

# 燃烧室雾化场全息图像分割方法研究

韩长材 曹娜 雷岚 曹亮 徐青 欧阳晓平

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

**摘要** 通过分析不同情况下雾化场全息图像中粒子数随阈值变化的规律,建立了基于粒子数变化的阈值估计算法,并给出不同情况下最优阈值的选择依据。针对粒径 $20\ \mu\text{m}$ 以下的雾化场全息图像,选择粒子数随阈值变化的一阶微分最小值所对应的阈值为最优阈值。该方法已应用于超燃冲压发动机燃烧室雾化场实际测量工作中,并获得了较好的结果。

**关键词** 全息; 超声速雾化; 粒子数; 二值化

中图分类号 TN249; TK16 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.080901

## Study on a Method for Segmentation of Atomization Field Holography in a Combustion Chamber

Han Changcai Cao Na Lei Lan Cao Liang Xu Qing Ouyang Xiaoping

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** By counting the detected particles in atomization field holographic image at different threshold levels, a threshold estimation algorithm, which is based on detected particle number varying with the threshold level, is modeled and the rules for optimizing threshold are generalized. For particle field holography with particle size less than  $20\ \mu\text{m}$ , the position corresponding to the smallest value in the difference curve of detected particle number varying with threshold levels, is defined as the best threshold. The results from a practical experiment show that this method can work well under such conditions.

**Key words** holography; supersonic atomization; particle number; binaryzation

**OCIS codes** 090.5694; 090.1995

### 1 引言

研究超声速气流中液体燃料的喷射雾化过程和液雾结构,获取雾化粒子的大小、分布及空间变化规律等信息,对优化超燃冲压发动机燃烧室设计和验证理论计算结果具有重要意义。测量雾化场的激光全息术,具有测量精度高、景深大及三维非接触全场测量等优点。雾化场全息图像虽然能够采用人工方法进行目标粒子识别提取,但是为了满足统计性要求<sup>[1-2]</sup>,需要对多幅图像进行处理,繁琐费时,因此,寻求一种实现简单、计算量小、性能稳定的阈值选取方法是实现雾化场粒子尺寸全息测量的关键环节之一。

目前通用的图像阈值选取方法无论是边缘检测法还是全局或局部阈值法,更适用于粒子尺寸较大(几十微米以上)、图像对比度高和粒子边缘清晰的场合。但是对于超声速气流中液体燃料雾化而言,粒子尺寸较小,平均粒子直径仅 $10\ \mu\text{m}$ 左右;同时,由于光的折射、较弱的再现光强以及环境背景光等因素的影响致使粒子信号强度微弱,上述方法不再适用<sup>[3-8]</sup>。黄琦兰等<sup>[9]</sup>采用双窗口背景校正法实现了粒子尺寸跨度较大的标准粒子板的目标检测和提取;Carter等<sup>[10]</sup>从粒子数、尺寸随阈值变化的规律出发,对管道内固气悬浮中的固体粉末图像进行了大粒子尺寸分布测量。在此基础上,通过遍历阈值的取值范围进一步认识了粒子数与阈值之间的关系,对标准粒子板图像和大粒子图像的阈值选取依据进行了分析,并推导出了超燃冲压发动机燃烧室雾化场图像阈值选取准则。

收稿日期: 2014-02-27; 收到修改稿日期: 2014-03-25; 网络出版日期: 2014-06-27

作者简介: 韩长材(1978—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事脉冲射线图像诊断及图像处理等方面的研究。

