

文章编号: 1001-4888(2024)03-0356-11

内外全景变形测量多镜面辅助数字图像相关方法*

徐孟乔, 温清凤, 马衍成, 张伟玲, 代祥俊

(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东淄博 255000)

摘要: 为实现管状结构内外全景变形的同时测量, 本文发展了一种可变姿态多镜面辅助数字图像相关方法。测量系统由共轴成像系统和 3 个可变姿态光学反射镜及必要的冷光源组成, 通过合理布置反射镜的位置并调整其姿态, 使管道内外壁各部分同时成像于相机靶; 共轴采集系统的使用保证了 2 个相机均能够观测到所有待测区域; 将采集到的图像进行相关计算并经过坐标转换后, 可得到内外壁的全景形貌和三维变形分布。形貌和变形验证实验证明了该方法的准确性和有效性。

关键词: 全景测量; 数字图像相关; 内外壁变形

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-222

0 引言

三维数字图像相关方法(Three-Dimensional Digital Image Correlation, 简称 3D-DIC)因其可测得物体表面形貌和全场三维变形, 同时具有非接触性、实验装置易于搭建、环境敏感度低等优点, 在土木^[1]、材料^[2-3]、机械^[4]、交通^[5]、医学^[6]等诸多领域得到了广泛的应用。该方法基于双目立体视觉原理和数字图像相关算法, 实现对三维空间的位移和应变测量。该方法的关键技术主要包括: 图像采集、相机标定、图像匹配、三维重建和三维变形计算^[7]。然而, 传统 3D-DIC 系统由于经典相机的视场(FOV)有限(一般为 30°~60°), 不适合宽视场范围的三维变形测量, 更无法进行全景测量。

为扩大变形测量的视场, 研究人员提出了不同的方法和策略, 如多相机法、双镜面辅助法和旋转策略等。基于多相机的方法即采用 4 个或更多的相机同时采集物体表面的图像, 以形成 1 个圆形的相机链或组成多个 3D-DIC 测量系统^[8]。通过校准法或重叠区域法, 可以将各个相机或系统得到的结果统一到一个坐标系下, 进而得到全周形貌和变形场。但由于价格成本和同步等问题, 使该方法难以应用于动态测量。镜面辅助方法因其低成本和易于实现而被研究人员应用于不同领域^[9-11]。一般来说, 镜面辅助 3D-DIC 系统由 2 个相机和 2 个平面镜组成。相机垂直或水平放置于物体的前面, 而平面镜以适当角度放置于物体背面。通过镜面反射, 相机可同时采集得到背面和正面的左右视图, 经过相关计算即可实现全周形貌和变形的测量。旋转策略是另一种解决方案, 大致可分为 2 类: 相机旋转和被测对象旋转^[12-13]。这 2 种方法都使用单台相机或 3D-DIC 系统来测量变形, 不同之处在于, 相机旋转时物体是固定的, 相机或系统围绕物体旋转; 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。该方法也只能用于静态或准静态条件。此外, 借助于棱台反射镜等其他光学元件也可以实现管道内壁表面的全景变形测量。

上述方法虽然在不同的场景已经有了较好的应用, 但对于管状结构均无法实现内部与外部形貌和

* 收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12172200)

通信作者: 代祥俊(1980-), 男, 博士, 教授。主要研究领域为光测力学。Email: daixiangjun@sdut.edu.cn

变形的同时测量。为解决这一问题,本文发展了一种可变姿态多镜面辅助数字图像相关方法,采用 3 个可变姿态光学反射镜和共轴双相机成像系统,一次拍照即可获得管状结构内外壁表面全景图像。通过经典的 3D-DIC 算法实现不同区域的形貌和变形计算,再经坐标转换,从而得到内外壁的全景形貌和三维变形分布。

1 测量系统与基本原理

1.1 测量系统

多镜面辅助数字图像相关系统主要由 3 个平面反射镜、2 个工业相机和 1 个分光棱镜组成,如图 1 所示。2 个工业相机构成 1 个双目立体数字图像相关系统。与传统 3D-DIC 系统不同的是,在相机和反射镜之间放置 1 个半反射和半透射的分光棱镜。2 个相机的光轴呈 90°,分别位于棱镜左侧和后侧,构成 1 个共轴立体成像系统。为了确保 2 个相机采集到图像的一致性,2 个相机到棱镜的距离、镜头的焦距和光圈都是相同的。3 个反射镜左中右对称布置于待测物体下方,分别反射内外壁各 1/3 区域。同一反射镜将内外壁同一方位 1/3 区域的像反射,并通过分光棱镜后,分别成像于 2 个光轴正交的相机 A、B 的靶面上。

1.2 数字图像相关方法

在传统的 3D-DIC 技术中,三维位移测量包括 3 个步骤:相机标定、相关匹配和三维重建。相机标定在 3D-DIC 系统中起着重要的作用,它可以同时确定 2 个相机的内参和外参。标定时一般将标定板放在待测物体表面附近,采集不同姿态下的标定板图像。本研究中由于反射镜的使用,相机对着反射镜中的像成像,因此标定时标定板应放置于反射镜附近。表 1 和表 2 分别给出了 2 个相机的内参和外参标定结果。

