

DOI: 10.3901/JME.2018.14.141

高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制的 动力学建模分析*

刘凯 龚建伟 陈舒平 张玉 陈慧岩
(北京理工大学智能车辆研究所 北京 100081)

摘要: 在高速无人驾驶车辆的运动规划与跟踪控制过程中, 滑移和侧倾是很难克服的高度非线性约束, 特别是在复杂地形条件下, 容易导致车辆失稳甚至侧翻。通过研究地形因素对车辆转向特性和稳定性的影响, 建立高速车辆的等效动力学模型, 并提出了一种变步长的模型离散化方法, 能够在保证及时动态响应的基础上, 实现较长的轨迹预测时域以及计算的实时性。针对高速无人驾驶车辆的滑移和侧倾等动力学安全因素, 通过对车辆稳定行驶状态进行分析, 推导了基于包络线和零力矩点的高速车辆稳定性约束条件。根据在高速、滑移、侧倾等复杂约束下车辆安全行驶的要求, 运用模型预测控制算法求解最优运动轨迹及跟踪控制序列, 在保证道路环境约束的同时满足车辆的滑移和侧倾等稳定性约束。仿真试验表明, 该方法可以有效地考虑道路曲率和地形对高速车辆动力学特性的影响, 保证车辆无碰撞行驶, 同时防止车辆出现滑移和侧倾等现象。

关键词: 高速无人驾驶车辆; 模型预测控制; 等效动力学建模; 操控稳定性

中图分类号: U461

Dynamic Modeling Analysis of Optimal Motion Planning and Control for High-speed Self-driving Vehicles

LIU Kai GONG Jianwei CHEN Shuping ZHANG Yu CHEN Huiyan
(Intelligent Vehicle Research Center, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Motion planning and control for high-speed self-driving vehicles is complicated since it involves highly nonlinear constraints such as sideslip and rollover. Inappropriate handling of these constraints, particularly under complex terrain conditions, will lead to loss control of vehicles or even fatal accidents. Through studies on the effect of road curvature and terrain to the vehicle steering characteristics and handling stability, a simplified equal dynamic model is developed for high-speed self-driving vehicles. And a model discretization method with variable time-steps in the prediction horizon is proposed to ensure immediate dynamical response while attaining a long enough prediction horizon and computational feasibility. Taking dynamical safety related concerns such as sideslip and rollover into account, vehicle handling stability constraints, including sideslip envelope and zero moment point, are concluded through vehicle steady-state analysis. A model predictive control problem is formulated and solved to find the optimal motion trajectory and control sequence, satisfying the road environmental constraints while ensuring handling stability. Simulation results validated the capability of the proposed approach under the influence of complex road curvature and terrain.

Key words: high-speed self-driving vehicle; model predictive control; equal dynamic modeling; handling stability

0 前言

随着计算机信息处理技术和传感器技术的进步, 基于高效环境感知的无人驾驶车辆技术迅速发展, 其中一个重要目标就是提高无人驾驶车辆的行驶速度, 使之在高速条件下具有良好的稳定性和安全性。例如

美国 DARPA 在 2005 年和 2007 年组织的无人驾驶车辆沙漠挑战赛和城市挑战赛^[1-2], 以及中国从 2009 年开始举办的“智能车辆未来挑战赛”^[3-4]等一系列针对未来应用的无人驾驶车辆比赛中, 参赛车辆的行驶车速都在规避危险的前提下逐年提升, 并成为一项重要的评判标准。另外, 谷歌、Uber 等公司推出的针对真实交通环境的无人驾驶车辆也对其在高速下受滑移、侧倾等高度非线性约束影响时的安全性和稳定性提出了更高的要求, 以满足实际应用的需要^[5]。

提升无人驾驶车辆的行驶速度, 研究在高速下

* 国家自然科学基金(91420203, 61703041, 51275041)和中央高校基本科研业务费用专项资金资助项目。20180205 收到初稿, 20180615 收到修改稿

的最优运动规划与控制,从而保证其安全性和稳定性,对无人驾驶技术的推广具有重要的现实意义。在军事应用上,一定的行驶速度是保证效率和作战安全的重要因素。通过保证高速无人驾驶车辆在复杂地形条件下的稳定性和安全性,一方面可以减轻无人驾驶车辆操控人员的工作负担,另一方面可以使车辆在执行任务时不因道路条件大幅降低速度,从而提高无人驾驶车辆的机动能力和战场适应能力。在民用方面,随着高速公路不断建设及车辆保有量的持续增加,传统的车辆被动安全和常规主动安全技术并不能完全满足日益发展的现代交通的要求,以预防和主动控制为核心的先进车辆安全技术必将是现代交通系统和未来智能化交通系统的核心技术之一。而研究高速无人驾驶车辆在滑移及侧倾约束下的最优运动规划与控制将为更先进的车辆主动安全技术和辅助驾驶系统的发展提供必要条件。

高速无人驾驶车辆的最优运动规划与控制具有很强的理论研究价值,其挑战性主要体现在以下三个方面。首先,车辆在高速行驶时的轨迹跟踪控制十分复杂,车辆在高速行驶时轮胎与地面摩擦引起的滑移和侧偏、车辆重心偏移引起的侧倾、以及道路曲率和地形等对车辆动力学特性的影响比常速时更加苛刻。其次,高速车辆的运动规划方法必须要考虑车辆的动力学特性,同时能在滑移、侧倾等复杂约束条件下规划出满足车辆有效避险且稳定行驶的运动轨迹。另外,规划算法要能在车辆有效避险与操控稳定性的目标发生冲突时优先确保车辆的无碰撞行驶轨迹。最后,高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制算法的实时性比常速情况下要求更高,因此车辆的动力学建模必须在保证及时动态响应的前提下,充分考虑计算复杂性,研究更为合理的模型等效简化及离散化方法。

鉴于高速无人驾驶车辆的最优运动规划与控制具有很强的理论研究价值和现实意义,国内外的学者对这个领域做了大量的研究^[6-8]。其中,模型预测控制算法由于具有处理非线性系统约束以及多约束优化问题的能力,在基于动力学模型的高速车辆规划与控制领域取得了长足的进步^[9]。针对车辆的滑移安全约束,文献[10-12]在分析轮胎最大侧偏力和车辆稳态特性的基础上,提出了滑移包络线的规划控制方法,在防止车辆出现滑移现象的前提下,不断逼近无人驾驶车辆的行驶速度极限。针对高速车辆的侧倾安全,文献[13-14]在考虑车辆横向操控稳定性的基础上,采用了载荷转移比来限制轮胎离地,从而达到避免高速车辆发生侧倾甚至侧翻危险的目的。

然而,由于载荷转移比不能体现道路地形对车辆动力学特性的影响,极大地限制了其在复杂地形条件下的应用。针对这一问题,文献[15-16]采用了考虑地形因素的零力矩点作为评价车辆侧倾倾向的指标。

