

基于分数阶的多向微分算子的高炉料面轮廓自适应检测

蒋朝辉¹ 吴巧群¹ 桂卫华¹ 阳春华¹ 谢永芳¹

摘要 高炉料面图像含有丰富的高炉炉况信息, 高炉料面轮廓能直接反映料面的凹凸起伏、煤气流分布以及炉况等信息, 但高炉料面图像具有对比度低、细节不明显和有强亮斑等特点, 使得高炉料面轮廓检测十分困难. 本文提出一种新型的高炉料面轮廓检测方法: 1) 对高炉料面图像进行预处理, 增强图像动态范围和图像边缘信息; 2) 采用分数阶的多向微分算子提取一组料面轮廓可行域; 3) 用自适应方法确定最佳分数阶阶次, 获得可行域中最优的料面轮廓曲线; 4) 用改进的 Canny 算子对其进行修正和补偿, 得到连续准确的料面轮廓曲线. 理论研究和实验结果表明, 该方法可准确获取平滑的高炉料面轮廓, 对高炉操作人员及时有效调控布料具有很好的参考价值.

关键词 高炉料面图像, 轮廓检测, 图像增强, 分数阶微分, Canny 算子

引用格式 蒋朝辉, 吴巧群, 桂卫华, 阳春华, 谢永芳. 基于分数阶的多向微分算子的高炉料面轮廓自适应检测. 自动化学报, 2017, 43(12): 2115–2126

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160621

Adaptive Detection of Blast Furnace Surface Contour with Fractional Multi-directional Differential Operator

JIANG Zhao-Hui¹ WU Qiao-Qun¹ GUI Wei-Hua¹ YANG Chun-Hua¹ XIE Yong-Fang¹

Abstract Blast furnace image contains abundant furnace condition information and blast furnace surface contour can directly reflect the bump ups and downs of burden surface, the gas distribution and other information, but the blast furnace burden surface image has the features of low contrast, inconspicuous details and strong bright spots, which make it difficult to detect the blast furnace surface contour. In this connection, a new blast furnace surface contour detection method is proposed. Firstly, the image is preprocessed to enhance its dynamic range and edge information; secondly, multi-directional differential operators based on fractional are deduced to extract a set of blast furnace burden surface contours of feasible region; then, the optimum fractional order is determined by adaptive method to obtain the optimal surface contour curve in the feasible region; lastly, an improved Canny operator is proposed to correct and compensate the optimal surface contour curve. Theoretical research and experimental results show that the new method can accurately obtain a smooth blast furnace burden surface contour, which has great guiding significance for blast furnace foreman to control charging in time and effectively.

Key words Blast furnace surface image, contour detection, image enhancement, fractional differential, Canny operator

Citation Jiang Zhao-Hui, Wu Qiao-Qun, Gui Wei-Hua, Yang Chun-Hua, Xie Yong-Fang. Adaptive detection of blast furnace surface contour with fractional multi-directional differential operator. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(12): 2115–2126

高炉内各机械探尺之间的料位高低是调控高炉布料操作的主要参考信息, 但随着料面检测技术的发展, 可以粗略地从高炉料面图像获取炉内炉料分布情况^[1], 而高炉料面轮廓最能直观反映高炉料面的起伏凹凸状态、煤气流分布情况以及炉况信息,

高炉操作人员可以通过料面轮廓来调整布料制度^[2], 因此研究高炉料面轮廓的实时在线检测具有重要的实用价值.

由于高炉内部高温、高粉尘和密闭无光等恶劣环境^[3], 使得从现场采集的料面图像具有以下特点: 1) 整个图像的对比度不高, 图像偏暗, 细节模糊; 2) 受中心光源的影响, 图像中心区域出现曝光过度现象, 呈现白色区域; 3) 远离中心光源区域图像细节模糊; 4) 料面区域与光源中心区域间的轮廓线较模糊. 高炉料面轮廓提取的目的是从复杂的料面纹理背景以及非料面区中获得准确平滑, 含噪声少的主料面轮廓线, 该主轮廓线是跨越两个机械探尺测量区域的料面曲线, 理想情况下高炉内各个探尺的测量点应位于轮廓线上. 高炉料面图像的特点以及料面轮廓提取的要求导致高炉料

收稿日期 2016-09-06 录用日期 2016-12-27

Manuscript received September 6, 2016; accepted December 27, 2016

国家自然科学基金(61290325, 61621062), 高性能复杂制造国家重点实验室自主研究课题(ZZYJKT2016-05)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61290325, 61621062) and Independent Research Topics of State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing (ZZYJKT2016-05)

本文责任编辑 胡昌华

Recommended by Associate Editor HU Chang-Hua

1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083

1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083

面轮廓检测困难,致使通过布料来调控高炉炉况的时间过长,造成炼铁过程资源消耗大、煤气利用率不高,排放超标.因此亟需提出适合高炉料面图像特点的料面轮廓检测方法为高炉炼铁过程实现精细化调控布料提供可靠信息.

现有的轮廓检测方法基本上是通过微分运算的边缘检测法.例如 Sobel 算子^[4]、Prewitt 算子^[5-6]等一阶微分算子和 Laplace 算子^[7]、LoG 算子^[8-9]等二阶微分算子.这些算子虽然具有实现简单、运行较快的优点,但存在以下缺点:1) 检测的边缘不全面,会出现孤立点或断续边缘;2) 不能保证得到的是单像素边缘,需对其进行细化以及连接处理才能完成轮廓提取;3) 二阶微分提取的边界还会出现双边效应,对噪声敏感,无法获取正确的轮廓.而高炉料面图像的特点,使得上述检测方法无法满足高炉料面轮廓定位精确、对噪声不敏感和纹理噪声少等要求.

近年来,分数阶微分算法^[10-11]已成为图像处理研究的热点,分数阶微分运算相对整数阶微分运算可以大幅度提升图像的高频信息,同时能非线性保留轮廓细节部分,且对噪声不敏感^[12].因此,利用分数阶微分算法对噪声不敏感且分数阶阶次可调等优点来进行高炉料面轮廓提取,可保持其原有的边缘信息,但获得的高炉料面轮廓不平滑还含有少量噪声.在众多边缘提取算子中,Canny 算子^[13-14]具有信噪比高、定位精确和单边缘响应的优点^[15],正好满足高炉料面轮廓检测的要求,但 Canny 算子对高炉料面进行图像处理时,要经过多次试探才能确定合适的高低阈值,对于大量的图像会增加时间复杂度,缺乏自动性和普适性.

针对高炉料面图像特点,融合分数阶微分算子和 Canny 算子的优点,本文提出一种基于分数阶的多向微分算子的高炉料面轮廓自适应检测方法,其思路如图 1 所示:1) 对图像进行预处理,增强图像动态范围和图像边缘信息;2) 采用分数阶的多向微分算子提取一组料面轮廓可行域;3) 用自适应方法确定最佳分数阶阶次,获得可行域中最优的料面轮廓曲线;4) 用改进的 Canny 算子对其进行修正和补偿,得到连续准确的料面轮廓曲线.

