

转子-支承-机匣系统碰摩试验及特征提取

梁智超¹, 张振波², 刘书国¹, 洪杰¹

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对航空发动机转子系统的结构特征和转静件碰摩的动力学特征,建立了转子-支承-机匣系统碰摩模拟试验器.对叶片与机匣间轻微碰摩和严重碰摩两种工况下转子和机匣振动响应进行了试验测量,并基于连续小波变换和连续小波包能量的时-频分析方法分别对转子和机匣的振动信号进行了特征提取.结果表明机匣响应信号同时包含高频冲击信号和低频摩擦信号,轻微碰摩时以碰撞冲击效果为主,机匣响应主要为高频冲击信号;严重碰摩时摩擦效应增强,可为碰摩故障诊断和识别提供方法和依据.

关 键 词: 叶片; 转子; 机匣; 碰摩; 时-频分析

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

Experiment and characteristics extraction of rub-impact in rotor-support-case system

LIANG Zhi-chao¹, ZHANG Zhen-bo², LIU Shu-guo¹, HONG Jie¹

- (1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: A rotor-support-case system simulated test rig was established by considering the structure characteristics and dynamic characteristics in blade to case rub-impact of aero-engine. The responses of both slight rub-impact and serious rub-impact were measured. Time frequency analysis methods, continuous wavelet transform and wavelet packet energy were used to perform the feature extraction of rotor and case. The results indicate that the response of case contents both high frequency signal and low frequency signal. The high frequency signal in case is mainly attributable to impact during slight rub-impact, and the friction effect is improved in serious rub-impact. As a conclusion, it may play a role in rub-impact fault diagnosis and identification.

Key words: blade; rotor; case; rub-impact; time-frequency analysis

转静件碰摩是旋转机械中常见的典型故障,可能诱发严重事故^[1],航空发动机由于高转速、高效率和高负荷的设计要求,使得转静件的碰摩问题一直是重要的研究内容.尤其是对于现代高结构效率^[2]的航空发动机系统而言,高速旋转的转子结构和轻薄的板壳静子结构大量应用使得结构

间相互耦合程度提高,振动响应规律更加复杂,非线性特征更为突出^[3].因此,对于带有航空发动机结构力学特征的转静件碰摩问题的研究具有理论和工程应用价值.

国内外学者针对航空发动机转静件碰摩问题开展了大量的研究工作,内容涵盖力学模型、特征

机理、数值仿真、试验验证和故障识别诊断等诸多方面^[4-9]. 在试验研究方面, Padova 等^[10]对工作转速下转子叶片与可变形(弱刚性)机匣的碰摩进行了试验研究,对叶片机匣接触碰撞的全过程测试,分析了碰摩力受机匣刚性和叶片刚性的影响规律. 国内学者^[11-15]也建立了多种结构形式的试验器,对不同状态的转静件碰摩进行了试验研究. 高艳蕾等^[11]建立转子-机匣试验器,模拟单点碰摩、双点碰摩、偏摩和双转子效应碰摩,对比分析各种碰摩状态的时域、频域、轴心轨迹、相位、机匣传递特性的特征和规律. 王四季等^[13]建立双转子碰摩试验台,提出用组合频率方法判别碰摩的发生和定位. 然而,碰摩过程与结构特征密切相关,涉及因素众多,针对航空发动机碰摩,需要建立考虑转静件振动耦合、更接近发动机真实结构/力学特征的试验器,探索更为科学的方法和理论对碰摩特征进行提取和分析.

因此,本文设计并建立一套基于航空发动机转子系统结构特征,同时考虑叶片与机匣碰摩力学特征的转子-支承-机匣碰摩模拟试验器,测试不同碰摩程度(刮蹭面积)情况下转子和机匣的响应,并进行转静件响应信号特征的提取和分析,得出碰摩程度对碰摩响应时、频响应特征的影响规律.

1 试验方案

1.1 试验器总体结构

转子-支承-机匣系统转静件碰摩模拟试验器结构如图1所示. 左侧由大功率直流电动机驱动转子运转,转轴靠近电动机端一侧刚性支承,另一侧弹性支承;转轴中部靠近弹性支承端固定安装一个圆盘,圆盘沿周向均布6个平板模拟叶片;刚性支承端通过轴承座直接安装固接于刚性台面,弹性支承端连接支承机匣、碰摩段机匣,并通过两个支座固接于刚性台面.

