

水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术

马晓君, 保守福, 齐鹏, 孔德豪
(黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 海东 810902)

摘要: 水电站巡逻机器人的避障性能较差, 使机器人在遇到障碍物时被迫停下或重新规划路径, 导致巡逻任务延误, 影响水电站的安全和运行效率; 因此, 提出水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术; 通过对巡逻机器人进行动力学分析, 理解机器人在运动中的力学特性和行为, 并利用栅格法对水电站机器人的巡逻场地进行避障路径规划; 在此基础上, 控制水电站巡逻机器人的角速度和线速度以调整行驶方向, 完成水电站巡逻机器人的避障轨迹自动化控制; 仿真结果表明, 所提方法的水电站巡逻机器人的实际轨迹与期望轨迹误差在 0.2~0.4 cm 左右, 避障轨迹自动化控制时间小于 95 s, 避障精度较高, 具有较强的实际应用效果。

关键词: 水电站巡逻机器人; 栅格法; 避障轨迹控制; 动力学分析; 自动化控制

Automatic Control Technology for Obstacle Avoidance Trajectory of Patrol Robots in Hydropower Stations

MA Xiaojun, BAO Shoufu, QI Peng, KONG Dehao
(Yellow River Hydroelectric Development Co., Ltd., Haidong 810902, China)

Abstract: Patrol robots have poor obstacle avoidance performance in hydroelectric stations, forcing them to stop or re-plan their paths with obstacles encountering, resulting in delays in patrol tasks, and affecting the safety and operational efficiency of hydroelectric stations. Therefore, an automatic control technology for obstacle avoidance trajectory of patrol robots in hydroelectric stations is proposed. Through dynamic analysis of patrol robots, their mechanical characteristics and behavior are understood during movement, and the grid method is used to plan obstacle avoidance paths for the patrol site of hydroelectric station robots. On this basis, the angular velocity and linear velocity of the hydroelectric station patrol robot are controlled to adjust the driving direction, and complete the obstacle avoidance trajectory automation control of the hydroelectric station patrol robot. Simulation results show that the error between actual trajectory and expected trajectory of the proposed method for the hydroelectric station patrol robot is about from 0.2 cm to 0.4 cm, and the automatic control time for the obstacle avoidance trajectory is less than 95 s. The method has a high obstacle avoidance accuracy, and has strong practical application effects.

Keywords: hydroelectric power station patrol robot; grid method; obstacle avoidance trajectory control; dynamic analysis; automation control

0 引言

为了确保水电站的安全运行, 提高工作效率, 降低人员风险, 水电站巡逻机器人的研发和应用逐渐受到重视。水电站巡逻通常依靠人工巡检, 存在着大量的人力和物力消耗, 并且巡检效果不佳。将巡逻机器人引入水电站巡逻可以解决巡检^[1-2]工作量大、巡检不及时的问题。然而水电站内部存在复杂的发电机、液压系统等设备和设施。传统的巡逻机器人通过避障功能无法完全避免与上述设备发生碰撞, 降低了设备的运行稳定性, 增大了潜在的损坏风险。因此, 如何获得高质量的水电站巡逻机器人避障轨迹控制效果成为当前巡逻机器人领域研究的重要问题。

文献[3]首先通过卷积神经网络模型构建机器人行驶道路网络模型; 其次, 通过自适应控制模块计算机器人前进场景特征; 最后, 道路场景理解方法完成巡检机器人的

避障轨迹自动化控制。该方法存在避障轨迹控制效率低的问题。文献[4]首先通过机器人安全度量指数定义 A^* ($*$) 算法的评价函数; 其次, 通过搜索邻域扩展优化 A^* ($*$) 算法搜索效率; 最后, 结合动态窗口法完成巡检机器人的避障轨迹自动化控制。该方法存在避障轨迹控制精度低的问题。文献[5]首先建立机器人动力学模型; 其次, 展开机器人避障运动规划; 最后, 基于传感器建立机器人避障运动控制模型完成巡检机器人的避障轨迹自动化控制。该方法存在机器人避障效果不佳的问题。文献[6]首先改进了 Floyd 全局路径规划算法, 以提升执行巡检任务效率; 其次, 设计欧拉数值积分的轨迹跟踪控制算法, 提高控制精度; 最后, 设计升降平台和摄像头云台控制方法, 实现巡检机器人控制。实验结果显示, 该方法满足了巡检要求。但是由于水电站的规模庞大, 通过机器人收集的数据有限,

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-11-21。

作者简介: 马晓君(1989-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 马晓君, 保守福, 齐鹏, 等. 水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 190-196.