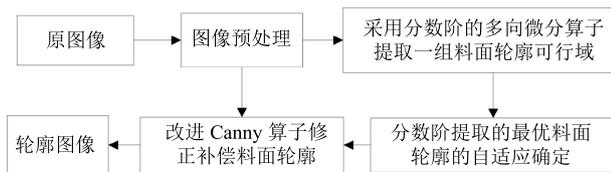


图 1 高炉料面轮廓检测过程

Fig. 1 Blast furnace surface contour detection process

1 图像预处理

在正文最新获取的高炉料面图像^[16]是通过安

装在高炉炉顶的小斜坡面上、镜头距离高炉料面为 1~1.5 m 的内窥镜拍摄的,如图 2 所示.整个料面轮廓较明显,但受中心光源的影响,图像中心区域出现曝光过度现象,呈现白色区域,远离中心光源区域无图像细节,边缘位置模糊.针对以上图像特点对其进行预处理:增强对比度^[17]、调整饱和度、增强边缘光与细节部分以及高反差保留处理等,经过预处理的料面图像如图 3 所示,对比图 2 的料面图像,可以看出增强了图像中的有用信息和边缘信息,图像变清晰,利于后续轮廓检测.

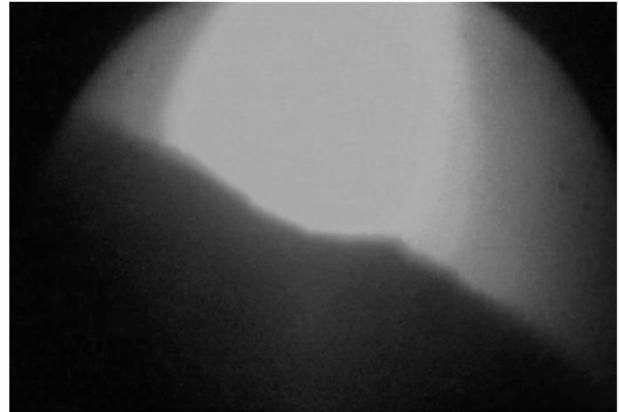


图 2 高炉料面图像

Fig. 2 Blast furnace material surface image

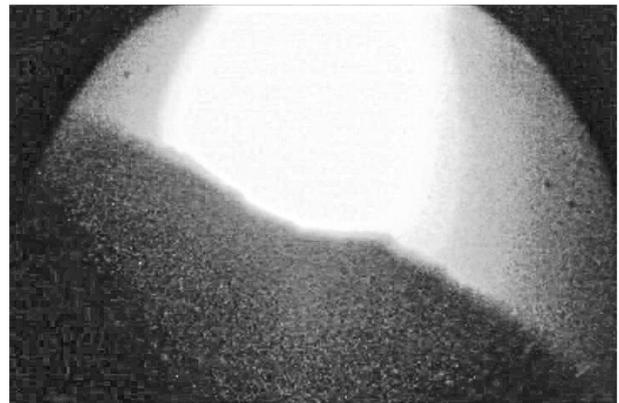


图 3 高炉料面增强图像

Fig. 3 Blast furnace material surface enhanced image

2 基于分数阶的多向微分算子提取高炉料面轮廓可行域

分数阶理论研究表明,信号进行分数阶微分运算,当微分阶数较小 ($0 < v < 1$) 时,能提升信号的高频部分、非线性增强中频部分和保留低频部分^[18].在数字图像中,高频部分对应边缘和噪声,低频部分对应图像平滑区,中频部分对应图形纹理细节,所以用分数阶微分对高炉料面图像进行轮廓检测,不仅能提取料面轮廓和保留图像的轮廓细节部分,而且

对噪声也有很好的抑制作用. 分数阶微分目前有三种定义, 其中最适合图像处理的 G-L 定义^[19] 是根据整数阶微分的定义直接推广到分数阶, 对于任意可微函数 $f(t)$ 在区间 $t \in [a, b]$ ($a < b, a \in \mathbf{R}, b \in \mathbf{R}$) 的 n 阶微分表达式

$$f^n(t) = \frac{d^n f}{dt^n} = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-n} \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} f(t - jh) \quad (1)$$

式中, $n \in \mathbf{Z}^*$, h 为变量 t 在区间 $[a, b]$ 内的步长, $\binom{n}{j} = n(n-1)\cdots(n-j+1)/j!$.

将整数阶阶数 n 推广到分数阶阶数 v , 其中 $v > 0$, 其表达式为

$${}^G D_t^v f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} f_h^{(v)}(t) = \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ nh=t-a}} h^{-v} \sum_{j=0}^{\lceil \frac{t-a}{h} \rceil} (-1)^j \binom{v}{j} f(t - jh) = \lim_{h \rightarrow \infty} \left\{ \frac{(\frac{t-a}{h})^{-v}}{\Gamma(-v)} \sum_{j=0}^{\frac{t-a}{h-1}} (-1)^j \frac{\Gamma(j-v)}{\Gamma(j+1)} f(t - jh) \right\} \quad (2)$$

式中, Gamma 函数 $\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx = (n-1)!$. 对图像进行处理时, 由于图像间距为 1 像素, 所以将一元函数的持续期按等间隔 $h = 1$ 等分, $n = \lceil (t-a)/h \rceil = \lceil t-a \rceil$, 可以推导出一元信号 $f(t)$ 的分数阶微分的差分表达式为

$$\frac{d^v f(t)}{dt^v} \approx f(t) + (-v)f(t-1) + \frac{(-v)(-v+1)}{2} f(t-2) + \frac{(-v)(-v+1)(-v+2)}{6} f(t-3) + \cdots + \frac{\Gamma(-v+1)}{n! \Gamma(-v+n+1)} f(t-n) \quad (3)$$

文献 [20] 根据 Sobel 算子推出分数阶微分掩模算子如下:

$$S_R^v(i, j) = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{v^2-v}{2} & -v & 1 \\ v^2-v & -2v & 2 \\ \frac{v^2-v}{2} & -v & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_C^v(i, j) = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -v & -2v & -v \\ \frac{v^2-v}{2} & v^2-v & \frac{v^2-v}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

经过行、列梯度模板检测的边缘只有横向和纵向的边缘, 对于其他角度的边缘没法获取, 因为 Sobel 算子是基于行梯度模板和列梯度模板来检测边缘. 通过对高炉料面图像的分析, 高炉料面图像不仅在行梯度方向和列梯度方向有料面边缘, 而且在 45° 方向和 135° 方向上也有料面边缘, 而 Sobel 算子的分数阶微分算子只能检测行列上的边缘, 因此提出基于分数阶的多向微分算子进行高炉料面轮廓提取方法, 在文献 [20] 推出的两个分数阶掩模算子的基础上, 基于 Sobel 算子原理定义 45° 和 135° 的斜边算子

$$S_{45^\circ} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$S_{135^\circ} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

45° 方向的算子是 Sobel 算子的列梯度模板最外层数据顺时针移一个单位得到, 135° 方向的算子是 Sobel 算子的行梯度模板最外层数据顺时针移一个单位得到. 可以看出斜边算子斜对角线上为 0, 以对角线对称的数互为相反数, 能够提取斜边上梯度. 将上述两个斜边算子用分数阶微分进行改进, 使其既具有计算简单, 易于实现的优点, 又具有分数阶微分阶次可调的特性, 其推导过程如图 4 所示.

