

# 基于改进人工势场-A\*算法的核辐射环境路径规划

邱滕文<sup>1,2</sup> 张华<sup>1,2</sup> 周怀芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(西南科技大学 绵阳 621010)

<sup>2</sup>(特殊环境机器人技术四川省重点实验室 绵阳 621010)

**摘要** 为加强转运机器人在核辐射环境下的路径规划应用,本文针对传统A\*算法缺乏周围环境对路径影响的问题,引入了核辐射环境下人工势场的思想对A\*算法评价函数进行改进,通过加入辐射源斥力函数、障碍物斥力函数以及目标点引力函数计算出栅格中受到的合力,以此让规划的路径远离周围障碍物;并对A\*算法的距离代价改为吸收辐射剂量代价,以及对启发式函数引入了核辐射环境下适用的动态系数,使得算法在搜索过程中有自适应权重对路径产生影响。MATLAB仿真实验表明:改进后的A\*算法与传统A\*算法相比核辐射剂量降低了52.11%~55.29%,与其他改进算法相比搜索节点数下降了34.67%~46.19%,且与辐射源和周围障碍物始终保持安全距离,具有较好的实现效果,验证了算法的有效性和优越性。

**关键词** 转运机器人,核辐射环境,人工势场,A\*算法,路径规划

**中图分类号** TL72, TL77

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2022-0054

## Path planning for nuclear radiation environments based on an improved artificial potential field A\* algorithm

QIU Mengwen<sup>1,2</sup> ZHANG Hua<sup>1,2</sup> ZHOU Huaifang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China)

<sup>2</sup>(Sichuan Key Laboratory of Special Environmental Robotics, Mianyang 621010, China)

**ABSTRACT** In order to enhance the path planning application of the transfer robot in a nuclear radiation environment, this paper addresses the problem of lack of influence from the surrounding environment on the path by the traditional A\* algorithm, and introduces the idea of an artificial potential field in the nuclear radiation environment to improve the evaluation function of this algorithm. This was achieved by obtaining the sum of the radiation source repulsion function, obstacle repulsion function, and target point gravitational force function to calculate the combined force received in the grid, thereby ensuring that the planned path is far from the surrounding environment. For the improved A\* algorithm, the MATLAB simulation experiments showed a decrease in the nuclear radiation dose by 52.11%~55.29% compared with the traditional A\* algorithm, and a decrease in the number of search nodes by 34.67%~46.19% compared with other improved algorithms. Moreover, the safety distance with

基金资助: 四川省科技计划资助项目(2021YFG0376)

第一作者: 邱滕文,男,1998年5月出生,2020年获西南科技大学学士学位;目前为西南科技大学硕士研究生,电子信息专业

通信作者: 张华,教授, E-mail: swustai@163.com

收稿日期: 初稿 2022-06-03; 修回 2022-09-07

Supported by Sichuan Provincial Science and Technology Plan Funding Project (2021YFG0376)

First author: QIU Mengwen (male) was born in May 1998, and obtained his bachelor's degree from Southwest University of Science and Technology in 2020. Now he is a graduate student at Southwest University of Science and Technology, majoring in electronic information

Corresponding author: ZHANG Hua, professor, E-mail: swustai@163.com

Received 03 June 2022; accepted 07 September 2022

the radiation sources and surrounding obstacles was constantly maintained, providing a better implementation effect and allowing the verification of the effectiveness and superiority of the improved A\* algorithm.

**KEYWORDS** Transit robot, Nuclear radiation environment, Artificial potential field, A\* algorithm, Path planning

**CLC** TL72, TL77

核能是能源的重要组成部分,它具有高能量密度、污染小的特点,为减少环境污染和发展我国的能源战略发挥了重要作用。虽然在核设施周围都有较为周全的防护措施,但对于在其中长期工作的人员来说,还是会受到一定剂量的辐照。目前,在核设施周围的生产作业过程中,核废料桶的运输还多是人工参与搬运。水泥固化生产线废料桶的周转过程中,通过人工操作手推升降机,将空废料桶从线边库存区转运至固化线生产滚筒线,该过程由于人工操作搬运存在着作业效率低、工作强度大、辐照影响职工健康等问题,该环节的工作完全可以通过转运机器人替代人工作业,虽然机器人可以安装一些辐射防护措施,在一定程度上可以控制机器人所受到的辐照水平,但我们还可以依靠技术手段为机器人设计一条合理的路线,使得机器人遭受的辐射降到最低,这样不仅可以保障职工的健康安全,还可以提高作业效率,延长机器人工作寿命。