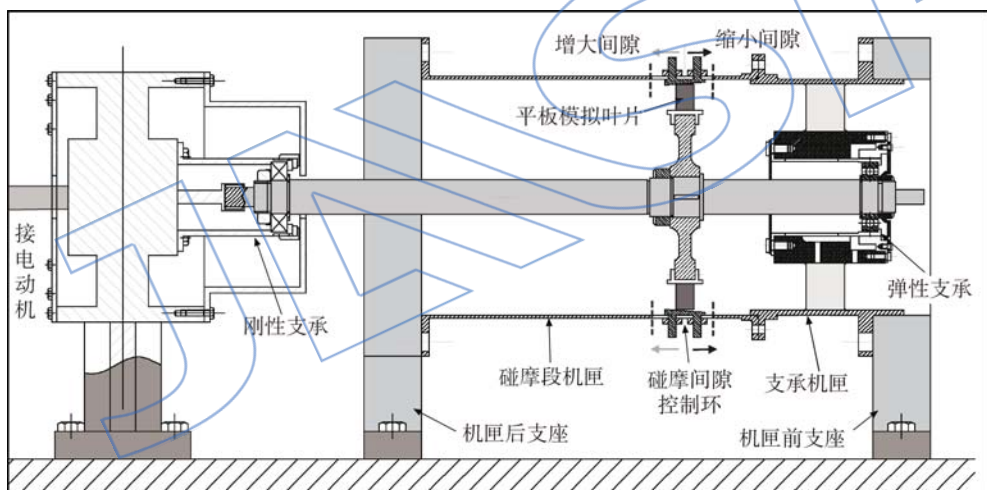


图1 试验器结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of test rig

1.2 碰摩试验段

转子系统运转时,由于自身不平衡量的作用使得叶片与碰摩间隙控制环(以下简称碰摩环)之间的间隙消失,发生碰摩. 平板模拟叶片与碰摩段机匣之间的初始径向间隙通过碰摩环的轴向移动来调整和控制,可以实现转子叶片(以下简称叶片)与机匣(碰摩环)之间不同程度的碰摩,如图2所示.

1.3 测点布置

试验器的振动响应测点方案布置如图3所示. 其中,振动位移采用非接触式的电涡流位移传感器,测点位于靠近刚性支承端的转轴(测试试验转子水平方向 X、竖直方向 Y 的位移). 振动加速

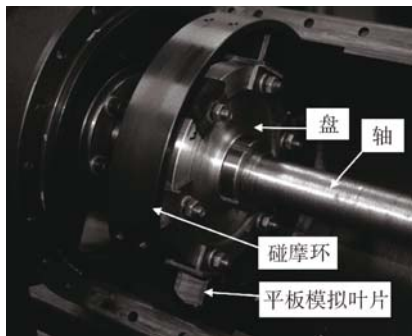


图2 碰摩试验段

Fig. 2 Test section of rub-impact

度采用加速度传感器测量,1#测点位于轴承座外环,测量轴承位置的振动加速度响应;2#测点位

于弹性支承框架外部,测量支承框架的振动加速度响应;3#,4#,5#测点为三向加速度传感器,位于碰摩环外部,测量碰摩环的振动加速度响应;6#测点位于碰摩机匣安装边(靠近机匣后支座),测量碰摩段机匣的振动加速度响应。

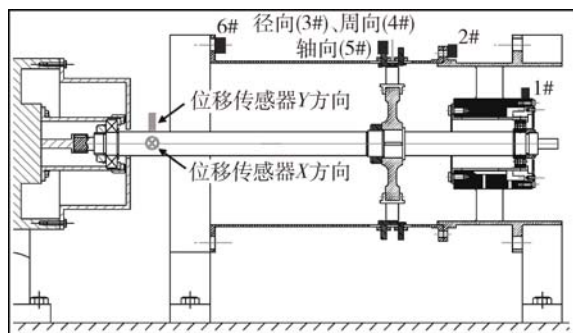


图3 测点方案

Fig. 3 Assignment of the sensors

1.4 试验状态与测试参数

试验转子的临界转速约为 4000 r/min,碰摩试验中工作转速选定为亚临界状态(1650 r/min). 采样频率为 2560 Hz.

