

文章编号: 1000-8055(2011)08-1847-08

失谐叶盘结构振动模态局部化实验

廖海涛, 王建军, 王 帅, 李其汉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于实际叶盘结构失谐振动模态局部化能量集中的物理特性, 以及基于优化方法提出了确定失谐叶盘结构最坏状态模态局部化的方法. 通过数值算例表明, 该方法可以有效定量确定失谐叶盘结构最坏情形模态局部化, 发现失谐跳变模态局部化现象. 利用搭建的失谐叶盘模态局部化实验系统, 针对典型的整体叶盘结构模型试件进行了失谐振动模态局部化实验, 通过实验验证了失谐跳变模态局部化现象, 实验测量与理论计算结果得到了较好的相互印证.

关 键 词: 失谐叶盘结构; 振动模态局部化; 最坏失谐模式; 失谐跳变-模态局部化现象

中图分类号: V231.92

文献标志码: A

Experimental investigation of the worst-case mode localization for a mistuned bladed disk assemblies

LIAO Hai-tao, WANG Jian-jun, WANG Shuai, LI Qi-han

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the vibration mode characteristics of mistuned bladed disk, the methods for analysis mode localization were presented to assess the worst-case mode localization of mistuned bladed disk, numerical example shows that the method presented is reliable and effective. An experimental investigation of a simple 12-bladed academic blisk was then presented. The purpose was to validate theoretical predictions about the occurrence of mistuning jump-localized modes and to gain greater insight into the mechanisms by which the phenomena occur. The experimental measurements of localized mode shapes were compared to predictions based on the finite element method. The experimental measurements were found to have excellent agreement with numerical simulation results.

Key words: mistuned bladed disk; vibration modal localization; the worst mistuning pattern; mistuning jump-mode localization phenomenon

失谐叶盘结构振动局部化会对其高周疲劳产生不利影响^[1-2], 近 20 余年来国内外均对此进行了大量研究; 其中失谐振动局部化程度的定量描述是深入进行失谐分析、失谐设计和失谐识别的基础问题之一. 因此, 建立失谐叶盘结构振动局部化的定量描述方法具有重要意义.

由于振动模态与振动响应关系密切, 研究失谐叶盘振动模态对于研究叶盘结构的振动响应和高周疲劳失效是很重要的. 迄今为止, 对于失谐周期结构和叶盘结构模态局部化的定量描述, 人们已经提出了多种思路和方法. 例如, 王建军课题组^[3-6]基于实际叶盘结构失谐振动模态局部化的

收稿日期: 2010-08-01; 修订日期: 2010-10-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2008AA04Z403)

作者简介: 廖海涛(1982—), 男, 湖南新田人, 博士生, 研究方向为航空发动机失谐叶盘振动控制.

通讯作者: 王建军(1956—), 男, 江苏苏州人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度与振动、振动抑制与可靠性研究.

基本特性和物理含义,提出了描述模态局部化程度的多种评价指标,即叶片模态位移、模态应力、模态应变能局部化因子等, Klawke 等^[7]基于失谐模态的节径成分定义了评价模态局部化程度的局部化因子,最近杨智春等^[8-9]给出了 T 尾结构模态峰值振幅比等 4 种模态局部化判据。

因为进行失谐叶盘结构振动模态局部化特性的实验不仅是研究模态局部化现象自身的要求,也是深刻理解其响应局部化特性的基础,所以进行失谐叶盘结构模态局部化特性实验非常必要。但是相对于失谐叶盘结构模态局部化众多的理论分析,目前仍缺少在实验方面的实践,特别是验证理论研究获得的现象和结论所需的实验。Kruse 等^[10]采用非接触式的激振和测量技术,通过对具有 12 个叶片的平板叶盘结构的失谐实验,证实了叶盘结构模态局部化现象。Gordon 和 Hollkamp^[11-13]研究了阻尼、叶间耦合因素以及实验模态分析方法对叶盘结构实验模态特性的影响。在国内,涂杰^[14]进行了失谐叶盘结构模态局部化的实验研究。实验中采用的是平板叶盘结构模型、单点力锤激振和非接触式位移传感器多点轮流拾振的方式。由于实验试件构型的复杂性,以及测量方法手段和实验系统设计缺陷等因素的影响,在上述一些实验研究结果中有些不能与理论计算进行对比,而有些实验也只是在定性的层面上具备可比性。

本文基于优化方法提出了确定失谐叶盘结构最坏状态模态局部化的方法,通过数值算例揭示了失谐跳变模态局部化现象,为验证理论发现及分析其特性,利用失谐叶盘结构模态局部化实验系统进行了失谐叶盘结构模态局部化实验,最后对与失谐叶盘结构模态局部化相关的有限元仿真和实验结果进行了比较和讨论。

1 确定最坏情形模态局部化的方法

1.1 问题描述

叶盘系统无阻尼自由振动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

其中 $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{q}$ 分别为叶盘系统的质量矩阵、刚度矩阵和位移矩阵,假设叶盘系统以频率 ω 做谐振动,则式可化为