近年来,针对核设施环境下的路径规划工作一直是研究热点。陶龙龙等<sup>[1]</sup>提出了一种在核辐射环境下适用的改进型A\*算法,该方法通过改进启发式函数与传统A\*算法实验对比,有效减少了路径总剂量代价。Chen等<sup>[2]</sup>对于核电站环境提出了一种改进的A\*算法,提供了一条累计剂量较低且长度合适的路径,经实验具有很强的抗干扰能力。Chao等<sup>[3]</sup>提出了基于网格的快速搜索随机树星(Grid-based rapidly-exploring random trees star, GB-RRT\*)算法,该算法在实现最小剂量路径的收敛性和可靠性方面均优于快速搜索随机树星(Rapidly-exploring random trees star, RRT\*)算法,为职业工人提供了最低剂量路径。对于其他智能算法在核辐射场景下的路径规划应用也较为广泛,张广成等<sup>[4]</sup>提出了对时间和剂量数值的双重约束,在蚁群算法中引入了辐射剂量权重因子对其进行修正,为核事故应急救援中的路径规划方案提供了新的思路。Zhou等<sup>[5]</sup>提出了改进的象群-蚁群混合算法,通过改进后的算法,在辐射环境中获得的路径更可靠,收敛速度更快,尤其是在含有凹面障碍物的环境,表现出了良好的搜索效果。Wang等<sup>[6]</sup>对粒子群算法进行了改进,建立了路径规划问题的数学剂量计算模型,实

验表明,可以降低有效剂量值,且保证总体收敛速度不受影响。对于避免辐射的路径优化问题,Gu等<sup>[7]</sup>设计了辐射接收运动模型和基于甲虫天线搜索(Beetle antennae search, BAS)的辐射规避算法,该算法具有较高的计算效率和简单的过程,计算机模拟实验表明,该算法可用于应对避免辐射应用的挑战。

以上相关研究对于核设施环境下的各种路径规划算法均有针对减少累计剂量指标的优化,但对于所规划路径是否便于机器人通过,以及搜索冗余节点的优化并未做过多讨论。本文拟采用转运机器人代替人工作业,将废料桶由库存区转运至生产线附近,需规划出一条累计剂量较低、远离地图障碍物、无多余拐点且搜索效率高的路径,以便于转运机器人安全高效地运送废料桶。因此,本文提出了一种引入人工势场影响并以总体辐射吸收剂量为评价函数的改进A\*算法。首先,根据合理估计辐射剂量代价修改评价函数,再引入核辐射环境下的人工势场法,使得所规划路径远离周围障碍物,该线路既保障了机器人的累计吸收剂量较小,又为运输过程的安全提供了保障。最后,引入了针对核辐射环境下的启发式函数动态系数,以平衡搜索开始阶段系数较小引起的搜索效率低下和搜索过程中系数过大而导致搜索最优路径失败的问题,并进一步减少搜索的冗余节点数,有效提高了算法的搜索效率。

## 1 算法描述

### 1.1 环境建模

本文所使用的A\*算法会针对环境地图信息进行栅格化处理<sup>[8]</sup>,每个栅格代表边长为0.2 m的正方形区域,黑色栅格代表障碍物,其余栅格代表自由通行区域,搜索方式采用八邻域搜索<sup>[9-11]</sup>,如图1(a)所示。在规划的路径中,如果线路和障碍物相接,相接点称为高风险点,此时机器人会与障碍物发生碰撞,如图中H点;如果线路和障碍物的距离小于半个栅格长度,则将该节点称为低风险点,此时机器人与障碍物容易发生碰撞,如图1(b)中L1、L2、L3、

L4点所示。

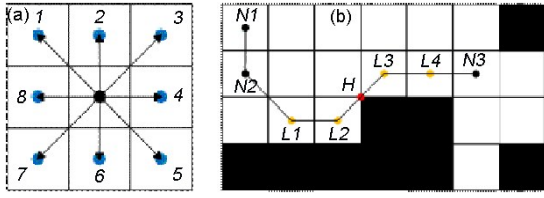


图1 环境建模: (a) 搜索方式; (b) 栅格地图及风险点  
Fig.1 Environmental modelling: (a) mode of search; (b) raster maps and risk points

