基于延迟决策策略的自动驾驶车辆路径规划*

李劲松　陈秋月　何慕寰　叶心

（重庆理工大学车辆工程学院，重庆 400054）

【摘要】为应对复杂交通环境下社会车辆驾驶意图不确定性，提出一种基于延迟决策的路径规划方法。通过生成包含一个初始共享轨迹段和针对社会车辆不同潜在行动的分叉轨迹的轨迹树；采用高斯混合模型进行社会车辆驾驶意图的概率预测，基于预测轨迹的状态偏差确定分叉点；根据不同场景的需求，分别在路径规划和速度规划中引入延迟决策机制，实现换道和减速避让策略。MATLAB/Simulink与CarSim联合仿真结果表明：相较于传统的生成单一轨迹方法，所提出方案在换道避让场景中，横向速度、加速度及其变化率分别降低9.2%、51.7%和63.6%，提升了变道过程的平稳性和乘坐舒适性；在减速避让场景中，纵向加速度及其变化率分别降低35%和61.5%，显著改善了减速过程的平稳性。

主题词：自动驾驶　路径规划　延迟决策　共享轨迹段　社会车辆意图

中图分类号：U469.7　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250015

Autonomous Vehicle Path Planning Based on Delayed Decision Strategies

Li Jinsong, Chen Qiuyue, He Muhuan, Ye Xin

（School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054）

【Abstract】To address the uncertainty of driving intentions among general vehicles in complex traffic environments, this paper proposes a path planning method based on delayed decision-making. This method generates a trajectory tree comprising an initial shared trajectory segment and branching trajectories corresponding to different potential actions of social vehicles; employs a Gaussian mixture model to predict the probability of social vehicle driving intentions; and determines branching points based on the state deviations of the predicted trajectories. Depending on the requirements of different scenarios, delayed decision-making mechanisms are incorporated into both path planning and speed planning to implement lane-changing and deceleration-based yielding strategies. The results of the joint simulation using MATLAB/Simulink and Carsim indicate that, compared to traditional methods that generate a single trajectory, the proposed approach reduces lateral velocity, acceleration, and their rates of change by 9.2%, 51.7%, and 63.6%, respectively, in lane-changing avoidance scenarios, thereby improving the smoothness of the lane-changing process and ride comfort. In deceleration avoidance scenarios, longitudinal acceleration and its rate of change are reduced by 35% and 61.5%, respectively, significantly improving the smoothness of the deceleration process.

Key words: Autonomous driving, Path planning, Delayed decision making, Shared trajectory segments, Socio-vehicular intent

【引用格式】李劲松，陈秋月，何慕寰，等. 基于延迟决策策略的自动驾驶车辆路径规划[J]. 汽车技术，2026(5): 23-31.

LI J S, CHEN Q Y, HE M H, et al. Autonomous Vehicle Path Planning Based on Delayed Decision Strategies[J]. Automobile Technology, 2026(5): 23-31.

1　前言

路径规划作为自动驾驶系统的核心关键技术，其算法性能与决策精度直接决定车辆行驶安全性、行驶平稳性及交通运输效率，是智能车辆完成环境感知、行为决策与运动控制的重要纽带。

常用的路径规划方法可分为图搜索方法、采样方法、优化方法以及拟合插值曲线方法等。在图搜索方法中，文献[1]、文献[2]采用迪杰斯特拉（Dijkstra）算法，在网格或节点网络中搜索最短路径，适用于全局路径

*基金项目：重庆市自然科学基金面上项目（CSTB2023NSCQ-MSX0418）。

通信作者：叶心（1981—），教授，主要研究方向为车辆动力学控制与优化，yexin@cqut.edu.cn。

规划。文献[3]提出A*算法，通过引入与目标点相关的启发式信息，从而提升搜索效率。快速随机搜索树（Rapidly exploring Random Tree，RRT）和概率路线图（Probabilistic Roadmaps，PRM）是基于采样的路径规划方法[4-6]。Kuwata等[7]利用RRT方法进行路径规划，实现了与周围自动驾驶车辆和人类驾驶车辆的安全交互。Karaman等[8]发现随着样本数量的增加，RRT算法会逐渐收敛到次优解，并提出快速探索随机图（Rapidly-exploring Random Graph，RRG）算法。

优化方法常采用数值优化、凸规划等，百度Apollo提出路径和速度分层的期望-最大化运动规划器，先进行路径和速度的初步规划，再利用二次规划方法对轨迹进行平滑处理[9]。Manzinger等[10]设计了一种结合可达性分析与凸优化的轨迹规划器，显著提升了路径规划效率。基于拟合插值曲线的路径规划方法通过拟合已知路点，生成平滑、连续的轨迹数据，适用于动态环境的局部路径规划。文献[11]提出的杜宾斯（Dubins）曲线和Reeds等[12]提出的里兹-谢普（R-S）曲线由直线段和固定半径的圆弧段组成，常用于无障碍环境的最短路径规划。

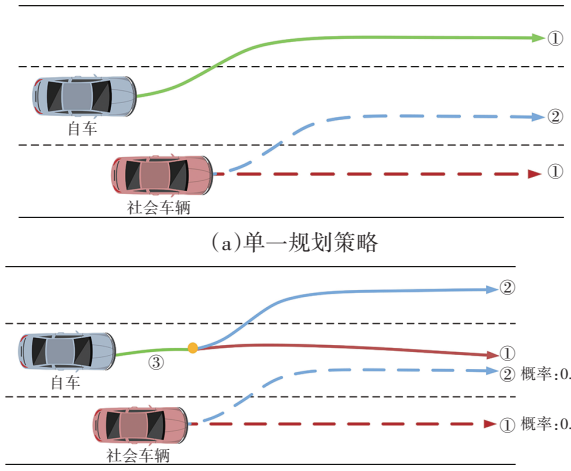
基于图搜索的规划算法在结构化道路上效率较低，难以适应复杂动态的交通场景；基于采样的规划算法计算复杂度高，无法满足实时性要求；基于曲线插值的方法在避障时的计算量较大，且路径选择合理性较差。相比之下，基于优化求解的路径更加平滑，应用更加广泛。同时，现有规划算法很少考虑社会车辆行为的不确定性，或通过生成单一的轨迹应对规划范围内社会车辆的所有潜在意图，导致规划效率低且具有一定的保守性。

