

基于单高速相机 3D-DIC 的涡轮叶片全场振动测量*

谢瑞丽¹, 许巍², 陈新², 潘兵¹

(1.北京航空航天大学航空科学与工程学院 北京,100191)

(2.中国航发北京航空材料研究院 北京,100195)

摘要 采用成本较低、结构紧凑且使用便捷的单高速相机三维数字图像相关方法(single-camera high-speed three-dimensional digital image correlation,简称SCHS 3D-DIC)对涡轮叶片的振动特性进行试验研究。首先,介绍了测量装置和原理,以悬臂铝板为对象开展验证试验,结果证明了该测量系统的准确性与有效性;其次,开展了叶片的全场振动特性测量,得到了其三维形貌、模态特性、全场位移与应变分布,获得了叶片在振动载荷作用下的高应变区域位置及应变分布特点。研究表明,SCHS 3D-DIC方法相比常规双高速相机3D-DIC方法具有更高的视场利用率,适合于细长型的涡轮叶片的振动测量试验。

关键词 数字图像相关;涡轮叶片;振动测量;单高速相机;模态试验

中图分类号 TH825;O348.1

引言

航空发动机涡轮叶片在服役过程中承受离心力、交变气动力与热应力等载荷,易导致叶片的疲劳损伤与断裂失效,引起航空发动机故障。因此,研究涡轮叶片的振动特性对于航空发动机的服役安全与故障诊断具有重要的工程意义。虽然理论与仿真方法在叶片设计及结构优化等方面发挥了重要作用,但为了检验叶片的加工制造质量以及在实际应用中的可靠性,提供令人信服的实测数据的试验方法更不可或缺。

叶片振动的试验方法分为接触式与非接触式。传统的接触式方法一般将加速度传感器、应变片^[1]等粘贴在叶片表面,利用力锤、激振器或振动台施加激励,测量叶片的模态与响应特性。接触式测量方法一般仅能获得叶片表面有限点信息,难以对叶片整体的动态变形分布进行全面准确的评估,且会增加附加质量与刚度,该方法存在较大局限性。在非接触式测量方法中,叶尖定时法^[2]和激光位移传感器^[3]仍属单点式,存在获取信息少的局限性。激光多普勒测振仪(laser Doppler vibrometer,简称LDV)^[4]已经发展出了三维扫描型,但要测量三维振动则需要利用三套扫描式LDV进行集成,价格相当昂贵,且对旋转振动和不规则测量面的复杂振动测量不适用。数字图像相关(digital image correlation,

简称DIC)^[5]方法具有同时获得全场变形的优点,基于单相机的2D-DIC与同步双相机的常规3D-DIC已被广泛应用于材料与结构的变形测量中^[6-7]。基于高速相机的高速3D-DIC系统用于叶片振动测量时将获得丰富的振动信息,为揭示叶片的复杂动力学响应特性提供了重要支持。

考虑到涡轮叶片的实际细长型几何特性,采用常规双高速相机3D-DIC系统测量其振动特性时存在成本高、同步性要求高、系统复杂且不便携、图像匹配误差大以及视场利用率低等弊端,故笔者利用基于四平面镜适配器的SCHS 3D-DIC系统开展叶片的全场振动特性测量。相较于理论和仿真研究,本试验可以为实际工程提供更加可靠的数据支持;相较于传统试验方法,所采用的DIC方法能实现信息更丰富的非接触、全场振动特性测量;相较于传统双高速相机立体视觉测量系统,所采用的SCHS 3D-DIC系统能够大幅降低系统成本、复杂性、同步性要求与图像匹配难度^[8],提高系统的紧凑性和相机的视场利用率。

1 测量装置和原理

1.1 SCHS 3D-DIC 测量系统

笔者采用的SCHS 3D-DIC测量系统如图1所示

* 国家科技重大专项资助项目(J2019-V-0006-0099);国家自然科学基金资助项目(11925202)

收稿日期:2021-10-09;修回日期:2021-11-28

示,主要包含一台高速相机、一台计算机(配有高速相机驱动与采集系统)、一个变焦镜头、一个四平面镜适配器和光源等。四平面镜适配器内侧两平面镜固定在镜头之前,呈 90°夹角。外侧两平面镜在固定之前可自由移动和旋转,通过调整其位置与角度,使试件表面通过左右 2 组光路清晰地落在相机靶面上成像。

