

基于图像处理的喷嘴雾化角测试方法

钱 晨¹, 高新妮², 胡保林², 彭中伟², 颜 华¹, 杨 斌¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:针对喷嘴雾化角测量,开展基于图像处理的喷嘴雾化角测量方法研究,设计搭建了采用远心透镜光学成像测量系统,研究基于图像灰度阈值分割、边缘识别和角度分析的图像处理算法,通过对喷雾图像进行处理得到雾化角与偏斜角。为验证系统测量精度,采用标准角度块进行测量,角度测量最大相对误差为 1.01%,测量不确定度优于 0.10°。在此基础上,将上述光学成像测量系统应用于 A、B、C 这 3 种型号喷嘴雾化角测试,结果显示:该方法能够有效获得清晰的图像,利用阈值分割和边缘识别算法能够获得雾化角与偏斜角。A、B、C 这 3 种典型单个喷嘴多次测试雾化角的测量不确定度分别为 0.806°、0.279°、0.624°,偏斜角的测量不确定度为 0.207°、0.402°、0.620°;A、B、C 型不同喷嘴多次测试雾化角平均测量不确定度为 0.659°、0.427°和 1.291°,偏斜角平均测量不确定度平均值为 0.389°、0.231°和 0.487°。因此,基于图像处理的喷嘴雾化角测试方法可为评判喷嘴雾化性能提供直观有效依据。

关键词:雾化角;偏斜角;图像处理;阈值分割;边缘识别;测量不确定度

中图分类号:V238 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)03-0063-08

Measurement method of nozzle atomization angle based on image processing

QIAN Chen¹, GAO Xinni², HU Baolin², PENG Zhongwei², YAN Hua¹, YANG Bin¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of

Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

200093, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the measurement of nozzle atomization angle, the measurement method of nozzle atomization angle based on image processing is studied. A telecentric lens optical imaging measurement system is designed and built, and the image processing algorithm based on image gray threshold segmentation, edge recognition and angle analysis is studied. The atomization angle and deflection angle are obtained by processing the spray image. In order to verify the measurement accuracy of the system, the standard angle block is used for measurement. The maximum relative error of angle measurement is 1.01 %

收稿日期:2021-12-08;修回日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金(51806144)

作者简介:钱晨(1998—),男,硕士,研究领域为气液两相流测量方法。

通信作者:杨斌(1985—),男,博士,副教授,研究领域为多相流与燃烧测量方法。

and the measurement uncertainty is better than 0.10° . On this basis, this optical imaging measurement system is applied to the atomization angle test of A, B and C three types of nozzles. The results show that the method can effectively obtain clear images, and the atomization angle and deflection angle can be obtained by threshold segmentation and edge recognition algorithm. The measurement uncertainty of atomization angle for three typical single nozzles A, B and C is 0.806° , 0.279° and 0.624° , and the measurement uncertainty of deflection angle is 0.207° , 0.402° and 0.620° , respectively. The average measurement uncertainty of atomization angle for A, B and C nozzles is 0.659° , 0.427° and 1.291° , and the average measurement uncertainty of deflection angle is 0.389° , 0.231° and 0.487° , respectively. Therefore, the test method of nozzle atomization angle based on image processing can provide intuitive and effective basis for evaluating nozzle atomization performance.

Keywords: atomization angle; deflection angle; image processing; threshold segmentation; edge recognition; measurement uncertainty

0 引言

液体火箭发动机工作过程中,燃料和氧化剂经过喷嘴雾化成细小液滴,在推力室进行蒸发、混合和燃烧产生高温燃气,高温燃气通过喷管产生推力^[1]。喷嘴雾化过程对发动机燃烧具有重要影响,关系发动机燃烧稳定与效率^[2-3]。其中,雾化角是评价雾化性能的重要指标之一^[4]。如果燃料喷嘴雾化角过大,喷出的燃料将会穿出氧化剂区域而造成燃料和氧化剂混合不良,降低燃烧效率,此外还会因为燃料喷射到推力室壁面上造成结焦或积碳现象,影响传热效果,导致发动机推力不足,甚至造成超温事故;如果燃料喷嘴雾化角过小,燃料和氧化剂雾滴不能有效地弥散在推力室,造成燃料和氧化剂混合不均匀,导致燃烧效率较低,影响发动机性能^[5]。因此,准确测量喷嘴出口雾化角对验证喷嘴结构设计具有重要意义。

