

基于红外视频的加油枪油气泄漏检测方法

陈 宁, 陈本均, 白 冰

(浙江科技学院机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要:加油站如果发生油气泄漏将造成巨大危害。针对加油枪泄漏油气具有的浓度低、动态发展等特性,提出一种基于红外视频的加油枪油气泄漏检测方法;利用红外相机采集加油枪工作区域的视频信号,针对其建立混合高斯背景模型,联合帧差法和背景消除法得到疑似泄漏图像;对该图像进行形态学和滤波运算,提取帧图像的形状和扩散特征,根据油气泄漏的特征范围,消除信号噪声干扰;建立图像灰度与油气浓度间的映射方程,按照国家油气泄漏浓度标准的相关规定,判断是否泄漏超标。本研究以水蒸气为模拟实验对象进行测试,结果表明该方法能较为精准的判断泄漏情况。

关键词:红外视频;油气泄漏;运动目标检测

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.10.012

Oil vapor leakage detection method of refueling gun based on infrared video

CHEN Ning, CHEN Ben-jun, BAI Bing

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: If oil vapor leakage occurs in gas stations, it will cause enormous damage. Aiming at the characteristics of low concentration and dynamic development of oil vapor leakage from refueling gun, a method of oil vapor leakage detection based on infrared video is proposed. The video signal of the working area of the refueling gun is collected by infrared camera, and a mixed Gaussian background model is established. The suspected leakage image is obtained by combining frame difference method and background elimination method. Morphological and filtering operations are performed on the image to extract the shape and diffusion features of the frame image. And the signal noise interference is eliminated according to the characteristic range of oil vapor leakage. The mapping equation between image gray scale and oil vapor concentration is established. And according to the relevant provisions of the national oil vapor leakage concentration standard, whether the leakage exceeds the standard is judged. In this study, water vapor was used as a simulated experimental object to test, and the results show that this method can accurately judge the leakage situation.

Keywords: infrared video; oil vapor leakage; moving object detection

1 引 言

汽油为易挥发性物质,使用时不可避免会出现

油气泄漏问题。我国对汽油在生产、运输、存储过程中的允许泄漏量制定了严格的标准。相对地,油

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61273240);浙江省科技计划项目(No. 2019C04025)资助。

作者简介:陈 宁(1975-),男,教授,博士,主要从事智能交通系统,电液控制技术等领域的研究。E-mail:neilching@163.com

通讯作者:白 冰(1984-),男,博士,讲师,主要从事现代物流装备技术,人工智能方面的研究。E-mail:stoutgun@163.com

收稿日期:2019-02-21; **修订日期:**2018-03-30

气回收系统早已强制要求在加油站中应用,理论上,油气回收系统能够有效防止加油站油罐车卸油、储油罐储油及加油机加油等环节中发生汽油挥发超标的问题^[1-2];然而,实际应用中,却经常发生因系统部件老化未及时察觉、或由于人为因素系统没有全天候启用等原因,导致加油站油气泄漏的实际情况并不能完全掌握,造成了巨大的安全隐患。因此,研究加油站油气泄漏在线实时检测及预警技术,不仅必要,而且具有重大的应用价值。

传统的油气泄漏检测主要集中于回收系统的检测,如美国早期的 ISD 系统、德国的 VAPORIX 系统等^[3],但上述的这些系统无一例外的都是通过回收系统气液比等关键参数进行测量计算来检测故障并报警,无法直观的看出泄漏问题,因此当前需要一种实时、可靠性好且高效的泄漏检测方法。

气体泄漏红外成像探测技术具有探测范围广、直观、快速且精确定位泄漏点等优势,被广泛应用于国内外的气体泄漏检测。泄漏油气拥有许多和其它气体相类似的特性,因此同样可使用红外成像技术。本研究通过设计运动区域检测算法,分析油气泄漏的相关特征,并结合国家规定的浓度排放标准,提出一种通过处理红外视频来检测油气泄漏的方法,应用于加油枪的检测。