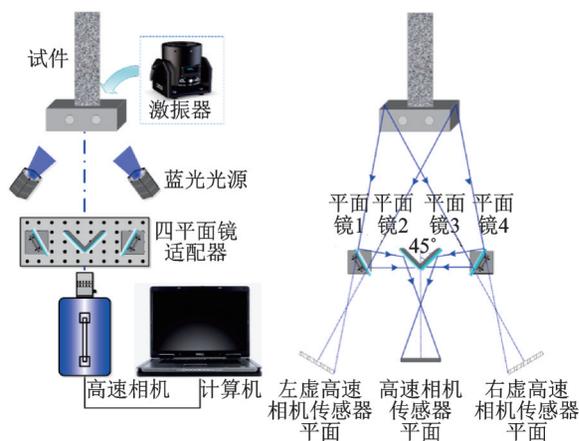


图 1 SCHS 3D-DIC 测量系统

Fig.1 Configuration of SCHS 3D-DIC system

1.2 SCHS 3D-DIC 测量原理

图 2 为 SCHS 3D-DIC 测量原理,介绍了其测量试件表面形貌、位移及变形场的基本流程:①图像采集(包括标定图像和试件的表面图像);②图像分割与三维标定;③三维形貌、位移与应变计算。由于高速相机采集的每一帧图像都包含左右 2 个虚拟高速

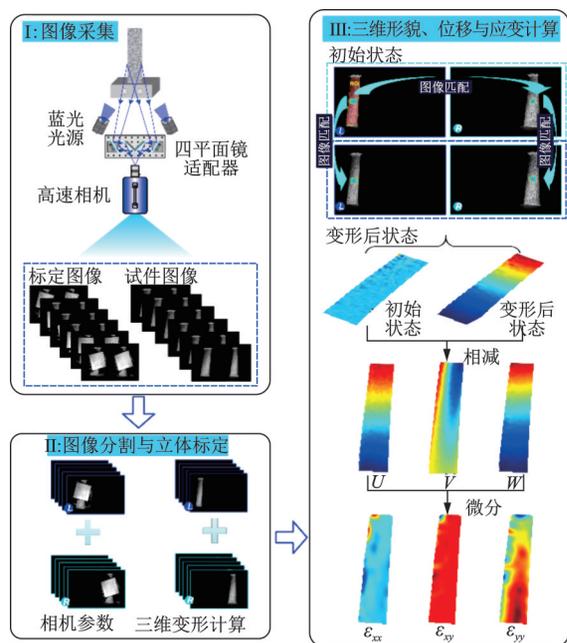


图 2 SCHS 3D-DIC 测量原理

Fig.2 Measurement principle of SCHS 3D-DIC system

相机的图像,因此在系统标定和图像处理之前需要对每一帧所采集的图像进行左右分割,形成数字图像对。后续计算采用常规的 3D-DIC 算法即可实现。

1.3 SCHS 3D-DIC 系统验证试验

为检验 SCHS 3D-DIC 系统在振动测量应用中的准确性和有效性,以结构相对简单的悬臂薄铝板为研究对象进行模态试验。悬臂铝板模态试验现场如图 3 所示,由一个固定在三脚架的高速相机(型号为 Phantom v2012,最大空间分辨率为 1 280×800 像素,最高采集帧率为 22 000 fps)、放置在相机前的 AF-S NIKKOR 55-200 mm 1:4-5.6G ED 镜头、四平面镜适配器以及高亮度蓝色光源等组成。铝板尺寸为 160 mm×40 mm×1 mm,材料型号为 6061 LD30,弹性模量为 68.9 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 750 kg/m³,在铝板表面制作随机分布的散斑。铝板首先被方形底座夹持,方形底座固连在激振器(型号为 JZK-20)振动端,再将激振器底座固定在光学平台上。

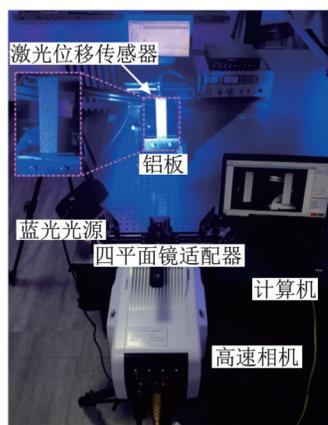


图 3 悬臂铝板模态试验现场图

Fig.3 Scene diagram of modal test on cantilever aluminium plate

利用 SCHS 3D-DIC 系统采集一组静止状态下铝板表面的数字图像,计算该系统的测量误差,设置相机采样帧率为 3 000 fps,图像分辨率为 1 280×800 像素,采样时间为 1 s。测量系统误差分析如图 4 所示。系统在 3 个方向的位移(U , V 和 W)均值都在 0 值附近波动,这符合铝板处于静止状态的实际情况; W 方向的位移均值与标准差的波动幅值都大于另外两个方向,但仍处在较低水平。

