

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.001

基于粒子群-遗传算法的多约束平行泊车路径规划

尹晨晨¹, 张冰战^{2,3}, 康谷峰², 邱明明⁴

(1. 比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118; 2. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 安徽省数字化设计与制造重点实验室, 安徽 合肥 230009; 4. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为满足多约束条件下汽车平行泊车的安全性、泊车效率以及车辆自身运动学要求,文章提出一种基于粒子群-遗传算法应用于平行泊车工况的路径规划算法。分析平行泊车过程,采用五次多项式曲线作为轨迹规划的基础,通过构建车辆运动学模型,分析泊车过程中运动学约束、碰撞约束和曲线端点约束,将车辆泊车路径规划问题转化为最优控制问题;采用粒子群-遗传算法进行求解,获得路径曲线的泊车起始点坐标,并计算路径曲线系数,以得到满足约束要求的路径曲线;基于模型预测算法进行泊车路径跟踪仿真,得到泊车过程中绝对误差最大为0.048 m,车身方位角最大误差为0.025 rad(约1.5°)。仿真结果表明:该算法能够较精确地跟踪优化后的五次多项式曲线路径,泊车起始点车身姿态与车位线平行,满足泊车路径端点要求;同时避免了与周围障碍物的碰撞,符合泊车安全性要求;前轮转角变化连续且曲线平滑,符合泊车过程汽车运动学要求。文章基于粒子群-遗传算法的路径规划算法可以为自动泊车提供有效参考路径。

关键词:平行泊车;路径规划;自动泊车;粒子群-遗传算法;模型预测控制

中图分类号:U461.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0289-06

Multi-constraint parallel parking path planning based on particle swarm optimization-genetic algorithm

YIN Chenchen¹, ZHANG Bingzhan^{2,3}, KANG Gufeng², QIU Mingming⁴

(1. BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China; 2. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Key Laboratory of Digit Design and Manufacturing, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to meet the safety, parking efficiency and the vehicle's kinematics requirements of parallel parking under multiple constraints, a path planning algorithm for parallel parking based on particle swarm optimization-genetic algorithm is proposed. The parallel parking process is analyzed, and a quintic polynomial curve is adopted as the basis of trajectory planning, and the vehicle parking path planning problem is transformed into an optimal control problem by constructing a vehicle kinematics model and analyzing the kinematics constraints, collision constraints, and curve endpoint constraints in the parking process. The particle swarm optimization-genetic algorithm is used to solve the problem, the coordinates of the parking start point of the path curve are obtained, and the coefficients of the path curve are calculated to obtain the path curve that meets the constraint requirements. The model prediction algorithm based parking path tracking simulation shows that the absolute error in the parking process is 0.048 m at most, and the maximum error of body azimuth is 0.025 rad (about 1.5°). The results indicate that the algorithm can track the optimized path of the quintic polynomial

收稿日期:2024-02-24; **修回日期:**2024-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52172344);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2023GDSK0065)和芜湖市科技计划资助项目(2223jc-04)

作者简介:尹晨晨(2000—),男,安徽马鞍山人,比亚迪汽车工业有限公司工程师;

张冰战(1982—),男,安徽宿州人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: zhangbingzhan@hfut.edu.cn.

curve more accurately, and the attitude of the body at the starting point of the parking is parallel to the parking line, which meets the requirements of the endpoints of the parking path; at the same time, it avoids the collision with the surrounding obstacles, which meets the parking safety requirements; the front wheel angle change is continuous and the curve is smooth, which also meets the kinematics requirements of the vehicle in the parking process. The proposed algorithm can provide an effective reference path for automatic parking.

