船舶管线智能布置的优化 Astar 算法

李喆[1]，王顺森[1]，李勇[2]，吴君[2]，颜晓江[1]，徐耀博[1]
（1. 西安交通大学叶轮机械研究所，710049，西安；
2. 武汉第二船舶设计研究所热能动力技术重点实验室，430205，武汉）

摘要：针对船舶的复杂管系布置设计工作量大、效率低下且依靠经验等问题，提出了一种船舶管线智能布置的优化 Astar 算法，建立了用于计算机识别的船舶虚拟布置空间模型，包括相关设备模型、管线简化模型、布置约束模型和栅格模型。对传统 Astar 算法进行优化，基于管线长度、拐角个数和栅格能量值对代价函数进行重新设计，引入方向概率系数和能量值提高管线布置结果的确定性。通过案例的仿真模拟，探究了方向概率系数、能量值对于管线布置速率和质量的影响。结果表明：与传统 Astar 算法以及遗传算法相比，所提优化 Astar 算法的拐角个数分别减少了 87%、50%；路径搜寻时间分别降低了 67.5%、51.5%，进一步提高了管线布置效率。与传统 Astar 算法相比，优化 Astar 算法生成的船舶管线长度减小了 49.8%，降低了管路成本，说明了该智能布置算法的适配性和优越性，对于实际船舶管线布置具有一定的借鉴性和指导性。

关键词：船舶管线；智能布置；优化 Astar 算法
中图分类号：TP399；TH128 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxb202212011 **文章编号**：0253-987X(2022)12-0108-10

Optimized Astar Algorithm for Ship Pipeline Intelligent Layout

LI Zhe[1], WANG Shunsen[1], LI Yong[2], WU Jun[2], YAN Xiaojiang[1], XU Yaobo[1]
(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Science and Technology on Thermal Energy and Power Laboratory, Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract: Aiming at the problems of heavy workload, low efficiency and experience dependency in the layout design of complex ship pipeline, an optimized Astar algorithm for intelligent layout of ship pipelines is proposed. The virtual layout space model of the ship for computer identification is established, including: related equipment model, pipeline simplified model, layout constraint model and grid model. The traditional Astar algorithm is optimized: redesigning the cost function based on the pipeline length, the number of corners and the grid energy value, and introducing the directional probability coefficient and energy value to improve the certainty of pipeline layout results. The case simulation explores the influence of the directional probability coefficient and energy value on the pipeline layout rate and quality. The results show that compared with the traditional Astar algorithm and the genetic algorithm, the number of corners of the optimized Astar algorithm in this paper is reduced by 87% and 50% respectively; the path search time is reduced by 67.5% and 51.5% respectively, which further improves the pipeline layout efficiency. Compared with the traditional Astar algorithm, the length of the ship pipeline

收稿日期：2022-05-12。 作者简介：李喆(1998—)，男，硕士生；王顺森(通信作者)，男，副教授，博士生导师。 基金项目：热能动力技术国家重点实验室开放基金资助项目(TPL2020B03)。
网络出版时间：2022-08-23 网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220823.1101.002.html

generated by the optimized Astar algorithm is reduced by 49.8%, which reduces the layout cost of the pipeline. It proves the adaptability and superiority of the intelligent layout method. It can provide reference and guidance for the actual ship pipeline layout.

Keywords: ship pipeline; intelligent layout; optimized Astar algorithm

船舶管线对于船舶而言，相当于血管对于人体的意义。船舶内部的管线承担着输送燃油、滑油、液压油、蒸汽、水、压缩空气等各类工质的作用[1-2]。船舶管线布置质量是衡量其经济性、安全性、可维修性和功能性的重要指标[3-6]。船舶管线布置设计的总体要求是：在给定的几何空间中，寻找满足相关规则和规范的从起点至终点的最佳布置路线[7]。

从 20 世纪 70 至 80 年代开始，船舶管线智能布置设计逐渐成为国内外众多研究者的研究热点。Park 等[8]提出了单元格生成法的概念，建立了一种考虑船舶管路布置规则的管路布置算法；范小宁等[9]对遗传算法的算子进行了优化设计，提出了一种变长度坐标编码方式用于遗传算法中的交叉编译步骤，由于程序更为复杂导致管线布置效率有一定的降低；邬君等[10]通过将协同进化算法和蚁群算法进行深度融合，得到了一种管线布置的新方案，不过随着规模的增大其管路布置质量存在明显降低；Lu 等[11]对 Park 提出的单元生成法进行了优化设计，不过该算法可选择的路径生成模式仍然有限，在复杂布局空间下生成的路径质量不高；隋海腾等[12]基于非支配排序遗传算法提出了一种处理管道路径规划问题的优化算法，经过验证具有较好的布置效果，不过需要很大的数据存储空间。

上述船舶管线智能布置算法可分为两大类：一类是以迷宫算法为代表的确定性算法，另一类是以遗传算法为代表的非确定性算法。确定性算法相对而言布置效率更高，不过固定条件下的布置结果是固定的，可选择性较小；非确定性算法可以提供多种布置结果，不过效率过低；将确定性算法和非确定性算法结合而成的混合算法，虽然能够提供相对较好的布置结果，不过布置效率反而更低。船舶内部的布置空间复杂性较高、管系繁多且存在诸多规则约束，由此可见船舶管线的布置设计工作量大、难度高、要求多。当前还没有形成一种适用于各类船型与各类别管路的船舶管路智能求解布置算法，因此对于具有不同特征的智能算法进行研究可为从事相关管路设计的工作者提供更多的选择方案，提高设计工作效率，降低设计人员的工作量与人为设计失误。

