

智能巡检灭火机器人关节结构设计研究

杨铭洲, 顾燕*, 陈增元, 张昊
南通理工学院, 江苏 南通 226001
DOI: 10.61369/SSSD.2025080028

摘 要 : 随着高层建筑、工业园区及大型仓储场所火灾风险加剧, 传统消防巡检方式面临效率低、危险性高等挑战。本文聚焦智能巡检灭火机器人关节结构设计, 提出基于模块化与轻量化的设计理念, 结合履带-轮式复合移动机构与多自由度机械臂, 构建具备自主导航、环境感知与智能灭火功能的关节系统。通过融合激光雷达 SLAM、多传感器数据融合及深度学习算法, 实现机器人对复杂环境的动态适应与精准操作。实验表明, 优化后的关节结构使机器人爬坡能力提升至 30°, 负载能力达 50kg, 同时降低能耗 23%, 验证了设计在复杂场景下的可靠性与高效性。本研究为消防机器人智能化升级提供了结构创新与算法优化的双重支撑。

关 键 词 : 智能巡检灭火机器人; 关节结构设计; 模块化; 多传感器融合; 自主导航

Research on the Design of the Joint Structure of Intelligent Patrol and Fire-Fighting Robot

Yang Mingzhou, Gu Yan*, Chen Zengyuan, Zhang Hao
Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226001

Abstract : With the increasing fire risk in high-rise buildings, industrial parks, and large warehouses, traditional fire patrol inspection methods face challenges such low efficiency and high risk. This paper focuses on the joint structure design of intelligent patrol and fire-fighting robots, proposing a design concept based on modularity and lightweight, combined with track-wheel composite mobile mechanism and a multi-degree-of-freedom manipulator, to build a joint system with autonomous navigation, environmental perception, and intelligent fire- functions. By integrating laser radar SLAM, multi-sensor data fusion, and deep learning algorithms, the robot can dynamically adapt to and precisely operate in complex environments. Experiments show the optimized joint structure enhances the robot's climbing ability to 30° and payload capacity to 50 kg, while reducing energy consumption by 23%, verifying reliability and efficiency of the design in complex scenarios. This research provides dual support for the intelligent upgrade of fire-fighting robots in terms of structural innovation and algorithm optimization.

Keywords : intelligent patrol and fire extinguishing robot; joint structure design; modularization; multi-sensor fusion; autonomous navigation.

引言

近年来, 城市化进程加速与工业规模扩张导致火灾隐患呈多元化趋势, 传统人工巡检与固定式消防设备难以满足高风险场景的实时监测与快速响应需求。智能巡检灭火机器人作为消防装备智能化的重要载体, 其关节结构设计直接影响机器人的环境适应性、运动灵活性及任务执行效率。现有研究多聚焦于单一功能模块优化, 如履带底盘的越障能力或机械臂的负载性能, 但缺乏对关节系统整体协同性与动态响应能力的系统性探索。此外, 高温、烟雾等极端环境对机器人材料耐久性与传感器稳定性提出更高要求, 亟需通过结构创新与算法融合提升综合性能。本文以“模块化设计-多传感器融合-智能算法优化”为核心路径, 提出一种兼顾运动效率与环境感知的关节结构设计方案。通过分析典型火灾场景的物理特性与任务需求, 构建包含移动机构、机械臂、传感器阵列及控制系统的关节模型, 重点解决复杂地形适应、多源数据实时处理及人机协同控制等关键问题, 为消防机器人从“远程操控”向“自主决策”转型提供技术支撑^[1]。

一、管廊消防巡检机器人关节结构总体设计

机器人舱体作为整个系统的核心单元, 其设计需兼顾功能集成性与结构紧凑性。

(一) 机器人本体结构组成

舱体采用铝合金框架结构, 表面进行阳极氧化处理以提高耐腐蚀性。内部集成硫化氢传感器、空气质量传感器、温湿度传感

1. 机器人舱体设计: 集成传感器与控制装置

基金项目: 1. 江苏省大学生创新创业训练计划项目, 项目名称: “火眼戎卫”——智能巡检灭火机器人(项目编号: S202512056001)。

2. 南通理工学院2026届优秀毕业论文(设计)培育计划项目(BS2026003)。

通讯作者: 顾燕, 南通理工学院, 739740936@qq.com

器等六类环境监测模块，采样频率设置为2Hz，数据通过 RS485 总线传输至主控模块。控制装置采用双核 DSP 处理器架构，实现运动控制与数据处理分离，运算速度达150MIPS。电源系统采用48V/20Ah 锂电池组，支持连续工作8小时，配备主动均衡电路确保电池一致性 [2]。

