

基于图搜索与数值优化方法的分层轨迹规划方法

周兵[†], 黄治坤, 柴天, 谭捷, 张苗苗
(湖南大学机械与运载工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:针对结构化道路场景中多约束的轨迹规划问题,提出一种路径和速度协同搜索、解耦优化的分层轨迹规划方法.上层初始轨迹规划器考虑动态障碍物风险场与时空信息,构造时空代价地图,通过三维A*算法搜索得到安全可行的初始轨迹,保证初始轨迹解的质量.下层运动轨迹规划器将轨迹规划解耦为路径规划和速度规划,以最小曲率、最大速度以及舒适性等为目标,采用数值优化算法构建路径和速度样条优化模型,使其在避障过程中能够充分发挥车辆的动力性能,同时保证驾乘舒适性,并以局部时空隧道思想简化约束条件,提高求解效率.通过试验验证本文提出的方法具有较好的行驶效率、舒适性以及实时性.

关键词:三次样条函数;优化;轨迹规划;三维A*算法;数值方法

中图分类号:TP242;U463.6 **文献标志码:**A

Hierarchical Trajectory Planning Method Based on Graph Search and Optimization Method

ZHOU Bing[†], HUANG Zhikun, CHAI Tian, TAN Jie, ZHANG Miaomiao
(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A hierarchical trajectory planning method with path and speed co-search and decoupling optimization is proposed to address the multi-constraint trajectory planning problem in structured road scenarios. To ensure the quality of the initial trajectory solution, the upper initial trajectory planner constructs the Spatio-temporal cost map by taking into account the risk field and spatio-temporal information of dynamic obstacles, and searches for the safe and feasible initial trajectory using a three-dimensional A* algorithm. The lower trajectory planner implements decoupling for the trajectory planning as path planning and velocity planning with the minimum curvature, maximum speed, and comfort as the goal. A numerical optimization algorithm is used to construct a spline optimization model for the path and speed, in order that in the process of obstacle avoidance it can give full play to the dynamic performance of the vehicle and at the same time improve the ride comfort, simplify the constraint conditions on local space-time tunnel thought, and improve solving efficiency. The experiment results show that the proposed method has better driving efficiency, comfort, and real-time performance.

Key words: cubic spline function; optimization; trajectory planning; three-dimensional A* algorithm; numerical approach

* 收稿日期:2021-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875184), National Natural Science Foundation of China(51875184);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40025), Natural Science Foundation of Hunan Province(2019JJ40025)

作者简介:周兵(1972—),男,贵州习水人,湖南大学教授,博士

[†] 通信联系人, E-mail:zhou_bingo@163.com

在自动驾驶系统中,轨迹规划模块对于车辆的驾驶安全和行驶效率有着至关重要的作用.然而在复杂、动态的场景中,轨迹规划问题会变得尤为困难^[1].

为简化轨迹规划命题,常将规划任务从笛卡尔坐标转换至自然坐标系(Frenet坐标系)中,并且组合多种规划算法构建分层轨迹规划方法^[2].Lim等人^[3]基于采样方法和S-T图得到候选路径集与各路径对应的速度信息,但该方法生成的候选路径有限,存在概率完备性不足的问题,无法保证初始解的最优性.Zheng等人^[4]基于四次贝塞尔曲线和危险势场规划无碰撞轨迹,采用三次样条函数和平均速度最大化目标进行速度求解,虽然考虑了障碍物的危险性,但求解轨迹欠缺时空最优性.彭晓燕等人^[5]设计代价函数来获得最佳路径,并通过一种新的坐标转换计算方式提高实时性,但未进行速度规划的分析.Moghadam等人^[6]基于Frenet空间设计了长期决策与短期规划框架,其中通过优化行车通道的Lattices算法生成时空轨迹,但未考虑障碍物的风险场.Werling等人^[7]提出采样算法和多项式曲线算法结合的方案,在自然坐标系中通过成本函数的形式分别优选出横向最优轨迹和纵向最优轨迹从而合成得到规划轨迹,然而该方法可能会导致转换到笛卡尔坐标后的轨迹连续性不佳,车辆频繁转向.Xu等人^[8]采用Werling等人坐标转换框架和轨迹解耦处理方式,以数值优化算法分别对路径和速度进行优化,但是其计算复杂度较大,无法用于高频局部规划.Meng等人^[9]将时空轨迹规划问题,解耦为二维路径搜索与优化和速度搜索与优化两部分,但在路径搜索过程中未考虑自车与障碍物的速度信息,可能使路径决策结果收缩到局部解.Fan等人^[10]结合动态规划算法和采样方法构建轨迹解耦框架,分别搜索路径和速度的初始解,然后分别优化路径和速度曲线,但在优化过程中忽略了曲率的连续性约束,可能会导致底层跟踪控制器的跟踪性能不佳.Zhang等人^[11]采用分段加速度算法,在Frenet坐标下构建三次样条曲线形式的路径优化模型,并通过近似处理Frenet坐标系中的曲率情况从而简化模型,但规划过程中没有考虑车辆形状,仍无法保证转换到笛卡尔坐标后的路径有可行性.

