

基于本体的钻具组合智能设计^①

邵 波¹, 段友祥¹, 孙歧峰¹, 李洪强²

¹(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 青岛 266580)

²(中石化胜利油田 钻井工艺研究院, 东营 257000)

通讯作者: 邵 波, E-mail: shaoboupc@163.com

摘 要: 为提高钻具组合设计过程中的设计知识利用率和设计效率, 提出一种基于本体的钻具组合智能设计方法。该方法通过构建井眼参数、地层参数、模型知识以及钻井工程实例的本体模型, 实现了对钻具组合设计知识的表示, 构建钻具组合设计知识库, 建立了本体间的语义映射关系, 完成了对钻具组合设计知识的组织、推送和嵌入。最后, 结合基于案例的推理方法, 实现了对钻具组合的智能设计。

关键词: 钻具组合设计; 本体; 知识库; 案例推理

引用格式: 邵波, 段友祥, 孙歧峰, 李洪强. 基于本体的钻具组合智能设计. 计算机系统应用, 2018, 27(6): 47-52. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6377.html>

Intelligent Drilling Assembly Design Based on Ontology

SHAO Bo¹, DUAN You-Xiang¹, SUN Qi-Feng¹, LI Hong-Qiang²

¹(College of Computer & Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

²(Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: In order to improve the design knowledge utilization and design efficiency in drilling assembly design, an intelligent design method based on ontology is proposed in this study. The method realizes the representation of the design knowledge of the drilling assembly and constructs the knowledge base of the design of the drilling assembly by constructing ontology model including borehole parameters, formation parameters, model knowledge, and drilling engineering base. In the method, the semantic mapping relations among ontologies are built. Thus an intelligent drilling assembly design pattern was formed and the organization, push and embedding of design knowledge are realized. Combining the case-based reasoning method, the intelligent design of drilling assembly is realized.

Key words: drilling assembly design; ontology; knowledge base; case reasoning

石油钻井工程是勘探开发石油天然气的主要手段, 它是一个投资巨大, 风险性很强的领域, 涉及多部门、多分支、多层次、多环节, 与许多相关部门有着密切的协作关系^[1]。钻具组合设计是钻井工程设计中的一个技术难度大, 又非常重要的环节, 特别是海上和陆从式、定向井以及水平井的发展, 更使钻具组合设计成为钻井工程关键问题之一^[2]。钻井工程是一项隐蔽的地下工程, 由于钻井过程地下环境所提供的信息往往是

不确定的、模糊的数据, 故钻具组合设计过程中存在着大量的模糊性、随机性和不确定性问题, 它需要理论基础扎实、技术全面、经验丰富的领域专家来完成, 但是目前还没有实现对设计知识的充分利用^[3]。面对当前智能制造的发展趋势, 为了提高钻具组合设计的效率和质量, 需要一种智能化的设计方法来实现对钻具组合设计设计知识的继承、共享和重用。

在基于知识的钻具设计中, 如何将钻具设计知识

^① 基金项目: “十三五”重大专项 (2017ZX05009-001)

收稿时间: 2017-09-25; 修改时间: 2017-10-18; 采用时间: 2017-10-31; csa 在线出版时间: 2018-05-28

与设计过程紧密结合,是实现该设计智能化的重要研究内容,并愈来愈受到国内外学者的重视.杨辽等^[2]应用专家系统,引入面向对象和过程相结合的知识表示方法设计实现针对不同地层、井眼条件的底部钻具组合设计.王正^[4]引入 CommonKADS 本体构建方法以及 CBR 推理方法,通过构建钻井参数的知识模型,实现了智能钻井参数优化的决策系统.Flett 等^[5]设计了一种以高度结构化的方式存储钻井知识和经验的方法,从而在案例库中检索相似的设计.Tobatayeva 等^[6]提出利用人工神经网络对底部钻具组合 (Bottom Hole Assembly, BHA) 的参数进行设计预测.高晓荣^[7]建立了本体知识表征模型,构建了钻井应急本体知识库和案例库,使用 SWRL 规则语言,通过 Jena 推理机实现在钻井事故中钻具组合优选.目前,知识本体在钻井工程中主要应用在复杂情况分析,故障预测,钻井参数优化等方面以上研究成果各有特色,但所述方法大多仅针对钻具设计过程中的某个对象或某个任务,无法完整有效地组织和表示钻具设计主体、钻具设计需求(钻具、实例)和钻具设计过程.