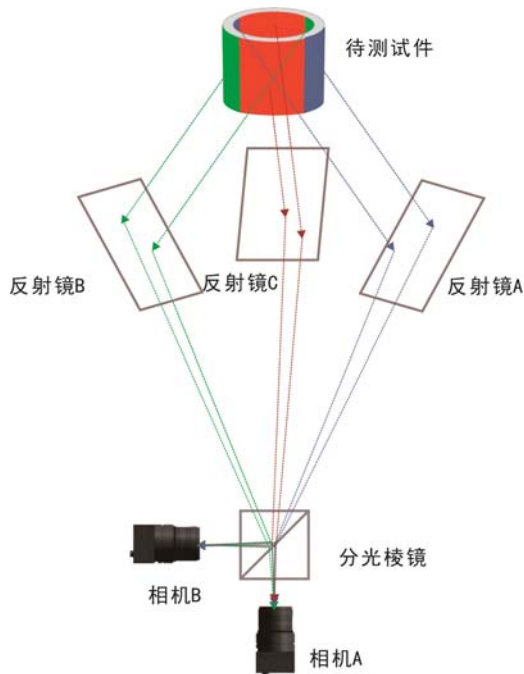


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed system

表 1 内部参数标定结果

Tab. 1 Internal parameter calibration data

内部参数	相机 A	相机 B
主点坐标 x/pixel	1012.32	1029.21
主点坐标 y/pixel	536.87	533.06
焦距 x/pixel	5052.18	4694.70
焦距 y/pixel	5036.47	4958.05
畸变	-0.2988	-0.1939

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/ $^\circ$	-1.8340	-6.3102	0.6662
平移向量/mm	9.4980	-1.1004	-3.7797

标定好 2 个相机的内参和外参即确定了空间坐标系中物点同它在图像平面上像点之间的对应关系,接下来便可进行三维形貌的重建和变形计算。加载前先拍摄一组图像作为参考图像,加载后记录一

系列变形图像作为目标图像。在参考图像中选择1个或多个感兴趣的区域,并选择1个正方形子区来跟踪其在目标图像中的对应位置。根据图像上对应像素点的二维图像坐标可重建出点的三维空间坐标,从而实现三维形貌重建。计算感兴趣区域内点变形前后的坐标差即可得到该点的三维位移。值得注意的是,为了实现对内外曲面的全周360°形貌重构和位移计算,需要在拍摄的2组图像中根据提前设定好的标记点将内壁和外壁分别均匀分为3个区域(如图2所示),然后对每一个区域分别计算,最终得到管道内外壁全周的三维形貌和位移场。

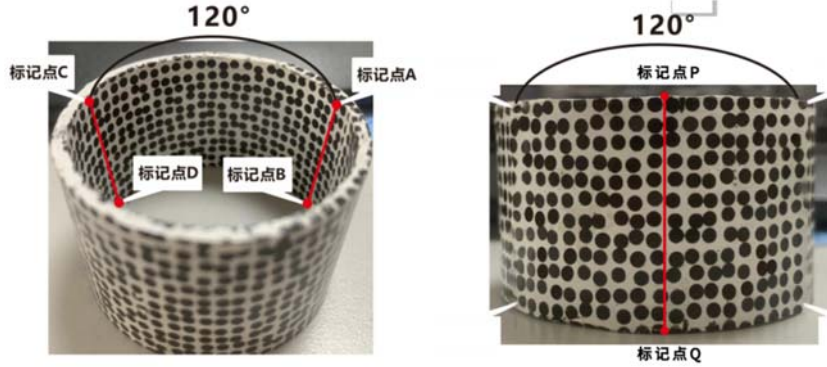


图2 管道内外标记点位置

Fig. 2 Location of marking points inside and outside the pipe

图像匹配的任务是寻找由2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。为了实现图像的精确匹配,使用式(1)给出的二阶形函数进行匹配计算。

$$\begin{aligned} u(x, y) &= u_0 + u_x \Delta x + u_y \Delta y + u_{xx} \Delta x^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y + u_{yy} \Delta y^2 \\ v(x, y) &= v_0 + v_x \Delta x + v_y \Delta y + v_{xx} \Delta x^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y + v_{yy} \Delta y^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Δx 、 Δy 为点 δ 到参考图像子区中心的距离; u_0 、 v_0 分别为参考图像子区中心在 x 、 y 方向上的位移; u_x 、 u_y 、 v_x 和 v_y 为图像子区的位移梯度; u_{xx} 、 u_{xy} 、 u_{yy} 、 v_{xx} 、 v_{xy} 和 v_{yy} 为图像子区的二阶位移梯度。

采用归一化的最小平方距离相关函数 ZNSSD (Zero-Normalized Sum of Squared Differences Criterion) 评价变形前后图像子区的相似程度,其表达式为^[14]

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

式中: $f(x_i, y_j)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 分别为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 分别为参考子集和变形子集的平均灰度; $p = [u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y}]^T$ 为待求的变形参数向量。

立体匹配策略对于3D-DIC中的相关计算非常重要。图3给出了本研究中使用的立体匹配步骤。由于计算过程中不存在增量相关性,因此采用该策略可避免误差积累,鲁棒性更好。

1.3 成像模型

根据平面镜成像的基本原理,物体上任意一点 $P(x, y, z, 1)$ 发出的光线经平面镜反射进入相机,将相应的反射光线向镜面方向对称延伸,即可得到虚像点 $P_v(x_v, y_v, z_v, w)$ 。通过光线追踪可确定虚拟相机的位置,再经反射变换即可重建出管壁的几何形状和变形。

实验前,在反射镜表面预制好散斑,通过传统的三维数字相关方法测得散斑的三维坐标。鉴于反射镜表面是平面,通过其中3个点的坐标即可确定其方程。假设3个点的坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 和 (x_3, y_3, z_3) ,则平面方程可表示为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

