

文章编号: 1672-8785(2012)05-0042-06

湍射流红外热成像及其图像处理

宫宇新¹ 龙爱芳¹ 宫伟力² 钟显思¹ 安树庭¹

(1. 中南民族大学数学与统计学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以水射流红外图像为研究对象, 提出了一种红外图像多步骤去噪方案, 即先利用图像减法得到红外温度场的增量分布, 然后通过自适应中值滤波去除具有高斯分布的白噪声, 最后用高斯高通滤波去除周期性噪声并对图像进行锐化处理。实验结果表明, 本文提出的多步骤去噪法具有很好的去噪效果。经过处理的图像清楚地揭示了射流核心区、主体段和扩散段的结构特征, 以及由射流剪节层带动环境空气形成的湍流场中不同尺度涡旋的结构特征。通过对去噪后的红外图像进行分析, 加深了我们对湍射流机理的认识。同时, 该方案对类似的红外图像处理也具有一定的借鉴意义。

关键词: 流场成像; 水射流; 红外探测; 去噪; 图像处理

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.05.007

Infrared Thermal Imaging and Image Processing of Turbulent Jet

GONG Yu-xin¹, LONG Ai-fang¹, GONG Wei-li², ZHONG Xian-si¹, AN Shu-ting¹

(1. School of Mathematics and Statistics, South Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking the infrared images of water jet as the research object, a multistep denoising scheme for infrared images is proposed. Firstly, an image subtraction method is used to obtain the increment distribution of the infrared temperature field. Secondly, an adaptive median filter is used to remove the white noise with Gaussian distribution. Finally, a Gaussian high-pass filter is used to remove the periodical noise and sharpen the image. The experimental result shows that the proposed multistep denoising method is good in denoising. In the processed image, the structural characteristics of the jet core, main region, diffuse region and different turbulent jet in the turbulent flow composed of water mist and flowing air induced by the momentum exchange between the jet boundary and ambient air are revealed clearly. The analysis of the denoised infrared images helps us further understand the mechanism of turbulent jet. The scheme is of significance to the processing of similar infrared images, too.

Key words: flow imaging; water jet; infrared detection; noise reduction; image processing

收稿日期: 2012-03-25

基金项目: 2011 年中南民族大学大学生科研基金项目 (KYCX110701Z); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2006CB202200)

作者简介: 宫宇新 (1991-), 男, 北京人, 本科生, 主要从事图像处理及时间序列分析方面的研究。

E-mail: gongyuxinsun@163.com

0 引言

红外热成像是一种实时、无损、遥感与全场探测技术,其微观机理是材料在变形或运动过程中由原子和分子的相对运动或者晶粒间断裂能级跃迁而产生的红外谱区电磁辐射能量。红外遥感力学是一门新兴前沿与交叉学科。长期以来,红外技术已在材料损伤探测中得到了广泛应用^[1]。

近二十几年来,红外探测技术在流体力学领域逐步得到了应用。例如,人们利用红外热成像技术对空气动力学流场^[2]、边界层分离^[3]以及混合层的涡旋^[4]进行了研究。近年来,人们还开展了对湍射流流场的红外热成像研究^[5],如用傅里叶分析研究红外热像湍流谱空间的尺度律^[6]和用高阶谱识别湍流红外图像中的相干结构^[7]等。在流场可视化实验方法中,目前用得最广泛的粒子速度成像^[8]和激光闪斑平面成像^[9]等方法均以速度场的测试为主,需要在流体中掺入示踪粒子来成像,因而存在一定的测量误差。利用红外热成像技术测得的温度信号是位于红外波段的热辐射(无需对流场进行任何干扰,可以真实地反映流动的结果)。根据力-热耦合原理,可以利用红外温度场研究流场的特征。

