

基于有限元的数字图像相关方法的测量误差*

王越其, 谢培悦, 吕中荣, 汪利

中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107

摘要: 基于有限元的数字图像相关在非接触式全场变形测量领域应用广泛, 网格尺寸、图像噪声、单元类型、真实位移场分布等因素均会对其测量精度产生显著影响。文中针对上述因素进行了理论分析, 并设计数值测试算例, 研究了上述因素对测量结果的影响。结果表明: 存在使位移测量误差最小的最优网格尺寸, 图像噪声幅值不仅直接影响测量精度, 还会改变最优网格尺寸的取值; 同时, 高阶单元对位移场的描述能力更优, 但其对图像噪声也更加敏感; 此外, 在复杂变形场中需采用小尺寸网格以精准捕捉局部变形信息。通过铝制板材单轴拉伸实验, 验证了上述结论在实际应变测试中的有效性。

关键词: 视觉测量; 数字图像相关; 有限元; 测量误差

中图分类号: O32 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2026)03-0121-07

Error of the finite-element-based digital image correlation measurement method

WANG Yueqi, XIE Peiyue, LÜ Zhongrong, WANG Li

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

Abstract: Finite-element-based digital image correlation (FE-DIC) is widely used for non-contact, full-field deformation measurement. The accuracy of this method is substantially affected by several factors, including mesh size, image noise, element type, and the spatial complexity of the actual displacement field. In this study, both theoretical analyses and numerical simulations were conducted to systematically examine the influence of these factors on the measurement performance of FE-DIC. The results demonstrate the existence of an optimal mesh size that minimizes the displacement measurement error. The amplitude of image noise not only directly degrades the measurement accuracy but also shifts the optimal mesh size. Moreover, higher-order elements exhibit enhanced capability in representing complex displacement fields, albeit with increased sensitivity to image noise. In addition, fine meshes are required in regions with highly nonuniform deformation to accurately capture local deformation characteristics. A uniaxial tensile test on an aluminum plate was performed, validating the effectiveness of the obtained conclusions in practical strain measurements.

Key words: optical deformation measurement; digital image correlation; finite element method; measurement error

* 收稿日期: 2025-10-15

录用日期: 2025-11-01

网络首发日期: 2026-01-23

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2022B0101080001)

作者简介: 王越其 (2001 年生), 女; 研究方向: 视觉测量和结构健康监测;

E-mail: wangyq283@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 汪利 (1989 年生), 男; 研究方向: 计算力学和结构健康监测;

E-mail: wangli75@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20250221

结构健康监测旨在通过长期、连续的观测获取结构在服役过程中的状态变化,用以实现损伤识别、性能评估与寿命预测 (Farrar et al., 2007; Doebling et al., 1998)。传统接触式传感手段(应变计、光纤等)虽精度高,但测点稀疏、布设维护成本大、在大型或复杂结构上的可扩展性受限,这促进了非接触式视觉测量的迅速兴起。其中,数字图像相关(DIC, digital image correlation)因设备门槛低、适应性强且可获得全场位移或应变信息而受到广泛重视。其基本思想是在结构表面布设散斑图案,拍摄结构变形前后的图像并利用其灰度一致性,基于图像相关准则,计算结构的位移与变形。

在 DIC 的诸多实现形式中,局部 DIC 是最早提出并应用最广泛的一种。该方法通过在参考图像中选择多个感兴趣区域(ROI, region of interest),并对每个 ROI 分别进行图像配准,逐个 ROI 计算位移并最终形成离散位移场。局部 DIC 具有实现简便、计算效率高的优势,但因在计算过程中对相邻 ROI 的位移连续性无强制约束,所得到的位移场也不具有连续性,甚至可能因散斑匹配失效出现部分 ROI 的异常位移结果。为了克服上述限制,学者们 (Besnard et al., 2006; Leclerc et al., 2009; Réthoré et al., 2008; Hild et al., 2006)陆续提出将有限元理论引入 DIC 框架的思想,即基于有限元的数字图像相关方法 (FE-DIC, finite-element-based digital image correlation)。其核心思路是将整个感兴趣的区域作为整体,利用有限元网格进行离散,并通过单元形函数对位移场进行插值,最终通过图像配准直接获取所有测点(网格结点)的位移。由于采用全场协同配准与形函数插值策略,经 FE-DIC 计算得到的位移场天然满足连续性要求。Hild et al. (2012)系统比较了局部 DIC 与全局 DIC 在位移、应变分辨率等方面的先验与后验评估,指出在多种实验条件下全局 DIC 方法在应变连续性和鲁棒性方面都更具优势。

