

变压器充油设备火灾中的消防炮视觉感知对准策略与实现方法

王海雷¹, 李宗泽², 赵俊¹, 朱红³

(1. 航天科工系统仿真科技(北京)有限公司, 北京 100095;

2. 中车信息技术有限公司, 北京 100089; 3. 中国矿业大学(北京)人工智能学院, 北京 100083)

摘要: 变压器充油设备火灾在短时间内迅速蔓延, 不仅会损坏设备, 还会造成电力系统停运。其中, 燃油会助长火势、增加扑救难度, 对周边工农业生产、居民生活造成巨大影响、经济损失。如何在火灾早期及时响应、报警、控制火灾发展和蔓延, 根据火势制定合理的灭火扑救方案, 成为亟待解决的问题。为此, 在深入研究变压器充油设备火灾燃烧特点的基础上, 提出针对变压器充油设备火灾的消防炮视觉感知对准策略与实现方法。首先, 利用视觉感知技术获取火焰对象; 其次, 基于火焰对象形态与变压器火灾燃烧特性提出水炮对准策略, 以动态确定灭火点; 最后, 基于灭火点空间坐标实现消防炮联动, 控制消防炮指向灭火点位。实验证明, 所提方法对火焰对象的感知F1值高达0.914, 所选灭火点与燃烧特性密切相关且更合理, 消防炮的近距离灭火联动控制误差小于0.1 m。

关键词: 充油设备火灾; 火焰感知; 特征提取; 灭火点; 消防炮

DOI: 10.11907/rjdk.241772

扫描二维码阅读全文:



中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)002-0193-09

Visual Perception Alignment Strategy and Implementation Method for Fire Monitors in Transformer Oil Filling Equipment Fires

WANG Hailei¹, LI Zongze², ZHAO Jun¹, ZHU Hong³

(1. Aerospace Science and Industry System Simulation Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100095, China;

2. CRRC Information Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China;

3. College of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Fire of transformer oil filling equipment spreads rapidly in a short period of time, which not only damages the equipment but also causes the power system to shut down. Among them, fuel will fuel the fire, increase the difficulty of firefighting, and cause huge impacts and economic losses to surrounding industrial and agricultural production, as well as residents' lives. How to respond, alarm, control the development and spread of a fire in a timely manner in the early stages, and develop a reasonable fire extinguishing plan based on the fire intensity, has become an urgent problem to be solved. Therefore, based on in-depth research on the combustion characteristics of transformer oil filling equipment fires, a fire monitor visual perception alignment strategy and implementation method for transformer oil filling equipment fires are proposed. Firstly, utilizing visual perception technology to obtain flame objects; Secondly, based on the shape of flame objects and the combustion characteristics of transformer fires, a water cannon alignment strategy is proposed to dynamically determine the extinguishing point; Finally, based on the spatial coordinates of the fire extinguishing point, the linkage of fire cannons is implemented to control the fire cannons to point towards the fire extinguishing point. Experimental results have shown that the proposed method has a perception F1 value of up to 0.914 for flame objects, and the selected fire extinguishing points are closely related to combustion characteristics and are more reasonable. The close range fire extinguishing linkage control error of the fire monitor is less than 0.1 m.

Key Words: oil filled equipment fire; flame perception; feature extraction; fire extinguishing points; fire monitor

收稿日期: 2024-12-10

作者简介: 王海雷(1997-), 男, 硕士, 航天科工系统仿真科技(北京)有限公司软件工程师, 研究方向为图像处理、人工智能; 李宗泽(1998-), 男, 中车信息技术有限公司工程师, 研究方向为图像处理、人工智能; 赵俊(1990-), 男, 航天科工系统仿真科技(北京)有限公司工程师, 研究方向为系统集成设备开发; 朱红(1974-), 女, 博士, 中国矿业大学(北京)人工智能学院副教授、硕士生导师, 研究方向为图像处理、人工智能。

0 引言

油浸式变压器是电厂与变电站广泛使用的核心设备,也是一种防爆型充油设备,工作中利用绝缘油实现绝缘、冷却及灭弧^[1]。由于内部、顶部油枕存在大量可燃变压器油,设备故障电弧或局部过热会引起变压器起火,严重时 will 影响电网稳定运行。同时,变压器在燃烧过程中,顶部油枕不断外喷的变压器油会助长火势,增大扑救难度。为此,在火灾早期及时报警,采取有效措施控制火势蔓延,便成为了电厂、变电站亟待解决的问题。

陈涛等^[2]提出“以固为主”的原则,在变压器结构中加入泡沫干管,使用压缩空气泡沫喷淋变压器充油设备完成灭火。李建涛等^[3]使用细水雾与 CO₂ 对变压器火灾进行灭火,验证了细水雾对变压器油池火灾的灭火效果更好。陈宝辉等^[4]在细水雾中添加 0.1% 的复合表面活性剂灭火剂,相较于普通细水雾扑灭变压器油池火的灭火效果提升 2.5 倍。上述研究主要通过改善灭火剂材料提升灭火效率,但灭火效率还与灭火剂是否准确喷射在起火点密切相关。

在视觉感知的相关研究中,将先进的机器视觉感知技术应用到消防炮联动,能在火灾早期发现火源位置,使炮头对准起火点实施扑救,这也是智慧消防的研究重点。诸多学者利用目标检测技术框定视频图像中的火焰区域,然而常用的目标检测算法框定结果为矩形,但火焰形态并不规则,因此框定的矩形中存在大量非火区域,导致基于感知结果的水炮联动对准精度较低。随后,发展起来的目标分割技术可在图像中检出目标的近似轮廓,在火焰定位和选取灭火点时相较于较矩形框更准确。

在起火点瞄准、扑救研究中,高振锡等^[5]指出需要研发具有自动探测跟踪火灾的自动喷雾消防炮、细水雾消防炮,在变压器火灾初期对准火焰、着火部位进行喷射以控制火势或灭火,防止长时间燃烧引发变压器油大量溢出,使火灾快速蔓延。汪亚龙等^[6]通过分析不同尺寸油盘、初始温度、燃料厚度的燃烧参数,系统给出换流变压器油燃烧参数的经验关系式。戴晨蓉等^[7]通过室外变压器全尺度火灾实验探究了变压器燃烧特性,总结了不同位置的火焰形态和燃烧现象。

