

流程工业控制系统的知识图谱构建

牟天昊¹, 李少远^{1,2}

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

2. 上海交通大学系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:近年来,工业控制系统智能化的趋势方兴未艾,相关新技术新思想不断被提出。知识图谱是人工智能应用的基础资源,构建专业领域知识图谱已经成为研究热点。然而,控制系统知识图谱构建尚处于发展初期。对控制系统的结构特点和任务要求进行分析,给出控制系统的知识图谱构建的方法框架。首先对已有的流程工业控制系统知识图谱构建的工作进行总结,阐述了工业控制系统的特点,给出了控制系统知识图谱构建的基本原则和流程,并以控制系统信息物理资产管理任务为例进行了详细的知识图谱构建说明。最后,对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 控制系统; 领域知识图谱; 物理信息系统; 构建技术

中图分类号: TP182

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202216

Knowledge graph construction for control systems in process industry

MOU Tianhao¹, LI Shaoyuan^{1,2}

1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Achieving intelligence in industrial control systems is a prevailing trend in recent years, with numerous new technologies and ideas prompted. Knowledge graph is a fundamental resource for artificial intelligence, and domain-specific knowledge graph construction attracts a lot of research attentions. However, knowledge graph construction for control systems is still in the early stage of exploitation. In this paper, structural characteristics and task requirements of process control systems were analyzed. Furthermore, a knowledge graph construction methodology architecture for process control systems was proposed. Firstly, a brief summary on existing related works was given. After that, the characteristics of process industry control systems were analyzed, and the corresponding knowledge graph construction principles and procedures were proposed. Cyber-physical assets management was taken as a case study for detailed explanation. Finally, a prospect for the future research directions of knowledge graph construction for process control systems was made.

Key words: control system, domain-specific knowledge graph, cyber-physical systems, construction technique

0 引言

2011年,国际商业机器公司(international business machines corporation, IBM)的Watson赢得“Jeopardy”电视智力竞赛,用于支持其知识发

现的知识图谱技术引发了研究者的广泛关注^[1]; 2012年谷歌公司发布了包含570亿实体的大规模知识图谱^[2],展示了知识图谱在知识工程中的巨大应用潜力。在刚刚过去的10年间,知识图谱因为其处理多源异构数据的能力、高效的知识检索、深入

收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2021-11-25

通信作者: 李少远, syli@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No.2018AAA0101701)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2018AAA0101701)

的知识挖掘和分析以及直观的知识可视化的能力,受到了学术界和工业界的广泛关注,取得了迅猛的发展。

知识图谱可以定义为由实体(节点)和关系(边)组成的多关系的图形知识库^[3]。在知识图谱中,知识以三元组(实体-关系-实体或者实体-属性-值)的形式存储。按照知识领域和应用范围的不同,知识图谱可以分为通用知识图谱和领域知识图谱。通用知识图谱涉及知识范围广,知识量大,且多为常识知识,已经有 DBpedia^[4]、Freebase^[5]、YAGO^[6]、NELL^[7]等代表性的工作;在领域知识图谱上,出现了一批针对医疗^[8-12]、教育^[13-15]、金融^[16-19]和社会研究^[20-23]领域知识图谱构建和应用的工作。

毫无疑问,知识图谱在知识存储和应用上的强大能力也吸引了控制领域的学者。这是因为,在实际的流程工业控制系统中,人员、物料、装置和设备、能量流等生产要素和它们之间的关联关系中包含了系统正常运行所依赖的知识。知识图谱作为一种关系型知识的有力表达形式,有望提升控制系统的知识自动化的程度^[24]。一方面,知识图谱可作为信息集成平台,对各生产要素及其关系进行统一的表达,从而成为解决生产过程的信息感知集成和人机物协同问题的基础资源之一;另一方面,知识图谱能够实现知识存储、知识检索和知识推理^[25],能为操作人员提供知识查询服务,还可以为生产指标预测、运行状态检测和故障诊断提供支持,从而实现信息物理系统的自感知。

在控制系统领域,有一些针对特定对象特定任务的知识图谱构建的文章陆续发表。比如, Mao S 等人^[26]针对延迟焦化生产过程中的风险分析和安全控制问题,构建了过程安全知识图谱; Zhou L 等人^[27]设计了面向石油化工生产过程仿真的本体,并在此基础上构建了柴油生产知识图谱; Chen Z Y 等人^[28]针对冷滚轧生产过程的钢带断裂问题,提取了相关特征并构建了知识图谱,实现了钢带断裂的建模; Shen G W 等人^[29]针对工业控制系统的网络安全问题,利用数据驱动的关系提取方法,构建了工业控制系统的网络安全知识图谱。然而,目前有关控制系统的知识图谱构建的研究多聚焦于控制系统的某个具体任务,尚无综述文章对这个主题进行系统深入的分析和总结。另外,现有的知识图谱构建方面的综述文章多关注于通用知识图谱构建技术,注意力多放在知识图谱构建的一般性技术上。

本文基于以上出发点,希望对控制系统的结构特点和任务要求进行分析,进而提出面向控制系统的知识图谱构建的一般性方法框架。

本文结构如下:第1节简要介绍领域知识图谱构建的一般方法,介绍控制系统的结构特点和任务特点,并给出控制系统知识图谱构建的基本原则和一般框架;第2节以信息物理资产管理的具体任务为例,详细阐明控制系统的知识图谱构建的具体方法和流程;第3节给出未来可能的研究方向;第4节对全文进行总结。

1 流程工业控制系统知识图谱的构建方法

1.1 领域知识图谱构建的一般方法

知识图谱可以分为数据层和模式层。数据层包含具体的知识实例。模式层通常指知识图谱的本体^[30-31],其中定义了概念和关系的类型、属性和范围。根据构建数据层和模式层的先后顺序,知识图谱构建分为两种方法:自底向上和自顶向下^[32-33]。自底向上的方法直接从结构化数据、半结构化数据和其他知识库中进行知识抽取,对抽取到的实体、关系和属性进行审核后将其加入知识图谱,再构建上层的本体。自顶向下的方法首先根据专家经验构建领域本体,然后在本体的约束下将知识实例加入知识图谱^[34]。自顶向下的方法能保证知识图谱中的实体之间满足良好的层次结构,减少错误和歧义,但是对人工经验的依赖性较大,设计本体也可能是一项繁重的任务。自底向上的方法适用于从大量数据中抽取知识。但是,自底向上的方法提取的知识图谱通常精度不高,概念完备性不足,层次结构不清楚。

领域知识图谱知识深度深,知识精细度细,对知识的准确性要求严苛。因此,常采用自顶向下的方法构建领域知识图谱。比如, Fu L J 等人^[35]使用自顶向下的方法构建了非传统机械加工行业的垂直知识图谱; Liang H 等人^[36]提出了一种自顶向下的基于 KKS (kraftwerk-kennzeichen system) 描述框架的发电知识图谱构建方法; Kou C 等人^[37]使用七步法的本体构建方法,搭建了应用于航天器发射的领域知识图谱; Jia Y 等人^[38]针对网络安全知识图谱的构建,设计了资产本体、漏洞本体和攻击本体,共包含漏洞、资产、软件、操作系统、攻击5个实体类型。近年来,自底向上的知识图谱构建技术取得了长足发展^[33,39-41],一些研究者将自顶向下和自底向上技术结合,希望在保持自顶向下方法的概念层

次清晰、准确性高的优势的同时，又具有自底向上的方法的更新速度快特点和可以处理大规模非结构化数据的能力。比如，参考文献[26]在过程安全知识图谱的本体设计中，首先借助专家经验构建大部分本体，然后再从关系数据库和文档数据（比如操作规程和技术规范）中提取其他本体；参考文献[42]在进行危化品管理知识图谱的本体设计时，同样将专家经验构建和数据抽取补全结合。

