

# 基于 OWL 的瓦斯爆炸事故语义本体构建及推理

刘 鹏<sup>1,2</sup>, 赵慧含<sup>3</sup>, 仰彦妍<sup>3</sup>, 景江波<sup>3</sup>, 魏卉子<sup>3</sup>, 丁恩杰<sup>1,2</sup>

(1. 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008;

3. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 基于矿山安全环境分析和事故危险源理论, 利用本体语言 OWL 构建了矿山危险源本体, 并结合与瓦斯爆炸事故的内在联系, 构建了瓦斯爆炸事故树本体。继而通过设计本体推理工具的自定义规则, 实现了从根源危险源到状态危险源的推理, 同时根据瓦斯爆炸事故树本体实现了顶上事件发生概率的计算。提出的矿山安全领域本体构建及推理方法, 可用于瓦斯爆炸事故预警的辅助决策。试验结果表明, 构建的矿山危险源本体可实现从根源危险源到状态危险源的正确推理, 并可根据瓦斯爆炸事故树本体自下而上计算顶上事件发生概率, 验证了利用 OWL 本体推理辅助预测瓦斯爆炸事故的有效性。

**关键词:** 瓦斯爆炸; 矿山危险源; 本体推理; 事故树

中图分类号: TP182; TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)08-0016-08

## Construction and reasoning of semantic ontology for gas explosion accident based on OWL

LIU Peng<sup>1,2</sup>, ZHAO Huihan<sup>3</sup>, YANG Yanyan<sup>3</sup>, JING Jiangbo<sup>3</sup>, WEI Huizi<sup>3</sup>, DING Enjie<sup>1,2</sup>

(1. The National Joint Engineering Laboratory of Internet Applied Technology of Mines, Xuzhou 221008, China;

2. Internet of Things Perception Mine Research Centre, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Based on mine safety environment analysis and danger source theory, coal mine danger source ontology by OWL is constructed. Exploring the intrinsic relation between mine danger source and gas explosion accident, we construct gas explosion fault tree. Moreover, by designing reasoning rules, we realize the reasoning process from the root danger source ontology to the status danger source ontology. Finally, from bottom to top, based on the basic events status, the probability of the top accident event is calculated according to the constructed gas explosion fault tree ontology. The proposed construction and reasoning methods of mine accident ontology can be used for assistant decision-making on gas explosion accident warning. The experimental results show that the constructed mine accident ontology can correctly implement the reasoning from the root danger source to the status danger source. Meanwhile, the probability of top accident event of the gas explosion fault tree ontology is exactly calculated. These results verify the effectiveness of OWL ontology technology in predicting coal mine gas explosion accidents.

**Key words:** gas explosion; mine danger source; ontology; fault tree

## 0 引言

由于矿山安全生产技术进步及投入增加, 矿山事故死亡人数逐年下降, 但矿山事故仍时有发生, 形

式依然严峻<sup>[1]</sup>。作为矿山物联网从业人员, 如何综合运用物联网新理论、新方法、新技术切实提高矿山安全生产水平, 已成为重要课题。

事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA)<sup>[2]</sup>是一

收稿日期: 2018-03-08; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.08.003

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804401, 2017YFC0804409)

作者简介: 刘 鹏(1973—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士。通信作者: 丁恩杰, 教授, 博士。E-mail: enjied@cumt.edu.cn

引用格式: 刘 鹏, 赵慧含, 仰彦妍, 等. 基于 OWL 的瓦斯爆炸事故语义本体构建及推理[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(8): 16-23.

LIU Peng, ZHAO Huihan, YANG Yanyan, et al. Construction and reasoning of semantic ontology for gas explosion accident based on OWL[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(8): 16-23.

种演绎推理方法,把系统可能发生的某种事故与导致事故发生的各种原因用逻辑符号连接起来,形成一种树形图,可定性和定量分析事故发生的直接原因和间接原因,是常用事故分析方法之一,在很多领域得到了广泛的应用。文献[3]根据事故树原理建造了排桩支护结构体系的事故树图,并对事故树进行相关分析,最终给出相应的安全对策和建议。文献[4]建立了煤矿突水事故树模型,并结合具体煤矿研究分析预防突水事故发生的有效途径,验证了事故树分析方法在煤矿突水事故中应用的可行性。