式中的系数 A 、 B 、 C 、 D 可由式(4)计算得到

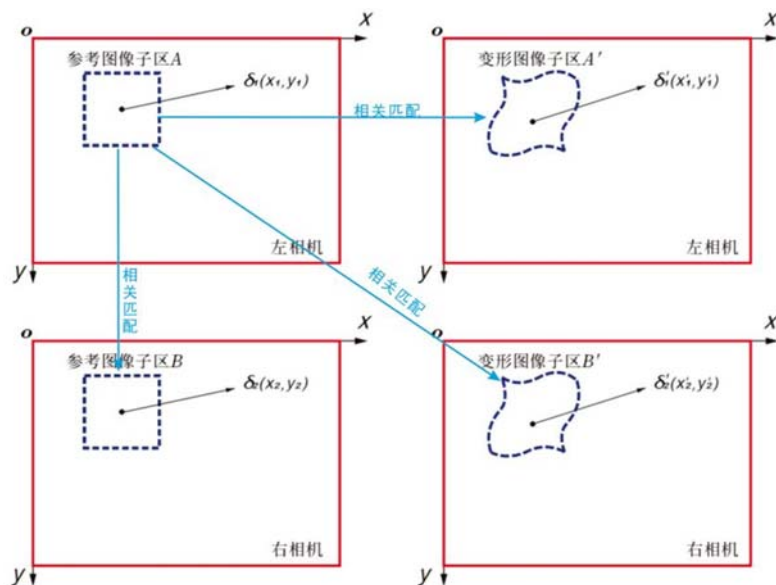


图 3 3D-DIC 位移计算步骤

Fig. 3 Procedure of displacement calculation in 3D-DIC

$$\begin{aligned}
 A &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2) \\
 B &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2) \\
 C &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \\
 D &= -x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) - x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) - x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1)
 \end{aligned} \tag{4}$$

镜面的法向量和点到镜面的距离可以由式(5)和式(6)求出

$$\vec{n} = \frac{(A, B, C)^T}{\|(A, B, C)^T\|} = (x_n, y_n, z_n, D) \tag{5}$$

$$d = \frac{D}{\|(A, B, C)^T\|} = x \cdot x_n + y \cdot y_n + z \cdot z_n + D \tag{6}$$

根据反射镜成像特点,实像和虚像连线被镜面垂直平分,可以得到如下关系式

$$[(x_v, y_v, z_v, w) + (x, y, z, 1)]/2 = (x, y, z, 1) - (x_n, y_n, z_n, 0) \cdot d \tag{7}$$

式(7)即为实点和其虚像点之间的位置关系。

2 实验验证

为验证所提出方法的有效性和准确性,本文开展了形貌和变形 2 项实验。实际实验时采用的测量系统如图 4 所示,2 个配有 35mm 定焦镜头的工业相机(UI-1540LE-M-GL,1024pixel×1024pixel)用于图像采集,1 个半反射半投射镜片用于与 2 个相机构建共轴成像系统。在反射镜的边缘区域预先制作了散斑图案,用于确定镜面方程。

本文所用到的左中右 3 个反射镜的平面方程分别为

$$\begin{aligned}
 \text{左: } &4.256x + 8.267y - 6.248z + 0.154 = 0 \\
 \text{中: } &1.214x - 3.214y - 4.054z + 3.246 = 0 \\
 \text{右: } &7.298x - 9.264y - 2.541z - 0.758 = 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

实验采用的试样为外径 60mm、内径 58mm、长度 20mm 的圆管,如图 5 所示。实验前在待测管道内外壁上预制不规则散斑作为形貌和变形信息的载体,同时将试样的内壁和外壁分别均匀地分成 3 个相等区域:前表面、左后表面及右后表面。散斑的制作可以采用喷涂法和水转印法等。本文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。

