



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 面向工业数字孪生的三层知识图谱结构设计方法

唐昕, 孙宇菲, 王钰珏, 石敏, 朱登明

引用本文

唐昕, 孙宇菲, 王钰珏, 石敏, 朱登明. 面向工业数字孪生的三层知识图谱结构设计方法[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230400153-6.

TANG Xin, SUN Yufei, WANG Yujue, SHI Min, ZHU Dengming. [Three Layer Knowledge Graph Architecture for Industrial Digital Twins](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230400153-6.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

**Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)**

[一种基于异构图神经网络和文本语义增强的实体关系抽取方法](#)

Method for Entity Relation Extraction Based on Heterogeneous Graph Neural Networks and TextSemantic Enhancement

计算机科学, 2024, 51(6A): 230700071-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230700071>

[融合HousE和注意力机制的知识推理模型](#)

Knowledge Reasoning Model Combining HousE with Attention Mechanism

计算机科学, 2024, 51(6A): 230600209-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230600209>

[知识图谱的可视化文献计量分析](#)

Visual Bibliometric Analysis of Knowledge Graph

计算机科学, 2024, 51(6A): 230500123-10. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230500123>

[基于自适应上下文匹配网络的小样本知识图谱补全](#)

Adaptive Context Matching Network for Few-shot Knowledge Graph Completion

计算机科学, 2024, 51(5): 223-231. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230200012>

[融合实体描述的水泥制造领域知识图谱嵌入模型](#)

Knowledge Graph Embedding Model with Entity Description on Cement Manufacturing Domain

计算机科学, 2024, 51(3): 251-256. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221200080>

# 面向工业数字孪生的三层知识图谱结构设计方法

唐昕<sup>1,2</sup> 孙宇菲<sup>1,2</sup> 王钰珏<sup>1,2</sup> 石敏<sup>1</sup> 朱登明<sup>2</sup>

1 中国科学院计算技术研究所 北京 100190

2 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206

(tx@ncepu.edu.cn)

**摘要** 随着工业领域数字化和智能化的发展,企业正面临着提高生产效率、降低生产成本、优化生产过程以及实现实时监控等挑战。数字孪生技术作为一种有效的解决方案,受到了广泛关注。然而,工业建设数字孪生过程中存在数据获取与整合、模型构建与更新以及实时性与精度等难点。为解决这些问题,提出了一种基于数字孪生的知识图谱概念-实例-模块结构设计方法。数字孪生知识图谱模型采用概念-实例-模块三层架构,概念层通过知识图谱建立全面有机的知识网络;实例层进行数字化建模,实现理论参数的真实再现;知识模块层则将前两层知识进行融合,形成功能模块,以实现全面监测和控制。这一模型能够对工业加工知识进行更为准确、细致的建模和分析,帮助企业实现数字化建模、精确仿真模拟、预测分析、异常检测等高级应用功能。

**关键词:** 数字孪生;知识图谱;智能制造;生产优化;质量控制

**中图分类号** TP391.7

## Three Layer Knowledge Graph Architecture for Industrial Digital Twins

TANG Xin<sup>1,2</sup>, SUN Yufei<sup>1,2</sup>, WANG Yujue<sup>1,2</sup>, SHI Min<sup>1</sup> and ZHU Dengming<sup>2</sup>

1 Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

**Abstract** As digitalization and intelligence continue to develop in the industrial field, enterprises are facing challenges in improving production efficiency, reducing production costs, optimizing production processes, and achieving real-time monitoring. Digital twin technology has received widespread attention as an effective solution. However, there are difficulties in data acquisition and integration, model construction and updating, and real-time performance and accuracy in the process of industrial digital twin construction. To address these issues, this paper proposes a concept-instance-module structure design method based on digital twin knowledge graph. The digital twin knowledge graph model proposed in this paper adopts a three-layer architecture of concept-instance-module. The concept layer establishes a comprehensive and organic knowledge network through the knowledge graph. The instance layer achieves digital modeling to reproduce theoretical parameters realistically. The knowledge module layer integrates the knowledge of the previous two layers to form functional modules for comprehensive monitoring and control. This model can provide more accurate and detailed modeling and analysis of industrial processing knowledge, helping enterprises to achieve advanced application functions such as digital modeling, accurate simulation, predictive analysis, and anomaly detection.

