

基于知识图谱的产品适应性设计辅助决策方法

林茂^{1,2}, 李佳骏¹, 郭伟¹, 张冠伟¹, 王磊¹

(1.天津大学 机械工程学院, 天津 300350; 2.海南大学 机电工程学院, 海口 570228)

摘要: **目的** 针对当前产品适应性设计过程中缺乏需求与运维知识的融合、设计案例知识难以有效组织、设计知识重用率低等问题, 提出一种基于知识图谱的产品改进设计辅助决策方法。**方法** 建立产品适应性设计辅助决策框架; 采用知识图谱构建的方法, 通过对产品运维知识数据源的特性分析, 完成本体建模, 实现知识图谱模式层的定义、知识实体与实体关系的抽取以及知识融合数据层的构建; 在运行环境-故障模式映射关系与子图的匹配下, 实现新的产品运行环境中潜在故障模式的推理, 以及案例数据与 CBR 适应性设计措施的匹配, 生成潜在故障模式下改进设计方案的候选集, 并对改进设计方案进行多属性评价, 实现改进方案的排序和决策。**结果** 以工程盾构螺旋输送机产品的适应性设计过程辅助决策为例, 验证了该辅助决策方法的可行性和有效性。**结论** 采用知识图谱技术构建产品全生命周期数据实体关系, 能够较好地解决知识融合、知识组织以及知识重用率低等问题, 提高了设计效率。

关键词: 知识图谱; 适应性设计; 故障模式; 分类模型; 辅助决策

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0048-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.005

Product Adaptive Design-assisted Decision-making Method Based on Knowledge Graph

LIN Mao^{1,2}, LI Jia-jun¹, GUO Wei¹, ZHANG Guan-wei¹, WANG Lei¹

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a knowledge mapping-based product improvement design-assisted decision-making method to solve the current problems of lack of integration of requirements, operation and maintenance knowledge, difficulty of effective organization of design cases knowledge, and low reuse rate of design knowledge in the product adaptive design. Firstly, a framework of product adaptive design-assisted decision-making was established. Then the method of knowledge graph construction was adopted to complete ontology modeling through characteristic analysis of product operation and maintenance knowledge data sources and realize the definition of knowledge graph pattern layer, the extraction of knowledge entities and entity relationships and the construction of knowledge fusion data layer. Then the potential fault mode in the new product operation environment was inferred under the operation environment-failure mode mapping relationship and subgraph matching, and the cases data were matched with CBR adaptive design measures to generate the candidate set of improvement design solutions for potential failure modes. The improvement design solutions were evaluated with multiple attributes to realize the ranking and decision making of the improvement solutions. Finally, the feasibility and the effectiveness of the assisted decision-making method were verified with the adaptive design process of the engineering shield screw conveyor product as an example. Construction of the entity relationship of product life cycle data with the knowledge graph technique can solve the problems of knowledge fusion, knowledge organization and low knowledge reuse rate, and improve the design efficiency.

KEY WORDS: knowledge graph; adaptive design; failure modes; classification model; auxiliary decision-making

收稿日期: 2022-11-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1711400)

作者简介: 林茂 (1979—), 男, 博士生, 副教授, 主要研究方向为现代机械设计理论方法。

通信作者: 张冠伟 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为制造业信息化、数字化设计。

当今的设计制造类企业想在激烈竞争的市场中保持竞争力, 必须不断改进产品的开发周期, 而产品设计理论方法及决策评价方法对产品全生命周期起着关键性的指导作用。近十年来, 产品适应性设计方法一直是一个比较热门的研究领域^[1]。适应性设计方法从经济和环境的角度, 通过修改设计使产品适应新需求的变化, 具有更长的使用寿命^[2]。适应性设计方法在运用过程中, 一般分为产品的适应性和设计的适应性两种。前者是指产品能够被修改, 使之功能发生改变以满足新用户的需求; 后者是指在原产品的设计方案上经过修改, 形成新的满足新需求的设计方案。在修改产品或设计方案的过程中, 会受到用户需求变化、环境变化、组件及装配件变化等多种因素的影响, 使设计人员在面对设计过程的复杂性时仅凭个人经验难以作出较好的决策。此外, 在产品全生命周期数据中, 以产品故障运维数据为代表, 多源数据需要进行有效处理及组织管理, 使之与适应性设计过程进行充分融合, 从而支持适应性设计方案的决策。然而, 在目前的产品适应性设计过程中, 存在缺乏与运维知识有效融合、难以对改进设计知识有效组织、设计知识重用率较低等问题, 不能较好地有效知识组织起来支持设计决策。因此, 如何充分利用现有改进设计案例等数据中的故障运维知识, 保障产品满足不同环境下的良好性能需求, 成为适应性设计过程辅助决策研究待解决的一个关键问题。

知识图谱的概念由谷歌公司于 2012 年提出^[3-4], 是一种结构化的语义知识库, 能以符号形式描述客观世界中的概念及其相互关系, 以“实体-关系-实体”三元组构成网状的知识结构。近年来知识图谱技术在商业、医疗、金融、企业管理、农业、建筑等领域得到迅速发展和运用, 它的重要运用价值体现在改变了现有的信息检索方式(字符串模糊匹配方式), 可以通过推理实现概念检索, 并能够以图形化方式向用户展示经过分类整理的结构化知识^[3], 在医疗诊断辅助决策、企业经营风险决策和金融风险决策等领域取得了一定的研究成果^[5-7]。基于知识图谱的技术特点, 可以从产品全生命周期中为数据驱动的适应性设计辅助决策方法研究提供一种新的探索思路。

1 基于知识图谱的适应性设计辅助决策框架

1.1 适应性设计过程分析

产品适应性设计过程一般是指针对用户需求的变化和环境的变化, 设计者对原产品或设计方案进行修改, 形成满足新变化要求的产品或方案。适应性设计的显著优点是在原有产品或方案的设计知识和规则的基础上, 对产品或方案进行修改和调整, 大大减少了设计过程的重复工作, 提高了效率^[8-9]。目前, 适应性设计在复杂机械工程装备的设计复杂性、环境

多样性、工况扰动性、需求多样性等方面还存在不少挑战和难题^[10]。适应性设计过程一般是针对不同的设计目标开展的, 例如针对产品结构、产品功能、性能或设计流程。现有的适应性设计过程从产品全生命周期数据中考虑产品运维数据、环境数据与产品适应性之间的关系的相关研究文献较少, 对快速响应外部环境变化的适应性设计尚有一定的差距。

适应性设计是一种建立在融合多种先进设计方法之上的应用性设计方法^[11], 在具体的设计过程中, 一般选择一个特定的理论技术方法作为主要支撑进行研究, 例如基于公理化设计、基于功能映射、基于知识重用、基于可拓理论、基于产品基因、基于生命周期理论等^[12-17]。但基于知识图谱技术并运用于适应性设计过程的研究鲜有报道。

1.2 辅助决策框架分析

适应性设计过程以现有产品与环境需求之间适应性最高的版本为母版, 借助产品实例库、规则库、参数库、知识库等, 面向设计目标需求进行替换或修改现有产品中适应性较低的零部件、结构或原方案里的某一环节, 从而实现适应性设计的目的^[12]。由此可知, 适应性设计的基础是产品在全生命周期演化中形成并存储积累的数据库。从知识图谱技术的角度来看, 数据库也是其技术运用的一个基础。如何从实例库、规则库、参数库、知识库等数据库中替换或修改某数据来支持辅助设计过程的决策, 需要采用一定的技术方法并经过一定的步骤来实现。

目前对适应性设计过程的辅助决策研究主要有数据驱动以及知识驱动两种, 其中数据驱动方式是研究的热点^[1,12,18-22]。从知识图谱实现的流程可知^[23], 需要以关联数据集等知识库为支撑, 从数据集中抽取事实数据、理论知识、案例知识等, 从而完成知识图谱构建的第一个知识获取环节。因此, 对企业内部相关数据库进行规范化管理, 第一步就是实现多源异构数据管理, 同时这一步也是基于知识图谱技术的适应性设计过程辅助决策方法的前奏。从适应性设计过程分析可知, 对产品全生命周期数据进行管理是首要任务, 然后依据需求变化和环境变化引起的用户要求, 确定产品或方案修改的领域词汇和领域本体, 对其数据和知识进行抽取、构建和组织, 再经过一系列推理、查询、匹配等操作活动, 最终达到辅助产品适应性设计方案修改决策的目的。适应性设计辅助决策体系可由多源异构数据管理、面向适应性设计过程的知识图谱构建、融合知识图谱与 CBR 的适应性设计方案辅助决策三个模块组成, 如图 1 所示。