因此，本文提出一种延迟决策策略应对社会车辆行为不确定性下的自动驾驶路径规划问题。该策略生成的轨迹规划结果呈现轨迹树结构，由一个共同的初始轨迹段（共享段）和随后的分叉轨迹组成。共享段确保在社会车辆意图尚未明确前，自动驾驶车辆拥有一个可行的连续行驶轨迹，从而保障规划的时间连续性；分叉轨迹则针对社会车辆可能采取的行动进行独立的轨迹规划。同时，通过MATLAB/Simulink与CarSim联合仿真，以典型的相邻车道社会车辆换道切入和直行2种意图场景，验证在社会车辆不同的意图概率下，自车的规划效果。

2 系统设计

2.1 方法概述

假设自车沿直线行驶，邻近车道的社会车辆可能存在2种驾驶意图：直行和左换道切入自车车道。分析3车道场景中单一规划策略与延迟决策规划场景差异，如图1所示。



（a）单一规划策略

（b）延迟决策规划

图1 延迟决策示意

在上述不确定交互场景中，单一规划策略需即时响应，生成兼顾所有可能意图的轨迹，自车选择立即换道。该策略能够保证安全，但易导致驾驶效率低下且过于保守。相较于单一规划策略，延迟决策无需在交通参与者意图尚不明确时进行决策。该策略在社会车辆意图不明确前，先规划出一段短期适用于2种驾驶意图的共享轨迹，自车沿此共享轨迹行驶。到达分叉点后，根据社会车实际行为，自车选择对应分支轨迹：若社会车辆直行，自车保持直行；若社会车辆变道切入，自车则左换道避让。

延迟决策通过轨迹树形式综合考虑了多种潜在意图，避免过早或过度规避操作，根据实时交通状况灵活调整策略，从而提升车辆行驶灵活性与效率。

2.2 整体框架

本文模型总体架构如图2所示，基于上游感知信息，预测模块输出社会车辆的轨迹分布及概率。规划模块结合自车状态与环境，经决策层判定生成换道避让的路径规划或减速避让的速度规划。路径与速度规划分别以参考路径和参考速度为基准，针对社会车辆的不同意图轨迹，规划出满足安全性、连续性、舒适性及运动学约束的避障轨迹。

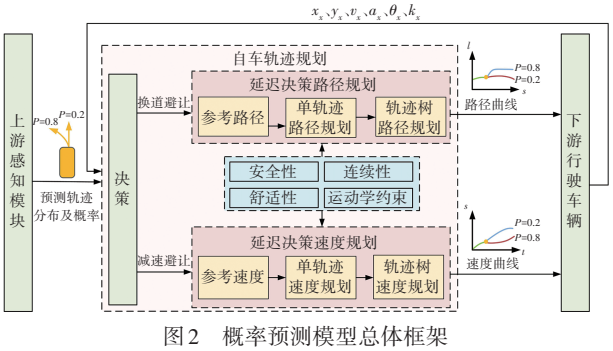
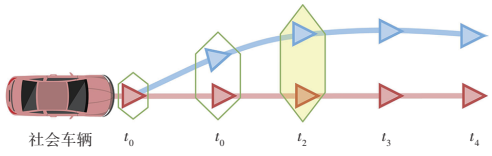


图2 概率预测模型总体框架

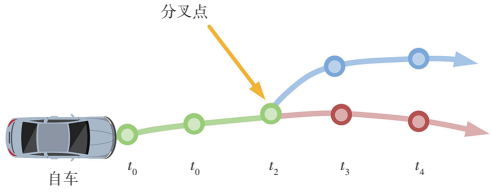
为确保规划的平滑连续，本文设计了轨迹共享段，从而形成多模态轨迹树。其中，社会车辆的意图预测采用文献[13]的高斯混合（Mixture-of-Gaussians，MoG）模型。该模型通过融合多个连续概率分布，以概率P量化意图的不确定性。

2.3 共享段分叉点选择

通过比较社会车辆不同预测轨迹的状态偏差确定分叉点，如图3所示，当偏差值超过预设阈值时，该时刻即被定义为分叉点[14]。在t_2时刻前，轨迹偏差未超阈值，自车沿共享段行驶；而在t_2时刻后，偏差超出阈值，自车需依据社会车辆的实际行为选择对应分支轨迹，故t_2被确定为分叉点。



（a）社会车辆预测轨迹



（b）自车规划轨迹

图3 分叉点确定

通过计算最大分叉时间优化轨迹树的多模态特性，同时确保计算效率与安全性：

$$\max_{\tau\in\{0,\cdots,\tau_{\max}\}} \text{ s.t. } \forall M(s_i,s_j,\tau)<\theta(s_i,s_j) \tag{1}$$

式中：$\tau_{\max}$为预定义的最大分叉时间，(s_i,s_j,τ)为时间戳τ下场景s_i和s_j的状态偏差，$\theta(s_i,s_j)$为预设的最大状态偏差值。

2.4 曲线坐标系与安全行驶区域设计

路径规划采用基于道路几何的曲线坐标系描述自车的行驶状态，如图4所示，轨迹点$\vec{x}$在笛卡尔坐标系的信息为$[x_x,y_x,v_x,a_x,\theta_x,k_x]$，其中$(x_x,y_x)$为位置坐标，$v_x$、$a_x$、$\theta_x$、$k_x$分别为速度、加速度、航向角和曲率。轨迹点在曲线坐标系使用$[s,\dot{s},\ddot{s},l,l',l'']$描述，$s$、$l$分别为对应曲线坐标系下相对于参考轨迹的纵向位移和横向位移，$\dot{s}$、$\ddot{s}$分别为纵向速度和加速度，l'、l''分别为横向位移对弧长的一阶导数和二阶导数。

为了保证曲线坐标系下规划轨迹的质量，需要对参考线进行平滑处理，如图5所示。其中，$P_{\text{ref},m}$、P_m分别为参考线上优化前、后的离散点，$(x_{\text{ref},m},y_{\text{ref},m})$、$(x_m,y_m)$为对应坐标。

