

# 风电设备情境知识图谱构建技术研究

石致远<sup>1,2</sup> 孔志伟<sup>2\*</sup> 陈俊臻<sup>3</sup> 王淑莹<sup>3</sup>

1.西南交通大学机械工程学院,成都,610031

2.东方电气集团科学技术研究院有限公司,成都,611731

3.西南交通大学计算机与人工智能学院,成都,610031

**摘要:**传统知识图谱构建方法未考虑知识的情境约束,难以有效表征风电等复杂机电设备海量知识间复杂的关联关系,限制了知识图谱在实际生产过程中的应用。提出了一种面向风电设备的情境知识图谱构建方法。首先抽取风电设备情境知识、模块元知识及项目定制产生的模块实例知识,结合形状约束语言(SHACL)构建了包含情境路径和属性值约束的本体模型,精准表征和抽取各类知识;然后提出了基于本体解析的情境知识子图可视化算法,通过解析本体中的情境知识类,为每类情境构建数据观测窗口,实现面向场景的知识子图多维可视化交互。实际应用结果表明,该方法能有效融合模块元知识与项目模块实例知识,满足风电设备知识的精准表征和多样化的应用场景需求。

**关键词:**风电设备;情境知识图谱;情境语义约束;可视化交互引擎;形状约束语言

**中图分类号:** TM315; TP391.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Construction Techniques for Wind Power Equipment Contextual Knowledge Graphs

SHI Zhiyuan<sup>1,2</sup> KONG Zhiwei<sup>2\*</sup> CHEN Junzhen<sup>3</sup> WANG Shuying<sup>3</sup>

1.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

2.Intelligence Manufacturing Department, Dongfang Electric Academy of Science and Technology Co., Ltd., Chengdu, 611731

3.School of Computing and Artificial Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

**Abstract:** Traditional methods for constructing knowledge graphs didn't consider the contextual constraints on knowledge, making it challenging to effectively represent the complex associative relationships among vast knowledge in complex electromechanical equipment like wind turbines. This limitation hindered the practical applications of knowledge graphs in the production processes. This paper proposed a method for constructing a context-aware knowledge graph tailored for wind turbine equipment. Initially, the method extracted contextual knowledge, module meta-knowledge, and module instance knowledge generated from project customization. Utilizing the SHACL, an ontology model was constructed, incorporating context paths and attribute value constraints, thereby precisely characterizing and extracting various knowledge types. Furthermore, an ontology parsing-based algorithm is introduced for visualizing contextual knowledge subgraphs. Through the parsing of contextual knowledge classes within the ontology, data observation windows were generated for each contextual class, facilitating the construction of multi-dimensional visualization interactions tailored to specific scenarios. Through practical applications, the proposed method effectively integrates module meta-knowledge with project-specific module instance knowledge, meeting the demands for precise representation and diverse application scenarios in wind turbine equipment knowledge.

**Key words:** wind power equipment; contextual knowledge graph; contextual semantic constraint; visualization interaction engine; shape constraint language(SHACL)

## 0 引言

风电设备作为一种典型的按单设计型复杂产品,在设计、制造和运维过程中普遍采用模块化定制模式。在此模式下,企业首先对现有的设计、制

造和运维通用知识进行模块化抽象,构建模块元知识库。产品的设计、制造和运维阶段通过重用这些模块元知识及现有产品模块的实例知识,并结合特定场景进行定制化生产,从而有效适应各种应用需求。随着模块化过程的不断深入,企业积累了大量多源异构的模块元知识和实例知识,使得对这些知识进行有效的管理、挖掘和智能应用变得至关重要。

收稿日期:2024-01-30

基金项目:四川省科技厅工业软件及信息安全重大科技专项(2022ZDZX0003)

作为一种有效表达实体间关系和语义的方法,知识图谱提供了灵活的海量数据管理解决方案<sup>[1]</sup>。它不仅具备强大的表示学习和推理的能力<sup>[2]</sup>,还提供了丰富的可视化技术<sup>[3-4]</sup>,可显著提高复杂知识理解和应用的直观性与效率。近年来,知识图谱在智能制造领域的应用已成为研究热点<sup>[5]</sup>,在航天产品研制<sup>[6]</sup>、数控装备信息建模<sup>[7]</sup>、高速列车可维修性设计<sup>[8]</sup>等领域已经开展了嵌入应用研究。然而,这些研究多集中于使用传统的三元组结构来表征和学习场景特征,缺乏对全生命周期业务情境和知识完整性的全面考虑。

