# 面向大变形测量的数字图像相关方法的研究进展及应用

# 李佳成<sup>a</sup>, 叶敬晨<sup>b</sup>, 计宏伟<sup>b</sup>

(天津商业大学 a.生物技术与食品科学学院 b.机械工程学院,天津 300134)

摘要:目的 探究数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)对大变形测量问题的研究现状,为 相关领域展开深入研究提供参考。方法 通过对增量相关、初值估计和形函数等方面的改进梳理,总结 研究人员关于 DIC 方法在大变形测量问题的研究进展。结果 现有的 DIC 方法研究大变形测量问题,主 要通过增量方法以及结合特征检测的初值估计方法,极大地消除了去相关效应,同时对形函数的选择和 结合深度学习等技术也增强了 DIC 方法对复杂变形的适用性。结论 尽管面向大变形测量的 DIC 方法面 临着诸多挑战,但 DIC 方法仍然是极具潜力的大变形测量技术之一,DIC 方法在大变形测量中将发挥更 重要的作用。

关键词:数字图像相关法;大变形测量;形函数;初值估计 中图分类号:TB487 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)05-0171-10 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.05.022

## Research Progress and Application of Digital Image Correlation for Large Deformation Measurement

LI Jia-cheng<sup>a</sup>, YE Jing-chen<sup>b</sup>, JI Hong-wei<sup>b</sup>

(a. College of Biotechnology and Food Science b. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the research status of Digital Image Correlation (DIC) for large deformation measurement and provide references for in-depth research in related fields. Through improved combing of incremental correlation, initial value estimation and form function, the research progress of the DIC method in large deformation measurement was summarized. The current DIC method used for large deformation measurements greatly eliminated the de-correlation effect through the increment method and the initial value estimation method combined with feature detection. At the same time, the choice of shape functions and the combination of deep learning techniques also enhanced the applicability of the DIC method to complex deformations. Despite the many challenges in large deformation measurement, the DIC method is still one of the most promising techniques for large deformation measurement, and it will play a more vital role in large deformation measurement.

KEY WORDS: digital image correlation (DIC); large deformation measurement; shape function; initial value estimation

随着包装材料<sup>[1]</sup>、软材料<sup>[2-3]</sup>、多孔材料<sup>[4-5]</sup>、航 空航天材料<sup>[6]</sup>、复合材料<sup>[7-8]</sup>、生物材料<sup>[9-10]</sup>等新型材

料的广泛使用以及应用场景的扩宽,探究材料在大变 形条件下的力学性能和力学行为逐渐成为研究热点,

收稿日期: 2022-10-09

- 作者简介:李佳成 (1997—),男,硕士生,主攻轻工装备设计理论与方法。
- 通信作者: 计宏伟 (1964—), 男, 博士, 教授, 主攻运输包装及图像测量技术。

基金项目: 国家自然科学基金(12172254)

实现准确的大变形测量极为重要。工程领域中广泛应 用的变形测量技术分为 2 类<sup>[11]</sup>:一类是以电阻应变片 为代表的接触式测量方法,具有量程大、灵敏度高、应 用范围广等优点<sup>[12]</sup>,但无法测量全场变形;另一类是全 场的非接触式光学测量方法,包括数字云纹法<sup>[13]</sup>、散 斑干涉法<sup>[14]</sup>、数字图像相关测量法(Digital Image Correlation, DIC)<sup>[15-16]</sup>等。其中 DIC 方法由于具有 设备简单、全场测量、适应性广、精度高等突出优点, 已经成为现代光测力学中受欢迎的变形测量方法之 一,在实验力学<sup>[17]</sup>、材料科学<sup>[18]</sup>、生物力学<sup>[19]</sup>等许 多领域中广泛使用。

DIC方法的开创性工作可以追溯到 20 世纪 80 年 代,由 Peters 等<sup>[15]</sup>和 Yamaguchi<sup>[16]</sup>首次提出,后经过 国内外学者的研究和完善发展,其方法已经相当成 熟。然而,DIC方法在大变形的测量问题中仍然面临 挑战,受到退相关效应、累计误差、形函数欠匹配等 问题的严重干扰。尽管如此,DIC技术仍然是大变形 测量中最具潜力、最具价值的测量方法。进一步提高 DIC 方法的大变形测量能力以应对日益复杂的变形 测量需求。本文首先介绍 DIC 的基本原理,然后回 顾并评述 DIC 方法在大变形测量问题中的进展和应 用,最后总结当前面临的挑战和可能突破的方向。

## 1 DIC 方法的基本原理

DIC 方法的基本测量过程如下:首先在被测试样 表面制作散斑,使用相机采集被测试样表面变形前后 的连续散斑图像作为参考图像与变形图像,然后使用 局部(基于子区)或全局(基于有限元)方法<sup>[20]</sup>通过 跟踪子区灰度分布获得子区的位移,如图1所示,从 而得到对应的位移场,最后使用合适的数值微分方法 从位移场中提取应变场。经典的 DIC 算法包含 2 个 关键步骤:首先使用整像素搜索算法寻找整像素精度 的位移初值,再通过亚像素配准方法将其精确到亚像 素精度。亚像素配准方法分为拟合法和迭代法2种。 其中,迭代法被认为是 DIC 方法获得高测量精度的 关键,其涉及的优化问题通常是非凸的,因此需要良 好的位移初值作为收敛性的保证。



a 局部DIC方法 b 全局DIC方法

图 1 DIC 方法基本原理 Fig.1 Basic principle of the DIC method

## 2 大变形测量的关键问题

由于试样变形前后图像过大的差异和随变形程 度增大而逐渐严重的退相关效应, DIC 方法在大变形 测量问题中仍然面临挑战, 其主要困难集中在退相关 效应和形函数欠匹配两方面, 特别是在复杂变形的测 量中。