基于图像处理的雾化角测量方法广泛应用于评估喷嘴性能及检测喷嘴结构设计缺陷。刘祺等采用阴影法和纹影法进行光学测量,基于高速摄像机拍摄喷雾图像,标定喷嘴头部端面直径和图像中断面直径像素点个数计算比例关系,通过比例关系和喷雾边缘像素点个数得到雾化角所需计算的边界长度,从而得到雾化角数值,发现雾化角大小随着背压的增大呈现出单调递减的关系^[5]。施智雄等基于背光阴影成像技术获得了扇形喷嘴出口的喷雾图像,基于图像二值化和边缘提取得到雾化角的边缘直线,从而得到喷嘴雾化角数值,并研究了

相同压力下不同孔径扇型喷嘴出口雾化角以及不同压力下扇形喷嘴出口雾化角的变化^[6]。杨国华等基于高速阴影技术和图像处理方法研究了两种不同螺旋升角的螺旋形实心锥喷嘴的雾化角变化规律^[7]。雒晨辉等利用自行设计搭建的喷雾性能测试平台,采用高速摄影获得喷雾图像,通过专业图像处理分析软件 Image-Pro Plus 6.0 获得喷嘴雾化角^[8]。周进华利用数码相机获得喷雾图像,并通过 AutoCAD 软件选取喷雾炬外包络线处理得到雾化角^[9]。基于图像处理的喷嘴雾化角测量广泛应用于喷嘴雾化性能评估中,但图像处理算法及测量精度评估并未开展系统研究工作。

因此本文设计搭建采用远心透镜光学成像实时雾化角测量系统,研究了基于图像灰度阈值分割、边缘识别和角度分析的图像处理算法,据此开展标准角度块角度测量实验验证,并将该系统应用于典型雾化喷嘴雾化角测量,基于雾化图像处理实现喷嘴雾化角与偏斜角测试。

1 雾化角图像测量原理

1.1 成像系统及其原理

雾化角测量系统主要有背光照亮模式和底光照亮模式两种成像模式。背光照亮模式采用背光源,通过均匀亮度的平行光照射,背景为白色,目标因为遮挡亮光呈现黑色,优点是背景为均匀的白色,不用考虑复杂的背景;底光照亮模式采用底光源,从被测物体的下方照亮,对于透明的被测物体,可以更好地使被测物体被照亮,可以使得后面

的图像阈值分割将被测物体和背景分离。

成像系统由远心镜头、工业相机、光源和计算机组成。工业相机主要功能是图像采集,将光信号转变成电信号,具有稳定、高传输能力、抗干扰、高帧率、结构紧凑等优点^[10-11]。远心镜头的孔径光阑被放在镜头像方的焦平面上,在成像时只有平行于主光轴的光线被接收用于成像,其他的光线都会被光栅遮挡,所有的光线可看作来自无穷远处^[12]。因此,不同于一般的传统镜头,采用远心镜头能够抑制镜头的畸变,具有较高的分辨率,纠正了由于视差产生的问题,也具有较宽的景深,即在一定的物距范围内移动被测物体,在成像时得到的放大倍率不变,不会出现物体近大远小的问题^[13-14]。

1.2 图像处理算法

为实现喷嘴雾化图像的雾化角与偏斜角自动处理,本文研究了“图像二值化-边缘识别-直接拟合与处理”喷嘴雾化图像雾化角自动处理算法,如图1所示为雾化角图像处理典型实例。

