

基于特征频点能量比的空压机喘振故障预警

刘磊, 刘均海, 彭保龙, 修苗苗

(山东交通学院 航运学院, 山东 威海 264200)

摘要: 随着自动化的发展, 空压机应用在多工序、多场景下, 对减少故障和预警提出了更高的要求; 论文介绍了空压机喘振故障实验环境和步骤, 采用层次分析法来优化喘振故障占权重大的指标, 提出一种基于特征频点能量比的喘振故障预警方法来得到振动传感器故障预警结果, 再融合优化指标预警结果来提高喘振故障预警准确率, 减少故障的发生; 通过实验验证: 特征频点能量比相比较传统预警方法更灵敏, 融合优化指标后相较于振动传感器根据特征频点能量比阈值预警 y_1 提高了 18.8%, y_2 提高了 7.7%。

关键词: 故障预警; 空压机; 特征频点能量比; 层次分析法; 喘振故障

Surge Fault Warning for Air Compressors Based on
Characteristic Frequency Energy Ratio

LIU Lei, LIU Junhai, PENG Baolong, XIU Miaomiao

(School of Navigation and Shipping, Shandong Jiaotong University, Weihai 264200, China)

Abstract: With the development of automation, air compressors are applied in multiple processes and scenarios, which puts forward higher requirements for reducing faults and early warning. This paper introduces the experimental environments and steps of air compressor surge faults, adopts analytic hierarchy process to optimize indicators with significant weight for surge faults, and proposes a surge fault early warning method based on the energy ratio of characteristic frequency points obtain the early warning results of vibration sensor faults, and then, integrates the early warning results of optimization indexes to improve the early warning accuracy of surge faults and reduce the occurrence of faults. Experimental results show that the characteristic frequency energy ratio of the proposed method is more sensitive than that of traditional early warning methods. After integrating optimization indexes, compared to vibration sensors, the threshold warning y_1 and y_2 based on the energy ratio of characteristic frequency points are increased by 18.8% and 7.7%.

Keywords: fault warning; air compressor; characteristic frequency energy ratio; analytic hierarchy process; surge fault

0 引言

空压机是工业领域必不可少的设备, 被广泛应用在船舶领域、气动工具等复杂恶劣的环境中, 空压机故障频发, 造成重大事故, 降低生产效率, 增加运维成本。空压机的喘振故障为典型频发故障, 它会导致设备熄火甚至叶片断裂。故研究喘振故障的预警诊断十分有必要。

随着人工智能的飞速发展, 对于设备故障诊断方法

有了新的要求, 许多智能化处理手段应用于空压机故障诊断中。例如, 文献 [1] 研究了实时监测振动速度均方根值的变化趋势可以指导该型循环海水泵的安全运行。文献 [2] 提出了一种基于振动图像和 TL 的深度全局子区域自适应网络来解决变工况下的智能诊断问题。文献 [3] 针对剥落故障的实际形式建立了含多齿剥落故障的斜齿轮副时变啮合刚度模型, 并通过有限元法验证了其有效性。文献 [4] 提出并验证了一种基于振动信号检测的液压盘式制动器故障诊断与判断方案。

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-01-08。

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR202112040200); 山东交通学院 2023 年校级研究生科技创新项目立项 (2023YK097)。

作者简介: 刘磊 (1997-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 刘均海 (1973-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师。

引用格式: 刘磊, 刘均海, 彭保龙, 等. 基于特征频点能量比的空压机喘振故障预警[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 9-15.

文献 [5] 提出了一种变转速工况下滚动轴承故障特征提取与增强的信号处理方法。文献 [6] 提出了一种基于深度学习 LSTM 网络结合深度置信网络的水轮机系统故障预测方法。文献 [7] 研究了导线支架的局部开裂现象, 揭示了结构失效的机理和原因。文献 [8] 提出一种多尺度约简聚类 (MRC) 方法用于机器故障的无监督诊断。文献 [9] 设计了一种基于信噪比增强和稀疏表示的故障特征增强模型, 有效地解决了安装位置有限和高温下振动测量性能有限造成的故障诊断问题。然而上述故障诊断方面忽略了两个问题: 1) 在实际应用中, 故障产生的振动信号包含大量的异常值和波动, 忽略对故障振动信号进行精准的判断, 且没有对故障进行预警; 2) 实际检测故障中, 只分析故障振动信号判断故障的准确率并不理想, 需故障振动信号结合其他表征指标一起进行判断, 来提高故障诊断准确率。

