

文章编号 1004-924X(2025)15-2478-13

基于曲面反射的单相机全景三维数字图像相关法

马衍成, 温清凤, 隋顺顺, 陈侯泽, 王亚琪, 代祥俊^{*}
(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要:提出一种单相机双棱镜全景三维数字图像相关法, 以实现 360° 表面变形测量, 并验证其在圆管内表面形貌测量及管道缺陷检测中的有效性和实用性。首先, 采用单相机结合双棱镜的光学系统, 通过成一定角度摆放的两块棱镜折射光线, 使单相机同时捕获左右视角图像, 达到双相机的成像效果。然后, 利用凸面镜反射实现全景观测, 覆盖待测内表面 360° 范围。最后, 对采集的图像进行数字图像相关计算和坐标变换, 重建三维形貌及变形场。结果表明, 形貌测量的最大绝对误差为 0.4 mm, 大部分位置的最大绝对误差在 0.1 mm 以内。本文方法测量的应变与应变仪结果相比, 最大相对误差为 3.86%。本文通过光学设计简化了系统结构, 实现了高精度管道内表面变形测量, 具备一定的准确性与实用性。

关键词:全景测量; 数字图像相关; 单相机; 内表面变形

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253315.2478

CSTR: 32169.14.OPE.20253315.2478

Single-camera panoramic 3D digital image correlation method based on curved surface reflection

MA Yancheng, WEN Qingfeng, SUI Shunshun, CHEN Yuze, WANG Yaqi, DAI Xiangjun^{*}

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology,
Zibo 255049, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: daixiangjun@sdut.edu.cn

Abstract: A single-camera, dual-prism panoramic three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) method was developed to enable full 360° measurement of internal surface deformation and to evaluate its effectiveness for internal morphology characterization of circular pipes and pipeline defect detection. A single camera in conjunction with a double-prism optical arrangement is employed to reproduce a stereoscopic (dual-camera) imaging effect by refracting light through two prisms oriented at a prescribed angle, allowing simultaneous capture of left and right views. Panoramic observation of the entire inner surface is achieved via reflection from a convex mirror, providing continuous 360° coverage. Subsequent digital image correlation processing and coordinate transformation are performed on the acquired images to reconstruct the three-dimensional displacement field and strain distribution. Morphology experiments indicate a maximum absolute error of 0.4 mm, with the majority of measurement points exhibiting errors within 0.1 mm. Deformation tests show a maximum relative error of 3.86% in comparison

收稿日期: 2025-06-30; 修订日期: 2025-07-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12172200)

with strain gauge measurements. The proposed system demonstrates high accuracy and practicality, achieves simplified hardware through optical design, and enables high-precision measurement of inner pipe-surface deformation.

Key words: panoramic measurement; digital image correlation; single camera; internal surface deformation

1 引言

在当代工程技术与科学研究领域,非接触式测量技术因其高效性和精确性而备受关注^[1]。其中,三维数字图像相关(three dimension Digital Image Correlation, 3D-DIC)方法是一种融合了双目立体视觉原理与图像相关算法的全场变形测量手段。该方法能够对物体表面的三维变形进行高精度分析^[2],因其系统搭建便捷且环境稳定性较强,已在土木^[3]、材料^[4-5]、机械^[6]、医学^[7]等诸多领域得到了广泛应用。

然而,传统工业相机固有的视场极大地制约了常规 3D-DIC 在宽视场及全景尺度下三维变形测量的适用性。为实现全景或全表面的变形测量,已提出了如多相机阵列法、旋转法和双镜面辅助法等多种研究方法。多相机阵列法^[8-11]通过配置 4 个或更多的相机,从多个不同视角同步采集物体表面的图像。这类系统将所有相机分为若干个独立的双目立体 DIC 系统^[12-17],将相机排列成链状^[18-20]或圆形^[21],并以相邻相机配对形成多个标准的 3D-DIC 子系统。随后利用全局校准或基于重叠区域的拼接技术,各子系统的测量结果可被统一到全局坐标系下,进而得到全周形貌和变形场。虽然这些系统对共同视场的要求较少,更适合进行大尺度物体的全场测量,但其高昂的成本和严格的同步要求限制了其应用。

为降低系统复杂度与经济成本,研究人员提出一些模拟多相机配置的替代方案,如移动相机^[22-23]和旋转被测样品策略^[24-25]。二者使用单相机或 3D-DIC 系统来测量变形,不同之处在于位姿变化主体。相机移动时物体是固定的,相机(系统)沿预设轨迹移动并采集多角度信息;被测对象旋转时,相机是静止的,物体围绕自身的某个轴旋转。然而,相机或试样的旋转都需要一定时间,因此这些方法主要适用于准静态测量,难

以满足动态测量的实时性需求。

近年来,镜面辅助方法^[26]因其低成本和易实现的特点,在多个领域^[27-30]得到了广泛应用。典型的镜面辅助 3D-DIC 系统由两个相机和两个平面镜构成。相机垂直或水平放置于物体前方,平面镜以适当角度置于物体后方。相机通过直接拍摄和镜面反射,能够同时采集物体正面和背面的左右视图,进而通过相关计算实现全周形貌和三维变形测量。此方法在动态全景测量中表现出显著优势,但其局限性在于仅适用于物体外表面的测量,无法获取内表面全景信息。为解决这一问题,在之前的工作中构建了基于凸面镜反射的全景成像系统,实现了对物体内表面的全景测量^[31],本文进一步改进了该系统,使用单相机来节约成本,使用单相机进行测量的方法确实可行^[32]。

本文提出了一种基于凸面镜的单相机双棱镜全景数字图像相关系统,将凸面镜置于待测物内部,相机通过两个棱镜折射成像,可以观测到左右相同的视场,再经凸面镜反射,即可获得管道内壁表面的全景图像。通过相关匹配算法计算不同区域的形貌与变形,再经坐标转换,最终获得内壁的全景形貌和三维变形分布。开展了三项实验,包括圆柱形管道内表面全景形貌恢复,不同载荷下管道内壁的变形以及带有缺陷的管道的变形,同时通过应变仪验证部分区域的应变结果。实验结果验证了该方法在形貌与变形测量中的准确性和有效性。

2 测量系统与基本原理

2.1 3D-DIC

在经典的 3D-DIC 技术中,三维位移的测量主要包括图像采集、相机标定、相关匹配、三维重建和变形计算 5 个步骤。其中,相机标定用于确定两个相机的内参(如焦距、畸变参数)和外参

(如相对位置与姿态)。标定完成后,建立空间坐标系中的物点与其在图像平面上的投影点之间的对应关系,为后续的三维形貌重建和变形计算奠定基础。在物体加载变形前拍摄一组图像作为基准,加载后则记录一系列变形图像作为目标图像。接着,在参考图像中选取一个或多个感兴趣区域,并以正方形子区为单位,跟踪其在变形图像中的对应位置。通过分析参考图像和变形图像中对像素点的二维图像坐标,可重建出这些点的三维空间坐标,从而实现三维形貌的重现。最后,计算感兴趣区域内点在变形前后坐标的差异,即可得出各点的三维位移。