然而,由于红外图像具有低信噪比的特点,特别是在应用被动红外成像时,由于没有辅助的热源对探测目标加温,加之环境的辐射与干扰,得到的红外图像大都比较模糊。另外,随着红外图像生成环境的变化,其噪声形式也有很大的不同。因此,开展红外图像滤波技术研究具有重要意义。本文研究高速水射流红外图像的滤波去噪技术,以期进一步深化对红外图像表征的湍射流机理的认识。

1 水射流红外探测

图1所示为高压水射流红外探测系统。其中,射流介质为纯水,经高压水泵加压后通过喷嘴直接射入大气中。水射流喷嘴为圆柱形收敛喷嘴,喷嘴直径为1 mm,收敛角为30°。射流的

压力由调压阀调节。在0~20 MPa的范围内缓慢增加射流压力,同时利用红外热成像仪进行探测。红外热像仪为TVS-8100MKII型,温度灵敏度为0.025℃;测量温度范围为-40~300℃;测量精度为±0.4%;最大探测距离为20 m。实验中,红外热像仪的镜头到射流的距离为1225 mm;视角为13.6°×18.2°,由此得到的实际成像区域为292.1 mm×392.4 mm大小的矩形范围;单个像素占有的实际物理尺寸为2.45 mm(物理分辨率)。实验的环境温度为室温(约20℃)。选择在夜间进行水射流实验,以减少环境的影响。

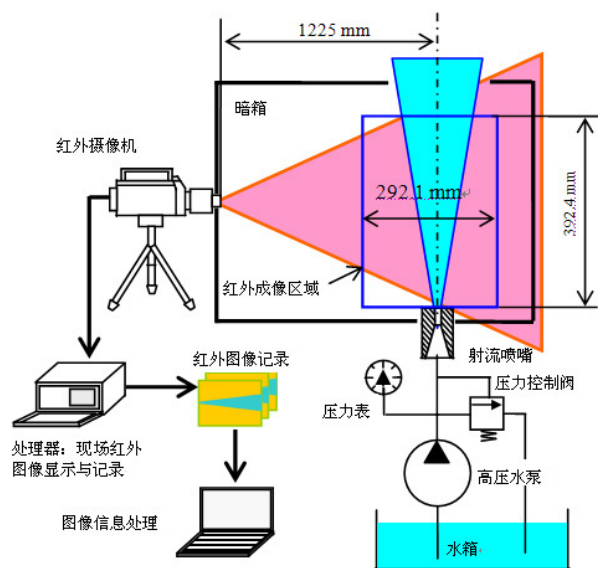


图1 水射流红外探测实验系统的原理图

实验中,热成像仪的处理器可对红外图像进行现场实时显示,同时将其记录为120×160大小的红外辐射温度文件并存储于红外记录仪中。为了减小周围环境对水射流红外辐射的影响,将射流喷嘴放置在一个封闭的暗箱内,并将纸箱表面涂成黑色。在正对热像仪镜头处开一个正方形孔进行拍摄,图像采集率为1帧/s。

2 图像去噪

在红外探测过程中不可避免地存在来自于周围环境及设备的噪声。因此,图像去噪就成了红外热成像技术的主要内容之一。噪声性质是多种多样的,目前人们对其中几种主要的噪声有了较为统一的认识:

(1) 热噪声 (又称 Johnson 噪声、高斯噪声或白噪声)。它与物体的绝对温度有关, 空间幅度分布符合高斯分布, 其频率覆盖整个频谱。

(2) 闪烁噪声。它是由电流运动引起的噪声。这种噪声一般具有反比于频率 ($1/f$) 的频谱, 所以又被称为 $1/f$ 噪声。一般闪烁噪声在 1000 Hz 以下的低频较为明显 (也有人称其为粉色噪声)。