针对以上问题, 本文以空压机喘振故障为研究对象, 提出一种基于特征频点能量比的喘振故障方法来提高预警准确率, 首先, 通过振动传感器利用能量比的方法预警故障, 然后利用层次分析法给不同指标分配权重, 选取在喘振故障占权重大的指标和振动传感器一起进行预警故障, 以此来提高故障预警准确率。经过实验验证了基于特征频点能量比的方法对喘振故障预警更敏感, 并且融合优化指标后预警准确率得到了提升。

1 空压机喘振故障

本研究用的空压机型号为 600 W-8 L, 额定转速为 1 420 r/min, 排气量为 40 L/min, 排气压力为 0.8 MPa; 振动传感器型号为 VTall-S101L-1, 精度为 $\pm 2\%$, 响应频率为 20~1 000 Hz。振动传感器具有时域分析输出多参数、频域分析输出频点频谱内能量数据。空压机喘振时横向振动幅度明显, 为采集到空压机喘振现象可靠的振动信号数据, 首先保证空压机转速稳定, 需要空压机进气阀门开度的调整要缓慢进行, 同时也保证了故障振动信号时域变成频域时在同一转速下进行。

空压机在喘振预警阶段^[10-12]时可能出现在准则层^[13]的指标有空压机出气口和储气罐压力差 (P_1)、空压机出气口的温度变化率 (T_1)、冷却水回水温度变化率 (T_2) 耗电异常 (V_1)、能量耗散 (J_1)。同时这些指标也与转子不平衡和机械摩擦有一定关联性, 故将喘振、转子不平衡和机械摩擦作为方案层。

2 特征频点能量比方法

2.1 基于时域特征的诊断方法

时域分析是一种在机械设备故障分析中常用的方法, 通过在时间上对信号进行切片处理, 然后提取各种特征作为分析故障的依据。具有简单直观的特点, 适用于捕捉信号随时间变化的特征信息^[14]。论文用的时域

特征参数如下:

1) 峰值特征, 峰值表述为一段时间内幅值的最大值, 是属于时域信号中最直观的。

2) 平均值, 也称为均值, 它反映的是振动信号变化的平衡趋势, 是信号的常量分量。

3) 标准差, 在说明数据偏离中心平均值的离散程度中最普遍的就是用标准差。

4) 峭度, 代表全体取值分布下走势的曲线形态, 峰度越大的情况下曲线分布就越“尖”, 相反就会越“缓”。

2.2 基于频域特征的诊断方法

时域分析所带来信息只能做初步有无故障判断, 而不能确定故障具体位置。频域分析研究对象的动态特性^[15], 可以对空压机的故障类型和具体位置做出分析。本文利用频谱分析得到了幅值谱、功率谱等。

对时域表达式 $x(t)$ 进行傅里叶变化的方程为:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

在特征频率分析时, 不同的故障振动产生不同的振动信号, 在现场测试中利用频谱图来分析故障类型和具体位置。

2.3 基于特征频点能量比的预警方法

论文根据故障振动产生特征振动信号, 提出一种基于特征频点能量和总能量相比的方法进行故障预警。用 M_c 代表振动信号在特征频点上的能量:

$$M_c = \int_{\text{lower}}^{\text{upper}} p(f)^2 df \quad (2)$$

其中: $p(f)$ 为振动的幅值。

振动信号的特征频点能量比的定义如下:

$$R = \frac{M_c}{M_z} \quad (3)$$

其中: M_z 为整个过程频域的总能量。

通过特征频点能量比的形式来诊断故障起到减小时域分辨率之间作用的影响, 响应时间迅速, 防止特征频点内的能量流失^[16]。

2.4 喘振故障特征提取

图 1 为空压机 1 420 r/min 工况下采集的节流阀整个调节过程中空压机振动的时域信号, 将整个调节过程分为正常、预警、喘振形成阶段。0~20 s 为空压机转速稳定阶段, 从 20 s 开始缓慢调节节流阀, 在 40 s 左右时空压机振动幅度开始明显增加, 进入喘振预警阶段后空压机的转速保持在稳定状态, 所以此处采集到的振动幅度变化不是由工况改变而产生的, 而是因为空压机的喘振现象存在引起的, 这时的喘振现象仅仅是形成阶段还没有完全成型。这时空压机因吸入气体不足, 发生旋转失速产生喘振预警现象。50 s 以后喘振现象形成,

