

一种基于 LTV MPC 改进的 无人驾驶汽车路径跟踪控制算法

张维刚[†], 张朋, 韦昊, 熊觉振

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:在低附着路面情况下,针对现有以线性时变模型预测控制(LTV MPC)为基础的无人驾驶汽车路径跟踪精确性和稳定性问题,提出一种改进的控制算法.以汽车动力学理论为基础,将四轮轮胎侧偏角和滑移率精确地表示为车辆状态量的非线性函数,在预测时域内对车辆状态方程线性化处理而求解雅可比矩阵时,为降低系统维度,将轮速作为非状态量,建立改进的三自由度车辆模型,在二次规划性能指标中加入横摆角速度跟踪误差项以提高路径跟踪性能,考虑质心侧偏角对跟踪精度和车辆稳定性的影响,修正参考横摆角,建立改进的 LTV MPC.在 Carsim-Simulink 联合仿真平台进行低附着系数路面情况下的双移线跟踪仿真,结果表明改进后的控制算法在保证实时性的前提下,提高了路径跟踪的精确性和车辆行驶的稳定性的。

关键词:无人驾驶汽车;路径跟踪;线性时变模型预测控制;二次规划

中图分类号:U467.1

文献标志码:A

An Improved Path Tracking Control Algorithm for Autonomous Vehicle Based on LTV MPC

ZHANG Weigang[†], ZHANG Peng, WEI Hao, XIONG Juezhen

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Under the case of low adhesion road, an improved control algorithm is proposed to solve the problem of the lack of accuracy and stability in the path tracking of autonomous vehicles based on Linear Time-Varying Model Predictive Control (LTV MPC). Based on vehicle dynamics, the slip angles and ratios of four tires are accurately expressed as the nonlinear function of vehicle state parameters. The Jacobian matrix is obtained by taking wheel speed as constant when linearizing the vehicle state equation in prediction horizon so as to reduce the dimension of the system, which aims to establish the improved 3-DOF vehicle model. The yaw rate tracking error is added into the performance index of quadratic programming to improve the path tracking performance and the influence of the slip angle of vehicle on the tracking accuracy and vehicle stability is considered to modify the reference yaw angle, which improves the overall performance of LTV MPC. The double lane change tracking simulation under the condition of low adhesion coefficient is performed on Carsim-Simulink co-simulation platform, and the results show that the improved control algorithm can increase the accuracy of path tracking and stability of vehicle while ensuring real-time performance.

Key words: autonomous vehicle; path tracking; Linear Time-Varying Model Predictive Control (LTV MPC); quadratic programming

* 收稿日期:2020-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51765021), National Natural Science Foundation of China(51765021)

作者简介:张维刚(1966—),男,湖北潜江人,湖南大学机械与运载工程学院教授

[†] 通信联系人, E-mail: zhangwg@hnu.edu.cn

路径跟踪是无人驾驶汽车自主行驶过程中的基本任务和关键环节,其主要目标是使车辆自动沿着规划路径安全稳定地行驶^[1].当车辆行驶在低附着路面上时,由于此时车辆极易处于失稳状态,路径跟踪精确性和车辆行驶稳定性就面临着很大的挑战.

为了增强路径跟踪控制效果,相关研究人员提出了许多算法.模型预测控制(MPC)由于能够有效处理系统约束、方便建立多输入多输出控制系统且具备前馈加反馈控制的优点,已经成为其中最有效的方法之一^[2].MPC首先利用已有模型来预测系统未来的动态,并将系统当前的状态作为初始状态,以某项性能指标达到最优为目标,形成一个有限时域开环最优问题,通过在线求解该问题而获得最优控制量^[3-4].由于在每个采样时刻都求解二次规划或非线性规划问题,当预测模型过于复杂或考虑过多的非线性约束时,计算量会过于庞大而限制其在车辆控制系统中的实际应用^[5-6].为提高算法的实时性,线性时变模型预测控制(LTV MPC)往往作为一种次优的选择^[7].

LTV MPC在每个时间步长内,将非线性车辆动力学模型在当前工作点连续线性化,且一般会将最优问题转化为二次规划问题进行求解.动力学预测模型是LTV MPC的核心,模型的精度和复杂度直接决定了路径跟踪的精确性和实时性^[8].文献[9]使用三种不同精度的车辆模型来建立LTV MPC路径跟踪控制器,指出精度高的车辆模型可以有效提高跟踪性能,但复杂的模型会相应增加计算负担,当模型的维度达到一定阶次后,性能的提升幅度有限.文献[10]基于简化的三自由度车辆动力学模型建立了典型的LTV MPC轨迹跟踪控制器,但由于未考虑左右轮胎受力的差异及低附着工况下质心侧偏角和横摆角速度对车辆稳定性的影响,路径跟踪精确性和车辆行驶稳定性的问题依然存在.

