DOI:10.14188/j.1671-8844.2025.0145　　文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-10

地下洞室施工排险机器人本体-末端可达域仿真研究

王奉奇[1,3],晋良海[1,3],彭仲文[2],贺国春[2],李成[4],毛三军[5]

(1. 三峡大学 水电工程施工与管理湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443002; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司,天津 300300; 3. 三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 4. 国网湖北省电力有限公司黄龙滩水力发电厂,湖北 十堰 442000; 5. 中国长江三峡集团有限公司,北京市 101199)

摘要:针对地下洞室施工排险机器人可达性受限的问题,提出基于多体运动学与环境感知融合的仿真分析方法:设计融合障碍物膨胀与动态安全距离启发函数的蚁群算法,实现机器人安全距离的弹性控制;建立包含6自由度机械臂的运动学约束方程组,绘制排险机器人末端可达点集图;构建排险机器人虚拟样机与三维仿真场景,求解受限空间排险人本体-末端可达域,验证机器人末端可达位置。结果表明,改进后的蚁群算法能避开所有障碍空间(机器人宽度1.5m和安全阈值0.2m),避障路径长度仅增加17.8%;末端执行器最大水平作业投影面积可达30.17m^2,垂直作业范围1.71~8.35m,单次规划耗时321ms,满足实时排险需求。研究成果为地下洞室排险机器人设计提供理论支撑。

关键词:地下洞室施工;排险机器人;可达域;运动学;虚拟仿真

中图分类号:TU94　**文献标志码:**A

Simulation study on body-end effector reachable workspace of the hazard elimination robot in underground tunnel construction

WANG Fengqi[1,3], JIN Lianghai[1,3], PENG Zhongwen[2], HE Guochun[2], LI Cheng[4], Mao Sanjun[5]

(1. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China;
2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd, Tianjin 300300, China;
3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China;
4. State Grid Hubei Electric Power Co. Ltd, Huanglongtan Hydroelectric Power Plant, Shiyan Hubei 442000, China;
5. China Three Gorges Corporation, Beijing, 101199)

Abstract: To address the reachability limitations between the robot body and end-effector in underground cavern hazard elimination operations, this study proposes a simulation analysis method integrating multibody kinematics and environmental perception. By designing an enhanced ant colony algorithm incorporating obstacle inflation and dynamic safety distance heuristic functions, kinematic constraint equations for a 6-DOF robotic arm were established. A virtual prototype and 3D simulation scenario were constructed to resolve the reachable workspace of the robot in confined spaces. Results demonstrated that the improved algorithm successfully avoids

收稿日期:XXXX-XX-XX

作者简介:王奉奇(2001—),男,硕士研究生,主要从事施工工效仿真研究,E-mail:202308710021012@ctgu.edu.cn。

通信作者:晋良海(1973-),男,教授,全国水利工程优秀硕导,主要从事安全工效学研究,E-mail:jinlianghai@ctgu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52179136);中铁建大桥局集团《滇中引水隧洞穿城施工多态扰动控制技术研究》(SDHZ2022043);中国长江三峡集团有限公司企业科研项目(202103551)。

本文引用格式:王奉奇,晋良海,彭仲文,等.地下洞室施工排险机器人本体-末端可达域仿真研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-10.

Citation: WANG Fengqi, JIN Lianghai, PENG Zhongwen, et al. Simulation study on body-end effector reachable workspace of the hazard elimination robot in underground tunnel construction[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX): 1-10.

all obstacle zones (robot width: 1.5m + safety margin: 0.2m) with only 17.8% path length increase. The end-effector achieved a maximum horizontal working area of 30.17m^2 and vertical working range of 1.71-8.35m, while maintaining a single-planning cycle time of 321ms, fulfilling real-time hazard elimination requirements. These findings provide theoretical foundations for the design of underground cavern hazard elimination robots.

Key words: underground tunnel construction; hazard elimination robot; reachable workspace; kinematics; virtual simulation

引言

随着地下空间开发向“超深、超敏感”方向发展[1-4],地下洞室施工呈现“大断面、长距离、高精度”特征,其作业环境面临“水文地质条件复杂、岩土体变形难以预测”的严峻挑战[5-8]。传统人工排险存在安全风险高、作业效率低等突出问题[9-11],而现有机器人受限于非结构化环境感知能力与运动学耦合约束,其本体与末端执行器在复杂地下洞室施工环境中作业可达范围不足,难以满足塌方体排险清理等核心任务需求[12-16]。为此,本文提出地下洞室排险机器人可达域算法及仿真方法,为排险机器人虚拟样机设计提供理论依据。

针对传统地下洞室施工作业中人工操作效率低、安全风险高等核心痛点,现有排险机器人研究已形成多维度技术路线:(1)感知领域通过多传感器融合技术构建风险检测模型[17],适应环境变化,配合信息化系统[18],实现数字化空间表征;(2)数据采集层面依托深度学习算法与智慧信息平台提升施工数据动态获取能力[19-20];(3)全寿命周期管理方面,非平稳伽马模型与成本优化模型结合创新结构劣化检测范式[21],利用BIM云平台,采用装配式的技术方案,通过建造机器人智能地完场现场施工[22]。上述研究虽在监测技术取得进展,但机器人设计与场景适配性仍是效能瓶颈,且现有方案多属被动监控[23],未能实现感知-执行协同,导致危险处置环节存在技术断链,缺乏主动排险能力。