## 2.1 退相关效应

DIC 方法获得可靠初值估计的关键是相关系数 分布的单峰性,如图 2a 所示,真实位移附近的相关 系数明显高于其他位置。在大变形测量中,由于图像 的差异过大,真实位移附近的相关系数急剧减小,如 图 2b 所示,有效的初值被淹没在局部极值中而无法 通过相关匹配正确求解。同时相关子区的选取中,大 旋转也可能会引起严重的退相关效应。此外,大变形 问题可能会伴随着较大的离面位移,焦距、视角的改 变也是退相关效应的重要来源。



图 2 典型的相关系数分布 Fig.2 Typical correlation coefficient distribution

#### 2.2 欠匹配问题

DIC 方法通过形函数近似子区内部变形以提高 测量的准确性。零阶形函数仅包含位移分量,用于表 征平移变化;一阶形函数增加了应变分量,能够表征 平移、伸缩、旋转、剪切及其复合。在大变形问题中, 尤其是复杂变形问题中,一阶形函数不足以描述子区 内部变形,形函数与真实变形欠匹配。较高的欠匹配 程度增大了亚像素迭代的系统误差,甚至导致无法收 敛,同时裂纹、界面处变形的强弱不连续性也会导致 较大的欠匹配问题。

# 3 大变形测量的研究进展

为了克服大变形测量问题中的关键问题,Zhang 等<sup>[21]</sup>指出 2 个关键因素:一是足够接近真值的初值估 计,二是足够合适的形函数。基于这 2 个关键的解决 因素,研究人员做了许多不同的研究。

## 3.1 增量相关策略

尽管 DIC 方法在大变形测量问题中具有困难, 但是实际上采用增量相关策略<sup>[22]</sup>很容易避免大变形 问题的出现。如图 3 所示,通过增大图像采集的频率 以捕捉更细微的变形过程,使得相邻 2 幅图像的变形 可以视为小变形。这意味着,其增量变形的测量仍然 可能处于 DIC 方法的测试范围内,实际变形场是增 量位移场的累积。然而遗憾的是,测量误差在每一阶 段的相关过程中被累积,这导致了可能过高的测量误 差,使最终的测量结果严重偏离实际值。其中累积误 差来源于子区偏移和插值误差这 2 个方面。





子区偏移是累积误差最主要的来源。由于每次增 量测量的误差,变形子区与其真实值存在微小的差 距,在更新参考图像后,新的参考子区与原始参考子 区并不完全相同,从而产生偏移,即使每一阶段的测 量误差都很小,也无法完全保证位移场累积后的测量 精度。累积误差的大小依赖于参考图像的更新次数。 为了避免过大的累积误差,Pan等<sup>[22]</sup>通过设定相关系 数的阈值控制参考图像的更新,这一策略获得了广泛 的使用。另一种高可靠的策略是避免对参考图像的直 接更新, Tang 等<sup>[23]</sup>认为引入增量相关的中间图像可 以用来辅助计算第 n 阶段的图像和参考图像之间的 相关性,但不能直接作为参考图像使用,因此使用第 n-1 阶段的相关参数 p 对参考子区进行重塑,重塑后 的参考子区进行之后的相关计算,同时应用 ILS 算法 的标准偏差来判断是否需要更新参考图像,将改进的 粗略搜索方法与更新参考图像的方法相结合,不但可 以成功地测量极大的变形,而且参考图像的更新次数 也减少到最小,从而控制了累积误差。

插值误差是累积误差的次要来源。插值误差会不 可避免地引起额外的系统误差。为了解决这一问题, Zhou 等<sup>[24]</sup>对增量相关方法进行改进,提出将更新的 参考子区转换到最近整数位置的自适应子区偏移方 法来消除插值误差;之后 Wang 等<sup>[25]</sup>应用同样的思想 提出了最近子体积偏移的增量 DVC 方法,该方法将 参考子体积自动转换到最近的整像素位置,避免了亚 像素插值中涉及的冗余计算和系统误差,解决了全场 内部大变形测量的挑战性问题。

### 3.2 形函数的选择

在大变形问题中,特别是复杂变形问题中,零阶 和一阶形函数不足以近似表达子区内部变形,这将造 成显著的系统误差。构造更为适合的形函数是减小系 统误差的关键。提高形函数阶数是避免欠匹配问题最 直接的想法,不同阶次形函数的对比如图4所示。二 阶形函数的引入能够更有效地反映子区内部潜在的 复杂变形,使非均匀和大变形的测量变得可行。Lu 等[26]证明了二阶形函数具有比一阶形函数更好的精 度。值得注意的是,尽管系统误差得到降低,但是随 机误差变得更高,为了避免较大的随机误差,一般建 议使用较大的子区尺寸。二阶形函数的另一个问题是 不可逆,这导致了无法直接通过普遍认为最有效平衡 计算效率和测量精度的反向组合高斯牛顿法 (IC-GN)进行求解。一些方法通过改进二阶形函数 使可逆性得到满足,使得二阶形函数获得更广泛的应 用。如: Gao 等<sup>[27]</sup>将传统的二阶形函数展开,得到形 函数的新分量,通过改进获得一个可逆的二阶形函 数,在大变形测量时具有稳定的精度。Bai 等<sup>[28]</sup>通过 引入位移函数及其共轭函数,在可逆线性变换中构造 了一个新的互补矩阵,从而满足 IC-GN 算法对二阶 形函数可逆的要求,来应对图像之间的非均匀大变 形;并将其与传统的二阶形函数和 Gao 等提出的二阶 形函数进行了比较。如图5所示,发现不同二阶形函 数的平均误差随着子区大小的增加而减小,当子区大 小足够大时, Bai 等<sup>[28]</sup>所提出的二阶形函数表现出更 稳定的匹配精度,并且建议在实际应用中选择 43~ 61 像素的子区大小。一些研究侧重于自适应方法<sup>[29]</sup>, 允许根据不同的变形程度选择合适的形函数,同时避 免可能出现的欠匹配与过匹配风险。