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

该方程可化为典型的特征值问题

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

其中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, $\mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$, $\lambda = \omega^2$ 。

引入失谐变量来模拟叶盘结构的失谐现象,表示为^[16]

$$\begin{aligned} v^{(k)}(i) = & [1 - \xi_v(k) + 2 \cdot \xi_v(k) \cdot v_{\text{mt}}^{(k)}(i)] v_{\text{um}}^{(k)}(i) \\ & (i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $v^{(k)}(i)$ 表示第 k 类结构参数第 i 个元素, $v_{\text{mt}}^{(k)}(i)$ 表示第 k 类失谐第 i 个失谐变量,取值区间为 $(0, 1)$, $\xi_v(k)$ 表示第 k 类失谐所有失谐变量的失谐强度, $v_{\text{um}}^{(k)}(i)$ 表示第 k 类谐调结构参数第 i 个元素, M 表示失谐参数类型的数目。

根据公式(1)~(4),以及文献[15]关于振动局部化随着失谐强度增大而增大的理论推导,寻求失谐叶盘最大模态幅值(模态局部化最坏程度)可转化为下述非线性优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq j \leq N_m} \| \mathbf{q}^j \|_{\infty} = \max f(v_{\text{mt}}) \\ \text{s. t. } v_{\text{mt}}^{(k)}(i) \in [0, 1] \\ (i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, M) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\|\cdot\|_{\infty}$ 表示向量的无穷范数, N_m 表示考虑的模态数目, v_{mt} 表示所有失谐变量构成的向量,即失谐叶盘最大的模态幅值可表示为仅与 v_{mt} 相关的函数。

1.2 数值算例

采用文献[15-16]中给出的典型谐调叶盘结构参数,该谐调系统固有频率特性的详细讨论可参考文献[5]。

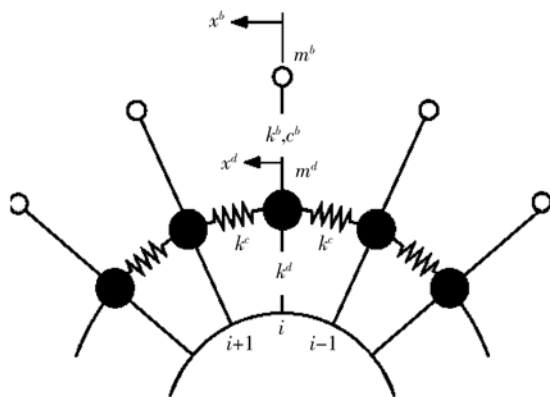
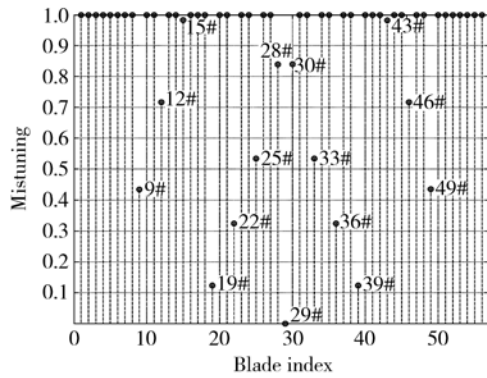
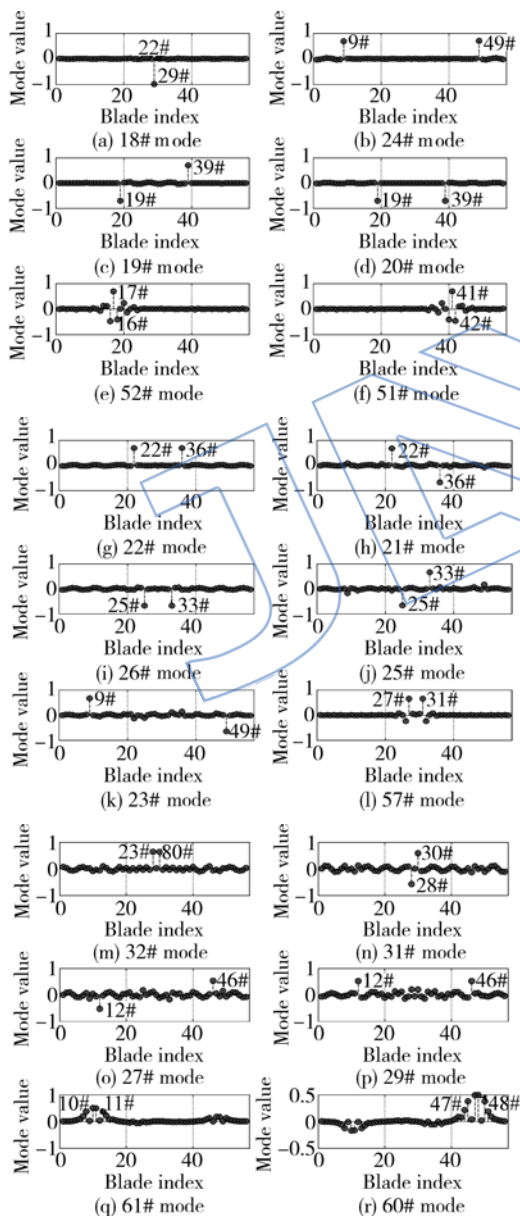


