

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.3007

基于 DIC 的无人机发射系统可靠性应急评估

蒋寒^{1,2,3}, 罗晨辰^{1,2}

(1. 浙江省涡轮机械与推进系统研究院, 浙江 湖州 313219; 2. 浙江省无人机技术重点实验室, 浙江 湖州 313219;
3. 浙江大学 航空航天学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 火箭助推零长发射作为高速无人机的主流起飞方式, 其多刚体连接结构的动态稳定性是决定能否发射成功的关键。针对发动机异常振动可能导致的火箭-机体连接姿态偏移问题, 提出了一种基于数字图像相关技术的现场应急评估方法。通过构建适配野外环境的简易光学测量系统, 实现了火箭助推系统位移场的实时捕捉与分析。针对非实验室条件下的散斑缺失问题, 利用无人机复合材料表面自然纹理与火箭筒体加工痕迹作为替代散斑源, 结合灰度自适应算法提升匹配精度。测试结果表明, 发动机转速升至 96 000 r/min 时, 火箭-机体水平位移差为 0.3 像素 (对应物理位移 0.12 mm), 垂直位移差为 0.5 像素 (对应物理位移 0.20 mm), 远低于安全阈值 (± 2 mm)。后续多次现场发射验证中, 系统姿态偏移量标准差保持在 0.15 mm 以内, 发射成功率达 100%。

关键词: 无人机; 火箭助推发射; 数字图像相关技术; 多刚体动力学; 振动可靠性评估

中图分类号: V216.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)03-0049-06

引文格式: 蒋寒, 罗晨辰. 基于 DIC 的无人机发射系统可靠性应急评估 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(3): 49-54.

DIC-Based UAV Launch System Emergency Reliability Evaluation

JIANG Han^{1,2,3}, LUO Chenchen^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Turbomachinery and Propulsion Systems, Huzhou Zhejiang 313219, China;

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle Technology, Huzhou Zhejiang 313219, China;

3. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In view of the fact that rocket-assisted zero-length launch (ZLL), as the mainstream takeoff method for high-speed UAVs, relies on the dynamic stability of its multi-rigid-body connected structure, which is critical to the success of the launch, a field emergency assessment method based on digital image correlation (DIC) technology has thus been proposed to address the rocket-body connection pose deviation brought about by abnormal engine vibrations. By constructing a simplified optical measurement system adapted for the field environment, a real-time capture, as well as an analysis of the displacement field of the rocket booster system, can be achieved. To address the lack of speckle patterns under non-laboratory conditions, natural textures on the surface of UAV composite materials and processing marks on the rocket body are utilized as alternative speckle sources, combined with grayscale adaptive algorithms so as to improve matching accuracy. Test results show that when the engine speed rises to 96,000 revolutions per minute (r/min), the horizontal displacement difference between the rocket body is 0.3 pixels (corresponding to a physical displacement of 0.12 mm), and the vertical displacement difference is 0.5 pixels (0.20 mm), which is far below the safety threshold (± 2 mm). In subsequent multiple field launch verifications, the standard deviation of the system pose offset remains within 0.15 mm, with the launch success rate reaching 100%.

收稿日期: 2025-02-20

作者简介: 蒋寒, 男, 浙江省涡轮机械与推进系统研究院工程师, 主要研究方向为无人飞行器设计,

E-mail: jiang078@163.com

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); rocket-assisted launch; digital image correlation (DIC); multi-rigid-body dynamics; vibration reliability assessment

1 研究背景

随着无人机技术向特种化与大众化方向并行发展,较大起飞质量的高速无人机的快速达到最小起飞速度,广泛采用火箭助推零长起飞模式。尽管该技术本身已较为成熟,但在实际应用过程中,发射失败的概率依然较高。事故分析表明,助推火箭安装角偏差、风载荷影响以及发射过程中的复杂动态因素是导致起飞失稳的主要原因。例如,助推火箭若在纵向或横向存在安装角度偏差,其推力方向将偏离无人机质心,从而引发姿态失控;瞬变风载荷,尤其在强风条件下,会显著干扰无人机初始飞行姿态;此外,发动机振动也可能引起火箭与机体连接结构的微小形变,导致助推合力方向偏移,进而造成姿态失稳。据统计,2020—2023年间,业内报告的近100起无人机发射事故中,约61%可归因于火箭助推阶段的多刚体动力学失稳问题^[1]。又因为此类高速无人机多承担重大科研或特种任务,一旦发射失利,不仅会造成严重的经济损失和任务延误,甚至可能影响战略目标的实现,因此,科研工作者对此类问题开展了相应的研究,且近年来的科研工作集中于高精度建模、参数优化和先进控制技术的应用,以提高发射安全性。

