

doi:10.3788/gzxb20144308.0812003

旋转粗糙目标动态散斑统计特性研究

阳志强^{1,2}, 吴振森¹, 张耿¹, 巩蕾²

(1 西安电子科技大学 物理和光电工程学院 西安 710071)

(2 西安工业大学 光电工程学院 西安 710032)

摘 要: 针对旋转目标视线角和角速度的特征识别问题, 基于激光散射理论, 分析了可见光波段激光中旋转对称目标动态特性, 设计了多姿态旋转运动目标的时序散斑测量光路. 研究表明: 采用多幅图相关函数计算方法对时序图进行处理, 得到了不同视线角和角速度的动态散斑归一化时间相关函数曲线. 给出了目标范围为 0.5r/min~6r/min 角速度, 范围为 20°~90° 视线角与时间统计特性的关系.

关键词: 散射; 时间相关函数; 相关; 旋转目标; 散斑; 统计特性; 激光

中图分类号: 0432.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0812003-5

The Statistical Properties of Dynamic Speckle Produced by Rotating Rough Target

YANG Zhi-qiang^{1,2}, WU Zhen-sen¹, ZHANG Geng¹, GONG Lei²

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 School of Photoelectrical Engineering, Xi'an Technological University Xi'an 710032, China)

Abstract: The dynamic properties of rotating symmetrical targets with visible band laser are analyzed and the time sequence speckle optical system to measure multi-pose rotating targets is designed, with the aim at the characteristics recognition of line-of-sight angle and angular velocity for rotating targets, on the basis of the laser scattering theory. The results reveal that the curve of normalized time correlation function can be achieved by adopting multi-map time correlation function algorithm, for dynamic speckles at different line-of-sight angles and angular speeds; the relationship is obtained of time statistical properties with line-of-sight angle within 20°-90° and angular speed within 0.5r/min-6r/min.

Key words: Scattering; Time correlation function; Correlation; Rotating target; Speckle; Statistical properties; Laser

OCIS Codes: 290.5880; 120.5820; 120.6150

0 引言

测量散斑图像的变化, 可用于获得目标的表面粗糙度、形状、位置变化等信息, 其主要方法有散斑相关法和散斑照相法. 2005 年 Semenov 等采用动态散斑相关法实现了目标运动距离的快速测量^[1-4], 该方法采用两个探测器同时接收信号, 对两个探测器同时性有很高的要求, 且只适用于平面运动物体的速度和距离测量. 2006 年 Kelly 研究了一种散斑照相法, 获取到目标

面倾斜时的动态散斑图像^[5], 2010 年 Bhaduri 等采用散斑相关法计算标倾斜移动和平移的幅度和方向^[6], 这两种方法采用测量面和一个标准面比较来实现, 但其测量范围有限. 2008 年 Gascón 等研究采用双曝光散斑照相法确定粗糙面平移特征^[7], 仅适合检测表面粗糙度小于 0.03λ 的目标. 2010 年, Shigeo Kubota 研究了散斑相关法中运动目标散斑图像处理技术^[8], 2010 年 Ping S. Huang 基于动态散斑匹配相关的方法反演出散斑图像位移特征^[9], 2011 年 Zhi Zhong 等研究了

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61172031, 61308071)和西安电子科技大学基金(No. 72136036)资助

第一作者: 阳志强(1982-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向光学. Email: yangzhiqiang185@163.com

导师: 吴振森(1946-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无线电物理、光学、成像处理. Email: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2014-04-10; 录用日期: 2014-07-11

<http://www.photon.ac.cn>

一种基于数字散斑相关技术获取角位移的方法^[10]. 2002年李喜德等研究采用时间序列散斑干涉计量方法进行火箭固体燃料在机械和热载荷作用下的性能检测^[11]. 2005年李善祥等研究了时间序列动态散斑相关跟踪测量法,可以用于测量大动态范围的面内变形^[12],只提取散斑时序图部分信息,未能有效利用整个散斑图. 2005年赵玮等研究了数字散斑相关法中的频率相关方法,可用于获取试件全场位移矢量图^[13]. 2010年董会等研究数字散斑干涉术测量物体面内位移及变形^[14]. 2013年张爱华等研究了一种获取物体的位移和形变的散斑照相技术^[15]. 然而这几种技术都要形成干涉条纹,且测量过程中容易带入干涉条纹引起的偏差.