图 4 形函数对比 Fig.4 Comparison of shape functions





特殊形函数在特殊场景中具备优势,如裂纹尖端、断裂界面等。当试样发生断裂时,材料尖端裂纹的变形也相当于大变形的问题,裂纹尖端位移函数的准确表征,对裂纹尖端变形场的计算是极其重要的。 江守燕等<sup>[30]</sup>基于三角变换的方法,将裂尖改进单元的4项改进函数缩减为2项,保留裂纹尖端场的应力奇异性和裂纹上、下表面的位移不连续性。Hattori等<sup>[31]</sup> 对各向异性材料的裂纹尖端的扩展有限元方法进行了研究,提出了简洁而紧凑形式的富集裂尖函数。

#### 3.3 初值估计方法

增量相关策略的累积误差主要依赖于参考图像 的更新次数,提高 DIC 方法的变形测量能力是减小 更新次数最直接的方法。由于变形程度增大导致的退 相关效应,整像素搜索很难为每个计算点寻找到合适 的初值。探索更可靠的初值估计方法是解决这一问题 的关键。种子点位移传递策略在大变形测量中应用广 泛,其基本原理如图6所示,该方法通过选取特征明 显、变形较小处的计算点为种子点,以避免可能出现 的退相关效应,种子点处的整像素搜索更为容易。潘 兵等<sup>[32]</sup>基于位移连续性假设,通过手动指定感兴趣点 周围3个或者更多的种子点,并在变形后图像中选择 其对应点,将种子点的计算结果逐步传递给下一点作 为初值估计,在大变形测量中十分有效。然而,遗憾 的是,测量误差以相同路径传递,会造成全场变形的 测量误差较大。为了克服这一缺陷,Pan等<sup>[33]</sup>又采用 了可靠性引导的种子点传递策略,由于将计算队列中 相关性最好的计算点作为相邻点的初值估计,确保了 计算路径始终沿着最可靠的方向,极大地抑制了误差 的传播。种子点的选择在该方法中至关重要,一些方 法致力于种子点的自适应选择。值得一提的是,Jiang 等<sup>[34]</sup>提出了路径无关的初值估计方法,通过频域中的 搜索方法,极大地提高了初值估计的效率,同时避免 了位移传递方法对路径的依赖性。尽管该方法适用于 小变形测量,但已有一些改进用于扩大测量范围,在 大变形测量中可能具备潜力。



可靠性引导的原理<sup>[33]</sup> Fig.6 Principle of seed point transfer strategy and reliability-guided DIC<sup>[33]</sup>

特征检测算法具有灵活、灵敏、计算和预测能力 强等优点,在大变形测量问题中具有广泛的应用前 景。通过特征检测算法和 DIC 方法的结合为大变形 测量问题提供了鲁棒性更强的初值估计方法,其基本 原理如图 7a 所示。Zhou 等<sup>[35]</sup>和 Wang 等<sup>[36]</sup>引入 SIFT 算法对特征点进行提取,在参考图像和变形图像中匹 配检测到的特征点,随后采用随机抽样一致算法 (Random Sample Consensus, RANSAC) 剔除错误匹 配,完成种子点的变形估计。然而 SIFT 算法的特征 提取和匹配非常耗时,限制了 SIFT 辅助 DIC 的应用。 一些方法通过应用并行算法加速 SIFT 来辅助 DIC, 取得了较好的效果。Yang等<sup>[37]</sup>提出一种基于 SIFT 算 法辅助的路径无关的 DIC 方法,并通过引入图形处 理单元 GPU 或多核 CPU 的并行计算来加速,提高了 计算效率。另外一些方法使用更为高效的特征提取算 法作为改进,如:Zou等<sup>[38]</sup>提出了应用 SURF 算法结 合可靠性引导位移跟踪策略应对较大变形的测量;李 慧等<sup>[39]</sup>提出首先对匹配图像进行网格划分,利用 ORB 算法<sup>[40]</sup>提取特征点,然后应用双边特征匹配来 剔除错误匹配,最后独立估计每个感兴趣点的变形参 数,为亚像素迭代提供初值估计; Zhang 等<sup>[41]</sup>将 ORB 算法与特征引导的高斯混合模型点集匹配算法 (FG-GMM)相结合,提出了一种基于特征的初始 猜测(FB-IG)方案,应用 RKHS 函数在参考图像的 特征点上对全局连续变形场进行内插,用期望和最大

化算法求解优化问题后,同时确定正确的特征对和不 均匀的变形场,该算法应用于大变形或旋转的情况下 具有鲁棒性;谭芳喜等<sup>[42]</sup>利用 AKAZE 特征提取算法 结合 Daisy 特征描述符,实现更加密集的特征提取, 提高 DIC 技术定位的准确性,而且计算效率更高; Li等<sup>[43]</sup>结合 DASIY 特征描述符和 PatchMatch 搜索方 法也提高了基于特征提取算法的 DIC 技术对大变形 测量的效率。同样为了解决特征提取算法耗时的问 题,Wang 等<sup>[44]</sup>在初值估计处理方面提出利用小波金 字塔的多分辨率分析方法,如图 7b 所示,多分辨率 小波金字塔在低分辨率层将原始图像缩小为小图像, 在低分辨率层计算 2 幅图像之间的相关系数,大大减 少了传统逐像素匹配算法的计算量。





