

考虑三维碰撞风险的大件物流车辆路径规划

韩彦岭¹, 张力珂¹, 周国峰², 曹守启², 宋戈¹, 王静¹, 张云¹

(1. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

摘要: 考虑大件物流车辆三维碰撞风险, 为提高车辆行驶路径平滑度及路径跟踪精度, 提出了一种大件物流车辆闭环迭代路径规划方法。首先, 在混合A*算法中引入大件物流车辆运动学约束规划基础路径; 其次, 结合控制器和车辆运动学模型进行基础路径优化, 提高路径平滑度, 降低车辆路径跟踪误差; 同时, 在路径优化过程中, 利用Delaunay三角剖分得到大件物流货物四面体网格, 进行精细化三维碰撞风险识别; 基于风险识别结果, 重新定义二维障碍物地图, 进行闭环迭代规划, 确定大件物流车辆最优路径。在3种典型场景中进行仿真测试, 结果显示, 相对于4种对比方法, 所提方法能有效识别三维碰撞风险, 规划出大件物流车辆最优安全路径, 规划路径平均曲率为 $0.013\ 7\ \text{m}^{-1}$, 铰接角均低于 24.59° , 均方根误差降幅达49.51%以上。

关键词: 大件物流; 路径规划; 碰撞检测; 铰接式车辆

中图分类号: TP39

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202539

Path planning for oversized cargo vehicles considering three-dimensional collision risks

HAN Yanling¹, ZHANG Like¹, ZHOU Guofeng², CAO Shouqi², SONG Ge¹, WANG Jing¹, ZHANG Yun¹

1. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: To address three-dimensional collision risks associated with oversized cargo vehicles and enhance path smoothness and tracking accuracy, a closed-loop iterative path planning method is proposed for oversized cargo vehicles. First, a basic path is planned by incorporating kinematic constraints for oversized cargo vehicles into the hybrid A* algorithm. Second, the basic path is optimized by integrating the controller and vehicle kinematic model to improve path smoothness and reduce path tracking error. Concurrently, during path optimization, a tetrahedral mesh of the oversized cargo obtained via Delaunay triangulation is utilized for refined 3D collision risk identification. Based on the risk identification results, the 2D obstacle map is redefined to perform closed-loop iterative planning, determining the optimal path for the oversized cargo vehicle. Through simulation testing in three typical scenarios, the proposed method effectively identifies 3D collision risks and plans safe paths compared with four alternative approaches. The average curvature of the planned paths is $0.013\ 7\ \text{m}^{-1}$, with articulation angles consistently below 24.59° , and the root mean square error reduction exceeds 49.51%, thereby planning optimal safe paths for large-item logistics vehicles.

Key words: oversized cargo, path planning, collision detection, articulated vehicle

收稿日期: 2025-07-23; 修回日期: 2025-10-21

通信作者: 周国峰, gfzhou@shou.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.42176175, No.42271335)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.42176175, No.42271335)

0 引言

大件物流(涉及体积大、重量重、形状复杂的货物,如风力发电机叶片等大型机械设备)的运输^[1]在国家经济发展中扮演着至关重要的角色。在运输过程中,弯道、狭窄和存在空中障碍物的路段对大件物流车辆安全行驶提出挑战。在大件物流运输路线勘测中,基于道路环境数据规划出安全的行进路径,对于大件物流增强安全性、提高运输效率和降低运输成本具有重要的意义^[2-3]。

大件物流车辆通常由牵引车与半挂车铰接组成,装载超长、超高或超宽的货物^[3-4]。目前针对铰接式车辆的路径规划方法主要分为基于采样和图搜索的方法、基于优化的方法。基于采样和图搜索的方法将行驶空间抽象为具有节点和边的图结构,在该图中搜索得到满足运动学约束和避障约束的路径^[5-6]。Barlakas等^[7]提出了一种基于人工势场的运动学双向快速探索随机树(APF-based KB-RRT)算法,将运动学约束直接整合到全局规划阶段,为挂车车辆规划出满足约束的路径;CHOI^[8]等结合五次贝塞尔曲线和A*算法,通过先构建运动基元、后搜索可行路径的方式,为牵引-挂车车辆规划出满足约束的路径。Evestedt等^[9]将控制器与挂车的运动学模型一起用于闭环快速搜索随机树(CL-RRT)的前向模拟,提出了一种同时考虑运动学约束和倒车限制的规划方法。基于优化的方法将路径规划中的运动学约束和避障约束抽象为最优控制问题,并通过数学方法求解得出路径^[10]。为了降低求解难度,通常会使用基于采样和图搜索的方法求出初始解,再进一步根据各类约束进行求解优化得到路径。如Zhao等^[11]提出了一个名为APTEN-Planner的3层运动规划框架,通过有效处理不稳定的倒车动态和复杂的避障约束,解决了半挂车在极端狭窄环境中的自主泊车难题。虽然现有的大多数路径规划方法可以有效地满足牵引-挂车车辆的运动学约束和避障约束,但未考虑车辆响应及路径跟踪控制性能影响导致的路径跟踪误差较大,不利于无碰撞状态从规划层面到执行层面的保持,增加了载有超规格货物的大件物流车辆碰撞的风险。

大件物流货物超长、超高、超宽,而且与地面间存在净空高度,需要考虑三维碰撞检测,合理规划运输环境中的空中障碍物。在三维碰撞检测方法中,基于几何空间的方法具有检测效率高、检测过

程简单等优点,可分为包围盒方法^[12]、空间划分方法^[13]。包围盒方法使用简单的几何体表示被测对象和环境,通过分离轴定理等^[14]计算包围盒间的重叠情况来判断碰撞状态。如Fan等^[15]提出了一种基于混合包围盒的机器人加工大型复杂零件的高效碰撞检测方法;Guo等^[16]通过构建加工环境的层次包围盒,基于刀具与包围盒之间的几何关系,推导出了刀具姿态的可行域,从而实现多轴机床加工刀具的自动避障。空间划分方法依据一定的规则将场景划分成不同的区域,在碰撞检测时,只需对位于同一区域或者相邻区域的模型进行重叠检测。如Zhu等^[17]将八叉树与边界体积层次结构(bounding volume hierarchy, BVH)相结合对吊装空间进行预分区,同时通过自适应变步长保证碰撞检测的连续性,提出了一种平衡效率与空间精度的起重机碰撞检测方法。但对于大件物流场景来说,使用简单几何体/划分空间来表示不规则且超规格的大件物流货物,会导致几何体/划分空间与实际轮廓间存在大量无效空间,容易造成误判。同时,还要将三维空间碰撞信息向二维地图路径规划方法进行映射反馈,以生成规避空中障碍物碰撞风险的安全路径。

针对大件物流车辆路径规划中存在的跟踪误差较大、三维碰撞风险感知不足问题,本文提出一种考虑三维碰撞风险、车辆运动学约束及路径跟踪误差的闭环迭代路径规划方法——改进混合A*与路径优化及三维风险检测(improved hybrid A* with path optimization and 3D risk recognition, 简称IHAO),本文的主要创新与贡献如下。

(1) 提出了一种路径规划与控制一体化的规划框架。向混合A*算法中引入大件物流车辆运动学约束(铰接角成本和牵引车-挂车双车体碰撞检测),得到满足铰接式车体可行性的基础路径后,创新性地结合了纯跟踪控制器、速度约束和车辆运动学模型进行路径优化,以在规划阶段提升路径的可执行性、减小实际行驶中的路径跟踪误差,从根源上降低因跟踪误差较大引发的碰撞风险。

(2) 设计了面向不规则大件货物的精细化三维碰撞风险识别方法。利用Delaunay三角剖分构建货物的三维四面体网格,实现了对不规则货物轮廓的精确表示,并结合重心坐标法进行碰撞检测。相比传统包围盒方法、空间划分方法,该方法能有效减少误判,为路径规划提供更准确的环境安全

信息。

(3) 构建了从三维风险识别到二维路径重规划的闭环迭代机制。将三维碰撞风险识别得出的碰撞风险点, 根据其碰撞深度信息, 动态、定量地投射并重定义二维障碍物地图, 为二维路径规划赋予三维碰撞风险感知能力, 并通过迭代规划使路径避开空中障碍物, 最终得到全局最优的安全路径。