为保证路径与速度同时最优,Li等人^[12]利用改进的RRT方法搜索三维 (s, l, t) 空间的初始粗轨迹,然后使用二次规划的方法进行路径和速度的耦合优化,但在搜索粗轨迹时未考虑动态障碍物的风险场,

导致风险传递到下层规划器致使最终轨迹安全性较差.Xin等人^[13]构建时空笛卡尔坐标系 (x, y, t) ,利用改进的A*算法搜索出粗轨迹,再利用MPC进行轨迹优化,但在笛卡尔坐标系上构建的时空坐标系难以适应道路存在曲率的工况.类似地,Zhang等人^[14]通过使用Dijkstra搜索,但由于缺乏启发函数,搜索时间较长.分析上述研究发现存在以下不足:针对轨迹决策,路径搜索和速度搜索解耦会降低初始解质量,路径搜索中缺乏时间维度的信息致使轨迹陷入局部解甚至无解;针对轨迹优化,在Frenet坐标系下进行规划求解仅满足Frenet坐标系下的轨迹性质,没有考虑轨迹在笛卡尔坐标下的曲率情况,导致将求解轨迹转换到笛卡尔坐标系下时其平滑性不佳,同时在数值优化过程中,须保证求解效率,以满足系统实时性要求.

本文提出路径和速度协同搜索、解耦优化的分层轨迹规划方法,在上层规划器中,综合考虑场景的空间维度和时间维度信息,对路径和速度的初始解进行协同搜索得到初始轨迹解,保证初始解的最优性.下层规划器先将得到的初始解进行解耦,接着进行路径规划和速度规划.路径规划中构建的路径优化算法可在Frenet坐标系中最小化笛卡尔坐标系下的曲线曲率以保证舒适性;速度规划中基于S-T图构建二次规划形式的优化模型保证行驶效率与安全,同时在局部时间窗中对优化模型的碰撞约束条件进行简化处理,以提高求解运行效率.

1 分层轨迹规划方法

本文提出的轨迹规划整体框架如图1所示.由地图定位模块提供的车辆位置和道路数据信息、感知预测模块提供周围障碍物的运动位置信息,轨迹规划器包含上层初始轨迹规划器和下层运动轨迹规划器两部分.上层初始轨迹规划器将规划空间进行离散处理,基于图搜索的方法生成安全可行的初始轨迹.下层运动轨迹规划器以初始轨迹为初始解,设计样条曲线形式的路径曲线和速度曲线,基于数值优化方法求解出安全舒适的轨迹.

1.1 基于图搜索的初始轨迹规划器

初始轨迹规划器主要考虑道路、障碍物等环境因素,对其离散化处理构建搜索空间.如图2所示,以具有动态障碍物和静态障碍物的车辆运动场景进行初始轨迹规划算法的研究.

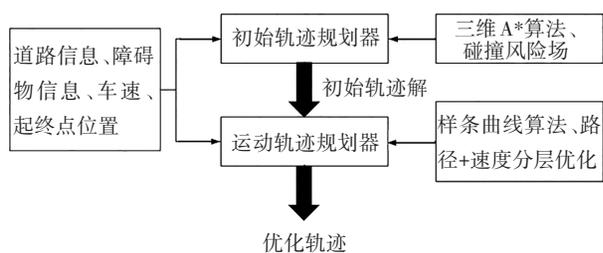


图 1 轨迹规划整体框架

Fig.1 Overall framework for trajectory planning

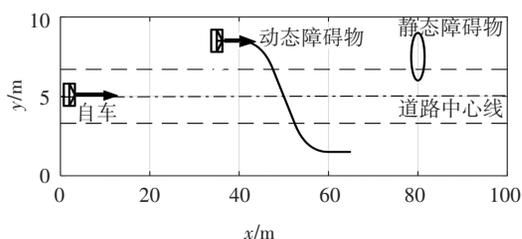


图 2 避障场景示意图

Fig.2 Schematic diagram of obstacle avoidance scene

将道路形状从笛卡尔坐标系 (x - y 坐标系) 转换为 Frenet 坐标系 (s - q 坐标系), 并增加时间维度 t , 从而得到如下形式的三维空间 Φ [15]:

$$\Phi = \{ [s, q, t]^T | s, t \in \mathbf{R}^+, q \in W \} \quad (1)$$

式中: s 为道路的纵向位置; q 为道路的横向位置; t 为时间; W 为道路横向宽度。

空间 Φ 的通行性由障碍物时空信息决定. 障碍物所占据的空间位置为不可通行状态, 对于动态障碍物而言, 由于其存在运动性, 周围区域具有碰撞风险 [12], 影响该空间的通行效果, 故需考虑其碰撞风险以构建安全合理的搜索空间. 通过上层定位感知预测模块, 根据文献 [16], 将动态障碍物在 t 时刻对 Frenet 坐标系 s - q 平面周围栅格 $n_{(s,q,t)}$ 产生的碰撞风险值定义为:

$$E_{v_{(s,q)}} = \frac{GM}{r_{(s,q)}} \exp[kvcos(\theta)] \quad (2)$$

式中: $E_{v_{(s,q)}}$ 表示 t 时刻下动态障碍物对周围栅格产生的碰撞风险值; $r_{(s,q)}$ 为周围栅格 $n_{(s,q,t)}$ 到障碍物质心距离; G, k 为大于 0 的比例常数因子 (本文中 G, k 分别取 0.001 和 0.5); M 为动态障碍物的质量; v 为动态障碍物的运动速度; θ 为动态障碍物运动方向与 $r_{(s,q)}$ 方向之间的夹角. 由式 (2) 获得的碰撞风险分布如图 3 所示.

构建如图 2 所示避障场景的搜索空间 (图 4). 其中深色栅格是与障碍物相交的栅格, 是不可通行的

栅格, 浅色栅格是可通行但具有碰撞风险的栅格.