文献[11]研究了质心侧偏角对路径跟踪效果的影响,指出把参考横摆角定义为期望路径航向角,横向误差和横摆角误差将难以同时收敛趋于0,而利用质心侧偏角对参考横摆角进行补偿能提高路径跟踪的精确性.文献[12-13]在LTV MPC性能指标中加入横摆角速度误差,指出该项的加入能够提高路径跟踪性能,但未对其影响作具体的阐述.质心侧偏角与地面对轮胎的横摆力矩和侧向力变化范围直接相关,横摆角速度表征了车辆的转弯能力和动态行为,通过对两者实施相应的动力学约束能够提升车辆的横摆稳定性^[14].因此,在LTV MPC路径跟踪控制算法

中,应综合考虑质心侧偏角和横摆角速度的影响,以提高路径跟踪的精确性和车辆行驶的稳定性.

基于以上分析,本文针对低附着路面情况下,基于LTV MPC的无人驾驶汽车路径跟踪控制精确性和稳定性问题,在精确建立四轮轮胎侧偏角、滑移率和车辆状态参数非线性关系的基础上,考虑预测模型维度对算法实时性的影响,简化雅可比矩阵的求解,建立改进的三自由度车辆模型.在二次规划性能指标中加入横摆角速度误差项,利用质心侧偏角修正参考横摆角,并对横摆角速度和质心侧偏角施加稳定性约束,建立改进的LTV MPC.在Carsim-Simulink联合仿真平台进行低附着路面情况下的双移线跟踪仿真,验证改进措施的有效性.

1 汽车动力学预测模型

假设车辆在水平路面上行驶,忽略空气阻力,建立主要考虑车辆纵向、横向以及横摆动力学特性的平面四轮车辆模型.如图1所示, $oxyz$ 为车辆坐标系,固定于车辆质心, $OXYZ$ 为惯性坐标系.

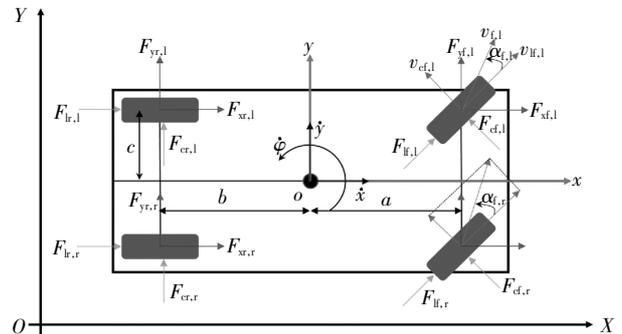


图1 车辆动力学预测模型

Fig.1 Vehicle dynamics prediction model

车辆横向、纵向及横摆运动的动力学方程可以分别表示为:

$$m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\phi} + F_{yf,1} + F_{yf,r} + F_{yr,1} + F_{yr,r} \quad (1)$$

$$m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\phi} + F_{xf,1} + F_{xf,r} + F_{xr,1} + F_{xr,r} \quad (2)$$

$$I\ddot{\phi} = a(F_{yf,1} + F_{yf,r}) - b(F_{yr,1} + F_{yr,r}) + c(-F_{xf,1} + F_{xf,r} - F_{xr,1} + F_{xr,r}) \quad (3)$$

式中: $F_{x*,*}$, $F_{y*,*}$ 表示车辆的纵向力和横向力,下标 $*$ $\in\{f,r\}$ 表示前后轴, $\cdot\in\{l,r\}$ 表示左右轮. a , b 分别为前后轴到质心的距离, c 为前后轴轮距(在此认为相等); m 为整车质量, I 为车辆绕 z 轴的转动惯量, \dot{y} 和 \dot{x} 分别为车辆沿着 y 轴和 x 轴的横向速度和纵向速度, $\dot{\phi}$ 为车辆横摆角速度.