针对地下作业空间受限性,学者转向机器人本体-末端可达性研究。(1)多体协同领域采用动态优先级安全间隔算法结合快速随机探索树局部拓扑适应机制[24-25],提升多机器人本体避障效率;(2)单体控制通过纵向动力学模型简化测控算法[26],研究多传感器计算时延下[27],机器人轨迹定位算法能力;(3)可基于马尔科夫决策优化路径和作业优先级分级拓展机器人末端执行器功能应用边界[28-29]。但现有研究未充分考虑障碍约束下的机器人本体建模,导致狭窄空间内运动可靠性不足,现有机器人算法避障覆盖性难以满足作业需求。

本研究拟围绕地下洞室施工排险机器人本体-末端可达性问题,设计障碍物膨胀算法并生成动态安全包络,融合障碍物膨胀与动态安全距离启发函数,设计改进的蚁群算法,求解机器人本体可达域;基于$D-H$(Denavit-Hartenberg)参数法构建6自由度机器人末端运动学模型,进行正-逆向运动学分析,建立关节角限位、连杆干涉检测的约束方程组,求解机器人末端可达域,仿真机器人排险作业,为地下洞室施工排险机器人虚拟样机研发提供理论支撑。

1 排险机器人本体可达域算法改进

蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)作为机器人本体可达域求解的群体智能优化算法,其核心是通过信息素正反馈机制和概率化路径选择策略,将路径搜索问题转化为多智能体的协作优化过程。然而,传统蚁群算法将排险机器人作为质点,未考虑地下洞室排险机器人物理宽度及安全距离约束,无法适应地下洞室施工的复杂障碍空间。为此,提出基于障碍物膨胀的改进ACO算法,基本原理如下:

(1)障碍物坐标提取与包络建模。通过传感器获取障碍物的几何坐标信息,并在栅格地图中对障碍物进行包络。

(2)机器人本体宽度的栅格膨胀。为规避本体宽度(含本体尺寸与安全阈值)风险,采用形态学膨胀算法对障碍物进行扩展:以长度r定义障碍物膨胀区域,设W_{rebot}为履带车横向宽度、d_{safe}为安全阈值。单个障碍物形成的机器人本体障碍空间如图1所示。

(3)路径搜索。将多个障碍空间约束嵌入改进蚁群算法的搜索空间,通过严格限制路径节点严格限制于非禁区范围内,并在启发函数中引入动态安全距离因子,使生成的路径趋于远离危险区。修改后的蚁群算法启发式函数如下:

$$\eta_{ij}=\frac{1}{d_{ij}}+\lambda e^{-k\cdot d_{\text{obs}}(j)} \tag{1}$$

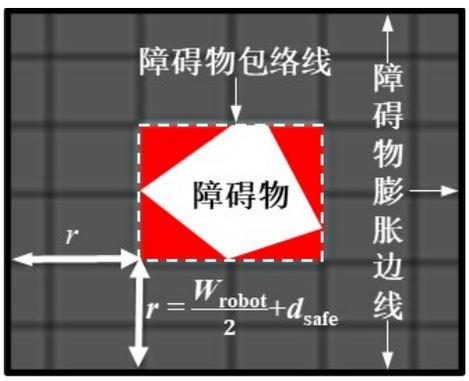


图1 单体障碍空间

Fig.1 Single obstacle zone

式(1)中：d_{ij}为节点间欧氏距离；$d_{obs}(j)$为第j个节点至最近矩形膨胀边界的曼哈顿距离，λ与k分别代表安全权重与衰减速率。

2 排险机器人末端可达域模型构建

在地下洞室排险作业中，排险机器人末端可达性至关重要。运动学可达域建模是关键环节，正向运动学建模能依据机器人各关节输入参数，精确推导末端执行器在空间中的位置与姿态，呈现其运动轨迹；而逆向运动学建模则与之相反，从期望的末端位姿出发，反解出各关节应有的运动参数。通过这两种建模方式，可全面剖析排险机器人末端可达性，为后续优化设计与高效控制奠定坚实基础。

2.1 运动学机器人末端可达域建模

六自由度PUMA560机器人被视为实现自动化的首选设备，其末端为机械手，可进行敲击排险等工作。因此，将机器人末端执行器改装为楔形头，其渐缩截面将敲击力集中作用于尖端，可显著提高应力在岩体中的传播效率。将关节旋转轴的方向定义为Z轴，沿相邻关节轴公垂线方向按照右手法则确定各个关节Y轴，据此建立$D-H$参数表(见表1)。

表1 机械臂$D-H$参数表

Table 1 The $D-H$ parameters table for the robot arm

连杆i	关节旋转角度变量θ_i（初始值）	相邻关节轴间距a_i	连杆旋转角度α_{i-1}	相邻连杆间距d_i	变量范围
1	$\theta_1(90^\circ)$	0	0	0	$-160^\circ\sim160^\circ$
2	$\theta_2(-180^\circ)$	0	-90°	0.6	$-225^\circ\sim45^\circ$
3	$\theta_3(90^\circ)$	1.65	0°	0	$-45^\circ\sim225^\circ$
4	$\theta_4(0^\circ)$	0	90°	1.716	$-110^\circ\sim170^\circ$
5	$\theta_5(0^\circ)$	0	-90°	0	$-100^\circ\sim100^\circ$
6	$\theta_6(0^\circ)$	0	90°	0.6	$-266^\circ\sim266^\circ$

表1中，各变量范围限制各关节旋转角度阈值区间，可防止旋转碰撞，消除不可达解集并抑制机械臂奇异位形的产生。

根据坐标系变换链式法则，建立第i-1个连杆到第i个连杆的坐标系齐次变换矩阵：

$$
{}_{i}^{i-1}T=\begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ sin\theta_i cos\alpha_{i-1} & cos\theta_i cos\alpha_{i-1} & -sin\alpha_{i-1} & -d_i sin\alpha_{i-1} \\ sin\theta_i sin\alpha_{i-1} & cos\theta_i sin\alpha_{i-1} & cos\alpha_{i-1} & d_i cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}
$$

