

基于优化过程的全场彩虹技术反演算法

宋飞虎 李臻峰

江南大学机械工程学院江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 全场彩虹技术是一种有效地同时测量雾化液滴粒径分布及折射率的方法,但现有算法或多或少地存在一些不足之处,故提出一种基于最小二乘法及优化过程的全场彩虹技术反演算法。从拍摄的全场彩虹中提取若干特征信息来估计粒径分布范围及折射率的初始值,用于构建线性方程组;通过最小二乘法解方程组获得粒径分布,并根据结果重构全场彩虹;基于所提出的优化过程不断调整粒径分布范围及折射率,最终得到较为准确的粒径分布及折射率。通过数值计算和实验研究验证了该算法的可行性,结果表明折射率的反演误差在 10^{-4} 量级,反演的平均粒径的误差小于 $3\ \mu\text{m}$,反演的粒径分布与真实情况一致。

关键词 测量; 全场彩虹技术; 粒径分布; 雾化; 反演算法

中图分类号 TN201 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.071203

Reversion Algorithm of Global Rainbow Technique Based on Optimization Process

Song Feihu Li Zhenfeng

Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract Global rainbow technique (GRT) is an effective method for the simultaneous measurement of the size distribution and refractive index of the spray droplets. However, there are some shortcomings in the existing algorithm. An improved reversion algorithm of GRT is proposed based on the least square method and optimization process. The features are extracted from the intensity distribution of the captured global rainbow to estimate the initial value of the size distribution and refractive index of the droplets, so as to build the linear equations. The linear equations are solved by the least square method to get the particle size distribution, and global rainbow is reconstituted according to the results. The refractive index and size distribution of the droplets are optimized according to the angular deviation between the reconstructed and captured rainbows. Both numerical simulations and experiments are carried out to evaluate the feasibility of the improved algorithm. The results show that the error of the inversion result of refractive index is of the order of magnitude 10^{-4} , and the error of the mean diameter is better than $3\ \mu\text{m}$, and the reverse grain diameter is in accordance with the true value.

Key words measurement; global rainbow technique; size distribution; spray; reversion algorithm

OCIS codes 120.5820; 200.4560; 290.1350; 290.5820

1 引言

雾化过程广泛地应用于燃烧、冷却、加湿和消防等各个领域,探索新的雾化场参数测量方法是该领域重要基础研究内容之一。目前,各种用于计算和预测雾化液滴粒径等过程参数的理论模型被广泛地应用于各个领域^[1-2]。与此同时,通过各种实验测量手段,对理论模型进行验证也是不可或缺的一个环节。光学测试技术由于其具有非接触、准确和快速等优点,更加适合对雾化场参数的测量。目前光学测试技术有很多种,如成像技

收稿日期: 2016-02-23; **收到修改稿日期:** 2016-03-24; **网络出版日期:** 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51406068)、江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放基金(FM-201504)

作者简介: 宋飞虎(1986—),男,博士,副教授,主要从事基于光散射的多相流测试技术方面的研究。

E-mail: sssongfh@sina.com

术^[3]、多普勒技术^[4]和光散射技术^[5-6]等。然而,成像技术和多普勒技术均只能测量液滴粒径尺寸和速度,而无法测量折射率这一与温度紧密相关的参数。为了解决这一问题,一些改进方法被提出。1990年,Nawqi等^[7]提出一种改进的相位多普勒(PDA)技术,可实现对液滴折射率的测量,然而该方法的系统极为复杂,且折射率的测量误差高达0.02,远大于彩虹技术的误差^[8],因此该方法至今仍未得到广泛应用。1993年Sanker等^[9]将彩虹技术与多普勒技术进行融合,通过后向散射光的分布来测量液滴折射率,通过多普勒技术测量液滴粒径。然而多普勒技术测量算法主要基于球形颗粒模型,当喷雾场中含有大量非球形液滴时,PDA技术的测量精度将会受到影响。

