

## 离心压缩机转子早期异常判别准则\*

温广瑞<sup>1</sup>, 马再超<sup>1,2,3</sup>, 吴广辉<sup>4</sup>, 董书志<sup>1</sup>, 刘学良<sup>5</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049) (2. 清华大学软件学院 北京, 100084)

(3. 工业大数据系统与应用北京市重点实验室 北京, 100084)

(4. 西安陕鼓动力股份有限公司 西安, 710075) (5. 中国船舶工业系统工程研究院 北京, 100070)

**摘要** 针对美国石油学会(American petroleum institute, 简称 API)617 标准规定的振幅限值准则一般用于离心压缩机转子故障报警, 而难以识别因早期微弱故障导致的振动异常现象, 提出一种以振动有效值辅助 API617 振幅限值准则的转子早期异常判别方法。该方法根据离心压缩机现场工况选择了转子临界前后的启停过程监测节点, 制定了振幅限值系数的选定原则, 设计了基于振幅限值准则的一次判定规则和有效值辅助的二次判定规则。Bently 转子实验台各轻度典型故障检测表明, 该方法可在 API617 振幅限值准则失效判定的情况下, 识别转子早期状态异常。现场轴流压缩机转子弯曲诱发碰摩故障分析表明, 一次判定规则适用于故障报警, 二次判定规则可识别转子早期的振动异常。

**关键词** 离心压缩机转子; 美国石油学会 617 振幅限值; 振动有效值; 早期异常  
**中图分类号** TH165

### 引 言

离心压缩机是电力、石化、船舶等行业的关键设备, 其动力学设计和振动评价主要参考美国石油学会的 API617 标准<sup>[1]</sup>。但该准则一般应用于转子产生故障的高报场合, 难以识别因微弱故障导致的早期振动异常。若转子处于轻微异常运行且未能及时识别, 将导致预测性维护滞后, 存在突发事故隐患。因此, 及时识别离心压缩机转子早期振动异常甚至潜在故障, 将提高生产过程的安全稳定性。

离心压缩机转子振动信号中蕴含的故障特征一般具有数量多、高频谱线相对接近及不同频率幅值差异大的特点, 且往往伴随非线性、非平稳现象及噪声干扰<sup>[2]</sup>。张小勤<sup>[3]</sup>采用频谱分析了 PC-1A 型离心压缩机转子振动异常引发联锁停车事故的原因是动平衡不良。文定良<sup>[4]</sup>采用通频振动趋势、频谱和轴心轨迹发现甲醇合成压缩机存在转子热变形、碰摩和不平衡复合的振动异常。胡大月<sup>[5]</sup>指出石化企业还缺乏离心压缩机振动异常的经验 and 处理方法总结。Li 等<sup>[6]</sup>构造了压力脉冲信号识别离心压缩机转子叶片裂纹微弱异常特征。王兆鑫<sup>[7]</sup>发现 VK50-3 型离心压缩机二级轴振动异常的原因是叶轮表面黏

结物脱落。Sun 等<sup>[8]</sup>提出采用离心压缩机喘振的平均相位提取和识别方法。He 等<sup>[9]</sup>提出了一种双稳随机共振方法以提取离心压缩机转子叶片裂纹故障特征。马再超等<sup>[10]</sup>采用改进的总体平均经验模式分解提取转子轴承系统轻度故障特征并进行分类。以上数据分析成果有望转化为某设备专用的监测诊断软件系统, 但面临工业现场大量相似个体的推广仍需普适性验证, 实际多采用 API617 支持。张小龙等<sup>[11]</sup>采用 API617 分析和指导离心压缩机的动力学特性设计。Brun 等<sup>[12]</sup>指出 API617 在离心压缩机喘振时的振动安全极限规定。Lei 等<sup>[13]</sup>采用消涡结构改进压缩机阻尼特性以符合 API617 的稳定性规定。冀沛尧等<sup>[14]</sup>根据 API617 研究得到孔型阻尼密封性能优于迷宫密封。胡永等<sup>[15]</sup>以 API617 新增的磁力轴承标准验证了电磁轴承支撑下的转子系统振动幅值低。可以看出, 近年的研究成果仍缺乏 API617 针对离心压缩机转子早期异常振动监测的应用, 一般仅用于报警。

本研究结合 API617 的动力学指标、离心压缩机振动数据和现场专家经验, 以 Bently 转子系统为实验验证对象, AV90 型轴流压缩机转子为实际验证对象, 对 API617 动力学部分的振幅限值

\* 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0210504); 国家自然科学基金资助项目(51775409); 工业和信息化部 2015 年智能制造专项资助项目; 工业和信息化部智能船舶 1.0 研发专项资助项目

