

DOI : 10.3901/JME.2019.19.112

叶尖碰摩诱发的转子系统振动响应数值分析与试验研究*

太兴宇^{1,2} 杨树华^{1,3} 马辉⁴ 张勇¹ 褚福磊²

(1. 沈阳鼓风机集团股份有限公司研究院 沈阳 110869 ;

2. 清华大学机械工程学院 北京 100084 ;

3. 大连理工大学能源与动力学院 大连 116024 ;

4. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

摘要：针对透平机械中叶尖碰摩诱发的转子系统振动问题，基于转子-叶片-定子耦合系统模型，通过对叶尖碰摩过程的数学表征，采用谐波平衡法和 Newmark- β 法，分别对转定子的稳态响应和瞬态响应进行数值计算，并分析了不同参数对系统振动响应的影响。通过分析发现，叶尖碰摩下的转定子稳态响应会呈现出“硬式”非线性特征；偏移量增加会导致峰值偏移提前，非线性特征更明显；接触刚度增加使得系统的振动加剧，并且离散性增加；叶片数增加后，“削峰”现象更加明显。由于定子的约束，系统的瞬态响应峰值明显被限制了，同时，在过临界转速后，系统会出现一个不稳定运动，使得系统振动出现瞬时增加。除了仿真分析，还基于转子-叶片碰摩试验台，对叶尖单侧碰摩下的转子和定子振动位移进行了测试。从测试结果可知，转轴的振动响应也会体现叶片的振动特征，而从定子的振动响应中可以看出由于转子涡动导致的频率调制现象。

关键词：叶尖碰摩；数值分析；试验研究；转子系统；稳态和瞬态响应

中图分类号：TH113

Numerical Analysis and Experimental Investigation of Blade Tip Rubbing-induced Vibration Responses of Rotor System

TAI Xingyu^{1,2} YANG Shuhua^{1,3} MA Hui⁴ ZHANG Yong¹ CHU Fulei²

(1. R&D Department, Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110869;

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

4. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract : Aiming to the blade tip rubbing-induced vibration of a rotor system, based on the rotor-blade-stator coupling system model, the numerical calculation of steady and transient responses of the rotor and stator was done by using harmonic balance method and Newmark- β method, and the effect of various parameters on vibration responses was also analyzed. The result shows that: the “hard” nonlinear characteristic is presented in the steady responses of rotor and stator under blade-tip rubbing; the increment of offset can bring the peak-shift forward and the nonlinear characteristic is more obvious; the contact stiffness can aggravate the vibration and discreteness; “peak clipping” can be more obvious as the number of blade increasing. Due to the restraint of stator, the peak of transient response is restricted obviously. Meanwhile, the unsteady motion that makes the vibration of the system increasing instantaneously can be found. In addition to simulation analysis, the rubbing vibration displacements of the rotor and stator were measured based on a rotor-blade rubbing rig. The test result shows that: the vibration characteristics of blade is reflected in the shaft responses, and the frequency modulation caused by rotor whirling can be presented in vibration responses of the stator.

Key words : blade tip rubbing ; numerical analysis ; experimental investigation ; rotor system ; steady and transient response

* 《天然气液化用大型混合制冷剂压缩机研制》项目(工信部联装[2014]500号)、中青年科技创新人才支持计划(RC180150)和国家自然科学基金(11772089, U1808214)资助项目。20181020 收到初稿, 20190503 收到修改稿

0 前言

透平机械通常被用来转换旋转部件和流体之间的能量, 根据各自功能的不同可分为汽轮机、燃机、压缩机、泵、涡轮增压机等。虽然功能不同, 但它们都具有相似的转子结构: 叶轮安装在一根转轴上并通过轴承与定子相连。虽然转定子之间隔开是必要的, 但是为了减小泄露并优化效率, 在一些特定的位置, 例如密封间隙和叶顶间隙, 转定子之间的间隙应该尽可能小一些。因此, 在运行过程中, 这些小间隙位置就有可能发生转定子碰摩, 从而导致机械发生不同程度的损伤, 甚至是报废^[1]。

目前, 对于转子-定子之间碰摩响应, 包括对其周期运动、混沌、分叉运动、稳定性等的研究, 已经相当充分^[2-9]。而对于转子-叶片-定子碰摩动力学响应的研究, 现有的文献尚不多见。SINHA^[10]以一个等截面悬臂梁为研究对象, 推导了带叶片柔性转子碰摩的动力学方程, 研究了叶尖和刚性定子碰摩的非线性动力学特性, 讨论了在升降速过程中, 过共振区时叶尖碰摩导致的转子瞬态响应。之后, 作者又建立了不对称涡扇转子系统的动力学模型, 并分析了叶片和外定子碰摩导致的复杂非线性动力学特性^[11]。THIERY 等^[12]以一个 Jeffcott 转子带有三个刚性叶片模型为研究对象, 忽略了叶片的振动响应, 针对转子系统在碰摩过程中产生的非线性特性进行分析。PADOVAN 等^[13]同样是忽略了叶片的振动, 建立了叶片-转子-定子间隙耦合模型, 该模型只有转子系统的质点方程, 分析了单叶片与多叶片碰摩时的动力学响应。PETROV^[14]将转子-叶片-定子耦合系统简化为 2 自由度的质点模型, 分析系统瞬态碰摩响应以及在不同参数下, 系统频域的振动特征。

