

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.04.009

恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法

宋安平¹ 臧朝平¹ 张忠²

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016;

2. 北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京, 100076)

摘要:介绍了一种恒速直线面扫描方式下的连续扫描激光多普勒测振(Continuous scanning laser Doppler vibrometry, CSLDV)方法。该方法在扫描多普勒测振系统的基础上,通过控制激光头两个相互垂直的扫描镜连续恒速运动实现激光点在被测平面连续扫描测试。本文阐述了恒速直线面扫描连续激光多普勒测振的基本理论,以及测试信号处理过程中的延迟去除和振型解调中的滤波器选择、坐标变换等内容,并以平板结构为例完成了连续激光多普勒测振实验及数据分析方法的验证,采用最小化虚部振型的方法解调了测试工作变形。结果表明,由恒速直线面扫描测试获得的工作变形与相应模态振型十分接近,可以作为空间分辨率很高的振型测试数据。连续扫描激光多普勒测振技术是一种高分辨率振型测试的高效方法,具有十分重要的应用价值。

关键词:激光多普勒测振;恒速扫描;连续面扫描;工作变形

中图分类号:TB53 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2017)04-0511-07

Laser Doppler Vibrometry Method with Uniform Rate Raster Continuous Scanning

SONG Anping¹, ZANG Chaoping¹, ZHANG Zhong²

(1. College of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing, 100076, China)

Abstract: This paper presents a method of measuring area sinusoidal vibration mode shapes using uniform-rate raster scan with continuous scanning laser Doppler vibrometry (CSLDV). In the method, laser point scans continuously on the tested surface at uniform rate by controlling beam-deflection mirrors in LDV. Firstly, basic theories of uniform-rate raster scan with CSLDV are introduced and methods of delay removal, filter choosing, coordinate transformation in operating deflection shape (ODS) demodulation are studied. Then, the process is used on a steel rectangular plate under single frequency sinusoidal excitation and ODS is demodulated. Finally, modal testing is conducted using scanning LDV and the modal assurance criterion (MAC) between tested ODS and tested mode shapes are calculated. The result shows that ODS obtained by the proposed method is very close to the mode shapes and can be used as mode shapes with high spatial resolution. CSLDV is a time efficient method to obtain mode shapes with high spatial resolution and has important application value.

Key words: laser Doppler vibration test; uniform rate scan; continuous raster scanning; operating deflection shape (ODS)

基金项目:国家自然科学基金(51175244, 11372128)资助项目;航天一院高校联合创新基金资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20150201)资助项目。

收稿日期:2016-06-27; **修订日期:**2017-01-18

通信作者:臧朝平,男,教授,博士生导师, E-mail: c. zang@nuaa.edu.cn.

引用格式: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 & Astronautics, 2017, 49(4): 511-517.

机械结构动态特性的设计、测试、优化对其在工程应用中的性能有着重要的意义,获得结构动态特性比较可靠的方法是进行振动测试。目前广泛应用的振动测试方法是在结构表面粘贴加速度传感器,并在结构上布置一定数量的测点进行测试,这种测试方式属于接触式测振方法,此方法将引入传感器附加质量影响,同时,在某些特殊的环境条件下,如高温、高速旋转结构,使用困难。为此,非接触测振技术被提出和采用。目前应用广泛的是基于激光多普勒测振技术的扫描激光多普勒测振系统(Scanning laser Doppler vibrometer, SLDV)。激光多普勒测振的基本原理是激光束照射到被测结构的表面、从振动表面反射时产生多普勒频移,在干涉仪中将反射光与入射光对比分析后获得被测表面沿着激光束方向的速度量。通常扫描式激光测振系统中都有两块相互垂直的扫描镜,用于对结构上布置特定的测点,实现扫描测试功能。

对结构进行密集空间场测试^[1]以获得更全面的振型信息,有助于有限元模型局部误差源识别、结构损伤识别^[2]等应用。空间场测试通常是在几个特定频率下对结构进行密集测点测试,具有较高的振型空间分辨率。商业扫描激光多普勒测振系统可以采用其相应的控制软件在结构表面布置几百甚至上千个测点,但实际应用中进行密集测点测试时将花费大量的时间,测试效率较低。

