

曲面叶片三维工作变形连续扫描激光测试

李 繁, 臧朝平

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 提出一种曲面叶片三维工作变形连续扫描激光多普勒振动测试方法并应用于某压气机叶片的振动测试。将图像几何变换引入激光连续扫描,发展了一种适合曲面叶片这类非规则几何结构的激光连续扫描路径算法,使连续扫描激光振动测试应用于非矩形区域,并通过实验验证了其准确性。基于此测试方法,提出了曲面叶片三维工作变形的测试方法,研究了三维激光测试坐标分解原理。对某压气机叶片进行了三维激光连续扫描测试,获取了 3 600 Hz 内的前 9 阶模态,与商用三维激光离散点扫描测试模态振型的相关性基本在 0.95 以上,验证了三维连续扫描激光多普勒振动测试的可行性和准确性。连续扫描激光多普勒测试的效率高、测点密集,对进一步工程应用具有重要意义。

关 键 词: 曲面叶片; 激光多普勒; 工作变形; 连续扫描; 非矩形区域; 三维振动

中图分类号: V232.4; TB53; TN249

文献标志码: A

Curved blade three-dimensional operational deflection shape continuous scanning laser measurement

LI Fan, ZANG Chaoping

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A continuous scanning laser Doppler vibration measurement method for three-dimensional operational deflection shape of a curved blade was proposed and applied to vibration test of a compressor blade. The image geometric transformation was introduced into the laser continuous scanning measurement, and a laser continuous scanning path algorithm capable of dealing with irregular geometries of curved blades was developed. The continuous scanning laser vibration test was applied to non-rectangular area, and its accuracy was verified by test. Based on this method, the approach for measuring three-dimensional operational deflection shape of curved blades was taken, and the coordinate decomposition principle of three-dimensional laser test was studied. The three-dimensional laser continuous scanning test was performed on a compressor blade and the first nine modes within 3 600 Hz were obtained. The correlation with the results from the commercial three-dimensional laser discrete scanning modal test was basically above 0.95, demonstrating the feasibility and accuracy of three-dimensional continuous scanning laser Doppler vibration test. The continuous scanning

收稿日期: 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(11372128); 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1730129); 航空科学基金(20151052017); 高校联合创新基金(CALT201608)

作者简介: 李繁(1993—),男,硕士生,主要从事结构振动与测试方面的研究。E-mail:li_fans@163.com

通讯作者: 臧朝平(1963—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事结构动力学与测试方面的研究。E-mail:c.zang@nuaa.edu.cn

引用格式: 李繁,臧朝平. 曲面叶片三维工作变形连续扫描激光测试[J]. 航空动力学报,2018,33(12):2991-2998. LI Fan, ZANG Chaoping. Curved blade three-dimensional operational deflection shape continuous scanning laser measurement[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(12):2991-2998.

laser Doppler vibration measurement, with advantages of high spatial resolution, efficient and effective test, shows the practical value for further engineering application.

Key words: curved blade; laser Doppler; operational deflection shape; continuous scanning; non-rectangular area; three-dimensional vibration

叶片故障是航空发动机常见的故障之一,了解叶片的动力学特性,对叶片的结构优化设计、防止叶片故障的发生具有重要意义。叶片的动力学特性测试通常采用传统的加速度传感器进行,但传感器的附加质量会影响测试结果的精度,同时,传感器布置测点数目有限,也会导致测点空间分辨率低,测试信息不完备等问题。近年来,扫描激光多普勒振动测试(scanning laser Doppler vibrometry,SLDV)技术因非接触测试和测试便捷等优点得到发展并被广泛使用。SLDV 是一种成熟的离散点扫描激光测振技术,可以有效地测试结构频响函数,准确获取结构固有频率、阻尼比及模态振型^[1-4]。

SLDV 中的单束激光相当于一个速度传感器,只能测试沿激光方向的振动速度,同时使用 3 束激光在不同方向测试,将测试振动时域信号进行坐标分解,经参数识别可得到三维模态振型。之后研究者研究了三维激光测试技术,利用不同方向的 3 束激光测试同一点的振动数据,通过三维激光坐标分解方法,实现了三维模态振型的测试并成功地应用于简单结构的测试。随着三维 SLDV 的发展,还增加了激光测距功能,除了测试结构表面测点三维振动外,还能扫描结构表面几何形貌,可以用于复杂结构的模态测试,如圆柱结构^[5]、车辆外壳^[6]和发动机叶片^[7]。三维 SLDV 中,为使 3 束激光可以聚焦在同一测试点,3 束激光需分别标定,因而导致该测试方法效率低、标定难度大。

