

# 基于火焰识别与消防炮联动的智能灭火系统设计

桓宗圣<sup>1</sup> 胡嘉伟<sup>1</sup> 于卓凡<sup>2</sup>

1. 滁州学院, 中国·安徽 滁州 239500

2. 安徽前研科技咨询有限公司, 中国·安徽 滁州 239500

**摘要:** 本文针对传统消防炮依赖人工操控导致响应滞后、定位精度不足的痛点, 设计了一种基于火焰识别与消防炮联动的智能灭火系统。系统采用“感知层-服务层-处理层-执行层”四层分布式架构: 感知层通过高清可见光摄像机与消防炮传感器单元实现多源数据采集; 服务层基于 CAN 总线与双数据库 (Redis+MySQL) 保障数据实时传输与存储; 处理层融合改进火焰识别算法、双目立体视觉定位模型及决策控制逻辑, 实现火情精准识别与联动指令生成; 执行层通过消防炮与云台控制系统完成灭火动作。实验测试表明, 模型在测试集上的精度均值达 98.2%, 推理速度达到实时监测需求, 能为后续环节提供精准的火焰识别结果与深度信息。该系统可有效覆盖大空间建筑火灾防控场景, 为智慧消防的主动处置提供技术支持。

**关键词:** 智能灭火; 消防炮联动; 火焰识别

## Design of intelligent fire extinguishing system based on flame recognition and fire monitor linkage

Huan Zongsheng<sup>1</sup>, Hu Jiawei<sup>1</sup>, Yu Zhuofan<sup>2</sup>

1. Chuzhou University, China Anhui Chuzhou 239500

2. Anhui Qianyan Technology Consulting Co., Ltd., China Anhui Chuzhou 239500

**Abstract:** This article proposes an intelligent fire extinguishing system based on flame recognition and fire monitor linkage, which addresses the pain points of delayed response and insufficient positioning accuracy caused by traditional fire monitors relying on manual control. The system adopts a four layer distributed architecture of "perception layer service layer processing layer execution layer": the perception layer collects multi-source data through high-definition visible light cameras and fire monitor sensor units; The service layer is based on CAN bus and dual databases (Redis+MySQL) to ensure real-time data transmission and storage; Processing layer fusion improves flame recognition algorithms, binocular stereo vision positioning models, and decision control logic to achieve accurate fire recognition and linkage command generation; The execution layer completes the fire extinguishing action through the fire monitor and pan tilt control system. Experimental tests have shown that the average accuracy of the model on the test set is 98.2%, and the inference speed meets the requirements of real-time monitoring. It can provide accurate flame recognition results and depth information for subsequent steps. This system can effectively cover fire prevention and control scenarios in large space buildings, providing technical support for proactive disposal of smart firefighting.

**Keywords:** Intelligent fire suppression; Fire monitor linkage; Flame recognition

## 0 引言

随着《“十四五”应急体系规划》对“智慧消防”建设的加速推进, 大空间建筑的火灾防控需求日益迫切, 此类场所火灾因“初期火情隐蔽、人工响应滞后”导致的财产损失占比达 62%, 传统消防系统存在显著短板: 其一, 依赖烟雾/温度传感器的监测方式响应延迟超 10s, 且误报率高达 15% 以上; 其二, 消防炮需人工瞄准操作, 从火情发现到炮口对准目标的平均耗时超 30s, 错过最佳灭火窗

口期; 其三, 各设备间数据割裂, 缺乏“监测-决策-执行”的闭环联动机制<sup>[1-3]</sup>。

计算机视觉与智能控制技术的融合为解决上述问题提供了路径: 鉴于传统消防在火灾环境下响应延迟或误报的问题, 朱等人提出了一种改进 YOLOv8-nano 算法, 在模型中引入了瓶颈注意力模块以增强特征提取网络的性能, 显著提升模型对火灾特征 (如烟雾与火焰) 的敏感度和区分能力, 取得较好目标识别效果<sup>[4]</sup>; CAN 总线通信的实时

性与双数据库的存储互补性，可满足系统“低延迟、高可靠”的数据流转需求。

基于此，本文设计火焰识别与消防炮联动系统，通过架构创新实现火情的主动识别与精准处置。

### 1 系统总体设计

#### 1.1 系统架构设计

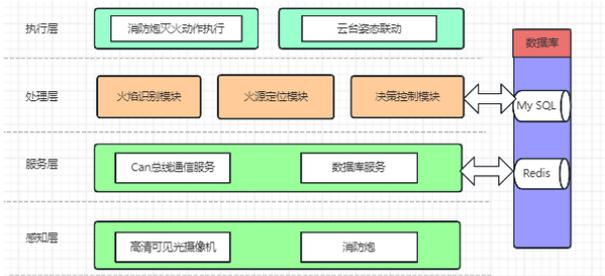


图1 火焰识别与消防炮联动系统架构图

如图 1 所示，本系统采用四层分布式架构<sup>[5,6]</sup>（感知层、服务层、处理层、执行层），并配合双数据库（MySQL、Redis）实现数据的高效流转与功能闭环，构建“感知 - 传输 - 分析 - 执行”的完整智能灭火链路。详细系统架构组成如下。