利用锤击法对悬臂铝板根部附近施加瞬态激励,在铝板背面利用型号为 HG-C1030 的松下激光

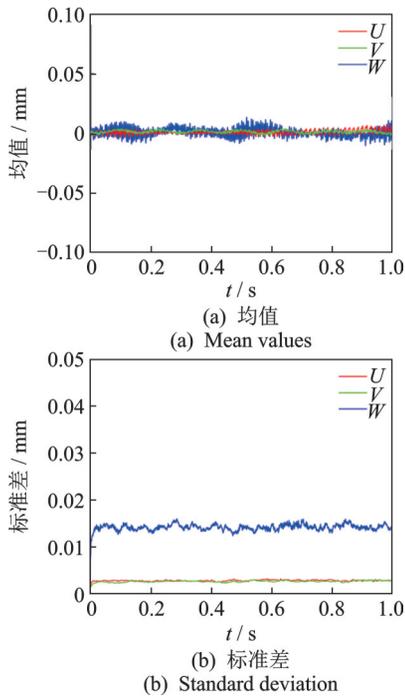


图4 测量系统误差分析

Fig.4 Error analysis of the test system

位移传感器(laser displacement sensor,简称LDS)和动态信号分析仪(型号为USB-4008)采集铝板尖端的振动,设置采样频率为2 kHz,采样时间为8 s。

与此同时,在铝板正面利用SCHS 3D-DIC系统记录铝板表面在振动过程中的数字图像,设置相机采样帧率为3 000 fps,图像分辨率为1 280×800像素,采样时间为3 s。通过图像处理,提取铝板尖端一点在振动过程中的W方向(面外)位移响应,利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称FFT)获得其频响曲线,并将其与该点处激光位移传感器的测量结果进行对比。图5为铝板尖端一点振动响应曲线的DIC结果与激光位移传感器结果对比。

DIC与LDS测量结果在时域与频域具有高度的一致性,这证明了本系统的准确性和有效性。此外,根据图5(b)所示的频响曲线峰值可以得到悬臂铝板的前几阶固有频率 f_n ,利用半功率带宽法^[9]可计算出每阶模态下的阻尼比 ξ 。

表1为试验与仿真所得到的铝板前5阶模态对比结果。其中:DIC与LDS所测得的固有频率相对误差最大为0.445%,DIC与有限元法(finite element method,简称FEM)所测得的固有频率最大相对误差为2.29%。由于有限元仿真模型中悬臂铝板的固支端为理想的全约束条件,边界约束强于实际试验中的夹持工况,因此仿真结果中铝板的固有频率普遍高于试验工况,但该误差仍在可接受的范围内。

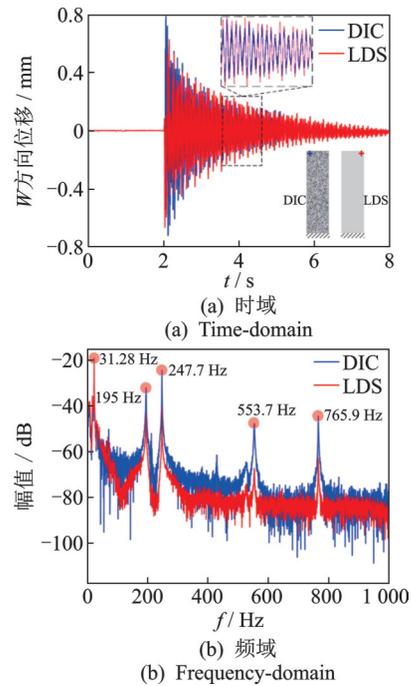


图5 铝板尖端一点振动响应曲线的DIC结果与激光位移传感器结果对比

Fig.5 Comparison of the vibration response at the point of aluminum plate tip between DIC and LDS