本文将研究连续扫描激光多普勒测振方法(Continuous scanning laser Doppler vibrometry, CSLDV),以便解决被测结构高分辨率的空间场、高效率的振动测试问题。该测试方法通过控制激光点在结构表面连续扫描,对振动信号进行采集、分析,即可获得扫描路径上的振型信息,其空间分辨率与采样频率、扫描频率有关,可根据需要设置,且测试时间大幅减少,保证高空间分辨率的基础上具有很高的测试效率,相对于扫描式激光多普勒测振仪测试结果,其数据量也大幅减少。

早期的连续扫描激光多普勒测振技术的研究始于20世纪90年代初:Sriram等人通过外置偏转镜实现激光束在结构表面的二维扫描功能^[3-5],并测试了圆盘结构表面的速度分布;其后,Stanbridge和Sriram等在文献[1,3]中总结归纳了连续扫描激光多普勒测振方法的基本理论,描述了恒速及正弦速度扫描、圆线扫描等测试方式及相应的振型解调等内容;相关科研人员利用短直线、小圆线、锥形连续扫描等方式测试了单个测点平动、扭转等多自由度振动响应^[6-8]。经过20余年的发展,连续扫描激光多普勒测振技术已经得到了长足的

发展:Maio^[9]研究了混合单频激励下的连续扫描测振技术,利用固支平板梁验证了方法的有效性,并将该方法应用到了直升机平尾的振动测试中;Weekes等^[10]研究了混合单频激励、任意测试区域、三维工作变形等综合条件下的连续扫描激光多普勒测振技术,并在仿风扇叶片的扭转实验板上做了方法的验证。目前国内关于连续扫描激光多普勒测振技术也开展了一定的研究:赵丽娜等对连续扫描激光多普勒测振方法进行了仿真研究,并将仿真测试数据应用到平板结构的模型修正中^[11]。陈强等实现了正弦速度下的一维直线连续扫描激光多普勒测振方法,并以固支梁为例对方法进行了验证,取得了较好的结果^[12]。李晖等采用单点激光及45°反射镜组建了激光旋转连续扫描测试系统,对固支薄壁圆桶结构进行了模态测试^[13]。本文在扫描激光多普勒测试技术的基础上,研究恒速直线面扫描方式下的连续扫描激光多普勒测振方法的实现,将连续扫描激光测试方法推广到二维结构的测试中,并论述其测试振型解调方法等内容,并以平板试验件为例对该测试方式进行验证。恒速直线面扫描技术振型解调过程是对时域信号的直接处理,因而可对不连续结构进行测试,较正弦速度下的连续扫描测振方式有着更广泛的应用。总体来说,国内对连续扫描激光多普勒测试技术开展的研究仍很少,作为一种新型的密集空间场高效测试技术,对其做深入的研究有着十分重要的意义与工程价值。

1 恒速直线面扫描连续激光多普勒测振方法及其数据处理

1.1 工作变形

一个多自由度系统的振动微分方程可以表示为

$$\mathbf{M}\{\ddot{x}(t)\} + \mathbf{C}\{\dot{x}(t)\} + \mathbf{K}\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中: $\{x(t)\}$ 为多自由度系统各自由度的位移; \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{f(t)\}$ 为多自由度系统的激振力向量。

当多自由度系统受到幅值为 $\{F\}$ 的简弦力激励时,即

$$\{f(t)\} = \{F\}e^{i\omega t} \quad (2)$$

则系统产生简弦响应,即

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (3)$$

式中 $\{X\}$ 为位移响应幅值。将式(2,3)代入式(1)中,可得系统响应为

$$\{X\} = (\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M} + i\omega\mathbf{C})^{-1}\{F\} = \sum_{r=1}^N \frac{\{\phi_r\}^T\{F\}\{\phi_r\}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r\omega_r\omega} \quad (4)$$

式中: ζ_r 为第 r 阶模态下的阻尼比; $\{X\}$ 为系统的受迫响应,也称为工作变形(Operating deflection shapes, ODS)。可以看出系统的工作变形是关于模态参数和激励参数的函数。在单位力激励下当激励频率与结构某阶固有频率接近时,系统的响应就近似为该固有频率下的振型^[2]。

