

基于反向差分进化算法优化的 平行泊车路径规划

徐茜茜,张美琪[†],郑竹安,孙博文,唐浩

(盐城工学院汽车工程学院,江苏 盐城 224051)

摘 要:为了提高平行泊车的效率、平稳性及乘坐舒适性,提出了基于反向差分进化算法优化的平行泊车路径规划方法。首先,综合考虑车辆位姿约束、边界避障约束和车辆性能约束,采用五次多项式规划了初始泊车路径。其次,针对初始路径无法兼顾曲率和长度的问题,以路径最大曲率和泊车始末位置之间的距离的加权和为适应度函数,利用反向差分进化算法对泊车初始位置坐标进行优化。最后,通过仿真实验对优化前后的路径进行仿真分析,并与差分进化算法优化后的路径进行对比。结果表明,此方法优化后的泊车路径使得车辆的停车姿态更理想、占用的行车道更小、能更好地平衡泊车曲率和泊车长度二者之间的关系,兼顾泊车舒适度及泊车效率。

关键词:自动泊车;平行泊车;路径优化;反向差分进化算法;五次多项式

中图分类号:TP29

文献标识码:A

Optimized Parallel Parking Path Planning Based on Opposition Differential Evolution Algorithm

XU Xixi, ZHANG Meiqi[†], ZHENG Zhu'an, SUN Bowen, TANG Hao

(College of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and smoothness of parallel parking and the comfort of the driver and passengers during the parking process, an optimized parallel parking path planning method based on the opposition-based differential evolution algorithm is proposed. Firstly, the initial parking path is planned with a fifth degree polynomial by comprehensively considering the vehicle position constraints, boundary obstacle avoidance constraints and vehicle performance constraints. Secondly, for the problem that the initial path cannot balance the curvature and length, taking the weighted sum of both the maximum curvature of the path and the distance between the start and end positions of the parking as the fitness function, then the coordinates of the initial parking position are optimized using the opposition-based differential evolution algorithm. Finally, simulation experiments are conducted to simulate and analyze the paths before and after optimization and compare them with the paths optimized by the differential evolution algorithm. The results show that the optimized parking path makes the parking posture of the vehicle more ideal, occupies a smaller driving lane, and can better balance the relationship between the path curvature and path length, taking into account both the parking comfort and parking efficiency.

Key words: automatic parking; parallel parking; path optimization; opposition-based differential evolution algorithm; fifth degree polynomial

随着汽车数量增长、停车环境变差,停车的难度也加大,自动泊车技术逐渐引起人们的广泛关注。它不仅能解决狭窄车位停车难的问题、减少碰撞事故的发生,还能缓解驾驶员停车时的紧张情绪,降低停车难度,提高驾驶舒适性。而路径规划作为自动泊车过程的重要技术,对泊车的效果具有决定性作用,因此深入研究路径规划对安全、顺畅、高效解决停车问题具有非常重要的意义。

近年来,国内外大量的科研人员不断从各个方面对泊车路径规划方法进行改进和研究。Chen 等^[1]提出了改进的反正切函数模型,建立停车约束,以车辆横摆角绝对值为目标函数,采用遗传算法对参数进行优化。Chen 等^[2]提出了一种基于改进免疫蛾焰算法的自动泊车路径优化方法,设计了以最短停车路径为优化目标的三次样条插值自动泊车路径优化模型。Lee 等^[3]提出了一种误差自适应采样的鲁棒停车路径规划方法,解决了感知不确定性条件下车辆无法安全停放到正确位置的问题,但该方法的路径曲率波动明显,舒适性表现不佳。

相对于上述路径规划方法,采用五次多项式规划路径的方法有着计算简单、实时性高、稳定可靠的优点,但是这种方法可能会出现路径曲率过大的问题,在行车道较窄的情况下停车效果较差。因此需要对此方法生成的初始路径进行优化,而原始差分进化算法容易陷入局部最优解,可能会出现路径过长的问题。针对这两个问题,在五次多项式规划初始路径的基础上,提出了一种基于反向差分进化算法优化的平行泊车路径规划方法,以期同时对路径长度及路径曲率进行权衡优化,既节约泊车空间又提高泊车舒适性。

