

面向电化学加工领域本体构建的研究

季 峰

南通大学, 杏林学院, 江苏 南通

收稿日期: 2021年11月16日; 录用日期: 2021年12月13日; 发布日期: 2021年12月15日

摘 要

电化学加工是特种加工领域关注的技术, 本文为促进加工领域知识的获取、重用和共享, 构建了面向电化学加工领域的本体模型EMO (Electrochemical Machining Ontology)。首先, 在领域专家的指导下, 本文构建了电化学加工上位本体模型EMSUMO; 然后, 从加工方法、加工设备、加工组织、特型加工、电流效率、加工速度、加工精度、加工质量等方面建立了EMO的概念、关系、函数、公理和实例的五元组; 最后以“深小孔电解加工”为例基于EMO进行了知识表示, 采用OntoQA方法对EMO本体模型进行评价, 评价指标计算结果表明EMO是有效的。

关键词

电化学, 加工, 领域本体, 本体模型, 知识表示

Research on Domain Ontology Construction Orienting Electrochemical Machining

Feng Ji

Xinglin College, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Nov. 16th, 2021; accepted: Dec. 13th, 2021; published: Dec. 15th, 2021

Abstract

Electrochemical machining is a hot technology in the field of special machining. In order to promote the acquisition, reuse and sharing of knowledge in the field of machining, this paper constructs an ontology model EMO (Electrochemical Machining Ontology) orienting the field of electrochemical machining. Firstly, under the guidance of domain experts, the upper ontology model EMSUMO of electrochemical machining is constructed; then, the concept, relationship, function, axiom and example of EMO quintet are established from the aspects of machining method, machining equipment, machining organization, special machining, current efficiency, machining

speed, machining accuracy and machining quality; finally, taking “electrochemical machining of a deep hole” as an example, the knowledge representation is carried out based on EMO, and the ontology model of EMO is evaluated by OntoQA method. The calculation results of evaluation indexes show that EMO is effective.

Keywords

Electrochemistry, Machining, Domain Ontology, Ontology Model, Knowledge Representation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电化学加工在精密零件领域的应用非常广泛，像航空叶片、枪管膛线、微孔、微坑等特殊工件的加工，使用它可以打破传统加工的瓶颈，目前它已经成为全球特种加工中重点研究的加工模式。在碳中和的背景下，节约能源成为各个行业的热门话题，在电化学加工中降低能源消耗和成本也是研究学者探索的领域，电化学领域本体的构建可以为电化学知识的管理、推理和发现提供框架，为电化学加工应用领域的科研和工程人员构建多源信息组织架构，便于数据、知识和模型交换，从而缩短实验周期，加快加工产品的迭代，同时节约加工过程中耗费的能源和成本。本文开创性地提出电化学加工领域的概念和概念之间的关系，对创建可相互交换和可重用知识模型库，具有十分重要的意义。

2. 研究现状

目前，各行各业都在利用本体构建领域内的知识结构，进行合理的领域知识表示，进一步推动各学科之间的知识融合与复用。在 CNKI 数据库中以“本体构建”“领域本体构建”“本体”为关键字进行主题搜索，从 2019 年至 2021 年发文数量分别为 778、458 和 16737，研究的主题覆盖工业、医学、影像学、建筑学、生物学、工艺美术学、教育学等。

文献[1] [2]基于本体构建了关于新冠肺炎领域知识库，很好的表达了新冠肺炎领域知识，为疫情防控提供知识共享；文献[3] [4] [5] [6]在中医药领域进行了基于本体的知识构建和知识发现，秦璐等人构建了化学药物的本体模型，为新药的发现奠定了知识基础；文献[7] [8] [9]将本体应用于安全生产领域，何苗苗等人在列车运行调整领域，构建了包括知识本体、规则库的列车运行调整的知识库，葛天一在故障诊断领域进行了研究；文献[10] [11]在建筑领域进行了本体应用，杨超用本体进行建模并建立了徽派建筑知识图谱，暴颖慧基于本体进行了建筑节能方法的合规检查，取得很好的成效；文献[12] [13] [14]在教育领域取得进展，胡茹艳进行了化学知识构建，马刚等构建了体育领域本体，杨夏基于本体构建了在线学习模型。文献[15] [16] [17]在自然领域深入研究，在本体的半自动化构建取得了新的进展，任妮等人主要攻克农业领域，刘博等人在大气污染领域进行了半自动化构建及推理研究；文献[18] [19]在军事文化领域，构建了知识库，为知识复用提供基础。

