

DOI: 10.7652/xjtuxb202003003

考虑误差校正的智能车辆路径跟踪鲁棒预测控制

张亮修^{1,2}, 张铁柱¹, 吴光强²

(1. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 255049, 山东淄博; 2. 同济大学汽车学院, 201804, 上海)

摘要: 为进一步增强高速智能车辆路径跟踪预测控制的鲁棒性和实时性,研究了一种考虑误差反馈校正机制的路径跟踪预测控制方法。考虑车辆纵向、侧向和横摆运动建立三自由度弱非线性车辆模型,以泰勒公式展开实现控制模型的线性时变一阶近似,引入预测状态变量构建路径跟踪预测优化问题。针对车辆参数偏差、系统时变和外界干扰等不确定性因素导致的建模失配,定义系统实际状态值与预测值之间的误差,得到带有反馈校正项的预测输出模型,通过误差反馈校正机制增强路径跟踪控制系统的鲁棒性。将路径跟踪预测优化问题推导转化为带约束的二次规划问题,并通过数值解法实现路径跟踪鲁棒预测控制律的滚动优化求解。结果表明:误差反馈校正机制可以有效改善路径跟踪预测控制算法因整车质量和横摆转动惯量变化导致的低鲁棒性问题,能够实现智能车辆高速行驶工况下的路径跟踪功能,且具备良好的实时性。

关键词: 智能车辆; 路径跟踪; 预测控制; 鲁棒性; 误差反馈校正

中图分类号: U242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0020-08

Robust Predictive Control for Intelligent Vehicle Path Tracking
Considering Error Feedback Correction

ZHANG Liangxiu^{1,2}, ZHANG Tiezhu¹, WU Guangqiang²

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;
2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To further enhance the robustness and real-time performance of path tracking predictive control for high-speed autonomous vehicle, a predictive control method for path tracking considering error feedback correction mechanism is proposed. A three-degree-of-freedom vehicle model with weak nonlinearity is established considering the longitudinal, lateral and yaw motions of the vehicle. The linear time-varying first-order approximation of the control model is realized by Taylor formula expansion. The predictive state variable is introduced to construct a path tracking optimization scheme. Aiming at the problems of mismatch caused by uncertainties such as vehicle parameter deviation, system time-varying and external disturbance, the error between the actual state value and the predicted one is defined, and the prediction output model with feedback correction term is obtained. The robustness of the prediction model of the path tracking control system is enhanced by the error feedback correction mechanism. The optimization of path tracking prediction is transformed into a constrained quadratic programming problem, and the receding optimization of robust predictive control law for path tracking is

numerically achieved. The results show that the error feedback correction mechanism can effectively improve the robustness of the predictive control algorithm for path tracking due to the change of vehicle mass and yaw moment of inertia, can realize the desired path tracking function under high-speed driving conditions, and has good real-time performance.

Keywords: autonomous vehicle; path tracking; predictive control; robustness; error feedback correction

随着汽车智能化需求的发展,路径跟踪控制这一智能车辆的关键技术已然成为研究重点。近年来,研究人员分别将PID控制^[1]、Hamilton理论^[2]、自抗扰控制^[3]、模糊自适应纯追踪模型控制^[4]、非光滑控制^[5]、最优容错控制^[6]、预瞄控制^[7]、模糊双曲正切模型^[8]、分段仿射控制^[9]和模型预测控制^[10]等方法用于车辆路径跟踪。其中,模型预测控制算法能够有效处理多个优化目标以及系统约束问题,已被广泛应用于智能辅助驾驶领域^[11-15]。

受车辆参数偏差、系统时变和外界干扰等不确定性因素的影响,模型预测控制的预测状态与系统实际状态之间不可避免地存在误差。传统模型预测控制算法对模型失配并不具备良好的鲁棒性^[16-17],当存在的不确定性因素较大时,预测模型也会存在较大预测误差,难以准确反映系统的实际特性。

本文从增强高速智能车辆路径跟踪预测控制的鲁棒性和实时性角度出发,研究了一种考虑误差反馈校正机制的路径跟踪预测控制方法。建立三自由度车辆模型,利用泰勒公式实现控制模型的线性时变一阶近似,构建了路径跟踪预测优化问题。针对车辆参数偏差、系统时变和外界干扰等不确定性因素引起的低鲁棒性问题,采用误差反馈校正机制建立鲁棒路径跟踪预测模型。将路径跟踪预测优化问题转化为二次规划问题,实现了路径跟踪鲁棒预测控制律的滚动优化求解。

1 路径跟踪预测控制算法

1.1 单轨三自由度车辆建模

采用单轨三自由度车辆模型作为路径跟踪控制模型,具体如图1所示。图中: $X-O-Y$ 、 $x-o-y$ 和 $\bar{x}-\bar{o}-\bar{y}$ 分别表示惯性坐标系、车辆坐标系和轮胎坐标系; a 、 b 分别为车辆质心到前、后轴距离; δ_f 为前轮转角; v_x 、 v_y 和 γ 分别为车辆的纵向速度、侧向速度和横摆角速度; β 为车辆质心侧偏角; Ψ 为横摆角,满足 $\gamma = \dot{\Psi}$; α_f 、 α_r 分别为前、后车轮的侧偏角; $F_{i,x}$ 、 $F_{i,y}$ ($i=f, r$)分别为前、后车轮的纵向轮胎力和侧向轮胎力;参考路径由参考位移 Y_{ref} 和参考横摆角 Ψ_{ref}