多源异构数据管理模块是指对产品设计过程中需要用到的数据和知识进行采集, 并存储到企业数据库中。数据主要源自产品设计质量文档、产品故障案例和相关领域文献案例等, 它以半结构化和非结构化

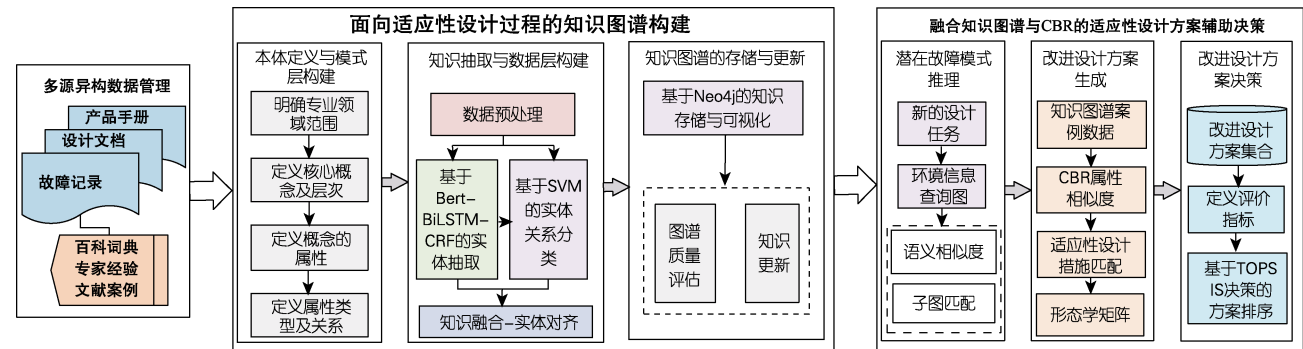


图 1 基于知识图谱的适应性设计辅助决策框架
Fig.1 Framework of adaptive design-assistant decision-making based on knowledge graph

文本数据为主，包括复杂产品改进设计案例的运行环境及其属性、潜在故障模式类型以及对应的改进设计措施，为领域知识图谱的构建提供数据基础，将历史故障案例进行知识重用。

面向适应性设计过程的知识图谱构建模块分为三个部分，依次是本体定义与模式层构建、知识抽取与数据层构建和知识图谱的存储与更新。此模块为应用实施层中潜在故障模式的推理、相似改进案例的输出等提供了知识支持，核心部分为知识图谱模式层和数据层的构建。适应性设计方案辅助决策过程主要包括潜在故障模式推理、改进设计方案生成与多属性评价等关键内容，涉及图结构数据匹配、案例推理等技术。面向新的产品运行环境，基于知识图谱数据匹配潜在故障模式与对应的改进设计措施，形成改进设计方案集合，并通过多属性评价的方式实现适应性设计的辅助决策。

2 面向适应性设计的知识图谱构建

2.1 知识图谱数据源的特性分析

面向复杂产品适应性改进设计过程的知识数据具有多源异构的特点，其中最为常见的信息记录形式为文本描述。企业或相关研究机构将故障诊断专家的知识与实际工程的经验，以维修记录、设计质量文档、学术文献等非结构化文本数据的形式记录下来^[24]，如表 1 所示，其中包含大量的产品故障模式、运行环境及改进设计案例知识，对提升产品的环境适应性和可靠性、保证产品具备良好的运行性能有重要的参考价值。

对复杂产品运维故障记录等文本数据进行分析，可发现与常见文本数据相比，本文构建的知识图谱数

据源具有 3 个特点：（1）知识实体的语义丰富；（2）知识实体的类型多样性；（3）知识实体间的关系复杂性。产品故障记录文本等数据源包含大量的专业词汇，涉及环境、故障运维、产品结构等领域，且各领域内均含有大量的专业知识实体。知识实体类型包括环境因素、故障模式、结构部件和改进设计措施，各实体类型又包含多类具体的知识实体。例如环境信息包括地质、水文、气候、社会等；故障模式包含所属系统类别和不同的故障表现；结构部件包含大量的产品结构及参数知识；改进设计措施可针对结构尺寸、配置、工艺、材料等进行调整。

由于知识图谱的文本数据源具有较强的专业领域性和语义复杂性，因此在抽取知识实体、构建复杂产品知识图谱的过程中应充分考虑上述特征，选用适合的实体抽取算法模型与图谱构建方案，面向适应性设计的知识图谱的拟构建方案如图 2 所示。

2.2 知识图谱构建流程

依据知识图谱的逻辑架构和数据处理顺序，其构建方式主要分为自顶向下（Top-down）和自底向上（Bottom-up）两种^[4]。自底向上的构建方法抽象得到的概念缺乏显性约束，实体关系类型较为模糊，不利于知识图谱的构建。若知识图谱包含较为明确的专业领域知识，则优先选用自顶向下的方式进行知识图谱的构建工作。

面向适应性设计的知识图谱构建流程主要包含模式层构建、数据层构建、知识存储与可视化等步骤，构建流程如图 3 所示，最终达成可视化结果。

2.3 知识图谱模式层构建方法

模式层是知识图谱的核心组织架构，其作用是表达领域概念实体、实体间关系和属性等信息。在自顶向下的知识图谱模式层构建过程中，通常从最顶层的概念开始构建本体，对实体类型和关系类型进行定义，并规范化实体、属性及关系的描述^[25]。此处知识图谱是面向适应性设计的特定领域构建，因此实体及关系类型的定义应充分考虑实体要素在产品适应性设计过程中的作用。以运维数据为例，构建模式层本

表 1 主要知识数据来源
Tab.1 Main sources of knowledge data

数据来源	数据源主要类型
企业数据	设计质量案例文档、设计任务书、产品设计手册、故障记录文本、专家经验
网络数据	文献案例、百科网站
专业资料	领域著作、行业标准

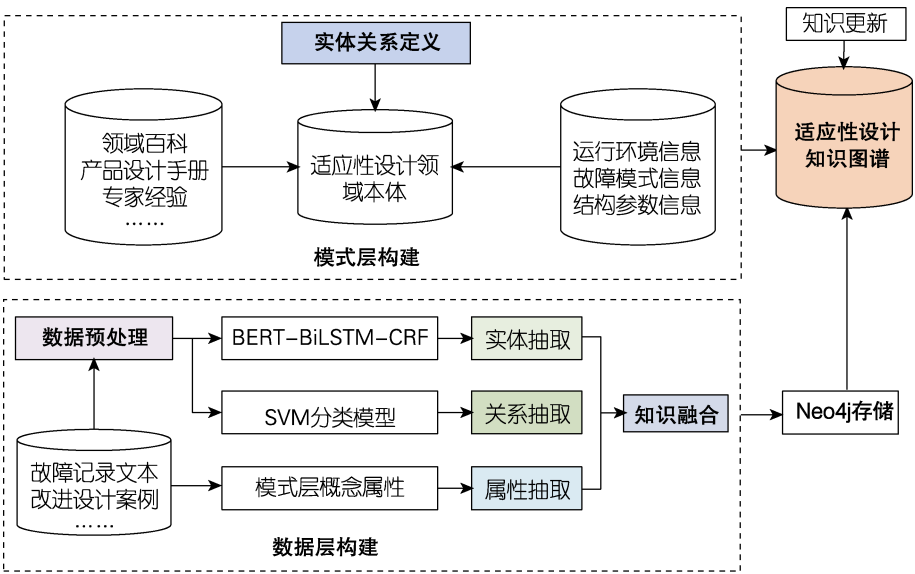


图 2 面向适应性设计的知识图谱构建方案
Fig.2 Construction scheme of knowledge graph oriented to adaptive design

