

旋转叶片-机匣碰摩分析方法与试验技术研究

慕琴琴, 徐健, 燕群, 黄文超

(中国飞机强度研究所 航空声学与振动航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: **目的** 较为深入地认识高速旋转转静子之间碰摩故障及碰摩机理。**方法** 采用冲击动力学分析方法, 建立考虑机匣柔性的转子-盘片-机匣碰摩有限元模型, 对旋转叶片-机匣碰摩的动力学行为、局部细节特征以及转静子的振动响应进行研究, 并将仿真分析结果与碰摩物理试验结果进行对比分析。**结果** 发现其吻合性较好, 证明了该仿真分析模型和仿真分析方法能够很好地描述旋转叶片-机匣之间碰摩动力学行为, 以及该物理试验的有效性。在此基础上, 对影响碰摩响应的不同参数进行深入研究, 发现转静子之间间隙、相对运动速度和刚度比对于碰摩响应均有较大影响, 得出了一些有效解释和预测碰摩故障现象的原理和规律。**结论** 其研究方法和研究成果可以为旋转机械碰摩故障的诊断和预测提供一定的参考。

关键词: 叶片-机匣碰摩试验; 冲击动力学分析方法; 振动响应特征; 碰摩参数; 碰摩故障诊断

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.010

中图分类号: V216 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)09-0054-07

Analysis Method and Test Technique of Rotor-blade-casing Rub-impact

MU Qin-qin, XU Jian, YAN Qun, HUANG Wen-chao

(Laboratory of Aeroacoustics and Vibration Aviation Technology, Aircraft Strength
Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: To better understand the mechanism of rub-impact failure and rub-impact between high-speed rotary transitions, the complete rotor-disc-casing rub-impact finite element model considering the flexible characteristic of the casing was established through the impact dynamic analysis method. And the transient process, local detail characteristics and vibration response of blade-casing rub-impact were studied. The simulation analysis results were compared with those of the physics test. It was found that the matching degree was good. And it proved that the simulation analysis model and simulation analysis method could describe the dynamic behavior of the rub-impact between the rotating blade and casing. And the effectiveness of the physics test was also proved. On this basis, different parameters influencing the rub-impact response were further analyzed. It was found that the gap between rotor and stator, relative velocity and stiffness ratio had great influence on rub-impact response. Some principles and laws explaining and predicting the phenomenon of rub-impact trouble were obtained. The research method and research results have some reference value for the diagnosis and prediction of the mechanical rub-impact trouble.

KEY WORDS: blade-casing rub-impact test; impact dynamic analysis method; vibration response characteristics; rub-impact characteristics; rub-impact trouble diagnosis.

收稿日期: 2020-07-05; 修订日期: 2020-08-08

Received: 2020-07-05; Revised: 2020-08-08

基金项目: 国防项目基金项目资助 (160541410024)

Fund: (Defense Project Fund Project Fund (160541410024))

作者简介: 慕琴琴 (1985—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为发动机强度动力学设计。

Biography: MU Qin-qin (1985—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: engine strength dynamics design.

现代先进航空发动机为了提高性能、增加推质比，通常采取缩小转静子之间间隙的方式增加气密性，这样就势必会导致转静子之间碰摩的机率增大^[1]。航空发动机叶片-机匣发生碰摩故障会导致叶片机匣变形及损伤，甚至会引起叶片断裂，引起转子不平衡和发动机结构和气动性能的损坏，甚至造成发动机起火等严重事故^[2-6]。20 世纪 80 年代，大量学者已开始探索碰摩问题对于转子系统振动响应的影响。此后，又出现了大量研究碰摩故障诱因的文章^[2]。关于转静子碰摩试验的研究，大量学者聚焦于不同碰摩响应工况下碰摩响应的载荷特性^[7-10]。对于碰摩理论分析和仿真计算方面，有大量学者关注于碰摩引起的转静子动力学响应特征和碰摩力数学模型^[11-14]。目前对于碰摩产生的局部细节特征，比如碰摩引起的叶片局部损伤和高周疲劳损伤等现象缺乏有效的理论分析和故障模拟，且大多数研究对转子-盘片-机匣结构都做了大量简化与假设，机匣往往只考虑为一刚性体或者一维弹性单元，因此掩盖了部分碰摩非线性动力学行为^[15-16]。

文中基于冲击动力学分析理论，建立了叶片-柔性机匣碰摩耦合动力学模型，主要针对叶片-机匣碰摩的瞬态响应特征和碰摩机理进行研究，分析了叶片-机匣发生碰摩时的动力学响应特征，并与碰摩物理试验结果进行对比分析。结果发现，其吻合性较好，证明了该仿真分析模型和仿真分析方法能够很好地描述旋转叶片-机匣之间碰摩动力学行为。在此基础上，对影响碰摩响应的主要因素进行了深入研究。其研究方法和揭示的机理均可以为旋转机械碰摩故障的诊断和预测提供一定的支撑。