无法做到及时、提前的预警,水电站的稳定运行有待优化。文献 [7] 介绍了一种基于深度强化学习的机器人避障混合控制方案。当障碍物靠近机器人时,该方法引入了一种切换机制来启用深度强化学习算法,而不是基本的运动规划器,从而产生了一种自配置架构来应对在工作空间中随机移动的物体,以此实现了混合防撞。文献 [8] 针对蛇形检测机器人在高压电缆上进行变直径螺旋运动的步态控制问题,提出了一种步态生成方法,使蛇形机器人能够适应缠绕高压电缆障碍物时直径的变化。该方法采用 3 次贝塞尔曲线拟合,解决了蛇形机器人变直径运动时速度不连续和关节角度突变的问题,避免了周期性的运动冲击。文献 [9] 使用反应控制综合方法分析了机器人的闭环动力学,以表征总是导致系统死锁的控制器参数、初始条件和目标位置。利用对偶理论中的工具。然后推导了 N 机器人系统在死锁时机器人配置的几何性质,以此为根据,确保移动机器人位于安全集合的边界上,避免障碍物的影响。

水电站通常处于复杂的工作环境中,存在水闸、水流等各种潜在的危险和障碍物。机器人巡逻时若不能有效避开这些障碍物,可能会导致碰撞事故,造成设备损坏或人员伤亡。在该背景下,基于现有研究的理论支持,提出水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术。引入栅格法和自适应阈值使巡逻机器人能够在水电站环境中进行自主避障和路径规划,实现安全、稳定、高效的巡逻任务。

1 巡逻机器人动力学分析

巡逻机器人动力学分析可以了解巡逻机器人的速度、加速度、惯性等运动和力学特性。在避障轨迹自动化控制中,巡逻机器人需要能够智能地感知周围环境并做出相应的反应,以避免碰撞和危险情况。因此,通过水电站巡逻机器人动力学分析,可以了解巡逻机器人在实际巡逻任务中的运动特性和动力学行为,为巡逻机器人的避障轨迹自动化控制提供依据。水电站巡逻机器人坐标系如图 1 所示。

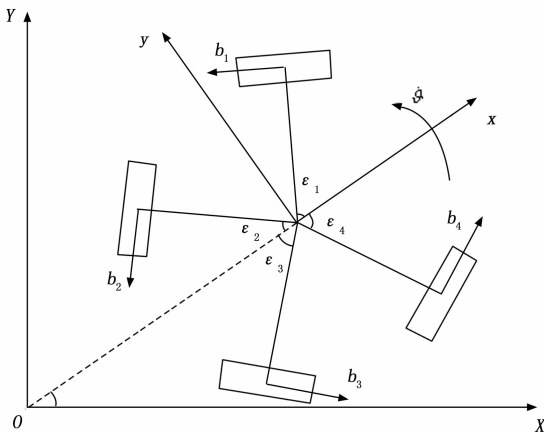


图 1 水电站巡逻机器人坐标系

用 $w = (X, Y, \vartheta)$ 表示巡逻机器人在静止状态下的位姿,其中, X, Y, ϑ 分别表示 x 轴坐标、 y 轴坐标、角度。

用 v_o 表示角速度,水电站巡逻机器人^[10]的线速度 v_o 公

式表达为:

$$v_o = \omega(b_1, b_2, b_3, b_4) \quad (1)$$

其中: b_1, b_2, b_3, b_4 表示 4 个轮子的移动速度。

假设巡逻机器人 4 个轮子的电机参数一致, R_s 表示电机等效电阻,得到巡逻机器人电机电感的公式为:

$$L_s = U_s u - K_n n v_o \gamma + R_s i_s \quad (2)$$

其中: L_s 表示巡逻机器人电机电感, i_s 表示巡逻机器人电机电流, U_s 表示电池电压, u 表示电压控制量, K_n 表示电机反电动势, γ 表示驱动轮角位移, n 表示减速比。

进一步得到输出力矩 G 公式为:

$$G = \frac{K_g n L_s}{R_s} \quad (3)$$

其中: K_g 表示输出力矩反电动势。

由此得到电机受力分析方程式,其公式为:

$$F = \delta \left(\frac{t O_l \gamma_o u_o}{G} \right) \quad (4)$$

其中: δ 表示粘滞阻力系数, O_l 表示巡逻机器人 4 个轮子的转动惯量, γ_o 表示 o 个轮子的角位移, u_o 表示第 o 个轮子的电压控制量, t 表示轮子半径。

基于上述计算,推导出基于电机参数的水电站巡逻机器人动力学方程为:

$$D = \frac{O_l v \gamma}{t} - F \left(\delta + \frac{E K_g K_n n^2}{R_s} \right) \quad (5)$$

其中: E 表示电荷量, v 表示电机等效驱动力矩。

根据上述动力学分析过程,可以确定巡逻机器人的最大速度、最大加速度等参数,为下一步设计避障轨迹自动化控制提供依据。此外,上述过程还可以帮助优化水电站巡检测巡逻机器人的运动路径,使其更加高效地绕过障碍物或避开危险区域,优化巡逻场地避障轨迹自动化控制效果。