**Keywords** Digital twin, Knowledge graph, Intelligent manufacturing, Optimization of the production process, Quality control

## 1 引言

随着工业 4.0 和智能制造的快速发展,企业正面临着提高生产效率、降低生产成本、优化生产过程以及实现实时监控等挑战。为应对这些挑战,数字孪生技术作为一种融合虚拟与现实的创新手段,近年来受到了广泛关注。数字孪生作为物理设备、系统或过程的虚拟镜像,可以实现数据与实体的无缝连接,为生产过程的优化和监控提供了强有力的支持。

数字孪生在工业领域的需求不仅仅限于提高生产效率、降低成本、提升产品质量以及支持决策等方面。在现代制造业中,数字孪生技术能够实现对设备和生产线的实时监控,

发现潜在故障,进行故障预测,提前制定应对措施,从而确保生产过程的稳定和可靠。然而,在实际应用过程中,工业建设数字孪生面临诸多挑战。由于工业设备和生产线涉及众多不同类型的传感器、控制器和其他设备,各种设备之间的内部编号名称和数据格式可能存在差异,数据获取和整合变得困难,如何将这些数据与数字孪生模型相结合,以实现实时更新和反馈,也是一个需要解决的问题。其次,数字孪生模型需要精确地反映现实世界的设备、系统和过程,但在实际应用中,随着生产条件的变化,以及设备的磨损和制造工艺的更新,数字孪生模型需要不断地进行调整和更新,以保持与现实世界的同步。同时,数字孪生模型需要实时响应现实世界的变化,并

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1710400)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China(2020YFB1710400).

通信作者:朱登明(mdzhu@ict.ac.cn)

保持较高的精度,以确保生产过程的稳定和可靠。然而,在实际应用中,如何实现高实时性与高精度的平衡,以满足工业应用的需求,是一个亟待解决的问题。

本方法通过三层架构来解决数字孪生领域的难点。首先,概念层通过知识图谱建立全面有机的知识网络,有助于解决数据整合问题。其次,实例层进行数字化建模,实现理论参数的真实再现,提高了数字孪生模型的构建和更新能力。最后,知识模块层基于实例层对物理环境进行的精确仿真模拟数据,实现各种高级功能模块如预测分析、异常检测等。借助这一模型,工业加工知识能够得到更为准确、细致的建模和分析,从而帮助企业实现数字化建模、精确仿真模拟、预测分析、异常检测等高级应用功能。

## 2 相关工作

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程,因此,数字孪生的技术体系必须支撑虚拟空间、物理空间以及双向的信息流动等要素,并在其全生命周期发挥作用<sup>[1]</sup>。

Tuegel 等<sup>[2]</sup>设计了一种可以对航空器的结构寿命进行预测和控制的数字孪生系统,该系统基于有限元分析和机器学习技术,将物理结构的多个层次信息进行集成和协同处理,以实现对其结构寿命的预测和控制。Guo 等<sup>[3]</sup>通过将数字孪生装配工艺模型与装配过程数据进行可视化展示,实现对装配过程的实时监控和优化。

在智能工业新时代,知识作为智能制造中的重要资源<sup>[4]</sup>,已在工业加工领域引起广泛关注。实现知识的高效管理与整合,不仅对创新能力的提升具有重要意义,而且在工业制造领域的智能化水平中占据举足轻重的地位。知识图谱作为一种基于语义网络的新型知识库形式,正迅速成为实现这一目标的关键技术。Google 于 2012 年提出知识图谱这个概念<sup>[5]</sup>——知识图谱是一种高效的图形技术,可用于表达实体之间的关系。它以实体-关系-实体或概念-属性-属性值等三

