

基于改进 A* 算法的行车自动路径规划

周 瑜, 张金聪, 曾诗研

(上海宝信软件股份有限公司, 上海 201203)

摘要: 行车作业时, 受工人经验限制, 由人工规划的路径无法实现效率最优, 可能存在安全隐患。相对地, 无人行车的运行路径受路径规划算法的控制, 严格遵守现场的工艺要求, 极大降低了安全事故发生的可能。以 A* 算法为基础, 与现场实际要求相结合, 提出一种路径规划算法, 实现了行车依据库区环境、作业需求进行自动路径规划的完整功能。该改进算法在保证安全性的基础上, 自动生成优化的行车路径, 经现场实践检验, 将厂区作业效率总体提高约 9.262%。

关键词: 行车; 路径规划; A* 算法; 可视图法

0 引言

行车在传统制造业中主要负责输送人力无法运输的大型无料的起降^[1]。在钢铁企业的成品或半成品仓库里, 人工操作行车依赖于行车驾驶员的个人经验、对库区相关规定的理解并不总是能规划出高效、合理的路径以满足现场需求。受限于工人的体力、安全问题。总之, 人工操作行车在运行效率、安全性、成本投入等方面都存在明显不足^[2-3]。

行车路径规划主要指无人行车在接收到起点、终点坐标后, 根据事先输入的现场布局和工艺要求, 自动规划出一条合理的路径, 使无人行车在满足安全要求的前提下, 运行效率尽可能提高的算法。针对不同的工况, 该算法只需更改输入的配置就可以在极短时间内生成路径, 更加适应制造业现代化、智能化的需要。

现存的路径规划产品, 对库区抽象不合理时, 规划出的路径易导致安全问题, 同时在短路径、路径转折角度过大等情况下易导致行车运行停顿, 降低效率。针对这些问题, 本文提出一种改进的路径规划算法, 依据可视图法思想, 将库区分割成特定区域, 行车在每个区域内都遵守诸如避让行人、在划定的行车通道内运行的运行要求。同时, 为提高行车的运行效率, 本文引入势场法的中心思想作为 A* 算法启发函数的依据之一, 通过尽量使规划出的路径一定程度上远离障碍物的方式来平滑最终生成的路径, 从而尽量保持行车运行

不停^[4]。

1 算法理论背景

常用的路径规划算法按不同的划分标准主要可以划分成完备性算法和概率完备性算法两类^[5-6]。其中, 完备性算法指如果在起点和终点间有可行解存在, 那么一定可以得到一个解; 概率完备性指如果在起点和终点间有可行解存在, 只要规划或搜索的时间足够长, 就一定能找到一个解。本文中提到的 A* 算法、势场法、粒子群算法、可视图法等都属于完备性算法。

1.1 A* 算法

A* (A-Star) 算法是一种启发式算法, 启发函数的设计使其不需要遍历全局来寻找最优路径, 拥有相对较高的搜索效率, 它的各种衍生算法, 如 LPA* 算法、D* 算法等则进一步提高了算法效率, 因而被广泛运用于各路径规划的相关领域^[7-9]。A* 算法使用启发函数 $f(n)$ 来预判接下来的节点代价, 从中选择代价最小的节点作为下一步的搜索节点, 直到将目标节点也扩展进节点序列为止, 以此为基础提高搜索效率。

核心的启发函数通常具有如下形式:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $f(n)$ 为由起始节点经由节点 n 抵达目标节点时的预估代价; $g(n)$ 为由起始节点到节点 n 的真实代价; $h(n)$ 为由节点 n 出发到达目标节点的预估代价。