本文基于散斑相关法,设计了旋转目标动态散斑测量光路,能够快速测量出时序散斑,通过增大激光光源光强,用于远距离探测. 采用多幅图相关函数计算方法,可充分利用散斑时序图中的有效散斑信息,进而计算获取旋转目标的动态散斑时间相关函数曲线.

1 动态散斑检测光路

用于测量旋转目标动态散斑的检测光路如图1,其中光源为激光光源,其波长为632.8 nm,光斑大小1.5 mm,为了增大目标的照射面积,采用激光扩束准直系统将光斑扩束10倍,同时为了减小杂散光的影响,在目标和激光扩束系统中间加入一个口径为 $\phi 12$ mm的孔径光阑. 目标放置在一个三维转台上,探测器采用带有成像镜头的高速CCD采集系统,其采样速率为285 000幅每秒,分辨率为 $1\ 472 \times 1\ 036$. 探测器镜头的光轴与激光器光轴在同一个水平面上,且两者的夹角为 100° . 目标的旋转中心线与激光器光轴在同一个平面内,且该平面垂直于水平面. 目标在测量过程中的旋转状态如图2,定义 α 角为视线角,即为目标的旋转中心线与激光器光轴的夹角,且在同一个垂直于水平面的平面内.

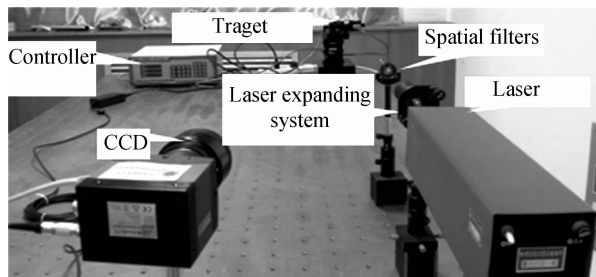


图1 动态散斑实验光路图

Fig. 1 The optical system of measure dynamic speckle

本文主要研究目标的尺寸、旋转角速度和视线角等参数对动态散斑归一化时间相关函数的影响. 选用两种不同规格的圆柱体和圆锥体分别进行实验,为了让激光光斑在横向能够完全照射目标,其中圆柱体目

标高度为15 mm,底面半径分别为5 mm和10 mm,圆锥体的高度为15 mm,半锥角分别为 22.5° 和 15° . 实验主要测量圆柱体和圆锥体在不同角速度、不同视线角下的动态散斑图像. 目标的旋转角速度选择为 $0.5\text{ r/min} \sim 6\text{ r/min}$,每隔 0.5 r/min 测量一组数据,视线角为 $20^\circ \sim 110^\circ$,每隔 10° 测量一组数据. 为获得比较理想的归一化时间相关函数曲线,经过多次试验,最优的结果是CCD每隔 $1/15\ 000\text{ s}$ 采集一副图像,其对应的最大的像素单元是 288×236 .

