第 40 卷 第 1 期 实 验 流 体 力 学 Vol. 40, No. 1
2026 年 2 月 Journal of Experiments in Fluid Mechanics Feb., 2026

文章编号: 1672-9897(2026)01-0020-14 doi: 10.11729/syltlx20240072

三维数字图像相关在旋转物体变形测量中的应用

任少洁, 黄湛*, 王宏伟, 李晓辉, 康国剑, 于靖波
中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074

摘要: 旋转部件在交通运输、风能发电等诸多领域具有重要作用。三维数字图像相关方法(Three-Dimensional Digital Image Correlation, 3D–DIC)作为一种非接触光学测量手段, 能够获取旋转部件在运转过程中的全场位移、变形及振动信息, 从而为故障诊断、健康监测以及气动结构优化设计提供重要数据支撑。本文对近年来 3D–DIC 技术的发展与应用进行了全面综述。首先介绍了 3D–DIC 技术的基本原理及其针对旋转物体的变形测量系统; 针对大角度旋转测量中出现的退相关问题, 详细阐述了国内外学者在初值估计和形函数设计等方面所提出的改进。随后, 通过若干典型应用案例, 展示了该技术相较于传统变形测量手段的优势。最后, 对该技术的应用前景和发展趋势进行了展望。

关键词: 三维数字图像相关; 旋转物体; 退相关; 故障诊断; 振动测量
中图分类号: O348.1; V214.3^{+}2 **文献标识码:** A

Deformation measurement of rotating object using three-dimensional digital image correlation

REN Shaojie, HUANG Zhan*, WANG Hongwei, LI Xiaohui, KANG Guojian, YU Jingbo
China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China

Abstract: Rotating structures are commonly used in the transportation and energy generation fields. As a non-contact optical measurement technique, the Three-Dimensional Digital Image Correlation (3D–DIC) allows for the full-field spatial measurement of displacement, deformation and vibration of rotating objects in operation, which provides important data support for damage detection, health monitoring and aerodynamics structural optimization design. A review of the extensive studies on the development and application of 3D–DIC is presented. First, the principle of 3D–DIC and its rotating object measurement setup are introduced. Particularly, in cases when the deformation involves a large rotation, a de-correlation problem emerges. To address this, many scholars have proposed initial value estimation and shape function design methods for large-rotation objects, which are investigated extensively here. Several application cases utilizing 3D–DIC for damage detection and vibration measurements are introduced, showing its unique advantages compared with traditional deformation measurements methods. Lastly, the application prospect and development trend of this technology are prospected.

Keywords: Three-Dimensional digital image correlation; rotation object; de-correlation; damage detection; vibration measurement

0 引 言

风力发电机叶片、直升机螺旋桨桨叶以及各类机械设备的轴承/齿轮等是设备正常运转的关键部件。这些旋转部件在运转过程中受到离心力作用, 容易产生变形: 一方面, 变形会引起周期性疲劳, 影

收稿日期: 2024-10-09; **修回日期:** 2025-03-07; **录用日期:** 2025-03-12
基金项目: 临空科技与产业指导基金项目 (LKJJ-2023005-01)
* 通信作者 E-mail: xfd_huangzh@sina.com

引用格式: 任少洁, 黄湛, 王宏伟, 等. 三维数字图像相关在旋转物体变形测量中的应用 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(1): 20-33.
REN S J, HUANG Z, WANG H W, et al. Deformation measurement of rotating object using three-dimensional digital image correlation[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(1): 20-33.

响设备工作效率甚至引发故障；另一方面，变形会导致旋转部件偏离最优设计状态，同样降低工作效率。因此，采用适当手段获取旋转部件的变形及振动信息，分析其动态性能，能够为性能评估、结构与气动优化设计以及健康监测提供重要的数据支撑。

传统测量旋转物体变形的方法依赖单点式应变传感器，空间分辨率低，难以获得应变梯度结果。为获取全场应变信息，通常需要在旋转部件表面布置大量应变计，再通过滑环或无线电将信号传输至现场设备。该方法硬件成本较高，对信号传输的稳定性要求也较严，而且传感器引入的额外质量往往也会改变物体本身的应变分布。鉴于此，亟需发展一种非接触、全场式的测量手段来获取旋转物体的变形信息。随着光学传感器、计算机算力及存储容量等的飞速发展，光学测量方法展现出显著优势，其代表性技术包括激光多普勒测速（LDV）和摄影成像（photogrammetry）技术。LDV 技术基于激光束与物体散射光之间的多普勒频移来获取速度[1-2]；传统 LDV 技术仅能进行单点测量，而扫描式 LDV（SLDV）技术则可在较短时间内实现多点测量[3]。然而，上述技术仍只能进行单维度测量。3D SLDV 技术采用 3 个激光头，分别检测各激光束方向上的瞬时振动速度，进而计算位移，实现振动测量。例如，Castellini 等[4] 基于 SLDV技术测量了水下螺旋桨的全场振动；Chen 等[5] 使用 3D SLDV 技术测量了风力发电机叶片的面内、离面及扭转模态。该方法测量灵敏度高，振动频率覆盖范围广，但需逐点扫描，无法同时获取各点数据，因而测量结果在时间上不一致。尤其在测量旋转物体变形时，对测速仪的要求更高，需与旋转轴对齐[4] 或与旋转物体转速同步[6]。

随着数字成像技术的发展，基于图像的摄影成像技术更常用于旋转物体的变形与振动测量，代表技术有三维点追踪（3DPT）和三维数字图像相关（3D–DIC）技术。它们通过一台或多台相机对目标区域成像，基于图像处理算法跟踪区域三维位置，从而获取全场三维位移变形并分析振动信息。这类基于图像的技术布局简单、成本较低、环境适应性好、测量范围广。3DPT 技术跟踪的是粘贴于旋转物体表面、反光度较强的目标点的三维位置：Corten 等[7] 最早使用该技术测量了直径 10 m 的风力发电机叶片振动；随后，Barrows 等[8] 在 NASA 风洞中完成了全尺寸直升机 UH–60A 在不同飞行参数下的变形测量；Baqersad 等[9-10] 则采用模态扩展算法结合有限元方法重构了风力发电机叶片的全场变形。3DPT 技术仅重建有限数量目标点的坐标，相比全场测量技术，其数据处理量小，尤其适用于大尺寸旋转物体的变形测量。例如，Ozbek[11-12] 和 Paulsen[13] 等分别测量了直径 80 和 41 m 的风力发电机叶片振动，并分析了模态参数。然而严格来说，3DPT 并非全场测量技术，因此空间分辨率较低。

3D–DIC 技术可直接获得空间分辨率更高的全场变形结果。该技术利用旋转物体表面对比度高的黑白随机散斑，将散斑图像划分子区并跟踪各子区的三维位置。Warren 等[14] 率先测量了 1.17 m 长风力发电机叶片的全场振动，进行了模态分析并与 LDV 测量结果对比，但测量的是叶片静态激励下的振动信息。Sirohi 和 Sicard 等[15-16] 利用 3D–DIC 测量了小尺寸直升机桨叶在转速达 1 500 r/min 时的离面、面内及扭转变形，通过与激光位移传感器结果对比验证了 DIC 的测量精度。Winstroth 等[17] 测量了直径 114 m 风力发电机叶片运行全过程的三维变形与扭转变形，与仿真结果对比验证了 DIC 算法的有效性。然而，仅用一对相机拍摄较大尺寸叶片时，图像分辨率往往较低；文献[18-19] 均采用多对相机的 DIC 系统拍摄叶片不同视角，并对测量模态进行拼接，以重建全场模态。针对高频振动测量，大多数学者使用基于 2 台高速相机的高速 DIC 系统[20]，例如 Goessling[21]、Rizo-Patron[22]、Uehara[23] 等利用高速 DIC 系统获取了高转速、高振动频率的风扇叶片和直升机叶片等的振动模态信息。也有学者为降低高速相机带来的成本，采用低速相机结合文献[24] 提出的下采样方法，克服奈奎斯特–香农采样定律的限制，以低帧率相机实现高频测量[25-27]。

本文在全面调研的基础上，综述了 3D–DIC 技术在旋转物体变形测量中的发展与应用。首先介绍了 3D–DIC 技术的基本原理及旋转物体测量系统的特点，并针对高速旋转物体变形测量中因旋转角度较大导致的退相关问题，阐述了相关匹配算法的改进。接着通过该技术在旋转物体故障诊断与振动测量等方面的典型应用，展现了其相较于传统变形测量手段的优势。最后，对 3D–DIC 技术的应用前景和发展趋势进行了展望。

