

文章编号: 1001-4888(2018)05-0685-11

利用有限测点的振动位移预测全局应变的研究^{*}

邓华夏, 陈帅, 王君, 张进, 马孟超, 钟祥

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘要: 在结构的健康监测中, 应变和位移是较为常用的监测对象。传统的位移和应变获取主要采用接触式测量, 如粘贴加速度传感器或应变片, 虽然这种方法应用广泛但是对于轻质或旋转结构较为困难。非接触测量由于没有附加质量故可以获得较为精确的振动位移, 但如何利用位移获取全局应变的研究还相对缺少。本文主要采用双目立体视觉技术获取结构上有限测点的振动位移, 通过模态扩展理论将有限测点的位移扩展为全局位移, 并根据应变模态与材料力学中应变和位移的关系预测结构的全局应变。在不同的激励情况下, 将本文方法的预测结果与应变片测量结果对比, 结果表明本文方法具有一定可行性, 能够进行全场的非接触式应变测试。

关键词: 双目视觉; 全局预测; 应变模态; 模态扩展

中图分类号: TM930.12

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-038

0 引言

有效监测是结构安全运行的有效保证, 应变和位移是结构健康监测的主要参数^[1,2]。位移的测量方法主要包括接触式测量和非接触式测量。传感器是位移接触式测量最为常用的工具, 但是由于测量过程存在附加质量故难以满足轻质结构的精度需求^[3,4]。激光测量和机器视觉测量是非接触测量最常用的两种方法。从 Barish 利用激光测量地震的引力波微振动^[5], 到 Halkon 等实现角度振动的俯仰测量^[6], 可获取一个振动点的精准位移, 但对结构振动的方向突变测量却是一个挑战。DIC 和 3DPT 都是基于双目立体视觉的非接触测量方法, 在动态测量领域得到了广泛的应用。DIC 测量不仅可以实现振动的位移测量而且可以获取应变信息^[7,8], 对全局振动响应的测量具有相对优势, 但是需要提前喷涂处理。3DPT 方法仅需将标志点贴在测量物体表面, 通过三维重建就可以获取结构的振动位移^[9-13]。Lundstrom 等和 Wang 采用 3DPT 方法分别得到 2.56m 直径涡轮和悬臂梁的动态数据^[9,10]。为了进一步提高 3DPT 方法的精度, Li 等分析了 3DPT 方法动态测试的误差分布, 并提出提高三维重建精度的可能性^[11]。邓华夏团队基于 3DPT 方法实现了正弦运动的高精度重建, 并用该方法重建了转台轴的运动轨迹, 进行故障诊断与分析^[12,13]。

应变的测量方法也有很多, 其中应变片最为常用。Dos 等采用应变片对 F-16 飞机进行地面振动试验, 并对比了应变模态与位移模态的灵敏度^[14]。亢景付等利用振弦式混凝土应变计测量温度作用产生的温度应力^[15]。虽然应变片的使用方便、测量精度较高, 但是除了本身容易受环境的影响不适于长期测量之外, 对于旋转或高速运行结构的测量也有一定的困难。3D-DIC 作为一种应变测量的非接触式方

^{*} 收稿日期: 2018-03-01; 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51575156, 51675156, 51775164, 51705122), 中央高校基本科研基金(JZ2017HGPA0165, PA2017GDQT0024)

通讯作者: 邓华夏(1982—), 男, 教授, 从事磁流变减振技术、系统振动分析、动态测试技术、智能执行机构的研制与开发。Email: hxdeng@hfut.edu.cn

法,受到越来越多研究者的关注。Kulha 等利用三维 DIC 提取风力机叶片的模态形状和固有频率^[16]。宋秋等结合 DIC 方法和钻孔法开发出残余应力快速测量系统^[17]。朱飞鹏等基于三维 DIC 方法得到应力—应变曲线及弹性模量等参数^[18]。虽然 3D-DIC 测量的应变结果具有较高精度,但是在某些特定的场合不太适用,而且对于在线测量,DIC 测量的速度还有待于提高。

早期,国外研究者对位移模态和应变模态之间关系的阐述及国内学者对“应变模态”模型的建立,为位移到应变的转换奠定了基础^[19-21]。Baqersad 等通过 3DPT 测量涡轮机叶片位移与有限元分析获取了叶片的全局应变^[22];Pingle 等利用相同的测量技术以悬臂梁为研究对象,实现了位移到应变的转化^[23]。采用 3DPT 测量由于受测量点数量的限制,而无法根据有限点的位移对全局应变进行预测,因此利用有限测点实现全局预测的扩展技术是必不可少的。Iliopoulos 等扩展了有限加速度测量的位移并预测风力涡轮机塔架的动应力^[24,25]。Chipman 等对几种不同的结构进行扩展,以验证扩展技术的鲁棒性^[26],而且扩展技术还能应用于复杂组合结构的故障诊断^[27]。

为了实现应变的在线测量,本文利用双目立体视觉技术和模态扩展技术相结合,通过三维重建获取高精度的有限点的振动位移,采用模态扩展技术得到全局的位移量,并根据位移模态与应变模态的关系,实现全局应变的预测。为了验证该方法的鲁棒性,本文以梁结构为例,分析不同激励条件下预测全局位移和应变的准确性。

