

田子建,高学浩,张梦霞.基于改进人工势场的矿井导航装置路径规划[J].煤炭学报,2016,41(S2):589-597.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1165

Tian Zijian, Gao Xuehao, Zhang Mengxia. Path planning based on the improved artificial potential field of coal mine dynamic target navigation [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 589-597. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1165

基于改进人工势场的矿井导航装置路径规划

田子建 高学浩 张梦霞

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘 要: 矿井中障碍物密集且移动,这给煤矿井下导航装置路径规划造成了极大的困难。结合原有的传统人工势场法,通过将相对速度场和相对加速度场引入势场函数中,改进引力势场函数,使矿井机器人、无人机等导航装置在路径规划中,充分考虑导航装置自身的移动信息,使躲避移动障碍物成为可能,并且避免动目标陷入局部极小点;针对路径规划过程中路径最优化的问题,提出了“全局势场线”的概念,使导航装置在局部路径规划的同时,充分考虑到全局的规划信息,避免局部规划与全局规划冲突,从而选取最优的路径进行导航。提出的方法通过仿真和地面模拟测试,结果证明,该方法可以帮助导航装置在煤矿井下成功躲避移动障碍物,避免与移动障碍物发生碰撞导致路径规划失败,同时处理复杂多变的环境,优化避障路径,最终到达目标位置,完成导航装置的路径规划任务。

关键词: 导航装置;人工势场法;引力势场函数;局部极小点;全局势场线;路径规划

中图分类号:TD654 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2016)S2-0589-09

Path planning based on the improved artificial potential field of coal mine dynamic target navigation

TIAN Zi-jian, GAO Xue-hao, ZHANG Meng-xia

(School of Machine Electric and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The mine obstacles is intensive and moving it caused great difficulties in devices path planning based on the original traditional artificial potential field method. Through the introduction of the relative velocity and relative acceleration field potential field function, it improved the gravitational potential field function, making the mine robots, unmanned aerial navigation devices in the path planning, making it possible to avoid moving obstacles, and moving target in a local minimum point; For problem of path optimization, it put forward the concept of 'total situation field line', making navigation devices in the local path planning at the same time, avoiding conflict of global planning and local planning, so as to select the optimal path for navigation. Method through the simulation and the ground simulation test, the results show that the method can help navigation devices to avoid moving obstacles to success in the coal mine, to avoid collision with moving obstacles lead to the failure path planning, finally it reaches the target location, navigation devices path planning task.

Key words: navigation equipment; artificial potential field method; gravitational potential field function; local minimum point; all-situation field lines; path planning

近年来,煤炭行业在我国经济发展中起到了至关重要的作用,成为推动我国经济发展的重要支柱产业。但是随着整个社会对安全的重视,煤矿安全变得愈发重要,在矿难发生时如何在第一时间进行救援,成为挽救工作人员生命财产安全的一大难题^[1-2]。煤矿环境特殊,发生矿难时又加大了救援的难度;采用导航装置进行探测和救援是可靠有效的途径^[3-6],路径规划一直是制约导航装置煤矿井下应用的难题,其路径规划的水平在很大程度上决定了救灾的效率。矿井导航装置的任务是,在复杂多变的动态环境,充分考虑全局规划信息,从而寻找到一条无碰撞的最优路径。人工势场法^[7-9]由于其简洁性和高效性在过去几十年被广泛应用在导航装置路径规划的领域中。传统人工势场法存在局部极小点的问题,在动态避障中,局部极小点会随时发生移动,导致导航装置无法到达既定的目标位置。针对上述问题,之前的研究提出了很多解决方法^[10-13],但并不适用于煤矿井下特殊环境。因此,需要对传统人工势场进行改进。

传统人工势场只考虑路径上的静态位置信息,本文将导航装置和巷道中移动障碍物的相对速度和相对加速度加入势场函数中,构成新的势场函数。根据全局规划信息,本文在引力势场中加入一条既定规划路径,称之为“全局线势场”,同时运用遗传信赖域算法,确定全局势场线中的次目标点,全局线势场可以引导导航装置围绕一条既定的路线进行规划,有效的解决导航装置逃离局部极小点后,再次路径规划的无法得到最优路径的问题。

1 传统人工势场法概述及其局限性

1.1 传统人工势场法的概述

传统人工势场法^[14]可以采取不同的势场函数进行表示,本文采用比较常用的势场梯度法,导航装置在势场中受到负梯度的作用,将负梯度作为导航装置受到的虚拟力,目标点对导航装置产生吸引力,障碍物对其产生排斥力,导航装置通过合力的作用从起点运动到既定的目标点。在人工势场模型中,用 q 表示导航装置的位置, q_s 表示目标位置, $U(q)$ 表示虚拟势场,虚拟引力势场和虚拟斥力势场分别用 $U_{att}(q)$ 和 $U_{rep}(q)$ 来表示。导航装置在某一位置受到的虚拟势场和虚拟力分别为

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (1)$$

$$F(q) = -\nabla U(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q) \quad (2)$$

其中, $\nabla U(q)$ 表示 U 在 q 处的梯度,它是一个向量,其方向是位置 q 处势场变化率最大的方向。所以,对于二维空间中的位姿 $q(x, y)$ 来说,有

$$\nabla U(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用静电场势场模型定义障碍物和目标点的势场如下:

$$\nabla U_{att}(q) = \frac{1}{2} \xi p_g^2(q) \quad (4)$$

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{p(q)} - \frac{1}{p_0} \right) \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 \quad \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $p_g(q)$ 为导航装置到目标点的距离, $p_g(q) = \|q - q_s\|$; ξ 和 η 为比例系数; ρ_0 为障碍物排斥力的最大范围; $\rho(q)$ 为导航装置到障碍物的最小距离。

