DOI: 10.3901/JME.2020.14.138

智能汽车的路面附着极限横向轨迹跟踪控制*

辛 喆¹ 陈海亮¹ 林子钰² 孙恩鑫¹ 孙 琪² 李升波²

(1. 中国农业大学工学院 北京 100083;

2. 清华大学汽车工程系 北京 100084)

摘要: 在极限轮胎-路面条件下, 智能汽车的横向操纵性能急剧恶化, 增加了自动驾驶系统的控制难度。现有研究主要聚焦智能汽车轨迹跟踪的性能, 但是难以解决低附着路面、紧急避障等极限工况下的智能汽车轨迹跟踪时的安全性和稳定性。利用模型预测控制方法实现了智能汽车的轨迹跟踪, 同时保证智能汽车行驶稳定性和安全性, 仿真试验同样表明该控制器具有较好的鲁棒性。结合二次型代价函数和安全约束构建了轨迹跟踪的开环最优预测控制问题, 通过约束车辆的前后轮侧偏角, 保持极限工况下智能汽车的行驶稳定性。研究方法可与智能汽车设计提供参考。

关键词: 自动驾驶; 智能车辆; 胎动力学; 横向稳定性; 预测控制

中图分类号: U467

Lateral Trajectory Following for Automated Vehicles at Handling Limits

XIN Zhe¹ CHEN Hailiang¹ LIN Ziyu² SUN Enxin¹ SUN Qi² LI Shengbo²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083;

2. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Under the limiting tire-road condition, the lateral operating control performance of vehicles would deteriorate sharply, which increases the control difficulty of the autopilot system. The existing researches mainly focused on the performance of intelligent vehicle trajectory trace controls without considerations of the safety and stability of the vehicle under low traction road surface, emergency obstacle avoidance and other limiting operation conditions. A lateral motion control method for automated vehicles is proposed by using the model predictive control (MPC) framework, which can ensure the driving stability and safety of intelligent vehicles. Meanwhile the simulation test results also show that the designed controller has a strong robustness. The open loop optimal control problem is formulated by using quadratic cost function and squared safety envelope. The side-slip angles of both front and rear wheels are constrained as the safety envelope so as to ensure the vehicle stability under the limiting operation conditions. The research methods and results can provide a reference for intelligent vehicle design.

Key words: automatic steering; intelligent vehicles; tire dynamics; lateral stability; predictive control

0 前言

道路车辆在低附着路面、紧急避障、高速转弯等工况下行驶, 轮胎的侧偏力达到轮胎与路面附着极限从而产生横向侧滑, 此时车辆与路面的横向作用力将迅速减小, 汽车将迅速失去控制产生碰撞和侧滑侧翻, 车辆失去行驶稳定性, 造成的交通事故和人员伤亡^[1-2]。虽然目前车辆都广泛应用了主动安

全技术, 如防抱死系统、电子稳定系统等, 但在高速路滑等极端条件下不能保证车辆的安全^[3-4]。随着计算机技术、传感器技术和车辆控制技术的进展, 基于环境感知的高度自动驾驶技术迅速发展, 以主动安全控制为核心的先进车辆安全技术将是现代交通系统和未来高度智能化交通系统的核心技术之一。轨迹跟踪是智能汽车底层控制的基本问题, 车辆是一个强非线性、具有多重约束的复杂系统, 传统的控制方法难以显示地处理约束问题, 因此智能汽车的轨迹跟踪控制始终是一个难点。同时现有的智能汽车轨迹跟踪控制算法仅考虑了车辆在正常工况下的行驶, 而对于在低附着路面、高速行驶等极限工况下的轨迹跟踪控制研究较少, 这显然无法满

