

文章编号:1671-251X(2018)03-0035-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017110017

煤矿事故案例本体知识库的构建及推理研究

张宝隆¹, 王向前¹, 李慧宗¹, 何叶荣²

(1. 安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽建筑大学 经济与管理学院, 安徽 合肥 230000)

摘要:针对煤矿事故案例知识组织、共享和再利用不足等问题,将本体引入事故案例知识管理中,研究基于本体的事故案例知识库的构建和推理技术。通过分析事故案例知识构建了事故知识表示元组和事故案例元本体。在此基础上,按照知识库模型和构建方法分别构建了事故案例本体库和规则库,从而完成知识库的构建。以瓦斯事故为例实现了基于煤矿事故案例知识库的知识推理应用。研究结果表明,利用所构建的煤矿事故案例知识库能够较好地进行知识组织和知识的自动推理,提高了煤矿事故案例知识的共享和重用。

关键词:煤矿事故;煤矿安全事故本体;煤矿事故案例知识库;规则推理

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2018-01-30 17:02

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180130.1309.001.html>

Research on construction and reasoning of coal mine accident case ontology knowledge base

ZHANG Baolong¹, WANG Xiangqian¹, LI Huizong¹, HE Yerong²

(1. School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei 230000, China)

Abstract:In order to solve problem of insufficient knowledge organization, sharing and reuse of coal mine accident cases, the ontology was introduced into knowledge management of accident cases, and construction and reasoning technology of the ontology-based accident case knowledge base were studied. Based on analysis of the accident case knowledge, accident knowledge representation model and accident case body model were constructed. According to knowledge base model and construction method, the coal mine accident case ontology and rule base were constructed respectively, thus the knowledge base was constructed. Knowledge reasoning application based on the knowledge base of mine accident case was realized with gas accident as an example. The research results show that using the knowledge base of coal mine accident case can achieve the knowledge organization and knowledge automatic inference, and can greatly improve sharing and reuse of the mine accident case knowledge.

Key words: coal mine accident; coal mine safety accident case ontology; coal mine accident case ontology knowledge base; rule-based reasoning

0 引言

近年来,我国煤矿安全形势虽有所好转,但各类

事故时有发生,煤矿安全问题仍不容忽视,煤矿安全管理水平仍需进一步提高^[1]。目前,信息技术在煤矿领域已得到广泛应用,煤矿企业所积累的各类数

收稿日期:2017-11-08;修回日期:2018-01-12;责任编辑:胡娟。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474007,51374114);安徽理工大学研究生创新基金资助项目(2017CX2052)。

作者简介:张宝隆(1991—),男,河南巩义人,硕士研究生,主要研究方向为矿业信息管理,E-mail:zbl_aust@163.com。

引用格式:张宝隆,王向前,李慧宗,等.煤矿事故案例本体知识库的构建及推理研究[J].工矿自动化,2018,44(3):35-41.

ZHANG Baolong, WANG Xiangqian, LI Huizong, et al. Research on construction and reasoning of coal mine accident case ontology knowledge base[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(3): 35-41.

据逐渐增多,煤矿知识资源正在快速增长。如何利用这些数据资源解决煤矿安全问题,实现煤矿安全管理信息化与智能化,已成为众多煤矿领域专家学者关注的重点^[2]。在煤矿安全领域,知识管理技术还没有得到长足发展,尤其是煤矿事故案例知识的组织、共享和再利用严重不足。

