

文章编号:1672-3961(2024)03-0141-08 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.104

# 基于 A\* 算法的输电线路组塔施工吊装路径规划方法

张飞凯<sup>1</sup>, 夏拥军<sup>1</sup>, 秦剑<sup>1</sup>, 游溢<sup>2</sup>, 鹏飞<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055; 2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**为提高双平臂落地抱杆的吊装效率,降低线路施工安全风险,提出一种基于 A\* 算法的输电线路组塔施工吊装路径规划方法。将三维空间中的吊装路径规划问题简化为水平面和铅垂面 2 个二维平面内的路径寻优问题,通过动力学仿真研究吊件摆动幅度和消摆时间对吊装路径的影响,在进行施工现场环境中心对称建模的基础上,基于 A\* 算法和仿真结论对吊装路径进行规划。实际工程应用结果表明,该方法可在约 0.188 s 内自动规划出双平臂落地抱杆两侧平衡起吊的优化吊装路径,可有效缩短吊装时间,保障线路施工的效率 and 安全性。

**关键词:**输电线路;组塔;吊装;双平臂落地抱杆;路径规划;A\* 算法

**中图分类号:**TM754 **文献标志码:**A

**引用格式:**张飞凯,夏拥军,秦剑,等. 基于 A\* 算法的输电线路组塔施工吊装路径规划方法[J]. 山东大学学报(工学版),2024,54(3):141-148.

ZHANG Feikai, XIA Yongjun, QIN Jian, et al. Hoisting path planning method for transmission line tower assembly construction based on A\* algorithm[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3):141-148.

## Hoisting path planning method for transmission line tower assembly construction based on A\* algorithm

ZHANG Feikai<sup>1</sup>, XIA Yongjun<sup>1</sup>, QIN Jian<sup>1</sup>, YOU Yi<sup>2</sup>, PENG Fei<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** To improve the hoisting efficiency of floor-standing two boom derrick and reduce the safety risk of transmission line construction, a hoisting path planning method for transmission line tower assembly construction based on A\* algorithm was proposed. This method simplified the hoisting path planning problem in three-dimensional space to the path optimization problem in two-dimensional planes, horizontal plane and vertical plane, and studied the influence of swing amplitude and swing elimination time of hoisting parts on the hoisting path through the dynamic simulation. Based on the centrosymmetric modeling of the construction site environment, the hoisting path was planned based on A\* algorithm and dynamic simulation conclusions. The engineering application results showed that this method could automatically plan the optimal hoisting path for balanced hoisting on both sides of the floor-standing two boom derrick in around 0.188 s, which could effectively shorten the hoisting time, and ensured the efficiency and safety of the line construction.

**Keywords:** transmission line; tower assembly construction; hoisting; floor-standing two boom derrick; path planning; A\* algorithm

## 0 引言

双平臂落地抱杆是一种具有 2 套吊臂、小车和吊钩的专用组塔装备,能同时将 2 个相同的吊件由地面

初始位置平衡吊装至目标位置,稳定性好,安全性高,在输电线路工程施工中应用广泛,其吊装路径是保证线路组塔效率及安全的基础,决定了电网的建设质量及工程安全。目前双平臂落地抱杆吊装路径规划方法缺失,操作人员只能凭经验进行吊装,效率较低且

收稿日期:2022-05-24

基金项目:国家电网有限公司总部科技资助项目(5200-202236097A-1-1-ZN)

第一作者简介:张飞凯(1993—),男,安徽枞阳人,工程师,博士,主要研究方向为接触力学、静密封、输电线路施工技术。

E-mail:zhangfkb@163.com

碰撞事故频发,严重影响施工安全。

针对流动式起重机、桥式起重机和塔式起重机等吊装设备的吊装路径规划方法有很多:文献[1-3]采用快速搜索随机树算法进行吊装路径搜索,该方法简单,适用于多约束的路径搜索问题,但是无法搜索出最优路径,且全局采样会导致算法收敛速度慢;文献[4]采用双向快速搜索随机树算法在优化后的C空间进行起重机的工作路径规划,能够在一定程度上提高路径搜索效率;随机路径图算法也是一种行之有效的吊装路径规划方法,但其高度依赖参数设置,无法规划出最优路径,且存在狭窄通路问题<sup>[5-7]</sup>;文献[8-9]基于改进的人工势场法和蚁群算法进行了多起重机协作的吊装路径规划;文献[10]利用遗传算法为起重机吊装路径的多个目标提供不同特点的路径。但这些算法均存在局部最优问题。其他吊装路径规划方法(如粒子群算法<sup>[11]</sup>、强化学习算法<sup>[12]</sup>、经验学习<sup>[13]</sup>等)均能实现单台/多台流动式起重机、桥式起重机和塔式起重机等吊装设备的吊装路径规划。与这些吊装设备不同,双平臂落地抱杆组塔具有两侧平衡起吊等特点,上述路径规划方法无法直接适用于双平臂落地抱杆的吊装路径规划,且目前尚无针对双平臂落地抱杆吊装路径规划方法的研究报道。

本研究在进行输电线路组塔吊装施工动力学仿真的基础上,考虑吊件摆动幅度和消摆时间对吊装路径的影响,提出一种基于A\*算法的双平臂落地抱杆吊装路径规划方法,实现输电线路组塔施工的吊装路径自动规划,有效缩短吊装时间,保障线路施工的效率 and 安全性。