OWL (Web Ontology Language) 本体语言基于 XML (Extensive Markup Language) 和 RDF (Resource Description Framework) 发展而来,用高度抽象的形式化语言定义和描述现实及网络世界的各种实体、类型、属性以及实体间的逻辑关系,具有结构严谨清晰、形式化强、机器可解释性强等显著优点,在智能搜索、知识图谱、物联网、工业 4.0 等领域均有重要应用。OWL 本体的理论基础和相关技术已相对完善,在许多领域都得到了广泛的应用,国外从业者已形成很多有影响力的本体,包括基于人类认知语言学的英文词典 WordNet<sup>[5]</sup>, 加州大学伯克利分校国际计算机科学研究所承担开发的 FrameNet<sup>[6]</sup>, Cycorp 集团研发的 Cyc<sup>[7]</sup> 项目等,都旨在提供一种可以为其他项目使用的人类常识知识库。文献[8]在智能楼宇领域构建本体,可描述智能楼宇的整个系统架构,并能实现故障检测和诊断算法的匹配等功能。国内本体构建研究与国外存在差距,但各领域也都有一定的应用,文献[9-10]分别构建了食品安全预警本体和装备故障知识库本体,文献[11]构建了中医针灸领域本体,文献[12]将本体思想引入地理信息科学领域,分析构建了时空地理本体模型的框架。文献[13]建立事故树本体,并设计了 SWRL (Semantic Web Rule Language) 规则实现了对系统故障快速定位的推理。文献[14]构建了基于本体的半自动业务流程配置框架,并验证了该方法的实用性和有效性。文献[15]构建了机器人智能空间系统本体,通过规则推理实现智能空间的信息整合,为用户提供个性化服务。

通过分析文献得知,目前罕有将 OWL 用于矿山本体构建的报道,更没有将事故树本体分析方法与矿山环境本体联合构建和推理的研究。笔者在分析矿山环境基础上构建了矿山危险源本体,在文献[16-17]研究瓦斯爆炸事故致因及防范的基础上,

以瓦斯爆炸为例构建了事故树本体,并充分研究 2 个本体的内在联系,设计了合理的推理规则,实现了矿山危险源到瓦斯爆炸事故发生概率的推理。论文的主要创新点有以下 4 点:

- 1) 创新性地将 OWL 本体构建和规则推理引入矿山事故预警领域,这在国内外文献罕有报道。
- 2) 通过分析矿山井下环境和事故危险源理论,构建了矿山危险源本体。
- 3) 结合矿山危险源本体与具体事故发生的内在联系,构建了与矿山危险源本体紧密相关的瓦斯爆炸事故树本体。
- 4) 设计了本体推理规则,实现从根源危险源到状态危险源的推理,并根据瓦斯爆炸事故树本体的计算模块成功计算了顶上事件发生概率。

## 1 矿山危险源理论和事故树分析法

研究矿山事故首先要分析事故发生的根源,“危险源是事故发生的根源”的观点得到了普遍的认同,但关于危险源的分类并不统一<sup>[18-19]</sup>。笔者根据文献[20]将危险源分为根源危险源和状态危险源:根源危险源是指能量或危险物质,既包括能量,也包括危险物质的载体;状态危险源则指致使根源危险源发生能量或危险物质的异常转移的条件或状态,且可能最终会导致事故或未遂事件的发生。状态危险源是附属于根源危险源的,也就是说根源危险源是状态危险源存在的前提,没有根源危险源,就不可能存在相应的状态危险源。

事故树是安全学科的重要分析方法之一,该方法不仅能分析出事故发生的直接原因,而且能深入地揭示出事故发生的潜在原因。事故树将不希望发生事故(顶上事件)作为分析的目标,逐层追溯可能导致事故的原因(中间事件),直到原因事件不能再分(基本事件)<sup>[21]</sup>。每个事件及其直接原因之间根据逻辑关系,用“与”门或者“或”门连接。图 1 为根据事故树分析理论绘制的瓦斯爆炸事故树(gas explosion fault tree, GEFT),图中矩形符号为顶上事件或中间事件,圆形符号为基本事件,“事件”与其“原因”之间通过“与”门或者“或”门连接。容易得知,“与”门连接的顶上事件发生概率  $P = \prod_{i=1}^n q_i$ , “或”门连接的顶上事件发生概率  $P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i)$ , 式中,  $q_i$  为第  $i$  个基本事件的发生概率,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