随着光散射理论的日益完善,基于光散射的测试技术被广泛地应用^[10-14],其中,彩虹技术是一种典型的光散射测量方法。1988年,Roth等^[15-16]将彩虹技术用于单个液滴折射率和粒径的测量。1999年,van Beeck等^[17]将全场彩虹技术用于雾化液滴群的尺寸及折射率测量。大量球形度很高的液滴形成单液滴彩虹,叠加后高频波纹结构彼此抵消,形成全场彩虹结构;而非球形度较高的液滴形成的彩虹结构,所在的散射角域会因液滴长短轴比的不同而或多或少的偏离,大量形状随机的非球形液滴彩虹叠加后,低频的背景光叠加于全场彩虹之上。van Beeck等^[18-19]针对全场彩虹结构,提出了基于经验公式的算法,通过提取全场彩虹主Airy峰、主峰之后的波谷和第二Airy峰等特征点的角位置,在预设粒径分布函数的前提下,计算雾化液滴的折射率和粒径分布。然而,该方法的测量误差主要来自于经验公式较小的实用范围,当液滴的参数明显偏离建立经验公式的条件时,误差将会增大。2007年,Wilms等^[20]通过调节透镜组中的视场光阑孔径,拍摄喷雾场中单个液滴的彩虹结构,并从大量图像中筛选出球形液滴的彩虹,再由统计的方法得出粒径分布。然而该方法由于需在较长时间段内进行统计,因此在测得雾化液滴参数的变化时存在一定的滞后。Wu等^[8,21]提出在无需预设粒径分布函数的前提下,根据全场彩虹图像由最小二乘法求解粒径分布的反演算法。然而,这一方法并未通过全场彩虹图像预先确定反演算法中粒径分布的大致计算范围,而是人为地提出一个区间,故其通用性较差。

为了解决上述问题,本文提出了基于最小二乘法及寻优过程的全场彩虹技术反演算法,同时测量了雾化液滴的粒径分布和折射率。基于全场彩虹的光强分布特性,从中建立一系列经验公式来估算粒径的折射率、平均粒径及粒径分布范围;在此基础上,基于约束性最小二乘法来求解粒径分布;通过所提出的寻优过程来不断优化上述折射率和粒径分布,提高其精度;最后采用数值计算及实验研究的方法对该算法进行了验证。

2 全场彩虹技术改进算法

2.1 全场彩虹技术测量原理

激光照射单个液滴时,在其后向散射区域会形成一阶彩虹结构。在雾化场中存在的大量液滴由于受表面张力和重力的共同作用,会形成近似的椭球。当球形液滴椭球化后,几何彩虹角会随长短轴比的不同而或多或少地发生偏离。当大量液滴受激光照射后,球形度较好的液滴形成的单液滴彩虹叠加后形成全场彩虹图像,而球形度较差的液滴形成的彩虹叠加后形成低频的背景光强,全场光强分布如图1所示。由于各单液滴彩虹的高频波纹结构的峰谷相互抵消,全场彩虹主要表现出低频的Airy结构;而图1中光强的整体增强是由叠加的低频背景光强造成^[18]。全场彩虹技术主要根据图中的彩虹图像进行参数反演计算,从而实现雾化液滴参数的测量。

2.2 折射率及粒径分布范围初始值估计方法

本文提出的反演算法采用线性方程组

$$\mathbf{I}_g = \begin{bmatrix} I_g(\theta_1) \\ I_g(\theta_2) \\ \vdots \\ I_g(\theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(d_1, \theta_1, m), & \cdots, & I(d_i, \theta_1, m), & \cdots \\ I(d_1, \theta_2, m), & \cdots, & I(d_i, \theta_2, m), & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ I(d_1, \theta_j, m), & \cdots, & I(d_i, \theta_j, m), & \cdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N(d_1) \\ N(d_2) \\ \vdots \\ N(d_i) \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{N}, \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} I(d_1, \theta_1, m), & \cdots, & I(d_i, \theta_1, m), & \cdots \\ I(d_1, \theta_2, m), & \cdots, & I(d_i, \theta_2, m), & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ I(d_1, \theta_j, m), & \cdots, & I(d_i, \theta_j, m), & \cdots \end{bmatrix}, \mathbf{N} = \begin{bmatrix} N(d_1) \\ N(d_2) \\ \vdots \\ N(d_i) \end{bmatrix}$$