1 大件物流车辆运动学建模

如图1(a)所示, 大件物流车辆由牵引车和半挂车组成, 通过位于牵引车后轴中心的可旋转铰接点连接, 挂车受牵引车拖曳被动前进。其中, 牵引车前轴为转向轴, 其他轴均不可主动转向。如图1(b)所示, 假设牵引车第二轴和第三轴为同一轴, 可简化为自行车模型; 同时, 挂车第四~六轴简化为同一轴, 通过铰接点与牵引车自行车模型连接。

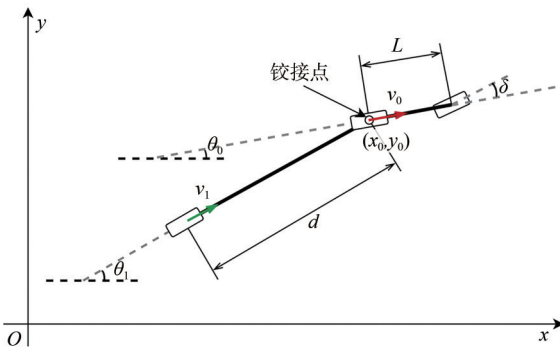
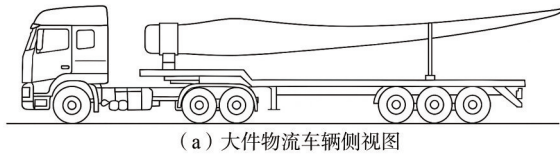


图1 大件物流车辆系统图示

大件物流车辆在弯道、狭窄且有空中障碍物的场景下行驶速度受限, 而且大件物流通常有护送车辆随行引导与护航^[18], 故将大件物流牵引车简化为前轮控制转向的两轮自行车模型^[19]。因此在图1(b)中, 根据几何运动学关系, 牵引车的后轴中心 (x_0, y_0) 在全局坐标系XOY下的横纵向速度为:

$$\dot{x}_0 = v_0 \cdot \cos \theta_0 \quad (1)$$

$$\dot{y}_0 = v_0 \cdot \sin \theta_0 \quad (2)$$

其中, v_0 为牵引车速度, θ_0 为牵引车航向角。如图2

所示, 当牵引车转向时, 点 O_r 为牵引车旋转中心, 牵引车横摆角速度为:

$$\dot{\theta}_0 = \frac{v_0}{R} = \frac{v_0}{L} \cdot \tan \delta \quad (3)$$

其中, $R=L/\tan \delta$ 为转弯半径, δ 为牵引车的前轮转角, L 为牵引车的轴距。

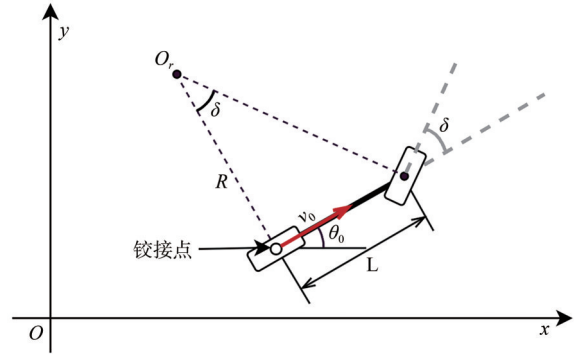


图2 牵引车运动示意图

如图3所示, 挂车在铰接点的侧向速度 v_{p1} 可以表示为:

$$v_{p1} = v_0 \cdot \sin(|\theta_0 - \theta_1|) \quad (4)$$

其中, θ_1 是挂车航向角。根据计算式(4), 可得挂车的航向角变化率 $\dot{\theta}_1$ 为:

$$\dot{\theta}_1 = \frac{v_{p1}}{d} = \frac{v_0 \cdot \sin(|\theta_0 - \theta_1|)}{d} \quad (5)$$

其中, d 为铰接点(牵引车后轴中心)到挂车后轴中心的距离。

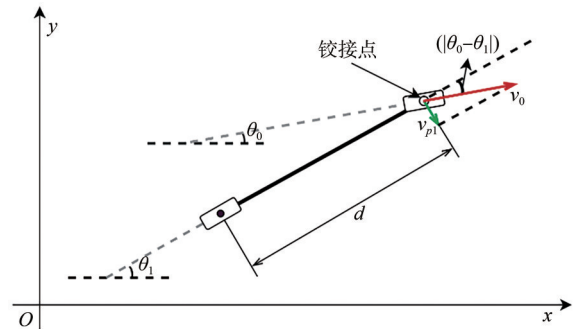


图3 挂车运动示意图

综合式(1)~(3)、(5)可得, 整车车辆运动学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = v_0 \cdot \cos \theta_0 \\ \dot{y}_0 = v_0 \cdot \sin \theta_0 \\ \dot{\theta}_0 = \frac{v_0}{L} \cdot \tan \delta \\ \dot{\theta}_1 = \frac{v_0 \cdot \sin(|\theta_0 - \theta_1|)}{d} \end{cases} \quad (6)$$

定义状态向量 $\mathbf{X} = [x_0, y_0, \theta_0, \theta_1]^T$ 和输入向量

$$\mathbf{u} = [v_0, \delta]^T, \text{ 则由式 (6) 可得状态空间方程为:}$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_0 \sin \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \cos \theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_0 \cos(|\theta_0 - \theta_1|)}{d} & -\frac{v_0 \cos(|\theta_0 - \theta_1|)}{d} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 \\ \sin \theta_0 & 0 \\ \frac{1}{L} \tan \delta & \frac{v_0}{L} \sec^2 \delta \\ \frac{\sin(|\theta_0 - \theta_1|)}{d} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (7)$$

2 基于车辆运动学的路径规划

大件物流车辆的整体规划框架如图4所示,其流程如下。

(1) 基础路径规划:在混合A*算法中引入铰接角成本和牵引-挂车双车体联合避障策略,进行路径规划,得到满足大件物流车辆运动学约束的基础路径。

(2) 路径优化:针对以上基础路径,结合横向纯跟踪控制器和纵向速度约束,通过车辆运动学模型计算得到优化路径,降低大件物流车辆的路径跟踪误差。

(3) 三维碰撞风险识别:针对上述优化路径,进行大件物流货物与环境点云间的三维碰撞检测,确定在优化路径上存在碰撞风险的点云点集合(碰撞风险点集合)及各点碰撞深度。

(4) 二维障碍物地图重定义:若碰撞风险点集合不为空(发生碰撞),则将碰撞风险点集合根据碰撞深度投射到二维障碍物地图中,以根据碰撞严重程度进行二维障碍物地图重定义。

(5) 闭环迭代规划:根据重定义的二维障碍物地图进行大件物流车辆迭代规划,当不发生三维碰撞时,结束规划,输出最优路径。

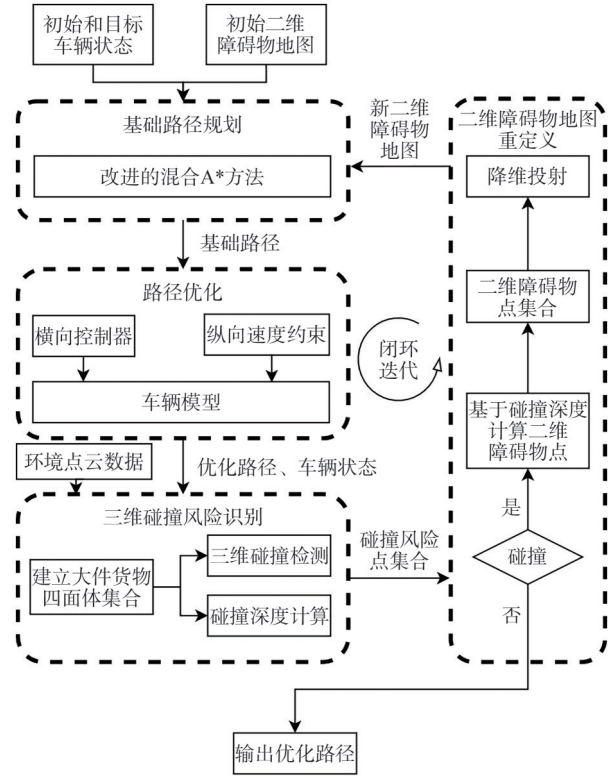


图4 闭环迭代路径规划框架

2.1 大件物流车辆基础路径规划

铰接角指的是铰接式车辆的牵引车朝向轴线与挂车朝向轴线之间的夹角,铰接角过大会导致车辆发生折叠失稳,甚至导致车辆侧翻。大件物流车辆为铰接式车辆,为保证规划路径能使其安全行驶,考虑铰接角约束^[20]和挂车避障约束,根据初始和目标车辆状态(牵引车后轴中心位置和航向角、挂车航向角),通过改进的混合A*算法,规划出大件物流车辆基础路径。具体改进如下。

