

面向作战指挥的武器装备知识图谱本体构建*

刘一博,张海粟,左青云,马琳飞
(国防科技大学信息通信学院,武汉 430014)

摘要:当前,在武器装备知识图谱本体构建的研究上,多是面向武器装备维修管理、武器装备体系建设进行本体构建,面向作战指挥的武器装备本体构建研究相对缺乏。鉴于此,面向作战指挥需求,提出一种基于七步法和 DODAF 相结合的本体构建流程框架,基于该流程框架进行了面向作战指挥的武器装备本体设计,并最终利用 protégé 工具进行了本体构建及展示,为后续面向作战指挥人员的知识库构建及知识应用打下基础。

关键词:作战指挥;武器装备;知识图谱;本体构建;DODAF

中图分类号:TJ01;E920 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1002-0640.2024.05.006

引用格式:刘一博,张海粟,左青云,等.面向作战指挥的武器装备知识图谱本体构建[J].火力与指挥控制,2024,49(5):44-51.

Ontology Construction of Weapon Equipment Knowledge Graph for Combat Command

LIU Yibo, ZHANG Haisu, ZUO Qingyun, MA Linfei

(Information and Communication College, National University of Defense Technology, Wuhan 430014, China)

Abstract: Currently, the research on the ontology construction of weapon equipment knowledge graph is mostly focused on weapon equipment maintenance management and the ontology construction of weapon equipment system construction, while the research on the ontology construction of weapon equipment for combat command is relatively lacking. In view of the above, an ontology construction process framework based on the combination of the seven-step method and DODAF for combat command requirements is proposed. Based on this process framework, the weapon equipment ontology design for combat command is carried out, and the ontology is ultimately constructed and displayed with the protégé tool, the foundation for subsequent knowledge base construction and knowledge application for combat command personnel is laid.

Key words: combat command; weapons and equipment; knowledge graph; ontology construction; DODAF

Citation format: LIU Y B, ZHANG H S, ZUO Q Y, et al. Ontology construction of weapon equipment knowledge graph for battle command[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(5): 44-51.

0 引言

知识图谱概念由谷歌公司于 2012 年提出,相关技术蓬勃发展并在各领域进行了探索应用^[1],其中,武器装备领域知识图谱的构建一直是一个热点研究方向,从具体意义上看,一是能够为武器装备

不同模态数据知识化融合提供解决方案;二是能够为下游基于知识的武器装备数据智能化检索、可视化分析等应用提供支撑;三是当前 ChatGPT 的出现引发人工智能领域的技术革命,其具备巨大潜在军事应用价值,武器装备领域知识图谱构建可为后续领域大模型训练、答案生成及修复提供知识支撑。

收稿日期:2023-04-28

修回日期:2023-05-17

* 基金项目:军内研究生资助项目(JY2022B162)

作者简介:刘一博(1991—),男,河南洛阳人,博士研究生。

本体构建是武器装备领域知识图谱构建的首要环节,为知识图谱构建的后续环节提供范式和标准支撑。苏正炼等提出了一种基于本体的装备故障知识库构建方法,并探索了基于规则的语义推理技术^[2];赵颜利等面向战例数据,构建了战例知识图谱的本体模型,为战例领域图谱构建提供本体支撑^[3];顾丹阳等借鉴开源军事网址编目,提出了一种基于装备本体的知识图谱构建方法^[4];李肖等借鉴《中国人民解放军军语》,领域相关图书等,提出一种自顶向下的武器装备领域知识图谱构建方法^[5]。当前,武器装备领域本体构建多是针对武器装备建设发展和维修保障,而针对面向作战指挥的本体构建研究相对缺乏。鉴于此,本文在分析七步法和美国国防部体系结构框架(department of defense architecture framework, DODAF)^[6]理论的基础上,提出一种面向作战指挥的武器装备知识图谱本体构建方法。

1 本体建模流程框架

1.1 本体构成分析

本体概念最初由哲学领域引入到知识图谱领域^[7],以描述客观世界含义为出发点,定义武器装备领域内的概念、关系。如图 1 所示,包含本体层和数据层两部分。

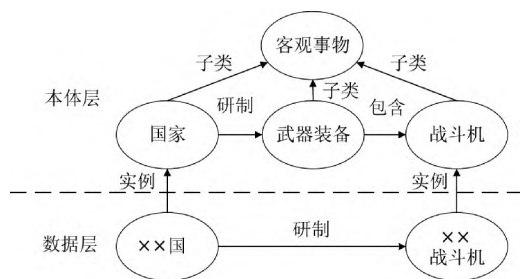


图 1 武器装备知识图谱构成示例

Fig. 1 Example of composition of weapon equipment knowledge graph

本体层由一系列“节点-边-节点”的三元组构成^[8],节点表示本体概念,边表示概念间关系,具体表示如式(1), C 表示 Concept,即概念节点, D 表示 Data properties,即数据属性, O 表示 Object Properties,即对象属性,又称为节点间关系。

$$T=\{C,D,O\} \quad (1)$$

1.2 本体构建方法分析

武器装备本体构建方法如图 2 所示,从两个角度进行分析,一是从构建依据上来看,分为基于数据的自动构建方式和基于人工的分析构建两种^[9],基于数据的自动构建方式又称为本体动态构建^[10],主要通过模板规则、机器学习、深度学习等方法^[11]