虽然 SLDV 可以在一定程度上提高测点的密集程度,但并未从本质上解决测点分辨率低的问题^[8]。在此基础上,研究者提出了连续扫描激光多普勒振动测试(continuous scanning laser Doppler vibrometry,CSLDV)技术。CSLDV 通过控制激光点在实验件表面以连续运动方式采集振动信号,通过相应的数据处理方法得到实验件测点密集的工作变形。CSLDV 在国外起步早,发展较为成熟,已实现了梁^[9]、板、圆盘^[10]、叶片^[11]和圆筒结构^[12-13]的连续扫描测试。国内宋安平、陈强等实现了板梁结构的实验测试^[14-15];覃

斌^[16]、李晖等^[17]实现了圆筒结构的 CSLDV。但是过去的研究对象主要是梁、平板和圆盘等形状规整的一维、二维结构,难以应用于实际结构和部件的三维振动测试。近年,Weekes 和 Ewins 改进了激光扫描路径计算方法,从 3 个方向分别测试曲面叶片的工作变形,成功解调出了三维工作变形^[18]。但国内鲜有看到关于采用 CSLDV 技术测量三维工作变形的研究报道。

本文针对曲面叶片结构,研究了非矩形区域激光连续扫描原理、曲面叶片三维工作变形测试方法及其坐标分解原理,实现了曲面叶片的三维工作变形测量和分析,验证了方法的有效性。

1 非矩形区域的激光连续扫描工作变形测试方法

1.1 非矩形区域的激光连续扫描路径

扫描式激光测振仪在激光前端配有一套轴线正交的扫描镜片,分别由两个电动机驱动,作为激光扫描位置的执行机构,如图 1 所示。镜片的扫描角度由电动机的输入电压控制,并且存在一定的线性关系

$$\begin{aligned}\alpha_x &= SV_x \\ \alpha_y &= SV_y\end{aligned}\tag{1}$$

其中 α_x 、 α_y 为 x 、 y 方向镜片的偏转角度, V_x 、 V_y 为 x 、 y 方向电动机的输入电压; S 为比例系数。本文使用的扫描式激光测振仪型号为 Polytec-PSV-400-3D,其比例系数 $S=4/V$ 。扫描镜片偏转角度决定了激光扫描点的位置,并且一一对应,

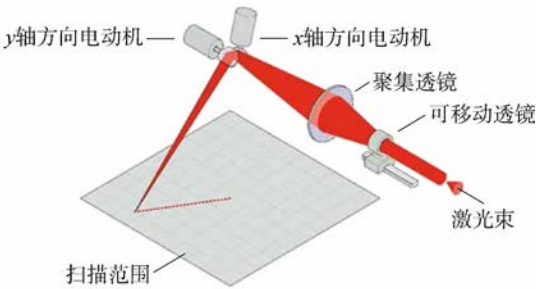


图 1 激光扫描系统
Fig. 1 Laser scanning system

因此为了方便描述问题,下面采用镜片偏角代替扫描点坐标来描述扫描路径。

为了方便路径计算与后期工作变形解调,定义一个归一化扫描区域 $G(g_x, g_y)$, 其中

$$\begin{cases} g_x = \sin(2\pi\Omega_x t) \\ g_y = \sin(2\pi\Omega_y t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 g_x 和 g_y 为归一化扫描区域 G 的 x 、 y 坐标, Ω_x 和 Ω_y 为方向扫描频率。

当实际扫描区域 $Q(q_x, q_y)$ 为矩形区域时, G 和 Q 为线性变换关系

$$\begin{aligned} q_x &= A_x g_x + B_x = A_x \sin(2\pi\Omega_x t) + B_x \\ q_y &= A_y g_y + B_y = A_y \sin(2\pi\Omega_y t) + B_y \end{aligned} \quad (3)$$