* 国家自然科学基金资助项目(U1664263 和 61790561)。20190724 收到初稿, 20200229 收到修改稿

足智能汽车的控制需求^[5]。

模型预测控制(Model predictive control, MPC)是目前应用比较多的一种控制方法,其基本原理是根据车辆当前状态,利用车辆动力学模型在未来一段时域预测系统输出,并根据期望的状态轨迹在该时域内求解一个开环优化问题,并将输入序列的第一个元素作用于系统,不断向前滚动优化^[6]。MPC 是一种滚动优化方法,因此可以提高控制精度,优化跟踪性能,同时 MPC 可以显示地处理约束,因此被广泛应用来解决车辆纵横向控制问题。LI 等^[7-8]将 MPC 控制方法应用于多目标协同的自适应巡航控制系统中,并提出一种分层式的控制框架,其中下位控制器用来补偿车辆动力学的非线性并跟踪期望的加速度。上位控制器通过 MPC 的理论框架实现,并构建了考虑最小跟踪误差、低油耗、与驾驶员动态跟驰特性相关的多目标二次型性能指标函数,将驾驶舒适性以及安全性作为线性约束,同时引入松弛变量以弱化硬约束,保证 MPC 问题有可行解。为了减小 MPC 的在线计算负担,保证求解实时性,LI 等^[9]提出了一种通用的 MPC 求解时的降维方法,将现有的降低控制变量维度方法与约束集压缩策略结合,通过放宽预测时域内部分不等式约束,进一步减小 MPC 问题的规模。LI 等^[10-11]提出了一种非接触式的智能汽车人机共驾方法,将 MPC 应用于人机共驾型智能汽车的轨迹跟踪控制,驾驶员的操作输入与控制器计算出的期望输入的加权和作为车辆的最终输入控制。

为求解处于轮胎-路面附着极限时的智能汽车轨迹跟踪问题,JI 等^[12]利用简化的线性自行车模型,构建了线性 MPC 问题,但是当车辆处在轮胎的工作点远离线性工作区的极限工况下,线性 MPC 跟踪精度差,不能补偿轮胎的非线性特性,在轮胎侧偏力趋于饱和时甚至使车辆失稳。FACLONE 等^[13]设计了一种基于魔术公式轮胎模型的横向预测控制器,将非线性轮胎模型引入到预测方程中,实现了车辆的轨迹跟踪,并通过对前后轮胎侧偏角的约束来保证车辆的横向稳定性。然而非线性模型预测问题的求解难度大,优化效率低,较好地构建非线性 MPC 快速求解以保证实时性是难点。为了减小由模型非线性引起的计算量,FALCONE 等^[14]围绕参考轨迹将非线性车辆模型连续线性化,将非线性 MPC 问题转换为线性时变的 MPC 问题,虽然该方法在一定程度上降低了计算复杂度,但它需要在预测范围内的所有参考轨迹点处对非线性车辆模型的雅可比矩阵进行估计,仍然需要较大的计算量,且线性化

后的车辆动力学模型精度差,预测迭代过程中将会产生更大的误差,线性时变的 MPC 控制精度难以保证。BOBIER 等^[5]以前轮侧偏力直接作为输入,后轮侧偏力在当前工作点附近线性化,将轮胎侧偏角与侧偏力的非线性关系从优化问题中剔除,构建了线性 MPC 问题,并利用非线性轮胎逆模型反解前轮转角。

本文利用单轨车辆动力学模型,构建轨迹跟踪的预测控制问题,并通过约束车辆的前后轮侧偏角,将其作为轨迹跟踪问题的安全约束,保证智能汽车在极限工况下的行驶稳定性。利用 YALMIP 语言及 GUROBI 求解器,实现 MPC 问题的快速构建和求解^[15]。此外,引入松弛变量来弱化安全约束所施加的硬约束,以避免滚动优化中的无可行解问题。

1 车辆动力学模型

本文只通过前轮的主动转向控制实现跟踪轨迹,所以忽略了车辆的纵向动力学,假设纵向速度为定值。采用如下式所示的单轨的自行车模型(图 1)描述车辆的侧向和横摆运动,其中大地坐标系是由图中 X 轴、 Y 轴组成的惯性坐标系;车身坐标系的 x 轴平行地面指向行进方向, y 轴指向车辆的左侧,并做了如下的假定。