综上文献分析，本体构建的主要方法为：手工构建、复用已有本体以及自动构建本体，其中前两种方法最为常用，领域本体依赖手工构建，需要耗费大量的人力。但综合来看，三种构建方法都各自存在着不同程度的弊端。本文采用复用本体构建法，基于上位本体 SUMO 进行了电化学领域本体的建设和扩展，目的为特种加工领域提供技术交流的语义知识基础，达到知识共享和重用，从而推动电化学加工的

深入推广应用。

3. 电化学加工本体建模

3.1. 模型构建总体框架

本文建立了面向电化学加工领域本体构建的框架，如图 1 所示，构建的框架遵照自底向上的工程思想，便于研究人员和领域专家的多层次化的交流，有利于提高所构建领域本体的准确性和合理性。

确定本体的应用领域，本文以《电化学加工技术》、《电解加工原理》和 CNKI 中相关关键词的文献为背景，构建本体的目的是促进电化学加工和智能信息领域的融合，辅助科研人员扩大电化学加工的应用场景，缩短实验周期，减少实验耗费的成本，帮助其他机械加工领域的人员能更好的利用电化学开发出新的零件产品。

构建电化学加工上位本体模型。基于电化学领域的专家为指导，对加工领域的已有本体和通用本体进行扩展，并构建出可共享重用的上位本体。定义电化学加工领域的知识，构建领域本体中的概念、关系、属性、公理和实例。从用本体描述语言对本体进行构建，并采用合适的评价方法进行评价，在领域专家的指导下进一步修正，建立电化学加工的领域知识库，达到知识共享和重用的目的从而推动电化学加工的技术进步和推广应用。

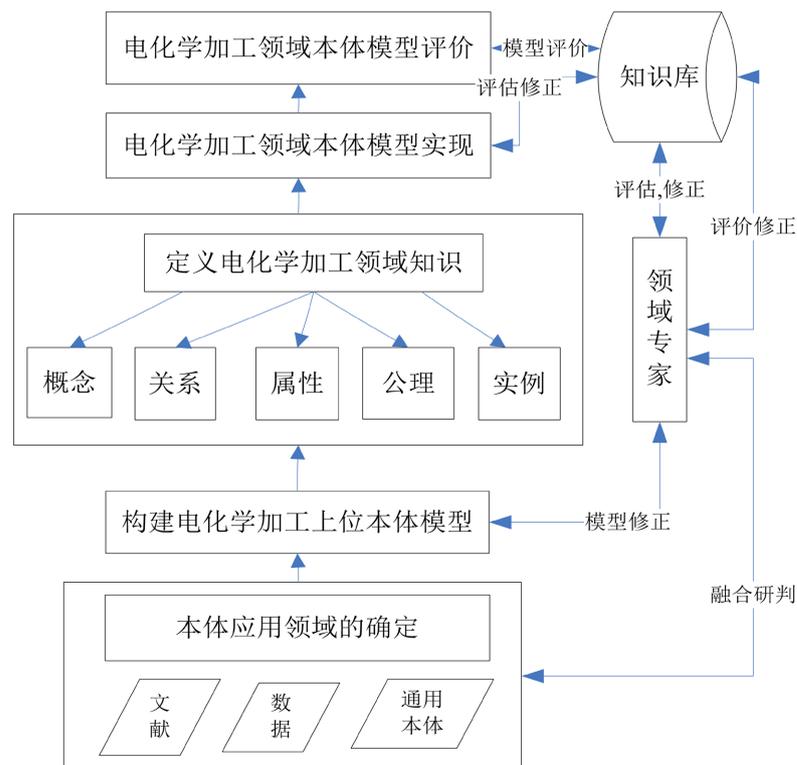


Figure 1. Construction framework of electrochemical machining domain ontology
图 1. 电化学加工领域本体的构建框架

