

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0104-05

复杂地下环境中挂轨式智能灭火机器人喷头射流轨迹研究

邹新

(江苏地下空间智慧运维工程技术研究开发中心,金肯职业技术学院,江苏南京211156)

摘要:在复杂地下环境中,由于空间狭小、通风条件差、障碍物众多以及烟雾弥漫等不利因素,喷头射流轨迹的设定若不合理,将导致灭火介质无法准确覆盖火源,从而严重影响灭火效率与安全性。为此,提出复杂地下环境中挂轨式智能灭火机器人喷头射流轨迹研究。基于所设计的智能灭火机器人喷头结构,综合考虑空气阻力、重力、风力等多因素影响,构建了射流轨迹的三维运动微分方程;采用数值分析方法——龙格库塔法对该非线性微分方程组进行求解,以实现射流轨迹的精确预测,从而辅助灭火机器人智能、精准地定位火源位置。实验结果表明,在 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 俯仰角范围内,射流轨迹近似直线;当俯仰角增大至 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,轨迹受重力与阻力影响显著,转变为明显的抛物线形态。同时,随着风速从 1 m/s 增加至 15 m/s ,射流轨迹由基本直线状态逐渐发生显著横向漂移,弯曲程度加剧。为挂轨式智能灭火机器人的喷头控制与轨迹规划提供了理论依据与方法支持,有助于实现高效、智能的灭火目标。

关键词:复杂地下环境;挂轨式智能灭火机器人;喷头设计;龙格库塔法;射流轨迹分析方法;受力分析

中图分类号: TP18;TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0104-05

Research on jet trajectory of rail-mounted intelligent fire-fighting robot nozzle in complex underground environment

ZOU Xin

(Jiangsu Underground Space Intelligent Operation and Maintenance Engineering Technology Research and Development Center, Jin Ken College of Technology, Nanjing 211156, Jiangsu, China)

Abstract: In complex underground environments, due to factors such as limited space, poor ventilation, numerous obstacles, and smoke diffusion, if the nozzle jet trajectory is not set reasonably, it will result in the inability of the extinguishing medium to accurately cover the fire source, thereby seriously affecting the efficiency and safety of fire extinguishing. Therefore, a study is proposed on the jet trajectory of a rail mounted intelligent fire extinguishing robot nozzle in complex underground environments. Based on the designed structure of the intelligent fire extinguishing robot nozzle, taking into account multiple factors such as air resistance, gravity, and wind force, a three-dimensional motion differential equation for the jet trajectory is constructed; The numerical analysis method—Runge Kutta method is used to solve the nonlinear differential equation system, in order to achieve accurate prediction of the jet trajectory and assist the fire extinguishing robot in intelligently and accurately locating the fire source position. The experimental results show that the jet trajectory is approximately straight within the pitch angle range of $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$; When the pitch angle increases to $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$, the trajectory is significantly affected by gravity and resistance, transforming into a distinct parabolic shape. Meanwhile, as the wind speed increases from 1 m/s to 15 m/s , the jet trajectory gradually undergoes significant lateral drift from a basic linear state, and the degree of curvature intensifies. This study provides theoretical basis and methodological support for the nozzle control and trajectory planning of rail mounted intelligent fire extinguishing robots, which helps to achieve efficient and intelligent fire extinguishing goals.

Keywords: complex underground environment; rail mounted intelligent fire extinguishing robot; spray nozzle design; Runge Kutta method; jet trajectory analysis method; force analysis

地下环境一旦发生火灾,由于封闭性强、烟雾弥漫、结构复杂等特点,灭火工作将变得极为困难,严重威胁人们的生命财产安全^[1-3]。研发一种能够在复杂地下环境中高效、智能地进行灭火的设备,成为了当前消防安全领域的重要课题。挂轨式智能灭火机器人作为一种新型的消防装备,因其能够在地下轨道上自由移动、具备自主导航和智能决策能力,成为了解决复杂地下环境灭火问题的有力工具^[4-5]。然而,要使挂轨式智能灭火机器人真正发挥