图 1 单轨车辆动力学模型

- (1) 前后轴的左右轮胎被等价集中于车辆前后轴与车体 x 轴的交点处,左右轮侧偏力相等。
- (2) 忽略车辆的俯仰和侧倾运动。
- (3) 车辆由后轮驱动,前轮仅用于转向。智能汽车为便于控制可能会对汽车的部分结构进行改变(如转向盘会选择转矩控制而非转角控制,或者直接加上整车控制器进行控制),车辆的横向采用直接的方向盘转角控制。

车辆的运动学模型如式(1)所示

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = v \cos(\psi(t) + \beta(t)) \quad (1a)$$

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = v \sin(\psi(t) + \beta(t)) \quad (1b)$$

车辆的单轨动力学数学模型如式(2)所示

$$mv(\dot{\beta} + r) = F_{yf} + F_{yr} \quad (2a)$$

$$I_{zz}r = aF_{yf} - bF_{yr} \quad (2b)$$

$$F_{yf} = -C_f \cdot \alpha_f \quad (2c)$$

$$F_{yr} = -C_r \cdot \alpha_r \quad (2d)$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{br}{v} \quad (2e)$$

$$\alpha_f = \beta + \frac{ar}{v} - \delta \quad (2f)$$

式中, m 是车辆质量, v 是车辆速度, β 是质心侧偏角, I_{zz} 是绕 z 轴的横摆惯性力矩, r 是横摆角速度, F_{yf} 是前轮侧偏力, F_{yr} 是后轮侧偏力, a 是质心距前轴的距离, b 是质心距后轴的距离。 C_f 和 C_r 分别为是前后轮的侧偏刚度, α_f 和 α_r 是前后轮侧偏角, δ 是前轮转角。选择 $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{y}(t), \psi(t), \beta(t), \mathbf{r}(t)]^T$ 作为车辆运动的状态变量, 式中 $\mathbf{y}(t)$ 是车辆的横向位移, 且存在 $\dot{\mathbf{y}}(t) = v \sin(\psi(t) + \beta(t))$, 在本文的研究的轨迹跟踪场景中, $\psi(t) + \beta(t)$ 的值较小, 因此 $\dot{\mathbf{y}}(t) \approx v(\psi(t) + \beta(t))$ 。 $\dot{\psi}(t)$ 是车辆的航向角随时间的变化, 式中 $\dot{\psi}(t) = \mathbf{r}(t)$ 。 $\beta(t)$ 为车辆的质心侧偏角随时间的变化, $\mathbf{r}(t)$ 为车辆的横摆角速度随时间的变化。因此车辆的动力学模型可以用如下的状态方程描述

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_c \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{z}(t) &= \mathbf{C}_c \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 输入 $\mathbf{u}(t) = \delta(t)$, 输出为 $\mathbf{z}(t) = [\mathbf{y}(t), \psi(t)]^T$,

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(t) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{A}_c &= \begin{pmatrix} 0 & v & v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{C_f + C_r}{mv} & \frac{aC_f - bC_r - mv^2}{mv^2} \\ 0 & 0 & (aC_f - bC_r)/I_{zz} & (a^2C_f + b^2C_r)/I_{zz}v \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_c &= [0 \quad 0 \quad -C_f/(mv) \quad -aC_f/I_{zz}]^T \\ \mathbf{C}_c &= [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0; 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \end{aligned}$$

对连续状态方程离散化, 得到离散状态方程

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{z}(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}_d = T_s \mathbf{A}_c + \mathbf{I} \\ \mathbf{B}_d = T_s \mathbf{B}_c \\ \mathbf{C}_d = \mathbf{C}_c \end{cases} \quad (5)$$

T_s 为采样时间, 其值为 0.02 s。 $\mathbf{I}$ 为 4×4 阶的单位矩阵。所用的车辆参数如表 1 所示

表 1 车辆参数

参数	数值
车辆质量/t	1.270
质心距前轴的距离/m	1.015
质心距后轴的距离/m	1.895
前轮侧偏刚度/(kN/rad)	72.197
后轮侧偏刚度/(kN/rad)	39.930
横摆惯性力矩/(t/m ²)	1.536

