DOI:10.3969/j.issn.1001 - 4551.2023.12.017

活塞式氢气压缩机排气温度超限故障诊断方法*

韩宇恒[1],胡光忠[1,2*],夏 秋[1],王 平[1,2,3]
(1.四川轻化工大学 机械工程学院,四川 宜宾 644000;2.过程装备与控制工程四川省高校重点实验室,四川 宜宾 644000;
3.攀枝花市先进制造重点实验室,四川 攀枝花 617000)

摘要:针对活塞式氢气压缩机各级排气温度超限的故障难以用传统故障的二态性准确描述,以及目前未见能对该故障实施自诊断的故障诊断系统等问题,以 DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 型无油润滑变频活塞式氢气压缩机为研究对象,对相关零部件进行了重要度分析,并设计了故障自诊断系统。首先,对该故障搭建了模糊高木-关野(T-S)故障树模型,并利用基于贝叶斯网络(BN)的 T-S 故障树分析法对底事件进行了重要度分析,以确定薄弱环节和故障零部件诊断顺序;然后,利用模糊数表征了零部件的故障状态,对排气温度超限故障发生概率进行了预测;最后,设计了基于规则的故障诊断专家系统,并对实例进行了故障原因的推理排查。研究结果表明:基于规则的故障诊断专家系统在对现有故障数据进行分析后,其诊断结果与事实相符,说明该系统能够准确地诊断出故障原因,并进行自诊断;同时,基于 BN 的 T-S 故障树分析法,使该系统可对顶事件故障发生概率进行预测,为活塞式氢气压缩机故障诊断提供了一个可行方案。

关键词:故障诊断;活塞式氢气压缩机排气温度;T-S 故障树模型;专家系统;贝叶斯网络
中图分类号:TH457 **文献标识码**:A **文章编号**:1001 - 4551(2023)12 - 1973 - 10

Fault diagnosis method of exhaust temperature exceeding limit of piston hydrogen compressor

HAN Yuheng[1], HU Guangzhong[1,2], XIA Qiu[1], WANG Ping[1,2,3]
(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China; 2. Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control, Yibin 644000, China; 3. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Panzhihua City, Panzhihua 617000, China)

Abstract: In response to the difficulty in accurately describing the fault diagnosis of exhaust temperature exceeding the limit of a piston type hydrogen compressor using traditional two-state fault diagnosis at each stage, and the lack of application of a fault diagnosis system that could finish self-diagnose for diagnosing the exhaust temperature exceeding the limit, the DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 oil-free variable frequency piston type hydrogen compressor was taken as the research object, the importance of relevant components were analyzed, and a fault self-diagnosis system was designed. Firstly, the corresponding fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) fault tree analysis model was built for the fault, and the T-S fault tree analysis method based on Bayesian network was used to analyze the importance of the bottom event to determine the weak links and the diagnosis sequence of faulty parts. Then, the fuzzy number was used to represent the fault status of the parts, and it was brought into the T-S fault tree analysis algorithm based on Bayesian-network (BN) to predict the occurrence probability of the primary exhaust temperature overrun fault. Finally, a rule-based fault diagnosis expert system was designed to infer and troubleshoot the fault causes of the instance. The research results indicate that after analyzing existing fault data, the rule-based fault diagnosis expert system's diagnosis results are consistent with the facts, indicating that the system can accurately diagnose the cause of the fault and achieve self-diagnosis. At

收稿日期:2023 - 04 - 06
基金项目:自贡市重点研发计划项目(2021QYCX03);过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金资助项目(GK202205);攀枝花市先进制造技术重点实验室开放基金资助项目(2022XJZD01)
作者简介:韩宇恒(1995 -),男,四川眉山人,硕士研究生,主要从事机械工程方面的研究。E-mail:623614928@qq.com
通信联系人:胡光忠,男,博士,教授,硕士生导师。E-mail:hgzdhx@163.com

the same time, combining with the T-S fault tree analysis method based on BN, the system can also realize the prediction of the probability of top event failure, which provides a feasible scheme for the fault diagnosis of the piston hydrogen compressor.

Key words: fault diagnosis; exhaust temperature of piston hydrogen compressor; T-S fault tree model; expert system; Bayesian network(BN)

0 引 言

凭借其工作效率高、压力范围大等特点,活塞式氢气压缩机目前已被广泛应用于各大化工领域。由于氢气具有易燃、易爆等特性,故为保证设备运行的可靠性,活塞式氢气压缩机的排气温度不能超过 135 ℃。

刘明洪[1]在对活塞式氢气压缩机排气温度超高的原因进行分析时指出,其排气温度受实际压比、气缸或级间冷却、进气温度等因素的影响。董绍平等人[2-3]采用了参数在线监测的方法监控压缩机工作状态,对活塞式氢气压缩机各级排气温度超限故障进行了诊断;但该方法要求现场工作人员有一定的活塞式氢气压缩机故障诊断经验,且未达到设备对故障的自诊断和故障发生概率预测的目的。

高木-关野(T-S)故障树分析法是传统故障树分析法[4]与模糊算法的结合,其不仅解决了系统故障多态性和事件联系不确定性的问题,同时引入了模糊数代替零部件故障程度或者模糊故障率,以对顶事件故障发生的概率进行预测[5]。但复杂 T-S 故障树模型对底事件的定量计算较为繁琐,故而学者引入贝叶斯网络(BN)以简化计算。李鹏等人[6]利用基于 BN 的 T-S 故障树分析法,对起重机变幅机构进行了可靠性分析,找到了其故障的薄弱环节。陈丽娜等人[7]同样利用该方法对注水管道进行了失效概率分析,发现内检测周期等腐蚀因素是导致管道失效的重要因素。郑来等人[8]将该方法应用于道路交通安全领域,找到了引起重大交通事故的关键原因。陈东宁等人[9-10]提出了基于 BN 的 T-S 故障树分析法,同时证明该方法不仅简化了 T-S 故障树分析法的计算,同时也可以用于对底事件可靠性分析和顶事件故障发生率进行预测;但对于活塞式氢气压缩机各级排气温度超限的故障诊断,目前针对该故障诊断的方式主要是状态监测,且该故障模型复杂,用传统故障二态性来描述输入事件和输出事件间的关系不够准确,致使学者对该故障的故障诊断研究有限;故有必要在考虑故障多态的情况下,对该故障模型进行重要度分析,确定薄弱环节,并对顶事件故障发生概率进行预测。