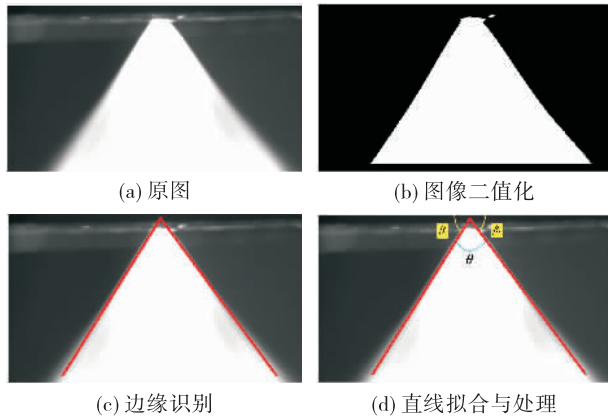


图1 雾化角图像处理典型实例

Fig.1 Typical example of atomization angle image processing

其中,对于图像二值化处理,采用大津法(OTSU阈值法)进行处理。大津法又被称为最大类间方差法,是按图像的灰度特性,将图像分成背景和目标两部分。类间方差值是评价灰度分布均匀性的一种指标,背景和目标之间的类间方差越大,说明构成图像的两部分的差别越大,当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分差别变小^[15-18]。采用遍历的方法得到使类间方差最大的阈值 T ,即

$$T = \arg \max \{g(T)\} \quad (1)$$

此外,对于直线拟合方法,喷嘴雾化角处理采用常用的最小二乘法^[19]。假设 x 和 y 之间的函数关系为一次函数关系,即

$$y = a + bx \quad (2)$$

式中: a 表示直线截距; b 表示直线斜率。对于经过图片处理后所识别出的 N 个点的坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, x_i 被认为是准确的,所有的误差只与 y_i 有关。下面利用最小二乘法把识别出的点拟合为直线^[20]。用最小二乘法估计参数时,要求观测值 y_i 的偏差的加权平方和 ε 为最小,即

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx)]^2 \quad (3)$$

由此,得到拟合直线的截距 a 和斜率 b 。

经过最小二乘法将识别出的像素点拟合成直线后,计算得出雾化角 θ 和偏斜角 β 分别为

$$\theta = \arctan b_2 - \arctan b_1 \quad (4)$$

$$\beta = \beta_1 - \beta_2 = \arctan b_1 + \arctan b_2 - 180^\circ \quad (5)$$

2 标准角度图像测试验证

2.1 标准角度块图像测试验证系统

标准角度块图像测试验证系统由远心镜头、工业相机、背光光源、标准角度块和计算机组成,如图2所示。远心镜头放大倍率为0.1倍,焦距300~500 mm;工业相机帧率90帧/s,拍摄图片 2×10^6 像素。背光光源采用平行均匀亮度的面光源,从背后照亮标准角度块,从而由成像系统拍摄图像,传输至计算机,由图像处理算法得到角度,验证其精度。

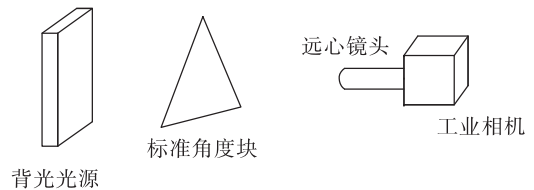


图2 基于背光照亮模式的标准角度块标定系统

Fig.2 Calibration system of standard angle block based on backlight illumination mode

标准角度块选用哈尔滨量具刃具集团有限责任公司的角度量块,分别有 15.17° 、 30.33° 、 45.50° 、 50.00° 、 60.67° 和 75.83° ,精度如表1所示。

表 1 标准角度块精度规格

Tab. 1 Accuracy specification of standard angle block			
精度等级	工作角偏差/($^{\circ}$)	测量面的平面度公差 $a/\mu\text{m}$	测量面对基准面 A 的垂直度公差 $b/(^{\circ})$
2	± 30	0.3	90

