

# 航空发动机篦齿-橡胶涂层机匣碰摩声信号特征研究

李斌<sup>1</sup>, 马瑞贤<sup>2</sup>, 王文<sup>1</sup>, 史鲁杰<sup>3</sup>

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;  
3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 为了验证声信号在发动机篦齿-橡胶涂层机匣碰摩故障诊断中的有效性, 开展了转静碰摩实验, 并采集了辐射声信号, 基于趋势分析和三维谱图提取了声信号的时频域特征, 揭示了转静碰摩过程中声压的变化规律及特征频谱。研究结果表明: 转静未碰摩时, 声压随着转子转速升高基本保持稳定, 此时声压级不超过 105 dB; 转静碰摩时, 声压急剧升高, 声压级最大可达 155 dB, 随着碰摩减弱, 声压逐渐降低; 声信号的特征频率成分包括机匣与鼓筒各自的行波共振频率以及二者的组合频率。与机匣振动加速度信号相比, 声信号包含更丰富的碰摩特征频率, 可作为诊断转静碰摩故障的有效参考依据。

**关键词:** 航空发动机; 转静碰摩; 声信号; 故障诊断

中图分类号: V231.9 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2026.02.009

[引用本文格式] 李斌, 马瑞贤, 王文, 史鲁杰. 航空发动机篦齿-橡胶涂层机匣碰摩声信号特征研究[J]. 热能动力工程, 2026, 41(2): 78-84. LI Bin, MA Ruixian, WANG Wen, SHI Lujie. Study on the characteristics of sound signals induced by rub-impact between labyrinth and rubber-coated casing for aero-engine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2026, 41(2): 78-84.

## Study on the Characteristics of Sound Signals Induced by Rub-impact Between Labyrinth and Rubber-coated Casing for Aero-Engine

LI Bin<sup>1</sup>, MA Ruixian<sup>2</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, SHI Lujie<sup>3</sup>

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200241;  
2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072;  
3. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu, China, Post Code: 610500)

**Abstract:** In order to verify the effectiveness of sound signals in diagnosing the rub-impact fault between the aero-engine's labyrinth and the rubber-coated casing, the rotor-stator rub-impact experiments were conducted and the radiated sound signals were collected. The time-frequency domain characteristics of sound signals were extracted based on trend analysis and 3D spectrogram. The variations of the sound pressure and the corresponding spectral features during the rotor-stator rub-impact were revealed. The results indicate that when rotor-stator rub-impact does not occur, the sound pressure remains almost stable with the increase of rotor speed, and the resulting sound pressure level (SPL) is less than 105 dB. However, during rotor-stator rub-impact, the sound pressure value abruptly increases, leading to a maximum SPL up to 155 dB. The sound pressure gradually decreases as the rub-impact intensity diminishes. The characteristic frequency components of sound signal include the respective traveling-wave resonant frequency in both of the casing and the drum, as well as the combination frequency of these traveling-wave resonant frequencies. In comparison with the vibration acceleration signals collected in the casing, more

收稿日期: 2025-07-08; 修订日期: 2025-09-22

基金项目: 国家科技重大专项 (J2022-IV-0011-0025)

**Fund-supported Project:** National Science and Technology Major Project (J2022-IV-0011-0025)

作者简介: 李斌 (1990-), 男, 中国航发商用航空发动机有限责任公司工程师。

rub-impact characteristic frequencies can be observed in sound signals, and it can be utilized as the reference signal for rub-impact fault diagnosis.

**Key words:** aero-engine; rotor-stator rub-impact; sound signals; fault diagnosis

## 引 言

转静碰摩是航空发动机运行过程中的常见振动故障。篦齿密封装置、涡轮叶尖与机匣涂层等位置允许轻微碰摩,但持续、规律、强烈的碰摩容易引起发动机严重故障,其危害不容忽视。为减轻转静碰摩对发动机运行安全的影响,提取其引起的转静子碰摩信号特征并进行故障诊断至关重要。