知识库是储存、组织和处理知识及提供知识服务的重要知识集合,而本体作为一种知识组织模型,为知识库实现知识的获取、组织、表示和再利用提供了良好的载体^[3]。目前,针对本体知识库的研究在生物、医学、航空等领域^[4-8]取得了丰富的成果。在煤矿安全领域,王志等^[9]在构建矿井电动机故障知识领域本体的基础上,建立了基于本体和规则推理的电动机故障知识库模型;李娟莉等^[10]构建了矿井提升机故障诊断本体知识库,并据此提出了基于本体映射的故障诊断方法;史春宝等^[11]通过构建矿用液压钻机本体模型实现了液压钻机知识的推理与检索;孟现飞^[12]在构建时间、空间、煤矿风险及时空事故树本体的基础上,结合多智能体理论构建了煤矿事故智能预警知识库;孙晋非^[13]通过构建基于本体的突水预测预报知识库,设计了突水预测预报决策支持系统,实现了知识库在煤矿突水事故中的应用。这些研究成果初步实现了基于本体的知识库在煤矿安全领域知识管理中的应用,但对于煤矿事故案例知识的应用研究相对较少,且多数研究对本体知识库中规则库的构建及基于规则的推理应用研究不够深入。鉴此,本文针对煤矿事故案例知识的特点,将本体应用到煤矿事故案例知识管理中。利用本体对概念及概念间关系的强大描述能力,构建煤矿安全事故本体,研究基于本体的煤矿事故案例知识库的构建方法及推理应用,旨在实现煤矿事故案例知识的有效管理、充分共享和高效利用,为煤矿企业的安全管理决策提供知识资源和理论依据。

1 煤矿事故案例知识

1.1 事故知识表示元组

煤矿事故案例包含煤矿事故中的基本知识要素,对事故案例知识进行分析可以确定事故所涉及的核心概念。煤矿事故案例知识主要涉及事故发生的时间和空间,引发事故的危险源,事故的原因、经过、后果等事故知识要素。因此,可以将事故案例知识抽象表示为一个六元组: $A = (D, R, C, P, T, S)$ 。其中: A 表示事故知识; D 表示根源危险源,主要是指引发事故的源头,如人、物、系统等; R 表示事故原

因,主要指导致事故发生的不安全因素,如不安全行为、不安全状态等; C 表示事故后果,指由事故造成的损失,如人员伤亡及事故的处理状况等; P 表示事故经过,主要指事故发生的演化过程; T 表示事故发生时间,包括时间点和时间段; S 表示事故发生的具体位置。

1.2 事故案例知识元本体模型

由于煤矿事故种类繁多、涉及面广,且事故隐患和事故致因复杂,所以,煤矿事故知识所包含的概念、属性、实例规模庞大,概念、实例间的关系复杂。通过少数专家参与的自顶向下的方式难以完成本体的构建,而需要较多专业人员参与的自底向上的协同本体构建方式容易产生冗余和异构问题。因此,本文利用元本体来表示事故的核心概念及概念间的主要关系,为构建事故知识库提供基本框架,从而保证本体在协同构建中的一致性^[14]。

以事故知识表示元组为概念基础来构建元本体模型。在知识表示元组中,事故原因主要指人的不安全行为、物的不安全状态及管理上的缺陷这三大不安全因素,也即事故隐患。在元本体中用事故隐患来表示事故的原因,以更好地表示本体的类间关系。为了更加准确地表示煤矿事故案例,将煤矿事故元本体中的核心概念分为根源危险源、隐患、事故、后果、地点和事故处理六大类,具体的概念层次和概念间关联关系如图1所示。图1只给出了一级子类和部分关系,实线表示概念间上下级关系,虚线表示各类之间的关联关系。

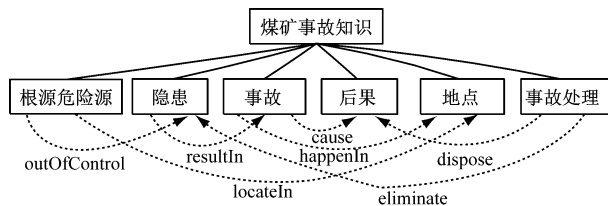


图1 事故案例知识元本体模型(部分)

Fig.1 Accident case knowledge meta-ontology model (partial)

2 煤矿事故案例知识库模型

基于本体的煤矿事故案例知识库是利用本体对煤矿事故特征信息、理论知识、公理规则进行存储、组织和管理的知识仓库,主要由煤矿事故实例库和规则库构成^[15]。其中,煤矿事故案例库主要存储煤矿事故的知识概念体系、数据属性、关联关系及事故实例等;而规则库主要存储对煤矿事故诊断、推理或判定的公理、规则等。煤矿事故案例知识库模型如