2.2 标准角度块测试结果与分析

6 种标准角度块图像处理结果如图 3 所示。

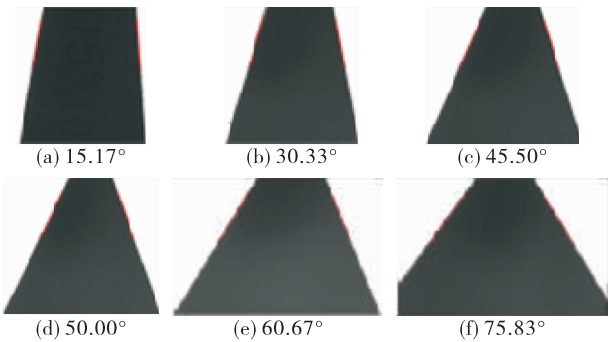


图 3 标准角度块图像处理结果

Fig. 3 Image processing results of standard angle block

对于 6 种不同角度的标准角度块,每个标准角度块测量 5 次,计算平均值、方差、不确定度以及相对误差,验证角度测试系统的精确性以及重复性。

对于等精度的多次测量,平均值 \bar{X} 、标准偏差 S_X 、A 类不确定度 μ_A 、B 类不确定度 μ_B 、不确定度

μ 、相对误差 δ 计算公式为

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \tag{6}$$

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \tag{7}$$

$$\mu_A = \frac{t_p(n - 1)}{\sqrt{n}} S_X \tag{8}$$

$$\mu_B = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}} = \frac{0.01^{\circ}}{\sqrt{3}} = 0.006^{\circ} \tag{9}$$

$$\mu = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \tag{10}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% = \frac{\bar{X} - L}{L} \times 100\% \tag{11}$$

式中: X_i 为第 i 次的测量值; n 为测量次数; Δ 为绝对误差; L 为真值; ΔI 为仪器误差; $\frac{t_p(n - 1)}{\sqrt{n}}$ 是与测量次数、置信概率有关的量,当置信概率为 0.90 时,该值为 1.69。

标准角度块测量结果如表 2 所示。由表 2 标准角度块测量结果可以看出,测量结果的不确定度均小于 0.10° ,相对误差均在 $\pm 2\%$ 以内,表明测量结果的重复性和精确性良好,所以认为基于图像处理的角

度测试系统的可行性良好,可以应用于喷嘴雾化角的实际测试。

表 2 标准角度块测量结果

Tab. 2 Test results of standard angle block

标准角度块 角度值/($^{\circ}$)	第一次 测量值/($^{\circ}$)	第二次 测量值/($^{\circ}$)	第三次 测量值/($^{\circ}$)	第四次 测量值/($^{\circ}$)	第五次 测量值/($^{\circ}$)	测量平均 值/($^{\circ}$)	不确定 度/($^{\circ}$)	相对误 差/%
15.17	15.29	15.38	15.28	15.28	15.32	15.33	0.067	1.01
30.33	30.20	30.15	30.12	30.26	30.18	30.18	0.090	-0.50
45.50	45.45	45.42	45.47	45.53	45.42	45.46	0.078	-0.09
50.00	50.02	50.11	50.04	50.08	50.03	50.07	0.064	0.11
60.67	60.68	60.72	60.71	60.73	60.69	60.71	0.036	0.06
75.83	75.88	75.81	75.86	75.91	75.85	75.86	0.063	0.04

3 喷嘴雾化角图像测量与结果分析

3.1 基于底光照亮模式的雾化角测试系统

基于底光照亮模式的喷嘴雾化角测试系统主

要有底光光源、喷嘴、工业相机、远心镜头、计算机和顶杆、固定板等器件,如图 4 所示。测试喷嘴为 A、B 和 C 型离心喷嘴,喷嘴结构尺寸不同,采用水作为工质,喷注压强相同。底光光源位于喷嘴正下

方,照亮喷嘴出口处的喷雾场。通过设置合适的曝光时间,由远心镜头和工业相机共同组成的成像系统获得喷嘴出口处清晰的雾场图像,通过 USB 传输线将拍摄的图片传输到计算机图像处理程序中,最后获得喷嘴出口雾化角数值。

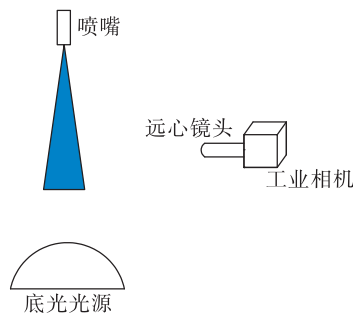


图 4 基于底光照亮模式的喷嘴雾化角测试系统
Fig. 4 Measurement system of nozzle atomization angle based on bottom light illumination mode