从数据源中自动或半自动方式提取出本体三元组^[12],这种做法优点是构建效率高,无需太多专家人力,缺点是构建的本体库准确性无法保障;而基于人工分析的构建一般用于专业度较高的垂直领域,武器装备领域是典型的垂直领域^[13],领域内业务概念复杂且对本体模型准确度要求较高,因一般采取专家人工分析构建的方式。二是从构建流程角度来看,当前国内外多采用本体论工程法,主要包括七步法、骨架法、IDEF5 法、TOVE 法、METHONLOGY 法、九步法等。这些方法各有优缺点,详见文献^[14],从成熟度上来看,依次是七步法>METHONLOGY 法>IDEF5 法>TOVE 法>骨架法>SENSUS 法>KACTUS^[15],因此,本文在流程方法上选择七步法作为方法基础,并针对武器装备领域本体构建特点对其进行适应性修改。

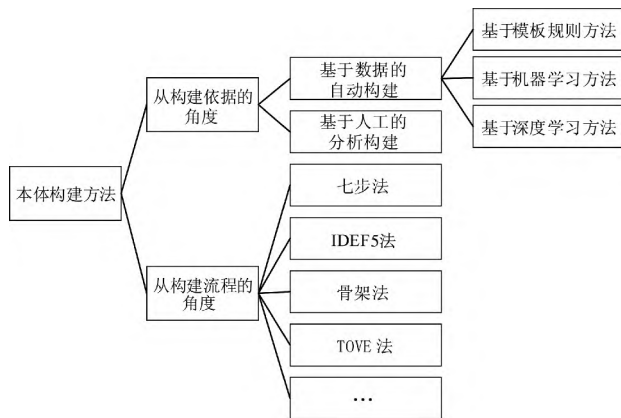


图 2 武器装备本体构建方法

Fig. 2 Construction method of weapon equipment ontology

1.3 基于七步法和 DODAF 相结合的本体构建流程框架

斯坦福大学医学院提出的七步法在众多方法中应用最为广泛,且给出了详细方法细节,7个步骤包括^[16]:1)确定本体范围,即确定本体要应用到的专业领域;2)研究领域内现有本体的复用;3)列举领域中的重要术语;4)定义本体中的类及其等级体系;5)定义类的属性名称;6)定义类的约束条件,即该类的属性取值类型及其范围限制;7)确定最终本体,创建实例。

DODAF 是美国国防部制定的解决军队建设顶层设计问题的一整套体系结构框架^[17],其版本从最初的自动化指挥系统(command control communication computer intelligence surveillance and reconnaissance C4ISR)到当前 DODAF2.02 版本,提出了全视角、数据和信息视角、标准视角、能力视角、作战视角、服务视角、系统视角、项目视角等 8 个视角,每个视角又涵盖多个模型,共 52 个模型^[18],当前已不仅

仅用于指挥系统范畴,而是针对整个军事系统进行了广泛应用,逐渐成为武器装备领域需求描述和建模的标准。

本文提出一种基于七步法和 DODAF 相结合的武器装备本体构建方法, 具体流程框架如图 3 所示, 设计思路如下: 在七步法基础上, 保持原有第一步与最后一步不变, 一是考虑武器装备领域专业度较高, 目前没有公认的面向指挥的本体库模型复用, 因此, 借鉴 DODAF 视角等系列理念及其概念模型, 提出将七步法的第二步“本体复用”更换为“定义知识框架”(图 3 中的步骤 2), 为后续得出更为准确的本体打下基础; 二是在实践过程中, 发现“列举领域术语”与“定义本体类”这两个

步骤拥有较强关联度,为提高建模效率,将原有七步法中的三四步进行合并(图3中的步骤3);三是七步法中的属性在其内涵上包含了对象属性(类之间关系属性)、数据属性(数值型属性)两部分,两部分内容实践时差别明显,区分处理较为合适,因此,将七步法中的五六步按属性分类的角度进行重新划分(图3中的步骤4与步骤5);四是七步法当前缺乏最终的本体检验环节,对其进行了增加(图3中的步骤6);五是针对领域特点,在框架中对每个步骤的二级步骤进行了细化设计和描述;六是作战指挥需求具有不固定性,本体的构建应是一个不断循环和修复优化的过程,在框架中加入了反馈和循环的设计。