在高精度的多刚体动力学模型研究方面,He C. C.等^[2]建立了无人机火箭助推零长发射过程的动态模型,并设计了相应的起飞控制律。赵志俊等^[3]在建立动力学模型时,尤其考虑了火箭脱落后质量和重心变化对发射动态过程的影响;探讨了发射角、火箭冲程、火箭安装角和火箭推力线偏差等仿真参数对发射动态过程的敏感性。Yin J.等^[4]分析了火箭安装角、无人机发射角以及短轨有效长度的影响。在推力偏差抑制与参数自主优化方面,Liu H. L.等^[5]指出工程中常用的重心测量方法由于累积误差大、操作困难,难以满足发射要求。他们提出了一种新的“背部单点吊装”方法,可直接测量重心与推力线之间的距离,减少了推力锥的位置和角度安装误差,确保了无人机的安全起飞。贾华宇等^[6]针对最优发射参数选择的难题,在构建六自由度非线性模型的基础上,提出了基于SSA-BP(sparrow search algorithm-backpropagation)神经网络的无人机发射参数自主择优方法。在关键结

构分离的安全性研究方面,周悦等^[7]针对提高火箭助推式无人机起飞时助推机构的分离安全性问题,提出了一种可自动安全分离的助推机构。他们运用刚体动力学分析方法,得到了助推机构的分离运动轨迹,并经实验验证表明该机构在分离过程中可有效规避安全隐患。在主动控制律与智能控制策略方面,Jia H. Y.等^[8]提出了利用深度强化学习实现运载器(与重型无人机发射类似)在助推阶段的实时姿态稳定控制。这种基于AI的方法代表了利用智能算法应对高不确定性、强非线性控制挑战的前沿方向。因此无人机火箭助推起飞模式正被不断研究和完善^[9-10]。

但目前发射现场,评估发动机的振动对助推火箭与无人机相对位置影响程度,没有齐全的实验室仪器,要应急测量突发事件中的火箭-机体多刚体相对位置变化特征十分困难。传统应变片与激光位移计虽能实现局部测量,但存在三大局限:1)安装限制。传感器需预埋于结构内部,无法适应快速部署需求。2)单点局限性。难以捕捉复杂连接界面的全场位移特征。3)环境敏感性。沙漠、高湿度等野外环境易导致测量误差。

近年来,数字图像相关技术(digital image correlation, DIC)方法以其测试手段的便捷性、数据解读的直接性获得广泛应用,已经在飞机变形测量、水下航行推进器变形测量、大型结构物变形监测中获得实际推广应用^[11-26]。但现有研究多集中于实验室环境(如A. Pagani等^[11]对VLA轻型飞机的静态测试),缺乏对野外多扰动耦合场景的适应性验证。在航空领域,DIC测量技术主要在实验室状态下测量准静态变形。文献[11]对超轻型飞机Dardo Aspect进行了破坏性和非破坏性机翼测试;文献[12]借助摄影仪技术的发展,通过同时触发高速相机拍摄并测量直升机桨叶的变形;文献[13]通过二维或三维的DIC测量技术,实现复合材料筒等结构的无损检测。

因此,为保障高速无人机顺利飞行,达成后续重大任务的展开,本研究构建了针对野外无人机发射系统可靠性监测的简易测量系统,通过DIC技术获得发动机试车过程中助推火箭与无人机连接特性的定量变化,以评估使用该发动机时火箭助推参数变化的风险。

2 DIC基本原理

数字图像相关技术(DIC)是一种用于测量结构二维或三维全场视野的表面位移响应的非接触式测量方法。其基本原理为通过对变形前后采集物体表面的两幅图像进行相关处理,进而实现物体变形场的测量;通过对位移场数据的进一步计算,获得表面应变场以表征结构的局部力学行为^[12-14]。

现有的DIC采用的二维装置(2D-DIC)由单摄像头采集图像,试件随机分布的表面斑点为图像处理提供了相关性分析的几何学基础。参考图像中的参考子集(通常是第一个图像)与后续变形图像子集(随后任何的图像)中进行比较,以寻找目标子集;这个目标子集是变形图像的子集,与参考子集匹配以最大程度相似。目标子集位置的确定通常基于互相关准则或者最小和平方差分相关准则。试件表面点新的二维位置,与原位置的增量进行二维位移矢量计算。对于所有变形的图像可以重复这个过程,以获得整个变形试样表面的二维位移^[14,20-21]。

