

基于自适应平滑模型预测控制的车辆轨迹跟踪控制

杨 兴, 杨亚会, 徐 文

(湖北汽车工业学院 汽车工程学院, 湖北 十堰 442000)

摘要: 针对车辆横向控制中存在的跟踪误差大与转向突变问题, 提出一种自适应平滑模型预测 (model predictive control, MPC) 控制方法。首先建立包含横向位置、航向角、侧偏角与横摆角速度误差的增广车辆动力学模型, 并引入自适应机制以动态调整采样周期、预测步长与控制步长; 其次在目标函数中引入线性递增的控制量及其变化率的平滑权重项, 以抑制转向角波动并提升控制平顺性, 进而采用二次规划方法实时求解最优前轮转角控制序列。通过 CarSim-Simulink 联合仿真, 在 36, 54, 72 km/h 等 3 种车速及不同路面附着系数条件下, 将所提方法与传统 MPC 与线性二次最优控制 (linear quadratic regulator, LQR) 进行性能对比分析。结果表明: 在所有工况下, 改进 MPC 控制器性能均显著优于传统 MPC 与 LQR, 不仅将最大横向跟踪误差降低 37% 至 70%, 且生成的前轮转角指令更为平滑连续, 有效避免了高频抖振与执行器过载, 即使在低附着系数路面 ($\mu=0.3$) 仍能保持稳定的路径跟踪能力, 验证了所提方法在多工况下具有优良的控制精度与平顺性。本研究通过协同优化预测模型与目标函数, 有效平衡了高精度轨迹跟踪与控制平顺性之间的矛盾, 为自动驾驶车辆在多变工况下提供了高鲁棒性的控制方案。

关键词: 自动驾驶车辆; 模型预测控制; 自适应控制; 轨迹跟踪; 平滑控制

中图分类号: TP 273; U 461.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.25053



Vehicle Trajectory Tracking Control Based on Adaptive Smooth MPC

YANG Xing, YANG Yahui, XU Wen

(School of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442000, China)

Abstract: A self-adaptive smooth model predictive control (MPC) method was proposed to address the issues of large tracking errors and steering abruptness in vehicle lateral control. Firstly, an augmented vehicle dynamics model incorporating errors in lateral position, heading angle, sideslip angle, and yaw rate was established, and an adaptive mechanism was introduced to dynamically adjust the sampling period, prediction horizon, and control horizon. Secondly, linearly increasing smooth weighting terms for the control inputs and their rates of change were incorporated into the objective function to suppress steering angle fluctuations and improve control smoothness, after which the quadratic programming method was employed to solve for the optimal front-wheel angle control sequence in real time. Through co-simulation using CarSim and Simulink, the proposed method was compared with traditional MPC and LQR controllers under three vehicle speeds of 36, 54, and 72 km/h and various road adhesion conditions. The results demonstrate that the improved MPC controller significantly outperforms both the traditional MPC and LQR controllers across all tested conditions. The maximum lateral tracking error is reduced by 37% to 70%, while

收稿日期: 2025-05-15

基金项目: 湖北省重大研发计划项目 (2020AAA001); 湖北省重点研发计划项目 (2020BAB099)

作者简介: 杨兴 (2001—), 男, 湖北武汉人, 硕士生, 主要研究方向为智能驾驶控制。

通信作者: 杨亚会 (1975—), 男, 河北保定人, 教授, 主要研究方向为智能驾驶。

引文格式: 杨兴, 杨亚会, 徐文. 基于自适应平滑模型预测控制的车辆轨迹跟踪控制 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(6):625-633.

the generated front-wheel steering angle commands are smoother and more continuous, effectively avoiding high-frequency chattering and actuator overload. Stable path tracking capability is maintained even on low-adhesion road surfaces ($\mu=0.3$), which validates the excellent control accuracy and smoothness of the proposed method under various operating conditions. By synergistically optimizing the prediction model and the objective function, a balance between high-precision trajectory tracking and control smoothness is effectively achieved, providing a highly robust control solution for autonomous vehicles under varying working conditions.

Keywords: autonomous vehicles; model predictive control (MPC); adaptive control; path tracking; smooth control

随着自动驾驶技术的快速发展,智能汽车已成为全球汽车产业发展的战略方向^[1]。轨迹跟踪控制作为实现车辆自动驾驶的关键技术之一,其核心任务是通过精确的转向控制使车辆沿预先设定的参考路径行驶^[2]。传统控制方法如基于车辆几何关系的纯追踪算法^[3]、Stanley 算法^[4-5]常用于低速场景,而PID 控制^[6]、滑模控制^[7]、线性二次最优控制(linear quadratic regulator, LQR)^[8]等在简单工况下表现出一定的有效性,在初期得到广泛的应用。然而,随着车辆行驶速度的提升及道路环境复杂化,这些方法在高速、紧急变道或低附着路面等复杂工况下,往往因模型简化或缺乏前瞻优化能力,出现跟踪误差显著增大、转向响应突变等问题,难以满足高阶自动驾驶对控制精度与平顺性的协同要求。因此,面对当前国家推动智能网联汽车技术攻关与产业升级的战略需求,开展能够适应多工况、具备强鲁棒的轨迹跟踪控制方法研究,不仅对提升智能车辆的综合性能具有重要的理论价值,也对促进相关技术应用、增强产业核心竞争力具有明确的工程意义。

近年来,模型预测控制(model predictive control, MPC)^[9]因其能够显式处理多约束、多目标优化问题,已成为车辆轨迹跟踪领域的研究热点。围绕 MPC 在车辆控制中的应用,已引起学者广泛研究。例如:潘世举等^[10]提出基于跟踪误差模型的线性时变 MPC(linear time-varying MPC, LTV-MPC)方法,在双移线工况下显著降低了横向与航向跟踪误差,但该方法在高速下轮胎侧偏特性假设不再适用而影响性能,且实车验证的速度范围有限;蔡志鑫等^[11]基于车辆运动学模型与 MPC 设计了轨迹跟踪控制器,仿真结果表明其可实现较小路径误差与良好横向稳定性,但未考虑复杂动力学特性与实时自适应能力,使其适用场景受到限制;郭盼等^[12]提出基于路面附着系数自适应调节车速的 MPC 方法,建立了全工况稳定区域评价体系,提升了轨迹跟踪的安全性,但未考虑对开路面等复杂附着工况;臧豫徽等^[13]提出一种曲率自适应 LTV-MPC 方法,通过动态调整权重矩阵兼顾弯道跟踪精度与稳定性,但在线调整参数

