

# 使用拍照手机的数字图像相关测量系统 在实验力学教学中的应用<sup>1)</sup>

俞立平 潘兵<sup>2)</sup>

(北京航空航天大学航空科学与工程学院固体力学所, 北京 100191)

**摘要** 为了加深对力学知识的理解以及激发学生对实验力学的兴趣, 本文介绍了基于拍照手机和二维及三维数字图像相关方法相结合的变形测试方法。首先以经典的单向拉伸实验为例, 应用拍照手机和二维数字图像相关法测量了铝合金试样的载荷-应变曲线, 并引入“补偿法”思想消除手机成像系统的成像误差以实现高精度的应变测量。随后, 利用基于单个拍照手机和伪立体视觉成像的三维数字图像相关系统测量了规则圆柱面和非规则曲面的三维形貌, 并测量了充气球体在放气过程中形貌变化和三维全场变形。实验结果直观地显示了充气球体表面在放气过程中的变化规律。这种易于获取、低成本且便携性好的数字图像相关测量系统不仅大大减少了系统搭建的硬件投入, 更提高了实际测量的便利性和效率, 因此有助于在条件有限的高等院校和研究机构中开展实验力学教学。

**关键词** 数字图像相关法, 智能手机, 变形测量, 实验教学

中图分类号: O348.1 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-20-211

## APPLICATIONS OF CAMERA PHONE-BASED DIGITAL IMAGE CORRELATION SYSTEM IN THE TEACHING OF EXPERIMENTAL MECHANICS<sup>1)</sup>

YU Liping PAN Bing<sup>2)</sup>

(Institute of Solid Mechanics, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** To help students better understand mechanics and to stimulate students' interest in experimental mechanics, this paper proposes experimental methods based on the camera phone imaging and the digital image correlation for two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) deformations measurement. Taking the typical tensile test as an example, we first determine the load-strain curve of an aluminum specimen using a camera phone and the two-dimensional digital image correlation (2D-DIC). To achieve the high-precision strain measurement, the idea of “compensation” is introduced to eliminate the errors associated with the camera phone image. Subsequently, the three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) system based on a single camera phone is developed to determine the shape profiles of a cylinder and irregular surfaces, as well as the topography change and the 3D full-field deformation of the inflatable sphere during the deflation process. The experimental results intuitively show the change of the surface of the inflatable sphere during the entire deflation process. The cost-effective and ultra-portable camera phone-based DIC systems not only greatly decrease the hardware investment in the system construction, but also increase the convenience and the efficiency of 3D deformation

2020-05-20 收到第 1 稿, 2020-06-16 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金资助项目 (11925202, 11872009)。

2) 潘兵, 教授, 主要研究方向为实验力学方法及其应用。E-mail: panb@buaa.edu.cn

**引用格式:** 俞立平, 潘兵. 使用拍照手机的数字图像相关测量系统在实验力学教学中的应用. 力学与实践, 2021, 43(2): 294-301

Yu Liping, Pan Bing. Applications of camera phone-based digital image correlation system in the teaching of experimental mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(2): 294-301

measurements, with a great potential in the teaching of experimental mechanics in resource-limited universities and research institutes.

**Key words** digital image correlation, smartphone, deformation measurement, experimental teaching

物体表面的位移和应变信息测量是实验力学的基本任务之一。准确测量出材料或结构在不同加载条件下的变形信息对于材料或结构的静、动态力学性能评估和安全设计具有重要意义。通过实际的力学变形测量实验不仅可以加深学生对课堂所学力学知识的理解,还可以激发学生对力学实验的兴趣,提高学生分析和解决实际工程问题的能力<sup>[1-3]</sup>。

相对于传统的应变片电测方法,实验力学领域各种光学全场测量方法能够得到试验件表面全场位移和应变信息,因此可以对试样表面进行更加直观有效地分析。在众多非接触式测量方法中,数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法由于具有测量精度高、对隔振条件要求低、抗干扰能力强和适用测量范围广泛等突出优点,已成为当前实验力学领域最重要、最受欢迎且应用最广泛的光测力学方法<sup>[4-5]</sup>。然而,相比于应变电测法,商业的 DIC 测量系统(尤其是基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关(3D-DIC)测量系统)成本较高,不适合在资源有限的高等院校和研究机构推广。因此,发展一种易于获得、低成本、便携性好且分辨率高的 DIC 测量系统对于推广数字图像相关方法在实验力学教学中的应用具有重要意义。