## 1 吊装路径规划影响因素分析

### 1.1 双平臂落地抱杆吊装施工

双平臂落地抱杆是根据输电铁塔具有空心结构及铁塔杆件对塔心对称布置的特点研制的一种专用组塔装备,具有2套吊臂、小车和吊钩,一般采用两侧平衡起吊的方式通过吊臂回转、小车变幅和吊钩起升动作同时将2个相同的吊件由地面初始位置吊装至目标位置。组塔施工现场的双平臂落地抱杆、铁塔和障碍物如图1所示。为保障施工安全,抱杆的各项动作独立进行,不联动。吊装的障碍物包括待吊装塔材、在建铁塔、拉线等。规划吊装路径时,需要同时考虑两侧吊件与障碍物的碰撞问题。

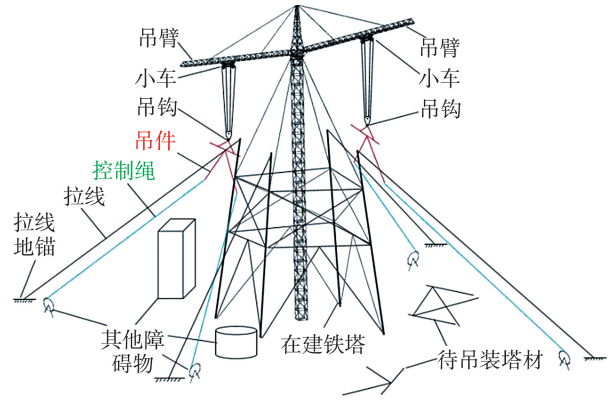
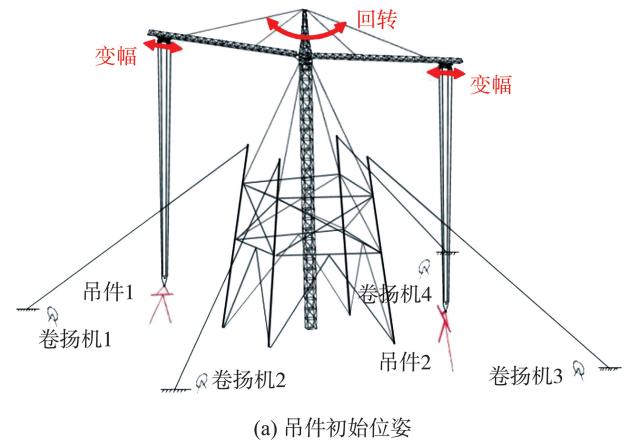
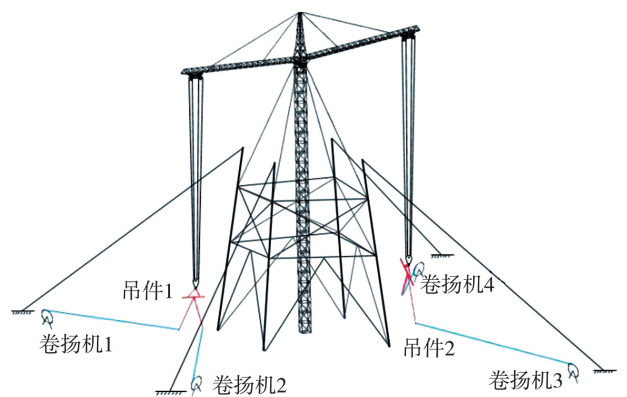


图1 双平臂落地抱杆、铁塔和障碍物示意图  
Fig.1 Floor-standing two boom derrick, tower, and obstacle diagram

吊装过程包括近地面位置调整、近地面姿态调整和高空吊装就位,如图2所示。近地面位置调整阶段进行回转和变幅,在近地水平面内将吊件移动到姿态调整位置;近地面姿态调整阶段用控制绳连接吊件和卷扬机,通过卷扬机拖曳控制绳调整吊件姿态;高空吊装就位阶段进行起升和变幅,将吊件由地面吊装到高空目标位置。吊装过程分解可将难度较高的三维空间吊装路径规划问题简化为水平面和铅垂面2个二维平面内的路径寻优问题。



(a) 吊件初始位姿



(b) 吊件吊装到近地面姿态调整位置

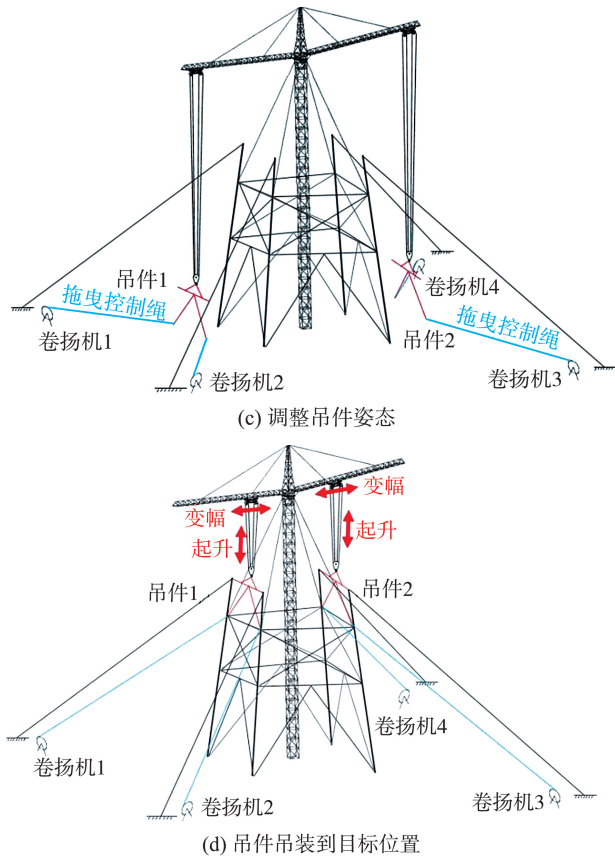


图2 双平臂落地抱杆吊装作业示意图

Fig.2 Floor-standing two boom derrick hoisting operation diagram

1.2 吊装施工动力学仿真

抱杆变幅/回转时,吊件发生摆动,其摆幅决定了吊件与障碍物之间的安全距离,影响吊件通过狭窄通道的能力。单次变幅/回转分为加速、匀速、减速、消摆4个过程,其中消摆(摆幅降至允许范围)时长占比最大,影响吊装效率。因此,规划吊装路径前需探究吊件摆动对路径规划的影响。