德国学者 AHRENS 等^[15]和中国学者 JIANG 等^[16-17]考虑直板叶片(矩形截面)的旋转, 将机匣简化为带有一定角度的弧形结构, 围绕着接触力进行了相关的试验。针对以往试验不足的情况, 俄亥俄州立大学燃气涡轮实验室 PADOVA 等^[18-20]围绕着真实结构叶片在真实工作转速下开展了大量试验研究工作。针对转子和叶片振动响应测量困难的情况, 陈果等^[21-23]以一个航空发动机试验器为研究对象, 基于机匣振动加速度谱分析, 对叶片-机匣碰摩以及滚珠轴承早期故障进行识别。

本文基于转子-叶片-定子耦合系统模型, 通过对叶尖碰摩过程进行数学表征, 对叶尖碰摩导致的转子和定子稳态和瞬态振动响应进行求解, 并对不同几何参数的影响进行了分析。同时, 基于转子叶

片碰摩试验台, 搭建了碰摩响应测试系统, 对叶片单侧碰摩下的转子和定子振动信号进行了采集, 通过与仿真结果对比, 分析了叶片碰摩下的转定子振动特征。

1 动力学模型建立

1.1 转子-定子耦合系统动力学模型

基于能量法, 得到转子-叶片耦合系统运动方程^[24], 同时, 将定子简化为 2 自由度模型(图 1), 通过叶片与定子间的碰摩, 行程转定子耦合系统, 其运动方程如式(1)所示

$$\begin{cases} \mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{D}_r \dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{K}_r \mathbf{q}_r = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_{rub} \\ \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{D}_s \dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{q}_s = \mathbf{F}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{q}_r 为转子-叶片系统的位移矢量; \mathbf{M}_r 为转子-叶片系统的质量矩阵; \mathbf{D}_r 为转子-叶片系统的阻尼矩阵; \mathbf{K}_r 为转子-叶片系统的刚度矩阵; \mathbf{F}_e 为转子-叶片系统的外力矢量; \mathbf{q}_s 为定子的位移矢量; \mathbf{M}_s 为定子的质量矩阵; \mathbf{D}_s 为定子的阻尼矩阵; \mathbf{K}_s 为定子的刚度矩阵; \mathbf{F}_{rub} 和 \mathbf{F}_s 分别为转子和定子的碰摩力矢量, 其具体表达式为

$$\mathbf{F}_{rub} = [\dots, f_n^i, f_t^i, \dots, T_{rub}^{rotor}, \dots, f_x, \dots, f_y, \dots]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_s = [-f_x, -f_y]^T \quad (3)$$

式中, f_n^i, f_t^i 为第 i 个叶片受到的法向力和切向力; T_{rub}^{rotor} 为转子受到的碰摩力矩; f_x 和 f_y 为转子受到的水平和竖直碰摩力。

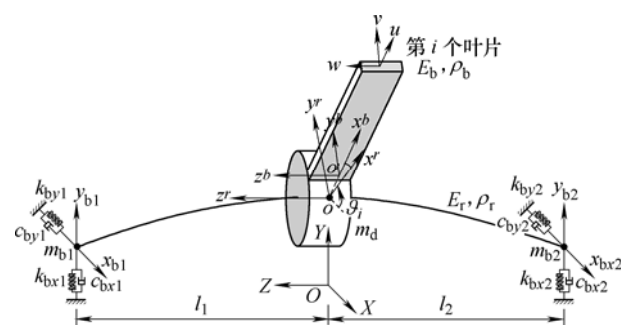


图 1 转子-叶片耦合系统模型示意图

1.2 转子-叶片系统碰摩过程表征

透平机械中的叶片与定子内壁发生碰摩主要是由于间隙设计过小、转定子局部间隙过小、外部扰动等原因导致的。本文考虑的是转定子局部间隙过小所导致的碰摩。安装误差、静挠度过大以及定子局部变形均会导致局部间隙过小, 如图 2 所示。所以, 即使设计间隙满足要求, 仍存在叶片与定子发生碰摩的风险。

表 1 柔性转子-叶片系统固有频率

振型描述	固有频率/Hz	振型描述	固有频率/Hz
转子 1 阶弯曲	82.1	转子 1 阶扭转	318.57
转子 2 阶弯曲	205.8	转子 4 阶弯曲	823.7
转子 3 阶弯曲	298.5	叶片 1 阶弯曲	1 020.9