1　3D–DIC 基本原理

3D–DIC 基于待测部件表面的随机灰度散斑特征进行测量。当部件发生变形时，表面散斑随之移

动，通过使用一台或多台位置相对固定的相机从不同视角拍摄变形前后的散斑图像，再经过相关匹配与三维重建，即可获取三维形貌、位移和变形信息。3D–DIC 克服了传统 2D–DIC 的局限，例如后者仅适用于平面物体的面内变形测量，且在相机光轴与物体平面不垂直或物体发生离面变形时，均会引入误差。

1.1 散斑特征

物体表面的散斑特征携带变形信息，因此散斑是实现 DIC 算法必不可少的一部分。根据制作工艺，散斑主要分为 3 种：一是利用物体表面已有的自然纹理特征，如桥梁、花岗岩等表面的纹理。这类自然纹理通常作为固有的微结构特征，适用于微观尺度的变形测量[28]，原因在于微结构特征在光学显微镜或扫描电子显微镜下能够被更清晰地观测。自然纹理散斑制备简单、成本低，但通常为单色，对比度较低，因此对 DIC 算法的鲁棒性要求更高。二是在物体表面人工制作随机散斑，例如使用喷枪喷涂黑或白色哑光漆、用永久性黑或白色记号笔点涂，或对大尺寸部件直接粘贴印有散斑图案的背胶箔[17, 21]等，均可形成对比鲜明的黑白散斑[28]；此外，也可通过喷涂荧光粒子并在光源照射下形成荧光散斑[23, 29]。人工散斑通过人为制作高对比度的随机分布图案，具有更好的可控性与灵活性，可根据实验需求定制，适用于宏观与微观尺度测量；其缺点在于需要接触物体表面，喷涂时易导致散斑分布不均，且通常不耐高温。三是激光散斑，即用相干激光束照射粗糙物体表面，经漫反射干涉后形成。当物体表面既无自然纹理也无法接触制作时，可考虑采用激光散斑。例如，Kirmse 等[30]在测量飞机发动机叶片变形时，便利用激光束照射形成了激光散斑。激光散斑的优点是耐高温，缺点是当物体发生较大应变或离面变形时，参考子区与目标子区之间的相关性会下降，导致匹配函数因峰值不明显而无法准确匹配，从而出现退相关现象[31]。

标准散斑通常为圆形点状。Stasicki 等[32]指出，等直径的点状散斑在多数情况下效果良好，但并不适用于所有场景。例如，当被测物体尺寸较大，且相机光轴与物体表面夹角也较大时（如从飞机机舱拍摄机翼），受限于相机分辨率和景深，距离相机较近的散斑成像尺寸较大，较远的则较小甚至模糊。因此，可采用如图 1 所示的散斑设计[33]，使散斑尺寸沿展向从桨根到桨尖逐渐增大，将圆形散斑拉伸为椭圆形状，从而保证成像中散斑尺寸的一致性。

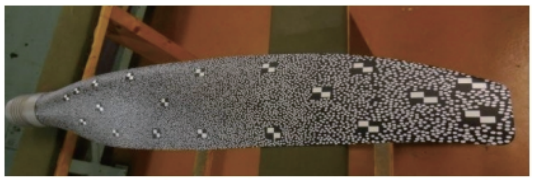


图 1 测量大视场物体，且相机光轴与物体表面夹角较大时设计的散斑形状[33]

Fig. 1 Speckle pattern design in case of high inclination of the camera optical axis to the surface of the investigated object for large fields of view[33]

散斑质量直接影响 DIC 算法的准确性与效率。Reu[34-37]与 Patil[38]等详细分析了散斑大小、密度及对比度对测量精度的影响。1）散斑大小：由拍摄视场大小与相机分辨率共同决定。从互相关计算的角度考虑，子区不宜过大，否则会损失变形梯度信息，降低空间分辨率；但子区又需包含足够数量的散斑点，因此散斑点尺寸也不宜过小，一般以直径 3～5 像素或稍大为宜。2）散斑密度：散斑过少会导致占空比下降、匹配困难，密度通常以高于 50% 为宜[38]；散斑也不宜过密，否则会引起斑点重叠干扰，散斑点间距建议不小于 3 像素或稍大。最佳密度可通过实验反复调整获得。3）散斑对比度：提高对比度有助于增强相关性，从而提升计算精度。表 1 汇总了各旋转物体变形测量案例中所使用的散斑特征参数。

1.2 相关匹配

3D–DIC 融合了 2D–DIC 与双目立体视觉技术，其核心是通过匹配获取变形前（时刻 0）与变形后（时刻 n）左、右相机图像中的对应像素点，进而通过三维重构恢复其三维坐标与形貌，从而得到位移信息。匹配主要包括立体匹配和时序匹配：首先对时刻 0 的左、右相机散斑图像进行立体匹配，再分别对左、右相机在时序上的散斑图像进行时序匹配，示意如图 2 所示。图中，P_n 与 P'_n 分别为时间 $T = n$ 时参考子区与目标子区的匹配中心像素点。

立体匹配和时序匹配均基于局部子区的相关匹配算法实现。首先，在首幅参考图像上选定感兴趣区域（参考子区）并将其均匀划分为网格；随后通过计算所有子区中心的位移，即可重构出全场位移分布，基本原理如图 3 所示。对于中心坐标为 $P(x_0, y_0)$ 的参考子区，在待匹配图像中寻找与之最相似、中心坐标为 $P'(x'_0, y'_0)$ 的目标子区，则待计算点 $P(x_0, y_0)$ 在 2 个坐标轴方向上的像素位移分别为 $u = x'_0 - x_0$，$v = y'_0 - y_0$。该过程通过形函数建立参考子区与目

表 1　各测量旋转物体变形使用的散斑特征参数

Table 1　Parameters of speckle patterns for rotating objects deformation measurement

旋转物体	制备工艺	散斑类型	散斑大小	散斑密度	参考文献
1.13 m长风力发电机叶片	黑色永久性记号笔点涂	点状	2～3 mm	50%	Khadka等[18]
0.99 m长鼓风机风扇叶片	打印的背胶箔	点状	5像素	—	Goessling等[21]
2.032 m长直升机叶片	喷涂黑色散斑	点状	2～3像素	间距3～9像素	Rizo-Patron等[22]
0.425 m长直升机叶片	荧光散斑	点状	3 mm	间距4 mm	Dong等[29]
1 m长直升机叶片	—	花椰菜状和点状	—	—	Stasicki等[32]
飞行螺旋桨叶片	黑色底漆，并粘贴黏性掩膜喷涂白色散斑	点状和椭圆状	大小不一	密度不一	Stasicki等[33]

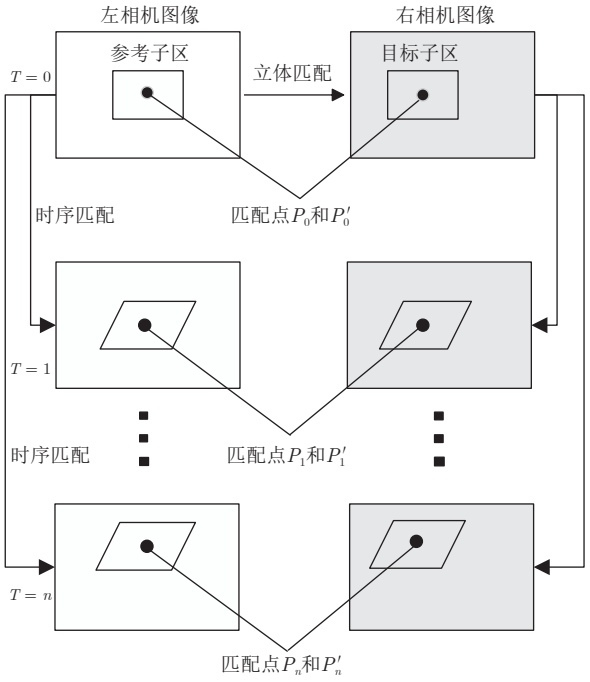


图 2　3D–DIC 中的立体匹配和时序匹配

Fig. 2　Stereo and temporal matching in 3D–DIC

标子区的位置关联，通过相关函数度量二者相似性，并通过搜索算法寻找最相似的子区。

1)形函数

设参考子区内任意像素点 Q 的坐标为 (x, y)。在考虑平移、旋转、剪切和拉伸等变形时，通常采用一阶形函数(二阶形函数则适用于更复杂的变形情况[39])，则目标子区内对应像素点 Q'的坐标为：