考虑到具有高分辨率数字成像功能的拍照或智能手机已成为现今社会人手必备的电子产品,拍照手机可以替代传统的图像采集系统应用于实验力学教学。然而,直接采用拍照手机进行二维和三维变形测量仍存在以下困难。首先,由于拍照手机焦距短、内部温度变化大,直接使用拍照手机进行二维变形测量极易受到被测物体表面的离面位移以及手机自热影响而引起较大测量误差。其次,采用两个拍照手机进行三维变形测量存在成本增加、结构复杂和同步难度大等难点。为此,本文介绍了基于拍照手机成像和 DIC 方法的高精度且易于实现的二维和三维变形测试方法,并通过几个典型变形测量实验展示该方法的效果。首先应用拍照手机和二维数字图像相关法(2D-DIC)测量了铝合金试样在单向拉伸状态下的载荷-应变曲线,并利用“补偿法”消除了离面位移等不利因素引起的测量误差。随后,利用发展

的基于单个拍照手机和伪立体视觉成像的 3D-DIC 测量了规则圆柱面和非规则曲面的三维形貌,并测量了充气球体在放气过程中形貌变化和三维全场变形。实验结果直观地显示了充气球体表面在整个放气过程中的变化规律。

## 1 实验方法

DIC 方法是一种可对试样表面进行全场变形测量的实验技术。通过跟踪(或匹配)试样表面变形前后两幅散斑图像中感兴趣点的位置来获得该点的位移矢量。随后对试样表面所有感兴趣点进行计算,即可获得全场变形信息。其中,使用单个相机的 2D-DIC 因具有低成本和测试过程简单等优点,已被广泛用于材料和结构表面的面内变形测量。然而,2D-DIC 仅能用于平面物体的面内变形测量,不适用于曲面物体,也不能获得物体表面的离面变形。而且,2D-DIC 的测量精度极易受到物体表面的离面位移干扰而产生较大的测量误差<sup>[6]</sup>。为了克服 2D-DIC 测量范围的局限性以及提高位移和应变的测量精度,基于同步双相机的 3D-DIC 逐渐被广泛采用。

### 1.1 二维变形测量

图 1 为基于拍照手机的 2D-DIC 测量系统示意图。通过分析试样加载前后由智能手机采集得到的数字图像,可获得试样表面的面内变形信息<sup>[4]</sup>。

然而,大部分拍照手机成像镜头的焦距都固定不可调,其物理焦距通常只有几毫米。因此,拍照手机必须减小物距才能“放大”测试区域。而根据 Sutton 等<sup>[6]</sup>的研究,离面位移引起的测量误差与物距成反比关系。因此,当测试区域越小时,物距需要相应地减小以获得足够的图像信息,物体表面的离面位移引起的测量误差越大。因此,若要使用拍照手机成像系统进行高精度 2D-DIC 测量,必须消除由离面位移、成像元件自热以及镜头畸变引起的测量误差。为此,这里采用了一种基于参考试样的补偿方法<sup>[7-8]</sup>,该方法被证明能在低质量的 2D-DIC 成像系统成功消除离面位移、成像元件自热以及镜头畸变等不利因素的影响。该方法的基本原理如图 2 所示,其核心

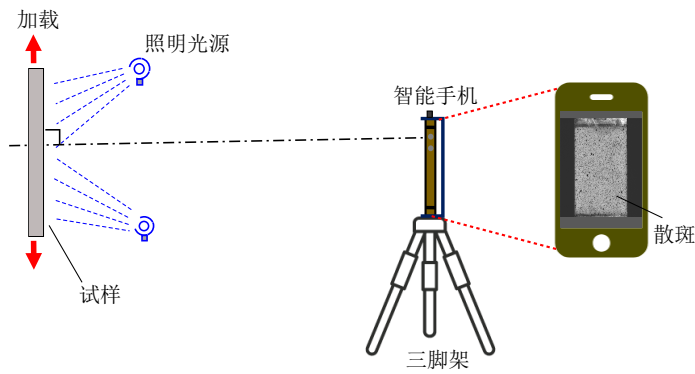


图1 基于智能手机的2D-DIC测量系统

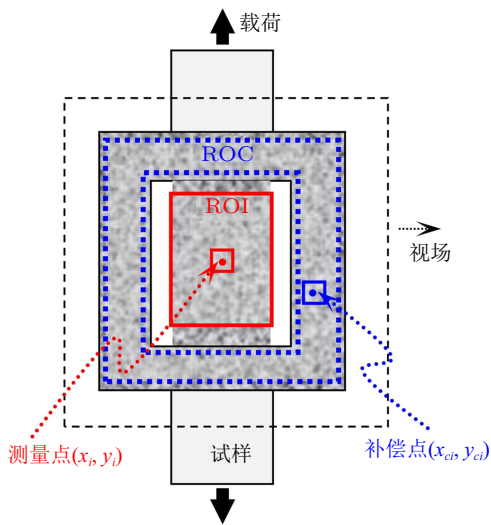
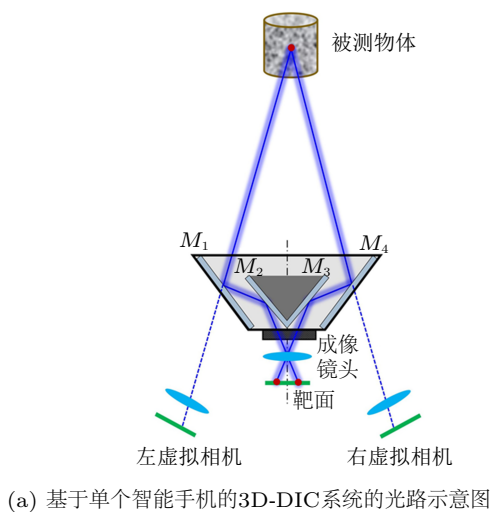


