doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.005

基于模糊算法的农机编队转场多机协同控制方法

魏新华[1,2]　邓　屹[3]　崔鑫宇[3]　王晔飞[3]　章少岑[3]　杨家鑫[3]

(1. 江苏大学智能农机装备理论与技术重点实验室, 镇江 212013;
2. 省部共建现代农业装备与技术协同创新中心, 镇江 212013;
3. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对协同控制在农机转场场景下受复杂环境影响导致的响应速度慢、控制精度低、稳定性差、鲁棒性不足等问题,提出一种农机编队转场多机协同控制方法。搭建主机人工驾驶领航、从机自动跟随的多机协同模型,基于弗莱纳坐标转换将协同控制解耦为横向、纵向控制,采用模型预测控制算法设计纵向控制器以实现机组间相对距离保持及速度、加速度跟随,采用纯追踪算法设计横向控制器以实现从机沿主机轨迹行驶,引入模糊算法实时调整关键控制系数以实现控制效果优化。基于 CarSim/Simulink 平台设计多种转场典型工况对本文方法进行仿真试验分析,结果表明相比传统控制方法本文方法具备更可靠优越的性能,并基于智能拖拉机机组开展实车试验验证,结果表明机组轨迹横向误差小于 0.090 m,速度误差小于 0.570 m/s,相对距离误差小于 0.169 m,加速度误差小于 0.252 m/s^2,均能渐进稳定满足农机编队转场实际需求。

关键词: 农机转场; 多机协同; 纯追踪算法; 模型预测控制算法; 模糊算法

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0048-13　　**OSID**:

Multi-machine Collaborative Control Method of Agricultural Machinery Formation Transfer Based on Fuzzy Algorithm

WEI Xinhua[1,2]　DENG Yi[3]　CUI Xinyu[3]　WANG Yefei[3]　ZHANG Shaocen[3]　YANG Jiaxin[3]

(1. *Key Laboratory for Theory and Technology of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Jiangsu Province and Education Ministry Co-sponsored Synergistic Innovation Center of Modern Agricultural Equipment, Zhenjiang* 212013, *China*
3. *School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of slow response speed, low control accuracy, poor stability, and insufficient robustness caused by the influence of complex environment of collaborative control in agricultural machinery transfer scenarios, a multi-machine collaborative control method is proposed for agricultural machinery formation transfer. The multi-machine collaborative model was constructed in which the host machine drived and navigated manually and the slave machines followed automatically. Based on the Frenet coordinate transformation, the collaborative control was decoupled into horizontal and vertical control, and the longitudinal controller was designed by using the model predictive control algorithm to achieve the maintenance of the relative distance and the following of speed and acceleration among the units, and the horizontal controller was designed by using the pure tracking algorithm to achieve the slave machines to follow the trajectory of the host machine and the introduction of fuzzy algorithm adjusted the key control coefficients to optimize the control effect in real time. Based on the CarSim/Simulink platform to design a variety of transfer typical working conditions on the designed method for simulation test analysis, comparisons showed that compared with the traditional control methods it had a more reliable and superior performance, and based on the intelligent tractor unit to carry out the real vehicle test verification, the results showed that the relative speed error was less than

收稿日期: 2024-10-20　修回日期: 2024-11-04

基金项目: 江苏省农业自主创新项目(CX(22)2040)、江苏大学农业工程学部项目(NGXB20240105)、国家重点研发计划项目(2022ZD0115804)和江苏省重点研发计划项目(BE2021313)

作者简介: 魏新华(1972—),男,研究员,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: wei_xh@126.com

0.570 m/s, the relative distance error was less than 0.169 m, the acceleration error was less than 0.252 m/s^2, the lateral error was less than 0.090 m, all of them can gradually and steadily meet the actual needs of agricultural machinery formation transfer.