$h(n)$ 的设计与计算是 A* 算法的核心之一,

合理的预估代价函数设计可以显著提升路径规划算法结果的合理性,使其适应不同的应用环境。

A* 算法原理示意图如图 1 所示。

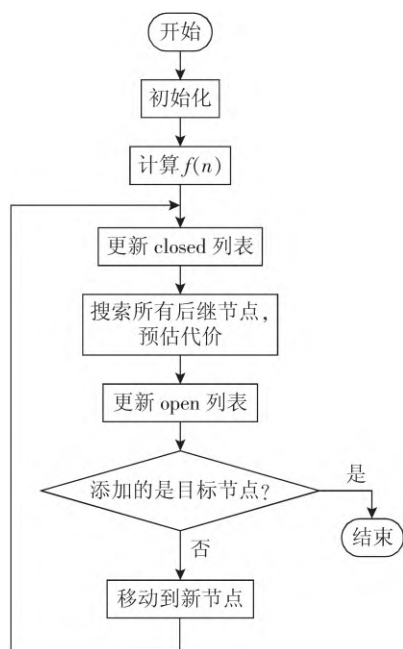


图 1 A* 算法原理示意图

1.2 势场法

势场法的核心思路是将地图区域内的障碍物视为存在重量的物体,它对移动的机器人存在斥力,而相对应地,目标点对移动的机器人存在引力,通过不同斥力和引力形成的力场来引导机器人行动^[10-12]。当机器人靠近障碍物时,距离障碍物越近,收到的排斥力越大,因而可以避免机器人与障碍物的碰撞;同时,机器人受目标点的引力影响,会自发向目标位置前进。然而,当目标点与障碍物之间距离过近时,移动机器人易受到吸引力和排斥力交替作用,产生震荡甚至锁死现象。势场法原理示意图如图 2 所示。

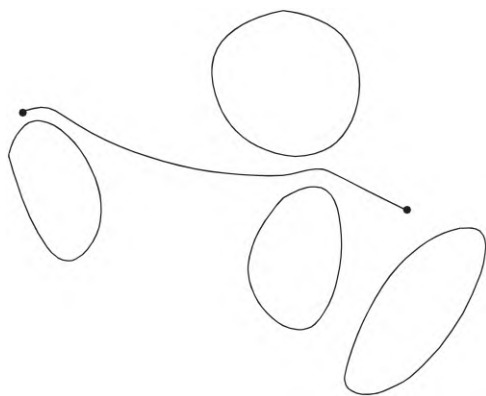


图 2 势场法原理示意图

1.3 可视图法

可视图法是指将机器人的活动区域内不可达的障碍物依据需求抽象成任意形状的多边形,将整个区域抽象成一张电子地图,依据这张电子地图进行路径规划的方法^[13-15]。在运用可视图法进行路径规划的过程中,用直线将机器人运动的起点和所有空间中的障碍物的顶点以及最终要到达的目标点连接,并去除与空间障碍物相交的直线,剩余直线被称为可视线,构成可视线的端点被称为可视点,最终形成的电子地图则被称为可视图。得到这样一些路线后,再通过迪杰斯特拉算法^[16]、A* 算法、蚁群算法^[17-18]等方法选择出合适的路径解作为最终路径。可视图法原理示意图如图 3 所示。

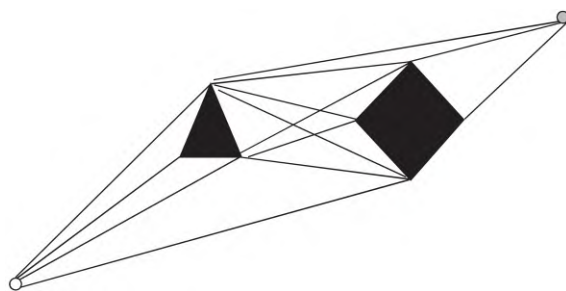


图 3 可视图法原理示意图

2 算法描述

为在保证安全性的基础上规划出合理路径,使行车的运行逻辑符合现场实际要求,同时尽可能地提高机构的运行效率,本文参考库区的真实工艺和运行原理,进行合理的抽象建模,同时,采用可视图法和改进的 A* 算法相结合的方式进行路径规划,在启发函数的设计方面则参考了势场法的一些思想。

2.1 库区建模

工厂内依据实际情况存在不同的作业需求,通常可以划分为工人作业区、行车作业区、禁区、行车通道、人行通道、其他车辆通道等区域,每个区域都存在各自的运行规则。对这些区域加以抽象总结,可以得到用于行车路径规划的地图信息。

禁区通常为任何情况下都不允许行车从上方经过的区域。精密器械、有一定危险性的机构、大型建筑构件所在的区域通常被视为禁区,用红色区域标注;使用中的工人作业区、人行通道等场所,为避免意外,通常也不允许行车从上方经过,在路径规划过程中,行车应尽量避免经过这类区

域,用黄色标注;允许任意通行方式的仓储、通道或空区域用白色标注;只允许沿特定道路前进的通道或其他区域则用蓝色标注。标注完成的区域如图4所示。为配合算法效率上的要求,尽量简化运算。将相应的区域抽象成规则的矩形,最终版本的库区地图如图5所示。

