

模具设计知识表示方法

李宝清¹, 王运平¹, 曹立林¹, 李西宁², 叶园园²

(1. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西 西安 710000; 2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 设计知识有效表示是模具智能化设计的前提和基础, 对提高模具设计质量和效率具有重要的作用和意义。首先, 对传统知识表示方法如谓词逻辑、产生式、框架、语义网络、面向对象和基于本体表示法的基本原理以及研究现状进行了总结。然后, 对比分析了不同知识表示方法的优缺点, 分析了知识表示的发展趋势并介绍了知识图谱的基本概况。最后, 结合知识特点, 将模具知识分为3类, 即事实类知识、规则类知识和实例类知识。阐述了基于知识图谱进行知识表示的基本流程, 主要包括: 信息抽取、知识融合和知识加工, 并以凸模结构形式(部分)知识为例, 完成了相关知识图谱的构建。

关键词: 知识表示; 知识分类; 知识图谱; 模具设计; 智能制造

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.024

中图分类号: TG385.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 06-0176-09

Representation method on mold design knowledge

Li Baoqing¹, Wang Yunping¹, Cao Lilin¹, Li Xining², Ye Yuanyuan²

(1. AECC Xi'an Power Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Effective representation of design knowledge is a prerequisite and foundation for intelligent design of mold, which plays an important role and significance in improving the quality and efficiency of mold design. Firstly, the basic principles and research status of traditional knowledge representation methods such as predicate logic, production, framework, semantic network, object-oriented and representation of ontology were summarized. Then, the advantages and disadvantages of different knowledge representation methods were compared, the development trends of knowledge representation were analyzed, and the basic overview of knowledge graph was introduced. Finally, based on the characteristics of knowledge, the mold knowledge was divided into three categories: practical knowledge, rule knowledge and instance knowledge, and the basic process of knowledge representation through knowledge graph was elaborated, mainly including information extraction, knowledge fusion and knowledge processing. In addition, taking the punch structure form (partial) knowledge as an example, the relevant knowledge graph construction was completed.

Key words: knowledge representation; knowledge classification; knowledge graph; mold design; intelligent manufacturing

知识库的形成可划分为5个阶段: 知识认知、知识收集、知识表示、知识库建立和知识库维护, 各阶段环环相扣、相互关联。知识表示作为构建知识库的中间环节, 在整个过程中具有关键作用。合理的知识表示是实现智能制造的前提, 并在一定程度上决定了智能制造的发展速度。如今, 各种知识表示方法层出不穷, 并具有不同的属性和优缺点, 如何根据知识的特点来选择合适的表示方法是本文的主要研究内容。

首先, 介绍了传统知识表示方法及其研究现状, 并分析了每种表示方法的优缺点; 其次, 介绍了知识图谱的有关概况; 最后, 结合模具设计知识类型特点, 以凸模结构形式为例, 构建了知识图谱模型。

1 知识表示方法及其研究现状

1.1 谓词逻辑表示法

谓词逻辑是人工智能领域中最早、最广泛的知识表示方法之一^[1-2]。 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为此表示法的一般形式, 其中: P 用于表示谓词名称, 用来描述命题中个体之间的关系; x_1, x_2, \dots, x_n 为个体, 表示独立存在的事物或概念; n 为个体项数。此方法在数理逻辑的基础上, 将命题里的个体、量词等成分之间的逻辑关系和相关规律进一步分析,

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-11-10

基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目 (ZZCX-2019-026)

作者简介: 李宝清 (1983-), 男, 本科, 工程师

E-mail: 1322182169@qq.com

通信作者: 李西宁 (1971-), 男, 博士, 副教授

E-mail: lixining@nwpu.edu.cn

从而获得一个命题逻辑子系统。

谓词逻辑表示法能够很好地契合人类语言的表示习惯, 因此, 在人工智能技术方面, 该方法在很多领域得到了广泛应用。为实现快速、准确和低成本的设计制造目标, 基于谓词逻辑表示法的知识工程设计理念被越来越多的学者应用于零部件的设计阶段。Lu J 等^[3]根据加工方法定义和推导了用于表示工艺计划的谓词逻辑。李国昌等^[4]根据冷弯成形工艺过程的知识特点, 采用谓词逻辑表示法对冷弯成形知识进行了表示。

除上述研究外, 谓词逻辑表示法常与其他技术相结合, 进而实现更多新的功能。Kushida H 等^[5]将约束满足问题 (Constraint Satisfaction Problem, CSP) 的通用框架应用于谓词逻辑, 从而形成了1个新的语义。李慧清^[6]在 Petri 网的设计过程中加入了谓词逻辑概念, 完成了机械产品设计过程中信息的表示。宋久鹏^[7]利用谓词逻辑表示法, 设计了一种机械设计领域的知识表示方法。

1.2 产生式表示法

产生式表示法^[8]的基本形式为: IF (前提 1) & (前提 2) & ..., THEN (结论 1) & (结论 2) ...。IF 部分记录了知识表示的先决条件, THEN 部分记录了知识表示的结论。产生式表示法中存在大量事件的因果关系, 可以通过事件中具有的规律行为来解决相关问题, 善于表达规则性知识, 一般记录过程知识之间的先后关系和之间的相互作用。

岳喜娜^[9]根据知识表示均为“name-value”格式的特点, 将产生式表示法与公式表达式相结合, 完成对研究知识的表示。李猛等^[10]应用产生式表示法建立了包含启发性知识和事实性知识的故障诊断知识库, 知识库各表之间的联系和存储结构如图1所示。杨宇希^[11]使用产生式表示法完成了对车载设备规范信息知识的表示。黄利江等^[12]将工艺信息分为两类, 即不变信息和可变信息, 其中可变信息以产生式表示法表达。

<框架名>

<槽名 1><槽值 1>/<侧面名 11><侧面值 111, 侧面值 112, ...>
<侧面名 12><侧面值 121, 侧面值 122, ...>

...