3.2 测试结果与分析

3.2.1 典型图像处理

对于 A、B、C 这 3 种不同型号的喷嘴,典型处理图像处理结果如图 5 所示。

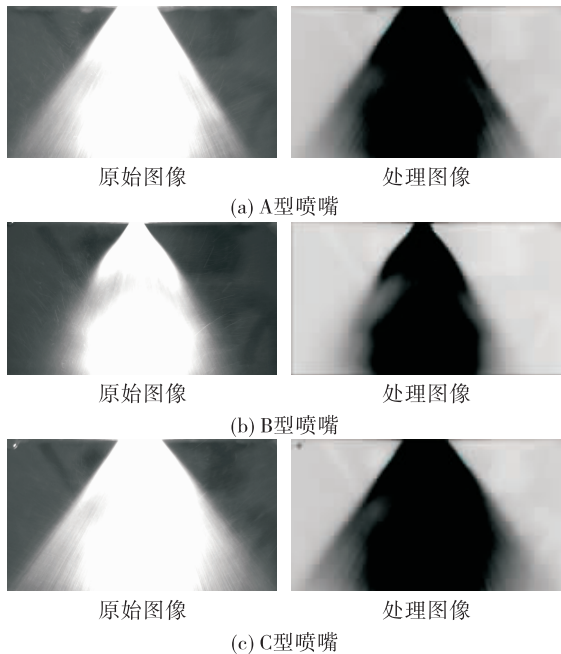


图 5 3 种不同型号喷嘴测试图像处理结果
Fig. 5 Test image processing results of three different types of nozzles

通过观察 A、B、C 这 3 种不同型号的喷嘴可知, A、C 型喷嘴的雾场整体呈现锥形,从上而下雾场边缘较平直,没有明显的缩小或扩张的趋势;B 型喷嘴的雾场整体呈现钟形,喷嘴出口处的雾场先扩张后收缩,测量时距不同喷嘴出口距离的雾化角大小不同,因此根据实际要求,选取不同喷嘴出口距离测试雾化角。测量 A、C 型喷嘴的雾化角和偏斜角时选取距离喷嘴出口处大约 15 ~ 20 mm 范围;测量 B 型喷嘴时选取距离喷嘴出口处大约 5 ~ 10 mm 范围。

3 种不同型号喷嘴雾化角和偏斜角数值大小如表 3 所示。

表 3 3 种不同型号喷嘴雾化角和偏斜角数值
Tab. 3 Atomization angle and deflection angle of three different types of nozzles 单位:(°)

喷嘴型号	雾化角数值	偏斜角数值
A 型	67.32	1.60
B 型	68.96	0.97
C 型	72.76	1.29

由结果显示,该方法能够有效获得清晰的图像,利用基于阈值分割和直线拟合等图像处理算法能够获得雾化角与偏斜角,为评判喷嘴雾化性能提供直观依据。

3.2.2 A、B、C 型典型喷嘴测量结果与分析

从 A、B、C 型 3 种不同喷嘴中各选取一个典型喷嘴,采用测试系统重复测量 3 次,测量结果分别如图 6、图 7、图 8 所示。

经过喷嘴雾化图像雾化角处理算法自动处理,可以得到 A、B、C 型典型喷嘴的雾化角和偏斜角大小分别如表 4、表 5、表 6 所示,雾化角、偏斜角平均值和不确定度如表 7 所示。由 A、B、C 典型喷嘴测试图像处理结果可见测试系统具有较好的重复性,可以满足测试若干个喷嘴的雾化角和偏斜角。