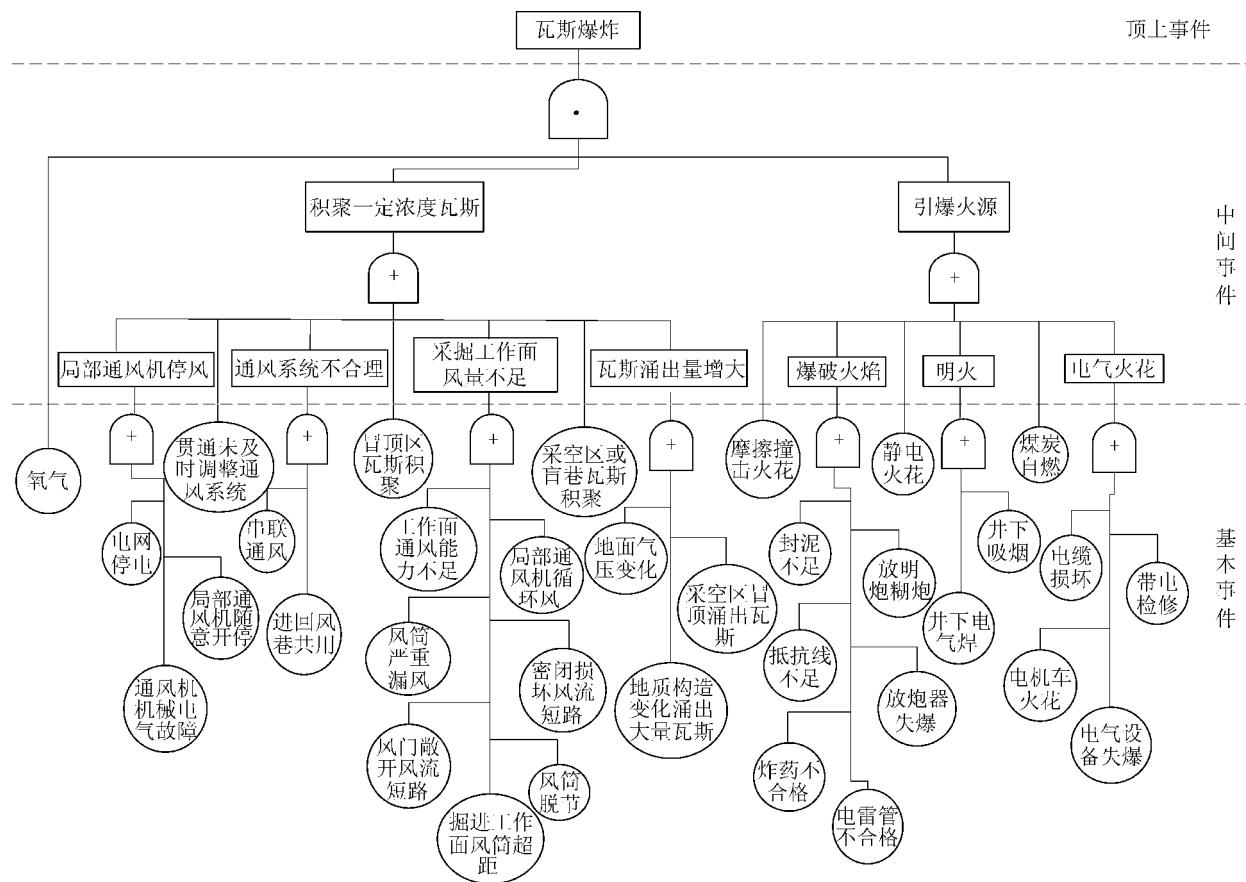


图 1 瓦斯爆炸事故树

Fig.1 Gas explosion fault tree

## 2 矿山危险源本体和事故树本体构建

笔者采用斯坦福大学的开源 OWL 本体构建工具 protégé 构建矿山危险源本体和瓦斯爆炸事故树本体。

### 2.1 矿山危险源本体构建

根据矿山危险源理论构建矿山危险源本体,包括 2 大类:根源危险源(RDS)和状态危险源(SDS)。根源危险源类包括造成不安全因素的 4 个子类:物( Object )、人( Person )、组织( Organization )和系统( System )。这些子类又可细分,如物( Object )有子类固体( Solid )、液体( Liquid )和气体( Gas );人( Person )有子类检修人员、井下人员等;系统( System )子类包括推进系统、地测防治水系统、采煤系统、通风系统、运输系统和机电系统等。依据矿山危险源分类理论,状态危险源表示根源危险源处于不安全状态,如冒顶区瓦斯浓度超标,氧气浓度超标,矿工吸烟等。

将图 1 中瓦斯爆炸事故树的基本事件定义为状态危险源,便建立了矿山危险源本体与瓦斯爆炸事故树本体的联系。构建的矿山危险源本体类关系如图 2 所示。

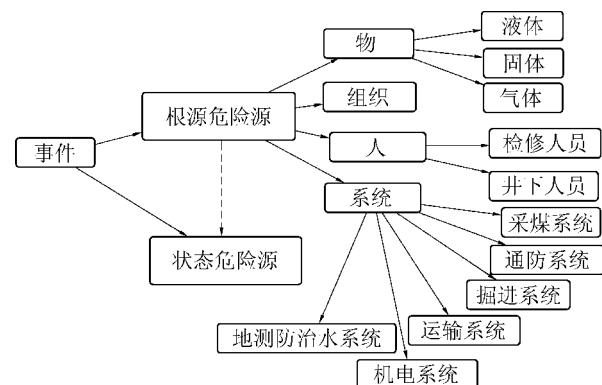


图 2 矿山危险源本体类关系

Fig.2 Class diagram of mine danger source ontology

建立的矿山危险源本体中不同的根源危险源具有不同的数据属性 (Data property),如气体有浓度

值数据属性,值域为 float 型,可根据浓度值的大小判断是否超标;井下人员有是否井下抽烟、是否井下电气焊等数据属性。根源危险源数据属性的值可以通过各种温度、浓度传感器获得实时信息,也可以通过图像处理、目标识别等方式,提取识别结果并保存在数据库中供本体调用。矿山危险源本体的对象属性(Object property)见表 1,当根源危险源达到规定的不安全状态时,就推理出某一根源危险源对应的状态危险源,生成新的三元组(RootDangerSource, cause, StatusDangerSource)。