为克服上述问题,本文在分析钻具组合结构设计知识的基础上,结合钻具组合结构设计知识的自身特点和设计过程中的知识利用方式,提出一种基于本体知识库和案例推理的钻具组合智能设计方法.首先基于本体表示法,分别对各个钻具、钻具组合设计理念和钻具组合设计实例进行知识本体建模,形成一种可扩展的钻具设计知识库,结合基于案例的推理方法,实现对钻具组合的智能选择.

1 知识本体建模

本体在知识库系统开发中较多应用于开发领域模型或语义骨架网络的构建过程中,它提供建模所需的基本概念,明确地显式描述对象自身的各种特性和对象间的各种联系^[8-10].目前,知识本体在钻具组合方面只是利用本体描述钻具组合设计文档,并没有对设计知识进行统一组织和管理.因此,需要通过建立知识本体有效表示钻具组合智能设计知识.

1.1 钻具组合本体模型设计

钻具组合本体是对所有钻具组合设计知识以及经验知识进行分类与描述的概念体系,它确定领域内共同认可的概念,给出概念间相互关系的明确定义,提供对领域知识的共同理解.本体通常由概念、关系、函

数、公理和实例五种基本元素构成,其中函数可看作作为一种特殊的关系^[10].钻具组合设计领域知识本体的设计主要在于概念本体设计以及本体关系,钻具设计本体关系较简单,均可用关系描述,因此,钻具组合设计知识本体模型可描述为一个四元组 $\{C, R, A, I\}$,其中:

(1) C 表示钻具组合设计知识的概念集合,包括地质参数、井眼参数、钻具模型、钻具组合实例等.

(2) R 表示概念间关系的集合,基本关系有:关联关系、继承关系、组成关系、同义关系等.① 关联关系表示设计知识中概念之间具有某种联系,如钻具组合设计影响因素有地质因素,包括属性关联和语义关联;② 继承关系表示设计知识中的概念存在子类与父类的关系,如增斜井段是井身结构的子类;③ 组成关系表示设计知识中的概念存在整体和部分的关系,如钻具组合由钻头、钻杆和扶正器等组成;④ 同义关系表示设计知识存在等价性,如扶正器又叫稳定器.设计知识中所存在的其他的复杂关系都可以用上述的4种关系表示.

(3) A 表示钻具组合设计中公理的集合,主要指在钻井设计知识中永远成立的声明,如涡轮钻具与螺杆钻具同属于动力造斜钻具.

(4) I 表示钻具组合设计知识领域内概念和关系的实例集合,如某油田中一口井的钻具组合设计记录.

1.2 钻具组合设计领域本体构建

钻具组合设计的核心任务是根据现场地层情况、井眼情况以及井眼轨迹设计要求,设计出一套有效的、适用于所钻地层和井眼,并能达到轨迹控制的钻具组合^[2].本文将参照 CommonKADS^[4]知识本体建模方法,采用本体构建工具 Protégé 来建立,并利用本体表示语言 OWL^[8]进行编码实现.根据上述的钻具组合设计的核心任务与钻具组合本体模型知识,确定钻具组合设计中的主要概念、属性和关系为:钻具组合设计首先对地层与井眼参数进行分析,判别当前井段的变井斜问题为增斜、降斜、稳斜等,给出适合当前井段的钻具组合结构,并根据模型知识判别设计是否合理.因此,在设计过程主要涉及地质参数、井眼参数、钻具模型、钻具组合实例四个重要要素.

本文将钻具组合的设计知识与这四个要素相集成,利用基于本体的表示方法构建地质参数、井眼参数、模型知识以及钻井工程实例的本体模型,以方便知识的继承与重用,如图1所示.