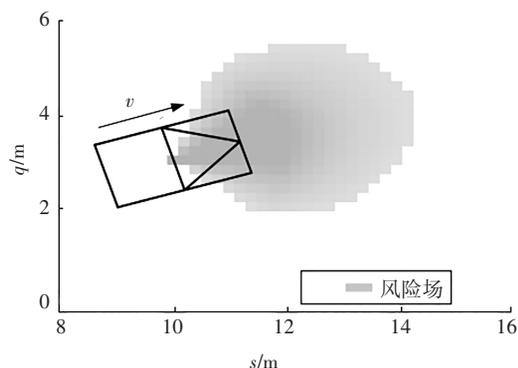


图 3 碰撞风险分布示意图

Fig.3 Diagram of collision risk distribution

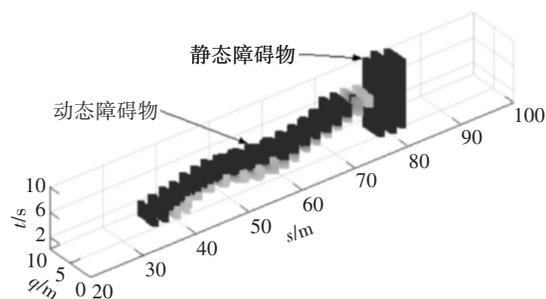


图 4 搜索空间

Fig.4 The search space

针对图 4 所示的搜索空间, 设计启发式的三维 A* 搜索算法进行高效搜索, 其算法流程图如图 5 所示. 对于搜索方向的确定, 由于时间不可逆, 故在 t 方向为严格递增, 而在 s, q 方向则由简化的车辆转向特性确定其扩展方向.

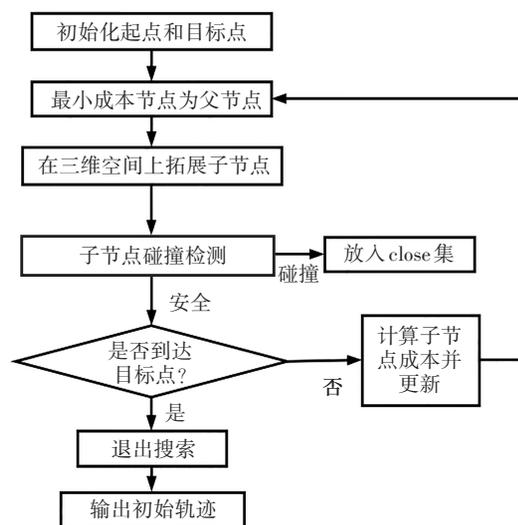


图 5 三维 A* 搜索算法流程图

Fig.5 Flow chart of 3D A* search algorithm

配置当前栅格的扩展矩阵为:

$$\begin{bmatrix} n_{next}^1 \\ n_{next}^2 \\ n_{next}^3 \\ n_{next}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta q \\ \Delta t \end{bmatrix} + n_{(s,q,t)} \quad (3)$$

式中: $n_{next}^1 \sim n_{next}^4$ 为从当前栅格 $n_{(s,q,t)}$ 扩展所得的邻近栅格; $[\Delta s \ \Delta q \ \Delta t]^T$ 为栅格离散间距, 本文中 Δs 取 1 m, Δq 取 0.2 m, Δt 为 Δs 与期望车速的比值. 通过评价函数 $F(n)$ 来计算车辆移动到当前离散栅格的成本^[17], 其计算公式如下:

$$F(n_{(s,q,t)}) = G(n_{(s,q,t)}) + H(n_{(s,q,t)}) + k_e E_v(n_{(s,q,t)}) \quad (4)$$

式中: $n_{(s,q,t)}$ 为当前栅格; $G(n_{(s,q,t)})$ 为沿着所规划出的路径从起点到当前栅格所花费的实际成本; $H(n_{(s,q,t)})$ 为启发函数, 用来预估当前栅格到终点将花费的成本; $E_v(n_{(s,q,t)})$ 为当前栅格的碰撞风险值, k_e 为风险影响因子. 由三维 A* 算法搜索所得栅格的集合为 $\{(s_i, q_i, t_i) | i = 1, 2, \dots, n+1\}$, 将这些栅格连接构成可行初始轨迹, 如图 6 所示.

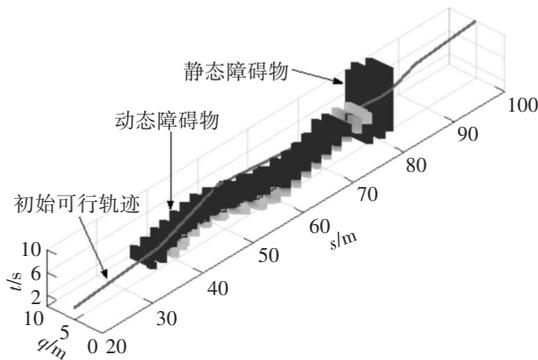


图 6 可行初始轨迹搜索结果

Fig.6 Feasible initial trajectory search results

1.2 基于数值优化的运动轨迹规划器

上层初始轨迹规划器规划出的初始轨迹解, 包含平滑性较差的路径位置信息和粗略的路径点配时空信息, 需通过数值优化来求解光滑的轨迹. 为减轻运动轨迹规划器的求解负担, 可将轨迹规划解耦为路径规划和速度规划^[18].

1.2.1 路径规划

1.2.1.1 路径规划转换关系

高效的路径规划算法通常是在 Frenet 坐标系下进行的, 然而该优化方式会带来 2 个问题: 一是在 Frenet 坐标中求解的平滑路径转换到笛卡尔坐标系

下, 其平滑性无法得到有效保障; 二是 Frenet 坐标无法考虑笛卡尔坐标系下的曲率信息, 求解路径转换到笛卡尔坐标系下后, 其曲率可能增大从而导致舒适性较差. 基于此, 本文提出最小化路径曲率的路径优化算法, 构建笛卡尔坐标系下的三次样条曲线作为待求解路径, 推导该路径曲率与 Frenet 坐标系横向位移的关系, 以横向位移作为优化参数, 建立优化模型, 便可在 Frenet 坐标系中最小化笛卡尔坐标系下的路径曲率, 保证得到笛卡尔坐标系下平滑的、曲率最小化的路径. 在路径优化阶段以初始轨迹形状作为初始路径解进行初始化, 得到所需优化的路径, 在此简称为优化路径, 如图 7 中实线所示.