2 巡逻场地避障轨迹自动化控制

水电站的环境通常比较复杂,可能存在各种障碍物、狭窄的通道、不同高度的地形等。这使得避障规划更加困难,需要考虑不同类型的障碍物,并且需要针对环境的特点进行有效的判断和规划。水电站巡逻机器人动力学方程描述了巡逻机器人在电机转矩下的运动和行为。通过栅格法并利用巡逻机器人的动力学方程,可以使水电站巡逻机器人避开障碍物并按设定的轨迹进行移动。因此,完成水电站巡逻机器人动力学分析后,通过栅格法对水电站巡逻机器人的巡逻场地进行避障规划。然后根据避障规划结果,控制行驶方向实现水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制。

2.1 避障路径规划

栅格法是一种简单直观的路径规划方法。它将环境划分为离散的栅格,并通过对栅格进行状态标记,可以方便地表示障碍物、可行走区域和巡逻机器人自身位置。同时,栅格法适用于各种环境和地形。无论是平坦的室内环境,还是复杂的户外场地,都可以将其离散化为栅格,并根据栅格的属性进行路径搜索和避障计算。且由于栅格法使用离散的栅格表示环境,因此生成的路径也是离散的,由此

提升了路径的可解释性,清晰地显示巡逻机器人在巡逻过程中经过的栅格以及避开的障碍物。综上可知,采用栅格法在巡逻机器人避障路径规划中具有简单高效、适用性强、路径可解释性好和可扩展性强等优势。因此,在避障路径规划过程中,采用栅格法完成。

定义水电站巡逻机器人巡逻场地^[11-12]为矩形,将水电站巡逻机器人与障碍物^[10]都定义为小矩形。将巡逻场地的矩形划分为多个小栅格^[13],并通过序号法编码小栅格。如图 2 所示。

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

图 2 巡逻场地栅格图

如图 2 所示,1 号栅格确定为水电站巡逻机器人初始点、100 号栅格为巡逻终点。黑色栅格表示水电站巡逻机器人巡逻场地中的障碍物^[11]栅格,白色栅格表示水电站巡逻机器人巡逻场地中的自由栅格。

假设栅格地图的表示矩阵为 M ,其中 $M(i, j)$ 表示第 i 行第 j 列的栅格元素值。将道路栅格设置为可达状态,用 0 来表示;为不可达状态,用 1 来表示。则有:

$$M(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{through} \\ 1, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 行驶方向控制

水电站通常由水轮发电机、泵站、输电线路等各种设备和机械组成。这些设备需要进行定期维护、修理或更换,这一过程中,可能会出现临时安装的手脚手架、工具、材料堆放等障碍物,如果没有及时移除,将成为巡逻机器人的新障碍物。因此,在利用栅格法规划避障路径之后,可能会有新的障碍物出现或原有的障碍物移动位置。因此,巡逻机器人需要通过对角速度和线速度进行控制来调整行驶方向,实时感知和处理动态环境的变化,以做出相应的调整,避免与障碍物发生碰撞。

当 $M(i, j) = 0$ 时,表示道路栅格为可达状态,此时,选用 LMS200 激光测距仪,其最大扫描范围为 8 m、最大扫描角度为 180°。按照 2.5°为一个区间大小,划分 180°扫描角度至 72 个区间,通过逆时针顺序由小到大为其编号,可表示为 X_o 。在每个区间 X_o 内获取最小扫描面积 f_{min}^o ,当 $f_{min}^o \geq 64 \text{ m}^2$ 时,则区间 X_o 为候选区间。

合并相邻的候选区间作为一个准可行扇区 H ,设置 ψ 为准可行扇区预先给定阈值,准可行扇区角平分线与水电站巡逻机器人 x 轴坐标夹角 ϑ_ψ 公式为:

$$\vartheta_\psi = \frac{f_{min}^o \times 2.5^\circ}{2} \times \frac{\pi}{180^\circ} \quad (7)$$

其中: M_o^c 表示准可行扇区第一个候选区间编号, M_o^e 表示准可行扇区最后一个候选区间编号。

描述准可行扇区 H ,得到公式为:

$$H = \vartheta_\psi X_o \quad (8)$$

可行扇区 H 中有与准可行扇区角平分线方向平行的矩形区域,通过对水电站巡逻机器人^[15-16]的角速度和线速度进行控制,使水电站巡逻机器人移动到该矩形区域内,即实现水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制。其中,角速度控制律是指通过控制巡逻机器人的角速度来实现期望的运动行为。线速度控制律是通过控制机器人^[17]的线速度来实现期望的运动行为。