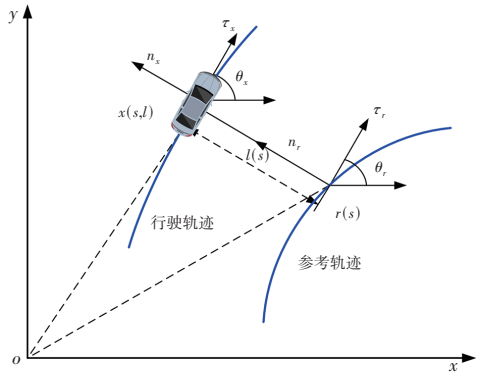


图4 坐标系转换关系

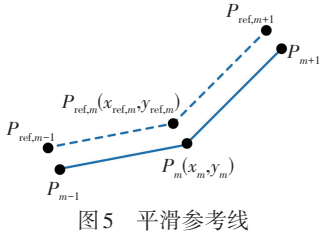


图5 平滑参考线

采用二次规划对道路中心参考线进行优化，使其曲率平滑且偏离原始点的程度控制在合理范围内。通过设置位置约束和目标函数，得到符合要求的平滑参考线：

$$\begin{aligned}\min J = {} & w_{\text{S}}\sum_{m=1}^{n-1}\left\|\overrightarrow{P_mP_{m-1}}+\overrightarrow{P_mP_{m+1}}\right\|^2+\\ & w_{\text{D}}\sum_{m=1}^{n}\left\|P_m-P_{\text{ref},m}\right\|^2+\\ & w_{\text{U}}\sum_{m=3}^{n}\left\|\Delta P_m-\Delta P_{m-1}\right\|^2\\ \text{s.t. } & \begin{cases}x_{\text{ref},m}-x_s\leqslant x_m\leqslant x_{\text{ref},m}+x_s\\ y_{\text{ref},m}-y_s\leqslant y_m\leqslant y_{\text{ref},m}+y_s\end{cases}\end{aligned} \tag{2}$$

式中：w_{S}、w_{D}、w_{U}分别为平滑度、偏离度和均匀度的权重系数，x_s、y_s分别为优化后离散点在x、y方向的松弛度。

在此基础上，参考文献[15]的方法规划安全行驶区域，首先基于规则的决策树算法确定可行车道，随后结合障碍物检测信息，沿参考线离散化空间维度，评估各采样点的可行性。若采样点存在障碍物，则通过集束搜索策略对绕障路径进行评估和排序，优先选择最宽敞的路径。自车在覆盖设定搜索范围后，最终得到包含上、下界$(l_{\min},l_{\max})$的安全行驶区域。

3 基于延迟决策的规划算法

3.1 路径规划

基于生成的参考线，采用延迟决策方法应对社会车辆意图的不确定性，针对社会车辆直行和切入2种意图，分叉轨迹策略分别为直行和换道，路径规划结果为带有共享段的轨迹树。通过二次规划建模，目标函数为最小化共享段和分叉轨迹的整体代价。分叉后各场景对应轨迹按其概率加权，赋予共享段倾向性。则该问题

可表述为：

$$\begin{aligned}&\min J_{l-\text{shared}}(\tau_{0:t_b})+\sum_{\lambda\in\Lambda}p(\lambda)J_{l-\text{conting}}(\tau_{t_b:T},\lambda)\\&\text{s.t. } g_j(\tau)\leqslant b_j,\quad j=1,2,\cdots,n\end{aligned}\tag{3}$$

式中：$J_{l-\text{shared}}$为共享段轨迹成本，t_b为分支时间，$J_{l-\text{conting}}$为与各分支轨迹相关联的成本，Λ为社会车辆所有预测意图场景，λ为社会车辆的单个意图场景，$p(\lambda)$为各意图预测概率。

假定$J_{l-\text{shared}}$和$J_{l-\text{conting}}$的目标函数均为$J_{l-\text{seg}}(\tau_{a:b})$，目标函数综合考虑舒适性、安全性和效率，优化目标主要包括：

a. 保持横向位移l较小，避免路径大幅偏离参考线。

b. 降低横向速度l'、加速度l''和加速度变化率l'''，以提高横向舒适性。

c. 将安全区域的中间值作为期望横向位移，确保自车与障碍物或边界保持安全距离：

$$\begin{aligned}\min J_{l-\text{seg}}(\tau_{a:b})=&w_l\sum_{i=a}^{b}l_i^2+w_{l'}\sum_{i=a}^{b}(l_i')^2+w_{l''}\sum_{i=a}^{b}(l_i'')^2+\\&w_{l'''}\sum_{i=a}^{b-1}(l_i''')^2+w_{\text{obs}}\sum_{i=a}^{b}(l_i-l_{\text{obs}})^2\\l_{\text{obs}}=&\frac{1}{2}(l_{i,\min}+l_{i,\max})\end{aligned}\tag{4}$$

式中：l_{obs}为第i个点的期望横向位移，w_l、$w_{l'}$、$w_{l''}$、$w_{l'''}$、w_{obs}为权重系数。

单条规划轨迹的约束包括：起点状态、连续性、安全行驶区域边界、横向速度、加速度、加速度变化率约束。其中，连续性约束要求各阶导数间满足特定关系，用状态空间表示为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i\\\boldsymbol{x}=[\,l\quad l'\quad l''\,]^{\mathrm{T}},\quad \boldsymbol{u}=[\,l'''\,]\\\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1&\Delta s&\frac{1}{2}\Delta s^2\\0&1&\Delta s\\0&0&1\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\frac{1}{6}\Delta s^3\\\frac{1}{2}\Delta s^2\\\Delta s\end{bmatrix}\end{cases}\tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{u}$分别为状态量和控制量，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$分别为状态矩阵和控制矩阵。

单条轨迹路径的优化问题的求解过程为：

$$\begin{aligned}&\min J_{l-\text{seg}}(\tau_{a:b})=w_l\sum_{i=a}^{b}l_i^2+w_{l'}\sum_{i=a}^{b}(l_i')^2+w_{l''}\sum_{i=a}^{b}(l_i'')^2+\\&\qquad w_{l'''}\sum_{i=a}^{b-1}(l_i''')^2+w_{\text{obs}}\sum_{i=a}^{b}(l_i-l_{\text{obs}})^2\\&\text{s.t.}\begin{cases}l_0=l_{\text{initial}},\quad l_0'=l_{\text{initial}}',\quad l_0''=l_{\text{initial}}''\\\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i\\l_{i,\min}\leqslant l_i\leqslant l_{i,\max},\quad l'_{\min}\leqslant l_i'\leqslant l'_{\max}\\l''_{\min}\leqslant l_i''\leqslant l''_{\max},\quad l'''_{\min}\leqslant l_i'''\leqslant l'''_{\max}\end{cases}\end{aligned}\tag{6}$$

式中：l_{initial}、l'_{initial}、l''_{initial}分别为l、l'、l''的初始量，$l_{\min}$、$l'_{\min}$、$l''_{\min}$、$l_{\max}$、$l'_{\max}$、$l''_{\max}$分别为l、l'、l''的下界和上界约束。