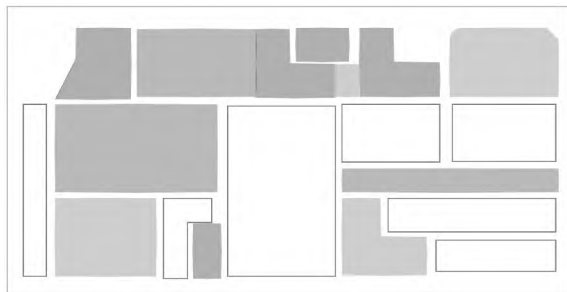


图4 某库区抽象地图

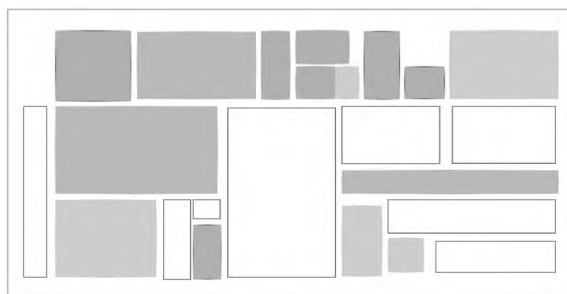


图5 优化后的某库区抽象地图

2.2 改进的路径规划算法

通常来说库区内的布局均存在一定的复杂性,在特定走行规则的限制下,使用全局遍历的方式很难将算法的运行时间控制在合理范围内,故采用可视图法和A*算法作为算法基础,减少遍历的开支。

如第1.3节中介绍,可视图法将地图中不可达的障碍物根据轮廓抽象成了由线段连接而成的多边形,当规划的路径经过任意一个多边形时,对该障碍物执行绕行操作。此时,机器人会在当前位置和选中多边形的连线中选择一条符合预设要求的线段作为当前规划出的路径,并更新选中连线的端点为新的路径点。

传统的A*算法习惯将地图进行栅格化,以45°的等间隔夹角搜索当前位置为向量起点的8个方向,一些改进的方法为了增强路径的合理性,会搜索16个乃至32个方向。显然,搜索方向粒度的细化会带来路径合理性的上升,但同时也会造成算法运行效率大幅下降。用可视图法的思想

来指导A*算法的搜索方向,可以将地图中无限个搜索方向有效缩减,避免了搜索方向细分粒度不合理导致的无效搜索。

另一方面,为尽可能保证在有限的几个方向中以启发式算法搜索到路径的合理性,本文对A*算法的启发函数做出一定改动,参考势场法中的斥力原理,将与障碍物的距离作为代价预估函数的参考项,也列入对路径合理性的评估中。

2.2.1 改进的预估代价函数

改进的A*算法以当前点和终点间的欧氏距离和当前所在区域的类型共同作为启发函数的判断依据,即

$$h(n) = w_1 \times D(n) + w_2 \times W(n) \quad (2)$$

式中: $D(n)$ 为当前位置和目标点位置间的欧氏距离; $W(n)$ 为依据当前所在的位置和附近区域类型得出的预估代价; w_1 、 w_2 分别为欧氏距离 $D(n)$ 和权重 $W(n)$ 在改进后的预估代价函数中的权值。

欧氏距离 $D(n)$ 计算公式为

$$D(n) = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \quad (3)$$

式中: x_1 、 y_1 分别为行车当前的横坐标和纵坐标; x_2 、 y_2 分别为目标点位置的横坐标和纵坐标。

特定类型的区域的权重由区域的类型和现场工艺要求共同决定,使行车倾向于从特定类型的区域所在位置绕行。

2.2.2 改进的搜索方向

在行车路径途径特定区域时,依据特定区域的工艺要求,应采取不同的路径规划方式。考虑对行车效率的要求,针对不同障碍物的绕行路径搜索的方向应受工艺要求和期望函数的共同约束,可以根据特定规则减少一部分没有必要继续搜索的方向以提高运行效率。

约定一个依据当前所在的位置和附近区域类型得出的预估代价 $W(n)$, $W(n)$ 依据绕行区域类型分别按如下方式计算

红区内在任何情况下禁止行车通过,因而行车仅搜索红区范围外,与前一节点连线方向绝对值差值在90°以内的扇形方向,有

$$W_r(n) = w_{11} \times |\theta - \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}}| + w_{12} \times \min\{|\theta - \theta_{r_{\max}}|, |\theta - \theta_{r_{\min}}|\}, \\ \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}} - \pi/2 \leq \theta \leq \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}} + \pi/2 \text{ 且 } \theta \leq \theta_{r_{\min}} \text{ 或 } \theta \geq \theta_{r_{\max}} \quad (4)$$