图2 补偿法原理示意图

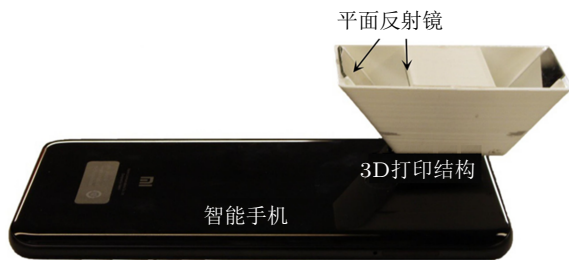
思想是利用补偿点上记录的变形信息来消除测试点所含误差。该方法的具体实现可参考文献 [7-8], 这里不再赘述。

### 1.2 三维变形测量

为了克服 2D-DIC 测量范围的局限性以及提高位移和应变的测量精度, 可采用基于单个智能拍照手机的 3D-DIC 系统。图 3 展示了该系统的示意图和照片。该系统仅由一个拍照手机和一个光学适配器组成, 该适配器主要包括四个平面反射镜 (分别表示为  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  和  $M_4$ ) 和一个 3D 打印结构。如图 3 所示, 两个内侧反射镜 ( $M_2$  和  $M_3$ ,  $30\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ) 彼此成  $90^\circ$ , 而两个外侧反射镜 ( $M_1$  和  $M_4$ ,  $30\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ) 以约  $50^\circ$  粘贴在 3D 打印结构两侧。光学适配器可以通过夹子与拍照手机连接。借助该光学适配器, 被测物体表面上一点可以通过左右两条不同的光路投影到相机靶面的左右两侧, 如图 3(a) 所示。通过调整平面反射镜之间的距离和角度可以改变靶面上投影点的位置。



(a) 基于单个智能手机的3D-DIC系统的光路示意图



(b) 已建立的基于智能手机的3D-DIC系统的照片



(c) 已建立的基于智能手机的3D-DIC系统的示意图

图3 3D-DIC系统的示意

为了准确测量试样表面的三维形貌、位移和应变，我们首先必须从相机靶面的左右图像中重建出所有测量点的空间三维坐标。然后，通过追踪这些点在变形图像中的位置进而重建出其变形后的三维坐标。最后，根据变形前后的三维坐标，我们可以计算出所有测量点的三维位移和应变。具体计算方法可参考文献 [9]。

## 2 实验示例

### 2.1 单轴拉伸实验

为了验证基于拍照手机成像系统和参考试样补偿法的 2D-DIC 方法的变形测量精度，下文将通过一个典型的单向拉伸实验来验证该方法的准确性。实验中使用的铝材试样如图 4(a) 所示，试样测试区截面长为 20 mm，宽为 4 mm。实验加载装置是一台普通万能试验机 (型号 WDW-100A，济南试验机厂)。测试中所用的手机为北京小米科技有限责任公司生产的智能手机 (Mi2S，小米，图像分辨率：3264 × 1840 像素)。实验时，先把试样安置在试验机上，然后将智能手机固定在距离试样约为 160 mm 的支座上，并保持试样表面与手机平面基本平行。选取已喷好散斑的试样中央区域作为测试区 (即 region of interest, ROI, 20 mm × 25 mm)，最后将同样做好散斑的参考试样粘贴到拉伸试样上作为补偿试样 (即 region of compensation, ROC)，如图 4(b) 所示。基于上述 2D-DIC 方法，我们可以获得 ROI 内补偿前后

的横向和纵向平均应变。为了验证补偿后的应变测量结果的正确性，在试样测试区上方和下方粘贴了两个直角应变花，并以应变花测得应变结果作为真实应变值。

加载时，先施加了 1 kN 的预拉力，记录此刻的图像作为参考图像，并将应变仪读数清零。随后试样每次加载 0.5 kN (应变约为  $9.0 \times 10^{-5}$ ) 后，采集一幅图像作为此时的变形图像，同时记录此时应变仪的读数作为应变片测得应变。最后试样加载到 8.5 kN 时 (理论上应变约为  $1.3 \times 10^{-3}$ ) 停止继续加载。由于 8.5 kN 远小于该铝材试件的屈服载荷，试件在整个加载过程中始终处于弹性变形阶段，卸载后以相同的加载方式重复了两次实验。