会增加计算量;徐佳宝等^[14]提出一种结合增量 MPC 与卡尔曼滤波转向角优化的方法,提升了泊车轨迹跟踪的精度与实时性,但未考虑外部扰动与动态环境适应性。尽管现有研究在车辆轨迹跟踪控制方面取得显著进展,但传统或部分改进的 MPC 方法在实际应用中仍面临挑战。为此,本文提出一种自适应平滑模型预测控制方法,通过构建增广车辆动力学模型,引入基于车速的自适应参数调整机制,并在目标函数中嵌入平滑加权项,有效抑制转向波动、提升跟踪精度与控制平顺性,以期实现车辆在多车速、多附着条件下的高精度、高鲁棒轨迹跟踪,为智能驾驶系统的实际应用提供有效的控制方案。

1 车辆轨迹跟踪模型建立

为实现车辆的精准轨迹跟踪,本文综合构建基于运动学与动力学的集成车辆模型。运动学模型从几何关系角度描述车辆的运动规律^[15],更适用于低速场景;为满足高速工况下对车辆动态特性的精确控制需求,进一步参考经典二自由度理论^[16]建立车辆动力学模型。

1.1 车辆运动学模型

为建立车辆运动学模型,作如下基本假设:车辆为刚体,忽略悬架作用,且运动中不发生侧滑。图 1 所示为模型所用的 2 个坐标系:固定于地面的大地坐标系 OXY , φ 为车辆的横摆角;固定于车身的车辆坐标系 oxy , o 为车辆质心位置, β 为质心侧偏角, L 为轴距。

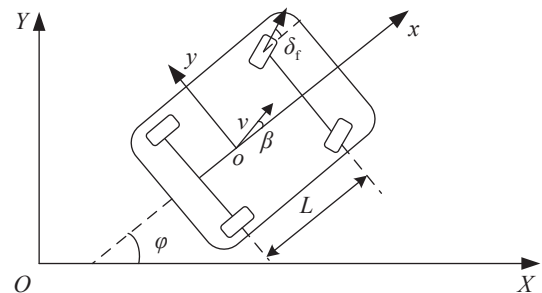


图1 车辆运动学模型

Fig. 1 Vehicle kinematics model

基于图 1 所示几何关系, 可推导出车辆运动学方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\varphi + \beta) \\ \dot{y} = v \sin(\varphi + \beta) \\ \dot{\varphi} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω 为车辆横摆角速度。进一步地, 引入小角度假设, 可对式 (1) 进行简化:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{y} = v \sin(\varphi + \beta) \\ \dot{\varphi} = \omega \end{cases} \quad (2)$$

1.2 车辆动力学模型

建立的车辆动力学模型如图 2 所示, 并引入如下简化假设^[17]。

- 1) 车辆运行于平整路面, 不考虑垂向运动、空气动力学及横风影响;
- 2) 悬架系统为刚性, 不考虑其形变及由此引发的载荷转移;
- 3) 轮胎侧向力采用纯侧偏刚度模型描述, 并忽略纵、横向滑移的耦合效应;
- 4) 车速变化平缓, 可将其视为定常过程。

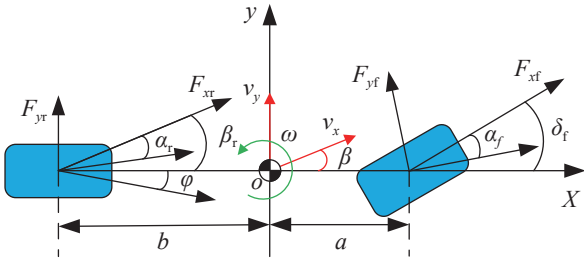


图 2 车辆动力学模型

Fig. 2 Vehicle dynamics model

首先, 根据图 2 所示的力学平衡, 建立侧向力与横摆力矩的动力学平衡方程:

$$\begin{cases} ma_y = F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} \\ I_z \dot{\omega} = a F_{yf} \cos \delta_f - b F_{yr} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为车辆质量; I_z 为转动惯量; a, b 分别为质心至前后轴的距离; δ_f 为前轮转角; F_{yf}, F_{yr} 分别为前后轮的侧向力。

进而, 基于轮胎侧偏特性, F_{yf} 和 F_{yr} 的关系可表示为:

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \alpha_f \\ F_{yr} = C_r \alpha_r \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_f, C_r 分别为车辆前后轴轮胎的侧偏刚度; α_f, α_r 分别为车辆前后轮胎的侧偏角。 α_f 和 α_r 与车辆运动状态存在如下几何关系:

$$\begin{cases} \alpha_f = \beta + \frac{a\omega}{v_x} - \delta_f \\ \alpha_r = \beta - \frac{b\omega}{v_x} \end{cases} \quad (5)$$

最终, 联立式 (3)~(5), 可得到车辆横向运动的

非线性微分方程:

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{C_f + C_r}{mv_x} \beta + \left(\frac{aC_f - bC_r}{mv_x^2} - 1 \right) \omega - \frac{C_f}{mv_x} \delta_f \\ \dot{\omega} = \frac{aC_f - bC_r}{I_z} \beta + \left(\frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{I_z v_x} \right) \omega - \frac{aC_f}{I_z} \delta_f \end{cases} \quad (6)$$

1.3 车辆预测模型与离散化

整合式 (2) 与式 (6) 所示的车辆运动学模型与动力学模型, 构建用于预测控制的统一模型。选取车辆横向位置、横摆角、质心侧偏角及横摆角速度作为状态变量 $X = [y, \varphi, \beta, \omega]$, 以前轮转角 δ_f 作为控制输入 u , 并将车辆横向位置和横摆角设定为输出 Y , 据此构建状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX \end{cases} \quad (7)$$