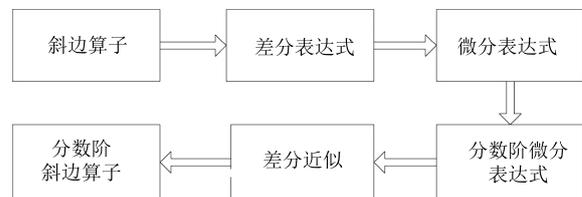


图 4 分数阶微分算子推导流程图
Fig. 4 Flowchart of deriving fractional differential operator

设一幅图像的灰度函数 $F(i, j)$, 取其 3 像素 \times 3 像素邻域, 如图 5 所示. 利用 45° 和 135° 的斜边算子对该区域进行卷积运算得到像素点 (i, j) 处的斜边梯度, 这里以 45° 斜边算子的处理过程进行说明, 利用 45° 斜边算子对其进行卷积运算得到的梯度差分表达式如下:

$$S_{45^\circ}(i, j) = \frac{1}{4} [2F(i-1, j+1) -$$

$$2F(i+1, j-1) + F(i, j+1) - F(i+1, j) + F(i-1, j) - F(i, j-1)] \quad (8)$$

式中, $S_{45^\circ}(i, j)$ 表示 45° 方向上的梯度.

$F(i-1, j+1)$	$F(i, j+1)$	$F(i+1, j+1)$
$F(i-1, j)$	$F(i, j) *$	$F(i+1, j)$
$F(i-1, j-1)$	$F(i, j-1)$	$F(i+1, j-1)$

图 5 3 像素 \times 3 像素邻域
($F(i, j)$ 代表该像素点 * 的灰度值)
Fig. 5 3 pixel \times 3 pixel neighborhood

根据导数定义, 将差分表达式转变为微分表达式:

$$F(i-1, j+1) - F(i+1, j-1) = F(i-1, j+1) - F(i+1, j+1) + F(i+1, j+1) - F(i+1, j-1) = -2 \frac{\partial F(x+1, y+1)}{\partial x} + 2 \frac{\partial F(x+1, y+1)}{\partial y} \quad (9)$$

同理有:

$$\left\{ \begin{aligned} F(i, j+1) - F(i+1, j) &= F(i, j+1) - F(i+1, j+1) + F(i+1, j+1) - F(i+1, j) = -\frac{\partial F(x+1, y+1)}{\partial x} + \frac{\partial F(x+1, y+1)}{\partial y} \\ F(i-1, j) - F(i, j-1) &= F(i-1, j) - F(i, j) + F(i, j) - F(i, j-1) = -\frac{\partial F(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

所以, $S_{45^\circ}(i, j)$ 的微分形式为

$$S_{45^\circ}(i, j) = \frac{1}{4} \left(-5 \frac{\partial F(x+1, y+1)}{\partial x} + 5 \frac{\partial F(x+1, y+1)}{\partial y} - \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \right) \quad (11)$$

将 $S_{45^\circ}(i, j)$ 推广到分数阶微分形式:

$$S_{45^\circ}^v(i, j) = \frac{1}{4} \left(-5 \frac{\partial^v F(x+1, y+1)}{\partial x^v} + 5 \frac{\partial^v F(x+1, y+1)}{\partial y^v} - \frac{\partial^v F(x, y)}{\partial x^v} + \frac{\partial^v F(x, y)}{\partial y^v} \right) \quad (12)$$

利用单变量函数分数阶微分的差分近似表达式(3), 取其前三项或两项作为近似计算表达式

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^v F(x+1, y+1)}{\partial x^v} &= F(x+1, y+1) + (-v)F(x, y+1) + \frac{v^2-v}{2}F(x-1, y+1) \\ \frac{\partial^v F(x+1, y+1)}{\partial y^v} &= F(x+1, y+1) + (-v)F(x+1, y) + \frac{v^2-v}{2}F(x+1, y-1) \\ \frac{\partial^v F(x, y)}{\partial x^v} &= F(x, y) + (-v)F(x-1, y) \\ \frac{\partial^v F(x, y)}{\partial y^v} &= F(x, y) + (-v)F(x, y-1) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

因此得到分数阶微分 $S_{45^\circ}^v(i, j)$ 的模板

$$S_{45^\circ}^v(i, j) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -5 \frac{v^2-v}{2} & 5v & 0 \\ v & 0 & -5v \\ 0 & -v & 5 \frac{v^2-v}{2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$S_{135^\circ}^v(i, j) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 5v & -5 \frac{v^2-v}{2} \\ -5v & 0 & v \\ 5 \frac{v^2-v}{2} & -v & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

从斜边模板可以看出, 斜对角线上全为 0, 以对角线对称的数互为相反数, 以此模板对图像进行处理时, 会在斜边上形成斜边梯度, 进而能检测出斜边上的边缘轮廓, 整个模板的权值和为 0, 对于噪声点能起到均值滤波的作用, 对噪声具有一定的抑制效果.

将上述两个斜边梯度的模板与文献 [20] Sobel 算子推出来的分数阶微分行和列梯度的模板对图像进行四个方向的卷积, 把卷积结果进行相加得到轮廓, 其中的分数阶阶次 v 具有可调性, 选取不同的 v , 轮廓检测效果会有差异. 现在对图像的处理整数阶阶次一般不超过 2 次, 因为高于二阶会对噪声敏感, 效果很不好, 所以在 $v \in (0, 2)$ 内来确定最佳的分数阶阶次. 选取最佳的分数阶阶次, 1) 需要确定一组可行域; 2) 构造一个评价函数对这组可行域进行评价; 3) 选取检测效果最好的阶次. 在 $v \in$

(0, 2) 内如果以 0.01 为步长, 需要实验 200 次, 如果以 0.1 为步长要实验 20 次且没有达到 0.01 的精度, 考虑到效率和时间复杂度的因素, 以 0.2 的步长选取不同的 v 得到一组高炉料面轮廓图, 定义为高炉料面轮廓的可行域。

3 最佳分数阶阶次的自适应确定

对于高炉料面轮廓来讲, 可根据两个机械探尺之间的料面轮廓的连续性好和噪声少来确定最佳的分数阶阶次。从检测的目的出发, 希望得到平滑含噪声少的单像素轮廓边缘。1) 对于分数阶微分不同阶次提取的轮廓, 每一点提取的位置是不变的, 只有检测出来与没检测出来的区别, 所以通过统计南北探尺之间料面轮廓像素点的个数可以知道其连续性的好坏; 2) 对于含噪声少的单像素要求来讲, 若一个横坐标只有一个相对应的纵坐标, 则认为该点是单像素边缘。为此, 本文自定义一个评价函数 $S(v)$ 通过扫描两个探尺之间的轮廓, 统计每个横坐标上对应的纵坐标的个数, 如果纵坐标个数为 1, 认为是单像素边缘点 $S(v)$ 加 1, 如果大于 1, 则不计入统计结果, 这样统计出 $S(v)$ 越大, 说明检测效果越好。计算出不同 v 相对应的 $S(v)$ 后, 描绘 $S(v) - v$ 散点图, 对其进行拉格朗日插值拟合, 得到一条 $S(v)$ 相对于 v 的连续曲线, 最后求取 $S(v)$ 的最大值, 其对应的 v 则是最佳分数阶阶次。具体步骤如下:

步骤 1. 在 $v \in (0, 2)$ 内, 将 v 以 0.2 为步长分别对高炉料面图像进行轮廓检测, 得到一组可行域;

步骤 2. 对可行域轮廓图像选取两个探尺之间感兴趣区域, 通过横和纵坐标的限制进行锁定, 找出边缘像素点的坐标;

步骤 3. 计算不同 v 的 $S(v)$, 首先令 $S(v) = 0$, 在选择区域进行扫描统计, 对于找出的边缘像素点的横坐标, 如果只对应了一个纵坐标, 令 $S(v) = S(v) + 1$;

步骤 4. 描绘 $S(v) - v$ 散点图;

步骤 5. 对 $S(v) - v$ 散点图进行拉格朗日插值, 得到 $v \in (0, 2)$ 的插值多项式及拟合曲线;