其在地下灭火中的优势,射流轨迹的研究显得尤为重要。

在上述背景下,很多专家和学者都进行了相关研究。例如,王波等提出的挂轨式巡检机器人的智能解决方案。通过引入图像识别、红外成像及深度学习技术,能够实现全天候、不间断巡检,并显著提高故障预警的准确性和及时性^[6]。但射流轨迹的预测结果与实际情况存在较大的偏差。刘征等针对火灾的预防和处理问题,设计了一款能自动寻找火源并灭火和现场环境探测的智能移动机

收稿日期:2024-06-27;录用日期:2024-09-11

基金项目:江苏地下空间智慧运维工程技术研究开发中心项目(jsdxkjzh-2023-21)

作者简介:邹新(1981—),女,硕士,副教授,研究方向:机械设计,电气控制。

引用本文:邹新.复杂地下环境中挂轨式智能灭火机器人喷头射流轨迹研究[J].自动化技术与应用,2026,45(2):104-108(ZOU Xin. Research on jet trajectory of rail-mounted intelligent fire-fighting robot nozzle in complex underground environment[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(2):104-108)

机器人。利用超声波传感器感知周围环境并进行避障,通过火焰传感器配合PID算法实现火源的精确定位和灭火,利用摄像头完成对现场信息的采集,并搭配专用遥控器实现对机器人的控制和环境探测^[7]。但模型与实际情况存在一定的差异,影响结果的准确性。刘盛鹏针对火场智能化侦察需求,提出了一种基于智能视频技术的陆空两栖侦察系统设计方案。提出了基于深度学习的智能视频火场探测技术,实时探测火场火源信息。该系统可应对复杂火场环境,开展火场实时智能侦察,具有良好消防实战效果^[8]。该方法虽然具有较高的准确性,但其适用范围可能受到一定限制。例如,在某些极端或复杂的环境下,该方法的预测效果可能受到影响。Ayoub Farkane等利用Navier-Stokes方程进行射流轨迹研究,通过Navier-Stokes方程,可以建立流体流动的数学模型,描述流体在特定条件下的流动特性,在已建立的流体流动模型中,通过求解Navier-Stokes方程,得到流体在不同位置和时间点的速度和压力分布,通过追踪流体质点的运动轨迹,可以得到射流的轨迹^[9]。Navier-Stokes方程中包含了多个参数,如黏性、密度、速度和压力等。这些参数对模拟结果具有重要影响,且可能相互关联。因此,在模拟过程中需要仔细选择和调整这些参数。

由于地下环境的特殊性,如空间狭小、结构复杂、烟雾弥漫等,对挂轨式智能灭火机器人的喷头设计及射流轨迹提出了更高的要求。因此,研究旨在探讨复杂地下环境中挂轨式智能灭火机器人的喷头射流轨迹。通过本研究以期对挂轨式智能灭火机器人的应用和发展提供有力支持。

1 挂轨式智能灭火机器人喷头

挂轨式智能灭火机器人被设计用于提高消防救援人员对交通隧道、煤矿等空间的灭火效率。喷头作为机器人灭火的关键部分,其设计直接影响灭火效果和机器人的整体性能^[10]。喷头主要由基座结构、旋转减速机机构、灭火剂存储机构、传感器机构、喷嘴机构设计。该喷头机构应具备结构紧凑、操作灵活、可靠性高等特点,能够适应地下环境的复杂多变。

1.1 基座机构设计

灭火机器人喷头基座机构设计的主要目标是确保喷头能够稳定、精确地安装在机器人上,并能有效传递灭火剂^[11]。基座选用铝合金材料,通过法兰盘连接喷头基座和行走机构上的连接板,连接中确保连接孔对齐,使用螺栓或其他紧固件进行紧固,从而实现喷头与行走机构的稳固一体化。