$$x' = x_0 + u + (1 + u_x)\,\Delta x + u_y \Delta y \tag{1}$$

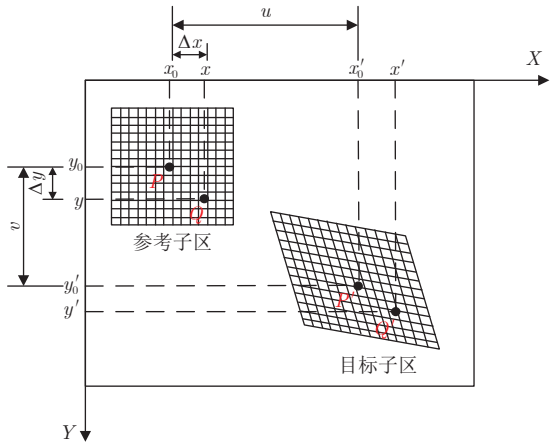


图 3　相关匹配基本原理示意图

Fig. 3　Basic principle of correlation matching

$$y' = y_0 + v + v_x \Delta x + (1 + v_y)\,\Delta y \tag{2}$$

式中：Δx 和Δy 分别为参考子区内像素点 (x, y) 到中心 (x_0, y_0) 的距离，(x_0, y_0) 可按等间隔选取，步长越小，空间分辨率越高；u_x、u_y、v_x、v_y 分别为位移 u、v 在 X、Y方向的梯度分量，其中 u_x 和 v_y 表示缩放应变，u_y 和 v_x 表示剪切应变。

2)相关函数

相关函数用于衡量参考子区与目标子区之间的相似度，基于散斑的灰度特征进行计算。常用函数包括互相关函数(Cross Correlation, CC)和平方距离函数(Sum of Squared Difference, SSD)，通常采用零均值归一化形式(即 ZNCC 和 ZNSSD)，两者对图像尺度及光照变化具有更好的鲁棒性[40]，其表达式分别为：

$$C_{\mathrm{ZNCC}}(\boldsymbol{P}) = \frac{\sum\limits_{x=-M}^{M}\sum\limits_{y=-M}^{M}[f(x,y)-f_{\mathrm{m}}]\,[g(x',y')-g_{\mathrm{m}}]}{\sqrt{\sum\limits_{x=-M}^{M}\sum\limits_{y=-M}^{M}[f(x,y)-f_{\mathrm{m}}]^2}\sqrt{\sum\limits_{x=-M}^{M}\sum\limits_{y=-M}^{M}[g(x',y')-g_{\mathrm{m}}]^2}} \tag{3}$$

$$C_{\mathrm{ZNSSD}}(\boldsymbol{P})=\sum_{x=-M}^{M}\sum_{y=-M}^{M}\left[\frac{f(x,y)-f_{\mathrm{m}}}{\sqrt{\sum_{x=-M}^{M}\sum_{y=-M}^{M}\left[f(x,y)-f_{\mathrm{m}}\right]^2}}-\frac{g\left(x',y'\right)-g_{\mathrm{m}}}{\sqrt{\sum_{x=-M}^{M}\sum_{y=-M}^{M}\left[g\left(x',y'\right)-g_{\mathrm{m}}\right]^2}}\right]^2 \tag{4}$$

式中：M为子区半径；$f(x, y)$和$g(x', y')$分别为参考图像和目标图像在对应坐标处的灰度值；f_{m}和g_{m}分别为参考子区和目标子区的灰度均值；$\boldsymbol{P}$为待求解的变形参数向量$[u, v, u_x, u_y, v_x, v_y]^{\mathrm{T}}$。ZNCC与ZNSSD是等价的，二者关系可表示为[40]：

$$C_{\mathrm{ZNSSD}}(\boldsymbol{P})=2\left[1-C_{\mathrm{ZNCC}}(\boldsymbol{P})\right] \tag{5}$$

3)搜索算法

搜索算法通过求解相关函数的极值来获得最优变形参数$\boldsymbol{P}$，通常采用非线性优化算法，包括初值估计与迭代优化2个步骤。

初值估计：对于每个子区中心点（POI），在图像水平和竖直方向上进行整像素遍历，将相关函数取最相关的位置作为位移u和v的初值，并将梯度u_x、u_y、v_x、v_y的初值设为0。该方法通常耗时，且仅适用于子区间相对变形及旋转较小的情况。为提高效率，可根据变形连续性假设，将前一计算子区的变形参数作为当前子区的初值，但该方法仅适用于变形连续的情形，且容易导致误差传递。Pan[41]对此进行了改进，提出了可靠导引DIC算法（Reliability-Guided DIC, RG-DIC）：首先计算具有最大ZNCC值的像素点，并将其变形参数作为初值向周围传递，使计算沿最可靠的路径进行，从而避免误差传递。Shao等[42]则提出一种基于种子点的并行传递策略：将ZNCC值超过给定阈值的点作为种子点，同时将其变形参数传递给4邻域像素点，相比RG-DIC，该策略提高了计算效率。

迭代优化：初值通过不断迭代更新，直至满足收敛条件，从而使变形参数精度从像素级提升至亚像素级。只要初值估计合理，迭代算法通常能够快速、准确地收敛。Sutton和Bruck等[43-44]提出的正向累积牛顿-拉夫逊法（Forward Additive Newton Raphson, FA-NR）是应用最广泛的迭代优化算法之一。FA-NR采用前馈匹配策略，基于NR算法迭代求解变形参数增量，并不断更新$\boldsymbol{P}$以获得最优解，其迭代公式为：

$$\boldsymbol{P}_{i+1}=\boldsymbol{P}_i-\frac{\nabla C\left(\boldsymbol{P}_i\right)}{\nabla^2 C\left(\boldsymbol{P}_i\right)} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{P}_i$为变形参数第i次迭代的估计值；$\nabla C(\boldsymbol{P})$和$\nabla^2 C(\boldsymbol{P})$分别是相关函数的一阶导数和二阶导数（Hessian矩阵）。

FA-NR精度较高，但由于涉及Hessian矩阵，计算复杂度与时间成本较大。Vendroux等[45]对Hessian矩阵进行了近似处理；Pan等[46-47]则提出了更高效的反向组合高斯-牛顿法（Inverse Compositional Gauss Newton, IC-GN），该方法无需重复计算Hessian矩阵，在保持FA-NR高精度的同时，显著提升了迭代效率。Pan等[48]进一步证明，与FA-NR相比，IC-GN具有更低的系统误差和随机误差，且抗噪声能力更强。

1.3 三维重构与变形计算

通过上述匹配，可得到左、右相机在时序上匹配的像素点，对其进行三维重构后获得对应的时序空间点坐标，从而重建变形前后的三维形貌，进而计算三维变形。三维重构基于双目视觉原理，空间点的世界坐标$(x_{\mathrm{w}}, y_{\mathrm{w}}, z_{\mathrm{w}})$与其在左、右相机像面上的投影点$(p_i, q_i)(i=1, 2)$满足如下关系：

$$z_{\mathrm{w}}\begin{bmatrix}p_i\\q_i\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{H}_i\begin{bmatrix}x_{\mathrm{w}}\\y_{\mathrm{w}}\\z_{\mathrm{w}}\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{11}^i & H_{12}^i & H_{13}^i & H_{14}^i\\H_{21}^i & H_{22}^i & H_{23}^i & H_{24}^i\\H_{31}^i & H_{32}^i & H_{33}^i & H_{34}^i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{\mathrm{w}}\\y_{\mathrm{w}}\\z_{\mathrm{w}}\\1\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{H}_i$为投影矩阵，由相机主点、焦距及相机相对于世界坐标系的变换矩阵构成。通过求解下列线性方程组，即可计算出$(x_{\mathrm{w}}, y_{\mathrm{w}}, z_{\mathrm{w}})$，实现三维坐标重构：

$$\begin{aligned}&\left(p_iH_{31}^i-H_{11}^i\right)x_{\mathrm{w}}+\left(p_iH_{32}^i-H_{12}^i\right)y_{\mathrm{w}}+\\&\left(p_iH_{33}^i-H_{13}^i\right)z_{\mathrm{w}}=H_{14}^i-p_iH_{34}^i\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}&\left(q_iH_{31}^i-H_{21}^i\right)x_{\mathrm{w}}+\left(q_iH_{32}^i-H_{22}^i\right)y_{\mathrm{w}}+\\&\left(q_iH_{33}^i-H_{23}^i\right)z_{\mathrm{w}}=H_{24}^i-q_iH_{34}^i\end{aligned} \tag{9}$$