上述基于模型预测控制的高速车辆运动与规划算法普遍采用了比较复杂的车辆动力学模型来体现滑移和侧倾对车辆稳定性的影响,这增加了优化求解的难度。同时,相比于常规速度下的运动规划与控制,高速下的无人驾驶车辆需要更长的预测时域来保证行驶安全,这也进一步增加了模型预测控制算法优化求解的计算量。然而,针对高速无人驾驶车辆的规划与控制,计算的实时性是影响其推广应用的一个主要瓶颈。为了提高模型预测算法的计算效率,文献[17-18]分别提出了基于伪谱法的模型离散化方法和基于模块化及约束集压缩的简化方法来降低优化问题的计算量,从而改善优化求解的实时性。此外,通过对系统的约束条件添加一定的收敛因子也能提高优化算法的收敛速度^[19]。

本文在深入研究道路曲率和地形对车辆转向特性和稳定性影响的基础上,建立了考虑道路曲率和路面倾角的高速车辆等效动力学模型,并提出了一种变步长的模型离散化方法,能在保证车辆及时动态响应的基础上,实现较长的预测时域,并满足计算实时性的要求。结合高速车辆等效动力学模型,通过分析车辆稳态行驶时的最大横摆角速度、轮胎最大侧偏力以及车辆侧倾的零力矩点,推导了高速车辆操控稳定性的约束条件。另外,推导了车辆在道路内行驶和避障的环境约束条件。最后将在高速、滑移、侧倾等复杂约束下的最优运动规划与控制问题转化为二次型优化求解问题,并运用模型预测控制算法实时计算满足车辆动力学与运动学约束的无碰撞运动轨迹及跟踪控制序列,并在车辆有效避障与操控稳定性发生冲突时优先保证无碰撞的轨迹。

1 高速车辆等效动力学建模

高速车辆的等效动力学建模是研究其最优运动规划与控制的基础。一是可以通过高速车辆的等效动力学模型进行状态预测来有效地优化运动轨迹和控制效果;二是可以通过模型的等效简化减少规划与控制的计算量,提高实时性;三是可以基于车辆的等效动力学模型进行车辆运动的稳定性分析。

1.1 车辆动力学模型法

道路曲率和地形(主要是路面倾角)等因素对高

速车辆的转向特性和行驶稳定性有重要影响, 直接关系到无人驾驶车辆动力学模型的准确程度。本文通过研究在这些因素影响下高速车辆的动力学特性, 建立了高速车辆等效动力学模型, 如图1所示。

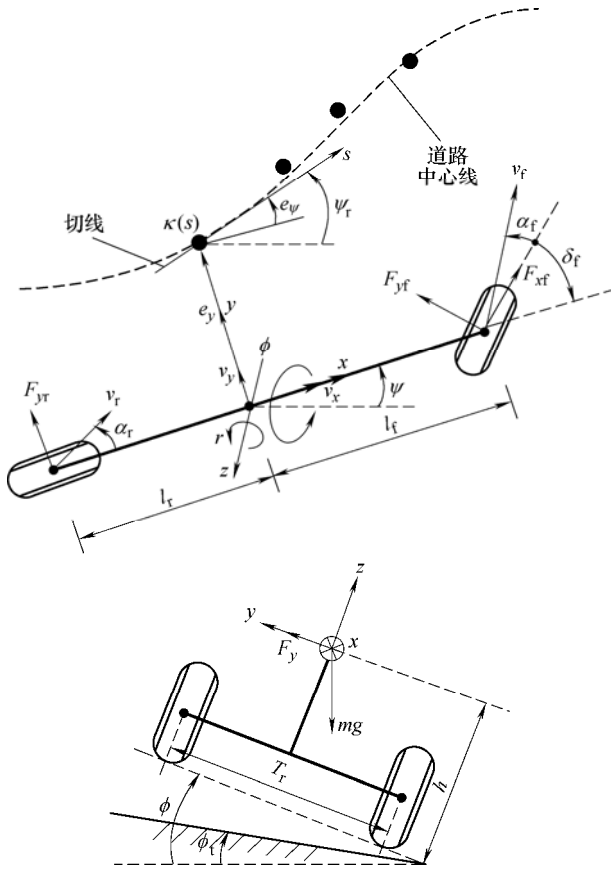


图1 车辆动力学模型

假设车辆为前轮驱动, 纵向速度 v_x 恒定, 忽略轮胎的纵向力, 则车辆的动力学模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{v}_y = -rv_x + h\cos(\phi)\ddot{\phi} + \frac{1}{m}F_y - g\sin(\phi) \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z}(l_f F_{yf} \cos(\delta_f) - l_r F_{yr}) \\ \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x}(mha_y + mgh\sin(\phi) - M_R) \\ \dot{e}_y = v_x \sin(e_\psi) + v_y \cos(e_\psi) \\ \dot{e}_\psi = r - \kappa v_x \end{cases} \quad (1)$$

式中, v_x, v_y 为车体重心的纵向和横向速度, r 为车体航向角变化率, m 车辆质量, I_x, I_z 为车身绕 x 和 z 轴的转动惯量, κ 为道路曲率, l_f, l_r 分别为车辆重心到前轴和后轴的距离, T_r, h 分别为车辆轮距和质心高度, e_y 和 e_ψ 分别为车辆与参考路径的横向距离偏差及航向角偏差, ψ 和 ψ_r 分别为车体航向角和参考路径航向角, $F_y = F_{yf} \cos(\delta_f) + F_{yr}$ 为车辆质心处的横向力合力, δ_f 为前轮偏角, F_{yf}, F_{yr} 为前轮和后轮的侧向力, $a_y = \dot{v}_y + rv_x - h\ddot{\phi}$ 为质心处的横向加

速度, M_R 为悬架系统产生的侧倾阻力矩。将车辆的悬架系统简化为一个弹簧-阻尼模型型, 且设 $\dot{\phi}_t \approx 0$, 则侧倾阻力矩为 $M_R = K_\phi(\phi - \phi_t) + D_\phi\dot{\phi}$, ϕ_t 和 ϕ 分别为道路和车辆的侧倾角, K_ϕ 和 D_ϕ 分别为车辆侧倾刚度系数和阻尼系数。

考虑高速行驶的特性, 对 δ_f, e_ψ, ϕ 等参数进行小角度假设, 则式(1)的前4式可简化为

$$\begin{cases} \dot{v}_y = -rv_x + h\ddot{\phi} + \frac{1}{m}(F_{yf} + F_{yr}) - g\phi \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z}(l_f F_{yf} - l_r F_{yr}) \\ \ddot{\phi} = \frac{1}{I_x}(mh(\dot{v}_y + rv_x - h\ddot{\phi}) + mgh\phi - M_R) \\ \dot{e}_y = v_x e_\psi + v_y \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中的非线性因素主要来自于轮胎侧向力, 本文采用 Pacejka 提出的 Brush 轮胎模型^[20]来计算。轮胎侧向力与轮胎侧偏角的关系如图2所示。

$$F_{y*} = \begin{cases} -C_{\alpha*} \tan \alpha_* + \frac{C_{\alpha*}^2}{3\mu F_{z*}} |\tan \alpha_*| \tan \alpha_* - \frac{C_{\alpha*}^3}{27\mu^2 F_{z*}^2} \tan^3 \alpha_* & |\alpha_*| < \arctan\left(\frac{3\mu F_{z*}}{C_{\alpha*}}\right) \\ -\mu F_{z*} \operatorname{sgn} \alpha_* & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, α_* 表示轮胎的侧偏角, $C_{\alpha*}$ 为轮胎的侧偏刚度, $* = \{f, r\}$ 分别表示车辆的前轮和后轮。当路面的摩擦因数 μ 以及轮胎垂直载荷 F_{z*} 确定之后, 轮胎侧向力可以简化为轮胎侧偏角的线性模型

$$F_{y*} = \bar{C}_{\alpha*} \alpha_* \quad (4)$$

式中, $\bar{C}_{\alpha*}$ 为轮胎的等效侧偏刚度。如图2所示, 此线性化模型只在轮胎侧向力的线性区域内有效。因此, 在应用中需要对轮胎侧偏角的范围进行约束。