(1) 引入铰接角成本

为了保证大件物流车辆的行驶安全性,向混合A*的成本值函数中引入了铰接角成本,从而在路径搜索时避免生成超出铰接角极限值的路径点。在二维障碍物地图上进行规划时,混合A*会基于当前车辆的状态根据车辆运动学模型扩展多个子节点,并计算每个可能的子节点状态的成本值,选取成本最小的子节点继续扩展,直到形成连接起始状态到目标状态的所有节点,得到规划路径。成本值的函数为 $f=g+h$, g 为从起点到当前节点的实际代价, h 是从当前节点到目标节点的启发式估计代价。为防止出现折刀事故(jackknife accident),考虑铰接角约束,向成本值的函数 f 中引入了铰接角成本,

主动惩罚过大的铰接角, 铰接角成本值表示为:

$$C_{\text{scissors}} = \text{SCISSORS_COST} \cdot \sum_{i=1}^N |\theta_i - \theta_i^t| \quad (8)$$

其中, SCISSORS_COST 为权重系数, 用于控制铰接角成本的惩罚力度, θ 是牵引车的航向角, θ^t 为挂车的航向角, N 是从上一节点到当前节点之间的中间点个数。故将式 (8) 添加到总成本值中可得新的成本值函数为:

$$f = g + h + \text{SCISSORS_COST} \cdot \sum_{i=1}^N |\theta_i - \theta_i^t| \quad (9)$$

(2) 牵引车-挂车双车体碰撞检测

考虑挂车避障约束, 进行牵引车-挂车双车体碰撞检测。本文使用如图 5 所示的有向包围盒 (oriented bounding box, OBB) [21] 表示大件物流牵引车和挂车的边界, 根据此包围盒与障碍物的重叠状态判断是否发生碰撞。首先进行障碍物点到车体坐标系的坐标转换:

$$\begin{aligned} d_x &= |(x_{\text{obs}} - x_{\text{veh}}) \cos(\theta) + (y_{\text{obs}} - y_{\text{veh}}) \sin(\theta)| \\ d_y &= |-(x_{\text{obs}} - x_{\text{veh}}) \sin(\theta) + (y_{\text{obs}} - y_{\text{veh}}) \cos(\theta)| \end{aligned} \quad (10)$$

其中, (d_x, d_y) 代表障碍物的点在车体坐标系中的坐标, $(x_{\text{obs}}, y_{\text{obs}})$ 和 $(x_{\text{veh}}, y_{\text{veh}})$ 分别是在全局坐标系下代表障碍物的点和车辆框体中心点的坐标, θ 是牵引车/挂车的航向角。

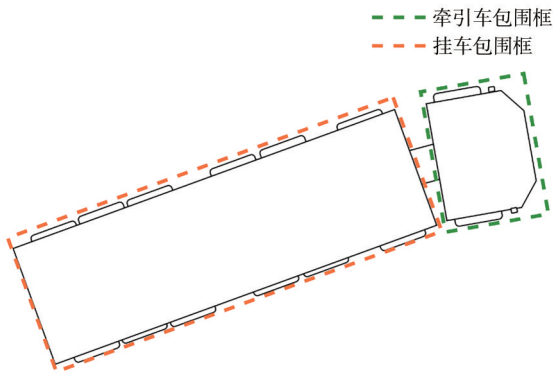


图5 牵引-挂车的有向包围盒

然后, 根据坐标转换得到的障碍物点, 基于如下策略进行碰撞检测, 若新扩展子节点发生碰撞, 则抛弃此子节点:

$$\text{is_collision} = \begin{cases} \text{True}, & (|d_x| + r_d) \leq l/2 \cap (|d_y| + r_d) \leq w/2 \\ \text{False}, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

其中, l 是车辆长度, w 是车辆宽度, r_d 是冗余量。最后, 利用改进的混合 A* 算法, 规划出大件物流车辆基础路径。

2.2 基于控制器的大件物流车辆路径优化

为了在规划阶段减小路径跟踪误差, 从而降低大件货物及铰接式车体与环境的碰撞风险, 本文结合横向纯跟踪控制器和纵向速度约束, 通过大件物流车辆运动学模型计算得到优化后的大件物流车辆基础路径 (优化路径)。过程如图 6 所示。

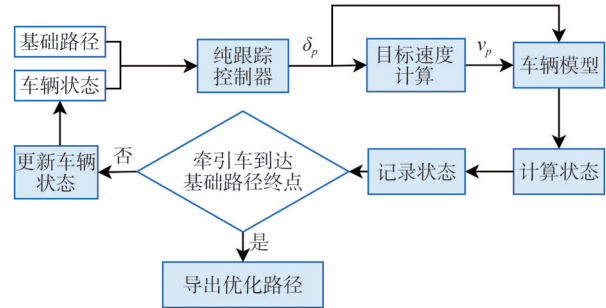


图6 路径优化流程

根据基础路径和初始车辆状态, 使用横向纯跟踪控制器, 计算牵引车前轮转角 δ_p 。以牵引车后轴中心为起点, 沿基础路径寻找第一个满足预瞄距离的点作为目标点。根据车辆当前的速度和预设参数动态计算出预瞄距离 L_f :

$$L_f = k \cdot v_0 + L_{fc} \quad (12)$$

其中, k 为预瞄距离增益定值, v_0 为牵引车当前速度, L_{fc} 为预设的预瞄距离, L_f 的值与车速成正比, 旨在模拟人类驾驶员在高速时远望、低速时近看的驾驶策略。此设计可确保在任意车速下都能选取适宜的路径目标点, 从而计算出更合理的前轮转角。

如图 7 所示, 通过牵引车当前朝向与预瞄向量之间的相对角度 α 和牵引车轴距 L , 根据阿克曼转向几何原理, 联立式 (12) 计算出牵引车前轮转角 δ_p :

$$\delta_p = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin(\alpha)}{L_f} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin(\alpha)}{k \cdot v_0 + L_{fc}} \right) \quad (13)$$

同时, 对于车辆来说, 前轮转向曲率越大意味着转弯半径越小, 即转弯越急。为避免超出最大横向加速度的限制并考虑转弯急剧程度, 提高路径的可执行性和行驶安全性, 根据牵引车前轮转向曲率 k_p 和最大横向加速度 $a_{\text{lat_max}}$ 确定牵引车目标速度 v_p 为:

$$v_p = \sqrt{\frac{a_{lat_max}}{k_p}} \quad (14)$$

其中, 由牵引车前轮转角 δ_p 和牵引车轴距 L 可计算得到曲率 $k_p = |\tan \delta_p / L|$ 。

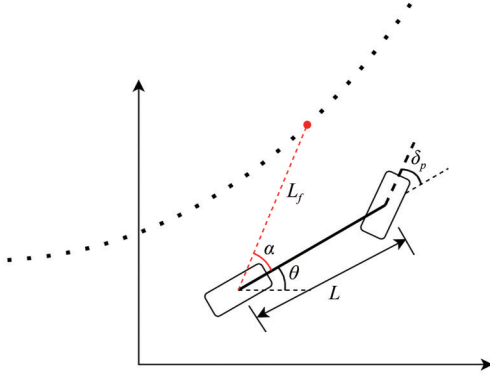


图7 前轮转角计算示意图

将当前车辆状态及上述确定的 v_p 和 δ_p 代入车辆状态空间方程 (7), 通过欧拉数值积分法递推得到在每个时间 Δt 后的牵引车车辆状态 (x_0, y_0, θ_0) 和挂车航向角 θ_1 , 记录每个牵引车车辆状态 (x_0, y_0, θ_0) , 最终得到优化路径 (牵引车状态集合), 同步计算每步的挂车车辆状态 (x_1, y_1, θ_1) 。其中, 根据牵引-挂车几何关系 (如图3所示), 挂车的后轴中心 (x_1, y_1) 确定为:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - d \cdot \cos \theta_1 \\ y_1 = y_0 - d \cdot \sin \theta_1 \end{cases} \quad (15)$$