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-08-16

准则应用进行了探讨,为离心压缩机转子因各类典型轻度故障诱发的早期状态异常判别提供参考。

## 1 API振幅限值准则

### 1.1 振动响应

API617的动力学部分<sup>[1]</sup>给出了离心压缩机转子振动响应随转速变化的示意关系和转子处于工作转速区间时的最大振幅示意限制,为简化表达,将这两部分合并为如图1所示的转子振动响应随转速变化示意图。图中: $N_{c1}$ 为转子一阶临界转速; $N_{cn}$ 为转子第 $n$ 阶临界转速; $N_{ma}$ 为转子最小运行转速; $N_{mc}$ 为转子最大连续转速; $A_{c1}$ 为 $N_{c1}$ 处的振幅峰值; $N_1$ 为0.707倍 $A_{c1}$ 对应的临界区初始转速; $N_2$ 为0.707倍 $A_{c1}$ 对应的临界区终止转速; $N_2 \sim N_1$ 为在“半功率”点峰值的宽度; $A_{v1}$ 为转子振幅极限的实验值,简称“振幅限值”; $A_{max}$ 为转子正常运行时所有探头中最大的振幅峰峰值; $S_{a1}$ 为 $N_{c1}$ 与 $N_{ma}$ 间的实际隔离转速; $S_{an}$ 为 $N_{cn}$ 与 $N_{mc}$ 间的实际隔离转速。

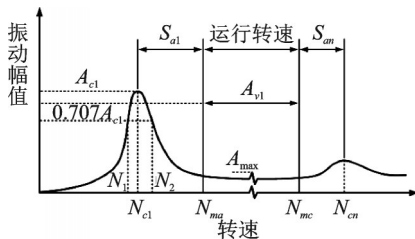


图1 转子振动响应随转速变化示意

Fig.1 Significance of rotor vibration response changes with rotating speed

图1定义了离心压缩机转子处于启动、变载、运行、降速和临界各阶段的异常振动判定指标。

以一阶临界为例,转子启动和降速阶段的振幅限值采用 $A_{c1}$ 定义,转子变载和运行阶段的振幅限值采用 $A_{v1}$ 定义;转子处于某临界阶段的振幅限值采用隔离裕度(separation margins,简称SM)定义。

### 1.2 转子变载和运行的振幅限值

以一阶临界为例,各振动探头处的未滤波峰峰振幅不应超过振幅极限值 $A_{v1}$ 与 $25.4 \mu\text{m}$ 的较小值<sup>[1]</sup>, $A_{v1}$ 按式(1)计算

$$A_{v1} = 25.4 \sqrt{12\,000/N_{mc}} \quad (1)$$

### 1.3 转子临界时的隔离裕度准则

隔离裕度准则分为计算值 $M_a$ 和标准值 $M_r$ ,以一阶和某阶临界为例,根据文献<sup>[1]</sup>,其对应的 $M_{a1}$ 和 $M_{an}$ 按式(2)计算

$$\begin{cases} M_{a1} = 100S_{a1}/N_{ma} \\ M_{an} = 100S_{an}/N_{mc} \end{cases} \quad (2)$$

$M_r$ 需要引入放大系数 $A_n$ 来定义, $A_n$ 的计算方法如式(3)所示

$$A_n = N_{cn}/(N_2 - N_1) \quad (3)$$

根据 $A_n$ 取值规定, $M_r$ 的计算方法分为3种:

1) 当 $A_n < 2.5$ 时,转子振动响应处于临界阻尼状态,此时没有隔离裕度要求, $M_r = 0$ ;

2) 当 $A_n \geq 2.5$ 时,且该临界转速小于最低运行转速,则 $M_r$ 按式(4)计算

$$M_r = 17 \left( 1 - \frac{1}{A_n - 1.5} \right) \quad (4)$$

3) 当 $A_n \geq 2.5$ ,且该临界转速大于最高连续转速,则 $M_r$ 按式(5)计算

$$M_r = 10 + 17 \left( 1 - \frac{1}{A_n - 1.5} \right) \quad (5)$$

### 1.4 转子振动异常判定规则

根据API617的规定,设 $A_{pp}$ 为数据样本未滤波的峰峰振幅,可得到如式(6)~(10)所示的转子处于启动、变载、运行、降速和临界各阶段的异常振动判定规则<sup>[1]</sup>。

1) 启动异常

$$A_{pp} > 0.707A_{c1} \quad (6)$$

2) 变载异常

$$A_{pp} > A_{v1} \quad (7)$$

3) 运行异常

$$A_{pp} > A_{v1} \quad (8)$$

4) 降速异常

$$A_{pp} > 0.707A_{c1} \quad (9)$$

5) 临界区异常

$$M_a < M_r \quad (10)$$

## 2 离心压缩机转子振动数据样本的异常判定方法

### 2.1 转子启停过程监测节点

离心压缩机转子启停全过程涉及加减速、通过

临界转速和加减负荷环节。在不同的转速阶段,离心压缩机振动状态完全不同,各转速阶段对应的振动数据也往往具有较大差异。因此,以API617转子启停过程定性监测区间为基础,根据离心压缩机现场运行的长期经验积累,进一步设置转速监测节点如下。

