

DOI: 10.19666/j.rlfed.202207170

风电机组故障知识的获取表达与推理框架

朱俊杰¹, 任鑫¹, 郝延², 杨立平², 杨奎², 强威威², 董玉亮³, 祝金涛¹
(1.中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209;
2.华能酒泉风电有限责任公司, 甘肃 酒泉 735100;
3.华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

[摘要] 针对目前风电机组故障种类多、故障知识关联关系复杂、知识表达差异化大、知识推理效率低等问题, 提出了风电机组故障知识的获取表达与推理框架。首先, 通过基于故障树分析方法的故障模式及影响分析方法, 全面获取并梳理出风电机组故障排查与检修维护的专家知识; 然后, 借助本体理论将非结构化的专家知识进行结构化表达, 形成知识图谱, 将知识可视化展示; 同时, 结合本体自定义规则以及因果推理模型实现故障原因的查询推理, 提高了知识查询与推理的效率; 最后, 通过具体的机组故障案例说明了本方法的实用性。研究结果可为风电场运维检修工作的智能化发展提供方向。

[关键词] 风电机组; 知识获取; 知识表达与推理; 检修维护

[引用本文格式] 朱俊杰, 任鑫, 郝延, 等. 风电机组故障知识的获取表达与推理框架[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 73-80.
ZHU Junjie, REN Xin, HAO Yan, et al. Acquisition, expression and reasoning framework of wind turbine fault knowledge[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 73-80.

Acquisition, expression and reasoning framework of wind turbine fault knowledge

ZHU Junjie¹, REN Xin¹, HAO Yan², YANG Liping², YANG Kui², QIANG Weiwei²,
DONG Yuliang³, ZHU Jintao¹

(1. China Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Huaneng Jiuquan Wind Power Co., Ltd., Jiuquan 735100, China;
3. Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of large number of wind turbine faults, complex fault knowledge relationship, large difference of knowledge expression and low efficiency of knowledge reasoning, a framework of acquisition, expression and reasoning of wind turbine fault knowledge is proposed. Firstly, through the failure mode and effect analysis method based on the fault tree analysis method, the expert knowledge of wind turbine trouble shooting and maintenance is comprehensively obtained and sorted out. Then, with the help of ontology theory, unstructured expert knowledge is expressed structurally to form a knowledge map and displayed visually. Combined with self-defined rules of ontology and causal reasoning model, the query and reasoning of fault causes are realized, which improves the efficiency of knowledge query and reasoning. Finally, the practicability of this method is illustrated by a specific unit fault case. The results of this study can provide a direction for the intelligent development of wind farm's operation and maintenance.

Key words: wind turbine unit; knowledge acquisition; knowledge expression and reasoning; overhaul and maintenance

近十年来, 我国风电进入快速发展时期, 装机容量和并网发电量不断攀升。截至2021年底, 风电装机容量突破3亿kW大关^[1]。“十四五”期间, 风电发展进入提质增速新阶段, 在确定的风资源条件

和风电场设计水平背景下, 风电场的效益由风电机组性能及其运维能力决定^[2], 如何提高风机利用率、降低设备故障发生率和故障时间、确保风电机组性能稳定, 已成为风电场日常运维的主要目标。《中国

收稿日期: 2022-07-16 网络首发日期: 2022-09-15

基金项目: 中国华能集团有限公司横向项目 (CERI/TO-CA-003-21E)

Supported by: Horizontal Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (CERI/TO-CA-003-21E)

第一作者简介: 朱俊杰 (1996), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为旋转机械状态监测与故障诊断, jj_zhu@qny.chng.com.cn。

制造 2025》明确提出，智能制造是未来中国制造业发展的趋势^[3]，日益成熟的大数据与人工智能技术推动场站的检修维护工作向智能化方向发展。风电机组的检修维护工作重点关注所监测参数的实际物理意义及其特征之间的因果联系，注重诊断推理结果的可解释性^[4]，因此，应用于风电机组检修维护的工业大数据除海量监测点数据以外，还应包括用于解释各个监测点关系的专家知识。如何将这非结构化的专家知识结构化地表达出来，并代替专家完成相关的诊断推理工作，对于本知识框架在智能运维平台上得到有效应用具有重要意义。

作为开发专家系统的关键工序，合理获取与表达领域知识十分重要。Choudhary 等人^[5]认为，知识是制造企业最有价值的资产。过去有不少学者^[6-8]借助机器学习方法，从系统设备历史样本数据中获取知识。在众多知识获取模型中，故障模式及影响分析（failure mode effect analysis, FMEA）和故障树分析（fault tree analysis, FTA）是目前广泛应用的故障分析技术。FMEA 致力于搜集故障发生产生的影响并针对性地提出相关部件预防维护措施。何成兵等^[9]利用 FMEA 方法对风电机组主要设备的故障模式进行了统计分析，为风电机组后续的状态监测与故障诊断工作提供了理论基础。FTA 通过适当的逻辑门，将故障链中的顶事件、中间事件、底事件逐级连接形成故障树。彭华亮等^[10]将故障树的定性分析与规则推理相结合，提出了一种基于故障树的发射车诊断方法。