如图 2 所示,每个区域分别占内壁或外壁圆周的 120°,在区域的分割处提前做好标记点以便于区

分。采用共轴成像系统可从反射镜中捕捉到管道内外壁表面的散斑信息(图6),从图中可以看出,管道内外壁的全周360°都能通过在反射镜中成像,并最终由工业相机捕捉到。

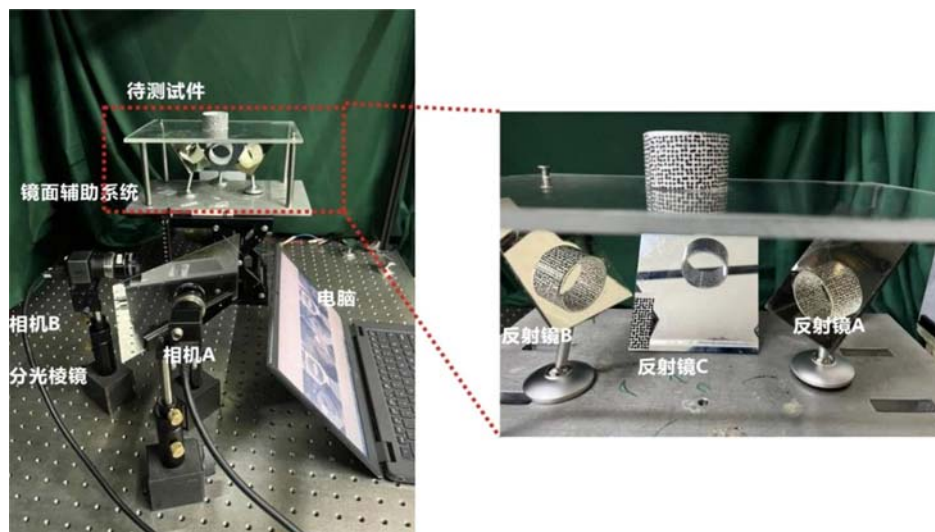


图4 实际测量系统

Fig. 4 Actual experimental set-up

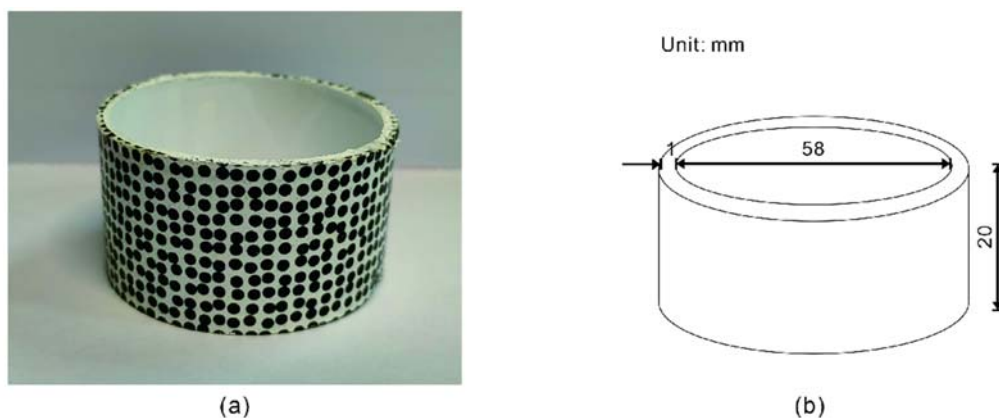


图5 (a)带散斑的圆管试件;(b)试件尺寸示意图

Fig. 5 (a) pipe with speckle pattern; (b) geometric dimension

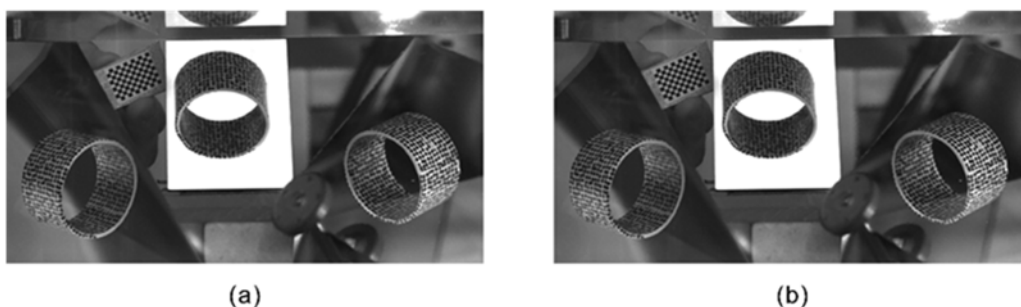


图6 系统成像图:(a)相机A;(b)相机B

Fig. 6 Images obtained by the proposed system: (a) camera A; (b) camera B

2.1 形貌测量

采用图4所示的测量系统,通过一次测量即可实现管道内外壁的形貌重构,如图7所示。图7(a)、(b)分别为管道内壁和外壁的三维形貌。为了验证管道内外壁形貌测量的精度,根据管道的出厂数据,建立1个标准管道内外壁模型,同时和测得的形貌数据作差,可得到内外壁形貌的绝对误差,分别如图7(c)、(d)所示,从图中可以看出,管道内壁的误差范围较外壁误差大。造成此种现象的原因为管道

内外壁分别反射到镜子中,内外壁的各个点到相机焦点的距离是不绝对相同的,因此导致内壁后部分区域的成像效果较其他区域相比有差别。通过图7(c)、(d)的误差云图还可以发现,外壁的形貌最大绝对误差为0.035mm,内壁的最大误差为0.061mm,大部分位置最大绝对误差在0.025mm以内,证明了该系统的有效性和准确性。

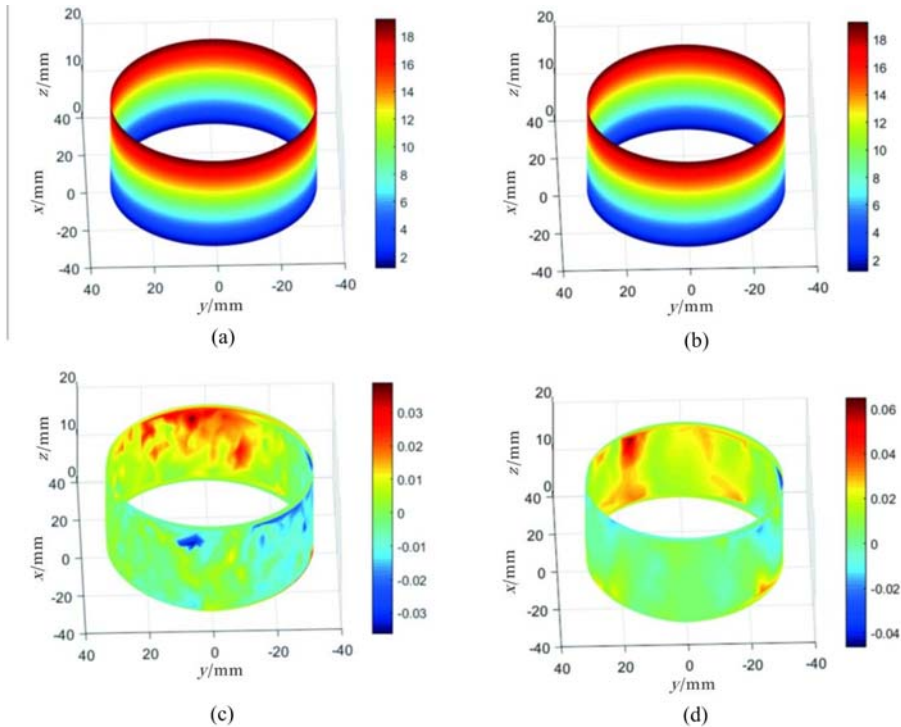


图7 管道形貌测量:(a)外壁形貌图;(b)内壁形貌图;(c)外壁误差云图;(d)内壁误差云图

Fig. 7 Shape measurement: (a) external surface; (b) internal surface;
(c) absolute error of external surface; (d) absolute error of internal surface