2 车辆稳定性边界

为了保证智能汽车在轨迹跟踪过程中的行驶稳定性, 在对车辆施加控制之前, 首先需要解决的是如何确定车辆状态的稳定性区域。相平面法是车辆稳定性分析的常用方法。之前对车辆稳定性分析的研究主要聚焦于质心侧偏角及其角速度相平面 ($\beta - \dot{\beta}$)、质心侧偏角与横摆角速度相平面 ($\beta - r$), INAGAKI 等^[3]绘制了不同的稳态转向条件下的 $\beta - \dot{\beta}$ 相轨迹, 通过试验分析估算稳定性区域的边界。随着车载传感技术的发展, 横摆角速度可以直接测量, 利用 $\beta - r$ 相图分析车辆稳定性引起研究者的关注。ONO 等^[4]揭示了车辆不稳定性的本质上是由 $\beta - r$ 相平面中鞍点周围的状态轨迹分岔引起的, 并指出鞍点是由后轮侧偏力饱和而产生的, 并根据鞍点的位置确定车辆状态的稳定性区域。还有一些学者根据平面中的轨迹趋势、平衡点位置等定义了其他类型的稳定性边界。但是以往研究中对稳定性边界定义基本是基于仿真试验或者实车试验, 缺少对稳定性边界的解析定义。车辆的不稳定性与轮胎侧偏力饱和和相关, 而轮胎模型描述了侧偏角与侧偏力的关系, 因此约束侧偏角可以抑制轮胎侧偏力过大的问题。本文利用前后轮质心侧偏角的阈值在 $\beta - r$ 相平面定义了车辆转向的稳定性边界, 将车辆状态约束在该区域时即能保证车辆的稳定性。对前后轮侧偏角的约束如式(6a)、(6b)所示

$$-\alpha_{f,\max} \leq \alpha_f \leq \alpha_{f,\max} \quad (6a)$$

$$-\alpha_{r,\max} \leq \alpha_r \leq \alpha_{r,\max} \quad (6b)$$

式中, $\alpha_{f,\max}$, $\alpha_{r,\max}$ 为前后轮发生侧滑时对应的侧偏角极限值。可由以下刷子轮胎模型计算得到公式

$$\alpha_{f,\max} = \frac{3\mu F_{zf}}{C_f} \quad (7a)$$

$$\alpha_{r,\max} = \frac{3\mu F_{zr}}{C_r} \quad (7b)$$

式中, μ 为路面附着系数, F_{zf} 前轮载荷, F_{zr} 为后轮载荷(假定车辆行驶过程中载荷不变, 其值为静态载荷)。

联合式(2e)和(2f)可以得到

$$-\alpha_{f,\max} \leq \beta + \frac{ar}{v} - \delta \leq \alpha_{f,\max} \quad (8)$$

$$-\alpha_{r,\max} \leq \beta - \frac{br}{v} \leq \alpha_{r,\max} \quad (9)$$

重新整理式(8)、(9)

$$\frac{v}{a}(-\beta - \alpha_{f,\max} + \delta) \leq r \leq \frac{v}{a}(-\beta + \alpha_{f,\max} + \delta) \quad (10)$$

$$\frac{v}{b}(\beta - \alpha_{r,\max}) \leq r \leq \frac{v}{b}(\beta + \alpha_{r,\max}) \quad (11)$$

构建如图 2 所示的车辆在 $\beta-r$ 相平面上的稳定性区域。

图 2 中 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 边界表达式如式(12)

$$\begin{cases} L_1: & r = \frac{v}{b}(\beta + \alpha_{r,\max}) \\ L_2: & r = \frac{v}{a}(-\beta - \alpha_{f,\max} + \delta) \\ L_3: & r = \frac{v}{b}(\beta - \alpha_{r,\max}) \\ L_4: & r = \frac{v}{a}(-\beta + \alpha_{f,\max} + \delta) \end{cases} \quad (12)$$