为此,本文针对油浸式变压器设备火灾的早发现、早扑救需求,将视觉感知技术与变压器火灾燃烧特性相结合,提出了针对变压器充油设备火灾的消防炮视觉感知对准策略与实现方法。首先,利用视觉感知技术获取各光照度条件下各尺度的火焰对象;其次,基于燃烧特性、火焰形态提出一种水炮对准策略,动态确定灭火点;最后,设计基于灭火点空间坐标的消防炮自动化联动控制方法,让炮头指向所选点位,以期在后续的灭火剂喷射中实现火灾的有效扑救。

1 相关研究

1.1 火灾感知技术

传统火灾感知使用温度传感器、烟雾传感器等设备进行测量,一旦温度或烟雾浓度超出阈值将自动报警。然而,但这种方式存在以下两个问题:①在开阔的场景中灵敏度不佳,变压器所处室外环境温度随季节和日照强度变化,阈值波动会导致虚警与漏检;②烟雾容易随风飘散,当传感器布控位置受限时漏检的可能性增大。为此,不少学者提出了不受温度、风力风向影响的基于机器视觉的补充型监测手段,无接触地感知火灾。

基于视觉感知的火灾识别技术包含火焰检测和火焰分割两大类。火焰检测是在视频图像中以矩形框形式标定火焰区域。Xu 等^[8]、王冠博等^[9]利用 YOLO 获取了较好的火焰检测结果。张永等^[10]利用 MobileNetv3-Large 替换 YOLOv3 主干网,在自制的火灾数据集上训练了一个检测火焰的轻量模型,但检测到的矩形范围内仍存在非火背景,风力带来的烟火斜飘、火焰燃烧区域的连通性变化等因素都会影响非火背景在检出框中的占比。当非火区域占比越大时,火焰的几何特征量化偏差越大,依靠几何特征选取的灭火点可信度就越低,进而会造成消防炮对准困难。

火焰分割技术仅具有标识图像中火焰区域的能力,相较于火焰检测而言能更有效地进行目标标定,可为火焰特征描述提供更准确的目标对象。火焰图像分割算法主要分为基于传统图像处理的火焰图像分割方法和基于深度学习的火焰图像分割方法。传统图像分割方法通过颜色、纹理、结构等特征判定目标区域,适用于识别火焰目标的方法主要包括局部阈值分割法、边缘检测分割法、颜色分割法、简单线性迭代聚类等,但这些方法对光照和火焰色彩变化敏感,受火焰区域内部纹理变化和背景干扰较大,容易产生严重的过分割和欠分割现象^[11-14]。为此,侯新国等^[15]通过改变颜色模型中蓝色通道的关注度,提升了颜色分割法对相似颜色的抗干扰能力,但并未设计光照干扰实验。颜礼彬^[16]提出基于 HIS 颜色空间的火焰识别方法,通过结合 ICA 的方法实现火焰区域分割,但在夜间存在光源干扰时易产生虚检。陈维相等^[17]对火焰图像进行颜色空间转换,先选取可疑火焰像素的中值像素点作为种子进行区域生长,再将该区域与较小自适应阈值背景相减得到的火焰区域取交集,以获得火焰分割结果。该方法有效减少了火焰在临近壁面反射时导致的过分割现象,但实验背景单一,在面对光源干扰的火灾图像上时分割效果仍不理想。综上,传统的图像分割算法大多利用图像的表层信息,适用目标特征变化不大、照度及背景环境较稳定的应用场景。

基于深度学习的语义分割根据目标区域信息训练模

型参数,使网络模型具有目标特征提取和辨识能力。基于深度学习的图像分割方法引入了卷积神经网络处理图像,相较于传统方法能更准确、高效地分割图像语义,经典的图像语义分割方法包括FCN、U-Net、PSPNet、DeepLab等,在网络结构、损失函数上各具特色,常用于分割人体、车辆、细胞、肿瘤、常见路障、车道线等常规目标。然而,这些预训练模型自身均无火焰特征提取能力,通过迁移学习才能具有火焰分割能力。谷世举等^[18]在U-Net网络模型的基础上进行改进,引入Xception卷积单元和残差网络训练炮口火焰分割模型,但仅限于炮口火焰。宁阳等^[19]提出一种改进的DeeplabV3+的火焰分割方法,现在解码器中融合高低层特征,再采用二倍上采样逐步恢复空间维度以提升火焰分割精度。Li等^[20]提出改进的DeeplabV3+,使用Mobilenetv3构建深度卷积神经网络,以提升识别森林火灾的精度和分割速度。朱红等^[21]使用多场景、多照度、存在相似物干扰的火灾图像对4种经典语义分割模型进行迁移学习,使模型具有泛化能力更强的火焰区域分割能力。

上述模型虽实现了火焰语义分割,但未考虑变压器火灾的特殊性,存在较多误分割现象,主要原因有3点:①全天候照度变化大,不同照度条件下火焰的特征表示存在较大的差异性;②环境可能存在色彩相似的干扰源或夜间光源,火焰与干扰源的特征区分度较低;③充油设备火灾中的多尺度火焰存在碰撞、合并、震荡、分离等不稳定现象,火焰特征稳定性与一致性较低。为此,本文利用多照度、多尺度、背景环境多样、各种燃烧阶段的大量变压器火灾影像,进行语义分割模型的迁移学习和优选。

1.2 研究现状

随着火灾感知技术逐渐成熟,智能消防炮联动灭火方法研究得到了高度重视。张航^[22]利用红外热像和区域生长法识别疑似火焰区域,将目标区域的椭圆特征输入SVM中辨识火焰,结合激光测距信息、坐标系转换得到火源目标与消防炮的相对位置,利用PLC调整炮头角度,对准火源进行扑救。杨刚^[23]首先利用阈值分割法提取目标圆弧度、形状相似度、质心位移、闪烁频率等特征,在图像上确定火焰;其次通过双目相机定位火源空间位置进行射流轨迹仿真,使用数字信号处理器处理图像;最后利用单片机控制电机,驱动消防炮实现智能灭火。Zhu等^[24]提出一种改进的智能消防机器人计算机视觉系统,预测射流轨迹落点。Kim^[25]利用传感器网络与人工智能,设计了一个货架仓储集成智能消防系统。Wu等^[26]通过研究消防运动系统、消防水喷雾系统、消防控制系统,利用STM32芯片设计了智能消防机器人。Zhang等^[27]利用红外热像仪与双目视觉相机检测、定位火焰,设计了多传感器融合的智能消防机器人。