国内外学者通过理论建模和实验测量已对转静碰摩的振动特征开展了大量的研究。理论建模方面,Patel 等人<sup>[1]</sup>基于一个六自由度裂纹转子弯扭耦合模型,对比了转子发生裂纹故障和碰摩故障时扭振成分的变化,结果表明,碰摩和裂纹故障均会加强系统非线性特征;Mokhtar 等人<sup>[2]</sup>建立了中置盘碰摩模型,讨论了摩擦系数、转静间隙以及静子刚度对碰摩的影响,结果表明,静子振动和转子横向、扭转振动频谱特征的组合信息可用于识别碰摩故障;邓小文等人<sup>[3]</sup>考虑转子弯曲-扭转耦合振动,建立了八自由度双盘柔性转子-静子碰摩模型,分析了碰摩对扭振的影响,结果表明,转子扭转振动的变化可有效诊断转静碰摩故障;廖明夫等人<sup>[4]</sup>建立了转子/机匣碰摩模型,分析了碰摩转子的弯扭耦合振动,结果表明,剧烈的碰摩会导致转子的反进动,而碰摩与转速控制力矩的延迟共同作用会导致转子的扭转振动加剧,甚至可能发生扭振失稳,这进一步说明转子扭振信号可以作为转静碰摩的重要诊断信息;Li 等人<sup>[5]</sup>建立了叶片-机匣碰摩的双转子系统动力学模型,重点分析了多个叶片碰摩下的轮盘振动响应,结果表明,叶片数量和碰摩刚度对振动响应影响较大。实验研究方面,侯理臻等人<sup>[6]</sup>采用了进动理论分析了碰摩转子振动特征,结果表明,风车不平衡状态下的转静碰摩会激发正反进动的超次谐波,尤以  $3/2$  倍频特征显著;王海飞等人<sup>[7]</sup>和 Guo<sup>[8]</sup>通过实验研究了单点碰摩以及局部碰摩,分析了机匣上的加速度信号特征,结果表明,碰摩特征表现为周期性冲击,冲击频率等于旋转频率与叶片数的乘

积,频谱中出现叶片通过频率及其倍频;符烧等人<sup>[9]</sup>采集了发动机机匣振动信号,基于信号的时频分析,可识别叶片模态形状变化,结合模态保证准则(MAC)验证故障特征,可缩小查找故障的范围;梁智超等人<sup>[10]</sup>建立了转子/机匣碰摩系统模拟实验器,结果表明,当碰撞冲击效果较明显时,机匣振动响应的高频信号冲击占优,而当转静件发生严重碰撞时,机匣响应中同时包含高频冲击信号和低频摩擦信号,转静子材料对碰摩引起的振动特征有重要影响;马瑞贤等人<sup>[11-12]</sup>分析了带篦齿鼓筒与橡胶涂层机匣碰摩的转子与机匣振动信号,并在振动信号中提取到了鼓筒及机匣的共振频率,结果表明,所捕捉到的碰摩的4个阶段与常规金属材料碰摩有显著差异;曾振坤等人<sup>[13]</sup>的仿真研究及 Zhou 等人<sup>[14]</sup>的仿真与试验研究亦验证了转静子耦合共振现象。由此可见,转静子耦合共振是碰摩的重要特征。然而,上述研究主要基于转静子稳态振动信号来进行转静碰摩故障诊断,如稳态振动时轴心的轨迹和频谱以及同频、倍频、分频的幅值和相位等。

除振动信号外,机械声信号同样蕴含设备的运行状态信息<sup>[15]</sup>,可用于航空发动机状态监测及故障诊断,相关学者已在该方面进行了探索研究。吴峰琦等人<sup>[16]</sup>通过典型的碰摩故障实验模拟,采集和提取了碰摩产生的声谱特征,证明了声信号对转子碰摩故障诊断的有效性。李熠等人<sup>[17]</sup>结合盲源分离和小波消噪方法,提高了碰摩故障声频信号的信噪比,使声频信号能更准确地反映碰摩信息。与振动信号相比,声信号的采集受空间和位置限制较弱,具有可实现远距离非接触式测量及可利用声源定位碰摩位置的优势。总体而言,目前在转静碰摩引起的声信号方面的研究较少,其时域与频域特征未被充分挖掘,也未考虑静子机匣涂层材料差异的影响。

针对上述问题,结合先进大涵道比航空发动机增压级采用篦齿-硫化硅橡胶涂层密封的实际结构,本文实验测量了模拟增压级鼓筒篦齿与机匣橡胶涂层碰摩的声信号,提取了碰摩不同阶段声信号的时域、频域及趋势特征,重点分析了碰摩引起的转

