

基于多个 MFC 激励器的复合材料宽弦 风扇叶片模态测试

黄丹丹¹, 陈 勇^{1,2}

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘要: 为了研究复合材料风扇叶片响应特性, 利用压电纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)激励器对复合材料宽弦风扇叶片进行模态测试。将测试结果与有限元仿真值进行比较, 分析风扇叶片不同 MFC 单独激励和组合激励下的响应特性。设计了 MFC 激励器激励系统, 采用 MFC 单独激励和组合激励的方法, 实现快速正弦扫频激励信号激励, 借助扫描式激光测振仪测量叶片上关注测点的振动响应。结果表明: MFC 激励下风扇叶片的响应与 MFC 覆盖位置处对应的 MFC 纤维极化方向的应变大小、MFC 纤维方向和测点选择有关; 不同位置的 MFC 激励叶片, 叶片各阶模态响应有差异。该结果可用于宽弦风扇叶片的 MFC 激励器/传感器控制方法的进一步研发和风扇叶片的振动特性分析。

关键词: 压电纤维复合材料激励器; 复合材料宽弦风扇叶片; 模态测试; 航空发动机

中图分类号: V216.2+1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.05.014

Modal Test of Composite Wide-chord Fan Blades Based on Multiple MFC Actuator

HUANG Dan-dan¹, CHEN YONG^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the response characteristics of the composite fan blades, a piezoelectric Macro Fiber Composite (MFC) actuator was used for the modal test of the composite wide-chord fan blades. By comparing the test results with the finite element simulation values, the response characteristics of different MFC of fan blades were analyzed under individual excitation and combined excitation. The excitation system of MFC actuator was designed, and the excitation of fast sinusoidal sweep frequency excitation signal was realized by means of individual excitation and combined excitation of MFC. The vibration response of the concerned points on the blades were measured by the scanning laser vibrometer. The results show that the response of the fan blades under MFC excitation is related to the strain of MFC fiber polarization direction, the direction of MFC fiber polarization, and the selection of measuring points at the MFC coverage position. Modal response of blades each order is different for different positions of the MFC excitation blades. The results can be used for further research and development of control methods of MFC exciter/sensor for wide-chord fan blades and analysis of vibration characteristics of fan blades.

Key words: piezoelectric macro fiber composite actuator; composite wide-chord fan blade; modal test; aeroengine

0 引言

宽弦风扇叶片广泛用于大涵道比涡扇发动机, 是发动机最前端的作功部件, 提供发动机 80% 的推力。与传统钛合金宽弦风扇叶片相比, 复合材料宽弦风扇叶片具有质量轻、噪声低、抗颤振、效率高、抗外物损

伤能力较强、维护成本低等特点, 代表了风扇叶片的发展方向。风扇叶片在工作中会受到来自进气口的外界激励和风扇级内部流场激励, 从而引发叶片振动。产生的激励根据来源可大致分为机械激励和气流激励。机械激励主要来自其他机械部件(如轴系、风扇盘

收稿日期: 2019-05-06

作者简介: 黄丹丹(1993), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为压电纤维复合材料 MFC 激励及复合材料宽弦叶片振动特性; E-mail: dandan_huang@126.com。

引用格式: 黄丹丹, 陈勇. 基于多个 MFC 激励器的复合材料宽弦风扇叶片模态测试[J]. 航空发动机, 2020, 46(5): 78-85. HUANG Dandan, CHEN Yong. Modal test of composite wide-chord fan blades based on multiple MFC actuator [J]. Aeroengine, 2020, 46(5): 78-85.

等),振动通过机械连接传递到叶片根部,高速旋转的叶片与机匣由于叶顶间隙过小发生碰摩,从而引发叶片振动。气流激励的来源较机械激励的更加广泛,主要包括叶顶泄漏流、旋转失速和叶片表面流动分离等^[1]。风扇叶片的振动对发动机的稳定性和可靠性有很大影响,尤其是叶片共振,易导致叶片疲劳失效。

王仲林等^[2]通过敲击法和基于振动台的随机宽带激励法研究了宽弦风扇叶片的振动特性;付曦等^[3]采用敲击法进行叶片的模态测试;Teter等^[4]和Yang等^[5]通过多点扫描式激光测振仪分别对复合材料叶片和旋转风力机叶片进行了模态测试。以上研究采用传统模态试验方法讨论了叶片的振动性能,但对新型激励方式的研究仍有不足。航空航天等高科技产业对传统激励器提出了更苛刻的要求,诸如噪声、精度、体积及质量等^[6],因此,探索其他形式的新型激励器具有重要意义^[7-9]。压电激励器是1种新型激励器,利用压电材料的逆压电效应将电能转换成机械能,再通过一定的机械结构将机械能输出激励载荷,具有输出频率响应高、动态反应快、承载大、性能稳定、不发热、不产生噪声及受外力干扰小等优点。压电纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)是1种新型压电复合材料,不仅具有更好的耐久性和柔韧性,还可以利用更强的压电应变常数 d_{33} 来实现更高的机电耦合^[7-9]。MFC可用于控制振动(激振或减振)、控制结构变形、收集能量及结构健康监测等^[7]。Belz等^[10]利用多个MFC激励器模拟压气机叶片受到的激励,在靠近叶根处布置MFC,试验数据表明MFC可以激励叶片振动;Teter等^[4]对具有3个主动复合叶片的转子进行模态分析,对系统进行有限元数值模拟和试验模态试验,得到系统的固有频率和模态振型,数值与试验结果非常吻合;Gawryluk等^[11]研究了MFC激励器谐波激励对恒角速度旋转的复合材料叶片转子动态特性的影响,进行数值分析和试验验证,二者结果吻合较好。上述研究利用MFC激励叶片振动,分析叶片的振动特性,对MFC激励器复杂激励下叶片的振动性能研究有所不足。