轮胎在 x 轴和 y 轴方向上的受力分别为:

$$F_{y^*} = F_{1^*} \sin \delta + F_{c^*} \cos \delta \quad (4)$$

$$F_{x^*} = F_{1^*} \cos \delta + F_{c^*} \sin \delta \quad (5)$$

式中: F_{1^*} 、 F_{c^*} 分别为轮胎所受到的纵向力和侧向力。

基于 Dugoff 轮胎模型, 轮胎的纵向力和侧向力可以表示为车辆状态参数和路面附着系数的复杂函数:

$$F_1 = f_1(\alpha, s, \mu, F_z) \quad (6)$$

$$F_c = f_c(\alpha, s, \mu, F_z) \quad (7)$$

式中: α 为轮胎侧偏角, s 为滑移率, F_z 为轮胎受到的垂向载荷, μ 为路面附着系数。

考虑到控制算法要显式表征线性化车辆动力学预测模型的状态转移矩阵, 公式(6)(7)的复杂函数关系会大大增加矩阵元素的复杂度, 从而影响模型预测控制的实时性, 因此对轮胎的纵向力和侧向力进行简化处理, 分别表示为:

$$F_{1^*} = C_{1^*} s^* \quad (8)$$

$$F_{c^*} = C_{c^*} \alpha^* \quad (9)$$

式中: C_{1^*} 、 C_{c^*} 分别为轮胎纵向刚度和侧偏刚度, s^* 为滑移率, α^* 为轮胎侧偏角。四轮侧偏角可以分别表示为车辆状态量和前轮转角的非线性函数:

$$\alpha_{f,l} = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x} - c\dot{\varphi}} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_{f,r} = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + a\dot{\varphi}}{\dot{x} + c\dot{\varphi}} \right) \quad (11)$$

$$\alpha_{r,l} = -\tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + b\dot{\varphi}}{\dot{x} - c\dot{\varphi}} \right) \quad (12)$$

$$\alpha_{r,r} = -\tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + b\dot{\varphi}}{\dot{x} + c\dot{\varphi}} \right) \quad (13)$$

式中: δ 为前轮转角。

滑移率可以表示为:

$$s^* = \frac{r\omega^* - v_{1^*}}{\max(r\omega^*, v_{1^*})} \quad (14)$$

式中: r 为车轮半径, ω 为车轮旋转角速度, v_{1^*} 表示车轮中心纵向速度(如图 1 所示)并可分别表示为:

$$v_{1f,l} = (\dot{x} - c\dot{\varphi}) \cos \delta + (\dot{y} + a\dot{\varphi}) \sin \delta$$

$$v_{1f,r} = (\dot{x} + c\dot{\varphi}) \cos \delta + (\dot{y} + a\dot{\varphi}) \sin \delta$$

$$v_{1r,l} = \dot{x} - c\dot{\varphi}$$

$$v_{1r,r} = \dot{x} + c\dot{\varphi}$$

忽略小角度假设, 且认为车辆仅通过前轮转向, 从而得到七自由度平面四轮车辆模型的状态方程:

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi(t), u(t)) \quad (15)$$

其中, $\xi = (\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X, \omega_{f,l}, \omega_{f,r}, \omega_{r,l}, \omega_{r,r})^T$, $u = \delta$ 。

该模型的维度较高且呈高度非线性, 考虑到无人驾驶汽车对控制器的实时性要求, 对式(15)线性

化、离散化处理。

在预测时域 N_p 内, 将轮速作为非状态量, 对系统状态方程(13)在 $\xi(t)$ 处进行一阶泰勒展开。在 MATLAB 环境中, 采用 Jacobian 函数分别求解对 $\xi(t)$ 和 $u(t)$ 的雅可比矩阵, 从而得到新的状态方程:

$$\xi(k+1) = A_{k,t} \xi(k) + B_{k,t} u(k) + d_{k,t} \quad (16)$$

其中, $A_{k,t} = \left. \frac{\partial f}{\partial \xi} \right|_{\hat{\xi}_{k,t}, u}$, $B_{k,t} = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\hat{\xi}_{k,t}, u}$,

$$d_{k,t} = \hat{\xi}_{k+1,t} - A_{k,t} \hat{\xi}_{k,t} - B_{k,t} u_t,$$

$$\hat{\xi}_{k+1,t} = f(\hat{\xi}_{k,t}, u_t), k = t, \dots, t + N - 1,$$

$$\hat{\xi}_{k,t} = \xi(t), u_t = u(t-1).$$

经过上述处理后, 在预测时域 N_p 内, 对车辆状态进行预测时, 车辆状态参数降为 3 个, 控制器的实时性得以提高。

2 路径跟踪目标协调与优化

双移线工况是能表征汽车操纵稳定性的典型行驶工况, 同时能在一定程度上反映车辆的超车和避障能力。期望双移线路径由横向坐标 Y_{ref} 和横摆角 ψ_{ref} 组成, 两者均为纵向坐标的非线性函数, 具体可表达为如下形式:

$$Y_{ref}(X) = \frac{d_{y1}}{2} (1 + \tanh(z_1)) - \frac{d_{y2}}{2} (1 + \tanh(z_2)) \quad (17)$$

$$\psi_{ref}(X) = \arctan(d_{y1} \left(\frac{1}{\cosh(z_1)} \right)^2 \left(\frac{1.2}{d_{x1}} \right) - d_{y2} \left(\frac{1}{\cosh(z_2)} \right)^2 \left(\frac{1.2}{d_{x2}} \right)) \quad (18)$$