### 2.2 三维形貌和变形测量

为了验证基于拍照手机的单相机 3D-DIC 系统的有效性和准确性，本文开展了一系列验证实验，包括对规则圆柱体和非规则玻璃瓶表面形貌的测量以及充气球体放气过程中的三维变形测量。图 5 展示了这些验证测试的实验设置图。如图 5 所示，整个测量系统主要由一台智能手机 (Mi8，小米，图像分辨率：4032 × 3024 像素)、自制的光学适配器和一个小型三脚架组成。与传统的基于双同步相机或现有的单相机 3D-DIC 系统相比，基于智能手机的 3D-DIC 系统成本更低且便携性更好。测量过程中，仅使用智能手机的一个后置摄像头和内置的采集软件 (手动模式) 进行图像采集。具体实验如下：

(1) 三维形貌测量 (图 5(a) 和图 5(b))：选择直径约为 100.20 mm 的规则圆柱面和具有非规则表面的玻璃瓶作为测试对象。实验前，使用白色喷漆和黑色记号笔在试样表面制作好随机分布散斑图案。随后，将被测物体放置在已建立的拍照手机 3D-DIC 系统前方，工作距离约为 400 mm。实验时，利用该系统采集了被测物体的表面图像以及一系列标定图像。

(2) 三维变形测量 (图 5(c))：被测物体是一个充气的球体，直径约为 198.2 mm。实验前，使用黑色记号笔在球体表面制作随机散斑，并放在环形支撑上以保持稳定。在测试过程中，首先采集一幅图像作为参考图像，随后利用充气针对球体进行放气，在放气过程中每隔五秒采集一幅图像。测试前同样对系统进行了标定。