图像匹配的任务是寻找由两个相机分别记录的被测物体表面数字图像中的对应点,其精度直接关系到被测物形貌和变形测量的精度。本文采用归一化的最小平方距离相关函数(Zero-Normalized Sum of Squared Differences Criterion, ZNSSD)评价变形前后图像子区的相似程度,其表达式为^[33]:

$$C_{\text{ZNSSD}}(p) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2, \quad (1)$$

式中: $f(x_i, y_i)$ 和 $g(x_i, y_i)$ 分别是参考子集选定计算点 (x_1, y_1) 和变形子集对应点 (x_2, y_2) 中的像素灰度; f_m 和 g_m 分别表示了参考子集和变形子集的平均灰度; $p = [u, v, u_x, u_y, v_x, v_y, u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}]^T$ 为待求的变形参数向量。

2.1 单相机双棱镜成像

传统的 3D-DIC 系统使用两台相机从两个不同的视点捕捉相同的场景。然而,当用于管道内

表面的变形测量时,两台摄像机观察到的重叠区域很小。为了克服这一限制,本研究中使用单相机双棱镜系统进行图像采集。

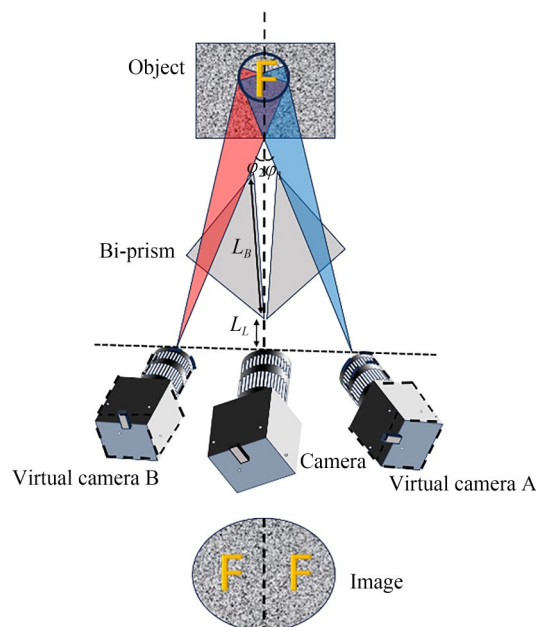


图1 单相机双棱镜系统

Fig. 1 Single-camera bi-prism DIC system

图1为单相机-双棱镜 3D-DIC 系统示意图。图中,一对双棱镜的光轴与相机光轴重合,并对称分布于相机光轴的两侧。当试件位于测量系统前方适当的距离时,在相机成像传感器的左右两个半区会分别呈现来自不同角度观测的试件图像,获得的两个子图像可以看作使用两个相同型号 CCD 相机拍摄的子图像。

单相机双棱镜系统的视场为^[34]:

$$\varphi_{1,2} = \arcsin \left[\sqrt{\frac{\Gamma^2(n^2 - 1) - \Gamma n^2 \sin \alpha + \sqrt{2} \Gamma \cos(\alpha + \gamma) + n^2 - \cos^2(\alpha + \gamma)}{\Gamma^2 + \Gamma \sin \alpha + 1}} \right] + \gamma - \alpha - \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

式中: φ_1 和 φ_2 分别表示左右两个虚拟相机的视场角度; $\Gamma = L_B/L_L$ 为系统的尺寸参数, L_B, L_L 分别为棱镜斜边长度和棱镜到镜头的距离,此时系统的整体视场角度 $\phi = \varphi_1 + \varphi_2$ 。

2.2 成像模型

图2为系统的整体光路,显示了该系统从凸面镜经双棱镜折射到相机的整体光路。凸面镜、双棱镜与相机的光轴在同一直线上,凸面镜反射的光线经双棱镜折射后进入相机成像。

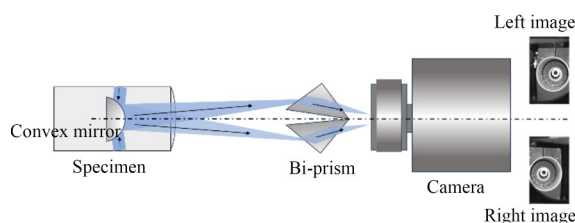


图2 单相机双棱镜系统光路

Fig. 2 Optical path of single-camera bi-prism DIC system

图 3 给出了所提出的全景系统的成像模型。 $O(r, z)$ 表示目标点, 从该点向焦点 $F(0, 0)$ 出射一束光, 入射光与光轴 z 的夹角为 φ 。光线在凸面镜上的点 A 处反射, 然后通过针孔 $P(0, 2c)$ 成像在像平面上的点 I 。以焦点为坐标原点, $r-z$ 平面上的双曲线可以表示为:

$$\frac{(z-c)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

其中: $c = \sqrt{a^2 + b^2}$, a 和 b 表示双曲函数的参数。式(3)也可改写为:

$$z = M(r) = c + \frac{a}{b} \sqrt{r^2 + b^2}. \quad (4)$$

入射光线为:

$$z = r \cdot \cot \theta + 2c. \quad (5)$$

反射光线为:

$$z = -r \cdot \cot \theta + 2c, \quad (6)$$

其中 θ 是入射线与垂直轴之间的夹角。

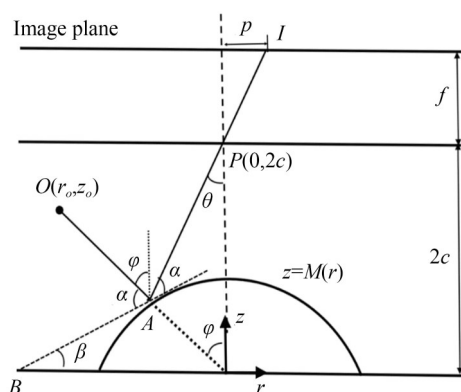


图 3 全景成像模型

Fig. 3 Panoramic imaging mode

凸面镜在 A 点的切线表示为 AB 。根据镜面反射定律, OA 与 AB 之间的夹角等于 AB 与 AP 之间的夹角, 可得:

$$\varphi + \theta + 2\alpha = \pi. \quad (7)$$

另一方面, 根据几何原理可得:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi + \beta, \quad (8)$$

其中 β 表示 AB 与坐标轴 r 之间的夹角。其计算公式为:

$$\beta = \arctan \left(\left. \frac{dM(r)}{dr} \right|_A \right). \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(7)和式(4), 入射光

和反射光线之间的关系可以表示为:

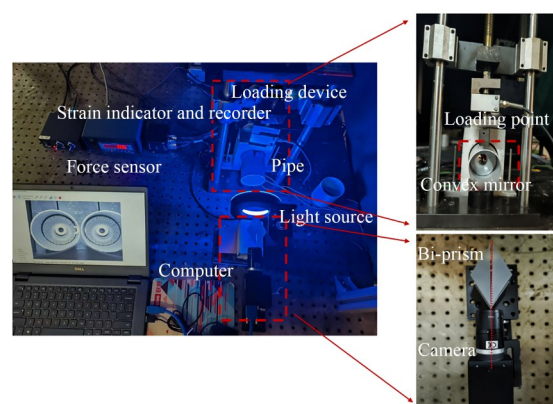
$$\theta = \varphi - 2 \frac{a^2}{b^2} \cdot \frac{r_A}{z_A - c}. \quad (10)$$