因此,笔者以某公司生产的 DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 型号的无油润滑变频活塞式氢气压缩机为研究对象,搭建各级排气温度超限故障的 T-S 故障树模型,利用基于 BN 的 T-S 故障树算法,对底事件进行重要度分析和顶事件故障概率预测;然后,在故障发生后,利用专家系统对故障原因进行匹配推理;最后,对活塞式氢气压缩机各级排气温度超限进行故障自诊断。

1 基于 BN 的 T-S 故障树分析法

1.1 模糊数

T-S 故障树分析法引入模糊数来描述底事件故障状态的模糊故障概率,常用三角形、梯形等多种隶属度函数进行表征。

模糊数位于区间[0,1][5-10]上,常见的故障状态有无故障、中等故障、严重故障,分别用模糊数 0、0.5、1 来表示。

为不失一般性,笔者选择梯形隶属度函数作为模糊数的隶属度函数,如图 1 所示。

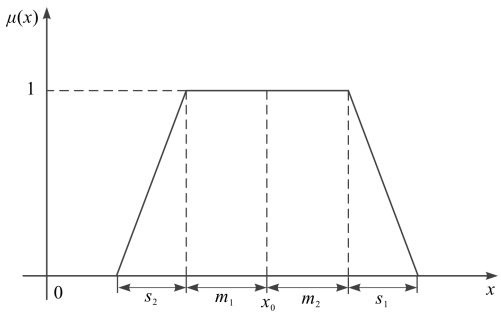

图 1 模糊数隶属函数

Fig. 1 Fuzzy number membership function

图 1 中,模糊数 x_0 的隶属度函数 $\mu(x)$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} 0 & ,0\leqslant x\leqslant x_0-m_1-s_1 \\ \dfrac{x-(x_0-m_1-s_1)}{m_1} & ,x_0-m_1-s_1\leqslant x\leqslant x_0+m_1 \\ 1 & ,x_0-m_1\leqslant x\leqslant x_0+m_2 \\ \dfrac{x_0+m_2+s_1-x}{s_1} & ,x_0+m_2\leqslant x\leqslant x_0+m_2+s_2 \\ 0 & ,x_0+m_2+s_2\leqslant x\leqslant 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:s_1,s_2 为模糊区域;m_1,m_2 为支撑半径。

1.2 T-S 故障树分析法

T-S 模糊模型由一些规则组成[11],规则由专家经验根据底事件故障程度的语言变量推理得到,用 If-Then 语句表达。

设底事件 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 为输入事件,输出事件为 $y_1,y_2,\cdots,y_n$。用 $x_1^{i_1},x_2^{i_2},\cdots,x_n^{i_n}$ 表示输入事件的故障程度,其中 $i_1=1,2,\cdots,k_1;i_2=1,2,\cdots,k_2;\cdots;i_n=1,2,\cdots,k_n$;用 $y_1^{j_1},y_2^{j_2},\cdots,y_n^{j_n}$ 表示输出事件的故障程度,其中 $j_1=1,2\cdots h_1;j_2=1,2\cdots h_2;\cdots;j_n=1,2\cdots h_n$,且它们的故障程度大小都属于[0,1];用 $l(l=1,2,3,\cdots,m)$ 表示规则,且 $m=k_1,k_2,k_3\cdots k_n$,则 T-S 模糊门规则表达如表 1 所示。

表 1　T-S 模糊门规则表

Table 1　T-S fuzzy gate rules table

规则序号	x_1	x_2	…	x_n	y_n			
					y_n^1	y_n^2	…	$y_n^{h_n}$
1	x_1^1	x_2^1	…	x_n^1	$P^1(y_n^1)$	$P^1(y_n^2)$	…	$P^1(y_n^{h_n})$
2	x_1^2	x_2^1	…	x_n^1	$P^2(y_n^1)$	$P^2(y_n^2)$	…	$P^2(y_n^{h_n})$
…	…	…	…	…	…	…	…	…
l	x_1^{i1}	x_2^{i2}	…	x_n^{in}	$P^l(y_n^1)$	$P^l(y_n^2)$	…	$P^l(y_n^{h_n})$

表 1 中:$P^1(y_n^1),P^1(y_n^2)\cdots P^1(y_n^{h_n});P^2(y_n^1),P^2(y_n^2)\cdots,P^2(y_n^{h_n});\cdots;P^l(y_n^1),P^l(y_n^2)\cdots,P^l(y_n^{h_n})$ 为 y_n 由规则推理出的在发生不同故障程度时的概率。

假设各个输入事件的不同故障程度的发生概率为 $P(x_1^{i_1}),P(x_2^{i_2}),\cdots,P(x_n^{i_n})$,则执行规则 l 的可能性为[10]31:

$$P_0^l = \prod_{j=1}^{n} P(x_j^{i_n}) \tag{2}$$

式中:$P(x_j^{i_n})$ 为第 l 条规则对应各个输入事件不同的故障程度的发生概率。

则输出事件发生的模糊可能性为:

$$\begin{cases} P(y_n^1) = \sum_{l=1}^{m} P_0^l P^l(y_n^1) \\ P(y_n^2) = \sum_{l=1}^{m} P_0^l P^l(y_n^2) \\ \cdots \\ P(y_n^{h_n}) = \sum_{l=1}^{m} P_0^l P^l(y_n^{h_n}) \end{cases} \tag{3}$$

式中:$P^l(y_n^1),P^l(y_n^2)\cdots,P^l(y_n^{h_n})$ 为第 l 条规则下,y_n 由规则推理出的在发生不同故障程度时的故障概率。

若不知底事件故障概率,而用[0,1]内的模糊数表示底事件 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 故障程度的模糊故障概率,则表达式如下[10]32:

$$\begin{cases} P(y_n^1) = \sum_{l=1}^{m} \beta_l^* P^l(y_n^1) \\ P(y_n^2) = \sum_{l=1}^{m} \beta_l^* P^l(y_n^2) \\ \cdots \\ P(y_n^{h_n}) = \sum_{l=1}^{m} \beta_l^* P^l(y_n^{h_n}) \end{cases} \tag{4}$$

$$\beta_l^* = \frac{\prod_{n=1}^{n} \mu_{x_n}^{i_j}(x_j^{i_n})}{\sum_{i=1}^{m} \prod_{n=1}^{n} \mu_{x_n}^{i_j}(x_n^{i_n})} \tag{5}$$

