

# 单车道环形交叉口联网自动驾驶汽车的轨迹优化模型

张恒, 何胜学

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年1月28日; 录用日期: 2025年2月21日; 发布日期: 2025年2月28日

## 摘要

在传统的车辆行驶环境中, 环形交叉口相比常规交叉口具有较少的冲突点, 然而, 由于车辆在入口处需要减速避让, 通常会导致车辆延误, 从而影响通行效率。网联自动驾驶汽车(CAV)的出现, 为提高交通基础设施的效率提供了巨大的机遇。本文提出了一种单车道环形车道的两阶段轨迹规划模型, 旨在通过网联自动化技术, 提升现有环形交叉路口的通行能力。该两阶段模型通过双层优化进行公式化处理: 上层使用混合整数线性规划模型, 优化车辆在环形交叉路口的到达时间; 下层则根据最佳到达时间, 优化车辆的行驶轨迹, 并以减少油耗为目标进行优化。最后, 本文在一个典型的四臂环形交叉口上进行了仿真评估, 验证了所提出模型的可行性, 并探讨了不同控制区长度对模型性能的影响。

## 关键词

网联自动驾驶汽车, 环形交叉口, 整数线性规划, 二次规划

# The Trajectory Optimization Model for Connected Automated Vehicles in Single-Lane Roundabout Intersections

Heng Zhang, Shengxue He

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 28<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2025; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

In traditional driving environments, roundabouts have fewer conflict points compared to conventional intersections. However, due to the need for vehicles to slow down and yield at the entrance,

delays occur, leading to lower traffic efficiency. The emergence of connected and automated vehicles (CAVs) offers significant opportunities to improve the efficiency of transportation infrastructure. This paper proposes a two-stage trajectory planning model for a single-lane roundabout, aiming to enhance the traffic capacity of existing roundabout intersections with the help of connected automation. The two-stage model is formulated as a bi-level optimization problem: the upper level uses a mixed-integer linear programming model to optimize the arrival times of vehicles at the roundabout, while the lower level optimizes vehicle trajectories based on the optimal arrival times, with fuel consumption reduction as the objective. Finally, the proposed model is validated through simulation on a typical four-arm roundabout, and the impact of different control zone lengths on the model's performance is discussed.

## Keywords

Connected Automated Vehicles, Roundabout Intersections, Integer Linear Programming, Quadratic Programming

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

环形交叉口被认为是一种增强交通安全的有效方法, 因为与信号控制交叉口相比, 它们的事故率和事故严重性较低。通过减少冲突点的数量、将冲突点从交叉冲突转变为合并冲突, 并降低车辆行驶速度, 环形交叉口能够实现显著的安全效益[1]。然而, 一个主要的缺点限制了其广泛应用: 环形交叉口的通行能力有限, 在交通拥堵时容易导致较高的延误和油耗。环形交叉口的运行模式本身决定了其通行能力的限制。传统的环形交叉口依赖基于规则的管理系统, 要求进入环形交叉口的车辆必须让行于交叉口内的车辆, 并等待合适的间隙才能进入。

然而, 随着交通量的增加, 环形交叉口内的车头时距往往低于可接受的车辆间隙, 导致车辆不得不在入口车道等待, 从而引发大规模的延误。随着网联自动驾驶(CAV)技术的进步, 车辆能够通过专用短程通信(DSRC)实时收集周围车辆的信息[2]。这为进一步改善数据收集和车辆控制提供了可能, 同时, 丰富的信息有助于优化控制过程。李昆耀[3]提出一种结合交叉口信号配时和车辆轨迹的联合优化方法, 通过最小化通行时间优化信号周期和相位时间, 优化车辆轨迹并提升交叉口通行效率。基于交通需求和信号周期, 通过 SUMO 仿真验证其效果; 武瑞一[4]提出了智能网联环境下考虑行驶方向的最优队列编队控制方法和基于混合队列的环形交叉口协同控制方法。杨庆芳[5]提出基于 VT-micro 模型的环形交叉口交通排放与燃油消耗计算模型, 将交通流参数与排放、燃油消耗模型结合, 能准确估算排放和燃油消耗, 为环形交叉口环境效益优化提供定量分析支持。刘永红[6]建立了交叉口综合评价模型, 采用交通成本效益、能耗成本效益和环境成本效益作为指标, 结合微观仿真平台和 CMEM 排放模型, 评估不同流量条件下三种控制方式的综合运行成本。岳永恒[7]提出一种基于 V2V 通信的智能车辆动态自主换道轨迹规划算法。智能车辆通过 V2V 获取周围车辆运动状态, 在换道条件允许时, 采用多项式函数描述车辆的横纵向运动, 并通过双圆车体近似模型的避障算法筛选无碰撞的轨迹。构建多目标优化价值函数, 求解约束化问题获得最优换道轨迹。利用 CarSim 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真验证算法有效性。牛国臣[8]为满足智能汽车换道过程中的安全性与舒适性要求, 提出了一种基于双五次多项式的换道轨迹规划算法。通过动态规划换道时间和增加舒适性约束改进五次多项式算法, 结合当前环境与换道状态计算中转状态, 并通过