2 泄漏区域检测

检测泄漏区域首先需要提取油气扩散运动区域,对于时刻变化的视频而言,使用最多的运动区域检测算法为帧差法和背景差分法^[4-6]。本研究将帧差法和背景差分法进行联合实现优势互补,进而提取油气扩散运动区域,其中背景模型的选择尤为重要。

2.1 混合高斯背景建模

合理的背景模型能够显著提高背景差分算法的效果。工业摄像机在加油站采集到的视频图像由于背景复杂多变,普通模型无法准确描述背景分布,因此本研究选用混合高斯模型进行建模^[7]。首先对帧图像每个像素点构造 k 个高斯分布(本研究取 $k=5$),则式(1)即为各像素点的混合高斯模型:

$$p(x_t) = \sum_{i=1}^k w_{i,t} \eta(x_t, u_{i,t}, \sigma_{i,t}^2) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 x_t 为 t 时刻某一像素点的观测值; $w_{i,t}$ 为 t 时刻

第 i 个高斯分布的权值,且满足 $\sum_{i=1}^k w_{i,t} = 1$;

$\eta(x_t, u_{i,t}, \sigma_{i,t}^2)$ 为 t 时刻第 i 个高斯分布的概率分布密度; $u_{i,t}$ 和 $\sigma_{i,t}^2$ 为第 i 个高斯分布的期望和方差。

2.2 高斯模型匹配及更新

像素值 x_t 与高斯分布匹配如下:

$$|x_t - u_{j,t-1}| < 2.5\sigma_{j,t-1} \quad (j = 1, \dots, k; t = 1, \dots, n) \quad (2)$$

若满足式(2),表明两者匹配成功,此时对模型参数用式(3)进行更新:

$$\begin{cases} \mu_{j,t} = (1 - \beta)\mu_{j,t-1} + \beta x_t \\ \sigma_{j,t}^2 = (1 - \beta)\sigma_{j,t-1}^2 + \beta (x_t - \mu_{j,t})^T (x_t - \mu_{j,t}) \end{cases} \quad (3)$$

$$w_{j,t} = (1 - \alpha)w_{j,t-1} + \alpha M_{j,t} \quad (4)$$

权值按照式(4)进行更新,对于匹配的分布 $M_{j,t} = 1$,不匹配的分布 $M_{j,t} = 0$,其中 α, β 分别为权值、期望和方差的学习率。

$$\beta = \alpha \eta(x_t | u_{i,k}, \sigma_{i,k}) \quad (5)$$

2.3 背景模型建立

将 k 个高斯分布按优先级 $p_{i,t} = \frac{\omega_{i,t}}{\sigma_{i,t}}$ 从大到小的顺序排列,并取前 b 个分布的权值进行求和,若符合式(6),则认定为背景模型。其中 T 值大小代表背景分布的个数。

$$BG = \arg \min_b \left(\sum_{i=1}^b \omega_{i,t} > T \right) \quad (6)$$

3 泄漏区域油气红外图像特征提取

泄漏区域的油气在红外图像上会显示出一定特征,根据这些特征,可以初步排除外界物体的干扰。

3.1 油气扩散特征

回收系统正常开启时,加油枪的油气挥发量很少,而一旦回收系统故障,则排出的油气超标,这部分油气由于压力的作用在排放初始时刻会不断向外扩张,即面积会持续缓慢增长。因而,可用一定时间间隔内油气图形的面积增长率来表征油气扩散特性^[8]。

记 t 时刻帧图像疑似泄漏区域面积为 s_t , $t+k$ 时刻面积为 s_{t+k} , k 为时间间隔,则这段时间间隔内相对面积增长率为:

$$\Delta s = \frac{s_{t+k} - s_t}{k s_t} \quad (7)$$

此外,实际加油过程中可能会受到风速的影响,使个别面积增长率为负值,因此可用平均值法来减轻风速的影响,即对 t 时刻邻近的 n 个面积增长率求取平均值:

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta s \quad (8)$$

综上,当平均相对面积增长率 $\bar{s} < T_s$ 时,认为满足油气泄漏扩散特征。

3.2 油气形状特征

泄漏的油气在扩散过程中会随着气流的运动呈现出各种不规则的形状,而外界干扰物体的形状基本恒定,据此可通过矩形度^[9] (Rectangularity) 来表征油气的形状特征:

$$r = s_0/s_r \quad (9)$$

其中, s_0 , s_r 分别表示疑似泄漏区域及其最小外接矩的面积。两者的比值即为矩形度,令矩形度阈值为 T_r ,若 $r < T_r$,则认为满足泄漏形状特征。

3.3 油气浓度特征

我国在 2007 年发布的《加油站大气污染排放标准》^[10] 中明确规定了经处理后的油气排放浓度应小于等于 25 g/m^3 。泄漏油气的浓度越大,光线的穿透率越小,检测到的图像的灰度值会越大。因此,只需建立油气浓度、红外光穿透率和图像灰度三者之间的关系式,即可由排放标准判断泄漏是否超标。

3.3.1 油气浓度与穿透率关系的确立

Lambert-Beer 定律^[11] 表现了物质吸光的强弱与浓度及其光程间的关系,由其可将油气质量浓度与透光率联系起来:

$$A = \lg(1/T) = \lg(I_0/I) = abc \quad (10)$$

其中, A 为光密度; $T = I/I_0$ 为透光率; b 为吸收物质的浓度; c 为光程; a 为吸收物质对光(本研究为红外光)的吸收系数。

3.3.2 穿透率与图像灰度关系的确定

令背景和摄像头间距为 D ,因泄漏的油气会吸收光强,设输入光强为 p ,则对于一微段 dD ,其光强如下:

$$dp = -\beta p dD \quad (11)$$

其中, β 为单位宽度油气中光强变化量与输入光强的比值。对式(11)积分可得:

$$P_a = P_0 \times e^{-\beta D} \quad (12)$$

式中, P_0 为输入光强; P_a 为输入光穿过宽度为 D 的油气层发生衰减后的光强。

红外光线透过油气颗粒会发生散射从而改变原先的轨迹,假设光线经油气颗粒向任意方向散射,因此有部分光线会随机散射到摄像头。由式(12)可知,光强会随距离呈指数衰减,则可计算散射光强^[12]:

$$P_s = \int_0^D P_0 B \times e^{-\beta x} dx \quad (13)$$

上式 B 为油气颗粒对红外光的散射系数,解该式得:

$$P_s = \frac{P_0 B}{\beta} (1 - e^{-\beta D}) = K(1 - e^{-\beta D}) \quad (14)$$

其中, $K = \frac{P_0 B}{\beta}$ 为常数;其大小与输入光强相关; P_s

为入射光通过距离为 D 的油气后摄像头收到的散射光强。综上,摄像头实际接收光强主要由背景反射光的衰减光强^[13] 和泄漏油雾的散射光强两部分组成:

$$P = P_b \times e^{-\beta D} + K(1 - e^{-\beta D}) \quad (15)$$

事实上,其它条件恒定时,光强越大,对应的图像灰度也越大,两者成正比,则可推出泄漏油气的灰度化方程如下:

$$G = G_b \times e^{-\beta D} + \lambda(1 - e^{-\beta D}) \quad (16)$$

式中, G, G_b 对应原图及其背景的灰度,并定义 λ 为入射光常数,其大小与入射光的强度有关。由式(12)可知, $T = e^{-\beta D}$ 即为油气的红外光穿透率,则上式可转化为:

$$G = G_b \times T + \lambda(1 - T) \quad (17)$$

油气灰度方程建立了当前图像灰度 G 、背景灰度 G_b 、入射光常数 λ 和红外光穿透率 T 之间的关系。油气扩散速度缓慢,在红外视频中邻近区的油气浓度可近似认为相等,对应的红外光穿透率也应相等,此时以邻近亮暗两处像素的灰度值和对应背景像素灰度值为对象,可建立方程组^[14]:

$$\begin{cases} G_m = G_{bm} \times T_m + \lambda(1 - T_m) \\ G_d = G_{bd} \times T_d + \lambda(1 - T_d) \end{cases} \quad (18)$$