### 2.1.1 刚性转子

启动:50%预设转速,100%预设转速;

加载:20%负荷,50%负荷;

运行:100%负荷;

减载:0负荷;

降速:95%预设转速,50%预设转速。

### 2.1.2 柔性转子

启动:90%一阶临界转速,一阶临界转速,110%一阶临界转速,100%工作转速;

加载:20%负荷,50%负荷;

运行:100%负荷;

减载:0负荷;

降速:95%工作转速,110%一阶临界转速,一阶临界转速,90%一阶临界转速。

当转子转速超过二阶临界转速时,需要增加的转子振动监测节点包括90%二阶临界转速、二阶临界转速和110%二阶临界转速。

## 2.2 振幅限值系数选定原则

西安陕鼓动力股份有限公司根据离心压缩机多年研制、应用和监测经验发现,在采用转子故障判定规则时,国内不同机型的振幅限值不同,同一机型之间的振幅限值不同,同一机型处于不同运行过程的振幅限值也不同,但这些振幅限值的差异固定于某一范围内。因此,需要一个系数指标乘以待测试机组的测量振值,将不同振幅限值的差异固定于该系数指标的控制范围内,从而形成离心压缩机振动数据的通用判定规则。

取现役某离心压缩机转子启停过程任意节点数据样本计算振动有效值的算术平均值,记为异常数据参考指标,记为 $R$ ;该离心压缩机转子启停过程任意节点振幅限值,记为 $A$ ;称系数指标为振幅限值系数,记为 $\epsilon$ ,其计算公式为

$$\epsilon = A/R \quad (11)$$

$N$ 台现役离心压缩机的振幅限值系数 $\epsilon$ 的平均值,记为 $\bar{\epsilon}$ ,计算公式为

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i}{N} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

需要说明的是,现场实际应用已经规定了离心压缩机 $\bar{\epsilon}$ 的取值范围是1.0~1.8,其他透平机械应用可参照式(11)、式(12)修正 $\bar{\epsilon}$ 的取值。

## 2.3 数据样本异常一次判定规则

在转子振动异常判定规则的基础上,引入振幅限值系数的平均值 $\bar{\epsilon}$ ,得到如式(13)~(17)所示的转子处于启动、变载、运行、降速和临界各阶段的异常振动一次判定规则。

启动异常

$$A_{pp} > 0.707\bar{\epsilon}A_{c1} \quad (13)$$

变载异常

$$A_{pp} > \bar{\epsilon}A_{v1} \quad (14)$$

运行异常

$$A_{pp} > \bar{\epsilon}A_{v1} \quad (15)$$

降速异常

$$A_{pp} > 0.707\bar{\epsilon}A_{c1} \quad (16)$$

临界区异常

$$M_a < \bar{\epsilon}M_r \quad (17)$$

## 2.4 数据样本异常二次判定规则

由于一次判定规则适用于转子故障报警场合,缺乏了早期微弱异常的识别能力,因此结合转子振动有效值来二次判定数据的正异常状态。取现役离心压缩机转子启停过程任意节点数据样本 $R$ 值的算数平均值为 $\bar{R}$ ,异常数据准则指标记为 $D$ ,计算公式为

$$D = \bar{\epsilon}\bar{R} \quad (18)$$

某离心压缩机转子启停过程任意节点数据样本的 $D$ 指标计算结果,记为 $d$ ;某待测离心压缩机转子启停过程任意节点数据样本有效值的算术平均值,记为 $r$ ,计算公式为

$$d = \bar{\epsilon}r \quad (19)$$

当 $d > D$ 时,判定异常;当 $d \leq D$ 时,判定正常。

## 2.5 离心压缩机转子数据异常判定流程

根据离心压缩机转子振动异常判定方法,归纳总体流程框架如图2所示。

由图2所示流程可归纳出离心压缩机转子振动异常判定的具体步骤如下:

- 1) 抽样离心压缩机转子振动信号,得到数据样本;
- 2) 根据数据样本对应的转速条件判断转子当时处于刚性或柔性运行状态;
- 3) 采用一次判定规则判定转子处于启动、变载、运行、降速和临界运行条件时的正异常情况,显