尽管 FE-DIC 在全场变形测量中展现出了显著优势,但其测量精度易受多种因素的耦合影响,一定程度上制约其在高精度测量场景中的应用。一方面,图像噪声会直接影响散斑特征的匹配进而影响测量精度,这类由噪声的随机性而产生的误差称为随机误差 (Pan et al., 2009; Sun et al., 2007);另一方面,单元类型的选择直接影响单元内位移场的插值精度,对于一些存在空间高频分量的位移场,低阶单元的插值函数无法精准表征位移场

的突变特征,难以实现对真实位移场的有效拟合,进而为测量结果引入误差,这类由计算模型(或单元类型)固有局限导致的误差被称为系统误差 (Schreier et al., 2002; Wang et al., 2016; Leclerc et al., 2009)。需要注意的是,网格尺寸的选择需平衡上述两类误差的贡献,力求使二者所造成的总误差最小。因此,网格尺寸的选择尤为重要。

以基于有限元的数字图像相关方法为研究对象,本文通过数值测试,系统探究了网格尺寸、噪声水平、单元类型、位移场复杂程度等对其位移测量误差的影响规律。此外,通过开展铝制板材单轴拉伸实验,验证所得出的影响规律在实际应变测试中的有效性。

1 基于有限元的数字图像相关方法

1.1 基本原理

FE-DIC 将感兴趣的目标图像区域划分为由结点连接的有限元网格,并通过定义在单元上的形状函数来近似描述位移场。之后,通过最小化基于灰度强度的最小二乘相关性全局目标函数,最终确定结点位移参数。具体地,先将感兴趣区域离散为一组单元,对于单元中的点 x ,其位移 $u(x)$ 通过结点位移向量 p 进行插值:

$$u(x; p) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) p_i = \Phi(x) p,$$

其中 n 为有限元离散后的结点总数, p_i 为结点 i 的位移, $\phi_i(x)$ 表示单元内该结点对应的形状函数, $\Phi(x)$ 为集合所有形状函数构成的形状函数矩阵。

FE-DIC 的核心原理在于通过求解位移参数 p ,使变形前后的图像灰度分布实现精准匹配。为了匹配参考区域和变形区域,需定义相关性准则。现有研究文献中,相关性准则主要包含互相关(CC)和最小平方和距离(SSD, sum of squares distances)两类,二者本质上是等效的。本文采用 SSD 准则,具体如下:

$$C_{\text{SSD}}(p) = \sum_{x \in \Omega} [f(x) - g(x + u(x; p))]^2, \quad (1)$$

其中 Ω 包含(变形前)模板图像中感兴趣区域内所有整数像素点, f 和 g 分别表示变形前后的图像灰度分布函数。

位移参数 p 的求解通过最小化目标函数(1)获得,一般采用牛顿-拉夫森方法进行求解。其核心思路是根据点位移估计 $\bar{p}$ 迭代计算增量 Δp ,则目标函数转变为

$$C_{SSD}(\bar{p} + \Delta p) = \sum_{x \in \Omega} [f(x) - g(x + u(x; \bar{p} + \Delta p))]^2. \quad (2)$$

对非线性项 $g[x + u(x; \bar{p} + \Delta p)]$ 在点 $\bar{p}$ 处进行一阶泰勒展开,则目标函数(2)可近似转化为

$$C_{SSD}(\bar{p} + \Delta p) = \sum_{x \in \Omega} [f(x) - g(x + u(x; \bar{p})) + \nabla g(x + u(x; \bar{p})) \cdot \Delta p]^2.$$

