DOI: 10.3901/JME.2019.08.136

基于模型预测控制的智能网联汽车 路径跟踪控制器设计*

王 艺¹ 蔡英凤² 陈 龙² 王 海¹ 何友国² 李 健¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013;

2. 江苏大学汽车工程研究院 镇江 212013)

摘要: 为解决智能车辆的自主转向问题,提高车辆在高速运动过程中的转向精度和稳定性,在智能网联汽车的背景下,从路径跟踪控制出发,提出一种变参数的智能网联汽车路径跟踪控制方法。该方法基于模型预测控制原理,设计了一种智能网联汽车的路径跟踪控制器。该方法先以 3 自由度模型的车辆模型为控制系统;对系统进行线性化后,确定系统的二次型目标函数,并依据函数形式确定矩阵形式;然后,在 Carsim 和 Matlab/Simulink 平台上进行离线仿真,确定各个典型工况下适用于该路径跟踪控制器的仿真参数;最后实现系统可根据由车联网获得车辆实际所处道路形状和实际车速选择合适的路径跟踪控制器的控制参数,完成智能网联汽车的自动转向。仿真结果表明该控制器相对于固定控制参数的控制器具有更好的控制效果,可控制车辆以较高车速行驶时达到较高跟踪精度和行驶稳定性。

关键词: 智能网联汽车; 路径跟踪; 模型预测控制; 变参数

中图分类号: TP242

Design of Intelligent and Connected Vehicle Path Tracking Controller Based on Model Predictive Control

WANG Yi¹ CAI Yingfeng² CHEN Long² WANG Hai¹ HE Youguo² LI Jian¹

(1. Department of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. Jiangsu University Automotive Engineering Research Institute, Zhenjiang 212013)

Abstract: In order to solve the problem of autonomous steering of intelligent vehicles and to improve the steering precision and stability during the high-speed movement, and considering the path tracking control, a path tracking control method of variable parameters under the background of intelligent and connected vehicle is proposed. A path tracking controller for intelligent vehicle based on the model predictive control principle is designed. Firstly, a 3-degree-of-freedom dynamic model is considered as the control system. Secondly, a quadratic form cost function of the system is determined after linearizing the system, and the form of the constraints are determined according to the cost function. Thirdly, the controller's parameters for typical operation conditions are obtained with the off-line simulation of the Carsim and Matlab/Simulink platforms. Finally, the intelligent and connected vehicle can complete the automatic steering by selecting the appropriate path tracking control parameters according to the road type where the vehicle is actually located and the actual speed of the vehicle. The simulation results show that the controller has a better control effect than the controller with fixed parameters. This controller can achieve higher tracking accuracy and driving stability when the vehicle is moving at high speed.

Key words: intelligent and connected vehicle; path tracking; model predictive control; variable parameters

0 前言

随着“中国制造 2025”及“互联网+”发展战

略的提出,智能网联汽车的发展上升到了国家战略层面。我国智能网联汽车概念首先出现在工信部对《中国制造 2025》的系列解读文件中^[1]。智能网联汽车(Intelligent and connected vehicle, ICV)是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置,并融合现代通信与网络技术,实现车与 X(车、路、人、云等)智能信息交换、共享,具备复杂环境感知、智

* 国家重点研发计划(2017YFB0102603)、国家自然科学基金(U1564201, U1664258, U1764257, 61601203, 61773184)、江苏省重点研发计划(BE2016149)、江苏省战略性新兴产业发展重大专项(苏发改高技发(2016)1094 号, (2015)1084 号)、镇江市重点研发计划(GY2017006)资助项目。20180721 收到初稿, 20181220 收到修改稿

能决策、协同控制等功能, 可实现安全、高效、舒适、节能行驶, 并最终实现替代人来操作的新一代汽车^[2]。智能汽车隶属于智能交通大系统, 而智能网联汽车则属于智能汽车与车联网的交集^[3]。因此, 智能网联汽车可以通过 V2X 实时获得自身所处位置的道路信息以及自身运动信息, 车辆便可基于所获得信息对车辆进行控制策略的选择。