DIC 技术对试件大旋转测量,存在着与大变形测量相同的问题。为了解决这一难题,Zhang等<sup>[21]</sup>提出采用环形模板匹配图像来初值估计,如图 8 所示,提出的环形模板具有旋转不变性和平移不变性。传统的DIC 计算缺少与旋转有关的参数,为了满足 DIC 技术对大旋转测量的要求,Zhong等<sup>[45]</sup>将笛卡尔坐标系下的旋转测量转换为极坐标下的平移测量,该方法中,参考子区和变形子区的形状都被定义为一个圆,然后这些子区被用极坐标来描述。将种子点或搜索点的梯度方向定义为极坐标中新的 0°方向,采用了高效的IC-GN 算法获取亚像素精度。迭代初值通过考虑种子点和搜索点的梯度方向之间的误差来获得关于旋转的参数,对于大旋转的测量,迭代的初值更准确,迭代收敛更快。

#### 3.4 预变形辅助策略

种子点初值估计、位移传递策略和高阶形函数是 大变形 DIC 方法普遍采用的策略,然而,尽管高阶 形函数可以用于描述复杂的变形,但由于涉及的变量 增多,其计算成本也将迅速增加。同时由于过匹配现 象的存在,导致形函数阶数的增加并不一定能够增加 测量精度。这意味着,即使有足够良好的初值估计, 简单地增加形函数阶数也不足以解决大变形问题。基 于此,Ye等<sup>[46]</sup>通过在散斑图像边缘设置人工标记点, 基于拟共形映射计算了稳健的大变形初值,并通过将 初值估计引入 ZNSSD 相关函数中,得到了大变形适 用的 DIC 方法。随后,叶敬晨<sup>[47]</sup>扩展了这一想法, 开发出预变形辅助策略。如图 9 所示,该方法将形分 解为预变形和后变形两部分,初值估计用于给出预变 形,该预变形能够描述试样变形中潜在的非线性部 分,从而使后变形能够在 DIC 框架中得到更可靠地 测量。预变形策略在使用低阶形函数的同时,保留了 描述子区变形中潜在非线性的能力,在大变形测量中 具备潜力。



图 8 环形模板示意图 Fig.8 Schematic diagram of ring template



图 9 预变形分解示意图<sup>[47]</sup> Fig.9 Schematic diagram of pre-deformation decomposition<sup>[47]</sup>

### 3.5 基于深度学习的 DIC 方法

深度学习是一种用于复杂任务数据驱动的模型, 是处理图像相关问题的重要工具。深度学习应用于 DIC 方法中,不需要特定的相关准则,也不需要进行 数值迭代计算,大大提高了 DIC 相关计算的效率。 Yang 等<sup>[48]</sup>利用 2 个卷积神经网络,即位移神经网络

(DisplacementNet)和应变神经网络(StrainNet)-起工作,对位移和应变进行端到端的预测,如图 10 所示; 位移神经网络预测位移场并自适应地更新感兴 趣区域以跟踪大变形,而应变神经网络直接从图像输 入中预测应变场,不依赖于位移预测,显著提高了应 变预测精度。Wu 等<sup>[49]</sup>为了将应变分布映射到发生的 相应裂缝上,将 DIC 应变分布数据应用到深度残余 网络(ResNet),以训练一个回归模型,实现实时检 测裂缝的发生情况并估计裂缝长度。深度学习可以解 决 DIC 计算过程中的非线性优化问题,为 DIC 迭代 问题提供了新的解决思路, Duan 等<sup>[50]</sup>采用二阶形函 数创建训练数据集,开发了一种新的基于卷积神经网 络的 DIC 分析理论框架 (DIC-net)。训练成功后的 DIC-net 更适合求解局部非线性变形场,实现高效的 图像匹配和位移场重构,为实时处理复杂大变形提供 了指导意义。深度学习应用在 DIC 中,提高了计算 效率,但是由于训练数据集的限制,在实际过程中计 算的精度可能并未得到实质性的改变。随着继续对深 度学习方法在 DIC 领域的深入研究,深度学习强大 的计算和预测能力,会在 DIC 领域大有可为。



图 10 位移/应变卷积神经网络原理 Fig.10 Schematic diagram of displacement/ strain convolutional neural network

# 4 大变形 DIC 的应用举例

#### 4.1 在包装领域中的应用

在包装工程领域,一些包装材料质轻而柔软,在 外载荷作用下通常应变量很大并且为非线性的,很难 测试其力学性能,同时应变片法测量会使胶水中的水 分子渗入到纸板中影响结果的准确性,引伸计的夹具 也会对测量产生影响;为了克服这些困难,可以通过 非接触的 DIC 技术测量包装材料的力学性能。Kueh 等<sup>[51]</sup>使用 DIC 技术,对瓦楞纸箱纵向压缩过程中面 板位移和变形情况进行测试,得到箱体应变分布情 况。Fadiji 等<sup>[52]</sup>利用 DIC 技术测量通风包装箱在机械 载荷作用下的位移场,考虑了不同几何构型气孔的影 响,加深对瓦楞纸板包装在压缩载荷作用下的位移场 和应变场的认识,证明 DIC 在压缩载荷下研究通风 包装箱的失效机制方面存在潜在价值,为新鲜农产品 包装箱的机械设计提供了指导。Zhou 等<sup>[53]</sup>综合测量 了聚丙烯包装材料的应力-应变关系、泊松比、线膨 胀性、蠕变特性、全场变形、低频振动,证明了 DIC 方法在包装材料上具有测量范围广、精度高、稳定性 好等优点。赵钊等<sup>[54]</sup>利用 DIC 方法对高速相机采集 的纸浆模塑托盘在不同高度跌落图像进行定量分析, 发现纸浆模塑托盘在跌落缓冲过程中主要发生塑性 变形,不同的跌落高度对弹性变形影响不大,这为纸 浆模塑托盘的设计提供了重要指导。储信庆等<sup>[55]</sup>将 DIC 方法与单项拉伸实验相结合,对白板纸和白卡纸 拉伸前后的图像进行分析,测量其泊松比;通过力-位移曲线得到其弹性模量,分析得到同种纸张中,定 量越高,其弹性模量越大,而泊松比越小。