式中: A 为状态矩阵; B 为控制矩阵; C 为对应输出矩阵。

由于该控制系统为非线性时变系统, 直接用于在线预测控制器的优化求解难度较大。为此, 采用计算效率高的前向欧拉法^[18] 对式 (7) 所示的系统进行离散化:

$$\begin{cases} X(t+1) = A_1 X(t) + B_1 u(t) \\ Y(t) = C_1 X(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A_1 = I + T'A$; $B_1 = TB$; $C_1 = C$; T 为离散时间; t 为离散采样时间。

令 $u(t) = u(t-1) + \Delta u(t)$, $\Delta u(t)$ 为控制增量, 并定义新的状态变向量 $\xi(t) = [X(t), u(t-1)]^T$, 将式 (8) 转化为以控制增量为输入的状态方程, 从而建立新的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \xi(t+1) = A_d \xi(t) + B_d \Delta u(t) \\ Y(t) = \Phi \xi(t) + \Theta \Delta u(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $A_d = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ 0 & I \end{bmatrix}$; $B_d = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

基于此, 定义预测时域 N_p 内的预测矩阵 Φ , 该矩阵由系统在未来 N_p 个采样时刻的状态响应序列堆叠构成^[19]:

$$\Phi = \begin{bmatrix} C_d A_d \\ C_d A_d^2 \\ \vdots \\ C_d A_d^{N_p} \end{bmatrix} \quad (10)$$

最终, 推导出预测模型递推公式如下:

$$\Theta = \begin{bmatrix} C_d B_d & 0 & \cdots & 0 \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d A_d^{N_p-1} B_d & C_d A_d^{N_p-2} B_d & \cdots & C_d A_d^{N_p-N_c-1} B_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (11) 表示未来每一步状态各控制量的线性依赖关系。

2 自适应平滑预测控制器设计

为实现高精度与高平顺性的轨迹跟踪, 本文设计如图3所示的自适应终端强化预测控制器。该控制器在传统模型预测控制框架基础上引入以下改进: 首先设计自适应调节机制, 根据实时行驶工况动态调整预测与控制时域, 以适应车辆动力学特性的变化; 其次在目标函数中引入平滑项 H_{smooth} , 通过对相邻控制增量的剧烈变化施加惩罚, 有效抑制转向波动并控制信号振荡; 此外采用线性递增的权重矩阵并强化末端状态约束, 改善系统末端状态的匹配精度。

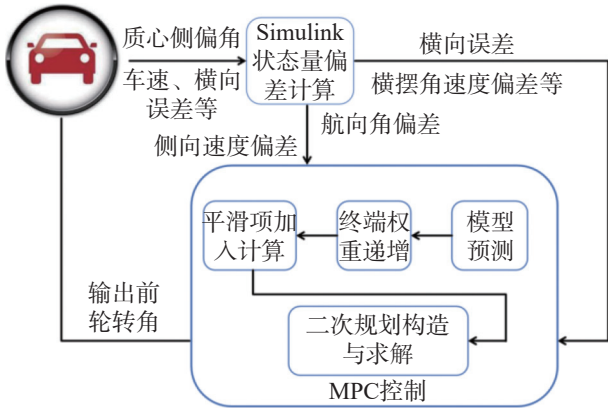


图3 自适应平滑控制器原理框图

Fig. 3 Block diagram of the adaptive smoothing controller

2.1 自适应因子设计

为提升控制器在不同工况下的适应性与鲁棒性, 本文设计一种基于实时误差状态的自适应因子调节机制。首先构造由横向误差 e_y 、横摆角误差 e_ϕ 、侧向速度误差 e_v 和横摆角速度误差 e_ω 组成的误差向量, 并通过计算其欧几里得范数以量化当前跟踪偏差的整体幅值:

$$e = \|e\|_2 = \sqrt{e_y^2 + e_\phi^2 + e_v^2 + e_\omega^2} \quad (12)$$

基于该误差幅值, 将其与调节增益系数 γ (可根据系统性能要求设定) 相乘, 生成自适应调节量 s 。当误差幅度增大时, 以线性方式增强控制权重, 从而在系统偏离参考轨迹时增强控制作用, 提升跟踪纠偏能力:

$$s = 1 + \gamma e \quad (13)$$

最终, 根据实时误差状态调整控制量惩罚权重, 其自适应更新规则设计为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_{1\text{base}} s \\ \lambda_2 = \lambda_{2\text{base}} s \\ R = R_{\text{base}} s \end{cases} \quad (14)$$

2.2 基于差分的平滑项设计

在车辆轨迹跟踪控制中, 前轮转角变化过快或

存在突变会引发车辆横向运动振荡, 严重影响行驶平顺性与稳定性。为此, 本文在目标函数中引入平滑项 H_{smooth} , 对控制增量的一阶差分(变化率)和二阶差分(变化加速度)进行惩罚, 以生成平滑的控制序列。

一阶差分惩罚项用于限制控制信号的变化速率, 其表达式为:

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u_0 \\ \Delta u_1 \\ \vdots \\ \Delta u_{N_c-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

矩阵 D_1 的作用是计算相邻控制增量插值, 其作用结果为:

$$D_1 \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u_0 - \Delta u_1 \\ \Delta u_1 - \Delta u_2 \\ \vdots \\ \Delta u_{N_c-2} - \Delta u_{N_c-1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过 $H_{\text{smooth}1} = \lambda_1 (D_1^T D_1)$ 构造二次惩罚因子, 并将其加入目标函数以限制控制信号的波动幅度。权重系数 (λ_1) 越大, 对相邻控制增量 Δu_i 与 Δu_{i+1} 间差异的惩罚越强, 优化算法所得的控制序列也越平缓。