本文在前人研究基础上，总结相关经验，引入确定性算法中的 Astar 算法，对船舶管线的智能布置问题进行研究。但直接将 Astar 算法用于船舶管线布置，其方向引导机制会导致管线出现大量拐角，且无法满足远离危险设备、附着舱壁布置等相关要求。本文对传统 Astar 算法进行改进，基于管线长度、拐角个数和栅格能量值对代价函数进行重新设计。相对于传统 Astar 算法和遗传算法，本文的优化 Astar 算法具有较高的运行效率和更少的拐角数，且引入方向概率系数和能量值提高管线布置结果的确定性。通过案例的仿真模拟，说明了该智能布置算法的适配性和优越性，探究了方向概率系数和能量值对于管线布置速率和质量的影响。

1　建立船舶虚拟布置空间模型

1.1　相关设备模型

船舶管线的布置空间内，存在形式多样的相关仪器设备，例如柴油机或锅炉、汽轮机、空气压缩机等，在管线布置时不能穿越这些设备及相关障碍物。因此，首先要对这些设备及障碍物建立计算机可识别的模型，考虑到管线走向大都与船体方向平行或垂直，只需要保证设备障碍物模型与真实设备形状近似即可。在已有研究中大都采用轴平行包围盒法[13]，其优点是设备模型大幅简化，不过缺点同样明显，部分自由空间被当作障碍物处理，影响空间利用率，难以保证最终的路线布置结果为最优解。

本研究以传统的轴平行包围盒法为基础，提出一种分割组合建模法，首先根据设备实体的几何结构特征将其分割为多个部分，针对每一个部分分别进行轴平行包围，再将各部分的包围盒按照设备原本几何结构重新组合在一起。基于此策略，在保证管线准确布置的情况下降低了工作的复杂度和数据信息的存储量。

1.2　简化管线模型

船舶管线主要由内径、壁厚、长度和起终点位置 4 个特征值决定。在计算机识别模型过程中，起终点会简化为一个点，因此本文针对船舶管线，在建立模型时将其简化为管线中心线所对应的直线，忽略其直径和壁厚，在实际管线布置时再将其复原。

1.3 布置约束模型

相对于传统的机器人[14]和无人机路径规划[15]，三维空间内的船舶管路布置的约束条件更多，包括经济性约束、物理性约束、安装性约束、安全性约束和美观性约束等。本文考虑的约束如下：①管路需要连接指定管路接口点，保证管路的连通性与合法性；②管线总长度要尽可能短，降低管材费用；③管线中的拐角数应尽可能少，降低弯头用量；④保证管线与管线、管线与设备障碍物之间不发生物理性穿插；⑤原则上管线应尽量沿舱壁、舱底以及可支撑设备表面，远离危险设备来安装，以减少安装费用，降低设备振动对管线的影响以及风险概率[16]。

其中①～④属于刚性约束，管线布置时必须满足，本文通过设置设备障碍物和重新设计代价函数来实现；⑤属于柔性约束，应尽可能满足，本文通过在栅格中赋予能量值，在代价函数中引入能量代价来实现。

1.4 栅格模型

按照船舶管线布置空间内存在的约束不同，可将整个布置空间分割为不同的布置区域，只需要对每个布置区域分别进行管线智能布置即可[17]。采用能量值和状态值两个评价指标，对各个布置区域进行描述，供计算机识别。

首先对船舶管线布置空间采用平行包络盒法进行包络处理，进而将船舶管线布置空间均匀划分为一定数目的栅格[18]，选取包络盒的任意顶点作为坐标原点建立三维空间坐标系，每一个栅格必定有唯一与其相对应的空间坐标[19]。按照栅格是否被设备障碍物占据分为可用栅格和不可用栅格[20]。

在可用栅格中，又按照是否希望管线通过分为优先可用栅格、普通可用栅格和候补可用栅格，分别对应不同的能量值。约束条件中要求管线尽量沿舱壁、舱底或者可支撑障碍物表面安装，则舱壁、舱底或者可支撑障碍物表面所对应的栅格便属于优先可用栅格，更适合布置管线，设置其对应的能量值相对较小，布置时优先考虑；而某些区域希望尽量不布置管线，这些区域对应的便是候补可用栅格，其能量值相对较大，相对而言不太适合布置管线；其他普通可布置区域对应的便是普通可用栅格。

2 船舶管线布置算法

2.1 Astar 算法简介

Astar 算法属于确定性智能寻径算法[21]，是对 Best-First 算法的一种改进，核心思想是广义搜索，利用 open 表和 close 表对节点进行剪枝，同时利用启发式代价函数来选择最优的扩展节点[22]。相对 Best-First 算法，搜寻节点更少，搜寻时间更短，适用性良好。Astar 算法的步骤如下。

(1)初始时刻，把起点作为当前点 C，将其加入 open 表。

(2)从 open 表取出当前点 C 放入 close 表。

(3)对当前点 C 的所有相邻节点进行搜寻，若某相邻节点既不在 open 表，也不在 close 表，计算该节点的 F 值后将其设为父节点，并将其加入 open 表。

(4)对 open 表是否为空进行判断，若为空则寻路失败；若不为空，则进行下一步骤。

(5)从 open 表中取出 F 值最小的节点，并将其放入 close 表，搜寻其可走的相邻节点，将这些相邻节点中不在 open 表中的节点加入其中。此时把 F 值最小节点认定为这些选取的相邻节点的父节点。

