

斜列车位的自动泊车路径规划

刘金庆^{1,2}, 孙仁云^{1,2}, 赵玲^{1,2}, 张国灏^{1,2}, 何梓豪^{1,2}

¹ (西华大学汽车与交通学院, 成都 610039)

² (汽车测控与安全四川省重点实验室, 成都 610039)

摘要: 基于圆弧与直线相切的路径规划方法, 分析泊车过程中可能碰撞条件, 对斜列式车位进行泊车路径规划。详细评估障碍物和车位边界, 以确保规划的合理性, 并构建泊车路径碰撞约束模型, 考虑车辆运动的动态特性和几何约束。创建了临界碰撞条件下的距离方程, 得到泊车过程中的安全距离和有效区域。通过对不同工况下的仿真实验, 结果表明, 在不同通/停车道宽度以及不同角度的斜列车位下, 该路径规划方法在车位朝向与车辆行驶方向一致的斜列车位下能够有效避免碰撞, 验证了规划路径的有效性, 评估了所规划路径的安全性和适应性, 确保安全的泊车操作。

关键词: 自动泊车; 斜列式车位; 路径规划; 仿真分析

中图分类号:

Parking Path Planning Method for Oblique Parking

LIU Jinqing^{1,2}, SUN Renyun^{1,2}, ZHAO Ling^{1,2}, ZHANG Guohao^{1,2}, HE Zihao

¹(School of Automotive and Transportation, Xihua University, Chengdu 610039)

²(Vehicle Measurement Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610039)

Corresponding Author: Renyun SUN. Automotive and Transportation College of Xihua University, Chengdu, 610039, China. Email: sunry2004@163.com.

Abstract: Based on the path planning method that ensures tangency between arcs and straight lines, potential collision conditions during parking are analyzed. Moreover, parking path planning for oblique spaces is conducted, with obstacles and parking space boundaries evaluated in detail to ensure the reasonableness of the planning. Additionally, a collision constraint model for the parking path is constructed to account for the dynamic characteristics and geometric constraints of vehicle motion. Distance equations for critical collision conditions are developed to determine safe distances and effective areas during parking maneuvers. Simulation experiments conducted under various working

来稿日期: 2024-09-15 修回日期: 2024-10-09

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (23ZDYF0506); 西华大学研究生科创竞赛项目 (2024-235)

作者简介: 刘金庆, 硕士研究生, 研究方向为自动泊车系统, Email:ljq@163.com; 孙仁云 (通讯作者), 教授, 研究方向为汽车动力学仿真与测试、新能源汽车和智能汽车技术, Email:sunry2004@163.com; 赵玲, 副教授, 研究方向为汽车电控技术, Email:657784329@qq.com; 张国灏, 硕士研究生, 研究方向为电子机械制动系统, Email:2115176240@qq.com; 何梓豪, 硕士研究生, 研究方向为大数据燃料电池故障检测, Email:1273156767@qq.com

conditions demonstrate that collision avoidance is effectively achieved through the path planning method, which aligns with the vehicle's traveling direction and accommodates varying lane widths. Ultimately, the validity of the planned paths is verified, and the safety and adaptability of these paths are assessed to ensure secure parking operations.

Key words: automated parking; diagonal parking; path planning; simulation analysis

Funding: The project is recognized as a key research and development project by the Sichuan Provincial Science and Technology Department (Project ID: 23ZDYF0506) and is supported as a project under the Xihua University Graduate Student Science and Innovation Competition (Project ID: 2024-235).

1 引言

自动泊车技术作为智能驾驶汽车的重要组成部分,包括车辆定位、车位检测、路径规划和轨迹跟踪控制,因计算机技术、车联网技术不断发展,自动泊车系统受到国内外学者的广泛关注^[1-2]。自动泊车的路径规划是通过相关传感器获取停车环境信息,由控制器规划一条最安全、可靠、便捷的泊车路径,使车辆在一定时间内到达目标停车位置。路径规划中,利用几何法规划泊车路径大多都用圆弧与直线结合,是一个经典的规划方式^[3]。Du X 等利用圆弧与直线进行组合来进行泊车路径的规划,存在曲率不连续的现象^[4]。HSU 等和 KIM 等都进行改进,利用两段圆弧和一条直线进行泊车路径的规划,此种方法结构简单,得到的车位尺寸小^[5-6]。为解决曲率不连续情况,有学者使用曲线拟合法对不连续点进行拟合, VOROBIEVA H 等在两段圆弧组成的路径不连续点使用回旋曲线,来解决微小车位的平行泊车中曲率不连续的情况^[7]。张家旭等在设计平行泊车路径时,通过固定的回旋曲线的平移和翻转完成曲率连续的路径规划^[8]。张明海等基于直线-圆弧组合的方式,结合回旋曲线进行曲率优化,进行垂直泊车的基础路径规划^[9]。李红、周辰昊等基于 B 样条曲线,通过分析碰撞法分别对平行车位泊车轨迹和垂直式车位进行了验证^[10-11]。张艺欣结合逆向行驶方法和圆弧-直线-圆弧曲线组合方法对平行式车位进行规划^[12]。赵克刚等基于混合 A*算法,设计了一种改进混合 A*路径规划算法对垂直式车位进行了仿真验证,其改进后的混合 A*算法能提高在特定区域内泊入车库的成功率^[13]。本文主要针对斜列式车位的泊车路径规划研究,解决了斜列式泊车路径的设计问题,通过碰撞分析确定了可通行区域,进行仿真,验证泊车路径的有效性和可靠性,提升自主泊车系统对不同停车位类型的适应能力。