图1 典型叶盘结构集中参数力学模型

Fig. 1 Lumped-parametric model of a bladed disk

图2显示了叶片刚度失谐叶盘结构模态局部化的最坏失谐模式。从失谐变量分布可知,29#叶片的叶片刚度失谐变量值为零,其余失谐变量值以29#叶片为中心类似对称分布,而标注序号以外的叶片变量值都为1。由图3给出的局部化模态(依模态幅值大小降序排列)可以看出,在18阶

图 2 k^b 失谐最坏失谐模式Fig. 2 Worst-case mistuning pattern when k^b is mistuned图 3 k^b 失谐最坏失谐模式局部化模式Fig. 3 Localized mode shapes of the worst-case bladed disk when k^b is mistuned

模式 29# 叶片处出现了非常强烈的振动模式局部化,其幅值为 -1,其余叶片模式幅值为 0. 通过观察,还可以得出如下发现:①失谐变量值对称出现,以 29# 叶片为对称中心,每间隔两个叶片出现一对类似对称的失谐变量值;例如失谐变量值介于 0.1 和 0.2 之间 19# 和 39# 叶片. ②在模式局部化程度严重的模式中,出现叶片振动局部化的叶片正是失谐变量值对称出现的叶片.

2 失谐叶盘结构振动模式局部化实验系统

整体叶盘结构试件具有循环对称性的特点,使其固有特性通常表现为具有分段高度密集的模式分布特征,这给模式参数提取带来了巨大的挑战. 因而采取何种数据采集、后处理方法是进行整体叶盘结构模式特性实验研究的关键. 本节简要介绍整体叶盘结构的失谐振动测量系统及其实验测量方法,详细的论述可参考文献[17].

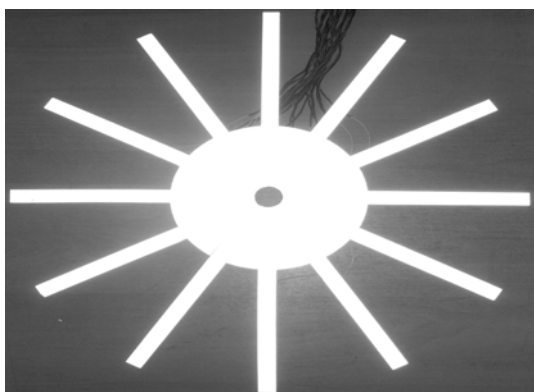
2.1 测量原理与方法

整体叶盘结构模式实验系统简要的工作流程为:由激光振动测量系统数控计算机(PSV-W-400-B)和连接箱(PSV-E-400)产生并控制快速扫频正弦激励所需的交变电压信号,并联产生两路完全相同的模拟电压信号,一路作为压电陶瓷动态驱动电源的控制信号,另一路提供给拾振系统作为参考信号(测量输入信号). 控制信号接入动态驱动电源后,可通过调节旋钮来调节和控制电源输出满足要求的交变电压(本实验中设定为 40 V). 将保真放大后的交变电压接入压电陶瓷激振器来激励实验件,由激光测振仪系统测量整体叶盘结构试件模型的振动信号(测量输出信号),最后综合必要的采集数据(测量输入、输出信号)完成后处理. 鉴于采用多输入多输出(MIMO)的测量方式应用于叶盘结构振动模式测量的局限性,这里采用了轮换激励点重复进行单输入单输出(SISO)模式实验的测量方法,即在叶盘每个扇区内选择一单点固定激励进行一次 SISO 测试过程. 此外,在整体叶盘结构的模式局部化实验中使用压电陶瓷片来激励,并选择常用的快速扫频正弦激励“chirp”形式.