Key words: agricultural machinery transfer; multi-machine collaborative; pure pursuit algorithm; model predictive control algorithm; fuzzy algorithm

0　引言

现代农业逐步向机械化、规模化转型，传统的单机作业模式已无法满足现代农业的高标准需求[1-2]，协同控制技术因其可有效提高作业效率、降低生产成本[3-5]，在耕种管收等农业环节中得到广泛应用[6-7]，然而由于转场环境的多变性和驾驶特征的复杂性，机库田间转场过程中农机协同控制实现难度较大，当前仍缺乏相应研究，导致驾驶员往返接送农机陷入“省力不省工”的困境[8]。

近年来针对农机协同控制的研究多集中于田间场景下独立的横向、纵向控制[9-16]。而在车辆领域协同控制已取得了显著成果[17-18]，其中自适应巡航控制应用普遍，其借助传感器获取周围路况信息[19]，结合 PID 控制、最优控制、滑模变结构控制等方法实现车辆间定速巡航、车距保持[20-21]，但控制效果受复杂交通因素影响而受到限制[22]。而模型预测控制（Model predictive control，MPC）算法可有效处理多目标多约束问题[23]，文献[24]将 MPC 算法与线性控制器结合，增强了系统稳定性，文献[25]通过动态调整目标函数中权重系数克服非实时性和突然性变化，以灵活应对不同车况，文献[26]结合智能驾驶员模型和预瞄跟随理论设计横纵向协同控制器，使车队实现良好的跟驰效果和稳定的路径跟踪。

针对目前农机协同控制研究中存在的独立横向、纵向控制方法无法适应实际作业，应用场景局限于卸粮、收获等田间作业，无法满足转场场景复杂需求等问题，本文借鉴车辆领域研究成果，设计一种农机编队转场多机协同控制方法，通过将协同控制横纵向解耦，基于纯追踪（Pure pursuit，PP）算法和 MPC 算法设计横向、纵向控制器，并基于模糊算法调整控制参数以提高对各种环境工况的适应性。

1　总体控制方案

根据实际农机编队转场需求，建立人工驾驶一台领航主机、多台从机依次自动跟随的多机协同模型并设计多机协同控制器。先采集主从机位置、速度、加速度等状态信息传输至控制器，经解算获得控制量后下发至各从机实现机组协同控制。其中，通过弗莱纳（Frenet）坐标转换将控制器的横纵向控制解耦；横向控制器采用曲线系数方法将主机历史轨迹拟合为从机参考路径，并基于 PP 算法求解前轮转角控制量实现方向控制；纵向控制器基于 MPC 算法设计上层控制器求解期望加速度，并基于下层控制器将期望加速度转化为电子油门电压、制动踏板行程控制量实现速度控制；模糊控制器优化纵向控制中权重系数，横向控制中前视距离系数；将从机速度作为耦合点实现控制闭环，如图 1 所示。

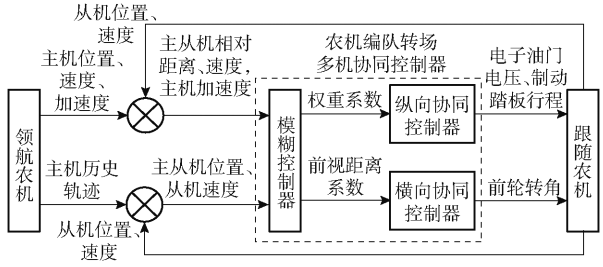


图 1　多机协同控制框图

Fig. 1　Multi-machine cooperative control block diagram

2　多机协同控制器设计

2.1　横纵向控制解耦

为使所设计横向、纵向控制器互不影响，将当前位置 P_c 从笛卡尔（Cartesian）坐标转换为 Frenet 坐标，如图 2 所示，该坐标系以参考路径为基础，路径起点为原点 P_0，切向量、法向量的方向为纵向、横向，从 P_0 至投影点 P_r 的累加距离为纵向距离 s_f，道路偏移量为横向距离 d_f。因此可忽略路径曲率影响，实现横纵向运动解耦，纵向控制器只需考虑间距、速度和加速度等纵向目标，不受农机转向影响，横向控制器则考虑前轮转角等横向目标。

