文章编号:1001-4888(2021)01-0001-16

综述:面向工程应用的激光干涉动态测量*

傅愉[1,2], 陈冰[1,2], 阎可宇[1,2], 缪泓[3], 于起峰[1,2,4]

(1. 深圳大学 物理与光电工程学院, 广东深圳 518060; 2. 深圳大学 智能光测研究院, 广东深圳 518060; 3. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027; 4. 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,激光干涉作为一种成熟的非接触式动态测量技术,开始逐步应用于不同的工业领域。激光干涉动态测量技术主要分成两类:一类是基于高速相机的干涉测量技术,而另一类则是基于单像素光电探测器的干涉测量技术。这两类技术都有其局限性:基于高速相机的技术受限于相机时间轴上的采样率;而基于光电探测器的技术则在空间域上只能进行单点测量。针对稳态振动和非稳态振动/变形测量两种实际应用,本文分别讨论了这两类干涉测量技术近年来的一些最新发展。作者希望通过本文的讨论为不同领域的研究人员和工程师在实际应用中选取更优的动态测量方案提供有力的参考。

关键词: 动态测量; 激光干涉; 变形测量; 振动测量; 激光多普勒测振技术

中图分类号: O329 **文献标识码**: A DOI: 10.7520/1001-4888-20-061

0 引言

半个世纪以来,工业界对产品结构性能和可靠性的高要求促进了高精度测量方法的飞速发展。光学测量作为一种高精度非接触式实验力学计量方法,在 20 世纪 60 年代,尤其是激光发明之后,有了显著的发展。全息干涉[1]、散斑[2]、剪切散斑[3,4]等一系列干涉计量方法的出现把力学变化量(变形、位移等)的测量分辨率提高到了光的波长量级,即微米至亚微米量级。20 世纪末,随着 CCD(电荷耦合元件)相机和计算机技术的发展,又涌现了一大批数字化的干涉测量技术,比如电子散斑干涉[5,6]、数字剪切散斑干涉[7,8]、数字全息[9,10]、云纹干涉[11,12]等。同时数字化的位相提取技术(如条纹的骨架化[13]、时间相移[14,15]和空间相移[16,17]技术),使二维干涉测量在光学实验室条件下的分辨率达到了一级干涉条纹代表物理量的百分之一。以离面位移为例,测量分辨率一般可达纳米量级。如果采用单点的激光多普勒测振技术[18],测量精度可以轻松达到百皮米量级,加之在时间轴上的采样有足够的冗余度,同时在干涉信号数字化之后的信噪比相对较高(60dB 以上)的情况下,其位移测量分辨率甚至可以达到皮米量级。除干涉测量技术外,投影云纹[19-21]、阴影云纹[22-24]、条纹/散斑投影[25-27]、数字图像相关[28-32]等非干涉技术也得到了长足的发展,如今的光学测量已基本覆盖了从纳米到宏观尺度的变形测量范围。基于图像的非干涉测量技术[33-37]受限于光学成像的衍射极限,其变形测量的分辨率最高只能达到微米量级,因而要达到覆盖亚纳米到微米这三到四个量级的变形测量,激光干涉是目前唯一的选择。

激光干涉虽然有高灵敏度的特性,但其缺点也很明显:(1) 激光干涉测量的是相对量,即测量光程的改变,而对绝对量的测量则相当困难,需要通过调制激光频率/波长等方法产生位相改变量,来反推绝对距离/形貌这样的状态量[38,39];(2) 激光干涉测量形成的干涉条纹常常带有散斑噪声[40,41],给条纹图

* **收稿日期**: 2020-04-06; **修回日期**: 2020-05-05
基金项目: 国家自然科学基金(11972235)资助
通信作者: 傅愉(1968-),男,博士,教授。主要研究领域:光学动态测量。Email: fuyuoptics@gmail.com

的位相提取带来了困难;(3) 正因为激光干涉测量的是光程的改变,因而对沿着光束方向的光程改变量最敏感,所以,电子散斑干涉(ESPI)、数字全息、激光多普勒测振等方法中,容易测量的往往是离面位移/变形,如果要测量面内位移/变形,需要采用左右或者上下的斜投双光束设计,光路相对比较复杂,对隔振的要求更高,也更容易造成散斑的失相关;(4) 激光干涉对测量环境的要求非常高,除了接近共轴的剪切散斑干涉[42,43]和点测量的激光多普勒测振技术[44,45],其他的方法通常只能在拥有隔振设施的光学实验室里实现。这些弱点大大限制了这类干涉技术在工业界的实际应用,使得图像测量技术[46−50]后来居上成为了光学测量方面的科研主流方法。

数字化的激光干涉技术在其发展初期,测量的都是静态或准静态的变形[51],即两个状态之间的变化量,这主要是受到传感器采集速度的限制。只有使用单像素光电探测器的激光多普勒测振技术,实现了空间域内单点的高频/高速动态测量。如果使用采样率相对较高的线阵相机,得到的是一个时间-空间二维干涉信号[52]。在 21 世纪初,随着相机高速采集技术的发展,科学家们将高速相机与各类光学测量方法相结合,从而得到时间-空间三维信号[53],逐步实现了光学动态测量。与此同时,针对一维、二维、三维时空干涉信号的位相提取算法[54],尤其是以频域信号处理为主的傅里叶变换[55,56],短时傅里叶变换[57,58],小波变换[59,60]等方法得到了巨大的发展,也相对弱化了散斑噪声、环境噪声的影响[61]。然而,相机的采样率仍然是制约激光干涉技术在动态测量中应用的最主要的因素:作为一个在时间轴上完备的测量,相机的帧率必须符合干涉测量的采样定理,即时间轴上任意两个采样点之间的干涉信号的位相变化不能超过 $\pi/2$,因而在相机帧率一定的情况下,能测得的干涉信号的位相改变率是受限的。

以上的干涉动态测量方法是基于硬件和信号处理技术的发展而逐步成熟起来的。以力学中的实际应用需求来分,又可以分为两大类:(1)稳态振动的分析,主要包括振动模态(Vibration modal)分析和工作变形(Operational deflection shape, ODS)的测量;(2)非稳态的振动/变形的分析,主要包括瞬时运动参数(位移、速度、加速度等)和变形参数[变形(相对位移)、应变、曲率和扭率等]的测量。本文将针对这两大应用,详细讨论如何选择合适的干涉测量方法达到动态分析的目的,以及这些方法在使用中的技术问题和需要注意的事项。作者希望通过这些讨论,给该方向的科研工作者和工程师在测量方法选择、具体实验设计,以及测量结果分析方法上提供一定的参考。

1 稳态振动分析和测量

结构的稳态振动分析和测量是动力学领域最常见的问题。这里的稳态是指振动在时间轴上具有周期性,其振动特性并不随着时间的推移而改变。普通的稳态振动的测量中,振幅和频率是最基本的参数。针对结构或者系统中一些特征点的振动参数测量,激光多普勒测振技术(LDV)[62,63]是目前广泛采用的方法。一般的 LDV 测量的是沿着激光光轴方向的速度/位移:当激光垂直打到被测表面,得到的测量值是被测物体的离面振动;如果需要测量被测物体某个方向上的面内振动,就需要把两束激光以相同的角度斜投在被测点上[64],用以抵消离面方向的振动;而如果需要同时测量被测物体面内和离面三个方向上的振动,通常需要至少三束激光沿不同方向打在被测点上,测量出沿各自方向的振动分量,并通过已知的入射角,换算得到在面内(x-, y-)和离面(z-)方向上的振动分量[65]。