1 旋转叶片-机匣碰摩理论模型

对于考虑机匣柔性特征的叶片-机匣碰摩，其实质是两个柔性体之间的碰撞，因此碰撞力主要与碰撞柔性体的变形有关^[17]。叶片-机匣碰摩瞬时的力学模型如图 1 所示，将柔性机匣碰摩位置等效为一个弹簧-阻尼系统。在发生碰摩时，机匣碰摩位置径向变形量为 a ；同时叶片在碰摩法向力作用下发生轴向压缩变形，变形量为 b 。因此，叶片与机匣的侵入量 d 为^[18]：

$$d = a + b \tag{1}$$

式中： $a = F_n / k_c$ ， k_c 为机匣的径向刚度， F_n 为法向碰摩力。

对于转子叶片，在叶片-机匣碰摩瞬时，忽略碰摩产生的热和气动效应，根据机械守恒定律，碰摩力做的功相当于叶片的弹性势能和离心势能的变化，得：

$$W_F = \Delta U_e + \Delta U_c \tag{2}$$

式中： W_F 为叶片碰摩力做的功； ΔU_e 为叶片弹性势能的变化； ΔU_c 为叶片离心势能的变化；

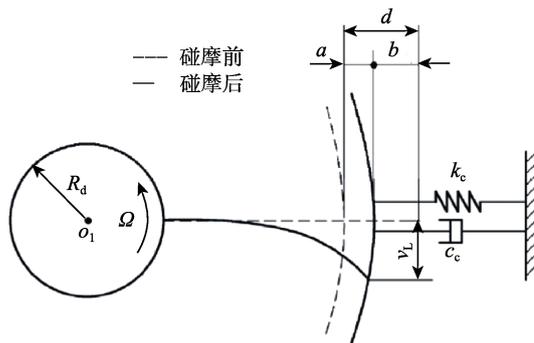


图 1 叶片-弹性机匣碰摩力学模型
Fig.1 Blade-elastic casing rub-impact mechanical model

最后整理得到叶片法向碰撞力 F_n 的解析表达式为^[19]：

$$F_n = \frac{5}{3} L k_c \frac{\Gamma \left(\frac{5\Gamma}{6} + \frac{\delta}{L} \right) - \frac{\sqrt{15}\Gamma}{6} \sqrt{\frac{15}{9} \Gamma^2 + 4 \left(\mu^2 - \Gamma \right) \frac{\delta}{L}}}{\frac{10\Gamma}{3} - \frac{5}{3} \mu^2 + \frac{\delta}{L}} \tag{3}$$

$$\text{其中：} \Gamma = \frac{3EI}{L^3} + \rho A \Omega^2 \left(\frac{81}{280} L + \frac{3}{8} R_d \right)$$

根据库伦定律^[20]，碰摩产生的切向力为：

$$F_t = \mu F_n \tag{4}$$

式中： μ 为叶片与机匣接触面的滑动摩擦系数。

2 旋转叶片-机匣碰摩数值仿真分析

2.1 有限元建模

文中基于冲击动力学理论，建立了转子-盘片-机匣耦合动力学模型。为了研究叶片-机匣碰摩的动力学行为，尽量减少其他影响因素，将转轴和轮盘假设为刚体，叶片与轮盘榫头处近似为刚性绑定连接，将叶片结构简化为一平板结构。根据三维数模对结构进行有限元离散，整个碰摩系统的有限元分析模型如图 2 所示，包含 4 个对称叶片，整个系统均采用六面体单元进行建模。叶片-机匣初始径向间隙为 0.03 mm，转子初始转速为 3000 r/min。轮盘与转轴以及叶片与轮盘均采用绑定“tied”刚性连接^[21]。转轴和轮盘假设使用刚性很大的钢材料，在碰摩过程中产生的响应很小，几乎不发生变形，叶片采用钛合金材料，机匣为铝制/钢制合金材料。在碰摩动态接触设置中，旋转叶片-机匣采取“对称罚函数法^[22]”设置动态接触关系，从而计算出碰摩动态响应。

