

基于预瞄距离的地下矿用铰接车路径跟踪预测控制

孟宇^{1,2)}✉, 甘鑫¹⁾, 白国星¹⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学人工智能研究院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: myu@ustb.edu.cn

摘要 矿用车辆无人驾驶是实现矿山无人化开采的关键技术,而路径跟踪控制是无人驾驶系统的核心技术之一。路径跟踪控制系统是多变量、多约束系统,采用传统方法在多约束条件下存在执行器饱和等问题。针对上述问题,本文引入模型预测控制方法,通过考虑车辆的姿态与位置之间的关系,以跟踪路径的横向偏差最小化和车辆的航向角偏差最小化为目标对预测控制的目标函数进行优化,以获得车辆速度和铰接角度的最优控制量,实现对多变量、多约束系统的求解。针对模型预测控制算法不能提前判断道路曲率突变而导致跟踪超调的问题,提出基于预瞄距离的控制方法,通过提前判断道路突变信息,提高车辆路径跟踪精确性和稳定性。使用 Matlab/Adams 仿真软件进行对比仿真试验,结果表明:使用模型预测跟踪控制器能够解决多变量、多约束系统控制问题,有效防止执行器饱和;而使用基于预瞄距离的模型预测跟踪控制器能够使车辆的横向位置偏差保持在 ± 0.04 m,航向角偏差保持在 $\pm 1.8^\circ$ 范围内,相较于改进前的控制器,其横向位置偏差减少了 80.9%,航向角偏差减少了 59.1%,证明改进后的控制器具有更好的横向稳定性和精确性。

关键词 铰接式车辆; 路径跟踪; 运动控制; 模型预测控制; 预瞄控制

分类号 TP273.1

Path following control of underground mining articulated vehicle based on the preview control method

MENG Yu^{1,2)}✉, GAN Xin¹⁾, BAI Guo-xing¹⁾

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: myu@ustb.edu.cn

ABSTRACT Due to the narrow roadway and poor working environment, underground mines pose a threat to the safety of vehicle drivers. The realization of automatic driving of underground mine vehicles can improve mining automation and intelligence and ensure safety of workers, and it can significantly increase mining and exploitation efficiency. Automatic driving of underground mining vehicles requires the technologies of location, communication, navigation, and path following control. Automatic driving of mining vehicles is the ultimate approach of autonomous navigation and auto driving, while path following control system is one of the core technologies of the autopilot system. The path following control system is a multi-variable, multi-constraint system. There are optimization problems under multiple constraints as well as challenges such as actuator saturation during the control process. To solve the above problems, a model predictive control method was introduced in this paper. By considering the relationship between the position and situation of the vehicle, the objective function of the predictive control was optimized by minimizing the lateral deviation of the following path and the heading angle deviation of the vehicle. Therefore, the optimal controls of vehicle speed and articulation angle were obtained, and the problem of multi-variable and multi-constraint system was solved. For the tracking overshoot problem caused by the inability of determi-

收稿日期: 2018-04-13

基金项目: 国家重点研发计划课题资助项目(2018YFC0604403,2016YFC0802905); 中央高校基本科研业务资助项目(FRF-TP-17-010A2); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060408)

ning sudden changes of road curvature in the model predictive control strategy, a control method based on preview distance was proposed; thus, the vehicle path following control accuracy and stability was improved through the advance judgment of road mutation information. Matlab/Adams simulation software was used to perform a comparison simulation test. The results show that the model predictive following controller is capable of solving the control problem in multi-variable, multi-constrained system and effectively prevent the actuator saturation. Moreover, the model predictive following control strategy based on the preview distance keeps the horizontal deviation of the vehicle within ± 0.04 m and the heading angle deviation within $\pm 1.8^\circ$. Compared with the controller before improvement, the lateral position deviation is reduced by 80.9%, and the heading angle deviation is reduced by 59.1%; this proves that the improved controller has better lateral stability and accuracy.

KEY WORDS articulated vehicle; path following; motion control; model predictive control; preview control

无人驾驶技术是目前热点研究领域,对自动化采矿和未来无人采矿的发展有重大推动作用^[1]。地下矿山由于巷道狭小,工作环境恶劣,对车辆驾驶员的安全造成威胁,实现地下矿用车辆无人驾驶能够提高矿山自动化、智能化水平,保障工作人员安全,同时显著提高矿产资源的开采效率和开发能力^[2]。

地下矿用车辆多为铰接式结构,其前后车体之间具有铰接点和摆动环^[3]。铰接点允许前车身相对后车身达到 45° 转角,从而实现在小转弯半径的路径下转向。当车辆行驶在不平坦的路面的时候,能够保证所有车轮与地面接触,以维持车身整体的稳定性、通过性。但是该结构也导致了铰接式矿用车辆的运动学等特性较一般轮式机器人和地面乘用车更加复杂,实现无人驾驶的难度更高。

路径跟踪控制是无人驾驶系统的核心技术之一^[4],即无人车辆通过采集信息规划出行驶路径,根据已知参考路径使用有效的跟踪算法实现对路径的精确跟踪^[5]。目前采用的路径跟踪控制系统主要有:前馈-反馈控制、滑模控制、模糊比例-积分-微分(PID)控制、线性二次型调节控制(linear quadratic regulator)和模型预测控制(model predictive control, MPC)等。Abatari和Tafti^[6]使用模糊PID控制器对轮式机器人进行路径跟踪控制,对PID参数进行模糊逻辑训练,相对于传统的PID控制有着更快的收敛速率,但PID控制不具备预测性,容易发生控制超调现象;Kritayakirana和Gerdes^[7]、Kapania和Gerdes^[8]设计了前馈-反馈跟踪控制器,控制精度相较PID控制器有所提高,但这类方法依赖于被控对象模型的可逆性或微分平坦性,一定程度上限制了车辆模型的应用;Aslam等^[9]设计了模糊滑模变结构控制的路径跟踪器,但由于模糊控制器无法考虑系统约束,容易产生执行器饱和,执行器饱和可能会造成执行部件的损坏^[10],并且由于转弯角度已经达到最大值,容易造成航道偏离。

相较于其他跟踪控制方法,模型预测控制主要优势在于其可以解决带系统约束跟踪问题^[11-12],防止执行器饱和,并结合二次型最优控制实现以较小的能量损耗将系统变量维持在零值附近。文献[13]~[16]使用模型预测控制器对车辆横向控制并取得良好的跟踪效果,但没有考虑预瞄距离控制的影响,在曲率变化较大的路径中仍然出现跟踪超调现象。过大的位置偏差会导致工程车辆在狭窄的巷道内碰撞巷道壁,造成事故,所以有必要对跟踪精度以及跟踪稳定性进行更深入研究。针对模型预测控制器在曲率突变处发生的跟踪超调问题,本文提出预瞄距离控制方法。该方法是通过预瞄车辆运行前方一定距离的参考点信息,估计下一时刻车辆位姿状态变化情况,提前将位姿信息输入控制器以提高对路径的跟踪精度,旨在有效解决车辆在路径曲率突变等复杂情况下容易发生控制超调等问题。