(6)判别该 F 值最小节点是否为终点，若是，搜寻成功，结束搜寻；否则继续。

(7)将该 F 值最小节点设为当前点 C，跳回步骤(3)。其中 $F=G+H$，G 等于从起点移动到当前节点的移动代价，H 等于从当前节点移动到终点的估算代价。

关于估算代价 H 的计算，主要有 3 种方法[23-24]。

(1)曼哈顿距离。从当前节点仅仅只能向上下左右 4 个方向进行搜寻，不能向其他方向进行搜寻移动，其距离计算公式为

$$d=(x_2-x_1)+(y_2-y_1) \tag{1}$$

(2)对角线距离。从当前节点可以朝着上下左右和 4 个 45°对角线方向进行搜寻，其距离为

$$d=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_2)^2} \tag{2}$$

(3)欧几里得距离。从当前节点可以朝着任意角度的几何方向进行搜寻，其计算公式与对角线距离公式相同。

2.2 优化 Astar 算法

在传统 Astar 算法路径规划中，大都是以线路的路程最短作为优化目标。本文根据实际约束条件，把管线总体长度最短、弯头数最少、不穿越设备障碍物、尽可能贴合船舱内壁等可依附表面、远离危险设备作为算法的优化目标。由于优化目标发生了改变，传统 Astar 算法的代价函数不再适用，本文对于代价函数进行优化改进。

2.2.1 当前移动代价

传统 Astar 算法的代价函数 F_n 的计算公式为

$$F_n=G_n+H_n \tag{3}$$

式中：G_n 为从起点到当前节点的移动代价；H_n 为从当前节点移动到目标节点的预估移动代价；n 为当前节点编号。

在过往路径规划研究中，G_n 的求解函数为

$$G_n = D \tag{4}$$

式中 D 为船舶管线的总距离长度，每移动一个栅格，就要加上一个栅格边长。

G_n 的求解函数仅仅以距离最短作为目标，并未考虑其他因素，而在船舶管线中，管线弯头的价格要远远高于等价长度的普通管线，因此有必要把弯头数目加入到 G_n 的求解函数中，优化后的当前移动代价 G_n 的求解函数为

$$G_n = \alpha D + \beta B \tag{5}$$

式中：B 为弯头数，也就是管线布置后的路径转弯次数；α、β 为常数，分别代表普通管线价格和弯头价格对应的代价因子。

2.2.2　预估移动代价

H_n 表示从当前节点移动到目标节点的预估移动代价，H_n 是启发式搜索中最重要的部分，控制着 Astar 算法的行为特征，当 H_n 为 0 时，$F_n = G_n$，Astar 算法转变为 Dijkstra 算法，此时寻找的路径最短；相反，如果 H_n 远远大于 G_n，此时 G_n 的作用基本被削弱消失，只有 H_n 起作用，Astar 转变为广度优先搜索算法（也称宽度优先搜索，通常简写为 BFS）。

预估移动代价 H_n 与从当前节点到终点实际代价的大小关系决定了路线规划的精度和速度。若 H_n 大于实际代价，此时搜索运算速度较快，可精度较低，无法保证搜寻到的路线为最短路线；若 H_n 等于实际代价，此时能够搜寻到一条最佳路径，并且不扩充无用节点，是一种理想情况，不过往往难以实现；若 H_n 小于实际代价，此时能够保证搜寻到一条最短路线，H_n 的数值越小，扩充的节点越多，搜寻速度越慢。在实际铺设管线时，可根据要求的搜索精度和速度，灵活设定 H_n。

通过对曼哈顿、对角线和欧几里得这 3 种距离计算公式对比可知，对角线、欧几里得距离均会出现倾斜管线，不符合船舶管线实际铺设的规范约束，因此船舶管线智能布置应该选择曼哈顿距离求解预估移动代价。

曼哈顿距离计算公式针对的是二维空间，不再适用于三维空间内的船舶管线布置，因此优化曼哈顿距离计算公式为

$$H_n = |X_d - X_n| + |Y_d - Y_n| + |Z_d - Z_n| \tag{6}$$

式中：下角标 d、n 分别表征终点和当前节点编号，即终点坐标是 (X_d, Y_d, Z_d)，当前节点坐标是 (X_n, Y_n, Z_n)。

2.2.3　能量代价

为使布置的管线尽可能满足约束条件⑤，在优化 Astar 算法的代价函数中引入能量代价 E_n，其计算方法为从起点到当前节点经过的所有节点的能量代价之和，计算公式为

$$E_n = \gamma \sum_{i=s}^{n+l} e_i \tag{7}$$

式中：n 为当前节点编号；s 为管线起点；e_i 为节点 i 对应的能量值；γ 为常数，代表能量值对应的代价因子。

综上，优化 Astar 算法的代价函数计算公式为

$$F_n = G_n + E_n + H_a = \alpha D + \beta B + \gamma \sum_{i=s}^{n+l} e_i + |X_d - X_n| + |Y_d - Y_n| + |Z_d - Z_n| \tag{8}$$