2.2 碰摩过程数值模拟

文中在计算旋转叶片-机匣碰摩问题时，既考虑了由于叶片高速旋转产生的低频离心力，又考虑了由于侵入接触引起的叶片-机匣之间高频的碰撞力和摩

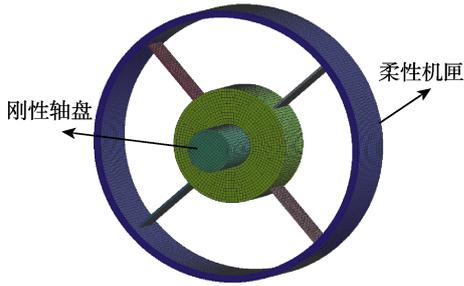


图2 叶片-机匣碰摩有限元模型
Fig.2 Blade-casing rub-impact finite element model

擦力。因此，在求解过程中，通过隐式与显式算法相结合的方式，计算旋转叶片-机匣的动态响应。

1) 首先通过隐式静力分析，求得整个旋转系统在高速旋转下的应力响应和刚度增强效应。

2) 然后将以上隐式静力求解得到的结果作为显式碰摩求解的初始条件，去修正旋转系统刚度矩阵，以及判断是否碰摩。

3) 最后，通过定义的接触摩擦属性，采用显式中心差分法进行叶片-机匣碰摩动态响应的求解。

由于碰撞产生的应力波在叶身的传导，从碰摩瞬态响应云图变化可以看出，在碰摩开始阶段，叶片最大应力位于碰摩叶尖，叶尖发生弯曲变形和局部掉角等损伤，然后随着碰摩应力波的传导，到碰摩结束阶段，最大应力响应逐渐传到叶根。

由于碰摩作用于叶尖部位，因此，碰撞力和摩擦力综合作用下，叶尖部位变形较大，更容易出现局部损伤现象。旋转叶片碰摩前后对比如图3所示，可以看出，叶片叶尖部位出现了局部掉角现象，而叶根部位更容易发生高周疲劳等现象。

单个叶片与机匣碰撞的时间历程曲线如图4所示，可以看出，首次碰摩的碰摩力最大，随后逐渐递

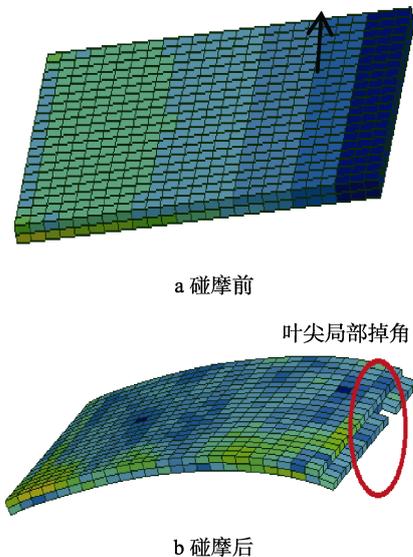


图3 碰摩前后叶片损伤情况对比
Fig.3 Comparison of blade damage before and after rub-impact: a) before rub-impact; b) after rub-impact

减。由于机匣发生弹性变形，后续碰摩时间间隔逐渐缩短。整周叶片依次与机匣碰摩的碰摩力时间历程曲线如图5所示，可以发现第一个碰摩叶片的碰摩力最大，随后各个叶片的首次碰摩力逐渐减小。这从机匣的加速度响应曲线也能得到对应的结论，机匣加速度响应也是在与第一个碰撞叶片接触时最大，随后逐渐递减。这是由于叶片与柔性机匣在碰摩过程中发生了变形，动能转化为变形能，根据能量守恒定律，旋转叶片的动能逐渐变小，因此碰撞接触力也随之变小。又由于转子不平衡量随着碰摩次数的增大而逐渐增大，因此从碰摩力动态响应峰值曲线图可以看出，碰摩过程刚开始为单个叶片碰摩和机匣变形后，耦合效应产生，变为多个叶片同时碰摩机匣，碰摩力相互耦合影响，机匣吸能更多，碰摩响应趋势逐渐趋于平缓。