元组形式进行表达,为深入挖掘知识提供了有力的工具,同时为智能制造过程提供了一种高效且具有语义关联的知识组织框架。知识图谱可分为通用知识图谱和行业知识图谱两种,前者重视广度、融合各领域实体,广泛应用于智能搜索、个性化推荐等场景<sup>[6-7]</sup>;后者则更注重深度,深挖医疗<sup>[8-10]</sup>、金融<sup>[11-12]</sup>、电力系统<sup>[13-14]</sup>等领域。产品复杂程度越来越高,传统的数字化手段已经无法满足市场对于产品的定制化需求日益增长的趋势。Gu<sup>[15]</sup>研究了一种基于知识图谱的复杂产品装配工艺智能设计方法,该方法对于提高装配工艺的设计效率具有一定参考意义。Han<sup>[16]</sup>从知识管理的角度提出了基于知识图谱技术的刀具产品知识库管理解决方案,应用知识图谱技术对切削刀具产品数据信息进行知识层面的组织管理,实现了对切削刀具产品知识的管理。Wang 等<sup>[17]</sup>对松散回潮的工序、加工参数和质量指标等多源异构的数据进行知识抽取,构建了松散回潮知识图谱,搭配神经网络算法强大的训练、预测和自学习能力,最终提高了松散回潮质量预测效果。

知识图谱可以将多源数据进行融合,对实体、属性、关系等信息进行语义化表示,让数字孪生能将信息从语义级别相关联,从而对信息描述更加精确,更贴近实际场景,更好地实现信息的标准化,从而提高数字孪生的数据质量以及数据分析能力。本文提出的三层知识图谱结构能够帮助加工工人全面深入地了解数字孪生物理对象和加工过程,将场景真实再现,为企业实现高效的优化和控制工业加工过程助力。

## 3 三层知识图谱结构设计

本文基于工业加工领域智能制造这一背景,旨在为工业加工知识系统的可靠动态建模提供一种新的思路。针对该目的,本文提出了一个多层次数字孪生模型——概念-实例-应用三层结构模型,如图 1 所示。这个模型以知识的概念、实例化和知识应用 3 个层面为主要切入点,从工业加工过程的角度出发,对物理元素的构成以及算法应用进行建模。这一模型具有多层次、全面性、动态性等诸多优势,能够对工业加工知识进行更为准确、细致的建模和分析。

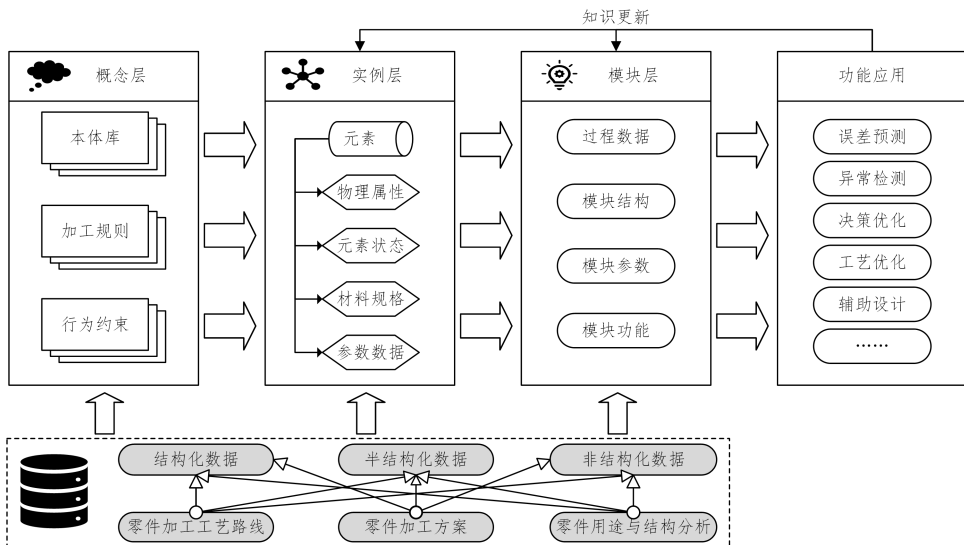


图 1 知识图谱架构

Fig. 1 Architecture of knowledge graph

在这个数字孪生知识图谱模型中,概念层面通过建立知识图谱,将工业加工领域的相关概念进行深度挖掘和关联,

形成一个全面而有机的知识网络;实例化层面则通过将现实世界中的工业加工物理元素进行数字化建模,形成数字孪生,实现了对实际工业加工过程理论参数的真实再现;而知识模块层面依托实例层所提供的精确仿真数据,为上层功能应用提供功能支持,进而完成对工业加工过程中潜在问题的预测和识别。

