

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007031



采用变时域模型预测的车辆 路径跟踪控制方法

张世义^{1,2}, 顾小川^{1,2}, 唐爽^{1,2}, 李军^{1,2}

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 为了解决自动驾驶车辆变速行驶时模型预测路径跟踪控制器的可靠性问题,提出一种变预测时域自适应路径跟踪控制方法. 首先,推导简化后适用于仿真验证的车辆三自由度动力学模型,引入松弛因子以避免求解过程中出现非可行解,并将跟踪控制转化为二次规划求解问题;然后,确定模型预测控制器的重要设计参数,分析车速和预测时域的变化关系,拟合预测时域与车速的函数曲线,设计一种变时域自适应路径跟踪控制器;最后,搭建 Carsim/Matlab/Simulink 联合仿真平台进行验证. 结果表明:变时域自适应路径跟踪控制器能够随着车速变化实时更新预测时域,可保证车辆具有较好的跟踪精度和稳定性.

关键词: 模型预测控制; 自适应控制; 预测时域; 自动驾驶车辆; 路径跟踪

中图分类号: U 467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)02-0141-09

Vehicle Path Tracking Control Method Using Varying Horizon of Model Predictive Control

ZHANG Shiyi^{1,2}, GU Xiaochuan^{1,2}, TANG Shuang^{1,2}, LI Jun^{1,2}

(1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Rail Vehicle System Integration and Control,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to solve the reliability problem of the model predictive path tracking controller for autonomous vehicles with variable speed, a varying prediction horizon adaptive path tracking control method was proposed. First, a simplified vehicle three freedom degrees dynamic model was deduced that can be applied to simulation and verification, the relaxation factors were introduced to avoid infeasible solutions when solving problems, and the path tracking control was transformed into quadratic problems. Then, the model predictive controller's important design parameters were confirmed, the varying relationship between vehicle speed and prediction horizon was analyzed, the function curve of prediction horizon and vehicle speed was fitted to design a varying prediction horizon adaptive path tracking controller. Finally, a Carsim/Matlab/Simulink co-simulation platform was established for verification. The results show that the varying horizon adaptive path tracking controller can update the prediction horizon in real-time as vehicle speed changes, and ensure good tracking accuracy and stability of vehicles.

Keywords: model predictive control; adaptive control; prediction horizon; autonomous vehicles; path tracking

随着交通事故发生率的不断提高^[1],旨在改善交通行车环境、安全与效率的智能交通系统(ITS)正被日益推崇^[2].智能交通系统集成各领域的先进技术,将人-车-路紧密配合,可以实现全局交通情况的优化与管理,对当今交通系统存在的污染、拥堵、事故频发、能源消耗过度等问题均能起到较好的缓解及改善作用.

路径跟踪通过转向轮主动转向控制准确地跟踪规划层的目标路径,并保持行车的平稳性和乘坐的舒适性^[3].目前,应用较为广泛的路径跟踪算法主要采用对车辆的横向和纵向进行控制的方法,如比例-积分-微分(PID)控制算法^[4]、纯追踪算法^[5]、滑膜控制算法^[6]、自适应控制算法^[7]和模型预测控制(MPC)算法^[8]等.模型预测控制算法通过预测模型、系统当前状态量和未来控制量进行在线滚动优化,再对预测输出进行矫正,从而进一步修正模型^[9].由于可以处理系统多目标及多约束优化问题,MPC 算法在国内得到广泛的运用.严国军等^[10]提出自适应 MPC 控制器自动调节预测时域,减少运算时间,保证跟踪控制的实时性,但其运动学模型无法满足高速和大侧向加速度的工况.白国星等^[11]基于非线性模型预测算法,采用三次多项式分别拟合速度、预测时域与稳态转向角的函数,但其运动学模型只考虑中低速的仿真效果.张严等^[12]在三自由度动力学模型基础上,采用遗传算法对模型预测控制器的预测时域、控制时域进行优化,但牺牲了部分乘坐舒适性.基于此,本文提出一种变预测时域自适应路径跟踪控制方法.

1 车辆动力学模型的建立

1.1 车辆三自由度动力学模型

动力学模型和运动学模型是自动驾驶车辆建模时最常用的两种模型.运动学模型不涉及车辆自身质量、受力等因素,适用于中低车速及道路曲率、侧向加速度较小的工况;动力学模型研究车辆运行中的受力情况,通过牛顿第二运动定律建立模型方程,在高速或道路曲率较大时的效果更佳.为了提高车辆高速行驶时跟踪控制的可靠性,将车辆动力学模型作为路径跟踪研究的基础.

假设车辆行驶于水平路面,忽略刚性悬架、横向及纵向空气阻力的影响^[13],建立纵向、侧向和横摆的车辆三自由度动力学简化模型,如图 1 所示.图 1 中: oxy 为车身坐标系; OXY 为大地惯性坐标系; a, b 分别为车辆质心与前、后轴间的距离; $F_{1,f}, F_{1,r}$ 分别为车辆前、后轮受到的纵向力; $F_{c,f}, F_{c,r}$ 分别为车辆前、后轮受到的侧向力; $F_{x,f}, F_{x,r}$ 分别为车辆前、后轮受到的 x 轴方向的力; $F_{y,f}, F_{y,r}$ 分别为车辆前、后轮受到的 y 轴方向的力; $v_f, v_{c,f}, v_{l,f}$ 分别为车辆前轴中心速度、前轮侧向速度和前轮纵向速度; α_f 为车辆前轮的侧偏角; δ_f 为车辆前轮的偏转角; $\dot{\varphi}$ 为车辆的横摆角速度; \dot{x}, \dot{y} 分别为车辆纵向和侧向的速度.

