

面向消防控制室的智能巡检机器人系统设计与实现

王军港¹ 夏慧钧² 仇大伟³ 刘益晗⁴ 王田虎^{5*}

1.常州地铁集团有限公司运营分公司 江苏 常州 213001

2.江苏荣夏安全科技有限公司 江苏 常州 213001

3.帝国理工学院 电气与电子工程系 英国 伦敦 SW7 2AZ

4.温州肯恩大学 理工学院 浙江 温州 325060

5.江苏理工学院 电气信息工程学院 江苏 常州 213001

【摘要】：为应对消防控制室传统人工巡检效率低、易出错以及设备老化等问题，本文设计并实现了一套基于视觉的智能巡检机器人系统。该系统以轨道式机器人为载体，集成高精度辅助定位机构、机械臂、多传感器及智能控制单元。其核心在于采用机械限位与磁吸辅助相结合的复合定位系统，有效消除了累积误差，确保了探头能精准对准机柜指示灯。机器人通过视觉组件采集图像，并利用内嵌算法实现设备状态的自动研判、异常报警与数据远程上报。测试表明，该系统运行稳定、定位准确，能够可靠完成定时定点自动化巡检，显著提升了消防设施运维的可靠性与效率。

【关键词】：消防控制室；巡检机器人；视觉检测；精确定位

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.017

1 引言

消防控制室（以下简称“消控室”）作为建筑物消防设施的核心监控与指挥中枢，其值守的可靠性、实时性与专业性直接关系到初期火灾的及时发现与有效处置^[1-3]。2017年，公安部消防局发布的《关于全面推进“智慧消防”建设的指导意见》首次从国家层面系统规划了消防信息化的蓝图，强调了物联网感知、数据挖掘与智能应用的重要性^[4]。2021年，国务院印发的《“十四五”国家应急体系规划》进一步将“智能消防装备”列为重点攻关项目，鼓励研发可替代危险环境人工作业的机器人装备^[5,6]。

发达国家在消防机器人领域的研究起步较早，已形成了较为成熟的产品体系与应用场景^[7,8]。如美国霍尼韦尔（Honeywell）公司推出的第三代 Fire Lite 系统，通过高度集成的传感器网络与优化算法，极大提升了初期火灾的处置效率。目前，国内市场产品主要沿着两条路径演进：一是专注于消控室内特定人机交互操作（如操作报警控制器）的专用值守机器人；二是集成巡检、监控、分析于一体的综合智能巡检机器人。例如，科大立安展示的“空地一体化”消防平台，将地面巡检机器人、无人机与固定监控系统结合，通过三维建模、火源定位等技术，实现灾情评估与协同处置的效能提升^[9-11]。

然而，传统依赖人工 24 小时值班的模式，长期面临人力

成本高昂、人员专业素质参差不齐、疲劳作业导致漏判误判风险，以及难以实现全天候绝对专注等诸多挑战。本论文将突破智能消防控制系列关键技术，构建新一代“端-边-云”协同的智能消防控制联动系统，形成多维决策支持体系，确保数据的实时处理和决策的快速响应。通过深度融合多模态感知与智能决策算法，应对传统消防系统响应滞后和现代建筑火灾防控难题，既响应了国家智慧城市建设需求，又提高了公共安全防控水平。

2 系统总体设计

本文设采用“轨道移动平台+机械臂+智能巡检终端”的层级化架构，并通过物联网与上位机管理平台进行数据交互。系统总体架构如图 1 所示，具体工作流程如下：系统依据预设计划或远程指令启动后，首先通过导轨移动至目标区域，借助活动板与物理限位器的机械连锁实现粗定位；限位器触发绳传动并触动内部传感器，使电机停止并转入精定位阶段，机械臂依据预先标定坐标将视觉传感器精确调整至最佳观测位姿；随后，系统基于计算机视觉算法对设备状态进行识别与分析，包括指示灯颜色、数码管读数及仪表指针位置等，并与预设正常状态进行比对；若检测到异常，系统同步启动本地声光报警并通过无线网络上传故障位置、图像与时间戳至远程监控平台；完成单点任务后，机械臂收回，定位机构电磁复位，系统自动转至下一巡检点，实现连续自动化作业。

作者简介：王军港，本科，高级工程师，研究方向为轨道交通运维。

*通讯作者：王田虎，博士，教授，研究方向为嵌入式系统及应用。

基金项目：常州市国际合作项目“基于智能决策的消防控制联动系统联合开发”（CZ20250010）

3 机械系统与精确定位设计

精确定位是确保巡检有效性的关键。系统采用“导轨路径约束+物理限位粗定位+机械臂视觉伺服微调”的三级定位策略，其中核心创新在于辅助定位组件与限位组件的设计，如图2所示。