光学记录数字图像进行位移运算的基本原理是:首先对散斑场作仿射变换,判断物体变形后的散斑场经仿射变换恢复到变形前对应的相似程度指标,就是散斑场之间的相关性。其次在仿射变换中,引入假设散斑位移函数,将变形前后散斑场的相关性与散斑位移场联系,相关性则成为散斑位移函数的一个泛函,物体的变形量从而可以从散斑位移导出^[14,22],这是关键步骤。

采用数字相关法中的搜索算法求取相关系数最大值通常有两个过程:首先,进行整像素搜索,即为粗匹配过程,以基准图像中的基准点 $P(x_0, y_0)$ 为中心,取边长为 $(2N+1)$ 像素的矩形方框作为计算子区域, $P(x_0, y_0)$ 点的灰度值为 $f(x, y)$;然后,在目标图像中选取边长为 $(2M+1)$ 像素的矩形方框为搜索子区域,其中 $M>N$;最后,以搜索子区域的每一个像素点为中心,选取边长为 $(2N+1)$ 的矩形区域作为目标子区域。通过相应的搜索方法计算变形图像中多个点的相关系数,选择相关系数最大值对应的搜索点作为 $P(x_0, y_0)$ 的匹配点 $P'(x'_0, y'_0)$ 。此匹配过程为数字图像相关法的粗匹配。随后求取 P 点与 P' 点之间的像素差值即为 u, v 方向的位移,获得整像素级的位移分量。最后,在整像素搜索结果的基础上进行细化,即亚像素搜索。最简单的平方和相关函数为

$$C_{f,g}(\vec{p}) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - g(x', y')]^2,$$

但常用的两个相关函数为零均值归一化相关函数

(ZNCC)和零均值归一化最小平方距离相关函数(ZNSSD):

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \bar{f}_i^2 \sum_{i=1}^n \bar{g}_i^2}},$$

$$C_{ZNSSD} = \sum \left(\frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \bar{g}_i^2}} \right),$$

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \quad \bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i,$$

$$\bar{f}_i = f_i - \bar{f}, \quad \bar{g}_i = g_i - \bar{g}.$$

式中: f_i 和 g_i 分别为搜索过程中对应子区域的灰度值; \bar{f} 和 \bar{g} 分别为子区域灰度值的均值。

实际 $P(x_0, y_0)$ 移动到 $P'(x'_0, y'_0)$ 期间可能经过平移、旋转和拉伸,因此采用所谓的“形函数”近似变形后图像子区域形状,通常采用6个参数来描述均匀变形,其变化关系如下:

$$x'_i = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y,$$

$$y'_i = y_i + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y.$$

式中: u 和 v 分别为基准子区域中心点 P 变形后 x 方向上的位移和 y 方向上的位移。

用相关性衡量假设位移函数与真实散斑位移函数的接近程度,之后通过搜索算法寻找变形前后两个对应点,进而通过前后对比求取物体位移和形变。采用DIC方法进行位移场测试的误差主要来源于不同图像帧间模式匹配过程中的误差,它是由摄像头噪声与图像失真、照明条件、散斑图质量、相机传感器和目标物的平行度以及匹配过程中子集大小、形状函数、亚像素插值格式、相关准则等因素产生。

3 DIC测试

3.1 发动机振动对火箭助推影响的评估方案与实验设备

3.1.1 现场创新评估方案

起飞较大质量的高速无人机通常采用火箭助推起飞方式。在极短时间内以助推火箭的总冲量为无人机提供动量,使得无人机在火箭脱离之后达到指定的速度和高度。这一方式对起飞场地要求低,发射时机灵活。火箭助推无人机离开发射架起飞到火箭脱离阶段,其发射安全性影响因素较多,主要有助推火箭装配体的稳定性、推力线方向精准度、机体承受助推火箭推力的刚度等。

某高速无人机,采用双发动力,固体火箭零长发射。在某试验现场经过多次试飞后,完好的发动机无库存,准备启用编号为A的发动机。A发动机验收时振动偏大,现场又无法验证原有振动水平对无人机发射安全性的影响程度。通过现场发动机开车试验,分别验证了机载电子设备的振动环境适应性、中控计算机的可靠性、姿态传感器的可靠性。此外,还需要进一步验证发动机振动是否影响助推火箭安装的可靠性。

