

# 基于试验模态的阻尼涂层整体叶盘 振动局部化定量测量

孙伟, 范云飞

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 用阻尼涂层对整体叶盘进行减振是一种全新的振动控制方法,为了有效实施这项技术需要对不同涂层方案下整体叶盘振动局部化程度进行有效的测量. 提出一种基于试验模态数据来定量测量整体叶盘振动局部化的方法. 首先,提出振动局部化定量测量原理,并验证了其合理性;接着,提出了测量涂层整体叶盘振动局部化的流程;最后,对3种涂层方案下整体叶盘振动局部化程度进行了测量. 结果表明,用本文研发的方法可以对各涂层方案对应的整体叶盘振动局部化进行有效测量,且随着涂层面积的增加,整体叶盘振动局部化程度变大且波动也较大.

**关 键 词:** 试验模态分析;阻尼涂层;整体叶盘;振动局部化;定量测量

**中图分类号:** V 231.9;TB 535      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)05-0679-05

## Quantitative Measurement of Vibration Localization of Blisk with Damping Coating Based on Experimental Mode

SUN Wei, FAN Yun-fei

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: SUN Wei, professor, E-mail: weisun@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Vibration control of blisk by attaching damping coating is a new technique. To implement this technology effectively, it is necessary to measure the degree of vibration localization of blisk for different coating schemes. Based on experimental modal data, a quantitative measurement method for the vibration localization of blisk is proposed. Firstly, the theory of quantitative measurement of the degree of vibration localization was proposed, and the reasonability was verified. Then, the procedure of quantitative measurement of vibration localization of blisk with damping coating was presented. Lastly, the vibration localizations of blisk with three coating schemes were tested. The results showed that the developed method can effectively measure the vibration localization of blisk with different coating schemes and the degree of vibration localization of blisk becomes more evident and fluctuates with the increase of coating area.

**Key words:** experimental modal analysis; damping coating; blisk; vibration localization; quantitative measurement

控制整体叶盘过大的振动成为研究者及相关企业共同关注的重点问题. 目前,已有多种方法可用于整体叶盘的振动控制,诸如,摩擦阻尼器<sup>[1]</sup>、压电网络<sup>[2]</sup>以及阻尼涂层减振<sup>[3-4]</sup>等. 其中阻尼涂层减振是指在整体叶盘叶片或者叶盘扇区上加装阻尼涂层,借助于这些阻尼材料的内阻尼实现振动能量的耗散. 由于减振成本低并可以融入到

整体叶盘的结构设计中,因而这种减振技术具有很好的技术优势.

众所周知,由于制造误差、材料缺陷或者使用中的磨损会使整体叶盘发生失谐,进而造成整体叶盘振动局部化. 许多研究者对这种由失谐产生的振动局部化现象进行了研究. 例如, Kruse 等<sup>[5]</sup>采用非接触式激振和测量技术,通过对叶盘模拟

件的振动特性测试,证实了叶盘结构存在振动模态局部化现象.类似地,Judge 等<sup>[6]</sup>以一个具有 12 个叶片的叶盘模型为例,用实验研究了该叶盘结构振动模态局部化及强迫振动响应.袁惠群等<sup>[7]</sup>建立了典型叶盘结构集中参数模型,分析了失谐叶片排列顺序对模态局部化的影响.整体叶盘加装涂层后,这种振动局部化现象依然存在,准确辨识出涂层整体叶盘振动局部化程度,对于整体叶盘复合结构动力学建模及阻尼减振优化均具有重要意义.

通常可以凭借观测模态振型来评判叶盘结构振动局部化的程度,但这仅是一种主观判断,不能用于比较几种涂层方案下整体叶盘复合结构振动局部化的大小.王建军等<sup>[8]</sup>提出可以利用位移模态振型、模态应力和模态应变能来定义叶盘结构振动局部化因子,进而定量评价失谐叶盘结构振动模态局部化程度.上述研究主要依赖于所研发的分析模型(通常是基于有限元的减缩模型)来对叶盘结构振动局部化定量评价,并不是对实际结构振动局部化程度的定量测量.

