

# 考虑复杂地形和障碍尺度的无人车轨迹规划\*

郭丛帅, 刘辉, 聂士达, 宋英杰, 谢雨佳, 张发旺

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**[摘要]** 非结构化道路往往路面起伏不平, 障碍物尺度不一, 忽视起伏地形及不合理处理障碍物会造成车辆运行安全性和通行效率失衡。为应对上述挑战, 本文提出了考虑复杂地形和障碍尺度的轨迹规划方法。首先, 基于车辆通过性分析建立了面向非结构化道路的轨迹规划框架, 判定最优通行模式。其次, 基于路面粗糙程度和障碍物尺度信息建立了运行风险场。另外, 综合考虑运行风险和通行效率, 提出了基于动态规划的避障路径规划算法和基于改进A\*的跨障路径规划算法。进一步的, 基于稳定性分析, 提出了考虑地形约束的速度规划方法。最后, 进行了实车试验。试验结果表明, 非结构化道路起伏地形条件下, 本文所提的轨迹规划方法平均车速提高15.8%, 平均绝对俯仰角和平均绝对侧倾角分别降低68.1%和73.6%, 可有效协调车辆运行安全性和通行效率, 具有较好的泛化性且符合实时性需求。

**关键词:** 非结构化道路; 轨迹规划; 路径规划; 风险场; 速度规划

## Trajectory Planning for Autonomous Vehicles Considering Complex Terrains and Obstacle Scales

Guo Congshuai, Liu Hui, Nie Shida, Song Yingjie, Xie Yujia & Zhang Fawang

School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

**[Abstract]** Unstructured road often has uneven surface and varying obstacle sizes. Neglecting the uneven terrain and handling obstacles improperly can lead to an imbalance between vehicle safety and travel efficiency. To cope with this challenge, in this paper a trajectory planning method that considers complex terrain and obstacle scales (TOTP) for unstructured road is proposed. Firstly, the trajectory-planning framework for unstructured road is established based on vehicle passability analysis, to determine the optimal travel pattern. Then, an operational risk field is established based on road roughness and obstacle's size information. In addition, considering both operational risk and travel efficiency, an obstacle avoidance path planning method based on dynamic programming and an obstacle crossing path planning method based on improved A\* are proposed. Furthermore, based on vehicle stability analysis, a speed planning method considering terrain constraints is proposed. Finally, real-world experiments are conducted, and the experimental results show that under unstructured road conditions, the trajectory planning method proposed in this paper increases the average vehicle speed by 15.8%, with the average absolute pitch angle and average absolute roll angle reduced by 68.1% and 73.6% respectively. This method can effectively coordinate the safety and efficiency of vehicle operation, demonstrating good generalization and meeting the requirements of real-time performance.

**Keywords:** unstructured road; trajectory planning; path planning; risk field; speed planning

\* 国家自然科学基金重大项目(52394262)和国家自然科学基金面上项目(52472445)资助。

原稿收到日期为2024年06月02日, 修改稿收到日期为2024年09月14日。

通信作者: 聂士达, 助理教授, 博士, E-mail: nieshida@bit.edu.cn。

## 前言

轨迹规划是无人驾驶关键技术之一。传统轨迹规划技术主要聚焦在结构化道路,结构化道路路面平坦,坡度变化小且障碍物类型单一。然而,非结构化道路区别于结构化道路<sup>[1]</sup>。一方面,地形复杂,不考虑复杂地形信息,不能保证车辆在三维地形下的安全运行。另一方面,障碍尺度不一,如果路径规划中对所有障碍物统一采用绕行的方式会导致在多障碍物的场景下车辆频繁转向,降低车辆行驶安全性和通行效率。因此,综合考虑复杂地形和障碍尺度进行轨迹规划,可充分发挥越野车辆高通过性的优势,协调车辆运行安全性和通行效率,具有非常重要的意义。

近年来,轨迹规划算法已成为无人驾驶车辆领域的研究热点之一。解耦式轨迹规划通过将路径-速度解耦(如百度EM Planner)<sup>[2-3]</sup>或是横纵向解耦<sup>[4]</sup>,得益于其高效性解耦式轨迹规划应用广泛。根据算法原理的差异,可将轨迹规划方法分为图搜索法、采样法、曲线插值法、数值优化法、势场法和智能算法<sup>[5-8]</sup>。

A\*算法<sup>[9]</sup>加入了启发式函数,搜索速度快,但是路径不连续,搜索效率受启发式函数影响,所以研究人员提出了多种改进A\*算法。Shang等<sup>[10]</sup>提出了一种基于引导线的A\*算法和一种新的基于关键点的算法,该算法相对于传统算法能够更早地引导规划路径避开障碍物。Erke等<sup>[11]</sup>提出了一种可变步长的A\*路径规划算法,可减少计算时间。Jiang等<sup>[12]</sup>建立了包含不可达区域和越野地形不确定性信息的栅格地图,提出了一种基于改进A\*算法和二次规划的双层全局路径规划方法,可降低计算成本并提高通行效率。动态规划(dynamic programming, DP)可处理多阶段决策问题,并得到全局最优解。Rastgoftar等<sup>[13]</sup>基于地理信息和云端气象信息数据,提出了基于DP的越野环境全局路径规划算法,所规划路径更具通过性和安全性。百度Fan等<sup>[2]</sup>提出了基于DP的运动规划算法,该算法具有较高的实用性和可扩展性。然而,单一算法在处理复杂地形及多尺度障碍对于车辆通行的影响时效果较差,尤其是通行模式较为单一,对于障碍均采取避让策略,难以适应非结构化道路的特点,实现非结构化道路最优通行路径的决策与规划。

针对复杂地形,Tian等<sup>[14]</sup>针对露天矿的崎岖地形条件下矿车运输,提出了考虑地形约束和发动机动力限制的轨迹规划方法。然而,该方法并未考虑起伏地形对于车辆运行特性的影响。为表征机器人穿越越野地形的能力(即速度),Cai等<sup>[15]</sup>提出了一种完全基于机器人速度的可通过性的表示方法,该方法可以从数据中学习,提供可解释性和直观的调整,然而其对数据依赖性强烈。势场法能有效结合地形和障碍信息<sup>[16]</sup>,Chi等<sup>[17]</sup>结合人工势场法和双向快速搜索随机树(rapidly exploring random tree, RRT)算法提出了一种基于风险的双树RRT算法。针对越野道路,田洪清等<sup>[18]</sup>采用人工势场法对越野环境建模量化车辆通行风险,提出了基于势能场模型的概率图算法。Tang等<sup>[19]</sup>综合考虑地形和障碍物的影响,提出了适应障碍物大小的综合势场,结合最近邻策略优化(proximal policy optimization, PPO)提出了分层路径规划方法,该方法提高了无人车辆在起伏地形运行的安全性和稳定性。以上算法虽然可以提高复杂地形条件下车辆运行安全性,但并不能处理多尺度障碍物跨越的问题。

障碍物一般均被认为不可跨越,然而,由于非结构化道路障碍尺度不一的特点,相较于单一避障,跨障路径会带来更高的通行效率。Yang等<sup>[20]</sup>提出了一种考虑矮障碍物或负障碍物的双层碰撞检查方法,该方法提高了可移动性和稳定性,然而,其不能处理复杂地形。Luo等<sup>[21]</sup>提出了针对新型模块化机器人的跨障策略,通过自重构实现跨障。Chen等<sup>[22]</sup>设计了一种新型电线检查维护机器人,采用被动顺应性跨障原理,可快速穿越障碍物。然而,区别于以上研究对象和应用场景,阿克曼转向车辆并不能实现自身结构变化,且非结构化道路地形和障碍复杂多变。

综上所述,为协调非结构化道路复杂地形和多尺度障碍条件下车辆运行安全性和通行效率,本文提出了考虑复杂地形和障碍尺度的轨迹规划方法(TOTP)。本文贡献主要包括以下几个方面。

(1) 基于车辆通过性分析建立了面向非结构化道路的轨迹规划框架,如图1所示。

(2) 综合考虑运行风险和通行效率,分别提出了基于动态规划的避障路径规划算法和基于改进A\*的跨障路径规划算法。另外,基于稳定性分析,提出了考虑地形约束的速度规划方法。

(3) 通过实车试验证明了非结构化道路条件下本文所提算法的有效性。

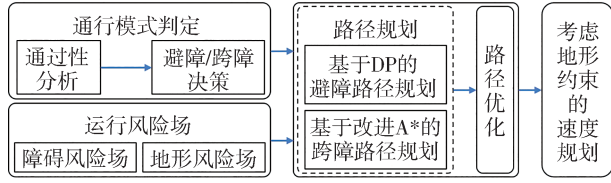


图1 面向非结构化道路的轨迹规划框架

## 1 通行模式判定

### 1.1 车辆运动学模型

如图2所示,  $L$  为车辆轴距,  $P$  为车辆后轴中心位置,  $P_{proj}$  为车辆后轴中心在参考轨迹上的投影点,  $\theta_p$  为点  $P_{proj}$  处参考轨迹的切线方向与  $X$  轴的夹角,  $\delta$  为车轮转角,  $\theta_c$  为笛卡尔坐标系下车辆航向角, 定义车辆航向角与参考线切线的角度偏差为  $\theta_F$ , 可表示为