1.2 灭火剂存储机构设计

为了满足灭火剂在存储过程中不会泄漏、变质,保证其在需要时能够正常供应,选择容量为70L的钢瓶作为灭火剂的存储容器^[12]。在钢瓶的出口处安装了高性能的电磁阀,能够在接收到指令后迅速开启或关闭,从而精确控制灭火剂的喷射。在钢瓶的瓶身上设计悬挂支架,采用

高强度、耐腐蚀的材料制成^[13]。通过将钢瓶悬挂在行走机构的下方,利用重力作用使行走机构的行走轮与导轨紧密贴合,从而起到紧固连接的作用。此外,考虑到隧道内部的空间限制和通行需求,将灭火机器人安装在隧道两侧的通行台阶上方。同时,将钢瓶的底部距离地面设定为约2.9米的高度,确保留有足够的空间供行驶车辆和过往人员正常通行。在钢瓶的周围,还设置了醒目的安全警示标识,以提醒人们注意避让和保持安全距离。

1.3 喷嘴机构设计

喷嘴机构是灭火机器人喷头设计中的关键组成部分,其设计直接影响到灭火剂的喷射效果。在复杂地下环境中,喷嘴机构需要确保灭火剂能够均匀、有效地覆盖火源,达到快速灭火的目的。在喷嘴机构的设计中,主要零件包括四个。其中,喷嘴轴负责支撑和定位其他零件;喷嘴杆通常与喷嘴轴相连,用于传递动力或调整喷嘴的位置^[14];喷嘴头的主要功能是将灭火剂(如水、化学溶液、燃料等)以一定的速度和方向喷射出去;喷嘴延长杆用于增加喷嘴的长度,以适应特定的安装环境或满足特定的喷雾需求^[15]。

1.4 旋转减速机与传感器机构设计

旋转减速机构主要由水平步进电机、垂直步进电机、水平传动机构和垂直传动机构四部分组成^[16-17]。减速比是指减速机构中瞬时输入速度与输出速度的比值。下述公式为两种旋转减速机构的减速比计算方法。

$$\begin{cases} I_H = \frac{A}{a} \\ I_V = \frac{B}{b} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_H 、 I_V 代表水平、垂直旋转减速机构的减速比; A 、 B 代表57系列水平、垂直步进电机的转速; a 、 b 代表喷头水平、垂直旋转速度。

传感器机构主要负责火灾的检测与定位,选择红外热像仪为传感器^[18]。红外热像仪通过接收和分析目标物体的红外辐射^[19],能够迅速感知到火源的存在。传感器机构工作流程如下:

步骤1 获取当前帧红外热像图和最高温度 C 和坐标 (x_c, y_c) 。按照下述公式进行火灾判断,即

$$(x_c, y_c) = \begin{cases} \text{发生火灾, } C > \bar{C} \\ \text{未发生火灾, } C \leq \bar{C} \end{cases} \quad (2)$$

式中, \bar{C} 代表温度阈值。

步骤2 判断发生火灾后,利用最大类间方差法进行图像分割,得到高温区域。并提取高温区域等效椭圆特征向量。

$$\begin{cases} F_1 = \sqrt{(f_{2,0} - f_{0,2})^2 + f_{1,1}^2} \\ F_2 = \sqrt{(f_{2,0} - f_{0,2})^2 + f_{1,1}^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$G = -\frac{\arctan \frac{2f_{1,1}}{f_{0,2} - f_{2,0}}}{2} \quad (4)$$

式中, F_1, F_2 代表等效椭圆的长半轴和短半轴向量; G 代表长半轴与 x 轴的夹角向量; $f_{i,j}$ 代表 (i, j) 阶几何矩。

步骤 3 将特征向量经归一化 $\{\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \tilde{G}\}$ 后送入训练好的支持向量机(SVM)模型中,进行火灾识别。SVM模型如下:

$$Y(s) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \psi(s_i, s) + \beta \right\} \quad (5)$$