根据双平臂落地抱杆特点,建立如图3所示的广义坐标 $(\psi, \rho, l, \varphi_1, \varphi_2)$ ,其中 $\psi$ 为回转角, $\rho$ 为小车幅度, $l$ 为小车与吊件间的钢丝绳长度, $\varphi_1$ 为钢丝绳在径向铅垂面投影与铅垂线的夹角(径向摆角), $\varphi_2$ 为钢丝绳与径向铅垂面的夹角(切向摆角)。

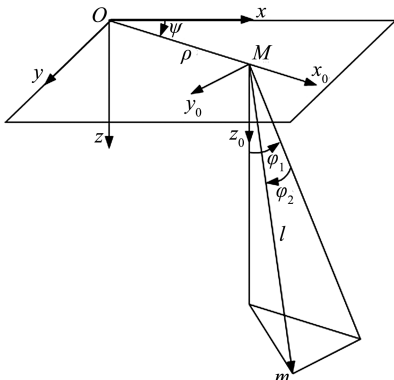


图3 抱杆单侧吊件系统广义坐标

Fig.3 Generalized coordinates of single-side hoist system

在该广义坐标系下建立吊件的拉格朗日动力学方程,不考虑钢丝绳的质量和变形,在吊件摆动角很小的情况下,忽略高次项, $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 的二阶微分方程可化简为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{-\ddot{\rho} + \rho \dot{\psi}^2}{l} = \ddot{\varphi}_1 + \frac{(g - l\dot{\psi}^2)\varphi_1}{l} - 2\dot{\psi}\dot{\varphi}_2 - \ddot{\psi}\varphi_2 \\ \frac{-2\rho\dot{\psi} - \rho\ddot{\psi}}{l} = \ddot{\varphi}_2 + \frac{(g - l\dot{\psi}^2)\varphi_2}{l} + 2\dot{\psi}\dot{\varphi}_1 + \ddot{\psi}\varphi_1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $g$ 为重力加速度。可以看出吊件摆动受小车位置、变幅速度、变幅加速度、回转速度、回转加速度、钢丝绳长度和摆角 $\varphi_1$ 与 $\varphi_2$ 的初值(初始摆动幅度)等影响,与小车、吊件质量无关。

建立抱杆单侧吊件动力学仿真模型,采用控制变量法仿真分析各因素对吊件摆动特性的影响。通过大量的仿真分析可知,吊件的摆动频率越高,摆动幅度衰减速度越快,消摆时长越短。吊件的摆动幅度越小,消摆时长越短。

吊件的摆动频率只受钢丝绳绳长影响,绳长越短,吊件的摆动频率越高。吊件的摆动幅度影响因素较多:抱杆变幅时,加速和减速变幅阶段 $\varphi_1$ 的摆幅都只与其初始幅度和加速度正相关,匀速变幅和消摆阶段 $\varphi_1$ 的摆幅只与初始幅度正相关;抱杆变幅时 $\varphi_2$ 恒为0;抱杆回转时,加速回转阶段 $\varphi_1$ 的摆幅与其初始幅度、绳长、小车位置和回转加速度正相关, $\varphi_2$ 的摆幅与其初始幅度、小车位置和回转加速度正相关;匀速回转、减速回转和消摆阶段, $\varphi_1$ 的摆幅与其初始幅度、绳长、小车位置、回转速度和加速度正相关, $\varphi_2$ 的摆幅与其初始幅度、小车位置、回转速度和回转加速度正相关。

因此,规划吊件路径时应优先减少抱杆动作变化次数,以降低消摆次数,提高吊装效率。同时应按缩短钢丝绳长度、减小小车幅度、回转、增大小车幅度、增长钢丝绳长度的优先级顺序进行吊装路径搜索,以提高摆动频率、缩短消摆时长和降低摆动幅度。

2 基于A\*算法的双平臂落地抱杆吊装路径规划

建立右手柱坐标系 $(r, \theta, z)$ ,其原点和 $z$ 轴与图3  $O-xyz$ 的原点和 $z$ 轴重合,吊臂回转角 $\psi=0$ 为 $\theta=0$ 方向。两侧平衡起吊时吊件的初始位置为 $(r_s, \theta_s,$

$z_s$ )和 $(r_s, \theta_s + 180^\circ, z_s)$ , 目标位置为 $(r_g, \theta_g, z_g)$ 和 $(r_g, \theta_g + 180^\circ, z_g)$ , 吊件(挂载在吊钩上时)的高度为 $h$ , 吊件最大自转半径为 $R_{max}$ , 小车最大幅度为 $r_{p,max}$ , 根开尺寸(塔腿间距)为 $L$ , 吊件与障碍物的安全距离为 $S$ , 吊件近地面姿态调整位置为 $(r_m, \theta_m, z_m)$ 和 $(r_m, \theta_m + 180^\circ, z_m)$ ,  $z = z_m$ 的水平面内在建铁塔 $\theta_m$ 方向的外廓尺寸为 $d_t$ 。