表1 铝板前5阶模态对比结果

Tab.1 Comparison of the first 5 modal results of aluminum plate

阶次	FEM		DIC		LDS		f_n 相对误差/%	
	f_n /Hz	ξ /%	f_n /Hz	ξ /%	f_n /Hz	ξ /%	DIC/FEM	DIC/LDS
	1	31.87	1.41	31.28	1.41	31.42	1.05	1.41
2	199.25	0.62	195.00	0.62	194.90	0.51	2.18	0.055
3	253.31	0.32	247.60	0.32	247.50	0.18	2.29	0.081
4	559.43	0.18	553.70	0.18	553.80	0.27	1.01	0.018
5	782.75	0.13	765.90	0.13	765.80	0.09	2.17	0.013

考虑到激振器的最大稳态激励载荷量程限制,将试验得到的前4阶固有频率输入激振器,对铝板进行定频稳态激励,利用SCHS 3D-DIC系统采集各激励频率下铝板表面的图像。经过图像处理获得在共振条件下的全场位移响应,取最大幅值为铝板的模态振型,并与有限元模态分析仿真结果进行对比。表2为铝板的SCHS 3D-DIC系统模态振型与有限元仿真对比。可见,二者具有高度一致性。

为实现试验模态与仿真模态的相关性量化对比,提取相关振型数据,基于模态置信度(modal assurance criterion,简称MAC)^[10]得到的前4阶试验模态与仿真模态MAC值如图6所示。悬臂铝板相同阶次模态试验与仿真结果均具有高度相关性(MAC

表 2 铝板的SCHS 3D-DIC系统模态振型与有限元仿真对比

Tab.2 Comparison of the mode shapes of aluminum plate obtained by the SCHS 3D-DIC test and FEM simulation

阶次	FEM		DIC	
	振型	振型	频域响应	
1				
2				
3				
4				

值接近于 1), 而不同阶次之间则存在巨大差异 (MAC 值接近于 0), 该结果验证了 DIC 方法在模态测试方面具有的有效性与其优越性。

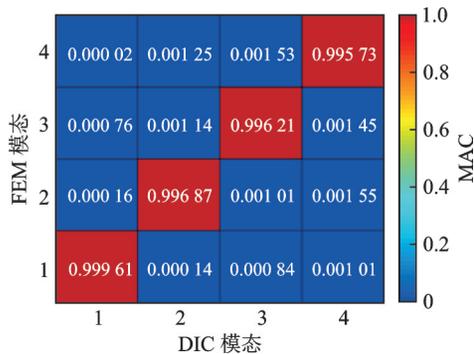


图 6 前 4 阶 DIC 模态与 FEM 模态 MAC 值

Fig.6 MAC of the first four modes between DIC and FEM

2 叶片全场振动测量

2.1 试验装置

图 7 为叶片试验装置及现场测试图。叶片的榫头端被带有与之匹配的榫槽夹具夹持, 固定在振动台 (型号为 ES-10D-240) 上, 在叶盆和叶背的感兴趣区域内都利用白色自喷漆和黑色记号笔制作了随机分布的散斑。