将车辆的三自由度模型表示为微分方程的形式,有

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= m\dot{y}\dot{\varphi} + 2(F_{1,r} + F_{1,f}\cos\delta_f - F_{c,f}\sin\delta_f), \\ m\ddot{y} &= -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2(F_{c,r} + F_{1,f}\sin\delta_f + F_{c,f}\cos\delta_f), \\ I_z\ddot{\varphi} &= 2a(F_{1,f}\sin\delta_f + F_{c,f}\cos\delta_f) - 2bF_{c,r}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: m 为整车整备质量; I_z 为车身绕 z 轴转动时的转动惯量; δ_r 为车辆后轮的偏转角; φ 为车体的横摆角(航向角); $\ddot{\varphi}$ 为车辆的横摆角加速度; \ddot{x}, \ddot{y} 分别为车辆纵向和侧向的加速度.

为了简化模型,采用小角度假设^[14],即

$$\cos\theta \approx 1, \quad \sin\theta \approx \theta, \quad \tan\theta \approx \theta. \quad (2)$$

式(2)中: θ 表示轮胎的侧偏角和偏转角等角度.

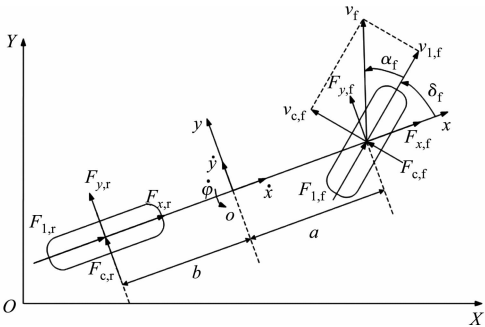


图 1 车辆三自由度动力学简化模型

Fig.1 Three freedom degrees dynamic simplified model of vehicle

当侧偏角较小时,前、后轮的侧向力与纵向力可用近似线性函数描述,前、后轮的侧向力分别为

$$F_{c,f} = C_{c,f} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right), \quad F_{c,r} = C_{c,r} \frac{b \dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}. \quad (3)$$

式(3)中: $C_{c,f}, C_{c,r}$ 分别为前、后轮的侧偏刚度.

前、后轮的纵向力分别为

$$F_{l,f} = C_{l,f} S_f, \quad F_{l,r} = C_{l,r} S_r. \quad (4)$$

式(4)中: $C_{l,f}, C_{l,r}$ 分别为前、后轮的纵向刚度; S_f, S_r 分别为前、后轮的滑移率.

通过车身坐标系和大地惯性坐标系之间的转换关系,对大地惯性坐标系下车辆的运动情况进行表述,有

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y} &= \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi, \\ \dot{X} &= \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中: \dot{X}, \dot{Y} 分别为大地惯性坐标系下车身的纵向速度和侧向速度.

联合整理式(1)~(5),简化后可得基于线性轮胎模型和小角度假设的车辆非线性连续三自由度动力学模型,即

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{2}{m} \left[C_{c,r} \frac{b \dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}} + C_{l,f} S_f \delta_f + C_{c,f} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \right] - \dot{x} \dot{\varphi}, \\ \ddot{x} &= \frac{2}{m} \left[C_{l,r} S_r + C_{l,f} S_f - C_{c,f} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \delta_f \right] + \dot{y} \dot{\varphi}, \\ \ddot{\varphi} &= \frac{2a}{I_z} \left[C_{l,f} S_f \delta_f + C_{c,f} \left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a \dot{\varphi}}{\dot{x}} \right) \right] - \frac{2b}{I_z} C_{c,r} \frac{b \dot{\varphi} - \dot{y}}{\dot{x}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

1.2 线性化系统

将系统任意参考时刻描述为状态空间表达式的形式,即

$$\dot{\xi} = f(\xi, u), \quad \eta = h \cdot \xi. \quad (7)$$

式(7)中: ξ 为状态变量, $\xi = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^T$; u, h 为控制量, $u = [\delta_f]$, $h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$; η 为输出量, $\eta = [\varphi, Y]^T$.