如图 3 所示, 物点在成像平面上的位置可由下式确定:

$$p = f \cdot \sin \theta. \quad (11)$$

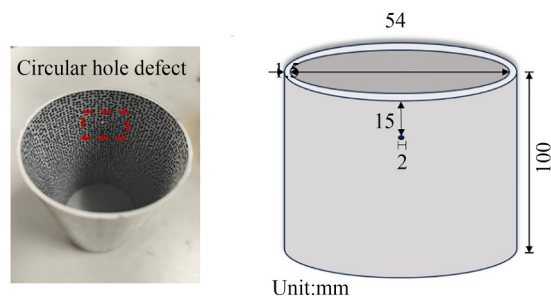
3 实验

为验证所提出方法的有效性和准确性, 实验开展了形貌、变形和缺陷检测。采用的测量系统如图 4(a) 所示, 一个配有 12 mm 定焦镜头的工业相机 (FLIR Blackfly S BFS-U3-51S5M-C, 2480×2040) 用于图像采集, 两个棱镜用于与相机构建成像系统。管道后半段受管夹固定, 顶端加压, 底端放置在加载平台上, 凸面镜直径为 52 mm, 厚度为 10 mm。图 4(b) 为带缺陷管道及示意图, 管道为外径 57 mm、内径 54 mm、长度 50 mm 的铝合金圆管, 且在距离底部 15 mm 处预



(a) 实验系统

(a) Experimental system



Unit:mm

(b) 带缺陷圆管

(b) Pipe with defect

图 4 单相机双棱镜全景三维数字图像相关测量装置

Fig. 4 Measurement setup for single-camera panoramic 3D digital image correlation

制了一直径为 2 mm 的贯穿圆孔缺陷。受凸面镜限制,本文实验只测量管道前端(加载端)3 cm 长度。采用棋盘格标定板进行标定,如图 5 所示,因双棱镜单相机系统一次可拍摄到两幅标定板图像,标定前需要将采集到的图像从中间分割,得到对应的左、右相机图片。表 1 和表 2 分别给出了相机的内参和外参标定结果。

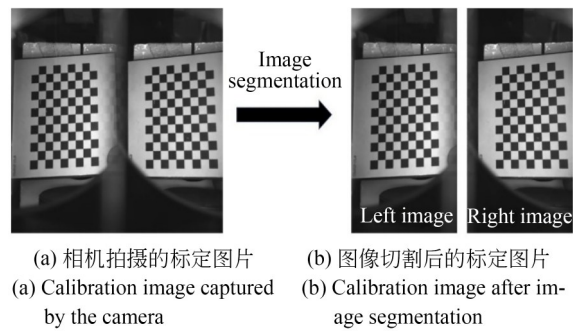


图 5 处理前后的标定图片

Fig. 5 Calibration images before and after drocessing

表 1 内部参数标定结果

Tab. 1 Internal parameter calibration results

内部参数	相机 A	相机 B
主点坐标 x (像素)	1 031.57	1 154.3
主点坐标 y (像素)	539.424	579.177
焦距 x (像素)	1 256.4	1 291.94
焦距 y (像素)	1 256.01	1 291.4
畸变	-0.344 47	-0.386 38

3.1 形貌测量

在形貌和变形测量实验采用的试样为外径

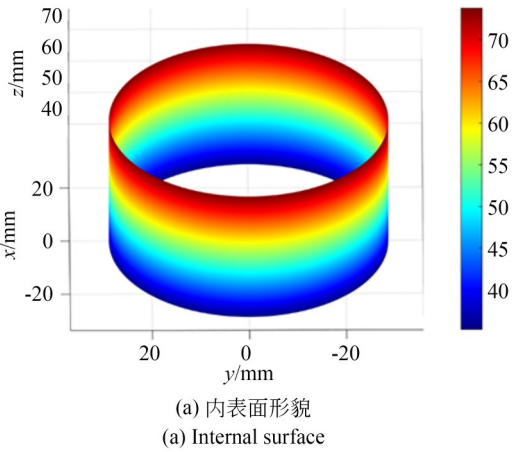


表 2 外部参数标定结果

Tab. 2 External parameter calibration data

外部参数	x	y	z
旋转向量/(°)	1.598 47	0.550 333	-5.121 07
平移向量/mm	0.513 547	-1.194 8	0.178 049

57 mm、内径 54 mm、长度 50 mm 的完好铝合金圆管,材料的弹性模量为 68.9 GPa,泊松比为 0.33。实验前在待测管道内壁上预制不规则散斑作为形貌和变形信息的载体。实验中均采用操作简单、适用范围广、成本低、可定制性强的水转印方法制作散斑。图 6 所示为实验过程中的立体匹配图,拍摄散斑图后进行立体匹配就可得到管道的三维形貌和变形。通过一次测量可实现管道内壁的形貌重构,如图 7(a)所示。为了验证管道内壁形貌测量的精度,根据管道的出厂数

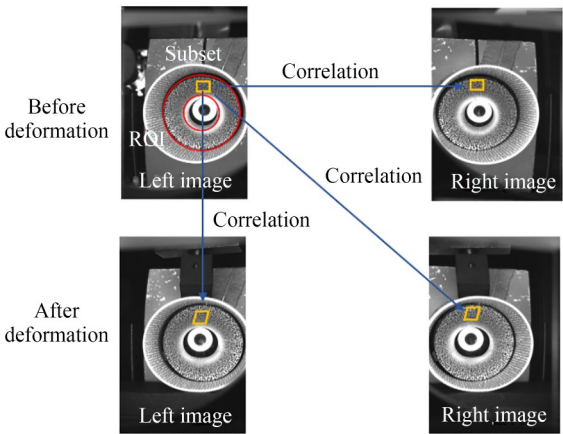


图 6 立体匹配图

Fig. 6 Stereo matching images

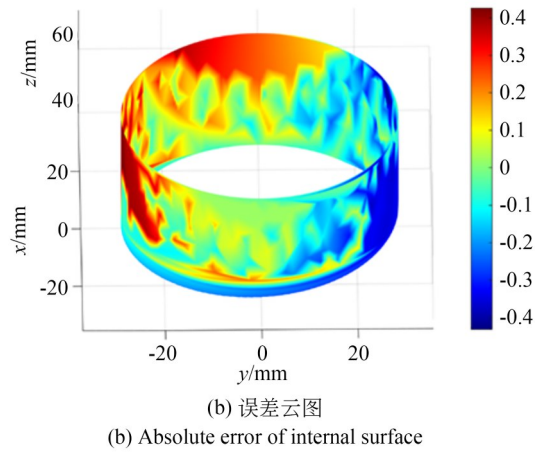


图 7 管道形貌测量

Fig. 7 Shape measurement of pipe

据,建立一个标准管道内壁模型,同时和测得的形貌数据作差,可得到内壁形貌的绝对误差,如图 7(b)所示。通过误差云图还可以发现,形貌最大绝对误差为 0.4 mm,大部分位置的最大绝对误差在 0.1 mm 以内,证明了该系统进行形貌测量的有效性和准确性。

3.2 变形测量

将本文提出的方法应用于空心圆管径向压缩时内壁变形测量上,以验证其变形测量精度。加载装置的最大量程为 1 kN,将管件后端用管夹固定,前端置于加载台上,单相机双棱镜系统放置在管道正前方,并调整好棱镜角度及相机位置。施加载荷前,采集管道在未变形时的图像作为参考图像。加载过程中,相机实时采集变形后管道内壁的图像作为目标图像。