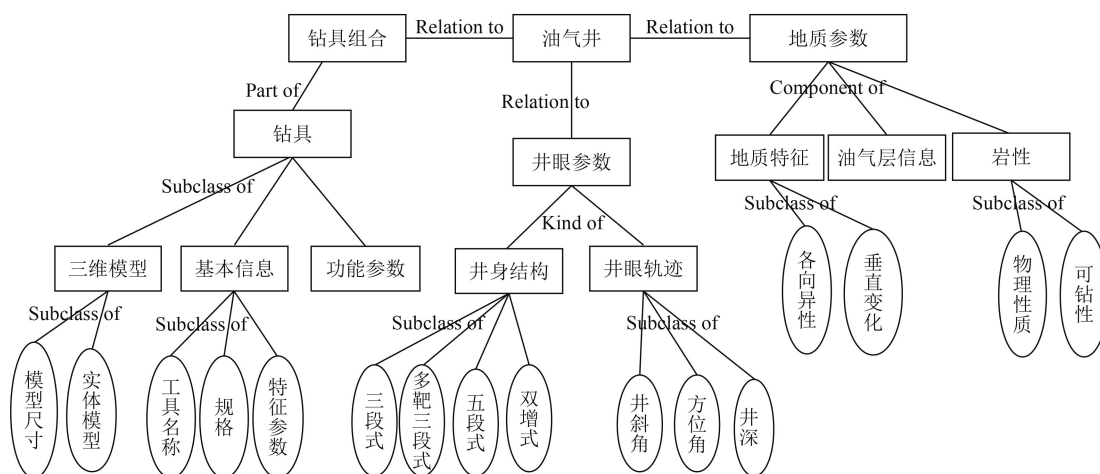


图1 钻具组合设计知识部分本体结构图

(1) 地质参数信息^[1]在钻具组合设计中起重要作用, 主要考虑地层可钻性的各向异性对井斜产生的影响, 需要对地质参数的属性进行建模表示. 影响钻具组合设计的地质参数中主要包括地质特征、油气层信息、地层岩性特征信息等. 地质特征包括地层的各向异性与纵向变化, 是产生井斜的重要因素, 同时地层岩性的可钻性与物性会产生地层方位漂移, 此时设计钻具组合需要考虑钻具组合的增方位效应与地层方位漂移效应^[2], 否则会使所钻轨迹偏离目标点.

(2) 井眼参数信息^[1]在钻具组合设计中起决定性作用, 钻具组合的初步设计主要依据井身结构判断某井段的轨道类型选取合适的功能钻具, 并且在钻进过程中, 井眼轨迹的偏移也需要对钻具组合进行调整, 因此需要对井眼参数进行建模表示. 井眼参数主要包括井身结构、井眼轨迹两部分. 其中井身结构指设计轨道类型, 主要分析目标段所处的是稳斜, 造斜等井段. 井眼轨迹主要包括井深、井斜角、方位角等参数, 用来判别在实钻过程中轨迹是否发生偏移.

(3) 钻具是石油钻井工程的必要工具, 其功能参数直接影响钻进参数以及钻井工况, 同时也是钻具组合

的组成部分^[1]. 通过对钻具本体的知识建模, 将钻具按功能和类别区分, 根据所钻井过程中井眼参数以及地层参数的不同, 合理选取井下钻具, 实现井下钻具性能与钻进参数相匹配. 钻具知识本体模型主要包括三维模型, 基本信息、功能参数.

(4) 同一个井场的钻具组合设计通常要借鉴临井的设计数据以及设计结果, 而相关设计信息因地下信息的复杂性以及钻井操作特殊性, 具有分布广、难以集成等问题, 通过对钻具组合设计理论知识本体建模, 可有效表示钻具组合与其他设计知识本体之间关系. 钻具组合实例本体模型主要包括钻具集合信息, 基本信息, 功能参数. 功能参数主要是利用白家祉教授提出的弹性力学纵横弯曲梁法^[11]分析钻具受力变形方法进行求解. 采用三维平面简化物理模型, 结合数值计算方法求解.

以增斜钻具组合为例, 某一种增斜钻具组合为塔式钻具组合^[12]: 钻头+近钻头稳定器+无磁钻铤+钻铤+稳定器+钻铤+稳定器+钻铤+随钻震击器+加重钻杆+钻杆. 钻具组合实例相关概念、概念属性(约束)及概念之间的类属关系, 其表达形式如表1.

表1 增斜钻具组合概念模型

名称	描述
ID	http://www.semanticweb.org/ontologies/Ontology1490315915110.owl# 微增斜钻具组合
Father	增斜钻具组合
Child	钻具集合信息(钻头, 稳定器, 钻铤, ...)、基本信息(名称, 尺寸, ...)、功能参数(微增斜井段, ...)
Relations	Relation-to(增斜钻具组合, 地层参数)、Part-of(增斜钻具组合, 稳定器)、Infer(增斜钻具组合, 井眼增斜井段)、...
Attribute	(对象属性, 地层压力, unite), (对象属性, 增斜, unite), ...

其中 ID 为领域本体中增斜钻具组合概念本体的唯一标识符, 利用概念本体和关系集描述领域概念, 定义自上而下纵向的一个层次分类关系; 本体关系集合如 Kind-of(x, y) 表示类别上的从属关系; Part-of(x, y) 用于指出“部分”与“整体”的关系; Infer(x, y) 用于表征两个框架所描述事物之间的逻辑推理关系, 用它可以表示产生式规则^[13]; 属性集合定义对象属性的集合.