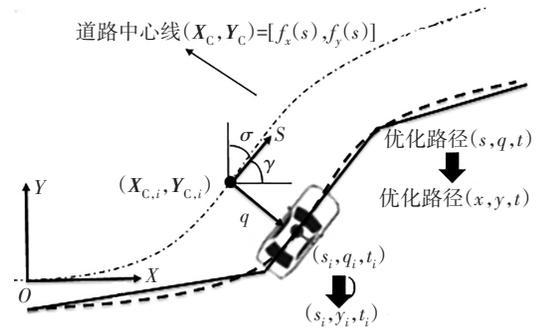


图 7 Frenet 空间与笛卡尔空间转换示意图

Fig.7 Frenet space and Cartesian space conversion diagram

由文献[9]可知, 根据道路中心线纵向距离 s 和法线距离 q 将 Frenet 空间的路径表示成笛卡尔空间的路径, 若道路中心线形式为 $(X_c, Y_c) = (f_x(s), f_y(s))$, 则优化路径在笛卡尔坐标系下的位置矩阵可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = X_c + \text{diag}[\boldsymbol{\gamma}]Q \\ \mathbf{y} = Y_c + \text{diag}[\boldsymbol{\sigma}]Q \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{x}, \mathbf{y} 为优化路径在笛卡尔坐标下的位置向量; $\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\sigma}$ 分别对应道路中心点的倾斜角向量与其互余角向量, 由道路中心线斜率确定; $\text{diag}[\boldsymbol{\gamma}], \text{diag}[\boldsymbol{\sigma}]$ 为常量矩阵; Q 为各节点对应到道路中心线的法向距离向量, 是 Frenet 空间下路径优化过程中的优化变量. 采用三次样条曲线拟合优化路径, 如图 7 中虚线所示, 拟合公式为:

$$\begin{cases} x_n(s) = a_n + b_n s + c_n s^2 + d_n s^3 \\ y_n(s) = e_n + f_n s + g_n s^2 + h_n s^3, s \in [0, 1] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a_n \sim h_n$ 为待求系数. 对于式(6)中的任一组方程组, 由函数连续性和微分连续性, 考虑每段样条曲线端点处的二阶导数一致性, 再添加自然边界端点条件可求解系数的线性方程组^[19]如下:

最终构建碰撞约束总集合 $F = \{F^1, \dots, F^{n+1}\}$. 针对碰撞约束总集合 F 中的非空子集构建碰撞安全约束函数如式(17)所示.

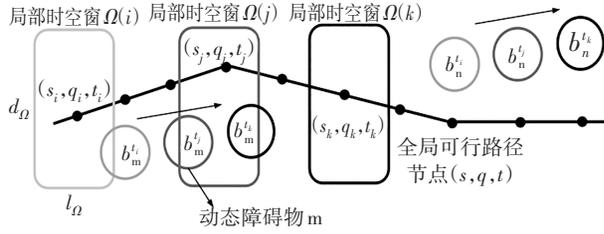


图8 局部时空窗示意图

Fig.8 Schematic diagram of local temporal window

$$g_k^{F^i} = (R_{ego} + b_m^r + \Delta r)^2 - [(x_i - b_m^x|_{F^i})^2 + (y_i - b_m^y|_{F^i})^2] = (R_{ego} + b_m^r + \Delta r)^2 - [(X_{C,i} + \gamma_i q_i - b_m^x|_{F^i})^2 + (Y_{C,i} + \sigma_i q_i - b_m^y|_{F^i})^2] \leq 0, \quad i \in [1, n+1], m \in F^i \quad (17)$$

式中: $g_k^{F^i}$ 为子集 F^i 中的碰撞安全约束函数, k 为子集 F^i 的元素数量; $b_m^x|_{F^i}$, $b_m^y|_{F^i}$, b_m^r 为子集 F^i 中障碍物 m 的位置坐标和半径; x_i, y_i 为优化路径在局部时空窗的笛卡尔坐标, 由式(5)进行转换; R_{ego} 为自车轮廓模型半径; Δr 为安全距离.

考虑式(15)、式(16)和式(17)所描述的目标函数和约束函数, 将路径规划问题描述成一个非线性优化问题, 得到优化模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & J_{\text{motion}}(X_1, X_2, \dots, X_{n+1}) \\ \text{s.t.} \quad & g_k^{F^i} \leq 0, \quad F^i \in F \\ & g_j^d \leq 0, \quad j \in [1, n+1] \end{aligned} \quad (18)$$

至此, 将优化空间转化至 Frenet 空间, 优化参数维数为一维横向控制变量 Q 序列, 与文献[9]相比, 在路径优化中使用的三维优化参数, 降低了优化参数维度, 同时也保证笛卡尔坐标系中路径的连续性和舒适性; 采用隧道化思想的障碍物碰撞检测方式, 减少障碍物约束数目, 减少优化参数和约束条件, 提高求解速度.