知识的表达研究注重知识的组织形式，知识表

示与问题的性质和推理策略有密切关系，针对同样的问题，不同的表示方法可以产生不同的效果。目前，常见的知识表达方法有状态空间、谓词逻辑、产生式规则、语义网络等^[11]。在计算机科学领域，本体被用来表达特定领域内各个概念的属性及关系，因其具备结构化的知识表达形式以及关联的推理机制，在各行业专家的方法库中得以应用^[12]。Dimitrova 等人^[13]将本体理论应用在隧道病理评估与诊断领域知识建模中。Nuñez 等人^[14]提出了一种基于本体的机械设备健康管理模型。Zhou 等人^[15]提出一种基于本体建模的机床故障诊断方法。Chen 等人^[16]将旋转机械故障诊断领域内关键词条进行了规范化本体表达。现有文献对各自领域内的知识系统构建过程进行了详细阐述，然而在风电智能运维工作中，存在着风电机组故障知识获取不足与表达缺失等问题，且仍然缺乏对故障知识获取、结构化表达、查询推理、检修维护全过程的研究。

在风电提质增速发展新阶段，需以建设智慧风场为目标，以智能运维为核心，借助大数据与人工智能技术，开展风电智能运维关键技术研究。本文尽可能全面地获取风电机组各类故障知识，形成完备的风电故障领域知识体系，并基于本体理论开展风电机组故障知识语义性建模及故障知识查询推理研究，以提高知识的管理能力和检索推理效率。

1 知识获取表达与推理研究框架

对风电机组故障知识的获取表达与推理框架分为知识的获取、表达、推理 3 部分，具体如图 1 所示。

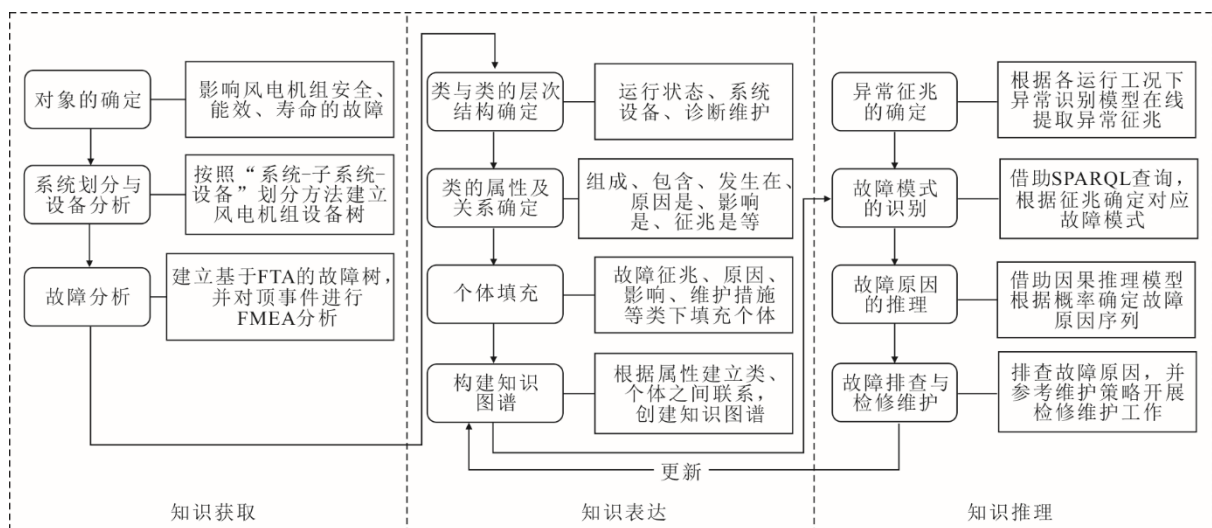


图 1 故障知识获取表达与推理框架

Fig.1 Acquisition, expression and reasoning framework of fault knowledge

首先，按照“系统-子系统-设备”的划分方法建立风电机组设备树，借助 FMEA 和 FTA 方法获取完备的风电机组故障诊断与检修维护专家知识；接着，确定风电机组诊断维护领域本体：通过系统设备、运行状态、诊断维护知识 3 大类表达风电机组的客观情况以及故障知识，确定领域本体概念之间的数据属性和数据属性，建立知识语义关系模型，将这些碎片化、非结构性的专家知识结构化地表达出来，形成知识图谱；最后，结合本体自定义规则以及因果推理模型实现故障的定位，给出故障原因排查序列，并提供相应的维护措施。

2 风电机组故障专家知识获取

风电机组的故障诊断与检修维护任务应该覆盖区域内各风机的所有运行工况，需要全方位、多维度地获取风机故障诊断与检修维护知识，建立机组的故障知识库。在故障知识获取方面，FMEA 和 FTA 方法是目前广泛使用的设备故障分析方法，本文借助这 2 种方法完成故障专家知识的获取工作。

2.1 基于 FMEA 的故障知识分析

FMEA 方法主要通过通过对系统、设备进行分析，将致使其无法完成工作目标甚至产生严重后果的原因找出来。其基本任务是：确定故障的发生形式，找出已发生故障以及潜在故障的主要原因，为后期检修维护提供科学依据。FMEA 方法多维度地分析系统设备的健康问题，以故障的征兆、模式、部件、影响、原因、措施为主要分析内容，通过表 1 的形式体现。借助 FMEA 分析方法思路，分析获取从原因到影响的故障演变知识、从故障征兆到故障诱因的诊断推理知识、从故障部位到维护措施的维护决策知识，具体如图 2 所示。

表 1 FMEA 分析表单
Tab.1 FMEA analysis form

模式	征兆	部件	影响	原因	措施
...