步骤 6. 求取曲线的最大值以及相对应的 v 值。

由于分数阶微分在处理图像时是用差分表达式进行处理, 轮廓会出现不平滑的现象, 还存在少量噪声, 为了改善轮廓提取效果, 在基于分数阶的多向微分算子提取的料面轮廓的基础上, 利用改进的 Canny 算子来修正和补偿料面轮廓曲线。

4 基于改进 Canny 算子的料面轮廓修正及补偿

传统 Canny 算子力图在抗噪声干扰和精确定位之间寻求最佳折衷方案, 提出了信噪比要高、定位要精度和最好是单边缘响应的三项原则。基本思想

是选择一定的高斯滤波器对图像进行平滑滤波, 用一阶偏导的有限差分计算梯度幅值和方向, 采用非极大值抑制技术保留局部梯度最大的点, 最后用双阈值算法检测和连接边缘^[21]。

传统 Canny 算子虽然是最优算子, 但在处理高炉料面图像时存在以下问题: 1) 由于高炉炉壁部分受粉尘影响, 存在大量的脉冲噪声, 通过高斯滤波之后不能很好地去掉噪声; 2) 阈值的选取需要人为确定, 通过高低阈值来连接边缘, 阈值选取缺乏自动性和准确性。所以针对 Canny 算子的滤波器和阈值问题进行改进对基于分数阶的多向微分算子提取高炉料面轮廓进行修正及补偿。

由于高斯滤波只能滤除正态分布的噪声, 高炉图像受高粉尘和强噪声等影响, 存在大量的脉冲噪声, 高斯滤波不能很好地去噪, 且在滤波的同时会引起图像模糊, 降低图像的边缘细节, 因此引进自适应中值滤波^[22] 代替高斯滤波, 在有效去掉脉冲噪声的同时很好地保留图像边缘, 并根据局部信息改变滤波窗口的大小, 提高去噪效果。

传统的双阈值确定方法一般是先人为定好高阈值 T_2 , 然后按 $T_2 \approx 2T_1$ 确定低阈值 T_1 。 T_2 定得太高, 图像边缘会丢失, T_2 定得太低, 会检测到由噪声引起的伪边缘, 没有根据图像自身特征来自适应地确定阈值, 不具普适性。Canny 算子中双阈值确定好之后, 通过高低阈值分别产生强边缘像素和弱边缘像素, 将弱边缘通过八邻域连接到强边缘像素, 产生连续完整的边缘。由于高阈值确定的边缘一般是真边缘, 定位比较精确, 所以可根据高炉料面图像的梯度直方图来自适应地确定高阈值, 并用高阈值确定的强边缘像素在八邻域连接基于分数阶的多向微分算子确定的高炉料面轮廓, 可减少多向分数阶微分算子确定的高炉料面轮廓的伪边缘, 同时增强连续性, 克服了分数阶微分单独检测时含有少量噪声和不平滑的缺点, 对基于分数阶的多向微分算子检测的结果起到一个修正和补偿的作用。

4.1 采用自适应中值滤波代替高斯滤波

中值滤波的基本原理是把数字图像中一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值代替, 使周围的像素值接近真实值, 从而消除孤立的噪声点。方法是用某种结构的二维滑动模板, 将模板内像素按照像素值的大小进行排序, 生成单调上升的二维数据序列, 然后选取中间值作为输出值。自适应中值滤波基于中值滤波的特点和性质, 根据噪声的干扰程度, 采取变换窗口大小的方法, 在原中值滤波算法中加入一个判断窗口内像素中值及滤波处的像素点灰度值是否为脉冲噪声, 然后分别进行处理。

设 S_{xy} 为 $n \times n$ 的模板, 其中 n 为奇数, I_{\min} 为 S_{xy} 中灰度级的最小值, I_{med} 为 S_{xy} 中灰度级的中值, I_{\max} 为 S_{xy} 中灰度级的最大值, $I(x, y)$ 是坐标

(x, y) 上的灰度值, S_{\max} 是 S_{xy} 允许的最大掩模尺寸. 自适应中值滤波的具体实现步骤如下:

步骤 1. 自适应调整滤波窗口. 首先确定一个最大的掩模尺寸 S_{\max} , 在该尺寸范围内选取一个合适的半径 r , 计算当前滤波半径像素灰度的 I_{\min} , I_{\max} , I_{med} , 然后判断 I_{med} 是否在 $[I_{\min}, I_{\max}]$ 中间, 如果 I_{med} 在 $[I_{\min}, I_{\max}]$ 中间, 则向下一步进行, 否则扩大当前半径 r 继续滤波, 直到 r 等于最大滤波半径.

步骤 2. 如果当前处理的像素 $I(x, y)$ 在 $[I_{\min}, I_{\max}]$ 之间, 则输出当前像素, 否则输出当前滤波半径中值像素 I_{med} .

4.2 自适应确定高阈值及改变轮廓连接方式

自适应确定高阈值根据梯度直方图来选择, 图像的梯度直方图描述的是图像边缘强度信息, 直方图的峰值对应于原图像的非边缘部分, 经过 Canny 算子的非极大值抑制之后, 对梯度幅值进行统计得到梯度直方图. 将梯度直方图中拥有最多像素数的梯度值称为最大值 H_{\max} , 计算全部像素梯度相对于最大值 H_{\max} 的方差, 称之为 e_{\max} .

$$e_{\max} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^k (H_i - H_{\max})^2}{N}} \quad (16)$$

式中, k 为像素数不为 0 的梯度最大值, N 为像素总数. H_{\max} 反映了非边缘区域在梯度直方图分布的中心位置, 像素最大值方差 e_{\max} 反映了梯度直方图中梯度分布相对于像素最大值梯度的离散程度, 可以

认为二者之和在非边缘区域, 所以高阈值计算公式为

$$T_2 = H_{\max} + e_{\max} \quad (17)$$

确定好高阈值之后, 按改进的 Canny 算子计算步骤得到高阈值确定的强边缘图像, 然后用高阈值确定的强边缘像素在八邻域来连接基于分数阶的多向微分算子确定的高炉料面轮廓, 其中强边缘像素位置精确、含噪声少, 用其连接最优料面轮廓曲线, 能起到修正和补偿的作用.

5 实例应用及效果评价

以某炼铁厂 2650 m² 高炉拍摄的料面图像经过增强后的图 3 进行料面轮廓检测作为应用来验证分析.

5.1 算法仿真

首先在 $v \in (0, 2)$ 内, 将 v 以 0.2 为步长分别对高炉料面图像进行轮廓检测, 得到一组可行域; 然后对不同 v 按第 3 节的方法计算自适应评价函数 $S(v)$, 对选取的 v 以及对应的 $S(v)$ 描绘散点图, 并对其拉格朗日插值得到拟合曲线, 对拟合多项式求最大值 $S(v)$ 及对应的 v , 得到最佳分数阶阶次; 最后用第 4 节改进的 Canny 算子对最佳分数阶阶次下多向微分算子检测的轮廓进行修正与补偿, 得到最终结果.