产生大幅度振动。预警阶段是避免喘振故障发生、减少维护的最佳时机。故应把喘振故障及时控制、消灭在初起阶段。

通过振动传感器采集到从空压机启动到预警阶段频点频谱内能量数据, 如图 2 所示。图中圈为空压机刚启动时产生的一个 0.5 倍频旋转机械设备正常冲击波形。

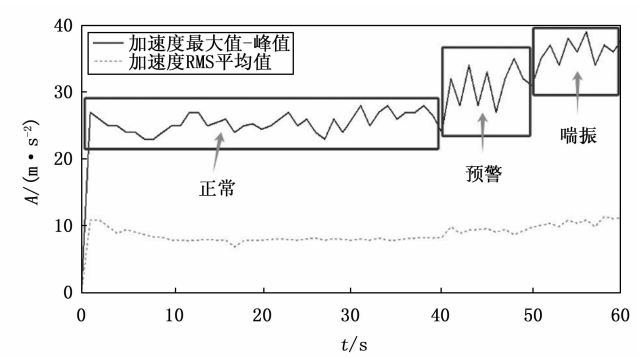


图 1 1420 r/min 工况下节流阀整个调节过程振动变化

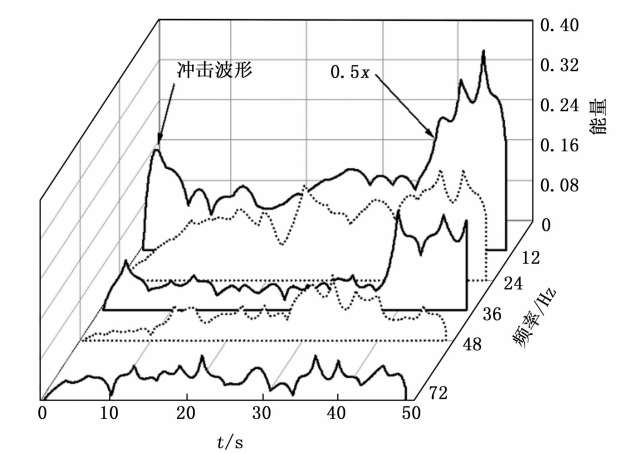


图 2 额定转速下频点加速度谱能量变化瀑布图

图 2 中, 0~40 s 为空压机正常运行阶段、41~50 s 为喘振预警阶段。在正常工作区域这些特征频点较为集中, 对于喘振预警区域会有一个明显的 0.5 倍频点能量凸显出来。为进一步地研究该频点能量变化, 将喘振预警阶段的振动信号用式 (4) 进行傅里叶变换如图 3 所示。其中采用样本数为 256, 使用周期 2.57 s, 采样率为 100 Hz, Resoulution 为 0.39 Hz, 奈奎斯特频率为 50 Hz。

图 3 中可以看到峰值频率为 12 Hz 左右, 此频段对空压机的喘振现象比较敏感, 故可以用该频段来预测空压机喘振故障。为了观察不同频率 FFT 随时间变化情况如图 4 所示。从图 4 中能观察到在 40 s 左右开始时, 圈内的颜色发生了急剧的变化, 代表着有强烈振动信号的存在。因为当进气量逐渐变小时, 空压机的负载就会随之变小, 转速会增加, 所以在图中变亮部分为喘振预