2.2.4　搜寻方向

对船舶管线的布置空间建立栅格后，每一个节点都相应对应着一个栅格，与空间中任意一个节点和至少 3～6 个节点相邻。

空间中任意两个节点的坐标在 X、Y、Z 方向的大小关系分别有大于和小于两种，根据 3 个方向坐标的大小关系排列组合后，空间中任意两个节点共有 8(2×2×2)种位置关系。相应地，当选择的管线起点和终点不同时，也分为这 8 种情况，起点和终点之间的空间相对位置关系发生变化时，管线路径搜寻的结果或者速率也必然发生改变。

在确定起点和终点的位置过后，可对每个搜索方向赋予一个方向搜索概率系数，代表着在众多搜索方向中选择该方向的概率值。方向搜索概率系数调整的具体实现方式为：在程序中设定一个列表([1,0,0],[0,1,0],[−1,0,0],[0,−1,0],[0,0,1],[0,0,−1])，列表中的每一个元素对应一个搜索方向，例如[1,0,0]代表搜索方向为 X 轴正方向。通过改变列表内部代表不同搜索方向的元素个数来调整方向搜索概率系数，例如[1,0,0],[1,0,0],[1,0,0],[0,1,0],[−1,0,0],[0,−1,0],[0,0,1],[0,0,−1]，内部有 3 个代表 X 轴正方向的元素[1,0,0]，代表其余搜索方向的元素各一个，此时 X 轴正方向的方向搜索概率系数为 3/8，代表着从当前节点向下一节点搜索时有 37.5% 的概率向 X 轴正方向进行搜寻。在已知管线起终点相对位置关系的情况下，通过合理地设置不同方向的方向搜寻概率，可

提高路径节点搜索时向终点方向搜索的趋势，进一步提高管线布置的确定性和路径搜索效率。本文提出的优化 Astar 算法具体流程如图 1 所示。

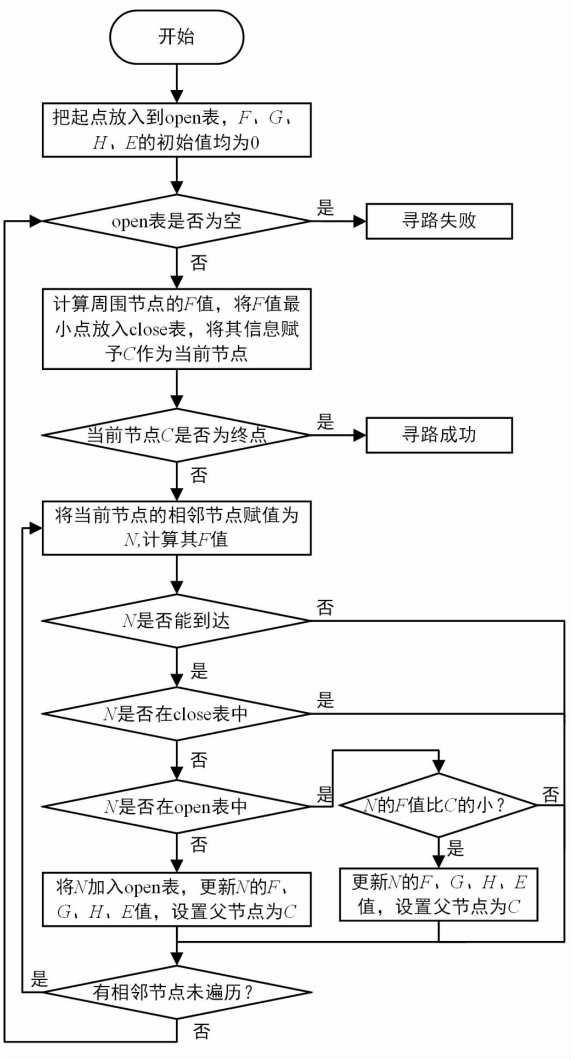

图 1 优化 Astar 算法流程

Fig. 1 Optimization process of Astar algorithm

3 模拟结果分析

3.1 模型参数设置

为验证优化 Astar 算法在船舶管线布置中的可行性，在 windows 10 环境下，通过 pycharm 平台用 python 语言进行编译实现上述算法。首先建立了一个 100×100×100 的船舶管线布置空间，采用栅格法对布置空间进行等分，设定栅格边长为 1，共生成 100 万个栅格细胞。基于前文所述的设备简化方法，在空间内搭建了一定数量的设备障碍物，各障碍物信息如表 1 所示，其中 1 号设备障碍物由 1_1 和 1_2 两部分组成。

表 1 障碍物位置坐标表

Table 1 Coordinate table of obstacle position

障碍物序号	X 范围	Y 范围	Z 范围
1_1	(70,80)	(70,80)	(0,50)
1_2	(80,95)	(80,100)	(0,50)
2	(60,95)	(0,50)	(0,10)
3	(20,40)	(10,70)	(0,80)
4	(10,80)	(80,100)	(80,100)

基于上表障碍物数据建立的船舶三维管线布置空间如图 2 所示。建立了三维管线布置空间后，设置管线布置的起点坐标为(100,100,0)，终点坐标为(0,0,100)。基于大量的模拟总结，综合考虑各参数对于管线布置的影响，最终初步选定相关优化 Astar 算法的参数如表 2 所示。