1.2 恒速直线面扫描

匀速直线扫描下 CSLDV 平板测试示意图如图 1 所示。由图 1 可以看出,结构受到频率为 ω 的正弦激励时,其在点 (x, y) 处、 z 方向上的速度响应可以表示为^[7]

$$v_z(x, y, t) = \dot{z}(x, y, t) = V_R(x, y) \cos \omega t + V_I(x, y) \sin \omega t \quad (5)$$

式中: V_R 和 V_I 分别为实部和虚部振动分量,与输入力等参数有关。若激光点在 x, y 方向的分速度都为恒定值,分别记为 v_x, v_y ,则激光点在扫描路径上即为匀速率直线运动。此时 $x = v_x t, y = v_y t$,则振动速度为仅与时间相关的函数,激光测振仪的输出信号为一调制信号,其包络记为扫描路径上的振型。如果将激光测振仪的输出信号分别乘以激励频率下与输入力同相及正交的信号,则有

$$v_z \cos \omega t = V_R(t) \cos^2 \omega t + V_I(t) \sin \omega t \cos \omega t = \frac{V_R(t)}{2} + \frac{V_R(t)}{2} \cos 2\omega t + \frac{V_I(t)}{2} \sin 2\omega t \quad (6)$$

$$v_z \sin \omega t = V_R(t) \cos \omega t \sin \omega t + V_I(t) \sin^2 \omega t = \frac{V_I(t)}{2} + \frac{V_R(t)}{2} \sin 2\omega t + \frac{V_I(t)}{2} \cos 2\omega t \quad (7)$$

若扫描频率相对激振频率较小, $V_R(t)$ 和 $V_I(t)$ 都为低频成分,则式(6,7)中频率为 2ω 的信号成分可以通过数字低通滤波器滤除,以获得实部及虚部振型分量。

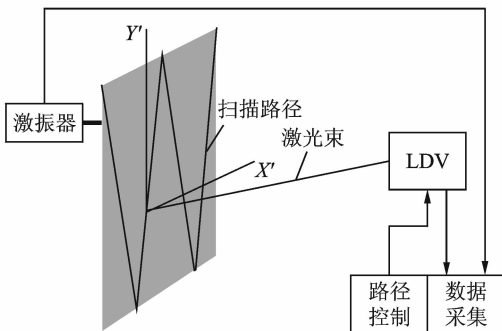


图 1 匀速直线扫描下 CSLDV 平板测试示意图

Fig. 1 Schematic of CSLDV test using uniform-rate raster scan

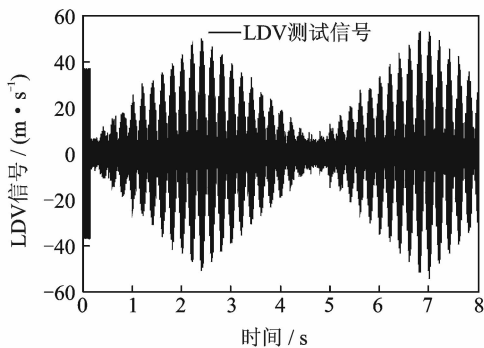
实际应用时由于激励与开始采集的时刻并不同步,很难准确确定采集获得的振动信号及激励信号的初始相位,另一方面,在固有频率下对小阻尼结构进行激励时,激励力常常会失效,使得激励力

信号不能作为振型解调的参考信号。但对于小阻尼结构,其振动响应以实振动为主,虚部响应近似为 0,因此,在实际的振型解调过程中,可以采用最小化虚部的原则:即生成一个激励信号,并调节该激励信号的初始相位,使解调出的虚部振型分量最小,再将调节后的激励信号相移 90° ,解调出实部振型分量。