机器人基座中心相对全局坐标原点存在初始变换矩阵T_{WB}，楔形头与其直接相连的关节存在固定变换矩阵E，由此可得排险机器人末端执行器操作空间的位姿矩阵X：

$$
T_{WB}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}
$$

$$
E=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}
$$

$$
X=T_{WB}{}^{0}_{6}TE=T_{WB}{}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T\,{}^{4}_{5}T\,{}^{5}_{6}TE=\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}
$$

以机器人底座中心为原点建立基坐标系，在初始变换矩阵(3)中，x、y和z分别表示X、Y、Z轴坐标值；位姿矩阵(5)的$\boldsymbol{p}$向量由基坐标系原点指向机器人末端中心处；$\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{o}$和$\boldsymbol{a}$分别代表机器人末端关节

坐标系相对于基坐标系在X、Y、Z轴方向上的旋转分量。

2.2 正向可达运动学分析

正向可达运动学分析是根据排险机器人当前的关节角度、连杆长度等参数,直接计算末端执行器在空间中的实时位姿,确保机器人末端运动可达性,验证目标排险点位是否处于可达范围内,避免因关节约束导致运动失败。

正向可达运动学假设关节角度已知,通过链式相乘法则,可得机器人末端位姿矩阵(5)的元素求解式:

$$\begin{cases}
n_x=-s_6(c_4s_1-s_4c_1c_{23})-c_6(c_5s_1s_4-c_5c_1c_4c_{23}+s_5c_2s_{23})\\
n_y=s_6(c_1c_4-s_1s_4c_{23})+c_6[c_5(c_1s_4+s_1c_4c_{23})-s_5s_1s_{23}]\\
n_z=s_4s_6s_{23}-c_6(s_5c_{23}+c_4c_5s_{23})\\
o_x=s_6(c_5(s_1s_4-c_1c_4c_{23})-c_6(c_4s_1+c_1s_4c_{23})\\
o_y=c_6(c_1c_4-s_1s_4c_{23})-s_6[c_5(c_1s_4+s_1c_4c_{23})-s_5s_1s_{23}]\\
o_z=s_6(s_5c_{23}+c_4c_5s_{23})+c_6s_4s_{23}\\
a_x=c_1c_5s_{23}-s_1s_4s_5+c_1c_4c_{23}s_5\\
a_y=s_5(c_1s_4+s_1c_4c_{23})+c_5s_1s_{23}\\
a_z=c_5c_{23}-c_4s_5s_{23}\\
p_x=x+33c_1c_2/20-3s_1/5-3s_5(s_1s_4-c_1c_4c_{23})/5+c_1s_{23}(150c_5+429)/250\\
p_y=y+3c_1/5+33c_2s_1/20+3s_5(c_1s_4+s_1c_4c_{23})/5+s_1s_{23}(150c_5+429)/250\\
p_z=z+429c_{23}/250-33s_2/20+3c_5c_{23}/5-3c_4s_5s_{23}/5
\end{cases}\tag{6}$$

式(6)中 c_i 表示 $cos\theta_i$, s_i 表示 $sin\theta_i$, c_{ij} 表示 $cos(\theta_i+\theta_j)$,s_{ij}表示 $sin(\theta_i+\theta_j)(i,j=1,2,3,4,5,6)$。带入对应关节角度和机器人底座中心相对于原点坐标进行消元法求解,可获取机器人末端位姿矩阵。

2.3 逆向可达运动学分析

逆向可达运动学分析是根据机器人作业需求,基于排险任务对末端执行器的目标位姿进行设计,计算求解满足多自由度非线性的关节角度组合,生成驱动机械臂运动的控制指令,重点解决多关节协同控制问题。

逆向可达运动学假设已知末端变换矩阵(5)的元素值,通过链式变换矩阵的逆运算建立非线性方程组,求解关节角度解析式:

$$\begin{cases}
\theta_1=atan2(p'_y,p'_x)-atan2(0.6,-\sqrt{p'^2_x+p'^2_y-0.6^2})\\
\theta_3=\dfrac{\pi}{2}+atan2(\sqrt{1.716^2-k^2},k)\\
\theta_2=atan2[-1.65p'_zc3+(1.716+1.65s_3)(p'_xc_1+p'_ys_1),\\
1.65c_3(p'_xc_1+p'_ys_1)+(1.716+1.65s_3)p'_z]-\theta_3\\
\theta_4=atan2(a_xs_1-a_yc_1,a_zs_{23}-a_xc_{23}c_1-a_zc_{23}s_1)\\
\theta_5=atan2(a_xc_{23}c_4c_1+a_yc_{23}c_4s_1+a_ys_4c_1-a_xs_1s_4-a_zc_4s_{23},\\
a_zc_{23}+a_xs_{23}c_1+a_ys_{23}s_1)\\
\theta_6=atan2[-n_x(c_4s_1+s_4c_{23}c_1)+n_y(c_4c_1-s_1s_4c_{23})+n_zs_4s_{23},\\
-n_x(c_5c_{23}c_1c_4-s_5s_{23}c_1+s_4c_5s_1)-n_y(c_5c_{23}s_1c_4-s_5s_{23}s_1-s_4c_5c_1)\\
-n_z(c_5c_{23}c_4+c_5c_{23}s_4)]\\
p'_x=p_x-(3a_x)/5-x\\
p'_y=p_y-(3a_y)/5-y\\
p'_z=p_z-(3a_z)/5-z\\
k=\dfrac{p'^2_x+p'^2_y+p'^2_z-1.65^2-0.6^2-1.716^2}{3.3}
\end{cases}\tag{7}$$