上述问题的求解为线性最小二乘优化问题,可直接求解:

$$\begin{cases} \Delta p = H^{-1} [\nabla g(x + u(x; \bar{p}))]^T [f(x) - g(x + u(x; \bar{p}))], \\ H = \sum_{x \in \Omega} [\nabla g(x + u(x; \bar{p}))]^T \nabla g[x + u(x; \bar{p})]. \end{cases} \quad (3)$$

每次计算得到位移参数增量 Δp 后,更新位移参数 $\bar{p} \leftarrow \bar{p} + \Delta p$,直至达到收敛条件 $\|\Delta p\| < 0.001$ 后终止迭代,其中 $\|\Delta p\|$ 表示向量 Δp 的欧式范数。

1.2 正则化约束

在实际计算中,由于图像灰度梯度不足、图像噪声、位移场不规则等情况,可能会引发解的不适定性问题。为此,有学者在目标函数中引入正则化项以提高解的稳定性与精度 (Mendoza et al., 2019)。将线性化后的式(3)写为

$$H\Delta p = \Delta q, \quad (4)$$

其中

$$\Delta q = \sum_{x \in \Omega} [\nabla g(x + u(x; \bar{p}))]^T [f(x) - g(x + u(x; \bar{p}))].$$

在实际应用中,正则化算子是作用于最终位移参数 p 而非增量 Δp 。因此,为了引入正则化项来增强解的稳定性并提升精度,需先将式(4)转化为

$$Hp = H(\bar{p} + \Delta p) = H\bar{p} + \Delta q = q. \quad (5)$$

解决线性与非线性不适定问题常用的正则化方法之一是 Tikhonov 正则化,该方法通过对式(5)引入额外的惩罚项来最小化泛函:

$$\|Hp - q\|^2 + \lambda \|Lp\|^2, \quad \lambda > 0, \quad (6)$$

其中 λ 为正则化参数,可通过 L-曲线法等方法确定; L 为正则化算子,合理的正则化算子应首先保证其与海森矩阵 H 的零空间无交集,以保证解的唯一性;其次,合理的正则化算子应能够有效抑制图像噪声等因素对真实位移解的影响。因此,本文此处正则化算子 L 取为位移场的梯度或高阶导数算子。

基于上述定义,最小化问题(6)的解可通过方程(7)给出,即

$$(H^T H + \lambda L^T L)p = H^T q. \quad (7)$$

1.3 误差分析

在 DIC 的计算中,测量总误差 ε 通常为随机误差 ε_r 与系统误差 ε_s 的叠加结果 (Zhao et al., 2025),即 $\varepsilon = |\varepsilon_r| + |\varepsilon_s|$ 。随机误差 ε_r 由图像噪声引起,其结果可近似为

$$\varepsilon_r \approx B \frac{\sigma}{h},$$

其中 σ 表示图像噪声标准差, h 为网格大小, B 为系数,其取值与图像灰度梯度、单元类型、网格数量有关 (Pan et al., 2016)。

系统误差 ε_s 由形函数对真实变形场的匹配不足引起,其结果可近似为

$$\varepsilon_s \approx Ch^p,$$

其中参数 p 与插值阶次相关,且 $p \geq 1$; C 为系数,其取值与真实变形场直接相关 (Brenner et al., 2008; Xu et al., 2017)。

从误差计算公式可以看出,当所用形状函数固定时,因测量噪声引起的随机误差与所选子集大小成反比,而因形函数插值拟合能力不足产生的系统误差则与子集大小成正比。因此,这将使得总误差关于网格尺寸存在一个极值点。此外,正则化约束、图像噪声、单元类型、真实变形场等因素均会对测量总误差产生影响,下面将通过数值算例对这些影响因素进行分析。

2 仿真测试与分析

本文采用 Abaqus 软件对双边固支薄板受均布载荷的变形过程进行了仿真,并导入 blender 软件渲染生成薄板变形前后的图像组。如图 1(a) 所示,薄板长 13 m、宽 13 m,左右两端分别施加固定约束,上端作用竖直方向的均布线荷载,荷载大小为 1.5×10^9 N/m。渲染生成的图像组如 1(b) 所示,图像分辨率为 1500×1500 像素,所施加的散斑直径为 8 像素,变形前后的图像均加入标准差 $\sigma = 30$ 的零均值高斯白噪声。