1 铰接车模型

1.1 运动学模型

铰接车的运动可以看作车体相对于地面的平面运动,具体可以分为垂直于车轮轴向的运动、沿着车轮轴向的运动和绕着铰接点的转动,由于车辆在运动的时候车轮受到的横向滑动阻力远远大于车轮滚动方向的滚动阻力,并且地下矿用铰接车在工作时运行速度不高,一般情况下不超过 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[17],所以在计算中忽略轮胎轴向弹性变形对车辆行驶路径的影响,现假定车体在运动时轮胎不产生横向运动。

铰接车运动学模型如图1所示^[18],其中 O 为瞬心; $P_f(x_f, y_f)$ 为前桥中点; $P_r(x_r, y_r)$ 为后桥中点; l_f , l_r 分别是前后桥中点到铰接点的距离; θ_f , θ_r 分别为前、后车桥的航向角; γ 为前后车体之间的夹角。为了方便计算,通常考虑使用前桥中点 $P_f(x_f, y_f)$ 为整车的参考点^[19]。

车辆的转向运动过程可以分解成两个运动:稳态转向运动和原地转向运动。定义整车的运动

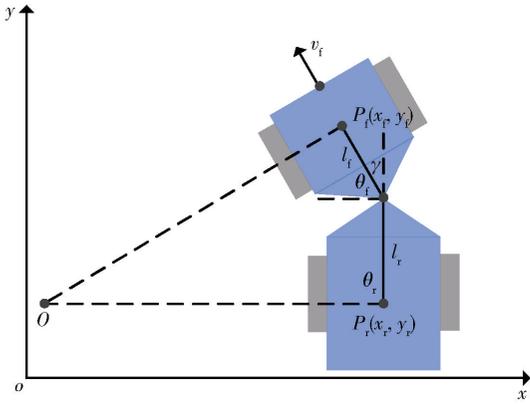


图 1 铰接车转向模型

Fig. 1 Articulated vehicle model

速度^[19]:

$$v = v_f \quad (1)$$

式中: v 为车辆整车速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_f 为前车参考速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 计算得到前桥中点 P_f 的速度为:

$$\dot{x}_f = v_f \cos \theta_f, \dot{y}_f = v_f \sin \theta_f \quad (2)$$

式中: \dot{x}_f 为车辆沿 x 轴方向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; \dot{y}_f 为车辆沿 y 轴方向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

对于稳态转向, 由于前后轮相对于车轮架都没有发生偏转, 其前桥航向角变化率为:

$$\dot{\theta}_f = \frac{v_f \sin \gamma}{l_f \cos \gamma + l_r} \quad (3)$$

式中: $\dot{\theta}_f$ 为航向角变化率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; γ 为车辆铰接角, rad ; l_f, l_r 分别为车辆前后桥中点到铰接点的距离, m .

对于原地转向, 认为 P_f 为整车的状态参考点, 该点相对地面静止, 其前桥航向角变化率等于前桥横摆角速度^[1], 即:

$$\dot{\theta}_f = \frac{(l_r + l_f \cos \gamma)}{l_r^2 + l_f^2 \cos^2 \gamma + 2l_r l_f \cos \gamma} l_r \omega_\gamma \quad (4)$$

式中: ω_γ 为车辆转向角速度, 即为 $\dot{\gamma}$, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$. 整车实际的前桥航向角变化率应该为整车稳态转向时转向角速度和原地转向造成的前桥横摆角速度之和^[20]:

$$\dot{\theta}_f = \frac{v_f \sin \gamma + l_r \omega_\gamma}{l_f \cos \gamma + l_r} \quad (5)$$

铰接车运动学模型可表示为 $N_f = (x_f, y_f, \theta_f, \gamma_f)$:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{y}_f \\ \dot{\theta}_f \\ \dot{\gamma}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_f \\ \sin \theta_f \\ \frac{\sin \gamma}{l_f \cos \gamma + l_r} \\ 0 \end{bmatrix} v_f + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{l_r}{l_r + l_f \cos \gamma} \\ 1 \end{bmatrix} \omega_\gamma \quad (6)$$

1.2 模型线性离散化

铰接车运动学模型(6)是一个典型的非线性模型, 而模型预测控制器只能求解线性离散系统, 并不能对非线性模型直接进行计算, 所以需要铰接车运动学模型进行线性离散化. 确定运动学模型的状态输入量和控制输出量分别为:

状态量:

$$\xi_{\text{kin}} = [x_f, y_f, \theta_f, \gamma_f]^T \quad (7)$$

控制量:

$$u_{\text{kin}} = [v_f, \omega_\gamma]^T \quad (8)$$

通过考虑参考点状态与车辆位姿状态之间的关系建立系统误差模型, 实现对车辆运动学模型线性化. 假设参考路径中的所有参考点可以由车辆运动学模型(6)进行描述, 则参考路径在任意时刻的状态和控制量满足以下关系:

$$\dot{\chi}_r = f(\chi_r, u_r) \quad (9)$$

式中: $\chi_r = [x_{fr}, y_{fr}, \theta_{fr}, \gamma_{fr}]^T$ 为路径参考点处的状态变量, $x_{fr}, y_{fr}, \theta_{fr}, \gamma_{fr}$ 分别为参考点的 x 坐标、 y 坐标、参考航向角度值以及参考转向角度; $u_r = [v_{fr}, \omega_{fr}]^T$ 为路径参考点处的控制变量, v_{fr}, ω_{fr} 分别为车辆参考速度值和参考角速度值.

使用泰勒公式在任意点 (χ_r, u_r) 处进行泰勒展开, 计算得到线性状态方程:

$$\dot{\xi} = A(t)\xi + B(t)\Delta u \quad (10)$$

式中各状态变量为: $\xi = (\chi - \chi_r)$; $\Delta u = (u - u_r)$; $A(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial \chi} \right|_{\substack{\chi = \chi_r \\ u = u_r}}$; $B(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{\chi = \chi_r \\ u = u_r}}$; 其中: χ 为车辆的状态变量, u 为车辆的控制变量.