图 2 所示。

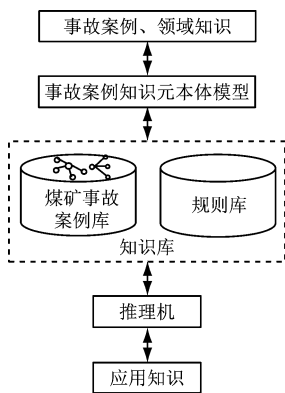


图 2 煤矿事故案例知识库模型

Fig. 2 Coal mine accident case knowledge base model

在知识库模型中,一方面,利用煤矿事故案例知识元本体模型对事故案例、领域知识及其中所包含的公理、规则进行组织和表示,从而构建煤矿事故本体库和规则库,实现对煤矿事故知识的存储、管理和共享。另一方面,在煤矿事故本体库和规则库的基础上,利用推理机对事故本体进行推理分析,进而获得事故本体中具有应用价值的隐性知识和新知识。

3 煤矿事故案例知识库的构建

3.1 煤矿事故案例知识库构建方法

目前,本体开发尚无统一的标准,基于本体的知识库构建方法也各具领域特色,不具有可复制性。因此,本文将煤矿事故案例知识库的构建流程分为知识获取和知识表示 2 个部分。根据煤矿事故案例知识库模型,将知识表示部分分为煤矿事故案例库构建和规则库构建,具体构建方法如图 3 所示。

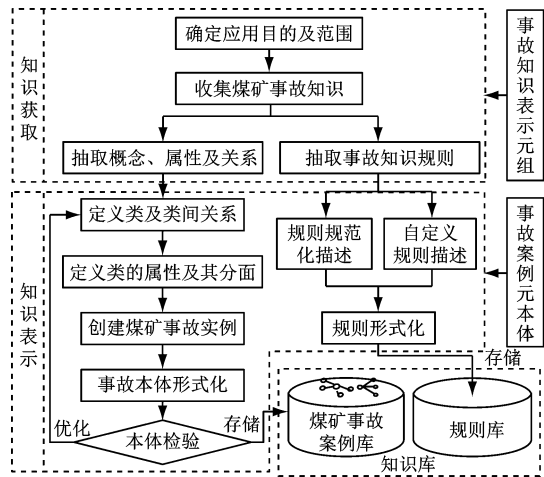


图 3 煤矿事故案例知识库构建方法

Fig. 3 Construction method of knowledge base of coal mine accident case

3.2 知识获取

知识获取是构建知识库的首要环节。获取领域知识首先需要确定知识库的应用目的和范围,才能在需求范围内搜集相关的文献资料,为领域概念、属性、关系及规则的获取提供数据支持。实现知识获取的步骤如下。

(1) 确定知识领域及应用目的。本文中知识库面向煤矿事故案例知识,主要应用于煤矿事故案例的管理、再利用与共享,其主要目的是明确、规范地表达煤矿事故、危险源、隐患、事故后果等概念和概念之间的语义关系,并利用事故本体和规则进行知识推理,为知识库深层次应用奠定基础。

(2) 收集煤矿事故知识资源。煤矿事故知识涉及到人员、设备、环境等多个方面,专业术语、属性等规模庞大,因此,要保证所构建知识库的质量,就需要收集足够全面的领域知识资源作为数据支撑。本文主要对与煤矿事故案例相关的图书资料、事故调查案例等官方公布材料、煤矿企业事故案例记录等资料进行收集和分类整理。

(3) 抽取事故概念、属性及关系。采用自动筛选和人工识别相结合的方式概念识别筛选。首先采用 ICTCLAS 分词工具对文档进行分词和词性标注,筛选出与煤矿事故相关的实词,如“冒顶”、“瓦斯突出”、“输送带断裂”、“风速”、“导致”、“引发”等。然后,参照事故知识表示元组对识别出的实词进行分类,如“冒顶”属于概念,“风速”属于属性,“引发”属于关系。

(4) 抽取事故知识规则。目前,规则提取的方法有基于粗糙集的提取方法^[16]、基于神经网络的提取方法^[17]等,但在实践过程中效果并不十分理想。所以,为保证规则质量,本文采用人工识别方法获取知识规则。利用所收集的事故知识资源,以事故案例、各类规程标准等为主要来源,从中甄选知识规则,如“瓦斯爆炸的条件是瓦斯体积分数在爆炸界限(5%~16%)内、氧气体积分数不低于 12%且出现高温火源(650~750 ℃)”、“造成 30 人以上死亡,或 100 人以上重伤,或 1 亿以上的直接经济损失的事故为特别重大事故”等。