1.2 流程工业控制系统的结构与要求

从功能的角度，工业控制系统可以分为5层结构。参考 IEC 62264-1 标准^[43]，从上到下分别为企业资源层、生产管理层、过程监控层、现场控制层和现场设备层，如图1所示。不同层的主要功能和联系如下^[44]。

企业资源层主要包括企业资源管理（enterprise resource planning, ERP）、产品生命周期管理（product lifecycle management, PLM）等功能单元，负责企业和工厂级别的生产计划，为企业决策层提供决策运行手段。

生产管理层主要包括制造执行系统（manufacturing execution system, MES）、仓库管理系统（warehouse manage system, WMS）功能单元，用于对生产过程进行管理，如制造数据管理、生产调度管理等。该层接受企业资源层下达的生产计划，产生车间级别的生产计划。该层不直接控制生产过程，但是负责监控生产状态和生产目标，并上报企业资源层。

过程监控层主要包括 SCADA（supervisory control and data acquisition）与人机界面（human machine interface, HMI）功能单元，用于对生产过程数据进行采集与监控，并通过 HMI 系统给操作人员提供监控和控制功能。该层接收生产管理层下达的生产指令，并获得现场控制层上传的实时运行数据，给出各回路的设定值。

现场控制层主要包括各类控制单元，如可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）、分散控制系统（distributed control system, DCS）控制单元等，用于对各执行设备进行控制。该层接收过程监控层下达的回路设定值，获得现场设备层上传的传感数据，使用模型预测控制（model predictive control, MPC）、比例微分积分（proportional integral differential, PID）等控制算法，产生控制量。

现场设备层主要包括各类过程传感设备和执

行设备单元，用于对生产过程进行感知与操作；该层接收现场控制层的控制量，由执行设备执行控制指令，对工艺流程进行操作。该层的传感设备收集实时生产数据，并上报现场控制层。

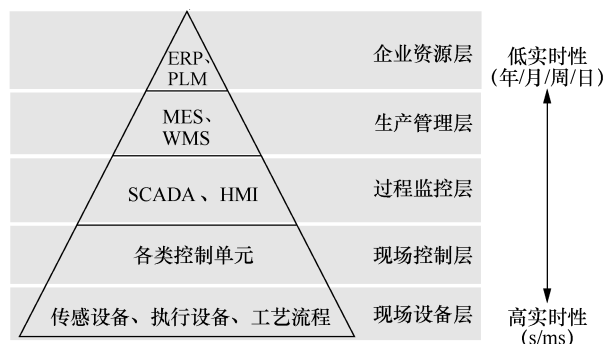


图1 工业控制系统的功能分层

工业控制系统有两个基本要求：实时性和可靠性。实时性表现为控制系统必须在规定的循环周期内完成任务。可靠性表现为系统必须保证连续工作。从上层到下层，控制系统对实时性和可靠性的要求逐渐提高。一般要求现场控制层和现场设备层的响应时间为毫秒级别。

1.3 流程工业控制系统知识图谱构建的基本原则

结合前文提到的流程工业控制系统的结构特点和运行要求，知识图谱构建应当考虑如下的基本原则。

① 知识图谱应当面向企业资源层、生产管理层、过程监控层的任务需求。这是因为上层的任务涉及的知识范围更广，知识多样性更强，事实性的知识较多，适合用知识图谱进行知识表示；上层的信息处理能力较强，方便知识图谱的存储和使用；上层任务对实时性要求不高，容错力强，有专业人员参与，适合知识图谱发挥其知识发现和推理能力。

② 知识图谱应当采用自顶向下和自底向上结合的构建方法。这是因为：一方面，经验知识对于流程工业控制系统至关重要，专家参与的自顶向下的构建能充分考虑这部分知识，保证知识的准确性、完备性和层次性；另一方面，流程工业控制系统包含大量以非结构化文本为载体的机理知识和结构化的数据知识，自底向上的方法适合处理这些数据，是对专家经验的补充。

③ 知识图谱应当充分考虑控制系统的信息和物理要素。信息物理系统是物理过程与计算过程

的整合^[45]。随着通信技术的发展和计算能力的提高,物理与信息的结合将越发紧密,因此从信息物理系统的角度考虑控制系统是必要的^[46-47]。物理层面涉及各类人员、装置和设备(比如反应釜、阀门、传感器、逻辑控制器等)、物料以及能量等;信息层面涉及系统层次模型(比如生产过程功能层次、装置设备的物理层次等)、信息流(包括生产目标和系统设定数据、实时运行和诊断数据、物料和能量需求数据、终端生产指标数据等)、功能模型(包括各类参数估计算法、指标预测算法、生产控制算法和各类专业软件等)和静态信息(包括过程机理信息、生产操作信息和设备装置说明等)等^[43]。这些都是控制系统的构成要件,应当在构建知识图谱的时候按任务需求考虑它们的概念和联系。

1.4 流程工业控制系统知识图谱构建的一般框架

基于以上3个构建原则,给出控制系统知识图谱构建的一般框架,如图2所示。

整个框架将自顶向下和自底向上方法结合。在自顶向下部分,由控制领域专家和知识工程师共同构建图谱的模式层。模式层的构建主要依赖于专家对控制系统的操作和过程的认识,同时可以参考行业标准规范,比如IEC 62264标准中对控制系统功能分层的定义和IEC 62794^[48]中对工业控制系统的概念划分,还可以参考软件模型,比如Aspen Plus、Aspen HYSYS、PetroFine^[49]等商用软件对过程控制系统的定义。在自底向上部分,构建过程类似于一般的领域知识图谱构建。针对控制系统中的工业历

史数据库、结构化数据、半结构化数据和非结构化数据,经过数据集成、知识提取和知识融合步骤,获得知识实例。针对流程工业非结构化数据中包含的图、表和公式,尚无高效的自动知识抽取方法,需要手工构建。图谱构建完成后,需要进行质量评估,再将获得的知识保存到合适的数据库中。至此完成知识图谱的构建。

在自顶向下的专家本体构建的部分,常用的方法包括七步法^[50]、骨架法^[51]、企业建模法^[52]和Methontology法^[53]等。参考文献[54]中对比了常用的本体构建方法的出发点和适用范围。以领域本体开发中常用的七步法为例,其步骤主要包括:①确定本体的领域和范围;②考虑复用现有的本体;③列出知识本体中的重要术语;④定义类和类的等级体系;⑤定义类的属性;⑥定义属性的分面;⑦创建实例^[50]。Kou C等人^[37]给出了使用七步法进行本体设计的一个具体的例子。常用的可视化的知识图谱构建工具包括Protégé^[55]、OilEd^[56]、WebODE^[57]和OntoEdit^[58]等。

在自底向上的本体构建的部分,需要对第三方数据库和结构化数据进行数据集成,还需要对半结构化数据(比如控制系统运行日志)和非结构化数据(比如系统说明和操作手册)进行知识抽取,然后经过实体对齐步骤,获得知识实例,再从中提取本体。下面对其主要步骤的常用方法和工具进行介绍。