### 4.2 在结构工程领域中的应用

桥梁挠度直接反映了桥梁结构的整体垂直刚度, 与承载能力和承受外部破坏荷载的能力密切相关,在 桥梁的日常安全评估中,桥梁的静态和动态挠度是其 测量的基本参数。针对土木工程结构大变形非接触测 量的需要, Pan 等<sup>[56]</sup>基于 IC-GN 算法结合激光测距 仪设计了一种视频挠度计,通过对桥梁的变形测量, 证明了该视频挠度计可以测量存在多个垂直偏转点 测试对象的变形场,同时验证了该视频挠度计在实 际、远距离、非接触实验中的实用性和有效性。 Mohammed 等<sup>[57]</sup>通过搭建适用于工程实际测量的自 标定图像相关系统,基于 DIC 技术对榫卯构件进行 了大面积的全场变形测量,获得了构件的变形分布以 及构件在破坏过程中的变形情况。针对桥梁挠度的长 期监测需要, Zhang 等<sup>[58]</sup>通过 DIC 技术并结合声发射 技术,了解桥梁之间板梁的开裂和抗剪承载性能,通 过 DIC 技术揭示了桥梁在剪切破坏时的结构变化。 Howlader 等<sup>[59]</sup>应用 DIC 方法对含开口的无筋砌筑墙 体的变形进行了测量并且捕获砖石的全场裂缝。 Nouri等<sup>[60]</sup>使用 DIC 技术对无箍筋钢筋混凝土梁的抗 剪强度各分量进行了测量研究,并且就计算模型对不 同梁的计算情况进行了评价。Zhang 等<sup>[61]</sup>利用 DIC 技 术对钢筋混凝土结构角部开裂的机理和过程进行了 实验研究,记录了拐角开裂的整个过程和拐角开裂的 旋转现象,研究结果有助于理解腐蚀引起拐角开 裂的机理和过程,开发精确的模型来评估钢筋混 凝土结构的使用寿命。

#### 4.3 在软材料领域中的应用

在软材料上,考虑到油漆涂层,会增加局部刚度, 减小表面变形的影响,Casavola等<sup>[62]</sup>利用材料自身存 在的膨胀石墨作为自然随机散斑,对3种密度不同的 软开孔聚氨酯泡沫塑料通过增量相关策略完成大变 形的测量,并对其力学性能进行分析与评价。正确估 计大变形下非线性材料的断裂参数是断裂力学的主 要难题之一,裂纹尖端检测受裂纹尖端纤维的影响显 著,导致测量不准确;为了克服这一限制,Filho等<sup>[63]</sup> 提出基于 DIC 方法的纤维软复合材料裂纹尖端检测 的新方法,并与视觉检测方法进行了比较,表明所提 出的方法可扩展到其他生物纤维软材料的可行性。开 孔聚氨酯泡沫的力学性能受微观结构的影响很大, Belda 等<sup>[64]</sup>为了探究开孔聚氨酯泡沫在微观尺度上的 破坏机制和变形模式表征,利用 DIC 技术测量了 3 种不同密度的开孔聚氨酯泡沫塑料在压缩试验中的 应变场,得到 DIC 参数对失效模型和表观极限点的 影响,为破坏机制的确定和微观尺度上变形模型的表 征提供指导作用。水凝胶等弹性体在外力作用下通常 表现较大的变形,常规的方法很难对其进行机械表 征,而 DIC 技术却表现出很强的适用性, Millar 等<sup>[65]</sup> 利用 DIC 技术测试了 4 种不同浓度的琼脂糖水凝胶 的机械剪切性能,发现随着凝胶浓度的增加,剪切模 量和最大剪切应变增加,证明了 DIC 技术在凝胶软 材料方面的适用性。

#### 4.4 在高温测量领域中的应用

试样在高温下会发生大的塑性变形,常用的人造 散斑图案可能会在颈缩后脱落,此外,涂料的厚度可 能导致对试样的真实应变测量不准确,因此,Zheng 等<sup>[66]</sup>利用激光散斑技术,采用 RG-DIC 方法对金属 在高温下的局部大塑性变形进行了定性和定量评价。 飞机在大气层中飞行时,由于剧烈的气动摩擦,其外 表面会处于恶劣的高温环境中,在高温环境下测量飞 机部件受热表面的变形是重要的问题;基于这一难题, Wu 等<sup>[67]</sup>利用 DIC 方法测量了飞机外表面在 1 200 ℃ 的高温环境下的应变分布,为飞机部件的热强度分析 以及安全可靠设计提供了重要依据。Rooyen 等<sup>[68]</sup>利 用 DIC 技术测量了在温度高达 900 ℃下铬钢的变形, 在 480~600 ℃内获得试件的弹性模量和泊松比。Le 等<sup>[69]</sup>通过 DIC 技术测定了混凝土结构在高温下的变 形,为混凝土结构改进防火性能提供指导。Kaczmarek 等<sup>[70]</sup>利用 DIC 技术分别检测耐火陶瓷在 20~1 200 ℃ 的断裂行为,结果表明,材料在1200℃时比在室温 下表现出更多的裂纹分枝。Xie 等[71]结合 DIC 技术和 扫描电子显微镜,对750℃下镍基单晶高温合金的变 形进行裂纹的扩展过程捕捉,通过显微观察和 DIC 测量,有助于进一步了解材料的失效机制。