虚拟力为

$$F_{att}(q) = -\xi(q - q_s) \quad (6)$$

$$F_{rep} = \frac{\eta}{\rho^2(q)} \left(\frac{1}{p(q)} - \frac{1}{p_0} \right) \nabla p(q) \quad (7)$$

式中, $p(q)$ 为由 q_c 指向 q 的单位向量, $p(q) = \|q - q_c\|$, q_c 为在障碍物上导航装置到障碍物的最近的位姿点。

即

$$\nabla p(q) = \frac{q - q_c}{\|q - q_c\|} \quad (8)$$

导航装置受到的合力为吸引力和排斥力的矢量和,导航装置根据最终的合力在环境中进行路径规划。

1.2 传统人工势场法在矿井巷道中应用的局限性

传统人工势场法虽然原理简单,算法简洁,易于实现,但是传统人工势场法只考虑了目标点与导航装置以及障碍物与导航装置的位置距离信息,而矿井中障碍物不是静止的,特别是在矿难时,障碍物随时会移动,传统的人工势场法难以适用于矿井环境。此外,传统人工势场适合运用在区域范围广阔的地面场所^[15-19],而矿井空间狭小,救援导航装置极易在路径规划过程中陷入局部极小点,如图1所示,多个障碍物所产生的局部极小点凹形区域。

2 改进人工势场法在矿井下巷道中的应用

本文在传统人工势场函数中,加入导航装置对目标点的相对速度和相对加速度,提出了“全局线势场”的概念,考虑到巷道空间狭小,导航装置路径规划过程中会产生较多的折线,因此引入“次目标点”的概念,通过遗传信赖域算法,确定全局势场线中的次目标点。全局线势场将为导航装置提供一条既定

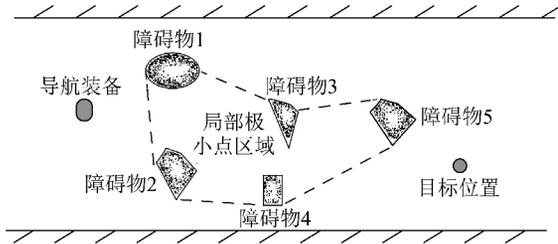


图 1 矿井巷道产生局部极小点的区域

Fig. 1 Roadway obstacle areas of local minimum point after the mine accident

的期望路径作为参考, 导航装置将围绕该既定路线再次进行路径规划。

2.1 改进引力场函数

对传统人工势场中引力函数进行改进, 改进后的引力函数包含导航装置与目标点的相对位置、相对速度和相对加速度产生的势场, 同时增加了一条全局规划的引力势场线, 作为导航装置全局规划的既定路线。考虑矿井巷道狭窄的空间, 导航装置到达目标点的直线距离会存在障碍物, 所以矿井下巷道的期望路径一般为折线。折线路径由单段直线路径组成, 首先对单段直线期望路径进行分析: 导航装置的引力场包含了位置场、速度场、加速度场和全局线势场。

公式如下:

$$U_{att}(q, v, a) = k_q \|q - q_g\|^s + k_v \|v\|^t + k_a \|a\|^p + k_l (\|q - q_{limc}\|^l + \|v\|^l + \|a\|^l) \quad (9)$$

其中 k_q, k_v, k_a 和 s, t, p 为比例系数, 其数值代表了导航装置与目标点相对位置、相对速度和相对加速度在引力势场中所占的权重; k_l 和 l 为比例系数, 其数值代表全局线势场在引力势场中所占的权重。具体数值由环境建模提取来决定。 $q_{limc} = (x_0, r(x_0))^T$, 其中, $r(x)$ 为全局线势场所规划的期望路径曲线方程; $(x_0, r(x_0))$ 为期望路径曲线到导航装置当前位置最近点的坐标。当导航装置靠近期望路径曲线时, 会因为全局线势场产生扰动, 所以在线势场中加入了速度和加速度参数减少导航装置的震荡。通过改进的引力势场可知引力为

$$F_{att}(q, v, a) = -\nabla U_{att}(q, v, a) = -\nabla_q U_{att}(q, v, a) - \nabla_v U_{att}(q, v, a) - \nabla_a U_{att}(q, v, a) \quad (10)$$

$$F_{att}(q, v, a) = F_{attq}(q) + F_{attv}(v) + F_{atta}(a) \quad (11)$$

导航装置所受到的合引力如图 2 所示。

2.2 改进斥力势场函数

改进斥力势场函数包含导航装置和障碍物的相对位置、相对速度和相对加速度, 导航装置受到的障碍物斥力势场为

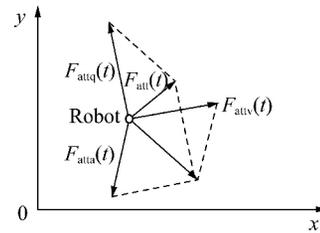


图 2 导航装置所受的复合引力示意

Fig. 2 Composite gravity map of navigation equipment

$$U_{rep}(q, v, a) = \begin{cases} K_q \left(\frac{1}{\rho_{obs}} - \frac{1}{\rho_0} \right) + K_v v_{ro} + K_a K_{ro} \rho_{obs} < \rho_0, & \rho_0 > v_{ro} > 0, K_{ro} > 0 \\ K_q \left(\frac{1}{\rho_{obs}} - \frac{1}{\rho_0} \right) + K_v v_{ro} \rho_{obs} < \rho_0, & v_{ro} > 0, K_{ro} \leq 0 \\ 0 & \rho_{obs} < \rho_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 ρ_0 为导航装置可探测到障碍物的最大距离, 只有当导航装置在距离障碍物 ρ_0 范围以内, 导航装置才会受到障碍物的斥力作用; $\rho_{obs} = \|q - q_{obs}\|$ 为导航装置中心到障碍物最近位置的距离。