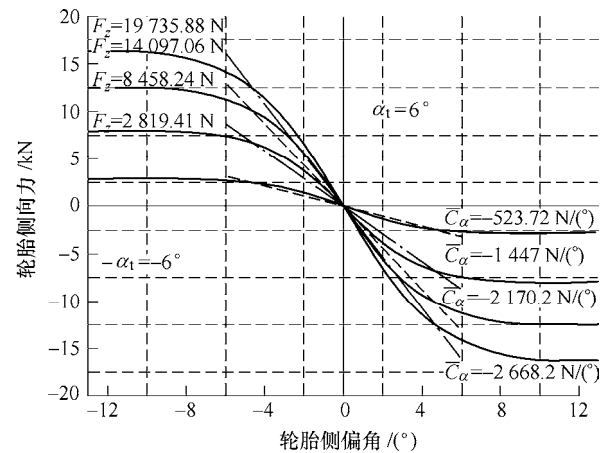


图2 轮胎侧向力与侧偏角的关系

在实际应用中, 轮胎的侧偏角 α_* 和等效侧偏刚

度 \bar{C}_{α^*} 可以通过估计得到^[21-22]。这里采用小角度假设将轮胎的侧偏角近似为

$$\alpha_f = \arctan\left(\frac{v_y + l_f r}{v_x}\right) - \delta_f \approx \frac{v_y + l_f r}{v_x} - \delta_f \quad (5)$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{v_y - l_r r}{v_x}\right) \approx \frac{v_y - l_r r}{v_x} \quad (6)$$

令 $\xi = (v_y \ r \ \dot{\phi} \ \phi \ e_y \ e_\psi)^T$ 为状态矢量, $u_1 = \delta_f$ 为控制输入, $u_2 = (\phi \ \kappa)^T$ 为附加输入, 综合式(1)~(6), 可以得到考虑道路曲率和路面倾角的高速车辆等效动力学模型

$$\dot{\xi} = A\xi + B_1 u_1 + B_2 u_2 \quad (7)$$

式中,

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\Theta_1 \Theta_4}{v_x} & \frac{\Theta_2 \Theta_4}{v_x} - v_x & \frac{-hD_\phi}{I_x} & \Theta_5 & 0 & 0 \\ \frac{\Theta_2}{I_z v_x} & \frac{\Theta_3}{I_z v_x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{h\Theta_1}{I_x v_x} & \frac{h\Theta_2}{I_x v_x} & \frac{-D_\phi}{I_x} & \frac{-K_\phi}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$B_1 = (-\bar{C}_{af} \Theta_4 \quad -l_f \bar{C}_{af} / I_z \quad -h \bar{C}_{af} / I_x \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T,$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} hK_\phi / I_x & 0 & K_\phi / I_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -v_x \end{pmatrix}^T.$$

$$\Theta_1 = \bar{C}_{af} + \bar{C}_{ar}, \quad \Theta_2 = l_f \bar{C}_{af} - l_r \bar{C}_{ar}, \quad \Theta_3 = l_f^2 \bar{C}_{af} + l_r^2 \bar{C}_{ar}, \quad \Theta_4 = (1/m + h^2 / I_x), \quad \Theta_5 = -K_\phi h / I_x - g.$$

1.2 变步长的模型离散化方法

由于高速下的无人驾驶车辆比常速时需要更长的预测时域, 因此车辆动力学模型的离散化方法对规划控制算法的计算量和实时性至关重要。本文采用了变步长的离散化方法来实现较长的预测时域, 同时保证车辆动力学模型的及时动态响应和计算的实时性。此模型离散方法将整个预测时域分成两部分, 即在第一部分使用短步长 t_s 进行离散来保证离散后模型的精度; 在第二部分使用较长的步长 t_l 进行离散, 在合理的模型精度和计算量下实现较长的预测时域。设整个预测时域为 N_p , 并在第 N_s 步分成短步长离散和长步长离散两个部分。

对于第一部分, $k = 0, 1, \dots, N_s$, 将车辆动力学模型以 t_s 为步长, 使用零阶保持(ZOH)进行离散。首先设计增广 $z_s = (\xi, u_1, u_2)^T$, 则式(7)可表示为

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}(k) \\ \dot{u}_1(k) \\ \dot{u}_2(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B_1 & B_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi(k) \\ u_1(k) \\ u_2(k) \end{pmatrix} = G_s z_s(k) \quad (8)$$

式(9)通过对 $G_s t_s$ 进行矩阵指数运算, 并采取零阶保持可得

$$\begin{pmatrix} \xi(k+1) \\ u_1(k+1) \\ u_2(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_s & B_{s1} & B_{s2} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi(k) \\ u_1(k) \\ u_2(k) \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, I_N 是一个 $N \times N$ 的单位矩阵, 这里 $N=6$, 表示状态变量的个数。(9)式的第二行和第三行可以验证在离散时 $u_1(k+1)=u_1(k)$, $u_2(k+1)=u_2(k)$ 的零阶保持假设。式(9)的第一行为离散化后的车辆动力学模型

$$\xi(k+1) = A_s \xi(k) + B_{s1} u_1(k) + B_{s2} u_2(k) \quad (10)$$

式中, $A_s = I_N + A t_s$, $B_{s1} = B_1 t_s$, $B_{s2} = B_2 t_s$ 。

根据不同离散步长使用不同的模型离散化方法的对比如图 3 所示。其中, 带圈虚线表示的是一组期望的控制器输入量, 带星号的实线表示的是离散模型(10)的输入。可以看出这种离散方法能够比较精确的符合期望的控制输入量。这是因为车辆的底层控制器也会在一个控制周期 t_s 内保持控制量恒定。然而, 零阶保持对于第二部分 $k = N_s+1, N_s+2, \dots, N_p$ 则不再适用。因为在零阶保持会限定这部分的控制量在较长的预测周期 t_l 内保持不变, 如图 3 中的点划线所示。可以看出这种假设会使得模型输入与期望的控制产生较大的偏离, 因为控制量在这样一个较长的时间内可能会有比较显著的变化。针对这种情况, 一阶保持通过假设控制量在预测周期 t_l 内呈线性变化, 有效的适应了较长的离散步长, 提供了更好的长步长离散化方法, 如图 3 中短虚线所示。可以看出, 虽然短虚线仍然不能很好地与带圈虚线重合, 但仍在控制精度可接受的范围内。因此, 将预测时域的第二部分($k = N_s+1, N_s+2, \dots, N_p$), 以 t_l 为步长, 使用一阶保持(FOH)进行离散。