由于可以精确而快速地实现转向, 智能车辆的主动转向已经引起了人们的极大关注^[4]。现已有较多控制算法通过较高精度的路径跟踪实现智能车辆的转向控制。美国学者 MAC ADAM 等于 1981 年将预瞄跟踪最优控制应用于无人驾驶车辆^[5]、我国郭孔辉等于 1982 年提出预瞄-跟随系统理论^[6]; 卡内基梅隆大学学者于 1992 年提出经典的路径跟踪控制方法——纯点追踪算法^[7]; 意大利 MARINO 等于 2011 年提出了嵌套式 PID 控制算法^[8]; 斯坦福大学 LEVINSON 等于 2011 年设计了线性二次型调节器(Linear quadratic regulator)LQR 跟踪控制器^[9]; 斯坦福大学 DDL 实验室的学者们于 2012 年将前馈-反馈控制方法应用于无人驾驶赛车的横向跟踪控制^[10]。

随着研究的深入发展, 模型预测控制方法也逐步应用于智能车辆控制^[11]。模型预测控制(Model predictive control, MPC)是一种于 20 世纪 70 年代被提出的计算机优化控制算法, 现已广泛应用于各个领域, 并衍生出多个分类。模型预测控制具有预测模型、滚动优化和反馈校正等基本特征^[12], 适用于不易建立精确数学模型且存在约束条件的控制系统, 对解决无人驾驶车辆在高速和冰雪等复杂路面下的路径跟踪控制问题具有独特的优势^[11]。近年来, MPC 已广泛应用于智能车辆的路径跟踪问题^[13]。FALCONE 等^[14-15]使用车辆的非线性模型和线性时变模型建立模型预测控制器用于无人驾驶车辆的轨迹跟踪控制; 在文献[16-17]中作者提出了基于 MPC 的前轮主动转向和四轮独立制动集成控制方法实现高速低附着路面工况下的轨迹跟踪控制; 国内, 吉林大学对 MPC 控制算法展开了应用研究^[18-19]。但是, 目前模型预测控制在较高车速下的路径跟踪精度难以保障, 且相关研究并不多见。

为了解决智能车辆在较高车速下跟踪目标路径的准确性问题, 本文在已有模型预测控制算法的基础上, 优化控制器的控制参数, 以实现智能车辆的更高精度的自主转向。本文对不同形状特征路段分别进行离线仿真, 通过修改控制时域、预测时域、采样时间、仿真步长、权重矩阵等仿真参数, 在兼顾路径跟踪精确度和车辆操纵稳定性的前提下, 得

到各类型路段所对应的最优控制参数。本文提出了一种基于智能网联汽车的控制参数选择机制——车辆通过智能网联汽车的车载传感器以及车联网获得的当前道路弯曲情况和车辆当前时速, 控制器依据车辆采集到的道路信息和车辆信息选择不同的控制参数并作用于控制系统, 完成路径跟踪, 其主要过程如图 1 所示。

图 1 智能网联汽车的控制参数选择机制示意图

本文首先建立车辆的 3 自由度非线性动力学模型, 并对其进行线性化得到线性时变模型; 其次, 推导出预测模型的各个矩阵表达式, 得到预测方程, 并确定模型预测控制器的各个控制参数、目标函数、约束以及约束表达形式; 接着, 在 Carsim 与 Matlab/Simulink 平台上进行联合仿真得到各个典型工况所对应的合适控制参数; 然后, 设计基于智能网联的控制器控制参数选择机制, 并与已有的控制器结合到一起, 形成一个完整的智能网联汽车路径跟踪控制器; 最后, 在仿真平台上验证该控制器的控制效果。

1 车辆动力学建模

在进行整车动力学建模时, 由于本文主要是为了研究车辆跟踪期望路径的鲁棒性和实时性, 车辆悬架特性对于车辆系统的影响忽略不计; 并基于减小计算量的目的对车辆的动力学约束进行简化。因此, 本文在进行动力学建模时, 先提出如下假设。

- (1) 假设车辆始终行驶在平坦路面上。
- (2) 忽略悬架作用和车辆的垂向运动。
- (3) 忽略车辆本身的转向系统影响。
- (4) 假设车辆轮胎一致, 且工作在线性区。
- (5) 忽略空气阻力和滚动阻力。