3.2. 电化学加工上位本体的构建

SUMO (Suggested Upper Merged Ontology)是由 IEEE SUO 研究组创建的标准通用本体，可以准确的描述事物的知识结构，定义事物概念、属性及概念之间的关系，是一种基础性的概念模型。SUMO 的实

体类(Entity)包括: 物理实体(Physical)和抽象实体(Abstract)。

物理实体(Physical)。用来描述客观世界中占据时空的事物。Physical 有两个子类: Object 和 Process 类, Object 类包括 Self Connected Object、Region、Collection 和 Agent 类。抽象实体(Abstract)用来描述非客观世界中的事物。它包括七子类: Set or class、Relation、Quantity (Number、Physical Quantity)、Attribute 和 Proposition。

本研究面向电化学加工, 以 SUMO 本体为基础建立相关概念和关系, 在领域专家的评估下构建了电化学加工领域的上位本体 EMSUMO 的主要概念关系, 具体如下:

1) 过程(Process)。过程是表示电化学加工发生、加工材料发展、溶液和零件成型变化的过程。过程通过 has activity 属性与 Agent 进行交互。

2) 资源(Resource)。资源继承 Physical 类的 Substance 子类, 表示加工过程中所使用到的实体, 除了包括电解液、电铸液、工具和工件等常规资源外, 还包括加工的数据资源。加工主体用属性 Uses 与资源进行交互。

3) 智能体(Agent)。Agent 表示加工过程中的实施主体, 包括组织(Organization)、人员(personnel)等主体构成要素。

4) 加工情景(Processing scenario)。描述特定零件在电化学加工中的方法以及它们各自的特征, 过程 Process 通过属性 in Production 来关联交互。

3.3. 电化学加工本体建模

根据文献[20] [21]中的本体建模元语, 本文中把电化学加工本体(Electrochemical Machining Ontology, EMO)定义成一个五元组。

定义 1: EMO_Ontology:=<EMO_Concepts,EMO_Relations,EMO_Functions,EMO_Axioms,EMO_Instances>。元组中, EMO_Concepts 表示电化学加工本体模型中的实体概念; EMO_Relations 表示电化学加工本体中两个实体概念之间的二元关系; EMO_Functions 表示电化学加工本体中的函数定义; EMO_Axioms 表示电化学加工本体中的客观为真的公理; EMO_Instances 表示电化学加工本体中的加工实例。

定义 2: EMO_Concepts={EMO_C}。电化学领域本体中的概念以上位本体 EMSUMO 的 Process, Resource, Agent, Processing scenario 等元素为基础进行定义和扩充, 部分概念如表 1 所示, 核心概念主要如下:

1) 加工方法(EMO_Processing method)。它是上位本体 Process 的子类, 表示电化学中的多种加工方法, 如电解加工、电铸加工和电刷镀加工等。

2) 加工设备(EMO_Processing equipment)。指在电化学加工中需要的软硬资源, 它是上位本体 Resource 的子类, 如电解机床、电解液系统、电解加工电源、控制系统和夹具等。

3) 加工组织(EMO_Processing organization)。指在电化学加工中实施的主体, 是上位本体 Agent 的子类。

4) 特型加工(EMO_Special processing)。指不同成型零件的加工场景, 它是上位本体 Processing scenario 的子类, 如叶片电解加工、枪炮管膛线加工、整体叶轮加工小间隙加工和电铸铜管等。

5) 电流效率(EMO_current efficiency)。指电化学加工中实际耗费在工件成型上的电量与通过所在电极总电量的比值。如电解加工中, 实际溶解阳极金属所占的耗电量对通过阳极总电量的利用率。它是 Processing scenario 的子类。

6) 加工速度(EMO_Processing speed)。指工件在电化学加工中成型的速度。如电解加工中, 指阳极金属工件被加工表面法线方向上的溶解速度。它是 Processing scenario 的子类。