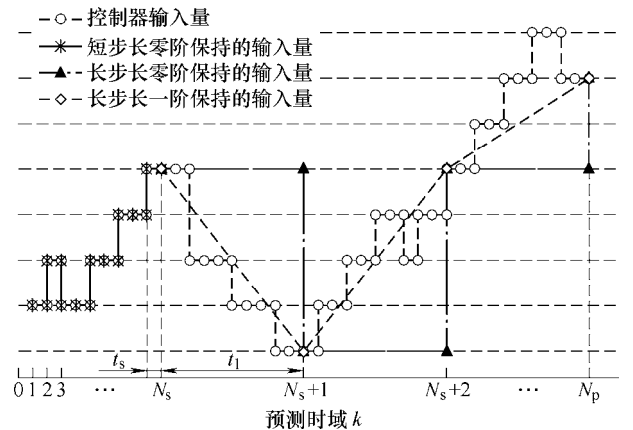


图 3 变步长的模型离散化方法对比

设计增广矢量 $z_1 = (\xi \ u_1 \ u_2 \ t_1 \dot{u}_1 \ t_1 \dot{u}_2)^T$, 令 $B_a = (B_1, B_2)$, I_3 为一个 3×3 的单位矩阵, 则(7)式可表示为

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}(k) \\ \dot{u}_1(k) \\ \dot{u}_2(k) \\ t_1 \ddot{u}_1(k) \\ t_1 \ddot{u}_2(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B_a & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi(k) \\ u_1(k) \\ u_2(k) \\ t_1 \dot{u}_1(k) \\ t_1 \dot{u}_2(k) \end{pmatrix} = G_1 z_1 \quad (11)$$

式(11)通过对 $G_1 t_1$ 进行矩阵指数运算, 并采用一阶保持可得

$$\begin{pmatrix} \xi(k+1) \\ u_1(k+1) \\ u_2(k+1) \\ t_1 \dot{u}_1(k+1) \\ t_1 \dot{u}_2(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & \Gamma_1 & \Gamma_2 \\ 0 & I_3 & I_3 \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi(k) \\ u_1(k) \\ u_2(k) \\ t_1 \dot{u}_1(k) \\ t_1 \dot{u}_2(k) \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, $A_1 = I_6 + A t_1 + (A t_1)^2/2$, $\Gamma_1 = B_a t_1 + A B_a t_1^2/2$, $\Gamma_2 = B_a t_1/2$ 。

根据式(12)的第二行可得 $u_1(k+1) = u_1(k) + t_1 \dot{u}_1(k)$, $u_2(k+1) = u_2(k) + t_1 \dot{u}_2(k)$ 。此式当 $\dot{u}_1(k)$ 和 $\dot{u}_2(k)$ 在 t_1 内保持恒定时成立, 从而满足了一阶保持的假设。将其代入式(12)的第一行可得离散化后的车辆动力学模型

$$\xi(k+1) = A_1 \xi(k) + B_{11} \begin{pmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{pmatrix} + B_{12} \begin{pmatrix} u_1(k+1) \\ u_2(k+1) \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中, $B_{11} = \Gamma_1 - \Gamma_2$, $B_{12} = \Gamma_2$ 。

2 高速车辆的安全行驶约束

2.1 车辆滑移约束

车辆滑移主要是由轮胎变形产生的侧偏角导致的, 且本文将轮胎侧偏角限制在 $[-\alpha_t, \alpha_t]$, 以保证线性化轮胎模型的有效性, 如图 2 所示。这里根据对后轮侧偏角的限制推导车辆的滑移稳定性约束。后轮最大侧偏角限制可以由式(6)转化为对车辆横向速度(v_y)和航向角变化率(r)的约束

$$\left| \frac{v_y - l_r r}{v_x} \right| \leq \alpha_t \quad (14)$$

式中, 航向角变化率的阈值可根据后轮最大侧偏力及式(2a)获得

$$\left| r + \frac{g}{v_x} \phi \right| \leq \frac{\bar{C}_r \alpha_t (1 + l_r/l_f)}{m v_x} \quad (15)$$

令 $S_s(k)$ 为对滑移约束的松弛因子, 则式(14)

和(15)可以写成下列形式

$$|H_s \xi(k)| \leq M_s + S_s(k) \quad (16)$$

式中, $H_s = \begin{pmatrix} 1/v_x & -l_r/v_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & g/v_x & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$,

$$M_s = (\alpha_t \ \bar{C}_r \alpha_t (1 + l_r/l_f)/m v_x)^T。$$

约束(14)、(15)组成了一个封闭的包络线, 如图 4 所示。其中, ①和③代表的是约束(14), ②和④代表的是约束(15)。当车辆状态处于包络线之内时可以保证车辆满足滑移约束。然而, 车辆状态超出包络线并不必然导致车辆失稳, 例如当侧偏角超出阈值时, 侧偏力进入 Brush 轮胎模型的非线性区域, 虽然轮胎力的线性化条件失效, 但是短时间内仍能保持车辆的可控性。因此, 设置了约束松弛因子 S_s , 允许车辆状态暂时超出包络线的限制。

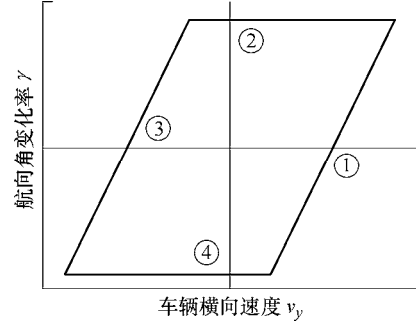


图 4 高速车辆滑移的包络线约束示意图

2.2 车辆侧倾约束

高速车辆侧倾危险主动规避的挑战在于侧倾开始发生的时刻难以预测, 特别是存在复杂地形特征时的车辆侧倾预测。考虑到高速车辆的动态特性, 本文选择车辆侧倾时的零力矩点作为预防车辆侧翻危险的约束条件。

零力矩点为位于地面上的, 使得重力、惯性力及地面对车辆作用力(F_N)所产生的车辆侧倾力矩之和为零的点^[15-16], 如图 5 所示。当车辆在平路或者有倾角的路面行驶且侧向加速度为零时, 零力矩点与重力的在同一垂线上, 如图 5a 和 5b 所示。当车辆的侧向加速度 a_y 不为零时, 惯性力会使零力矩点发生偏移, 如图 5c 所示。当道路倾角或者侧向加速度过大时, 会使得零力矩点偏移 to 车辆轮距之外, 导致车辆发生侧翻, 如图 5d 所示。