## 5 结语

DIC 技术作为重要的非接触全场变形测量手段, 在许多领域中广泛采用,但在大变形测量方面所面临 的挑战限制了 DIC 方法的进一步发展。通过对增量 相关、初值估计、形函数、预变形以及深度学习方面 等一系列改进措施的研究,面向大变形测量的 DIC 方法取得了较大的进步。当前,大变形 DIC 方法的 发展仍然受到退相关效应和欠匹配问题的严重影响, 面临着诸多挑战。为了进一步提高大变形 DIC 方法 的测量精度,还需要在以下方面做进一步的研究:进 一步引入其他测量技术来辅助实现大变形测量;在形 函数的处理上,大部分只是对二阶形函数进行改进, 对更高阶形函数的研究仍不够深入;预变形是一种对 处理大变形问题新颖的想法,对预变形优化处理方法 有待继续挖掘,将预变形与增量相关方法结合起来共 同处理更新后参考图像的方法,也将进一步提高 DIC 计算的精度。可以预测,DIC 方法将在大变形测量中 发挥更重要的作用。

#### 参考文献:

- CHENG Hao, XU Hao, JULIAN MCCLEMENTS D, et al. Recent Advances in Intelligent Food Packaging Materials: Principles, Preparation and Applications[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131738.
- [2] WEITZ D A. Soft Materials Evolution and Revolution[J]. Nature Materials, 2022, 21(9): 986-988.
- [3] WEYMANN A, FOROUGHI J, VARDANYAN R, et al. Artificial Muscles and Soft Robotic Devices for Treatment of End-Stage Heart Failure[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2022: 2207390.
- [4] LI Yi-ding, YAN Shi-bo, YAN Ying, et al. Modelling of the Compressive Behavior of 3D Braided Tubular Composites by a Novel Unit Cell[J]. Composite Structures, 2022, 287: 115303.
- [5] ZHANG Bo-yi, WANG Li, ZHANG Jian, et al. Deformation and Energy Absorption Properties of Cenosphere/Aluminum Syntactic Foam-Filled Circular Tubes under Lateral Quasi-Static Compression[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 192: 106126.
- [6] WICKRAMASINGHE K C, SASAHARA H, RAHIM E A, et al. Recent Advances on High Performance Machining of Aerospace Materials and Composites Using Vegetable Oil-Based Metal Working Fluids[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310: 127459.
- [7] KOOHBOR B, MONTGOMERY C B, SOTTOS N R. Identification of RVE Length Scale in Fiber Composites via Combined Optical and SEM Digital Image Correlation[J]. Composites Science and Technology, 2022, 227: 109613.
- [8] SPENCER R, ALWEKAR S, JO E, et al. Fiber Orientation Evaluation in Reinforced Composites Using Digital Image Correlation and Thermal Excitation[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 234: 109713.
- [9] MALLETT K F, ARRUDA E M. Digital Image Correlation-Aided Mechanical Characterization of the Ante-

romedial and Posterolateral Bundles of the Anterior Cruciate Ligament[J]. Acta Biomaterialia, 2017, 56: 44-57.

- [10] KELLY B P, SILVA C R, LEHRMAN J N, et al. Use of Digital Imaging Correlation Techniques for Full-Field Strain Distribution Analysis of Implantable Devices and Tissue in Spinal Biomechanics Research[J]. Journal of Biomechanics, 2022, 135: 111025.
- [11] JIN Zu-quan, LI Shi-cai, SONG Hua-miao, et al. Experimental and Simulative Study of Bonding Properties on Fiber/Epoxy Interfaces by Digital Image Correlation (DIC) Technique and Molecular Dynamics[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 131: 104569.
- [12] ZHAO Yin-ming, TAN Si-yang, ZHANG Chao-fan, et al. Dependence of Creep Strain and Fatigue Behavior on Surface Characteristics of Resistive Strain Gauges[J]. Micromachines, 2022, 13(3): 379.
- [13] CHEN Chang-fu, MAO Feng-shan, YU Jia-yong. A Digital Image Correlation-Aided Sampling Moiré Method for High-Accurate In-Plane Displacement Measurements[J]. Measurement, 2021, 182: 109699.
- [14] LI Zhi-song, ZHONG Ping, CHEN Yu, et al. Simultaneous Measurement of Three-Dimensional Deformation Based on Digital Speckle Pattern Interferometry Technology[J]. Optics Communications, 2021, 480: 126423.
- [15] PETERS W H, RANSON W F. Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-431.
- [16] YAMAGUCHI I. A Laser-Speckle Strain Gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [17] WANG Qi-yu, CHEN Sheng-hu, LV Xin-liang, et al. Role of Δ-Ferrite in Fatigue Crack Growth of AISI 316 Austenitic Stainless Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 114: 7-15.
- [18] GAO Jin-ling, KIRK C D, KEDIR N, et al. A Method for Characterization of Multiple Dynamic Constitutive Parameters of FRCS[J]. Composites Science and Technology, 2021, 203: 108607.
- [19] MA Chun-yang, DU Tian-ming, NIU Xu-feng, et al. Biomechanics and Mechanobiology of the Bone Matrix[J]. Bone Research, 2022, 10(1): 59.
- [20] HUANG Yang, JI Jing-jing, LEE K M. Model-Based Digital Image Correlation for Noncontact Deformation Measurement of Strain Field and Mechanical Property[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5109-5118.
- [21] ZHANG Xiao-chuan, CHEN Jin-long, WANG Zong-tao, 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.