2 旋转物体3D-DIC系统

3D-DIC系统通常由2台相机、光源、同步控制器及采集计算机等组成，如图4所示。相机分别采集旋转叶片在静态和旋转状态下的散斑图像，以静态图像作为参考，通过相关匹配和三维重构运算获取

位移与变形信息。

由于使用 2 台相机对硬件成本及相机间同步控制的要求较高，有学者提出采用单相机 3D–DIC 系统，通过在相机镜头前添加衍射光栅、双棱镜或多个平面镜等光学装置，实现伪双目拍摄效果[49-51]。这些装置将单相机采集的图像分割为 2 个不同视角的子图像。此类设计降低了硬件成本，避免了双目系统的几何失真，提高了匹配精度，但通常会减小拍摄视场并降低测量灵敏度[25]。

对于旋转物体，尤其是高速旋转物体的位移与变形测量，对 3D–DIC 系统中的相机、光源及同步控制提出更高要求。

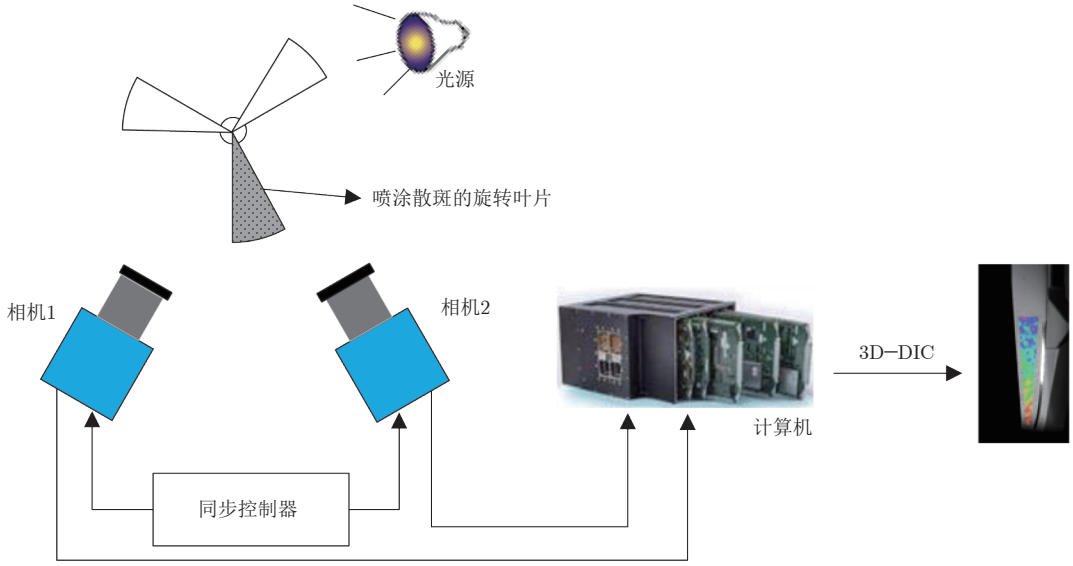


图 4　旋转物体 3D–DIC 测量系统

Fig. 4　3D–DIC measurement system for rotating objects

2.1　相机和光源

DIC 测量系统的关键在于获取对比度高、成像清晰的散斑图像。对于高速旋转物体，其尖端散斑由于线速度较高易产生运动模糊，此时应尽量缩短相机曝光时间；同时，旋转物体尖端通常离面变形更大，需要缩小镜头光圈以增大景深。以上 2 点均会导致图像亮度降低，因此需使用高照度光源进行补光，并对被测表面进行均匀照射[52]，以增强散斑对比度、提升图像质量。光源可采用常亮光源或闪光灯；对于极短曝光时间，则需使用高能量脉冲激光光源。对于高频振动测量，相机采集帧率至少应为物体振动频率的 2 倍，故一般需选用高速相机。

2.2　相位锁定

使用 3D–DIC 系统拍摄旋转物体时，通常有 2 种方式：一是拍摄物体旋转的全过程，并计算各位置相对于静止状态的变形。这种方式适用于尺寸较小的物体；对于大尺寸物体，为获得足够视场需增大拍摄距离或使用短焦镜头，前者会降低空间分辨率，后者可能引起图像边缘失真。此外，拍摄大尺寸物体全过程对光源能量要求更高，会增加成本。二是仅在物体旋转到特定相位位置时进行拍摄，并计算每次到达该位置时相对于静止状态的变形。这种方式更适用于大尺寸物体，且能避免因帧间旋转和变形过大给 DIC 算法带来的计算误差。

为实现旋转到特定位置时的精确拍摄，需使相机快门和光源与物体旋转严格同步，即对旋转位置进行相位锁定。一般需借助与旋转位置关联的触发模块来控制相机和光源。例如，Stasicki 等[32] 利用激光传感器发射光束，经桨叶反射后接收并产生触发信号，通过调节触发延时实现不同相位锁定。Sousa 等[53] 将激光器与光电探测器分置叶片两侧，当叶片遮挡光束时，探测器向触发模块发送信号，进而触发相机，示意如图 5 所示。余镇江[54] 采用激光触发和频闪照射系统，通过在发动机叶片上粘贴触发标记，在叶片转到待测相位时触发频闪仪发出短脉冲光；将频闪频率设置为与叶片旋转频率相等，即可实现相位锁定。Sicard[16]和 Li[55] 等利用霍尔传感器和频闪仪锁定发动机叶片或转盘的相位，后者还采用可编程时序单元控制相机和频闪仪的重复频率，以实现与叶片旋转的严格同步。Stasicki 等[33] 将相机直接固定在螺旋桨桨毂上随叶片同步旋转（图 6），使相

机相对于待测叶片的视角保持固定。该设计具有小型化工装的特点，已成功应用于叶片变形的地面及飞行试验测量。

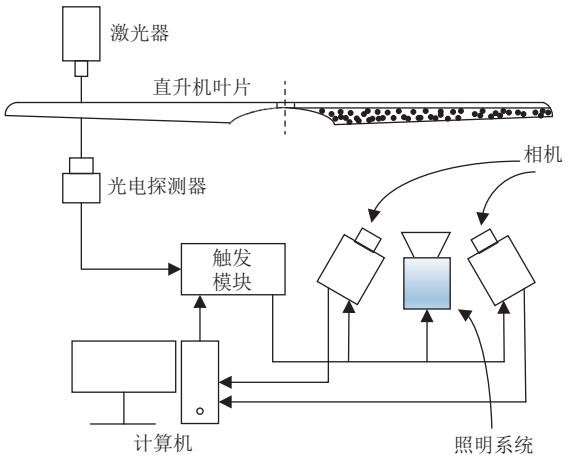


图 5 利用激光器、光电探测器和触发模块锁定叶片相位[53]

Fig. 5 Schematic of phase locking for blades via laser, photodetector and trigger controller[53]

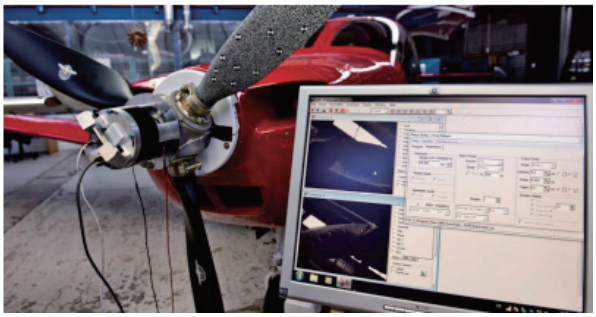


图 6 相机固定在飞行器螺旋桨桨毂上[33]

Fig. 6 Camera mounted on the aircraft propeller hub[33]

当硬件无法实现完全锁相时，可通过算法消除叶片旋转引起的刚体位移对变形测量的影响。余镇江[54]和潘济宇[56]等通过配准叶片桨毂区域在变形前后的点云，得到旋转矩阵和平移向量，进而修正观测变形数据。文献[57]则利用 2 个不同相位角的静态叶片点云，基于最小二乘法计算出叶片的旋转轴和旋转中心，并用于修正观测变形。Huňady 等[58]直接基于 SVD 分解和最小二乘估计拟合刚性变换矩阵，以消除刚体位移。