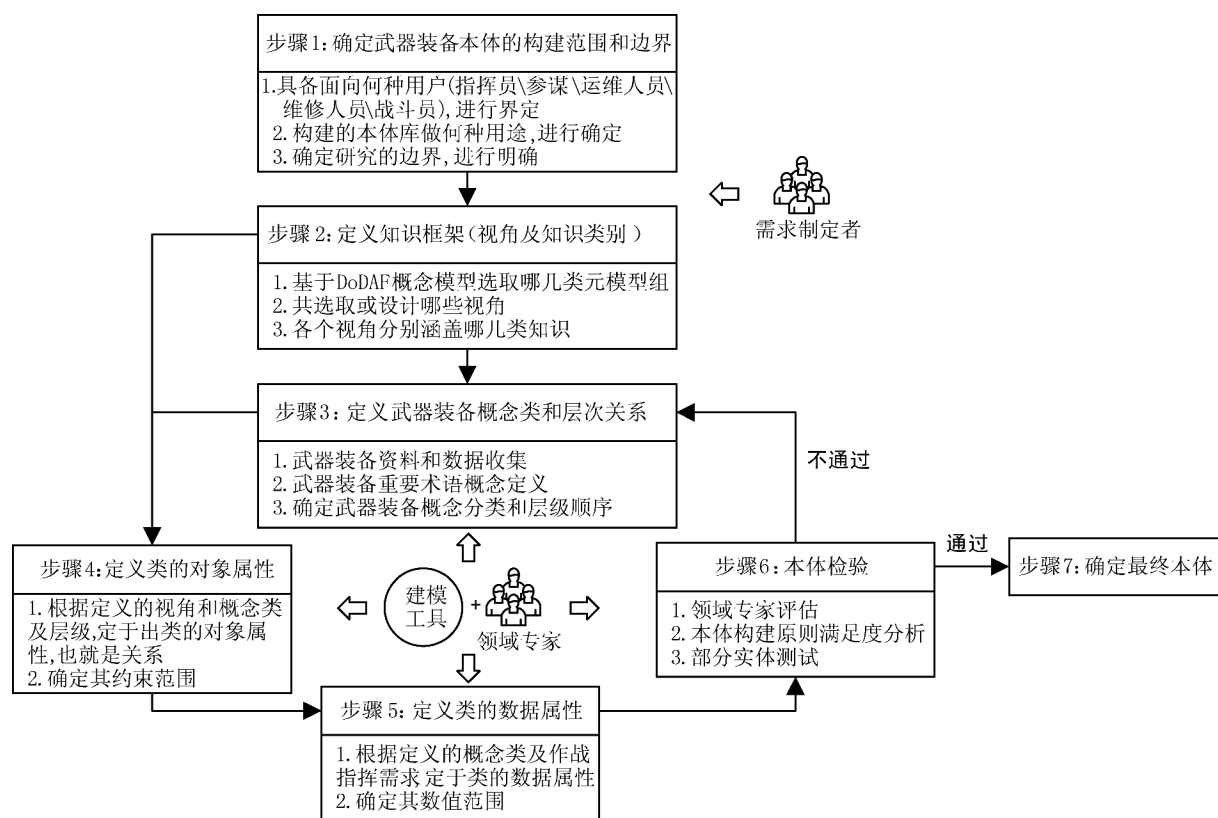


图3 武器装备本体构建流程框架

Fig. 3 Process framework for constructing weapon equipment ontology

2 面向作战指挥的武器装备本体设计

2.1 确定本体构建范围和边界

随着科技发展,武器装备的概念内涵越来越复杂,除了传统的杀伤性兵器之外,还拓展了信息系统、保障系统等一系列相互嵌套的软硬件,共同构成了武器系统。而与其产生关系的军事人员及关联的领域也有多种,若针对武器装备全体系进行本体库建模,求大求全,则难以深入研究和具体落地。因

此,本文在本体构建范围和边界上,重点面向各类指挥人员及参谋,针对作战筹划、组织实施及作战评估总结环节,分析其对武器装备的知识需求,构建面向作战指挥的武器装备本体库。

2.2 面向作战指挥的武器装备知识框架

在武器装备知识的需求上,对作战指挥者而言,在制定作战计划方案时需要了解各类武器装备的主要能力,武器装备的状态,各单位武器装备配备情况等,除此关键信息外,还需了解武器装备运用

战例,武器装备运用法规,以及其他敌我装备综合性信息等辅助知识^[19-20],鉴于此,根据 DODAF2.02 的视角和概念数据模型理念及作战指挥需求,建立知识整体框架如图 4 所示,以作战指挥为核心,共包含能力知识、状态知识、力量知识、战例知识、法规知识、综合知识六大视角。

