

基于主动轮廓方法提取雾化锥角

曾青华^{1,2}, 范慧杰^{2,3}, 王 岳¹, 孔文俊¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所 中国科学院轻型动力重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 中国科学院 沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 基于主动轮廓方法(ACM)原理,将 ACM 延伸开发应用到雾化锥角的测量领域.经过调试,ACM 成功捕捉到了雾锥边界以及喷雾矩在喷口后一定位置处出现的收缩特征,准确地获得了雾化锥角.验证结果显示:ACM 获得的雾化锥角数值与阴影法测量值之间的相对误差小于 1.5%.基于 ACM 提取雾化锥角方法的应用可以在保证实验结果准确度的同时降低工程应用成本.

关 键 词: 雾化锥角; 主动轮廓; 燃烧室; 喷嘴; 喷雾测量

中图分类号: V23; TK263.4

文献标志码: A

Spray angle tracking based on active contour method

ZENG Qing-hua^{1,2}, FAN Hui-jie^{2,3}, WANG Yue¹, KONG Wen-jun¹

(1. Key Laboratory of Light-duty Gas-turbine Chinese Academy of Sciences,

Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Active contour model (ACM) was developed to track spray angle of atomizer. Through debugging and testing, ACM successfully captured the boundary of atomizer spray. The feature of spray contraction at downstream part of spray was also obtained, and spray angle was got exactly. The verification results show that, the relative errors between the spray angle values measured by the ACM tracking and the shadowgraph measurement are less than 1.5%. The ACM tracking spray angle can reduce cost of engineering applications with an identical measuring accuracy.

Key words: spray angle; active contour; combustor; atomizer; measurement of spray

离心式喷嘴是一种简单机械压力雾化喷嘴,在航空发动机、燃气轮机、火箭发动机、锅炉等动力设备中均得到广泛应用.雾化锥角是表征离心式喷嘴雾化性能的重要参数之一,其特性关系到火焰稳定、燃烧效率及污染物生成,是喷嘴设计、运行的重要参数.

对于光学摄像获得的离心式喷嘴的喷雾图

像,雾化锥角的提取以往通常采用的是直接量取法^[1-3].一般做法是目测喷雾边界,确定喷雾两侧的边界线,然后采用量角器量取角度或者是将图像导入图像软件,采用功能模块中的量角器获得角度.这种方法简单直接,但带有很强的主观性,尤其是当图像边界模糊时,可能导致研究结果出现很大的误差.近年来,为了提高雾化锥角提取的

收稿日期:2012-12-11

基金项目:国家自然科学基金(50936005,50876110);国家高技术研究发展计划(2007AA050501,2007AA050502)

作者简介:曾青华(1982-),男,湖南常宁人,博士生,主要从事燃烧学研究.

精度,基于机器视觉的图像检测技术在此逐渐被开发应用.其中基于 MATLAB 平台的阈值法^[4-6]已应用到雾化锥角的研究中.阈值法基本原理是通过设定像素亮度的阈值实现区域分割从而获得边界.不过该方法仍然存在不足,其中最大缺陷是在阈值设定上存在很大的主观随意性.主动轮廓方法(active contour model, ACM)是实现区域分割和提取边界的最新方法^[7-13].该方法从原理上保证了提取边界结果的唯一性和最佳可信度,可以避免阈值法所包含的主观因素.目前 ACM 已开始应用于燃烧领域用以提取火焰前锋^[14-15],并取得了优于阈值法的研究结果.不过,从已有文献看,ACM 鲜有应用到雾化锥角的测量上.

本文建立喷雾实验系统,采集了离心式喷嘴喷雾图像,然后基于 ACM 原理,在原有程序基础上将 ACM 延伸开发应用到雾化锥角的测量上.经过调试,ACM 准确地捕捉到了雾锥边界以及喷雾矩在喷口后一定位置处出现的收缩特征. ACM 最终准确地获得了雾化锥角.该研究有助于提高雾化锥角测量的准确性,从而深化对雾化燃烧的认识.

1 喷雾图像采集

喷雾实验系统包括供油系统、马尔文粒径测量系统、喷雾图像采集系统等,如图 1 所示.喷雾图像采集由有效像素为 500 万的数码相机完成.供油压力由压力传感器测量,精度等级为 0.5.

