doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.031

基于生食牡蛎 HACCP 计划的语义建模研究

邹一波[1,2]　李清雨[1]　陈　明[1,2]　葛　艳[1,2]

(1. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306; 2. 农业农村部渔业信息重点实验室, 上海 201306)

摘要: 为提高水产品加工中的质量安全风险信息化管理水平,以国标中的生食牡蛎 HACCP 计划为例,提出了基于生食牡蛎加工 HACCP 计划的语义基础模型(HACCP semantic base model,HSBM),用来实现知识的提取、表示、建模和推理。从 HACCP 计划中获取领域知识,构建生食牡蛎 HACCP 语义建模架构。在该架构指导下,构建知识表示模型,采用本体建模方法对生食牡蛎加工 HACCP 语义进行建模,并绘制生食牡蛎 HACCP 概念-关系结构图。然后,采用语义网规则语言 SWRL 描述业务逻辑规则,提高知识的自动推理能力。最后,利用 HermiT 推理机实现知识推理。结果表明,此模型可以较为完整地表述生食牡蛎 HACCP 计划覆盖的知识,丰富生食牡蛎本体知识库,为 HACCP 计划的数字化、智能化应用提供技术支持。

关键词: 生食牡蛎; 危害分析及关键控制点; 语义建模; 知识表示模型

中图分类号: TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0290-10　　**OSID**:

Semantic Modeling Based on Raw Oyster HACCP Program

ZOU Yibo[1,2]　LI Qingyu[1]　CHEN Ming[1,2]　GE Yan[1,2]

(1. *College of Information Technology*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*
2. *Key Laboratory of Fisheries Information*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: In order to improve the informatized management level of the quality and safety risks appear in aquatic product processing, taking the national standard hazard analysis and critical control point system (HACCP) of aquatic products and raw oyster HACCP plan as examples, a semantic basic model was proposed based on raw oyster HACCP plan (HACCP semantic base model, HSBM), which was used to extract, represent and reason knowledge. Firstly, the domain knowledge was obtained from HACCP plan, then the raw oyster HACCP semantic modeling framework was constructed. Under the guidance of this architecture, a knowledge representation model was constructed (knowledge representation model - HACCP, KRM - HACCP), ontology modeling method was used to model the HACCP semantics of raw oyster processing, and concept - relationship structure diagram of raw oyster HACCP was drawn. Then, the semantic Web rules language SWRL was used to describe business logic rules and improve the automatic reasoning ability of knowledge. Finally, the HermiT inference machine was used to realize knowledge reasoning. Experiments showed that the model had the ability to describe knowledge, share knowledge, realize semantic reasoning, discover knowledge, and apply knowledge. It was able to systematically and completely express raw oyster processing system, and enrich the ontology knowledge base of raw oyster, thus providing technical support for the digitalization, intelligent applications, natural language processing, case-based reasoning and other possible applications of HACCP plan.

Key words: raw oysters; hazard analysis and critical control point; semantic modeling; knowledge representation model

0　引言

水产品极易被污染,其质量安全风险高于其他类别食品[1]。危害分析及关键控制点(Hazard analysis critical control point, HACCP)是一种全面的、系统的控制体系,具有严格的记录保持程序,可

收稿日期: 2021-09-15　修回日期: 2021-10-21

基金项目: 江苏现代农业产业关键技术创新项目(CX(20)2028)和教育部产学研合作项目(E-6006-00-0222)

作者简介: 邹一波(1983—),男,讲师,博士,主要从事区块链技术和机器视觉研究,E-mail: ybzou@shou.edu.cn

通信作者: 葛艳(1974—),女,副教授,博士,主要从事质量安全风险评价、溯源和农业信息化研究,E-mail: yge@shou.edu.cn

以降低食品行业风险[2]，对水产品安全性和可靠性的提高也有积极的作用。因此研究 HACCP 计划的信息化、数字化应用，对于提升生产和销售环节的安全性和可靠性有积极的作用。

目前，已有众多研究者开展了这方面的研究[3-13]。但这些研究主要集中于 HACCP 计划的信息化应用、HACCP 计划的优化或者各种新兴信息技术和 HACCP 计划的结合应用。在此基础上，还出现了有关 HACCP 的应用研究[14-16]。但针对如何把 HACCP 计划中的知识作完整的数字化提取，实现 HACCP 计划的知识表达和推理，相关研究还不多。

为提高水产品流通过程中的质量安全风险信息化管理水平，本文将生食牡蛎 HACCP 计划（无特别说明，下文均用 HACCP 指代生食牡蛎 HACCP）与语义建模相结合，提出基于生食牡蛎加工 HACCP 计划的语义基础模型（HACCP semantic base model，HSBM），用来实现知识提取、知识表示、知识建模以及知识推理，以语义的方式将 HACCP 计划的知识固化到信息领域，为 HACCP 计划的数字化应用奠定语义基础。

1　HACCP 语义建模概述

1.1　生食牡蛎 HACCP 计划概述

参照文献[17]进行生食牡蛎 HACCP 计划的完整知识表示研究。

生食牡蛎 HACCP 计划经危害分析确定活牡蛎接收、干法冷藏、牡蛎肉储存 3 个环节，分别从显著危害（HA）、各预防措施的关键限值（CL）、监控（CM）、纠偏行动（CA）、验证（VE）、记录（RE）6 方面展开描述。其中每个环节从不同的危害角度，对与各环节、各危害相关的温度、时间等作出要求，并对出现偏差可能会发生严重危害的关键点进行监控，如果监控发现该点超出关键限值的要求，则对该操作进行纠偏，通过每天审查监控、纠偏记录等方式进行验证。另外，在计划表中的每个操作都要进行记录，记录也作为每个操作的凭证。具体的生食牡蛎 HACCP 计划[17]如表 1 所示。