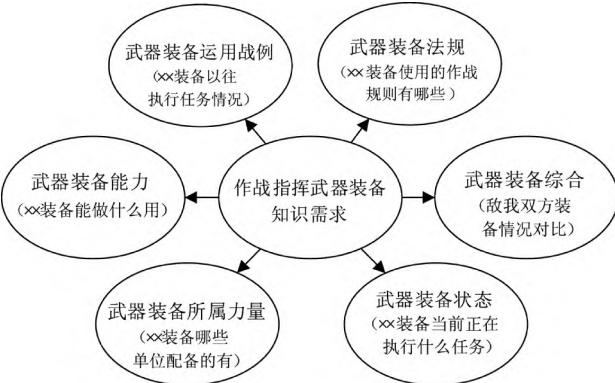


图 4 面向作战指挥的武器装备知识框架
Fig. 4 Weapon equipment knowledge framework for combat command

2.3 面向作战指挥的武器装备概念类及属性

基于上述六大类视角,设计武器装备概念类及

知识框架中所涵盖的知识类别具体如表 1 所示。

表 1 知识框架涵盖的知识类别
Table 1 Knowledge categories covered in the knowledge framework

序号	视角名称	所含知识类别
1	武器装备能力知识	包含武器装备战技性能(射程范围、最大速度、续航距离等)、挂载配备、协调保障等知识
2	武器装备状态知识	包含任务目的、任务时间、任务路线、任务装备等知识
3	武器装备力量知识	包含作战编成、指挥员、拥有武器装备类型、武器装备数量、部署位置等知识
4	武器装备战例知识	包含战例时间、战例地点、战例事件、战例类别、战例装备、文献资料等知识
5	武器装备法规知识	包含作战规则、武器装备运用法律法规、规章制度、条例条令等知识
6	武器装备综合知识	包含武器装备简介、所属国、生产国、武器装备所属大类、武器装备所属小类、武器装备图片等知识

层次关系,如图 5 所示,矩形代表概念名称,椭圆形代表属性。设计思路如下:

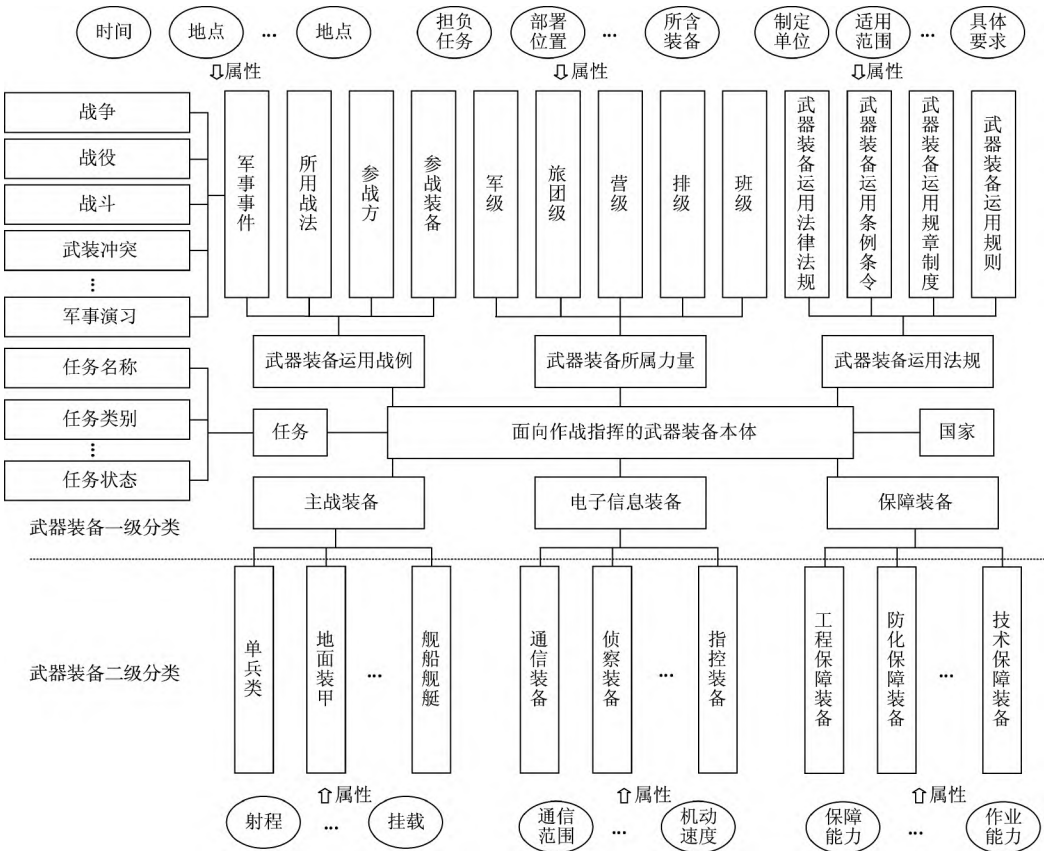


图 5 武器装备本体层级概念图
Fig. 5 Conceptual diagram of weapon equipment ontology hierarchy

1) 针对表 1 中的能力知识,考虑其和武器装备本身战技性能等关联紧密,为对其进行全面描述,

在图 5 中设计了主战装备、电子信息装备、保障装备 3 个一级概念类,利用其下属二级概念类的战技性能等属性中对能力知识进行描述。

2) 针对表 1 中的状态知识,考虑其为实时动态知识,需重点刻画动态任务,在图 5 中对应设计了任务一级概念类,由于任务本身就有类别之分,因此,将任务类别作为其二级节点。