采用近似离散化的方法对线性状态方程进行离散化处理, 假设采样周期为 T , 每一个周期的模型状态变化量 ξ 为线性变化, 即车辆由 k 时刻的状态变化量 $\xi(k)$ 至 $k+1$ 时刻的状态变化量 $\xi(k+1)$ 为线性变化, 计算得到离散化线性时变模型:

$$\xi(k+1) = \tilde{A}_{k,t} \xi(k) + \tilde{B}_{k,t} \Delta u(k) \quad (11)$$

式中各矩阵和状态变量为:

$$\xi = [x_f - x_{fr}, y_f - y_{fr}, \theta_f - \theta_{fr}, \gamma_f - \gamma_{fr}]^T,$$

$$\tilde{A}_{k,t} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_{fr} \sin \theta_{fr} T & 0 \\ 0 & 1 & v_{fr} \cos \theta_{fr} T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{v_{fr}(l_f + l_r \cos \gamma_r) + \omega_{fr} l_f l_r \sin \gamma_r T}{(l_f \cos \gamma_r + l_r)^2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r T & 0 \\ \sin \theta_r T & 0 \\ \frac{\sin \gamma_r}{l_f \cos \gamma_r + l_r} T & \frac{l_r}{l_f \cos \gamma_r + l_r} T \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

2 路径跟踪控制器设计

通过上述对车辆运动学模型的分析,得到铰接车辆路径跟踪控制的控制变量(8)和控制目标(7),即控制量 $\mathbf{u}_{kin} = [v_f, \omega_y]^T$ 和状态量 $\xi_{kin} = [x_f, y_f, \theta_f, \gamma_f]^T$ 。为了保证无人驾驶车辆能够平稳、快速地实现路径跟踪,需要对公式(7)中车辆速度 v_f 和铰接角角速度 ω_y 进行约束控制,以实现对公式(8)中多个控制目标变量的优化。针对多变量、多约束系统控制问题,传统的控制方法无法进行求解控制,故引入模型预测控制方法,实现对无人车辆控制目标的优化调整。

模型预测控制包括三个核心环节:预测模型、滚动优化、反馈校正,它是通过每一时刻 k 的性能指标的最优来确定系统的控制变量,与传统优化算法的不同之处在于模型预测控制的每一次优化不是离线进行,而是反复在线进行的。本文采用车辆运动学离散线性时变模型(11)作为预测模型,确定每一时刻 k 的优化目标函数 $J(k)$,并将计算得到的最优控制输入 \mathbf{u}_{kin} 作为下一时刻的系统输入对车辆系统进行控制,模型预测控制(MPC)路径跟踪控制原理如图2所示,其中 $\phi(t)$ 为被控车辆实际输出。



图2 MPC 路径跟踪控制原理图

Fig. 2 Schematic of vehicle path tracking control of MPC

2.1 模型预测控制方法

预测模型是模型预测控制的基础,预测模型通过分析铰接车的历史位置、姿态信息和路径跟踪控制系统的未来控制量 \mathbf{u}_{kin} ,便可以预测铰接车未来时刻的位置和姿态信息。假设公式(11)中 k 时刻的预测模型为:

$$\xi(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}_{k,t} \xi(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta \mathbf{u}(k|t) \quad (12)$$

假设铰接车控制系统的预测时域为 N_p ,控制时域为 N_c ,为了简化计算,线性时变模型(11)中状态变量设为 $\tilde{\mathbf{A}}_{k,t} = \tilde{\mathbf{A}}_t, \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = \tilde{\mathbf{B}}_t$ 。则铰接车预测时域内的位置和姿态信息可以由式(13)计算得到,车辆在预测时域内的控制输出由式(14)计算得到。

$$\xi(t+N_p|t) = \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p} \xi(t|t) + \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta \mathbf{u}(t|t) + \dots + \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_t \Delta \mathbf{u}(t+N_c|t) \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}_t = \Psi_t \xi(t|t) + \Theta_t \Delta \mathbf{U}(t) \quad (14)$$

式中,

$$\Theta_t = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_t & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{\mathbf{A}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{B}}_t & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c-2} \tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{B}}_t \\ \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c} \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{A}}_t \tilde{\mathbf{B}}_t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}}_t & \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-2} \tilde{\mathbf{B}}_t & \dots & \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{\mathbf{B}}_t \end{bmatrix},$$

$$\Psi_t = [\tilde{\mathbf{A}}_t \quad \tilde{\mathbf{A}}_t^2 \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_c} \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p}]^T,$$

$$\Delta \mathbf{U}(t) =$$

$$[\Delta \mathbf{u}(t|t) \quad \Delta \mathbf{u}(t+1|t) \quad \dots \quad \Delta \mathbf{u}(t+N_c|t)]^T.$$

由于每一时刻 k 的最优控制输入 $\Delta \mathbf{U}(k)$ 是未知的,因此每一个控制周期都要求解设定的优化目标,以获得第 k 个周期的控制时域内的控制序列,重复此优化过程便称为滚动优化过程。为了避免系统无法对每一个采样周期内的控制增量进行限制,导致控制量变化不连续性而使得被控车辆在运行过程中发生抖振现象,从而造成车辆路径跟踪的稳定性、精确性下降,本文采用软约束的方法^[21]对车辆控制目标进行滚动优化,基于预测模型(14)设置如下形式的目标函数:

$$J(\xi(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta \mathbf{U}(t)) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{x}(t+i|t) - \mathbf{x}_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta \mathbf{U}(t+i|t)\|_R^2 + \tau^2 \quad (15)$$

式中, τ 为松弛因子; Q 为误差权矩阵; R 为控制权矩阵。

公式(15)中的第一项反映了系统对参考路径的跟随能力,第二项反映了对控制量增量变化的约束,并且在最后一项中加入了松弛因子,不仅能对控制增量进行直接限制,也能防止在控制器执行过程中出现无可行解的情况。对目标函数(15)进行求解便能得到控制时域内的系统输出,结合公式(12)、(14)并经过矩阵运算,得到最后的目标函数:

$$J(\xi(t), \mathbf{u}(t-1), \Delta \mathbf{U}(t)) = \frac{1}{2} [\Delta \mathbf{U}(t)^T, \tau]^T \mathbf{H}_t [\Delta \mathbf{U}(t)^T, \tau] + \mathbf{G}_t [\Delta \mathbf{U}(t)^T, \tau] \quad (16)$$

式中, $H_t = \begin{bmatrix} 2\Theta_t^T Q \Theta_t + R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $G_t = [2E(t)^T Q \Theta_t \quad 0]$, $E(t) = \Psi_t(\chi(t|t) - \chi_{ref}(t))$.

使用 LQR 优化算法对目标函数进行求解:

$$\min_{\Delta U(t), \tau} = \frac{1}{2} [\Delta U(t)^T, \tau]^T H_t [\Delta U(t)^T, \tau] + G_t [\Delta U(t)^T, \tau] \quad (17)$$

式(17)中系统的约束条件为:

$$\begin{aligned} \Delta U_{min} &\leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{max}, \\ U_{min} &\leq U(t-1) + \sum_{i=1}^k \Delta U(i) \leq U_{max}, \\ Y_{min} + \tau &\leq \Psi_t \xi(t|t) + \Theta_t \Delta U(t) \leq Y_{max} + \tau, \\ \tau &> 0. \end{aligned}$$

其中, $k=1, 2, \dots, N_c-2, N_c-1$.