图 8~图 10 分别给出了载荷分别为 50,100,150,200,250 和 300 N 的管道内壁的全景周向、径向和轴向位移分布云图。轴向是沿管道中心线的延伸方向,即与所有横截面垂直的直线方向。径向在横截面内,通过该点并指向或背离管道中心线的直线方向。周向在横截面内,与该点处的径向垂直,并沿管壁圆周切线的方向。由图可以看出,随着载荷的增加,管道内壁全周整体

的周向位移量没有变化,说明径向集中载荷对管道周向形变几乎不产生影响;径向位移大体呈对称分布,这是因为载荷给管道向下压力,底部平台给管道向上的支撑力,使得管道向两侧扩张,所以产生了两侧相反的位移,且随载荷增大,径向位移幅值近似线性增长;管道顶部(施力点处)的轴向位移最大,底端因为固定的原因几乎不产生位移,后端(固支处)也几乎为零,位移与载荷近线性相关,且沿轴向由顶向底呈衰减分布。随着载荷的增大,这种现象也越发明显。总之变形最大方向为轴向,其次为径向,周向变化最小,所以本文中只计算分析轴向应变。这种变形特征源于“顶部集中载荷、底部支撑与后端刚性固支”的边界条件。

在获得全场位移数据后,即可计算出结构的轴向应变分布。图 11 展示了在 50,100,150,200,250 和 300 N 载荷作用下的应变云图,由于加压过程中底面轴向位移几乎不发生变化,因此从图中可以看到,管道底部应变较小。在径向集中载荷作用下,管道大部分区域应变值为负值,即管道产生了压应变;而在管道顶端表现出拉应变,这是因为径向载荷把管道加压位置附近区域拉长了,从而形成应变集中带;载荷增大主要放