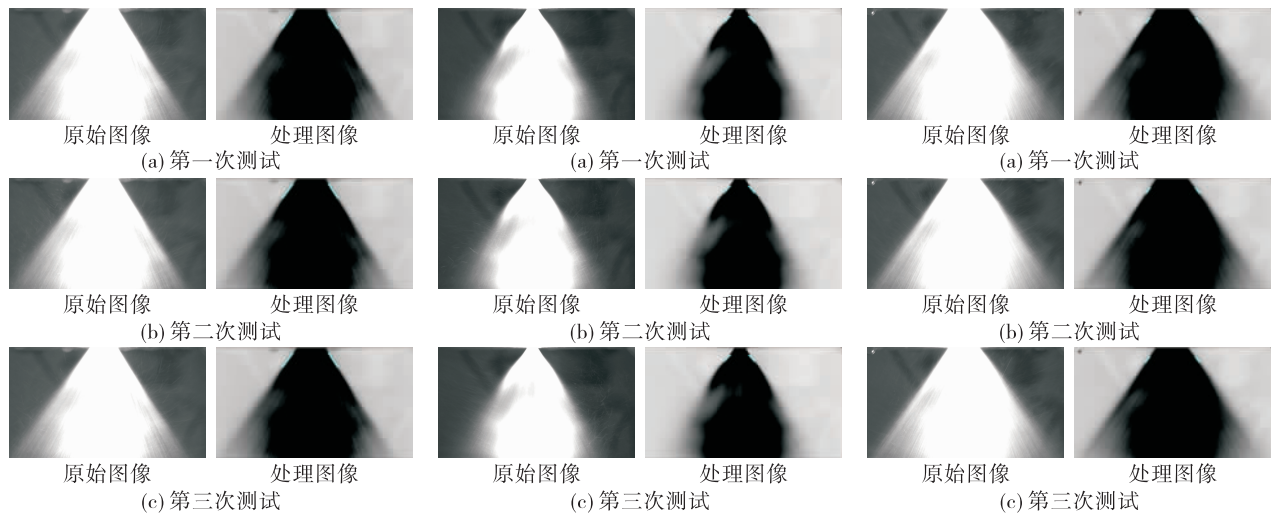


图 6 A 型典型喷嘴测试图像处理结果

图 7 B 型典型喷嘴测试图像处理结果

图 8 C 型典型喷嘴测试图像处理结果

Fig. 6 Image processing results of typical nozzle test of type A

Fig. 7 Image processing results of typical nozzle test of type B

Fig. 8 Image processing results of typical nozzle test of type C

表 4 A 型典型喷嘴雾化角和偏斜角测试结果

Tab. 4 Test results of atomization angle and deflection angle for typical type A nozzle

单位: (°)

测试	雾化角数值	偏斜角数值
第一次	67.32	1.60
第二次	67.87	1.76
第三次	68.27	1.84

表 5 B 型典型喷嘴雾化角和偏斜角测试结果

Tab. 5 Test results of atomization angle and deflection angle for typical type B nozzle

单位: (°)

测试	雾化角数值	偏斜角数值
第一次	68.96	0.97
第二次	69.13	1.27
第三次	68.80	0.80

表 6 C 型典型喷嘴雾化角和偏斜角测试结果

Tab. 6 Test results of atomization angle and deflection angle for typical type C nozzle

单位: (°)

测试	雾化角数值	偏斜角数值
第一次	72.76	1.29
第二次	71.05	0.81
第三次	72.58	1.53

表 7 3 种单个典型喷嘴雾化角、偏斜角的平均值和不确定度

Tab. 7 Average values and uncertainties of atomization angle and deflection angle for three single typical nozzles

单位: (°)

喷嘴 型号	雾化角 平均值	偏斜角 平均值	雾化角 不确定度	偏斜角 不确定度
A 型	67.82	1.73	0.806	0.207
B 型	68.96	1.01	0.279	0.402
C 型	72.46	1.21	0.624	0.620

3. 2. 3 A、B、C 型不同喷嘴测量结果与分析

A、B、C 型 3 种型号喷嘴,同种型号喷嘴的不同编号只是代表了喷嘴产品的批次,喷嘴之间的个体差异主要是由加工时的细微工艺差异引起。因此对于 A、B、C 不同型号喷嘴选取 6 个编号,每个喷嘴分别测试 3 次,每次测量值雾化角和偏斜角大小分别如表 8、表 9、表 10 所示,两者的平均值和不确定度如表 11 所示。