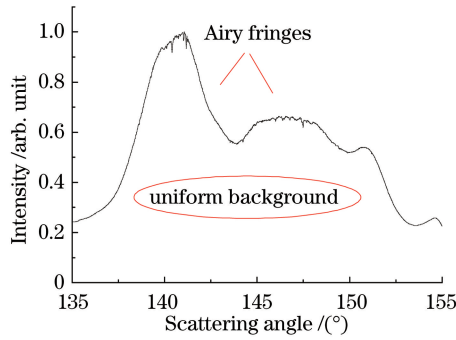


图1 拍摄的全场彩虹图像的光强分布

Fig. 1 Beam intensity distribution of captured global rainbow

式中 $I_g(\theta_i)$ 为由相机拍摄的全场彩虹在各个散射角上的光强, $I(d_i, \theta_i, m)$ 为由 Nussenzveig 理论计算得到的粒径为 d_i 的液滴产生的一阶彩虹在散射角 θ_i 上的光强, m 表示液体折射率, $N(d_i)$ 为粒径为 d_i 的液滴数量。通过求解该方程组可以计算得到雾化液滴的粒径分布。在构建该线性方程组之前, 需预估矩阵 \mathbf{A} 中所描述的粒径范围和折射率, 基于对全场彩虹光强分布特性的研究, 提出经验公式^[19-20]

$$D_{\text{mean}} = 462.6\lambda (\theta_{\text{min}} - \theta_1)^{-3/2}, \quad (2)$$

$$\theta_{\text{rg}} = \theta_1 - 0.2117(\theta_{\text{inf}2} - \theta_{\text{inf}1}), \quad (3)$$

$$\theta_{\text{rg}} = \pi - 4\arcsin\sqrt{(4 - m^2)/(3m^2)} + 2\arcsin\sqrt{(4 - m^2)/3}, \quad (4)$$

$$\sigma = 0.2469q_1^2 - 1.06q_1 + 1.237, \quad (5)$$

$$q_1 = (I_1 - I_{\text{min}})/(I_1 - I_2), \quad (6)$$

$$\begin{cases} d_{\text{lower}} = \max(D_{\text{mean}} - 4.5\sigma, 0) \\ d_{\text{upper}} = D_{\text{mean}} + 4.5\sigma \end{cases}, \quad (7)$$

式中 D_{mean} 表示平均粒径估计值, I_1 和 I_2 分别为全场彩虹中第 1、第 2 个 Airy 结构峰值的光强, θ_1 和 θ_2 分别为两峰值对应的散射角, I_{min} 和 θ_{min} 为两个峰值之间散射区域的光强极小值及其对应的散射角, $\theta_{\text{inf}1}$ 和 $\theta_{\text{inf}2}$ 为 Airy 结构第 1 个峰中光强等于 $(I_1 + I_{\text{min}})/2$ 时所对应的两个散射角, σ 为对数正态分布分散系数, d_{lower} 和 d_{up} 分别表示预估粒径范围的上下限, \max 表示取最大值。全场彩虹中的若干特征值分布如图 2 所示。

不同平均粒径下 q_1 与分散系数的关系如图 3 所示, 从图中可以看出 q_1 受平均粒径的影响很小, 而主要受分散系数的影响。根据(7)式结合平均粒径估计值可以预估粒径范围, 其中 d_{lower} 和 d_{upper} 是预估粒径范围的上下限。

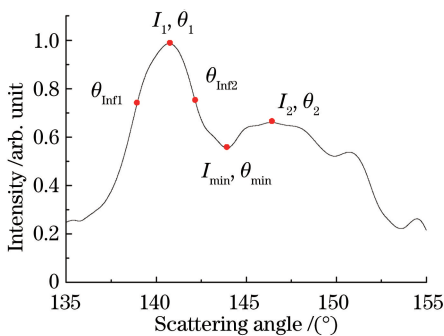


图2 全场彩虹中的若干特征值

Fig. 2 Characteristic value in global rainbow

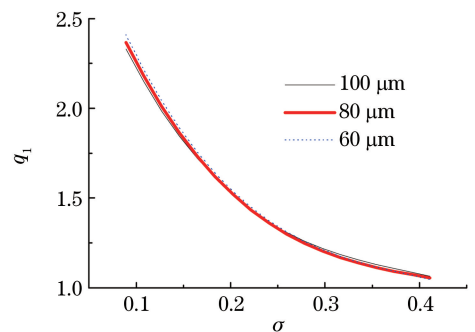
图3 对数正态分布分散系数 σ 与 q_1 的关系Fig. 3 Dispersion factor of lognormal distribution versus q_1