除了基本的点测量以外,在结构动力学中稳态振动测量主要集中于两个方面:模态振型和工作变形(ODS)的测量。模态是结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。模态振型是指弹性体或者弹性系统自身固有的振动形式,可用质点在各阶固有频率激振下的相对位置,即振动曲线来描述。模态振型是一个无量纲的量,同激励大小无关。如果通过实验模态分析的方法得到了结构在某一易受影响的频率范围内各阶主要模态的特性,就可以描述在此频段内该结构的实际振动响应,因而模态分析是结构动态设计和故障诊断的重要方法。ODS 和模态振型都是描述结构各点之间的相对运动,但两者的概念完全不同。ODS 的大小反映了结构在工作状态下的响应水平,是一个有量纲的物理量,可以描述任意频率下结构的振动变形,是一定激励作用下所有模态共同作用的结果。两者的关系可以简单理解为:当外激励形式为简谐激励,激励频率为结构的第 n 阶固有频率,且没有密集模态的前提下,此时的结构 ODS 中,第 n 阶振型占主要成分,因此可以把此时的 ODS 认为是结构的第 n

阶模态振型。在实际测量中无论是模态振型还是工作变形，所采用的干涉测量的方法都是一致的。

大多数激光干涉测量手段得到的是被测物体的位移模态，但位移模态分析结果不能直接用于结构的疲劳设计，在运动机械和承受动载结构的设计中，工程师们从强度和疲劳的观点出发，更关心应力、应变的分布情况。应变模态反映的是结构在相应模态下各个部位的应变大小，是一个能够反映结构局部特征变化的模态参数[66,67]。应变模态可以通过位移模态沿着某个空间方向微分得到，两者在振型上有较大的差异。应变模态中数值大的点表示此点的应变大而不一定是位移大。应变模态对局部结构变化的敏感性远远高于位移模态，能较准确地反映结构的共振危险点[68]。应变模态振型对非模态节点部位的损伤尤其敏感，在损伤附近应变模态会发生突变，其程度随着损伤量增加而增大。对缺陷损伤最敏感的是曲率模态[69]，它可以准确地确定结构损伤位置及损伤程度，实现结构损伤的定位[70]。然而目前仍然欠缺直接获取全场曲率模态的实验方法，只能通过对应变模态的求导得到[71]。

采用相机的稳态振动干涉测量方法中有基于积分成像的时间平均法：包括全息干涉（Holographic Interferometry）[72,73]、数字全息（Digital Holography）[74]、电子散斑干涉（ESPI）[75]等针对离面振动的测量方法，以及针对应变测量的数字剪切散斑干涉（DSSI）[76]方法。图 1（a）是东南大学杨福俊课题组在一块一端固支的铝板上，采用 ESPI 得到的前 10 阶离面振动模态条纹图[77]。确切地讲，条纹代表的应该是不同阶固有频率激振下的工作变形。图 1（b）显示的是通过剪切散斑的时间平均法得到的沿着 x 方向的应变模态条纹。除了上述时间平均法以外，还有频闪法，即将频闪激光光源同数字全息、ESPI、剪切散斑等方法相结合[78－80]，通过与振动频率相同的频闪光源对振动物体进行锁相，把稳态振动静态化，该方法结合相移技术可以得到高精度的工作变形。但频闪法对同步控制系统要求严格，需要精确判断振幅达到最大值的时间。与频闪法相类似的还有基于红宝石激光器的双曝光法[81,82]，同样是测量动态过程中两个时间点之间的变形，达到动态测量问题静态化的目的。

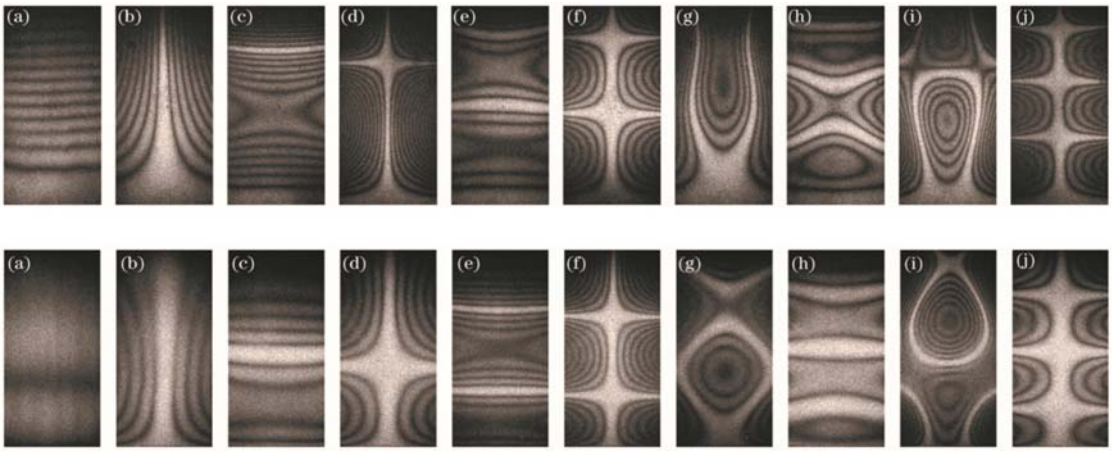


图 1　（a）ESPI 和（b）DSSI 时间平均法得到的一端固支铝板的前 10 阶振动模态
（经杨福俊教授同意引自参考文献[77]）

Fig. 1　Fringe patterns of the 1st 10-order vibration modal using (a) ESPI; (b) DSSI time averaging method
(reprint from Ref. [77], permitted by Prof. YANG Fujun)

由于基于相机的稳态振动分析方法对测量环境要求高，实验系统复杂，因而基于光电探测器的扫描型激光多普勒测振技术（SLDV）[83,84]已经成为测量模态振型和 ODS 的主要方法。激光多普勒测振实现的是点测量，在 ODS 和模态振型测量时，实验人员可通过电脑屏幕对测试结构进行测点布置，激光束通过扫描振镜逐点扫描测试点，实现全场振动信息的获取。SLDV 通常用单点激励-多点测振的方法，同步采集激励信号和测点振动信号，并以激励信号为参照，同步各个测点的振动位相。德国的 Polytec 公司还生产了可以同时测量三维振动的 SLDV，把三个 SLDV 的激光束以标定好的角度打在被测物体的同一点上（为防止不同激光之间相互串扰对测量产生影响，通常是打在非常靠近被测点的三个不同的空间点上，并假设这三个非常靠近的空间点的动态参数一致），通过扫描和拟合，最终可以得到整个测量表面的三维振动参数。

连续扫描激光多普勒测振技术(CSLDV)[85,86]是在 SLDV 研究的基础上发展起来的一种快速 ODS 测量方法,实现方案是:让激光点以正弦变化的速率在结构表面做往返扫描,采集扫描路径上的振动信息,SLDV 采集到的速度信号被认为是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号频域信息之间的关系,把测试信号中的频域信息转换为多项式系数,进而拟合成结构的 ODS[87]。SLDV 和 CSLDV 是目前被工业界和科技界普遍认可的位移和模态振型的测量方法,涵盖的振幅测量范围从纳米到毫米量级,测量的频率可以超过 1MHz,速度测量范围在 0～20m/s,有些特制 LDV 的参数甚至更高。但 SLDV 和 CSLDV 得到的是被测物体的位移模态,应变模态和曲率模态仍然需要通过求导得到[71],另外 SLDV 昂贵的价格也阻碍了其被工业界广泛采用。

表 1 比较了几种不同的稳态变形/振动测量方法的优缺点。从表中可以看出,几种常用的激光干涉测振技术各有特点,但从测量系统搭建的难易程度、对测量环境的要求、时空域上的采样率以及涵盖的测量范围等角度上讲,激光多普勒测振技术具有非常明显的优势。

表 1 各类激光干涉稳态测振技术的比较

Tab. 1 Comparison of various laser interferometric techniques for steady-state vibration measurement

	参数和项目	时间平均法 (以 ESPI 为例)	频闪法 (以 ESPI 为例)	扫描型激光多普勒 测振技术(SLDV)	连续扫描型激光 多普勒测振技术(CSLDV)
1	测量类型	面测量	面测量	点测量	点测量
2	测量范围(位移)	100nm～10μm	10nm～10μm	100pm～10mm 以上	1nm～10mm
3	测量条件	光学实验室 隔振台	光学实验室 隔振台	普通实验室 加工车间	普通实验室
4	时域采样	积分累积	根据振动频率和 频闪频率确定	＞100MS/sec	＞100MS/sec
5	空域采样	取决于相机像素, 对测量足够	取决于相机像素, 对测量足够	最高 256 点×256 点	沿设计的扫描路径 连续采样
6	优点	全场测量, 测量时间短	全场测量,可测得不同 时间点的变形	测量准确,扫描过程 中可自动对焦	扫描时间短, 数据量小
7	缺点	测试系统对环境 要求高,不能测得 瞬态变形	对变形和频闪 的同步要求高, 系统调整复杂	扫描时间长,需多次 激振同步不同点的 测量位相,数据量大	测试过程中因无法 自动对焦,通常需 贴反射膜