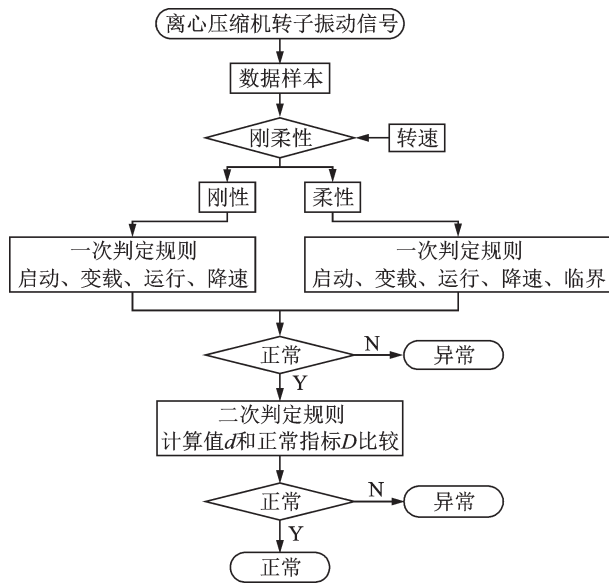


图2 离心压缩机转子振动数据样本的异常判定流程  
Fig.2 Decision procedure of abnormal data sample from the rotor of centrifugal compressor

示异常则判定结束,正常则继续执行步骤4;

4) 采用二次判定规则计算转子正常运行条件下的所有判定指标 $D$ 值;

5) 采用二次判定规则计算转子当前运行条件下的判定指标 $d$ 值;

6) 比较 $d$ 和 $D$ 大小,确定转子当前运行的正异常情况,判定结束。

需要说明的是:刚性条件时的一次判定规则仅在盘车和测试时使用,实际运行时一般按照柔性条件处理;实际操作时 $D$ 值已经储备并阶段性更新。

### 3 实验验证

离心压缩机转子正常运行时,其理想的振动信号频谱特征通常表现为转频幅值较大且伴随通频噪声的特点。在转子各类典型故障中,转子不平衡振动的频谱特征近似转子正常振动特征,差别在于转频幅值更大。因此,若能尽可能设置较低的转子不平衡程度,使其转频幅值略大于转子正常振动的转频幅值,又便于观察两者之间存在的差异,则该转子轻度不平衡故障能验证离心压缩机转子振动数据样本的异常判定方法。首先,采用平衡校正过的Bent-ly-RK4转子实验台模拟转子轻度不平衡故障,实验台由转子系统和振动测试系统组成,如图3所示。转子系统包括转子、质量盘、电机、轴承座和基座;振动测试系统包括6组位移传感器、数据采集模块和上位机。其中:1~4号传感器以 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ 方向放置

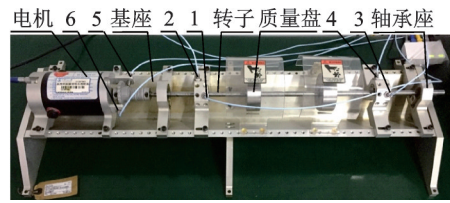


图3 Bently-RK4转子实验台  
Fig.3 Bently-RK4 rotor test bench

并分为2组用于采集转子振动信号;5和6号传感器分别用于测量相位和获取转速。

使用上述转子实验台模拟故障并采集转子正常振动和轻度不平衡故障信号。其中,转子系统质量盘部件加工了以 $22.5^\circ$ 为间隔、均匀分布的螺纹孔,如图4所示。在 $0^\circ$ 位置螺纹孔中加入 $0.4\text{ g}$ 的配重实现转子质心偏离轴心线的轻度不平衡现象。

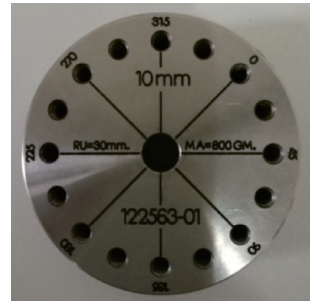


图4 转子系统质量盘  
Fig.4 Mass disk of rotor system

实验中,采样频率设为 $1\ 024\text{ Hz}$ ,采样长度设为 $1\ 024$ 点,工作转速设为 $4\ 000\text{ r/min}$ 。

#### 3.1 转子不平衡故障验证

列举柔性转子处于 $100\%$ 工作转速和负荷时,正常和轻度不平衡振动时域信号及频谱(time and frequency domain, 简称T&F),如图5、图6所示。

