。

(4)加载校验:勘误及反馈。

以规则前件的条件匹配过程为例,反射推理具体执行步骤如下:

Begin:基于算法描述获取目标算法;

Step1:分析并获取算法的类型信息及参数定义;

Step2:动态创建反射对象 Rf;

Step3:索引内搜索并定位目标算法实体 P;

Step4:创建实例 P',赋值 Rf;

Step5:校验 Rf,执行 P';

End:返回计算结果。

最终返回结果将作为规则 R 的置信度,反射推理方法的知识推理过程存在并发冲突及不确定性界定问题。并发冲突可采用论据累积的贝叶斯方法解决^[10-11],不确定性界定可通过确信因子计算判定。

3.2 论据累积的贝叶斯方法

定义知识 k 的事实论据 pH,隶属概率 G(k),权值 V(k → r),建立三者联系,如式(12)所示。

$$pH = G(k) \otimes V(k \rightarrow r) \quad (12)$$

其中, r 表示知识 k 的隶属规则。

定义事件 E, H 分别表示不同知识阐述的事实, H 表示假设,事件关系为 OR,重写贝叶斯公式,如下:

$$p(H|E) = \frac{p(E|H) \times p(H)}{p(E|H) \times p(H) + p(E|\neg H) \times p(\neg H)} \quad (13)$$

其中, p(H) 为事件 H 发生的先验概率; p(E|H) 为事件 H 发生后的论据 E 概率; p(¬H) 是事件 H 不发生的先验概率; p(E|¬H) 是事件 H 不发生时论据 E 的概率。

由贝叶斯方法衍生,累计计算事实论据 E 下的非单一假设 H₁ - H_i 的发生概率;或给定多事实论据 E₁ - E_n,反向推广假设 H 的发生概率。

假设事实 H₁ - H_i、E₁ - E_n 相互独立且完备,则 H₁ - H_i | E 的情况描述如下:

$$p(H_i|E) = \frac{p(E|H_i) \times p(H_i)}{\sum_{k=1}^n p(E|H_k) \times p(H_k)} \quad (14)$$

H₁ - H_i | E_n 的情况描述如下:

$$p(H_i|E_1E_2\cdots E_n) = \frac{p(E_1E_2\cdots E_n|H_i) \times p(H_i)}{\sum_{k=1}^n p(E_1E_2\cdots E_n|H_k) \times p(H_k)} \quad (15)$$

由于所有组合条件的概率计算难度较大,所以忽略微小论据差异,并假设条件独立。式(16)描述了论据累计的贝叶斯方法。

$$p(H_i|E_1E_2\cdots E_n) =$$

$$\frac{p(E_1|H_i) \times p(E_2|H_i) \times \cdots \times p(E_n|H_i) \times p(H_i)}{\sum_{k=1}^n p(E_1E_2\cdots E_n|H_k) \times p(H_k)} \quad (16)$$

3.3 确信因子计算方法

确信因子通过计算实现不同框架内不确定性界定。设框架内知识集 Kf = {kf₁, kf₂, ..., kf_n} ,知识可简化表达如下:

$$kf_n = \langle \text{evidence} \rangle \rightarrow \langle \text{hypothesis} \rangle \{cf\} \quad (17)$$

框架的槽值符合率包括可信度计算(正度量)及不可信计算(逆度量),假定原始符合率范围为[0,1]。设贝叶斯结果 p' = p(H|E),定义确信因子槽值正度量函数 MB(p'),逆度量函数 MD(p'),则通过先验条件概率计算的槽值公式如下所示:

$$MB(p') = \frac{\max[p', pH] - p(H)}{\max[1, 0] - p(H)} \quad (18)$$

$$MD(p') = \frac{\min[p', pH] - p(H)}{\min[1, 0] - p(H)} \quad (19)$$

将 MB(p'), MD(p') 综合为确信因子 {cf}, 如下:

$$cf = \frac{MB(p') - MD(p')}{1 - \min[MB(p'), MD(p')]} \quad (20)$$

因此, {cf} 可以表达知识的槽值符合率。研究多知识触发的 {cf}, 最终给出包含知识全集的框架满意度:

$$cf(cf_1, cf_2, \cdots, cf_n) = \frac{\sum_{i=1}^n cf_i}{1 - \min[|cf_1|, |cf_n|]} \quad (21)$$