然而,上述方法主要利用人工设计的特征获取可见光影像或红外热像中的火焰区域,未结合变压器火灾的监控要求和环境特点解决全天候照度变化、环境干扰存在的火

焰对象分割不准的问题;未考虑变压器火灾中火焰碰撞合并、震荡分离等存在的火焰对象特征不稳定问题;未考虑变压器不同部位燃烧时灭火扑救点差异的问题;未解决变压器火灾中多点燃烧时的灭火点优选问题。综上,这些问题将降低灭火点选择的准确度,降低了灭火效率。

2 本文工作

2.1 总体设计

本文基于视觉感知的消防炮对准总体设计包括火焰视觉感知模块、消防炮对准控制模块(见图1)。其中,火焰视觉感知模块用于提取视频图像中的火焰及其特征参数,包括图像采集、火焰分割、火焰特征提取3个子模块。消防炮对准控制模块在视觉感知获取的火焰特征基础上,选取灭火对准点、计算炮头控制参数和炮头运动参数,以控制炮头指向燃烧区域实施扑灭。

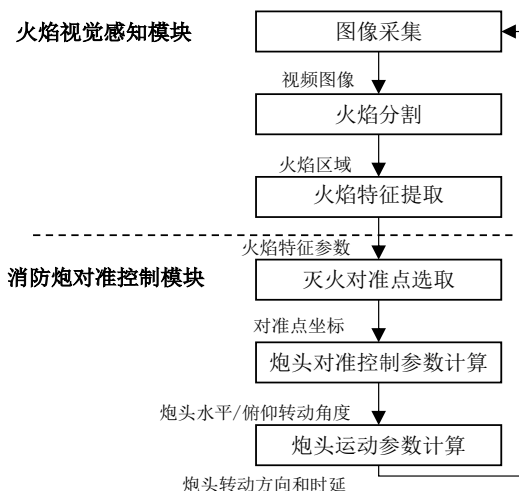


Fig. 1 Overall design of fire cannon alignment system based on visual perception

图1 基于视觉感知的消防炮对准系统总体设计

为了实现上述模块功能,本文工作包括:①火焰分割。训练了一个具有变压器火灾检测能力的语义分割模型,先对实时视频流进行周期性采样,再利用分割模型预测采样图像中的火焰区域;②火焰特征提取。设计火焰特征描述算子,基于分割得到的火焰区域设计火焰特征提取算法;③灭火对准点选取。针对单发性火源和多发性火源设计灭火对准点选取策略与实现方法,根据火焰特征参数计算得到图像中的灭火对准点坐标;④炮头对准控制参数计算。设计图像对准点坐标到现实三维空间坐标的映射方法,通过消防炮的水平、俯仰转动角度计算方法,使灭火剂落点达到目标灭火点位;⑤炮头运动参数计算。基于炮头转动角度的运动控制方法,计算炮头转动方向、时延,控制炮头实现水平、俯仰角度的转动。

2.2 火焰视觉感知

2.2.1 火焰分割

为了实现火焰分割构建了一个包含充油设备火灾图

片的标注数据集,利用该数据集在经典语义分割网络模型 FCN、PSPNet、U-Net、Deeplab 上进行迁移学习,以评估 4 个模型迁移后的性能。在数据集构建过程中,选取油池火实验视频、充油设备火灾实验视频作为原始图像来源,涵盖了多种目标尺度、多点位火焰、多种燃烧类型、多种照度条件、存在干扰物或干扰光源等情况,共收集了 1 200 张原始图像,样本具有多样性和均衡性。

在标注数据集时,采用 GIMP 软件对原始图像中可见火焰区域的全部像素进行标注,以生成二值图。其中,火焰区域的像素值置为 255(白色),非火区域的像素值置为 0(黑色)。本文利用图像掩膜方法解决区域边缘不准确的问题(见图 2),在标注图像中随机选取 800 对图像,应用旋转、镜像、缩放裁剪、亮度变换、色彩微调等数据增强方法得到 2 000 对标注图像对,再选择 1 800 对图像作为训练集,其余作为测试集。

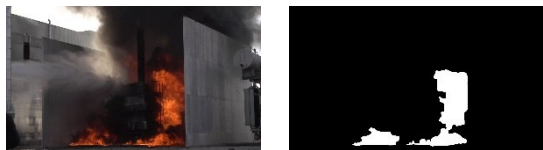


Fig. 2 Sample of original fire image and label image

图 2 火灾原始图像与标注图像样例

由图 2 可见,火焰分割模型的预期功能是根据输入图像生成二值图(火焰像素值为 255,非火焰背景区域像素值均为 0)。为了实现该目标,对 FCN、PSPNet、U-Net 和 Deeplab 等 4 个经典语义分割模型,应用构建的训练集进行迁移学习、微调模型参数,所得的交并比 IoU、召回率 Recall、精度 Precision 和 F1 分值如表 1 所示。由此可知,U-Net 模型的综合性能最佳,为此将其作为火焰分割模型。

Table 1 Test results after model fine-tuning

表 1 微调模型后的测试结果

模型	IoU	Recall	Precision	F1
FCN	0.648	0.752	0.812	0.776
PSPNet	0.607	0.667	0.844	0.724
U-Net	0.844	0.951	0.884	0.914
DeeplabV3+	0.780	0.798	0.974	0.874

图 3 为 U-Net 模型的网络结构,首先采用去除全连接层的卷积神经网络作为编码器,其次将 2×2 上采样卷积作为解码器结构,最后通过合并(Concat)通道数进行跨层特征融合^[21]。U-Net 的上采样部分融合了特征提取部分的输出,兼顾了多尺度特征的融合,可识别网络中图像的多尺度特征,分割结果更好。具体为,在编码器结构中经过多次下采样的深层特征,能提供目标在整个图像中的上下文语义信息。为此,U-Net 在解码器中进行了多次上采样,并将上采样结果与同层下采样结果进行融合,而非直接在高级语义特征上进行监督和反向传播,以保证上采样最后一层提取到的特征融合了更多浅层特征,因此 U-Net 既能根据深层特征定位目标,又能根据浅层特征保留目标边缘

等细节。

2.2.2 火焰特征提取

火焰属性表征包括形状特征和纹理特征。其中,形状特征包括区域轮廓和区域自身特征,可利用轮廓计算火焰区域周长,基于区域自身特征计算火焰区域面积、质心;纹理特征可计算分形维数,以表征分形体的复杂程度。此外,还可通过火焰长宽比表征火焰类型,通过褶皱比与圆形度表征火焰不规则程度,通过周长、面积、长宽比的变化率等表征火势动态变化。

