

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205575

基于序列图像与针孔成像的井喷流体流速计算*

梁海波¹ 徐彬轩¹ 卿玉²

(1. 西南石油大学机电工程学院 成都 610599;

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司井控应急救援响应中心 德阳 618399)

摘要:针对常见井喷流体流速测量方法存在危险性较高、准确性较差的问题,为安全、精确测量井喷流体流动速度,提出了一种基于序列图像与针孔成像的井喷流体流速计算方法并进行了相应的实验。该方法利用摄像机和自研井喷模拟装置,通过获取大量模拟井喷的序列图像,从中选取前后两帧图像后,对这两幅图像分别用 SIFT 算法进行特征点提取,再用 FLANN 算法对提取出来的特征点进行特征匹配,最后使用 RANSAC 算法进行误匹配特征点消除,得到两幅图之间的准确匹配特征点后,提取这些像素点的坐标位置并计算出匹配特征点之间的位移距离,最后使用基于针孔成像的方法计算出井喷流体的流速,实验结果表明,能获得较准确的井喷流体流速,从而更准确估计井喷的危害,保障了现场作业人员人身安全。

关键词: 图像处理;特征识别;井喷流体;针孔成像;流速计算

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Blowout fluid velocity calculation based on sequence image and pinhole imaging

Liang Haibo¹ Xu Binxuan¹ Qing Yu²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610599, China;

2. CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Well Control Emergency Rescue Response Center, Deyang 618399, China)

Abstract: Aiming at the problems of high risk and poor accuracy in common blowout fluid velocity measurement methods, in order to measure the blowout fluid flow velocity safely and accurately, a calculation method of blowout fluid velocity based on sequence images and pinhole imaging was proposed and carried out corresponding experiments. The method uses a camera and a self-developed blowout simulation device to obtain a large number of sequence images of simulated blowouts, selects two frames of images before and after, and uses the SIFT algorithm to extract the feature points of the two images respectively, and then uses the FLANN algorithm to extract the feature points for feature matching, and finally the RANSAC algorithm is used to eliminate the mismatched feature points. After obtaining the accurate matching feature points between the two images, the coordinate positions of these pixel points are extracted and the displacement distance between the matching feature points is calculated. Finally, the flow rate of blowout fluid is calculated by the method based on pinhole imaging. The experimental results show that a more accurate flow rate of blowout fluid can be obtained, so as to more accurately estimate the harm of blowout and ensure the personal safety of field operators.

Keywords: image processing; feature recognition; blowout fluid; pinhole imaging; velocity calculation

0 引言

近年来,随着对石油天然气的需求量增加,石油天然气开采的强度在增大,井喷事故发生的次数逐渐增

多,井喷事故的发生,使得大量油液流入土壤和海洋,且难以再次回收,造成大量油气资源浪费^[1-2]。由于地层强大的压力和高温使得流体喷出后,地面工作人员无法靠近检测流体参数,且目前未有仪器可以实现井喷流速的近距离测量。因此,需积极推进井喷流体参

数测量技术的研究进程,对早期井喷的应急抢险具有重要意义^[3-6]。

杨强^[7]将开展了井控管汇失效过程量化分析和防控措施研究,得到冲蚀磨损构建井控管汇的失效模型,建立了井控管汇冲蚀模型。马睿^[8]研究了井喷的预防和控制问题,发现早期溢流监测具有决定性的作用,他使用非接触超声波多普勒检测能够及时监测到井下早期溢流的发生。刘书杰等^[9]针对海上井喷,提出一种基于观测船体三自由度运动形式的井喷射流高度检测方法,但其只关注井喷射流的高度。姚笛^[10]利用航拍或救援船拍摄井喷液柱瞬态图像,建立基于井喷射流高度的井口压力和井喷出口处流体流速间的理论计算模型,但其模型过于复杂,计算量过大。

Palacios 等^[11]研究井喷事故伴随的喷射火焰,提出了一个方程,能够确定涉及多种气体燃料、风条件、流态和方向的喷射火焰的喷出速度。Dunn 等^[12]在自由场条件下,预测了井喷流体流速,并总结出了空气产生的自然夹带向射流的径向流入时,其射流速度随着射流高度的升高而降低。Maleta 等^[13]从统一的 Damkohler 数(基于射流边界处的速度梯度和从层流火焰速度估计的化学反应时间尺度)表征了混合火焰喷出速度。Morales 等^[14]对预混钝体火焰的稀薄喷出机理进行了实验研究,发现随着湍流水平的增加,井喷机制变得更少依赖于火焰和剪切层的相互作用,而更多的受火焰-湍流相互作用的驱动。