2 泊车路径规划

自动泊车的路径规划是整个系统的关键部分,进行泊车时,当车位检测模块检测到车位以及周围环境时,路径规划模块根据车辆的位置、尺寸以及停车空间的大小和形状,构建合适的车辆模型、停车空间模型以及障碍物模型。并结合直线与圆弧两部分来规划合适的路径,以确保车辆能够安全、平稳地沿预定路径完成泊车操作。

2.1 车辆运动模型

在车辆泊车的过程中,由于其行驶速度非常低,因此可以合理地忽略汽车在行驶过程中所受到的侧倾效应以及轮胎的滑移现象,这一假设为泊车分析的过程提供了便利。为了确保泊车过程的准确性,将一款中型汽车作为研究模型。为方便后续的计算和分析,我们在此过程中忽略了车辆轮廓的不规则部分,将整个车辆简化为一个标准的矩形刚体^[14]。

然而，仅仅依靠车辆的几何模型并不足以有效规划车辆的泊车路径。为了实现这一目标，我们还需要建立一个泊车系统的运动学模型，如图 1 所示。该模型基于阿克曼转向原理，以汽车后轴中心作为研究对象，构建了一个大地坐标系 XOY 。在这个模型中，系统具有四个自由度，分别为 x 、 y 、 φ 、 δ_f ，其中 (x_f, y_f) 为车辆前轴中心坐标， (x_r, y_r) 为车辆后轴中心坐标。通过这种方式，我们能够更准确地描述车辆在泊车过程中的运动特性，从而为后续的路径规划提供理论基础。

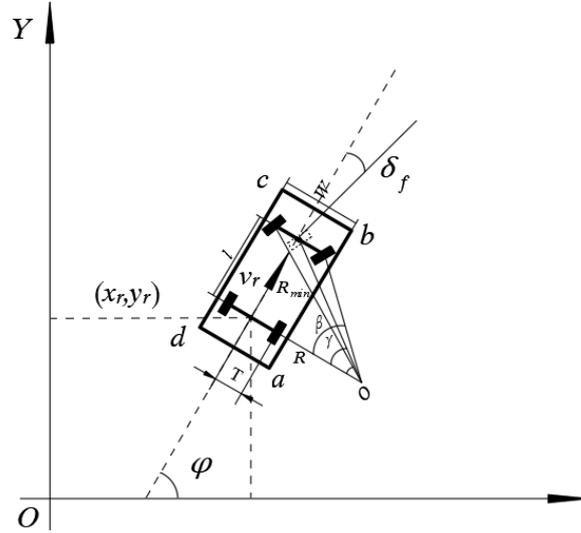


图 1 车辆运动学模型

Fig. 1 Vehicle kinematics model

得到车辆的运动方程

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot \cos\varphi \\ \dot{y} = v \cdot \sin\varphi \\ \dot{\varphi} = \frac{v \cdot \tan\delta_f}{l} \end{cases} \quad (1)$$

其中， φ 为航向角，是车身与 X 轴正方向的夹角； v_r 是车辆后轴的速度，将汽车简化为一个整体， v_r 也为汽车的速度 v ； δ_f 为等效前轮转角； l 为汽车的轮距^[15]。

将汽车简化为一个刚体后，车身的四个角点位置在笛卡尔坐标系关系如图 2 所示。根据此模型，可以在后续的路径规划中分别计算出各角点的位置关系。

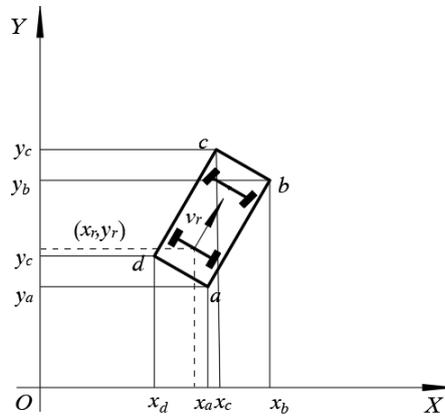


图 2 车身角点几何位置

Fig. 2 Geometric position of body corner points

2.2 简单场景下斜列车位泊车模型

斜列式车位的结构与垂直式泊车位相似，但其具有一定的倾斜角度。在进行斜列式车位泊车时，首先应该判断其泊车场景是否为简单泊车场景，如图 3 所示。其中间车位为空闲车位，在通（停）车道上无任何的障碍物，且其余车位的车辆停放规范，将此种场景归类为简单场景下泊车，此时自动泊车能采用两段式路径泊车一次性入库。根据《车库建筑设计规范》JGJ-2015 中对斜列式车位的規定，斜列式车位角度 α 一般为 30°、45°、60°。