轻微碰摩和严重碰摩两组试验中,叶片与碰摩环之间的初始间隙分别为 0.5 mm 和 0.3 mm,以实现转静件间不同的侵入深度。

2 试验结果及分析

2.1 轻微碰摩

对叶片与机匣轻微碰摩时的振动响应进行测试,试验后对试验器分解,可见碰摩环的刮蹭痕迹较浅,产生了一道宽度约为 2 mm、轴向弧度不超过 1/10 圆周的刮痕,属于转静件局部的小面积碰摩,碰摩环的划痕如图 4 所示。

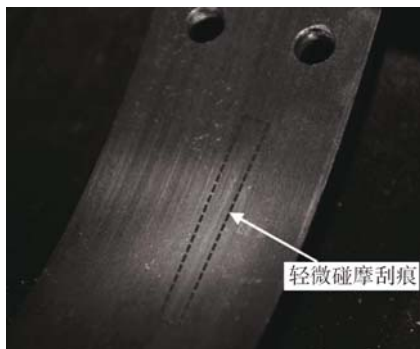


图4 轻微碰摩时碰摩环刮痕

Fig. 4 Scratch in rub ring in slight rub-impact

发生轻微碰摩时的转子位移响应信号频域成分如图 5 所示。水平方向和竖直方向的位移响应频域成分基本相同,水平方向位移幅值略高于竖直方向。

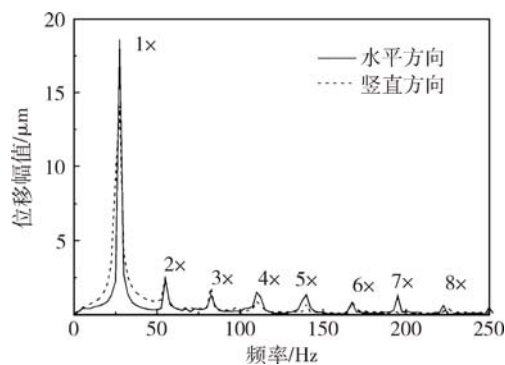


图5 轻微碰摩时转子频域响应

Fig. 5 Rotor responses in frequency domain in slight rub-impact

根据位移传感器测试结果得到转子轴心轨迹如图 6 所示,其为不规则的多边形轨迹,表明叶片与碰摩环发生瞬时局部的碰撞摩擦后,径向碰撞力改变轴心的运动方向(即转子的公转运动方向),使得转轴沿不规则多边形轨迹运动。

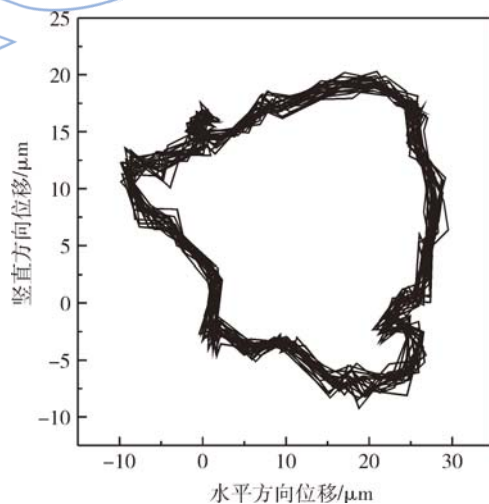


图6 轻微碰摩时转子位移响应轴心轨迹

Fig. 6 Shaft centerline orbits of rotor displacement response in slight rub-impact

从轻微碰摩状态转轴的位移响应频谱和轴心轨迹分析结果可以看出:转子在轻微碰摩状态时作周期、拟周期的运动;频谱成分以转子频率成分为主,同时伴有高阶倍频成分,倍频能量随阶次升高而降低,但衰减速度很慢;水平和垂直两个方向的响应特征基本一致;轴心轨迹受碰摩力的影响

呈现不规则多边形,运动形式较为稳定.

在碰摩过程中与叶片直接接触的静子部件为碰摩环,碰摩环时域加速度响应信号如图7所示.可以明显看出加速度响应在0.6s内出现了9次峰值,说明转子与机匣的碰摩并非连续的,而是间断的碰撞冲击.