本文提出一种不借助有限元分析,完全基于试验模态分析数据来定量辨识涂层整体叶盘振动局部化程度的方法.

# 1 振动局部化定量测量原理

## 1.1 测量原理

模态置信度(modal assurance criterion,MAC)描述了两个模态振型的相似性<sup>[9]</sup>,可表达为

$$MAC_{ij} = \frac{(\boldsymbol{\phi}_i^T \boldsymbol{\phi}_j)^2}{(\boldsymbol{\phi}_i^T \boldsymbol{\phi}_i)(\boldsymbol{\phi}_j^T \boldsymbol{\phi}_j)}.$$

(1)

这里, $\boldsymbol{\phi}_i, \boldsymbol{\phi}_j$ 表示由数值模拟或实验获得的同一结构的两阶模态振型.当  $MAC_{ij}$  的值趋近于 1 时表明两个模态振型很接近,趋近于 0 时表明两者相差较大.模态置信度经常用于考核理论分析与实验测得结果的相似程度,或者考核两种不同数值方法得到的分析结果的相似性<sup>[10-11]</sup>.

对于失谐叶盘结构振动模态局部化的定量描述主要针对模态振型局部化.一般说来,谐调叶盘的模态振型是“延展”的,失谐后的模态振型则产生“局部化”,振动主要集中到若干较少的叶盘扇区.既然振动局部化主要体现在模态振型上,则可以考虑利用模态置信度的概念考核失谐整体叶盘模态振型偏离谐调振型的程度.这里定义为模态置信度局部化因子,表达为

$$MACLF_j = \max_{1 \leq k \leq N} \frac{(\boldsymbol{\phi}_j^T \boldsymbol{\phi}_k)^2}{(\boldsymbol{\phi}_j^T \boldsymbol{\phi}_j)(\boldsymbol{\phi}_k^T \boldsymbol{\phi}_k)}.$$

(2)

式(2)用来评价振动局部化程度,在式(2)中  $MACLF_j$  表示第  $j$  阶失谐整体叶盘结构模态置信度局部化因子,而这里的  $\boldsymbol{\phi}_j, \boldsymbol{\phi}_k$  分别表示失谐和谐调情况下整体叶盘的模态振型, $N$  为所考虑的阶次.

可见,在考虑的频率范围内,只要测得涂层前后整体叶盘的模态振型,进一步假定一种状态为谐调的(这里认定涂层前为谐调的),则可以辨识出任意一种涂层方案下整体叶盘振动局部化的程度.

## 1.2 数值验证

图 1 为用 Ansys 软件创建的整体叶盘试验件有限元模型,其中在 9 个叶片上加装了涂层(见图 1b).分别将阻尼涂层的厚度设定为叶片厚度的 10%,20%,直至 100%,来模拟不同阻尼涂层方案.

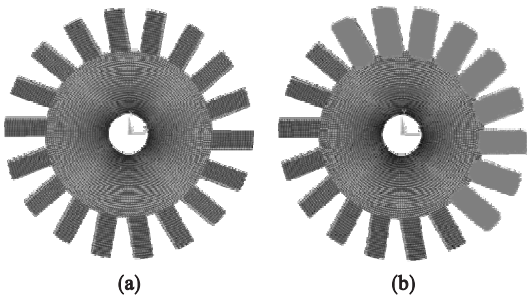


图 1 整体叶盘涂层前后的有限元模型

Fig. 1 Finite element models of blisk with and without damping coating

(a)—阻尼处理前;(b)—阻尼处理后.

表 1 给出了利用分块 Lanczos 法计算涂层前、涂层为叶片厚度的 20% 和 50% 时整体叶盘的前 3 阶模态振型.