其中, $z_1 = \frac{2.4}{25} (X - 27.19) - 1.2$, $z_2 = \frac{2.4}{21.95} (X - 56.46) - 1.2$, $d_{x1} = 25$, $d_{x2} = 21.95$, $d_{y1} = 4.05$, $d_{y2} = 5.7$ 。

图 2 显示了车辆跟踪参考路径的运动过程, 图中, β 为车辆质心侧偏角, φ 为车辆横摆角, ψ_{ref} 为参考路径横摆角, φ_{ref} 为修正后的参考横摆角, e 为车辆质心与参考路径的直线距离。

从实际应用的角度来说, 要使车辆精确地沿着期望路径行进, 横向误差收敛到 0 应为主要目标。从汽车动力学的角度看, 这意味着车辆质心速度方向要与车辆参考路径切线方向一致。否则, 车辆在参考路径法向上就会有速度分量, 车辆便有位置误差增大的运动趋势。为实现以上要求, 将参考横摆角的修正值取为:

$$\varphi_{ref} = \psi_{ref} - \beta \quad (19)$$

相应地,参考横摆角速度为:

$$\dot{\varphi}_{\text{ref}} = \dot{\psi}_{\text{ref}} - \dot{\beta} = \rho \cdot \dot{x} - \dot{\beta} \quad (20)$$

式中: ρ 为参考路径的曲率.

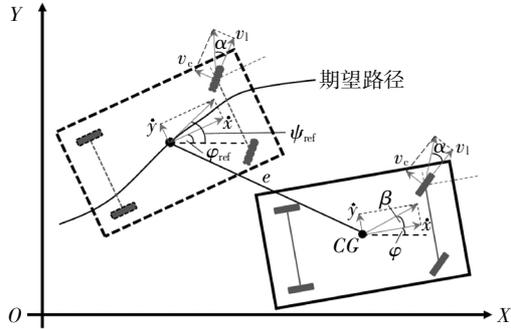


图2 路径跟踪示意图

Fig.2 Path tracking schematic diagram

将参考横摆角速度作为跟踪目标之一且考虑质心侧偏角的影响,通过对两者添加动力学约束可以提高车辆在跟踪参考路径时的稳定性.

3 改进 LTV MPC 控制器设计

在每个采样时刻,LTV MPC 控制器通过建立最小化性能指标和添加相关约束,并采用二次规划算法求解这样一个有限时域最优化问题.在新的采样时刻,利用被控对象的实际输出信息,更新上述优化控制问题,实现滚动优化的过程,其控制原理如图3所示:

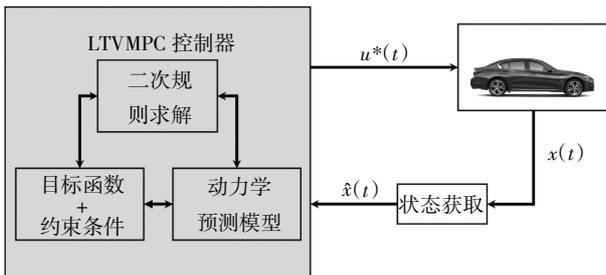


图3 LTV MPC 原理框图

Fig.3 LTV MPC schematic diagram

为了能对控制量变化做出有效的约束,实现平稳的路径跟踪过程,针对状态方程(14),以前轮转角变化量为新的控制量,得到新的状态空间表达式:

$$\tilde{\xi}(k+1t) = \tilde{A}_{k,t} \tilde{\xi}(klt) + \tilde{B}_{k,t} \Delta u(klt) + \tilde{d}_{k,t} \quad (21)$$

$$\text{其中, } \tilde{A}_{k,t} = \begin{pmatrix} A_{k,t} & B_{k,t} \\ 0_{m \times n} & I_m \end{pmatrix}, \tilde{B}_{k,t} = \begin{pmatrix} B_{k,t} \\ I_m \end{pmatrix},$$

$$\Delta u(klt) = u(klt) - u(k-1t), \tilde{d}_{k,t} = \begin{pmatrix} d(klt) \\ 0_m \end{pmatrix},$$

$$\tilde{\xi}(klt) = \begin{pmatrix} \xi(klt) \\ u(k-1t) \end{pmatrix}, m=1, n=6.$$