图 6 展示了可行域中随机选取 $v = 0.4, 0.6, 0.8,$

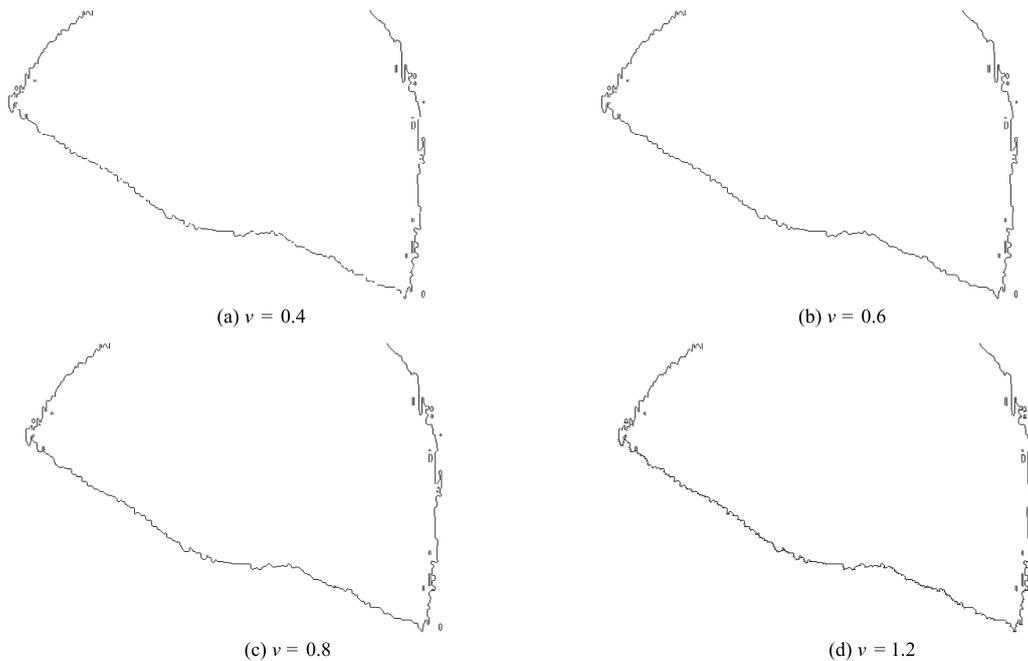


图 6 基于分数阶的多向微分算子不同分数阶阶次的轮廓检测图

Fig. 6 Contour detection based on fractional order of multiple direction differential operators with different fractional orders

1.2 的检测结果, 可以看出 v 的选取对检测结果有很大影响, $v = 0.4$ 时斜边曲线有很明显的断续现象, 随着 v 的增大断续现象减少, 当 $v = 1.2$ 时, 图像斜边上几乎没断续现象, 但是出现毛刺现象, 影响单边边缘效果.

图 7 为 $S(v) - v$ 拉格朗日插值拟合曲线, 从图 7 中可以看出, $S(v)$ 随 v 先增大后减少, 说明检测效果随 v 先变好后变差, 在取得最大值时效果最好.

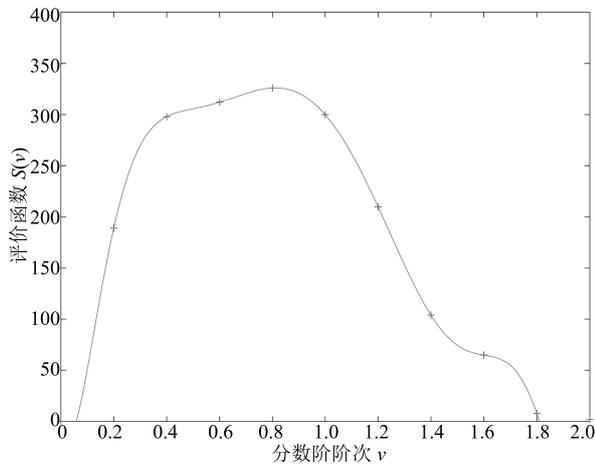


图 7 不同分数阶阶次的评价函数及拟合曲线

Fig. 7 The evaluation function and fitting curve of different fractional orders

拉格朗日插值拟合多项式为

$$y = 3786.440x^{10} - 37135.101x^9 + 158555.765x^8 - 387380.754x^7 + 596342.477x^6 - 596467.986x^5 + 382518.831x^4 - 147946.718x^3 + 29297.440x^2 - 1270.395x \quad (17)$$

对上述多项式求最大值, 得到 $S(v)$ 的最大值为 326, 其对应的分数阶阶次为 0.81, 自此自适应确定了最佳的分数阶阶次, 图 8 为最佳阶次下的高炉料面轮廓曲线.

图 9 是用改进的 Canny 算子对图 8 进行补偿和修正处理的结果, 整个曲线平滑, 含噪声少.

5.2 本文算法与经典算法的实验结果对比分析

本小节分两个部分: 1) 文献 [20] 分数阶微分与 Sobel 算子结合的新模型与本文算法的比较; 2) 本文算法与其他经典算法的比较.

5.2.1 本文算法与文献 [20] 的比较

采用文献 [20] 的算法对增强后的图 3 进行处理, 其中分数阶阶次按多次试验选取, 最适合的阶次

是 0.8, 处理结果如图 10(a) 所示, 图 10(b) 是本文处理结果. 可以看出 10(a) 只检测出部分边缘, 左上角和右上角部分的斜边缘没检测出来, 且中间斜边部分存在很严重的断续现象, 而本文算法不仅检测出行列边缘, 斜方向的边缘也检测出来, 轮廓曲线平滑, 且在阶次选择方面, 文献 [20] 是通过试验决定, 本文算法中阶次是通过自适应的方法确定.

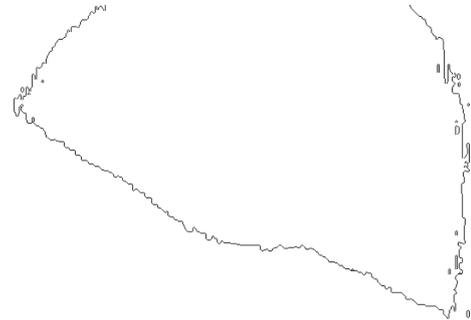


图 8 $v = 0.81$ 时检测结果

Fig. 8 Result of $v = 0.81$

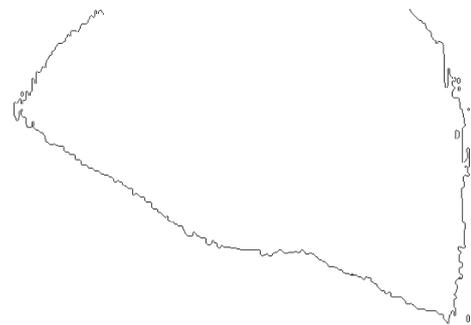


图 9 本文算法处理结果

Fig. 9 Detection result of ours

5.2.2 本文算法与其他经典算法的比较

从定性分析与定量分析两个方面来对比分析.

1) 与标准曲线比较的定性分析

本文算法与经典 Sobel 算子、Log 算子和 Canny 算子的比较结果如图 11 所示. 图 11(a) 是用 Sobe 算子对图 3 进行边缘检测的结果, 可以看出检测的边缘不连续, 且噪声很多. 图 11(b) 是用边缘检测效果相对较好的 Log 算子对图 3 进行检测的结果, 可以看出检测的边缘含有的噪声相对较少, 但是边缘不连续. 图 11(c) 是用传统的 Canny 算子对图 3 进行边缘检测的结果, 可看出其检测的边缘是连续的, 但两侧的边缘还是含有噪声, 不满足连续且含噪声少的单像素边缘的要求. 图 11(d) 是本文检测的结果, 相对上述几种方法, 检测的边缘是连续的, 含噪声最少, 符合检测目标.

