

引文格式:肖彪,徐宝德,彭仕鑫,等.基于知识图谱的复杂薄壁零件机械加工工艺知识建模研究[J].航空制造技术,2024,67(11):76-86.

XIAO Biao, XU Baode, PENG Shixin, et al. Study on machining knowledge modeling of complex thin-walled parts based on knowledge graph[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(11): 76-86.

基于知识图谱的复杂薄壁零件机械加工工艺知识建模研究

肖彪¹,徐宝德²,彭仕鑫¹,尉渊²,丁国智²,王萌²,赵正彩¹

(1.南京航空航天大学,南京 210016;

2.北京星航机电装备有限公司,北京 100074)

[摘要] 智能工艺设计是数字孪生环境下工艺设计的核心,零件工艺知识建模是实现基于数字孪生的智能工艺设计的前提。为此,针对航空航天领域复杂薄壁零件机械加工工艺数据结构化程度低、难以重用的问题,提出了典型复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱的构建和质量评估方法。首先,对机械加工工艺知识组成和结构进行分析。其次,通过本体建模、知识抽取、知识储存等相关技术实现了工艺知识的可视化表征,并基于 Neo4j 图数据库实现机械加工工艺知识检索。最后,利用层次分析法对构建完成的知识图谱进行评估,并以框段类零件的机械加工工艺知识为验证对象,得到子图谱的综合准确率为 92.28%。试验结果表明,基于知识图谱的工艺知识建模方法切实可行,有助于实现工艺知识的有效组织和重用,为数字孪生的智能工艺设计奠定基础。

关键词:复杂薄壁零件;知识图谱;工艺知识建模;数据抽取;图谱质量评估;数字孪生

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.11.076



肖彪

博士研究生,研究方向为智能加工单元调度优化、智能工艺设计。

数字孪生技术可以监控零件的生产过程并更新虚拟零件的实时状态,为工艺人员提供零件制造过程的反馈,以辅助工艺设计工作。为了实现加工与设计的协同,建立工艺知识数据库,是实现数字孪生模型建立及其应用的关键基础^[1]。复杂薄壁零件在航空航天领域应用十分广泛,如飞机蒙皮、壁板,火箭舱体、整流罩等。一方面,由于复杂薄壁零件壁厚小、刚性差,在制造过程中容易受到切削力、残余应力等因素的影响而发生变形;另一方面,复杂薄壁零件通常使用钛合金、高温合金、复合材料等难加工材料,可加工性差。此外,一个复杂薄壁零件包含的典型特征数可多达 20 余个,因此,需要更多的加工步骤控制复杂薄壁零件的加工质量和精度。复杂

薄壁零件的机械加工工艺流程极其复杂,从毛坯料到加工成完整零件,过程中包含的工艺知识数量也十分庞大。目前大多数工艺数据以简单图纸和工艺卡片的形式存在,结构化程度低,导致历史工艺知识重用困难^[2]。由于不同工艺员设计经验的差异,完成的零件工艺规程质量也参差不齐。因此,在进行工艺设计时,实现历史工艺知识的有效重用以及工艺设计规范性的提高,对于提升数字孪生驱动下的工艺设计效率和工艺质量一致性具有重要意义。

知识图谱(Knowledge graph)作为构建下一代智能化搜索引擎的核心基础,它的概念由 Google 公司于 2012 年首次提出^[3]。本质上,知识图谱是以三元组(头实体、关系、

尾实体和实体、属性、属性值)形式描述客观世界的实体及其关系之间的语义网络^[4],相对于传统的数据储存工具和知识表示方法,知识图谱拥有以下优势^[5-7]:(1)图结构的数据存储方式让数据调取速度更快;(2)数据检索更有深度和广度,可以匹配出与搜索结果相关的完整知识体系;(3)具有强大的推理能力,可以模仿人类的思考过程推理出隐含知识;(4)知识图谱支持可视化展示,更方便进行人机交互。

随着知识图谱技术逐渐成熟,为知识建模提供了新的思路。近年来,已有相关研究人员利用知识图谱技术在知识建模、重用及共享领域进行了探索。李秀玲等^[8]针对复杂、多样的工艺知识难以统一表示所导致的工艺知识重用和共享困难等问题,提出了一种面向工艺重用的工艺知识图谱构建方法。Grangel-Gonzalez等^[9]提出一种基于知识图谱集成不同数据源的通用方法,并能基于知识图谱的数据轻松实现生产线产品零件的管理。顾星海等^[10]基于知识图谱将CAD几何信息与装配工艺文档信息进行集成建模,有效地提升了装配信息之间的交互效率。Zhang等^[11]提出了一种基于子图语义距离和本体的金属材料概念、实体和属性等的抽取方法,利用知识图谱实现了金属材料的知识建模。目前,知识图谱在机械加工领域主要用于整合和组织零件材料属性、加工工艺参数和机床性能参数等各种数据,为加工参数推理、工艺路线优化和机器故障诊断等智能决策提供历史数据支撑。如何使构建出的知识图谱与制造企业内部知识保持一致性和互通性,一直是该领域的研究热点。

因此,本文通过分析航天企业的工艺知识组成和结构,提出基于知识图谱的复杂薄壁零件机械加工工艺知识表示方法,通过构建知识图谱,在语义层面将复杂薄壁零件加工过

程中的工艺知识关联起来,结合本体建模、知识抽取、知识融合和本体关系建立等方法,搭建复杂薄壁零件机械加工工艺知识库,以实现工艺知识结构化和可视化,有利于历史工艺知识的重用,同时对工艺设计数字化具有辅助作用。

1 机械加工工艺知识组成与定义

复杂薄壁零件的工艺设计是一个十分复杂的多任务、多层次、多约束的过程,包括过程知识、加工规则和专家经验等工艺知识贯穿于整个设计过程。企业的工艺设计实践中积累了大量的工艺知识,这些工艺知识大多以工艺设计手册、专家经验、计算机辅助工艺规划(Computer aided process planning, CAPP)数据库3种形式存在。在本研究中,将CAPP数据库中的历史工艺设计实例作为知识图谱构建的数据来源,数据库的工艺知识以文档的形式对历史工艺实例进行存储,这种方式虽然在一定程度上方便管理,但工艺知识之间的关联性差,查询检索困难,难以实现知识共享。每个工艺实例都以工艺规程的形式体现,其中既包括工艺设计手册上的通用知识,也包含工艺专家根据零件实际加工情况和自身经验所形成的决策知识,工艺规程中包含的工艺知识内容如图1所示。因此,本文以复杂薄壁零件历史加工工艺规程