本文基于MFC激励器进行模态试验,设计MFC激励系统,实现快速正弦扫频电压激励,采用MFC单独激励和组合激励,利用扫描式激光测振仪测量叶片的响应,分析复合材料风扇叶片在不同MFC激励器激励方式下不同响应特性。

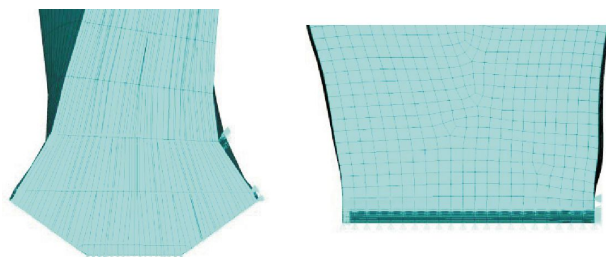
1 叶片有限元模型

以朱启晨等^[12]设计的某型复合材料宽弦风扇叶片为研究对象,该叶片的实体单元有限元模型^[13]如图1所示。在ANSYS-APDL有限元软件中仿真,单元类型为8节点的6面体单元solid185,共80294个实体单元,81465个节点。



图1 复合材料风扇叶片有限元模型

不考虑由于叶片旋转离心力产生的预应力,在ANSYS中进行自由状态条件下复合材料风扇叶片的模态分析,设置边界条件为叶片榫头受压面约束所有自由度,在叶根端部施加轴向约束,在叶片榫头底部施加竖直向上的约束^[12]。复合材料叶片与风扇盘通过燕尾槽连接,为了更加接近试验约束,本文将边界条件简化为在叶片榫头受压面施加垂直受压面方向的约束,在叶根端部施加轴向约束,在叶片榫头底部施加竖直向上约束,如图2所示。



(a) 叶片榫头受压面约束 (b) 叶片叶根端部、底部约束

图2 有限元仿真边界条件

2 MFC 模态测试

2.1 MFC 激励器

1996年,美国航空航天局(NASA)Langley研究中心研制出了1种新型压电复合材料—压电纤维复合材料(MFC)。MFC激励器^[14](如图3所示)是在聚酰亚胺薄膜中嵌入薄PZT(Lead Zirconate-Titanate ceramics)纤维制作而成的,上、下表面覆盖有指间交叉模式的电极,MFC的分层结构^[15]如图4所示。图中,坐标

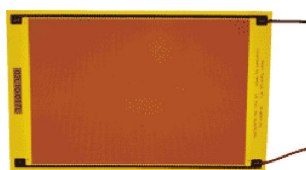


图3 MFC激励器^[14]

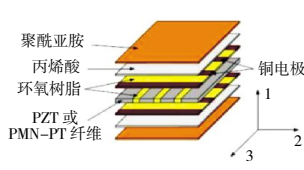


图4 MFC的分层结构^[15]

轴 1 为 MFC 厚度方向,坐标轴 2 为铜电极方向,坐标轴 3 为压电纤维的极化方向。

与传统压电陶瓷相比,树脂基的保护作用使得 MFC 很大程度上克服了纯压电陶瓷在强度和脆性方面的缺点,具有较好的柔韧性。由于 MFC 采用矩形截面的压电纤维和指尖交叉电极,大大提高了其机电耦合系数。由于 MFC 具有频率响应高、动态反应快、承载大、性能稳定、不发热、不产生噪声及受外力干扰小、柔韧性好、耐高温、变形大以及机电耦合系数高等优点,使得其广泛应用于控制振动(激振或减振)、控制结构的变形、收集能量和结构健康监测等^[4]。本文利用 MFC 激励器激励风扇叶片,进行模态测试,研究其振动特性。

2.2 MFC 布置

本文基于 MFC 激励法的叶片模态测试以复合材料风扇叶片为研究对象,采用 Smart Material 公司生产的 M8557-P1 激励器,其技术指标列见表 1^[4]。

表 1 M8557-P1 激励器的技术指标^[4]

尺寸参数	数值	材料参数	数值
活跃区域长度/mm	85	自由应变/ 10^{-6}	1800
活跃区域宽度/mm	57	阻滞力/N	923
总体长度/mm	103		
总体宽度/mm	64		