7) 加工精度(EMO_Processing accuracy)。指工件加工实际成型和目标成型之间的差值。如电解加工中的复制精度和重复精度。

8) 溶液(EMO_solution)。指电化学加工过程中的溶液,如电解液和电铸液等,它是 Resource 的子类。

9) 加工质量(EMO_Processing quality)。指工件加工成型的粗糙度、硬度、拉升强度等,它是 Processing scenario 的子类。

10) 参数(EMO_Processing parameters)。指电化学加工中电解液的配比、电流强度、电压、水压等,它是上位本体 Quantity 的子类。

Table 1. Partial EMO_Concepts details

表 1. 部分 EMO_Concepts 明细

一级概念	二级概念	三级概念	四级概念
		脉冲电流电解加工	低频宽脉冲、高频窄脉冲
		微细电解加工	微细、复合
	电解加工	电解擦削	脉冲电流电解擦削
		小间隙电解加工	
加工方法		数控展成电解加工	旋转阴极展成、闭式整体构件异性腔数控
	复合电解加工	电解磨削、电解磨料光整、 超声 - 电解复合、电解 - 电火花复合	
	电铸加工	-	-
	电刷镀加工	-	-
加工设备	电解加工机床	-	-
	电解液系统	-	-
	电解加工控制系统	-	-
特型加工	模具型面加工	-	-
	叶片型面加工	-	-
	深小孔、孔型加工	-	-
	整体叶轮加工	等截面叶片整体叶轮、 变截面扭曲叶片整体叶轮	-
	去毛刺	-	-
溶液	电解液	-	-
	电铸液	-	-

定义 3: EMO_Relations。定义 $EMO_Relations = \{EMO_R\}$ 。

本文在电化学加工领域相关概念建立的基础上,构建了概念之间的二元关系。定义 $EMO_R = \{R(Conceptsi, Conceptsj) | Conceptsi, Conceptsj \in EMO_C\}$ 。具体如表 2 所示。

Table 2. EMO_Relations
表 2. 电化学加工本体关系

关系名称	说明
is-a	子类继承父类，枪管膛线电解加工与电解加工之间的继承关系
is part of	整体与部分，描述一个概念由几个概念组成，如电解液系统由主泵、电解液槽、热交换器、电解液净化装置和电解产生物处理装置等五个概念组成
is attribute of	属性，表示概念之间的属性关系，如得电子是若干个金属离子的属性
is instance of	实例，领域本体中的叶子结点型概念，如阳离子、阴离子等
has process	描述电化学加工方法与零件成型过程之间的关系
has method	描述电化学加工方法与零件成型工艺之间的关系
has advantages	描述电化学加工方法与零件成型优势之间的关系
has disadvantages	描述电化学加工方法与零件成型劣势之间的关系
has liquor	描述电化学加工方法与电解液之间的关系
uses	描述加工组织实体与电化学加工方法之间的关系
affects	描述零件成型和加工方法、电解液、工艺参数之间的影响关系
constraint	描述概念之间的约束关系，如电解液成分之间的配比约束关系
compose	描述概念之间的包含关系，如电解液里有中性、酸性和碱性等三类
test	描述加工主体对零件成型结果的评估关系，如零件的粗糙度检测
increase/reduce	描述零件成型和加工工艺之间的关系，如电铸加工铜管和电流、电压等概念之间的关系

定义 4: EMO_Functions。定义电化学加工函数是一种能够映射加工概念之间的特殊关系。EMO_Functions 中的元素 EMO_C_i 由它的直接前驱 EMO_C_{i-1} 推导出，定义为：

$$\text{EMO_Functions} := \{ \text{EMO_C}_{i-1} \rightarrow \text{EMO_C}_i, \text{EMO_C}_i \rightarrow \text{EMO_C}_{i+1} \mid \text{EMO_C}_i \in \text{EMO_Concepts} \cup \text{EMO_R} \}。$$
当一个零件加工初始化，根据成型目标，可以确定加工方式。

$$(\text{Parts manufacturing}(a) \cap \text{Forming target}(a) \cap \text{Attribute}(a)) \rightarrow \text{Processing}(a) \cap \text{Resource}(a)。$$