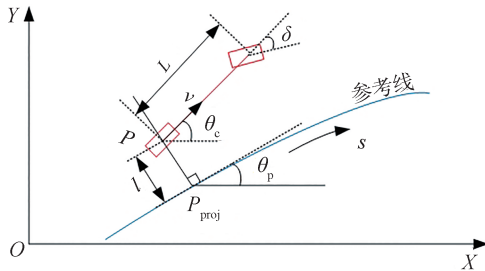


图2 车辆运动学模型

$$\theta_F = \theta_c - \theta_p \quad (1)$$

参考轨迹上点  $P_{proj}$  处的曲率  $\kappa_r$  可以表示为

$$\kappa_r = d\theta_p/ds \quad (2)$$

式中:  $s$  为参考线弧长;  $l$  为车辆后轴中心到参考轨迹的横向偏差。  $\dot{s}$  和  $\dot{l}$  可分别表示为

$$\dot{s} = v \cos \theta_F / (1 - \kappa_r l) \quad (3)$$

$$\dot{l} = v \sin \theta_F \quad (4)$$

联立式(4)得, Frenet坐标系基于时间的车辆运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{l} \\ \dot{\theta}_F \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_F \\ \frac{\tan \delta}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_p + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\delta} \quad (5)$$

为便于做路径规划, 将式(5)转为基于参考线弧长  $s$  的表达式, 可得:

$$\begin{cases} l' = (1 - \kappa_r l) \tan \theta_F \\ \theta_F' = \frac{\tan \delta (1 - \kappa_r l)}{L \cos \theta_F} - \dot{\theta}_p \\ \delta' = \dot{\delta} (1 - \kappa_r l) / (v \cos \theta_F) \end{cases} \quad (6)$$

### 1.2 通过性分析

车辆的通过性几何参数包括最小离地间隙、车辆两侧轮胎内缘距离、纵向通过角、接近角、离去角<sup>[23]</sup>。影响车辆能否跨越障碍物的主要参数是最小离地间隙  $h$  和两侧轮胎内缘距离  $b$ 。定义车辆能否跨越障碍物的条件为

$$\begin{cases} b > W_{obs}^F + \zeta_1 \\ h > h_{obs} + \zeta_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $W_{obs}^F$  为障碍物在 Frenet 坐标系下的投影宽度;  $h_{obs}$  为障碍的高度;  $\zeta_1$  为宽度松弛因子, 取  $\zeta_1 = 0.2b$ ;  $\zeta_2$  为高度松弛因子, 取  $\zeta_2 = 0.1h$ 。

### 1.3 避障跨障决策

本文中避障/跨障决策主要包含两部分: 第一部分目的是对预估避障路径和跨障路径的代价进行对比, 判断是否有必要生成跨障路径; 第二部分目的是对生成的避障轨迹和跨障轨迹进行综合决策, 选取最优的轨迹输出。本文轨迹规划流程如图3所示。

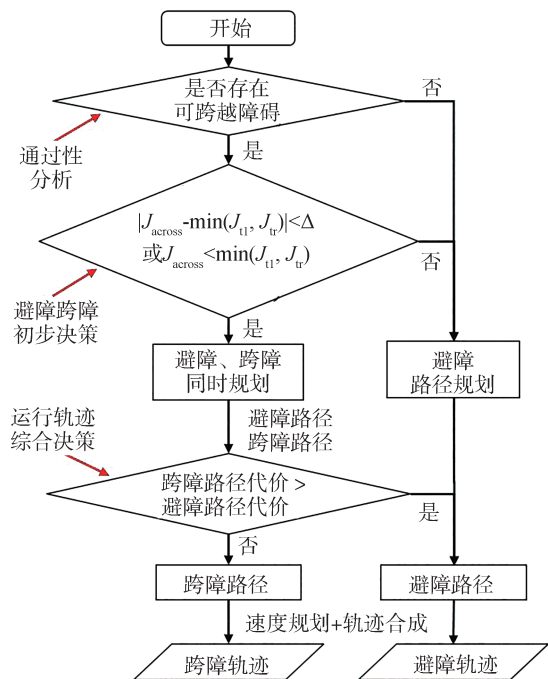


图3 轨迹规划流程图

#### 1.3.1 避障跨障初步决策

本文基于车辆运动基元构建预估路径, 建立代价函数对左转预估路径、右转预估路径和跨越路径

进行评价来决定是否进行跨越规划。运动基元是由车辆运动学模型生成的路径,基元终点确定条件为:车辆在Frenet坐标系下 $s$ 值与障碍物的 $s$ 值相等,且车辆轮廓刚好不与障碍物发生接触,以左转预估路径构建为例,如图4所示。

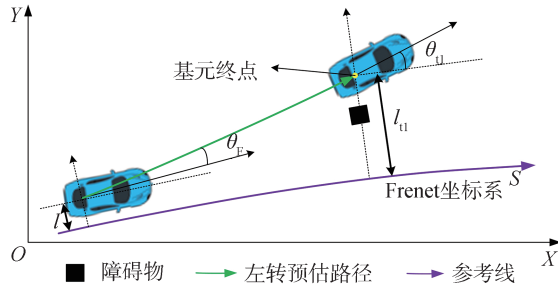


图4 左转预估路径构建

图4中, $l$ 为自车在Frenet坐标系下的横向偏移, $\theta_{il}$ 为左转工况下基元终点航向角度与参考线切线的角度差值, $l_{il}$ 为左转工况下基元终点的横向偏移值。

代价函数由距离改变代价和航向改变代价两者构成,左转的代价为

$$J_{il} = \omega_1 |\theta_F - \theta_{il}| + \omega_2 |l - l_{il}| \quad (8)$$

式中: $\omega_1$ 为距离代价权重; $\omega_2$ 为航向改变代价权重,取 $\omega_1 = 0.3$ 和 $\omega_2 = 0.7$ 。

右转的代价为

$$J_{ir} = \omega_1 |\theta_F - \theta_{ir}| + \omega_2 |l - l_{ir}| \quad (9)$$

式中: $\theta_{ir}$ 为右转工况下基元终点航向角度与参考线切线的角度差值; $l_{ir}$ 为右转工况下基元终点的横向偏移值。

跨越的代价为

$$J_{across} = \omega_1 |\theta_F - \theta_a| + \omega_2 |l - l_a| \quad (10)$$

式中: $\theta_a$ 为跨越工况下基元终点航向角度与参考线切线的角度差值; $l_a$ 为跨越工况下基元终点的横向偏移值。

该部分主要是根据预估的避障和跨障路径判断接下来是否有必要生成跨障轨迹。在满足预估跨障路径代价小于预估避障路径代价,或是预估跨障路径代价与预估避障路径代价很接近的条件,都应生成跨障轨迹。则,若满足条件 $|J_{across} - \min(J_{il}, J_{ir})| < \Delta$ 或 $J_{across} < \min(J_{il}, J_{ir})$ , $\Delta$ 为定值,则考虑跨越障碍物,同时进行跨越规划和避障规划;反之,不考虑跨越障碍物,轨迹规划系统只进行避障轨迹规划。

### 1.3.2 运行轨迹综合决策

为判定车辆通行模式,选取最优的车辆运行轨

迹,本文通过3方面进行评定,包括:纵向目标代价、横向安全性代价和地形安全性代价。纵向目标代价主要衡量车辆的通行效率,轨迹点的速度越接近目标速度,轨迹平均速度越高,纵向目标代价就越小。纵向目标代价定义如下:

$$J_{lon}^{obj} = \omega_v \sum_{t=0}^T (t^2 \cdot |v_{ref} - \dot{s}(t)|) + \omega_s \frac{1}{1+s} \quad (11)$$

式中: $v_{ref}$ 为轨迹的目标速度; $s$ 为轨迹的纵向长度; $T$ 为轨迹的时间长度; $\omega_v$ 为纵向速度代价; $\omega_s$ 为纵向距离代价。

横向安全代价主要衡量车辆的横向安全性和稳定性,其定义如下:

$$J_{lat} = \sum_{t=0}^T \frac{a_{lat}^2}{|a_{lat}|} \quad (12)$$

式中 $a_{lat} = (\dot{s}(t))^2 \cdot \kappa$ 。

地形代价是轨迹点纵向速度和路面粗糙度的函数,主要考虑地形对于车辆运行安全性和稳定性的影响,其定义如下:

$$J_{lon}^s = \sum_{t=0}^T e^{f(R_{rough}, \dot{s}(t))} \quad (13)$$

式中 $f(R_{rough}, \dot{s}) = \omega_{s1} \cdot R_{rough} + \omega_{s2} \cdot \dot{s}$ , $\omega_{s1}$ 为地形代价, $\omega_{s2}$ 为速度代价, $R_{rough}$ 为路面粗糙度。

本文通过高程均方差算法(RMSH)<sup>[23]</sup>计算路面粗糙度,并以此来表征地形起伏程度。本文使用的模型为存储高程信息的2.5D栅格地图,选择3×3的占据栅格作为目标区域,如图5所示。

$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$
$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$

图5 3×3移动网格

路面粗糙度 $R_{rough}$ 可表示为

$$R_{rough} = \frac{1}{n^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n})^2} \quad (14)$$