表 1 矿山危险源本体对象属性

Table 1 Object property of mine danger source ontology

对象属性	定义域	值域
cause	RootDangerSource	StatusDangerSource

本体理论中,类是对一个集合的总体描述,实例代表集合的元素。通过定义实例的方式描述某一元素的性质,如定义的实例井下人员-1,表示特指的一个井下人员,可对该实例定义姓名,作业范围等数据属性来区别于其他实例,同时又是井下人员类的实例,可继承井下人员类的属性。井下吸烟-1 是状态危险源的子类井下吸烟的一个实例,表示根源危险源实例井下人员-1 在其数据属性是否井下吸烟的值为“是”时,推理出实例井下吸烟-1。

## 2.2 瓦斯爆炸事故树本体构建

瓦斯爆炸事故树本体包括事件(Event)和逻辑门(LogicGate)两大类,并且由图 1 瓦斯爆炸事故树的示例可知,事件类包括顶上事件(TopEvent)、中间事件(MiddleEvent)和基本事件(BasicEvent),逻辑门类包括与门(AndGate)和或门(OrGate)。对本文研究的瓦斯爆炸事故树而言,顶上事件类为瓦斯爆炸,中间事件类包括积聚一定浓度瓦斯、局部通风机停风、引爆火源、明火等,基本事件类包括氧气、串联通风、井下吸烟等。构建的瓦斯爆炸事故树本体的类关系如图 3 所示。

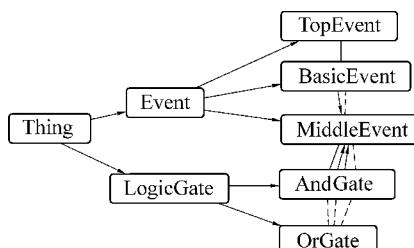


Fig.3 Class diagram of gas explosion fault tree ontology

瓦斯爆炸事故树本体的对象属性见表 2,定义了对象属性的定义域和值域。hasAndGate 描述 TopEvent 类的属性,表示 TopEvent 通过 hasAndGate 连接 AndGate 类;hasOrGate 描述 MiddleEvent 类的属性,表示 MiddleEvent 类通过 hasOrGate 连接 OrGate 类;behadAndGate 描述 AndGate 类的属性,表示 AndGate 通过 behadAndGate 连接 MiddleEvent 类和 BasicEvent 类;behadOrGate 描述 OrGate 类的属性,表示 OrGate 类通过 behadOrGate 属性连接 MiddleEvent 类和 BasicEvent 类。

表 2 瓦斯爆炸事故树本体对象属性

Table 2 Object property of gas explosion fault tree ontology

对象属性	定义域	值域
hasAndGate	TopEvent	AndGate
hasOrGate	MiddleEvent	OrGate
behadAndGate	AndGate	MiddleEvent、BasicEvent
behadOrGate	OrGate	MiddleEvent、BasicEvent

瓦斯爆炸事故树本体的数据属性见表 3,其中 EventId 和 GateId 描述事件和逻辑门标号,具有唯一性。构建的事故树本体要计算顶上事件发生概率,因此对 BasicEvent 类定义了 Probability 数据属性,描述 BasicEvent 类的事件发生概率,根据基本事件的发生概率便可推导出顶上事件发生概率。

表 3 瓦斯爆炸事故树本体数据属性

Table 3 Data property of gas explosion fault tree ontology

数据属性	定义域	值域类型
EventId	MiddleEvent、BasicEvent	string
GateId	LogicGate	string
Probability	BasicEvent	decimal

定义瓦斯爆炸事故树本体的实例,描述具体瓦斯爆炸事故树的逻辑关系。如瓦斯爆炸-1 是瓦斯爆炸类的一个实例,可对实例进行数据属性和对象属性的描述,瓦斯爆炸-1 可以通过对象属性 hasAndGate 连接 AndGate 类的实例 And1。对每个类都定义了实例,实例通过属性连接,形成了一个瓦斯爆炸事故树的实例描述,接下来顶上事件发生概率的计算,就是对这一特定的实例事故树本体进行的查询和计算。