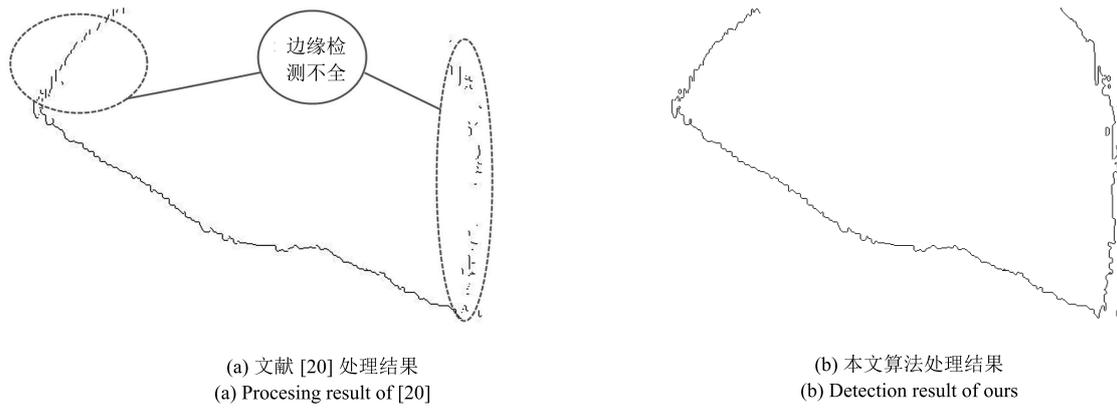


图 10 Sobel 分数阶微分与本文算法处理结果对比图

Fig. 10 Contradistinction of results of Sobel fractional differential and ours

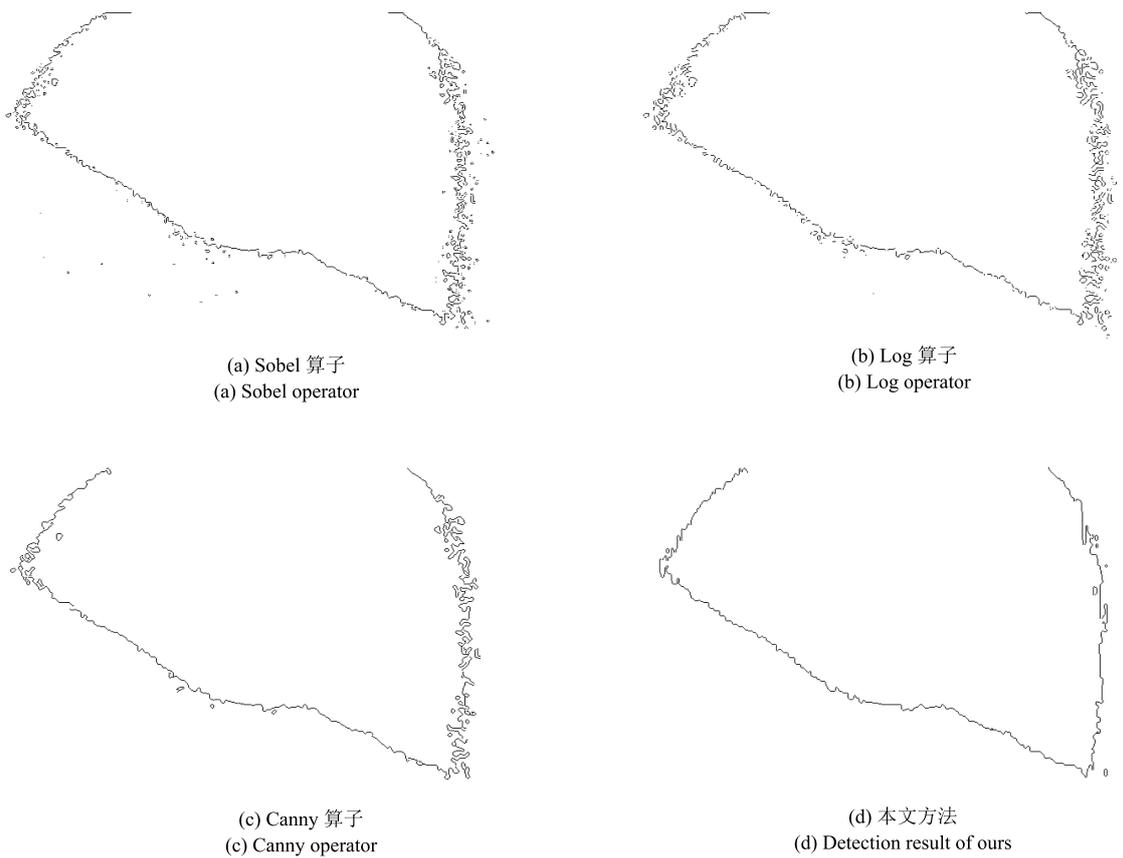


图 11 经典算子与本文最后处理结果对比图

Fig. 11 Contradistinction of results of classical operators and ours

2) 与标准曲线比较的定量分析

为了更进一步说明本文方法与其他方法的优劣, 将本文方法和现有方法与标准曲线进行比较. 该标准曲线是根据高炉料面增强图像的轮廓曲线, 同时结合南北两个探尺的数据, 融合现场经验获得. 为了比较不同方法获取的高炉料面轮廓曲线与标准曲线之间的吻合程度, 将标准曲线分别与本文算法和其

他经典算子提取的轮廓曲线置于同一坐标系下, 分别如图 12~15 所示. 其中 *A* 指的轮廓曲线是标准曲线, *B* 指曲线是各方法检测出的轮廓.

从图 12~15 中可见, 各方法都能很好地跟踪标准轮廓曲线, 但是 Log 算子和 Sobel 算子不仅有边缘断续现象, 且由于噪声引起的伪边缘比较多, 传统 Canny 算子检测的边缘虽然没有断续现象, 但还是

有很多噪声引起的伪边缘, 而本文方法提取的轮廓连续、噪声少且轮廓吻合度最好.