综上, 本文最终搭建包括纵向移动、横向移动、横向摆动在内的三个自由度车辆模型, 其示意图如图 2 所示。

图2-3 自由度车辆模型

据此建立的车辆动力学模型为

$$\begin{cases} m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\phi}) = \sum F_x = 2F_{lr}\cos\delta_f - 2F_{cf}\sin\delta_f + 2F_{lr} \\ m(\ddot{y} + \dot{x}\dot{\phi}) = \sum F_y = 2F_{lr}\sin\delta_f + 2F_{cf}\cos\delta_f + 2F_{cr} \\ m\ddot{\phi} = \sum M_z = 2a(F_{lr}\sin\delta_f + F_{cf}\cos\delta_f) - 2bF_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_{cf} , F_{cr} 为车辆前后轮胎所受侧向力, 与轮胎的侧偏刚度、侧偏角有关; F_{lf} , F_{lr} 为车辆前后轮胎所受纵向力, 与轮胎的纵向刚度、滑移率有关; F_{xf} , F_{xr} 为车辆前后轮胎在 x 方向所受力; F_{yf} , F_{yr} 为车辆前后轮胎在 y 方向所受力; δ_f 为车辆前轮转角, ϕ 为车辆横摆角; a 为前轮到质心距离, b 后轮到质心距离。

根据前文假设, 本文涉及的轮胎力用线性函数近似表示。引入侧偏刚度、侧偏角、纵向刚度、滑移率之后, 轮胎力可以表示为

$$F_{lf} = C_{lf}s_f \quad (2)$$

$$F_{lr} = C_{lr}s_r \quad (3)$$

$$F_{cf} = C_{cf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + l_f\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) \quad (4)$$

$$F_{cr} = C_{cr}\left(\frac{l_r\dot{\phi} - \dot{y}}{\dot{x}}\right) \quad (5)$$

式中, C_{cf} , C_{cr} 为车辆前后轮胎的侧偏刚度; C_{lf} , C_{lr} 为车辆前后轮胎的纵向刚度; s_f , s_r 为车辆前后轮胎的滑移率。

在式(1)描述的车辆动力学模型中存在三角函数, 假设车辆前轮转角和轮胎侧偏角处于较小的角度区间, 三角函数可转换成

$$\cos\theta \approx 1 \quad \sin\theta \approx \theta \quad \tan\theta \approx \theta \quad (6)$$

至此, 车辆的动力学模型可变为

$$\begin{cases} \ddot{x} = \dot{y}\dot{\phi} + \frac{2}{m}\left[C_{lf}s_f - C_{cf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}\right)\delta_f + C_{lr}s_r\right] \\ \ddot{y} = -\dot{x}\dot{\phi} + \frac{2}{m}\left[C_{lf}s_f\delta_f + C_{cf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}\right) - C_{cr}\frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}}\right] \\ \ddot{\phi} = \frac{2a}{I_z}\left[C_{lf}s_f\delta_f + C_{cf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}\right)\right] + \frac{2b}{I_z}C_{cr}\frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}} \\ \dot{\phi} = \dot{\phi} \\ \dot{\phi} = \frac{2a}{I_z}\left[C_{lf}s_f\delta_f + C_{cf}\left(\delta_f - \frac{\dot{y} + a\dot{\phi}}{\dot{x}}\right)\right] + \frac{2b}{I_z}C_{cr}\frac{\dot{y} - b\dot{\phi}}{\dot{x}} \\ \dot{Y} = \dot{x}\sin\phi + \dot{y}\cos\phi \\ \dot{X} = \dot{x}\cos\phi - \dot{y}\sin\phi \end{cases} \quad (7)$$

2 模型预测控制原理

2.1 线性时变模型

以线性时变模型作为预测模型的控制算法叫做线性时变模型预测控制算法。相较于非线性模型预测控制, 线性时变模型计算更加简单、实时性好, 因此应用相当广泛^[12]。

前文所得车辆模型为非线性模型, 经过线性化得到线性时变方程

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A(t)\xi(t) + B(t)u(t) \\ y = C\xi(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\xi = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\phi} \ \phi \ Y \ X)^T$, 为系统状态量, $u = \delta_f$, 为系统控制量, $A(t) = \frac{\partial f}{\partial \xi}$, $B(t) = \frac{\partial f}{\partial u}$,

$$C = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)^T.$$

对线性时变方程采用一阶差商的方法进行离散化后得到离散的状态空间方程

$$\begin{cases} \xi(k+1) = A(k)\xi(k) + B(k)u(k) \\ y(k) = C\xi(k) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $A(k) = I + TA(t)$, $A(k) = TA(t)$, T 为采样周期。