其中, d 为铰接点 (牵引车后轴中心) 到挂车后轴中心的距离。

2.3 大件物流车辆三维碰撞风险识别

为了给二维路径规划方法增加感知与避开三维空中障碍物的能力, 使载有超规格大件货物的大件物流车辆能够避开空中障碍物, 考虑空中障碍物碰撞风险, 针对大件物流车辆优化路径, 进行大件物流货物与环境点云间的三维碰撞检测及碰撞深度计算, 确定风险点云信息, 具体流程如图8所示。

首先, 为了更合理地表示大件物流货物, 给定一个代表大件物流货物的顶点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i = (x_i, y_i, z_i)$, 基于快速凸包原理^[22]得到能完全包裹大件物流货物的最小凸多面体 (凸包) T 。

从点集 P 中找到在3个坐标轴 X、Y、Z 上最大和最小的6个极值点, 从这6个点中, 选取4个点

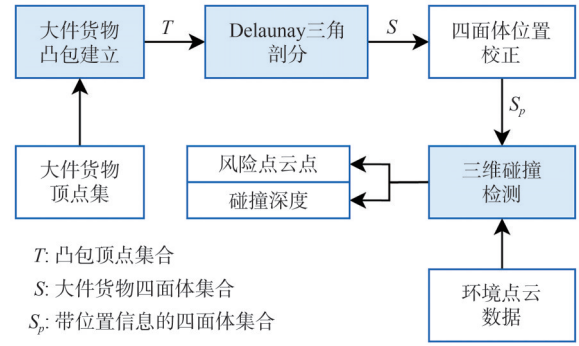


图8 三维碰撞风险识别流程

构建一个初始的四面体 $V_f = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。对于初始四面体的每个面, 以顶点 $Q = \{v_1, v_2, v_3\}$ 为例, 该平面可以用方程 $\vec{n}_v \cdot Q + k = 0$ 表示, 其中:

$$\begin{aligned} k &= -\vec{n}_v \cdot v_1 \\ \vec{n}_v &= (v_2 - v_1) \times (v_3 - v_1) \end{aligned} \quad (16)$$

设 r 是面外任意一点, 则点 r 到平面的距离为:

$$\text{dist}(r) = \frac{(\vec{n} \cdot r + k)}{\|\vec{n}\|} \quad (17)$$

若 $\text{dist}(r) > 0$, 则称点 r 在平面上方。对于初始四面体的每个面, 取其在平面上方的所有点为外部点集。对于每个外部点集, 选择距离面最远的点, 将其加入凸包, 并更新凸包的面和外部点集, 重复上述过程 (该过程被称为递归构造), 直到所有外部点集为空, 即所有点都包含在凸包内, 得到最终代表大件物流货物的凸包顶点集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, $t_i = (x_i, y_i, z_i)$ 。

然后, 基于 Delaunay 三角剖分原理^[23], 对凸包顶点集合 T 进行三角剖分, 得到代表大件物流货物的标准四面体集合 S , 完成凸包标准化处理。

首先构造一个包含凸包顶点集合 T 的初始四面体, 将其作为初始剖分。将凸包顶点逐个插入初始剖分中, 对于每个插入的点, 找到所有外接球包含该插入点的四面体, 并将这些四面体删除。删除四面体后会形成一个空洞区域, 其边界由若干个三角形组成, 将插入点与空洞的每个边界三角形连接, 形成一系列新的四面体。每生成一个新四面体后, 需检查是否满足空外接球条件, 如果不满足, 通过面翻转调整相邻四面体, 直到所有四面体满足空外接球条件。最后删除与初始四面体顶点相关的四面体, 得到大件物流货物四面体集合。根据路径优化时得出的每个挂车车辆状态, 将大件物流货物四面

体集合进行坐标平移和旋转, 确定路径中四面体的位置变化信息, 得到带位置信息的四面体集合 S_p 。

最后, 根据上述大件物流货物四面体集合及环境点云数据 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, $d_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 进行三维碰撞检测, 确定存在碰撞风险的点云点集合。使用重心坐标法^[24]来判断点云点是否在四面体内, 将所有发生碰撞的点云点(在四面体内的点云点)坐标添加到碰撞风险点集合 $\mathcal{P}_{\text{collision}}$ 中。

同时, 为了表明发生碰撞的点云点与大件物流货物的碰撞严重程度, 基于大件物流货物的几何中心 $C = (c_x, c_y, c_z)$ 和与其发生碰撞的点云点 $p_c = (x_c, y_c, z_c)$, 计算点云点 p_c 到大件物流货物最小外接矩形表面的距离作为碰撞深度, 值越大代表碰撞越严重。

定义碰撞点云点 p_c 在大件物流货物局部坐标系中的坐标为 $p'_c = (x'_c, y'_c, z'_c)$, 碰撞点云点 p_c 与大件物流货物几何中心的相对位置向量 $\mathbf{v} = (x_c - c_x, y_c - c_y, z_c - c_z)$ 。将向量 $\mathbf{v}$ 在 X-Y 平面上的分量绕 Z 轴旋转 θ 角(挂车的航向角), 得到:

$$x'_c = (x_c - c_x) \cos \theta + (y_c - c_y) \sin \theta \quad (18)$$

$$y'_c = -(x_c - c_x) \sin \theta + (y_c - c_y) \cos \theta \quad (19)$$

由于大件物流货物的局部 Z 轴与世界 Z 轴平行, Z 坐标的变换只是一个平移:

$$z'_c = z_c - c_z \quad (20)$$

在大件物流货物局部坐标系中, 设大件物流货物顶点集的最小外接矩形在 X、Y 和 Z 轴上的长度分别为 w 、 l 和 h , 则其沿 3 个局部坐标轴的半长 $E = (e_x, e_y, e_z) = (w/2, l/2, h/2)$, 则碰撞深度 d_{pen} 为:

$$d_{\text{pen}} = M \cdot \max(|e_x - |p'_x||, |e_y - |p'_y||, |e_z - |p'_z||) \quad (21)$$

其中, M 为惩罚因子, 在迭代规划过程中, 对于重复添加到 $\mathcal{P}_{\text{collision}}$ 中的点云点(即重复发生碰撞的点云点), 其对应的碰撞深度会根据碰撞次数 n 增加, 以解决潜在的局部最优解问题:

$$M(n) = 1 + \gamma \log(n) \quad (22)$$

为了避免惩罚因子线性增长太平缓导致收敛慢, 以及避免其无限增长太激进导致障碍物过度膨胀, 采用 $\log(n)$ 作为惩罚因子的增长函数, 以保证整体在初始阶段惩罚增长较快, 使规划时尽快绕

行, 但会逐渐趋于一个上限, 防止障碍物过度膨胀导致可通行区域骤减, 造成不可通过、无法规划的误判。 γ 是一个缩放系数, 在 γ 初始值为 1(无缩放)的基础上, 在可通行区域较宽敞时设定较大的 γ 以求更少的迭代次数, 当可通行区域较狭窄时, 设定较小的 γ 以避免误判。

2.4 二维障碍物地图重定义与闭环迭代规划

为了将三维空间碰撞风险有效映射并反馈至基础路径规划, 将三维碰撞风险点集合 $\mathcal{P}_{\text{collision}}$ 投射到 X-Y 平面, 并以每个碰撞风险点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ 的二维投影坐标 (x_i, y_i) 为圆心, 向现有的二维障碍物地图 $\mathcal{P}_s$ 中增加半径为其碰撞深度的圆形障碍区域 O_i , 进行二维障碍物地图重定义, 得到新的二维障碍物地图 $\mathcal{P}_{2D}$:

$$\mathcal{P}_{2D} = \mathcal{P}_s \cup \left(\bigcup_{i=1}^n O_i \right) \quad (23)$$