- [22] PAN Bing, WU Da-fang, XIA Yong. Incremental Calculation for Large Deformation Measurement Using Reliability-Guided Digital Image Correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 586-592.
- [23] TANG Zheng-zong, LIANG Jin, XIAO Zhen-zhong, et al. Large Deformation Measurement Scheme for 3D Digital Image Correlation Method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 122-130.
- [24] ZHOU Yi-hao, SUN Chen, CHEN Ju-bing. Adaptive Subset Offset for Systematic Error Reduction in Incremental Digital Image Correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 55: 5-11.
- [25] WANG Bo, PAN Bing. Incremental Digital Volume Correlation Method with Nearest Subvolume Offset: An Accurate and Simple Approach for Large Deformation Measurement[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 116: 80-88.
- [26] LU H, CARY P D. Deformation Measurements by Digital Image Correlation: Implementation of a Second-Order Displacement Gradient[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(4): 393-400.
- [27] GAO Yue, CHENG Teng, SU Yong, et al. High-Efficiency and High-Accuracy Digital Image Correlation for Three-Dimensional Measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 73-80.
- [28] BAI Rui-xiang, JIANG Hao, LEI Zhen-kun, et al. A Novel 2nd-Order Shape Function Based Digital Image Correlation Method for Large Deformation Measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 48-58.
- [29] ZHAO Jian. Deformation Measurement Using Digital Image Correlation by Adaptively Adjusting the Parameters[J]. Optical Engineering, 2016, 55(12): 124104.
- [30] 江守燕, 杜成斌. 一种 XFEM 断裂分析的裂尖单元新型改进函数[J]. 力学学报, 2013, 45(1): 134-138.
  JIANG Shou-yan, DU Cheng-bin. A Novel Enriched Function of Elements Containing Crack Tip for Fracture Analysis in Xfem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(1): 134-138.
- [31] HATTORI G, ROJAS-DÍAZ R, SÁEZ A, et al. New Anisotropic Crack-Tip Enrichment Functions for the Extended Finite Element Method[J]. Computational Mechanics, 2012, 50(5): 591-601.
- [32] 潘兵,谢惠民,夏勇,等.数字图像相关中基于可靠 变形初值估计的大变形测量[J].光学学报,2009,

29(2): 400-406.

PAN Bing, XIE Hui-min, XIA Yong, et al. Large-Deformation Measurement Based on Reliable Initial Guess in Digital Image Correlation Method[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 400-406.

- [33] PAN Bing. Reliability-Guided Digital Image Correlation for Image Deformation Measurement[J]. Applied Optics, 2009, 48(8): 1535-1542.
- [34] JIANG Zhen-yu, QIAN Ke-mao, MIAO Hong, et al. Path-Independent Digital Image Correlation with High Accuracy, Speed and Robustness[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 93-102.
- [35] ZHOU Yi-hao, PAN Bing, CHEN Yan qiu. Large Deformation Measurement Using Digital Image Correlation: A Fully Automated Approach[J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7674-7683.
- [36] WANG Z, VO M, KIEU H, et al. Automated Fast Initial Guess in Digital Image Correlation[J]. Strain, 2014, 50(1): 28-36.
- [37] YANG Jun-rong, HUANG Jian-wen, JIANG Zhen-yu, et al. SIFT-Aided Path-Independent Digital Image Correlation Accelerated by Parallel Computing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105964.
- [38] ZOU Xiang, PAN Bing. 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.
- [39] 李慧, 顾永刚, 翟超. 一种基于 DIC 测量帧间大压缩 变形的方法[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(8): 90-92.
  LI Hui, GU Yong-gang, ZHAI Chao. A Method for Measuring Large Inter-Frame Compression Deformation Based on DIC[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(8): 90-92.
- [40] LIU Kai, XU Zheng, HOU Zhao-hui, et al. Further Non-Local and Channel Attention Networks for Vehicle re-Identification[C]// 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW) Seattle, WA, USA, IEEE, 2020: 2494-2500.
- [41] ZHANG Yun-lu, YAN Lei, 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.
- [42] 谭芳喜,肖世德,李晟尧,等.基于密集特征匹配的数字图像相关法[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(16):390-398.
  TAN Fang-xi, XIAO Shi-de, LI Sheng-yao, et al. Digital Image Correlation Method Based on Dense Feature Matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021,

58(16): 390-398.