表 1　生食牡蛎 HACCP 计划

Tab.1　HACCP schedule of raw oysters

CCP	HA	CL	CM				CA	VE	RE
			对象	方法	频率	监控者			
活牡蛎接收	致病菌污染	每个容器有标识牌；捕捞者须有许可证；无来自关闭水域的牡蛎	捕捞标识牌；捕捞许可证	视觉检查	每个容器；每个交货批	品管	拒收来自关闭水域、非许可水域、没有捕捞标识牌或标识不当的原料	每天审查监控、纠偏记录	接收记录
	致病菌生长	捕捞至冷藏的最长时间小于 24 h	捕捞时间牌	视觉检查	每个交货批	品管	拒收超出时间限制的原料	每天审查监控、纠偏记录	接收记录
	环境化学污染	每个容器有标识牌；捕捞者须有许可证；无来自关闭水域的牡蛎	捕捞标识牌；捕捞许可证	视觉检查	每个容器	品管	拒收来自关闭水域、非许可水域、没有捕捞标识牌或标识不当的原料	每天审查监控、纠偏记录	接收记录
	天然毒素	每个容器有标识牌；捕捞者须有许可证；无来自关闭水域的牡蛎	捕捞标识牌；捕捞许可证	视觉检查	每个容器	品管	拒收来自关闭水域、非许可水域、没有捕捞标识牌或标识不当的原料	每天审查监控、纠偏记录	接收记录
干法冷藏	致病菌生长	冷藏库温度不超过 7.2℃的时间不大于 2 h	冷藏库温度	视觉检查连续温度记录仪	作业过程中，每 2 h 视觉检查连续温度记录仪	品管	调节冷藏库温度；根据总的暴露在不当温度下的时间，扣留、评估产品	每天审查监控、纠偏记录；每周校准温度记录仪	冷藏库温度记录；记录曲线图
牡蛎肉储存	致病菌生长	冷藏库温度超过 7.2℃的时间不大于 2 h；产品从干法冷藏库移到牡蛎肉储藏间的时间不得超过 3 h	冷藏库温度记录仪；从干法冷藏库移到牡蛎肉储藏间的时间	视觉检查连续温度记录仪；检查标记产品的进程	作业过程中，每 2 h 视觉检查连续温度记录仪；每 2 h 检查标记的产品	品管	调节冷藏库温度；根据暴露在不当温度下的时间，扣留、评估产品；产品加冰和（或）退回冷藏库，按暴露时间，扣留、评估产品	每天审查监控、纠偏记录；每周校准温度记录仪	冷藏库温度记录；标记产品暴露日志

1.2 HACCP 语义建模基础

HACCP 语义建模过程就是对 HACCP 作知识提取、知识表示、知识建模以及知识推理的过程。HACCP 计划既有结构化的知识,又有非结构化的知识,并且涉及到工作流程问题,计划内容繁多,关系复杂,流程之间信息无法共享,因此准确描述 HACCP 中的相关知识,加强机器对数据的理解,为后续的知识推理及实际应用打下良好的基础成为要解决的关键问题。

知识表示是使用合适的知识表示方法[18]对 HACCP 知识进行分析整理,得到概念、关系、实例等相关知识,对知识进行新的描述,使计算机能对生食牡蛎知识进行有效的表达[19]。知识表示是知识建模与推理的基础。

知识建模的过程实际上就是建立本体的过程,对 HACCP 计划中的知识进行科学的表示、获取和组织。本体(Ontology)可有效地实现知识表示,得到可以被机器处理和共享的抽象模型[20]。它由概念、概念之间的关系以及概念之间的约束组成[21]。而 OWL2(Ontology Web languag 2)是一种网络本体语言,拓展了领域知识的表达和推理能力[22],是一种针对领域知识而通用的建模语言,可实现与本体建模工具的交互[23-24]。

为了增强知识推理能力,在知识表示的基础上,使用语义网规则语言(Semantic Web rule language, SWRL)建立规则,使用推理机获取新的知识。

SWRL 以逻辑形式来表达规则,根据已有知识得到隐含知识,具有较强的逻辑表达能力[25]和推理能力[26]。每条规则的基本语法[27]为

$$P_1, P_2, \cdots, P_n \rightarrow C' \tag{1}$$

式中,P_1、P_2、…、P_n以及 C'都是基本命题,P_1、P_2、…、P_n这些基本命题之间是逻辑与的关系,它们统称为前提,C'称为结论。式(1)的含义是,如果前提 P_1、P_2、…、P_n成立,则结论 C'成立。

基本命题 P 还可以拓展为形如 $P(?\ x, ?\ y)$的限制式,此时,x、y 可以是变量或实例,P 表示 x、y 之间的某种关系。

知识推理可以在知识建模的基础上通过本体推理或规则推理获取新的知识。

本体推理是通过概念的约束条件对本体模型中概念的推理,保证本体模型中概念的一致性。本体推理为规则推理提供前提条件,可使用 HermiT、FaCT + + 等推理机实现。

2 HSBM 模型概述

结合生食牡蛎业务流程与 HACCP 计划特点,对 HACCP 计划中的概念、关系、实例及规则等进行提取设计本体模型,并借助本体建模工具实现该模型,形成生食牡蛎 HACCP 计划的语义基础模型(HSBM),该模型的语义建模层次架构如图 1 所示。

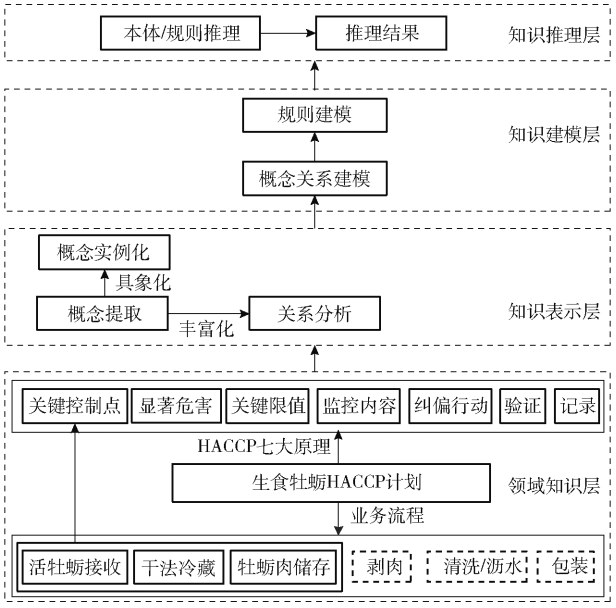

图 1 生食牡蛎 HACCP 语义建模层次架构

Fig. 1 HACCP semantic modeling hierarchy for raw oyster

按照不同的业务逻辑,该模型分为 4 层,自底向上分别是:领域知识层、知识表示层、知识建模层和知识推理层。

领域知识层是模型的基础层,对内容繁多、关系复杂的 HACCP 知识作梳理,该层为模型最底层,为上层系统和业务实现提供领域知识支撑。知识表示层是模型的核心层,将领域知识用本体建模方法完成元素抽取。知识建模层是模型的实现层,对知识表示层抽象表达的知识作具体的本体描述。知识推理层是模型的补充层,按规则或约束条件实现知识的推理,得到新的知识,从而丰富 HACCP 计划知识,形成概念化、形式化、结构化的本体知识库。