式中: $z_i$ 为第 $i$ 个数据点的高程值; $n$ 为数据点的数量。

因此,轨迹的总代价可表示为

$$J = \omega_{obj} J_{lon}^{obj} + \omega_{lat} J_{lat} + \omega_s J_{lon}^s \quad (15)$$

式中 $\omega_{obj}$ 、 $\omega_{lat}$ 和 $\omega_s$ 分别表示纵向目标代价权重、横向安全代价权重和地形代价权重。

## 2 路径规划

### 2.1 运行风险场

#### 2.1.1 障碍风险场

为引导车辆避开不可通行障碍,本文提出障碍风险场量化障碍物对于车辆运行的威胁,如图6(a)所示。非结构化道路存在正负障碍,两者的区别在于负障碍的高度并不会影响车辆的通过性,其长度和宽度是影响车辆通过性的关键参数。从规划的角度,正负障碍的路径规划无本质差别,所以本文只以正障碍物作为典型。定义障碍风险函数为

$$U_{\text{obs}}(d_{oi}) = \begin{cases} \exp(-\tau d_{oi}^2/d_0^2), & d_{oi} \leq d_0 \\ 0, & d_{oi} > d_0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\tau$ 为风险场调整因子; $d_{oi}$ 为车辆与第*i*个障碍物的欧氏距离,认为该参数可以从感知层获取; $d_0$ 为风险场辐射的半径,通过障碍物尺寸和安全膨胀距离确定。

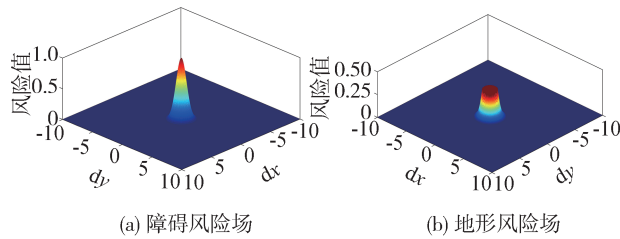


图6 运行风险场

#### 2.1.2 地形风险场

为在路径规划中使车辆避开障碍物的同时,尽量避免穿越粗糙度过大的路面,借鉴风险场的思想表征起伏地形对于车辆运行的影响。当路面粗糙度超过预设值时,则以地形风险场量化其对于车辆运行的影响,以引导车辆避开这些区域,如图6(b)所示。值得注意的是,与不可通行障碍物不同,在特定情况下车辆可能须穿越这些地形。因此,当车辆与路面风险场中心距离小于一定范围时,将风险值设定为固定值而非无限大,以保证车辆局部路径有解。因此,定义地形风险场为

$$U_{\text{R}}(d_{ii}) = \begin{cases} \exp(-\tau d_{ii}^2/d_1^2), & d_{ii} < d_1 \\ \exp(-\tau d_{ii}^2/d_2^2), & d_1 \leq d_{ii} \leq d_2 \\ 0, & d_{ii} > d_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $d_{ii}$ 为车辆与第*i*个起伏地形中心的欧氏距离; $d_1$ 为起伏地形半径,认为该参数可以从感知层获取;

$d_2$ 为风险场辐射半径。

### 2.2 避障路径规划

避障路径规划旨在引导车辆安全、高效地绕行静态障碍物,同时尽量选择路面粗糙度较小的地形行驶。针对此目标,以运行风险场综合量化复杂地形和障碍下车辆运行风险,结合动态规划算法求解避障路径,具体规划流程如图7所示。

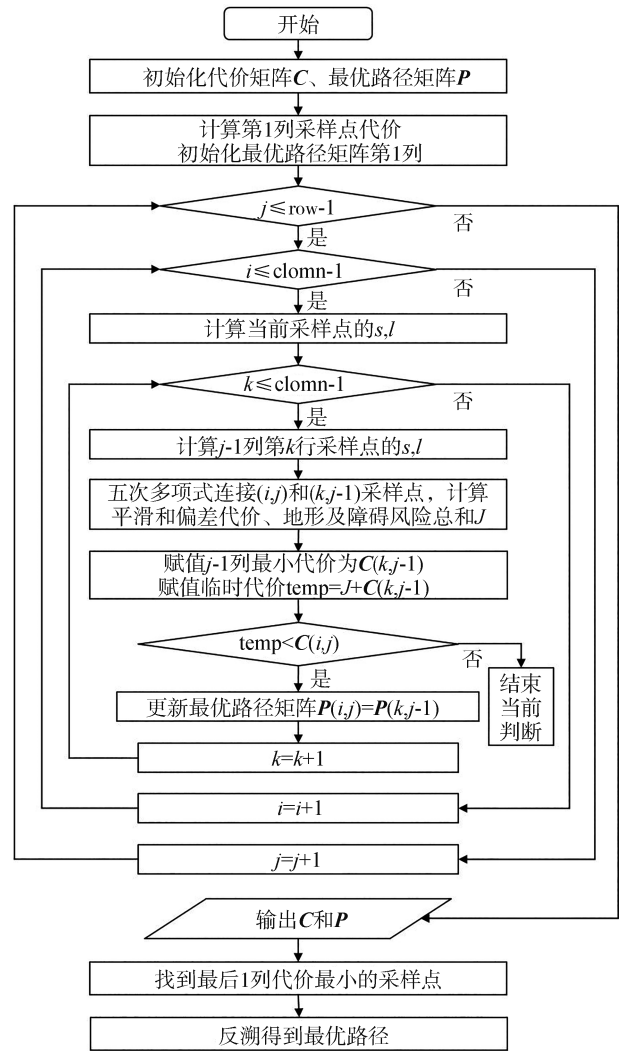


图7 避障路径规划算法流程图

#### 2.2.1 路径单元设计

动态规划过程以等纵向间隔距离采样将路径划分为若干段。为保证采样点间曲线平滑,且更合理计算路径代价,本文采用五次多项式曲线作为基本单元来构建路径,如图8所示。

Frenet坐标系下,每段路径可表示为

$$l = f_i(s) = a_0^i + a_1^i s + a_2^i s^2 + a_3^i s^3 + a_4^i s^4 + a_5^i s^5 \quad (18)$$

式中  $s_{p_i} \leq s \leq s_{p_{i+1}}$ 。

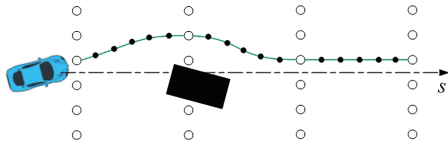


图8 路径单元构建

路径规划起点状态应与车辆初始状态保持一致,设置其边界条件为

$$f(s_0) = l_0; f'(s_0) = \tan \theta_F; f''(s_0) = 0 \quad (19)$$

另外,对于任意路径点  $P_i$ ,应保证曲线连续平滑。因此,令:

$$f(s_i) = l_i; f'(s_i) = 0; f''(s_i) = 0 \quad (20)$$

### 2.2.2 代价函数设计

为保证车辆在安全无碰撞的条件下,运行平稳且尽可能靠近参考路径,本文主要考虑车辆运行风险、路径平滑性和横向偏移程度。

车辆运行过程中,希望其不与障碍物发生接触,且减少在起伏道路运行,以此保证车辆安全稳定运行。因此,安全代价  $J_{av}^{sf}$  可定义如下:

$$J_{av}^{sf} = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{oi=1}^{OI} U_{obs}(d_{oi}^i) + \sum_{ti=1}^{TI} U_R(d_{ti}^i) \right) \quad (21)$$

式中:  $OI$ 、 $TI$  分别表示障碍物和起伏地形的总数;  $d_{oi}^i$  和  $d_{ti}^i$  表示第  $i$  个采样点车辆与第  $oi$  个障碍物和第  $ti$

个起伏地形的距离。

路径平滑性代价主要是为了保证路径满足车辆运动学要求,可以通过最小化横向偏移的1阶和2阶导数来实现,定义平滑代价  $J_{av}^{smo}$  如下:

$$J_{av}^{smo} = \omega_{dl} \sum_{i=1}^n (l'(s_i))^2 + \omega_{ddl} \sum_{i=1}^n (l''(s_i))^2 \quad (22)$$

式中  $\omega_{dl}$  和  $\omega_{ddl}$  为权重系数。

横向偏移代价主要是为防止盲目搜索,使车辆偏离参考线,通过最小横向偏移来实现,定义偏移代价  $J_{av}^r$  如下:

$$J_{av}^r = \sum_{i=1}^n (f(s_i))^2 \quad (23)$$

综上,避障路径规划代价函数可定义为

$$J_{av} = \omega_{av}^{all} J_{av}^{sf} + \omega_{av}^{smo} J_{av}^{smo} + \omega_{av}^r J_{av}^r \quad (24)$$

式中  $\omega_{av}^{all}$ 、 $\omega_{av}^{smo}$  和  $\omega_{av}^r$  分别表示安全性、平滑性和横向偏移代价权重。

### 2.3 跨障路径规划

对于任意障碍物统一采取避让策略,会降低车辆通行效率。跨障路径规划旨在避免车辆盲目绕行,降低转向频率,提高车辆的通行效率和安全性。本文应用分离轴定理进行碰撞检测,确保车辆与障碍物之间无碰撞,提出基于改进A\*算法的跨障路径规划,具体规划流程如图9所示。