在早期扑救过程中,图像可能存在单发火源与多发火源,单发区域的灭火策略重点是尽力扑灭火焰,多发区域的灭火策略重点是判定紧急区域进行扑救。本文根据火焰几何形态可将火焰分为射流火、油池火和流淌火。其中,油枕处的射流火燃烧剧烈,火焰呈喷射状;油池火在充油设备火灾初期形成,横向蔓延速度快、燃烧状态稳定;流淌火附着在充油设备外壁,火焰会随外溢油品呈流淌之势。通过长宽比可对 3 类火焰进行有效表征和区分:①射流火呈喷射状,长宽比较大;②油池火横向蔓延,长宽比较小;③流淌火沿外壁燃烧并在下落过程中熄灭,因此火焰区域近似正方形,长宽比接近 1。

对于多发区域火焰而言,火焰周长、面积变化率可作为度量火势紧急性的重要参数,周长越大表示火势越大,火焰面积变化率越大表示爆燃的可能性越大,火势大且爆燃可能性大的火焰区域是扑救紧急性最高的区域。此外,由于水炮转动到目标位置需要一定时延,在紧急性差异不大的情况下,就近扑灭是提升灭火效率的要素之一,因此还应考虑水炮当前位置到目标位置的距离(与各区域质心相关)。上述火焰特征的具体计算方法为:

(1) 质心 (x_c, y_c) 。每个目标轮廓区域 $f(x, y)$ 的几何矩。

$$M_{p,q} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad (1)$$

式中: $p+q < 4$; $f(x, y)$ 表示目标轮廓在点 (x, y) 的像素值。

当 $p=q=0$ 时称为零阶矩,当 p, q 分别取 0、1 时被称为一阶矩。通过零阶矩与一阶矩可计算火焰区域质心坐标 (x_c, y_c) 。

$$\begin{cases} x_c = \frac{M_{1,0}}{M_{0,0}} \\ y_c = \frac{M_{0,1}}{M_{0,0}} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 周长 c 。火焰区域轮廓的像素总数。

$$c = \sum_{x=1}^N 1 \quad (3)$$

(3) 面积 s 。使用格林公式计算轮廓二重积分得到每个火焰区域内的所有像素数。

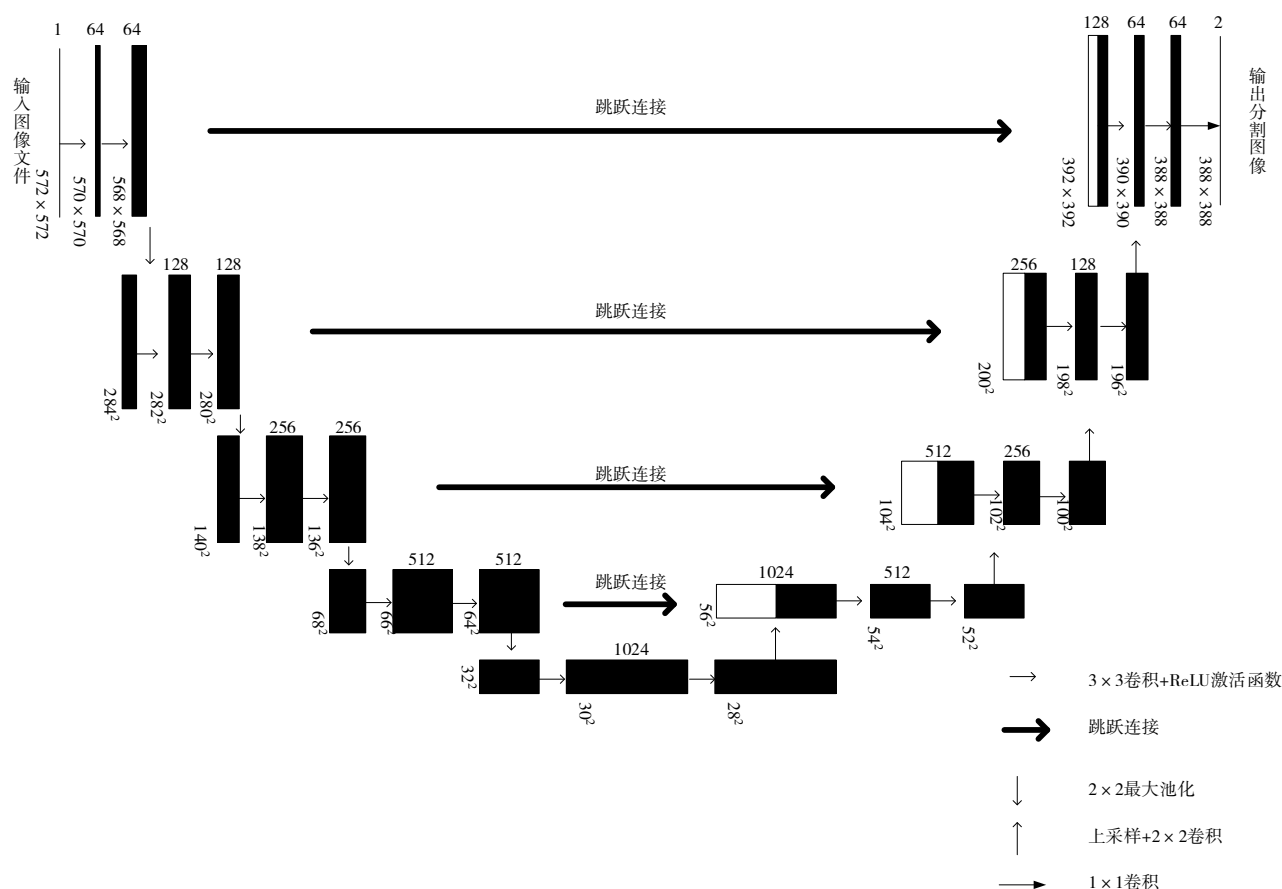


Fig. 3 U-Net network structure

图3 U-Net网络结构

$$s = \iint \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy \quad (4)$$

式中: P 、 Q 为组成火焰区域的曲线函数。

(4)长宽比 k 。火焰区域外接矩的长度 l 与宽度 w 比值。

$$k = \frac{l}{w} \quad (5)$$

2.3 消防炮对准控制方法

2.3.1 灭火对准点选取

若火场仅有单个火源,则根据火焰特征判定燃烧类型,选择相应的灭火点;若火场存在多个火源,则需要优选最紧急的燃烧区域进行瞄准扑救。变压器充油设备发生火灾时通常有3种火焰类型:油池火、射流火、流淌火。其中,油池火是火灾的主要形式,在充油设备火灾初期形成,横向蔓延速度快,可能产生爆燃严重损害充油设备;射流火燃烧状态剧烈,由油池火爆燃产生,火焰呈喷射状;流淌火附着在充油设备外壁,由于燃油附着在充油设备外壁,因此火焰呈流淌之势。