Key words: parallel parking; path planning; automatic parking; particle swarm optimization-genetic algorithm; model predictive control

近年来,随着我国汽车的数量不断增加,车位紧缺和空间狭小等问题日益凸显,为提升泊车安全性,对自动泊车功能的需求日益迫切。路径规划作为自动泊车系统中至关重要的一环,其任务就是获取一条安全无碰撞的轨迹,路径规划的优劣将直接影响自动泊车效果,因此,对其展开研究有着重要的应用价值。

目前,在路径规划方法上国内外学者已进行了大量研究。文献[1]提出基于几何方法规划的泊车轨迹,根据泊车起始点的车辆最小转弯半径,通过圆弧-直线-圆弧相切方法,设计泊车的轨迹曲线;文献[2]基于圆弧-直线组合方式的方法,用于推导平行泊车可行泊车起始区域边界,通过对固定回旋曲线进行旋转和翻转变换,设计了曲率连续的平行泊车路径;文献[3-4]采用 B 样条曲线和反正切曲线进行泊车路径规划,解决了泊车路径曲率不连续的问题;文献[5]基于 Sigmoidal Gompertz 曲线模型策划了一条单步平行泊车轨迹,并通过三次多项式插值将时间维度转换为弧长维度,实现了方向盘转角控制和车速控制的解耦;文献[6]利用前轴等效转角与路径曲率之间的运动学关系,实现了平行泊车路径的开环跟踪控制。在碰撞问题方面,文献[7]设计了双向的 3 段弧泊车路径,并通过遗传算法对路径进行优化;文献[8]改进了现有的五阶多项式路径规划方法,引入针对性的惩罚函数,并采用遗传算法计算最佳泊车路径和最小泊车空间,实现自动平行泊车。以上研究通过各种方法很好地对泊车路径进行了优化,但在路径规划时没有完整考虑到泊车过程中碰撞、曲线和运动学全部约束。

为解决如何设计出满足多重约束且有效的泊车路径这一问题,本文选用五次多项式曲线进行轨迹规划,通过建立车辆运动学模型,分析泊车过程中运动学约束、碰撞约束和曲线端点约束;总结上述约束方程,并通过粒子群-遗传算法求解泊车路径规划问题,得到泊车曲线;最后基于模型预测

算法进行泊车路径跟踪仿真,验证所得到的泊车路径的安全性和有效性。

1 汽车泊车模型搭建

车辆自主泊车过程为低速运动过程,轮胎发生侧滑的概率很低。本文基于阿克曼前轮转向建立车辆的自主泊车运动学模型^[9-10],如图 1 所示。

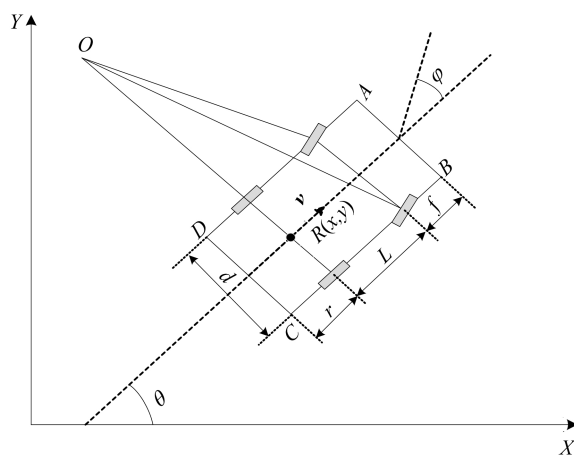


图 1 泊车过程分析图

图 1 中: $R(x, y)$ 为车辆后轴中心在地面坐标系中的坐标; O 为车辆转弯圆心; v 为后轴中心点运动速度,且速度沿着轴线方向; f 为车辆前悬长度; r 为车辆后悬长度; L 为车辆前轴到后轴距离; d 为车辆宽度; φ 、 θ 分别为车辆前轮转向角和车辆方位角。

对前轮转向的车辆进行建模,以后轴中心点为参考点,可得车辆的运动学方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta, \\ \dot{y} = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = v \tan \varphi / L \end{cases} \quad (1)$$

其中: \dot{x} 为车辆在 X 方向上的分速度; \dot{y} 为车辆在 Y 方向上的分速度; $\dot{\theta}$ 为车辆方位角速度。车辆的位姿状态可以由后轴中点坐标与车辆方位角表

示,即 $p=(x,y,\theta)$ 。

2 泊车路径规划

泊车路径规划问题可以转化为寻找一条满足多个约束条件的曲线,其中路径需要满足的条件^[11]如下:① 泊车安全性的要求,即车辆在沿着规划路径泊车的过程中应避免与其他物体发生碰撞;② 车辆的跟踪要求,即车辆泊车过程中要满足车辆自身的运动学约束,确保车辆在实际泊车中是可以跟踪的;③ 车辆停车规范要求,即车辆在停车位中泊车操作完成后,要求车辆车轮归正以及车身尽量与停车位相平行。

