

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.020

柔直换流阀冷却系统动设备故障诊断图形化规则推理 系统研究与开发

刘 官¹, 杨 勇², 高仕龙², 张文博¹, 邵珠柯¹, 袁洪涛¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 针对基于机器学习需要大量的训练数据,且模型的可解释性较差的问题,文中将规则推理与图形化界面相结合,以提高故障诊断系统的可理解性和易用性,通过分层和图形化的表示,大大降低了规则制定的复杂性和难度。特别是对模糊数学运算的支持,使得规则能够更加灵活地适应各种情况,提高了故障诊断的准确性和可靠性。通过现场应用验证了文中所提方法的效性,并可有效提高现场人员对故障诊断规则的理解和制定能力,从而提升柔性直流输电冷却系统动设备的运行效率 and 安全性。

关键词: 柔性直流输电; 冷却系统动设备; 故障诊断; 规则推理

Research and Development of a Graphical Rule-based Reasoning System for Fault Diagnosis of Dynamic Equipment in the Cooling System of VSC-HVDC

LIU Guan¹, YANG Yong², GAO Shilong², ZHANG Wenbo¹, SHAO Zhuke¹, YUAN Hongtao¹

(1. Xuji Group Corporation, Henan Xuchang 461000, China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In response to the issues associated with machine learning, such as the requirement for a substantial amount of training data and the relatively poor interpretability of models, this paper integrates rule-based reasoning with a graphical user interface to enhance the comprehensibility and usability of the fault diagnosis system. By employing a hierarchical and graphical representation, the complexity and difficulty of rule formulation are significantly reduced. Particularly, the support for fuzzy mathematical operations allows the rules to adapt more flexibly to various situations, thereby improving the accuracy and reliability of fault diagnosis. Field applications have demonstrated the effectiveness of the methods proposed in this paper, while also effectively enhancing the understanding and formulation capabilities of on-site personnel regarding fault diagnosis rules, thus improving the operational efficiency and safety of the dynamic equipment in the cooling systems of VSC-HVDC.

Key words: VSC-HVDC; cooling system dynamic equipment; fault diagnosis; rule-based reasoning

0 引言

直流输电技术作为当今世界电力系统发展的重要方向,对于实现远距离、大容量的电力输送具有显著优势^[1-3]。换流阀作为直流输电系统的核心组成部分,其稳定性和可靠性直接关系到电网的安全运行^[4-6]。在换流站中,冷却系统负责维持站内设备的正

常工作温度,是保障设备稳定运行的关键环节^[7-10]。然而,动设备作为冷却系统中的重要部分,其故障发生频率高,且故障类型复杂多变,给故障诊断和维护带来了巨大的挑战。

人工智能技术在故障诊断领域的应用已经取得了显著的进展。Smith和Wang等提出了一种基于因果学习和图神经网络的故障诊断方法,该方法通

收稿日期:2024-05-18; 修回日期:2024-07-25

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目资助(5200-202356142A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5200-202356142A-1-1-ZN)。

过将工业系统的组件和它们的相互作用表示为图中的节点和边,有效地识别了工业系统的运行状况。这种方法特别适用于那些组件间存在复杂相互作用的系统^[11]。此外,文成林等总结了深度学习模型在工业系统故障诊断中的应用,强调了深度学习在处理大量数据和识别复杂模式方面的优势。换流阀作为电力系统的关键组成部分,其稳定运行对电网的安全性至关重要^[12]。李刚等针对柔性直流输电的故障诊断问题,提出了一种基于数据融合和D-S证据理论的诊断模型。该模型通过数据层融合、特征层融合以及决策层融合的三层结构,有效地提高了故障诊断的准确性^[13]。此外,裴岳等人聚焦于特高压直流输电系统换流站故障过电压问题,探讨了过电压产生的影响、避雷器配置以及磁控电抗器的设置,为柔性直流输电系统的稳定运行提供了重要的技术支持^[14]。

综合上述研究,可以看到人工智能技术,尤其是深度学习和图神经网络,在故障诊断领域的应用前景广阔。这些技术不仅能够处理复杂的数据关系,还能够提供更准确的故障预测和诊断^[15-17]。然而,尽管取得了一定的进展,特高压换流站故障诊断仍然面临诸多挑战,特别是如何以易于理解的方式帮助现场运维人员进行故障诊断工作,并沉淀现场运维人员的经验是值得研究探讨的重点^[18]。