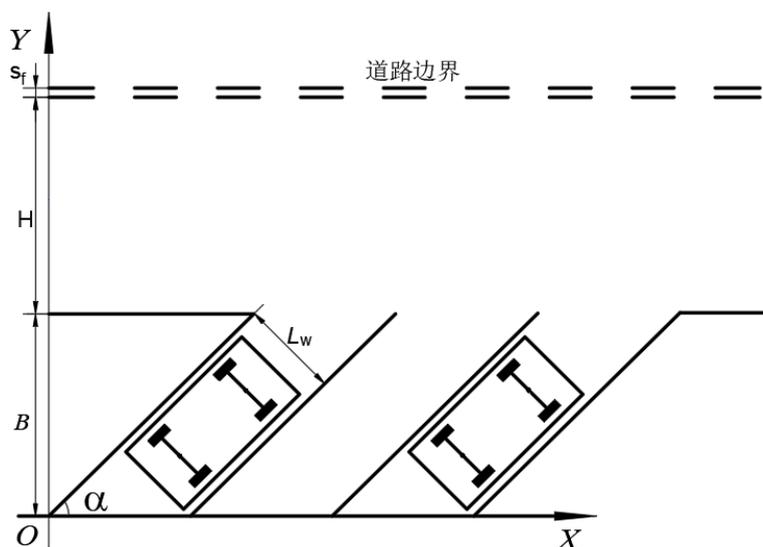


图 3 简单场景下泊车

Fig. 3 Parking in a simple scenario

斜列式泊车过程中，简单场景下斜列式泊车如图 4 所示。由于泊车的入库和出库正好是一个相反的动作，泊车的路径规划可以看作是将汽车从车库开到道路上的一个逆向过程^[16]。连接汽车的前后轴中心，做出平行于汽车前后轴的一条直线，两直线的垂直距离为

$$R_o = \sqrt{R_{min}^2 - l^2} - \frac{T}{2}$$

得到的此直线则为泊车圆弧段路径的圆心所在直线， R_{min} 是汽车的最小转弯半径，此公式可算出当汽车以最小转弯半径转向时，汽车后轴中心的变化情况， T 为汽车的轮距。由于泊车是前进的逆向过程，则可将汽车视为由车位开出至初始泊车点，车辆可一次性泊入车库的后轴中心点始终在 P_3P_2 上滑动。由此利用汽车最小转弯半径做出了两个极限位置的汽车初始泊车点，即 P_1 、 P_1' 为两极限位置下，汽车后轴中心所在点。若汽车后轴中心在线段 P_1P_1' 右半轴都能一次性泊入斜列式车位内。

$$y = \tan \alpha \cdot x - \frac{\frac{3}{2}L_w}{\cos \alpha} \quad (8)$$

泊车路径的圆弧线段始终与段相切，且圆弧的圆心在直线上保持滑动状态，且其随 P_2 点运动，其半径 $R_o = \sqrt{R_{min}^2 - l^2 - \frac{T}{2}}$ ，当汽车在上极限位置以最小转弯半径进行泊车时，圆弧与直线相切点为 P_2' ，当汽车在下极限位置以最小转弯半径进行泊车时，圆弧与直线相切点为 P_2 ，当圆弧与直线的切点为 P_2' 与 P_2 之间时，汽车都以最小转弯半径进行泊车。圆心O点所在的直线方程为：

$$y_0 = \tan \alpha \cdot x_0 - \frac{\frac{3}{2}L_w + R_o}{\cos \alpha} \quad (9)$$

则斜列式车位汽车泊车路径可表示为：

$$\begin{cases} y = \tan \alpha \cdot x - \frac{\frac{3}{2}L_w}{\cos \alpha} & , x \in (x_{P_3}, x_{P_2}) \\ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = (\sqrt{R_{min}^2 - l^2 - \frac{T}{2}})^2 & , x \in (x_{P_2}, x_{P_1}) \end{cases} \quad (10)$$

2.3 自动泊车中的动态路径规划与适应

自动泊车车位检测模块在自动泊车过程中，可以同时检测多个停车位，需要选择一个相对空旷、无其他障碍物且方便进入的停车位，按照约束模型计算当前位置到目标停车位的最佳路线。如图4的斜列式车位的简化模型，汽车起始位置的纵向中心线位置在 h 范围内， h 的值与道路的通/停宽度有关，在此范围内，汽车有多条可用的泊车路径。若检测到当前泊车路径范围内有其他障碍物存在则更换当前路径以确保行车安全并避免碰撞和时间浪费。若路径规划模块在当前规划过程中在无法找到有效的泊车路径，则需要采用复杂场景下泊车路径规划，此时汽车的泊车路径由前进路段和后退两段路径组成。当车辆在进行泊车作业时，若存在其他的车辆以及行人突然闯入，泊车过程中的汽车应由控制器控制进行主动停车，待行人或车辆驶出后再继续进行泊车操作。

2.4 泊车过程中碰撞约束

汽车在泊车过程中的碰撞约束主要包括道路的上下边界、车位及障碍物的碰撞约束，在泊车过程中的第一段圆弧路径中，车辆的左前顶点 a ，可能与道路的上边界发生碰撞影响到车辆的轨迹规划；车辆的右侧可能与车位的右前点发生碰撞。在泊车过程的直线路径中，汽车的右后顶点 d 可能与车位的右下顶点发生碰撞，通过约束相关的碰撞点，系统判断最佳的起始位置及速度，如图5斜列式泊车场景的约束分析图所示。