综上所述，用于旋转物体（尤其是高速旋转物体）的 3D–DIC 测量系统，通常具备曝光时间短、光源能量高以及相位锁定的特点。表 2 汇总了 3D–DIC 系统在高速旋转物体变形测量中的相关应用。

3 大角度旋转测量研究进展

传统 DIC 算法仅适用于参考图像与目标图像之间相对变形及旋转较小的情况。然而在高速旋转物体的变形测量中，即便使用高速相机，仍可能出现较大的帧间旋转角度。此时，由于变形前参考子区中的像素点在变形后的目标子区中可能不再出现，子区之间的相关性下降，从而引发退相关问题，导致匹配精度降低。因此，如何改进传统 DIC 算法以提高其对大角度旋转的鲁棒性，成为国内外学者研究的重点。其中关键在于以下 2 点：鲁棒的初值估计和合适的形函数设计。

3.1 初值估计方法

大角度旋转引起的退相关现象会直接降低变形参数初值估计的精度。研究表明，迭代优化算法（如 FA–NR 或 IC–GN）的收敛范围有限，其可收敛的旋转角度通常不超过 7°[47]。因此，改进变形参数的初值估计策略对于迭代优化能否快速、准确收敛至关重要。目前主要策略包括：

1）图像配准与相关匹配相结合。Zhou 等[59-60]在 RG–DIC 框架下，引入尺度不变特征转换算法（SIFT）与随机采样一致性算法（RANSAC）来估计种子点的变形参数初值：首先利用 SIFT 提取并匹配变形前后图像的特征点，再通过 RANSAC 剔除误匹配点，最

表 2 3D–DIC 系统测量高速旋转物体变形

Table 2 3D–DIC systems for high-speed rotation deformation measurements

旋转物体	转速/(r·min^{-1})	光源	曝光时间/μs	相位锁定方式	参考文献
航空发动机叶片	6000	频闪仪	20×10^{3}	激光触发和频闪照射	余镇江[54]
圆盘	4700	1400 W卤素灯	20×10^{-3}	未使用	Huňady等[58]
飞机发动机风扇叶片	4650	Nd-YAG脉冲激光器	10	每转1圈产生1个触发脉冲	Kirmse等[30]
飞机螺旋桨叶片	2700	未使用	—	相机与叶片同轴旋转	Stasicki等[33]
直升机螺旋桨叶片	2000	氙气频闪灯	1.25～10.00	激光传感器对准轮毂上的反射垫产生触发信号	Stasicki等[32]
直升机叶片	1200	10 W氙气频闪仪	10	霍尔传感器每转1圈产生1个触发信号	Sicard等[16]
直升机叶片	900	LED灯和卤素灯	11	霍尔传感器每转1圈产生1个触发信号	Rizo-Patron等[22]
直升机叶片	900	Nd:YLF脉冲激光器	10	增量式轴编码器每转1圈产生32个触发脉冲序列	Uehara等[23]

后基于种子点附近的匹配点计算仿射变换，并结合形函数估计种子点的初值，示意如图 7 所示。SIFT 具有旋转、平移与尺度不变性，即使在大角度旋转下仍能实现特征点匹配，但其计算耗时较长。Yang 等[61]通过并行计算提升了 SIFT 的效率。亦有学者采用 SURF（speeded-up robust features）、ORB（oriented fast and rotated brief）等更高效的特征匹配算法替代 SIFT[62-64]，例如 Zou 等[65]提出的基于 SURF 辅助的 RG-DIC 算法，利用 SURF 自动选取种子点并估计其变形参数初值，从而提高了计算效率与大角度旋转下的鲁棒性。

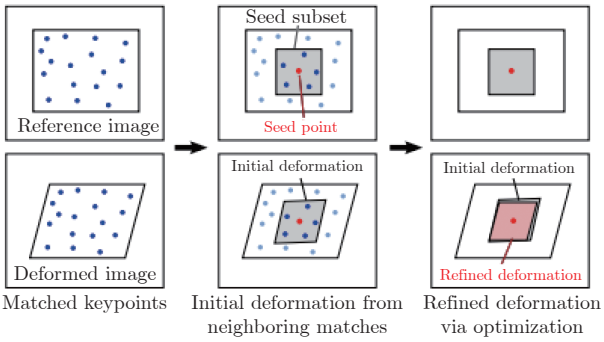


图 7　利用 SITF 匹配关键点估计种子点变形[59]

Fig. 7　Estimating deformation of seed point from SIFT matched keypoints[59]

2）频域 DIC 算法。Pan 等[66]采用傅里叶-梅林变换互相关算法（FMT-CC）[67]，将时域的旋转转换为频域的平移，用以估计 RG-DIC 中种子点的初值。FMT-CC 具有旋转、平移和尺度不变性，且计算效率较高，但要求匹配子区的重叠面积大于 50%。当帧间旋转角度较大时，所需的子区尺寸也相应增大，会降低运算效率。Fang 等[68]对此进行了改进，引入高斯金字塔多尺度匹配策略，减小了大旋转角度下的子区尺寸，从而提升了计算效率。

3）模板匹配与相关匹配相结合。Zhang 等[69]利用圆环模板的旋转不变特性，选择多层以待计算点为中心的等距同心圆环作为匹配模板来计算整像素位移。类似地，Zhong 等[70]将子区定义为圆形，并在极坐标下将旋转表示为平移，从而消除了旋转对相关匹配的影响。由于环形模板的平均灰度有时不足以精确定位，汪连坡[71]提出一种结合圆环模板匹配与方向码的旋转不变 DIC 方法，用于大帧间旋转变形测量，该方法可进一步估计旋转角度，使初值估计更为准确。为进一步提升匹配效率，Wang 等[72]先通过小波分解原始图像得到小波金字塔，再自上而下进行匹配以获取初值（如图 8 所示）。匹配时采用具有旋转不变性的局部圆环特征，从而提高了计算效率与大角度旋转下的鲁棒性。

3.2　形函数设计

当叶片发生大角度旋转时，旋转引起的位移远大于其变形量。然而传统 DIC 的相关匹配并未考虑旋转因素，因此需要采用合适的方法消除大角度旋转的干扰。Wu 等[73]提出一种基于旋转子区的 DIC 测量方法，设目标子区相对于参考子区的旋转角度为 θ，其一阶形函数可表示为：

$$x^* = x + u + \Delta x\cos\theta + \Delta y\sin\theta \tag{10}$$

$$y^* = y + v - \Delta x\sin\theta + \Delta y\cos\theta \tag{11}$$

这种考虑了旋转因素的形函数设计提升了相关匹配在大角度旋转变形测量中的鲁棒性。Wu 等[73]先通过 SIFT 算法获取特征点匹配并计算子区旋转角度初值 θ_0，再借助 NR 算法优化得到包含 θ 在内的变形参数。基于该方法，Wu 等[74-75]成功测量了风扇及风力发电机叶片运行全过程的三维位移场。针对旋转物体的应变计算，Wu 等[76-77]在传统 DIC 应变计算中引入了变形前后的旋转矩阵，从而实现了任意旋转角度下的高精度应变测量。

Gu 等[78]进一步考虑了子区的缩放应变与剪切

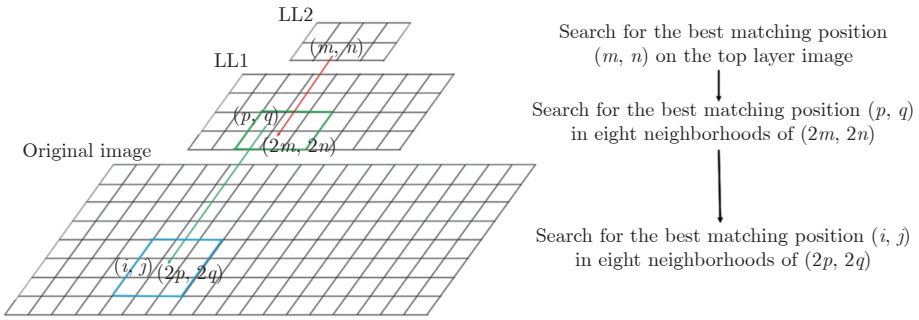


图 8　利用小波金字塔进行图像匹配[72]