E-mail: changcai\_han@163.com

导师简介: 欧阳晓平(1961—),男,博士,研究员,主要从事脉冲射线测量方面的研究。E-mail: oyxp2003@yahoo.com

## 2 燃烧室雾化场全息图像分割

### 2.1 图像特征

超声速气流中液体燃料高温雾化下产生的粒子尺寸大部分只有几微米或十几微米,实际占有的像素数很少;此外,为了拍摄雾化场高速瞬变过程,激光脉宽只有皮秒量级,曝光时间很短,加上环境背景光的影响,使得雾化场再现像对比度差、边缘模糊,尤其对小粒子而言,信号微弱,加上散射光的影响,很难与背景区别开来<sup>[7-8,11]</sup>。图1为采用脉宽为150 ps的激光光源记录的某型号喷嘴雾化场再现像,热态温度为800 K。图1(b)中矩形区域内为目标粒子,圆形区域内为背景噪声、散斑噪声或脉冲噪声等<sup>[11-12]</sup>。由图1(b)可见,从空间角度来看,目标粒子占有的像素数与噪声占有的像素数相当,多数粒子在一维尺度上所占像素数仅为3~5个;从图像特征角度来看,目标粒子成点状结构,形态上近似圆形,其自身灰度值较为单一,而噪声在形态上无规律可言,其自身灰度值变化起伏大。

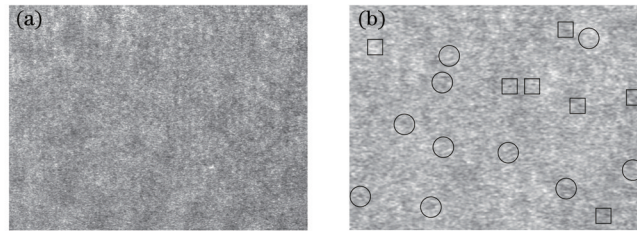


图1 (a) 雾化场全息再现像; (b) 图1(a)的右上角区域(约2倍放大率)

Fig.1 (a) Supersonic atomization holography; (b) top-right corner in Fig.1 (a) (magnification is about 2)

### 2.2 基于粒子数变化的阈值估计法

粒子所占像素的灰度值并非完全单一,因此,在图像二值化结果中粒子的数量、尺寸会随阈值变化而变化,研究这一变化规律,可以为雾化场全息图像阈值选取提供一种可行的技术途径。由于不同情况下全息图像中粒子尺寸分布差异很大,且粒子自身像素灰度值表现形式也不尽相同,因此阈值选取依据不具有—般性。对于粒径有几十微米的粒子场,空间上占的像素数较多,如图2所示,随着阈值的变化,二值化图像中粒子数会在一个较大阈值变化范围内出现一个稳定值,称为坪区。Carter等<sup>[10]</sup>选择坪区20%~25%处作为图像分割阈值,获得了很好的实验结果;黄琦兰等<sup>[9]</sup>采取双窗口背景拟合校正的方法,有效地增强了目标信息,该方法从根本上讲也是从阈值变化出发的。

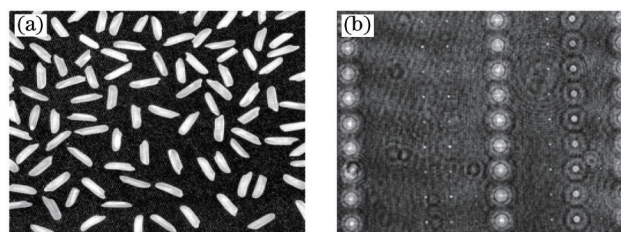


图2 (a) 大米粒图像; (b) 粒径范围在5~100 mm的标准粒子板全息再现像

Fig.2 (a) A non-holographic image of rice grains; (b) reconstructed image of standard particle plate with particle size from 5 mm to 100 mm

为了深入理解这一阈值估计算法的原理,图3中给出了不同阈值条件下图2(a)中的粒子数以及最佳二

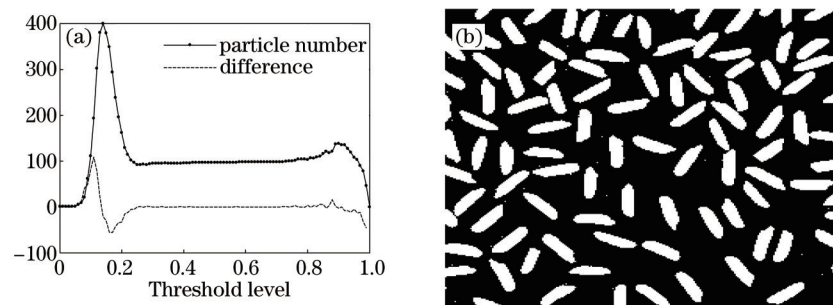


图3 (a) 不同阈值条件下图2(a)中的粒子数; (b) 最佳二值化分割结果

Fig.3 (a) Particle number in Fig.2(a) for varying threshold; (b) optimization binaryzation