在实际测量中,MFC 激励法和传统力锤敲击法选取激励位置略有不同。力锤敲击叶片振动,激励点(敲击点)的选择依据需要丰富的实践经验^[6]。MFC 在叶片位置处的某阶模态 MFC 极化方向的应变足够大,可以激励出该阶模态。为了研究叶片响应特性,本文对叶片的不同位置布置了 3 个 MFC,进行不同的 MFC 激励,同时测量每个网格结点的响应。测量结点在叶片上的位置如图 5 所示。MFC No 1 和 No 2 纤维极化方向与叶片叶高方向水平,No 3 纤维极化方向与叶片叶高方向成 90° 夹角。宽弦风扇叶片尺寸大,为了研究响应特性,根据各阶模态阵型图选取响应比较大的测点。

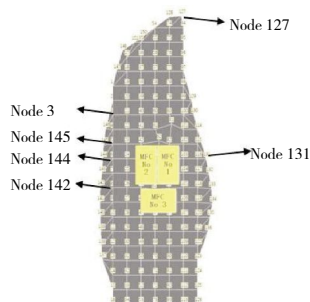


图 5 MFC 测量点分布

2.3 试验装置

复合材料叶片的模态试验系统如图 6 所示。该系统由夹持、激励和测量系统 3 部分组成。夹持系统由夹具和基座组成;MFC 激励系统由信号发生器、激励器(MFC)和恒电压功率放大器组成,其作用是产生具有一定能量的和频率可调的激振力,激励叶片使之发生振动;测量系统采用非接触式测量扫描式激光测振仪,测量复合材料叶片测点的响应。

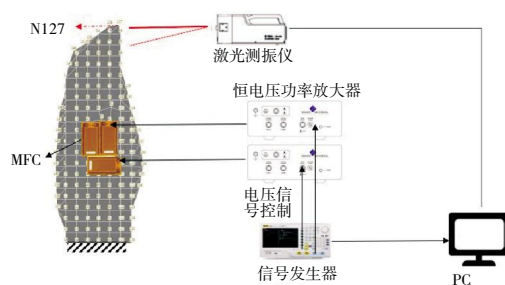


图 6 MFC 激励系统模态试验装置

带有 MFC 激励器的复合材料风扇叶片被夹持在振动隔振台上,MFC 粘贴在叶片上进行激励。恒电压功率放大器和信号发生器提供了 MFC 激励器的开环控制(没有反馈)电压变化。测量系统可以监控梁的振动,测量采用 Polytech 公司多点扫描测振仪 PSV-500-H^[15],根据复合材料叶片的几何尺寸,布置四边形结点扫描网格,每个网格节点的振动速度可以单独测量。逐点扫描方式可以得到各点频域响应幅值和相位,绘制出振型图。信号同步采用 PC 端采集信号发生器输出的电压信号,作为 PSV-500-H 多点扫描测振仪的触发信号。在 PC 端接收测量系统的数据,记录、保存和分析测量数据。信号发生器采用北京普源公司生产的 DG4062 信号发生器,等性能双通道信号输出,采样率为 500 MSa/s,可输出正弦波、方波、噪声等波形,也可输出线性、对数和步进多种扫频模式,可提供 MFC 在振动测试中的激励。恒电压功率放大器选用 Trek 公司的 PA05029 恒电压放大器,电压输出范围为 $-500\sim 1500$ V,电压放大 200 V/V(外部电压源),可激励多种 P1 型 MFC 激励器。

3 振动特性分析

3.1 叶片固有频率及振型分析

本文采用 MFC 激励器进行快速正弦扫频信号激励叶片开展模态试验,同时进行传统敲击法试验,敲击复合材料叶片叶根部位,与 MFC 激励进行对比。试

验测量叶尖测点 Node 127 速度响应如图 7 所示,试验结果与有限元模拟结果对比见表 2。从表中可见,仿真和试验得到的复合材料宽弦叶片的前 5 阶模态固有频率的偏差均在 4%以内,说明 MFC 激振器布置于复合材料叶片上,MFC 激振器附加质量很小,对叶片本身固有频率影响可以忽略不计。而传统敲击法需要经验多次试验选择敲击点,而且要避免在试验过程中连击,而 MFC 激励法操作简单方便、重复性好、信噪比高。

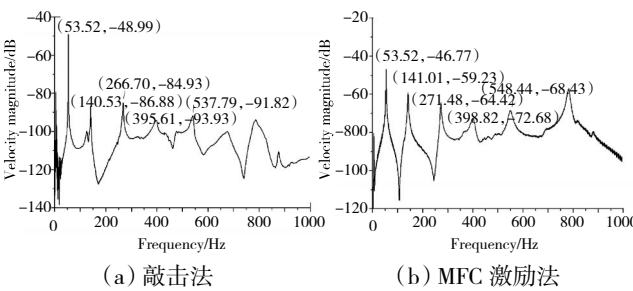


图 7 叶尖测点 Node 127 频域响应

表 2 仿真和试验的复合材料叶片固有频率

模态阶次	仿真值 /Hz	敲击法		MFC 02 激励器	
		频率 /Hz	偏差 /%	频率 /Hz	偏差 /%
Mode 1	52.84	53.52	1.28	53.52	1.28
Mode 2	135.58	140.63	3.72	140.63	3.72
Mode 3	268.86	266.70	-0.80	268.75	-0.04
Mode 4	390.67	395.61	1.26	397.66	1.79
Mode 5	532.34	537.79	1.02	541.41	1.70