## 4 知识图谱构建

### 4.1 概念层

如图3所示,概念层作为多层次数字孪生架构中的关键组成部分,涵盖了基本元素类型以及元素间的规则约束集合。针对工业加工领域的特点,概念层对所涉及元素进行深入剖析,识别出基本元素间的互动关系与制约因素,为数字孪生的基本构成单元生成底层规则约束,奠定了数字孪生模型的基石。概念层可以表示如下:

$$C = \{C_{ID}, R_T, R_A, C_R\} \quad (1)$$

其中, $C_{ID}$ 表示基本概念编号,确立了概念模型中各元素类型的唯一性; $R_T$ 表示规则的类型,明确了概念层中规则约束的多样化特征; $R_A$ 表示规则的作用域,界定了规则在特定场景下所影响的元素领域; $C_R$ 表示在特定规则下所生成的基本元素集合,表明了基本元素之间的相互关系。

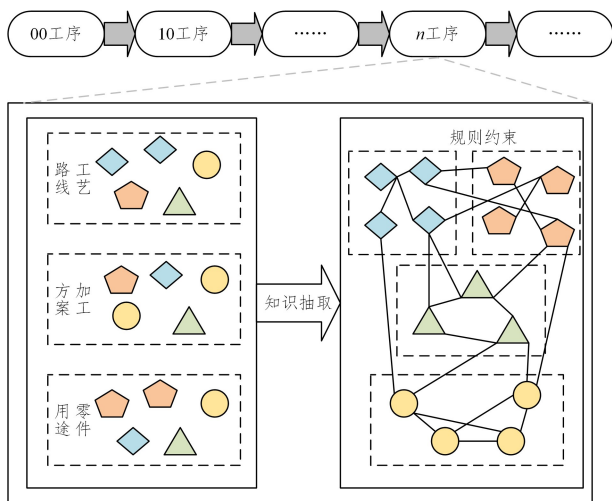


图2 数字孪生知识图谱概念层

Fig. 2 Conceptual layer of digital twin knowledge graph

### 4.2 实例层

实例层专注于工业加工领域的特定元素,概念层所定义的规则约束下,针对其在加工过程中所表现的物理属性,展开详细的数字化建模,如图3所示。这一模型为数字孪生的物理规则提供了关键的数据支持,将真实工业加工过程中的物理理论参数纳入理论建模,以便更精确地模拟实际情况。在实例层的构建过程中,遵循概念层中识别的基本元素间的互动关系和制约因素,通过对不同元素的各种物理属性进行深入剖析,包括元素的状态和规格、物理属性、一般属性等多个方面的细节,确保模型的完整性和准确性,为工业加工过程提供了精确可靠的数字表示。实例模型可以表示如下:

$$I = \{I_{ID}, I_T, I_P, I_I\} \quad (2)$$

其中, $I_{ID}$ 代表实例化后基本概念元素实体的唯一编号,用于确保每个实例在整个模型中的独立性和可识别性; $I_T$ 表示实例化实体的种类,与概念层中基本概念元素类型相对应,以体

现实例与其原始概念元素之间的紧密联系; $I_P$ 描述实例的共有属性集合,即在同族概念元素实例化时,将同族概念元素所具备的普遍特征作为实例化后实例的共有属性,以展示同类实例之间的相似性; $I_I$ 则表示实例的独有属性集合,即在概念元素实例化后,实例所具有的独有特征属性,如实例的状态、规格和物理特性,以表明实例在特定环境下的独特性和差异性。 $I_I$ 可以用下面的等式来描述:

$$I_I = \{[P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n]\} \quad (3)$$