3.4 校验算法

在获取不确定性多级框架满意度后,需要校验其可信度。设定单体框架误差精度 λ₀,依据距离偏移误差公式得:

$$\psi_{ps} = F(T_{ps}) - \lambda_0 \times dk_{ps} \quad (22)$$

其中, ψ_{ps} 表示在槽值点 T_{ps},预期结果 F(T_{ps}) 与实际值 dk_{ps} 的偏移差。

计算平均误差率及最大误差率:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{p \times s} \sum \frac{\psi_{ps}}{F(T_{ps})} \quad (23)$$

$$\lambda_{\max} = \text{MAX}(\frac{\psi_{ps}}{F(T_{ps})}) \quad (24)$$

当 λ_{max} < λ 时,认为框架匹配度较高;当 λ < λ_{max}, λ̄ < λ 时,认为框架结果发生局部偏差,将进行局部重新计算;当 λ < λ_{max}, λ < λ̄ 时,认为该框架结果需要进行重新计算或舍弃。

4 设计实例

以 UnMF 为基础,设计措施作业后生产模型,通过分析计算油田施工后生产数据及相关作业历史数据,结合油藏地质学理论知识和生产经验,获取并发性油井生产异常,应用在大庆油田某采油厂地质大队、作业大队等相关单位。

为了缩小地质师和作业工程师的初次界定范围,规避客观环境影响,通过与油藏学家及上游生产信息系统(PCEDM)设计师的反复交流和推敲,建立聚驱区块生产异常知识库。知识库主要实体结构和实例说明如图 2 所示。

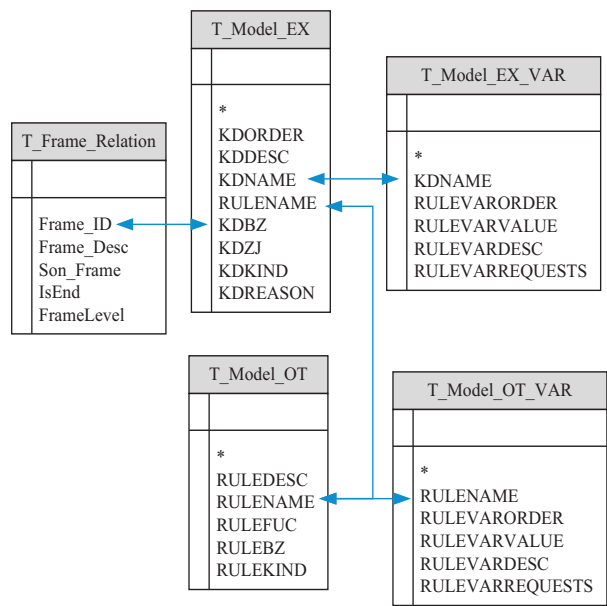


图 2 知识库实体结构

4.1 参数设置

基于频域特征,选择井壁结垢生产异常作为框架实例。井壁结垢指由于聚合物在井壁粘连导致结垢阻塞^[12],隶属于油井(一级框架),井下故障(二级故障),损耗性异常。

框架推理特征选用日产液量,日产油量,含水、动液面(或沉没度)^[13];敏感特征选用油压、注入浓度、采聚浓度和套管半径。部分异常界定标准如表 1 所示。

4.2 框架实例描述

根据地质师对南三及萨东区块经验,给出井壁结垢框架表达结构,定义 tgbj 和 bh 分别代表该井在完钻记录中的套管半径和厚度;定义槽值隶属度总和 $S = 100$;定义环比下降 70% 为异常阈值^[14];重点分析注入压差波动率。