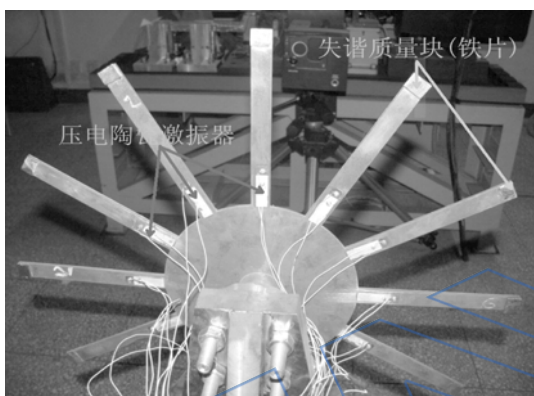
2.2 测量模型与信号采集

整体叶盘结构试件如图 4 所示,在试件表面粘贴反光膜是为了提高激光拾振的信号质量,而保持一次完整模式实验中 12 次 SISO 测试结

果的一致性,实验前在试件背面每个叶片根部均粘结了压电陶瓷激振器。



(a) 正面反光膜



(b) 背面粘结压电陶瓷激振器

图4 整体叶盘结构试件

Fig. 4 Experimental blisk

实验主要以该整体叶盘结构试件的前2族系统模态为测量和研究范围,即1阶弯曲和2阶弯曲模态族,此范围系统振型特征主要表现为0~6节径的轮盘振动和1阶、2阶弯曲叶片振动的组合,并且主要是产生离面的轴向振动.实验模型测点数量和位置的选定如图5所示,各测点的测量方向均为轴向(Z向).每个叶片(含叶片与轮盘交界)包含9个测点,可充分满足测量叶片2阶弯曲振动的要求,而轮盘上共120个测点,相邻测点周向分布弧度角为 $\pi/30$,可以清晰地观测并区分出0~6节径振动,所以该实验模型保证了所关心的结构点都在所选的测量点之中,并足以胜任在变形后明确显示在实验频段内的所有模态的变形特征及各模态间的变形区别。

对应于激励每个叶片的12次SISO测试过程中,扫频激励在相同的条件下重复进行,对试件模型的每个测点(共216个,见图5)进行了3次信号数据采集.各测点包含激励、响应两路信号的

采集记录;振动响应主要采集的是叶盘试件的速度信号(m/s);对于激励(参考)信号来说,由于难以采集到压电陶瓷片所产生的力信号,那么依据压电陶瓷片激振力与施加电压的线性关系原理,这里利用压电陶瓷动态驱动电源的控制信号(V)来替代该激振力信号(N).该控制信号实际上由激光振动测量系统内置的任意波形信号发生器产生,为线性扫频正弦交变电压信号.测试信号采集记录中的关键参数可参考文献[17].

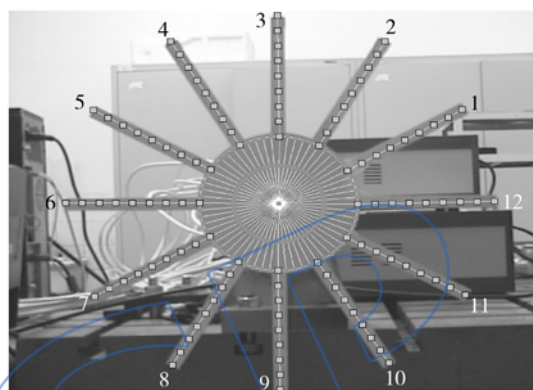


图5 实验模型测量点

Fig. 5 Measured model of experimental blisk

3 失谐叶盘结构的实验结果及分析

3.1 实验件及理论分析

借助于有限元法(FEM)程序,利用1.1节的方法计算了叶盘结构理论模态局部化最坏失谐模式.整体失谐叶盘结构有限元模型如图6所示,共15888个单元,26088个节点,叶片根部为粘结的压电陶瓷激振器,失谐是通过改变各个叶片的密度来模拟的,失谐强度取为0.05.图7给出了模

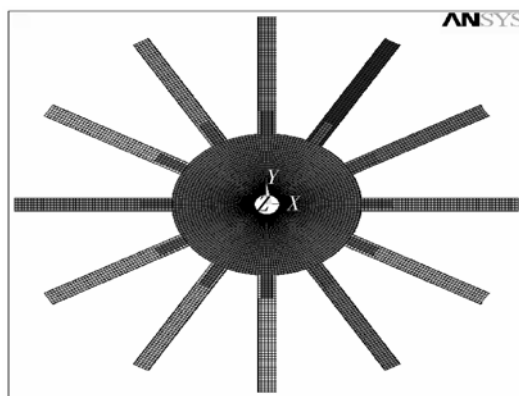


图6 整体失谐叶盘模式设计有限元模型

Fig. 6 Finite element model of experimental blisk

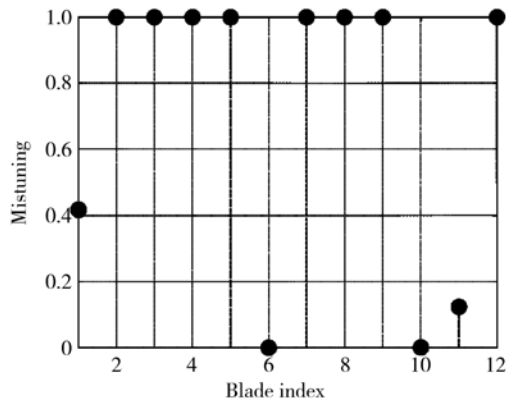


图 7 模式局部化最坏失谐模式

Fig. 7 Worst-case mistuning pattern of mode localization

态局部化最坏失谐模式的有限元仿真结果,由图可知失谐值发生剧烈变化的分别是 6, 10 和 1 号叶片. 而根据该理论最坏失谐模式实际添加于实验试件各叶尖上的失谐质量块质量可参见表 1.