1 原理

1.1 有限测点位移到全局位移预测

利用双目立体视觉测量振动位移时,只能获取有限测点的信息。为获取全局的振动数据,则需要采用扩展技术。根据扩展技术建立有限测点位移与全场位移的关系,其过程如下:

$$[U_n] = \begin{bmatrix} U_a \\ U_d \end{bmatrix} = T[U_a] \quad (1)$$

式中, $[U_a]$ 、 $[U_d]$ 和 $[U_n]$ 分别表示测量点的位移、未测量点的位移和全场的位移; T 表示扩展矩阵。由于结构模态振型是连续函数,故可利用模态理论进行扩展矩阵的计算。

根据线性系统的叠加理论,系统的响应与各阶模态之间可表示为:

$$[U_n] = [\Phi_n][q] \quad (2)$$

式中, $[\Phi_n]$ 表示系统全场的模态振型; $[q]$ 表示各阶模态对响应的贡献量,也称为模态坐标。联立式(1)和式(2),全场的位移可表示为:

$$[U_n] = \begin{bmatrix} U_a \\ U_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_d \end{bmatrix} [q] \quad (3)$$

式中, $[\Phi_a]$ 和 $[\Phi_d]$ 分别表示测量点和未测量点的模态振型,故测量点处的响应可以表示为:

$$[U_a] = [\Phi_a][q] \quad (4)$$

由于 $[\Phi_a]$ 不一定是方阵,不能直接采用求逆的方法计算模态坐标 $[q]$ 。为了计算模态坐标,将式(4)左右两边同时乘以 $[\Phi_a]^T$,得到:

$$[\Phi_a]^T[U_a] = [\Phi_a]^T[\Phi_a][q] \quad (5)$$

$[\Phi_a]^T[\Phi_a]$ 是一个方阵,模态坐标 $[q]$ 可以表示为:

$$[q] = ([\Phi_a]^T[\Phi_a])^{-1}[\Phi_a]^T[U_a] \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)中,全场的振动位移 $[U_n]$ 可以表示为:

$$[U_n] = [\Phi_n]([\Phi_a]^T[\Phi_a])^{-1}[\Phi_a]^T[U_a] \quad (7)$$

对比式(1)与式(7)可以得到扩展矩阵 T 为:

$$T = [\Phi_n]([\Phi_a]^T[\Phi_a])^{-1}[\Phi_a]^T \quad (8)$$

通过以上模态扩展方法能实现有限测点的振动位移到全局振动位移的扩展。从公式(7)可以看出,当已知有限测点的振动位移及模态振型时,即可预测全场的振动位移,但是全局振动位移预测的精度主要由振动位移及模态振型共同决定。

1.2 位移到应变的转化理论

利用模态扩展理论, 实现有限测量点到全局位移的预测, 对实现应变的在线测量是很有意义的。位移的在线测量方法很容易得到, 但是应变的在线测量相对困难。以梁为例, 根据弯曲理论可得位移与应变的关系:

$$\epsilon_x = -y \frac{\partial^2 [U_n]}{\partial x^2} \quad (9)$$

式中, ϵ_x 为沿 x 方向的应变, y 为 x 位置在梁高方向距中性轴的距离。根据式(2), 式(9)又可以表示为:

$$\epsilon_x = -y \frac{\partial^2 [U_n]}{\partial x^2} = -y \frac{\partial^2 ([\Phi_n][q])}{\partial x^2} \quad (10)$$

由于 $[q]$ 仅是时间和频率的函数, 它与 x 没有明显的函数关系。故式(10)可转化为:

$$\epsilon_x = -y \frac{\partial^2 [\Phi_n]}{\partial x^2} [q] \quad (11)$$

式中, $-y \frac{\partial^2 [\Phi_n]}{\partial x^2}$ 为应变模态。结合模态坐标的计算式(6), 全场的应变表达式如式(12)所示:

$$\epsilon_x = -y \frac{\partial^2 [\Phi_n]}{\partial x^2} ([\Phi_a]^T [\Phi_a])^{-1} [\Phi_a]^T [U_a] \quad (12)$$

1.3 位移和应变的定性判定

为了验证模态扩展技术和位移到应变转化的可行性, 本文利用两个准则分别对预测的位移和应变进行判定, 其表达式如下所示:

$$\text{TRAC}_{U_{ij}} = \frac{([U_i]^T [U_j])^2}{([U_i]^T [U_i])([U_j]^T [U_j])} \quad (13)$$

$$\text{TRAC}_{\epsilon_{ij}} = \frac{[\epsilon_i^T \epsilon_i][\epsilon_j^T \epsilon_j]}{[\epsilon_i^T \epsilon_i][\epsilon_j^T \epsilon_j]} \quad (14)$$

$\text{TRAC}_{U_{ij}}$ 为振动位移判定准则, $[U_i]$ 和 $[U_j]$ 分别代表了预测位移和实测位移。 $\text{TRAC}_{\epsilon_{ij}}$ 为应变判定准则, ϵ_i 和 ϵ_j 分别代表预测应变和应变片测量数据。TRAC 的值范围是 0 到 1, 越接近 1 表示预测结果与实测情况吻合度越高, 也就越准确。相反地, 越接近 0, 说明预测结果与实测结果相似性越低, 预测结果越不准确。

2 数值仿真

为验证本文理论的可行性, 首先进行仿真分析。以固支梁为例, 在正弦激励和随机激励两种情况下分析位移和应变。固支梁的几何尺寸分别是长 200mm、宽 20mm、厚 2mm, 梁的弹性模型为 200GPa, 密度为 7870kg/m³。固支梁的示意图如图 1 所示, 梁被均分为 20 等份, 每份长 10mm, 其中 I、II 和 III 处直接获取应变。