二阶差分则表征控制信号变化率的变化(即 jerk), 旨在抑制控制指令的突变, 避免车辆行驶产生急剧抖动。 D_2 是维数为 (N_c-2) 行 N_c 列的矩阵, 用于计算控制序列的二阶差分(离散二阶导数):

$$D_2 \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u_0 - 2\Delta u_1 + \Delta u_2 \\ \Delta u_1 - 2\Delta u_2 + \Delta u_3 \\ \vdots \\ \Delta u_{N_c-3} - 2\Delta u_{N_c-2} + \Delta u_{N_c-1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

类似地, 通过将 $H_{\text{smooth}2} = \lambda_2 (D_2^T D_2)$ 引入目标函数, 可约束控制信号的变化加速度。权重参数 λ_2 决定系统对 jerk 的抑制强度, 其取值越大, 对控制信号二阶变化的约束越强, 最终得到的控制输入也更为平滑。

2.3 目标函数构造

为精确跟踪参考轨迹并确保平顺性与稳定性, 需构建兼顾状态跟踪误差、控制能耗及约束可行性的目标函数; 同时, 为避免优化问题无解, 引入软约束松弛机制^[20], 最终构建的目标函数形式如下:

$$\begin{cases} J = J_1 + J_2 + J_3 + H_{\text{smooth}} \\ J_1 = (\Phi \zeta + \Theta \Delta U)^T Q_{\text{big}} (\Phi \zeta + \Theta \Delta U) \\ J_2 = \Delta U^T R \Delta U \\ J_3 = \rho \varepsilon^2 \\ H_{\text{smooth}} = H_{\text{smooth}1} + H_{\text{smooth}2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $Q_{\text{big}} = \text{diag}\{k_1 Q_{\text{base}}, k_2 Q_{\text{base}}, k_3 Q_{\text{base}}, \dots, k_{N_p} Q_{\text{base}}\}$, 为对状态误差进行加权矩阵, 其基于基础权重矩阵

Q_{base} 与车辆工况设计而构造, 并通过随预测步数线性上升的系数 k_i 调整不同预测时域的权重分配; R 为控制增量权重矩阵 (通常 $R = R_{base}J$), 通过对控制增量矩阵施加惩罚以抑制控制输入突变, 确保车辆响应平稳; ε 为软约束的违反量, 表征实际控制中对约束条件 (如车辆运动限制、安全边界等) 的偏离程度^[21]; ρ 为对应的权重系数, 表示目标函数中动态调节对约束违反的惩罚力度, 从而平衡优化问题的可行性与约束严格性^[22]; J_1 为状态追踪误差代价项, 反映系统实际状态与参考状态之间的偏差; J_2 为控制输入代价项, 用于限制控制能量; J_3 为软约束项, 通过引入可控的约束违反容忍度以增强优化问题的可解性; H_{smooth} 为平滑项, 由一阶和二阶差分矩阵 D_1 , D_2 构造而成, 用于提升控制序列的平滑性, 具体表达形式如下:

$$H_{smooth} = \lambda_1(D_1^T D_1) + \lambda_2(D_2^T D_2) \quad (19)$$

在 Matlab 环境中, 通过构建包含上述各代价项的目标函数并引入松弛变量 ε , 可将该优化问题转化为二次规划形式, 进而采用内点法进行求解^[23], 最终获得控制序列 U , 其数学表述如下:

$$\min J = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \varepsilon \end{bmatrix}^T H \begin{bmatrix} \Delta U \\ \varepsilon \end{bmatrix} + f^T \begin{bmatrix} \Delta U \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中: $H = 2(\theta^T Q_{big} \theta + R + H_{smooth})$; $f = 2\theta^T Q_{big} \Phi \zeta(t)$ 。

2.4 约束条件

在设计模型预测控制器时, 需对系统的输出量、控制量及其增量施加约束。输出约束根据车辆所需跟踪的参考轨迹设定; 对于控制量 (即前轮转角) 及其增量^[24], 约束可设置为:

$$\begin{cases} -15^\circ \leq \delta_f \leq 15^\circ \\ -0.8^\circ \leq \Delta \delta_f \leq 0.8^\circ \end{cases} \quad (21)$$

基于 Matlab 平台, 采用内点法求解该优化问题, 得到未来的控制序列 \tilde{U} , 即 $\tilde{U} = [\Delta U \ \varepsilon]$ 。取该序列中的第一个元素作为 t 时刻的控制增量^[25], 将其与 $t-1$ 时刻的实际控制量相加, 可得到第 t 时刻应用于系统的实际控制量:

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (22)$$

系统通过循环执行包含预测、优化与反馈的滚动时域控制流程, 在线更新控制量, 从而实现目标轨迹的持续跟踪。至此, 基于自适应平滑模型预测控制 (MPC) 的智能汽车轨迹跟踪控制器设计完成。

3 路径跟踪仿真分析

为验证本文所提自适应平滑模型预测控制方法

的有效性 with 优越性, 基于 CarSim 与 Simulink 搭建联合仿真平台^[26]。在不同车速 (36, 54, 72 km/h) 与路面附着系数 (高附着 $\mu=0.85$, 低附着 $\mu=0.30$) 组合工况下, 采用本文方法与传统 MPC 及 LQR 控制器进行速度适应性与路面适应性实验, 对比分析不同控制器的路径跟踪性能, 综合评估本文方法控制精度、平顺性与鲁棒性方面的表现。实验采用 CarSim 内置的 B 级轿车模型提供高保真车辆动力学环境, 控制器在 Simulink 中搭建实现; 参考轨迹为包含直线与弯道段的复合路径, 具体如图 4; 车辆模型与控制器的主要参数分别见表 1, 2。

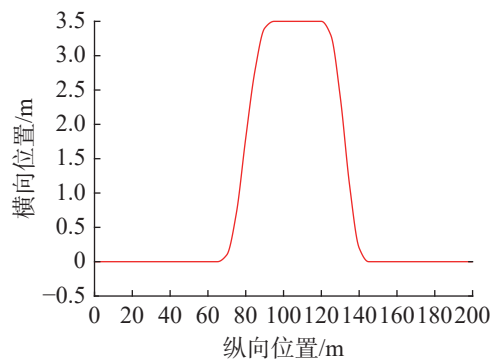


图 4 参考轨迹

Fig. 4 Reference trajectory

表 1 整车参数

Tab. 1 Vehicle parameters

参数	数值
整车质量/kg	1 416
质心到前轴的距离 a /mm	1 015
质心到前轴的距离 b /mm	1 895
质心高度/mm	540
绕 z 轴转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1 536.7
前轮侧偏刚度/($\text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$)	-112 600
后轮侧偏刚度/($\text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$)	-89 500