假设起点坐标 x 值小于终点坐标,即行车从左向右移动,则 θ 表示本次所求节和与上一节点

连线与库区 x 轴正方向所成夹角 $\theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}}$ 表示上一节点和终点连线与库区 x 轴正方向所成夹角, $\theta_{r\max}$ 表示上一节点和红色区左上角顶点连线与库区 x 轴正方向所成夹角, $\theta_{r\min}$ 表示上一节点和红色区左下角顶点连线与库区 x 轴正方向所成夹角。若起点终点反向,即起点位于目标点右侧,行车从右向左移动,则将求取的所有角度值替换成与 x 轴负方向的夹角。 w_{11} 表示本次行车运动方向偏移起终点连线方向程度在预估代价函数中对应的权值, w_{12} 表示本次行车运动方向远离红区程度在预估代价函数中对应的权值。具体搜索范围和角度如图 6 所示。

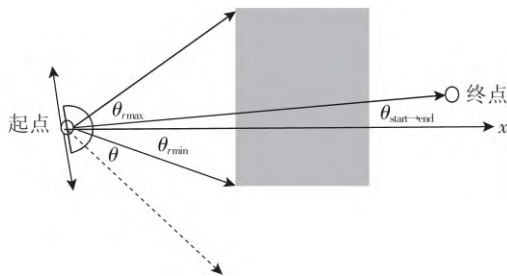


图 6 行车在红区范围附近的搜索方向

行车在蓝区仅沿规定的路径前进,不需要额外搜索前进方向,权值函数为固定常数,移动方向与预设方向相同,如图 7 所示,有

$$Wb(n) = w_{21} \quad \theta = \theta_0 \quad (5)$$

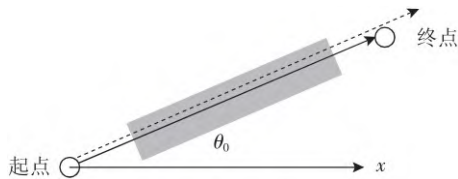


图 7 行车在蓝区范围附近的搜索方向

在黄区范围内则优先搜索黄区范围外的方向,此时 $W(n)$ 计算公式与 $Wr(n)$ 相同,有

$$W_{y1}(n) = w_{31} \times |\theta - \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}}| + w_{32} \times \min\{|\theta - \theta_{r\max}|, |\theta - \theta_{r\min}|\} \\ \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}} - \pi/2 \leq \theta \leq \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}} + \pi/2 \text{ 且 } \theta \leq \theta_{r\min} \text{ 或 } \theta \geq \theta_{r\max} \quad (6)$$

若绕行黄区代价过大,则选择从黄区中穿行,此时加入较大的惩罚权值 w_{33} ,如 w_{34} ,有

$$W_{y1}(n) = w_{33} \times |\theta - \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}}| + w_{34} \\ \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}} - \pi/2 \leq \theta \leq \theta_{\text{start} \rightarrow \text{end}} + \pi/2 \text{ 且 } \theta_{r\min} \leq \theta \leq \theta_{r\max} \quad (7)$$

黄区路径搜索方式如图 8 所示,权值设置应

使行车优先考虑蓝色虚线所示的绕行方案,仅在无法绕行的情况下选择穿过黄区。

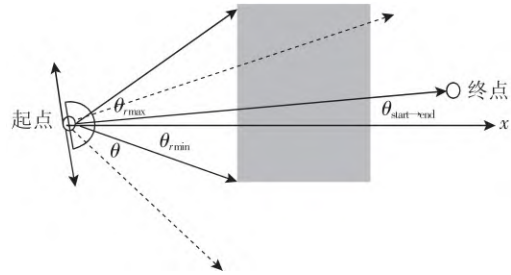


图 8 行车在黄区范围附近的搜索方向

3 应用实例

以某钢厂热轧某产线库区为例,进行算法检验。算法流程图如图 9 所示。首先基于工艺情况进行库区障碍物配置,系统接收起点、终点信息后,模型采集当前库区信息,确定当前库区障碍物编号,然后通过已知的库区障碍物类型进行库区障碍物预处理,如果当前障碍物为机组或特殊区域时,需要在当前障碍物外部设置缓冲区,即对当前障碍物原始信息进行修改。