图 4 中的柱状图为液滴粒径真实分布, 其分布情况为标准正态分布, 平均粒径为 $100 \mu\text{m}$, 分散系数为 $10 \mu\text{m}$ 。根据(2)~(7)式所示的经验公式, 对相应的全场彩虹图像进行分析可以得到图中所示的粒径范围预估。从图中可以看出, 预估范围略大于真实范围, 这样可以兼顾效率及反演精度, 从而说明根据(2)~(7)式对粒径范围的估计不只适用于对数正态分布。

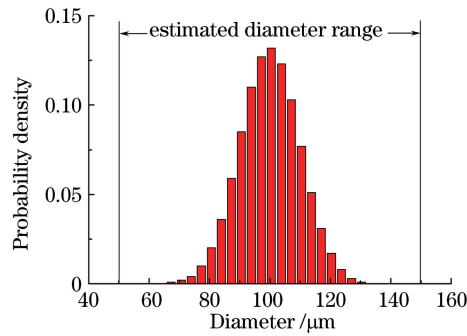


图4 粒径范围估计

Fig. 4 Diameter range estimation

2.3 折射率及粒径分布范围的优化过程

在对折射率和粒径范围的初值进行估计后,可以构建如(1)式所示的线性方程组。进而通过约束性最小二乘法来求解粒径分布 N 。通常单喷嘴雾化液滴的粒径分布呈现单峰的曲线,故约束条件主要根据这一特性来建立。例如,粒径分布离散为 15 个值,则 $N(d_1) \sim N(d_6)$ 依次增大, $N(d_{10}) \sim N(d_{15})$ 依次减小, $N(d_6) \sim N(d_{10})$ 处于同一量级。

在上述约束条件下,求解线性方程组可以得到粒径分布,再根据求解结果和折射率估计值可以重构全场彩虹图像。为了进一步提高测量精度,通过比较重构全场彩虹和拍摄的全场彩虹图像的差异来优化粒径分布及折射率,优化过程如图 5 所示。全场彩虹主峰的散射角主要受液滴折射率的影响,主峰散射角随着折射率的增大而增大;主峰宽度主要受粒径大小的影响,粒径越大则主峰宽度越窄^[18-19]。因此,折射率根据拍摄及重构的彩虹图像的主峰峰值角位置的偏离来调整,如图 6(a)所示;粒径范围的均值根据拍摄及重构的彩虹图像的主峰右侧半宽[即 $\theta_{inf2} - \theta_1$,如图 6(b)所示]的差异来进行调整,进而根据(7)式来调整粒径范围。重复上述优化过程,直到图 6 中所示的两个偏差小于设定值(根据所需精度及计算机硬件合理设置),最后即可得到折射率及粒径分布的优化结果。

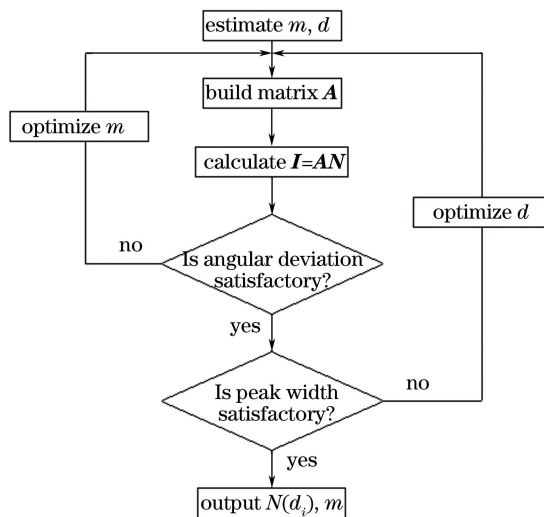


图5 优化过程流程图

Fig. 5 Flow chart of optimization process

3 数值计算研究

先设置粒径分布及折射率作为真实值,再由 Mie 理论计算全场彩虹光强分布,作为从拍摄得到的彩虹中提取到的光强信息;然后在彩虹光强分布中添加白噪声(信噪比为 20 dB)来模拟拍摄彩虹图像过程中的一系列外界干扰。图 7 为含噪声的彩虹光强分布,对应的液滴折射率为 1.333,粒径按对数正态分布,其均值

