

单帧长曝光法颗粒测速上限的影响因素

冯明亮^{1,2}, 周 骛^{1,2}, 蔡小舒^{1,2}

¹上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;

²上海理工大学颗粒与两相流测量研究所, 上海 200093

摘要 为了提高单帧长曝光图像法的颗粒速度测量的测速上限,以背光成像的单帧长曝光法测速装置为研究对象,从轨迹识别的角度,对该方法测速上限的影响因素进行了理论分析和实验研究。结果表明:在背光成像方式下,颗粒速度越高,轨迹灰度值越高,越难以识别;从轨迹可识别性的角度可知,影响因素主要包括颗粒直径、颗粒透射率和光源光强;当光源光强足够时,背光成像的单帧长曝光法测速装置对直径 50 μm 不透光圆盘颗粒的测速上限为 1250 m/s。

关键词 测量; 单帧长曝光图像法; 测速上限; 灰度

中图分类号 TK31 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.051202

Influencing Factors of Upper Limit for Particle Velocity Measurement Using Single-Frame Long-Exposure Method

Feng Mingliang^{1,2}, Zhou Wu^{1,2}, Cai Xiaoshu^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China;

²Institute of Particle and Two-Phase Flow Measurement, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract In order to improve the upper limit of particle velocity measurement for single-frame long-exposure imaging method, influence factors of upper limit for velocity measurement are theoretically analyzed and experimentally researched with backlit imaging single-frame long exposure method from the perspective of image grayscale. The results show that for backward illumination, higher particle velocity leads to higher gray value of particle image and more difficult to distinguish it. From the perspective of track recognition, the influencing factors mainly include the particle diameter, the particle transmittance and the intensity of light source. It is found that the upper limit of velocity measurement for the opaque disk particle with the diameter of 50 μm reaches 1250 m/s by using the backlit imaging single-frame long exposure method velocity measurement device when the intensity of the light source is high enough.

Key words measurement; single-frame long-exposure imaging method; upper limit for velocity measurement; grayscale

OCIS codes 120.1880; 120.2650

1 引言

目前流场的速度测量方式主要有热线热膜风速仪(HWFA)、激光多普勒测速仪(LDV)及粒子图像测速(PIV)技术,国内外学者对这三种方式的研究从未间断^[1]。研究表明:HWFA的测量速度范围为 0.01~600 m/s^[2-4],LDV的测量速度范围为 0.001~2000 m/s^[5-6],PIV技术的测量速度范围为 0.01~

收稿日期: 2016-09-12; 收到修改稿日期: 2017-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(51576130, 51327803)、上海市教委资助项目(14CG46)、上海市科委科研项目(13DZ2260900)

作者简介: 冯明亮(1992—),男,硕士研究生,主要从事图像法颗粒测量方面的研究。E-mail: fml_usst@163.com

导师简介: 周 骛(1986—),女,博士,副教授,主要从事图像法颗粒与流动测量方面的研究。

E-mail: zhouwu@usst.edu.cn(通信联系人)

1200 m/s^[7-8]。HWFA 的测速范围影响因素是探头几何尺寸和探头材料物性参数、流体物性(主要是密度、温度)和流体洁净度等^[9];LDV 的测速范围影响因素是激光光束线宽、探测器孔径、空气折射率变化和信号处理算法等^[10];PIV 技术的测速范围影响因素则包括激光片光厚度、激光散斑、诊断窗口尺寸、示踪粒子跟随性、流场中示踪粒子浓度和当地速度梯度等^[11]。

单帧长曝光图像法通过适当延长工业相机曝光时间以获得流场中离散颗粒的单帧“拖影”图像,即运动轨迹,通过轨迹的长度和宽度可以分别获得颗粒粒径和运动速度信息^[12]。该方法具有结构简单和成本低的特点,易应用于工业在线测量,尤其适用于稀疏颗粒相多参数在线测量。2008 年张弘等^[13]采用单帧图像法测量了汽轮机低压缸内湿蒸汽的速度大小和方向,2009 年 Chinnaya 等^[14]采用该方法测量了 4 MW 煤粉燃烧器实验机组煤粉管道给煤粉速度。随着工业现场对速度测量范围上限要求的提高,需要对速度测量的主要影响因素进行系统研究与分析,以提出测量装置的优化措施。本文主要对单帧长曝光图像法背光测量的成像过程进行实验研究和理论分析,以研究测速上限的主要影响因素,为高速运动颗粒的背光式测量设备参数优化提供参考和依据。