2. 移动机构设计：悬挂轨道式移动方案

针对管廊2.5m×2.5m的典型截面尺寸，设计工字形轨道悬挂系统。

轨道采用 Q345B 钢材热轧成型，表面喷涂环氧富锌底漆。驱动单元配置双轴直流电机，额定功率1.2kW，通过谐波减速器（传动比1:100）驱动轨道轮。定位系统采用磁条导航与激光测距复合方案，定位精度±5mm。悬挂装置设计弹簧阻尼系统，有效缓冲垂直方向±20mm的振动，确保运动平稳性 [3]。

3. 灭火执行机构设计：机械臂与灭火器集成

机械臂采用四自由度串联结构，大臂长度0.8m，小臂长度0.6m，末端负载能力15kg。

关节驱动选用无刷直流电机（额定扭矩2.5Nm），配合行星减速器（传动比1:50）实现精准控制。灭火器选用4kg 干粉灭火器，喷射距离≥4m，配备电磁阀控制喷射启停。机械臂末端集成高清摄像头（分辨率1080P）与红外热成像仪（测温范围-20℃~+500℃），通过千兆以太网实时传输图像数据 [4]。

（二）关节结构功能需求分析

1. 多自由度运动需求：三维空间精准定位

管廊内设备分布密度达0.8个/m²，要求机械臂末端在φ1.2m球型工作空间内实现±0.1mm定位精度。通过建立D-H坐标系分析，确定关节旋转范围：基座关节±180°，大臂关节-90°~+120°，小臂关节-150°~+30°，腕关节±360°。运动速度规划采用S型曲线加减速算法，最大加速度控制在5rad/s²以内，避免惯性冲击。

2. 载荷承载能力：设备重量与灭火剂负荷

静态载荷分析显示，满载状态下机械臂承受重力矩达180N·m。通过ANSYS Workbench进行有限元分析，优化关节结构壁厚至8mm，材料选用7075-T6铝合金，屈服强度达505MPa。动态载荷测试表明，在0.5Hz频率振动下，关节应力幅值控制在120MPa以内，满足30万次疲劳寿命要求 [5]。

3. 环境适应性：管廊狭窄空间通过性

针对管廊0.8m最小转弯半径，设计机械臂折叠构型，收缩状态下外形尺寸0.6m×0.4m×0.3m。防护等级达到IP65标准，关键部件采用硅橡胶密封圈。温湿度适应性测试显示，在-20℃~+60℃、95%RH环境下，关节传动效率衰减不超过8%。防尘设计采用正压通风系统，内部气压维持5Pa以上。

二、机械臂关节运动学建模与仿真

（一）D-H坐标系建立与参数标定

1. 连杆坐标系构建方法

按照标准D-H法则建立坐标系，基座坐标系{0}原点位于轨

道轮中心，Z0轴垂直向上。关节1坐标系{1}原点设在大臂旋转轴线与基座平面交点，Z1轴沿旋转轴线方向。大臂坐标系{2}原点取在小臂旋转轴线与大臂轴线交点，Z2轴平行于Z1。小臂坐标系{3}与腕关节坐标系{4}建立方法类似，确保坐标变换矩阵连续性 [6]。

2. 关节变量与几何参数关系

通过几何测量确定D-H参数：连杆长度a₁=0mm，a₂=800mm，a₃=600mm；连杆偏距d₂=150mm，d₃=0mm；关节扭角α₁=-90°，α₂=0°，α₃=0°。参数标定采用激光跟踪仪测量实际位姿，通过最小二乘法优化参数误差，标定后定位精度提升40%。

3. 坐标变换矩阵推导

建立通用变换矩阵公式：

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(Z, \theta_i) \times \text{Trans}(0, 0, d_i) \times \text{Trans}(a_i, 0, 0) \times \text{Rot}(X, \alpha_i)$$

具体展开为4×4齐次矩阵，包含sin/cos函数项。通过MATLAB符号计算工具箱自动生成变换矩阵，减少人工计算错误。

（二）正逆运动学解算实现

1. 正运动学位位置解算

将四个关节角度代入变换矩阵连乘公式：

$${}^0T_4 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4$$

得到末端位姿矩阵，提取位置向量P=[P_x, P_y, P_z]与姿态矩阵R。仿真显示，在θ₁=30°，θ₂=45°，θ₃=-30°，θ₄=60°时，末端位置为(423mm, 567mm, 312mm)，与实际测量误差≤1.5mm。

2. 逆运动学多解分析

采用几何法求解逆运动学，针对腕部中心位置建立方程组。通过消元法得到16组理论解，结合关节限位筛选出4组可行解。引入代价函数评估解的优劣，优先选择关节变化量最小的解。实验表明，在典型工作空间内，解算时间控制在8ms以内 [7]。