表 2 控制器参数

Tab. 2 Controller parameters

参数	数值
采样时间 T^s	0.01
控制时域 N_c	10
预测时域 N_p	25
重力加速度 g /(m/s^2)	9.8
状态权重矩阵 Q	diag(25,12,6,3)
控制输入权重矩阵 R	0.05

3.1 速度适应性验证

为验证改进 MPC 在不同速度下的适应能力, 在

固定高附着路面 ($\mu=0.85$) 条件下, 分别以 72, 54, 36 km/h 车速开展仿真, 对比各控制器的跟踪性能, 结果如图 5~7。

图 5(a) 显示: 改进 MPC 的横向偏差波动幅值最小, 系统约在 8 s 后收敛至稳态, 表现出良好的动态性能和鲁棒性; 传统 MPC 在 6~8 s 区间出现明显振荡, 最大横向偏差达 -0.75 m; LQR 在前期响应速度较快, 但稳态波动较大, 最大偏差约为 0.35 m。相对之下, 改进 MPC 的最大偏差仅为 0.22 m, 较 MPC 和 LQR 分别降低了约 70% 和 37%。由图 5(b) 可见: 改进 MPC 的前轮转角变化最为平稳, 输入连续且无明显突变, 波动幅度最小, 控制效果更为平稳。

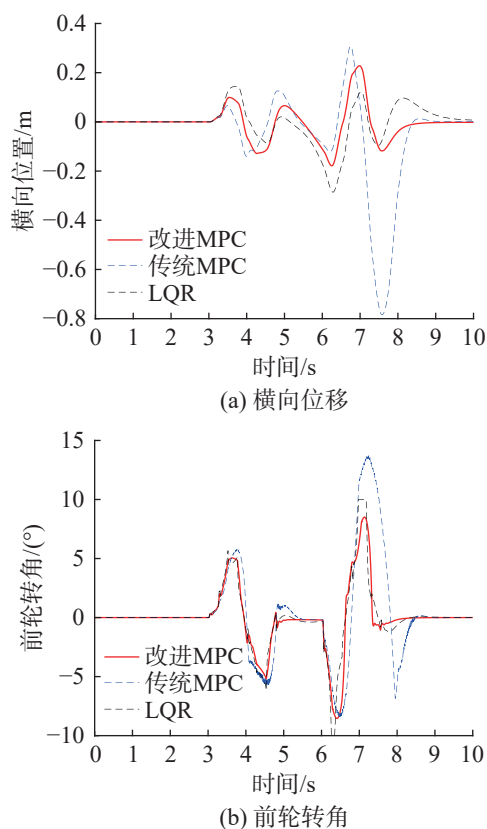


图5 车速 72 km/h 高附着路面的仿真结果

Fig. 5 Simulation results on high-adhesion road surface at vehicle speed of 72 km/h

根据 6(a) 的跟踪结果可看出: 改进 MPC 在峰值误差控制与瞬态抑制方面均显著优于传统 MPC 与 LQR。改进 MPC 的最大绝对横向误差约 0.13 m, 而传统 MPC 与 LQR 分别约 0.22, 0.23 m, 即改进 MPC 相较于后两者的最大误差降幅分别约 40.6% 与 44.2%。进一步分析图 6(b) 可知: 改进 MPC (红色实线) 的转角变化最为平稳, 控制输入连续且无明显突变, 其最大前轮转角约 8.2° , 波动范围在 -6° 至 8° 之间; 传统 MPC 在转向切换阶段存在明显抖动, 最

大转角达 13° , 波动范围更大; 而 LQR 在 7 s 左右出现显著的峰值过冲, 最大转角约 11° , 反映出其响应迅速但控制稳定性不足的特点。

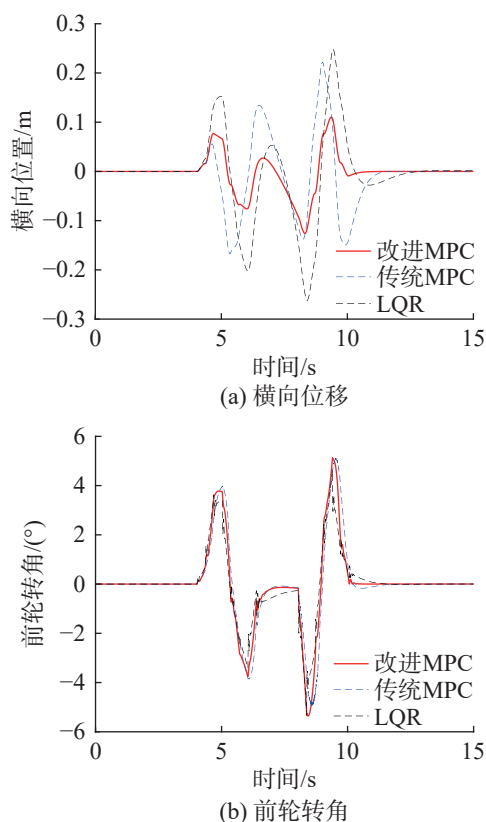
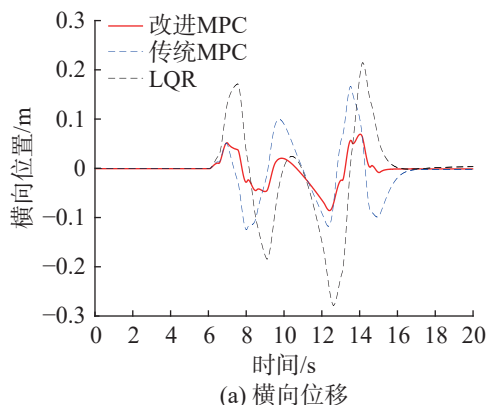