根据新的二维障碍物地图 $\mathcal{P}_{2D}$, 重新进行基础路径规划、路径优化及三维碰撞风险识别, 最终将不存在三维碰撞风险的优化路径作为最优路径输出。

3 仿真测试与实验结果分析

为了验证本文提出的大件物流车辆路径规划方法的有效性, 搭建 RoadRunner-MATLAB/Simulink 联合仿真平台, 如图9所示。其中, 根据 OpenStreet-Map (OSM) 的真实道路数据, 利用 RoadRunner 建立大件物流三维场景, 并导出三维模型文件, 使用 CloudCompare 从模型中提取三维场景点云数据, 为大件物流路径规划提供数据基础; 以牵引车和挂车长宽中的最小值为分辨率, 对 OSM 的真实道路数据进行栅格化, 得到初始二维障碍物地图; 通过 MATLAB/Simulink 建立大件物流车辆动力学模型, 为大件物流车辆路径跟踪提供模型基础。基于上述三维场景点云数据和 OSM 道路数据, 利用 Python 进行大件物流车辆路径规划, 将最优路径发送至 MATLAB/Simulink 车辆动力学模型进行路径跟踪仿真模拟。

本文以徐工燃油牵引车 XG1-DH510S 为例进行仿真测试, 具体参数见表1。基于阿克曼转向几何原理和车辆运动学模型, 根据牵引车轴距 WB 、牵引车后轴到挂车后轴距离 RTR 和最小转弯半径 $R_{\min}$, 车辆允许的路径最大曲率 $C_{\max}$ 计算方法为:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{WB}{\tan(\text{steer_max})} \\
 R_{\min} &= \sqrt{R_1^2 + R_2^2} \\
 C_{\max} &= \frac{1}{R_{\min}} = \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}
 \end{aligned} \quad (24)$$

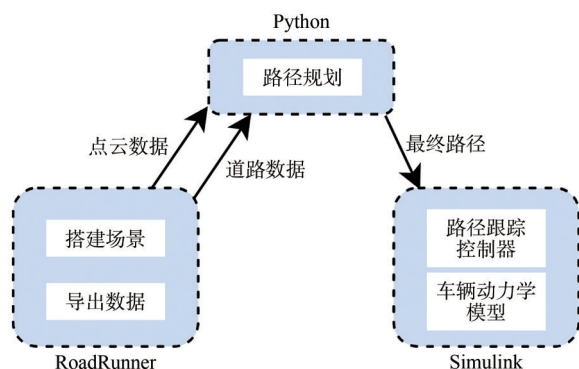


图9 仿真结构

表1 车辆参数设计

参数	释义	值
W	车辆宽度	2.55 m
WB	牵引车轴距	4.65 m
RF	牵引车后轴到牵引车最前端距离	6.15 m
RB	牵引车后轴到牵引车最后端距离	1.00 m
RTR	牵引车后轴到挂车后轴距离	10.0 m
RTF	牵引车后轴到挂车最前端距离	1.50 m
RTB	牵引车后轴到挂车最后端距离	11.5 m
SM	牵引车最大前轮转角	0.60 rad
AG	车辆允许最大铰接角	45.0 deg
AM	车辆最大横向加速度	1.50 m/s ²

基于上述参数，经计算车辆允许的路径最大曲率 $C_{\max}$ 为 0.09 m^{-1} 。本文选取 1.5 MW 风力发电机叶片作为大件物流运输货物，其长 37.5 m，装载于

挂车上时最大宽度为 2.7 m，最大高度为 3.0 m，大件物流车辆装载货物后的示意图如图 10 所示。



图10 大件物流车辆及货物示意图

3.1 仿真场景建立

如表 2 和图 11 所示，本文选取 3 类存在弯道、狭窄、空中障碍物的大件物流典型场景。

- 直行与空中障碍物场景：在车辆直行过程中，道路上存在跨越型空中障碍物（过路桥洞）和非跨越型空中障碍物（道路交通标志牌）。

- 弯道与空中障碍物场景：在车辆过弯道过程中，道路上存在跨越型空中障碍物（双立交桥）和非跨越型空中障碍物（道路交通标志牌）。

- 弯道山路场景：在车辆过弯道过程中，道路上存在狭窄山路（非跨越型空中障碍物），部分山体甚至侵入道路。

其中，直行与空中障碍物场景取自 RoadRunner 中的直行过立交桥实例场景，其他两个场景使用 RoadRunner 根据 OSM 的真实道路数据建立^[25]。此外，最大速度为 8.3 m/s（过窄路、弯道等时的特殊运输车辆最大限速）^[26]。

3.2 对比验证测试

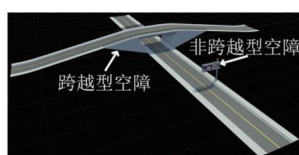
3.2.1 3种场景路径规划

为了验证本文方法的有效性，针对上述 3 种场景进行路径规划仿真测试。

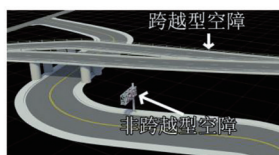
为了验证三维碰撞风险识别中惩罚因子对减少迭代次数的有效性，在不同缩放系数 γ 下进行规划

表2 场景类型与障碍物及道路形态对照表

编号	场景类型	障碍物	道路形态	道路数据来源
1	直行与空中障碍物场景	复合空中障碍物、道路边界	直行	RoadRunner
2	弯道与空中障碍物场景	复合空中障碍物、道路边界	S型连续弯道	OSM
3	弯道山路	山体、道路边界	单车道弯道	OSM



(a) 直行空中障碍物场景



(b) 弯道空中障碍物场景



(c) 弯道山路场景

图11 仿真场景总览

实验, 结果见表3。 γ 为0时, 惩罚因子为1, 即无惩罚因子。可以看到, 在适当增大 γ 的情况下, 除直行空中障碍物场景外, 其他场景的迭代次数均随 γ 增大而减少, 表明使用惩罚因子调整碰撞深度对减少迭代次数的有效性。

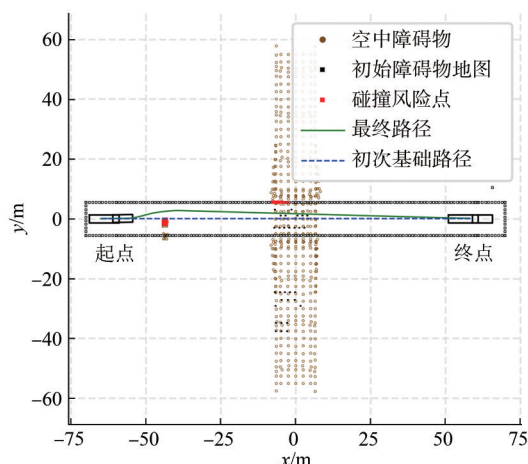
表3 不同缩放系数下惩罚因子实验结果

γ	场景1迭代次数	场景2迭代次数	场景3迭代次数
0.0	2	4	13
0.2	2	4	10
0.4	2	4	7
0.6	2	4	3
0.8	2	2	3
1.0	2	2	规划失败
1.2	2	2	规划失败
1.4	2	规划失败	规划失败
1.6	规划失败	规划失败	规划失败
1.8	规划失败	规划失败	规划失败
2.0	规划失败	规划失败	规划失败