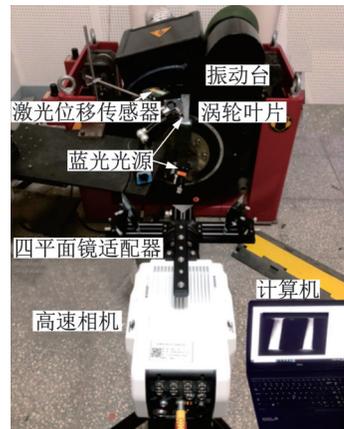


图 7 叶片试验装置及现场测试图

Fig.7 Scene diagram and test device of the turbine blade

2.2 叶片形貌测量

在开展叶片的动态测试之前, 先进行了叶片静态测量, 图 8 为叶片三维形貌测量结果。图 8(a) 和 8(b) 分别为叶盆与叶背的形貌重构结果。

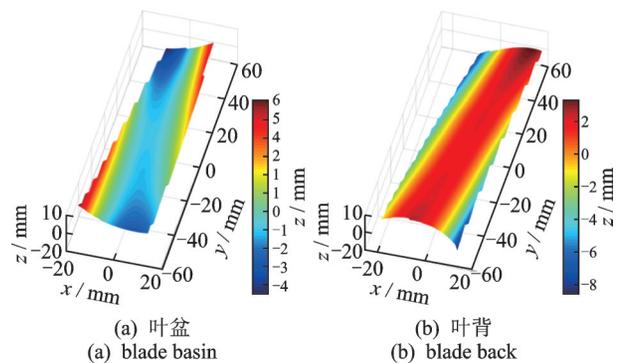


图 8 叶片三维形貌测量结果

Fig.8 3D shape measurement results of the blade

2.3 叶片模态试验

在开展叶片模态试验时, 首先利用振动台对叶片施加 0~1 500 Hz 的正弦扫频激励, 利用激光位移传感器 (型号为 HL-C2, 松下) 采集叶片尖端附近一

点的响应,通过FFT获得系统的前2阶固有频率,分别为375 Hz与1 063 Hz。在此基础上,通过振动台对叶片分别施加上述频率的正弦稳态激励,利用SCHS 3D-DIC系统采集稳态激励过程中的一系列数字图像(375 Hz时的采样帧率为4 000 fps,采样时间为3 s,图像分辨率为1 280×800像素;1 063 Hz时的采样帧率为10 000 fps,采样时间为1 s,图像分辨率为1 280×800像素),处理后获得叶片表面的三维动态位移及应变场结果。

表3为叶片模态试验结果,展示了叶片的前2阶振型及叶片上3个位置若干周期内的W方向振

动响应(时域及频域)。观察发现,叶片在375 Hz与1 063 Hz激励下分别表现出显著的1阶弯曲与2阶弯曲振型,分别提取叶尖处(P_1 点)、中间部位(P_2 点)及叶根处(P_3 点)在振动过程中W方向的位移响应,经过FFT得到的响应频率分别为375.1 Hz与1 063 Hz,与激励频率高度一致。在1阶模态试验中, P_1, P_2 与 P_3 点的振幅依次递减且始终同相位振动,这符合1阶弯曲振型时的振动特性;在2阶模态中,叶尖 P_1 点的振幅与叶片中间部位 P_2 的振幅近似相等,但始终反相位振动,叶根 P_3 点的振幅则极小,这符合悬臂结构的2阶弯曲振动特性。

表3 叶片模态试验结果
Tab.3 Modal test results of the blade

阶次	振型	频域响应	时域响应
1			

2.4 叶片全场动态变形特性分析

在得到上述模态振型的同时,也能获得叶片在振幅最大时刻的三向位移和应变场。考虑到篇幅且不失一般性,以叶片1阶模态试验工况为例,展示了叶盆与叶背在振幅最大时刻的典型位移场和应变场

云图,如图9所示。

叶盆的最大正应变出现在左下角的叶片前缘根部附近(图9(b)中MX区域),高应变区域沿着叶片前缘朝叶尖方向扩散并递减,如图9(b)中 L_1 所示。其中: L_1 的箭头方向表示高应变区域扩展与递减趋势;叶盆的根部区域整体上都处于较高的应变水平,

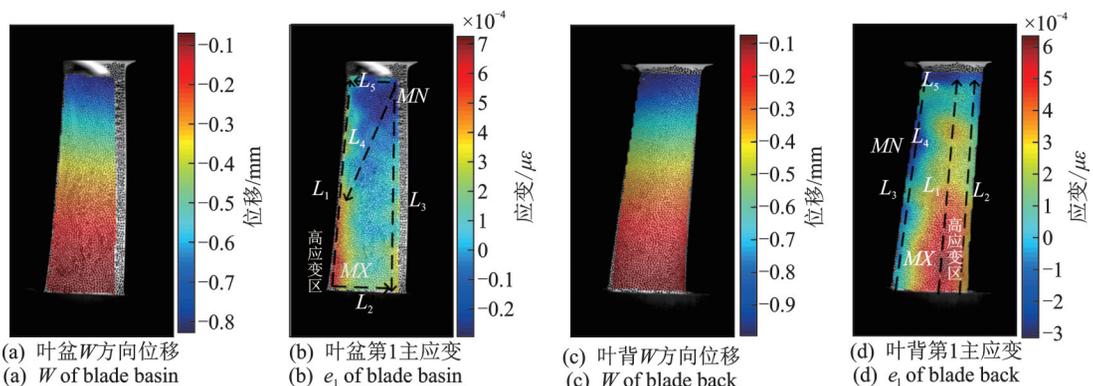


图9 振幅最大时刻典型位移场和应变场云图

Fig.9 Cloud pictures of the typical displacement field and strain field of blade

但中间凹陷区的应变相对前缘和尾缘区较小,如图9(b)中 L_2 所示。叶盆的最大负应变位于叶尖靠近尾缘出气口处附近(图9(b)中MN区域),沿着叶盆凹陷区逐步朝根部方向扩散,如图9(b)中 $L_3\sim L_5$ 所示, L_4 的箭头方向表示负应变区的实际递减方向。

