doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.043

基于改进 A* 算法的地下无人铲运机导航路径规划*

马　飞　杨皞屾　顾　青　孟　宇
(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种基于改进 A* 算法的铰接式地下铲运机导航路径规划方法。针对地下铲运机的铰接结构,采用按铰接角扩展节点的方法,使扩展节点符合铲运机的轨迹特性;针对巷道狭窄,易于发生碰撞的问题,在估价函数中引入了碰撞威胁代价,避免铲运机与巷道壁发生碰撞。通过仿真试验分析比较了传统 A* 算法和所提出的改进 A* 算法的搜索性能,验证了改进 A* 算法可提高搜索效率。通过多组试验参数比较表明,当碰撞代价加权系数为 0.2 时,可以得到在避免碰撞情况下的最短路径。最后在实验室环境下实现了无人铲运机的路径规划及轨迹跟踪。跟踪结果表明,采用所提出的算法规划的导航路径,符合铲运机的结构特性,使跟踪误差保持在 0.2 m 之内,同时也可使铲运机不与巷道发生碰撞,实现安全行驶,验证了所提方法的可行性和实用性。

关键词: 地下无人铲运机　路径规划　A* 算法
中图分类号: TD422.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)07-0303-07

Navigation Path Planning of Unmanned Underground LHD Based on Improved A* Algorithm

Ma Fei　Yang Haoshen　Gu Qing　Meng Yu
(*School of Mechanical Engineering*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: An improved A* algorithm based path planning method for unmanned underground load-haul-dump (LHD) was proposed and verified. According to the articulated structure of the underground LHD, the nodes were expanded by the articulated angle, which makes the expended nodes match the trajectory characteristic of the LHD. In order to avoid collision, collision threat cost was designed and added into the evaluation function, which makes the navigation path exclude against the walls. Simulation and comparison results between the improved A* algorithm and tranditional one show that the improved A* algorithm is more efficient, and the shortest path without collision can be obtained when the weighting coefficient is 0.2. Moreover, a path planning and tracking test is carried out in lab environment. It is shown that the tracking precision can keep in a small range and the LHD can run without collision when the navigation path is given by the proposed algorithm, which proves the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm.

Key words: Unmanned underground LHD　Path planning　A* algorithm

引言

随着地下矿开采深度增加,采矿条件越来越恶劣,地下采矿技术正向机械化、智能化的方向发展,导航路径的生成是实现地下铲运机精确定位与智能导航的基本任务之一[1]。在采矿业发达的国家很早就开展了地下铲运机自动化和智能化技术的研究,并取得了一些研究成果[2-3]。

传统的无人铲运机导航依靠在铲运机行驶的巷道中安装可以被唯一识别的信标,铲运机依靠识别

收稿日期: 2015-02-06　修回日期: 2015-03-05
*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2013BAB02B07)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060408)
作者简介: 马飞,教授,博士生导师,主要从事车辆动力学、车辆振动与噪声分析与控制研究,E-mail: yeke@ustb.edu.cn

并依次通过各信标实现导航。Eriksson 等[4]提出一种在巷道地下铺设感应电缆的方法,铲运机通过接收感应电缆的信号导航行驶,首次实现了无人铲运机的生产应用。随后相继出现了采用顶板反光带、LC 谐振反射圈、一维条形码等引导设施的导航方法[5-6]。此类方法优势在于算法简单,可靠性高,但由于在地下矿山工作环境下随着巷道的掘进以及转场等因素,铲运机常常需要改变导航线路。引导设施需要频繁的拆卸和安装,运行成本高而且自动化程度不高。目前国内尚无成熟的无人铲运机方案,为保障井下作业安全和矿山数字化水平,“地下智能铲运机”将是地下车辆自动化的研究热点和主导方向[7]。