式中, α_i 代表与第 i 个样本相对应的拉格朗日乘子; s_i 代表第 i 个训练样本的特征向量; $\psi(s_i, s)$ 代表核函数; β 代表超平面的截距; s 代表输入的特征向量, 记为 $s = \{\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \tilde{G}\}$; y_i 代表 s_i 的类别标签; 则 $Y(s) = +1$, 表示发生火灾; $Y(s) = -1$, 表示未发生火灾。

通过火灾识别结果,就可以确定灭火位置。当发现火灾点之后,启动喷头机构,喷头先进行水平方向旋转再进行垂直方向的旋转,利用扫描定位法通过安装在喷头上的传感器机构确定火源中心位置后喷射灭火剂灭火^[20]。

2 射流轨迹研究

射流轨迹是指灭火介质从喷头喷出后,在空中形成的流动路径。在复杂地下环境中,射流轨迹受到多种因素的影响,如喷头的设计、喷射压力、火源位置、风速风向等。这些因素的相互作用使得射流轨迹变得复杂多变,难以预测和控制^[21-22]。因此,深入研究挂轨式智能灭火机器人在复杂地下环境中的射流轨迹,对于提高灭火效率和安全性具有重要意义。射流轨迹研究分为两部分,即射流轨迹微分方程、微分方程求解。

2.1 射流轨迹微分方程

为了构建射流轨迹的微分方程,需要考虑射流在空气中的运动,这通常是一个二维的抛体运动问题。假设射流从原点出发,以初速度和与水平面成角的初始方向射出。接下来,根据牛顿第二定律,出射流在 Y, X 轴方向上的运动方程受力分析为如图 1。

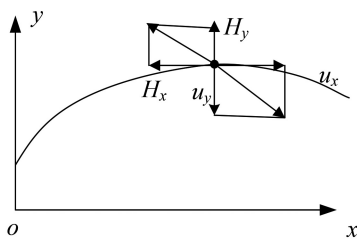


图 1 灭火介质的受力分析

Fig. 1 Force analysis of fire extinguishing medium

根据牛顿第二定律,得

$$\begin{cases} -H_y = \lambda a_y \\ -H_x = \lambda a_x \\ a_y = \frac{du_y}{dt} \\ a_x = \frac{du_x}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_y = \frac{dY}{dt} \\ u_x = \frac{dX}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ 代表灭火介质的质量; H_1 代表灭火介质受到的空气阻力; H_y, H_x 代表风沿 y 轴、 x 轴的分力; u_y, u_x 代表灭火介质在 y 轴、 x 轴的运动速度。 Y, X 分别表示灭火介质沿 y 轴、 x 轴方向运动的位移。

$$\begin{cases} \frac{\lambda}{dt} \times du_y = H_y - H_1 \\ \frac{1}{dt} \times dy = u_y \\ \frac{\lambda}{dt} \times du_{xz} = \frac{-H_1 \sin \varphi - H_x}{\lambda} \\ \frac{\lambda}{dt} \times du_{xz} = \frac{h - H_1 \cos \varphi - H_z}{\lambda} \\ \frac{1}{dt} \times dx = u_{xz} \sin \varphi \\ \frac{1}{dt} \times dz = u_{xz} \cos \varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中, u_{xz} 代表灭火介质水平面内的运动速度; h 代表灭火介质所受重力; φ 代表灭火介质的运动方向与 z 轴负向的夹角。