式中, G_m, G_{bm}, T_m 分别表示亮区域的当前灰度值、背景灰度值及油气的红外光穿透率; G_d, G_{bd}, T_d 分别表示暗区域的当前灰度值、背景灰度值及油气的红外光穿透率,当前帧和背景帧灰度值可直接提取,又

由同一帧两邻近区的油气红外光穿透率相等,则可求出入射光常数,从而建立穿透率与图像灰度之间的关系。

联立式(10)和式(17),即可由图像灰度值计算出油气泄漏的浓度值。

4 泄漏检测算法流程

在上述理论分析的基础上,本研究设计了加油站油气泄漏检测算法如图1:首先将相邻帧差分,然后将结果进行或运算,同时使用混合高斯模型方法来建立背景模型,可得到符合式(6)的背景BG,随后再进行背景差分。最后将帧差或运算结果、背景差分结果两者相与,可得到较为完整的泄漏区域的灰度图像,此时一方面对该图像进行二值化、滤波、形态学处理,提取其形状和扩散特征,另一方面提取背景灰度、帧图像灰度,计算相应的红外穿透率和浓度,最后综合判断是否满足特征判别,若不符合,则继续下一帧检测,反之则发出警报。

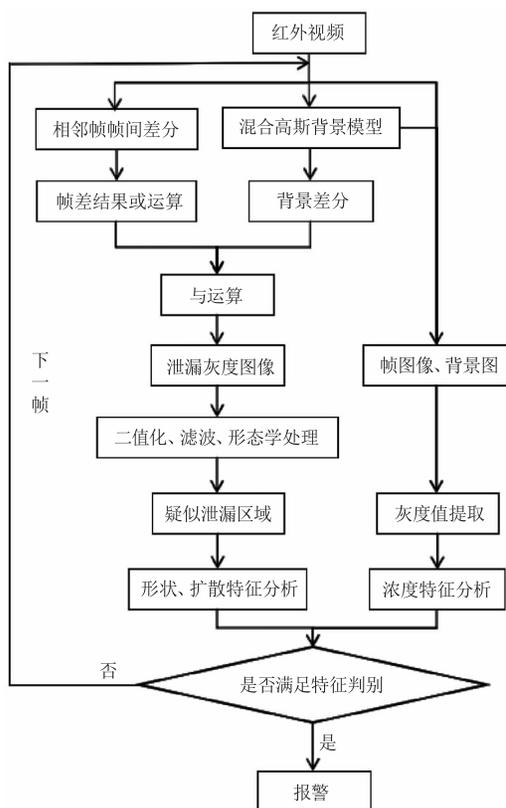


图 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

5 模拟实验

本研究采用(SAGA-0540-YSY)红外相机,在Windows 7系统下使用Visual Studio 2017集成开发环境和OpenCV3.4.1视觉库搭建了实验平台,相机

分辨率为 1280×720 ,帧速率为30 f/s,算法处理器选用AMD A8 4500M APU 1.9 GHz,内存为4 GB。出于安全的考虑,模拟实验的研究对象为不同档位下加湿器释放的水蒸汽,实验时红外摄像机距离背景0.7 m,实验光照为300 lx。