国内外对路径规划问题开展了很多研究,开发出了一系列有效的算法,包括人工势场法[8]、遗传算法[9]、蚁群算法[10]、粒子群算法[11]、A* 算法等[12-14],并在无人机航迹规划、无人车导航、机器人路径规划等领域广泛应用。目前地下铲运机路径规划问题的研究主要集中在调度层面的路径规划。如 Gamache 提出一种基于 Dijkstra 算法的铲运机调度规划方法,地图内所有巷道路口信息都以状态空间图的形式储存,导航结果为自起点至终点的一系列有先后顺序的路口节点[15],此类路径规划所搜索出的路径结果主要用于驾驶员的行驶路线参考。本文主要研究无人铲运机的导航路径规划问题,根据给出的当前位置和目标位置,求出无人铲运机能沿其行驶的最短无碰路径。现行路径规划算法普遍以执行器可以原地转向或者执行器相对于地图可以作为质点处理。为了适应井下狭窄、受限制的巷道空间,地下铲运机采用了低矮、细长、中央铰接、双向行驶的车身结构[16],铲运机既不能实现原地转向也不可作为质点处理。若要求铲运机能跟踪所规划的路径行驶,则算法必须保证路径结果符合铲运机轨迹特性。针对无人铲运机路径规划问题的特定要求,本文提出一种基于改进 A* 算法的路径规划方法。

1 A* 算法

A* 算法中估价函数的形式一般为

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{1}$$

式中 $g(n)$——从起始节点 S_0 到当前节点 S_n 的实际代价

$h(n)$——当前节点 S_n 到目标节点 S_t 的预估代价[14]

由于有预估代价 $h(n)$ 的存在,使得 A* 算法成为一种启发式搜索算法,用于指导搜索朝着最有希望的方向前进,使得搜索过程中展开的节点数尽量小,从而提高搜索效率。估价函数 $f(n)$ 的作用是估计 Open 表中各节点的重要性程度,决定它们在 Open 表中的次序。其中 $g(n)$ 决定搜索的横向趋势,它有利于搜索的完备性,但影响搜索的效率[17]。在确定 $f(n)$ 时,需要权衡各种利弊得失,使 $g(n)$ 和 $h(n)$ 各占一定的比重。

2 改进的 A* 算法

2.1 符合地下铲运机轨迹特性的扩展节点方法

运用 A* 算法求解机器人路径规划等一般问题时,一般按相邻 8 节点或者 24、48 相邻节点扩展子节点,并未考虑最小转弯半径和轨迹特性等问题。而在井下狭窄、受限制的巷道空间里,节点的扩展方式必须符合地下铲运机的轨迹特性。

在建立地下铲运机运动学模型时假定铲运机在转向过程中轮胎只发生纯滚动而没有侧向滑移,则可将地下铲运机简化为两条线段,如图 1 所示。规定铲运机后半部分中心线与 y 轴方向的夹角 γ 近似为航向角,铲运机前半部分中心线与后半部分中心线延长线的夹角为铰接角 θ,前桥中心为 A,铰接点为 B,后桥中心为 C。搜索中每步长为地下铲运机行走轨迹的圆弧 $\hat{S}$ 的长度 $|\hat{S}|$,并认为地下铲运机在每一步长内行驶时均保持铰接角 θ 不变,即每一步长内矿车的各点绕其对应的转向中心 O 作圆周运

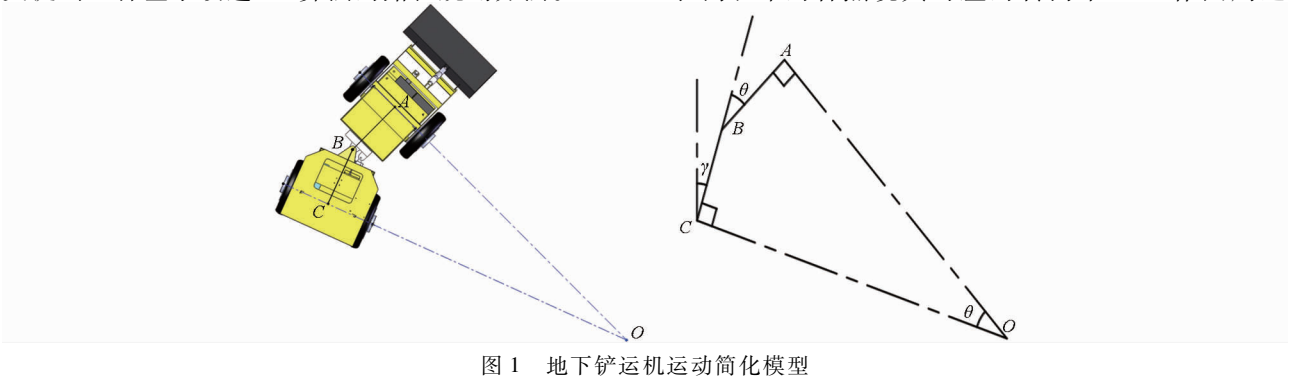

图 1 地下铲运机运动简化模型

Fig. 1 Simplified kinematic model of LHD

动。

已知铰接点 B 的坐标(x_B, y_B)、铰接角 θ 和航向角 γ,就可求出前桥中心点 A 的坐标(x_A, y_A)和后桥中心点 C 的坐标(x_C, y_C)。基于水平面的坐标系可建立地下铲运机的自身约束方程。