文中针对上述问题,研究一种支持模糊数学运算支持的图形化规则表方法,采用层次结构表示,并提出图形化规则表示模型,同时,为适应推理中的不确定性,在逻辑运算中支持模糊数学运算。在上述基础上,给出推理算法的详细实现过程,最后利用现场数据检测规则的有效性。

1 支持模糊数学运算支持的图形化规则表示方法研究

1.1 规则的层次结构

设备诊断的逻辑判断遵循“证据→逻辑推理→结论”的流程。其中,证据基于收集的数据或观察到的现象,而逻辑推理则是对这些证据的可信度进行评估,从而得出结论。例如,特高压换流站冷却系统水泵不平衡的判断规则为:泵径向振动1倍频幅值大于2倍的正常幅值时或者泵径向振动1倍频幅值小于2倍的正常幅值但大于1倍正常幅值,且泵径向振动2倍频幅值小于0.9倍泵径向振动1倍频幅,且泵径向振动3倍频幅小于1.3倍泵径向振动

1倍频幅,且泵轴向振动2倍频幅值小于轴向振动1倍频幅值。

因此,文中将这一逻辑思考流程图形化表示,既可让人更容易接受、理解和编辑,又方便计算机实现。此外,考虑到设备诊断过程中,涉及数学运算、逻辑运算等,而层次结构作为一种管理复杂信息的有效方法,通过分解信息为多个层级来展现对象间的层级关系。据此,文中提出了一种将诊断规则推理过程分为4个层次的框架:输入层、运算层、逻辑层和结论层,见图1。其中,输入层:负责从多个测点搜集特征数据。如常见振动特征有效值、峰峰值等,为之后的推理提供必要的基础信息。运算层:特征数据将通过一系列函数或数学运算进行更深入的处理。运算可能包括基本的加减乘除,也可能涉及更复杂的数学函数,以适应各种规则的需求。逻辑层:作为规则制定的核心,逻辑层根据前两层的结果进行逻辑推理。这可能包括比较、条件判断等逻辑操作,用以确定是否触发特定的规则。结论层:最终,结论层将逻辑层的结果综合起来,形成规则的最终结论。这些结论可以直接应用于故障诊断或其他决策制定过程。



图1 规则层次结构

Fig. 1 Rule hierarchy structure

这种分层方法不仅有助于清晰地组织和表述复杂的规则推理流程,而且使得非专业用户也能够进行理解 and 操作。

1.2 图形化规则的表示方法

有了上述层次化的规则结构,文中将层次结构中涉及的输入、算术运算、逻辑运算、结论抽象为图形化表达,则规则可用如下模型表示

$$rule = \{Nodes, Lines\} \quad (1)$$

式(1)中: *Nodes* 表示节点集合,具体对应为各层的输入数据、算术运算符、逻辑运算符、结论等; *Lines* 表示节点间的连线集合,对应节点间的关联关系。

上述模型中节点的表示模型为

$$Node = \{Connectors, PropertyDats\} \quad (2)$$

式(2)中: *Connectors* 表示节点的可连接点,用于

建立连线与节点的具体联系,由于算术或逻辑运算节点能识别与其关联节点所表示的数据含义;*PropertyDatas*表示节点的属性配置,用于配置节点的行为。

连线的表示模型为

$$\text{Line} = \{\text{FromNode}, \text{FromNodeConnector}, \text{ToNode}, \text{ToNodeConnector}, \text{Weight}\} \quad (3)$$

式(3)中:*FromNode*、*ToNode*表示连线所连接的节点;*FromNodeConnector*、*ToNodeConnector*表示对应节点的连接点;*Weight*表示权重,用于配置在节点间传递数据的重要程度。