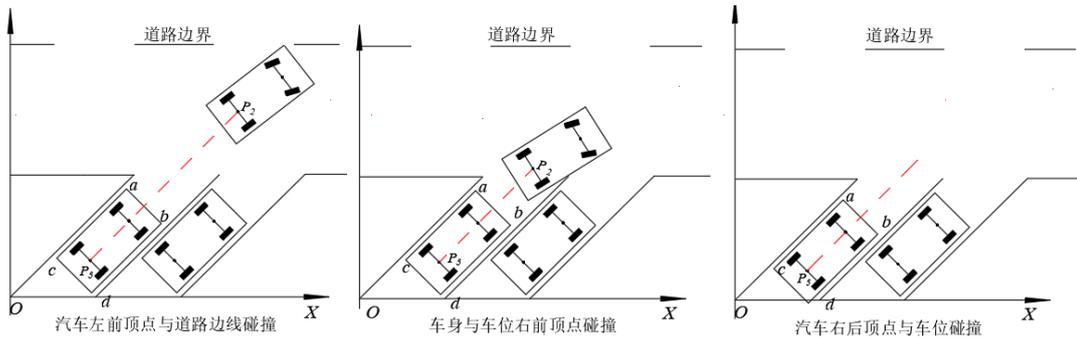


图5 斜列式泊车场景的约束分析图

Fig. 5 Constraint analysis diagram for the ramp parking scenario

对三个可能碰撞点进行碰撞分析，得到极限约束条件下 P_2 、 P_3 的范围，求得车辆在斜列式车位的有效且无碰撞的泊车路径。

在泊车终止时，汽车的后轴中心位置应该与安全位置下的 P_3 点重合，此时，车辆右下角顶点与车位右下角顶点具有安全距离 s_r 。

泊车的终止位置 P_3 点的坐标为 $\left(\frac{3}{2}l_w + \cos\alpha(l_r + \frac{1}{2}L_w), (l_r + \frac{1}{2}L_w)\sin\alpha\right)$ ，只要汽车后轴中心的终点位置横纵坐标大于该值，汽车后部不会发生碰撞。

当汽车在下极限位置下泊车时，车位右前点可能与车辆的右侧发生碰撞，作出车位右前点的轨迹图，其半径为 $R = R_0 - \frac{L_w}{2}$ ，其轨迹圆的大小可以表示为：

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (11)$$

其中 (x_0, y_0) 为车位右前角点圆心坐标，可以将车位右前角点圆心坐标写为

$$\left(x_0, \tan\alpha \cdot x_0 - \frac{\frac{3}{2}L_w + \sqrt{R_{min}^2 - l^2 - \frac{T}{2}}}{\cos\alpha}\right), \text{ 车位右前角点坐标表示为}\left(\frac{2L_w}{\sin\alpha} + \frac{B}{\tan\alpha}, B\right)$$

可将车位右前顶点坐标及其圆心坐标代入式子：

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (12)$$

取车位倾斜角 α 为 45° 时，将车位右前角点坐标与圆心坐标表达式直接代入式(12)整理得

$$\sin\alpha x_0 - B\cos\alpha = L_w + \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(R^2 - \gamma^2 - 4L_w^2 + 4\gamma L_w)} \quad (13)$$

$$\text{即 } x_0 = \sqrt{2}L_w + \frac{\sqrt{2}\gamma}{2} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(R^2 - \gamma^2 - 4L_w^2 + 4\gamma L_w)} + B$$

其中， $\gamma = \frac{3}{2} \cdot L_w + \sqrt{R_{min}^2 - l^2 - \frac{T}{2}}$ ， $\gamma > 0$ ， $R = R_0 - \frac{L_w}{2}$ ， $\gamma > R$ 。当汽车转弯时的半径 R 的横坐标 x 大于车位右前顶点的圆心坐标 x_0 时，泊车过程中，汽车右侧不会与车位右前侧顶点发生碰撞。

当汽车在上极限位置下泊车时，为保证汽车的左前顶点 a 点不会与道路边界发生碰撞，则需要求出此时泊车路径圆弧与直线的切点 P_2 的圆心位置坐标，此时汽车左前顶点 a 的圆弧半径为 $R_{min} + \frac{w-T}{2}$ ，则此时圆心位置坐标可以表示为 $\left(\frac{\gamma}{\cos\alpha} + \Delta, \Delta\right)$ ，其中 $\Delta = B + H - s_f - R_{min} - \frac{w-T}{2}$ 。

其中根据车库建筑设计规范 JGJ 100 - 2015 规定， B 为垂直车道方向的最小停车位宽度，即车位的高度， H 为通（停）车道宽度。

则汽车不发生碰撞的条件为，汽车泊车时以最小转弯半径泊车的转向中心横、纵坐标值分别不大于 $\left(\frac{\gamma}{\cos\alpha} + \Delta\right)$ 和 Δ 。得到两个极限位置下转向中心的横纵坐标，上极限位置的转向中心坐标为 $\left(\frac{\gamma}{\cos\alpha} + \Delta, \Delta\right)$ ，下极限位置的转向中心坐标为 $\left(\frac{\gamma}{\cos\alpha} + \Delta - h, \Delta - h\right)$ 。

其中，上下极限位置与上极限位置都与通停车道的最小宽度 H 和车位高度 B 有关。下极限位置下的转向中心坐标也是汽车车位右前角点的转向中心，也为 $\left(x_0, \tan\alpha \cdot x_0 - \frac{\gamma}{\cos\alpha}\right)$

可以求得 $h = \frac{\gamma}{\cos\alpha} + R_{min} - x_0$ ，即，

$$h = \frac{\sqrt{2}-1}{2}\gamma + H - s_f - R_{min} - \frac{w-T}{2} - \sqrt{2}L_w + \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(R^2 - \gamma^2 - 4L_w^2 + 4\gamma L_w)}$$

则得出在 45° 角的斜列式车位下的泊车路径方程：

$$\begin{cases} y = \tan \alpha \cdot x - \frac{3}{2} \frac{L_w}{\cos \alpha} & , x \in (x_{P_3}, x_{P_2}) \\ \left\{ x - \left(\frac{y}{\cos \alpha} + R_{min} - h \right) \right\}^2 + \{ y - (R_{min} - h) \}^2 = \left(\sqrt{R_{min}^2 - l^2} - \frac{T}{2} \right)^2 & , x \in (x_{P_2}, x_{P_1}) \end{cases} \quad (14)$$