AB与 y 轴夹角为 $\gamma+\theta$:

$$\begin{bmatrix} x_A - x_B \\ y_A - y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma+\theta) & -\sin(\gamma+\theta) \\ \sin(\gamma+\theta) & \cos(\gamma+\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ l_{AB} \end{bmatrix} \tag{2}$$

CB与 y 轴夹角为 γ:

$$\begin{bmatrix} x_C - x_B \\ y_C - y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ l_{CB} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$AB \perp AO$并且$CB \perp CO$:

$$l_{AB} l_{AO} = 0 \tag{4}$$

$$l_{CB} l_{CO} = 0 \tag{5}$$

所以在确定了地下铲运机的初始位置和初始姿态的情况下,如果地下铲运机运行速度恒定,则地下铲运机的铰接角变化规律 $\theta(t)$是影响地下铲运机路径的唯一因素,改进节点的扩展方式可以从这一条规律入手。考虑到铰接角在地下铲运机行驶搜索步长的时间内不会产生太大的变化,且有最大铰接角 $\theta_{\max}$限制,所以在扩展节点的时候并不直接用铰接角 θ 进行扩展,而是根据铰接角的一阶微分 θ'进行扩展,由一阶微分 θ'积分得到当前的铰接角,对于当前节点 S_n 有

$$\theta_n = \int_0^n \theta' \mathrm{d}t \tag{6}$$

式中　θ_n——搜索到节点 S_n 时铲运机的铰接角

考虑搜索算法对时间进行了离散化处理,在一个采样周期 Δt 内的铰接角变化量 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \theta' \Delta t \tag{7}$$

节点 S_n 的铰接角 θ_n 可由自节点 S_0 至节点 S_n 的铰接角变化量累加得到,即

$$\theta_n = \sum_{i=0}^{n} \theta_i' \Delta t = \sum_{i=0}^{n} \Delta\theta_i \tag{8}$$

如图 2,圆弧 $\hat{S}$ 为铰接点移动轨迹,其长度$|\hat{S}|$为搜索步长,由弧度公式可知,铰接矿车行走$|\hat{S}|$长度时绕点 O 转过的角度为 $\alpha = \dfrac{|\hat{S}|}{|l_{OB}|}$。即可通过将 k 时刻的铰接矿车 ABC 上的任意点坐标(x_k, y_k)绕 O 点旋转 α 得到在 $k+1$ 时刻铰接矿车 $A'B'C'$上对应点的坐标(x_{k+1}, y_{k+1})

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} - x_O \\ y_{k+1} - y_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k - x_O \\ y_k - y_O \end{bmatrix} \tag{9}$$

这种扩展节点的方式充分考虑了铰接矿车的轨迹特性,所搜索出的路径符合铰接矿车的轨迹特性,同时这种扩展节点方式在搜索步长$|\hat{S}| = 2$ m 的情况下,同一搜索深度的相邻节点间的距离也可控制在 0.2 m 以内,有很高的精度。而在巷道宽度一般只有 4 m 以内的井下工作环境中,如果用相邻 8 节点的扩展方式则搜索步长一般选择在 0.3 m 以内。搜索步长大的结果是搜索深度的降低和扩展节点数的减少,有利于最优路径搜索算法的执行效率,在精度允许范围内搜索步长可尽量取大值。

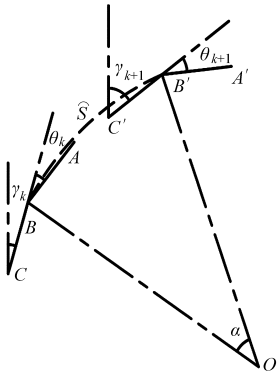

图 2　节点扩展示意图

Fig. 2　Extension of nodes

2.2　针对地下铲运机行驶要求的综合估价函数

地下铲运机导航的路径不仅要求其为符合地下铲运机轨迹特性的最短路径,同时也要求地下铲运机沿路径行驶时不会与巷道墙壁发生碰撞并保持一定的安全距离,为了防止 A* 算法为实现最短路径而使铲运机与墙壁距离过近,还需要对 A* 的估价函数进行相应修改。