在风电设备的模块化知识领域,存在多种类型的模块元知识和实例知识,这些知识间存在复杂的完整性约束关系。例如,模块参数值间的约束、模块加工工序间的前置依赖关系,以及排程中工序实例的事务原子性约束等。同时,这些知识均具有显著的业务情境特征,例如风机齿轮箱检修标准仅适用于在运维业务场景中的齿轮箱部件的维修。因此,有效表征各类知识约束及情境是提高知识精准性、满足生产应用的关键。本文针对风电设备知识应用情境特征,通过对各类知识融入情境约束,改进传统三元组的知识建模方法和可视化方法,以满足场景驱动的知识精准服务需求。

## 1 情境知识图谱构建相关工作

### 1.1 知识完整性约束

在知识完整性约束方面,ShEx(shape expressions)<sup>[9]</sup>和SHACL(shapes constraint language)<sup>[10]</sup>是两个主要的标准。特别地,SHACL作为W3C的推荐标准,在知识图谱完整性约束方面已得到广泛应用。例如,文献<sup>[11]</sup>提出了使用SHACL约束为图数据集定义模式,并通过推理规则检测知识实例违反约束的方法。文献<sup>[12]</sup>探讨了将一组SHACL形状转化为描述逻辑知识库的句法转化方法,并使用描述逻辑判断SHACL形状的包含关系。此外,文献<sup>[13]</sup>提出了一个能够规划形状模式遍历和执行的SHACL引擎,该引擎通过重新排列形状模式中的形状,实现无效实体的快速检测。

### 1.2 知识情境融合

在知识情境融合方面,本体建模是一种常用的方法。例如,文献<sup>[14]</sup>提出了一个基于本体建模语言(web ontology language,OWL)编码的上下文本体,用于在普适计算环境中对上下文进行建模,该方法使用位置、任务、用户和设备等要素

来描述知识情境。文献<sup>[15]</sup>针对火情情境感知需求构建了一个涵盖紧急事件、事件应对方案、救援服务、资源、运输设备和人员等六个维度的知识情境模型。文献<sup>[16]</sup>则针对复杂工程系统设计情境,将利益相关者和任务信息融入上下文,构建了设计助手知识图谱,为设计师提供与任务相关的设计规则服务;文献<sup>[17]</sup>针对高速列车多领域知识,提出了融合实体及属性综合相似度和元结构树的本体及数据的融合方法,为构建高速列车全生命周期知识图谱提供解决方案。

### 1.3 面临的挑战

风电设备本身复杂的结构层级性和知识间的关联性,使得传统的知识表征和可视化方法难以准确描述各类模块元知识与项目定制生产中产生的实例知识间的语义约束,同时也难以针对各类业务场景提供知识快速分割和可视化服务。

## 2 风电设备领域知识分类及表征方法

如前所述,风电设备知识具有多样性,按照知识来源可分为三大类,各类知识特征如表1所示。

表1 风电设备领域知识分类

Tab.1 The classification of knowledge in the field of energy equipment

知识分类	知识特征
情境类知识	模块、阶段、事故等级等业务相关的分类知识。
模块元知识	模块通用知识,这类知识包含了模块通用的结构和特征,但一般情况下不能直接用于项目,需要经过特征实例化配置后形成实例,如零件族模型、零部件工艺模板、设计约束规则等。
模块实例时序知识	模块实例时序知识是在具体产品项目设计、制造、运维中实例化定制产生的结果,这类知识既可以从元知识通过配置生成,也可以引用其他项目已有模块变更设计生成;与项目间存在“生成”和“引用”联系;由于一项元知识在不同项目定制中会生成多项实例,实例的时间属性在相似案例推荐中具有重要参考价值,因此这类知识具有时序性。

### 2.1 情境类知识表征

情境类知识指与特定业务环境紧密相关的分类知识的总称。这类知识在风电设备的元知识和实例知识的精确分类中发挥着至关重要的作用,主要体现在两个方面:一是使元知识和实例知识能够根据业务环境的具体需求进行更加精确的分类,提高知识的语义完整性;二是提高图谱可视化处理速度,使复杂知识数据的解读变得更加直观和快捷。

1)模块及装配关系。模块及装配关系构建的通用物料清单(generic bill of material,GBOM)是风电设备知识中最重要的情境之一,用于表征风电设备本身的结构特征。由于风电设备由成千上万个零部件装配而成,模块元知识是针对零部

件设计、制造和运维的通用知识,实例知识是在零部件定制过程中产生的,因此模块是知识最重要的载体。GBOM 的本体结构包括:①模块节点,代表 GBOM 中的基本构成单元;②属性,包括编码、名称、词条和概念类型等,其中词条表征模块的语义;③part-of 关系,表示模块间的装配关系,揭示了不同模块之间的依赖和连接方式。

2)生命周期阶段。风电设备业务过程复杂,其生命周期从大类上分为设计、制造和运维三个阶段,每个阶段又细分为多个子业务阶段,如设计阶段细分为方案设计、定标设计、载荷设计等。因此知识与业务活动的关联性是其另一本质特征,这一特征可用生命周期阶段本体表征,其结构包括:①阶段节点,代表生命周期的各个阶段;②属性,包括编码、名称、词条和概念类型等;③is-a 关系,表示阶段之间的子类关系。