针对井喷流速的计算未能实现实时、快速计算,并且现有测量仪器必须由工作人员深入高温、高压事故现场进行参数测量,为现场人员的生命安全带来隐患的问题。本文提出一种基于序列图像与针孔成像的井喷流体流速计算,可以在井喷事故初期对井喷流体流速实现快速测量,且无需工作人员在情况复杂事故现场近距离测量参数,使得工作人员的安全得以保障。

1 井喷流体特性分析

1.1 射流形式

当发生井喷事故后,井筒内流体喷出地表,根据喷出流体周围的介质运动形式,将喷出流体分为3种射流形式^[15]。

在流体喷出地表后,进入大气空间里自由运动称为自由射流。形成此种类型的射流需要具备的条件是:首先,射流流体自身的密度、温度等物理性质与周围介质相同;其次,空间内的介质处于静止状态,且不受边界阻碍。其基本特点是,射流流体与周围环境的介质间得速度梯度差异明显,在流体质点之间进行动量交换的过程中,射流流体的速度减小,与此同时,射流主体周围的

流体被卷吸到射流主方向,并进行加速,使得射流边界逐渐变窄。除此之外还有旋转射流和受限射流。由于自由射流受周围介质影响较少,符合本文针对性地研究井喷流速目的,因此,本文基于自由射流形式来展开对井喷流速的研究。

1.2 井喷射流运动分析

一般自由射流具有喷射成束的性质,在井口上空形成束状射流,当喷流速度较低时,相邻的流股间发生动量、热量或质量的交换,由此形成具有一定厚度的层流射流边界层。当喷流速度过大时,雷诺数增加并超过一定临界值后,切向的各断面出现旋涡,这些旋涡在向周围不规则流动时,造成喷流微团的径向动量、质量和热量的转换,最终形成紊动射流边界层。一般情况下,井喷射流都为紊动射流^[16-17]。

当井喷流体进入井口上空后,由于在重力作用下,随着射流高度的增加,其射流直径逐渐增大,且自身速度逐渐降低,最后喷流的能量主要由速度耗散。在井喷喷流形成稳定流态后,其射流形态与流速分布如图1所示。

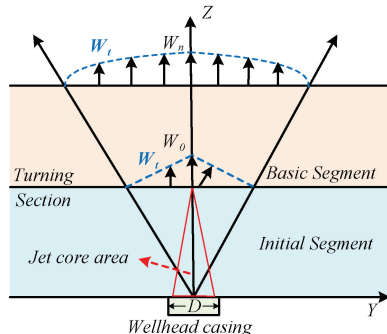


图1 井喷射流速度分布

Fig. 1 Velocity distribution of well jet flow

在图1中,根据统计平均意义,将射流边界视作线形扩散界面。井喷的速度演变过程为,井喷流体以初速度 ω_0 从直径为 D 的井口喷出,当其沿 Z 轴运动一段距离后,在射流流体卷吸周围空气后,使得射流边界逐渐变宽,射流主体速度衰减,依旧保持初始速度的区域逐渐变小。一般将喷流的初速度边界视为喷流内边界,速度为零的边界视为喷流外边界,随着喷流高度的再次上升,更多的空气被卷吸,在一定高度处,喷流边界层扩展到喷流中轴线,此时仅有喷流中心线上速度保持初始速度 ω_0 ,该中心线处横截面视为转折截面,即从这一转折截面开始,喷流速度沿 Z 轴降低。另外,一般将井口到转折截面间的喷流段定义为喷流初始段;将转折截面以上的部分定义为喷流基本段,该段中心速度沿中轴线不断衰减; ω_n 为射流轴线上速度, ω_l 为同一截面沿 Y 轴方向任意位置的射流速度^[18]。

2 理论模型

2.1 SIFT 算法

尺度不变特征变换算法 (scale-invariant feature transform algorithm, SIFT) 主要包括 4 个步骤: 1) 建立尺度空间; 2) 特征点检测; 3) 确定关键点的大小和方向; 4) 特征点描述子生成^[19]。