式中:$\mu_{x_n}^{i_j}(x_n^{i_n})$ 为在某条规则下,第 n 个底事件故障状态为 $x_n^{i_n}$ 时对应的模糊集隶属度大小;β_l^* 为这条规则的执行度。

1.3　T-S 故障树向 BN 的转换

BN 是一种有向无环图,由节点随机变量和代表节点关系的向量构成,其层次关系图与故障树相似,是一种有利于对不确定知识的表达和推理的概率图模型。

T-S 故障树向 BN 进行转换的方式,如图 2 所示[9]900。

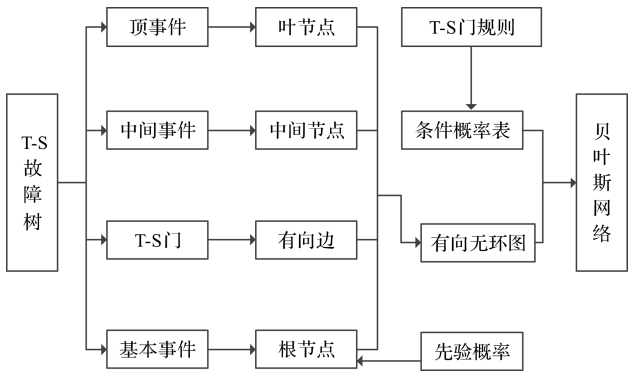

图 2　T-S 故障树向 BN 转换

Fig. 2　Transition from T-S fault tree analysis to Bayesian network

由图 2 可知:在转换过程中,T-S 故障树的顶事件、中间事件、T-S 门、基本事件分别向 BN 的叶节点、中间节点、有向边和根节点转换;然后,将 T-S 门规则写入条件概率,并将对应的先验概率写入根节点中,形成相应的 BN。

根据 T-S 故障树重要度算法[12-13],笔者给出基于 BN 的 T-S 故障树的概率重要度和关键重要度的计算公式[10]77。

概率重要度计算公式如下:

$$I_{T_Q}^{\Pr}(x_n^{i_n}) = P(T=Tq \mid x_n = x_n^{i_n}) - P(T=Tq \mid x_n = 0) \tag{6}$$

其中:$P(T=Tq \mid x_n = x_n^{i_n})$ 为底事件 x_n 的故障状态为 $x_n^{i_n}$ 时,顶事件 T 的故障状态为 T_q 的条件概率;而 $P(T=Tq \mid x_n=0)$ 表示底事件 x_n 的故障状态为 0 时,顶事件 T 的故障状态为 T_q 的条件概率,可由贝叶斯公式求得。

基本事件 x_n 对顶事件 T 的故障状态为 T_q 的 T-S 故障树概率重要度为:

$$I_{T_q}^{\mathrm{Pr}}(x_n) = \frac{1}{k_n - 1}\sum_{i_n=2}^{k'_n} I_{T_q}^{\mathrm{Pr}}(x_n^{i_n}) \tag{7}$$

式中：k_n 为 x_n 所有故障状态个数。

关键重要度算法如下：

$$I_{T_q}^{Cr}(x_n^{i_n}) = \frac{P(x_n^{i_n})I_{T_q}^{\mathrm{Pr}}(x_n^{i_n})}{P(T=T_q)} \tag{8}$$

式中：$P(T=Tq)$ 为顶事件 T 的故障状态为 T_q 的概率；$P(x_n^{i_n})$ 表示底事件 x_n 故障状态为 $x_n^{i_n}$ 的概率。

因此，基本事件 x_n 对顶事件 T 故障状态为 T_q 的 T-S 故障树关键重要度为：

$$I_{T_q}^{Cr}(x_n) = \frac{1}{k_n - 1}\sum_{i_n=2}^{k'_n} I_{T_q}^{Cr}(x_n^{i_n}) \tag{9}$$

式中：k_n 为 x_n 所有故障状态个数。

2 活塞式氢气压缩机各级排气温度超限故障诊断系统设计

2.1 T-S 故障树搭建

DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 型号的氢气压缩机的结构简图如图 3 所示。

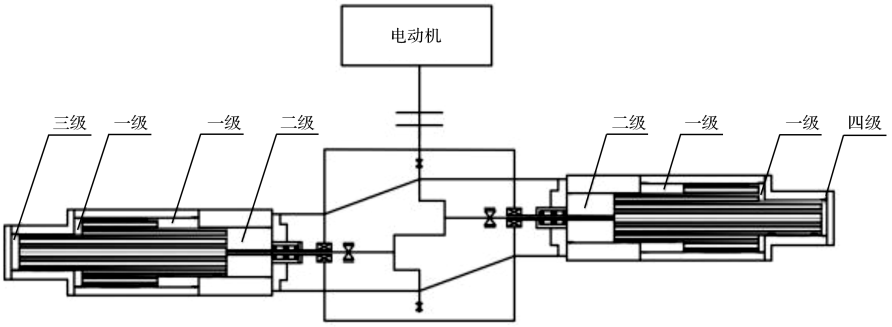

图 3 DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 型号氢气压缩机结构简图

Fig. 3 Structural diagram of DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 hydrogen compressor)

由图 3 可知：该型号压缩机含有四级压缩，故为减少篇幅，笔者以一级排气温度超限故障为例进行展示。

笔者根据专家经验以及设备结构，对一级排气温度超限进行 T-S 模糊故障树搭建，如图 4 所示。

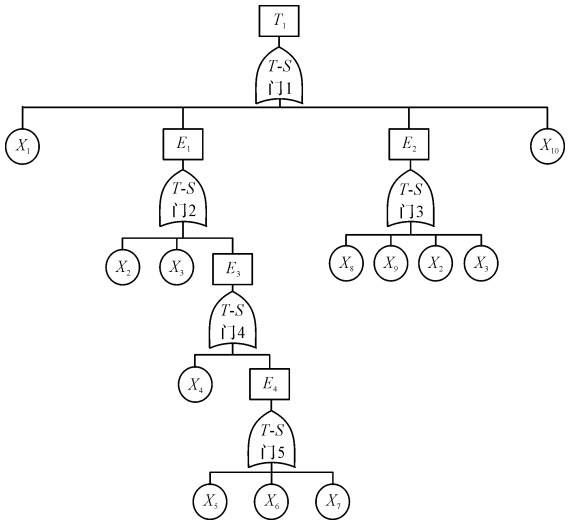

图 4 一级排气温度超高 T-S 故障树

Fig. 4 T-S fault tree analysis of ultra high exhaust temperature of the first stage