2.1 泊车过程约束分析

2.1.1 泊车曲线的选择

泊车路径的曲线有圆弧-圆弧式、圆弧-直线-圆弧和反正切函数等多种曲线^[12],为满足泊车过程路径曲线光滑的要求,即泊车曲线曲率连续以及曲率变化率连续的要求,并且由于转向系统惯性的约束,在泊车过程中车辆转向角不能发生突变,即曲线要求三阶连续,本文的泊车路径采用五次多项式曲线,其数学表达式如下:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (2)$$

其中: $a_0 \sim a_5$ 为五次多项式的系数; x 为车辆后轴中心点在 X 方向上的坐标; y 为车辆后轴中心点在 Y 方向上的坐标。

2.1.2 泊车过程的几何约束

自动平行泊车过程示意图如图 2 所示。汽车 1 和汽车 2 分别为位于目标停车位的前、后方已泊汽车,汽车 3 为待泊的目标车辆。以平行于停车位方向为 X 轴,垂直于停车位方向为 Y 轴,后方泊车边界中心点位置为坐标原点建立坐标系, R 为车辆后轴中心点。

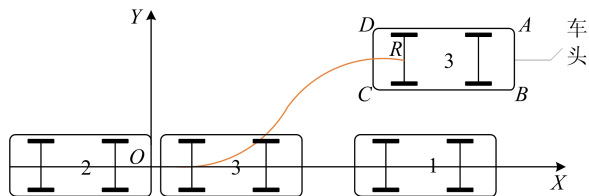


图 2 泊车过程示意图

泊车路径规划首先要确保车辆在泊车过程中符合安全性要求,即在车辆沿着规划路径行驶时,必须避免与周围物体发生碰撞^[13]。因此,对车辆泊车过程中的几何约束进行深入详细分析至关重要。

通过对车辆外部尺寸、周围障碍物位置因素进行全面考虑,可以确定出最佳的泊车路径,以确保车辆能够安全顺利地完泊车过程。车辆平行泊车时几何约束示意图如图 3 所示。

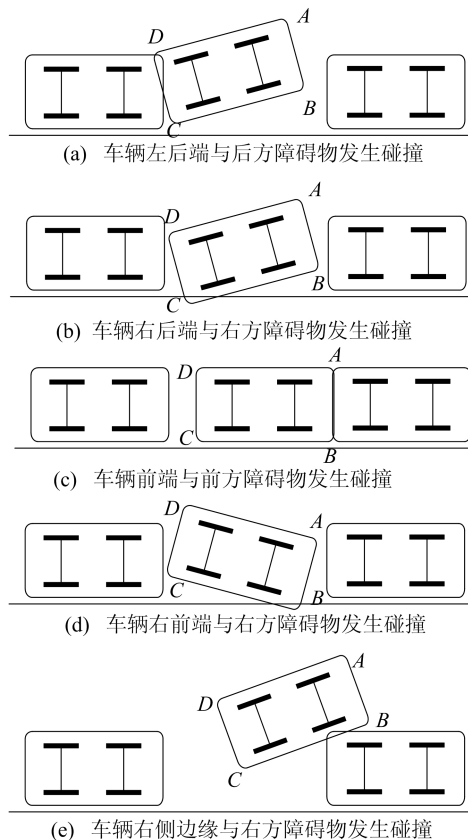


图 3 泊车几何约束示意图

为确保车辆在泊车过程中能安全进入停车位并避免与周围物体碰撞,在车辆沿着规划的路径行驶时,泊车轨迹应满足以下条件。

1) 由图 3a 可知,车辆左后端应避免与后方障碍物发生碰撞,则车辆左后端处的约束为:

$$D_x \geq 0 \quad (3)$$

$$D_x = R_x - r \cos \theta - d \sin \theta / 2 \quad (4)$$

其中, D_x 为 D 点在 X 方向上的坐标。

2) 由图 3b 可知,车辆右后端应避免与右方障碍物发生碰撞,则车辆右后端处的约束为:

$$C_y \geq -W/2 \quad (5)$$

$$C_y = R_y - r \sin \theta - d \cos \theta / 2 \quad (6)$$

其中: C_y 为 C 点在 Y 方向上的坐标; W 为停车位宽度。

3) 由图 3c 可知,车辆前端应避免与前方障碍物发生碰撞,则车辆前端处的约束为:

当 $A_y < W/2$ 时,

$$A_x < L_p \quad (7)$$

$$A_x = R_x + (L + f)\cos \theta - d\sin \theta/2 \quad (8)$$

当 $B_y < W/2$ 时,

$$B_x < L_p \quad (9)$$

$$B_x = R_x + (L + f)\cos \theta + d\sin \theta/2 \quad (10)$$

其中: A_x 、 A_y 和 B_x 、 B_y 分别为 A 点和 B 点在 X、Y 方向上的坐标; L_p 为泊车位长度。

4) 由图 3d 可知, 车辆右前端应避免与右方障碍物发生碰撞, 则车辆右前端处的约束为:

$$B_y \geq -W/2 \quad (11)$$

$$B_y = R_y + (L + f)\sin \theta - d\cos \theta/2 \quad (12)$$

5) 由图 3e 可知, 车辆右侧边缘应避免与右方障碍物发生碰撞, 则车辆右前边缘处的约束为:

当 $C_x < L_p$ 且 $B_x > L_p$ 时,

$$\tan \theta(L_p - C_x) + C_y - W/2 \geq 0 \quad (13)$$

根据上述对于泊车过程中碰撞分析所得的公式(3)、(5)、(7)、(9)、(11)、(13), 可以建立几何碰撞的约束函数用于车辆泊车路径规划。

2.1.3 泊车过程的曲线端点和运动学约束

首先, 在车辆进行停车前和完成停车时, 车辆的车身姿态线与车道线平行。换言之, 车辆在泊车起始点和泊车终止点时车身的方向角为 0, 泊车的起始点和终止点的一阶导数也为 0, 因此, 车辆泊车起始点和终止点的约束如下:

$$y_0 = a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + a_3x_0^3 + a_4x_0^4 + a_5x_0^5 \quad (14)$$

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 + a_4x_1^4 + a_5x_1^5 \quad (15)$$

$$\dot{y}_0 = a_1 + 2a_2x_0 + 3a_3x_0^2 + 4a_4x_0^3 + 5a_5x_0^4 = 0 \quad (16)$$

$$\dot{y}_1 = a_1 + 2a_2x_1 + 3a_3x_1^2 + 4a_4x_1^3 + 5a_5x_1^4 = 0 \quad (17)$$

由于在泊车的起始位置汽车尚未转向, 泊车终点位置汽车已完成转向, 转向轮转角为 0, 路径曲率也为 0, 其中曲率的表达式为:

$$k = \frac{|\ddot{y}|}{(1 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

由式(18)可得, 泊车路径曲率为 0, 即泊车起始点和终止点的二阶导数为 0, 即

$$\ddot{y}_0 = 2a_2 + 6a_3x_0 + 12a_4x_0^2 + 20a_5x_0^3 = 0 \quad (19)$$

$$\ddot{y}_1 = 2a_2 + 6a_3x_1 + 12a_4x_1^2 + 20a_5x_1^3 = 0 \quad (20)$$

车辆泊车过程中, 前轴转向角的范围和泊车轨迹的曲率是决定其灵活性的关键因素。若转向角或曲率过大或过小, 车辆将无法在实际泊车中进行准确地跟踪控制, 导致规划的路径失去对车辆运动的引导作用。因此, 在泊车路径规划中, 必