为研究对象,构建零件机械加工工艺知识模型。

完整的零件工艺规程包含工序路线,在每道工序中包含若干个工步,在工步内容中又描述了一个或多个特征的加工信息。因此,考虑工艺知识表示的完整性和逻辑性,将工艺规程中涉及的工艺知识分成以下4个层次。

(1)零件层。包括零件基本信息、材料信息、加工信息。其中,零件基本信息是对每个零件实例的描述,便于搜索和重用,包括零件ID、零件代号等;材料信息是对毛坯件的材料描述,包括材料名称、毛坯尺寸等;加工信息是每个零件在实际加工中的工艺设计经验,包括整体工艺路线、注意事项等。

(2)工序层。包括工序ID、工序代号、工装信息等。工序层包含了工艺人员根据零件实际加工情况做出工序合并和工序连接的设计经验与方法。

(3)工步层。包括工步ID、工步代号、加工余量和尺寸公差等加工参数及加工过程具体内容的描述。

(4)特征层。包括特征ID、特征代号、特征名称及各特征尺寸参数的描述。

基于层次表示的工艺规程表达模型如图2所示,展示了一个完整的零件工艺规程中4个层次包含的工艺信息和彼此之间的关系,从这4个

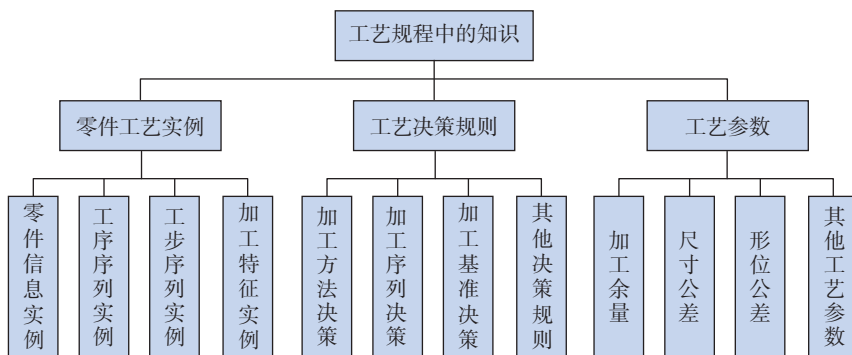


图1 工艺规程中包含的工艺知识内容

Fig.1 Process knowledge content contained in process specification

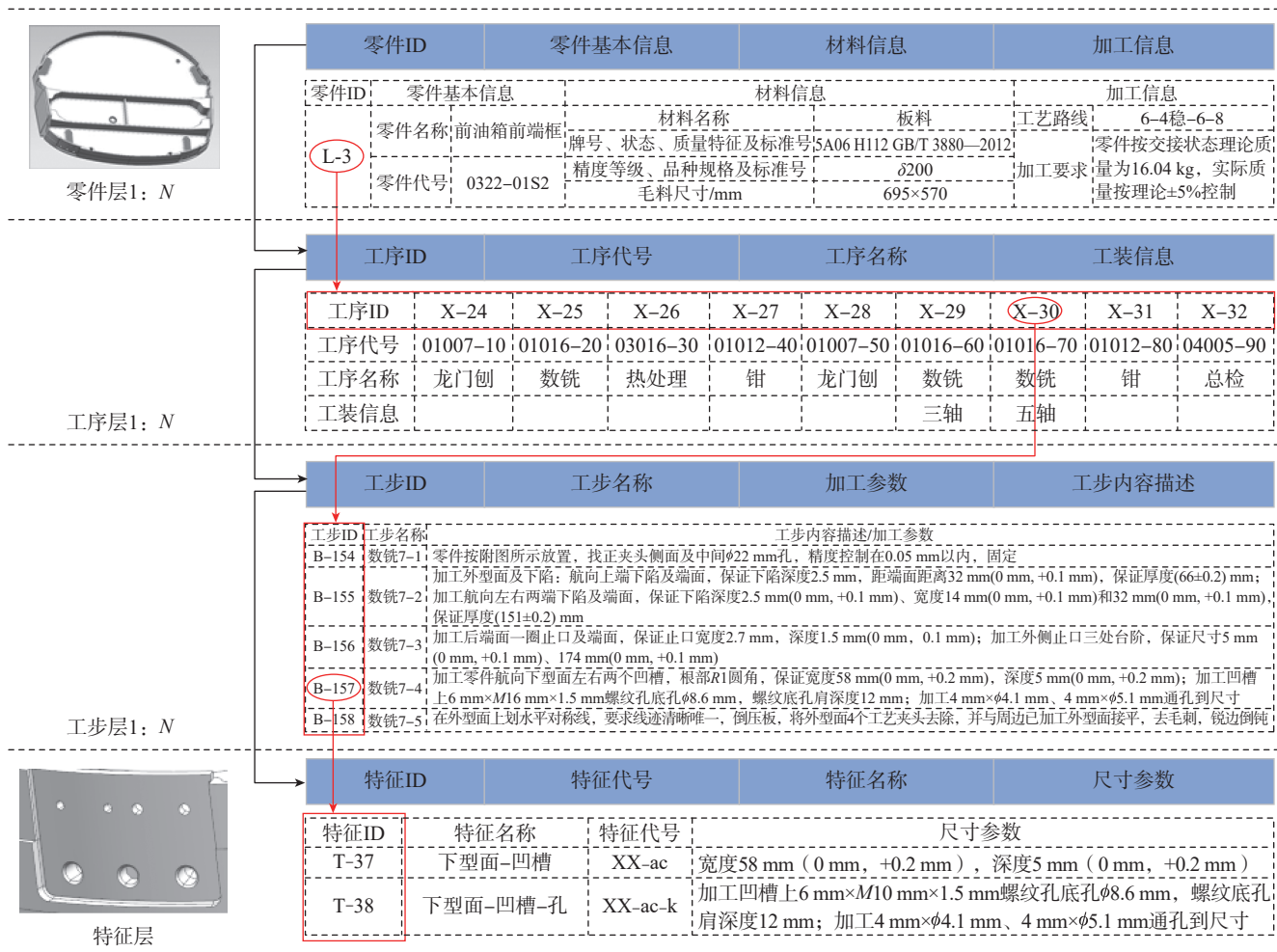


图2 工艺规程表达模型

Fig.2 Process specification expression model

层次对工艺知识进行分析,可以全面地概括复杂薄壁零件各个加工阶段的工艺知识,提高工艺的完整性、关联性和推理速度。

通过对实体、关系和属性的知识抽取完成数据层的构建;最后将模式层与数据层关联映射并导入 Neo4j 图

数据库中,得到工艺知识图谱。复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱构建框架如图3所示。

2 复杂薄壁零件机械加工知识图谱构建

2.1 架构设计

将航空航天复杂薄壁零件作为图谱构建对象,其机械加工工艺知识图谱属于一种领域知识图谱,对知识有更加严苛的专业性和准确性要求。本文采用自顶向下和自底向上相结合的构建方法,首先通过对历史工艺数据的分析,并在某企业专家指导下,利用本体建模工具 Protege 进行本体构建,确立良好的概念层次;再

