

# 基于数字图像相关方法的空心圆盘热变形测量

李桂华, 马万龙, 朱天天, 付中男, 葛朋祥\*

安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 数字图像相关(DIC)方法是一种间接测量位移和应变的方法,具有光路简单、适应性好等优点,因此在相关领域得到了广泛应用。首先,以典型的空心圆盘金属零件为研究对象,并利用自行搭建的热变形装置对其进行加热控温。然后,利用 DIC 方法提取变温前后零件的图像特征,以计算零件外径的热变形。最后,用 ANSYS 仿真软件对零件在相同温度变化下的热变形进行仿真。实验结果表明,DIC 方法测量的零件热变形结果与 ANSYS 的仿真结果吻合度较好,这表明 DIC 方法可应用于金属零件的热变形测量。

**关键词** 图像处理; 数字图像相关; 热变形; 机械零件; 有限元仿真

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1412003

## Thermal Deformation Measurement of Hollow Disk Based on Digital Image Correlation Method

Li Guihua, Ma Wanlong, Zhu Tiantian, Fu Zhongnan, Ge Pengxiang\*

College of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

**Abstract** Digital image correlation (DIC) method is an indirect method for measuring displacement and strain. It has been widely used in related fields owing to its advantages of simple optical path and good adaptability. In this study, first, typical hollow disk metal parts are taken as the research objects and a self-built thermal deformation device is used to heat and control the temperature of the parts. Then, the DIC method is used to extract the image features of the parts before and after temperature change to calculate the thermal deformation of the outer diameter of the parts. Finally, ANSYS simulation software is used to simulate the thermal deformation of the parts under the same temperature change. Experimental results show that the thermal deformations of the parts measured using the DIC method correspond well with the ANSYS simulation results, which indicates that DIC method can be used to measure the thermal deformation of metal parts.

**Key words** image processing; digital image correlation; thermal deformation; mechanical parts; finite element simulation

**OCIS codes** 100.2000; 120.4640; 160.3900

## 1 引言

科学技术水平的不断发展,使精密机械和仪器科学等领域对零件加工精度的要求越来越高。热变形引起的热膨胀误差是影响零件加工精度的主要因素之一,Peclenik 等<sup>[1]</sup>的统计结果表明,热

变形引起的误差约占精密机械加工中总误差的 40%~70%,因此,研究机械零件的热变形对提高机床的加工及工件测量精度具有重要意义。热变形的测量方法大体上可分为接触式测量和非接触式测量两类,传统接触式测量实验中,材料的应变通常用引伸仪或粘贴应变片等方式进行测量<sup>[2]</sup>,

收稿日期: 2020-09-12; 修回日期: 2020-10-14; 录用日期: 2020-11-14

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(2015KJS010003)、安徽省振兴计划项目(J05201343)、安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2016A037)

通信作者: \*gpxiang123@163.com

测量时仪器会直接与试样接触,从而对测量结果产生影响,只能获得某方向上的平均位移或单点位移,无法获得变形过程中的全场应变数据。而引伸仪的标距范围有限,无法测量尺寸过大或过小的试样。此外,测杆和测头自身的热变形也会影响测量结果的精度<sup>[3]</sup>。

近年来,光学测量技术的发展进一步拓宽了材料应变的测量方法。数字图像相关(DIC)方法具有非接触性测量、全场应变测量以及适用范围广、光路简单、对环境要求低等优点,已广泛应用于物体位移场、动静态变形场、冲击振动测量等领域<sup>[4-5]</sup>。人们针对 DIC 方法开展了一系列研究工作<sup>[6-9]</sup>,在材料热变形测量方面 DIC 方法也取得了不错的进展,如 Lyons 等<sup>[10]</sup>采用 DIC 方法对温度为 650 °C 的平面热变形进行研究,验证了 DIC 方法在高温环境下应用的可行性;潘兵等<sup>[11]</sup>建立了一套基于 DIC 方法的非接触高温热变形测量系统,对铬镍奥氏体不锈钢在 20~550 °C 温度范围内的热变形和热膨胀系数进行测量,验证了 DIC 方法用于高温热变形测量的可行性;丁水汀等<sup>[12]</sup>采用数字散斑相关法(DSCM)对航空发动机涡轮盘承受外缘热载荷时的表面热变形进行了实时测量;Pan 等<sup>[13]</sup>利用碳化钼粉末以及特殊的制斑工艺,在电子束加热下实现了 3000 °C 的机械变形测量。

