

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.027

基于本体的民机增材制造数据管理与知识图谱构建

余玮琛,余卓,马超,邹楠,麦嘉琪,易俊兰

(上海飞机制造有限公司,上海 201324)

摘要:从民机增材制造数据管理的痛点出发,通过基于本体的数据管理方法,对增材人、机、料、法、环、测等经典要素术语概念进行规范化的同时,建立术语对应数据属性及术语之间的逻辑关系;建立统一数据架构存储管理新的制造数据;采用映射方法对结构化历史制造数据进行知识抽取;结合知识图谱构建技术,将多源异构数据进行融合,针对增材制造典型场景开发易追溯、机器可读的知识图谱以进行一站式语义查询、数据追溯分析。

关键词:民用飞机;增材制造;本体建模;知识图谱;数据管理

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0141-04

Data Management and Knowledge Graph Construction of Civil Aircraft Additive Manufacturing Based on Ontology

YU Weichen, YU Zhuo, MA Chao, ZOU Nan, MAI Jiaqi, YI Junlan

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

Abstract: To overcome the weakness of data management in civil aircraft additive manufacturing, the terminology concepts of classic elements such as additive human, machine, material, method, environment, and measurement were standardized, and the corresponding data attributes and logical relationships between terms were established through ontology based data management methods. A unified data architecture to store and manage new manufacturing data was established. Knowledge extraction of structured historical manufacturing data was performed by mapping method. Combined with knowledge graph construction technology, multi-source heterogeneous data was fused to develop an easily traceable and machine-readable knowledge graph for typical additive manufacturing scenarios for one-stop semantic queries and data traceability analysis.

Keywords: civil aircraft; additive manufacturing; ontology modeling; knowledge graph; data management

0 引言

金属增材制造技术以逐点堆积、柔性化加工的特点解决了复杂异形构件的加工制造问题,成为航空航天领域复杂构件产品的重要加工制造手段,与民机发展需求相契合,具有巨大前景和优势^[1-4]。典型的增材制造全流程涉及增材制造、热处理、线切割、机加工和无损检测等工艺,其工艺链长,过程中产生的数据多源异构。增材制造过程存在的问题是:1)术语标准化缺乏,工艺链各环节工作人员之间以及信息化系统之间缺乏术语标准化定义,易引起理解偏差而出错;2)数据存储分散,数据存储在不同的信息化系统、从不同的前端界面获取,需要不断在系统及界面之间跳转切换,数据长链追溯难、效率低;3)需要定制化开发,数据查询方式固化,业务需求变化时,无法灵活按

需建立查询路径,重新定制化开发效率低^[5-6]。针对这些问题需要研发创新有效的方法来规范增材制造工艺链术语,找到便捷且可按需灵活进行数据长链追溯的查询方式。以此提高在飞机型号零件预研和制造过程中数据查找、追溯的效率和可达性;对宝贵但目前还没有集中管理的增材制造数据资产进行统一管理和利用,为我国民机增材制造水平的提升助力。

1 方法与路径

通过基于本体的数据管理创新方法,对增材人、机、料、法、环、测等经典要素术语概念进行规范化的同时,建立术语对应数据属性及术语之间的逻辑关系;建立统一数据架构来存储管理新的制造数据。采用映射方法对结构化历史制造数据进行知识抽取;在此基础上结合知识图谱构建技

基金项目:上海市浦江人才计划项目(2022PJD093)

第一作者简介:余玮琛(1991—),男,湖南长沙人,工程师,博士,研究方向为新型航空热表工程技术与数字化转型, yuweichen@comac.cc。

术,将多源异构数据进行融合,针对增材制造典型场景开发易追溯、机器可读的知识图谱以进行一站式语义查询、数据追溯分析。进而在这个基础上进行增材制造的制程能力计算、基于机器学习的数据分析、质量问题追溯等应用。

1.1 面向数据标准化及关联关系的本体建模

波音和空客在十几年前就已经开始应用本体以及本体编辑器 Protege 进行生产制造数据标准化以及有效的(元)数据管理集成^[7-9]。本体作为知识共享、语义互操作和系统工程的基础必须经过精心的设计。常用的本体建模七步法在分析现有领域本体、考虑现有本体复用性的基础上主要进行如下工作^[10]:

1) 梳理领域重要术语并确定本体中的类(术语概念)及类与子类的层次结构;

2) 定义类的属性,类的属性包括对象属性与数据属性,其对象属性描述类之间的关系,数据属性描述类之间的特性;

3) 定义本体很少是自身的缘故,而是为了用本体来组织大规模的个体,个体与类具有对应关系,是类的具体实例,因此类的对象属性与数据属性会被继承至个体。

在知识体系不具有完备性的新兴领域,少部分知识适用于自顶向下构建,而在数据未成体系,需要通过自底向上的方式对这类知识进行基于数据驱动的方式来构建,比如基于数据集进行实体与关系的抽取。因此通常在领域内,尤其新兴领域,本体建模是会将自顶向下与自底向上的构建方法进行结合。

1.2 数据架构建立与数据映射

本体建模的意义之一在于利用本体来组织大规模的个体数据。对于新产生的数据可以按照以下规则建立基于本体的数据架构:本体中定义的类对应数据库中的物理表;本体中定义类的数据属性对应数据库物理表中的列即字段名;个体对应数据库物理表中的行;个体的具体数据属性值对应数据库物理表中每个单元格的值。

对于已有的历史数据其架构与定义的本体存在异构,可以通过映射方法将关系型数据库中的数据进行知识抽取转换成包含语义 RDF 图数据形式,为之后数据按照定义的本体进行对齐融合、构建知识图谱奠定基础。数据映射的方法有直接映射法、R2RML 法、D2RQ 方法等^[11-12]。

1.3 面向数据融合及高效查询的知识图谱构建

知识图谱是用图模型来描述知识和建模世界万物之间关联关系的技术方法。知识图谱由节点和边组成,节点作为实体可以是术语概念,边是实体之间的关系。知识图谱与本体的区别可以理解为:本体定义可传递给机器的人类对世界的认知框架即“世界观”;而富含实体及关系实例的数据的知识图谱相当于血肉,它依附于认知框架进行具象化^[13-15]。

大量学者开展了知识图谱相关研究^[16-18],在构建知识图谱时可以从第三方知识库或者已有结构化数据中获取知识输入。当多个图谱/数据库或者将外部数据库融入到现有知识图谱时,需要处理两个方面的问题:1) 模式层的融合即本体对齐,包括本体概念合并对齐、概念上下位关系、概念的属性定义对齐;2) 数据层的融合,包括实体的属性、关系以及所属类别等^[19]。

Neo4j 作为可视化良好呈现知识图谱、对图数据进行存储与推理的有效工具,可以导入 RDF、CSV 数据、通过 cypher 语言进行灵活高效的语义查询。在 Neo4j 中节点可以对应概念类,边对应概念类之间的关系,数据属性为节点的标签。

2 实现与验证

2.1 增材制造本体构建

增材制造并非传统制造技术,经过近 20 年的发展,与增材制造相关的标准化工作日益完善。由 ASTM 最早成立的增材制造技术委员会标准化协会组织 ASTM F42 与 ISO 创建的增材制造标准化委员会 ISO/TC261 共同发布修订增材制造标准架构^[20],如图 1 所示。

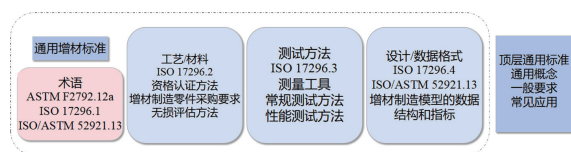


图 1 ISO/TC261 和 ASTM F42 增材制造标准架构

民机增材制造基于以上国际标准结合自身增材制造特点建立增材制造的企业标准,在此基础上定义术语、类及类层次;对增材工艺以及增材工艺后处理如热处理及表面处理进行了术语及属性的梳理,依据制造大纲、零件增材制造纸质成形记录文件来自底向上补充术语并定义数据属性。在