## 1.2 基于核辐射环境改进A\*算法评价函数

A\*算法是通过Dijkstra算法改进而来,是一种典型的启发式搜索算法<sup>[12-13]</sup>。它主要通过计算当前点到起点的累计实际代价和当前点到目标点的预估代价组成A\*算法的评价函数。通过这个评价函数计算出地图上被搜索节点的代价,并对接下来需要搜索的节点进行评估,从而迭代计算,不断靠近目标点。它的表达式定义为式(1)。

$$F(n) = G(n) + H(n) \quad (1)$$

式中: $F(n)$ 代表的是从起始点通过节点 $n$ 到达目标点需要花费的代价; $G(n)$ 表示起始点到当前点的累计实际代价; $H(n)$ 表示预估当前点到目标点的代价。

由于传统A\*算法只能解决路径最短问题,但在核辐射环境下,需要考虑机器人受到的辐射剂量影响。因此,改进后的A\*算法以机器人的吸收剂量作

$$H(n) = \frac{l}{24v} \left( \sum_{i=x_c}^{x_g-1} \left( \sum_{j=y_c-1}^{y_c+1} N_k(x,y) + \sum_{j=y_g-1}^{y_g+1} N_k(x,y) \right) + \sum_{i=y_c}^{y_g-1} \left( \sum_{j=x_c-1}^{x_c+1} N_k(x,y) + \sum_{j=x_g-1}^{x_g+1} N_k(x,y) \right) \right) \quad (4)$$

$$F(n) = \frac{l \times d_k}{v} \times \sum_{k=1}^{n-1} \left( \frac{N_k(x,y) + N_{k+1}(x,y)}{2} \right) + \frac{1}{24v} \left( \sum_{i=x_c}^{x_g-1} \left( \sum_{j=y_c-1}^{y_c+1} N_k(x,y) + \sum_{j=y_g-1}^{y_g+1} N_k(x,y) \right) + \sum_{i=y_c}^{y_g-1} \left( \sum_{j=x_c-1}^{x_c+1} N_k(x,y) + \sum_{j=x_g-1}^{x_g+1} N_k(x,y) \right) \right) \quad (5)$$

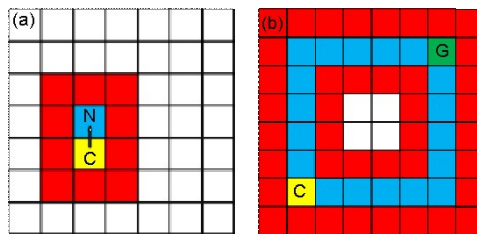


图2 A\*算法启发式函数选取示意图:(a)相邻栅格剂量率选取;(b)预估路径剂量率选取  
Fig.2 Heuristic function selection of A\* algorithm:  
(a) dose rate selection of adjacent grids; (b) selection of estimated path dose rate

为评价函数;其中 $G(n)$ 代表的是机器人从起始点到当前点的累计吸收剂量, $G(n)$ 表示为式(2)。

$$G(n) = \frac{l \times d_k}{v} \times \sum_{k=1}^{n-1} \left( \frac{N_k(x,y) + N_{k+1}(x,y)}{2} \right) \quad (2)$$

式中: $l$ 代表栅格长度; $v$ 为机器人移动速度; $N_k(x,y)$ 和 $N_{k+1}(x,y)$ 分别代表第 $k$ 和第 $k+1$ 个节点的剂量率,除以2代表相邻栅格之间的剂量率的平均值。

$$d_k = \begin{cases} 1 & \\ 1.414 & \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d_k$ 取值如图1(a)所示,节点2、4、6、8表示移动路径为栅格直边,取值为1,节点1、3、5、7表示移动路径为栅格对角线,取值为1.414。

$H(n)$ 表示预估当前点到目标点机器人的吸收剂量, $H(n)$ 的选取对A\*算法搜索路径起到了至关重要的作用<sup>[14]</sup>, $H(n)$ 的预估值越接近实际值则规划的路径越接近最优路径。由于本文考虑的是预估剂量率, $H(n)$ 定义为式(4)。

A\*算法启发式函数估计当前点 $(x_c, y_c)$ 和目标点 $(x_g, y_g)$ 之间的代价, $C$ 代表当前节点, $N$ 代表预估下一步的节点, $G$ 代表目标节点,每一段相邻节点的剂量率估计除了 $C$ 点和 $N$ 点外,还加入了周围10个节点剂量率,再算平均值,如图2所示,可以有效估计接下来路径的剂量率。