在路径规划中, 导航装置与障碍物的相对位置、相对速度、相对加速度之间的矢量关系如图 3 所示。

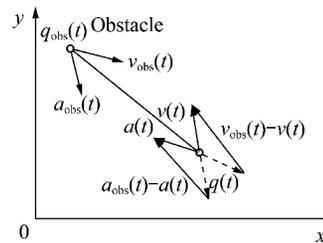


图 3 导航装置与障碍物相对位置、相对加速度、相对速度矢量

Fig. 3 Relative position, relative acceleration, relative velocity vector diagram between navigation equipment and obstacle

由式(12)推导, 可得知导航装置在斥力势场的作用下受到的斥力为

$$F_{rep}(q, v, a) = -\nabla U_{rep}(q, v, a) = \begin{cases} F_{repq} + F_{repv} + F_{repa}, & \rho_{obs} < \rho_0, v_{ro} > 0, K_{ro} > 0 \\ F_{repq} + F_{repv}, & \rho_{obs} < \rho_0, v_{ro} > 0, K_{ro} \leq 0 \\ 0, & \rho_{obs} < \rho_0 \end{cases}$$

导航装置受到的斥力如图 4 所示。

2.3 基于遗传信赖域算法求折线期望路径的次目标点

在矿井狭窄的巷道中, 导航装置将在有限的空间区域完成路径规划, 期望路径一般都为折线, 对于折线期望路径, 一般将折线拆分为多段直线进行分析。

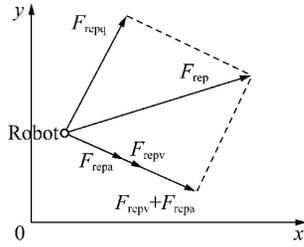


图 4 导航装置所受到的斥力分解

Fig. 4 Navigation equipment by the repulsive force diagram

所以,如何选取折线中的折点,对于规划折线期望路径有重要的意义。本文将折线期望路径的折点定义为导航装置路径规划中的次目标点,采用遗传信赖域算法^[20]对子目标点进行选择。

2.3.1 次目标点的选择

根据 2.1 和 2.2 节中所建立的改进人工势场的模型,将路径规划中每个采样周期中导航装置可达范围内势场强度最小的点作为子目标点,多个次目标点构成了整个折线期望路径。设导航装置的最大速度为 v_{max} , 采样周期为 t_0 , 则导航装置在每个采样周期可达的范围就是以当前位置为中心, $v_{max}t_0$ 为半径的圆。为保证导航装置在路径规划中减少震荡和执行效率, 尽量减少导航装置以最大的速度 v_{max} 前行, 导航装置的前行速度也不宜过低, 因此可以在 $R \in (3v_{max}t_0/5, v_{max}t_0)$, $\theta \in (0, 2\pi)$ 的环形区域内选择次目标点。如图 5 所示, 图中的环形阴影部分即为次目标点的选择范围。

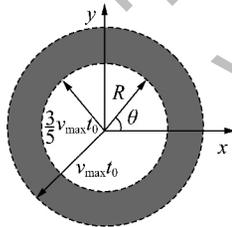


图 5 次目标点的选择范围

Fig. 5 Choice of next target

2.3.2 基于遗传信赖域算法求解次目标点

根据导航装置距离障碍物的距离,对以下两种情况分别进行分析。

(1) 当导航装置距离障碍物较远时 ($>\rho_0$), 导航装置只受到引力势场的作用, 由式(11)可知, 次目标点就是导航装置中心与目标点连线与阴影部分外圆的交点, 此时已知导航装置当前位置与目标点的位置, 求解次目标点的位置较易, 无需采用遗传信赖域算法。

(2) 当导航装置距离障碍物较近时 ($\leq \rho_0$), 导航装置同时受到引力势场和斥力势场的作用, 求取次目标点即折点成为建立折线期望路径的关键步骤。优

化搜索算法中的信赖域算法具有很强的鲁棒性和快速收敛性。但是, 信赖域算法的迭代速度会受信赖半径的影响, 从而影响整个算法的效率。此时, 利用遗传算法在当前迭代点的一个邻域内快速求解一个相比此迭代点更优的迭代点, 然后利用新的迭代点重新运行信赖域算法, 直到找到最优迭代点, 可以大大提高算法的效率。

图 4 中阴影部分的点坐标可表示为 (x', y') , 其中 $x' = x + R\cos\theta$, $y' = y + R\sin\theta$, $R \in (2v_{max}t_0/3, v_{max}t_0)$, $\theta \in (0, 2\pi)$ 。设 $z_1 = x + R\cos\theta$, $z_2 = y + R\sin\theta$, 求解由式(9)可以得出, 使用遗传信赖域算法求解子目标点, 即寻找阴影区域的势场最低点, 求解公式如下:

$$\min U(z) = U_{att}(z) + \sum_{i=1}^n U_{reps}(z_i) + \sum_{r=1}^m U_{repm}(z_r) \quad (13)$$

运用原迭代点的邻域, 构造新的遗传信赖域, 求取更优迭代点:

$$\min q_k(d) = q_k(d) + g_k^T d - d^T G_k d \quad (14)$$

s. L $\|d\|_2 \leq \Delta_r$, $z_k + d_k \in \Omega$

其中 $q_k = \nabla U(z_k)$; Δ_r 为信赖域的半径; $G_k = \nabla^2 U(z_k)$, $q_k(d)$ 可微, 用牛顿法的 BFGS 公式构造 Hessian 矩阵 B_k 来近似 G_k , d_k 为信赖域试探步。 Ω 为次目标点的选择范围, 即图 5 中的阴影面积部分。