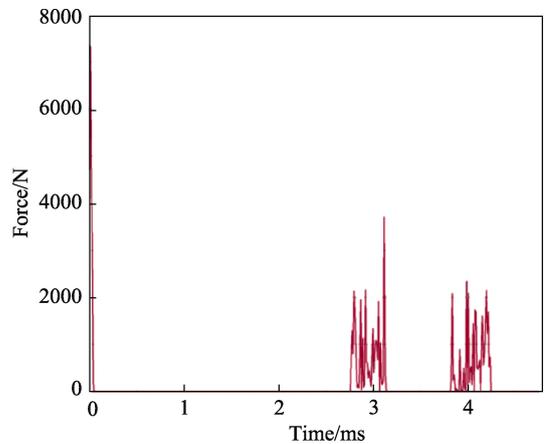


图4 单个叶片-机匣碰摩力曲线
Fig.4 Single blade-casing rub-impact force curve

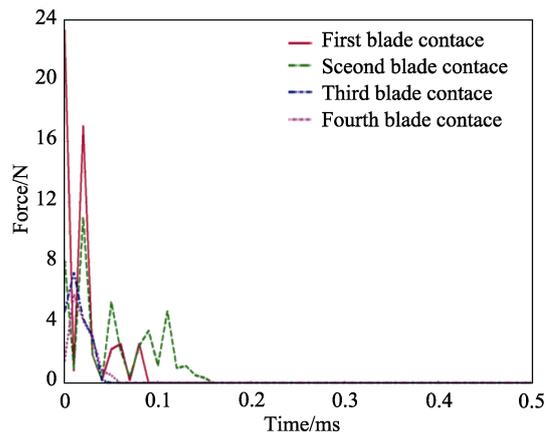


图5 叶片依次与机匣碰摩力曲线
Fig.5 Each blade rub-impact force with the casing curve

2.3 碰摩响应特征分析

转子叶片在碰摩过程中的响应是碰摩冲击动力学研究的焦点，碰摩叶片典型位置的应力响应曲线如图6所示。可以看出，由于高速旋转离心力的作用，叶片在碰摩初始阶段已有应力存在，且最大应力位

于叶根处。在碰摩发生的过程中，最大应力位置逐渐沿着叶尖-叶中-叶根方向传导。叶尖由于变形最大，吸能最多，碰摩力衰减最严重，而叶根处的平均应力最大。因此，叶根位置是转静子碰摩故障中最容易产生疲劳断裂的部位，这与多次碰摩故障的现象也比较吻合。

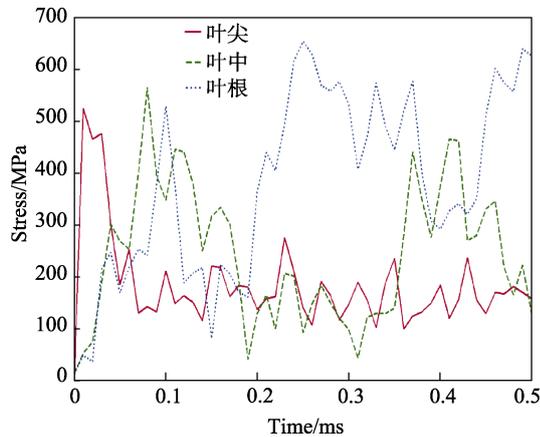


图 6 碰摩叶片典型位置的碰摩力响应曲线
Fig.6 Rub-impact force response curve at typical locations of the blade

对叶根单元的等效应力响应时域曲线进行快速傅里叶变化，得到碰摩叶片频域响应曲线如图 7 所示。可以看出，旋转叶片在低频碰摩力响应最大，且振动衰减主要以低阶固有频率为主，但由于碰摩效应，会有高频谐波响应成分。

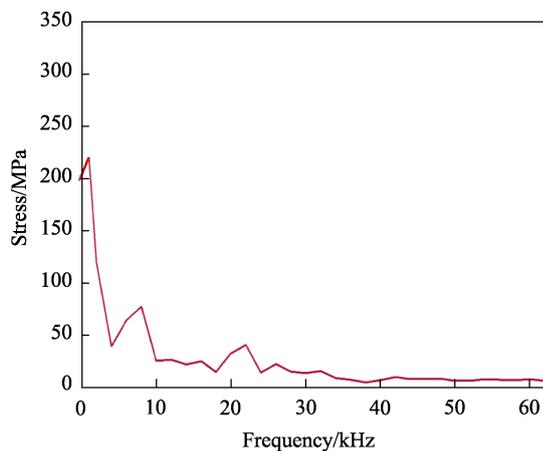


图 7 碰摩叶片叶根单元频域响应曲线
Fig.7 Frequency response curve of the rub-impact blade root unit

3 旋转叶片-机匣碰摩物理试验验证

为了对碰摩故障机理有深刻的认识，以及与仿真分析结果形成对比，笔者团队建立了转子-盘片-机匣碰摩试验器。该试验器主要由转子模拟装置、静子进给装置、控制与采集系统和辅助结构组成，如图 8 所

示。通过调整机匣进给系统来模拟转子与静子之间的间隙，实现不同的碰摩侵入量的控制；通过三向力传感器测试法向碰撞力和切向摩擦力，实现叶片在不同侵入量下碰摩力的测试；通过电涡流位移传感器测试轴心位移；通过无线遥测应变仪测试叶片动应变；通过加速度传感器测试机匣碰摩加速度。



图 8 转子-盘片-机匣碰摩试验器
Fig.8 Rotor-disc-casing rub-impact test device

当转速为 3000 r/min，初始径向间隙为 0.03 mm 时，转轴同一位置处的轴心轨迹（水平方向和垂向）试验与仿真结果对比如图 9 所示，发现两者吻合性较好。试验和仿真均发现，由于碰摩激发了高倍频成分，轴心轨迹在水平方向倍频上均出现了峰值。试验曲线较仿真曲线在水平方向有所右移，这是因为试验台在未发生碰摩时，由于地基等因素，自身台面存在干扰，在高速旋转未碰摩时，已有微小的位移存在，与碰摩响应耦合效应叠加致使轴心轨迹较仿真偏大。