图2为泄漏和干扰下的检测结果,其中图2(a)、图2(b)为高浓度视频第88帧图像,图2(c)、图2(d)图为手势干扰视频第120帧图像。

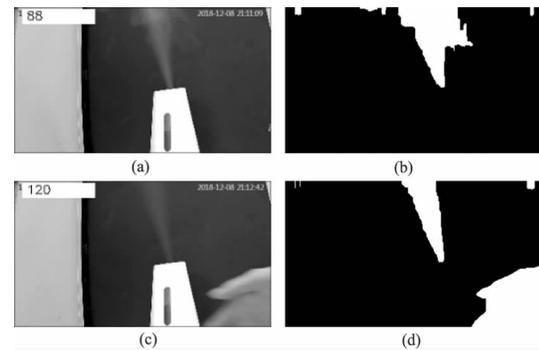


图2 视频帧及其疑似泄漏区域图像

Fig. 2 Video frame and suspected leakage area image

5.1 多特征实验结果分析

调整加湿器档位,分别对应低、高两个泄漏浓度级,并以手势干扰做为外界干扰,一共三组视频,选取合适背景,提取其相关特征,对比结果如图3。

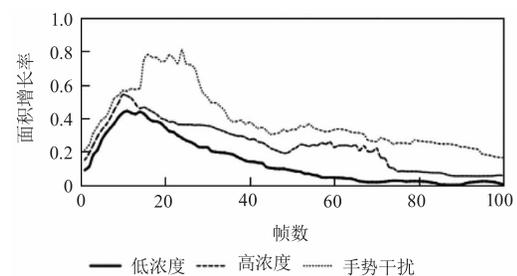


图3 面积增长率变化曲线

Fig. 3 Area growth rate curve

图3为不同浓度泄漏区域面积增长率变化曲线,可见三组视频测出的泄漏区域相对面积增长率均呈现出在泄漏初期快速增大,当达到最大值后逐渐减小,最后趋于0的现象,并且高低两个浓度级面积增长率均小于0.55,而手势干扰则有部分增长率大于0.55,因此可令面积增长率阈值为0.55。

图4为不同浓度泄漏区域矩形度变化曲线,可见高低两个浓度级矩形度均在0.14~0.60之间,而手势干扰矩形度存在大于0.60的部分,因此可令矩形度阈值 T_r 为0.60。

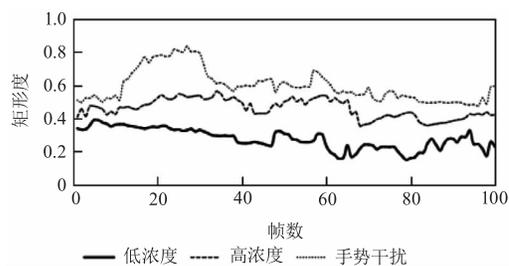


图4 矩形度变化曲线

Fig.4 Rectangularity curve

5.2 浓度变化分析

图5为选取的某相邻明暗区域根据式(18)计算出的红外光穿透率变化曲线,可见浓度越低,红外光穿透率越大,低浓度穿透率基本在0.8~1.0范围间,高浓度在0.6~0.9之间,而手势干扰情况下,由于人手本身会发散红外光,得到的红外穿透率基本大于1,维持在1.0~1.3间。

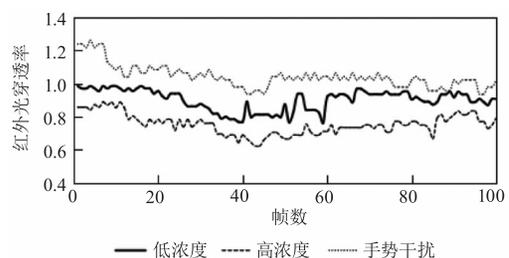


图5 红外光穿透率变化曲线

Fig.5 Infrared transmittance curve

由于手势干扰情况下红外光穿透率大于1,因此计算得到的浓度为负值,可以直接排除。另外,加油枪工作时,即使回收系统正常开启也会有少量油气挥发,但此时的泄漏量很少,在规定的浓度范围内,可认为正常工作。当计算出穿透率后,若已知油气混合物的吸光系数,则可推出对应的浓度。事实上,油气的吸光系数 a 会随着温度、压强、入射光波长范围及油品种类等因素不同而发生一定的变化,具体数值可通过实验测定,本文初步取 $a = 0.02 \text{ L/g} \cdot \text{cm}$ 。则根据式(11)可绘制出浓度曲线如图6所示。

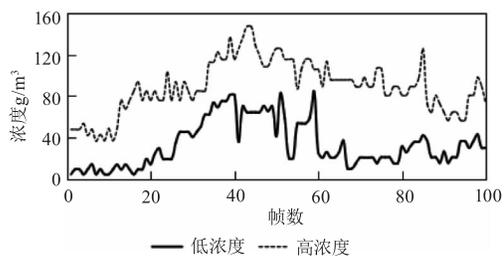


图6 浓度变化曲线

Fig.6 Concentration curve

综上,当特征判别同时满足面积增长率小于阈值 $T_s = 0.55$,矩形度小于阈值 $T_r = 0.60$,浓度大于阈值 $T_b = 25 \text{ g/m}^3$ 时判定为存在泄漏,系统报警。