3)项目及人员。项目和人员两类情境知识是用来描述模块定制实例类的情境知识的。其中,项目由属性编码、名称和立项时间表征,人员由编码、名称和部门属性表征。

4)其他情境类知识。除了上述情境类知识外,还可以根据业务需求构建其他情景类知识,如故障来源、故障等级等。这些知识有助于更全面地理解和管理风电设备知识的复杂性。

## 2.2 模块元知识表征

在风电设备领域,模块元知识指的是与装备零部件相关的通用知识,如设计标准、设计参数、设计约束规则、加工工艺、工序、维修规范等,这类知识间往往具有复杂的依赖关系。本文根据与情境的相关程度和知识本身的独立性,将其分为强实体类元知识和弱实体类元知识。

**定义 1** 强实体类:在特定的知识情境中,知识本身具有语义的完整性。

**定义 2** 弱实体类:在特定的知识情境中,知识本身不具有完整的语义,需要与其他强实体类关联才具有语义的完整性。

例如,模块设计标准、设计参数、维修规范等属于强实体类知识,而设计约束规则、工序等属于弱实体类元知识。这是因为设计约束规则是对一个或多个设计参数约束关系的描述,而多个工序按一定的前后顺序聚集形成工艺才有意义,单独一个或几个工序没有实际价值。

1)强实体类元知识表征。强实体类知识的表征需要添加它与模块和阶段间的情境路径约束。以模块设计标准为例,这类知识可以通过图 1 所示的本体模型描述,除了实体本身及其属性(编

码、名称、文件路径)外,还需要在该节点上定义它与模块和阶段节点的情境联系(context-of)路径约束,路径约束可通过 SHACL 语言在设计标准类上定义与模块及阶段的路径实现。

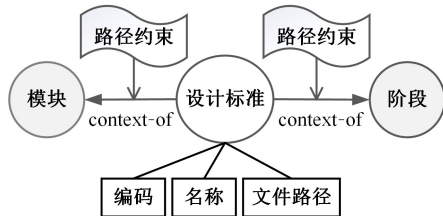


图 1 强实体类元知识本体(以设计标准为例)

Fig.1 Strong entity class meta-knowledge ontology

(in terms of design criteria)

2)弱实体类元知识表征。如前所述,风电设备中,弱实体类主要分为两种类型:一类是约束规则类知识,如设计参数约束规则、故障维修规则等,另一类是流程类知识,如工艺的工序、检修的工步等。约束规则类知识是一类特殊的模块元知识,这类知识用来表征某类元知识间的约束。如“齿轮箱最小齿间距  $d = 2.5m + 0.01$ ”(m 为齿轮模数),这一约束规则表达了齿轮箱与齿轮模数参数间的关系。这类知识可通过形如图 2 所示的本体模型描述,除自身的属性外,还需要添加它与对应强实体类间的因子参数(factor-para)和校核参数(check-para)路径约束。流程类知识是另外一类特殊的模块元知识,这类知识节点间存在前序依赖关系,通过聚集形成完整的知识。以工序为例,这类知识可通过形成如图 3 所示的本体进行表示,流程类知识节点除自身属性外,还需要建立节点间前序依赖(pre-process)的路径约束以及与对应强实体类间的 part-of 路径约束。

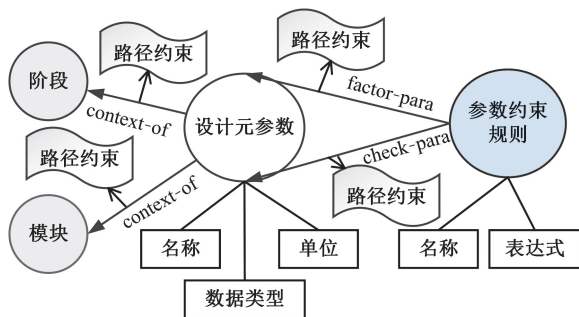


图 2 约束规则类知识本体(以设计约束为例)

Fig.2 Constraint rule class knowledge ontology

(as an example of design constraints)

## 2.3 模块实例时序知识表征

模块实例时序知识产生于不同项目中,在模块定制过程中对元知识或实例知识进行复用是一种关键的时序知识,是基于实例进行推荐的基础。为了全面表征这种知识,本文引入事件类节点,用