图5、图6分别给出了转子正常振动和轻度不平衡故障信号的时域波形及频谱。由时域波形看

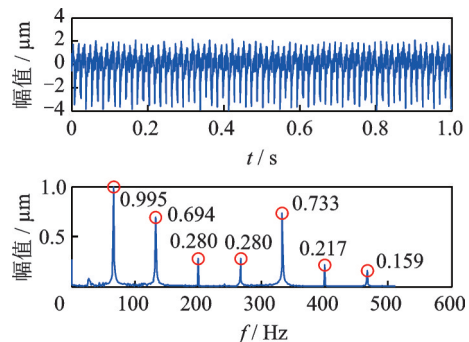


图5 转子正常振动信号的时域波形和频谱  
Fig.5 Normal rotor vibration signal in T&F

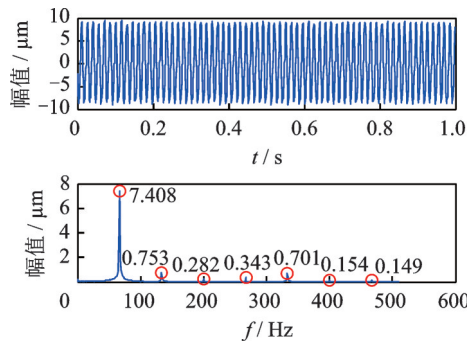


图6 转子轻度不平衡故障信号的时域波形和频谱  
Fig.6 Slight unbalance rotor vibration signal in T&F

出,转子正常振动信号的坐标幅值范围显示为 $4\sim 4\ \mu\text{m}$ ,转子轻度不平衡故障信号的坐标幅值范围显示为 $-10\sim 10\ \mu\text{m}$ 。因此,两信号虽然具有近似的振荡周期,但振荡幅值差异大,且转子正常振动信号主要表现为多分量叠加的形式,而转子轻度不平衡故障信号的单一性相对较强。在频谱中,转子正常振动信号的坐标幅值范围为 $0\sim 1\ \mu\text{m}$ ,转子轻度不平衡故障信号的坐标幅值范围为 $0\sim 8\ \mu\text{m}$ 。进一步给出转频 $67\ \text{Hz}$ 及其倍频位置的成分幅值情况,对比可见,两信号除转频幅值差异较大,其他成分幅值都对近似相等。因此,转子正常振动信号和轻度不平衡故障信号特征仅在转频处存在差异。根据离心压缩机转子振动异常判定的步骤3,进行转子轻度不平衡状态的一次判定。实验研究中设置振幅限值系数为1.0,列出20个监测节点的标准值、测量值和判定结果如表1所示。其中,由于节点10和19是转子临界区运行过程的监测节点,故采用无量纲的隔离裕度准则进行判定:节点10的标准值是 $16.36\%$ ,测量值是 $57.50\%$ ,判定正常;节点19的标准值是 $16.36\%$ ,测量值是 $57.50\%$ ,判定正常。

由表1可知,节点1~8对应转子刚性振动条件:1,2,7,8为转子启动和降速过程的监测节点;3,4,5,6为转子变载和运行过程的监测节点。节点9~20对应转子柔性振动条件:9,11,12,17,18,20为转子启动和降速过程的监测节点;13,14,15,16为转子变载和运行过程的监测节点;10,19为转子临界区运行过程的监测节点。可以看出,所有监测节点的监测结果都显示正常。需要注意的是:所有启动和降速过程的测量值远小于标准值,平均测量值约为平均标准值的 $26.20\%$ ;所有变载和运行过程的测量值小于标准值,平均测量值约为平均标准值的 $70.32\%$ ;临界区测量值为标准值的 $3.51$ 倍。这些结果验证了现行API振幅限值准则适用于故

表1 转子轻度不平衡20个监测节点的一次判定  
Tab.1 The first decision of 20 monitoring nodes for slight unbalance rotor

监测节点	标准值/ $\mu\text{m}$	测量值 $\mu\text{m}/$	判定结果
1	336.810	50.942	正常
2	336.810	68.118	正常
3	80.322	68.099	正常
4	80.322	66.855	正常
5	80.322	65.862	正常
6	80.322	68.918	正常
7	336.810	66.448	正常
8	336.810	50.039	正常
9	336.810	166.584	正常
11	336.810	140.602	正常
12	336.810	17.534	正常
13	43.994	24.646	正常
14	43.994	18.694	正常
15	43.994	18.500	正常
16	43.994	18.078	正常
17	336.810	18.470	正常
18	336.810	137.173	正常
20	336.810	166.670	正常

障报警场合,而难以识别因微弱故障导致的早期振动异常。因此,继续根据离心压缩机转子振动异常判定的步骤4~6进行转子轻度不平衡状态的二次判定,实验研究中设置振幅限值系数为1.0,列出20个监测节点的标准值、测量值和判定结果,如表2所示。

表2给出了转子处于轻度不平衡振动状态时,所设20个监测节点对应的标准值、测量值和二次判定结果。可以看出:节点10,19和20显示为标准值大于测量值,判定结果为正常;大部分节点的振动状态都判定异常。进一步观察判定结果异常的节点可以发现:节点1,2,4~9,11,18的振动测量值和标准值平均相差 $11.23\%$ ;节点3的振动测量值和标准值相差 $40.41\%$ ;节点12~17的振动测量平均值是标准平均值的 $4.81$ 倍。值得注意的是:节点12~17监测了柔性转子处于运行和变载时刻的振动状态,判定结果与图5、图6显示的波形差异相对应;其他节点虽然不是运行和变载区域节点,但同样能检测出异常,其微弱的差异表明这些对应的转子不平衡故障特征属微弱特征。这些结果验证了二次判定规则可辅助API准则识别因微弱故障而导致的转子早期振动异常。