2.1 网格尺寸与正则化约束

为验证网格尺寸和正则化约束对测量结果的影响,本节以四结点单元为例,采用 15~200 像素的多种网格尺寸对上述算例进行计算,每种网格尺寸均考虑了朴素 FE-DIC 方法与引入正则化约束两种情况。每次计算均采用所有网格点的平均绝对误差 (MAE) 对计算结果进行评估,结果如图 2 所示。

图 2 中,无论是否引入正则化约束,随着网格尺

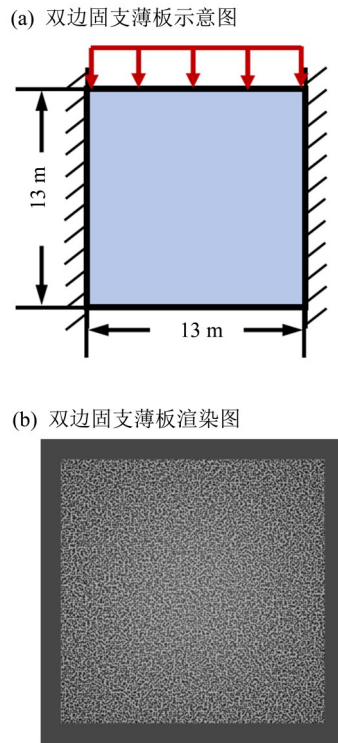


图1 双边固支薄板及其渲染图

Fig. 1 Rendered view of the doubly-clamped thin plate

寸的增大, MAE 均呈现出先减小后增大的趋势, 并在网格尺寸为 100~150 像素时达到最小值。因为在网格尺寸较小时, 由图像噪声引起的随机误差主导了测量误差, 随着网格尺寸增大, 单个网格内像素个数的增加有效抑制了图像噪声带来的负面影响; 当网格尺寸增大到一定程度时, 四结点单元的形状函数不足以匹配更大区域内的复杂位移场, 导致位移测量结果出现显著的系统误差, 此时 MAE 随网格尺寸的增大逐步增大。

此外, 当网格尺寸较大时, 是否引入正则化约束对测量结果几乎没有影响, 因为此时问题的不适定性并不严重, 误差主要由形状函数对位移场的匹配能力所决定。当网格尺寸较小时, 正则化约束保证了结点间测量结果的连续性, 进而有效抑制了测量过程中噪声主导的随机误差。因此, 在图像噪声不可避免而又需要进行高空间分辨率测量时, 正则化技术可在一定程度上提高 FE-DIC 的测量精度。

2.2 噪声水平

改变图像噪声的标准差, 考虑 $\sigma = 5, 10, 20, 30$ 的情况, 并统一采用引入正则化约束的 FE-DIC 方法进行测量。图 3 显示了不同噪声条件下 MAE 随网格尺寸的变化。不同噪声条件下, 随着网格尺寸增加, MAE 均呈现出先减小后增大的趋势, 即均存在一个最优网格尺寸; 且随着噪声增大, 最优网格