火焰持续燃烧的条件为燃烧介质、氧气和达到可燃温度,充油设备火灾中主要的燃烧介质为油品,因此需阻断油品与氧气的接触、降低油品温度。为此,不同类型的燃烧应采用不同的灭火策略,射流火与油池火需对火焰底部

喷射灭火剂,阻断燃烧介质油品与氧气的接触,降低可燃油品的温度;流淌火在流淌过程中油品将燃尽,不会产生过大的流淌火焰区域,但充油设备的内部油品会从设备上持续溢出,因此需在火焰上部(油品溢出位置)喷射灭火剂以阻断可燃油品与氧气的接触、降低可燃油品的温度。

根据上述策略,在综合考虑3种类型的燃烧形式且火焰区域可能连通等情况,制定了灭火对准点选取方案。如图4所示,点 $A(x_a, y_a)$ 为单个区域火焰区域的根部最低点, $G(x_g, y_g)$ 为火焰质心, A 的水平线与质心 G 的垂线交点记为 $B(x_b, y_b)$,在线段 GB 上取点 $I(x_i, y_i)$ 为此刻的优选灭火点, I 点的选取与火焰区域的长宽比特征相关,如式(6)所示。

$$I(x_i, y_i) = \begin{cases} (x_g, y_a - kh_{GB}) & 0 < k \leq 0.7 \\ (x_g, y_g - h_{GB}) & 0.7 < k \leq 1.3 \\ (x_g, y_a - \frac{h_{GB}}{3k}) & k > 1.3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: k 为长宽比; h_{GB} 为线段 GB 的长度。

由式(6)可知,当相同视距时同类燃烧中 h_{GB} 值越大表明火焰越高、火势越大,火焰的水平覆盖面积也较大,灭火点应略高于灭火策略中的灭火剂落点,以便灭火剂在喷洒

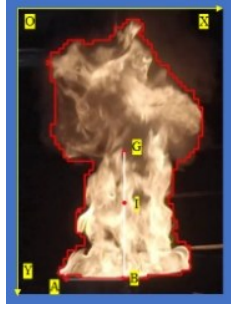


Fig. 4 Sample selection of fire extinguishing points

图4 灭火点选取样例

过程中覆盖更大面积,因此在设置灭火点 I 的 y_i 值时应减去一个以 h_{GB} 为基数的参数。当 $0 < k \leq 0.7$ 时,按油池火策略处理, k 值越小表征火焰宽度较大, y_i 值选取越接近火焰区域根部;当 $0.7 < k \leq 1.3$ 时,按流淌火策略处理, y_i 选取应接近火焰区域的顶部;当 $k > 1.3$ 时,视为射流火或包含射流火在内的多种类型火焰区域联通,以火焰根部为基准,依据火焰实际高度和长宽比进行动态优选。

由于油品的易燃性,单火源燃烧过程可能引燃其他区域,出现多个火源区域,但每个火源的燃烧速度和危险性不同,因此需计算每个燃点的灭火紧急性,选取紧急性最高的火焰区域,再按照单区域方案确定灭火对准点,如式(7)所示。

$$y_i = w_1 S_i + w_2 r_{s_i} + w_3 (1 - d_i) \quad (7)$$

式中: y_i 为第 i 个火焰区域的灭火紧急性; w_1, w_2, w_3 为不同权重,分别取0.4、0.4、0.2; S_i 为第 i 个火焰区域面积占图像总面积的比例; r_{s_i} 为第 i 个火焰区域相较于上一周期的面积变化率; d_i 为火焰质心到当前落点的距离占对角线长度的比例。

由式(7)可知,当固定深度距离灭火时,火灾面积、变化率相较于平面距离对灭火更重要,因此距离权重小于面积与变化率权重;火宅面积、变化率对火灾扑救的紧急情况同等重要,不同权重存在不同的灭火紧急性,但对火灾扑救具有积极意义。

2.3.2 炮头对准控制参数计算

消防炮对准与图像采集装置位置关系密切相关,本文遵循摄像头不随炮头转动的原则,将摄像头的固定位置处于炮头转动基点的正上方1 m处,视线平行于消防炮底座,面向正前方进行图像采集。同时,通过以下步骤得到炮头转动的水平角度、俯仰角度这两个控制参数:①计算图像中的灭火点 I ;②计算灭火点 I 到现实空间中真实灭火点 F 的坐标映射;③测量消防炮底座基点与燃烧设备的距离 h ;④计算炮头转动的水平角度 θ_1 、俯仰角度 θ_2 。

为了实现步骤②建立空间坐标系 $O-XYZ$,如图5所示。由于消防炮依靠底座基点进行转动,故将该基点作为该坐标系原点 O ,摄像头视线方向为 Z 轴方向, X 、 Y 、 Z 轴两两垂直。本文炮头长度为0.5 m,故将摄像头安置在水炮底座基点正上方1 m处,避免炮头转动造成视线遮挡。

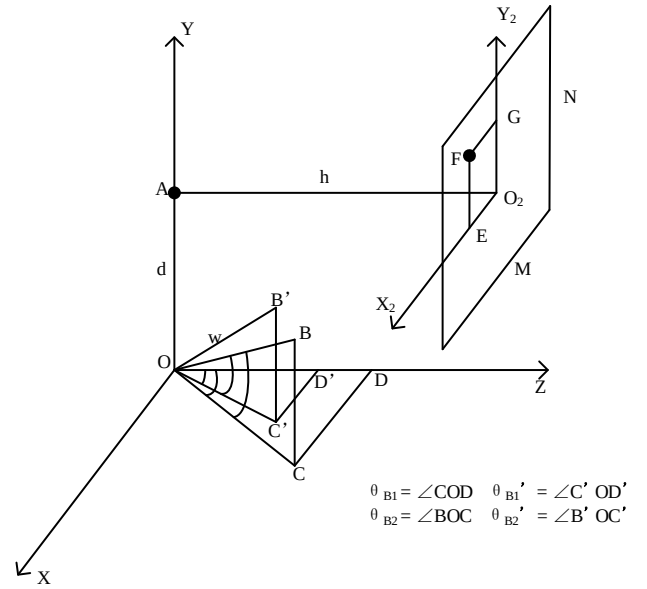


Fig. 5 Space coordinate system of fire scene

图5 火灾现场空间坐标系

假设炮头当前位置为 $B(x_B, y_B, z_B)$,炮头长度为 w ,摄像头距离消防炮底座高度为 d ,记为 $A(0, d, 0)$,拍摄视线平行于 Z 轴,现实空间灭火点为 $F(x_F, y_F, z_F)$,炮头转动的目标位置为 B' ,消防炮底座基点到被监测设备的距离由激光测距仪测定记为 h 。本文设定水炮喷射强度为定值且为短距离灭火,在该条件下可测得水炮转动基点 O 、炮头目标位置 B' 与真实灭火点 F 三点共线。