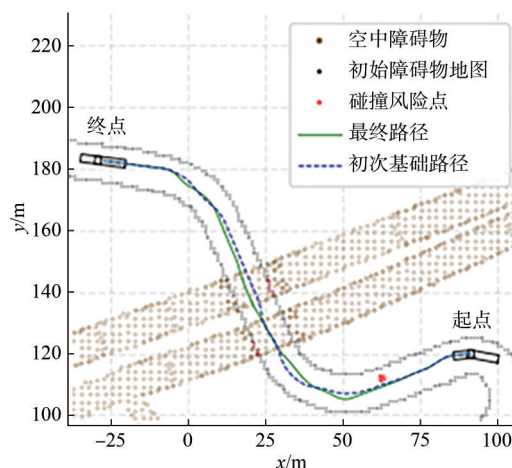
本文方法在各场景规划的结果如图12所示。其中, 蓝色虚线为第一次规划出的基础路径, 绿色实线为最终规划路径, 黑色为初始二维障碍物地图, 红色为从三维投射至二维障碍物地图的碰撞风险点, 棕色为空中障碍物。在图12(a)中, 本文方法成功识别了大件物流车辆与道路交通标志牌及立交桥边缘的碰撞风险点, 并将其投射至二维障碍物地图, 最终规划出规避风险区域的路径。图12(b)表明, 在识别车辆与标志牌及立交桥边缘碰撞风险后, 路径规划向左偏离以避让标志牌时, 及时控制路径向右调整, 避免了与左侧桥体及路缘的碰撞; 通过第二立交桥时, 再次向左调整避开了右侧边缘。图12(c)显示, 针对车辆与山体的碰撞风险, 本文方法及时控制路径向左调整, 成功规划出避让山体的有效路径。

3.2.2 路径曲率与铰接角对比分析

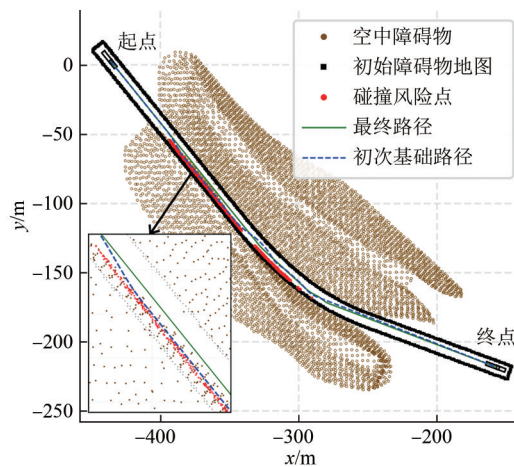
在重定义后的二维障碍物地图的基础上, 分别与混合A*算法(Hybrid A*)、基于运动学模型的CL-RRT* (简称K-CL-RRT*)、APTEN-Planner (简称APTEN)和基于人工势场的运动学双向快速探索随机树(简称AKR)方法进行曲率和最大铰接角对比实验。图13所示为各算法在3种场景中的规划路径(为了更清晰地展示路径的细节, 图13对较曲折或存在不必要倒车/方向调整动作的路径进行了局部放大, 以揭示原始比例下难以辨识的路



(a) 本文方法在直行空中障碍物场景中的规划结果



(b) 本文方法在弯道空中障碍物场景中的规划结果



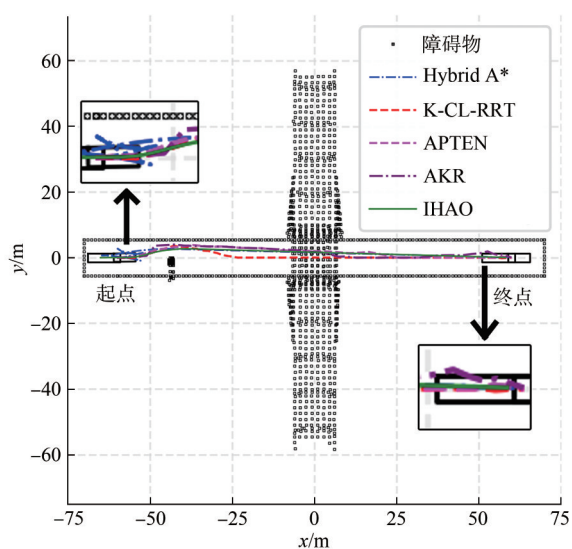
(c) 本文方法在弯道山路场景中的规划结果

图12 本文方法在各场景中的规划结果

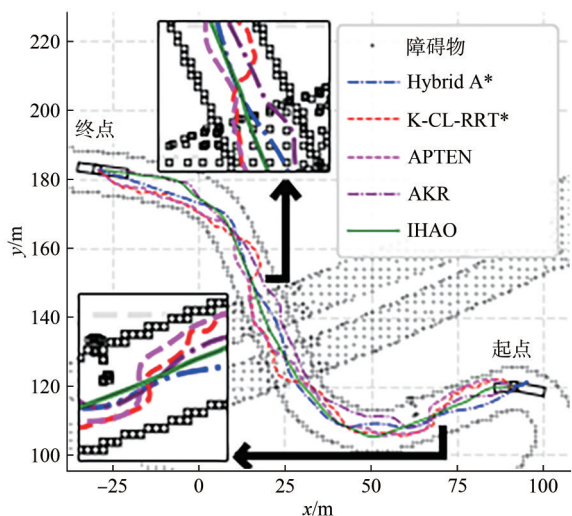
径形态), 表4所示为规划路径的曲率相关数据及最大铰接角, 各方法对比分析如下。

(1) 场景1

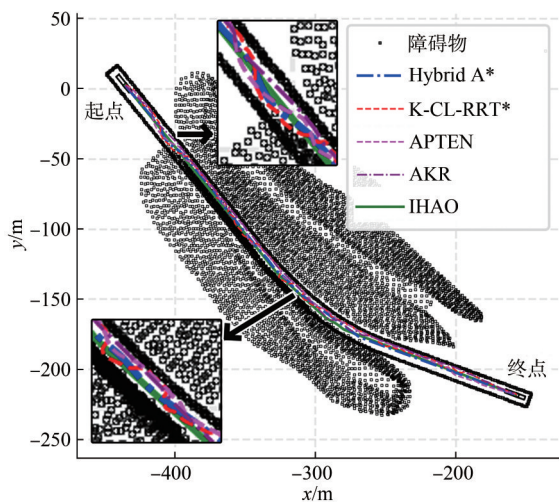
混合A*算法未考虑铰接角约束, 其规划路径



(a) 各方法在直行空中障碍物场景中的规划路径



(b) 各方法在弯道空中障碍物场景中的规划路径



(c) 各方法在弯道山路场景中的规划路径

图13 各方法在3种场景中的最终规划路径

在起始状态处进行了多次方向调整和倒车动作以避开道路交通标识牌, 导致其最大曲率和最大铰接角超过了最大极限值, 且平均曲率和曲率标准差分别达到了本方法规划路径的1.61倍和3.46倍, 表明其平滑度表现不佳。K-CL-RRT*方法虽然考虑了铰接角约束, 其规划路径的最大铰接角未超过允许极限值, 但采样搜索策略导致其规划路径较曲折, 其最大曲率超过了最大极限值, 平均曲率和曲率标准差分别达到了本方法规划路径的2.40倍和4.39倍, 表明其平滑度表现不佳。APTEN和AKR对铰接角约束处理得较好, 最大铰接角分别为 19.83° 和 22.55° , 但最大曲率均超过了最大极限值, 其中AKR在起始状态和目标状态附近较曲折, 导致其平均曲率及曲率标准差远高于APTEN和本文方法。本文方法规划路径在满足铰接角约束的同时, 最大曲率控制在允许范围内, 平均曲率和曲率标准差显著低于对比方法, 证明了其在车辆运动学约束满足和路径平滑度方面的优越性。

(2) 场景2

混合A*算法未考虑铰接角约束, 虽然其规划路径的平均曲率和曲率标准差与本文方法相近, 但在初始状态附近存在不必要的倒车动作, 且在 $x=6\text{ m}$ 、 $x=25\text{ m}$ 和 $x=50\text{ m}$ 附近出现显著波动, 导致最大曲率和最大铰接角超过了最大极限值。K-CL-RRT*和APTEN的规划路径为满足铰接角约束进行多次方向调整, 路径较曲折, 虽然勉强满足了铰接角约束(小于最大极限值 45°), 但平均曲率、曲率标准差均偏高, 最大曲率甚至达到了 0.2878 m^{-1} 和 0.1922 m^{-1} (最大极限值 0.09 m^{-1})。AKR使用B-RRT作为其路径规划初始解的规划器, 其最终路径偏向道路右侧且道路长度相对本文方法较短, 并很好地满足了铰接角约束, 但其曲率表现相对本文方法仍较差, 且最大曲率超出最大极限值2.3%。相比之下, 在双连续弯道与密集立交桥的复杂场景中, 虽然各方法规划路径曲率相比直行场景均有增加, 但本文方法仍能形成符合几何约束, 即最大曲率 0.0861 m^{-1} (低于最大极限值 0.09 m^{-1})和最大铰接角 24.59° (低于最大极限值 45°)的规划路径, 这表明本文方法在平衡地满足运动学约束和路径平滑度方面具有明显优势。