上述约束中, $(\Delta U_{min}, \Delta U_{max})$ 是输入增量的动态约束范围; (U_{min}, U_{max}) 是系统运动学输入的约束范围; (Y_{min}, Y_{max}) 是系统运动学输出的约束范围. 完成对每一个控制周期方程(15)的求解之后, 便会得到第 k 个周期的控制时域内控制输入增量的序列:

$$\Delta U_k^* = [\Delta u_k^*, \Delta u_{k+1}^*, \Delta u_{k+2}^*, \dots, \Delta u_{k+N_c-1}^*]^T \quad (18)$$

式中, Δu_k^* 为控制时域内 k 时刻的控制变量.

将序列中的第一个元素作为实际的控制增量反馈作用于系统, 即:

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u_k^* \quad (19)$$

这样便得到了下一时刻的经过优化的控制输入量, 将 $u(k+1)$ 作为控制变量输入被控车辆. 如此反复执行上述步骤, 直到系统完成控制过程, 如图 3 所示.

2.2 预瞄距离控制策略

预瞄点控制相当于一个驾驶员控制模型, 在实际驾驶中, 驾驶员通常会根据当前车辆的运动状态, 预测汽车行驶到前方某处时车辆与期望路径之间横向误差的大小, 驾驶员控制车辆方向使得这个误差趋近于零, 这个预瞄误差便称作横向预瞄误差. 驾驶员是通过判断横向预瞄误差的大小和方向来进行车辆的控制, 实现对路径的调节. 而对于无人驾驶车辆, 通过传感器采集信息并且传回车载计算机后, 计算机根据车辆的运动参数、道路曲率和预瞄模型计算出预瞄点处的横向误差, 通过分析预瞄误差和车辆当前的运动状态, 计算出车辆控制量的最优解, 从而实现对目标路径的跟踪.

铰接车速度控制对提高路径跟踪精度有着重要的作用. 铰接车主要在地下矿场巷道内工作, 巷道

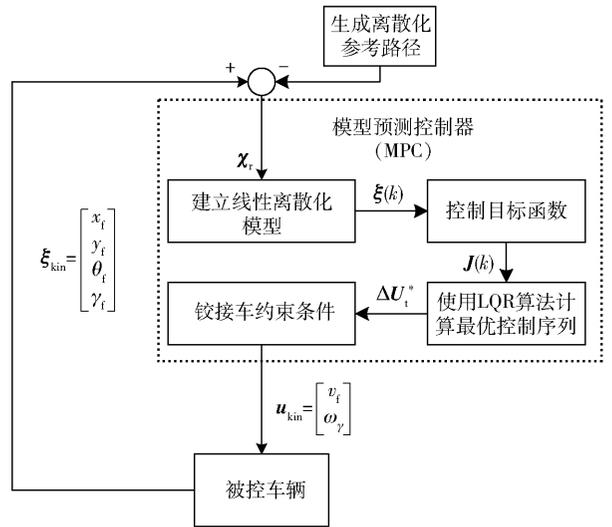


图 3 MPC 控制器路径跟踪流程简图

Fig. 3 Block diagram of MPC path following the controller

路径狭小并且弯道曲率变化大, 铰接车转向机构主要由液压缸推动完成, 转向速度相对于普通刚性结构车辆更慢, 若铰接车不能及时判断路况特征完成减速和转向操作而发生欠转向或过转向, 很可能导致车辆偏离预定路径发生超调现象, 如图 4 所示.

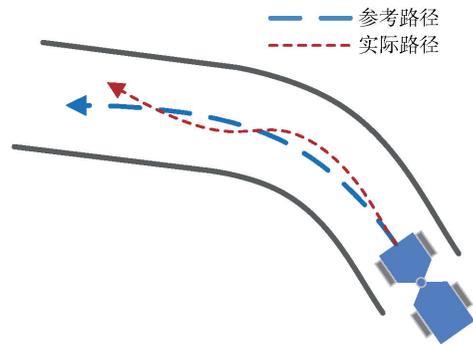


图 4 路径超调示意图

Fig. 4 Path overshoot diagram

由公式(20)可知, 当曲率 c 增大并且纵向速度 v_t 仍然保持较高速度时, 会导致车辆铰接角速度 ω_γ 的需求增大, 容易引起铰接角速度 ω_γ 饱和而产生横向偏差和航向角偏差^[22], 所以当路径曲率变大时, 需适当减小车辆纵向速度. 车辆目标速度 v_t 由参考路径曲率 c 、当前铰接角 θ_t 以及铰接角速度 ω_γ 计算得到.

$$c = \frac{\sin \gamma}{l_r \cos \gamma + l_r} + \frac{\omega_\gamma l_r}{v_t (l_r \cos \gamma + l_r)} \quad (20)$$

式中, c 为路径曲率.

$$\dot{\theta}_t = \frac{v_t \sin \gamma}{l_r \cos \gamma + l_r} + \frac{\omega_\gamma l_r}{(l_r \cos \gamma + l_r)} \quad (21)$$

公式(21)的等式右边第一项为车辆稳态转向时航向角变化率, 第二项为车辆原地转向时航向角

变化率. 第一项的因素中包含铰接角 γ , 是铰接角速度 ω_γ 的一次积分项, 为保证铰接车的转向灵活性, 需要保证第一项小于第二项, 由此得到车辆纵向速度参考值 v_f :

$$\begin{cases} v_f = v_{\max}, & v \geq v_{\max} \\ v_f = \left| \frac{\dot{\gamma} l_r}{\sin \gamma} \right|, & v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ v_f = v_{\min}, & v \leq v_{\min} \end{cases} \quad (22)$$

其中, 车辆的最大纵向参考速度 v_{\max} 按照矿用铰接车辆的特性和地下矿山巷道路况决定; 车辆最小参考速度 v_{\min} 依据最小预瞄距离 $L_{a, \min}$ 决定. 控制器预瞄距离由车辆当前纵向速度决定, 当前车辆预瞄距离由式(23)计算得到^[23], 基于预瞄距离的 MPC 控制器控制流程如图 5 所示^[24]:

$$L_a = \kappa |v|, |v| \geq v_{\min} \quad (23)$$

式中: L_a 为预瞄距离, m; $|v|$ 为车辆当前速率, $m \cdot s^{-1}$; κ 为预瞄常数.