为了计算方便分别建立两个坐标系 $O_1 - X_1Y_1$ 、 $O_2 - X_2Y_2$,如图6所示。图6左侧为 $m \times n$ 尺寸的图像,点 $I(x_i, y_i)$ 为灭火对准点;图6右侧是以与摄像头竖直高度一致、空间 Z 轴距离为 h 建立的现实平面坐标系,图像到现实空间中的映射区域大小为 $M \times N$,点 $F(x_{f_i}, y_{f_i})$ 为该坐标系中的真实灭火点。

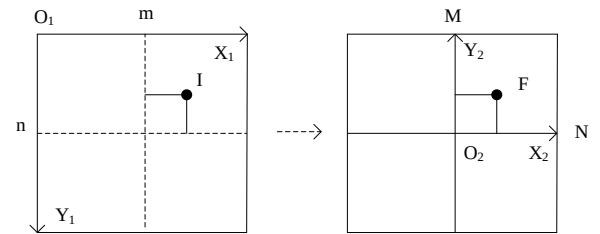


Fig. 6 Mapping relationship between images and spatial coordinates of the fire scene

图6 图像到火灾现场空间坐标的映射关系

图像中与现实平面对应的比例关系为:

$$\begin{cases} \frac{x_i - 0.5m}{0.5m} = \frac{x_{f_i}}{0.5M} \\ \frac{0.5n - y_i}{0.5n} = \frac{y_{f_i}}{0.5N} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_{f_i} = \frac{(x_i - 0.5m)M}{m} \\ y_{f_i} = \frac{(0.5n - y_i)N}{n} \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_i 为点 I 到 Y_1 轴的距离; y_i 为点 I 到 X_1 轴的距离; x_{f_i} 为点 F 到 Y_2 轴的距离; y_{f_i} 为点 F 到 X_2 轴的距离。

由于 $O_2 - X_2Y_2$ 的原点、 X 轴、 Y 轴分别与空间坐标系 $O - XYZ$ 的原点、 X 轴、 Y 轴重合, 点 $F(x_F, y_F, z_F)$ 坐标 x_F, y_F 分别与 x_{f_i}, y_{f_i} 同值, 则 $F(x_F, y_F, z_F)$ 为:

$$\begin{cases} x_F = \frac{(x_i - 0.5m)M}{m} \\ y_F = \frac{(0.5n - y_i)N}{n} \\ z_F = h \end{cases} \quad (10)$$

为了实现步骤④, 设测量炮头当前坐标为 $B(x_B, y_B, z_B)$, 转动目标到 $B'(x_{B'}, y_{B'}, z_{B'})$ 时即可瞄准灭火点。假设灭火剂喷射呈直线则 O, B', F 三点共线, 点 C, C' 分别为 B, B' 在 XOZ 面的垂直投影, 因此点 B', F 在水平方面与面 $O - YZ$ 和面 $O - XZ$ 所成夹角相同, OC 与 Z 轴的夹角记为 θ_{B_1} , OB 与 OC 夹角记为 θ_{B_2} , OC' 与 Z 轴夹角记为 $\theta_{B_1'}$, OB' 与 OC' 夹角记为 $\theta_{B_2'}$ 。

$$\begin{cases} \theta_{B_1} = \sin^{-1} \frac{x_B}{\sqrt{x_B^2 + z_B^2}} \\ \theta_{B_2} = \sin^{-1} \frac{y_B}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2 + z_B^2}} \end{cases} \quad (11)$$

由于 O, B', F 三点共线可得:

$$\begin{cases} \theta_{B_1'} = \sin^{-1} \frac{x_F}{\sqrt{x_F^2 + z_F^2}} \\ \theta_{B_2'} = \sin^{-1} \frac{y_F}{\sqrt{x_F^2 + y_F^2 + z_F^2}} \end{cases} \quad (12)$$

若要使其瞄准灭火点, 则水平方向转动角度 θ_1 、俯仰方向转动角度 θ_2 为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_{B_1'} - \theta_{B_1} \\ \theta_2 = \theta_{B_2'} - \theta_{B_2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\theta_1 > 0$ 表明炮头向右转动; $\theta_1 < 0$ 时表明炮头向左转动; $\theta_2 > 0$ 时表明炮头向上转动; $\theta_2 < 0$ 时表明炮头向下转动。

2.3.3 炮头运动参数计算

通过上述方法得到 θ_1, θ_2 后, 可对照炮头转动角度与时间关系控制水平、俯仰方向转动的继电器接通时长 t_1, t_2 , 具体计算公式如式(14)所示。每秒炮头转动角度如表2所示。

$$\begin{cases} t_1 = \frac{|\theta_1|}{10} \\ t_2 = \frac{|\theta_2|}{20} \end{cases} \quad (14)$$

Table 2 Rotation angle of the cannon head per second

表2 每秒炮头转动角度

方向	每秒转动角度/°
左	10
右	10
仰	20
俯	20

3 实验结果与分析

3.1 视觉感知实验

3.1.1 火焰分割模型优选实验

为了验证模型分割效果, 使用测试集中的200对图像, 分别对上述4个微调后的火焰分割模型进行测试。这些模型的主干网均搭载轻量级网络 MobilenetV2, 选用预测图与标注图的火焰区域交并比 IoU、召回率 Recall、分割精度 Precision、F1 分值作为评价指标, 测试结果如表3所示。其中, 表中数据为全部测试图像的均值。

Table 3 Test results after model fine-tuning

表3 微调模型后的测试结果

模型	IoU	Recall	Precision	F1
FCN	0.648	0.752	0.812	0.776
PSPNet	0.607	0.667	0.844	0.724
U-Net	0.844	0.951	0.884	0.914
DeeplabV3+	0.780	0.798	0.974	0.874