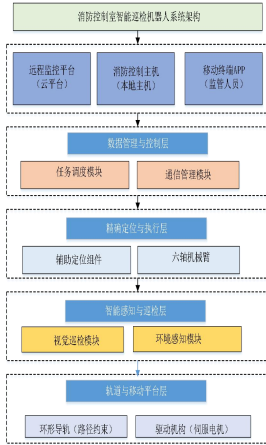


图1 系统架构图

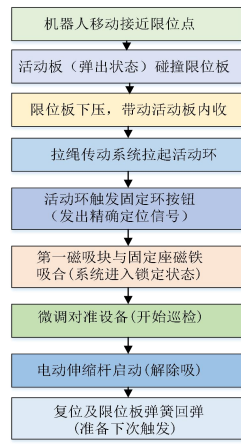


图2 辅助定位组件与限位组件协同工作流程图

3.1 辅助定位组件

辅助定位组件含固定座、活动板、拉绳传动系统、电磁驱动单元及位置传感模块。活动板铰接于固定座，可内外运动，内侧设有磁吸块。拉绳连接活动板与空腔内的活动环，活动板内移时牵引活动环触发固定环按钮，发出到位信号。电动伸缩杆可前伸推动磁吸块分离，实现驱动与复位。磁吸开关通过感应第二磁铁本体判断活动板是否恢复弹出状态。

3.2 限位组件

限位组件沿辅助导轨等间距布置，每一组件对应一个巡检点位（如单个机柜）。其核心为可弹性偏转的限位板，该板内部集成T型滑块、弧形导向杆及弹簧，共同构成缓冲与复位机构，可在受到外力时实现可控偏转并自主回位。限位板顶部嵌有第三磁铁本体，利用磁力吸附作用，在非工作状态下维持限位板处于竖直姿态，确保其具备稳定且一致的初始触发位置。

3.3 定位过程

该定位系统的工作流程始于机器人接触限位板，迫使活动板收回并触发双按钮信号，同步控制机器人急停与机械臂启动。随后活动板内移，通过磁吸锁合进入精确定位状态，机械臂执行作业。完成后，电动推杆主动解除磁力锁，各部件在磁力与重力作用下复位。系统融合机械结构与磁电控制，不依赖编码器或激光传感器，通过刚性接触与磁力锁合实现物理校准，具备抗干扰强、重复定位精度高、可靠耐用等优点，适用于工业巡检等高频次、高可靠性定位场景。

4 硬件系统设计

该系统由移动平台、六轴机械臂、巡检组件及主控制器协同构成。移动平台采用闭环环形铝合金轨道与伺服电机驱动机构，实现全域覆盖及平稳、低噪的变速运动，为基础巡检提供可靠移动能力。六轴协作机械臂具备高重复定位精度（ $\pm 0.1\text{ mm}$ ），用于执行最终对准微调，确保巡检定位准确性。巡检组件集成高分辨率工业相机、嵌入式AI处理单元、双频Wi-Fi通信模块与环形LED补光灯，实现图像采集、实时状态识别与稳定数据传输。主控制器基于ARM架构，负责整合多传感器信号、执行定位控制逻辑、协调驱动与机械臂操作，并管理电源及系统通信。通过各模块功能整合，该系统实现了自动化、高精度与全区域的智能巡检任务。消防巡检机器人硬件系统架构如图3所示。

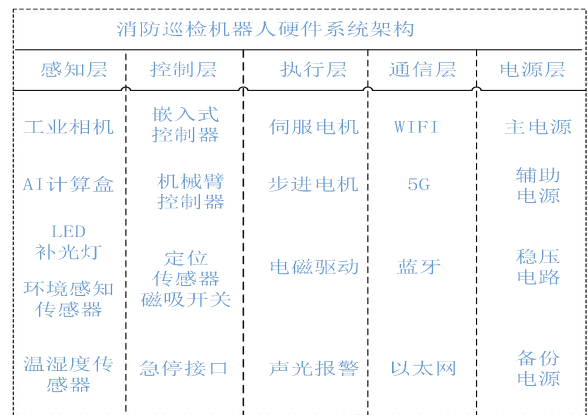


图3 消防巡检机器人硬件系统架构

5 软件与算法设计

论文所设计系统的软件与算法架构分为三层，协同实现自动化巡检与智能运维。系统控制软件部署于主控制器，采用模块化设计，核心包括任务调度、运动控制、定位逻辑及通信管理模块，负责自动化任务执行、设备驱动与精准定位连锁控制。视觉巡检算法运行于AI计算单元，其流程包括图像预处理、目标定位，并运用色彩分析、OCR及指针检测等技术，完成对仪表、指示灯的状态识别与故障诊断，异常结果将触发报警并记录。此外，系统搭建了基于Web的远程监控平台，可实时显示机器人位置、设备状态与报警信息，支持远程手动控制与任务管理，实现了数据的集中管理与交互式运维。

5.1 系统控制软件

系统控制软件部署于主控制器，采用模块化架构设计，以实现机器人各执行单元的协调与任务流程的自动化管理。该软件核心包含以下功能模块：任务调度模块负责日常定时巡检与紧急呼叫任务的队列管理与优先级排序；运动控制模块集成导轨速度规划、伺服电机伺服控制及六轴机械臂的轨迹规划算法，确保运动过程的平稳与精确；定位逻辑模块实时处理来自辅助传感器的信号，并执行“触发-停止-启动机械臂精细操作-