改进的五次多项式避免与前方车辆碰撞。Bang H [9]提出了一个无信号交叉口的自动驾驶汽车协调框架,建立了自动驾驶汽车的四种潜在的交通场景,分析了在冲突点的最优到达时间。通过将冲突点的最优到达时间与交叉口的最优进入时间相关联,将复杂交叉口的多车协调问题简化为交叉口进入时的速度控制问题。Danesh A [10]提出了一种两阶段优化模型来优化车辆轨迹来保证汽车安全通过环形交叉口而不停车。但其在速度优化时使用近似模型定义车辆行驶状态为匀加速、匀减速与匀速,有一定的局限性。Pérez J [11]在单车道环岛的前提下用圆形参数定义了车辆轨迹,解释路径规划,考虑环形交叉路口内的入口、出口和车道变化,提出了一种自动驾驶汽车在环形交叉路口导航的控制策略。Müller E R [12]将车辆通过冲突区的顺序转换为一个混合整数规划问题,通过将整体问题分解为三个子问题来实现的:计算每辆车的可行到达时间;车辆到达十字路口时间的混合整数规划问题;以及车辆在预定时间到达十字路口的运动规划问题,以充分管理所考虑的简单交叉路口的交通。Rastelli J P [13]在考虑到环形交叉路口内不同的速度曲线和变道操作的情况下,使用级联架构进行横向控制和参数轨迹生成,提出了一种用于环形交叉路口内自动驾驶汽车转向控制的模糊逻辑系统的设计和实现。

## 2. 模型构建

本研究聚焦于联网自动驾驶车辆(CAV)的应用,这些车辆通过车辆间通信(V2V)和车辆与基础设施通信(V2I)实现相互协作与信息共享,能够从中央控制器实时接收轨迹规划指令。为了支持 V2V 和 V2I 通信,本研究采用了几种通信技术,包括 5G、蓝牙和专用短程通信(DSRC),以确保车辆之间的实时数据交换和信息同步。

本研究中的交通环境为一个单车道环形交叉口,如图 1 所示,所有区域均由中央控制系统进行管理和调度。在该交叉口中,存在多个潜在的横向冲突点,其中四个主要冲突点(a1、a2、a3、a4)分别位于每条引道与环形交叉口入口线或停车线的交接处。特别地,当两辆车的行驶路径相交并经过相同冲突点时,车辆必须按照预定的顺序连续通过该冲突点,并保持规定的安全车距,以确保交通安全和顺畅流动。