基于上述研究,本文采用 DIC 方法对静止自由空心铸铝盘承受热载荷时的盘面热变形进行实时测

量,并与有限元仿真结果进行了对比,验证了该方法的可行性。该研究为机械零件热变形误差的修正提供了数据基础,进而为 DIC 方法在其他零件热变形研究中的应用提供了参考。

## 2 DIC 方法的原理

### 2.1 相关原理

DIC 方法通过跟踪(匹配)物体表面变形前后散斑图像中同一像素点的位置获得该像素点的位移向量,从而得到试样表面的全场位移<sup>[14]</sup>。即用 CCD 相机采集物体变形前后表面的散斑图像,并通过计算机对散斑图像进行处理,计算出感兴趣区域变形前后的相关信息。

CCD 相机采集的散斑图上每个像素点均具有固定的灰度值,因此,可通过计算像素点的位移变化计算出物体的位移。图 1 为 DIC 方法的原理图<sup>[15]</sup>,以热变形前的图像为基准图像(参考图像),以热变形后的图像作为匹配图像(目标图像)。首先,在参考图像中任意取一点  $P(x, y)$ ,该点的灰度值为  $f(x, y)$ ,以该点为中心选取  $(2N+1) \times (2N+1)$  的参考子区域;然后,在目标图像中选取  $(2M+1) \times (2M+1)$  ( $M > N$ ) 的搜索子区域;最后,以搜索子区域的每一个像素点为中心,选取  $(2N+1) \times (2N+1)$  的区域作为目标子区域。参考子区域和目标子区域的匹配程度可用零均值归一化互相关函数  $C_{ZNSSD}$  表示为

$$C_{ZNSSD} = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - \bar{f}] \cdot [g(x', y') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中,  $P(x', y')$  为最大相关系数对应的整像素点

(最佳匹配点),  $g(x', y')$  为该点的灰度值,  $\bar{f}$ 、 $\bar{g}$  分

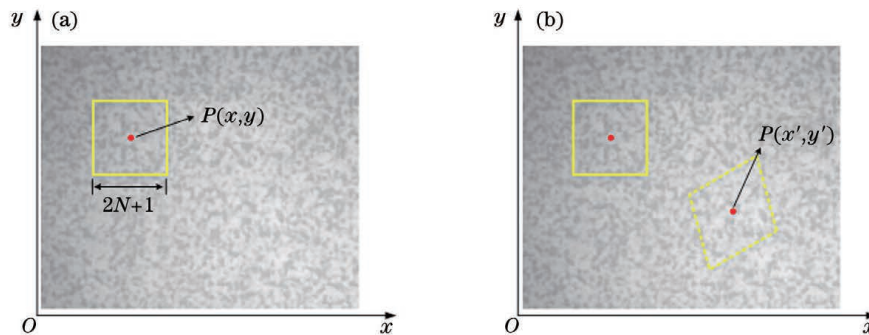


图 1 DIC 方法的原理图。(a)参考图像;(b)目标图像

Fig. 1 Schematic diagram of the DIC method. (a) Reference image; (b) target image

别为参考子区域、目标子区域的平均灰度值,可表示为

$$\bar{f} = \frac{1}{(2M+1)^2} \cdot \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f(x,y),$$

$$\bar{g} = \frac{1}{(2M+1)^2} \cdot \sum_{x'=-M}^M \sum_{y'=-M}^M g(x',y'). \quad (2)$$