3) 针对表 1 中的力量知识,考虑其为装备所关联的重要指挥需求知识,按照军事力量的特点,在图 5 中设计了武器装备所属力量一级概念类,在其二级层级当中包括从班级到军级的 5 个类别。

4) 针对表 1 中的战例知识,考虑到其为历史事实性知识,在图 5 中设计了武器装备运用战例一级概念类,按照战例需具备的要素,在其二级层级当中主要设计了事件、战法、参战方和参战装备 4 类,其中,军事事件又分为战争、战役、战斗等层级,此处也可按照作战样式进行分类。

5) 针对表 1 中的法规知识,考虑其为装备本身所关联的重要知识,根据法规知识的涵盖范围,在图 5 中设计了武器装备运用法规一级概念类,在其二级层级设计中主要包括法律法规、条令条例、规章制度、运用规则 4 类。

6) 针对表 1 中的综合知识,考虑其为辅助补充的常识性知识,在下页图 5 中主要对应设计了国家一级概念类,为避免本体库过于复杂,国家拥有的武器装备知识主要体现在国家节点与主战装备、电子信息装备、保障装备 3 类节点的关系属性上,不再单独增加概念节点。

针对上述概念层级,设计了隶属、下辖、担负等 11 类对象属性,如表 2 所示。

表 2 对象属性(部分示例)

Table 2 Object attributes (partial examples)

序号	对象属性	对应概念类
1	隶属	作战力量 - 作战力量
2	下辖	作战力量 - 作战力量
3	担负	作战力量 - 任务
4	配备	作战力量 - 武器装备
5	运用	任务 - 武器装备
6	拥有	国家 - 武器装备
7	包含	武器装备一级分类 - 武器装备二级分类,武器装备二级分类 - 武器装备
8	挂载	武器装备 - 武器装备
9	使用	军事事件 - 武器装备
10	投入	武器装备 - 军事事件
11	规定要求	法规 - 武器装备

在属性设计上,针对能力知识、状态知识、力量知识、战例知识、法规知识、综合知识六大视角,区分设计位置属性、状态属性、任务属性、描述属性 4 类属性。

3 本体构建及展示

针对本体层建模,当前存在的工具包括 protégé 工具、NeOn Toolkit 工具、Altova Semantic Works 工具、TopBraid Composer 工具以及思维导图工具等^[21],在这些工具当中,斯坦福大学所研制的 protégé 开源工具较为常用^[22-23],且能够提供丰富的本体建模及可视化展示功能,因此,本文根据上述概念层级设计、对象属性设计和数据属性设计,利用 protégé 工具进行本体库实际构建,成果如图 6 所示。

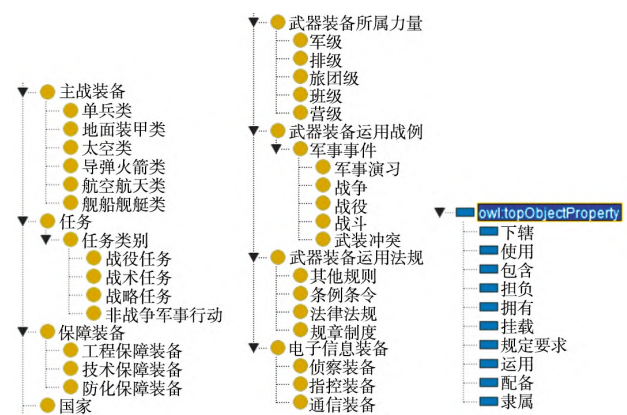


图 6 概念类及对象属性设计(部分示例)

Fig. 6 Conceptual class and object attribute design (partial examples)

由图 6 可以看出,在该本体设计过程中,一级本体概念与前文所提的面向作战指挥的六大知识视角紧密相关,而同一节点下的二和三层级本体概念都是属于同一类别概念,体现了设计的科学性,并且有利于后续针对具体的数据集进行知识抽取^[24]。本体库 OWL 语言^[25]描述示例如下页图 7 所示。

本体库整体示例如图 8、图 9 所示,通过图 8 和图 9 的对比可以看出,在实践过程中,本文面向作战指挥设计的关系种类有 11 种,由于两个概念间可能存在多种关系,使得本体库复杂度将会上升,在本体库的设计过程中,关系种类设计过多,会带来本体库复杂度的指数级上升^[26],但如果过少则无法满足业务需求,需考虑复杂度和业务需求两方面因素进行取舍。