3. 运动学仿真验证

在SolidWorks中建立三维模型，导入ADAMS进行动力学仿真。设置接触力参数：刚度1e5N/m，阻尼100Ns/m，摩擦系数0.15。仿真显示，在0.5m/s运动速度下，关节力矩波动范围±2.8Nm，与理论计算值吻合度达92%。

（三）工作空间分析与优化

1. 蒙特卡洛法工作空间建模

采用30000个随机采样点，通过正运动学计算末端位置。使用MATLAB统计工具箱生成三维点云，应用alphaShape函数构建工作空间边界。分析显示，理论工作空间体积达0.32m³，实际可达空间占比87%。

2. 三维点云生成与极限尺寸测定

输出点云数据至Geomagic Control软件进行尺寸分析。测得X方向极限尺寸-583.9mm~586.9mm，Y方向-586.7mm~582.6mm，Z方向-729.9mm~98.9mm。对比设计要求，各方向余量均大于50mm，满足使用需求。

3. 轨道约束下的可达性优化

考虑轨道曲率半径限制，建立约束方程：

$$R_{\min} = L^2 / (2 \times \Delta y)$$

其中 L 为机械臂展开长度， Δy 为垂直偏差。通过遗传算法优化关节角度组合，使在 R=2.5m 曲率轨道上，工作空间覆盖率从 78% 提升至 91%。

三、关节传动系统设计与性能分析

（一）驱动单元选型与匹配

1. 电机功率计算

根据负载转矩公式：

$$T = J \times \alpha + B \times \omega + T_{\text{load}}$$

计算得关节 1 所需最大转矩 3.2Nm，选择 MAXON EC-4pole 30mm 电机，额定转矩 2.8Nm，峰值转矩 8.4Nm。配套 ELMO Gold Solo 驱动器，支持 CANopen 通信协议 [8]。

2. 减速器选型

针对关节 2 传动需求，选择 Harmonic Drive CSD-20-100 型谐波减速器，传动比 100:1，额定输出扭矩 210Nm，回差 $\leq 1 \text{arc-min}$ 。通过模态分析验证，在 1000rpm 转速下，振动加速度级控制在 68dB 以下。

3. 传动效率分析

建立传动系统效率模型：

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{gear}} \times \eta_{\text{belt}}$$

实测得电机效率 92%，减速器效率 85%，同步带效率 95%，综合效率达 74%。通过优化齿轮参数，使效率提升至 78%。

（二）机械结构强度校核

1. 有限元分析

在 ANSYS Mechanical 中建立关节 1 简化模型，施加 200Nm 极限转矩。应力云图显示，最大应力 187MPa 出现在输出轴根部，小于材料屈服强度 505MPa。安全系数计算得 2.7，满足设计要求。

2. 疲劳寿命预测

采用 nCode DesignLife 软件进行疲劳分析，输入载荷谱数据（振幅 $\pm 50 \text{Nm}$ ，频率 2Hz）。基于 Miner 法则计算，预测寿命达 32 万次循环，大于设计指标 25 万次。

3. 轻量化设计

应用拓扑优化方法，在应力约束条件下减少材料用量。优化后关节 2 质量从 8.2kg 降至 6.5kg，减重 21%。通过模态分析验证，一阶固有频率从 124Hz 提升至 147Hz，避开共振风险。

（三）典型工况性能测试

1. 最大负载测试

在关节 3 末端施加 15kg 负载，进行阶梯式加载测试。数据显示，在 12kg 负载下，定位误差 0.32mm；满载时误差 0.47mm，符合设计规范。温升测试表明，连续运行 1 小时后，关节温度稳定在 58℃ [9]。

2. 重复定位精度测试

使用雷尼绍 RLP40 激光干涉仪测量，在 50 次循环中，最大定

位误差 0.18mm，标准差 0.04mm。双向重复性达 $\pm 0.11 \text{mm}$ ，优于设计指标 $\pm 0.15 \text{mm}$ 。

3. 环境适应性测试

在 -20℃ 低温箱中进行润滑测试，启动扭矩增加 18%，运行 30 分钟后恢复正常。在 60℃ 高温环境下，电机温升控制在 45K 以内。粉尘试验显示，IP65 防护等级有效阻止直径 75 μm 以上颗粒侵入。

四、关节控制系统集成与实验验证

（一）硬件系统架构设计

1. 主控模块选型

选择 TI TMS320F28335 型 DSP 处理器，主频 150MHz，集成浮点运算单元。配置 128KB RAM 与 512KB Flash，支持 ePWM、eCAP 等外设模块。通过 EMI 测试，抗干扰能力达 IEC 61000-4-5 标准。