当 $\Omega_x \neq \Omega_y$ 时, 扫描路径为覆盖扫描区域的李萨茹图形, 通过调整 x 、 y 方向扫描幅值 A_x 、 A_y 和偏置 B_x 、 B_y , 可以实现任意矩形区域的连续扫描。

当实际扫描区域为非矩形区域时, 归一化扫描区域将不再是线性变换关系, 此变换规律十分复杂, 难以用一个严格的数学表达式来描述, 可取一个适当的多项式来描述实际扫描区域和归一化扫描区域之间的关系。不同二维坐标系下的空间转换, 通常可采用二元 n 次多项式, $Q(q_x, q_y)$ 和 $G(g_x, g_y)$ 变换实现, 其表达式为

$$\begin{cases} q_x = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} g_x^i g_y^j \\ q_y = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} g_x^i g_y^j \end{cases} \quad (4)$$

式中 a_{ij} 和 b_{ij} 为多项式系数, m 和 n 为多项式次数。假设多项式项数为 r , 分别在 G 、 Q 面中选取 r 个控制点, 其坐标分别为 (g_{xq}^c, g_{yq}^c) , (q_{xq}^c, q_{yq}^c) , $q=1, r$, 根据两个坐标系下控制点坐标可求得多项式系数

$$\begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & g_{x1}^c & g_{y1}^c & \cdots & g_{x1}^{cm} g_{y1}^{cn} \\ 1 & g_{x2}^c & g_{y2}^c & \cdots & g_{x2}^{cm} g_{y2}^{cn} \\ 1 & g_{x3}^c & g_{y3}^c & \cdots & g_{x3}^{cm} g_{y3}^{cn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & g_{xr}^c & g_{yr}^c & \cdots & g_{xr}^{cm} g_{yr}^{cn} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} q_{x1} \\ q_{x2} \\ q_{x3} \\ \vdots \\ q_{xr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} b_{00} \\ b_{10} \\ b_{01} \\ \vdots \\ b_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & g_{x1}^c & g_{y1}^c & \cdots & g_{x1}^{cm} g_{y1}^{cn} \\ 1 & g_{x2}^c & g_{y2}^c & \cdots & g_{x2}^{cm} g_{y2}^{cn} \\ 1 & g_{x3}^c & g_{y3}^c & \cdots & g_{x3}^{cm} g_{y3}^{cn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & g_{xr}^c & g_{yr}^c & \cdots & g_{xr}^{cm} g_{yr}^{cn} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} q_{y1} \\ q_{y2} \\ q_{y3} \\ \vdots \\ q_{yr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 非矩形区域测试实验验证

1.2.1 非矩形区域 SLDV

为了验证非矩形区域连续扫描测试方法的准确性, 选择一个方向进行 SLDV 和非矩形 CSLDV。SLDV 意义有两点: ①将 SLDV 振型作为评价 CSLDV 的基准; ②将 SLDV 结构固有频率作为 CSLDV 的激励频率。

选择某压气机叶片作为研究对象, 实物和几何模型如图 2 所示。该叶片是型面较为复杂的曲面叶片, 任意视角下叶片都是非矩形区域, 因此难以通过以往矩形区域 CSLDV 方法准确地获取叶片的工作变形。

测试时, 叶片通过夹具固定在工作台上, 夹具上加工有与叶片榫头相配合的榫槽, 通过底部螺栓顶紧来模拟叶片的实际工作边界条件; 由于叶片较为轻薄, 为了避免激振器附加质量和附加刚度对测试的影响, 采用声激励激振。叶片实验装置如图 3 所示。

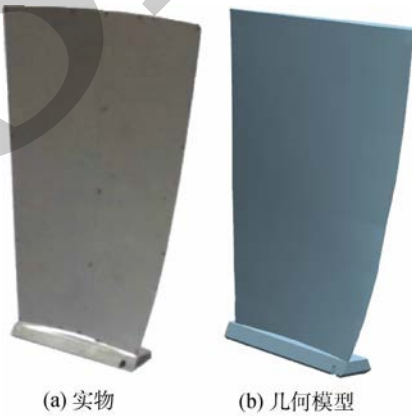


图 2 某压气机叶片实物与几何模型
Fig. 2 Physical and geometric models of a compressor blade



图 3 叶片实验装置
Fig. 3 Blade test device

SLDV 时,叶片上布置 50 个测点,叶高方向有 10 个,叶弦方向有 5 个,以描述叶片弯曲、扭转和弯扭组合的模态振型,激励信号为 0~3 600 Hz 的正弦扫频信号,每个测点平均测试 3 次,整个测试过程耗时约 10 min,测得前 9 阶固有频率如表 1 所示。