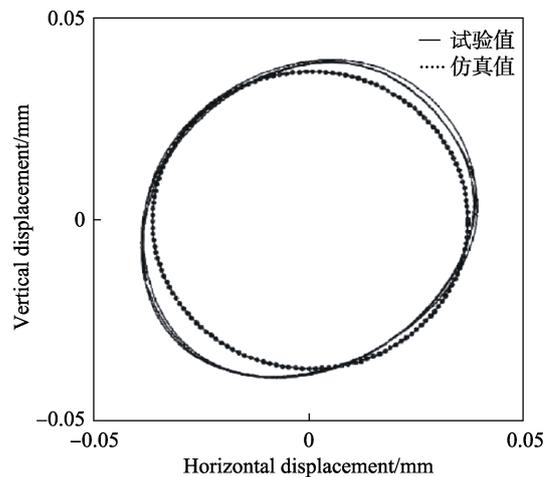


图 9 试验与仿真轴心轨迹对比
Fig.9 Comparison of the axis trajectory of experiment and simulation

转速为 3000 r/min 时，叶片-机匣不同侵入量初值下试验与仿真的碰摩力响应对比如图 10 所示。从曲线可以看出，对于碰摩力与侵入量的变化趋势，仿真分析结果与试验结果大体一致，即随着侵入量的增大，碰摩力逐渐增大，近似成线性关系。然而试验得到的碰摩力较仿真不大规则，这是因为在试验过程

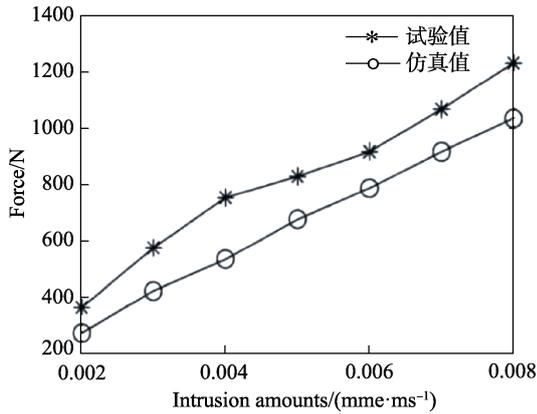


图 10 不同侵入量的碰摩力试验与仿真对比
Fig.10 Comparison of rub-impact force with different intrusion amounts

中，侵入量进给精度控制存在一定误差所致。

从以上试验与仿真分析结果对比可以看出，两者吻合性较好，证明了该仿真模型与仿真方法的可靠性。因此下面在有效的仿真模型和仿真方法的基础上，对影响碰摩响应的因素作进一步分析。

4 不同因素对碰摩响应的影响

由于碰摩响应分析与试验设置的主要参数为叶片与机匣的初始间隙、叶片与机匣的材料刚度比以及碰摩叶片的运动速度，因此就这些碰摩响应主要参数进行进一步深入研究。

4.1 叶片-机匣不同初始间隙

在叶片旋转速度为 6000 r/min 的工况下，设置不同的叶片-机匣初始间隙条件，使其在碰摩发生时具有不同的侵入量。

叶片-机匣在不同侵入量工况下，转轴同一位置的轴心轨迹时间历程曲线如图 11 所示。可以看出，侵入量越大，轴心轨迹在水平和垂直方向的值越小，

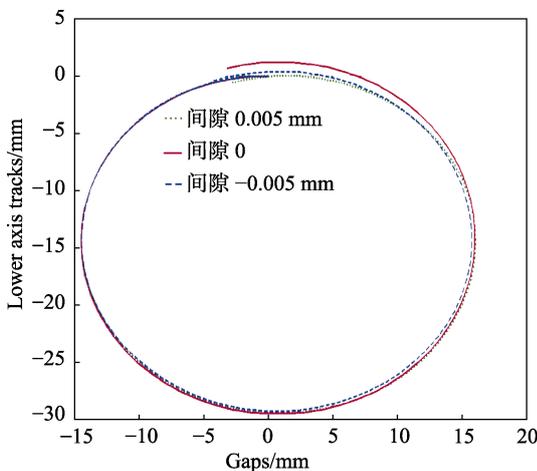


图 11 不同间隙下轴心轨迹
Fig.11 Axis tracks of different gaps

反而会抑制转轴在水平方向的移动。不同侵入量下碰摩力时间历程曲线如图 12 所示。从曲线可以看出，碰摩力在首次碰摩时，随着侵入量的增大，呈非线性增大趋势，碰摩力差距最大。随后碰摩力逐渐衰减，且侵入量越小，碰摩力衰减得越慢，碰摩时间越长。