Fig. 8　Image matching based on wavelet pyramid[72]

应变，其一阶形函数表达式见式(12)～(13)，并提出了角度补偿策略以获取旋转角度初值(示意见图 9)。该策略通过不断对变形图像进行反向旋转生成中间图像，并计算其与参考图像的旋转角度，直至角度增量满足收敛条件，最终将所有旋转角度之和作为初值。这一角度补偿方法显著增强了算法对大角度旋转的鲁棒性。

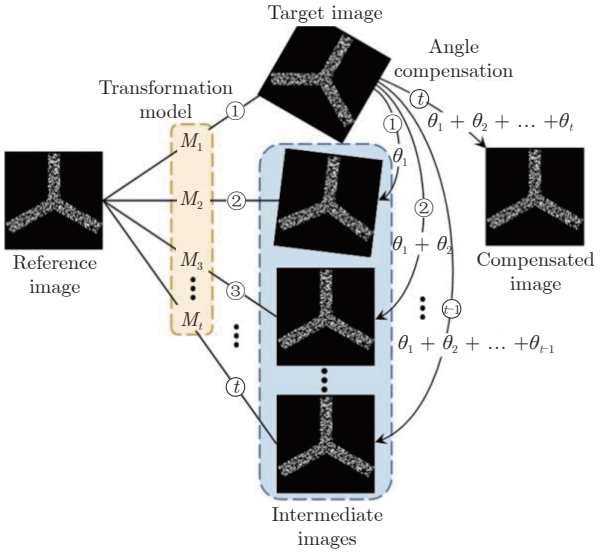


图 9 角度补偿示意图[78]

Fig. 9 Illustration of angle compensation[78]

$$x' = x + u + u_x\Delta x + u_y\Delta y + \Delta x\cos\theta + \Delta y\sin\theta \quad (12)$$

$$y' = y + v + v_x\Delta x + v_y\Delta y - \Delta x\sin\theta + \Delta y\cos\theta \quad (13)$$

4 3D–DIC 测量旋转部件变形应用

3D–DIC 测量系统能够获取旋转部件的位移和变形信息，进而分析其应变和振动特性，为故障诊断和振动测量提供可靠依据。

4.1 故障诊断

风力发电机叶片长期暴露于紫外线辐射、温度变化、强风与闪电等恶劣环境中，更易发生故障甚至停转；涡轮叶片长期运行也会因周期性疲劳而产生故障。3D–DIC 可获取位移场信息，并通过对位移场进行局部多项式最小二乘拟合得到应变信息[79-80]。叶片在故障位置处的应变通常会出现阶跃式变化，因此获取全场应变可用于故障定位，该方法已在多例风力发电机叶片的故障诊断中得到验证[81-83]。例如，LeBlanc 等[82] 测量了一段 9 m 长风力发电机叶片在静态加载下的位移和应变，根据应变不连续的位置成功诊断出位于叶片根部的故障，如图 10 所示。

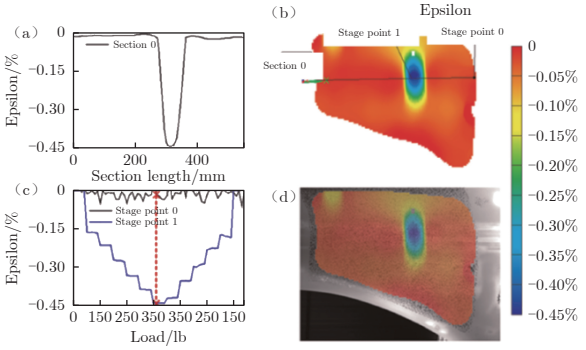


图 10 叶片应变测量诊断故障[82]

Fig. 10 Measurement of strain for blade damage detection[82]

针对动态旋转工况，吴荣等[74] 使用高速 3D–DIC 系统测量了一个风力发电机模型的三维位移，叶片最高转速达 336 r/min。通过对比有无故障时叶片的三维位移曲线，验证了该高速 DIC 系统用于风扇叶片故障诊断的可行性。在另一项工作中，吴荣等[83] 将该方法拓展至全尺寸风力发电机叶片的故障诊断。叶片直径为 5 m，转速为 270 r/min，研究获取了叶片旋转全过程的全场位移与应变分布，通过分析发现位移分布连续且应变场无明显突变，据此判定叶片在旋转过程中未出现裂纹或不平衡故障。

4.2 振动测量

对直升机发动机叶片、飞机螺旋桨桨叶和风力发电机叶片等旋转部件进行振动特性分析，可为其数值模拟与健康监测提供验证数据。一般流程为：先通过 3D–DIC 系统获取旋转部件运行中的变形数据，再将时域结果转换至频域，最后通过模态分析方法提取频率、模态形状等振动模态参数。

Goessling 等[21] 测量了转速为 960 r/min 的风扇叶片尖端振动，获得了其主频及相应振动模态。如图 11 所示(其中 ϕ 为相位角)，结果表明叶片在主频 38 Hz 下呈现一阶离面模态。

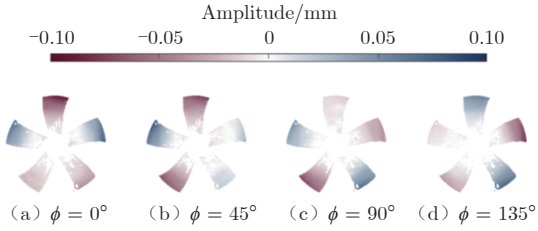


图 11 不同相位角在主频 38 Hz 下的振动模态[21]

Fig. 11 Vibration pattern at 38 Hz for different phase angles[21]

Rizo-Patron 等[22] 基于 3D–DIC 获得直径 2.032 m 的直升机发动机叶片在最高转速 900 r/min 下的离面变形数据，进而提取了叶片振动的前三阶固有频

率及离面模态形状，并与有限元模态分析结果进行了对比。通过计算 MAC（modal assurance criterion）指标[84]，定量给出了实验结果与数值模拟之间的误差，如图 12 所示。实验中，在叶片尖端正下方设置喷嘴喷射压缩空气以激励模态。

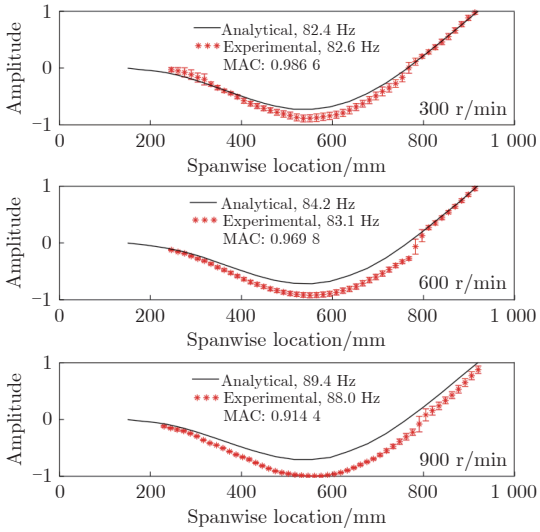


图 12　二阶离面模态形状实验与数值对比结果[22]

Fig. 12　Experimental and analytical comparison results of second flap bending mode shapes[22]

5　结论与展望

经过近 30 年的发展，3D–DIC 技术在硬件系统和算法上不断改进提升，已成为一种适用于测量高速旋转物体变形的重要手段。所获取的变形数据可用于进一步分析振动信息，或与压力等参数进行同步测量，从而为气动–结构耦合研究提供重要支撑。未来，3D–DIC 将与其他测量技术（如压敏漆（PSP）测压、背景纹影（BOS）测密度等）相结合，实现旋转部件压力、变形、密度场等的一体化测量。例如，Dong 等[29] 融合 PSP 和 3D–DIC 技术，同步测量了旋转直升机叶片的压力和变形，为流体–结构干扰研究提供了实验数据。

在 3D–DIC 的算法改进方面，随着深度学习在计算机视觉领域的快速发展，将深度学习与 DIC 相结合以进一步提升算法效率已成为当前的研究趋势。赵斌等[85] 利用全局运动聚合（GMA）光流网络估计位移场初值，适用于大变形测量；萧红等[86] 通过改进现有卷积神经网络模型，实现了大变形位移场的高效测量，在保证精度的同时运算速度远超传统方法。然而，这 2 种算法主要针对大变形情形，对高速旋转部件测量中存在的大帧间旋转角度问题研究尚少。利用深度学习 DIC 算法解决此类问题同样具有重要的研究价值。