## 3 本体推理论和计算系统

本体属于数据层,用来描述具体资源,但是难以表达类与类、类与属性间关系,因此需要采用规则语

言对本体数据进行规则扩展,以获得隐含知识,使本体具有实际应用价值。本体查询及推理系统的实现有多种方法和工具,笔者主要借助开源工具 Jena 来构建语义应用的 java 程序框架,实现矿山危险源的推理和瓦斯爆炸事故树本体查询计算系统。

表 4 矿山危险源本体推理规则集  
Table 4 Reasoning rule set of mine danger source ontology

规则标号	内 容
Rule1	(http://www.semanticweb.org/.../#O2-1 http://www.semanticweb.org/.../#浓度值 ? data) greaterThan( ? data 0.12) -> (http://www.semanticweb.org/.../#O2-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#氧气浓度超标-1)
Rule2	(http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区-1 http://www.semanticweb.org/.../#是否瓦斯积聚 ? data) equal( ? data yes) -> (http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区瓦斯积聚-1)
Rule3	(http://www.semanticweb.org/.../#炸药-1 http://www.semanticweb.org/.../#是否合格 ? data) equal( ? data no) -> (http://www.semanticweb.org/.../#炸药-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#炸药不合格-1)
...	...

Rule1:O2-1 是根源危险源 O2 的一个实例,氧气浓度超标-1 是状态危险源氧气浓度超标的一个实例,Rule1 表示如果 O2-1 的浓度值大于 0.12,则推理出氧气浓度超标-1。

Rule2:冒顶区-1 是根源危险源冒顶区的一个实例,冒顶区瓦斯积聚-1 是状态危险源冒顶区瓦斯积聚的一个实例,Rule2 表示当冒顶区-1 瓦斯浓度达到危险标准时,推理冒顶区瓦斯积聚-1 发生。

Rule3:炸药-1 是根源危险源炸药的一个实例,炸药不合格-1 是状态危险源炸药不合格的一个实例,Rule3 表示如果炸药-1 不合格,则推理出炸药不合格-1 的发生。

除以上列出的 3 条规则之外还有很多推理规则,因编写格式及意义类似,此处不赘述。

矿山危险源本体推理机制(图 4)主要步骤如下:

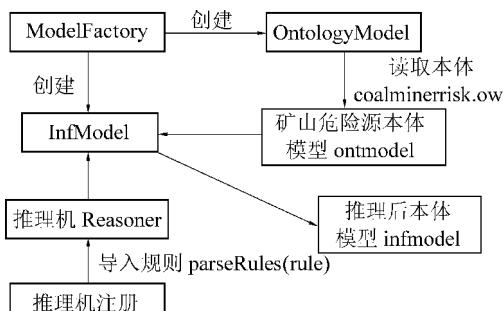


图 4 根源危险源到状态危险源推理机制

Fig.4 Reasoning method for RDS to SDS

1) 通过 ModelFactory 访问 Jena 推理机制,On-

### 3.1 矿山危险源本体推理模块

笔者对矿山危险源本体的推理是根据矿山知识,制定推理规则形成规则集,对已有的事实数据应用规则集来完成由根源危险源到状态危险源的推理。矿山危险源本体推理规则集见表 4。

tologyModel 创建并读取矿山危险源本体形成模型 ontmodel。

2) 将规则集以 Rule.parseRules( rule ) 格式导入推理机 Reasoner。

3) 对矿山危险源本体 ontmodel 应用推理机 Reasoner, 推理得到本体模型 infmodel, 该本体不但包含原数据,还包含推理得到的隐含信息数据。

对推理得到的 infmodel 本体使用 SPARQL (Sparql Protocol And RDF Query Language) 语言查询,查询推理出的状态危险源,即基本事件的发生概率,保存在指定数组中以便后续计算顶上事件发生概率时调用。查询过程如下伪代码所示:①输入:需要查询的内容。②编写查询要求 qpro = SELECT ?x WHERE { 基本事件 http://www.semanticweb.org/.../#发生概率 ? x }, ?x 为查询变量。③创建查询 query = QueryFactory.create( qpro )。④执行查询 queryexecution = QueryExecutionFactory.create( query, infmodel ), 在推理得到的本体中查询符合要求的变量。⑤返回查询结果集 resultset = queryexecution.execSelect( )。⑥将查询到的基本事件发生概率保存在数组中。⑦输出:查询结果。

### 3.2 瓦斯爆炸事故树本体查询计算模块

事故树本体是由“与”“或”门连接事件一层一层构成的,因此需要逐层查询门和事件逻辑关系,获取基本事件的发生概率,最终实现顶上事件发生概率的计算。瓦斯爆炸事故树本体的查询计算流程如图 5 所示。