其中, $P_i$ 表示实例层的第*i*个独有特征属性; $N$ 表示独有特征属性的个数。

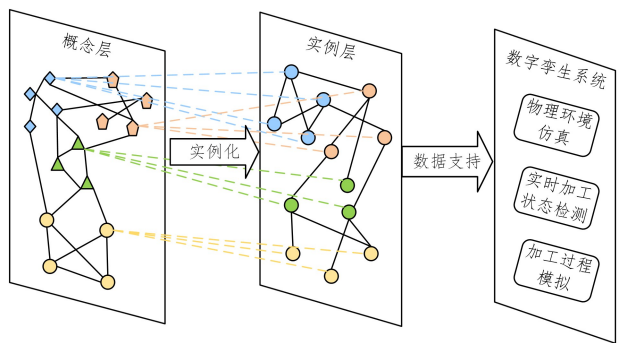


图3 数字孪生知识图谱实例层

Fig. 3 Instance layer of digital twin knowledge graph

### 4.3 模块层

模块层作为数字孪生知识图谱模型的功能应用,建立在实例层对物理环境所进行的精确仿真模拟之上,如图4所示。针对工业加工过程的数据,模块层致力于执行预测分析、异常检测以及其他高级应用功能模块。在此基础上,功能模块进一步挖掘实例模型所提供的静态物理数据,借助先进的算法和计算技术,实现对工业加工过程中潜在问题的预测和识别。模块层可以表示如下:

$$A = \{A_{ID}, A_T, A_P, A_M\} \quad (4)$$

其中, $A_{ID}$ 代表功能模块实例的唯一标识符,用以区分和标识不同的功能模块; $A_T$ 代表功能模块的类别,反映了功能模块在数字孪生知识图谱中所扮演的角色及其针对的特定应用场景; $A_P$ 代表功能模块所依赖的数据集合,这些数据包括源自实例模型中所提供的静态物理数据和实时模拟数据,为功能模块提供了丰富的信息,以支持高级应用功能的实现; $A_M$ 代表功能模块所采用的算法模型,这些算法模型借助领先的技术和方法,赋予功能模块能力以对工业加工过程中的潜在问题进行预测和识别。 $A_M$ 可以用下面的等式来描述:

$$A_M = \{M_S, M_I, M_O\} \quad (5)$$

其中, $M_S$ 表示算法模型的结构,包括模型的神经网络结构和超参数等信息; $M_I$ 表示模型的输入,包括模型的形状和输入数据的类型等信息; $M_O$ 表示模型的输出,对应于应用模型的输出需求。

数字孪生知识图谱以概念层为基础,通过对工业加工领域的元素进行深入剖析,识别出元素间的互动关系和制约因素,为数字孪生模型生成底层规则约束,奠定了数字孪生模型的基石。实例层则专注于工业加工领域的特定元素,展开详细的数字化建模,并为数字孪生的物理规则提供关键的数据支持,为工业加工过程提供了精确可靠的数字表示。模块层则建立在实例层对物理环境所进行的精确仿真模拟之上,致力于为预测分析、异常检测以及其他高级应用功能提供功能模块。

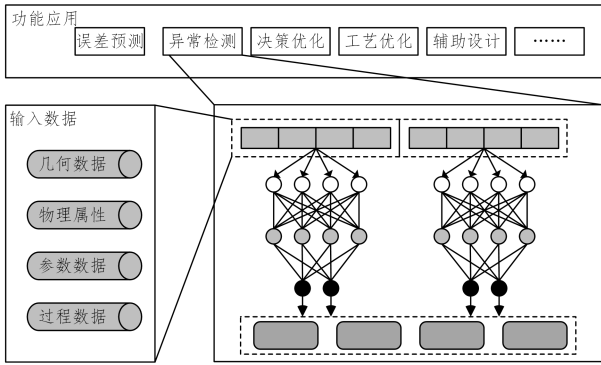


图 4 数字孪生知识图谱模块层

Fig. 4 Module layer of digital twin knowledge graph

这种数字孪生知识图谱的三层架构可以帮助企业实现数字化建模、精确仿真模拟、预测分析、异常检测等高级应用功能,为企业提高生产效率、降低成本、优化产品质量等带来巨大的潜力和机遇。