$F(n)$ 代表的是机器人从起始点通过节点 $n$ 要到达目标点需要的吸收剂量代价,所以改进后A\*算法的评价函数可以表示为式(5)。

### 1.3 引入核辐射环境下的人工势场法

传统人工势场法<sup>[15-16]</sup>是由Khatib于1986年提出的一种虚拟力法,与A\*算法的启发式函数作用相近,其中包含了构建的虚拟引力场和虚拟斥力场,通过目标点对机器人产生引力和障碍物对机器人产生斥力,作为对机器人施加的合力,引导机器人避开障碍物朝目标前进。由于它计算简单、规划的路径安全平滑的特点被广泛应用于机器人路径规划中。

引力势场与机器人和目标点的距离呈正相关,机器人离目标点越远,所受的引力越大,机器人离

$$U_{\text{req}}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}k\left(\frac{1}{\rho(q,q_0)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & 0 \leq \rho(q,q_0) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q,q_0) \geq \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $k$ 为斥力增益系数; $q_0$ 为障碍物位置; $\rho(q,q_0)$ 是一个矢量,代表机器人与障碍物之间的距离; $\rho_0$ 是常数,表示当机器人离障碍物在 $\rho_0$ 距离以内才有斥力效果。

总的势场函数为引力势场和斥力势场之和如式(8)表示。

$$U(q) = U_{\text{att}}(q) + U_{\text{req}}(q) \quad (8)$$

由于A\*算法在规划路径时缺乏对周围障碍物的考虑,离障碍物较近存在碰撞风险,所以通过引入人工势场法可以在规划的路径中与障碍物始终保持安全距离,为达到此效果,在栅格地图中目标点所在节点引入引力势场,在障碍物所在节点引入斥力势场;辐射源所在位置对机器人产生单独的斥

$$U_{\text{req}}(q) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \left( k \left( \frac{1}{\rho(q,q_i)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \right) + \gamma \frac{1}{e^{\rho(q,q_n)}}, & 0 \leq \rho(q,q_n) \leq \rho_0 \\ \gamma \frac{1}{e^{\rho(q,q_n)}}, & \rho(q,q_n) \geq \rho_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $i$ 代表周围第 $i$ 个障碍物对机器人位置的斥力; $\gamma$ 代表辐射源斥力系数; $q_n$ 代表辐射源位置; $\rho(q,q_n)$ 代表机器人当前位置到辐射源位置的距离。 $N$ 代表

$$G'(n) = G(n) + \sqrt{U_{\text{att},x}(q) + U_{\text{req},x}(q)^2 + U_{\text{att},y}(q) + U_{\text{req},y}(q)^2} \quad (11)$$

式中: $U_{\text{att},x}(q)$ 和 $U_{\text{req},x}(q)$ 分别代表引力势场和斥力势场在 $x$ 轴方向的分量, $U_{\text{att},y}(q)$ 和 $U_{\text{req},y}(q)$ 分别代表引力势场和斥力势场在 $y$ 轴方向的分量。

### 1.4 引入核辐射环境下A\*算法启发式函数动态系数

引入人工势场后的A\*算法可以有效减少搜索

目标点越近,所受引力越小。引力势场函数如式(6)所示。

$$U_{\text{att}}(q) = \frac{1}{2}\eta\rho^2(q,q_g) \quad (6)$$

式中: $\eta$ 为引力增益系数; $q$ 代表当前位置; $q_g$ 代表目标位置; $\rho(q,q_g)$ 是一个矢量,代表当前位置到目标点的距离。

斥力势场与机器人当前位置和障碍物的距离有关,障碍物对周围空间有一个影响范围,当机器人在影响范围外时,斥力表现为零;当机器人在影响范围内时,距离越近,斥力表现越大,距离越远,斥力表现越小。斥力势场函数表示为式(7)。

力,该斥力距离越远,作用力越小。在共同的作用范围内,各势场力效果相互叠加,本文将每个栅格受到的引力和斥力在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向上叠加,然后计算出该栅格受到的合力,将该合力引入到A\*算法的 $G(n)$ 中。当机器人在栅格地图中处于障碍物影响范围外时,仅受到目标点的引力和辐射源的斥力;当机器人在栅格地图中处于障碍物影响范围内时,会受到目标点的引力、周围障碍物施加的斥力以及辐射源的斥力。