2.2 变形测量

将本文提出的方法应用于空心圆管轴向压缩时内外壁变形测量上,以验证其变形测量精度与有效性。变形测量验证实验的试件为外径60mm、内径58mm、长度20mm的铝合金圆管,在距离底部15mm处预制了一直径为2mm的圆孔缺陷。材料的弹性模量为68.9GPa,泊松比为0.33。采用岛津AGS-J万能试验机作为加载装置,试验机的最大量程为10kN,实验时加载速度设置为1mm/min。如图8所示,将镜面辅助系统及带缺陷的待测试件置于万能试验机实验台上,并调整好镜子角度及相机位置。施加载荷之前,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外壁的图像作为目标图像,采集速率为每秒1帧。采用第1节所述方法进行计算可得到不同载荷作用时的内外壁全景应变场。

图9、图10分别给出了4个典型轴向载荷作用下外壁和内壁的全景轴向应变变化云图,载荷大小分别为4.5kN、5.0kN、5.5kN和6.0kN。通过应变变化云图可以看出,随着载荷的增加,管道外壁全周整体的应变绝对值也在增加;所有的应变数值均为负值,即产生的均为压应变,且底边应变数值偏大;在圆孔缺陷附近区域应变值突然增大。同时随着载荷的增加,此应变集中区和其他区域的应变绝对值差距明显增加,应变集中现象更加明显,且区域呈现扩散趋势。对比图9和图10可以发现,圆筒在轴向压缩载荷作用下内外壁全景轴向应变云图的分布与变化趋势相一致,数值大小处于同一区间。

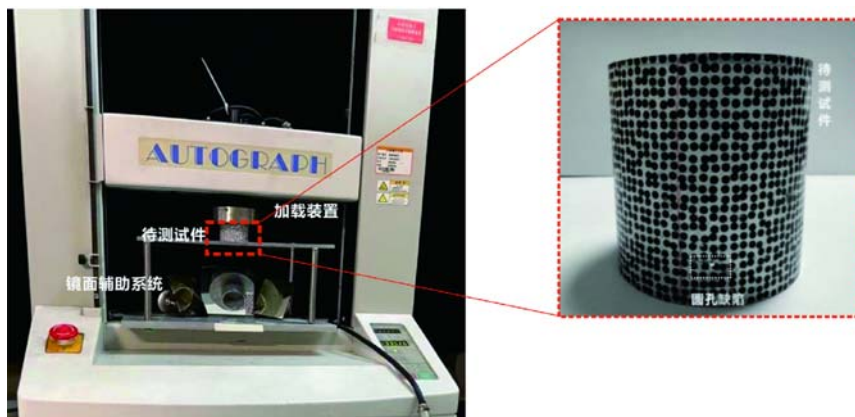


图8 实验系统及带缺陷圆管

Fig. 8 Experimental set-up and pipe with defect

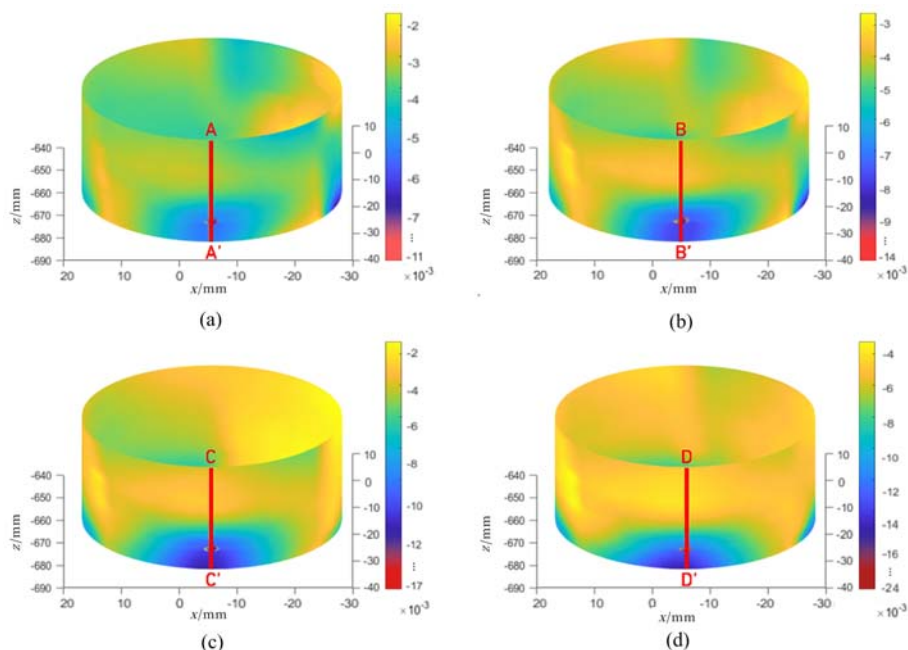


图9 不同载荷下外壁轴向应变分布图:(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

Fig. 9 Axial strain distribution of the external surface under different loading;

(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

本文还通过有限元仿真计算了压缩时管道内外壁的变形,将其与实验结果作比较以进一步验证方法的有效性。有限元计算时选用了四面体单元进行网格划分,总共划分了101368个单元。

图11和图12分别为管道外壁和内壁轴向应变分布图,从图中可以看出,在缺陷所在位置存在不同于其他位置处的应变集中现象,且随着压力的增加,应变集中现象更加明显,该处产生的应变值与其他区域相比,数值更大。该趋势与实验测量得到的趋势及大小大体相同。需要说明的是,为了清楚观察管道内壁处的应变分布,图12使用了内壁的剖面图。