引入增量模型后

$$\begin{cases} \Delta\xi(k+1) = A(k)\Delta\xi(k) + B(k)\Delta u(k) \\ y(k) = C\Delta\xi(k) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 预测方程

预测方程是模型预测控制中重要的一部分, 需要计算出未来一段时间系统的输出。先将式(9)转换成

$$x(k|t) = \begin{pmatrix} \xi(k|t) \\ u(k-1|t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

至此可以得到一个新的状态空间表达式

$$\begin{cases} x(k+1|t) = \tilde{A}(k)\xi(k|t) + \tilde{B}(k)\Delta u(k|t) \\ y(k|t) = \tilde{C}(k)x(k|t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中, } \tilde{A}(k) = \begin{pmatrix} A(k) & B(k) \\ 0_{1 \times 6} & 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{B}(k) = \begin{pmatrix} B(k) \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$\tilde{C}(k) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)^T.$$

根据模型预测控制的基本理念, 设 N_p 为预测时域, N_c 为控制时域, $N_c \leq N_p$ 。定义 k 时刻系统输出为

$$Y(k+1|k) = \begin{pmatrix} \eta(k+1|k) \\ \eta(k+2|k) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p|k) \end{pmatrix} \quad (13)$$

定义 k 时刻系统输入为

$$U(k) = \begin{pmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1) \end{pmatrix} \quad (14)$$

依据模型预测控制原理的基本相关理论可以得到系统未来 k 时刻预测方程为

$$Y((k+1|k)) = S_\xi \xi(k) + S_u \Delta U(k) \quad (15)$$

$$\text{式中 } S_\xi = \begin{pmatrix} C\tilde{A}(k) \\ C\tilde{A}(k)^2 \\ \vdots \\ C\tilde{A}(k)^{N_c} \\ \vdots \\ C\tilde{A}(k)^{N_p} \end{pmatrix}$$

$$S_u = \begin{pmatrix} C\tilde{B}(k) & 0 & \cdots & 0 \\ C\tilde{A}(k)\tilde{B}(k) & C\tilde{B}(k) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C\tilde{A}(k)^{N_c-1}\tilde{B}(k) & C\tilde{A}(k)^{N_c-2}\tilde{B}(k) & \cdots & C\tilde{A}(k) \\ C\tilde{A}(k)^{N_c}\tilde{B}(k) & C\tilde{A}(k)^{N_c-1}\tilde{B}(k) & \cdots & C\tilde{A}(k)\tilde{B}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C\tilde{A}(k)^{N_p-1}\tilde{B}(k) & C\tilde{A}(k)^{N_p-2}\tilde{B}(k) & \cdots & C\tilde{A}(k)^{N_p-N_c-1}\tilde{B}(k) \end{pmatrix}$$

2.3 构建约束条件

在设计模型预测控制器时，本文考虑了包括前文提到的控制量和增量的约束，以及轮胎侧偏角约束和路面附着条件等车辆的动力学约束。

(1) 轮胎侧偏角约束。根据轮胎的侧偏特性可知，在轮胎侧偏角不超过 5° 时，侧偏角和侧偏力成线性关系。根据前文构建动力学模型时提出的小角度约束，设定前轮侧偏角约束条件为

$$-2^\circ \leq \beta \leq 2^\circ$$

(2) 附着条件约束。汽车的动力性能还受到路面附着系数的影响。路面附着条件较好时，该因素对车辆行驶影响不大；当条件较为恶劣时，则会对车辆的动力性和乘客的舒适性产生影响^[20]。此外，限定过小的约束条件会造成控制器的求解失败。因此，本文将路面附着系数设置为软约束。当车辆纵向匀速行驶时，车辆的侧向加速度和路面附着系数存在

$$|a_y| \leq \mu g \quad (16)$$

因此，可以将路面附着条件约束写成

$$a_{y,\min} - \varepsilon \leq a_y \leq a_{y,\max} + \varepsilon \quad (17)$$

式中， ε 为松弛因子。

2.4 求解目标函数

目标函数是为了保证车辆能够迅速且稳定的跟踪目标轨迹，所以需要体现出对系统状态量以及控制量的优化。由于车辆动力学模型本身的复杂性，且系统加入了较多的约束条件，因此为了减小运算的复杂程度，在设计目标函数时加入松弛因子，同时参考文献[21]最终采用如下目标函数的表达式