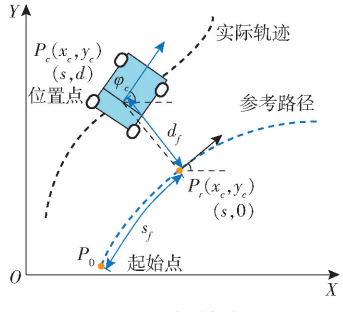


图 2　坐标转换图

Fig. 2　Coordinate transformation

用 x_c、y_c、v_c、a_c、φ_c、κ_c 表示 P_c 在 Cartesian 坐标系下的横坐标、纵坐标、速度、加速度、航向角及曲

率，s_f、$\dot{s}_f$、$\ddot{s}_f$、d_f、$\dot{d}_f$、$\ddot{d}_f$ 表示在 Frenet 坐标系下的纵向坐标、速度、加速度和横向坐标、速度、加速度。相应地 P_r 在两个坐标系中可分别表示为$(x_r, y_r, \varphi_r, \kappa_r)$、$(s_r, 0)$，坐标系间转换关系为[27]

$$\begin{cases} s_f = s_r \\ \dot{s}_f = \dfrac{v_c\cos(\varphi_c-\varphi_r)}{1-\kappa_r d_f} \\ \ddot{s}_f = \dfrac{a_c\cos(\varphi_c-\varphi_r) - \dot{s}^2\left[\dot{d}\left(\kappa_c\dfrac{1-\kappa_r d_f}{\cos(\varphi_c-\varphi_r)}-\kappa_r\right)-(\dot{\kappa}_r d_f+\kappa_r\dot{d}_f)\right]}{1-\kappa_r d_f} \\ d_f = \sin((y_c-y_r)\cos\varphi_r-(x_c-x_r)\sin\varphi_r)\sqrt{(x_c-x_r)^2+(y_c-y_r)^2} \\ \dot{d}_f = (1-\kappa_r d_f)\tan(\varphi-\varphi_r) \\ \ddot{d}_f = (\dot{\kappa}_r d_f+\kappa_r\dot{d}_f)\tan(\varphi-\varphi_r)+\dfrac{1-\kappa_r d_f}{\cos^2(\varphi-\varphi_r)}\left(\dfrac{1-\kappa_r d_f}{\cos(\varphi-\varphi_r)}\kappa_c-\kappa_r\right) \end{cases} \tag{1}$$

2.2 横向协同控制器设计

为实现农机转场中从机“一跟一”依次跟随主机轨迹行驶，如图 3 所示，需先以序列形式存储前机历史轨迹点，再将其拟合生成从机参考路径，并进一步选取合适索引点，采用 PP 算法对从机进行横向协同控制，实现从机对主机轨迹跟随。

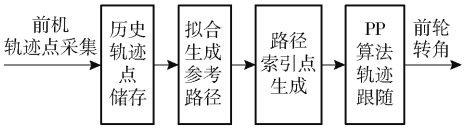


图 3 横向协同控制框图

Fig. 3 Lateral cooperative control framework

生成参考路径需先使用中值滤波算法去除前机行驶过程中实测位置数据噪声，再采用自由边界三次样条插值算法将轨迹点拟合生成平滑曲线表示参考路径[28]，在 Frenet 坐标系下沿着路径方向以一定的距离间隔均匀采样，选取位置点作为从机路径索引点，实现精准横向控制，如图 4 所示。

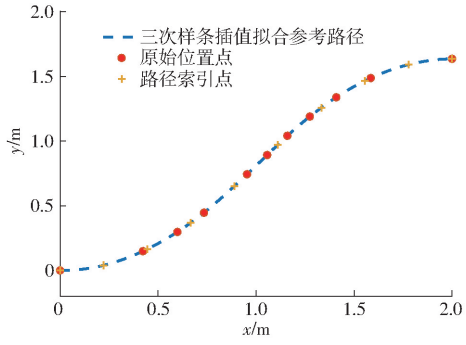


图 4 参考路径生成图

Fig. 4 Reference path generation

PP 算法是农机广泛应用的几何追踪横向控制方法，如图 5 所示，该方法将轴距为 L_a 的农机简化为二轮车模型，通过前视距离 I_d 在前方参考路径上匹配合适的预瞄点 P_P，选择农机后轴位置 P_B 为切点、纵向机身方向为切线获得偏航角 β，调整前轮转角 δ 使农机沿着一条半径为 R_a 圆弧行驶到预瞄点。