(3) 场景3

弯道山路场景中的路径规划皆需不断调整方向以避开山体, 导致整体曲率偏高。其中K-CL-RRT*

表4 各方法规划路径的曲率与最大铰接角

场景	方法	平均曲率/ m^{-1}	曲率标准差/ m^{-1}	最大曲率/ m^{-1}	最大铰接角/ $^{\circ}$
直行空中障碍物场景	Hybrid A*	0.009 2	0.035 3	0.215 1	79.78 $^{\circ}$
	K-CL-RRT*	0.013 7	0.044 8	0.295 4	20.56 $^{\circ}$
	APTEN	0.008 8	0.036 2	0.134 4	19.83 $^{\circ}$
	AKR	0.011 4	0.045 5	0.158 0	22.55 $^{\circ}$
	IHAO	0.005 7	0.010 2	0.045 2	10.23 $^{\circ}$
弯道空中障碍物场景	Hybrid A*	0.039 6	0.036 0	0.092 7	86.63 $^{\circ}$
	K-CL-RRT*	0.162 7	0.183 5	0.287 8	43.22 $^{\circ}$
	APTEN	0.155 7	0.097 9	0.192 2	39.76 $^{\circ}$
	AKR	0.035 8	0.055 6	0.092 1	22.50 $^{\circ}$
	IHAO	0.032 8	0.028 5	0.086 1	24.59 $^{\circ}$
弯道山路场景	Hybrid A*	0.008 8	0.014 4	0.087 6	75.22 $^{\circ}$
	K-CL-RRT*	0.142 5	0.080 1	0.293 2	42.51 $^{\circ}$
	APTEN	0.083 1	0.035 5	0.113 2	25.36 $^{\circ}$
	AKR	0.025 2	0.038 5	0.082 4	16.78 $^{\circ}$
	IHAO	0.002 6	0.009 6	0.079 6	11.80 $^{\circ}$

路径波动最大,平滑度最低,最大曲率达到了最大极限值的3.26倍,APTEN和AKR良好地满足了铰接角约束,但平均曲率及曲率标准差仍远高于本方法,且APTEN的最大曲率超过了最大极限值。相比之下,本文方法规划路径的最大曲率和最大铰接角分别为 $0.079\ 6\ \text{m}^{-1}$ 和 11.80° ,仍能满足车辆运动学约束(最大极限值分别为 $0.09\ \text{m}^{-1}$ 和 45°)。与同样低于曲率最大极限值的混合A*和AKR算法相比,本文方法规划路径的最大铰接角分别降低84.3%和29.7%,平均曲率分别降低70.5%和89.7%,这表明本文方法规划路径不仅整体平滑性良好,还保留充足的安全裕度,有利于车辆平稳行驶。

3.2.3 路径跟踪误差对比分析

为了验证规划路径的可执行性,对上述各算法在3种场景中的规划路径进行路径跟踪仿真模拟,并基于跟踪误差(规划路径点与车辆实际行驶路径点间的欧氏距离)进行定量对比。各算法规划路径在3种仿真场景中的最大跟踪误差和跟踪误差的均方根值(均方根误差)数据见表5,跟踪误差随车辆行驶时间的变化如图14所示。

由表4、表5和图14(a)可知,在直行空中障碍物场景中,本文所提方法的路径规划效果显著优于其他对比算法。具体而言,混合A*算法规划的路径不仅最大曲率远超约束,还违反了铰接角约束;K-CL-RRT*算法虽满足了铰接角约束,但其最大曲率同样严重超限。因此,这两种算法的路径跟踪效果最差,其最大跟踪误差和均方根误差分别

达到了本文方法的16.07倍和20.38倍。相较之下,APTEN和AKR两种算法表现稍好,均满足了铰接角约束,但路径中段或末段出现波折,导致其最大曲率依然超出上限。这使得它们的规划路径跟踪性能劣于本文方法,最大跟踪误差与均方根误差至少是本文方法的3.79倍和8.56倍。

表5 对比试验规划路径的跟踪误差

场景	方法	最大跟踪误差/m	均方根误差/m
直行空中障碍物场景	Hybrid A*	1.990 5	0.505 5
	K-CL-RRT*	1.451 9	0.359 5
	APTEN	0.469 8	0.212 4
	AKR	0.576 6	0.192 1
	IHAO	0.123 9	0.024 8
弯道空中障碍物场景	Hybrid A*	2.831 7	0.164 4
	K-CL-RRT*	2.729 2	1.142 1
	APTEN	2.323 5	0.859 9
	AKR	1.108 8	0.375 8
	IHAO	0.258 8	0.083 0
弯道山路场景	Hybrid A*	1.032 1	0.162 2
	K-CL-RRT*	2.307 4	0.612 4
	APTEN	1.074 9	0.353 1
	AKR	0.986 4	0.201 1
	IHAO	0.159 1	0.033 1

由表4、表5、图14(b)和图14(c)可知,在弯道空中障碍物场景中,混合A*路径因未考虑铰接角约束和路径跟踪控制性能,在避开道路交通标志牌后的中前段(6~12 s)出现3次显著的误差

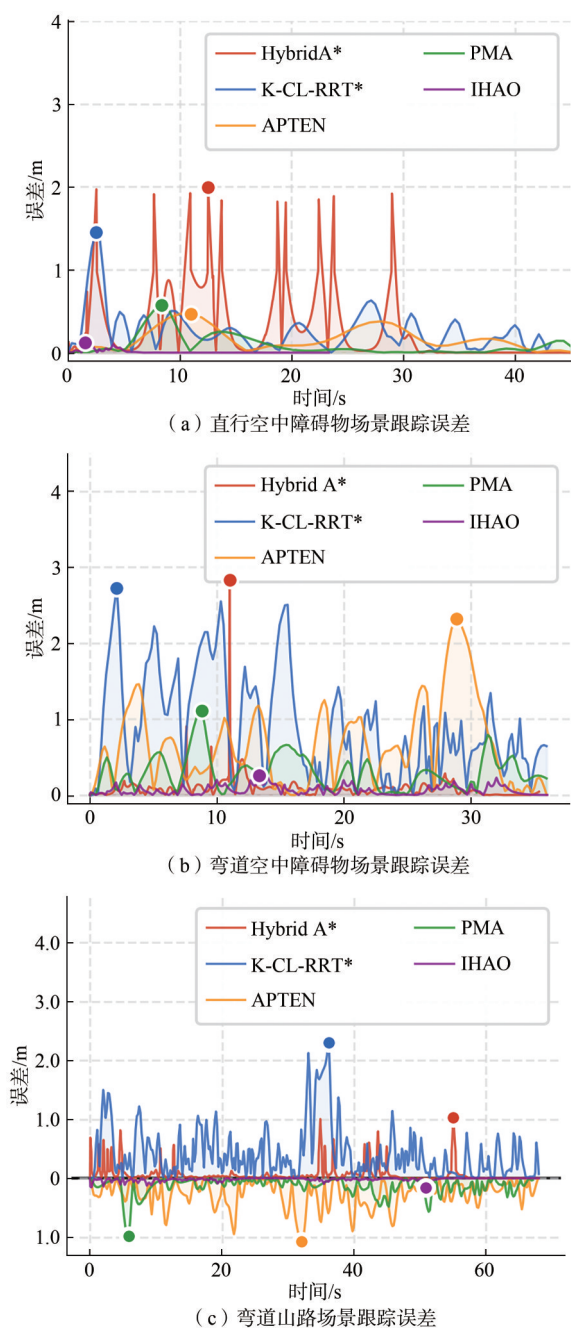


图14 各场景跟踪误差

尖峰(峰值2.831 7 m); K-CL-RRT*和APTEN的规划路径因较曲折、最大曲率超过最大极限值,而导致跟踪误差波动较大(峰值2.729 2 m和2.323 5 m),均方根误差高达1.142 1 m和0.859 9 m。AKR最大跟踪误差和均方根误差相对APTEN降幅明显,但仍达到了本文方法的4.28倍和4.53倍。在弯道山路场景中,受通行空间狭窄和山体侵入道路的影响,4种对比方法的表现均不佳,最大跟踪误差均超过0.986 4 m。而本文方法规划路径的均方根误差仅为0.033 1 m,