定义 5: EMO_Axioms。公理是通过电化学领域专家和知识库构建出概念之间的公认为真的声明，是本体模型实现语义推理的基础。文中定义 $\text{EMO_Axioms} := \{ \text{EMO_A} \}$ ， $\text{EMO_A} := \{ \text{EMO_A_ER} \cup \text{EMO_A_CI} \cup \text{EMO_A_E} \cup \text{EMO_A_I} \}$ ，主要公理如下：

定义 5.1: EMO_A_ER。表示等价关系公理，表明了 EMO 中概念之间的等价关系，如加工类 \equiv 制造类。

定义 5.2: EMO_A_CI。表示继承关系公理，表明了 EMO 中概念之间的继承关系，如脉冲电流电解加工 \subset 电解加工。

定义 5.3: EMO_A_E。表示排他约束性公理，表明了 EMO 中概念之间相互排斥的关系，如电铸加工 $\subset \neg$ 电解加工。

定义 5.4: EMO_A_I。表示实例性公理，用来表明实例和类之间的关系，如脉冲直流电源是电源的实例化。

定义 6: EMO_Instances。表示电化学加工本体模型中概念的实例表示，形式化表示为 EMO_Instances：

={EMO_Instances|EMO_Concept(Instances),EMO_R(Instances) ∈ EMO_Concepts ∪ EMO_R}。例如，钛合金叶片电解加工就是概念“电解加工”的一个实例，即 EM(钛合金叶片电解加工)。

4. EMO 本体模型的应用

EMO 为电化学加工领域构建了一个知识结构体系，描述了工件在电化学加工过程中的概念和关系，在此体系上可以实现电化学加工的知识描述。本文构建了一个深小孔电解加工的概念实例，由于篇幅关系，部分知识片段描述如图 2 所示。