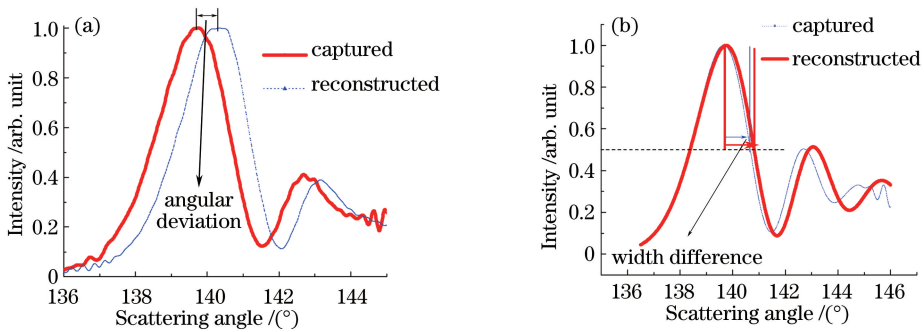


图 6 调整折射率及粒径分布范围的评定标准。(a) 光强峰值的角度偏差；(b) 主峰右半宽之差

Fig. 6 Judgment standard for optimization of refractive index and diameter range.

(a) Angular deviation of the peak intensity; (b) difference of the right half width in the first Airy fringe

为 $60\ \mu\text{m}$ 、分散系数为 0.1, 由上述反演算法, 得到的折射率反演结果为 1.3332, 粒径分布均值为 $60.3\ \mu\text{m}$ 。图 8 为设定的粒径分布曲线(视为真实值)和反演得到的粒径分布。从结果中可以看出, 折射率和粒径均值的反演误差均较小, 且反演的粒径分布的轮廓与真实值大致一致。图 9 为原彩虹及重构的彩虹光强分布的比较, 可以看出两者重合较为一致, 尤其是两者的第一峰几乎重合。

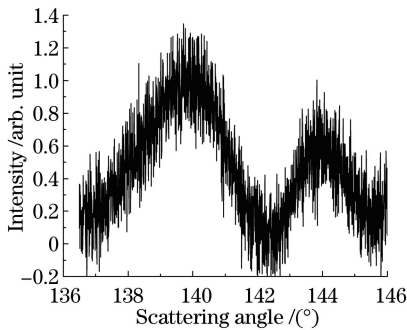


图 7 添加白噪声的全场彩虹

Fig. 7 Global rainbow with white noise

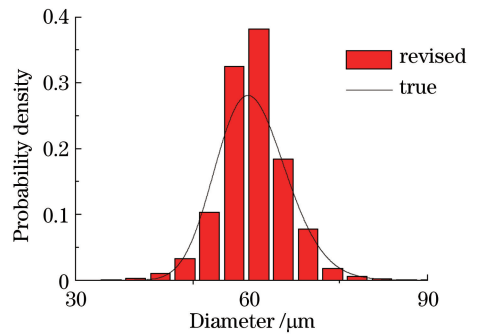


图 8 粒径分布反演结果

Fig. 8 Inversion results of size distribution

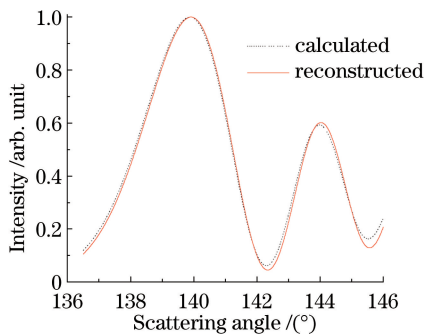


图 9 原彩虹与重构彩虹的比较

Fig. 9 Comparison between original calculated and reconstructed rainbows

针对小型喷嘴以水为工质这一情况进行数值计算, 雾化液滴参数如表 1 所示, 其中 1.333~1.34 为水在室温附近时的折射率, $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 为小型喷嘴工作时的常见平均粒径。根据表中参数, 由 Mie 理论计算的全场彩虹光强分布来模拟光强测量值, 同样在其中添加 20 dB 的白噪声。通过本文提出的算法, 折射率及平均粒径的反演结果如图 10 和图 11 所示, 从中可以看出当折射率取值为 1.333~1.34 以及平均粒径取值为 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 时, 折射率的误差小于 4×10^{-4} , 平均粒径的误差小于 $3\ \mu\text{m}$ 。上述数值计算结果表明所提出的算法具有可行性。