表2 转子轻度不平衡20个监测节点的二次判定

Tab.2 The second decision of 20 monitoring nodes for slight unbalance rotor

监测节点	标准值/ $\mu\text{m}$	测量值/ $\mu\text{m}$	判定结果
1	13.726	16.460	异常
2	20.765	23.342	异常
3	13.956	23.421	异常
4	20.886	22.860	异常
5	20.940	22.447	异常
6	21.009	23.609	异常
7	19.444	21.948	异常
8	13.847	16.538	异常
9	55.379	58.106	异常
10	183.463	162.579	正常
11	41.148	48.846	异常
12	1.135	5.985	异常
13	1.429	7.592	异常
14	1.442	6.277	异常
15	1.297	6.309	异常
16	1.314	6.162	异常
17	1.344	5.953	异常
18	40.867	47.746	异常
19	192.401	175.924	正常
20	59.766	57.818	正常

### 3.2 其他典型故障实验验证结果

笔者直接给出转子轻度不对中、轻度偏心、轻度弯曲、轻度裂纹、轻度松动和轻度碰摩的20个监测节点判定个数,统计结果如表3所示。

表3 其他典型轻度故障验证统计

Tab.3 Verification statistics of other typical slight faults

类型	不对中	偏心	弯曲	裂纹	松动	碰摩
异常	15	16	20	20	20	11
正常	5	4	0	0	0	9

6类典型轻度故障的验证统计结果表明,二次判定规则辅助一次判定规则能识别转子早期异常。

## 4 实际应用验证

笔者采用轴流压缩机转子故障数据验证离心压缩机转子振动数据样本的异常判定方法的有效性,数据来源于西安陕鼓动力股份有限公司的AV90型轴流压缩机。轴流压缩机的空气压缩增压主要依

于转子上安装的多级动叶片、各级工作叶片和导流叶片来实现。气体连续流经由工作叶片和导流叶片构成的轴流压缩机各级,逐级压缩和升压。由于载荷较大,加压过程易使得各级流道扰动转子,从而加剧转子弯曲故障特征。当经过若干次加压后,若转子弯曲振动过大将导致工作叶片接触导流叶片,从而形成周期性碰摩故障。轴流压缩机开盖后的故障转子如图7所示。测试方法如图8所示的闭盖状态,采用一对Bently电涡流传感器互成 $90^\circ$ 安装于转子轴颈处,测量转子的径向振动位移。

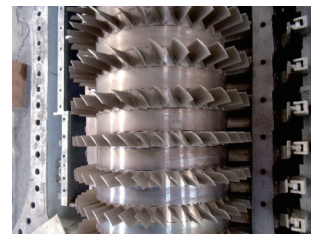


图7 轴流压缩机开盖状态

Fig.7 Opening state of axial flow compressor



图8 轴流压缩机闭盖状态

Fig.8 Closing state of axial flow compressor

轴流压缩机转子系统的工作转速测量值为4 569 r/min,测试系统的采样频率设为2 048 Hz,采样长度为1 024,获取转子系统一个加压周期的3个节点(180,300和550 kPa)振动位移信号,其时域波形和频谱分别如图9~11所示。

转子压力为180 kPa时,信号在时域表现为单一的正弦波形,振动峰值在 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 之间变化。