第 1~5 阶的模态振型如图 8 所示。从图中可见,各阶次仿真和测试的振型相符合,准确地捕捉到所有

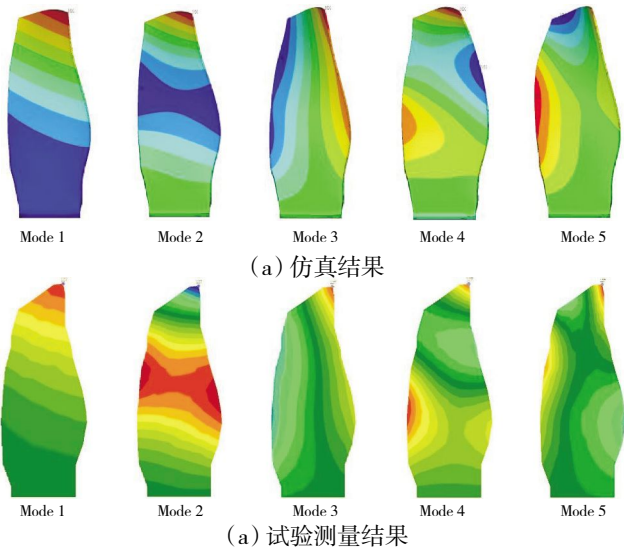


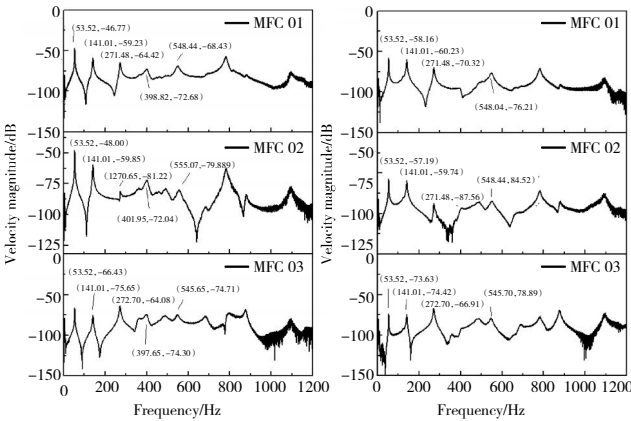
图 8 复合材料宽弦风扇叶片前 5 阶有限元仿真振型和测量振型

的弯扭振动特征。通过叶片的总位移振型图可知复合材料叶片前 6 阶模态振型中,Mode 1、Mode 2、Mode 4 为叶片的前 3 阶弯曲模态,由于叶片前尾缘的刚度分布不同,横向节线在前缘处向下倾斜,不考虑根部夹持位置的节线,节线数依次为 0、1、2,叶片主要呈扭转模态;Mode 3 和 Mode 5 为叶片的前 2 节扭转模态,节线为竖直方向,沿叶高方向呈 S 型分布,特别是 Mode 3 较为明显,竖直节线数依次为 1 和 2,叶片主要呈扭转振动状态;Mode 6 为弯曲和扭转的叠加模态。

3.2 MFC 单独激励

复合材料叶片上关注响应点在不同的 MFC 单独激励下的频域响应如图 9 所示,激励信号是快速线性正弦扫频信号。在 Mode 3 模式下,复合材料叶片 MFC 01/02/03 覆盖位置处,MFC 纤维极化方向的应变如图 10 所示。从图中可见,所有测点的前 5 阶固有频率,比较 3 个不同 MFC 激励出的叶片模态:Mode 3 是 1 阶扭转模态,比较不同 MFC 相同测点激励,MFC 02 激励和叶片 Mode 3 的响应均不明显,峰值很小,这是由于 MFC No 2 覆盖位置的 Mode 3 纤维方向的应变很小,MFC No 2 不能明显地激励出 Mode 3 扭转模态。MFC 01 和 03 激励,叶片 Mode 3 响应较为明显,相比较 MFC 01,MFC 03 激励出的叶片响应略大于 MFC 01 激励出的。这是由于 MFC 01 覆盖位置纤维方向应变(strain y)比 MFC 03 覆盖位置纤维方向应变(strain z)略小一些。

由复合材料叶片不同 MFC 激励下不同测点的频域响应的幅值可知,在 MFC 01 激励下,叶片振动以低阶弯曲和 1 阶扭转为主;在 MFC 02 激励下,叶片振动以低阶弯曲为主;在 MFC 03 激励下,叶片振动以 1 阶扭转为主。因此,当 MFC 纤维极化方向布置的