<槽名 2><槽值 2>/<侧面名 21><侧面值 211, 侧面值 212, ...>
<侧面名 22><侧面值 221, 侧面值 222, ...>

...

<槽名 3><槽值 3>/<侧面名 31><侧面值 311, 侧面值 312, ...>
<侧面名 32><侧面值 321, 侧面值 322, ...>

...

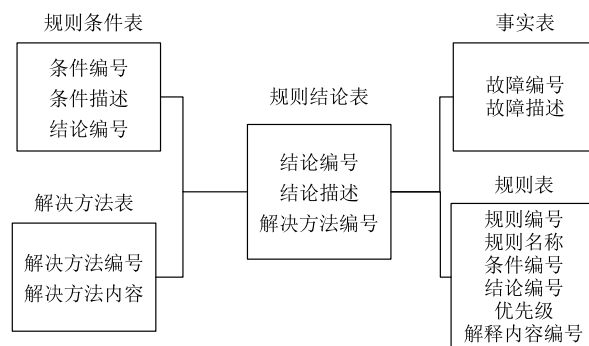


图1 知识库存储结构

Fig. 1 Storage structure of knowledge base

在工业领域的设计方面, 产生式表示法也得到了较为广泛的应用。王诚^[13]根据齿轮加工误差方面的知识, 利用产生式表示法建立了知识库。刘佳等^[14]基于设计规则创建了高速面铣刀设计知识库, 实现了切削铝合金高速面铣刀模型知识的快速重用。

产生式表示法也常常与其他表示方法相结合, 用以实现复杂知识的转换。李新等^[15]在知识表示方法为产生式的基础上, 结合粗糙集理论, 提高了刀具选配的效率。路浩等^[16]将谓词逻辑表示法和产生式表示法相结合, 根据焊接工艺的需求建立了专家系统。刘尚仁^[17]针对汽车焊装夹具设计领域的知识特点, 将夹具设计内部知识利用产生式表示法转化, 将外部知识利用面向对象表示法转化。Li H C 等^[18]将改进的和声搜索算法与神经网络相结合, 提出了一种改进的加权模糊产生式规则提取方法。

1.3 框架表示法

框架表示法是把某一事件或对象的所有知识储存在一起的复杂数据结构^[19-20]。框架顶层往下被划分为若干槽, 上层知识的不同属性被存储于各个槽中, 而每个槽根据实际情况又可分为若干侧面。当槽值和侧面是另一个框架的标题名, 此时两个框架之间则存在一定的联系^[21]。

框架的一般形式如下^[22]:

因为框架表示法的结构性强,所以,常用在对案例知识的表示。Mandolini M 等^[23]提出了一个用于制造和成本相关知识形式化的新框架,可实现快速分析和估算组件的生产成本。Wei X B 等^[24]通过基于规则的推理,实现了结构的智能设计。张永春等^[25]采用框架表示法在计算机存储重现获取的知识,并结合具体的推理方法构建了模具设计系统,其冷冲压模具设计框架如图 2 所示。张孝木^[26]采用框架知识表示法对驱动桥壳涉及到的方法类知识进行了表示。黄德浩等^[27]在刻画分类法的基础上结合知识表示方法,提出了采用框架表示法的组件库构建模型。张立志等^[28]针对复杂产品的管理提出了基于框架表示法与其他方法相结合的应对表示方法。柯旭贵等^[29]利用框架表示法作为冲压模具结构设计表达方法,实现了冲压模具典型结构的表示。

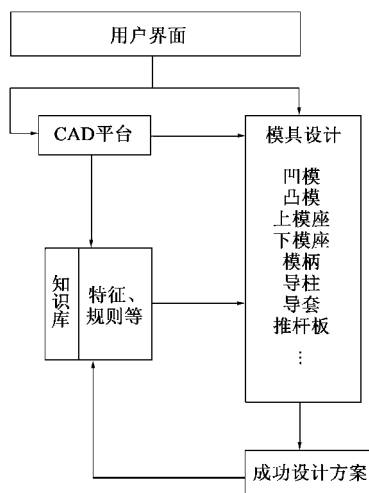


图 2 基于知识工程的冷冲压模具设计框架

Fig. 2 Design framework of cold stamping die based on knowledge engineering

1.4 语义网络表示法

语义网络^[30]是通过节点之间的有向线段网络图进行知识表示。语义网络中的节点用来描述实体等,节点之间的有向连线则用来描述事件、情况等之间的关系。一般的语义网络表示法是由词法、结构、过程和语义这 4 部分所组成,是表示概念链接之间的关系网络^[31]。基本的语义网络形式是一个 3 元组:节点 A、弧 R_{AB} 、节点 B,如图 3 所示。