复位”的连锁控制逻辑；通信管理模块则负责主控制器与巡检组件 AI 计算单元、远程监控平台之间的稳定数据包交换与指令传输。

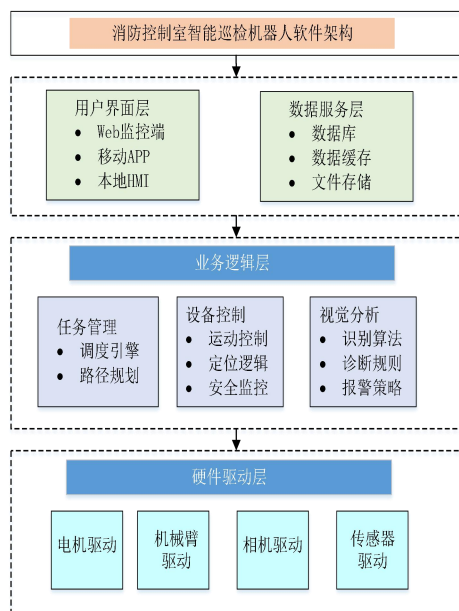


图4 消防巡检机器人软件架构

5.2 视觉巡检算法

视觉巡检算法运行于 AI 计算单元，构成系统智能感知核心。其流程包括：图像预处理后，通过模板匹配或深度学习定位待检设备区域；进而针对指示灯、仪表等目标，分别采用色彩分析、OCR 或指针检测技术进行状态识别。最终结果与知识库比对实现故障诊断，异常时生成报警事件并触发本地警示。

5.3 数据管理与远程交互

为便于集中监控与交互，系统配套构建了基于 Web 的远程

数据管理平台，可实时显示机器人的地理位置、运行状态、当前巡检计划与历史任务记录。平台核心功能在于提供设备状态的综合视图与异常报警列表，并能调阅报警瞬间的现场抓拍图像以供核查。此外，平台支持远程交互式操作，运维人员可通过其手动控制机器人移动、重新下达针对特定点位的巡检指令，从而实现了现场巡检作业的灵活干预与高效管理。

6 实验验证与结果分析

为验证所设计系统的综合性能，本研究在模拟消防控制室环境中搭建了原型系统并开展了一系列实验测试。首先，针对定位精度，在闭合轨道上均匀布设 10 个测试点位，控制机器人往返运行并重复停靠各点位 100 次，使用高精度激光跟踪仪测量机械臂末端工具中心点的位置。结果表明，其重复定位精度标准差小于 $\pm 0.3\text{ mm}$ ，完全满足对典型尺寸大于 5 mm 的指示灯进行可靠观测的精度要求，验证了辅助定位系统的有效性。其次，在视觉识别准确率测试中，模拟了 20 类常见消防设备面板状态（包括正常、故障及数值超限等），并在不同光照条件下采集图像进行测试，结果表面，系统对指示灯颜色状态的识别准确率达 99.8%。此外，系统连续无故障运行 720 小时（模拟每日 24 次全点位巡检），期间未出现定位失效、通信中断或误报警等重大故障，平均无故障时间符合设计预期。

7 结论与展望

本文设计并实现了一种面向消防控制室的轨道式智能巡检机器人系统。该系统通过创新的机械式辅助定位机制，解决了移动机器人长期运行下的精度保持难题，实现了巡检点位的高精度、高可靠性重复停靠。结合高效的视觉识别算法，能够自动化完成对消防设备状态指示的读取与故障判断，显著减轻了人工巡检负担，提升了消防设施监控的及时性与可靠性。

参考文献：

- [1] 黄博学.消防安全监督中物联网技术的应用概述[J].湖北应急管理,2025,(22):55-57.
- [2] 陈秉安.福建省智慧消防服务平台建设的实践与展望[J].消防科学与技术,2025,44(11):1684-1689+1713.
- [3] 张琳.物联网技术在消防监督智能化中的应用[J].大众标准化,2025,(21):155-157.
- [4] 郭靖.基于物联网的建筑智能化技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(01):76-78.
- [5] 熊智明.基于电力物联网的变电站环境监测自动化系统研发[D].华南理工大学,2022.
- [6] 茹清晨.基于物联网的火灾感知系统设计与实现[D].南京信息工程大学,2022.
- [7] 刘嘉兴.民宅消防设备数字化巡检系统的设计与实现[D].电子科技大学,2024.
- [8] 丁宏军.基于物联网技术的智慧消防建设[J].消防技术与产品信息,2017,(05):67-69.
- [9] 张辉,陈古典.基于物联网的城市消防远程监控系统[J].信息化研究,2010,36(10):55-58.
- [10] 陈能成,李丹丹,肖长江,等.基于物联网 GIS 的消防智能巡检系统设计与实现[J].地理信息世界,2016,23(04):71-75+80.
- [11] 汤华清.基于物联网技术的城市消防安全管理监测平台[J].消防科学与技术,2019,38(07):1031-1034.