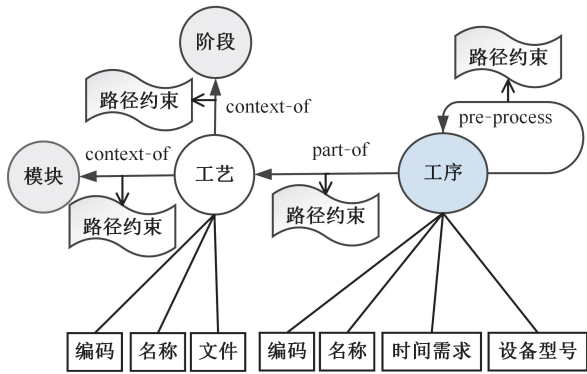


图3 流程类知识本体(以工艺工序为例)

Fig.3 Process-type knowledge ontology

(as an example of a technological process)

以构建情境和实例知识节点之间的关系和约束。

1) 模块实例变更产生的模块实例。以模块设计模型定制为例,如图4所示,模型定制是一个具有开始和结束时间属性的事件类,该定制过程是从现有的模块模型实例中选择一个模型作为定制的基准,形成本项目的模块实例。其中,“base-of”表示定制基准,“outcome-of”表示定制结果,其余同上。

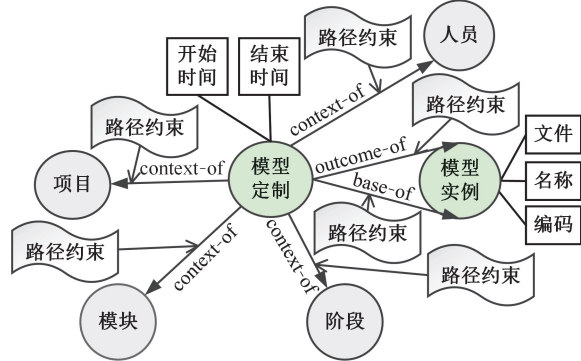


图4 模块定制实例知识本体(以模型定制为例)

Fig.4 Module customization example knowledge ontology

(model customization as an example)

2) 模块元知识复用产生的模块实例。在产品模块化定制的生产过程中,一些模块元知识(如设计标准、维修规范等)被用作参考,而另一些(如族模型、工艺等)则需要实例化和复用。一般强实体类元知识的复用与图4中的实例知识复用类似,差异在于定制事件中的“base-of”联系是由模块元知识类代替模块现有实例。但对于具有弱实体约束的元知识,在实例化过程中则需要对弱实体约束进行特殊处理。①约束规则类弱实体关联元知识实例化。对于图2所示的设计元参数类知识,在其实例化设计中需要将参数约束规则转换为参数值间的约束,如图5所示(为清晰起见,图中仅保留了参数定制事件关联的路径约束及属性)。其中,设计元参数在项目模块实例化定制中

产生设计参数(属性包括值和名称),需要将参数约束规则转换为参数值间的约束,例如对于前述约束“齿轮箱最小齿间距  $d = 2.5m + 0.01$ ”,需要通过约束语言将其转化为对应的设计参数值间的取值规则表达式查询约束2。②流程类弱实体关联元知识实例化。对于图3所示的流程类弱实体关联的元知识,在实例化过程中需要项目模块对应的任务驱动,通过任务排程事件实例化组成工艺的工序形成工序任务,转换工序间的前置依赖为工序任务间的时间值约束,并用路径数量约束来表征每个工序的完整性,对应的本体结构如图6所示。

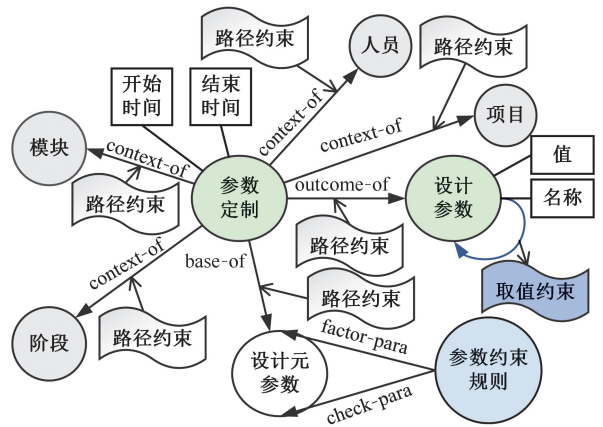


图5 约束规则类弱实体关联元知识实例化本体结构

(以设计元参数实例化为例)

Fig.5 Constraint rule class weak entity association meta-knowledge instantiation of ontology structure

(as an example of design meta-parameter instantiation)