此基础上以零件为核心的增材制造工艺链本体定义如图2所示。为了便于查找,两个术语之间的

对象属性直接将术语用下划线相联,如零件(part)与人员(staff)之间的对象属性为 part_staff。

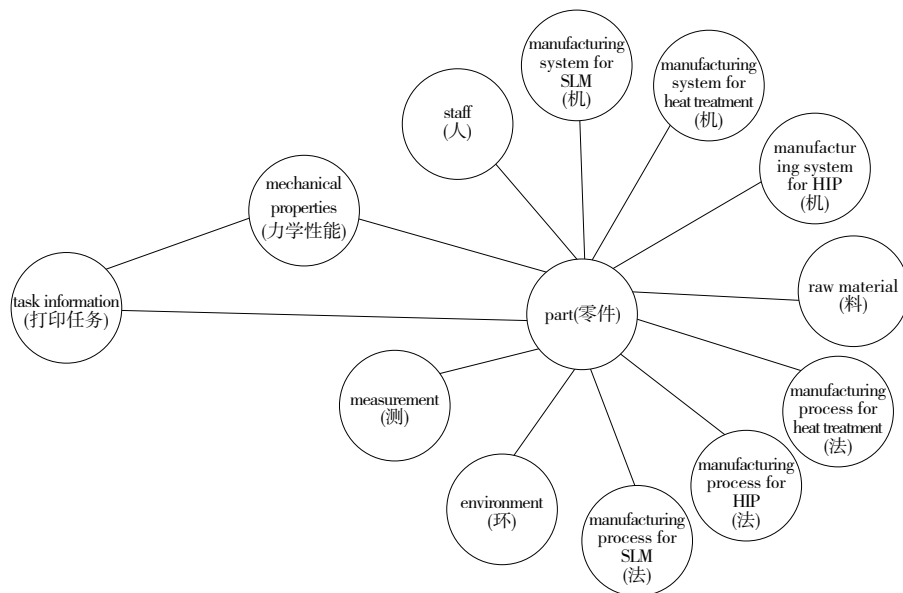


图2 增材工艺链本体

2.2 数据架构建立与数据映射

在如上定义的本体基础上,依据以下原则建立数据架构,构建增材工艺数据库,对新的数据实现基于本体的存储与管理,如图3所示。

1) 本体定义类选区激光融化 Selective_Laser_Melting 作为数据库的物理表名。

2) 本体定义的数据属性即工艺参数激光功率 Laser_Power、扫描速度 Scanning_Speed、扫描间距 Scanning_Interval 为物理表的字段名。

3) 个体1、2、3为物理表的元组行数据。

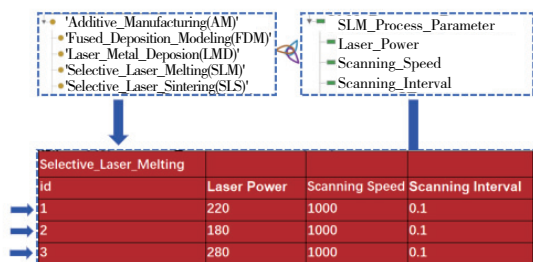


图3 基于本体建立增材工艺数据库架构

已有信息化系统中的历史数据,其本体与定义本体存在异构,无法统一调用,需要进行融合。通过数据映射将结构化数据转换成含有语义的RDF图数据形式,为数据的融合提供基础。

2.3 增材制造知识图谱构建与知识查询

增材制造的数据经历了从纸质分散存储至数

字化统一存储的过程,基于新旧多个数据库构建知识图谱或者将外部数据库融入到现有知识图谱时,需要将多源异构数据的概念、属性、关系进行对齐。主要采用两种方式:直接在 Mapping 文件上进行对齐;在导入图数据库 Neo4j 时进行对齐。前者在应用 D2RQ 映射文件后,Mapping 语言中的命名源自数据库中的表名及字段名,可以按需修改向定义的本体对齐。比如将"device_identifier"向本体的"device_name"对齐。将对经过本体对齐的 RDF 数据导入图数据库 Neo4j 构建知识图谱并进行图数据存储与可视化呈现。后者应用 Neo4j 直接导入数据库 CSV 文件至图数据库,导入时基于本体创建相应的节点和关系,完成对齐融合。通过以上两种方式,将增材新旧数据共 618 条关系型数据经过映射对齐融合后转换成 Neo4j 图数据库中 1 466 个节点及之间 7 619 个关系,如图4所示。