将式(6)、(7)进行化简,得到灭火介质在三维空间中的运动方程组,即

$$\begin{cases} H_x + H_y + H_z = H_w (\cos J + \sin J + \sin \theta) \\ \frac{du_x}{dt} = - \frac{H_1 - H_x \sin \varphi + (h - H_z) \cos \varphi}{\lambda} \\ \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{H_x \cos \varphi - (h - H_z) \sin \varphi}{\lambda u_{xz}} \\ \frac{du_y}{dt} = \frac{H_y - H_2}{\lambda} \\ \frac{dx}{dt} + \frac{dz}{dt} + \frac{dy}{dt} = u_{xz} (\sin \varphi + \cos \varphi) + u_y \sin \varphi \cos \varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中, θ 代表风力与 $o-xy$ 面的夹角; J 代表风力与 $o-xz$ 面的夹角; H_w 代表风的阻力大小。

y 轴、 x 轴、 z 轴方向上阻力大小为

$$\begin{aligned} H_x &= H_w \cos \varphi \times \cos J \\ H_y &= H_w \cos \varphi \times \sin J \\ H_z &= H_w \sin \varphi \end{aligned} \quad (9)$$

灭火介质在三维空间中的运动方程组充分描述了射流轨迹问题,为研究奠定了基础。

2.2 求解射流轨迹

龙格库塔法(Runge-Kutta methods)在求解射流轨迹模型时,是一种常用的数值计算方法,特别适用于处理非线性常微分方程。在气动力学、水射流等领域,射流轨迹的计算通常涉及复杂的微分方程组,龙格库塔法提供了一种

高效且准确的方式来逼近这些微分方程的解。以下是使用龙格库塔法求解射流轨迹模型的基本步骤。

步骤 1 确定初始条件,包括射流的初始速度、初始角度、初始位置等。这些条件将作为龙格库塔算法的输入参数。

步骤 2 设定时间步长 Δt , 用于控制迭代的精度。

步骤 3 构建射流轨迹微分方程, 见式(8)。

步骤 4 令 $t = 0$, 龙格库塔法通过迭代计算来逼近微分方程的解。在每个时间步长内, 算法会计算一系列的斜率。

$$p_1 = \xi \left(\frac{x_i}{2}, \frac{y_i}{2} \right) \tag{10}$$

$$p_2 = \xi \left(\frac{2x_i + \Delta t}{2}, \frac{2y_i + \Delta t k_1}{2} \right) \tag{11}$$

$$p_3 = \xi \left(\frac{2x_i + \Delta t}{2}, \frac{2y_i + \Delta t k_2}{2} \right) \tag{12}$$

$$p_4 = \xi \left(\frac{2x_i + \Delta t}{2}, \frac{2y_i + \Delta t k_3}{2} \right) \tag{13}$$

式中, x_i 代表当前区间的起点; y_i 代表当前区间起点对应坐标; p_1, p_2, p_3, p_4 代表时间段开始、中间点、另一中间点、终点的斜率。

步骤 5 根据这些斜率估算出下一个时间点的射流位置。

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + \Delta t \\ y_{i+1} = y_i + \frac{\Delta t(p_1 + p_2 + p_3 + p_4)}{3} \end{cases} \tag{14}$$

步骤 6 判断 t 是否超过终止时间? 若是, 则停止迭代; 否则回到步骤 4, 继续下一个时间步的迭代。

步骤 7 输出每个时间步的解, 得到射流轨迹上每个点。经过上述过程, 将所有点连接到一起, 得到射流轨迹。

3 实例测试

3.1 实验对象

基于章节 1 研究, 设计出来的挂轨式智能灭火机器人喷头实物如图 2 所示。



图 2 挂轨式智能灭火机器人喷头实物图

Fig. 2 Physical picture of the nozzle of the rail mounted intelligent fire extinguishing robot

DFFF 将图 2 中设置的挂轨式智能灭火机器人喷头用于地下交通隧道, 其喷头安装高度设置 4.8 m, 工作压力设置为 0.4 MPa, 灭火介质为水。挂轨式智能灭火机器人

喷头可以实时监测隧道内的火灾情况, 一旦发现火源, 立即启动灭火程序, 迅速喷射灭火剂。

3.2 复杂地下环境工况设置

地下交通隧道作为一种特殊的地下环境, 具有独特的空间结构和火灾特点, 因此要求灭火设备具备高效、快速、准确的灭火能力。针对地下交通隧道, 设置复杂地下环境工况, 如表 1 所示。