表 1 叶片前 9 阶固有频率

Table 1 The first nine natural frequencies of the blade

阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz
1	149.02	6	2 386.43
2	582.61	7	2 573.88
3	846.97	8	3 031.30
4	1 536.41	9	3 336.23
5	2 022.10		

1.2.2 CSLDV

当扫描区域进行多项式变换时,为使系数求解更加准确,一般要求:①两个坐标系下控制点的选取在扫描区域中要尽量均匀;②特征变化大的区域应选择更多的控制点;③在扫描区域的边缘选择控制点^[19]。对于所选择的压气机叶片,其型面尽管比较复杂,但是表面特征变化缓慢,选定一个测试方向后,选取了 15 个控制点,分布在测试区域的边缘和中部。15 个控制点在归一化区域和实际测试区域中坐标(角度)如表 2 所示。

表 2 控制点坐标

Table 2 Control point coordinates

控制点	归一化扫描区域 G		实际扫描区域 Q	
	g_x	g_y	q_x	q_y
1	-1.00	-1.00	-0.93	-1.44
2	-1.00	-0.33	-0.87	-0.12
3	-1.00	0.33	-0.83	1.30
4	-1.00	1.00	-0.79	2.70
5	-0.33	1.00	-0.21	2.72
6	0.33	1.00	0.38	2.70
7	1.00	1.00	0.91	2.64
8	1.00	0.33	0.96	1.32
9	1.00	-0.33	0.96	0
10	1.00	-1.00	0.85	-1.28
11	0.33	-1.00	0.28	-1.32
12	-0.33	-1.00	-0.30	-1.38

续表

控制点	归一化扫描区域 G		实际扫描区域 Q	
	g_x	g_y	q_x	q_y
13	0	-0.50	0.04	-0.32
14	0	0	0.12	0.70
15	0	0.50	0.12	1.68

选定控制点后通过式(4)~式(6)可以计算出实际扫描区域扫描路径,归一化扫描区域和实际扫描区域的控制点和扫描路径如图 4 所示。利用 SLDV 获得的固有频率对叶片进行单频激励,依次测试各个固有频率下叶片工作变形,每阶模态扫描测试时间 10 s。

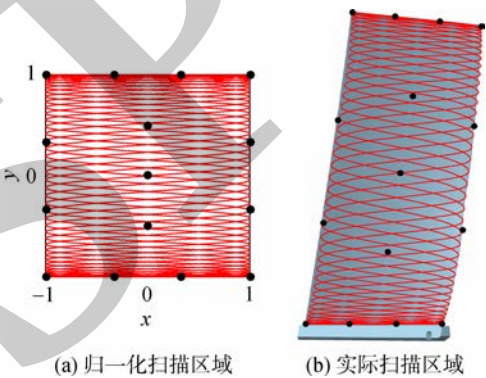


图 4 控制点和扫描路径

Fig. 4 Control points and scanning paths

1.3 结果对比

通过 SLDV 和 CSLDV,分别获得叶片在该方向上的一维工作变形,两组测试振型的模态置信准则(modal assurance criterion, MAC)均在 0.96 以上,如图 5 所示。这表明非矩形区域的