须研究考虑路径曲率和车辆转向角的约束, 以确保路径规划的实用性。

泊车过程中的轨迹最大曲率 k_{\max} 需要满足一定的约束条件, 以确保规划的路径是可跟踪的。具体的约束条件如下: k_{\max} 对应的最小曲率半径 $1/k_{\max}$ 要大于汽车最小转弯半径 R_{\min} , 即

$$k_{\max} < 1/R_{\min} \quad (21)$$

车辆在泊车过程中有着最大前轮转角的约束, 即车辆在泊车过程中前轮转角 δ_i 要小于等于最大前轮转角, 即

$$|\delta_i| \leq \varphi_{\max} \quad (22)$$

根据上述对于泊车过程中碰撞分析所得的公式(14)、(15)、(16)、(17)、(19)、(20)、(21)、(22), 可以建立车辆曲线端点和运动学的约束函数用于车辆泊车路径规划。

2.2 粒子群-遗传算法的路径规划

遗传算法改进粒子群算法流程如图 4 所示。

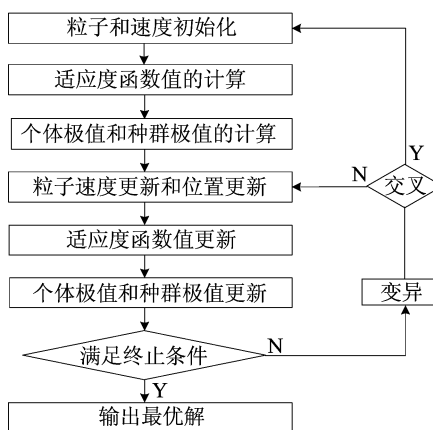


图 4 粒子群-遗传算法流程

粒子群优化算法通过初始化一组随机粒子并经过多次迭代寻找最优解, 在每次迭代中, 粒子根据个体最优解和整个群体历史最优解来更新自身状态。传统的粒子群算法是一种快速收敛、高精度的随机搜索算法, 但容易陷入局部最优解。为解决该问题, 本文针对每个粒子的适应度进行评估, 保留适应度高的粒子, 同时对适应度较低的粒子使用遗传算法的交叉操作和变异操作。遗传算法的交叉和变异操作能够对粒子群算法中的粒子进行重组和优化, 产生新的粒子, 从而拓宽搜索范围, 进一步增加种群的多样性, 增强算法的全局收敛能力, 防止种群陷入局部最优解。

自动泊车技术旨在减轻交通拥堵, 协助驾驶员迅速将车辆停放至泊车位, 从而缩短泊车时间。综合考虑上述约束, 本文选取最短泊车起始点的

横坐标 R_x 的最小值作为目标函数进行优化。

3 泊车控制仿真

以某款车型为例,实验车辆参数见表 1 所列。

表 1 实验车辆参数

参数	参数描述	数值
L/m	轴距	2.6
d/m	车身宽度	1.8
r/m	后悬长度	0.80
f/m	前悬长度	0.92
$v/(m/s)$	车速	1
R_{min}/m	最小转弯半径	4.3
φ_{max}/rad	最大前轮转角	0.524

选定车辆自身参数后,确定停车位尺寸为长 7.0 m、宽 2.2 m。选定 $y_0=2.3$ m 为泊车起始点后轴中心点的纵坐标, $x_1=1.0$ m、 $y_1=0$ m 作为泊车终止点后轴中心点的坐标。利用软件 MATLAB/Simulink 搭建自动泊车仿真平台进行仿真实验^[14-15],车辆泊车仿真结果如图 5 所示。图 5 展示了平行泊车过程中车辆车身轮廓的位置变化情况。

从图 5 可以看出,车辆从泊车起点出发,根据规划后的路径成功地从泊车起始点行驶至平行停车位中,在此过程中车辆的车身与周围物体未发生任何交集,即未发生碰撞。此外,泊车结束时,车辆完全停靠在停车位内,并满足自动泊车路径的避障约束和端点约束。仿真结果表明,本文算法可以对自动泊车路径规划问题进行求解并能得到满足要求的路径。

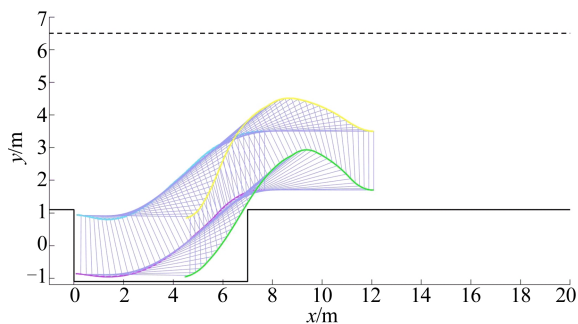


图 5 自动泊车仿真结果

车辆泊车过程中的轨迹对比如图 6 所示,可以看出,本文规划的泊车路径与车辆泊车过程中的实际轨迹有较高的吻合度,并且车辆行驶轨迹平滑,不会产生原地转向的情况,避免了轮胎磨损。