### 2.1 路径规划主要流程

进行双平臂落地抱杆吊装路径规划的主要流程如图4所示, 主要步骤如下。

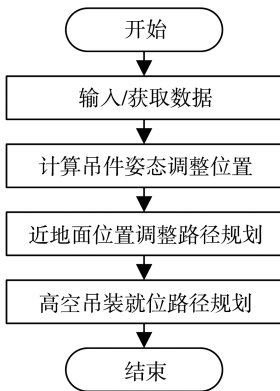


图4 双平臂落地抱杆吊装路径规划主要流程  
Fig.4 Main process of floor-standing two boom derrick hoisting path planning

(1) 根据抱杆、在建铁塔和吊件等信息, 计算吊件姿态调整位置。

(2) 以初始位置为起点、姿态调整位置为终点, 在水平面内进行近地面位置调整路径规划。

(3) 以姿态调整位置为起点、目标位置为终点, 在铅垂面内进行高空吊装就位路径规划。

### 2.2 吊件近地面姿态调整位置计算

由 $(r_s, \theta_s, z_s)$ 、 $(r_g, \theta_g, z_g)$ 、 $R_{max}$ 、 $d_t$ 、 $h$ 和 $S$ 可计算吊件近地面姿态调整位置 $(r_m, \theta_m, z_m)$ 。

吊件完成近地面姿态调整后, 在铅垂面内进行高空吊装就位, 因此近地面姿态调整位置的角度坐标 $\theta_m$ 与目标位置的角度坐标相等, 即:

$$\theta_m = \theta_g \quad (2)$$

由于施工前需对地面进行平整作业, 地面高度坐标与吊件初始位置高度坐标一致; 当吊件离地后, 其最大高度为 $h$ 且底部需与地面保持安全距离 $S$ 。因此, 近地面姿态调整位置的高度坐标

$$z_m = z_s + h + S \quad (3)$$

在近地面姿态调整位置, 无论吊件如何转动, 都必须与在建铁塔外轮廓保持安全距离, 因此近地面姿态调整位置的径向坐标

$$r_m = \frac{d_t}{2} + R_{max} + S \quad (4)$$

### 2.3 近地面位置调整路径规划

#### 2.3.1 环境建模

吊件近地面位置调整径向范围不会超过小车最大变幅幅度, 吊件需与障碍物、拉线和铁塔边界保持一定的安全距离, 即图5(a)中的避让区域。双平臂落地抱杆两侧平衡起吊时, 双侧路径规划区域内的障碍物情况不同。因2个吊件的起点、终点和路径均中心对称, 可将双侧吊装路径规划区域内的障碍物中心对称到单侧吊装路径规划区域内, 将原路径规划问题简化成如图5(b)所示的单侧路径规划问题。

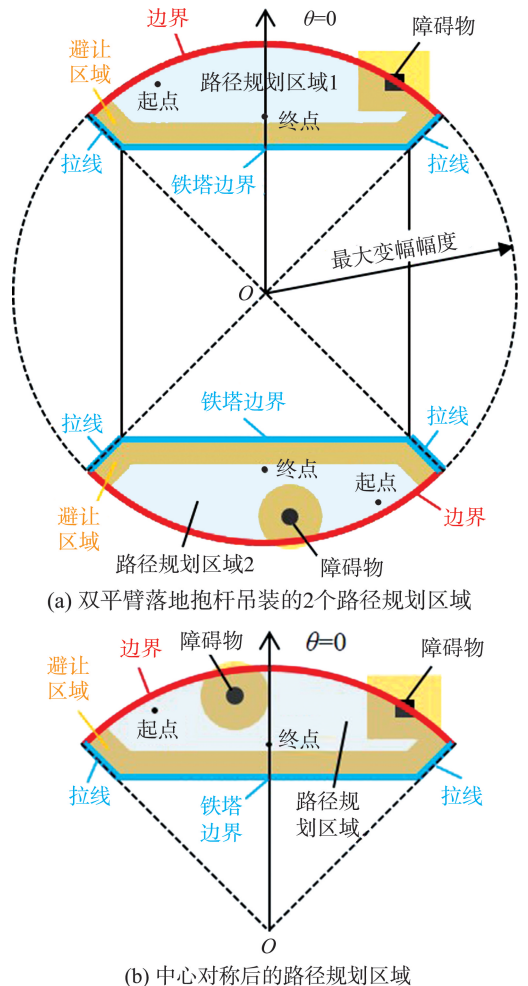


图5 路径规划问题简化  
Fig.5 Path planning problem simplification

路径规划前进行环境建模描述区域空间、障碍物等。先将路径规划区域扩展成图6(a)所示的扇环栅格, 扩展区域为吊件避让区域, 扇环外径为 $r_{p,max}$ , 内径为 $L/2$ , 圆周方向边界为该区域的左右2根拉线所在角度 $\theta_{left}$ 和 $\theta_{right}$ 。对扇环区域进行栅格化, 将其划分为 $m \times n$ 个小扇环( $m$ 为径向小扇环数