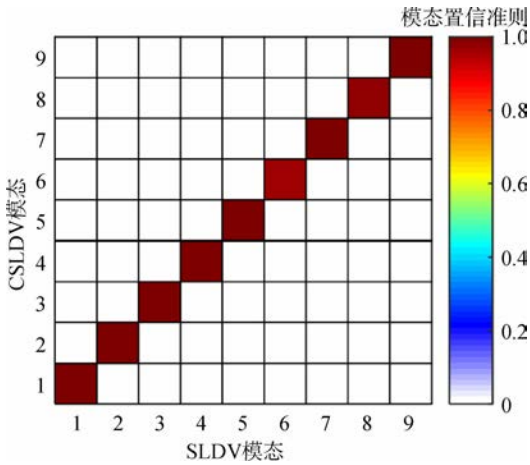


图 5 一维测试振型的 MAC 图

Fig. 5 MAC plot of mode shapes with one-dimensional test

CSLDV 振型和 SLDV 振型相关性较高,验证了非矩形区域 CSLDV 的有效性和准确性。

2 三维工作变形激光连续扫描测量

2.1 三维测试坐标分解原理

尽管单向 CSLDV 具有很高的准确性,但是在测量曲面叶片这类三维结构的工作变形时,仅从一个方向描述,测试信息不完备,存在一定的局限性,因此有必要对曲面叶片进行三维振型测试。

有别于三维加速度传感器,由于激光反射问题,三维激光测试难以从 3 个正交的方向测试结构表面某点振动信息。目前广泛使用的三维激光测试方案如图 6 所示。尽管无法从 3 个正交的方向进行测试,但是采用不在同一平面的 3 束激光测试通过相应的坐标分解,依然可以获得结构三维振型。

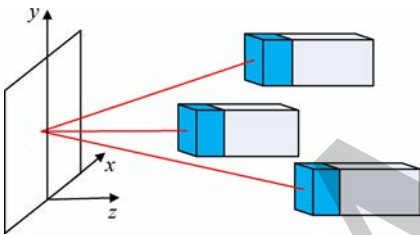


图 6 三维激光测试方案

Fig. 6 Three-dimensional laser test program

对于某一测点,将该点视为坐标原点,3 个方向工作变形分别为 u_1 、 u_2 、 u_3 ,其方向分别沿 3 束激光方向, u_1 、 u_2 、 u_3 三个矢量端点法平面交点即为该点实际振型矢量端点,如图 7 所示,求得 u 即可求得该点沿三坐标轴的工作变形,即 $u = (u_x, u_y, u_z)$ 。

为方便描述振型方向与三坐标轴的夹角关系,引入 9 个方向的余弦,如表 3 所示。

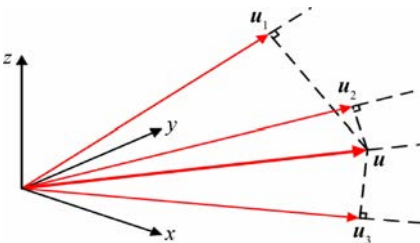


图 7 三维激光测试坐标分解

Fig. 7 Coordinate decomposition of three-dimensional laser test

表 3 方向余弦
Table 3 Directional cosine

方向	方向余弦		
	u_1	u_2	u_3
x	l_{11}	l_{21}	l_{31}
y	l_{12}	l_{22}	l_{32}
z	l_{13}	l_{23}	l_{33}

u_1 、 u_2 、 u_3 三个矢量端点法平面为

$$\begin{cases} xl_{11} + yl_{12} + zl_{13} = |u_1| \\ xl_{21} + yl_{22} + zl_{23} = |u_2| \\ xl_{31} + yl_{32} + zl_{33} = |u_3| \end{cases} \quad (7)$$

求解 3 个法平面交点为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} |u_1| \\ |u_2| \\ |u_3| \end{bmatrix} \quad (8)$$

即求得该点三维振型

$$u = (u_x, u_y, u_z) = (x, y, z) \quad (9)$$

2.2 三维工作变形的实验测试

2.2.1 三维 SLDV

三维 SLDV 的实现是通过标定使 3 束激光聚焦在同一点,测试该点沿激光方向振动速度,通过坐标分解将时域信号分解到笛卡儿坐标系,从而得到 3 个方向频响函数,其本质上仍是模态测试,测点布置数量仍然有限。叶片三维 SLDV 实验装置如图 8 所示。



图 8 三维 SLDV 实验装置

Fig. 8 Three-dimensional SLDV test device

2.2.2 三维 CSLDV 扫描路径仿真验证

由于激光测振仪只有一对激光扫描镜片可受外部控制,实现连续扫描测试。因此,本文使用一个激光头在 3 个方向分别进行 CSLDV,获取叶片沿 3 个方向的工作变形,然后将结构沿 3 个方向的工作变形进行坐标分解,从而得到叶片笛卡儿坐标系下三维工作变形,这一点有别于三维