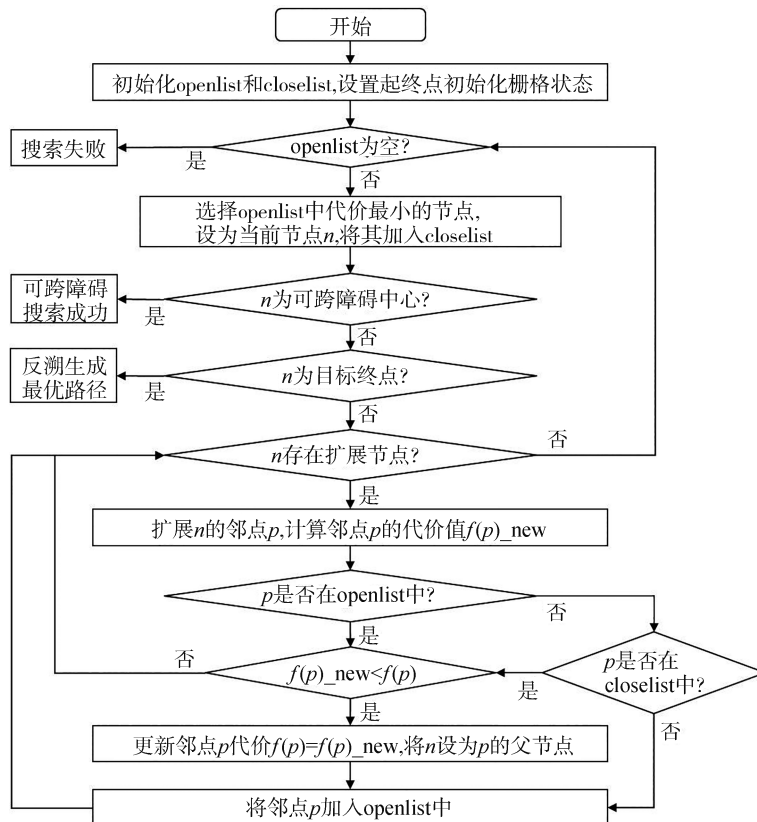


图9 跨障路径规划流程图

经典A\*算法存在一定局限性,即生成的路径具有固定的角度,路径不够平滑,且往往无法规划出局部最短路径。因此,本文采用车辆运动基元作为A\*算法的节点扩展方式,给定运动基元的长度和车辆最大转向曲率,基元之间的曲率变化限制则可以保证生成路径符合车辆运动学约束。这种节点扩展方式充分考虑了车辆的非完整约束,从而保证了路径的可行性。本文只考虑车辆前进运动,运动基元扩展如图10所示。

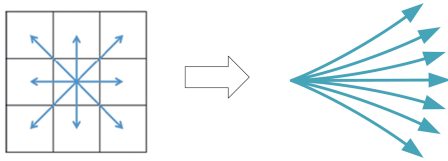


图10 运动基元扩展子节点

### 2.3.1 累计真实代价和启发项设计

累计真实代价值 $g(N)$ 由从起点到当前点的各条边的代价值累加得到,其设计体现了该路径规划算法的最优准则。为使车辆的行驶范围限制在参考线左右一定范围内,设计横向偏离代价,横向偏移代价可以通过最小化横向偏移来完成,将横向偏移 $J_{ac}^r$ 定义为

$$J_{ac}^r = \sum_{j=1}^N (f(s_j))^2 \quad (25)$$

式中 $s_j$ 表示第 $j$ 个扩展节点的纵向位移。

为保证轨迹的平滑性,在代价函数中加入路径曲率 $\kappa$ 切换的代价,平滑代价 $J_{ac}^{smo}$ 定义为

$$J_{ac}^{smo} = \sum_{j=1}^N |\Delta\kappa| \quad (26)$$

式中 $\Delta\kappa$ 表示两个运动基元之间的曲率变化值, $\Delta\kappa = \kappa_{j+1} - \kappa_j$ 。

由于跨越规划要求车辆从可通行障碍物正上方行驶通过,因此,只考虑地形风险和不可通行障碍物,使车辆尽量选择平缓区域通过,避开不可通行障碍物,定义安全代价 $J_{ac}^{sf}$ 为

$$J_{ac}^{sf} = \sum_{j=1}^N \left( \sum_{oj=1}^{OJ} U_{obs}(d_{oj}^j) + \sum_{ti=1}^{TI} U_R(d_{ti}^j) \right) \quad (27)$$

式中: $OJ$ 表示不可通行障碍的总数; $d_{oj}^j$ 和 $d_{ti}^j$ 分别表示第 $j$ 个扩展节点,车辆与第 $oj$ 个障碍物和第 $ti$ 个起伏地形的距离。

综上,累计真实代价值 $g(N)$ 可表示为

$$g(N) = \omega_{ac}^{att} J_{ac}^{sf} + \omega_{ac}^{smo} J_{ac}^{smo} + \omega_{ac}^r J_{ac}^r \quad (28)$$

式中 $\omega_{ac}^{att}$ 、 $\omega_{ac}^{smo}$ 和 $\omega_{ac}^r$ 分别表示安全性、平滑性和横向

偏移代价权重。

启发项设计:启发项 $h(N)$ 影响了算法收敛速度,其意义在于引导搜索方向和减少扩展节点。本文采用Frenet坐标系下的曼哈顿距离设计启发项,使扩展节点在横向和纵向上同时靠近目标点,从而有效引导车辆跨越障碍物和前进。

对于规划起点和被跨越障碍物之间扩展的子节点,如图11中的 $P_1$ ,其主要作用是引导车辆精准跨越障碍物。而对于障碍物和目标点之间扩展的子节点,如图11中的 $P_2$ ,其主要用于引导车辆前进至目标点,因此启发项定义为

$$h(N) = \begin{cases} |s_N - s_{obs}| + |l_N - l_{obs}|, & s_N \leq s_{obs} \\ |s_N - s_G| + |l_N - l_G|, & s_N > s_{obs} \end{cases} \quad (29)$$

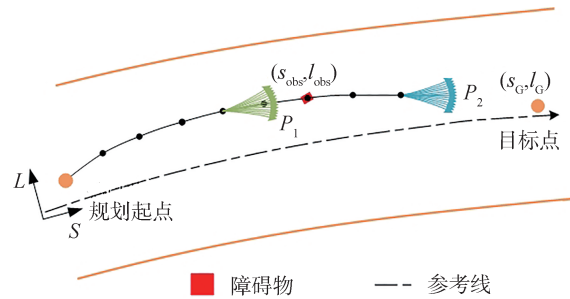


图11 障碍物前扩展的子节点

### 2.3.2 碰撞检测

非结构化环境路面有明显的起伏变化,车辆所在平面与障碍物平面往往不同,因此单独根据底盘离地高度大于障碍物高度的条件不能够保证跨越障碍物时车体不与障碍物发生碰撞,如图12所示。

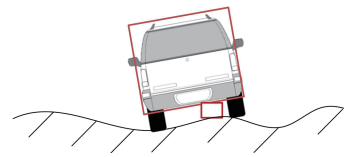


图12 碰撞检测

因此,在改进A\*算法扩展子节点时,需要对车体边界框和障碍物边界框进行碰撞检测,确保车辆在跨越障碍物时不与障碍物发生碰撞。若检测到车体与障碍物发生碰撞,则将该节点的真实累计代价值 $g(N)$ 设置为无穷大。本文基于分离轴定理进行碰撞检测。以障碍物位置和尺寸信息作为障碍物边界框绘制基准,以车辆尺寸、位置、姿态角和路径点的位置和高程信息作为车体边界框绘制基准。

## 2.4 路径优化

### 2.4.1 约束分析

#### (1) 车辆运动学约束

本文针对的对象是阿克曼转向车辆,因为车辆存在最小转弯半径,所以对最大曲率进行限制,否则路径曲率过大。根据车辆运动学模型可推导得到曲率表达式为

$$\kappa = \frac{(l'' + (l\kappa_r + l'\kappa_r) \tan \theta_F) \cos^2 \theta_F + \kappa_r}{(1 - l\kappa_r) / \cos \theta_F} \quad (30)$$

假设  $\theta_F$  和  $l''$  均趋近于0,则简化式(30)为

$$\kappa = \kappa_r / (1 - l\kappa_r) \quad (31)$$

根据车辆最大车轮转角可得最大曲率为

$$\kappa_{\max} = \tan \delta_{\max} / L \quad (32)$$

因此,路径最大曲率限制可表示为

$$\tan \delta_{\max} \cdot l\kappa_r - \tan \delta_{\max} + |\kappa_r| \cdot L \leq 0 \quad (33)$$

#### (2) 无碰撞约束

在图13中,蓝色线段表示每个位置的侧向安全范围,所有蓝色线段组成了可通行空间。对于每个  $s_k$  值,都可以根据可通行空间确定  $l_k$  的上下界  $l_{k_{\max}}$  和  $l_{k_{\min}}$ ,可通行障碍的上下界分别为  $l_{\max}^{\text{obs}}$  和  $l_{\min}^{\text{obs}}$ 。