针对车辆的侧倾约束主要关注零力矩点的横向偏移 y_{ZMP} , 并将其相对于车辆轮距进行归一化

$$\bar{y}_{ZMP} = \frac{2}{T_r} \left[h \phi + \frac{h}{g} (\dot{v}_y + r v_x) - \frac{I_x}{M g} \ddot{\phi} \right] \quad (17)$$

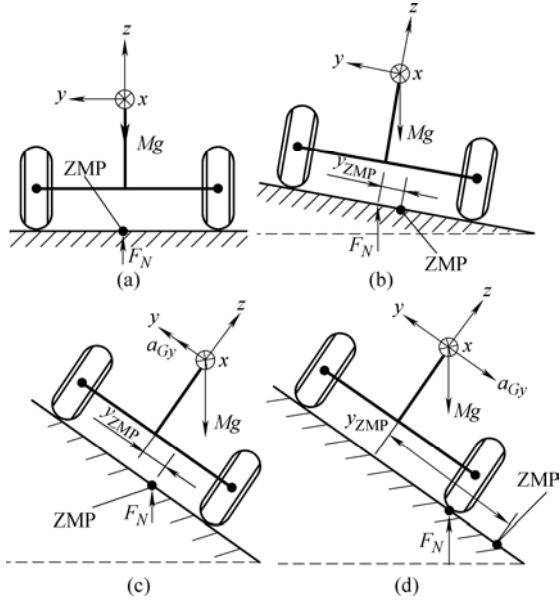


图5 零力矩点示意图

式(17)结合状态空间方程式(7), 可以表示为

$$\bar{y}_{ZMP} = N_1 \dot{\xi}(k) + N_2 \xi(k) \quad (18)$$

式中, $N_1 = (2h/(gT_r) \ 0 \ -2I_x/(mgT_r) \ 0 \ 0 \ 0)$, $N_2 = (0 \ 2hv_x/gT_r \ 0 \ 2h/T_r \ 0 \ 0)$ 。

为了防止车辆发生侧翻危险, 对 \bar{y}_{ZMP} 进行约束

$$-\bar{y}_{ZMP, \max} \leq \bar{y}_{ZMP} \leq \bar{y}_{ZMP, \max} \quad (19)$$

2.3 道路环境约束

道路环境对高速车辆的约束主要表现为车辆轨迹必须保持在给定的可行区域内, 并满足无碰撞的要求。其中, 通过在生成可行区域时考虑障碍物的影响, 可以实现高速车辆避障的功能。本文将道路环境对车辆轨迹的约束表示为一系列横向偏差阈值的组合, 如图6所示。

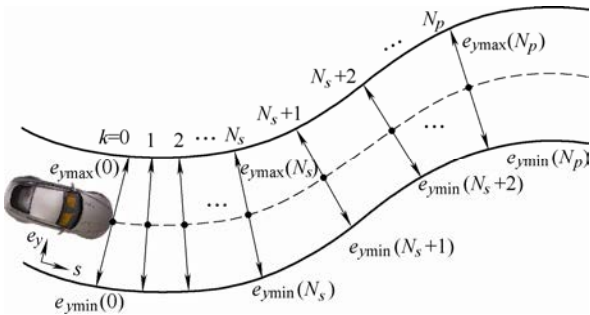


图6 道路环境约束示意图

首先根据车辆纵向速度和车辆动力学模型的离散化步长, 在道路的上生成一系列参考点。然后将道路环境约束对参考点的横向跟踪偏差阈值定义为 $e_{y, \max}(k)$ 和 $e_{y, \min}(k)$, 因此道路环境约束可表示为

$$H_e \xi(k) \leq M_e(k) \quad (20)$$

$$H_e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_e(k) = \begin{pmatrix} e_{y, \max}(k) - d_s \\ -e_{y, \min}(k) + d_s \end{pmatrix}$$

式中, d_s 是一个根据车体尺寸定义的安全距离。此外, 高速车辆的跟踪控制必须满足底层驱动能力的限制, 设 $\delta_{f, \max}$ 和 $\Delta\delta_{f, \max}$ 分别为前轮偏角及其变化率的阈值, $t_* = \{t_s, t_l\}$ 表示不同的模型离散化步长, 则

$$|\delta_f| \leq \delta_{f, \max} \quad (21)$$

$$|\Delta\delta_f| \leq t_* \Delta\delta_{f, \max} \quad (22)$$

3 最优运动规划与控制

考虑滑移、侧倾的高速无人驾驶车辆运动规划与跟踪控制问题可以转换为如式(23)的二次型最优求解问题, 并通过实时求解生成有效避险的运动规划轨迹及最优控制序列, 同时防止车辆侧倾、侧滑等危险的发生。

$$\begin{aligned} \min_{\xi, \delta_f, k=1, \dots, N_p} J = & \sum_k \left(W_{e\psi} (e_\psi(k))^2 + W_{ey} (e_y(k))^2 \right) + \\ & \sum_k W_{\delta f} (\delta_f(k) - \delta_f(k-1))^2 + \\ & \sum_k W_s^T S_s(k) W_s \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } \xi(k+1) = A_s \xi(k) + B_{s1} u_1(k) + B_{s2} u_2(k)$$

$$\xi(k+1) = A_l \xi(k) + B_{l1} u_4(k) + B_{l2} \underline{u}_2(k+1) \quad (23)$$

$$|H_s \xi(k)| \leq M_s + S_s(k)$$

$$|\bar{y}_{ZMP}| \leq \bar{y}_{ZMP, \max}$$

$$H_e \xi(k) \leq M_e(k)$$

$$|\delta_f| \leq \delta_{f, \max}$$

$$|\Delta\delta_f| \leq t_* \Delta\delta_{f, \max}$$

式(23)中待优化的变量是车辆前轮偏角控制量 (δ_f), 以及滑移约束的松弛因子 S_s 。松弛因子的存在是为了通过允许高速车辆出现暂时性滑移现象来保证此优化问题始终可以找到可行解。需要调试的参数为 $W_{\delta f}$ 、 W_{ey} 、 $W_{e\psi}$ 和松弛因子的权重 W_s 。通过选取不同的权重可以体现出优化目标的优先级。通过对车辆滑移约束施加一定的松弛因子, 可以保证当道路的无碰撞轨迹与稳定性约束发送冲突时, 优先保证车辆在可行区域内行驶, 即允许车辆暂时发生滑移。

代价函数的第一项抑制了高速无人驾驶车辆相对于参考路径的横向偏差和航向偏差, 体现了路径

跟踪的期望, 第二项建立了跟踪参考路径与控制量平滑之间的关系, 第三项对车辆滑移稳定性约束的松弛因子进行惩罚, 从而促使高速车辆尽量不出现滑移现象。另外, 高速车辆行驶过程中稳定性的包络线滑移约束、零力矩点侧倾约束、道路环境约束以及车辆执行机构和底层驱动能力的约束也得到了体现。