3.3 知识表示

3.3.1 煤矿事故案例库构建

构建煤矿事故案例库的步骤如下。

(1) 确定类和类间层次结构。根据煤矿事故知识表示元组和元本体模型,结合煤矿事故领域核心概念、属性及关系等知识要素,对煤矿事故知识的本体层级结构进行深入分析,采用自底向上和自顶向

下相结合的方法,逐步确定类和类间的层次结构,从而构建出煤矿事故本体结构,如图 4 所示。限于篇幅,图 4 中只给出了部分结构。

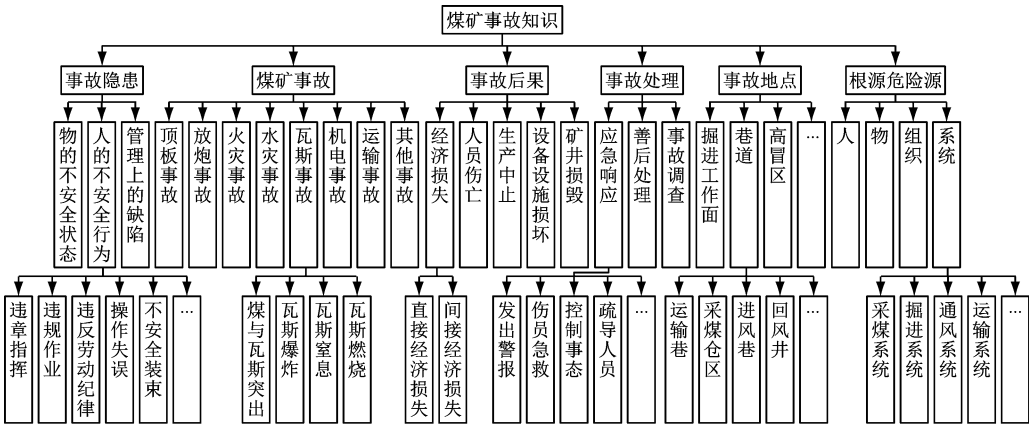


图 4 煤矿事故本体层次结构(部分)

Fig. 4 Coal mine accident case ontology hierarchy (partial)

(2) 定义类的属性及其分面。本体中类的属性是一种二元关系,包括对象属性和数据属性,主要用来描述类的共有特征和实例的特有特征。结合元本体中定义类间关系,分析本体中类的对象属性和数据属性,并对属性分面及属性约束进行定义。本体中的部分对象属性和数据属性见表 1、表 2。

表 1 对象属性(部分)

Table 1 Object properties (partial)					
名称	释义	逆属性	属性特性	定义域	值域
cause	造成	causeBy	反对称性	事故	事故后果
happenIn	发生在	—	反对称性	事故	事故地点
isKindOf	是一种	hasKind	传递性	—	—
isPartOf	是一部分	hasPart	传递性	—	—
locateIn	位于	—	反对称性	根源危险源	事故地点
resultIn	导致	hasReason	传递性	根源危险源	事故隐患
hasReason	事故原因	isReasonOf	反自反性	煤矿事故	事故隐患
dispose	处理后果	disposeBy	反自反性	善后处理	事故后果
induce	引发	induceBy	传递性	管理缺陷	不安全行为
amplify	同时发生	—	对称性	人员伤亡	经济损失
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(3) 本体形式化表示。煤矿事故案例本体的形式化表示需要借助软件来实现。利用 Protégé 4.0 对本体进行可视化构建,编辑事故案例本体的层次结构、属性及其约束,添加类的实例。同时,将事故案例本体转换为 OWL 格式的形式化代码,用 Protégé 4.0 自带的 Pellet 推理机可进行本体的一致性检验^[18]。

3.3.2 事故知识规则库构建

表 2 数据属性(部分)

Table 2 Data properties(partial)