值得注意的是,该环形交叉口是一个孤立的交叉口,意味着它的交通流不受上游交叉口的影响,从而避免了上游交通流的干扰,简化了模型的计算与调控。

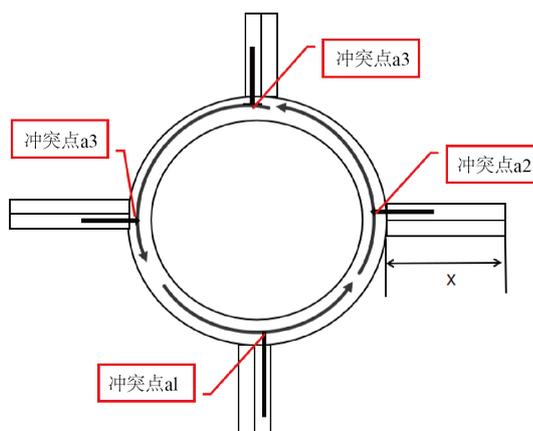


Figure 1. Roundabout layout

图 1. 环岛布局

### 2.1. 符号说明

$X$ : 入口前的控制区域距离

- $\tau$ : 反应时间  
 $\Delta t$ : 时间步长  
 $h$ : 安全时间间隔  
 $d$ : 相邻车辆之间的安全距离  
 $r$ : 环岛半径  
 $i$ : 车辆指数  
 $k$ : 进近车道编号,  $j=1,2,3,4$   
 $N_j$ : 从入口  $k$  进入的车辆数目  
 $M$ : 一个很大的常数  
 $D_i^k$ : 车辆  $i$  在到达  $k$  入口时所用时间  
 $T_0^{i,k}$ : 车辆  $i$  在车道  $k$  进入控制区域的时刻  
 $T_s^{i,k}$ : 车辆  $i$  在车道  $k$  进入环形交叉口入口的时刻  
 $v_{\max}$ : 车辆行驶时允许的最大速度  
 $v_r$ : 环岛内车辆行驶的目标速度  
 $v_f$ : 速度优化阶段车辆允许到达的最大速度(不能达到  $v_{\max}$  的情况)  
 $a_{\max}$ : 车辆行驶时允许的最大加速度  
 $a_{\min}$ : 车辆行驶时允许的最大减速度  
 $t_0^{i,k}$ : 当车辆  $i$  从入口车道  $k$  进入控制区时的时间指数  
 $t_s^{i,k}$ : 当车辆  $i$  从入口车道  $k$  到达环形交叉路口时的时间指数  
 $x_t^{i,k}$ : 车辆  $i$  在时间  $t$  内在车道  $k$  行驶的距离  
 $v_t^{i,k}$ : 时间  $t$  时车辆  $i$  在车道  $k$  上的速度

## 2.2. 到达时间模型

在第一阶段,我们的目标是通过优化每辆车进入环形交叉口的时间,从而最大化交叉口的通行效率。为实现这一目标,关键在于确定每辆车进入交叉口的最早时间,从而避免不必要的延误和拥堵。具体来说,这一问题可以转化为一个求解混合整数线性规划(MILP)问题,旨在最小化进入环形交叉口的总延误时间。以下是最小化问题的数学模型:

$$\min \sum_{j=1}^4 \sum_{i=0}^{N_j} D_i^k \quad (1)$$

$$D_i^k = T_s^{i,k} - T_0^{i,k}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; k = 1, 2, 3, 4; \quad (2)$$

确保每辆车的到达时间受到最小和最大到达时间的约束

$$T_{\min}^{i,k} \leq D_i^k, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; k = 1, 2, 3, 4; \quad (3)$$

确保道路上的两辆连续车辆必须保持安全车头时距

$$T_s^{i,k} + h \leq T_s^{i+1,k}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; k = 1, 2, 3, 4; \quad (4)$$

对于任何一对来自不同途径且路径上有相同冲突点的车辆都可以防止碰撞。引入一个二元变量  $\alpha_{i,i'}^a$  来决定通过冲突点的顺序,如果车辆  $i$  在车辆  $i'$  之前到达冲突点  $a$ ,则  $\alpha_{i,i'}^a = 1$ , 否则为 0, 这个公式确保对于每个冲突点,从不同路径到达的车辆能够按照顺序通行,避免冲突。

$$T_{s,a_n}^{i,k} + h \leq T_{s,a_n}^{i',k'} + M(1 - \alpha_{i,i'}^a), \forall i = 0, 1, \dots, N_j; k = 1, 2, 3, 4; \forall i' = 0, 1, \dots, N_j; k' = 1, 2, 3, 4; n = 1, 2, 3, 4; i \neq i'; j \neq j'; \quad (5)$$

$$\alpha_{i,i'}^{a_n} + \alpha_{i',i}^{a_n} = 1, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; \forall i' = 0, 1, \dots, N_j; i \neq i'; n = 1, 2, 3, 4; \quad (6)$$

到达冲突点“a”的时间是车辆到达入口线的时间加上到达冲突点所需的时间(冲突点之间的行驶时间是恒定的, 因为弧长和恒定速度  $v_r$  是给定的)。例如, 到达图中冲突点  $a_1$  到  $a_2$  的行驶时间:

$$T_{s,a_2}^{i,k} = T_s^{i,k} + \frac{\pi r}{2v_r} \quad (7)$$

为保证第二阶段的速度优化模型的可行性, 车辆到达时间的最早界限在等式中给出。如图 2 所示, 当车辆加速到最高限速, 并在环形交叉路口中以规定限速通过停车线时, 车辆在入口车道上花费的时间最短。计算最短时间公式如下:

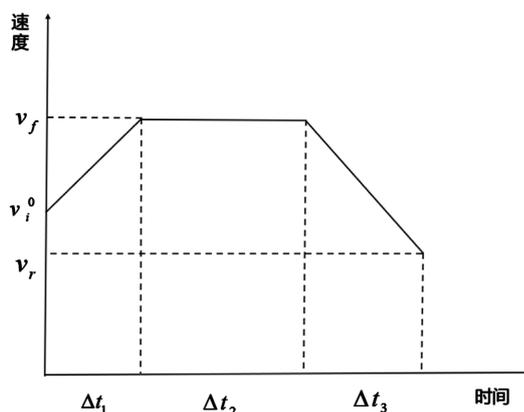


Figure 2. Vehicle reaches the limit conditions

图 2. 车辆到达极限条件

$$T_{\min}^{i,k} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \quad (8)$$

$$\Delta t_1 = \min \left\{ \frac{v_{\max} - v_i^0}{a_{\max}}, \frac{v_f - v_i^0}{a_{\max}} \right\}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; \quad (9)$$

$$\Delta t_2 = \max \left\{ \frac{X - \frac{v_{\max}^2 - v_i^0^2}{2a_{\max}} - \frac{v_r^2 - v_{\max}^2}{2a_{\max}}}{v_{\max}}, 0 \right\}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; \quad (10)$$

$$\Delta t_3 = \min \left\{ \frac{v_r - v_{\max}}{a_{\min}}, \frac{v_r - v_f}{a_{\min}} \right\}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j \quad (11)$$

$$v_f = \sqrt{\frac{(2a_{\max} a_{\min} X + a_{\max} v_i^0^2 + a_{\min} v_r^2)}{(a_{\max} a_{\min})}}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; \quad (12)$$

### 2.3. 速度优化模型

在第一阶段确定每辆车进入环形交叉口的时间后, 第二阶段将基于这些时间信息, 进一步优化每辆车的行驶轨迹, 以最小化燃料消耗。此阶段的输入包括每辆车的到达时间、当前位置和初始速度。由于燃料消耗与车辆加速度密切相关, 因此我们简化了目标函数, 将其转化为一个二次规划问题, 从而降低

了计算复杂度。具体来说, 目标函数旨在最小化车辆的燃料消耗, 这一过程依赖于车辆的加速度控制和轨迹优化, 以下是该阶段的目标函数:

$$\min p = \sum_{t=t_0^{i,k}}^{t_s^{i,k}} a_t^{i,k^2}, \forall i = 0, 1, \dots, N_j; k = 1, 2, 3, 4; \quad (13)$$

$$t_s^{i,k} = T_s^{i,k} / \Delta t \quad (14)$$

$$t_0^{i,k} = T_0^{i,k} / \Delta t \quad (15)$$

确保速度和加速度在规定范围内

$$0 < v_i^k \leq v_{\max} \quad (16)$$

$$a_{\min} \leq a_t^{i,k} \leq a_{\max} \quad (17)$$

确保车辆  $i$  不与前一车辆  $i-1$  发生碰撞

$$x_t^{i,k} + d + \tau v_t^{i,k} < x_{t-\Delta t}^{i-1,k} \quad (18)$$

确保车辆在给定到达时间进入环形交叉口入口

$$x_{T_s^{i,k}}^{i,k} = X \quad (19)$$

确保车辆以期望的稳定速度进入环形交叉路口

$$v_{T_s^{i,k}}^{i,k} = v_r \quad (20)$$

### 3. 实验设计

#### 3.1. 参数设置

采用一个典型的四臂环形交叉路口, 入口车道和环道均为单车道如图 1 所示。实验假设车辆到达控制区符合泊松分布, 且进入控制区的速度符合正态分布。评估的设置在此处指定: 考虑每个交叉口入口均有三个目标出口, 出口比例为 0.5: 0.3: 0.2, 比如 1 号入口的目标出口为(出口 2: 出口 3: 出口 4) = (0.5: 0.3: 0.2); 该假设有助于模拟实际交通流中的随机性, 并能通过调整入口流量来考察不同交通密度对优化模型性能的影响。实验结果表明, 在不同的流量分配下, 模型能够有效调节速度与加速度, 减少延误并提升通行能力为了评估提出的两阶段优化模型, 实验设置遵循模型中对环形交叉口、车辆行驶速度、加速度限制等的假设, 具体参数如下表 1 所示。

**Table 1.** Parameter settings in the simulation

**表 1.** 模拟中的参数设置

参数	值	单位
环岛半径 $r$	20	米
引道长度 $X$	200	米
引道速度上限 $v_{\max}$	20	米/秒
引道速度下限 $v_{\min}$	0	米/秒
最大加速度 $a_{\max}$	3	米/秒 <sup>2</sup>
最小加速度 $a_{\min}$	-4	米/秒 <sup>2</sup>

续表

环岛速度 $v_r$	10	米/秒
安全时间间隔 $h$	2	秒
相邻车辆安全距离 $d$	6	米
反应时间 $\tau$	1	秒
时间步长 $\Delta t$	0.5	秒