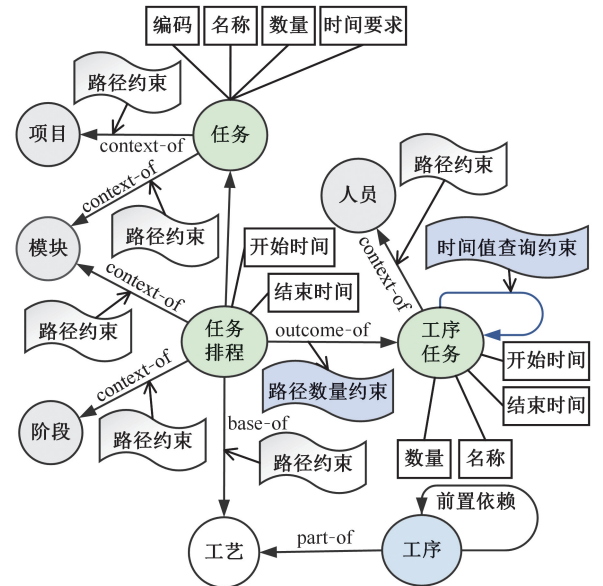


图6 流程类弱实体关联元知识实例化本体结构

(以工艺任务为例)

Fig.6 Process class weak entity association meta-knowledge instantiated ontology structure

(as an example of a process task)

### 3 基于情境约束的时序知识图谱构建

#### 3.1 情境知识形状约束定义

本文采用 SHACL 语言来定义路径约束和知识数据值间的约束,以确保数据的一致性和准确性。SHACL 构建约束的语法元素如表 2 所示。

应用表 2 中的 SHACL 语法元素定义本体路径形状约束,例如:对于设计标准与模块间的路径约束,可在设计标准类上定义节点约束,通过 `sh:path:ex:Module` 定义它与模块间的路径约束;对于约束“齿轮箱最小齿间距  $d = 2.5m + 0.01$ ”,可通过构建 SPARQL 查询,用 FILTER 与表达式比较,将实际值代入表达式,再通过存在性 Exist 判断查询结果。

表 2 SHACL 构建约束的语法元素

Tab.2 Syntax elements for SHACL construction constraints

分类	元素名称	元素语义
目标声明	<code>sh:targetClass</code>	针对特定类的所有实例
	<code>sh:targetNode</code>	针对特定节点
	<code>sh:targetObjectsOf</code>	针对特定属性的对象或主体
路径约束	<code>sh:path:</code>	定义属性形状中的路径,即要约束的属性。
约束条件	<code>sh:datatype</code>	指定数据类型
	<code>sh:minCount</code> , <code>sh:maxCount</code>	指定属性的最小和最大出现次数
逻辑约束	<code>sh:and</code> , <code>sh:or</code> , <code>sh:not</code>	允许使用逻辑运算符来组合或修改约束
高级特性	SPARQL 查询	用于构建 RDF 查询
	<code>sh:node</code> , <code>sh:property</code>	值形状约束
	FILTER	应用各种函数和表达式过滤满足条件的数据

#### 3.2 知识数据抽取、校验及存储

基于上述方法,梳理风电设备知识,构建领域知识本体和约束。在此基础上,抽取并验证知识构建知识图谱,具体步骤如下(图 7):

1)收集风电设备结构、阶段等情景数据。

2)使用 D2RQ(database to RDF query)工具对存储在企业资源计划(enterprise resource planning,ERP)、产品数据管理(product data management,PDM)等既有业务系统中的结构化模块通用知识和实例知识进行抽取。

3)对于设计标准、故障维修手册等非结构化知识进行标注,用标注的语料库训练命名实体识别和关系抽取模型(如 BERT-BiLSTM-CRF 等),利用训练好的模型将文本知识抽取为图节点及关系结构化数据。

4)将前面两步抽取的知识节点和关系数据转为资源描述框架(resource description framework,RDF)图,使用 Python 的 pySHACL 包中的 `validate(·)` 函数对数据 RDF 图和形状 RDF

图进行校验,确保数据满足约束条件。

(5)将符合条件的知识按知识三元组持久化地存储到图数据库中。

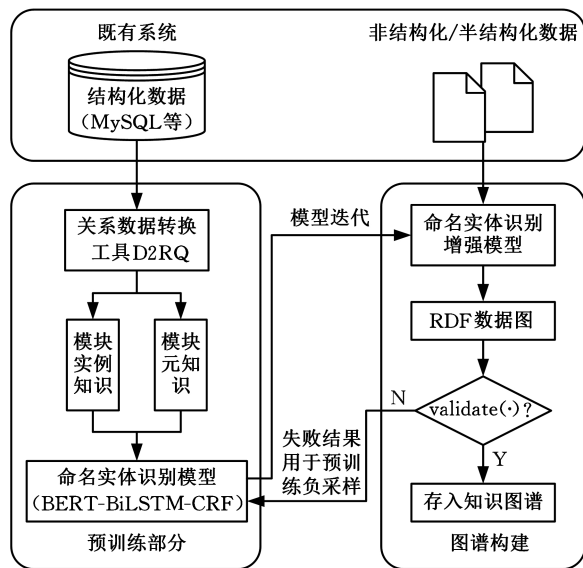


图 7 知识数据抽取校验及图谱构建流程

Fig.7 Knowledge data extraction verification and graph construction process

#### 3.3 基于知识情境的图谱可视化

针对不同场景对知识快速定位和交互需求,本文提出了基于本体解析的情境知识子图可视化算法(算法 1)如下:

输出:可视化图谱

- 1: if 任务编码为空 then
- 2: 为模块、阶段和项目情境变量赋默认值
- 3: else 解析任务编码,获取模块、阶段和项目信息
- 4:解析本体中的情境类知识
- 5: for each 情境类知识 do
- 6:构建观测窗口标签页
- 7:获取该情境知识的数据集
- 8:以该知识数据集为分组条件,构建分组统计模型
- 9:将分组结果数据集以表格形式可视化
- 10:为每行统计生成子图查看按钮及点击事件
- 11: end for
- 12: for each 元概念及实例概念 do
- 13:为每个概念生成一种颜色
- 14:为每个概念生成一个标签及点击可视化事件
- 15: end for
- 16:生成语义搜索窗体及搜索事件
- 17:以人员、模块、阶段和项目为条件查询获得子图
- 18:为图数据节点生成查看其语义信息的点击事件。

该算法首先通过用户身份和当前任务编码获得场景初始特征,然后解析本体中的情境知识类,为每类情境构建数据观测窗口,以情境数据作为分组条件对知识进行分组,生成分组统计视图,以支持用户对知识的分类检索。同时对每个类生成

可视化颜色和标签,用户通过标签可隐藏或加载该类数据,并为图中数据项提供点击事件功能,通过点击可按前面情境约束本体展示数据属性及相关数据实体,从而提高知识图谱的可视化效率和知识的可读性。

算法的收敛性分析:①算法的两个循环结构均是针对本体中概念而非知识数据本身,数据量非常小,可在有限步骤内收敛;②算法在图数据层只执行一次以情境特征值为条件的图查询,由于在模块元知识和实例知识表征中融入了知识情境(见 2.2 节和 2.3 节),各类知识与情境知识节点间最多为 2 跳关系,因此图查询性能得以保证。

本文集成基于本体解析的情境知识子图可视化算法研发了风电设备情境知识图谱可视化引擎,该引擎前端采用 ECharts 可视化控件,后端采用 Springboot 应用框架,知识图谱采用 Neo4j 图数据库存储。该引擎通过集团单点登录获取用户身份和当前对应任务编码,读取 Neo4j 图数据库中的本体和图数据,执行算法 1,生成针对该场景

的初始化界面,当用户点击界面中的结构节点或图中按钮等事件后,引擎获取事件对应的数据,以该数据为查询条件执行算法 1 更新子图。

#### 4 实例验证

##### 4.1 实验背景

为了验证所提出方法的可行性,以风机设计过程的情境知识、模型元知识和 4 个项目的设计实例知识数据为基础开展实验。

##### 4.2 实验过程

1)情境本体模型构建。应用图 2 和图 4 的本体模型,对设计过程情境知识(模块、项目、人员、阶段)、模块元知识(设计元参数、设计标准、参数约束规则)和实例知识(项目模块定制形成的零部件、设计参数)间关系进行表征,形成情境知识本体。