牛顿法的 BFGS 公式构造的矩阵 B_k 进行迭代更新 $B_{k+1}^{BFGS} = B_k + y_k y_k^T / y_k^T d_k - B_k d_k d_k^T B_k^T / d_k^T B_k d_k$, 实际上升量与预估上升量比值定义为

$$r_k = \frac{\Delta U_k}{\Delta q_k} = \frac{U(z_k + d_k) - U(z_k)}{q_k(d_k) - q_k(0)} \quad (15)$$

具体算法步骤如下:

step1 初始化参数 $\Delta_0 > 0$, $\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 > 0$, $\varepsilon_3 > 0$, $\mu > 0$, $b > 0$, $M > 1$, $0 < \eta_1 < \eta_2 < 1$, $B_0 = I_{2 \times 2}$, $0 < \beta_1 \leq \beta_2 < 1 \leq \beta_3$ 。

step2 计算 q_k , 判断是否 $\|g_k\|_2 < \varepsilon$, 如果成立则停止计算, 输出结果, 如果不成立, 进行下一步。

step3 根据式(14)求得试探步 d_k 。

step4 计算 r_k , 在确定 z_{k+1} 的值, 有

$$z_{k+1} = \begin{cases} z_k + d_k & r_k > \eta_1 \text{ 且 } z_k + d_k \in \Omega \\ z_k & r_k < \eta_1 \end{cases} \quad (16)$$

step5 确定 Δ_{r+1} 的值, 满足下面的条件:

$$\Delta_{r+1} \in \begin{cases} [\Delta_r, \beta_3 \Delta_r] & r_k > \eta_2 \\ [\beta_2 \Delta_r, \Delta_r] & r_k \in [\eta_1, \eta_2] \\ [\beta_1 \Delta_r, \beta_2 \Delta_r] & r_k < \eta_1 \end{cases} \quad (17)$$

step6 如果 $\Delta_{r+1} < \varepsilon_2$, $\|U_{k+1} - U_k\| < \varepsilon_3$, 可用遗传算法快速求解 $\min U(z_{k+1}^e)$, 可以得到一个较当前迭

代点更优的替换迭代点 z_{k+1}^c , 跳转 step7, 否则跳转 step8。

step7 如果 $\|U_{k+1} - U_{k+1}^c\| > M \|U_{k+1} - U_{k+1}^e\|$, 则令 $z_{k+1} = z_{k+1}^c$, $G_{k+1} = B_0 \Delta_{r+1} = \max(\Delta_0, \|g_k\|_2)$ 跳转 step1; 否则继续进行 step7。

step8 用 BFGS 公式重新定义 B_k 得到 B_{k+1} , 令 $k = k+1$ 跳转 step1。

3 仿真实验

3.1 单段直线期望路径仿真结果

图 6 为 $t=0$ 时的仿真环境, 为方便研究, 将导航装置抽象为质点。环境中的动态障碍物用圈来表示, 静态障碍物用星来表示, 全局信息中已知静态障碍物的位置。

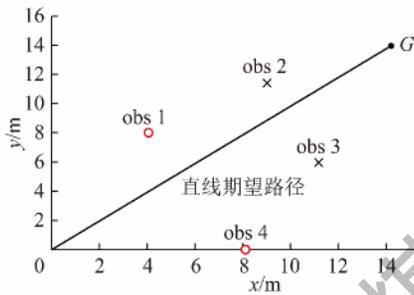


图 6 导航装置直线期望路径避障

Fig. 6 Navigation equipment line expectations obstacle avoidance path diagram

导航装置的起始坐标位置为 $(0, 0)$, 初始速度为 $(0, 0)$, 全局信息中目标点的坐标位置 $q_g(14, 14)$, 从导航装置的起点到目标点的直线与静态障碍物不相交, 将此条直线定义为直线期望路径, 导航装置受此条势场线的作用。其中静态障碍物 $q_{obs2} = (9, 11.5)$, $q_{obs3} = (11, 5.5)$, 动态障碍物 1 的起始点 $q_{obs1} = (4, 8)$, $v_{obs1} = (0.25, -0.35)$, $a_{obs1} = (0.036, 0.16)$, 动态障碍物 4 的起始点 $q_{obs4} = (8, 0)$, $v_{obs4} = (0, 0)$, $a_{obs4} = (0.012, 0.021)$, 动态障碍物 5 的起始点 $q_{obs5} = (16, 4)$, $v_{obs5} = (0, 0)$, $a_{obs5} = (0.018, 0.024)$ 。根据环境建模取 $m = n = q = 2$, 其中 $a_q = 0.05$, $\mu_v = 0.1$, $\mu_a = 0.1$, $\mu_{line} = 0.1$, $\rho_0 = 2$ 。

如图 7 所示, 导航装置在 $t=7$ s 时, 与从 $(4, 8)$ 出发的动态障碍物 1 相遇, 导航装置此时收到障碍物的斥力、目标点引力和期望势场线势场力的作用, 通过路径可以看出, 导航装置通过调整自身的加速度完成动态避障, 沿着期望路径向目标点运动。

如图 8 所示, 导航装置在合力作用下完成路径规划, $t=15$ s 时, 导航装置与从 $(9, 11.5)$ 出发的动态障碍物 4 相遇, 采用增加路径长度来提前躲避障碍物, 紧接着在 $t=18$ s 时, 导航装置与从 $(16, 4)$ 出发的动