当单条轨迹过渡到轨迹树时，需保证共享段到各分支轨迹平滑过渡，则轨迹树的连续性约束为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i,\quad i=0,1,\cdots,I_{\text{branch_idx}}-1\\\boldsymbol{x}_{i+1}^{\lambda}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i^{\lambda}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{i+1}^{\lambda},\quad i=I_{\text{branch_idx}}-1,\cdots,N\ \lambda\in\Lambda\end{cases}\tag{7}$$

式中：$I_{\text{branch_idx}}$为轨迹树分叉点索引号，N为各分支轨迹终点索引号。

轨迹树的共享段和分支轨迹的安全行驶区域边界约束存在差异，共享段的安全行驶区域边界约束需满足所有场景的限制，而分支轨迹仅需遵循各自场景的约束，如图6所示。社会车辆意图①引起的自车安全行驶区域边界为(Ⅰ，Ⅲ)，意图②引起的边界为(Ⅱ，Ⅲ)。则自车共享段边界约束需同时满足(Ⅰ，Ⅲ)和(Ⅱ，Ⅲ)，分支轨迹①仅需满足(Ⅰ，Ⅲ)，分支轨迹②满足(Ⅱ，Ⅲ)。

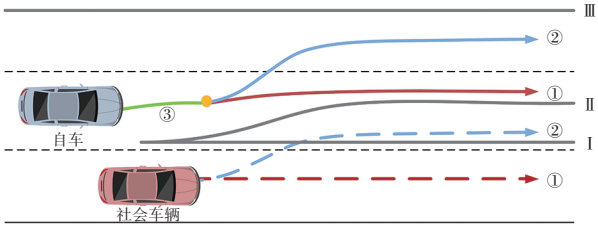


图6　边界约束示意

因此，整体路径规划的轨迹树问题可表示为：

$$\begin{aligned}&\min J=J_{l-\text{shared}}(\tau_{0:t_b})+\sum_{\lambda\in\Lambda}p(\lambda)J_{l-\text{conting}}(\tau_{t_b:T},\lambda)\\&\text{s.t.}\begin{cases}J_{l-\text{shared}}=J_{l-\text{conting}}=J_{l-\text{seg}}\\l_0=l_{\text{initial}},\quad l_0'=l'_{\text{initial}},\quad l_0''=l''_{\text{initial}}\\\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i,\quad i=0,1,\cdots,I_{\text{branch_idx}}-1\\\boldsymbol{x}_{i+1}^{\lambda}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i^{\lambda}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{i+1}^{\lambda},\quad i=I_{\text{branch_idx}}-1,\cdots,N\ \lambda\in\Lambda\\l_{i,\min}\leqslant l_i\leqslant l_{i,\max},\quad i=0,1,\cdots,I_{\text{branch_idx}}-1\\l_{i,\min}^{\lambda}\leqslant l_i^{\lambda}\leqslant l_{i,\max}^{\lambda},\quad i=I_{\text{branch}_{\text{idx}}}-1,\cdots,N\ \lambda\in\Lambda\\l'_{\min}\leqslant l_i'\leqslant l'_{\max}\\l''_{\min}\leqslant l_i''\leqslant l''_{\max}\\l'''_{\min}\leqslant l_i'''\leqslant l'''_{\max}\end{cases}\end{aligned}\tag{8}$$

3.2　速度规划

针对社会车辆直行和切入两种意图，两条分叉轨迹的策略分别是保持匀速和减速避让，速度规划结果为带有共享段的轨迹树。速度延迟决策的优化问题与路径规划相近，但速度规划是在位移-时间(S-T)图中规划最优速度曲线，待求解的决策变量为自车沿参考线方向的s、速度v和加速度a。

采用二次规划方法建模，目标函数设计为最小化共享段与分叉轨迹的总体代价值，并在分叉后为每个场景分配对应的概率，以赋予共享段一定的倾向性。问题可表述为：

$$\begin{aligned}&\min J_{v-\text{shared}}(\tau_{0:t_b})+\sum_{\lambda\in\Lambda}p(\lambda)J_{v-\text{conting}}(\tau_{t_b:T},\lambda)\\&\text{s.t. } g_j(\tau)\leqslant b_j,j=1,2,\cdots,n\end{aligned}\tag{9}$$

式中：$J_{v-\text{shared}}$为共享段速度成本，$J_{v-\text{conting}}$为与各分支速度相关联的成本。

假设$J_{v-\text{shared}}$和$J_{v-\text{conting}}$的目标函数均为$J_{v-\text{seg}}(\tau_{a:b})$，单条轨迹的优化目标为：在正确的时间到达参考位置$s_{\text{ref}}$，行驶速度尽量接近参考速度$v_{\text{ref}}$，保持速度曲线的加速度$a$和加速度变化率$j$较小，以保证纵向稳定性和舒适性。单条轨迹的目标函数为：

$$\begin{aligned}\min J_{v-\text{seg}}(\tau_{a:b})=w_s\sum_{i=a}^{b}(s-s_{\text{ref}})^2+w_v\sum_{i=a}^{b}(v-v_{\text{ref}})^2+\\w_a\sum_{i=a}^{b}a^2+w_j\sum_{i=a}^{b-1}j^2\end{aligned}\tag{10}$$

式中：w_s、w_v、w_a、w_j为代价项权重。

规划速度需满足以下约束：起点状态、连续性、安全边界、沿参考线的速度、加速度、加速度变化率约束。其中，连续性约束需满足：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i\\\boldsymbol{x}=[\,s\quad v\quad a\,]^{\mathrm{T}},\boldsymbol{u}=[\,j\,]\\\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1&\Delta t&\frac{1}{2}\Delta t^2\\0&1&\Delta t\\0&0&1\end{bmatrix},\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\frac{1}{6}\Delta t^3\\\frac{1}{2}\Delta t^2\\\Delta t\end{bmatrix}\end{cases}\tag{11}$$

因此，整体速度规划的轨迹树问题可表述为：

$$\min J=J_{v-\text{shared}}(\tau_{0:t_b})+\sum_{\lambda\in\Lambda}p(\lambda)J_{v-\text{conting}}(\tau_{t_b:T},\lambda)$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}J_{v-\text{shared}}=J_{v-\text{conting}}=J_{v-\text{seg}}\\s_0=s_{\text{initial}},\quad v_0=v_{\text{initial}},\quad a_0=a_{\text{initial}}\\\boldsymbol{x}_{i+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i,\quad i=0,1,\cdots,I_{\text{branch_idx}}-1\\\boldsymbol{x}_{i+1}^{\lambda}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i^{\lambda}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{i+1}^{\lambda},\quad i=I_{\text{branch_idx}}-1,\cdots,N\ \lambda\in\Lambda\\s_{i,\min}\leqslant s_i\leqslant s_{i,\max},\quad i=0,1,\cdots,I_{\text{branch_idx}}-1\\s_{i,\min}^{\lambda}\leqslant s_i^{\lambda}\leqslant s_{i,\max}^{\lambda},\quad i=I_{\text{branch_idx}}-1,\cdots,N\ \lambda\in\Lambda\\v_{\min}\leqslant v_i\leqslant v_{\max}\\a_{\min}\leqslant a_i\leqslant a_{\max}\\j_{\min}\leqslant j_i\leqslant j_{\max}\end{cases}\tag{12}$$

