

透射式纹影摄影成像灵敏度分析

王文悦**, 董睿歌, 杨文龙*

哈尔滨理工大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

摘要 在流体密度测量中,纹影设备的灵敏度是实验测量结果的关键。为了研究空气流速、温度以及装置参数对实验的影响,设计了以热风枪为扰动区的灵敏度测量系统。通过成像分析,给出了不同温度和不同空气密度下的像面图。发现纹影系统的灵敏度可以由像面上热风枪的温度变化(像面条纹数)来衡量,即系统的纹影设备灵敏度越高,可分辨的热风枪扰动后成像面中得到的条纹数越多,能够分辨的温度区间越大。利用 Zemax 进行模拟验证,实验结果和理论分析基本一致。结果表明,热风枪扰动法可以便捷、有效地衡量透射式纹影设备的灵敏度,为纹影系统灵敏度的测量提供了一种简洁有效的方法。

关键词 成像系统; 纹影摄影; 灵敏度; 热风枪; 密度可视化

中图分类号 TB811 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.111102

Sensitivity Investigation of Schlieren Imaging System

Wang Wenyue**, Dong Ruige, Yang Wenlong*

College of Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150000, China

Abstract The sensitivity of schlieren equipment is the key issue of the experimental results in the density measurements of fluid. A sensitivity measuring system was designed, taking a hot air gun as the disturbing region. The effect of flow velocities, temperatures of the hot air, and equipment parameters on the sensitivity of the system was investigated. The images were obtained under various temperatures and air densities. The sensitivity of the schlieren system could be characterized by the temperature variation, so called fringe number on the image. The more obtained fringe number of the image in the hot air gun disturbed schlieren imaging system, the higher sensitivity and the wider range of temperature variation. The optical paths of the schlieren imaging system were simulated by Zemax, and the experimental results agree with the theoretical analysis. The results show that the hot air disturbing method could characterize the sensitivity of schlieren equipment effectively, which provides a convenient and sensitive approach for sensitivity measurement of the schlieren system.

Key words imaging systems; schlieren imaging; sensitivity; hot air gun; density visualization

OCIS codes 110.2970; 110.2960; 330.6130

1 引言

2017 国际青年物理学家锦标赛和 2017 年中国大学生学术物理竞赛中有“Visualising Density”一题^[1]。英文原文为“Schlieren Photography is often used to visualise density variations in a gas. Build a schlieren setup and investigate how well it can resolve density differences.”题目要求建立一个 Schlieren 摄影装置,即纹影摄影装置,并研究该装置对密度差异的分辨能力(灵敏度)。

纹影法是一种经典的光学显示技术,通常用于

非均匀介质流场的测量^[2]。1864 年,纹影摄影法由 Toepler 首先提出^[3],1951 年 Holde 和 Norht 将纹影法加以改进,实现了彩色纹影成像,使纹影法得到广泛的应用。由于其对气体密度变化的捕捉能力强,设备成本低,因而应用广泛。纹影摄影通常用于流场状态的定性研究^[4-6],也是人们最早采用的一种非接触式测量手段。

目前,纹影摄影装置进一步应用于不同扰动物体的定量研究。从简单摄影到风洞气流监测^[7],从观察火花点燃的瞬间状态变化^[8]到捕捉子弹等物体的高速运动轨迹^[9]以及对光学材料的检验^[10],纹影

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-06; 录用日期: 2018-06-04

* E-mail: wlyang@hrbust.edu.cn; ** E-mail: 942330720@qq.com

摄影装置已应用于生活、科学研究和军事等诸多领域。随着科学技术的发展,人们对纹影摄影装置的分辨能力,即灵敏度这一关键参数的要求也越来越高。但对纹影装置灵敏度,即像平面对扰动区的捕捉能力的测试手段相对较少。在火焰光学测量^[11-12]、柴油机喷雾^[13-14]等各领域的研究中,均需通过系统灵敏度的测量分析来优化实验结果,不但需要采集高速摄影图像,而且需要应用 MATLAB 自编程序或数值模拟^[15-16]对成像面进行分析,成本较高,实验标定工作量大。纹影设备的灵敏度取决于光源种类^[17]、纹影透镜的焦距以及刀口遮挡光源的大小等诸多因素^[18],缺少一种测定纹影摄影系统灵敏度的便捷途径,因此设计一种直观、有效的灵敏度检测方法是纹影摄影领域亟需解决的问题之一。

