

基于智能知识网络的航空发动机使用与维护关键技术研究

Zhexuan Huang, Yunbin Yan, Wenwen Yu^{*}, Kai Han

中国人民解放军陆军工程大学石家庄校区 河北石家庄

【摘要】知识图谱以其强大的知识表示能力、知识推理能力和对语义检索的支持而闻名。航空发动机拆解过程知识图谱能够清晰地呈现拆解过程中的众多要素及其之间复杂的关系，同时能够协助工艺人员处理拆解过程中的突发情况，例如，对于难以逆向拆卸的零件或设备，能够按照装配流程快速构建新的拆解流程。这一进展推动了发动机拆解技术的发展，增强了发动机智能维护的可操作性，显著提高了设备运行的安全性和可靠性。在复杂设备拆解过程知识图谱的自动构建中，将文本数据提取到碎片化的知识图谱中，对于扩展知识图谱的规模、提升设备拆解过程知识图谱的实际应用具有重要的理论意义。在知识图谱的应用中，利用本文改进的拆卸过程知识图谱，进行拆装序列规划技术的研究也是本文提出的方法工程化的一个重要方向。

【关键词】智能知识网络；航空发动机；智能维护；可靠性

【收稿日期】2025年6月3日

【出刊日期】2025年7月9日

【DOI】10.12208/j.ae.20250001

Research on key technology of aero-engine operation and maintenance based on intelligent knowledge network

Zhexuan Huang, Yunbin Yan, Wenwen Yu^{*}, Kai Han

Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】Knowledge graphs are known for their powerful knowledge representation capabilities, knowledge reasoning capabilities, and support for semantic retrieval. The aero-engine disassembly process knowledge map can clearly present the many elements in the process and the complex relationship between them. At the same time, the disassembly process knowledge map can assist craftsmen in managing unexpected situations during disassembly. It enables the rapid construction of a new disassembly process for parts or equipment that are challenging to disassemble in reverse order, in accordance with the assembly process. This advancement promotes the development of engine disassembly technology, enhances the operability of intelligent engine maintenance, and significantly improves the safety and reliability of equipment operation. In the automatic construction of a complex equipment disassembly process knowledge graph, extracting textual data into a fragmented knowledge graph is of great theoretical significance for expanding the scale of the knowledge graph and improving the practical application of equipment disassembly process knowledge graph. In the application of the knowledge graph, using the disassembly process knowledge graph improved in this paper, the study of disassembly and assembly sequence planning technology is also an important direction for the engineering of the method proposed in this paper.

【Keywords】 Intelligent knowledge network; Aero-engine; Intelligent maintenance; Reliability

1 研究背景

航空发动机长期处于复杂多变甚至恶劣的运行环境中，零部件劣化加剧，导致其全寿命周期内的维修次数、维护复杂度和维护成本大幅增加。航空

发动机的复杂性体现在系统结构、功能要求、技术难度、制造工艺、维护难度、管理难度等各个方面，这决定了该装备的制造、运行、维护和管理环节的技术含量、知识密度和系统集成度都较高。与普通

*通讯作者：Wenwen Yu

注：本文于2023年发表在Engineering Advances期刊3卷3期，此文为其授权翻译版本。

设备相比，航空发动机的维修和拆卸更加复杂，对专业知识和技能的依赖性更强，对拆卸过程的要求更严格，拆卸安全系数更高。（1）具体而言，航空发动机系统集成度高，通常由多个系统和子系统组成，这些系统和子系统相互依赖、相互作用、紧密结合，因此在维修和拆卸过程中更需要了解各系统之间的相互关系，避免发生意外拆卸损坏；（2）航空发动机应用了各种先进技术，如先进材料、复杂结构、高性能传感器和控制系统等，这些技术要求维修人员具备更高的技能水平和专业知识，才能确保正确进行维修和拆卸；（3）由于航空发动机的复杂性，维修和拆卸难度更大，需要选用更专业的工具和设备，具备更多的决策知识，决策效率更高；（4）航空发动机所用零部件精度更高，拆解成本及不当拆解的后果更为严重，甚至威胁生命安全。综上所述，与普通设备相比，航空发动机维修拆解需要更精准的拆解流程来指导拆解过程，因此迫切需要开发用于航空发动机拆解过程决策的智能化支持工具。

复杂设备的拆解严重依赖专家的技术和拆解经验。不当的拆解不仅会延长拆解周期、增加拆解成本，还可能对零部件造成二次损伤，甚至引发安全事故。由于拆解过程的高度不确定性和经验依赖性，迫切需要一种由足够知识和经验支持的决策工具，以确保拆解过程正确、安全地进行。一个能够指导技术人员科学专业地进行设备拆解，并支持技术人员快速构建拆解工艺方案的工艺知识库是实际需求。用于复杂设备的拆卸。复杂设备拆解流程知识图谱的自动化构建与智能化应用对于提高设备拆解效率、降低复杂设备维护成本、避免拆解事故具有重要意义。本文针对该领域涉及的关键技术，研究了复杂设备拆解流程知识的语义量化表达方法、复杂设备拆解流程知识图谱的实体类别预测方法、设备拆解流程碎片化知识图谱的相似度度量与融合建模方法、复杂设备拆解流程知识图谱的细粒度集合实体链接方法，研究结果对于提高复杂设备拆解智能化水平具有一定的理论意义，同时对于提高复杂设备制造商的设备拆解及拆解工艺构建水平具有实用价值。