语义网络多数情况下被应用于复杂事件的分类推理领域。Sarica S 等^[32]为帮助工程师快速理解新的、复杂的设计知识,提出了一种由语义网络提供支持的映射方法。Chen L Q 等^[33]基于计算创造力理论在语义和视觉上提供的灵感,提出了一种通过应用人工智能和数据挖掘技术来增强设计理念的

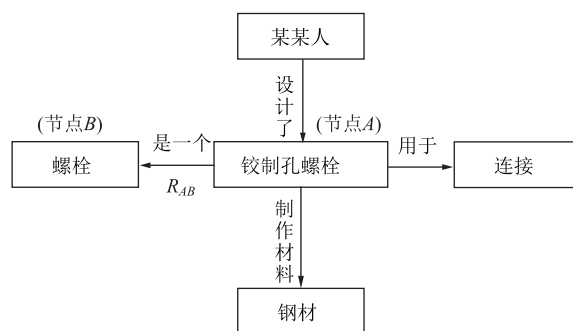


图 3 铰制孔螺栓的语义网络表示

Fig. 3 Semantic network representation of reamed hole bolts

综合方法。刘臻^[34]为了便于知识的转换,将零件知识分解为零件、体和面等不同层级知识,并在此基础上利用语义网络来表示零件知识。顾复等^[35]针对设计实例与需求特点,在相关本体建模知识的基础上,在建立了语义网络产品结构模型。郑金桥等^[36]在大型复杂冲压件的成形工艺知识方面,在建立冲压件的知识模型时,采用语义网络表示法来表达获取的成形图形知识。

1.5 面向对象表示法

面向对象表示法认为客观世界是由一系列对象构成,并且对象之间能够通过继承、组合等方式发生联系^[37]。在面向对象表示法中知识分类的基本单位为对象,每一个对象又包含属性、关系和方法的基本知识,这些知识特征被封装在表达结构中。封装后的知识具有封闭性和模块性,只需要对象的消息接口即可访问该对象^[38]。使用面向对象设计是一个建立类层次的过程,表示知识时需要类进行描述,具体形式如下^[39]:

```
class
<类名> [ : <Superclass> ] [ <类变量表> ]
structure
<对象静态结构描述>
method
<对象的操作定义>
restraint
[ <限制条件> ]
end
```

目前,面向对象表示法主要应用于专家系统和知识库的构建中,有时面向对象的知识表示方法也与其他表示法混合使用,从而形成混合式知识表示法。朱玲利等^[40]针对回转窑领域知识特点,采用以面向对象为基础的混合知识表示方法,实现了回转窑专家系统综合知识表示的简洁性和高效性。周梦杰等^[41]根据钢铁一体化生产中的知识特点和其分

类，提出了一种基于面向对象的知识表示方法。刘钊^[42]根据数控机床设计中知识的分类和复杂程度，利用面向对象结合改进产生式的混合表示法，实现了实例类、规则类知识的表达。周伟祝等^[43]为实现动态知识的表达，在面向对象的基础上融合一种动态对象表示法，可灵活、动态地实现武器装配保障信息的共享和融合。于芳芳等^[44]将面向对象与产生式表示法相结合，表达了飞机整体壁板的相关知识。

1.6 基于本体的表示法

1993 年，本体被 Gruber T R^[45]从本质上定义为概念化显式规范的说明或表示方法。一般的本体可用概念、概念属性集合、定义在概念集合上的关系集合和公理表示。本体的基本要求^[46]：表达抽象现象的一种概念化模型；所采用的抽象概念皆有明确的约束性；描述的概念必须具有可读性，计算机可直接处理；本体所描述的内容具有形式化、共享化、明确化和概念化的规范。依据本体的层次和领域依赖度，本体的分类如图 4 所示。此外，近些年在本体基础上结合语义网络发展而来的知识图谱十分流行，Trans、Trans H 和 Trans R 等表示模型被逐渐应

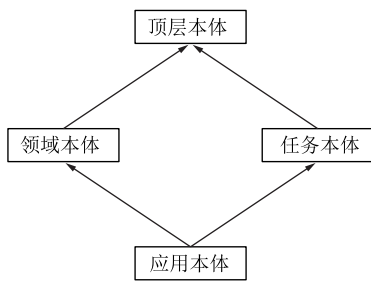


图 4 本体分类

Fig. 4 Ontology classification

用于关系的空间构建^[47]、嵌入^[48]和实体^[49]中。

Chhim P 等^[50]提出了一种基于本体的有效产品设计和制造过程，用于制造知识实现重用。Li Z 等^[51]提出了一种基于本体的产品设计框架，用于可制造性验证和知识重用。艾鑫^[52]实现了航空材料标准知识的本体表示。Zhou Q 等^[53]提出了一种信号分析和本体表示的模型，完成了机械零部件使用过程中的故障诊断。顾黎等^[54]将模型类型划分和属性信息按照本体表示法表达，实现了几何与非几何信息集成的本体数据结构。

刘旭^[55]基于实例建模技术的优缺点，提出了冲压模具设计知识的本体表示模型，完成了知识的本体建模。张田会等^[56]将本体和知识组件相互结合，实现了对夹具结构本体知识的表示，同时对夹具元件、工件和夹具设计实例进行本体知识表示。李长杰等^[57]利用本体知识表示方法构建了设计对象、设计人员、设计流程和设计知识的飞机工装设计知识本体主模型。负周会等^[58]从知识工程的角度分析了钣金工艺知识，采用基于本体的表示方法实现了对钣金工艺知识的描述。朱文博等^[59]结合冲压工艺知识特点和冲压工艺领域本体定义 5 要素，实现了对冲压工艺知识的本体表示。