本文设计了以热风枪为扰动区的纹影摄影装

置,确立了一种便捷的纹影摄影装置密度可视化灵敏度分析方法^[19]。研究了热风枪扰动区温度、风速参数对空气气流密度的影响,进而了解系统扰动区折射率的改变,发现像面条纹数能够便捷、有效地衡量纹影系统的灵敏度。同时利用 MATLAB 对成像进行了分析,并采用 Zemax 仿真分析验证光路及实验结果,运用适当的近似分析纹影装置的灵敏度。

2 透射式纹影系统

光路设计为光源经聚光镜会聚在狭缝上,由狭缝限制照明光源的大小。狭缝置于准直透镜的焦面上,准直透镜射出平行光照明实验扰动区,再经纹影透镜将狭缝成像于位于纹影透镜焦平面的刀口上。与此同时,光线通过扰动区,携带扰动区的密度信息,成像于像平面上,如图 1 所示。

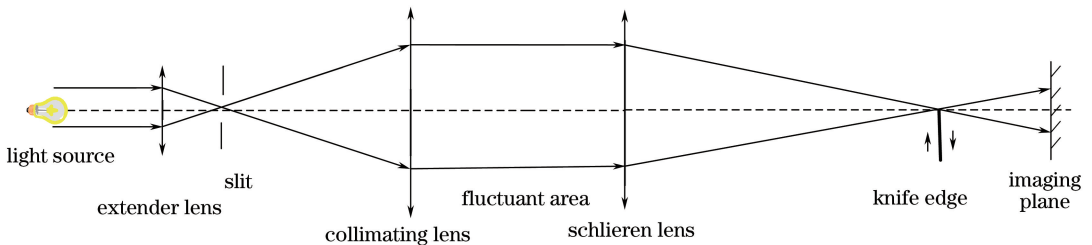


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

当一束光线入射进入一种存在折射率梯度且气体折射率为 n 、气体密度为 ρ 的介质中时,光线会向着折射率增大的方向偏折。由格拉斯通-戴尔定律可知,气体折射率与密度的关系可表示为

$$\frac{n-1}{\rho} = K_{G-D}. \quad (1)$$

在空气中格拉斯通-戴尔系数为

$$K_{G-D}(\lambda) = 2.2244 \times 10^{-4} \left[1 + \left(\frac{6.7 \times 10^{-8}}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中: λ 为光的波长。

当扰动区空气密度发生变化时,可由(2)式推出密度与折射率变化规律,而后再将空气折射率变化经纹影设备成像于像平面上。

纹影法的计算是根据纹影图的反差,首先测量仪器光刀刀口的位移量的移动量,然后计算被测流场在垂直于光刀刀口移动方向上的密度变化梯度或密度值。光线通过扰动区,在纹影镜焦点,设刀口位置 K 处的位移量为 Δa ,纹影透镜焦距为 f_3 ,扰动区折射率为 ϵ (图 2),由折射定律可得位移量为