2.1 稳态响应分析

转定子碰摩稳态响应采用谐波平衡法进行求解。谐波平衡法是一种将传统解析法与数值法相结合的半解析法。本文采用了文献[26]中的谐波平衡-弧长延拓法对转子的碰摩稳态响应进行分析。计算流程如图 4 所示。

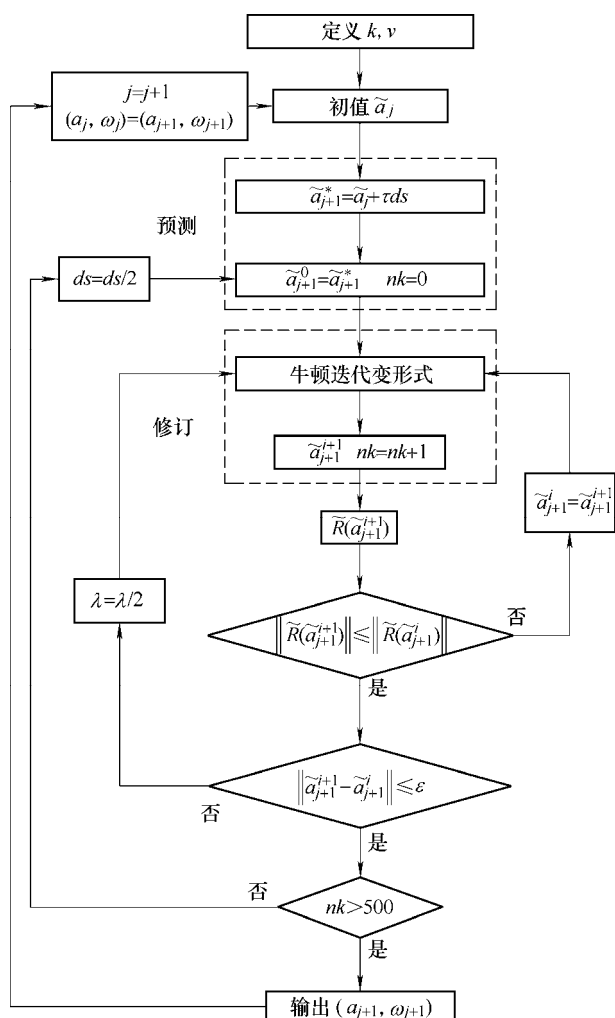


图 4 谐波平衡-弧长延拓法计算流程

当叶片与定子发生碰摩时，转子响应中的 1 倍频占主导，所以，为了提高计算效率，只对转子响应的 1 次谐波进行分析，并且在稳态分析中不考虑叶片局部振动的影响，仅考虑转子和定子的振动响应。

图 5 为不同机匣偏移量下转子和机匣的幅频响应。机匣偏移量的不同实际上是影响了转子和定子

之间的最小间隙，以下简称“间隙”。系统中的间隙明确限定了碰摩发生的位置，或者发生的频率。从图中可以看到，由于转定子之间发生碰摩，导致转子振动的峰值出现后移现象，即为“硬式”非线性特性，以及“跳跃”现象。而且随着间隙减小，峰值后移现象更加明显，同时峰值增大。从图中还可以看到，在频率为 90 Hz 左右时，会出现一些离散点。这些点是由于谐波方程非线性求解不收敛导致的，算法很难找到稳定解。

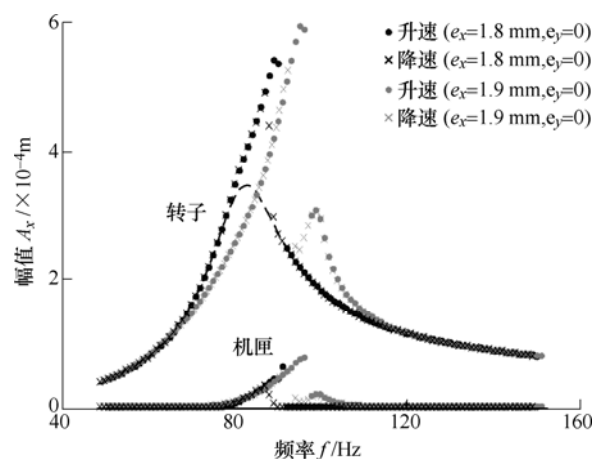


图 5 不同间隙下系统的幅频响应

($k_c=2 \times 10^6 \text{ N/m}$, $\mu=0.1$, $N_b=4$)