SLDV。为保证三维 CSLDV 中,3 次测试的激光扫描路径一致,3 次测量的激光位置进行路径计算时的控制点应该一致。由于无法在实验中验证三维 CSLDV 扫描路径的一致性,这里通过仿真测试进行验证。

在空间上选择 3 个激光位置,通过叶片上 15 个控制点分别计算 3 个激光位置下扫描镜片偏角,求解光束与叶片表面的交点即为激光实际扫描点,如图 9 所示。

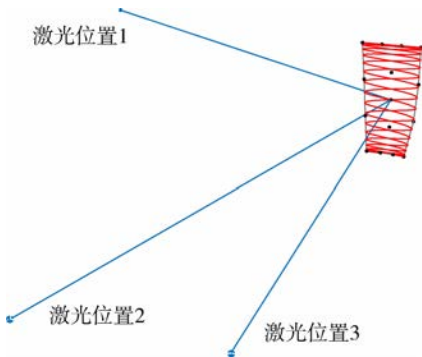


图 9 三维 CSLDV 示意图

Fig. 9 Sketch map of three-dimensional CSLDV

3 个激光位置下激光实际扫描点如图 10 所示,可以看出 3 个扫描路径基本重合,其中最大偏差为 0.8 mm,与叶片实际尺寸(叶高大约 160 mm)相比,该偏差可以忽略不计,认为 3 个激光扫描路径一致。因此在实际测试中,只要保证 3 个激光位置进行路径计算时的控制点一致,即可实现 3 束激光扫描路径的一致。

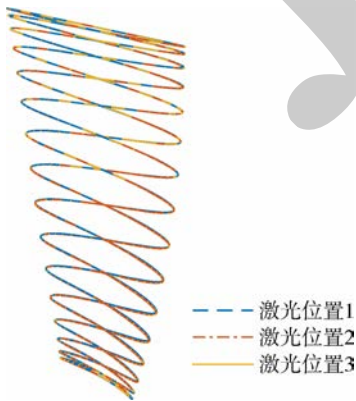


图 10 三维 CSLDV 扫描路径对比

Fig. 10 Comparison of three-dimensional CSLDV scanning paths

2.2.3 三维 CSLDV

三维 CSLDV 时,在叶片上选取同样的控制

点,选择 3 个激光位置分别进行一维非矩形区域 CSLDV。3 次测试控制点和激光扫描路径(镜片偏角)如图 11 所示。

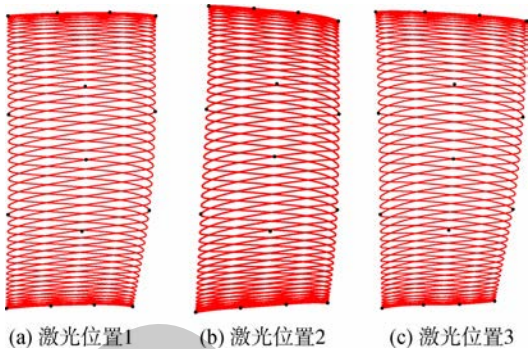


图 11 测试控制点和激光扫描路径

Fig. 11 Test control points and laser scanning paths

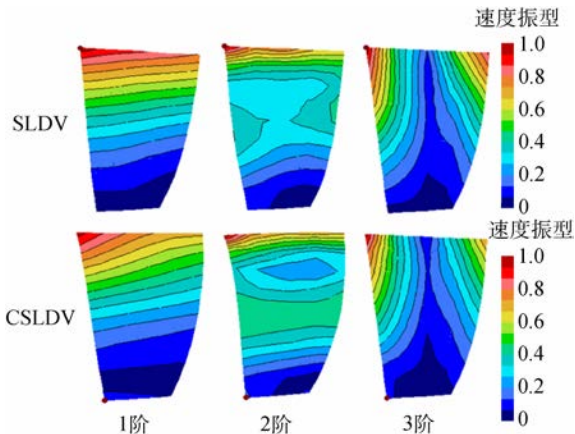
提取 3 组测试工作变形时,在叶高和叶弦方向选择同样的拟合点,以保证 3 组测试测点一一对应。根据镜片偏转角度通过坐标分解将获得的各个测点沿 3 束激光方向的工作变形分解到笛卡儿坐标系,得到叶片三维工作变形。

2.3 结果对比

三维 SLDV 测点与一维 SLDV 一致,同样是 50 个测点,而 CSLDV 可以选择任意点数拟合工作变形,不会像 SLDV 出现因测点太少而描述振型不准确的情况。

三维 CSLDV 和三维 SLDV 的前 9 阶归一化振型对比如图 12 所示,MAC 如图 13 所示。

分析结果可知:除第 2 阶的振型 MAC 值为 0.88 以外,其余各阶模态的振型 MAC 值均在 0.95 以上,说明两组测试振型具有很高的 consistency,三维 CSLDV 具有很高的精度。



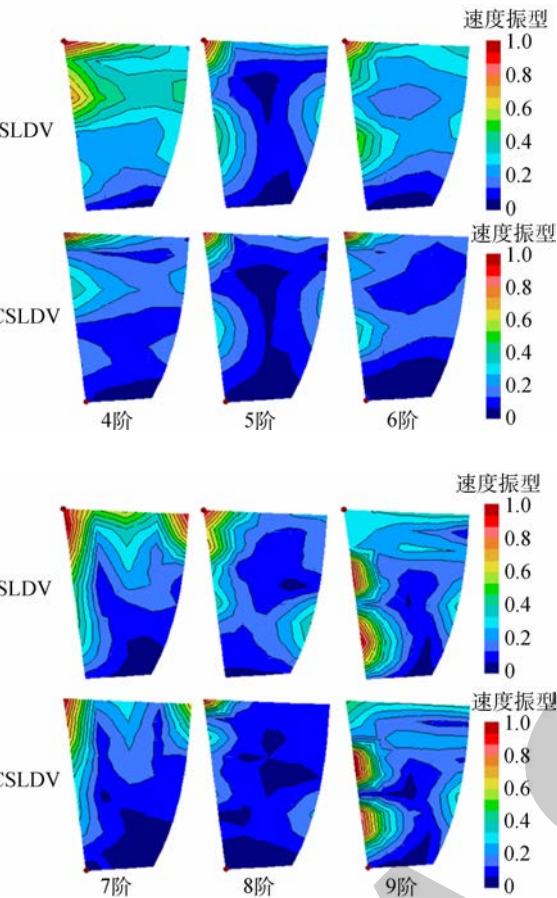


图 12 三维 SLDV 和 CSLDV 振型的对比
Fig. 12 Mode shapes comparison between three-dimensional SLDV and CSLDV

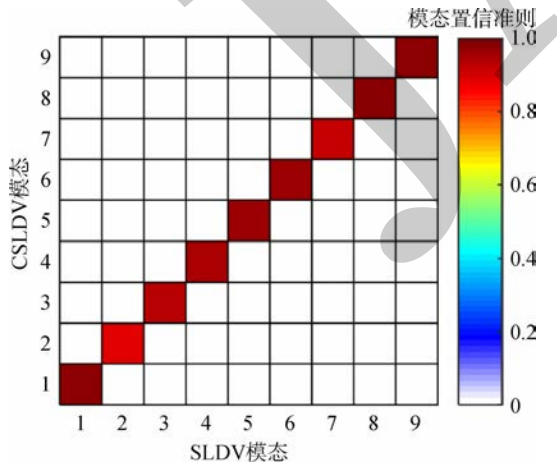


图 13 三维 SLDV 和 CSLDV 振型相关性 MAC 图
Fig. 13 MAC plot of mode shapes between three-dimensional SLDV and CSLDV

3 结 论

本文研究了曲面叶片三维工作变形 CSLDV 方法。首先研究了非规则几何结构 CSLDV 方

法,并通过实验验证了该测试方法的有效性,使得激光能够应用于实际复杂结构而非简单的板梁结构,拓宽了 CSLDV 的应用范围。在此基础上,提出了曲面叶片三维工作变形测试方案,通过坐标分解算法将从 3 个不同的方向测试的叶片工作变形分解到笛卡儿坐标系下,得到叶片三维工作变形。与商用三维 SLDV 方法得到的叶片三维振型对比发现,两者具有很高的-致性,说明三维 CSLDV 技术具有很高的精度,并且具有测试效率高、测点密集的特点,是激光连续扫描测试工程应用的突破。

参考文献:

[1] STANBRIDGE A B,EWINS D J. Modal testing using a scanning laser doppler vibrometer[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,1999,13(2):255-270.