2.1 领域知识层

围绕 HACCP 计划中的活牡蛎接收、干法冷藏、牡蛎肉储存 3 个关键控制点,以及每个关键控制点覆盖的显著危害、关键限值、监控内容、纠偏行动、验证和记录来获取相关知识。其中的典型知识分析如下:

(1)在活牡蛎接收、干法冷藏、牡蛎肉储存各环节中,活牡蛎接收环节会有捕捞产生的捕捞标识牌、捕捞许可证、捕捞时间牌等标识,接收之后对牡蛎进行简单处理,进入干法冷藏、储存环节,要保证从捕捞到冷藏库以及从冷藏库到储藏间运输过程中的食品安全性。

(2)活牡蛎接收包括致病菌污染、致病菌生长、

环境化学污染、天然毒素 4 种显著危害，针对各危害制定 HACCP 计划；干法冷藏和牡蛎肉储存环节确定致病菌生长为显著危害，围绕致病菌生长制定 HACCP 计划。

(3)在实施 HACCP 计划中，会有许可证、标识牌类的监测信息贯穿业务流程，它们是检测该批水产品是否满足关键限值的重要依据。

(4)还有一类监控信息是温度、时间。如果监控值不符合关键限值的要求，则产生拒收的纠偏行动。同时需要对监控、纠偏等进行验证。不管监控的结果是否符合关键限值的要求，都要产生记录，以作为该批水产品接收或拒收的依据。

2.2　知识表示层

上述 HACCP 领域知识可抽象为一个知识表示模型(Knowledge representation model - HACCP, KRM - HACCP)，该模型由领域的抽象概念集 C 和与概念相关的关系集 R 组成。其中概念集是 HACCP 计划中包含的所有概念形成的集合，概念集 $C_n = \{C_1, C_2, \cdots, C_i\}$，每个概念可以具像化为多个实例 I，由此又形成实例集 $I_n = \{I_1, I_2, \cdots, I_i\}$，$I \subset C$。

(1)概念提取

建立完整的概念集是构建一个本体的基础，结合 2.1 节领域知识描述，概念集合 C 包括：对生食牡蛎业务流程的抽象形成生食牡蛎业务流程概念(STEP)；按照危害分析与关键控制点 HACCP 原理抽象出的 7 个概念：CCP(关键控制点)、HA、CL、CM、CA、VE、RE。

(2)概念实例化

将上述 HACCP 中的每个概念作为一个表格列，结合表 1 的原始 HACCP 计划表，可以得到对应每个概念下合理存在的实例如表 2 所示。表中每一行代表一个被选为关键控制点 CCP 的实例，除首行首列外的每个单元格代表一个列概念在当前行对应关键控制点上存在的所有实例。

表 2　KRM - HACCP 中的实例

Tab. 2　Instances of KRM - HACCP

Step	HA	CL	CM	CA	VE	RE
Step1(活牡蛎接收)	HA1(致病菌污染) HA2(致病菌生长) HA3(环境化学污染) HA4(天然毒素)	CL1(活牡蛎捕捞标识) CL2(活牡蛎捕捞许可) CL3(活牡蛎捕捞水域) CL4(活牡蛎捕捞至冷藏时间关键限值)	CM1(捕捞标识监控) CM2(捕捞许可监控) CM3(捕捞时间监控) CM4(移到冷藏库的时间监控) Proof1(捕捞标识) Proof2(捕捞许可证) Proof3(捕捞时间标识)	CA1(捕捞标识纠偏措施) CA2(捕捞许可纠偏措施) CA3(捕捞水域纠偏措施) CA4(捕捞至冷藏时间纠偏措施)	VE1(审查监控记录) VE2(审查纠偏记录)	RE1(监控记录) RE2(纠偏记录) RE3(接收记录)
Step2(干法冷藏)	HA2(致病菌生长)	CL5(牡蛎肉干法冷藏冷藏库温度关键限值) CL6(冷藏库温度不超过 7.2℃ 的时间关键限值)	CM5(冷藏库温度监控) CM6(移出冷藏库的时间监控) CM8(温度记录仪监控) Proof4(冷藏库时间标识)	CA5(冷藏库温度纠偏措施) CA6(暴露在不当温度下的纠偏措施)	VE1(审查监控记录) VE2(审查纠偏记录) VE3(校准温度记录仪)	RE4(冷藏库温度记录) RE5(温度曲线图记录)
Step3(牡蛎肉储存)	HA2(致病菌生长)	CL7(牡蛎肉储存冷藏库温度关键限值) CL8(冷藏库温度超过 7.2℃ 的时间关键限值) CL9(牡蛎从冷藏库移到储藏间的时间关键限值)	CM7(移到储藏间的时间监控) CM8(温度记录仪监控) Proof4(冷藏库时间标识)	CA5(冷藏库温度纠偏措施) CA6(暴露在不当温度下的纠偏措施) CA7(冷藏库至储藏间时间纠偏措施)	VE1(审查监控记录) VE2(审查纠偏记录) VE3(校准温度记录仪)	RE4(冷藏库温度记录) RE6(产品暴露记录)

(3)关系分析

关系是连接两个概念的“桥梁”，两个概念之间通过属性建立相连的关系。与关系相连的两个概念根据连接属性的作用方式分别定义为：主体和客体。主体表示触发该属性作用的概念，客体表示该属性作用的目标对象概念。这些连接属性构成概念的关系集，反映领域知识中概念之间的交互作用。

首先，以活牡蛎接收这一关键控制点流程为例，

说明其中包含的主要关系,如表 3 所示。

表 3 活牡蛎接收中的关系分析

Tab. 3 Relationship analysis in live oyster reception

主要关系	解释	主体	客体
CCP_generate_proof	某环节产生证明	CCP	CM
Has_HA_risk	有显著危害	HA	HA
Has_CL	有关键限值	CCP	CL
Monitored_by	对某关键限值进行监控	CL	CM
CA_proved_by	由某纠偏证明	CCP	CA
CCP_generate_CA	某环节产生纠偏行动	CCP	CA
Has_CM	有监控	CCP	CM
CL_proved_by	由某关键限值证明	CCP	CL
Proof_from_CCP	由某环节产生证明	CM	CCP