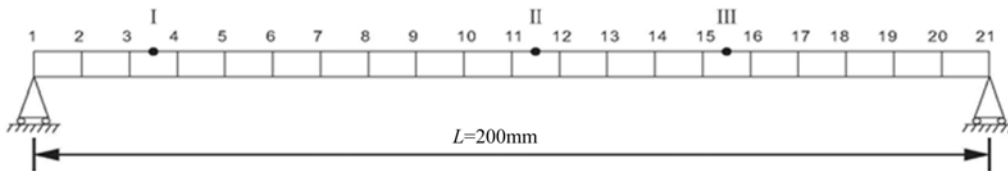


图 1 固支梁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the clamped beam

2.1 正弦载荷下的全场动应变估计

为验证正弦载荷作用时预测全场动应变的有效性, 将幅值为 200N、频率为 2π 的正弦激励施加在节点 11 处, 作用时间为 6s。同时选择 1~21 测点的位移数据, 通过模态扩展技术得到 I、II 和 III 处的位移数据并与参考位移对比, 如图 2 所示。从图中可以看出, TRAC_U 均在 0.99 以上, 所以本文方法在正弦激励下可以准确地预测全场的位移。然后根据梁的弯曲理论中位移与应变的关系可以求得在 I、II 和 III 处的应变, 并与参考值进行对比, 如图 3 所示。根据应变判断准则, 三个位置处的 TRAC_{ϵ} 均为

0.999,说明利用本文方法扩展得到的应变与参考值有很好的 consistency,正弦载荷能够适用于梁结构全场应变测量。

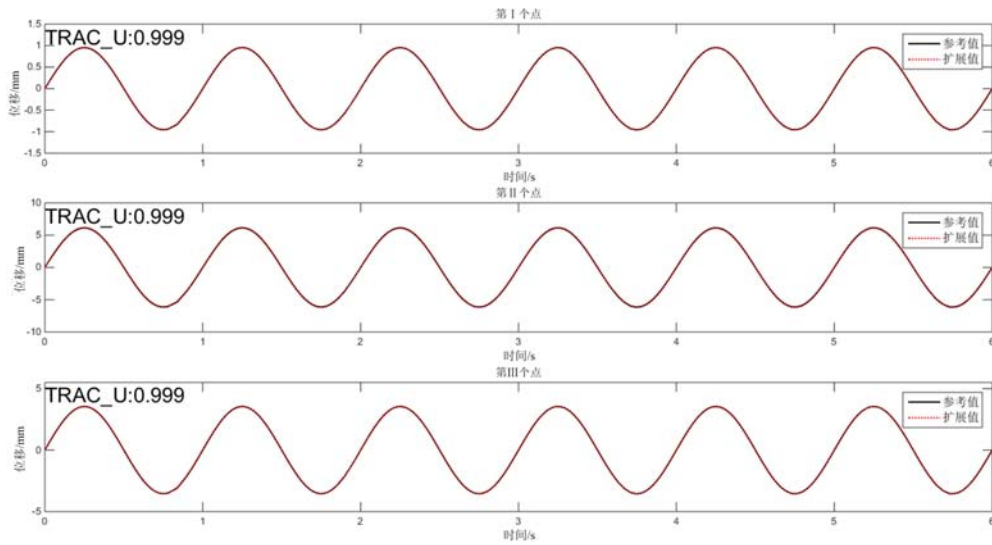


图 2 正弦载荷施加在节点 11 时 I、II 和 III 处计算位移与参考位移的对比

Fig. 2 The comparison of the calculated displacement with the reference displacement at the point I, II and III when the sinusoidal load was applied at the node 11

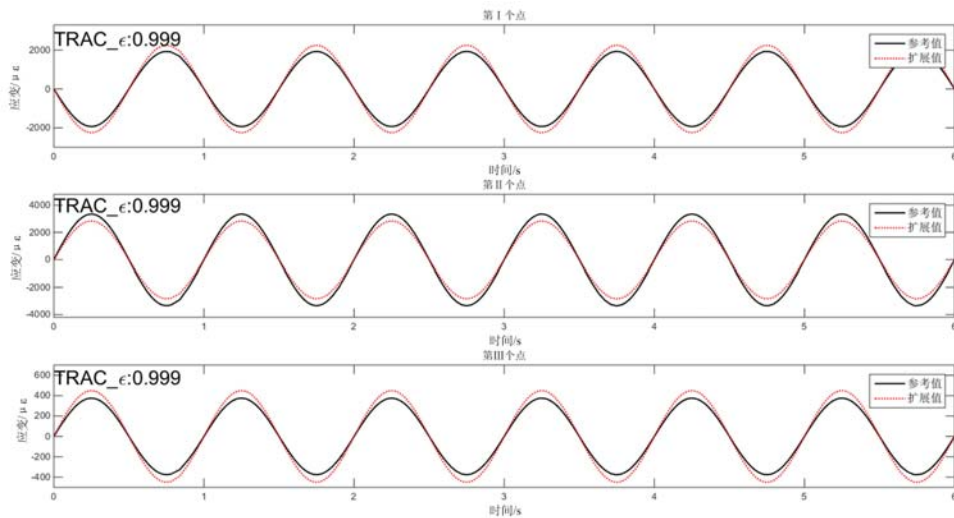


图 3 正弦载荷施加在节点 11 时 I、II 和 III 处计算应变与参考应变的对比

Fig. 3 The comparison of the calculated strain with the reference strain

at the point I, II and III when the sinusoidal load was applied at the node 11

2.2 随机载荷下的全场动应变估计

为了进一步验证本文所提方法在预测全场动态应变的有效性,以 11 节点处为激励点,利用模态扩展理论得到全场的位移数据, I、II 和 III 处的理论振动位移与预测位移的对比如图 4 所示。从图中可以看出,理论值与计算结果高度吻合,且根据位移判定准则计算得出 TRAC_U 均保持在 0.9 以上。说明本文方法获取的位移与实验仿真效果有较好一致性,即在随机激励时可以实现高精度的位移预测。