式(7)中:$atan2(y,x)$函数表示计算从原点到点(x,y)的向量与X正半轴之间的角度。带入对应末端变换矩阵(5)的元素值进行消元,可得关节角度值。

3　Webots仿真模型构建

3.1　基于Webots的排险机器人虚拟样机建模

本研究采用Webots软件，它是机器人建模与编程专业软件，支持C语言、Python语言编程。

虚拟样机以三一SY26U挖掘机为底座原型。本文结合地下洞室特殊工况进行系统性优化，提出履带式三一SY26U挖掘机基座与楔形头改装PUMA560融合的排险机器人虚拟样机方案（见图2），在保留原有挖掘机快捷、灵活的同时，提高最大作业高度并降低接地比压，满足地下洞室环境排险作业需求（见图3）。

由图3可知，排险机器人相较于三一SY26U机器人整机质量、尺寸和接地比压下降，提高最大作业高度和最大行驶速度，可有效适应地下洞室狭窄环境，满足排险作业需求。

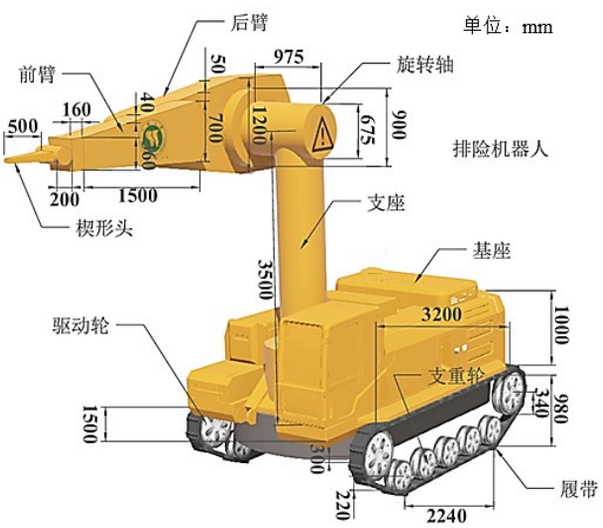


图2　排险机器人结构模型

Fig.2　Structural design diagram of the hazard elimination robot

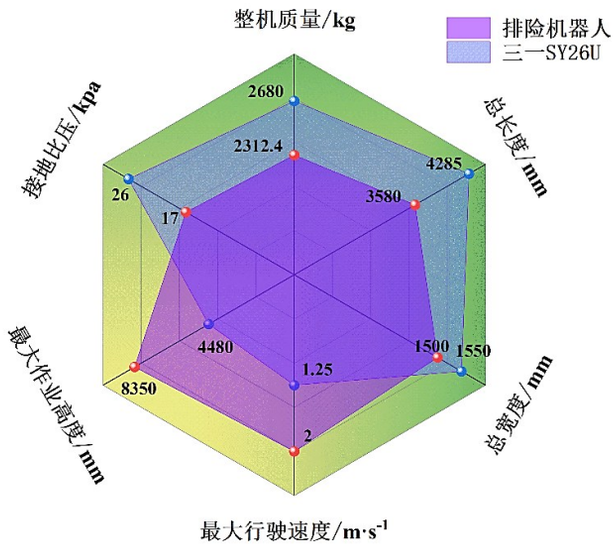


图3　排险机器人参数雷达图

Fig.3　Radar diagram of risk mitigation robot parameters

对于垂直越障，机器人履带底部与水平面夹角α增大时，整机受力部位转移至支重轮与后轮，而当障碍物最高点位于重心垂直延长线时，排险机器人达到最大垂直障碍高度[30]，如图4所示。

图4中，α为履带攀升角度，°；H_Z为垂直越障高度，mm；b为机器人重心相对接地履带中心偏移距离，mm；点M_G为机器人重心；D_S为机器人重心与接地履带垂线交点；A_q表示接地履带与垂直障碍交点；A_{h1}为后轮与接地履带相切点；A_{h2}为后轮与地面接触点。结合图2，可绘制机器人垂直越障高度过程线，如图5。