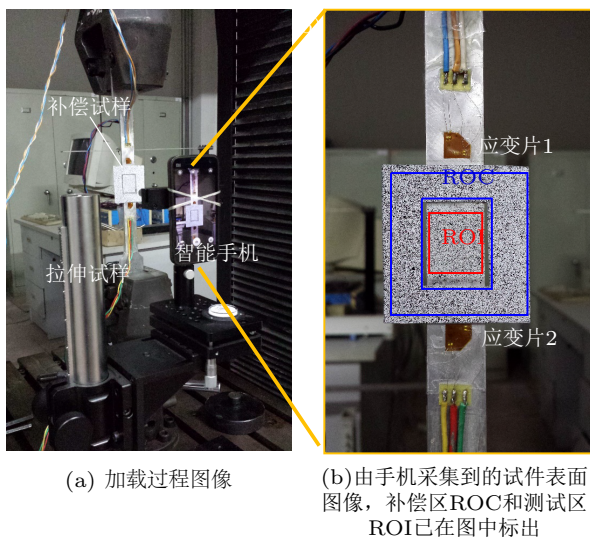


图 4 典型单向拉伸实验示意

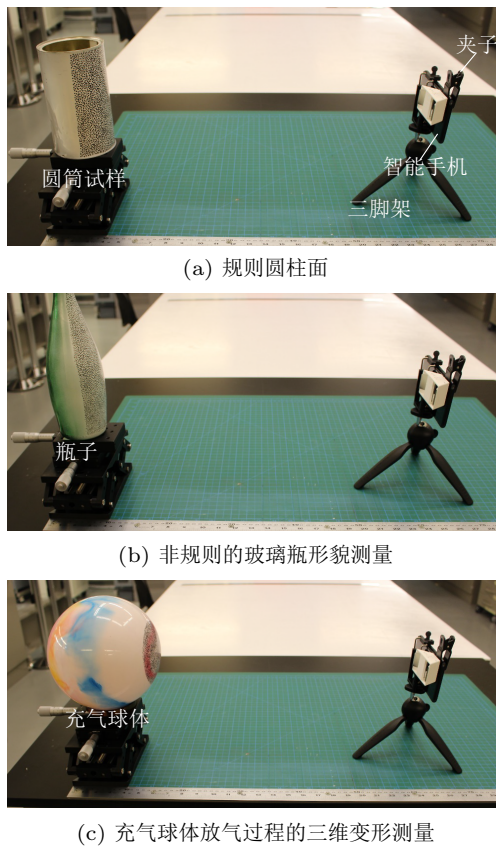


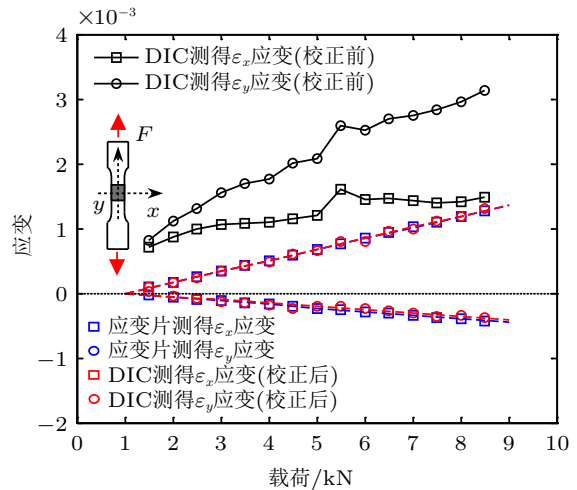
图5 实验装置图

### 3 实验结果

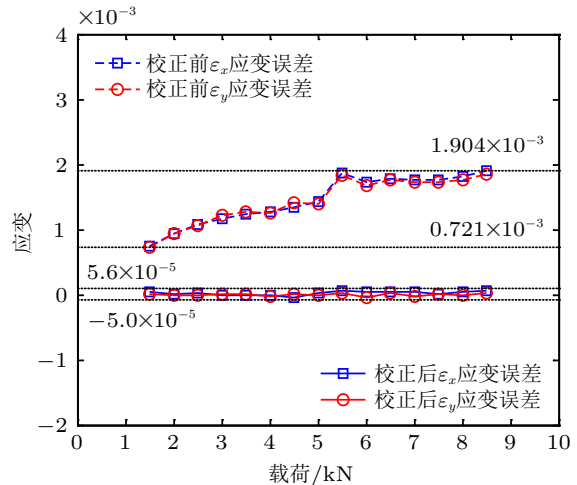
#### 3.1 单轴拉伸实验结果

通过将 1.5 kN 到 8.5 kN 载荷下获得的 15 幅图片与 1 kN 载荷时刻记录下的参考图像进行相关运算可以获得相应载荷下由 DIC 方法测得的横向和纵向应变。图 6(a) 给出了直接由 DIC 方法测得的应变值、补偿校正后的应变值以及由应变片测得应变。如图所示，补偿校正前 ROI 内由 DIC 方法测得  $x$  方向和  $y$  方向上的应变值严重偏离应变片测得应变，而且两个方向上的应变值均大于 0，这与单向拉伸应变状态严重不符。然而，补偿之后的应变值与应变片测量值基本吻合。因此，可以认为补偿之后由 DIC 测得应变结果是完全准确的。上述实验结果一方面说明了在工作距离较小时由手机成像系统直接测得应变结果严重偏离了真实应变状态；另一方面也说明基于参考试样的补偿法能有效地消除实验中可能存在的由离面位移、离面转动以及畸变等其他不利因素引起的测量误差。以应变片测量值作为参考应变值，从补偿前后由 DIC 方法测得的应变中减去应变片测量值即可认为是 DIC 测量值与真实应变值之间的相对偏差。如图 6(b) 所示，补偿校正

之前，应变误差大体上随着载荷的增加而增加，且  $x$  方向和  $y$  方向上的应变误差值在每个载荷级处基本相等。相比之下，补偿校正之后的应变相对误差则在  $-5.0 \times 10^{-5}$  到  $5.6 \times 10^{-5}$  之间随机波动。 $x$  和  $y$  方向的平均误差分别为  $(22 \pm 28) \times 10^{-6}$  和  $(-2 \pm 22) \times 10^{-6}$ 。可以看出，使用手机成像系统的 2D-DIC 方法在补偿校正之后测得的应变值是准确可靠的。



(a) 应变片测得的、由 2D-DIC 方法直接测出以及补偿校正后的轴向和横向应变与施加载荷之间关系



(b) 应变片测量结果与相应的补偿校正前后的 2D-DIC 测量值之间的相对误差

图6 应变片及 DIC 测得应变及补偿校正

#### 3.2 三维形貌和变形测量结果

图 7(a) 和图 7(b) 是重建的圆柱体和玻璃瓶表面的三维形貌。可以清楚地看到，规则圆柱体和非规则玻璃瓶表面的重建形貌特征与实际表面轮廓完全一致。通过使用最小二乘拟合法拟合圆柱表面的三维空间坐标，测得圆柱的直径估计为 101.84 mm。与通过游标卡尺确定的物理尺寸 (100.20 mm) 相比，