地下铲运机在狭窄的巷道可简化为 9 个有相互约束关系的点,分别为铲运机车身最外轮廓的 8 个顶点以及铰接点,如图 3 所示。据此建立的简化模型可以用来判别地下铲运机是否与墙壁发生碰撞或干涉,即若墙壁范围内的任意点处于地下铲运机简化模型内则认为铲运机与墙壁发生碰撞,同时将此节点标记为不可通行,存入 Close 表。

传统 A* 算法中的估价函数 $f(n)$中实际代价 $g(n)$是从源点 S_0 走到节点 S_n 的总距离,但在地下铲运机的路径中除了已走过的路径代价 $g_p(n)$作为实际代价,还应加入碰撞威胁的代价 $g_c(n)$,引入加权系数 W_p 和 W_c 控制路径代价和碰撞威胁代价在实际代价中所占的比例,即

$$g(n) = W_p g_p(n) + W_c g_c(n) \tag{10}$$

其中 $g_p(n)$用路径节点间距离的累加表示为

$$g_p(n) = g_p(n-1) + d \tag{11}$$

每一步的路径代价 d 等于搜索步长$|\hat{S}|$。

$g_c(n)$代表节点 S_n 的碰撞代价,即地下铲运机

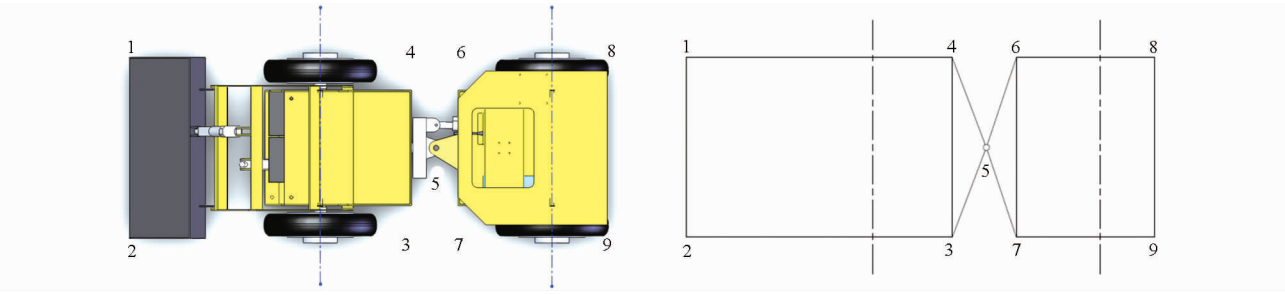

图 3 地下铲运机碰撞简化模型

Fig. 3 Simplified crash model of LHD

处于节点 S_n 时可能与墙壁发生碰撞的代价。可通过检测铲运机 9 个有相互约束关系的点与巷道壁的距离来确定铲运机与墙壁发生碰撞的可能性及其代价。定义 C_n 为轨迹内节点 S_n 与墙壁发生碰撞的威胁。地下铲运机与墙壁发生碰撞的威胁可以用关于 9 个轮廓特征点到墙壁的最短距离 $d_{\min}=\min(d_1,d_2,\cdots,d_9)$ 的函数表示,即

$$C_n=f(d_{\min}) \tag{12}$$

定义一个安全距离 d_{safe},当铲运机在节点 S_n 时,如果铲运机 9 个轮廓特征点到墙壁的距离均大于安全距离($d_{\min}\geqslant d_{\text{safe}}$),则可认为当前节点铲运机没有与墙壁发生碰撞的危险,$C_n=0$。如果铲运机 9 个轮廓特征点到墙壁距离的最小值小于安全距离($d_{\min}<d_{\text{safe}}$),则认为当前节点铲运机有与墙壁发生碰撞的危险,在节点 S_n 处 C_n 的大小应随距离 $d_{\min}$ 减小单调增加,这里用二次函数表示最小距离 $d_{\min}$ 与碰撞威胁 C_n 的关系

$$C_n=\begin{cases}0 & (d_{\min}\geqslant d_{\text{safe}})\\ (d_{\text{safe}}-d_{\min})^2 & (d_{\min}<d_{\text{safe}})\end{cases} \tag{13}$$