测试现场有一定的风速干扰,并且记录对象没有预先散斑化,因此在试验现场首先进行了图像相关性预备实验,在确认了可以获得目标物变形定量的前提下,进入DIC测试。现场实验对象如图1所示。



图1 助推火箭与无人机装配照片

Fig. 1 Photos of booster rocket and UAV assembly

3.1.2 实验设备

由于试验现场不具备实验室条件,拟采用DIC方法判定发动机振动对火箭助推系统稳定性的影响程度。针对野外测试需求,采用普通家用摄影硬件,构建模块化DIC系统(图像采集范例见图1)。

1) 光学采集模块: Sony $\alpha 7IV$ 全画幅相机(6 100万像素)(型号A7R IV,索尼公司)搭配200 mm长焦镜头(型号F2.8 GM OSS II,索尼公司),配合高速摄像机(型号PXW-FX9,索尼公司)组成异构视觉系统; 2) 环境补偿模块: 集成光强传感器(型号FA01,南华机电)与风速仪(型号FA01,南华机电),实时监测环境参数并反馈至图像预处理单元。

3.2 DIC测试条件与流程

试飞无人机实机质量约为140 kg,安放在发射架上,通过推拉连杆与剪切销形成3点支撑。发射架固定在混凝土墩上,本身不具有刚体位移。

1) 测试表面处理。测试表面通常要求具有散斑特征^[27]。助推火箭为合金加工筒体,其他装配零件由铝镁合金制作,表面粗糙,具有自然漫反射能力;无人机主体为复合材料,结构表面因为气动与隐身要求,没有特殊处理。局部有LOGO标识,具有一定

的漫反射能力。

2) 光照条件。无人机试飞现场地处沙漠,根据气象预报与现场判断,具有较好的光照条件;试验时间周期为数分钟以内,阳光光源按照恒定位置考虑;风力2级以下,测试环境良好,故认为空气流动对本次较远距离光路的影响可以忽略。

3) 光路与图像记录设备。图像记录设备采用2套装置。装置编号甲是民用高速图像采集摄像机,记录的视频是JPG图片格式,距离无人机约15 m;既作为本次测试的图像记录设备,也兼做发射现场的监控装置。装置编号乙是单反相机,采用长焦模式,记录的视频是JPG图片格式,距离无人机约30 m。2套设备基本垂直于火箭助推器安装平面。

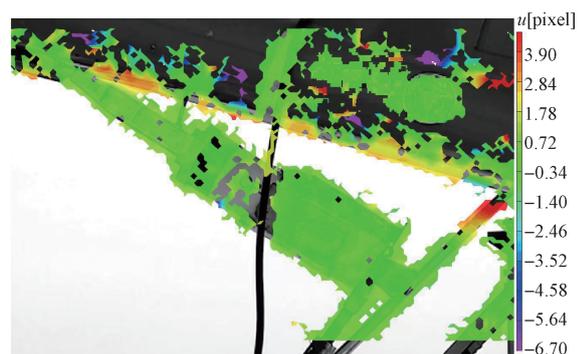
4) 试验流程。图像记录装置调试完成后,无人机与模拟助推火箭完成装配,安装在发射架上形成发射状态;启动编号甲设备记录视频,同时编号乙设备多次记录无人机与模拟助推火箭的初始状态;启动发动机并调试转速稳定在30 000 r/min约30 s,然后调试发动机转速至96 000 r/min稳定运行15 s,接下来至慢车稳定15 s,最后至停车;编号乙设备分别记录各阶段试验对象状态。最后关闭编号甲设备视频记录。