用相同的方法可计算感兴趣区域内任意像素点对应的位移量,从而得到物体表面的全场位移。

## 2.2 实验试样

热变形实验使用厚度  $h = 15 \text{ mm}$ 、内半径  $r = 20 \text{ mm}$ 、外半径  $R = 100 \text{ mm}$  的铸铝空心圆柱体试样,试样表面如图 2(a)所示。用 DIC 方法评估试样在热变形过程的应变分布时,试样表面需有对比度明显的散斑图案。已有研究表明,散斑质量对 DIC 方法的搜索速度、测量精度、计算效率和计算结果的一致性等均产生影响<sup>[16]</sup>。高质量的散斑图要求散斑点多数、散斑点均匀,因此,在试样表面喷涂人工散斑,如图 2(b)所示。

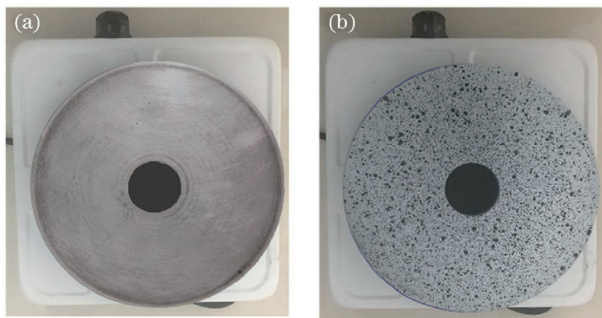


图 2 试样的实物图。(a) 无散斑的原始图像;(b) 散斑图  
Fig. 2 Physical image of the specimen. (a) Original image without speckle; (b) speckle pattern

## 2.3 测量系统的搭建

整个热变形测量系统由自行研制的温度测量、控制系统与德国 Dantec Dynamics A/S 公司产的 DIC 系统(Q-400 3D-DIC)组成。其中,DIC 系统主要包括三角架、2 个 CCD 相机与镜头、LED 冷光源、计算机等硬件设备和相应的图像处理软件。搭建的热变形图像采集及测量系统原理如图 3 所示。

## 2.4 实验过程

首先,将 CCD 相机安装在三角架的横梁上,将试样置于恒温炉的中间位置;然后,调整试样与 CCD 的相对位置,使试样位于相机的拍摄视场内,并使 CCD 光轴尽可能与试样上表面垂直;最后,启动 Q-400 系统的软件,调整光源强度和方向,保证试样表面无明显反光情况,采集的数字图像有一定清晰度。采用张正友标定法对相机的内参进行标

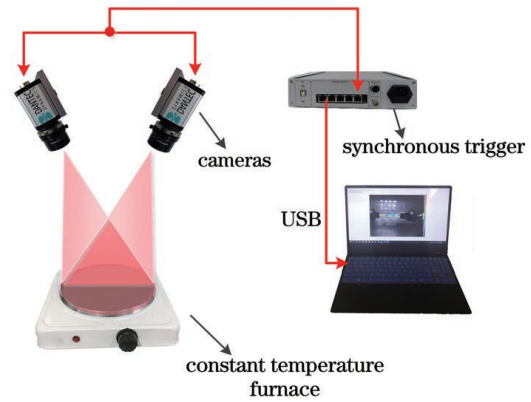


图 3 热变形图像采集及测量系统的原理

Fig. 3 Principle of thermal deformation image acquisition and measurement system

定;根据试样加热和升温的速度,将相机的拍摄频率设置为  $2 \text{ Hz}$ ;启动加热炉对试样进行加热,当试样温度升至  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  时,停止加热,保温一段时间后移开保温罩,并使其自然冷却。同时,用相机进行拍摄,试样温度降至  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时停止拍摄。根据一定规则,提取数据图像散斑图中的有效部分作为计算区域,计算温度从  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  降至  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时试样外径的变形量。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 DIC 方法的测量结果