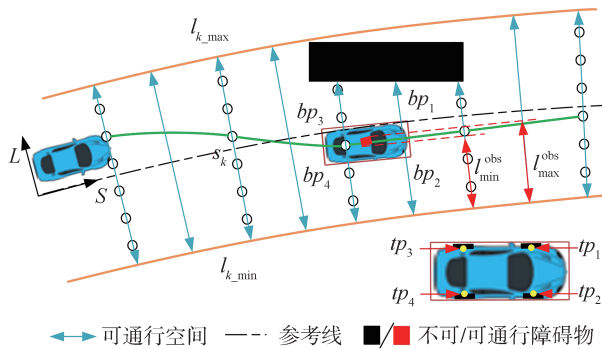


图13 可通行区域及约束范围

针对避障路径,须考虑车辆外部轮廓不与障碍物发生碰撞且不出可通行区域。如图13所示,本文以矩形表示车辆轮廓。车辆轮廓4个顶点的  $l$  值分别为

$$\begin{cases} l_k^{tp_1} = l_k + d_1 \sin \theta_F + W \cdot \cos \theta_F / 2 \\ l_k^{tp_2} = l_k + d_1 \sin \theta_F - W \cdot \cos \theta_F / 2 \\ l_k^{tp_3} = l_k - d_2 \sin \theta_F + W \cdot \cos \theta_F / 2 \\ l_k^{tp_4} = l_k - d_2 \sin \theta_F - W \cdot \cos \theta_F / 2 \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $d_1$  为车辆后轴中心到车辆前端外沿的距离;  $d_2$  为车辆后轴中心到车辆后端外沿的距离;  $W$  为车辆

宽度。

记  $l_{k_{\max}}^{bp_m}$ 、 $l_{k_{\min}}^{bp_m}$  分别为点  $bp_m$  对应的可通行空间侧向位移的上、下界,故无碰撞约束可以表示为

$$l_{k_{\min}}^{bp_m} < l_k^{bp_m} < l_{k_{\max}}^{bp_m}, m \in [1, 4] \quad (35)$$

针对跨障路径,须考虑车辆轮胎内缘不与障碍物发生碰撞且车辆不超出可通行区域。本文以矩形包围盒表示车辆轮廓。如图13所示,  $tp_1 \sim tp_4$  分别表示4个轮胎内缘中心,其侧向位置分别为

$$\begin{cases} l_k^{tp_1} = l_k + L_v \sin \theta_F + b \cdot \cos \theta_F / 2 \\ l_k^{tp_2} = l_k + L_v \sin \theta_F - b \cdot \cos \theta_F / 2 \\ l_k^{tp_3} = l_k + b \cdot \cos \theta_F / 2 \\ l_k^{tp_4} = l_k - b \cdot \cos \theta_F / 2 \end{cases} \quad (36)$$

式中  $L_v$  为车辆长度。

则无碰撞约束可以表示为

$$\begin{cases} l_{\max}^{\text{obs}} < l_k^{tp_1}, l_k^{tp_3} < l_{k_{\max}} \\ l_{k_{\min}} < l_k^{tp_2}, l_k^{tp_4} < l_{\min}^{\text{obs}}, |s_k - s_{\text{obs}}| < L_v \end{cases} \quad (37)$$

#### (3) 连续性约束

在路径优化问题中,曲线是通过一系列离散点来表示的,因此必须在这些点之间施加连续性约束,以保证优化后的曲线是连续平滑的。

$$\begin{cases} l_{k+1} = l_k + l'_k \Delta s + \frac{l''_k (\Delta s)^2}{2} + \frac{l''_{k+1} - l''_k}{6 \Delta s} (\Delta s)^3 \\ l'_{k+1} = l'_k + l''_k \Delta s + \frac{l''_{k+1} - l''_k}{2 \Delta s} (\Delta s)^2 \end{cases} \quad (38)$$

### 2.4.2 代价函数设计

由于避障路径规划缺乏对无碰撞约束和车辆运动学约束的限制;相对的,基于运动基元生成的跨障路径不同基元之间存在着曲率差异,不能保证整条路径平滑,因此需要对路径进一步优化,以确保路径的安全性和可行性。定义优化变量为  $\mathbf{x} = [l_1, l'_1, l''_1, l_2, l'_2, l''_2, l_3, l'_3, l''_3, \dots, l_k, l'_k, l''_k]$ ,  $l'_k = dl/ds$ ,  $l''_k = d^2l/ds^2$ 。

代价函数主要有平滑性代价与与动态规划路径的误差两个指标。可以通过最小化  $l$  的1阶导数和2阶导数实现第1个指标,最小化  $l$  与动态规划路径的横向偏移  $l_k^{\text{ref}}$  的误差来实现第2个指标。因此,代价函数可以表示为

$$\begin{aligned} J_{\text{pp}}^{\text{opt}} &= \omega_{\text{opt}}^{\text{dl}} \sum_{k=1}^K (l'_k)^2 + \omega_{\text{opt}}^{\text{dll}} \sum_{k=2}^K (l''_k)^2 + \\ &\omega_{\text{opt}}^{\text{ref}} \sum_{k=1}^K (l_k - l_k^{\text{ref}})^2 \end{aligned} \quad (39)$$

式中  $\omega_{\text{opt}}^{\text{dl}}$ 、 $\omega_{\text{opt}}^{\text{dll}}$  和  $\omega_{\text{opt}}^{\text{ref}}$  分别表示纵向目标代价权重、纵向安全代价权重和横向偏移权重。

### 3 考虑地形约束的速度规划

#### 3.1 约束分析

越野工况具有高路径曲率、横坡和低附着系数等特征,导致车辆易于在行驶过程中失稳。因此,在越野车辆速度规划中,必须考虑车辆的稳定性约束,以防止侧滑、侧翻等危险情况的发生。

##### 3.1.1 侧翻约束

根据刚性汽车的准静态侧翻过程<sup>[24]</sup>可得侧向加速度为

$$a_y = \left( \frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{F_{zi}}{mg} \right) \frac{B}{h_g} + \sin \alpha \quad (40)$$

式中: $\alpha$ 为侧坡角度; $F_{zi}$ 为车辆转向过程内侧轮胎垂向反作用力; $B$ 为轮距; $h_g$ 为质心高度。

则横坡条件下车辆速度约束可表示为

$$\dot{s} \in \left[ 0, \sqrt{\frac{Bg \cos \alpha}{h_g \kappa} + \frac{g \sin \alpha}{\kappa}} \right] \quad (41)$$

##### 3.1.2 横向稳定约束

为保障驾驶安全性,防止车辆失稳情况的发生,质心侧偏角 $\beta$ 和横摆角速度 $\omega$ 应该满足以下条件<sup>[25]</sup>:

$$\begin{cases} |\beta| \leq \arctan(0.02\varphi g) \\ |\omega| \leq \mu g/\dot{s} \end{cases} \quad (42)$$

式中 $\mu$ 为路面附着系数。

根据单车模型,车辆横摆角速度、质心侧偏角、纵向车速和前轮转角之间的关系如下:

$$\begin{cases} \beta = \frac{b\delta}{L} - \frac{\dot{s}^2}{LR_r} \left( b \frac{m_f}{|k_f|} + a \frac{m_r}{|k_r|} \right) \\ \omega = \frac{\delta\dot{s}}{L} - \frac{\dot{s}^3}{LR_r} \left( \frac{m_f}{|k_f|} - \frac{m_r}{|k_r|} \right) \end{cases} \quad (43)$$

式中: $R_r$ 表示弯道半径; $m_f$ 表示前轴质量; $m_r$ 表示后轴质量; $k_f$ 表示前轴刚度; $k_r$ 表示后轴刚度。

因此,车辆质心侧偏角保持在稳定域内的条件可以表示为

$$-\zeta \leq \frac{b\delta}{L} - \frac{\dot{s}^2}{LR_r} \psi \leq \zeta \quad (44)$$

式中: $\zeta = \arctan(0.02\varphi g)$ ; $\psi = bm_f/|k_f| + am_r/|k_r|$ 。求解式(44)可以得到纵向车速的范围为

$$\dot{s} \in \begin{cases} \left[ \sqrt{\frac{\eta R_r}{\psi}}, \sqrt{\frac{(b\delta + L\zeta)R_r}{\psi}} \right], & \eta \geq 0 \\ \left[ 0, \sqrt{\frac{(b\delta + L\zeta)R_r}{\psi}} \right], & \eta < 0 \end{cases} \quad (45)$$

式中 $\eta = b\delta - L\zeta$ 。

联立式(42)和式(43)可得车辆横摆角速度保持在稳定域内的条件为

$$-\varphi g \leq \frac{\dot{s}^4}{LR_r} \left( \frac{m_f}{|k_f|} - \frac{m_r}{|k_r|} \right) - \frac{\delta\dot{s}^2}{L} \leq \varphi g \quad (46)$$