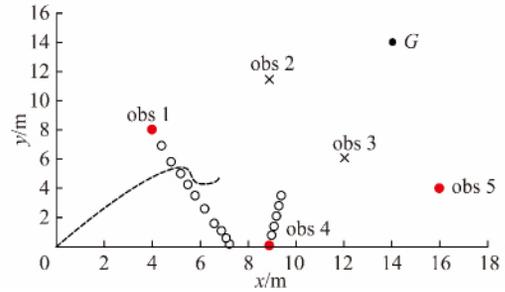


图 7 $t=7$ s 时导航装置动态避障路径仿真

Fig. 7 Navigation equipment dynamic obstacle avoidance path simulation diagram when $t=7$ s

态障碍物 5 相遇, 通过路径线路可知, 导航装置采用改变自身加速度来躲避动态障碍物, 最终完成路径规划。

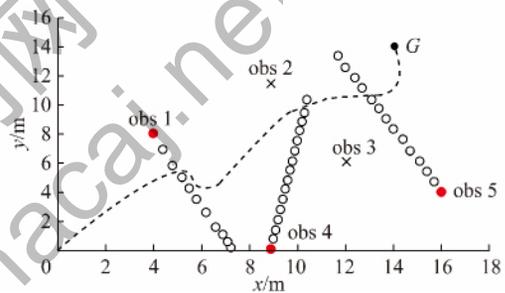


图 8 导航装置在用 $t>7$ s 后的动态避障路径仿真

Fig. 8 Navigation equipment dynamic obstacle avoidance path simulation diagram when $t>7$ s

当在全局势场中撤销直线期望路径后, 导航装置路径规划路线如图 9 所示。

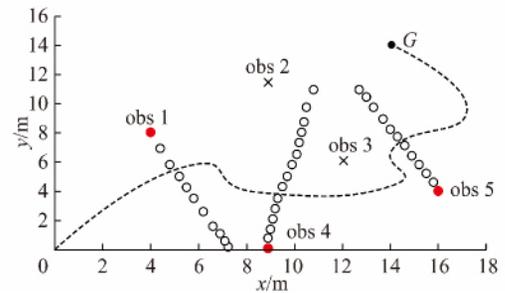


图 9 无单段期望路径的导航装置路径规划仿真

Fig. 9 No single expectation path navigation path planning simulation equipment

根据路径规划线路的轨迹, 导航装置在与动态障碍物 5 轨迹交汇处的附近位置, 导航装置陷入了局部极小点, 重新规划路径后, 导航装置的路径更加远离最优路径。

通过以上分析得出, 期望路径在动态避障中可以使移动导航装置获得最优路径, 特别是在遇到局部极小点或震荡问题后, 移动导航装置需要重新规划路径, 期望路径可以使移动导航装置重新规划的路径保持最优, 充分节省路径规划时间, 减少路径规划过程

中的能量消耗,具有较好地鲁棒性。

3.2 折线期望路径的仿真结果

井下巷道空间狭小,导航装置一般很难通过单段直线期望路径到达目标点,因此一般采用折线期望路径。将融合遗传信赖域算法的折线期望路径拆分成单段期望路径,然后对路径规划进行仿真模拟。

图10为 $t=0$ 时的仿真环境,环境中有6个静态障碍物,分别分布在坐标位置 $(4,6)$ 、 $(6,3)$ 、 $(9,11.5)$ 、 $(10,8)$ 、 $(12,5)$ 、 $(14,13)$,导航装置的起始坐标位置为 $(0,0)$,目标点坐标位置 $q_g=(14,14)$ 。环境中还有两个动态障碍物,动态障碍物a的起始坐标 $q_{obsa}=(2,6)$, $v_{obsa}=(0,0)$, $a_{obsa}=(-0.16,0.21)$,动态障碍物b的起始坐标 $q_{obsb}=(9,2)$, $v_{obsb}=(0,0)$, $a_{obsb}=(0.12,-0.18)$ 。根据环境取 $m=n=q=2$,其中 $a_q=0.05$, $a_v=0.1$, $a_a=0.1$, $a_{line}=0.1$, $\rho_0=2$ 。图中A和B两点是依据遗传信赖域算法确定的折点。A和B的坐标位置分别为 $(4.9,5)$ 、 $(10.8,6.2)$ 。

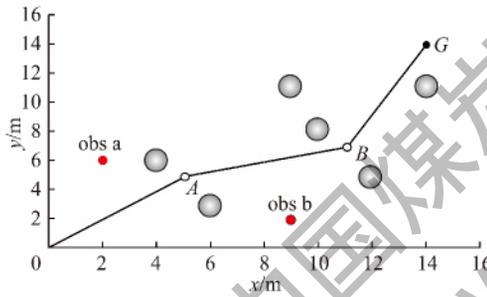


图10 导航装置折线期望路径避障

Fig. 10 Navigation equipment line expect obstacle avoidance path chart

当 $t=32$ s时(图11),导航装置与动态障碍物a相遇,导航装置此时受到障碍物的斥力、目标点的引力以及期望势场线OA的势场,通过轨迹交汇点处的密集点可知,导航装置采用“等待”的策略,让动态障碍物a先通过,受到势力场中导航装置本身加速的和速度的影响,导航装置缓慢逼近折点A。

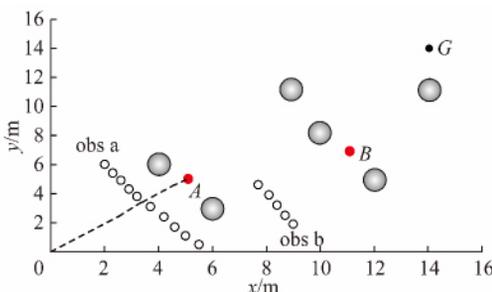


图11 $t=32$ s时导航装置动态避障仿真

Fig. 11 Navigation equipment dynamic obstacle avoidance path simulation diagram when $t=32$ s