静子耦合行波共振特征,并与机匣振动加速度信号进行了对比,以验证声信号特征的正确性与独特优势。

1 实验介绍

1.1 实验系统

模拟增压级鼓筒篦齿与机匣橡胶涂层碰摩声采集实验的原理如图 1 所示。实验器转子系统的结构模拟实际发动机低压转子结构,由 3 个滚动轴承支承。其中,转子部分包含模拟风扇盘、模拟风扇轴、鼓筒、模拟涡轮轴以及模拟涡轮盘,转子在涡轮端由电机驱动,转子与电机之间采用柔性联轴器连接。模拟风扇盘与模拟涡轮盘分别等效风扇级与低压涡轮的质量和转动惯量特征。鼓筒为环形薄壁件,用于模拟发动机增压级鼓筒的结构特点,其通过止口结构过盈安装在模拟风扇轴上,鼓筒等直段加工有两级整圈密封篦齿,篦齿高度为 8 mm。机匣结构亦为环形薄壁壳体,在机匣碰摩环内侧粘贴硫化橡胶涂层,涂层厚度为 2 mm、宽度为 21 mm。机匣右端通过螺栓与实验器支座刚性连接,其中机匣螺栓孔预留调节空间,用于沿垂直方向调整机匣橡胶涂层与鼓筒篦齿之间的径向间隙  $\Delta h$ 。实验过程中,随着转子转速升高,鼓筒的不平衡响应逐渐增大,当篦齿在竖直方向的振动位移幅值大于  $\Delta h$  时,篦齿与橡胶涂层碰摩。

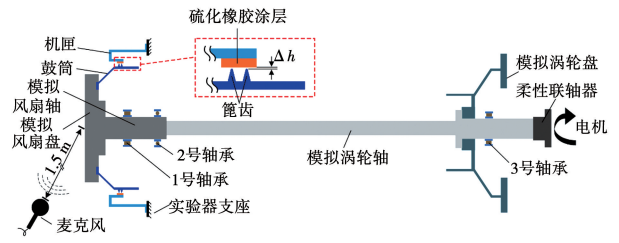


图 1 碰摩声采集实验原理

Fig. 1 Experimental principle of rub-impact sound acquisition

为了捕获鼓筒篦齿与橡胶涂层碰摩时的声音,在距离转子左端面中心 1.5 m(与左端面夹角 45°)处布置 1 支麦克风传声器,采样频率为 16 kHz。实验中共调整了 3 组间隙值  $\Delta h$ :0.6,0.4 和 0.2 mm,实测碰摩转速分别为 2 121,1 663 和 1 119 r/min。实验工况参数如表 1 所示。

表 1 碰摩工况参数

Tab. 1 Parameters of rub-impact cases

工况	$\Delta h/\text{mm}$	碰摩转速 $\Omega/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
1	0.6	2 121
2	0.4	1 663
3	0.2	1 119

1.2 碰摩结构动力学特征

为了便于后续分析实验数据的频谱特征,利用 Ansys 有限元计算平台,计算了机匣和鼓筒在安装状态下的固有频率,此时二者均在法兰安装面上完全约束。机匣的节径振型固有频率及模态的计算结果如图 2 所示。可以看到,机匣前两阶节径型固有频率分别为 599.64 和 790 Hz,其中 790 Hz 处为三节径振型。