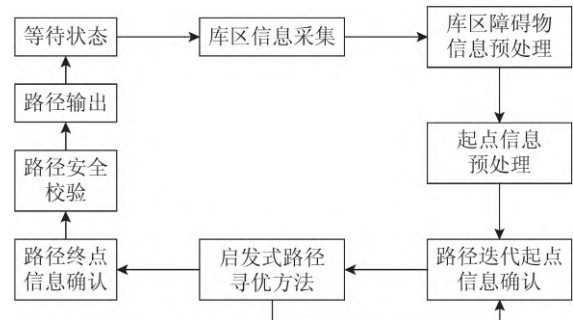


图 9 行车路径规划整体算法流程图

将起点、终点信息进行更新和确认,并将起点、终点信息作为输入信息输入到路径寻优模块,在路径寻优模块中通过启发式算法对路径中的起点和终点进行连线,并判断连线中是否存在障碍物,如果不存在障碍物,则路径寻优过程完成,此路径就是最优路径;如果起点、终点之间存在障碍物,选取起点到终点向量上第一个经过的障碍物,参考防摇的约束条件,以起终点连线与障碍物交点为线索,进行绕行障碍物的中间点计算,得到路径的中间必经点。采用迭代算法,递归进行算法求解。

在得到初步的路径计算后,需要判断已生成路径是否与已激活的障碍物之间存在交叉,进入路径修正方法,将穿越障碍物的路径再次按照路

径寻优算法进行迭代,直到最终路径点完全避开障碍物,得到最终的路径。最终将得到的路径进行数据组织,然后输出信息。算法流程图如图 10 所示。

部分起终点和行车走行路径对应结果如图 11 所示。本次实验共测试了 6 组任务,在库区中生成 6 组起、终点,分别由人工规划路径和改进的路径规划算法自动生成路径,由行车控制程序统一进行行车调度。对实验中进行的所有随机路径花费的时间进行分析统计,并总结了 6 组路径规划整体的时间消耗,体现了自动路径规划相对于人工路径规划整体上对行车运行效率的影响。

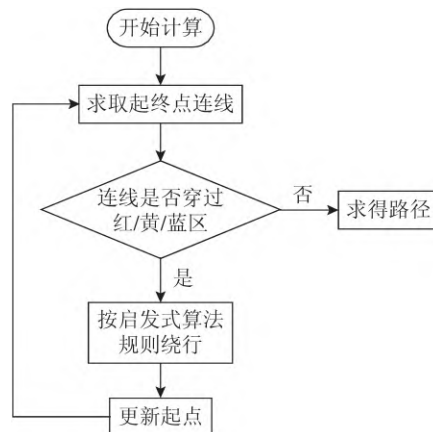


图 10 求取路径点算法流程示意图

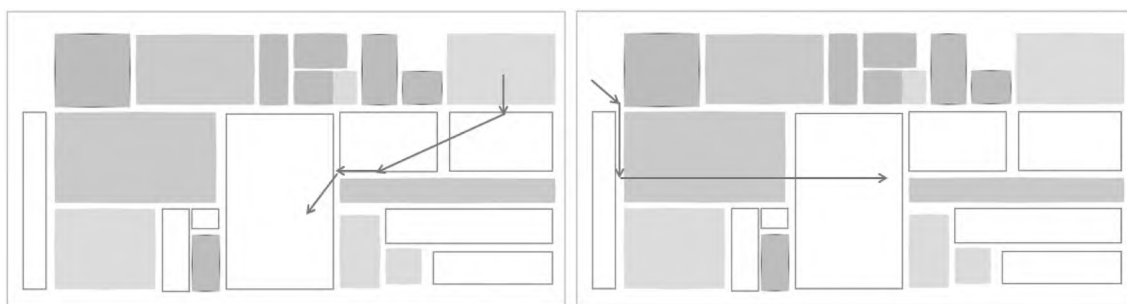


图 11 自动路径规划结果

行车走行耗时及相应效率统计见表 1。由表 1 可知,虽然在不同起终点情况下,行车自动路径规划相对人工路径规划对行车效率提升存在一定

不确定性,但改进的路径规划算法能在保证安全性的前提下总体上较大幅度提升了行车运行效率,证实了本文提出路径规划算法的有效性。

表 1 行车走行耗时及相应效率统计

任务 序列号	人工规划路径 耗时/s	是否存在违规 操作	自动规划路径 耗时/s	是否存在违规 操作	自动路径规划相对人工路径 规划耗时差百分比/%
1	212.67	否	187.13	否	-12.009
2	92.84	否	94.28	否	1.551
3	208.41	否	192.26	否	-7.749
4	185.01	否	168.85	否	-8.735
5	323.39	否	277.04	否	-14.333
6	197.99	否	187.72	否	-5.187
总计	1 220.31		1 107.28		-9.262