引力势场表示为式(9)。

$$U_{\text{att}}(q) = \eta\rho(q,q_g) \quad (9)$$

式中: $\eta$ 为引力增益系数。

核辐射环境下斥力势场则表示为(10)式。

辐射源位置,如图3所示。

所以A\*算法评价函数中 $G'(n)$ 可用式(11)表示。

过程中Closed列表中节点的数量,因为斥力场覆盖的节点可以避免A\*算法重复搜索,从而减少运算量,提高寻路速度。但对于A\*算法的启发式函数,如果估计值小于实际值,会产生过多的搜索节点,降低计算效率,但可以获得最优路径;如果估计值大于实际值,将生成较少的搜索节点,虽然效率提升,但路径不一定最优。所以本文拟对A\*算法启发式函

数加以改进,起到平衡此问题的作用。在搜索开始阶段,此时应增加估计值权重,起到提高效率的作用,在搜索过程中不断接近目标点时,应当不断减小估计值权重,以得到最优路径。所以本文对A\*算法的启发式函数引入核辐射环境下的动态系数如式(12)所示。相较于改进前,会进一步减少Closed列表中的搜索节点数,但会保持路径的低辐射剂量。

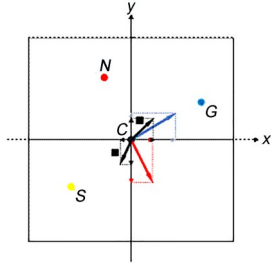


图3 人工势场受力  
Fig.3 Artificial potential field forces

$$H'(n) = \left( 1 + \frac{\rho(q, q_g)}{\rho(q_s, q_g) + \rho(q, q_n)} \right) \times H(n) \quad (12)$$

式中: $\rho(q_s, q_g)$ 为机器人起始点和目标点之间的距离; $\rho(q, q_g)$ 为机器人当前位置和目标点之间的距离; $\rho(q, q_n)$ 为机器人当前位置和辐射源位置的距离。

## 1.5 算法概览

经改进后的A\*算法如下所示。

### Algorithm 1: Improve A\*

```

Input: Obstacle_map, Nuclear_map, Map_size, Start_point,
Goal_point, Open_list, Closed_list
1 For i←1 to (Map_size)
2   For j←1 to (Map_size)
3     do if Nodes(i,j)≠Obstacle
4       then I(i,j)←artificial_potential_field + Nuclear_radiation_dose
5     end
6 end
7 end
.....
8 Openlist = Start_point
9 while Current_node ≠ Goal_point
10  do Min F'(n) ← Cost of surrounding expandable nodes
11    next_nodes ← Min F'(n) corresponding node
12    Closed_list = [Closed_list; next_nodes]
13    Closed_cost = [Closed_cost; Min F'(n)]
14 end
Output: Path, Cumulative nuclear radiation dose, Search nodes

```

## 2 仿真实验

为验证本文改进后A\*算法在核辐射环境下的有效性,对文献中改进A\*算法<sup>[1]</sup>、本文方法和A\*算法在MATLAB中进行仿真实验,计算机配置为: Intel(R) Core(TM) i5-10300H 2.50 GHz CPU、NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti GPU、内存8 GB。蒙特卡罗方法是一种概率方法,常用于计算辐射剂量,可通过计算机模拟和抽样求解出近似解。本实验以钴-60作为辐射源,将它视为点辐射源,通过中子输运设计与安全评价软件系统SuperMC得到吸收剂量场数据<sup>[17-20]</sup>。

### 2.1 改进A\*算法评价函数对比实验

通过改进A\*算法在核辐射环境下适用的评价函数,选取相同的起始点和相同的目标点分别在30×30和50×50地图中进行实验,如图4所示。

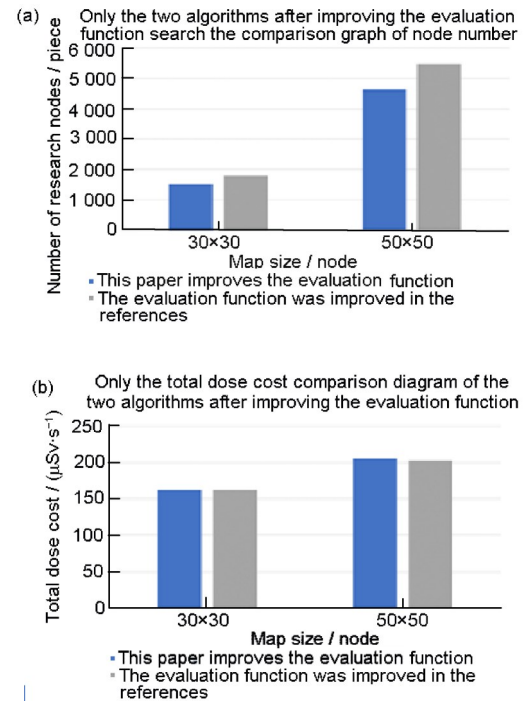


图4 本文改进评价函数后与引用文献算法对比:(a)搜索节点数对比;(b)总剂量对比(彩色见网络版)