值化结果。考虑到采样定理及全息照相系统分辨率的影响<sup>[8,11]</sup>, 仅对直径大于 2 pixel 的粒子进行统计计数。由图 3(a)可见, 坪区阈值范围为 0.3~0.8, 此时最优分割阈值为 0.4。

对于粒子尺寸较大且分布范围较窄的情况, 如图 2(a)所示, 坪区明显, 此时很容易找到最优阈值; 而对于粒子尺寸跨度较大的标准粒子板全息再现像, 如图 2(b)所示, 粒子数随阈值变化的坪区范围较窄, 阈值区间仅为 0.7~0.76, 如图 4(a)所示, 如果按照 Carter 等<sup>[10]</sup>的阈值计算方法, 最优阈值为 0.72, 此时标准粒子板全息再现像二值化结果如图 4(b)所示。

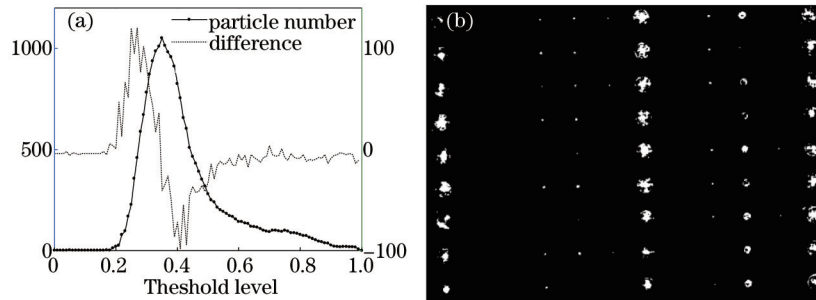


图 4 (a) 不同阈值条件下图 2(b)中的粒子数及其微分; (b) 图 2(b)二值化结果

Fig.4 (a) Particle number and its difference in Fig.2(b) for varying threshold; (b) binaryzation of Fig.2(b)

从图 4(b)中可以看出, 虽然噪声被剔除得很干净, 但是多数粒子尤其是大粒子出现了很大的残缺, 且小粒子丢失严重, 与理想结果相去甚远。造成该结果的原因显然是阈值选择过高。对照粒子数变化曲线及其一阶微分结果可以发现。在 0.5~0.7 阈值区间内, 粒子数减少趋势趋于平缓, 如果将坪区定义进行“延伸”的话, 坪区取值区间为 0.5~0.76, 此时最优阈值为 0.56, 二值化结果如图 5(a)所示。图 5(a)中虽然大粒子附近出现了一些非目标信号, 但是可以通过形态学等图像算法做进一步处理, 最终结果如图 5(b)所示。

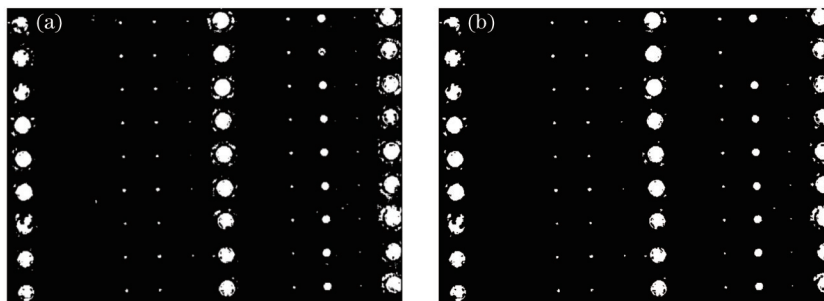


图 5 (a) 图 2(b)较优的二值化结果; (b) 图 2(b)最终二值化结果

Fig.5 (a) Better binaryzation of Fig.2(b); (b) final binaryzation of Fig.2(b)