①数据集成是对结构化数据进行格式变换,使其满足知识图谱构建的格式要求。常用的数据集成

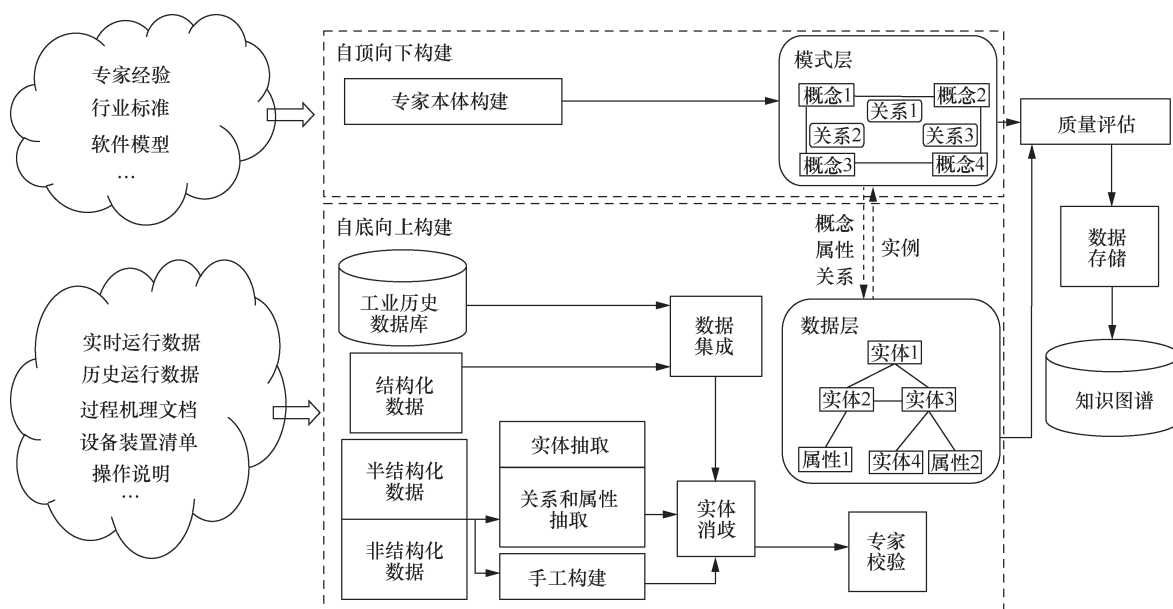


图2 控制系统知识图谱构建的一般框架

方法包括直接映射（direct mapping，DM）和R2RML^[59]。常用的工具包括D2RQ^[60-61]、MASTRO^[62]、Ultrawrap^[63]、Morph-RDB^[64]等。

②实体抽取就是命名实体识别，旨在从控制系统涉及的数据源中抽取命名实体。实体抽取方法可以分为基于规则、基于统计和基于深度学习三大类。基于规则的方法需要由控制专家和知识工程师来制定规则集，通过将数据与规则集匹配来获得命名实体。基于统计的方法通过使用语料库训练统计模型来计算某个词是命名实体的概率。常用的方法包括条件随机场模型（conditional random field，CRF）^[65]、最大熵模型^[66-67]、隐马尔可夫模型^[68-70]、条件马尔可夫模型^[71]和决策树方法^[72]等。基于深度学习的方法使用深度神经网络自动地从数据中学习隐藏特征，其常用的方法有卷积神经网络、长短期记忆（long short time memory，LSTM）神经网络^[73]和图神经网络^[74]。在控制系统知识图谱的构建中，基于规则的方法适用于规模小、专业性强、结构性好的数据（比如设备清单和系统运行日志）；基于统计和深度学习的方法适用于规模大、通用性强、结构性差的数据（比如关于被控对象的介绍）。

③关系和属性抽取旨在从控制系统涉及的数据源中抽取实体之间的语义关系。抽取方法可以分为基于规则和基于机器学习两大类。基于规则的方法首先通过人工编辑或者学习获得模板，然后基于模板匹配对实体关系进行抽取和判别。根据含标签样本的多少，基于机器学习的方法又可以分为有监督方法和弱监督方法两大类^[75]。有监督方法包括基于核函数的方法^[76-79]和基于神经网络的方法^[80-82]等，弱监督方法中具有代表性的是基于距离监督的方法^[83-85]。

④实体消歧旨在消除多个命名实体指代同一个实体或多个实体对应同一个命名实体的情况。比如“PLC#018”和“18号控制器”均指代号为18的可编程逻辑控制器；同一个控制系统中可能有多个“监控室”；不同传感器的“采样时间”可能不同。目前实体消歧的方法主要分为基于聚类的方法^[86-88]和基于实体链接的方法^[89-90]。

质量评估是对新知识的可信度进行评估，保留可信度高的知识，从而保证图谱的质量。在自动质量评估方面，已有强化学习（reinforcement learning，RL）^[91]和Logistic回归^[92]等方法。但是现有的自动评估方法还不能代替人工审核，部分知识仍要由专

家进行人工审核。

在数据存储方面，知识图谱常用的存储格式为RDF表结构数据库和图数据库。RDF表结构数据库的优点是简单直接、容易理解，缺点是占用空间大、增删改和复杂查询开销大。RDF表结构数据库已经有不少成熟的产品，包括Jena^[93]、Oracle^[94]和3store^[95]等。图数据库的优点是对知识图谱的结构描述明确、支持图挖掘算法、复杂查询效率高，缺点是数据更新慢、大节点的处理开销大。常用的图数据库有Neo4j^[96]、OrientDB^[97]和HyperGraphDB^[98]等。此外，刘宝珠等人^[99]提出了统一的数据存储方案，支持两种数据模型的高效存储和不同查询语言的互操作。

2 流程工业控制系统的知识图谱构建案例——以信息物理资产管理任务为例

本节聚焦流程工业控制系统的信息物理资产管理任务，介绍信息物理资产知识图谱的构建流程和构建方法。信息物理资产管理的主要任务是从信息物理系统的角度，将控制系统涉及的硬件、软件和算法信息集成到知识图谱中，以实现资产信息的高效管理。本节包含知识来源、本体构建、知识抽取、实体消歧和质量评估、知识存储5个方面。

2.1 知识来源

在知识来源上，用于构建信息物理资产知识图谱的知识可以分为两部分：开放性知识和特异性知识^[31]。开放性知识指与控制系统相关，能够在外部语料中找到的知识。特异性知识指与控制系统相关，但是无法在外部语料库找到的知识，这类知识一般来自企业内部。

在流程工业控制系统的信息物理资产管理任务中，开放性知识包括某些常用物料的信息和通用物理化学反应机理等，通常可以在科学技术文档或相关网站中找到。特异性数据包括人员信息过程反应设备的详细信息（包括容器、塔器、反应釜、换热器等）、控制设备的详细信息（包括控制器、开关、起动机、接触器、驱动器、电机、泵、网络等）、信息流（包括生产目标和系统设定数据、实时运行和诊断数据、物料和能量需求数据、终端生产指标数据等）及其说明、过程机理说明、控制系统说明、控制系统操作手册、各类算法和软件的技术参考文档等。上述信息来源中，既包含清单、列表和数据库数据等结构化数据，也包含文档、说明和手册等非结构化数据。

2.2 本体构建

本体构建使用自顶向下和自底向上结合的方式。在自顶向下部分,由专家定义知识图谱的模式层;这里使用七步法^[50]进行本体构建。在自底向上部分,从数据中提取本体。最后,所有本体都要经过专家的审核。

控制系统信息物理资产知识图谱本体自顶向下的构建流程如图3所示。

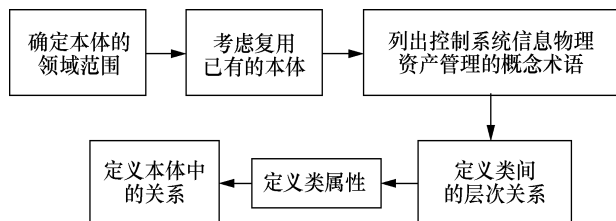


图3 控制系统信息物理资产知识图谱本体自顶向下的构建流程

首先确定本体的领域范围。本知识图谱的领域是流程工业控制系统的信息物理资产管理,目标是通过构建信息物理资产知识图谱来提高控制系统资产库的管理效率。

然后考虑复用已有的本体。这里考虑复用 OntoCAPE 本体库^[100-102]。它是针对化工过程工程构建的大规模本体,其中描述了一部分流程工业信息物理资产管理中涉及的概念,比如反应物质、反应装置和工厂设备。OntoCAPE 中的“夹具(Fixture)”类及其常用子类^[101]如图4所示,以工厂固定设备“Fixture”概念为例,给出了 OntoCAPE 本体库的一个简单例子。然而从信息物理系统的角度来看,OntoCAPE 主要考虑了物理侧的概念和属性,对信息侧讨论较少。OntoCAPE 中未包含的概念和属性需要单独构建。