对比表 3,针对干法冷藏关键控制点流程还需在此基础上附加的关系如表 4 所示。

表 4 干法冷藏的附加关系分析

Tab. 4 Additional relationship analysis of dry refrigeration

主要关系	解释	主体	客体
Has_CA	有纠偏行动	CL	CA
CM_proved_by	由某监控证明	CCP	CM
Monitor_CL	进行监控	CM	CL
Has_RE	有记录	CCP	RE
CCP_generate_RE	某环节产生记录	CCP	RE
Has_VE	有验证	CCP	VE
CA_generate_VE	某纠偏行动产生验证	CA	VE

在 3 个控制点各自对应的关系分析外,还有涉及到两个关键控制点之间,为了更好地实现信息共享而有必要表达的关系如表 5 所示。

表 5 两个流程之间的关系分析

Tab. 5 Analysis of relationship between two processes

主要关系	解释	主体	客体
Next_CCP	下一步	CCP	CCP
Differentfrom	两环节不同	CCP	CCP
CCP_deliver_CL	某环节向下交付证明	CCP	CL
CCP_submit_proof	某环节向上提交证明	CCP	CM

(4)属性分析

概念不仅有相互之间的连接关系,还有属于自己的一些数据属性,比如在 HACCP 计划表中与时间、温度等有具体数据要求的概念。因此用数据属性描述概念主体与一些数据特征之间的关系,表现为主体和数据类型的关系,本质上也是一种关系。其中,主体表示该属性作用的对象概念,数据类型表示该属性值的取值约束。主要的数据属性如表 6 所示。

2.3 知识建模层

知识建模是知识推理和知识应用的基础。此处

表 6 KRM-HACCP 中的主要数据属性

Tab. 6 Main data attributes in KRM-HACCP

数据关系	解释	主体	数据类型
Frequency_monitoring	监控频率	CM	Float
Has_tempure_limits	温度限值	CL	Integer
Has_data_limits	时间限值	CL	date

的知识建模主要是通过两方面建立本体知识模型:一是概念关系模型的构建,以理清领域知识核心概念间的关系;二是基于本体的规则的提取与表述,实现通过本体共享概念模型的明确形式化规范说明[28],通过本体建模工具,建立概念关系和规则,为知识推理提供前提条件。

2.3.1 概念关系建模

对 2.2 节中通过知识表示提取出的、面向一个关键控制点的相关概念,梳理这些概念间的相互关系,建立生食牡蛎 CCP 概念-关系(E-R)模型,如图 2 所示。图中矩形框表示概念,菱形框是概念间存在的关系。连接线上的数字代表连接基数,0 表示所连接的概念中可以没有实例与对应概念的实例建立关系,1 表示所连接的概念中实例与对应概念的实例之间建立一对一关系,n 表示所连接的概念中最多有 n 个实例与对应概念的实例之间建立关系。

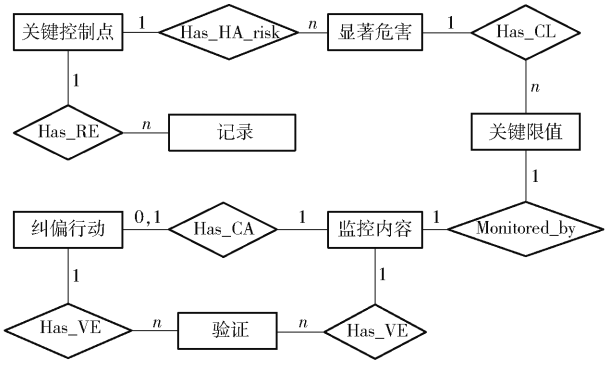

图 2 系统中的概念关系 E-R 结构图

Fig. 2 E-R diagram of conceptual relationship in system

2.3.2 规则建模

规则建模采用 SWRL 构造规则本体并通过本体之间的关联来获取更多的知识,即使用 SWRL 建立推理规则。推理规则是以目标为导向的推理条件的有机组合[29]。

对 HACCP 计划表达的知识作规则提取,可以更好地监控 HACCP 计划实施、保障产品质量、提供水产品追溯证明。基于上述 HACCP 计划知识表示基础,描述部分典型推理规则:

(1)流程记录类规则

这类规则与各关键控制点中的信息密切相关。以活牡蛎接收 CCP 为例,其中涉及到捕捞标识、捕

捞许可证、捕捞时间等证明信息，为下一个 CCP 的实施提供前提条件，因此要将产生的证明信息进行验证，并拒收不符合条件的原材料，形成记录。为此，设计了如下规则。

Rule－1（记录验证规则）：如果某 CCP 中实施了某项监控措施 CM，且监控措施 CM 对关键限值 CL 进行监控，并由监控对象信息载体 Proof 进行记录和证明，则在 CCP 中需要提交产生的 Proof 供后续验证有效性。该规则描述为

Has_CM(？CCP,？CM),Monitor_CL(？CM,？CL),CL_proved_by(？CL,？Proof),Proof_from_CCP(？Proof,？CCP)→CCP_submit_proof(？CCP,？Proof)

Rule－2（监控记录规则）：如果某 CCP 有某显著危害 HA，实施了某项监控措施 CM，CM 对 CL 进行监控，对监控内容进行记录，监控信息可以用来检验某关键限值 CL，则在实例 CCP 中会产生记录 RE，记录实例 CCP 中的接收记录。该规则描述为

Has_HA_risk(？CCP,？HA),Has_CM(？HA,？CM),Monitored_by(？CL,？CM),Has_RE(？CM,？RE),CL_proved_by(？CL,？CM)→CCP_generate_RE(？CCP,？RE)

Rule－3（有偏必纠规则）：如果某 CCP 有某种显著危害 HA，根据某显著危害有相应的预防措施的关键限值 CL，由监控措施 CM 对关键限值 CL 实施监控，并由记录 RE 检验某纠偏措施 CA，当显著危害超出关键限值的要求时，则在实例 CCP 中产生纠偏行动的一个实例纠偏措施 CA。该规则描述为

Has_HA_risk(？CCP,？HA),Has_CL(？HA,？CL),Monitored_by(？CL,？CM),CA_proved_by(？CA,？RE)→CCP_generate_CA(？CCP,？CA)