稳定性边界 L_1 和 L_3 后轮的侧偏角阈值有关, L_2 和 L_4 与前轮侧偏角阈值及前轮转角有关, 因此稳定性区域随着速度、前轮转角变化实时更新。该稳定性区域作为轨迹跟踪控制器的安全约束, 保证车辆的稳定性。

图 2 车辆转向稳定性区域

3 预测型横向控制器设计

本节设计了车辆横向的预测控制器, 用于在轮胎-路面附着极限下进行精确的轨迹跟踪。控制框架如图 3 所示。

智能汽车的轨迹规划层根据当前感知系统获取的道路环境生成安全可行驶的参考轨迹^[14](本研究中假定参考轨迹已知)。在每个预测时域内, 建立轨迹跟踪的开环最优控制问题并满足车辆动力学约束以及稳定性的安全约束。根据车辆动力学预测方程可以计算 MPC 在预测时域内每个时刻的横向位移和航向角输出为

$$\begin{cases} \mathbf{z}(k+1) = \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_d \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{z}(k+2) = \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^2 \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \mathbf{C}_d \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{z}(k+H_p) = \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{H_p} \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{H_p-1} \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) + \dots + \mathbf{C}_d \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k+H_p-1) \end{cases} \quad (13)$$

图 3 MPC 控制框架

并构建如下的开环最优控制问题

$$J(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) = \sum_{k=1}^{H_p} (\|\mathbf{z}(k) - \mathbf{z}_{\text{ref}}(k)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(k)\|_R^2 + \rho_f \cdot \epsilon_f^2 + \rho_r \cdot \epsilon_r^2) \quad (14a)$$

满足车辆的动力学约束(3)并服从如下的安全约束

$$\begin{cases} -\delta_{\max} \leq \mathbf{u}(k) \leq \delta_{\max} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a/v \\ 0 & 0 & 1 & -b/v \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) \leq \begin{bmatrix} \alpha_{f,\max} + \epsilon_f \\ \alpha_{r,\max} + \epsilon_r \end{bmatrix} \\ \epsilon_f \geq 0 \quad \epsilon_r \geq 0 \end{cases} \quad (14b)$$

式中, k 是当前时刻, H_p 是预测时域, $\mathbf{z}(k)$ 是考虑当前车辆位置和速度从参考路径提取的一个预测时域内的参考轨迹点, $\mathbf{u}(k) = \delta(k)$ 是预测控制的输入, $\delta_{\max}$ 为前轮转角阈值, $\alpha_{f,\max}$ 和 $\alpha_{r,\max}$ 分别为前后轮侧偏角阈值, ϵ_f 和 ϵ_r 为松弛变量。代价函数中

的第一项通过加权矩阵 $\mathbf{Q}$ 惩罚轨迹跟踪性能; 第二项由加权矩阵 $\mathbf{R}$ 惩罚输入的控制量; 最后两项引入惩罚系数 ρ_f 、 ρ_r 对侧偏角超出稳定性边界惩罚, 以保证优化问题有可行解^[15]。

4 仿真结果及验证

4.1 仿真平台搭建

YALMIP 是一种简洁明了的建模语言, 适用于求解大规模优化问题^[15]。本研究利用 YALMIP 构建 MPC 问题, 并利用 GUROBI 实现预测问题的快速求解。搭建基于 CARSIM 与 SIMULINK 的联合仿真试验平台, 在 SIMULINK 中设计控制器, 由 MPC 算法算出的控制输入传给 CARSIM; CARSIM 模拟真车, 给出状态反馈, 实现智能汽车的轨迹跟踪控制。仿真平台如图 4 所示。

图 4 CARSIM/Simulink 仿真平台

本文的控制器试验参数如表 2 所示。

表 2 MPC 控制器参数

参数	数值
预测时域	50
采样时间/s	0.02
车辆纵向速度/(km/h)	60
路面附着系数	0.85/0.5
前轮侧偏阈值/rad	0.15
后轮侧偏阈值/rad	0.14
跟踪性能权重矩阵	$[10^5 \quad 0; 0 \quad 10^3]$
输入惩罚因子	10^7
松弛惩罚系数/ 10^5	5
松弛惩罚系数/ 10^5	5
前轮转角范围/rad	$[-0.7, 0.7]$