指定。

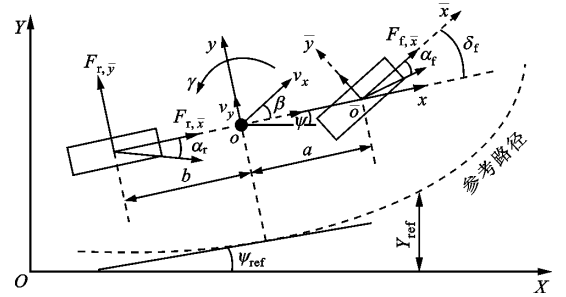


图1 单轨三自由度车辆模型

考虑车辆纵向、侧向和横摆运动,建立小前轮转角(认为 $\cos\delta_i \approx 1$, $\sin\delta_i \approx \delta_i$)和线性化轮胎模型的非线性三自由度车辆模型^[14],即

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{v}_x - v_y\gamma) &= 2 \left[k_{f,x}s_f - k_{f,y} \left(\frac{v_y + a\gamma}{v_x} - \delta_f \right) \delta_f + k_{r,x}s_r \right] \\ m(\dot{v}_y + v_x\gamma) &= 2 \left[k_{f,x}s_f\delta_f + k_{f,y} \left(\frac{v_y + a\gamma}{v_x} - \delta_f \right) + k_{r,x} \frac{v_y - b\gamma}{v_x} \right] \\ I_z\dot{\gamma} &= 2 \left\{ a \left[k_{f,x}s_f\delta_f + k_{f,y} \left(\frac{v_y + a\gamma}{v_x} - \delta_f \right) \right] - bk_{r,y} \frac{v_y - b\gamma}{v_x} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m 为整车质量; I_z 为车辆横摆转动惯量; $k_{i,x}$ 、 $k_{i,y}$ ($i=f, r$)分别为前、后轮胎的纵向刚度和侧偏刚度; s_i ($i=f, r$)为前、后车轮的纵向滑移率。惯性坐标系下车辆的运动学关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= v_x \cos\Psi - v_y \sin\Psi \\ \dot{Y} &= v_x \sin\Psi + v_y \cos\Psi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 分别为惯性坐标系下的车辆纵向、侧向速度。

为便于描述,将式(1)和式(2)用离散状态方程统一表示,即

$$\xi(t+1) = F(\xi(t), u(t), T_s) \quad (3)$$

式中: $\xi = [v_y, v_x, \Psi, \gamma, Y, X]^T$; $u = \delta_f$; $F(\mathbf{0}_{6 \times 1}, 0, T_s)$

$= \mathbf{0}_{6 \times 1}$; T_s 为离散系统采样时间。

1.2 控制模型线性时变一阶近似

为便于控制器设计,需将式(3)做线性时变处理^[18]。假定当前时刻的状态量和控制量为 (ξ_0, u_0) ,对系统施加持续控制 $u(k) = u_0, k \geq 0$,得到参考状态轨迹 $\hat{\xi}_0(k), k \geq 0, \hat{\xi}_0(k)$ 满足

$$\hat{\xi}_0(k+1) = \mathbf{F}(\hat{\xi}_0(k), u(k)) \quad (4)$$

式中: $u(k) = u_0; \hat{\xi}_0(0) = \xi_0$ 。

将非线性系统式(3)在工作点 $(\xi_0, 0)$ 处用泰勒公式展开,只保留一阶项,得到

$$\xi(k+1) = \mathbf{F}(\hat{\xi}_0(k), u(k)) + \mathbf{A}_{k,0}(\xi(k) - \hat{\xi}_0(k)) + \mathbf{B}_{k,0}(u(k) - u_0) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{A}_{k,0} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \xi} \Big|_{\hat{\xi}_0(k), u_0}$ 和 $\mathbf{B}_{k,0} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial u} \Big|_{\hat{\xi}_0(k), u_0}$ 分别为 $\mathbf{F}(\hat{\xi}_0(k), u(k))$ 相对于 ξ 和 u 的雅可比矩阵。

用式(5)减去式(4),得到

$$\xi(k+1) = \mathbf{A}_{k,0}\xi(k) + \mathbf{B}_{k,0}(k) + \mathbf{d}_{k,0}(k) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{d}_{k,0} = \hat{\xi}_0(k+1) - \mathbf{A}_{k,0}\hat{\xi}_0(k) - \mathbf{B}_{k,0}u_0$ 。

式(6)为非线性系统式(3)沿着参考轨迹 $\hat{\xi}_0(k)$ 在 $k \geq 0$ 时的一阶近似表示。在每个采样时刻 t ,即可得到线性时变系统为

$$\xi(k+1) = \mathbf{A}_{k,t}\xi(k) + \mathbf{B}_{k,t}u(k) + \mathbf{d}_{k,t} \quad (7)$$

式(7)即为单轨三自由度车辆模型的线性时变一阶近似模型,其中系数矩阵 $\mathbf{A}_{k,t}$ 、 $\mathbf{B}_{k,t}$ 和 $\mathbf{d}_{k,t}$ 均为线性时变矩阵。