4 结论

本文分析了当前常用的本体库构建方法,针对武器装备领域特点,结合 DODAF 相关理念对七步


```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns="http://www.semanticweb.org/weapon/"
  xml:base="http://www.semanticweb.org/weapon/"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xml="http://www.w3.org/XML/1998/namespace"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  owl:Ontology rdf:about="http://www.semanticweb.org/weapon"/>

  <owl:ObjectProperty rdf:about="http://www.semanticweb.org/weapon#下辖">
    <owl:inverseOf rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#隶属">
      <rdfs:domain rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#军级">
        <rdfs:domain rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#排级">
          <rdfs:domain rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#旅团级">
            <rdfs:domain rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#营级"/>
            <rdfs:range rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#排级"/>
            <rdfs:range rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#旅团级"/>
            <rdfs:range rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#班级"/>
            <rdfs:range rdf:resource="http://www.semanticweb.org/weapon#营级"/>
          </owl:ObjectProperty>

```

图 7 本体库 OWL 语言描述(部分示例)

Fig. 7 Ontology library OWL language description (partial examples)

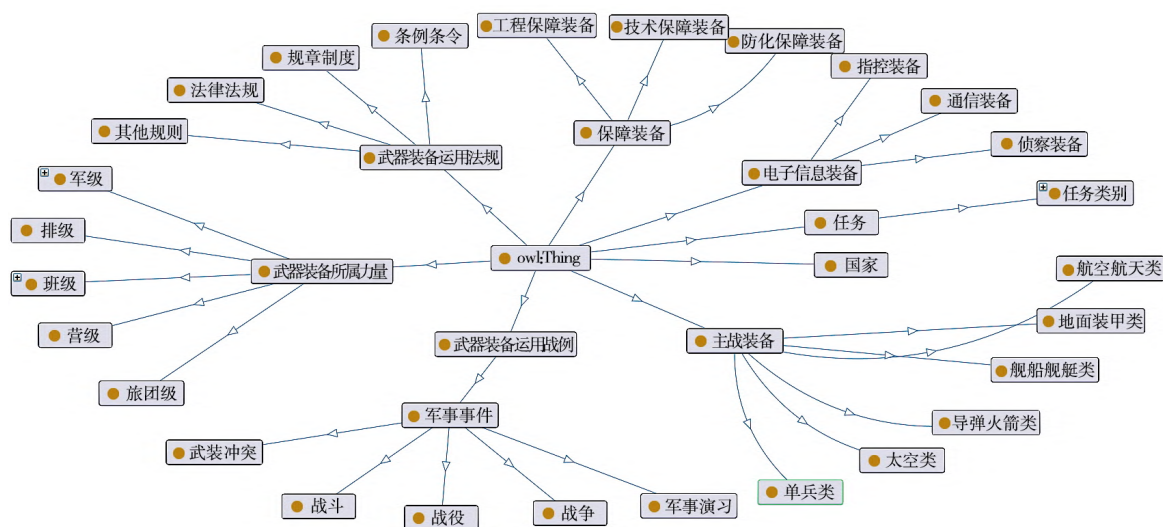


图 8 本体库概览图(不含关系)

Fig. 8 Skeleton diagram of ontology library (excluding relationships)