一幅图像的多尺度空间定义为:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

其中, $I(x, y)$ 为输入图像, σ 为尺度空间因子, $*$ 表示卷积, $G(x, y, \sigma)$ 为高斯卷积函数。然后将相邻两个尺度的图像相减建立图像的 DOG 金字塔。其表达式为:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) \quad (2)$$

式中: 因子 k 满足 $k = 2^{(1/s)}$, s 表示不同的高斯核, $*$ 表示卷积; 如果一个点在 DOG 金字塔本层以及上下两层的 26 个近邻像素的值中是最大或最小值, 就认为该点是图像在该尺度下的一个特征点。

2.2 FLANN 算法

近似最近邻的快速库 (fast library for approximate nearest neighbors, FLANN) 的特征空间通常是一个 n 维的实向量空间命名为 R^n 。特征点 m 和 n 的子向量分别用 S_m 和 S_n 表示, 则 $D(m, n)$ 的欧氏距离如下式:

$$D(m, n) = \langle S_m - S_n \cdot S_n - S_m \rangle \quad (3)$$

R^n 中的所有 $D(m, n)$ 都存储在若干个基于 KD 树部分的结构中。核心是寻找基于欧氏距离的相邻点, 在整个 KD 树中搜索到接近查询点的最小欧氏距离, 从而有效地搜索到参考点的最近点, 最后得到特征点初始匹配点集, 完成图像配准粗匹配点对结果^[20]。

2.3 RANSAC 算法

随机抽样一致算法 (random sample consensus, RANSAC) 的核心思想就是假设性和随机性, 假设性理解为随机抽样选出来的数据都是正确的, 随机性则用来减少算法执行过程中的计算量^[21], 用来筛选掉 FLANN 法误匹配的特征点。SIFT-FLANN-RANSAC 算法流程图如图 2 所示。

2.4 序列图像与针孔成像的井喷流体流速模型研究

本文在通过前文图像处理获得的关键特征点对基础上, 采用针孔成像法实现对井喷流速的计算。首先, 通过对相机的标定, 确定相机的内参数和外参数^[22], 需要将外参数从像素坐标系转换到世界坐标系, 来实现后续井喷流体流速计算的研究, 针孔成像原理如图 3 所示。

图 3 中, 相机坐标系以 O 为相机光心, O_z 轴为光轴,



图 2 SIFT-FLANN-RANSAC 图像处理流程
Fig. 2 SIFT-FLANN-RANSAC image processing flow chart

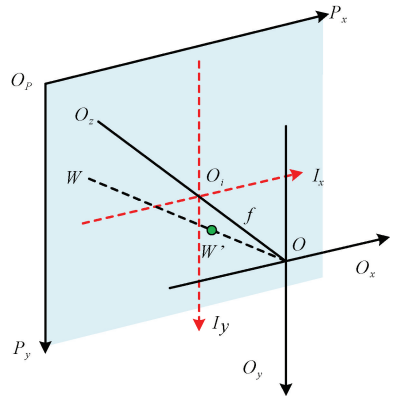


图 3 针孔成像模型

Fig. 3 Pinhole imaging model

O_x, O_y 分别为水平轴、垂直轴; 由坐标原点 O_i , 横坐标 I_x , 纵坐标 I_y 构成的坐标系为图像坐标系, 且 I_x 与 I_y 分别与相机坐标系中的 O_x, O_y 平行, 相机坐标系光心 O 与图像坐标系原点 O_i 之间的距离 OO_i 为焦距 f ; 由坐标原点 O_p , 横坐标 P_x , 纵坐标 P_y 构成的坐标系为像素坐标系, 坐标系中任意一点 (P_{xi}, P_{yi}) 表示图像中的一个像素点坐标; 但由于像素坐标系无法反映目标在图像中的具体位置, 因此需要将像素坐标转换为图像坐标^[9, 23]。假设图像坐标系中 O_i 的像素坐标为 (P_{x0}, P_{y0}) , 像机中感光器件像素规格为 $dx \times dy$, 得出像素坐标系与图像坐标系的转换关系如式 (4) 所示。

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -P_{x0}dx \\ 0 & dy & -P_{y0}dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