量,  $n$  为周向小扇环数量), 小扇环的内外径之差  $\Delta r$  和左右边界角度差  $\Delta\theta$  分别为:

$$\Delta r = \frac{2r_{p,max} - L}{2m}, \quad (5)$$

$$\Delta\theta = \frac{\theta_{right} - \theta_{left}}{n}. \quad (6)$$

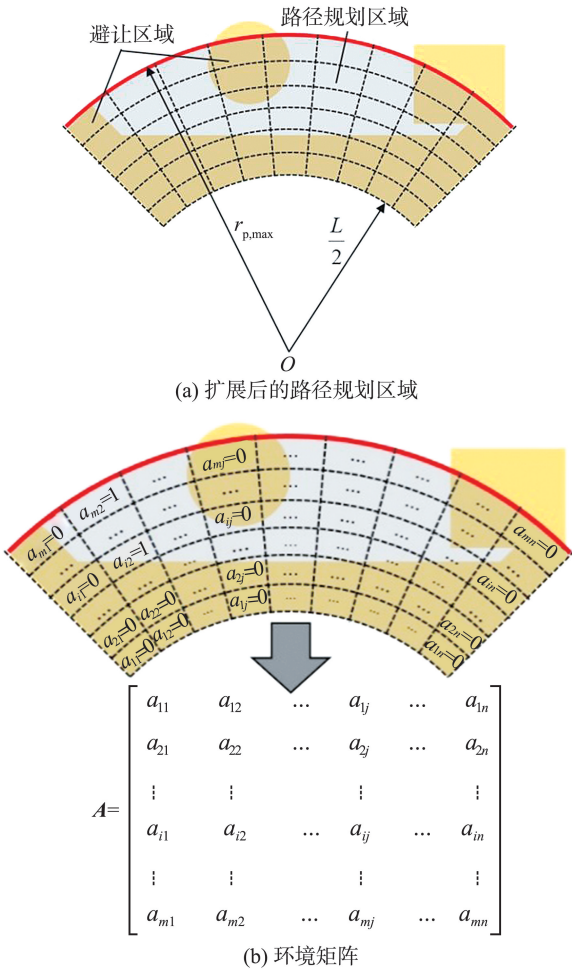


图6 路径规划区域环境建模

Fig.6 Path planning area environment modeling

建立路径规划区域的  $m \times n$  环境矩阵  $A$ , 如图6(b)所示, 其元素  $a_{ij}$  为  $(r_i, \theta_j, z_m)$  位置处的环境情况 ( $i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n$ )。当该位置是吊件避让区域时,  $a_{ij}=0$ ; 否则  $a_{ij}=1$ 。  $r_i, \theta_j$  分别为:

$$r_i = \frac{L}{2} + (i-1/2)\Delta r, \quad (7)$$

$$\theta_j = \theta_{left} + (j-1/2)\Delta\theta. \quad (8)$$

### 2.3.2 基于A\*算法的近地面位置调整路径规划

A\* 算法是一种启发式算法, 利用启发函数  $h(\eta)$  估算当前栅格到目标位置的通行成本, 常用的估算方法有切比雪夫距离、欧几里得距离、曼哈顿距离等。结合起点到当前节点的实际成本, 计算经由当前节点路径的通行成本估价函数  $f(\eta)$ , 以引导整个路径搜索方向, 快速完成路径搜索。

A\* 算法进行路径规划的主要原理如图7所示<sup>[15]</sup>, 主要步骤如下。

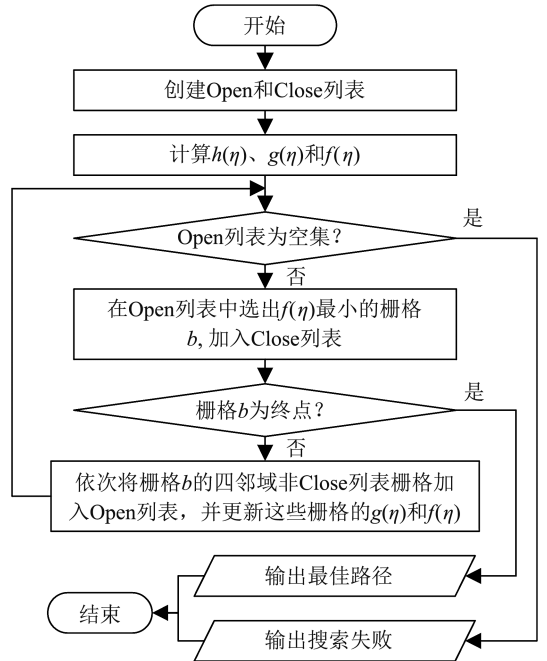


图7 基于A\*算法的吊件近地面位置调整路径规划流程

Fig.7 Path planning process of near ground position adjustment of hoisting parts based on A\* algorithm

(1) 创建2个空的列表, 分别命名为 Open 和 Close, 其中 Open 列表用于保存将要遍历搜索的小扇环栅格, Close 列表用于保存已经被遍历搜索的小扇环栅格(或障碍物栅格)。开始路径搜索时, 先将表示起点的栅格添加到 Open 列表, 将避让区域的栅格添加到 Close 列表。

(2) 使用欧几里得距离估算所有栅格点到终点的通行成本, 作为启发函数  $h(\eta)$ 。给起点到所有栅格的实际通行成本  $g(\eta)$  赋初值, 当  $\eta$  为起点时,  $g(\eta)=0$ ; 当  $\eta$  为其他栅格时,  $g(\eta)=\infty$ 。建立每个栅格的通行成本估价函数  $f(\eta)=g(\eta)+h(\eta)$ 。

(3) 判断 Open 列表是否为空集。如果是, 说明已经完成所有栅格的搜索; 否则, 进入下一步。

(4) 在 Open 列表选出  $f(\eta)$  最小的栅格  $b$ , 并将其加入 Close 列表。

(5) 判断栅格  $b$  是否为终点。如果是, 完成路径搜索并输出最佳路径; 否则, 进入下一步。

(6) 依次选取栅格  $b$  的四邻域非 Close 列表栅格, 将其记为栅格  $d$  并加入 Open 列表, 令  $g_{bd} = g(b) + h_{bd}$ , 其中  $h_{bd}$  为栅格  $b$  到  $d$  的通行成本,  $g_{bd}$  为从起点出发经由栅格  $b$  到达栅格  $d$  的实际通行成本。如果  $g_{bd} < g(d)$ , 则  $g(d) = g_{bd}$ ,  $f(d) = g_{bd} +$