当 $t=59$ s时,导航装置与动态障碍物b相遇,由

图12可知,导航装置采用“弧形路线”增加路径规划长度来躲避动态障碍物。当 $t=72$ s时,导航装置到达折点B,在整个过程中,导航装置一直受到期望路径势场线AB的作用,使导航装置一直保持在期望路径AB附近,当导航装置快到达折点B时,受到势力场中导航装置本身加速的和速度的影响,导航装置速度减缓慢慢靠近折点B。

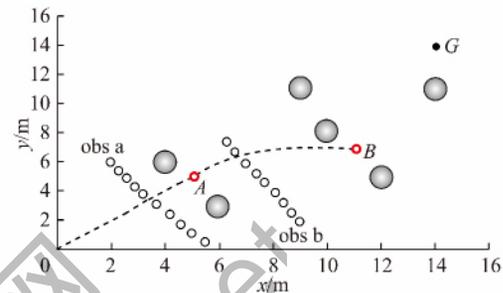


图12 $t=72$ s时导航装置动态避障仿真

Fig. 12 Navigation equipment dynamic obstacle avoidance path simulation diagram when $t=72$ s

如图13所示,导航装置通过折点B之后,由于受到期望路径BG的势场作用,导航装置贴近期望路径继续向目标点移动,通过遗传信赖域算法,将目标点G更新为最终的目标点。最终在 $t=97$ s时,到达目标点G,完成路径规划任务。

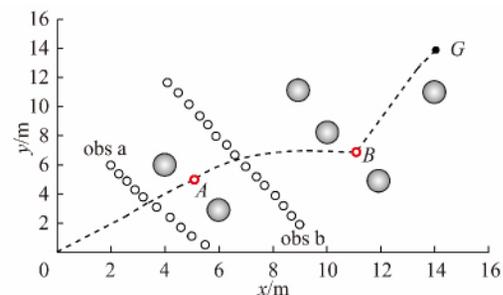


图13 $t=97$ s时导航装置动态避障仿真

Fig. 13 Navigation equipment dynamic obstacle avoidance path simulation diagram when $t=97$ s

由表1可知当导航装置的路径越接近最优路径,即所求得的期望路径时,势场强度下降的越快。导航装置到达A点(采样点3)之前,导航装置基本是按照期望路径进行规划,势场强度下降很快;当导航装置进入AB段时,由于受到动态障碍物b而采取了“绕行”的方法进行避障,从采样点4到采样点8,导航装置所受到的势场强度下降速度变缓慢;从采样点9开始,导航装置开始延既定的期望路径BG开始规划,通过表1可知,此段时间势场强度下降速度下降最快。

为了对折线期望路径在全局规划中的作用进行研究,将折线期望路径从全局环境中撤销,仅采用改

进的人工势场法对导航装置再次进行路径规划, 仿真结果如图 14 所示。

表 1 导航装置运动轨迹上典型点的势场强度
Table 1 Navigation equipment trajectory of typical points on the potential field intensity

采样点	x/m	y/m	势场强度
1	0.91	0.94	490.540
2	2.11	2.24	440.290
3	4.82	5.02	368.760
4	7.28	6.11	322.590
5	8.01	6.77	290.480
6	9.09	6.99	254.710
7	10.00	6.89	225.380
8	11.51	6.80	187.750
9	12.40	8.23	122.190
10	12.89	10.21	68.760
11	13.97	13.92	0.002

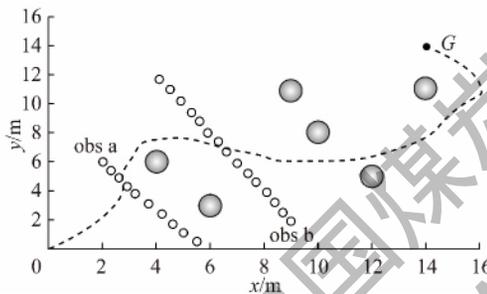


图 14 无折线期望路径的导航装置路径规划仿真
Fig. 14 No line expected path navigation equipment path planning simulation diagram

通过比较图 13 和 14 仿真结果中导航装置的路径轨迹, 可以简单地看出, 在折线期望路径的作用下, 导航装置可以大致沿着期望路径进行路径规划。但是当撤销折线期望路径后, 导航装置在矿井中遇到移动障碍物, 为了进行避障, 导航装置偏离了原有的折线期望路径并对路径进行了重新规划, 重新规划后的路径距离增加, 路径规划难度也随之增加, 对两种算法的仿真时间进行比较, 如图 15 所示。

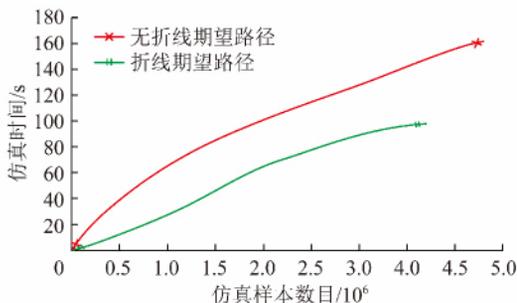


图 15 两种算法的仿真时间
Fig. 15 Simulation time of the two algorithms

由图 15 可知, 包含折线期望路径的全局环境中, 算法仿真运行时间 $t=97\text{ s}$, 撤销折线期望路径的全局环境中, 算法仿真时间 $t=161\text{ s}$, 前者的路径规划时间更短, 算法的效率更高; 对比样本仿真个数, 前者仿真样本数目约为 4.1×10^6 个, 后者仿真样本数目约 4.9×10^6 个, 包含折线期望路径的算法样本数目更少, 减少了算法的复杂性, 同时增加了算法运行中的稳定性, 提高了算法的鲁棒性。图 16(a) 和(b) 分别表示包含折线期望路径算法和撤销折线期望路径算法的内存使用率。