2 知识表示方法的对比分析

每种知识表示方法均具有优缺点，在进行相关工作前不仅要了解知识所具备的特点，同时也要分析不同表示方法所具备的特点，从而选取更合适的知识表示方法。传统知识表示方法的优缺点如表 1 所示。

表 1 知识表示方法优缺点对比

Table 1 Comparison between advantages and disadvantages of knowledge representation methods

知识表示方法	优点	缺点
谓词逻辑表示法	逻辑接近自然语言，便于计算机的读取与存储；可由简单的方式构建复杂知识，且表达清晰唯一。	不能准确地表示确定性、启发性知识，当知识过于复杂和众多时，易出现组合爆炸，且效率低。
产生式表示法	与人类自然判断的逻辑一致；应用上具有较大的灵活性，且表达形式固定。	不适用于结构性知识；推理速度较慢，问题复杂时易发生组合爆炸。
框架表示法	与人类的认知求解过程类似；表达能力强，层次丰富，易扩充；具有较好的继承性，可保证知识一致性。	难以准确地表示过程性的知识，通常需结合其他知识表示法一起使用。
语义网络表示法	善于表示结构性知识、表达灵活、便于理解；符合人类的思维联想；表达能力强大，可将知识结构化。	不能保证知识表示的严格性和唯一性；因为该方法的灵活性，使得知识处理起来较为复杂，不具唯一性。
面向对象表示法	能够单独修改不同对象内部知识；对象兼容性好；与外界联系只需通过接口，降低了系统的开发与使用难度。	方法较为抽象，理解起来较为困难；对外接口形式单一。
基于本体表示法	在表达知识时，可构建出清晰的结构，可扩充、可重用性较强；同时表示内容具有共享性，便于对知识进行获取。	目前本体知识表示法的构建规则还无统一标准；现阶段本体建立的过程较为复杂，知识转化过程难度较大。

在进行知识表示时,若只使用单一的知识表示法往往具有局限性,但是,使用两种及以上的知识表示法便可起到扬长避短的效果,因此,混合知识表示法愈发得到学者的青睐。例如,李丽英等^[60]将几种单一知识表示方法集成为一种基于本体混合型的表示方法,并将其应用到了机床夹具设计系统中。姜少飞等^[61]根据机加工类产品知识的特点,提出一种知识元-规则-框架的混合知识表示方法,以产生式表示法为主,实现了知识的表达。陈军等^[62]根据不同知识表示方法的优缺点,以面向对象表示法为主,将不同表示方法取长补短,完成了汽车覆盖件冲压工艺知识的表示。

知识图谱是在语义网络的基础上发展而来的一种新兴的知识表示方法,即本体知识建模应用于语义功能的表示,是目前知识工程中的一个研究热点。为了增强引擎搜索能力,2012年Google正式提出知识图谱概念。随着技术的逐渐成熟,知识图谱开始和设计工艺知识相结合,在智能制造领域的知识表示研究愈发深入。Hka B等^[63]采用知识图谱作为知识库,构建了基于知识图谱的增材制造设计规则模型。梁蕾等^[64]将知识图谱和航空航天飞机总装知识相结合,研究了知识图谱的构建方法,为后续的相关研究提供参考。

知识图谱不仅可存储海量的数据,还能增强实体之间的关联性,使得知识的联系和推理能力大大优于其他知识表示方法。其次,该方法可将各种类型知识表示为更接近人类认知世界的形式,具有更好的共享能力和推理能力,更加契合未来智能制造的发展要求。

3 模具设计的知识图谱构建

模具设计具有如下特点:模具类型复杂且涉及

知识类型较多,需要系统的表达;有的知识需封装禁止改动,但有的知识需要根据实际情况修改;知识间存在联动性,修改某处可能会导致其他设计知识发生改动;针对不同应用环境,模具设计过程具有创新性的知识,使得知识复杂程度上升。

由于模具设计知识不是单一的知识体系,所以在表达知识内容时,需将涉及到的知识根据其特点进行分类。根据模具设计知识来源,将知识分为3类:(1)查询手册获得的事实类知识(表格参数、公式、定理等);(2)设计过程中所要遵守的统一规范、准则等规则类知识;(3)以往设计、制造、应用过程中成功解决问题的案例、经验等实例类知识。

根据模具设计知识的分类和特点,本文采用知识图谱对不同类型知识进行表示,并建立不同知识之间的联系。知识图谱常用的构建方法有自底向上法和自顶向下法,分别适用于不清楚数据范围和用途的通用模型构建和已知应用场景的行业知识图谱模型构建。因为模具设计知识图谱属于行业知识图谱,所以选择自顶向下的方法构建知识表示模型。

构建模具设计知识图谱的过程可分为以下3个环节。

(1)信息抽取:从不同类型的数据源中提取出实体、属性以及实体间的相互关系,在此基础上形成本体化的知识表达。

(2)知识融合:在获得新知识之后,需要对其进行整合,以消除矛盾和歧义,例如:某些实体可能有多种表达、某个特定称谓也许对应于多个不同的实体(实体消歧)、某个确定代词应该指向哪个名词或短语(代指消解)等。