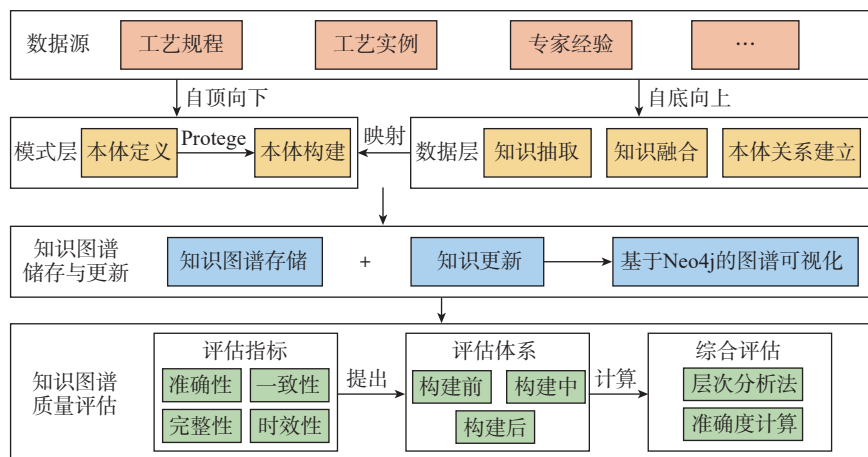


图3 复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱构建框架

Fig.3 Construction framework of machining knowledge graph for complex thin-walled parts

2.2 模式层设计

采用本体建模的方法完成模式层构建。本体描述某个领域内的概念与概念间关系,使得概念和关系在共享的范围内具有共同认可的、明确的、唯一的定义^[12]。

由典型复杂薄壁零件机械加工工艺知识组成的分析结果可知,从毛坯件到成品零件的加工过程中,涉及的四大核心要素分别是零件、工序、工步和特征,并采用层次树结构对各要素包含的概念进行分类细化。利用本体对概念和关系进行建模,形成类、对象属性和数据属性,具体的模式层结构如图4所示。

(1)零件本体。从零件结构及实际应用角度分析,将复杂薄壁零件本体分成舱段类、框段类、壁板类、翼面类、骨架类和蒙皮类。根据长径比、壁厚等典型特征继续细化成多个子类,例如将舱段类分为复杂舱段、异形舱段、封闭舱段和 Ω 舱段。

(2)工序本体。每个零件本体都有加工工序路线,典型的机械加工工序本体包括车、铣、刨、磨、钳和镗等工种。

(3)工步本体。每道工序包含着多个加工工步,工步可以分为固化工步(如划线、零件找正、去毛刺和去夹头等),加工结构特征的工步(如铣平面、铣型面、车外形和车端面等)。

(4)特征本体。为保证工艺知识图谱中对特征描述的区别性、规范性和统一性,以工艺规程中的加工特征作为参考,结合生产现场工艺专家经验制定出特征划分规则。首先,根据复杂薄壁零件装配时所在的空间位置进行划分,包括前端、后端、外型面、上型面和下型面等;其次,根据特征的形状结构进行划分,包括下陷、凸台、凹槽、整流罩安装面和U型腔等。

利用本体建模工具 Protege 按照模式层结构完成复杂薄壁零件机械加工工艺知识本体建模,将结果保存

为 owl 文件,便于后续与数据层相互映射。利用可视化插件 OntoGraf 将所构建的本体语义关系进行可视化展示,如图5所示,不同颜色的虚线表示不同的对象属性,其箭头方向由定义域指向值域。

2.3 数据层构建

数据层依据模式层设定的结构层次和规则进行构建,从数据源中抽取出本体概念及其属性,使构建完成的模式层实例化,典型复杂薄壁零件机械加工工艺知识数据层的构建包括知识抽取、知识融合和本体关系建立3个部分。

2.3.1 知识抽取

知识抽取出的知识质量直接影响着知识图谱的优劣^[13]。知识抽取的数据源是以 PDF 格式保存的历史工艺文件,包括结构化数据和非结构化数据。知识抽取内容主要包括对实体和属性的抽取。针对知识抽取的数据源有以下特点:(1)面向航空航天领域的复杂薄壁零件机械加工工艺知识,领域专业性强;(2)格式

统一,各类本体以模块化的形式体现在工艺文件中;(3)在工艺专家的帮助下,对复杂薄壁零件机械加工工艺知识本体及概念关系进行了详细定义。基于上述原因,本文采用基于模板匹配的抽取方法可显著提高知识图谱质量。

(1)结构化数据的知识抽取。

在工艺文件中的结构化数据包括零件、工序、工步的实体及相关数据属性,该部分利用 PDFplumber 库将实体及属性提取出来,生成实例表储存于 MySQL 数据库中。MySQL 数据库中储存的零件实例如表1所示。

(2)非结构化数据的知识抽取。

非结构化数据是指数据结构不规则或不完整,没有预定义的数据模型,不适用数据库二维逻辑表来表示的数据。非结构化数据的抽取方法通常有基于规则的方法、机器学习的方法和深度学习的方法等^[14]。采用编写规则模板的方法进行知识抽取,该方法修改方便、易于理解,在