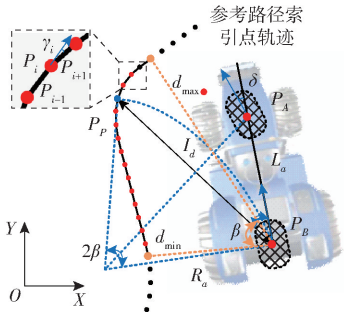


图 5 纯追踪算法几何示意图

Fig. 5 Geometric schematic of pure pursuit algorithm

由正弦定理与阿克曼转向模型可得

$$\frac{I_d}{\sin(2\beta)} = \frac{R_a}{\sin\left(\dfrac{\pi}{2}-\beta\right)} \tag{2}$$

$$\delta = \arctan\frac{L_a}{R_a} \tag{3}$$

由式(2)、(3)联立可得

$$\delta = \arctan\frac{2L_a\sin\beta}{I_d} \tag{4}$$

为确保农机准确稳定地沿目标路径行驶，驾驶员需密切关注目标路径的前视区域，可用最短前视距离 d_{min}、最长前视距离 d_{max} 分别确定前视区域的起点和终点，因此路径弯曲程度 Q_C 可由前视区域内相邻轨迹点 P_i 两两连接的相邻折线夹角 γ_i 总和定义，即

$$Q_C = \sum_{i=1}^{n_q}\gamma_i \tag{5}$$

其中

$$\gamma_i = \arccos\frac{\boldsymbol{l}_{P_{i-1}P_i}\cdot\boldsymbol{l}_{P_iP_{i+1}}}{|\boldsymbol{l}_{P_{i-1}P_i}|\cdot|\boldsymbol{l}_{P_iP_{i+1}}|} \tag{6}$$

式中 n_q——前视区域内折线数量

2.3 纵向协同控制器设计

为实现农机机组转场过程中相对距离、车速、加

速度等目标的协调控制，如图 6 所示，建立包含协同性、稳定性、经济性的多目标函数 MPC 控制器以求解期望加速度，并设计下层控制器将期望加速度转化为农机具体执行部件的期望控制量，使农机实际加速度能够准确跟踪期望加速度。

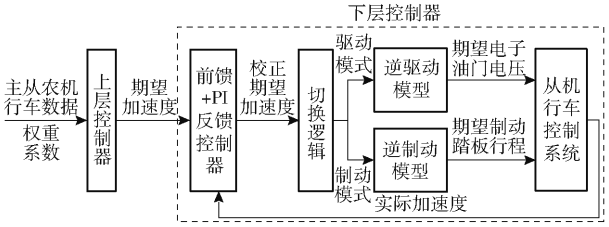


图 6　纵向协同控制框图

Fig. 6　Longitudinal cooperative control framework

2.3.1　纵向上层控制器设计

根据主从农机之间的纵向动力学特性，取机间相对距离、从机速度、机间相对速度、从机加速度、从机加速度变化率构成状态变量 $\boldsymbol{x}(k)=(D_r(k),v(k),V_r(k),a(k),j(k))$，取期望加速度 $a_{\mathrm{des}}(k)$ 为系统输入 $\boldsymbol{u}_1(k)$，取前车加速度 $a_1(k)$ 为系统扰动 $\boldsymbol{u}_2(k)$，建立系统离散状态空间方程模型为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_1(k)+\boldsymbol{G}\boldsymbol{u}_2(k) \tag{7}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1&0&T&-\frac{1}{2}T^2&0\\0&1&0&T&0\\0&0&1&-T&0\\0&0&0&1-\frac{T}{\tau}&0\\0&0&0&-\frac{1}{\tau}&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\\frac{T}{\tau}\\\frac{1}{\tau}\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}\frac{T^2}{2}\\0\\T\\0\\0\end{bmatrix}$$