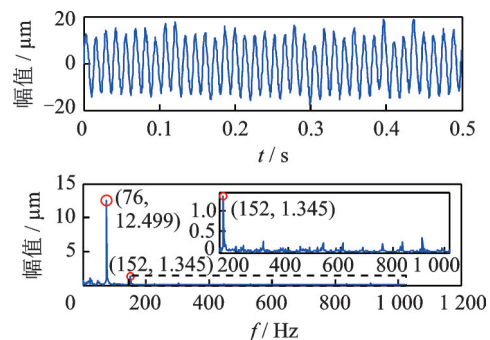


图9 压力180 kPa的转子振动信号时域波形和频谱

Fig.9 Rotor vibration signal with 180 kPa in T&amp;F

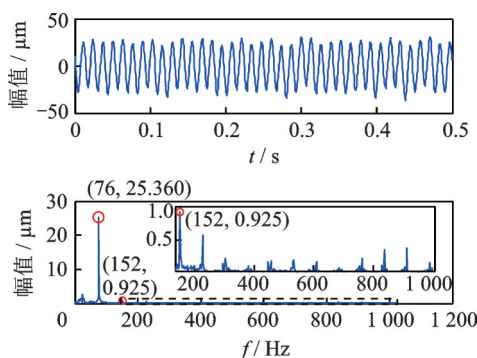


图10 压力300 kPa的转子振动信号时域波形和频谱

Fig.10 Rotor vibration signal with 300 kPa in T&F

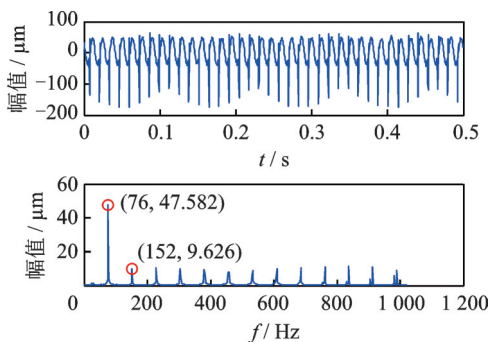


图11 压力550 kPa的转子振动信号时域波形和频谱

Fig.11 Rotor vibration signal with 550 kPa in T&F

频谱中,转速4 569 r/min对应的转频76 Hz幅值为12.499 μm,远大于其他成分幅值。进一步放大观察大于转频的成分,可以看到存在很多幅值微弱的谐波,二倍频152 Hz成分的幅值为1.345 μm,其右侧谐波幅值相对微弱的多,仅略大于噪声幅值。该节点为转子处于工作转速时的正常振动情况。

转子增压至300 kPa时,信号仍然表现为单一的正弦波形,振动幅值大于20 μm。频谱中,转频76 Hz成分幅值升高至25.360 μm,近似于原始幅值的2倍,仍然远大于其他成分幅值。在大于76 Hz的放大图中,152 Hz成分幅值降至0.925 μm,其右侧的成分幅值都小于152 Hz成分幅值,且基本处于同一数量级。相对180 kPa节点,转频幅值显著增大的情况代表转子由正常运行转变为弯曲运行。

转子增压至550 kPa时,信号不再是简单的正弦波形,而是多振动叠加形式,振动幅值处于-200~100 μm之间,峰值波动剧烈程度远大于180和300 kPa的对应结果,且此时波形已经严重不对称。频谱中,转频76 Hz幅值为47.582 μm,大于其他成分幅值,且其他小幅值成分已经不需要放大观察,与幅值为9.626 μm的二倍频152 Hz成分水平相同,共计有11个三倍频以上的高次谐波。相对180和300 kPa节点,各成分幅值明显升高,代表工作叶片和导流叶

片碰摩。令转子压力180 kPa时的振动状态相关计算值为标准值,进行离心压缩机转子弯曲和碰摩状态的一次判定,应用研究中设置振幅限值系数为1.2,列出3种状态的标准值、测量值和判定结果,如表4所示。

表4 轴流压缩机转子3种加压状态的一次判定

Tab.4 The first decision of three pressure states of the rotor of axial flow compressor

加压/kPa	标准值/μm	测量值/μm	判定结果
180	49.397	36.630	正常
300	49.397	66.770	异常
550	49.397	238.830	异常

由表4可以看出:180 kPa对应的正常振动节点显示正常,测量值相对标准值小25.8%;300 kPa对应为转子弯曲振动,测量值大于标准值的35.2%,表明转子在该监测节点的振动情况出现异常;550 kPa对应为转子碰摩振动,测量值为标准值的4.83倍,表明转子在该监测节点的振动远超过标准值。轴流压缩机工作条件下的3个加压时刻振动状态判定表明,由API振幅限值准则得出的振动标准值适用于高振动报警场合,但可以正确判别3种工作状态的正、异常情况。笔者继续进行轴流压缩机转子3种加压状态的二次判定,验证二次判定规则。应用研究中设置振幅限值系数为1.2,列出3种状态的标准值、测量值和判定结果,如表5所示。

表5 轴流压缩机转子3种加压状态的二次判定

Tab.5 The second decision of three pressure states of the rotor of axial flow compressor

加压/kPa	标准值/μm	测量值/μm	判定结果
180	11.022	—	—
300	11.022	22.117	异常
550	11.022	53.328	异常

由表5可知,以转子压力为180 kPa时刻的振动数据计算正常标准值为11.022。可以得出,转子压力为300 kPa时的测量值是标准值的2.01倍,转子压力为550 kPa时的测量值是标准值的4.84倍。该计算结果与API准则对应的计算结果类似,可以检测出转子异常振动状态。值得注意的是,二次判定规则在转子弯曲异常检测时,测量效果更明显,表明二次判定规则更适用于转子因微弱故障而导致的早期振动异常检测。