2.5 复杂场景下斜列车位泊车模型

若通（停）车道上有临时障碍物，此时车辆开始泊车位置被临时障碍物挡住，汽车在通停车道的起始位置发生了改变，采用两段式路径进行泊车时初始位置受限，则视为复杂场景下泊车。如图 6 所示的具有临时障碍物下的汽车泊车简化模型，路径由多段前进路段及后退路段组成，其中线段 P_0P_2 是前进线段，由一条直线与曲线组成，是在该环境下泊车的准备阶段； P_2P_3 为开始泊车时的第一段圆弧段；线段 P_3P_4 为前进路段，由当前车辆的最小转弯半径组成的圆弧段； P_4P_6 是两个相切圆弧段组成的泊车入库的弧线段。

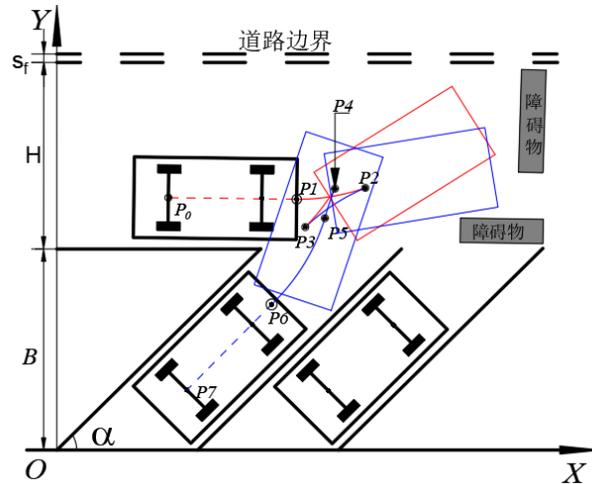


图 6 复杂场景下泊车路径模型

Fig. 6 Parking path model in complex scenarios

3 不同泊车场景下的斜车位泊车路径仿真结果

为验证方法的可靠性，参考《车库建筑设计规范》JGJ100-2015 的规定进行斜列式车位的建模，对通（停）车道的最小宽度做了一条虚拟道路边界线，并在边界线下方作了预留了 30cm 的安全线，要是车辆超过该安全线，则表示在该位置下泊车可能会与障碍物或者道路边界发生摩擦或碰撞，车辆参数及车位信息见表 1。

表 1 车辆参数与车位信息

Table 1 Vehicle parameters and parking space information

参数	符号	单位	数值
车长	L	m	4.622
车宽	W	m	1.860
前悬	l_f	m	0.735
后悬	l_r	m	1.015
轴距	l	m	2.782
轮距	T	m	1.505
最大等效前轮转角	δ_{max}	rad	0.535
最大前轮转角速度	ω_{max}	rad/s	0.535

最小转弯半径	R_{\min}	m	5.6
车位宽度	L_w	m	2.4
最小通（停）车道宽度	H	m	3.8

对车位角度为 45° 且其最小通（停）车道宽度 3.8m 泊车时，泊车路径仿真结果由图 7 所示，汽车在泊车过程中，车辆不会与道路边界和车位右上角发生刮擦现象，在泊车终止点，汽车尾部也与车位的右下角位置具有一定安全距离。图中，红色斜线为斜向车位示意图，蓝色框线表示泊车时汽车的各点轮廓轨迹，红色阴影部分表示相邻车位已停放规范的车辆，路径 $P_1 P_3$ 为泊车时所规划的路径。

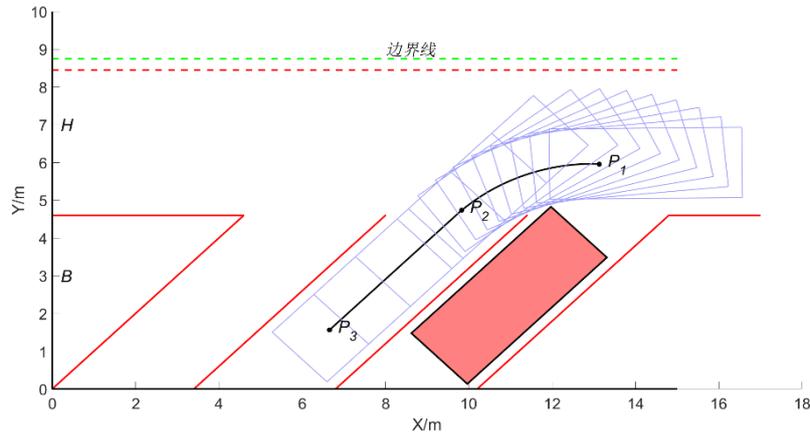


图 7 最小通（停）车道宽度下泊车路径

Fig. 7 Parking Paths with Minimum Through (Parking) Lane Widths

当车位角度为 45° 时，通（停）车道宽度高于最小规定高度 3.8m 时，车辆的泊车路径见图 8，在泊车时，车辆左前点 a 点最有可能与道路边界发生刮擦，因此，在进行规划时，应极力避免此情况的发生，控制在安全线以内。结果表明，车辆在加宽通（停）车道宽度下进行泊车时也能有效的规划出一条可靠的路径。