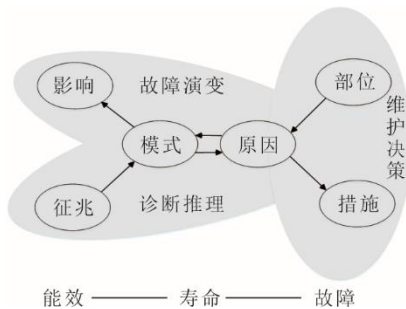


图 2 基于 FMEA 的多维度知识获取

Fig.2 Multidimensional knowledge acquisition based on FMEA

2.2 基于 FTA 的故障演变规则获取

FTA 方法是一种图形演绎分析方法，注重分析各故障事件之间的关联关系从而获得故障演变规则，并通过定量分析计算出各个设备、部件的失效概率。故障树由顶事件、中间事件、底事件以及逻辑符号组成，其详细介绍及符号说明见文献[17]。构建故障树前，需要确定顶事件、底事件以及中间事件的划分原则。顶事件通常选取那些对设备影响较大的、易于监测与分析且频繁发生的故障，底事件应选取那些划分到最小的维修单元节点所对应的事件，中间事件通常指介于顶事件与底事件之间的逻辑连接事件。在确定好故障树顶事件后，用矩形代表中间事件，圆圈代表原因底事件，三角形表示未能详细说明的故障底事件，各故障间用或门连接，基于顶事件、中间事件与底事件的故障树分析示意如图 3 所示。

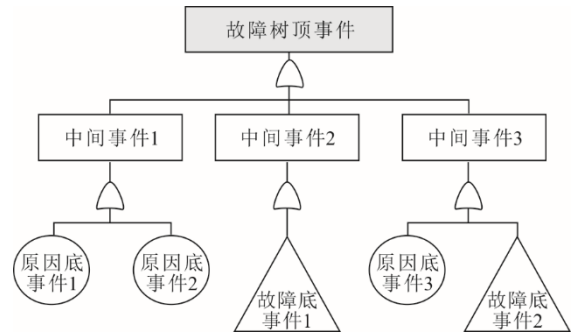


图 3 故障树分析示意

Fig.3 Schematic diagram of fault tree analysis

在故障树的定性分析工作中，最小割集可以表示故障的发展路径。在故障树结构中，从底事件到中间事件再到顶事件的所有最小割集汇总形成了故障模式的演变图，同时，割集中逻辑门“与门”越多，割集中元素的数量越多；“或门”越多，割集的个数也越多。当故障树中顶事件与中间事件对应的故障模式同时发生时，通常认为该中间事件促成顶事件的发生。

2.3 基于 FMEA 和 FTA 的风电机组故障知识获取

FMEA 方法侧重于单一故障模式分析，FTA 方法侧重于多故障因果关系演绎。考虑到实际情况中某个故障的发生往往是多个设备、部件同时失效导致，本文以设备树为依据，梳理出各系统各设备下典型故障模式，通过故障树的形式梳理出各典型故障之间的耦合关系，展现故障间的因果联系，并对故障树中的顶事件进行 FMEA 分析，既确定了重点分析对象，又能全面深入开展故障分析工作。

1) 确定风电机组故障树顶事件 风电机组的故障排查不仅仅局限于设备的损坏失效, 机组的发电性能、能效水平同样应当纳入研究范畴。应从风电机组发电性能评估、能效分析、设备寿命管理等角度出发, 选取位于故障传递链顶端且易于监测的故障模式作为故障树顶事件。

2) 故障树分析 从故障树顶事件出发, 多层次分析顶层故障发生的原因, 以各设备下典型故障模式为基础, 自上而下地梳理出各典型故障之间的耦合关系, 建立故障树, 展现故障间的因果联系。

3) 典型故障模式的 FMEA 分析 对故障树中顶事件以及各原因事件进行 FMEA 分析, 获取典型故障模式的故障演变知识、诊断推理知识、维护决策知识。

3 基于本体的风电故障知识结构化表达与诊断推理

在风电机组故障诊断与检修维护工作中需要大量的专家知识与机组设备信息, 各发电单位大多通过非结构化的文本形式保存这些信息, 此类保存形式难以实现故障的自动化查询推理诊断工作, 且知识未能与现场实际情况结合, 知识的更新迭代性差。本文通过本体建模的方式, 将这些非结构化的知识结构化地表达出来, 且概念化和规范化的本体约束可以很好地避免语言歧义。

3.1 风电机组故障知识本体的构建

本体作为一种结构化的概念知识的表达形式, 主要由类、属性以及个体组成。在本体构建过程中, 需要选择合适的描述语言才能更好地描述出知识的概念和关系, 本文选用语言表达能力和计算机自动化推理能力都十分出色的 OWL DL 语法^[18], 借助 Protégé 软件和基于 Protégé 的七步法构建风电机组故障知识本体, 具体步骤为:

1) 确定对象 本文构建的是风电机组故障诊断与检修维护领域本体;

2) 搜集领域内现有本体 分析其可用性;

3) 整理本体中的重要术语 将基于 FMEA 分析方法获得的相关风机故障知识表中的重要概念及属性关系提炼出来;

4) 确定类与类的层次结构 从风机运行状态、系统设备、检修维护 3 大类出发, 梳理出父类与子类的层次结构, 具体见表 2;

5) 确定类的属性及关系 根据风电机组故障

知识领域本体的实际情况, 将对象属性分为“状态是”“包括”“属于”“发生在”等 7 种, 同时设置“有先验概率”“有因果强度”“有历史次数”3 种数据属性, 借助数据属性确定设备故障原因的先验概率和因果强度及其发生的历史次数, 具体见表 3。对象属性用于建立类之间、类与个体间、个体之间的关联关系, 数据属性用于表征个体的数值属性;

表 2 风电机组故障知识本体类的术语与类的层次结构
Tab.2 Terminology and hierarchy of wind turbine fault knowledge ontology class

类	说明	子类	说明
Operatingstate	运行状态	Normal	运行
		Suspended	暂停
		Shutdown	停机
Equipment	系统设备	Windcapturesystem	风捕系统
		Drivesystem	传动系统
		Generatorsystem	发电机系统
Diagnosis Maintenance	检修维护	Mode	故障模式
		Cause	故障原因
		Effect	故障影响
		Symptom	故障征兆
		Maintenance	维护措施

表 3 风电机组故障知识本体属性说明
Tab.3 Attribute description of wind turbine fault knowledge ontology

属性类别	属性	说明
ObjectProperty (对象属性)	consist of	组成
	contains	包含
	happenedIn	发生在
	hasCause	原因是
	hasEffect	影响是
	hasSymptom	征兆是
DataProperty (数据属性)	hasMaintenance	维护措施是
	hasPP	有先验概率
	hasCS	有因果强度
	hasTimes	有历史次数

6) 添加个体 抽象的类由具体的个体组成, 所有个体根据概念划分分配到各个类中, 划分完成后构建个体元素间的关系;

7) 一致性检测 确定构建的风电机组故障知识本体不存在逻辑冲突。

3.2 基于本体的故障知识查询与诊断推理

实际上, 风电机组的故障知识查询与诊断推理主要分为故障模式的识别和故障原因的推理 2 个环节, 最后根据具体的故障原因制定相关的维护措施。首先, 通过基于规则的相关性查询, 借助“匹

配+搜索”机制下 SPARQL 查询语言完成本体知识库中某个知识单元的查询，完成故障模式识别与故障原因的查询工作。区别于传统数据库复杂的 SQL 语句，SPARQL 语言可以实现对知识图谱中特定知识表达形式 RDF 三元组中主语、谓语、宾语进行直接查询，定位故障模式。常用的 SELECT 语句如下：

SELECT ?X?Y WHERE{?X rdfs:subClassOf: ?Y.}

在定位到具体故障模式后，将进行故障发生原因的推理工作。本文结合故障树分析与条件概率公式，提出基于因果图模型的故障原因诊断推理方法，具体如图 4 所示。借助因果图模型可以计算出引起故障发生的各个原因的概率序列，该方法在构造方便的同时具有可解释性强和计算高效的特点。

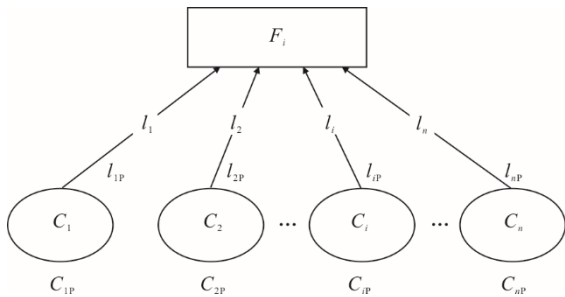


图 4 因果图模型图示

Fig.4 A model example of cause and effect diagram

图 4 中：1) 方形节点 F_i 表示故障模式，对应故障树中的顶事件；2) 圆形节点 C_i 表示各个故障原因，对应故障树中的底事件， C_{iP} 表示该原因的先验概率；3) 指向连接线 l_i 表示故障原因 C_i 与故障模式 F_i 之间的因果关系， l_{iP} 表示该原因与故障模式因果关系的因果强度，指向同一故障模式的所有故障原因之间是逻辑或关系。

基于因果图模型的故障原因诊断推理环节是指依据被满足条件的知识单元求取所需的值。可对搜索出的各故障原因进行初步筛选，去除可以直接排除的定量指标类故障原因，初步得到故障原因备选集。在最终故障原因的排查工作中，结合基于专家知识的因果强度赋值及基于故障原因历史发生次数的先验概率赋值方法，根据因果模型图得到所有最小割集布尔表达式以及不交化的最终割集表达式，计算出故障模式出现时各个故障原因的发生概率，并根据概率序列从高到低排查故障原因。