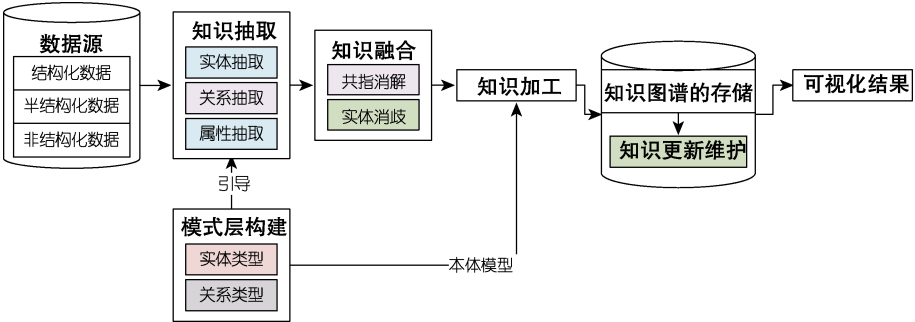


图 3 知识图谱构建流程
Fig.3 Construction process of knowledge graph

体主要包含环境信息、故障信息和产品参数信息三大领域，可以对相应概念的定义进行重用。具体的思路方法是先明确构建本体的专业领域和范围，分析重用现有本体的可能性，确定本体中的重要术语；接着定义核心概念、层次结构、概念属性，再定义属性类型和属性关系，最后创建本体实例。依据适应性设计中各类要素及其相互关系，定义环境类型、环境属性、结构部件、故障模式、改进措施、设计参数等 6 种实体类型，如表 2 所示。以盾构螺旋输送机产品为例，

表 2 实体类别及示例说明		
Tab.2 Description of entities and examples		
实体类别	符号	示例
环境类型	ET	“卵石”“硬岩地层”
环境因素	EA	“最大抗拉强度”“含水量”
结构部件	SC	“螺旋轴”“叶片”“减速器”
故障模式	FM	“卡死”“断裂”“喷涌”
改进措施	IM	“配置独立渣土改良注射点”“配置双出料门”
设计参数	DP	“最大通过粒径”“马达最大输出转矩”

模式层中概念实体及关系的定义和示例如图 4 所示，实体关系类型及描述如表 3 所示。

2.4 知识图谱数据层构建方法

在完成模式层的定义后，需要通过知识抽取与实例填充进行数据层的构建，主要包括数据预处理、知识抽取和知识融合等步骤。

文本数据预处理在采用自然语言处理技术进行半结构化或非结构化文本中的概念实体抽取时，可通过序列标注的方式对文本语料进行表达，将字符转化为段落语料集中的元素。根据模式层所定义的实体种类，与实体边界标注符号组合形成实体标签，同时也将数据源文本中的字符进行序列标注。如表 4 所示为某条语句的标注示例。

常用的实体抽取方法有基于规则、基于统计机器学习和基于深度学习模型算法等，这些算法各有优缺点。其中，基于机器学习算法的 CRF(Conditional Random Fields)模型集成了基于规则算法中的 MEMM(Maximum Entropy Markov Models)与 HMM (Hidden Markov Model)的优点，能避免标记偏执^[26]；基于深

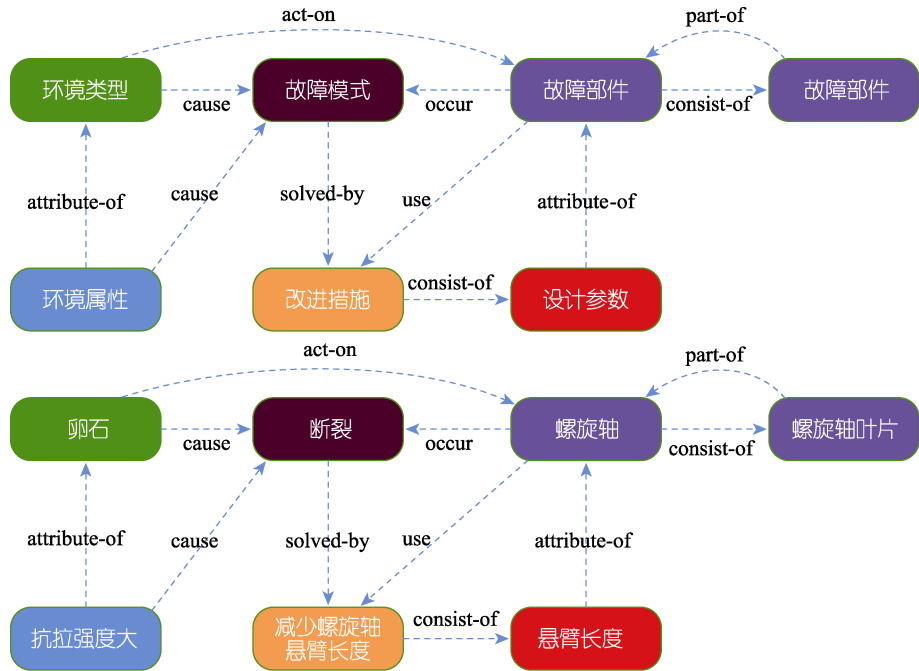


图 4 知识图谱模式层实体和关系示例

Fig.4 Examples of entities and relationships in knowledge graph pattern layer

表 3 实体关系类型及描述

Tab.3 Type and description of entity relationship

关系类型	头实体类型	尾实体类型	关系描述
act-on	环境类型	结构部件	环境类型作用于结构部件
cause	环境类型	故障模式	环境类型引发故障模式
attribute-of	环境属性	环境类型	环境属性 C 是环境类型 D 的一种属性
cause	环境属性	故障模式	环境属性导致故障模式
consist-of	结构部件	结构部件	结构部件 A 包含结构部件 B
part-of	结构部件	结构部件	结构部件 B 是结构部件 B 的组成部分
occur	结构部件	故障模式	结构部件产生故障模式
attribute-of	设计参数	结构部件	设计参数是结构部件的属性
solved-by	故障模式	改进措施	故障模式由改进措施来解决
consist-of	改进措施	设计参数	改进措施包含设计参数的调整

表 4 语句标注示例

Tab.4 Example of statement annotation

字符	标签	字符	标签	字符	标签
在	O	机	E-SC	杆	E-IM
富	B-ET	必	O	防	O
水	M-ET	须	O	止	O
地	M-ET	采	B-IM	排	B-SC
层	E-ET	用	M-IM	土	M-SC
中	O	有	M-IM	口	E-SC
螺	B-SC	轴	M-IM	发	O
旋	M-SC	式	M-IM	生	O
输	M-SC	螺	M-IM	喷	B-FM
送	M-SC	旋	M-IM	涌	E-FM

度学习算法中的 BERT (Bidirectional Encoder Rep-
resentations from Transformers)模型引入注意力机制,

具有理想的文本处理效果^[27]。此外,在 BERT 模型基础
上引入双向长短期记忆网络 BiLSTM (Bidirectional
Long-Short Term Memory)模块,能够对文本的上下文
信息同时进行编码,有效利用上下文信息^[28],被广泛应
用于实体抽取任务。根据上述模型算法的优点,构建
了 BERT-BiLSTM-CRF 深度学习算法模型,如图 5 所示,
完成对文本数据源中目标实体的高效准确抽取。

在完成实体抽取后,需要进行实体关系的抽取。
接着基于监督学习的方法,将抽取任务转化为样本数
据中两个实体之间关系的判断与分类过程,通过将标
注好的实体输入分类模型,最后判断实体之间是否存
在关系并确定其类别。与决策树、朴素贝叶斯等机器
学习模型相比,支持向量机(Support Vector Machines,
SVM)模型能够处理稀疏数据且泛化性较好,是文本
关系分类领域应用较为广泛的模型之一。^[29-30]。本文实

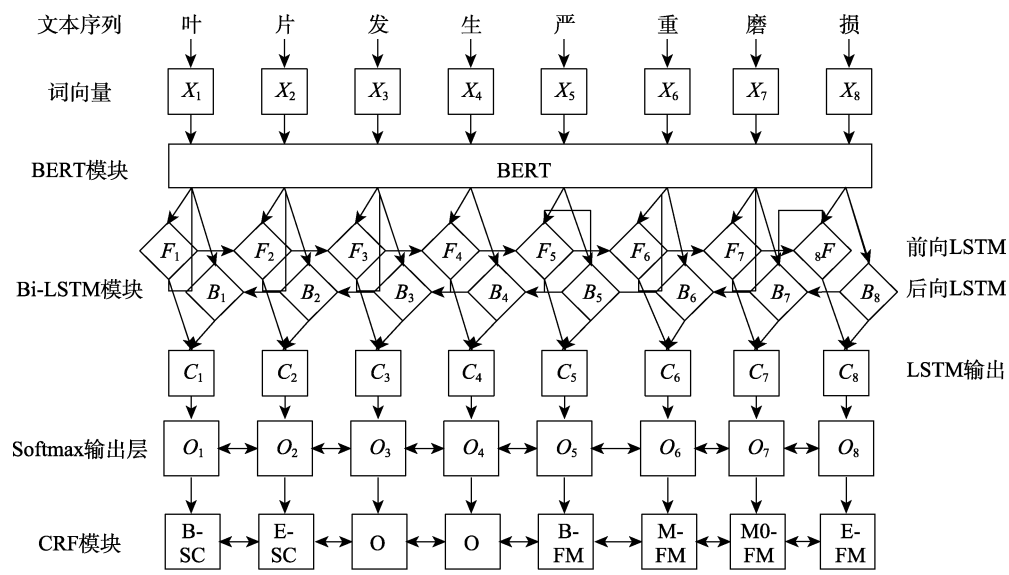


图 5 基于 Bert-BiLSTM-CRF 的实体抽取模型
Fig.5 Entity extraction model based on Bert-BiLSTM-CRF