### 3.2. 数据分析

在传统车辆行驶中, 进入的车辆需要减速并注意所有其他已经在环形交叉路口上的道路使用者, 然后找一个空隙进入环形交叉路口。而提出的控制模型没有这种强烈的减速行为, 所提出的控制模型增加了吞吐量。在这种情况下, 车辆在进入环形交叉路口时不会遇到冲突交通。因此, 通过量完全取决于饱和车头时距  $h$ , 它有一个理论上的最大值:

$$C_{\max} = \frac{3600}{h} = \frac{3600}{\tau + d/v_r} = 2250 \text{ pcu/h} \quad (21)$$

本文采用 matlab 和 gurobi 求解器对模型进行求解和仿真模拟, 并使用不同的数据验证模型稳定性, 具体数值如表 2 所示。

**Table 2.** Experimental simulation data  
**表 2.** 实验模拟数据

车辆总数	分配情况	1 号入口	2 号入口	3 号入口	4 号入口
400	平衡	100	100	100	100
	不平衡	100	70	50	180
800	平衡	200	200	200	200
	不平衡	200	140	100	360
1200	平衡	300	300	300	300
	不平衡	300	210	150	540

根据仿真表明, 当入口比例不平衡时, 速度规划会发生改变。图 3 展示了在车辆总数为 400 且入口车辆分配比例不同的情况下, 车辆的速度和加速度随行驶距离的变化。图中的蓝色曲线代表入口比例不平衡时的情况, 红色曲线代表入口比例平衡时的情况。通过对比, 可以观察到在不平衡流量条件下, 车辆在加速和减速过程中显著不同的表现, 验证了模型在不平衡流量下对速度调节的优化能力。图中包含了两辆车的速度与加速度的变化。蓝色曲线代表“入口比例不平衡”的情况下车辆的速度和加速度随行驶距离的变化。红色曲线代表“入口比例平衡”情况下车辆的速度和加速度变化。在不平衡的情况下, 车辆的速度显著变化, 在某些阶段出现了较大幅度的加速或减速, 而在平衡的情况下, 速度变化较为平稳。不平衡的情况下, 加速度在一定区间内可能变化较大, 甚至出现负加速度较强的阶段, 表明车辆可能在减速或者存在快速调整。相比之下, 平衡情况下加速度变化相对平稳, 可能是因为更均匀的流量分配使得车辆的控制更加平稳。

当车辆更均匀地到达时, 可以使用所提出的模型来实现  $C_{\max}$ , 可以明显提高现有环形交叉路口的空间利用率。

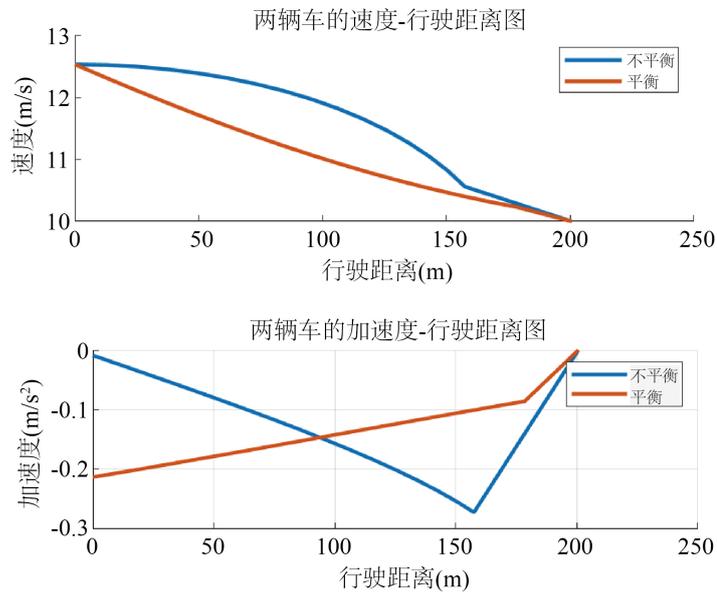


Figure 3. Velocity, acceleration, and distance diagram for the same vehicle  
图 3. 同一车辆速度加速度行驶距离图

以车辆总数为 1200 进行数据为例, 绘制前 10 辆车从 1 号入口进入控制区后的速度和加速度变化关系图, 从图 3 可以看出车辆经过优化达到目标速度  $v_r$ , 而且加速度变化范围在 -1 到 1 之间, 通过图像可以看出速度和加速度以及控制区域的距离 ( $X = 200$  米) 都符合约束, 证明模型的可行性。