$h(d)$ , 同时将  $d$  点的父节点记为  $b$ ; 如果  $g_{bd} \geq g(d)$ , 保持  $g(d)$  和  $f(d)$  不变。当完成栅格  $b$  的所有四邻域栅格的处理后, 返回步骤(3)。

栅格  $b$  到  $d$  的通行成本  $h_{bd}$  受路径规划影响因素、约束条件和优化目标影响。受抱杆吊装动作的限制, 吊件只能运动到与其相邻的 4 个联通栅格, 所以在扩充 Open 列表时, 仅选取栅格的四邻域栅格。计算由栅格  $b$  到  $d$  的通行成本  $h_{bd}$  时, 需考虑  $b$  到  $d$  的距离, 按照先减小小车幅度后回转的优先级顺序进行路径搜索时, 可搜索出总长度更短的吊装路径, 且能减小吊件摆动。同时, 需考虑  $b$  到  $d$  的方向与  $a$  ( $b$  的父节点) 到  $b$  的方向的一致性, 即考虑吊件由  $b$  到  $d$  和由  $a$  到  $b$  是否改变吊装动作, 计算吊件消摆的时间成本。综上所述, 由栅格  $b$  到  $d$  的通行成本

$$h_{bd} = |r_d - r_b| + \frac{2\pi r_b |\theta_d - \theta_b|}{360^\circ} + \kappa\omega, \quad (9)$$

式中:  $r_b$  和  $r_d$  分别为栅格  $b$  和  $d$  的径向坐标;  $|r_b - r_d|$  为由栅格  $b$  到  $d$  的径向距离变化量;  $\theta_b$  和  $\theta_d$  分别为栅格  $b$  和  $d$  的角度坐标;  $2\pi r_b |\theta_b - \theta_d| / 360^\circ$  为由栅格  $b$  到  $d$  的周向距离变化量;  $\kappa$  为大于 0 的常数, 表示吊件消摆的时间成本;  $\omega$  为系数, 取值为 0 或 1。路径搜索先增加小车幅度后回转时,  $r_b$  增大,  $h_{bd}$  和  $g_{bd}$  增大, 通行成本增加, 所以算法更倾向于先减小小车幅度后回转的搜索方向。式(9)中系数

$$\omega = \left| \frac{|r_d - r_b|}{2\Delta r} - \frac{|r_a - r_b|}{2\Delta r} \right| + \left| \frac{|\theta_d - \theta_b|}{2\Delta \theta} - \frac{|\theta_a - \theta_b|}{2\Delta \theta} \right|, \quad (10)$$

当  $b$  到  $d$  的方向与  $a$  到  $b$  的方向相同时, 即抱杆动作未改变时,  $|r_d - r_b| = |r_a - r_b|$  且  $|\theta_d - \theta_b| = |\theta_a - \theta_b|$ , 此时  $\omega = 0$ , 式(9)中  $\kappa\omega = 0$ ; 当  $b$  到  $d$  的方向与  $a$  到  $b$  的方向不同时, 即改变抱杆动作时,  $|r_d - r_b| \neq |r_a - r_b|$  且  $|\theta_d - \theta_b| \neq |\theta_a - \theta_b|$ , 此时  $\omega = 1$ , 式(9)中  $\kappa\omega = \kappa > 0$ ,  $h_{bd}$  和  $g_{bd}$  增大, 通行成本增加, 所以算法会优选出抱杆动作变化次数少的路径。

### 2.4 高空吊装就位路径规划

完成吊件近地面位置调整和吊件姿态调整后, 将吊件吊装到目标位置。在高空吊装就位过程中, 障碍物较少且位置分布规律; 考虑环境特点和吊装动力学特性, 高空吊装就位时严格按照缩短钢丝绳长度、减小小车幅度、回转的顺序进行吊装即可避开障碍物完成吊装。吊件高空吊装就位路径流程如图 8 所示。

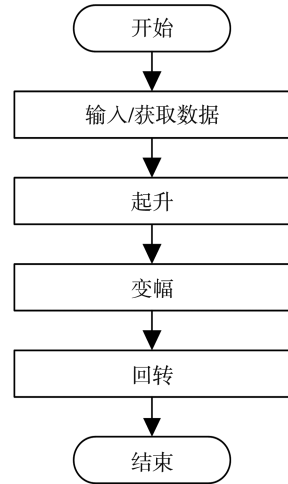
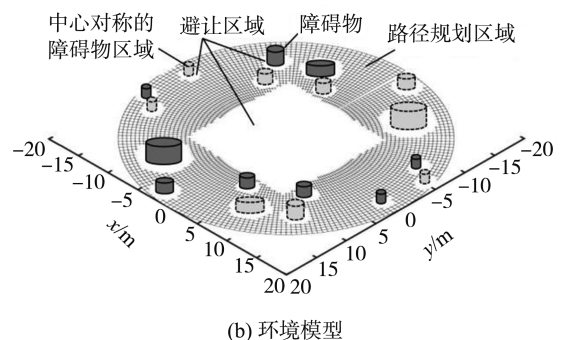
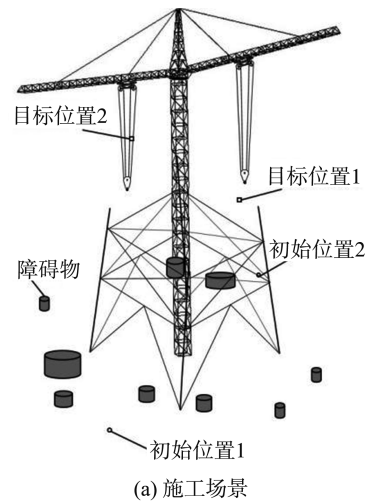