角速度控制律 $\xi(v_o)$ 公式为:

$$\xi(v_o) = \alpha \Delta \vartheta H \quad (9)$$

其中: α 为比例增益, $\Delta \vartheta$ 为目标角度与当前角度之间的偏差。

线速度控制律^[18-19] $\xi(v_b)$ 公式为:

$$\xi(v_b) = \alpha \Delta b \xi(v_o) \quad (10)$$

其中: Δb 表示预先设置的最大行驶速度和最小行驶速度的差值。

由此,获取可行方向公式为:

$$T = \xi(v_b)(\vartheta_o, T_o, Z_o) \quad (11)$$

其中: ϑ_o 表示水电站巡逻机器人 x 轴与第 o 个可行方向的夹角, T_o 表示第 o 个可行方向对应的阈值, Z_o 表示第 o 个可行方向对应扇区的弦长。

水电站巡逻机器人在公式 (11) 得到的可行方向 T 上行进过程中,除了考虑行进方向上的障碍物外,还需要考虑该条线路行进时巡逻机器人^[20-21]自身的高度和宽度是否可以保证其正常通行,以确保巡逻任务的完成度。因此,设 ϑ_t 表示目标点相对于水电站巡逻机器人方向, ϑ_k 表示最大第 o 个可行方向对应的阈值 T 。在所有可行方向中选取的可行方向,当水电站巡逻机器人 x 轴与第 o 个可行方向的夹角小于等于两个方向的夹角,即 $\vartheta_o \leq |\vartheta_k - \vartheta_t|$ 时,表明水电站巡逻机器人可以在规划的避障轨迹上正常通行,至此完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制。

3 仿真与分析

为了验证水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术研究有效性,进行仿真与分析。

3.1 仿真设置

在仿真前,首先从硬件环境、水电站巡逻机器人参数、障碍物场地 3 个方面进行设定。

1) 硬件环境设计:

在 Windows 7、Intel core i7-4210H、8 GB 操作系统,编程环境为 python3.7 的计算机上使用 MATLAB 软件完成

仿真。仿真过程中, 通过下述步骤完成模拟控制系统的设计。

步骤一: 利用 HC-SR04 超声波模块检测水电站巡逻机器人前方障碍物的距离, 利用 MPU-6050 三轴陀螺仪传感器测量机器人的旋转速度、倾斜角度和动作稳定性等数据。将上述两部分数据传输到 Windows 7、Intel core i7-4210H、8 GB 操作系统的计算机中。

步骤二: 利用 python3.7 编程语言结合 MATLAB 提供的 API 接口, 实现与 MATLAB 的通信和数据交互。

步骤三: 使用 MATLAB 提供的功能和工具, 根据设计的避障轨迹自动化控制技术建立控制模型。将水电站巡逻机器人的动力学特性和步骤一传感器采集的数据输入到控制系统中, 并观察系统对障碍物的检测和避让行为。

2) 水电站巡逻机器人参数设置:

本文在仿真过程中, 水电站巡逻用的机器人型号为 CPAT-CM-3。其具体相关参数设置如表 1 所示。

表 1 巡逻机器人的参数设置

参数名称	参数值
巡逻机器人尺寸(长×宽×高)	1 200 mm×750 mm×1 500 mm
最大移动速度	20 km/h
最大攀爬角度	15°
最大越障高度	70 mm
最大越沟宽度	70 mm
转弯半径	无(原地旋转)
导航定位精度	50 mm
巡逻速度	1.5 m/s

3) 障碍物场地设计:

为模拟真实的水电站巡逻环境, 设计障碍物场地。该过程中, 利用黑色矩形模拟水电站实际巡逻环境中存在的墙壁、柱子、设备等各种障碍物, 以更加真实地模拟机器人在水电站中进行巡逻时所面临的复杂环境和潜在隐患。障碍物场地如图 3 所示。

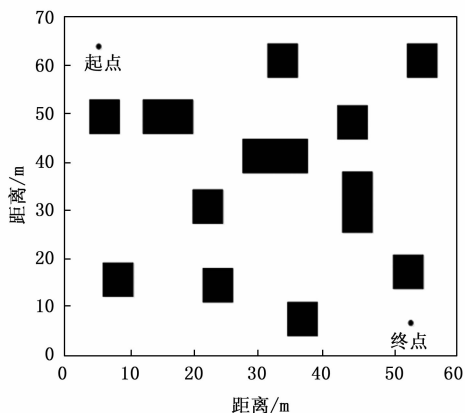


图 3 障碍物分布情况

3.2 仿真流程设计

在上述仿真设定下, 采用水电站巡逻机器人避障轨迹

自动化控制技术(所提方法)、基于道路场景理解的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术(文献[3]方法)和基于安全 $A \sim *$ 与 DWA 算法融合的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术(文献[4]方法)完成仿真测试。具体仿真流程如下所示。