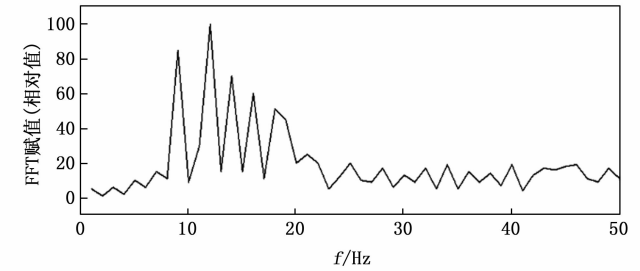


图 3 喘振预警阶段频谱图

警信号导致。

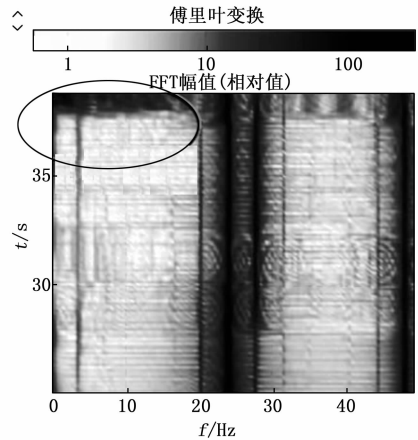


图 4 喘振阶段傅里叶变换图

图 5 中可看到喘振预警阶段 0.3x~1.2x 频带占据主要能量, 谱总能量也会有相应的增加, 而其他频点的能量会有小幅度波动。因此该现象让喘振预警阶段的各频点能量在总能量中的占比有所差距。所以本文提出利用特征频点能量比对喘振故障预警进行分析, 将整个喘振测试阶段中 0.5 倍频的特征频点能量与总能量相比。采集到的数据保存到数据库中, 经查询计算出 0.5x 能量比 R 数据如表 1 所示, 计算公式由 (3) 定义:

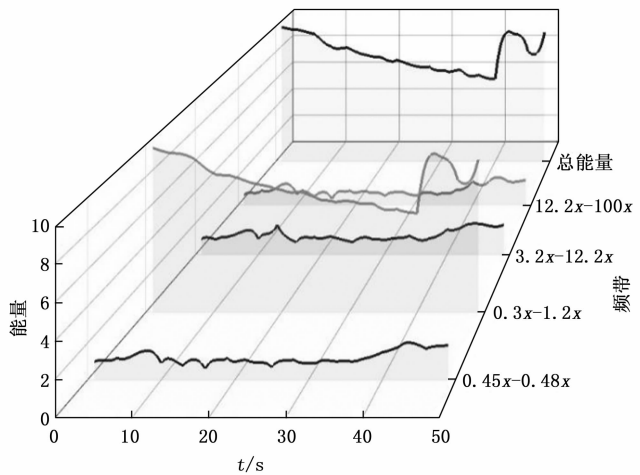


图 5 额定转速下频带谱能量变化瀑布图

表 1 1 420 r/min 工况下喘振测试 0.5*x* 的能量比

时间/s	0.5 <i>x</i> 能量比/%	时间/s	0.5 <i>x</i> 能量比/%
1~2	2.93	25~26	1.42
3~4	1.73	27~28	1.30
5~6	1.72	29~30	1.27
7~8	1.22	31~32	1.43
9~10	1.73	33~34	1.77
11~12	1.48	35~36	1.47
13~14	1.51	37~38	2.42
15~16	1.59	39~40	3.12
17~18	1.39	41~42	3.89
19~20	1.15	43~44	5.30
21~22	1.23	45~46	4.71
23~24	1.29	47~48	4.58

从表 1 中可见,在 0~40 s 空压机正常工作阶段,除了刚开始启动的振动冲击外,大部分的能量比都低于 2%。直到 37~38 s 时开始大于 2%,在 39 s 之后进入喘振预警阶段的能量比都大于 3%,最大值到达了 5.3%,因此在 39 s 左右的能量比迅速增大,说明了喘振预警的发生。特征频点的能量比在空压机喘振预警阶段是非常灵敏的。故可以用特征频点的能量比作为空压机喘振的一个重要判断指标或者预测指标。

2.5 不同预警方法对比分析

将对不同的预警方法作对比分析,在空压机喘振时由于机械设备的振动时域信号会有强烈幅值的改变,故选择说明幅值改变的峰值特征、选择形容振动信号变化平衡趋势的有效值、选择说明数据总体取值分布趋势程度的峭度来进行对比。

在正常工作阶段各个特征相对比较平稳,由于信噪比的存在会有一些小的波动。在随机 4 个不同工况下,正常工作阶段由做实验采集到的多组指标数据计算出相应平均值如表 2 所示。其中表 2~4 中 940 r/min、1 014 r/min 工况时计算平均能量比的特征频点为 1 倍频,1 274 r/min、1 420 r/min 工况时计算平均能量比的特征频点为 0.5 倍频。