由图 4 可知：引起一级排气温度超限的因素有很多。$T1$ 为一级排气温度超高；$E1$ 为缸内气体受热高；$E2$ 为一级排气压力增大；$E3$ 为气缸过热；$E4$ 为一二级气缸冷却不完善；X_1 为一级进气阀故障；X_2 为二级活塞环损坏；X_3 为三级活塞环损坏；X_4 为一级活塞环摩擦严重；X_5 为水泵故障；X_6 为一二级气缸水路结垢堵塞；X_7 为一二级气缸水路冷却水泄露；X_8 为一二级气液分离器堵塞；X_9 为二级进气阀故障；X_{10} 为滤网堵塞；T-S 门 1 至 T-S 门 5 为对输入事件与输出事件的连接。

2.2 T-S 门规则建立

笔者以图 4 中的 T-S 门 5 和 T-S 门 1 为例进行展示，则 T-S 门 4 的规则如表 2 所示。

表 2 T-S 门 4 的规则

Table 2 Rules for T-S Gate 4

序号	X_5	X_6	X_7	$E3$		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.5	0.5	0
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.7	0.3	0
5	0	0.5	0.5	0.4	0.6	0
6	0	0.5	1	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0.5	0	0	1
9	0	1	1	0	0	1
…	…	…	…	…	…	..
24	1	0.5	1	0	0	1
25	1	1	0	0	0	1
26	1	1	0.5	0	0	1
27	1	1	1	0	0	1

T-S 门 1 的规则如表 3 所示。

表 3　T-S 门 1 的规则

Table 3　Rules for T-S gate 1

序号	X_1	X_{10}	$E1$	$E2$	$T1$		
					0	0.5	1
1	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0.5	0.1	0.7	0.2
3	0	0	0	1	0	0	1
4	0	0	0.5	0	0.4	0.6	0
5	0	0	0.5	0.5	0	0.7	0.3
6	0	0	0.5	1	0	0	1
7	0	0	1	0	0	0	1
8	0	0	1	0.5	0	0	1
…	…	…	…	…	…	…	…
77	1	1	0.5	0.5	0	0	1
78	1	1	0.5	1	0	0	1
79	1	1	1	0	0	0	1
80	1	1	1	0.5	0	0	1
81	1	1	1	1	0	0	1

表 2 和表 3 根据以下 3 点确定 T-S 门规则:

1)专家的工作经验;2)设备的历史数据;3)在多状态系统中,对与门和或门的输入输出表示方法的定义[14-15]。

2.3　底事件故障率获得

笔者采用专家调查法获得底事件故障率,根据调查人员的工作年限、工作岗位设定相应的比列权重,对调查得到的数据做线性加权处理如下[12]96:

$$f_i = \sum_j^m \omega_j b_{ij}, i = 1,2,\cdots,n \tag{10}$$

式中:ω_j 为比例权重,且有 $\sum_j^m \omega_j = 1$;b_{ij} 为调查数据。

具体权重分配如表 4 所示。

表 4　调查人员权重设置

Table 4　Weight setting of investigators

工作岗位	调查人数/个	平均工作年限/年	对应人数(职称)/个	权重
研发设计	5	20	3(高工)	0.35
研发设计	5	10	2(工程师)	0.15
售后维修	6	20	2(高工)	0.25
售后维修	6	13	4(维修人员)	0.1
设备装配	15	15	6(装配人员)	0.1
设备装配	15	6	9(装配人员)	0.05

表 4 中,笔者根据不同的工作岗位和平均工作年限来分配权重系数。

笔者对同种调查结果取均值计算,代入式(9)可得到一级排气温度超限故障树的底事件的故障率。

笔者假设底事件故障状态不为 0 时的故障率相同,如表 5 所示。

表 5　底事件故障率

Table 5　Bottom event failure rate

事件编号	事件名称	故障率(10^{-6})
X_1	一级进气阀故障	115
X_2	二级活塞环损坏	115
X_3	三级活塞环损坏	120
X_4	一级活塞环摩擦严重	115
X_5	水泵故障	28.5
X_6	一二级气缸水路结垢堵塞	19
X_7	一二级气缸水路冷却水泄露	11.4
X_8	一二级气液分离器堵塞	5.71
X_9	二级进气阀故障	120
X_{10}	滤网堵塞	38.5

表 5 中,各级气阀和活塞环的故障率相对较高,其他零部件故障率相对较低,与实际生产中气阀和活塞环为易损件的事实相符合。

2.4　基于故障树的专家系统搭建

专家系统是根据行业内的专业人士提供的知识经验来模拟专家决策过程,并对复杂问题进行推理和解释的一种计算机软件系统[16-17]。其能够很好地解决需要用不确定或不完全信息来描述的模糊问题[18]。运用专家系统对多源数据进行分析[19],便可找到造成当前故障的所有可能的原因[20]。

专家系统由 CLIPS 软件进行设计,其包括知识库、推理机、知识获取系统和输入输出系统[21]。

知识库是用来储存专家知识和已知规则的。其中,常用产生式规则表示如下:

$$If\cdots Then\cdots \tag{11}$$

知识的表达采用框架的模式,将知识定义为一个类,利用自定义模板和槽值(slot)对知识中的属性进行定义和约束,从而搭建知识库。

推理机由一条条规则组成,其根据事实对规则进行匹配,若规则前件部分匹配成功,则会执行规则的后件,后件执行结果会加入议程中,进行下一步推理。

活塞式压缩机排气温度计算公式如下:

$$T'_d = T_0 \varepsilon'^{\frac{n-1}{n}} \tag{12}$$

式中:T'_d 为排气终了温度,K;T_0 为进气终了温度,K;ε'为实际压比;n 为压缩过程指数。

因此,根据公司专家经验和历史数据,笔者讨论整理出该型号活塞式氢气压缩机各级排气温度超限的专家规则,并对一级排气温度超限的故障诊断专家规则进行展示,如表 6 所示。

表 6 中展示了基于专家经验的用于诊断一级排气温度超限的专家规则。其对应的判断标准为该压缩机工作时的报警值和停机值值域,如表 7 所示。

表 6 一级排气温度超限故障诊断专家规则

Table 6 Expert rules for fault diagnosis of primary exhaust temperature exceeding limits