2 单帧长曝光成像原理和测速上限理论分析

2.1 单帧长曝光成像原理

单帧长曝光图像法的测量系统由成像系统和分析显示系统组成,成像系统包括工业相机、远心镜头和平行光源等;分析显示系统由图像分析处理软件及计算机组成,图 1 所示为典型的背光式单帧长曝光图像法测量系统示意图。工业相机常用的图像传感器是电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器^[15],其成像本质是像场的光能量于曝光时间 T 内在图像传感器上的累积,产生电荷信号,传输至计算机,由计算机量化为数字图像,最后以图像灰度值呈现。

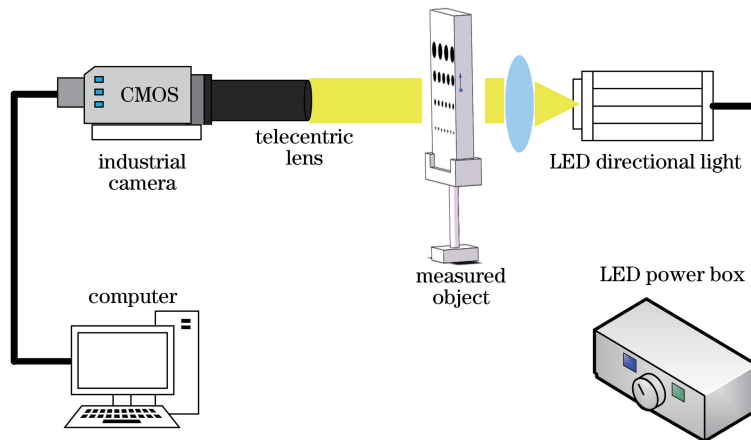


图 1 背光式单帧长曝光法测量系统示意图

Fig. 1 Sketch map of single-frame long-exposure method based on backward illumination

2.2 测速上限理论分析

图像传感器感光特性曲线如图 2 所示,其表征的是图像灰度值与曝光时间的关系。在特性曲线的线性区域,即正常工作区,曝光量与曝光时间成线性,传感器接收的光学密度又与数字图像灰度值成线性,因此图像灰度值 G 与曝光时间 T 成线性关系。

对于背光方式下的成像系统而言,图像灰度值 G 也与光源强度 I 成线性^[16-17],则图像背景灰度 G_b 可表示为

$$G_b = K(C_1 + T)(C_2 + I), \quad (1)$$

式中 C_1 、 C_2 和 K 为实验系统常数。

若有透射率为 τ 的静止颗粒在曝光时间 T 内对图像局部造成遮挡,形成投影成像,当光源为平行光且不考虑颗粒衍射时,前景(即颗粒投影成像部分)灰度 G_f 可表示为

$$G_f = K\tau(C_1 + T)(C_2 + I), \quad (2)$$

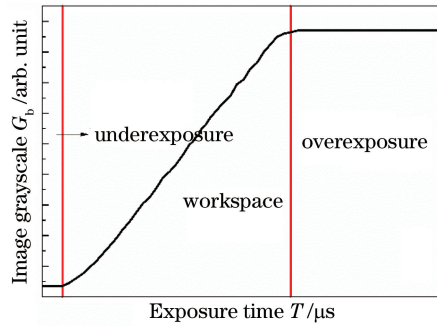


图2 图像传感器的感光特性曲线示意图

Fig. 2 Sensitivity curve diagram of image sensor

则背景灰度和前景灰度的差值 ΔG 可表示为

$$\Delta G = K(1 - \tau)(C_1 + T)(C_2 + I)。 \quad (3)$$

当采集图像为 8 bit 的灰度图时, G_b 和 G_r 的取值范围为 0~255 的整数。理想无噪声情况下, 当两者灰度有差别, 即背景灰度和前景灰度差值 $\Delta G \geq 1$ 时, 就能够通过阈值分割等手段对颗粒图像与背景进行区分与识别。