### 5 三层结构知识图谱应用

工业加工领域的数字孪生知识图谱数据一般来源于零件加工工艺路线、零件加工方案以及零件用途与结构分析。针对其中非结构化和半结构化的数据,本文利用知识抽取的方式从中提取出本体库、加工规则以及行为约束。本文利用本体库将元素实例化,并根据加工规则及行为约束对实例化的元素进行限制和约束。数字孪生系统利用实例化后元素的物理属性和材料规格对数字孪生物理环境进行仿真建模;根据元素的状态实现对实时加工状态的检测;通过利用仿真建模的物理环境,结合元素加工过程的参数数据对工业加工过程进行模拟。将数字孪生系统加工过程模拟以及实时加工状态检测生成的过程数据作为输入,输入到不同的功能模块。上层应用根据应用需求选择不同模块的组合来完成,在应用过程中产生新知识时可以同时同步更新到功能模块以及元素属性。具体流程如图 5 所示。

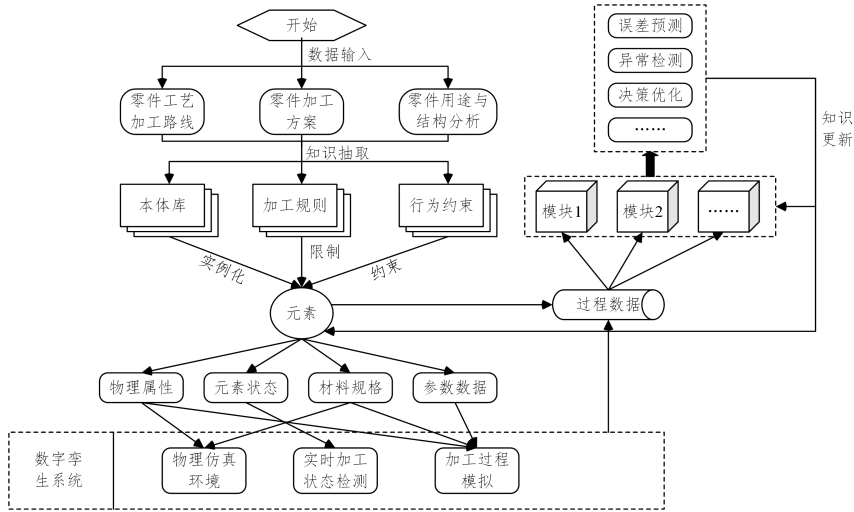


图 5 数字孪生知识图谱应用流程

Fig. 5 Application process of digital twin knowledge graph

以某叶片加工过程为例,从零件加工工艺路线、零件加工方案以及零件用途与结构分析中通过利用知识抽取的方法将其中非结构化、半结构化和结构化的知识抽取出来并融合,将其中的本体库、加工规则和行行为约束在 Protégé 开发环境下构建部分概念层,如图 6 所示。

通过对概念层元素实例化,利用 neo4j 图数据库将加工工艺、工艺参数、机器设备和原材料等相关物理信息及其关系进行了建模和存储,如图 7 所示,以便于加工工人在生产过程中更好地理解 and 应用相关知识,从而提高生产效率和产品质量,同时为工业加工数字孪生建模提供物理仿真数据支持。

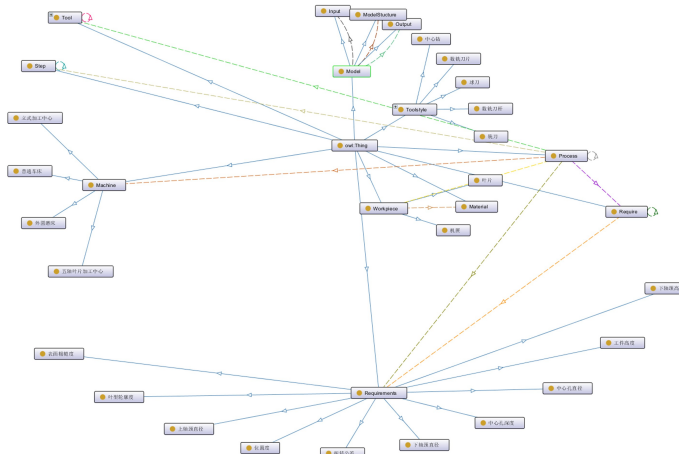


图 6 叶片加工概念层(部分)