2 非稳态变形/振动的分析和测量

针对非稳态的振动/变形的分析,从力学角度讲,需要测量的是物体表面瞬时的运动参数(位移、速度、加速度等)和变形参数[变形(相对位移)、应变、曲率和扭率等][88,89]。由于针对稳态振动的许多测量手段,比如频闪法、扫描法都已经不再适用,基于高速相机的激光干涉或者多点同步的激光多普勒测振成为唯一可行的方法。

2.1 基于高速相机的测量

在基于高速相机的激光干涉动态测量中,普通的 CCD 相机被高速相机所取代,并通过触发采集序列干涉图像,因而得到的原始测量结果是在时间轴上等间隔的散斑、散斑条纹或者干涉条纹图。其表达式可以写成

$$f(x,y;t) = I_b(x,y;t) + A(x,y;t)\cos(\varphi(x,y;t) + \varphi_0(x,y)) \tag{1}$$

其中,$I_b(x,y;t)$和 $A(x,y;t)$分别是直流项和调制项,这两项在时间轴上的变化非常缓慢。$\varphi(x,y;t)$是因为振动或者连续变形带来的位相改变量;$\varphi_0(x,y)$是每个像素点的初始位相。基于序列干涉图像的干涉动态测量技术就是要从公式(1)所代表的三维矩阵中提取位相 $\varphi(x,y;t)$, $\varphi(x,y;t)$代表的就是同测量方法相关的被测物理量。而在基于高速相机的动态干涉测量中,位相提取的方法、载波的引入和信号处理的各类算法决定了测量的精度和能得到的变形参数。位相提取方法有很多种,基本可以分为三

大类：相移法、变换法以及其他位相提取方法。

2.1.1　相移法

相移法包含时间相移和空间相移。多步时间相移技术中，至少需要三幅已知相移量的散斑图或者条纹图，也就是需要三个方程解公式(1)中的 I_b、A 和 φ 三个未知量。为了确保计算得到的位相 φ 准确，就需要在实验中做到高速的相移和高速的图像采集，即假设相移过程中 φ 不变。1996 年 De Lega 和 Jacquot 使用了压电传感器(PZT)以 80Hz 的频率推动被测物体，实现相移[90]。1999 年 Huntley 等人采用普克尔盒(Pockels cell)和高速相机实现了 1kHz 的时间相移[91]。2003 年 Kaufmann 采用了相同的技术在一块带有缺陷的板上测量了连续离面变形[92]。2002 年 Kao 等人采用在 t_0 瞬间做相移，其他时刻只高速采集散斑图的方法，从而使得不再需要对相移器和高速相机实现同步控制，同时，为了避免当变形较大时会出现的散斑失相关，需要不断更新时间轴上的参考散斑图[93]。总之在图像动态干涉测量中，多步时间相移及相关技术只适合测量比相移缓慢得多的变形[94,95]。

多幅空间相移是通过几个 CCD 相机，或者一个 CCD 相机靶面的不同部位同时采集带有不同相移的条纹图[96,97]，以降低多步时间相移对高速相移和采集帧率的要求，这类方法存在的问题是需要空间上的图形配准，以及评估图形配准带来的测量误差。美国的 4D Technology 提出了一种基于偏振相机的动态干涉仪，把一个 2×2 的像素区域认定为一个超级像素，在每个像素前都有一个起偏方向不同的偏振片，通过光路设计在一个超级像素区域内形成四步相移，这样把一幅 $2x\times 2y$ 的图，变成四幅 $x\times y$ 的相移散斑或者条纹图。这个方法牺牲一定的空间分辨率，但降低了时间轴上对相机帧率的要求[98]。现在索尼(Sony)公司都推出了这类偏振相机，为研究人员自己搭建动态干涉仪提供了可能。笔者认为从技术层面上讲，虽然光路相对复杂，但基于偏振相机的动态干涉仪是目前为止最合理的动态位相提取技术，它牺牲的空间分辨率最小，对相机时间采样率的要求也相对最低。类似的概念也被用于条纹投影技术上[99]，同偏振相机稍有不同的是，条纹投影是通过采集 RGB 三种不同的颜色达到相移目的的。

2.1.2　变换法

在只使用普通高速相机的时候，变换法是最常用的位相提取方法。这些变换包括傅里叶变换[100,101]、希尔伯特变换[102]、窗口傅里叶变换[57,103]、小波变换[59,104,105]，以及傅里叶变换结合窗口傅里叶变换[54]。变换法可以用在空间域、时间域以及时间-空间域，变换可以是一维、二维、甚至三维的，前提是变换的空间至少有一维的位相变化是单向的。如果被测的变形本身非单向，那就必须引入载波，人为地把相变单向化。20 世纪 80 年代，傅里叶变换首先被使用在带有空间载波的单幅条纹图的位相提取上[106]，之后又被用在带有载波的瞬态云纹干涉条纹图[107]和散斑条纹图上。上述各类变换算法也可以用在动态干涉计量的时间轴上，也同样要求时间轴上的相变单向性。Joenathan 等在散斑干涉中利用时间位相提取技术做了离面变形[108]、面内变形[109]、离面变形的一阶导数[110]，以及形状测量[111]的系列分析，详细讨论了散斑的大小、失相关以及相机的非线性等因素对测量结果的影响[112]。Kaufmann 和 Galizzi 比较了多步时间相移和时间轴上傅里叶变换的位相提取结果[113]。1997 年，De Lega 在动态测量中首先沿时间轴采用了小波变换位相提取方法[114]，并被多位学者在动态干涉测量中采用[115-117]。一种同小波变换非常接近的 S 变换也被用在时间位相提取中[118]。2003 年 Ruiz 等人提出了沿着时间轴的窗口傅里叶变换[119]，与多步相移法相比，得到的测量结果更好。2006 年钱克矛等人在散斑时间序列上采用了三维的窗口傅里叶变换[120]。2007 年傅愉等人利用数字全息和窗口傅里叶变换实现了比傅里叶变换更精确的振动测量[121]，并同时得到了位移、速度、加速度等运动参数。同年他们提出了时间轴上傅里叶变换结合空间轴上的窗口傅里叶变换，不仅得到了任意时刻三个运动参数，还在每个瞬时得到了应变以及曲率和扭率等变形参数，得到的测量结果优于单独使用任意一种变换[54]。

上述位相提取的变换算法，基本都需要人为设定一些变换参数：傅里叶变换方法需设置带通滤波的窗口大小，窗口傅里叶变换需设置内核 σ 的大小等。即使那些不需要人为直接设定参数的方法，其实质也是按照一定的方式自动设定参数：希尔伯特变换法是将带通滤波窗口自动设定为最大，这会在最终的位相中带进更多的噪声；小波变换是根据信号频率自动设定内核 σ 的大小，虽然有其合理性，但在一些特殊情况下，提取到位相反而是错误的[54]。另外，就精度和计算量上比较：希尔伯特变换和傅里叶变换

在计算量上相对较小,可以实现实时的位相提取;窗口傅里叶变换和小波变换在大多数情况下可以得到更高的位相提取精度,对噪声的抑制效果较好,但耗费的时间会大大多于傅里叶变换。综上,选取合适的位相提取方法需要根据不同的信号和实际需求,可以说没有一种变换方法在实际应用中具有完美的适应性。