式中　T——控制系统采样周期

τ——下层控制器控制时间常数

为实现协同转场过程中跟随平稳、间距适合及能源消耗较少的纵向控制目标，选取协同性能、稳定性能、经济性能作为性能指标进行分析设计。

编队转场过程中为保证协同性能，需防止农机间间距过大导致他车驶入或过小导致追尾碰撞，农机间实际相对距离趋向期望相对距离，从机速度趋向前机速度，相对距离误差 ΔD、相对速度误差 ΔV 趋于 0，因此协同性能控制目标函数表示为

$$\begin{cases}\lim\limits_{k\to\infty}\Delta D=D_r-D_{des}=0\\\lim\limits_{k\to\infty}\Delta V=V_r=0\end{cases} \tag{8}$$

其中　$D_{des}(k)=v(k)t_h+d_0$

式中　D_{des}——期望相对距离

t_h——固定车间时距

d_0——最小安全距离

农机悬挂质量较大农机具或道路坡度变化时产生的大幅度速度、加速度变化会导致农机具损坏概率增加，且农机能源消耗较大，燃油消耗量会随着加速度增加相应增长，为实现稳定作业、节能省油，需农机加速度、加速度变化率更小更缓，因此稳定性、燃油经济性控制目标表示为

$$\begin{cases}\lim\limits_{k\to\infty}a(k)=0\\\lim\limits_{k\to\infty}j(k)=0\end{cases} \tag{9}$$

因此取 $\boldsymbol{y}(k)=(D_r(k),V_r(k),a(k),j(k))$ 为系统输出，可搭建状态空间方程

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{D} \tag{10}$$

其中

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}1&-t_h&0&0&0\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}d_0\\0\\0\\0\end{bmatrix}$$

引入反馈校正机制修正模型预测值与实际值之间的误差以提升模型鲁棒性

$$\boldsymbol{e}(k)=\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}_p(k|k-1) \tag{11}$$

式中　$\boldsymbol{x}_p(k|k-1)$——$k-1$ 时刻预测量

将预测时域设定为 N_p，控制时域设定为 N_c，满足条件 $N_p\geqslant N_c$，假设在控制时域之外的控制量维持不变，驾驶干扰在控制时域时刻之后也保持恒定，则式(7)、(10)可进一步表述为

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_p=\boldsymbol{A}_p\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_p\boldsymbol{U}_1(k)+\boldsymbol{G}_p\boldsymbol{U}_2(k)+\boldsymbol{F}_p\boldsymbol{e}(k)\\\boldsymbol{Y}_p=\boldsymbol{C}_p\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{E}_p\boldsymbol{U}_1(k)+\boldsymbol{H}_p\boldsymbol{U}_2(k)+\boldsymbol{L}_p\boldsymbol{e}(k)-\boldsymbol{D}_p\end{cases} \tag{12}$$

其中

$$\boldsymbol{X}_p=[\boldsymbol{x}_p(k+1|k)\quad \boldsymbol{x}_p(k+2|k)\quad \cdots\quad \boldsymbol{x}_p(k+N_p|k)]^{\mathrm{T}}_{N_p\times 1}$$

$$\boldsymbol{Y}_p=[\boldsymbol{y}_p(k+1|k)\quad \boldsymbol{y}_p(k+2|k)\quad \cdots\quad \boldsymbol{y}_p(k+N_p|k)]^{\mathrm{T}}_{N_p\times 1}$$

$$\boldsymbol{U}_1=[\boldsymbol{u}_1(k)\quad \boldsymbol{u}_1(k+1)\quad \cdots\quad \boldsymbol{u}_1(k+N_c-1)]^{\mathrm{T}}_{N_p\times 1}$$

$$\boldsymbol{U}_2=[\boldsymbol{u}_2(k)\quad \boldsymbol{u}_2(k)\quad \cdots\quad \boldsymbol{u}_2(k)]^{\mathrm{T}}_{N_p\times 1}$$