由于非线性系统不能用于线性时变模型预测控制,因此,在某参考时刻一阶泰勒展开,并结合式(7)可得误差状态方程.即

$$\tilde{\xi} = \tilde{A}_t \tilde{\xi}(t) + \tilde{B}_t \tilde{u}(t). \quad (8)$$

$$\text{式(8)中: } \tilde{A}_t = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{14} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{41} & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ \cos \varphi_t & \sin \varphi_t & \dot{x}_t \cos \varphi_t - \dot{y}_t \sin \varphi_t & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_t & \cos \varphi_t & -\dot{y}_t \cos \varphi_t - \dot{x}_t \sin \varphi_t & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad t \text{ 为 } t \text{ 时刻, } A_{11} = \frac{-2(C_{c,f} + C_{c,r})}{m \dot{x}_t}, A_{12} = \frac{2C_{c,f}(\dot{y}_t + a \dot{\varphi}_t) + 2C_{c,r}(\dot{y}_t - b \dot{\varphi}_t)}{m \dot{x}_t^2} - \dot{\varphi}_t, A_{14} = \frac{2(bC_{c,r} - aC_{c,f})}{m \dot{x}_t} - \dot{x}_t, A_{21} = \dot{\varphi}_t + \frac{2C_{c,f}\delta_{f,t-1}}{m \dot{x}_t}, A_{22} = -\frac{2C_{c,f}\delta_{f,t-1}(\dot{y}_t + a \dot{\varphi}_t)}{m \dot{x}_t^2}, A_{24} = \dot{y}_t + \frac{2aC_{c,f}\delta_{f,t-1}}{m \dot{x}_t}, A_{41} = \frac{2(bC_{c,r} - aC_{c,f})}{I_z \dot{x}_t}, A_{42} = \frac{2aC_{c,f}(\dot{y}_t + a \dot{\varphi}_t) - 2bC_{c,r}(\dot{y}_t - b \dot{\varphi}_t)}{I_z \dot{x}_t^2}, A_{44} = -\frac{2(b^2C_{c,r} + a^2C_{c,f})}{I_z \dot{x}_t}, \tilde{B}_t = [B_1 \quad B_2 \quad 0 \quad B_4 \quad 0 \quad 0]^T, B_1 =$$

$$\frac{2(C_{c,f}+C_{l,f}S_f)}{m}, B_2 = \frac{2C_{c,f}(\dot{y}_t + a\dot{\varphi}_t - 2\delta_{f,t-1})}{\dot{x}_t}, B_4 = \frac{2a(C_{c,f}+C_{l,f}S_f)}{I_z}.$$

2 模型预测路径跟踪控制器

基于车辆动力学模型和模型预测控制算法,设计模型预测路径跟踪控制器.

2.1 预测方程

对误差状态方程(8)进行离散化,有

$$\boldsymbol{\xi}(k+1) = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{\xi}(k) + \boldsymbol{B}_k \boldsymbol{u}(k). \tag{9}$$

式(9)中: $\boldsymbol{A}_k = \boldsymbol{I} + T\boldsymbol{A}_t$, \boldsymbol{I} 为单位矩阵, T 为采样周期; $\boldsymbol{B}_k = T\boldsymbol{B}_t$; k 为 k 时刻.

设定 $\boldsymbol{\xi}(k|t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}(k|t) \\ \boldsymbol{u}(k-1|t) \end{bmatrix}$, 则新的状态方程为

$$\boldsymbol{\xi}(k+1|t) = \tilde{\boldsymbol{A}}_{k,t} \boldsymbol{\xi}(k|t) + \tilde{\boldsymbol{B}}_{k,t} \Delta \boldsymbol{u}(k|t), \quad \boldsymbol{\eta}(k|t) = \tilde{\boldsymbol{C}}_{k,t} \boldsymbol{\xi}(k|t). \tag{10}$$

式(10)中: $\tilde{\boldsymbol{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{k|t} & \boldsymbol{B}_{k|t} \\ \boldsymbol{0}_{1 \times 6} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix}$; $\tilde{\boldsymbol{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{k|t} \\ \boldsymbol{I} \end{bmatrix}$; $\tilde{\boldsymbol{C}}_{k,t} = [\boldsymbol{C}_{k|t} \quad \boldsymbol{0}]$; $\Delta \boldsymbol{u}(k|t) = \boldsymbol{u}(k|t) - \boldsymbol{u}(k-1|t)$.

将基于 MPC 控制器的预测时域和控制时域分别定义为 N_p 和 N_c , $N_p > N_c$. 系统未来预测时域内的预测方程可以用矩阵形式表示, 即

$$\boldsymbol{Y}(k+1|k) = \boldsymbol{\Psi}_k \boldsymbol{\xi}(k) + \boldsymbol{\Theta} \Delta \boldsymbol{U}(k). \tag{11}$$

式(11)中: $\boldsymbol{\Psi}_k = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{C}}_{k,t} \tilde{\boldsymbol{A}}_{k,t} \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_{k,t} \tilde{\boldsymbol{A}}_{k,t}^2 \\ \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_{k,t} \tilde{\boldsymbol{A}}_{k,t}^{N_p} \end{bmatrix}$; $\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{B}}_k & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c-1} \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c-2} \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{B}}_k \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c} \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c-1} \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k \tilde{\boldsymbol{B}}_k \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_p-1} \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_p-2} \tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & \tilde{\boldsymbol{C}}_k \tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_p-N_c-1} \tilde{\boldsymbol{B}}_k \end{bmatrix}.$

2.2 约束条件

2.2.1 轮胎侧偏角 由前、后轮侧偏角与系统各状态量的关系可知,当侧偏角不超过 5° 时,在任一时刻 t ,前轮侧偏角 $\alpha_{f,t}$ 和后轮侧偏角 $\alpha_{r,t}$ 的计算公式为

$$\alpha_{f,t} = \frac{\dot{y}_t + a\dot{\varphi}_t}{\dot{x}_t} - \delta_{f,t-1}, \quad \alpha_{r,t} = \frac{\dot{y}_t - b\dot{\varphi}_t}{\dot{x}_t}. \tag{12}$$

因此,选择前轮侧偏角的约束为 $-2.5^\circ < \alpha_{f,t} < 2.5^\circ$.