施的方法是将文本数据进行实体标注, 输入 SVM 分类模型, 结合模式层关系的重用, 对实体关系的概率进行预测, 选取概率的最大值为对应的关系类别, 并通过准确率 P 、召回率 R 和 F_1 值等指标进行评估。实体的抽取效果测试选用产品运维故障数据进行, 数据源由某重工集团盾构螺旋输送机设计质量文档、产品故障问题记录, 以及知网平台下载的该类产品故障分析与改进设计相关主题的文献组成。测试共筛选了 2 500 条段落文本并进行标注, 用于实体抽取模型效果的测试, 通过 8 : 2 的比例进行划分, 选用其中的 2 000 条文本数据作为训练集, 使模型进行文本特征的学习; 500 条文本数据作为测试集, 用于测试模型实体抽取的性能。测试中采用准确率 P 、召回率 R 和 F_1 值 (H-mean 值) 3 个指标评估实体抽取结果, 评估指标的计算公式为:

$$P = TP / (TP + FP) \times 100\%$$
$$R = TP / (TP + FN) \times 100\%$$
$$F_1 = 2PR / (P + R) \times 100\%$$

(1)
(2)
(3)

式中, TP 表示识别正确的实体数目, 即抽取结果和实际标注均为该标签; FP 表示识别错误的实体数目, 即抽取结果为某一标签、但实际标注不是该标签的实体数目; FN 表示实际标注为某一标签, 但未识别出的实体数目。

测试的目的是通过对比 BiLSTM-CRF、BERT-CRF 等当前主流的基于深度学习的实体抽取模型, 验证所提出的基于 Bert-BiLSTM-CRF 的实体抽取模型对运维知识数据的抽取效果。取五次实验结果的平均值, 模型的识别结果如表 5 所示。通过上述基于 BERT-BiLSTM-CRF 的实体抽取算法完成知识实体抽取后, 为了使知识图谱内容更加完善与准确, 同时便于后期设计知识匹配过程中进行属性相似度的计算, 需要继

续对实体包含的属性进行抽取, 主要有量值属性和程度属性两类, 如表 6 所示。

表 5 模型实体识别结果对比

Tab.5 Comparison of model identification results

模型	准确率 P /%	召回率 R /%	F_1 值/%
BiLSTM-CRF	88.63	89.30	88.96
BERT-CRF	94.20	93.87	94.03
Bert-BiLSTM-CRF	94.48	94.17	94.32

表 6 实体属性类别与示例

Tab.6 Types and examples of entity attributes

属性类别	示例
量值属性	最大抗拉强度为“200 MPa”、漂石含量为“25%”
程度属性	地下水含量“较多”、渗透系数“低”

2.5 基于 SVM 的实体关系分类

支持向量机 (SVM) 模型是文本关系分类领域应用较为广泛的一种模型。它的原理是在样本空间中确定一个最优的分类平面, 将不同特征的数据划分到对应的类别中。基于 SVM 的领域文本实体关系分类流程为: 将文本数据及各实体的标签输入 SVM 分类模型, 输出对实体关系的预测概率, 选取概率的最大值为对应的关系类别, 并通过准确率 P 、召回率 R 和 F_1 值等指标进行评估。为降低实体在文本中分布不均对测试结果产生的影响, 进行了 5 次数据划分与训练测试, 以测试结果的平均值作为模型评估依据, 准确率 P 、召回率 R 和 F_1 值分别为 83.69、80.88 和 82.25, 充分说明了 SVM 模型对文本数据中知识实体关系具有良好的分类效果, 同时对知识图谱模式层关系类别的重用, 简化了数据关系的建立过程, 证明该方法对

知识数据实体关系抽取的有效性。

2.6 知识融合

在完成对知识数据的抽取后,必须进行知识融合处理,使不同数据源的知识在同一个框架下进行异构数据整合、实体重要度计算以及推理验证等步骤^[23]。产品运维故障记录文本和相关文献等数据源均属于专业领域的文本,抽取到的知识为特定领域的词汇,因此存在歧义的情况较为少见,可以采用基于语义相似度的计算方法^[8]对实体间的相似程度进行评估,能够更好地将异构数据进行融合。

此外,知识融合后还需进行知识加工,具体操作内容包括本体抽取、知识推理以及知识质量评估三个阶段,在此不再展开赘述。

2.7 知识存储与更新

在各类图谱构建工具中,Neo4j 作为当前应用最为广泛的图数据库,具有免费开源、高性能、操作灵活、便于扩展等特点,因此选用 Neo4j 进行知识数据的存储。Neo4j 通过其固有的 Cypher 语言完成知识数据的存储、查询与更新^[30-31],Cypher 语言的语法较为简单且功能完备,不需要编写遍历代码即可访问图谱中的节点和边。将抽取完成的知识数据导入 Neo4j 中,进行数据的可视化。

随着应用场景的变化与知识数据的不断累积,需要对知识图谱进行质量评估。具体评估的内容包括对数据源的真实性、模式层与数据层的简洁性,以及查询过程的效率和准确性等指标进行定性或定量评估,并及时对图谱内容进行更新与修正。知识更新主要分为全面更新和增量更新两种方式,前者需要基于新知识对图谱进行重新构建,而后者在现有图谱的基础上进行扩展,资源消耗更小,适用于专业领域知识的更新^[32]。因适应性设计知识类别具有有限性以及领域性,故采用增量更新的方式实现知识的扩展。知识图谱的构建是一个迭代更新的过程,根据知识获取的逻辑,每一轮的迭代都包括了数据信息抽取、知识融合、知识加工等三个阶段。

3 适应性设计辅助决策生成

3.1 辅助决策总流程

面向适应性设计的知识图谱构建完成后,需要针对产品在特定运行环境下的潜在故障模式,进行改进设计措施知识的检索匹配,以及最终适应性改进设计方案的辅助决策。首先对新的设计需求进行输入,识别产品运行环境信息并构建查询图,通过子图匹配检索知识图谱数据,并基于环境-故障映射关系进行潜在故障模式的推理;然后通过基于案例的推理技术(CBR)方法计算改进设计案例的环境属性相似度,匹配改进设计措施知识,构建形态学矩阵生成改进设

计方案集合;最后通过定义评价指标,针对生成的不同改进设计方案进行多属性评价,实现适应性改进设计方案的辅助决策,总体流程如图 6 所示。

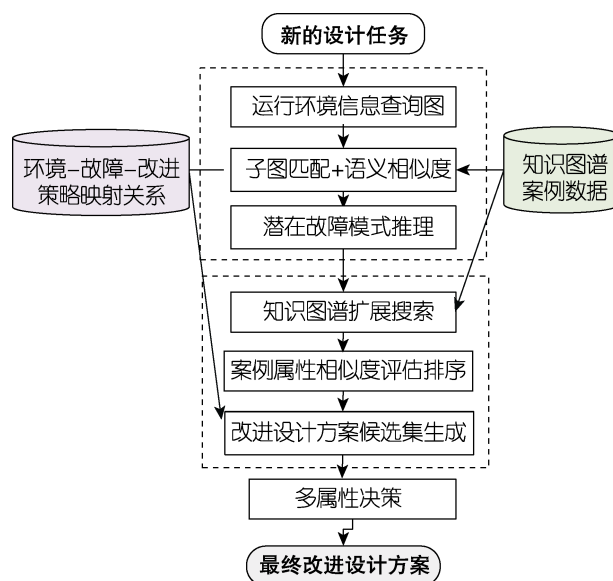


图 6 融合知识图谱与 CBR 的改进设计辅助决策过程
Fig.6 Improvement design-assisted decision-making process by integrating knowledge graph and CBR