编号	故障事件名称	监测参数	参数状态
X_1	一级进气阀故障	一级排气温度	升高
		一级进气压力	升高
		一级排气压力	降低
		一级进气温度	升高
X_2	二级活塞环损坏	一级排气温度	升高
		一级排气压力	升高
		二级排气压力	升高
X_3	三级活塞环损坏	一级排气温度	升高
		三级排气压力	降低
		一级排气压力	降低
X_4	一级活塞环摩擦严重	一级排气温度	升高
		一级进气温度	升高
X_5	水泵故障	一级排气温度	升高
		冷却水水泵出水压力	降低
X_6	一二级气缸水路因结垢等原因堵塞	一级排气温度	升高
		一级进气温度	升高
		二级进气温度	升高
		一二级气缸冷却水进水压力	升高或不变
		一二级气缸冷却水出水流量	降低
X_7	一二级气缸水路冷却水泄露	一级排气温度	升高
		一级进气温度	升高
		二级进气温度	升高
		一二级气缸冷却水进水压力	降低
		一二级气缸冷却水出水流量	降低
		冷却水回水压力	降低
X_8	一二级气液分离器堵塞	一级排气温度	升高
		二级进气压力	降低
		一级排气压力	升高
X_9	二级进气阀故障	一级排气温度	升高
		二级排气压力	降低
		二级进气温度	升高
		一级排气压力	升高
X_{10}	滤网堵塞	一级排气温度	升高
		一级进气压力	降低

表 7 中,所有参数来源于该设备的设计标准。

在 CLIPS 软件中,根据 T-S 故障树和底事件关键重要度大小顺序[21],笔者搭建了基于多叉树的推理模型。该模型利用 CLIPS 软件产生式规则的正向链推理方式及其独特的 Rete 模式匹配算法,在顶事件发生后,将监测到的故障参数传入专家系统中。专家系统会按照知识库中对应的规则进行比较推理,得到发生故障的具体零部件[22]。

表 7 监测参数值

Table 7 Monitoring parameter values

监测参数/单位	报警值		停机值	
	上限	下限	上限	上限
一级进气压力/kPa	50	20	80	5
一级排气压力/MPa	0.28	0.04	0.3	0.03
一级进气温度/℃	40	—	45	—
一级排气温度/℃	130	—	135	—
二级进气压力/MPa	0.28	0.04	0.3	0.03
二级排气压力/MPa	0.75	0.25	0.8	0.2
二级进气温度/℃	40	—	45	—
二级排气温度/℃	130	—	135	—
三级排气压力/MPa	1.5	0.75	1.55	0.7
三级排气温度/℃	130	—	135	—
四级排气温度/℃	130	—	135	—
冷却水水泵出水压力/MPa	0.6	0.25	0.7	0.2
一二级气缸冷却水进水压力/MPa	0.6	0.25	0.7	0.2
一二级气缸冷却水出水流量/(m^3/h)	—	0.8	—	0.6
冷却水总回水流量/(m^3/h)	—	18	—	16

3 实例分析

3.1 底事件重要度计算分析

笔者利用 MATLAB 对基于 BN 的 T-S 故障树算法进行编程,在工作表 1 中将每个 T-S 模糊门的规则都写入独立的 Excel 表中,在工作表 2 中写入该 T-S 模糊门输入事件的故障率,并由顶向下进行计算,对各级排气温度超限的 T-S 故障树底事件进行重要度分析。

笔者以一级排气温度超限故障为例进行展示,其 BN 如图 5 所示。

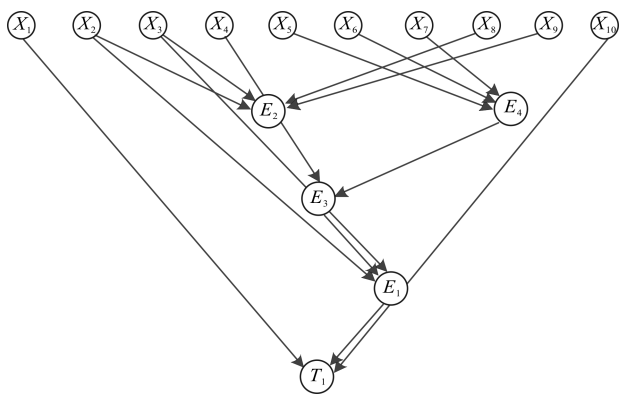

图 5 模糊故障树转换成 BN

Fig. 5 Fuzzy fault tree analysis converted to BN

图 5 中,一级排气温度超限的 T-S 故障树转换成

了对应 BN 的结果。

然后,笔者把专家调查法获得的底事件概率代入所编写的 MATLAB 程序中,计算得到:$P(T1=0.5)=0.000\,492\,1$,$P(T1=1)=0.000\,749\,0$。

根据式(6)和式(7),可得底事件不同状态引起顶事件不同状态的概率重要度如表 8 示。

表 8　底事件概率重要度

Table 8　Probability and importance of bottom events

底事件	$I^{Pr}_{T_q=0.5}(x_n)$			$I^{Pr}_{T_q=1}(x_n)$		
底事件状态	$x_n^{i_n}=0.5$	$x_n^{i_n}=1$	$x_n^{i_n}$ 概率重要度	$x_n^{i_n}=0.5$	$x_n^{i_n}=1$	$x_n^{i_n}$ 概率重要度
X_1	$6.996\,5\times10^{-1}$	$6.303\,6\times10^{-4}$	$3.501\,4\times10^{-1}$	0	1	$5.000\,0\times10^{-1}$
X_2	$8.955\,5\times10^{-1}$	$5.387\,5\times10^{-4}$	$4.480\,4\times10^{-1}$	0	1	$5.000\,0\times10^{-1}$
X_3	$8.955\,6\times10^{-1}$	$5.287\,6\times10^{-4}$	$4.480\,4\times10^{-1}$	0	1	$5.000\,0\times10^{-1}$
X_4	$4.468\,5\times10^{-4}$	$6.341\,0\times10^{-4}$	$5.404\,7\times10^{-4}$	$4.091\,7\times10^{-4}$	$6.929\,6\times10^{-4}$	$5.510\,6\times10^{-4}$
X_5	$5.959\,9\times10^{-4}$	$7.205\,2\times10^{-4}$	$6.582\,5\times10^{-4}$	$5.371\,3\times10^{-4}$	$8.354\,3\times10^{-4}$	$6.862\,8\times10^{-4}$
X_6	$5.907\,7\times10^{-4}$	$7.300\,0\times10^{-4}$	$6.603\,9\times10^{-4}$	$5.466\,1\times10^{-4}$	$8.449\,2\times10^{-4}$	$6.957\,6\times10^{-4}$
X_7	$5.983\,6\times10^{-4}$	$7.376\,0\times10^{-4}$	$6.679\,8\times10^{-4}$	$5.542\,0\times10^{-4}$	$8.525\,1\times10^{-4}$	$7.033\,5\times10^{-4}$
X_8	$6.396\,9\times10^{-1}$	$7.412\,3\times10^{-4}$	$3.202\,1\times10^{-1}$	0	1	$5.000\,0\times10^{-1}$
X_9	$6.397\,0\times10^{-1}$	$5.859\,0\times10^{-4}$	$3.201\,4\times10^{-1}$	0	1	$5.000\,0\times10^{-1}$
X_{10}	$7.994\,5\times10^{-1}$	$7.947\,4\times10^{-4}$	$4.001\,2\times10^{-1}$	0	1	$5.000\,0\times10^{-1}$