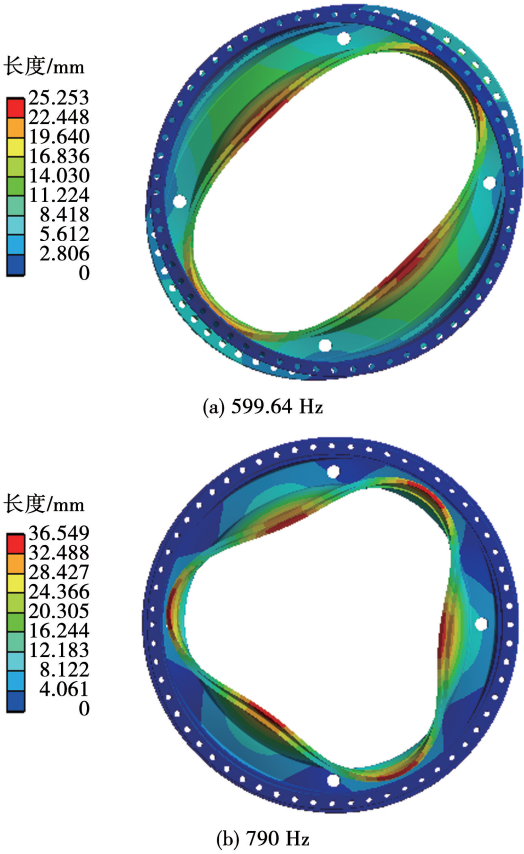


图 2 机匣的节径振型固有频率及模态

Fig. 2 Natural frequencies and modes of pitch diameter vibration mode of casing

图 3 给出了模拟增压级鼓筒固有频率及模态的计算结果,计算时忽略鼓筒安装螺栓对其刚度以及模

拟风扇盘和模拟风扇轴对鼓筒的影响。可以看到,增压级低阶模态为节径振型,一阶固有频率为487 Hz。

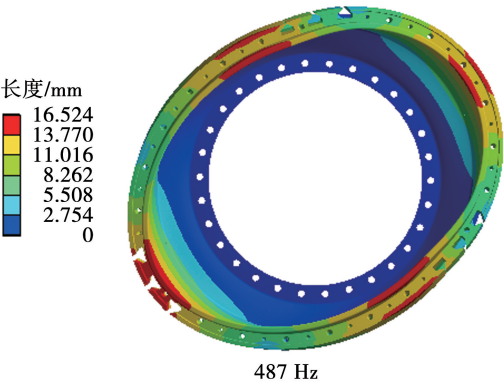


图3 模拟增压级鼓筒固有频率及模态结果  
Fig.3 Natural frequency and modes result of simulated booster drum

2 实验结果及分析

2.1 碰摩声信号时域分析

图4给出了不同工况下篦齿与橡胶涂层碰摩过程的声压时域波形。

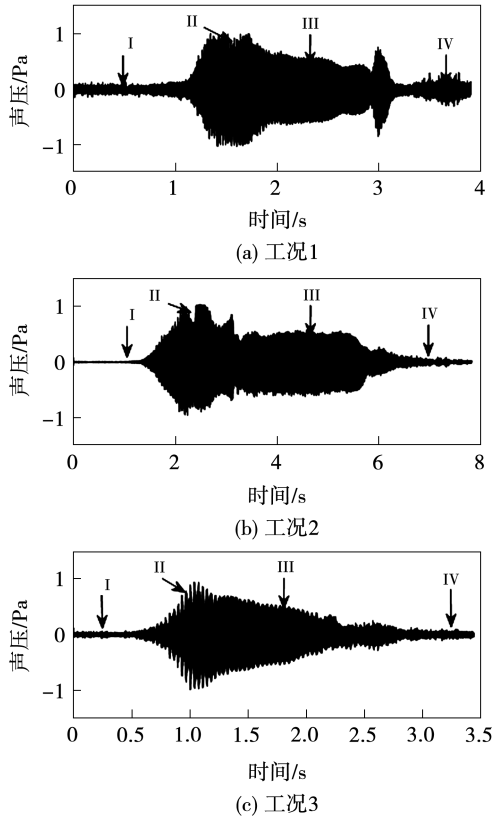


图4 不同工况下碰摩过程中监测点声压随时间变化曲线  
Fig.4 Time-domain waveforms of sound pressure at monitoring point during rub-impact of different cases

可以看到,3种碰摩工况下的声压波形演变规律表现出相似性,变化过程可分为4个阶段。在阶段Ⅰ时,篦齿与涂层尚未碰摩,声压值保持平稳,此时声信号主要包括转子正常运转的振动噪声及转子旋转鼓风噪声,但其声压值约为0 Pa,可见正常运转下转子所产生的声压较低;在阶段Ⅱ时,篦齿与涂层碰摩强烈,声压迅速增大,最大值约为1 Pa;在阶段Ⅲ时,篦齿与橡胶涂层持续碰摩,但由于橡胶涂层逐渐磨损,篦齿与涂层接触变弱,声压缓慢下降;在阶段Ⅳ时,由于涂层磨损深度增加,篦齿与涂层逐渐脱离碰摩,声压逐渐衰减至转子正常运转时的水平。以上声信号的4个变化过程,即“平稳-急剧增加-缓慢减小-恢复平稳”,反映了篦齿与橡胶涂层碰摩时碰摩程度的变化。