3.2 辅助决策的关键过程分析

3.2.1 产品改进设计案例知识检索

通过对辅助决策框架和辅助决策过程的分析可知,案例知识的检索是适应性设计辅助决策的核心环节,改进设计案例知识的检索可以转化为基于知识图谱的实体搜索和基于 CBR 的相似案例匹配过程,主要包括潜在故障模式的推理与改进设计措施知识匹配两部分内容。潜在故障模式的推理可以依据适应性设计知识图谱和运行环境-故障模式映射模型,针对设计输入的运行环境及其属性,可实现潜在故障模式的推理。映射关系的构建过程将产品运行环境信息映射为预防潜在故障模式的性能需求,实现了用户定制信息到产品特性的转化;同时将案例数据提取归纳为关联规则,为当前产品运行环境下的潜在故障模式的匹配推理提供关系模型支持。检索的步骤依次是:输入新的产品设计任务,提取运行环境类型及其属性信息,同时构建运行环境查询图;由查询图通过基于语义相似度的子图匹配方法,从知识图谱中查询相似案例,构建查询结果子图;基于运行环境-故障模式映射关系,提取查询结果子图中的故障模式实体,推理当前运行环境下的潜在故障模式;根据潜在故障模式匹配查询结果子图中的改进设计措施实体,并依据运行环境-故障模式-改进措施的映射关系,生成“环境因素-关系-改进措施”候选三元组集合;计算运行环境查询图与查询结果子图中运行环境属性的相似度,并设定相似度阈值,去除计算结果小于阈值的案例;

最后提取相似度较高的“改进措施”实体, 构建当前运行环境下潜在故障模式的改进设计措施集合。

3.2.2 运行环境信息-故障模式映射关系的生成

根据知识图谱本体层中的运行环境概念和类别, 对设计质量文档等数据源进行分类, 归纳每一类运行环境下的故障模式集合, 生成环境类别-故障模式映

射。然后继续根据环境概念本体提取每一类环境条件下的环境属性与故障模式信息, 基于知识图谱数据层中的“环境属性-关系-故障模式”三元组, 将相同的环境属性实体进行合并, 归纳环境属性-故障模式的匹配关系, 实现运行环境信息到故障信息的完整映射。具体实例如图7所示。

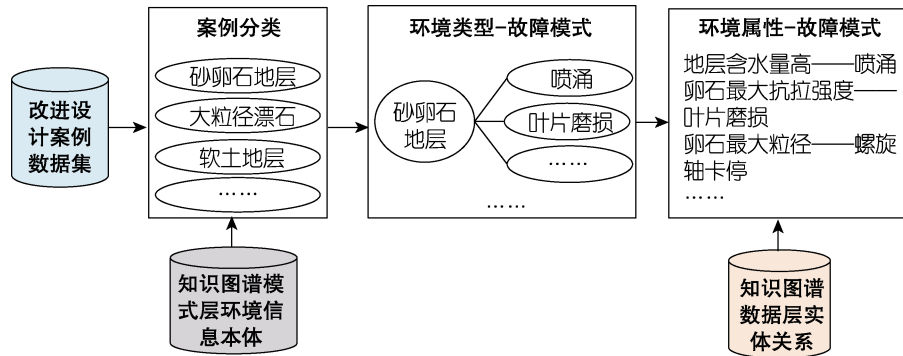


图7 运行环境-故障模式映射关系的生成

Fig.7 Generation of operating environment-fault mode mapping relationship

3.2.3 潜在故障模式推理过程

子图匹配是实现图数据高效查询的一种基本操作, 被广泛应用于各个领域的问题研究中^[33]。采用基于子图匹配算法的潜在故障模式推理方法替代传统的案例匹配方法(通过关键词和属性值进行检索), 可以提升检索的灵活性和扩展性。具体的实施步骤依次为: 输入新的设计任务并提取运行环境信息, 构建运行环境查询图; 将运行环境查询图分解为单一路径子图, 构建环境信息查询子图集合; 输入知识图谱, 选择查询子图起始节点, 对知识图谱数据进行节点搜索; 若在图谱中找到相同节点, 则重复上一步骤进行下一节点的搜索, 若未找到相同节点, 则根据知识图谱本体概念进行语义相似度分析, 检索相似实体; 查询子图的节点路径完成匹配后, 通过实体关系进行扩展搜索, 匹配该查询子图对应的故障模式实体, 并存入故障模式实体集合; 继续搜索其他子图, 直至查询图中全部节点搜索完毕, 得到最终的故障模式实体集合, 完成潜在故障模式推理。

为了提高语义相似度的计算精度, 引入子图实体概念节点之间的语义距离进行相似度计算。其中相似度的相关计算公式有:

1) 语义相似度计算公式

$$\text{Sim}(D_1, D_2) = \frac{1}{1 + \text{Distance}(D_1, D_2)} \quad (4)$$

式中, $\text{Sim}(D_1, D_2)$ 表示两个实体的语义相似度, $\text{Distance}(D_1, D_2)$ 表示两个实体之间的语义距离。

2) 精确数值相似度计算公式

$$\text{Sim}_{en}(D_1, D_2) = 1 - \frac{|a - b|}{R} \quad (5)$$

式中, $\text{Sim}_{en}(D_1, D_2)$ 表示该实体精确属性值的数值相似度, a 为运行环境查询图中实体 D_1 的精确属性数值, b 为知识图谱中对应环境因素实体 D_2 的属性数值, R 表示该属性数值的取值范围。

3) 确定区间数值的相似度计算公式

$$\text{Sim}_{ei}(D_1, D_2) = \frac{|a_1, a_2| \cap |b_1, b_2|}{\text{Max}(a_2, b_2) - \text{Min}(a_1, b_1)} \quad (6)$$

式中, 实体 D_1 的属性取值区间为 $[a_1, a_2]$, 知识图谱中环境因素实体 D_2 的属性取值区间为 $[b_1, b_2]$ 。

4) 模糊区间数值的相似度采用梯度函数计算公式

$$\text{Sim}_f = \text{Sim}_f(x) = \begin{cases} \frac{y - \min(d)}{D_1 - \min(d)} & \forall y \in [\min(d), D_1) \\ 1 & \forall y \in [D_1, D_2] \\ \frac{\max(d) - y}{\max(d) - D_2} & \forall y \in (D_2, \max(d)] \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $[D_1, D_2]$ 表示属性值的最优取值区间, y 是对应属性的实际数值。

3.2.4 适应性改进设计方案生成

在完成潜在故障模式的推理后, 构建对应的故障模式实体集合, 需要从知识图谱中通过扩展搜索故障模式对应的改进设计案例数据。在每一个改进设计案例中, 既有对环境属性的描述, 也有对应结构、参数的改进设计措施。在改进设计方案的生成过程中, 主要根据对环境属性部分的相似度计算, 检索最相近的案例, 提取对应的改进设计措施知识, 并通过组合形成改进设计方案候选集。具体生成的流程步骤依次为: 将推理得到的故障模式实体作为索引, 在知识图谱中检索到可重用的改进设计措施知识; 根据子图匹

配过程,提取故障模式所在路径中的环境属性实体,组成“环境属性-改进设计措施”知识图谱案例集,为环境属性相似度的计算提供依据;将环境信息查询图与改进设计案例中的环境属性进行相似度计算,设定相似度阈值,提取符合条件的改进设计措施实体节点;最后通过形态学矩阵生成针对潜在故障模式的改进设计方案候选集。

3.2.5 产品适应性改进设计方案多属性决策

以上由形态学矩阵组合生成的多种针对故障模式的改进方案,需要通过定义评价指标进行方案综合评估,最后依据评估结果选定最优的改进方案。在多属性问题优化过程中,逼近理想解排序法的基本原理为通过计算正负理想解与评估目标的距离值,对评估目标进行排序,选用基于三角模糊数的逼近理想解排序方法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)可以达到最佳效果^[34],通过改进设计方案与理想目标相对贴近度的值来判断方案综合性能的好坏,值越大则方案综合性能越好。相对贴近度 D_i 的计算公式如下:

$$D_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

式中, D_i^+ 、 D_i^- 分别表示各方案的评分值到正、负理想解的距离。

在确定适应性改进设计方案评价指标后,对候选方案进行多属性评价,最后将该过程得到的方案结果存储到对应的设计案例库中,完成改进设计方案多属性决策。根据相对贴近度计算结果进行排序,贴近度值最大的方案综合性能最优,作为最终的改进方案。