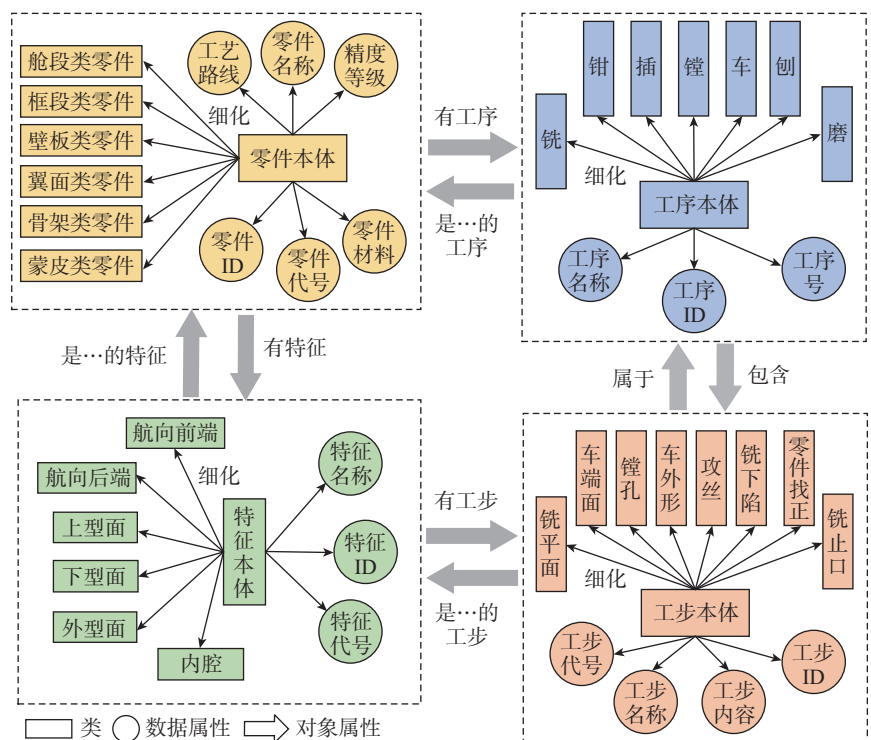


图4 复杂薄壁零件加工工艺知识图谱模式层

Fig.4 Schema layer of knowledge graph for machining process of complex thin-walled parts

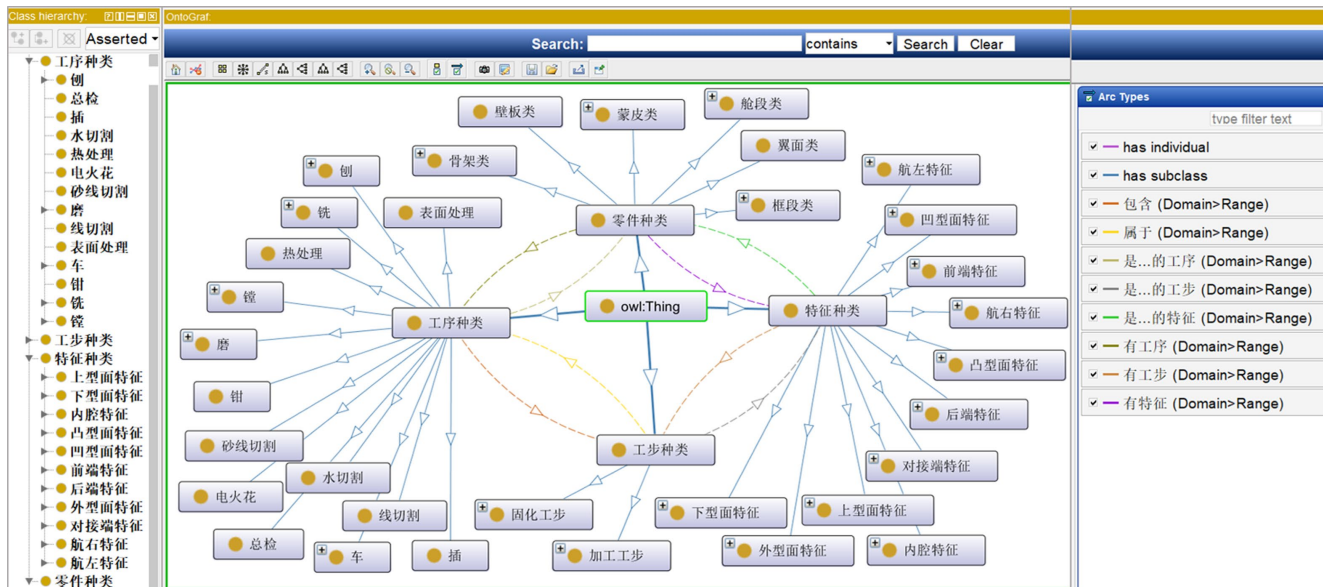


图5 本体关系可视化

Fig.5 Ontology relationship visualization

小规模的数据集上相对容易实现。在工艺文件中对于加工特征的描述相对固定，动宾搭配组合常用“加工……”等。因此，采用定义匹配模板对特征本体进行抽取，抽取规则以句号、逗号等标点作为规则的终止符。

2.3.2 知识融合

通过知识抽取得到的结果中包含冗余和错误信息，须对数据进行清理和整合。通过知识融合，可以消除概念的歧义，剔除冗余和错误概念，从而确保知识的质量。由于工艺文件是不同工艺员编写，所以无法保证实体名称的规范性。针对复杂薄壁零件机械加工工艺知识的融合，将数据源中不同的实体语义链接到同一实体上，完成实体语义的消歧和共指消解，并对实体做统一规范命名处理，具体融合流程如图6所示。

基于典型复杂薄壁零件加工工艺规程中各实体名称构建工艺知识词典，针对抽取到的实体，采用编辑距离对实体名称进行相似度计算，将相似度大于阈值的实体聚类融合，统一成词典中指代相同的实体命名，达到实体对齐的效果。编辑距离指一

表1 MySQL数据库中存储的零件实例

Table 1 Part instances in MySQL database

零件ID (LJ-ID)	零件名称 (LJ-Name)	零件代号 (LJ-Code)	零件工艺路线 (LJ-Process)	...
L-1	前端框	0510-1101	6-4稳-6-试茨-6-8	...
L-2	中端框	0510-1105YS	6-4稳-6-试茨-6-8	...
L-3	后端框	0510-1103S1	6-4稳-6-试茨-6-8	...
L-4	后油箱前端框	0322-01S2	6-4稳-6-8	...
L-5	后油箱后端框	0322-02S2	6-4稳-6-8	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