图 6 为不同接触刚度对幅频响应的影响。从图中可以看到，较大接触刚度下的频率响应在 90 Hz 处出现了更多的离散点，离散特征更加突出。

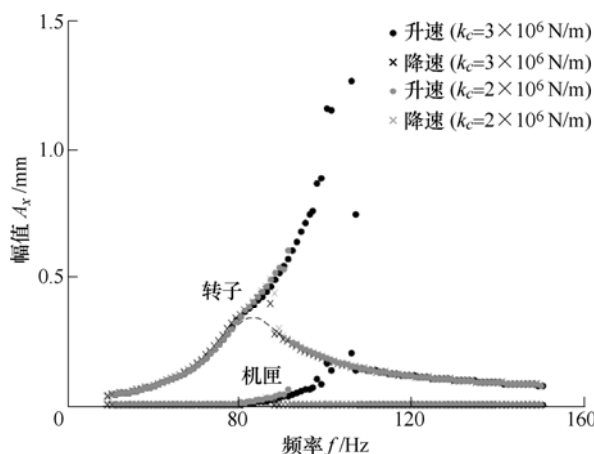


图 6 不同接触刚度下系统的幅频响应

($e_x=1.8 \text{ mm}$, $e_y=0$, $\mu=0.1$, $N_b=4$)

图 7 为不同叶片数对系统的幅频响应的影响。随着圆盘上叶片数量的增加，叶片-机匣碰撞产生的离散特性减弱。8 叶片时峰值后移的趋势更加明显，说明碰撞效果更加突出。并且 8 叶片的峰值也要小于 4 叶片系统。

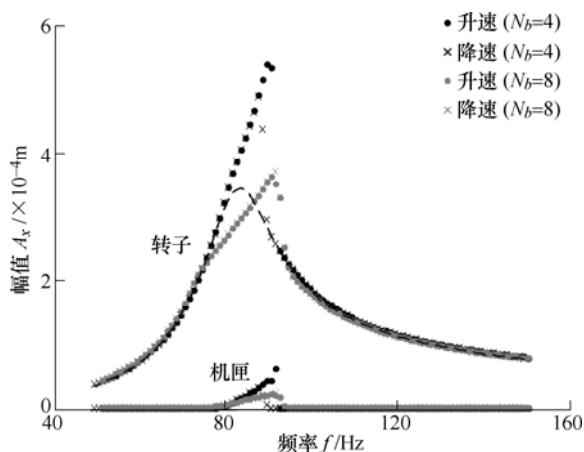


图 7 不同叶片数量系统的幅频响应

($k_c=2 \times 10^6 \text{ N/m}$, $e_x=1.8 \text{ mm}$, $e_y=0$, $\mu=0.1$)

2.2 瞬态响应分析

转定子碰摩瞬态响应是指转子在升降速过程中,在通过临界转速时,由于转子产生较大的横向振动,从而导致叶尖位移超过间隙值,发生碰摩;而当转子通过共振区后,转子振动减小,叶尖位移小于间隙值,碰摩消失。

图 8 为不同定子偏移量时系统的碰摩响应,其他仿真参数为:定子刚度 $k_c=2 \times 10^6 \text{ N/m}$,定子阻尼 $c_c=200 \text{ N}\cdot\text{s/m}$,摩擦因数 $\mu=0.1$,叶片数 $N_b=4$ 。

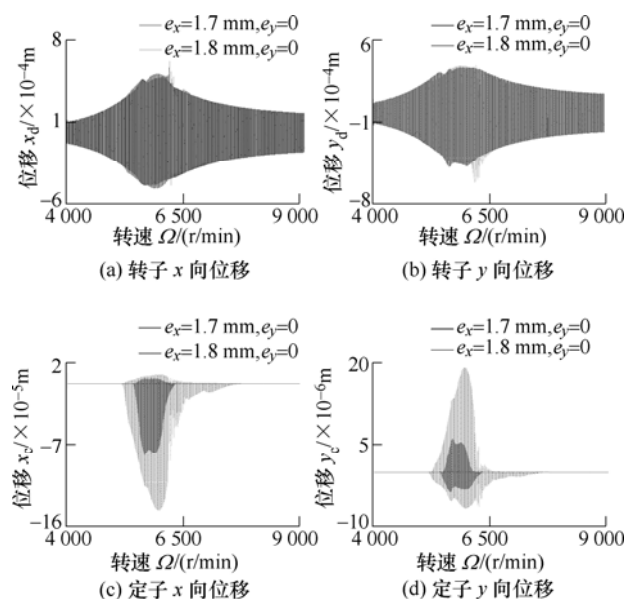


图 8 不同定子偏移量下系统碰摩升速响应

图 8a、8b 为转子的碰摩响应。图 8c、8d 为定子的碰摩响应。从转子的碰摩响应中可以看到,较大的定子偏移量会更早的发生碰摩,因为较大的定子偏移量表示叶尖与定子之间的间隙较小,其碰摩程度也要高于偏移量较小的情况。在过共振区时,转子的共振峰值会被“削掉”,在偏移量较大时,在转子刚刚通过共振区后,即 6 400 r/min 左右,会出

现不稳定的振荡。从定子的碰摩响应中可以看到,偏移量大时的定子振动幅值和碰摩持续区域都要大于偏移量较小的时候,并且在定子响应中可以清楚地看到在 6 400 r/min 附近,偏移量较大的情况会发生不稳定运动。

图 9 为不同叶片数时系统的碰摩响应,其他仿真参数为:定子偏移量为 $e_x=1.8 \text{ mm}$, $e_y=0$,定子刚度 $k_c=2 \times 10^6 \text{ N/m}$,定子阻尼 $c_c=200 \text{ N}\cdot\text{s/m}$,摩擦因数 $\mu=0.1$ 。从转子的响应图中可以看出,随着叶片数的增加,转子的“削峰”现象更加明显,并且会在临界转速后出现瞬时的振动加剧的现象。

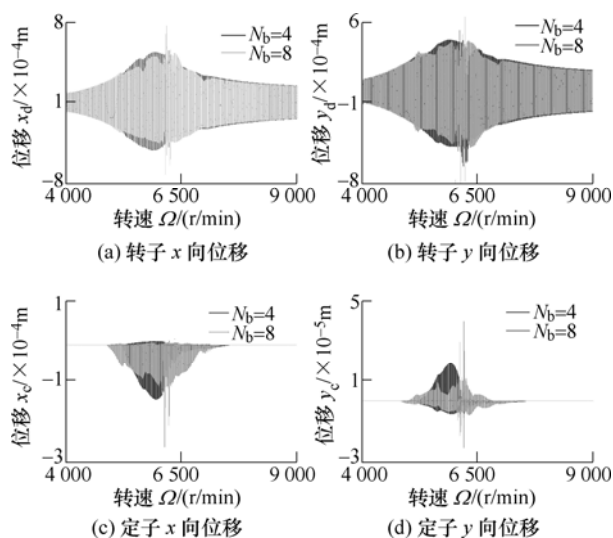


图 9 不同叶片数系统碰摩升速响应

3 叶片碰摩试验研究

除了数值仿真,试验也是必不可少的研究手段,通过试验可对仿真模型进行验证,也可以发现一些新的试验现象。下面基于一个转子-叶片碰摩试验台,对叶片局部碰摩导致的转子和定子振动进行分析。

3.1 碰摩试验台及测试系统

转子-叶片-定子碰摩试验台实物图如图 10 所示。该试验台由动力系统、转子系统、进给系统以及测试系统组成。动力系统包括一个电动机和联轴器,其中,电动机的最高转速为 3 000 r/min。转子系统的组成包括一个刚性轴以及一个刚性圆盘。4 个叶片通过燕尾型棒连结构固定在圆盘上。整个转子系统安装在两个滚珠轴承上,由电动机驱动。进给系统主要是由一个丝杠导轨装置组成,进给量由伺服电动机控制,精度可达到 $1 \mu\text{m}$ 。丝杠上方连接的是弹性定子,定子本身带有弧度,其中心与转子中心齐平。

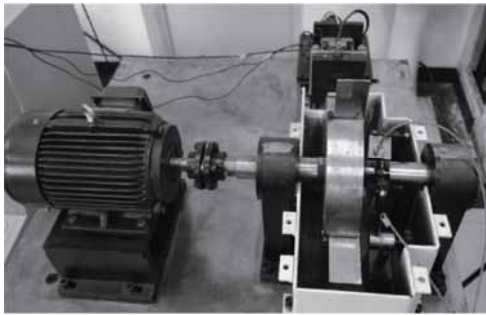


图 10 试验台结构图

文献[24]通过敲击法得到了该试验台的固有频率，其结果如表 2 所示。

表 2 转子碰摩试验台固有频率

试验结果/Hz	振型描述
132.2	转子平动
266.9	转子俯仰
348.4	叶片 1 阶弯曲
356.6	叶片 1 阶弯曲

碰摩试验所采用的振动测试系统如图 11 所示，主要由计算机、数据采集系统、电涡流位移传感器（前置器和探头）、电压测量装置、调速装置以及进给伺服系统组成。



图 11 转子-叶片-机匣碰摩测试系统

试验信号采集布点方式如图 12 所示，共需要测试 7 个振动信号，分别为法向及切向碰摩力、水平及竖直方向位移、定子径向及切向加速度和电压信号。其中，电压信号主要用来测试接触时间。

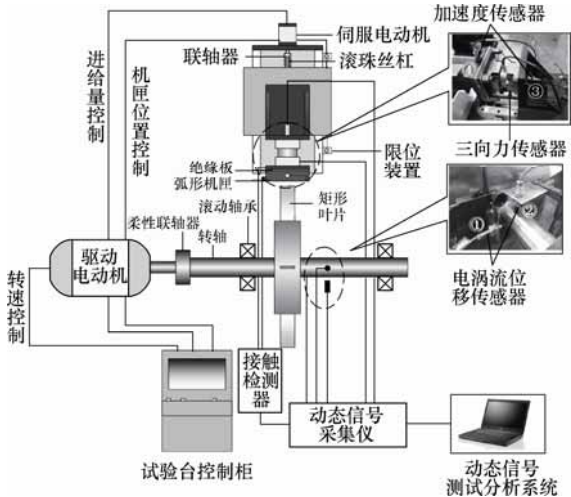


图 12 碰摩响应测试示意图

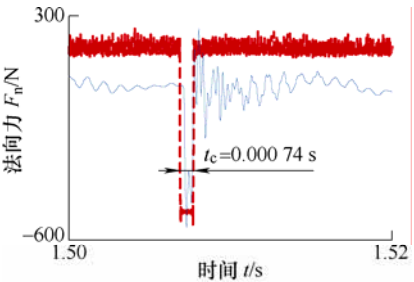
试验中所采用的传感器测试内容及其通道设置如表 3 所示。

表 3 传感器及通道设置

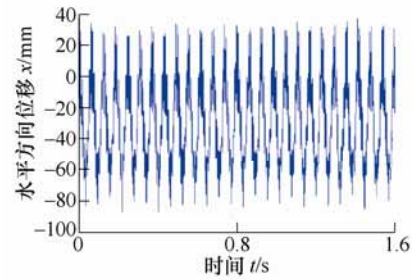
通道	测试内容	传感器类型	单位
1	法向碰摩力	三向力传感器	N
2	切向碰摩力	三向力传感器	N
3	水平方向位移 (图 12 中)	电涡流传感器	μm
4	竖直方向位移 (图 12 中)	电涡流传感器	μm
5	定子径向加速度 (图 12 中)	单向加速度传感器	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
6	定子切向加速度 (图 12 中)	单向加速度传感器	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
7	接触电压	双通道接触检测器	mV

3.2 试验结果采集

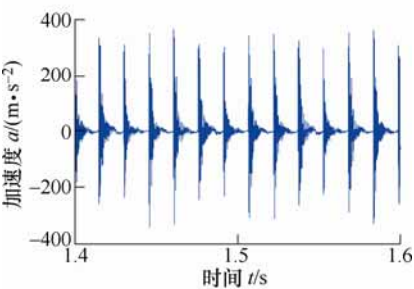
采样频率设置为 50 kHz，分析频率为 19.53 kHz。测得的叶片碰摩响应如图 13 所示，分别为碰摩力和接触时间(图 13a)、位移(图 13b)以及定子的加速度(图 13c)。



(a) 法向力信号和电压信号



(b) 转子水平位移信号



(c) 定子径向加速度信号

图 13 转子-叶片-定子碰摩测试系统

3.3 试验结果分析

试验主要对转轴的振动位移响应以及定子的振

动加速度响应进行测试和分析,其中仿真模型采用文本前面采用的转子-叶片耦合系统动力学模型。

(1) 转子响应。图14为转速为977 r/min(16.28 Hz)下碰摩振动响应的仿真结果和试验结果。从图中可以看到,在转子平动频率(132.2 Hz)和叶片固有频率(348.4~356.6 Hz)附近,以及叶片通过频率65.12 Hz (4×16.28 Hz)处都出现了幅值放大现象。在固有频率附近出现幅值放大现象是转定子碰摩的典型现象,而通过频率处的幅值放大现象则是叶片碰摩的特征。说明在转子的振动响应里也会体现叶片的振动特征。由于试验转速小于转子固有频率,所以无法得到“硬式”非线性性和“跳跃”现象。这部分试验内容将会在今后工作中进一步展开。

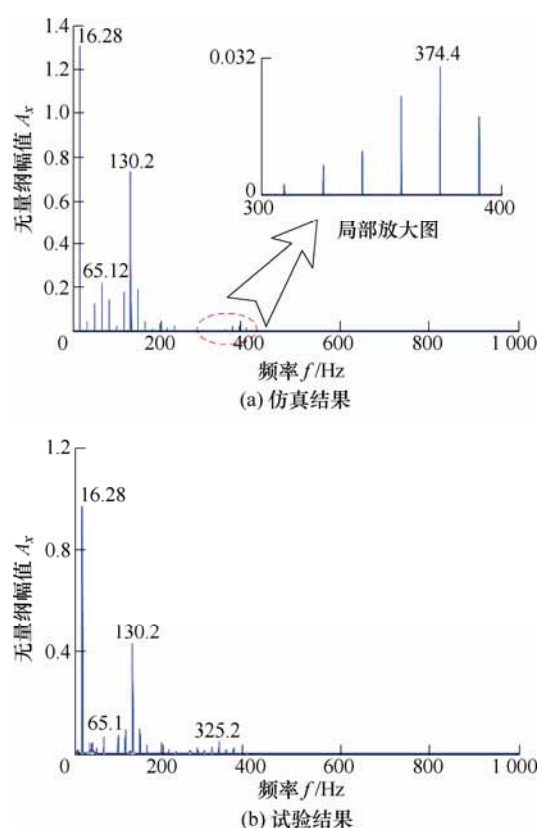


图14 转轴的振动特征

(2) 定子响应。对于高速大型旋转机械来说,定子的振动信号会更为复杂,采用倒频谱会增强识别能力。该方法可以分离出反应叶片碰摩的特征信息,更好地分析叶尖碰摩的动力特性^[27]。

图15为转速为977 r/min(16.28 Hz)时定子的法向加速度信号。从频谱图中可以看到,振动特征主要体现为通过频率及其倍频。而由于转子不平衡导致的涡动,使得碰摩力又受到转频的调制,从在频谱中表现出明显的调幅特征,即叶片的通过频率及其倍频附近存在边频带,其边频带宽为转频。由于倒频谱对边频成分具有“概括”能力,能够较明

显地显示出频谱上的周期成分,从倒频谱中可以看到,其边频成分将谱线“概括”为了间隔0.06 s的“块”,其中,0.06 s(1/16.28 Hz)为倒频率。在倒频率及其倍频中,会有4根间隔0.0154 s(1/65.12 Hz)的谱线。这种现象就是碰摩故障导致振动信号的调制现象。

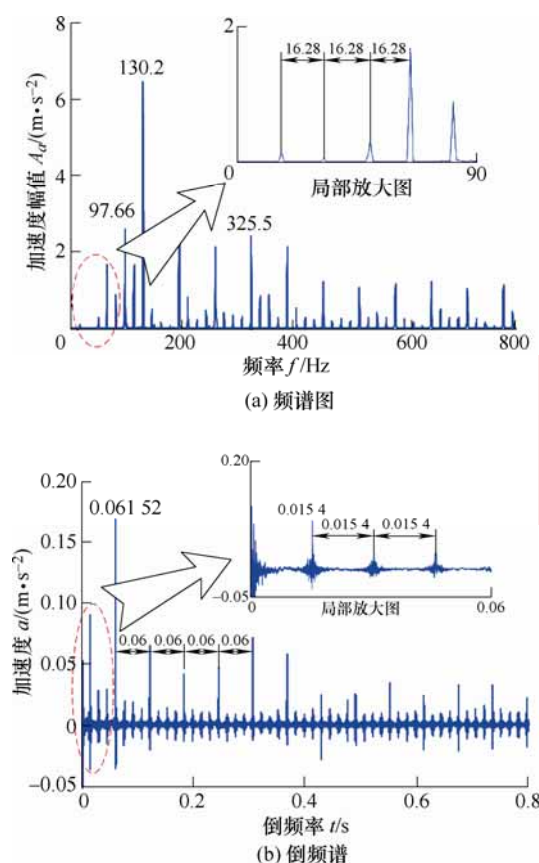


图15 定子的径向加速度特征

4 结论

(1) 本文针对由叶尖碰摩引起的转子系统振动响应,基于转子-叶片耦合系统模型以及叶尖碰摩过程的数学表征,对转子和定子的稳态响应和瞬态响应进行了仿真分析。

(2) 从稳态响应结果中可以看出,转子和定子在叶尖发生碰摩时,会呈现“硬式”非线性特征。偏移量增加会导致峰值偏移提前,非线性特征更明显;接触刚度增加使得系统的振动加剧,并且离散型增加;叶片数增加后,“削峰”现象更加明显。

(3) 从系统的瞬态响应结果中可以看出,由于定子的约束作用,转子位移超过间隙后,会产生一个明显的“削峰”现象,同时,在过临界转速后,系统会出现一个不稳定运动,使得系统振动出现瞬时增加。

(4) 本文基于转子-叶片碰摩试验台, 对叶尖单侧碰摩下的转子和定子振动位移进行了测试, 从转子振动位移仿真和测试的结果中可以看出, 两者反映出的振动特征是一致的: 除了转子的振动特性, 还包含了叶片的振动特性。而通过对定子振动信号的分析可以发现, 对比于转轴响应, 碰摩发生时, 定子振动加速度具有明显的周期冲击特性, 主要表现为通过频率及其倍频, 并且由于转子的涡动, 导致冲击受转频调制, 在叶片通过频率周围出现了以转频为间隔的边频。

参 考 文 献

- [1] JACQUET-RICHARDET G, TORKHANI M, CARTRAUD P, et al. Rotor to stator contacts in turbomachines. Review and application[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40(2): 401-420.
- [2] MUZYNSKA A. Rotor-to-stationary element rub-related vibration phenomena in rotating machinery[J]. Shock and Vibration Digest, 1989, 21: 3-11.
- [3] CHU F L, LU W X. Stiffening effect of the rotor during the rotor-to-stator rub in a rotating machine[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 308(3): 758-766.
- [4] ZHANG W M, MENG G, CHEN D, et al. Nonlinear dynamics of a rub-impact micro-rotor system with scale-dependent friction model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 309(3): 756-777.
- [5] CHU F L, ZHANG Z. Periodic, quasi-periodic and chaotic vibrations of a rub-impact rotor system supported on oil film bearings[J]. International Journal of Engineering Science, 1997, 35(10): 963-973.
- [6] CHU F L, ZHANG Z. Bifurcation and chaos in rub-impact Jeffcott rotor system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 210(1): 1-18.
- [7] ZHANG H B, CHEN Y S. Bifurcation analysis on full annular rub of a nonlinear rotor system[J]. Science China, 2011, 54(8): 1977-1985.
- [8] ZHANG G F, XU W N, XU B, et al. Analytical study of nonlinear synchronous full annular rub motion of flexible rotor-stator system and its dynamic stability[J]. Nonlinear Dynamics, 2009, 57(4): 579-592.
- [9] MA Hui, TAI Xingyu, SUN Jian, et al. Analysis of dynamic characteristics for a dual-disk rotor system with single rub-impact[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4: 2782-2789.
- [10] 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: 875-919.
- [11] SINHA S K. Rotordynamic 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.
- [12] THIERY F, AIDANPAA J O. Dynamics of a Jecott rotor with rigid blades rubbing against an outer ring[J]. Chaotic Modeling and Simulation, 2012, 4: 643-650.
- [13] PADOVAN J, CHOY F K. Nonlinear dynamics of rotor/blade/casing rub interactions[J]. Journal of Turbomachinery, 1987, 109: 527-534.
- [14] PETROV E P. Multiharmonic analysis of nonlinear whole engine dynamics with bladed disc-casing rubbing contacts[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, 2012: 1-11.
- [15] AHRENS J, ULBRICH H, AHAUS G. Measurement of contact forces during blade rubbing[C]// Vibrations in Rotating Machinery, 7th International Conference, Nottingham, ImechE, London, 2000: 259-263.
- [16] 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.
- [17] JIANG J. Investigation of friction in blade/casing rub and its effect on dynamics of a rotor with rub[D]. German: Shaker Verlag GmbH, 2001.
- [18] PADOVA C, BARTON J, DUNN M, et al. Development of an experimental capability to produce controlled blade tip/shroud rubs at engine speed[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127: 726-735.
- [19] PADOVA C, BARTON J, DUNN M, et al. Experimental results from controlled blade tip/shroud rubs at engine speed[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129: 713-723.
- [20] PADOVA C, DUNN M, 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: 011016.1-011016.11.
- [21] 陈果, 冯国权, 姜广义, 等. 航空发动机叶片-机匣碰摩故障的机匣振动加速度特征分析及验证[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 10-16.
CHEN Guo, FENG Guoquan, JIANG Guangyi, et al. Feature analysis and verification of casing vibration acceleration for aeroengine blade-casing rubbing fault[J]. Aeroengine, 2014, 40(1): 10-16.
- [22] CHEN G. Study on the recognition of aero-engine blade-casing rubbing fault based on the casing vibration acceleration[J]. Measurement, 2015, 65: 71-80.
- [23] CHEN G, HAO T F, WANG H F, et al. Sensitivity analysis and experimental research on ball bearing early fault diagnosis based on testing signal from casing[J].

- Journal of Dynamic Systems Measurement and Control , 2014 , 136(6) : 061009-1-061009-10.
- [24] MA H , LU Y , WU Z , et al. A new dynamic model of rotor-blade systems[J]. Journal of Sound and Vibration , 2015 , 357 : 168-194.
- [25] 太兴宇, 马辉, 谭祯, 等. 一种新的旋转叶片_机匣碰摩表征模型[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21) : 180-188. TAI Xingyu , MA Hui , TAN Zhen , et al. A new representation model of rotating blade-casing rub-impact[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2014 , 50(21) : 180-188.
- [26] TAI Xingyu , MA Hui , LIU Fuhao , et al. Stability and steady-state response analysis of a single rub-impact rotor system[J]. Archive of Applied Mechanics , 2015 , 85(1) : 133-148.
- [27] 陈果, 于明月, 刘永泉, 等. 基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7) : 32-38. CHEN Guo , YU Mingyue , LIU Yongquan , et al. Identifying rotor-stator rubbing positions using the cepstrum analysis technique[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2014 , 50(7) : 32-38.

作者简介: 太兴宇, 男, 1986 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为旋转机械动力学、振动控制。

E-mail : taixingyu@126.com

马辉(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为转子动力学与故障诊断。

E-mail : mahui_2007@163.com

杨树华(通信作者), 男, 1972 年出生, 硕士, 教授级高级工程师, 集团副总工程师。主要研究方向为流体机械、转子动力学。

E-mail : yshemail@sina.com