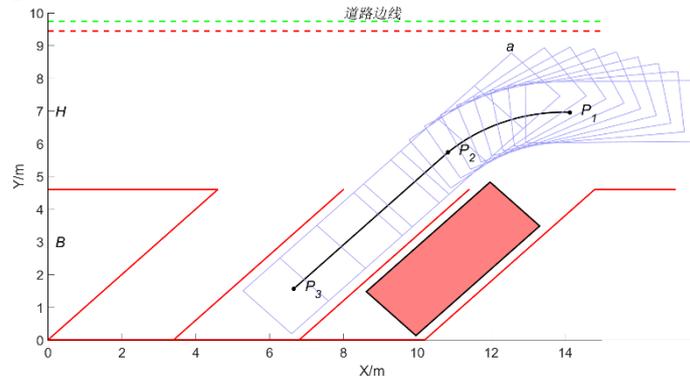


图 8 加宽通（停）车道宽度下泊车路径

Fig.8 Parking Paths with Wider Through (Parking) Lane Widths

当车位角度为 30° 或 60° 时，车辆的泊车路径与车位角度为 45° 时的路径类似，正常泊车情况下都是以圆弧与直线组成，图 9 为车位夹角为 30° 时的路径规划。当图像识别模块检测时车位时，路径规划模块找到与车位斜线平行的直线再利用障碍物进行碰撞约束，便能利用倒推式进行规划得到有效的泊车路径。

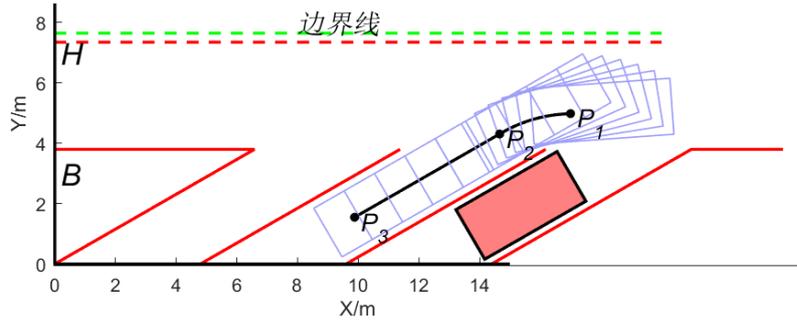


图 9 车位夹角为 30°时的泊车路径

Fig. 9 Parking path with 30° angle of parking space 图 10 为复杂场景下 45° 车位车辆泊车轨迹仿真图，阴影部分为障碍物示意图，其中路径 P_0P_2 为前进路径，路径 P_2P_3 为第一次泊车时以汽车最小转弯半径行驶时的圆弧路径，路径 P_3P_4 为揉库时向前行驶的圆弧路径，路径 P_4P_6 为最总泊车时的圆弧路径与直线路径的组合。相较于简单场景下泊车时，其泊车的初始位置在通（停）车道的空间路程变短，泊车起点位置发生改变，增加了一段前进路段，其结果显示，能规划出一条合适的路径进行自动泊车。其中，车辆的右前点 b 点在直线行驶时，不会与车位上边界发生摩擦，在路径 P_0P_3 中有一个切点 P_2 ，这也是车辆开始转向的点，巧妙地利用了该空闲车位的位置，在该位置转向时，汽车的右后点 d 点不会与车位边线发生碰撞，揉库时，汽车后轴中心在 P_3 点时，也与车位的左前点有一定安全距离。结果表明，在通停车道下具有临时障碍物时，能够规划出有效的泊车路径。