（2）数据共享类规则

这类规则主要与计划表中时间相关特征属性密切相关。比如，针对表 1 中活牡蛎接收 CCP 下的关键限值："捕捞至冷藏的最长时间小于 24 h"，即是要求在 CCP1 中有关起始时间的监控信息需共享给干法冷藏 CCP2。为此，设计了如下规则。

Rule－4（数据共享规则）：如果有实例 CCP1、CCP2，且在生食牡蛎业务流程中，CCP2 是 CCP1 之后的实例，监控措施 CM 对实例 CCP1 的关键限值 CL 进行监控，且由监控对象信息载体 Proof 进行证明，那么在 CCP1 中需将关键限值 CL 向下一步传递。该规则描述为

Differentfrom(？CCP1,？CCP2),Next_CCP(？CCP1,？CCP2),Proof_from_CCP(？Proof,？CCP1),Monitored_by(？CL,？CM),CL_proved_by(？CL,？Proof)→CCP_deliver_CL(？CCP1,？CL)

其他，诸如"冷藏库温度不超过 7.2℃的时间不大于 2 h"，"产品从干法冷藏库移到牡蛎肉储藏间的时间不得超过 3 h"等也可对应此规则，在此不再赘述。

（3）纠偏类规则

这类规则与各 CCP 中与温度相关的 CL 纠偏记录密切相关。比如，针对表 1 中干法冷藏 CCP 下的关键限值："冷藏库温度不超过 7.2℃的时间不大于 2 h"，牡蛎肉储存 CCP 下的关键限值："冷藏库温度超过 7.2℃的时间不大于 2 h"，即需要严密监控冷藏库温度以便及时纠偏，并作出记录。为此，设计了如下规则。

Rule－5（纠偏记录规则）：如果某 CCP 有某显著危害 HA，各显著危害有某关键限值 CL，监控措施 CM 对 CL 进行监控，监控措施 CM 由记录 RE 进行证明，若有误差则有纠偏措施 CA，那么 CA 由记录 RE 进行证明，并记录其中。该规则描述为

Has_HA_risk(？CCP,？HA),Has_CL(？HA,？CL),Monitor_CL(？CM,？CL),CM_proved_by(？CM,？RE),Has_CA(？CM,？CA)→CA_proved_by(？CA,？RE)

同时设计了在各 CCP 中与温度相关的纠偏验证的规则。

Rule－6（纠偏验证规则）：如果某 CCP 有某关键限值 CL，CL 由监控措施 CM 进行监控，并且 CM 由监控记录进行证明，如果发现不符合关键限值的要求，产生纠偏 CA，并审查纠偏措施，则该纠偏措施会产生相关的验证信息 VE。该规则描述为

Has_CL(？CCP,？CL),Monitor_CL(？CM,？CL),CM_proved_by(？CM,？RE),Has_CA(？CM,？CA)→CA_generate_VE(？CA,？VE)

2.4　知识推理层

知识推理层核心是实现 HACCP 规则的推理，继续丰富 HACCP 知识库的知识。推理系统的概念逻辑可抽象为图 3，它由 HACCP 的基础知识库再加一个 HACCP 知识推理机组成[30]。

HACCP 的基础知识库包括事实集合和规则集合。HACCP 知识推理机由模式匹配、规则选择和规则执行 3 个组件构成。推理机的执行流程为：首先对输入的命题从语法层面作模式分析，匹配的模式进入规则选择环节，可以从 HACCP 基础知识库中去选择匹配度最高的规则，接下来执行该规则，执行后得到的结论进一步去丰富原始的事实集合。

结合实例，部分推理过程如图 4 所示。图中由

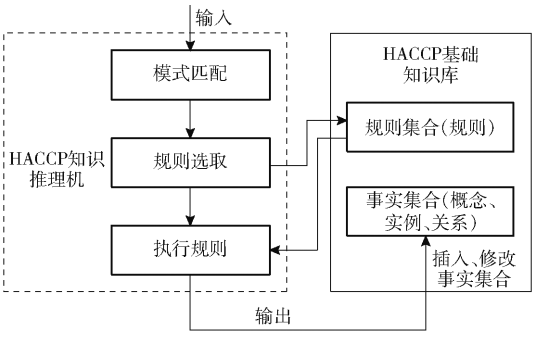

图 3 规则推理执行流程

Fig. 3 Rule reasoning execution process

6 个圆角矩形分割出 6 个不同规则的条件实例关系和部分推理结果,其中“$\text{Monitored_by}^- \equiv \text{Monitor_CL}$”、“$\text{Proof_from_step}^- \equiv \text{CCP_generate_proof}$”展现的是部分本体推理内容。

在“活牡蛎接收”中执行规则 Rule－2,CCP1 的一个显著危害点在于“致病菌生长”,为预防该危害的发生,“活牡蛎捕捞至冷藏的时间关键限值”规定该时间差小于 24 h,由“捕捞时间监控”和“移到冷藏库的时间监控”两个监控内容对该关键限值进行监控,记录监控内容,若证明其差值未超出时间限