由图5可知，在α=28°时，机器人最大垂直越障高度H_{Zmax}=348mm。

3.2　基于Webots的地下洞室障碍物识别系统建

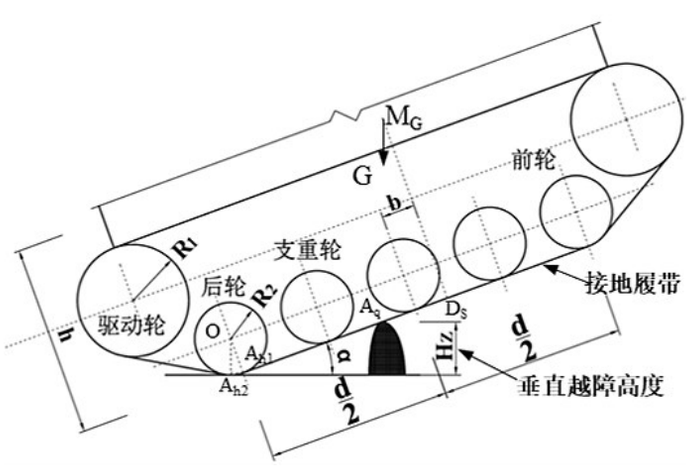


图4　排险机器人垂直越障图

Fig.4　Vertical obstacle traversal diagram for hazard elimination robot

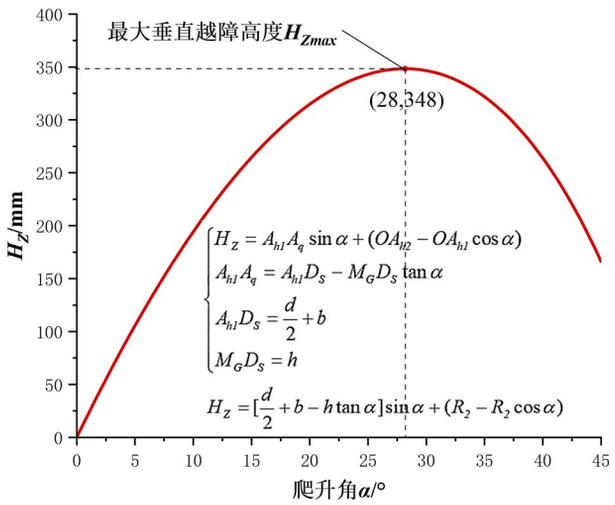


图5 机器人垂直越障高度图

Fig.5 Robotic vertical obstacle surmounting height diagram

模

Webots软件内置虚拟传感器,可设置水平分辨率和垂直视场角,识别空间障碍物,但仅能解算障碍物相对于传感器局部坐标系的相对位姿参数,难以获取全局坐标系的绝对位姿参数。为此,本研究运用坐标系变换链式法则,构建位姿映射模型:

$$T_{WO} = T_{WB}T_{BS}T_{SO} \tag{8}$$

式(8)中,T_{WO}表示障碍物相对于全局坐标系的位姿变换矩阵;T_{BS}表示传感器相对于机器人基座中心的位置,为固定偏移矩阵;T_{SO}表示障碍物相对于传感器的位姿变换矩阵,为平移变换矩阵。调用Webots的wb_supervisor_node_get_position函数,利用坐标转换关系,获取障碍物的绝对坐标,并与车载视觉传感器进行匹配,方可排除低于最大垂直障碍尺寸和碰撞范围外的障碍物。

4 案例仿真分析

以滇中引水工程为案例,针对KCT10+842.0~KCT11+583.0段Ⅴ类围岩进行仿真分析。洞室断面为马蹄形,净宽6m、拱顶高度8.35m。

4.1 障碍物识别与排险机器人本体可达域

通过点云匹配与语义分割检测,排险机器人提取碰撞范围内钢架台车、爆破块石、排水沟等障碍物以及目标危石坐标信息,如图6所示,其中低于机器人本体最大垂直越障高度的石块为非障碍物。取d_{safe}= 0.2m,结合图2可知W_{rebot}= 1.8m,由图1可知膨胀半径r为1m,形成机器人通行禁区。在栅格地图中部署改进蚁群算法,设置蚂蚁数量N=50、迭代次数T=20、信息素挥发系数ρ=0.3,取λ=0.5、k=0.3,运用式(1)修改启发式函数,并对路径进行三次B样条曲线优化,增加平滑度,结果如图7所示。经修改后的避障路径长度仅增加17.8%,却考虑了机器人宽度和安全阈值,实现100%避障。

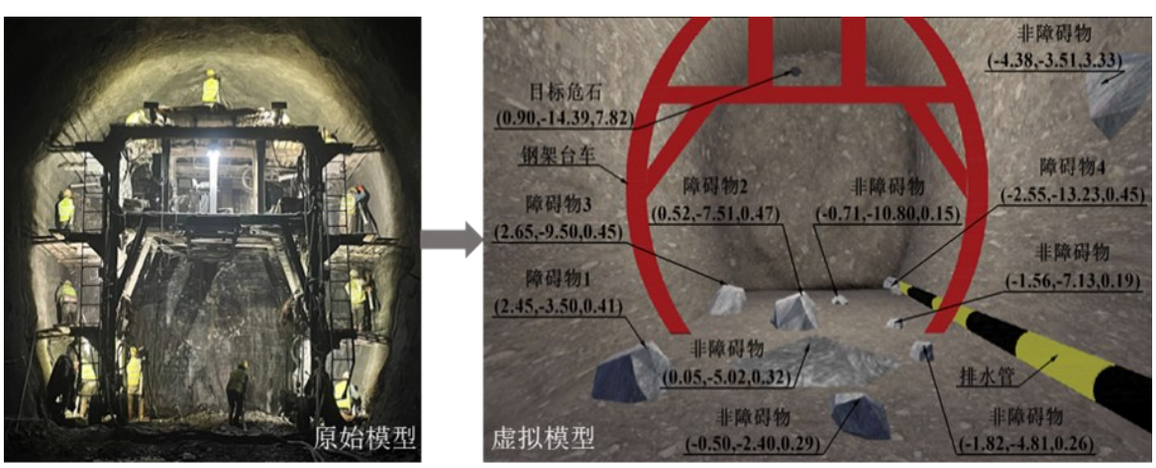


图6 排险机器人障碍物识别图

Fig.6 Obstacle recognition diagram for hazard elimination robot

4.2 排险机器人本体行进参数仿真

在Webots中按照4.1节中生成的路径,进行左右履带速度规划,机器人底座中心初始投影于XOY平面的(0.5,0.5)位置,经16.75s后,运动至(1.5,-11.5),机器人行进参数变化如图8所示。

由图8可知,在阶段Ⅰ,左右履带线速度相同,机器人作匀加速直线运动。在阶段Ⅱ,右履带线速度大于左履带线速度,机器人本体角速度$w \neq 0$,开始向左转弯:6.85~9.63s,角速度恒定,机器人作匀速圆周运动;11~16.75s,机器人逐渐趋于停止。在整个行进过程中,机器人角速度$w \propto \left|V_{left} - V_{right}\right|$,且