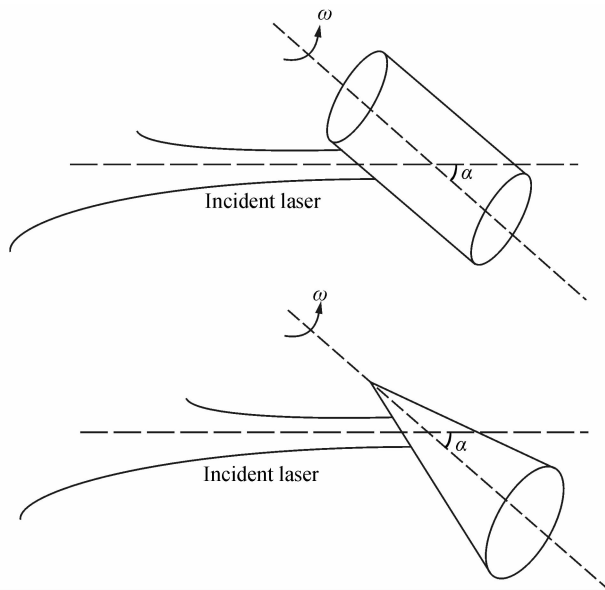


图2 倾斜目标旋转散射示意图

Fig. 2 The scatter schematic diagram of tilt rotation target

图3和图4分别给出了旋转速度为1 r/min,视线

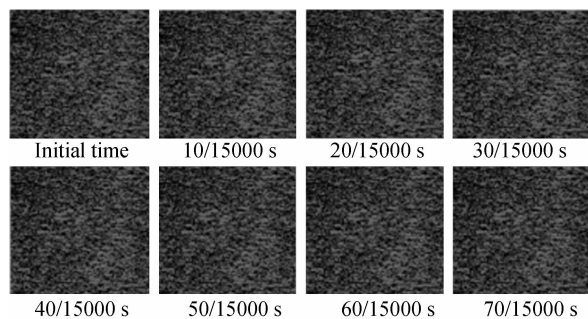


图3 粗糙柱体散斑图,视线角 $\alpha=90^\circ$

Fig. 3 The speckle picture of rough cylinder, angle of sight $\alpha=90^\circ$

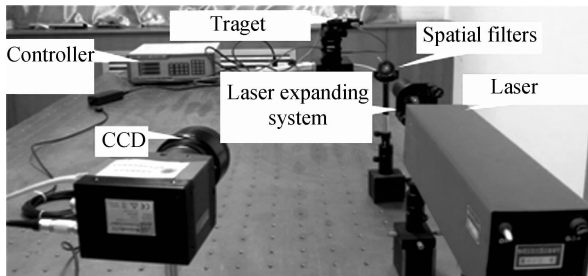


图4 粗糙锥体散斑图,视线角 $\alpha=90^\circ$

Fig. 4 The speckle picture of rough cone, angle of sight $\alpha=90^\circ$

角为 90° 时,底面半径为 5 mm 圆柱体和半锥角为 22.5° 的圆锥体的动态散斑图.为了更清晰看出动态散斑图差别,所选用图的测量时间间隔为 10/15 000 s.从图中不能直接获取目标的特征信息,仅仅能看到散斑图上的随机光点分布,因此需要对动态散斑图做进一步的处理,以获得动态散斑统计特性.

2 实验数据处理方法

实验获得的散斑光强是随机分布的,要研究其统计特性,需要读取随机分布的强度值.本文采用时间相关函数来分析动态散斑的统计特性.计算时间相关函数所采用的离散化公式为

$$C(\tau) = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mm} - \bar{A})(B_{mm} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mm} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mm} - \bar{B})^2)}} \quad (1)$$

式中 $C(\tau)$ 是时间相关函数值; \bar{A} 是图 A 的平均强度;