$$\Delta a = f_3 \tan \epsilon. \quad (3)$$

光线穿过测量体积内有密度梯度的区域时,位

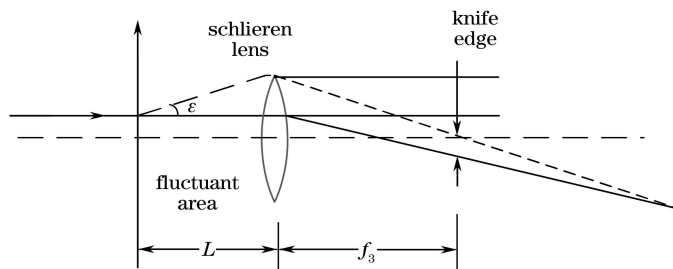


图 2 光线偏折示意图

Fig. 2 Light deflection diagram

移矢量代表了光线在该处的偏折情况。从位移矢量可获得水平和竖直两个方向的分量。根据费马原理,任意点间光程的变分为零。

在二维扰动条件下,可以计算出密度与光线偏角 ϵ 的关系,即气流密度在垂直于光刀刀口 y 方向上的变化。设光线通过的扰动区长度为 L ,可得

$$\tan \epsilon = L \frac{d}{dy} (\ln n), \quad (4)$$

$$\frac{d\rho}{dy} = \frac{(1 + K\rho)\Delta a}{KLf_3}. \quad (5)$$

3 透射式纹影仪成像

3.1 光强

由几何光学可知,光强与刀口遮挡光线多少以

及光源强度有关。为了计算刀口对光强的影响,先将光源假设为矩形光源,即在像面上成像为矩形。若光源尺寸为 $a_0 \times b_0$,当流场无扰动时,在纹影透镜的焦点处将得到尺寸为 $a_1 \times b_1$ 的图像,其与光源为共轭关系,即

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{b_1}{b_0}. \quad (6)$$

扰动区中流场密度发生变化后,通过扰动区的光线发生偏转,在刀口处上下移动距离为 $\pm \Delta a$ (图 3)。设 I_0 为无刀口时接收屏的照度, I_k 为有刀口时接收屏的照度,则屏幕的照度为

$$I_p = \frac{a_k \pm \Delta a}{a_k} I_0. \quad (7)$$

可以得出扰动区中流场密度梯度越大,则光线在刀口处移动的距离越大。

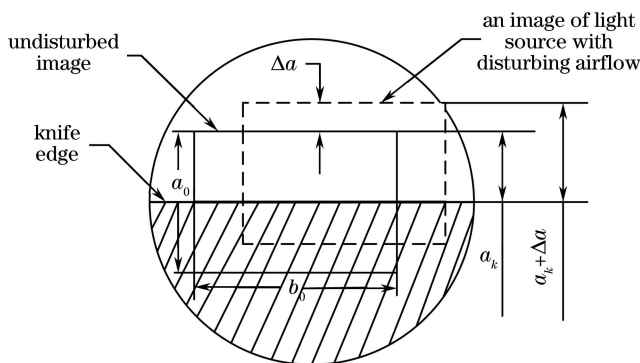


图 3 刀口处光源成像示意图

Fig. 3 Image of the light source at the knife edge

3.2 灵敏度

在有扰动区有物体扰动的情况下,系统的灵敏度越高,像面上照度的相对变化量也就越大,因而系统对扰动区中微小折射率变化的表现能力越强,即解决密度差异的效果越好。经过刀口后像光源剩余宽度 Δa 的大小与光线经扰动区中折射率不均匀部位产生的光线偏折角,以及纹影透镜焦距 f_3 之间的关系式为^[7]

$$\Delta a = f_3 \int_0^{\tau} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{f_3}{a} \int_0^{\tau} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz. \quad (9)$$

f_3/a 即为纹影摄影的灵敏度,在一定偏折角(一定变化率)的情况下,系统的灵敏度越高,像面照度变化越大,即对系统扰动中微小折射率的变化表现能力越强。

4 实验装置与讨论

4.1 实验装置

利用中心波长为 632.8 nm、功率为 25 mW 的 He-Ne 激光器作为光源。扩束透镜焦距为 50 mm,准直透镜焦距为 600 mm,纹影透镜焦距为 600 mm。实验装置如图 4 所示。

AT850b 高级数显热风枪温度变化范围为 100~480 °C。实验选取 CCD 作为纹影成像平面,直接捕捉热风枪扰动产生的密度变化信息,即像平面上变化的条纹数。

4.2 灵敏度分析

在图 4 所示实验装置下,改变扰动物体热风枪的风速和温度,可以得到图 5 所示扰动像面图。采用 MATLAB 软件对图像进行处理,对不同条件下的图像进行亮度处理以及等高线分析。不同情况下