名称	释义	定义域	值域
accidentLevel	事故级别	事故	string
airQuantity	风量	巷道	decimal
gasConcentration	瓦斯浓度	瓦斯	decimal
airVelocity	空气流速	巷道	decimal
temperature	温度	采煤工作面	float
hasDeathToll	死亡人数	人员死亡	positiveInteger
gasEmission	瓦斯涌出量	瓦斯突出	decimal
accidentID	事故编号	事故	integer
accidentName	事故名称	事故	string
occurrenceTime	发生时间	事故	dateTime
⋮	⋮	⋮	⋮

规则库在煤矿事故知识本体的推理过程中发挥着重要作用,可以提高知识库的知识推理能力。规则库的构建主要包括定义规则和规则形式化 2 个部分,其中定义规则包括知识规则的规范化和自定义属性规则。

知识规则的规范化:初步获取的规则存在表述不完整、歧义、逻辑冲突、冗余等问题,需要对知识规则进行进一步甄选和规范化处理。在规则的规范化过程中,采用“If...,then...”的表述方式,其中所涉及的术语应与本体中的类、属性及实例保持一致。例如,如果瓦斯浓度超过 5%且同时出现高温火源,则会发生瓦斯爆炸。

自定义属性规则:在本体的构建过程中,煤矿事故实例都是按照链路形式添加的。由于实例规模庞

大,在创建实例时多以实例链路中的核心要素与上层父类联接,其余要素通过对象属性与核心要素联接的形式进行添加。通过自定义属性规则,利用规则推理来补充类与实例之间及实例与实例之间的属性关系。例如,如果瓦斯抽采机出现电动机停转故障,导致瓦斯积聚进而造成人员窒息死亡事故,则该事故的根源危险源为瓦斯抽采机电机,事故隐患为电动机停转,事故后果为人员死亡。

规则形式化:规则的形式化就是将自然语言规则转换为计算机可识别的编码语言,以方便推理机进行推理。本文采用 Jena 的规则语法实现规则的形式化,定义方法如下:rule:(? X ? H ? Y)(? Y ? I ? Z)→(? X ? J ? Z)。其中,X,Y,Z 代表类或实例;H,I,J 代表属性关系。该规则表示 X 通过属性 I 与 Y 有联系,Y 通过属性 I 与 Z 有联系,推理出 X 通过属性 J 与 Z 有联系。按照此定义规则对自然语言规则进行形式化,最终构建成规则库。

4 基于知识库的推理应用

在构建煤矿事故案例知识库的基础上,以煤矿事故中的瓦斯事故为例,分析基于煤矿事故案例知识库的知识推理应用。

4.1 构建事故实例知识

以具体事故为例,利用 Protégé 软件对本体进行形式化表示,从而创建本体实例知识。事故实例:2009 年 2 月 22 日 2 时 20 分,山西焦煤集团西山煤电屯兰煤矿南四采区发生一起瓦斯爆炸事故,事故发生在 12403 工作面 1 号联络巷,联络巷内瓦斯积聚、局部通风设计和开关安装不符合规程、瓦斯检查员检查不到位是事故的直接原因,事故共造成 78 人死亡、114 人受伤。该实例的部分形式化代码如下。

//类的表示

```
<owl: Class rdf = "事故后果"/>
<owl: Class rdf = "人员死亡"/>
<rdfs: subClassOf rdf:resource = "# 事故后果"/>
<owl: Class rdf = "瓦斯事故"/>
<owl: Class rdf = "瓦斯爆炸"/>
<rdfs: subClassOf rdf:resource = "# 瓦斯事故"/>
</owl: Class>
```

//属性表示

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID = "resultIn">
<rdfs:domain rdf:resource = "# 瓦斯爆炸"/>
<rdfs:range rdf:resource = "# 人员死亡"/>
</owl: ObjectProperty>
<owl:dataProperty rdf:ID = "hasDeathToll">
```