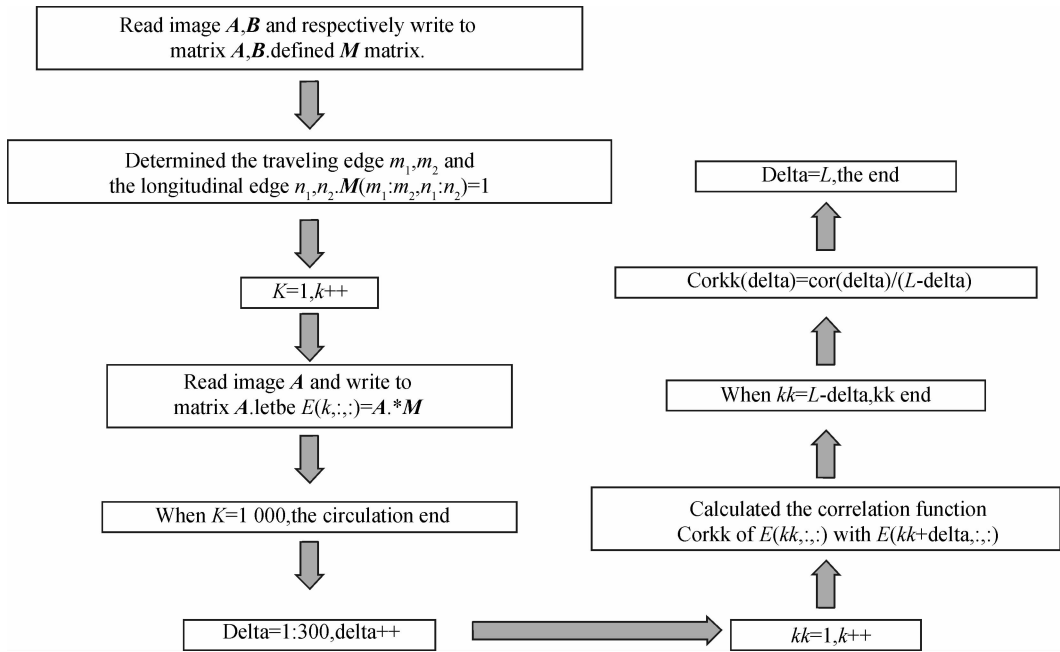


图 5 多幅散斑图相关函数计算流程图

Fig. 5 The flowchart of multi-maps time correlation function calculation

3 数据处理结果及分析

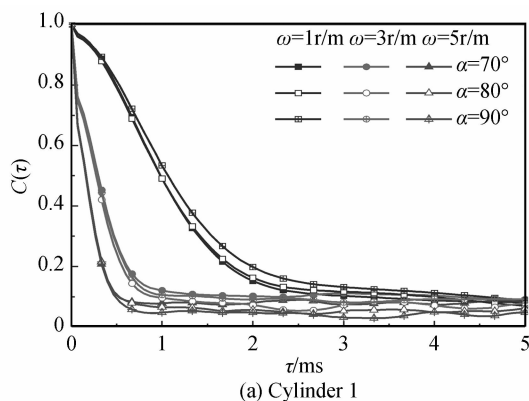
本文分别计算了两种圆柱体和圆锥体在不同角速度下、不同视线角的归一化时间相关函数曲线,其结果如图 6、图 7 和图 8 所示.其中 cylinder 1 半径为 5 mm 的圆柱体, cylinder 2 半径为 10 mm 的圆柱体, cone 1 半锥角为 22.5° 的圆锥体, cone 2 半锥角为 15° 的圆锥体.

由图 6,7,8 可以看出,目标尺寸、旋转角速度和视线角等因素对目标动态散斑归一化时间相关函数均有影响,但是影响程度不同.同时也说明,测量获取的动态散斑图像两者之间时间间隔越小,其相关性越大,随着时间的增加,其相关性迅速下降,在时间间隔到一定

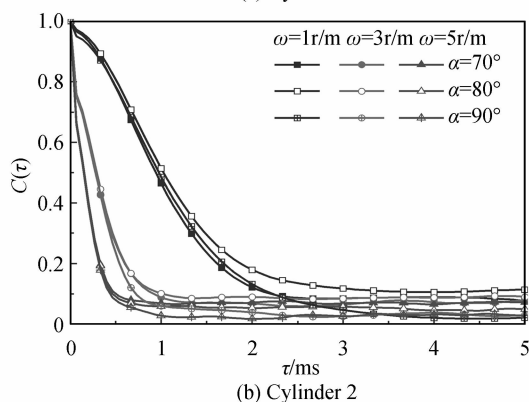
\bar{B} 是图 B 的平均强度; τ 是两幅图的时间间隔.

多幅图相关函数计算方法,流程如图 5.首先对图像的边缘进行检测,以读取散斑图的有效强度信息为起点,逐行搜索,提取出散斑图像的有效范围,以利于后期的数据处理.为了减小实验测量散斑图的数量,有效利用测量获得的散斑时序图,将时序图划分成多个较小的区域,并将划分出的每个子区域的光强认为是均匀的,选择第一幅时序图作为基准比较图,对后面的时序图与基准比较图对应的子区域求相关系数,然后将获得的区域相关系数求平均,就可以得到时序图的相关系数.实验每组共测得不少于 1 000 张的散斑图像,按照如图 5 计算流程,将后面的每一幅图像与 A 图进行相关系数计算,就可以获得归一化的时间相关函数曲线.

程度,其相关性趋近于 0.图 6 和图 7 分别给出了圆柱体和圆锥体目标的归一化时间相关函数曲线,由图中曲线分析得出,相同视线角下,目标角速度越大,归一化时间相关函数下降的越快,且随着速度的增加,速度对归一化时间相关函数的影响减小.以圆柱体目标 1 为例,当相同的视线角 70° ,角速度为 1 r/m,其归一化相关函数在 3 ms 后开始趋于稳定,角速度为 3 r/m,归一化相关函数在 1.5 ms 后开始趋于稳定,角速度为 5 r/m,归一化相关函数在 1.3 ms 开始趋于稳定.从中也可以得到,采用散斑相关法反演旋转目标的速度,当目标速度越小,其时间统计特性表现的更明显,要反演出目标速度会更容易,随着目标速度的增加,其时间统计特性差别越来越小,要获得速度信息的难度会越来