4.3 知识表达

定义 KM2 表示井壁结垢框架,框架内槽可用 KM2C1-KM2C6 表示。将 KM2 框架内的知识归结为表 2 所示规则。给出知识倾向度:

$$U(c)\overline{\text{万方数据}}$$

$$\begin{matrix} < \text{KM2C1} \rightarrow 0.12 > & < \text{KM2C2} \rightarrow 0.15 > \\ < \text{KM2C3} \rightarrow 0.13 > & < \text{KM2C4} \rightarrow 0.31 > \\ < \text{KM2C5} \rightarrow 0.13 > & < \text{KM2C6} \rightarrow 0.16 > \end{matrix}$$

$$(25)$$

表 1 油井生产异常界定标准

敏感特征	数据项	浮动情况	阈值(适用范围)
日产液/t	rcyl1	±	50% (rcyl1<20)
		±	40% (20<rcyl1<50)
		±	30% (50<rcyl1<70)
		±	20% (70<rcyl1<100)
		±	10% (rcyl1 ≥ 100)
		±	50% (rcyl<5)
日产油/t	rcyl	±	40% (5<rcyl1<10)
		±	30% (10<rcyl1<20)
		±	20% (70<rcyl1<100)
		±	2% (rcyl1 ≥ 100)
含水/%	hs	±	8% (hs<60)
		±	5% (60<hs<80)
		±	4% (80<hs<90)
沉没度/m	cmd	=	泵深
		<	50

表 2 规则及知识表达实例

规则描述	衍生知识	守护程序
对象 A 波动	KM2C2, KM2C4	fuc_mb1_yj
对象 A 环比升/降	KM2C1, KM2C6	fuc_mb2_yj
对象 A 值比升/降	KM2C5, KM2C1 KM2C4, KM2C6	fuc_mb6_yj
对象 A 超过阈值	KM2C3, KM2C3 KM2C2, KM2C4	fuc_mb4_yj

4.4 实验结果对比

为进行并发测试,同时选用注入过量异常作为并发测试条件。给出结垢周期内产量拟合实验离散点分布,如图 3 所示。

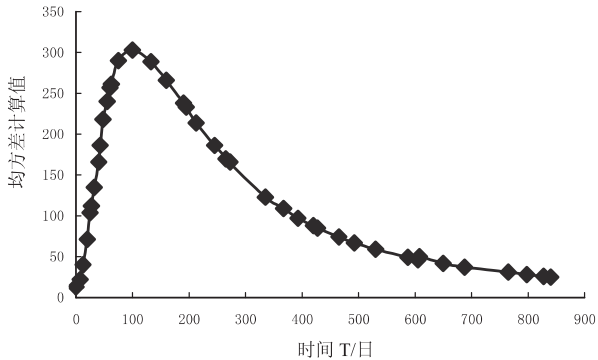


图 3 产油量离散点分布图

筛选某采油厂南三区西部区块 108 口油井异常井,计算所有井的框架隶属程度。定义隶属程度阈值为 55%。给出与真实情况的对比及与常规方法的数据对比分析,如表 3 所示。

表 3 多方法诊断结果数据对比

实验结果	真实情况	UnMF	传统方法
注入过量(井数)	17	17	16
管壁结垢(井数)	19	19	16
并发数(井数)	22	21	4
单项均差率	-	-	11.1%
并发误差率	-	0.045%	81.8%
运算时间/min	120	4	12
成本消耗/元	5 200	-	-

由表 3 可得到以下结论:

(1)传统方法的并发误差率较大,处理单异常诊断同样存在误差,对于复杂因素的分析能力较差。

(2)UnMF 处理并发时发生一例误判,经分析后发现该井属于长关井。

(3)真实现场分析过程准确率较高,但成本消耗高,实时性较差。

以 UnMF 方法为基础开发的故障诊断及预警系统:三次采油开发辅助分析系统已经正常工作,因其对专家意见的深度合理分析,较好的自适应性和相对简单的应用过程受到了应用单位的好评。