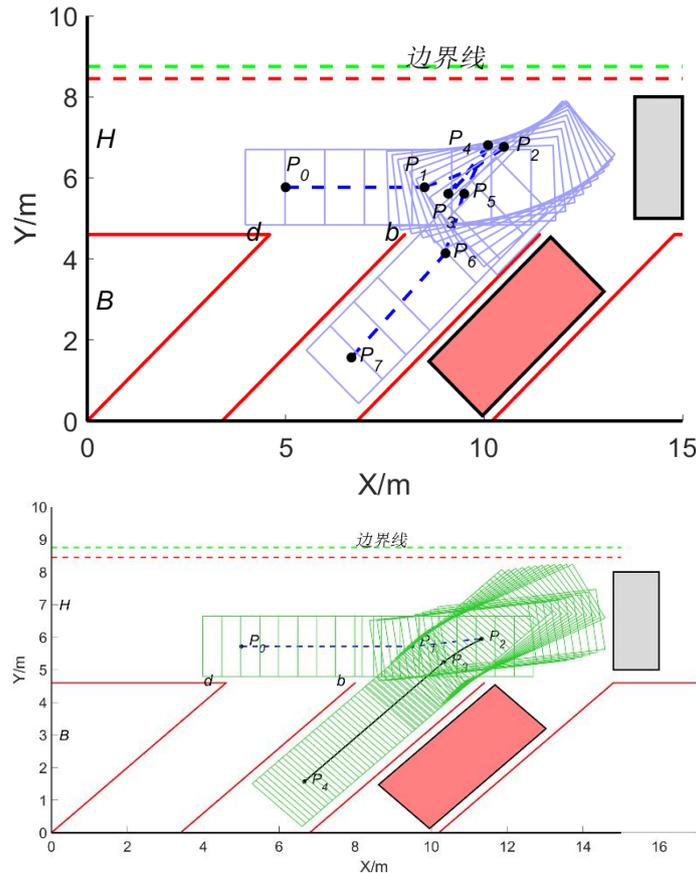


图 10 复杂场景下泊车路径 Fig.10 Parking path in complex scenarios

4 讨论与分析

通过对斜列式车位的泊车路径进行规划研究，得到各种工况下安全可靠的泊车路径。张持等在进行泊车的轨迹规划时，对平行式车位利用两段圆弧进行倒推式轨迹规划^[17]。在

此基础上进行改进，对斜列式车位进行倒推式进行轨迹规划，并把泊车的轨迹改为了直线加圆弧的形式，对倒推式轨迹规划方法在斜列式车位的应用做了补充。Lei Cai 等在有限的停车空间分别对垂直式车位和平行式车位利用几何法进行了路径的规划分析，但未考虑当车位为斜列式时的路径情况^[18]。在利用几何法进行垂直式和斜列式停车的路径规划时，二者存在明显区别。垂直式停车时，车辆与停车位的方向垂直，路径规划相对简单，主要关注车辆的倒车入位及转向组合，需避免与旁边车辆或障碍物的碰撞。而斜列式停车则要求车辆以一定角度进入车位，导致路径规划更加复杂，需考虑车辆宽度、入车角度及出车时的视野，且容易面临更高的侧面碰撞风险。此外，斜列式停车通常能更有效地利用空间，减少后退空间需求。Cheedalla P 等通过利用阿克曼转向原理与车位的信息对垂直式车位与平行式车位进行了路径规划^[19]。其垂直式路径与斜列式路径基本一致，都由一段圆弧与一条直线路径组合，其圆弧路径是由汽车最小转弯半径决定，以车辆最终停放在该车位的最佳位置为起点进行逆推得到泊车开始时的起点位置。江金芙设计了一个两段路径进行泊车的斜列式路径规划方法，其分析的车位倾斜角为 60° ^[20]，但通/停车道宽度按国标标准来说最小为 4.2m，其设计的通停宽度为 8m，高于标准所规定，适用场景可能不高。因此，按照国标车库设计要求，验证了在 60° 倾斜角的车位下的最小通（停）车道宽度要求 4.2m 设计，实验结果表明，能规划出一条安全可靠的泊车路径，通停车道宽度，如图 11 所示车位倾斜角度都为 60° 时两通停车道宽度对比，左图为江金芙设计，右图为本方法设计。

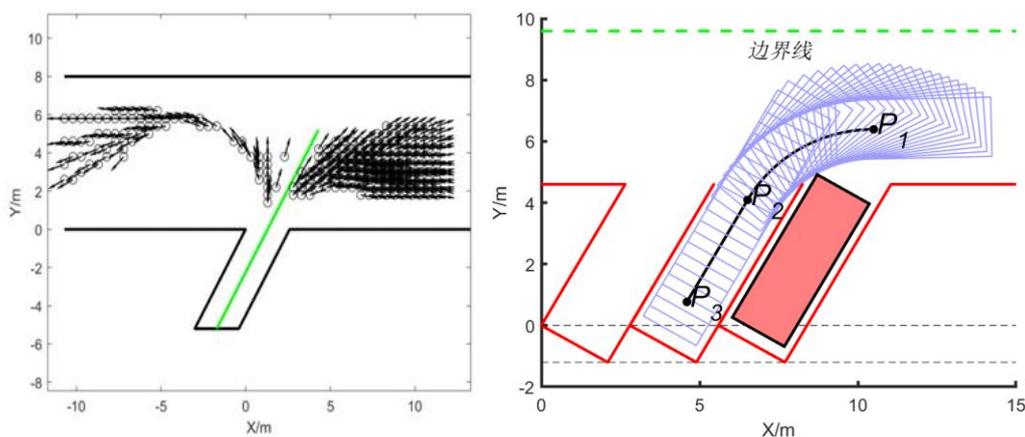


图 11 两通停车道宽度对比

Fig.11 Comparison of Widths of Two Way Parking Lanes

李克强等通过基于几何方法利用圆弧与直线来设计斜列式车位的泊车轨迹^[6]，并利用实车实验检验了轨迹规划的效果，未考虑在有临时障碍物情况下的轨迹规划。在此基础上添加了有临时障碍物的情况，将泊车的轨迹分为两步，首先由一段直线的前进路段，然后利用最小转弯半径来规划一个弧线，再进行泊车，此方法能够缩短泊车的起始点的位置距离。

针对斜列式车位的路径规划进行了研究，对固定的车位以及其他障碍物都是静止状态下做出了安全有效的泊车路径，但在实际的生活，泊车环境随时变换，在以后研究中应考虑停车环境的动态变化，如其他车辆的移动和障碍物的出现，进行实时路径调整，让其具有更高的适用性，由于采用了圆弧与直线结合的规划方式，其路径的曲率在相切点发生突变，可在相切处采用 RS 曲线或者回旋曲线来改变曲率的突变优化相关的泊车路径。

5 结论

- (1) 根据不同的工况，规划出斜列式车位泊车的不同路径，其泊车路径都能使汽车安

全可靠的停入到车库内并预留一定安全距离。

(2) 对可能碰撞点进行分析, 获得了斜向车位下汽车的泊车可用区域, 得到两段路径结合, 一次性泊入车库且无碰撞的泊车路径。

(3) 对通(停)车道具有临时障碍物的情况下做了仿真实验, 其仿真结果表明, 能够规划出由前进与后退两步结合的圆弧与直线组合的有效泊车路径。

(4) 所设计的泊车路径在无其他障碍物遮挡时无重复的揉库环节, 有效减少了轮胎磨损, 但对通(停)车道的最小宽度有严格要求, 需严格按照 GB《车库建筑设计规范》JGJ100-2015 要求设计。