1) 系统初始化: 启动 MATLAB 仿真软件, 并设置图 3 水电站障碍物场地环境地形、建筑物、设备位置等参数。

2) 机器人起始位置: 选择机器人的初始位置, 并将其放置在该位置上。

3) 传感器模拟: MATLAB 仿真软件模拟水电站巡逻机器人搭载的 HC-SR04 超声波模块和 MPU-6050 三轴陀螺仪传感器, 并生成模拟的传感器数据。

4) 算法实现: 根据动力学特性分析结果和传感器数据, 启动水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术(所提方法)、基于道路场景理解的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术(文献[3]方法)和基于安全 $A \sim *$ 与 DWA 算法融合的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术(文献[4]方法)进行处理, 生成避障路径。

5) 硬件环境设计: 设计水电站巡逻机器人的控制硬件环境。

6) 自动化控制: 将 3 种方法设计的避障路径规划输入到控制硬件环境中, 水电站巡逻机器人自动执行规划好的路径, 动态调整行驶速度、方向等参数, 以实现自动避障。

7) 动态模拟: MATLAB 仿真软件通过实时更新水电站巡逻机器人的位置和环境数据, 模拟机器人在水电站中的实际运动和避障过程。

8) 输出结果分析: 在仿真软件 MATLAB 中, 观察机器人的运动轨迹以及避障效果, 并进行结果分析和评估, 以优化算法和控制策略。

3.3 仿真分析

在上述准备和流程下进行测试, 从障碍物躲避性能、移动轨迹准确性、避障控制时间、路径分布阈值、运动收敛性、角速度自动化控制、线速度自动化控制七个方面进行分析。

1) 障碍物躲避性能:

障碍物躲避性能是衡量水电站巡逻机器人在面对障碍物时的反应能力和机动性能的指标, 其涉及机器人在检测到障碍物时能否快速准确地做出避让动作, 避免与障碍物发生碰撞。因此, 采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制, 记录 3 种方法的障碍物躲避情况如图 4 所示。

分析图 4 可知, 文献[3]方法出现 2 次障碍物碰撞的情况, 且路径规划长; 文献[4]方法出现 3 次障碍物碰撞的情况, 且路径规划复杂; 所提方法未出现障碍物碰撞的情况, 且路径规划简单。表明所提方法的水电站巡逻机器人障碍物躲避能力更强, 且路径规划线路更好。

2) 移动轨迹准确性:

移动轨迹准确性是衡量水电站巡逻机器人在执行预定

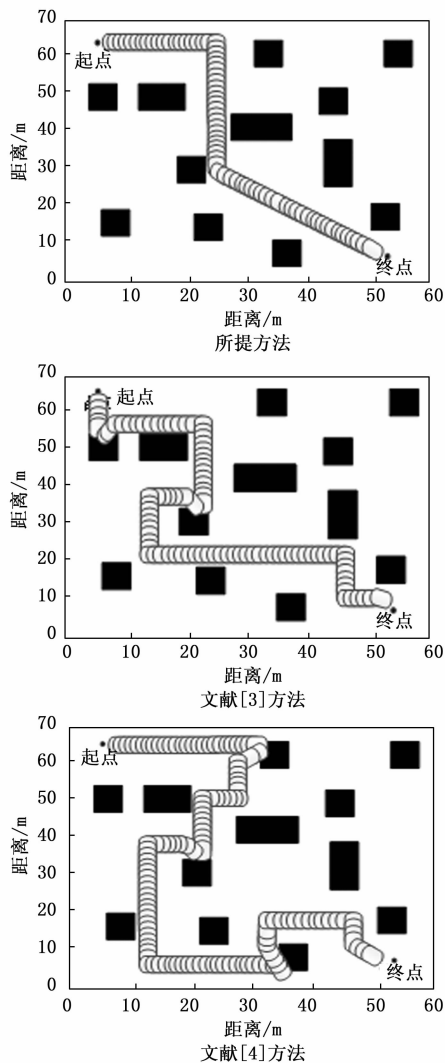


图 4 3 种方法的障碍物躲避情况

移动轨迹时的精确程度的指标, 即该指标可以判断机器人是否能够按照预定的路径进行准确的移动, 达到期望的位置或目标点。采用所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制, 记录 3 种方法的移动轨迹检测如图 5 所示。

分析图 5 可知, 文献 [3] 方法的实际轨迹与期望轨迹误差在 0.5~2 cm 左右; 文献 [4] 方法的实际轨迹与期望轨迹误差在 0.6~1.5 cm 左右; 所提方法的实际轨迹与期望轨迹误差在 0.2~0.4 cm 左右, 所提方法的避障轨迹控制精度高于文献 [3] 方法和文献 [4] 方法, 表明所提方法的水电站巡逻机器人避障轨迹控制效果更好。

3) 避障控制时间对比:

避障控制时间是衡量水电站巡逻机器人在遇到障碍物时, 从检测到障碍物到成功避障的所花费的时间。较短的避障控制时间意味着机器人可以更快地检测到障碍物、做出相应的避障动作, 并顺利通过障碍物。采用所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法完成水电站巡逻机器人避