4 工程案例验证

4.1 辅助决策方法的背景及流程

依托国家重点研发计划项目“产品自适应在线设计技术平台研发”,以某大型重工企业的盾构螺旋输送机产品的适应性设计过程为例,对本文提出的基于知识图谱的产品适应性设计辅助决策方法的可行性与有效性进行验证。

螺旋输送机是盾构机实现渣土输送与排出、调整土压平衡的主要设备,保障其运行性能的稳定对盾构施工过程来说具有重要意义^[35]。螺旋输送机由多个结构系统组成,零部件数目较多,集成多学科设计知识,属于典型的复杂产品。螺旋输送机主要由螺旋轴、筒体、驱动装置、伸缩节、出渣门和防涌门等组成,如图8所示。其工作原理是通过电机驱动液压泵带动液压马达,深入土舱内的螺杆和叶片,土舱内的渣土最终通过出渣门排出。

盾构螺旋输送机的常规改进设计过程根据设计任务、工程地质状况、客户需求等信息,进行需求分析作为设计输入,检索设计方案库相关案例进行改

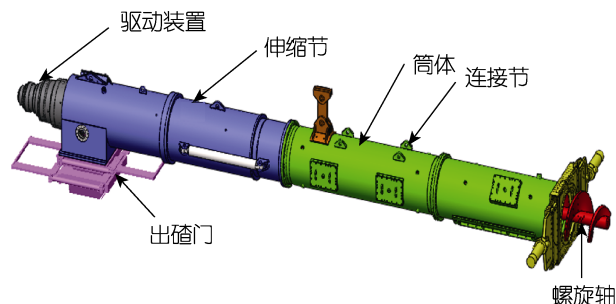


图8 螺旋输送机主要结构模型
Fig.8 Main structure model of screw conveyor

进,这种常规改进设计缺乏对多种异构数据的融合管理,也缺乏快速检索产品有效知识的手段,造成设计知识的重用程度低,容易导致产品设计缺陷多,需反复修改、试验,难以快速满足市场的需求。为此改变常规改进设计过程的方法,根据螺旋输送机的改进设计流程与运维阶段知识数据形式,结合运维知识驱动的复杂产品适应性改进设计特点,提出基于知识图谱的螺旋输送机适应性改进设计辅助决策方法。适应性设计辅助决策流程如图9所示。

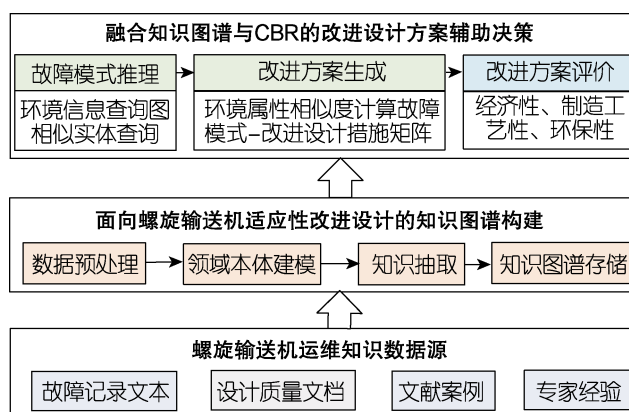


图9 基于知识图谱的螺旋输送机适应性改进设计辅助决策过程

Fig.9 Adaptive improvement design-assisted decision-making process of screw conveyor based on knowledge graph

4.2 适应性设计的知识图谱构建

在构建螺旋输送机领域知识图谱时,需要对螺旋输送机运行环境、故障模式、结果零部件等信息进行分析,建立其本体分类模型并对相关属性进行定义。选用斯坦福大学开发的 Protégé 软件作为本体构建工具,构建螺旋输送机适应性设计领域核心概念本体。以企业的产品故障记录文本、设计质量文档、不同型号螺旋输送机改进设计相关文献作为主要数据源,在上述实体关系分类实验结果的基础上,抽取所需的结果零部件、运行环境、故障模式和对应的改进设计措施等知识,然后人工校正提高知识质量,最后存储在 Neo4j 图数据库中。构建的部分领域知识图谱的实体与关系如图10所示。

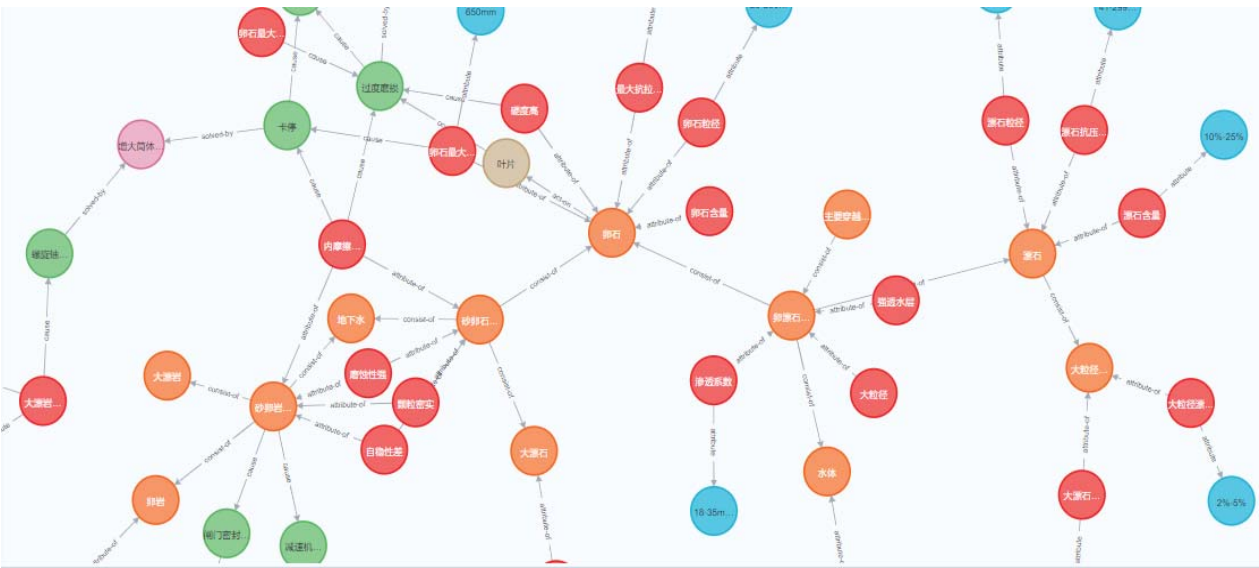


图 10 螺旋输送机领域知识图谱局部实体及其关系
Fig.10 Local entities of knowledge graph in the field of screw conveyor and their relations

基于该知识图谱可进行适应性设计知识查询、潜在故障模式推理、改进设计措施匹配、故障影响关系推理与设计参数相关性分析等操作,并辅助设计人员进行产品改进设计方案决策。

4.3 适应性设计方案的辅助决策

以 T 市地铁工程项目的盾构机产品设计任务为例,选取螺旋输送机为设计对象,进行案例知识匹配与适应性改进方案的辅助决策,具体流程如图 11 所示。

在潜在故障推理环节,对产品施工环境信息进行获取,筛选出影响盾构机掘进性能的关键环境信息,其三元组信息通过运行环境信息查询图进行表示,再利用 Neo4j 的 Match 语句可以在知识图谱中查询运行环境实体对应的结果子图,通过结果子图显示该环境实体的不同属性,以及对产品造成的潜在故障模式及其改进设计措施。以环境信息实体“卵石”为例,获取“卵石”不同属性条件下造成的螺旋输送机故障模式及相应的改进设计措施,结果子图中的部分实体及关系如图 12 所示。如“卵石最大粒径为 650 mm”时,可能导致部件“叶片”发生“卡停”故障,进而还可能导致“螺旋轴”发生“断裂”,针对“卡停”的改进设计措施包括“提高最大通过粒径”“优化前端叶片尺寸和形状”等。针对其他环境信息实体重复上述子图匹配操作,获取当前设计任务下的全部环境信息查询子图,并进行下一步的相似度评估计算。以“螺旋轴断裂”故障为例,部分案例的匹配结果如表 7 所示,并根据式(4)~(7)进行查询图和结果子图的相似度评估,依据结果排序得到当前环境条件下的潜在故障模式及改进设计措施集合,如表 7 所示。

根据形态学矩阵,可列出 8 种故障模式的 $N=2^8=256$ 种改进设计方案,利用基于三角模糊数的 TOPSIS 法对改进方案从经济性、制造工艺性、环保性 3 个方