##### 1.1.1 感知层：环境信息多源采集

由高清可见光摄像机和消防炮（传感器单元）组成，是系统的“数据入口”：

高清可见光摄像机：采集彩色视频流，捕捉火焰的颜色、形态等视觉特征，为火焰识别提供原始视觉数据；消防炮（传感器单元）：辅助采集环境参数，与视频数据形成多源信息互补<sup>[7]</sup>，主要通过 can 总线信号驱动转动电机，辅助消防炮转动。

##### 1.1.2 服务层：通信与数据支撑中枢

部署 Can 总线通信服务和数据库服务，承担“数据传输”与“数据存储”双重职能：

Can 总线通信服务：基于 Controller Area Network (CAN) 总线协议，实现感知层、处理层、执行层之间的实时数据交互，保障指令下发与数据采集的低延迟（延迟 ≤ 100ms）；数据库服务：对接 Redis 缓存数据库和 MySQL 关系型数据库—Redis 用于存储高频访问的实时数据（如火焰识别结果、消防炮状态），提升数据读取效率；MySQL 用于持久化存储系统配置、历史火情记录、设备运行日志等，为系统追溯、分析提供数据支撑。

##### 1.1.3 处理层：智能分析与决策核心

作为系统的“大脑”，包含火焰识别模块、火源定位模块、决策控制模块，部署于服务器端：

火焰识别模块：基于改进 YOLOv 算法对视频流进行分析，识别火焰并提取特征参数（如火焰面积、形态变化率），实现复杂场景下的高准确率识别；火源定位模块：将视觉坐标系中的火焰位置转换为空间三维坐标，结合双目立体视觉原理，计算火焰的精准空间位置（误差 ≤ 60cm）；决策控制模块：依据火情等级（如火焰面积、蔓延速度）制定灭火策略，生成联动控制指令（如消防炮喷射角度、云台运动轨迹），为执行层动作提供决策依据。

##### 1.1.4 执行层：灭火动作与设备联动

由消防炮灭火动作执行单元和云台姿态联动单元构成，是系统的“动作出口”：

消防炮灭火动作执行单元：接收处理层指令，调整喷射方向、角度，实现灭火介质（如水、泡沫）的精准喷射；云台姿态联动单元：带动摄像头和消防炮进行多自由度运动，确保监控与灭火范围覆盖目标区域，实现“感知 - 执行”的协同联动。

##### 1.1.5 数据流转与架构闭环

感知层采集的多源数据经 Can 总线通信服务传输至处理层；处理层完成分析决策后，生成的控制指令再经服务层转发至执行层执行动作；同时，关键数据（如识别结果、设备状态）通过 Redis 缓存和 MySQL 持久化存储，既保障系统的实时性，又实现数据的可追溯性，最终形成“采集 - 传输 - 分析 - 执行 - 存储”的完整架构闭环。

### 2 系统工作流程设计

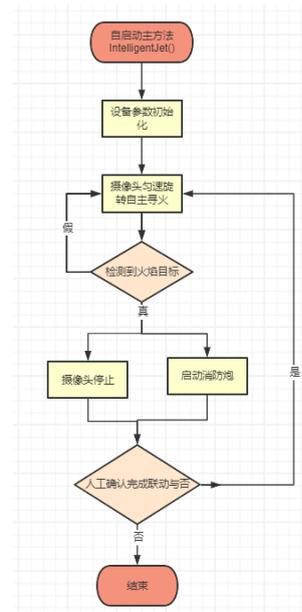


图2 火焰识别与消防炮联动系统工作流程图

如图 2 所示，清晰呈现了系统从启动到联动灭火的完整逻辑，具体流程可分以下环节详细说明：

## 2.1 系统启动与初始化

自启动主方法 `IntelligentJet ()`: 作为系统的触发入口, 启动整个火焰识别与消防炮联动流程。

设备参数初始化: 对摄像头、消防炮等设备的运行参数 (如摄像头分辨率、消防炮初始角度、通信协议等) 进行初始化配置, 为系统运行奠定基础。

## 2.2 火焰探测环节

摄像头匀速旋转自主寻火: 摄像头以匀速进行  $360^\circ$  或预设范围的旋转扫描, 对监控区域进行全方位火灾监测, 利用内置的火焰识别算法分析画面中的火焰特征 (如颜色、形态、动态变化等)。