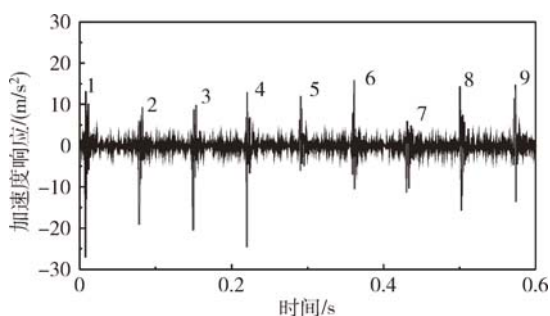


图7 轻微碰摩时碰摩环的时域加速度响应

Fig. 7 Acceleration responses in time domain of rub ring in slight rub-impact

2.2 严重碰摩

调整碰摩环的位置,减小转静件之间的初始间隙到0.3mm,试验后分解可见碰摩环的刮蹭痕迹和叶片磨损明显,如图8所示,碰摩环产生了一道宽度大于10mm、周向约为1/4圆周的刮蹭痕迹,属于转静件局部较大面积碰摩,在碰摩叶片尖部处出现磨损.

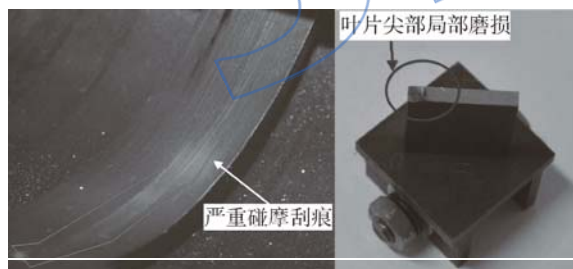


图8 严重碰摩时碰摩环刮痕及叶片磨损

Fig. 8 Scratch in rub ring and blade abrasion in serious rub-impact

严重碰摩情况下转子水平方向和竖直方向位移响应频域成分如图9所示,可见响应规律与轻微碰摩时存在较大差异,位移幅值提高,而且各阶倍频成分位移幅值的相对比例关系产生差异,以转速频率和3倍频响应为主.此外,转子在竖直方向的位移响应明显高于水平方向,原因在于发生严重碰摩的位置位于6点钟方向附近,说明转子在碰摩点径向的振动响应较大.

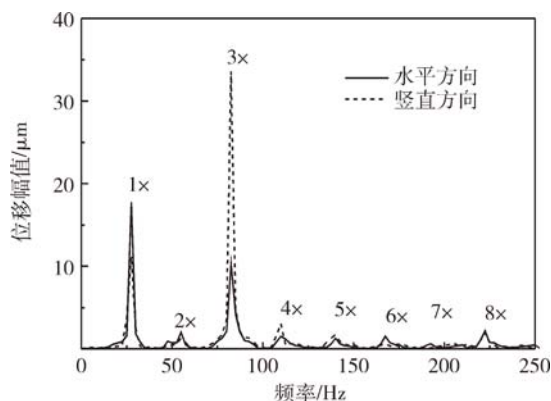


图9 严重碰摩时转子频域响应

Fig. 9 Rotor responses in frequency domain in serious rub-impact

叶片与机匣发生严重碰摩时转子的轴心轨迹如图10所示.此时,转子的轴心轨迹呈现杂乱的形式,说明在严重碰摩情况时,转子在碰撞力和摩擦力的综合作用下力学行为和运动形式复杂.

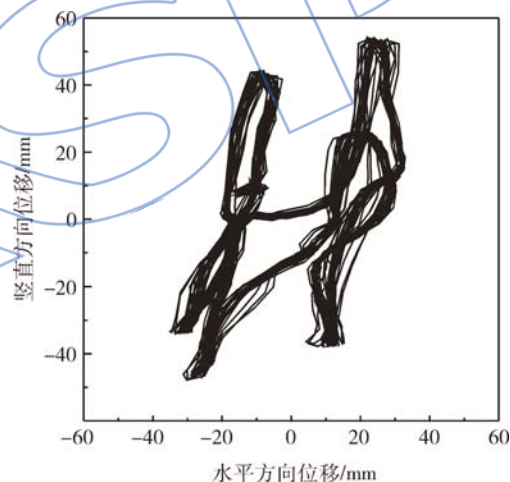


图10 严重碰摩时转子位移响应轴心轨迹

Fig. 10 Shaft centerline orbits of rotor displacement response in serious rub-impact

由严重碰摩状态转轴的位移响应频谱和轴心轨迹可以看出:严重碰摩状态转子也作拟周期的运动,但与轻微碰摩相比,由于碰摩状况复杂,导致稳定性差;频谱成分主要以转速频率成分和3倍频为主;水平和垂直两方向的信号存在差异;轴心轨迹受碰摩力的影响运动较为杂乱呈不规则形状.