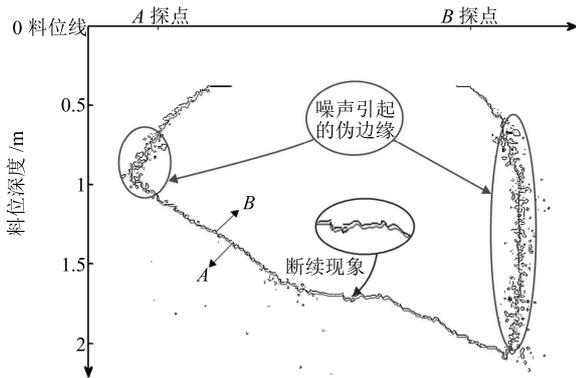


图 12 Sobel 算子检测结果与标准曲线比较图

Fig. 12 Comparison of Sobel operator detection results and standard curve

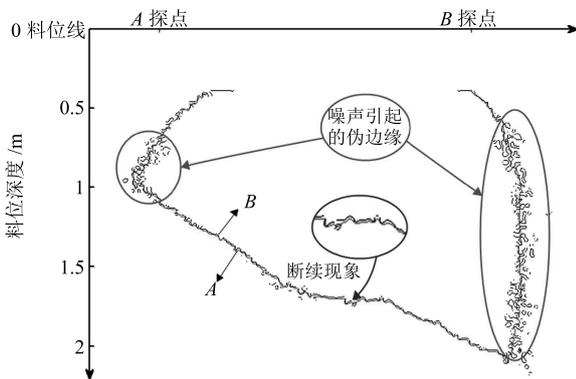


图 13 Log 算子检测结果与标准曲线比较图

Fig. 13 Comparison of Log operator detection results and standard curve

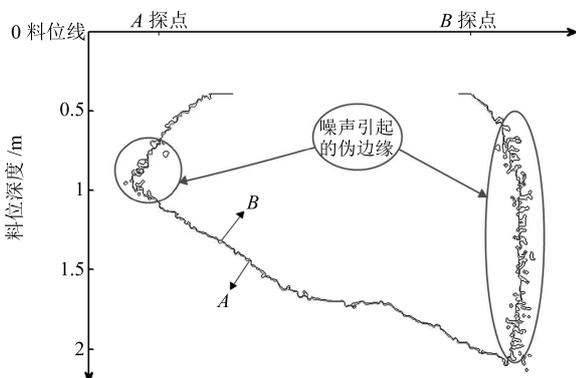


图 14 Canny 算子检测结果与标准曲线比较图

Fig. 14 Comparison of Canny operator detection result and standard curve

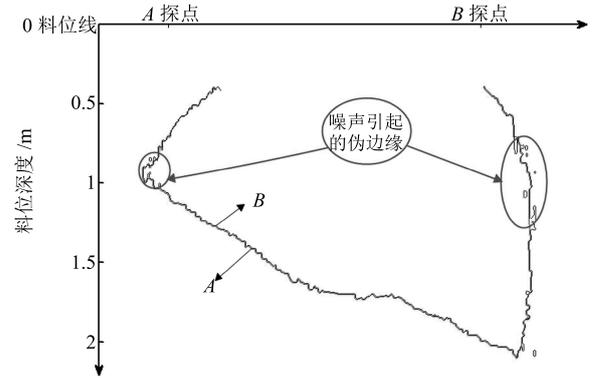


图 15 本文算法检测结果与标准比较图

Fig. 15 Comparison of ours and standard curves

本文从误检像素点个数、误检率、漏检像素点个数、漏检率、命中像素点个数、命中率^[23]、品质因数以及算法复杂度八个定量指标来评价本文算法与经典 Canny 算子、Log 算子以及 Sobel 算子检测边缘的效果. 其中误检像素点个数是指各方法检测出标准曲线上没有的像素点个数; 误检率是指误检个数占标准边缘像素点的比例; 漏检像素点个数是各方法没有检测出标准曲线上的像素点个数; 漏检率是指漏检像素点个数占整个标准边缘像素点的比例; 命中轮廓像素点是指各方法检测的轮廓与标准轮廓相匹配的像素点; 命中率是指相匹配的像素点个数占整个标准轮廓像素点的比例; 计算结果如表 1 所示, 其中标准轮廓的像素点个数是 1 203.

从表 1 可以看出, 本文算法的误检像素点、误检率、漏检像素点和漏检率都远远低于其他三种方法, 其中 Canny 算子是三种方法中相对较好的边缘检测方法, 但其误检率是本文算法的 6.4 倍, 漏检率是本文算法的 14.5 倍. 从命中率的角度来看, 本文算法是 Canny 算子的 2.74 倍, 达到 0.9551. 对于品质因数 Fom^[24], 其值越接近 1 说明检测效果越好, 本文算法的 Fom 是 0.8063, 而其他方法的 Fom 都较小, 说明本文算法能适应高炉料面轮廓检测, 检测效果优于其他经典的算法.

算法复杂度根据每种方法的运行时间来衡量, 通过在 4GB 内存的 64 位系统上采用 MATLAB2013a 进行仿真, 计算结果见表 1, 可以看出本文方法比其他方法慢 2.5 倍左右. 虽然算法复杂度相对于其他方法大一些, 但是我们的要求是得到准确连续的单像素边缘, 其他方法的检测效果没有本文算法的好. 此外, 可以通过提升计算机性能来降低运行时间.

5.3 轮廓与工况对比分析验证

为了说明高炉料面轮廓能表征相应炉况的信息, 将提取的轮廓置于对应的坐标系中, 如图 16 所示.

表 1 高炉料面轮廓检测评价定量指标计算值

Table 1 The calculated value of blast furnace surface contour detection evaluation quantitative indicators

算法	误检像素点	误检率	漏检像素点	漏检率	命中轮廓像素点	命中率	Fom (品质因数)	算法复杂度 (s)
本文算法	321	0.2668	54	0.0449	1 149	0.9551	0.8063	2.937
Canny	2 058	1.7107	784	0.6517	419	0.3483	0.3252	1.159
Log	2 291	1.9044	780	0.6484	423	0.3516	0.2920	0.864
Sobel	2 424	2.0150	805	0.6692	398	0.3308	0.2 839	0.800

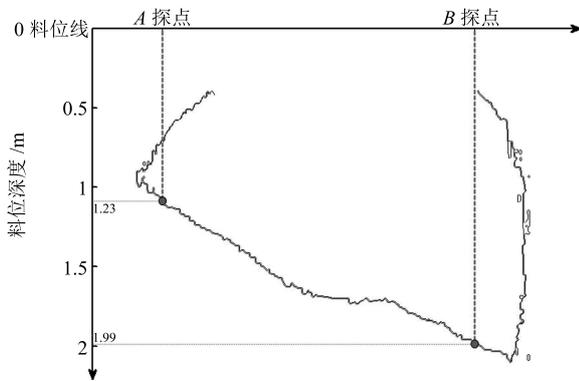


图 16 斜料轮廓图

Fig. 16 Contour of blast furnace burden sloping

图 16 中 A 和 B 两个探尺是高炉的南和北探尺测量点, 均处于提取的高炉料面轮廓线上, 并标出了此时对应的料位深度, 可以看出能够提供料面高度信息的是中间的斜线部分, A 探点处的料位高出 B 探点处料位 0.76 米, 整个轮廓是倾斜向下的, 可以分析出高炉正处于斜料状态, 经与现场工人交流, 当时的炉况确实是发生了斜料, 现场工人通过提取的料面轮廓提供的高低信息进行针对性的布料操作, 30 分钟后, 炉料恢复正常状态. 高炉正常料面增强图像如图 17 所示, 得到的高炉正常料面轮廓如图 18 所示, 此时料面轮廓呈凹状, A 和 B 两个探尺测点的料位深度只相差 0.25 米, 高炉正处于顺行状态.



图 17 高炉正常料面增强图

Fig. 17 Normal blast furnace material surface enhanced

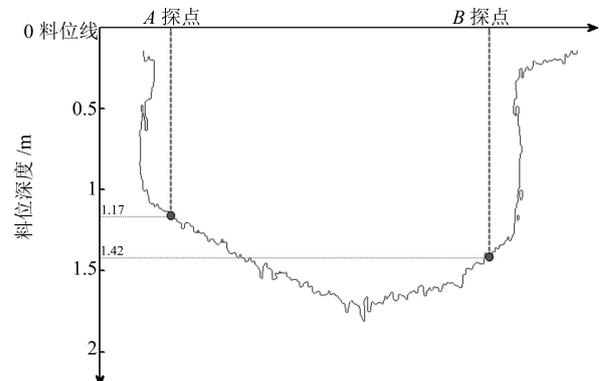


图 18 正常料面轮廓图

Fig. 18 Contour of normal blast furnace burden

通过对比分析高炉料面轮廓与高炉工况, 验证了提取高炉料面轮廓曲线可以得知高炉运行情况, 虽然只是从一个切面的角度来分析, 但对高炉工长及时有效调控布料具有很好的参考价值和指导意义.