1.3 路径跟踪预测优化问题构建

路径跟踪控制是在已有前轮转角基础上不断修正控制量。引入预测状态变量 $\xi(k|t)$,得到预测形式的状态空间表达式为

$$\left. \begin{aligned} \xi(k+1|t) &= \bar{\mathbf{A}}_{k,t}\xi(k|t) + \bar{\mathbf{B}}_{k,t}\Delta u(k|t) + \bar{\mathbf{d}}_{k,t} \\ \bar{\eta}(k|t) &= \bar{\mathbf{C}}_{k,t}\xi(k|t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\xi(k|t) = \begin{bmatrix} \xi(k|t) \\ u(k-1|t) \end{bmatrix}$; $\bar{\mathbf{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & 1 \end{bmatrix}$; $\bar{\mathbf{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{k,t} \\ 1 \end{bmatrix}$; $\bar{\mathbf{d}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{k,t} \\ 0 \end{bmatrix}$; $\bar{\eta}(k|t) = \begin{bmatrix} Y(k|t) \\ \Psi(k|t) \end{bmatrix}$; 控制增量 $\Delta u(k|t) = u(k|t) - u(k-1|t)$; $\Delta(k|t)$ 表示在 t 时刻预测的 k 时刻的 $\Delta, k = t, t+1, \dots, \Delta$ 为式(18)中的各变量。

路径跟踪的目标函数要保证车辆快速且平稳地追踪参考路径,为避免被控系统的控制量发生突变而影响控制量的连续性,采用二次型的目标函数来进行控制^[14],公式为

$$\begin{aligned} J(\xi, \Delta u) &= \sum_{i=1}^{N_p} (\bar{\eta}(t+i|t) - \eta_{\text{ref}}(t+i|t))^T \mathbf{Q}(\bar{\eta}(t+i|t) - \eta_{\text{ref}}(t+i|t)) + \sum_{i=0}^{N_c-1} \Delta u(t+i|t) \mathbf{R} \Delta u(t+i|t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: N_p 为预测时域; η_{ref} 为参考路径; N_c 为控制时域; $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 为权重系数。

分别对控制量 u 、控制增量 Δu 和输出量 η 进行约束,即

$$\left. \begin{aligned} u_{\min} &\leq u \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} &\leq \Delta u \leq \Delta u_{\max} \\ \bar{\eta}_{\min} &\leq \bar{\eta} \leq \bar{\eta}_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 分别为控制量 u 的上、下边界; $\Delta u_{\max}$ 和 $\Delta u_{\min}$ 分别为控制增量 Δu 的上、下边界; $\bar{\eta}_{\max}$ 和 $\bar{\eta}_{\min}$ 分别为输出量的上、下边界。

车辆路径跟踪控制问题是以式(9)为目标函数,以输入输出约束式(10)为约束条件,遵循离散线性时变系统式(7)的滚动时域优化问题,公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u^*(t+i|t) &= \min J(\xi, \Delta u), i = 0, \dots, N_p \\ \text{s. t.} \quad &\text{式(7)(10)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2 误差反馈校正机制

因车辆参数偏差、系统时变和外界干扰等不确定,模型预测状态与其实际状态之间不可避免地存在一定误差,势必影响系统的控制精度和鲁棒性,采用误差校正机制来提高预测模型的鲁棒性^[19-20]。

定义 t 时刻系统状态真实值 $\xi(t)$ 与预测值 $\xi(t|t-1)$ 之间的误差为

$$\mathbf{e}(t) = \xi(t) - \xi(t|t-1) \quad (12)$$

利用误差 $\mathbf{e}(t)$ 校正预测模型式(8)的状态方程在 $t+1$ 时刻的状态预测量,得到

$$\xi(t+1|t) = \bar{\mathbf{A}}_{t,t}\xi(t|t) + \bar{\mathbf{B}}_{t,t}\Delta u(t|t) + \bar{\mathbf{d}}_{t,t} + \mathbf{H}\mathbf{e}(t) \quad (13)$$

式中 $\mathbf{H}$ 为校正矩阵。

依此类推,误差 $\mathbf{e}(t)$ 可以校正预测模型式(8)的状态方程在 k 时刻($k = t+2, t+3, \dots$)的状态预测量 $\xi(k|t)$,得到

$$\begin{aligned} \xi(k|t) &= \prod_{i=1}^{k-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t}\xi(t) + \prod_{i=t+1}^{k-1} \mathbf{H}\mathbf{e}(t) + \sum_{i=1}^{k-1} \left\{ \prod_{j=i+1}^{k-1} \bar{\mathbf{A}}_{j,t} [\bar{\mathbf{B}}_{i,t}\Delta u(i|t) + \bar{\mathbf{d}}_{i,t}] \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

联合式(8)的输出方程,得到带有反馈校正项的

鲁棒路径跟踪预测输出模型,即

$$\bar{\boldsymbol{\eta}}(k | t) = \bar{\mathbf{C}}_{k,t} \prod_{i=1}^{k-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \bar{\boldsymbol{\xi}}(t) + \bar{\mathbf{C}}_{k,t} \prod_{i=1}^{k-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \mathbf{H} \mathbf{e}(t) + \bar{\mathbf{C}}_{k,t} \sum_{i=t}^{k-1} \left\{ \prod_{j=i+1}^{k-1} \bar{\mathbf{A}}_{j,t} [\bar{\mathbf{B}}_{i,t} \Delta \mathbf{u}(i | t) + \bar{\mathbf{d}}_{i,t}] \right\} \quad (15)$$