利用位移到应变的转化理论,计算出 I、II 和 III 处的动态应变量并与参考值进行对比,如图 5 所示。从图中可以看出三个点处的 TRAC_ε 都在 0.9 以上,结果表明扩展出来的应变与参考值有很好的 consistency,本方法能够适用于随机载荷下的梁结构全场应变扩展。

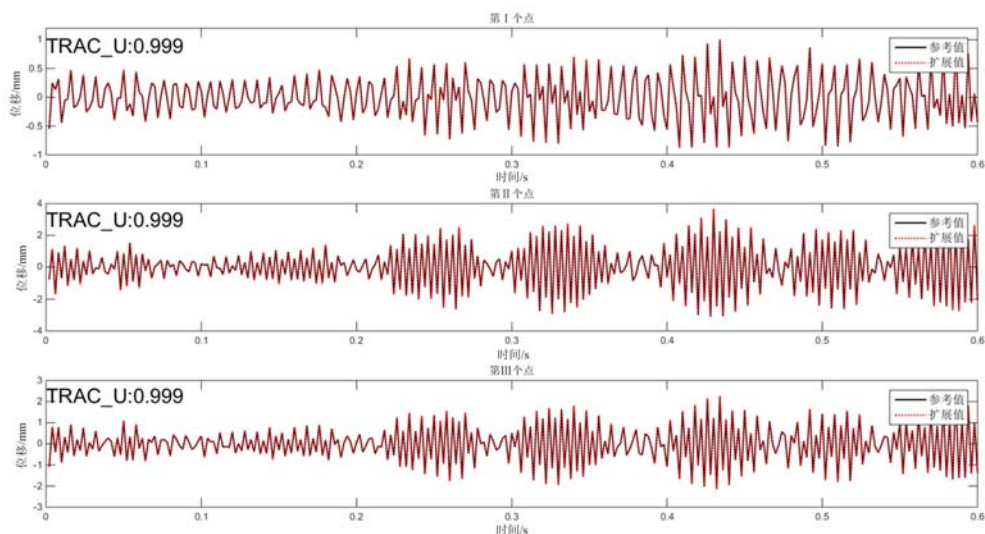


图 4 随机载荷施加在节点 11 时 I、II 和 III 处的计算位移与参考位移的对比

Fig. 4 The comparison of the calculated displacement with the reference displacement at the point I, II and III when the random load was applied at the node 11

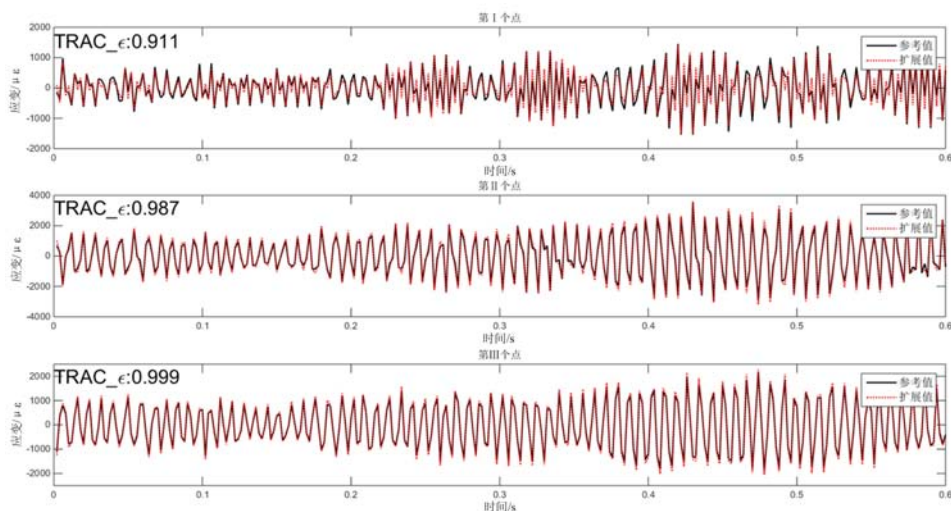


图 5 随机载荷施加在节点 11 时 I、II 和 III 处计算应变与参考应变的对比

Fig. 5 The comparison of the calculated strain with the reference strain at the point I, II and III when the random load was applied at the node 11

3 实验验证

仿真结果表明,利用有限点的振动位移可以实现全局应变的预测,但是在实际测量过程中,测量的振动位移精度是全局应变预测的关键因素。本文以长为 200mm 的悬臂梁作为实验对象,通过三种不同的激励情况对全局应变进行预测,并判定预测应变的准确性。实验装置及示意图如图 6 所示,悬臂梁左端固定,并在侧面贴有直径为 3mm 的圆形标志点;一对焦距为 12mm 的高速工业摄像机固定在三脚架上,并以一定的速率来拍摄悬臂梁上的标志点;梁上总共贴有 13 个标志点,标号为 1~10 的 10 个标志点是进行数据扩展用的,标号为 I、II 和 III 的三个标志点是用来与扩展得到的位移进行对比的,同时标号为 I、II 和 III 的三个标志点下面分别贴有应变片,用以作为参考应变值。其中应变片采用半桥接法,并通过桥盒连接在东华信号采集器上(桥盒,图 6(b))。为了保证摄像机和应变片同步进行,本文采用一个 BNC 三通接头来保证摄像机和应变片能够同时采集数据,如图 6(c) 所示。由于结构在实际运作过程中激励的形式是多样的,因此本文以三种比较典型的激励为例,对悬臂梁的非接触测量位移