Fig.4 Comparison with the cited literature algorithm after improving the evaluation function in this paper: (a) comparison of the number of search nodes; (b) total dose comparison (color online)

搜索节点数反映了A\*算法的搜索效率,通过减少路径规划算法的搜索节点数,可以提高机器人更早到达目的地的概率,减少搜索时间,有效提高了路径规划算法的性能。从图4可以看出,改进评价函数后的A\*算法相比于引用文献算法在生成的路径

总剂量代价几乎一致;但搜索节点数有了显著降低,在30×30的地图中,搜索节点数降低了15.6%,在50×50的地图中,搜索节点数降低了15.1%。实验结果表明,改进适用于核辐射环境下的A\*算法评价函数后相比于引用文献算法有效提高了搜索效率。

### 2.2 引入人工势场影响的改进A\*算法对比实验

在实验一的基础上,继续引入人工势场实验,可以有效规避障碍物,使得转运机器人可以在保证

生成路径的总剂量代价较低的情况下,更倾向于选择道路更宽的路径,且远离周围障碍行驶。本文针对30×30的稀疏障碍物地图和50×50的稠密障碍物地图,选取相同的起始点和目标点对传统A\*算法(Path1, Path4)、文献[1]中的改进A\*算法(Path2, Path5)和本文引入人工势场影响的改进的A\*算法(Path3, Path6)做实验对比。此时的路径将按着远离周围障碍物、较低辐射剂量的原则规划,如图5所示。

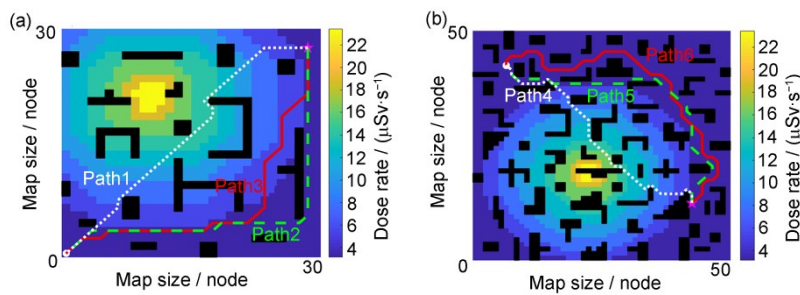


图5 引入人工势场影响后算法对比图: (a) 30×30地图; (b) 50×50地图  
 Fig.5 Comparison diagram of the algorithm after the introduction of artificial potential field influence: (a) 30×30 map; (b) 50×50 map

由表1中数据对比可知,引入人工势场影响的改进A\*算法(路径3、路径6)相比于文献[1]算法在搜索耗时上有所下降,搜索效率明显提高。在30×30的地图中,搜索节点数减少了12.4%,移动距离减少了0.7 m,风险节点数均降为0;在50×50的地图中搜索节点数减少了26.98%,移动距离增加了1.87 m,

风险节点数均降为0。在本实验中,虽然引入人工势场影响后的改进A\*算法在生成路径的总剂量代价上略高于文献[1]中的改进A\*算法,但从路径上消除了有风险的节点,使得规划路径远离障碍物,更有利于自动引导运输车(Automated guided vehicle, AGV)转运机器人安全行进。

表1 各算法实验数据对比  
 Table 1 Comparison of experimental data of each algorithm

路径编号 Path number	移动距离 / m Moving distance	搜索耗时 / s Search time	搜索节点数 / Piece Number of search nodes	高风险点数 / Point High risk points	低风险点数 / Point Low risk points	总剂量代价 / μSv Total dose cost
路径1 Path1	8.47	0.51	784	5	10	77.78
路径2 Path2	10.41	0.58	1 800	1	20	32.49
路径3 Path3	9.71	0.56	1 576	0	0	37.17
路径4 Path4	11.24	0.59	808	12	32	96.66
路径5 Path5	12.97	0.69	5 456	7	32	40.48
路径6 Path6	14.84	0.67	3 984	0	0	46.29