Fig. 6 Blade machining concept layer(part)

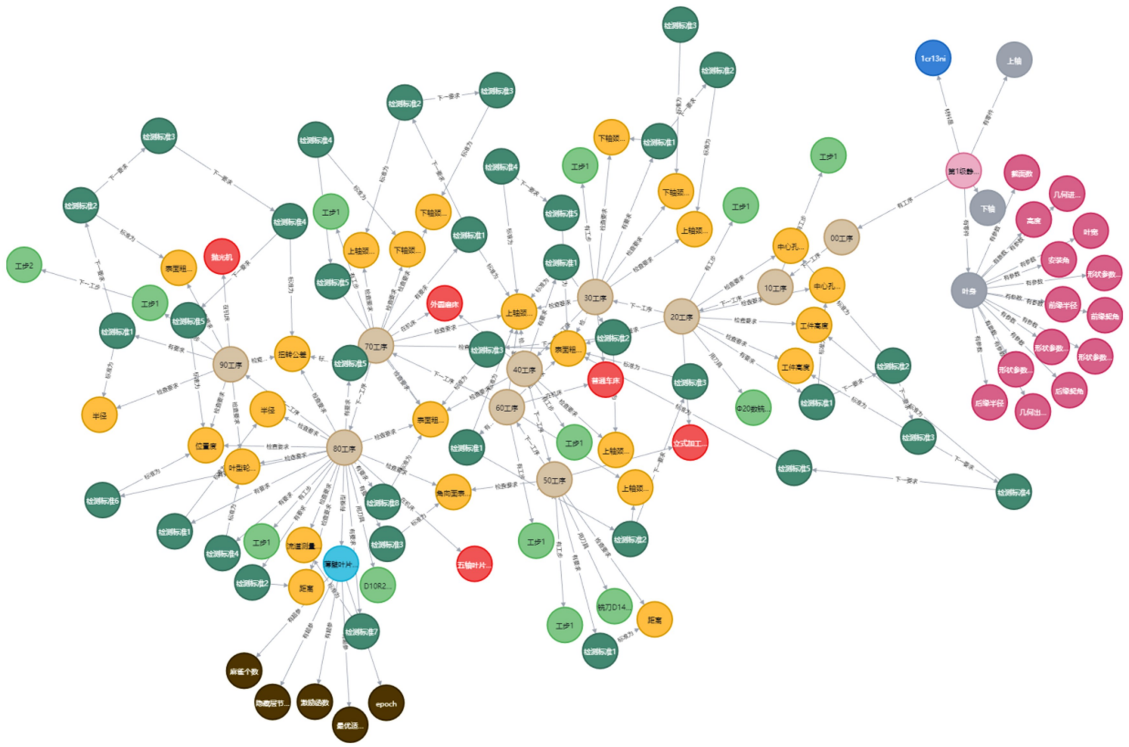


图 7 工业加工数字孪生知识图谱(部分)

Fig. 7 Industrial processing digital twin knowledge graph(part)

模块层为高级软件功能提供模块化建模技术,减轻高级软件功能实现的编程负担。本文以切削力预测模块为例(如图 8 所示),将叶片加工过程中刀具切削时涉及到的理论切削力、刀具转速、环境温度以及刀路轨迹等信息作为输入,调用模块中算法,输出对叶片加工过程中切削力的预测,为预测分析及异常检测提供下层模块支持。

信息数量巨大,且企业的保密性导致在数据不易于收集,知识组织难度较高,需要一定的专业背景知识,由于其专业领域性较强,本体的构建会直接影响到知识图谱的构建质量;另外考虑到时间、成本等因素,后续还需要对本体以及知识图谱进行不断完善。