图6 车速 54 km/h 高附着路面的仿真结果

Fig. 6 Simulation results on high-adhesion road surface at vehicle speed of 54 km/h

根据图 7(a) 所示, 改进 MPC 控制器的最大横向误差约 0.08 m, 显著低于传统 MPC (约 0.15 m) 和 LQR (约 0.27 m), 降幅分别达 47% 与 70%, 体现出其在轨迹跟踪精度、稳定性与抗扰动能力上的优势。由图 7(b) 可见: 改进 MPC 输出的控制指令平滑稳定, 几乎无抖振, 与传统 MPC 的低频波动及 LQR 的高频抖振形成鲜明对比, 展现出更优的执行品质。



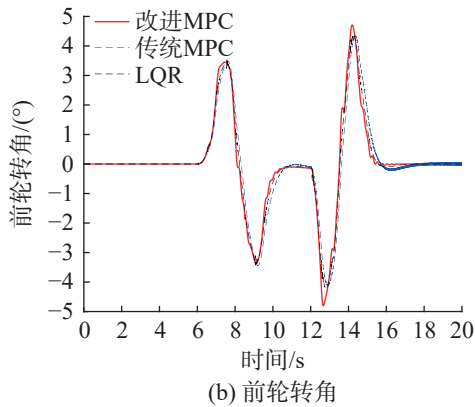


图7 车速 36 km/h 高附着路面的仿真结果

Fig. 7 Simulation results on high-adhesion road surface at vehicle speed of 36 km/h

综上所述可知改进 MPC 在 3 种不同速度下均展现出优于传统 MPC 与 LQR 的综合性能: 其横向跟踪误差始终最小, 收敛迅速且稳态波动极小, 动态响应与鲁棒性良好; 前轮转角输出平滑连续, 无剧烈抖动或过冲, 控制指令更符合执行器特性, 兼顾控制精度与工程实用性。相比于传统方法易出现的振荡、超调与高频抖动, 改进 MPC 凭借自适应优化机制, 在跨速度工况下实现了稳定精准与平顺的跟踪控制, 验证了其在复杂行驶环境中的强适应性与应用潜力。

3.2 路面适应性验证

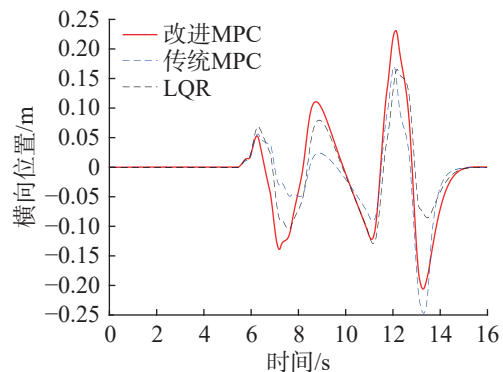
为检验改进 MPC 在不同路面附着条件下的鲁棒性, 在 40 km/h 条件下设置高附着 ($\mu=0.85$) 与低附着 ($\mu=0.30$) 路面工况进行仿真, 结果如图 8~9。

根据图 8(a) 所示, 在低附着路面 ($\mu=0.30$), 改进 MPC 的横向跟踪精度显著优于传统 MPC 与 LQR: 其最大横向误差控制在约 ± 0.12 m 内, 曲线平滑且收敛迅速, 表现出良好的动态响应与鲁棒性; 传统 MPC 最大误差达 ± 0.18 m, 波动剧烈并存在明显相位滞后, 反映其对路径曲率变化适应不足; LQR 最大误差达 ± 0.23 m, 稳态漂移严重, 尤其在二次转向阶段出现大幅偏离, 反映出线性反馈结构在非线系统中的固有局限。由图 8(b) 可见: 改进 MPC 的前轮转角响应平滑无抖振, 峰值最小 (约 $\pm 8^\circ$); 而传统 MPC 出现明显高频波动 (超过 $\pm 12^\circ$), LQR 响应中存在剧烈尖峰 (近 $\pm 15^\circ$)。

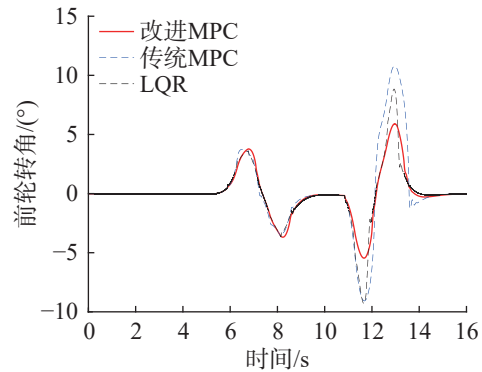
由图 9(a) 可看出: 在高附着路面 ($\mu=0.85$) 中, 改进 MPC 横向误差曲线波动最小、收敛最快, 最大误差控制在 ± 0.10 m 以内; 传统 MPC 误差幅值更大 (约 ± 0.15 m), 存在明显振荡与滞后; LQR 误差最显著 (达 ± 0.18 m), 稳态漂移严重, 路径转折处响应迟钝。由图 9(b) 看出: 改进 MPC 的前轮转角响应最平滑紧凑, 峰值在 $\pm 5^\circ$ 以内, 过渡自然无抖动; 传统

MPC 虽能基本跟随轨迹, 但存在轻微震荡与延迟; LQR 输出呈现剧烈跳变, 峰值超过 $\pm 6^\circ$, 控制粗糙且易引发执行器疲劳。

综上所述, 改进 MPC 在两类路面均展现出卓越的适应能力: 其横向跟踪误差始终最小、收敛最快, 转向指令平滑连续, 无抖振或过冲, 兼顾精度与执行器友好性; 相比之下, 传统 MPC 在低附着路面时易出现振荡与滞后, LQR 全程响应迟钝、控制粗糙。改进 MPC 通过在线优化与约束嵌入机制, 在复杂路面环境下仍能保持稳定、精准与平顺的控制输出, 验证了其在实际道路场景中具备良好的鲁棒性与工程适用性。