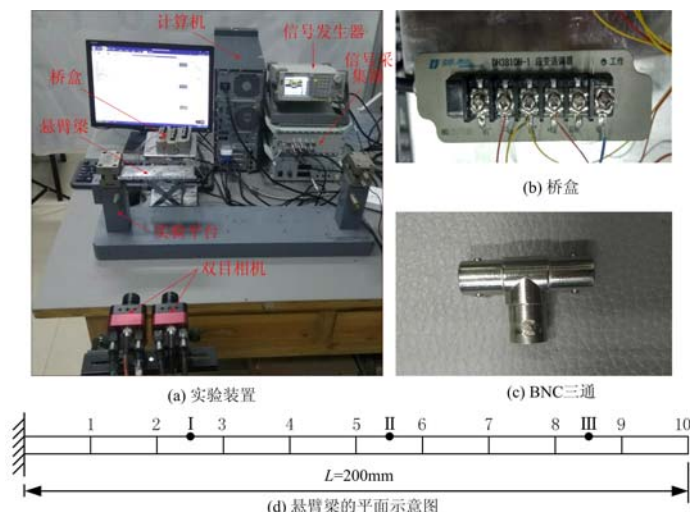


图 6 实验布置及悬臂梁的平面示意图

Fig. 6 Experimental equipment and the plan of the cantilever beam

进行全局应变预测。三种激励分别为:正弦激励、随机激励和自由振动。

在悬臂梁的右端分别施加正弦激励、随机激励和移动一定距离后松开,利用信号发生器控制双目摄像机拍摄悬臂梁的振动图像,在正弦激励和随机激励下双目摄像机以 128fps 速率拍摄获取悬臂梁 10s 的振动图像,自由振动下双目摄像机以 200fps 速率拍摄获取悬臂梁 4s 的振动图像,同时利用东华测试系统获得应变片数据。利用三维重建第 5 个点的振动位移如图 7 所示,(a)、(b)和(c)分别表示

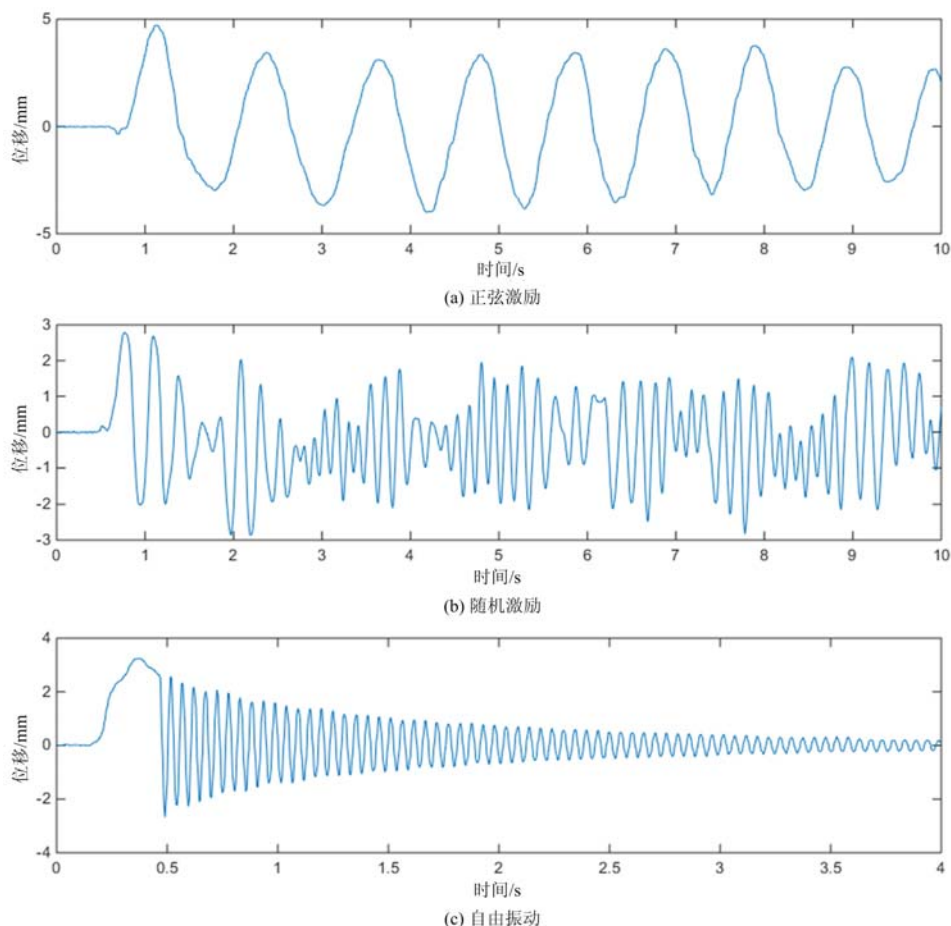


图 7 不同激励条件下,节点 5 的振动位移

Fig. 7 Vibration displacement of point 5 under different excitation conditions

正弦激励、随机激励和自由端移动一定的距离并松开后的振动位移。

根据重建出来的标号为 1~10 的 10 个点的振动位移和本文提出的扩展位移的方法可以得到全场的位移数据,并将扩展得到的位移结果与机器视觉直接重建出的位移在点 I、II 和 III 处进行对比,其结果如图 8 所示。从图中可以看出不同激励情况下,利用模式扩展预测的位移与机器视觉三维的振动位