根据图 4~图 6 可以看出速度 - 距离变化: 随着  $X$  的增加, 车辆的减速过程变得更加平缓。在  $X = 100$  时, 车辆的速度下降较为剧烈, 意味着车辆在较短的距离内必须进行急剧减速, 以达到目标速度; 而在  $X = 200$  时, 车辆的减速过程较为平稳, 速度下降的幅度较小, 趋向目标速度的速度曲线更加平滑; 当  $X = 300$  时, 减速过程进一步平缓, 车辆的速度变化更加温和, 减速曲线更加平稳且车辆间的速度差异较小, 表现出更高的稳定性。加速度 - 距离变化: 在  $X = 100$  时, 车辆的加速度变化幅度较大, 特别是在车辆初始阶段, 急剧减速导致加速度迅速减少并保持负值, 表明车辆需要更高的制动力度来迅速减速。随着  $X$

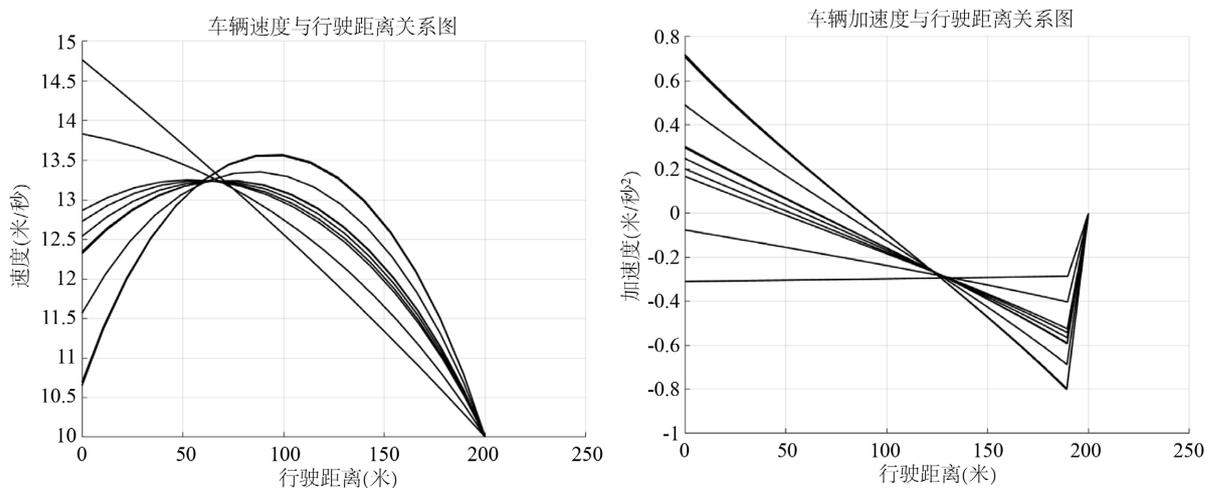


Figure 4. Velocity and acceleration-distance relationship diagram when  $X = 200$   
图 4.  $X = 200$  时速度和加速度距离关系图

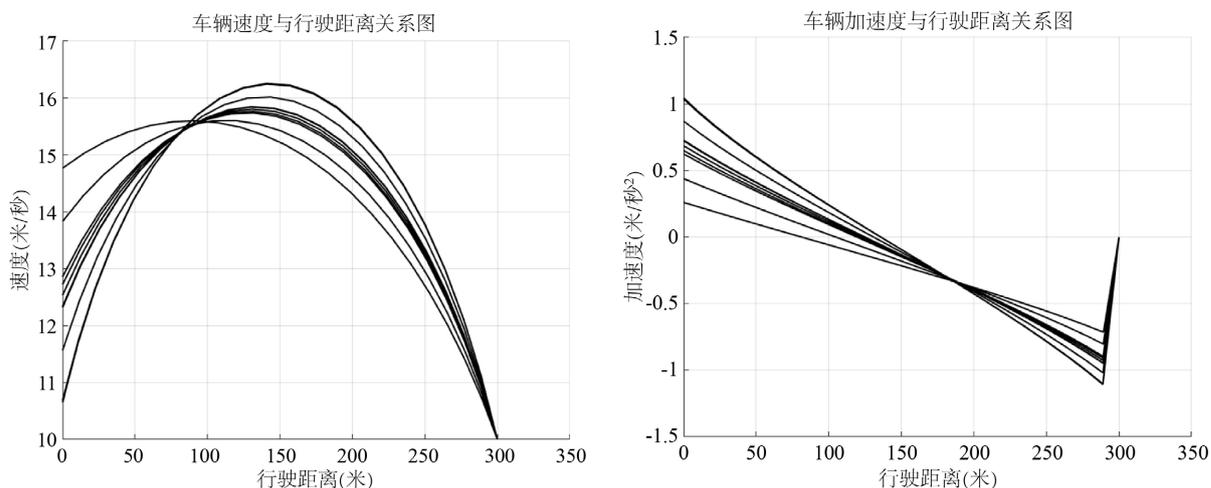


Figure 5. Velocity and acceleration-distance relationship diagram when  $X = 300$