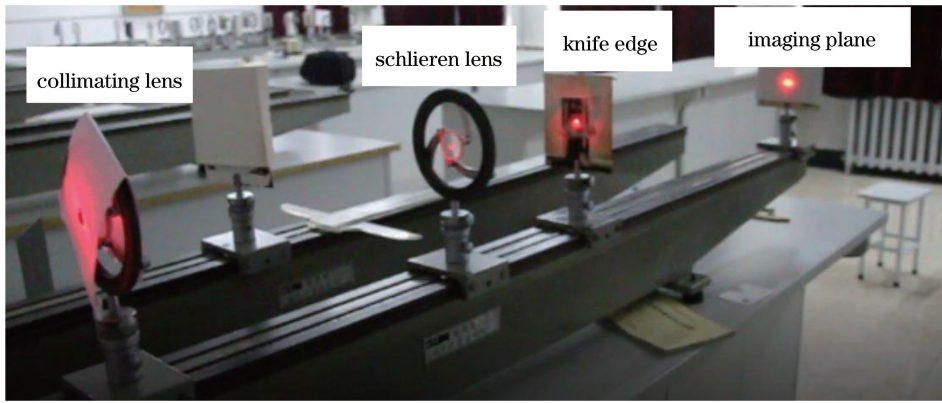


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

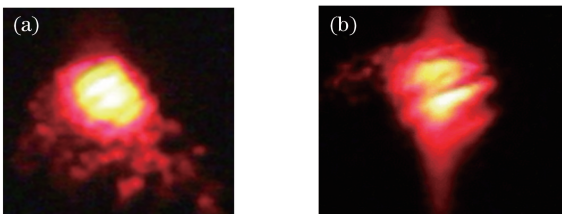
图 5 热风枪扰动像面图。(a) $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Images with hot air gun disturbance.

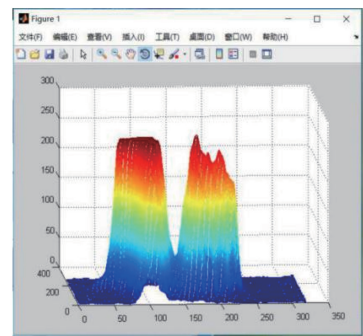
(a) $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

图 7 亮度处理后扰动像面图

Fig. 7 Disturbed image after brightness processing

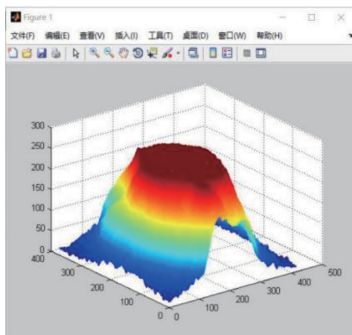


图 6 亮度处理后未扰动像面图

Fig. 6 Undisturbed image after brightness processing

图像的亮度处理结果如图 6 和图 7 所示,灰度直方图中虚线为波峰波谷趋势线。相同情况重复实验共 6 次,所得数据求取平均值,以消除随机误差。

实验结果表明,热风枪风速相同,温度逐渐变化,可以观察到该纹影设备在空气密度变化时产

生的不同现象,即像平面上产生的条纹数,由此判断纹影设备不同焦距下的灵敏度。

改变纹影透镜焦距,发现其灵敏度随纹影透镜焦距增大而减小。由表 1^[17]可知温度与折射度之间的关系,代入实验结果中可得,当纹影透镜焦距为 600 mm 时,即最优纹影系统中,折射度为 48.1337~36.1255 mg/kg,温度为 80~240 °C 时每变化 20 °C,气体密度变化为 0.08 kg/m³,当温度变化值大于 20 °C,纹影设备可以清晰分辨空气中的密度变化,如图 8 所示。

由图 8 可知,不同纹影透镜的灵敏度可以由像面上热风枪的温度变化(条纹数)来衡量,即系统的纹影设备灵敏度越高,可分辨的热风枪扰动后成像面中得到的条纹数越多,能够分辨的温度区间越大。

表 1 大气温度与折射度的关系

Table 1 Relationship between atmospheric temperature and refraction

Temperature /°C	20	60	130	180	230
Atmospheric refraction / (mg · kg ⁻¹)	271.5863	238.9083	43.5403	39.5466	36.1255