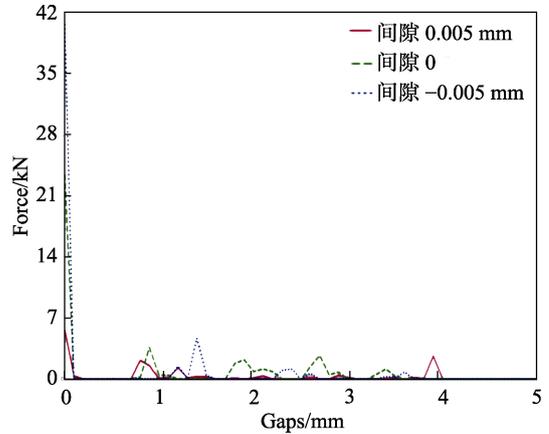


图 12 不同间隙下碰摩力时间历程曲线
Fig.12 Rub-impact force of different gaps

4.2 叶片 - 机匣不同材料刚度比

当转速为 6000 r/min，初始径向间隙为 0.03 mm 时，钛合金叶片分别与具有不同刚度的铝合金机匣和钢材料机匣碰撞，其碰摩力时间历程曲线如图 13 所示。从该曲线可以看出，叶片与刚度较大的钢制机匣碰摩时，碰摩力更大一些，吸能较少。第二次碰摩时，碰摩力依然较大，且碰摩间隔时间较短。相比之下，铝制机匣由于其刚度较小，在碰摩过程中由于变形吸收了较多能量，碰摩力衰减较为明显，但碰摩力衰减较慢。到碰摩后期，碰摩耦合效应更明显。因此，机匣并非吸能越多越好，刚度较小的机匣会激起更多的高频响应成分，使振动加剧，这也解释了 RB211 发动机在改型后机匣采用刚柔耦合分区的原因^[23]。

另外通过研究发现，叶片与不同刚度材料机匣碰撞时，叶片应力响应差距较小，机匣应力响应差距较

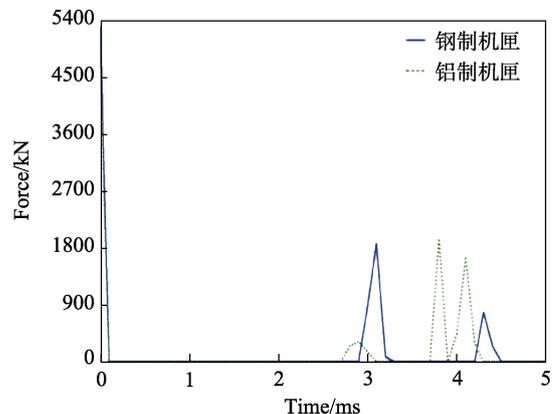


图 13 不同材料机匣的碰摩力
Fig.13 Rub-impact force of different casing materials

大。这是因为钛合金叶片刚度较大，在碰摩时变形较小，吸能较少。反之，机匣柔性较大，碰摩时动能转化为变形能较多一些，因此振动响应差距较大。对于与不同刚度材料机匣碰撞的叶片碰撞位置的等效应力时间历程曲线进行 FFT 变换得到其在频域内等效应力响应曲线如图 14 所示。可以看到，叶片的一阶动频随着碰摩机匣的刚度增大而增大，但激起的高频响应成分随着刚度的增大而减小。

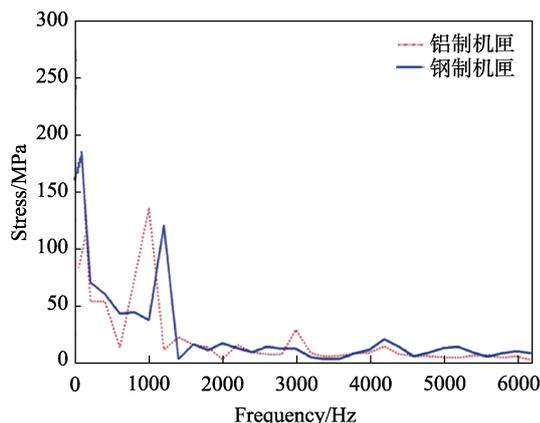


图 14 与不同刚度比继机匣碰摩的叶片同一位置处频域等效应力

Fig.14 Frequency equivalent stress of the different stiffness ratio at the same blade location of casing rub-impact

4.3 碰摩叶片不同转速

在初始间隙为 0.03 mm 的工况下，对碰摩叶片不同运动转速下的碰摩响应特征进行分析。不同转速下叶片-机匣碰摩力时间历程曲线如图 15 所示，可以看出，转速越大，碰摩力越大，且碰摩越频繁。这是因为转静子相对运动转速越大，转子在碰撞时所受不平衡力越大，导致碰撞耦合效应越明显，碰摩次数也越多。因此，旋转机械转速越高，碰摩故障发生的机率越高，且碰摩转速越大。在离心力作用下，叶片伸长量越多，侵入量越大，越易发生碰摩，碰摩应力响应也越大。