表 8 中,顶事件 T_1 故障状态为 0.5 时,底事件概率重要度排序为:

$X_2\geqslant X_3\geqslant X_{10}\geqslant X_1\geqslant X_8\geqslant X_9\geqslant X_7\geqslant X_6\geqslant X_5\geqslant X_7$。

顶事件 $T1$ 故障状态为 1 时,底事件概率重要度排序为:

$X_2\geqslant X_3\geqslant X_{10}\geqslant X_1\geqslant X_8\geqslant X_9\geqslant X_7\geqslant X_6\geqslant X_5\geqslant X_7$。

这说明引起一级排气温度超限的薄弱环节为 X_2(二级活塞环损坏)、X_1(一级进气阀)、X_3(三级活塞环损坏)、X_9(二级进气阀故障)、X_8(一二级气液分离器堵塞)以及 X_{10}(滤网堵塞),因此应对相关零部件进行定期检查或者更换保养[23-24]。

根据式(7)和式(8),笔者计算关键重要度结果如表 9 所示。

表 9　底事件关键重要度

Table 9　Key importance of bottom events

底事件	$I^{Cr}_{T_q=0.5}(x_n)$			$I^{Cr}_{T_q=1}(x_n)$		
底事件状态	$x_n^{i_n}=0.5$	$x_n^{i_n}=1$	$x_n^{i_n}$ 关键重要度	$x_n^{i_n}=0.5$	$x_n^{i_n}=1$	$x_n^{i_n}$ 关键重要度
X_1	$1.634\,9\times10^{-1}$	$1.473\,0\times10^{-4}$	$8.181\,7\times10^{-2}$	0	$1.535\,4\times10^{-1}$	$7.677\,1\times10^{-2}$
X_2	$2.092\,6\times10^{-1}$	$1.258\,9\times10^{-4}$	$1.046\,9\times10^{-1}$	0	$1.535\,4\times10^{-1}$	$7.677\,1\times10^{-2}$
X_3	$2.183\,6\times10^{-1}$	$1.289\,3\times10^{-4}$	$1.092\,5\times10^{-1}$	0	$1.602\,2\times10^{-1}$	$8.010\,9\times10^{-2}$
X_4	$1.044\,1\times10^{-4}$	$1.481\,7\times10^{-4}$	$1.262\,9\times10^{-4}$	$6.282\,5\times10^{-5}$	$1.064\,0\times10^{-4}$	$8.461\,1\times10^{-5}$
X_5	$3.451\,3\times10^{-5}$	$4.172\,5\times10^{-5}$	$3.811\,9\times10^{-5}$	$2.043\,9\times10^{-5}$	$3.178\,9\times10^{-5}$	$2.611\,4\times10^{-5}$
X_6	$2.280\,8\times10^{-5}$	$2.818\,3\times10^{-5}$	$2.549\,5\times10^{-5}$	$1.386\,6\times10^{-5}$	$2.143\,4\times10^{-5}$	$1.765\,0\times10^{-5}$
X_7	$1.386\,0\times10^{-5}$	$1.708\,6\times10^{-5}$	$1.547\,3\times10^{-5}$	$8.435\,4\times10^{-6}$	$1.297\,6\times10^{-5}$	$1.070\,6\times10^{-5}$
X_8	$7.421\,8\times10^{-3}$	$8.599\,9\times10^{-6}$	$3.715\,2\times10^{-3}$	0	$7.623\,7\times10^{-3}$	$3.811\,8\times10^{-3}$
X_9	$1.559\,8\times10^{-1}$	$1.428\,6\times10^{-4}$	$7.806\,0\times10^{-2}$	0	$1.602\,2\times10^{-1}$	$8.010\,9\times10^{-2}$
X_{10}	$6.254\,0\times10^{-2}$	$6.217\,1\times10^{-5}$	$3.130\,1\times10^{-2}$	0	$5.140\,3\times10^{-2}$	$2.570\,2\times10^{-2}$

表 9 中,顶事件 T_1 故障状态为 0.5 时,底事件关键重要度排序为:

$X_3\geqslant X_2\geqslant X_1\geqslant X_9\geqslant X_{10}\geqslant X_8\geqslant X_4\geqslant X_5\geqslant X_6\geqslant X_7$。

顶事件 $T1$ 故障状态为 1 时,底事件关键重要度排序为:

$X_3\geqslant X_9\geqslant X_1\geqslant X_2\geqslant X_{10}\geqslant X_8\geqslant X_4\geqslant X_5\geqslant X_6\geqslant X_7$。

这说明在出现一级排气温度超限时,可根据底事件关键重要度的排序来确定故障零部件诊断的顺序。

3.2　顶事件故障概率预测

以一级排气温度超限 T-S 故障树为例,设各个零部件的故障程度为:$X_1=0.1$,$X_2=0.12$,$X_3=0.24$,$X_4=0.1$,$X_5=0.1$,$X_6=0$,$X_7=0.2$,$X_8=0.06$,$X_9=0.18$,$X_{10}=0$。

笔者计算可得每个基本事件对应不同故障状态的隶属度,如表 10 所示。

表 10 基本事件对应不同故障状态的隶属度

Table 10 Membership degree of different fault states corresponding to elementary event

事件编号	故障状态		
	0	0.5	1
X_1	1	0	0
X_2	0.93	0.07	0
X_3	0.53	0.47	0
X_4	1	0	0
X_5	1	0	0
X_6	1	0	0
X_7	0.67	0.33	0
X_8	1	0	0
X_9	0.73	0.27	0
X_{10}	1	0	0