通过上述规则的表示模型,则1.1节中的特高压换流站冷却系统水泵不平衡的判断规则部分可以见图2。

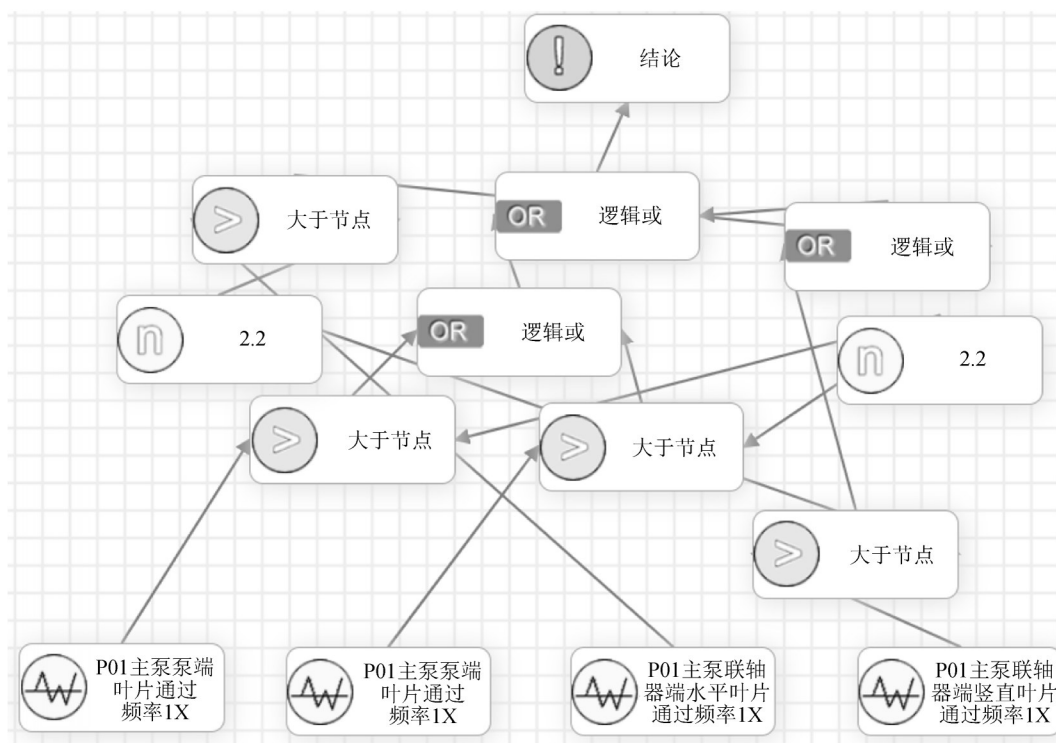


图2 基于图形化表示的离心泵端不平衡诊断部分规则

Fig. 2 Partial rules for diagnosing centrifugal pump end unbalance based on graphical representation

1.3 逻辑运算中的模糊数学运算

为了适应实际应用中的不确定性,文中在逻辑运算时引入了隶属度函数的支持,通过为逻辑判断指定相应的函数,使得规则能够更好地反映实际情况和专家经验。举例来说,如果机泵正常运行要求有效值为 5 m/s^2 以下, 5.1 、 15 m/s^2 显然是可以区分异常的严重程度的,因此,在逻辑运算中模糊数学支持有助于为实际诊断提供支撑。文中逻辑运算支持的隶属度函数见表1。

2 图形化规则推理算法

从图2可以看出,从数据结构角度分析规则,文中所述规则是一种森林的图形化表示。为了便于计算,需要明确提出一种计算方法,以检验、计算规

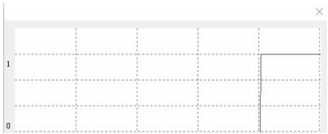
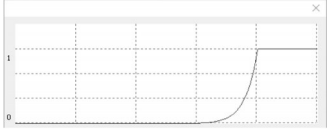
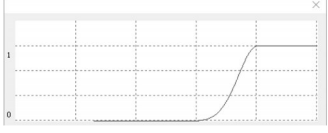
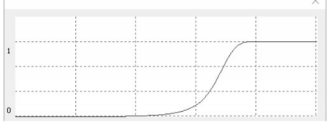
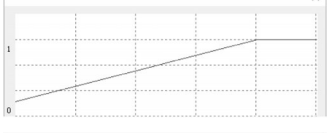
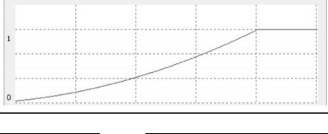
则。按1.1节所述,文中制定的规则是一种层次结构,运算结果从底层逐级向上传递,最后获得结论。因此,推理算法基本思路为:从输入节点开始计算节点运算或赋值,将其结果沿着连线向另一个关联节点传递,重复上述过程,直至结论节点被计算。此时,结论节点的结果就是规则推理的结果。具体算法见图3。