碰摩环在严重碰摩时的加速度响应信号如图11所示,可以看出加速度响应在0.6s内出现了9次较大的峰值,中间还有较弱的峰值,说明在严重碰摩时,不仅叶片与机匣刮蹭时间增加,而且碰撞次数也增多,碰撞响应峰值也大大增加.

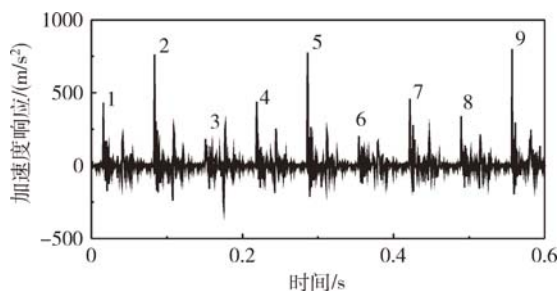


图 11 严重碰摩时碰摩环的时域加速度响应

Fig. 11 Acceleration responses in time domain of rub ring in serious rub-impact

3 信号特征提取

对试验器转静件发生轻微碰摩(局部碰摩)和严重碰摩(碰摩面积较大)时转子和机匣振动响应信号进行特征提取. 对于转子的振动位移信号特征提取采用 Gauss 小波基连续小波变换方法, 对于机匣振动加速度信号特征提取采用连续小波包能量法.

3.1 转子振动响应

试验器转子在无碰摩情况下位移响应连续小波变换得到的等高线变换结果如图 12 所示.

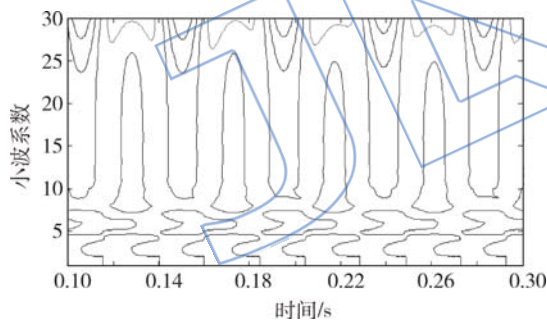


图 12 无碰摩时转子位移响应的连续小波变换

Fig. 12 Continuous wavelet transform of rotor displacement response without rub-impact

相同转速条件下,发生轻微碰摩时,转子的位移响应的连续小波变换等高线如图 13 所示,严重碰摩时,连续小波变换等高线如图 14 所示,由于竖直方向位移响应的小波变换等高线特征与水平方向相同,本文不再赘述.

对比分析转子系统在无碰摩、轻微碰摩、严重碰摩的振动信号特征,可以得到:

1) 转静件无碰摩时,转子运行状态平稳,小波变换的等高线图较为均匀地分布于整个时-频平面,无突发的局部信号叠加进去,小波变换值变

化不大,几乎位于同一数量级.

2) 转静件发生轻微碰摩时,在频谱中主要是转速频率成分同时伴有小量的倍频($2\times, 3\times, 4\times$ 等),如图 5 所示,但很难辨别碰摩发生过程特征. 通过连续小波变换等高线图可以清晰看到密集的峰值线簇和多条等高线环绕的区域,表明这些区域能量较高. 小尺度小波系数对应的是高频信号,具有奇异突变特征,说明轻微碰摩时,叶片和机匣之间以带有冲击作用效果的碰撞为主.

3) 转静件发生严重碰摩时,频谱中主要含有转速频率和 3 倍频成分,伴有余小量的倍频($2\times, 4\times, 5\times$ 等),如图 9 所示,同样很难辨别碰摩发生过程特征. 在连续小波变换等高线图上可以看到多条等高线环绕区域,相比轻微碰摩时环绕区域面积更大并接近大尺度区且持续时间略长,大尺度小波系数对应于低频信号,说明叶片和机匣在严重碰摩情况下摩擦效果明显.