若颗粒以较大的速度 v 在平行于成像平面的某一方向上匀速运动, 投影成像是一段运动模糊的轨迹, 如图 3 所示。不考虑颗粒对光的衍射效应, 对颗粒轨迹图像中间段的某个像素而言, 此时被遮光的时间 t_s 不再等于相机曝光时间 T , 而由颗粒直径 D 和颗粒运动速度 v 决定:

$$t_s \approx D/v。 \quad (4)$$

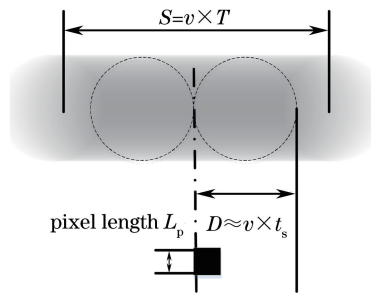


图3 运动模糊图像及成像模型

Fig. 3 Motion-blurred image and the model of imaging

在无遮光的时间段 $T - t_s$ 内, 该像素的曝光量和背景像素相同, 即只有在光照被颗粒遮挡的 t_s 时间段内才会引起图像前景灰度的降低, 影响 ΔG 的大小。而在 t_s 时间内曝光产生的背景图像灰度 G_{mb} 与轨迹图像灰度 G_{mf} 依然满足(3)式, 则颗粒运动图像前景灰度和背景灰度的差值 ΔG_m 可表示为:

$$\Delta G_m = G_{mb} - G_{mf} = \Delta G = K(1 - \tau)(C_1 + t_s)(C_2 + I)。 \quad (5)$$

结合(4)式和(5)式, 在无图像噪声的理想情况下, ΔG_m 取最小值 1 时即可得到颗粒的最大允许速度 V_{max} :

$$V_{max} = \frac{1}{1 - KC_1(1 - \tau)(C_2 + I)} KD(1 - \tau)(C_2 + I)。 \quad (6)$$

3 实验装置及实际参数分析

3.1 实验装置及标定

本研究所搭建的单帧长曝光法背光测量系统如图 4 所示, 包括工业相机、远心镜头和平行光源, 拍摄对象为标准圆盘板中的圆盘颗粒。实验时将标准圆盘板调至镜头焦平面, 并保证相机镜头轴线、光源轴线及标定圆盘板所拍摄区域中心位于同一水平线上, 且与标定板平面垂直, 避免远离光轴位置的离焦模糊现象。

基于背光式图像法的实验装置, 标定(1)式中的常数 C_1 、 C_2 和 K , 即获得该系统的光电响应特性。实验时, 分别采集不同光源强度、不同曝光时间的正常曝光的圆盘标定板图片, 处理图片, 取各像素背景灰度的均

值作为图片背景灰度 G_b 。通过上述实验装置得到的数据组合成 3×300 矩阵,矩阵第一列表示曝光时间 T ,第二列表示光源强度 I ,第三列表示背景灰度 G_b 。基于该数据矩阵分别绘制三维散点图和最小二乘法拟合的曲面图,如图 5 所示。最小二乘法拟合得到的 Z 值与实际实验数据的平均相对误差为 7.7%,拟合曲面的曲面方程为