式中：s_{initial}、v_{initial}、a_{initial}分别为s、v、a的初始量，$v_{\min}$、$v_{\max}$、$a_{\min}$、$a_{\max}$、$j_{\min}$、$j_{\max}$分别为v、a、j的下界和上界约束。

4 仿真分析

为验证本文延迟决策规划算法的有效性，采用MATLAB/Simulink与CarSim联合仿真分析。其中，MATLAB/Simulink用于延迟决策路径/速度规划算法的建模，CarSim提供高保真的车辆动力学模型，以验证规划算法在实际车辆动态响应中的可行性。

在设计算法时，由于权重过大会降低算法的求解速度，延长规划时间；权重值过小则可能导致规划结果偏离最优解，故依据文献[16]、文献[17]，规划器的参数设置如表1所示。

表1 规划器参数

参数	取值
平滑度权重w_{S}	1 000
偏离度权重w_{D}	10
均匀度权重w_{U}	10
$[l'_{\min},l'_{\max}]$边界	[−0.577,0.577]
$[l''_{\min},l''_{\max}]$边界/m^{-1}	[−0.4,0.4]
$[l'''_{\min},l'''_{\max}]$边界/m^{-2}	[−0.105,0.105]
$[v_{\min},v_{\max}]$边界/m·s^{-1}	[−30,30]
$[a_{\min},a_{\max}]$边界/m·s^{-2}	[−5,5]
$[j_{\min},j_{\max}]$边界/m·s^{-3}	[−5,5]
横向位移权重w_l	1
偏航角权重$w_{l'}$	10
曲率权重$w_{l''}$	100
曲率变化率权重$w_{l'''}$	1 000
安全距离权重w_{obs}	1 000
偏离参考位置权重w_s	10
偏离参考速度权重w_v	10
加速度权重w_a	100
加速度变化率权重w_j	1 000

4.1 延迟决策路径规划结果

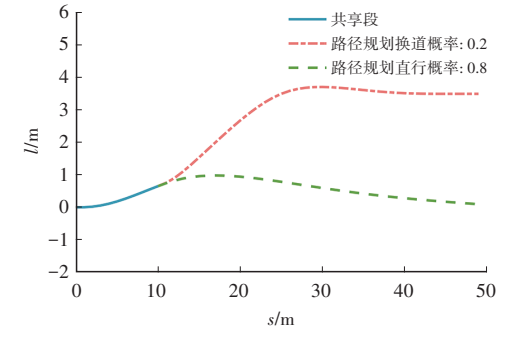
假定自车与社会车辆的初始速度均为36 km/h，且自车车速固定，相邻车道社会车辆与自车的纵向距离为5 m，其行驶意图包括直行和切入车道。不同切入概率下社会车辆对自车路径规划的影响，结果如图7所示。

由图7可知，本文方法融合社会车辆的切入概率，能够生成连续平滑的轨迹树，综合评估共享段社会车辆的2种行驶意图及其概率：当切入概率较低时，自车共享段倾向于直行；当切入概率较高时，共享段倾向于直行倾向换道。社会车辆切入概率为0.2时，轨迹树中$l'_{\max}$=0.234，$l''_{\max}$=0.055 m^{-1}，$l'''_{\max}$=0.060 m^{-2}；社会车辆切入概率为0.8时，轨迹树中$l'_{\max}$=0.207，$l''_{\max}$=0.028 m^{-1}，$l'''_{\max}$=0.029 m^{-2}，满足运动学和舒适性约束。

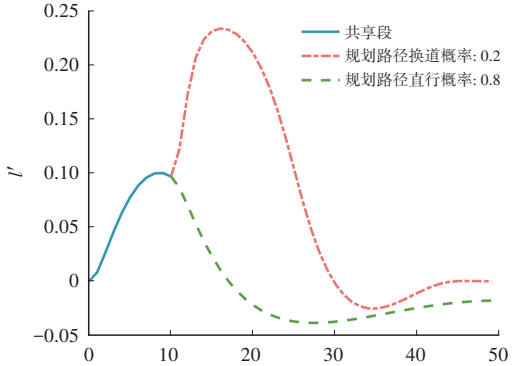
鉴于传统生成单一轨迹的路径规划算法中，自车需要提前对社会车辆的所有意图采取保守应对策略，通过二次规划方法生成轨迹。将本文方法与传统方法进行对比分析，在社会车辆切入概率为0.8的场景下，路径规划结果如图8所示。

由图8可知，当社会车辆切入概率为0.8时，传统规划方法因完全考虑社会车辆切入，导致较早执行换道操作。而延迟决策考虑了社会车辆切入的概率，优化了换

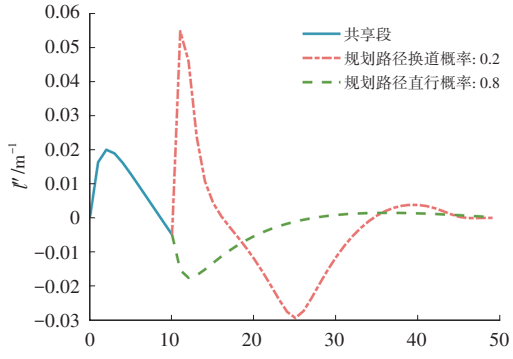
道时机同时确保安全。相较于传统二次规划方法，规划的换道避让分叉轨迹，车辆的横向速度、加速度及其变化率分别降低9.2%、减少51.7%和63.6%，换道时横向运动更平稳，驾乘舒适性明显提升。