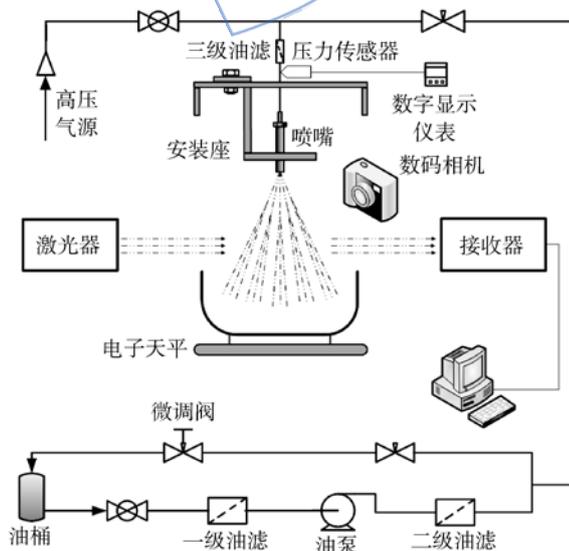


图 1 喷雾实验系统
Fig. 1 Experimental rig of spray test

实验喷嘴为商用小流量喷嘴.该喷嘴标称参数如下:压力为 1MPa,流量为 1.15 kg/h,雾化锥角为 60°.本文针对该型喷嘴进行雾化实验,工作压力稳定在 1MPa,数码相机进行喷雾图像采集,典型喷雾图像如图 2 所示.

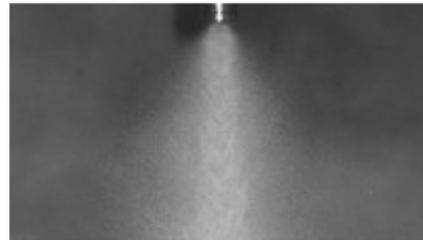


图 2 典型喷雾图像
Fig. 2 Typical image of spray

2 ACM 基本原理及算法

2.1 ACM 基本原理

ACM 的基本思想是用连续曲线来表达目标轮廓,并定义一个自变量包括曲线的能量泛函,将分割问题转变为求解泛函极小值问题,当泛函达到最小值时,曲线演化到目标边界.如图 3 所示.该方法获得的目标边界具有唯一性,且避免了边界噪声.

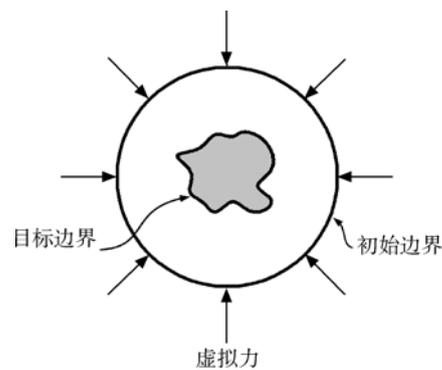


图 3 ACM 边界演化原理
Fig. 3 Principle diagram of boundary evolution based on ACM

2.2 ACM 算法

ACM 经过发展形成了一些分支,本文采用的是 Chan 和 Vese 提出的 ACM 模型^[8].设 I 为喷雾图像, $C(s)$ 为演化的曲线,弧长参数 $s \in [0, 1]$,定义能量泛函 $F(C)$ 如下:

$$F(C) = \alpha \int_0^1 \left| \frac{\partial C}{\partial s} \right| ds + \xi \int_{C_{in}} |I - c_1|^2 ds + (1 - \xi) \int_{C_{out}} |I - c_2|^2 ds \quad (1)$$

式(1)中 c_1, c_2 分别是 C 内部和外部像素亮度的平均值; α 和 ξ 为非负权值. 式(1)中第一项称为正则项, 主要由演化曲线自身性质来决定, 其作用是消除边界噪声, 保持演化过程中曲线的光滑性; 后两项称为数据项, 由图像本身决定, 主要作用是推动演化曲线向目标边界移动, 当演化曲线与目标边界重合时, 数据项达到极小值. 能量泛函 $F(C)$ 处于极小值时对应的曲线 C 即为要找的目标边界.