控制器的主要目标是使车辆精确稳定地跟踪参考路径,性能指标应能兼顾跟踪精度和平稳性.根据上节对跟踪误差的分析结果,总优化目标定义为跟踪误差和控制增量的加权求和:

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U_t, \varepsilon) = \sum_{t=1}^{H_p} \|\eta_{tr}(t+ilt) - \eta_{ref}(t+ilt)\|_Q^2 + \sum_{t=0}^{H_c-1} \|\Delta u(t+ilt)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (22)$$

式中: H_p 和 H_c 分别为预测时域和控制时域, $\eta = (\varphi, Y, \dot{\varphi})$ 为系统输出, η_{ref} 为相应的参考输出, Q, R, ρ 为相应优化目标的权重矩阵, ε 是为了确保在规定时间内存在最优解而加入的松弛因子, ΔU_t 为控制时域内的控制增量序列.

为了使得轮胎处于线性范围内,以保证建立动力学预测模型时的线性化处理对模型精度影响较小,对侧偏角施加软约束.轮胎侧偏角为控制量和状态量的非线性函数,式(8)-(11)可以表示为:

$$\alpha(t) = \text{alp}(\xi(t), u(t)) \quad (23)$$

采用和上述系统方程相似的线性化离散化方法:

$$\alpha(k+1) = C_{k,t} \xi(k) + D_{k,t} u(k) + e_{k,t} \quad (24)$$

写成以控制增量为变量的形式为:

$$\alpha(k+1t) = \tilde{C} \tilde{\xi}(klt) + \tilde{D} \Delta u(klt) + e_{k,t} \quad (25)$$

其中, $\tilde{C}_{k,t} = (C_{k,t} \ D_{k,t}), \tilde{D}_{k,t} = D_{k,t},$

$$e_{k,t} = \tilde{\alpha}_{k,t} - C_{k,t} \tilde{\xi}_{k,t} - D_{k,t} u(t+1).$$

车辆在实际行进过程中,作为控制输出的前轮转角范围会受到转向机构的限制,为了使得前轮转角变化比较平稳且易于实现,分别对前轮转角及其变化量取值范围做出约束.

车辆在低附着路面上行进时,极易处于失稳状态.考虑到质心侧偏角对车辆稳定性的影响以及路面附着条件对轮胎力的限制,对两者做出约束:

$$|\beta| \leq \tan^{-1}(0.02 \mu g)$$

$$|\dot{\varphi}| \leq \frac{\mu g}{\dot{x}} \quad (26)$$

式中: μ 为路面附着系数, β 由于不是直接输出量,采用与轮胎侧偏角类似的方式进行约束,并且为了保证车辆在低附着路面上行驶时的稳定性而不加松弛因子. $\dot{\varphi}$ 为直接输出量,可以直接对其进行限制.

综合考虑上述目标函数及约束,最优化问题可以规整为:

$$\begin{aligned}
 & \min_{\Delta U, \varepsilon} J(\xi(t), u(t-1), \Delta U, \varepsilon) \\
 & \text{s.t. } \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k|t) \leq \Delta u_{\max} \\
 & u_{\min} \leq u(k|t) \leq u_{\max} \\
 & y_{\min} \leq y_{\text{out}} \leq y_{\max} \\
 & \alpha_{\min} - \varepsilon \leq \alpha(k|t) \leq \alpha_{\max} + \varepsilon \\
 & -\tan^{-1}(0.02 \mu g) \leq \beta(k|t) \leq \tan^{-1}(0.02 \mu g) \quad (27)
 \end{aligned}$$

式中: y_{out} 表示控制器的直接输出量, 包括车辆横摆角、横向位置及横摆角速度。

将式(25)的最优化问题转化为二次规划问题, 在 MATLAB 环境中, 使用 Quadprog 函数并采用有效集法进行求解, 将解的第一个元素作为实际控制量。

4 仿真实验结果及分析

根据我国道路交通安全法, 车辆在一般道路上的行驶速度不超过 70 km/h。在 Carsim-Simulink 联合仿真平台上进行仿真实验, 为了验证控制器在低附着路面不同车速情况下的路径跟踪效果, 设置路面附着系数 $\mu=0.3$, 初始车速为 30 km/h 和 70 km/h 两种情况。