由表3可知, U-Net 的 IoU、Recall 和 F1 均优于 FCN、PSPNet、DeeplabV3+, 在精度方面 DeeplabV3+ 最高, 原因为不同语义网络模型对深层、浅层特征的利用程度和融合方法不同。具体为, FCN 仅对最终提取到的特征进行两次跨层特征融合, 并未进行多尺度运算, 因此在充油设备火灾场景下面对不同尺度的火焰时分割效果不佳; PSPNet 的核心是对提取到的深层特征行4种不同尺度的池化, 再与原先的特征进行连接融合, 相较于其他3类模型缺乏浅层特征融合, 容易丢失目标边缘、小尺度目标等细节信息, 造成火焰边缘不准确和小尺度火焰欠分割; DeeplabV3+ 集成了 FCN 与 PSPNet 等模型的优点, 在编码器中对深层特征进行多种运算以丰富深层特征, 在解码器中与浅层特征进行连接合并, 兼顾了深层与浅层特征, 融合次数少于 U-Net, 因此 IoU、Recall 和 F1 优于 FCN、PSPNet, 但略低于 U-Net; U-Net 在编码器结构中经过多次下采样得到的深层特征信息, 能提供分割目标在整个图像中的上下文语义信息, 并在解码器中进行了多次上采样, 将上采样结果与同阶段下采样的结果进行连接融合, 保证了最后的特征图融合了更多浅层特征, 既能标定火焰区域, 又保留了更多细节。

3.1.2 火焰特征提取实验

本文采用 U-Net 模型进行火焰分割, 使用火焰特征提取方法对分割后的二值化图像进行特征量化, 以提取充油设备火焰的质心、周长、面积、长宽比, 如图7所示的红线区域所示。



Fig. 7 Flame segmentation results

图7 火焰分割结果

同时,使用火焰区域中所有像素点的总数来表征区域面积,面积变化率参照当前图像的前一帧图像的火焰区域面积进行计算,火焰特征参数值如表4所示。其中,提取质心有利于定位火焰区域;提取面积、周长可表示火焰尺度;长宽比可用于评估燃烧类型。

Table 4 Flame feature quantification results corresponding to Figure 7

表4 图7对应的火焰特征量化结果

特征	图7(a)	图7(b)
质心	(966,926)	(947,741)
周长	676	1 740
面积	14 229	87 416
长宽比	0.480	1.710
面积变化率	0.040	0.468

3.2 消防炮对准控制实验

3.2.1 灭火对准点选取测试

为验证灭火方案的合理性,对含有油池火、流淌火和射流火的图像进行灭火对准点选取测试,如图8所示(图中的红点表示火焰区域质心,绿点表示本文灭火方案所选的灭火对准点)。由此可见,图8(a)油池火与图8(b)射流火的灭火火点在火焰根部;图8(c)流淌火的灭火火点在火焰顶端,相较于质心更接近燃烧介质,可降低燃油品温度、阻断其与氧气接触;图8(d)存在多个燃烧区域,测试所选灭火对准点位于燃烧更剧烈的右侧火焰区域,可满足灭火紧急性需求。

3.2.2 炮头对准控制与转向运动测试

将消防炮底座基点与充油设备垂线的距离记为 h ,所提方法用于消防炮的短距离灭火,可假设炮头延长线在深度 h 下的落点即为灭火剂落点。因此,将激光发射器固定于炮头位置,用炮头转动结束后的激光落点 LP 模拟灭火剂喷射落点,图像中的灭火对准点 I 映射到现实空间的期望对准点记为 F ,则 LP 与 F 之间的距离误差 e 越小,代表炮头的对准控制和转向运动越可信。

在固定喷射压力条件下进行近距对准测试,距离 h 分别选取为4 m、6 m、8 m、10 m,每组测试50个距离误差 e ,并对其求均值 $\bar{e}$,结果如表5所示。由此可见,消防炮与设备之间的距离 h 越远, LP 与 F 距离偏离越大;但 $\bar{e}/h$ 值相对稳定,均在0.009左右,表明距离误差均值 $\bar{e}$ 与深度 h 呈线性相关;在近距灭火联动控制中, LP 与 F 距离误差均值 $\bar{e}$ 均小于0.1 m,期望对准点 F 在灭火剂喷雾的有效覆盖范围

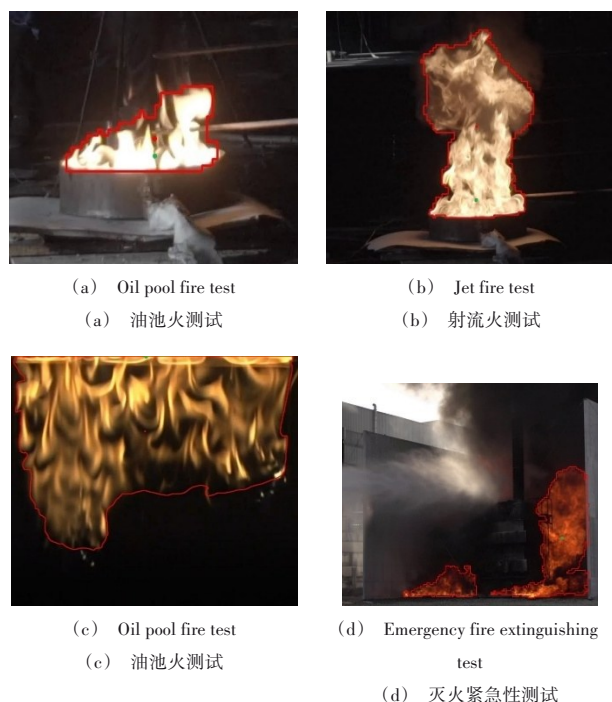


Fig. 8 Fire extinguishing target selection test

图8 灭火对准点选取测试

内,证明了所提方法有效。

Table 5 Mean distance error between laser landing point LP and expected alignment point F after cannon head rotation

表5 炮头转动后激光落点 LP 与期望对准点 F 的距离误差均值

h/m	距离误差均值 $\bar{e}/m$	$\bar{e}/h$
4	0.036	0.009 000
6	0.053	0.008 833
8	0.074	0.009 250
10	0.092	0.009 200

4 结语

本文在深入研究变压器充油设备火灾燃烧特点的基础上,提出了针对变压器充油设备火灾的消防炮视觉感知对准策略与实现方法。首先,通过视觉感知技术获取图像中的火焰对象及其形态特征;其次,基于火焰形态、充油设备火灾燃烧特性,制定不同情况下的水炮对准策略。