表 10 中,各个数据表示不同故障程度的底事件对应的隶属度。

笔者计算可得中间事件和顶事件各个故障状态预测的模糊故障率,如表 11 所示。

表 11 事件发生的模糊故障率

Table 11 Fuzzy failure rate of event occurrence

事件编号	故障状态		
	0	0.5	1
E_1	0.59	0.41	0
E_2	0.46	0.54	0.000 83
E_3	1	0	0
E_4	0.73	0.27	0
T_1	0.37	0.63	0.008 3

由表 11 可知:就算是基本事件发生轻微故障,也有可能会导致顶事件的故障发生。

3.3 故障诊断专家系统应用

现场试车时,笔者选择压缩系数与氢气相差不大的空气为压缩对象,以各参数停机值作为界限,来保证各管道、阀门等零部件在极端条件下的可靠性。

以四级排气温度超限为例,现有首次试车时的试车数据记录,如表 12 所示。

表 12 首次试车记录

Table 12 Record of first test run

时间	(表)压力/MPa									
11:00	进气	一级排气	二级排气	三级排气	四级排气	仪表空气	充氮压力	主轴油压	润滑油压	冷却水压
	0.03	0.1	0.3	0.82	2	0.64	–	0.7	0.72	0.2
	温度/℃									
11:00	一进	二进	三进	四进	一排	二排	三排	四排	送气温度	出水温度
	24	29	33	50	75	83	129	137	33	27
	部分其他监测参数									
11:00	三四级级间冷却水进水压力			三四级级间冷却水出水流量				冷却水回水流量		
	0.5 MPa			3 m^3/h				18 m^3/h		

表 12 中,笔者展示了部分用于诊断压缩机排气温度超限的参数,并省略了一部分正常参数。

从表 12 可知:四级排气温度超过了氢气压缩机排气温度的上限(135 ℃),因此,需对其进行故障诊断。

笔者将故障数据输入专家系统中进行故障诊断,其推理结果如图 6 所示。

现场人员按照图 6 诊断结果进行停机排查,发现三四级级间冷却器冷却水阀门未完全打开。

故障处理完毕后,笔者得到新的试车数据如表 13 所示。

由表 13 可知:将三四级级间冷却器冷却水阀门完全开启后,四级排气温度超限的故障现象消失了,说明此次故障诊断正确。

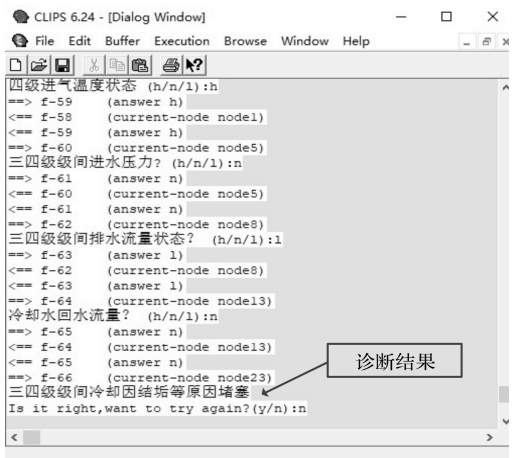

图 6 试车数据诊断结果

Fig. 6 Diagnosis results of test run data

表 13　后续试车记录

Table 13　Subsequent test run records

时间	(表)压力/MPa									
	进气	一级排气	二级排气	三级排气	四级排气	仪表空气	充氮压力	主轴油压	润滑油压	冷却水压
	0.03	0.1	0.3	0.82	2	0.64	- -	0.62	0.68	0.2
13:00	温度/℃									
	一进	二进	三进	四进	一排	二排	三排	四排	送气温度	出水温度
	23	30	33	41	77	86	127	125	33	27
…	…									
	(表)压力/MPa									
	进气	一级排气	二级排气	三级排气	四级排气	仪表空气	充氮压力	主轴油压	润滑油压	冷却水压
	0.032	0.09	0.3	0.79	1.93	0.59	- -	0.6	0.75	0.2
17:00	温度/℃									
	一进	二进	三进	四进	一排	二排	三排	四排	送气温度	出水温度
	24	30	33	38	72	82	127	122	33	27

4　结束语

笔者对某公司生产的 DW-(5.6-13)/(0.2-0.5)-20 型无油润滑变频活塞式氢气压缩机一级排气温度超限的故障进行了相关零部件重要度分析和故障自诊断系统的设计。

研究结果表明:

1)搭建了该故障的 T-S 故障树模型,利用基于 BN 的 T-S 故障树分析法对底事件进行了概率重要度和关键重要度分析,确定了引起一级排气温度超限的薄弱环节和故障诊断顺序;

2)利用模糊数表征了一级排气温度超限 T-S 故障树底事件的故障状态,计算得到了一级排气温度超限故障发生的预测概率;

3)利用 CLIPS 设计基于规则的故障诊断专家系统,将某次试车时的故障数据输入系统中进行了分析,得到了引起此次故障的原因,且该原因与事实相符,达到了设备对故障的自诊断目的。

笔者将继续研究专家系统知识获取方式,把神经网络、数字孪生技术等具备学习、预测能力的先进技术,与专家系统进行结合开发,达到自主获取专家系统知识的目的。

参考文献(References):

[1] 刘明洪. 新氢压缩机一级排气温度高的原因分析及措施[J]. 河南化工,2022,39(7):43-45.
LIU Ming-hong. Reason analysis and measures for high discharge temperature of the first stage of a new hydrogen compressor[J]. Henan Chemical Industry, 2022, 39(7): 43-45.

[2] 董绍平. 大型活塞式压缩机状态监测[J]. 石油化工设备技术,1999,19(4):51-53.
DONG Shao-ping. Condition monitoring of large piston compressors [J]. Petrochemical Equipment Technology, 1999,19(4):51-53.

[3] 卢志国. 往复式压缩机在线监测系统应用[J]. 石化技术,2022,29(2):243-244.
LU Zhi-guo. Application of online monitoring system for reciprocating compressors [J]. Petrochemical Technology, 2022,29(2):243-244.

[4] SONG H, ZHANG H Y, CHAN C W. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system[J]. Soft Computing,2009,13(1):31-40.

[5] 陈紫起. 基于故障树方法的柴油机可靠性研究[D]. 大连:大连理工大学能源与动力学院,2020.
CHEN Zi-qi. Research on Diesel Engine Reliability based on Fault Tree Analysis Method [D]. Dalian: School of Energy and Powe, Dalian University of Technology,2020.