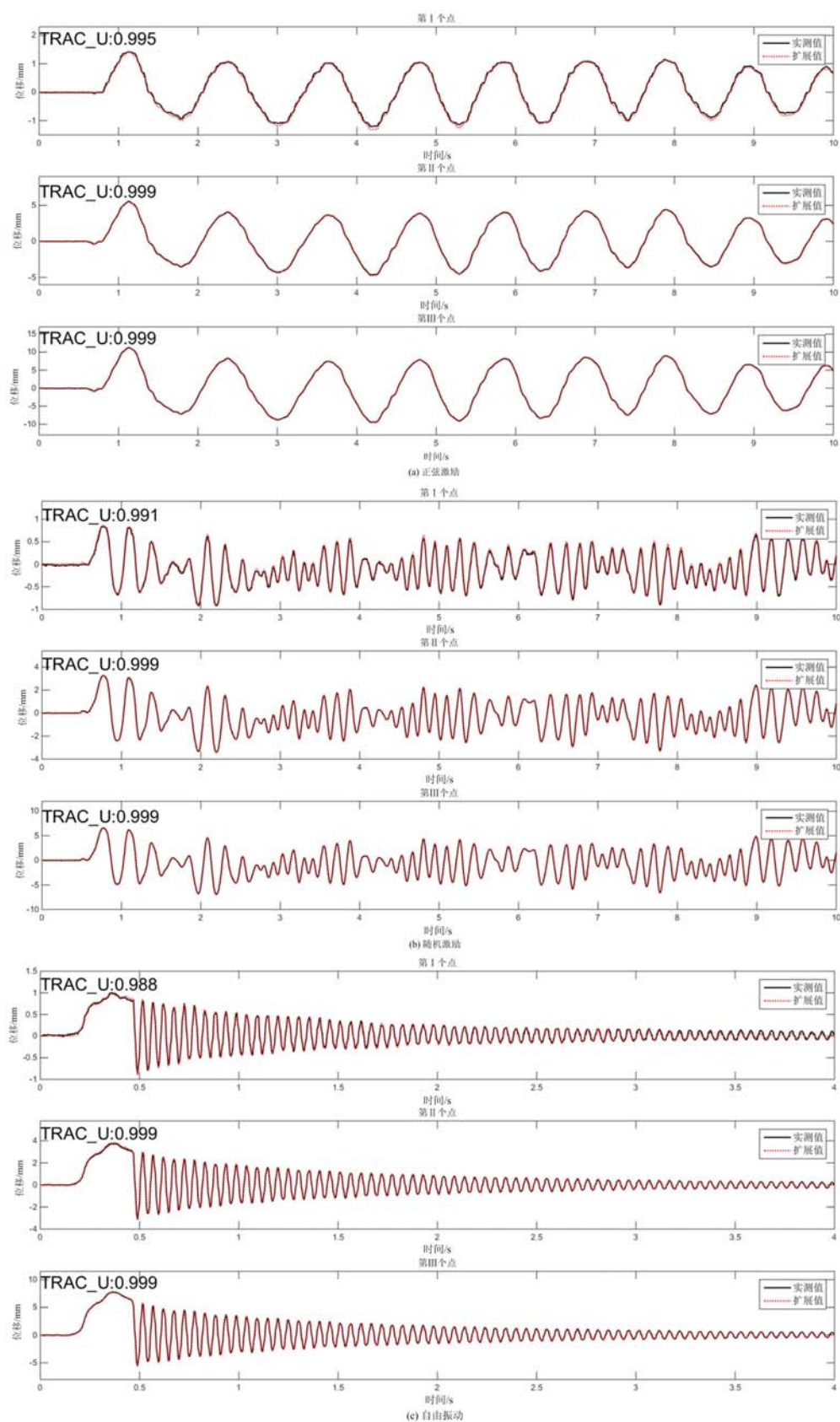


图8 不同激励条件时, I、II和III点计算位移与参考位移的对比

Fig. 8 The comparison of the calculated displacement with the reference displacement at the point I, II and III under different excitation conditions