式中　$\boldsymbol{X}_p$、$\boldsymbol{Y}_p$——预测时域内状态量、输出量序列

$\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{U}_2$——预测时域内控制量、扰动量序列

$\boldsymbol{x}_p$、$\boldsymbol{y}_p$——误差校正后的预测量

令 $\boldsymbol{F}=\mathrm{diag}(f_d,f_v,f_a,f_j,f_{a_{des}})$ 为校正矩阵（$f_{a_{des}}$ 为校正系数），式(12)中系数矩阵为

$$\boldsymbol{B}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}&\boldsymbol{O}&\cdots&\boldsymbol{O}\\\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}&\boldsymbol{B}&\cdots&\boldsymbol{O}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\\boldsymbol{A}^{N_c}\boldsymbol{B}&\boldsymbol{A}^{N_c-1}\boldsymbol{B}&\cdots&\boldsymbol{B}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\\boldsymbol{A}^{N_c-1}\boldsymbol{B}&\boldsymbol{A}^{N_c-2}\boldsymbol{B}&\cdots&\boldsymbol{A}^{N_p-N_c}\boldsymbol{B}\end{bmatrix}_{N_p\times N_c}$$

$$\boldsymbol{A}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}\\ \boldsymbol{A}^2\\ \vdots\\ \boldsymbol{A}^{N_p}\end{bmatrix}_{N_p\times 1}\quad \boldsymbol{C}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{CA}\\ \boldsymbol{CA}^2\\ \vdots\\ \boldsymbol{CA}^{N_p}\end{bmatrix}_{N_p\times 1}\quad \boldsymbol{D}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{D}\\ \boldsymbol{D}\\ \vdots\\ \boldsymbol{D}\end{bmatrix}_{N_p\times 1}$$

$$\boldsymbol{E}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{CB} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{CAB} & \boldsymbol{CB} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{CA}^{N_c}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{CA}^{N_c-1}\boldsymbol{B} & \cdots & \boldsymbol{CB}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{CA}^{N_p-1}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{CA}^{N_p-2}\boldsymbol{B} & \cdots & \boldsymbol{CA}^{N_p-N_c}\boldsymbol{B}\end{bmatrix}_{N_p\times N_c}$$

$$\boldsymbol{F}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}\\ \boldsymbol{F}^2\\ \vdots\\ \boldsymbol{F}^{N_p}\end{bmatrix}_{N_p\times 1}\quad \boldsymbol{G}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{G} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{AG} & \boldsymbol{G} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{A}^{N_c}\boldsymbol{G} & \boldsymbol{A}^{N_c-1}\boldsymbol{G} & \cdots & \boldsymbol{G}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{A}^{N_p-1}\boldsymbol{G} & \boldsymbol{A}^{N_p-2}\boldsymbol{G} & \cdots & \boldsymbol{A}^{N_p-N_c}\boldsymbol{G}\end{bmatrix}_{N_p\times N_c}$$

$$\boldsymbol{L}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{CF}\\ \boldsymbol{CF}^2\\ \vdots\\ \boldsymbol{CF}^{N_p}\end{bmatrix}_{N_p\times 1}\quad \boldsymbol{H}_p=\begin{bmatrix}\boldsymbol{CG} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{CAG} & \boldsymbol{CG} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{CA}^{N_c}\boldsymbol{G} & \boldsymbol{CA}^{N_c-1}\boldsymbol{G} & \cdots & \boldsymbol{CG}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{CA}^{N_p-1}\boldsymbol{G} & \boldsymbol{CA}^{N_p-2}\boldsymbol{G} & \cdots & \boldsymbol{CA}^{N_p-N_c}\boldsymbol{G}\end{bmatrix}_{N_p\times N_c}$$