## 5 结论

1) API617的振幅限值准则适用于离心压缩机

转子的故障报警场合,而难以实现因早期微弱故障导致的振动异常检测。

2) 在 API617 启停过程监测区间的基础上,详细设计了离心压缩机转子的转速监测节点。

3) 以振幅限值系数修正振幅限值准则而构造的一次判定规则仍然适用于离心压缩机转子故障报警。

4) 以振幅限值系数修正有效振幅而构造的二次判定规则适用于转子因早期微弱故障导致的状态异常识别。

### 参 考 文 献

- [1] American Petroleum Institute. API standard 617—2014 axial and centrifugal compressors and expander-compressors [S]. Washington DC, America: API Publishing Services, 2014.
- [2] ZHOU H, MAO Y, ZHANG Q, et al. Vibroacoustics of a pipeline centrifugal compressor—part I: experimental study [J]. Applied Acoustics, 2018, 131(2): 112-128.
- [3] 张小勤. 苯酚装置离心压缩机转子振动故障分析[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(1): 72-75.  
ZHANG Xiaoqin. The analysis on vibration fault of centrifugal compressor rotor for the phenol device[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2015, 35(1): 72-75.(in Chinese)
- [4] 文定良. 离心压缩机振动故障分析与诊断案例[J]. 制造业自动化, 2016, 38(6): 137-142.  
WEN Dingliang. Centrifugal compressor vibration fault analysis and diagnosis example[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(6): 137-142.(in Chinese)
- [5] 胡大月. 离心压缩机振动故障的分析和处理[J]. 化工管理, 2018(2): 185-186.  
HU Dayue. Centrifugal compressor vibration fault analysis and processing [J]. Chemical Enterprise Management, 2018(2): 185-186.(in Chinese)
- [6] LI H K, HE C B, REZA M, et al. Weak defect identification for centrifugal compressor blade crack based on pressure sensors and genetic algorithm [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1264.
- [7] 王兆鑫. 一起 VK50-3 离心压缩机组振动异常的分析与处置[J]. 设备管理与维修, 2019(1): 82-83.  
WANG Zhaoxin. Abnormal vibration analysis and processing of VK50-3 centrifugal compressor [J]. Plant Maintenance Engineering, 2019(1): 82-83. (in Chinese)
- [8] SUN J, ZHAO J, WANG K. Online surge detection method based on axial displacement sensor of MSCC [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(15): 6029-6036.
- [9] HE C, LI H, LI Z, et al. An improved bistable stochastic resonance and its application on weak fault characteristic identification of centrifugal compressor blades[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442: 677-697.
- [10] 马再超, 温广瑞, 张恒辉, 等. 离心式压缩机转子故障识别的 EEMD-PCA 方法研究[J]. 振动与冲击, 2016, 38(4): 148-155.  
MA Zaichao, WEN Guangrui, ZHANG Henghui, et al. EEMD-PCA method for rotor fault identification in a centrifugal compressor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 38(4): 148-155.(in Chinese)
- [11] 张小龙, 谢永慧. 基于 API 617 的离心压缩机转子系统动力学特性研究[J]. 风机技术, 2017, 59(1): 32-37.  
ZHANG Xiaolong, XIE Yonghui. Study of the rotordynamic characteristics of a centrifugal compressor based on the API 617 standard [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2017, 59(1): 32-37.(in Chinese)
- [12] BRUN K, SIMONS S, KURZ R, et al. Measurement and prediction of centrifugal compressor axial forces during surge—part I: surge force measurements [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 140(1): 012601-012608.
- [13] LEI Y, XIAO L Z. Application of swirl brake in pipeline compressor system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 872: 185-191.
- [14] 冀沛尧, 何立东, 胡航领, 等. 涡轮泵密封对转子动力特性的影响[J]. 润滑与密封, 2019, 44(1): 52-57.  
JI Peirao, HE Lidong, HU Hangling, et al. Effect of turbo pump seal on rotor dynamic characteristics [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(1): 52-57.(in Chinese)
- [15] 胡永, 肖忠会, 王玉旌, 等. 电磁轴承支撑系统转子动力学分析[C]//第十六届沈阳科学学术年会. 沈阳: [s.n.], 2019: 116-122.



**第一作者简介:**温广瑞,男,1976年7月生,博士后、教授。主要研究方向为机械运行状态故障诊断及性能维护、现场动平衡理论及方法、远程及现场监测与系统开发。发表论文70余篇(SCI/EI收录30篇),申请国家发明专利17项,获得国家软件著作权13项。2015年获得陕西省青年科技奖,2014年获得中国振动工程学会青年科技奖,2013年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”,同年获得中国机械工程学会青年科技成就奖,2011年获得西安交通大学优秀博士后称号,2010年被聘为西安陕鼓动力股份有限公司“旋转机械远程在线监测及故障诊断中心”技术专家。  
E-mail: grwen@mail.xjtu.edu.cn

**通信作者简介:**马再超,男,1986年8月生,博士、助理研究员。主要研究方向为机械故障诊断、物联网数据管理与分析。  
E-mail: mazaichao@mail.tsinghua.edu.cn