表明跟踪误差变化较平稳,且跟踪误差都能够维持在0.26 m以下,表现出路径良好的可跟踪性。

综上所述,本文方法规划路径显著降低了跟踪误差,有利于减少大件物流车辆因为行驶路径与规划路径间的高偏差而造成的碰撞风险。

4 结束语

面向大件物流,本文提出了一种闭环迭代式车辆路径规划方法,识别三维碰撞风险并优化规划路径。首先,考虑铰接角约束和牵引-挂车双车体避障,利用改进的混合A*算法规划基础路径;然后,为减少路径跟踪误差,降低车辆实际执行路径时的碰撞风险,结合横向纯跟踪控制器和速度约束,通过大件物流车辆运动学模型进行基础路径优化;同时,在基础路径优化过程中,进行大件物流车辆与环境点云间的三维碰撞风险识别;最后,根据碰撞风险点和碰撞深度,重新定义二维障碍物地图并迭代规划路径,有效避开空中障碍物。为了验证本文方法的有效性,选取3种大件物流典型场景进行仿真验证对比。本文方法在3种场景中均能规划出安全路径,其中,相较于4种对比方法,本文方法的曲率标准差降幅达到20.83%以上,最大跟踪误差和均方根误差降幅分别达到73.63%和49.51%以上。本文方法规划路径不仅能有效避开道路交通标志牌、立交桥、山体等多类型空中障碍物,还能提高规划路径平滑度,降低路径跟踪难度,为大件物流车辆路径规划提供了有效解决方案。本文后续将在四面体网格搜索加速、点云数据的合理稀疏化及大件货物晃动模型方面进行进一步的研究,以进一步减少计算资源依赖、应对突发事件带来的规划挑战。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于修改《超限运输车辆行驶公路管理规定》的决定:中华人民共和国交通运输部令2021年第12号[R]. 北京:中华人民共和国交通运输部, 2021.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Decision of the Ministry of Transport on Amending the "Regulations on the administration of highway transportation by oversized and overweighted vehicles": No. 12, 2021, Ministry of Transport of the People's Republic of China[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2021.
- [2] 骆云飞, 王书民. 机载LiDAR系统在道路勘测中的数据获取及应用[J]. 测绘通报, 2012(S1): 362-364, 371.
LUO Y F, WANG S M. Data acquisition and application of airborne LiDAR system in road survey[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(S1): 362-364, 371.
- [3] PETRU J, KRIVDA V. The transport of oversized cargoes from the

- perspective of sustainable transport infrastructure in cities[J]. Sustainability, 2021, 13(10): 5524.
- [4] 田振鼎, 吕路, 王玉莹, 等. 公路大件运输空间可通行性评价方法[J]. 公路交通科技, 2024, 41(3): 179-189.
TIAN Z D, LYU L, WANG Y Y, et al. Evaluation method for space accessibility of highway abnormal indivisible load transport[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(3): 179-189.
- [5] REDA M, ONSY A, HAIKAL A Y, et al. Path planning algorithms in the autonomous driving system: a comprehensive review[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 174: 104630.
- [6] 管家意, 李斌, 周傲, 等. 面向狭窄环境的安全泊车路径规划算法研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(5): 797-808.
GUAN J Y, LI B, ZHOU A, et al. Study on safe parking path planning algorithm for narrow environment[J]. Automotive Engineering, 2025, 47(5): 797-808.
- [7] BARLAKAS S, TSIKAKIS K, ALEXIOU D, et al. Artificial potential field-based kinematic bidirectional-RRT for robot-trailer kinematics[C]//Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [8] CHOI J W, HUHTALA K. Constrained global path optimization for articulated steering vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(4): 1868-1879.
- [9] EVESTEDT N, LJUNGQVIST O, AXEHILL D. Motion planning for a reversing general 2-trailer configuration using Closed-Loop RRT[C]//Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2016: 3690-3697.
- [10] LI B, ACARMAN T, ZHANG Y M, et al. Tractor-trailer vehicle trajectory planning in narrow environments with a progressively constrained optimal control approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 5(3): 414-425.
- [11] ZHAO M Z, SHEN T, WANG F X, et al. APTEN-planner: autonomous parking of semi-trailer train in extremely narrow environments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 4116-4132.
- [12] HE S W, LIU B L. Review of bounding box algorithm based on 3D point cloud[J]. International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls, 2021, 6(1): 18-23.
- [13] PALMER I J, GRIMSDALE R L. Collision detection for animation using sphere-trees[J]. Computer Graphics Forum, 1995, 14(2): 105-116.
- [14] ZHANG R, YANG Z H, SUN G M, et al. Linear dynamic separating axis algorithm for continuous collision detection[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2024, 36(10).
- [15] FAN Q, TAO B, GONG Z Y, et al. Fast global collision detection method based on feature-point-set for robotic machining of large complex components[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(1): 470-481.
- [16] GUO X Y, WANG R, ZHONG S S, et al. Boundary construction method of collision avoidance for conventional cutters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(1): 65-80.
- [17] ZHU A M, ZHANG Z Q, PAN W. Developing a fast and accurate collision detection strategy for crane-lift path planning in high-rise modular integrated construction[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 61: 102509.
- [18] 湖南省市场监督管理局. 《公路大件运输护送规范》: DB43/T 2994—2024[S]. 长沙: 湖南省市场监督管理局, 2024.
Administration for Market Regulation of Hunan Province. Specification of escorting about highway over-limited transportation: DB43/T 2994—2024[S]. Changsha: Administration for Market Regulation of Hunan Province, 2024.
- [19] KONG J, PFEIFFER M, SCHILDBACH G, et al. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design[C]//Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1094-1099.
- [20] ZIPS P, BÖCK M, KUGI A. An optimisation-based path planner for truck-trailer systems with driving direction changes[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2015: 630-636.
- [21] FANG Z G, JIANG J X, XU J. Efficient collision detection using a dual K-DOP-sphere bounding volume hierarchy[C]//Proceedings of the 2010 International Forum on Information Technology and Applications—Volume 03. New York: ACM, 2010: 185-189.
- [22] BOISVERT R, BARBER C B, DOBKIN D P, et al. The quickhull algorithm for convex hulls[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1996, 22(4): 469-483.
- [23] LEE D T, SCHACHTER B J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation[J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1980, 9(3): 219-242.
- [24] FLOATER M S. Generalized barycentric coordinates and applications[J]. Acta Numerica, 2015, 24: 161-214.
- [25] 陈欣, 向隆刚, 焦凤伟. 基于众源轨迹的OSM路网转向信息增强[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(10): 1954-1967.
CHEN X, XIANG L G, JIAO F W. Turning information enhancement of OpenStreetMap Road network based on crowdsourcing trajectory data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(10): 1954-1967.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 公路限速标志设计规范: JTG/T 3381-02—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specifications for Highway Speed Limit Signs: JTG/T 3381-02—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.

[作者简介]



韩彦岭 (1975—), 女, 上海海洋大学信息学院教授, 主要研究方向为路径规划算法、基于深度学习的图像分类与识别。



张力珂 (2001—), 男, 上海海洋大学信息学院硕士生, 主要研究方向为路径规划算法。



周国峰 (1985—), 男, 上海海洋大学工程学院讲师, 主要研究方向为车辆动力学、建模、仿真和控制。



曹守启（1973-），男，上海海洋大学工程学院教授，主要研究方向为海洋与渔业物联网工程、渔业装备及自动化。



王静（1984-），女，上海海洋大学信息学院副教授，主要研究方向为计算机视觉与人工智能技术与应用、人工视觉信息处理。



宋戈（1986-），男，上海海洋大学信息学院讲师，主要研究方向为光电磁波理论、量子系统与人工微结构材料的相互作用、量子信息与量子通信、微纳光子学等。



张云（1974-），男，上海海洋大学信息学院教授，主要研究方向为导航系统的高精度定位原理、导航系统的反射信号的海洋遥感技术。