图 5.  $X = 300$  时速度和加速度距离关系图

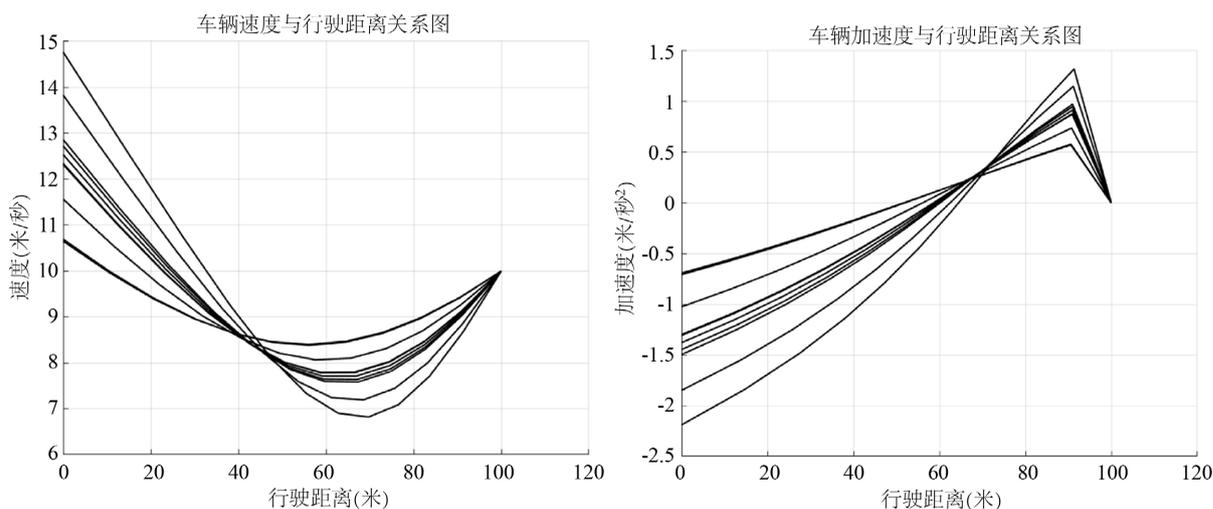


Figure 6. Velocity and acceleration-distance relationship diagram when  $X = 100$

图 6.  $X = 100$  时速度和加速度距离关系图

的增加, 当  $X=200$  和  $X=300$  时, 车辆的加速度变化逐渐趋于平稳, 减速过程更加柔和, 尤其在  $X=300$  时, 加速度趋于零, 表示车辆进入了更加稳定的减速阶段。平衡性和稳定性: 从整体来看, 较低的  $X$  值 (例如 100) 对应着更加急剧的减速过程, 可能会导致车辆在行驶中出现较大的加速度变化, 不利于车辆的稳定性。而较高的  $X$  值 (例如 300) 则展现了更加平稳的减速过程, 减速过程中车辆的加速度变化较为平缓, 这种方式有助于车辆保持更加稳定的状态, 并减少在车辆减速过程中可能产生的不必要的冲击力和不适感。最合适的  $X$  值选择: 综合来看,  $X=200$  或  $X=300$  是最合适的选择。这两个值展示了较为平稳的减速过程和稳定的加速度变化, 适用于需要在较长时间内实现平稳减速的情形。如果对于快速且平稳的减速过程有更高要求, 选择  $X=300$  可能更加适合, 它能提供更加温和的加减速体验。而  $X=200$  提供的减速效果也能满足大多数普通驾驶需求, 尤其适用于保持车速稳定同时避免过快减速的情况。

#### 4. 结论与展望

本研究提出了一种基于联网自动驾驶车辆(CAV)的单车道环形交叉口两阶段轨迹优化模型, 旨在提

高环形交叉口的通行能力,并减少车辆行驶过程中的油耗。通过混合整数线性规划(MILP)和二次规划(QP)两阶段优化方法,本研究在环形交叉口环境中成功实现了以下主要结果:

**通行能力的提升:**通过优化车辆的进入时间和行驶轨迹,研究表明,相较于传统基于规则的控制方法,所提出的模型能够显著提高环形交叉口的通行能力,减少因等待和减速造成的交通延误。特别是在交通流量不平衡的情况下,模型展示了其对车辆流量调控的灵活性,能够有效缓解车辆排队等待的情况。