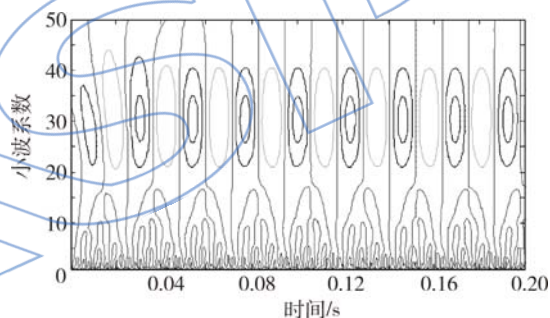


图 13 轻微碰摩时转子位移响应的连续小波变换

Fig. 13 Continuous wavelet transform of rotor displacement response in slight rub-impact

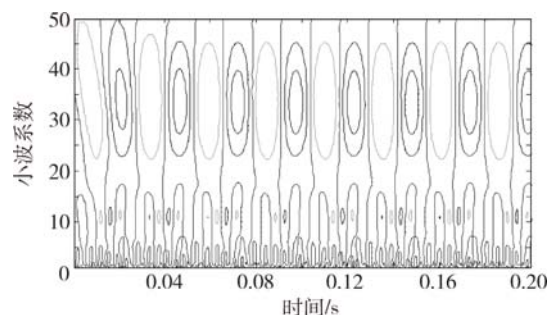


图 14 严重碰摩时转子位移响应的连续小波变换

Fig. 14 Continuous wavelet transform of rotor displacement response in serious rub-impact

在工程实际应用中可根据这些频谱和小波变换特征初步推断转子有无碰摩发生以及碰摩的严

重程度.

3.2 机匣振动响应

对相同时间段内时域响应信号求方均根值,反映了振动信号的平均能量,对比两种碰摩状态下机匣的振动大小,如表 1 所示.

转静件发生严重碰摩时,机匣各个测点的振动方均根明显高于轻微碰摩状态.轻微碰摩时,主要是叶片与机匣的碰撞作用,碰摩环各个方向的

振动响应能量大致相当,碰摩环直接参与碰摩,其振动能量高于机匣其余测点.严重碰摩时,碰摩环的周向振动响应高于径向和轴向,原因在于随着碰摩程度加剧,转静件的碰摩侵入量加大,碰摩作用时间增长,碰摩刮蹭的周向距离增大.

基于小波包能量法对机匣 3 处振动能量较大位置(机匣前部 2#、碰摩环径向 3#、碰摩环周向 4#测点)的响应信号进行特征提取,将信号分解为 16 个频带,其中,转速频率及其 2 倍频都落于第 1 个频带,碰摩引起的转子系统倍频主要落在第 2,3 个频带内,支承机匣模态频率落在第 12 个频带内,碰摩环的模式频率落在第 11 和第 15 个频带内.轻微碰摩时机匣前部和碰摩环的响应信号连续小波包能量分解如图 15 所示,严重碰摩时碰摩环和机匣前部的响应信号连续小波包能量分解如图 16 所示.

表 1 机匣响应方均根值(单位: m/s^2)
Table 1 Root-mean-square of case responses
(unit: m/s^2)

测点号	碰摩环			轴承 支座	机匣 前部	机匣 后部
	径向	周向	轴向			
1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
轻微碰摩	2.32	2.28	1.86	0.16	0.53	0.52
严重碰摩	5.13	8.58	4.65	0.59	2.20	1.47