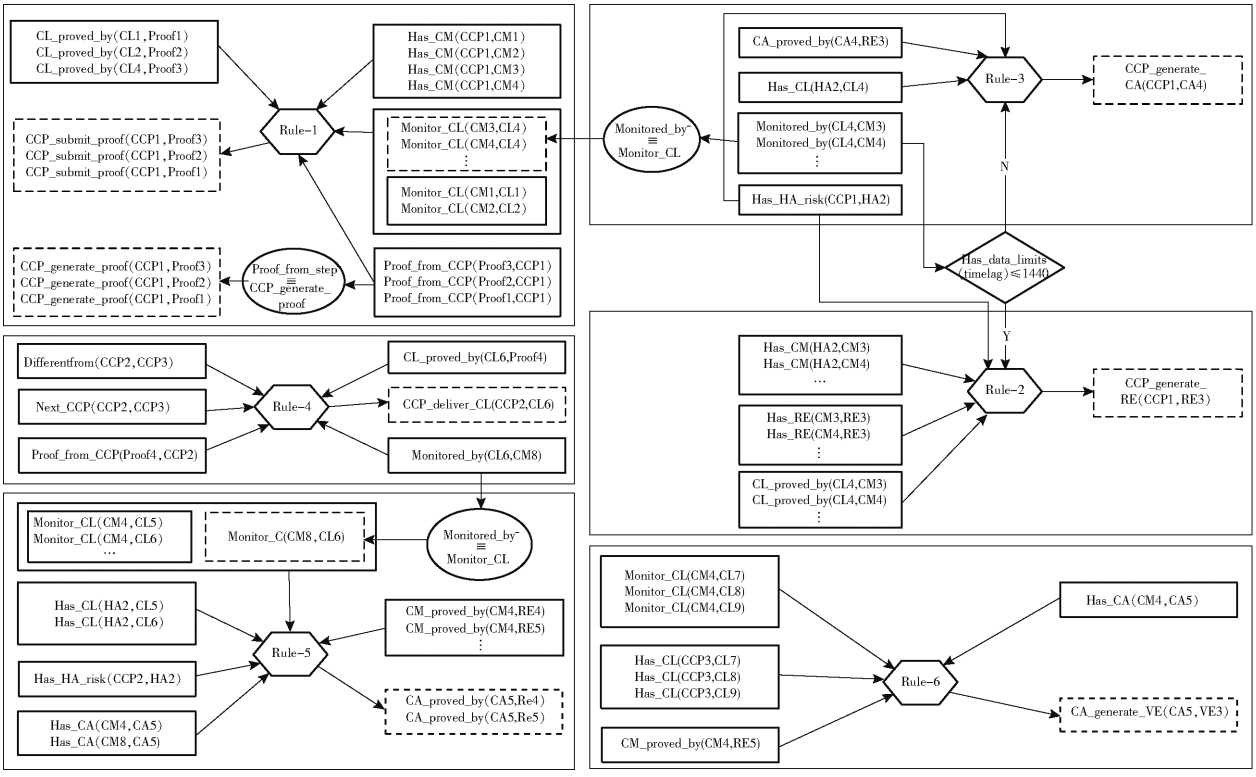

图 4 实例的部分推理过程示意图

Fig. 4 Illustration of partial reasoning process

制,该批牡蛎符合要求,则推出结论:“接收记录”,并在“活牡蛎接收”中产生该记录,形成 CCP1 中的一条实例。

规则 Rule－3 中推理条件与规则 Rule－2 类似,区别在于规则 Rule－3 推理条件中“活牡蛎捕捞至冷藏时间关键限值”不符合要求,则该规则推出的是在 CCP1 中产生“捕捞至冷藏时间纠偏措施”,拒收超出时间限制的牡蛎。图中菱形框内容并没有在本体编辑工具中实现,还需辅以外部应用来实现。

其他规则相关的推理过程与上述推理流程类似。

3 实验

将 2.2 节中通过 HACCP 计划表抽象出的概念、关系和实例,借助本体建模工具 Protégé 进行本体构建,实现概念关系建模以及规则建模。

在 Protégé 中通过 Ontograf 得到的图形化关系结构如图 5 所示。CCP 概念和 Step 概念在具体实现中设置为两个等价概念。“OWL:Thing”代表定义的所有概念都是它的子概念。实线代表本体中的基本关系,虚线代表本体中的自定义关系,相同颜色的线条代表同一种关系。以“CL”和“CM”为例,关键限值被监控内容监控,同时监控内容也监控关键限值,所以图中两个概念之间有两条自定义关系。概念具象化出的实例之间根据语义设置它们之间的关系,所以实例既存在自定义的关系,又存在基本关系。概念与概念,概念与实例之间通过 2.3 节所述关系联系在一起,这些联系是规则推理的基础。

在概念、关系建立的本体基础上,结合 SWRL 表达的规则,借助 HermiT 推理机进行本体推理和规

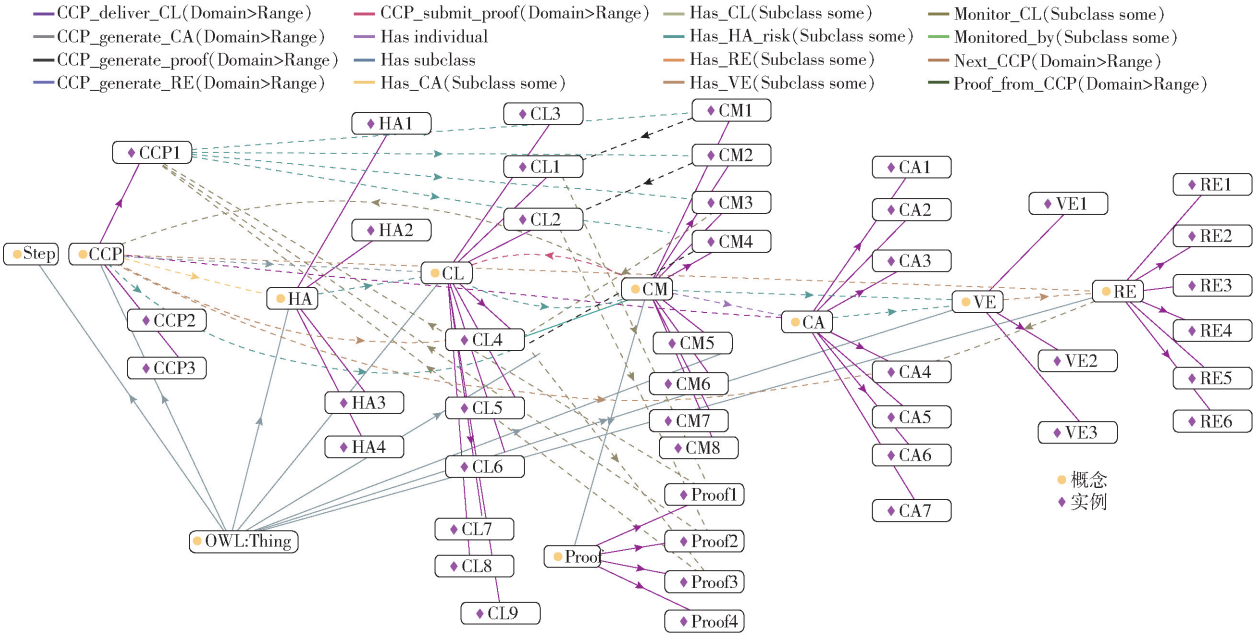

图 5　关系结构图

Fig. 5　Relationship structure diagram

则推理。以活牡蛎接收为例，部分推理结果及其分析如图 6 所示，其中推理①、②、③、④为本体推理结果，对应(1)、(2)、(3)、(4)推理过程，推理⑤、⑥、⑦为规则推理结果，对应(5)、(6)、(7)推理过程。