在式(1)数值求解过程中, 正则项与虚拟能量相比是小量, 边界位置基本上由虚拟能量确定, 对 α 的变化并不敏感. α 在边界演化过程中仅起到调节边界平滑程度的作用. ζ 和 $(1 - \zeta)$ 分别为 C 内部和外部虚拟能量的加权因子. 对于大部分区域像素亮度呈现渐变的特殊图像, ζ 值影响边界的位置, 可以根据物理模型调整 ζ 值以满足提取边界的需求. 对于能够观察到边界的图像没有必要加权, 选择 $\zeta = 0.5$. 对图像的测试显示 ζ 对边界的影响很小, 原因是收敛后两个虚拟能量项的值都趋近于零.

在对上述能量泛函极小化问题的数值求解过程中, 由于用参数化曲线表示的目标边界在演化的过程中常常会陷入自交, 而且演化结果受初始曲线的位置影响较大, 于是引入了水平集^[16]函数 $\phi(x, y)$ 来表示演化曲线

$$\begin{cases} C = \{(x, y) | \phi(x, y) = 0\} \\ C_{in} = \{(x, y) | \phi(x, y) > 0\} \\ C_{out} = \{(x, y) | \phi(x, y) < 0\} \end{cases} \quad (2)$$

水平集是将平面闭合曲线隐含表示为二维连续函数(level set 函数 $\phi(x, y)$) 的一个水平集(通常采用零水平集), 即有相同函数值的点集, 通过不断更新 level set 函数, 达到演化隐含在该函数中的曲线的目的.

引入水平集函数后, 式(1)中的能量泛函可表达为

$$F(\phi(x, y)) = \alpha \int_{\Omega} |\nabla H(\phi(x, y))| dx dy + \xi \int_{\Omega} |I(x, y) - c_1|^2 H(\phi(x, y)) dx dy + (1 - \xi) \int_{\Omega} |I(x, y) - c_2|^2 [1 - H(\phi(x, y))] dx dy \quad (3)$$

其中 $H(\cdot)$ 为 Heaviside 函数. 引入虚拟演化时间 t , 极小化能量泛函 F 的过程转换成下述微分方程的迭代求解过程, 即

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta_{\epsilon}(\phi) \left[\alpha \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) + \xi (I - c_1)^2 - (1 - \xi) (I - c_2)^2 \right] \quad (4)$$

初始条件

$$\phi(0, x, y) = \phi_0(x, y)$$

边界条件

$$\frac{\delta_{\epsilon}(\phi)}{|\nabla \phi|} \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$$

式中 $\delta_{\epsilon}(\phi)$ 是狄拉克 δ 函数的连续近似; \mathbf{n} 是图像边框的外法线方向, 每次迭代都根据曲线的演化位置更新 c_1, c_2 的值. 曲线的收敛速度由曲率 $\operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$ 控制, 为了保证曲率计算的精度, 我们在迭代求解的过程增加了对水平集函数的重新初始化步骤, 即曲线演化若干次(实验中取5次)以后重新初始化为符号距离函数^[17]

$$\phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} D(\mathbf{x}, C) & \mathbf{x} \in C_{in} \\ -D(\mathbf{x}, C) & \mathbf{x} \in C_{out} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{x} = (x, y)$, $D(\cdot)$ 为距离函数. 根据式(4), 随着 t 的推移, 曲线逐渐向目标边界移动, 并且最终停留在目标的边界上.

3 喷雾图像上雾化锥角的提取过程

图4给出了基于ACM提取雾化锥角的过程. 图中喷雾图像采用的是图2所示照片, 横坐标及纵坐标的单位均为像素. 图4(a)为程序运行的第3次迭代结果, 该图显示了ACM根据图像判断出的初始某时刻的喷雾边界. 图中存在许多小的封闭边界, 这些边界可能是逃逸的雾滴边界, 也可能是由图片噪声引起的. 随着时间的推移, 不断数值迭代, 正则项平滑边界, 消除噪声, 从而使那些小的非实际雾锥边界逐渐变小甚至消失, 而实际雾锥边界也就越来越明显. 图4(d)为第15次迭代后的结果, 此时已明显捕捉到了喷嘴附近平滑的雾锥边界, 喷嘴出口雾化锥角也已清晰可见. 不过, 此后的数值迭代过程中, 收敛速率变得缓慢, 迭代对雾化锥角的影响变得越来越小. 但进一步计算会促使喷雾下游边界接近目标边界. 图4(f)为第80次迭代后的结果, 该图更为清晰地捕捉到了雾锥边界, 同时喷雾矩在离喷口一定距离位置处出现的收缩特征也被捕捉到. 至此, 再进行迭代计算, 发现雾锥边界几乎不变, 捕捉到的雾化