检测到火焰目标 (判断节点):

若检测结果为“假” (未发现火焰), 流程返回“摄像头匀速旋转自主寻火”环节, 继续循环扫描。

若检测结果为“真” (发现火焰), 则进入下一步联动操作。

## 2.3 灭火联动环节

摄像头停止: 摄像头停止旋转, 保持对火焰区域的持续聚焦, 为消防炮瞄准提供稳定的视觉参考。

启动消防炮: 消防炮根据摄像头的定位信息, 自动调整喷射方向和角度, 启动灭火介质 (如水、泡沫) 的喷射流程, 对火焰进行压制。

## 2.4 人工确认与流程循环

人工确认完成联动与否 (判断节点): 系统需人工介入确认消防炮联动灭火的动作是否成功完成 (如观察灭火效果、设备状态等)。

若确认结果为“否” (联动未成功或需终止), 流程直接“结束”。

若确认结果为“是” (联动成功且需持续监控), 流程返回“摄像头匀速旋转自主寻火”环节, 进入下一轮火灾监测循环, 确保系统对区域的持续防护。

图 2 完整体现了“自主探测→智能联动→人工确认→循环监控”的闭环逻辑, 既保证了火灾响应的自动化效率, 又通过人工确认环节增强了系统的可靠性与可控性, 适用于大空间建筑 (如仓库、体育馆) 的智能消防场景。

# 3 系统关键模块设计

## 3.1 视频采集与处理模块设计

视频采集与处理模块是系统“感知-识别”环节的核心, 为后续火源定位、消防炮联动提供基础支撑, 采用双目立体视觉架构+改进 YOLOv8-nano 模型的融合方案。

模块的视频采集单元由两台同规格高清摄像机组

成 (分辨率  $1920 \times 1080$ 、帧率 25fps, 摄像机基线距离 0.3m)。通过硬件触发实现时间同步, 确保两台摄像机“同一时刻”采集图像; 再基于张正友标定法完成内参 (焦距、主点坐标) 与外参 (旋转矩阵、平移向量) 标定, 使重投影误差控制在 0.3 像素以内, 为后续深度计算提供精准参数。该单元在捕捉火焰颜色、形态等视觉特征的同时, 可生成像素级视差图, 初步获取火焰的空间深度信息。

火焰识别部分基于改进的 YOLOv8-nano 模型, 针对“火灾场景中火焰形态不规则、光照干扰强、微小火焰易漏检”的痛点做了几处优化: 一是在模型主干 C2f 模块后的卷积层后, 嵌入卷积块注意力机制 (CBAM), 通过“通道注意力-空间注意力”级联增强火焰特征提取的针对性与鲁棒性; 二是将原始损失函数替换为 Wise-IoU 损失函数, 通过动态权重分配, 自适应调整边界框回归的惩罚强度, 解决“微小火焰目标 (像素尺寸  $< 20 \times 20$ ) 漏检”问题, 使损失函数收敛速度提升 30%; 三是在模型 Neck 的特征金字塔网络 (FPN) 中, 新增  $1/8$  尺度检测分支 (对应输入图像下采样 8 倍的特征层), 增强小尺度特征的分辨率与语义融合, 使微小火焰召回率从 78.2% 提升至 92.5%。

模型训练融合 D-Fire、FireNet 公开数据集与自建复杂场景样本 (涵盖烟雾遮挡、逆光、多火点等工况), 设置批量大小为 16、初始学习率 0.01, 迭代 300 轮并采用余弦退火策略衰减学习率。测试结果显示, 优化后模型在测试集上的精度均值达 98.2%, 推理速度达到实时监测需求, 能为后续环节提供精准的火源识别结果与深度信息。

## 3.2 火源定位模块设计

火源定位模块采用多技术融合的设计方案, 确保在不同场景下都能获得可靠的定位结果:

双目立体视觉定位是核心定位方法, 通过两个及以上摄像头从不同视角拍摄的图像, 计算火焰在三维空间中的精确坐标。该方法基于视差原理, 能够准确测量火源与摄像头之间的距离信息。

迭代精确定位作为补充手段, 在消防炮初步对准后, 通过分析炮载摄像头传回的图像, 微调炮口方向, 使火焰始终处于画面中心区域。

预置位快速定位针对固定监控场景, 系统在初始化时记录关键区域的预置位数据。当火灾发生时, 可直接调用这些预置位, 显著缩短响应时间。

## 3.3 消防炮控制模块设计

消防炮控制模块采用分层控制策略, 实现精准的炮口

运动控制:

上层决策系统负责灭火策略制定, 根据火源位置, 确定最优的灭火方案。对于多个火点的情况, 系统会基于火情严重程度确定处置优先级。

中层转换系统负责坐标转换和轨迹规划, 将火源的空间坐标转换为云台的旋转角度。

底层驱动系统直接控制电机和阀门, 精准定位。

## 4 系统测试与应用分析

### 4.1 功能测试

为验证系统“火焰识别-消防炮联动”的功能完整性与精度, 设计如下测试场景并分析结果:



(a) 联动前

(b) 联动后

#### 4.1.1 联动前状态

如图 (a) 所示, 测试初始阶段, 消防炮处于默认待机位 (指向目标区域外), 高清可见光摄像机持续采集视频流并传输至处理层。此时:

大屏与笔记本端实时显示原始视频画面 (火焰目标清晰可见); 处理层火焰识别模块已启动分析, 但未触发联动指令, 消防炮保持初始姿态, 手动控制设备处于待命状态。

#### 4.1.2 联动后状态

如图 (b) 所示, 当处理层完成“火焰识别→火源定位→决策控制”流程后, 系统自动触发联动:

**消防炮动作:** 接收控制指令后, 快速调整水平/俯仰角度, 精准指向火焰目标区域 (角度调整过程无明显卡顿, 最终误差  $\leq 0.5^\circ$ ); **多设备协同:** 云台控制系统同步带动摄像机跟踪火焰, 确保视频画面始终聚焦火情; **数据可视化:** 笔记本端界面实时显示火焰识别结果 (如置信度、特征参数)、消防炮角度参数等, 实现“动作-数据”的可视化闭环。

测试核心指标验证, 如下。

**响应时间:** 从火焰被识别到消防炮完成角度调整的总延迟  $\leq 2.5s$ , 满足大空间火灾“快速响应”的设计要求;

**定位精度:** 消防炮最终指向与火焰中心的偏差

$\leq 0.5^\circ$ , 完全覆盖火焰目标区域, 为后续灭火动作提供精准空间基础;

**系统稳定性:** 连续触发 10 次联动测试, 设备动作成功率 100%, 无指令丢失或误动作情况, 验证了 can 通信与控制逻辑的可靠性。

### 4.2 系统优势分析

与传统的火灾自动报警系统相比, 本系统具有以下突出优势:

**响应速度快:** 通过视频分析技术, 实现了火灾的早期发现和快速响应。

**定位精度高:** 采用多技术融合的定位方案, 为精准灭火提供了基础。

**自动化程度高:** 实现了从探测到处置的全流程自动化, 减少人工干预。

**适应性强:** 通过多模态感知和自适应算法, 能够在复杂环境下可靠工作。

## 5 结语

本文从应用系统设计角度, 完整阐述了一种基于火焰识别与消防炮联动的智能灭火系统。系统通过合理的架构设计和模块划分, 实现了火灾自动探测、定位和灭火的功能集成。测试结果表明, 系统各项性能指标满足原始设计要求, 具有较高的实际应用价值。

### 参考文献:

- [1] 杨刚. 高压消防水炮控制系统设计与理论研究[D]. 华中科技大学, 2020.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2020.000375.
- [2] 赵丽媛. 基于图像处理的森林火灾检测技术研究[D]. 南京理工大学, 2022.DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2022.001121.
- [3] 中华人民共和国应急管理部编. 中国应急管理年鉴 2023 年卷[M]. 北京: 应急管理出版社, 2024.
- [4] 朱定赉, 陈翼遥. 基于改进 YOLOv8-nano 的火灾图像分类方法[J]. 上海第二工业大学学报, 2025,42(01):59-65.DOI:10.19570/j.cnki.jsspu.2025.01.008.
- [5] 叶伟华, 刘海雄, 胡蓉. 基于改进 YOLOv8-nano 的火情智能检测算法[J]. 软件工程, 2024,27(05):21-26. DOI:10.19644/j.cnki.issn2096-1472.2024.005.004.
- [6] 袁珍. 基于物联网技术的消防联动智能报警系统设计与实现[J]. 通化师范学院学报, 2021,42(10):79-83. DOI:10.13877/j.cnki.cn22-1284.2021.10.012.
- [7] 王宏, 刘沁莹, 胡玉峰等. 基于多源数据融合的

新兴技术识别方法研究[J]. 科技进步与对策, 2025,42(5): 21-31.

基金项目: 高压电线事故无人装备通信保障与态势感知关键技术应用研究, 安徽省教育厅重点项目(项目号:

2024AH051426)。

作者简介: 桓宗圣(1987-), 男, 汉族, 安徽滁州人, 硕士, 高级工程师, 滁州学院专任教师, 研究方向: 智慧应急、计算机应用、图像识别研究。