5 结束语

为解决知识推理的并发性问题,提出一种基于多级框架的不确定性推理方法。以 FC 规则闭包为基础,借鉴面向对象设计思想,采用规则-知识衍生方式构建产生式系统,设计多级框架结构,引入多元因子参与置信度计算,完成不确定性知识库设计;以反射推理方法为基础实现正向不确定性推理,应用论据累计的 Bayes 方法和确信因子算法消解并发冲突,同时提出一种校验算法验证推理置信度。最终将该方法用在油田预警过程中,提高了油田预警准确率 30% 以上,达到了提高知识抽象化程度、实现并发计算并大幅提升推理速度的目的。

参考文献:

[1] 张可佳. 基于混合智能的聚驱区块生产动态预警方法研究 [D]. 大庆:东北石油大学,2016.

[2] 刘立坤. 海量文件系统元数据查询方法与技术 [D]. 北京:清华大学,2011.

[3] Negnevitsky M. 人工智能智能系统指南 [M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[4] 吴信东,谢 飞,黄咏明,等. 带通配符 One-Off 条件的序列模式挖掘 [J]. 软件学报,2013,24(8):1804-1815.

[5] Lautre N K, Manna A. A study on fault diagnosis and maintenance of CNC-WEDM based on binary relational analysis and expert system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(5):490-498.

[6] 葛林涛,徐桂琼. 基于模糊 C 均值聚类有效性的协同过滤算法 [J]. 计算机技术与发展,2016,26(1):22-26.

[7] 杨一鸣,潘 嵘,潘嘉林,等. 时间序列分类问题的算法比较 [J]. 计算机学报,2007,30(8):1259-1265.

[8] 孙 昊,李盼池. 基于量子粒子群优化的油水井措施方案优选 [J]. 计算机技术与发展,2016,26(9):78-82.

[9] 王 虎,丁世飞. 序列模式挖掘研究与发展 [J]. 计算机科学,2009,36(12):14-17.

[10] Bi Zhongwei, Zhang Ming, Jin Feng, et al. Study on the prior information quantity and fusion technology applied in inference of rock mechanics parameters with Bayes method [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2):96-100.

[11] Costa P C G D, Laskey K B, Laskey K J. PR-OWL: a Bayesian ontology language for the semantic web [M]//Uncertainty reasoning for the semantic web I. Berlin: Springer, 2008:88-107.

[12] 李春生,苏晓伟,魏 军,等. 基于支持向量机的抽油机井功图识别研究 [J]. 计算机技术与发展,2014,24(8):215-218.

[13] 伍晓林,楚艳苹. 大庆原油中酸性及含氮组分对界面张力的影响 [J]. 石油学报:石油加工,2013,29(4):681-686.

[14] 李春生,魏 军,王 博,等. 油田生产动态预警模型研究 [J]. 计算机技术与发展,2013,23(4):245-248.

(上接第 51 页)

2015,32(C):199-210.

[11] 赵 辉,李牧东,韩 统,等. 基于多目标 MQABC 算法的无人机协同任务分配 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2016,44(3):121-126.

[12] 薛 羽,庄 毅,张友益,等. 基于启发式自适应离散差分进化算法的多 UCAV 协同干扰空战决策 [J]. 航空学报,2013,34(2):343-351.

[13] Huo Y, Yi Z, Gu J, et al. Discrete gbest-guided artificial bee colony algorithm for cloud service composition [J]. Applied Intelligence, 2015, 42(4):661-678.

[14] Ardagna D, Pernici B. Adaptive service composition in flexible processes [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2007, 33(6):369-384.

[15] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process [J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1):9-26.

[16] Xu J, Fortes J A B. Multi-objective virtual machine placement in virtualized data center environments [C]//IEEE/ACM international conference on green computing and communications & 2010 IEEE/ACM international conference on cyber, physical and social computing. [s. l.]: IEEE, 2010:179-188.