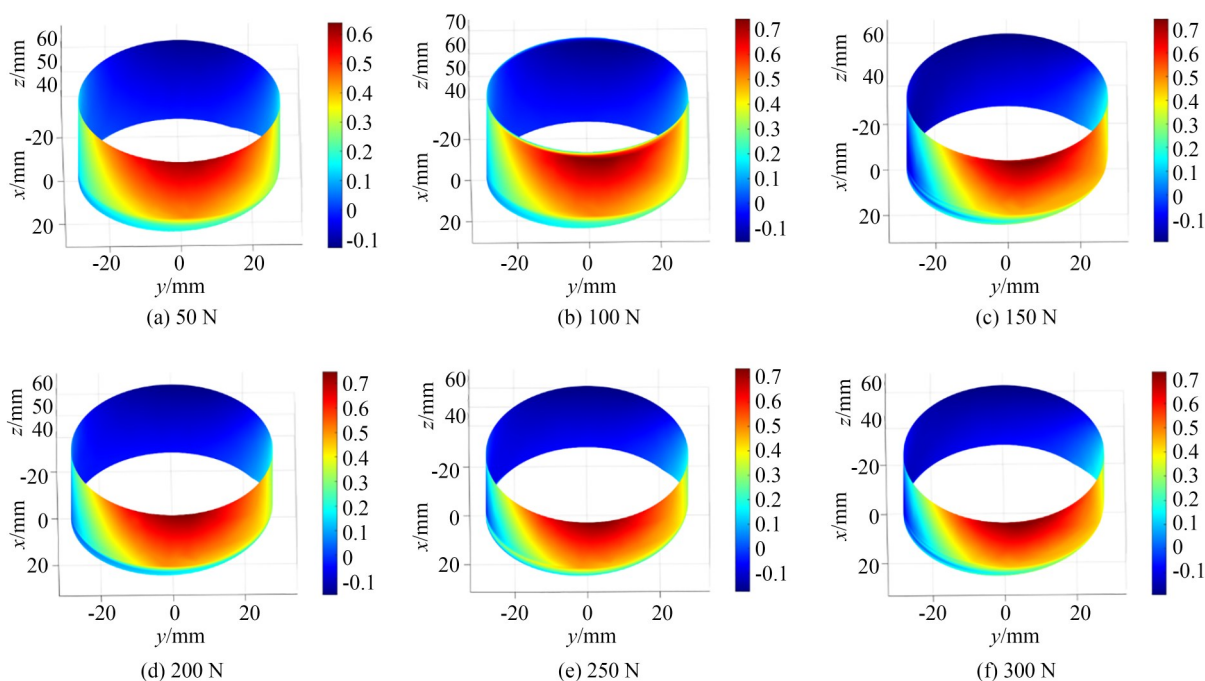


图 8 不同载荷下的周向位移分布

Fig. 8 Circumferential displacement distribution under different loads

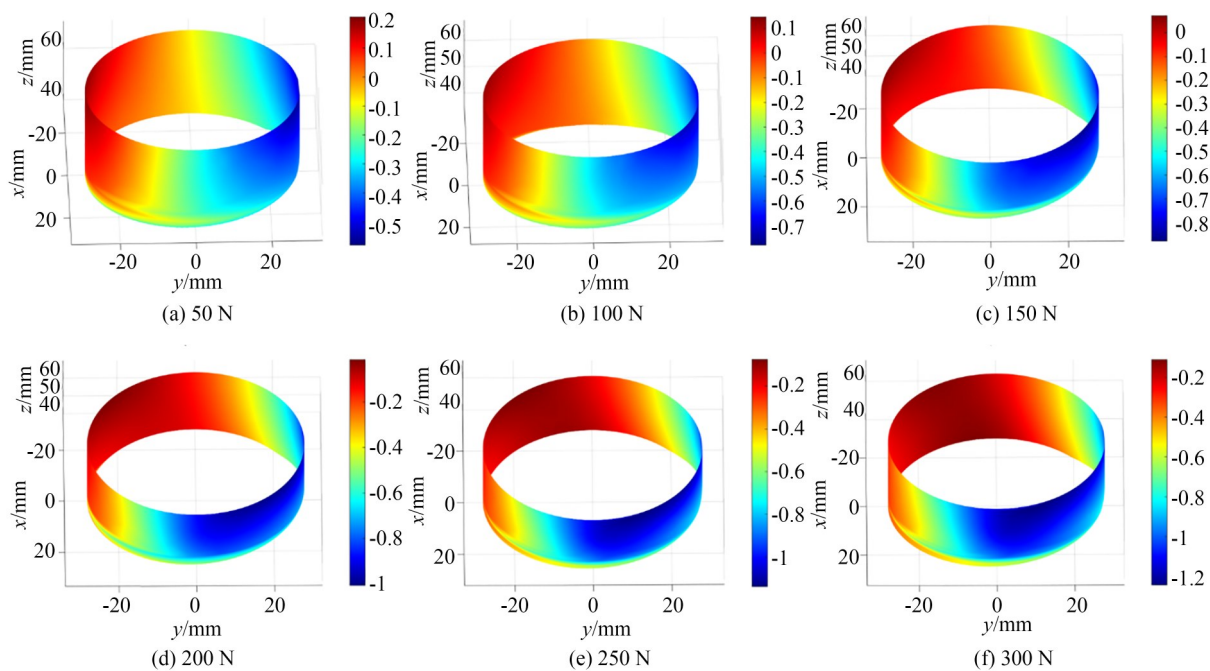


图9 不同载荷下的径向位移分布

Fig. 9 Radial displacement distribution under different loads

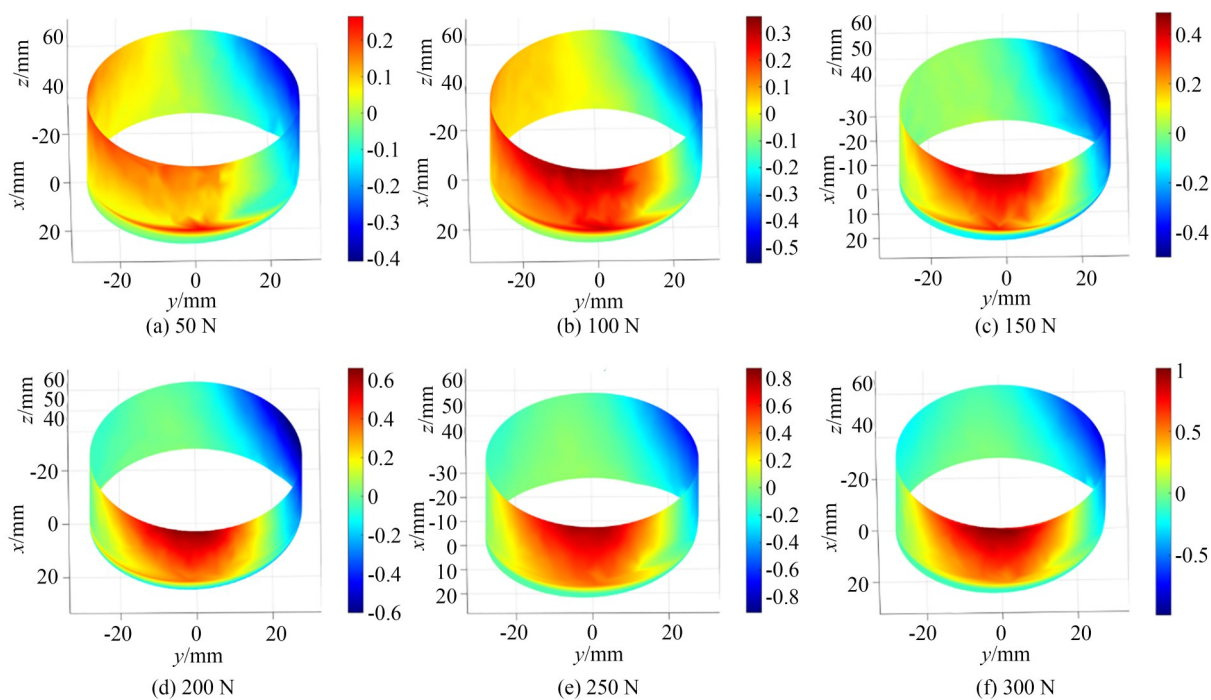


图10 不同载荷下的轴向位移分布

Fig. 10 Axial displacement distribution under different loads

大集中带的幅值,基本不改变集中区域的空间范围。

为了验证该系统的准确性,还使用了应变仪

来测量应变,将应变片贴在加压位置附近。实验中只贴了轴向的应变片,所以只对照轴向应变。表3为应变仪数据与DIC测量数据。从表中可以

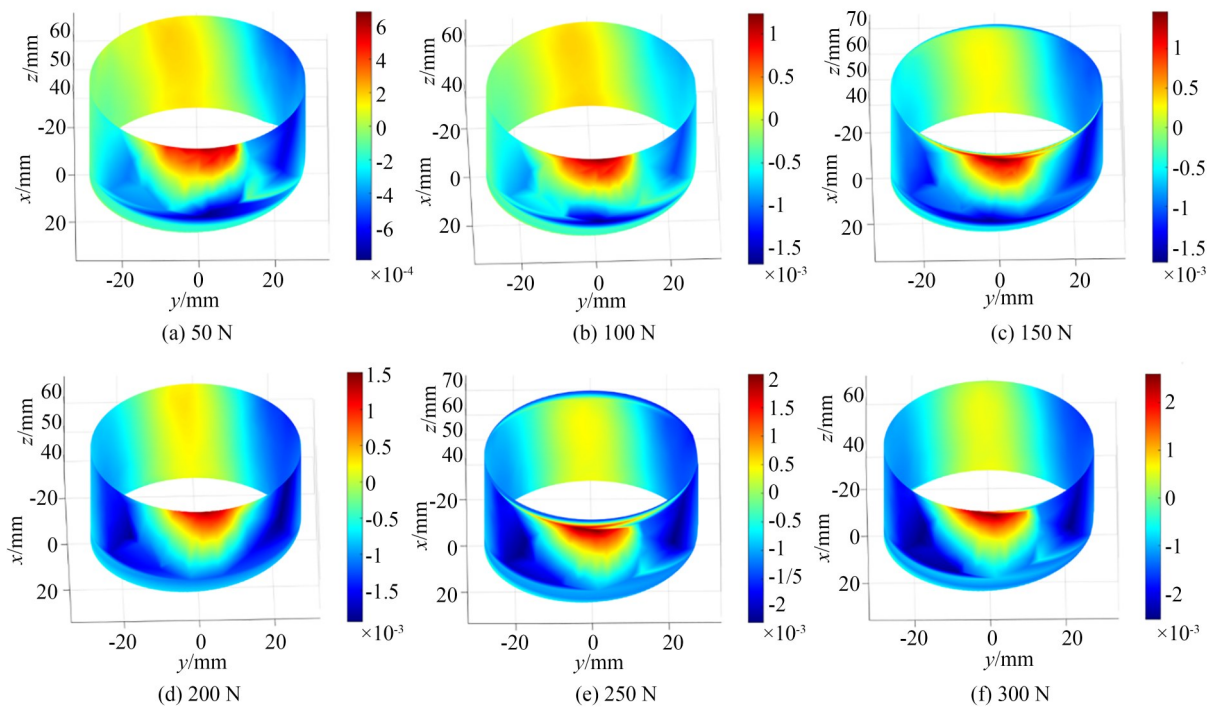


图 11 不同载荷下的轴向应变分布
Fig. 11 Axial strain distributions under different loads

看到,实验测量数据相比应变片要较高,最大误差达到 $83.81\text{ }\mu\epsilon$,最大相对误差为 3.86% ,在可接受范围,由此可见该系统在变形测量中的可靠性。

表 3 应变测量结果对比		
Tab.3 Comparison of strain between DIC and strain gauge measurements		
载荷/N	DIC/ $\mu\epsilon$	应变仪/ $\mu\epsilon$
50	611.25	598.73
100	945.48	938.92
150	1 289.71	1 255.86
200	1 633.94	1 603.55
250	1 978.17	1 938.98
300	2 253.54	2 169.73