表 2 不同工况下正常阶段指标的平均值

工况	正常工作阶段各指标平均值			
	峰值/(m/s ²)	有效值/(m/s ²)	峭度	能量比/%
940 r/min	26.09	8.03	1.59	0.84
1 014 r/min	26.55	8.21	1.63	1.14
1 274 r/min	23.86	6.41	1.58	1.71
1 420 r/min	26.25	7.64	1.95	1.53

在随机 4 个不同工况下,喘振预警发生阶段由采集数据计算出相应指标平均值如表 3 所示。

表 4 将喘振预警阶段各个诊断指标和正常阶段比较,得出对喘振故障灵敏程度如图 6 所示。

表 3 不同工况下喘振预警阶段指标的平均值

工况	喘振预警阶段各指标平均值			
	峰值/(m/s ²)	有效值/(m/s ²)	峭度	能量比/%
940 r/min	28.34	8.69	1.68	2.42
1 014 r/min	29.28	8.59	1.78	3.33
1 274 r/min	33.12	8.59	1.72	3.51
1 420 r/min	32.11	8.68	2.13	4.32

表 4 不同工况下喘振预警阶段各指标的改变趋势

工况	喘振预警阶段各指标的改变趋势			
	峰值/%	有效值/%	峭度/%	能量比/%
940 r/min	108.59	108.16	105.78	288.38
1 014 r/min	110.28	104.73	109.50	292.21
1 274 r/min	138.80	121.62	108.72	205.26
1 420 r/min	122.32	113.61	109.23	282.35

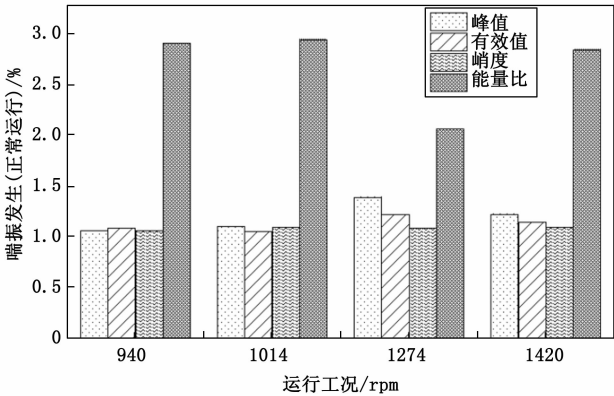


图 6 不同工况下各指标对喘振故障预警的灵敏程度对比

从表 4 中能够得出相同工况下的有效值与峭度的敏感程度几乎一样,峰值的敏感程度最高为 1.388,但注意能量比敏感程度最低为 2.052 6。图 7 直观地表明了利用频域特征频点能量比作为预警喘振故障的优越性,故利用能量比方法使振动传感器对喘振故障的预警更敏感。特别需要指出的是针对不同设备、不同类型的故障,特征频点会有所不同,需要根据试验确定故障对应的特征频点。

3 改进喘振故障预警方法

3.1 层次分析法及一致性检验

为了选取合理的指标与振动传感器一起来提高喘振故障预警准确率,利用层次分析法^[17]进行指标选取,其整体构建流程如图 7 所示。

为了比较准则或因素之间的相对重要性,使用的比较标尺^[18]包括 1~9 的尺度,其中 1 表示两个准则或因素完全相等,9 表示一个准则或因素比另一个准则或因素明显更重要。对相应的指标进行相互赋值,可得判断矩阵,如式(4):

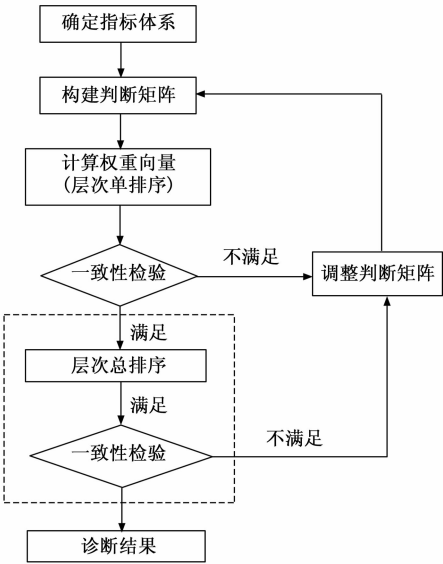


图 7 层次分析法流程图

$$A = (a_{ij})_n (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (4)