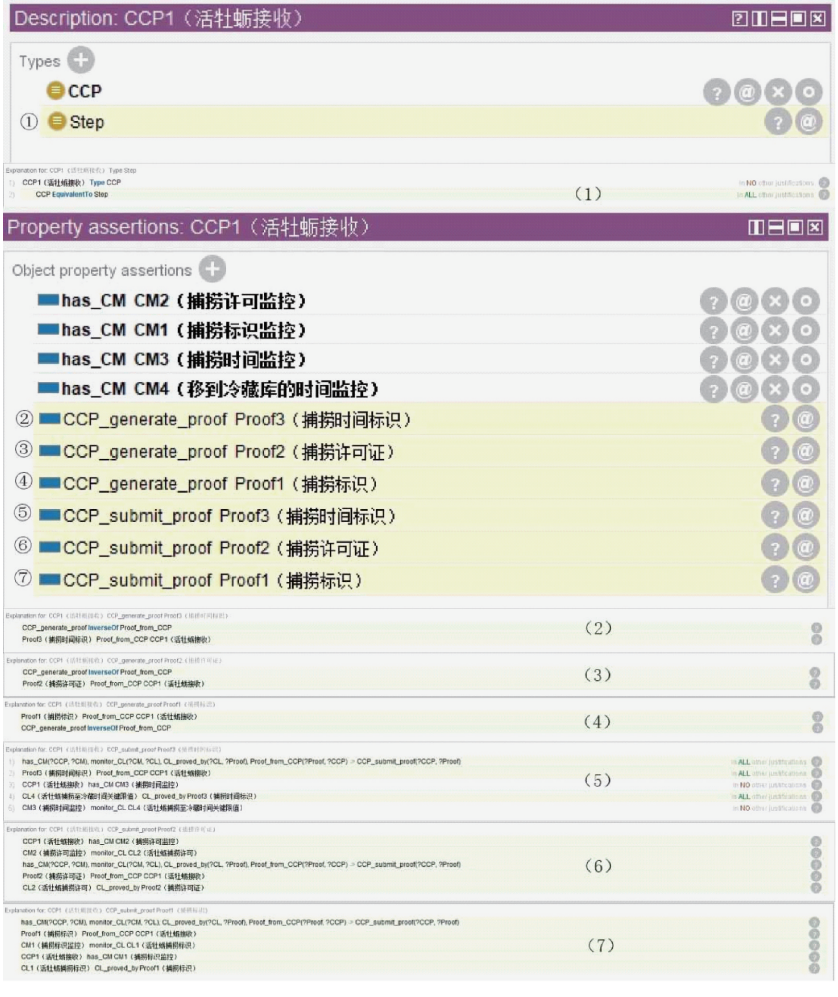

图 6　推理结果及分析

Fig. 6　Inference results and analysis

推理⑤、⑥、⑦是由规则推理得到的知识,根据规则 Rule－1,在“活牡蛎接收”中,由“捕捞标识监控”监控“活牡蛎捕捞标识”关键限值,在监控过程中产生“捕捞标识”证明关键限值符合要求,则推出在 CCP1 中要提交监测信息以供后续 CCP 验证该批牡蛎符合要求。在规则推理过程中,包含部分由约束条件得到的本体推理结果。约束条件 Proof_from_step⁻ ≡CCP_ generate_proof,得到推理②、③、④,即捕捞标识、捕捞许可证、捕捞时间标识等监测信息在 CCP1 中产生。因为“活牡蛎接收”为 CCP 的一个实例,CCP 中存在约束条件“Equivalent to”Step,则得到推理①,即活牡蛎接收也是业务流程中的一个实例。Step 这一等价实例的存在是为 HACCP 计划中关键控制点的动态调整预留的。

4 结论

(1)结合生食牡蛎 HACCP 质量体系,提取领域知识,保证了提取到影响质量安全的关键监控知识,以及 HACCP 原理知识,奠定了 HACCP 计划自动化应用的知识基础,也为可信溯源提供业务知识保证。

(2)结合生食牡蛎 HACCP 质量体系标准,设计规则,在增强语义描述能力的同时,实现了知识共享,使时间等相关信息在不同业务流程之间有效传递,从语义层面保障了业务约束的可控性。

(3)应用本体建模工具 Protégé 实现了本体构建,完成了 HACCP 计划的知识表达,借助 HermiT 推理机实现了知识推理,充实了 HACCP 基础知识库。

(4)生食牡蛎 HACCP 语义建模层次架构以及 KRM－HACCP 模型已完全具备知识描述能力、知识共享能力、知识语义推理能力以及知识发现能力。同时,该模型可以更系统、更完整地理解和表达 HACCP 计划语义。

参 考 文 献

[1] 张雷蕾,滕官宏伟,朱诚. 便携式水产品多品质参数拉曼检测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):478－483.
ZHANG Leilei, TENG Guanhongwei, ZHU Cheng. Design and experiment of portable multi-quality parameter Raman testing device for aquatic products[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 2):478－483. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 2020s259&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. S2. 059. (in Chinese)

[2] LIU F,RHIM H,PARK K,et al. HACCP certification in food industry: trade-offs in product safety and firm performance[J]. International Journal of Production Economics,2021, 231: 107838.

[3] 孙红,李松,李民赞,等. 农业信息成像感知与深度学习应用研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):1－17.
SUN Hong,LI Song,LI Minzan,et al. Research progress of image sensing and deep learning in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020, 51(5):1－17. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20200501&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. 05. 001. (in Chinese)

[4] 傅泽田,邢少华,张小栓. 食品质量安全可追溯关键技术发展研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):144－153.
FU Zetian, XING Shaohua, ZHANG Xiaoshuan. Research on key technology development of food quality and safety traceability [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7):144－153. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20130725&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 07. 025. (in Chinese)

[5] 刘寿春,赵春江,杨信廷,等. 基于微生物危害的冷却猪肉加工过程关键控制点分析与控制[J]. 食品科学,2013,34(1):285－289.
LIU Shouchun, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting,et al. Analysis and control of critical control points in chilled pork processing based on microbial hazard[J]. Food Science,2013,34(1):285－289. (in Chinese)

[6] 赵晓芳,王贵禧,梁丽松,等. 鲜桃采后商品化处理及冷链运输过程对果品品质的影响及控制[J]. 食品科学,2010,31(16):278－281.
ZHAO Xiaofang, WANG Guixi, LIANG Lisong,et al. Effects of post-harvest commercial treatment and cold chain transportation on fruit quality and control[J]. Food Science,2010,31(16):278－281. (in Chinese)

[7] ASADUZZAMAN M. The implementation of hazard analysis critical control point (HACCP) plan for chicken nugget plant[J]. Asian Food Science Journal, 2021,20(5): 11－24.