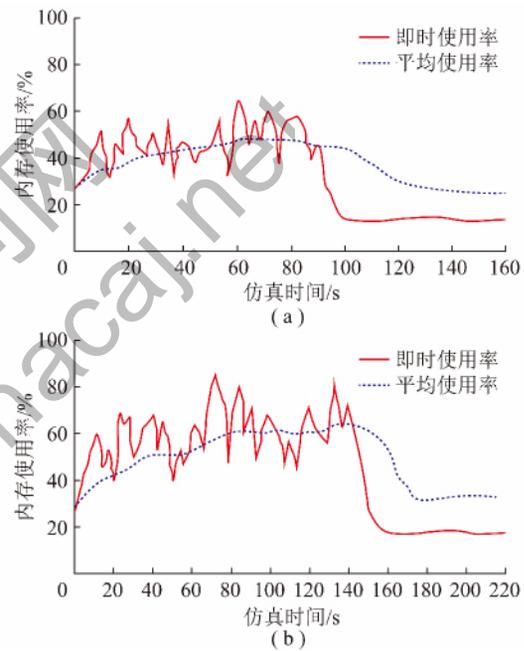


图 16 两种算法内存使用率的对比
Fig. 16 Memory utilization contrast of the two kinds of algorithms

比较图 16(a) 和(b) 中两种算法的内存使用率, 图 16(a) 中包含折线期望路径的算法, 由于导航装置受到既定折线路径的作用, 整个导航过程中路径保持最优, 图 16(b) 中撤销折线期望路径的算法, 由于受到动态障碍物和局部极小点的影响, 导航装置偏离原有的既定期望路径, 导航装置不能按照最优的路径进行导航。综上所述, 前者的内存使用率整体较低, 算法优化性能更好, 内存使用率变化幅度较低, 算法具有较强的鲁棒性。

4 实物实验

针对上文中融合遗传信赖域算法的折线期望路径仿真情况, 设置了实物实验, 实验中导航装置采用 CUMTB08-C-G 型避障小车, 实物实验的开发环境为 Visual studio 2010, 开发语言为 C++, 实验导航装置如图 17 所示。

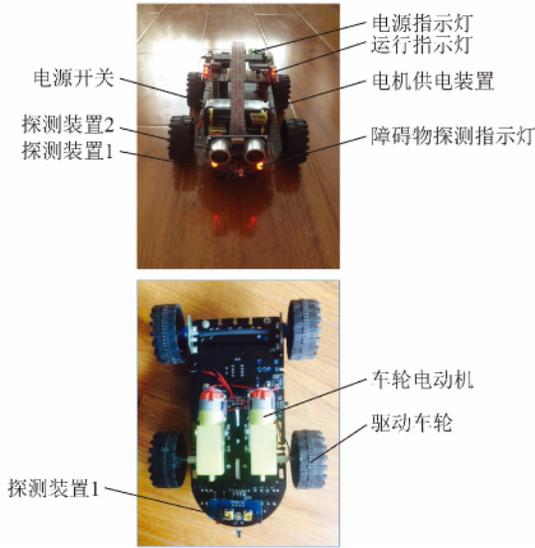


图 17 避障小车硬件构成

Fig. 17 Hardware of the obstacle avoidance car

实物实验环境按照图 10 的仿真环境进行设置, 环境如图 18 所示, 导航装置 CUMTB08-C-G 型避障小车实验结果如图 19 所示, 环境中设置了相应的障碍物和目标位置。

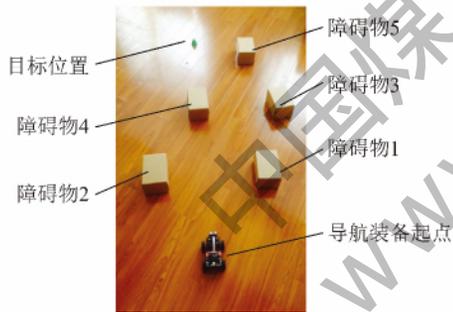


图 18 实物实验环境设置

Fig. 18 Physical experiment environment settings



图 19 避障小车路劲规划实验

Fig. 19 Planning experiments of the obstacle avoidance car road

导航装置部分 C++ 程序控制语言如图 20 所示。

```

Microsoft Visual C++ 2010 环境 帮助
文件 编辑 查看 插入 工程 视图 窗口 帮助

void delay_ms(unsigned int i) //延时:i-12 .i的最小延时12 us
{
    i=i/10;
    while(--i);
}
void delay_ms(unsigned int n) //延时n ms
{
    n=n*1;
    while(--n)
        delay_ms(900); //延时 1ms,同时进行补偿
}
void ControlCar(unsigned char Contype) //定义电机控制子程序
{
    tingzhi();
    switch(Contype) //判断用户设定电机形式
    {
        case 1: //前进 //判断用户是否选择形式1
            qianjin();
            break;
        case 2: //后退 //判断用户是否选择形式2
            houtui(); //电机反转
            break;
        case 3: //左转 //判断用户是否选择形式3
    }
}
  