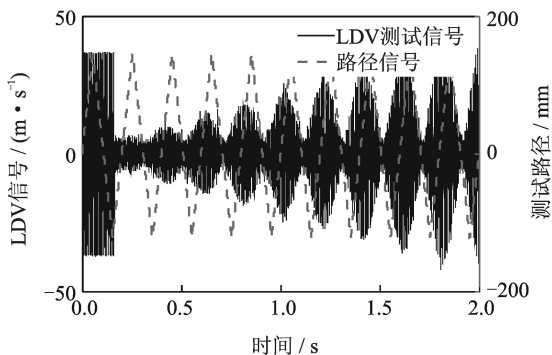
1.3 测试数据处理

1.3.1 测试延迟

匀速直线扫描测试典型的测试信号如图 2(a) 所示,图 2(b) 为匀速直线扫描方式下信号起始段的局部放大图,其中包含扫描路径信号及由 LDV 测试获得的振动速度信号,路径信号已经根据标定结果由电压信号转换为与一定坐标系下平板上位置对应的坐标。注意到测试信号前面有一段幅值不变的信号,这一段信号是由 LDV 激光头的扫描镜的机械惯性造成的,即在路径信号输入到扫描镜驱动电路时,虽然采集系统在同时开始振动速度采集,但扫描镜由于惯性仍未动作,因而在一段时间内采集到的测试信号没有变化,这一段信号称为测试延迟。



(a) Test signal



(b) Partial magnification of test signal

图 2 匀速直线扫描测试信号及起始段局部放大图

Fig. 2 Test signal and its partial magnification drawing

采用恒速直线面扫描方式进行连续扫描激光测振的优点在于测试信号与路径信号是对应的,即测试信号对应于被测结构一定坐标系下的位

置坐标。因此,结合路径信号对测试信号进行解调就可以获得与结构测试坐标相对应的工作变形。但测试延迟使路径信号与测试信号产生了错位,破坏了测试信号与结构坐标的对应关系,所以采用合理的方法去除测试延迟十分必要。图3(a)所示为未去除测试延迟解调获得的工作变形,从图中可以看出工作变形与测试坐标出现了较为严重的错位。去除延迟点后得到的工作变形如图3(b)所示。去除测试延迟基本的方法是将测试信号进行左移,由于不同激励频率及扫描频率下延迟的具体时间都有所差异,延迟的去除需要人为参与,即在数据后处理软件中手动将测试信号手动左移。由于初始测试延迟点的具体数值是无法获得的,实际操作中通过观察信号特征手动左移去除测试延迟的方法无法保证去除的信号延迟为最佳延迟,同样可能出现如图3所示解调获得的工作变形与测试坐标错位的问题,或者存在无法直接观察看出的微小错位,影响测试数据的精度。

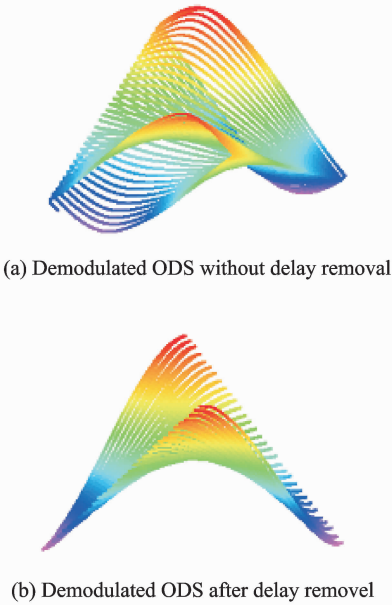
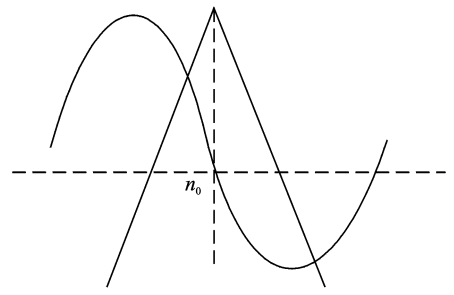


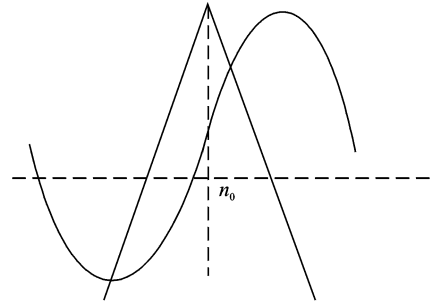
图3 测试工作变形

Fig. 3 Test ODS

为了在手动去除测试延迟后优化出最佳的测试延迟,本文建立了测试延迟优化算法,算法的基本思想是对齐解调后截取的时间段内的扫描频率较高路径信号峰值与工作变形信号极值(极大值或极小值),从而使工作变形信号与路径信号相匹配。手动去除测试延迟之后,工作变形信号的极值与路径信号最大值若有错位则存在如图4(a,b)所示两种位置关系。需要注意的是,手动去除测试延迟之后,这种偏差应该是在很小的范围内,工作变形信号的极值与路径信号的极值较为接近。