3 柔性直流输电冷却系统动设备故障诊断图形化编辑的关键实现

规则的图形化编辑是人机交互主要环节,根据文中设计的规则表示模型,其图形化编辑主要是实现对节点以及连线两模块的操作。特别是连线是关联建立节点的关联关系,且决定数据传导方向,即连线有方向性,其起点至终点是数据传递的方

表1 模糊函数列表

Table 1 List of fuzzy functions

名称	隶属度曲线	说明
矩形分布		隶属度函数在某个区间内取值为1,而在区间外取值为0。形状类似于矩形。适用于具有清晰界限的分类问题。
Γ 分布		Γ 分布是一种两个参数的分布,形状可以是偏斜的,具有一个长尾。它通常用于表示具有重尾分布的连续变量。常用于等待时间或寿命数据分析,以及在可靠性工程和生存分析中。
正态分布		正态分布是一种对称的钟形曲线,具有均值(μ)和标准差(σ)两个参数。用于表示连续变量,其值在均值附近的概率最高。
Cauchy分布		Cauchy分布是一种具有无边界的分布,没有均值和方差,具有一个尖锐的峰和长尾。适用于具有极端值或异常值的数据,以及在信号处理中用于模拟具有尖锐峰的信号。
梯形分布		隶属度函数在两个边界之间线性增加或减少,形状类似于梯形。适用于需要在一定范围内变化隶属度的模糊分类问题。
岭形分布		隶属度函数在某个点达到最大值,然后在两侧逐渐减少,形状类似于山岭。用于表示数据集中的局部极大值点,或者在优化问题中用于寻找全局最优解。
K次抛物线分布		这是一个二次或更高阶的多项式分布,其中K表示幂次。用于模拟具有抛物线形状的物理现象,如运动物体的轨迹。

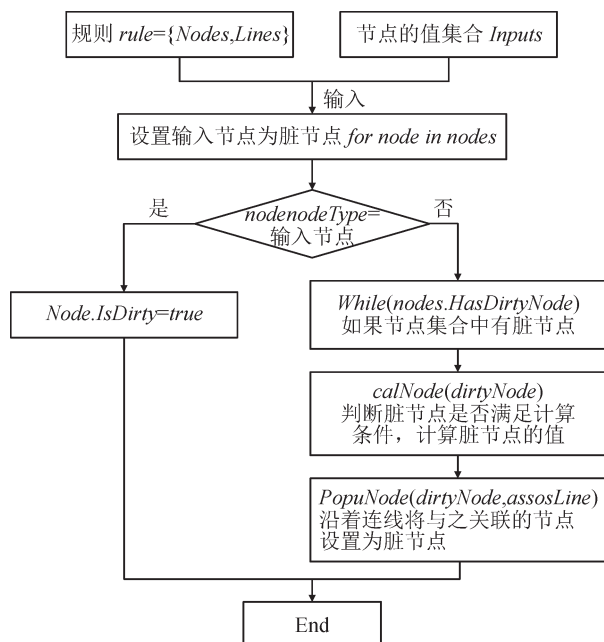


图3 图形化规则推理算法

Fig. 3 Graphical rule-based reasoning algorithm

向。因此,文中连线的绘制流程为:①初始化流程;②判断鼠标左键是否按下,如果没有,结束流程;③判断是否靠近节点的连接点,没有则结束流程;④记录此时的节点和其连接点做为连线的起始节点和起始连接点;⑤判断是否释放鼠标,如果是结束流程;⑥判断是否移动鼠标,如果没有,则回到步骤⑤;⑦擦除原有连线,并绘制新连线;⑧判断是否告诉节点的连接点,没有则回到步骤⑤;⑨记录此时的节点为连线的结束节点和结束连接点;⑩结束流程。其绘制流程图见图4。