面进行评价,依据工程经验,评价指标的权重分配分别为 0.4、0.4、0.2。分值越高说明该方案的评价指标越优,从而计算出不同方案与理想方案的相对贴近度。由于篇幅的关系,选择分值较高的 15 个组合方案进行评价。首先建立专家评分矩阵,然后将 15 个组合方案评分矩阵进行去模糊化,建立经济性、工艺性、环保性 3 个方面的综合评分矩阵,最后按照三角

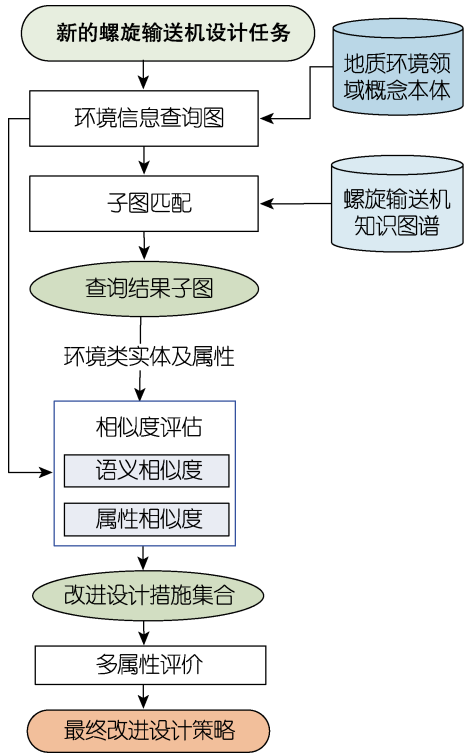


图 11 融合知识图谱和 CBR 的螺旋输送机适应性改进设计辅助决策流程
Fig.11 Adaptive improvement design-assisted decision-making process of screw conveyor based on knowledge graph and CBR

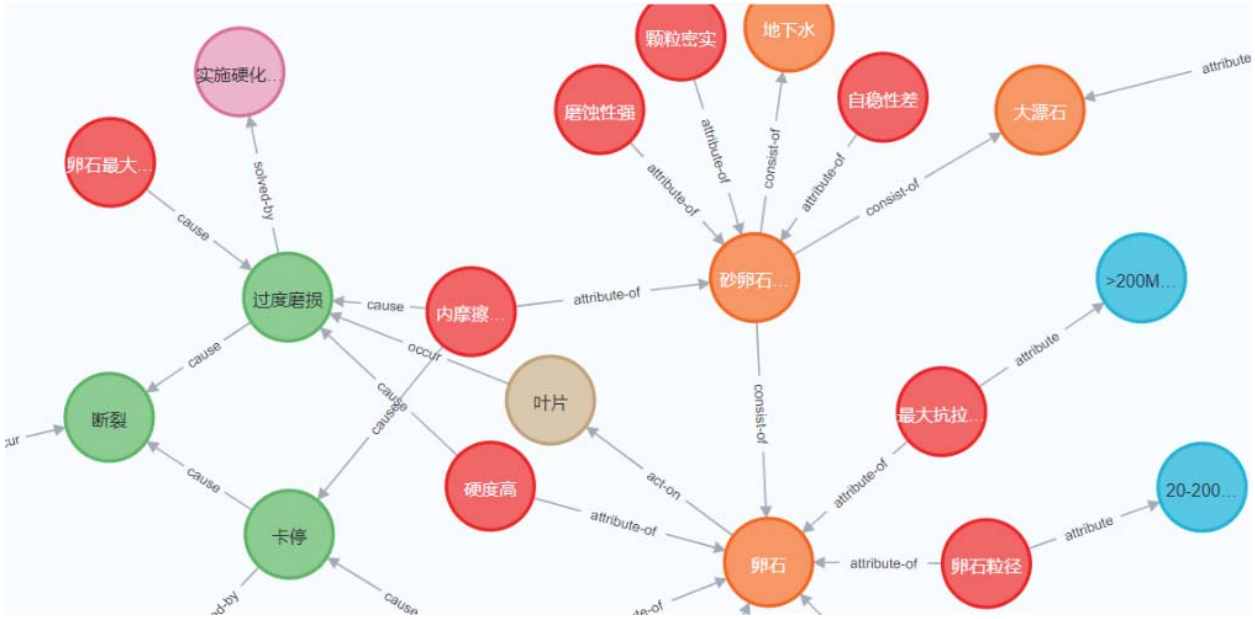


图 12 部分查询结果子图
Fig.12 Subgraph of partial query result

表 7 故障模式-改进设计措施集合矩阵表
Tab.7 Set matrix of failure mode-improvement design measures

故障模式	改进设计措施
叶片磨损	①螺旋轴叶片采用高锰铸铁耐磨块 ②叶片采用高铬合金耐磨材料
螺旋轴磨损	①螺杆焊接 40~50 HRC 硬度耐磨条 ②筒体前部设计可更换的衬套
螺旋轴卡死	①采用前端小、后端大的变螺旋距设计 ②增大筒体内径
螺旋轴断裂	①加长伸缩筒体长度 ②减少螺旋轴悬臂长度
筒体磨损	①筒体增设耐磨块 ②配置可更换的伸缩筒
闸门密封失效	①滑动轴承改为滚动轴承/调心轴承 ②采用双主唇油封
减速机磨损	①由中心轴带动螺旋轴回转模式 ②出入口设置在驱动轴下部，皮带输送机相应地向前延伸
出渣口喷涌	①配置双出料门 ②降低叶片节距

模糊数的 TOPSIS 方法计算出 15 个方案的正负理想解及各方案到正负理想解的距离,以及各备选方案的相对贴程度,各方案的相对贴程度数值如表 8 所示。

表 8 各备选方案的相对贴程度计算结果
Tab.8 Calculation results of relative closeness of various alternatives

方案 序号	相对 贴程度	方案 序号	相对 贴程度	方案 序号	相对 贴程度
DS1	0.401	DS6	0.472	DS11	0.642
DS2	0.562	DS7	0.457	DS12	0.556
DS3	0.731	DS8	0.506	DS13	0.478
DS4	0.537	DS9	0.755	DS14	0.770
DS5	0.921	DS10	0.557	DS15	0.781

综合上述计算结果,确定方案 DS5 为最优改进方案,具体提出的改进设计策略包括: {叶片采用高铬合金耐磨材料、螺杆焊接 40~50 HRC 硬度耐磨条、采用前端小、后端大的变螺旋距设计、减小螺旋轴悬臂长度、配置可更换的伸缩筒、采用双主唇油封、由

中心轴带动螺旋轴回转、配置双出料门}。从方案结果来看,通过对叶片、螺旋轴等关键部件,在结构尺寸、工艺等不同方面进行适当的调整改进,能够有效避免富水卵漂石地层环境下系统潜在故障模式的发生;该方案在有效预防故障模式、提升环境适应性的前提下,可以尽可能缩小对原型产品参数的调整范围,兼顾了改进设计的时间成本、经济成本与制造工艺性;同时在改进策略的选择上考虑改进方案的环保性,降低产品在全生命周期过程中对环境的影响,也验证了该辅助决策方法是可行有效的。

5 结语

文中讨论了基于知识图谱的产品适应性改进设计辅助决策方法,构建了适应性设计辅助决策框架及知识图谱构建框架,分析了基于知识图谱的适应性设计辅助决策过程的查询与推理规则方法,为实现产品运行环境与改进设计方案的精准匹配,提高设计人员决策效率与产品适应性提供了一种新方法。