[6] 李　鹏,徐格宁. 基于 BN 和 T-S 模糊故障树的起重机变幅机构可靠性评估[J]. 中国工程机械学报,2021,19(3):273-277,282.
LI Peng, XU Ge-ning. Reliability evaluation of crane luffing mechanism based on BN and T-S fuzzy fault tree analysis [J]. Journal of China Construction Machinery,2021,19(3): 273-277,282.

[7] 陈丽娜,齐光峰,韩　庆,等. 基于 T-S 模糊故障树和 BN 的注水管道失效概率计算方法研究[J]. 安全、健康和环境,2022,22(9):38-45.
CHEN Li-na, QI Guang-feng, HAN Qing, et al. Research on calculation method of failure probability of water injection pipeline based on T-S fuzzy fault tree analysis and Bayesian network[J]. Safety, Health and Environment,2022,22(9): 38-45.

[8] 郑　来,顾　鹏,卢　健. 基于 T-S 模糊故障树和 BN 的重特大交通事故成因分析[J]. 交通信息与安全,2021,39(4):43-51,59.
ZHENG Lai, GU Peng, LU Jian. Cause analysis of major traffic accidents based on T-S fuzzy fault tree analysis and Bayesian network[J]. Traffic Information and Safety,2021, 39(4):43-51,59.

[9] 陈东宁,姚成玉,党 振. 基于 T-S 模糊故障树和 BN 的多态液压系统可靠性分析[J]. 中国机械工程,2013,24(7):899-905.
CHEN Dong-ning, YAO Cheng-yu, DANG Zhen. Reliability analysis of polymorphic hydraulic system based on T-S fuzzy fault tree analysis and Bayesian network [J]. China Mechanical Engineering,2013,24(7):899-905.

[10] 姚成玉,陈东宁. 可靠性新技术丛书 T-S 故障树理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2020.
YAO Cheng-yu, CHEN Dong-ning. New Reliability Technology Series T-S Fault Tree Analysis Theory and its Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, December,2020.

[11] 李文锋,游庆和,廖 强,等. 基于 T-S 模糊 FTA 的远程故障诊断方法研究[J]. 控制工程,2018,25(9):1703-1708.
LI Wen-feng, YOU Qing-he, LIAO Qiang, et al. Research on remote fault diagnosis method based on T-S fuzzy FTA [J]. Control Engineering,2018,25(9):1703-1708.

[12] 张 亚,安晓红. 引信可靠性技术[M]. 北京:国防工业出版社,2016.
ZHANG Ya, AN Xiao-hong. Fuze Reliability Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2016.

[13] 胡广平. 民用飞机可靠性工程[M]. 上海:上海交通大学出版社,2019.
HU Guang-ping. Reliability Engineering of Civil Aircraft [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press,2019.

[14] BARLOW R E, WU A S. Coherent systems with multi-state components[J]. Mathematics of Operations Research, 1978,3(4):275-281.

[15] 陈 龙,黄宏伟. 软土盾构隧道施工期风险损失分析[J]. 地下空间与工程学报,2006,25(1):74-78.
CHEN Long, HUANG Hong-wei. Risk loss analysis of soft soil shield tunnel construction period [J]. Journal of Underground Space and Engineering,2006,25(1):74-78.

[16] 史蒂芬·卢奇,丹尼·科佩克. 人工智能[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2018.
STEPHEN L, DANNY K. Artificial Intelligence [M]. Second Edition. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press,2018.

[17] 胡 姗. 基于 FTA 地源热泵热水系统故障诊断专家系统研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2013.
HU Shan. Research on Fault Diagnosis Expert System of Hot Water System based on FTA Geothermal Heat Pump [D]. Changsha: School of Cioil Engimeering, Hunan University,2013.

[18] 姚华堂. 往复式压缩机故障诊断专家系统知识库构建与系统实现[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2004.
YAO Hua-tang. Construction and System Implementation of a Knowledge Base for Fault Diagnosis Expert System of Reciprocating Compressors [D]. Hangzhou: School of Hechanical Engimeering, Zhejiang University of Technology,2004.

[19] 张春生. 往复压缩机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 中国设备工程,2011,26(12):51-53.
ZHANG Chun-sheng. Overview of status monitoring and fault diagnosis technology for reciprocating compressors [J]. China Equipment Engineering, 2011, 26(12): 51-53.

[20] 胡杭健,石 坤,周云奕. 车用 LNG 气瓶绝热性能在线监测与评价方法[J]. 压力容器,2022,39(11):64-68,86.
HU Hang-jian, SHI Kun, ZHOU Yun-yi. Research on on-line health monitoring and evaluation system for vehicle low temperature insulated gas cylinders [J]. Pressure Vessel Technology,2022,39(11):64-68,86.

[21] 韩宏峰,冯 石,罗羿隆,等. 探索应用人工智能技术的专家系统 CLIPS[J]. 信息技术与信息化,2017,41(7):33-36.
HAN Hong-feng, FENG Shi, LUO Yi-long, et al. Exploring the expert system CLIPS for the application of artificial intelligence technology[J]. Information Technology and Informatization,2017,41(7):33-36.

[22] 张 芳. 基于 CLIPS 的专家系统应用技术研究[D]. 成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2015.
ZHANG Fang. Research on Application Technology of Expert System Based on CLIPS [D]. Chengdu: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronics Technology),2015.

[23] 薛金鑫,林家祥,谢慧钰. 螺杆压缩机排气管路参数对其振动特性的影响[J]. 机电工程技术,2022,51(2):11-15.
XUE Jin-xin, LIN Jia-xiang, XIE Hui-yu. The influence of exhaust pipeline parameters on the vibration characteristics of screw compressors [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2022,51(2):11-15.

[24] 胡小青,余 豹,严辉容,等. 基于 6σ 的 R290 冷媒热泵空调低温制热性能改善[J]. 机械制造,2021,59(8):88-92.
HU Xiao-qing, YU Bao, YAN Hui-rong, et al. Based on 6σ improvement of low-temperature heating performance of R290 refrigerant heat pump air conditioning [J]. Machinery,2021,59(8):88-92.

本文引用格式:

韩宇恒,胡光忠,夏 秋,等. 活塞式氢气压缩机排气温度超限故障诊断方法[J]. 机电工程,2023,40(12):1973 - 1982.

HAN Yuheng, HU Guangzhong, XIA Qiu, et al. Fault diagnosis method of exhaust temperature exceeding limit of piston hydrogen compressor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023,40(12):1973 - 1982.