1.2.2 速度规划

经过路径规划求解得到平滑的路径, 需要通过速度规划为其进行时间配置. 在速度规划中, 常采用 S - T 图(路径-时间障碍物图)分析工具^[21], 如图9所示, 以时间刻度 t 作为横坐标, 路径的累积距离 s 作为纵坐标构建 S - T 图坐标系, 速度规划便是求解路径累积距离 s 值与时间 t 的函数关系. 图9中, Ω_{ob} 表示障碍物在 S - T 图的位置. 同样采用隧道化思想, 沿着

初始轨迹进行前向遍历, 计算时间维度 t 时刻的可行行驶累积距离 s 的范围, 从起始规划时间开始以时间刻度递增方向沿着决策轨迹进行搜索, 铺设出速度规划的优化空间, 将碰撞躲避约束条件简化描述为车辆在通道中行驶的范围 $[S_{\min}^k, S_{\max}^k]$, $k \in [1, n]$.

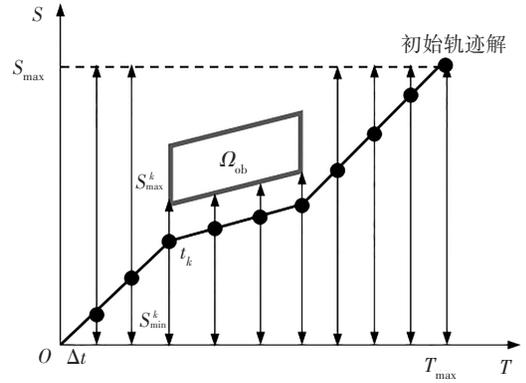


图9 S-T图示意图

Fig.9 Schematic diagram of S-T diagram

速度优化的目的是求解按时间维度 t 离散的累积距离 s 的平滑曲线 $s(t)$. 采用三次样条拟合曲线 $s(t)$, 优化变量是由累积距离 s_k 、累积距离的一阶导数 \dot{s}_k 和累积距离二阶导数 \ddot{s}_k 构成的, 为 $[s_k, \dot{s}_k, \ddot{s}_k]$, $k \in [1, n]$, 其物理含义分别代表累积距离、累积速度和累积加速度. 构建速度优化目标函数形式, 如式(19)所示.

$$J_{\text{speed}}(s_k, \dot{s}_k, \ddot{s}_k) = w_1 \sum_{k=1}^n (s_k - s_{\text{ref}})^2 + w_2 \sum_{k=1}^n \dot{s}_k^2 + w_3 \sum_{k=1}^n (\ddot{s}_k - \ddot{s}_{k+1})^2 \quad (19)$$

式中: w_1, w_2, w_3 为权重系数; s_{ref} 表示参考距离. 式(19)右边第一项是用来保证每个时刻车辆位置与期望位置的距离差距最小化. 为了驾驶舒适性, 式(19)右边第2和第3项分别表示累积加速度 \ddot{s}_k 及其变化率累积值最小化. 在优化过程中, 需要考虑优化参数的边界, 对于速度优化模型中的优化参数, 其边界约束为:

$$\begin{cases} S_{\min}^k \leq s_k \leq S_{\max}^k \\ 0 \leq \dot{s}_k \leq v_{\max} \\ a_{\min} \leq \ddot{s}_k \leq a_{\max} \end{cases}, k \in [1, n] \quad (20)$$

式中: S_{\min}^k, S_{\max}^k 分别为 S - T 图得到的通道行驶最小、最大范围; v_{\max} 由交通规则或者期望速度确定, 确保求解的速度不超过设定速度; a_{\min}, a_{\max} 分别为车辆可执行的最小、最大加速度, 由车辆的动力性能确定. 为保证曲线速度、加速度的连续性, 令每段样条曲线两端函数值、一阶导和二阶导相等, 从而构成等式约

束,根据 Newton-Leibniz 公式逐段积分确定各路径离散点状态变量的闭合形式.

$$\begin{cases} \dot{s}_{k+1} = \dot{s}_k + \ddot{s}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_{k,k+1} \Delta t^2 \\ s_{k+1} = s_k + \dot{s}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_k \Delta t^2 + \frac{1}{6} \ddot{s}_{k,k+1} \Delta t^3 \end{cases} \quad (21)$$

由三次样条曲线性质得:

$$\ddot{s}_{k,k+1} = \frac{\ddot{s}_{k+1} - \ddot{s}_k}{\Delta t} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21),得到速度优化模型中的连续性约束条件.

$$\begin{cases} \dot{s}_{k+1} = \dot{s}_k + \frac{1}{2} \ddot{s}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_{k+1} \Delta t \\ s_{k+1} = s_k + \dot{s}_k \Delta t + \frac{1}{3} \ddot{s}_k \Delta t^2 + \frac{1}{6} \ddot{s}_{k+1} \Delta t^2 \end{cases} \quad (23)$$

考虑到车辆行驶速度普遍较高,为避免车辆通过大曲率弯道发生侧滑失稳等安全问题,车辆所允许的最大速度可根据最大横向加速度 a_{lat_max} 进行限制^[22],从而制定安全性约束:

$$\dot{s}_k \leq \sqrt{\kappa^{-1} a_{lat_max}}, k \in [1, n] \quad (24)$$

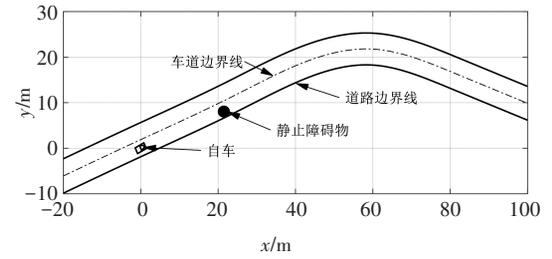
最终考虑式(19)~式(24)所描述的目标函数和约束函数,将速度规划问题描述成一个二次规划形式的优化问题,得到优化模型为:

$$\begin{aligned} & \min J_{speed}(s_k, \dot{s}_k, \ddot{s}_k) \\ & \text{s.t. } S_{min}^k \leq s_k \leq S_{max}^k, \\ & 0 \leq \dot{s}_k \leq v_{max}, a_{min} \leq \ddot{s}_k \leq a_{max} \\ & \dot{s}_{k+1} = \dot{s}_k + \frac{1}{2} \ddot{s}_k \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{s}_{k+1} \Delta t \quad k \in [1, n] \\ & s_{k+1} = s_k + \dot{s}_k \Delta t + \frac{1}{3} \ddot{s}_k \Delta t^2 + \frac{1}{6} \ddot{s}_{k+1} \Delta t^2 \\ & \dot{s}_k \leq \sqrt{\kappa^{-1} a_{lat_max}} \end{aligned} \quad (25)$$

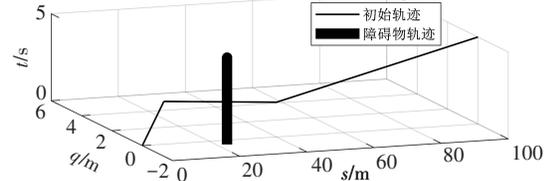
综上所述,基于数值优化分别设计了路径规划方法和速度规划方法,前者使用非线性 IPOPT 优化求解器^[23]求解,对于后者的二次规划问题采用线性 OSQP 优化求解器^[24]完成求解.

2 仿真验证

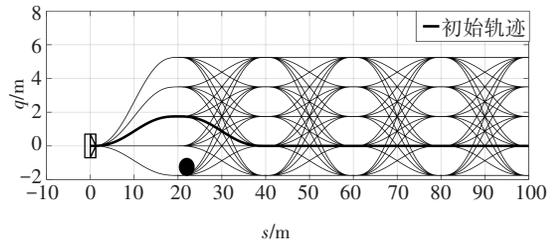
通过 MATLAB/Simulink 平台构建避障场景,对本文提出的分层轨迹规划方法的效果进行验证. 仿真试验的硬件平台为 Win10+Core-i5(2.6 Hz)+RAM(4 G),构造的 2 种场景均为双车道道路,分别如图 10(a)和图 11(a)所示. 场景 a 为包含静止障碍物的大曲率弯道场景,其中自车期望速度为 20 m/s,圆



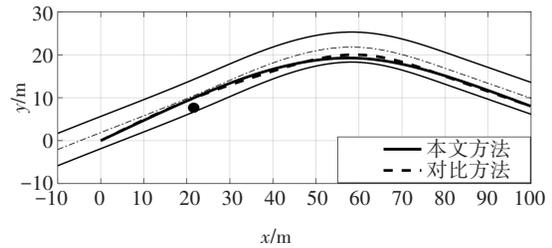
(a) 场景 a 示意图



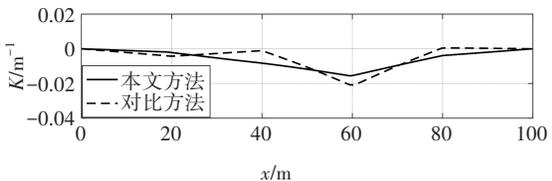
(b) 本文方法的初始轨迹示意图



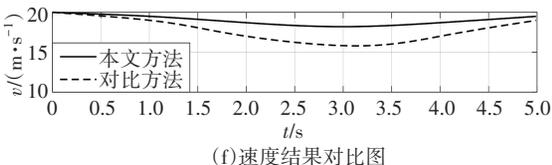
(c) 对比方法的初始轨迹示意图



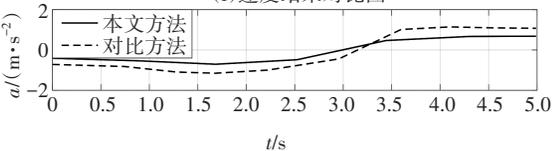
(d) 路径规划结果对比图



(e) 路径曲率结果对比图



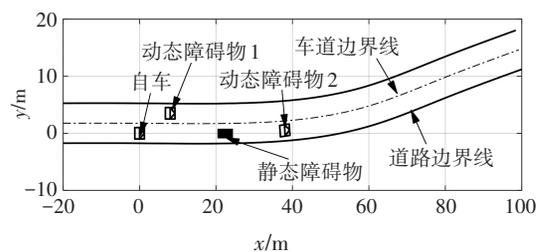
(f) 速度结果对比图



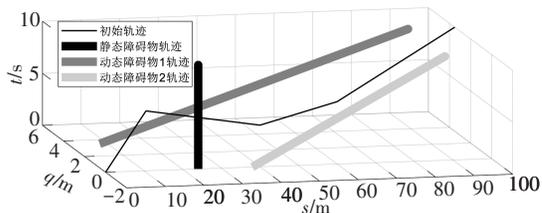
(g) 加速度结果对比图

图 10 场景 a 轨迹规划结果图

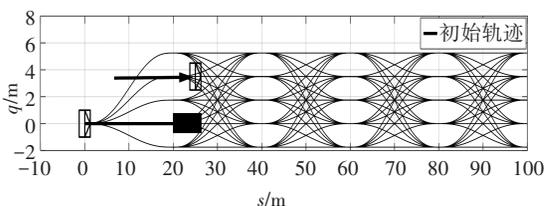
Fig.10 Trajectory planning result of scenario a