参考文献：

[1] REU P L, ROHE D P, JACOBS L D. Comparison of DIC and LDV for practical vibration and modal measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 2-16.
doi: 10.1016/j.ymssp.2016.02.006

[2] BAQERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics–A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 17-34.
doi: 10.1016/j.ymssp.2016.02.011

[3] HALKON B J, ROTHBERG S J. Vibration measurements using continuous scanning laser vibrometry: Advanced aspects in rotor applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(6): 1286-1299.
doi: 10.1016/j.ymssp.2005.11.009

[4] CASTELLINI P, SANTOLINI C. Vibration measurements on blades of a naval propeller rotating in water with tracking laser vibrometer[J]. Measurement, 1998, 24(1): 43-54.
doi: 10.1016/S0263-2241(98)00044-X

[5] CHEN Y, ESCALERA MENDOZA A S, GRIFFITH D T. Experimental dynamic characterization of both surfaces of structures using 3D scanning laser Doppler vibrometer[J]. Experimental Techniques, 2023, 47(5): 989-1006.
doi: 10.1007/s40799-022-00604-2

[6] DI MAIO D, EWINS D J. Applications of continuous tracking SLDV measurement methods to axially symmetric rotating structures using different excitation methods[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(8): 3013-3036.
doi: 10.1016/j.ymssp.2010.06.012

[7] CORTEN G P, SABEL J C. Optical motion analysis of wind turbines[M]. SV Research Group, 1995.

[8] BARROWS D, OLSON L, ABREGO A, et al. Blade displacement measurements of the full-scale UH-60A airloads rotor[C]//Proc of the 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 2011.
doi: 10.2514/6.2011-3655

[9] BAQERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, et al. Extracting full-field dynamic strain response of a rotating wind turbine using photogrammetry[C]//Proc of the Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2015. SPIE, 2015.
doi: 10.1117/12.2084633

[10] CARR J, BAQERSAD J, NIEZRECKI C, et al. Full-field dynamic strain on wind turbine blade using digital image correlation techniques and limited sets of measured data from photogrammetric targets[J]. Experimental Techniques, 2016, 40(2): 819-831.
doi: 10.1007/s40799-016-0082-0

[11] OZBEK M, RIXEN D J. Operational modal analysis of a

2.5 MW wind turbine using optical measurement techniques and strain gauges[J]. Wind Energy, 2013, 16(3): 367-381.
doi: 10.1002/we.1493

[12] OZBEK M, RIXEN D J, ERNE O, et al. Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry[J]. Energy, 2010, 35(12): 4802-4811.
doi: 10.1016/j.energy.2010.09.008

[13] PAULSEN U S, SCHMIDT T, ERNE O. Developments in large wind turbine modal analysis using point tracking videogrammetry[M]//Structural Dynamics and Renewable Energy, Volume 1. New York: Springer, 2011: 187-198.
doi: 10.1007/978-1-4419-9716-6_17

[14] WARREN C, NIEZRECKI C, AVITABILE P. Optical non-contacting vibration measurement of rotating turbine blades II[M]//Structural Dynamics and Renewable Energy, Volume 1. New York: Springer, 2011: 39-44.
doi: 10.1007/978-1-4419-9716-6_4

[15] SIROHI J, LAWSON M S. Measurement of helicopter rotor blade deformation using digital image correlation[J]. Optical Engineering, 2012, 51(4): 043603.
doi: 10.1117/1.oe.51.4.043603

[16] SICARD J, SIROHI J. Measurement of the deformation of an extremely flexible rotor blade using digital image correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(6): 065203.
doi: 10.1088/0957-0233/24/6/065203

[17] WINSTROTH J, SCHOEN L, ERNST B, et al. Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: a comparison to aeroelastic simulations of a multi-megawatt wind turbine[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 524: 012064.
doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012064

[18] KHADKA A, FICK B, AFSHAR A, et al. Non-contact vibration monitoring of rotating wind turbines using a semi-autonomous UAV[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106446.
doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106446

[19] WANG Y, LAVA P, COPPIETERS S, et al. Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an erichsen test: methodology and validation[J]. Strain, 2013, 49(2): 190-198.
doi: 10.1111/str.12027

[20] BEBERNISS T J, EHRHARDT D A. High-speed 3D digital image correlation vibration measurement: Recent advancements and noted limitations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86: 35-48.
doi: 10.1016/j.ymssp.2016.04.014

[21] GOESSLING J, SEUME J R. High-speed Digital Image Correlation (DIC) for measuring deformation and vibration of fast rotating fan blades[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2526(1): 012075.
doi: 10.1088/1742-6596/2526/1/012075

[22] RIZO-PATRON S, SIROHI J. Operational modal analysis of a helicopter rotor blade using digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(3): 367-375.
doi: 10.1007/s11340-016-0230-6

[23] UEHARA D, JOHNSON C, SIROHI J. Transient blade deformation and loads measurement of a coaxial rotor system[C]//Proc of the AIAA Scitech 2019 Forum. 2019.
doi: 10.2514/6.2019-0862

[24] ENDO M T, MONTAGNOLI A N, NICOLETTI R. Measurement of shaft orbits with photographic images and sub-sampling technique[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(2): 471-481.
doi: 10.1007/s11340-014-9951-6

[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.
doi: 10.1016/j.ymssp.2019.01.016

[26] NERI P, PAOLI A, RAZIONALE A V, et al. Low-speed cameras system for 3D-DIC vibration measurements in the kHz range[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162: 108040.
doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108040

[27] WANG Y, GAO Z, FANG Z, et al. Rotating vibration measurement using 3D digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2023, 63(3): 565-579.
doi: 10.1007/s11340-022-00934-7

[28] DONG Y L, PAN B. A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(8): 1161-1181.
doi: 10.1007/s11340-017-0283-1

[29] DONG Z, LIANG L, ZHANG W G, et al. Simultaneous pressure and deformation field measurement on helicopter rotor blades using a grid-pattern pressure-sensitive paint system[J]. Measurement, 2020, 152: 107359.
doi: 10.1016/j.measurement.2019.107359

[30] KIRMSE T, MARING S, EBEL P B, et al. Fan blade deformation measurements on the DLR airbus A320-ATRA by means of IPCT as part of the ground test campaign in the frame of the DLR-project SAMURAI[C]//New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X. Cham: Springer International Publishing, 2016: 629-638.
doi: 10.1007/978-3-319-27279-5_55

[31] BRILLAUD J, LAGATTU F. Limits and possibilities of laser speckle and white-light image-correlation methods: theory and experiments[J]. Applied Optics, 2002, 41(31): 6603-6613.
doi: 10.1364/ao.41.006603

[32] STASICKI B, BODEN F. Application of high-speed videography for in-flight deformation measurements of aircraft propellers[C]//Proc of the 28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. 2008.
doi: 10.1117/12.822046

[33] STASICKI B, BODEN F. In-flight measurements of aircraft propeller deformation by means of an autarkic fast rotating imaging system[C]//Proc of the International Conference on Experimental Mechanics. 2014.
doi: 10.1117/12.2081393

[34] REU P. All about speckles: speckle density[J]. Experimental Techniques, 2015, 39(3): 1-2.
doi: 10.1111/ext.12161

[35] REU P. All about speckles: contrast[J]. Experimental Techniques, 2015, 39(1): 1-2.
doi: 10.1111/ext.12126

[36] REU P. All about speckles: speckle size measurement[J]. Experimental Techniques, 2014, 38(6): 1-2.
doi: 10.1111/ext.12110

[37] REU P. All about speckles: aliasing[J]. Experimental Techniques, 2014, 38(5): 1-3.
doi: 10.1111/ext.12111

[38] PATIL K, SRIVASTAVA V, BAQERSAD J. A multi-view optical technique to obtain mode shapes of structures[J]. Measurement, 2018, 122: 358-367.
doi: 10.1016/j.measurement.2018.02.059

[39] SCHREIER H W, SUTTON M A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(3): 303-310.
doi: 10.1007/BF02410987

[40] 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.
doi: 10.1088/0957-0233/20/6/062001

[41] PAN B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement[J]. Applied Optics, 2009, 48(8): 1535.
doi: 10.1364/ao.48.001535