4 案例分析

4.1 风电机组故障知识获取

以西北某风场某风电机组作为研究对象，验证

本文提出的知识框架在风电机组故障诊断与检修维护工作应用中的有效性。首先对目标风电机组进行系统划分与设备分析，风电机组可以分为风能捕捉系统、传动系统、发电机系统 3 个子系统，得到如图 5 所示的设备树。

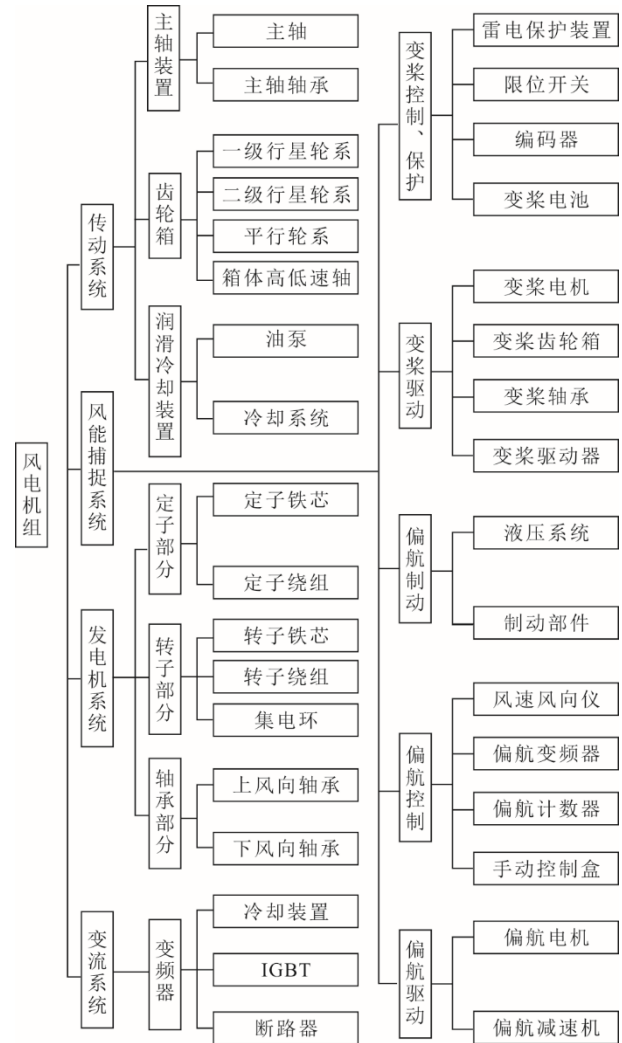


图 5 风电机组设备树

Fig.5 Wind turbine equipment tree

确定各个子系统下各设备顶事件，开展 FTA 分析，建立故障树并整理出故障树顶事件以及原因事件的 FMEA 分析表。顶事件齿轮箱高速轴超温故障的故障树如图 6 所示，FMEA 分析表见表 4。

4.2 风电机组故障知识表达

通过 Protégé 本体软件依据七步法构建出的风电机组故障知识领域本体如图 7 所示。图 7 中，左侧表示风电机组故障知识本体的类及其层次关系，中间部分表示各类所包含的个体，右侧表示该领域本体内的对象属性及数据属性。

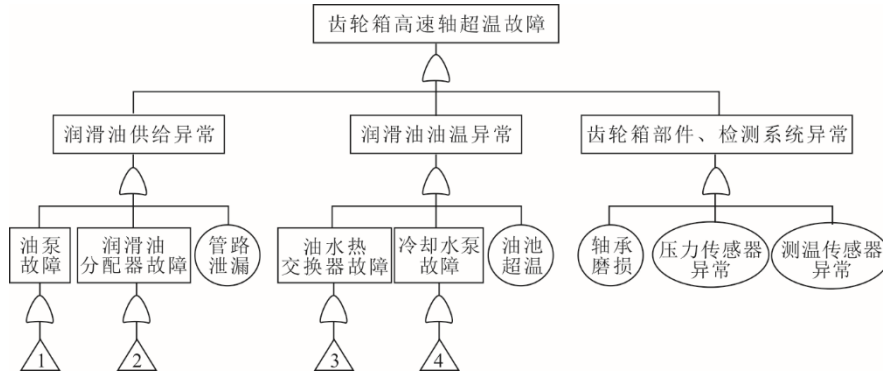


图 6 齿轮箱高速轴超温故障 FTA 分析

Fig.6 FTA analysis of overtemperature fault of gearbox high speed shaft

表 4 齿轮箱高速轴超温故障 FMEA 分析表

Tab.4 FMEA analysis table of overtemperature fault of gearbox high speed shaft

类型	事项描述	编码
故障模式	齿轮箱高速轴超温故障	DF01
故障征兆	高速轴前端温度高于 80 ℃	SY01
故障征兆	高速轴后端温度高于 80 ℃	SY02
故障征兆	齿轮箱高速轴运行声音异常	SY03
故障部位	齿轮箱	D01
故障影响	产生噪音和振动	EY01
故障影响	造成齿轮箱高速轴损坏	EY02
故障原因	齿面润滑油量不足	CY01
故障原因	润滑油种杂质过多	CY02
故障原因	轴面磨损或齿面偏载断齿、磨损、胶合	CY03
故障原因	测温原件损坏	CY04
故障原因	润滑油入口油温过高	CY05
维护措施	检查各管路或油泵是否泄漏，齿轮箱润滑油分配器是否堵塞	MY01
维护措施	检查油泵过滤器滤芯是否堵塞	MY02
维护措施	检查齿面磨损老化情况后低负荷运行或停机维修	MY03
维护措施	检查测温模块是否松动、线路异常、损坏	MY04
维护措施	检查齿轮箱油水热交换器和空水冷却器是否异常	MY05