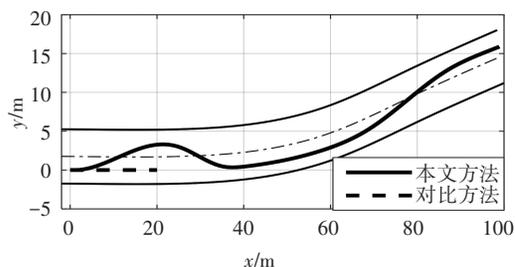
(a) 场景 b 示意图



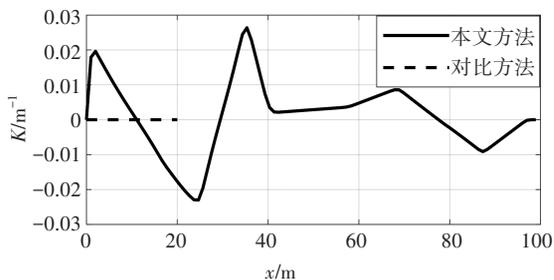
(b) 本文方法的初始轨迹示意图



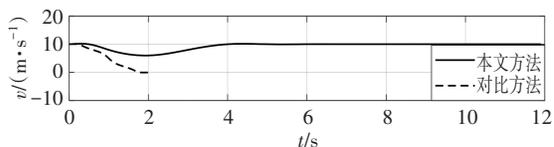
(c) 对比方法的初始轨迹示意图



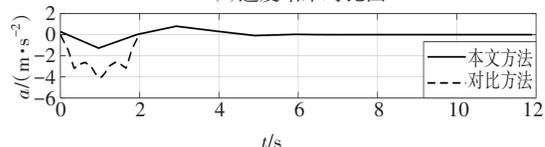
(d) 路径规划结果对比图



(e) 路径曲率结果对比图



(f) 速度结果对比图



(g) 加速度结果对比图

图 11 场景 b 轨迹规划结果图

Fig.11 Trajectory planning result of scenario b

形静止障碍物位置为(22 m, 8 m);场景 b 为包含动态和静态障碍物的场景,其中自车期望速度为 10 m/s;动态障碍物 1、2 的位置分别为(8 m, 3.5 m)和(38 m, 1.0 m),车速分别为 8 m/s 和 5 m/s;矩形为静态障碍物,位置为(23 m, 0 m).文献[9]中的方法将时空轨迹规划问题解耦为二维路径搜索优化以及速度搜索优化两部分,但在路径搜索过程中未考虑自车与障碍物的速度信息,可能使路径决策结果收缩到局部解.因此,本文采用文献[9]提出的方法(以下称对比方法)进行规划求解并与本文方法进行结果对比,并参考文献[9]中的实验方式,对构建的场景进行单次轨迹决策与轨迹规划以验证算法的效果.

1) 场景 a 结果与分析. 由图 10(b) 和图 10(c) 可知,本文上层初始轨迹规划器和对比方法都可有效规划出初始轨迹,虽然对比方法的初始轨迹比本文的初始轨迹平滑性好,但是在进行优化求解后都得到如图 10(d) 所示平滑连贯的避障路径曲线. 由图 10(e) 可以看出,本文方法求解路径曲率连续且最大值为 0.015 m^{-1} ,相较于对比方法的路径曲率(最大值为 0.02 m^{-1})更小. 由图 10(f) 和图 10(g) 可知,速度曲线都平滑且加速度连续,由于本文求解的路径曲率较小,在满足速度安全性约束前提下规划的速度更高且加速度较小,本文方法规划的速度最低为 18.2 m/s ,最大加速度为 1.5 m/s^2 ;对比方法规划的速度最小为 15.8 m/s ,最大加速度为 1.8 m/s^2 . 由此验证了本文方法具有较好的行驶效率和舒适性.

2) 场景 b 结果和分析. 本文方法求解的初始轨迹解如图 11(b) 所示,从图 11(b) 可看出,自车采取减速动作在动态障碍物 1 之后通过矩形障碍物,然后实现对动态障碍物 1 和 2 的规避行驶,和实际人类驾车行为一致性较高. 而对比方法的规划结果如图 11(c) 所示,其中箭头表示未来一段时间间隔内动态障碍物 1 运动情况,由于采取二维采样的搜索方式,因候选路径均与障碍物路径发生碰撞,故在当前规划中会规划短距离的直线路径以减速停车,由此验证了本文上层初始轨迹规划器的优越性. 下层避障路径优化结果如图 11(d) 所示,本文的下层运动轨迹规划器可规划平滑连贯的路径,而对比方法得到的路径为直行路径. 由图 11(e) 可知,虽然本文求解路径的曲率最大值达 0.025 m^{-1} ,但是曲率是连续的,

同时在求解过程中考虑了车辆侧向加速度约束,不会导致车辆侧倾等危险.由图 11(f)和图 11(g)可知,本文方法规划的速度最低为 7.2 m/s,最大加速度为 1.2 m/s^2 ,说明本文先减速跟随在动态障碍物 1 身后以规避矩形障碍物,之后加速到期望速度实现超车动作;而对比方法以停车等待方式进行避撞,最终速度为 0,最大减速度为 3.8 m/s^2 .由此验证了本文方法具有较好的舒适性和行驶效率.

为验证本文方法的运行效率,参考文献[9]中所设计的避障场景测试,在结构化场景中布置 4 个静态障碍物,设置规划的轨迹长度为 100 m,本文方法与文献[9]方法的优化求解时间如表 1 所示.本文方法的运算时间为 0.39 s,表明本文轨迹优化方法具有较好的计算速度和运行效率.其原因在于本文方法在路径非线性优化中的优化参数维数为一维变量,相比于文献[9]方法的优化参数有所减少,同时采用局部时空隧道化思想的障碍物碰撞检测方式,减少了约束数目.