(a) ODS extremum on the left of path peak



(b) ODS extremum on the right of path peak

图4 路径峰值与工作变形极值位置关系

Fig. 4 Relationship between path peak and ODS extremum position

进行路径信号与测试信号匹配时,首先确定路径信号的最大值索引,记为 n_0 ,实际过程中不能确定具体的位置关系,因而从路径信号最大值索引 n_0 分别向索引减小和增大的方向搜索,工作变形信号记为 $x(i)$,检验以下判定条件

$$[x(n_0+i)-x(n_0)][x(n_0+i+1)-x(n_0)] < 0 \quad (8)$$

$$[x(n_0-i)-x(n_0)][x(n_0-i-1)-x(n_0)] < 0 \quad (9)$$

式中 $i=1,2,\dots,i_0$ 。当优先满足式(8)条件时,工作变形信号极值在路径信号最大值右侧,索引范围为 $n_0 \sim (n_0+i_0)$;当优先满足式(9)条件时,工作变形信号的极值在路径信号最大值的左侧,索引范围为 $(n_0-i_0) \sim n_0$ 。找出工作变形信号极值索引,记为 n_e ,则需要调整的点为 $n_e - n_0$,移动点的符号满足左正右负的原则。对于截取的工作变形时间段内的每个路径峰值进行匹配,将偏移量取平均值,最终得到总体最优去除延迟的采样点数。

1.3.2 振型解调

如前所述,实际测试结构为小阻尼结构时,对采集到的测试信号进行解调是采用最小化虚部振型的原理使结构虚部工作变形分量最小化,再通过将对应的激励信号相移 90° 来解调实部工作变形,流程如图5所示。这其中十分重要的一个环节是解调工作变形过程中的滤波器选择,数字滤波器具有参数修改灵活、滤波性能稳定可靠的优点,商业

软件中也易找到设计成熟的数字滤波器。本文中采用有限长单位脉冲响应(Finite impulse response, FIR)数字滤波器解调测试振型。该滤波器具有线性相位,滤波后各频率成分产生的相位延

迟相同且可由滤波器参数确定:若设定滤波器抽头数为 n ,则其滤波延迟为 $(n-1)/2$ 个采样点。这样保证了恒速直线面扫描方式下测试信号与扫描路径信号的匹配。

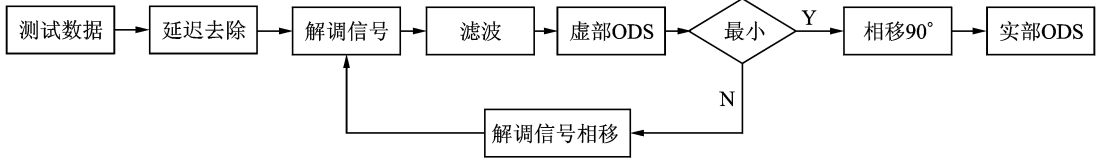


图5 恒速直线连续扫描测试振型解调流程

Fig. 5 Mode shape demodulation process of CSLDV using uniform-rate raster scan

实际测试时,由于激光测振仪激光头的摆放的位置不同,测试坐标的原点可能在平板的任意位置,为方便测试数据的应用,可对测试坐标做简单的变换。假设连续扫描激光测试坐标 $O'x'y'$ 原点在新坐标系 Oxy 中的坐标为 (x_0, y_0) ,则对于任意工作变形的的位置坐标 (x', y') ,变换后的坐标为

$$\begin{cases} x = x_0 \pm x' \\ y = y_0 \pm y' \end{cases} \quad (10)$$

式中:“+”表示坐标方向相同;“−”表示坐标方向相反。坐标变换后,测试获得的工作变形数据即可方便用于有限元模型评价、修正等应用中。

2 平板结构的恒速直线连续面扫描激光多普勒测振分析

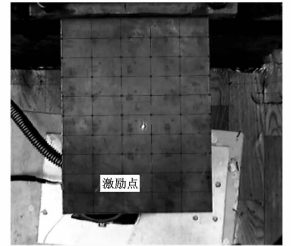
为了验证恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法的有效性,现以平板结构为例,分别采用商用扫描激光多普勒测振(Scanning laser Doppler vibrometry, SLDV)方法与恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法得到的实验及结果进行对比、分析。平板实验装置如图6所示,其中平板一端固支一端自由,固支后尺寸为 $270\text{ mm} \times 205\text{ mm}$ 。由Polytec系统产生的激振信号通过功率放大器后驱动激振器对平板结构进行激振。平板的测点布置如图6(b)所示,其中共有 $11 \times 6 = 66$ 个测点,激励点位于21号测点。