2.2.2 车辆附着条件 当车辆纵向匀速行驶时,横向加速度 a_y 与地面附着系数 μ 呈线性关系,即 $a_y \leq \mu g$. 为避免约束条件限定范围过窄而求解失败,将附着条件约束设置为软约束条件,即

$$a_{y,\min} - \epsilon \leq a_y \leq a_{y,\max} + \epsilon. \tag{13}$$

式(13)中: ϵ 为松弛因子; $a_{y,\min}$, $a_{y,\max}$ 分别为横向加速度的最小值与最大值.

2.2.3 质心侧偏角 β 为质心侧偏角,在良好路面中, $-12^\circ < \beta < 12^\circ$; 在冰雪路面中, $-2^\circ < \beta < 2^\circ$.

2.3 目标函数

基于 MPC 路径跟踪策略的目的是保证预测输出变量与参考值之间的误差尽可能小,从而准确地跟随预定的轨迹,保持跟踪稳定性.

为了求出状态方程(10)的最优解,得到控制输入增量,将其作为设计相应目标函数的状态量进行下一步求解. 此外,因预测模型具有复杂性,且包含较多的动力学约束,故加入松弛因子^[15],目标函数的最终形式为

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{\text{ref}}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta u(t+i|t)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2. \tag{14}$$

式(14)中: Q, R 为权重矩阵; ρ 为松弛因子的权重系数; η_{ref} 为输出量参考值.

基于以上推导过程, 为便于求解, 路径跟踪问题可转为二次规划求解问题, 即

$$\left. \begin{aligned} \min J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)), \\ \text{s. t. } \mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{A} \Delta \mathbf{U}_t + \mathbf{U}_t \leq \mathbf{U}_{\max}, \\ \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U}_t \leq \Delta \mathbf{U}_{\max}, \\ \mathbf{y}_{h, \min} \leq \mathbf{y}_h \leq \mathbf{y}_{h, \max}, \\ \mathbf{y}_{s, \min} + \varepsilon \leq \mathbf{y}_s \leq \mathbf{y}_{s, \max} + \varepsilon. \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

式(15)中: $\mathbf{U}_{\max}, \mathbf{U}_{\min}$ 分别为控制量的最大和最小值; $\Delta \mathbf{U}_{\max}, \Delta \mathbf{U}_{\min}$ 分别为控制增量的最大和最小值; $\mathbf{y}_h, \mathbf{y}_s$ 分别为硬约束输出和软约束输出.

2.4 反馈校正

在每一个控制周期里对式(15)完成求解计算后, 得到控制时域内的控制输入增量序列为

$$\Delta \mathbf{U}_t^* = [\Delta \mathbf{u}_t^*, \Delta \mathbf{u}_{t+1}^*, \dots, \Delta \mathbf{u}_{t+N_c-1}^*]^T. \tag{16}$$

根据模型预测基本原理, 将该控制序列的首个元素值作为实际控制输入增量, 再作用到系统中, 有

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t-1) + \Delta \mathbf{u}_t^*. \tag{17}$$

系统不断循环向前重新预测下一时域的输出, 通过优化得到新的控制序列, 直至最终搜索完成.

3 变时域模型预测路径跟踪控制

3.1 车速与预测时域对跟踪效果的影响

预测时域对模型预测控制器的性能影响较大, 预测时域类似于驾驶员模型中预瞄未来一段时刻的距离, 在不同车速的工况下, 不同的预瞄距离会产生不同的控制效果. 根据以往的研究经验, 当车辆低速运行时, 减小预瞄距离会产生相对较好的控制效果, 增大预瞄距离则会降低跟踪精度与车辆稳定性; 反之, 当车辆高速运行时, 增大预瞄距离能够提高控制效果, 且不会产生因预瞄距离过小导致的跟踪精度不良、转向抖动等问题, 从而提高车辆的稳定性. 搭建 Carsim/Matlab/Simulink 联合仿真平台, 在跟踪双移线工况下, 分析不同车速和预测时域的跟踪效果, 车速(v)分别选取 36, 72, 90, 108, 126 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, 预测时域 N_p 分别选取 8, 15, 20, 25, 30; 附着系数设置为 0.8.

当车速为 36 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 不同预测时域的仿真结果对比, 如图 2 所示. 由于车速较低, 故选取前 4 组预测时域数据进行对比较为合理. 由图 2 可知: 跟踪过程较为平稳, 轨迹的跟踪偏差均较小, 横摆角速度的变化也在合理范围内; 当 $N_p=8$ 时, 轨迹的跟踪偏差及横摆角速度最优; 当 $N_p=25$ 时, 横向位移偏差最大.