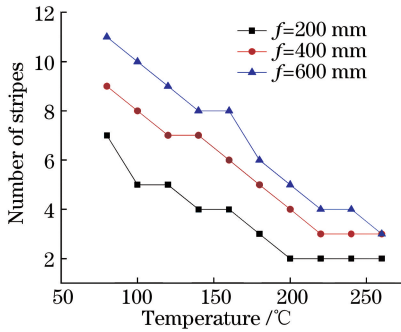
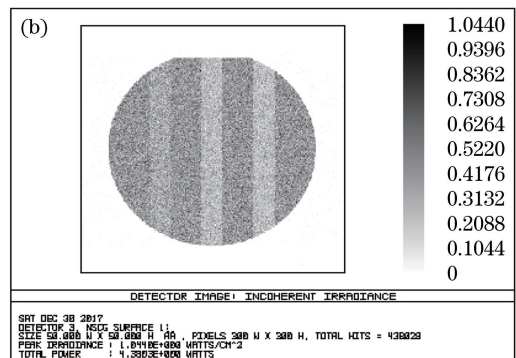
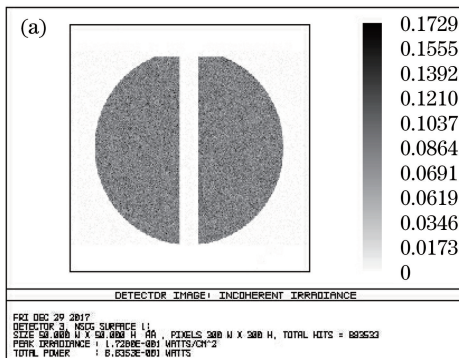


图 8 不同纹影透镜焦距条件下的像面条纹数

Fig. 8 Number of stripes with different schlieren lens focal lengths

图 9 模拟像面图。(a) $n=0.6417, f_3=200$ mm; (b) $n=1.000051, f_3=200$ mmFig. 9 Simulated images. (a) $n=0.6417, f_3=200$ mm; (b) $n=1.000051, f_3=200$ mm

从图 9 可以看出在不同温度的热风枪风柱扰动区域,不同纹影透镜焦距的纹影摄影设备能分辨的条纹数多少,即为纹影设备的灵敏度大小。

6 结 论

通过对透射式纹影摄影的分析,针对热风枪气流对像面的扰动条纹数影响,确定设计指标,并验证透射式纹影摄影的最佳成像系统。发现该系统在 240 °C 以下时可分辨 0.08 kg/m^3 的密度变化,且纹影透镜的焦距越大,刀口遮挡的光源越多,纹影系统的灵敏度越高。光源的尺寸越小,准直镜的焦距越大,清晰度越高。光源功率越大,灵敏度越高。

参 考 文 献

- [1] International Youth Physical Tournament 2017 [EB/OL]. [2018-02-27]. <http://iypt.org/Problems>.
- [2] Weinberg F J. Optics of flames: including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics [M]. London: Butterworths, 1963.

5 仿真模拟

应用 Zemax 光学软件进行仿真,根据纹影装置准直透镜后的光学特性,在非序列条件下近似选取平行光模拟该平面后的发光情况。在 Zemax 中模拟光路,经热风枪发出风柱模拟为一折射率可变的区域,模拟了 Z 字型纹影摄影装置,通过改变扰动区折射率的大小,即实验中热风枪温度的改变来模拟实验。图 9 为仿真光学系统后统计的像面条纹数。由表 1 可知不同大气温度下的折射度变化,进而仿真得到不同折射率变化下的像面图,可得到与图 8 相符的结果。

- [3] Settles G. Schlieren and shadowgraph techniques [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [4] Yan S Y, Chang Z, Wang F, *et al.* Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration optimization [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0722002.
闫素英, 常征, 王峰, 等. 积尘对槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的影响及聚光优化 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0722002.
- [5] Qu D S, Hong Y J, Wang G Y, *et al.* Study on mass flux measurement methods of gas based on scanning wavelength modulation spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904006.
屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于扫描波长调制光谱的气体质量流量测量方法研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904006.
- [6] Feng T Z, Liu C M, Zhao R X, *et al.* Schlieren methods: a review of techniques [J]. Journal of Ballistics, 1994(2): 89-91.
冯天植, 刘成民, 赵润祥, 等. 纹影技术述评 [J]. 弹道学报, 1994(2): 89-91.

