

文章编号: 1001-4888(2024)04-0389-10

LDV 辅助下的全场振动测量(1): 3D-DIC 测量分辨率提升方法*

傅愉¹, 翁纯洁¹, 郜泽仁¹, 陈冰¹, 韦宇晨¹, 缪泓², 于起峰^{1,3}

(1. 深圳大学 物理与光电工程学院 深圳大学智能光测研究院, 广东深圳 518060; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027;
3. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 进入 21 世纪之后, 随着计算机处理能力的快速提升, 基于高速相机的三维数字图像相关 (3D-DIC) 测振技术开始逐步被应用于不同的科研和工程领域。其优点是能够实现全场振动测量, 对测量环境的要求比较低, 但在时间采样率和测量分辨率上无法满足大部分的振动测量需求。另外一类成熟的振动测量方法是基于单像素光电探测器的激光多普勒测振技术 (LDV), 这类基于干涉的测量技术具有极高的时间采样率和测量分辨率, 测量时对隔振要求也不高, 但主要的问题是在空间域上只能实现单点或者少量稀疏点的测量。激光多普勒测振技术在应对稳态振动时, 虽然可以采用扫描的方式, 但受限于设备的光学景深, 扫描范围非常有限, 其空间采样率远不如基于图像的方法。本文提出了一种新型的振动测量方法, 即利用 LDV 辅助 3D-DIC 实现全场振动测量, 利用两者各自在测量分辨率和全场测量上的优势, 从硬件和数据处理两个方面提升全场 3D-DIC 的振动测量分辨率, 由特征尺寸的 10^{-4} 量级提升至 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 量级。所提方法在采用普通帧率相机和没有隔振措施的情况下仍然可以实现干涉量级的全场振动测量, 满足大部分结构振动测量的需求。

关键词: 振动测量; 数字图像相关; 全场测量; 激光多普勒测振技术

中图分类号: O329 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-24-066

0 引言

振动是造成设备、结构和零部件失效乃至恶性破坏的一个重要因素^[1-2], 因此, 振动始终是各类重大装备和工程在设计 and 健康监测阶段需要考虑的关键问题。随着重大装备朝向轻量化、大型化、复杂化及多功能化发展, 其结构也由简单的板、壳和梁等逐渐发展为材料复合、几何形状不规则和边界条件非常规的结构^[3]。模态分析是研究结构动力学特性的一种经典方法, 由于计算模型同实际结构在边界条件 (比如螺栓、焊缝等)、材料系数以及几何参数等方面存在一定差异, 因此实验模态分析^[4] 是重大装备和工程结构动力学分析必不可少的手段。通过实验模态分析, 可以清楚了解结构在易受影响的频率范围内各阶主要模态特性, 获得频响函数的空间分布, 预判结构在不同内外振源作用下实际的振动响应。在普通稳态振动测量中, 振幅和频率是最基本的参数。由于振型既是模态阶数的函数, 又是结构位置的函数, 这就需要振动测量涵盖不同的频率和不同的空间点, 相应的动力学测试需要满足“全场”“宽频”和“高精度”的需求。目前尚未有一种振动测量方法能同时满足这些需求。

* 收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12102423); 深圳市科技创新委员会项目 (20231120175055001); 深圳大学专项项目 (2023YQ011)

通信作者: 郜泽仁 (1992-), 男, 博士, 副研究员。主要研究领域: 光测实验力学。Email: gaozeren@szu.edu.cn

随着 20 世纪 60 年代激光技术的发明,以及全息干涉^[5]、散斑^[6]、剪切散斑^[7-8]等一系列干涉计量方法的出现,将力学变化量(变形、位移等)的测量分辨率提高至光的波长量级,即微米至亚微米水平。在振动测量领域,首先出现的是基于积分成像的时间平均法,主要包括针对离面振动测量的数字全息(Digital Holography)^[9]、电子散斑干涉(ESPI)^[10],以及针对应变测量的数字剪切散斑干涉(DSSI)^[11]。这类方法不具有时间轴信息,且对测量环境要求较高,实验系统复杂,难以在工业界应用。同样受制于测量环境问题的还有 20 世纪末出现的时间序列干涉测量方法。随着高速相机技术的发展,科学家们将高速相机与各类光学测量方法相结合,逐步实现了时间-空间三维光学动态测量^[12]。然而,高速相机的帧率依然是制约图像方法在动态测量中应用的主要因素,这是由于为了实现时间轴上完备的测量,相机的帧率必须满足干涉测量的采样定理,即任意两个采样点之间的干涉信号的相位变化不超过 $\pi/2$,这限制了振幅测量范围且对高速相机的帧率提出了极高的要求。