2.1 扫描激光多普勒测振实验及结果

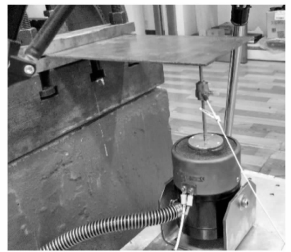
扫描激光多普勒测振技术已较为成熟,其测试具有非接触、高精度的特点,因此,作为评价连续扫描激光多普勒测振测试结果有效性的指标。本次实验采用了Polytec公司的激光测振系统,该系统包含信号发生器、数据采集分析系统等功能,其软件可以完成扫描多普勒测振过程中的测点布置、激励信号产生、数据采集和模态分析等工作。完成测试后,对获得数据进行模态分析,得到平板结构前



(a) Overview of experimental facilities



(b) Measurement points and exciting position



(c) Exciting manner

图6 实验装置与测点布置

Fig. 6 Experimental facilities and measurement points

八阶固有频率及各阶模态阻尼比,如表1所示,其对应的前八阶振型如图7所示。从表1可以看出,各阶模态阻尼比都很小,因此,使用最小化虚部的原则处理连续扫描测试获得的数据是有效可行的。

表1 平板SLDV测试频率与阻尼比

Tab. 1 SLDV testing frequency and damping of clamped plate

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8
频率/Hz	40.80	127.71	251.56	446.02	551.16	705.34	893.44	919.00
阻尼比/%	1.02	0.27	0.59	0.6	0.23	0.49	0.17	0.35

2.2 连续面扫描激光多普勒测振实验及结果分析

2.2.1 连续扫描激光测振测试

将平板的各阶固有频率分别作为激振频率,对平板进行单频正弦激励,设采样率 f_s 为 $4\ 096\text{ Hz}$,激光点在 x 方向扫描频率 f_x 为 0.125 Hz , y 方向

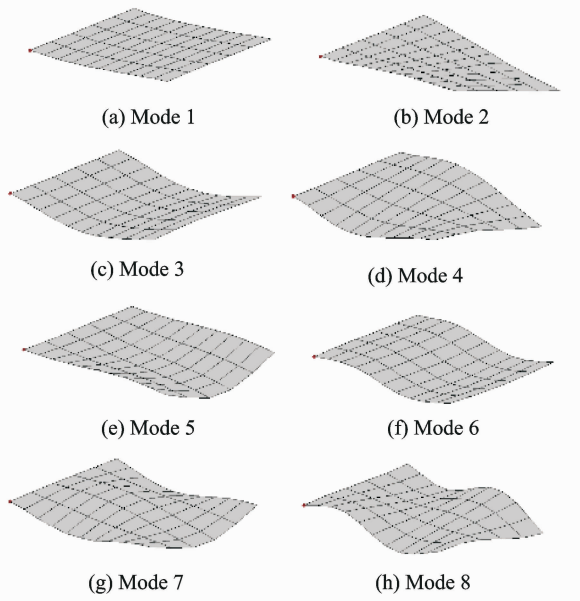


图7 固支平板 SLDV 测试各阶振型

Fig. 7 SLDV testing mode shapes of clamped plate

的扫描频率 f_y 为 8 Hz, 则激光点在平板上完成一次扫描所需时间为 4 s, 即半个 x 方向扫描周期, 此时激光点在 y 方向上完成 32 个周期扫描。一般采集系统采样率 f_s 由于快速傅里叶变换 (Fast Fourier transformation, FFT) 的需要往往设置为 2^m (如 1 024, 2 048, ...), 将扫描频率 f 也设置为 2^m , $m = \dots, -1, 0, 1, 2, \dots$ (如 0.125, 0.25 等) 时, 则对应于路径信号每个周期采样点数为 f_s/f 为偶数, 采样过程可以恰好采集到路径峰值点, 且采样点关于路径信号峰值点对称。将 f_y 与 f_x 设置为成比例的值保证了每个测试周期的重复性, 有时为了获得结构表面更全面的振型信息, 需要将 f_y 与 f_x 设置成不能整除的值。