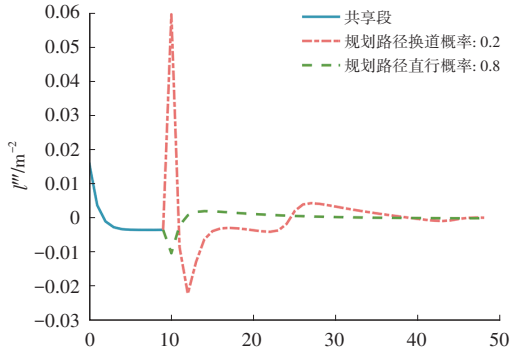
$l-s$



$l'-s$

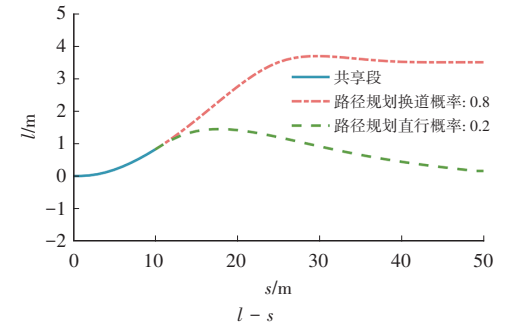


$l''-s$

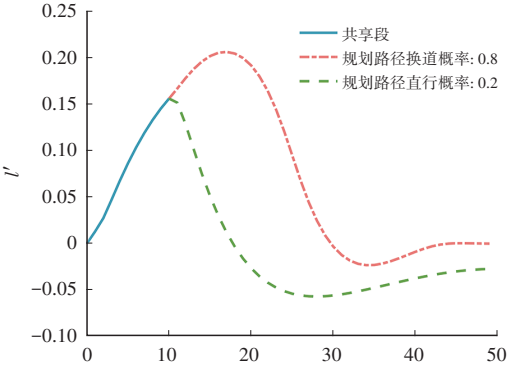


$l'''-s$

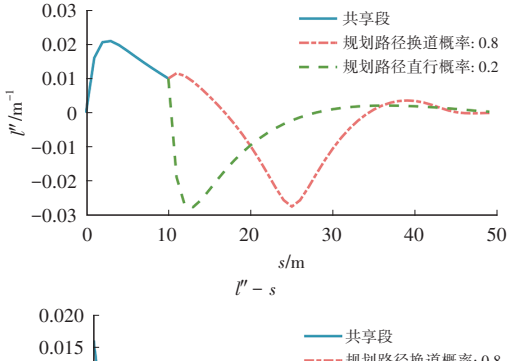
(a)切入概率0.2



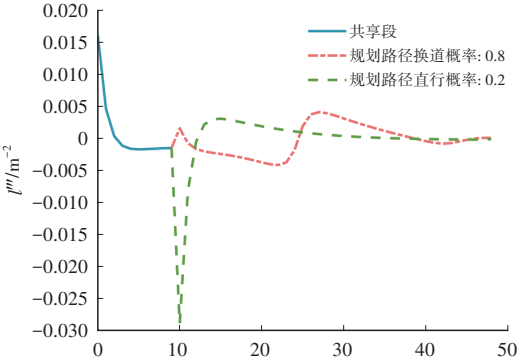
$l-s$



$l'-s$



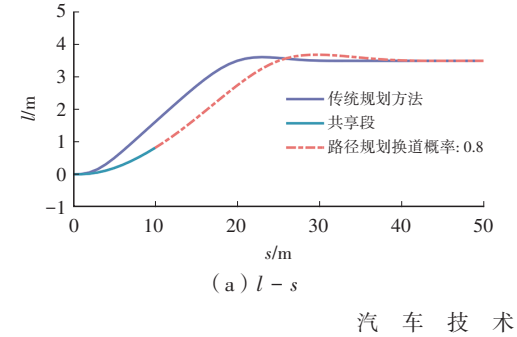
$l''-s$



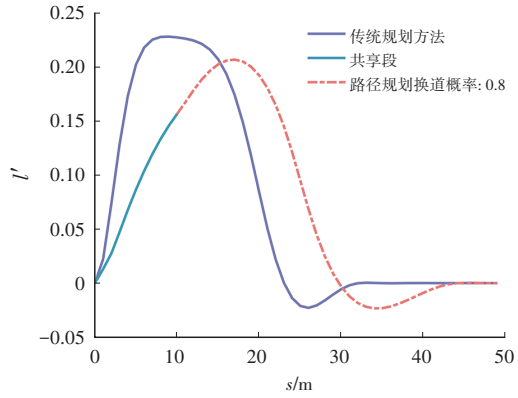
$l'''-s$

(b)切入概率0.8

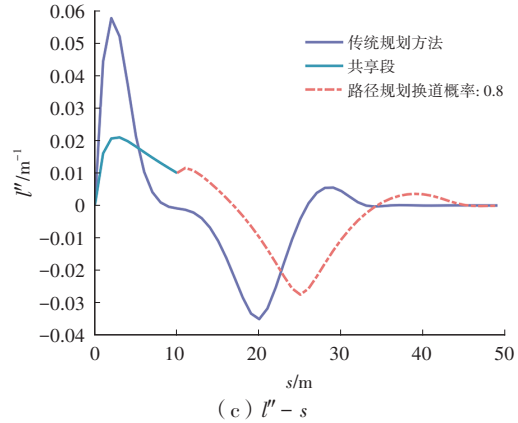
图7　路径规划



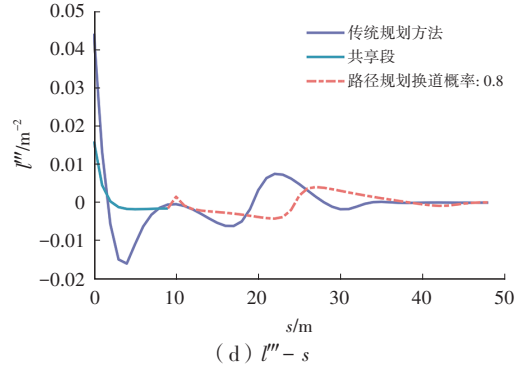
(a) $l-s$



（b）$l'-s$



（c）$l''-s$



（d）$l'''-s$

图8　不同方法换道避让路径规划对比

针对社会车辆切入概率为0.8的场景，路径规划CarSim仿真结果如图9所示。当社会车辆未切入时，由于自车沿着考虑了其2种潜在结果，在共享段并非完全直行。当社会车辆切入时，自车平滑切换至规划换道轨迹，成功完成避让并提升了驾驶安全性。

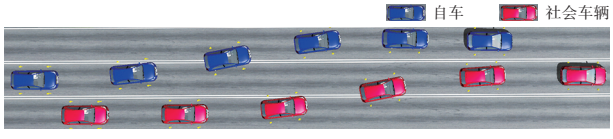
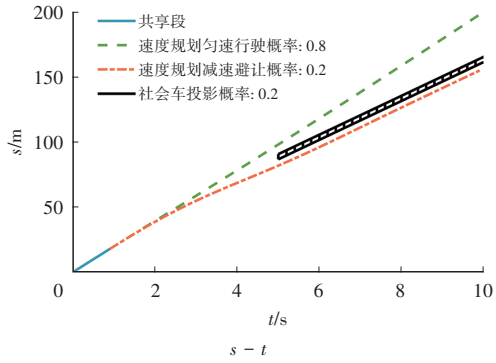