判断矩阵实际上是一个正互反矩阵，其中每个元素表示对应指标之间的相对重要性评分。最终由收集到的调查问卷数据取平均值构建出的初始判断矩阵数据，如表 5 所示。

表 5 初始判断矩阵数据表

数据	P_1	T_1	T_2	V_1	J_1
P_1	1	2	6	5	4
T_1	1/2	1	3	4	5
T_2	1/6	1/3	1	2	2
V_1	1/5	1/4	1/2	1	2
J_1	1/4	1/5	1/2	1/2	1

为了确定不同指标或因素之间的相对重要性，进行层次单排序求取权重向量，步骤如下：

1) 用式 (5) 计算特征向量，得到 m 维向量：

$$B_i = {}^m \sqrt{\prod_{j=1}^m a_{ij}}$$
 (5)

2) 将上述特征向量用公式 (6) 求取权重。

$$W_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^m B_i}$$
 (6)

得到特征向量 B_i 和标准化后的权重 W_i 如表 6 所示。

表 6 初始判断矩阵数据表特征向量和权重

数据	P_1	T_1	T_2	V_1	J_1
B_i	2.992 5	1.974 3	0.740 2	0.549 2	0.416 2
W_i	0.448 4	0.295 8	0.110 9	0.082 3	0.062 3

计算出指标的权重后需要进行一致性检验，首先计算最大特征根，其公式为 (7) 所示：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{\omega_i}$$
 (7)

其中： $(AW)_i$ 为矩阵和权重的乘积。
得到最大特征值后计算判断矩阵的一致性指标如式 (8) 所示：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
 (8)

其中： $\lambda_{\max}$ 为最大特征值； n 为式 (4) 中的 n 。计算一致性比例如式 (9) 所示：

$$CR = \frac{CI}{RI}$$
 (9)

其中： RI 为平均一致性指标，是 Satty 模拟^[19] 1 000 次得到随机一致性指标 RI 取值如表 7 所示。

表 7 RI 值对应数据表

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

根据判断矩阵的维数选择 RI 的值为 1.12，便可以由式 (9) 得到 $CR=0.046\ 0<0.1$ ，表明初始判断矩阵的一致性程度可以被接受，排除判断矩阵存在的逻辑错误。同时也说明权重分配的合理性^[20]。

层次总排序是在层次单排序与一致性检验通过后进行的，对于每对指标或因素，根据它们在层次单排序中的权重比较大小，给出一个相对重要性的判断。该过程是从最高层向最底层进行计算。

首先进行类似层次单排序分别对不同故障进行矩阵构造，得到一个 3×3 的矩阵。便可以得到喘振故障、转子不平衡故障和机械摩擦故障在 P_1 上的得分矩阵表 (a)，在 T_1 上的得分矩阵表 (b)，在 T_2 上的得分矩阵表 (c)，在 V_1 上的得分矩阵表 (d)，在 J_1 上的得分矩阵表 (e)，汇总后的矩阵如表 8 所示。

表 8 层次总排序矩阵表

(a)			
P_1	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦
喘振故障	1	6	5
转子不平衡	1/6	1	1/2
机械摩擦	1/5	2	1
(b)			
T_1	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦
喘振故障	1	5	4
转子不平衡	1/5	1	1/3
机械摩擦	1/4	3	1
(c)			
T_2	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦
喘振故障	1	2	2
转子不平衡	1/2	1	1
机械摩擦	1/2	1	1

表 8 层次总排序矩阵表
(d)

V_1	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦
喘振故障	1	1/2	2
转子不平衡	2	1	4
机械摩擦	1/2	1/4	1

(e)

J_1	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦
喘振故障	1	4	2
转子不平衡	1/4	1	1/3
机械摩擦	1/2	3	1

根据上述各个矩阵的计算和验证,使用式(5)、(6)计算得到了各个指标的权重。使用式(7)~(9)进行一致性验证。构建了个数为叶子节点指标数目的判断矩阵对各个指标的权重进行分析,计算得到的权重和CR值如表9所示。

表 9 方案层判断矩阵汇总结果

节点	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦	CR 值	一致检验
P_1	0.726	0.102	0.172	0.028	通过
T_1	0.674	0.101	0.226	0.082	通过
T_2	0.600	0.200	0.200	0	通过
V_1	0.286	0.571	0.143	0	通过
J_1	0.558	0.122	0.320	0.017	通过