2 基于钻具组合本体知识库的案例推理

2.1 本体间映射关系

在基于本体的钻具组合知识库中, 由于匹配过程中所涉及的钻具本体、地质参数本体、井眼参数本体以及钻具组合实例本体存在异构问题, 为实现四种本体间的相互联系与操作, 对四种本体中的知识进行共享和复用, 需要建立它们之间的映射关系, 如图 2 所示. 本文所建立的本体映射是指钻具组合本体和钻具实例本体之间存在语义上的概念关联, 通过建立异构本体间的映射规则, 计算两个本体之间的相似度, 对资源知识 (钻具和实例本体等) 做出定量判断, 从而实现从知

识库中返回满足需求的知识的过程. 其中图 2 中的关键技术在于本体间的映射关系, 本体间映射关系建立的关键在于比较实体中概念之间语义的相似程度^[14], 令 $A\{a_1, a_2, a_3, \dots\}$ 为钻具组合本体 A 中的一个概念集, $B\{b_1, b_2, b_3, \dots\}$ 为待选钻具组合或者实例本体 B 中的一个概念集, 则两个概念 a_i 和 b_j 之间的相似度^[15]为:

$$Sim(a_i, b_j) = \begin{cases} 0 & |a_i \cap b_j| = 0 \text{ 且 } |a_i| < 0; \\ \frac{|a_i \cap b_j|}{|a_i|} & 0 < |a_i \cap b_j| < |a_i|; \\ 1 & |a_i \cap b_j| = |a_i| \text{ 且 } |a_i| < 0, |a_i \cap b_j| < 0; \end{cases} \quad (1)$$

式中: $|a_i \cap b_j|$ 为两个本体间的概念 a_i 和 b_j 中共有词的数目, $|a_i|$ 为概念 a_i 中词的数目. 当 $|a_i \cap b_j| = |a_i|$ 时, 两个概念间的相似度 $Sim(a_i, b_j) = 1$, 说明 a_i 和 b_j 为相同概念, 或者概念 b_j 包含概念 a_i , 即概念 b_j 完全满足概念 a_i ; 当 $0 < |a_i \cap b_j| < |a_i|$ 时, 两个概念间的相似度 $Sim(a_i, b_j) = \frac{|a_i \cap b_j|}{|a_i|}$, 说明概念 b_j 部分满足概念 a_i ; 当 $|a_i \cap b_j| = 0$ 时, 两个概念间的相似度 $Sim(a_i, b_j) = 0$, 说明概念 b_j 完全不满足概念 a_i .

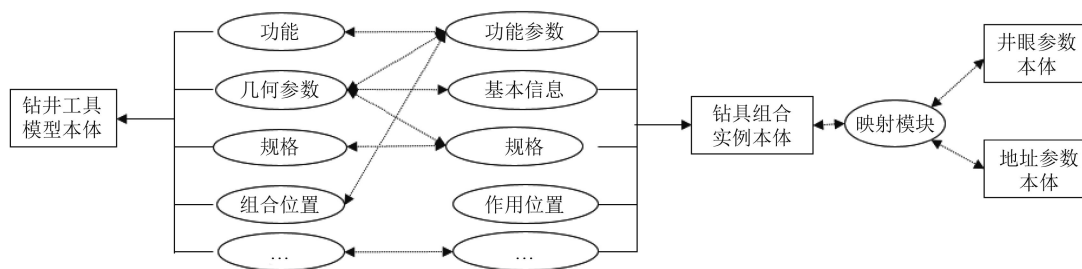


图 2 钻具组合设计知识本体映射关系

2.2 案例推理相似度计算

案例推理^[14]主要依据钻具组合设计知识库、钻具组合设计案例库, 利用相似度算法推算案例相似度尽可能地检索到最符合当前实例的相似案例. 案例相似度必须考虑组成一个案例的各个属性相似度综合在一起的效应, 且案例的相似度也常常是通过距离来定义的. 本文采用海明距离^[10]计算相似度, 可形式化为:

$$Sim = 1 - \sum_i^n w_i * dist(x_i, y_i) \quad (2)$$

其中, 权重 w_i 代表第 i 个属性的重要度, 特征权值需要专家参与确定; x_i 与 y_i 代表新旧两个案例的某个属性的属性值; n 是案例中属性的个数, 标准的 $dist(x_i, y_i)$ 通常表

示如下:

$$dist(x_i, y_i) = \frac{|x_i - y_i|}{|\max_i - \min_i|} \quad (3)$$

对于实例的特征属性值, \max_i 和 \min_i 分别代表实例第 i 个属性的最大值和最小值. 对于符号属性值, 如果 $x_i = y_i$, 则 $dist(x_i, y_i) = 0$, 否则为 1.