[42] SHAO X X, DAI X J, HE X Y. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss–Newton algorithm in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71: 9-19.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2015.03.005

[43] SUTTON M, WOLTERS W, PETERS W, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method[J]. Image and Vision Computing, 1983, 1(3): 133-139.
doi: 10.1016/0262-8856(83)90064-1

[44] BRUCK H A, MCNEILL S R, SUTTON M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. Experimental Mechanics, 1989, 29(3): 261-267.
doi: 10.1007/BF02321405

[45] VENDROUX G, KNAUSS W G. Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 1998, 38(2): 86-92.
doi: 10.1007/BF02321649

[46] PAN B, LI K, TONG W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(7): 1277-1289.
doi: 10.1007/s11340-013-9717-6

[47] PAN B. An evaluation of convergence criteria for digital image correlation using inverse compositional Gauss–Newton algorithm[J]. Strain, 2014, 50(1): 48-56.
doi: 10.1111/str.12066

[48] PAN B, WANG B. Digital image correlation with enhanced accuracy and efficiency: a comparison of two subpixel registration algorithms[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(8): 1395-1409.
doi: 10.1007/s11340-016-0180-z

[49] PANKOW M, JUSTUSSON B, WAAS A M. Three-dimensional digital image correlation technique using single high-speed camera for measuring large out-of-plane displacements at high framing rates[J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3418-3427.
doi: 10.1364/AO.49.003418

[50] YU L P, PAN B. Single-camera high-speed stereo-digital image correlation for full-field vibration measurement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 94: 374-383.
doi: 10.1016/j.ymssp.2017.03.008

[51] PAN B, YU L P, ZHANG Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(1): 2-20.
doi: 10.1007/s11431-017-9090-x

[52] HADDADI H, BELHABIB S. Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(2): 185-196.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2007.05.008

[53] SOUSA P, BARROS F, TAVARES P, et al. Experimental and numerical analysis of deformation in a rotating RC helicopter blade[J]. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power, 2020, 5(3): 13.
doi: 10.3390/ijtpp5030013

[54] 余镇江. 基于数字图像相关法的航空发动机叶片三维变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[55] LI G, BAO M Y, DING S T, et al. A system for accurate measuring of thermal-structure displacement on a high speed rotating turbine disk by using digital image correlation technology[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 36-46.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.167

[56] 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 J Y, ZHANG S Q, SU Z L, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1212001.
doi: 10.3788/AOS202141.1212001

[57] SOUSA P J, TAVARES J M R S, TAVARES P J S, et al. Correction of rigid body motion in deformation measurement of rotating objects[J]. Measurement, 2018, 129: 436-444.
doi: 10.1016/j.measurement.2018.07.049

[58] HUŇADY R, PAVELKA P, LENGVARSKÝ P. Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 201-214.
doi: 10.1016/j.ymssp.2018.11.024

[59] ZHOU Y H, PAN B, CHEN Y Q. Large deformation measurement using digital image correlation: a fully automated approach[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7674-7683.
doi: 10.1364/AO.51.007674

[60] ZHOU Y H, CHEN Y Q. Feature matching for automated and reliable initialization in three-dimensional digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(3): 213-223.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.10.011

[61] YANG J R, HUANG J W, JIANG Z Y, et al. SIFT-aided

path-independent digital image correlation accelerated by parallel computing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105964.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.105964

[62] 张华俊, 李桂华, 刘程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112005.
ZHANG H J, LI G H, LIU C, et al. Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112005.
doi: 10.3788/AOS201333.1112005

[63] ZHANG Y L, YAN L, LIOU F. Improved initial guess with semi-subpixel level accuracy in digital image correlation by feature-based method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104: 149-158.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.05.014

[64] LI W P, LI Y F, LIANG J. Enhanced feature-based path-independent initial value estimation for robust point-wise digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 189-202.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.04.016

[65] ZOU X, PAN B. Full-automatic seed point selection and initialization for digital image correlation robust to large rotation and deformation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 138: 106432.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106432

[66] PAN B, WANG Y J, TIAN L. Automated initial guess in digital image correlation aided by Fourier–Mellin transform [J]. Optical Engineering, 2017, 56(1): 014103.
doi: 10.1117/1.oe.56.1.014103

[67] GIARRA M N, CHARONKO J J, VLACHOS P P. Measurement of fluid rotation, dilation, and displacement in particle image velocimetry using a Fourier-Mellin cross-correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(3): 035301.
doi: 10.1088/0957-0233/26/3/035301

[68] FANG Z, GAO Y, GAO Z R, et al. Efficient and automated initial value estimation in digital image correlation for large displacement, rotation, and scaling[J]. Applied Optics, 2020, 59(33): 10523-10531.

[69] ZHANG X C, CHEN J L, WANG Z T, et al. Digital image correlation using ring template and quadrilateral element for large rotation measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7): 922-928.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.02.014

[70] ZHONG F, QUAN C. Digital image correlation in polar coordinate robust to a large rotation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98: 153-158.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.06.019

[71] 汪连坡. 数字图像相关方法在特殊应用场景中的关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.

[72] WANG L P, BI S L, LI H, et al. Fast initial value estimation in digital image correlation for large rotation measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105838.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.105838

[73] WU R, QIAN H, ZHANG D S. Robust full-field measurement considering rotation using digital image correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(10): 105002.
doi: 10.1088/0957-0233/27/10/105002

[74] WU R, CHEN Y, PAN Y T, et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 38-45.
doi: 10.1016/j.optlaseng.2014.04.020

[75] 吴荣, 刘依, 周建民. 数字图像相关用于测量风电叶片全场变形[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 258-264.
WU R, LIU Y, ZHOU J M. Full-field deformation measurement of wind turbine blades using digital image correlation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 258-264.
doi: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1803938

[76] 吴荣, 刘依, 周建民, 等. 数字图像相关在旋转物体全场应变测量中的应用[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 110-117.
WU R, LIU Y, ZHOU J M, et al. Full-field strain measurement of rotating object using digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 110-117.
doi: 10.3788/AOS202040.1312005

[77] WU R, ZHAO S L, LIU Y, et al. Strain accuracy enhancement of stereo digital image correlation for object deformation with large rotations[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(5): 055003.
doi: 10.1088/1361-6501/ac3fc5

[78] GU J W, LIU G, YANG Q S, et al. Improved SURF method in digital image correlation for estimation of large rotation angle[J]. Measurement, 2023, 207: 112372.
doi: 10.1016/j.measurement.2022.112372

[79] 潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量[J]. 光学学报, 2007, 27(11): 1980-1986.
PAN B, XIE H M. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 1980-1986.
doi: 10.3321/j.issn:0253-2239.2007.11.012

[80] VOGEL J H, LEE D. An automated two-view method for determining strain distributions on deformed surfaces[J]. Journal of Materials Shaping Technology, 1988, 6(4): 205-216.
doi: 10.1007/BF02834735

[81] GU J W, LIU G, LI M Z. Damage detection for rotating blades using digital image correlation with an AC-SURF matching algorithm[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8110.
doi: 10.3390/s22218110

[82] LEBLANC B, NIEZRECKI C, AVITABILE P, et al. Damage detection and full surface characterization of a wind turbine blade using three-dimensional digital image correlation[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(5-6): 430-439.
doi: 10.1177/1475921713506766

[83] WU R, ZHANG D S, YU Q F, et al. Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 470-483.
doi: 10.1016/j.ymssp.2019.05.031

[84] ALLEMANG R J. The modal assurance criterion - twenty years of use and abuse[J]. Sound & Vibration, 2003, 37(8): 14-23.

[85] 赵斌, 孟祥印, 肖世德, 等. 基于 GMA 光流网络的二维变形测量数字图像相关法初值估计[J]. 光学学报, 2023, 43(13): 106-117.
ZHAO B, MENG X Y, XIAO S D, et al. Initial value estimation of digital image correlation method for two-dimensional deformation measurement based on GMA optical flow network[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(13): 106-117.
doi: 10.3788/AOS222143

[86] 萧红, 李成南, 冯明驰. 基于深度学习的散斑图像大变形测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 123-135.
XIAO H, LI C N, FENG M C. Large deformation measurement method of speckle images based on deep learning[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 123-135.
doi: 10.3788/AOS222084



作者简介：

任少洁（1994—），女，安徽六安人，硕士，工程师。研究方向：光学测试技术。

E-mail: rsj_caaa@163.com

（编辑：秦虹）