3.3 缺陷检测

本文进一步进行了管道缺陷检测实验。该实验与变形验证实验所用的管道规格相同,不同之处在于管道存在缺陷,如图 4(b)所示。

图 12~图 14 为 6 个径向载荷作用下管道内壁的全景周向、径向和轴向位移分布云图,载荷大小分别为 50,100,150,200,250 和 300 N。可以看出,缺陷使得管道内壁的周向、径向位移分布明显破坏了原有的对称性。与完好管道相比,周向位移场在缺陷所在位置出现了凸起高值区,而其对侧区域相对平缓。径向位移云图显示,在缺陷位置附近,管壁向内的压缩量更深,相邻区域有轻微的向外膨胀,这种分布随加载增加愈发明显。在轴向位移场中,缺陷位置对应的局部位移最大值显著高于周围区域,相较于完好管道,缺陷区位移峰值增幅可达 $20\%\sim 30\%$,说明该处刚度减弱使得同等载荷更易产生轴向变形。

图 15 是带圆孔缺陷管道在不同载荷下的轴向应变云图。将该图与无缺陷条件下的图 11 对比,可以明显看出,缺陷所在位置的应变值显著高于其他区域,形成了明显的缺陷引起的应变集中区域;载荷从 50 N 逐步增至 300 N,该缺陷区的应变绝对值增幅大于完好管壁的变化,表明缺陷位置对整体变形响应尤为敏感;随着载荷的增加,缺陷附近形成的应变集