为确保优化问题存在可行解,基于硬约束条件引入了松弛因子进行选择性松弛化调整,其中相对距离是保证行驶安全的关键,将其约束作为硬约束,则约束条件为

$$\begin{cases}D_r\geqslant D_{r\min}+\gamma_d\varepsilon_{d\min}\\ v_{\min}+\gamma_v\varepsilon_{v\min}\leqslant v(k)\leqslant v_{\max}+\gamma_v\varepsilon_{v\max}\\ a_{\min}+\gamma_a\varepsilon_{a\min}\leqslant a(k)\leqslant a_{\max}+\gamma_a\varepsilon_{a\max}\\ j_{\min}+\gamma_j\varepsilon_{j\min}\leqslant j(k)\leqslant j_{\max}+\gamma_j\varepsilon_{j\max}\\ a_{des\min}+\gamma_{a_{des}}\varepsilon_{a_{des}\min}\leqslant a_{des}(k)\leqslant a_{des\max}+\gamma_{a_{des}}\varepsilon_{a_{des}\max}\end{cases}\tag{13}$$

式中 $D_{r\min}$、$v_{\min}$、$a_{\min}$、$j_{\min}$、$a_{des\min}$——参数最小值

$v_{\max}$、$a_{\max}$、$j_{\max}$、$a_{des\max}$——参数最大值

γ_v、γ_a、γ_j、$\gamma_{a_{des}}$——松弛因子

$\varepsilon_{d\min}$、$\varepsilon_{v\min}$、$\varepsilon_{a\min}$、$\varepsilon_{j\min}$、$\varepsilon_{a_{des}\min}$——约束下界松弛系数,$\varepsilon_{d\min}=0$,其余均小于0

$\varepsilon_{v\max}$、$\varepsilon_{a\max}$、$\varepsilon_{j\max}$、$\varepsilon_{a_{des}\max}$——约束上界松弛系数,均大于0

为实现系统控制输出沿平滑曲线到达预设值,引入指数衰减函数 $\boldsymbol{y}_{ref}$,以加权方式整理推导出性能代价目标函数为

$$\begin{aligned}\tilde{J}=&\sum_{i=1}^{N_P}[\boldsymbol{y}_p(k+i|k)-\boldsymbol{y}_{ref}(k+i|k)]^{\mathrm{T}}\cdot\\ &\boldsymbol{Q}[\boldsymbol{y}_p(k+i|k)-\boldsymbol{y}_{ref}(k+i|k)]+\\ &\sum_{i=1}^{N_P}\boldsymbol{u}_1(k+i)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}_1(k+i)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{\gamma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\zeta}\boldsymbol{\gamma}\end{aligned}\tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{y}_{ref}(k+i)=\boldsymbol{\Lambda}^i\boldsymbol{y}(k)$

$\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(q_d,q_v,q_a,q_j)$

$\boldsymbol{R}=q_{des}$

式中 $\boldsymbol{\Lambda}$——参考轨迹系数矩阵

$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$——输出量、控制量权重系数矩阵

$\boldsymbol{\gamma}$——松弛因子矩阵

$\boldsymbol{\zeta}$——松弛因子权重系数矩阵

最终推导带约束的二次规划函数在线求解问题,并在过程中自动调整求解可行域,获得满足约束条件、性能指标最优的控制序列,将第1个元素作为期望加速度传输给下层控制器,即

$$\begin{cases}\min(\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{U}+2\boldsymbol{f}\boldsymbol{U})\\ \text{s.t. }\boldsymbol{A}_u\boldsymbol{U}\leqslant\boldsymbol{b}_u\end{cases}\tag{15}$$

其中

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\widetilde{\boldsymbol{R}}+\boldsymbol{E}_p^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{E}_p & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O} & \boldsymbol{\zeta}\end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{f}=[&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{C}_p^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\Lambda)\widetilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{E}_p+\boldsymbol{U}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_p^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{E}_p-\\ &(\boldsymbol{D}_p^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\Lambda)\widetilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{E}_p+\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}_p\widetilde{\boldsymbol{Q}}\boldsymbol{E}_p\quad\boldsymbol{O}]\end{aligned}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{Q}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{R}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & \cdots & \boldsymbol{O}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{R}\end{bmatrix}$$