最后列出控制系统信息物理资产管理的概念术语,定义类间的层次关系,定义类属性,定义本体中的关系。控制系统信息物理资产知识图谱的部

分类的结构示意图如图5所示,其中概念共分为数据、算法、通信和算力四大类,每一大类又可以细分为若干子类。类属性可以从机械和结构属性、功能属性、性能属性、商业属性、位置属性5个方面考虑^[48]。类间关系可以从结构关系和功能关系两个方面考虑^[48]。控制系统信息物理资产知识图谱的部分类和关系示意图如图6所示。图6中的“包含部分”“测量设备”“监控设备”“包含子类”“包含变量”和“隶属机构”为结构关系;“上传”“输入”“输出”“监控变量”“产生”和“负责人员”为功能关系。

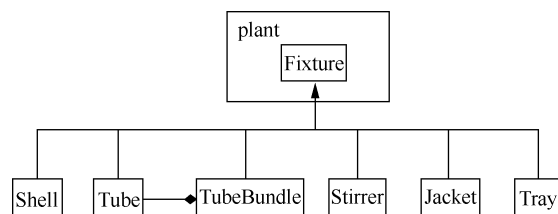


图4 OntoCAPE 中的“Fixture”类及其常用子类^[101]

在自底向上的本体构建中,使用基于规则的方法从结构化和半结构化数据中提取概念和关系,进而构建本体^[103]。比如,为了避免不同数据中对化学物质名称不一致引起的歧义,将 CAS 编号作为标准名来提取化学物质实体;类似地,使用设备统一编号作为参照来抽取反应装置实体。对于非结构化数据,首先进行知识抽取,然后对抽取到的实体和关系进行专家人工审核,最后完成本体构建。

2.3 知识抽取

知识抽取分为两个步骤。首先,从数据中抽取命名实体;然后,抽取命名实体的关系和属性。正确的命名实体抽取是知识抽取的关键。对于结构化数据和半结构化数据,使用基于规则的方法进行抽取,比如“温度传感器”“热敏电阻”“热电偶”“电磁流量计”“霍尔传感器”等词汇都应

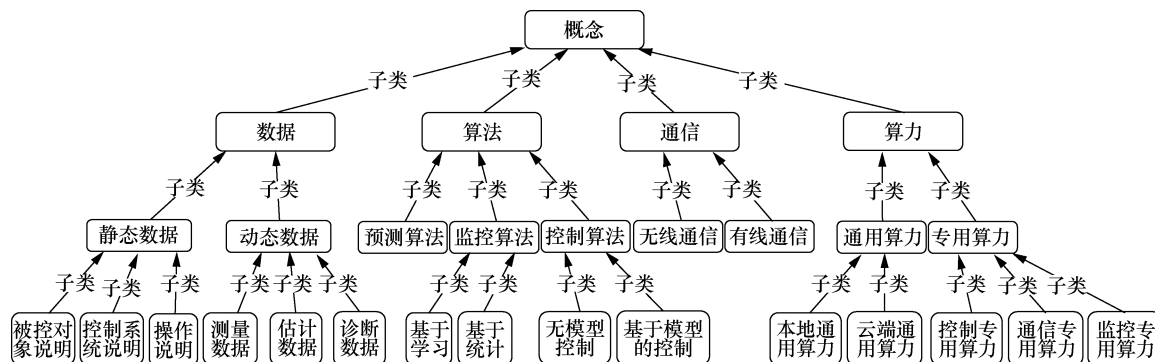


图5 控制系统信息物理资产知识图谱的部分类的结构示意图

当被识别为传感器名,这种方法抽取速度快,准确率高。对于非结构化的文本数据,可以使用基于深度学习的方法进行命名实体识别。具体来说,首先对文本数据进行句子分割和字符分解,然后进行手动命名实体标注从而构建语料库,最后使用语料库中的带标签数据对深度学习模型进行训练。在模型选择上,LSTM网络和CRF结合的方法^[73]和预训练BERT(bidirectional encoder representations from transformer)+CRF^[42]都是有效的深度学习模型。抽取命名实体关系时,对于结构化数据和半结构化数据,可以使用专家编写的模板进行关系抽取。对于非结构化的文本数据,同样使用利用文本数据构建的语料库进行深度学习模型的抽取。在模型的选择上,将双向长短期记忆神经网络和注意力机制结合的模型表现出了良好的效果^[104]。

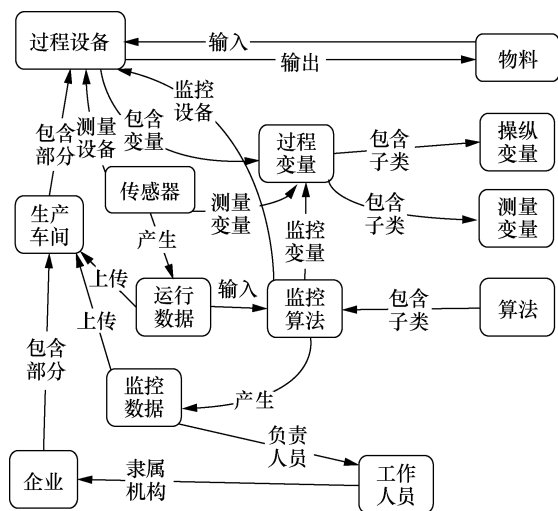


图6 控制系统信息物理资产知识图谱的部分类和类关系示意图

2.4 实体消歧和质量评估

信息物理知识图谱中的歧义一方面来自自底向上构建时造成的多指和共指,另一方面来自自顶向下构建时的专家经验的主观性或疏忽。相比于开放域知识图谱,本任务中图谱构建有较多的专家参与,在构建时就考虑了其在流程工业控制系统中的适用性,因此结构性较好。因此,基于社会化网络的实体消歧方法是一种行之有效的方法^[24,87,105]。

在质量评估中,可以采用从业者众包校验^[106]的方法。具体来说,将知识图谱按照生产工艺流程或者控制功能层次分解,让相关从业人员根据经验对图谱质量进行判断。对于错误或置信度较低的知识,由工

艺专家和知识工程师进行进一步的判断。

2.5 知识存储

常用的知识图谱存储方式包括以Jena和3store为代表的RDF表数据库和以Neo4j为代表的图数据库。这里展示田纳西-伊斯曼(Tennessee Eastman, TE)^[107]化工过程控制系统信息物理资产知识图谱的一部分,如图7所示,其中明黄色节点代表操纵变量,粉红色节点代表测量变量,灰黄色节点代表反应装置,绿色节点代表传感器,紫色节点代表算法,其包含操纵变量、测量变量、反应装置、传感器、监控算法5类实体共71个节点,152条边,308个节点属性和177个边属性。该知识图谱存储于Neo4j图数据库^[108]。TE化工过程控制系统信息物理资产知识图谱的部分类属性见表1。

表1 TE化工过程控制系统信息物理资产知识图谱的部分类属性

类名	类属性
操纵变量	{变量名, 变量编号, 高限, 低限, 基础值, 采样频率, 数据类型, 位置}
测量变量	{变量名, 变量编号, 高限, 低限, 基础值, 采样频率, 数据类型, 位置}
反应装置	{装置名, 装置编号, 位置, 附加说明}
传感器	{传感器名, 传感器编号, 采样频率, 位置}
监控算法	{算法名, 算法编号, 执行周期, 复杂度, 附加说明}