```
<rdfs:domain rdf:resource = "# 人员死亡"/>
<rdfs:range rdf:resource = "&.xsd; positive Integer"/>
</owl: dataProperty>
//实例表示
<瓦斯爆炸 rdf:ID = "瓦斯事故">
<happenIn>
<1 号联络巷 rdf:ID = "事故地点"/>
</happenIn>
<causeConsequence>
<人员死亡 rdf:ID = "事故后果"/>
<人员受伤 rdf:ID = "事故后果"/>
</causeConsequence>
</瓦斯爆炸>
```

4.2 构建事故知识规则

在煤矿领域专家的指导下,通过抽取规则和自定义规则来实现事故知识规则构建,采用 Jena 规则语法进行形式化处理并存储,从而建立规则库。规则及其代码示例如下。

规则 1:如果煤矿事故死亡人数超过 30 人,则该事故的事故级别为 V 级(特别重大事故)。

规则 2:如果根源危险源失控,出现事故隐患,事故隐患导致煤矿事故发生,则该煤矿事故有根源危险源。

```
Rule1:(? c rdf:type ns: CoalAccident)(? p rdf:type ns: DeathPeople)(? a rdf:type ns: AccidentLevel)(? c ns: resultIn ? p)(? p ns: hasDeathToll ? vp)greaterthan(? vp, 30)(? c ns: hasAccident ? a)→(? a ns: hasAccident LevelValue V)
```

```
Rule2:(? s rdf:type ns: SourceDanger),(? h rdf:type ns: HiddenDanger)(? c rdf:type ns: CoalAccident)(? s ns: outOfControl ? h)(? h ns: resultIn ? c)→(? c ns: has SourceDanger ? s)
```

4.3 基于知识库的语义推理

在建立煤矿事故案例知识库之后,可以在其基础上进行语义知识推理,以获取更多的隐性知识和新知识。利用 Jena 推理机对事故本体和规则进行知识推理,核心代码如下。

//URI 注册及规则前缀定义

```
PrintUtil. registerPrefix(" ns"," http://www. owl-ontologies. com/CoalAccident. owl#");
```

//创建模型并加载 owl 文件

```
String owlFilePath = "E: \ ontologyOwlFile \ Coal Accident. owl";
```

```
Model moData = FileManager. get(). loadModel("file:" + owlFilePath);
```

//添加规则,创建推理机和推理模型

```
String jenaRule = "[Rule1:...]"+ "[Rule2:...]";
```

```
Reasoner jenaReasoner = new GenericRuleReasoner
(Rule, parseRules(jenaRule));

InfModel jenaInf = ModelFactory. createInf Model
(jenaReasoner,moData);

//创建 Resource res,输出推理结果

Resource res = jenaInf. getResource (ns + "? Gas ns;
outOfControl ? GasOverrun,? GasOverrun ns; resultIn ?
GasExplosion,? GasExplosion ns: hasConsequence ?
DeathOfPeople, ? DeathOfPeople ns:hasDeathToll 78");