$$G_b = 0.00184(13.4 + T)(169.6 + I), \quad (7)$$

式中 $K = 0.00184, C_1 = 13.4, C_2 = 169.6$ 。

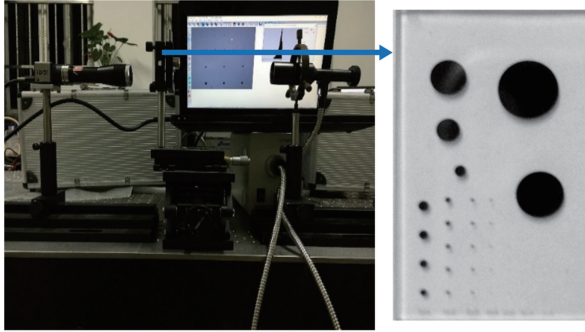


图 4 背光式图像法实验装置

Fig. 4 Experimental setup of backward illumination imaging method

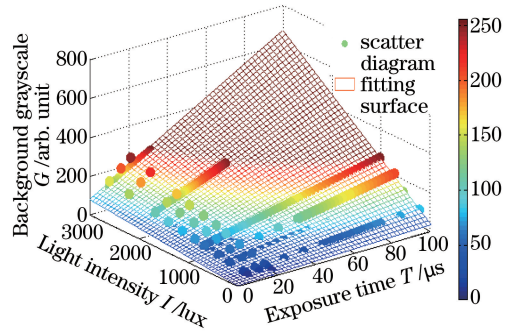


图 5 曝光时间、光源强度与背景灰度的三维散点图和拟合曲面图

Fig. 5 3D scatter plot and fitting surface of exposure time, light intensity and background grayscale

本次实验将光源强度 $I_0 = 330 \text{ lux}$ 、相机曝光时间 $T = 9 \mu\text{s}$ 作为基准状态。保持曝光时间不变,分别在 $9I_0$ 、 $30I_0$ 和 $60I_0$ 光源强度下,采集获得不同大小的标准圆盘图片,取圆盘图片的灰度最小值作为不同直径颗粒对应的前景灰度 G_f ,得到不同光强下大量 $G_f - D$ 数据点,如图 6 所示。可以发现,在颗粒直径较大时,前景灰度 G_f 符合(2)式,基本保持不变;但随着颗粒直径的减小,前景灰度并非保持不变,而是逐渐增大,即与背景的对比度减小。考虑到标准圆盘制作材料的一致性,圆盘透射率应基本保持不变,本研究认为是小颗粒对光的衍射效应以及非平行光等因素造成这一现象,可将这些因素影响采用修正系数 β 来表示,其值随粒径变化而改变,即:

$$G_f = K(\tau + \beta)(C_1 + T)(C_2 + I). \quad (8)$$

结合(8)式和上述实验所获得的圆盘前景灰度值,可计算得到三种光强下不同直径圆盘对应的前景灰度修正系数 β ,绘制如图 7 所示的散点图,并采用最小二乘法拟合所有数据点,得到前景灰度修正系数的表达式为

$$\beta = 1.41 D^{-0.66}. \quad (9)$$

由(9)式可知前景修正系数 β 为圆盘直径 D 的单值函数。后文中进行影响因素分析时,均比较了理论分析(无修正, $\beta = 0$)和实际标定[有修正, $\beta = f(D)$]两种情况。

3.2 圆盘直径对测速上限的影响

图 8 为 $9I_0$ 光照强度下,理论分析(红线)和实际标定(黑线)时得到的系统测速上限与圆盘直径 D 的关系,可以看到,尽管圆盘直径 D 对修正系数有一定影响,但仍不改变整体上测速上限与圆盘粒径的线性关系,因为修正系数的主要影响位于粒径较小的范围内,所以修正系数对测速上限的影响也较小。如圆盘颗粒直径 $D = 50 \mu\text{m}$ 时,系统理论分析测速上限是 605 m/s ,而修正后测速上限是 539 m/s 。

3.3 光源光强对测速上限的影响

以直径为 $50 \mu\text{m}$ 圆盘颗粒为研究对象,分析光源强度对测速上限的影响,结果如图 9 所示。在正常工作区间内,随着光源强度的提高,系统测速上限的理论分析和实际修正结果都增大,只是在实际情况下由于衍射等效效应,增大趋势略缓。当光强提高到一定程度,图片背景区域过度曝光后,进一步提高光照不仅不会增加背景灰度,反而会提高前景灰度,减小前景和背景的灰度差,不利于测速上限的提高。对于直径为 $50 \mu\text{m}$ 的圆盘,采用提高光源的手段,系统测速上限最高可达到 1416 m/s ,而修正后的测速上限最高可达到 1250 m/s 。