表 1 添加质量块的失谐质量

Table 1 Mass added to the tip of blade of the validation blisk

叶片序号	1	2	3	4	5	6
失谐质量/g	2.135	5.121	5.124	5.126	5.125	0
叶片序号	7	8	9	10	11	12
失谐质量/g	5.124	5.124	5.124	0	0.630	5.124

表 2 失谐叶盘固有频率实验与有限元法仿真结果对比(单位:Hz)

Table 2 Experimental natural frequencies for the worst-case mistuning pattern compared with FEM predictions for a blisk mistuned by added masses (units:Hz)

模态阶数	有限元预测	实验数据	误差/%	模态阶数	有限元预测	实验数据	误差/%
1	64.319	62.250	3.2168	13	287.88	286.5	0.4794
2	65.118	63.500	2.4847	14	294.53	293	0.5195
3	69.584	67	3.7135	15	303.93	303.8	0.0428
4	75.028	70	6.7015	16	348.8	345.8	0.8600
5	75.434	70.50	6.5408	17	350.31	349.5	0.0231
6	88.913	80	10.024	18	467.93	457.3	2.2717
7	89.427	81.25	9.1438	19	469.91	460.8	1.9387
8	94.476	84	11.089	20	531.84	517.3	2.7339
9	94.658	84.75	10.467	21	535.18	519.8	2.8738
10	96.843	87.75	9.3894	22	557.55	542	2.7890
11	97.918	91	7.0651	23	563.89	552	2.1086
12	99.220	92.50	6.7728	24	572.39	556.8	2.7237

表 2 列出了叶盘结构模式局部化最坏失谐模式有限元分析的固有频率与相应叶盘试件实验测量得到的固有频率对比. 1~12 阶模态代表着叶片主导 1 弯模态族,该区域固有频率和模态受失谐的影响是较为敏感的;而该叶盘结构的 2 弯模态族振型(13~24 阶模态)大多数均属于轮盘主导模态,该区域属于低模态密度区域,因此对失谐不敏感,失谐对于该区域固有频率和模态影响较小. 为了从整体上比较实验测量模态与有限元模型计算模态之间的差别,定量衡量各阶模态间的相关性,这里引入了模态置信因子

$$M_{ac}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \left(\frac{\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{v}}{\|\mathbf{u}\| \|\mathbf{v}\|} \right)^2 \quad (6)$$

式中 $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ 分别表示测量模态和计算模态向量,当 $\mathbf{u} = \alpha \cdot \mathbf{v}$ (α 是一常数) 时, $M_{ac} = 1$, 而当振型向量 $\mathbf{u}, \mathbf{v}$ 相互正交时, $M_{ac} = 0$. M_{ac} 值的计算要求测量振型的自由度数 n 与有限元模型的自由度数 N 相一致, 对比图 5 和图 6 可以看出实际情况是 $n < N$, 实现这一要求, 一是扩充测量振型的自由度, 二是减缩有限元模型的自由度数, 为了减少测试工作量, 这里采取了第 2 种途径, 即提取出有限元模型中与实验模型测点对应位置的自由度作为理论计算的模态向量. 该最坏失谐模式叶盘结构各阶模态的 M_{ac} 值如图 8 所示, 从图中可以看出, 不同阶模态 M_{ac} 值接近于 0, 同阶模态除了第 5, 8, 9, 13, 14 等几阶模态 M_{ac} 值介于 0.4~0.7 之

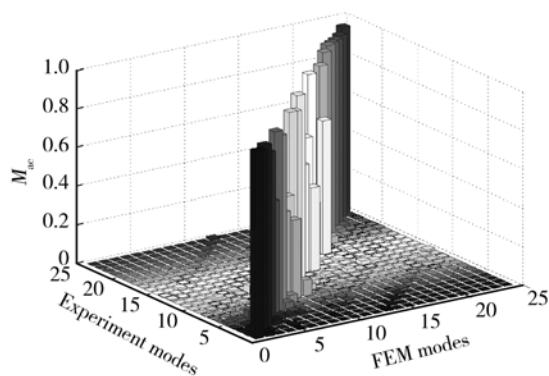


图8 失谐叶盘实验测量与有限元模态相关性

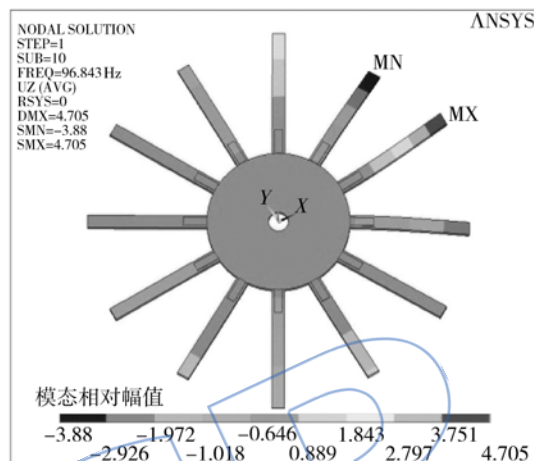
Fig. 8 M_{ac} between measured modes and FEM modes

外,其他模态的 M_{ac} 值都大于 0.9, 有较好的相关性. 相关性较差的几阶模态可能是由如下原因引起: 对于名义谐振的和失谐的叶盘结构试件, 在整个实验过程中都存在着同样的未知失谐, 并且在理论仿真计算中无法计及, 因此由于响应振幅对失谐的高度敏感性, 该部分未知失谐将会带来的理论计算与实验测量之间的差异. 此外, 实验中的各种实际因素在理论计算中也不可能完全有效地模拟, 如引入失谐时粘结剂的质量、试件的阻尼等等.