文中不足的地方是所构建的知识图谱主要面向产品运行环境分析与对应故障模式及改进设计方案,限定了部分实体与关系的类别,未能完全包含产品设计领域、需求分析、制造装配等环节的知识实体,下一步将丰富完善全生命周期的适应性改进设计知识图谱内容,使产品适应性设计辅助决策方法具有更为广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王星星. 数据驱动的产品适应性评价方法与工具[D]. 汕头: 汕头大学, 2021.
WANG Xing-xing. Data-driven Method and Tool for Evaluation of Product Adaptability[D]. Shantou: Shantou University, 2021.
- [2] GU P, HASHEMIAN M, NEE A Y C. Adaptable Design[J]. CIRP Annals, 2004, 53(2): 539-557.
- [3] 刘峤, 李杨, 段宏, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 582-600.
LIU Qiao, LI Yang, DUAN Hong, et al. Knowledge Graph Construction Techniques[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(3): 582-600.
- [4] 张吉祥, 张祥森, 武长旭, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机工程, 2022, 48(3): 23-37.
ZHANG Ji-xiang, ZHANG Xiang-sen, WU Chang-xu, et al. Survey of Knowledge Graph Construction Techniques[J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 23-37.
- [5] 胡珉, 胡星辰, 宋云, 等. 基于知识图谱的盾构施工辅助决策系统设计和开发[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 66-75.
HU Min, HU Xing-chen, SONG Yun, et al. Design and Development of the Shield Construction Assistant Decision-Making System Based on the Knowledge Graph[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 66-75.
- [6] 吴隔格, 石宇强, 姜辉, 等. 基于本体的包装设计辅助决策支持方法[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 59-64.
WU Ge-ge, SHI Yu-qiang, JIANG Hui, et al. Support Method Used to Assist Decision Making in Packaging Design via Ontology[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 59-64.
- [7] 廖立君, 吴岳忠, 李长云. 中国包装产业大数据知识图谱应用系统的设计[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 140-150.
LIAO Li-jun, WU Yue-zhong, LI Chang-yun. Design of Big Data Knowledge Graph Application System for China Packaging Industry[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 140-150.
- [8] 陈永亮, 满佳, 曲艺, 等. 机械产品可适应性度量方法及应用[J]. 工程设计学报, 2010, 17(1): 1-11, 24.
CHEN Yong-liang, MAN Jia, QU Yi, et al. Measurement Method and Application of Adaptability for Mechanical Products[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(1): 1-11, 24.
- [9] 魏云蓬, 陈永亮, 索树灿. 基于模块度和均衡度的复杂产品架构评价方法[J]. 工程设计学报, 2021, 28(5): 527-538.
WEI Yun-peng, CHEN Yong-liang, SUO Shu-can. Evaluation Method of Complex Product Architecture Based on Modularity and Equilibrium[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(5): 527-538.
- [10] 龚勋, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 复杂工况驱动的产品适应性设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 505-520.
GONG Xun, FENG Yi-xiong, TAN Jian-rong, et al. Product Adaptable Design Method Driven by Complex Condition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 505-520.
- [11] 辛志杰. 面向产品族的机床结构可适应动态设计理论、方法与应用[D]. 天津: 天津大学, 2008.
XIN Zhi-jie. Research on Theory, Methodology and Application of Adaptable Dynamic Design of Machine Tools Structures for Product Family[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [12] 徐灵浩, 贺华波. 机械产品面向可变功能再设计的环境适应性设计研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2021, 34(5): 109-116.
XU Ling-hao, HE Hua-bo. Environmentally Adaptive Design in Redesign for Adaptable-function Mechanical Product[J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2021, 34(5): 109-116.
- [13] 赵婕. 基于功能与场地线索的大型综合医院布局适应性设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHAO Jie. Research on Adaptive Design of Layout of Large General Hospitals Based on Function and Site Clues[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [14] 从言言. 基于知识重用的门式起重机适应性设计及应用[D]. 南昌: 华东交通大学, 2017.
CONG Yan-yan. The Adaptive Design and Application for Gantry Crane Based on Knowledge Reuse[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.
- [15] 杨爱军. 基于可拓理论的机械产品适应性设计方法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
YANG Ai-jun. Research and Application of Adaptive Design for Mechanical Products Based on Eextension Theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [16] 周宏明, 付培红, 李峰平, 等. 基于产品基因的适应性设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1175-1179.
ZHOU Hong-ming, FU Pei-hong, LI Feng-ping, et al. Research on Adaptability Design Method Based on Product Genes[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(10): 1175-1179.
- [17] 尹从峰. 基于生命周期理论的铁路客运站适应性设计研究报告[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
YIN Cong-feng. Based on the Life Cycle Theory of Railway Station Design Research Report[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

- [18] 赵婉, 胡彭伟, 程海龙. 基于关键产品把控的舰船装备环境适应性设计对策分析方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 125-129.
- ZHAO Wan, HU Peng-wei, CHENG Hai-long. Environmental Worthiness Design Countermeasure Analysis Method Based on Crucial Product Control for Marine Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(6): 125-129.
- [19] 杨子超. 数据驱动的火箭贮箱拉锻式摩擦塞焊机建模与适应性设计[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- YANG Zi-chao. Data-driven Modeling and Adaptive Design of Friction Pull Plug Welding Machine for Rocket Tank[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [20] 王儒. 基于知识的产品设计决策过程建模方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- WANG Ru. Study on Knowledge-based Product Design Decision Process Modeling Method[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [21] ZHANG D, LIAO W. An Application of Real-coded Genetic Algorithm to Mechanical Optimization Design[C]. International Conference on Agile Manufacturing, 2003, 6: 547-551.
- [22] YANG C J, CHEN J L. Accelerating Preliminary Eco-Innovation Design for Products that Integrates Case-Based Reasoning and TRIZ Method[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(9-10): 998-1006.
- [23] 曹倩, 赵一鸣. 知识图谱的技术实现流程及相关应用[J]. 情报理论与实践, 2015, 38(12): 127-132.
- CAO Qian, ZHAO Yi-ming. The Realization Process of Knowledge Map Technology and Its Relevant Application[J]. Information Studies: Theory & Application, 2015, 38(12): 127-132.
- [24] OBOLEWICZ J, BARYŁKA A, JAROS H, et al. A Map of Knowledge and Its Importance in the Life Cycle of a Construction Object[J]. Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych, 2020(2): 1-11.
- [25] TIAN Ling, ZHOU Xue, WU Yan-ping, et al. Knowledge Graph and Knowledge Reasoning: A Systematic Review[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2022, 20(2): 159-186.
- [26] 扈应, 陈艳平, 黄瑞章, 等. 结合 CRF 的边界组合生物医学命名实体识别[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(7): 2025-2031.
- HU Ying, CHEN Yan-ping, HUANG Rui-zhang, et al. CRF-Combined Boundary Assembly Method for Biomedical Named Entity Recognition[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(7): 2025-2031.
- [27] 许力, 李建华. 基于 BERT 和 BiLSTM-CRF 的生物医学命名实体识别[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(10): 1873-1879.
- XU Li, LI Jian-hua. Biomedical Named Entity Recognition Based on BERT and BiLSTM-CRF[J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(10): 1873-1879.
- [28] 江叶峰, 孙少华, 仇晨光, 等. 电网故障处置预案文本中的命名实体识别研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 177-183.
- JIANG Ye-feng, SUN Shao-hua, QIU Chen-guang, et al. Named Entity Recognition in Power Fault Disposal Preplan Text[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 177-183.
- [29] 刘绍毓, 周杰, 李弼程, 等. 基于多分类 SVM-KNN 的实体关系抽取方法[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(1): 202-210.
- LIU Shao-yu, ZHOU Jie, LI Bi-cheng, et al. Entity Relation Extraction Method Based on Multi-SVM-KNN Classifier[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(1): 202-210.
- [30] 赵旭, 唐健均, 谭清中. 基于 Neo4j 的网络化协作加工设备资源建模方法研究[J]. 现代制造工程, 2018(2): 55-63.
- ZHAO Xu, TANG Jian-jun, TAN Qing-zhong. Resource Modeling Method for Networked Collaborative Manufacturing Equipment Based on Neo4j[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(2): 55-63.
- [31] ZOU Xin, YUE Wen long, LE VU H. Visualization and Analysis of Mapping Knowledge Domain of Road Safety Studies[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 118: 131-145.
- [32] XU Shuai, DAI Hao-hua, YU Xin, et al. Big Data Knowledge Map Based on Entity Recognition[C]//2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE). Nanchang, China. IEEE, 2021: 163-166.
- [33] 许文, 宋文爱, 富丽贞, 等. 面向大规模图数据的分布式子图匹配算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(4): 28-35.
- XU Wen, SONG Wen-ai, FU Li-zhen, et al. Distributed Subgraph Matching Algorithm for Large Scale Graph Data[J]. Computer Science, 2019, 46(4): 28-35.
- [34] 徐波. 基于逼近理想解排序法的基坑风险模糊识别方法[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 673-680.
- XU Bo. Fuzzy Risk Identification during Excavation Based on TOPSIS Method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 673-680.
- [35] 胡竟. 基于 CFD 数值模拟的盾构刀盘设计分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- HU Jing. The Numerical Simulation of Earth Pressure Balance Shield Cutter Head Design Based on CFD[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

责任编辑: 马梦遥