**燃料消耗的优化:**在第二阶段的轨迹优化中,研究通过最小化燃料消耗目标函数,有效降低了车辆的油耗。实验结果验证了这一点,模型能够在保证安全距离和车辆舒适度的前提下,优化加速和减速过程,从而减少不必要的能量浪费。

**速度与加速度的平稳性:**仿真结果显示,随着车辆进入控制区的流量和车道长度的不同,模型成功调整了车辆的速度和加速度,使得速度变化更加平稳,避免了剧烈的加速或减速波动。特别是车辆在更长的控制区内能够实现更加温和地减速过程,提升了车辆的稳定性和舒适性。

**模型的适应性与鲁棒性:**在不同的交通流量条件下,所提出的模型表现出了良好的适应性和鲁棒性。无论是车流量较低还是较高的情况下,模型都能够有效优化车辆轨迹,保证环形交叉口内车辆的流畅通行,避免了因交通拥堵或不均匀流量分配带来的问题。

本文通过提出一种两阶段模型来优化车辆进入环形交叉口的轨迹,相较于传统交叉口的让行通过原则,通过对不同交通流量和入口分配情况下的仿真,结果表明,所提出的两阶段轨迹优化模型在环形交叉口环境中有效提升了通行能力,减少了车辆的延误时间和油耗。特别是在入口流量不平衡的情况下,模型能够灵活调整车辆的速度和加速度,从而优化车辆通行顺序,并确保安全距离和车速稳定,该模型不仅提高了交叉口的通行能力,还最大限度地避免了因让行导致的走走停停现象,从而有效减少了延误和油耗。

然而,本文假设了一个完全由联网自动驾驶车辆(CAV)组成的交通环境。然而,在不久的将来,人类驾驶的车辆、联网车辆和CAV将共同构成交通流。如何在这种混合交通环境中进行有效的控制,仍是一个值得深入研究的课题。未来的研究可以进一步扩展本文所提出的方法,探讨如何在部分联网和自动化的环境中增强其适应性,确保在不同类型车辆共存的情况下,仍能保持高效的交通流和最优的车辆轨迹规划。这一方向不仅能提升现有交通管理技术的适用性,也有助于应对未来智能交通系统中可能出现的多元化交通状况。

## 参考文献

- [1] 范新科,徐雨竹,何文强,等.城市道路典型环形交叉口交通组织优化研究[J].交通工程,2024,24(11):97-102,108.
- [2] 林建喜,郑燮,宗尧,等.基于专用短程通信的港口车路协同[J].上海船舶运输科学研究所学报,2021,44(4):56-62.
- [3] 李昆耀,褚端峰,胡海洋.网联环境下的交叉口信号配时与车辆轨迹联合优化方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(3):427-434.
- [4] 武瑞一.智能网联环境下城市平面交叉口混合队列协同控制策略研究[D]:[博士学位论文].长春:吉林大学,2024.
- [5] 杨庆芳,王立强,郑黎黎,等.一种环形交叉口交通排放及燃油消耗模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(7):67-73.
- [6] 刘永红,廖瀚博,余志,等.基于环境影响的交叉口控制方式综合评估研究[J].中山大学学报(自然科学版),2013,52(1):12-16.
- [7] 岳永恒,田明柱.基于V2V的智能车辆换道轨迹规划方法研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(9):

---

14-21.

- [8] 牛国臣, 李文帅, 魏洪旭. 基于双五次多项式的智能汽车换道轨迹规划[J]. 汽车工程, 2021, 43(7): 978-986, 1004.
- [9] Bang, H., Chalaki, B. and Malikopoulos, A.A. (2022) Combined Optimal Routing and Coordination of Connected and Automated Vehicles. *IEEE Control Systems Letters*, **6**, 2749-2754. <https://doi.org/10.1109/lcsys.2022.3176594>
- [10] Danesh, A., Ma, W., Yu, C., Hao, R. and Ma, X. (2021) Optimal Roundabout Control under Fully Connected and Automated Vehicle Environment. *IET Intelligent Transport Systems*, **15**, 1440-1453. <https://doi.org/10.1049/itr2.12117>
- [11] Pérez, J., Milanés, V., de Pedro, T. and Vlacic, L. (2011) Autonomous Driving Manoeuvres in Urban Road Traffic Environment: A Study on Roundabouts. *IFAC Proceedings Volumes*, **44**, 13795-13800. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-it-1002.00423>
- [12] Müller, E.R., Carlson, R.C. and Junior, W.K. (2016) Intersection Control for Automated Vehicles with MILP. *IFAC-PapersOnLine*, **49**, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.007>
- [13] Rastelli, J.P. and Peñas, M.S. (2015) Fuzzy Logic Steering Control of Autonomous Vehicles Inside Roundabouts. *Applied Soft Computing*, **35**, 662-669. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.06.030>