6 结论

通过对高炉料面图像特点的分析, 提出了一种适合高炉料面轮廓检测方法. 实例仿真及验证表明该方法有以下优点:

1) 预处理使图像轮廓清晰, 边缘信息增强方便后续的边缘检测;

2) 基于 Sobel 算子原理, 创新性地推导出 45° 与 135° 方向上的分数阶微分算子, 加上文献 [20] 提出的水平与垂直方向的分数阶微分算子实现了四个方向对高炉料面轮廓提取;

3) 对于分数阶阶次的确定, 以 0.2 为步长选取不同的 v 得到一组高炉料面轮廓图来确定轮廓可行域, 然后自定义评价函数自适应确定了最佳分数阶阶次;

4) 改进的 Canny 算子对高炉料面具有很好的去噪效果, 其自适应确定的高阈值决定的强边缘像素具有定位准确的优点, 在八邻域内来连接最佳分数阶阶次下检测的高炉料面轮廓曲线, 达到了修正和补偿料面轮廓的目的.

5) 从定性分析和定量分析比较本文算法与经典边缘检测算子, 验证了本文算法检测的边缘所含噪

声最少, 定位精确, 能够比较直观的看出高炉料况, 对现场操作人员具有指导意义。

References

- 1 Yang Zhen-Hu. Image Processing in the Visual Monitoring of High Surface Charge in the Application of the Theory [Master dissertation], Shandong University, China, 2011. (杨振虎. 图像处理在高炉料面可视化监控中的理论应用 [硕士学位论文], 山东大学, 中国, 2011.)
- 2 Huang Yue-Qin, Chen Xian-Zhong, Wang Tian, Huang Liu, Hou Qing-Wen. Control study based on fuzzy pattern recognition of blast furnace surface. In: Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China, 2013. 2548–2553 (黄月琴, 陈先中, 王田, 黄柳, 侯庆文. 基于模糊模式识别的高炉料面控制研究. 第 32 届中国控制会议论文. 西安, 中国, 2013. 2548–2553)
- 3 Chen X Z, Liu F M, Hou Q W, Lu Y F. Industrial high-temperature radar and imaging technology in blast furnace burden distribution monitoring process. In: Proceedings of the 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Beijing, China: IEEE, 2009. 1599–1603
- 4 Koyuncu İ, Çetin Ö, Katırcıoğlu M, Tuna M. Edge detection application with FPGA based Sobel operator. In: Proceedings of the 23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Malatya, Turkey: IEEE, 2015. 1829–1832
- 5 Wen Shan, Li Bao-Qing. Multidirectional image edge detection based on wavelet laid. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(5): 480–487 (文山, 李葆青. 基于小波分层的多方向图像边缘检测. 自动化学报, 2007, **33**(5): 480–487)
- 6 He Chun, Ye Yong-Qiang, Jiang Bin, Zhou Xin. A novel edge detection method based on fractional-order calculus mask. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(5): 776–787 (何春, 叶永强, 姜斌, 周鑫. 一种基于分数阶微积分模板的新型边缘检测方法. 自动化学报, 2012, **38**(5): 776–787)
- 7 Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2008. 703–728
- 8 Li E S, Zhu S L, Zhu B S, Zhao Y, Xia C G, Song L H. An adaptive edge-detection method based on the Canny operator. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. Wuhan, China: IEEE, 2009. 465–469
- 9 Zhang J X, Chang W, Wu L. Edge detection based on general grey correlation and LoG operator. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI). Sanya, China: IEEE, 2010. 480–483
- 10 Wang Z M, Su J Y, Zhang P. Image edge detection algorithm based on wavelet fractional differential theory. In: Proceedings of the 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu, China: IEEE, 2016. 10407–10411
- 11 Gao C B, Zhou J L, Hu J R, Lang F N. Edge detection of colour image based on quaternion fractional differential. *IET Image Processing*, 2011, **5**(3): 261–272
- 12 Xie Y F, Chen H, Gui W H, Liu J P, Xia J L. A novel fractional order Sobel operator based on texture images. In: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference (CCC). Yantai, China: IEEE, 2011. 3100–3104
- 13 Mcilhagga W. The Canny edge detector revisited. *International Journal of Computer Vision*, 2011, **91**(3): 251–261
- 14 Hao G, Min L, Feng H. Improved self-adaptive edge detection method based on Canny. In: Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Hangzhou, China: IEEE, 2013. 527–530
- 15 Yuan L Y, Xu X. Adaptive image edge detection algorithm based on Canny operator. In: Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application (AITS). Harbin, China: IEEE, 2015. 28–31
- 16 Chen Z P, Jiang Z H, Gui W H, Yang C H. A novel device for optical imaging of blast furnace burden surface: parallel low-light-loss backlight high-temperature industrial endoscope. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(17): 6703–6717
- 17 Yoon H, Han Y, Hahn H. Image contrast enhancement based sub-histogram equalization technique without over-equalization noise. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2009, **3**(6): 323–329
- 18 Pu Y F, Wang W X, Zhou J L, Wang Y Y, Jia H D. Fractional differential approach to detecting textural features of digital image and its fractional differential filter implementation. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008, **51**(9): 1319–1339
- 19 Chen X H, Fei X D. Improving edge-detection algorithm based on fractional differential approach. In: Proceedings of the 2012 International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC 2012). Singapore, Singapore: IACSIT Press, 2012. 1–6
- 20 Jiang Wei, Chen Hui. New edge detection model based on fractional differential and Sobel operator. *Computer Engineering and Applications*, 2012, **48**(4): 182–185 (蒋伟, 陈辉. 基于分数阶微分和 Sobel 算子的边缘检测新模型. 计算机工程与应用, 2012, **48**(4): 182–185)
- 21 Pan D F, Wang B. An improved Canny algorithm. In: Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Kunming, China: IEEE, 2008. 456–459
- 22 Xie Y N, Zhu Z, Zhang X G, Wang Q. An adaptive median filter using local texture information in images. In: Proceedings of the 13th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS). Taiyuan, China: IEEE, 2014. 177–180
- 23 Panetta K, Gao C, Agaian S, Nercessian S. A new reference-based edge map quality measure. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, **46**(11): 1505–1517
- 24 Chen Hong-Xi. Study on the objective evaluation of the performance of edge detection operator based on the quality factor. *Automation and Instrumentation*, 2015, (8): 8–10 (陈宏希. 基于品质因数的边缘检测算子性能优劣客观评价研究. 自动化与仪器仪表, 2015, (8): 8–10)



蒋朝辉 博士, 中南大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 广义大系统控制理论与应用. 本文通信作者.

E-mail: jzh0903@csu.edu.cn

(JIANG Zhao-Hui Ph.D., associate professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling

and optimal control of complex industrial process, descriptor large systems control theory and application. Corresponding author of this paper.)



吴巧群 中南大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为图像处理, 智能控制系统.

E-mail: qiaoqunwu@126.com

(**WU Qiao-Qun** Master student at the School of Information Science and Engineering, Central South University. Her research interest covers image processing and intelligent control system.)



桂卫华 中国工程院院士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 工业大系统控制理论与应用.

E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn

(**GUI Wei-Hua** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, industrial large system control theory

and application.)



阳春华 博士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 智能自动化控制系统.

E-mail: ychh@mail.csu.edu.cn

(**YANG Chun-Hua** Ph.D., professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. Her research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, and intelligent automation control system.)



谢永芳 博士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与控制, 分散鲁棒控制.

E-mail: yfxie@mail.csu.edu.cn

(**XIE Yong-Fang** Ph.D., professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, and distributed robust control.)