3 未来研究展望

知识图谱能够有效地处理控制系统中涉及的多源异构数据,集成控制系统的认知和经验知识。它有望在以下几个方向发挥重要的作用。

3.1 信息物理资产管理

现代工业控制系统是集成了物理对象和信息资源的信息物理系统,涉及物质输入输出、物理化学反应、生产装置、测量设备、控制设备、计算设备、存储设备、通信设备、数据、算法、算力、通信和软件资源。将这些资源信息都纳入知识图谱表达形式,有助于对控制系统信息物理资产进行高效管理。比如,知识图谱可以方便地以图的形式直观地展示资源实体和资源实体间的关系;借助图搜索算法,可以对资源依照关联关系进行复杂的搜索;借助图推理算法,可以发掘资源之间的隐藏关联关系。在这方面,Zhou X C等人^[109-110]探索了化工生产领域的代理服务管理的知识图谱构建。Farazi F

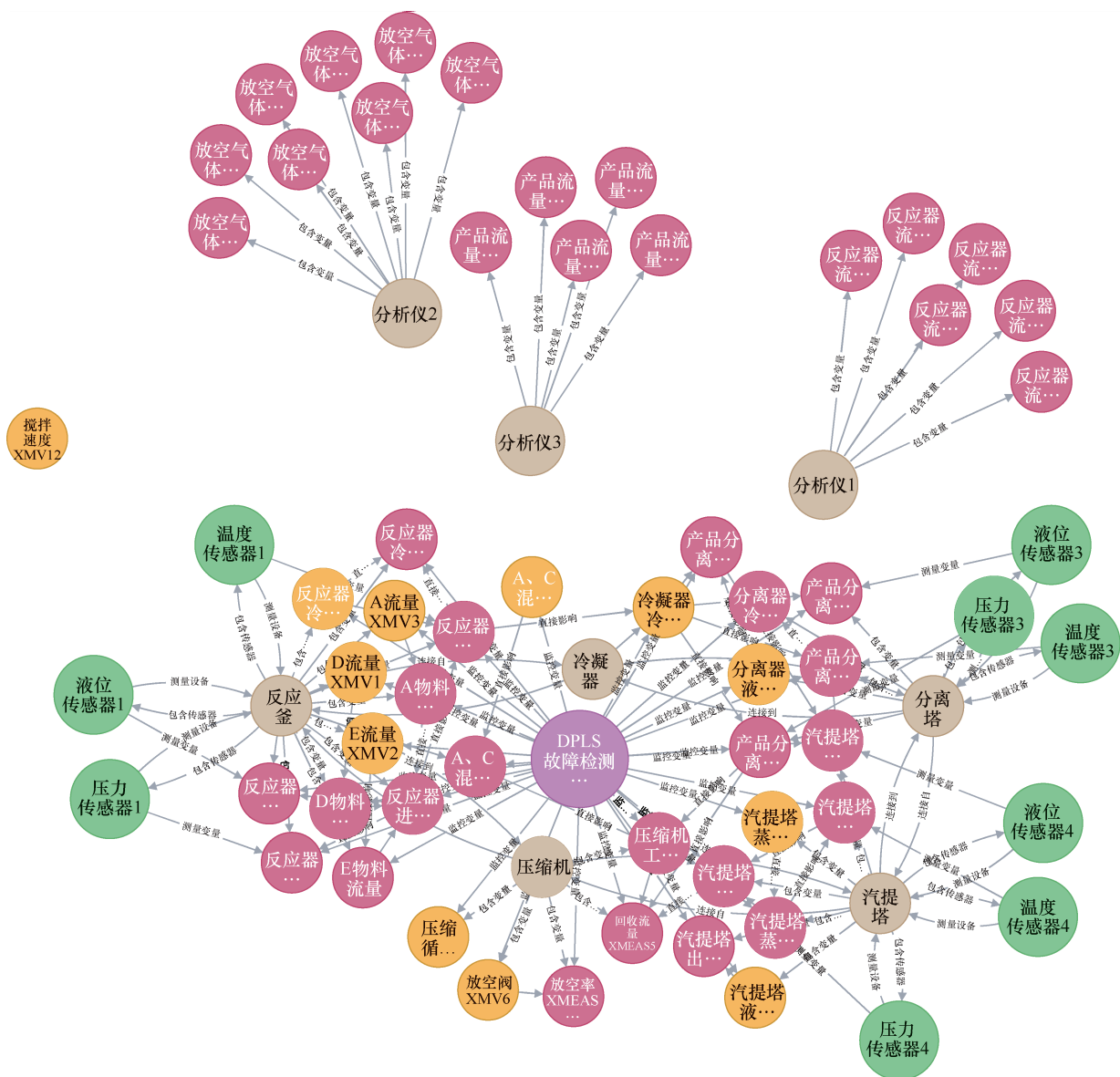


图7 Tennessee Eastman 化工过程控制系统信息物理资产知识图谱部分示意图

等人^[111]将燃烧化学机理模型集成到知识图谱中。

3.2 虚拟制造

数字孪生和虚拟制造是流程工业迈向智能化的重要技术^[112]。现代流程工业控制系统在功能上具有分层结构,包含了信息物理方面的诸多要素。知识图谱是关系型数据的有力描述形式,能为不同功能层次之间提供信息对接平台,对关键生产要素及其关系进行集成,从而为虚拟制造提供支撑。在这方面,基于知识图谱的 J-Park Simulator 仿真平台是具有代表性的工作成果,已经被用于石化生产过程的仿真和优化^[27,113]。

3.3 运行风险分析

控制系统的运行风险常由专家根据经验推理

判断,利用专家经验和从数据中提取的知识构建运行风险知识图谱,有助于对风险事件进行自动分析和及时处置。比如,利用控制系统运行所积累的历史风险数据,提取相关装置、涉及物质、故障发生时的操作条件、故障原因、故障类型症状、处置策略等信息,再结合专家制定的风险分析规则,从而构建运行风险知识图谱。当风险因素出现时,借助图检索算法,可以实现快速的风险因素的严重性分析、原因追溯和处置方案制定。此外,借助知识推理算法,还可以从已有运行风险知识中挖掘未被发现的风险因果关系。在这方面,参考文献[26]针对延迟焦化生产过程构建了安全知识图谱用于风险分析;参考文献[42]针对化工生产中的危化品事故

风险构建了危化品管理知识图谱。

3.4 关键指标预测

工业控制系统常常机理复杂, 无法得到精确的数学模型。利用工艺专家、控制专家和一线技术人员的关于系统机理的经验, 构建过程机理知识图谱, 可以为关键生产指标的准确预测提供支持。比如, 将专家和技术人员关于变量之间影响强弱和时延关系的经验存储在知识图谱当中, 然后借助图神经网络等方法构建关键指标预测模型。这样充分利用了专家经验, 有望提升关键生产指标的预测精度。在这方面, Wu D Y 等人^[114]在将图谱结构与预测模型结合方面做出了探索性的工作。

3.5 控制算法自适应调整

现代工业控制系统一般变量数目多, 被控对象复杂。为了满足不同回路和层级的任务要求, 达到不同回路和层级的控制目的, 控制系统中常用到PID、模型预测控制和自适应控制多种控制方法, 控制方法及其参数的选择往往依赖专家经验。将专家的控制算法设计经验(包括各个控制算法的适用条件、算法流程、基本参数及其选定依据等)保存到知识图谱中, 有助于实现控制算法的自适应调整。比如, 将专家关于PID控制器主要参数的调节规则保存到知识图谱中, 当系统监视器返回异常结果时, 知识图谱使用图检索推荐最适宜的算法参数, 或者推荐合适的备选控制算法。