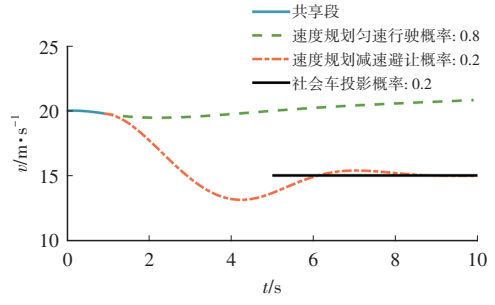
图9　路径跟踪幻影

4.2　延迟决策速度规划结果

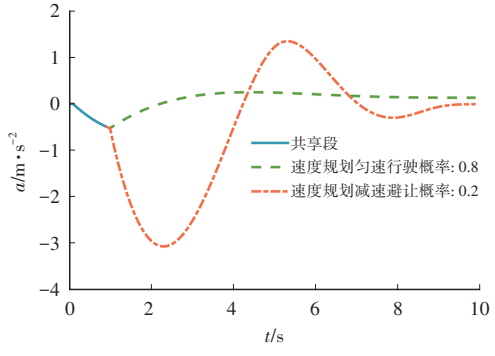
假设自车初始速度为72 km/h，社会车辆的速度为54 km/h，两车的纵向距离为15 m。社会车辆的行驶意图包括直行和切入，自车保持直行，不同切入概率下社会车辆对自车速度规划的影响，结果如图10所示。