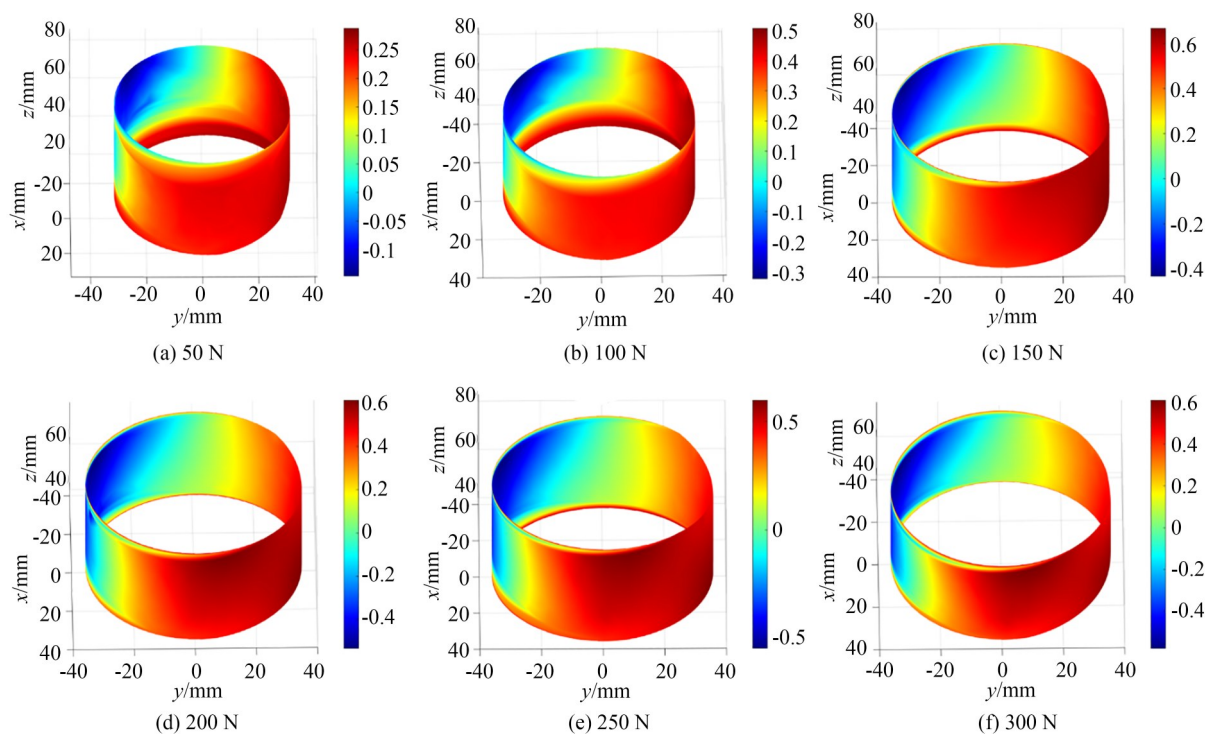


图 12 不同载荷下的周向位移分布

Fig. 12 Circumferential displacement distribution under different loads

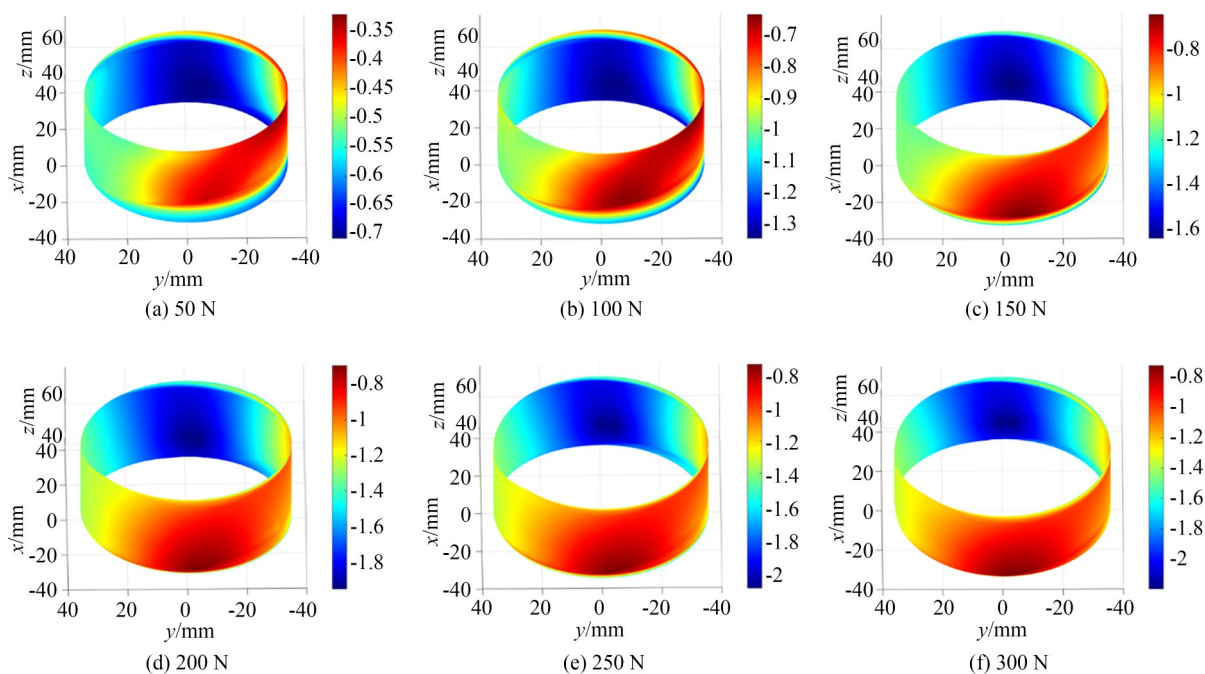


图 13 不同载荷下的径向位移分布

Fig. 13 Radial displacement distribution under different loads

中区域越来越明显。除加压位置的应变集中外,其他的集中带为缺陷所在位置。

此次实验中也把 DIC 结果与应变仪测量数据进行了对比,应变片粘贴在缺陷附近。表

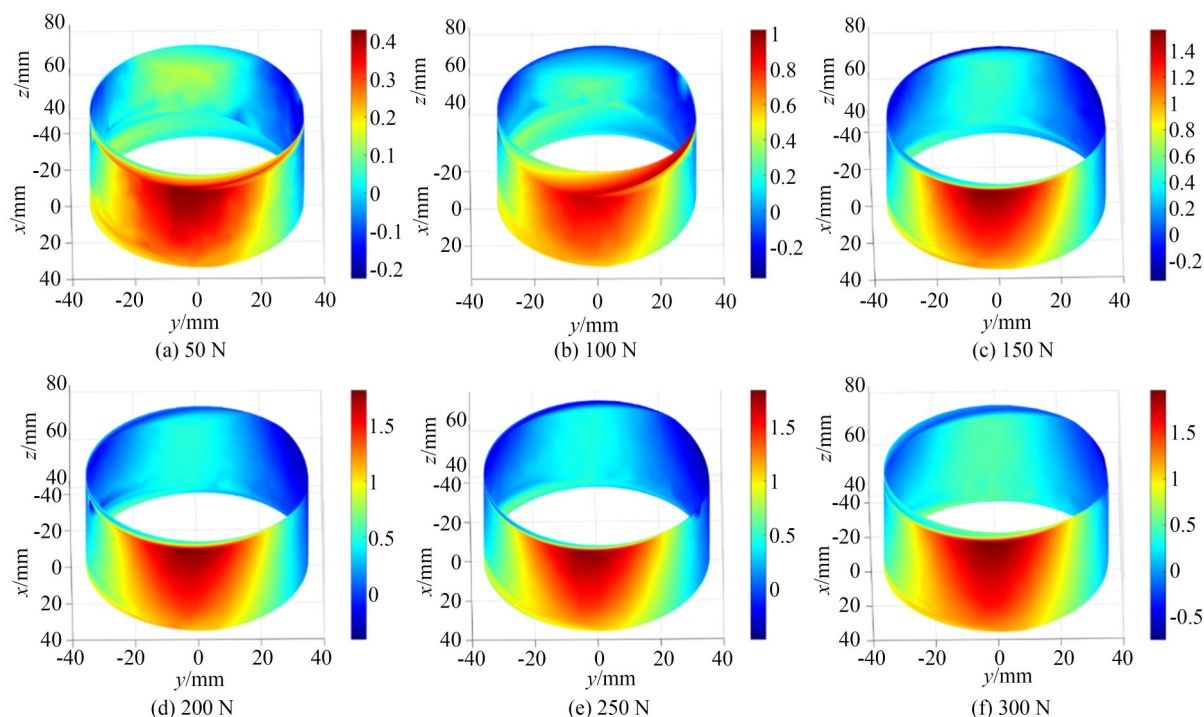


图 14 不同载荷下的轴向位移分布

Fig. 14 Axial displacement distribution under different loads

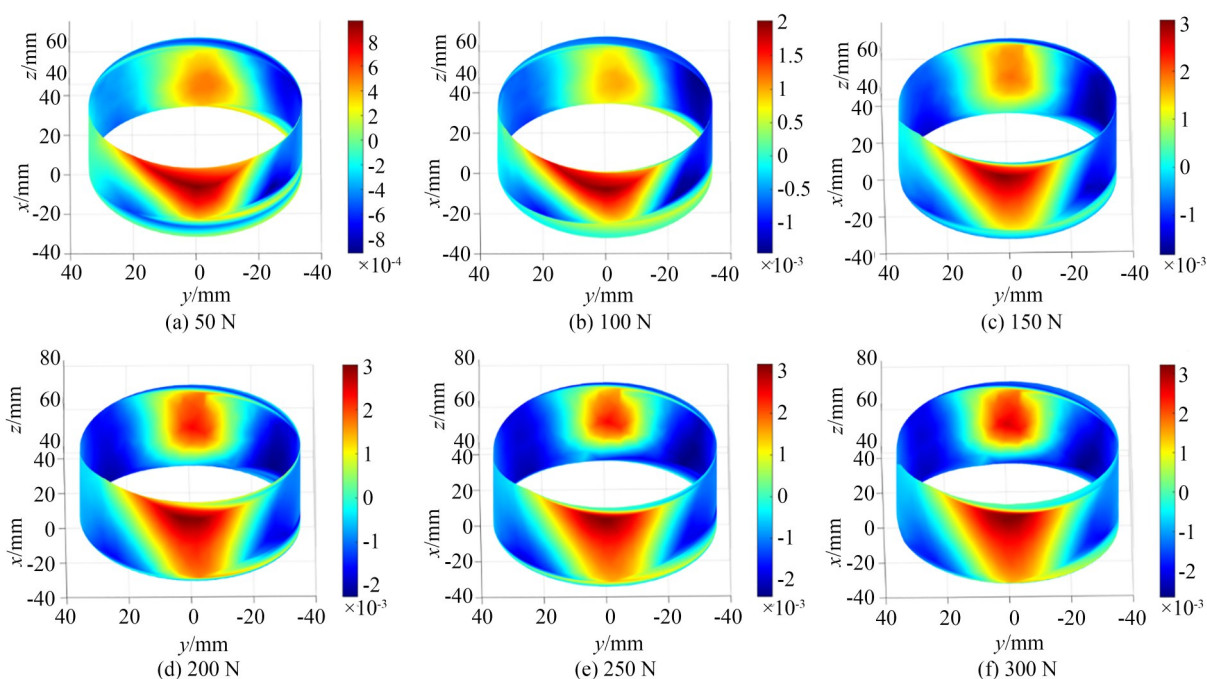


图 15 不同载荷下的轴向应变分布

Fig. 15 Axial strain distributions under different loads

4 列出了两种方法测得的应变数据。通过对比可知, DIC 与应变仪数据总体吻合良好, 应变值随着载荷的增大而增加, 最大绝对误差为

$88.33 \mu\epsilon$, 最大相对误差为 3.31%。由此表明, 该系统在测量缺陷区应变时具有较高的可靠性。

表 4 应变测量结果对比

Tab.4 Comparison of strain between DIC and strain gauge measurements

载荷/N	DIC/ $\mu\epsilon$	应变仪/ $\mu\epsilon$
50	406.65	378.32
100	925.84	903.39
150	1 441.85	1 417.52
200	1 961.98	1 913.96
250	2 482.45	2 415.58
300	2 925.89	2 837.56

4 结 论

本文提出了一套单相机双棱镜全景三维数字图像相关方法系统,可用于圆管内表面全 360° 三维形貌和变形测量。该系统由一台工业相机、两个棱镜、凸面镜和光源组成。采用凸面镜可实现全景成像,双棱镜与相机组成单相机双棱镜 3D-DIC 系统。通过 DIC 算法获得了全场 360° 三维位移和应变分布,并通过坐标变换进行了重建。形貌最大绝对误差为 0.4 mm,大部分位置最大绝对误差在 0.1 mm 以内,变形实验的最大误差达到 $83.81 \mu\epsilon$,最大相对误差为 3.86%,验证了系统的准确性,并通过缺陷检测实验证明了该系统的实用性。

参考文献:

- [1] 王嘉雯,吴峻青,吴敏杨,等. 激光电子散斑干涉法隐形牙齿矫治器全场变形测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(17): 2663-2675.
WANG J W, WU J Q, WU M Y, *et al.* Whole-field deformation measurement of clear orthodontic aligner using electronic speckle pattern interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2663-2675. (in Chinese)
- [2] LI J R, YAO Y F, ZHAO Q H, *et al.* Simultaneous measurement of six displacement gradients using Digital Shearography [J]. *Measurement*, 2025, 240: 115520.
- [3] WANG P P, SANG Y, GUO X X, *et al.* A novel optical method for measuring 3D full-field strain deformation in geotechnical tri-axial testing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(1): 015403.