20 世纪末,出现了以激光多普勒测振(Laser Doppler Vibrometer, LDV)^[13]为代表的基于光电探测器的点干涉测量方法,该方法采用面积较大(如直径 1mm)的单像素光电探测器,具有强抗干扰能力、高时间分辨率及高测量精度,可准确测量振动物体的位移、速度和加速度,目前已成为主流的非接触振动测量方法。如今,LDV 技术已经非常成熟,德国 Polytec 公司开发的单点 LDV 可实现 25MHz 的测量频率和亚纳米级的位移分辨率,满足几乎所有的高动态响应的采样率和测量精度需求,但其缺点是只能针对单一空间点进行测量,无法实现全场测量。为了改善 LDV 技术空间采样率低的劣势,研究者开发出了多点 LDV 技术^[14],但仍只能实现少量稀疏点的测量,无法满足复杂结构的全场测量需求。针对结构稳态振动,扫描型激光多普勒测振技术(SLDV)被提出^[15],尽管 SLDV 理论上最高扫描点数可达 512×512 ,但超长的测量时间使高空间采样率难以实现(以 1 秒钟测量一个点计算,全场扫描需要 3 天时间)。连续扫描型多普勒测振法(CSLDV)是在线性结构稳态振动测量中兼顾时间和空间采样的一种方法^[16],让激光点在结构表面以正弦变化的速率做往返运动,通过解调扫描路径上工作变形调制的振动正弦信号,建立多项式拟合的系数与振动信息和频域信息之间的关系,最终通过拟合得到工作振型。CSLDV 在国外起步较早,发展较为成熟,已实现了梁、板、圆盘、叶片^[17]和圆筒结构^[18]的连续扫描测试。CSLDV 在测量上也有很大局限,由于扫描过程中光学镜头不能调整,测量距离的变化受限于镜头景深,导致被测物体尺寸受限,若增大测量距离以扩大景深又会降低分辨率和精度。此外,CSLDV 的扫描路径规划复杂,通常不被工业界接受。

随着计算机处理能力的快速提升,基于高速相机的三维数字图像相关(Three Dimensional Digital Image Correlation, 3D-DIC)测振技术^[19]逐步应用于不同的科研和工程领域。例如,朱魁章等^[20]利用 DIC 系统获得了斯特林制冷机振动的全场三维变形。王述良等^[21]利用 3D-DIC 技术测试了导线气弹模型的跨位移时程,得到了导线风致位移的变化规律与概率分布特性。潘济宇等^[22]使用 3D-DIC 系统测量了不同水速和转速下螺旋桨的三维变形。DURAND-TEXTE 等^[23]利用高速相机与常规相机组成的立体视觉系统,实现了用一个高速相机测量曲表面振动。SEO 等^[24]利用 3D-DIC 系统测量爆破引起的岩柱位移和振动,验证了 DIC 方法和高速摄像机结合在井下采矿中的适用性。BARONE 等^[25]利用单个普通相机和两个平面镜建立立体视觉系统,并通过降采样克服帧速率限制,实现了高达 4kHz 的三维全场稳态振动测量。MASTRODICASA 等^[26]利用 3D-DIC 系统测量风力涡轮机叶片的三维变形,验证了 DIC 在旋转结构上进行模态分析的准确性。3D-DIC 的优点是能实现全场振动测量,但其最大问题是振幅测量分辨率在普通视场下仅可达特征尺寸的 10^{-4} 量级,这对于一般振动工作变形测量来说远不够。此外,由于数据传输和存储上的瓶颈,高速摄影系统的动态范围和空间分辨率随着帧率的提高而显著下降,进一步降低了测量分辨率。

为此,本文提出一种 LDV 辅助的全场 3D-DIC 振动测量方法,结合点测量的 LDV 技术和面测量的 3D-DIC 技术^[27-28],实现两者各自在测量分辨率和全场测量上的优势互补。在硬件上,通过光学上同步和导引,将两者在信号采集阶段融合,实现测量数据的时空对应。在数据处理上,同时利用 LDV 测得的频谱信息,对 3D-DIC 数据进行时间和空间优化,最终在非隔振条件下实现全场高精度稳态振动测量。

1 LDV 和 3D-DIC 测振的原理和特点

激光多普勒测振仪(LDV)是一种基于多普勒效应的高精度非接触式测量工具,专用于测量物体表面的振动速度和位移。该技术不会对被测对象产生任何干扰。LDV 工作原理是测量投射至振动物体表面激光束回光的频率偏移,物体表面向激光源移动时反射光频率增加,远离激光源时频率减少。LDV 内的干涉仪可以使得物光与参考光干涉形成干涉信号,干涉信号被记录在单像素光电探测器上。干涉信号的频率变化与振动速度成正比,通过对干涉信号进行细致分析,可以准确测得物体表面的振动速度和位移,进而获取详细振动参数。此外,LDV 测量具有以下特点:

(1)由于采用单像素光电探测器,LDV 主要适用于单点或少量稀疏点的振动测量。

(2)光电探测器的较大面积(例如直径 1mm)减少了环境噪声对测量信号的影响,允许在无隔振措施的情况下进行测量。尽管环境噪声可能会影响测量结果,但可以通过频谱滤波有效去除。

(3)光电探测器上形成的一维信号提供了高时间分辨率和振动测量分辨率,使 LDV 结果相较于图像测量更为精确,也可以作为图像处理中的一个先验信息。

(4)尽管可以通过扫描型 LDV 或连续扫描型 LDV 进行稳态振动测量,但由于需要在二维空间进行长时间扫描或规划复杂的路径,且扫描过程中无法调整镜头焦距,这在实际应用中带来了局限性,有时会导致非理想的测量结果。

全场振动测量是 3D-DIC 方法的一种重要应用,通常利用双目相机进行。其基本原理是从两个或更多不同视角拍摄带有散斑的物体图像,通过分析不同视角下的图像,可以精确地计算出物体表面点在三维空间中的位置。此过程涉及提前标定物理空间与像素坐标之间的映射关系以及多个相机之间的位姿关系,进而可以对物体表面在不同时刻的三维坐标及位移场进行解算。3D-DIC 测量离面位移的分辨率受多种因素影响,包括双相机之间的位姿关系、照明以及散斑质量等。除了这些已有明确优化方案的参数外,相机自身的参数如像素分辨率、动态范围以及电子噪声大小也是重要的考虑因素。在静态测量应用中,3D-DIC 通常能达到 0.01pixel~0.1pixel 的离面位移分辨率,这意味着使用 1k×1k 相机测量 100mm×100mm 尺寸物体时,离面位移的分辨率约为几微米。高速相机的空间分辨率、动态范围及电子噪声水平相较于普通帧率相机有所不及。此外,动态模糊和相机同步性等问题的影响会进一步降低其离面测量的分辨率。这样的位移测量分辨率对于通常的振动测量是不够的,以振动模态测量为例,尤其是高阶振动模态,这些模态在空间上存在大量离面位移为零的节点,以及节点附近离面位移非常小的区域,3D-DIC 在这些区域的测量分辨率不足,因此在基于高速相机的 DIC 系统中,尽管能提供全场测量,其在时间采样率和离面位移测量分辨率方面的表现仍然不足。这些限制因素局限了 3D-DIC 在振动测量领域的应用。