(5) 为多种停车方式路径规划的深入研究提供了一定的参考。如, 调整斜列式车位的倾斜角度, 形成与其它方式的车位泊车情况, 车位模型、车辆模型等与大地坐标系 X 轴的角度做相应调整, 组成车位泊车路径变为相应方式下与 X 轴垂直或平行的直线和相切的圆弧。

参考文献

- [1]左时胜. 基于乘用车的自动泊车路径规划与跟踪控制[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
Zuo SS. Automatic Parking Path Planning and Tracking Control Based on Passenger Cars [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2021.
- [2]尤田田. 自动泊车路径规划及跟踪控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
You TT. Research on automatic parking path planning and tracking control method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [3]胡杰,张敏超,徐文才,等. 自动驾驶车辆的平行泊车轨迹规划 [J]. 汽车工程, 2022, 44 (03): 330-339.
Hu J, Zhang MC, Xu WC, et al. Parallel parking trajectory planning for self-driving vehicles [J]. Automotive Engineering, 2022, 44 (03): 330-339.
- [4]DU X X, TAN K K. Autonomous reverse parking system based on robust path generation and improved sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1225-1237.
- [5]HSU T H, LIU Jingfu, YU Penning, et al. Development of an Automatic Parking System for Vehicle [C] //2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 3-5, 2008, Harbin, China. Piscataway NJ:IEEE, c2008:1-6.
- [6]KIM D, CHUNG W, PARK S. Practical Motion Planning for Car-Parking Control in Narrow Environment [J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4(1): 129-139.
- [7]VOROBIEVA H, GLASER S, MINOIU-ENACHE N, et al. Automatic parallel parking in tiny spots: path planning and control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 396-410.
- [8]张家旭,赵健,施正堂,等. 基于回旋曲线的平行泊车路径规划和跟踪控制 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(6): 2247-2257.
Zhang JX, Zhao J, Shi ZT, et al. Parallel parking path planning and tracking control based on gyratory curve [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2020, 50(6): 2247-2257.
- [9]张明海,丁宁,曹立波,等. 基于回旋曲线的垂直泊车路径规划 [J]. 汽车技术, 2023, (06): 30-36.
Zhang MH, Ding N, Cao LB, et al. Vertical parking path planning based on gyratory curve [J]. Automotive Technology, 2023, (06): 30-36.
- [10]李红, 王文军, 李克强. 基于B样条理论的平行泊车路径规划 [J]. 中国公路学报, 2016,

29(9):143-151.

Li H, Wang WJ, Li KQ. Path Planning for Parallel Parking Based on B Spline Theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9):143-151.

[11]周辰昊,刘中华,吴新焯. 基于5阶B样条的避障泊车路径规划 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2024(04).

Zhou CH, Liu ZH, Wu XY. Obstacle avoidance parking path planning based on 5th order B-splines [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2024(04).

[12]张艺欣. 基于MATLAB的平行泊车路径规划 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(19): 130-134.

Zhang YX. Parallel parking path planning based on MATLAB [J]. Automotive Utility Technology, 2022, 47(19): 130-134.

[13]赵克刚,曾润林,梁志豪,等. 基于圆弧样条参考路径的改进混合A*泊车路径规划算法 [J]. 科学技术与工程, 2024,24(17):7376-7386.

Zhao KG, Zeng RL, Liang ZH, et al. Improved hybrid A* parking path planning algorithm based on circular spline reference path [J]. Science, Technology and Engineering, 2024, 24(17): 7376-7386.

[14]罗钊,张文强,赵玛龙,等.智能驾驶汽车自动泊车轨迹规划仿真分析 [J]. 兰州工业学院学报, 2024, 31(02): 57-61.

Luo D, Zhang WQ, Zhao ML, et al. Simulation analysis of automatic parking trajectory planning for intelligent driving vehicles [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2024, 31(02): 57-61.

[15]蔡文胜,孙仁云,李卓霖,等.自动泊车系统路径规划仿真研究[C]//四川省汽车工程学会,成都市汽车工程学会. 四川省第十七届汽车行业学术年会论文集. 成都:西华大学汽车与交通学院,汽车测控与安全四川省重点实验室, 2023: 11.

Cai WS, Sun RY, Li ZL, et al. Simulation study on path planning of automatic parking system [C] // Sichuan Automotive Engineering Society, Chengdu Automotive Engineering Society. Proceedings of the 17th Annual Conference of Sichuan Automobile Industry. Proceedings of the 17th Annual Conference of Sichuan Automotive Industry. Chengdu: Xihua University School of Automotive and Transportation, Sichuan Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety, 2023: 11.

[16]李富强,古谚谏,王永胜,等. 基于预定义几何集的斜列式泊车路径规划方法 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(12):1-11.

Li KQ, Gu YC, Wang YS, et al. A predefined geometric set-based path planning method for diagonal parking [J]. China Highway Journal, 2021, 34(12): 1-11

[17]张持,张永林. 基于两段圆弧的倒推式平行泊车路径规划方法 [J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(12): 3035-3040.

Zhang C, Zhang YL. Backward parallel parking path planning method based on two-segment arc [J]. Computer and Digital Engineering, 2019, 47 (12): 3035-3040.

[18] CAI L, GUAN H, ZHOU Z Y, et al. Parking planning under limited parking corridor space[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(2): 1962-1981.

[19]Cheedalla P, Karanam M. Survey: An automatic parallel parking using path planning methodologies[C] // 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). Trichy, India: IEEE, 2022: 1122-1128.

[20]江金芙. 垂直与斜列式泊车轨迹规划算法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.

Jiang JF. Research on vertical and diagonal parking trajectory planning algorithms[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.