由上述表结果显示,A、B、C 型 3 种不同喷嘴的雾化角不确定度平均值为 0.659°、0.427° 和 1.291°,偏斜角不确定度平均值为 0.389°、0.231° 和 0.487°,可见 A、B 型喷嘴雾化角和偏斜角重复性较好,C 型喷嘴雾化角和偏斜角重复性较差;B 型喷嘴雾化角和偏斜角每次测量结果波动性较小,A、C 型喷嘴雾化角和偏斜角每次测量结果波动性较大,可能是喷嘴出口压力波动或喷嘴设计结构缺陷导致。

表 8 A 型喷嘴测试结果										
Tab. 8 Test results of type A nozzle										单位:(°)
喷嘴编号	第一次测试值		第二次测试值		第三次测试值		测试平均值		不确定度	
	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角
1	67.32	1.60	67.87	1.76	68.27	1.84	67.82	1.73	0.806	0.207
2	66.26	1.53	67.25	1.23	67.63	1.86	67.05	1.54	0.366	0.533
3	69.83	1.86	70.77	1.98	70.04	1.64	70.21	1.83	0.834	0.291
4	68.62	1.20	69.33	1.68	68.21	1.81	68.72	1.56	0.958	0.543
5	69.45	2.12	69.11	1.68	69.74	1.78	69.43	1.86	0.533	0.390
6	74.66	3.12	75.03	2.68	74.50	2.93	74.73	2.91	0.459	0.373

表 9 B 型喷嘴测试结果										
Tab. 9 Test results of type B nozzle										单位:(°)
喷嘴编号	第一次测试值		第二次测试值		第三次测试值		测试平均值		不确定度	
	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角
1	68.96	0.97	69.13	1.27	68.80	0.80	68.96	1.01	0.279	0.402
2	70.36	1.02	70.46	1.25	71.16	1.13	70.66	1.13	0.737	0.195
3	69.52	0.86	69.23	1.05	68.80	1.02	69.18	0.98	0.612	0.173
4	72.08	0.97	72.61	0.86	72.20	1.03	72.30	0.95	0.470	0.146
5	70.27	1.22	70.09	1.02	70.38	0.96	70.25	1.07	0.247	0.230
6	68.40	1.12	68.53	0.84	68.27	0.93	68.40	0.96	0.220	0.242

表 10 C 型喷嘴测试结果										
Tab. 10 Test results of type C nozzle										单位:(°)
喷嘴编号	第一次测试值		第二次测试值		第三次测试值		测试平均值		不确定度	
	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角	雾化角	偏斜角
1	72.76	1.29	72.05	0.81	72.58	1.53	72.46	1.21	0.624	0.620
2	66.44	1.50	67.10	0.98	68.45	1.08	67.33	1.19	1.731	0.466
3	60.41	0.80	60.92	1.26	59.27	1.07	60.20	1.04	1.428	0.391
4	70.70	1.48	72.67	1.86	71.83	1.09	71.73	1.48	1.671	0.651
5	66.55	1.13	66.68	0.84	68.50	1.54	67.24	1.17	1.843	0.594
6	69.90	1.46	69.78	1.27	69.39	1.24	69.69	1.32	0.451	0.202

表 11 3 种喷嘴雾化角、偏斜角的平均值和不确定度平均值										
Tab. 11 Average values of atomization angle and deflection angle and the average values of uncertainty for three types of nozzles										单位:(°)
喷嘴型号	雾化角平均值		偏斜角平均值		雾化角不确定度平均值		偏斜角不确定度平均值			
A 型	69.72		1.91		0.659		0.389			
B 型	69.96		1.02		0.427		0.231			
C 型	68.11		1.24		1.291		0.487			