3.3 DIC测试结果分析

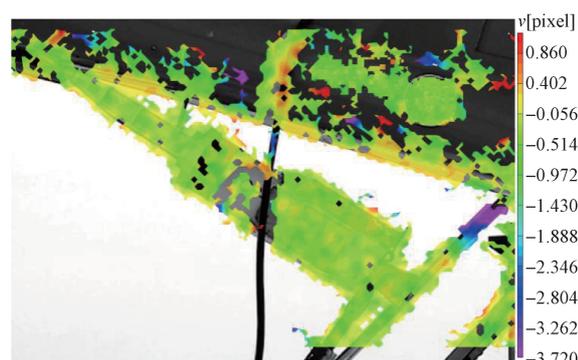
选取试验记录,分别在无人机整体静止状态和发动机处于96 000 r/min运转工况稳定时分别截取光学记录图片,进行DIC计算。计算程序采用Matlab代码,具有一定的灵活性。预测试结果分析表明,火箭助推器与机体LOGO都有良好的计算结果,两者分别代表多刚体结构的两个不同子系统。正式试验数据记录后离线分析的位移场结果如图2所示(位移场计算结果云图单位以图片像素计)。助推火箭与无人机处于一致的微小刚体位移,分别为水平位移0.3像素(对应物理位移0.12 mm)、垂直位移0.5像素(对应物理位移0.20 mm)。即助推火箭与无人机没有相对位移,多体系统的整体性没有被破坏。

本型无人机尽管发动机振动很大,但是助推火箭与无人机没有相对位移,多体系统的整体性与上发射架之前一致,说明该发动机的振动不足以影响发射状态的改变。在后续的多次飞行试验中,火箭助推发射系统性能稳定,为成功完成高速无人机飞行任务提供了可靠保障。

本次应急测试,因为试验现场条件限制,没有完成镜头校正等实验室典型试验流程。由于测试目的是考核发动机振动对助推火箭与机体之间的位置变化影响,从测试和后续的飞行试验结果看,应急测试流程简化后其精度满足工程要求。



a) 水平方向



b) 垂直方向

图2 发动机启动后助推火箭与无人机的位移场

Fig. 2 Perpendicular displacement field between booster rocket and UAV after engine driving

通过对试验数据的分析,可以得出以下结论:

1) 发动机振动对火箭助推系统的影响程度。试验结果表明,在发动机A振动较大的情况下,助推火箭与无人机没有出现明显的相对位移,这说明发动机A的振动不足以影响发射状态的稳定性。2) DIC技术的适用性。试验过程中,DIC技术展现了其在现场测试中的灵活性和可靠性。即使在野外工况下,DIC方法依然能够提供准确的位移测量数据,为无人机发射系统的可靠性评估提供了有力保障。3) 试验流程的简化与精度。由于试验现场的条件限制,本次试验简化了实验室部分流程。然而,简化后的应急测试流程依然满足工程要求,表明DIC技术在紧急情况下具有较高的实用性和精度。

4 结语

无人机火箭助推发射是典型的多刚体动力学问题,当出现特殊工况时,试飞现场应急处理往往不具备测试手段。数字图像相关性方法作为应急测试手段具有便捷性、适用性强等特点,为较短时间内多体联结边界的可靠性检测提供了较好的测试手段。本次重大科研发射任务的保障体现了DIC方法在现场测试中的灵活性与可靠性,本研究创新性地将DIC

技术应用于野外多刚体系统动态监测,突破了实验室设备依赖性强、标定流程复杂等局限。所提出的应急评估框架为复杂工况下航空航天装备可靠性验证提供了可推广的技术范式。

基于本次测试手段的成功实施,未来将进一步探索红外DIC在夜间发射中的应用,并开发基于边缘计算的实时监测系统,推动航空航天装备可靠性评估向智能化方向发展。

参考文献:

- [1] SIDDIQUI M Z. 2D-DIC for the Quantitative Validation of FE Simulations and Non-Destructive Inspection of Aft End Debonds in Solid Propellant Grains[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 39: 128-136.
- [2] HE C C, SUN Z H, WU L N. UAV Zero-Length Launch Control Law Design[C]//Proceedings of the International Conference on Guidance Navigation and Control, ICGNC 2022. Harbin: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023: 869-877.
- [3] 赵志俊, 郑浩, 孟祥喆. 无人机零长发射动态特性分析及控制律设计[J]. 飞机设计, 2023, 43(1): 18-22.
ZHAO Zhijun, ZHENG Hao, MENG Xiangzhe. Dynamic Characteristic Analysis and Flight Control Law Design of UAV Zero Length Launch[J]. Aircraft Design, 2023, 43(1): 18-22.
- [4] YIN J, ZHANG B, ZHAO L X, et al. Simulation and Analysis of Short Rail Launch for UAV with Rocket Booster[C]//2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Harbin: IEEE, 2020: 570-574.
- [5] LIU H L, TANG M H, ZHU A Y, et al. Research on Barycenter Measurement Method in Launch of Rocket-Boosted Unmanned Aerial Vehicles[C]//Proceedings of the 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Shanghai: ICAS: 1-7.
- [6] 贾华宇, 郑会龙, 周洪, 等. 基于SSA-BP神经网络的无人机发射参数择优[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 90-101.
JIA Huayu, ZHENG Huilong, ZHOU Hong, et al. Optimal Selection of UAV Launch Parameters Based on SSA-BP Neural Network[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(4): 90-101.
- [7] 周悦, 李壮壮, 郑然舜, 等. 无人机火箭助推机构分离安全性研究[J]. 兵工学报, 2024, 45(1): 219-230.
ZHOU Yue, LI Zhuangzhuang, ZHENG Ranshun, et al. Research on Safe Separation Mechanism of UAV