2.3 案例推理流程

如图 3 所示, 基于案例的钻具组合设计流程是在所建立的钻具组合设计知识库、钻具组合设计案例知识库以及本体间的相似度算法的基础上, 结合井场参数利用案例知识库推理出合理的钻具组合结构. CBR 推理过程最重要的是案例检索过程, 而案例检索^[16]

主要依据的是案例推理相似度计算。当输入井场参数后, 首先经过本体知识库处理后, 经过 Protégé支持的 RacerPro 推理机, 结合相似度计算实现案例匹配确定合适的相似案例; 然后使用修正技术修正相似案例, 从而得出钻具组合的设计方案。

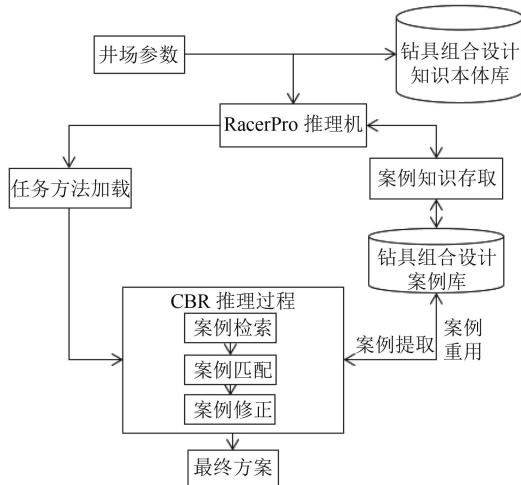


图3 基于案例钻具组合设计流程图

3 实验分析

例如通过输入井场参数为井深段 1300~1500 m, 井

径 0.4 m, 井斜角 13°~18°, 方位角 300°~350°, 地层各向异性使用地层倾角表示 30°, 地层硬度为中硬, 岩性为泥岩。系统首先根据井场参数中的井径确定钻头直径为 0.4 m, 并依据地层岩性与硬度选择钻头型号为 PDC 钻头。通过井斜角与方位角判断出需要设计增斜钻具组合, 因此可以从案例知识库中搜寻与案例相似的设计组合, 但由于地层的各向异性会产生井斜以及增方位效应, 从而在设计过程中需要考虑使用钻具组合增斜的同时稳方位, 最终设计出的钻具组合为: PDC 钻头 (0.44 m)+近钻头稳定器 1(12")+无磁钻铤 (12")+钻铤 (12"*8 m)+稳定器 2(12")+钻铤 (12"*8 m)+稳定器 3(12")+...。最后通过力学模型知识库判断当前所设计的钻具组合是否符合井场条件。下面给出两种井场参数条件下的钻具组合设计与实际设计对比:

表 2 是直井段设计常用的塔式钻具组合, 对于造斜点较浅且地层稳定、井斜角较小的情况, 钻头和钻杆之间只需加 3 根钻铤。表 3 是造斜井段使用的钻具组合, 一般采用动力钻具组合, 从表 2 和表 3 可看出, 程序所设计的钻具组合与实际相差不大, 由于未考虑到井喷情况发生, 没有设计回压凡尔。但是在表 3 中专家系统只考虑了一般的增斜钻具组合, 没有考虑实用动力钻具, 出现与实际情况不符合现象。

表 2 直井段钻具组合设计实例

井眼参数		地层参数			
井深	方位	井斜	井径	硬度	岩性
100~1000	0~200	0~1	444.5 mm	中硬	可钻
实际设计组合	Φ444.5 mmPDC 钻头+Φ244 mm 钻铤 3+回压凡尔+Φ442 mm 稳定器+Φ203 mm 钻铤 3+Φ178 mm 钻铤 9+Φ127 mm 钻杆				
专家系统设计结果	Φ444.5 mmPDC 钻头+Φ244 mm 钻铤+Φ442 mm 稳定器+Φ203 mm 钻铤+Φ127 mm 钻杆				
程序设计结果	塔式钻具组合: Φ444.5 mmPDC 钻头+Φ244 mm 钻铤+Φ442 mm 稳定器+Φ203 mm 钻铤+Φ178 mm 钻铤+Φ127 mm 钻杆				