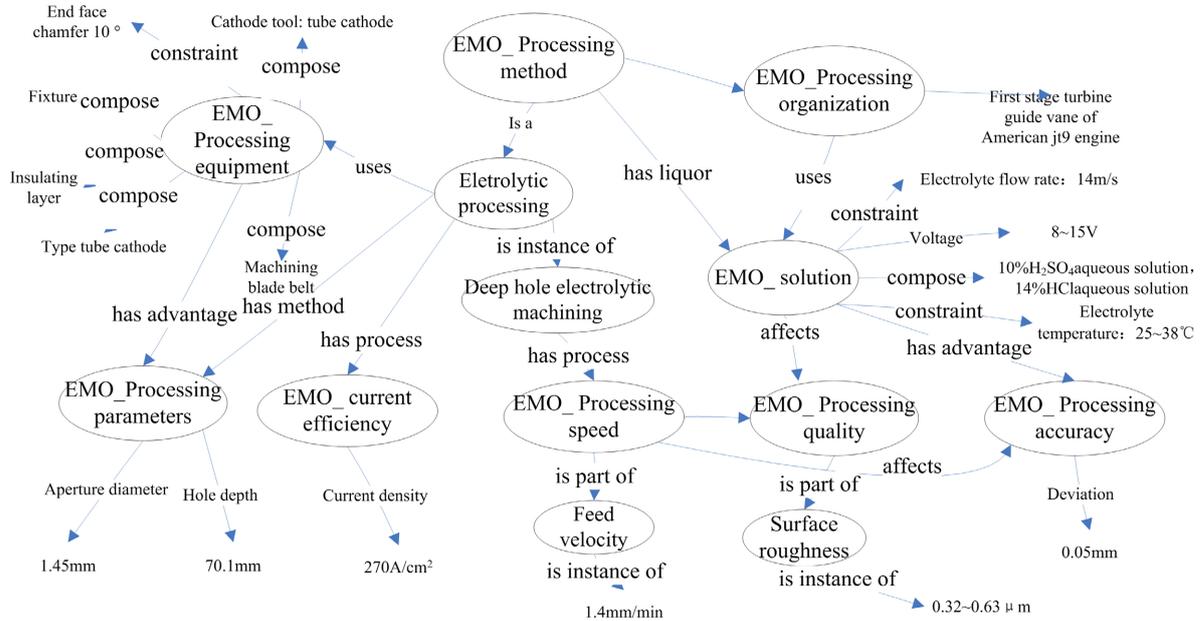


Figure 2. A knowledge fragment of deep hole ECM
图 2. 一个深小孔电解加工知识片段

5. EMO 本体的评价

本文根据文献[22] [23] [24] [25] [26]中采用的 OntoQA 方法对 EMO 本体模型进行评价,OntoQA 方法主要考查本体模型结构中关键词描述的丰富程度,本文从类的丰富度、关系的丰富度、属性的丰富度对 EMO 进行评价,为 EMO 的校正完善提供依据。

1) CRD_EMO, 评价模型中类的丰富度(Class Richness Degree, CRD), 衡量可以实例化的类在知识结构中的比重, N_{IC} 表示具有实例的类数目, N_c 表示本体模型中类的总数目。

$$CRD_EMO = \frac{N_{IC}}{N_c}$$

2) RRD_EMO, 类的关系丰富度(Relationship Richness Degree, RRD), 表示本体模型中父子类继承关系的占比, N_{IFC} 表示具有父子继承关系的数目, N_r 表示本体模型中所有关系的数目。RRD_EMO 占比越小, 说明其他关系形式越丰富, 越能体现本体模型中类之间的多样性。

$$RRD_EMO = \frac{N_{IFC}}{N_r}$$

3) ARD_EMO, 类的平均属性丰富度(Attribute Richness Degree, ARD), 表示本体模型中类的平均属

性占有比值, N_{ATT} 表示本体模型中所有类具有的属性数目。

$$ARD_EMO = \frac{N_{ATT}}{N_C}$$

文中按照上述指标计算的结果及评价等级等描述如表 3 所示。

Table 3. Evaluation results of EMO using OntoQA method

表 3. EMO 采用 OntoQA 方法评价结果

评价指标	计算结果	评价等级	描述
CRD_EMO	0.71	优	本体中 71% 的类得到实例化, 类和概念比较丰富。
RDD_EMO	0.38	优	本体中父子类继承占 38% 其他关系占 62%, 说明本体中关系比较丰富。
ARD_EMO	0.20	良	本体中类的属性平均占有度为 20%, 需要提升属性的定义数目。

6. 总结

本文实现了电化学加工领域的知识表示, 构建了上位本体 EMSUMO, 在领域专家的指导下定义了过程、资源、智能体和加工情景等四个主要的概念。基于此, 对 EMO 进行本体扩展, 定义了加工方法、加工设备、加工组织、特型加工、电流效率、加工速度、加工精度、加工质量、溶液、参数等概念, 以及 is-a、is part of、is attribute of、is instance of、has process、has method、has advantage、has liquor、uses、affects、constraint、compose、test 等概念之间的关系。最后以“一个深小孔电解加工”为例进行了知识表示, 并对构建结果用 OntoQA 方法对 EMO 本体模型进行评价。

本文从构建的 EMSUMO 和 EMO 中得到概念及概念之间的关系在电化学领域属于开创性的工作, 能够促进电化学加工在特种加工中的深度融合, 利用电化学技术提高精密零件的加工精度, 缩短研发周期, 减少开发成本。

然而, 本文的研究在电化学加工领域的知识表示还处于起始阶段, 需要进一步深入, 并在现有的概念和关系的知识结构基础上, 形成可视化友好的知识库, 这样才能便于多行业的知识共享, 真正做到知识复用, 从而推动电化学加工领域的发展。