此外,还选择典型的横截面定量,对不同载荷下实验测量和仿真计算得到的内外壁应变大小进行了比较。如图9、图10所示,将载荷大小为4.5kN、5.0kN、5.5kN和6.0kN时管壁同一横截面位置分别标记为A-A'、B-B'、C-C'和D-D'。实验结果和有限元计算结果得到的外壁和内壁应变对比曲线分别如图13和图14所示。从对比曲线可以看出,同一位置处实验与仿真得到的应变变化呈相同的变化趋势,在缺陷处均出现明显的应变集中。通过对比数据可以得到4.5kN、5.0kN、5.5kN和6.0kN载荷下内壁应变最大相对误差分别为14.12%、5.18%、4.27%和3.86%,外壁应变最大相对误差分别为3.26%、

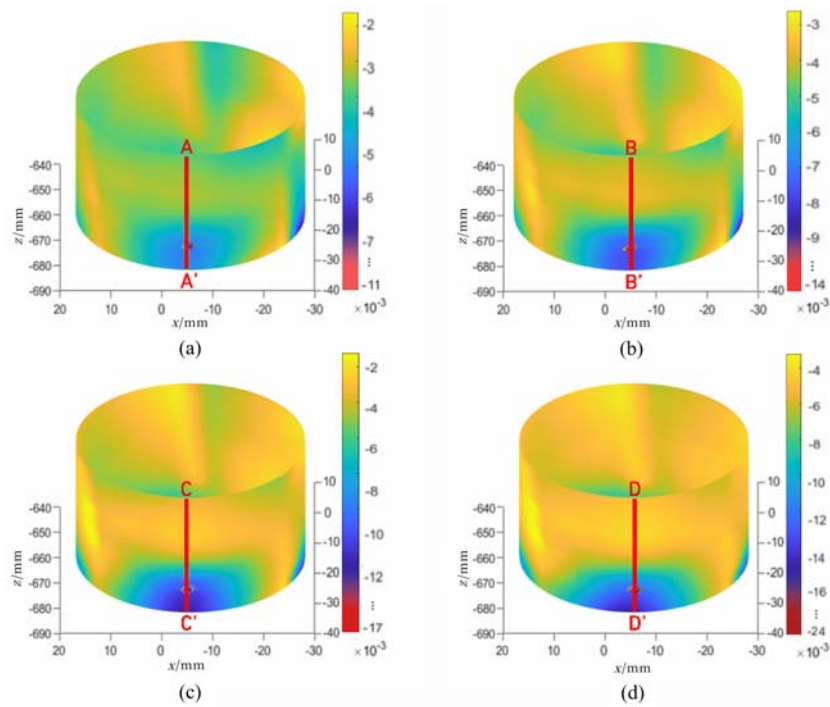


图 10 不同载荷下内壁轴向应变分布:(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

Fig.10 Axial strain distribution of the internal surface under different loading:

(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

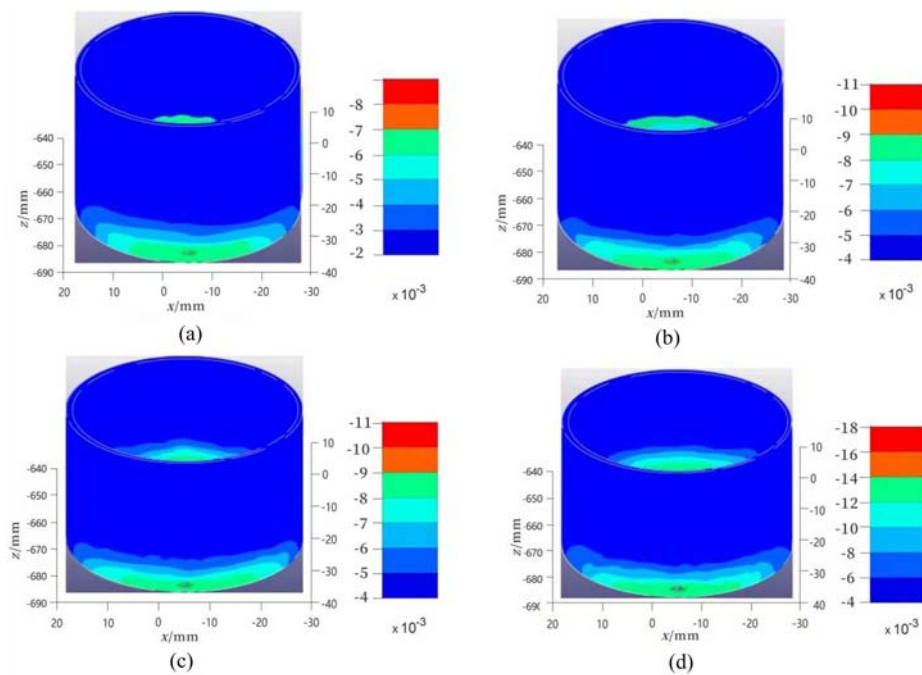


图 11 不同载荷下外壁轴向应变分布有限元结果:(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

Fig.11 Displacement of the external surface obtained by

Finite element method (FEM) under different loading:

(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

2.87%、3.91%和 3.09%。除了载荷为 4.5kN 时内壁最大误差超过 10%外,其他误差均小于 6%。需要说明的是,载荷为 4.5kN 时内壁的应变最大误差仅发生在试件边缘附近局部范围内,其他区域最大相对误差小于 6%。由此可见,实验结果与有限元计算结果符合较好。