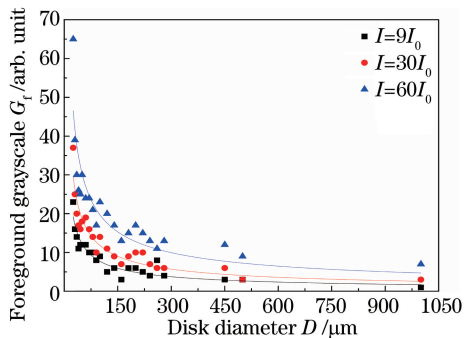


图 6 圆盘前景灰度与圆盘直径的关系

Fig. 6 Relationship between disk foreground grayscale and disk diameter

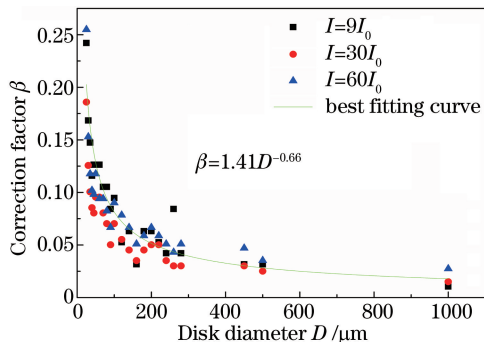


图 7 圆盘前景灰度的修正系数与圆盘直径的关系

Fig. 7 Relationship between disk foreground grayscale correction and disk diameter

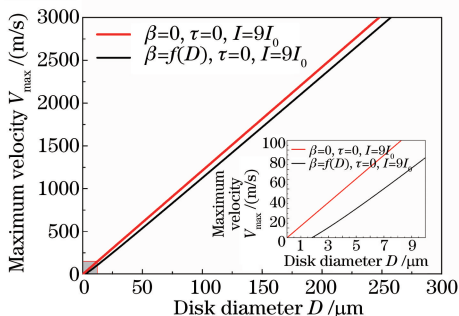


图 8 测速上限与圆盘直径的关系(插图为圆盘直径 0~9 μm 对应的速度上限)

Fig. 8 Relationship between upper limit of velocity measurement and disk diameter (inset shows upper limit of velocity corresponding to disk diameter of 0-9 μm)

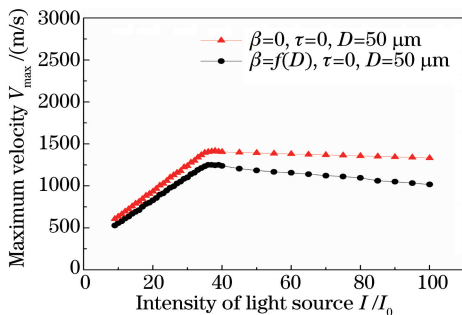


图 9 测速上限与光源光强的关系

Fig. 9 Relationship between upper limit of velocity measurement and light source intensity

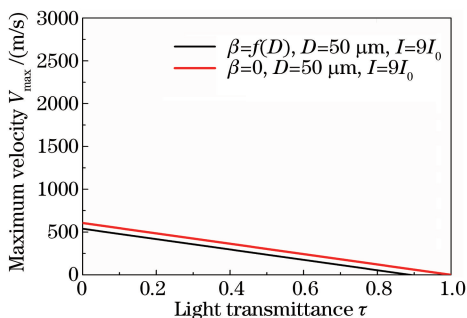


图 10 测速上限与圆盘颗粒透射率的关系

Fig. 10 Relationship between the upper limit of velocity measurement and the light transmittance of disk particle

3.4 圆盘透射率对测速上限的影响

图 10 为 $9I_0$ 光照强度下直径为 $50\ \mu\text{m}$ 的圆盘颗粒在理论分析(红线)和实际标定(黑线)时得到的系统测速上限与圆盘透射率的关系。可以看到,在理论分析和实际修正情况下,透射率对测速上限的影响规律是一致的,且系统测速上限均与 τ 成近似线性递减关系,只是在实际标定情况下由于衍射等效效应,前景灰度略大于理想情况,所以系统测速上限略小。

4 结 论

从图像灰度可识别性的角度,对单帧长曝光法的测速上限进行理论和实验研究,具体结论如下:

1) 轨迹图像法测速上限主要受前景物尺寸、前景物透射率及光源相对光强影响,且在传感器正常工作区间内基本成线性关系。

2) 对本测量系统而言,圆盘直径 D 为 $50\ \mu\text{m}$ 、光源强度为 $9I_0$ 时,系统理论分析测速上限是 $605\ \text{m/s}$; 由于直径不同导致的衍射效应使直径较小时该方法的测速上限略有减小,但不改变测速上限的量级。