本文使用 CVXGEN 等^[23]生成针对二次型优化问题式(23)的求解器, 得到前轮偏角的最优控制序列。模型预测控制所使用的参数及其数值如表 1 所示。

表 1 模型预测控制使用的参数及其数值说明

参数	数值
预测时域长度 N_p	20
模型离散化第一部分长度 N_s	10
短步长离散化步长 t_s/s	0.05
长步长离散化步长 t_l/s	0.2
轮胎模型线性化的侧偏角限制/rad	0.1
车辆偏角的极值 $\delta_{f,max}/rad$	0.4
车辆偏角变化率的极值 $\Delta\delta_{f,max}/(rad/s)$	0.08
航向偏差的极值 $e_{\psi,max}/rad$	0.15
横向侧偏的极值 $e_{y,max}/m$	2
航向变化率的极值 $r_{max}/(rad/s)$	1
横向侧偏和航向偏差的权重 $W_{ey}, W_{e\psi}$	500, 500
对约束松弛因子的权重 W_s	50
对控制量增量的权重 $W_{\delta f}$	5

4 仿真试验

由于高速车辆的实车试验具有一定的危险性, 这里在仿真环境中研究本算法的性能, 实车试验将在下一步工作中展开。仿真试验主要针对以下三个方面: 高速车辆等效动力学模型的侧倾约束一致性验证; 高速车辆在复杂地形条件下规避滑移和侧翻等危险, 并保持无碰撞行驶轨迹的能力; 最优运动规划与跟踪控制算法的实时性分析。

通过 CarSim/Matlab 搭建联合仿真试验环境, 仿真所用车辆模型为前轮驱动的 D 类 SUV, 如图 7 所示。车辆动力学模型所用的各项参数如表 2 所示。



图 7 仿真试验用 D 类 SUV

表 2 车辆参数数值说明

参数	数值	参数	数值
m/kg	1 600	l_f/m	1.12
$I_z/(kg \cdot m^2)$	2 059.2	l_r/m	1.48
$I_x/(kg \cdot m^2)$	700.7	T_f/m	1.565
$g/(m/s^2)$	9.81	h/m	0.68
$\bar{C}_{af}/(N/rad)$	-110 000	$K_{\phi}/(N \cdot m/rad)$	145 330
$\bar{C}_{ar}/(N/rad)$	-92 000	$D_{\phi}/(N \cdot m \cdot s/rad)$	4 500

4.1 等效动力学模型的侧倾约束一致性

本文采用零力矩点作为预防高速车辆侧翻的约束条件。为了验证高速车辆等效动力学模型的侧倾约束一致性, 进行了 J-turn 仿真验证。即在车辆以 30 m/s 的速度行驶时, 方向盘转角输入如图 8 所示。由于轮胎载荷转移比可以直观地表示车辆一侧的轮胎是否抬起, 因此将其与等效动力学模型计算的归一化零力矩点对比来验证侧倾约束的一致性。

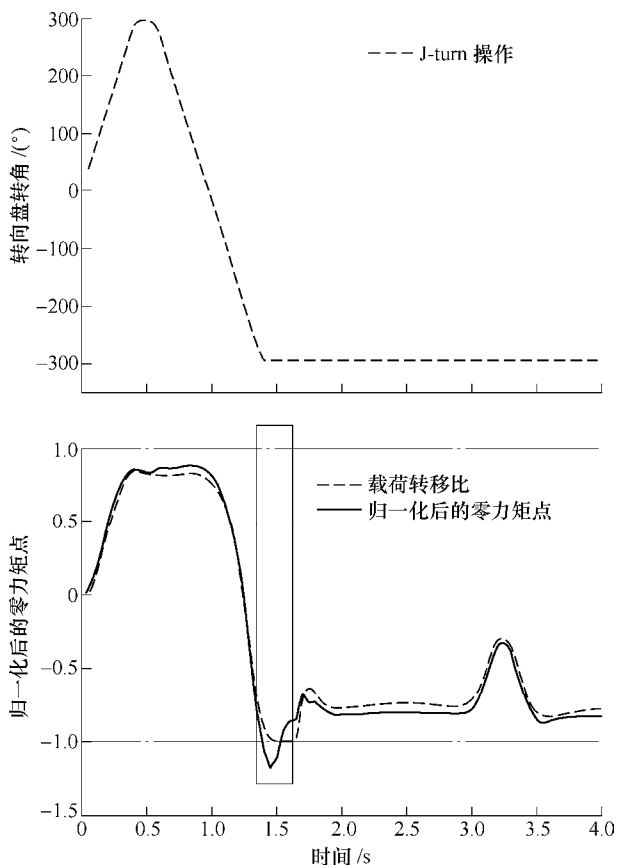


图 8 零力矩点与轮胎载荷转移比

图 8 中长虚线为 J-turn 仿真测试过程中的轮胎载荷转移比, 实线为归一化后的零力矩点, 点划线表示车辆一侧轮胎抬起、车辆发生侧倾时载荷转移比和零力矩点的阈值, 可以看出, 归一化后的零力矩点可与轮胎载荷转移比有效重合, 且比轮胎载荷转移更为保守, 因此可以用来预防车辆的侧翻危险。

另外, 在矩形区域中轮胎载荷转移比达到阈值,

即车辆一侧轮胎的垂直载荷为零,标志着一侧轮胎已经离地。可以看出,零力矩点与轮胎载荷转移比在矩形区域所示范围内有了显著的差异,这是受本文所建立的车辆等效动力学模型限制,不能预测车辆一侧轮胎已经离地之后的状态,但此缺陷可通过对归一化后零力矩点的范围进行约束来避免。

4.2 高速车辆在复杂地形下的危险规避能力

为了研究本算法在复杂道路地形条件(存在道路曲率和路面倾角)下进行无碰撞的路径跟踪,且保持高速车辆动力学稳定性(防止车辆滑移和侧翻)的能力,设计了路径跟踪仿真对比试验,仿真测试道路包括三个连续的大曲率弯道和复杂的路面倾角,如图9、10所示。

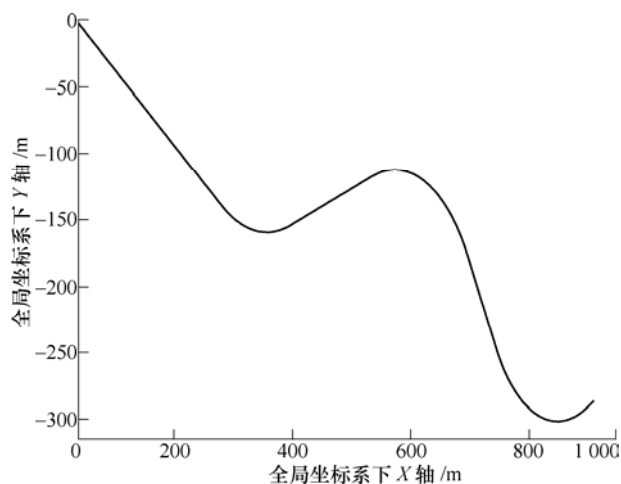


图9 CarSim 仿真测试的道路

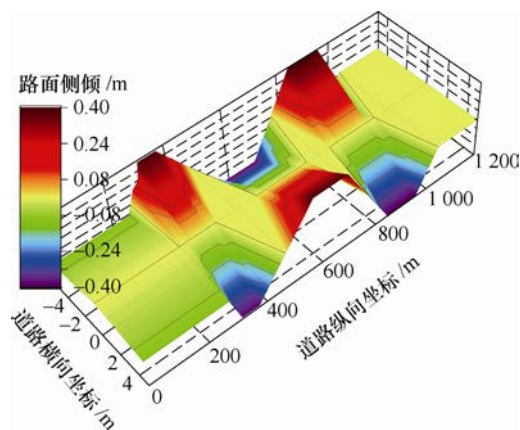


图10 CarSim 仿真测试道路的地形倾角

在 CarSim 中设置车速为 72 km/h, 分别采用下列四种车辆动力学模型进行高速无人驾驶车辆的最优运动规划与轨迹跟踪控制, 并对比地形条件及滑移、侧倾等约束对高速无人驾驶车辆最优运动规划及跟踪控制的影响。