表 1 不同涂层厚度时整体叶盘模态振型

Table 1 Modal shapes of blisk for different thickness of coating

涂层前			
	(a) 第 1 阶	(b) 第 2 阶	(c) 第 3 阶
涂层为叶片厚度的 20%			
	(d) 第 1 阶	(e) 第 2 阶	(f) 第 3 阶
涂层为叶片厚度的 50%			
	(h) 第 1 阶	(i) 第 2 阶	(j) 第 3 阶

由表 1 可以看出,由于仅在部分叶片上加装了涂层,使涂层后叶盘的模态振型产生了振动局部化.但是从模态振型上并不能区分上述含不同涂层厚度的整体叶盘振动局部化的程度有何不同.

进一步地,利用 \* get,node,u, sum 提取涂层前以及对应上述各种涂层方案的整体叶盘的模态振型数据,按式(2) 计算模态置信度局部化因子 MACLF,相关结果列在表 2 和图 2 中.

表 2 不同涂层厚度下整体叶盘的模态置信度局部化因子  
Table 2 MACLF of blisk for different thickness of coating

涂层与叶片厚度比/%	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
10	0.913 2	0.946 0	0.929 7	0.803 1	0.803 1	0.944 1	0.779 4	0.864 5	0.639 4	0.701 4
20	0.798 1	0.851 6	0.792 8	0.920 2	0.920 2	0.787 2	0.771 8	0.659 6	0.622 4	0.568 1
30	0.724 3	0.775 6	0.723 1	0.845 2	0.845 2	0.722 8	0.645 2	0.695 6	0.549 6	0.608 5
40	0.6786	0.721 9	0.698 3	0.792 8	0.792 8	0.811 1	0.718 4	0.620 1	0.586 6	0.542 2
50	0.648 6	0.683 9	0.671 8	0.755 3	0.755 3	0.715 0	0.586 6	0.608 5	0.526 3	0.530 2
60	0.627 7	0.656 2	0.648 9	0.708 3	0.708 3	0.616 5	0.566 2	0.543 9	0.518 9	0.507 4
70	0.612 3	0.635 2	0.630 0	0.670 3	0.670 3	0.582 3	0.553 7	0.529 2	0.514 7	0.503 0
80	0.600 5	0.618 9	0.614 4	0.641 9	0.641 9	0.564 8	0.545 3	0.522 4	0.512 0	0.501 1
90	0.591 3	0.605 9	0.601 5	0.620 6	0.620 6	0.553 9	0.539 4	0.518 5	0.510 1	0.500 1
100	0.583 8	0.595 4	0.590 8	0.604 3	0.604 3	0.546 5	0.535 0	0.515 9	0.508 8	0.499 4

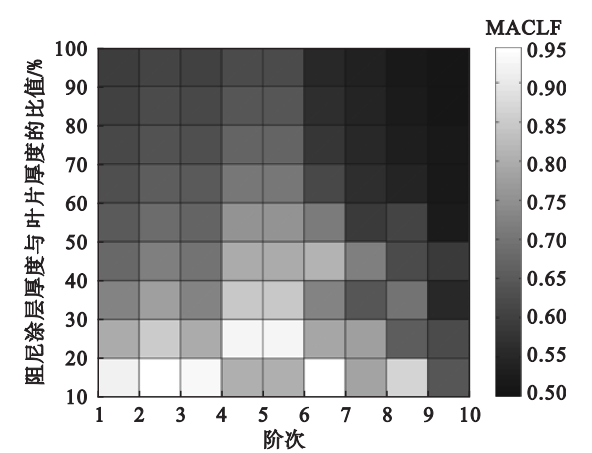


图 2 不同涂层厚度时整体叶盘的 MACLF  
Fig. 2 MACLF of blisk for different thickness of coating

从表 2 及图 2 可以看出,随着涂层厚度的增加,整体叶盘的 MACLF 数值不断减小,表明振动局部化程度不断增大,可见所提出的振动局部化测量方法是有效的.