锥角在相邻两次迭代结果间的误差小于 0.1%，此时认为计算最终收敛。再进行计算结果精度有所提高，但计算成本会明显增加。对收敛的边界进行输出，可以最终确定雾化嘴角为 61.6°。

图 4 喷雾边界演化过程实质为式(4)的数值求解过程。随着式(4)数值解的收敛， $\phi=0$ 水平集从初始位置开始演化，演化停止从而得到雾锥边界。由于最终位置是依据式(1)虚拟能量最小的原则由偏微分式(4)的解来确定，因此 ACM 依据图像自动得出的边界是最佳选择，不受人为因素的影响，结果具有最佳可信度。

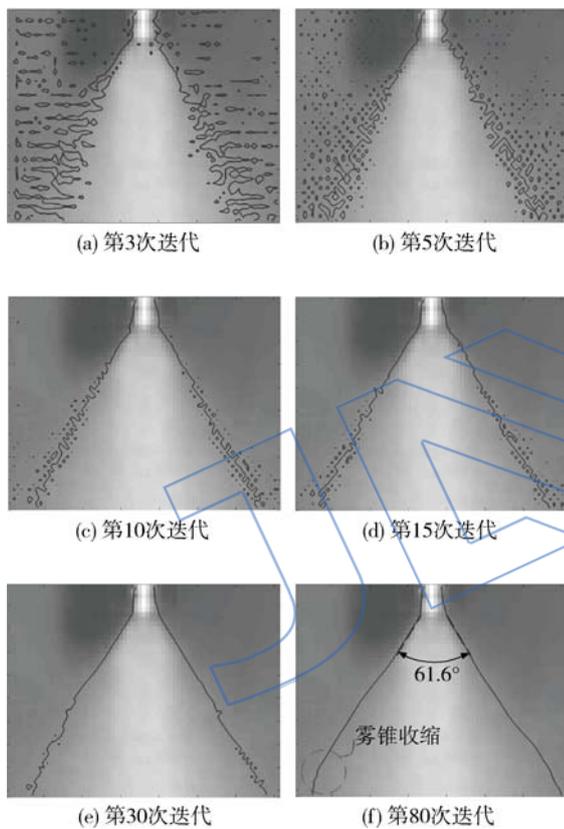


图 4 ACM 提取喷雾边界过程

Fig. 4 Spray boundary tracking process based on ACM

4 ACM 结果与常规方法的对比分析

常规的雾化锥角提取法为直接量取法和阈值法。直接量取法明显带有主观因素，对同一幅喷雾图像，不同个体判断出的雾化锥角会不一样，甚至同一个体在不同时空点得出的雾化锥角也存在很大不同。此外，当喷雾图像边界模糊时，雾化锥角的提取会更加困难，误差也会更大。因此直接量取法从原理上看无法克服这种测量上的不足。

阈值法是通过设定代表边界处像素亮度的阈

值来实现区域分离。通常首先设定分离气液边界的阈值，然后依据阈值将喷雾图像转换为只有 0 (黑色背景) 和 1 (白色喷雾矩) 的二值图像，并提取二值图像的边界点，最后用最小二乘法将提取的边界点进行线性拟合，两条拟合直线的夹角即为雾化锥角。从阈值法原理看出，设定阈值之后所有计算雾化锥角的步骤一般不会带来大的误差。阈值法在一定程度上消除了一些主观因素，相对直接量取法有了改进。但阈值法在阈值选定上存在很大主观因素，目前还没有合适的阈值选择方法，通常通过选择阈值得出结果后，再与原始图像直观对比后进行人为确定。

不同的阈值会产生不同的分析结果，图 5 给出了阈值对喷雾边界提取的影响。图中喷雾图像采用图 2 所示照片， ϵ 为用像素亮度表征的阈值。从图中看出，阈值改变，捕捉到的喷雾边界也随之变化。阈值法包含的主观因素削弱了提取雾化锥角的可信度。