2.2 碰摩声信号趋势分析

为了量化分析碰摩过程中声压的变化趋势,图5给出了3种碰摩工况下噪声声压有效值(RMS)随时间的变化曲线。

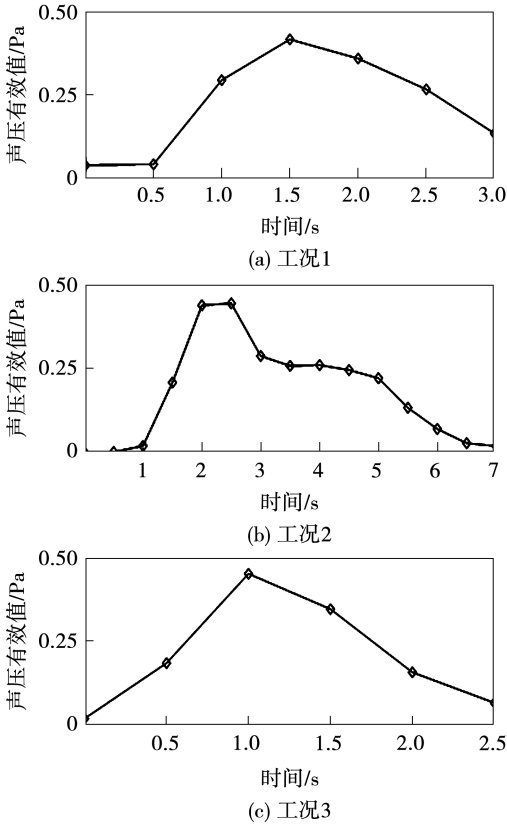


图5 不同工况下碰摩过程中监测点声压RMS值随时间的变化  
Fig.5 Time-domain waveforms of sound pressure RMS values at monitoring point during rub-impact of different cases



可以看到,声压 RMS 值的变化趋势与图 4 中声压幅值一致,碰摩严重时,声压 RMS 值明显增大,声压 RMS 值达到最大值后,开始逐渐减小,直至恢复到碰摩前的声压水平。在声压 RMS 峰值时,篦齿与橡胶涂层摩擦最严重,所辐射出的噪声能量最强。

为了更直观地展示碰摩噪声的能量级别,按下式将声压信号的 RMS 值转换为声压级:

$$SPL = 20\log(\frac{p}{p_{ref}})$$

式中: $p$ —声压信号,Pa; $p_{ref}$ —参考声压,空气中其值为  $2 \times 10^{-5}$  Pa; $SPL$ —声压级,dB。

图 6 给出了 3 种工况下噪声声压级随时间的变化趋势。可以看到,碰摩未发生时,3 种工况下的噪声声压级值分别为 105,54 和 91 dB;碰摩发生时,3 种工况下的噪声声压级最大值分别为 153,154 和 155 dB。与未碰摩时相比,3 种工况下噪声声压级最大值分别增大了 48,100 和 64 dB,进一步说明了篦齿与橡胶涂层碰摩辐射出高能级噪声。

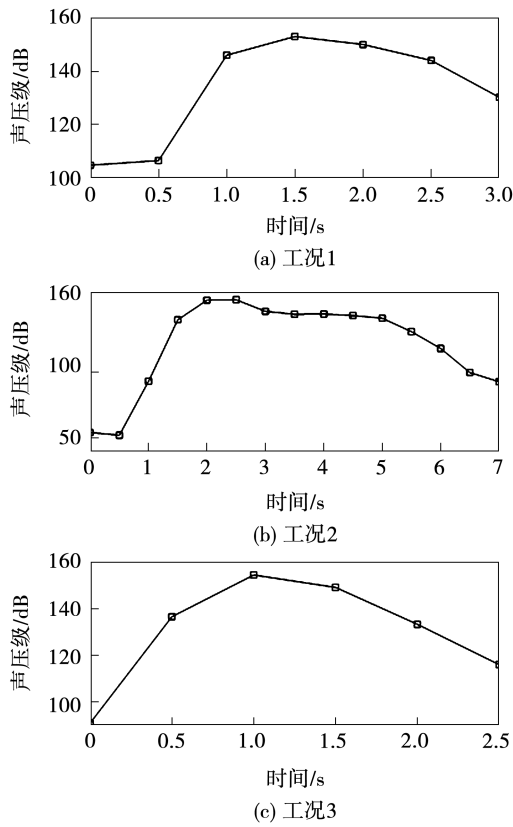


图 6 碰摩过程中监测点声压级随时间的变化  
Fig. 6 Time-domain waveforms of sound pressure level at monitoring point during rub-impact