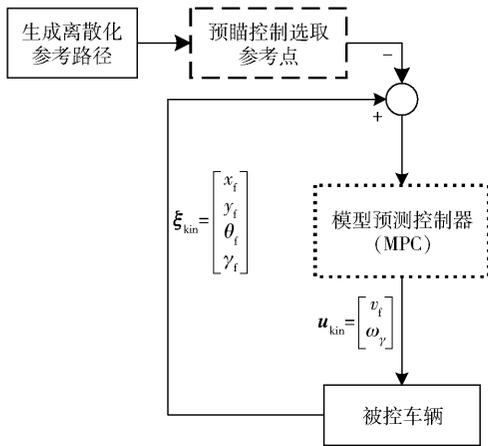


图 5 基于预瞄距离的 MPC 控制器路径跟踪控制流程图

Fig. 5 Block diagram of MPC path following control based on preview distance

3 仿真测试

3.1 仿真系统搭建

本文利用 Adams/Matlab 联合仿真来验证控制策略的有效性, 如图 6 所示. 在 Solidworks 中建立铰接车的三维模型, 其中包括车辆的左右转向液压缸、左右转向推杆、前后车体等部件. 为了弥补实体模型导入后丢失的原有属性, 在 Adams 模型中添加了车辆各部位的零部件质量, 为其添加约束; 同时考虑铰接式车辆运行的巷道路况, 参考 E 级路面修改路面谱系数, 采用二维随机不平路面建立约束和驱动. 基于 Adams 的铰接式车辆模型如图 7 所示.

仿真采用某型 35 t 自卸矿用铰接车辆数据设

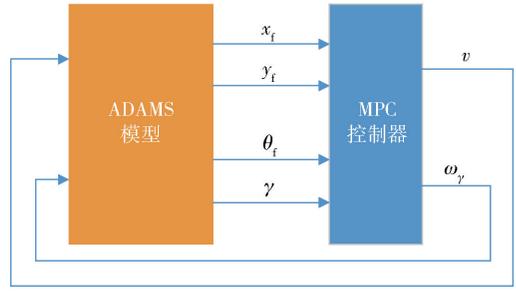


图 6 联合仿真示意图

Fig. 6 Block diagram of unity simulation scheme

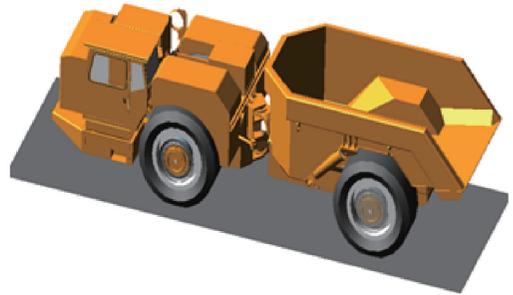


图 7 基于 Adams 的 35 t 铰接式车辆模型

Fig. 7 35 t articulated vehicle model based on Adams

定, 其铰接点到前桥中点的距离 l_f 和到后桥距离 l_r 分别为 2.468 m 和 3.439 m; 车辆铰接角度的转向范围 $\gamma \in (-0.698 \text{ rad}, 0.698 \text{ rad})$; 车辆铰接角速度的变化范围 $\omega_\gamma \in (-0.21 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, 0.21 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1})$; 预瞄常数 $\kappa = 2$; 松弛因子 $\tau = 10$. 地下矿山的结构复杂, 定位精度不高, 地下矿用车辆要求的路径跟踪精度误差范围为 0.2 m, 并且应当尽可能提高其路径跟踪精度.

针对路径跟踪控制器的仿真试验, 采用文献 [13]、[25-27] 中的评价方法定义横向位置偏差和航向角偏差作为跟踪精确性及稳定性的评价标准.

如图 8 所示, 圆弧 \widehat{AP} 的圆心为 C_{AP} 定义了铰接车辆在当前时刻的实际行驶路径; 圆弧 \widehat{BP} 的圆心为 C_{BP} , 定义了参考路径经过 P_1, P_2, P_3 三个点时需要跟踪的运动轨迹, 点 P_f 为车辆前桥中点. 图 8 定义了铰接车模型在路径跟踪过程中实际轨迹和参考轨迹的偏差:

(1) 横向位置偏差 ε_d : 前桥中点 P 的横向坐标值与参考路径上对应参考点的横向坐标值之间的差值.

(2) 航向角偏差 ε_θ : 前桥航向角与参考轨迹上对应的航向角之间的差值.

3.2 仿真结果

为了检验控制器对初始路径偏差的跟踪能力, 设定初始路径偏差为 0.5 m, 仿真路径采用“S”型曲

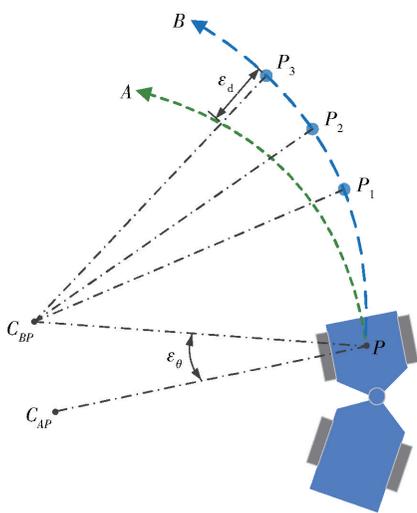


图 8 误差参数示意图

Fig. 8 Definition of error parameters

线,用来测试车辆对直线、连续弯道的跟踪能力以及在弯道和直线的衔接处对曲率突变的控制能力. 如图 9 所示,分别对曲率半径 $R = 20\text{ m}$ 的曲线路径(a)