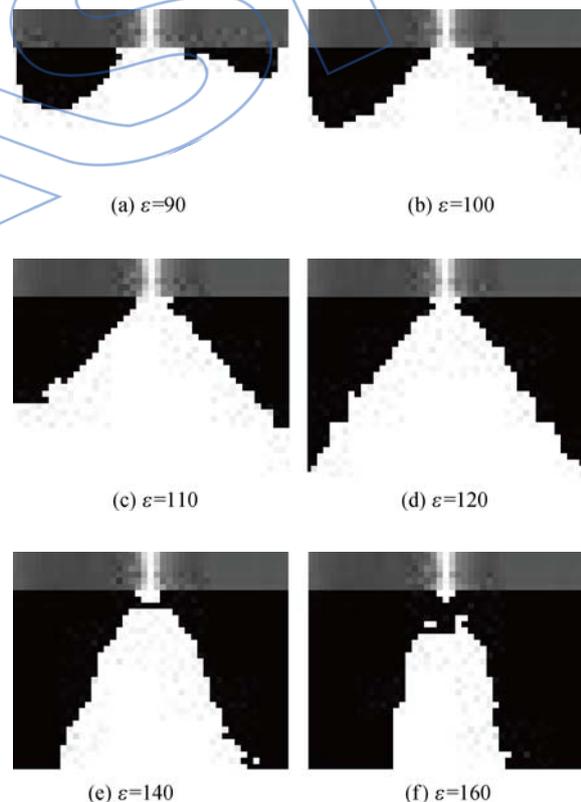


图 5 阈值对喷雾边界提取的影响

Fig. 5 Effect of threshold on spray boundary tracking

图 6 直观给出了分别利用 ACM 与阈值法针对图 2 所示图像所捕捉到的不同阈值下雾化锥角的对比。ACM 不受人为因素影响，不同阈值下雾化锥角保持不变；阈值法包含着主观因素，雾化锥

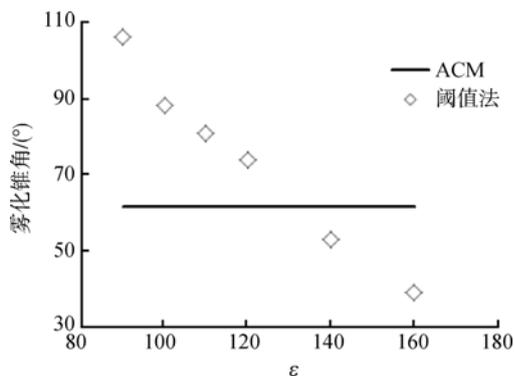


图6 ACM与阈值法得到的雾化锥角对比
Fig. 6 Spray angle captured respectively by ACM and threshold method

角随阈值增大而单向变化. 因此要想获得准确的雾化锥角, 需要选择合适的阈值.

可见, 直接量取法和阈值法明显受主观因素的影响, 在原理上均无法克服主观误差. 相对常规方法, 结合上节可看出, ACM从原理和实际效果方面均优于常规法.

5 ACM可靠性的验证

阴影法能够获得清晰的雾锥边界, 通过直接量取则可得准确的雾化锥角. 为了验证ACM的可靠性, 以文献[18]中通过阴影法获得的喷雾图像为基础, 采用ACM进行提取雾化锥角, 结果如图7所示. 图7显示, ACM获得的雾化锥角值与真实值(阴影法量取值)之间的相对误差小于1.5%. 该结果表明, ACM在本文研究中的应用是可靠的.

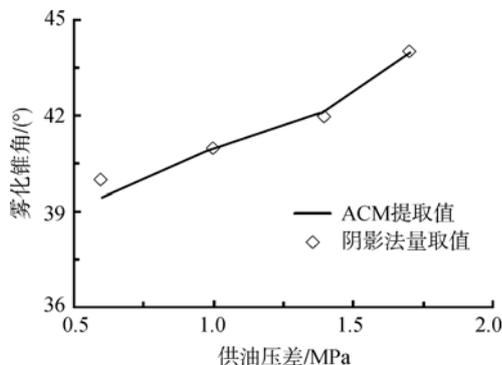


图7 ACM可靠性验证
Fig. 7 Reliability validation of the ACM

6 结论

本文建立喷雾实验系统, 采集了离心式喷嘴的喷雾图像. 基于ACM原理, 将ACM延伸开发

应用到雾化锥角的测量领域. 经过调试, ACM成功捕捉到了雾锥边界以及喷雾矩在喷口后一定位置处出现的收缩特征, 最终准确地获得了雾化锥角. 经过验证, ACM在雾化锥角提取的应用中是可靠的.