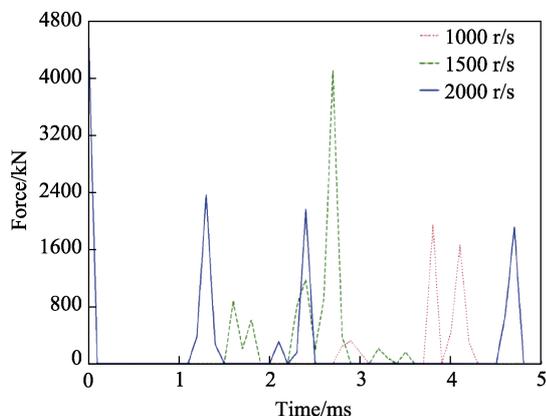


图 15 不同转速下叶片-机匣碰摩力曲线

Fig.15 Blade-casing rub-impact force at different speeds

由于在高速旋转下，相比转子不平衡力，碰摩力引起的转子轴心位移较小，因此轴心轨迹在水平方向的偏移较为显著，而在垂直方向几乎没有差别，这从不同转速下轴心轨迹对比图中可以得出相同的结论。对不同转速下的轴心位移时间历程曲线进行 FFT 变换，得到在频域内转轴的轴心轨迹如图 16 所示。可以看出，在低频区域，转速越低，转轴位移响应越明显；在高频区域，转速越高，转轴位移响应越大。因此，可以得出，转速越高，越会激起转轴的高倍频响应。

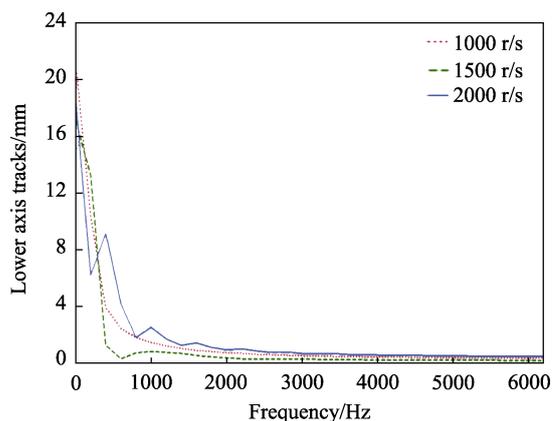


图 16 不同转速下转轴轴心轨迹频率响应曲线

Fig.16 Frequency response curve of the axis trajectory at different speeds

5 结论

文中基于冲击动力学与非线性接触动力学原理，建立了叶片-柔性机匣碰摩有限元模型，利用隐显式相结合的积分求解方式，分析了叶片-机匣碰摩力学行为和响应特征，并用物理试验进行了验证，证明了其仿真分析模型和仿真分析方法的可靠性。在此基础上，对碰摩响应分析中的几个主要参数的影响进行了较为深入的研究，得到如下结论。

- 1) 叶片-机匣的气密性设计要综合考虑旋转工况，转静子材料等多种因素。
- 2) 高速旋转叶片-机匣碰摩时，叶尖部位最容易发生直接局部损伤破坏，但叶根部位更容易发生高周疲劳断裂损伤，危害更严重。
- 3) 旋转速度越大，轴心轨迹水平方向振动抑制越明显，但高倍频上的位移响应峰值越突出。
- 4) 刚度较小的机匣吸能效果虽好，但会激起高频响应成分，使机匣振动加剧，更容易发生破坏。

文中利用仿真与试验相结合的方法研究了叶片-机匣碰摩过程中的动态响应和碰摩机理，对于有效解释工程中的叶片-机匣碰摩故障现象和故障预测均有一定的参考价值。在仿真分析中未考虑到摩擦产生的热效应和磨损造成的间隙变化等因素，与真实物理工况还有一定差距，后续进一步完善这些影响因素。

参考文献:

- [1] 马辉, 太兴宇, 李焕军, 等. 旋转叶片-机匣碰摩模型及试验研究综述[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9): 2055-2069.
MA Hui, TAI Xing-yu, LI Huan-jun, et al. Literature Survey of Rub-impact Model and Experiment of Rotating Blade and Casing[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9): 2055-2069.
- [2] PADOVA C, BARTON J, DUNN M G, et al. Experimental Results from Controlled Blade/Shroud Rubs at Engine Speed[J]. Journal of Turbo Machinery, 2007, 129(4): 713-723.
- [3] AHRENS J, ULBRICH H, AHAUS G. Measurement of Contactforces during Blade Rubbing[C]// Proceedings of the Seventh International Conference on Vibration in Rotating Machinery. Nottingham: IMechE, 2000: 259-268.
- [4] 慕琴琴, 燕群, 黄文超. 航空发动机转静子系统碰摩特性影响因素分析[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 43-49.
MU Qin-qin, YAN Qun, HUANG Wen-chao. Analysis of Influence Factors on Rub-impact Characteristics of Engine Rotor-blade-casing System[J]. Computer Simulation, 2018, 35(3): 43-49.
- [5] FERGUSON J L. A Moving Load Finite Elementbased Approach to Determining Blade Tip Forces during a Blade on Casing Incursion in a Gas Turbine Engine[D]. Columbus, OH: The Ohio State University, 2008.
- [6] 杨文鑫, 蔡增杰, 陆锦斌, 等. 航空发动机叶片振动特性试验研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 84-87.
YANG Wen-xin, CAI Zeng-jie, LU Jin-bin, et al. Experimental Research on Vibration Characteristics of Aeroengine Blade[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 84-87.
- [7] SINHA S K. Dynamic Characteristics of a Flexible Bladed-rotor with Coulomb Damping Due to Tip-rub[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(4-5): 875-919.
- [8] SINHA S K. Rotor Dynamic Analysis of Asymmetric Turbofan Rotor due to Fan Blade-loss Event with Contact-impact Rub Loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(9): 2253-2283.
- [9] LESAFFRE N, SINOUE J J, THOUVEREZ F. Contact Analysis of a Flexible Bladed-rotor[J]. European Journal of Mechanics-A/Solid, 2007, 26(3): 541-557.
- [10] CHEN G. Simulation of Casing Vibration Resulting from Blade-casing Rubbing and Its Verifications[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 361: 190-209.
- [11] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与实验[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
WEN Bang-chun, WU Xin-hua, DING Qian, et al. The Theory and Experiment of Nonlinear Dynamics of Fault-rotating Machinery[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] FU X Q, JIA W T, XU H, et al. Imbalance-misalignment-rubbing Coupling Faults in Hydraulic Turbine Vibration[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(8): 3708-3712.
- [13] HUANG Z, ZHOU J, YANG M, et al. Vibration Characteristics of a Hydraulic Generator Unit Rotor System with Parallel Misalignment and Rub-impact[J]. Archive of Applied Mechanics, 2011, 81(7): 829-838.
- [14] 慕琴琴, 燕群, 黄文超. 航空发动机旋转叶片-机匣碰摩动力学特性研究[J]. 航空计算技术, 2017(6): 13-17.
MU Qin-qin, YAN Qun, HUANG Wen-chao. Study on Rubbing Dynamic Characteristics of Aero-engine Rotating Blade-casing[J]. Aeronautical computing technique, 2017(6): 13-17.
- [15] LU X, ZHANG J, MA L, et al. Effects of Misalignment on the Nonlinear Dynamics of a Two-shaft Rotor-bearing-gear Coupling System with Rub-impact Fault[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8): 5960-5977.
- [16] YOUNG G. Development of a General Predictive Model for Blade Tip/Shroud Interference, Interactive Forces[D]. Columbus, OH: The Ohio State University, 2006.
- [17] 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: IFToMM, 1998: 478-489.
- [18] 马辉, 吴志渊, 太兴宇, 等. 含碰摩故障的转子-盘片-机匣系统动力学特性分析[J]. 航空动力学报, 2015(8): 1950-1957.
MA Hui, WU Zhi-yuan, TAI Xing-yu. Analysis of the Dynamics of Rotor-disc-casing System with Rub-impact Failure[J]. Journal of Aerospace Power, 2015(8): 1950-1957.
- [19] TURNER K E, ADAMS M L, DUNN M G. Simulation of Engineblade Tip-rub Induced Vibration[R]. ASME Paper 2005-GT-68217, 2005.
- [20] BATAILLY A, LEGRAND M, CARTRAUD P, et al. Assessment of Reduced Models for the Detection of Modal Interaction Through Rotor Stator Contacts[J]. Journal of Sound and Vibration 2010, 329(26): 5546-5562.
- [21] 江俊, 陈艳华. 转子与定子碰摩的非线性动力学研究[J]. 力学进展, 2013, 43(1): 132-148.
JIANG Jun, CHEN Yan-hua. Advances in the Research on Nonlinear Phenomena in Rotor/Stator Rubbing Systems[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1): 132-148.
- [22] 刘书国, 洪杰, 陈萌. 航空发动机叶片-机匣碰摩过程的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1282-1288.
LIU Shu-guo, HONG Jie, CHEN Meng. Numerical Simulation of the Dynamic Process of Aero-engine Blade-to-Case Rub-impact[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1282-1288.
- [23] ZHANG J H, MA W P, LIN J W, et al. Fault Diagnosis Approach for Rotating Machinery Based on Dynamic Model and Computational Intelligence[J]. Measurement, 2015, 59: 73-87.