1 运动学模型建立及参数选择

在泊车过程中,由于车辆车速较低,可以忽略车辆侧倾和轮胎滑移的情况,认为车轮只做滚动和转向运动^[4]。基于阿克曼转向原理,如图 1 所示,建立车辆运动学模型,由于车辆后轮的运动方向始终与车身的运动方向相同,所以选取后轴中心 O_r 作为参考点,车辆位置坐标为 (x, y) ^[5]。

根据图 1,得到如下微分方程:

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \tag{1}$$

由式(1)得出车辆的运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot \cos \theta \\ \dot{y} = v \cdot \sin \theta \\ \dot{\theta} = v \cdot \tan \varphi / (L - L_f - L_r) \end{cases} \tag{2}$$

式中, (x, y) 为车辆位置坐标; v 为车速; φ 为等效前轮转角; θ 为航向角; $L - L_f - L_r$ 为车辆轴距。

根据最大等效前轮转角 $\varphi_{\max}$ 和轴距 $L - L_f - L_r$, 可求得后轴中心对应的最小转弯半径 $R_{\min}$ ^[4]:

$$R_{\min} = (L - L_f - L_r) / \tan \varphi_{\max} \tag{3}$$

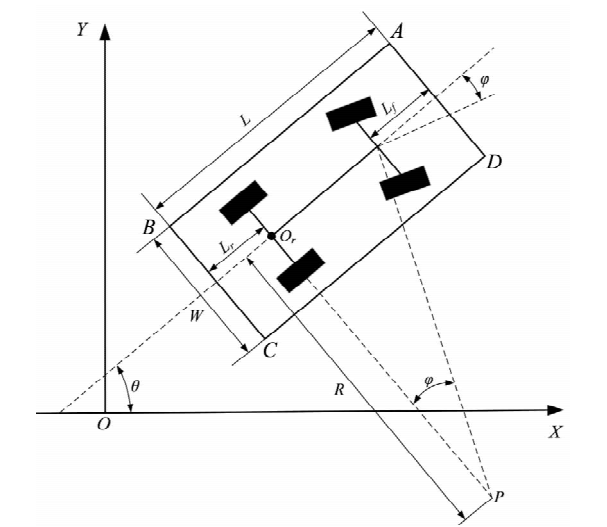


图 1 泊车运动学模型

停车主要分为垂直停车、倾斜停车和平行停车。与垂直停车和倾斜停车相比,平行停车更复杂,停车难度更大。因此,本文主要以平行停车为研究对象。《城市道路路内停车位设置规范》(GA/T 850—2021)^[6]中要求小型车的平行停车位最小车位长度为 6 m,最小车位宽度为 2.4 m,最小行车道路宽度为 3.5 m。结合此标准以及预设的安全距离,设置平行泊车环境参数,所用车辆参数及平行泊车环境参数如表 1 所示。

表 1 车辆参数及平行车位参数表

参数名称	参数符号	参数数值及单位
车长	L	4.155 m
车宽	W	1.645 m
轴距	$L - L_f - L_r$	2.405 m
前悬	L_f	0.800 m
后悬	L_r	0.950 m
前轮最大转角	$\varphi_{\max}$	33°
最小转弯半径	$R_{\min}$	3.703 m
车位长度	L_p	7 m
车位宽度	W_p	2.4 m
行车道路宽度	W_r	3.5 m