```

图 20 导航装置部分程序控制语言

Fig. 20. Navigation devices part program control language

根据图 19 中导航装置的避障导航过程, 导航装置路径示意如图 21 所示。导航装置从起点开始出发, 最终到达图 19 中的目标点 G。

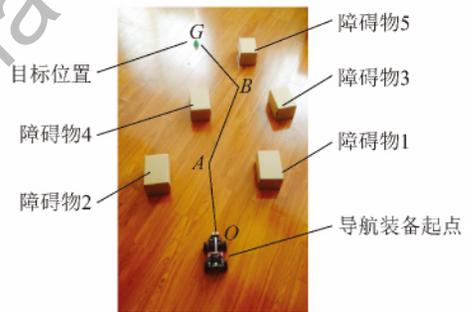


图 21 导航装置路径示意

Fig. 21 Navigation equipment path diagram

5 结 论

针对井下移动障碍物使导航装置无法进行路径规划的难题, 在原有的传统人工势场法的基础上, 首先将速度场和加速度场引入势场函数, 改变了原有的势场函数, 然后提出了“全局势场线”的概念, 将期望路径引入到全局路径规划中, 同时融合了遗传信赖域的算法, 解决了折线期望路径中折点选择的问题。通过仿真结果可以看出, 导航装置可以成功有效地躲避静态障碍物, 与此同时, 导航装置通过对移动障碍物相对速度、相对加速度以及相对位置的分析, 成功躲避移动障碍物, 并且选择一条最优的路径进行导航。文章的最后对静态障碍物进行了实物导航的实验, 实验证明导航装置可以很好的导航到达目标位置, 并且选择一条最优的路径, 验证了之前提出方法和算法的可行性。

参考文献:

- [1] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1925-1929.
Sun Jiping. Coal mine safety production monitoring and communication technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1925-1929.
- [2] 孙继平. 煤矿安全生产理念研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 313-316.
Sun Jiping. Philosophy research of coal mine safety production[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 313-316.
- [3] 王忠民, 刘军, 窦智, 等. 矿难救援机器人的研究应用现状与开发[J]. 煤矿机械, 2007, 28(11): 6-8.
Wang Zhongmin, Liu Jun, Dou Zhi, et al. The research application status and the development of the mine rescue robot[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(11): 6-8.
- [4] Tian Zijian, Zhang Liya, Chen Wei. Improved algorithm for navigation of rescue robots in underground mines[J]. Computers and Electrical Engineering, 2013, 39(4): 1088-1094.
- [5] 朱磊, 樊继壮, 赵杰, 等. 基于栅格法的矿难搜索机器人全局路径规划与局部避障[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(11): 3421-3428.
Zhu Lei, Fan Jizhuang, Zhao Jie, et al. Based on grid method of coal mine search robot global path planning and local obstacle avoidance[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2011, 42(11): 3421-3428.
- [6] 张志超, 郑之增, 方海峰, 等. 矿井救灾机器人的导航定位研究[J]. 煤矿机械, 2008, 29(11): 41-44.
Zhang Zhichao, Zheng Zhizeng, Fang Haifeng, et al. The research of mine rescue robot navigation and position[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(11): 41-44.
- [7] Park M, Jeon J, Lee M. Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field approach with simulated annealing[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. Pusan: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001: 1530-1535.
- [8] Kitamura Y, Tanaka T, Kishino F, et al. 3-D path planning in a dynamic environment using an octree and an artificial potential field[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Piscataway, 1995: 2474-2481.
- [9] Janabi-Sharifi F, Vinke D. Integration of the artificial potential field approach with simulated annealing for robot path planning[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control [C]. Piscataway, 1993: 536-541.
- [10] Sato K. Deadlock-free motion planning using the Laplace potential field[J]. Advanced Robotics, 1993, 7(5): 449-461.
- [11] 谭民, 王硕, 曹志强. 多机器人系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 42-46.
Tan Min, Wang Shuo, Cao Zhiqiang. Multi-robot system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 42-46.
- [12] Tang L, Dian S, Gu G, et al. A novel potential field method for obstacle avoidance and path planning of mobile robot[A]. IEEE International Conference on Computer Science and Technology [C]. 2010: 633-637.
- [13] 王佳, 吴晓蓓, 徐志良. 避免人工势场中一类局部极小点的规划方法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(11): 151-154.
Wang Jia, Wu Xiaobei, Xu Zhiliang. The method of planning to avoid a local minimum point in artificial potential field[J]. The Computer Simulation, 2007, 24(11): 151-154.
- [14] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Washington, 1990: 500-505.
- [15] 石为人, 黄兴华, 周伟. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2021-2023.
Shi Weiren, Huang Xinhua, Zhou Wei. The method of mobile robot path planning based on the improved artificial potential field[J]. Computer Application, 2010, 30(8): 2021-2023.
- [16] 肖本贤, 余雷, 李善寿, 等. 逃逸人工势场法局部极小值策略的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 4495-4503.
Xiao Benxian, Yu Lei, Li Shanshou, et al. Escape local minima artificial potential field method strategy research[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(10): 4495-4503.
- [17] 孙继平. 现代化矿井通信技术与系统[J]. 工矿自动化, 2013, 39(3): 1-5.
Sun Jiping. Modern mine communication technology and system[J]. Industrial Automation, 2013, 39(3): 1-5.
- [18] 庄晓东, 孟庆春, 高云, 等. 复杂环境中基于人工势场优化算法的最优路径规划[J]. 机器人, 2003, 25(11): 531-535.
Zhuang Xiaodong, Meng Qingchun, Gao Yun, et al. The optimal path planning based on artificial potential field optimization algorithm in the complex environment[J]. The Robot, 2003, 25(11): 531-535.
- [19] 方华京, 魏然. 人工势场法在多机器人运动的研究[J]. 控制工程, 2007, 14(3): 115-118.
Fang Huajing, Wei Ran. Artificial potential field method in the study of the motions of robot[J]. Control Engineering, 2007, 14(3): 115-118.
- [20] 孙小军, 焦建民, 何俊红. 解优化问题的遗传加速信赖域搜索算法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2008, 32(3): 22-25.
Sun Xiaojun, Jiao Jianmin, He Junhong. Genetic solve the optimization problem of trust region algorithm to accelerate[J]. Journal of Anhui University(Natural Science Edition), 2008, 32(3): 22-25.