4.2 仿真工况

4.2.1 良好路面条件下的轨迹跟踪控制

图 5 在良好路面条件下(车速 $v=60$ km/h, 路面

附着系数 $\mu=0.85$)进行的轨迹跟踪的仿真试验, 跟踪的轨迹为双移线(图 5a), 并将所得结果与 CARSIM 内置的预瞄最优控制器(Optimal preview control, OPC)对比。从图 5a 中可以看出, MPC 控制器的跟踪性能与 OPC 控制器相差不大, 都具有较高的跟踪精度。由图 5b 是在 MPC 和 OPC 控制器的作用下的转向盘转角曲线图。由图 5b 和图 5c 可知, 车辆的质心侧偏角和横摆角速度都相对较小, 表明在该工况下轮胎工作在非饱和区, 车辆行驶稳定。

图5 正常工况下的仿真结果图

4.2.2 低附着路面条件下的轨迹跟踪控制

图6为在低附着路面条件下(车速 $v = 60 \text{ km/h}$, 路面附着系数 $\mu = 0.5$)进行的轨迹跟踪试验。由图6a中可知, OPC控制器在起始阶段其跟踪性能优于MPC, 但是慢慢出现后轮侧滑甚至甩尾的情况, 最终导致车辆不稳定, 由图6c可以看出, 在OPC控制器的作用下, 车辆的质心侧偏角很大(最大 3 rad/s), 发生了较大的横向侧滑; 由图6d可以看出车辆在此过程中横摆角速度, 发生了较大的横摆运动, 整车处于回旋激转状态。因此在OPC控制器作用下车辆处于不稳定状态, 出现横向侧滑回旋并滑出跑道。与OPC控制器相比, MPC通过约束前后轮侧偏角, 将轮胎的极限附着能力作为轨迹跟踪问题的安全约束, 通过主动限制前轮转角将车辆状态限制在稳定区域内, 具有较小的质心侧偏角(约为 0.05 rad (图6c)), 其横摆角速度也处于正常值范围内(图6c)。MPC控制器在保证车辆行驶稳定性的同时, 充分利用了轮胎的极限附着能力。与正常工况相比, MPC控制器在牺牲部分轨迹跟踪性能以保持车辆在低附着路面下的行驶稳定性。

图6 低附着路面条件下的仿真结果图

4.2.3 低附着路面条件下的MPC控制器鲁棒性验证

智能汽车在低附着路面等极限工况下行驶涉及到驾乘人员及周围交通参与者的安全, 当整车受到不确定扰动时, 轨迹跟踪控制器应具有保持车辆轨迹跟踪以及车辆行驶稳定性的能力, 因此控制器应具有较强的鲁棒性。在实际车辆行驶过程中, 由于驾乘人员或者承载物品增减, 整车质量通常会发生变化, 而质量变化又会影响轮胎的极限附着能力, 进而影响车辆的行驶稳定性与安全性。因此本节通过变化车辆质量, 验证MPC控制器在轮胎-路面附着极限下的鲁棒性。

图7为整车质量变化为原先的0.8倍时轨迹跟踪控制器的仿真结果图。从图6a和图7a中可以看出, 在起始阶段MPC控制器的跟踪效果与质量未发生变动时基本一致, 而在最后阶段在MPC控制器的作用下, 实车的轨迹发生了轻微波动(由图7b方向盘转角图也可看出), 而车辆的质心侧偏角和横摆角速度仍处于合理范围内(图7c和图7d), 因此车辆仍具有较好的稳定行驶性。

图7 车辆质量变化为0.8倍的仿真结果图

当整车质量变化为原来的1.2倍时, 车辆的轨迹跟踪性能甚至略优于质量未发生变动时(图8a和图6a), 同时也能使车辆在低附着路面条件下保持稳定(图8c和图8d)。