2.1.3 其他位相提取法及载波的引入

21 世纪初,李喜德等提出了另外一种时间轴位相提取方法,即位相扫描法(Phase scanning method)[122-124],在变形是单向性的前提下,通过灰度值的改变来计算位相。该方法即使在散斑干涉等实验方法中也能简单有效地提取位相,缺点是在一个灰度改变周期中至少需要 6 个采样点。笔者在实验中发现如果需要获得同相移法和变换法接近准确的位相信息,在一个周期中至少需要 10～16 点[125,126],这就提高了对高速相机采样率的要求。

近年来,不少科研人员尝试在不带有空间载波的条纹图中提取位相信息[127-131],但这些算法都基于某一个特定的假设,这些假设在某些条纹图中满足,但在另外一些条纹图计算中又不满足。因而无论是在时间轴还是在空间轴加上载波,使得相变具有单向性,到目前为止还是位相提取中最可靠的方法。

在激光干涉动态测量中,位相提取无论是一维、二维还是三维的算法,都必须至少在一个维度上相变是单向的。因而载波可以加在空间(x-或 y-)轴,也可以加在时间(t-)轴上。载波在空间轴上引入,位相提取的区域必须包含空间轴。提取的位相会受到散斑噪声、表面反光的不均匀性,以及被测物体的不规则形状的影响[132]:若被测物体形状不规则,受边界效应的影响,位相提取的误差非常大;受散斑噪声的影响,加了载波以后的条纹不能太密,这也限制了被测物理量的大小。载波也可以在时间轴引入,做法通常是在参考臂上加入一个匀速的刚体位移[115,133],使得即使没有物体变形/振动的情况下,也可以在整个物体表面测到一个线性变化的位相。图 2 是空间载波和时间载波在剪切散斑测量中的比较[88]。被测物体是一块四周固支的、在中心点受 z 向载荷的圆板。图 2(a)、(b)、(c)分别是带有空间载波的剪切散斑条纹图、空间二维傅里叶变换之后得到的位相条纹图以及去包裹之后的位相图。从图中可以看出散斑噪声对最终的测量结果还是有比较大的影响的。图 2(d)、(e)、(f)分别是剪切散斑加了时间轴载波以后某个时刻的条纹图、沿着时间轴做一维傅里叶变换之后得到的位相条纹图以及去包裹之后的位相图。由于是在时间轴上做信号处理,即使条纹比较密,也能得到很好的位相分布。激光干涉计量在空间轴上存在散斑噪声,通常情况下沿着时间轴求位相比在空间轴求位相结果要好很多。但是沿着时间轴求位相,需要在时间轴上加载波,这又对高速相机的帧率提出了更高的要求。

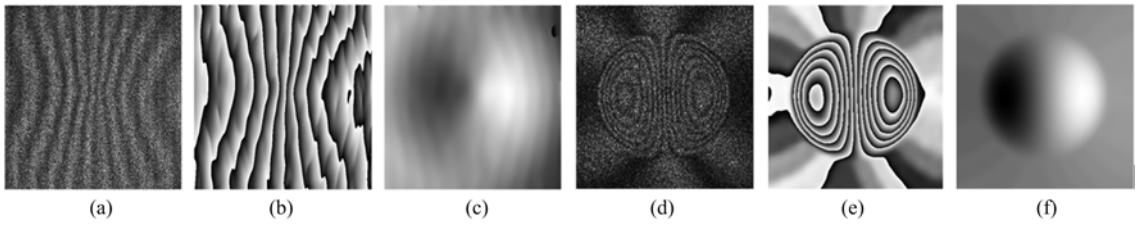


图 2 (a)带有空间载波的剪切散斑条纹;(b) 去包裹前和(c)去包裹后的位相图;(d) 带有时间载波的瞬态剪切散斑条纹;(e) 去包裹前和(f)去包裹之后的位相图 (引用自参考文献[88])

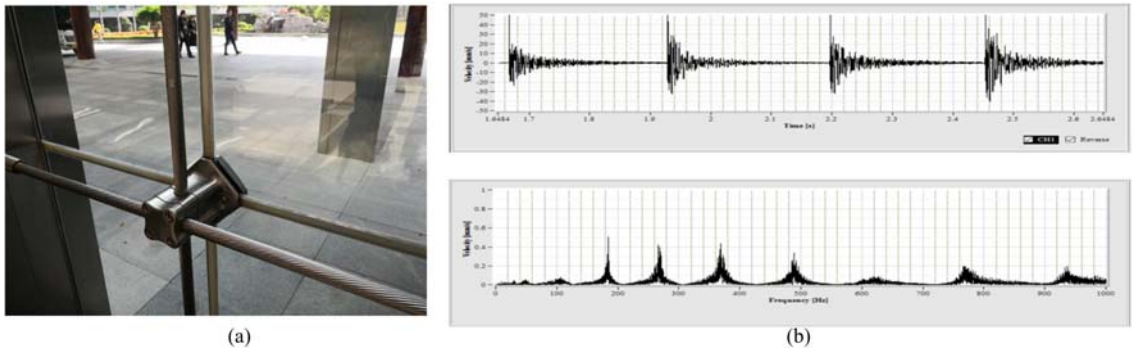
Fig. 2 (a) Shearographic fringe pattern with spatial carrier; (b) wrapped phase and (c) phase map after unwrapping; (d) instantaneous shearographic fringe pattern with temporal carrier; (e) wrapped phase and (f) phase map after unwrapping (reprint from Ref. [88])

鉴于时间和空间载波各自的问题,在非稳态变形的激光干涉测量中可以采用时空同步位相提取方法。例如离轴的数字全息本身就是带有空间载波的光学方法,可以通过单幅数字全息图提取位相,但为了得到沿着时间轴的运动参数,位相提取可以在时-空(x,t)或(y,t)平面上进行 2D 处理[134],甚至可以在(x, y, t)空间进行 3D 处理[120]。另外,空间载波的大小和方向可以在实验中调整,甚至可以在一幅数字全息图中实现双波长测量[135,136],这样可以形成合成波长,降低干涉测量的分辨率,扩大测量范围。总之,针对一个特定的瞬态变形/振动测量采用怎样的实验方式和位相提取算法,是综合考虑相机帧率、

变形大小、激光功率等各个实验条件后平衡的结果。

2.2　基于光电探测器的测量

基于光电探测器的激光多普勒测振技术主要优势在于：(1) 像素的尺寸比高速相机要大；(2) 频率响应宽；(3) 对弱光信号更敏感。以输出带宽为 1GHz 的雪崩型光电探测器为例，像素尺寸为 0.1mm 左右，远大于相机的单个像素尺寸。加上合适的光路设计，对环境振动的影响相对不敏感，因而在工业界中得到普遍应用。当一束激光打在移动的被测物体上，散射回来的光束带有多普勒频偏，而这个频偏同物体的速度成正比。LDV 就是通过参考光和物光的干涉，求得两者之间的频率差。常见的光路设计有以迈克尔逊干涉仪为原型的内差光路，和以 Mach-Zehnder 干涉仪为原型的外差光路。随着声光调制技术的成熟，目前市场上的 LDV 基本上都是加入声光调制器的外差光路。单点的 LDV 只要在电路中设计了足够的带宽，可以满足速度测量的要求，不但可以测量稳态的振动，也可以测量瞬态的变形和振动。最典型的例子就是通过锤击实验测量物体的共振频率[137]，并通过共振频率估算其他力学参数。在拉索桥、拉索玻璃幕墙等结构中，可以通过测量钢索的共振频率，估算拉索的索力[138]。图 3 是 LDV 在玻璃幕墙拉索的锤击实验中测得的瞬态速度变化以及频谱。从频谱中可以清晰地得到钢索的前几阶共振频率。



(a)　　(b)

图 3　(a)玻璃幕墙的固定钢索；(b) LDV 在钢索敲击实验中得到的时间域和频率域信号

Fig. 3　(a) Mounting cable of glass curtain wall; (b) vibration measurement result in time and frequency domain on mounting cable under hammer test