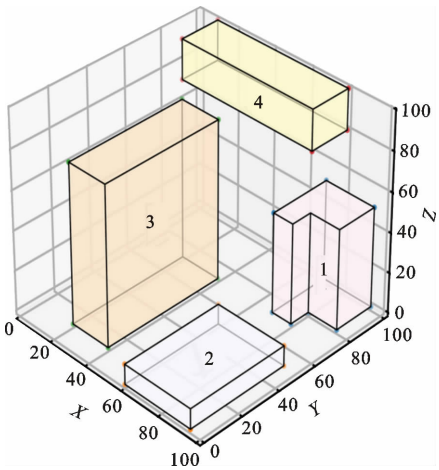

图 2 布置空间三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of layout space

表 2 优化 Astar 算法参数设置

Table 2 Parameter setting of improved Astar algorithm

参数变量	数值
系数 α	0.3
系数 β	0.5
系数 γ	0.2
栅格边长	1
默认能量值	1
X 正方向概率	1/6
X 负方向概率	1/6
Y 正方向概率	1/6
Y 负方向概率	1/6
Z 正方向概率	1/6
Z 负方向概率	1/6

3.2　管线布置结果对比

基于前文所建立的船舶管线三维布置空间模型和设置的相关参数数值，分别采用传统 Astar 算法和优化 Astar 算法进行管线布置仿真，布置结果如图 3、图 4 所示，表 3 为两种算法管线布置结果的部分信息对比。

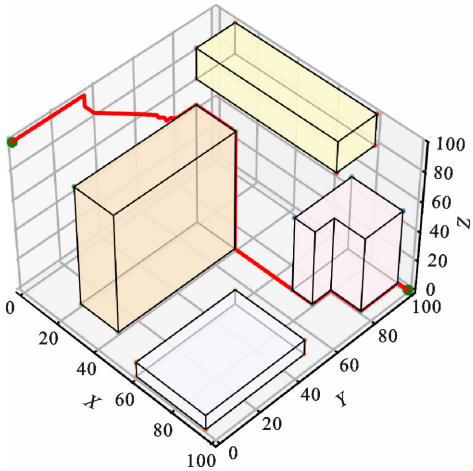

图 3　采用传统 Astar 算法的布置结果

Fig. 3　Search result based on conventional Astar algorithm

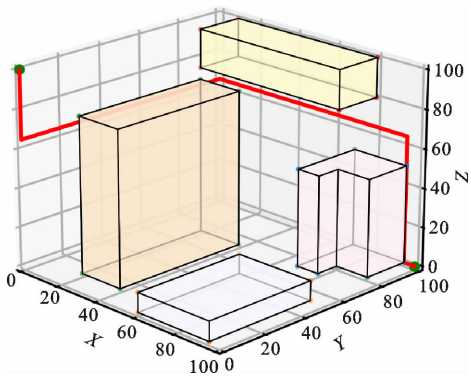

图 4　采用优化 Astar 算法的布置结果

Fig. 4　Search result based on optimized Astar algorithm

表 3　传统 Astar 算法和优化 Astar 算法的布置结果对比

Table 3　Comparison of search results between conventional Astar algorithm and optimized Astar algorithm

算法	路径节点数	搜寻时间/s	拐角数
优化 Astar	300	1.563 577	4
传统 Astar	598	4.809 945	31

通过对比图 3 和图 4 的管线布置结果，不难发现，两种算法虽然都能够搜寻到一条从起点至终点不经过障碍物的管线铺设路径，但传统 Astar 算法搜寻的管线铺设路径拐角个数高达 31 个，不仅影响布置美观性，更增加了管线与管线之间发生干涉的概率，而优化 Astar 算法管线布置结果更加符合实际的船舶三维管线布置情况，拐角较少，并且在搜寻时间和路径节点数上，优化 Astar 算法均小于传统 Astar 算法，说明优化 Astar 算法的管线布置效率和质量均优于传统 Astar 算法，证明本研究方案的先进性。

基于本文算法对文献[25]中的案例进行了仿真运算，结果如图 5 所示，文献[25]的管线布置结果如图 6 所示。将两种算法结果进行对比，结果如表 4 所示，可知相对于文献[25]中遗传算法的布置结果，本文布置的管路结果具有更少的拐角数、更短的搜寻时间即更快的运行效率，但是管路布置结果没有文献[25]丰富，可选择性略低。本文布置的结果在符合相关约束条件下经济性良好，由此可见其布置结果质量较高，没有过多的布置方案带来的影响微乎其微，由此可证明本文船舶管线布置算法的优越性。本文在后续仿真案例部分没有采用文献[25]的案例信息，主要是因为本文需要对能量值和方向概率函数对于管线布置结果进行验证，而文献[25]的

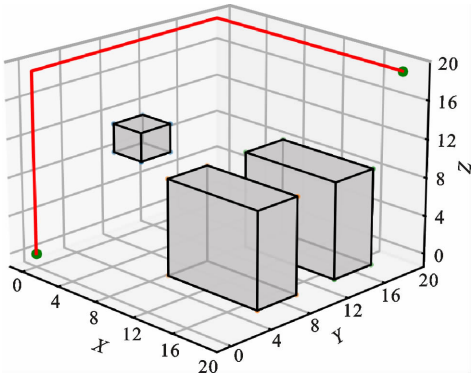

图 5　本文算法对文献[25]中的案例仿真运算的结果

Fig. 5　Result of simulation operation of the algorithm in this paper on cases in literature [25]