2)本文情境知识形状约束定义。按照 3.1 节的方法用 SCHAL 对本体中路径及值约束进行定义,定义结果用开源 Graphviz 可视化展示,如图 8 所示。

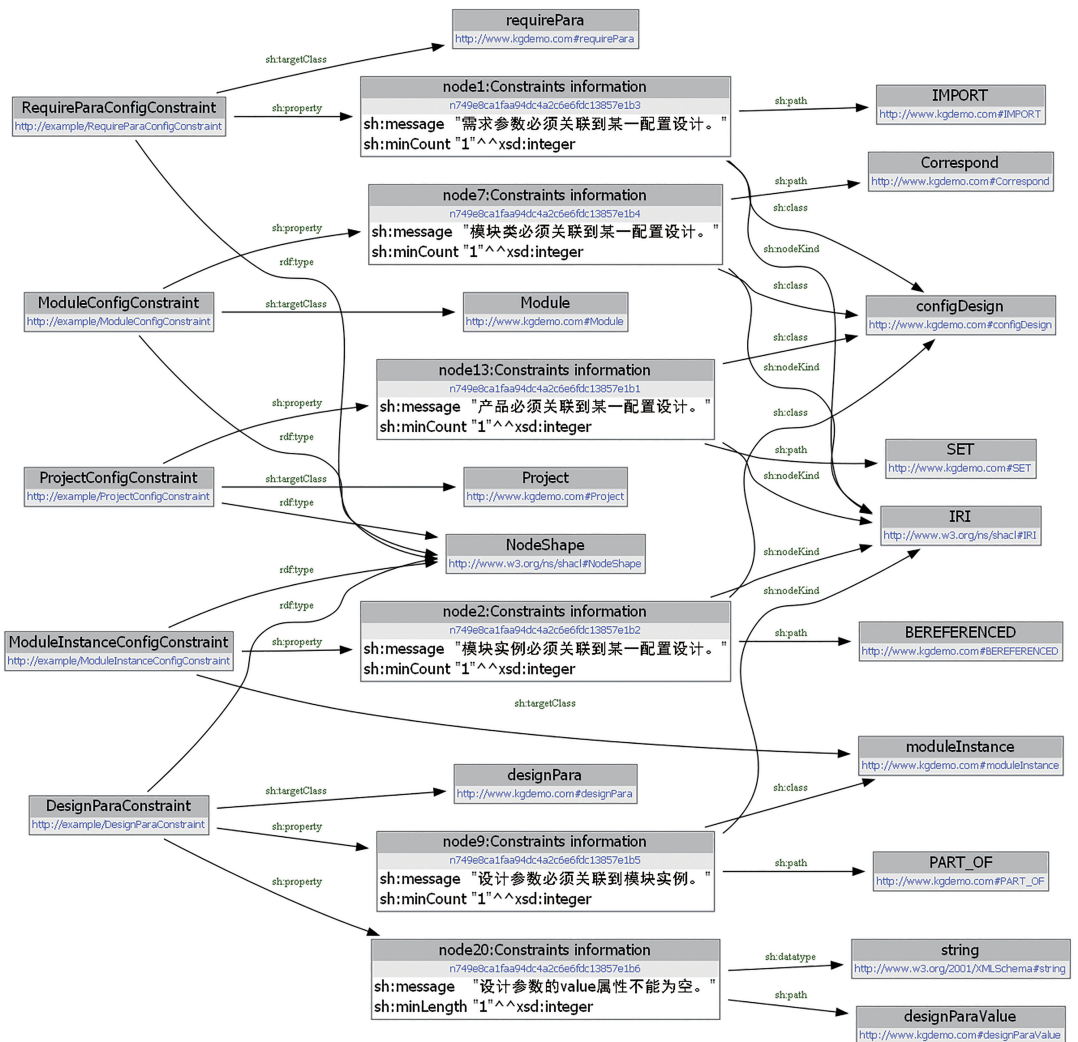


图 8 基于 SHACL 的本体形状约束定义(部分)

Fig.8 Ontology shape constraints definition based on SHACL(partial)

3)知识数据抽取、校验及存储。根据知识本体中的概念及关系,按照 3.2 节的步骤对知识数据进行抽取、路径及值约束校验,最终将数据存储到 Neo4j 图数据库中。

4)场景驱动的图谱可视化。通过用户身份集成认证进入知识图谱可视化引擎,解析用户任务,渲染出对应的多维可视化界面,如图 9 所示。可视化内容及交互服务接口包括:①多维可视化交互构建。引擎自动解析并构建基于知识情境的多维可视化交互界面,按元数据及实例数据概念自动分配颜色标签并按规则加载子图。②情境标签页展示。在界面的右侧弹出窗口上端展示情境标签页,其中默认标签页为模块维度。③知识数据

分布与交互。右方表格展示按模块数据分组统计的知识数据分布及交互入口。④知识情境切换。用户可通过点击标签页切换不同的知识情境。⑤知识节点交互。点击图上的知识节点,展示其具有完整语义的知识属性及路径约束关联数据。图 10 展示了点击某条质量问题处理实例知识节点后弹出的窗口,其中包含了该质量问题事件及其关联信息。实例验证结果证实了所提出的风电设备知识图谱构建方法能够有效表征风机设备知识的语义,并能够根据应用场景快速地将情境知识切分为子图,实现高效的多维可视化展示,从而便于用户理解和分析复杂的风电设备项目和专业



图 9 基于知识情境可视化引擎的多视图生成

Fig.9 Multi-view generation based on knowledge context visualization engine

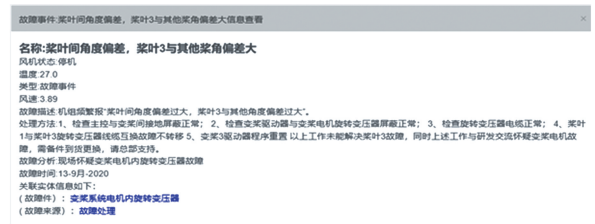


图 10 知识节点交互

Fig.10 Knowledge node interaction

5 结语

本文深入分析了风电设备领域的知识特征及其应用场景,构建了针对情景类知识、模块元知识和项目定制实例知识的语义本体模型,并详细阐述了基于 SHACL 的知识情境约束验证。在此基础上提出了一种基于本体解析和情境交互的子图切分算法,并开发了一个高效的情境图谱可视化交互引擎。通过对风机情境知识图谱的实例验

证,证实了该方法在处理复杂的风电设备项目和专业

参考文献:

[1] WANG J, WANG X, MA C Q, et al. A Survey on the Development Status and Application Prospects of Knowledge Graph in Smart Grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(3): 383-407.