为简化公式,令 $\gamma = m_f/|k_f| - m_r/|k_r|$ ,然而,随着路面坡度和车辆加速的变化, $\gamma$ 可能发生符号变化,因此分类讨论得到横摆稳定速度范围为

$$\dot{s} \in \begin{cases} \left[ 0, \sqrt{\frac{\xi_2 + \sqrt{\xi_2^2 + 4\xi_1\xi_3}}{2\xi_1}} \right], & \begin{cases} \gamma \geq 0 \\ \Delta < 0 \end{cases} \\ \left[ 0, \sqrt{\frac{\xi_2 - \sqrt{\xi_2^2 - 4\xi_1\xi_3}}{2\xi_1}} \right], & \begin{cases} \gamma \geq 0 \\ \Delta \geq 0 \end{cases} \\ \left[ 0, \sqrt{\frac{\xi_2 - \sqrt{\xi_2^2 - 4\xi_1\xi_3}}{2\xi_1}} \right], & \gamma < 0 \\ \left[ 0, \sqrt{\frac{\varphi g L}{\delta}} \right], & \gamma = 0 \end{cases} \quad (47)$$

式中: $\xi_1 = \gamma/LR_r$ ; $\xi_2 = \delta/L$ ; $\xi_3 = \varphi g$ ; $\Delta = \xi_2^2 - 4\xi_1\xi_3$ 。

##### 3.1.3 连续性约束

在速度规划中,要求车辆在连续时间段内速度的变化是连续的,可保证车辆运动的稳定性和可控性。另外,有助于降低驾驶员和乘客的不适感,同时,连续性还有助于优化约束路径规划,减少了路径跟踪中的误差,提高了路径执行的可行性和稳定性,连续性约束的定义如下:

$$\begin{cases} s_{k+1} = s_k + \dot{s}_k dt + \frac{\ddot{s}_k dt^2}{2} + \frac{(\ddot{s}_{k+1} - \ddot{s}_k) dt^2}{6} \\ \dot{s}_{k+1} = \dot{s}_k + \ddot{s}_k dt + \frac{(\ddot{s}_{k+1} - \ddot{s}_k) dt}{2} \end{cases} \quad (48)$$

##### 3.1.4 边界条件约束

边界条件约束要求速度曲线起始点符合车辆当前状态,其定义如下:

$$s_0 = s_{\text{start}}; \dot{s}_0 = v; \ddot{s}_0 = a \quad (49)$$

式中: $s_{\text{start}}$ 为规划起点的 $s$ 值; $v$ 为车辆速度; $a$ 为车辆加速度。

#### 3.2 问题建立

速度优化问题的目标是为所得到的规划路径规划一条符合车辆运动学约束和地形约束的安全平滑的速度曲线。与路径优化相似,期望得到由 $K$ 个 $(s, \dot{s}, \ddot{s}, t)$ 组成的速度曲线,对于第 $k$ 个点: $s_k$ 表示该点的纵向位移; $\dot{s}_k$ 表示该点的纵向速度; $\ddot{s}_k$ 表示该点的纵向加速度。因此,定义优化变量为: $\mathbf{s} = [s_1, \dot{s}_1, \ddot{s}_1, s_2, \dot{s}_2, \ddot{s}_2, s_3, \dot{s}_3, \ddot{s}_3, \dots, s_K, \dot{s}_K, \ddot{s}_K]$ 。速度优化问题可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} J_{sp}^{opt} &= \omega_s^{ref} \sum_{k=1}^K (\dot{s}_k - v_s^{ref})^2 + \\ &\omega_s^a \sum_{k=1}^K \dot{s}_k^2 + \omega_s^j \sum_{k=2}^K (\ddot{s}_{k+1} - \ddot{s}_k)^2 \end{aligned} \right. \quad (50)$$

s. t. 式(40), 式(44), 式(46)~式(48)

式中  $\omega_s^{ref}$ 、 $\omega_s^a$  和  $\omega_s^j$  分别表示速度偏差代价权重、加速度和加加速度权重。

式(50)中等号右边第1项衡量了速度曲线靠近目标速度的程度, 该项代价越小, 说明速度曲线更接近目标速度, 提高该项的权重有助于提高车辆的通行效率; 第2项和第3项衡量速度曲线的平滑程度, 这两项代价越小, 速度曲线越平滑。

### 4 实车试验

为验证本文所提出的算法(TOTP)在复杂地形和多尺度障碍条件下的有效性、决策合理性及其泛化能力, 本文设置了4个试验工况进行分析验证, 试验工况及目的如表1所示。另外, 验证TOTP的实时性, 并将其部署到工控机上, 进行实车测试。图14所示为本文试验车辆及其传感器布置情况。试验车搭载线控转向、线控驱动、线控制动系统、激光雷达、摄像头和惯性导航单元, 一台处理器为 Intel Core i9-10900K、显卡为 NVIDIA GeForce RTX 3080, 并安装机器人操作系统(robot operation system, ROS)的边缘计算平台作为工控机, 车辆参数如表2所示。试验场地如图15所示。

表1 试验工况及目的

工况名称	工况特点	试验目的	
工况1	包含起伏路面	验证TOTP对复杂地形的处理能力	算法有效性
工况2	包含起伏路面和不可跨越障碍	验证TOTP对复杂地形和不可跨越障碍物的处理能力	
工况3	包含可跨越障碍和不可跨越障碍	验证非结构化道路同时存在可跨越和不可跨越障碍时TOTP的处理能力	决策合理性
工况4	包含可跨越障碍和起伏路面	验证同时存在起伏道路和可跨越障碍条件下TOTP的处理能力	

#### 4.1 工况测试

##### 4.1.1 工况1

为验证TOTP对复杂地形的处理能力, 本节将

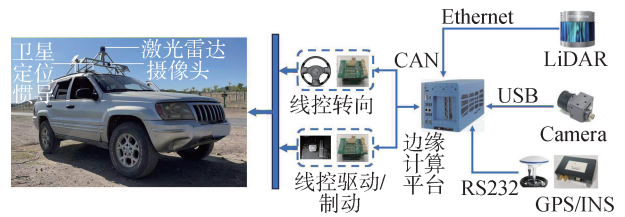


图14 试验车辆及其传感器布置情况

表2 车辆参数

参数	数值
车辆长度 $L/m$	4.610
车辆宽度 $W/m$	1.826
车辆高度 $H/m$	1.763
车辆质量 $m/kg$	2285
轴距 $L/m$	2.69
轮距 $B/m$	1.581
质心高度 $h_g/m$	0.67
最小离地间隙 $h/m$	0.283
两侧轮胎内缘距离 $b/m$	1.36
车辆前轴刚度 $k_f/(N \cdot m^{-1})$	39600
车辆后轴刚度 $k_r/(N \cdot m^{-1})$	39600



图15 包头试验场地

本文提出的TOTP算法与EM Planner<sup>[2]</sup>进行对比分析。本节设置试验场景包括起伏路面, 如图16(a)所示, 车辆初速度为3 m/s, 目标速度为10 m/s。

由图16(b)、图16(c)和图16(d)可知, 由EM Planner规划的轨迹有两处车辆俯仰角和侧倾角绝对值较大, 且抖动十分剧烈。原因是EM Planner未考虑地形变化对于车辆运行状态的影响, 规划路径经过了两处起伏路面, 造成了车辆俯仰角和侧倾角的抖动, 由TOTP规划的轨迹车辆俯仰角和侧倾角变化更为平缓, 如表3所示, 平均绝对俯仰角(mean absolute pitch, MAP)和平均绝对侧倾角(mean absolute roll, MAR)数值显著降低, 分别降低70.3%和72.9%。

由图16(e)和图16(f)可知, 有两种方法规划的速度曲线均位于速度约束范围内, 保证了车辆安全

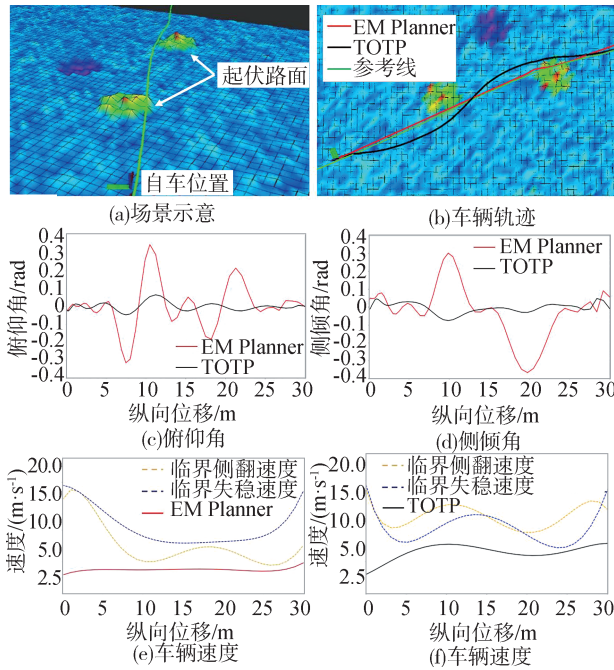


图 16 工况 1 试验场景及结果

表 3 工况 1 各项数据对比

项目	MAP/rad	MAR/rad	MV/(m·s <sup>-1</sup> )
EM Planner	0.074	0.096	3.71
TOTP	0.022	0.026	5.21
对比	-70.3%	-72.9%	40.4%

行驶。由 EM Planner 规划得到的平均速度 (mean speed, MV) 为 3.71 m/s, 然而, 由 TOTP 规划得到的平均速度为 5.21 m/s, 平均速度提高了 40.4%。