个字符串转换成另一个字符串所需的最小编辑次数，编辑操作包括替换、插入和删除，编辑距离越小表明两字符串相似度越大。式(1)为编辑距离的递推公式。

$$lev_{a,b}(i,j) = \begin{cases} \max(i,j), & \text{if } \min(i,j) = 0 \\ \min \begin{cases} lev_{a,b}(i-1,j) + 1 \\ lev_{a,b}(i,j-1) + 1 \\ lev_{a,b}(i-1,j-1) + 1_{(a_i \neq b_j)} \end{cases}, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中， a, b 为字符串； i, j 为长度； $lev_{a,b}(i-1, j)$ 为删除 a_i ； $lev_{a,b}(i, j-1)$ 为插入 b_j ； $lev_{a,b}(i-1, j-1) + 1_{(a_i \neq b_j)}$ 为替换 b_j ，其中 $1_{(a_i \neq b_j)}$ 为一个指示函数，相等时为0，不相等时为1。

将实体融合的结果保存于MySQL数据库中，如表2所示。

2.3.3 本体关系建立

通过知识抽取得到的实体之间是以节点的形式分隔开，未产生关联。关系抽取的目的为挖掘实体之间的关联关系，搭建起实体内部的语义桥梁^[15]。在工艺规程中缺少对本体关系的描述，难以通过关系抽取的方式获得本体间关系，且对象属性的定义仅有4组本体关系。因此，采用建立关系表的方式将抽取得到的实体关联。图7为本体关系建立示意图，将知识抽取获取到的工艺数据中的所有本体实例ID提取出来，使其

有关系的实例之间用 ID 进行一一对应,最后生成图 7 所示的 4 个关系表:“特征有工步”“工序有工步”“零件有特征”和“零件有序序”。

2.4 知识存储

知识图谱的主要存储方式有 3 种^[16]: 基于关系型数据库的存储、基于 RDF 结构的存储方式、基于免费开源的图数据库。本文利用关系型数据库对数据操作高效的优点和图数据库在搜索查询方面的优

势^[17],使用关系型数据库和图数据库相结合的方式对工艺知识进行存储:以 MySQL 数据库作为储存数据的媒介,主要储存各类本体实例;以 Neo4j 图数据库为中心,将三元组在 Neo4j 图数据库中可视化展示。通过对类、对象属性和数据属性的映射使模式层与数据层结合,实现知识图谱的实例化。知识存储路径及方法如图 8 所示,具体包括模式层导入和数据层导入两个部分。

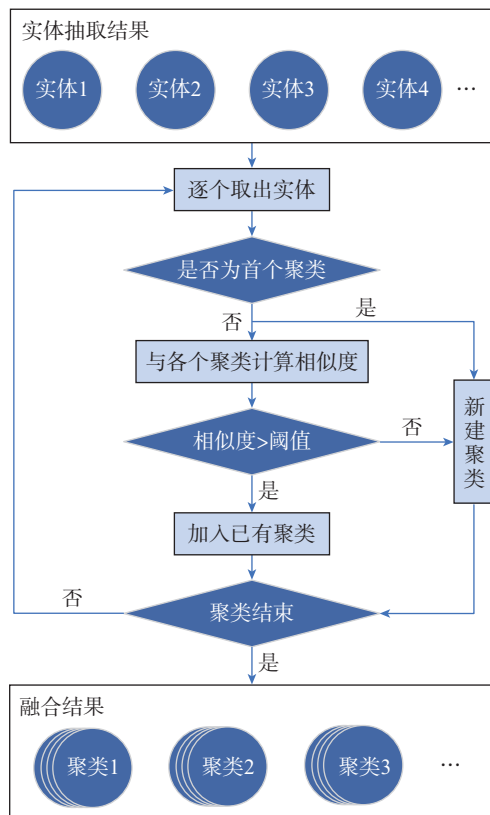


图 6 特征实体知识融合流程

Fig.6 Process of feature entity knowledge fusion

表 2 MySQL 数据库中存储的特征实例
Table 2 Feature instances in MySQL database

特征 ID (TZ-ID)	特征名称 (TZ-Name)	特征代号 (TZ-Code)
T-1	前端框-前端-端面	QDK-QD-dm
T-2	前端框-外型面	QDK-WX-mm
T-3	前端框-内型面	QDK-NX-mm
T-4	前端框-后端-端面	QDK-HD-dm
T-5	前端框-前端-凹槽	QDK-QD-ac
⋮	⋮	⋮

2.5 可视化展示与检索

2.5.1 可视化展示

基于所提出的典型复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱构建方法,选取数据库中 325 个典型零件的工艺实例,利用工艺规程中的工艺知识进行数据层构建,共形成 23596 个节点和 43713 个实体关系,将这些三元组数据导入 Neo4j 图数据库中,构成可视化的复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱。图 9 是知识图谱中某零件实例的所有关联信息的展示。

2.5.2 工艺知识检索

传统信息检索方式是通过关键词匹配完成的,搜索结果仅为自然语言的表层信息,未深入到语义信息。而知识图谱以图的形式对复杂薄壁零件加工工艺知识进行表示,可以准确直观地表达出实体之间的关联关系。

以“端框”为例,当用户需要查询零件的属性和加工工艺信息时,利用 Cypher 语言查询如下:

```
MATCH p= (n : 零件实例 { 零件名称: '端框' }) <-[r]-> (m)
RETURN p
```

查询结果如图 10 所示,查询时间仅需 7 ms,可以通过双击特征或节点查看与之关联的工步信息,由此仅需搜索零件的名称或代号即可获得该零件相关属性、加工工艺规程以及特征构成信息,提高了检索效率和信息关联深度。

3 工艺知识图谱构建质量评估

3.1 图谱质量评估维度与指标

为有效控制知识图谱质量,需从图谱构建前、中、后 3 个阶段分别进行工艺知识图谱质量评估。从数据源至实际应用的多个过程中影响图谱质量的因素较多,分别从准确性、一致性、完整性和时效性对图谱质量进行多维度评估^[18]。结合工艺知识图谱构建的 3 个阶段,提出了一套复杂薄壁零件加工工艺知识图谱质量评估体系,具体指标如图 11 所示。