2 振动局部化定量测量流程

按照锤击法试验模态理论,基于 LMS 测试平台简要叙述涂层整体叶盘振动局部化定量测量流程:

1) 根据整体叶盘试验件的结构形状和尺寸关系在 LMS. Test lab 中完成其建模,在模型中需突出被测结构的主要振动关注点;

- 2) 用多点激励单点拾振的方法进行模态试验;
- 3) 基于 LMS. Test lab 中的 Modal Analysis 模块进行模态分析,辨识出各阶次振型,并提取各阶振型数据用于振动局部化测量;
- 4) 将阻尼处理前的模态振型数据作为基准的(或谐调的)数据,而将对应各阻尼涂层方案的模态振型数据作为待辨识的数据. 分别将振型数据代入到式(2) 中,计算可得到对应各涂层方案的整体叶盘的 MACLF,从而完成涂层整体叶盘振动局部化的定量测量.

3 实例研究

3.1 测试对象

测试对象为涂层前后的整体叶盘试验件. 涂层前的整体叶盘见图 3a,涂层后的整体叶盘见图 3b ~ 图 3d. 具体的阻尼涂层方案为:对所有叶片分别涂敷叶片面积的 50% ,75% ,100% 的阻尼涂层.

3.2 试验模态测试

按照第 2 节所描述的流程,分别对涂层前以及对应各涂层方案的整体叶盘进行试验模态测试,整个测试现场见图 4.

基于 LMS. Test lab 软件分析并提取固有频率和相应的模态振型数据. 表 3 给出了涂层前以

及各涂层方案对应的整体叶盘固有频率,表 4 给出第 8,10,11 阶模态振型.

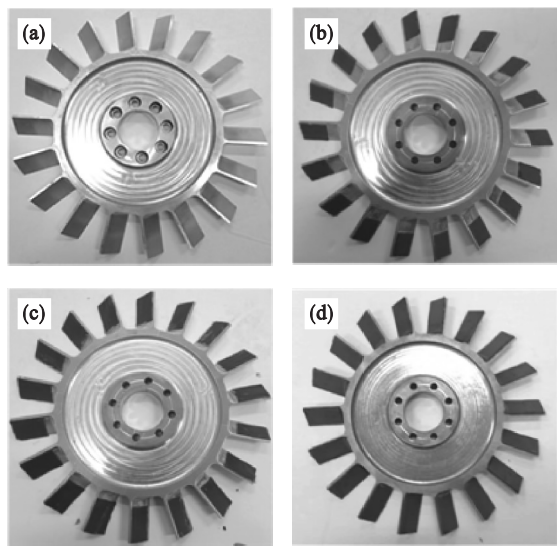


图 3 涂层前后的整体叶盘试验件  
Fig. 3 Specimens of blisk with and without damping coating  
(a)—涂层前;(b)—涂敷 50%;  
(c)—涂敷 75%;(d)—涂敷 100% .

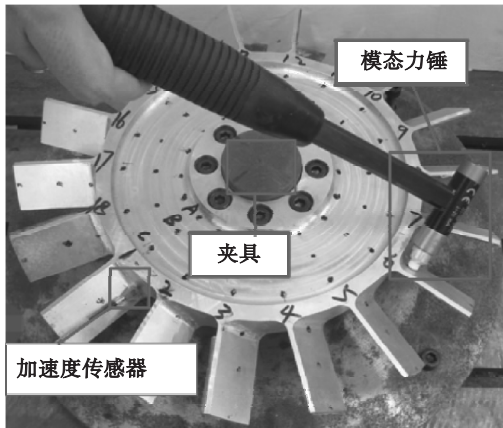


图 4 整体叶盘与实验装置  
Fig. 4 Blisk and experimental facility

从表 3 可以看出,加装阻尼涂层后整体叶盘固有频率降低,且随着叶片上涂层面积的增大,固有频率下降得越快.另外,从表 4 可以看出,加装阻尼涂层后整体叶盘的模态振型发生改变,与涂层前的模态振型相比振动局部化程度增大.从中也可以看出对于本实例,认为涂层前整体叶盘是协调的具有一定的合理性.