2.3 碰摩声信号频谱分析

进一步分析篦齿与橡胶涂层碰摩的辐射噪声频谱特征,图 7 给出了 3 种工况下转静碰摩过程中的辐射噪声声压瀑布图。

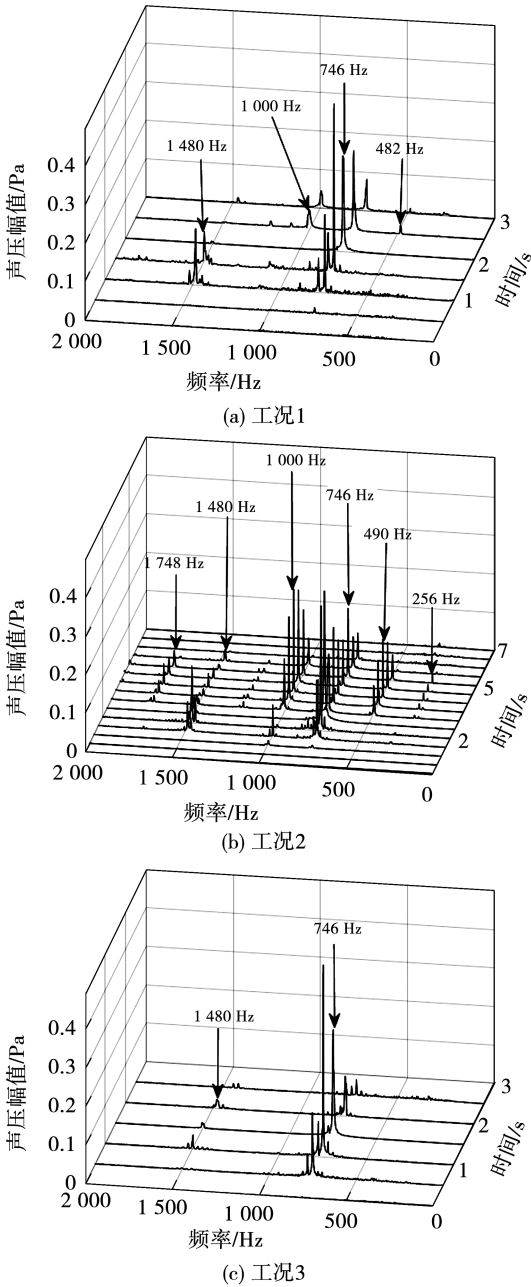


图 7 不同工况下的碰摩声压瀑布图  
Fig. 7 Sound pressure waterfalls of different rub-impact cases

图 7(a)中可以看到,对于工况 1,按照时间轴的顺序,未发生碰摩时,频谱上仅有低频噪声,幅值接近 0 Pa。当碰摩发生时,首先激起了频率为  $f_1 = 746$  Hz 和  $f_2 = 1\,480$  Hz 的振动,结合图 2 机匣固有

频率分析结果,特征频率 $f_1$ 应为机匣三节径振型对应的频率,特征频率 $f_2$ 为机匣三节径振型频率的二倍频,即 $f_2 \approx 2f_1$ ;机匣三节径振型固有频率略低于仿真结果,误差来源于计算机匣固有频率时忽略了螺栓连接的刚度弱化作用。随着碰摩力的变化,可捕捉到频率为 $f_3 = 482\text{ Hz}$ 和 $f_4 = 1\,000\text{ Hz}$ 的噪声成分,结合图 3 增压级鼓筒固有频率分析结果,特征频率 $f_3$ 应为增压级鼓筒一阶固有频率,定义为机匣三节径振型频率与增压级鼓筒一阶固有频率之差 $\Delta f = f_1 - f_3$ ,特征频率 $f_4$ 满足 $f_4 = f_1 + \Delta f$ ,即 $1\,000\text{ Hz}$ 处的噪声信号为机匣三节径振型频率与增压级鼓筒一阶固有频率的耦合振动产生。