1) 查询功能验证

以“增材制造后零件力学性能异常根因追溯”为例,通过以上建立的图数据库查询增材制造后零件是否有力学性能异常。查询所有零件的力学性能,返回屈服强度不满足 800 MPa 的节点对应的零件编号以及屈服强度,查询语句为:

```
match(q:part) <-[r]-(n:mechanical_properties)
Where n.yield_strength<800
Return q.part_serial_number AS part_serial_number, n.yield_strength AS yield_strength
```

图 5 为查询返回的结果,结果准确反馈了零件编号为 2-ZL-03 以及 Y2-ZL-01 的屈服强度没有达到 800 MPa。

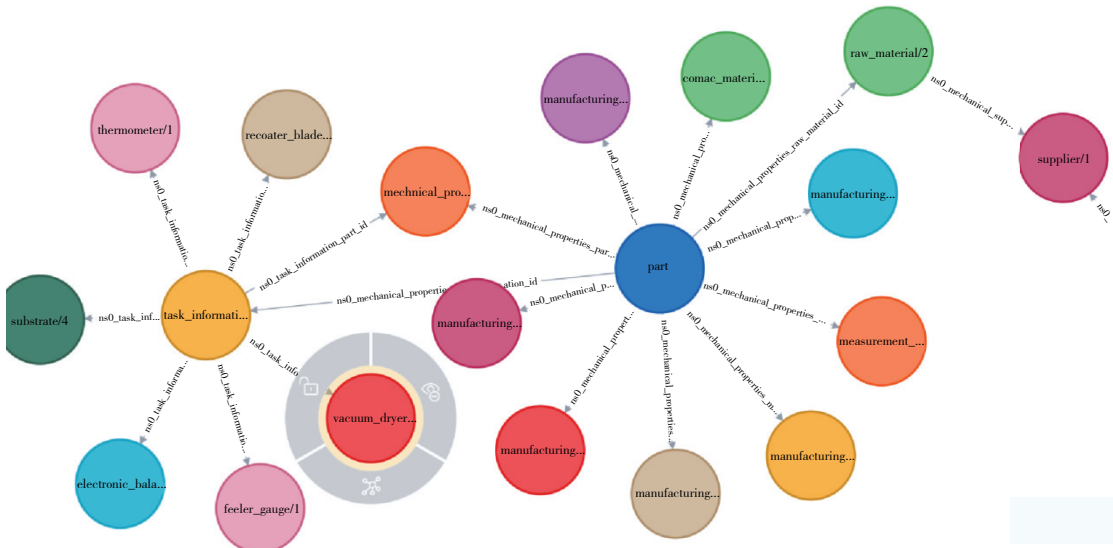


图 4 零件 Part4 关联节点示例

part_serial_number	yield_strength
"2-ZL-03"	708.092
"Y2-ZL-01"	770.145

图 5 查询返回结果

2) 推理功能验证

在查询出增材制造数据库中存在力学性能异常数据的基础上,通过人、机、料、法、环、测等数据的查询,实现性能异常的根因追溯,验证模型的推理功能。a) 首先查询零件编号 2-ZL-03 以及 Y2-ZL-01 的操作人员是否具有资质,结果为正常。b) 查询设备是否打印中断,一般在打印中断的时候实际打印时间要远超过预计打印时间,结果为正常。c) 查询原材料粉末入场复验信息,并与原材料粉末入场复验要求进行比较,结果满足要求。d) 继续追溯零件编号 2-ZL-03 以及 Y2-ZL-01 的生产工艺信息以及查询力学性能合格零件的平均生产工艺信息。对比可知,异常零件的激光功率 laser_power 值明显低于合格零件的平均激光功率值 280 W。e) 继续查询金相照片存储地址进而找到金相图片进行根因追溯(图 6)。结果显示异常数据的金相照片出现较多未融或半融粉末。其中屈服极限稍高的零件 Y2-ZL-01,其未熔处明显比零件 2-ZL-03 少。因此推理得出力学性能异常的原因大概率是过程激光功率参数偏低引起的未熔,就此结束异常根因追溯。