表 1 不同全场彩虹的折射率及粒径分布的设定值

Table 1 Refractive indices and size distributions for calculated global rainbows

$d / \mu\text{m}$	m	Dispersion of normal distribution	Dispersion of lognormal distribution / μm
50	1.333	0.1	5
60	1.335	0.1	10
70	1.336	0.1	10
80	1.337	0.15	15
90	1.338	0.15	15
100	1.34	0.2	20

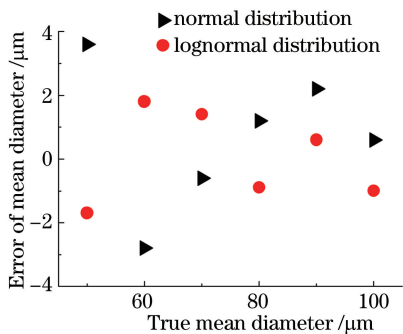


图 10 折射率反演误差

Fig. 10 Errors of inversion results of refractive index

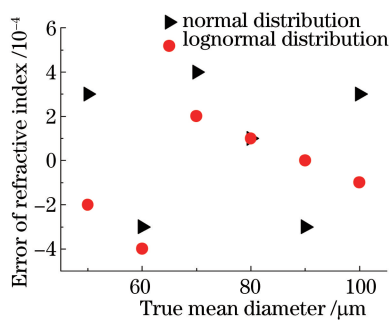


图 11 平均粒径反演误差

Fig. 11 Errors of inversion results of mean diameter

4 实验结果及讨论

为了通过实验来验证反演算法,构建如图 12 所示的实验系统,系统主要包括测量部分及雾化部分。雾化部分主要包括喷嘴、水泵、压力传感器、水管、水箱和阀。去离子水在水泵的作用下从水箱进入喷嘴;阀用来调整管路中水的压降,从而实现雾化液滴粒径的调节;压力传感器用于测量喷嘴进口处流体的压力。测量部分包括光学平台及若干光学支架、激光器(100 mW, 532 nm)、偏振片、两块凸透镜、狭缝和线阵 CCD 相机(Delsa, 02k40)。激光光线所在的高度位于喷嘴下方 10 cm 处,从而保证雾化充分。液滴散射光线经第 1 块透镜作用后,相同散射角的散射光线会聚为一点,再由第 2 块透镜将该点成像到 CCD 相机上。狭缝放置于液滴对应的第 1 块透镜的像平面上,通过调整狭缝宽度,仅让一部分液滴的散射光通过,从而达到区域选择的目的。通过标定工作可以将 CCD 上的各像素点与散射角一一对应,从所拍摄的全程彩虹图像中得到光强分布。

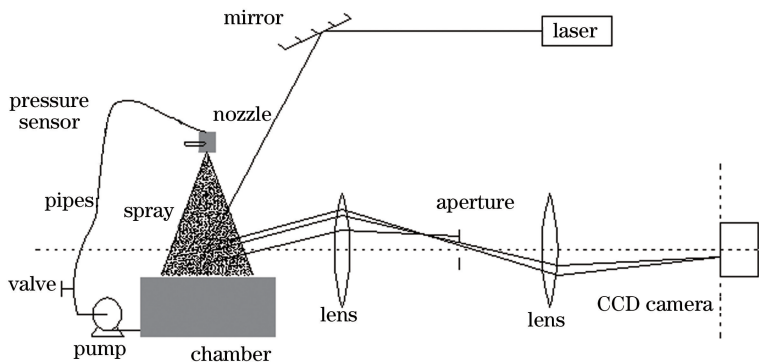


图 12 实验系统图

Fig. 12 Experimental system diagram

调节阀门开度,分别使雾化喷嘴处的压力保持在 0.22, 0.27, 0.32, 0.4 MPa。图 13 为各工作压力下雾化液滴全场彩虹的光强分布。对各全场彩虹使用本文所提出算法反演计算后,得到的粒径分布如图 14 所示,从中可以看出随着压力的增大,液滴的粒径减小。随着压力的升高,所对应的平均粒径分别为 74.53, 71.00,

66.80, 60.83 μm , 折射率反演值分别为 1.3341, 1.3345, 1.3343, 1.3340, 各折射率反演值之差小于 5×10^{-4} 。通过反演值重构的不用压强下的全场彩虹光强分布如图 15 所示, 其中采用去除背景光强并归一化后的全场彩虹作为对比。由于全场彩虹中含有近似均匀的背景光强, 对各散射角上的光强减去同一光强值, 其取值依据为归一化后全场彩虹低频分量的 I_{\min} , 其值为 0.1。由图 15 可以看出, 拍摄及重构彩虹的光强分布较为相似。