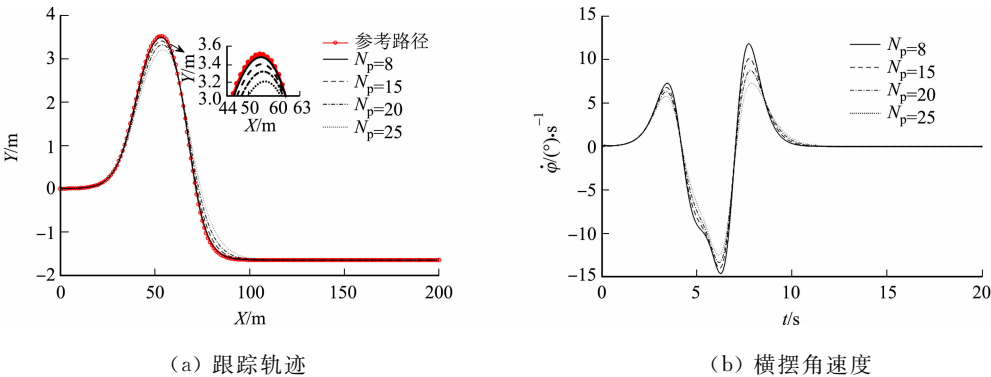


图 2 不同预测时域的仿真结果对比($v=36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 2 Comparison of simulation results in different prediction horizons ($v=36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)

当车速为 $72\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,选取前 4 组预测时域数据进行分析,不同预测时域的仿真结果对比,如图 3 所示.由图 3 可知:当 $N_p=8$ 时,车辆在 $80\sim 100\text{ m}$ 处再次发生侧滑,且横摆角速度过大,车辆的行驶稳定性受到很大影响,故中高车速时应该适当地增大预瞄距离,给予足够的空间响应期望轨迹;当 $N_p=15$ 时,跟踪偏差适中,横摆角速度的变化平滑自然,且在合理范围内.

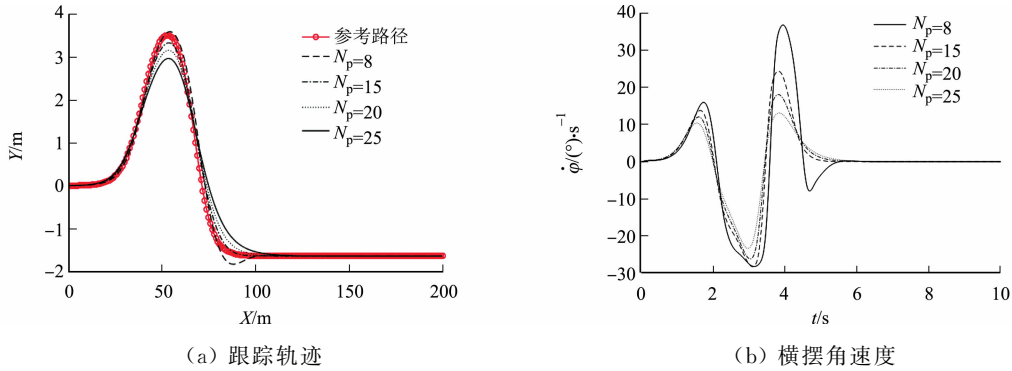


图 3 不同预测时域的仿真结果对比($v=72\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 3 Comparison of simulation results in different prediction horizons ($v=72\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

当车速为 $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (中高车速) 时,不同预测时域的仿真结果对比,如图 4 所示.由于车速为 $72\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,较小的预测时域会使车辆稳定性大幅降低(图 3(b)),因此,在中高车速下,选取后 4 组预测时域进行分析较为合理.由图 4(a)可知:当 $N_p=15$ 时,在纵向位移 100 m 处,横向位移偏差达到 1 m ,此时,横摆角速度震荡过大,表明车辆路径跟踪的稳定性较差;当 $N_p=20$ 时,跟踪偏差较小,横摆角速度波动平滑自然,较为合理.

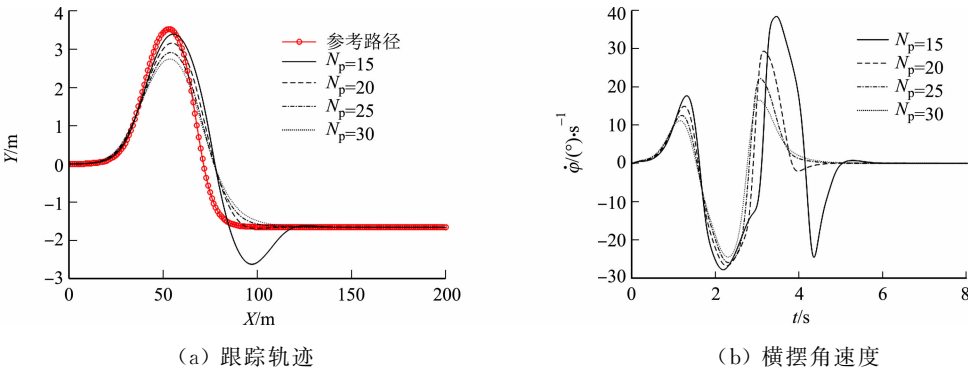


图 4 不同预测时域的仿真结果对比($v=90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 4 Comparison of simulation results in different prediction horizons ($v=90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

当车速为 $108\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,选取后 4 组预测时域进行分析,不同预测时域的仿真结果对比,如图 5 所示.由图 5 可知:当汽车在较高车速下运行时,较小的预测时域已经无法满足路径跟踪精度和行驶稳定性的要求,这是由于高速下汽车的动力学特性发生了很大的变化,车辆行驶的稳定性急剧下降,使车