综上所述,通过层次单排序、层次总排序由式(10)计算出对各故障的评分如表10所示。

$$s = \sum_{i=1}^n w_i l_i \tag{10}$$

其中: w_i 为层次单排序权重, l_i 为总排序权重。

表 10 各故障评分汇总

类别	喘振故障	转子不平衡	机械摩擦
评分	0.649 7	0.152 4	0.197 9

可知喘振故障的得分最高,故由 P_1 、 T_1 、 T_2 、 V_1 、 J_1 这 5 个指标来预警故障概率最高的是喘振故障。因为 P_1 权重为 0.726、 T_1 权重为 0.674,在此选取对喘振故障占权重大的指标,故选取 P_1 、 T_1 两项指标做进一步提高精度研究。

3.2 融合优化指标预警方法

空压机在额定工况下分两组进行实验,一组为主动给予空压机喘振故障,另一组空压机正常运行,分别记录两组实验下的振动传感器根据特征频点能量比预警情况和 P_1 、 T_1 两个指标同时出现的情况,汇总如表 11 所示。

表 11 中实验振动传感器预警能量比阈值设为 3%, P_1 压力差阈值为 17 kPa、 T_1 变化率阈值为 0.2 ℃/500 ms。从表 11 中发现,当喘振故障时振动传感器预

警概率为 84.2%,由于振动传感器本身问题仍存在 15.8%的无预警概率;当正常运行时振动传感器无预警概率为 70.5%,存在 29.5%的错误预警概率。

表 11 故障预警和指标概率情况 %

类别	喘振故障	正常运行
振动传感器预警概率	84.2	29.5
振动传感器无预警概率	15.8	70.5
P_1 、 T_1 同时出现概率	90.3	19.8
P_1 、 T_1 不同时出现概率	9.7	80.2

为进一步提高系统预警准确率,利用振动传感器根据能量比预警结果融合优化指标预警结果一起进行故障预警,即振动传感器和优化指标必须同时预警时才进行系统故障预警,否则系统无预警。改进的喘振故障预警方法流程如图 8 所示。

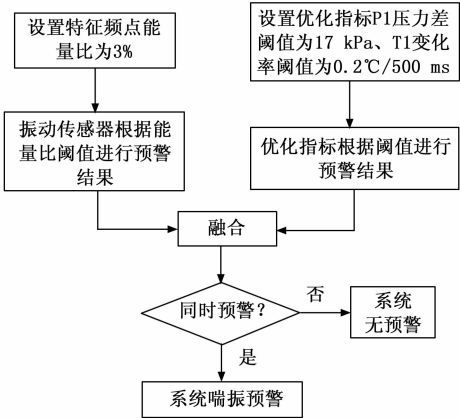


图 8 改进喘振故障预警方法流程

4 试验验证与分析

为验证改进故障预警方法准确率的提高,将振动传感器根据特征频点能量比预警情况和改进预警方法后的预警情况,进行两个维度下的预警准确率分析,其计算公式为:

$$\frac{\text{故障时预警次数}}{\text{故障时预警次数} + \text{正常时预警次数}} = y_1 \tag{11}$$

$$\frac{\text{故障时系统预警数目} + \text{正常时系统无预警数目}}{\text{表 11 中两组实验次数之和}} = y_2 \tag{12}$$

表 12 中, A 为振动传感器根据特征频点能量比阈值预警, B 为图 12 所示的改进方法后的系统预警,将表 11 中的数据代入式(11)(12),得到 A 、 B 两种预警方法在两个维度下的预警准确率,如表 12 所示。

表 12 两种预警方法在两个维度下准确率对比

维度	$A/\%$	$B/\%$
y_1	74.1	92.9
y_2	77.4	85.1

表 12 中可发现改进后的预警方法相较于振动传感器根据特征频点能量比阈值预警 y_1 提高了 18.8%, y_2 提高了 7.7%。由此证明改进后的故障预警准确率得到了很好的提升。