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \Delta \eta(t+i|t)_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \Delta u(t+i|t)_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (18)$$

式中， $\Delta \eta(t+i|t) = \eta(t+i|t) - \eta_r(t+i|t)$ ，为实际输出与参考路径之差； Q 和 R 为权重矩阵； ρ 为 ε 的权重系数，当系统跟踪误差较小时，取较大值，以保证车辆能够稳定无误差的跟踪前车，当系统跟踪误差较大时，取较小值，以提高车辆安全性^[22]。

式(18)可比较容易地转化成标准二次型，便于求解，而且中的控制增量和松弛因子可以防止求解过程中出现可行解的情况。但是，由于目标函数中控制量是以控制增量的形式出现，所以约束条件也必须以控制增量的形式出现。

综合考虑目标函数和约束条件后，控制器需要在每个控制周期内需要解决

$$\begin{cases} \min_{\Delta U, \varepsilon} J(\xi(t), u(t-1), \Delta U(t)) \\ \text{s.t. } \Delta U_{\min} \leq \Delta U_t \leq \Delta U_{\max} & \text{控制量约束} \\ U_{\min} \leq A\Delta U_t + U_t \leq U_{\max} & \text{控制增量约束} \\ y_{h,\min} \leq y_h \leq y_{h,\max} & \text{硬约束} \\ y_{s,\min} - \varepsilon \leq y_s \leq y_{s,\max} + \varepsilon & \text{软约束} \end{cases} \quad (19)$$

在每一个控制周期里，系统都需要对优化问题式(19)进行求解，求解结果为控制时域内的一系列包含控制增量和松弛因子的控制序列，该序列的第一个元素将作为实际的控制增量作用于系统。进入到下一个周期后，系统重复上述过程，循环实现车辆对目标路径的跟踪。

3 控制器设计

模型预测控制器的必要设置包括采样时间、预测时域和控制时域的设计。一般，在整个模型预测控制器中这三者都是不变的，但是不同的采样时间、预测时域、控制时域的选择会对控制效果产生很大的影响。图 3 显示了不同预测时域、控制时域对直线路径跟踪的不同结果。

(a) 直线轨迹跟踪效果

(b) 修改控制参数后的直线轨迹跟踪效果

图 3 控制参数对跟踪效果的影响

图 3a 的控制参数为 $N_p=10$, $N_c=2$, 图 3b 控制参数为 $N_p=20$, $N_c=1$ 。两者控制效果的差异显而易见, 图 3a 在跟踪时出现了明显的超调现象, 图 3b 通过修改控制参数消除了超调现象, 可见控制参数对控制精确度的影响。

因此, 本文提出针对不同路况以及车速, 采用不同的控制时域和预测时域, 并适当对采样时间进行修改, 具体的参数选择以及切换机制的设计将在下文进行描述。

3.1 控制参数的选择

之前的相关研究已经证明上文所设计的路径跟踪控制器在中低速车况下具有很好的跟踪精度。如图 4 所示, 在东风悦达起亚 K3 的 3 自由度车辆模

图 4 中低速车况下路径跟踪控制器的路径跟踪情况

型上, 当 $N_p=20$, $N_c=3$, 车速在 18 km/h、36 km/h、54 km/h 时, 车辆在自动转向过程中跟踪双移线路径时, 具有很好的跟踪精确度和操纵稳定性。

图 4 说明这组控制参数基本可以满足中低速下路径跟踪的精度和稳定性要求。相关的其他参数如表 1 所示, 本文将该组控制参数记为控制参数 1。

表 1 控制器参数 1

控制参数	取值
N_p	20
N_c	3
T	0.05
δ_f	$[-10^\circ, 10^\circ]$
$\Delta\delta_f$	$[-0.8^\circ, 0.8^\circ]$
ρ	1 000

但是, 该组控制参数在较高车速下的跟踪效果并不理想, 如图 5 所示, 当车辆时速达到 100 km/h 时, 车辆出现了明显的过度转向, 局部最大横向误差达到了 1 m 左右, 需要对控制参数进行调整。

图 5 控制参数 1 在高速下路径跟踪效果

调整后的控制参数如表 2 所示, 本文将该组控制参数记为控制参数 2。在该组控制参数控制下, 车辆以 100 km/h 的车速跟踪双移线轨迹时, 达到了较好的跟踪效果。图 6 为时速 100 km/h 时, 车辆跟踪双移线轨迹时的效果图。从图 6a 中可以看出最大跟踪误差只有 0.5 m, 达到了很好控制精度。从图 6b 也可以看出, 在跟踪双移线路径的过程中, 车辆的前轮转角变化也很平稳, 没有出现抖动。