当相机坐标系中物体一点 W 坐标为 (O_x, O_y, O_z) 时, 将图像中所成的像设为点 $W'(I_x, I_y)$, 则图像坐标系与相机坐标系的转换关系用矩阵齐次式表示为式 (5):

$$\begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_z/f & 0 & 0 \\ 0 & O_z/f & 0 \\ 0 & 0 & O_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

与像素坐标系的关系如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_z dx/f & 0 & -O_z P_{x0} dx \\ 0 & O_z dy/f & -O_z P_{y0} dy \\ 0 & 0 & O_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在进行相机标定时,将获得的相机内部参数表示为 k_x, k_y 和 P_{x0}, P_{y0} 。其中, $k_x = f * (1/dx)$ 、 $k_y = f * (1/dy)$ 。当目标景物与相机平面平行时,目标景物点 $W_0 = (O_{x0}, O_{y0}, O_{z0})$ 移动到 $W_1 = (O_{x1}, O_{y1}, O_{z1})$ 时,在图像上,相当于从 $W'_0 = (P_{x0}, P_{y0})$ 移动到 $W'_1 = (P_{x1}, P_{y1})$ 。此时,根据映射关系可得式(7):

$$\begin{cases} P_{x1} - P_{x0} = \frac{k_x(O_{x1} - O_{x0})}{O_z} \\ P_{y1} - P_{y0} = \frac{k_y(O_{y1} - O_{y0})}{O_z} \end{cases} \quad (7)$$

通过相机标定 k_x 和 k_y 后,并计算出相机距射流面的距离 O_z ,即可推导出像素与实际距离的比例。假设物体在成像平面上移动的像素为 $(\Delta m, \Delta n)$,则实际移动距离 ΔY 为:

$$\Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\Delta m O_z}{k_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n O_z}{k_y}\right)^2} \quad (8)$$

最后根据相机帧率,推导出前后帧时间间隔 Δt ,重力加速度为 g ,可以得到式(9),将式(9)等价变换后,得到式(10),利用式(10),即可计算出井喷射流的初速度。

$$\Delta Y = \omega_0 \Delta t - \frac{1}{2} g (\Delta t)^2 \quad (9)$$

$$\omega_0 = (\Delta Y + \frac{1}{2} g (\Delta t)^2) / \Delta t \quad (10)$$

本文对流速的计算采用基于前后帧图像,对其特征点进行提取并匹配,利用实物尺寸转换系数法和透镜成像法,通过计算前后帧图像特征点位移像素差,结合前后帧时间差进行流速计算。

3 实验装置及数据分析

3.1 井喷流体视频获取方案设计

为了验证本文所建井喷流体流速图像算法模型的性能,进行了井喷流体视频采集方案设计,搭建了井喷模拟实验架台,利用获取的井喷图片,验证本文所建井喷流体流速算法模型的性能。

在井喷视频采集过程中,首先将两台型号均为 Canon EOS 850D 的相机置于与井喷目标连线夹角呈 90° 的两方位上,然后通过控制两台相机的焦距 f 、图像像素大小,以及物距 d 与相机高度 H 保持不变,分别进行了背景优化下和自然背景下的井喷视频采集,采集方案和参数设置如表1所示,将采集到的井喷视频利用视频切割算法处理为连续帧图像,以进行流速计算。

表1 井喷视频采集方案

Table 1 Blowout video acquisition scheme

相机 1:			相机 2:		
视频帧率:59 fps、1 920×1 080			视频帧率:59 fps、1 920×1 080		
焦距	速度 1(阀门全开)		焦距	速度 1(阀门全开)	
$f1=35 \text{ mm}$	速度 2(打开阀门 2/3)		$f1=35 \text{ mm}$	速度 2(打开阀门 2/3)	
物距:	物理对象的总高度	速度 3(阀门开度的	物距:	物理对象的总高度	速度 3(阀门开度的
$d=245 \text{ cm}$	高=165 cm	1/3)	$d=244 \text{ cm}$	高=137 cm	1/3)
相机度数高度:	焦距	速度 1(阀门全开)	相机度数高度:	焦距	速度 1(阀门全开)
高=100.5 cm	$f2=55 \text{ mm}$	速度 2(打开阀门 2/3)	高=97 cm	$f2=50 \text{ mm}$	速度 2(打开阀门 2/3)
	物理对象的总高度	速度 3(阀门开度的		物理对象的总高度	速度 3(阀门开度的
	$h=107.5 \text{ cm}$	1/3)		高=93 cm	1/3)