与传统三维数字图像相关方法相比,单相机双棱镜全景三维数字图像相关方法的主要优点如下:首先,基于凸面镜的反射成像可得到圆管内表面的无盲区全景图像;其次,双棱镜的使用实现了单相机双目测量,并可同时观测待测表面相同部分;最后,该系统紧凑、易于搭建。但是,目前的系统仍具有一定的局限性。曲面反射镜会导致成像过程中的畸变,在测量过程中还存在边缘效应。这也是形貌和变形结果的最大误差都出现在视场边缘的原因。此外,总视场受限于凸面镜的几何结构,想要扩大测量范围可以采用分段式测量,并通过图像拼接技术得到完整的长管道变形场。目前,所提方法仅在实验室中对试件进行静态或准静态加载时取得了较好的结果,未来将该方法应用于动态或高温等环境下的变形测量。

作者贡献声明:

代祥俊:测量方法的提出,项目管理;
马衍成:测量实验设计及论文构思和撰写;
温清风:数据整理和分析;
隋顺顺:论文审核与编辑;
陈保泽:测量实验数据分析;
王亚琪:方法验证。

- [4] GÓRSZCZYKJ, MALICKIK, ZYCHT. Application of digital image correlation (DIC) method for road material testing[J]. *Materials*, 2019, 12(15): 2349.
- [5] DAI X J, YE H Y, YANG W, *et al.* Mechanical behaviors of inner and outer sidewalls of honeycomb cores subjected to out-of-plane compression [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 127: 107659.
- [6] SWAMINATHAN B, ABUZAIID W, SEHITOG-LU H, *et al.* Investigation using digital image correlation of Portevin-Le Chatelier Effect in Hastelloy X under thermo-mechanical loading [J]. *International Journal of Plasticity*, 2015, 64: 177-192.
- [7] XUE Y, CHENG T, XU X H, *et al.* High-accuracy and real-time 3D positioning, tracking system for medical imaging applications based on 3D digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*

- ing, 2017, 88: 82-90.
- [8] ORTEU J J, BUGARIN F, HARVENT J, *et al.* Multiple-camera instrumentation of a single point incremental forming process pilot for shape and 3D displacement measurements: methodology and results [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(4): 625-639.
- [9] SIEBERT T, TRAN V. *Multi-camera DIC Offers New Dimensions in Material Testing* [M]. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, Volume 3. Cham: Springer International Publishing, 2014: 325-330.
- [10] MALOWANY K, MALESA M, KOWALUK T, *et al.* Multi-camera digital image correlation method with distributed fields of view [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 198-204.
- [11] LI J R, XIE X, YANG G B, *et al.* Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 19-25.
- [12] CHEN F X, CHEN X, XIE X, *et al.* Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(9): 1044-1052.
- [13] CHEN X, YANG L X, XU N, *et al.* Cluster approach based multi-camera digital image correlation: Methodology and its application in large area high temperature measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57: 318-326.
- [14] MALESA M, MALOWANY K, PAWLICKI J, *et al.* Non-destructive testing of industrial structures with the use of multi-camera Digital Image Correlation method [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 69: 122-134.
- [15] MALOWANY K, PIEKARCZUK A, MALESA M, *et al.* Application of 3D digital image correlation for development and validation of FEM model of self-supporting arch structures [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1305.
- [16] CANDAU N, PRADILLE C, BOUVARD J L, *et al.* On the use of a four-cameras stereovision system to characterize large 3D deformation in elastomers [J]. *Polymer Testing*, 2016, 56: 314-320.
- [17] ROSSI M, FABRICE P. Identification of the plastic behaviour in the post-necking regime using a three dimensional reconstruction technique [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 504-506: 703-708.
- [18] 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.
- [19] SOLAV D, MOERMAN K M, JAEGER A M, *et al.* MultiDIC: an open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 30520-30535.
- [20] SOLAV D, MOERMAN K M, JAEGER A M, *et al.* A framework for measuring the time-varying shape and full-field deformation of residual limbs using 3-D digital image correlation [J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2019, 66(10): 2740-2752.
- [21] 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.
- [22] LEBLANC B, NIEZRECKI C, AVITABILE P, *et al.* *Surface Stitching of a Wind Turbine Blade Using Digital Image Correlation* [M]. *Topics in Modal Analysis II*, Volume 6. New York, NY: Springer New York, 2012: 277-284.
- [23] SRIVASTAVA V, BAQERSAD J. An optical-based technique to obtain operating deflection shapes of structures with complex geometries [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 128: 69-81.
- [24] BADEL P, GENOVESE K, AVRIL S. 3D residual stress field in arteries: novel inverse method based on optical full-field measurements [J]. *Strain*, 2012, 48(6): 528-538.
- [25] GENOVESE K, CORTESE L, ROSSI M, *et al.* A 360-deg Digital Image Correlation system for materials testing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 82: 127-134.
- [26] PAN B, CHEN B. A novel mirror-assisted multi-view digital image correlation for dual-surface shape and deformation measurements of sheet samples [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 512-520.
- [27] CHEN B, PAN B. Mirror-assisted multi-view digital image correlation: Principles, applications and implementations [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149: 106786.
- [28] GE P X, WANG H Q, ZHANG Q, *et al.* Mirror-

- assisted multiview DIC for 360° panoramic large deformation measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106673.
- [29] ZHU F P, TAO J, LU R Z, *et al.* Advanced self-compensated, high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting and dual-reflector imaging techniques [J]. *Measurement*, 2021, 174: 109024.
- [30] 张越, 张宁, 徐熙平, 等. 融合结构光的折反射全景单目视觉测距 [J]. *光学 精密工程*, 2024, 32 (4): 490-503.
- ZHANG Y, ZHANG N, XU X P, *et al.* Catadioptric omnidirectional monocular visual distance measurement method integrating structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32 (4): 490-503. (in Chinese)
- [31] WEN Q F, DAI X J, QI J K, *et al.* Coaxial panoramic 3D-DIC system for full inner surface deformation measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 179: 108264.
- [32] LI J R, DAN X Z, XU W, *et al.* 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 95: 1-7.
- [33] 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.
- [34] 原天宇, 代祥俊, 杨福俊. 单目立体视觉中的系统误差与棱镜位姿对视场的影响评估 [J]. *光学学报*, 2024, 44(8): 0812004.
- YUAN T Y, DAI X J, YANG F J. Influence evaluation of systematic errors and prismatic postures on field of view in monocular stereo vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(8): 0812004. (in Chinese)

作者简介:



马衍成(2001—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事数字图像相关方法的研究。E-mail: mycheng2001@163.com.cn

通讯作者:



代祥俊(1980—),男,安徽巢湖人,博士,教授,2016年于东南大学获得博士学位,主要从事光测实验力学方面的研究。E-mail: daixiangjun@sdut.edu.cn