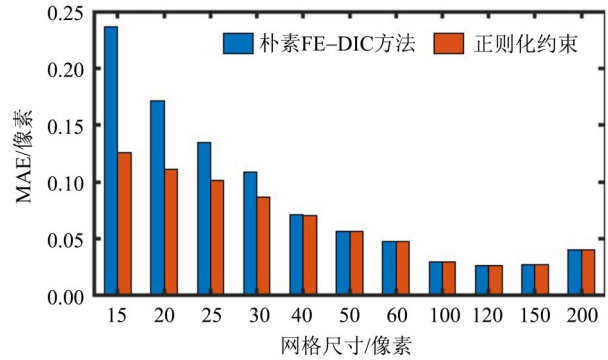


图2 不同网格尺寸下的位移测量误差

Fig. 2 Displacement measurement error for different mesh sizes

尺寸也逐渐增大。例如, 在低噪声条件 ($\sigma = 5$) 下, 最佳网格为 60~80 像素; 而在高噪声条件 ($\sigma = 30$), 最优网格尺寸达到 120~150 像素。这进一步印证了 1.3 节的结论, 即网格尺寸较小时, 由图像噪声引起的随机误差主导了测量误差, 误差水平的提升也必然导致最优网格尺寸的增大; 当网格尺寸增大到一定程度时, 图像噪声的影响被抑制, 系统误差主导了测量误差, 此时图像噪声对测量误差的影响显著减弱。因此, 当噪声水平较高时, 应适当增大网格尺寸以增加单元内像素数量, 降低噪声对计算误差的主导作用; 而在低噪声条件下, 可以选用更小尺寸的网格捕捉变形场的局部细节。

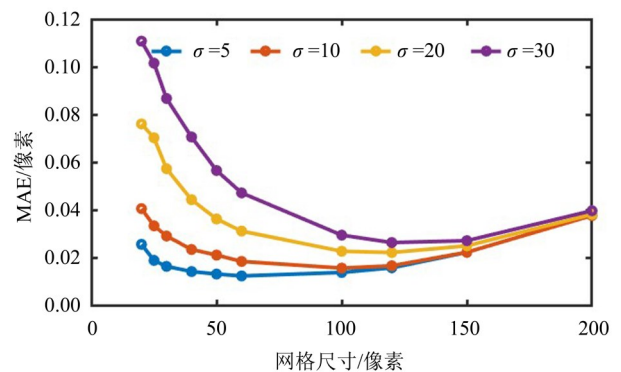


图3 不同噪声下位移测量误差随网格尺寸的变化

Fig. 3 Variation of displacement measurement error with mesh size under different noise levels

2.3 单元类型

单元类型的选择同样对 FE-DIC 的测量精度有显著影响。本节采用 4 结点单元 (Q4) 与 8 结点单元 (Q8) 进行计算并分析。考虑到 8 结点单元的结点数更多, 所能描述的特征尺度与 4 结点单元不同, 因此采用单元尺寸为 h 的 4 结点与单元尺寸为 $2h$ 的 8 结点单元进行对比 (Lu et al., 2024)。4 结点与 8

结点单元如图4所示。

图5给出了在不同噪声水平下,4结点与8结点单元的测量误差对比。无噪声和低噪声条件下,8

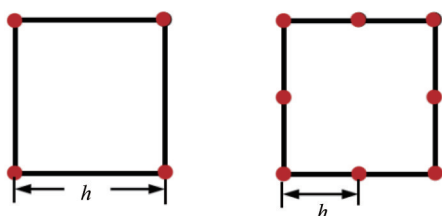


图4 4结点与8结点单元

Fig. 4 Four-node and eight-node finite elements

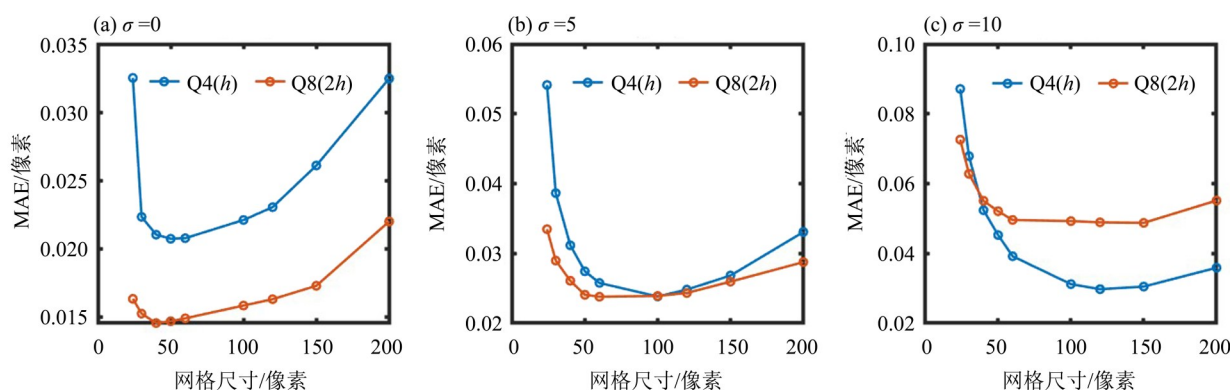


图5 不同噪声下4结点与8结点单元的位移测量误差

Fig. 5 Displacement measurement errors for Q4 and Q8 elements under different noise levels