3.2 井喷模拟实验架台

首先,通过对实际井喷特性分析,自主研制了井喷模拟装置,本文研制的井喷模拟装置局部喷头结构如图4所示。

将两台相机分别置于与井喷模拟装置喷头连线交点夹角成 90° 两个方位上,进行井喷流体视频采集,如图5所示,为摄像机现场布局情况。

在井喷视频采集过程中:物距一定时,在不同背景下,拍摄不同焦距下的井喷流体视频;拍摄背景一定,焦距一定条件下,控制流体流量变化,拍摄不同速度下流体视频,同时在上位机上记录质量流量计测得的流体流速。

如图6所示为各仪器协调工作下的模拟井喷流体视频采集流程。

实验中,当模拟井喷流体进入井口上空后,由于在重

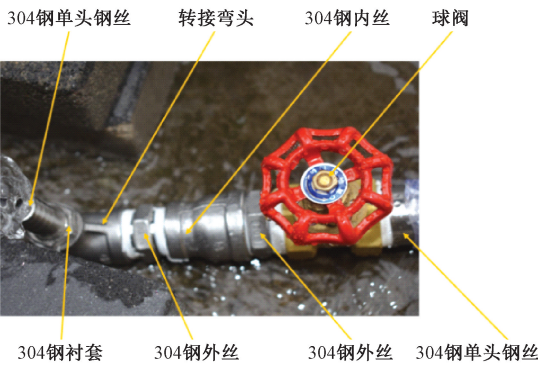


图 4 井喷模拟装置局部喷头结构说明
Fig. 4 Description of local nozzle structure of blowout simulation device



图 5 摄像机现场布局
Fig. 5 Camera site layout

3.3 井喷模拟实验

本文所进行的井喷模拟实验在室外光线充足、无安全隐患的条件下进行,如图 7 为井喷模拟实验现场。井喷模拟实验共进行了两次,初次实验未能达到预期效果,因此对井喷模拟装置所用摄像机参数进行了更进一步调试,对实验方案做了进一步的优化,具体在于改进了相机参数和相机位置且增加了更优质的黑色背景以减少背景干扰,在第 2 次井喷模拟中,模拟效果可满足预期要求,如图 8 所示,图 8(a)为第 1 次实验中获取的井喷图像,可见其分辨率低,对于图像细节的显示模糊,图 8(b)为第 2 次实验获取的井喷图像,可以看出相较于初次拍摄的井喷局部图,第 2 次所拍图像局部纹理清晰呈现,图像分辨率高,井喷流体细节得到了很好地展现。因此,本文以第 2 次实验获取的井喷流体图像为样本进行算法模型的仿真研究。



图 7 实验现场
Fig. 7 Blowout simulation test site

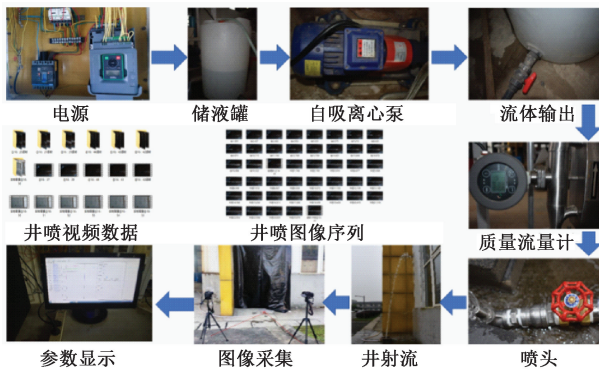
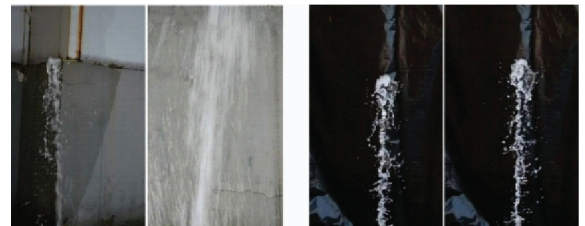