- Rocket Booster[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(1): 219–230.
- [8] JIA H Y, ZHENG H L, HUO S B, et al. Autonomous Prediction of UAV Launch Parameters Based on SSA-BP Model[C]//2024 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). Beijing: IEEE, 2024: 437–442.
- [9] 陈刚. 无人机单(双)火箭助推发射安全性对比分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(8): 27–32.
CHEN Gang. Comparative Analysis of UAV Launching Safety by Using Single or Double Solid-Rocket Booster[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(8): 27–32.
- [10] PAGANI A, AZZARA R, CARRERA E, et al. Static and Dynamic Testing of a Full-Composite VLA by Using Digital Image Correlation and Output-Only Ground Vibration Testing[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 112: 106632.
- [11] JANELIUKSTIS R, CHEN X. Review of Digital Image Correlation Application to Large-Scale Composite Structure Testing[J]. *Composite Structures*, 2021, 271: 114143.
- [12] PAN B. Digital Image Correlation for Surface Deformation Measurement: Historical Developments, Recent Advances and Future Goals[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 082001.
- [13] WANG B, PAN B. Subset-Based Local Vs. Finite Element-Based Global Digital Image Correlation: A Comparison Study[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2016, 6(5): 200–208.
- [14] 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): 1212001.
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): 1212001.
- [15] MARTÍNEZ M, LÓPEZ R, RODRÍGUEZ J, et al. Evaluation of the Structural Integrity of Solid Rocket Propellant by Means of the Viscoelastic Fracture Mechanics Approach at Low and Medium Strain Rates[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 118: 103237.
- [16] WANG R, WANG N F, ZHANG Y M, et al. Dynamic Mechanical Response and Failure Behavior of Solid Propellant Under Shock Wave Impact[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 164: 108700.
- [17] XIN R H, TUNG L, SEO G. Buckling Identification in Composite Cylindrical Shells with Measured Imperfections Using a Multi-DIC Method and Finite Element Analysis[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 177: 109436.
- [18] LIAN Z Y, ZHU X W, GAO L Q, et al. A Novel Videogrammetric Method Based on a Single Scheimpflug Camera for Full-Field Deformation Measurement of Large-Scale Wing in Flight[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 186: 108778.
- [19] HASSAN G M. Deformation Measurement in the Presence of Discontinuities with Digital Image Correlation: A Review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106394.
- [20] SUTTON M A, HILD F. Recent Advances and Perspectives in Digital Image Correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 1–8.
- [21] LUU L, WANG Z Y, VO M, et al. Accuracy Enhancement of Digital Image Correlation with B-Spline Interpolation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3070–3072.
- [22] ACIKGOZ S, DEJONG M J, SOGA K. Sensing Dynamic Displacements in Masonry Rail Bridges Using 2D Digital Image Correlation[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(8): e2187.
- [23] SOUSA P J, BARROS F, TAVARES P J, et al. Displacement Measurement and Shape Acquisition of an RC Helicopter Blade Using Digital Image Correlation[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 5: 1253–1259.
- [24] TIAN L, ZHAO J H, PAN B, et al. Full-Field Bridge Deflection Monitoring with Off-Axis Digital Image Correlation[J]. *Sensors*, 2021, 21(15): 5058.
- [25] WINKLER J, HENDY C. Improved Structural Health Monitoring of London's Docklands Light Railway Bridges Using Digital Image Correlation[J]. *Structural Engineering International*, 2017, 27(3): 435–440.
- [26] HUA T, XIE H M, WANG S, et al. Evaluation of the Quality of a Speckle Pattern in the Digital Image Correlation Method by Mean Subset Fluctuation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(1): 9–13.

(责任编辑: 姜利民)