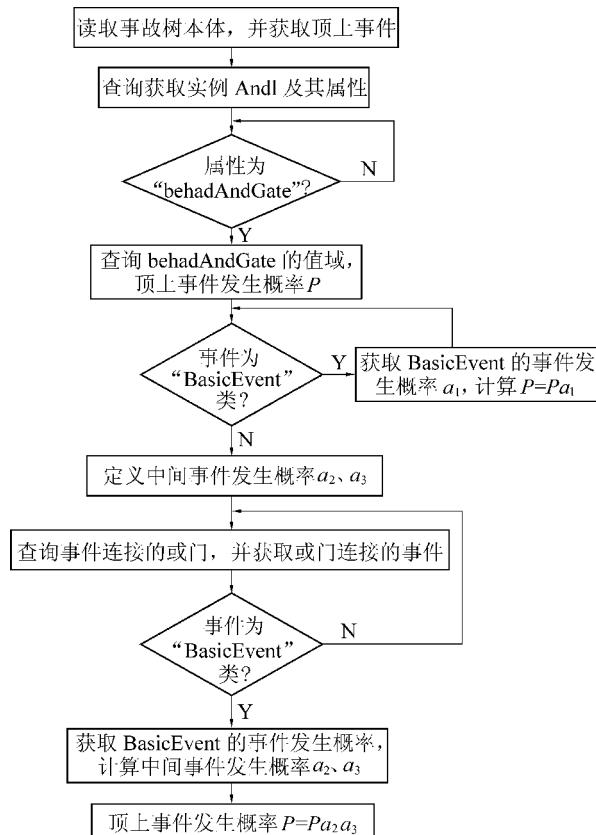


图 5 瓦斯爆炸事故树本体查询计算流程

Fig.5 Flow chart of GEFT ontology query &amp; calculation

表 5 矿山环境安全状态下推理计算

Table 5 Reasoning &amp; calculation of safe mine environment

规则标号	已有事实	推理结果
Rule1	http://www.semanticweb.org/.../#O2-1 http://www.semanticweb.org/.../#浓度值 0.2	http://www.semanticweb.org/.../#O2-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#氧气浓度超标-1
Rule2	http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区-1 http://www.semanticweb.org/.../#是否瓦斯积聚 是	http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区瓦斯积聚-1

注:发生的基本事件及其事件发生概率:氧气浓度超标 0.9, 冒顶区瓦斯积聚 0.5。最终计算结果:瓦斯爆炸顶上事件发生概率为 0。

表 5 中实例 O2-1 的浓度为 0.2, 在规则 Rule1 作用下推理出状态危险源实例氧气浓度超标-1, 即事故树中基本事件氧气浓度超标发生, 事件发生概率为 0.9; 实例冒顶区-1 的数据属性是否瓦斯积聚的值为“是”, 在 Rule2 作用下, 状态危险源冒顶区瓦斯积聚-1 被推理出, 即基本事件冒顶区瓦斯积聚发生, 概率为 0.5。在只有以上 2 个基本事件情况下, 通过事故树本体的查询计算模块得出顶上事件发生概率为 0, 符合预期计算结果。

需要说明的是, 瓦斯爆炸事故树本体中参与顶上事件发生概率计算的基本事件都是通过第 3.1 节推理得到的, 因此需要确定这些基本事件在事故树中的位置, 进而计算顶上事件发生概率。通过循环查询“与”门和“或”门连接的事件, 判断事件是否为“BasicEvent”类, 确定推理得到的基本事件位置, 按逻辑门的计算公式计算中间事件和最终的顶上事件发生概率。

#### 4 仿真验证与分析

仿真试验目的是为验证所构建的本体及推理程序能根据已知本体信息进行有效地推理, 并根据事故树本体计算顶上事件瓦斯爆炸的发生概率。本节对所有基本事件的发生概率赋值为十进制(decimal)的 0~1 随机数。为了验证矿山环境下本体描述和推理计算的有效性, 根据“与”门连接的事件是否发生和基本事件发生数量分类, 分别设计了以下试验。

1) 试验 1: 矿山环境安全状态下推理计算。设置瓦斯爆炸的 3 个基本要素至少有一个不满足, 即顶上事件通过“与”门连接的事件不能全被推理出, 则顶上事件不发生, 发生概率为 0。矿山危险源推理结果和顶上事件发生概率计算结果见表 5。

2) 试验 2: 矿山环境不安全状态下推理计算。设置瓦斯爆炸的 3 个基本要素都满足, 即顶上事件通过“与”门连接的事件都被推理出, 则顶上事件发生概率不为 0。状态危险源氧气浓度超标-1、冒顶区瓦斯积聚-1 和炸药不合格-1 都被推理出时, 推理结果和计算顶上事件发生概率的结果见表 6。表 6 中对已有事实应用推理规则集, 得到的推理结果符合矿山环境不安全情况时从根源危险源到状态危险源的推理, 瓦斯爆炸发生概率的计算结果符合预期计算结果。