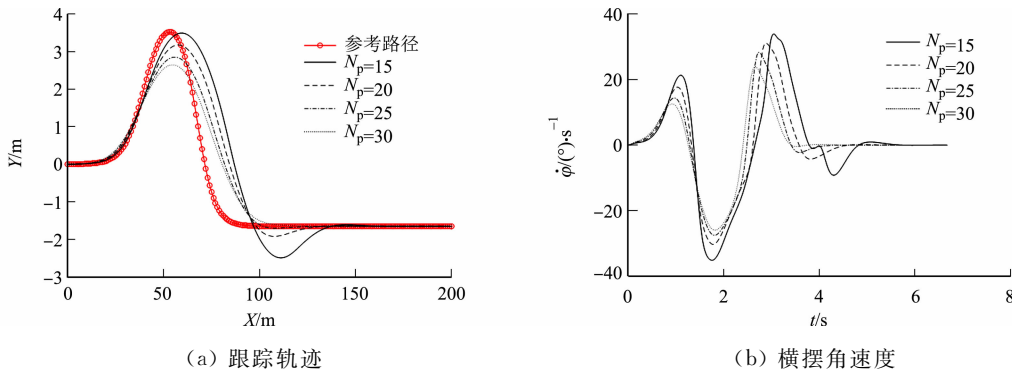


图 5 不同预测时域的仿真结果对比($v=108\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 5 Comparison of simulation results in different prediction horizons ($v=108\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

辆无法快速地响应期望的转角;当 N_p 为 25,30 时,横摆角速度变化较为平稳,但当 N_p 为 30 时,其路径跟踪偏差相对不理想,最大偏差达到 1 m.

当车速为 $126\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,选取后 4 组预测时域进行分析,不同预测时域的仿真结果对比,如图 6 所示.由图 6 可知:当预测时域较小($N_p=15$)时,车辆的横摆角速度波动较大,已超出稳定性要求的界限,车辆严重失稳,路径跟踪失败,车辆完全脱离期望的轨迹;当 $N_p=30$ 时,虽然路径跟踪精度误差最大达到 1 m,但由于此时车辆运行于高速工况,应着重考虑保持超车变道时的稳定性以保证安全.

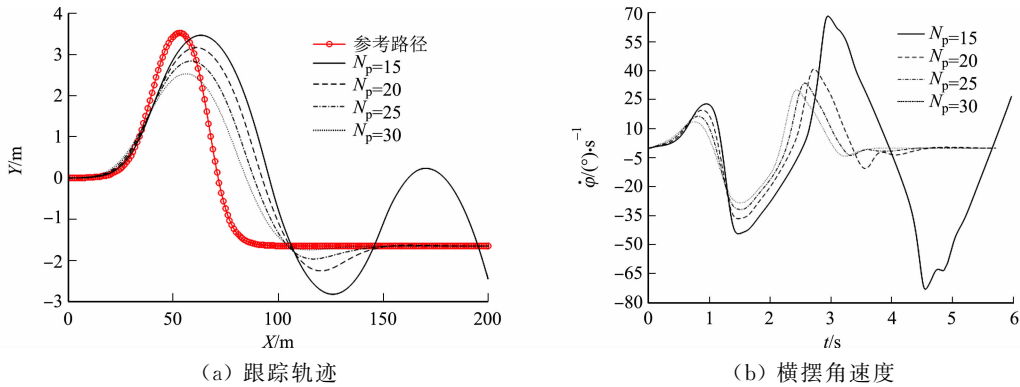


图 6 不同预测时域的仿真结果对比($v=126\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 6 Comparison of simulation results in different prediction horizons ($v=126\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

综上可知,在低速(某一定速)工况下,较小的预测时域的跟踪过程较为平稳,且车辆路径跟踪精度较高,而较大的预测时域会增大预瞄距离,使响应期望轨迹变慢,跟踪过程虽然平稳,但偏差相对较大;在高速(某一定速)工况下,较大的预测时域能够稳定地追踪期望路径,但由于预瞄距离增大,存在跟踪偏差,而较小的预测时域会牺牲车辆的稳定性,在高速运行时十分危险,应尽量避免.

3.2 变时域自适应路径跟踪控制器

总结预测时域与车速的变化关系,为了使车辆在不同车速下行驶时能自适应地调节预测时域,获取较优的跟踪精度及行驶稳定性,提出一种变时域自适应路径跟踪控制器,即根据车辆当前的行驶速度更新预测时域.路径跟踪控制器流程,如图 7 所示.

选取 5 组速度对应的较优预测时域作为变时域自适应路径跟踪控制器的数据来源.将数据在 Matlab 软件中进行 3 次多项式拟合,得出预测时域与车速 v 的拟合关系函数为

$$N_p = \begin{cases} 8, & 0 \leq v < 36, \\ \text{int}(-0.000\ 013\ 75v^3 + 0.004\ 18v^2 - 0.124\ 3v + 7.776\ 3), & 36 \leq v \leq 126, \\ 31, & v > 126. \end{cases} \quad (18)$$

预测时域与车速的拟合函数关系曲线,如图 8 所示.图 8 中:5 个圆圈代表上述对比分析后选取的实验数据.