定义预测时域 N_p 内的输出向量为 $\bar{\mathbf{Y}}(t)$, 控制时域 N_c 内的控制增量向量为 $\Delta \mathbf{U}(t)$, 并假设 $u(t+i | t) = u(t+N_c-1 | t)$, $i = N_c, \dots, N_p-1$, 得到预测时域内的预测输出为

$$\bar{\mathbf{Y}}(t) = (\boldsymbol{\Psi}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{H}) \bar{\boldsymbol{\xi}}(t) + \boldsymbol{\Theta}_t \Delta \mathbf{U}(t) + \boldsymbol{\Gamma}_t \boldsymbol{\Phi}(t) - \mathbf{E}_t \mathbf{H} \bar{\boldsymbol{\xi}}(t | t-1) \quad (16)$$

式中:

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{\eta}}(t+1 | t) \\ \bar{\boldsymbol{\eta}}(t+2 | t) \\ \vdots \\ \bar{\boldsymbol{\eta}}(t+N_p | t) \end{bmatrix}; \Delta \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} \Delta u(t | t) \\ \Delta(t+1 | t) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N_c-1 | t) \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Psi}_t = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{t+1,t} \bar{\mathbf{A}}_{t,t} \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+2,t} \bar{\mathbf{A}}_{t+1,t} \bar{\mathbf{A}}_{t,t} \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=1}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \end{bmatrix}; \mathbf{E}_t = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{t+1,t} \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+2,t} \bar{\mathbf{A}}_{t,t} \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=t+1}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Theta}_t = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{t+1,t} \bar{\mathbf{B}}_{t,t} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \cdots & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+2,t} \bar{\mathbf{C}}_{t+1,t} \bar{\mathbf{B}}_{t,t} & \bar{\mathbf{C}}_{t+2,t} \bar{\mathbf{B}}_{t+1,t} & \cdots & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=t+1}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \bar{\mathbf{B}}_{t,t} & \boldsymbol{\Theta}_{t,2} & \cdots & \boldsymbol{\Theta}_{t,3} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Theta}_{t,2} = \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=t+2}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \bar{\mathbf{B}}_{t+1,t};$$

$$\boldsymbol{\Theta}_{t,3} = \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=t+N_c}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} \bar{\mathbf{B}}_{t+N_c-1,t};$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_t =$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{t+1,t} & \mathbf{0}_{2 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{2 \times 6} \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+2,t} \bar{\mathbf{A}}_{t+1,t} & \bar{\mathbf{C}}_{t+2,t} & \cdots & \mathbf{0}_{2 \times 6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=1}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} & \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \prod_{i=t+2}^{t+N_p-1} \bar{\mathbf{A}}_{i,t} & \cdots & \bar{\mathbf{C}}_{t+N_p,t} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Phi}(t) = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{d}}(t | t) \\ \bar{\mathbf{d}}(t+1 | t) \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{d}}(t+N_p-1 | t) \end{bmatrix}.$$

3 路径跟踪鲁棒预测控制律的滚动优化求解

根据式(16), 目标函数式(9)可转化为

$$J(\boldsymbol{\xi}, \Delta \mathbf{u}) = [\bar{\mathbf{Y}}(t) - \bar{\mathbf{Y}}_{\text{ref}}(t)]^T \bar{\mathbf{Q}} [\bar{\mathbf{Y}}(t) - \bar{\mathbf{Y}}_{\text{ref}}(t)] + \Delta \mathbf{U}(t)^T \bar{\mathbf{R}} \Delta \mathbf{U}(t) \quad (17)$$

式中: $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{ref}}(t) = [\boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}(t+1 | t), \boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}(t+2 | t), \dots, \boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}(t+N_p | t)]^T$; $\bar{\mathbf{Q}} = \text{diag}([\mathbf{Q}, \mathbf{Q}, \dots, \mathbf{Q}])$; $\bar{\mathbf{R}} = \text{diag}([\mathbf{R}, \mathbf{R}, \dots, \mathbf{R}])$; diag 为生成对角矩阵的函数。进一步整理可得

$$J(\boldsymbol{\xi}, \Delta \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{U}(t)^T \mathbf{K}_t^1 \Delta \mathbf{U}(t) + \mathbf{K}_t^2 \Delta \mathbf{U}(t) \quad (18)$$

式中 $\mathbf{K}_t^1$ 和 $\mathbf{K}_t^2$ 为线性时变系数矩阵, $\mathbf{K}_t^1 = 2(\boldsymbol{\Theta}_t^T \bar{\mathbf{Q}} \boldsymbol{\Theta}_t + \bar{\mathbf{R}}) \in \mathbf{R}^{N_c \times N_c}$, $\mathbf{K}_t^2 = 2\mathbf{M}_t^T \bar{\mathbf{Q}} \boldsymbol{\Theta}_t \in \mathbf{R}^{1 \times N_c}$, $\mathbf{M}_t = \boldsymbol{\Psi}_t \boldsymbol{\xi}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{H} \bar{\boldsymbol{\xi}}(t) + \boldsymbol{\Gamma}_t \boldsymbol{\Phi}_t - \mathbf{E}_t \mathbf{H} \bar{\boldsymbol{\xi}}(t | t-1) - \mathbf{Y}_{\text{ref}}$ 。