表 1 复杂地下环境工况

参数名称	参数设置
隧道高度	4.5 m
风力	微风至强风
风量	1 000 m ³ /h
风向	东北风
风速	5 m/s
压力	100 kPa (大气压)
风速	1 m/s、5 m/s、10 m/s
湿度	45 %
温度	34.05 °C

面对复杂地下环境工况, 灭火机器人喷头设计要求较高, 因为会对射流轨迹产生显著影响。

3.3 射流轨迹分析结果

1) 不同俯仰角度下的射流轨迹

设置喷头俯仰角 20°、50°、70°、90°, 得到的射流轨迹如图 3 所示。

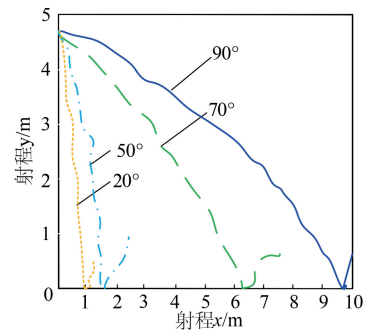


图 3 不同俯仰角度下的射流轨迹

Fig. 3 Jet trajectory at different pitch angles

在 20°~50° 俯仰角范围内, 射流的轨迹基本呈现直线状态。这是因为在这个角度范围内, 重力和空气阻力对射流的影响相对较小。在 70°~90° 俯仰角范围内, 由于射流的方向接近垂直地面, 重力和空气阻力的影响变得尤为显著, 导致射流在飞行过程中逐渐偏离其初始的直线轨迹, 形成一个类似抛物线的曲线状态。

2) 不同风速下的射流轨迹

设置风速为 1 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s 三种工况, 得到的射流轨迹如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 在低风速条件(1 m/s)下, 射流轨迹受风速影响较小, 基本保持直线或微弯状态。中等风速条件(5 m/s)下, 射流轨迹开始受到风速的明显影响, 出

现一定程度的偏移或弯曲。高风速条件(10 m/s、15 m/s)下,射流轨迹受到风速的强烈影响,出现显著的横向漂移,且风速越高,横向漂移距离增加量越明显。

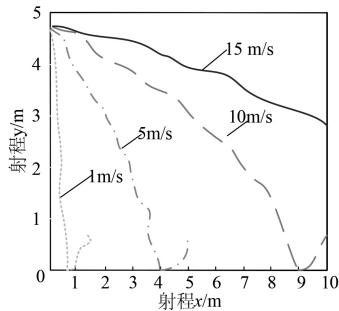


图4 不同风速下的射流轨迹

Fig. 4 Jet trajectory at different wind speeds

4 结论

针对地下空间狭窄、曲折、环境多变的特性,本文对挂轨式智能灭火机器人喷嘴射流轨迹设置进行了研究。通过研究深刻认识到数据的重要性、模型融合的优势,高质量、全面的数据是模型准确预测的基础;而卷积神经网络和长短期记忆网络的结合则实现了特征提取与时间序列处理能力的互补,提升了模型性能。通过多次实验和验证,确定了最优参数配置,确保了模型的稳定性和可靠性。然而,在实际应用中还需考虑数据实时性、系统稳定性、计算资源等因素,这些都需要在未来的研究中进一步深入探索和改进。今后也会更多地考虑环境因素,如湿度、温度变化等对射流轨迹的影响;通过探索更先进的控制算法,提高灭火效率,实现喷头更精准的目标定位和火源跟踪。