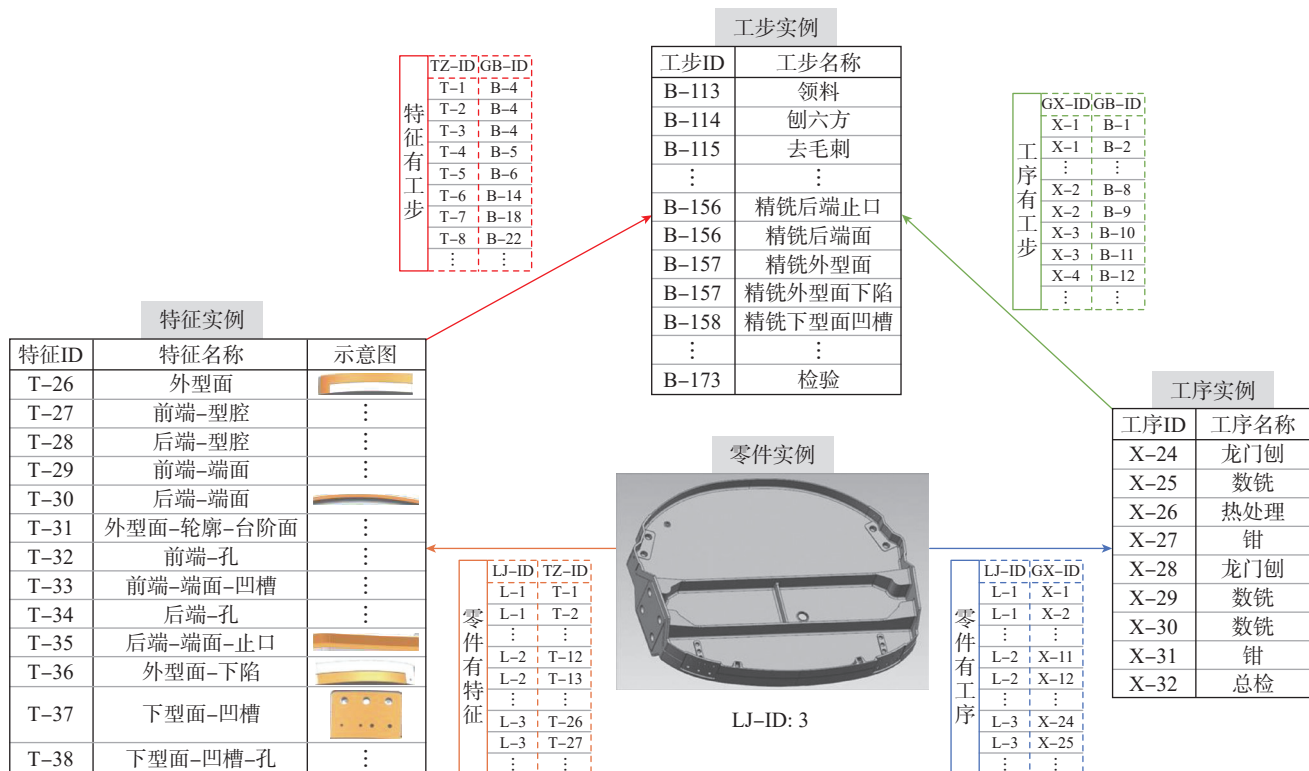


图7 本体关系建立示意图
Fig.7 Ontology relationship establishment diagram

3.2 图谱质量综合评估

工艺知识图谱质量综合评估旨在结合图谱构建多个评估指标将工艺知识的质量量化,从而根据评估结果对知识进行针对性的修改和舍弃,达到保证知识图谱可靠性和实用性的目的。本文以工艺知识图谱的综合准确度为评估目标,通过层次分析法对指标权重赋值,计算图谱构建3个阶段的准确度,结合权重值最后得到工艺知识图谱的准确度,从而对图谱质量进行综合评估。

3.2.1 确定指标权重

为使复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱的质量满足企业实际应用的要求,需将工艺专家在工艺设计过程中的主观判断引入质量评估指标权重赋值中。利用层次分析法把图11中的各指标按相互关系分解为自上向下的层次结构,每层内部指标需请工艺专家根据主观经验进行两两比较,并将主观判断量化形成判断矩阵,再利用数学方法计算每层判断

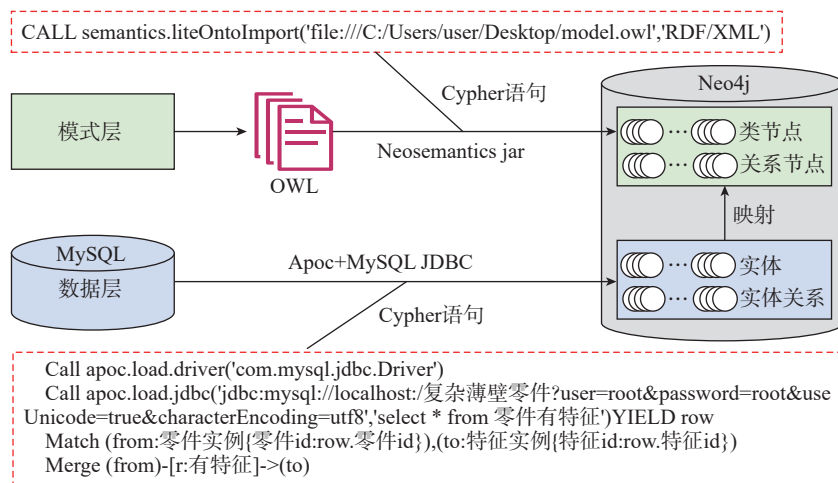


图8 知识存储路径及方法
Fig.8 Knowledge storage path and method

矩阵中各指标相对于上一层的权重值,最后进行层次总排序,计算出全部指标相对于总目标的权重系数^[19],具体步骤如下。

(1) 构造判断矩阵。

判断矩阵表示本层所有因素相对上一层的重要性比较,判断矩阵的元素 a_{ij} 表示元素 i 较于元素 j 重要

性,以图11中评估图谱质量的7个指标建立判断矩阵,即

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{17} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{27} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & \dots & a_{34} & \dots \\ \dots & \dots & 1/a_{34} & 1 & a_{67} \\ 1/a_{17} & 1/a_{27} & \dots & 1/a_{67} & 1 \end{bmatrix}_{7 \times 7} \quad (2)$$