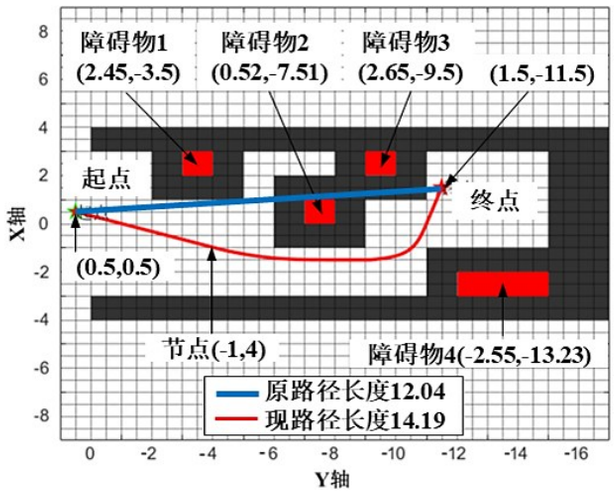


图7　机器人本体可达域图

Fig.7　Robotic body reachable path diagram

左右履带速度与转弯半径始终满足式(9)关系。

$$R=\frac{L}{2}\cdot\frac{V_{\text{right}}+V_{\text{left}}}{V_{\text{right}}-V_{\text{left}}} \tag{9}$$

式(9)中，R为机器人转弯半径，L为左右履带中心间距，V_{left}、V_{right}分别为左右履带速度。当左右履带速度相等，也即$V_{\text{left}}=V_{\text{right}}$时，$R\to\infty$，机器人作直线运动。

4.3　排险机器人末端执行器作业仿真

排险机器人末端执行器作业仿真一方面通过正向可达运动学分析，量化末端执行器在地下洞室障碍空间内的有效运动范围，避免因关节角度超限或机械干涉导致逆向可达运动学求解失败；另一方面通过设计机器人末端期望位姿，根据式(7)求解各关节角度，仿真进行排险作业。

蒙特卡罗法结合概率抽样与统计模拟，可有效解决高维非线性运动学系统的可达空间求解难题。采用(p_x,p_y,p_z)标记机器人末端空间位置坐标，在MATLAB中定义$D-H$参数和各关节变量范围，利用*rand*函数选取各关节转动随机值，并代入位置坐标，使用*plot*函数绘制机器人末端可达空间点集图，并给出各平面视图如图9所示。

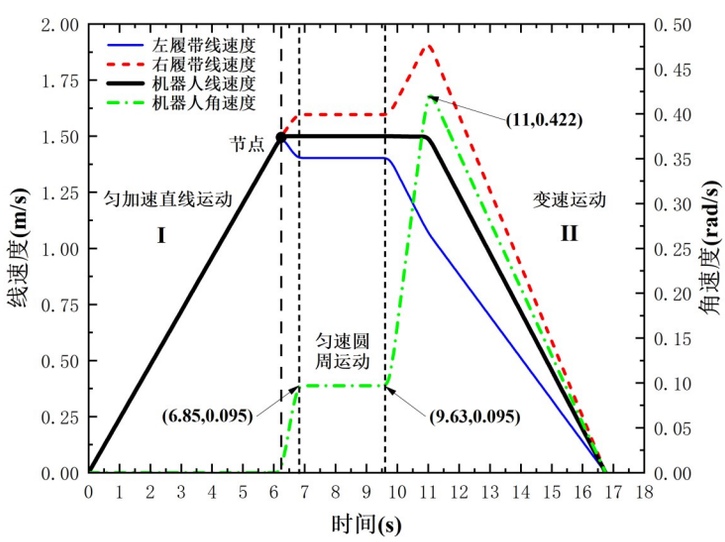


图8　机器人本体行进参数变化图

Fig.8　Diagram of changes in robot body travel parameters

由图9可知，受地下洞室空间环境限制，排险机器人末端执行器最大水平作业投影面积约30.17m^2、垂直作业范围1.71～8.35m，目标点各平面投影均被可达空间点集包络，位于机器人末端可达域内。

基于目标危石的位置与表面法向量，将楔形头末端定位至危石几何中心，调整末端姿态使末端执行器轴线与岩石表面垂直并进行敲击，设计末端期望位姿域如式(10)：

$$X=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & 0.9\\ 0.71 & 0 & -0.71 & -14.39\\ 0.71 & 0 & 0.71 & 7.82\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

采用逆向可达运动学求解方法，将式(10)矩阵元素带入式(7)，利用MATLAB，求解关节角度，经过[30]1ms后，结果求解完成(见表2)。在Webots中仿真机器人末端执行器排险作业(如图10)，机器人本体与末端均达到了期望位姿域。

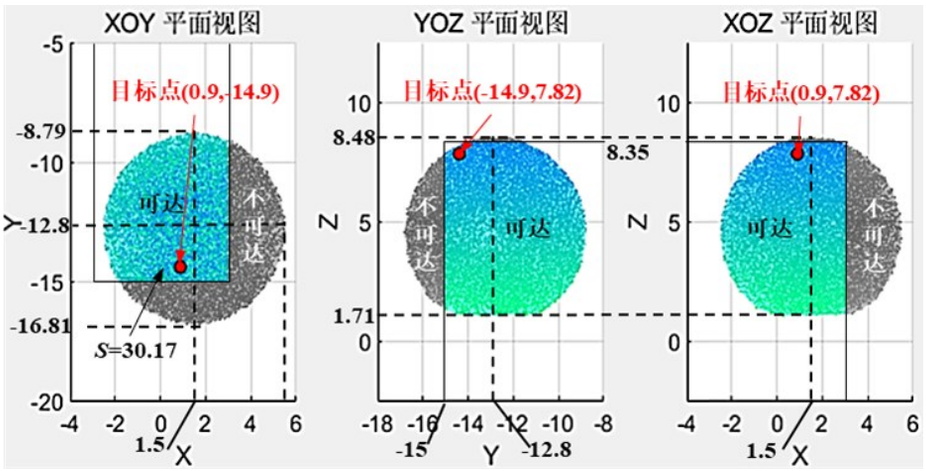


图9 机器人末端可达空间点集平面视图

Fig.9 Planar projection diagram of robotic end-effector reachable workspace point set

