

含碰摩故障的转子-盘片-机匣系统 动力学特性分析

马 辉, 吴志渊, 太兴宇, 闻邦椿

(东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘 要: 以转子-盘片-机匣耦合系统为研究对象, 基于 ANSYS 有限元软件建立有限元模型, 通过实验测试得到的固有频率验证了模型的有效性; 采用点点接触来模拟叶片和机匣之间的碰摩故障, 并通过测试的响应数据, 进一步验证了所采用模型的正确性和可行性。最后, 仿真分析了定转速情况下不同侵入量、定侵入量和定间隙下不同转速对系统动力学响应的影响。研究结果表明: 叶尖碰摩主要激发高倍频成分, 且在系统俯仰刚体模态频率附近会出现倍频幅值放大现象; 定侵入量条件下, 高转速碰摩情况时系统的频率成分减少, 系统的法向碰摩力也随着转速的增大而变化; 定间隙条件下, 在高转速碰摩情况时倍频幅值会超过转频, 在一次连续碰摩过程中会出现多次碰撞反弹现象。

关 键 词: 旋转机械; 动力学特性; 转子-盘片-机匣系统; 碰摩; 接触

中图分类号: V21; TH113; O322

文献标志码: A

Dynamic characteristic analysis of rotor-blade-casing system with rub-impact fault

MA Hui, WU Zhi-yuan, TAI Xing-yu, WEN Bang-chun

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Taking a rotor-blade-casing coupling system as the research object, finite element model of the rotor-blade-casing coupling system was established by ANSYS software, and then the validity of the model was verified by the natural frequencies obtained from experimental measurement. A point-point contact element was used to simulate the fixed-position rubbing fault between the blade and the casing, and further the validity and feasibility of the method adopted were also verified by the testing response data. Finally, the influences of different penetrations at a certain rotate speed, the constant penetration at different rotate speeds and the constant clearance at different rotate speeds on system vibration responses were analyzed. The results show that rubbing on the tip of blade mainly excites high multiple frequency components, and the amplitude of the multiple frequencies near the pitching rigid model increases. Under the constant penetration at different rotating speeds, the frequency components of the system is reduced at high speed rubbing conditions, and the normal rubbing force also changes with the increase of rotating speed. Under the constant clearance at different rotating speeds, the amplitudes of some multiple-frequency components are greater than those of rotating frequency when the rubbing appears at high speed, and repeatedly collision rebound can be observed during continuous rubbing.

收稿日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1433109);

中央高校基本科研业务经费项目(N130403006, N140301001)

作者简介: 马辉(1978—), 男, 河北安平人, 副教授, 博士, 主要从事转子动力学、非线性振动、旋转机械故障诊断研究。

Key words: rotating machine; dynamic characteristic; rotor-blade-casing system; rubbing; contact

为提高旋转机械的工作性能和效率,减小转静子之间的间隙,是目前设计中采取的主要措施之一.然而转静子之间间隙过小,会导致发生碰摩故障可能性增大,造成严重的安全隐患.碰摩故障本质上是高度非线性问题,涉及多物理场和多尺度耦合的行为^[1].因此,研究旋转机械转静子之间的碰摩故障具有重要学术价值和现实意义,目前有很多研究人员对此开展了大量研究,并取得了卓越的成果^[2-9].

以往研究者多关注转子和密封等致密弹性体之间的碰摩,针对叶片和机匣间的碰摩也开始日益受到研究者的关注^[10-12].Padovan等^[13]将叶片简化为悬臂梁建立了转子系统的动力学模型,分析了不平衡量、摩擦、叶片刚度及叶片数量对系统碰摩时动力学特征的影响.Jiang等^[14]基于Padovan的模型,考虑叶片旋转离心作用推导出旋转叶片的法向接触力和叶片径向变形之间的关系.Batailly等^[15]将叶片和机匣简化为梁,并把模态综合法和基于Lagrange乘子的接触算法相结合,研究了叶尖与机匣碰摩问题.Legrand等^[16]用分段线性塑性材料本构模拟机匣内侧阻尼涂层材料,并采用数值计算以及计算机辅助分析的方法研究了叶片与机匣的接触特性,分析了叶片的模态及响应,并对阻尼涂层的磨损进行了评估.

为了更加精确地描述叶片-机匣之间的碰摩特征,一些学者基于接触理论并采用实体模型来模拟叶片和机匣的碰摩过程.Roques等^[17]以某核电厂汽轮发电机组的转子系统为研究对象,建

立了相应的转子-静子有限元模型,基于接触动力学理论分析了转轴与静子隔板间的碰摩现象.刘书国等^[18]基于隐式-显式相结合的积分方法,考虑实际叶片的叶形特征,分析了叶片顶部受瞬时碰撞与摩擦载荷(碰摩载荷)作用下的动力学响应特征.

由上述文献可知,目前针对叶片-机匣之间的碰摩多集中于盘片或者单叶片系统,而针对转子-盘片-机匣耦合系统碰摩故障的研究还不多见.针对这一实际情况,本文依据现有的叶片碰摩实验台建立了一种转子-盘片-机匣有限元碰摩模型,通过与实验测试对比,验证模型的有效性,并运用接触动力学理论,讨论了定转速下不同侵入量、定侵入量和定间隙下不同转速对系统动力学响应的影响.

1 转子-盘片-机匣有限元模型

依据现有的叶片碰摩实验台,基于ANSYS软件建立转子-盘片-机匣耦合系统有限元模型,其中转轴和叶片采用Timoshenko梁单元模拟,轮盘采用壳单元模拟,机匣简化为一个质量点,并用弹簧单元模拟机匣刚度,转定子之间的碰摩通过点点接触单元模拟,转轴与转盘之间通过刚性区进行连接,转盘与叶片之间通过节点共享进行连接,如图1所示(图1(a)中数字代表节点编号).系统模型参数见表1.转轴采用Beam188单元进行模拟,并划分为29个单元,转轴各轴段的尺寸如表2所列.

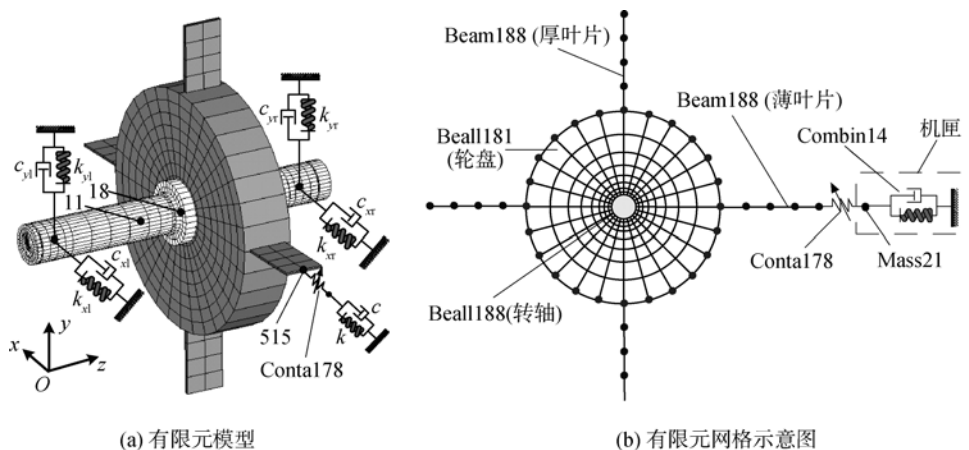


图1 转子-盘片-机匣系统有限元模型

Fig.1 Finite element model of rotor-blade-casing system

表1 转子-盘片-机匣系统模型参数

Table 1 Model parameters of the rotor-blade-casing system

模型	单元类型	单元数	参数	材料参数
轴承	Combi214	2	刚度 $k_{xl} = k_{xr} = k_{yl} = k_{yr} = 1.5 \times 10^7$ N/m, 阻尼 $c_{xl} = c_{xr} = c_{yl} = c_{yr} = 2000$ N · s/m	
叶片	Beam188	16	长 $l = 82$ mm, 宽 $w = 44$ mm, 厚叶片厚度 $h_1 = 5$ mm, 薄叶片厚度 $h_2 = 3$ mm	
轮盘	Shell181	256	内径 $r_1 = 25$ mm, 外径 $r_2 = 140$ mm, 厚 $h = 58$ mm,	密度 $\rho = 7800$ kg/m ³ 弹性模量 $E = 200$ GPa
机匣	Mass21	1	质量 $m = 1.68$ kg	泊松比 $\nu = 0.3$
机匣刚度阻尼	Combin14	1	刚度 $k = 4.5 \times 10^9$ N/m, 阻尼 $c = 1000$ N · s/m	
碰摩单元	Conta178	1	接触刚度 $k_n = 3.5 \times 10^7$ N/m, 摩擦因数 $\mu = 0.246$	

表2 转轴各轴段结构尺寸

Table 2 Structure size of each section on the shaft

轴段编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
轴段长度/mm	4.8	1.7	9.5	9.5	9.5	9.5	24	24	24	24	15	15	3	5.5	13.5
轴段直径/mm	45	41.5	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	43	48	72
轴段编号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
轴段长度/mm	1	28	27	2	10	28	28	2	7.5	9.5	9.5	9.5	1.7	14.3	
轴段直径/mm	44	50	50	48	55	51	51	43	45	45	45	45	41.5	45	

2 转子-盘片-机匣模型验证

转子-盘片-机匣系统的实验台,如图2所示,测试现场1为系统固有特性的测试现场,整个测试系统主要包括:LMS16通道便携式数据采集前端控制器、PCB086C01型力锤、BK4517轻质加速度传感器(质量为0.7g)、测试现场2为系统轴心轨迹的测试现场,测试点为距离轮盘左侧面52mm处(即节点11),整个测试系统主要包括:DH5956动态信号测试分析系统,DH902电涡流位移传感器。

实验及仿真得到的固有频率,如表3所列。实验与仿真获得的固有频率有很好的吻合度,最大误差为3.57%。造成较大误差的原因可能是由于实际叶片与轮盘的连接形式为榫联,而仿真中则忽略了这种连接关系,此外采用梁单元来模拟叶片也会到导致一定的误差。通过误差对比及误差

分析,验证了本文有限元模型的有效性。

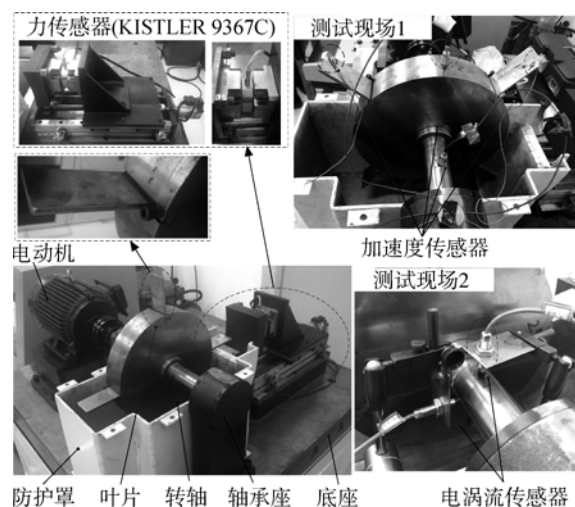


图2 转子-盘片-机匣系统碰摩实验台

Fig. 2 Experiment rig of rotor-blade-casing system

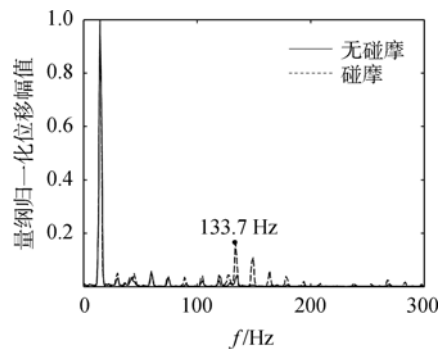
表 3 实验及仿真固有频率

Table 3 Natural frequencies of experiment and simulation

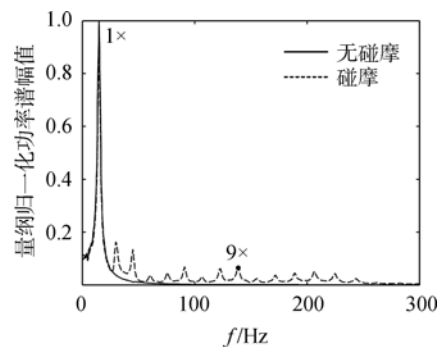
阶数	实验固有频率/Hz	仿真固有频率/Hz	误差/%
1		116.8	
2	132.2	132.49	0.22
3	132.2	132.51	0.23
4	266.9	262.22	-1.75
5	266.9	264.94	-0.73
6	348.4	360.85	3.57
7	356.6	363.08	1.82
8	573.8	576.33	0.44
9	589.7	582.40	-1.24

转速为 900 r/min 时,实验与仿真获得的节点 11 处轴心轨迹有很好的吻合度,如图 3(a)所示(图中 x 为水平方向位移, y 为竖直方向位移),仿真中为模拟实验台本身的不平衡量,在与轮盘连接的轴心(即节点 18)处施加不平衡力,假定偏心力矩为 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}$. 实验发现,发生碰摩故障时,节点 11 水平方向位移响应在倍频上出现峰值,且在 9 倍频($9\times$)处的峰值较为突出,如图 3(b)所示;仿真结果也有同样的现象,碰摩激发了系统高倍频成分,且在 9 倍频处峰值突出,如图 3(c)所示. 实验还发现无碰摩时在倍频处也有微小的幅值,这主要由于实验台自身存在其他干扰,如支承采用的滚珠轴承和轴系不对中等. 进一步分析可知,9 倍频附近的固有频率(f)为竖直俯仰和水平俯仰的刚体模态,如图 4 所示.

图 5 为 1000 r/min 转速时,实验与仿真获得的不同侵入量(δ)的法向碰摩力(F). 仿真结果与实验结果有相同的趋势,即法向碰摩力随着侵入

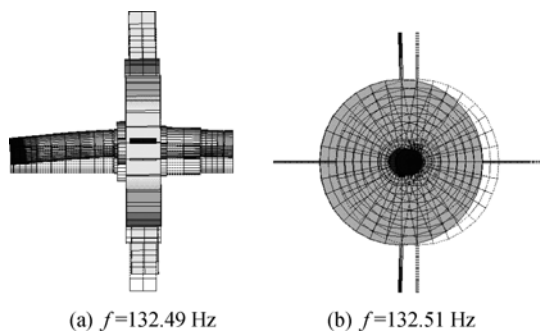


(b) 实验获得水平方向位移频谱图



(c) 仿真获得水平方向功率谱图

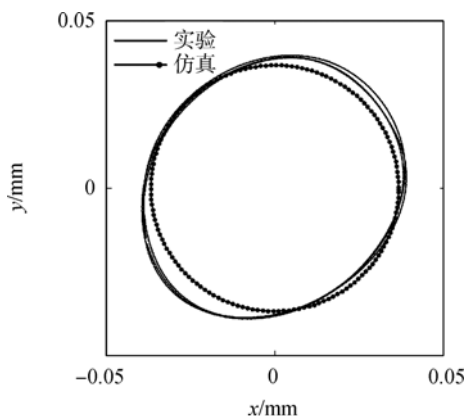
图 3 900 r/min 时实验及仿真的振动响应
Fig. 3 Vibration responses of experiment and simulation at 900 r/min



(a) $f=132.49 \text{ Hz}$ (b) $f=132.51 \text{ Hz}$

图 4 转子-盘片-机匣系统俯仰刚体模态

Fig. 4 Pitching rigid modal of rotor-blade-casing system



(a) 轴心轨迹

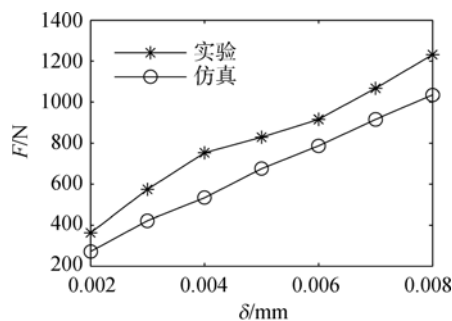


图 5 不同侵入量的法向碰摩力

Fig. 5 Normal rubbing force under different penetrations

量的增大几乎成线性增大,然而实验与仿真得到的法向碰摩力大小有一些差距,是由于实验控制侵入量时步进电动机存在进给误差以及实验机匣的运动和仿真略有差异所致。

3 转子-盘片-机匣碰摩动力学仿真分析

3.1 900 r/min 转速不同侵入量的动力学仿真

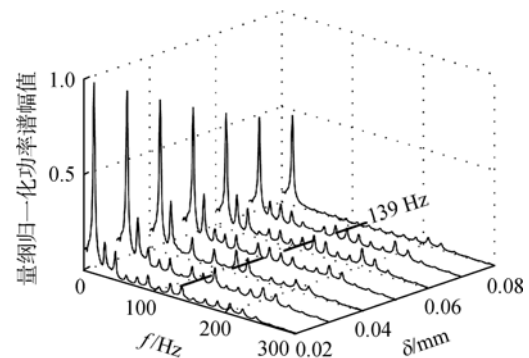
设置不同的初始间隙条件,使得在不平衡力的作用下,叶片-机匣有不同的侵入量,不同间隙条件对应的侵入量在表4中列出。

表4 不同初始间隙条件对应的侵入量

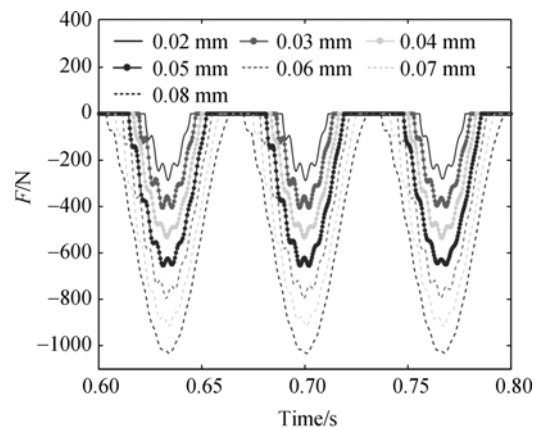
Table 4 Penetrations corresponding to different initial clearance conditions

初始间隙/mm	δ /mm
0.021	0.02
0.011	0.03
0.001	0.04
-0.009	0.05
-0.019	0.06
-0.029	0.07
-0.039	0.08

图6为900 r/min转速下系统碰摩时的振动响应。图6(a)为节点11的轴心轨迹,由图可知,随着侵入量的增大节点11在碰摩一侧的水平方向位移向另一侧压缩;图6(b)为以 $\delta=0.02$ mm时节点11水平方向功率谱的最大幅值为标准,获得的量纲归一化三维功率谱图,由图可知,侵入量越大最大峰值的幅值越小,且在俯仰刚体模态附近的倍频幅值有不同程度的放大;由图6(c)可知,900 r/min转速下随着侵入量的增大,碰摩力增



(b) 节点11水平方向三维功率谱图



(c) 法向碰摩力

图6 900 r/min 转速下碰摩时系统振动响应

Fig. 6 Vibration responses of rotor-blade-casing system with rub-impact at 900 r/min

大,碰摩时间增加,与此同时,小侵入量下的碰摩力波动较大,而大侵入量下的碰摩力波形比较规整。

3.2 侵入量为0.03 mm时不同转速的动力学仿真

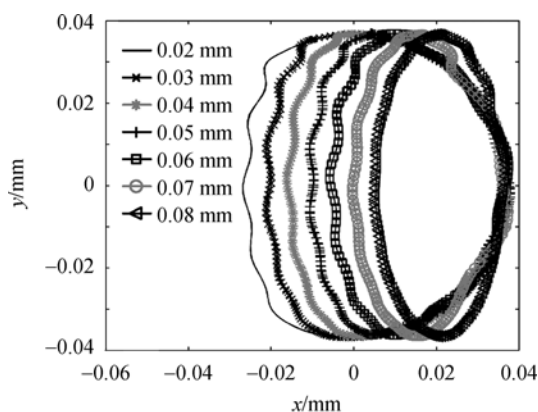
不同转速下叶尖节点515水平方向(x 向)最大位移,以及 $\delta=0.03$ mm时各转速对应的初始间隙条件如表5所示。

表5 侵入量为0.03 mm时不同转速对应的初始间隙条件

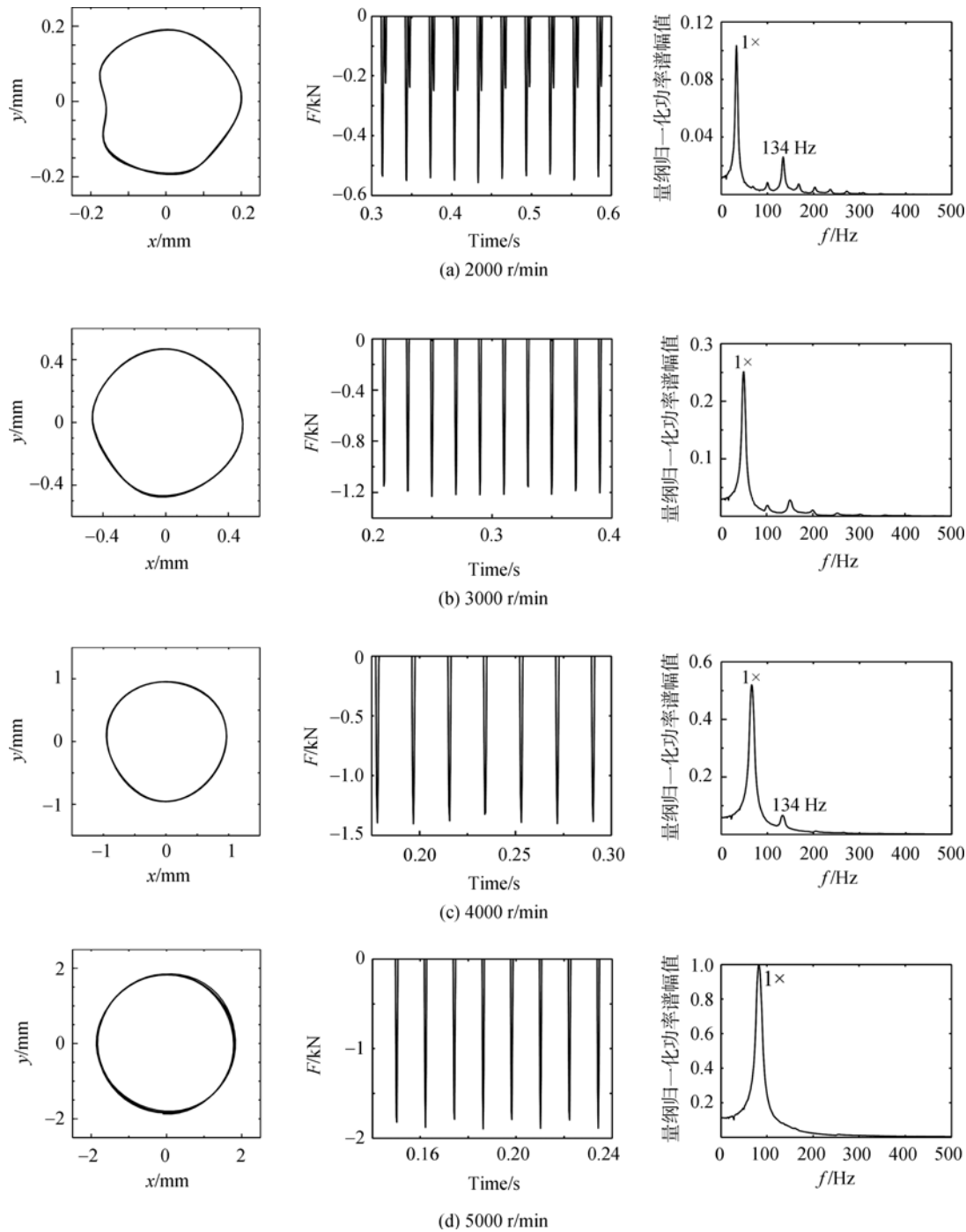
Table 5 Initial clearance conditions corresponding to 0.03 mm penetration at different speeds

转速/ (r/min)	水平方向最大 位移/mm	初始间隙/ mm
2000	0.211	0.181
3000	0.519	0.489
4000	1.058	1.028
5000	2.033	2.003

在不同转速下 $\delta=0.03$ mm时,系统的振动响应,如图7所示。图中从上到下依次为节点11轴心



(a) 节点11的轴心轨迹

图 7 不同转速下碰摩时系统振动响应 ($\delta=0.03\text{ mm}$)Fig. 7 Vibration responses of rotor-blade-casing system with rub-impact at different speeds ($\delta=0.03\text{ mm}$)

轨迹、法向碰摩力、节点 11 水平方向位移功率谱图。随着转速的增大,轴心轨迹的形状也发生变化,轴心轨迹越趋向于圆形。这是由于影响轴心轨迹的主导因素有不平衡力和碰摩力,转速较大时不平衡力占主导,碰摩力相对于不平衡力引起的位移非常小,故轴心轨迹趋于圆形。在侵入量相同的条件下,系统法向的碰摩力随着转速的增加而增大。

以转速 5000 r/min 时节点 11 水平方向位移功率谱的最大幅值为标准,获得的不同转速节点

11 水平方向量纲归一化功率谱图,随着转速的增大,高倍频成分逐渐消失;在某些倍频上位移响应的峰值突出,这是由于倍频靠近系统的俯仰刚体模态频率,激发了系统的俯仰刚体模态造成的。

3.3 初始间隙条件为 0.1 mm 时不同转速的动力学仿真

不同转速下叶尖节点 515 水平方向(x 向)最大位移,以及初始间隙条件为 0.1 mm 时,各转速对应的叶片-机匣侵入量如表 6 所示。

表6 初始间隙为0.1 mm时不同转速对应的侵入量

Table 6 Penetrations corresponding to 0.1 mm initial clearance conditions at different speeds

转速/(r/min)	水平方向最大位移/mm	δ /mm
2000	0.211	0.111
3000	0.519	0.419
4000	1.058	0.958
5000	2.033	1.933

在不同转速下初始间隙为0.1 mm时,系统的振动响应,如图8所示.图中从上到下依次为节点11轴心轨迹、法向碰摩力、节点11水平方向位移功率谱图.随着转速的增加,导致碰摩一侧的位移收到阻碍,严重时向内凹陷.

随着转速的增加,产生不同形式的碰撞,转速较小时,每周碰撞一次,如2000 r/min和3000 r/min;转速较大时存在一周连续碰两次的情况,如4000 r/min和5000 r/min;碰撞形式不同的原因主要是由于转速越大,受到的不平衡力越大,法

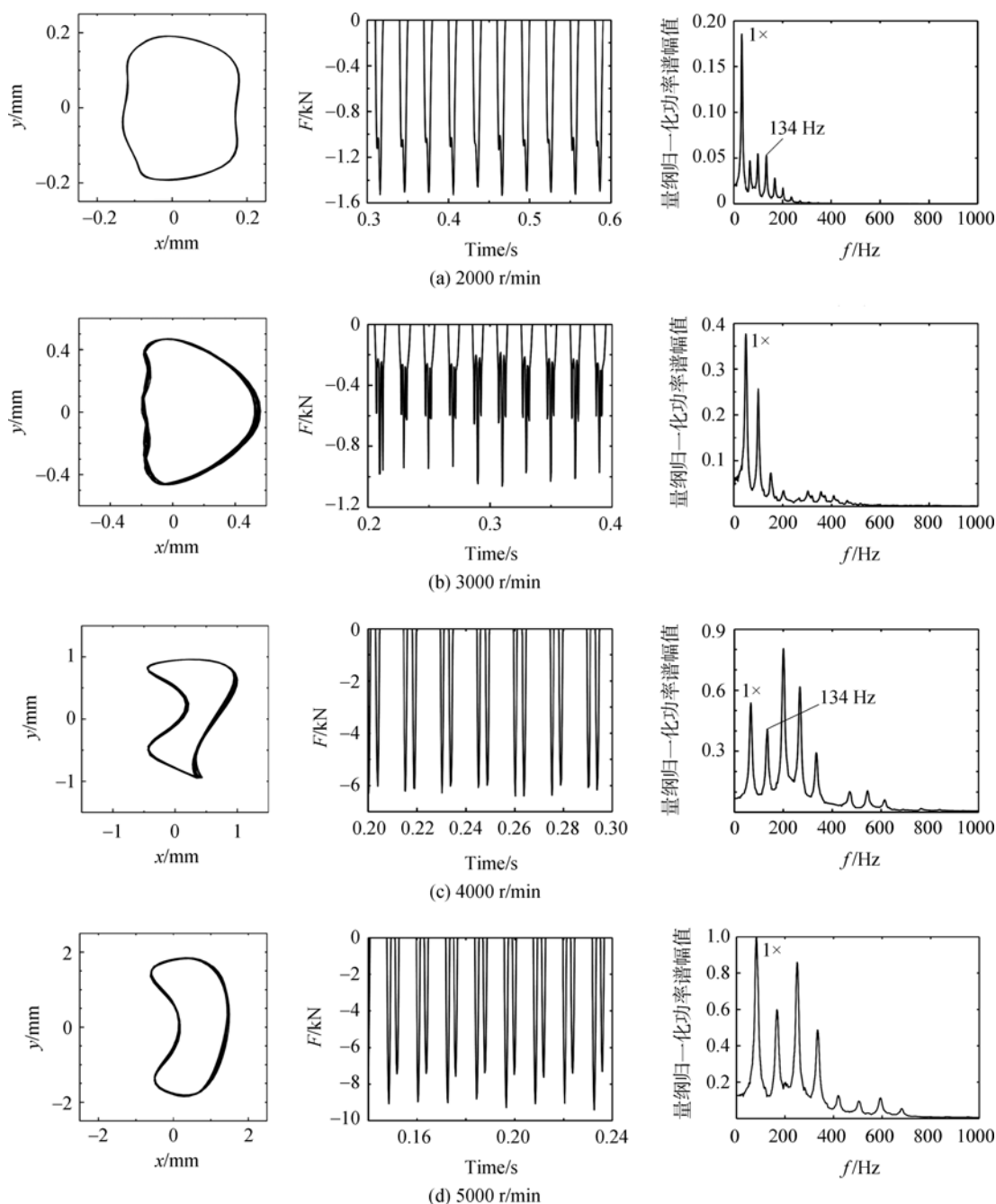


图8 不同转速下碰摩时系统振动响应

Fig. 8 Vibration responses of rotor-blade-casing system with rub-impact at different speeds

向碰摩力越大,而系统受到的反弹力也越大,故出现在短时间内产生多次碰撞的现象。

以转速 5000 r/min 时节点 11 水平方向位移功率谱的最大幅值为标准,获得的不同转速节点 11 水平方向量纲归一化功率谱图,发生碰摩时频率成分复杂,转速较大时有多个较大的峰值出现,甚至有倍频处幅值大于转频幅值的现象。

4 结 论

本文依据现有实验台,基于 ANSYS 有限元软件建立了一种转子-盘片-机匣系统有限元碰摩模型。通过仿真以及实验测试对比,分析了定转速下不同侵入量、定侵入量和定间隙下不同转速对系统动力学响应影响,得到以下结论:

1) 在较低转速下,碰摩可以激发系统的俯仰刚体模态,侵入量较大情况下的碰摩可以限制叶片水平方向的振动,但同时会导致叶尖法向碰摩力增大,碰摩时间增加。

2) 当侵入量一定时,转速越高,转子的不平衡力会占主导,使得系统的碰摩特征减弱。

3) 当初始间隙一定时,转速较大时,侵入量也会随之增大,叶片-机匣的碰摩程度会增加,导致叶片-机匣会在短时间内发生多次碰撞,剧烈的碰摩会导致倍频幅值大于转频。

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] Muszynska A. Rotor-to-stationary element rub-related vibration phenomena in rotating machinery: literature survey [J]. Sound and Vibration Digest, 1989, 21(3): 3-11.
- [3] Muszynska A. Rotordynamics [M]. New York: CRC Press, 2005.
- [4] Ahmad S. Rotor casing contact phenomenon in rotor dynamics: literature survey [J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 16(9): 1369-1377.
- [5] 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试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] 高喜, 张新江, 张勇. 非线性转子动力学问题研究综述 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2002, 32(3): 443-451.
- [7] GAO Wei, ZHANG Xinjiang, ZHANG Yong, et al. Review of nonlinear rotor-dynamics [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(3): 443-451. (in Chinese)
- [8] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望 [J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1371-1391.
- [9] CHEN Yushu, ZHANG Huabiao. Review and prospect on the research of dynamics of complete aero-engine systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1371-1391. (in Chinese)
- [10] CHEN Guo, LI Chenggang, WANG Deyou. Nonlinear dynamic analysis and experiment verification of rotor-ball bearings-support-stator coupling system for aeroengine with rubbing coupling faults [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(2): 022501. 1-022501. 9.
- [11] 袁惠群, 贺威, 韩清凯. 发动机双转子-机匣耦合系统碰摩故障分析 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2401-2408.
- [12] YUAN Huiqun, HE Wei, HAN Qingkai. Analysis on rubs of double rotor-stator coupling system [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2401-2408. (in Chinese)
- [13] 李勇, 姜广义, 王德友, 等. 转静件碰摩状态下的叶片振动载荷和振动特性测试分析 [J]. 航空动力学报, 2008, 23 (11): 1988-1992.
- [14] LI Yong, JIANG Guangyi, WANG Deyou, et al. Test analysis of blades vibration load and vibration characteristics on the condition of rotor and stator rubbing [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 1988-1992. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] JIANG Jun, CHEN Yanhua. Advances in the research on nonlinear phenomena in rotor/stator rubbing systems [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1): 132-148. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] MA Hui, TAI Xingyu, LI Huanjun, 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. (in Chinese)
- [19] Padovan J, Choy F K. Nonlinear dynamics of rotor/blade/casing rub interactions [J]. Journal of Turbomachinery, 1987, 109(4): 527-534.
- [20] Jiang Jun, 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, Germany: IFTOMM, 1998: 478-489.
- [21] 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.
- [22] Legrand M, Batailly A, Pierre C. Numerical investigation of abradable coating removal in aircraft engines through plastic constitutive law [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7(1): 011010. 1-011010. 10
- [23] Roques S, Legrand M, Cartraud P, et al. Modeling of a rotor speed transient response with radial rubbing [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(5): 527-546.
- [24] 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.
- [25] LIU Shuguo, 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. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)