printStatement(jenaInf,res,null,null);
```

将 Rule1 和 Rule2 添加至 Jena 推理代码中,运行后得到 2 条推理结果:1-(ns:GasExplosion ns:hasSourceDanger ns: Gas), 2-(ns: GasExplosion ns:hasAccidentLevelValue ns: V)。2 条推理结果分别表示:瓦斯爆炸事故和根源危险源瓦斯之间有对象属性 hasSourceDanger;瓦斯爆炸事故的事故等级为 V 级(特别重大事故)。通过分析推理结果发现,第 1 条推理结果原是本体中的隐性知识,第 2 条推理结果是知识库中原本不存在的。2 条推理结果都是在煤矿事故案例知识库的基础上,利用 Jena 推理机对本体和规则进行语义推理得到的。这说明了基于本体构建的事故案例知识库可以实现隐性知识和新知识的自动挖掘,同时也体现了本体与规则相结合的语义推理优势。

5 结语

利用基于本体的知识库来对案例知识进行组织、表示和存储,可以大大提升知识库的扩展能力和语义推理能力,更有利于提高案例知识的共享程度和利用率。煤矿事故案例知识库的构建为煤矿事故的预警及处理提供了知识保障,为提高煤矿安全管理决策水平提供了理论支持,同时也推动了知识管理在煤矿领域的应用,加速提升了煤矿企业的信息化、智能化水平。然而,在知识库的构建过程中还存在一些不足之处:在本体的知识获取和构建过程中,多为人工操作,这虽然保证了知识库的质量,但效率较低,知识库的规模也相对较小,仍然需要持续的扩充和完善。所以,知识的自动化获取及本体的自动化/半自动化构建将是下一步研究的重点。

参考文献(References):

[1] 丁百川. 我国煤矿主要灾害事故特点及防治对策[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):109-114.
DING Baichuan. Features and prevention countermeasures of major disasters occurred in China

coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5):109-114.

[2] 谭章禄,陈晓. 煤炭企业信息化建设现状及发展对策探讨[J]. 工矿自动化,2016,42(7):63-65.
TAN Zhanglu, CHEN Xiao. Discussion on situation and development countermeasures of coal enterprise informatization construction[J]. Industry and Mine Automation, 2016,42(7):63-65.

[3] 张斌,魏扣,郝琦. 国内外知识库研究现状述评与比较[J]. 图书情报知识,2016(3):15-25.
ZHANG Bin, WEI Kou, HAO Qi. Review and comparison of research status of knowledge base at home and abroad [J]. Document, Informaiton & Knowledge, 2016(3):15-25.

[4] NATALIA V R, MICHEL D. yOWL: An ontology-driven knowledge base for yeast biologists [J]. Journal of Bio-medical Informatics, 2008, 41 (5): 779-789.

[5] SUNITHA A, SURESH B G. Ontology-driven knowledge-based health-care system, an emerging area - challenges and opportunities - Indian scenario [C]//ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Hyderabad, 2014:239-246.

[6] 张克亮,李伟刚,王慧兰. 基于本体的航空领域问答系统[J]. 中文信息学报,2015,29(4):192-198.
ZHANG Keliang, LI Weigang, WANG Huilan. Ontology-based question answering system for aviation domain[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2015, 29(4):192-198.

[7] RUBEN C, CELSON L, JOAO S, et al. Facilitating knowledge sharing and reuse in building and construction domain:an ontology-based approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27 (1): 263-282.

[8] FARINHA RODOLFO A, GONÇALVES PAULO J S. Knowledge based robotic system towards ontology driven pick and place tasks[J]. Romanian Review Precision Mechanics Optics and Mechatronics, 2016 (49):152-157.

[9] 王志,夏士雄,牛强,等. 基于本体的矿井电机故障知识库构建[J]. 计算机工程,2010,36(10):270-272.
WANG Zhi, XIA Shixiong, NIU Qiang, et al. Construction of ontology-based mine-motor fault knowledge base[J]. Computer Engineering, 2010, 36(10):270-272.

[10] 李娟莉,杨兆建. 基于本体的矿井提升机故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(6):993-997.

LI Juanli, YANG Zhaojian. Fault diagnosis method for mine hoist based on ontology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 993-997.

[11] 史春宝,王西韦,吕冰,等. 基于本体的矿用液压钻机建模方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 106-109.

SHI Chunbao, WANG Xiwei, LYU Bing, et al. Study on modelling method of mine hydraulic drilling machine based on ontology [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 106-109.

[12] 孟现飞. 基于本体的煤矿事故预警知识库模型及其应用[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.

[13] 孙晋非. 突水预测预报决策支持系统关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2012.

[14] OCHS C, HE Z, ZHENG L, et al. Utilizing a structural meta-ontology for family-based quality assurance of the BioPortal ontologies[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2016, 61: 63-76.

[15] 苏正炼,严骏,陈海松,等. 基于本体的装备故障知识库构建[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2067-2072.

SU Zhenglian, YAN Jun, CHEN Haisong, et al. Construction of ontology-based equipment fault knowledge base [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2067-2072.

[16] 索中英,程嗣怡,袁修久,等. 优势决策信息系统规则获取方法及应用[J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 539-544.

SUO Zhongying, CHENG Siyi, YUAN Xiujiu, et al. Rule acquisition method and application of dominance decision-making information system [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3): 539-544.

[17] 陈果,宋兰琪,陈立波. 基于神经网络规则提取的航空发动机磨损故障诊断知识获取[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2170-2176.

CHEN Guo, SONG Lanqi, CHEN Libo. Knowledge acquisition for aero-engine wear fault diagnosis based on rule extraction from neural networks[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2170-2176.

[18] SIRIN E, PARSIA B, GRAU B C, et al. Pellet: A practical OWL-DL reasoner [J]. Web Semantics: Science, Services & Agents on the World Wide Web, 2007, 5(2): 51-53.