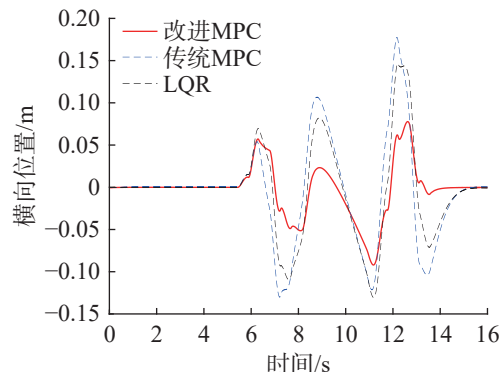
(a) 横向位移



(b) 前轮转角

图8 车速 40 km/h 高附着路面的仿真结果

Fig. 8 Simulation results on high-adhesion road surface at vehicle speed of 40 km/h



(a) 横向位移

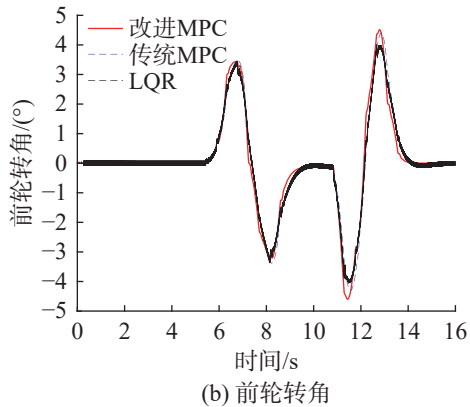


图9 车速 40 km/h 低附着路面的仿真结果

Fig. 9 Simulation results on low-adhesion road surface at vehicle speed of 40 km/h

4 结论

针对车辆轨迹跟踪过程中存在的横向误差大与控制输入突变问题,提出一种融合自适应机制与平滑项优化的模型预测控制策略。在增广车辆动力学模型的基础上,设计基于实时车速与综合误差的自适应调节机制,实现采样、预测与控制参数的动态调整;在目标函数中引入基于一阶与二阶差分的平滑惩罚项,有效抑制前轮转角的突变与抖振。跨工况仿真结果表明,所提方法在 72, 54, 36 km/h 多种车速下,其最大横向跟踪误差相较于传统 MPC 与 LQR 均显著降低,最高降幅超过 70%,同时前轮转角输出更为平滑连续,展现出优异的跟踪精度、动态稳定性与控制平顺性。此外,在高、低附着路面条件下均表现出良好的环境适应性与鲁棒性。然而,本研究尚未考虑纵向车速动态变化及其与横向运动的耦合效应。为此,后续研究将重点开展动态车速下的纵横协同控制、控制器参数自整定及实车验证,以提升系统在真实复杂交通场景中的实用性与可靠性。

参考文献:

- [1] 陈琦, 邸浩, 沈康宇. 基于 QPSO-MPC 的绳驱动连续体机器人轨迹跟踪控制 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(11):23-29.
CHEN Q, DI H, SHEN K Y. Trajectory tracking control of cable-driven continuum robot based on QPSO-MPC[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(11):23-29.
- [2] 龚建伟, 龚乘, 林云龙, 等. 智能车辆规划与控制策略学习方法综述 [J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(7):665-674.
GONG J W, GONG C, LIN Y L, et al. Review on machine learning methods for motion planning and control policy of intelligent vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(7):665-674.
- [3] WANG M, LYU X, CHEN J X, et al. Improved pure pursuit algorithm based path tracking method for autonomous vehicle[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2024, 28(4):1034-1042.
- [4] 王鑫, 凌铭, 饶启鹏, 等. 基于改进 Stanley 算法的无人车路径跟踪融合算法研究 [J]. 汽车技术, 2022(7):25-31.
WANG X, LING M, RAO Q P, et al. Research on fusion algorithm of unmanned vehicle path tracking based on improved Stanley algorithm[J]. Automobile Technology, 2022(7):25-31.
- [5] 靳欣宇, 张军, 刘元盛, 等. 基于 Stanley 算法的自适应最优预瞄模型研究 [J]. 计算机工程, 2018, 44(7):42-46.
JIN X Y, ZHANG J, LIU Y S, et al. Research on adaptive optimal preview model based on Stanley algorithm[J]. Computer Engineering, 2018, 44(7):42-46.
- [6] SARHADI P, NOEI A R, KHOSRAVI A. Model reference adaptive PID control with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 83:87-93.
- [7] HWANG C L, YANG C C, HUNG J Y. Path tracking of an autonomous ground vehicle with different payloads by hierarchical improved fuzzy dynamic sliding-mode control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(2):899-914.
- [8] ZHANG Q, KONG H F, LIU T K, et al. Adaptive model predictive control: based curved path-tracking strategy for autonomous vehicles under variable velocity[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2025, 47(8):1624-1638.
- [9] 李健康, 江本赤, 吴路路, 等. 基于改进蚁群算法的 AGV 全局路径规划 [J]. 安徽科技学院学报, 2023, 37(3):89-95.
LI J K, JIANG B C, WU L L, et al. AGV global path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2023, 37(3):89-95.
- [10] 潘世举, 李华, 苏致远, 等. 基于跟踪误差模型的智能车辆轨迹跟踪方法 [J]. 汽车工程, 2019, 41(9):1021-1027.
PAN S J, LI H, SU Z Y, et al. Trajectory tracking method for intelligent vehicles based on tracking-error model[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(9):1021-1027.
- [11] 蔡志鑫, 古永鹏, 董浩, 等. 基于 MPC 的无人驾驶汽车轨迹控制研究 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(1):24-27.
CAI Z X, GU Y P, DONG H, et al. Research on tracking of unmanned vehicle based on MPC[J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47(1):24-27.
- [12] 郭盼, 于蕾艳. 无人驾驶汽车路面自适应 MPC 轨迹跟踪控制 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(3):270-275,323.
GUO P, YU L Y. Trajectory tracking control of driverless vehicle based on road adaptive model predictive control[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(3):270-275,323.
- [13] 臧豫徽, 杨爱喜, 李兰友. 基于曲率自适应 LTV-MPC 的轨迹跟踪控制研究 [J]. 安徽工程大学学报, 2025, 40(1):22-30.
ZANG Y H, YANG A X, LI L Y. Trajectory tracking control method based on curvature-adaptive LTV-MPC[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2025, 40(1):