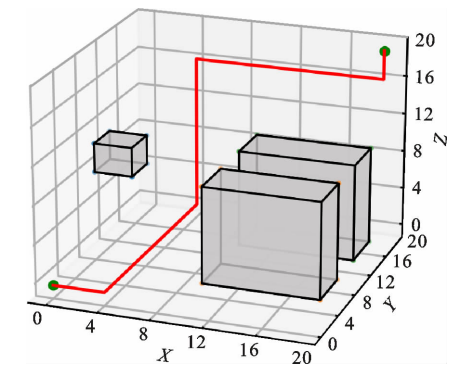

图 6　文献[25]的管线布置结果

Fig. 6　Pipeline layout result in reference [25]

案例中障碍物所占空间体积的比例较低，不能很好体现能量值和方向概率函数对于管线布置结果的影响。

表 4 本文算法和遗传算法的布置结果对比

Table 4 The results of the proposed algorithm and genetic algorithm are compared

算法	管路长度	拐角数	搜寻时间/s
本文算法	57	2	0.16
文献[25]算法	57	4	0.33

3.3 不同能量值对于管线布置的影响

本文在代价函数加入了能量代价，以此希望布置的船舶管线尽可能贴合船舱内壁等可贴合表面，远离相对危险设备，即通过尽可能多的优先可用栅格，通过尽可能少的候补可用栅格。设定默认情况下，普通可用栅格的能量值都为 1。设定 1 号设备障碍物(1_1 号障碍物和 1_2 号障碍物组合构成)为柴油机时，相对管线而言存在一定风险，希望管线尽可能远离，因此把 1 号设备障碍物表面栅格能量值设定为 10，此时基于文模型信息所建立的管线布置结果如图 7 所示。

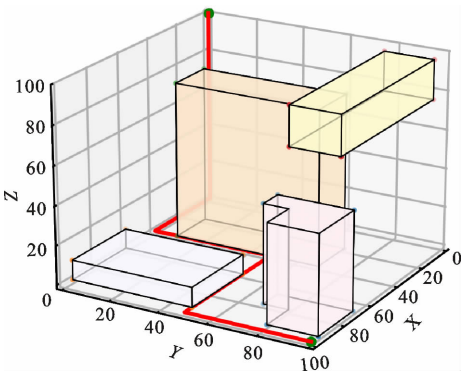

图 7 一号障碍物表面为高能量值时的布置结果

Fig. 7 Layout result of obstacle No. 1 with high energy value

设定 1 号设备障碍物为储物间，相对管线而言是可依附设备，把 1 号设备障碍物表面栅格能量值设定为 0.1，其他栅格的能量值仍默认为 1，此时管线的布置结果如图 8 所示。

通过对 1 号障碍物表面设定不同的能量值，得到了不同的管线布置结果，验证了栅格能量值对于管线布置的影响，证明了在代价函数中引入能量代价的科学性和必要性。

3.4 方向选择概率对于管线布置的影响

在管线布置时，每个节点向下一个节点搜寻时，分别有 X 轴正负方向、Y 轴正负方向和 Z 轴正负方向 6 个方向可选择，默认情况下各方向选择概率相同。为研究方向选择概率对于管线布置的影响，通过控制变量法，设置不同的方向选择概率进行多次模拟实验。以 Y 轴作为研究对象，设置两组对照组，在对照组 A 中，不断增大 Y 轴正方向的选择概率，其余 5 个方向选择概率不断减小且均等，如表 5 所示；在对照组 B 中，不断增大 Y 轴负方向的选择概率，其他 5 个方向选择概率不断减小且均等，如表 6 所示。同理，X 轴和 Z 轴同样利用改变相应方向选择概率进行实验，具体改变数值与对照组 A、B 保持一致。基于前文建立的布置空间模型和设置的相关参数，模拟实验、记录搜寻节点个数、搜寻时间、搜寻路径节点数和拐角数等数据进行对比。

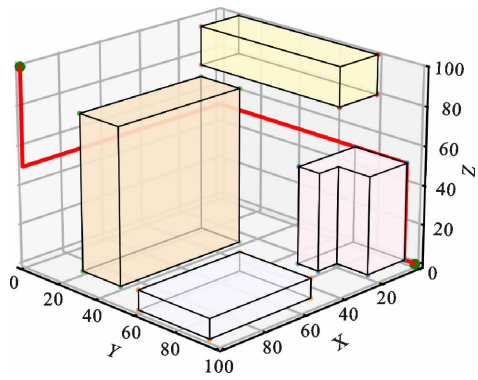

图 8 一号障碍物表面为低能量值时的布置结果

Fig. 8 Layout result of obstacle No. 1 with low energy value

表 5 对照组 A 的方向选择概率

Table 5 Direction selection probability of control group A

序号	X 正方向概率	X 负方向概率	Y 正方向概率	Y 负方向概率	Z 正方向概率	Z 负方向概率
1	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
2	1/7	1/7	2/7	1/7	1/7	1/7
3	1/8	1/8	3/8	1/8	1/8	1/8
4	1/9	1/9	4/9	1/9	1/9	1/9
5	1/10	1/10	5/10	1/10	1/10	1/10
6	1/11	1/11	6/11	1/11	1/11	1/11

通过程序算法的不断模拟运算，得到了管线布置运行时间与方向选择概率的关系曲线，分别如图 9、图 10 所示，管线最终布置结果分别如图 11、图 12 所示。

通过观察，可以得到以下结论：当靠近终点的方向选择概率不断增加时，即不断增大 X 轴负方向、Y 轴负方向和 Z 轴正方向的方向选择概率，此时管线

表 6　对照组 B 的方向选择概率

Table 6　Direction selection probability of control group B

序号	X 正方向概率	X 负方向概率	Y 正方向概率	Y 负方向概率	Z 正方向概率	Z 负方向概率
1	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
2	1/7	1/7	1/7	2/7	1/7	1/7
3	1/8	1/8	1/8	3/8	1/8	1/8
4	1/9	1/9	1/9	4/9	1/9	1/9
5	1/10	1/10	1/10	5/10	1/10	1/10
6	1/11	1/11	1/11	6/11	1/11	1/11