2 LDV 和 3D-DIC 的硬件融合和同步采集

由于 LDV 和 3D-DIC 在振动测量上各自的优势和劣势具有互补的特点,本文提出了一种在单点 LDV 辅助下的 3D-DIC 全场振动测量方法。这种方法要求在测量过程中实现单点 LDV 和 3D-DIC 的硬件底层融合。所提方法利用 LDV 提供的高精度振动信息作为 3D-DIC 测量的先验信息,以稳态振动测量为例,可以根据 LDV 提供的振动相位,在设定的不同相位点上同步触发频闪照明和相机采集。图 1 为这种融合方法的流程和示意图。以下是这种融合方法的优势:

(1)在使用两个相机进行 3D-DIC 振动测量时,尤其是当这些相机为普通帧率型时,即使输入相同的触发信号,也可能由于各自内置的时钟晶振存在微小差异,导致相机采集不同步的问题。为解决这一同步问题,本文采用了频闪照明的技术,其关键在于频闪的时宽远小于相机的曝光时间。这种频闪照明技术可以在光学层面上实现多相机的有效同步。当频闪灯触发时,发出的光照时长极短,但光强足以在相机的曝光周期内清晰成像,从而保证两台相机在几乎相同的时间内捕捉到图像,实现同步拍摄。图 2 中展示了这一同步采集策略的触发示意图。由于频闪的照明时长远短于相机的曝光时间,这确保了在任何给定的触发周期内,两台相机都能在频闪照明期间内捕获到图像。这种方法不仅提高了测量的可

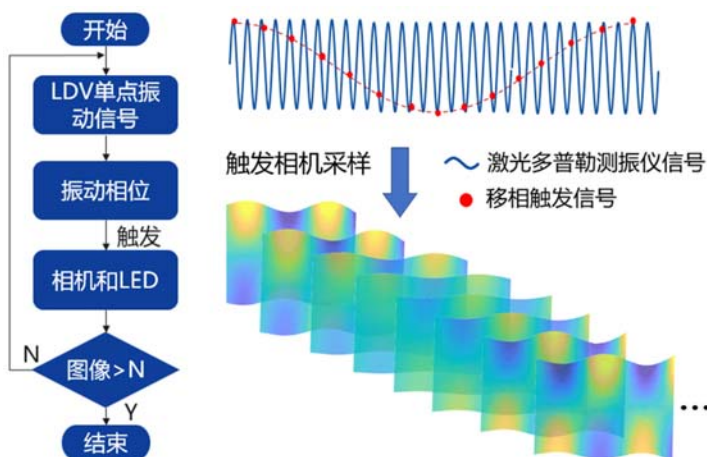


图1 3D-DIC采集的流程图和示意图

Fig. 1 3D-DIC acquisition flowchart and schematic layout

重复性,还增强了动态测量的准确度。此外,利用频闪照明还可以降低环境光的干扰,增强散斑图案的对比度,从而提高3D-DIC系统的图像质量和后续数据处理的精度。通过这种同步策略,可以有效地克服由相机自身的时钟偏差所带来的挑战,优化整个测量系统的性能。

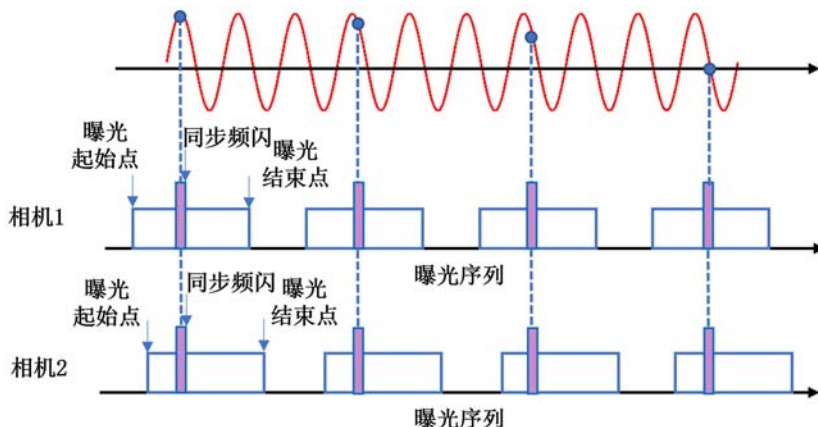


图2 3D-DIC普通帧率相机触发同步采集示意图

Fig. 2 Diagram of 3D-DIC trigger and synchronization using normal-rate cameras

(2) 采用具有足够窄的频闪时宽和高能量输出的频闪灯,可以使普通帧率的相机有效采集高频稳态振动,同时避免因物体振动引起的动态模糊,实现高频振动的降采样采集策略。这种方法允许使用普通帧率相机替代高速相机,从而摆脱了高速3D-DIC测量频率范围受到采集帧率限制的问题。此外,普通帧率相机相比高速相机,具有更高的空间分辨率(像素数)、更高的动态范围以及更低的电子噪声,这些硬件优势可以在一定程度上提升3D-DIC的测量分辨率。