4 结语

本文简要介绍了无人行车的使用背景和应用意义,简要介绍了现存的一些路径规划算法原理。然后,提出一种基于 A* 算法、可视图法和势场法的改进路径规划算法,详述了依据库区工艺和实际要求,建立库区抽象模型,并结合可视图法建立库区的电子地图。在此基础上,以势场法思想作为指导,利用改进的 A* 算法进行无人化行车的路径规划。

在合理设置抽象规则和启发函数的前提下,本算法在某厂的初步实践中取得了良好的运行结

果。基于现场实际状况下发的行车任务各有不同,改进路径规划算法指导的无人行车在不同任务中的表现也有所差异,但总体上节省了约 9.262% 的任务时间。实验证明了无人化行车相对于人工操作行车,在保证安全性的前提条件下,也在效率上实现了一定程度的提高,对后续行车无人化、智能化发展有一定的积极作用。

参考文献:

- [1] 王标,郭敏,罗以东,等. WMS 系统与自动化行车解决方案在汽车工厂的应用[J]. 电工技术,2018

- (16): 154.
- [2] 张子才, 鲁刚, 谢磊. 等. 钢成品仓储装卸自动控制系统[J]. 冶金自动化 2015 39(6): 1.
- [3] 王会卿, 黄功军, 石爱文. 全自动行车及库区智能管理系统与应用[J]. 冶金自动化 2017 41(4): 13.
- [4] 王红卫, 马勇, 谢勇. 等. 基于平滑 A* 算法的移动机器人路径规划[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010 38(11): 1647.
- [5] 张广帅, 韦建军, 刘检权. 等. 移动机器人导航的路径规划策略[J]. 机电工程技术 2021 50(4): 14.
- [6] JIANG Jianxun, ZENG Xiangyuan, David Guzzetti et al. Pathplanning for asteroid hopping rovers with pre-trained reinforcement learning architectures [J]. Acta Astronautica 2000 47(6): 265.
- [7] 宋雪倩, 胡士强. 基于 Dubins 路径的 A* 算法的多无人机路径规划[J]. 电光与控制 2018 25(11): 25.
- [8] 郭江, 肖宇峰, 刘欣雨. 等. Bezier 曲线与 A* 算法融合的移动机器人路径规划[J]. 微型机与应用 2017, 36(2): 5255.
- [9] 胡蔚旻, 靳文舟. 改进平滑 A* 算法的多 AGV 路径规划[J]. 计算机工程与应用 2020 56(16): 204.
- [10] 刘志强, 朱伟达, 倪婕. 等. 基于新型人工势场法的车辆避障路径规划研究方法[J]. 科学技术与工程, 2017 17(16): 310.
- [11] 徐飞. 基于改进人工势场法的机器人避障及路径规划研究[J]. 计算机科学 2016 43(12): 293.
- [12] 温素芳, 郭光耀. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与设计 2015 36(10): 2818.
- [13] 陈超, 唐坚, 靳祖光. 等. 一种基于可视图法导盲机器人路径规划的研究[J]. 机械科学与技术 2014, 33(4): 490.
- [14] 邵伟伟, 骆正磊. 改进的可视图法在路径规划中的运用[J]. 南阳师范学院学报 2018 17(4): 38.
- [15] Sarthak Pradhan, Ravi Kumar Mandava, Pandu R. Vundavilli. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph [J]. International Journal of Information Technology 2021: 1.
- [16] QIAO Y, QIAN X M, LOU P H. Improved time window-based conflict-free automated guided vehicle system routing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems 2012 18(12): 2683.
- [17] Karaboga D, Akay B. A comparative study of artificial bee colony algorithm [J]. Applied Mathematics & Computation 2009 214(1): 108.
- [18] Brand M, Masuda M, Wehner N et al. Ant colony optimization algorithm for robot path planning [C]//Proceedings of International Conference on Computer Design & Applications. Qinhuaadao [s. n.], 2010: 436.