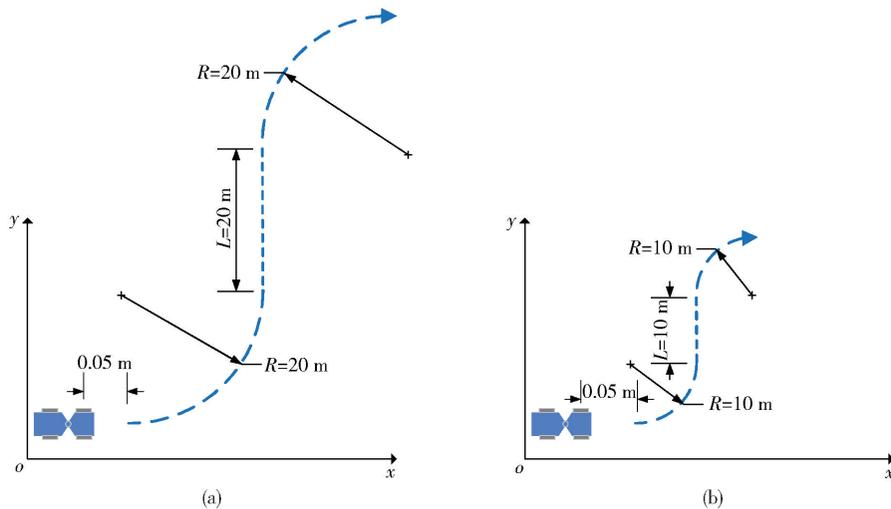


图 9 “S”型曲线

Fig. 9 Definition of “S” path

3. 2. 1 曲率半径 20 m 的路径仿真

车辆对曲率半径 $R = 20\text{ m}$ 的“S”型路径的跟踪仿真结果如图 10 ~ 图 15 所示. 图 10 为 MPC 控制器和基于预瞄距离的 MPC 控制器的路径跟踪效果对比图;图 11 ~ 图 13 分别为铰接车运行过程中的速度、铰接角速度以及铰接角度的变化曲线;图 14 ~ 图 15 分别为铰接车运行中的横向位置偏差和航向角偏差的变化曲线. 由仿真结果可知,使用 MPC 控制器对车辆路径进行跟踪控制,其横向位置偏差均保持在 0.1 m 范围内,航向角偏差均保持在 1.8° 范围内,跟踪误差均保持在合理的范围内,证明了使用 MPC 控制器能够更好地跟踪参考路径. 但

和半径 $R = 10\text{ m}$ 的曲线路径(b)进行仿真,其中曲线路径(a)的直线过渡路线长度 $L = 20\text{ m}$,设定跟踪参考速度 $v_t = 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;曲线路径(b)的直线过渡路线长度 $L = 10\text{ m}$,设定跟踪参考速度 $v_t = 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 仿真平台的跟踪周期为 $T = 0.05\text{ s}$,预测时域 $N_p = 50$,控制时域 $N_c = 49$,加权矩阵设置为:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, R = 0.05I$$

式中,误差权矩阵 Q 为对称正定或半正定矩阵,作用是调节系统控制性能;控制权矩阵 R 为对称正定矩阵,作为系统控制能量限制的加权量, I 为单位矩阵. 当 Q 值取值较大, R 的取值较小时,系统的稳定性性能较好^[28],但 Q 值不宜太大,如果系统过分追求短时间消除偏差,结果可能造成角度偏差过大,造成控制器饱和现象.

是在转弯和直线的交汇处由于发生曲率突变,没有使用预瞄距离的 MPC 控制器不能很好地做出反应,发生了超调现象,最大超调量为 0.1 m . 而使用了基于预瞄距离的 MPC 控制器能很好地跟踪路径,最大超调量仅为 0.036 m . 此外,使用了预瞄控制的 MPC 控制器能够使横向位置偏差始终保持在 0.04 m ,航向角偏差保持在 1.0° 范围内,相较于改进前的控制器,其最大横向位置偏差减少了 64.7% ,最大航向角偏差减少了 44.4% ,在整个路径跟踪控制过程中航向角偏差波动显著降低,证明使用了基于预瞄距离控制的铰接车辆对路径跟踪有更好的跟踪稳定性和精确性.

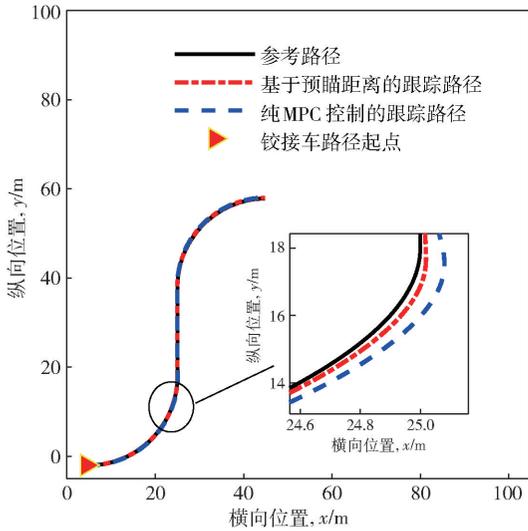


图 10 纯 MPC 控制器与基于预瞄距离 MPC 控制器对曲率半径 20 m 路径跟踪效果对比

Fig. 10 Comparison of tracking results based on a radius path of curvature of 20 m between the pure MPC controller and the preview distance-based MPC controller