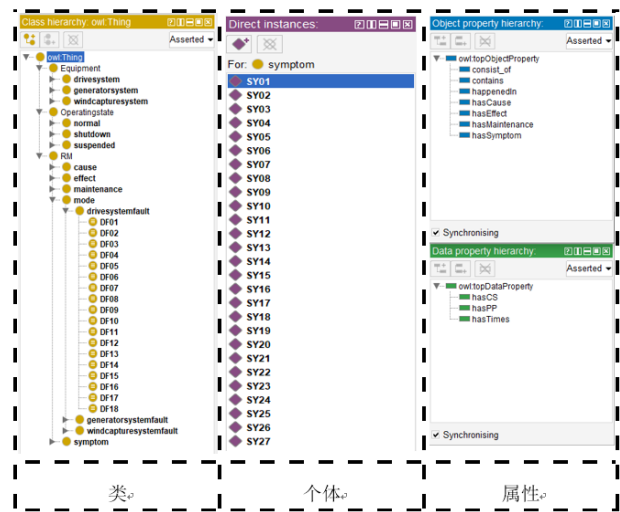


图 7 风电机组故障知识本体

Fig.7 Wind turbine fault knowledge ontology

齿轮箱高速轴超温故障 DF01 的故障知识本体可视化展示如图 8 所示。

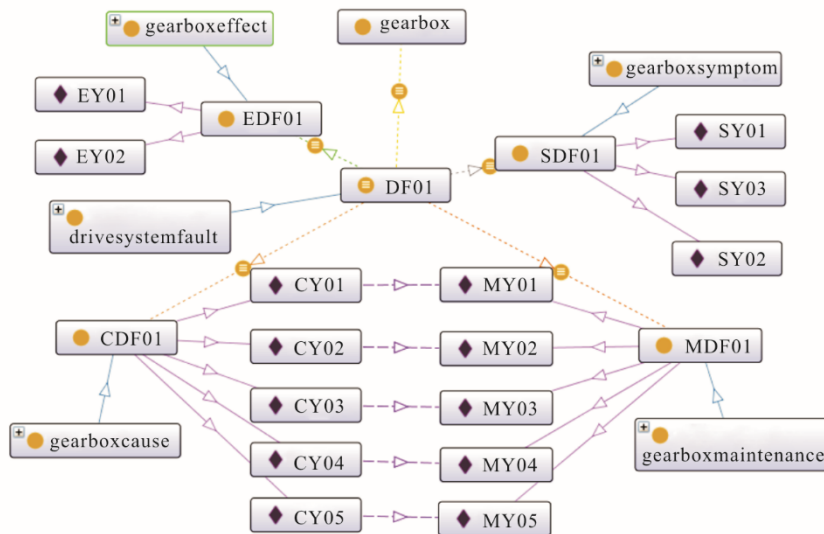


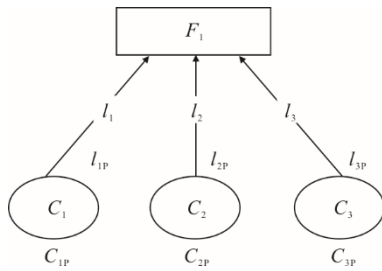
图 8 故障 DF01 知识的本体化展示

Fig.8 Ontology display of DF01's fault knowledge

4.3 风电机组故障知识推理

以某次齿轮箱高速轴超温故障为例说明该知识框架在风电机组故障诊断与检修维护工作中应用的有效性。机组在 2022 年 5 月 15 日的正常运行过程中, SCADA 系统监测出齿轮箱高速轴温度超出阈值后报警, 最终导致机组停机。其中, 报警阈值是由机组正常运行的历史数据经聚类算法、多元高斯混合模型等方法确认的全工况下参数基准区间。故障发生时, 齿轮箱高速轴前端测点温度及后端测点监测温度均超过 80 °C, 根据高速轴前端超温和后端超温 2 个异常事件确定故障征兆集合 SY={SY01、SY02}, 从而触发基于规则的相关性查询。采用 SPARQL 查询故障征兆属于何种故障模式, 并在确定故障模式之后罗列出该故障的原因及相应的维护措施。查询语句为: SELECT ? fault ? cause ? maintenance WHERE { ? fault :has Symptom ? symptom1 . ? fault :has Symptom ? symptom2 . ? symptom1 rdfs: label 'SY02' . ? symptom2 rdfs: label 'SY03' . ? fault :has Cause ? cause . ? fault :has Maintenance ? maintenance . }。