图 6 模拟井喷流体视频采集流程
Fig. 6 Video acquisition process of simulated blowout fluid

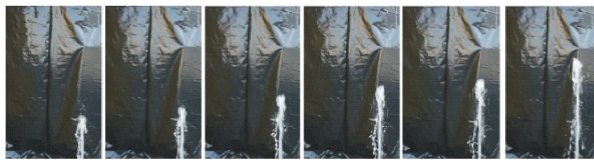


(a) 第 1 次模拟井喷图
(a) First simulated blowout test diagram
(b) 第 2 次模拟井喷图
(b) Second simulated blowout test diagram

图 8 第 1 次实验与第 2 次实验模拟井喷图像对比
Fig. 8 Comparison of simulated blowout images between the first experiment and the second experiment

力作用下,随着射流高度的增加,其射流直径逐渐增大,且自身速度逐渐降低,最后喷流的能量主要由速度耗散,如图 1 所示。在井喷喷流形成稳定流态后,其射流形态与流速分布符合图 1 所示流速特征,因此该实验平台实现了对实际井喷特性的模拟。

实验过程中,摄像机拍摄井喷流体视频,并通过无线传输方式将获取的井喷流体视频数据传输到上位机端,随后在上位机上利用视频切割算法将视频数据处理为连续帧的图像序列。处理后的图像序列如图 9(a)、(b)所示,分别为相机 1 在背景优化下和自然背景下图像序列,如图 10(a)、(b)所示,分别为相机 2 在背景优化下和自然背景下图像序列。



(a) 背景优化
(a) Background optimization



(b) 自然背景
(b) Natural background

图 9 相机 1 图像序列

Fig. 9 Camera 1 image sequence



(a) 背景优化
(a) Background optimization



(b) 自然背景
(b) Natural background

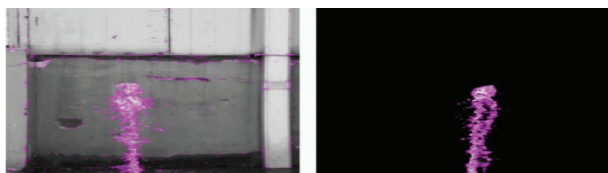
图 10 相机 2 图像序列

Fig. 10 Camera 2 image sequence

3.4 模拟井喷流体流速计算

为验证井喷模拟实验获取的图像可靠性和本文图像处理模型的准确性,本文分别选取相机 1 和相机 2 获取的井喷流体图像数据,进行本文所提图像处理模型仿真。

利用本文所提的 SIFT 算法对相机 1 和相机 2 的井喷流体图片进行特征检测,特征检测结果如图 11 所示。



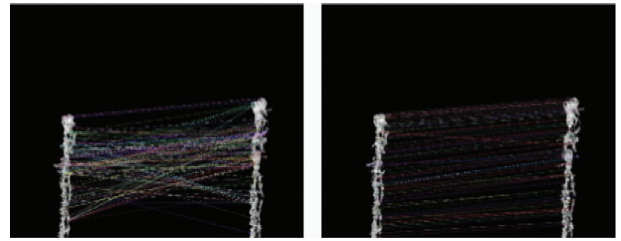
(a) 未剔除背景
(a) Background not culled
(b) 剔除背景
(b) Cull background

图 11 井喷流体特征检测结果

Fig. 11 Testing results of blowout fluid characteristics

在井喷流体图像特征点检测后,根据检测的特征点

描述符进行基于 SIFT-FLANN 算法和 SIFT-FLANN-RANSAC 算法的井喷流体图像特征匹配对比,如图 12 所示为井喷流体图像前后两帧特征匹配结果。



(a) SIFT-FLANN算法
(a) SIFT-FLANN algorithm
(b) SIFT-FLANN-RANSAC算法
(b) SIFT-FLANN-RANSAC algorithm

图 12 井喷流体特征匹配结果

Fig. 12 matching results of blowout fluid characteristics

由图 12 可见,图 12(b) 特征点匹配效果明显优于图 12(a),所以选择使用 SIFT-FLANN-RANSAC 匹配相机 2 的前后帧井喷流体图片,得到位移后,利用式(11)计算井喷流速。