图8 车辆质量变化为1.2倍的仿真结果图

5 结论

(1) 搭建了基于 Simulink 和 CARSIM 的联合仿真试验平台, 利用 YALMIP 和 GUROBI 构建求解 MPC 问题, 实现了基于联合仿真平台的轨迹跟踪试验。

(2) 仿真试验结果表明, 正常工况下本文设计的 MPC 控制器的控制精度优于 CARSIM 内置的 OPC 控制器; 低附着路面极限工况下, MPC 控制器牺牲部分轨迹跟踪的性能以保持车辆的横向稳定性。

(3) 当车辆质量变化时, 设计的 MPC 控制器具有良好鲁棒性, 能保持轨迹跟踪以及行驶稳定性的能力。

参考文献

- [1] SIAMPIS E, VELENIS E, GARIUOLO S, et al. A real-time nonlinear model predictive control strategy for stabilization of an electric vehicle at the limits of handling[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 26(6): 1982-1994.
- [2] 孙银健. 基于模型预测控制的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
SUN Yinjian. Research on model prediction control-based trajectory tracking algorithm for unmanned vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [3] INAGAKI S, KUSHIRO I, YAMAMOTO M. Analysis on vehicle stability in critical cornering using phase-plane method[J]. Jsa Review, 1995, 2(16): 216-217.
- [4] ONO E, HOSOE S, TUAN H D, et al. Bifurcation in vehicle dynamics and robust front wheel steering control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1998, 6(3): 412-420.
- [5] BOBIER C G, GERDES J C. Staying within the nullcline boundary for vehicle envelope control using a sliding surface[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(2): 199-217.
- [6] ERLIEN S M, FUJITA S, GERDES J C. Shared steering control using safe envelopes for obstacle avoidance and vehicle stability[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 441-451.
- [7] LI Shengbo, LI Keqiang, RAJESH R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2011, 19(3): 556-566.
- [8] LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang. Economy oriented vehicle adaptive cruise control with coordinating multiple objectives function[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(1): 1-17.
- [9] 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.
- [10] LI Renjie, LI Yanan, LI Shengbo, et al. Driver-automation indirect shared control of highly automated vehicles with intention-aware authority transition[C]// The 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2017.
- [11] LI Renjie, LI Shengbo, GAO Hongbo, et al. Effects of human adaptation and trust on shared control for driver-automation cooperative driving[R]. SAE Intelligent and Connected Vehicles Symposium, 2017.
- [12] JI J, KHAJEPOUR A, MELEK W W, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 952-964.
- [13] FACLONE P, BORRELLI F, TSENG H E, et al. Linear time-varying model predictive control and its application to active steering systems: Stability analysis and experimental validation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2008, 18(8): 862-875.
- [14] FALCONE P, TSENG H E, ASGARI J, et al. Integrated braking and steering model predictive control approach in autonomous vehicles[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2007, 40(10): 273-278.
- [15] LÖFBERG J. Modeling and solving uncertain optimization problems in YALMIP[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 1337-1341.

作者简介：辛喆，女，1964 年出生，博士，教授。主要研究方向为车辆智能化及电气化。

E-mail: xinzhe@cau.edu.cn

陈海亮，男，1992 年出生，硕士。主要研究方向为车辆动力学控制。

E-mail: chenhailiang_cau@126.com

林子钰，女，1994 年出生，博士。主要研究方向为自动驾驶及动力学控制。

E-mail: linzy17@mails.tsinghua.edu.cn

孙恩鑫，男，1996 年出生，硕士。主要研究方向为自动驾驶及最优估计。

E-mail: enxinsun1996@163.com

孙琪，男，1989 年出生，博士。主要研究方向为自动驾驶技术及分布式协作。

E-mail: qisun@mail.tsinghua.edu.cn

李升波，男，1982 年出生，博士，副教授。主要研究方向为自动驾驶技术、强化学习、分布式控制等。

E-mail: lishbo@tsinghua.edu.cn