表 2 控制器参数 2

控制参数	取值
N_p	15
N_c	2
T	0.05
δ_f	$[-10^\circ, 10^\circ]$
$\Delta\delta_f$	$[-0.6^\circ, 0.6^\circ]$

(a) 轨迹跟踪误差

(b) 前轮转角示意图

图 6 控制参数 2 在高速下路径跟踪效果

本文还设计了跟踪蛇形路径的控制参数，具体参数如表 3 所示，该组控制参数记为控制参数 3。

表 3 控制器参数 3

控制参数	取值
N_p	20
N_c	2
T	0.05
δ_f	$[-8^\circ, 8^\circ]$
$\Delta\delta_f$	$[-0.4^\circ, 0.4^\circ]$

在该组控制参数控制下，车辆跟踪蛇形路径的效果如图 7 所示。从图 7a 可以看出，车辆跟踪轨迹时的最大误差均出现在直道和弯道交叉的地方，其数值为 0.4 m 左右，相对于整个车身宽度误差还在合理范围内。从图 7b 可以看出，在跟踪蛇形路径的过程中，车辆的前轮转角的变化在整个过程中比较平稳。

至此，用于路径跟踪控制器的三组控制参数已基本确定，本文将基于上文所描述的三组控制参数，设计智能网联汽车的路径跟踪控制器。

(a) 轨迹跟踪误差

(b) 前轮转角示意图

图 7 控制参数 3 高速时路径跟踪效果

3.2 选择机制的确定

从上文可以知道，同一组控制参数作用下的控制器对不同轨迹进行跟踪时，会产生不同的误差。因此，本文确定了分路段选择控制参数的车辆自主转向控制器设计，使车辆控制器根据输入路径特点选择不同的控制参数并作用于控制系统，完成路径跟踪，达到较好的跟踪精度和行驶稳定性。

基于之前已有的研究结果，随着车速的提高，车辆跟踪轨迹的误差逐步增大，因此本文选择将车速作为车辆路径跟踪控制器参数选择的判据之一。此外，从上文的仿真结果可看出，车辆极易在弯道处出现误差；并且在连续弯道处，车辆的跟踪误差会长时间处于一个较恒定区间，因此本文依据道路弯曲程度，将道路几何特征作为车辆路径跟踪控制器参数选择的另一个判据。直线路径、蛇形路径、移线路径可以覆盖现实生活中的大部分路径，因此本文将道路形状按直线、蛇形、移线分为三种情况。车辆通过车联网获得所经过路段的道路特征，根据其曲率确定道路更贴近于哪一种轨迹，并通过车载

传感器采集车速信息, 综合两者进行控制参数的选择。结合已有的研究成果, 以及前文离线仿真得到的控制参数设计: 当车速低于 72 km/h 时, 车辆选用第一组控制参数进行自动转向控制; 但车速高于或等于 72 km/h 时, 偏于直线路径的路段车辆仍选用第一组控制参数进行自动转向控制, 偏于移线路径的路段车辆选用第二组控制参数进行自动转向控制, 偏于蛇形路径的路段车辆选用第三组控制参数进行自动转向控制。其具体流程如图 8 所示。

图 8 智能网联汽车自动转向控制流程图

对于智能网联汽车, 其车载传感器可直接获得路径特征和车辆速度, 而在仿真验证时, 本文将三种路径对应三组不同的道路曲率, 直接作为已知条件作用于控制系统, 控制器依据曲率大小进行控制参数的选择, 完成路径跟踪

4 仿真结果

为了验证本文提出的基于模型预测控制的智能网联汽车路径跟踪控制器的在较高车速下的控制效果, 本文以东风悦达起亚 K3 搭建的 3 自由度车辆模型作为控制对象, 基于前文离线仿真得到的三组控制参数, 在 Carsim 平台和 Matlab/Simulink 平台进行联合仿真。