(3) 扫描激光多普勒测振系统(SLDV)通过一个激光点在二维空间(x, y)上扫描工作。以Polytec的最新扫描型激光多普勒测振系统为例,理论上可以扫描最多 512×512 个点。然而,实际上扫描时间较长,假设频率分辨率达到1Hz,则每个点需要扫描1秒钟,总共 512×512 个点需要大约72.8小时,这种扫描策略在实际应用中并不合理。相比之下,本文提出的方法采用二维图像沿一维时间轴进行扫描,假设每秒钟采集左右相机的10对图像,一个振动周期采20个点,连续采集100个振动周期,总耗时约200秒。这种策略显著减轻了数据存储和传输的压力,使得测量过程更加高效合理。

(4) 尽管成本不是测量方法性能的主要考量因素,但相比于超过150万元人民币一套的单元SLDV系统,本文提出的测量方法成本相对较低,且能有效解决广泛的全场振动测量问题。因此,本文所提方法更易被科研院所和工业界接受,具有较高的应用潜力和实用价值。

3 LDV 辅助下的 3D-DIC 振动测量分辨率提升

除了相机的空间分辨率、动态范围、电子噪声等硬件限制,在实际测试中,由于在一个状态下左右相机只能拍摄一张图,无法通过多次拍摄并采用图像平均的方法来降低电子噪声,这往往导致基于高速相机的 3D-DIC 在振动测量时的分辨率低于静态测量。本文所提方法在拥有先验信息的情况下,在时间轴上的信息可以被用于信号提取,从而显著提升 3D-DIC 振动测量的分辨率。这就是采用 LDV 作为辅助测量工具的原因,LDV 提供了测量点在时间轴上的频域信息,通过时域信号处理,实现电子噪声、环境噪声与振动信号的有效解耦,从而大幅度提升了 3D-DIC 的振动测量分辨率。

我们进行了一个 3D-DIC 和 LDV 同步的扫频实验来演示这一过程。实验中,在一块单边固支板的背后加装了激振器,扫频范围为 $0\sim 200\text{Hz}$,扫频时间为 10 秒,3D-DIC 的采集帧率设定为每秒 1000 帧。图 3(a)展示了 LDV 测得的板上一个测量点的频率响应函数,图 3(b)显示了在 LDV 测点非常接近的位

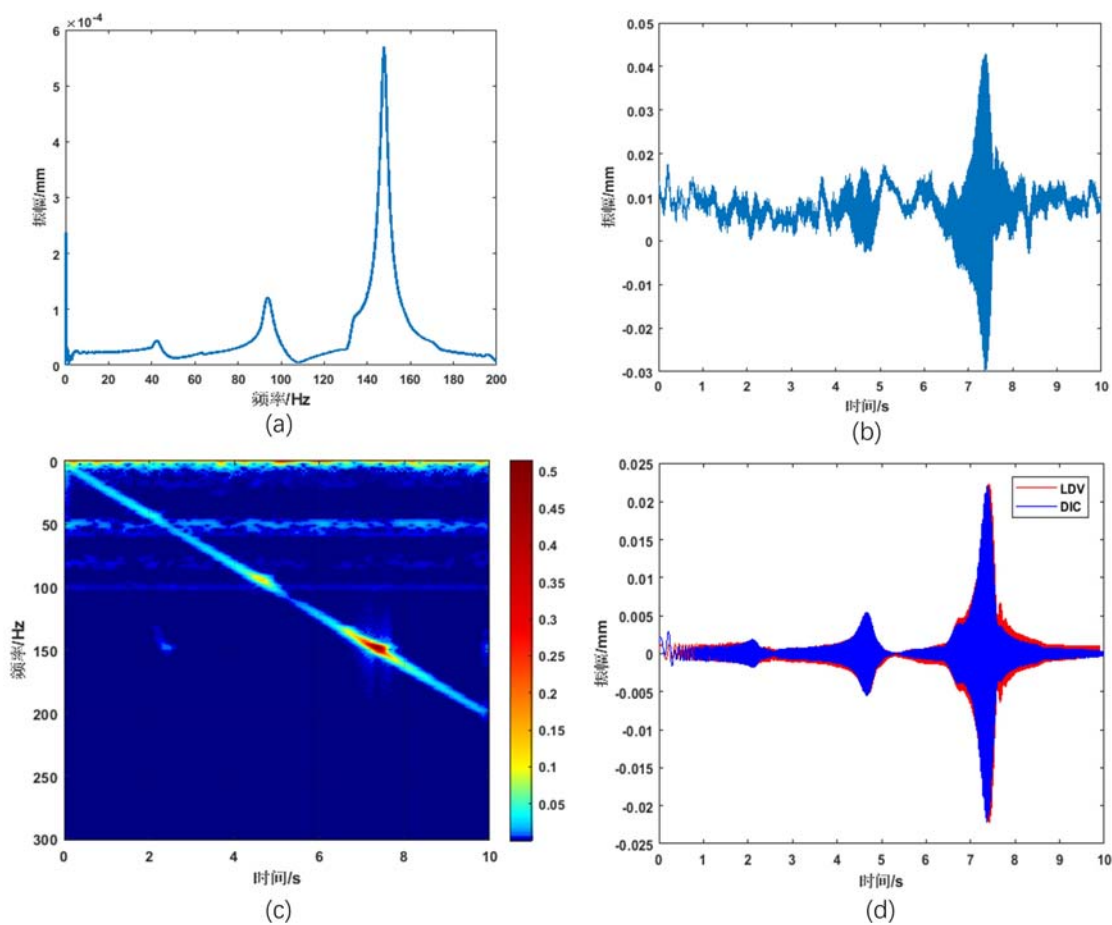


图 3 (a)被测点在扫频激励下的响应谱;(b) 3D-DIC 获得的原始结果;