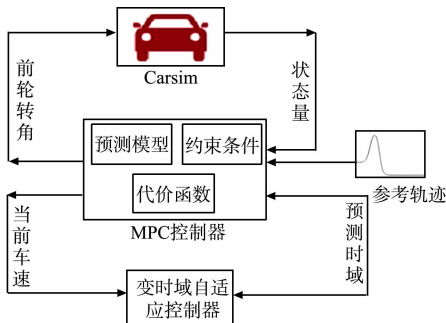


图 7 路径跟踪控制器流程

Fig. 7 Flow chart of path tracking controller

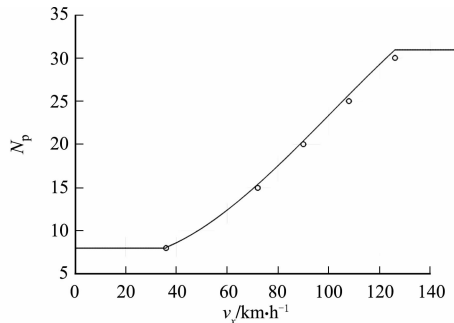


图 8 预测时域与车速的拟合函数关系曲线

Fig. 8 Fitting functional relation curves for prediction horizon and speed

3.3 仿真分析

设置仿真环境,对变预测时域自适应路径跟踪控制器的有效性进行验证,并与 5 组数据结果进行对

比分析. 设置附着系数为 0.8, 并根据车辆的实时速度不断更新预测时域, 参与路径跟踪模块进行计算. 变速工况下的路径跟踪仿真结果, 如图 9 所示.

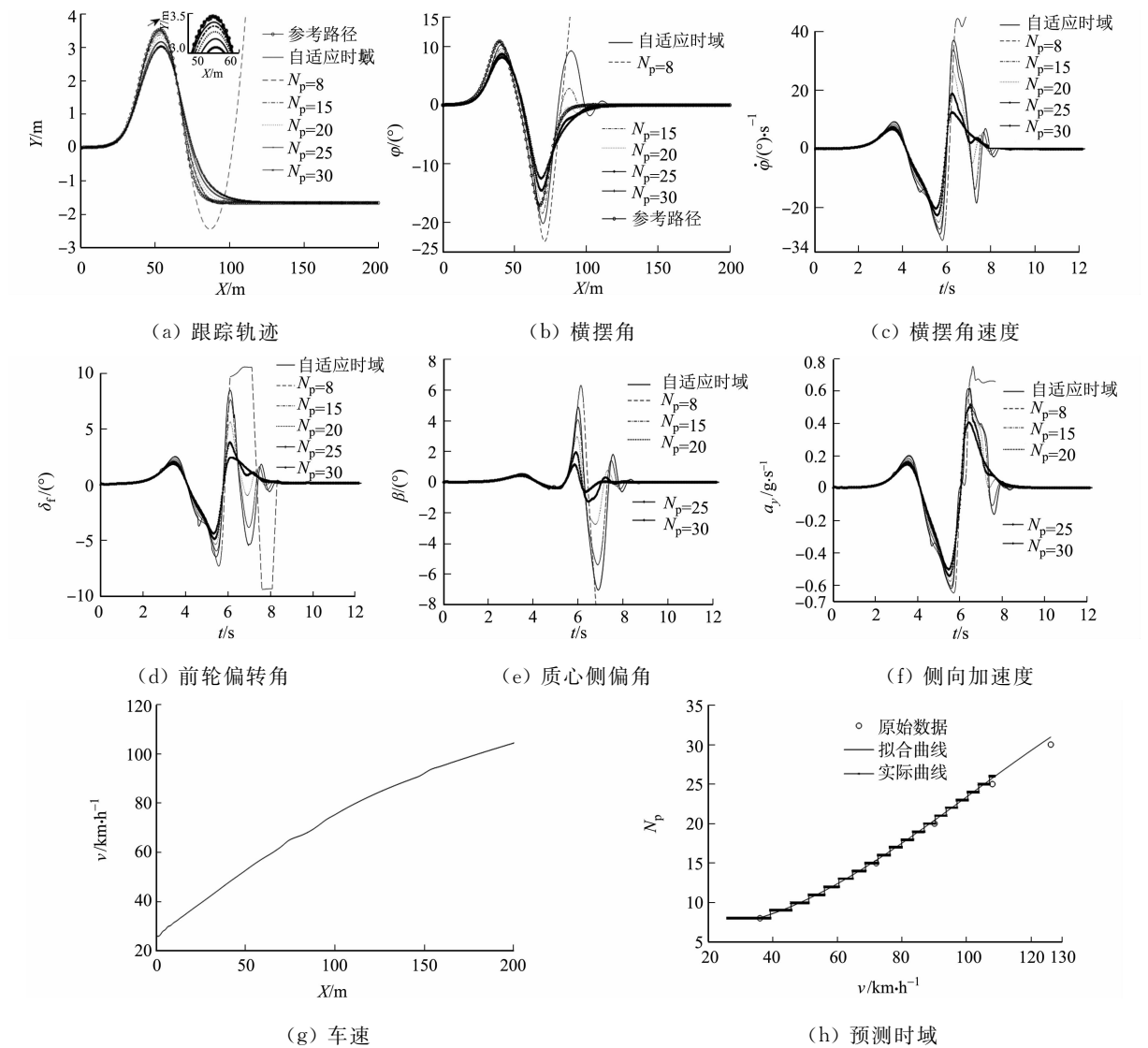


图 9 变速工况下的路径跟踪仿真结果

Fig. 9 Path tracking simulation results of path tracking under variable speed condition