当需要测量一个物体整个表面的瞬态变形/振动时，由于不能再使用扫描方法，因而多点同步测量成为必须。研究人员首先想到的是把多个单点 LDV 组合起来，成为多通道的 LDV(Multi-channel LDV)[139,140]。尤其随着光纤技术的发展，把一路激光分成几路只要通过一个或者几个光纤耦合器就能解决，光纤版的多通道 LDV 就已逐步在市场出现。这样的多通道 LDV 由于每个测量点采用不同的光电探测器和后续解调电路，器件和电路上的同步性成为它的瓶颈。针对 kHz 以下的结构振动，定制的多通道 LDV 基本能保证同步性，但当需要测量高频振动，尤其是进入超声频率之后，多通道 LDV 的同步性就不再满足要求了。

为了在高频测量情况下实现多点振动测量的同步，傅愉在新加坡南洋理工大学的团队提出了一种空间编码技术[141]，该技术采用一个激光器和一个光电探测器，可以实现完全同步的空间 20 点的振动测量[142]。主要思路是采用几个不同的声光调制器的组合实现 20 路分光，与此同时，在每路激光上实现了不同大小的频移(即不同的载波频率)，当这 20 路激光光束打在被测物体上 20 个不同的空间点，每路反射激光就带有了各个不同空间点的多普勒频偏。这 20 路信号合并后同一路参考光进行干涉，并通过一个高频的光电探测器输出含有 20 点振动信息的一维干涉信号。在避免了信号串扰之后[143]，实现了在 20 个空间点的高精度振动测量。由于 20 路振动信号都是从一个一维数字信号中解调出来的，因而无论振动频率多高，都不存在同步问题。图 4 是根据空间编码技术发展的 16 点激光多普勒测振原型机，以及在车身上的多点瞬态振动测量结果。该技术已由新加坡 HoloBright 公司实现产品化。这类产品可以应用于 Lamb 波在结构中的传播[144]，实现超声缺陷检测[145]。

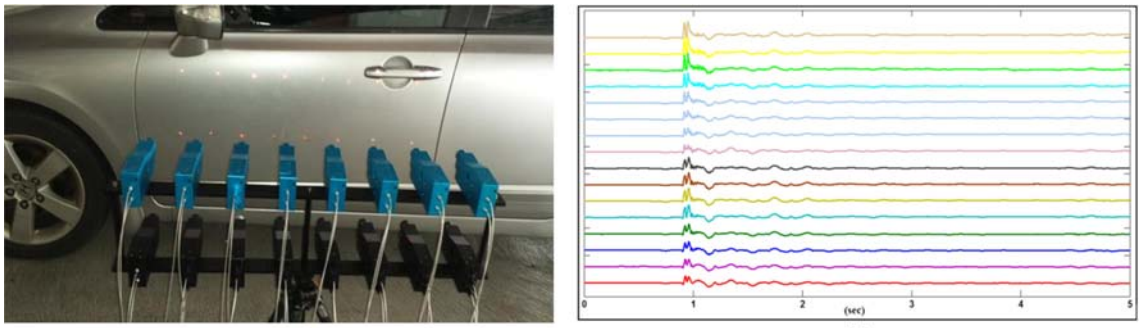


图 4 (a) 基于空间编码技术的 16 点激光多普勒测振原型机;(b) 车身上 16 点同步振动信号

Fig. 4 Prototype of 16-point LDV based on spatial-encoding technology; (b) self-synchronized vibration signal on 16 spatial points of car body

3 干涉动态测量的应用及发展前景

高灵敏度是干涉测量的优点,但高灵敏度带来的对测量环境的高要求也是阻碍其工程应用的弱点。目前基于高速相机的二维干涉测量涵盖了纳米到十微米量级的位移/变形测量范围;而基于光电探测器的一维干涉测量涵盖了亚纳米到毫米量级的位移/变形测量范围。由于图像测量等非干涉技术受限于成像衍射极限,微米量级以下的测量,仍然需要依靠干涉方法,尤其是生物细胞和 MEMS 等微尺寸的动态测量,基于激光干涉的数字全息显微系统和激光多普勒显微系统对此都有广阔的应用前景。而多点的激光多普勒测振系统在横向和纵向的超声探测领域具有应用价值。除了以上的应用前景,笔者认为干涉动态测量方法还会在以下两个方向得到发展:

(1) 随着新型近红外和中红外激光光源以及光电探测器的发展,干涉的灵敏度会随着光源波长的上升而下降,对环境噪声的敏感性也会下降,干涉技术的测量范围则会向大尺度平移。另外由于红外激光的线宽已经可以做到$<$1kHz,相干长度达到了几十千米,因而远距离的干涉测量变成可能。在中、远距离离面方向的测量中,干涉技术相对于成像测量技术具有更高的灵敏度,在某些工程应用中具有一定的优势。因而发展基于红外激光的干涉技术,会给干涉测量带来新的活力。

(2) 基于光电探测器的动态测量技术在测量点离面方向具有从亚纳米到毫米量级的位移测量范围,且具有非常宽的频率响应范围;而单相机,或者双目相机的测量具有很高的空间分辨率。两者在测量范围上有重叠,在时间、空间轴上有各自的采样优势,因而通过两者测量结果的信息融合,尤其在稳态振动分析上,将可能实现在面内(x-, y-)、离面(z-)和时间(t-)四个维度上的高精度、高分辨率的动态测量。

4 结论

本文把激光干涉动态测量分成两大类:基于高速相机的干涉测量和基于光电探测器的干涉测量,并分别在稳态振动和瞬态振动/变形这两大类实际应用中讨论了干涉动态测量方法的优点和存在的问题。作为一种高分辨率、高精度、非接触的测量方式,干涉测量目前在亚纳米到微米量级的变形测量中仍然不可替代。但干涉测量技术对环境要求较高,当环境噪声较高时,不仅会导致真实信号被淹没,甚至会引起整个干涉系统失相关,这是现阶段激光干涉动态测量技术在工程领域应用中最大的制约因素。因而作者建议发展红外波段的激光干涉测量技术,适当降低测量的灵敏度,并通过适应性较强的单点干涉测量与图像测量的信息融合,扩展激光干涉的测量范围,进而给整个技术带来新的活力。同时,作者也希望这篇综述能给不同领域的研究人员和工程师在实际应用中选取最佳的动态测量方案提供有力的参考。

参考文献：

[1] Vest C M. Holographic interferometry[M]. New York: John Wiley, 1979.

[2] 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))

[3] Hung Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):213391.

[4] 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))

[5] 刘宝会，秦玉文，曲日，等. 宽音频扫描加载的电子剪切散斑技术在多层粘接板结构无损检测中的应用[J]. 实验力学，2003，18(2):229－233 (LIU Baohui, QIN Yuwen, QU Ri, et al. Non-destructive test for multiply plywood by using ESSPI with wide audio-frequency driving vibration loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2):229－233 (in Chinese))

[6] 王宝瑞，梁永强，钱克矛. 电子散斑干涉法在平面小振幅振动测量中的应用[J]. 实验力学，2003，18(3):355－359 (WANG Baorui, LIANG Yongqiang, QIAN Kemao. An application of ESPI in small-amplitude vibration measurement for a plane[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(3):355－359 (in Chinese))

[7] Ng T, Chau F. A digital shearing speckle interferometry technique for modal analysis[J]. Applied Acoustics, 1994, 42(2):175－185.

[8] 张伟伟，贺玲凤，顾学甫. 电子剪切散斑在检测材料缺陷中的应用[J]. 实验力学，2006，21(6):753－757 (ZHANG Weiwei, HE Lingfeng, GU Xuefu. Application of electronic shear speckle pattern interferometry to nondestructive evaluation of materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(6): 753－757 (in Chinese))

[9] 周灿林，司书春，徐建强，等. 数字全息干涉相位导数计算的研究[J]. 实验力学，2015，30(2):183－191 (ZHOU Canlin, SI Shuchun, XU Jianqiang, et al. Research on the algorithm of phase derivative in digital holographic interferometry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(2):183－191 (in Chinese))

[10] Asundi A, Singh V R. Digital holography-a new paradigm in imaging, microscopy and metrology[J]. 实验力学，2006，21(1):1－10.

[11] Post D, Han B, Ifju P. High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials[M]. Springer Science & Business Media, 2012.