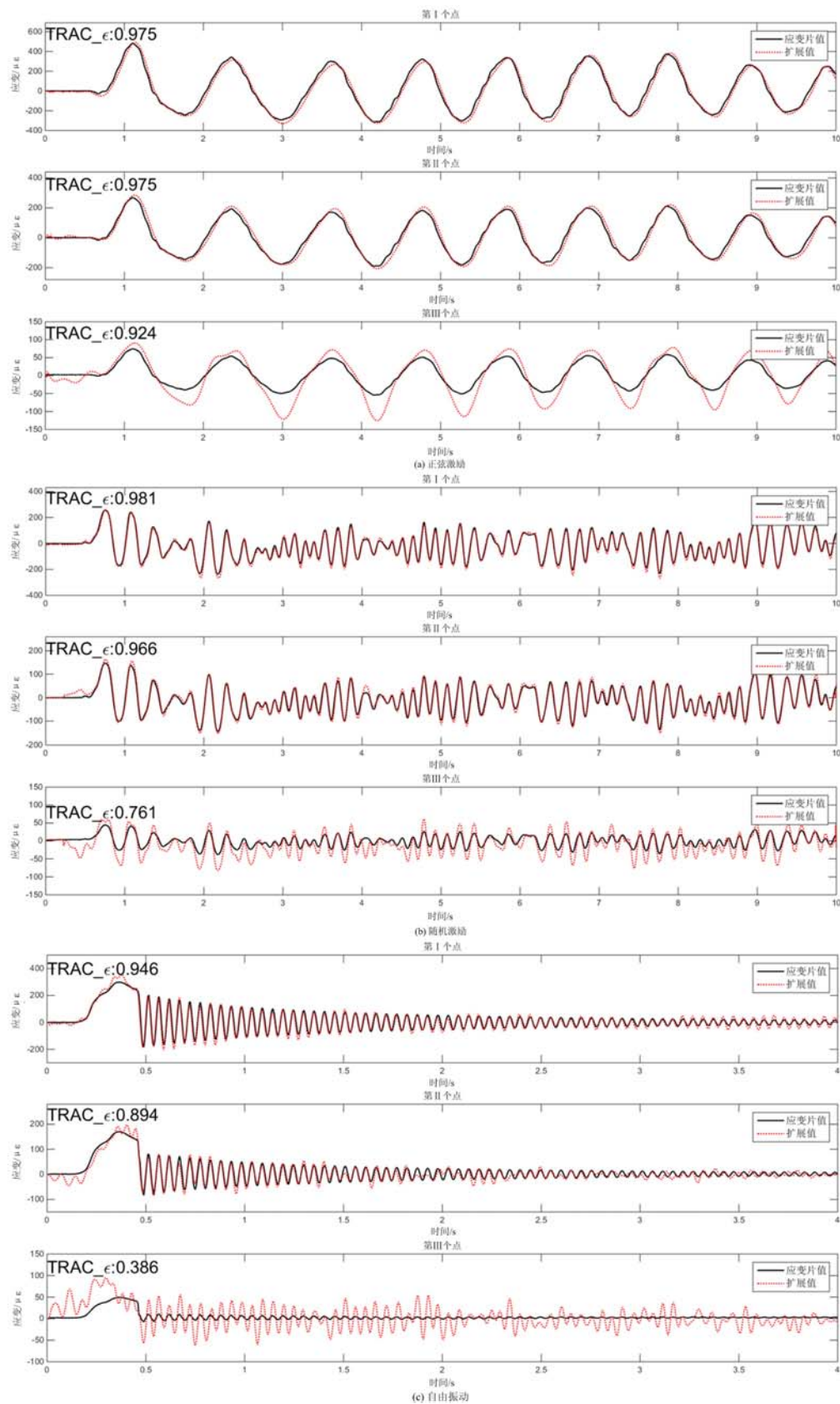


图 9 不同激励下, I、II 和 III 点计算应变与应变片数值的对比

Fig. 9 The comparison of the calculated stain with the strain gauge data at the point I, II and III under different excitation conditions

移基本吻合,TRAC都保持在0.9以上。结果表明不同激励对预测位移的影响较小,且I点的精度较II和III点偏低。

根据模态扩展位移和梁的应变与位移的关系,计算得到不同激励条件下I、II和III的应变结果并进行滤波,与应变片测量结果的对比如图9所示。由图可以看出,正弦激励条件下预测的应变与实际测量值较吻合;不同激励条件时,各处的应变预测结果差异很大。位置I处计算应变与实测应变量的TRAC ϵ 最大,最高达到0.981,而位置III处的TRAC ϵ 最小,在自由振动时低至0.385,其原因在于应变尤其是应变模态对材料及环境等因素相比于位移测量而言更敏感,因此位移的重建精度TRAC值高但应变的TRAC值差异较大,更为详细的参数影响还有待于进一步深入系统的研究。

本文提出的非接触式全场动应变测量方法成功地应用在梁结构上,对于更为复杂的结构,其大部分都是由梁、板、壳等因素组成,既然本文方法对梁结构适用,那么复杂结构的应变预测同样可以通过本文方法进行分析,后期将引入复杂结构的计算。

4 结论

本文提出一种非接触在线测量技术,结合模态理论不仅可以实现全局位移的预测而且能预测全局的应变情况。首先采用双目立体视觉技术获取结构有限点的振动位移,之后采用模态扩展技术实现全局位移及应变预测。通过仿真与实例分析,验证了本文方法的可行性。相对于其他激励条件,正弦激励时预测的应变与实测应变较吻合。悬臂梁自由端的预测应变结果比固定端的预测结果差,存在差异的原因在于目前研究的是单方向的,而应变片只能单方向测量,以及自由端相对于固定端的振动方向比较多,情况比较复杂,往后可能会进行多方向的研究。进一步提高非接触式测量及结构振型的精度,有望将本文方法推向更加复杂结构的健康监测,从而能够在结构或机器运行的同时检测过载或准确预测剩余疲劳寿命。

致谢 作者感谢以下资金支持,国家自然科学基金(51575156, 51675156, 51775164, 51705122),中央高校基本科研基金(JZ2017HGP0165, PA2017GDQT0024)。

参考文献:

- [1] Li D, Ho S C M, Song G, et al. A review of damage detection methods for wind turbine blades[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(3):033001.
- [2] Khan A A, Zafar S, Khan N S, et al. History, current status and challenges to structural health monitoring system aviation field[J]. Space Technol, 2014, 4:67—74.
- [3] Aykan M, Celik M. Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3):897—907.
- [4] Kammer D C. Sensor set expansion for modal vibration testing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4):700—713.
- [5] Barish B C. The laser interferometer gravitational-wave observatory LIGO[J]. Advances in Space Research, 2000, 25(6):1165—1169.
- [6] Halkon B J, Rothberg S J. Angular (pitch and yaw) vibration measurements directly from rotors using laser vibrometry[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 46(2):344—360.
- [7] Wu R, Chen Y, Pan Y, et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:38—45.
- [8] Baqersad J, Carr J, Lundstrom T, et al. Dynamic characteristics of a wind turbine blade using 3D digital image correlation[C]//Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2012. International Society for Optics and Photonics, 2012:83482L.
- [9] Lundstrom T, Baqersad J, Niezrecki C, et al. Using high-speed stereophotogrammetry techniques to extract shape information from wind turbine/rotor operating data[M]. Topics in Modal Analysis II, Volume 6. Springer, New York, NY, 2012:269—275.
- [10] Wang Y, Zhang J, Deng H, et al. Three-dimensional reconstruction coordinate error induced by asynchronous

- cameras for moving objects [C]//Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements. International Society for Optics and Photonics, 2013:89160J.
- [11] Li Y, Zhang J, Tian J. Error analysis in stereo vision for location measurement of 3D point[C]//MIPPR 2015: Pattern Recognition and Computer Vision. International Society for Optics and Photonics, 2015:981315.
- [12] Zhang J, Zhang P, Deng H, et al. High-accuracy three-dimensional reconstruction of vibration based on stereo vision[J]. Optical Engineering, 2016, 55(9):091410.
- [13] Deng H, Diao Y, Zhang J, et al. Three-dimensional identification for unbalanced mass of rotor systems in operation[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2):173.
- [14] Dos Santos F L M, Peeters B, Lau J, et al. The use of strain gauges in vibration-based damage detection[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2015, 628(1):012119.
- [15] 亢景付, 随春娥, 张雪涛, 等. 基于应变计观测数据的混凝土温度应力解析[J]. 实验力学, 2013, 28(1):121—126 (KANG Jingfu, SUI Chune, ZHANG Xuetao, et al. Concrete thermal stress analysis based on observational data from concrete strain meter[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1):121—126 (in Chinese))
- [16] Kulha P, Husak M. Piezoresistive sensor for strain measurement on turbine blade with wireless telemetry data acquisition[C]//Proc. of the Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (April 13-15, 2011, Las Palmas de Gran Canaria, Spain), EA4EPQ, 2011:743—746.
- [17] 宋秋, 李晓星, 杨岩峰. 基于 DIC 方法的残余应力快速测量系统[J]. 实验力学, 2017, 32(4):506—516 (SONG Qiu, LI Xiaoxing, YANG Yanfeng. A rapid measurement system of residual stress based on DIC method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4):506—516 (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 陆秋海, 李德葆. 模态理论的进展[J]. 力学进展, 1996, 26(4):464—472 (LU Qiuhai, LI Debao. The advances of modal theory[J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(4):464—472 (in Chinese))
- [20] 李德葆. 实验应变/应力模态分析若干问题的进展评述[J]. 振动与冲击, 1996(1):13—17 (LI Debao. A general review on several fundamental points of experimental strain/stress modal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 1996(1):13—17 (in Chinese))
- [21] 李德葆, 诸葛鸿程, 王波. 实验应变模态分析原理和方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1990(2):105—112 (LI Debao, ZHUGE Hongcheng, WANG Bo. On the principle and technique of experimental strain modal analysis[J]. Journal of Tsinghua University, 1990(2):105—112 (in Chinese))
- [22] Baqersad J, Niezrecki C, Avitabile P. Full-field dynamic strain prediction on a wind turbine using displacements of optical targets measured by stereophotogrammetry[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 62:284—295.
- [23] Pingle P, Avitabile P. Limited experimental displacement data used for obtaining full-field dynamic stress strain information[M]. Linking Models and Experiments, Volume 2. Springer, New York, NY, 2011:201—217.
- [24] Iliopoulos A N, Devriendt C, Iliopoulos S N, et al. Continuous fatigue assessment of offshore wind turbines using a stress prediction technique[C]//Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2014. International Society for Optics and Photonics, 2014:90640S.
- [25] Iliopoulos A, Weijtjens W, Van Hemelrijck D, et al. Full-field strain prediction applied to an offshore wind turbine[M]. Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3. Springer, Cham, 2016:349—357.
- [26] Chipman C, Avitabile P. Expansion of transient operating data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 31:1—12.
- [27] Harvey E, Avitabile P, Niezrecki C. Dynamic stress-strain prediction from limited measurements in the presence of structural defects[M]. Topics in Experimental Dynamics Substructuring and Wind Turbine Dynamics, Volume 2. Springer, New York, NY, 2012:279—287.

On the prediction of full-field strain by using vibration displacement of limited measurement points

DENG Hua-xia, CHEN Shuai, WANG Jun, ZHANG Jin, MA Meng-chao, ZHONG Xiang

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: In structural health monitoring, strain and displacement are the common monitoring objects. Traditional method of obtaining displacement and strain is mainly contact-type measurement, such as pasting acceleration sensor or strain gauge. This method is widely used, but it is difficult for light weight or rotating structures. Non-contact measurement can obtain more accurate vibration displacement due to without additional mass. But how to use local displacement data to obtain global strain is relatively scarce. In this paper, the vibration displacement data of finite measurement points are obtained by binocular stereo vision technology, and the displacement of finite measured points is extended to global displacement information by modal expansion theory. Under different excitation conditions, the prediction results of this method are compared with the results of strain gauge measurement. Results show that the proposed method is feasible and can be used for full-field non-contact strain measurement.

Keywords: binocular stereo vision; full-field prediction; strain modal; modal expansion