### 2.3 燃烧室雾化场全息图像阈值估计

在雾化场粒子尺寸测量中, 由于大多数目标粒子直径在 20  $\mu\text{m}$  以下, 受全息记录系统分辨以及再现系统放大倍率的影响, 小粒子所占像素数太少, 且由于光的折射降低了粒子像强度, 使得与散射引起的部分区域的杂散光强度相当, 小粒子很容易淹没在噪声中<sup>[7-8,11]</sup>, 此时, 由图 1 得到的粒子数随阈值变化的曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 粒子数坪区没有出现。

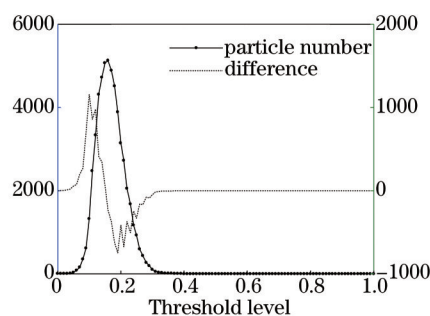


图 6 不同阈值条件下图 1(a)中的粒子数及其微分

Fig.6 Particle number and its difference in Fig.1 (a) for varying threshold levels

在阈值可取范围内,粒子数变化全过程可细分为:1) 阈值较低时,灰度值较高的不同区域会连接成一个大“粒子”,统计出来的粒子数较少;2) 随着阈值的不断提高,大“粒子”被打断,统计出来的粒子数逐渐增加,直至出现一个最大值;3) 阈值继续提高时,粒子数逐渐减少,其主要原因是噪声随着阈值的提高而逐渐被剔除,如果目标粒子尺寸很大时,阈值的提高在“侵蚀”目标粒子边缘过程中只对目标粒子尺寸产生影响,而对目标粒子数的影响很小,此时粒子数坪区出现。如果阈值再提高的话,粒子数会在坪区上限出现一个小峰,这一阶段就是第4个过程。产生第4个过程的原因是大粒子自身灰度值并非完全单一,阈值的提高会在大粒子内部分割出更多的小粒子;反之,目标粒子尺寸过小时,阈值的持续提高会对目标粒子尺寸和数量同时带来影响,这种情况下粒子数坪区和第4个过程都不会出现。

从上述讨论中得知,一般情况下,雾化场全息图的最优阈值应出现在粒子数随阈值变化的第3个过程,即最优阈值大于粒子数最多时所对应的阈值。分别从两个角度出发定性分析出最优阈值点。首先,在图6中选取六个不同阈值,从小到大依次为0.16、0.17、0.19、0.22、0.25、0.30,给出相应的图1(b)二值化结果,如图7所示。对照原始图1(b)中粒子和噪声信号位置和图7中二值化粒子空间分布位置发现,阈值区间为0.19~0.22时图像二值化结果较为理想。其次,从噪声的角度出发,背景噪声的强度相对于其他噪声或目标粒子的强度更加微弱,且空间上服从均匀分布,随着阈值的提高,此类噪声最先被剔除;同时,背景噪声在所有噪声中所占比重最大,因此,粒子数减少最快的地方对应大部分背景噪声被剔除的时候,此时阈值约为0.19,即图6中一阶微分最小值时所对应的阈值,与理论分析一致。综合考虑以上两个因素,可以定义粒子数随阈值变化的一阶微分最小值时所对应的阈值为图1(b)初步二值化的最优阈值。除此之外,选择一阶微分最小值作为分割阈值还有一个优点,可以实现阈值的图像处理程序自动选择,无人工干涉,从而为全息术中海量数据的快速处理奠定了基础。