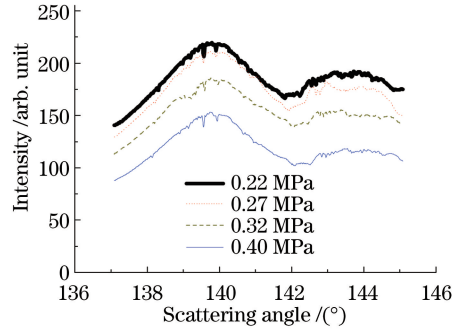


图 13 拍摄的全场彩虹的光强分布

Fig. 13 Intensity distribution of the captured global rainbows

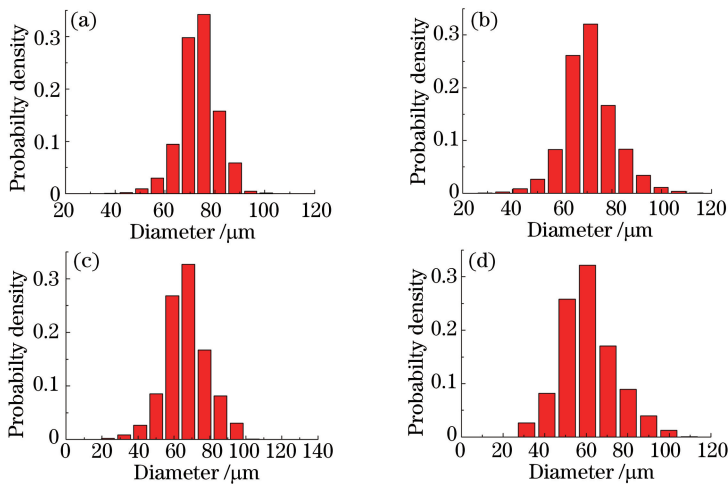


图 14 不同压力下粒径分布的反演结果。(a) 0.22 MPa; (b) 0.27 MPa; (c) 0.32 MPa; (d) 0.4 MPa

Fig. 14 Inversion results of size distributions under different pressures.

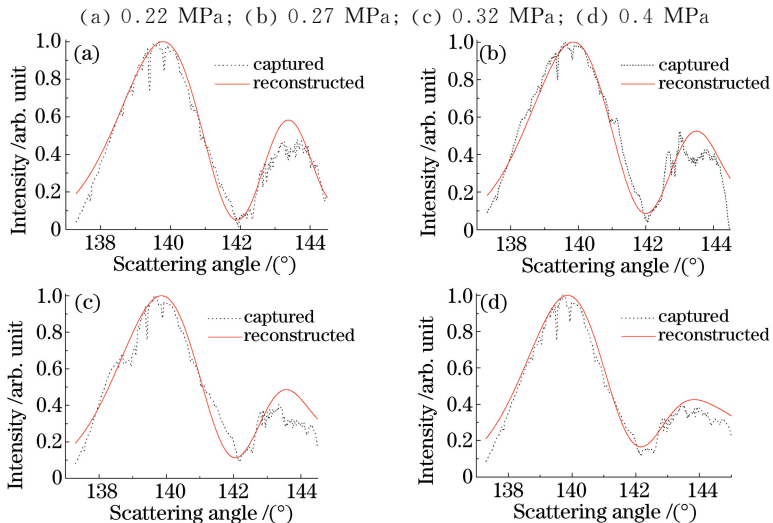


图 15 不同压力下拍摄及重构的全场彩虹的光强分布比较。(a) 0.22 MPa; (b) 0.27 MPa; (c) 0.32 MPa; (d) 0.4 MPa

Fig. 15 Comparison of intensity distribution between captured and reconstructed rainbows under different pressures.