表 3 造斜井段钻具组合设计实例

井眼参数		地层参数			
井深	方位	井斜	井径	硬度	岩性
1100~1200	100~108	20~50	444.5 mm	较硬	可钻
实际设计组合	Φ444.5 mm 牙轮钻头+Φ244 mm 动力钻具+回压凡尔 (631×610)+Φ203 mm 无磁钻铤×1 根+MWD+ 转换接头 (631×410)+Φ178 mm 无磁钻铤×1 根+Φ127 mm 加重钻杆+Φ127 mm 钻杆				
专家系统设计结果	Φ444.5 mmPDC 钻头+Φ203 mm 近钻头稳定器+ Φ203 mm 无磁钻铤+Φ203 mm 钻铤+Φ203 mm 稳定器+转换接头+ Φ178 mm 钻铤+Φ178 mm 稳定器+Φ178 mm 钻铤+Φ178 mm 随钻震击器+Φ127 mm 加重钻杆+Φ127 mm 钻杆				
程序设计结果	增斜钻具组合: Φ444.5 mm 牙轮钻头+Φ244 mm 动力钻具+Φ203 mm 无磁钻铤+MWD+ 转换接头+Φ178 mm 无磁钻铤+Φ127 mm 加重钻杆+Φ127 mm 钻杆				

4 结论

本文针对钻具设计过程中设计知识的局限性和难以重用的问题,提出一种基于本体的钻具组合智能设计方法,利用 CommonKADS 知识模型构建方法以及 Protégé 本体构建工具构建钻具组合设计知识库,完成了对钻具组合设计知识的组织、推送和嵌入。实验结果证明通过构建钻具组合本体知识库以及使用 CBR 推理,可以得出本系统可以得出基本的钻具组合设计,实现对钻具组合的智能选择。

参考文献

- 1 管志川,陈庭根. 钻井工程理论与技术. 东营: 中国石油大学出版社, 2011.
- 2 杨辽,陈元顿,史忠植. 应用专家系统进行定向井下部钻具组合设计. 石油学报, 1989, 10(4): 89-96. [doi: 10.7623/syxb198904011]
- 3 郭建明. 基于本体的优化钻井知识库系统模型的研究. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2008, 30(1): 110-114.
- 4 王正. 钻井参数优化及其知识建模的研究[硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- 5 Flett AN, Sleeman DH, Preece AD. Case-based drilling knowledge management system: US, US8036866. 2011-10-11.
- 6 Tobatayeva A, Mesbahi AP, Muzaparov M, *et al.* Development of a numerical tool for design of the Bottom Hole Assembly (BHA) using artificial neural networks. Energy Exploration & Exploitation, 2011, 29(4): 357-377.
- 7 Gao XR. Research of knowledge base system based on ontology for drilling accident emergency decision. Proceedings of 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. Hangzhou, China. 2012. 230-234.
- 8 袁磊,张浩,陈静,等. 基于本体化知识模型的知识库构建模式研究. 计算机工程与应用, 2006, 42(30): 65-68, 104. [doi: 10.3321/j.issn:1002-8331.2006.30.019]
- 9 吴强,刘宗田,强宇. 基于本体的知识库推理研究. 计算机应用研究, 2005, 22(1): 50-52, 87.
- 10 Zhong J, Aydina A, McGuinness DL. Ontology of fractures. Journal of Structural Geology, 2009, 31(3): 251-259. [doi: 10.1016/j.jsg.2009.01.008]
- 11 白家祉,黄惠泽,刘玉石. 纵横弯曲法对钻具组合的三维分析. 石油学报, 1989, 10(2): 60-66. [doi: 10.7623/syxb198902008]
- 12 杜旭东,张慧,曾玉斌,等. 定向井常用钻具组合. 石油矿场机械, 2009, 38(5): 44-47.
- 13 Breuker VDV. Common KADS Library for Expertise Modelling. Amsterdam, The Netherlands: IOS Press, 1994. 31-56.
- 14 李云峰. 基于本体的钻井复杂情况监控实例推理技术的研究[硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2010.
- 15 张田会,张发平,阎艳,等. 基于本体和知识组件的夹具结构智能设计. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1165-1178.
- 16 高晓荣,郭小阳,徐英卓. 基于本体和 CBR 的钻井工程风险决策模型研究. 计算机工程与应用, 2015, 51(3): 265-270.