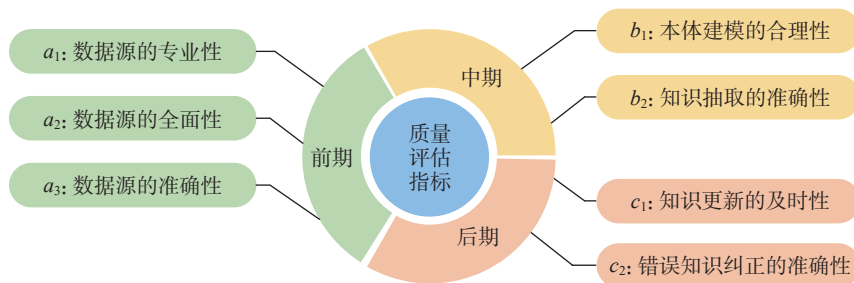


图 11 工艺知识图谱质量评估指标

Fig.11 Quality evaluation index of process knowledge map

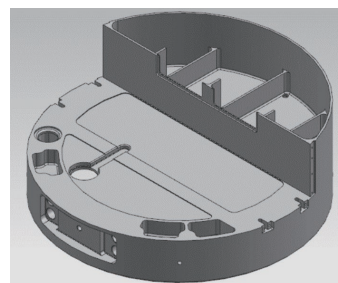


图 12 框段类零件三维模型

Fig.12 3D model of frame segment part

特征向量。矩阵 A 的特征向量 w_i 和最大特征根 λ_{\max} 的计算公式为

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{m=1}^n a_{mj}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\sum_{i=1}^n w_j a_{ij}}{w_j} \quad (5)$$

式中, m 为矩阵 A 的行数, 取值 1~7。

计算矩阵 A 的特征向量并做归一化处理得到权重向量 $W = (0.0763, 0.0495, 0.1974, 0.1295, 0.3039, 0.0509, 0.1924)$; 最大特征根 $\lambda_{\max} = 7.1724$ 。

(3) 一致性检验。

由于判断对象本身的复杂性, 以及工艺人员的思维判断的主观差异, 在实际进行指标标度判断时会对比较指标缺乏清楚的认识或出现一定的差异, 导致各指标间的重要程度排序出现矛盾, 整体权重分配得不到满意一致性。因此, 需进行满意一致性检验, 若判断矩阵偏出一致性条件的阈值则该矩阵无法客观反映指标间的关系。满意一致性检验 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, CI 越接近 0, 则一致性越满意; CI 越大则表示判断矩阵不一致越严重。为了衡量 CI 的大小, 又引入随机一致性指标 RI ^[21]。定义一致性比率为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

一般当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵 A 的不一致程度在容许范围内, 通过一致性检验。根据工艺知识图谱质量评估指标的判断矩阵得到 $CR = 0.0218 < 0.1$, 表明矩阵 A 具有满

意的一致性。

3.2.2 综合准确度计算

以复杂薄壁零件机械加工工艺知识图谱中框段类零件的工艺子图谱作为质量评估验证对象, 某框段类零件三维模型如图 12 所示。该子图谱中包含 72 个工艺文件实例, 4676 个节点和 8368 条实体关系。根据工艺知识图谱质量评估各指标权重赋值方法, 7 个指标从左到右权重赋值结果如表 3 所示。

可以看出, 知识抽取的准确性得到的权重值最高, 为 0.3039, 表明在工艺知识图谱构建的 3 个阶段中, 知识抽取的准确性对图谱质量评估影响最大。同时将相同阶段的评估指标权重相加, 得到 3 个阶段对图谱质量评估影响的占比, 记为 $W = \{w_1, w_2, w_3\} = \{0.3232, 0.4334, 0.2434\}$, 表明图谱构建中期相较于前后两个时期对图谱质量影响最大。

(1) 构建前准确度计算。

图谱构建前期的准确度通过专家对工艺规程中的工艺知识进行抽样检查, 评估工艺规程中达到复杂薄壁零件工艺设计领域使用标准的工艺知识所占比重, 计算公式为

$$R_1 = \frac{c}{k} \quad (7)$$

式中, k 为数据源包含的工艺知识总

量; c 为满足复杂薄壁零件加工工艺设计领域可信度要求的工艺知识数量。由框段类零件加工工艺文件可得, 工艺知识来源的准确度 R_1 为 98.49%。

(2) 构建中准确度计算。

工艺知识图谱构建过程中的质量主要取决于数据层中三元组的质量, 由专家对框段类零件工艺知识的三元组进行核查, 存在 698 个错误实体和 1440 个错误关系。因此构建过程中的准确度评估 $R_2 = 83.61\%$, 说明在数据层构建时会将数据源中知识实体和关系错误地表示, 从而影响三元组的质量。

(3) 构建后准确度计算。

图谱构建完成后还需对错误知识进行检测和修改, 利用 SDValidate 算法^[22]通过关系来检测错误知识, 准确度计算公式为

$$R_3 = 1 - \frac{r_{sdv}}{r_k} \quad (8)$$

式中, r_{sdv} 为识别出错误信息的个数; r_k 为图谱中所包含的关系数, 其中 $r_k = 8368$ 。由 SDValidate 算法检测出错误信息数量为 43 个, 则计算得到图谱构建完成的准确度 $R_3 = 99.49\%$ 。

结合图谱构建 3 个时期的准确度和各自影响质量评估的权重, 得到工艺知识图谱综合准确度计算公

表 3 质量评估指标权重值
Table 3 Quality evaluation index weight value

a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	c_1	c_2
0.0763	0.0495	0.1974	0.1295	0.3039	0.0509	0.1924

式为

$$R = \sum_{i=1}^3 R_i \times w_i \quad (9)$$

将 R_1 、 R_2 、 R_3 和各自的权重值代入到式(9)中,得到框段类零件机械加工子图谱的准确度 $R=92.28\%$ 。同时对图谱中其他 5 类零件的子图谱进行抽样试验检测,按照上述计算方法进行准确度计算,详细的质量评估情况如表 4 所示。结果表明构建的复杂薄壁零件机械加工子图谱的质量处于非常优秀水准。

4 结论

为了实现高效地组织管理和重用复杂薄壁零件机械加工子图谱,本文对基于知识图谱的机械加工子图谱知识建模方法进行了研究。

(1) 对复杂薄壁零件机械加工子图谱的组成结构开展分析,并对相应机加工工艺领域知识进行定义。

(2) 通过对历史工艺数据的分析,结合复杂薄壁零件机械加工子图谱领域的实体概念和关系,构建出机加工工艺子图谱相应的模式层。利用知识抽取、知识融合和本体关系建立等方法实现历史工艺规程数据结构化,并通过 Neo4j 图数据库实现了工艺数据的映射和工艺知识的表示。

(3) 针对构建的复杂薄壁零件机械加工子图谱质量提出了质量评估体系。以框段类零件机械加工子图谱为例进行了质量评估验证,准确度为 92.28%,结果表明使用该建模方法构建出的工艺子图谱质量满足应用需求。

本文研究了机械加工子图谱知识建模方法,后续将在数字孪生驱动的工艺设计模式基础上结合工艺自主决策与工艺知识挖掘等技术,进一步提升工艺设计的质量和效率。具体体现在以下 3 个方面。