(3)知识加工:对于经过融合的新知识,需要经过质量评估之后,才能将合格部分加入到知识库中,以确保知识库的质量。

模具设计知识图谱的构建流程如图5所示。

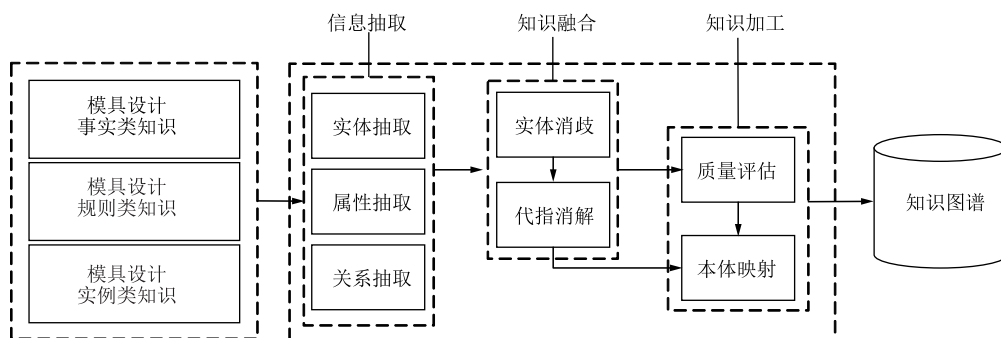


图5 知识图谱构建流程

Fig. 5 Construction process for knowledge graph

模具设计需要从手册中获取相关的设计知识，表 2 为凸模结构形式设计要求。为了更好地诠释模具设计知识图谱的构建，结合表 2 中的内容，来演示构建知识图谱的过程。

表 2 凸模结构形式（部分）
Table 2 Punch structural form (Part)

凸模类型	特点
小圆孔凸模	用于冲制 $\Phi 1 \sim \Phi 15$ mm 的小圆孔，为了增加凸模的强度与刚度，避免应力集中，凸模非工作部位为逐渐增大并圆滑过渡的阶梯形式。
中圆孔凸模	用于冲制 $\Phi 8 \sim \Phi 30$ mm 的中型圆孔，因直径较大，可不中部增加过渡阶梯。
大圆孔凸模	冲大型圆孔凸模，定位后用螺钉紧固，为减少精加工面积，非工作表面直径可略小一些，端面要加工成凹坑形状。

首先，抽取表格中信息所包含的实体和实体间的属性关系，以小圆孔凸模为例，可抽取出的实体有：小圆孔凸模、圆孔直径（ $\Phi 1 \sim \Phi 15$ mm）、过渡阶梯。这 3 个实体之间存在的关系为：圆孔直径和过渡阶梯均是小圆孔凸模上所具有的结构形式。其次，对知识进行检查确认重用价值。最后，通过本体映射建立基于表 2 内容的知识图谱，如图 6 所示。

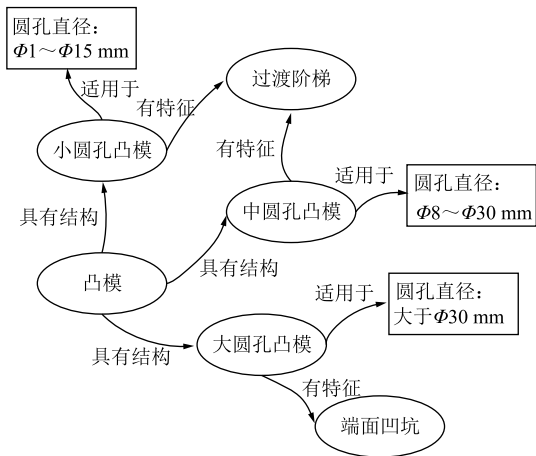


图 6 凸模结构形式的知识图谱（部分）
Fig. 6 Knowledge graph of punch structural form (Part)

4 结论与展望

(1) 详细介绍了谓词逻辑表示法、产生式表示法、框架表示法、语义网络表示法、面向对象表示法和基于本体表示法的研究现状。

(2) 对传统知识表示法的优缺点进行了比较，

分析了未来知识表示的发展趋势，并在此基础上总结了知识图谱在智能制造领域的应用前景及其优势。

(3) 结合模具设计知识特点，阐明了构建模具设计知识图谱的方法步骤，并以凸模结构形式为例，构建了知识图谱模型。

(4) 为促进智能制造技术的发展与应用，提高知识重用度、灵活性和共享化，还需将领域知识与产品特点相结合，不断深入研究适用于各领域的知识表示方法。

参考文献：

[1] 张攀,王波,卿晓霞. 专家系统中多种知识表示方法的集成应用 [J]. 微型电脑应用, 2004, 20 (6): 4-6.
Zhang P, Wang B, Qing X X. On integration of several knowledge representations in the expert system [J]. Microcomputer Applications, 2004, 20 (6): 4-6.

[2] 王湘云. 一阶谓词逻辑在人工智能知识表示中的应用 [J]. 重庆工学院学报: 社会科学版, 2007, 123 (9): 69-71.
Wang X Y. The application of first order predicate logic in the field of knowledge representation of artificial intelligence [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Social Science Edition, 2007, 123 (9): 69-71.