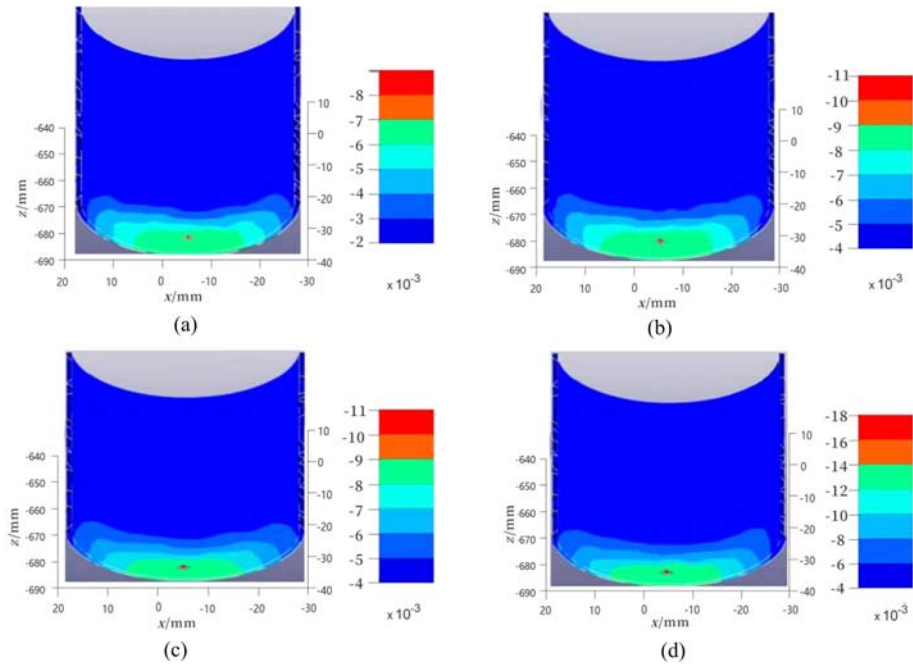


图 12 不同载荷下内壁轴向应变分布有限元结果:(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

Fig. 12 Axial strain of the internal surface obtained by FEM under different loading:

(a)4.5kN; (b)5.0kN; (c)5.5kN; (d)6.0kN

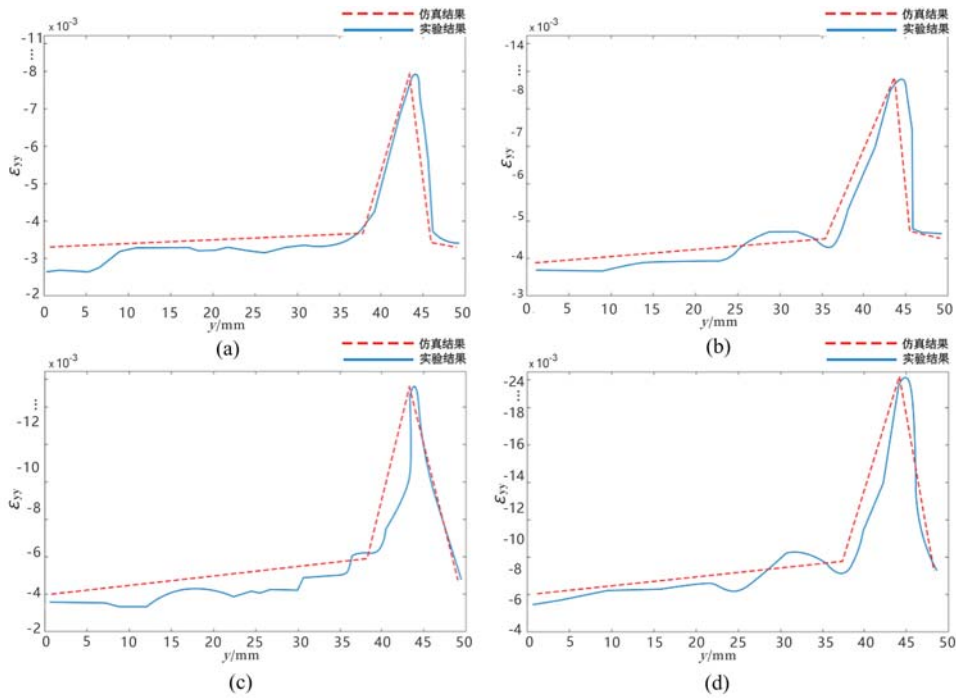


图 13 内壁实验与仿真应变对比曲线:(a)A-A'; (b)B-B'; (c)C-C'; (d)D-D'

Fig. 13 Comparison of strains of the internal surface obtained by the proposed method and FEM:

(a)A-A'; (b)B-B'; (c)C-C'; (d)D-D'