[2] 徐有为, 张宏军, 程恺, 等. 知识图谱嵌入研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(9):30-50.

XU Youwei, ZHANG Hongjun, CHENG Kai, et al. Comprehensive Survey on Knowledge Graph Embedding[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(9):30-50.

[3] JI S X, PAN S R, CAMBRIA E, et al. A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition and Applications[J]. IEEE Transactions on Neural Net-

- works and Learning Systems, 2022, 33(2):494-514.
- [4] 刘玉华, 翟如钰, 张翔, 等. 知识图谱可视分析研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(1):23-36.  
LIU Yuhua, ZHAI Ruyun, ZHANG Xiang, et al. A Survey on the Visual Analytics of Knowledge Graph [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2023, 35(1):23-36.
- [5] 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.  
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.
- [6] 徐雪松, 肖刚, 孟航程, 等. 面向设计计算多层知识图谱构建方法与应用[J/OL]. 计算机集成制造系统. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230515.1129.014.html>.  
XU Xuesong, XIAO Gang, MENG Hangcheng, et al. Multilayer Knowledge Graph Construction Method and Application for Design Calculation[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing System. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20230515.1129.014.html>.
- [7] 路松峰, 李伟明, 屠向阳, 等. 基于知识图谱的数控装备信息模型建模方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(6):39-47.  
LU Songfeng, LI Yiming, TU Xiangyang, et al. Modeling Method of Numerical Control Equipment Information Model Based on Knowledge Graph[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(6):39-47.
- [8] 郭恒, 黎荣, 张海柱, 等. 多域融合的高速列车维修性设计知识图谱构建[J]. 中国机械工程, 2022, 33(24):3015-3023.  
GUO Heng, LI Rong, ZHANG Haizhu, et al. Construction of Knowledge Graph of Maintainability Design Based on Multi-domain Fusion of High-speed Trains [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(24):3015-3023.
- [9] PRUD' HOMMEAUX E, LABRA GAYO J E, SOLBRIG H. Shape Expressions: an RDF Validation and Transformation Language[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Semantic Systems. Leipzig, 2014:32-40.
- [10] FERNBACH A, KASTNER W. Semi-automated Engineering in Building Automation Systems and Management Integration[C]// The 26th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Edinburgh, 2017:8001472.
- [11] PARETI P, KONSTANTINIDIS G, NORMAN T J, et al. SHACL Constraints with Inference Rules[C]// The Semantic Web-ISWC 2019: 18th International Semantic Web Conference. Auckland: Springer International Publishing, 2019:539-557.
- [12] SCHAFFENRATH R, PROKSCH D, KOPP M, et al. Benchmark for Performance Evaluation of SHACL Implementations in Graph Databases[C]// Rules and Reasoning: 4th International Joint Conference. Oslo, 2020:82-96.
- [13] FIGUERA M, ROHDE P D, VIDAL M E. Traversing SHACL: Efficiently Validating Networks of SHACL Constraints[C]// Proceedings of the Web Conference. New York, 2021:3337-3348.
- [14] WANG X H, ZHANG D Q, GU T, et al. Ontology Based Context Modeling and Reasoning Using OWL[C]// IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, 2004. New York: IEEE, 2004:18-22.
- [15] SMIRNOV A, LEVASHOVA T, SHILOV N. Patterns for Context-based Knowledge Fusion in Decision Support Systems[J]. Information Fusion, 2015, 21:114-129.
- [16] HUET A, PINQUIÉ R, VÉRON P, et al. CACDA: a Knowledge Graph for a Context-aware Cognitive Design Assistant[J]. Computers in Industry, 2021, 125:103377.
- [17] 王淑营, 李雪, 黎荣, 等. 基于知识图谱的高速列车知识融合方法[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5):1194-1203.  
WANG Shuying, LI Xue, LI Rong, et al. Knowledge Fusion Method of High Speed Train Based on Knowledge Graph[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5):1194-1203.

(编辑 王艳丽)

作者简介:石致远,男,1989年生,高级工程师。研究方向为智能制造系统数字孪生应用技术。获省部级奖项2项,授权专利40余项。发表论文15篇。E-mail:shizy@dongfang.com。孔志伟\*(通信作者),男,1995年生,硕士研究生。研究方向为面向装备制造过程的人工智能与系统。E-mail:kongzw@dongfang.com。

#### 本文引用格式:

石致远,孔志伟,陈俊臻,等. 风电设备情境知识图谱构建技术研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(6):1206-1213.

SHI Zhiyuan, KONG Zhiwei, CHEN Junzhen, et al. Research on Construction Techniques for Wind Power Equipment Contextual Knowledge Graphs[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1206-1213.