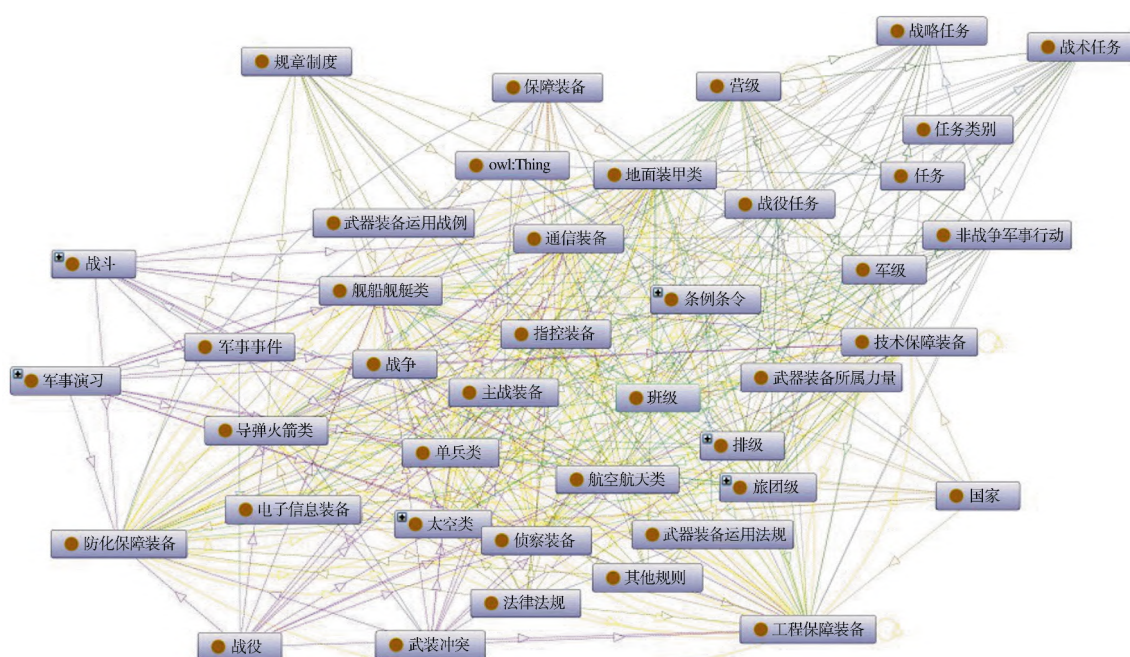


图 9 本体库概览图(含关系)

Fig. 9 Skeleton diagram of ontology library (including relationships)

法进行改造,提出了武器装备本体构建流程框架,在此基础上,面向作战指挥需求,设计了六大类知识视角及其涵盖的知识类别,进行了武器装备概念层级、对象属性、数据属性等设计,并利用本体构建工具进行了本体库构建及展示。后续基于此研究,一是将利用所设计的武器装备本体库进行知识抽取及融合,构建出面向作战指挥的武器装备知识图谱;二是研究大模型和知识图谱相结合的技术方法,探索武器装备知识图谱的应用方式。

参考文献

- [1] 王萌,王昊奋,李博涵,等.新一代知识图谱关键技术综述[J].计算机研究与发展,2022,59(9):1947-1965.
WANG M, WANG H F, LI B H, et al. Survey on key technologies of new generation knowledge graph [J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(9): 1947-1965.
- [2] 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 Z L, YAN J, CHEN H S, et al. Construction of ontology-based equipment fault Knowledge base [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2067-2072.
- [3] 赵颜利,李连军,余红梅,等.面向战例知识图谱的本体构建[J].海军航空工程学院学报,2020,35(5):407-413.
ZHAO Y L, LI L J, YU H M, et al. Ontology construction oriented knowledge graph of battle case [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2020, 35(5): 407-413.
- [4] 顾丹阳,李明倩,权冀川,等.基于本体的主战武器装备知识图谱构建[J].指挥控制与仿真,2021,43(6):14-20.
GU D Y, LI M Q, QUAN J C, et al. Ontology based knowledge graph construction for combat weapon equipment [J]. Command Control & Simulation, 2021, 43(6): 14-20.
- [5] 李肖,刘德生.面向武器装备体系知识图谱的本体构建[J].兵工自动化,2022,41(3):25-30.
LI X, LIU D S. Ontology construction for knowledge map of weapon equipment system [J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(3): 25-30.
- [6] 李瑛,曹江.解读《美国国防部体系结构框架》2.0 版[J].外国军事学术,2010,56(2):44-47.
LI Y, CAO J. Interpretation of the US department of defense architecture framework, version 2.0 [J]. Foreign Military Academia, 2010, 56(2): 44-47.
- [7] JI S X, PAN S R, CAMBRIA E, et al. A survey on knowledge graphs: representation, acquisition, and applications [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(2): 494-514.
- [8] 刘梦超,王玉玫,吴亚非,等.基于本体的军事装备知识建模及分析[J].计算机与现代化,2021,37(1):76-80.
LIU M C, WANG Y M, WU Y F, et al. Ontology based modeling and analysis of military equipment [J]. Computers and Modernization, 2021, 37(1): 76-80.
- [9] 任飞亮,沈继坤,孙宾宾,等.从文本中构建领域本体技术综述[J].计算机学报,2019,42(3):654-676.
REN F L, SHEN J K, SUN B B, et al. A review for domain ontology constructing from text [J]. Chinese Journal of Computer, 2019, 42(3): 654-676.
- [10] 王娜,蒋智慧.动态本体构建的国内外研究现状综述[J].现代情报,2020,40(4):159-166.
WANG N, JIANG Z H. Research overview on dynamic ontology construction at home and abroad [J]. Journal of Modern Information, 2020, 40(4): 159-166.
- [11] 张婷.本体构建相关文献综述报告[J].电子技术与软件工程,2019,26(1):244-245.
ZHANG T. A literature review report on ontology construction [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019, 26(1): 244-245.
- [12] 李志义,李德惠,赵鹏武.电子商务领域本体概念及概念间关系的自动抽取研究[J].情报科学,2018,36(7):85-90.
LI Z Y, LI D H, ZHAO P W. Research on automatic extraction of ontology concepts and relationships between concepts in the field of E-commerce [J]. Intelligence Science, 2018, 36(7): 85-90.
- [13] 胡卫,赵文龙,李石磊,等.军事装备管理数据知识图谱构建及应用[J].火力与指挥控制,2022,47(10):125-131.
HU W, ZHAO W L, LI S L, et al. Research on construction and application of a knowledge graph of military equipment management data [J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(10): 125-131.
- [14] 汤再江,徐享忠,薛青,等.作战行动本体构建及基于本体的语义推理[J].计算机仿真,2018,35(6):393-398.
TANG Z J, XU X Z, XUE Q, et al. Operational ontology modeling and semantic reasoning based on ontology [J]. Computer Simulation, 2018, 35(6): 393-398.
- [15] 张文秀,朱庆华.领域本体的构建方法研究[J].图书与情报,2011,31(1):16-40.
ZHANG W X, ZHU Q H. Research on construction methods of domain ontology [J]. Library and Information, 2011, 31(1): 16-40.
- [16] 岳丽欣,刘文云.国内外领域本体构建方法的比较研究[J].情报理论与实践,2016,39(8):119-125.
YUE L X, LIU W Y. Comparative research on domain ontology construction methods at home and abroad [J]. Information Studies: Theory & Application, 2016, 39(8): 119-125.
- [17] 张天琦,吕卫民,陈健,等.基于 DoDAF 的岸舰导弹武器装备体系结构建模[J].火力与指挥控制,2022,47(5):20-28.