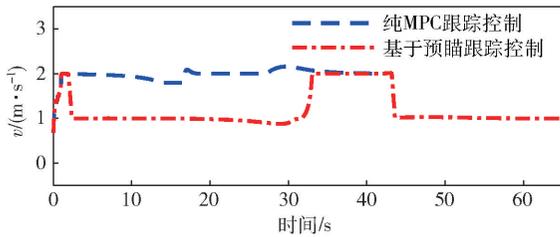


图 11 车辆速度变化曲线
Fig. 11 Curves of vehicle running speed

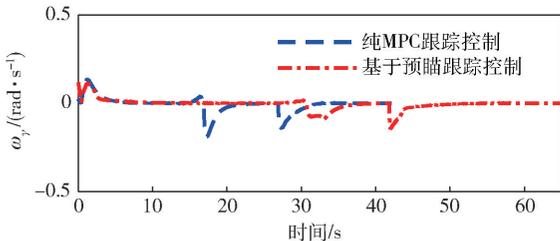


图 12 车辆铰接角速度变化曲线
Fig. 12 Curves of vehicle articulated angular velocity

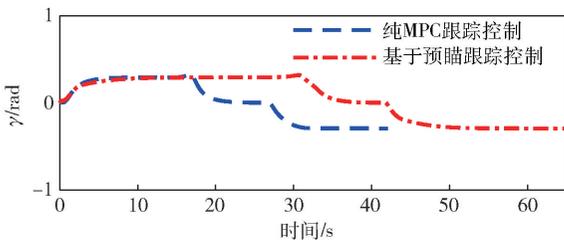


图 13 车辆铰接角度变化曲线
Fig. 13 Curves of vehicle articulation angle

3.2.2 曲率半径 10 m 的路径仿真

车辆对曲率半径 $R = 10\text{ m}$ 的“S”型路径的路径

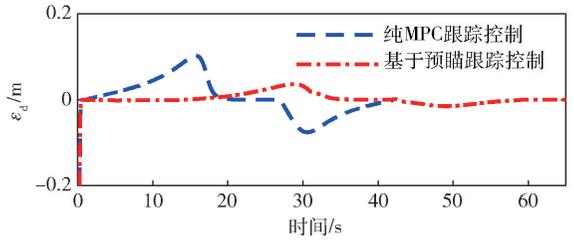


图 14 车辆路径跟踪的横向位置偏差
Fig. 14 Lateral positional deviation of vehicle path tracking

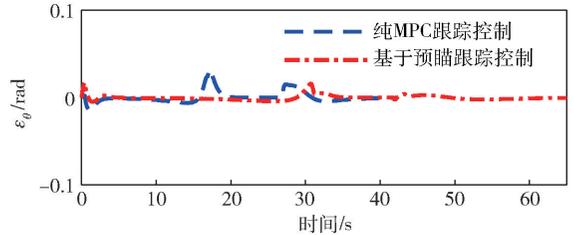


图 15 车辆路径跟踪的航向角偏差
Fig. 15 Heading angle deviation of vehicle path tracking

跟踪仿真结果如图 16 ~ 图 21 所示。图 16 为 MPC 控制器和基于预瞄距离的 MPC 控制器的路径跟踪效果对比图；图 17 ~ 图 19 分别为铰接车运行过程中的速度、铰接角速度以及铰接角度的变化曲线；图 20 ~ 图 21 分别为铰接车运行中的横向位置偏差和航向角偏差的变化曲线。半径为 10 m 的曲线路径其曲率更大,对车辆路径跟踪的要求更高,由仿真结果可知,车辆在曲线与直线的衔接路段出现了最大的超调量,使用纯 MPC 控制器控制的车辆最大超调量为 0.21 m,最大航向角偏差为 4.4°,相较于曲率半径为 20 m 的路径,其跟踪超调量变大。而使用基于预瞄距离的 MPC 控制器控制的车辆最大超调量控制在 0.04 m,航向角偏差为 1.8°,相对于曲率半径为 20 m 的路径其跟踪超调量没有明显的增加。在相同路径下基于预瞄距离的 MPC 控制器与纯 MPC 控制器对比,其最大横向位置偏差减少了 80.9%,航向角偏差减少 59.1%,并且航向角偏差波动没有明显增加,证明使用了预瞄距离的 MPC 控制器对大曲率的曲线路径仍然具有较高的跟踪精度和稳定性能。

4 结论

(1) 本文提出了使用模型预测控制算法对铰接车路径进行跟踪控制的方法。通过构造铰接式车辆运动学模型,并将其线性化得到最优控制函数作为预测模型,实现了对铰接式车辆纵向行驶速度以及横向角速度的控制。

(2) 设计了基于预瞄距离的控制方法,将预瞄

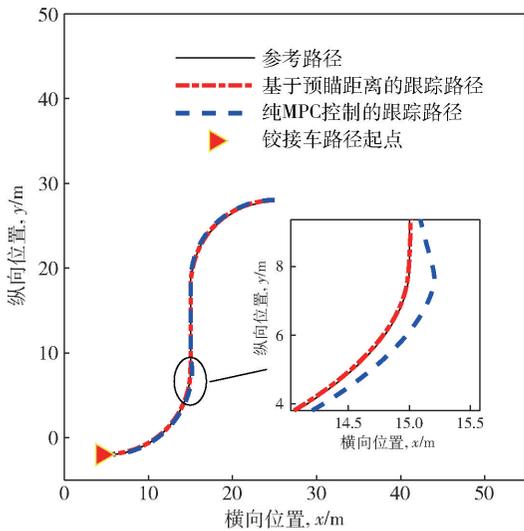


图 16 纯 MPC 控制器与基于预瞄距离 MPC 控制器对曲率半径 10 m 路径跟踪效果对比

Fig. 16 Comparison of tracking results based on a radius path of curvature of 10 m between the pure-MPC controller and the preview distance MPC controller

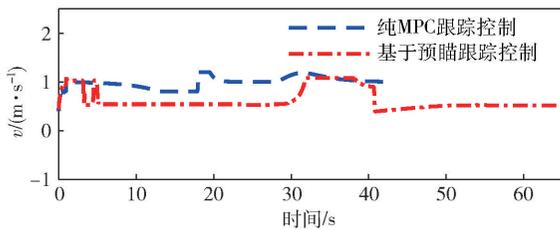


图 17 车辆速度变化曲线

Fig. 17 Curve of vehicle running speed

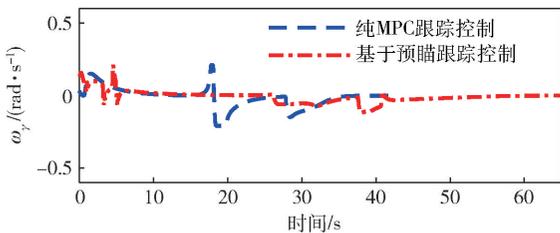


图 18 车辆铰接角速度变化曲线

Fig. 18 Curve of vehicle articulated angular velocity

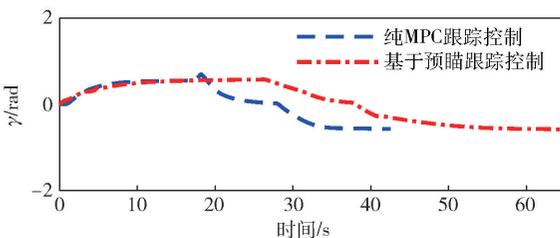


图 19 车辆铰接角度变化曲线

Fig. 19 Curve of vehicle articulation angle

控制与模型预测控制相结合, 构建了基于预瞄距离的 MPC 控制器. 并通过仿真试验证明加入预瞄控

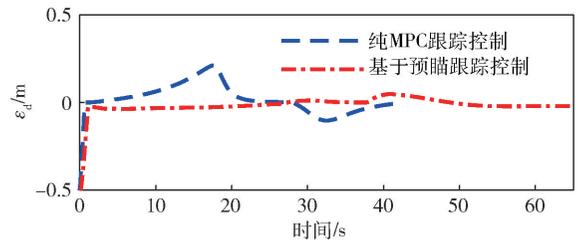


图 20 车辆路径跟踪的横向位置偏差

Fig. 20 Lateral positional deviation of vehicle path tracking

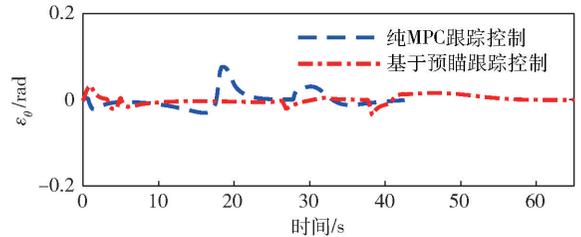


图 21 车辆路径跟踪的航向角偏差

Fig. 21 Heading angle deviation of vehicle path tracking

制的控制器能够提前判断前方路况的变化信息, 提高路径跟踪精度和稳定性, 有效减少路径跟踪超调量.