3 复杂位移场测试

为了探究复杂位移场下网格尺寸的选择,采用4结点单元对Reu et al.(2022)提出的DIC Challenge 2.0数据集中的Star 2测试图像组进行测试。该图像组为 501×2000 像素,位移场如图6所示,是一个空间频率变化、幅度为 ± 0.5 像素的正弦式垂直位移,其中图像左侧正弦曲线周期为10像素,该周期从图像左侧向右侧逐渐增大,至右侧时达到150像素。同时叠加了基于PointGrey / FLIR 5 MP相机标定得到的非齐次采集噪声。

图7(a)给出了位移测量误差随网格尺寸的变化。可以发现,与均匀位移场不同,复杂位移场时

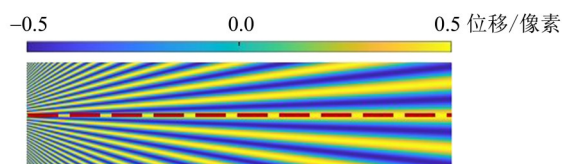


图6 位移场的理论分布

Fig. 6 Theoretical distribution of the displacement field

结点单元在多数网格尺寸下表现更好,体现了8结点单元所用的更高阶形函数在捕捉高阶变形方面的优势。然而,当噪声水平升至 $\sigma = 10$ 及以上时,小尺寸网格条件下2种单元的测量误差都较大,而在大网格条件下4结点单元则更具优势。这是因为8结点单元具有更高的自由度数目,使其在图像配准过程中对图像的局部噪声更加敏感,导致测量误差增大。由此可见,单元类型的选择应结合图像噪声水平进行考虑,在低噪声条件下适合采用高阶单元,噪声较大时则应使用较大尺寸的低阶单元。

误差随网格尺寸增大而单调上升,即网格尺寸越大误差越大。这是因为低阶形函数难以精准表征高频变形特征,而网格尺寸过大时,会直接滤除图像中的高频信息,进而使得测量结果的整体误差急剧上升。图7(b)中不同像素下的位移场结果也直观展示了这一现象。网格大小为10像素时,仍能较好测量部分高频变形,而在网格逐渐增大时,所能测得的高频变形特征也逐渐减少。由此可见,在复杂变形场下,误差主要由有限元近似误差主导,小尺寸网格能更好地保留变形场的细节信息。

4 实验验证

为验证上述结论在实际测试中的有效性,设置铝制板材单轴拉伸实验,对试件表面位移场与应变场进行了重建。实验布置如图8所示,试件表面附着有随机散斑,通过拉伸试验机对试件逐级施加轴向荷载,采用一台摄影机在试件初始状态及每级荷载稳定后采集其表面图像,同时布设一个引伸计记录试件轴向变形量,用于后续与FE-DIC的应变计算结果进行对比。

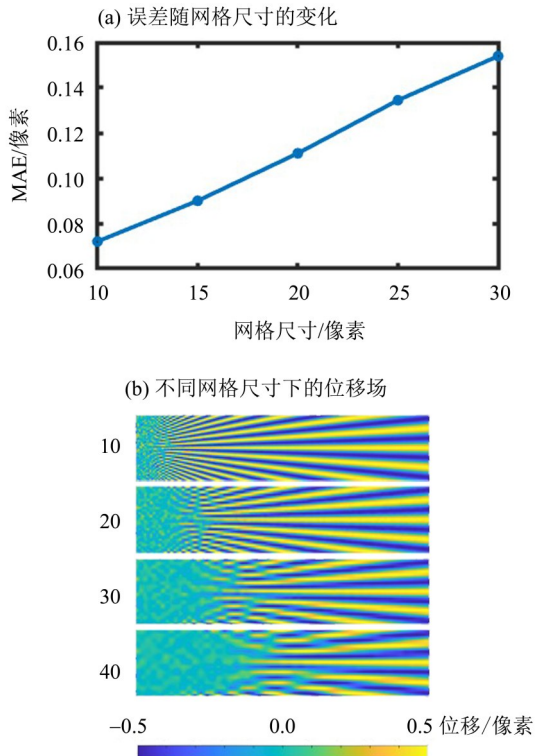


图7 复杂位移场下网格尺寸与位移测量误差的关系

Fig. 7 Relationship between mesh size and displacement measurement error for a complex displacement field