将约束条件式(10)转化为以 $\Delta \mathbf{U}(t)$ 为优化变量, 得到

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\Delta u} \\ -\mathbf{T}_{\Delta u} \\ \mathbf{I}_{\Delta u} \\ -\mathbf{I}_{\Delta u} \\ \boldsymbol{\Theta}_t \\ -\boldsymbol{\Theta}_t \end{bmatrix} \Delta \mathbf{U}(t) \leq \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\max} - \mathbf{T}_u u(t-1) \\ -\mathbf{U}_{\min} + \mathbf{T}_u u(t-1) \\ \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ -\Delta \mathbf{U}_{\min} \\ \mathbf{Y}_{\max} - (\boldsymbol{\Psi}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{H}) \bar{\boldsymbol{\xi}}(t) - \boldsymbol{\Gamma}_t \boldsymbol{\Phi}(t) + \mathbf{E}_t \mathbf{H} \bar{\boldsymbol{\xi}}(t | t-1) \\ -\mathbf{Y}_{\min} + (\boldsymbol{\Psi}_t + \mathbf{E}_t \mathbf{H}) \bar{\boldsymbol{\xi}}(t) + \boldsymbol{\Gamma}_t \boldsymbol{\Phi}(t) - \mathbf{E}_t \mathbf{H} \bar{\boldsymbol{\xi}}(t | t-1) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{T}_{\Delta u}$ 为维度 $N_c \times N_c$ 的单位下三角矩阵; $\mathbf{I}_{\Delta u}$ 为维度 $N_c \times N_c$ 的单位矩阵; $\mathbf{T}_u$ 为维度为 $N_c \times 1$ 的矩阵, 矩阵中元素均为 1; $\mathbf{T}_p$ 为维度为 $N_p \times 1$ 矩阵, 矩阵中元素均为 1; $\mathbf{U}_{\max} = u_{\max} \mathbf{T}_u$; $\mathbf{U}_{\min} = u_{\min} \mathbf{T}_u$; $\Delta \mathbf{U}_{\max} = \Delta u_{\max} \mathbf{T}_u$; $\Delta \mathbf{U}_{\min} = \Delta u_{\min} \mathbf{T}_u$; $\mathbf{Y}_{\max} = \bar{\boldsymbol{\eta}}_{\max} \otimes \mathbf{T}_p$; $\mathbf{Y}_{\min} = \bar{\boldsymbol{\eta}}_{\min} \otimes \mathbf{T}_p$; $\otimes$ 为克罗内克积。

路径跟踪鲁棒预测控制最终转化为以式(18)为目标函数、式(19)为约束条件、 $\Delta \mathbf{U}(t)$ 为优化变量的二次规划问题。在每个采样周期, 优化得到控制时域内的控制增量序列为

$$\Delta \mathbf{U}^*(t) = [\Delta u^*(t | t), \Delta u^*(t+1 | t), \dots, \Delta u^*(t+N_c-1 | t)]^T \quad (20)$$

若将第一个分量 $\Delta u^*(t | t)$ 作为实际被控输入, 则此时的前轮转角为 $\delta_t = u(t-1 | t) + \Delta u^*(t | t)$, 进入下一个控制周期后, 重复进行这一过程。

4 结果验证

采用 Carsim 和 Matlab/Simulink 联合仿真环境设计控制算法,验证误差反馈校正机制的有效性。基于硬件在环平台验证算法的实时性。仿真环境和硬件在环平台的主要参数如表 1 所示。