实验表明,基于灭火对准点空间坐标的水炮联动控制和运动方法取得的灭火对准点更合理,在近距灭火领域可行、有效,可为智慧消防系统的建设提供有益参考。

参考文献:

- [1] SUN R N, YANG X, WANG J C, et al. Experimental study on axial temperature profile of jet fire of oil-filled equipment in substation[J]. Processes, 2021, 9(8): 1460.
 - [2] CHEN T, ZHAO L Z, FU X C, et al. Characteristics of large converter transformer fire accidents and fire extinguishing plans[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1138-1114.
- 陈涛,赵力增,傅学成,等. 大型换流变压器火灾事故特点与灭火方案

- [J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8): 1138-1141.
- [3] LI J T, ZHU H Y. Experimental study on fire suppression of oil immersed power transformers [J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(12): 1306-1309.
- 李建涛, 朱红亚. 油浸式电力变压器火灾抑制实验研究[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(12): 1306-1309.
- [4] CHEN B H, LU J Z, LIANG P, et al. Water mist enhanced fire extinguishing system and transformer fire extinguishing test [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(1): 107-110.
- 陈宝辉, 陆佳政, 梁平, 等. 细水雾增强型灭火系统与变压器灭火试验[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(1): 107-110.
- [5] GAO Z X, ZHANG F, GAO D, et al. Discussion on fire extinguishing scheme for ultra high voltage DC converter transformers [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(8): 1106-1107, 1116.
- 高振锡, 张凡, 高迪, 等. 特高压直流换流变压器灭火方案探讨[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(8): 1106-1107, 1116.
- [6] WANG Y L, LI C H, ZHANG J Q, et al. Analysis of oil fire characteristics parameters of K150X ultra high voltage transformer [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1361-1369.
- 汪亚龙, 黎昌海, 张佳庆, 等. K150X 特高压变压器油火灾特性参数分析[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1361-1369.
- [7] DAI C R, CHEN G, ZHU B, et al. A full-scale experimental study on the combustion characteristics of outdoor transformer fires [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(3): 318-321.
- 戴晨蓉, 陈光, 朱博, 等. 室外变压器火灾燃烧特性全尺度实验研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(3): 318-321.
- [8] XU K, XU Y, XING Y X, et al. YOLO-F: YOLO for flame detection [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2023, 37(1): 2250043.
- [9] WANG G B, YANG J D, LI B, et al. Improved YOLOv4 flame image real-time detection [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(5): 1358-1365.
- 王冠博, 杨俊东, 李波, 等. 改进 YOLOv4 的火焰图像实时检测[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(5): 1358-1365.
- [10] ZHANG Y, LIU M Y, XU S W, et al. Substation fire detection based on MobileNetv3-Large-YOLOv3 [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(11): 123-132.
- 张永, 刘明一, 许庶威, 等. 基于 MobileNetv3-Large-YOLOv3 的变电站火灾检测[J]. 广东电力, 2021, 34(11): 123-132.
- [11] GAO S H, WANG Y Y, CHEN Z F, et al. Design and implementation of local threshold segmentation based on FPGA [EB/OL]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/6532852>.
- [12] ZHAO S Z, KANG F, LI J J. Non-contact crack visual measurement system combining improved U-Net algorithm and canny edge detection method with laser rangefinder and camera [J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10651.
- [13] KUMAR M P, ASHOK D. A multi-level colour thresholding based segmentation approach for improved identification of the defective region in leather surfaces [J]. Engineering Journal, 2020, 24(2): 101-108.
- [14] WU C, ZHENG J B, FENG Z N, et al. Fuzzy slic: fuzzy simple linear iterative clustering [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(6): 2114-2124.
- [15] HOU X G, WANG C, BU L P, et al. A lightweight fire detection model based on flame color features [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 47-50, 63.
- 侯新国, 王灿, 卜乐平, 等. 基于火焰颜色特征的火灾探测轻量化模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 47-50, 63.
- [16] YAN L B. Video flame image segmentation method based on independent component analysis and color features [J]. Sensors and Microsystems, 2022, 41(4): 149-152.
- 颜礼彬. 基于独立分量分析和颜色特征的视频火焰图像分割法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(4): 149-152.
- [17] CHEN W X, ZHAO W D, LIU Y J, et al. Flame segmentation algorithm based on automatic seed region growth [J]. Fire Science, 2018, 27(4): 197-204.
- 陈维相, 赵望达, 刘玉杰, 等. 基于自动种子区域生长的火焰分割算法[J]. 火灾科学, 2018, 27(4): 197-204.
- [18] GU S J, BU X Z, JIN J W, et al. Cannon flame segmentation method based on improved Unet network [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 16-21.
- 谷世举, 卜雄洙, 新建伟, 等. 基于改进 Unet 网络的炮口火焰分割方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4): 16-21.
- [19] NING Y, DU J C, HAN S, et al. Improved flame segmentation and fire analysis method for DeeplabV3+ [J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2021, 48(5): 38-46.
- 宁阳, 杜建超, 韩硕, 等. 改进 DeeplabV3+ 的火焰分割与火情分析方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(5): 38-46.
- [20] LI M, ZHANG Y, MU L, et al. A real-time fire segmentation method based on a deep learning approach [J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(6): 145-150.
- [21] ZHU H, WANG H L, ZHANG H X, et al. Comparative study on deep learning based flame segmentation models [J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(1): 25-30.
- 朱红, 王海雷, 张昊轩, 等. 基于深度学习的火焰分割模型对比研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(1): 25-30.
- [22] ZHANG H. Research on automatic control system of firefighting robot based on infrared thermal imaging [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- 张航. 基于红外热成像的消防灭火机器人自动控制系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [23] YANG G. Design and theoretical research of high pressure fire water cannon control system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- 杨刚. 高压消防水炮控制系统设计与理论研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [24] ZHU J S, PAN L, ZHAO G. An improved near-field computer vision for jet trajectory falling position prediction of intelligent fire robot [J]. Sensors, 2020, 20(24): 7029.
- [25] KIM J H. Design of integrated smart fire protection system for rack storage [J]. Fire Science and Engineering, 2020, 34(1): 26-36.
- [26] WU C Z, GE F, SHANG G C, et al. Design and development of intelligent fire-fighting robot based on STM32 [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1748(6): 62019.
- [27] ZHANG S, YAO J T, WANG R C, et al. Design of intelligent fire-fighting robot based on multi-sensor fusion and experimental study on fire scene patrol [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 154: 104122.