表6 矿山环境不安全状态下推理计算

Table 6 Reasoning &amp; calculation of unsafe mine environment

规则标号	已有事实	推理结果
Rule1	http://www.semanticweb.org/.../#O2-1 http://www.semanticweb.org/.../#浓度值 0.2	http://www.semanticweb.org/.../#O2-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#氧气浓度 超标-1
Rule2	http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区-1 http://www.semanticweb.org/.../#是否瓦斯积聚 是	http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#冒顶区瓦斯 积聚-1
Rule3	http://www.semanticweb.org/.../#炸药-1 http://www.semanticweb.org/.../#是否合格 是	http://www.semanticweb.org/.../#炸药-1 http://www.semanticweb.org/.../#cause http://www.semanticweb.org/.../#炸药 不合格-1

发生的基本事件及其事件发生概率:氧气浓度超标 0.9, 冒顶区瓦斯积聚 0.5, 炸药不合格 0.1。最终计算结果:瓦斯爆炸顶上事件发生概率为 0.045。

3) 试验 3: 矿山环境不安全状况下的顶上事件和基本事件关系分析。本试验首先设置状态危险源及事故树基本事件为不同数量, 而后根据基本事件数量变化, 计算顶上事件发生概率的变化趋势, 如图 6 所示。

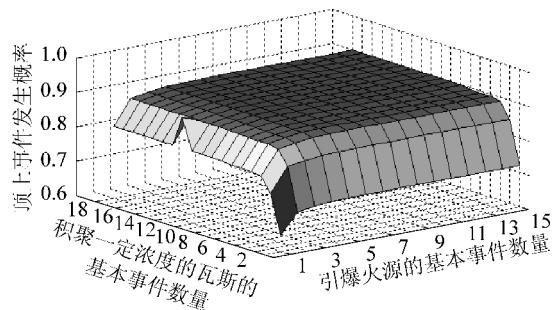


图 6 顶上事件发生概率变化趋势

Fig.6 Top event probability variation trend

基本事件“氧气浓度达标”始终发生, 故图 6 中没有标出。图 6 中颜色越深表示顶上事件发生概率越大, 可以看出顶上事件发生概率随着基本事件数量的增加而增大, 在“积聚一定浓度瓦斯”的基本事件数量最大和“引爆火源”的基本事件数量最大时达到最大值。这是因为导致顶上事件发生的基本事件越多, 中间事件发生概率越大, 从而使得顶上事件的发生概率也越大。因此图 6 中顶上事件瓦斯爆炸事故发生概率的变化趋势是符合矿山安全生产规律的, 进一步验证了笔者提出的矿山危险源本体推理以及瓦斯爆炸事故树本体计算的正确性。

## 5 结语

矿山环境及其事故逻辑的语义描述对矿山事故预警智能化有着重要意义, 近年来逐渐成为相关领域的研究热点之一。笔者基于 OWL 构建了矿山危险源本体和瓦斯爆炸事故树本体, 制定了矿山危险源本体推理规则, 并根据已推理的状态危险源和瓦斯爆炸事故本体基本事件关系, 计算了顶上事件(瓦斯爆炸事故)发生概率。试验证明笔者构建的矿山危险源本体、瓦斯爆炸事故树本体及相关推理算法, 可正确推理计算顶上事件发生概率, 从而为瓦斯爆炸智能预警做出有效辅助决策。笔者目前的工作主要是矿山事故静态本体构建与推理, 在未来工作中, 将重点研究适应矿井安全预警需求的矿井空间及时间本体, 联合空间和时间维度, 构建矿山事故动态本体及推理模型。

## 参考文献(References) :

- [1] 王凯, 蒋曙光, 马小平, 等. 瓦斯爆炸致灾通风系统实验及应急救援方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 617-623.  
WANG Kai, JIANG Shuguang, MA Xiaoping, et al. Experimental of the ventilation systems hazard by gas explosion and the methods of emergency rescue [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 617-623.
- [2] 曹蓓, 于航, 孙佳, 等. 基于事故树分析法的发动机空中停车人为差错研究 [J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 14-18.  
CAO Bei, YU Hang, SUN Jia, et al. Research of human errors in in-flight shut-down based on the fault tree analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6): 14-18.