从图 7(b)中可以看到,工况 2 的碰摩噪声瀑布图上可同时捕捉到更多频率成分,包括了机匣三节径振型频率 $f_1$ 及其 2 倍频 $f_2$ ,以及增压级鼓筒一阶固有频率 $f_3 = 490\text{ Hz}$ ,此处增压级鼓筒一阶固有频率与工况 1 稍有差异,应是由于碰摩附加刚度的变化所引起。此外,工况 2 碰摩时间较长,频谱图上除 $f_1 + \Delta f(1\,000\text{ Hz}, \Delta f = f_1 - f_3)$ 的组合频率外,还出现了 $\Delta f(256\text{ Hz})$ 及 $2f_1 + \Delta f(1\,748\text{ Hz})$ 的组合频率,反映了增压级鼓筒与机匣的耦合共振特征。

对于碰摩工况 3,由于碰摩时间较短且碰摩转速低,声信号只捕捉到了机匣三节径振型对应的频率 $746\text{ Hz}$ 及其 2 倍频 $1\,480\text{ Hz}$ 。

为了更清晰地表明篦齿与橡胶涂层碰摩过程中声信号的频率特性,图 8 对比了 3 种碰摩工况下的声信号特征频率,并与文献[12]的机匣振动加速度信号特征频率进行了对比。

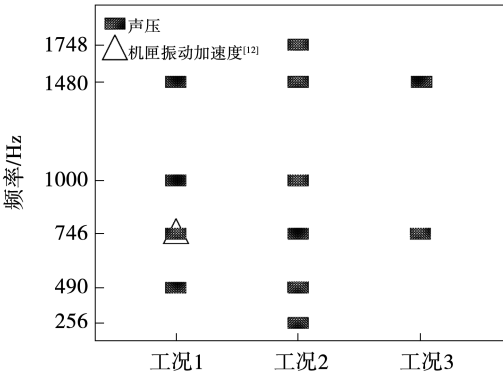


图 8 不同碰摩工况的特征频率对比

Fig. 8 Comparison of characteristic frequencies between different rub-impact cases

由图 8 可知,在不同的碰摩工况下,均可捕捉到机匣三节径振型频率 $f_1 = 746\text{ Hz}$ 及其二倍频成分 $2f_1$ ;此外,碰摩严重时还会出现增压级鼓筒一阶固有频率 $f_3$ ,以及 $f_1$ 与 $f_3$ 的组合频率: $\Delta f = f_1 - f_3$ 、 $f_1 + \Delta f$ 及 $2f_1 + \Delta f$ 等。振动加速度信号中,仅包含机匣的三节径振型频率,可见,篦齿与橡胶涂层碰摩声信号的特征频率更丰富。

3 结 论

本文采集了旋转薄壁鼓筒篦齿结构与机匣橡胶涂层碰摩时的声信号,分析了其时频域特征及趋势特征,得到的主要结论有:

- (1) 篦齿-橡胶涂层碰摩时,声信号时域波形幅值变化包括“平稳-急剧增加-缓慢减小-恢复平稳”的 4 个阶段,能反映转静碰摩接触状态的变化过程。
- (2) 篦齿-橡胶涂层碰摩时的声压有效值显著高于未碰摩声信号,且声压有效值趋势图中存在峰值,峰值所对应的声压级较未碰摩声信号增加 48 dB 以上。声压级突变超过 48 dB 是篦齿-橡胶涂层碰摩的典型时域特征,可作为碰摩发生的判据。
- (3) 在篦齿-橡胶涂层碰摩的声信号频谱图中,存在机匣及鼓筒的固有频率( $f_1, f_3$ )及其倍频成分,还存在 2 个固有频率的组合成分( $\Delta f = f_1 - f_3$ 、 $f_1 + \Delta f$ 及 $2f_1 + \Delta f$ )。出现行波共振频率及其组合频率是篦齿-橡胶涂层碰摩的典型频域特征。

参考文献:

[1] PATEL T H, DARPE A K. Coupled bending-torsional vibration analysis of rotor with rub and crack[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326: 740-752.

[2] MOKHTAR M A, KAMALAKAR DARPE A, GUPTA K. Investigations on bending-torsional vibrations of rotor during rotor-stator rub using Lagrange multiplier method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 401: 94-113.

[3] 邓小文,廖明夫,Robert Liebich,等. 碰摩转子的弯曲和扭转振动分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 97-104.

DENG Xiaowen, LIAO Mingfu, LIEBICH R, et al. Coupled bending and torsional vibrations due to rotor-to-stator contacts[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 97-104.