#### 4.1.2 工况 2

为验证 TOTP 对于复杂地形和不可跨越障碍物的处理能力, 本节设置试验场景包括起伏路面和不可跨越障碍物如图 17(a) 所示, 车辆初速度为 3 m/s, 目标速度为 10 m/s。

由图 17(b)、图 17(c) 和图 17(d) 可知, 因 EM Planner 没有考虑复杂地形, 其倾向于选择距离参考线较近的左侧绕行了障碍物, 并没有避开起伏路面, 其规划的轨迹存在两处车辆俯仰角和侧倾角绝对值较大, 且抖动十分剧烈。而 TOTP 考虑了地形和障碍的共同影响, 选择从右侧绕行障碍物, 且避开了起伏地形, 车辆俯仰角和侧倾角变化较为平缓。如表 4 所示, MAP 和 MAR 显著降低, 分别降低 68.1% 和 73.6%。

其次, 由两种方法规划的速度曲线均位于速度约束范围内, 保证了车辆安全行驶, 如图 17(e) 和图 17(f) 所示。由 EM Planner 规划得到的 MV 为

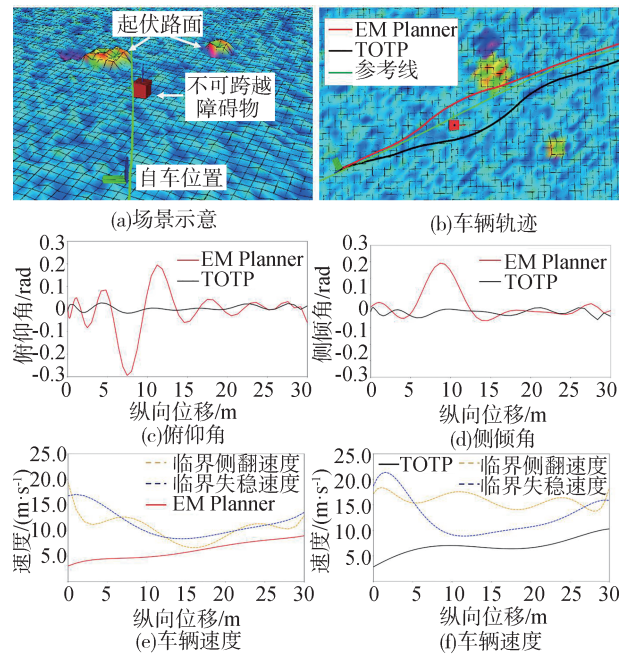


图 17 工况 2 试验场景及结果

表 4 工况 2 各项数据对比

项目	MAP/rad	MAR/rad	MV/(m·s <sup>-1</sup> )
EM Planner	0.047	0.072	5.62
TOTP	0.015	0.019	6.51
对比	-68.1%	-73.6%	15.8%

5.62 m/s, 然而, 由 TOTP 规划得到的平均速度为 6.51 m/s, 平均速度提高了 15.8%。

#### 4.1.3 工况 3

为验证非结构化道路同时存在可跨越和不可跨越障碍物时, 考虑障碍物尺度进行路径规划的优势。设置试验场景主要包括不可跨越障碍和可跨越障碍, 如图 18(a) 所示, 初速度为 3 m/s, 目标速度为 10 m/s。

由图 18(b)、图 18(c) 和图 18(d) 可知, 跨障轨迹和避障轨迹均保证车辆安全运行, 两条轨迹经过的路面都比较平坦, 车辆姿态角接近且数值较小。由于避障路径规划算法将所有障碍物统一视为不可跨越障碍物, 其倾向于绕行可跨越障碍物, 导致规划路径存在较大曲率变化。相反, 跨障路径规划算法选择避让不可跨越障碍物的条件下跨越尺度较小的可跨越障碍物。结合速度规划算法, 其规划的路径曲率相对较小, 进而规划得到更大的通行速度, 如图 18(e) 和图 18(f) 所示。结合表 5 可知, 跨障轨迹平均车速提高 29.6%, 且平均绝对侧向加速度 (mean absolute lateral acceleration, MALA) 降低 71.5%。如

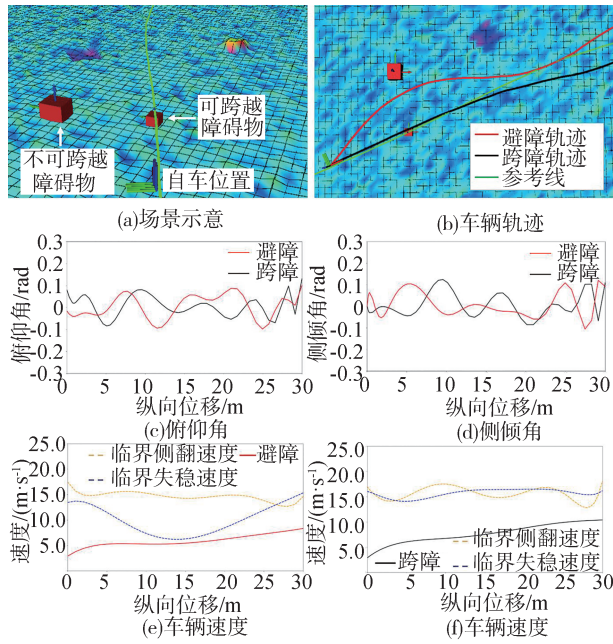


图18 工况3试验场景及结果

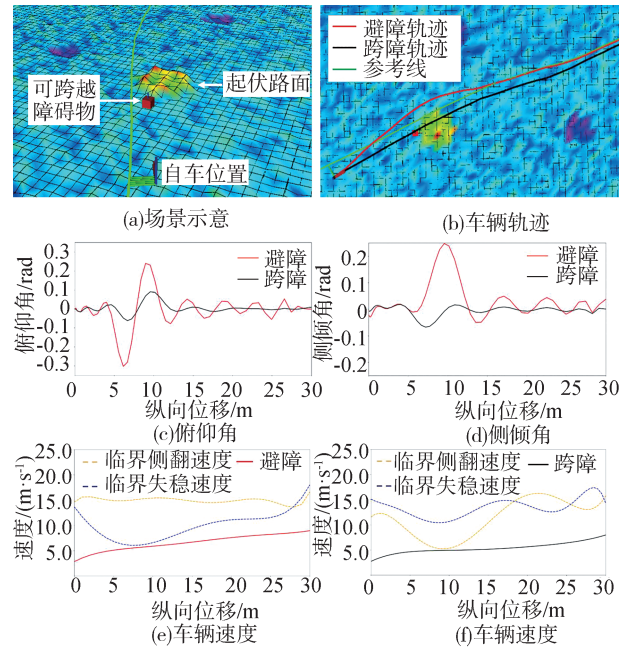


图19 工况4试验场景及结果

表6所示,跨障轨迹具有更小的整体代价,尤其是在横向安全代价和纵向目标代价方面显著降低,分别为34.92和245.49。由于道路相对平坦,两种轨迹地形代价基本一致。因此,通行模式判定模块选取车辆通行模式为跨障模式,输出跨障轨迹。

表5 工况3各项数据对比

项目	MAP/rad	MAR/rad	MV /(m·s <sup>-1</sup> )	MALA /(m·s <sup>-2</sup> )
避障	0.006	0.009	5.58	1.65
跨障	0.007	0.009	7.23	0.47
对比	16.6%	0	29.6%	-71.5%

表6 工况3避障跨障代价对比

项目	$J_{lon}^{obj}$	$J_{lat}^{obj}$	$J_{lon}^s$	$J$
避障	385.44	145.87	120.40	651.71
跨障	245.49	34.92	122.78	403.19

#### 4.1.4 工况4

为验证起伏道路且存在可跨越障碍物条件下,本文所提算法对于复杂场景的处理能力,设置起伏路面和可跨越障碍连续出现的场景为工况4测试场景,如图19(a)所示,车辆初速度为3 m/s,目标速度为10 m/s。

由图19(b)、图19(c)和图19(d)可知,避障轨迹绕行障碍物和起伏地形,而跨障轨迹受限于障碍物的跨越过程,其也会从起伏地形上经过,导致车辆存在较大的俯仰角和侧倾角。其原因在于,本文所提

轨迹规划框架的通行模式判定模块综合考虑了车辆通行效率和运行安全性目标,保证车辆以最佳轨迹运行。根据表7和表8可知,避障轨迹相对于跨障轨迹更能够保证车辆的稳定运行,姿态变化更为平缓。对应的,虽然路径较直,相对路程变少,MV和MALA分别降低6.4%和70.6%,具有较小的横向安全代价,但另一方面,MAP和MAR分别增加173.3%和225.0%,具有较大的纵向目标代价和地形代价,整体代价高于避障路径,所以输出避障轨迹。

表7 工况4各项数据对比

项目	MAP/rad	MAR/rad	MV/(m·s <sup>-1</sup> )	MALA/(m·s <sup>-2</sup> )
避障	0.015	0.012	6.19	1.53
跨障	0.041	0.039	5.79	0.45
对比	173.3%	225.0%	-6.4%	-70.6%