(a) Node 127 频域响应 (b) Node 3 频域响应

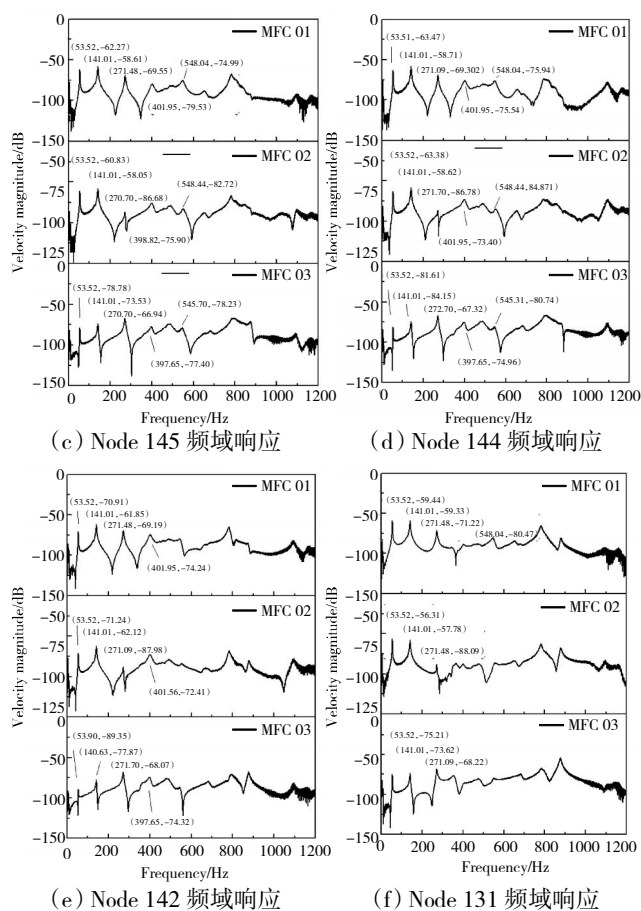


图9 MFC快速正弦扫频信号激励

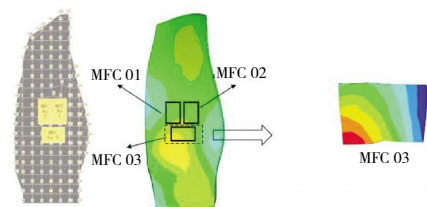
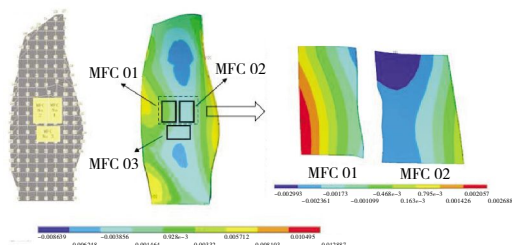


图10 在 Mode 3 模式下复合材料叶片上 MFC 纤维极化方向的应变

位置沿着叶片叶高方向,叶片振动以低阶扭转为主;如果想激励出扭转模态,需要将 MFC 布置于扭转模态的纤维极化方向应变较大的位置。当 MFC 纤维极

化方向布置沿着叶片的弦向方向,叶片振动以低阶扭转为主。

根据不同 MFC 激励和不同点测量结果可知,不同的测量点对不同阶次的响应有很大差异:Node 131 和 Node 144 位于前尾缘,所以扭转状态的 Mode 3 响应明显,当时 Node 131 靠近 Mode 4 的节线,Node 131 测点的 Mode 4 响应很低。Node 127 位于叶尖位置,因此在所有的测点中,Node 127 的 Mode 1 响应最高。测点位置从叶顶到叶根变化,Mode 1 的响应越来越低。观察同一测点 Node 127,采用不同的 MFC 进行激励,都可以明显激励出 Mode 1 和 Mode 2。MFC 01 激励,叶片的 Mode 1 和 Mode 2 响应较大;MFC 03 激励,叶片的 Mode 1 和 Mode 2 响应较小。这是不同的 MFC 覆盖叶片位置纤维方向的应变相对大小不同,Mode 1、2 的 2 阶弯曲模态,MFC No 1、2 覆盖位置的 strain y 明显大于 MFC No 3 覆盖位置的 strain z 。在 Mode 3 扭转模态下,具有 1 条竖直的节线,最大响应点出现在叶尖位置,在叶尖测点 Node 127 测得的响应明显大于其他测点的。Mode 4 是 3 阶弯曲,最大的响应点位于叶尖处,在测点 Node 127,Mode 4 的响应相比与其他测点明显提高,测点 Node 3 位于 Mode 4 (3 阶弯曲)的节线上,因此测点 Mode 3 不能观察到 Mode 4 的响应。Mode 5 是条带扭转模态,最大响应点位于叶高和尾缘 2/3 叶高处,相比于其他测点,在测点 Node 127 和 Node 3 处可以明显测得 Mode 5 的响应。