2.2.2 测试结果及对比分析

对恒速直线面扫描方式下连续激光多普勒测振技术测试采集获得的数据进行分析, 得到各阶测试振型如图 8 所示。这里采用模态置信准则 (Modal assurance criterion, MAC) 将连续扫描激光测试工作变形与平板振型进行相关分析, 以表明将连续扫描测试获得的工作变形作为平板振型的可行性。MAC 值的计算公式为

$$\text{MAC} = \frac{(\psi_S^{(r)\top} \psi_C^{(r)})^2}{(\psi_C^{(r)\top} \psi_C^{(r)})(\psi_S^{(r)\top} \psi_S^{(r)})} \quad (11)$$

式中: $\psi_S^{(r)}$ 表示由离散点扫描测试获得振型; $\psi_C^{(r)}$ 表示由连续扫描测试获得工作变形。

图 9 为由恒速直线连续扫描测试工作变形与平板振型的相关图, 表 2 为各阶具体的 MAC 值, 从中可以看出各阶测试振型的 MAC 值都在 97% 以上, 表明连续扫描激光多普勒测振获得的工作变

形与平板振型十分相似, 可以作为平板结构空间分辨率很高的振型。

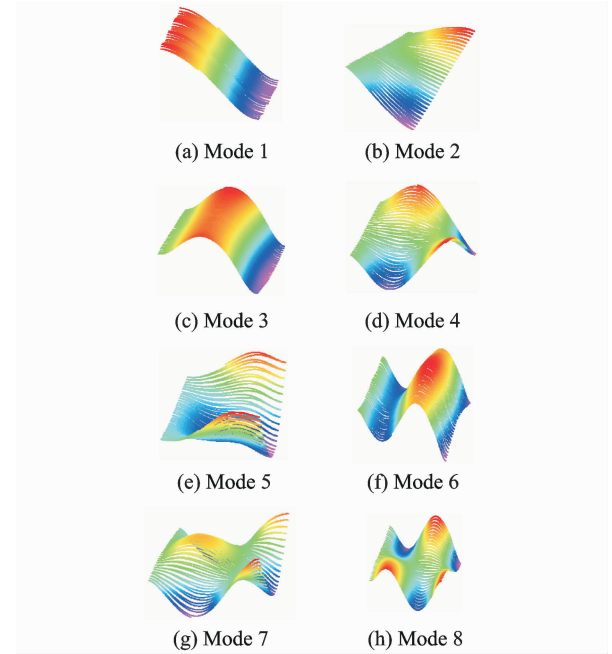


图8 恒速直线面扫描测试振型

Fig. 8 Mode shapes of CSLDV test

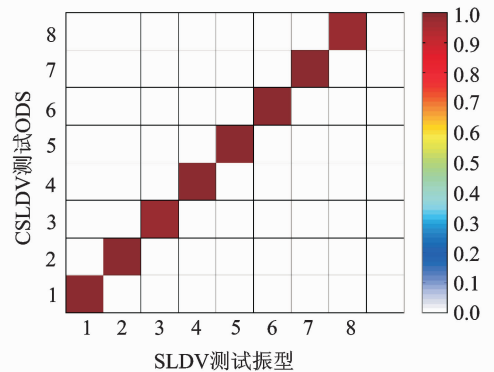


图9 测试工作变形与平板振型相关图

Fig. 9 MAC between CSLDV testing ODS and mode shapes

表2 平板 CSLDV 测试 ODS 与振型 MAC

Tab. 2 MAC values between CSLDV testing ODS and mode shapes

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8
MAC/%	99.43	99.49	98.34	99.55	99.34	99.07	99.42	97.70