规则在编辑完成后仅需按1.2节的模型存储并附加必要的图元信息即可。

其最终实现见图5。

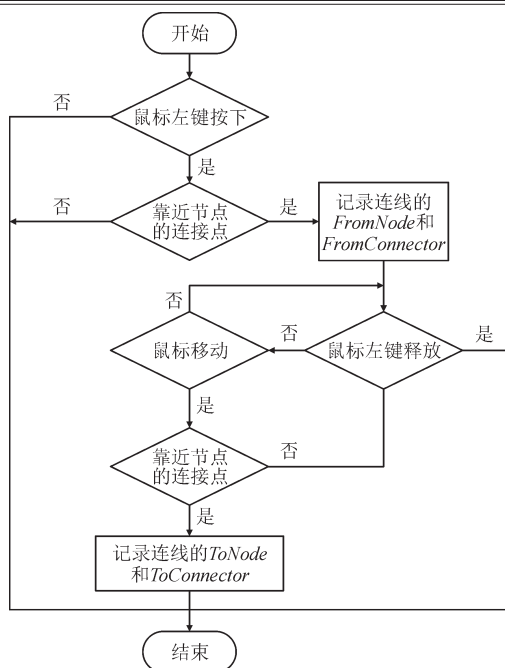


图4 连线动作的流程图

Fig. 4 Flowchart of connection action

4 现场应用

文中设计的图形化规则推理系统已成功应用于国内某柔性直流输电换流站冷却系统主泵机组的故障诊断中,现场机组见图6。离心主泵与异步电机通过联轴器直接连接,离心泵与异步电机通过螺栓固定在平台上。采用加速度传感器进行振动信号获取,振动测点布置见图7。

对单台套机泵系统,分别对涉及电机、离心泵、联轴器等部件,共设置了29条规则,见图8,涵盖主泵叶片轮故障、联轴器不对中、电机输入端不对中、主泵不平衡、电机不平衡、支座松动等故障。