按设置的采样频率 ( $2 \text{ Hz}$ ) 在试样温度从  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  降至  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  的过程中采集了 302 帧图像,经 Q-400 测量系统生成一系列空心圆柱体变形图。以  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  采集的试样图像为参考图像,通过图像处理方法提取参考图像的轮廓点。以  $x$  方向上两个边缘点 A、B 的最远距离为  $x$  方向的直径,以  $y$  方向上两个边缘点 C、D 的最远距离为  $y$  方向的直径,如图 4(a)所示。基于 DIC 方法找到其余 301 帧目标图像上与参考图像 A、B、C、D 对应的特征点,最后 1 帧图像(温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的 DIC 匹配结果如图 4(b)所示。

Q-400 系统处理连续降温过程 302 帧图像导出的结果如图 5 所示,可以发现,由于加工误差的存在,试样的外直径是不一致的,但试样的外直径在降温过程中基本随温度的降低而减小,与实际变形趋势一致。局部出现较明显的波动与温度变化的不均匀性及滞后有关,表现为外直径的尺寸变化不均匀。为了得到试样在温度变化过程中的热变形量,将  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  采集的试样图像作为参考图像, $20 \text{ }^\circ\text{C}$  采集的试样图像作为目标图像,用系统导出第 1 帧和最后 1 帧图像对应的试样外直径,结果如表 1 所示。

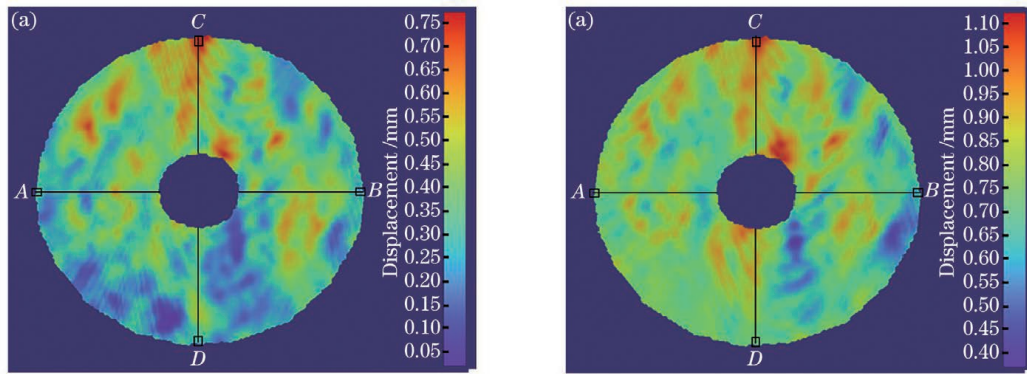


图 4 参考图像与目标图像的试样外直径。(a)参考图像(180 °C);(b)目标图像(20 °C)

Fig. 4 Outer diameters of the specimen for the reference image and the target image. (a) Reference image (180 °C); (b) target image (20 °C)

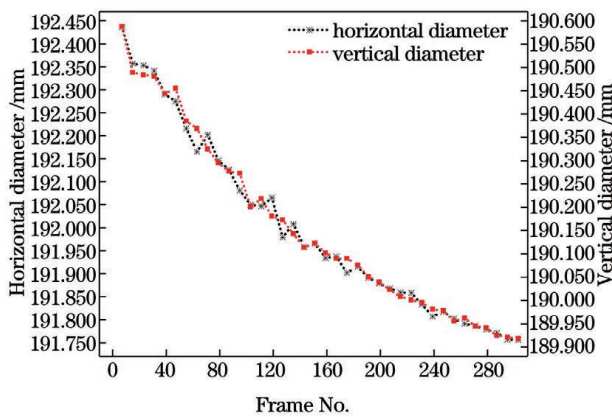


图 5 降温过程中试样外直径的变化曲线

Fig. 5 Change curve of the outer diameter of the specimen during the cooling process