2 知识图谱在航空发动机制造及运维领域的应用现状

目前，航空发动机制造与运维领域的数据和知识大多以传统关系数据库的形式存储，冗余度高、分布分散、相关性弱，存储容量相对较小^[1]。因此，为了从冗余数据和知识文本中提取有用信息，有效表达数据与知识之间的内在关联，实现高效的信息检索和信息推理，提高航空发动机领域知识的可重用性，智能知识网络逐渐被应用到航空发动机制造与运维各个阶段。总体而言，知识图谱的构建和应用在航空发动机制造与运维领域尚处于初步发展阶段，尤其是在航空发动机拆解工艺领域，航空发动机制造与运维领域知识图谱构建技术进展缓慢、可扩展性差，虽然有研究成果，但传播性较差，缺乏影响力，其主要原因在于缺乏领域知识学习和领域知识图谱的自动化构建方法；虽然数据丰富，但缺乏统一的管理，导致数据采集和聚合困难，无法形成知识图谱的迭代更新和丰富；受限于专业人员自身素质，导致知识图谱的工程化程度较低。目前的研究成果主要集中在设备维护数据的互联互通^[2,3]、复杂资料查询^[4,5]、设备故障知识问答^[6,7]、设备故障诊断^[8,9]等方面。

在复杂装备的制造与运行方面，德国的研究目前处于先进水平。德国西门子建立了设备维护知识图谱，将生产设备、生产物料、人员、生产流程等企业不同环节的数据联系起来，为用户提供更直接有效的数字化解决方案；为了支持工程师开发和引入新材料进行生产，德国博世公司构建了底盘系统控制相关数据的大规模知识图谱，满足工程师对复杂材料特性的查询需求^[11]。

随着知识图谱的推广，我国科研人员在航空发动机制造及运维领域取得了一系列成果。在航空发动机制造领域，赵某等利用开放平台构建了工业知识图谱，并提出了一种层次化匹配策略，支持装备制造服务的语义匹配，主要包括特征相似性匹配、数值匹配和功能匹配^[12]。袁方毅针对当前装备制造领域知识图谱构建中存在的问题，建立了面向装备制造领域的知识图谱构建与表示模型，研究了命名实体提取、知识图谱补全等技术，改进了制造业知识图谱的构建方法，为制造业知识图谱的构建提供了参考^[13]。何某等基于本体技术构建了制造业知识图谱，用于获取和集成多层级制造业知识；并建立了面向图的元知识模型来表示知识实体之间的语义

信息，并采用基于语义的知识计算方法计算两个知识实体之间的固有术语相似度和关系术语相似度^[14]。陆某等^[15]针对当前装备制造领域知识图谱构建中存在的问题，建立了面向本体的制造业知识图谱，用于获取和集成多层级制造业知识；并建立了面向图的元知识模型来表示知识实体之间的语义信息，并采用基于语义的知识计算方法计算两个知识实体之间的固有术语相似度和关系术语相似度^[15]。建立了故障知识图谱的定义，研究了基于多数据源的工程机械设备故障领域的知识获取与融合技术，提出了数据驱动的知识图谱迭代自动构建方法，探索了基于模板的故障知识问答、知识图谱推理用于故障消除等数字化应用^[15]。

3 基于智能知识网络的航空发动机使用维护方法介绍

3.1 复杂设备拆解工艺知识语义向量化表达方法

建立翻译模型以实现工艺知识的精确语义向量化表示。目前的知识语义向量化表达方法多面向通用领域，由于复杂设备拆解工艺知识图谱中不存在定义其的多种复杂关系，传统模型难以同时提取工艺实体和多种关系的语义特征。针对该问题，本文分析了复杂设备拆解工艺知识图谱的复杂关系类型，建立了能够有效提取复杂关系语义特征的双投影超平面模型，得到了能够精确表示工艺实体和关系的语义向量。

3.2 复杂设备拆解过程知识图谱实体类别预测方法

目前，拆卸工艺碎片化知识图谱中实体数量庞大，但由于实体类别信息不影响工艺方案的实施，存在实体类别缺失的问题，而人工为每个实体标注实体类别的成本巨大。为了实现类别信息的自动补全，可以建立机器学习模型，利用已获取的工艺知识语义向量对未知实体类别进行预测。

3.3 设备拆卸过程碎片化知识图谱相似度度量与融合建模方法

在复杂设备拆卸知识图谱建模过程中，充分考虑现有的拆卸工艺方案，研究通过融合碎片工艺方案实现知识图谱自动建模的方法，重点解决相似知识图谱的度量与融合问题。本文提出建立基于图结构相似性、路径相似性、实体重要性的增强最大连