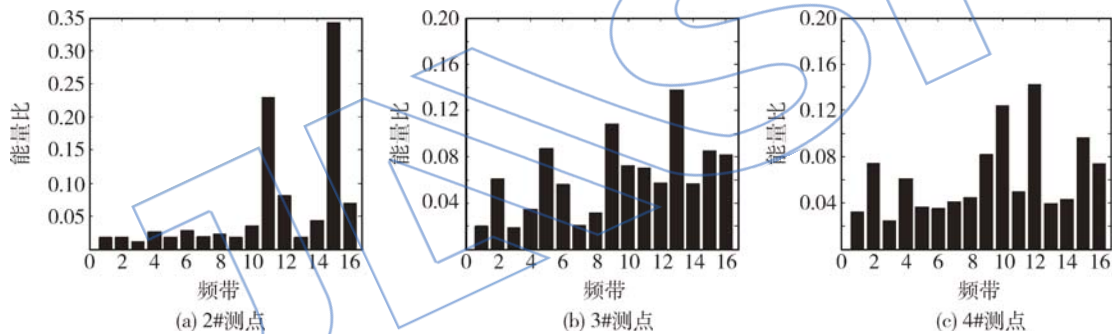


图 15 轻微碰摩时机匣小波包能量分解

Fig. 15 Wavelet packet energy decomposition of case in slight rub-impact

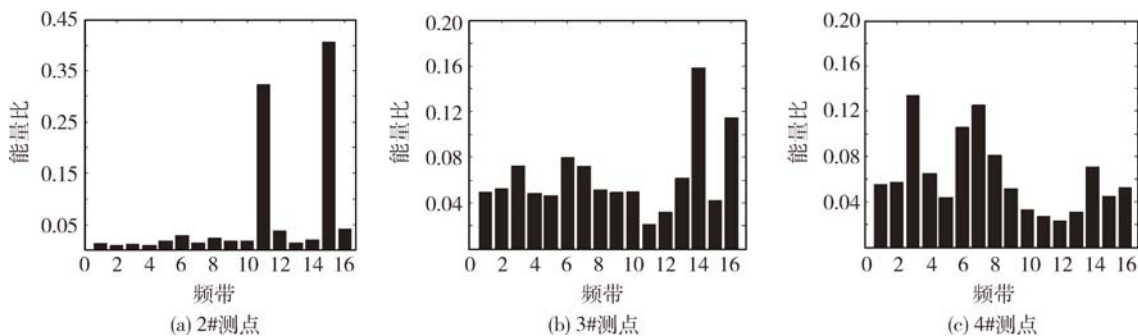


图 16 严重碰摩时机匣小波包能量分解

Fig. 16 Wavelet packet energy decomposition of case in serious rub-impact

在轻微碰摩时,2#测点振动能量主要集中在第 11,12 和 15 频带上,反映的是机匣的模式特征频率,表明轻微碰摩产生的载荷具有冲击效果,机

匣以低阶模态频率作自由衰减振动.碰摩环的周向和径向振动相似,振动能量分布频带特征不是十分明显.径向振动能量较为集中于第 2,5,9,13

频带,高频带能量略高于低频段,说明碰摩的冲击效应较为明显而摩擦效应较弱。

在严重碰摩时,2#测点振动能量也集中在第11和第15频带上,频带的能量分布更集中。碰摩环径向和周向能量分布特征较为明显,有冲击和摩擦特征,3#测点测得径向冲击激发高频带第14和第16频带能量集中,4#测点测得周向摩擦引发低频频带的能量突出。结合轻微碰摩与严重碰摩振动响应信号的有效值(见表1)可知,严重碰摩时径向和周向响应同时加剧,并且周向响应高于径向响应,说明严重碰摩时径向碰撞力和周向摩擦力均增大的情况下,摩擦力的作用显著高于轻微碰摩状态。

4 结 论

本文设计并建立了一套转子-支承-机匣系统碰摩试验器,实现了叶片与机匣碰摩全过程的模拟和测试。通过基于小波变换时-频分析方法的分析案例,为碰摩响应信号特征提取提供了有效途径。得到的主要结论如下:

1) 带有弹性支承的转子-支承-机匣中叶片与机匣碰摩为间断性碰摩,激发转子系统的转速频率及其倍频成分。

2) 转静件轻微碰摩时,碰撞冲击效果明显,摩擦效果较弱,机匣响应主要为高频信号。严重碰摩时,转静件接触面积增大,摩擦效果增强,机匣响应中同时包含高频冲击信号和低频摩擦信号。

3) 基于小波变换的时-频分析方法应用于碰摩故障不同部位响应信号的特征提取,有较好的适用性和可操作性,能够检测到碰摩过程中转子的瞬态响应特征,识别碰摩故障特征,具有工程实用价值。