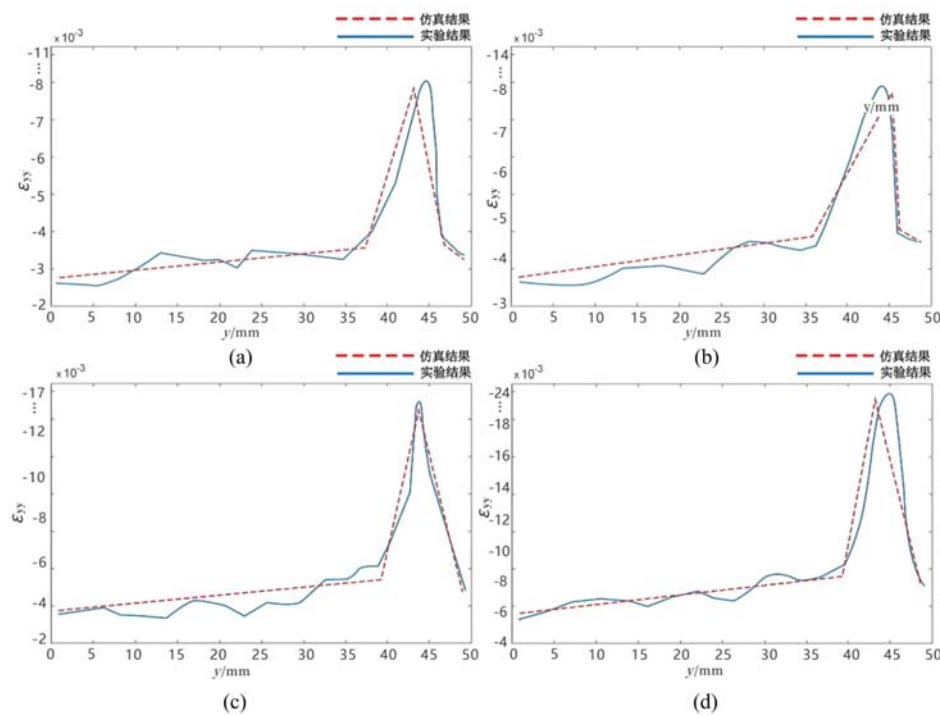


图 14 外壁实验与仿真应变对比曲线:(a)A-A'; (b)B-B'; (c)C-C'; (d)D-D'

Fig. 14 Comparison of strains of the external surface obtained by the proposed method and FEM:

(a)A-A'; (b) B-B'; (c)C-C'; (d) D-D'

3 结论

本文发展了一种可变姿态多镜面辅助三维数字图像相关方法,以实现管状结构内外全景形貌变形测量。通过 3 个平面镜分别反射管道内外壁的表面信息,采用传统的相关算法进行图像匹配和变形计算,经过坐标转换后,实现内外壁全景形貌和变形的重建。形貌测量实验和与有限元对比的变形测量实验证明了方法的准确性和可行性。与传统三维数字图像相关方法相比,本文所发展方法的主要特点有:(1)通过 3 个反射镜扩大了测量视场。(2)通过单一测量即可同时获得圆管内外表面的全景形貌和变形信息。(3)该方法具有进行缺陷检测的潜力,如内外表面外形特征不同的空心圆柱结构缺陷检测。

参考文献:

- [1] 邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. 光学学报, 2015, 35(10):133—141 (SHAO Xinxing, DAI Yuntong, HE Xiaoyuan, et al. Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10):133—141 (in Chinese))
- [2] 王浩, 孙翠茹, 张晓川, 等. 基于数字图像相关方法的 TiO₂/PI 纳米杂化薄膜低温力学性能研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3):343—351 (WANG Hao, SUN Cuiru, ZHANG Xiaochuan, et al. Study of low temperature mechanical properties of TiO₂/PI nano-hybrid thin film based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):343—351 (in Chinese))
- [3] DAI X, YE H, 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.
- [4] 李阳, 孙晨, 陈巨兵. 基于数字图像相关方法的矿用扁平接链环模型接触变形实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(6):926—934 (LI Yang, SUN Chen, CHEN Jubing. Experimental investigation on contact deformation of mining flat type chain connector model based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(6):926—934 (in Chinese))
- [5] 刘艳, 赵威, 李秋彤, 等. 基于数字图像相关法的扣件弹条模态特征识别试验研究[J]. 实验力学, 2021, 36(6):804—816 (LIU Yan, ZHAO Wei, LI Qiutong, et al. Experimental study on the modal characteristics

- identification for the clip based on the digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(6):804–816 (in Chinese))
- [6] 叶开, 张晓川. 基于数字图像相关的血管截面变形测试方法[J]. *光电子·激光*, 2021, 32(11):1196–1203 (YE Kai, ZHANG Xiaochuan. Blood vessel cross-section deformation testing method based on digital image correlation [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2021, 32(11):1196–1203 (in Chinese))
- [7] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H W. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*[M]. New York: Springer, 2009.
- [8] SIEBERT T, TRAN V. Multi-camera DIC offers new dimensions in material testing[C]//*Proceedings of the 2014 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, 2015:325–330.
- [9] ZHU F, TAO J, LU R, 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.
- [10] CHEN B, PAN B. Mirror-assisted panoramic-digital image correlation for full-surface 360-deg deformation measurement[J]. *Measurement*, 2019, 132:350–358.
- [11] 葛朋祥, 王欢庆, 朱奕磊, 等. 基于平面镜成像的单相机数字图像相关三维全景测量[J]. *中国激光*, 2022, 49(9):92–100 (GE Pengxiang, WANG Huanqing, ZHU Yilei, et al. Single-camera digital image correlation three-dimensional panoramic measurement using reflector imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(9):92–100 (in Chinese))
- [12] SPERA D, GENOVESE K, VOLOSHIN A. Application of stereo-digital image correlation to full-field 3-D deformation measurement of intervertebral disc[J]. *Strain*, 2011, 47(Suppl. 1):572–587.
- [13] BADEL P, GENOVESE K, AVRIL S. 3D residual stress field in arteries: a method combining optical full-fields measurements and finite element reconstruction[J]. *Strain*, 2012, 48(6):528–538.
- [14] 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.

Multi-mirror aided digital image correlation for internal and external panoramic deformation measurement

XU Mengqiao, WEN Qingfeng, MA Yancheng, ZHANG Weiling, DAI Xiangjun

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: An attitude-variable multi-mirror assisted digital image correlation method was developed to achieve panoramic topography and deformation measurements on both the inside and outside of tubular structures in this paper. The measurement system consists of a coaxial imaging system, three optical mirrors with adjustable attitudes, and the required cold light source. By adjusting the reflector's position and angle, the camera is able to capture images of both the inner and outer walls of the pipeline simultaneously. Furthermore, the coaxial acquisition system ensures that every tested domain is observable by both cameras. After completing the correlation calculations and converting the coordinates, the panoramic 3D shape and deformation distribution of both the internal and external walls can be obtained. The accuracy and efficiency of the proposed method are demonstrated through validation experiments.

Keywords: panoramic measurement; digital image correlation; deformation of internal and external walls