由图 9 可知: 当 $N_p=8$ 时, 在纵向位移为 80 m 后, 车速不断提升, 此时, 车辆动力学特性发生较大变化, 已满足不了约束要求, 控制量出现非可行解, 导致在双移线工况出口处的跟踪参考路径和参考横摆角失败; 预测时域较大时, 跟踪精度较差, 最大误差接近 1 m; 在自适应时域控制下, 车辆能准确地跟踪参考轨迹, 横摆角虽然随着车速的提升出现偏转, 但是最终能迅速调整并收敛于参考值, 使横摆误差趋于 0, 车辆恢复稳定行驶; 变时域自适应路径跟踪控制器的横摆角速度变化也较为平稳, 可保证车辆运行时的稳定性; 质心侧偏角在 $\pm 8^\circ$ 范围内波动, 当路面附着系数为 0.8 时, 侧向加速度也能保持在阈值范围内变化, 均满足节 2.2 中对动力学约束的要求; 随着车速的不断变化, 控制器可实时更新对应的预测时域, 从而预测下一时刻的输出, 保证不同车速下变时域跟踪控制器良好的自适应性能.

4 结束语

建立车辆三自由度动力学模型, 通过一阶泰勒线性展开, 近似地离散化处理等变换, 完成线性时变模型预测的理论推导. 加入松弛因子, 避免控制器求解过程中多约束导致非可行解的情况, 进一步推导预测优化问题的矩阵形式, 将模型预测路径跟踪控制问题转化为二次规划求解问题. 选取不同车速及预测时域进行仿真, 对比分析不同车速对应的最优预测时域值, 拟合预测时域与车速的函数关系曲线, 设

计变预测时域自适应路径跟踪控制器,实时更新预测时域,预测下一时刻的输出值,并搭建 Carsim/Matlab/Simulink 联合仿真平台进行验证。结果表明:当车辆变速行驶时,自适应路径跟踪控制器在满足动力学约束的前提下,能够实时更新不同车速下的最优预测时域,并进行计算求解,在一定程度上可以解决车辆在低速和高速下的跟踪精度问题,保持车辆行驶的稳定性。

参考文献:

- [1] 冉斌,谭华春,张健,等. 智能网联交通技术发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报,2018,9(2):119-130. DOI:10.3969/j.issn.1674-8484.2018.02.001.
- [2] SUN Chuanyang,ZHANG Xin,XI Lihe,*et al.* Design of a path-tracking steering controller for autonomous vehicles[J]. Energies,2018,11(6):53103-53114. DOI:10.3390/en11061451.
- [3] PADEN B,CAP 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. DOI:10.1109/TIV.2016.2578706.
- [4] LI Ye,JIANG Yanqing,WANG Leifeng,*et al.* Intelligent PID guidance control for AUV path tracking[J]. Journal of Central South University,2015,22(9):3440-3449. DOI:10.1007/s11771-015-2884-0.
- [5] WANG W J,HSU T M,WU T S. The improved pure pursuit algorithm for autonomous driving advanced system [C]//10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications. Hiroshima:IEEE Press,2017:33-38. DOI:10.1109/IWCIA.2017.8203557.
- [6] GUO Jinhua,LUO Yugong,LI Keqiang. An adaptive hierarchical trajectory following control approach of autonomous four-wheel independent drive electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2018,19(8):1-11. DOI:10.1109/TITS.2017.2749416.
- [7] 苏树华,陈刚. 机器人驾驶车辆的横向自适应反演切换控制[J]. 汽车工程,2020,42(1):11-19. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2020.01.002.
- [8] NAM H,CHOI W,AHN C. Model predictive control for evasive steering of an autonomous vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology,2019,20(5):1033-1042. DOI:10.1007/s12239-019-0097-5.
- [9] 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.
- [10] 严国军,贲能军,顾建华,等. 基于 MPC 的无人驾驶拖拉机轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(9):1-6. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2019.09.01.
- [11] 白国星,孟宇,刘立,等. 基于可变预测时域及速度的车辆路径跟踪控制[J]. 中国机械工程,2020,31(11):1277-1284. DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2020.11.003.
- [12] 张严,黄妙华. 基于模型预测的无人驾驶车辆路径跟踪控制[J]. 数字制造科学,2019,17(1):21-26. DOI:10.3963/j.issn.1672-3236.2019.01.005.
- [13] 段建民,田晓生,夏天,等. 基于模型预测控制的智能汽车目标路径跟踪方法研究[J]. 汽车技术,2017(8):6-11.
- [14] WANG Hengyang,LIU Biao,PING Xianhao,*et al.* Path tracking control for autonomous vehicles based on an improved MPC[J]. IEEE Access,2019,7:161064-161073. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2944894.
- [15] 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. DOI:10.3901/JME.2019.08.136.

(责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)