(3) 发射噪声。它也是电流非均匀运动或者说是电子运动具有随机性的结果。发射噪声又常被称为“房顶雨 (rain on the roof)”噪声。

(4) 有色噪声。它是指具有非白色频谱的宽带噪声。另外, 白噪声通过信道后也会被染色成有色噪声。相对于白噪声而言, 有色噪声中的低频分量占了很大的比重。

(5) 周期噪声。周期噪声是在获取图像时从电力或机电干扰中产生的。它是惟一的一种空间依赖型噪声。

含噪图像的模型可以表示为^[10]

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y) \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 为输入图像; $\eta(x, y)$ 为噪声项; $g(x, y)$ 为噪声污染的图像。式 (1) 的傅里叶变换为

$$G(u, v) = F(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

式中, $G(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别为 $g(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 和 $\eta(x, y)$ 的傅里叶变换。

脉冲噪声 (即椒盐噪声) 是图像中常见的一种噪声, 它在红外图像中显示为个别的白色斑点。脉冲噪声会使图像的动态范围降低, 为下一步的图像分割与特征提取增加难度。因此, 首先需要去除图像中的脉冲噪声。脉冲噪声常用平滑滤波器来处理。平滑滤波中的统计滤波器是一种非线性滤波器, 其响应基于图像滤波器所包围的图像区域中的像素的排序, 然后由统计排序结果决定的值代替中心像素的值。计算机实验结果表明, 中值滤波器对处理脉冲噪声非常有效。

下面介绍中值滤波去噪原理。对于给定的 n 个数值 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 将它们按大小进行有序

排列。当 n 为奇数时, 位于中间位置的那个数值被称为这个数值的中值; 当 n 为偶数时, 位于中间位置的那两个数值的平均值被称为这 n 个数值的中值, 记作

$$\text{med}[a_1, a_2, \dots, a_n] \quad (3)$$

令 S_{xy} 表示中心在点 (x, y) 、尺寸为 $m \times n$ 的矩形子窗口的坐标组, 即掩模, $\hat{f}(x, y)$ 表示经过滤波后的图像, 中值滤波器的滤波运算就是用该相邻像素的灰度中值替代该像素的值:

$$\hat{f}(x, y) = \text{median}_{(s, t) \in S_{xy}} |g(s, t)| \quad (4)$$

传统的中值滤波器适用于不考虑图像特征在不同位置之间差异的图像。自适应中值滤波器可以考虑图像局部区域的特性。本文采用自适应中值滤波器来进行红外图像预处理。自适应空间中值滤波通过用 Matlab7.0 的图像处理工具箱 (Image Processing Toolbox, IPT) 中的 M 函数 `adpmedian` 来实现。详细的自适应中值滤波算法可参考文献 [11]。

对红外图像进行中值滤波预处理后, 只是消除了图像中的脉冲噪声。而对于图像中的周期性噪声, 在研究中采用频域滤波的方法进行消除。频域滤波是通过改变图像中的不同频率成分来实现的。频域滤波的主要步骤有: (1) 计算待滤波图像的傅里叶变换; (2) 将其与滤波器函数相乘; (3) 计算此乘积的逆傅里叶变换以得到滤波后的图像。对于数字图像, 可利用二维离散傅里叶变换 (2-dimensional Discrete Fourier Transform, 2-D DFT) 来实现。经过预处理的红外图像仍用 $f(x, y)$ 表示, 其 2-D DFT 公式为

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (5)$$

式中, $F(u, v)$ 为输入图像 $f(x, y)$ 的二维 DFT, $x = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $y = 0, 1, 2, \dots, M-1$; M 和 N 分别为图像水平方向和垂直方向上的像素个数; u 和 v 分别为水平方向与垂直方向上的频率变量, 其单位为 Hz。频域滤波的算法为