MFC 激励叶片振动,叶片响应和 MFC 覆盖位置的模态纤维方向的应变相对大小、MFC 纤维方向和测点选择有关。MFC 通过传递应变能激励叶片振动,为了尽可能激励多且明显地激励出叶片的模态,需要将 MFC 布置于叶片模态纤维方向应变较大的位置。MFC 的纤维方向沿着叶片叶高方向,叶片振动响应以低阶扭转为主;如果想激励出扭转模态,需要将 MFC 布置于扭转模态纤维方向应变较大的位置。MFC 纤维方向沿着叶片弦向方向,叶片振动响应以低阶扭转为主。对于宽弦复合材料风扇叶片,MFC 布置的位置靠近叶片 1/2 叶高处,可以激励出叶片的前 5 阶模态。测点的选择,对于低阶弯曲模态(Mode 1 和 Mode 2),叶尖的测点可以得到最大的响应值;当测点靠近 1/2 叶高前尾缘时,低阶弯曲模态响应很小,高阶弯曲和弯扭组合模态响应较大。

3.3 MFC 组合激励

不同位置的 MFC 单独激励叶片, 叶片的响应也不同, 例如 MFC 02 激励叶片, Mode 3 的响应不明显; MFC 03 激励叶片, Mode 3 的响应明显。因此本文考虑用不同 MFC 组合激励叶片, 研究 MFC 组合激励下的叶片响应特性。试验设定信号发生器 1 个通道发出相同电压幅值的快速正弦扫频信号, 经过恒电压功率放大器输出给 2 个 MFC 激励器 (MFC 01 和 MFC 02

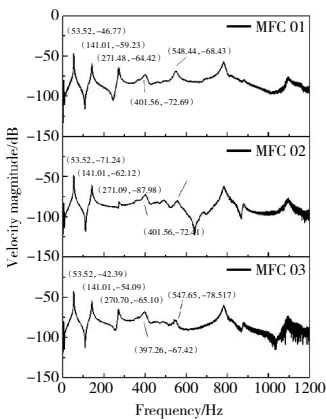
并联), 2 个 MFC 同时激励复合材料叶片, 测量叶片速度响应。

MFC 单独激励和组合激励下的叶片固有频率见表 3。从表中可见, MFC 单独和组合激励叶片的固有频率最大相对误差为 1.83%, 在可接受的范围内。因此, MFC 单独和组合激励都可以准确地得到叶片的固有频率。最大相对误差 = (各阶模态下测量的最大固有频率差值 / 各阶模态下测量的最小固有频率) × 100%。

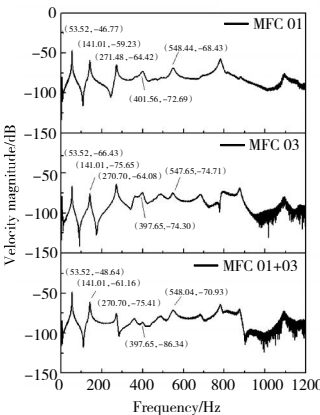
表 3 MFC 组合和单独激励下叶片固有频率偏差

模态阶次	MFC 单独和组合激励下叶片固有频率 /Hz						最大相对误差 /%
	MFC 01	MFC 02	MFC 03	MFC 01+02	MFC 01+03	MFC 02+03	
Mode 1	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	53.52	0
Mode 2	141.01	141.01	141.01	141.01	141.01	141.01	0
Mode 3	271.48	272.65	270.7	270.7	270.7	270.31	0.86
Mode 4	401.56	401.95	397.65	397.26	397.65	397.65	1.17
Mode 5	548.44	555.07	547.65	547.65	548.04	544.92	1.83

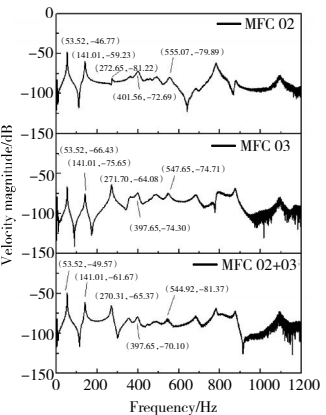
MFC 单独激励和组合激励叶片, 叶尖测点 Node 127 频域响应如图 11 所示。MFC 叠加激励和单独激励, 叶尖测点 Node 127 响应幅值大小见表 4。从表中可见, MFC 01 和 MFC 02 布置的纤维极化相同, 皆沿叶高方向。对于弯曲模态 (Mode 1、Mode 2 和 Mode 4), MFC 01 和 MFC