运行过程中,成功捕获了泵端不平衡故障,避免了故障停机,此时机组测点3波形见图9,可以看出故障在数据中反映并不明显,证明了规则诊断系统的有效性。

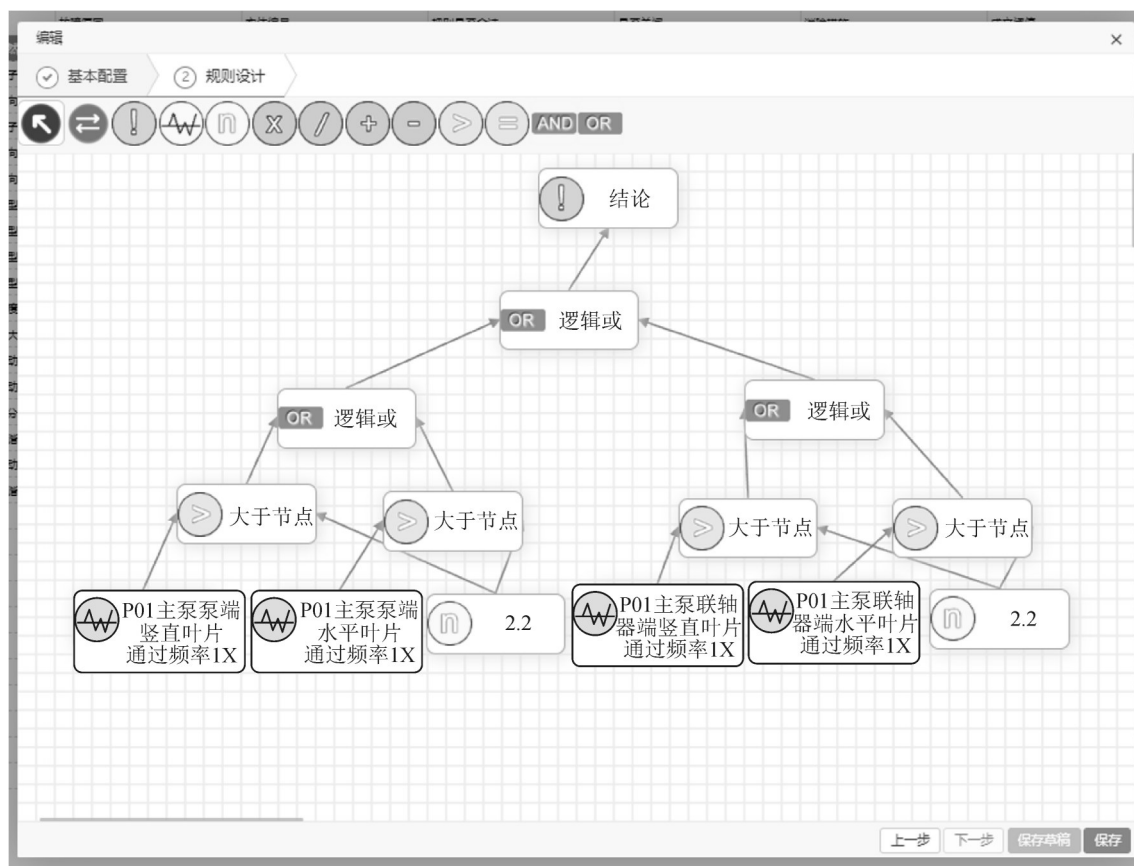


图5 规则图形编辑系统的实现

Fig. 5 Implementation of rule graph editing system

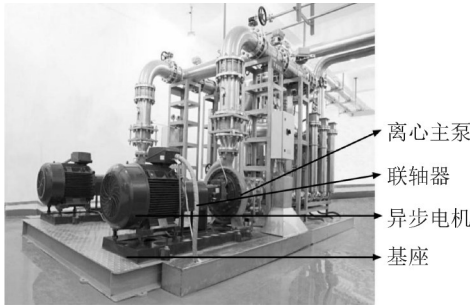
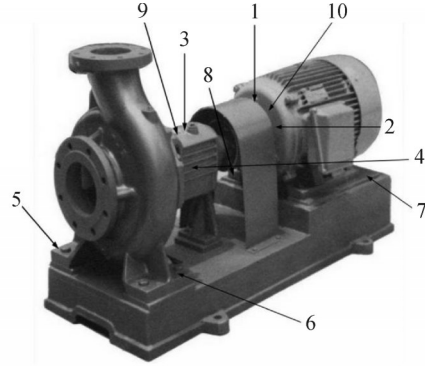


图6 特高压换流站冷却系统主泵机组

Fig. 6 Main pump unit of cooling system for ultra-high voltage converter station

5 结语

文中提出了一种清晰、结构化的基于图形界面的四层规则制定框架,通过将规则推理过程分为输入层、算术运算层、逻辑判断层和结论层。这种分层方法不仅有助于简化复杂的规则推理过程,而且便于用户理解和操作。同时,在逻辑运算中引入了模糊数学运算的支持,通过指定隶属度函数,使规则更好地适应实际应用中的不确定性和经验性,提



1—驱动侧电机出轴处轴承的水平振动测点;2—驱动侧电机出轴处轴承的垂直振动测点;3—水泵动力输入轴侧轴承的水平振动测点;4—水泵动力输入轴侧轴承的垂直振动测点;5、6—水泵底座上对角布置的振动测点;7、8—电机底座上对角布置的振动测点;9、10—电机和水泵的轴向振动测点。

图7 振动测点分布图

Fig. 7 Distribution diagram of vibration measuring points

高了故障诊断的准确性和可靠性。此外,通过提供用户友好的界面和工具,本研究的框架大大降低了现场人员在故障诊断规则制定和维护方面的难度。现场应用表明,图形化规则推理可成功捕捉冷却系统故障,本研究创新性和实用性为该领域的研究和实践带来了新的视角和工具。