将从 S_0 沿规划路径到 S_n 上的所有碰撞威胁 $C_i(i=0,1,\cdots,n)$ 累加计算碰撞代价 $g_c(n)$

$$g_c(n)=\sum_{i=0}^{n}C_i \tag{14}$$

改进后的估价函数中实际代价 $g(n)$ 由路径代价 $g_p(n)$ 和碰撞代价 $g_c(n)$ 组成,加权系数 W_p 和 W_c 控制路径代价和碰撞威胁代价在实际代价中所占的比例,大小可由巷道通行条件和铲运机工况决定。预估代价 $h(n)$ 则可用当前节点到目标节点的直线距离表示为

$$h(n)=D(S_n,S_t) \tag{15}$$

3 仿真试验验证算法性能

本文所述算法在计算机(处理器:AMD -6300 - Six Core - 3.50 GHz;RAM:8.00 GB)Windows7 x64 位操作系统下进行测试,编程环境采用 Visual Studio 2010 VC + +(V100)实现。地图采用一片 50 m × 35 m 的虚拟地下矿运输巷道俯视图,巷道宽度为 4 m。铲运机长 6 m,最大宽度为 2 m,前桥距铰接点 1.5 m,后桥距铰接点 2 m。如图 4,取地图西南边界点为坐标原点,起点设定为(6, 2),终点设定为(48, 25),在地图中用☆表示。

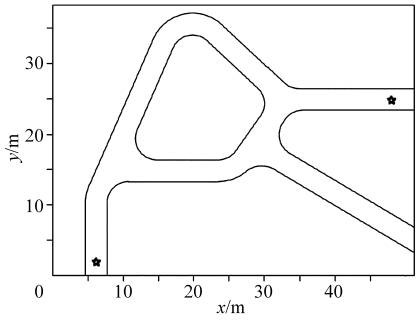

图 4 仿真试验地图及起点/终点设置

Fig. 4 Algorithm performance test map and settings of start point and end point

3.1 传统 A* 算法与改进 A* 算法的性能对比

符合铲运机轨迹特性的扩展节点方法,搜索步长设定为 1.5 m,铰接角变化量 $\Delta\theta=6°$,不考虑碰撞威胁的影响,即 $W_p=1$、$W_c=0$。搜索路径结果如图 5。按普通 A* 算法相邻 8 节点扩展方法,设定栅格大小为 0.3 m × 0.3 m,搜索路径结果如图 6。

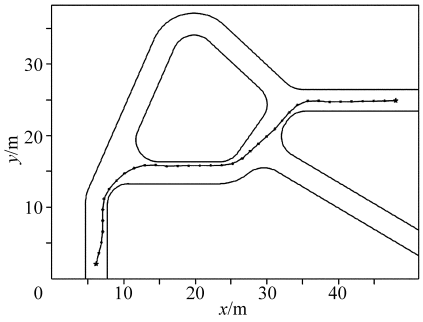

图 5 符合铲运机轨迹特性的扩展方式搜索路径结果

Fig. 5 Path result using extension method match track of LHD

对比两者搜索结束后 Open 表和 Close 表节点数(表 1),可以发现,较相邻 8 节点的扩展方式,符合铲运机轨迹特性的扩展方式在搜索路径时,所扩展的节点数有明显的减少。

同时也可以看出,符合铲运机轨迹特性的扩展方式所搜索出的路径是一组首尾相连、角度变化、连

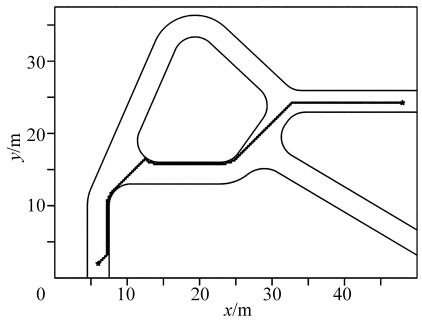

图 6　相邻 8 节点扩展方式搜索路径结果

Fig. 6　Path result using extension method of adjacent 8 nodes

续的折线段，铲运机能以较小的误差沿该路径行驶。而相邻 8 节点的扩展方式所搜索出的路径转向处角度变化太大，明显不适于铲运机沿该路径行驶。

表 1　不同扩展方式展开节点数对比

Tab. 1　Comparison of extended nodes between different extension methods

扩展方式	Open 表节点数	Close 表节点数
相邻 8 节点	422	255
改进算法	174	65

3.2　碰撞威胁对轨迹的影响

图 5 中的搜索路径虽然符合铲运机的轨迹特性，但路径上有很多节点距离墙壁过近，铲运机沿该路径行驶有与墙壁发生碰撞的危险。图 7 是分别取 $W_p = 0.9$，$W_c = 0.1$；$W_p = 0.8$，$W_c = 0.2$；$W_p = 0.7$，$W_c = 0.3$；搜索步长为 2 m 的搜索路径结果。