恒速直线面扫描方式下的连续扫描激光测试中, 当 x 方向的扫描频率小于 y 方向的扫描频率时, 将 x 方向的空间分辨率 Δx 定义为三角波路径信号波峰之间的距离, y 方向的空间分辨率 Δy 定义为扫描线上两个采样点之间的距离, 则

$$\Delta x = \frac{2l_x f_x}{f_y}, \Delta y = \frac{2l_y f_y}{f_s} \quad (12)$$

式中: l_x, l_y 分别为 x 方向和 y 方向的测试范围; f_x, f_y 分别为 x 方向和 y 方向的扫描频率; f_s 为

信号的采样率。

将本文实验中平板结构尺寸及扫描测试参数代入式(12)中计算可得 $\Delta x \approx 6.41 \text{ mm}$, $\Delta y \approx 1.05 \text{ mm}$, 平板上的测点数为 $f_s/(2f_x) = 16\ 384$ 个测点,若以每阶模态测试时重复扫描两个周期计算,前八阶模态总的测试时间为 128 s 。而采用扫描式激光多普勒测振仪进行测试时若要使测试空间分辨率达到 6.41 mm ,则需要布置的测点网格密度为 $32 \times 42 = 1\ 344$ 个测点。当频率范围设置为 $1\ 000 \text{ Hz}$,谱线数取 $1\ 600$ 时,测试的频率分辨率为 0.625 Hz ,每个点的测试时间为 1.6 s ,则完成一次测试总的的时间接近 36 min ,若计及多次平均和激光点在测点之间切换、稳定等时间,这一测试时间将更长。由此可以看出,恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法有着极高的测试效率。

3 结 论

(1)本文研究了恒速直线连续面扫描激光多普勒测振及相应的数据处理方法,介绍了测试延迟去除及优化的算法,振型解调中滤波器选择、振型解调等内容,并对悬臂平板进行了连续扫描激光振动测试与分析,测试结果与离散点激光测试结果对比表明,该方法可以快速、准确地测试平板光滑的振型,且能极大提高测点的空间分辨率,具有重要的工程应用价值。

(2)本文所提连续扫描激光多普勒测试方法仍处于初步的研究阶段,未对测试过程中的散斑噪声等问题作更深入的研究,以进一步提高测试的准确性。另一方面,对于复杂结构的连续扫描激光多普勒测振方法的实现也有待进一步研究。

参考文献:

- [1] STANBRIDGE A B, MARTARELLI M, EWINS D J. Measuring area mode shapes with a scanning laser Doppler vibrometer[J]. Proceedings of IMAC XVII, 1999,3727:980-985.
- [2] 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:[s. n.], 2009.
- [3] SRIRAM P, HANAGUD S, CRAIG J, et al. Scanning laser Doppler technique for velocity profile sensing on a moving surface[J]. Applied Optics, 1990, 29(16):2409-2417.
- [4] SRIRAM P, CRAIG J I, HANAGUD S. A scanning laser Doppler vibrometer for modal testing[J]. International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1990,5:155-167.
- [5] SRIRAM P, HANAGUD S, CRAIG J. Mode shape measurement using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1992,7(3):168-178.
- [6] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Measurement of translational and angular vibration using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1994,2358(2):37-47.
- [7] 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.]: International Society for Optics and Photonics, 1996:126-136.
- [8] SALMAN M, SABRA K G. Broadband measurement of translational and angular vibrations using a single continuously scanning laser Doppler vibrometer [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012,132(132):1384-1391.
- [9] MAIO D D, EWINS D J, MAIO D D, et al. Continuous Scan, a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters: Part I[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(25):3027-3042.
- [10] WEEKES B, EWINS D. Multi-frequency, 3D ODS measurement by continuous scan laser Doppler vibrometry[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015,58/59:325-339.
- [11] 赵丽娜,臧朝平. 连续扫描激光多普勒测振修正结构有限元模型的方法研究[C]//中国力学大会——2011暨钱学森诞辰100周年纪念大会. 哈尔滨:中国力学学会,2011.
- [12] ZHAO Lina, ZANG Chaoping. Structural model updating method using continuous scanning laser Doppler vibrometry[C]//Chinese Mechanics Conference 2011 and the 100th Anniversary of the Arrival of Qian Xuesen. Harbin: Chinese Society of Mechanics, 2011.
- [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.
- [14] 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.
- [15] 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的测试新方法[J]. 振动与冲击, 2014,33(16):156-159.
- [16] LI Hui, SUN Wei, XU Zhuo, et al. Experimental method of laser rotating scanning to measure mode shapes of constrained thin cylindrical shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(16):156-159.