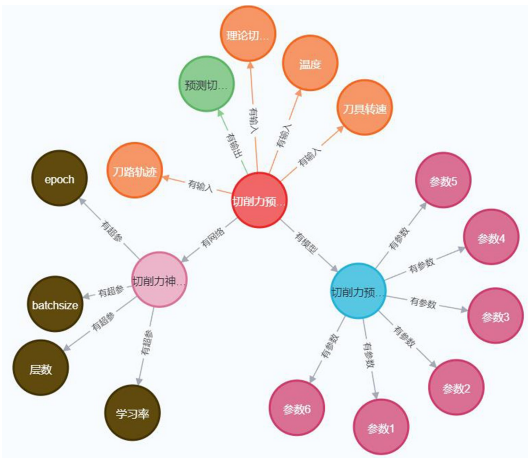


图 8 切削力预测模块

Fig. 8 Cutting force prediction module

**结束语** 知识图谱在工业加工领域的应用可以在工艺设计、生产管理、质量控制等方面进行效率以及质量上的提升。目前知识图谱在互联网、金融、医疗等领域得到了广泛的应用。本体理论与知识图谱相关技术已经趋于成熟,但是在工业领域还处在初步应用的阶段,知识图谱在专业领域垂直深化的可能性还有待挖掘。

专业领域的知识图谱具有行业壁垒高、专业性强等特点,因此工业加工知识图谱在实际工程中的应用还存在一定挑战。工业零件、产品等种类众多,结构复杂,导致其相关数据

### 参 考 文 献

- [1] LI X, LIU X, WAN X X. Overview of digital twins application and safe development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [2] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 6: 1-14.
- [3] GUO F Y, LIU J H, ZOU F, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132.
- [4] Knowledge management empowers industry innovation and development [J]. China Survey and Design, 2020(11): 22-23.
- [5] AMIT S. Introducing the knowledge graph[R]. America: Official Blog of Google, 2012.
- [6] XU Z L, SHENG Y P, HE L R, et al. Overview of Knowledge Graph Technology [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2016, 45(4): 589-606.
- [7] LIANG J, WEN Y. Research on the Application of Knowledge Graph in Medical Assisted Diagnosis [J]. Journal of Medical Informatics, 2022, 43(11): 34-40.
- [8] ZHOU J J, TIAN Z W, ZHOU S Y. Medical intelligent dialogue robot based on knowledge graph [J]. Information Technology, 2022, 46(12): 62-68.
- [9] SUN T T. Research on Knowledge Graph Medical Diagnosis Method Based on Deep Learning [D]. Baotou: Inner Mongolia

University of Science and Technology, 2022.

- [10] XU T T. Construction of medical knowledge graph based on NLP and application of intelligent consultation platform [D]. Shanghai: East China University of Technology, 2022.
- [11] JIA Y H. Construction and Practice of Industrial and Commercial Bank of China Enterprise Level Financial Knowledge Graph [J]. China Financial Computer, 2022, 391(2): 66-69.
- [12] WU M Y. Design and Implementation of a Financial Domain Service System Based on Knowledge Graph [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [13] JI X, WU T X, YANG Z W, et al. Prediction of Power Equipment Defects Based on Time Series Knowledge Graph [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1-9. [2023-02-07].
- [14] LU G H, YU T, CHEN J B, et al. Application and Prospects of Knowledge Graph in Power System Dispatching and Operation [J/OL]. Power Information and Communication Technology: 1-13. [2023-02-07].
- [15] GU X H. Intelligent Design Method for Complex Product Assembly Process Based on Knowledge Graph [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [16] HAN Chaoqun. Research on Knowledge Management of Cutting Tool Products Based on Knowledge Graph [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [17] WANG X, XU C X. A Method for Predicting the Quality of Loose Moisture regain in Cut Tobacco by Combining Knowledge Graph and Deep Neural Network [J]. Light Industry Machinery, 2022, 40(4): 100-104.



**TANG Xin**, born in 2000, master. His main research interests include knowledge graph and times series forecast.



**ZHU Dengming**, born in 1973, Ph.D, associate researcher, master supervisor, is a member of CCF (No. 05984S). His main research interests include virtual reality and human-computer interaction.