### 2.3 引入动态系数后的改进A\*算法对比实验

为了进一步提高改进A\*算法后的搜索效率,引入动态系数后在上一个实验背景下进一步实验,分别在30×30和50×50的栅格地图中测试,传统A\*算

法为Path1和Path4、文献[1]中的改进A\*算法为Path2和Path5和本文继续引入动态系数后的改进A\*算法为Path3和Path6。本文改后的A\*算法路径始终远离周围障碍物且保持低辐射剂量,搜索节点数进一步降低,实验如图6所示。

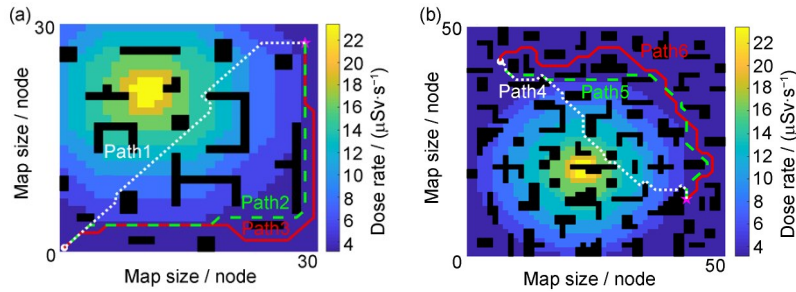


图6 引入动态系数后算法对比图: (a) 30×30地图; (b) 50×50地图  
Fig.6 Comparison diagram of algorithm after introducing dynamic coefficient: (a) 30×30 map; (b) 50×50 map

由表2可知,引入动态系数后的改进A\*算法相比仅引入人工势场影响时的改进A\*算法在30×30地图中搜索节点数下降了25.38%;在50×50地图中搜索节点数下降了26.31%。引入动态系数后的改进A\*算法相比于文献1中的改进A\*算法在30×30的地图中搜索节点数下降了34.67%;在50×50的地图中搜索节点数下降了46.19%,且搜索耗时均有所下降,风险系数点均保持为0。说明引入动态系数后的

改进A\*算法相比未引入前有效提高了搜索效率,且相比于文献[1]中的改进A\*算法大幅提高了搜索效率。但本实验中为了规避风险节点远离周围障碍物,导致规划的路径长度增加,从而影响总剂量代价增加,但与文献[1]中所规划的路径所受总剂量代价接近,相比传统A\*算法规划的路径总剂量代价大幅降低。

表2 各算法实验数据对比  
Table 2 Comparison of experimental data of each algorithm

路径编号 Path number	移动距离 / m Moving distance	搜索耗时 / s The search time	搜索节点数 / Piece Number of search nodes	高风险点数 / Point High risk points	低风险点数 / Point Low risk points	总剂量代价 / μSv Total dose cost
路径1 Path1	8.47	0.51	784	5	10	77.78
路径2 Path2	10.41	0.58	1 800	1	20	32.49
路径3 Path3	11.15	0.54	1 176	0	0	34.77
路径4 Path4	11.24	0.59	808	12	32	96.66
路径5 Path5	12.97	0.69	5 456	7	32	40.48
路径6 Path6	14.84	0.63	2 936	0	0	46.29

### 3 结论

本文针对核辐射场景中机器人行进的A\*路径规划方法进行了改进,通过改进A\*算法的评价函数

使得该算法适用于在核辐射场景下使用,并引入了人工势场影响,将规划的路径远离环境中的障碍物,减少机器人行进过程中发生碰撞的概率;最后为进一步提高算法的搜索效率加入了基于辐射环

境的动态系数。实验表明,改进后的A\*算法可以有效提高搜索效率,保障机器人行进路径的安全,且路径平滑可靠无多余拐点,验证了算法的有效性,对辐射环境中机器人作业的应用提供了参考。

**作者贡献声明** 邱滕文提出研究思路,设计研究方案,负责实验;张华提出研究方案修改意见;周怀芳指导研究思路及方法,负责最终版修订;所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