2 初始路径规划及约束条件分析

2.1 初始路径规划

合理规划参考路径,既可以避免泊车时与周围障碍物发生碰撞,又可以节约空间。

本泊车路径规划以多项式曲线为基础,为了兼顾泊车曲线光滑、计算难度小的要求,采用五次多项式曲线^[7]。在图 2 的坐标系下,以停车位右后方的角点 c 为坐标系原点 O ,设五次多项式曲线的表达式为:

$$y = k_0 + k_1 + k_2x^2 + k_3x^3 + k_4x^4 + k_5x^5 \quad (4)$$

式中, $k_0, k_1, \dots, k_5$ 为曲线表达式的系数, x 为车辆后轴中心点的横坐标, y 为车辆后轴中心点的纵坐标。

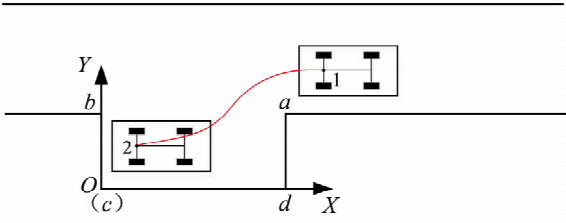


图 2 平行泊车基本工况

求解六个系数需要六个等式,通过对起始位置和终止位置的位姿进行约束,可以得到两点限制:第一,车辆在泊车初始位置车身要与车道线平行,终止位置的车身要水平停在车位内,即初始位置和终止位置车辆的航向角都应 为 0,即图 2 中 1、2 两点的一阶导数都为 0。第二,车辆在泊车初始位置时,未开始转向,在终止位置时,转向轮回正,即初始位置和终止位置车辆的转向轮转角都为 0,路径曲率为 0,根据曲率 K 的计算公式可得图 2 中点 1、2 处的二阶导数也为 0。综上,可以得到式(5):

$$\begin{cases} y_1 = k_1 + 2k_2x_1 + 3k_3x_1^2 + 4k_4x_1^3 + 5k_5x_1^4 = 0 \\ y_2 = k_1 + 2k_2x_2 + 3k_3x_2^2 + 4k_4x_2^3 + 5k_5x_2^4 = 0 \\ K = \frac{|y_1y_2|}{(1+y_{21}^2)^{3/2}} \\ y_1^* = 2k_2 + 6k_3x_1 + 12k_4x_1^2 + 20k_5x_1^3 = 0 \\ y_2^* = 2k_2 + 6k_3x_2 + 12k_4x_2^2 + 20k_5x_2^3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

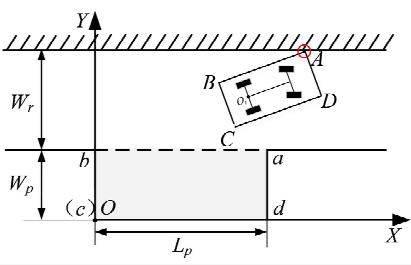
将泊车的起始点和终止点坐标带入式(4)又可得到两个等式,随后结合式(5)即可获得一个初始的泊车路径轨迹^[8]。

2.2 约束条件分析

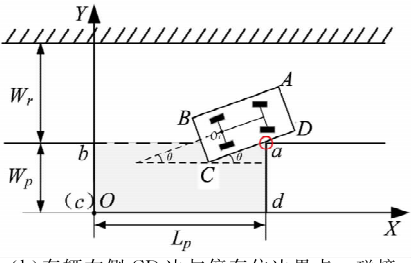
在同一场景下,泊车的终止点是固定的,但是

起始点有一个可选区域,这个区域是根据车辆的避障约束,以及车辆的性能约束来确定的。

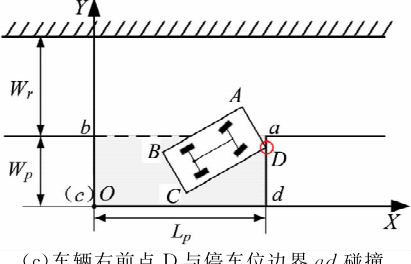
在避障约束方面,考虑图 3 所示的四种碰撞情况:第一,车身还未开始进入停车位,车辆左前点 A 与行车道边界发生碰撞。第二,车身未完全进入停车位,车辆右侧 CD 边与停车位边界点 a 发生碰撞。第三,车身回正时,车辆右前顶点 D 与停车位边界 ad 发生碰撞。第四,车辆右后顶点 C 与停车位边界 cd 发生碰撞。