(1) 工艺子图谱为数字孪生提供决策支持,辅助工艺人员评估不同工艺设计方案的效果,预测零件加

表 4 各类零件子图谱质量评估抽样试验结果

Table 4 Sampling test results of quality evaluation of various parts subgraphs

零件种类	工艺实例数量	节点数	实体关系数	综合准确度R/%
舱段类	20	1469	2911	90.34
翼面类	20	1188	2246	93.96
壁板类	20	1121	2074	94.69
骨架类	20	1206	2328	93.21
蒙皮类	20	1084	2065	95.03

工过程中可能会出现风险并提供解决方案。

(2) 利用工艺子图谱对数据和关系的深入理解,挖掘工艺设计中的潜在模式和规律,辅助工艺人员优化现有工艺路线。

(3) 在工艺子图谱的基础上,根据工艺设计目标与约束条件,实现特征尺寸、加工余量等工艺参数的自主推荐。

参考文献

- [1] 赵鹏. 基于数字孪生的加工工艺评价方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [2] ZHAO Peng. Research on evaluation method of machining process based on digital twinning[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [3] 李春磊. 面向机加工工艺设计过程的智能决策与工艺重用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [4] LI Chunlei. Research on intelligent decision-making and process reuse for machining process design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [5] AMIT S. Introducing the knowledge graph: Things, not strings[EB/OL]. (2012-05-16)[2024-03-15]. <http://googleblog.blogspot.com>.
- [6] YAN J H, WANG C Y, CHENG W L, et al. A retrospective of knowledge graphs[J]. Frontiers of Computer Science, 2018, 12(1): 55-74.
- [7] 陶家琦, 李心雨, 郑湃, 等. 制造领域知识图谱的应用研究现状与前沿[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(12): 3720-3736.
- [8] TAO Jiaqi, LI Xinyu, ZHENG Pai, et al. State-of-the-art and frontier of manufacturing knowledge graph application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(12): 3720-3736.
- [9] SHEN T, ZHANG F, CHENG J W. A comprehensive overview of knowledge graph completion[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 255: 109597.
- [10] XU Q, NIU N, QUAN Y, et al. Research on the development of text mining technology based on bibliometrics and knowledge map visualization[J]. Scientific Journal of Information Engineering, 2017, 7(1): 51-52.
- [11] 李秀玲, 张树生, 黄瑞, 等. 面向工艺重用的工艺子图谱构建方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1174-1183.
- [12] LI Xiuling, ZHANG Shusheng, HUANG Rui, et al. Process knowledge graph construction method for process reuse[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(6): 1174-1183.
- [13] GRANGEL-GONZALEZ I, LOSCH F, UL MEHDI A. Knowledge graphs for efficient integration and access of manufacturing data[C]//2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 93-100.
- [14] 顾星海, 鲍劲松, 吕超凡. 基于知识图谱的装配语义信息建模[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 74-81.
- [15] GU Xinghai, BAO Jinsong, LÜ Chaofan. Assembly semantic information modeling based on knowledge graph[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 74-81.
- [16] ZHANG X M, LIU X, LI X, et al. MMKG: An approach to generate metallic materials knowledge graph based on DBpedia and Wikipedia[J]. Computer Physics Communications, 2017, 211: 98-112.
- [17] 杨玉基, 许斌, 胡家威, 等. 一种准确而高效的领域知识图谱构建方法[J]. 软件学报, 2018, 29(10): 2931-2947.

YANG Yuji, XU Bin, HU Jiawei, et al. Accurate and efficient method for constructing domain knowledge graph[J]. Journal of Software, 2018, 29(10): 2931–2947.

[13] 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.

[14] TIWARI S, AL-ASWADI F N, GAURAV D. Recent trends in knowledge graphs: Theory and practice[J]. Soft Computing, 2021, 25(13): 8337–8355.

[15] 邱凌, 张安思, 李少波, 等. 航空制造知识图谱构建研究综述[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(4): 968–977.

QIU Ling, ZHANG Ansi, LI Shaobo, et al. Survey on building knowledge graphs for

aerospace manufacturing[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(4): 968–977.

[16] QI Z X, WANG H Z, ZHANG H R. A dual-store structure for knowledge graphs[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2021: 1.

[17] KOTIRANTA P, JUNKKARI M, NUMMENMAA J. Performance of graph and relational databases in complex queries[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6490.

[18] 肖仰华, 徐波, 林欣, 等. 知识图谱: 概念与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.

XIAO Yanghua, XU Bo, LIN Xin, et al. Knowledge graph: Concept and techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.

[19] 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

XU Shubai. Practical decision-making method—Principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.

[20] SAATY T L. Modeling unstructured decision problems—The theory of analytical hierarchies[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1978, 20(3): 147–158.

[21] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[22] PAULHEIM H, BIZER C. Improving the quality of linked data using statistical distributions[J]. International Journal on Semantic Web & Information Systems, 2014, 10(2): 63–86.

通讯作者: 赵正彩, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为复杂结构自适应智能加工。

Study on Machining Knowledge Modeling of Complex Thin-Walled Parts Based on Knowledge Graph

XIAO Biao¹, XU Baode², PENG Shixin¹, YU Yuan², DING Guozhi², WANG Meng², ZHAO Zhengcai¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Xinghang Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

[ABSTRACT] Intelligent process design is the core of process design in the digital twin environment, and part process knowledge modeling is a prerequisite for achieving intelligent process design based on digital twins. To address the issues of low structured and difficult to reuse machining process data for complex thin-walled parts in the aerospace field, a construction and quality evaluation method for a typical knowledge graph of machining process for complex thin-walled parts is proposed. Firstly, the composition and structure of machining process knowledge are analyzed. Secondly, the visualization of process knowledge was realized through ontology modeling, knowledge extraction, knowledge storage, and other related technologies, and the knowledge retrieval of machining process was realized based on Neo4j database. Finally, the analytic hierarchy process is used to evaluate the constructed knowledge map, and the machining process knowledge of frame and segment parts is taken as the verification object, the comprehensive accuracy of the sub-map is 92.28%. The experimental results show that the process knowledge modeling method based on knowledge map is feasible, which can help to realize the effective organization and reuse of process knowledge, and lay the foundation for digital twin intelligent process design.

Keywords: Complex thin-walled parts; Knowledge graph; Process knowledge modeling; Data extraction; Graph quality evaluation; Digital twin

(责编 七七)