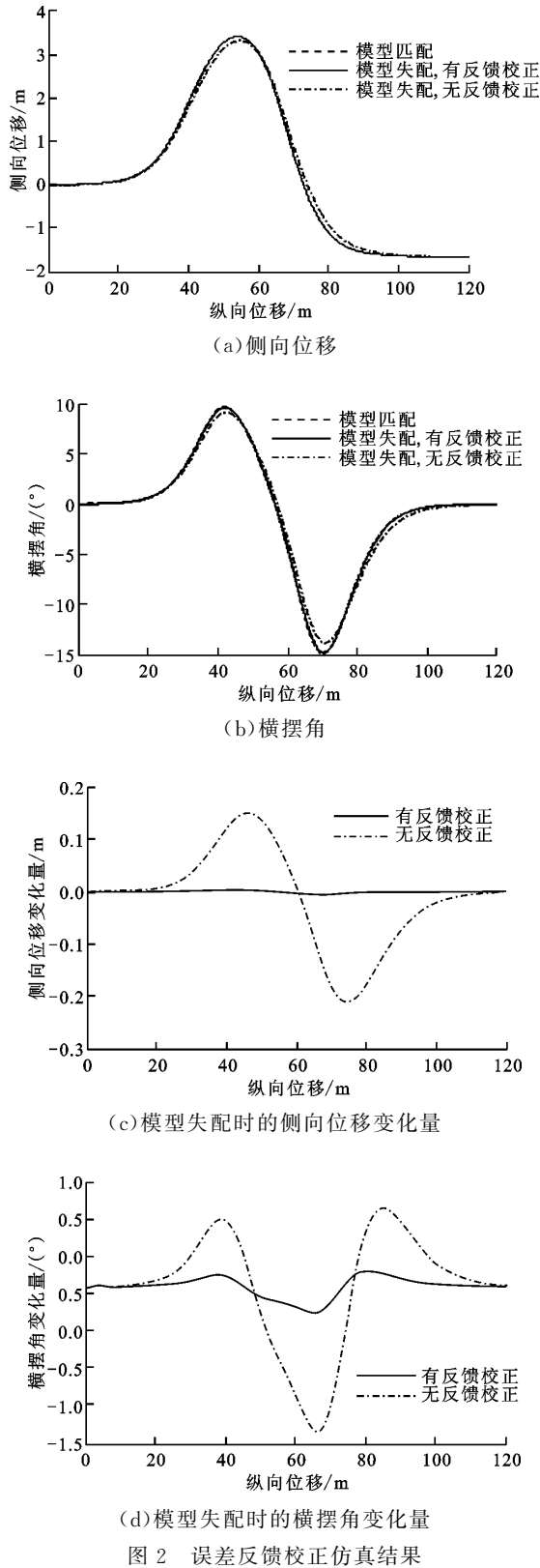
表 1 主要参数

参数	数值
整车质量 m/kg	1 773.5
横摆转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	2 553.6
质心到前轴距离 a/m	1.159
质心到后轴距离 b/m	1.678
前轮纵向滑移率 s_f	0.2
后轮纵向滑移率 s_r	0.2
前轮侧偏刚度 $k_{f,y}/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-67 000
后轮侧偏刚度 $k_{r,y}/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-63 000
权重矩阵 Q	$\text{diag}([2\ 000, 1\ 000])$
权重 R	5×10^5
控制量下界 $u_{\min}/(^{\circ})$	-8
控制量上界 $u_{\max}/(^{\circ})$	8
控制增量下界 $\Delta u_{\min}/(^{\circ})$	-0.7
控制增量上界 $\Delta u_{\max}/(^{\circ})$	0.7
输出量下界 $y_{\min}/[\text{m}, (^{\circ})]^T$	$[-3, -0.3]^T$
输出量上界 $y_{\max}/[\text{m}, (^{\circ})]^T$	$[5, 0.3]^T$
校正矩阵 H	$\text{diag}([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1])$
预测时域 N_p	30
控制时域 N_c	30
采样时间/ s	0.02

4.1 误差反馈校正仿真实验

控制算法设计时用到的车辆参数通常取标称值,而外界因素的不确定性定会导致车辆参数发生变化,此时若仍按照标称参数来设计预测模型将导致预测模型与实际失配。以整车质量和横摆转动惯量变化导致的建模失配来验证误差反馈校正机制增强系统鲁棒性的效果,仿真对比结果如图 2 所示,图中:模型匹配时,整车质量和横摆转动惯量取表 1 中的标称值;模型失配时,整车质量和横摆转动惯量取标称值的 1.2 倍。从图 2a 和 2b 可知,模型失配时有反馈校正的控制器输出量与模型匹配时的几乎重合,而模型失配时无反馈校正的控制器输出量与模型匹配时的出现偏离,即当模型失配时,误差反馈校正项可补偿状态预测误差,增强模型预测控制律对模型失配的鲁棒性;从图 2c 和 2d 可知,相对于模型

匹配时的控制器输出,在模型失配时,有反馈校正的控制器输出变化量要远远小于无反馈校正的控制器输出变化量。从图 2 可见,误差反馈校正机制能够改善算法设计时存在的外界干扰和建模失配等低鲁棒性问题。



4.2 路径跟踪硬件在环验证

为弥补无实车验证的不足,基于 NI 公司的 PXI 平台进行路径跟踪硬件在环试验。

图 3 是路径跟踪硬件在环平台的系统框图,硬件在环平台包括 PC 上位机、PXI 下位机和路径跟踪控制器。PC 上位机利用 Visual C++ 编译器将 Simulink 车辆模型编译成 .dll 文件,然后通过 LabVIEW 环境实现程序部署和监控。同时,PC 上位机装有 Unity 3D 可视化场景,用于模拟车辆运行环境。PC 上位机和 PXI 下位机通过 Ethernet 连接。PXI 下位机主要包括嵌入式实时处理器和输入/输出板卡:嵌入式实时处理器(PXI-8840)运行 LabVIEW RT 操作系统和编译后的 Simulink 模型可执行文件;输入/输出板卡包括模拟信号输入板卡 PXI-6220、模拟信号输出板卡 PXI-6733、数字信号传输板卡 PXI-6515 和 CAN 信号传输板卡 PXI-8513。路径跟踪控制器主要包括电源模块、单片机最小系统、输入模块、输出模块和 CAN 通信模块等。应用层软件通过 Simulink 代码生成得到,并通过 CAN 模块与 PXI 下位机的 PXI-8513 板卡连接。