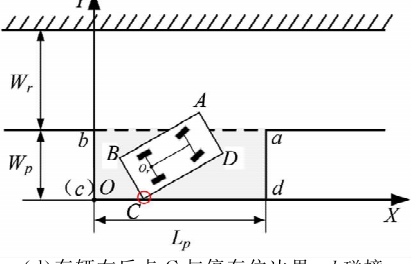
(a) 车辆左前点 A 与行车道边界碰撞



(b) 车辆右侧 CD 边与停车位边界点 a 碰撞



(c) 车辆右前点 D 与停车位边界 ad 碰撞



(d) 车辆右后点 C 与停车位边界 cd 碰撞

图 3 四种碰撞情况示意图

为了避免碰撞,需要设置一些约束条件,留出安全距离。针对图 3(a)的情况,在车辆左前点 A 与行车道边界之间留出安全距离 L_{S1} ;针对图 3(b),在车位边界点 a 的竖直上方留出安全距离

L_{S2} ; 针对图 3(c), 车辆右前顶点 D 要始终在车位边界 ad 的内侧, 且保留一定安全距离 L_{S3} ; 针对图 3(d), 车辆右后顶点 C 要始终在车位边界 cd 的内侧, 且保留一定安全距离 L_{S4} 。综上, 可以得到式(6):

$$\left\{ \begin{array}{l} y_A = y_{O_r} + (L - L_r) \sin \theta + \frac{W \cos \theta}{2} \leqslant \\ \quad W_r + W_p - L_{S1}, x \in [0, x_1] \\ y_C + (L_p - x_C) \tan \theta - W_p \geqslant L_{S2}, x_C \leqslant \\ \quad L_p \cap x_D \geqslant L_p \\ x_D = x_{O_r} + (L - L_r) \cos \theta + \frac{W \sin \theta}{2} \leqslant L_p - L_{S3} \\ y_D = y_{O_r} + (L - L_r) \sin \theta - \frac{W \cos \theta}{2} > 0 \\ y_C = y_{O_r} - L_r \sin \theta - \frac{W \cos \theta}{2} > 0, L_{S4} \leqslant \\ \quad x_C \leqslant L_p - L_{S3} \end{array} \right. \quad (6)$$

在车辆的性能约束方面, 由于车辆的转向性能受其转向系统结构的限制, 所以规划的路径曲线的曲率 K 不宜过大, 要小于等于车辆最小转弯半径的倒数, 可以得到式(7):

$$|K| \leqslant K_{\max} = \frac{1}{R_{\min}} \quad (7)$$

3 基于反向差分进化算法的泊车路径优化

3.1 反向差分进化算法

差分进化算法(Differential Evolution, DE)是一种基于群体差异的启发式随机搜索算法^[9]。主要通过差分和交叉操作来生成新的解决方案, 这样不仅计算效率较高, 而且能够在搜索过程中探索更广泛的解空间。因此本文选择差分进化算法对五次多项式规划的初始路径进行优化。差分进化算法主要有初始化、变异、交叉和选择这几个步骤^[10]。

但是原始差分进化算法有着易陷入局部最优解、收敛速度过慢等问题, 因此将反向学习(Opposition-Based Learning, OBL)概念引入到差分进化算法中, 构成了反向差分进化算法(Opposition-based Differential Evolution, ODE)。OBL 的核心思想是在原始解和对立解之间进行选择 and 更新, 以找到最优解。在搜索空间中引入对立的解, 能提高搜索的全局性和多样性。OBL 概念主要应用在

原始差分进化算法的种群初始化阶段和迭代跳跃阶段^[11]。

在种群初始化阶段, 要在给定的静态变量区间 $[a_j, b_j]$ 中使用 OBL 机制, 记随机初始化的种群为 X , 反向种群 OX 的计算公式为^[12]:

$$OX_{i,j} = a_j + b_j - X_{i,j} \quad (8)$$

式中, $i=1, 2, \dots, N_p, j=1, 2, \dots, D$ 。

随后从集合 $\{X \cup OX\}$ 中选出前 N_p 个最好的个体作为初始种群 X_0 。

在迭代跳跃阶段, 当随机数 rand 小于预先给定的跳跃概率 J 时, 种群进行反向迭代跳跃, 这一阶段不再使用静态区间, 而是在一个动态的搜索范围计算反向种群, 公式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} OX_{i,j} = a_j(g) + b_j(g) - X_{i,j} \\ a_j(g) = \min_{1 \leqslant j \leqslant N_p} (x_{i,j}(g)) \\ b_j(g) = \max_{1 \leqslant j \leqslant N_p} (x_{i,j}(g)) \end{array} \right. \quad (9)$$