表2 机械臂逆向运动学关节参数表

Table 2 Robot arm inverse kinematics joint angle parameter

θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
90°	−135°	135°	0°	−45°	0°

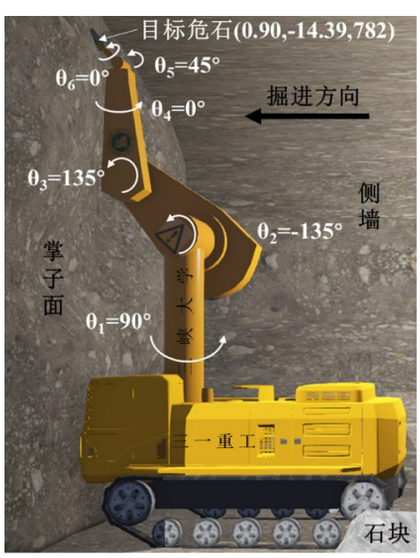


图10 排险机器人仿真效果图

Fig.10 Hazard elimination robot simulation model diagram

5 结论

针对地下洞室排险作业高危性,提出三一SY26U履带式挖掘机基座与楔形头改装PUMA560融合的排险机器人虚拟样机,仿真分析机器人本体-末端可达域。考虑机器人宽度和安全阈值,改进蚁群算法,求解排险机器人本体可达域;运用正-逆向运动学方程组,求解排险机器人末端可达域;基于Webots平台搭建机器人虚拟样机并进行仿真推演。

(1)本研究提出一种基于障碍物膨胀模型与动态安全距离启发函数的改进蚁群算法,通过构建障碍膨胀区域,考虑机器人本体宽度(1.5m)和安全阈值(0.2m);优化路径节点选择策略,通过动态调整节点选择,实现安全距离的弹性控制。在避障路径长度仅增加17.8%的代价下,成功实现机器人本体在滇中引水工程Ⅴ类围岩场景下实现100%避障,满足复杂地下洞室排险需求。

(2)通过构建6自由度机械臂$D-H$参数模型及正-逆向可达运动学方程组,结合蒙特卡洛法绘制排险机器人末端可达点集图,验证末端执行器最大水平作业投影面积达30.17m^2、垂直作业范围覆盖1.71~8.35m。保留三一SY26U挖掘机优点的同时,提升最大垂直作业高度,降低接地比压,满足地下洞室环境排险作业需求。在Webots中搭建虚拟样机,精准实现排险机器人末端执行器排险作业,为地下洞室排险机器人设计提供理论支撑。

后续将开展排险机器人实物样机研制,基于地下洞室施工场景进行实验,完善机器人环境适应性与系统鲁棒性。

6 参考文献:

[1] 徐前卫,龚振宇,孙梓栗,等.滇中引水工程超深圆形基坑施工变形和内力监测结果分析[J].土木工程学报,2022,55(06):102-111.
Xu Qianwei, Gong Zhenyu, Sun Zili, et al. Analysis on the monitoring results of construction deformation and internal force of ultra-deep circular foundation pit of Dianzhong Water Diversion Project[J]. China Civil Engineering journal, 2022, 55(06): 102-111.

[2] 焦方通,石镇玮,杜志刚,等.多入口下穿隧道主路至地下合流区车道偏移特性[J].中国安全科学学报,2024,34(12):187-194.
Jiao Fangtong, Shi Zhenwei, Du Zhigang, et al. Lateral offset characteristics from main road to underground merging area in multi-entry underpass tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12): 187-194.

[3] 李泽文,谭勇,廖少明,等.上海超深基坑地下连续墙的空间变形特性实测分析[J].岩土工程学报,2024,46(11):2380-2390.
Li Zewen, Tan Yong, Liao Shaoming, et al. Field tests on performance of diaphragm wall for an ultra-deep excavation in Shanghai soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11): 2380-2390.

[4] Bangke R, Yi S, Tengteng Z, et al. Deformation monitoring and remote analysis of ultra-deep underground space excavation[J]. Underground Space, 2023, 8: 30-44.

[5] 郭春,许昱旻,宗志栓,等.基于熵权优化法的地下空间工程施工环境评价模型研究[J].安全与环境学报,2023,23(08):2916-2923.
Guo Chun, Xu Yumin, Zong Zhishuan, et al. Research on the construction environment evaluation model of underground space engineering based on entropy power optimization method[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(08): 2916-2923.

[6] 陈云,何诗语,晋良海,等.融合眼动-心电的地下洞室施工环境驾驶负荷评价[J].中国安全科学学报,2024,34(11):229-238.
Chen Yun, He Shiyu, Jin Lianghai, et al. Evaluation of driving load in construction environment of underground tunnel based on eye-ECG physiological indicators[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 229-238.

[7] Xing Zhi-zhong, Zhao Shuanfeng, Guo Wei, et al. Coal resources under carbon peak: Segmentation of massive laser point clouds for coal mining in underground dusty environments using integrated graph deep learning model[J]. Energy, 2023, 285.

[8] Zhang Cun, Wang Fangtian, Bai Qingsheng. Underground space utilization of coalmines in China: A review of underground water reservoir construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 107:103657.

[9] 李术才,刘洪亮,李利平,等.隧道危石识别及防控研究现状与发展趋势[J].中国公路学报,2018,31(10):1-18.
Li Shucai, Liu Hongliang, Li Liping, et al. State and trend of dangerous rock prevention and control during tunnel construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 1-18.