由于高速轴前、后端温度超过报警阈值 20% 以内且无异常波动, 润滑油入口油温正常, 在初步排查过程中根据后台指标类故障原因判别方法直接排除故障原因 CY04、CY05, 明确故障原因备选合集 CY={CY01,CY02,CY03}, 需要对具体故障原因序列进行推理确认, 借助本体中的对象属性及数据属性自动构建 DY01 故障因果图模型, 具体如图 9 所示。



F_1 —故障 DF01; C_1 —故障原因 CY01;
 C_2 —故障原因 CY02; C_3 —故障原因 CY03。

图 9 故障 DF01 因果图模型
Fig.9 Cause and effect diagram model of DF01

本体知识库中, 数据属性记录了用来表示各故障原因对故障发生影响程度的因果强度, 以及用来表示以往同类机组该故障出现时各故障原因发生概率的先验概率, 以 SPARQL 中对各故障原因的数据属性查询结果为依据, 确认各原因的先验概率及因果强度。 C_1 的先验概率 $C_{1P}=0.3$, C_1 与 F_1 的因果强度 $I_{1P}=0.9$; C_2 的先验概率 $C_{2P}=0.1$, C_2 与 F_1 的因果强度 $I_{2P}=0.5$; C_3 的先验概率 $C_{3P}=0.6$, C_3 与 F_1 的因果强度 $I_{3P}=0.7$ 。

因此, 故障 DF01 的最小割集布尔表达式见式(1), 不变化最终割集见式(2)。

$$F_1 = C_1 I_1 \cup C_2 I_2 \cup C_3 I_3 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= C_1 I_1 + \overline{C_1} I_1 (C_2 I_2 \cup C_3 I_3) = \\ &= C_1 I_1 + (\overline{C_1} \cup \overline{I_1})(C_2 I_2 + \overline{C_2} \overline{I_2} C_3 I_3) = \\ &= C_1 I_1 + (\overline{C_1} + C_1 \overline{I_1}) [C_2 I_2 + (\overline{C_2} + C_2 \overline{I_2}) C_3 I_3] = \\ &= C_1 I_1 + \overline{C_1} C_2 I_2 + \overline{C_1} \overline{C_2} C_3 I_3 + \overline{C_1} C_2 \overline{I_2} C_3 I_3 + \\ &= C_1 I_1 \overline{C_2} \overline{I_2} + C_1 I_1 \overline{C_2} C_3 I_3 + C_1 I_1 C_2 \overline{I_2} C_3 I_3 \end{aligned} \quad (2)$$

根据式(2)计算出故障 DF01 发生的概率:

$$\begin{aligned} P(F_1) &= C_{1P} C_{1P} I_{1P} + \overline{C_{1P}} C_{2P} I_{2P} + \overline{C_{1P}} \overline{C_{2P}} C_{3P} I_{3P} + \\ &= \overline{C_{1P}} C_{2P} \overline{I_{2P}} C_{3P} I_{3P} + C_{1P} \overline{I_{1P}} C_{2P} I_{2P} + \\ &= C_{1P} \overline{I_{1P}} \overline{C_{2P}} C_{3P} I_{3P} + C_{1P} \overline{I_{1P}} C_{2P} \overline{I_{2P}} C_{3P} I_{3P} = \\ &= 0.59777 \end{aligned} \quad (3)$$

故障原因为 C_1 时, $C_1 F_1$ 和 $P(C_1 F_1)$ 可由式(4)、式(5)计算。

$$\begin{aligned} C_1 F_1 &= C_1 I_1 + C_1 \overline{I_1} C_2 I_2 + C_1 \overline{I_1} \overline{C_2} C_3 I_3 + \\ &= C_1 I_1 \overline{C_2} \overline{I_2} C_3 I_3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P(C_1 F_1) &= C_{1P} \overline{I_{1P}} C_{2P} I_{2P} + C_{1P} \overline{I_{1P}} \overline{C_{2P}} C_{3P} I_{3P} + \\ &= C_{1P} \overline{I_{1P}} C_{2P} \overline{I_{2P}} C_{3P} I_{3P} + C_{1P} I_{1P} = 0.28347 \end{aligned} \quad (5)$$

由式(3)、式(5)可求取故障 C_1 发生的概率为:

$$P(C_1 | F_1) = \frac{P(C_1 F_1)}{P(F_1)} = \frac{0.28347}{0.59777} = 0.474 \quad (6)$$

同理, 故障发生时故障原因 C_2 的后验概率计算见式(7), 故障原因 C_3 的后验概率计算见式(8):

$$P(C_2 | F_1) = \frac{P(C_2 F_1)}{P(F_1)} = 0.132 \quad (7)$$

$$P(C_3 | F_1) = \frac{P(C_3 F_1)}{P(F_1)} = 0.795 \quad (8)$$

计算可知, $P(C_3 | F_1) > P(C_1 | F_1) > P(C_2 | F_1)$ 。因此, 根据后验概率的高低, 给出故障原因排查及维护措施序列 CY-MY={CY03-MY03,CY01-MY01,CY02-MY02}。经风场检修人员核查, 齿轮箱内部齿面有损伤, 且检查过程中油泵、过滤器等设备均未出现故障, 测温模块更换后也未能消缺, 因此可以推断齿轮箱齿面磨损是本次齿轮箱高速轴超温故障的原因, 根据本次故障消缺记录更新本体知识库中先验概率、因果强度等相关知识。