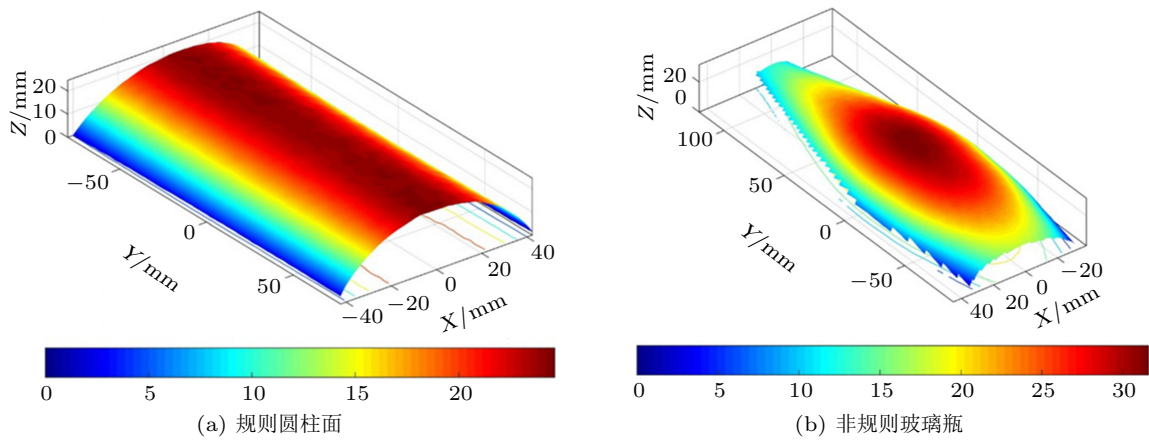


图 7 重建的三维形貌

相对误差估计仅为 1.64%，验证了基于智能手机的 3D-DIC 系统的准确性。

通过分析采集得到的球体表面图像，可以获得不同时间测试区域 (ROI, 如图 8(a) 所示) 内的三维形状、位移和变形。图 8(b)~图 8(j) 展示了不同时刻球体表面的三维形貌。从这些轮廓中，可以清楚地观察到由于放气而导致的球表面整个变形过程，即球体在放气过程中体积发生了明显的缩小。这与球体在充气过程中变化相反。为了更好地展示球的变形，在图 9 中给出了不同时刻测试区域内的径向位移场。

如图 9 所示，球体表面形貌有规律性的收缩并且缩小量随时间增加。在第 80 s 时测得的最大面内收缩约为 3 mm。需要指出的是，球体在放气过程中的径向位移矢量方向指向中心，而在充气过程则指向四周。通过使用最小二乘法拟合球表面的重建 3D 坐标，可以确定不同时刻球体的直径。通过比较放气前后的直径 (197.02 mm 和 184.59 mm) 与直接测量的直径 (198.2 mm 和 183.9 mm)，相对误差约为 0.6% 和 0.4%，验证了基于拍照手机的 3D-DIC 系统在三维变形测量中的准确性。