通同调结构相似性模型，从图结构和路径相似性两个方面对碎片化知识图谱的相似性进行度量。同时，提出一种基于实体融合、路径融合、分支融合的相似知识图谱融合方法，支持完整复杂设备拆卸工艺知识图谱的自动构建。

3.4 复杂设备拆解过程知识图谱的细粒度集合实体链接方法

为了实现复杂设备拆解工艺知识的高效模糊语义检索，研究了一种基于设备拆解工艺知识图谱的实体链接方法。提出一种基于强关联序列的细粒度集合实体链接方法，该方法考虑语言的逻辑特性，将检索文本中的实体视为一个整体，引入知识语义向量表示，最终建立强关联序列相似度模型来度量候选实体组的整体关联性。该方法可有效提高实体链接的准确率，实现工艺知识的模糊语义检索。

4 讨论与建议

航空发动机拆解过程知识图谱的自动化构建与智能化应用对于提高设备拆解效率、降低航空发动机维修成本、避免拆解事故具有重要意义。本文深入探讨了该领域的关键技术，研究了航空发动机拆解过程相关的方法，包括拆解过程知识的语义向量表达方法、航空发动机拆解知识图谱的实体类别预测方法、设备拆解过程碎片化知识图谱的相似度度量与融合建模方法、航空发动机拆解知识图谱的细粒度集合实体链接方法，对提升航空发动机拆装过程的智能化水平具有重要的理论意义。研究结果对于提高航空发动机拆装智能化水平具有一定的理论意义，同时对于提升航空发动机制造企业设备拆装水平及拆装工艺建设具有实用价值。

参考文献

- [1] Zhang Donghao, Liu Zhenyu, et al. An overview of the current research status and application prospect of knowledge graph in intelligent manufacturing. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021;57(5):90-113.
- [2] Han Zhi, Zhou France. Ontology framework construction and maintenance of high-speed railway moving vehicle equipment inspection system based on knowledge graph. *Modern Electronic Technology*. 2018;41(6):11-14.
- [3] Zhang G, Cao X, Zhang M. A knowledge graph system for the maintenance of coal mine equipment. *Mathematical*

- Problems in Engineering. 2021;2021:1-13.
- [4] Zhang X, Liu X, Li X, et al. MMKG: An approach to generate metallic materials knowledge graph based on DBpedia and Wikipedia. Computer Physics Communications. 2017;211:98-112.
- [5] Mrdjenovich D, Horton MK, Montoya JH, et al. Propnet: a knowledge graph for materials science. Matter. 2020;2(2):464-480.
- [6] Feng Y, Zhai F, Li B, et al. Research on intelligent fault diagnosis of power acquisition based on knowledge graph//2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE). IEEE. 2019; Pp. 1737-1740.
- [7] Liang K, Zhou B, Zhang Y, et al. PF2RM: a power fault retrieval and recommendation model based on knowledge graph. Energies. 2022;15(5):1810.
- [8] Wang XQ, Yang SK. A tutorial and survey on fault knowledge graph//Cyberspace Data and Intelligence, and Cyber-Living, Syndrome, and Health: International 2019 Cyberspace Congress, CyberDI and CyberLife, Beijing, China, December 16-18, 2019, Proceedings, Part II 3. Springer Singapore. 2019; Pp. 256-271.
- [9] Liu Ruihong, Xie Guoqiang, Yuan Zonggang, et al. Research on intelligent fault diagnosis based on knowledge graph. Post and Telecommunication Design Technology. 2020;(10):30-35.
- [10] Hubauer T, Lamparter S, Haase P, et al. Use cases of the industrial knowledge graph at siemens//ISWC (P&D/Industry/BlueSky). 2018.
- [11] Schmid S, Henson C, Tran T. Using knowledge graphs to search an enterprise data lake//The Semantic Web: ESWC 2019 Satellite Events: ESWC 2019 Satellite Events, Portorož, Slovenia, June 2-6, 2019, Revised Selected Papers 16. Springer International Publishing. 2019; Pp. 262-266.
- [12] Zhao Y, Liu Q, Xu W. Open industrial knowledge graph development for intelligent manufacturing service matchmaking// 2017 International Conference on Industrial Informatics—Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII). IEEE Computer Society. 2017; Pp. 194-198.
- [13] Yuan Fangyi. Research on Knowledge Graph Representation Model and Construction Technology for Manufacturing Industry. Harbin: Harbin Institute of Technology; 2019.
- [14] He L, Jiang P. Manufacturing knowledge graph: a connectivism to answer production problems query with knowledge reuse. IEEE Access. 2019;7:101231-101244.
- [15] Lu YC, Wen YJ, Xuan L. Exploration of the construction and application of knowledge graph in equipment failure. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering, (SMCE). 2017;147-152.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS