

含圆孔平板结构的连续扫描激光测振方法

汤涛,臧朝平,张磊,张根辈

(南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

摘要:提出一种基于扫描路径规划和工作变形归一化的激光连续扫描多普勒测振的方法,用以测量含任意圆孔平板结构的振型。通过构造边界函数等进行规划,获取对被测区域连续域范围内的遍历式路径方案;针对边界条件变化导致的同一阶内振幅比例不一致的问题,借助重合的规则区域振型结果进行归一化处理;将其结果与逐点扫描激光测振结果进行对比,MAC值均高于0.94,验证了该方法的有效性,对进一步提高其工程应用范围,具有重要作用。

关键词:圆孔平板;连续扫描;激光多普勒;路径规划;同阶归一化

中图分类号:TH744;TN249 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)05-0104-04

Continuous Scanning Laser Vibration Measurement Method for Plate Structure with Circular Holes

TANG Tao,ZANG Chaoping,ZHANG Lei,ZHANG Genbei

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

Abstract:A laser continuous scanning Doppler vibration measurement method based on scanning path planning and working deformation normalization is proposed to measure the mode shape of a flat plate structure with arbitrary circular holes. A plan is made by constructing boundary functions, etc., to obtain the traversal path scheme within the continuous domain of the measured area. With the aid of the results of the overlapping regular area mode shapes, the inconsistent amplitude ratios in the same order caused by the change of boundary conditions are normalized, and its results are compared with the ones of point-by-point scanning laser vibration measurement, indicating that the MAC values are all higher than 0.94, which verifies the effectiveness of the method and plays an important role in further improving its engineering application range.

Keywords:circular hole; continuous scanning; laser Doppler; path planning; same-order normalization

0 引言

逐点扫描式激光多普勒测振技术(scanning laser doppler vibrometry, SLDV)是指一种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、阻尼比以及模态振型^[1],目前已经发展成成熟并且广泛应用^[2-3],但是如果遇到模型修正等需求,其测点数目与仿真节点数相比十分有限。连续扫描激光多普勒测振技术(continuous scanning laser doppler vibrometry, CSLDV)通过控制激光点在试验件表面持续运动,采集振动信号,处理得到试验件的工作变形(operational deflection shape, ODS)。ODS是指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,这时的结构动态变形,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,从而可以便利地得到结构在该阶的振型。

但是目前该方法一般只能用于规则形状结构的测试,例如梁^[4-5]、板^[6-7]等。在工程实际中,表面不完整结构占据较大比例。如果能将 CSLDV 测试技术应用至不完整结构的测试当中,即可大幅缩短测试时间,提高振型分辨率。

LIU C H 等^[8]通过选择参考点建立映射关系的方法,将适用于规则矩形的扫描路径变形为非规则形状,此方法侧重于表面完整的结构。

本文针对带圆孔的平板结构,提出了一种基于路径规划和同阶 ODS 归一化为振型的连续扫描激光测振方法。首先保持扫描水平速度和竖直速度的大小不变,规划匀速路径对被测表面进行连续域范围内的完全覆盖。其次,激光沿扫描路径进行多周期测试,采集测点位置、振动响应和激励 3 组时域信号,并针对不同路径幅值导致的同阶 ODS 结果出现量纲持续变化的问题,建立了一种同阶 ODS 归一化为无量纲振型的方法,以实现在短时间内测试获得含任意圆孔平板结构的振型。最后与 SLDV 进行了对比实验,并计算了 MAC 值,从而验证了本文方法的有效性。

1 测试方法

当进行激光连续扫描测试时,测试上位机输出预设路径对应的电压信号至扫描振镜,以实现激光测点连续运动,输出激励信号至功率放大器再到激励设备,以实现定频激励,采集时域上的路径、振动响应和激励电压 3 组数

据以供后续数据处理,测试系统如图1所示。

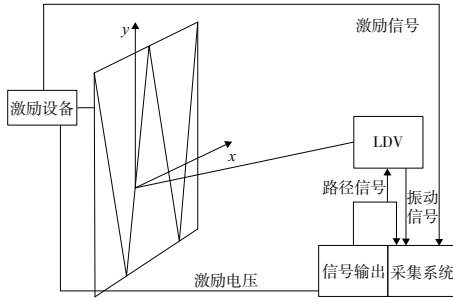


图1 激光连续扫描测试系统示意图

1.1 路径规划方法

不完整被测表面的扫描路径,本质是连续域范围内的遍历式路径。其特点是需要用最短的路径去覆盖被测结构的每个角落。基于测试的完整性要求和完全的覆盖率以及测试的效率要求最小的重复率,提出了一种以恒速直线扫描为基础的扫描路径设计方法,首先将平板结构以圆孔圆心所在直线划分为左右两块,分别根据其对应的边界函数规划得到扫描路径,最后进行衔接。

以左侧区域为例,取以下参数对其进行描述:

$$\begin{cases} \text{圆心坐标} & (x_0, y_0) \\ \text{半径} & r \\ \text{左右边界} & x = x_{\text{left}}; x = x_0 \\ \text{上下边界} & y = y_{\text{up}}; y = y_{\text{down}} \end{cases} \quad (1)$$

其中右侧边界由于圆孔的存在出现了分段的情况,圆孔函数为

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = r^2 \quad (2)$$

在已知纵坐标的情况下,可以通过公式计算得到对应横坐标,则其右边界函数更新为

$$x = \begin{cases} x_0, & y > y_0 + r \text{ 或 } y < y_0 - r \\ -\sqrt{r^2 - (y-y_0)^2} + x_0, & y \in [y_0 + r, y_0 - r] \end{cases} \quad (3)$$

基础扫描方式为恒速直线扫描,一般会在水平和垂直两个方向均利用幅值、频率等生成三角波的方法得到路径,从而两个方向上的匀速运动可以合成为恒速扫描。但路径幅值的变化会导致速度发生变化,同时扫描路径的数据精度以及速度合成过程中所用的勾股定理,均会产生一定的误差,导致保持速度不变难度增加,对路径规划提出了一定的限制。

因此首先根据整体区域长宽比例以及测试频率需求等确定测试参数,利用式(1)中的边界生成三角波,获取两个方向上的分速度 v_x 和 v_y , 垂直方向三角波保持不变,在水平方向出现幅值持续变化,保证其水平分速度大小恒定的条件下,持续性地左右往返式运动。此情况下路径斜率 k 满足

$$k = \pm \frac{v_y}{v_x} \quad (4)$$

此方法避免了精度问题导致的速度变化,保证了扫描速度的恒定,同时也保证了100%的覆盖率和0%的重复率。

1.2 数据后处理方法

当被测结构受到频率为 ω 的定频正弦激励时,由于采用了单个激光测试模块,因此只能获得垂直于激光射出方向的二维平面振型结果,所以结构的任意位置 (x, y) 处平行于激光光路方向的速度响应为

$$v_{\text{test}}(x, y, t) = V_R(x, y) \cos \omega t + V_I(x, y) \sin \omega t \quad (5)$$

式中: V_R 为实部振动分量; V_I 为虚部振动分量,均与激励水平有关。

针对所采用的匀速直线路径,激光点在 x 和 y 方向的速度大小均为恒定值,水平速度的方向变化规律性较弱,但扫描速度始终一致:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

因此,激光测点所在位置与时间具有确定的函数对应关系,即

$$(x, y) = f(t) \quad (7)$$

将式(7)代入式(5),得

$$v_{\text{test}}(t) = V_R(t) \cos \omega t + V_I(t) \sin \omega t \quad (8)$$

可以看出连续扫描测试采集的时域速度信号是调制信号,其包络即为沿着扫描路径的 ODS。为了处理得到振动变形,将 v_{test} 分别乘以激励频率下与激励同向和正交的简谐信号:

$$\begin{cases} v_z \cos \omega t = V_R(t) \cos^2 \omega t + V_I(t) \sin \omega t \cos \omega t = \\ \frac{V_R(t)}{2} + \frac{V_R(t)}{2} \cos(2\omega t) + \frac{V_I(t)}{2} \sin 2\omega t \\ v_z \sin \omega t = V_R(t) \cos \omega t \sin \omega t + V_I(t) \sin^2 \omega t = \\ \frac{V_I(t)}{2} + \frac{V_R(t)}{2} \sin 2\omega t + \frac{V_I(t)}{2} \cos 2\omega t \end{cases} \quad (9)$$

虚部和实部振动分量均可通过滤除高频成分获得。

将采集时域上的激光测点位置、激励信号和速度响应信号处理得到 ODS 的过程中,主要包括测试延迟初步处理、虚部最小化、低通滤波、延迟点优化和归一化等步骤。

当开始测试时,由于信号传输延迟、机械惯性等原因,导致时域信号的初始阶段会存在一段无效信号,同时也破坏了速度信号与路径在时域上的联系,测试延迟初步处理的核心目标为去除测试开始阶段没有规律性的部分,一般舍去第一个或者前两个测试周期内的所有时域数据,如果仍呈现非周期性,则可以舍去更多的周期数。

在初步处理后即可代入式(9)进行低通滤波得到实部和虚部振型。由于本次实验采用结构为小阻尼结构,因此可以使用虚部最小化原则进行处理得到实部振型结果。通过舍去完整周期的方法去除了显著的测试延迟,但是其对应关系仍未得到恢复,此时路径极值与振幅极值发生了微小错位,索引路径信号的最大值,序号记作 n_0 , 分别向增大和减小的方向逐个点进行搜索,判定条件为与振幅最大值重合,即其与前一个点或者后一个点之间存在一个0值,采用0值左右异号的定理来判定:

$$\begin{aligned} & [x(n_0+i) - x(n_0)][x(n_0+i+1) - x(n_0)] < 0 \text{ 或} \\ & [x(n_0-i) - x(n_0)][x(n_0-i-1) - x(n_0)] < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

基于孔附近的水平幅值持续变化,此时得到的 ODS 结果会存在持续变化的振幅量纲,导致 ODS 结果表面出现跳跃,孔附近的振幅之间无法对应,因此需要在完成上

述一般化处理后进行归一化,以将不同振幅基准的 ODS 结果变成无量纲的振型结果。若基于表面连续性原则对每种路径幅值均进行人为参与,工作量过大,且难以保证准确性;若利用相位进行辨识,路径幅值连续变化,区域间相互混杂,难以实现。本文提出了一种同阶归一化的方法:

1) 在一侧区域内选择一个规则矩形区域,涉及所有不同路径幅值的周期,对其进行连续扫描测试获得其各阶振型;

2) 在各周期中至少选择两个间距较大的测点,且所选测点均在第一步所测区域内,并将所选测点在第一步所得振型结果中进行插值,得到对应的振幅;

3) 通过一次函数 $y=kx+b$ 构建所选测点原振幅和插值振幅之间的函数关系,并利用所构建函数中的系数 k 和 b 对所在周期所有测点进行处理。

另一侧处理步骤相同,ODS 结果归一化后即所需模态振型结果。

2 实验验证

选择一个包含圆孔的平板结构展开实验,材料为 304 不锈钢,长 200 mm,宽 80 mm,厚度 3 mm,以平板的中心为坐标原点,圆孔的圆心坐标为 $(-5, 35)$,半径为 25 mm。通过夹板的方式将其固定于底座支架,即一端固支,测试时实验装置如图 2 所示。



图 2 测试时实验装置

2.1 与 SLDV 对比试验

利用商业扫描式激光测振仪 Polytec-PSV-400 进行离散点扫描式激光测振,获得其各阶模态的固有频率及振型,其中频率用于后续连续扫描测试的定频正弦激励,振型用于评价 CSLDV 测试结果。

激励方式选择声激励,基于最优激励点选择结果以及不影响激光光路的要求,激励点选在结构顶部一侧,喇叭置于后方且不接触被测结构。在平板表面共布置 $9 \times 17 - 9 = 144$ 个测点,分析频率 1500 Hz,采用单输入多输出的模态分析方法,共测得 4 阶模态,固有频率如表 1 所示。

表 1 前 4 阶固有频率表 单位:Hz

阶次	固有频率
1	66.88
2	309.38
3	339.06
4	861.88

进行 CSLDV 测试时,保持边界条件和激励方式不变,首先规划路径,沿 $x=-5$ 分成左右两份后分别规划,结果如图 3 所示,将两部分首尾相连进行拼接,即可得到半个周期的路径,再原路返回,即为一个周期。

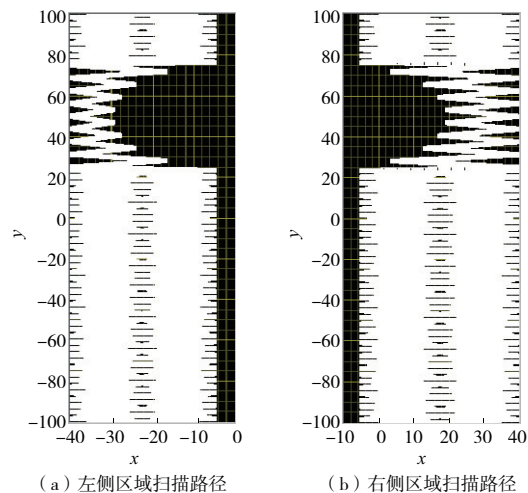


图 3 左右两部分路径规划结果

在处理得到 ODS 结果后,选择作为基准的规则矩形区域如图 4 所示。

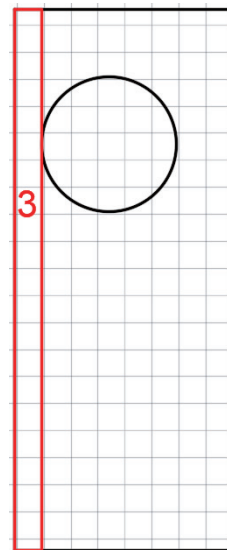


图 4 左侧区域的基准矩形区域

2.2 结果及分析

SLDV 测试振型结果和连续扫描测试结果进行对比分析如图 5 所示。将本文所提以路径规划和同阶振型归一

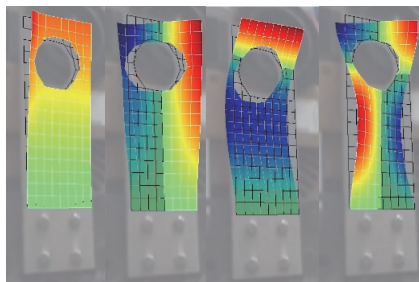
化为主的连续扫描测试方法与 SLDV 测试相比结果如下:

1) SLDV 测试所用时间与测点数目成正比, 144 个测点, 每个测点需要测量 3 次取平均值以减小偶然误差的影响, 每次测量均需花费 6.4 s, 则共需约 46 min, 本文所提方法每阶振型均需测量 3 次, 每次 10 个周期, 测 4 阶振型则共需约 16 min, 明显缩短了测试时间;

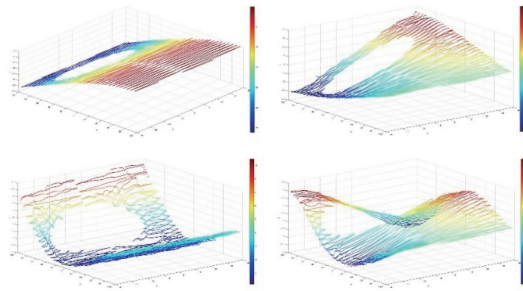
2) 对于圆孔附近的振动情况, SLDV 测试一般采用多边形拟合的方式进行测量, 仅有几个测点在其附近, 难以

很好地反映孔附近的振型, 如果在孔附近密集化布置测点, 则会导致所需时间按比例增加, 而本文所提方法分辨率很高, 且边界平滑, 可以很好地对孔附近进行贴合;

3) SLDV 振型结果仅测点位置为实测数据, 其余区域均为拟合或插值等方法获得, 对于规则区域影响不大, 但是对带孔结构, 容易产生较大的误差, 而本文所提方法, 测点数量极大, 振型结果均由实测获得, 很好地避免了因局部缺少测点导致的误差。



(a) SLDV 测试振型结果



(b) 连续扫描测试结果

图 5 连续扫描测试与 SLDV 测试振型结果

本文所提方法振型结果与 SLDV 测试结果的相关分析如图 6 所示, MAC 值均在 0.94 以上, 证明该测试方案具有很高的准确性。

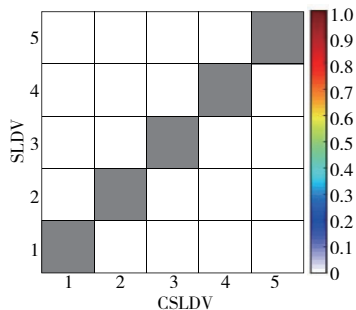


图 6 连续扫描测试与 SLDV 测试振型 MAC 值

3 结语

本文所提基于匀速路径规划和同阶 ODS 归一化为振型的连续扫描测振方法, 实现了带有任意圆孔平板结构的振型测试。首先通过控制扫描水平速度和垂直速度大小不变, 保证了扫描过程中的匀速, 在此前提下规划完全覆盖被测区域的扫描路径并进行测试, 然后对所采集的时域数据进行处理, 包括了延迟处理、虚部最小化、低通滤波、延迟点优化以及 ODS 归一化, 最后以带有圆孔的平板结构为例, 进行了连续扫描测试, 并与 SLDV 测试结果进行了对比, MAC 值均高于 0.94, 同时极大缩短了测试时间, 与

SLDV 相比缩短了 65.2%, 表明了本文所提方法可以高效获取可靠的高分辨率带圆孔结构的振型。

参考文献:

- [1] STANBRIDGE A B, EWINS D J, KHAN A Z. Modal testing using impact excitation and a scanning LDV[J]. Shock and Vibration, 2000, 7: 527389.
- [2] 陈香, 臧朝平, 朱靖, 等. 基于 SLDV 技术的薄壁机匣三维全场模态测试方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(2): 274-281.
- [3] SRIRAM P, CRAIG J, HANAGUD S. A scanning laser Doppler vibrometer for modal testing[J]. Engineering, 1990, 5: 155-167.
- [4] SRIRIAM P, HANAGUD S, CRAIG J. Mode shape measurement using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. Physics, 1992, 7(3): 169-178.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LIU C H, ZANG C P, ZHOU B. Extension of continuous scanning laser Doppler vibrometry measurement for complex structures with curved surfaces [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3220-3227.

收稿日期: 2022-04-11