[8] 王开义,徐红敏,赵春江,等. 优化支持向量机在鲜切生菜加工 HACCP 分类中的应用[J]. 农业工程学报,2009,25(11):219－221.
WANG Kaiyi, XU Hongmin, ZHAO Chunjiang,et al. Application of optimized support vector machine in HACCP classification of fresh lettuce processing[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(11):219－221. (in Chinese)

[9] 赵春江,王开义,喻钢,等. 基于 SVM 快速增量算法的 HACCP 控制点分类[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):260－262.
ZHAO Chunjiang, WANG Kaiyi, YU Gang, et al. HACCP control point classification based on SVM fast increment algorithm

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(Supp.):260 - 262. (in Chinese)
[10] 胡金有,王靖杰,朱志强,等.冷链物联网监测数据质量评估与优化研究进展分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(8):1 - 14.
HU Jinyou, WANG Jingjie, ZHU Zhiqiang, et al. Analysis of data quality evaluation and optimization in IoT in cold chain [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):1 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190801&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.001. (in Chinese)
[11] IFTEKHAR A,CUI X. Blockchain-based traceability system that ensures food safety measures to protect consumer safety and COVID - 19 free supply chains[J]. Foods, 2021, 10(6): 1289.
[12] REJEB A. Halal meat supply chain traceability based on HACCP, blockchain and internet of things[J]. Acta Technica Jaurinensis, 2018, 11(4):218 - 247.
[13] 葛艳,黄朝良,陈明,等.基于区块链的 HACCP 质量溯源模型与系统实现[J/OL].农业机械学报,2021,52(6):369 - 375.
GE Yan, HUANG Chaoliang, CHEN Ming, et al. HACCP quality traceability model and system implementation based on blockchain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):369 - 375. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210639&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.039. (in Chinese)
[14] 牟向伟,陈燕,曹妍.农产品冷链 HACCP 管理体系知识建模与推理[J].农业工程学报,2016,32(2):300 - 308.
MOU Xiangwei, CHEN Yan, CAO Yan. Knowledge modeling and reasoning of agricultural cold chain HACCP management system[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(2):300 - 308. (in Chinese)
[15] 朱麟,张友华,李绍稳,等. 一个基于本体的 HACCP 体系知识服务系统[C]// 2011 年智能计算与工业应用国际会议论文集.智能信息技术应用学会,2011.
[16] CASTELLANO-ESCUDER P,GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ R,WISHART D S,et al. FOBI: an ontology to represent food intake data and associate it with metabolomic data[J]. The Journal of Biological Databases and Curation,2020,2020:baaa033.
[17] GB/T 19838—2005　水产品危害分析与关键控制点(HACCP)体系及其应用指南[S].2005.
[18] LIN Jinjiao, ZHAO Yanze, HUANG Weiyuan, et al. Domain knowledge graph-based research progress of knowledge representation[J]. Neural Computing and Applications,2021,33(2): 681 - 690.
[19] 刘宏新,李金龙,郭丽峰,等.联合收获机知识组织与知识库系统研究[J/OL].农业机械学报,2021,52(2):381 - 393.
LIU Hongxin,LI Jinlong,GUO Lifeng,et al. Knowledge organization and knowledge base system of combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):381 - 393. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210238&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.038. (in Chinese)
[20] VITA R,ZHENG J,JACKSON R,et al. Standardization of assay representation in the ontology for biomedical investigations [J]. The Journal of Biological Databases and Curation,2021,2021: baab040.
[21] KHADIR A C,ALIANE H,GUESSOUM A. Ontology learning: grand tourand challenges[J]. Computer Science Review,2021, 39: 100339.
[22] 赵宇飞,黄美发,王志越.公差与配合选择方法的本体化研究[J].机械设计与制造,2021(6):95 - 100.
ZHAO Yufei, HUANG Meifa, WANG Zhiyue. Research on ontology of tolerance and fit selection method[J]. Machinery Design & Manufacture,2021(6):95 - 100. (in Chinese)
[23] HAJJAMY O E,KHALLOUKI H,ALAOUI L,et al. Semantic integration of traditional and heterogeneous data sources (UML, XML and RDB) in OWL2 triplestore[J]. International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies,2021,13(1 - 2): 36 - 58.
[24] VAN WOENSEL W, ABIDI S S R. Benchmarking semantic reasoning on mobile platforms: towards optimization using OWL2 RL[J]. Semantic Web,2018,10(4): 637 - 663.
[25] 李洇洇,田国会,路飞,等.面向服务机器人的物品知识自主构建方法[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(2): 395 - 401.
LI Cici, TIAN Guohui, LU Fei, et al. Autonomous construction of object knowledge for service-oriented robot[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2020,50(2):395 - 401. (in Chinese)
[26] GONZÁLEZ E, PIÑEIRO J D. An approach based on the ifcOWL ontology to support indoor navigation[J]. Egyptian Informatics Journal, 2021, 22(1): 1 - 13.
[27] DEVI R, MEHROTRA D, ZGHAL H B, et al. SWRL reasoning on ontology-based clinical dengue knowledge base[J]. International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies, 2020, 14(1): 39 - 53.
[28] XUE X,ZHANG J,YANG C. An ontology-supported inquiry learning technique[J]. Journal of Network Intelligence,2021, 6(1):16 - 28.
[29] 高文文,白中科.基于推理条件和规则的废弃露天矿坑再利用方式选择[J].农业工程学报,2018,34(11):253 - 260.
GAO Wenwen, BAI Zhongke. Selection of reuse mode of abandoned open pit based on reasoning conditions and rules[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):253 - 260. (in Chinese)
[30] 陈延雪,杨长春,葛天一,等.基于知识推理的医疗应急响应机制研究[J/OL].小型微型计算机系统, http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1106.TP.20210428.1742.023.html.