为了验证改进模型的有效性, 以基于二自由度车辆模型的 LTV MPC 为比较对象, 不加入质心侧偏角修正且不考虑横摆角速度跟踪误差, 除预测模型不同外, 控制器的其他参数均相同且如下所示:

- 仿真步长 $T = 0.05 \text{ s}$, 预测时域 $H_p = 20$, 控制时域 $H_c = 5$
- 优化目标权重:
 $Q = \begin{pmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}, R = 5 \times 10^4, \rho = 1000$
- 相关约束: $\Delta u_{\min} = -0.85^\circ, \Delta u_{\max} = 0.85^\circ, u_{\min} = -10^\circ, u_{\max} = 10^\circ, y_{\min} = (-0.5 \ -2)^T, y_{\max} = (0.5 \ 4)^T$ 。

图 4、图 5 分别显示了 30 km/h 和 70 km/h 初始车速情况下改进模型前后的路径跟踪仿真结果:

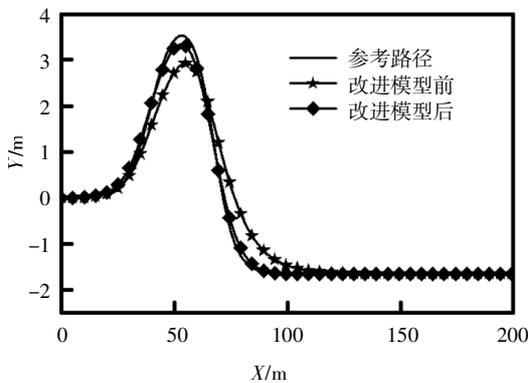


图 4 $v = 30 \text{ km/h}$ 时路径跟踪仿真结果

Fig.4 Simulation results of path tracking when $v = 30 \text{ km/h}$

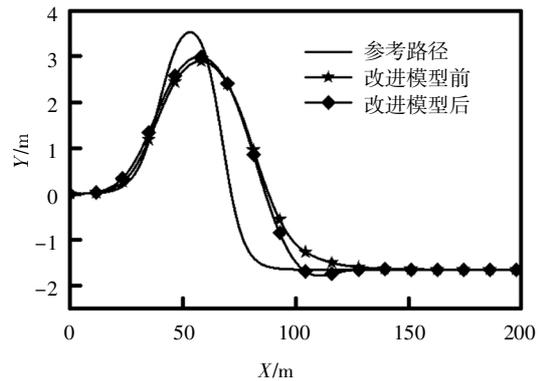


图 5 $v = 70 \text{ km/h}$ 时路径跟踪仿真结果

Fig.5 Simulation results of path tracking when $v = 70 \text{ km/h}$

使用均方根跟踪误差(RMSE)表示改进模型前后的跟踪精度变化, 如表 1 所示, Y_{RMS} 表示改进模型前后的均方根误差。

表 1 跟踪精度对比

Tab.1 Comparison of tracking accuracy

	Y_{RMS} (改进模型前)/m	Y_{RMS} (改进模型后)/m
30 km/h 车速	0.337 1	0.084 6
70 km/h 车速	0.671 0	0.578 2

表 1 表明, 相比基于二自由度模型的 LTV MPC, 改进模型后的控制器在初始车速为 30 km/h、70 km/h 情况下的跟踪误差分别减小了 74.92%和 13.83%, 说明改进后的预测模型能有效提高 LTV MPC 的路径跟踪精度。

动力学预测模型很大程度上决定了每个仿真步长内控制器的求解时间, 改进模型前后控制器的实时性如表 2 所示, 其中, $t_{\text{ave}}, t_{\text{max}}$ 分别表示控制器在每个仿真步长内计算时间的平均值和最大值。

表 2 实时性对比

Tab.2 Comparison of real-time performance

	t_{ave}/ms		t_{max}/ms	
	改进模型前	改进模型后	改进模型前	改进模型后
30 km/h 车速	5.968	14.454	19.502	33.372
70 km/h 车速	6.198	15.735	18.031	29.093

表 2 说明, 改进模型前后, 控制器的实时性没有出现量级上的变化, 最大计算时间不超过 35 ms, 基于改进模型的 LTV MPC 具有较好的实时性。

为了表示在性能指标中加入横摆角速度跟踪误

差并利用质心侧偏角修正参考横摆角和横摆角速度的路径跟踪效果,基于改进的动力学预测模型,对比了目标优化前后的跟踪性能.考虑到车辆在低附着路面上行驶时的稳定性,在以上约束的基础上加入侧偏角约束和横摆角速度约束,并将横摆角速度的权重取为 $Q_{\dot{\alpha}} = 10$, α 绝对值上限取为 4° .