[2] STANBRIDGE A B,EWINS D J,KHAN A Z. Modal testing using impact excitation and a scanning LDV[J]. Shock and Vibration,2000,7(2):91-100.

[3] STANBRIDGE A B,MARTARELLI M,EWINS D J. The scanning laser Doppler vibrometer applied to impact modal testing[C]// Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference. Orlando, US; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,1999:986-991.

[4] MARTARELLI M,REVEL G M,SANTOLINI C. On the use of laser Doppler vibrometry for modal analysis[R]. Santa Barbara, US; 16th International Model Analysis Conference,1998.

[5] LEZHIN D S,FALALEEV S V,SAFIN A I,et al. Comparison of different methods of non-contact vibration measurement[J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 175-183.

[6] BATEL M. Deploying successfully laser Doppler vibrometry techniques within the automotive NVH process[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123 (5):3868-3868.

[7] VUYE C,VANLANDUIT S,PRESEZNIAC F,et al. Optical measurement of the dynamic strain field of a fan blade using a 3D scanning vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering,2011,49(7):988-997.

[8] CASTELLINI P,REVEL G M,TOMASINI E P. Laser Doppler vibrometry:a review of advances and applications [J]. Shock and Vibration Digest,1998,30(6):443-456.

[9] MAIO D D,EWINS D J. Continuous scan, a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters;Part I [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2011,25(8):3027-3042.

[10] MARTARELLI M. Exploiting the laser scanning facility for vibration measurements[D]. London: University of London, 2001.

[11] MAIO D D,EWINS D J. Applications of continuous track-

ing SLDV measurement methods to axially symmetric rotating structures using different excitation methods[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(8): 3013-3036.

[12] SCHWINGSHACKL C W, ZANG C, MASSEI L, et al. The simulation of a full-field vibration measurement of cylindrical structures using a continuous scanning LDV technique[C]// Proceedings of SPIE on the 8th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008: 709801-709805.

[13] SCHWINGSHACKL C W, MASSEI L, ZANG C, et al. A constant scanning LDV technique for cylindrical structures: simulation and measurement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(2): 394-405.

[14] 宋安平, 臧朝平, 张忠. 恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 511-517.

SONG Anping, ZANG Chaoping, ZHANG Zhong. Laser Doppler vibrometry method with uniform rate raster continuous scanning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(4): 511-517. (in Chinese)

[15] 陈强, 臧朝平. 基于连续正弦速度扫描方式的激光多普勒测振技术[J]. 实验力学, 2015, 30(5): 613-620.

CHEN Qiang, ZANG Chaoping. On the laser Doppler vibrometry technique based on continuous scanning LDV with sinusoidal rate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5): 613-620. (in Chinese)

[16] 覃斌. 单点激光连续扫描测振的薄壁件实验模态测试方法研究[D]. 长沙: 湖南科技大学, 2013.

QIN Bin. Research on experimental modal testing method for thin-walled parts using single point laser continuous scanning vibration measurement[D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

[17] 李晖, 孙伟, 许卓, 等. 基于激光旋转扫描的约束态薄壁圆柱壳模态振型测试新方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 155-159.

LI Hui, SUN Wei, XU Zhuo, et al. A experimental method of laser rotating scanning to measure mode shape of constrained thin cylindrical shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16): 155-159. (in Chinese)

[18] WEEKES B, EWINS D. Multi-frequency, 3D ODS measurement by continuous scan laser Doppler vibrometry[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 58/59: 325-339.

[19] 王学平. 遥感图像几何校正原理及效果分析[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(9): 102-105.

WANG Xueping. Geometric rectification and effect analysis of remote sensing image[J]. Computer Applications and Software, 2008, 25(9): 102-105. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)