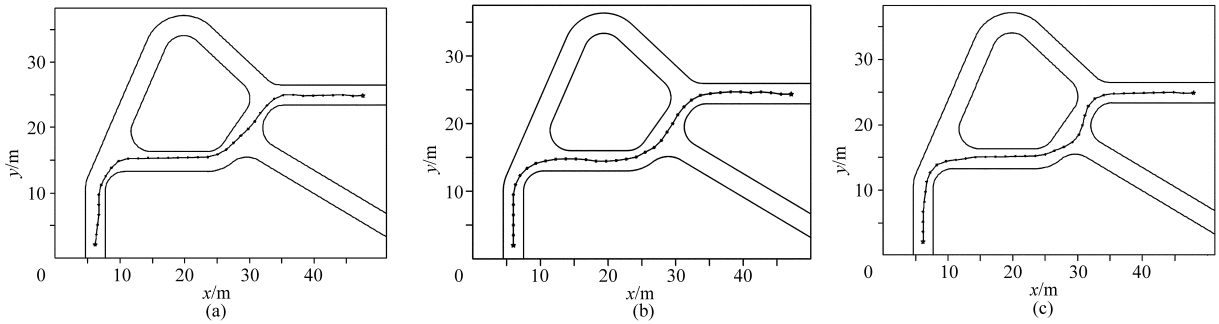

图 7　不同碰撞威胁参数对路径的影响

Fig. 7　Influence of different collision threat parameters on path

(a) $W_p = 0.9$, $W_c = 0.1$　(b) $W_p = 0.8$, $W_c = 0.2$　(c) $W_p = 0.7$, $W_c = 0.3$

不同碰撞威胁参数下，路径结果有明显的变化，随着路径代价加权系数 W_p 的减小和碰撞代价加权系数 W_c 的增大，路径逐渐移动到巷道中心以避免与墙壁发生碰撞。各参数下路径的算法性能评价指标如表 2 所示，随着 W_p 的减小和 W_c 的增大，Open 表和 Close 表的节点数随之减少，符合碰撞威胁能剔除距墙壁过近的节点加速搜索的理论。而取 $W_p = 0.9$、$W_c = 0.1$ 的节点数多于取 $W_p = 1$、$W_c = 0$ 时的节点数，是由于碰撞威胁 C_n 是关于与墙壁距离的二次函数(式(13))，当路径距离墙壁较近时相邻节点碰撞威胁变化很大，导致更新的节点的估价函数 $f(n)$ 变化很大，更容易从搜索树根部重新搜索。同时可以看出，随着 W_p 的减小和 W_c 的增大，路径的碰撞代价 $g_c(n)$ 随之减小，而路径长度随之增加，说明随着碰撞代价 $g_c(n)$ 对估价函数 $f(n)$ 比重的增大，算法更倾向于牺牲寻找最短路径而寻求一条更不易于碰撞墙壁的路径。综合来看，碰撞威胁参数取 $W_p = 0.8$、$W_c = 0.2$ 时，展开节点数较少，其结果既符合铲运机轨迹特性，同时也是在避免与墙壁碰撞的前提下的最短路径。

表 2　不同碰撞威胁参数下算法性能对比

Tab. 2　Comparison of algorithm performance in different collision threat parameters

参数	Open 表节点数	Close 表节点数	碰撞代价 $g_c(n)$	路径长度/m
$W_p = 0.9$, $W_c = 0.1$	510	216	13.05	74.0
$W_p = 0.8$, $W_c = 0.2$	130	42	1.12	74.3
$W_p = 0.7$, $W_c = 0.3$	123	41	0	74.6