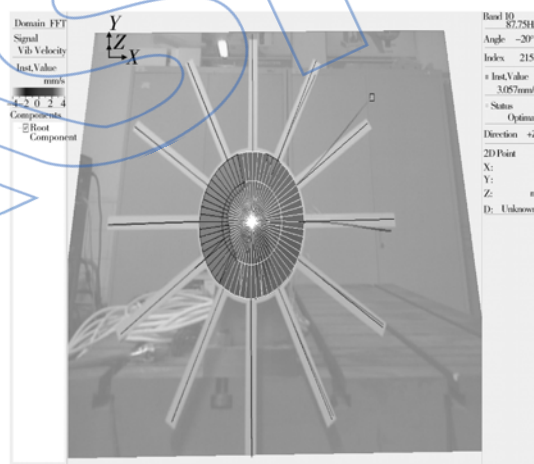
图9给出了模态局部化程度很严重的第10、11和12阶模态有限元仿真和实验测量结果, 而叶尖位置这三阶归一化模态的实验与有限元比较如图10所示. 从图10中可以看出, 这些模态已不再表现出单个节径的波形特征, 最坏失谐模式的叶盘结构振动模态出现了非常明显的模态能量集中现象, 而其他叶片的模态能量则非常小, 第10、11和12阶模态出现的模态局部化位置分别为1#、6#和10#叶片. 通过比较最坏失谐模式图7发现, 与这些模态对应的失谐变量值发生了急剧变化, 与附近失谐变量值反差很大, 表现对失谐变量值很强的敏感性; 出现模态局部化的叶片位置正是失谐变量值跳变的位置, 且模态局部化程度跟失谐变量值跳变程度相关; 失谐变量值6、10跳变程度很大, 而失谐变量值1的跳变程度相对较小. 随着失谐变量值跳变程度不同, 模态局部化严重程度依次为11、12和10阶模态, 特别是在11阶模态, 振动能量集中在6#叶片, 其模态相对幅值在所观测到的有限元仿真与实验测量结果中分别达到其最大值5.567 mm/s和3.312 mm/s.

这些模态局部化振型对应于谐调系统中1阶弯曲模态族的5(第10、11阶)和6(第12阶)节径

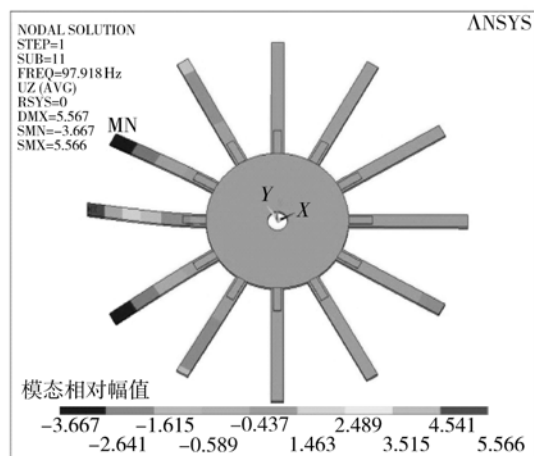
表现出来的振型, 属于叶片主导模态并均为离面振动, 这是和频率转向区^[18-19]内叶片发生面内振动而轮盘的离面振动的弱耦合特点存在区别的, 表明叶片和轮盘之间存在着强耦合的特征(即均为离面振动, 能量可以进行部分传递). 由此可知, 在高频率密度模态区域, 随着轮盘振型节径数的