车辆泊车纵向误差曲线如图 7 所示。

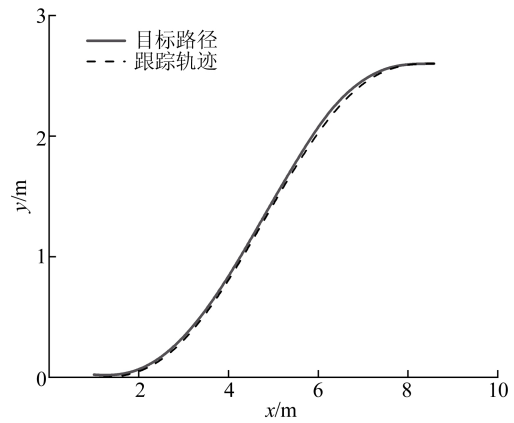


图 6 自动泊车过程中的轨迹对比

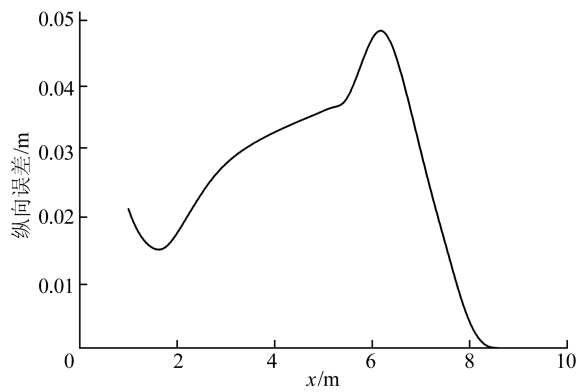


图 7 自动泊车过程中纵向误差曲线

从图 7 可以看出,车辆后轴中点在泊车过程中的纵向误差均不超过 0.050 m,最大误差为 0.048 m,误差较小,表明车辆可以较精准地跟踪目标路径。

车辆泊车过程中前轮转角曲线如图 8 所示。

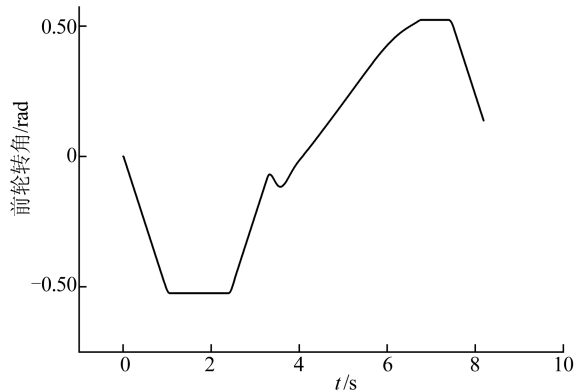


图 8 自动泊车过程中前轮转角曲线

从图 8 可以看出,整个车辆泊车过程中前轮转角的变化满足设置的最大值约束,并且整个过程无突变,车辆行驶顺滑。

车辆方位角对比曲线和车辆方位角绝对误差如图 9、图 10 所示。

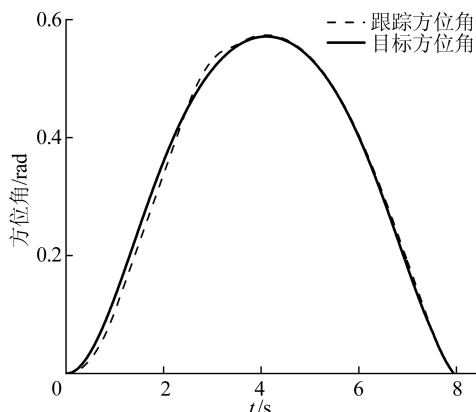


图 9 自动泊车过程中车辆方位角曲线

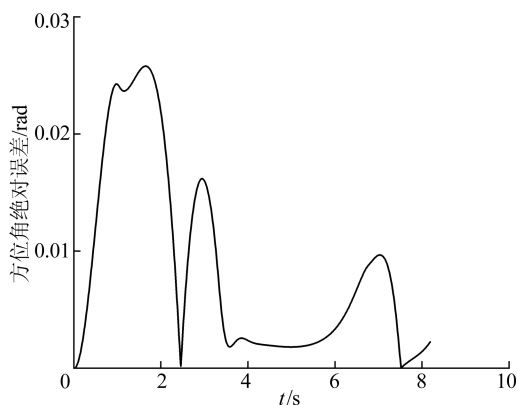


图 10 自动泊车过程中车辆方位角绝对误差

从图 9、图 10 可以看出,车辆泊车过程中方位角误差最大值为 0.025 rad,约为 1.5° ,不超过 0.030 rad,可以认为车辆跟踪精度较高。

4 结 论

本文提出了一种基于粒子群-遗传算法应用于平行泊车工况的路径规划算法。采用五次多项式曲线作为轨迹规划的基础,通过构建车辆运动学模型,综合考虑了泊车过程中的运动学约束、碰撞约束和曲线端点约束,将车辆泊车路径规划问题转化为最优控制问题;采用粒子群-遗传算法进行问题求解,获得路径曲线的泊车起始点坐标,并计算出路径曲线系数,得到满足约束要求的规划路径曲线;基于模型预测算法进行泊车路径跟踪,得到泊车过程中绝对误差最大为 0.048 m,车身方位角最大误差为 0.025 rad(约 1.5°),仿真结果显示:该控制方法能够精确地跟踪优化后的五次多项式曲线路径,泊车起始点车身姿态与车位线

平行,满足了泊车路径端点要求;同时避免了与周围障碍物的碰撞,符合泊车安全性和端点要求;前轮转角变化连续且曲线平滑,符合泊车过程汽车的运动学要求。仿真结果验证了本文算法可以为自动泊车提供有效的参考路径。

[参 考 文 献]

- [1] 江浩斌,沈峥楠,马世典,等. 基于信息融合的自动泊车系统车位智能识别[J]. 机械工程学报,2017,53(22):125-133.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] ZHANG D, LI S, YANG Q, et al. Optimization based trajectory planning of parallel parking with multiple constraints [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2015, 8(2): 413-418.