式中, $a_j(g)$ 和 $b_j(g)$ 分别表示当前种群中第 j 维上最小值和最大值, g 表示迭代次数。

3.2 泊车路径优化

由于轨迹的终止位置是固定的, 因此想找到一个轨迹最优解, 就是要找到轨迹最优初始位置。为了权衡泊车路径长度和泊车平稳性, 采用反向差分进化算法可以将求取泊车最优初始位置的问题转化为算法中适应度函数的最小化问题。

设计适应度函数时, 需要考虑泊车路径的长度及泊车过程中的平稳性, 泊车终止点 2 的坐标 (x_2, y_2) 固定, 为 $(1, 1.35)$, 那么泊车初始位置 1 的坐标 (x_1, y_1) 就影响路径长度, 始末位置之间的距离公式如式(10)所示:

$$l_{12} = \sqrt{(x_1 - 1)^2 + (y_1 - 1.35)^2} \quad (10)$$

l_{12} 越小, 泊车路径越短, 泊车效率越高, 但是路径的最大曲率也相应会变高。而在泊车过程中, 路径的曲率大小影响汽车的稳定性。具体来说, 当路径的最大曲率 $K_{\max}$ 较小时, 汽车转向所需的角也相应较小, 此时泊车的稳定性就越高。

综上, $K_{\max}$ 和 l_{12} 之间存在矛盾, l_{12} 越大, $K_{\max}$ 越小, 设计适应度函数时, 既要构建优化函数以获得最平滑的平行停车路径, 又需要权衡路径的长度, 因此, 适应度函数为:

$$\text{fitness}_{\min} = \lambda_1 K_{\max} + \lambda_2 l_{12} \quad (11)$$

式中, λ_1 和 λ_2 为权重系数, 取 λ_1 为 36, λ_2 为 1。适应度函数值越小, 说明初始位置坐标值越优, 带

入五次多项式曲线表达式求得轨迹的最大曲率越小、路径越短。

反向差分进化算法的参数选择方面,通常是按经验在参数取值范围内选取一个固定值,参数选取如表 2 所示。

基于反向差分进化算法的水平泊车路径优化流程如下:(1)获取车位环境信息、车辆的位姿约束、碰撞约束、性能约束,确定种群边界。(2)初始化种群 X ,设置如表 2 所示的基本参数。(3)使用反向学习策略将种群更新为 X_0 。(4)根据适应度函数、约束条件、变量范围计算每个个体的适应度。(5)对种群采用差分策略进行变异,然后进行交叉操作,再根据计算出的适应度函数值,采用贪婪选择策略进行选择操作,选择较优的个体。(6)判断随机数是否小于跳跃概率,如果小于,则再次使用反向学习策略更新种群,然后进入下一步;否则直接进入下一步。(7)判断是否达到最大进化代数;若达到,则进入下一步,若没达到则回到(5)。(8)输出最优结果,路径规划结束。流程图如图 4 所示。

表 2 反向差分进化算法参数

参数名称	参数符号	参数数值及单位
种群规模	N_P	100
种群维度	D	2
最大函数评估次数	M	50D
进化代数	g	11
缩放因子	F	0.5
交叉概率	CR	0.9
跳跃概率	J_r	0.3

4 仿真及分析

采用 MATLAB 2021b 对水平泊车路径规划进行仿真,为了凸显本研究中差分进化算法在路径优化方面的卓越性,对优化前的路径、原始差分进化算法优化后的路径和本文采用的反向差分进化算法优化后的路径进行仿真比较。根据表 1 和表 2 的参数、图 4 的流程图,编写相应的文件,得出的仿真结果如图 5~图 6 所示:

图 5 中,(a)是优化前的泊车仿真图,(b)是原始算法优化后的泊车仿真图,(c)是本文算法优化后的泊车仿真图,通过三种泊车轨迹可以看出,在停车过程中,三种方法的车辆轮廓线均不与车位边界线相交,车头也始终没有越过行车道路边界线,说明满足碰撞约束,能够安全、准确地完成泊车。

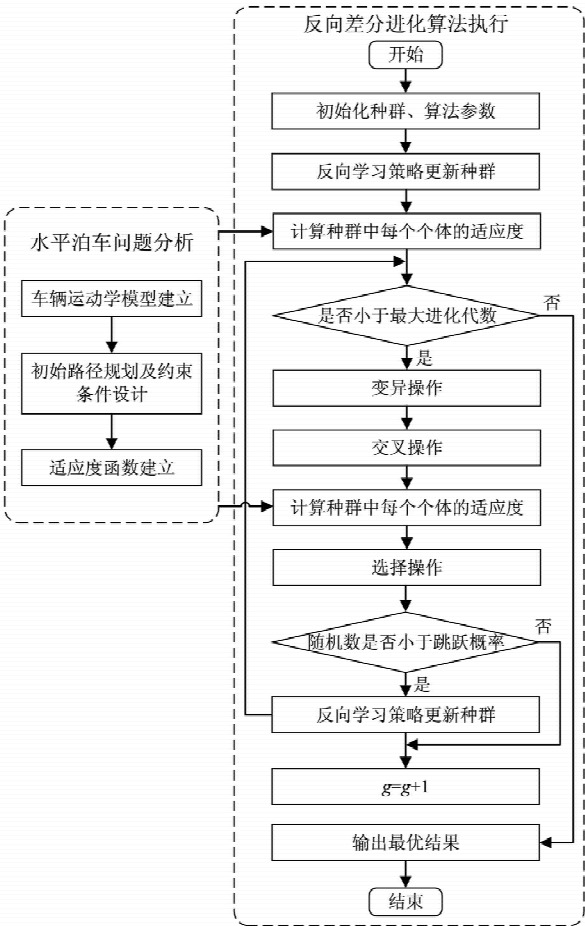


图 4 基于反向差分进化算法的水平泊车路径优化流程

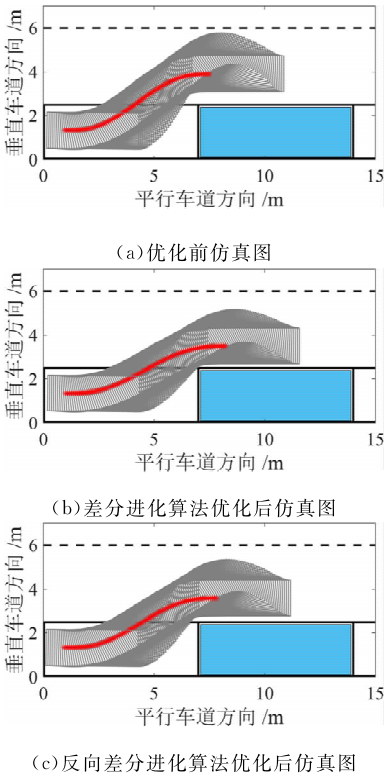
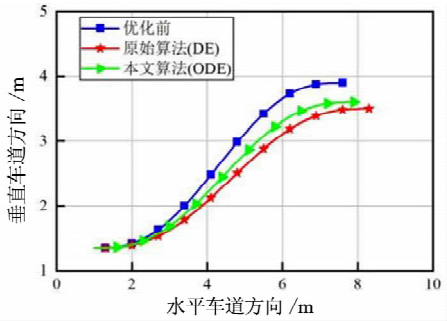
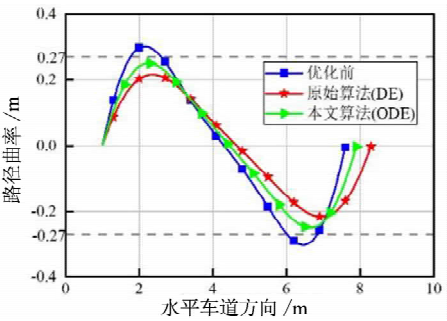