由表1中的数值计算得到温差为 160 °C 时试样

表 1 起止温度下试样的外直径

Table 1 Outer diameters of the specimen at the starting and ending temperatures

Measured temperature /°C	Diameter in x direction /mm	Diameter in y direction /mm
180	192.420	190.558
20	191.756	189.911

在  $x, y$  方向外直径的相对变化量(热变形)  $\Delta l_x = 0.664 \text{ mm}$ 、 $\Delta l_y = 0.647 \text{ mm}$ , 取其平均值作为试样外直径的受温变形量, 即  $\Delta \bar{l}_1 = 0.655 \text{ mm}$ 。

### 3.2 热变形仿真结果

为验证 DIC 方法在热变形测量中的准确性和有效性, 用 ANSYS 软件对试样的热变形过程进行仿真, 铸铝试样的物性参数如表 2 所示。

表 2 铸铝的物性参数

Table 2 Physical parameters of the cast aluminum

Temperature /°C	Density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Thermal conductivity / [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	Coefficient of thermal expansion	Specific heat capacity / [ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio
20	2.81	173	23	0.96	71.7	0.33

考虑到仿真模型的尺寸和形状以及有限元分析软件 ANSYS 的精度和效率之间的平衡关系, 自动对试样进行网格划分, 网格单元尺寸为 4 mm, 划分后共产生 4495 个四面体网格, 如图 6 所示。根据热变形实验的操作情况, 热变形仿真时选择单面加热、稳态仿真, 温度从 180 °C 降为 20 °C, 仿真结果如图 7 所示。可以发现, 空心圆盘的内半径热变形量最小, 约为 0.065 mm; 外半径热变形量最大, 约为 0.329 mm, 且变形量随半径的增加逐渐增大。这表明尽管温度场按稳定场处理, 零件的热变形也不是常数, 原因是热变形的实质与形体结构尺寸有关, 而

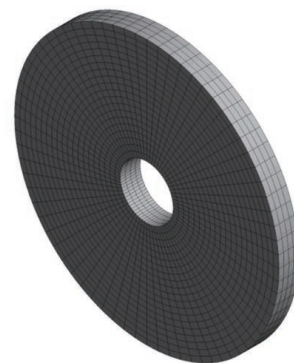


图 6 试样的有限元网格划分图

Fig. 6 Finite element meshing diagram of the specimen

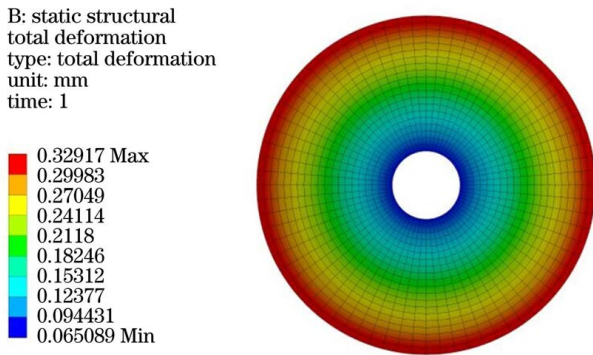


图 7 试样热变形的仿真结果

Fig. 7 Simulation result of thermal deformation of the specimen

空心圆盘的结构对称,使试样在径向上的热变形基本是相同的。仿真结果表明,圆盘在温差为  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,外直径的总变形量及方差  $\Delta l = (658 \pm 5)\text{ }\mu\text{m}$ ,而用 DIC 方法单次计算得到的绝对误差  $e = \Delta l - \Delta l_1 = 3\text{ }\mu\text{m}$ ,相对误差  $\epsilon = 4.5\%$ 。

综上所述,经 DIC 方法计算的空心圆盘外直径热变形与仿真值存在一定的偏差,产生偏差的主要原因:圆盘真实温度分布与仿真温度场之间存在偏差、DIC 测量系统的软件处理误差、DIC 方法测量原理本身的精度、光源光强变化影响及测试环境中的噪声等误差。