4　实验室环境下无人铲运机路径规划及轨迹跟踪试验

为了验证改进 A* 算法的可行性，在实验室楼道内进行了无人铲运机模型机的路径规划及轨迹跟踪试验，如图 8。实验室楼道地图如图 9 所示，起点

图 8　无人铲运机路径规划及轨迹跟踪试验

Fig. 8　Unmanned LHD path planning and tracking test

设定为西侧楼道点(1.1,11.6),终点设定在电梯间(9.1,7.5),模拟无人铲运机从运输巷道进入采掘巷道的工况。

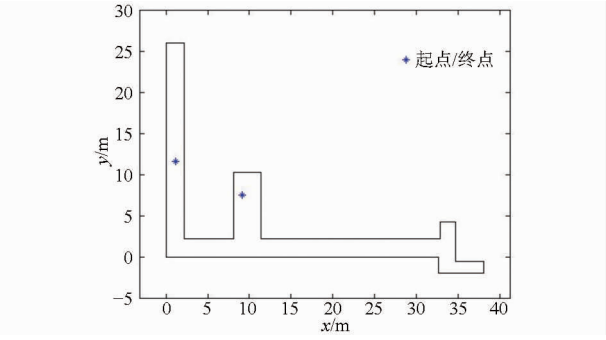

图 9 楼道环境地图及路径规划起点、终点设置

Fig. 9 Passageway map and settings of start point and end point

试验过程中,通过车载定位系统记录了模型机运行过程的位置信息[18],改进 A* 算法规划的路径和实际运行轨迹对比如图 10。可以看出无人铲运机自起点沿改进A* 算法所得出的路径成功到达终点,图 11 监视了无人铲运机在运行过程中的跟踪误差,无人铲运机在运行过程中跟踪误差保持在 0.2 m 以内,与目标路径跟随良好。

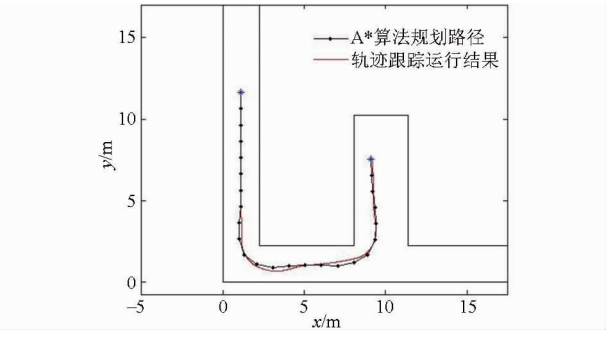

图 10 改进 A* 算法规划路径与无人铲运机实际运行轨迹的对比

Fig. 10 Comparison between path searched by improved A* algorithm and final path in test

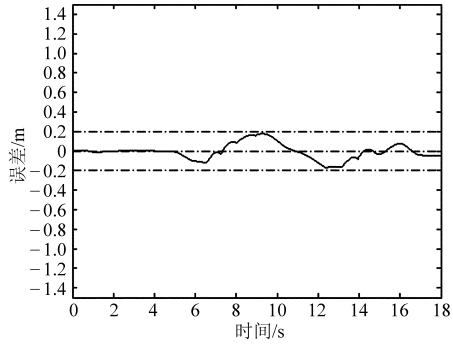

图 11 无人铲运机跟踪误差曲线

Fig. 11 Tracking error during tracking test

5 结论

(1) 针对无人地下铲运机对路径规划问题的特殊要求,本文对 A* 算法加以改进,提出一种符合铲运机轨迹特性的扩展节点方法,并在估价函数中引入了与巷道壁碰撞的威胁代价。

(2) 经仿真试验表明,相比于传统 A* 算法,改进 A* 算法所规划路径符合无人铲运机路径要求,同时也大大降低了搜索节点数,提升了搜索效率。

(3) 通过仿真试验对比各碰撞威胁参数,得出了适于无人铲运机路径规划的参数($W_p = 0.8$, $W_c = 0.2$),使算法能求出在避免与墙壁碰撞的前提下的最短路径。

(4) 通过实验室楼道环境下的模型车试验,表明无人铲运机在运行过程中路径跟踪误差保持在 0.2 m 以内,验证了本文提出的改进 A* 算法在无人铲运机路径规划场合的适用性。

参 考 文 献

1 石峰, 战凯, 顾洪枢, 等. 地下铲运机跟踪轨迹推算模型研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(6):66 - 69.
Shi Feng, Zhan Kai, Gu Hongshu, et al. A study on underground loader tracking track calculation model[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2010, 62(6):66 - 69. (in Chinese)