[12] 刘宝琛，史训清. 云纹干涉反转倍增法及其在微电子组件变形场测量中应用[J]. 实验力学，1996，11(4):133－137，139 (LIU Baochen, SHI Xunqing. The reverse multiplicate method of moire interferometry and its application to measure deformation of microelectronics package[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11 (4):133－137, 139 (in Chinese))

[13] 孙祥一，于起峰. 一种通过条纹方向图提取散斑条纹中心线的方法[J]. 实验力学，2001，16(4):427－432 (SUN Xiangyi, YU Qifeng. A method for picking up fringe skeletons of speckle pattern from fringe orientation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4):427－432 (in Chinese))

[14] 张熹，孙平，王海峰. 三维相移电子散斑干涉法在柴油机机身中的应用[J]. 实验力学，2002，17(4):393－397 (ZHANG Xi, SUN Ping, WANG Haifeng. 3D-ESPI with phase-shifting and its application in diesel engine research[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(4):393－397 (in Chinese))

[15] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Optics Letters, 1997, 22(16):1268－1270.

[16] Takeda M. Spatial-carrier fringe-pattern analysis and its applications to precision interferometry and profilometry: an overview[J]. Industrial Metrology, 1990, 1(2):79－99.

[17] Shan M, Hao B, Zhong Z, et al. Parallel two-step spatial carrier phase-shifting common-path interferometer with a Ronchi grating outside the Fourier plane[J]. Optics Express, 2013, 21(2):2126－2132.

[18] 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.

[19] 唐颖，姚骏，陈巨兵. 一种基于投影云纹法的三维形貌测量技术及其标定方法[J]. 实验力学，2018，33(5):665

－674 (TANG Ying, YAO Jun, CHEN Jubing. A 3-D profile measurement technique and its calibration method based on projected moiré method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(5):665－674 (in Chinese))

[20] Tang Y, Yao J, Chen J. Novel method for increasing accuracy of projection moiré contouring of large surfaces[J]. Optics Express, 2016, 24(18):21190－21204.

[21] Tang Y, Yao J, Zhou Y, et al. Calibration of an arbitrarily arranged projection moiré system for 3D shape measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104:135－140.

[22] Dirckx J J, Decraemer W F. Automatic calibration method for phase shift shadow moiré interferometry[J]. Applied Optics, 1990, 29(10):1474－1476.

[23] Seif M A, Khashaba U A, Rojas-Oviedo R. Measuring delamination in carbon/epoxy composites using a shadow moiré laser based imaging technique[J]. Composite Structures, 2007, 79(1):113－118.

[24] Han C, Han B. Error analysis of the phase-shifting technique when applied to shadow moiré[J]. Applied Optics, 2006, 45(6):1124－1133.

[25] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2):149－158.

[26] Pan B, Kemao Q, Huang L, et al. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry[J]. Optics Letters, 2009, 34(4):416－418.

[27] Pan B, Xie H, Gao J, et al. Improved speckle projection profilometry for out-of-plane shape measurement[J]. Applied Optics, 2008, 47(29):5527－5533.

[28] 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. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6):556－567 (in Chinese))

[29] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. 实验力学, 2017, 32(5):699－717 (SU Yong, ZHANG Qingchuan. Noise-induced bias and evaluation criterion of speckle quality in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):699－717 (in Chinese))

[30] 孟利波, 马少鹏, 金观昌. 数字散斑相关测量中亚像素位移测量方法的比较[J]. 实验力学, 2003, 18(3):343－348 (MENG Libo, MA Shaopeng, JIN Guanchang. On the performance of the subpixel displacement estimations used in digital speckle correlation method (DSCM) [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(3):343－348 (in Chinese))

[31] 刘强, 周轶昊, 孙晨, 等. 基于数字图像相关的裂纹端部全场三维变形实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1):49－58 (LIU Qiang, ZHOU Yihao, SUN Chen, et al. Experimental investigation on full three-dimensional deformation near crack tip based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1):49－58 (in Chinese))

[32] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2):120－129 (PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2):120－129 (in Chinese))

[33] 何小元, 朱飞鹏, 徐莹雋, 等. 基于频闪栅线投影的三维微结构高频动态测试系统[J]. 实验力学, 2011, 26(5):592－602 (HE Xiaoyuan, ZHU Feipeng, XU Yingjuan, et al. High-frequency 3D dynamic measurement system of micro-devices based on stroboscopic fringe projection[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):592－602 (in Chinese))

[34] 胡而已, 何玉明, 陈炎明. 投影栅相移法中的相位波动误差及修正算法研究[J]. 实验力学, 2008, 23(4):345－352 (HU Eryi, HE Yuming, CHEN Yanming. Study on phase error with periodic wave behavior and a new algorithm in projected grating phase-shifting profilometry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(4):345－352 (in Chinese))

[35] Tay C J, Quan C, Huang Y, et al. Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera[J]. Optics Communications, 2005, 251(1-3):23－36.

[36] 侯方, 雷冬, 龚兴龙. 结合数码显微镜的数字散斑相关方法精度分析及应用[J]. 实验力学, 2009, 24(4):269－275 (HOU Fang, LEI Dong, GONG Xinglong. Analysis of digital image correlation method coupling with digital

microscopy and its application[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(4):269－275 (in Chinese))

[37] 于起峰，尚洋，伏思华，等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学，2011，26(5):479－490 (YU Qifeng, SHANG Yang, FU Sihua, et al. Development of videometrics for large-scale structual deformation and topography measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):479－490 (in Chinese))

[38] Feneyrou P, Leviandier L, Minet J, et al. Novel development for FMCW lidar[C]. Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications, 2018:SM3H. 2.

[39] Yamaguchi I, Ida T, Yokota M, et al. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift[J]. Applied Optics, 2006, 45(29):7610－7616.

[40] 于起峰. 光测条纹图处理中免除噪声的正则化条纹法[J]. 实验力学，1999，14(3):294－301 (YU Qifeng. Noise free normalized fringe method for interferometric fringe processing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1999, 14(3):294－301 (in Chinese))

[41] 李凯. 基于多通道滤波技术的散斑条纹图正则化方法[J]. 实验力学，2010，25(6):633－640 (LI Kai. A new method for speckle fringe pattern normalization based on multichannel filtering[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6):633－640 (in Chinese))

[42] Francis D, Tatam R, Groves R. Shearography technology and applications: a review[J]. Measurement science and technology, 2010, 21(10):102001.

[43] Liu B, Wei Q, Tu J, et al. Inspection of the interior surface of cylindrical vessels using optic fiber shearography [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(9):095202.

[44] Cloud G. Optical methods in experimental mechanics[J]. Experimental Techniques, 2009, 33(5):13－17.

[45] Yang C, Guo M, Liu H, et al. A multi-point laser Doppler vibrometer with fiber-based configuration[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(12):121702.

[46] 胡斌，贺玲凤，张蕊. 橡胶材料弹性模量数字图像相关测定法[J]. 实验力学，2011，26(2):151－157 (HU Bin, HE Lingfeng, ZHANG Rui. Digital image correlation method for rubber elastic modulus measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(2):151－157 (in Chinese))

[47] 牛永强，胡秋实，闫德莹，等. 基于数字图像体相关的物体内部三维位移场分析[J]. 实验力学，2011，26(3):247－253 (NIU Yongqiang, HU Qiushi, YAN Deying, et al. Internal 3D displacement analysis using digital image volumn correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3):247－253 (in Chinese))

[48] 朱飞鹏，王京荣，雷冬，等. 三维 DIC 在 GFRP 锚杆拉伸力学性能测试中的应用[J]. 实验力学，2014，29(3):302－309 (ZHU Feipeng, WANG Jingrong, LEI Dong, et al. Application of 3D-DIC in tensile mechanical properties test for glass fiber reinforced plastic bolt[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3):302－309 (in Chinese))

[49] 尚洋，于起峰，关棒磊，等. 大型结构变形监测摄像测量研究进展[J]. 实验力学，2017，32(5):593－600 (SHANG Yang, YU Qifeng, GUAN Banglei, et al. Recent advances of videometrics for large-scale structure deformation monitoring[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):593－600 (in Chinese))

[50] 邵新星，陈振宁，戴云彤，等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学，2017，32(3):305－325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, DAI Yuntong, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(3):305－325 (in Chinese))

[51] 秦玉文，戴嘉彬，陈金龙. 电子散斑方法的进展[J]. 实验力学，1996，11(4):63－69 (QIN Yuwen, DAI Jiabin, CHEN Jinlong. Developments on electronic speckle method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(4):63－69 (in Chinese))

[52] Rasouli S, Daemi M H. Rotation-sensitive and direction-resolved homodyne laser-Doppler vibrometry method for simultaneous measurement of rotational and translational vibrations of a rigid object using a 1D array detector[J]. Optics Express, 2020, 28(6):8658－8667.