(c) 图 3(b)中振动信号的窗口傅里叶频谱;(d) 经过频谱滤波之后的 3D-DIC 信号与 LDV 信号的对比

Fig. 3 (a) the response spectrum under frequency-scanning excitation; (b) original vibration

result on one point using 3D-DIC; (c) windowed Fourier spectrum of the signal in Fig. 3(b);

(d) comparison of the results from the proposed method and LDV on the same point

置上使用 3D-DIC 得到的测量结果,图 3(c)展示了 3D-DIC 得到的一维信号的短时傅里叶变换频谱,其中斜线部分代表扫频振动,而环境噪声和电子噪声主要集中在接近 0Hz 的极低频段,以及 50Hz 至 100Hz 之间,短时傅里叶变换参数为高斯窗函数(窗长度为 400, $\sigma=2(\sigma$ 为标准差))。利用 LDV 提供的先验信号频率信息,我们对信号频率进行窄带滑动带通滤波处理,在时间-频率域上将电子噪声和环境噪声与振动信号解耦,其中带通滤波器的带宽为 2Hz 。图 3(d)展示了经过时间轴滤波后的 3D-DIC 振

动信号,与 LDV 获得的振动信号对比显示两者的吻合度极高。与图 3(b)中的原始 DIC 信号相比,噪声解耦效果十分明显。如果对每一个测量点都进行类似的时域信号处理,并结合前文提到的硬件改进,我们能够在空间域上将基于高速相机的 3D-DIC 测量分辨率提升近两个数量级,在几百毫米特征尺寸的结构上,获得干涉量级的全场稳态振动响应。

4 实验、结果和讨论

图 4 为 LDV 辅助下 3D-DIC 的测振装置。被测结构为一块 100mm×100mm 单边固支的板,板厚度为 1mm,采用水转印的方法制作散斑,散斑的直径为 10pixel,随机度为 35%,如图 5 所示。矩形板图像的尺寸为 900pixel×900pixel,其中一个 pixel 对应物理空间的 0.111mm。激励源为贴附在板背部的 PZT 陶瓷激振片,激励频率通过信号发生器进行控制。LDV 输出单频振动信号,而振动相位的计算则由 FPGA 控制器完成。系统还需要测定 LDV 模拟输出与真实振动之间的延时,以及双目相机和频闪 LED 的触发延时等关键硬件参数,以确保在不同的振动相位点进行双相机的同步频闪采集。采用的普通帧率相机型号为 UI-3370CP-M-GL, IDS,像素分辨率为 2048×2048;采用镜头焦距为 25mm;便携式单点激光多普勒测振系统的型号为 HoloBright PNV-RD-AVD1;LED 的频闪控制器为 SP-24W90-2T,用于精确控制频闪的时宽和亮度,以实现精确的光学同步。实验中频闪时间为 20μs,实验中双目相机的标定参数见表 1,DIC 的计算参数见表 2。

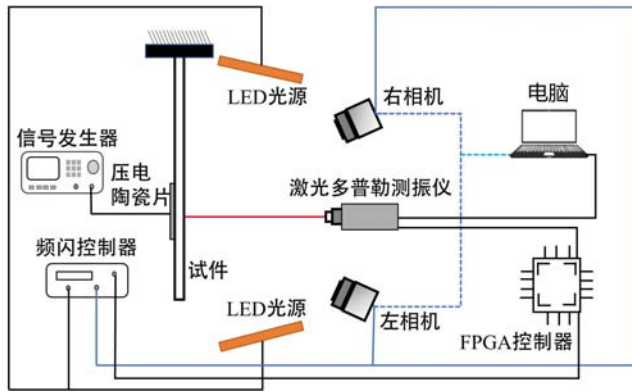


图 4 LDV 辅助下的 3D-DIC 振动测量实验装置示意图

Fig. 4 Experimental illustration of LDV-assisted 3D-DIC vibration measurement

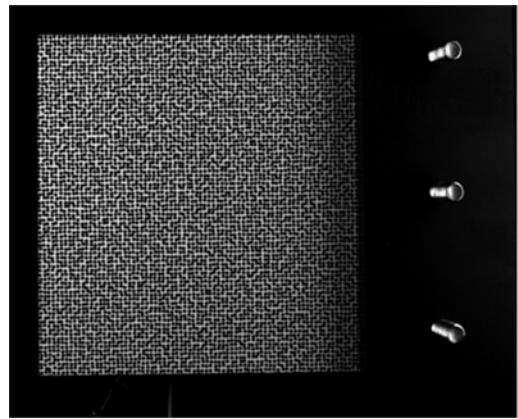


图 5 实验散斑图

Fig. 5 Experimental speckle pattern

表 1 双目相机标定参数

Tab. 1 Stereo camera calibration parameters

	左相机	右相机
内参	$\begin{bmatrix} 6515.710938 & 0 & 994.074707 \\ 0 & 6516.570801 & 1009.559204 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6540.265348 & 0 & 900.918457 \\ 0 & 6554.738770 & 998.521729 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
外参	选择矩阵 $R = \begin{bmatrix} 0.932203 & -0.000623 & 0.363429 \\ 0.000220 & 0.999429 & 0.002354 \\ -0.359870 & -0.002768 & 0.920528 \end{bmatrix}$	平移矩阵 $T = \begin{bmatrix} -257.125988 \\ -1.554047 \\ 64.083924 \end{bmatrix}$