4 结束语

知识图谱使用图的数据结构, 结合图论方法和自然语言处理技术, 既能够组织和表达控制专家积累的经验, 也能够处理和挖掘控制系统中多源异构数据中的知识。在工业智能化发展方兴未艾的今天, 知识图谱是推动控制系统智能化发展不可或缺的基础资源, 引起了研究者广泛的关注。本文首先对现有的控制系统知识图谱构建工作进行了回顾和总结, 简要介绍了领域知识图谱的构建方法。然后, 本文分析了控制系统的结构和特点, 提出了控制系统知识图谱的构建原则和构建流程, 并以控制系统信息物理资产知识图谱为例进行了比较详细的说明。最后, 本文给出了控制系统知识图谱可能产生的重要影响的研究方向。

知识图谱仍是一门新技术, 其在控制系统中的应用也处于发展初期。本文希望能抛砖引玉, 吸引更多研究者投入控制系统的知识图谱的研究中。

参考文献:

- [1] FERRUCCI D, LEVAS A, BAGCHI S, et al. Watson: beyond jeopardy[J]. *Artificial Intelligence*, 2013, 199/200: 93-105.
- [2] FENSEL D, ŞİMŞEK U, ANGELE K, et al. Introduction: what is a knowledge graph?[M]//*Knowledge graphs*. [S.l.:s.n.], 2020: 1-10.
- [3] WANG Q, MAO Z D, WANG B, et al. Knowledge graph embedding: a survey of approaches and applications[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2017, 29(12): 2724-2743.
- [4] LEHMANN J, ISELE R, JAKOB M, et al. DBpedia-a large-scale, multilingual knowledge base extracted from Wikipedia[J]. *Semantic Web*, 2015, 6(2): 167-195.
- [5] BOLLACKER K, EVANS C, PARITOSH P, et al. Freebase: a collaboratively created graph database for structuring human knowledge[C]//*Proceedings of 2008 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. New York: ACM Press, 2008: 1247-1250.
- [6] SUCHANEK F M, KASNECI G, WEIKUM G. YAGO: a core of semantic knowledge[C]//*Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web*. [S.l.:s.n.], 2007: 697-706.
- [7] MITCHELL T, FREDKIN E. Never-ending language learning[C]//*Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Big Data*. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [8] ROTMENSCH M, HALPERN Y, TLIMAT A, et al. Learning a health knowledge graph from electronic medical records[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-11.
- [9] ZHANG Y, SHENG M, ZHOU R, et al. HKGB: an inclusive, extensible, intelligent, semi-auto-constructed knowledge graph framework for healthcare with clinicians' expertise incorporated[J]. *Information Processing & Management*, 2020, 57(6): 102324.
- [10] MA F L, YOU Q Z, XIAO H P, et al. KAME: knowledge-based attention model for diagnosis prediction in healthcare[C]//*Proceedings of the 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*. New York: ACM Press, 2018: 743-752.
- [11] CUI L M, SEO H, TABAR M, et al. Deterrent: knowledge guided graph attention network for detecting healthcare misinformation[C]//*Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. New York: ACM Press, 2020: 492-502.
- [12] 谭玲, 鄂海红, 匡泽民, 等. 医学知识图谱构建关键技术及研究进展[J]. *大数据*, 2021, 7(4): 80-104.
- [13] TAN L, E H H, KUANG Z M, et al. Key technologies and research progress of medical knowledge graph construction[J]. *Big Data Research*, 2021, 7(4): 80-104.
- [14] CHEN P H, LU Y, ZHENG V W, et al. KnowEdu: a system to construct knowledge graph for education[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 31553-31563.
- [15] SHI D Q, WANG T, XING H, et al. A learning path recommendation model based on a multidimensional knowledge graph framework for e-learning[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 195: 105618.
- [16] CHI Y, QIN Y, SONG R, et al. Knowledge graph in smart education: a case study of entrepreneurship scientific publication management[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 995.
- [17] LIU Y, ZENG Q G, ORDIERES MERÉ J, et al. Anticipating stock market of the renowned companies: a knowledge graph approach[J].

- Complexity, 2019: 9202457.
- [17] FU X Y, REN X Q, MENGSHOEL O J, et al. Stochastic optimization for market return prediction using financial knowledge graph[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Big Knowledge. Piscataway: IEEE Press, 2018: 25-32.
 - [18] DING X, ZHANG Y, LIU T, et al. Knowledge-driven event embedding for stock prediction[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Computational. [S.l.:s.n.], 2016: 2133-2142.
 - [19] WANG C, ZHU H Y. Representing fine-grained co-occurrences for behavior-based fraud detection in online payment services[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2020, 19(1): 301-315.
 - [20] CHEN W, ZHANG X, WANG T J, et al. Opinion-aware knowledge graph for political ideology detection[C]//Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence. California: International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization, 2017: 3647-3653.
 - [21] LIU S, YANG H, LI J Y, et al. Preliminary study on the knowledge graph construction of Chinese ancient history and culture[J]. Information, 2020, 11(4): 186.
 - [22] FAN T, WANG H. Research of Chinese intangible cultural heritage knowledge graph construction and attribute value extraction with graph attention network[J]. Information Processing & Management, 2022, 59(1): 102753.
 - [23] 李望月, 刘瑾, 陈娜. 大数据技术在乡村画像中的应用研究[J]. 大数据, 2020, 6(1): 99-118.
LI W Y, LIU J, CHEN N. Application research of big data technology in rural portrait[J]. Big Data Research, 2020, 6(1): 99-118.
 - [24] LI X Y, LYU M T, WANG Z X, et al. Exploiting knowledge graphs in industrial products and services: a survey of key aspects, challenges, and future perspectives[J]. Computers in Industry, 2021, 129: 103449.
 - [25] 王文广. 知识图谱推理: 现代的方法与应用[J]. 大数据, 2021, 7(3): 42-59.
WANG W G. Knowledge graph reasoning: modern methods and applications[J]. Big Data Research, 2021, 7(3): 42-59.
 - [26] MAO S, ZHAO Y M, CHEN J H, et al. Development of process safety knowledge graph: a case study on delayed coking process[J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 143: 107094.
 - [27] ZHOU L, PAN M, SIKORSKI J J, et al. Towards an ontological infrastructure for chemical process simulation and optimization in the context of eco-industrial parks[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1284-1298.
 - [28] CHEN Z Y, LIU Y, VALERA-MEDINA A, et al. Multi-sourced modelling for strip breakage using knowledge graph embeddings[J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 1884-1889.
 - [29] SHEN G W, WANG W L, MU Q L, et al. Data-driven cybersecurity knowledge graph construction for industrial control system security[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020: 8883696.
 - [30] GRUBER T R. A translation approach to portable ontology specifications[J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199-220.
 - [31] STUDER R, BENJAMINS V R, FENSEL D. Knowledge engineering: principles and methods[J]. Data & Knowledge Engineering, 1998, 25(1/2): 161-197.
 - [32] 徐增林, 盛泳潘, 贺丽荣, 等. 知识图谱技术综述[J]. 电子科技大
学学报, 2016, 45(4): 589-606.
 - XU Z L, SHENG Y P, HE L R, et al. Review on knowledge graph techniques[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(4): 589-606.
 - [33] 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 Q, LI Y, DUAN H, et al. Knowledge graph construction techniques[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(3): 582-600.
 - [34] ZHAO Z, HAN S K, SO I M. Architecture of knowledge graph construction techniques[J]. International Journal of Pure and Applied Mathematics, 2018, 118(19): 1869-1883.
 - [35] FU L J, YV B, ZHONG Z Y. Constructing a vertical knowledge graph for non-traditional machining industry[C]//Proceedings of 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
 - [36] LIANG H, PENG X J, ZHAO N N, et al. An approach of top-down electric generation knowledge graph construction[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 661(1): 012021.
 - [37] KOU C, LIU T, MA L, et al. Construction and application research of knowledge graph in spacecraft launch[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1754(1): 012180.
 - [38] JIA Y, QI Y, SHANG H, et al. A practical approach to constructing a knowledge graph for cybersecurity[J]. Engineering, 2018, 4(1): 53-60.
 - [39] 柴洪峰, 王帅, 涂晓军, 等. 智能化金融科技创新监管工具: 理念、平台框架和展望[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 214-226.
CHAI H F, WANG S, TU X J, et al. Intelligent innovative regulatory tools on financial technology: concept, platform framework, and prospects[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 214-226.
 - [40] 陈强, 代仕娅. 基于金融知识图谱的会计欺诈风险识别方法[J]. 大数据, 2021, 7(3): 116-129.
CHEN Q, DAI S Y. Recognition method of accounting fraud risk based on financial knowledge graph[J]. Big Data Research, 2021, 7(3): 116-129.
 - [41] MEILICKE C, CHEKOL M W, RUFFINELLI D, et al. Anytime bottom-up rule learning for knowledge graph completion[C]//Proceedings of the 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence. California: International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization, 2019: 3137-3143.
 - [42] ZHENG X, WANG B, ZHAO Y M, et al. A knowledge graph method for hazardous chemical management: ontology design and entity identification[J]. Neurocomputing, 2021, 430: 104-111.
 - [43] IEC. Enterprise-control system integration — Part 1: models and terminology : IEC 62264-1: 2013[S]. 2013.
 - [44] SIENIUTYCZ S. Complexity and complex thermo-economic systems[M]. [S.l.]: Elsevier, 2019.
 - [45] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution[C]//Proceedings of Design Automation Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 731-736.
 - [46] QIAN F, ZHONG W M, DU W L. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry[J]. Engineering, 2017, 3(2): 14-27.
 - [47] 袁小锋, 王雅琳, 阳春华, 等. 深度学习在流程工业过程数据建模