(a) MFC 01、02 组合激励



(b) MFC 01、03 组合激励



(c) MFC 02、03 组合激励

图 11 Node 127 MFC 单独激励和组合激励下叶片的频域响应

02 单独激励的幅值差异很小。在弯曲模态下, MFC 01 和 02 组合激励的响应幅值比 MFC 01 或 MFC 02 激

励的响应幅值明显增大, 是 MFC 01 单独振动的 1.66、1.81 和 1.83 倍, 且不是 2 个 MFC 单独激励幅值的线性叠加; 对于扭转模态 (Mode 3、Mode 5), MFC 01 单独激励的响应幅值明显大于 MFC 02 单独激励的幅值 (55.00、3.74 倍)。在扭转模态 (Mode 3、Mode 5) 下, MFC 01 和 MFC 02 的组合激励响应幅值分别是 MFC 02 单独激励的 6.40、1.17 倍, 是 MFC 01 单独激励的 0.12、0.31 倍, 明显大于 MFC 02 单独激励的响应, 但小于 MFC 01 单独激励的响应。

MFC 01 和 MFC 03 组合激励叶片, MFC 01、03 纤维方向分别沿叶高、弦向方向, 相差 90°。相同电压激励, MFC 01 和 MFC 03 都能激励出全部的前 5 阶固有频率。叶片前 5 阶模态的响应, MFC 01 激励的皆大于 MFC 03 激励的。MFC 01、03 叠加激励的前 5 阶模态响应值大于 MFC 03 单独激励的幅值, 但是小于 MFC 01 单独激励的幅值。

MFC 02 和 MFC 03 组合激励叶片, MFC 02、03 纤维方向分别沿叶高、弦向方向, 也相差 90°。相同电压激励, 弯曲模态的响应峰值, MFC 02 单独激励的明显大于 MFC 03 单独激励的, 扭转模态的响应峰值, MFC 02 单独激励比 MFC 03 单独激励的略小。MFC 02、03 叠加激励, 弯曲模态和 1 阶扭转模态, 叠加模态响应值大于 MFC 03 单独激励的幅值, 但是小于 MFC 01 单独激励的幅值。

表 4 叠加激励和单独激励,叶尖测点 Node 127 响应幅值大小

模态阶次	MFC 叠加激励与单独激励幅值比值 / 倍						MFC 单独激励幅值比值		
	01+02/01	01+02/02	01+03/01	01+03/03	02+03/02	02+03/03	01/02	01/03	02/03
Mode 1	1.66	1.66	0.81	7.75	0.72	6.97	1.00	9.62	9.62
Mode 2	1.81	1.81	0.80	5.30	0.76	5.00	1.00	6.62	6.62
Mode 3	0.12	6.40	0.04	0.27	5.99	0.83	54.95	7.64	0.14
Mode 4	1.83	1.70	0.21	0.25	0.44	0.58	0.93	1.20	1.30
Mode 5	0.31	1.17	0.75	1.55	0.84	0.46	3.74	2.06	0.55

2 个 MFC 组合激励, 振幅的叠加响应幅值比 MFC 单独激励幅值的变化, 与 MFC 布置的纤维方向、模态阶次及各模态阶次单独激励幅值的相对大小有关。当 2 个 MFC 布置的纤维极化方向相同时, 弯曲模态的叠加振幅比单独 MFC 激励增加; 扭转模态的叠加振幅比较小的单独激励的幅值增加, 但是小于较大的单独激励的幅值。当 2 个 MFC 布置的纤维极化方向不同时, 叠加振幅比较小的单独激励的幅值增加, 但是小于较大的单独激励的幅值。

由上述的分析可知, MFC 激励器激励叶片振动, 组合激励叶片的响应效果不一定优于 MFC 单独激励。选用 MFC 组合激励, MFC 在叶片上布置位置与各阶模态 MFC 纤维方向的应变相关, 尽可能布置在叶片纤维方向应变都较大的位置。因此, 如果 1 个 MFC 激励器不能有效地激励出全部的模态, 可以选用多个 MFC 进行组合激励, 但应该优先选择纤维方向一致的 MFC 组合激励。

4 结 论

本文建立了 MFC 激励系统, 在复合材料宽弦风扇叶片 3 个不同位置上布置 3 个 MFC 激励器进行模态试验, 与仿真值和传统激励敲击法比较叶片固有频率和振型, 分析复合材料叶片在 MFC 激励下的响应, 得到以下结论:

(1) 根据仿真计算和 MFC 激励法模态测试结果, 前 5 阶固有频率和对应振型对比结果吻合得很好, 表明本文采用的 MFC 模态测试方法和仿真计算具有较高的准确性。

(2) 根据不同位置 MFC 激励叶片振动, 测量叶片相同测点的响应速度幅值大小, 为了尽可能激励多且明显地激励出叶片的模态, 应将 MFC 布置于叶片各阶模态下的纤维极化方向应变较大的位置。对于宽弦

复合材料风扇叶片, MFC 布置的位置靠近叶片 1/2 叶高处, 可以激励出叶片的前 5 阶模态。

(3) 风扇叶片在不同位置 MFC 激励下的响应特性显示, 不同位置 MFC 的激励, 各阶模态响应有较大差异。当 MFC 纤维方向布置的位置沿着叶高方向, 叶片振动以低阶扭转为主; 如果想激励出扭转模态, 需要将 MFC 布置于扭转模态的纤维方向应变较大的位置。当 MFC 纤维方向布置沿着叶片的弦向方向, 叶片振动以低阶扭转为主。