- [3] 张小平,王杰,胡明亮.事故树分析在排桩基坑工程安全评价中的应用研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):960-965.  
ZHANG Xiaoping, WANG Jie, HU Mingliang. Application of FTA in safety assessment of row piles of excavation engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(6):960-965.
- [4] 王长申,孙亚军,杭远.基于事故树分析的煤矿潜在突水危险评价研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):298-305.  
WANG Changshen, SUN Yajun, HANG Yuan. Application of fault tree analysis to risk assessment of potential water-inrush hazards in coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(2):298-305.
- [5] NAVIGLI R, PONZETTO S P. BABEL Net: The automatic construction, evaluation and application of a wide-coverage multilingual semantic network [J]. Artificial Intelligence, 2012(3):193-217.
- [6] MAHWISH K, RUZANNA C. Use case elicitation with frameNet frames [C]//2017 IEEE 25th International Requirements Engineering Conference Workshops, 2017:224-231.
- [7] WEIKUM G, THEOBALD M. From information to knowledge: harvesting entities and relationships from web sources [C]//Proceedings of the Twenty-ninth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database System. Indiana: ACM Press, 2010:65-76.
- [8] BJORN B, DIRK T. A survey on information modeling and ontologies in building automation [C]//2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017:8615-8621.
- [9] 李宏伟,黄卫东,洪小娟.食品安全预警本体构建研究[J].计算机技术与发展,2013,23(9):238-244.  
LI Hongwei, HUANG Weidong, HONG Xiaojuan. Research on ontology building in food security pre-warning [J]. Computer Technology and Development, 2013,23(9):238-244.
- [10] 苏正炼,严峻,陈海松,等.基于本体的装备故障知识库构建[J].系统工程和电子技术,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.
- [11] HUA G, DAN X. Research on building of acupuncture domain ontology [C]//2017 19th International Conference on E-health Networking, Application & Service: The 1st IEEE International Workshop on Artificial Intelligence in Chinese Medicine Workshop, 2017:87-90.
- [12] 宋佳,诸云强,王卷乐,等.基于 GML 的时空地理本体模型构建及应用研究[J].地球信息科学学报,2009,11(4):442-451.  
SONG Jia, ZHU Yunqiang, WANG Juanle, et al. A study on the model of spatio-temporal geo-ontology based on GML [J]. Journal of Geo-information Science, 2009,11(4):442-451.
- [13] 周亮,黄志球,黄传林.故障树领域本体及 SWRL 规则的构建方法研究[J].计算机科学,2015,42(8):198-202.  
ZHOU Liang, HUANG Zhiqiu, HUANG Chuanlin. Construction method for fault tree domain ontology supporting SWRL rules [J]. Computer Science, 2015,42 (8):198-202.
- [14] 黄颖,何克清,冯在文,等.基于本体的业务流程适应性配置方法研究[J].电子学报,2016,44(3):699-708.  
HUANG Ying, HE Keqing, FENG Zaiwen, et al. Research on adaptive approach for business process configuration based on ontology [J]. Acta Electronic Sinica, 2016,44 (3):699-708.
- [15] 路飞,田国会,李擎.智能空间环境下基于本体的机器人服务自主认知及规划[J].机器人,2017,39(4):423-430.  
LU Fei, TIAN Guohui, LI Qing. Autonomous cognition and planning of robot service based on ontology in intelligent space environment [J]. Robot, 2017,39(4):423-430.
- [16] 孙继平.基于物联网的煤矿瓦斯爆炸事故防范措施及典型事故分析[J].煤炭学报,2011,36(7):1172-1176.  
SUN Jiping. The accident prevention measure and analysis based on internet of things in the gas explosion of coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36 (7):1172-1176.
- [17] 时国庆,周涛,刘茂喜,等.矿井火灾封闭中瓦斯爆炸危险性的数值模拟分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):997-1006.  
SHI Guoqing, ZHOU Tao, LIU Maoxi, et al. Numerical analysis on methane explosion hazard during the process of fire zone sealing in coal mine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017,46 (5):997-1006.
- [18] 陈全.事故致因因素和危险源理论分析[J].中国安全科学学报,2009,19(10):67-71.  
CHEN Quan. Analysis on accident causation factors and hazard theory [J]. China Safety Science Journal, 2009,19(10):67-71.
- [19] 段瑞威.煤矿危险源安全管理系统设计[J].工矿自动化,2017,43(8):94-97.  
DUAN Ruiwei. Design of coal mine hazard safety management system [J]. Industry and Mine Automation, 2017,43(8):94-97.
- [20] 孟现飞,丁恩杰,刘全龙,等.危险源概念的重新界定及隐患关系研究[J].中国安全科学学报,2017,27(7):1172-1176.  
MENG Xianfei, DING Enjie, LIU Quanlong, et al. Study on redefinition of hazard and its relationship with latent danger [J]. China Safety Science Journal, 2017,27 (7):1172-1176.
- [21] 李新春,刘全龙,裴丽莎.基于模糊事故树的煤矿瓦斯爆炸事故危险源分析[J].煤炭工程,2014,46(5):93-96.  
LI Xinchun, LIU Quanlong, PEI Lisha. Analysis on danger sources of mine gas explosion based on fuzzy fault tree [J]. Coal Engineering, 2014,46(5):93-96.