车速为 30 km/h 情况下,目标优化前后的仿真结果如图 6 所示:

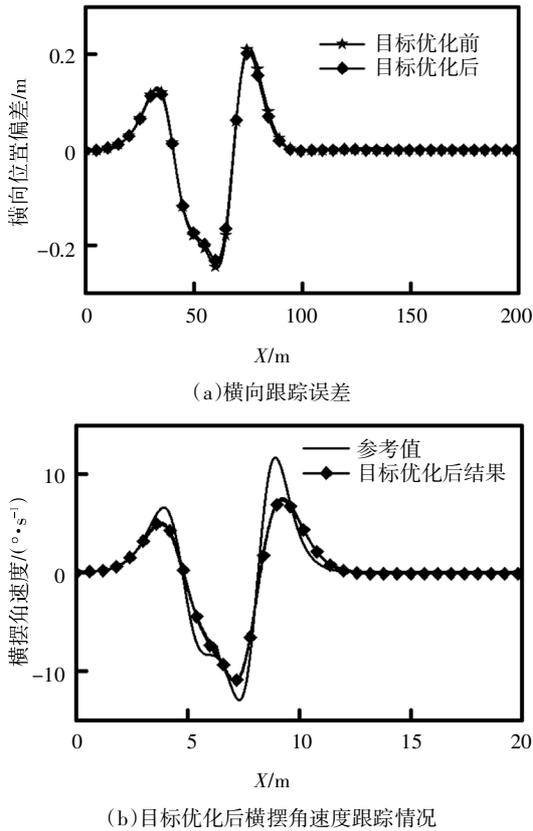


图 6 $v = 30 \text{ km/h}$ 时目标优化前后仿真结果

Fig.6 Simulation results before and after objective optimization when $v = 30 \text{ km/h}$

图 6(a)显示了路径跟踪过程中车辆横向位置跟踪误差变化情况,使用质心侧偏角和横摆角速度对跟踪目标修正和优化后,横向位置最大误差不超过 23 cm,目标优化前后跟踪精度提高较小,这是因为车辆以低速行驶时,质心侧偏角和横摆角速度变化较小,其对跟踪目标的优化作用较小.图 6(b)显示了经过目标优化后横摆角速度的跟踪效果,跟踪误差均方根为 $1.2^\circ/\text{s}$,表明车辆能较好地跟踪参考值.

车速为 70 km/h 情况下,目标优化前后的仿真结果如图 7 所示:

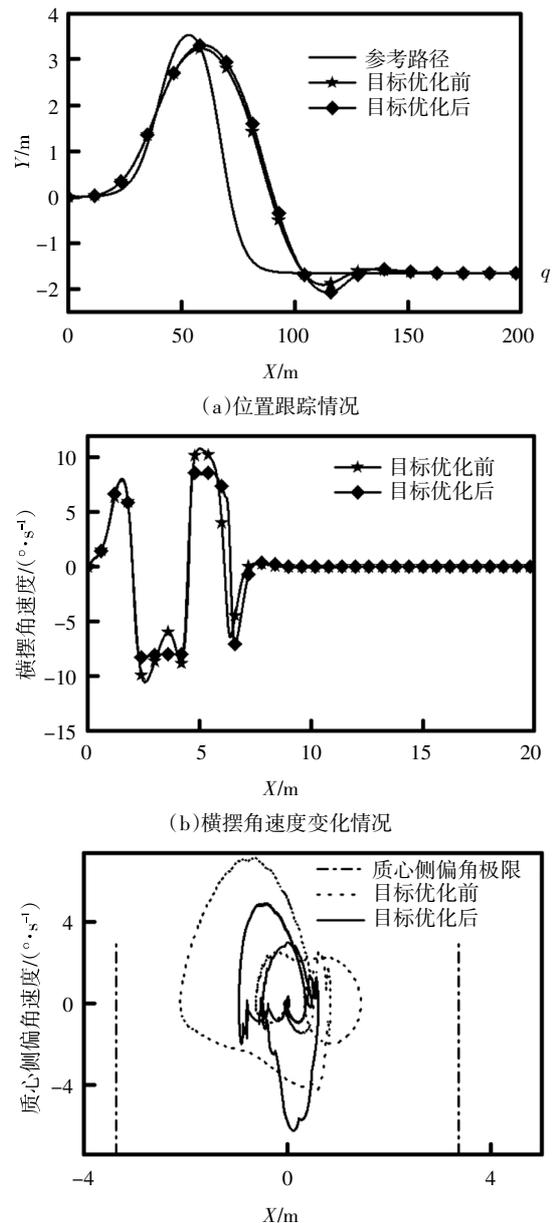


图 7 $v = 70 \text{ km/h}$ 时目标优化前后仿真结果

Fig.7 Simulation results before and after objective optimization when $v = 70 \text{ km/h}$