I. 本文所提出的考虑道路曲率及地形的高速车辆等效动力学模型。

II. 不考虑道路曲率及地形的车辆动力学模

型。

III. 仅考虑地面倾角的高速车辆等效动力学模型。

IV. 仅考虑道路曲率的高速车辆等效动力学模型。

使用四种高速车辆动力学模型进行路径跟踪的归一化零力矩点、横向偏差和横摆角速度对比分别如图11~13所示。

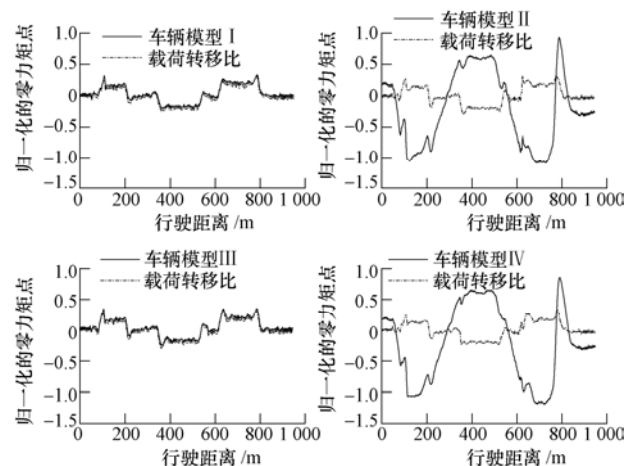


图11 归一化的零力矩点对比

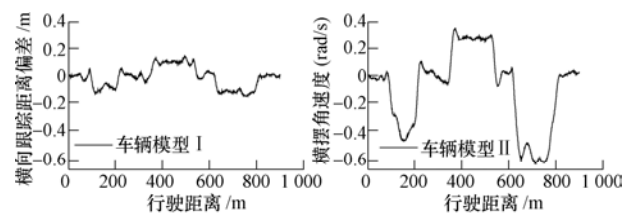


图12 高速车辆路径跟踪横向偏差对比

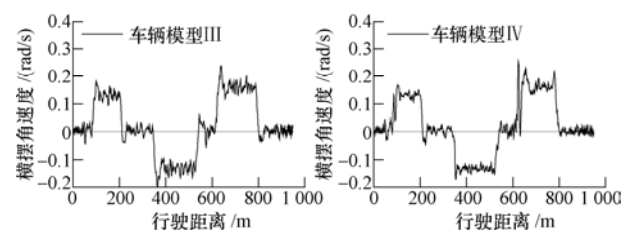
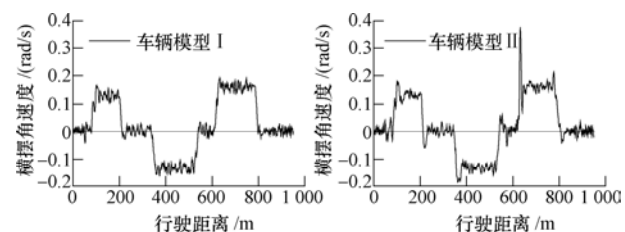


图13 高速车辆路径跟踪横向偏差对比

由图 11 可以看出,考虑地面倾角影响的车辆动力学模型(I 和 III)进行路径跟踪时,归一化的零力矩点可以与轮胎载荷转移较好地吻合,因此可以通过限制零力矩点的最大值,预防高速车辆发生侧翻危险。而没有考虑地面倾角影响的车辆动力学模型(II 和 IV)在路径跟踪过程中归一化的零力矩点与轮胎载荷转移比产生较大的偏差,失去了约束一致性,不能用来预防车辆的侧翻危险。

由图 12 可以看出,使用本文提出的考虑道路曲率和地面倾角的车辆动力学模型(I)可将横向跟踪误差限制在 0.15 m 以内,相比于其他车辆模型能够更显著地减少跟踪误差,提高路径跟踪质量。另外,不考虑道路曲率的车辆模型(II 和 III)在进行路径跟踪时所产生的横向跟踪距离偏差明显大于考虑道路曲率的车辆模型(I 和 IV),因此可以推断出道路曲率比道路侧倾角对横向跟踪偏差的影响更大。

由图 13 可以看出,使用本文提出的考虑道路曲率和地面倾角的车辆动力学模型(I)可以有效地将横摆角速度约束在 0.2 rad/s 以内,体现了高速车辆路径跟踪过程中的动力学稳定性。限制横摆角速度的阈值可以有效地防止发生侧滑现象。

针对高速无人驾驶车辆操控滑移稳定性约束如图 14 所示。可以看出,使用本文提出的考虑道路曲率和地面倾角的车辆动力学模型(I)可以有效地减少车辆的滑移现象,从而保持车辆的操控稳定性。

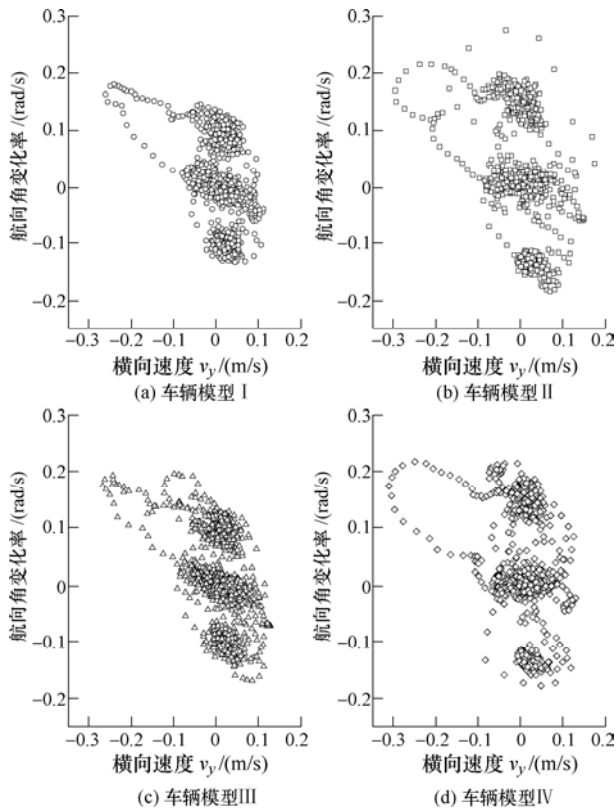


图 14 滑移稳定性约束

4.3 最优运动规划算法实时性分析

本文提出的高速车辆最优运动规划与控制算法在配置了四核 i7 处理器、16 G 内存的 W541 工作站上进行验证。使用四种模型进行高速无人驾驶车辆最优运动规划和跟做控制的优化求解时间及其标准方差如表 3 所示。