[3] Lu J, Ou C Y, Liao C, et al. Formal modelling of a sheet metal smart manufacturing system by using petri nets and first-order predicate logic [J]. Intelligent Manufacturing, 2021, 34 (4): 1-21.

[4] 李国昌,杨仙. 冷弯成型过程智能化的知识表示方法研究 [J]. 焊管, 2015, 38 (8): 20-23.
Li G C, Yang X. Research on the intelligent methods of knowledge representation in cold-roll forming process [J]. Welded Pipe, 2015, 38 (8): 20-23.

[5] Kushida H, Haralick R. First-order logic as a constraint satisfaction problem [J]. Progress in Artificial Intelligence, 2021, 10 (4): 375-389.

[6] 李慧清. 机械产品设计知识建模及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Li H Q. Research on the Modeling and Application of Mechanical Product Design Knowledge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[7] 宋久鹏. 汽车方案设计智能决策支持系统的开发技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
Song J P. Research on the Development Technology of Intelligent Decision Support System for Automobile Conceptual Design [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.

[8] 杨宪泽. 产生式规则的研究 [J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 1994, 20 (1): 22-27.
Yang X Z. A study on production rules [J]. Journal of Southwest Nationalities College: Natural Science Edition, 1994, 20 (1): 22-27.

[9] 岳喜娜. 基于 BIM 的梁式桥快速建模专家系统研究 [D]. 西

- 安: 西安理工大学, 2019.
- Yue X N. Research on Expert System for Rapid Modeling of Beam Bridge Based on Bim [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [10] 李猛, 曹春平, 孙宇. 基于专家系统的离合器制动器故障诊断 [J]. 锻压技术, 2017, 42 (12): 163-169.
- Li M, Cao C P, Sun Y. Fault diagnosis for clutch and brake based on expert system [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42 (12): 163-169.
- [11] 杨宇希. 基于专家系统的 CTCS-3 级车载测试结果分析与评估方法的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- Yang Y X. An Expert System Approach for Analyzing and Evaluating the Testing Results of Ctc3 On-Board Equipment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [12] 黄利江, 田锡天, 贾晓亮, 等. 融合规则的典型工艺表示与工艺决策方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2009, 27 (5): 583-589.
- Huang L J, Tian X T, Jia X L, et al. Exploring rule-fused technology for typical process representation and automatic process decision [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27 (5): 583-589.
- [13] 王诚. 齿轮精度设计及加工误差分析智能系统研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- Wang C. The Research about Intelligent System of Gear Precision Design and Machining Errors Analysis [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010.
- [14] 刘佳, 郑敏利, 姜彬, 等. 基于知识的高速面铣刀设计系统研究 [J]. 工具技术, 2009, 43 (10): 22-25.
- Liu J, Zheng M L, Jiang B, et al. Research on design system of high speed face milling cutter based on knowledge [J]. Tool Engineering, 2009, 43 (10): 22-25.
- [15] 李新, 徐宁. 基于知识重用的刀具选配技术研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 474 (5): 82-84.
- Li X, Xu N. Research on tool selection technology based on knowledge reuse [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 474 (5): 82-84.
- [16] 路浩, 汪认, 魏艳红. 高速动车焊接工艺评定专家系统研制 [A]. 中国机械工程学会焊接学会. 中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议 [C]. 南昌, 2013.
- Liu H, Wang R, Wei Y H. Development of welding procedure qualification expert system for high speed motor car [A]. Welding Society of China Society of Mechanical Engineering. Proceedings of the 18th National Welding Academic Conference of Welding Society of China Society of Mechanical Engineering [C]. Nanchang, 2013.
- [17] 刘尚仁. 基于知识的汽车焊装夹具智能化 CAD 系统模型和知识库的研究与开发 [D]. 烟台: 烟台大学, 2007.
- Liu S R. Research and Development of Intelligent CAD System Model and Knowledge Base of Automobile Welding Fixture Based on Knowledge [D]. Yantai: Yantai University, 2007.
- [18] Li H C, Zhou K Q, Mo L P, et al. Weighted fuzzy production rule extraction using modified harmony search algorithm and BP neural network framework [J]. IEEE Access, 2020, 8: 186620-186637.
- [19] 朱光菊, 夏幼明. 框架知识表示及推理的研究与实践 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2006, 28 (1): 154-157.
- Zhu G J, Xia Y M. Research and practice of frame knowledge representation [J]. Journal of Yunnan University: Natural Science Edition, 2006, 28 (1): 154-157.
- [20] 王永庆. 人工智能原理与方法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- Wang Y Q. Principles and Methods of Artificial Intelligence [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [21] 汤文字, 李玲娟. CBR 方法中的案例表示和案例库的构造 [J]. 西安邮电学院学报, 2006, (5): 75-78.
- Tang W Y, Li L J. The representing of case and construction of case base by CBR method [J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2006, (5): 75-78.
- [22] 李太福, 黄茂林, 赵明富. 旋转机械故障诊断的框架知识表示 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, (5): 633-636.
- Li T F, Huang M L, Zhao M F. Fault diagnosis knowledge representation of rotary machinery based on frame structure [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, (5): 633-636.
- [23] Mandolini M, Campi F, Favi C, et al. A framework for analytical cost estimation of mechanical components based on manufacturing knowledge representation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (3): 1131-1151.
- [24] Wei X B, Yuan H, Wang H, et al. Intelligent design for automotive interior trim structures based on knowledge rule-based reasoning [J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 21 (5): 1149-1167.
- [25] 张永春, 周洪, 王秀凤, 等. 基于知识工程的冷冲压模具设计系统 [J]. 锻压技术, 2013, 38 (3): 125-128.
- Zhang Y C, Zhou H, Wang X F, et al. Cold stamping die design system based on knowledge engineering [J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 38 (3): 125-128.
- [26] 张孝木. 客车驱动桥壳智能化 CAE 系统的知识表示研究 [J]. 科技资讯, 2014, 12 (10): 84-85.
- Zhang X M. Research on knowledge representation of intelligent CAE system for bus drive axle housing [J]. Science & Technology Information, 2014, 12 (10): 84-85.
- [27] 黄德浩, 杨宗源, 黄海涛. 基于框架表示的组件库模型 [J]. 计算机工程, 2002, (7): 111-112, 139.
- Huang D H, Yang Z Y, Huang H T. A component library model based on frame representation [J]. Computer Engineering, 2002, (7): 111-112, 139.
- [28] 张立志, 李原, 余剑峰. 复杂产品系统的风险管理实现研究 [J]. 航空制造技术, 2009, 331 (9): 94-97.
- Zhang L Z, Li Y, Yu J F. Implementation on risk management of complex product system [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 331 (9): 94-97.
- [29] 柯旭贵, 张佑生. 基于实例推理的冲压模结构设计的框架知识表示 [J]. 计算机工程与应用, 2002, (13): 254-256.
- Ke X G, Zhang Y S. Knowledge representation of the die structure