通过图像处理结合针孔成像法对井喷流体流速进行计算后,为了验证本文计算的井喷流体流速的准确程度,利用研制的井喷模拟装置的质量流量计记录的流体流速,将其作为本文井喷流体流速的标定流速,以进行和本文计算出的流速值进行比较。本文计算的井喷流体流速值和标定流速值的比较结果如表 2 和 3 所示。

表 2 35 mm 焦距下井喷液流量精度对比结果

Table 2 Comparison results of blowout fluid flow accuracy under 35 mm focal length

样本	质量流量计速率 $/(m \cdot s^{-1})$	当前速率 $/(m \cdot s^{-1})$	平均相对 误差/%	平均绝对百分 比误差/%
1	2.028	2.317	12.47	
2	1.844	1.689	8.41	14.68
3	1.352	1.641	21.38	

表 3 55 mm 焦距下井喷液流量精度对比结果

Table 3 Comparison results of blowout fluid flow accuracy under 55 mm focal length

样本	质量流量计速率 $/(m \cdot s^{-1})$	当前速率 $/(m \cdot s^{-1})$	平均相对 误差/%	平均绝对百分 比误差/%
1	2.028	2.101	3.60	
2	1.844	1.835	0.49	3.78
3	1.352	1.450	7.25	

通过表 2 和 3 可以得出,当相机焦距 $f=55 \text{ mm}$ 时,3 组样本的平均相对误差以及平均绝对百分比误差都比焦距 $f=35 \text{ mm}$ 时更低,由此可得,在本文实验中使用相机 2 且焦距 $f=55 \text{ mm}$ 时,其计算的井喷流体流速值

最准。

4 结 论

为了保障现场作业人员的安全,避免环境污染,提高井喷应急抢险救援的速度,现场决策指挥人员急需知道井喷初速度以做出正确的决定。本文对井喷流体特性进行了分析,确定井喷喷口处的射流初速度为本文计算目标,随之提出了 SIFT-FLANN-RANSAC 的井喷图像特征点匹配方法,首先用 SIFT 算法提取前后帧图像的特征点,然后利用 FLANN 算法匹配这些特征点,最后用 RANSAC 算法剔除误匹配特征点对。在实验中,将井喷射流上边缘特征匹配对作为计算的关键点,得到前后帧图像特征点对的像素位移,最后通过针孔成像法计算出井喷射流实际初速度。最后,通过与质量流量计所测流速进行比较,结果表明,本文提出的序列图像与针孔成像算法在计算井喷射流的初速度时误差小,速度快,准确率高,对井喷应急抢险现场指挥决策人员的决策提出具有重要意义。

参考文献

- [1] YFWA D, ZML A, JCJ B, et al. Blowout fire probability prediction of offshore drilling platform based on system dynamics[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 62: 103960.
- [2] ZHU J, CHEN G, YIN Z, et al. An integrated methodology for dynamic risk evaluation of deepwater blowouts[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 74: 104647.
- [3] YIN Q, YANG J, TYAGI M, et al. Machine learning for deepwater drilling: Gas-kick-alarm classification using pilot-scale rig data with combined surface-riser-downhole monitoring[J]. *SPE Journal*, 2021: 1-27.
- [4] MUOJEKE S, VENKATESAN R, KHAN F. Supervised data-driven approach to early kick detection during drilling operation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192: 107324.
- [5] SUN X, SUN B, ZHANG S, et al. A new pattern recognition model for gas kick diagnosis in deepwater drilling [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2018, 167: 418-425.
- [6] RASSENFOSS S. Report recounts the missed signals leading to a blowout that killed five [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2019, 71(8): 40-42.
- [7] 杨强. 海洋油气井控管汇失效风险量化分析与防控研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- YANG Q. Quantitative analysis and research on prevention and control of failure risk of offshore oil and