6 结论

本文针对加油站存在的油气泄漏情况,提出一种通过处理红外视频来检测油气泄漏的新方法,首先建立混合高斯背景模型,通过帧差法和背景差分法提取泄漏区域图像,其次对根据帧图像的形状、扩散特征进行分析,设定阈值,排除干扰,并通过分析灰度、光强及浓度三者的联系,建立灰度与浓度之间的关系,最后利用国家规定的浓度排放标准合理判别泄漏情况,实验表明该方法能较为精准的判断泄漏情况。

参考文献:

- [1] XIE Yingfen. Recovering Petro-filling station oil vapor for safety and clean environment[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2006, (5): 53-56. (in Chinese)
谢英奋. 加油站的油气回收与安全环保[J]. 炼油技术与工程, 2006, (5): 53-56.
- [2] GONG Zhongxuan. Discussion on pollution, energy saving and recovery technology of oil vapor volatilization in gas station[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, (4): 89. (in Chinese)
龚仲旋. 加油站油气挥发的污染与节能及回收技术的探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, (4): 89.
- [3] LI Zhiwei, QIAN Hua, DAI Haixia, et al. Brief introduction and application prospect of online monitoring system for gas station[J]. Environment Protection of Oil & Gas Fields, 2011, (1): 53-56. (in Chinese)
李智玮, 钱华, 戴海夏, 等. 加油站在线监控系统简述与应用展望[J]. 油气田环境保护, 2011, (1): 53-56.
- [4] ZHANG Yinghui, LIU Yangshuo. Moving object detection based on method of frame difference and background subtraction[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(2): 25-28. (in Chinese)
张应辉, 刘养硕. 基于帧差法和背景差法的运动目标检测[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(2): 25-28.
- [5] Guo J, Wang J, Bai R, et al. A new moving object detection method based on frame difference and background subtraction[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2017: 242.
- [6] ZHANG Caizhen, ZHANG Yunxia, CHEN Yonggang, et al. Moving target detection and recognition based on five

- frame difference and template matching[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(12):108-114. (in Chinese)
- 张彩珍, 张云霞, 陈永刚, 等. 基于五帧差分法和模板匹配的运动目标检测识别[J]. *激光与红外*, 2018, 48(12):108-114.
- [7] LU Bing, WANG Lingling, PEI Dong. Object detection algorithm based on Gaussian mixture model and six-frame difference[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(2):240-244. (in Chinese)
- 陆冰, 王玲玲, 裴东. 基于混合高斯模型和六帧差分的目标检测算法[J]. *激光与红外*, 2016, 46(2):240-244.
- [8] ZHAO Changsheng. The research on the fire smoke detection study based on the video sequence under the indoor conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 兆长胜. 室内条件下基于视频序列的火灾烟雾检测算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [9] ZHANG Yujin. A course of image processing and analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2016:258-262. (in Chinese)
- 章毓晋. 图像处理和分析教程[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2016:258-262.
- [10] GB 20952-2007. Emission standard of air pollutant for gasoline filling stations[S]. 2007. (in Chinese)
- GB 20952-2007. 加油站大气污染物排放标准[S]. 2007.
- [11] LIU Yongping, WANG Xia, LI Shuaishuai, et al. Gas concentration detection method based on infrared absorption spectroscopy technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1):195-201. (in Chinese)
- 刘永平, 王霞, 李帅帅, 等. 基于红外技术的气体浓度检测方法研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(1):195-201.
- [12] Cozman F, Krotkov E. Depth from scattering[C]//Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 1997.
- [13] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[J]. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision & Pattern Recognition*, 2001, 1:325.
- [14] YUAN Feige. Smoke detection method based on smoke density with video[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- 袁飞阁. 基于烟雾浓度的火灾视频检测方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.