叶背的最大正应变出现在右下角的根部靠近叶片前缘位置(图9(d)中MX区域),高应变区域呈带状分布,沿叶背凸起弧面朝叶尖方向扩散并逐步减小,如图9(d)中 L_1 所示。叶背的最大负应变出现在尾缘区域的中部靠上位置(图9(d)中MN区域)。整体上,除了叶背凸起区域外,其他区域的应变都处于较低水平,如图9(d)中 L_2 和 L_3 所示,其应变值均低于 L_1 所示水平。

3 结束语

航空发动机涡轮叶片几何结构及载荷条件复杂,研究其振动特性能够为整机故障分析、可靠性预测及健康评估等提供重要的技术支持。传统方法实现叶片的全场振动特性测量存在难度,为此,笔者利用搭建的结构简单、成本低廉且尤其适用于细长型结构测量的SCHS 3D-DIC系统开展了叶片振动特性的试验研究。通过模态试验,测得了叶片的固有频率及振型,并获得了叶片表面的位移场及应变场分布,确定了叶片高应变区域及其分布特性,该区域对于叶片的故障分析及危险点预测具有重要的参考价值。研究表明,SCHS 3D-DIC方法适用于细长型航空发动机涡轮叶片的振动测量试验,测得的丰富且直观的全场振动信息在叶片的高应变、应力危险点、区域识别、整机故障分析、健康监测及可靠性预测等方面具有巨大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 朱昱达, 乔百杰, 符顺国, 等. 基于响应传递比的转子叶片动应变重构[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8): 1690-1701.
ZHU Yuda, QIAO Baijie, FU Shunguo, et al. Dynamic strain reconstruction of rotating blade based on response transmissibility [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8): 1690-1701. (in Chinese)
- [2] 刘美茹, 朱靖, 滕光蓉, 等. 涡轮转子叶片非接触振动测试试验研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(6): 1216-1225.
LIU Meiru, ZHU Jing, TENG Guangrong, et al. Non-contact vibration measurement experiment of turbine rotor blades [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1216-1225. (in Chinese)
- [3] 李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测

量中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1939-1947.
LI Bing, SUN Bin, CHEN Lei, et al. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1939-1947. (in Chinese)

- [4] 刘杰坤, 马修水, 马颢. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光, 2014, 35(12): 1-5.
LIU Jiekun, MA Xiushui, MA Xie. Review of laser doppler vibrometer [J]. Laser, 2014, 35(12): 1-5. (in Chinese)
- [5] PAN B, QIAN K M, XIE H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6): 062001.
- [6] 徐超, 张一凡, 韩晓明, 等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 781-786.
XU Chao, ZHANG Yifan, HAN Xiaoming, et al. Machine vision based vibration displacement measurement of large flexible structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 781-786. (in Chinese)
- [7] 熊克, 刘红光. 直流电激励下的IPMC弯曲大变形力-电耦合模型[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1033-1039.
XIONG Ke, LIU Hongguang. An electromechanical model of large deflection for IPMC actuators under dc voltages applied [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1033-1039. (in Chinese)
- [8] XIE R L, YU L P, ZHU W D, et al. Experimental study on flow-induced full-field vibration of a flexible splitter plate behind a cylinder using stereo-digital image correlation [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2021, 143(3): 034501.
- [9] PAPAGIANNOPOULOSA G A, HATZIGEORGIOU G D. On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(7): 1075-1079.
- [10] MIROSLAV P, MICHAL B, TOMÁS H. Modal assurance criterion [J]. Procedia Engineering, 2012, 48: 543-548.



第一作者简介:谢瑞丽,女,1989年7月生,博士生。主要研究方向为高速数字图像相关法及其应用。曾发表《Experimental study on flow-induced full-field vibration of a flexible splitter plate behind a cylinder using stereo-digital image correlation》(《Journal of Vibration and Acoustics》2021, Vol.143, No.3)等论文。
E-mail: xierl@buaa.edu.cn

通信作者简介:潘兵,男,1978年4月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为实验固体力学。
E-mail: panb@buaa.edu.cn