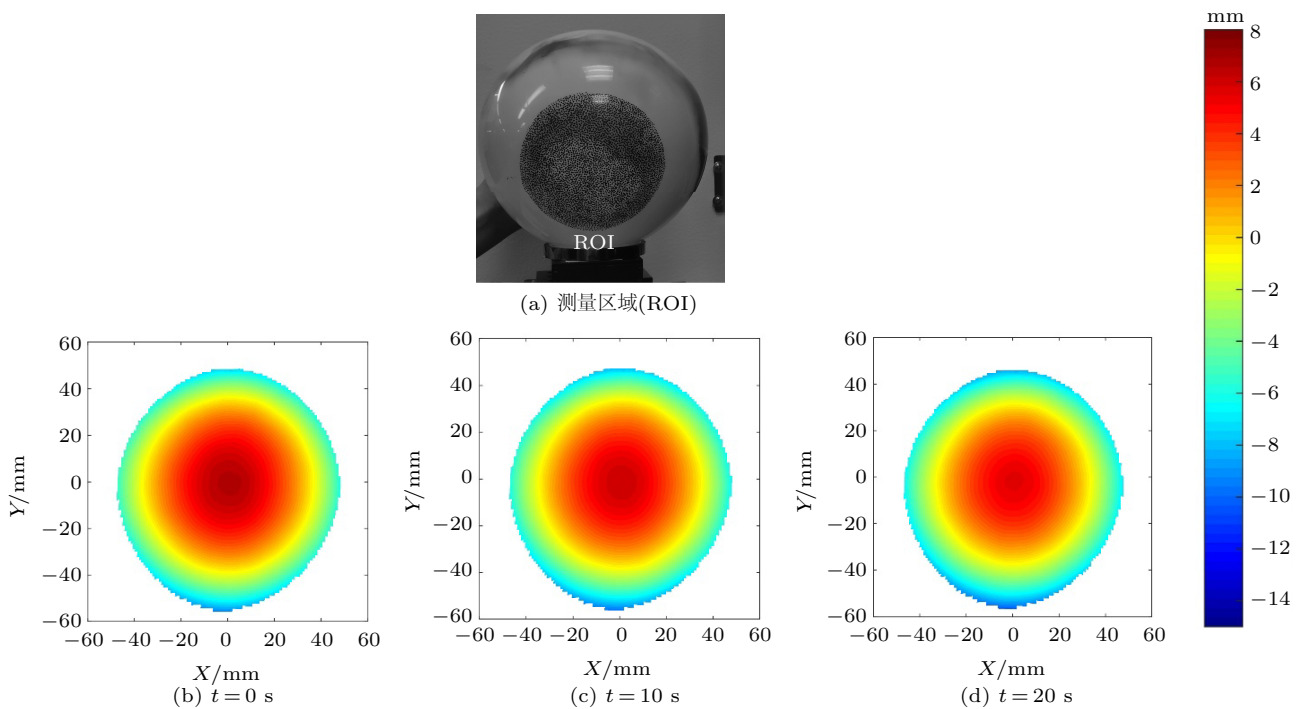


图 8 测量区域 (ROI) 和不同时刻测试区内的三维形貌变化

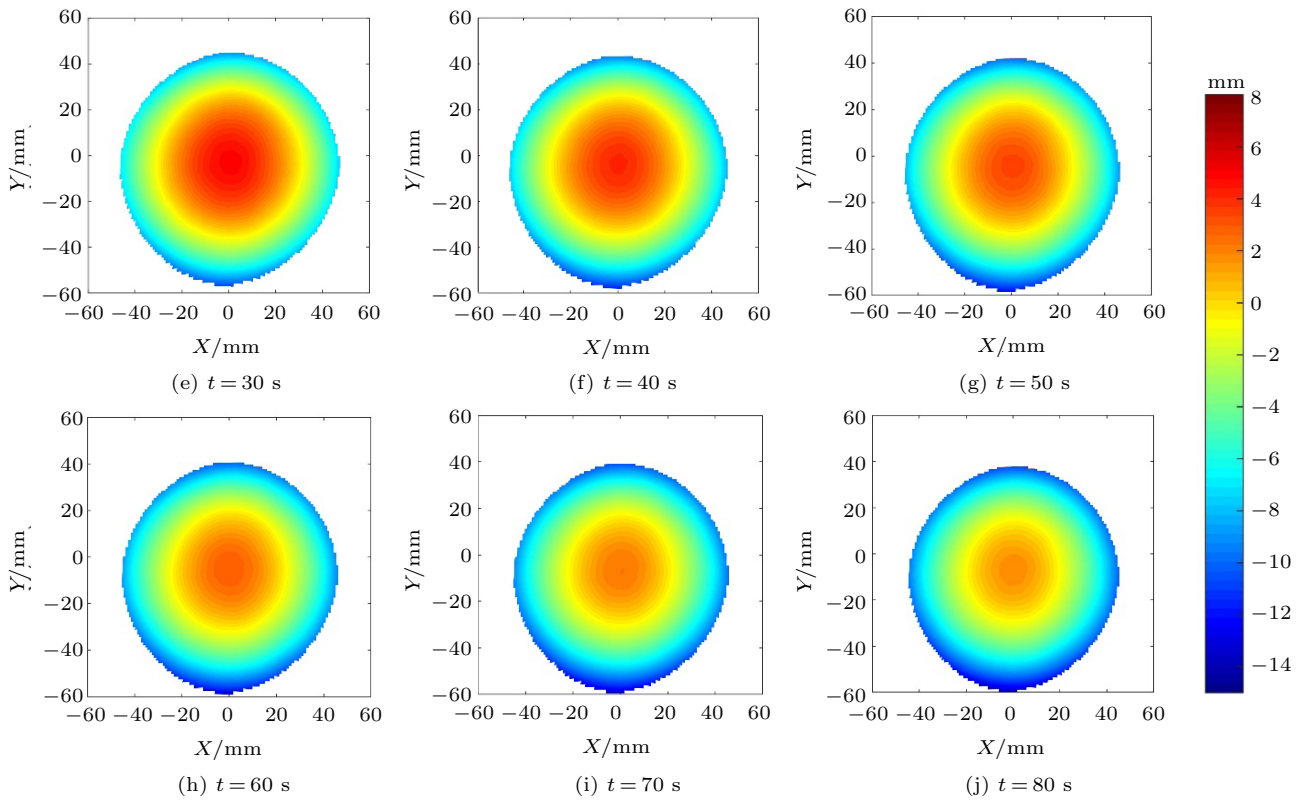


图8 测量区域 (ROI) 和不同时刻测试区内的三维形貌变化 (续)