表 2 DIC 参数

Tab. 2 DIC parameters

DIC 参数	评价准则	迭代方法	形函数	子区尺寸	步长
	ZNSSD	IC-GN	1 Order	21×21	1

图 6(a)~(h)展示了一块单边固支板的首 8 阶共振频率激振下的测量结果,其中(I)列代表了采用

LDV 导引下普通帧率相机的 3D-DIC 的结果;从图 6 实验结果可以看到在特征尺寸 100mm 左右的板上面,采用信噪比较好的普通相机的 3D-DIC,其测量分辨率在 $10\mu\text{m}$ 左右,也就是特征尺寸的 10^{-4} 左右;(II)列显示的是每个像素经过了时间轴噪声解耦处理后在空间上合并的结果。实验结果(图 6)显示,在振幅仅为 100nm 的部位,仍然能给出很好的振动测量结果,也就是测量分辨率达到了特征尺寸的 10^{-6} 以上。由于这些测量结果是在单频激励下获得的,因此通过简单的带通滤波处理就可以有效地将振动信号与电子噪声和环境噪声进行解耦。只有当电子噪声和环境噪声的频率与结构振动的频率重叠时,解耦处理才可能会遇到挑战,因而本文提出的时间轴噪声解耦方法在大多数情况下被证明是极为有效的。在 100mm~1m 大小的结构振动测量上,只通过单点 LDV 和普通帧率相机,就可以得到干涉量级的振动测量分辨率,这是全场振动测量领域方法上的提升。

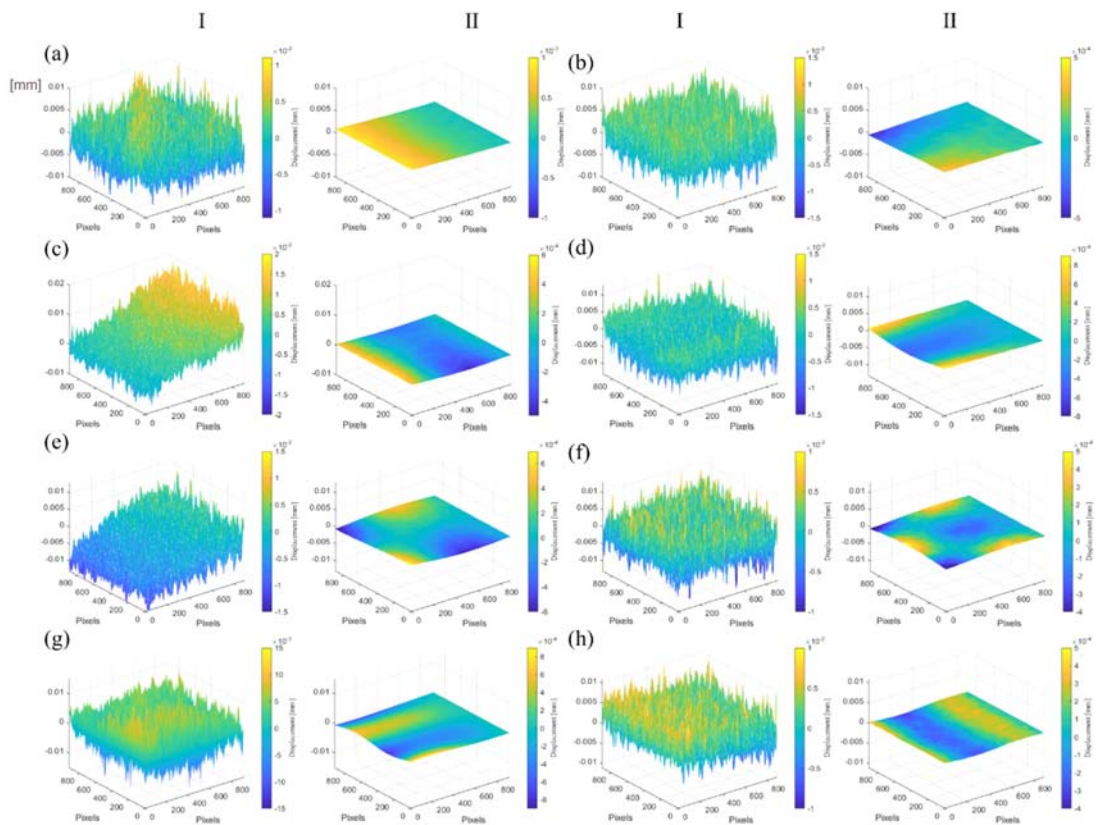


图 6 (a)~(h)为单边固支薄板的首八阶振动模式;其中(I)为 3D-DIC 直接测量的结果;(II)为 LDV 辅助下 3D-DIC 的测量结果(通过时间轴带通滤波实现噪声解耦)(注:矩形板图像的尺寸为 900pixel×900pixel,一个 pixel 对应物理尺寸约 0.111mm)

Fig. 6 (a)~(h)the first 8 orders vibration mode of a plate with fixed one edge; (I) direct vibration mode obtained by 3D-DIC; (II) vibration mode obtained by LDV assisted 3D-DIC (including noise decoupling and removal through bandpass filtering in time axis) (Note: The image size of the rectangular plate is 900pixel×900pixel, where one pixel corresponds to the physical size of about 0.111mm)