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) \quad (6)$$

式中, $G(u, v)$ 为经频域滤波后的输出图像;
 $H(u, v)$ 为频域滤波器的传递函数。

图像中的边缘对应于高频分量, 如红外图像中的射流与涡旋的边缘。因此, 在进行滤波去噪的同时, 还需要锐化图像中的边缘。本文采用频域中的高斯高通滤波器进一步去除了图像中的噪声并对图像进行了锐化。研究表明, 与理想高通滤波器及巴特沃斯高通滤波器相比, 用高斯高通滤波器滤波后的图像更加平滑, 并且能够更好地保留图像中的边缘细节。图2为高斯高通滤波函数的三维图像。高斯高通滤波器的实现方法为: 设图像的尺寸为 $M \times N$, 二维频率平面 $F(u, v)$ 的频率中心在 $(M/2, N/2)$ 处, 从平面上任一频率点 (u, v) 到中心的距离为

$$D(u, v) = [(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2} \quad (7)$$

于是, 截止频率距原点为 D_0 的高斯高通滤波器的传递函数可由式(8)定义:

$$H(u, v) = 1 - e^{-D^2(u, v)/2D_0} \quad (8)$$

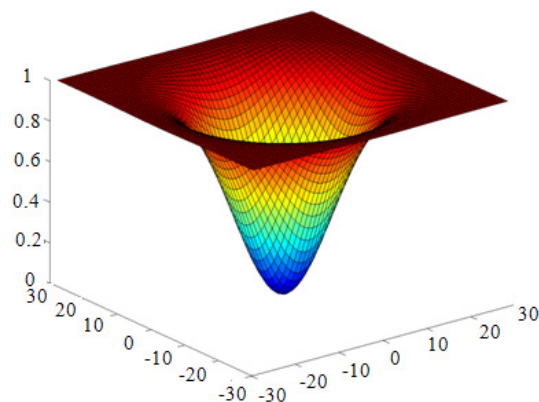


图2 二维高斯高通滤波函数

3 去噪实验

以第257幅红外图像(射流压力为16 MPa, 射流速度为179 m/s)为输入图像, 利用上节中所说的图像去噪算法进行红外图像去噪实验(结果见图3)。图3(a)为第257幅原图, 它是一幅被噪声污染的图像(其对比度低, 图像动态范围窄, 图像模糊, 以致难以看清射流的结构)。对图3(a)进行2-D离散傅里叶变换, 其频谱见图3(b): 2-D DFT 频谱平面的中心点代表低频部分(也被称为直流分量), 代表射流的能量, 二维频谱的高频分量分布在频率平面中心点的四周。由图3