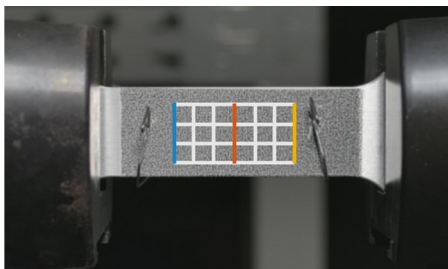


图8 板材单轴拉伸实验示意图

Fig. 8 Theoretical distribution of the displacement field

选取试件中部一块 601×301 像素的矩形区域作为 ROI, 考虑到拉伸变形主要为一阶变形, 且图像不

可避免存在噪声, 参照 2.3 节的结论, 单元类型选择 4 结点单元。同时参照 2.1 节的结果, 网格尺寸取为 100 像素, 并在计算时引入正则化约束。由于拉伸过程中试件发生了较大变形, 若采用小变形假设下的 Cauchy 应变计算方式将难以准确反映真实应变状态。因此本研究基于 Green-Lagrange 应变来计算应变场, 其表达式为

$$E = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T + (\nabla \mathbf{u})^T \nabla \mathbf{u}]$$

为了验证应变场测量的有效性, 将 FE-DIC 的应变结果与引伸计测得的变形进行对比。具体做法是选取 3 列网格结点 (图 8 的蓝色线、红色线、橙色线), 分别计算其平均应变, 并与由引伸计转换得到的区域内平均应变进行比较, 如图 9 所示。其中每个圆点表示 1 次采样, 横轴为引伸计转换得到的应变结果, 纵轴为 FE-DIC 测量的平均应变, 对角虚线为测量等值线。结果表明, 3 处位置的应变计算值与引伸计结果基本吻合, 散点整体紧贴理论一致线分布, 无明显系统偏差。

考虑到引伸计仅能反映标距范围内的平均变形, FE-DIC 则更多反映局部变形信息, 因此两者的测量结果不会完全相等, 尤其在拉伸实验后期, 试件进入塑性流动阶段时, 局部区域因应力集中出现非均匀变形, FE-DIC 捕捉的局部应变差异更显著, 与引伸计的平均应变偏差略有增大, 但仍处于工程测量可接受范围。综上所述, 实验结果验证了上述结论在实际应变测试中的有效性。

5 总 结

1) 在均匀位移场中, 网格尺寸过小或过大将分别增大随机误差与系统误差对测量总误差的影响, 存在最优网格尺寸使位移测量误差最小, 且噪声增大会提高整体测量误差并使最优网格尺寸增大, 同