基金项目

南通市科技计划项目编号为 JCZ18021。

参考文献

- [1] 熊励, 王成文, 王锟. 基于事件本体的疫情知识库构建策略[J]. 图书情报工作, 2021, 65(14): 138-148.
- [2] 肖宇, 郑翔文, 宋伟, 佟凡, 毛逸清, 刘圣, 赵东升. 新冠肺炎领域本体构建及应用[J]. 军事医学, 2021.
- [3] 秦璐, 徐倩, 胡超, 王安莉, 罗爱静. 基于本体的化学药物知识表示模型构建[J]. 智慧健康, 2021, 7(20): 109-114.
- [4] 刘丽红, 贾李蓉, 李凯. 基于本体推理的中西药物相互作用自动发现研究[J]. 中华医学图书情报杂志, 2021, 30(1): 12-16.
- [5] 曹睿杰. 面向中医领域的本体构建与知识发现应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [6] 杨郑子衿, 徐倩, 王安莉, 罗爱静. Protégé 在构建中医药本体中的应用[J]. 医学信息学杂志, 2021, 42(6): 37-42+47.
- [7] 刘聪琳. 基于本体的高支模事故知识建模与推理研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [8] 葛天一. 基于本体的旋转机械故障诊断方法研究[D]: [硕士学位论文]. 常州: 常州大学, 2021.

- [9] 何苗苗, 彭其渊, 鲁工圆, 陈卓. 基于本体的列车运行调整知识库构建研究[J]. 综合运输, 2021, 43(8): 83-89.
- [10] 杨超. 基于本体的徽派建筑知识图谱构建研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- [11] 暴颖慧, 李想, 刘莎. 基于本体的建筑节能设计方案合规检查与评价[J]. 工程管理学报, 2020, 34(6): 37-42.
- [12] 胡茹艳. 初中化学课程本体的构建与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [13] 杨夏. 基于本体知识图谱的在线学习资源推荐模型研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(6): 248-250.
- [14] 马刚, 李红云. 高校体育微领域本体的构建与语义推理[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(4): 56-58.
- [15] 靳广帅. 基于本体的地表覆盖整合方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [16] 任妮, 孙艺伟, 鲍彤, 郭婷. 农业领域本体构建方法研究——以番茄病虫害为例[J]. 情报探索, 2021(4): 51-57.
- [17] 刘博, 张佳慧, 李建强, 李永, 郎建垒. 大气污染领域本体的半自动构建及语义推理[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(3): 246-259.
- [18] 巫斐然, 章牧, 郑天翔. 基于本体论的非遗数字化档案构建——以龙泉青瓷烧制技艺为例[J]. 特区经济, 2021(2): 127-129.
- [19] 刘梦超, 王玉玫, 吴亚非, 臧义华, 梁佳. 基于本体的军事装备知识建模及分析[J]. 计算机与现代化, 2021(1): 76-80.
- [20] 徐蓓蓓, 杨子江, 朱世伟, 等. 基于本体的突发事件舆情知识库建设研究[J]. 图书情报工作, 2021, 65(14): 132-137.
- [21] 杜磊, 许博, 阚媛, 高珊. 基于本体的应急情境知识表示[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(2): 79-83.
- [22] 王芳, 杨京, 徐路路. 面向火灾应急管理的本体构建研究[J]. 情报学报, 2020, 39(9): 914-925.
- [23] Tartir, S. and Arpinar, I.B. (2007) Ontology Evaluation and Ranking Using OntoQA. *International Conference on Semantic Computing (ICSC 2007)*, Irvine, 17-19 September 2007, 185-192. <https://doi.org/10.1109/ICSC.2007.19>
- [24] 贾君枝, 牛雅楠. 本体评估工具的比较分析[J]. 图书情报工作, 2010, 54(6): 87-90.
- [25] Tartir, S., Arpinar, I.B. and Sheth, A.P. (2010) Ontological Evaluation and Validation. In: Poli, R., Healy, M. and Kameas, A., Eds., *Theory and Applications of Ontology: Computer Applications*, Springer, Dordrecht, 115-130. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8847-5_5
- [26] Benítez-Andrades, J.A., García-Rodríguez, I., Benavides, C., et al. (2020) An Ontology-Based Multi-Domain Model in Social Network Analysis: Experimental Validation and Case Study. *Information Sciences*, **540**, 390-413. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.06.008>