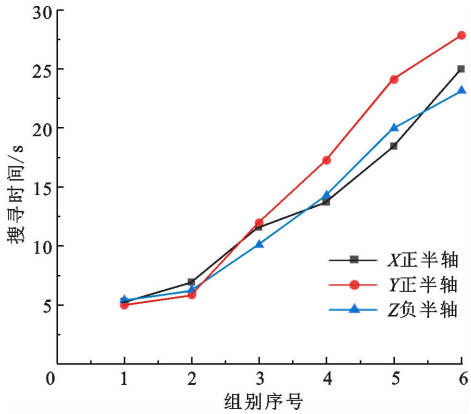

图 9　增大远离终点的方向概率时的搜寻时间

Fig. 9　Increases the search time of direction probability away from the end point

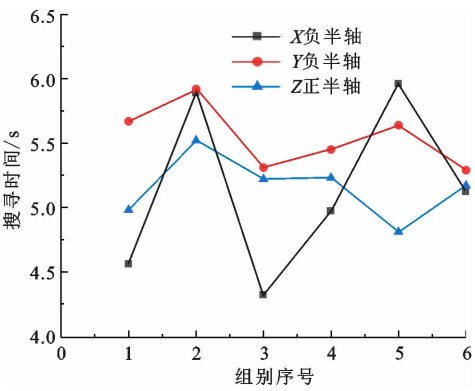

图 10　增大靠近终点的方向概率时的搜寻时间

Fig. 10　Increases the search time of direction probability near the end point

布置的搜寻时间并不会发生明显变化；相反地，当远离终点的方向选择概率不断增加时，即不断增大 X 轴正方向、Y 轴正方向和 Z 轴负方向的选择概率，管线布置的路径搜寻时间大幅度增加。并且当方向选择概率发生改变时，管线的布置结果也会发生改变，可利用该特点，合理设置方向选择概率，可提高路径节点搜索时向终点方向搜索的趋势性，进一步提高管线布置的确定性和效率。

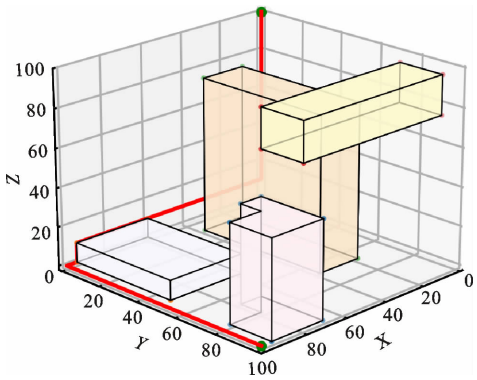

图 11　增大 Y 轴负半轴选择概率的布置结果

Fig. 11　Layout result of increasing the probability of Y-axis negative semi-axis selection

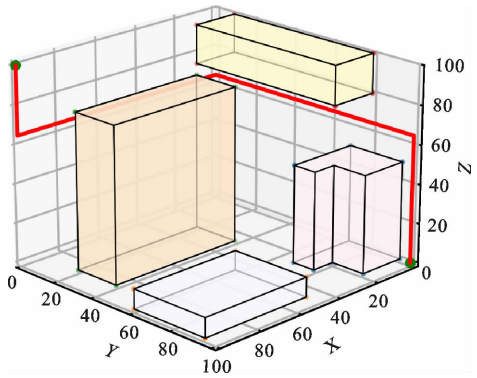

图 12　增大 Y 轴正半轴选择概率的布置结果

Fig. 12　Layout result of increasing the probability of positive half-axis selection of Y-axis

4　结　论

针对传统 Astar 算法在船舶管路布置时出现的问题，提出了一种船舶管线智能布置的优化 Astar 算法。基于管线长度、拐角个数和栅格能量值对传统 Astar 算法的代价函数进行重新设计，并引入方向概率系数和能量值提高管线布置结果的确定性。通过仿真模拟探究了优化 Astar 算法的优势以及方向概率系数和能量值对于管线布置速率和质量的影响。主要结论如下。

(1)与传统 Astar 算法和遗传算法相比，本文的优化 Astar 算法进行船舶管线布置时的拐角个数分别减少了 87%、50%。因为管线弯头的价格要远远高于等价长度的普通管线，本算法进一步降低了管线布置的成本，同时提高了管线布置的美观性。

(2)与传统 Astar 算法和遗传算法相比,本文的优化 Astar 算法的路径搜寻时间分别降低了 67.5%、51.5%,进一步提高了管线布置效率。

(3)与传统 Astar 算法相比,本文的优化 Astar 算法生成的船舶管线长度减小了 49.8%,降低了管线的布置成本。

参考文献:

[1] PÉREZ D M, RAMOS-ARZOLA L C, TORRES A Q. Pressure-dependent models in ship piping systems [J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19(2): 266-274.

[2] KIMURA H. Automatic designing system for piping and instruments arrangement including branches of pipes [C]// International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2011. London, UK: RINA, 2011: 93-99.