- 中的应用[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(2): 107-115.
- YUAN X F, WANG Y L, YANG C H, et al. The application of deep learning in data-driven modeling of process industries[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(2): 107-115.
- [48] IEC. Industrial-process measurement, control and automation-reference model for representation of production facilities (digital factory): GB/Z 32235-2015[S]. 2012.
- [49] 黄德先, 江永亨, 金以慧. 炼油工业过程控制的研究现状、问题与展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(6): 902-916.
- HUANG D X, JIANG Y H, JIN Y H. Present research situation, major bottlenecks, and prospect of refinery industry process control[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(6): 902-916.
- [50] NOY N, MCGUINNESS D L. Ontology development 101: a guide to creating your first ontology[R]. 2001.
- [51] DAVIES J, FENSEL D, HARMELEN F V. Towards the Semantic Web: ontology-driven knowledge management[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [52] GRNINGER M, FOX M S. Methodology for the design and evaluation of ontologies[C]//Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence. [S.l.:s.n.], 1995.
- [53] LOPEZ M F, GOMEZ-PEREZ A, SIERRA J P, et al. Building a chemical ontology using Methontology and the ontology design environment[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 1999, 14(1): 37-46.
- [54] CRISTANI M, CUEL R. A survey on ontology creation methodologies[J]. International Journal on Semantic Web and Information Systems, 2005, 1(2): 49-69.
- [55] NOY N F, FERGERSON R W, MUSEN M A. The knowledge model of Protégé-2000: combining interoperability and flexibility[C]//Proceedings of the Knowledge Engineering and Knowledge Management Methods, Models, and Tools. [S.l.:s.n.], 2000.
- [56] BECHHOFFER S, HORROCKS I, GOBLE C, et al. OilEd: a reason-able ontology editor for the semantic web[C]//Proceedings of 2001 Annual Conference on Artificial Intelligence. [S.l.:s.n.], 2001: 396-408.
- [57] ARPÍREZ J C, CORCHO O, FERNÁNDEZ-LÓPEZ M, et al. WebODE: a scalable workbench for ontological engineering[C]//Proceedings of the 1st international conference on Knowledge Capture. [S.l.:s.n.], 2001: 6-13.
- [58] SURE Y, ERDMANN M, ANGELE J, et al. OntoEdit: collaborative ontology development for the semantic web[C]//Proceedings of 2002 International Semantic Web Conference. [S.l.:s.n.], 2002: 221-235.
- [59] HERT M, REIF G, GALL H C. A comparison of RDB-to-RDF mapping languages[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Semantic Systems. [S.l.:s.n.], 2011: 25-32.
- [60] SPANOS D E, STAVROU P, MITROU N. Bringing relational databases into the Semantic Web: a survey[J]. Semantic Web, 2012, 3(2): 169-209.
- [61] BIZER C, SEABORNE A. D2RQ-treating non-RDF databases as virtual RDF graphs[C]//Proceedings of the 3rd International Semantic Web Conference. [S.l.:s.n.], 2004.
- [62] CALVANESE D, DE GIACOMO G, LEMBO D, et al. The MASTRO system for ontology-based data access[J]. Semantic Web, 2011, 2(1): 43-53.
- [63] SEQUEDA J F, MIRANKER D P. Ultrawrap: SPARQL execution on relational data[J]. Journal of Web Semantics, 2013, 22: 19-39.
- [64] PRIYATNA F, CORCHO O, SEQUEDA J. Formalisation and experiences of R2RML-based SPARQL to SQL query translation using morph[C]//Proceedings of the 23rd international conference on World wide web. 2014: 479-490.
- [65] MCCALLUM A, LI W. Early results for named entity recognition with conditional random fields, feature induction and web-enhanced lexicons[C]//Proceedings of the 7th Conference on Natural Language Learning at HLT-NAACL 2003. Morristown: Association for Computational Linguistics. 2003: 188-191.
- [66] BORTHWICK A E. A maximum entropy approach to named entity recognition[D]. New York: New York University, 1999.
- [67] MIKHEEV A, GROVER C, MOENS M. Description of the LTG system used for MUC-7[C]//Proceedings of the 7th Message Understanding Conference. [S.l.:s.n.], 1998.
- [68] BIKEL D M, MILLER S, SCHWARTZ R, et al. Nymble: a high-performance learning name-finder[C]//Proceedings of the 5th Conference on Applied Natural Language Processing. Morristown: Association for Computational Linguistics, 1997: 194-201.
- [69] SUN J, GAO J F, ZHANG L, et al. Chinese named entity identification using class-based language model[C]//Proceedings of the 19th International Conference on Computational Linguistics. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2002.
- [70] ZHANG H P, LIU Q, YU H K, et al. Chinese named entity recognition using role model[J]. International Journal of Computational Linguistics & Chinese Language Processing. 2003, 8(2): 29-60.
- [71] DOWNEY D, BROADHEAD M, ETZIONI O. Locating complex named entities in web text[C]//Proceedings of the 20th International Joint Conferences on Artificial Intelligence. [S.l.:s.n.], 2007: 2733-2739.
- [72] SEKINE S, GRISHMAN R, SHINNOU H. A decision tree method for finding and classifying names in Japanese texts[C]//Proceedings of the 6th Workshop On Very Large Corpora. [S.l.:s.n.], 1998.
- [73] LAMPLE G, BALLESTEROS M, SUBRAMANIAN S, et al. Neural architectures for named entity recognition[C]//Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2016.
- [74] 胡志磊, 靳小龙, 陈剑赞, 等. 事件图谱的构建、推理与应用[J]. 大数据, 2021, 7(3): 80-96.
- HU Z L, JIN X L, CHEN J Y, et al. Construction, reasoning and applications of event graphs[J]. Big Data Research, 2021, 7(3): 80-96.
- [75] 赵军, 刘康, 何世柱, 等. 知识图谱[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- ZHAO J, LIN K, HE S Z, et al. Knowledge graph[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [76] ZELENKO D, AONE C, RICHARDELLA A. Kernel methods for relation extraction[C]//Proceedings of the ACL-02 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2002.
- [77] BUNESCU R C, MOONEY R J. A shortest path dependency kernel for relation extraction[C]//Proceedings of the Conference on Human Language Technology and Empirical Methods in Natural Language Processing. Morristown: Association for Computational Linguistics,