[10] 谢和平,张茹,张泽天,等.深地科学与深地工程技术探索与思考[J].煤炭学报,2023,48(11):3959-3978.
Xie Heping, Zhang Ru, Zhang Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978.

[11] 晋良海,张荣坤,郑霞忠,等.隧洞钻孔作业工效及低位作业姿势研究[J].中国安全科学学报,2016,26(04):66-71.
Jin Lianghai, Zhang Rongkun, Zheng Xiazhong, et al. Research on simulation of drilling work posture and optimization of lowing work posture for tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(04): 66-71.

[12] 谢核,李文龙,尹周平.机器人加工几何误差建模及工程应用[J].机械工程学报,2022,58(02):175.
Xie He, Li Wenlong, Yin Zhouping. Modeling and engineering application of geometric errors in robot processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(02): 175.

[13] 毛新军.自主机器人软件工程的研究综述[J].计算机学报,2021,44(08):1661-1678.
Mao Xinjun. A Systematic Review on Software Engineering for Autonomous Robot[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(08): 1661-1678.

[14] Gharbia M., Chang-Richards A., Lu Y, et al. Robotic technologies for on-site building construction: A systematic review[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101584.

[15] Melenbrink N, Werfel J, Menges A. On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building[J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103312.

[16] Petersen K H, Napp N, Stuart-Smith R., et al. A review of collective robotic construction[J]. Science Robotics, 2019, 28(04): 8479.

[17] 陈永灿,陈嘉杰,王皓冉,等.大直径长引水洞室水下检测机器人系统关键技术[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(07):1015-1031.
Chen Yongsan, Chen Jiajie, Wang Haoran, et al. Key technology of underwater inspection robot system for large diameter and long headrace tunnel[J]. Tsinghua Univ(Sci&. Technol), 2023, 63(07): 1015-1031.

[18] 李清泉,朱家松,李虹,等.基于漂流式胶囊机器人的管道快速检测系统[J].中国给水排水,2021,37(10):126-132.

Li Qingquan, Zhu Jiasong, Li Hong, et al. Rapid detection system of pipeline based on floating capsule robot [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 126-132.

[19] 肖尧,钟登华,余佳,等.基于改进HT-LCNN线段检测模型的洞室施工活动时间信息智能提取方法[J].水利学报,2024,55(01):24-34+47.
Xiao Yao, Zhong Denghua, Yu Jia, et al. An intelligent extraction method of tunnel construction activity duration information based on improved HT—LCNN [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(01): 24-34+47.

[20] 潘良波,周文,丁志庆,等.城市地下空间信息集成管理与服务平台关键技术及应用[J].隧道建设(中英文),2021,41(04):588-596.
Pan Liangbo, Zhou Wen, Ding Zhiqing, et al. Key Technologies and application of information management and service platform for urban underground space [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(04): 588-596.

[21] Chen Xin, Zhang Qingsong, Liu Rentai, et al. Maintenance strategies and life-cycle cost analysis of inspection robots in metro tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2023, 140: 1-10.

[22] 熊浩,伍军,蔡国庆.装配式建筑全寿命周期智能建造技术体系构建[J].铁道工程学报,2023,40(05):96-101.
Xiong Hao, Wu Jun, Cai Guoqing. Establishment of Smart Construction Technology System in the Life Cycle of Prefabricated Buildings[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(05): 96-101.

[23] 张涛,丁宁,蔡晓坚,等.综合管廊巡检机器人综述[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2):522-533.
Zhang Tao, Ding Ning, Cai Xiaojian, et al. A review of underground utility tunnel inspection robots[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 522-533.

[24] 贺志刚,毛剑琳,杨邹,等.一种面向地下管网环境的多机器人路径规划算法[J].机器人,2024,46(01):94-104+117.
He Zhigang, Mao Jianlin, Yang Zou, et al. AMulti-robot Path Planning Algorithm for underground pipeline network environment[J]. Robot, 2024, 46(01): 94-104+117.

[25] Tung D, Marco T, Shehryar K, et al. Graph-based subterranean exploration path planning using aerial and legged robots[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(8): 1363-1388.

[26] Liu Keqiang, Zhong Shisheng, Kun, et al. Motion control and positioning system of multi-sensor tunnel defect inspection robot: from methodology to application [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 232.

[27] 谭震,崔祥,高永军,等.多传感器时延下井工矿无轨胶轮车轨迹跟踪控制[J].工矿自动化,2025,51(04):120-130.
Tan Zhen, Cui Xiang, Gao Yongjun, et al. Trajectory tracking control of trackless rubber-tired vehicles in underground mines under multi-sensor time delays[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(04): 120-130.

[28] 孙玉山,张力文,张国成,等.输水洞室检测机器人发展现状及关键技术研究[J/OL].哈尔滨工程大学学报,1-14.[2025-04-01].http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20250218.1024.011.html.
Sun Yushan, Zhang Liwen, Zhang Guocheng, et al. Development and key technology research of AUV in water conveyance tunnel detection[J/OL]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1-14. [2025-04-01]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20250218.1024.011.html.

[29] 徐剑安,贾连辉,荆留杰,等.喷浆机器人自适应喷涂路径规划研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(11):1963-1971.
Xu Jianan, Jia Lianhui, Jing Liujie, et al.[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(11): 1963-1971.

[30] 吴洋,王聪,董国新,等.考虑滑移的无人履带车自适应路径跟踪控制策略[J].机械工程学报,2024,60(24):211-225.
Wu Yang, Wang Cong, Dong Guoxin, et al. Slip-aware Adaptive Trajectory Tracking Control Strategy for Autonomous Tracked Vehicle[J]. Journal of mechanical engineering, 2024, 60(24):211-225.