ACM从原理上保证了提取边界结果的唯一性和最佳可信度, 消除了阈值法尤其是直接量取法所包含的主观因素. 本文ACM的应用探索出了雾化锥角提取的新方法, 在保证实验结果准确度的同时可以降低工程应用成本.

参考文献:

- [1] 赵娜, 余永刚, 张琦, 等. 液体推进剂模拟工质在离心喷嘴内流动特性研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(12): 2168-2172.
ZHAO Na, YU Yonggang, ZHANG Qi, et al. Flow characteristics study of the simulated liquid propellant medium in the swirl nozzle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(12): 2168-2172. (in Chinese)
- [2] 刘定平, 余海龙. 基于“液包气”雾化的脱硫喷嘴特性实验[J]. 动力工程学报, 2012, 32(9): 693-732.
LIU Dingping, YU Hailong. Experimental study on spray characteristics of a gas-outside liquid-inside atomizer[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(9): 693-732. (in Chinese)
- [3] 方立军, 李斌. 压力式喷嘴雾化性能的试验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(2): 202-245.
FANG Lijun, LI Bin. Experimental study of the atomization performance of a pressure type nozzle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(2): 202-245. (in Chinese)
- [4] 邓巍, 丁为民, 柳平增, 等. 基于MATLAB的雾化图像处理及雾化角的测定[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7): 155-159.
DENG Wei, DING Weimin, LIU Pingzeng, et al. A method of processing the atomization image and detecting the spray angle[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2006, 34(7): 155-159. (in Chinese)
- [5] 金仁喜, 袁江涛, 杨立, 等. 压力喷嘴常温下雾化特性实验研究[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(3): 52-56.
JIN Renxi, YUAN Jiangtao, YANG Li, et al. Experimental study of spray characteristics of pressure nozzle at room temperature[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(3): 52-56. (in Chinese)
- [6] 史春建, 邱白晶, 吴春笃, 等. 基于机器视觉的常温烟雾机喷雾角测量系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 47-50.
SHI Chunjian, QIU Baijing, WU Chundu, et al. Normal-temperature fog machinery spray angle measuring system based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 47-50. (in Chinese)

- Chinese)
- [7] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(4): 321-331.
- [8] Chan T F, Vese L A. Active contours without edges[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(2): 266-277.
- [9] Mohanna F, Mokhtarian F. An efficient active contour model through curvature scale space filtering[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2003, 21(3): 225-242.
- [10] Gout C, Le Guyader C, Vese L. Segmentation under geometrical conditions using geodesic active contours and interpolation using level set methods[J]. *Numerical Algorithms*, 2005, 39(1/2/3): 155-173.
- [11] Mille J. Narrow band region-based active contours and surfaces for 2D and 3D segmentation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, 113(9): 946-965.
- [12] Fereshteh S, Hamid I, Reza S. A new active contour model based on the conscience, archiving and mean-movement mechanisms and the SOM[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(12): 1622-1634.
- [13] Drakopoulos K, Maragos P. Active contours on graphs: multiscale morphology and graphcuts[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(7): 780-794.
- [14] 王岳, 唐延东, 张哲巅, 等. 利用主动轮廓算法提取火焰前锋[J]. *燃烧科学与技术*, 2005, 11(6): 543-546.
WANG Yue, TANG Yandong, ZHANG Zhedian, et al. Flame front tracking by active contour method[J]. *Journal of Combustion and Technology*, 2005, 11(6): 543-546. (in Chinese)
- [15] Abu-Gharbieh R, Hamarneh G, Gustavsson T, et al. Flame front tracking by laser induced fluorescence spectroscopy and advanced image analysis[J]. *Optics Express*, 2001, 8(5): 278-287.
- [16] Sethian J A. *Level set methods and fast marching methods* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
- [17] Adalsteinsson D, Sethian J A. The fast construction of extension velocities in level set methods[J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 148(1): 2-22.
- [18] 刘娟, 李清廉, 王振国. 离心式喷嘴液膜破碎过程高速阴影试验研究[R]. 广州: 中国工程热物理学会燃烧学学术会议, 2010.