本文的研究重点是将转子-支承-机匣作为整体系统进行碰摩动力响应特征的试验和分析,但目前的试验转子的工作状态仅为亚临界状态,结果具有局限性。因而后续的研究中将进一步完善试验器设计,使其可以进行超临界柔性转子碰摩试验,以便得到更具适用性的规律。

参考文献:

- [1] 马辉,李焕军,刘杨,等. 转子系统耦合故障研究进展与展望[J]. 振动与冲击, 2012, 31(17): 1-11.
MA Hui, LI Huanjun, LIU Yang, et al. Review and prospect for research of coupling faults in rotor systems[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(17): 1-11 (in Chinese)
- [2] 张大义,马艳红,梁智超,等. 整机结构设计的评估方法: 结构效率[J]. 航空动力学报, 2010, 25(10): 2170-2176.
ZHANG Dayi, MA Yanhong, LIANG Zhichao, et al. Evaluation method on whole engine structural design: structural efficiency[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(10): 2170-2176. (in Chinese)
- [3] 黄文虎,武新华,焦映厚,等. 非线性转子动力学研究综述[J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 5-17.
HUANG Wenhui, WU Xinhua, JIAO Yinghou, et al. Review of nonlinear rotor dynamics[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(4): 5-17. (in Chinese)
- [4] Muszynska A. Rotor-to-stationary element rub-related vibration phenomena in rotating machinery: literature survey[J]. The Shock and Vibration Digest, 1989, 21(3): 3-11.
- [5] 徐可君,秦海勤. 一种考虑径向-轴向碰摩的双盘转子-机匣系统力学模型的建立[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 17-21.
XU Kejun, QIN Haiqin. Dynamic model of two disk rotor-stator rubbing action[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 17-21. (in Chinese)
- [6] Choy F K, Padovan J. Non-linear transient analysis of rotor-casing rub events[J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 113(3): 529-545.
- [7] Patel T H, Darpe A K. Study of coast-up vibration response for rub detection[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(8): 1570-1579.
- [8] Jiang J, Ahrens J, Ulbrich H, et al. A contact model of a rotating rubbing blade[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Rotor Dynamics. Darmstadt: IF-ToMM, 1998: 478-489.
- [9] 彭志科,何永勇,卢青,等. 用小波时频分析方法研究发电机碰摩故障特征[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 76-80.
PENG Zhike, HE Yongyong, LU Qing, et al. Using wavelet method to analyze fault features of rub rotor in generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 76-80. (in Chinese)
- [10] Padova C, Dunn M G, Barton J, et al. Casing treatment and blade-tip configuration effects on controlled gas turbine blade tip/shroud rubs at engine conditions[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(1): 011016. 1-011016. 12.
- [11] 高艳蕾,李勇,王德友. 转子-机匣系统碰摩故障特征试验研究[J]. 航空发动机, 2002(4): 16-21.
GAO Yanlei, LI Yong, WANG Deyou. Experimental investigation of rotor-to-casing rubbing fault[J]. Aeroengine, 2002(4): 16-21. (in Chinese)
- [12] 刘耀宗,胡芑庆. Jeffcott 转子碰摩故障试验研究[J]. 振动工程学报, 2001, 14(1): 100-103.
LIU Yaozong, HU Niaoqing. Some observations of rub-impact fault on Jeffcott rotor[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(1): 100-103. (in Chinese)
- [13] 王四季,廖明夫,蒋云帆,等. 对转双转子局部碰摩故障实验[J]. 推进技术, 2013, 34(1): 29-34.
WANG Siji, LIAO Mingfu, JIANG Yunfan, et al. Experimental study on local rub-impact fault of counter-rotating

- dual-rotor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(1): 29-34. (in Chinese)
- [14] 卢文秀, 褚福磊. 转子系统碰摩故障的实验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(5): 614-617.
LU Wenxiu, CHU Fulei. Experimental investigation of rotor rubbing faults[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(5): 614-617. (in Chinese)
- [15] 曲秀秀, 陈果, 乔保栋. 转子动静碰摩故障试验研究[J]. 飞机设计, 2011, 31(4): 50-54.
QU Xiuxiu, CHEN Guo, QIAO Baodong. Experimental study of rotor rub-impact fault[J]. Aircraft Design, 2011, 31(4): 50-54. (in Chinese)