- 22–30.
- [14] 徐佳宝, 张国良, 汪坤. 基于增量 MPC 和转向角优化的泊车轨迹跟踪研究 [J]. 中国测试, 2024, 50(7):170–177.
XU J B, ZHANG G L, WANG K. Research on parking trajectory tracking based on incremental MPC and steering angle optimization[J]. *China Measurement & Test*, 2024, 50(7):170–177.
- [15] 任宏斌, 孙纪禹, 陈志铿, 等. 基于线性时变模型预测控制的实时抗噪高速车辆运动控制 [J]. 兵工学报, 2024, 45(12):4311–4322.
REN H B, SUN J Y, CHEN Z K. LTV-MPC-based real-time and anti-noise motion control for high-speed vehicle[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(12):4311–4322.
- [16] 吴勃夫, 徐晓, 陈自强, 等. 基于非线性 MPC 的电动赛车驱动防滑控制 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(2):182–188.
WU B F, XU X, CHEN Z Q, et al. Acceleration slip regulation of electric racing cars based on nonlinear MPC[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2024, 47(2):182–188.
- [17] 丁承君, 耿宇坤, 胡健鑫, 等. 基于自适应时域 MPC 的无人车轨迹跟踪控制 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(23):9883–9891.
DING C J, GENG Y K, HU J X, et al. Trajectory tracking control of unmanned vehicles based on MPC with adaptive horizon[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(23):9883–9891.
- [18] ZHANG K W, SUN Q, SHI Y. Trajectory tracking control of autonomous ground vehicles using adaptive learning MPC[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(12):5554–5564.
- [19] 程超, 贺容波, 何浩然, 等. 基于 DBO-LQR 和 MPC 的智能车轨迹跟踪控制 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):507–515.
CHENG C, HE R B, HE H R, et al. Intelligent vehicle trajectory tracking control based on DBO-LQR and MPC[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2024, 41(5):507–515.
- [20] 陈舒平, 熊光明, 陈慧岩, 等. 基于 MPC 的考虑时间最优速度的高速无人驾驶车辆路径跟踪和 PID 速度控制 [J]. 中南大学学报, 2020, 27(12):3702–3720.
CHEN S, XIONG G, CHEN H, et al. Path tracking and PID speed control of high-speed unmanned vehicles based on MPC considering time-optimal speed[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(12):3702–3720.
- [21] 谢宪毅, 金立生, 杜军彪, 等. 基于 MPC 的自动驾驶汽车轨迹跟踪控制 [J]. 机械设计, 2024, 41(S1):20–26.
XIE X Y, JIN L S, DU J B, et al. MPC-based trajectory tracking control for autonomous vehicles[J]. *Journal of Machine Design*, 2024, 41(S1):20–26.
- [22] WANG H Y, LIU B, PING X Y, et al. Path tracking control for autonomous vehicles based on an improved MPC[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:161064–161073.
- [23] 唐传茵, 赵懿峰, 赵亚峰, 等. 智能车辆轨迹跟踪控制方法研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(9):1297–1303.
TANG C Y, ZHAO Y F, ZHAO Y F, et al. Research on the trajectory tracking control method of intelligent vehicles[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(9):1297–1303.
- [24] NAN J R, GE Z Q, YE X C, et al. Model predictive control for autonomous vehicle path tracking through optimized kinematics[J]. *Results in Engineering*, 2024, 24:103123.
- [25] XU S B, PENG H E, TANG Y F. Preview path tracking control with delay compensation for autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(5):2979–2989.
- [26] LIU C L, PAN J, CHANG Y F. PID and LQR trajectory tracking control for an unmanned quadrotor helicopter: experimental studies[C]//2016 35th Chinese Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2016:10845–10850.

责任编辑:何莉

(上接第 605 页)

- [23] 杨西荣, 王兆麟, 罗雷, 等. 新型 ECAP 工艺制备超细晶材料研究进展 [J]. 稀有金属, 2025, 49(3):413–431.
YANG X R, WANG Z L, LUO L, et al. Progress in preparation of ultrafine grained materials by novel ECAP process[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2025, 49(3):413–431.
- [24] MONSCHHEIN S, RAGGER K S, ZÜGNER D, et al. Influence of the Ti content on the grain stability and the recrystallization behavior of Nb-alloyed high-strength low-alloyed steels[J]. *Steel Research International*, 2022, 93(7):2200094.
- [25] 李泽超, 郭飞虎, 时朋召, 等. 低温 HiB 钢全流程组织、织构演变及成品磁性能 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(4):432–440.
LI Z C, GUO F H, SHI P Z, et al. Whole process microstructure, texture evolution of low-temperature HiB steel and its finished magnetic properties[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2024, 41(4):432–440.
- [26] BHATTACHARYYA M, LANGELIER B, PURDY G R, et al. Effect of Mn and C on grain growth in Mn steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(2):905–914.
- [27] 康海军, 杨得草, 于立伟, 等. 热轧酸洗板 QStE460TM 制管开裂原因分析 [J]. 金属世界, 2017(3):73–76.
KANG H J, YANG D C, YU L W, et al. Causes analysis on cracking problem during pipe-making of hot-rolled pickling sheet QStE460TM[J]. *Metal World*, 2017(3):73–76.
- [28] WINZER N, BISCHOFF C, BRUGGER P, et al. Factors influencing the resistance of dual-phase steels to edge cracking[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 880:145334.
- [29] PARK S, JUNG J, CHO W, et al. Predictive dual-scale finite element simulation for hole expansion failure of ferrite-bainite steel[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 136:102900.

责任编辑:何莉