表 3 不同车辆模型的优化时间和标准方差对比 ms

	模型 I	模型 II	模型 III	模型 IV
优化时间	12.4	11.7	11.8	11.8
标准方差	0.012 9	0.011 9	0.013 1	0.017 8

可以看出,使用不同的车辆模型进行最优运动规划与跟踪控制所需的优化求解时间基本恒定,并且平均优化求解时间低于 20 ms,可满足高速车辆实时控制的需求。另外,使用本文所提出的车辆模型(I)的优化求解时间相比于其他车辆模型平均延长了 0.6~0.7 ms,这是由于在车辆动力学 I 考虑了道路曲率及地形的影响,从而增加了优化求解的计算量所导致的。

5 结论

(1) 提出一种考虑道路曲率和地形倾角的高速车辆等效动力学模型及变步长的模型离散化方法,解决了在满足车辆及时动态响应和预测精度下,实现较长预测时域并保证计算的实时性的问题。

(2) 针对高速车辆的滑移、侧倾等高度非线性约束,推导了基于包络线和零力矩点的动力学稳定性约束,同时考虑了道路环境等约束。

(3) 设计了基于模型预测控制的高速车辆最优运动规划与控制算法。仿真试验证明本算法可以实时的在高速、侧滑、侧倾等约束下得到最优运动轨迹和控制序列,在有效避障的前提下保证车辆的操控稳定性。

下一步工作将继续研究高速车辆在时变纵向加速度下、存在横纵向载荷转移时的等效动力学模型,分析在动态环境下的最优运动规划及控制算法,并展开实车试验进行验证。

参 考 文 献

- [1] FU L, YAZICI A, OZGUNER U. Route planning for osu-act autonomous vehicle in darpa urban challenge [C]//Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2008: 781-786.

- [2] THRUN S, MONTEMERLO M, DAHLKAMP H, et al. Stanley: The robot that won the darpa grand challenge[J]. *Journal of field Robotics*, 2006, 23(9): 661-692.
- [3] 姜岩, 赵熙俊, 龚建伟, 等. 简单城市环境下地面无人驾驶系统的设计研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(20): 103-112.
- JIANG Yan, ZHAO Xijun, GONG Jianwei, et al. System design of self-driving in simplified urban environments [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(20): 103-112.
- [4] 姜岩, 龚建伟, 熊光明, 等. 基于运动微分约束的无人驾驶车辆纵向协同规划算法的研究[J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2012-2020.
- JIANG Yan, GONG Jianwei, XIONG Guangming, et al. Research on differential constraints-based planning algorithm for autonomous-driving vehicles[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2012-2020.
- [5] GREENBALTT N A. Self-driving cars and the law[J]. *IEEE Spectrum*, 2016, 53(2): 46-51.
- [6] 余卓平, 章仁燮, 熊璐, 等. 基于条件积分方法的无人驾驶转向车辆动力学控制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(14): 39-38.
- YU Zhuoping, ZHANG Renxie, XIONG Lu, et al. Dynamic control for unmanned skid-steering vehicle with conditional integartors[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(14): 29-38.
- [7] JEON J, COWLAGI R, PETERS S, et al. Optimal motion planning with the half-car dynamical model for autonomous high-speed driving[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. Washington, DC, USA: 2013: 188-193.
- [8] SHIMODA S, KURODA Y, IAGNEMMA K. High-speed navigation of unmanned ground vehicles on uneven terrain using potential fields[J]. *Robotica*, 2007, 25(4): 409-424.
- [9] LIU Kai, GONG Jianwei, KURT A, et al. A model predictive-based approach for longitudinal control in autonomous driving with lateral interruptions[C]// *International Conference on Vehicles Symposium*. Los Angeles, USA: IEEE, 2017: 359-364.
- [10] BROWN M, FUNKE J, ERLIEN S. Safe driving envelopes for path tracking in autonomous vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 61: 307-316.
- [11] BEAL C, GERDES J. Model predictive control for vehicle stabilization at the limits of handling[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1258-1269.
- [12] BROWN M, ERLIEN S.M, FUNKE J, et al. Collision avoidance and stabilization for autonomous vehicles in emergency scenarios[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25: 1204-1216.
- [13] PARIDA N, RAHA S, RAMANI A. Rollover-preventive force synthesis at active suspensions in a vehicle performing a severe maneuver with wheels lifted off[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6): 2583-2594.
- [14] LI Liang, LU Yishi, WANG Rongrong, et al. A three-dimensional dynamics control framework of vehicle lateral stability and rollover prevention via active braking with MPC[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 3389-3401.
- [15] LAPAPONG S, BRENNAN S. Terrain-aware rollover prediction for ground vehicles using the zero-moment point method[C]// *Proceedings of the 2010 American Control Conference*. Baltimore, MD, USA: 2010: 1501-1507.
- [16] STANKIEWICZ P, BROWN A, BRENNAN S. Preview horizon analysis for vehicle rollover prevention using the zero-moment point[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2015, 137(9): 1-12.
- [17] LI Shengbo, XU Shaobing, KUM D. Efficient and accurate computation of model predictive control using pseudospectral discretization[J]. *Neuro Computing*, 2015, 172: 363-372.
- [18] LI Shengbo, JIA Zhenzhong, Li Keqiang, et al. Fast online computation of a model predictive controller and its application to fuel economy-oriented adaptive cruise control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2015, 16(3): 1199-1209.
- [19] 李升波, 王建强, 李克强. 软约束线性模型预测控制系统的稳定性方法[J]. *清华大学学报*, 2010, 50 (11): 1848-1852.
- LI Shengbo, WANG Jianqiang, LI Keqiang. Stabilization of linear predictive control systems with softening constraints[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2010, 50(11): 1848-1852.
- [20] PACEJKA H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [21] CHENG Shuo, LI Liang, CHEN Jie. Fusion algorithm design based on adaptive SCKF and integral correction for side-slip angle observation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(7): 5754-5763.

- [22] BECHTOFF J, KOENIG L, ISERMANN R. Cornering stiffness and sideslip angle estimation for integrated vehicle dynamics control[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(11): 297-304.
- [23] MATTINGLEY J, BOYD S. CVXGEN: a code generator for embedded convex optimization[J]. Optimization and

Engineering, 2012, 13(1): 1-27.

作者简介: 刘凯, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为无人驾驶车辆、路径规划与控制。

E-mail: leoking1025@bit.edu.cn

龚建伟(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为无人驾驶车辆、路径规划与控制、环境感知、机器学习。

E-mail: gongjianwei@bit.edu.cn