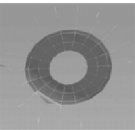
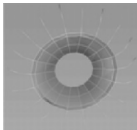
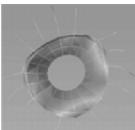
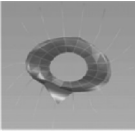
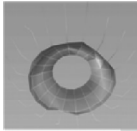
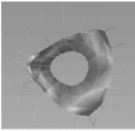

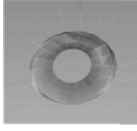
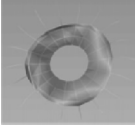
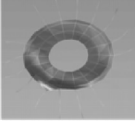
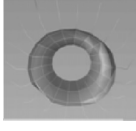
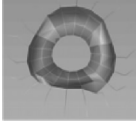
3.3 振动局部化程度定量测量

进一步,将提取的振型数据代入到式(2)中,以涂层前整体叶盘模态振型为基准,分别计算对应各涂层方案下的整体叶盘各阶次的 MACLF,相关计算结果见表 5.

表 3 涂层前后整体叶盘固有频率  
Table 3 Natural frequencies of blisk with and without damping coating Hz

阶次	涂层前	涂敷 50%	涂敷 75%	涂敷 100%
1	697.25	634.02	636.15	631.56
2	715.02	653.26	653.32	648.89
3	738.17	667.23	670.34	664.72
4	750.61	678.61	680.20	673.97
5	762.48	694.23	695.58	687.37
6	767.72	700.05	705.26	696.68
7	778.98	707.28	714.10	708.55
8	1 103.30	1 065.43	1 062.56	1 052.77
9	1 156.66	1 121.02	1 118.50	1 106.24
10	1 249.18	1 219.46	1 216.27	1 205.80
11	1 371.12	1 329.63	1 324.59	1 310.02
12	1 390.46	1 346.01	1 344.17	1 328.39

表 4 涂层前后整体叶盘模态振型  
Table 4 Modal shapes of blisk with and without coating

阶次	第 8 阶	第 10 阶	第 11 阶
涂层前			
涂敷 50%			
涂敷 75%			
涂敷 100%			

为了便于进一步比较各涂层方案下整体叶盘振动局部化的程度,现将表 5 中所列的模态置信度局部化因子进一步归类,详见表 6 和图 5.

从表 6 及图 5 可以看出,随着叶片上阻尼涂层面积的增大,总体上看整体叶盘的 MACLF 变小,即振动局部化程度增大.另外,相对于涂敷 50% 的情况,涂敷 75%,100% 这两种涂层方案 MACLF 波动较大.



表 5 对应各涂层方案的整体叶盘各阶次模态置信度局部化因子												
Table 5 MACLF of blisk of different orders for different coating schemes												
阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
涂敷 50%	0.751	0.722	0.739	0.684	0.811	0.677	0.676	0.741	0.720	0.733	0.669	0.720
涂敷 75%	0.869	0.596	0.771	0.662	0.733	0.740	0.710	0.673	0.702	0.679	0.746	0.810
涂敷 100%	0.833	0.692	0.737	0.674	0.561	0.681	0.745	0.672	0.768	0.666	0.672	0.773

表 6 对应不同涂层方案的整体叶盘 MACLF 分布情况  
Table 6 Distribution of MACLF of blisk for different coating schemes

分布区间	0.5 ~ 0.6	0.6 ~ 0.7	0.7 ~ 0.8	0.8 ~ 0.9
涂敷 50%	0	4	7	1
涂敷 75%	1	3	6	2
涂敷 100%	1	6	4	1