- gas well control manifolds [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [8] 马睿. 基于多普勒原理的溢流早期监测方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- MA R. Research on early monitoring method of overflow based on Doppler principle [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [9] 刘书杰, 耿亚楠, 任美鹏, 等. 基于船体三自由度井喷液柱高度测量方法[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(11): 76-81.
- LIU SH J, GENG Y N, REN M P, et al. Height measurement method of blowout liquid column based on three degrees of freedom of hull [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(11): 76-81.
- [10] 姚笛. 基于井喷液柱高度的井口与井底压力预测研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- YAO D. Prediction of wellhead and bottom hole pressure based on the height of blowout liquid column [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [11] PALACIOS A, RENGEL B, WANG Q, et al. Analysis of experimental flame shapes and blowout velocities of partially-premixed methane-air jet flames [J]. *Fuel*, 2020, 269: 117430.
- [12] DUNN M, FITZGERALD S, GARNER J. Predicting hydrocarbon burn efficiency of ignited blowout for oil spill source control [C]. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. OnePetro, 2018.
- [13] MALETA T, PARTHASARATHY R N, GOLLAHALLI S R. Blowoff characteristics of partially premixed flames of prevaporized blends of biofuels and petroleum fuels [C]. Asme International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2017.
- [14] MORALES A J, REYES J, BOXX I, et al. The effects of turbulence on the lean blowout mechanisms of bluff-body flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 6317-6325.
- [15] TANG L, MASUTANI S M. Laminar to turbulent flow liquid-liquid jet instability and breakup [C]. The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. OnePetro, 2003.
- [16] 刘凯. 气井失控井喷数学模型及其计算机模拟[J]. *西南石油学院学报(自然科学版)*, 1988, 10(1): 42-51.
- LIU K. Mathematical model of uncontrolled blowout in gas well and its computer simulation [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)*, 1988, 10(1): 42-51.
- [17] 周豪杰, 牛小静, 邵冬冬. 气泡羽流内部结构的实验

测量和图像处理方法[C]. 第十届全国流体力学学术会议论文摘要集, 2018.

ZHOU H J, NIU X J, SHAO D D. Experimental measurement and image processing of internal structure of bubble plume [C]. Abstracts of the 10th National Conference on Fluid Mechanics, 2018.

- [18] 刘振翼, 张应安, 郑远攀, 等. 含 CO₂ 天然气井井喷流场特征[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 90-96.
LIU ZH Y, ZHANG Y AN, ZHENG Y P, et al. Characteristics of well jet flow field in natural gas wells containing CO₂ [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 90-96.
- [19] MA W, WEN Z, WU Y, et al. Remote sensing image registration with modified SIFT and enhanced feature matching [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 14(1): 3-7.
- [20] 冯亦东, 孙跃. 基于 SURF 特征提取和 FLANN 搜索的图像匹配算法 [J]. 工程图学学报, 2015, 36(4): 650-654.
FENG Y D, SUN Y. Image matching algorithm based on surf feature extraction and FLANN search [J]. Journal of Graphics, 2015, 36(4): 650-654.
- [21] ZHANG J, YU K, WEN Z, et al. 3D reconstruction for motion blurred images using deep learning-based intelligent systems [J]. CMC-Computers Materials & Continua, 2021, 66(2): 2087-2104.
- [22] SUN J, LU B, WU X H, et al. Study of the parallax correction algorithm based on the multiple regulatory factors [C]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 466: 876-880.
- [23] 黄建坤. 基于图像序列的桥梁形变位移测量方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
HUANG J K. Bridge deformation and displacement measurement method based on image sequence [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

作者简介



梁海波 (通信作者), 2008 年获西南石油大学工学学士、硕士、博士学位, 现任西南石油大学教授。主要研究方向为石油钻井相关工作, 如专家系统、数据挖掘、石油装备开发及相关系统开发, 和油气地质导向分析和信息解释分析工作。

E-mail: secondbo@126.com

Liang Haibo (Corresponding author) received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees at Southwest Petroleum University in 2008. He currently works as a professor at Southwest Petroleum University. His main research interests include oil drilling related work, such as: Expert system, data mining, oil equipment development and related system development. He is engaged in oil and gas geological guidance analysis and information interpretation analysis.



徐彬轩, 2019 年于西南石油大学获得学士学位, 现为西南石油大学研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: 527497889@qq.com

Xu Binxuan received a B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interest includes image processing.



卿玉, 2008 年于西南石油大学获得学士学位, 2011 年于西南石油大学获得硕士学位, 现为中国石油井控应急救援响应中心高工, 主要研究方向为油气井井控及应急救援技术。

E-mail: qingy_zcy@cnpc.com.cn

Qing Yu received a B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2008 and a M. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2011. He is currently a senior engineer at the China Petroleum Well Control Emergency Rescue Response Center. His main research interests include oil and gas well control and emergency rescue technology.