规则列表									
规则名称	故障现象描述	故障原因	规则编号	规则逻辑	危害等级	处理措施	备注	成立概率	
1 P01主泵叶轮故障	振动值突然增大, 振动频率增大	叶轮损坏或松动	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	0	停机检修, 更换叶轮	需停机检修, 更换叶轮	0.5	
2 P01主泵联轴器不对中 (平行)	平行不对中时振动值为转子工频	联轴器不对中	e2ec1f7f-d851-4c25-9dc1-cd54...	1	0	调整联轴器, 重新对中	需停机调整, 重新对中	0.6	
3 P01主泵联轴器不对中 (角度)	角度不对中时振动值为转子工频	联轴器不对中	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	调整联轴器, 重新对中	需停机调整, 重新对中	0.6	
4 P01电机轴出轴不对中 (平行)	平行不对中时振动值为转子工频	联轴器不对中	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	调整联轴器, 重新对中	需停机调整, 重新对中	0.6	
5 P01电机轴出轴不对中 (角度) - 展	角度不对中时振动值为转子工频	联轴器不对中	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	调整联轴器, 重新对中	需停机调整, 重新对中	0.6	
6 P01电机轴出轴不对中 (角度) - 展	角度不对中时振动值为转子工频	联轴器不对中	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	调整联轴器, 重新对中	需停机调整, 重新对中	0.6	
7 P01主泵不平衡 (联轴器)	振动以低频为主, 波形为典型的正弦	联轴器不对中	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	停机检修, 更换联轴器	需停机检修, 更换联轴器	0.1	
8 P01主泵不平衡 (联轴器)	振动以低频为主, 波形为典型的正弦	联轴器不对中	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	停机检修, 更换联轴器	需停机检修, 更换联轴器	0.1	
9 P01主泵不平衡 (联轴器)	振动以低频为主, 波形为典型的正弦	联轴器不对中	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	停机检修, 更换联轴器	需停机检修, 更换联轴器	0.1	
10 P01主泵不平衡 (联轴器)	振动以低频为主, 波形为典型的正弦	联轴器不对中	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	停机检修, 更换联轴器	需停机检修, 更换联轴器	0.1	
11 P01主泵联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	e2ec1f7f-d851-4c25-9dc1-cd54...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.1	
12 P01主泵联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.1	
13 P01主泵联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.1	
14 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.1	
15 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
16 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	e2ec1f7f-d851-4c25-9dc1-cd54...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
17 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
18 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
19 P01联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	e2ec1f7f-d851-4c25-9dc1-cd54...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.6	
20 P01联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	e2ec1f7f-d851-4c25-9dc1-cd54...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.6	
21 P01联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.6	
22 P01联轴器故障 (联轴器)	联轴器振动值突然增大, 振动频率增大	联轴器损坏或松动	e69de2e9-384e-4468-b268-2f4f...	1	1	1.检查联轴器支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换联轴器	0.6	
23 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.5	
24 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.5	
25 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
26 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
27 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.6	
28 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	1	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	1	
29 P01电机轴出轴故障 (联轴器)	电机轴出轴振动产生许多谐波分量	电机轴出轴故障	34cd03dc-b0c0-4283-aacb-888...	1	0	1.检查电机轴支撑固定螺栓是否松动	需停机检查, 更换电机轴	0.5	

图8 规则列表

Fig. 8 Rule list

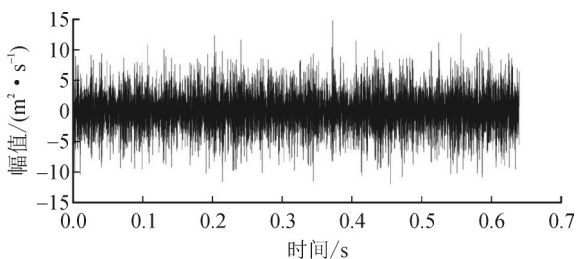


图9 加速度传感器幅值

Fig. 9 Acceleration sensor amplitude

参考文献:

- [1] 孙宇晗,程永峰,卢智成,等. 特高压换流站高压换流变及防火墙上设备减隔震分析研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 204-212.
- SUN Yuhan, CHENG Yongfeng, LU Zhicheng, et al. Analysis and research on vibration control and isolation of high voltage converter transformer and equipment on firewall in