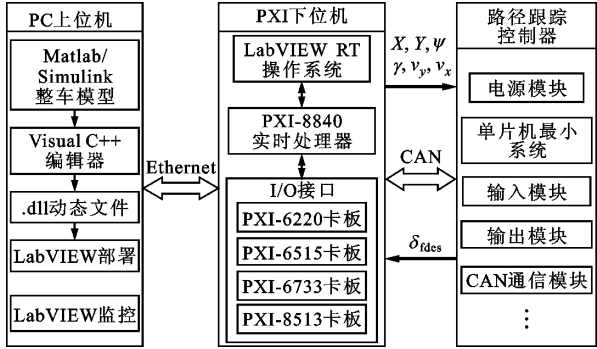


图 3 路径跟踪硬件在环平台的系统框图

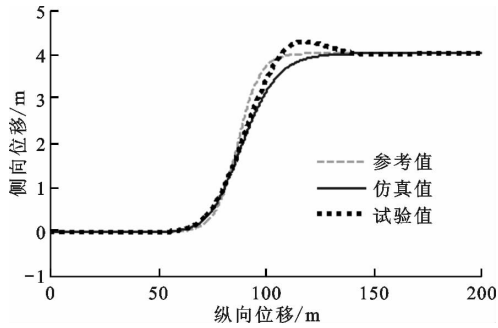
PXI 下位机将车辆纵向位移、侧向位移、横摆角、横摆角速度、侧向速度和纵向速度等状态量($X, Y, \Psi, \gamma, v_y, v_x$)实时发送给路径跟踪控制器,控制器基于这些状态量实时计算路径跟踪期望的前轮转角 δ_{ides} ,并传递给 PXI 中的 Matlab/Simulink 整车模型,实现闭环控制。

图 4 为车速 100 km/h 时的硬件在环试验结果,其中,路面附着系数为 0.9,参考路径包括参考位移 Y_{ref} 和参考横摆角 Ψ_{ref} ,两者均为纵向位移 X 的函数,且存在关联,即

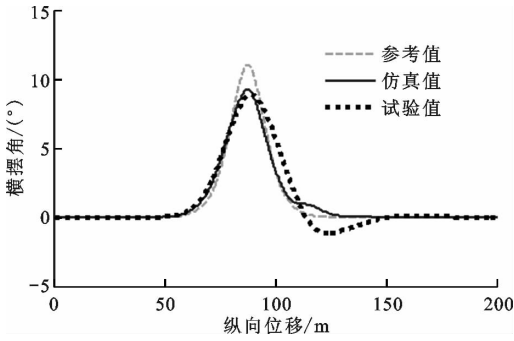
$$\begin{aligned} Y_{ref}(X) &= \frac{d_y}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{p_s}{d_x} (X - X_s) - \frac{p_s}{2} \right) \right) \\ \Psi_{ref}(X) &= \arctan \dot{Y}_{ref}(X) \end{aligned} \quad (21)$$

式中 p_s, d_x, d_y, X_s 均为形状控制参数,取 $p_s=2.4, d_x=25, d_y=4.05, X_s=75$ 。

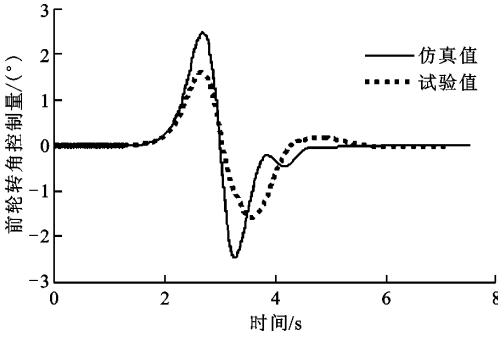
从图 4a 和 4b 可知,硬件在环试验的试验值与仿真值基本一致,且比较平滑。从图 4c 可知,4 s 左右硬件在环试验的前轮转角控制量试验值相对于仿



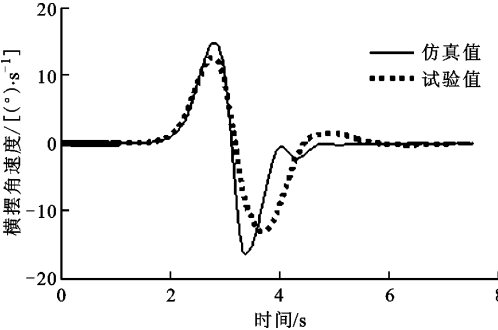
(a)侧向位移



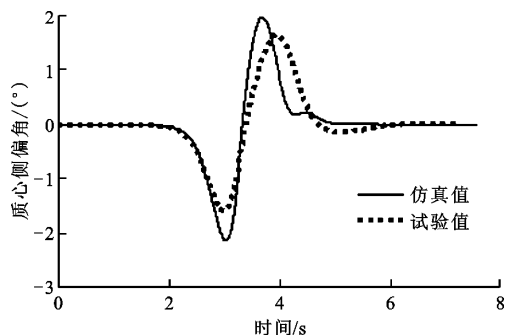
(b)横摆角



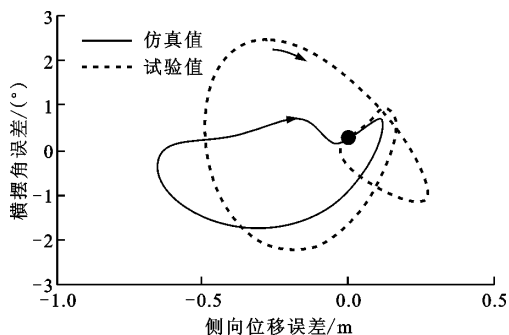
(c)前轮转角控制量



(d)横摆角速度



(e)质心侧偏角



(f)路径跟踪偏差

图4 硬件在环验证结果

真值出现了一定程度的偏离,由此导致图4d横摆角速度和图4e质心侧偏角试验值也在此时刻与仿真值出现了一定偏差,但是前轮转角控制量和横摆角速度的变化趋势是一致的。从图4f可知,硬件在环试验的横摆角误差大一些,但是侧向位移误差较小。由此,路径跟踪预测控制算法的实时性和可行性得到了验证。