参考文献

- [1] 陈朝大, 莫丰荣, 李建基, 等. 轮式移动灭火机器人底盘机械系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2024(2):82-84.
- [2] 宁赵玉, 袁狄平, 张国维, 等. 风流增强作用对城市地下物流通道液氮灭火效能提升研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(9):1328-1334.
- [3] 李彬, 宁赵玉, 张志伟, 等. 城市地下综合管廊电缆火灾低压细水雾灭火效能研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(6):787-791.
- [4] 王秋冬, 雷美荣, 张艳军, 等. 井下皮带带防灭火机器人的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(5):60-63.
- [5] 刘文博, 李红双, 宋肱宇. 7自由度双云台消防灭火机器人设计与研究[J]. 机械设计, 2025, 42(S1):26-32.
- [6] 王波, 曹永峰. 输煤栈桥挂轨式巡检机器人智能识别与应用研究[J]. 当代化工研究, 2024(20):125-127.
- [7] 刘征, 鞠艳杰, 钟国涛, 等. 基于STM32的探灭一体化智能灭火机器人设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(1):207-211.
- [8] 刘盛鹏. 基于智能视频技术的陆空两栖消防侦察系统设计[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(8):132-134.
- [9] Ayoub Farkane, Mounir Ghogho, Mustapha Oudani, et al. Enhancing physics informed neural networks for solving Navier-Stokes equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2024, 96(4):381-396.
- [10] 李楠, 苏航, 张安莉, 等. 基于OneNET云平台的智慧消防远程监控系统的设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32(9):56-60, 65.
- [11] 周迎, 陆强明. 人工智能技术在消防装备中的应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(8):110-111.
- [12] 郭哲锋, 张慧贤, 马利民, 等. 履带式消防机器人底盘耐热性能的研究[J]. 消防科学与技术, 2025, 44(1):97-102.
- [13] 戴慎超, 顾保虎, 孙景富, 等. 未知环境下的消防机器人智能灭火技术[J]. 兵工自动化, 2023, 42(1):86-91, 96.
- [14] 刘智超, 李昕龙, 姜禹含, 等. 基于可视探测感知的风电场全自动灭火系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2):119-122, 149.
- [15] 李夏, 崔竟成. 煤矿井下外因火灾智能防控系统设计[J]. 工矿自动化, 2024, 50(S1):100-103.
- [16] 杜传胜, 高煥兵, 侯宇翔, 等. 基于改进双向A算法的消防机器人路径规划[J]. 计算机与现代化, 2023(4):15-19, 25.
- [17] 叶光伟, 刘海哲, 李长武. 光伏发电智能清洁机器人设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):95-99.
- [18] 李长武, 高菁, 周晓宇, 等. 多传感器融合在智能铺贴机器人路径优化中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(10):90-93.
- [19] 丁林祥, 陶卫军, 黄潇. 一种基于ROS的分布式安防巡逻机器人系统[J]. 兵工自动化, 2024, 43(6):87-90.
- [20] 李葳挺. 变电站巡检机器人越障视觉伺服路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):10-14.
- [21] 田建林, 陈晓波, 张文昌, 等. 移动机器人自主导航技术研究进展[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7):1-4, 55.
- [22] 陈涛, 张鹏, 张佳庆, 等. 举高喷射灭火机器人灭实体油浸变压器火试验研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(11):1457-1461.
- [6] 曾鑫, 唐樟春, 卢军, 等. 基于PLC的升降横移车库系统设计研究与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43(9):23-29.
- [7] 叶光伟, 刘海哲, 李长武. 光伏发电智能清洁机器人设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):95-99.
- [8] 王晓瑜, 李嘉伟. 基于物联网与PLC的高炉槽下液压站控制系统试设计台设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(6):54-59.
- [9] 袁海波, 徐仁虎, 龙智睿, 等. 新一代信息技术背景下智慧电厂建设探索和实践[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7):178-181.
- [10] 李大勇, 袁江, 吉方松, 等. 基于物联网下的汽车实训室设备管理系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(8):135-139.
- [11] 王金仕, 陈民洪, 杨新华. 基于多目标粒子群的光伏电站火灾综合管控一体化系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(8):52-56.
- [12] 王晓瑜, 李浩煜. 基于PLC与HMI的物料分拣控制系统设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2023(1):38-42.

(上接第33页)