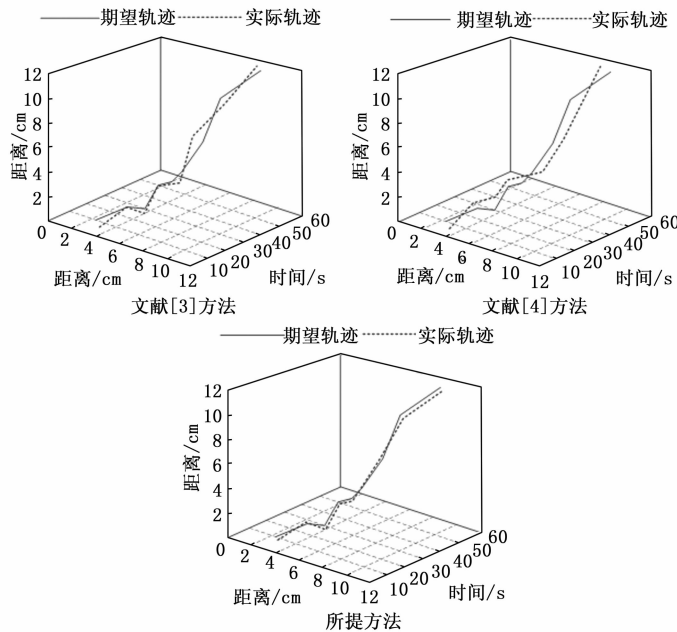


图 5 3 种方法的移动轨迹检测

障轨迹自动化控制, 记录 3 种方法的避障轨迹控制时间如表 2 所示。

表 2 3 种方法的避障控制时间

仿真次数	文献[3]方法避障控制时间/s	文献[4]方法避障控制时间/s	所提方法避障控制时间/s
100	100.6	98.7	93.6
200	104.6	97.1	88.2
300	112.7	99.5	90.6
400	123.6	100.4	94.1
500	131.2	108.6	93.9

分析表 2 可知, 文献 [3] 方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制时间在 100.66~131.2 s 之间, 文献 [4] 方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制时间在 97.1~108.6 s 之间, 所提方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制时间在 88.2~94.1 s 之间, 所提方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制时间低于文献 [3] 方法和文献 [4] 方法, 表明所提方法的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制时间更短。

4) 路径分布阈值:

路径分布阈值是指在避障轨迹自动化控制中, 对水电站巡逻机器人生成的路径进行评估和判断的阈值。具体而言, 当机器人生成的路径偏离期望路径过多时, 会被认为是不合理或不稳定的。路径分布阈值可以通过测量机器人实际路径与期望路径之间的偏移量或距离来确定。通过设定路径分布阈值, 可以评估机器人在执行避障轨迹时的准确性和稳定性。因此, 分别采用所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法进行避障路径规划, 得到路径分布阈值结果, 如图 6 所示。

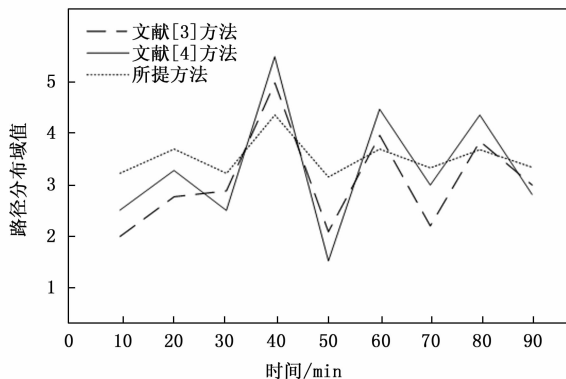


图 6 3 种方法的避障轨迹自动化控制结果

分析图 6 得知, 文献 [3] 方法和文献 [4] 方法在水电站巡逻机器人避障轨迹控制过程中, 路径分布阈值稳定在 1.8~4.8 之间和 1.4~5.3 之间, 所提方法路径分布阈值稳定在 2.9~4.2 之间。综上可知, 所提方法路径分布阈值变化幅度较小, 路径寻优能力较好, 能有效实现水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制。其主要原因是, 所提水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术在动力学分析的基础上, 采用栅格法进行避障路径规划, 实现了避障路径最优化。

5) 运动收敛性分析:

运动收敛性是指在避障轨迹自动化控制中, 机器人是否能够逐渐收敛到期望位置或路径的能力。具体而言, 当机器人从初始位置开始执行避障轨迹后, 它会根据传感器数据和控制策略不断更新当前位置和行进方向, 以逐步接近或到达目标位置。运动收敛性是评估机器人在执行避障任务时是否能够迅速、精确地达到预定目标的一个指标。一个具有良好运动收敛性的机器人系统可以更高效地完成巡逻任务, 并提高自主导航的能力。经过路径规划的对比, 只能从单方面看出路径的优劣, 但对方法的整体性能并不能作出一个客观的判断, 因此为了进一步验证所提水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术的有效性, 对所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法 3 种方法收敛情况作出详细对比, 绘制成收敛曲线图, 如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 与文献 [3] 方法和文献 [4] 方法相比, 所提方法收敛曲线更为平稳, 且在 3.3×10^3 次迭代时, 即可完成收敛。相比较之下, 3 种方法中所提方法的收敛速度更快, 稳定性更高, 在同样的水电站场景中执行巡逻任务, 所提方法能够使巡逻机器人通过更少次数的迭代运算找到最优轨迹, 水电站巡逻机器人轨迹自动化控制效果较好。

6) 角速度自动化控制效果:

考虑到水电站部分设备需要定期维修和检修, 在这一过程中使用的脚手架、工具、材料堆放等都会对水电站巡逻机器人轨迹控制效果造成不利影响。因此, 为了测试在不同目标角速度下能否准确跟踪目标, 实时控制避障轨迹,

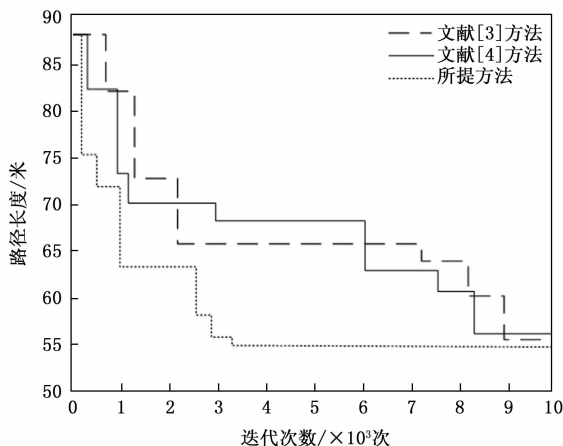


图 7 3 种方法对水电站巡逻机器人轨迹控制的收敛曲线图

以实际达到目标角速度与设定目标角速度之间的差异为指标, 测试所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法 3 种方法的角速度自动化控制效果。结果如表 3 所示。

表 3 3 种方法的角速度自动化控制效果 (°/s)

障碍物类型		实际需要调整的角速度	文献[3]方法角速度	文献[4]方法角速度	所提方法角速度
脚手架	固定位置	0.1	0.6	1.7	0.1
	变化位置	0.2	1.6	2.1	0.2
工具	固定位置	0.5	2.7	3.5	0.6
	变化位置	0.6	3.6	3.4	0.5
材料堆放	固定位置	0.8	3.2	2.6	0.9
	变化位置	1.3	1.9	2.1	1.4

表 3 中, 固定位置是指该处原本存放着脚手架、工具、材料堆放等障碍物, 变化位置是因维修需求, 工作人员放到该处的障碍物。分析表 3 可知, 文献 [3] 方法完成机器人避障轨迹控制的角速度在 1.7°/s~3.5°/s 之间, 文献 [4] 方法完成机器人避障轨迹控制的角速度在 0.6°/s~3.6°/s 之间, 所提方法完成机器人避障轨迹控制的角速度在 0.1°/s~1.4°/s 之间。其中, 变化位置比固定位置所需要控制的角速度更大, 其原因是当障碍物位置变化时, 机器人需要更大的角速度来保持稳定运行。通过调整角速度, 机器人可以更快地调整姿势和重心位置, 以保持动态平衡。整体来看, 所提方法完成水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制的角速度与实际需要调整的角速度基本一致, 且低于文献 [3] 方法和文献 [4] 方法的角速度, 表明所提方法的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制性能较优。

7) 线速度自动化控制效果:

在分析角速度自动化控制效果后, 上述障碍物也会对线速度造成负面影响。因此, 为了测试在实际达到目标线速度时与目标值之间的误差范围, 以评估控制避障轨迹的精度, 以实际达到目标线速度与设定目标线速度之间的差

异为指标, 测试所提方法、文献 [3] 方法和文献 [4] 方法 3 种方法的线速度自动化控制效果。结果如表 4 所示。

表 4 3 种方法的线速度自动化控制效果 (m/s)

障碍物类型		实际需要调整的线速度	文献[3]方法线速度	文献[4]方法线速度	所提方法线速度
脚手架	固定位置	0.5	0.7	0.8	0.5
	变化位置	1.2	1.8	1.5	1.2
工具	固定位置	0.4	0.9	1.1	0.4
	变化位置	1.5	2.1	2.4	1.5
材料堆放	固定位置	0.9	1.2	1.6	0.8
	变化位置	2.3	2.9	3.1	2.4