(3)使用 Adams/Matlab 软件对两组“S”型路径进行跟踪仿真试验, 结果表明:模型预测控制器能够将铰接车辆路径跟踪控制的横向偏差保持在 0.2 m 以内, 航向角偏差保持在 4.4° 范围内, 达到实际路径跟踪精度要求; 基于预瞄距离的模型预测控制器相对于纯 MPC 控制器显著提高了路径跟踪精度: 曲率半径为 20 m 时, 最大横向位置偏差减小了 64.7%, 最大航向角偏差减小了 44.4%; 曲率半径为 10 m 时, 最大横向位置偏差减小了 80.9%, 最大航向角偏差减小了 59.1%. 证明基于预瞄距离的模型预测控制器对大曲率路径具有更好的路径跟踪的精确性, 路径跟踪过程更加平稳.

参 考 文 献

[1] Nayl T, Nikolakopoulos G, Gustafsson T. Kinematic modeling and extended simulation studies of a load hull dumping vehicle under the presence of slip angles // *The International Conference on Modelling, Simulation and Identification*. Pittsburgh, 2011

[2] Zhan K, Gu H S, Zhou J W, et al. Remote controlling and precision positioning technologies of underground remote-controlled scrapers. *Nonferrous Met*, 2009, 61(1): 107
(战凯, 顾洪枢, 周俊武, 等. 地下遥控铲运机遥控技术和精确定位技术研究. 有色金属, 2009, 61(1): 107)

[3] Dong J J, Zhang W M, Shi B Q. General of underground mining articulated dump truck and market in China. *Coal Mine Machinery*, 2007, 28(12): 1
(董建军, 张文明, 石博强. 地下矿用铰接式自卸汽车的概况

- 及中国市场分析. 煤矿机械, 2007, 28(12): 1)
- [4] Yakub F, Mori Y. Comparative study of autonomous path-following vehicle control *via* model predictive control and linear quadratic control. *Proc Inst Mech Eng Part D J Automobile Eng*, 2015, 229(12): 1695
- [5] Liu C, Zou Z J, Li T S. Path following of underactuated surface vessels with fin roll reduction based on neural network and hierarchical sliding mode technique. *Neural Comput Appl*, 2015, 26(7): 1525
- [6] Abatari H T, Tafti A D. Using a fuzzy PID controller for the path following of a car-like mobile robot // 2013 *First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*. Tehran, 2013: 189
- [7] Kritayakirana K, Gerdes J C. Using the centre of percussion to design a steering controller for an autonomous race car. *Vehicle Syst Dyn*, 2012, 50(Suppl 1): 33
- [8] Kapania N R, Gerdes J C. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling. *Vehicle Syst Dyn*, 2015, 53(12): 1687
- [9] Aslam J, Qin S Y, Alvi M A. Fuzzy sliding mode control algorithm for a four-wheel skid steer vehicle. *J Mech Sci Technol*, 2014, 28(8): 3301
- [10] Zhang L W, Xie W, Wang J C. Robust MPC for linear systems with structured time-varying uncertainties and saturating actuator. *Asian J Control*, 2017, 19(3): 1197
- [11] Di Cairano S, Bemporad A. Model predictive control tuning by controller matching. *IEEE Trans Autom Control*, 2010, 55(1): 185
- [12] Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control—status and challenges. *Acta Autom Sin*, 2013, 39(3): 222
(席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战. 自动化学报, 2013, 39(3): 222)
- [13] Yu R, Guo H Y, Sun Z P, et al. MPC-based regional path tracking controller design for autonomous ground vehicles // 2015 *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Hongkon, 2015: 2510
- [14] Falcone P, Eric Tseng H, Borrelli F, et al. MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking. *Vehicle Syst Dyn*, 2008, 46(Suppl 1): 611
- [15] Nayl T, Nikolakopoulos G, Gustafsson T. A full error dynamics switching modeling and control scheme for an articulated vehicle. *Int J Control Autom Syst*, 2015, 13(5): 1221
- [16] Gong J W, Xu W, Jiang Y, et al. Multi-constrained model predictive control for autonomous ground vehicle trajectory tracking. *J Beijing Inst Technol*, 2015, 24(4): 441
- [17] Polotski V, Hemami A. Control of articulated vehicle for mining applications; modeling and laboratory experiments // *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications*. Hartford, 1997: 318
- [18] Ridley P, Corke P. Load haul dump vehicle kinematics and control. *J Dyn Syst Meas Control*, 2003, 125(1): 54
- [19] Wang J M, Steiber J, Surampudi B. Autonomous ground vehicle control system for high-speed and safe operation // *Proceedings of the American Control Conference* (2008). Seattle, 2008: 218
- [20] Zhao X, Yang J, Zhang W M, et al. Sliding mode control algorithm for path tracking of articulated dump truck. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, 31(10): 198
(赵翔, 杨珏, 张文明, 等. 农用轮式铰接车辆滑模轨迹跟踪控制算法. 农业工程学报, 2015, 31(10): 198)
- [21] Li S B, Wang J Q, Li K Q. Stabilization of linear predictive control systems with softening constraints. *J Tsinghua Univ Sci Technol*, 2010, 50(11): 1848
(李升波, 王建强, 李克强. 软约束线性模型预测控制系统的稳定性方法. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(11): 1848)
- [22] Dou F Q. *Research on Path Tracking and Obstacles Avoidance for Autonomous Underground Mining Articulated Vehicles* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018
(窦凤谦. 地下矿用铰接车路径跟踪与智能避障控制研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2018)
- [23] Liu R, Duan J M. A path tracking algorithm of intelligent vehicle by preview strategy // *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*. Xi'an, 2013: 5630
- [24] Bruschetta M, Cenedese C, Beghi A, et al. A motion cueing algorithm with look-ahead and driver characterization: application to vertical car dynamics. *IEEE Trans Human-Mach Syst*, 2018, 48(1): 6
- [25] Chan W W, Li J, Wang T B, et al. Preview control for road following of vision guided intelligent vehicle. *Chin J Mech Eng*, 2008, 44(10): 277
(陈无畏, 李进, 王檀彬, 等. 视觉导航智能车辆的路径跟踪预瞄控制. 机械工程学报, 2008, 44(10): 277)
- [26] Lin F, Ni L Q, Zhao Y Q, et al. Path following control of intelligent vehicles considering lateral stability. *J S China Univ Technol Nat Sci Ed*, 2018, 46(1): 78
(林葵, 倪兰青, 赵义群, 等. 考虑横向稳定性的智能车辆路径跟踪控制. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 78)
- [27] Nayl T, Nikolakopoulos G, Gustafsson T. Path following for an articulated vehicle based on switching model predictive control under varying speeds and slip angles // *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*. Krakow, 2012: 1
- [28] Jin L S, Gao L L, Xie X Y, et al. Fuzzy-optimal control of four-wheel independent steering vehicles. *J Southwest Jiaotong Univ*, 2016, 51(6): 1064
(金立生, 高琳琳, 谢宪毅, 等. 四轮独立转向车辆稳定性的模糊最优控制方法. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1064)