图 8 吊件高空吊装就位路径流程  
Fig.8 Hoisting flow of lifting parts at high altitude

### 3 吊装路径规划算例

采用本研究所提算法针对图 9(a) 所示典型双平臂落地抱杆组塔吊装施工场景进行路径搜索, 在建立如图 9(b) 所示的环境模型后, 基于 A\* 算法对吊件的近地面位置调整路径进行自动规划, 在此基础上根据吊件的动力学特性, 规划吊件高空吊装就位路径, 如图 9(c) 所示。



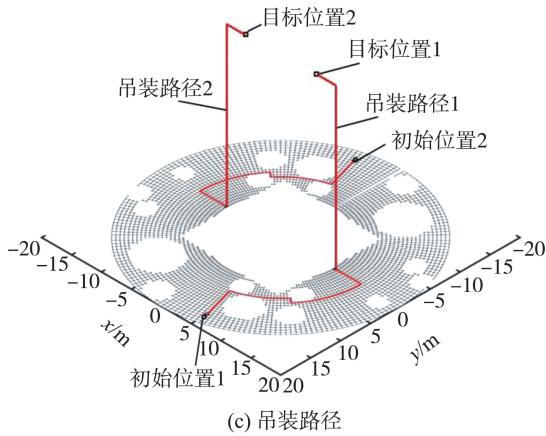


图9 双平臂落地抱杆吊装路径规划算例

Fig.9 Example of path planning for floor-standing two boom derrick hoisting

选取10个典型双平臂落地抱杆组塔吊装施工场景,抱杆型号为T2T60X,铁塔根开为16 m,用本方法进行路径规划。对吊装区域进行栅格化时,将扇环栅格尺寸设置为 $\Delta r=0.5\text{ m}$ 、 $\Delta\theta=1.8^\circ$ 。在八核英特尔Core i7-9700@3.00 GHz处理器、8 GB内存的计算机上进行数据处理,搜索出的吊装路径如图10所示,路径搜索时长如表1所示,单个施工场景路径规划平均耗时约0.188 s。

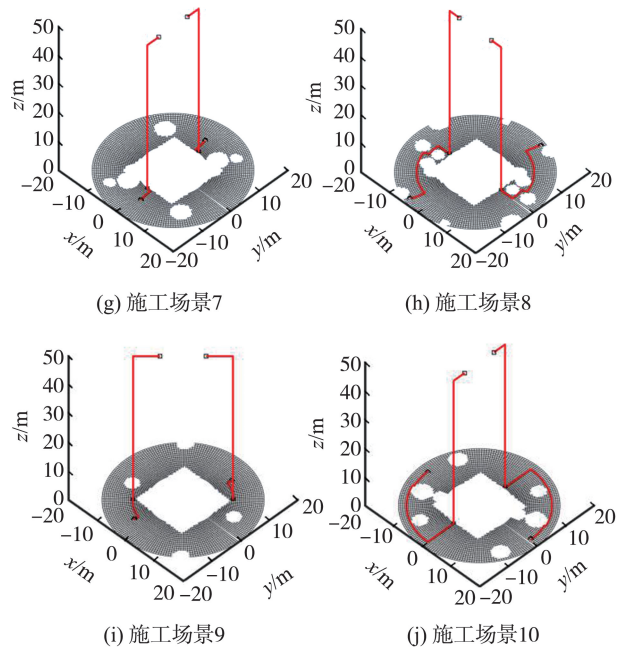


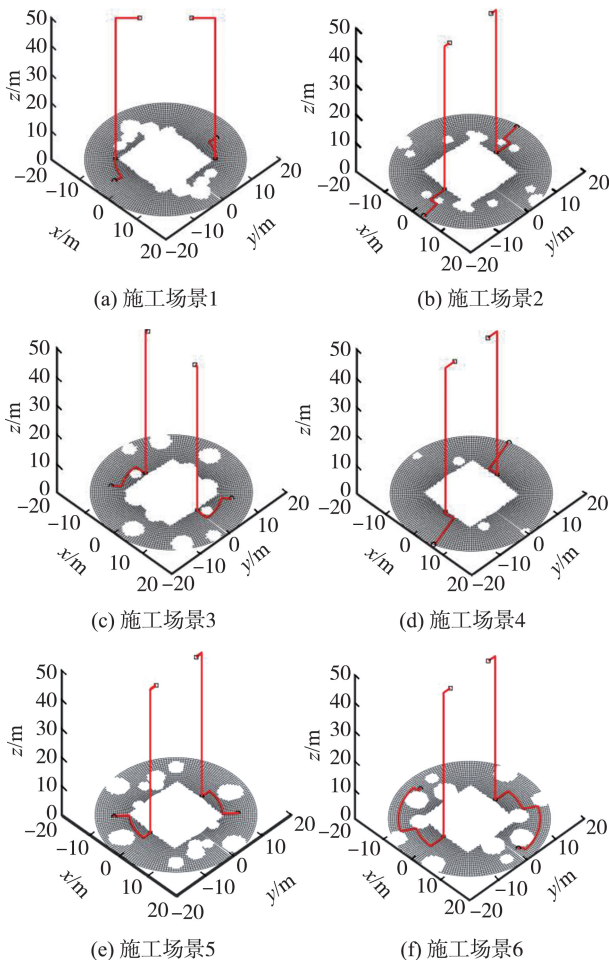
图10 本方法路径搜索结果

Fig.10 Path planning results calculated by the presented method

表1 路径搜索时长

Table 1 Time cost of path planning

施工场景	障碍物数量/个	路径搜索时长/s
1	6	0.115
2	8	0.166
3	6	0.238
4	2	0.199
5	7	0.160
6	6	0.268
7	4	0.172
8	7	0.215
9	2	0.125
10	3	0.223
平均	5.1	0.188