本文所提方法中,由于 LDV 在单点上可以实现极高分辨率的振动测量,这一测量结果为 3D-DIC 数据处理提供了宝贵的先验信息。因此,在时间轴上的噪声解耦方法显示出了显著的效果,通常情况下,采用单频激励的振动测量仅需应用简单的带通滤波,就能显著提升测量分辨率,比一般的 DIC 测量高出两个数量级。图 7(a)和图 6(b)展示了单边固支板在第 16 阶和第 25 阶共振频率下的工作变形,测量结果(图 7)显示,振动的最大变形量仅在微米量级,这是普通的 3D-DIC 技术无法达到的。然而,这种方法也存在一定的局限性。当结构振动的频率与电子噪声或环境噪声的频率发生重叠,且在时间轴上无法将两者有效分离时,噪声与振动信号会叠加在一起,此时常规的时频滤波方法可能无法有效工作。在这种情况下,需要对 LDV 和 3D-DIC 的时域振动信息进行更深入的分析。因此,虽然在理想条件下

本方法能显著提升振动分辨率,但在噪声和振动频率重叠的实际情况下,振动分辨率的提升有可能达不到本文所描述的理想结果。

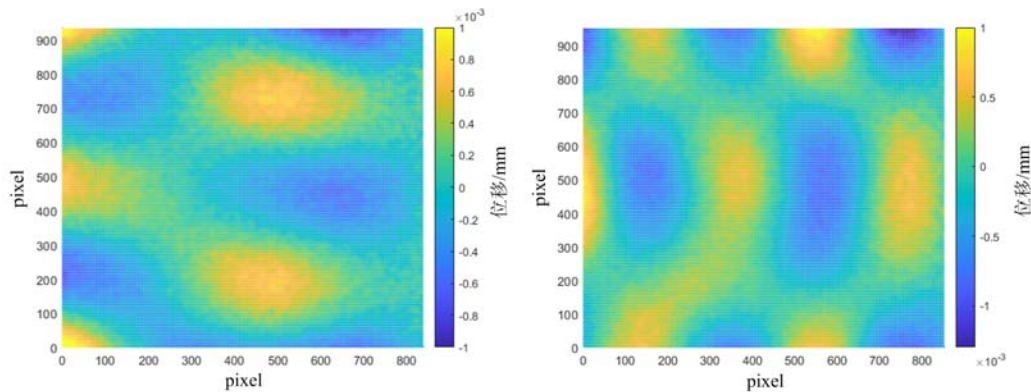


图7 LDV辅助下的3D-DIC振动测量方法给出的单边固定板在(a)第16阶共振频率 $f = 1098\text{Hz}$;
(b)第25阶共振频率 $f = 1886\text{Hz}$ 激励下的工作变形(注:矩形板图像的尺寸为 $900\text{pixel} \times 900\text{pixel}$,
其中一个pixel对应物理尺寸约 0.111mm)

Fig. 7 Operating deflection shape obtained by the proposed LDV-assisted 3D-DIC method when the plate is excited by
(a) the 16 order of nature frequency $f = 1098\text{Hz}$; (b) the 25 order of nature frequency $f = 1886\text{Hz}$
(Note: The image size of the rectangular plate is $900\text{pixel} \times 900\text{pixel}$, where one pixel
corresponds to the physical size of about 0.111mm)

5 结论

本文综合分析了LDV与基于高速相机的全场稳态振动测量方法的各自优势和局限,提出了一种LDV和3D-DIC相融合的全场振动测量方法,此方法利用LDV提供的高精度单点振动信息作为导引,指导普通帧率相机同步采集。通过3D-DIC算法,不仅实现了时间序列离面位移的测量,而且还利用LDV提供的噪声解耦先验信息,对原始的3D-DIC时间序列离面位移进行了时间轴信号处理,最终实现了高精度的全场振动测量。得益于空间采样点充足以及较高的测量分辨率,这种方法在大型结构全场振动响应的测量和结构缺陷定位等领域显示出巨大的应用潜力。此外,它也为全场振动测量仪器的开发提供了思路,有望推动相关技术和应用的进一步发展。

参考文献:

- [1] 邓淇, 沈春颖, 马江霞. 平面闸门流激振动分析及防振措施[J]. 中国水运, 2021(12):112-114 (DENG Qi, SHEN Chunying, MA Jiangxia. Analysis of flow induced vibration and anti-vibration measures of plane gate[J]. China Water Transport, 2021(12):112-114 (in Chinese))
- [2] 黄正辉, 彭孝旺. 桥梁结构的风致破坏与风致振动控制措施[J]. 交通世界, 2021(12):138-139 (HUANG Zhenghui, PENG Xiaowang. Wind-induced damage and wind-induced vibration control measures of bridge structures[J]. Transportation World, 2021(12):138-139 (in Chinese))
- [3] 张甲瑞, 姜雪妹. 典型三维点阵夹芯结构抗压性能及其在汽车上的应用分析[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(9):128-129 (ZHANG Jiarui, JIANG Xuemei. Compressive performance of typical three-dimensional lattice sandwich structure and its application in automobile[J]. Automotive Practical Technology, 2021, 46(9):128-129 (in Chinese))
- [4] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001 (LI Debao, LU Qiuhai. Experimental modal analysis and its application[M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese))
- [5] VEST C M. Holographic interferometry[M]. New York: John Wiley, 1979.
- [6] 戴福隆, 沈观林, 谢惠民. 实验力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010 (DAI Fulong, SHEN Guanlin, XIE Huimin. Experimental mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010 (in Chinese))
- [7] HUNG Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing[J]. Optical