- [7] Xu X, Xie A M, Lü Z G, *et al.* Application of focusing schlieren visualization system in shock tunnel experiment [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 75-79.
徐翔, 谢爱民, 吕治国, 等. 聚焦纹影显示技术在激波风洞的初步应用 [J]. *实验流体力学*, 2009, 23(3): 75-79.
- [8] Jiang D M. Spark ignition engine combustion [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992: 35-48, 362-376.
蒋德明. 火花点火发动机的燃烧 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992: 35-48, 362-376.
- [9] Chang L H, Tan X X, Wang W, *et al.* Schematic photography technology and its application [C] // 4th National Explosion Mechanics Experimental Technology Conference, 2006: 323-328.
畅里华, 谭显祥, 汪伟, 等. 纹影摄影技术及其应用 [C] // 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议, 2006: 323-328.
- [10] You Q. Inspection of optical materials using schlieren method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1989, 26(3): 44.
友清. 用纹影法检验光学材料 [J]. *激光与光电子学进展*, 1989, 26(3): 44.
- [11] Meng S, Yang Z J, Wang M X, *et al.* Application of quantitative schlieren in flame temperature measurement [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(4): 65-69.
孟晟, 杨臧健, 王明晓, 等. 纹影定量在火焰温度测量中的应用 [J]. *实验流体力学*, 2015, 29(4): 65-69.
- [12] Zhang X, Li S. The application of high-speed schlieren photography to the test for droplet spray and flow field [J]. *Journal of Northeast Normal University*, 1992, 24(3): 71-75.
张旭, 黎苏. 高速纹影摄影技术在喷雾场和流场测试中的应用 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 1992, 24(3): 71-75.
- [13] Gao H B, Li X R, Xue J Y, *et al.* Effect of background temperature and density on the sensitivity of diesel spray characteristics [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(11): 1553-1559.
高浩卜, 李向荣, 薛继业, 等. 背景温度和密度对柴油喷雾特性影响灵敏度分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(11): 1553-1559.
- [14] Gao J, Jiang D M. Measurements of diesel spray characteristics [J]. *Diesel Engine*, 2002, 24(6): 4-7.
高剑, 蒋德明. 柴油机喷雾特性的测试方法 [J]. *柴油机*, 2002, 24(6): 4-7.
- [15] Li W Y, Wang P, Zhang J W, *et al.* Three-dimensional visualization for numerical simulation data of laser transmission [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111410.
黎万义, 王鹏, 张军伟, 等. 激光传输数值模拟数据的三维可视化研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111410.
- [16] Li X R, Zhao W H, Gao H B, *et al.* Responsive sensitivity analysis of diesel spray characteristics to injection parameters and ambient parameters [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 67-73.
李向荣, 赵伟华, 高浩卜, 等. 柴油机喷雾特性对喷油和环境参数响应灵敏度分析 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 67-73.
- [17] Ye J F, Jin Y, Wu W T, *et al.* Light source selection and design method in schlieren [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(4): 94-96.
叶继飞, 金燕, 吴文堂, 等. 纹影技术中光源的选择和设计方法 [J]. *实验流体力学*, 2011, 25(4): 94-96.
- [18] Li A P. One simple and applicable method to fabricate the knife-edges for colour schlieren [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 1994, 8(4): 73-76.
李艾平. 一种简单适用的彩色纹影刀口制作方法 [J]. *气动实验与测量控制*, 1994, 8(4): 73-76.
- [19] Hu W. The structure, principle and characteristics of the hot air gun [J]. *Overhaul Appliance Technology*, 2011(16): 21-22.
胡伟. 热风枪的结构、原理及其特点 [J]. *家电维修技术*, 2011(16): 21-22.
- [20] Jin Q F. Research on influence factors of atmospheric refractive index [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 20-31.
金群峰. 大气折射率影响因素的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 20-31.