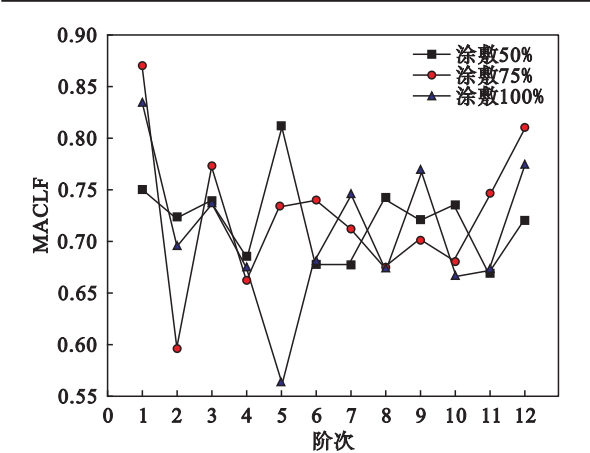


图 5 对应不同涂层方案的整体叶盘 MACLF 分布图  
Fig. 5 Distribution of the MACLF of blisk for different coating schemes

## 4 结 论

1) 模态置信度反映了两个模态振型的相似程度,因而可以用模态置信度局部化因子来定量评价涂层后整体叶盘振动局部化的程度.数值算例显示,这种定量评价整体叶盘振动局部化的原理是合理的.

2) 用本文方法可以对各涂层方案对应的整体叶盘振动局部化有效测量,因而可作为实际工程叶盘结构失谐模态局部化程度定量描述的一个有效手段.另外,从测试结果上看随着叶片上阻尼涂层面积的增大,整体叶盘振动局部化程度增大且波动较大.

3) 在叶片涂层减振优化设计中,可采用本文方法对各设计方案的振动局部化程度进行定量测量,以建立失谐程度与减振效果的量化关系.最终为涂层阻尼减振技术在整体叶盘上应用提供技术支持.

## 参考文献:

[ 1 ] Sever I A, Petrov E P, Ewins D J. Experimental and numerical investigation of rotating bladed disk forced response using under platform friction dampers[ J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130 (130) :042503.

[ 2 ] Yu H, Wang K W. Vibration suppression of mistuned coupled-blade-disk systems using piezoelectric circuitry network[ J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2009, 131 (2) :021008.

[ 3 ] Bruce R W, Schell J D. Process for depositing a coating on a blisk; U. S. Patent Application 12/241,678[ P]. 2008 - 09 - 30.

[ 4 ] Balmes E, Corus M, Baumhauer S, et al. Constrained viscoelastic damping, test/analysis correlation on an aircraft engine[ M]//*Structural Dynamics*, Volume 3. New York: Springer, 2011:1177 - 1185.

[ 5 ] Kruse M J, Pierre C. An experimental investigation of vibration localization in bladed disks: part I—free response [ C]//*ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. Orlando: American Society of Mechanical Engineers, 1997:68.

[ 6 ] Judge J, Pierre C, Mehmed O. Experimental investigation of mode localization and forced response amplitude magnification for a mistuned bladed disk [ J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(4) :940 - 950.

[ 7 ] 袁惠群, 杨少明, 吴震宇, 等. 基于蚁群算法和模态局部化参数的失谐叶盘减振研究[ J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(11) :1611 - 1614.

( Yuan Hui-qun, Yang Shao-ming, Wu Zhen-yu, et al. Vibration reduction of mistuned blade-disc by ant colony algorithm and modal localization parameter[ J]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2010, 31 (11) : 1611 - 1614. )

[ 8 ] 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 Jian-jun, Yu Chang-bo, Yao Jian-yao, et al. Vibratory modal localization factors of mistuned bladed disk assemblies [ J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(4) :457 - 461. )

[ 9 ] Randall J. The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse[ J]. *Sound and Vibration*, 2003, 37(8) :14 - 23.

[ 10 ] Najib M F, Nobari A S. Nonlinear viscoelastic constitutive model identification for a polyurethane adhesive in a bonded joint using structural dynamic model updating [ J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 100:72 - 85.

[ 11 ] Debruyne S, Vandepitte D, Moens D. Identification of design parameter variability of honeycomb sandwich beams from a study of limited available experimental dynamic structural response data[ J]. *Computers & Structures*, 2015, 146:197 - 213.