## 参考文献

- 1 陶龙龙, 龙鹏程, 郑晓磊, 等. 改进型A\*算法引导的核辐射环境路径规划[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, **36**(6): 060601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rrj.36.060601.  
TAO Longlong, LONG Pengcheng, ZHENG Xiaolei, *et al.* An improved A\* algorithm-guided path-planning method for radioactive environment[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, **36**(6): 060601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rrj.36.060601.
- 2 Chen C, Cai J J, Wang Z, *et al.* An improved A\* algorithm for searching the minimum dose path in nuclear facilities[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, **126**: 103394. DOI: 10.1016/j.pnucene.2020.103394.
- 3 Chao N, Liu Y K, Xia H, *et al.* Grid-based RRT\* for minimum dose walking path-planning in complex radioactive environments[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **115**: 73-82. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.01.007.
- 4 张广成, 何桃, 郑晓磊, 等. 基于剂量权重因子与蚁群算法耦合的核应急路径规划仿真[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(2): 020601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.020601.  
ZHANG Guangcheng, HE Tao, ZHENG Xiaolei, *et al.* Simulation research of nuclear emergency path planning based on the coupling of dose weight factor and ant colony optimization[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, **38**(2): 020601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.020601.
- 5 Zhou H F, Zhang H, Qiu M W. Radiation avoiding algorithm for nuclear robot path optimization[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, **169**: 108948. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108948.
- 6 Wang Z, Cai J J. The path-planning in radioactive environment of nuclear facilities using an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, **326**: 79-86. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.11.006.
- 7 Tan K, Li M K, Gu H X, *et al.* A radiation avoiding algorithm of path optimization for radiation protection of workers and robots[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, **135**: 106968. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106968.
- 8 王梓强, 胡晓光, 李晓筱, 等. 移动机器人全局路径规划算法综述[J]. 计算机科学, 2021, **48**(10): 19-29. DOI: 10.11896/jsjcx.200700114.  
WANG Ziqiang, HU Xiaoguang, LI Xiaoxiao, *et al.* Overview of global path planning algorithms for mobile robots[J]. Computer Science, 2021, **48**(10): 19-29. DOI: 10.11896/jsjcx.200700114.
- 9 Zhang D H, You X M, Liu S, *et al.* Dynamic multi-role adaptive collaborative ant colony optimization for robot path planning[J]. IEEE Access, 8: 129958-129974. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009399.
- 10 焦莉莉, 王凤娇, 张苏林, 等. 针对不规则机器人路径规划改进的A\*算法[J]. 电脑知识与技术, 2021, **17**(27): 98-100. DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2021.2718.  
JIAO Lili, WANG Fengjiao, ZHANG Sulin, *et al.* Improved A\* algorithm for path planning of irregular robots[J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, **17**(27): 98-100. DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2021.2718.
- 11 Xu Y R, Liu R. Path planning for mobile articulated robots based on the improved A\* algorithm[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, **14**(4): 172988141772801. DOI: 10.1177/1729881417728013.
- 12 Ji X Y, Feng S, Han Q D, *et al.* Improvement and fusion of A\* algorithm and dynamic window approach considering complex environmental information[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, **46**(8): 7445-7459. DOI: 10.1007/s13369-021-05445-6.
- 13 肖献强, 王鼎用, 王家恩, 等. AGV复合自主路径规划方法研究[J]. 机械设计与制造, 2022(3): 262-265. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20211115.007.  
XIAO Xianqiang, WANG Dingyong, WANG Jiaen, *et al.* A research on AGV composite autonomous path planning method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(3): 262-265. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20211115.007.
- 14 Chen Y Q, Guo J L, Yang H D, *et al.* Research on navigation of bidirectional A\* algorithm based on ant colony algorithm[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, **77**(2): 1958-1975. DOI: 10.1007/s11227-020-03303-0.



- 15 Song J, Hao C, Su J. Path planning for unmanned surface vehicle based on predictive artificial potential field[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, **17**(2): 172988142091846. DOI: 10.1177/1729881420918461.
- 16 Orozco-Rosas U, Montiel O, Sepúlveda R. Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, **77**: 236-251. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.01.036.
- 17 赵恒柱, 杨明翰, 邓多成, 等. 期望核辐射剂量下移动机器人的路径规划[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2021, **39**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rj.39.050601.  
ZHAO Hengzhu, YANG Minghan, DENG Duo Cheng, *et al.* Path planning of mobile robot under expected radiation dose[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2021, **39**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rj.39.050601.
- 18 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC[J]. *核科学与工程*, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.  
WU Yican, SONG Jing, HU Liqin, *et al.* Super Monte Carlo simulation program for nuclear and radiation process: SuperMC[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2016, **36**(1): 62-71. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009.
- 19 Long P C, Zeng Q, He T, *et al.* Development of a geometry-coupled visual analysis system for MCNP[J]. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2011, **2**: 280-283. DOI: 10.15669/pnst.2.280.
- 20 Wu Y C, Long P C, Yu S P, *et al.* Depth peeling based nuclear radiation shield calculation grid generation method and system: US20180018407[P/OL]. (2018-01-18) [2022-06-03]. <https://www.freepatentsonline.com/y2018/0018407.html>.