表 1 运算优化求解时间对比表

Tab.1 Calculation optimization solution time comparison table

算法	耗时/s
本文方法	0.39
文献[9]方法	0.55

3 结 论

针对结构化道路场景中的轨迹规划算法中的不足,本文提出协同决策、解耦优化的分层轨迹规划方法.在上层规划器中采用路径和速度协同搜索的方式设计三维搜索算法,下层规划器中的路径规划以最小化笛卡尔坐标下的路径曲率为目标,构建优化参数和约束条件较少的路径优化模型;对于速度规划采用设计二次规划优化模型,加入车辆动力学约束以保证车辆行驶安全.通过与其他方法进行比较,验证了本文的规划方法在结构化道路场景中具有较好的适应性,求解的轨迹质量较好,求解效率较高,兼具耦合与解耦规划的优点.后续研究将尝试在实车中实现算法并进行实际场景的实验分析,以进一步验证和提升该算法的规划效果.

参考文献

- [1] SHAMGAH L, TADEWOS T G, KARIMODDINI A, *et al.* Path planning and control of autonomous vehicles in dynamic reach-avoid scenarios [C]//2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2018: 88-93.
- [2] PADEN B, ČÁP M, YONG S Z, *et al.* A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 33-55.
- [3] LIM W, LEE S, SUNWOO M, *et al.* Hierarchical trajectory planning of an autonomous car based on the integration of a sampling and an optimization method [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(2): 613-626.
- [4] ZHENG L, ZENG P Y, YANG W, *et al.* Bézier curve-based trajectory planning for autonomous vehicles with collision avoidance [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(13): 1882-1891.
- [5] 彭晓燕, 谢浩, 黄晶. 无人驾驶汽车局部路径规划算法研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42(1): 1-10.
PENG X Y, XIE H, HUANG J. Research on local path planning algorithm for unmanned vehicles [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 1-10. (In Chinese)
- [6] MOGHADAM M, ELKAIM G H. An autonomous driving framework for long-term decision-making and short-term trajectory planning on frenet space [C]//2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering. Lyon, France: IEEE, 2021: 1745-1750.
- [7] WERLING M, ZIEGLER J, KAMMEL S, *et al.* Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame [C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2010: 987-993.
- [8] XU W D, WEI J Q, DOLAN J M, *et al.* A real-time motion planner with trajectory optimization for autonomous vehicles [C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA: IEEE, 2012: 2061-2067.
- [9] MENG Y, WU Y M, GU Q, *et al.* A decoupled trajectory planning framework based on the integration of lattice searching and convex optimization [J]. IEEE Access, 2019, 7: 130530-130551.
- [10] FAN H, ZHU F, LIU C, *et al.* Baidu apollo EM motion planner [EB/OL]. (2018-07-20) [2021-10-09]. <https://arxiv.org/abs/1807.08048>.
- [11] ZHANG Y J, SUN H Y, ZHOU J Y, *et al.* Optimal vehicle path planning using quadratic optimization for Baidu Apollo open platform [C]//2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2020: 978-984.
- [12] LI B, KONG Q, ZHANG Y M, *et al.* On-road trajectory planning

- with spatio-temporal RRT and always-feasible quadratic program [C]//2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering. Hong Kong, China:IEEE, 2020:942-947.
- [13] XIN L, KONG Y T, LI S E, *et al.* Enable faster and smoother spatio-temporal trajectory planning for autonomous vehicles in constrained dynamic environment[J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2021, 235(4): 1101-1112.
- [14] ZHANG T, SONG W, FU M, *et al.* A unified framework integrating decision making and trajectory planning based on spatio-temporal voxels for highway autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 10365-10379.
- [15] FRAICHARD T. Trajectory planning in a dynamic workspace: a state-time space approach[J]. *Advanced Robotics*, 1998, 13(1): 75-94.
- [16] 王建强, 吴剑, 李洋. 基于人-车-路协同的行车风险场概念、原理及建模[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(1): 105-114.
WANG J Q, WU J, LI Y. Concept, principle and modeling of driving risk field based on driver-vehicle-road interaction[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(1): 105-114. (In Chinese)
- [17] NANNICINI G, DELLING D, LIBERTI L, *et al.* Bidirectional A* search for time-dependent fast paths [C]//2008 International Workshop on Experimental and Efficient Algorithms. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 334-346.
- [18] GU T Y, ATWOOD J, DONG C Y, *et al.* Tunable and stable real-time trajectory planning for urban autonomous driving [C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg:IEEE, 2015:250-256.
- [19] 曾绍标, 韩秀芹, 翟瑞彩. 工程数学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 206-241.
ZENG S B, HAN X Q, ZHAI R C. Fundamentals of engineering mathematics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 206-241. (In Chinese)
- [20] LIU S K, WATTERSON M, MOHTA K, *et al.* Planning dynamically feasible trajectories for quadrotors using safe flight corridors in 3-D complex environments[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(3): 1688-1695.
- [21] YU Z, CHEN H, WASLANDER S L, *et al.* Speed planning for autonomous driving via convex optimization [C]//2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Maui, HI, USA :IEEE, 2018: 1089-1094.
- [22] ZHOU J, HE R, WANG Y, *et al.* DL-IAPS and PJSO: a path/speed decoupled trajectory optimization and its application in autonomous driving[EB/OL]. (2020-09-23) [2021-10-09]. <https://arxiv.org/abs/2009.11135v1>.
- [23] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. *Mathematical Programming*, 2006, 106(1): 25-57.
- [24] STELLATO B, BANJAC G, GOULART P, *et al.* OSQP: an operator splitting solver for quadratic programs[J]. *Mathematical Programming Computation*, 2020, 12(4): 637-672.