3) 高速流场测量装置的设备参数选取原则是:确保粒子跟随性前提下,选取尺寸大、透射率小的示踪粒子;在不过度曝光的前提下,选取高流明光源。

参 考 文 献

- [1] Xu Jinglei. The development of the PIV experimental study of the super/hypersonic flowfield [J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(1): 81-90.
徐惊雷. PIV 技术在超及高超声速流场测量中的研究进展 [J]. *力学进展*, 2012, 42(1): 81-90.
- [2] Zhao Bo. Application of velocimeters to melt-blown and spun-bonded flow field [J]. *Polyester Industry*, 2009, 22(4): 11-14.
赵 博. 测速仪在熔喷和纺黏流场中的应用 [J]. *聚酯工业*, 2009, 22(4): 11-14.
- [3] Jørgensen F E, Chernoray V G, Bakchinov A A, *et al.* A multi-sensor hot-wire anemometer system for investigation of wall-bounded flow structures [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(2): 207-214.
- [4] Al-Garni A M. Low speed calibration of hot-wire anemometers [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2007, 18(2): 95-98.
- [5] Abdel-Gayed R G, Al-Khishali K J, Bradley D. Turbulent burning velocities and flame straining in explosions [C]. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1984, 391(1801): 393-414.
- [6] Zhang Yanyan, Gong Ke, He Shufang, *et al.* Progress in laser Doppler velocity measurement techniques [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1157-1162.
张艳艳, 巩 轲, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(11): 1157-1162.
- [7] Huang H T, Fiedler H E, Wang J J. Limitation and improvement of PIV [J]. *Experiments in Fluids*, 1993, 15(3): 263-273.
- [8] Huang H T, Fiedler H E, Wang J J. Limitation and improvement of PIV. I-Limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns [J]. *Experiments in Fluids*, 1993, 15(3): 168-174.
- [9] 于 宁, 狄洪发, 赵荣义, 等. 热线风速仪在动态热舒适性研究中的应用及测量的影响因素 [C]. *全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集*, 2008.
- [10] Zhou Jian, Feng Qingqi, Ma Shuguang, *et al.* Error analysis of reference-beam laser Doppler velocimetry [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2581-2587.
周 健, 冯庆奇, 马曙光, 等. 参考光束型激光多普勒测速仪的误差分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2581-2587.
- [11] Willert C E, Gharib M. Digital particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 1991, 10(4): 181-193.
- [12] Zhang Jingjing, Fan Xuiliang, Cai Xiaoshu. Measurement for the velocity vector field of gas-solid two phase flow using single frame and single exposure imaging [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(1): 79-82.
张晶晶, 范学良, 蔡小舒. 单帧单曝光图像法测量气固两相流速度场 [J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(1): 79-82.

- [13] Zhang Hong, Cai Xiaoshu, Shang Zhitao, *et al.* The measurement of size, velocity and flow angle of coarse water with single image method[J]. *Thermal Turbine*, 2008, 37(1): 26-29.
张 弘, 蔡小舒, 尚志涛, 等. 单帧图像二次水滴粒径、速度和流动角度测量方法研究[J]. *热力透平*, 2008, 37(1): 26-29.
- [14] Chinnayya A, Chtab A, Shao J Q, *et al.* Characterization of pneumatic transportation of pulverized coal in a horizontal pipeline through measurement and computational modelling[J]. *Fuel*, 2009, 88(12): 2348-2356.
- [15] Li Jijun, Du Yungang, Zhang Lihua, *et al.* Research progress on CMOS image sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 45-52.
李继军, 杜云刚, 张丽华, 等. CMOS图像传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 45-52.
- [16] Du Lin, Sun Huayan, Zhang Tinghua, *et al.* Camera response function calibration algorithm based on single frame image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0711003
都 琳, 孙华燕, 张廷华, 等. 基于单帧图像的相机响应函数标定算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0711003.
- [17] Fang Huameng, Yi Benshun, Gan Liangcai, *et al.* A fast calibration method of camera response function for high dynamic range image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 43(6): 737-741.
方华猛, 易本顺, 甘良才, 等. 高动态范围图像合成中相机响应函数的快速标定[J]. *光子学报*, 2013, 42(6): 737-741.