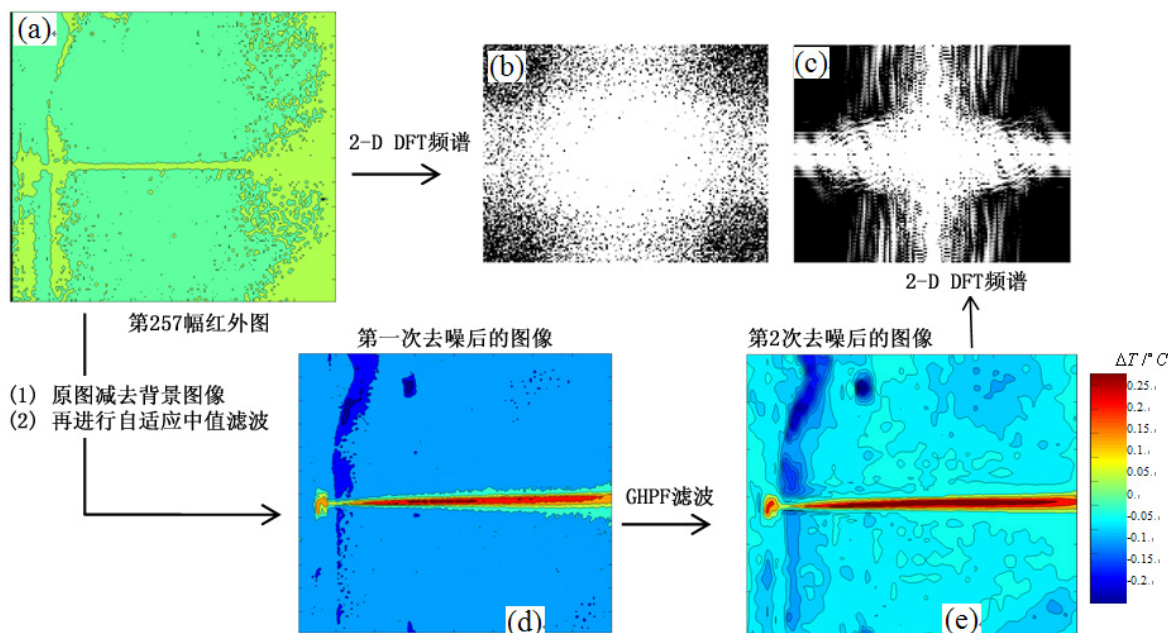


图3 红外图像去噪计算机实验。(a) 第257幅原红外图像; (b) 原红外图像的2-D DFT 频谱; (c) 第二次去噪后的频谱; (d) 第一次去噪后的图像(与背景图像相减后, 再进行自适应中值滤波); (e) 第二次去噪后的结果(高斯高通滤波)

(b) 可知, 平面的高频部分呈现散点分布, 这与原图的噪声分布成对应关系。由于在红外图像分析中, 我们所关心的是由射流动量传递形成的热力耦合效应所产生的温度变化, 因此对采集的所有红外原图进行图像相减处理, 即与采集的第 1 幅红外图像相减。第 1 幅红外图像是在实验中水射流没有启动时拍摄的, 其反映的是大气背景辐射; 相减后的图像反映了流场温度的增量分布 ΔT ($^{\circ}\text{C}$)。

将第 257 幅图像与第 1 幅图像相减后, 再进行自适应中值滤波处理, 得到图 3(d) 所示的图像。由图 3(d) 可知, 射流的结构已清晰可见; 但是由于环境空气的流动远比射流主干的能量低, 由射流带动形成的环境空气流场是一个由细小的水滴与空气形成的随机湍流场, 占据了图像的高频频带, 而处理后的图像并未反映出由射流剪切层带动周围环境空气形成的湍流场。环境空气流场与射流主干是高度相关的, 因此这一部分噪声属于周期性噪声。我们在实验中利用高斯高通滤波器得到了图 3(e) 所示的图像。从图 3(e) 中可以清晰看出, 由环境空气与水滴形成的伴随湍流场在射流出口的上下平面上分布着大尺度的涡旋, 上半平面的大尺度涡旋具有更大的涡量, 它具有更密集的等温线并具有更大的尺度, 这实际上是一个由两个涡组成的大尺度涡; 沿射流下游, 还分布着尺度中等的涡与成片的更小尺度的涡旋。

由图 3 可知, 本文提出的图像去噪算法是十分成功的, 即在有效去除了图像中的噪声的同时, 还保留了所关心的图像特征, 使得红外图像可以清晰地显示出射流本身及相伴的环境空气与细小水滴的随机湍流场的结构特征。因此, 人们可以利用红外图像对射流进行合理的解释。

图 4 为经本文提出的多步骤红外图像滤波去噪算法 (即图像相减 + 自适应中值滤波 + 高斯高通滤波) 处理后得到的红外图像集。图 4 第一行红外图像所示为在射流压力较小 ($0.3 \sim 5$ MPa) 时由红外图像表征的湍流场。由图 4(a) 可知, 在射流刚刚启动时, 射流的能量还很小, 尚未形成连续的射流; 环境空气流场与射流没有形成明显的能量交换。图 4(b) ~ 图 4(c) ($0.6 \sim 2$ MPa) 所示为射流压力增至 0.6 MPa 时的情况, 此时射流形成了近似连续的、较窄的平行射流束。由于射流能量较低, 射流束与周围环境的温度相差不大, 因而整个成像平面呈现较高的、随机的温度分布模式。从图 4(d) ~ 图 4(e) ($4 \sim 5$ MPa) 给出的射流内部结构中可以看出, 射流压力的升高和动量传递的加强使得射流束内部温度升高并开始出现分层, 而且射流与环境空气的温差进一步加大, 并在环境空气的湍流场开始形成小尺度涡。图 4(a) ~ 图 4(e) 表征的湍射流流场结构的特点是, 射流流束较窄且近似平行,