5 结束语

论文提出了一种振动传感器基于特征频点能量比预警故障方法。以空压机喘振故障为案例,对比分析了不同的预警方法,实验表明能量比预警方法对喘振故障特征频点的灵敏度更高。在此基础上论文提出了一种改进喘振故障预警方法。采用层次分析法挑选出了关键性的判定指标。设定优化指标和特征频点能量比阈值。通过试验分析,改进后的预警方法相较于振动传感器根据特征频点能量比阈值预警 y_1 提高了 18.8%, y_2 提高了 7.7%。论文引入特征频点能量比使得系统能够对振动信号中的关键变化做出敏感反应,从而更早期地探测到潜在的喘振故障。再通过融合优化的指标,进一步提高预警系统的准确性。系统得以更全面地审视潜在的故障迹象,确保了对喘振故障的高效预警。在故障正式形成之前及时、准确地发出警报。不仅提高了空压机的使用寿命,而且在系统性能和可靠性方面取得了显著的效益。

参考文献:

[1] 舒相挺,杨璋,徐逸哲,等.某循环海水泵振动故障诊断与趋势分析[J].振动·测试与诊断,2022,42(4):791-796.

[2] MENG T Z, XIAO Y L, CONG P, et al. Intelligent fault diagnosis for variable working conditions of rotor-bearing system based on vibration image and domain adaptation[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(12): 167-173.

[3] ZI M L, ER L S, YI F H, et al. Vibration characteristics analysis of flexible helical gear system with multi-tooth spalling fault: simulation and experimental study[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 201(5): 370-378.

[4] YAN W. Fault diagnosis and analysis of hydraulic brake based on friction vibration signal[J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25(5): 775-792.

[5] XIAO H C, AI M W, HUI Y, et al. Vibration analysis of a deep groove ball bearing with localized and distributed faults subject to waviness based on an improved model under time-varying speed condition[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(13/14): 752-769.

[6] 罗毅,武博翔.基于深度学习 LSTM-DBN 的水轮机振动故障预测方法[J].振动·测试与诊断,2022,42(6):1233-1238.

[7] ZI Y D, WEN J W, SEN D, et al. Research on vibration fatigue and failure mechanism of the wire bracket for high-

speed train[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 151(16): 412-424.

[8] YI F W, CHUAN L, SHUAI Y, et al. Multiscale reduction clustering of vibration signals for unsupervised diagnosis of machine faults[J]. Applied Soft Computing Journal, 2023, 142: 293-318.

[9] PU Z, SHU Y L. A fault diagnosis method based on low signal to noise ratio vibration measurement for use in casing cutters[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(4): 1271-1276.

[10] ARASH G, KARIM M, TAGHI S, et al. Development of a mathematical model to simulate a natural gas compression system and its anti-surge control to improve performance: a case study to reduce the energy consumption, and the environmental impact[J]. Results in Engineering, 2023, 17: 692-706.

[11] 张洋,丘东元,张波,等.基于层次分析-熵值法的 DC-DC 变换器综合评价[J/OL].北京航空航天大学学报,1-14[2024-01-04].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0291>.

[12] 程志友,陶青,朱唯韦,等.基于改进模糊综合评判法的空压机状态评估[J].电测与仪表,2020,57(3):12-18.

[13] 杜昶,汪东达,包新胜.基于层次分析-云模型的大型 LNG 高压泵自停故障智能诊断方法[J].液压气动与密封,2023,43(11):119-124.

[14] 王庆健,王森,伍星,等.转子图像空时域增强与振动测量方法研究[J].振动与冲击,2023,42(7):133-142.

[15] 袁盛铭,吴兴文,赵明花,等.随机振动疲劳寿命评估频域法模型适用性研究[J].噪声与振动控制,2023,43(2):28-34.

[16] KAZUKO S, TSUNEYOSHI S, NORIYUKI U, et al. The defect detection algorithm that combined spectrum entropy with vibrational energy ratio for acoustic inspection method[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 3: 2672-2680.

[17] 李鹏,党炜,李桃,等.基于模糊层次分析法的系统加速验证试验设计[J].中国科学院大学学报,2021,38(1):121-129.

[18] 马九方,杨森,黄欣鑫.基于灰色层次分析法的有人/无人协同作战效能评估[J].电讯技术,2023,63(10):1625-1630.

[19] 洪志国,李焱,范植华,等.层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J].计算机工程与应用,2002(12):45-47.

[20] 冶鑫晨,张海龙,王杰,等.基于 EMD-LSTM 的分子谱线数据预处理容器负载分组预测算法[J/OL].吉林大学学报(工学版),1-10[2024-01-04].<https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230690>.