图 9 为设计智能网联汽车需要跟踪的轨迹, 分为直线路段、蛇形路径和双移线路径三部分。仿真过程中, 路面附着系数取 0.85, 车辆的初始位置为坐标原点。

仿真结果如图 10 所示, 其中图为不同速度下车车辆路径跟踪效果对比图, 包括 54 km/h 和 100 km/h 两种车速下的跟踪结果, 以及各自车速下路径跟踪时的横向偏差对比。

图 9 智能网联汽车的目标轨迹

图 10 智能网联汽车路径跟踪效果

从图 10 可以看出, 无论在低速还是高速工况下, 车辆都能够较好地进行路径跟踪, 但容易在直道和弯道交叉处出现微小偏差。当车速为 54 km/h 时, 轨迹跟踪误差几乎为零, 跟踪精确度很好。车速达到 100 km/h 时, 跟踪误差变大, 大约 0.6 m; 最大误差出现在 600 m 处, 局部达到 0.7 m 以上。分析误差出现的原因, 可能是双移线之间的过渡路程偏短且车速偏大。

图 11 为该控制器控制下智能网联汽车跟踪目标轨迹时各个车辆参数变化情况。图 11a 为车辆前轮转角变化图, 图 11b 为车辆纵向加速度变化图, 图 11c 为车辆横摆角速度变化图, 图 11d 为车辆质心侧偏角变化图。从图 11 可以看出, 在转向过程中, 车辆的前轮转角、纵向加速度、横摆角速度和质心侧偏角的曲线均出现了细微抖动。分析原因可能是较大的纵向加速度使轮胎侧偏特性处于非线性区。

图 11a 表明, 车辆的前轮转角变化均较为平稳。从图中可以看出零时刻时已出现前轮转角。分析原因可能是目标路径开始部分的直线路径较短, 且由于仿真车速设置过高, 为了保证路径跟踪的精确性和自动转向的平稳性, 控制器在开始便已经计算前

轮转角。当车辆速度为 100 km/h 时的初始前轮转角明显高于车辆速度为 54 km/h 时。

图 11b~11d 的变化趋势几乎一致，从图中可以看出车辆的纵向加速度、前轮转角、横摆角速度和

质心侧偏角均在较小范围内整体平滑变化。为了更直观地观察数据，车辆的前轮转角、纵向加速度、横摆角速度、质心侧偏角以及跟踪误差的最值如表 4 所示。

(a) 前轮转角示意图

(b) 侧向加速度加速示意图

(c) 横摆角速度示意图

(d) 质心侧偏角示意图

图 11 智能网联汽车路径跟踪仿真结果

表 4 不同车速下各状态量最值(绝对值)对比

参数	车速/(km/h)	
	54	100
跟踪误差/m	0.3	0.7
前轮转角/(°)	1.7	1.4
纵向加速度/g	0.2	0.5
横摆角速度/(°/s)	5.6	10
质心侧偏角/(°)	0.5	0.75

由表 4 可见，各状态量的最值均较为合理，只有 100 km/h 速度下的横摆角速度的最值偏大，达到了 10°/s。结合图 11，发现最大值重复出现在蛇形路径的几个顶点处，分析原因为，此处路径弯曲程度较大，且车速过高。结合图 11 和表 4，可见该控制器控制下的车辆能够在较中高速的运行过程中处于良好的稳定状态，并达到较好的跟踪精度。

5 结论

针对智能网联汽车的自动转向问题，提出了一种基于模型预测控制理论的智能网联汽车路径跟踪控制器设计方法，通过改变控制参数的方法提高车辆在较高车速下跟踪具有不同形状特征的路径时的跟踪精度。本文在 Carsim 和 Matlab/Simulink 平台上进行了联合仿真，对所设计的智能网联汽车路径跟踪控制器进行了仿真验证。仿真结果表明，本文所设计的路径跟踪控制器具有以下特性。

- (1) 以较高车速跟踪不同曲率路径时误差较小，最大误差为 0.7 m，相较于整车尺寸可以接受。
- (2) 同时也能够满足较低车速下，车辆进行路径跟踪的误差要求。
- (3) 保证路径跟踪精度的同时，也能够保持一

定的稳定性。

该仿真结果对后续的实车试验有一定的参考价值, 下一步将考虑该控制器在实车上的实用意义。但实际情况下, 车辆系统及其所处环境的复杂程度远远高于仿真环境。本文虽然对路面附着系数的相关约束进行了设置, 但仍与真实路况有一定的差距; 同时没有考虑车辆纵横向的耦合关系。因此, 该控制器还需要进一步完善, 提高其真实环境的适用性以及操纵稳定性。