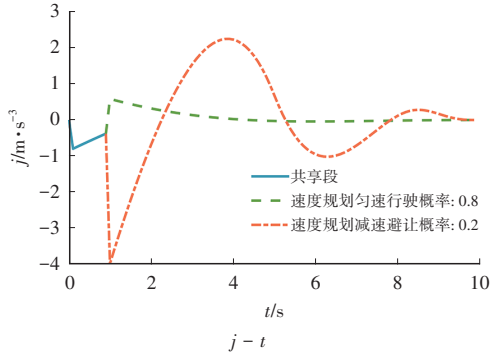
$s-t$



$v-t$

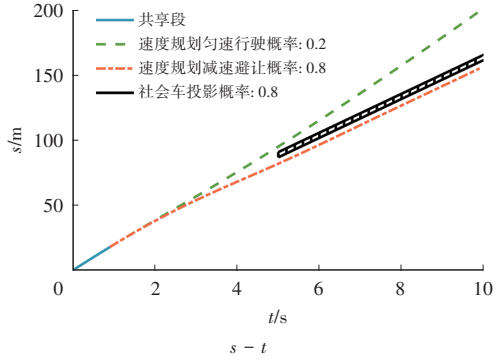


$a-t$

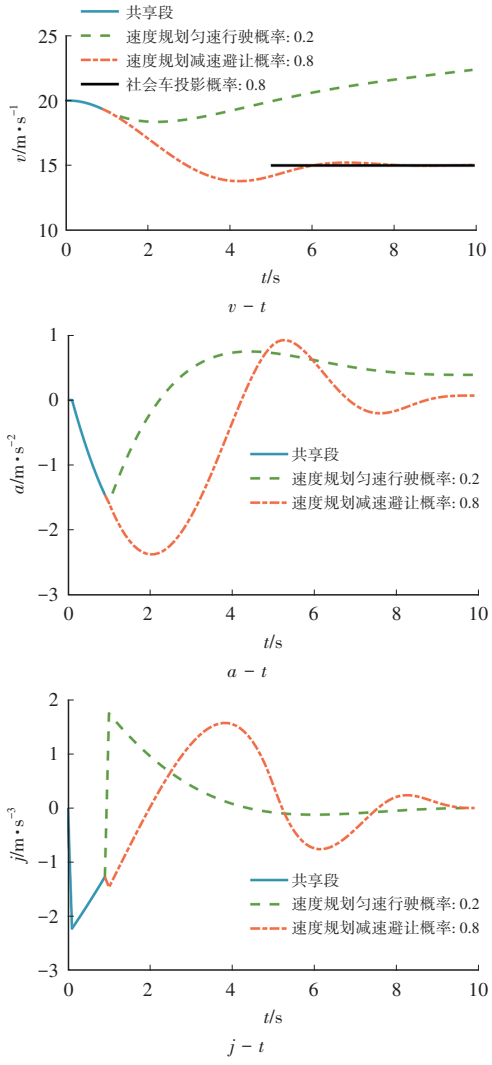


$j-t$

（a）切入概率0.2



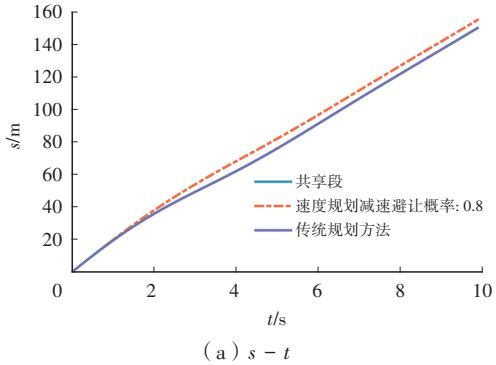
$s-t$



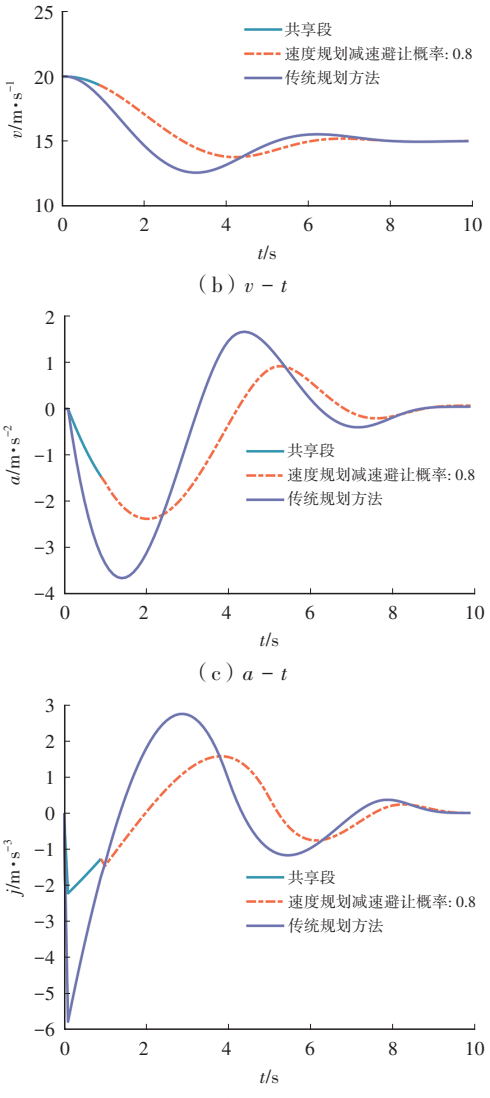
(b)切入概率0.8

图10　速度规划

由图10可知，本文方法能有效融合社会车辆的切入概率，生成平滑的轨迹树。综合评估共享段社会车辆可能的两种行驶意图及其概率：当社会车辆切入概率较低时，共享段倾向匀速行驶；当切入概率较高时，则倾向减速避让。在减速避让策略下，自车减速后逐渐加速以跟随社会车辆，保持与社会车辆8 m的纵向最小间距，从而实现安全交互。针对社会车辆切入概率为0.8的场景下，对比传统生成单一轨迹规划方法，结果如图11所示。



(a) $s-t$



(b) $v-t$

(c) $a-t$

(d) $j-t$

图11　不同方法减速避让速度规划对比

由图11可知，在社会车辆切入概率为0.2时，整个轨迹树中，$a_{max}=3.079\ m/s^2$，$j_{max}=3.982\ m/s^3$；社会车辆切入概率为0.8时，整个轨迹树中，$a_{max}=2.374\ m/s^2$，$j_{max}=2.230\ m/s^3$，均满足运动学和舒适性约束。

在图11a和图11b中，在社会车辆切入概率为0.8时，传统规划方法因完全考虑社会车辆的切入意图，其决策较为谨慎，减速避让操作较早执行。考虑切入意图概率并实施延迟决策策略后，优化了减速时机，确保安全的同时提升了效率。图11c和图11d中，相较于传统方法，本文方法规划减速避让曲线的纵向加速度和纵向加速度变化率显著降低，分别为35%和61.5%，车辆在减速过程中更加平稳舒适。

针对社会车辆切入概率为0.8的场景，速度跟踪CarSim仿真结果如图12所示。当社会车辆切入时，自车按照规划的速度曲线行驶，成功避免碰撞并保持一定的纵向安全距离跟随社会车辆，成功完成车辆交互。

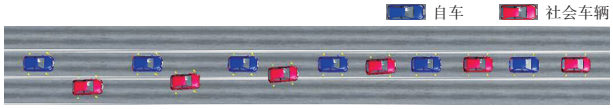


图12　速度跟踪幻影

5　结束语

针对社会车辆行为不确定性，本文提出一种基于延迟决策的自动驾驶车辆路径规划方法。通过构建轨迹树结构，在初始阶段采用共享轨迹段以涵盖社会车辆的所有可能意图，随后通过分叉轨迹灵活应对社会车辆的不同未来行为。根据不同场景需求，分别在路径规划和速度规划中引入延迟决策机制，实现了横向和纵向运动的独立规划。此策略在保障规划的时间连续性的同时，显著提升了自动驾驶车辆在复杂交通环境中的适应性和安全性。

通过MATLAB/Simulink与CarSim的联合仿真验证，延迟决策规划方法不仅优化了决策时机，同时大幅提升了车辆的舒适性与安全性，为自动驾驶车辆在复杂场景中的路径规划提供了有效的解决方案。

参　考　文　献

[1] BOHREN J, FOOTE T, KELLER J, et al. Little Ben: The Ben Franklin Racing Team's Entry in the 2007 DARPA Urban Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(9): 598-614.

[2] KALA R, WARWICK K. Multi-Level Planning for Semi-Autonomous Vehicles in Traffic Scenarios Based on Separation Maximization[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 72: 559-590.

[3] HART P E, NILS J N, RAPHAEL B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.

[4] FU J Y, SUN G H, YAO W R, et al. On Trajectory Homotopy to Explore and Penetrate Dynamically of Multi-UAV[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 24008-24019.

[5] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Randomized Kinodynamic Planning[C]// Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, MI, USA: IEEE, 2002, 20(5): 378-400.

[6] ZENG D Q, YU Z P, XIONG L, et al. Driving-Behavior-Oriented Trajectory Planning for Autonomous Vehicle Driving on Urban Structural Road[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2021, 235(4): 975-995.

[7] KUWATA Y, TEO J, FIORE G, et al. Real-Time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(5): 1105-1118.

[8] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-Based Algorithms for Optimal Motion Planning[C]// 2012 American Control Conference (ACC). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012, 30(7): 846-894.

[9] FAN H Y, ZHU F, LIU C C, et al. Baidu Apollo EM Motion Planner[EB/OL]. (2018-07-20) [2025-02-12]. https://arxiv.org/abs/1807.08048.

[10] MANZINGER S, PEK C, ALTHOFF M. Using Reachable Sets for Trajectory Planning of Automated Vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 6(2): 232-248.

[11] DUBINS L E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents[J]. American Journal of Mathematics, 1957, 79(3): 497-516.

[12] REEDS J, SHEPP L. Optimal Paths for a Car that Goes both Forwards and Backwards[J]. Pacific Journal of Mathematics, 1990, 145(2): 367-393.

[13] CHAI Y N, SAPP B, BANSAL M, et al. Multipath: Multiple Probabilistic Anchor Trajectory Hypotheses for Behavior Prediction[J]. (2019-10-12) [2025-02-12]. https://arxiv.org/abs/1910.05449.

[14] LI T, ZHANG L, LIU S K, et al. MARC: Multipolicy and Risk-Aware Contingency Planning for Autonomous Driving[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(10): 6587-6594.

[15] 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 (IV). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2020.

[16] 宋春雷，张嘉轩，田晓春，等. 基于优化的离散空间轨迹规划算法[J]. 中国惯性技术学报，2023，31(11)：1150-1156+1166.
SONG C L, ZHANG J X, TIAN X C, et al. Discrete Space Trajectory Planning Algorithm Based on Optimization[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(11): 1150-1156+1166.

[17] ZHANG C T, XU W H. Intelligent Vehicle Path Based on Discretized Sampling Points and Improved Cost Function: A Quadratic Programming Approach[J]. IEEE Access, 2024, 12: 24500-24515.

（责任编辑　瑞　秋）

修改稿收到日期为2025年2月12日。