5 结 论

1) 结合 FMEA 和 FTA 的故障知识获取方法,

建立了故障树,形成了故障链条,展现了各故障之间的关联关系,完整梳理出了风电机组相关设备的故障知识,完成了多故障耦合情况下的综合分析获取。

2) 本体建模方法将非结构化的故障诊断与检修维护知识结构化地表达出来,相比传统方法,基于语义网络的风电机组故障知识库在知识表达、推理及管理方面都更加快捷有效。

3) 借助本体自定义规则查询方法和因果图模型模拟专家解决复杂故障问题的过程,完成了故障模式的快速定位,实现了故障原因的自动化诊断推理工作,基于风机运行实际情况的因果模型概率赋值方法区别于其他“黑匣子”算法,具有一定的可解释性。

4) 本文提出的知识获取、表达与推理方法具有较强的可推广性。其中,知识获取与表达方法可以直接移植到其他型号的风电机组上;在推理方面,由于因果推理模型的先验概率及因果强度确定是基于机组实际情况的,因此该方法同样适用于其他型号的风电机组。

5) 本文的故障知识单一来源于对系统设备的机理分析,后续工作中应结合机组海量运行数据,以及每台机组自身的设备情况与运行工况,从数据中挖掘、获取知识,丰富故障知识图谱,提高知识对故障的识别诊断支撑能力。

[参考文献]

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布2021年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2022-01-26)[2022-05-05]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm. National Energy Administration. The National Energy Administration released the statistical data of the national power industry in 2021[EB/OL]. (2022-01-26)[2022-05-05]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [2] 刘承东. T公司风电场降本增效精益管理对策研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 5. LIU Chengdong. Research on learn management countermeasures of reducing cost and increasing efficiency in wind farm of T company[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 5.
- [3] 国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. (2015-05-19)[2022-05-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm. The State Council. Notice of the State Council on printing and distributing made in China 2025[EB/OL]. (2015-05-19)[2022-05-05]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [4] PEARL J, MACKENZIE D. The book of why: the new science of cause and effect[J]. Science, 2018, 361(6405): 855.
- [5] CHOUDHARY A K, TIWARI M K, HARDING J A. Data mining in manufacturing: a review based on the kind of knowledge[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2009, 20(5): 501-521.
- [6] 文振华. 智能诊断专家系统的知识获取方法研究及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 16. WEN Zhenhua. Research and application of knowledge acquirement methods for intelligent diagnosis expert system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006: 16.
- [7] 王小华, 荣命哲, 吴翊, 等. 高压断路器故障诊断专家系统中快速诊断及新知识获取方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 95-99. WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, WU Yi, et al. Method of quick fault diagnosis and new knowledge obtainment for high voltage circuit breaker expert system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 95-99.
- [8] 王晓垠. 基于神经网络和专家系统的智能故障诊断系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2005: 18. WANG Xiaoyin. The research of intelligent fault diagnosis system based on expert system and neural network[D]. Nanjing: Southeast University, 2005: 18.
- [9] 何成兵, 顾煜炯, 邢诚. 基于FMEA法的风力发电机组故障模式分析[J]. 可再生能源, 2011, 29(3): 120-126. HE Chengbing, GU Yujiong, XING Cheng. Failure mode analysis of wind turbines based on FMEA method[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(3): 120-126.
- [10] 彭华亮, 沈暑龙, 李军, 等. 基于故障树的故障诊断专家系统设计[J]. 控制工程, 2019, 26(3): 584-588. PENG Hualiang, SHEN Shulong, LI Jun, et al. Design of diagnosis expert system for launch vehicles based on FTA[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(3): 584-588.
- [11] 刘培奇. 新一代专家系统开发技术及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 24. LIU Peiqi. The developing technology and application of new generation expert system[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 24.
- [12] YANG L, CORMICAN K, YU M. Ontology-based systems engineering: a state-of-the-art review[J]. Computers in Industry, 2019, 111: 148-171.
- [13] DIMITROVA V, MEHMOOD M O, THAKKER D, et al. An ontological approach for pathology assessment and diagnosis of tunnels[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 90: 1-18.
- [14] NUÑEZ D L, BORSATO M. OntoProg: an ontology-based model for implementing prognostics health management in mechanical machines[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 38: 746-759.
- [15] ZHOU Q, YAN P, YANG X. Research on a knowledge modelling methodology for fault diagnosis of machine tools based on formal semantics[J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 32: 92-112.
- [16] CHEN R, ZHOU Z D, LIU Q, et al. Knowledge modeling of fault diagnosis for rotating machinery based on ontology[C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics. Cambridge, 2015: 1050-1055.
- [17] 顾煜炯. 发电设备状态维修理论与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 19. GU Yujiong. Theory and technology of condition based maintenance for power generation equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 19.
- [18] SMITH M K, WELTY C, MCGUINNESS D L. OWL web ontology language guide[M/OL]. (2004-02-10)[2022-05-05]. <http://www.w3.org/TR/owl-guide/>.

(责任编辑 李园)