图 5 水平泊车仿真图

优化前后的对比如图 6 所示,图 6 中,(a)为路径轨迹对比图,(b)为路径曲率对比图。由(b)可以看出,三种方法得到的路径曲率过渡平稳,无突然变化,说明停车过程是连续的,避免了车辆原地转向、减少了轮胎磨损。



(a)路径轨迹对比图



(b)路径曲率对比图

图 6 优化前后对比图

综合图 5、图 6 的信息,从路径长度和路径曲率这两个评价标准来看:优化前的初始路径虽然路径长度最短,但是路径曲率已经超出了车辆性能允许的最大值(0.27),且占用的行车道最宽;原始算法(DE)优化后的路径虽然路径曲率最小,但是陷入了局部最优,导致路径长度最长且车身几乎碰到停车位的角点;而本文使用的算法(ODE),能综合考虑路径长度和路径曲率这两个方面的要求,寻求最优解,优化后的路径最大曲率为 0.25,满足最大曲率约束,优化后的泊车路径长度较原始算法(DE)优化后的路径长度缩短了 17.54%。总之,优化后的泊车路径使得车辆的停车姿态更理想、占用的行车道更小、能更好地平衡泊车曲率和泊车长度二者之间的关系,兼顾泊车舒适度及泊车效率。

5 结 论

本文根据水平泊车工况,提出了基于反向差分进化算法优化的水平泊车路径规划方法。采用五

次多项式规划初始路径,并建立了约束条件来限定算法中的种群边界。权衡路径曲率及长度建立了算法的适应度函数,利用算法对泊车初始位置坐标进行优化,并计算出优化后的路径曲线。通过仿真及对比结果可知,此方法得到的泊车轨迹能更好地平衡路径曲率和路径长度二者之间的关系,既提高了泊车舒适性又节约了泊车空间。

参考文献

[1] CHEN Q, GAN L, CHEN B, et al. Parallel parking path planning based on improved arctangent vunction optimization [J]. International Journal of Automotive Technology, 2023, 24(1): 23—33.

[2] CHEN Y, WANG L, LIU G, et al. Automatic parking path optimization based on immune moth flame algorithm for intelligent vehicles [J]. Symmetry — Basel, 2022, 14 (9): 1923.

[3] LEE S, LIM W, SUNWOO M. Robust parking path planning with error-adaptive sampling under perception uncertainty [J]. Sensors, 2020, 20(12):3560.

[4] 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(6): 30—36.

[5] 胡勤明, 王金刚, 张小俊. 五次多项式优化的平行泊车路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(14): 291—298.

[6] 城市道路路内停车位设置规范:GA/T 850—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[7] 于蕾艳, 王显宇, 吴宝贵, 等. 无人驾驶汽车平行泊车路径规划优化与跟踪 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 519—523.

[8] 郑福民, 段敏. 差分进化算法寻优下的自动垂直泊车路径规划方法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(2): 44—51.

[9] ABBAS Q, MALIK K M, SAUDAGAR A K J, et al. Convergence track based adaptive differential evolution algorithm (CTbADE) [J]. Cmc-Computers Materials &. Continua, 2022, 72(1): 1229—1250.

[10] WISITTIPANICH W, PHOUNGTHONG K, SRISUWAN-NAPA C, et al. Performance comparison between particle swarm optimization and differential evolution algorithms for postman delivery routing problem [J]. Applied Sciences — Basel, 2021, 11(6):2703.

[11] YUE Y, ZHOU Y, XU L, et al. Optimal defense strategy selection algorithm based on reinforcement learning and opposition-based learning [J]. Applied Sciences—Basel, 2022, 12(19):9594.

[12] KANG D W, MO L P, WANG F L, et al. Adaptive harmony search algorithm utilizing differential evolution and opposition-based learning [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(4): 4226—4246.