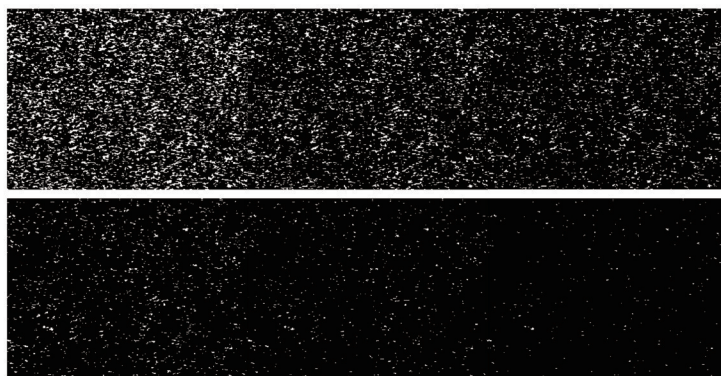


图7 阈值分别为0.16、0.17、0.19、0.22、0.25、0.30时图1(b)的二值化结果

Fig.7 Binaryzation of Fig.1 (b) for different thresholds of 0.16, 0.17, 0.19, 0.22, 0.25 and 0.30, respectively

#### 2.4 目标粒子判定

初步分割结果中除了目标粒子外,显然还包含一些非目标粒子,已无法通过阈值变化把二者区别开来,此时依据二者图像特征的差异,利用形态学等图像算法剔除非目标粒子。本文通过二值化粒子的长短轴之比、粒子中心是否在粒子区域范围内等近圆形粒子特征来判定目标粒子,算法流程如图8(a)所示,最终的分

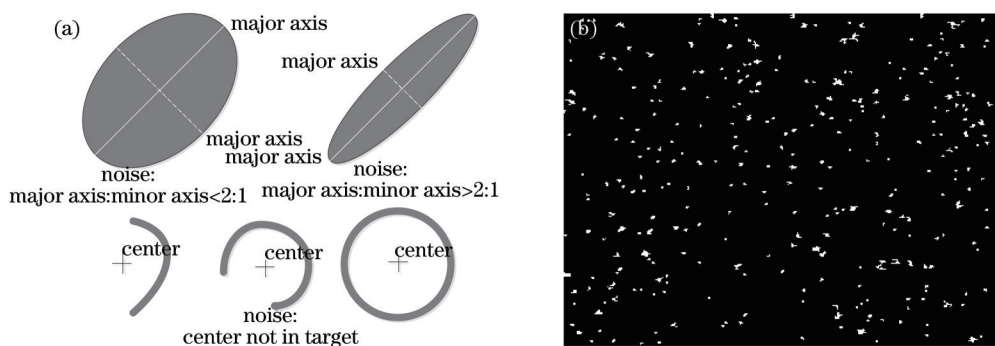


图8 (a) 形态学算法;(b) 图1(b)的最终分割结果

Fig.8 (a) Morphology algorithm;(b) final binaryzation of Fig.1(b)

割结果如图 8(b)所示。

### 2.5 基于粒子数变化的阈值估计法的局限性与优势

图像分割结果中超小粒子的数目受噪声影响很大,测量结果多于真实情况,导致实验测量得到的粒子平均直径偏小,如图 9 所示(图像尺寸从像素空间对应到物理空间,读出  $\Phi 20.8 \mu\text{m}$  标准丝的像素为 8 个)。虽然包括本文所述阈值估算法在内的图像阈值选取方法能够给出理想情况下的粒径测量误差<sup>[6,10,13]</sup>,但在实际应用中,其测量结果的误差难以量化给出。尽管如此,基于粒子数变化的阈值估计法的优点主要体现在两个方面:1) 在算法实现上,空间复杂度很低;2) 通用性较强。

除此之外,应用该阈值估算方法的前提是图像背景均匀。针对背景不均的图像,可利用形态学中的顶帽变换和底帽变换或中值滤波等方法进行背景估计和扣除等预处理操作,然后再通过该方法计算出最优阈值。