参 考 文 献

- [1] 黎宇科, 刘宇. 国内智能网联汽车发展现状及建议[J]. 汽车与配件, 2016(41): 56-59.
- LI Yuke, LIU Yu. Current situation and suggestions on the development of intelligent and connected vehicles[J]. Automobile & Parts, 2016(41): 56-59.
- [2] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- Chinese Society of Automotive Engineering. Energy saving and new energy vehicle technology road map[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [3] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
- LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14.
- [4] WU Jian, LIU Yahui, WANG Fengbo, et al. Vehicle active steering control research based on Two-DOF robust internal model control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 739-746.
- [5] MAC ADAM C C. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving[J]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions, 1981, 11(6): 393-399.
- [6] GUO K H. A study of method for modeling closed-loop vehicle directional control[R]. Ann Arbor: UMTRI, 1982.
- [7] COULTER R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm[R]. Pittsburgh, Pennsylvania: DTIC Document, 1992.
- [8] 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.
- [9] LEVINSON J, ASKELAND J, BECKER J, et al. Towards fully autonomous driving: systems and algorithms[C]// Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE. IEEE, 2011: 163-168.
- [10] KRITAYAKIRANA K, GERDES J C. Using the centre of percussion to design a steering controller for an autonomous race car[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(Suppl.1): 33-51.
- [11] 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, 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, 2016, 44(10): 1595-1603.
- [12] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- CHEN Hong. Model predictive control[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [13] 余如, 郭洪艳, 陈虹. 自动驾驶车辆的预测避障控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(1): 117-124.
- YU Ru, GUO Hongyan, CHEN Hong. Predictive obstacle-avoidance control for autonomous vehicle[J]. Information and Control, 2015, 44(1): 117-124.
- [14] 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.
- [15] 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 predictive control-based trajectory tracking algorithm for unmanned vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [16] FALCONE P, ERIC T H, BORRELLI F, et al. MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S1): 611-628.
- [17] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, et al. A model predictive control approach for combined braking and steering in autonomous vehicles[C]// Mediterranean Conference on. Control & Automation, 2007. MED'07 IEEE, 2007: 1-6.
- [18] 柳致海. 基于 MPC 的车辆稳定性控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- LIU Zhihai. Study on MPC for vehicle stability control[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [19] 梁赫奇. 基于模型预测控制的底盘分层集成控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- LIANG Heqi. Research on hierarchical chassis integrated control based on model predictive control method[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [20] 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.

(下转第 153 页)

- [15] GB5599-1985, 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准局, 1985.
- GB5599-85, Railway vehicles-specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test[S]. Beijing: China Bureau of Standards, 1985.
- [16] 铁运函[2004]120 号, 铁路桥梁检定规范[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2004.
- Railway Transport[2004]120, Code for rating existing railway bridges[S]. Beijing: Ministry of Railways of China, 2004.
- [17] JTJ 025-86, 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- JTJ 025-86, Specifications for design of steel structure and timber structure highway bridge and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 1988.
- [18] 中国铁道科学研究院. 复合材料轨枕受力状态分析报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2016.
- China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. Analysis report on stress state of composite sleeper[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2016.

作者简介: 张骞, 男, 1985 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为车线桥耦合振动。

E-mail: figozq100@sina.com

(上接第 144 页)

- GONG Jianwei, JIANG Yan, XU Wei. Model predictive control for self-driving vehicles[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [21] 李升波, 王建强, 李志强. 软约束线性模型预测控制系统稳定性方法[J]. 清华大学学报, 2010(11): 1148-1152.
- LI Shengbo, WANG Jianqiang, LI Keqiang. Stability method for predictive control system of soft constrained linear model[J]. Journal of Tsinghua University, 2010(11): 1148-1152.
- [22] 罗禹贡, 陈涛, 李志强. 混合动力汽车非线性模型预测巡航控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 11-18.
- LUO Yugong, CHEN Tao, LI Keqiang. Nonlinear model predictive cruise control of hybrid electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 11-18.

作者简介: 王艺, 女, 1992 年出生。主要研究方向为智能车辆转向控制。

E-mail: shivery_wang@163.com

蔡英凤(通信作者), 女, 1985 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为交通感知与智能车辆。

E-mail: caicaixiao0304@126.com