[4] 廖明夫,宋明波,张霞妹. 转子/机匣碰摩引起的转子弯扭耦合

- 振动[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(5):1009–1017.
- LIAO Mingfu, SONG Mingbo, ZHANG Ximei. Coupled bending and torsional vibration due to rotor-casing contact[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2016, 36(5):1009–1017.
- [5] LI S, ZHI W, SUN R, et al. Analysis of vibration characteristics of rotor-stator rubbing faults in a dual-rotor system[C]//2024 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference, Beijing, China, 2024.
- [6] 侯理臻, 廖明夫, 王四季, 等. 航空发动机转子不平衡下转静摩擦实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22):14–20, 43.
- HOU Lizhen, LIAO Mingfu, WANG Siji, et al. Experimental study on the aero-engine rotor-stator rubbing in imbalance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(22):14–20, 43.
- [7] 王海飞, 陈 果. 考虑多叶片-机匣多点变形转静摩擦模型的机匣响应特征与验证[J]. 推进技术, 2016, 37(1):128–145.
- WANG Haifei, CHEN Guo. Casing response characteristics and its verification considering multiple blades-casing multiple point deformation rotor-stator rubbing model[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(1):128–145.
- [8] GUO C. Study on the recognition of aero-engine blade-casing rubbing fault based on the casing vibration acceleration[J]. Measurement, 2015, 65:71–80.
- [9] 符 晓, 陈 钊, 左思佳. 基于小波多分辨分析的试飞中发动机转静摩擦故障检测及诊断[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(1):227–230.
- FU Rao, CHEN Zhao, ZUO Sijia. Detection and diagnosis to aero-engine rotor-stator rubbing fault in flight test based on the wavelet multi-resolution analysis[J]. Mechanical Research and Application, 2016, 29(1):227–230.
- [10] 梁智超, 张振波, 刘书国, 等. 转子-支承-机匣系统碰摩实验及特征提取[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3):604–611.
- LIANG Zhichao, ZHANG Zhenbo, LIU Shuguo, et al. Experiment and characteristics extraction of rub-impact in rotor-support-case system[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3):604–611.
- [11] 马瑞贤, 马倩玲, 廖明夫, 等. 发动机篦齿-橡胶涂层碰摩转子振动特性实验研究[J]. 推进技术, 2023, 44(10):153–161.
- MA Ruixian, MA Qianling, LIAO Mingfu, et al. Experimental study on vibrational characteristics induced by rubbing between labyrinth and rubber-coating for aero-engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(10):153–161.
- [12] 马瑞贤, 王 鑫, 王开明, 等. 航空发动机篦齿-橡胶涂层机匣碰摩实验[J]. 航空学报, 2024, 45(4):78–89.
- MA Ruixian, WANG Xin, WANG Kaiming, et al. Rubbing experimental study on labyrinth and rubber-coated case for aero-engines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(4):78–89.
- [13] 曾振坤, 张大义, 范 雨, 等. 碰摩引发的增压级转静耦合振动特性分析方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10):2233–2241.
- ZENG Zhenkun, ZHANG Dayi, FAN Yu, et al. Method of rub-induced booster rotor/stator coupled vibration characteristics analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10):2233–2241.
- [14] ZHOU Tao, JIA Yanfei, ZOU Limin, et al. Vibration characteristics of blade-casing rubbing fault considering rotor-stator coupling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 218:111589.
- [15] 李造鼎, 李锡润, 虞和济. 故障诊断的声学方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 1989.
- LI Zaoding, LI Xirun, YU Heji. The acoustic method of fault diagnosis[M]. Beijing:Metallurgical industry press, 1989.
- [16] 吴峰琦, 孟 光, 荆建平. 基于声信号三维谱分析的转子复合碰摩故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6):79–84.
- WU Fengqi, MENG Guang, JING Jianping. Feature extraction based on 3D spectrum analysis of acoustic signal in rotor malfunctions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6):79–84.
- [17] 李 熠, 何永勇, 李志农, 等. 盲源分离和小波消噪在碰摩声频信号分析中的应用研究[J]. 机械强度, 2005, 27(6):719–724.
- LI Yi, HE Yongyong, LI Zhinong, et al. Study on application of blind source separation wavelet denoising in rubbing fault acoustic signal analysis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(6):719–724.

(刘 颖 编辑)