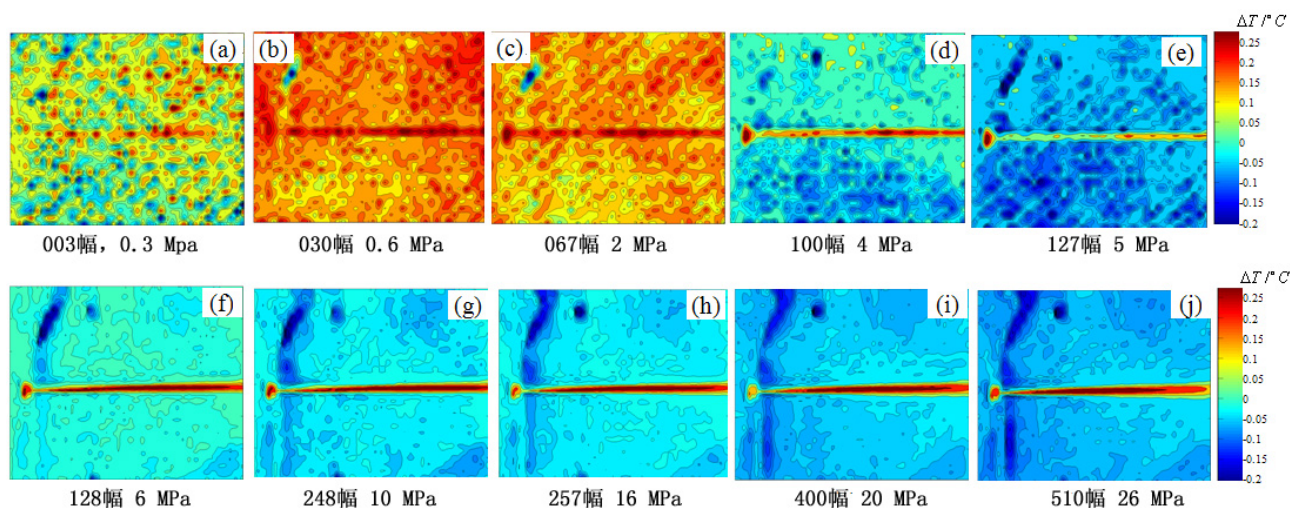


图 4 经高斯高通滤波去噪后得到的不同射流压力下的红外图像

由射流与静止的环境空气的动量交换形成的环境空气湍流场是由小尺度涡旋的随机分布形成的(为随机湍流场)。

图 4 第二行红外图像所示为射流压力较大(6 ~ 26 MPa) 时由红外图像表征的湍流场。它们具有类似结构, 即射流呈现明显的三段式结构, 周围环境空气的湍流具有稳定的大尺度涡、中尺度涡和小尺度随机湍流结构的模式。以第 257 幅(16 MPa) 红外图像为例(见图 5), 对这一阶段射流的结构特点进行分析。