- design on frame with case-based reasoning [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, (13): 254-256.
- [30] 李洁, 丁颖. 语义网、语义网络和语义网络 [J]. *计算机与现代化*, 2007, 143 (7): 38-41.
- Li J, Ding Y. Semantic web, semantic grid and semantic network [J]. *Computer and Modernization*, 2007, 143 (7): 38-41.
- [31] Ma Q, Isahara H. Semantic networks represented by adaptive associative memories [J]. *Neurocomputing*, 2000, 34: 207-225.
- [32] Sarica S, Luo J. Design knowledge representation with technology semantic network [A]. *The Design Society. Proceedings of the Design Society* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [33] Che L Q, Wang P, Dong H, et al. An artificial intelligence based data-driven approach for design ideation [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, 61: 10-22.
- [34] 刘璨. 基于特征的零件知识语义网络表示法 [J]. *机电工程技术*, 2003, (6): 49-50.
- Liu C. Approach of semantic network for representing feature based knowledge of part [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2003, (6): 49-50.
- [35] 顾复, 张树有. 基于语义网络的产品建模及配置方案搜索 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2010, 44 (9): 1692-1697.
- Gu F, Zhang S Y. Semantic web based product modeling and configuration searching method [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2010, 44 (9): 1692-1697.
- [36] 郑金桥, 王义林, 李志刚. 基于知识工程的大型复杂冲压件工艺方案设计 [J]. *中国机械工程*, 2004, (16): 16-20.
- Zheng J Q, Wang Y L, Li Z G. Knowledge-based process planning for large complicated stampings [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, (16): 16-20.
- [37] 徐宝祥, 叶培华. 知识表示的方法研究 [J]. *情报科学*, 2007, 25 (5): 690-694.
- Xu B Y, Ye P H. Research on the method of knowledge representation [J]. *Information Science*, 2007, 25 (5): 690-694.
- [38] 陈德锐. 面向对象的知识表示方法与知识库构建研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- Chen D R. The Research of Object Oriented Knowledge Representation and Construction of Knowledge Base [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [39] 刘晓慧. 面向对象的知识表示方法研究 [J]. *电脑学习*, 2010, 146 (1): 135-137.
- Liu X H. Research on object-oriented knowledge representation method [J]. *Computer Learning*, 2010, 146 (1): 135-137.
- [40] 朱玲利, 孙亦博. 回转窑专家系统综合知识表示方法的研究 [J]. *洛阳师范学院学报*, 2015, 34 (8): 68-71.
- Zhu L L, Sun Y B. Research on knowledge presentation methods in expert system for rotary kiln [J]. *Journal of Luoyang Normal University*, 2015, 34 (8): 68-71.
- [41] 周梦杰, 蒋国璋. 面向对象混合知识表示方法在钢铁一体化生产中的应用 [J]. *现代制造工程*, 2016, 430 (7): 30-34.
- Zhou M J, Jiang G Z. Application of object-oriented representation in the integrated steel production [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016, 430 (7): 30-34.
- [42] 刘钊. 数控机床设计知识库系统知识获取、表示及推理研究 [J]. *机械制造与自动化*, 2012, 41 (2): 118-120.
- Liu Z. Study of knowledge acquisition, representation and reasoning of knowledge base system in cnc machine tools design [J]. *Machine Building & Automation*, 2012, 41 (2): 118-120.
- [43] 周伟祝, 宦婧. 新的面向对象知识表示方法 [J]. *计算机应用*, 2012, 32 (S2): 16-18.
- Zhou W Z, Huan J. New object-oriented knowledge representation method [J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32 (S2): 16-18.
- [44] 于芳芳, 郑国磊, 陈树林, 等. 飞机整体壁板智能数控编程系统 [J]. *航空制造技术*, 2008, 320 (23): 83-88.
- Yu F F, Zheng G L, Chen S L, et al. Intelligent NC programming system of aircraft integral panel [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, 320 (23): 83-88.
- [45] Gruber T R. A translation approach to portable ontology specifications [J]. *Knowledge Acquisition*, 1993, 5 (2): 199-220.
- [46] Gruber T R. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing [J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 1995, 43 (5-6): 907-928.
- [47] Huang X Q, Tang J Y, Tan Z, et al. Knowledge graph embedding by relational and entity rotation [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 229 (11): 20-31.
- [48] Novacek V, Mcgauran G, Matallanas D, et al. Accurate prediction of kinase-substrate networks using knowledge graphs [J]. *Cold Spring Harbor Laboratory*, 2019, 16 (12): 1-30.
- [49] Panisson A R, Bordini R H. Knowledge representation for argumentation in agent-oriented programming languages [A]. *IEEE. Brazilian Conference on Intelligent Systems* [C]. Recife (BR): 2016.
- [50] Chhim P, Chinnam R B, Sadawi N. Product design and manufacturing process based ontology for manufacturing knowledge reuse [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, (30): 905-916.
- [51] Li Z, Zhou X W, Wang W M, et al. An ontology-based product design framework for manufacturability verification and knowledge reuse [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, (99): 2121-2135.
- [52] 艾鑫. 基于语义的航空材料标准知识管理研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- Ai X. Research on Knowledge Management of Aviation Material Standards Based on Semantics [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [53] Zhou Q, Yan P, Liu H Y, et al. A hybrid fault diagnosis method for mechanical components based on ontology and signal analysis [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, (6): 1-23.
- [54] 顾黎, 李澍, 王哲, 等. 面向重用的MBD模型本体知识库构建技术研究 [J]. *航空制造技术*, 2017, 537 (18): 100-105.
- Gu L, Li S, Wang Z, et al. Research on construct technology of mbd model ontology knowledge base oriented to reuse [J]. *Aero-*