图 7(a)显示了对参考轨迹的跟踪情况,从图中可以看出,在高速低附工况下,由于考虑了横摆角速度的跟踪情况,经过目标优化后的控制器相比优化前对最大横向位置的跟踪误差减小了 16.8 cm,但为跟踪参考横摆角速度,车辆由于惯性而使得车辆的实际运动路径稍微滞后.车辆在最后一个转角处误差收敛的速度下降且出现略微的超调,这是因为将横摆角速度作为跟踪目标之一,相当于增加了汽车的动态响应需求,跟踪误差的收敛性相对下降.图 7(b)、7(c)表明了稳定性约束对路径跟踪效果的影响

响,从图中可以看出,相比优化前,横摆角速度由于受到约束而处于稳定性范围内,且质心侧偏角-质心侧偏角速度相平面具有更小的变化区间,说明横摆角速度和质心侧偏角的综合约束使得车辆具有良好的稳定性。

5 结 论

针对低附着路面情况下基于 LTV MPC 的无人驾驶汽车路径跟踪控制精确性和稳定性问题,提出相应的改进措施,包括:1)建立兼顾路径跟踪精确性和实时性的改进三自由度车辆模型;2)将横摆角速度跟踪误差加入二次规划性能指标,利用车辆质心侧偏角修正跟踪目标,建立改进的 LTV MPC。

搭建 Carsim-Simulink 联合仿真平台,在低附着路面情况下,车辆以 30 km/h 和 70 km/h 两种初速度跟踪双移线的仿真表明:改进后的车辆模型能提高路径跟踪精度且不影响实时性;将质心侧偏角和横摆角速度加入跟踪目标,能提高控制器的路径跟踪能力。优化后的 LTV MPC 路径跟踪控制器能更精确地跟踪参考轨迹,且能提高车辆在低附着路面情况下的行驶稳定性。

参考文献

- [1] HANG P, LUO F M, FANG S D, *et al.* Path tracking control of a four-wheel-independent-steering electric vehicle based on model predictive control [C]//第 36 届中国控制会议论文集. 2017: 1110—1116.
- [2] BAI G X, MENG Y, LIU L, *et al.* A new path tracking method based on multilayer model predictive control[J]. Applied Science, 2019, 9 (13): 2649—2666.
- [3] 龚建伟, 刘凯, 齐建勇. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 第二版. 北京:北京理工大学出版社, 2020.
GONG J W, LIU K, QI J Y. Model predictive control for self-driving vehicles [M]. 2nd Edition. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020. (In Chinese)
- [4] MAYNE D Q, RAWLINGS J B, RAO C V, *et al.* Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36 (6): 789—814.
- [5] GUO H Y, CAO D P, CHEN H, *et al.* Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: Implementation, testing, and verification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118(1): 41—60.
- [6] SWIEF A, EL-ZAWAWI A, EL-HABROUK M. A survey of model predictive control development in automotive industries [C]// 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID). Elazig, Turkey: IEEE, 2019: 1—7.
- [7] VELHAL S, THOMAS S. Improved LTV MPC design for steering control of autonomous vehicle [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 783(1): 012028.
- [8] JAMES B. RAWLINGS, DAVID Q. MAYNE M M. DIEHL. Model predictive control: Theory, Computation, and Design [M]. 2nd Edition. Santa Barbara: Nob Hill Publishing, LLC, 2019.
- [9] CHEN S P, CHEN H Y, DAN N. Implementation of MPC-based trajectory tracking considering different fidelity vehicle models [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2020, 29 (03): 303—316.
- [10] MING T Y, DENG W W, ZHANG S M, *et al.* MPC-based trajectory tracking control for intelligent vehicles [C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2016.
- [11] HU C, WANG R R, YAN F J, *et al.* Should the desired heading in path following of autonomous vehicles be the tangent direction of the desired path? [J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 (6): 3084—3094.
- [12] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, *et al.* Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 566—580.
- [13] FALCONE P, TUFO M, BORRELLI F, *et al.* A linear time varying model predictive control approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems [C]// 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007: 2980—2985.
- [14] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control [M]. Boston, MA: Springer US, 2012.