## 4 结论

针对双平臂落地抱杆吊装路径规划问题,本研究提出一种基于A\*算法的输电线路组塔施工吊装路径规划方法。

(1)将双平臂落地抱杆组塔吊装过程分解为近地面位置调整、近地面姿态调整和高空吊装就位3个阶段,将三维空间中的吊装路径规划问题简化为水平面和铅垂面2个二维平面内的路径寻优问题,降低了吊装路径规划的难度,提高了路径搜索效率。

(2)考虑吊件摆动对吊装路径规划的约束与影响,通过吊装施工动力学仿真分析确定了吊装路径搜索应优先选择不改变抱杆动作的策略,且应按缩短钢丝绳长度、减小小车幅度、回转、增大小车幅

度、增长钢丝绳长度的优先级顺序进行吊装路径搜索,以缩短消摆时长和降低摆动幅度,提高吊装效率。

(3)采用中心对称和栅格化方法对吊装空间进行环境建模,将双平臂落地抱杆的两侧平衡吊装的双路径联合搜索问题简化为单路径规划问题,降低了路径搜索的复杂度。

(4)基于A\*算法对水平面内的吊件近地面位置调整路径进行规划,并根据吊装施工动力学仿真结论对铅垂面内的吊件高空吊装就位路径进行规划,实现了双平臂落地抱杆吊装路径规划,有效缩短吊装时间,保障线路施工的效率 and 安全性。

#### 参考文献:

- [1] HU S, FANG Y, GUO H. A practicality and safety-oriented approach for path planning in crane lifts [J]. *Automation in Construction*, 2021, 127: 103695.
- [2] ZHOU Y, ZHANG E, GUO H, et al. Lifting path planning of mobile cranes based on an improved RRT algorithm [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 50: 101376.
- [3] 郭红领,张恩东. 移动式起重机吊装路径智能规划方法研究[J]. *工程管理学报*, 2018, 32(6): 115-120.  
GUO Hongling, ZHANG Endong. An approach for intelligent lifting path planning of mobile cranes [J]. *Journal of Engineering Management*, 2018, 32(6): 115-120.
- [4] LIN Y, WU D, WANG X, et al. Lift path planning for a non-holonomic crawler crane [J]. *Automation in Construction*, 2014, 44: 12-24.
- [5] CHANG Y, HUNG W, KANG S. A fast path planning method for single and dual crane erections [J]. *Automation in Construction*, 2012, 22: 468-480.
- [6] 林远山,王欣,吴迪,等. 移动式起重机吊装路径规划仿真平台设计[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(24): 231-235.  
LIN Yuanshan, WANG Xin, WU Di, et al. Design of path planning platform for mobile crane [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(24): 231-235.
- [7] 王崴,王建峰,瞿珏,等. 基于改进概率路标法的虚拟吊装路径规划[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(4): 695-701.  
WANG Wei, WANG Jianfeng, QU Jue, et al. Virtual hoisting path planning based on improved probabilistic roadmap algorithm [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018, 30(4): 695-701.
- [8] 钱森,訾斌. 多起重机协作吊装避障路径规划研究[J]. *机械设计与制造*, 2015(10): 260-263.  
QIAN Sen, ZI Bin. Research on obstacle avoidance path planning for cooperation of multiple cranes [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(10): 260-263.
- [9] 钱森,钱鹏飞,王春航,等. 多机协作吊装机器人动力学分析与路径规划[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(7): 20-31.  
QIAN Sen, QIAN Pengfei, WANG Chunhang, et al. Dynamics and path planning of multi-crane cooperative lifting robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(7): 20-31.
- [10] 邓乾旺,高礼坤,罗正平,等. 基于多目标遗传算法的起重机吊装路径规划[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(1): 63-69.  
DENG Qianwang, GAO Likun, LUO Zhengping, et al. Lifting path planning of crane based on multi-objective genetic algorithm [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2014, 41(1): 63-69.
- [11] 付雪青. 钢卷仓库三维建模及吊装路径规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
FU Xueqing. Three-dimension model and hoisting path planning in coil warehouse [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [12] SUNGHWAN C, SANGUK H. Reinforcement learning-based simulation and automation for tower crane 3D lift planning [J]. *Automation in Construction*, 2022, 144: 104620.
- [13] 李国杰. 基于经验学习的智能起重机搬运路径规划研究[J]. *中国工程机械学报*, 2021, 19(5): 377-383.  
LI Guojie. Carrying path planning of intelligent crane based on experience learning [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2021, 19(5): 377-383.
- [14] 刘波. 超重机械消摆控制及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.  
LIU Bo. The anto swing control and experiment research of hoisting machinery [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [15] 贾森浩. 游戏人工智能中A\*算法的应用研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.  
JIA Senhao. Research on the application of A\* algorithm in game artificial intelligence [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017.

(编辑:孙亚彤)