- 2005: 724-731.
- [78] ZHANG M, ZHANG J, SU J, et al. A composite kernel to extract relations between entities with both flat and structured features[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Computational Linguistics and the 44th Annual Meeting of the ACL. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2006: 825-832.
- [79] ZENG D, LIU K, LAI S, et al. Relation classification via convolutional deep neural network[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers. [S.l.:s.n.], 2014: 2335-2344.
- [80] WANG L L, CAO Z, DE MELO G, et al. Relation classification via multi-level attention CNNs[C]//Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2016: 1298-1307.
- [81] SOCHER R, HUVAL B, MANNING C D, et al. Semantic compositionality through recursive matrix-vector spaces[C]//Proceedings of 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning. [S.l.:s.n.], 2012: 1201-1211.
- [82] MINTZ M, BILLS S, SNOW R, et al. Distant supervision for relation extraction without labeled data[C]//Proceedings of the Joint Conference of the 47th Annual Meeting of the ACL and the 4th International Joint Conference on Natural Language Processing of the AFNLP: Volume 2. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2009: 1003-1011.
- [83] RIEDEL S, YAO L M, MCCALLUM A. Modeling relations and their mentions without labeled text[C]//Proceedings of the Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. [S.l.:s.n.], 2010: 148-163.
- [84] NGUYEN T V T, MOSCHITTI A. End-to-end relation extraction using distant supervision from external semantic repositories[C]//Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. [S.l.:s.n.], 2011: 277-282.
- [85] BAGGA A, BALDWIN B. Entity-based cross-document coreferencing using the vector space model[C]//Proceedings of the 36th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. Morristown: Association for Computational Linguistics, 1998: 79-85.
- [86] MANN G S, YAROWSKY D. Unsupervised personal name disambiguation[C]//Proceedings of the 7th Conference on Natural Language Learning at HLT-NAACL 2003. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2003: 33-40.
- [87] MALIN B. Unsupervised name disambiguation via social network similarity[C]//Proceedings of the Workshop on Link Analysis, Counterterrorism, and Security. [S.l.:s.n.], 2005: 93-102.
- [88] MEDELYAN O, WITTEN I H, MILNE D. Topic indexing with Wikipedia[C]//Proceedings of the AAAI 2008 Workshop on Wikipedia and Artificial Intelligence. [S.l.:s.n.], 2008: 19-24.
- [89] HAN X P, SUN L, ZHAO J. Collective entity linking in web text: a graph-based method[C]//Proceedings of the 34th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM Press, 2011: 765-774.
- [90] WEN P M, YE Z W, DING W J, et al. A review of research progress on the disambiguation of named entities[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2020.
- [91] TAKANOBU R, ZHANG T Y, LIU J X, et al. A hierarchical framework for relation extraction with reinforcement learning[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, 33: 7072-7079.
- [92] FADER A, SODERLAND S, ETZIONI O. Identifying relations for open information extraction[C]//Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. [S.l.:s.n.], 2011: 1535-1545.
- [93] WILKINSON K, SAYERS C, KUNO H, et al. Efficient RDF storage and retrieval in Jena2[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Semantic Web and Databases. [S.l.:s.n.], 2003: 120-139.
- [94] CHONG E I, DAS S, EADON G, et al. An efficient SQL-based RDF querying scheme[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases. [S.l.:s.n.], 2005: 1216-1227.
- [95] HARRIS S W, GIBBINS N. 3store: efficient bulk RDF storage[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Practical and Scalable Semantic Systems. [S.l.:s.n.], 2003: 1-15.
- [96] MILLER J J. Graph database applications and concepts with Neo4j[C]//Proceedings of the Southern Association For Information Systems Conference. [S.l.:s.n.], 2013, 2324(36).
- [97] FERNANDES D, BERNARDINO J. Graph databases comparison: AllegroGraph, ArangoDB, InfiniteGraph, Neo4J, and OrientDB[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Data Science, Technology and Applications. [S.l.:s.n.], 2018: 373-380.
- [98] IORDANOV B. HyperGraphDB: a generalized graph database[C]//Proceedings of the Web-Age Information Management. [S.l.:s.n.], 2010.
- [99] 刘宝珠, 王鑫, 柳鹏凯, 等. KGDB: 统一模型和语言的知识图谱数据库管理系统[J]. 软件学报, 2021, 32(3): 781-804.
- LIU B Z, WANG X, LIU P K, et al. KGDB: knowledge graph database system with unified model and query language[J]. Journal of Software, 2021, 32(3): 781-804.
- [100] MORBACH J, YANG A D, MARQUARDT W. OntoCAPE—a large-scale ontology for chemical process engineering[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, 20(2): 147-161.
- [101] MARQUARDT W, MORBACH J, WIESNER A, et al. OntoCAPE: a re-usable ontology for chemical process engineering[M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [102] MARQUARDT W, MORBACH J, WIESNER A, et al. Chemical process systems[M]. Heidelberg: Springer, 2009: 241-321.
- [103] ZHOU L N. Ontology learning: state of the art and open issues[J]. Information Technology and Management, 2007, 8(3): 241-252.
- [104] LIU G, GUO J B. Bidirectional LSTM with attention mechanism and convolutional layer for text classification[J]. Neurocomputing, 2019, 337: 325-338.
- [105] MALIN B, AIROLDI E, CARLEY K M. A network analysis model for disambiguation of names in lists[J]. Computational & Mathematical Organization Theory, 2005, 11(2): 119-139.
- [106] LIU A L, SODERLAND S, BRAGG J, et al. Effective crowd annotation for relation extraction[C]//Proceedings of 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2016: 897-906.

- [107]DOWNS J J, VOGEL E F. A plant-wide industrial process control problem[J]. Computers & Chemical Engineering, 1993, 17(3): 245-255.
- [108]WEBBER J. A programmatic introduction to Neo4j[C]//Proceedings of the 3rd Annual Conference on Systems, Programming, and Applications: Software for Humanity. [S.l.:s.n.], 2012: 217-218.
- [109]ZHOU X C, LIM M Q, KRAFT M. A smart contract-based agent marketplace for the J-Park Simulator - a knowledge graph for the process industry[J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 139: 106896.
- [110]ZHOU X C, EIBECK A, LIM M Q, et al. An agent composition framework for the J-Park Simulator - a knowledge graph for the process industry[J]. Computers & Chemical Engineering, 2019, 130: 106577.
- [111]FARAZI F, SALAMANCA M, MOSBACH S, et al. Knowledge graph approach to combustion chemistry and interoperability[J]. ACS Omega, 2020, 5(29): 18342-18348.
- [112]王飞跃. 平行控制与数字孪生: 经典控制理论的回顾与重铸[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 293-300.
- WANG F Y. Parallel control and digital twins: control theory revisited and reshaped[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 293-300.
- [113]EIBECK A, LIM M Q, KRAFT M. J-Park Simulator: an ontology-based platform for cross-domain scenarios in process industry[J]. Computers & Chemical Engineering, 2019, 131: 106586.

- [114]WU D Y, ZHAO J S. Process topology convolutional network model for chemical process fault diagnosis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 150: 93-109.

[作者简介]



牟天昊 (1998-), 男, 上海交通大学电子信息与电气工程学院博士生, 主要研究方向为知识图谱、机器学习以及它们在流程工业中的应用。



李少远 (1965-), 男, 博士, 上海交通大学电子信息与电气工程学院讲席教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目负责人。主要研究方向为预测控制、工业智能、满意优化控制、分布式优化等。