[53] Shi H, Fu Y, Quan C, et al. Vibration measurement of a micro-structure by digital holographic microscopy[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6):065301.

[54] 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.

[55] Bone D J. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem[J]. Applied Optics, 1991, 30

(25):3627－3632.

[56] Takeda M. Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review[J]. Applied Optics, 2013, 52(1):20－29.

[57] Kemao Q, Wang H, Gao W. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses[J]. Applied Optics, 2008, 47(29):5408－5419.

[58] Kemao Q. Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66:67－73.

[59] Zhong J, Weng J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry[J]. Applied Optics, 2004, 43(26):4993－4998.

[60] Zhong J, Weng J. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform[J]. Optics Letters, 2005, 30(19):2560－2562.

[61] Yu Q, Sun X, Liu X, et al. Spin filtering with curve windows for interferometric fringe patterns[J]. Applied Optics, 2002, 41(14):2650－2654.

[62] Rothberg S, Allen M, Castellini P, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: making light work of vibration measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99:11－22.

[63] Di Sante R, Scalise L. A novel fiber optic sensor for multiple and simultaneous measurement of vibration velocity [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(6):1952－1958.

[64] Zhong Y, Zhang G, Leng C, et al. A differential laser Doppler system for one-dimensional in-plane motion measurement of MEMS[J]. Measurement, 2007, 40(6):623－627.

[65] Pieczonka Ł, Ambroziński Ł, Staszewski W J, et al. Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99:80－87.

[66] 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))

[67] Li D, Zhuge H, Wang B. The principle and techniques of experimental strain modal analysis[C]. International Modal Analysis Conference, 7th, Las Vegas, NV, 1989:1285－1289.

[68] 王文静, 刘志明, 缪龙秀. 基于实验模态的结构应变模态分析[J]. 北方交通大学学报, 2000(4):20－23, 28 (WANG Wenjing, LIU Zhiming, MIU Longxiu. The strain modal analysis of structure based on modal testing [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2000(4):20－23, 28 (in Chinese))

[69] 顾培英, 邓昌, 汤雷. 基于工作应变模态损伤识别方法的试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11):175－178 (GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. Experimental study on damage identification based on operational strain modal shape[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11):175－178 (in Chinese))

[70] 陆秋海, 周舟, 李德葆, 等. 结构应变模态辨识的特征系统实现方法[J]. 机械强度, 2004(1):1－5 (LU Qiuhai, ZHOU Zhou, LI Debao, et al. Structural strain modes identification method by eigensystem realization algorithm [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004(1):1－5 (in Chinese))

[71] Yang C, Fu Y, Yuan J, et al. Damage identification by using a self-synchronizing multipoint laser doppler vibrometer[J]. Shock and Vibration, 2015(2):1－9.

[72] Stetson K A. Effects of beam modulation on fringe loci and localization in time-average hologram interferometry [J]. JOSA, 1970, 60(10):1378－1388.

[73] Ishii Y. Time-average holographic interferometry with a sinusoidally modulated laser diode[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(5):515－526.

[74] Thomas B P, Annamala Pillai S, Narayanamurthy C S. Investigation on vibration excitation of debonded sandwich structures using time-average digital holography[J], 2017, 56(13):F7－F13.

[75] 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.

[76] 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.

[77] 马银行, 蒋汉阳, 戴美玲, 等. 基于电子散斑干涉与数字剪切散斑干涉法的悬臂薄板振动分析[J]. 光学学报,

2019，39(4)：56－64（MA Yinhang，JIANG Hanyang，DAI Meiling，et al. Cantilevered plate vibration analysis based on electronic speckle pattern interferometry and digital shearing speckle pattern interferometry[J]. Acta Optica Sinica，2019，39(4)：56－64 ((in Chinese))

[78] De Greef D，Soons J，Dirckx J J. Digital stroboscopic holography setup for deformation measurement at both quasi-static and acoustic frequencies[J]. International Journal of Optomechatronics，2014，8(4)：275－291.

[79] Alexeenko I，Gusev M，Gurevich V. Separate recording of rationally related vibration frequencies using digital stroboscopic holographic interferometry[J]. Applied Optics，2009，48(18)：3475－3480.

[80] Zhu L，Wu S，Yang L. Stroboscopic digital shearographic system for vibration analysis of large-area object[J]. Instruments and Experimental Techniques，2014，57(4)：493－498.

[81] Pedrini G，Pfister B，Tiziani H. Double pulse-electronic speckle interferometry[J]. Journal of Modern Optics，1993，40(1)：89－96.

[82] Pedrini G，Osten W，Gusev M E. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement[J]. Applied Optics，2006，45(15)：3456－3462.

[83] 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.

[84] Stanbridge A，Ewins D. Measurement of translational and angular vibration using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. Shock and Vibration，1996，3(2)：141－152.

[85] 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))

[86] Stanbridge A，Ewins D. Modal testing using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，1999，13(2)：255－270.

[87] Devriendt C，Steenackers G，De Sitter G，et al. From operating deflection shapes towards mode shapes using transmissibility measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2010，24(3)：665－677.

[88] Fu Y，Guo M，Liu H. Determination of instantaneous curvature and twist by digital shearography[J]. Optical Engineering，2012，51(8)：083602.

[89] Tay C J，Fu Y. Determination of curvature and twist by digital shearography and wavelet transforms[J]. Optics Letters，2005，30(21)：2873－2875.

[90] De Lega X C，Jacquot P. Deformation measurement with object-induced dynamic phase shifting[J]. Applied Optics，1996，35(25)：5115－5121.

[91] Huntley J M，Kaufmann G H，Kerr D. Phase-shifted dynamic speckle pattern interferometry at 1kHz[J]. Applied Optics，1999，38(31)：6556－6563.

[92] Kaufmann G H. Nondestructive testing with thermal waves using phase-shifted temporal speckle pattern interferometry[J]. Optical Engineering，2003，42(7)：2010－2015.

[93] Kao C-C，Yeh G-B，Lee S-S，et al. Phase-shifting algorithms for electronic speckle pattern interferometry[J]. Applied Optics，2002，41(1)：46－54.

[94] Dong C，Li K，Jiang Y，et al. Evaluation of thermal expansion coefficient of carbon fiber reinforced composites using electronic speckle interferometry[J]. Optics Express，2018，26(1)：531－543.

[95] Ye Y，Ma K，Zhou H，et al. An automated shearography system for cylindrical surface inspection[J]. Measurement，2019，135：400－405.

[96] Van Haasteren A J，Frankena H J. Real-time displacement measurement using a multicamera phase-stepping speckle interferometer[J]. Applied Optics，1994，33(19)：4137－4142.

[97] Kemao Q，Hong M，Xiaoping W. Real-time polarization phase shifting technique for dynamic deformation measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering，1999，31(4)：289－295.

[98] Millerd J，Brock N，Hayes J，et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometers[M]// Fringe 2005. Springer，Berlin，Heidelberg，2006：640－647.

[99] Huang P S，Hu Q，Jin F，et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed 3-D surface contouring[J]. Optical Engineering，1999，38：1065－1071.

[100] Bai F, Han F, Xu Y, et al. Modified Fourier-transform method for phase-shift calibration[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7):932－936.

[101] Bone D J, Bachor H-A, Sandeman R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform[J]. Applied Optics, 1986, 25(10):1653－1660.