[3] JAQUITH P E, BURNS R M, DUNBARR S E, et al. Modular engine room design and construction for the strategic sealift ships [J]. Journal of Ship Production, 1996, 12(4): 230-243.

[4] BEAMES C J. 3D modelling and model management applied to ship design [J]. Computer-Aided Design, 1987, 19(10): 560-565.

[5] ZHENG Chen, AN Yushu, WANG Zhanxi, et al. Application of configuration principle on knowledge-based engineering for manufacturing system design [J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 1378-1383.

[6] 王运龙, 吴张盼, 李楷, 等. 基于禁忌搜索算法的船舶舱室智能布局设计 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 49-53, 70.
WANG Yunlong, WU Zhangpan, LI Kai, et al. Ship cabin intelligent layout design based on tabu search algorithm [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 49-53, 70.

[7] YANG H Z, CHEN J F, MA N, et al. Implementation of knowledge-based engineering methodology in ship structural design [J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(3): 196-202.

[8] PARK J H, STORCH R L. Pipe-routing algorithm development: case study of a ship engine room design [J]. Expert Systems with Applications, 2002, 23(3): 299-309.

[9] 范小宁, 林焰, 纪卓尚. 船舶管路三维布局优化的变长度编码遗传算法 [J]. 中国造船, 2007, 48(1): 82-90.
FAN Xiaoning, LIN Yan, JI Zhuoshang. A variable length coding genetic algorithm to ship pipe path routing optimization in 3D space [J]. Ship Building of China, 2007, 48(1): 82-90.

[10] 邬君, 林焰, 纪卓尚, 等. 基于协同进化的舰船分支管路系统路径优化研究 [J]. 船海工程, 2008, 37(4): 135-138.
WU Jun, LIN Yan, JI Zhuoshang, et al. Optimal approach of ship branch pipe routing optimization based on Co-Evolutionary algorithm [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(4): 135-138.

[11] LU Huibiao, YU Zhefu, SUN Peiting. Hanging bridge algorithm for pipe-routing design in ship engine room [C]// 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 153-155.

[12] 隋海腾, 牛文铁. 基于迷宫算法和遗传算法的船舶管路路径规划 [J]. 工程设计学报, 2016, 23(2): 188-194.
SUI Haiteng, NIU Wentie. Ship pipe route planning method based on maze algorithm and genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(2): 188-194.

[13] ASMARA A, NIENHUIS U. Automatic piping system in ship [C]// The 5th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Sieca Repro, TUD: Delft, 2006: 269-280.

[14] 王硕, 段蓉凯, 廖与禾. 机器人路径规划中快速扩展随机树算法的改进研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 1-8.
WANG Shuo, DUAN Rongkai, LIAO Yuhe. Research on improvement of rapidly exploring random tree algorithm in robot path planning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 1-8.

[15] 张佳龙, 闫建国, 张普, 等. 基于改进人工势场的无人机编队避障控制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 112-119.
ZHANG Jialong, YAN Jianguo, ZHANG Pu, et al. Study on the collision avoidance of UAV cooperative formation with improved artificial potential field [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 112-119.

[16] DONG Zongran, LIN Yan. Ship pipe routing method based on genetic algorithm and cooperative coevolution [J]. Journal of Ship Production and Design, 2017, 33(2): 122-134.

[17] WANG Yunlong, YU Yanyun, LI Kai, et al. A human-computer cooperation improved ant colony optimi-

zation for ship pipe route design [J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 12-20.

[18] WANG Yunlong, WEI Hao, ZHANG Xin, et al. Optimal design of ship branch pipe route by a cooperative co-evolutionary improved particle swarm genetic algorithm [J]. Marine Technology Society Journal, 2021, 55(5): 116-128.

[19] 董宗然，林焰. 船舶布管系统的结构设计及自动化算法 [J]. 计算机集成制造系统，2016，22(3)：714-727.
DONG Zongran, LIN Yan. Structure design and automation algorithm for ship piping system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 714-727.

[20] SUI Haiteng, NIU Wentie. Branch-pipe-routing approach for ships using improved genetic algorithm [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2016, 11(3): 316-323.

[21] 程传奇，郝向阳，李建胜，等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划 [J]. 西安交通大学学报，2017，51(11)：137-143.
CHENG Chuanqi, HAO Xiangyang, LI Jiansheng, et al. Global dynamic path planning based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 137-143.

[22] PENG Jiansheng, HUANG Yiyong, LUO Guan, et al. Robot path planning based on improved A* algorithm [J]. Cybernetics and Information Technologies, 2015, 15(2): 171-180.

[23] FRANSEN K, VAN EEKELEN J. Efficient path planning for automated guided vehicles using A* (Astar) algorithm incorporating turning costs in search heuristic [J/OL]. International Journal of Production Research, 2021 [2022-01-22]. https: // doi. org/10.1080/00207543.2021.2015806.

[24] 李文博，秦小林，罗刚. 基于无障碍凸区域的无人机在线航迹规划 [J]. 系统科学与数学，2021，41(6)：1493-1506.
LI Wenbo, QIN Xiaolin, LUO Gang. Online trajectory planning of UAV based on convex obstacle-free area [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2021, 41(6): 1493-1506.

[25] 王运龙，王晨，韩洋，等. 船舶管路智能布局优化设计 [J]. 上海交通大学学报，2015，49(4)：513-518.
WANG Yunlong, WANG Chen, HAN Yang, et al. Intelligent layout optimization design of ship pipe [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(4): 513-518.

（编辑　赵炜　亢列梅）