(4) 2 个 MFC 组合激励, 振幅的叠加响应幅值比 MFC 单独激励幅值的变化, 与 MFC 布置的纤维极化方向、模态阶次及各模态阶次单独激励幅值的相对大小有关。当 2 个 MFC 布置的纤维极化方向相同, 弯曲模态的叠加振幅比单独 MFC 激励的增加; 扭转模态的叠加振幅比较小的单独激励的幅值增加, 但小于较大的单独激励的幅值。当 2 个 MFC 布置的纤维极化方向不同, 叠加振幅比较小的单独激励的幅值增加, 但是小于较大的单独激励的幅值。

因此, 采用 MFC 激励器进行模态测量, 组合激励叶片的响应效果不一定优于 MFC 单独激励, 选用 MFC 组合激励, 首先应考虑尽可能布置在叶片纤维方向应变都较大的位置; 如果 1 个 MFC 不能激励出所有模态, 可以选用 MFC 组合激励, 应该优先选择纤维方向一致的 MFC 进行组合激励。

MFC 驱动器激励风扇叶片振动, 风扇叶片的响应与 MFC 覆盖位置处对应 MFC 纤维极化方向的应变大小、MFC 纤维方向和测点选择有关。该结果可用于宽弦风扇叶片的 MFC 传感器 / 激励器控制方法进一步有效研发和风扇叶片的振动特性分析。

参考文献:

[1] 蔡肇云, 金六周. 航空发动机强度设计、试验手册: 叶片强度与振动

- 计算[M]. 北京:第三机械工业部第六研究院,2014:207-218.
- CAI ZaoYun,JIN LiuZhou. Strength design and test manual of aero-engine;blade strength and vibration calculation [M].Beijing:Sixth Research Institute of the Third Ministry of Machinery Industry,2014:207-218. (in Chinese)
- [2] 王仲林,陈勇,欧阳华. 钛合金宽弦风扇叶片的振动特性[J]. 航空动力学报,2018,33(11):42-50.
- WANG ZhongLin,CHEN Yong,OUYang Hua.Vibration characteristics of titanium wide-chord fan blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2018,33(11):42-50.(in Chinese)
- [3] 付曦,张俊红,刘萌,等. 某航空发动机压气机叶片振动分析[J]. 机械设计,2018,35(5):11-17.
- FU Xi,ZHANG Junhong,LIU Meng,et al. Vibration analysis of an aeroengine compressor blade [J]. Mechanical Design,2018,35(5):11-17. (in Chinese)
- [4] Teter A,Gawryluk J. Experimental modal analysis of a rotor with active composite blades[J]. Composite Structures,2016,153:451-467.
- [5] Yang S,Allen M S. Output-only modal analysis using continuous-scan laser doppler vibrometry and application to a 20 kW wind turbine[J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2012,31(8):228-245.
- [6] Heylen W. Modal analysis theory and testing[M].Belgium:Departement Werktuigkunde Press,1998:11-25.
- [7] Williams R B,Park G,Inman D J,et al. An overview of composite actuators with piezoceramic fibers[J]. Proceeding of IMAC,2002,47(4):421-427.
- [8] BENT A A. Active fiber composites for structural actuation[D].Cambridge,Massachusetts,USA:Massachusetts Institute of Technology,1997.
- [9] WILKIE W K,BRYANT R G,HIGH J W,et al. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications [C]// Bellingham, Washington,USA:Smart Structures and Materials 2000:Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. International Society for Optics and Photonics,2000,3991:323-335.
- [10] Belz J,May M,Siemann J,et al. Excited blade vibration for aeroelastic investigations of a rotating blisk using piezo-electric macro fiber composites [C]//ASME Turbo Expo 2013:Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers,2013: V07BT33A011-V07BT33A011.
- [11] Gawryluk J,Mitura A,Teter A. Dynamic response of a composite beam rotating at constant speed caused by harmonic excitation with MFC actuator[J]. Composite Structures,2019,210:657-662.
- [12] 朱启晨,陈勇,肖贾光毅. 复合材料风扇叶片模态仿真分析[J]. 航空发动机,2018,44(3):49-54.
- ZHU Qichen,CHEN Yong,XIAO Jianguangyi. Modal simulation analysis of a composite wide-chord fan blade [J]. Aeroengine,2018,44(3):49-54. (in Chinese)
- [13] 朱启晨,陈勇. 复合材料风扇叶片铺层设计方法研究[J]. 航空发动机,2019,45(1):28-32.
- ZHU Qichen,CHEN Yong. Study on laminate design method of composite fan blade[J]. Aeroengine,2019,45(1):28-32. (in Chinese)
- [14] Smart Material MFC overview [EB/OL]. <http://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>,2018-03-08/2018-06-08.
- [15] Stanbridge B,Ewins J. Modal testing using a scanning laser doppler doppler vibrometer [J]. Mechanical Systems & Signal Processing,199,13(2):255-270.

(编辑:刘 亮)