

含圆形缺孔平板结构振型的连续扫描激光测试*

张 磊¹, 臧朝平¹, 陈 香², 王 琦²

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院 南京, 210016)

(2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 成都, 610000)

摘要 为了实现含任意圆形缺孔的平板结构的振动变形测量,提出了一种子区域划分测试与振型重构的激光连续扫描多普勒测试方法。首先,将任意圆形缺孔的平板结构表面通过子区域划分,得到完全覆盖的多个矩形和圆环形扫描的子区域,并分别使用恒速直线连续扫描和螺旋线扫描的方法,得到各子区域的振动变形;其次,考虑子区域分别扫描中存在的振幅比例、基准平面和旋转角度不同以及节径两侧反向振动等问题,拼接和重构所有子区域的振动变形,得到整体结构的振动变形;最后,将振型结果与仿真结果进行对比,模态置信因子(modal assurance criterion, 简称 MAC)均大于 0.95,验证了方法的有效性。该方法可实现含有任意圆形缺孔的平板结构的连续扫描激光振动测试,具有效率高、测点密集等优点,对进一步提高其工程应用的适用范围具有重要作用。

关键词 圆形缺孔;连续扫描;激光多普勒;子区域划分;振型重构

中图分类号 TH744;TN249

引 言

在工程实际中,随着机械结构逐渐复杂化,对结构表面进行测试时针对完整区域的测试技术难以满足需求^[1-4],需要一种适用于有缺孔结构的测试方法。连续扫描激光多普勒测振技术(continuous scanning laser Doppler vibrometry, 简称 CSLDV)作为一种非接触振动测试技术,普遍应用于表面完整且形状规则的结构^[5-8]。国外已经在板、梁、圆盘及叶片等结构上实现了连续扫描激光测试^[9-11];国内也实现了板、梁的测试^[12-13],包括恒速度和正弦速度连续扫描。

结构的振动变形(operational deflection shape, 简称 ODS)是结构在强迫激励下的动态实际变形,是结构激发的多个模态振型的叠加。当被施加的激励为某一阶固有频率下的简谐激励时,结构动态变形几乎由此阶的模态振型主导,其振动变形与该阶的固有振型一致,从而可以方便地得到结构在该阶的振动振型。当 CSLDV 技术运用于测试表面不完整结构的振动变形时,如果扫描时不跳过缺孔区域,即按照完整区域进行测试,缺孔处由于扫描距离的突变等原因,会极大地影响后续分析,难以保证结果的准确性;如果扫描时跳过缺孔区域,扫描路径出现

间断,即激光进行跳跃,在跳跃时间段内的测试数据会产生难以预估的影响,导致实验结果可信度降低,甚至无法得到结果。张弓等^[14]利用线段的坐标转换,实现了发动机外部弯曲管路的振动测试,但仅适用于曲线扫描,无法用于面扫描。李繁等^[15]通过调整扫描幅值和利用归一化扫描区域与实际扫描区域的映射关系,实现了大扭转叶片的 3 维 ODS 测量,但二元二次多项式的拟合关系难以适用于复杂扫描区域。

笔者提出了一种连续扫描激光测振方法,通过划分子区域并分别测试分析后进行振型重构,测试包含任意圆形缺孔平板结构表面的振动变形,从而可以在较短时间内获得包含任意圆孔结构表面的高分辨率振型,以用于模型修正等后续工作。首先,将包含任意圆形缺孔的结构通过一定的步骤划分为矩形和圆环形 2 种完整且形状规则的子区域,在矩形子区域表面进行恒速连续扫描测试,在圆环子区域表面进行螺旋线扫描测试,并分别根据所用扫描方式对测试采集的时域速度信号进行处理,得到各子区域的振动变形;其次,针对各子区域 ODS 之间的振幅比例和基准平面不同以及圆环子区域旋转角度的选取问题,提出了整体结构振动变形的拼接性重构方法;最后,和逐点扫描式(scanning laser doppler

* 国家自然科学基金资助项目(12072146);中国航发四川燃气涡轮研究外委课题(基础支撑)资助项目
收稿日期:2021-05-10;修回日期:2021-08-30

vibrometry, 简称 SLDV) 激光测量结果一起与仿真结果进行对比分析, 计算了 MAC 值, 验证了本研究方法的可靠性。

1 带任意圆孔平板结构的连续扫描测试方法

基于测试过程中激光扫描路径不能发生跳跃以及只含有任意圆形缺孔结构的表面特性, 首先, 将所有圆形缺孔沿统一方向拓展成正方形缺孔, 在满足有所重合与完全覆盖 2 个条件的情况下, 划分得到尽可能少的规则矩形子区域; 其次, 在每个圆孔附近划分 1 个圆环子区域; 最后, 分别测试所有子区域并分析得到各自 ODS 之后, 进行拼接性的振型重构, 便可实现对任意多圆孔平面结构的激光连续扫描测试。

1.1 子区域划分方法

对于包含任意圆形缺孔的平板结构, 按照如下步骤将其划分为多个形状规则的子区域:

1) 将所有圆形缺孔假想扩展为矩形缺孔, 矩形的边长等于对应圆形缺孔的直径, 每一条边均与圆周相切, 一般所有矩形子区域的方向相同;

2) 将缺孔拓展后的剩余部分划分为尽可能少的规则矩形子区域, 在划分子区域时不仅要保证覆盖所有表面, 也要保证每一个子区域均与其余子区域有一定的重合部分, 以便于后续振型重构;

3) 在所有圆孔处划分为圆环子区域, 以圆孔半径为圆环内径, 外径大于圆孔半径的 $\sqrt{2}$ 倍, 从而完全覆盖结构表面。

以在任意位置包含 1 个任意大小的圆形缺孔的平板结构作为研究对象, 选用材料为 304 不锈钢, 长度为 200 mm, 宽度为 80 mm, 厚度为 3 mm。

根据结构的表面形状特性以及子区域的划分步骤, 将单个圆形缺孔结构表面的区域划分为 5 部分, 如图 1 所示, 图中红色部分编号依次为 1~5, 其中 5 号子区域为圆环。

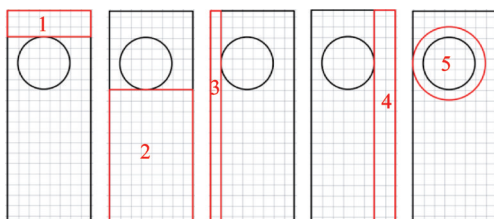


图 1 单个圆形缺孔结构表面的区域划分

Fig.1 Region division of a structure with a circular hole

以该结构中心位置为坐标原点, 建立直角坐标系, 横向为 x 轴, 纵向为 y 轴, 则圆形缺孔的圆心坐标为 $(-5, 50)$, 内半径为 25 mm, 外半径为 35 mm。所划分的矩形子区域以左下角和右上角 2 个端点坐标描述其所在位置及大小, 圆环子区域以圆心坐标和内外径进行描述, 单个圆形缺孔结构划分各子区域的位置参数如表 1 所示。

表 1 单个圆形缺孔结构划分各子区域的位置参数

Tab.1 The location parameters of each sub region divided by the structure with a circular hole mm

区域编号	左下端点坐标	右上端点坐标
1	$(-40, 75)$	$(40, 100)$
2	$(-40, -100)$	$(40, 25)$
3	$(-40, -100)$	$(-30, 100)$
4	$(20, -100)$	$(40, 100)$

基于圆孔个数的任意性, 在划分子区域时, 如果圆孔较多, 则可以划分为多个只含有单个圆孔的矩形区域, 同样满足有所重合与完全覆盖 2 个条件, 每一个区域均与单个圆孔结构类似, 可以测量得到 ODS, 最后对所有矩形区域进行拼接即可。如果圆孔个数较少, 可以以子区域个数最少为原则进行人为优化, 如在原有结构基础上增加 1 个任意圆孔, 该结构表面分成 9 部分。多个圆形缺孔结构表面的区域划分如图 2 所示, 图中红色部分编号依次为 1~9, 其中 8 号和 9 号子区域为圆环。

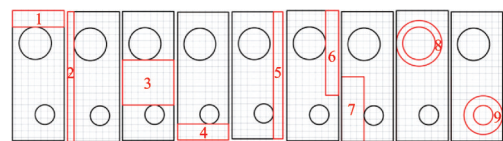


图 2 多个圆形缺孔结构表面的区域划分

Fig.2 The regional division of the structure with multiple circular holes

新增圆孔的圆心坐标为 $(10, -60)$, 内半径为 15 mm, 外半径为 30 mm 多个圆形缺孔结构划分各子区域的位置参数如表 2 所示。

1.2 不同子区域的激光连续扫描方法

当进行 CSLDV 测试时, 路径控制模块依据设计的路径, 生成所需的对应电压信号, 提供给扫描系统, 使激光点按照设计路径进行连续扫描, 同时采集路径、振动和激励 3 组时域数据, 以供后续处理。恒速直线扫描测试如图 3 所示。

表 2 多个圆形穿孔结构划分各子区域的位置参数
Tab.2 Location parameters of sub region division of the structure with multiple circular holes mm

区域编号	左下端点坐标	右上端点坐标
1	(-40,75)	(40,100)
2	(-40,-100)	(-30,100)
3	(-40,-45)	(40,25)
4	(-40,-100)	(40,-75)
5	(25,-100)	(40,100)
6	(20,-30)	(40,100)
7	(-40,-100)	(-5,0)

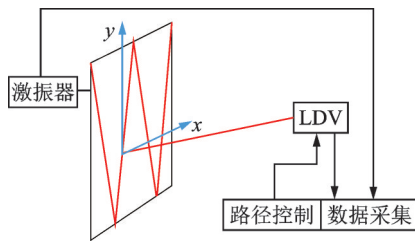


图 3 恒速直线扫描测试示意图

Fig.3 Schematic diagram of constant speed scanning test

当被测结构受到频率为 ω 的正弦激励时,结构在任意测点 (x, y) 处,平行于激光束方向(即 z 方向)上的速度响应为

$$v_z(x, y, t) = \dot{z}(x, y, t) = V_R(x, y) \cos \omega t + V_I(x, y) \sin \omega t \quad (1)$$

其中: V_R 为实部振动分量; V_I 为虚部振动分量,与激励水平有关。

针对规则矩形的子区域采用恒速直线连续扫描测试的方法,激光点在 x 和 y 方向的速度都为恒定值,分别记作 v_x 和 v_y ,此时

$$\begin{cases} x = v_x t \\ y = v_y t \end{cases} \quad (2)$$

2 个方向上的恒速直线运动进行合成后仍然是恒速直线运动,激光点所在位置仅与时间相关,激光测振仪输出的是调制信号,该信号的包络即为沿着扫描路径的振型。为了将激光测振仪采集的速度信号处理得到振动变形 ODS,将速度信号分别乘以激励频率下与激励同向和正交的简谐信号,即

$$\begin{cases} v_z \cos \omega t = V_R(t) \cos^2 \omega t + V_I(t) \sin \omega t \cos \omega t = \\ \frac{V_R(t)}{2} + \frac{V_R(t)}{2} \cos 2\omega t + \frac{V_I(t)}{2} \sin 2\omega t \\ v_z \sin \omega t = V_R(t) \cos \omega t \sin \omega t + V_I(t) \sin^2 \omega t = \\ \frac{V_I(t)}{2} + \frac{V_R(t)}{2} \sin 2\omega t + \frac{V_I(t)}{2} \cos 2\omega t \end{cases} \quad (3)$$

振动分量为低频成分,含 2ω 项为高频成分,只

需要合理设置低通滤波器的阈值,便可滤除高频项,从而使结果中只包含实部振动分量 V_R 或虚部振动分量 V_I 。

针对圆环形的子区域采用螺旋线连续扫描测试的方法,激光点沿圆环周向作匀角速度扫描,沿圆环径向作正弦直线扫描。用极坐标 (r, θ) 来表示测试路径

$$\begin{cases} \theta = 2\pi f_\theta t \\ r = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{2} \cos(2\pi f_r t) + \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

其中: f_θ 为周向扫描频率; f_r 为径向扫描频率; R_{\max} 和 R_{\min} 分别为圆环的外径和内径。

结合考虑周向振动与径向振动后通过积化和差,可以得到描述圆环振动的表达式为

$$v_z(t) = \sum_{i=0}^p A_{Rni} \cos(\omega \pm n2\pi f_\theta \pm i2\pi f_r)t \quad (5)$$

其中: A_{Rni} 为边带系数。

在进行测试数据处理时,先提取原数据的频域信息以获取边带系数,再经过矩阵变换获取多项式系数,最后进行多项式拟合便可得到圆环的振型。

1.3 整体结构振动变形的重构方法

在将每个子区域分别测试分析得到振型后,矩形子区域振型结果之间只会存在振幅比例不同和基准平面不同 2 种问题,可以利用一次函数 $y = kx + b$ 进行处理。圆环子区域本身为中心对称图形,其振型按照节径和节圆数目划分后仍为中心对称图形,因此额外存在旋转角度的问题。

在根据各子区域的 ODS 重构出整个结构的振动变形时,单块子区域内不论振型复杂程度,只要重合部分的振型可以很好地匹配,则不重合部分必然可以匹配。重构过程中的主要问题为:如果待拼接区域与已有区域重合部分包含节线时,容易出现 2 个子区域在节线两侧振动方向不同。笔者提出了一种振型拼接法来进行重构,具体过程如下。

1) 判断预拼接区域与原来已有区域的 ODS 是同向还是反向,并进行对应处理,保证为同向。主要有 2 种方法:①适用于结构简单或者阶次较低的振型重构,在 1 张 3D 图上同时画出子区域的 ODS 结果,人为参与判断;②通过仿真计算或者低分辨率 SLDV 测试得到所需阶次振型的节线,在拼接区域共有部分中包含节线时,如果节线处于拼接区域中部,则在共有区域中分别在节线两侧各取 1 个点,共

2组,这种方法具有一般性。判断节线处是否反向振动的选点示意如图4所示,其中红色为节线,A和A'与B和B'处于共有区域,拼接后对应重合。

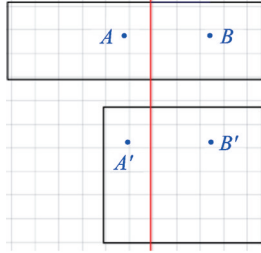


图4 判断节线处是否反向振动的选点示意图

Fig.4 Schematic diagram of point selection for judging whether the pitch line vibrates reversely or not

以各自节线处幅值为参照,如果A处的幅值大于节线处幅值,则需保证A'处的幅值同样大于节线处幅值,B与B'同样处理,从而保证处于同一振动方向。如果节线接近拼接区域边界,则只需要1组距离节线较远的点即可。

2) 根据重合区域大小以及对结果精度的需求,在重合区域选择一定数量的点。正常情况下,如果重合区域是矩形,一般选择5个点即可,重合区域选点如图5所示。如果是圆环,则一般在圆环周向等距取4~8个点。

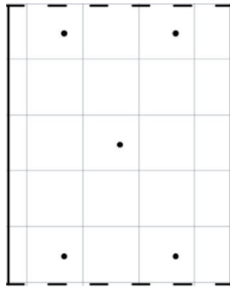


图5 重合区域选点示意图

Fig.5 Schematic diagram of point selection in coincidence area

3) 在2个子区域中均通过插值得到选取点的对应幅值。连续扫描结果分辨率很高,因此整个区域内可以得到大量的点,所有点的坐标 (x, y) 均对应一个幅值 $S(x, y)$,从而可以得到

$$S(x, y) = Z_1(1-u)(1-v) + Z_2u(1-v) + Z_3uv + Z_4(1-u)v \quad (6)$$

其中: $Z_1 = S(x_1, y_1)$; $Z_2 = S(x_2, y_2)$; $Z_3 = S(x_3, y_3)$; $Z_4 = S(x_4, y_4)$; Z_1, Z_2, Z_3 和 Z_4 分别为点 (x, y) 为中心的4个临近点的幅值; $u = \frac{x-x_2}{x_2-x_1}$; $v = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}$; u 和 v 为基函数。

将选择点的坐标依次记为 $(X_i, Y_i)(i=1, 2, \dots, n)$, n 为选择点的总数,分别代入式(6)便可得到所有选择点的幅值 S_i ,另一块区域所有选择点的幅值记作 S'_i 。

4) 如果待拼接区域是矩形区域,则利用多组幅值确定一次函数 $y = kx + b$ 中的系数 k 和 b ,每个点的误差为

$$\Delta S_i = S_i - (kS'_i + b) \quad (7)$$

以所有点的误差和 $\sum_{i=1}^n \Delta S_i$ 最小为判断依据,得到最佳系数。

如果待拼接区域为圆环区域,则需要将圆环子区域的转动角度系数 θ 同样进行循环。其圆心坐标记作 (x_0, y_0) ,对于选定 (X_i, Y_i) ,逆时针旋转 θ 角度后用极坐标表示为

$$r = \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (Y_i - y_0)^2} \\ \alpha = \theta + \arctan\left(\frac{Y_i - y_0}{X_i - x_0}\right) \quad (8)$$

以直角坐标表示为

$$\begin{cases} X'_i = x_0 + r \cos \alpha = \\ x_0 + \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (Y_i - y_0)^2} \times \\ \cos(\theta + \arctan(Y_i/Y_i)) \\ Y'_i = y_0 + r \sin \alpha = \\ y_0 + \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (Y_i - y_0)^2} \times \\ \sin(\theta + \arctan(Y_i/Y_i)) \end{cases} \quad (9)$$

在原有区域中得到坐标 (X_i, Y_i) 对应的幅值,在圆环区域中得到坐标 (X'_i, Y'_i) 对应的幅值,每组对应点的误差计算见式(7)。同样以所有点的误差和 $\sum_{i=1}^n \Delta S_i$ 最小为判断依据,得到最佳系数。

5) 利用步骤4中得到的系数进行修正处理,将修正后的各子区域共同作图即可重构出整个结构的振动变形。

2 带圆孔平板结构的实验验证

2.1 与SLDV的对比测试

本次实验所使用的平板结构通过4对螺栓螺母和1个夹板固定于支架上,模拟一端固支状态,测试时单个与多个圆孔平板实验装置如图6所示。

SLDV测试采用声激励,测试中单个圆孔平板共布置 $9 \times 17 - 9 = 144$ 个测点,多个圆孔平板共布置 $5 \times 11 - 6 = 49$ 个测点,分析频率为1 kHz,采用单

输入多输出模态分析方法,测得 5~1 000 Hz 内的模态固有频率如表 3 所示。

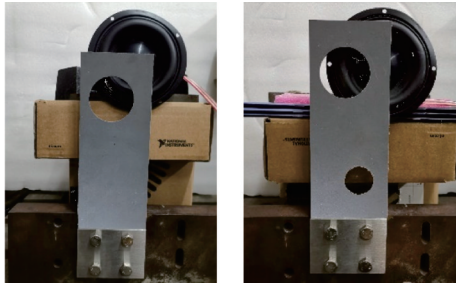


图 6 单个与多个圆孔平板实验装置

Fig.6 The experimental device for flat plates with single and multiple circular holes

表 3 单个与多个圆形缺孔平板 1 kHz 内固有频率

Tab.3 Natural frequencies of plates with single and multiple circular holes in 1 kHz

阶次	1	2	3	4	5
单孔	66.88	309.38	339.06	861.88	—
多孔	58.76	281.19	325.16	818.59	917.03

以单个圆孔平板为例进行连续扫描测试与分析。保持测试装置和测试环境不变,分别利用 SLDV 测取的各阶固有频率作为激振频率,通过喇叭实现对平板的单频激励。1~4 号区域为规则矩形,按照长宽情况,选择短边方向扫描频率为 8 Hz、长边方向扫描频率为 0.125 Hz 的恒速直线连续扫描方式,以 3 号区域激励频率为 861.88 Hz 时为例,其连续扫描测试的速度信号如图 7 所示。

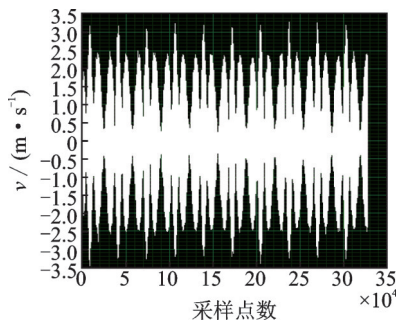


图 7 单个圆孔结构的 3 号区域在激励频率为 861.88 Hz 时连续扫描测试的速度信号

Fig.7 The velocity signal of region 3 of the structure with a circular hole at the excitation frequency of 861.88 Hz

5 号为圆环区域,采用螺旋式扫描路径,如图 8 所示。取径向频率为 1.1 Hz,周向频率为 20 Hz,扫描区域的最大半径为 35 mm,最小半径为 25 mm,采样频率为 2 048。

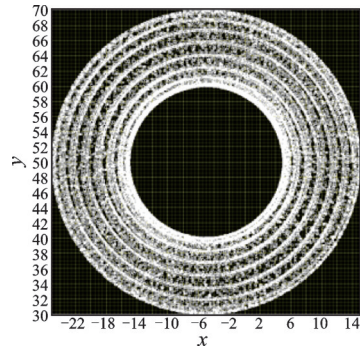


图 8 螺旋式扫描路径

Fig.8 Spiral scanning path

采集时域速度信号后处理即得到各阶所有子区域的振型。在拼接重构时,一般含有扭转的模态较难处理,因此以第 2 阶固有频率下的 ODS 为例进行重构说明,振型为第 1 阶扭转振型,以 2 号子区域为基础开始拼接。首先拼接 4 号区域,公共部分为从 (20, -100) 到 (40, 20) 的矩形,在此区域内按照图 5 选择 5 个点,其坐标及幅值如表 4 所示。以 4 号区域的幅值作为自变量,已有区域的幅值作为因变量,进行一次函数的拟合,可得 $k=0.813 6, b=-0.016 1$,其余矩形区域拼接基本相同。

表 4 单个圆孔结构第 2 阶固有频率下区域 4 拼接时的选点及对应幅值

Tab.4 Selection of points and corresponding amplitudes for region 4 splicing of structures with a circular hole under the second natural frequency

序号	坐标	4 号区域幅值	原有区域幅值
1	(21, -99)	0.068 5	-0.039 6
2	(39, -99)	0.407 1	-0.151 9
3	(30, -40)	5.239 7	-4.763 6
4	(21, 19)	8.814 8	-6.966 0
5	(39, 19)	14.342 6	-11.650 3

最后拼接 5 号圆环区域,在圆环外径均匀选取 6 个点,坐标及其在两区域的幅值如表 5 所示。

将所需 3 个系数进行循环,得到最优值为 $k=0.874 9, b=0.187 0, \theta=3^\circ$ 。单个圆孔结构第 2 阶固有频率下的 ODS 拼接系数如表 6 所示,其 ODS 重构如图 9 所示(图中视角均以上部为悬臂端,下部为固支端)。其余各阶固有频率下 ODS 处理过程基本相同。

2.2 结果对比

将 SLDV 测试振型结果、连续扫描测试结果与仿真结果进行对比分析,如图 10 所示。振型结果均

表 5 单个圆孔结构第 2 阶固有频率下区域 5 拼接时的选点及对应幅值

Tab.5 Selection of points and corresponding amplitudes for region 5 splicing of structures with a circular hole under the second natural frequency

序号	坐标	5号区域幅值	原有区域幅值
1	(30, 50)	-11.841 0	-9.854 4
2	(12.5, 80.31)	-3.526 5	-2.450 0
3	(-22.5, 80.31)	17.765 7	16.826 8
4	(-40, 50)	17.615 8	15.213 4
5	(-22.5, 19.69)	8.279 7	6.528 8
6	(12.2, 19.69)	-4.646 8	-5.049 5

表 6 单个圆孔结构第 2 阶固有频率下的 ODS 拼接系数

Tab.6 ODS splicing coefficient of the structure with a circular hole at the second natural frequency

待拼接序号	是否存在反向	k	b	$\theta/(^\circ)$
2	否	1.000 0	0	—
4	是	-0.813 6	-0.016 1	—
3	是	0.494 3	0.465 7	—
1	是	-1.060 6	1.926 3	—
5	是	0.874 9	0.187 0	3

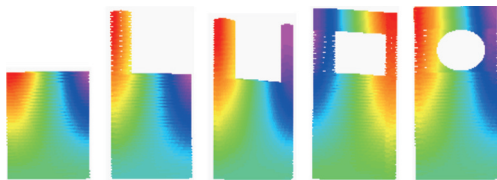


图 9 单个圆孔结构第 2 阶固有频率下的 ODS 重构
Fig.9 ODS reconstruction of the structure with a circular hole at the second natural frequency

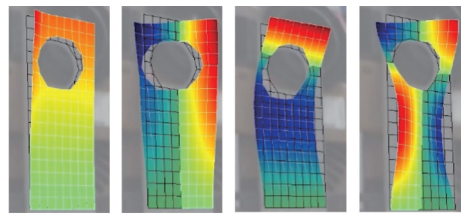
选择下端为底部固支端,上端为顶部自由端。将 SLDV 测试与连续扫描测试方法进行对比,结果如下。

1) SLDV 测试的时间随测点个数线性增长,共 144 个测点,每个测点需要测量 3 次取平局值,每次测量需要 6.4 s,共需 61 min;而本研究所提出的连续扫描测试方法每个区域最多需要测试 10 个周期,每个周期 8 s,9 个子区域需要 12 min 即可,明显缩短了测试时间。

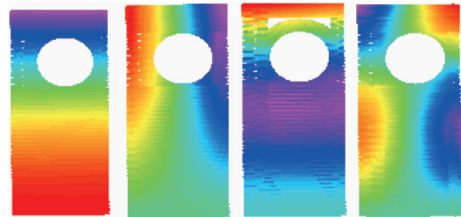
2) SLDV 测试结果由于测点数目受限,在圆孔周边利用多边形拟合圆形,边界不够平滑,与实际情况有所差距,且临近圆孔附近的振动情况难以获得,如果在圆孔附近将测点密集化,会导致测试时间线性增长;而本研究所提连续扫描方法分辨率高,所得结果可以在类似边界非常光滑,更好地切合了实际情况。

振型的相关分析需要使用维度相同的矩阵,因此基于 SLDV 测试的测点数及坐标位置,获得其在 CSLDV 中对应的振幅,保证矩阵维度一致后,即可

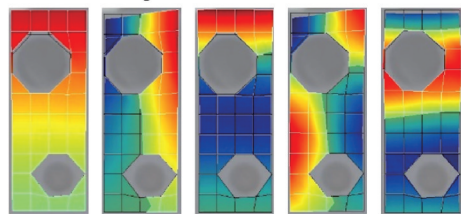
进行 MAC 值计算。CSLDV 测试和 SLDV 测试的 MAC 值如表 7 所示,MAC 值均在 0.95 以上,证明该种连续扫描测试具有很高的准确性。



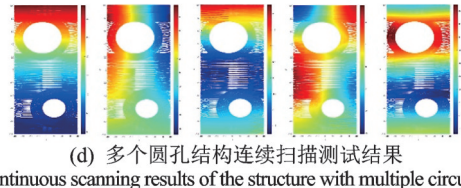
(a) 单个圆孔结构 SLDV 测试结果
(a) SLDV test results of the structure with a circular hole



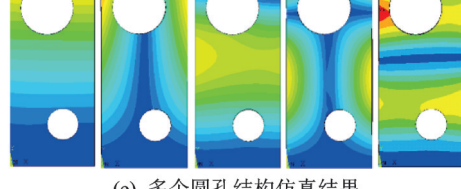
(b) 单个圆孔结构连续扫描测试结果
(b) Continuous scanning test results of the structure with a circular hole



(c) 多个圆孔结构 SLDV 测试结果
(c) SLDV results of the structure with multiple circular holes



(d) 多个圆孔结构连续扫描测试结果
(d) Continuous scanning results of the structure with multiple circular holes



(e) 多个圆孔结构仿真结果
(e) Simulation results of the structure with multiple circular holes

图 10 SLDV 和 CSLDV 测试振型与仿真结果对比
Fig.10 Comparison of simulation results and test results of SLDV and CSLDV

表 7 CSLDV 测试和 SLDV 测试的 MAC 值

Tab.7 MAC of continuous scanning test results and SLDV results

阶次	1	2	3	4	5
MAC 值	0.99	0.96	0.95	0.98	0.97

3 结束语

基于恒速直线连续扫描与螺旋式连续扫描的激

光测振原理,通过将带有任意圆孔的结构表面划分为多个完整矩形或者圆环形的子区域,分别利用恒速直线和螺线式的连续扫描得到所有子区域的振动变形,进行拼接性的振型重构,从而实现了连续扫描测试带有任意圆孔结构的振动变形。以带有单个和2个圆孔的平板结构的连续扫描测试为例,分别划分为5个和9个子区域,对测试信号进行处理,可以得到该结构的振动变形。通过与SLDV测试结果对比,MAC值均高于0.95,表明所提出的连续扫描激光测试方法可以有效地获得带有任意圆孔结构的振动变形。

参 考 文 献

- [1] EWINS D J, SAUNDERS H. Modal testing: theory and practice [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1980, 71(3):377-382.
- [2] STANBRIDGE A B, MARTARELLI M, EWINS D J. Measuring area mode shapes with a scanning laser Doppler vibrometer [C]//*Proceedings of IMAC XVII*. Kissimmee, Florida: [s.n.], 1999:123-128.
- [3] ZANG C. Structural health monitoring and damage detection based on decomposition of the structural ODS [C]//*The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration*. Kraków, Poland: International Institute of Acoustics and Vibration, 2009.
- [4] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Measurement of translational and angular vibration using a scanning laser doppler vibrometer [C]//*First International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*. [S.l.]: SPIE, 1994:37-47.
- [5] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Measurement of total vibration at a point using a conical-scanning LDV [C]//*Second International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*. [S.l.]: SPIE, 1996:126-136.
- [6] KANG M S, STANBRIDGE A B, CHANGH T G, et al. Measuring mode shapes with a continuously scanning laser vibrometer—Hilbert transform approach [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002, 16(2/3):201-210.
- [7] STANBRIDGE A B, MARTARELLI M, EWINS D J. Measuring area vibration mode shapes with a continuous-scan LDV [J]. *Measurement*, 2004, 35(2):181-189.
- [8] 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]//*Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*. [S.l.]: SPIE, 2008:59-66.
- [9] DI-MAIO D, EWINS D J. Continuous scan, a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(8):3027-3042.
- [10] ALLEN M S, SRACIC M W. A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(8):2619-2630.
- [11] DI-MAIO D, EWINS D J. Applications of continuous tracking SLDV measurement methods to axially symmetric rotating structures using different excitation methods [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(8):3013-3036.
- [12] 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 vibration measurement method of constant-speed linear continuous surface scanning [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 49(4):511-517. (in Chinese)
- [13] 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. Laser Doppler vibration measurement technology based on continuous sinusoidal velocity scanning method [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 30(5):613-620. (in Chinese)
- [14] 张弓, 臧朝平, 张让威, 等. 基于激光连续扫描的弯曲管路工作变形测试方法 [J]. *航空发动机*, 2019, 45(4):71-74.
ZHANG Gong, ZANG Chaoping, ZHANG Rangwei, et al. Testing method for working deformation of curved pipelines based on continuous laser scanning [J]. *Aero Engine*, 2019, 45(4):71-74. (in Chinese)
- [15] 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):182-189.
LI Fan, ZANG Chaoping. Continuous scanning laser test for 3D working deformation of curved blades [J]. *Chinese Journal of Aeronautical Dynamics*, 2018, 33(12):182-189. (in Chinese)



第一作者简介:张磊,男,1995年12月生,硕士生。主要研究方向为结构振动与激光测试。

E-mail: zlzhanglei@nuaa.edu.cn

通信作者简介:臧朝平,男,1963年5月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构动力学与测试。

E-mail: c.zang@nuaa.edu.cn