[102] Hahn S L. Hilbert transforms in signal processing[M]. Artech House Boston, 1996.

[103] Kemao Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(2):304－317.

[104] Quan C, Fu Y, Tay C J, et al. Profiling of objects with height steps by wavelet analysis of shadow moiré fringes [J]. Applied Optics, 2005, 44(16):3284－3290.

[105] Tay C J, Quan C, Fu Y, et al. Instantaneous velocity displacement and contour measurement by use of shadow moiré and temporal wavelet analysis[J]. Applied Optics, 2004, 43(21):4164－4171.

[106] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. JOSA, 1982, 72(1):156－160.

[107] Kujawinska M. Automated moiré interferometry for local and global analysis of transient phenomena [J]. Advances in Electronic Packaging, 1995, 10:2.

[108] Joenathan C, Franze B, Haible P, et al. Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation[J]. Applied Optics, 1998, 37(13):2608－2614.

[109] Joenathan C, Franze B, Haible P, et al. Large in-plane displacement measurement in dual-beam speckle interferometry using temporal phase measurement[J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(9):1975－1984.

[110] Joenathan C, Franze B, Haible P, et al. Novel temporal Fourier transform speckle pattern shearing interferometer[J]. Optical Engineering, 1998, 37(6):1790－1795.

[111] Joenathan C, Franze B, Haible P, et al. Shape measurement by use of temporal Fourier transformation in dual-beam illumination speckle interferometry[J]. Applied Optics, 1998, 37(16):3385－3390.

[112] Joenathan C, Haible P, Tiziani H J. Speckle interferometry with temporal phase evaluation: influence of decorrelation, speckle size, and nonlinearity of the camera[J]. Applied Optics, 1999, 38(7):1169－1178.

[113] Kaufmann G H, Galizzi G E. Phase measurement in temporal speckle pattern interferometry: comparison between the phase-shifting and the Fourier transform methods[J]. Applied Optics, 2002, 41(34):7254－7263.

[114] De Lega X C. Processing of non-stationary interference patterns: adapted phase-shifting algorithms and wavelet analysis: application to dynamic deformation measurements by holographic and speckle interferometry [D]. Verlag Nicht Ermittelbar, 1997.

[115] Fu Y, Tay C J, Quan C, et al. Wavelet analysis of speckle patterns with a temporal carrier[J]. Applied Optics, 2005, 44(6):959－965.

[116] Federico A, Kaufmann G H. Robust phase recovery in temporal speckle pattern interferometry using a 3D directional wavelet transform[J]. Optics Letters, 2009, 34(15):2336－2338.

[117] Fu Y, Tay C J, Quan C, et al. Temporal wavelet analysis for deformation and velocity measurement in speckle interferometry[J]. Optical Engineering, 2004, 43(11):2780－2788.

[118] Stockwell R, Mansinha L, Lowe R. Localisation of the complex spectrum: the S transform[J]. Journal of Association of Exploration Geophysicists, 1996, 17(3):99－114.

[119] Ruiz P D, Huntley J M, Kaufmann G H. Adaptive phase-shifting algorithm for temporal phase evaluation[J]. JOSA A, 2003, 20(2):325－332.

[120] Qian K, Fu Y, Liu Q, et al. Generalized three-dimensional windowed Fourier transform for fringe analysis[J]. Optics Letters, 2006, 31(14):2121－2123.

[121] Fu Y, Pedrini G, Osten W. Vibration measurement by temporal Fourier analyses of a digital hologram sequence [J]. Applied Optics, 2007, 46(23):5719－5727.

[122] Li X, Wang K, Deng B. Matched correlation sequence analysis in temporal speckle pattern interferometry[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(4):315－322.

[123] 李喜德. 时间序列散斑干涉技术的发展及应用[J]. 实验力学, 2002, 17(3):279－283 (LI Xide. Progress of time-sequence speckle metrology and its applications[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(3):279－

283 (in Chinese))

[124] Li X, Tao G, Yang Y. Continual deformation analysis with scanning phase method and time sequence phase method in temporal speckle pattern interferometry[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(1):53－59.

[125] Quan C, Fu Y, Tay C J. Determination of surface contour by temporal analysis of shadow moiré fringes[J]. Optics Communications, 2004, 230(1-3):23－33.

[126] Tay C J, Quan C, Fu Y, et al. Surface profile measurement of low-frequency vibrating objects using temporal analysis of fringe pattern[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(6):471－476.

[127] Kai L, Kemao Q. Fast frequency-guided sequential demodulation of a single fringe pattern[J]. Optics Letters, 2010, 35(22):3718－3720.

[128] Wang H, Kemao Q. Frequency guided methods for demodulation of a single fringe pattern[J]. Optics Express, 2009, 17(17):15118－15127.

[129] Dalmau-Cedeño O S, Rivera M, Legarda-Saenz R. Fast phase recovery from a single closed-fringe pattern[J]. JOSA A, 2008, 25(6):1361－1370.

[130] Li K, Pan B. Frequency-guided windowed Fourier ridges technique for automatic demodulation of a single closed fringe pattern[J]. Applied Optics, 2010, 49(1):56－60.

[131] Servin M, Estrada J, Quiroga A. Single-image interferogram demodulation[M]. Advances in Speckle Metrology and Related Techniques, 2011:105－146.

[132] Fu Y. Low-frequency vibration measurement by temporal analysis of projected fringe patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2):226－234.

[133] Quan C, Fu Y, Miao H. Wavelet analysis of digital shearing speckle patterns with a temporal carrier[J]. Optics Communications, 2006, 260(1):97－104.

[134] Fu Y, Shi H, Miao H. Vibration measurement of a miniature component by high-speed image-plane digital holographic microscopy[J]. Applied Optics, 2009, 48(11):1990－1997.

[135] Fu Y, Pedrini G, Hennelly B M, et al. Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(5):552－557.

[136] Xie X, Chen X, Li J, et al. Measurement of in-plane strain with dual beam spatial phase-shift digital shearography[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(11):115202.

[137] 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, 2010, 24(3):721－735.

[138] Chen S-E, Petro S. Nondestructive bridge cable tension assessment using laser vibrometry[J]. Experimental Techniques, 2005, 29(2):29－32.

[139] Dirckx J, Van Elburg H, Decraemer W, et al. Performance and testing of a four channel high-resolution heterodyne interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3-4):488－494.

[140] Zheng W, Kruzelecky R V, Changkakoti R. Multichannel laser vibrometer and its applications[C]. Third International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 1998:376－384.

[141] Fu Y, Guo M, Phua P B. Spatially encoded multibeam laser Doppler vibrometry using a single photodetector[J]. Optics Letters, 2010, 35(9):1356－1358.

[142] 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.

[143] Fu Y, Guo M, Phua P B. Cross-talk prevention in optical dynamic measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4):547－555.

[144] Rajic N, Rosalie C, Norman P, et al. Determination of the in-plane components of motion in a Lamb wave from single-axis laser vibrometry[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(6):3446－3454.

[145] Lemistre M, Balageas D. Structural health monitoring system based on diffracted Lamb wave analysis by multiresolution processing[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(3):504.

Engineering-oriented laser interferometric dynamic measurement: a review

FU Yu[1,2], CHEN Bing[1,2], YAN Keyu[1,2], MIAO Hong[3], YU Qifeng[1,2,4]

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Institute of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 4. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Since the beginning of the 21st century, laser interferometry, as a mature non-contact dynamic measurement technology, has been applied to various industrial areas. It can be divided into two categories: high-speed camera-based and photodetector-based technologies, respectively. Both types of technologies have their own limitations: high-speed camera-based technologies are limited by the capturing rate; while photodetector-based technologies can only perform single-point measurements. Aiming at two practical applications of steady-state vibration and unsteady-state vibration or deformation, this review discusses some of the latest developments of both technologies. The authors hope the review would throw some light on the guidelines when the researchers and engineers in different areas choose better measurement solutions for various applications.

Keywords: dynamic measurement; laser interferometry; deformation measurement; vibration measurement; laser Doppler vibrometry