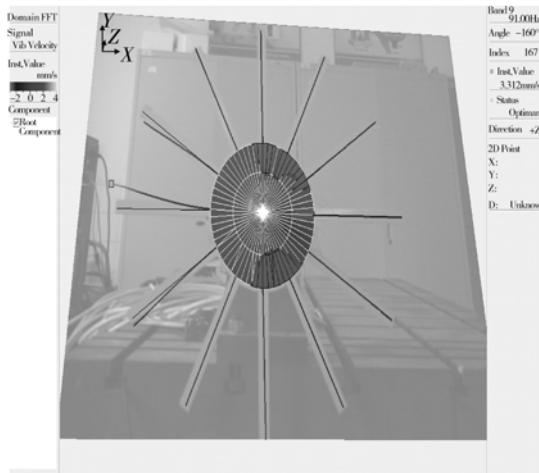
(a) 有限元仿真10阶模态



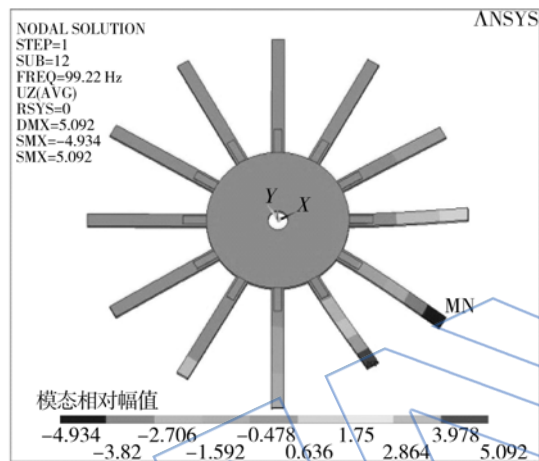
(b) 实验测量10阶模态



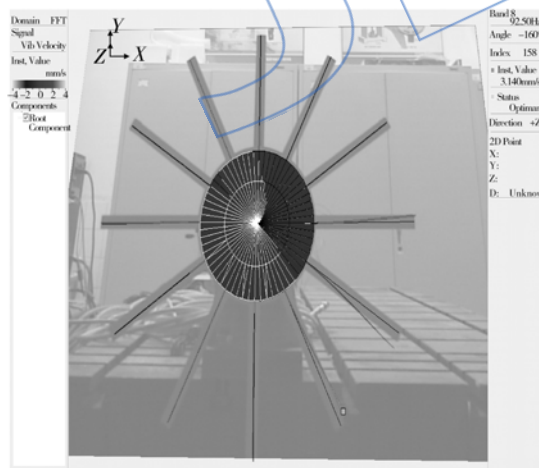
(c) 有限元仿真11阶模态



(d) 实验测量11阶模态



(e) 有限元仿真12阶模态

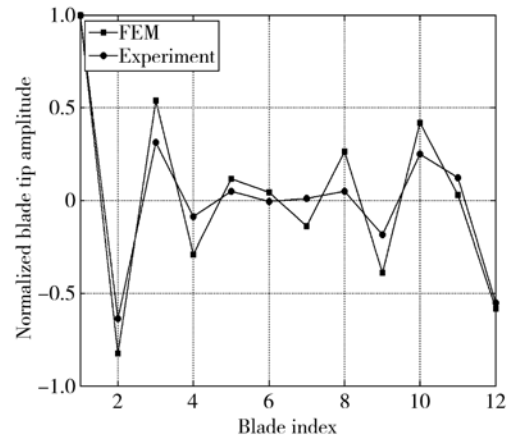


(f) 实验测量12阶模态

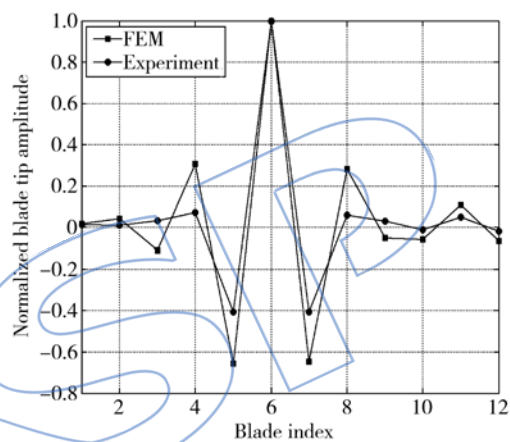
图 9 叶盘结构有限元仿真与实验模态比较

Fig. 9 Comparison of mode shapes of validation blisk measured by the experiment and predicted by the FEM model

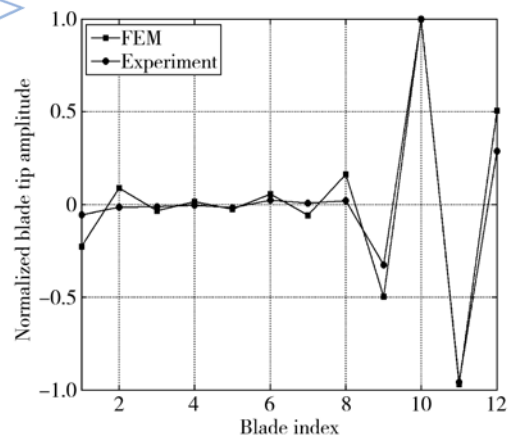
增加,轮盘迅速的变刚和变硬同样可以降低叶片之间耦合强度。



(a) 第10阶模态



(b) 第11阶模态



(c) 第12阶模态

图 10 有限元仿真与实验叶尖模态比较

Fig. 10 Comparison of measured and predicted bladed tip localized mode shapes for the validation blisk

4 结 语

研究表明:与模态局部化对应的最坏失谐模式中存在失谐值剧烈变化的特点,在该失谐值跳变位置附近,失谐叶盘结构的模态对失谐值非常敏

感,会导致出现强烈的模态局部化现象.此外,实验获得的局部化模态并不是发生在典型的弱耦合、高模态密度转向区域,而是发生在叶片主导的模态区域,且表现为轮盘和叶片之间有着较强的耦合运动关系.在高频率密度模态区域,随着轮盘振型节径数的增加,轮盘变刚和变硬同样可以降低叶片之间耦合强度,进而发生振动模态局部化.