4 结 论

1) 利用远心镜头、工业相机、背光光源等组成基于图像处理的角度测试系统,研究了“图像二值化-边缘识别-直接拟合与处理”喷嘴雾化图像雾化角自动处理算法,对 6 个标准角度块进行标定测试,角度测试结果的不确定度均小于 0.10° ,相对误差均在 $\pm 2\%$ 以内,表明标准角度块测试结果的重复性和精确性良好,基于图像处理的角度测试系统的可行性良好。

2) 利用基于底光照亮模式的角度测试系统对 A、B、C 这 3 种典型单个喷嘴进行测量,雾化角和偏斜角的不确定度均小于 1° ,表明该测试系统对于喷嘴雾化角与偏斜角的测试重复性好;利用基于底光照亮模式的角度测试系统对 A、B、C 这 3 种典型多个喷嘴进行测量,雾化角不确定度平均值为 0.659° 、 0.427° 和 1.291° ,偏斜角不确定度平均值为 0.389° 、 0.231° 和 0.487° ,测量结果为喷嘴性能评估提供重要参考。

参考文献:

- [1] 周帅,林磊,杜大华,等. 液体火箭发动机对接焊管道振动疲劳性能研究[J]. 火箭推进,2021,47(3):90-97.
ZHOU S, LIN L, DU D H, et al. Study on vibration fatigue of butt welded pipe of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(3): 90-97.
- [2] 谢福寿,杜飞平,王晓峰,等. 液氧煤油补燃发动机泵间管路高温富氧燃气掺混冷凝特性数值研究[J]. 推进技术,2021,42(7):1544-1552.
- [3] 孙迎霞,王浩,陈剑,等. 液体推进剂的新型加注方法[J]. 火箭推进,2019,45(6):60-65.
SUN Y X, WANG H, CHEN J, et al. A new injection method for liquid propellant[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(6): 60-65.
- [4] 田畅. X 型旋流压力喷嘴雾化参数及降尘效率预测模型[D]. 湘潭:湖南科技大学,2019.
- [5] 刘祺,夏津,黄忠,等. 航空发动机离心式喷嘴宏观喷雾特性[J]. 推进技术,2021,42(2):362-371.
- [6] 施智雄,潘科玮,平力,等. 喷嘴雾化参数轨迹图像法测量实验研究[J]. 化工学报,2020,71(8):3527-3534.
- [7] 杨国华,王凯,雷凡培,等. 螺旋形实心锥喷嘴雾化特性试验研究[J]. 热能动力工程,2021,36(3):77-86.
- [8] 雒晨辉,黄靖龙,孙世彪,等. 司马煤业有限公司掘进机外喷雾喷嘴雾化特性及降尘性能研究[J]. 采矿技术,2022,22(1):166-170.
- [9] 周进华. 小油量气泡雾化喷嘴的试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [10] 马牙川. 基于 FPGA 的智能工业相机系统的研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [11] 许敬华. 基于远心镜头的视觉齿轮倒角测量方法研究[D]. 天津:天津科技大学,2016.
- [12] 王明威. 基于双远心镜头的虹膜图像采集方法[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [13] STEGER C, ULRICH M. A camera model for line-scan cameras with telecentric lenses[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(1): 80-99.
- [14] 王洪益. 一种远心镜头的标定方法及精度研究[J]. 光学技术,2018,44(3):359-364.
- [15] HAN H H, DENG H Y, DONG Q, et al. An advanced OTSU method integrated with edge detection and decision tree for crack detection in highway transportation infrastructure[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 9205509.
- [16] 姜联堂,何慧玲. 基于图像灰度变换的 OTSU 阈值优化算法[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2021,40(3):325-330.
- [17] CHEN X L, LI J, HUANG S W, et al. An automatic concrete crack-detection method fusing point clouds and images based on improved OTSU's algorithm[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1581.
- [18] LI N, LV X, XU S K, et al. An improved water surface images segmentation algorithm based on the OTSU method[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2020, 29(15): 2050251.
- [19] 张婷婷. 基于分数阶理论与最小二乘法的复杂背景车道线检测研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- [20] 樊德金,杨龙兴,丁力,等. 基于改进最小二乘法的焊缝直线提取研究[J]. 热加工工艺,2018,47(15): 217-220.