- [43] LI Wen-pan, LI You-fu, LIANG Jin. 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.
- [44] WANG Lian-po, BI Song-lin, LI Hui, et al. Fast Initial Value Estimation in Digital Image Correlation for Large Rotation Measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105838.
- [45] 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.
- [46] YE Jing-chen, JI Hong-wei, ZHANG Xiao-chuan. Digital Image Correlation Method Based on Quasi-Conformal Mapping for Large Deformation Measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 106985.
- [47] 叶敬晨. 面向大变形测量的数字图像相关方法研究
  [D]. 天津: 天津商业大学, 2022: 14-15.
  YE Jing-chen. Research on Digital Image Correlation Method for Large Deformation Measurement[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022: 14-15.
- [48] YANG Ru, LI Yang, ZENG D, et al. Deep DIC: Deep Learning-Based Digital Image Correlation for End-to-End Displacement and Strain Measurement[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 302: 117474.
- [49] WU Zi-ran, HAN Yan, LIANG Bu-meng, et al. A Metallic Fracture Estimation Method Using Digital Image Correlation[J]. Processes, 2022, 10(8): 1599.
- [50] DUAN Xiao-cen, XU Hong-wei, DONG Run-feng, et al. Digital Image Correlation Based on Convolutional Neural Networks[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107234.
- [51] KUEH C S L, DAHM K, EMMS G, et al. Digital Image Correlation Analysis of Vertical Strain for Corrugated Fiberboard Box Panel in Compression[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(3): 133-141.
- [52] FADIJI T, COETZEE C J, OPARA U L. Evaluating the Displacement Field of Paperboard Packages Subjected to Compression Loading Using Digital Image Correlation (DIC)[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 123: 60-71.
- [53] ZHOU Jian-wei, LIU Dong-hong, SHAO Lan-yuan, et al. Application of Digital Image Correlation to Measurement of Packaging Material Mechanical Properties[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-8.
- [54] 赵钊,张晓川,王佼,等. 纸浆模塑托盘对角刚度的 跌落试验测试[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 1-4.

ZHAO Zhao, ZHANG Xiao-chuan, WANG Jiao, et al. Drop Test of Molded Pulp Pallet and Diagonal Stiffness Analysis[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 1-4.

- [55] 储信庆, 计宏伟. 灰底白板纸与白卡纸的弹性常数对 比[J]. 包装工程, 2015, 36(23): 48-52.
  CHU Xin-qing, JI Hong-wei. Comparison of the Elastic Constants between the Gray Manila Board and Ivory Board[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 48-52.
- [56] PAN Bing, TIAN Long, SONG Xiao-lin. Real-Time, Non-Contact and Targetless Measurement of Vertical Deflection of Bridges Using Off-Axis Digital Image Correlation[J]. NDT & E International, 2016, 79: 73-80.
- [57] MOHAMMED M E, 邵新星, 钱帅宇, 等. 基于自标 定数字图像相关技术的榫卯构件大面积全场变形测 量[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(2): 337-341.

MOHAMMED M E, SHAO Xin-xing, QIAN Shuai-yu, et al. Large-Area Full-Field Deformation Measurement of Mortise-Tenon Structures Based on Self-Calibration Digital Image Correlation Technology[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(2): 337-341.

- [58] ZHANG Feng-qiao, ZARATE GARNICA G I, YANG Yu-guang, et al. Monitoring Shear Behavior of Prestressed Concrete Bridge Girders Using Acoustic Emission and Digital Image Correlation[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(19): 5622.
- [59] HOWLADER M K, MASIA M J, GRIFFITH M C. Digital Image Correlation for the Analysis of In-Plane Tested Unreinforced Masonry Walls[J]. Structures, 2021, 29: 427-445.
- [60] NOURI A, HAMRAT M, BOULEKBACHE B, et al. Quantification of Shear Strength in Reinforced Concrete Beams Using Digital Image Correlation: Experimental and Analytical Study[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(1): 147-164.
- [61] ZHANG Yan-long, SU R K L. Experimental Study of Corrosion-Caused Corner Cracking Using Digital Image Correlation[J]. Materials and Structures, 2022, 55(4): 121.
- [62] CASAVOLA C, CORE L, MORAMARCO V, et al. Full-Field Mechanical Characterization of Polyurethane Foams under Large Deformations by Digital Image Correlation[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(24): 3540-3555.

- [63] FILHO J, XAVIER J, NUNES L. An Alternative Digital Image Correlation-Based Experimental Approach to Estimate Fracture Parameters in Fibrous Soft Materials[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2022, 15(7): 2413.
- [64] BELDA R, MEGÍAS R, FEITO N, et al. Some Practical Considerations for Compression Failure Characterization of Open-Cell Polyurethane Foams Using Digital Image Correlation[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(15): 4141.
- [65] MILLAR D, MENNU M, UPADHYAY K, et al. An Improved Direct Shear Characterisation Technique for Soft Gelatinous and Elastomeric Materials[J]. Strain, 2021, 57(3): 12383.
- [66] ZHENG Qiu, MASHIWA N, FURUSHIMA T. Evaluation of Large Plastic Deformation for Metals by a Non-Contacting Technique Using Digital Image Correlation with Laser Speckles[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108626.
- [67] WU Da-fang, LIN Lu-jin, REN Hao-yuan, et al. High-Temperature Deformation Measurement of the Heated Front Surface of Hypersonic Aircraft Component at 1200[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 184-194.
- [68] ROOYEN M V, BECKER T H. High-Temperature Tensile Property Measurements Using Digital Image Correlation over a Non-Uniform Temperature Field[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2018, 53(3): 117-129.
- [69] LE D B, TRAN S D, TORERO J L, et al. Application of Digital Image Correlation System for Reliable Deformation Measurement of Concrete Structures at High Temperatures[J]. Engineering Structures, 2019, 192: 181-189.
- [70] KACZMAREK R, DUPRÉ J C, DOUMALIN P, et al. High-Temperature Digital Image Correlation Techniques for Full-Field Strain and Crack Length Measurement on Ceramics at 1 200 °C: Optimization of Speckle Pattern and Uncertainty Assessment[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 146: 106716.
- [71] XIE Hong-fu, WANG Jie, WANG Zhen, et al. In Situ Scanning Digital Image Correlation for high-Temperature Deformation Measurement of Nickel-Based Single Crystal Superalloy[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(8): 084008.