## 4 结 论

搭建了热变形 DIC 测量系统,以空心圆盘金属零件为测量对象,分析了试样从  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度场下的外直径变化情况,并与有限元分析的结果进行了对比。实验结果表明,DIC 测量系统实测圆盘的外直径变化量与有限元分析结果的相对误差保持在  $4.5\%$  以内;且降温过程中试样外直径的变化曲线近似均匀,这表明 DIC 测量系统可应用于金属零件的热膨胀测量。但实验过程中也存在一定的问题,如实验中的热变形装置应保证箱体内的温度分布尽量均匀;需采用加工均匀的试样作为研究目标,以减少非必要的误差干扰;DIC 方法对小尺寸零件的测量误差比大尺寸零件小,之后还需针对这些问题进一步优化测量方法。

## 参 考 文 献

- [1] Peklenik J, Jerele A. Some basic relationships for identification of the machining processes [J]. CIRP Annals, 1992, 41(1): 155-159.
- [2] Du Y, Gou Z M. Application of the non-contact video gauge on the mechanical properties test for steel cable at elevated temperature [J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1670-1683.
- [3] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6): 062001.
- [4] Wang Y H, Liang H, Wang S, et al. Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 470-480.  
王永红, 梁恒, 王硕, 等. 数字散斑相关方法及应用进展 [J]. 中国光学, 2013, 6(4): 470-480.
- [5] Sasso M, Mancini E, Chiappini G, et al. Application of DIC to static and dynamic testing of agglomerated cork material [J]. Experimental Mechanics, 2018, 58(7): 1017-1033.
- [6] Kowalczyk P. Identification of mechanical parameters of composites in tensile tests using mixed numerical-experimental method [J]. Measurement, 2019, 135: 131-137.
- [7] Wu R, Liu Y, Zhou J M, et al. Full-field strain measurement of rotating object using digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1312005.  
吴荣, 刘依, 周建民, 等. 数字图像相关在旋转物体全场应变测量中的应用 [J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1312005.
- [8] Chen B, Pan B. Through-thickness strain field measurement using the mirror-assisted multi-view digital image correlation [J]. Mechanics of Materials, 2019, 137: 103104.
- [9] Yang J, Bhattacharya K. Combining image compression with digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2019, 59(5): 629-642.
- [10] Lyons J S, Liu J, Sutton M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation [J]. Experimental Mechanics, 1996, 36(1): 64-70.
- [11] Pan B, Wu D F, Gao Z T. A non-contact high-temperature deformation measuring system based on digital image correlation technique [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(10): 1960-1967.  
潘兵, 吴大方, 高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统 [J]. 航空学报, 2010, 31(10): 1960-1967.
- [12] Ding S T, Wang Z Y, Li Y. Application of digital speckle correlation method to disk surface thermal deformation measurement [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2665-2671.

- 丁水汀, 王子尧, 李焯. 数字散斑相关方法用于圆盘表面热变形测量[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2665-2671.
- [13] Pan Z W, Huang S H, Su Y, et al. Strain field measurements over 3000 °C using 3D-digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105942.
- [14] Zhu T T, Fu Z N, Zhang M, et al. Initial value estimation of digital image correlation method in deformation measurement based on feature matching [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (18): 181012.  
朱天天, 付中男, 张梅, 等. 基于特征匹配的数字图像相关法在变形测量中的初值估计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181012.
- [15] Tang H C, Li D H, Li L, et al. Planar object surface shape speckle pattern deflectometry based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (2): 0212006.  
汤海潮, 李大海, 李磊, 等. 基于数字图像相关的平面物体面形散斑图形偏折术[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212006.
- [16] Chen Z N, Shao X X, Xu X Y, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency[J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 884-893.