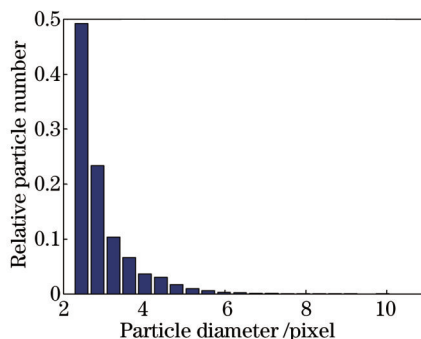


图 9 图 1(a)中粒子直径分布

Fig.9 Distribution of particle diameter in Fig.1 (a)

## 3 结 论

雾化场全息图像阈值选取是实现海量再现图像数据处理的关键,从实际应用出发详细研究了粒子数随阈值变化的规律,给出了不同情况下最优阈值的选择依据,扩大了基于粒子数变化的阈值估计方法的应用范围。利用该方法完成了粒径  $20 \mu\text{m}$  以下的燃烧室雾化场全息图像阈值选取,实现了目标粒子的识别和提取,取得了较好的应用效果。对该方法的应用前提和局限性进行了初步讨论。

### 参 考 文 献

- Liu Zichao, Zhao Yunhui. Liquid Spray and Grain Measurement with Laser[M]. Beijing: Space Navigation Press, 1988. 4.  
刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量原理[M]. 北京: 宇航出版社出版, 1988. 4.
- Cao Jianming, Wang Lei, Chen Zhiwei, *et al.*. Experimental study on spray characteristics of diesel-biodiesel blend fuel [J]. Vehicle Engine, 2008, (1): 33-35.  
曹建明, 王磊, 陈志伟, 等. 柴油-生物柴油混合燃料喷雾特性试验研究[J]. 车用发动机, 2008, (1): 33-35.
- Mehmet Sezgin, Bulent Sankur. Selection of thresholding methods for non-destructive testing applications[C]. 2001 International Conference on Image Processing, 2001. 3: 764-767.
- Oivind Due Trier, Anil K Jain. Goal-directed evaluation of binarization methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(12): 1191-1201.
- Guozhi Wang, Zhiqi Hao. Image processing of particle field hologram[C]. SPIE, 1995, 2406: 369.
- Luo Zhenxiong, Li Zeren, Li Zuoyou, *et al.*. An automatic segmenting method for the reconstructed image of high speed particle field[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 503-506.  
罗振雄, 李泽仁, 李作友, 等. 高速粒子场的全息再现图像的自动分割方法[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 503-506.
- Chen Liang, Song Wenyan, Xiao Yinli. Numerical simulation of liquid spray atomization in scram jet combustor[J]. Computer Simulation, 2008, 25(3): 75-78.  
陈亮, 宋文艳, 肖隐利. 超燃冲压发动机燃烧室液体射流雾化数值模拟[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 75-78.
- Cao Na, Cao Liang, Xu Qing, *et al.*. Methods for obtaining high quality reconstructed image of particles[J]. Laser Technology, 2009, 33(4): 419-421.  
曹娜, 曹亮, 徐青, 等. 高清晰度粒子场全息再现现象的获取方法[J]. 激光技术, 2009, 33(4): 419-421.

- 9 Huang Qilan, Pu Minghui. A new method of target detection used in holography on particle field[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(7): 608-609.  
黄琦兰, 蒲明辉. 一种用于粒子场全息图像的目标检测新方法[J]. *激光与红外*, 2006, 36(7): 608-609.
- 10 R M Carter, Y Yan. On-line particle sizing of pulverized and granular fuels using digital imaging techniques[J]. *Meas Sci Technol*, 2003, 14(7): 1099-1199.
- 11 Li Ru. Design on Particle Field Holographic Image Processing System[D]. Xi'an: Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999.  
李 茹. 粒子场全息图像处理系统的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1999.
- 12 Cai Xiaoou, Ni Xiaojing. Study on reduction of speckle noise in reconstructed image of digital hologram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050901.  
蔡晓鸥, 倪小静. 数字全息再现像散斑噪声消除的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050901.
- 13 Xie Zhengmao, Gao Limin, He Junhua. Design of high-speed photography optical system for air bubbles in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422002.  
谢正茂, 高立民, 何俊华. 水下气泡高速摄影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422002.