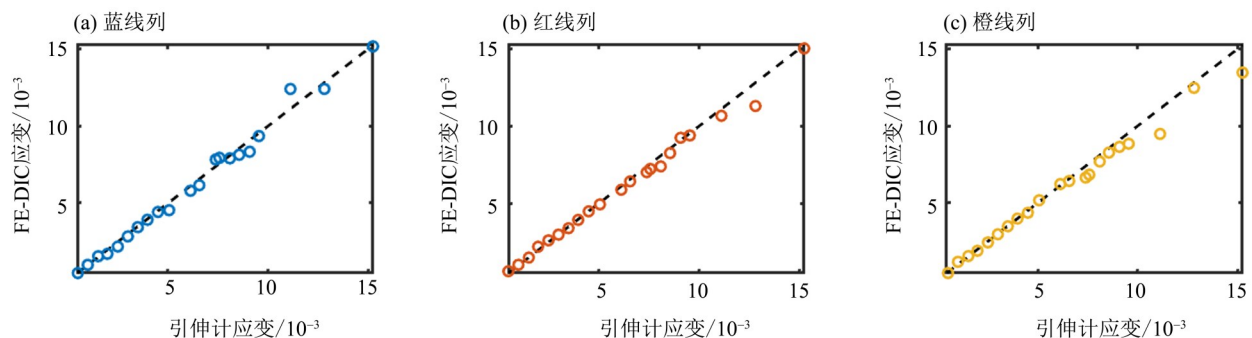


图9 板材单轴拉伸的应变测量结果

Fig. 9 Experimental results for strain measurement in the uniaxial tensile test of a plate specimen

时正则化约束可在小尺寸网格下显著降低图像噪声带来的随机误差。

2)在低噪声条件下使用高阶单元的测量误差更小,而在噪声较高时则宜使用尺寸较大的低阶单元。

3)在复杂位移场中,由于低阶形函数难以表征高频空间变形,测量误差主要由系统误差主导,位移测量误差随网格尺寸增大而增大,小尺寸网格更能捕捉复杂位移场的局部特征。

参考文献:

- BESNARD G, HILD F, ROUX S, 2006. "Finite-element" displacement fields analysis from digital images[J]. *Exp Mech*, 46(6):789-803.
- BRENNER S C, SCOTT L R, 2008. The mathematical theory of finite element methods [M]. Cham: Springer.
- DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B, 1998. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. *Shock Vib Dig*, 30(2):91-105.
- FARRAR C R, WORDEN K, 2007. An introduction to structural health monitoring [J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 365(1851):303-315.
- HILD F, ROUX S, 2006. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties—A review [J]. *Strain*, 42(2):69-80.
- HILD F, ROUX S, 2012. Comparison of local and global approaches to digital image correlation [J]. *Exp Mech*, 52(9):1503-1519.
- LECLERC H, PÉRIÉ J N, ROUX S, et al, 2009. Integrated digital image correlation for the identification of mechanical properties [C]//Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques. Berlin, Heidelberg: Springer:161-171.
- LU Y, ZHU W, 2024. Convolution finite element based digital image correlation for displacement and strain measurements [J]. *Comput Meth Appl Mech Eng*, 419: 116597.
- MENDOZA A, NEGGERS J, HILD F, et al, 2019. Complete mechanical regularization applied to digital image and volume correlation [J]. *Comput Meth Appl Mech Eng*, 355: 27-43.
- PAN B, QIAN K, XIE H, et al, 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review [J]. *Meas Sci Technol*, 20(6):062001.
- PAN B, WANG B, LUBINEAU G, 2016. Comparison of subset-based local and FE-based global digital image correlation: Theoretical error analysis and validation [J]. *Opt Laser Eng*, 82:148-158.
- RÉTHORÉ J, HILD F, ROUX S, 2008. Extended digital image correlation with crack shape optimization [J]. *Int J Numer Meth Eng*, 73(2):248-272.
- REU P L, BLAYSAT B, ANDÓ E, et al, 2022. DIC challenge 2.0: Developing images and guidelines for evaluating accuracy and resolution of 2D analyses [J]. *Exp Mech*, 62(4):639-654.
- SCHREIER H W, SUTTON M A, 2002. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions [J]. *Exp Mech*, 42(3):303-310.
- SUN Y, PANG J H L, 2007. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images [J]. *Opt Laser Eng*, 45(9):967-974.
- WANG B, PAN B, 2016. Subset-based local vs finite element-based global digital image correlation: A comparison study [J]. *Theor Appl Mech Lett*, 6(5): 200-208.
- XU X, SU Y, ZHANG Q, 2017. Theoretical estimation of systematic errors in local deformation measurements using digital image correlation [J]. *Opt Laser Eng*, 88: 265-279.
- ZHAO J, PAN B, 2025. Smart DIC: User-independent, accurate and precise DIC measurement with self-adaptively selected optimal calculation parameters [J]. *Mech Syst Signal Process*, 222: 111792.

(责任编辑 王海蓉)