- UHV converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):204-212.
- [2] 任冠雄, 曹枚根, 冯国栋, 等. 特高压换流站直流场复合绝缘子动力特性测试研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 77-84.
- REN Guanxiong, CAO Meigen, FENG Guodong, et al. Research on dynamic characteristic testing of DC field composite insulator in UHV converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2):77-84.
- [3] 程建登, 吴斌, 毛文俊, 等. 特高压换流站故障统计与反措[J]. 高压电器, 2018, 54(12):292-298.
- CHENG Jiandeng, WU Bin, MAO Wenjun, et al. Failure statistics and countermeasures of UHVDC converter stations[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12):292-298.
- [4] 毛艳, 谷琛, 魏杰, 等. ± 800 kV 特高压换流站阀厅金具防晕设计尺寸研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2):8-13.
- MAO Yan, GU Chen, WEI Jie, et al. Research on anti-corona design size of electric power fittings in ± 800 kV UHVDC converter station valve hall[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2):8-13.
- [5] 彭寅章, 王海云, 张维宁, 等. 特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护故障研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2):6-13.
- PENG Yinzhang, WANG Haiyun, ZHANG Weining, et al. Study on unbalance protection fault of AC filter capacitor bank of UHV converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2):6-13.
- [6] CHENYANG H, ENHU Z, KAI G, et al. Potential application of six Sigma method in operation and maintenance management of UHVDC converter station[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2022, 24(2): 151-162.
- [7] 刘禾雨, 姚进波. 一起特高压换流站阀冷系统补水故障处理与分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2022, 27(1):38-40.
- LIU Heyu, YAO Jinbo. Treatment and analysis of replenishment fault of valve cooling system in UHV converter station[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2022, 27(1):38-40.
- [8] CHEN P, LU D, MA L. Research on the design principle of the contact terminal in large DC current loop of ± 800 kV, 10 000 MW UHVDC converter station[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1408-1412.
- [9] LIU Cong, HAO Jian, LIAO Ruijin, et al. Magnetic flux leakage, eddy current loss and temperature distribution for large scale winding in UHVDC converter transformer based on equivalent 2D axisymmetric model[J]. Electrical Engineering, 2024, 106(1):711-725.
- [10] 李秀婧, 徐友, 张意, 等. 某直流换流站高压穿墙套管发热故障分析与处理[J]. 电工技术, 2022(3):47-49.
- LI Xiujing, XU You, ZHANG Yi, et al. Analysis and treatment of heating fault of high voltage through wall bushing in a DC converter station[J]. Electric Engineering, 2022(3):47-49.
- [11] WANG Hao, LIU Ruonan, DING S X, et al. Causal-trivial attention graph neural network for fault diagnosis of complex industrial processes[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2):1987-1996.
- [12] 文成林, 吕菲亚. 基于深度学习的故障诊断方法综述[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1):234-248.
- WEN Chenglin, LYU Feiya. Review on deep learning based fault diagnosis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(1):234-248.
- [13] 李刚, 于长海, 范辉, 等. 基于多级决策融合模型的电力变压器故障深度诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11):138-144.
- LI Gang, YU Changhai, FAN Hui, et al. Deep fault diagnosis of power transformer based on multilevel decision fusion model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):138-144.
- [14] 裴昱, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12):149-154.
- PEI Chan, LYU Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12):149-154.
- [15] HU Heng, LU Hao, SHI Ruijing, et al. A novel fault diagnosis method for key transmission sections based on nadam-optimized GRU neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2024(233): 110522.
- [16] 黄欣, 邹嘉嘉, 赵敏彤, 等. 基于DKG和IGCN的电力变压器故障诊断方法[J]. 广东电力, 2023, 36(11):146-156.
- HUANG Xin, HUAN Jiajia, ZHAO Mintong, et al. Fault diagnosis method of power transformer based on DKG and IGCN[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11):146-156.
- [17] 冯寅, 贾宏涛, 杨震强, 等. 基于CNN-LSTM的输电线路故障诊断方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 59-65.
- FENG Yin, JIA Hongtao, YANG Zhenqiang, et al. A study on the transmission line fault diagnosis method based on CNN-LSTM[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11):59-65.
- [18] 成功. 基于深度学习的换流站阀冷系统主循环泵的故障诊断研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- CHENG Gong. Research on fault diagnosis of main circulating pump in valve cooling system of converter station based on deep learning[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- 刘官(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事特高压直流输电冷却系统的设计与研究(E-mail: liuguan@xj.cee-group.cn)。