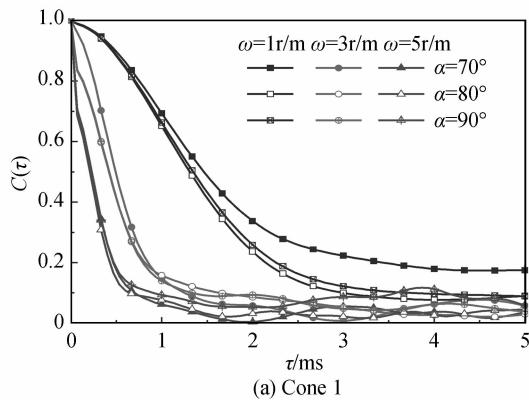


(a) Cylinder 1

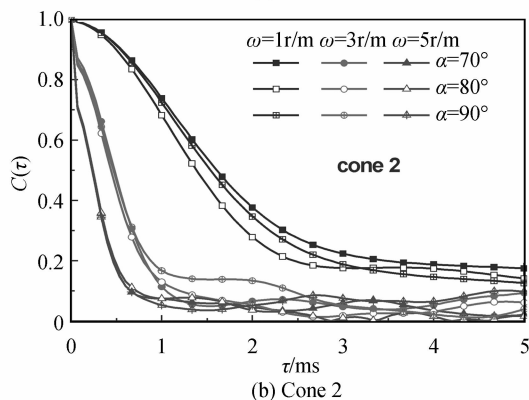


(b) Cylinder 2

图6 旋转圆柱体动态散斑时间相关函数
Fig. 6 The dynamic speckle time correlation function of rotation cylinder



(a) Cone 1

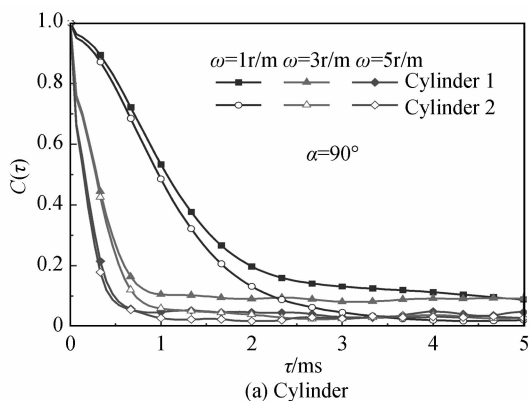


(b) Cone 2

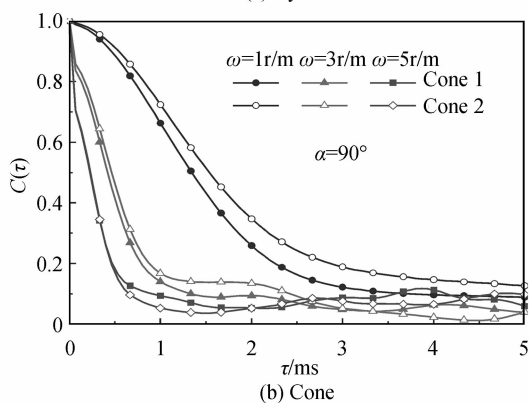
图7 旋转圆锥体动态散斑时间相关函数
Fig. 7 The dynamic speckle time correlation function of rotation cone

越大. 由图中可以看出, 相同角速度, 视线角越大, 归一化时间相函数下降的越快. 目标处于视线角越大, 视线角变化对归一化时间相关函数的影响越小, 因此在视线角越小时, 越能够清楚获得目标的时间统计特性, 随着视线角的增大, 其时间统计特性的差别越来越小.

图8给出了不同尺寸归一化时间相关函数曲线, 可以得出目标尺寸也影响归一化时间相关函数, 圆柱体目标的底面半径越大, 其归一化时间相关函数下降的越快, 锥体目标的半锥角越大, 其归一化时间相关函数下降的越快. 原因是由于目标的尺寸越大, 在相同的角速度情况下, 其照射位置点的线速度就越大, 验证了归一化时间相关函数速度越大其下降越快的结论. 从中也可以看出, 在实验过程中, 激光照射点的位置不同, 对于圆锥体目标, 使得其照射点的线速度会不同, 也会影响到归一化时间相关函数. 因此在本文研究中, 都是选取圆锥体的顶点作为照射位置的最高点, 以保证数值的可比较性.