- [5] CHAND A, KAWANISHI M, NARIKIYO T. Application of sigmoidal gompertz curves in reverse parallel parking for autonomous vehicles[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12(9): 127.
- [6] 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.
- [7] 陈无畏,方玉杰,魏振亚. 基于遗传算法优化的双向垂直泊车路径规划[J]. 汽车工程,2017,39(11):1325-1332.
- [8] 林蓁蓁,李庆,梁艳菊,等. 一种基于路径规划的自动平行泊车算法[J]. 计算机应用研究,2012,29(5):1713-1715.
- [9] 曹彦博,颜京才,李旭升,等. 基于改进混合 A* 算法的自动泊车系统路径搜索方法[J]. 汽车技术,2023(6):37-41.
- [10] 侯晓阳,黄勇,孙思,等. 多约束平行泊车路径规划[J]. 汽车技术,2015(9):48-52.
- [11] 何朋声. 平行泊车路径规划及跟踪控制研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2020.
- [12] 钱立军,吴冰,仇多洋,等. 基于分段高斯伪谱法的平行自主泊车路径规划[J]. 汽车工程,2019,41(12):1401-1409.
- [13] 刘平,陈卓,刘明杰,等. 阶段约束下 Gauss 配点离散化平行车位自动泊车轨迹规划[J]. 汽车工程,2023,45(7):1163-1173.
- [14] MA S, JIANG H, HAN M, et al. Research on automatic parking systems based on parking scene recognition [J]. IEEE Access, 2017, 5: 21901-21917.
- [15] DAI C, ZONG C, CHEN G. Path tracking control based on model predictive control with adaptive preview characteristics and speed-assisted constraint [J]. IEEE Access, 2020, 8: 184697-184709.

(责任编辑 胡亚敏)