- nautical Manufacturing Technology, 2017, 537 (18): 100-105.
- [55] 刘旭. 融合 CBR 与知识图谱的冲压模具设计知识表示 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- Liu X. Knowledge Representation Combining Case-Based Reasoning with Knowledge Graphs for Stamping Die Design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [56] 张田会, 张发平, 阎艳, 等. 基于本体和知识组件的夹具结构智能设计 [J]. 计算机集成制造系统, 2016, 25 (5): 1165-1178.
- Zhang T H, Zhang F P, Yan Y, et al. Intelligent fixture configuration design based on ontology and knowledge components [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 25 (5): 1165-1178.
- [57] 李长杰, 明新国, 邱坤华, 等. 基于本体的飞机工装设计知识表示方法 [J]. 中国机械工程, 2014, 25 (19): 2614-2619.
- Li C J, Ming X G, Qiu K H, et al. Knowledge representation method for aircraft tooling design based on ontology [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25 (19): 2614-2619.
- [58] 负周会, 徐龙, 宋利康, 等. 基于本体的航空产品钣金件工艺知识获取与表示研究 [J]. 航空制造技术, 2014, 446 (Z1): 111-114.
- Yuan Z H, Xu L, Song L K, et al. Knowledge acquisition and representation of aircraft sheet metal part based on ontology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 446 (Z1): 111-114.
- [59] 朱文博, 李爱平, 刘雪梅. 基于本体的冲压工艺知识表示方法研究 [J]. 中国机械工程, 2006, (6): 616-620.
- Zhu W B, Li A P, Liu X M. Research on knowledge representation for stamping process based on ontology [J]. China Mechanical Engineering, 2006, (6): 616-620.
- [60] 李丽英, 刘德仿, 周临震, 等. 本体混合型知识表示在组合机床夹具设计系统中的应用 [J]. 机械设计, 2011, 28 (4): 89-92.
- Li L Y, Liu D F, Zhou L Z, et al. Application of ontology hybrid knowledge representation in fixture design system of modular machine tool [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28 (4): 89-92.
- [61] 姜少飞, 卢纯福, 鲁聪达, 等. 用于机加工产品设计过程降低成本求解的知识表示方法 [J]. 机械工程学报, 2007, (3): 89-94.
- Jiang S F, Lu C F, Lu C D, et al. New method of machining product knowledge representation for solution of cost reduction in design process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, (3): 89-94.
- [62] 陈军, 石晓祥, 赵震, 等. 汽车覆盖件冲压工艺设计 KBE 系统中的知识表示技术 [J]. 金属成形工艺, 2003, 21 (1): 49-52.
- Chen J, Shi X X, Zhao Z, et al. Knowledge representation techniques in auto panel stamping process design KBE system [J]. Metal Forming Technology, 2003, 21 (1): 49-52.
- [63] Hka B, Pw A, Yan L A, et al. Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 37: 1-16.
- [64] 梁蕾, 宋庆明, 康陆佳, 等. 总装制造工艺知识图谱的构建 [J]. 现代计算机, 2022, 28 (8): 59-62.
- Liang L, Song Q M, Kang L J, et al. Construction of knowledge graph for final assembling process [J]. Modern Computer, 2022, 28 (8): 59-62.