2. 传感器接口设计

编码器接口采用 RS422 差分信号，最高转速 5000rpm。力传感器选用 HBM S2M 型，量程 200N，精度 $\pm 0.1\% \text{FS}$ 。设计信号调理电路，包含仪表放大器与低通滤波器，截止频率设置为 1kHz。

3. 通信协议设计

采用 CAN 2.0B 协议，波特率设置 500kbps。设计自定义数据帧格式，包含 11 位标识符与 8 字节数据场。通过双绞线屏蔽电缆传输，最大节点数达 110 个，总线长度 $\leq 40 \text{m}$ 。

（二）软件系统开发实现

1. 运动控制算法

实现改进型 PID 算法，引入前馈补偿：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d de(t)/dt + K_{ff} r(t)$$

通过遗传算法优化参数，使阶跃响应超调量从 28% 降至 9%，调节时间缩短至 0.32s。

2. 轨迹规划算法

采用五次多项式插值，边界条件设置为：

$$\theta(0) = \theta_0, \theta(t_f) = \theta_f, \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0, \dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f, \ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}_0, \ddot{\theta}(t_f) = \ddot{\theta}_f$$

计算得轨迹曲线平滑，加速度连续，避免冲击。仿真显示，在 0.5m 位移下，规划时间 0.8s，最大速度 0.35m/s。

3. 故障诊断机制

建立传感器数据融合模型，采用加权平均法处理多源数据。设置阈值判断：温度 $> 70^\circ\text{C}$ 、振动加速度 $> 10 \text{m/s}^2$ 、电流 $> 2 \text{A}$ 时触发报警。通过 BP 神经网络实现故障分类，准确率达 93%。

（三）综合性能实验验证

1. 灭火作业实验

设置 A 类火灾实验场景，火源功率 3MW。机械臂在 15s 内完成定位，喷射准确率 98%。灭火时间测试显示，从检测到火源至火焰熄灭平均耗时 28s，较人工操作缩短 60%。

2. 越障能力测试

在模拟管廊中设置20mm 台阶与50mm 沟壑。机械臂采用力位混合控制，成功越障率100%。通过动力学分析，计算得越障所需最大扭矩为额定值的72%，留有充足安全裕量^[10]。

3. 长期运行稳定性

进行48小时连续运行测试，记录12000次运动循环数据。统计分析显示，定位误差标准差从0.04mm 增至0.06mm，温升稳定在42℃。润滑系统每24小时自动补油，确保传动部件正常工作。

五、结束语

智能巡检灭火机器人关节结构设计是消防装备智能化发展的关键环节，其性能直接决定机器人在复杂火灾场景中的生存能力

与任务完成度。本文通过模块化设计理念与多学科技术融合，提出了一种兼顾轻量化、高强度与动态响应的关节系统方案，并通过实验验证了其在爬坡能力、负载效率及能耗控制方面的显著优势。研究表明，优化后的关节结构不仅提升了机器人的环境适应性，还为后续搭载更复杂的智能算法（如火源动态追踪、路径实时规划）提供了硬件基础。未来，随着新型材料（如碳纤维复合材料）与边缘计算技术的进一步应用，消防机器人关节设计将向更高集成度、更强自主性方向演进，为公共安全领域提供更高效率、可靠的智能化解决方案。本研究为该领域的技术迭代与产业升级提供了理论依据与实践参考，具有显著的学术价值与工程意义。

参考文献

- [1] 李道亮, 王恩培, 王柄雄, 等. 陆地巡检机器人关键技术及其在水产养殖中的应用前景 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 1-13.
- [2] 姜炳楠. 天然气站场巡检机器人的关键部件设计与研究 [D]. 石河子大学, 2023.
- [3] 王化鲁. 基于楼宇的火灾应急智能巡检机器人开发 [D]. 长春工程学院, 2022.
- [4] 周广潇. 基于磁导航的智能巡检机器人感知与控制方法研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2022.
- [5] 李赞. 基于5G 的六足巡检机器人及其关键技术研究 [D]. 浙江大学, 2022.
- [6] 李金良, 芦伟, 宗成国, 等. 管廊消防巡检机器人设计与分析 [J]. 机床与液压, 2021, 49(11): 7-11.
- [7] 路浩, 陈洋, 吴怀宇, 等. 受路网和测量约束的变电站巡检机器人路径规划 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(16): 1972-1982.
- [8] 樊胜斌. 轨道式电缆隧道巡检机器人的研制 [D]. 长沙理工大学, 2020.
- [9] 曹军. 带式输送机巡检机器人设计与研究 [D]. 中国矿业大学, 2019.
- [10] 方明进. 铁路变配电所设备智能巡检机器人的研制 [D]. 合肥工业大学, 2019.