分析表 4 可知, 文献 [3] 方法和文献 [4] 方法完成机器人避障轨迹控制的线速度 0.7~2.9 m/s 之间和 0.8~3.1 m/s, 与实际需要调整的线速度 0.4~2.3 m/s 相差较大。所提方法完成机器人避障轨迹控制的线速度在 0.5~2.4 m/s 之间, 相较于两种对比方法而言, 更接近于实际需要调整的线速度。其中, 变化位置比固定位置所需要控制的线速度更大, 与角速度自动控制原理相同。综上可知, 所提方法的水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制性能较优。

4 结束语

水电站巡逻机器人的避障控制研究是巡逻机器人领域研究的重点问题之一。因此, 为实现水电站巡逻机器人的避障轨迹控制, 提出水电站巡逻机器人避障轨迹自动化控制技术, 并进行了相应的仿真实验。通过验证和评估得出以下结论: 提出技术基于利用栅格法进行避障路径规划, 能够生成可避开障碍物的合理路径, 有效提高了巡逻机器人避障效率和精度。提出技术应用后, 通过控制机器人的角速度和线速度来调整行驶方向, 使得水电站巡逻机器人能够更加灵活和高效地躲避障碍物, 避免碰撞和堵塞等潜在问题, 获得了更好的水电站巡逻机器人避障轨迹控制效果。该技术应用后, 对保证提升水电站安全性、减少事故风险以及提高机器人工作效率具有重要意义。

参考文献:

[1] 王波, 赵远, 刘喜泉, 等. 智能巡检机器人在大坝廊道运维中的应用 [J]. 人民长江, 2022, 53 (7): 227-231.

[2] 陈南凯, 王耀南, 贾林. 基于改进生物激励神经网络算法的多移动机器人协同变电站巡检作业 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (6): 1453-1459.

[3] 赵小勇, 陈钦柱, 郑鸿彦, 等. 基于道路场景理解的巡检机器人避障方法研究与应用 [J]. 微电子学与计算机, 2022, 39 (4): 118-127.

[4] 金梅, 李清天, 张立国. 基于安全 A~* 与 DWA 算法融合的军队车场巡检机器人路径规划 [J]. 高技术通讯, 2022, 32 (11): 1202-1212.

[5] 王吉岱, 梁茂轩, 孙爱芹, 等. 基于有限状态机的输电线路巡

检机器人自主越障运动控制方法 [J]. 机床与液压, 2022, 50 (5): 21-27.

[6] 姚楚阳, 刘爽. 一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2021, 47 (1): 116-122.

[7] INCREMONA G P, SACCHI N, SANGIOVANNI B, et al. Experimental Assessment of Deep Reinforcement Learning for Robot Obstacle Avoidance: A LPV Control Perspective-Science-Direct [J]. IFAC-PapersOnLine, 2021, 54 (8): 89-94.

[8] YANG Z, ZHANG Z, FANG Q, et al. Research on obstacle climbing gait of snake-like robot on high voltage cables [J]. Electronics Letters, 2021, 57 (23): 865-868.

[9] GROVER J, LIU C, SYCARA K. The Before, During, and After of Multi-robot Deadlock [J]. International Journal of Robotics Research, 2023, 42 (6): 317-336.

[10] 邹蓉蓉, 黎大健, 覃剑, 等. 变电站室内柔索驱动巡检机器人系统设计与运动学分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (10): 89-97.

[11] 童泉军, 陈洋, 路浩, 等. 面向表计读数的变电站巡检机器人路径规划 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (8): 167-177.

[12] 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.

[13] 王豪杰, 马向华, 代婉玉, 等. 改进 DWA 算法的移动机器人避障研究 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59 (6): 326-332.

[14] 吴宇, 郝万君, 曹选, 等. 改进蚁群与势场融合算法的平滑路径规划 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (3): 141-146.

[15] 孔慧芳, 丁道远, 房耀. 基于干扰观测器的移动机器人路径跟踪控制 [J]. 光电与控制, 2021, 28 (12): 91-96.

[16] 董诗绘, 牛彩雯, 戴琨. 基于深度强化学习的变电站巡检机器人自动化控制方法研究 [J]. 高压电器, 2021, 57 (2): 172-177.

[17] 张振乾, 李世超, 李晨阳, 等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (21): 9-15.

[18] 梁倍源, 杨瀚. 基于视觉图像的全向移动机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (4): 143-148.

[19] 高庆吉, 侯世昊, 岳凤发, 等. 载人机器人平顺轨迹规划及自抗扰跟踪控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (9): 83-89.

[20] LI Y, CHEN S, BAI K, et al. Path planning of patrol robot based on improved discrete electrostatic discharge algorithm [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2022, 42 (6): 5919-5930.

[21] ZU W, LI Z, NIE L. Research on the Core Algorithm of Wireless Charging Technology for Substation Patrol Robot Based on Electromagnetic Resonance [J]. Nonlinear Optics, Quantum Optics, 2022, 55 (3/4): 343-353.