5 结论

(1)建立了三自由度弱非线性车辆模型作为控制模型的基础,采用泰勒公式展开实现控制模型的线性时变一阶近似,引入预测状态变量构建路径跟踪预测优化问题。

(2)针对车辆参数偏差、系统时变和外界干扰等不确定性因素导致的建模失配问题,采用误差反馈校正项补偿状态预测误差,增强路径跟踪预测模型的鲁棒性。

(3)联合仿真结果表明,误差反馈校正机制能够有效改善路径跟踪预测控制算法因整车质量和横摆转动惯量变化导致的低鲁棒性问题。

(4)基于PXI的硬件在环试验表明,考虑误差反馈校正的路径跟踪预测控制算法能在高速时控制车辆实现预定路径跟踪,且具备良好的实时性。

参考文献:

- [1] MARINO R, SCALZI S, NETTO M. Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(12): 1459-1467.
- [2] 陈特, 陈龙, 徐兴, 等. 基于Hamilton理论的无人车路径跟踪控制 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(7): 676-682.
CHEN Te, CHEN Long, XU Xing, et al. Path following control of autonomous vehicles based on Hamilton theory [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(7): 676-682.
- [3] 阮久宏, 李贻斌, 杨福广, 等. 高速4WID-4WIS自主车路径跟踪控制 [J]. 机器人, 2011, 33(4): 411-418.
RUAN Jiuhong, LI Yibin, YANG Fuguang, et al. Path tracking control of high-speed 4WID-4WIS autonomous vehicle [J]. Robot, 2011, 33(4): 411-418.
- [4] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205-210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205-210.
- [5] 江浩斌, 李臣旭, 马世典, 等. 智能车辆自动泊车路径跟踪的非光滑控制策略 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 497-502.
JIANG Haobin, LI Chenxu, MA Shidian, et al. Path tracking control of automatic parking for intelligent vehicle based on non-smooth control strategy [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science), 2017, 38(5): 497-502.
- [6] YANG Hao, VINCENT C, JIANG Bin. Optimal fault-tolerant path-tracking control for 4WS4WD electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 237-243.
- [7] 李爽, 徐延海, 陈静, 等. 基于弧长预瞄的车辆侧向跟踪控制研究 [J]. 汽车工程, 2019, 41(6): 668-675.
LI Shuang, XU Yanhai, CHEN Jing, et al. A study on vehicle lateral tracking control based on arc-length preview [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(6): 668-675.
- [8] 杨珏, 史广思, 张文明, 等. 基于模糊双曲正切模型的车辆路径跟踪算法 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(s1): 78-84.
YANG Jue, SHI Guangsi, ZHANG Wenming, et al. Path tracking algorithm of vehicles based on fuzzy hy-

- perbolic tangent model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(s1): 78-84.
- [9] BENINE-NETO A, MAMMAR S, LUSETTI B, et al. Piecewise affine control for lane departure avoidance [J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(8): 1121-1150.
- [10] 周苏, 吴楠, 支雪磊. 四轮独立转向电动汽车路径跟踪预测控制 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 47(6): 842-850.
- ZHOU Su, WU Nan, ZHI Xuelei. Path tracking predictive control of four-wheel independent steering electric vehicle [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 47(6): 842-850.
- [11] LI S, LI K, RAJAMANI R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 556-566.
- [12] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 120-135.
- [13] 王艺, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于模型预测控制的智能网联汽车路径跟踪控制器设计 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 136-144, 153.
- WANG Yi, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Design of intelligent and connected vehicle path tracking controller based on model predictive control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 136-144, 153.
- [14] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1595-1603.
- ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao. Path tracking using linear time-varying model predictive control for autonomous vehicle [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1595-1603.
- [15] JIJ, AMER K, WAEL W M, 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.
- [16] 李升波, 王建强, 李克强, 等. MPC 实用化问题处理及在车辆 ACC 中的应用 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(5): 645-648.
- LI Shengbo, WANG Jianqiang, LI Keqiang, et al. Processing of MPC practical problems and its application to vehicular adaptive cruise control systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(5): 645-648.
- [17] 舒迪前. 预测控制系统及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 45-47.
- [18] 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]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2980-2985.
- [19] 席裕庚, 许晓鸣, 张钟俊. 预测控制的研究现状和多层智能预测控制 [J]. 控制理论与应用, 1989(2): 5-11.
- XI Yugeng, XU Xiaowu, ZHANG Zhongjun. The status of predictive control and the multilayer intelligent predictive control [J]. Control Theory and Applications, 1989(2): 5-11.
- [20] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓, 等. 车辆多目标自适应巡航控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 136-143.
- ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao, et al. Vehicular multi-objective adaptive cruise control algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 136-143.

(编辑 陶晴 荆树蓉)