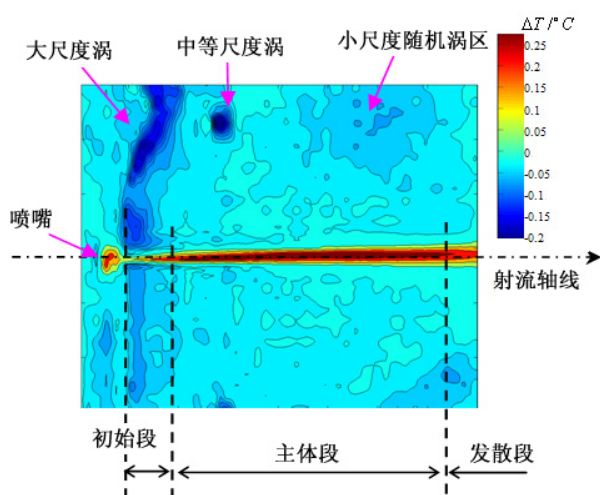


图 5 第 257 幅(16 MPa) 射流结构的红外图像分析

从图 5 中可以看出, 射流束逐渐变宽, 其内部温度分层明显, 沿着射流轴线可以看出温度分布的不同模式, 即在射流的初始段, 射流温度逐渐升高; 在射流主体段, 温度沿轴线分布大致相同; 在射流发散段, 温度分布迅速衰减, 并沿径向发散。由主体段构成的射流核心区与边界层的温度差别明显, 由射流带动形成的环境空气湍流场具有明显的涡旋结构。以射流轴线为界, 在上半平面的环境空气湍流场中存在大尺度涡、中等尺度涡以及由这些涡旋破裂形成的小涡汇集在一起形成的随机湍流区。另外, 这些涡的结构是关于轴线近似对称的。由图 4 与图 5 可知, 在 16 MPa 时射流下半平面的涡量较小。但随着射流压力的增加, 射流下半平面的涡旋尺度逐渐增大, 与上半平面涡尺度的差别逐渐缩小。

4 结论

针对水射流红外图像比较模糊以及不能反映射流流场结构细节的问题, 提出了多步骤去噪方法。即先利用图像减法得到红外温度场的增量分布, 然后通过自适应中值滤波去除脉冲噪声, 最后用高斯高通滤波去除周期性噪声并对图像进行锐化处理。实验结果表明, 多步骤去噪法取得了很好的去噪效果, 清楚地揭示了射流核心区、主体段和扩散段的结构特征, 以及由射流剪节层带动环境空气形成的湍流场中不同尺度涡旋的结构特征。通过对多步骤去噪后的红外图像进行分析, 加深了我们对湍流射流机理的认识。本文提出的滤波方案对含噪红外图像的处理具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] He M C, Gong W L, Zhai H M, et al. 水平岩层开挖物理模拟实验的红外热像分析[J]. 隧道与地下工程技术, 2010, 25(2): 366-376.
- [2] Cehlin M, Moshfegh B, Sandberg M. 用红外技术测量接近低速扩散的位移通风[J]. 能源与建筑, 2002, 34(4): 687-698.
- [3] Bouchardy A M. 对于空气动力学研究的红外热像处理[J]. 应用数字图像处理, 1983, 39(7): 304.
- [4] Turner J S. 湍流卷吸: 卷吸的假设与它应用在地理物理学射流的发展[J]. 流体力学, 1986, 37(3): 431-471.
- [5] 宫伟力, 赵海燕, 安里千. 高压水射流的红外热像特征[J]. 实验流体力学, 2008, 22(3): 31-35.
- [6] 宫伟力, 赵海燕, 安里千, 等. 基于 DFT 的水射流红外热像频域时空分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6): 690-694.
- [7] 宫伟力, 赵海燕, 安里千. 基于红外热像的自由剪切湍流被动标量高阶谱分析[J]. 应用力学学报, 2009, 26(3): 6-12.
- [8] Gaungyu Cao, Markku Sivukari, Jarek Kurnitski, et al. 用 PIV 测量飞机喷气在高强度湍流流场[J]. 国际热与流体杂志, 2010, 31: 897-908.
- [9] Hua Feng, Michael G Olsen, James C Hill, et al. 用 PIV 和 PLIF 同步测量被动标量的混合尾流[J]. 化学工程科学, 2010, 65: 3372-3383.
- [10] 章毓晋. 图像处理工程(上册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理第二版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.