表8 工况4避障跨障代价对比

项目	$J_{lon}^{obj}$	$J_{lat}^{obj}$	$J_{lon}^s$	$J$
避障	355.46	137.87	128.72	622.05
跨障	407.34	29.92	307.44	744.7

#### 4.2 算法实时性

在跨障试验中,由于须同时规划两条局部轨迹,总耗时相当于单独规划避障轨迹的两倍,因此须验证跨障、避障同时规划的实时性。为验证其实时性,本文设置30 m规划长度,随机设置3个障碍物,包括可跨越和不可跨越障碍,进行200组规划测试,轨迹

规划耗时如表9所示。

表9 轨迹规划耗时 ms

跨障规划 平均耗时	避障规划 平均耗时	速度规划 平均耗时	总耗时
20.3	21.57	18.3	60.37

如表9所示,跨障规划平均耗时20.3 ms,避障规划平均耗时21.57 ms,速度规划平均耗时18.3 ms,轨迹规划程序平均耗时为60.37 ms,满足一般自动驾驶系统对规划节点要求,本文所提算法符合实时性需求。

## 5 结论

为协调非结构化道路条件下车辆运行安全性与通行效率,提出了考虑复杂地形和障碍尺度的轨迹规划方法。为规划得到综合性能更好的轨迹,本文提出了面向非结构化道路的轨迹规划框架。根据车辆通行模式并综合考虑运行风险和通行效率,分别提出了基于动态规划的避障路径规划算法和基于改进A\*的跨障路径规划算法,协调非结构化道路车辆运行安全性与通行效率。基于稳定性分析,提出了考虑地形约束的速度规划方法,保证车辆非结构化道路运行稳定性。基于实车试验分析,起伏地形条件下,相对于EM Planner,本文所提的轨迹规划方法可提高车辆运行效率和安全性,平均车速提高15.8%,平均绝对俯仰角和平均绝对侧倾角分别降低68.1%和73.6%。多尺度障碍和复杂地形综合作用条件下,本文所提算法框架可判定最优通行模式,并规划得到最优通行轨迹,协调车辆运行安全性和通行效率,保证综合性能最佳。且本文所提算法平均耗时60.37 ms,符合实时性需求。在未来研究中,将进一步研究多个可跨越障碍条件下的轨迹规划方法,扩展轨迹规划场景,从而全面保障非结构化道路无人车辆安全性和通行效率。

### 参考文献

[1] HU J, HU Y, LU C, et al. Integrated path planning for unmanned differential steering vehicles in off-road environment with 3D terrains and obstacles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6): 5562-5572.

[2] FAN H, ZHU F, LIU C, et al. Baidu apollo EM motion planner [J]. ArXiv, 2018, abs/1807.08048.

[3] SHI Y, HUANG Y, CHEN Y. Trajectory planning of autonomous trucks for collision avoidance with rollover prevention [J]. IEEE

Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021: 1-10.

[4] WERLING M, ZIEGLER J, KAMMEL S, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame [C]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2010: 987-993.

[5] YANG L, QI J, SONG D, et al. Survey of robot 3D path planning algorithms [J]. Journal of Control Science and Engineering, 2016, 2016: 1-22.

[6] CLAUSMANN L, REVILLOUD M, GRUYER D, et al. A review of motion planning for highway autonomous driving [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 1826-1848.

[7] 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.

[8] 吴晓建, 廖平伟, 雷耀, 等. 面向结构化道路的智能驾驶轨迹规划一致性研究 [J]. 汽车工程, 2024, 46(3): 383-395, 430.

WU X J, LIAO P W, LEI Y, et al. Research on consistency of intelligent driving trajectory planning for structured road [J]. Automotive Engineering, 2024, 46(3): 383-395, 430.

[9] HART P E, NILSSON N J, 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.

[10] SHANG E, DAI B, NIE Y, et al. A guide-line and key-point based A-star path planning algorithm for autonomous land vehicles [C]. Proceedings of the 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2020.

[11] ERKE S, BIN D, YIMING N, et al. An improved A-Star based path planning algorithm for autonomous land vehicles [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(5).

[12] JIANG J, HAN Z, LI J, et al. Global path planning of UGVs in large-scale off-road environment based on improved A-star algorithm and quadratic programming [C]. Proceedings of the 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2023.

[13] RASTGOFTAR H, ZHANG B, ATKINS E M. A data-driven approach for autonomous motion planning and control in off-road driving scenarios [Z]. Ithaca; Cornell University Library, arXiv.org. 2018.

[14] TIAN F, ZHOU R, LI Z, et al. Trajectory planning for autonomous mining trucks considering terrain constraints [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 6(4): 772-786.

[15] CAI X, EVERETT M, FINK J, et al. Risk-aware off-road navigation via a learned speed distribution map [C]. Proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 2931-2937.

[16] 田洪清, 丁峰, 郑讯佳, 等. 基于势能场虚拟力的智能网联车辆运动规划 [J]. 汽车工程, 2021, 43(4): 518-526.

TIAN H Q, DING F, ZHENG X J, et al. Motion planning based on virtual force of potential field for intelligent connected vehicles [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(4): 518-526.

- [8] HE C, HUANG K, CHEN X, et al. Transportation control of cooperative double-wheel inverted pendulum robots adopting Udvardia-control approach[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 91: 2789–2802.
- [9] KOUNG D, KERMORGANT O, FANTONI I, et al. Cooperative multi-robot object transportation system based on hierarchical quadratic programming[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 6466–6472.
- [10] VERGINIS C K, MASTELLARO M, DIMAROGONAS D V. Robust cooperative manipulation without force/torque measurements: control design and experiments[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(3): 713–729.
- [11] 何一新. 轮式移动机器人可变构型设计与协同搬运控制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.  
HE Y X. Wheeled mobile robot for variable configuration design and cooperative handling control[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [12] ZHANG B, HUANG J, SU Y, et al. Distributed collaborative control of multi-vehicle autonomous cooperative transportation systems: a hierarchical constraint-following approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023.
- [13] 张利鹏, 穆建华, 王建涛, 等. 角模块架构智能电动汽车路径跟踪鲁棒预测控制[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(1): 241–254.  
ZHANG L P, MU J H, WANG J T, et al. Robust predictive control for path tracking of intelligent electric vehicle based on wheel corner module [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(1): 241–254.
- [14] WANG J, GAO S, QIANG Y, et al. Structural topology and dynamic response analysis of an electric torque vectoring drive-axle for electric vehicles [J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5(2): 164–179.
- [15] CHEN Y H. Mechanical systems under servo constraints: the Lagrange's approach[J]. *Mechatronics*, 2005, 15(3): 317–337.
- [16] YANG Z, HUANG J, YANG D, et al. Design and optimization of robust path tracking control for autonomous vehicles with fuzzy uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 30(6): 1788–1800.
- [17] CHEN Y H, ZHANG X. Adaptive robust approximate constraint-following control for mechanical systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2010, 347(1): 69–86.
- [18] 李玲, 马力, 牟宇, 等. 模型车轮胎侧偏刚度的参数辨识方法[J]. *汽车工程*, 2016, 38(12): 1508–1514, 1466.  
LI L, MA L, MOU Y, et al. Parameter identification method for the tire cornering stiffness of model vehicle[J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(12): 1508–1514, 1466.
- [19] UDWADIA F E, KALABA R E. New directions in the control of nonlinear mechanical systems[J]. *Mechanics and Control*, 1994: 81–84.
- [20] 陈特, 陈龙, 徐兴, 等. 分布式驱动无人车路径跟踪与稳定性协调控制[J]. *汽车工程*, 2019, 41(10): 1109–1116.  
CHEN T, CHEN L, XU X, et al. Integrated control of unmanned distributed driven vehicles path tracking and stability [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(10): 1109–1116.

(上接第657页)

- [17] CHI W, WANG C, WANG J, et al. Risk-DTRRT-based optimal motion planning algorithm for mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(3): 1271–1288.
- [18] 田洪清, 王建强, 黄荷叶, 等. 越野环境下基于势能场模型的智能车概率图路径规划方法 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(7): 1496–1505.  
TIAN H Q, WANG J Q, HUANG H Y, et al. Probabilistic road-map method for path planning of intelligent vehicle based on artificial potential field model in off-road environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1496–1505.
- [19] TANG C, ZHAO Y. Hierarchical path planning based on PPO for UVs on 3D off-road terrain [C]. *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. IEEE, 2022: 295–300.
- [20] YANG L, WANG Q, TAN Y, et al. Autonomous vehicle path planning considering dwarf or negative obstacles [C]. *Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2019: 1021–1026.
- [21] LUO H, LI M, LIANG G, et al. An obstacle-crossing strategy based on the fast self-reconfiguration for modular sphere robots [C]. *Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2020: 3296–3303.
- [22] CHEN M, CAO Y, TIAN Y, et al. A passive compliance obstacle-crossing robot for power line inspection and maintenance [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(5): 2772–2779.
- [23] BERTI M, CORSINI A, DAEHNE A. Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides [J]. *Geomorphology*, 2013, 182: 1–18.
- [24] 余志生. 汽车理论 [M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
YU Z S. *Automotive theory* [M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [25] RAJAMANI R. *Vehicle dynamics and control* [M]. Springer Science & Business Media, 2011.