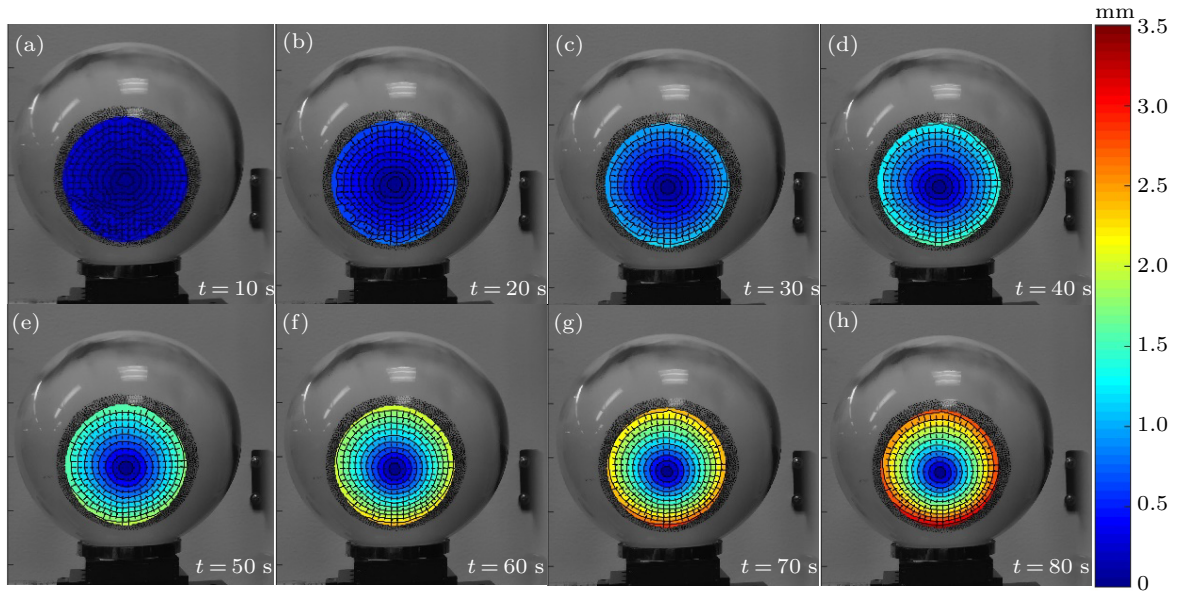


图9 不同时刻被测球体表面的面内径向变形

### 4 结论

本文将生活中随处可见的拍照手机作为数字图像的采集设备,提出了基于拍照手机成像系统和数字图像相关技术的二维和三维变形测试方法。文中

首先定量地比较了铝件在单向拉伸状态下由智能手机和应变片分别测得的轴向和横向平均应变。结果显示,两种方法测得的两个方向上应变测量结果基本吻合,由本文方法测得的弹性模量与应变片测量结果偏差为 1.38%,泊松比与应变片测量结果偏差

为 6.25%。随后, 利用发展的基于单个拍照手机的 3D-DIC 系统测量了圆柱体和非规则曲面的三维形貌, 并测量了充气球体在放气过程中形貌变化和三维全场变形。实验结果直观地显示了充气球体表面在整个放气过程中的形貌变化和面内变形信息。本文研究表明, 拍照手机在补偿法或光学适配器的辅助下能够进行准确的二维和三维变形测量。

本文方法具有极佳的成本优势和简便性, 在力学实验教学中有较大应用潜力, 尤其对于条件有限的院校和研究机构。此外, 除了高分辨率的成像系统外, 具有拍照功能的智能手机内还配置了多种处理器或传感器 (例如 GPU, 无线传输, 重力传感器, 加速度传感器, 陀螺仪和 GPS)。这些优异的性能使智能手机成为科学研究和实验教学的理想平台, 有助于激发学生学习实验力学的热情以及推广普及先进的光测力学技术。

### 参 考 文 献

- 1 耿红霞, 付朝华, 蒋小林等. 光学应变测量系统在研究生实验教学中的应用. 实验室研究与探索, 2015, 34(3): 220-222  
Geng Hongxia, Fu Chaohua, Jiang Xiaoling, et al. Application of optical strain measurement system in experiment teaching for postgraduates. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015, 34(3): 220-222 (in Chinese)
- 2 朱建国. 数字图像相关法在力学实验教学中的应用. 实验科学与技术, 2015, 13(1): 9-11  
Zhu Jianguo. Application of digital image correlation in course of mechanical experiments. *Experiment Science and Technology*, 2015, 13(1): 9-11 (in Chinese)
- 3 李凯, 冯捷敏, 韩子健等. 低碳钢滑移带的实验观测. 力学与实践, 2017, 39(4): 412-416  
Li Kai, Feng Jiemin, Han Zijian, et al. Experimental observation of slip band of low-carbon steel. *Mechanics in Engineering*, 2017, 39(4): 412-416 (in Chinese)
- 4 Pan B, Qian KM, Xie HM, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001
- 5 Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 082001
- 6 Sutton MA, Yan JH, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746-757
- 7 Pan B, Yu LP, Wu D. High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging lenses: implementation of a generalized compensation method. *Measurement Science and Technology*, 2013, 25(2): 025001
- 8 Yu LP, Pan B. In-plane displacement and strain measurements using a camera phone and digital image correlation. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 054107
- 9 Yu LP, Pan B. Single-camera stereo-digital image correlation with a four-mirror adapter: optimized design and validation. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 120-128

(责任编辑: 王永会)