2 龙智卓, 战凯, 顾洪枢, 等. 基于改进蚁群算法的智能铲运机全局路径规划[J]. 有色金属(矿山部分), 2013, 65(2):6 - 10.
Long Zhizhuo, Zhan Kai, Gu Hongshu, et al. Global path planning of intelligent load-haul-dump based on improved ant colony algorithm[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2013, 65(2):6 - 10. (in Chinese)

3 陈盟, 王李管, 贾明涛, 等. 地下铲运机自主导航研究现状及发展趋势 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(3):130 - 134.
Chen Meng, Wang Liguan, Jia Mingtao, et al. An overview of autonomous navigation techniques and development trend for underground LHD [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(3):130 - 134. (in Chinese)

4 Eriksson G, Kitok A. Automatic loading and dumping using vehicle guidance in a Swedish mine[C]// Proceedings of the First International Symposium on Mine Mechanization and Automation, 1991, 6:15-33 - 15-44.

5 Hannu Mäkelä. Overview of LHD navigation without artificial beacons[J]. Journal of Robotics and Autonomous Systems, 1999, 36(1):21 - 35.

6 Marshall J, Barfoot T, Larsson J. Autonomous underground tramming for center-articulated vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(6 - 7):400 - 421.

7 高梦熊. 浅谈地下装载机、地下汽车自动化技术的发展(一)[J]. 现代矿业,2009(12):1 - 6.

Gao Mengxiong. The development of technology on underground loader and underground automobile automation [J]. Modern Mining, 2009(12):1 – 6. (in Chinese)

8 张建英, 赵志萍, 刘暾. 基于人工势场法的机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8):1306 – 1309.
Zhang Jianying, Zhao Zhiping, Liu Dun. A path planning method for mobile robot based on artificial potential field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8):1306 – 1309. (in Chinese)

9 李擎, 谢四江, 童新海, 等. 一种用于车辆最短路径规划的自适应遗传算法及其与 Dijkstra 和 A* 算法的比较[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11):1082 – 1086.
Li Qing, Xie Sijiang, Tong Xinhai, et al. A self-adaptive genetic algorithm for the shortest path planning of vehicles and its comparison with Dijkstra and A* algorithms [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(11):1082 – 1086. (in Chinese)

10 史恩秀,陈敏敏,李俊,等. 基于蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法研究[J]. 农业机械学报,2014,45(6):53 – 57.
Shi Enxiu, Chen Minmin, Li Jun, et al. Research on method of global path-planning for mobile robot based on ant-colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):53 – 57. (in Chinese)

11 李擎, 徐银梅, 张德政, 等. 基于粒子群算法的移动机器人全局路径规划策略[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(3):397 – 402.
Li Qing, Xu Yinmei, Zhang Dezheng, et al. Global path planning method for mobile robots based on the particle swarm algorithm [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3):397 – 402. (in Chinese)

12 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13):109 – 115.
Jia Qingxuan, Chen Gang, Sun Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13):109 – 115. (in Chinese)

13 Giuseppe C, Marcello F, Giacomo L. A network flow based heuristic approach for optimising AGV[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(2):405 – 419.

14 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2012, 52(8):1085 – 1089.
Wang Dianjun. Indoor mobile-robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(8):1085 – 1089. (in Chinese)

15 Gamache M, Grimard R, Cohen P. A shortest-path algorithm for solving the fleet management problem in underground mines[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 166(2):497 – 506.

16 石峰, 顾洪枢, 战凯. 典型路径下的地下铲运机行驶轨迹分析[J]. 矿冶, 2009, 18(2):67 – 70.
Shi Feng, Gu Hongshu, Zhan Kai. Analysis of driving track for LHD on typical path[J]. Mining & Metallurgy, 2009, 18(2):67 – 70. (in Chinese)

17 李季, 孙秀霞. 基于改进 A-Star 算法的无人机航迹规划算法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(7):788 – 792.
Li Ji, Sun Xiuxia. A route planning's method for unmanned aerial vehicles based on improved A-Star algorithm[J]. Introducing Journal of China Ordnance, 2008, 29(7):788 – 792. (in Chinese)

18 孟宇, 刘立, 马飞, 等. 基于视觉的地下矿用车辆自定位方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 22 – 27.
Meng Yu, Liu Li, Ma Fei, et al. Vision-based self-localization method for underground mining vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 22 – 27. (in Chinese)