- Engineering, 1982, 21(3):213391.
- [8] 洪友仁, 何浩培, 何小元. 剪切散斑: 一种光学测量技术及其应用[J]. 实验力学, 2006, 21(6):667-688 (HONG Youren, HE Haopei, HE Xiaoyuan. Shearography: an optical measurement technique and applications [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(6):667-688 (in Chinese))
- [9] THOMAS B P, ANNAMALA P S, NARAYANAMURTHY C S. Investigation on vibration excitation of debonded sandwich structures using time-average digital holography[J]. Applied Optics, 2017, 56(13):F7-F13.
- [10] WANG W C, HWANG C H, LIN S Y. Vibration measurement by the time-averaged electronic speckle pattern interferometry methods[J]. Applied Optics, 1996, 35(22):4502-4509.
- [11] TOH S, SHANG H, CHAU F, et al. Flaw detection in composites using time-average shearography[J]. Optics & Laser Technology, 1991, 23(1):25-30.
- [12] FU Y, GROVES R M, PEDRINI G, et al. Kinematic and deformation parameter measurement by spatiotemporal analysis of an interferogram sequence[J]. Applied Optics, 2007, 46(36):8645-8655.
- [13] CASTELLINI P, MARTARELLI M, TOMASINI E. Laser Doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(6):1265-1285.
- [14] FU Y, GUO M, PHUA P B. Multipoint laser Doppler vibrometry with single detector: principles, implementations, and signal analyses[J]. Applied Optics, 2011, 50(10):1280-1288.
- [15] NGOI B K, VENKATAKRISHNAN K, TAN B, et al. Two-axis-scanning laser Doppler vibrometer for microstructure[J]. Optics Communications, 2000, 182(1-3):175-185.
- [16] 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))
- [17] 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 (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6):556-567 (PAN Bing, XIE Huimin, LI Yanjie. 3D digital image correlation method for surface topography and deformation measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6):556-567 (in Chinese))
- [20] 朱魁章, 程腾, 仰叶, 等. 基于 DIC 的斯特林制冷机振动非接触三维全场测试方法[J]. 中国测试, 2015, 41(5):1-4 (ZHU Kuizhang, CHENG Teng, YANG Ye, et al. Stirling refrigerator vibration non-contact three-dimensional full-field test method based on DIC[J]. China Testing, 2015, 41(5):1-4 (in Chinese))
- [21] 王述良, 梁枢果, 邹良浩, 等. 基于三维数字图像相关法(DICM)的输电导线风致动态位移测试及分析[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(4):503-510 (WANG Shuliang, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Measurement and analysis of wind-induced dynamic displacements of transmission conductors based on 3-D DICM[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 34(4):503-510 (in Chinese))
- [22] 潘济宇, 张水强, 苏志龙, 等. 基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量[J]. 光学学报, 2021, 41(12):108-116 (PAN Jiyu, ZHANG Shuiqiang, SU Zhilong, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12):108-116 (in Chinese))
- [23] DURAND-TEXTE T, MELON M, SIMONETTO E, et al. Single-camera single-axis vision method applied to measure vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 465:115012.
- [24] SEO S, KO Y, CHUNG M. Evaluation of field applicability of high-speed 3D digital image correlation for shock vibration measurement in underground mining[J]. Remote Sensing, 2022, 14(13):3133.
- [25] BARONE S, NERI P, PAOLI A, et al. Low-frame-rate single camera system for 3D full-field high-frequency

- vibration measurements[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 123:143–152.
- [26] MASTRODICASA D, FERREIRA C, DI LORENZO E, et al. DIC using low speed cameras on a scaled wind turbine blade[J]. *Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods*, 2023, 6:15–26.
- [27] SHENG Z, CHEN B, HU W, et al. LDV-induced stroboscopic digital image correlation for high spatial resolution vibration measurement[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18):28134–28147.
- [28] SHENG Z, ZHANG K, GE Z, et al. Defects localization using the data fusion of laser Doppler and image correlation vibration measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160:107293.

LDV-assisted full-field vibration measurements (1): 3D-DIC resolution enhancement method

FU Yu¹, WEN Jiechun¹, GAO Zeren¹, CHEN Bing¹, WEI Yuchen¹, MIAO Hong², YU Qifeng^{1,3}

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China; 3. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: After entering the 21st century, with the rapid improvement of computer processing capabilities, 3D digital image correlation (3D-DIC) based on high-speed cameras has gradually been applied to various scientific research and engineering fields. Its advantages are that it can provide full-field vibration measurement and has relatively low requirements for the measurement environment. However, in terms of time sampling rate and measurement resolution, it cannot meet the general requirements of vibration measurement. Another mature vibration measurement method is the laser Doppler vibrometry (LDV) based on single-pixel photodetectors. This type of interference-based measurement technique has an extremely high time sampling rate and measurement resolution, and the requirements for isolation are also not high. But the main problem is that in the spatial domain, it can only achieve single-point or sparse-point measurement. For stationary vibration, although scanning can be used, the scanning range is limited due to the optical depth of field of the equipment, resulting in low spatial sampling rate. This paper proposes a new vibration measurement method, namely LDV-assisted full-field vibration measurements by 3D-DIC. By utilizing the advantages of the two methods in measurement resolution and full-field measurement, the vibration measurement resolution of full-field DIC can be improved to the $10^{-6} \sim 10^{-7}$ scale of characteristic size in both hardware and data processing aspects. Even without using a high-speed camera and vibration isolation measures, it is still possible to achieve interferometric-level full-field vibration measurement, which meets the requirements of most structural vibration measurements.

Keywords: vibration measurement; 3D-DIC; full-field measurement; laser Doppler vibrometry