- ZHANG T Q, LYU W M, CHEN J, et al. Architecture modeling of shore-ship missile weapon and equipment system based on DoDAF[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(5): 20–28.
- [18] 王新尧, 曹云峰, 孙厚俊, 等. 基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(10): 2265–2274.
- WANG X Y, CAO Y F, SUN H J, et al. Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42 (10): 2265–2274.
- [19] 游乐圻, 裴忠民, 罗章凯. 基于元数据的卫星通信装备本体建模方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(S1): 87–93.
- YOU L Q, PEI Z M, LUO Z K. Research on ontology method of satellite communication equipment based on meadata[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42 (S1): 87–93.
- [20] 罗弋洋, 赵青松, 李华超, 等. 武器装备运用知识框架及建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 841–849.
- LUO Y Y, ZHAO Q S, LI H C, et al. Framework and modeling method of weaponry utilization knowledge [J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 841–849.
- [21] 麦强, 王宁, 安实, 等. 基于本体语义建模的航天工程风险管理知识库[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2331–2337.
- MAI Q, WANG N, AN S, et al. A knowledge base for aerospace engineering risk management based on ontology semantic modeling[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2016, 38 (10): 2331–2337.
- [22] 刘煜澄. 面向多源数据的军事本体构建系统[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- LIU Y C. A military ontology construction system for multi-source data[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [23] 朱文跃, 刘宗田. 基于事件本体的突发事件领域知识建模[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(21): 148–155.
- ZHU W Y, LIU Z T. Knowledge modeling of emergencies based on event ontology[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(21): 148–155.
- [24] 李广建, 袁钺. 基于深度学习的科技文献知识单元抽取研究综述[J]. 数据分析与知识发现, 2023, 7(7): 1–17.
- LI G J, YUAN Y. A review of research on deep learning based knowledge unit extraction in scientific literature [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2023, 7(7): 1–17.
- [25] 张智雄. 从 RDF(S) 到 OWL, 什么在改变之中[J]. 图书馆杂志, 2005(1): 54–59, 14.
- ZHANG Z X. What is changing from RDF (S) to OWL[J]. Library Journal, 2005(1): 54–59, 14.
- [26] 张海燕, 连彬, 韩钰, 等. 面向安防领域的模块化本体重用算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(3): 9–15.
- ZHANG H Y, LIAN B, HAN Y, et al. Research on modular algorithms for security applications [J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(3): 9–15.

(上接第 43 页)

- reinforcement learning[J]. Journal of Machine Learning Research, 2020, 21(178): 1–51.
- [12] ZHAO W, CHU H, MIAO X, et al. Research on the multi-agent joint proximal policy optimization algorithm controlling cooperative fixed-wing UAV obstacle avoidance [J]. Sensors, 2020, 20(16): 4546.
- [13] 赖俊, 魏竞毅, 陈希亮. 分层强化学习综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(3): 72–79.
- LAI J, WEI J Y, CHEN X L. A review of hierarchical reinforcement learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(3): 72–79.
- [14] 熊健, 赵青松, 葛冰峰, 等. 基于多目标优化模型的武器装备体系能力规划[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(3): 140–144.
- XIONG J, ZHAO Q S, GE B F, et al. Capability planning of weapon equipment system based on multi objective optimization model[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(3): 140–144.
- [15] NEFTCI E O, MOSTAFA H, ZENKE F. Surrogate gradient learning in spiking neural networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(6): 51–63.
- [16] 黄庆杰. 基于 YOLOv4 架构的脉冲神经网络目标检测算法研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- HUANG Q J. Research on spiking neural network object detection algorithm based on YOLOv4 architecture[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.