(a) 0.22 MPa; (b) 0.27 MPa; (c) 0.32 MPa; (d) 0.4 MPa

5 结 论

提出一种基于优化过程的全场彩虹反演算法,用于同时计算雾化液滴的粒径分布及折射率。数值计算与实验验证了算法的可行性。数值计算结果表明:折射率的反演误差在 10^{-4} 量级,平均粒径反演结果的误差小于 $3\ \mu\text{m}$,且粒径分布反演结果的轮廓与真实情况类似。实验结果表明:随着雾化压力的增大,液滴平均粒径减小,折射率反演结果的误差小于 5×10^{-4} 。

参 考 文 献

- 1 Y Li, S Kong. Integration of parallel computation and dynamic mesh refinement for transient spray simulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198(17): 1596-1608.
- 2 P Pogorevc, B Kegl, L Skerget. Diesel and biodiesel fuel spray simulations[J]. Energy Fuels, 2008, 22(2): 1266-1274.
- 3 Y Tao, L Chance, L Baoren. Full scale fruit vision sorting system design-factors and considerations[C]. Proceedings of the FPAC Conference, Chicago, 1995: 14-22.
- 4 V G McDonell, C P Wood, G S Samuelsen. A comparison of spatially-resolved drop size and drop velocity measurements in an isothermal chamber and a swirl-stabilized combustor[C]. 21st Symposium on Combustion, Pennsylvania, 1986, 21(1): 685-694.
- 5 H C Hust, H C van de Hulst. Light scattering by small particles[M]. New York: Dover Publications, 1957: 136-156.
- 6 R Foord, E Jakeman, C J Oliver, *et al.*. Determination of diffusion coefficients of haemocyanin at low concentration by intensity fluctuation spectroscopy of scattered laser light[J]. Nature, 1970, 227(5255): 242-245.
- 7 A Naqwi, F Durst, G Kraft. Sizing of sub micrometer particles using a phase-Doppler system[J]. Applied Optics, 1991, 30(33): 4903-4913.
- 8 X Wu, Y Wu, S Saengkaew. Concentration and composition measurement of sprays with a global rainbow technique[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(12): 125302.
- 9 S V Sankar, K M Ibrahim, D H Buermann, *et al.*. An integrated phase Doppler/rainbow refractometer system for simultaneous measurement of droplet size, velocity[C]. 3rd International Congress on Optical Particle Sizing, Yokohama, 1993: 275-283.
- 10 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- 11 Zhang Xusheng, Guo Liang, Huang Yong, *et al.*. Echo characteristic of Gaussian pulse laser in anisotropic scattering medium[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802003.
张旭升, 郭亮, 黄勇, 等. 各向异性散射介质中高斯脉冲激光的回波特性[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802003.
- 12 Gong Lei, Wu Zhensen, Dai Shaoyu, *et al.*. Study on difference field scattering properties between slightly rough optical surface and above redundant particles[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0829001.
巩蕾, 吴振森, 代少玉, 等. 微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子的差值场散射特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0829001.
- 13 Zhu Lili, Li Hui. Imaging by optically scattering objects and absorption objects with ultrasound-modulated optical tomography[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0204001.
朱莉莉, 李晖. 散射体和吸收体的超声调制光学成像[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0204001.
- 14 Bu Yichuan, Zhao Yongkai, Chen Zhengyan, *et al.*. Research on real-time aerosol particle shape identification based on scattered light detection[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0413003.
卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 等. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0413003.
- 15 N Roth, K Anders, A Frohn. Simultaneous measurement of temperature and size of droplets in the micrometer range[J]. Journal of Laser Applications, 1990, 2(1): 37-42.
- 16 N Roth, K Anders, A Frohn. Refractive-index measurements for the correction of particle sizing methods[J]. Applied Optics, 1991, 30(33): 4960-4965.
- 17 J P A J van Beeck, D Giannoulis, L Zimmer, *et al.*. Global rainbow thermometry for droplet temperature measurement[J]. Optical Letters, 1999, 24(23): 1696-1698.

- 18 J P A J van Beeck, L Zimmer, M L Riethmuller. Global rainbow thermometry for mean temperature and size measurement of spray droplets[J]. Particle & Partical Systems Characterization, 2001, 18(4): 196-204.
- 19 M R Vetrano, J P A J van Beeck, M L Riethmuller. Global rainbow thermometry: improvements in the data inversion algorithm and validation technique in liquid-liquid suspension[J]. Applied Optics, 2004, 43(18): 3600-3607.
- 20 J Wilms, B Weigand. Composition measurements of binary mixture droplets by rainbow refractometry[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 2109-2118.
- 21 S Saengkaew, D Bonin, G Gréhan. On the measurements of particles smaller than 20 μm by global rainbow refractometry [C]. Proceeding of 5th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Macao, 2007, 914 (1): 430-436.