(a) 2-ZL-03 (b) Y2-ZL-01

图 6 查询调用数据库中的金相照片

3 结语

本文利用本体术语规范化的层面,对领域术语及定义进行标准化,统一不同领域的系统使用者对术语的理解,基于本体对分散的增材制造人、机、料、法、环、测数据进行结构化存储,同时可以将来自不同数据库的多源异构数据通过建立与本体的映射关系进行集成融合;利用本体定义术语逻辑关系的层面,将实例化的数据进行关联,使数据便于多条追溯和通过语义查询按需调用,利用本体语言机器可读、可推理的层面,在本体填入数据之后,利用知识图谱进行推理并进行统计分析。这对于未来航空制造业,可有效减少纸面数据传递带来的错误,延长数据追溯链条,解决大数据分析的问题;可用于提高我国航空制造业的专家数据库构建,将传统的经验思维转为数据思维,为航空制造业的数字化转型及智能化升级提供理论借鉴及实践经验。

(下转第 218 页)

- 人轨迹跟踪控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(11): 13-19.
- [11] 周俊, 赵涛. 基于广义二型模糊神经网络的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(4): 68-74, 79.
- [12] 周震, 崔国华, 潘颖, 等. 双臂机器人的轨迹跟踪控制方法研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(24): 31-36.
- [13] 肖帆, 李公法, 章晓峰, 等. 基于参考轨迹实时修正的机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 441-449.
- [14] 马磊, 郭鹏远, 杨小强. 一种用于控制工业机器人运动轨迹误差的观测控制策略研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(23): 56-60.
- 收稿日期: 2023-12-06

(上接第 144 页)

参考文献:

- [1] 陈理燃. 金属增材制造技术在航空零部件应用与发展研究[J]. 冶金与材料, 2024, 16(5): 82-84.
- [2] 许世娇, 权纯逸, 杨堃, 等. 金属增材制造技术在航空领域的应用现状及前景展望[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(3): 9-17.
- [3] 常坤, 梁恩泉, 张韧, 等. 金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3176-3182.
- [4] 雷力明, 侯慧鹏, 何艳丽, 等. 金属增材制造技术在民用航空领域的应用与挑战[J]. 航空制造技术, 2019, 62(21): 22-30.
- [5] 操宇恒, 陈超越, 郭铠, 等. 机器学习在金属增材制造技术中的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(11): 1454-1465.
- [6] 刘志远, 丁卯, 王沛, 等. 机器学习在金属增材制造中的应用现状和前景展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(增刊2): 14-28.
- [7] GONNSEN T. Component Application Publication: US 2018/0037339 A1[P]. 2018-02-08.
- [8] KOSSMANN M, ODEH M. Ontology driven requirements engineering system and method: US2013205190A1 [P]. 2013-08-08.
- [9] MEYER M, YU Z, GULATI P, et al. Ontologies for digital twins in smart manufacturing[J]. Whitepaper in Research Gate, 2020(2): 11346.
- [10] 徐享忠, 汤再江, 杨建东, 等. 本体理论与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [11] 吴华, 李湑, 张世贵, 等. STEP 中 EXPRESS 语言到 Java 语言的映射方法[J]. 机械工程师, 2022(2): 117-120.
- [12] 高金. 基于 RDB-RDF 模式映射的数据转换方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [13] 王昊奋, 漆桂林, 陈华钧. 知识图谱方法、实践与应用[J]. 自动化博览, 2020, 37(1): 7.
- [14] 张栋豪, 刘振宇, 郑维强, 等. 知识图谱在智能制造领域的研究现状及其应用前景综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 90-113.
- [15] 程豪, 张峥. 钛合金 3D 打印颠覆性创新研究的知识图谱分析[J]. 技术与创新管理, 2019, 40(3): 313-319.
- [16] 韩涛. 面向航空发动机设计的知识图谱关键构建技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [17] 聂同攀, 曾继炎, 程玉杰, 等. 面向飞机电源系统故障诊断的知识图谱构建技术及应用[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 625499.
- [18] 周航, 张泽, 马泽祺, 等. 基于知识图谱的航空领域问答系统设计[J]. 信息与电脑, 2021(24): 162-164.
- [19] 蓝波, 胡旭洁, 谭佳豪, 等. 基于本体的电子装配工艺知识建模与管理[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 127-130.
- [20] 熊华平, 郭绍庆, 刘伟, 等. 航空金属材料增材制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2019.
- 收稿日期: 2024-09-03