参考文献:

- [1] 王建军,李其汉,朱梓根.失谐叶片-轮盘结构系统振动局部化问题的研究进展[J].力学进展,2000,30(4):517-528.
WANG Jianjun, LI Qihan, ZHU Zigen. Vibratory localization of mistuned bladed disk assemblies-a review[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(4): 517-528. (in Chinese)
- [2] Castanier M P, Pierre C. Modeling and analysis of mistuned bladed disk: status and emerging directions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 384-396.
- [3] 王建军,于长波,姚建尧,等.失谐叶盘振动模态局部化定量描述方法[J].推进技术,2009,30(4):457-461.
WANG Jianjun, YU Changbo, YAO Jianyao, et al. Vibratory mode localization factors of mistuned bladed disk assemblies[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(4): 457-461. (in Chinese)
- [4] 王建军,于长波,李其汉.错频叶盘结构振动模态局部化特性分析[J].航空动力学报,2009,24(4):788-792.
WANG Jianjun, YU Changbo, LI Qihan. Localization characteristics of vibratory mode for bladed disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 788-792. (in Chinese)
- [5] 王建军,姚建尧,李其汉.刚度随机失谐叶盘结构概率模态特性分析[J].航空动力学报,2008,23(2):256-262.
WANG Jianjun, YAO Jianyao, LI Qihan. Probability characteristics for vibratory mode of bladed disk assemblies with random stiffness mistuning[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 256-262. (in Chinese)
- [6] 于长波,王建军,李其汉.错频叶盘结构的概率模态局部化特性分析[J].航空动力学报,2009,24(9):2040-2045.
YU Changbo, WANG Jianjun, LI Qihan. Probability characteristics for vibratory mode of detuned bladed disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 2040-2045. (in Chinese)
- [7] Klauke T, Kuhhorn A, Beirrow B, et al. Numerical investigations of localized vibrations of mistuned blade integrated disks (blisks) [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131: 031002-01/11.
- [8] 杨智春,杨飞. T 尾结构振动的模态局部化判据研究[J].力学学报,2010,42(2):290-299.
YANG Zhichun, YANG Fei. Mode localization prediction criterion for T-tail structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(2): 290-299. (in Chinese)
- [9] 杨智春,杨飞.失谐参数对 T 尾结构振动模态局部化的影响[J].航空学报,2009,30(12):2328-2334.
YANG Zhichun, YANG Fei. Effect of mistuned parameters on mode localization of T-tail structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2328-2334. (in Chinese)
- [10] Kruse M J, Pierre C. An experimental investigation of vibration localization in bladed disks, Part I: free response proc[R]. Orlando, Florida, USA: 42nd ASME Gas Turbine and Aeroengine Cong., 1997.
- [11] Gordon R W, Holkkamp J J. An experimental investigation of non-uniform damping in bladed disks [R]. AIAA-98-3747, 1998.
- [12] Gordon R W, Holkkamp J J. An experimental investigation of piezoelectric coupling in jet engine fan blades [R]. AIAA-2000-1700, 2000.
- [13] Holkkamp J J, Gordon R W. Modal test experience with a jet engine fan model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(1): 151-165.
- [14] 涂杰.谐调和失谐叶盘结构试验件振动模态特性实验与分析[D].北京:北京航空航天大学,2007.
TU Jie. Experiment and analysis of vibration modes in tuned and mistuned blade disks [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [15] LIAO Haitao, WANG Jianjun, LI Qihan. Mistuning forced response characteristics analysis of mistuned bladed disks [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(12): 122501. 1-122501. 11.
- [16] 廖海涛,王建军,李其汉.随机失谐叶盘结构失谐特性分析[J].航空动力学报,2010,25(1):160-168.
LIAO Haitao, WANG Jianjun, LI Qihan. Mistuning characteristics analysis of mistuned bladed disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 160-168. (in Chinese)
- [17] 王帅.整体叶盘结构失谐识别方法及动态特性实验研究[D].北京:北京航空航天大学,2010.
WANG Shuai. Mistuning identification theory and dynamic characteristic experiment for integrally blade disk [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [18] 王建军,卿立伟,李其汉.旋转叶片频率转向与振型转换特性[J].航空动力学报,2007,22(1):8-11.
WANG Jianjun, QING Liwei, LI Qihan. Frequency veering and mode shape interaction for rotating blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 8-11. (in Chinese)
- [19] 王红建,贺尔铭,赵志彬.叶盘系统频率转向与模态耦合特性分析[J].航空动力学报,2008,23(12):2214-2218.
WANG Hongjian, HE Erming, ZHAO Zhibin. Characteristic analysis of frequency veering and mode interaction of bladed disks [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2214-2218. (in Chinese)