(a) Cylinder



(b) Cone

图8 不同尺寸旋转圆柱体/圆锥体动态散斑时间相关函数
Fig. 8 The dynamic speckle time correlation function of different size rotation cylinder/cone

4 结论

本文基于动态散斑相关法, 研究了旋转目标的时间统计特性. 设计了旋转目标动态散斑图像测量光路. 对半锥角为 15° 和 22.5° 两种规格尺寸圆锥体与半径为 5 mm 和 10 mm 两种规格尺寸圆柱体的动态散斑进行

了测量. 基于边缘检测算法和多幅散斑图相关函数算法, 给出了目标旋转角速度、视线角和尺寸与目标时间统计特性的关系. 当目标速度越大, 归一化时间相关函数下降的越快, 且随着速度的增加, 速度对归一化时间相关函数的影响减小; 角速度相同时, 视线角越大, 归一化时间相函数下降的越快, 目标处于视线角越大, 视线角变化对归一化时间相关函数的影响越小.

参考文献

- [1] SEMENOV D, NIPPOLAINEN E, KAMSHILIN A. Fast distance measurements by use of dynamic speckles [J]. *Optical Letters*, 2005, **30**(3): 248-250.
- [2] KAMSHILIN A, SEMENOV D, NIPPOLAINEN E, *et al.* Computer acquisition of 3D images utilizing dynamic speckles [C]. SPIE, 2006, **6252**: 6252E-1-6252E-9.
- [3] SEMENOV D, NIPPOLAINEN E, KAMSHILIN A. Accuracy and resolution of a dynamic-speckle profilometer [J]. *Applied Opticals*, 2006, **45**(3): 411-418.
- [4] SEMENOV D, MIRIDONOV S, NIPPOLAINEN E, *et al.* Statistical properties of dynamic speckles formed by a deflecting laser beam [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(2): 1238-1247.
- [5] PATTEN R, HENNELLY B, KELLY D, *et al.* Speckle photography: mixed domain fractional Fourier motion detection [J]. *Optical Letters*, 2006, **31**(1): 32-34.
- [6] BHADURI B, TAY C, QUAN C, *et al.* Motion detection using extended fractional Fourier transform and digital speckle photography [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 11396-11405.
- [7] GASCON F, SALAZAR F. Numerical computation of in-plane displacements and their detection in the near field by double-exposure objective speckle photography [J]. *Optics Communications*, 2008, **10**. **1016**(2008. 09. 034): 1-9.
- [8] KUBOTA S. Sensitivity evaluation of dynamic speckle activity measurements using clustering methods [J], *Applied Opticals*, 2010, **49**(23): 4385-4391.
- [9] HUANG Ping-S, LIAO Chih-Ming, CHIU Chung-Cheng. Real-time analysis of laser speckle patterns for precision positioning [J]. *IEEE*, 2010, **10**. **1109**(2010. 89): 340-343.
- [10] ZHONG Zhi, SUN Jie. Angular-displacement measurement with the digital-speckle correlation method [J]. *IEEE*, 2011, **10**. **1109**(2011. 6003107): 5301-5304.
- [11] LI Xi-de, TAO Gang, DENG Bing, *et al.* Time-sequence speckle metrology and its applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 993-997.
李喜德, 陶刚, 邓兵等. 时间序列动态散斑相关跟踪测量原理及其应用[J]. 光子学报, 2002, **31**(8): 993-997.
- [12] LI Shan-xiang, SUN Yi-ling, LI Jing-zhen. The tracking method of digital speckle correlation using the sequential dynamical speckle patterns and its applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1066-1068.
李善祥, 孙一翎, 李景镇. 时间序列动态散斑相关跟踪测量原理及其应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(7): 1066-1068.
- [13] ZHAO Wei, ZHAO Xiao-ming, WANG Hong-xia *et al.* The research of fractional fourier transform correlation applied on speckle measure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 464-467.
赵玮, 赵晓铭, 王红霞, 等. 利用分数傅里叶变换相关实现散斑相关测量[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 464-467.
- [14] DONG Hui, ZHOU Yan, GUO Jun *et al.* Digital speckle pattern interferometry for deformation measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 19-22.
董会, 周岩, 郭俊, 等. 数字散斑干涉术物体形变测量[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 19-22.
- [15] ZHANG Ai-hua, LOU Xiao-ping, LÜ Nai-guang *et al.* In-plane displacement measurement of rigid body based on digital speckle photography [J]. *Optical Technique*, 2013, **39**(4): 343-347.
张爱华, 娄小平, 吕乃光, 等. 基于数字散斑照相术测量刚体面内位移[J]. 光学技术, 2013, **39**(4): 343-347.