式中 $\boldsymbol{U}$——控制量及松弛因子矩阵

$\boldsymbol{A}_u$、$\boldsymbol{b}_u$——约束条件系数、常数项矩阵

2.3.2 纵向下层控制器设计

为将上层控制器所得期望加速度转化为具体可执行控制量,设计前馈加PI反馈下层控制器实现误差反馈调节,快速精确响应。不考虑坡道阻力分析农机纵向受力及运动特性,可建立纵向运动方程

$$ma_{des}=\frac{M_gN_o\eta_t}{r_w}T_{des}-K_pP_{des}-\frac{C_dA_iv^2}{21.15}-mgf_z\tag{16}$$

式中 M_g、N_o——变速器、主减速传动比

T_{des}——期望发动机转矩

P_{des}——期望制动压力

η_t——机械效率 r_w——车轮半径

K_p——制动转化系数

C_d、f_z——空气、滚动阻力系数

A_i——迎风面积 m——整机质量

g——重力加速度

驱动控制根据发动机转矩 T_{des}、发动机转速 n_e 和图 7 所示逆 MAP 表通过查表法获得相应节气门开度 α_{thr}，来调节农机电子油门电压控制电子油门。

$$\alpha_{thr}=f(T_{des},n_e) \tag{17}$$

其中

$$n_e=0.377\frac{vr_w}{M_gN_o}$$

$$T_{des}=\frac{\left(ma_{des}+\dfrac{C_dAv^2}{21.15}+mgf+mg\sin\theta\right)r_w}{M_gN_o\eta_t}$$

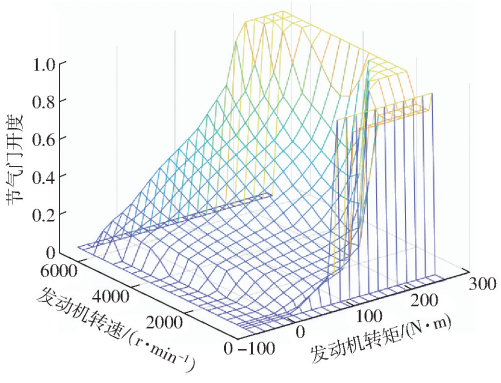


图 7　发动机转速转矩逆 MAP 图

Fig. 7　Engine speed torque inverse MAP

制动控制通过解算制动压力 P_{des} 来调节农机制动踏板行程控制制动电动推杆实现，即

$$P_{des}=\left|\frac{ma_{des}+\dfrac{C_dAv^2}{21.15}+mgf+mg\sin\theta}{K_p}\right| \tag{18}$$

为防止行驶过程中扰动导致控制模式频繁切换影响控制精度、损伤部件，需设计合理的模式切换策略，以无驱动、制动控制下滑行的阻力加速度 a_{res} 为参考，并给定宽度 h 为 0.1 m/s^2 的缓冲区间。$a_{des}\geqslant a_{res}+h$ 时切换为驱动控制；$a_{res}-h\leqslant a_{des}<a_{res}+h$ 时保持当前控制状态；$a_{des}<a_{res}-h$ 时切换为制动控制。

2.4　模糊控制器设计

2.4.1　纵向模糊权重系数控制器设计

基于 MPC 算法的纵向上层控制器中单一权重系数适应性常受农机转场过程中复杂环境、异常工况限制，因此采用模糊控制实时调节目标函数中各权重系数满足各个工况需求，提升控制效果。

当相对距离、相对速度误差权重系数 q_d、q_v 越大，控制器偏重协同性能、响应迅速，但频繁加减速引起超调振荡；从机加速度、加速度变化率权重系数 q_a、q_j 越大则偏重稳定性能、响应平稳，但限制响应速度、影响安全，根据工况调整权重系数：当 $\Delta D<0$，ΔD 越小碰撞追尾可能性越大，应快速增加 q_d；若 $\Delta V>0$，ΔV 越大应缓慢增加 q_v，缓慢减小 q_a、q_j 使从机缓加速制动平稳响应；若 $\Delta V<0$，ΔV 越小应快速增加 q_v，快速减小 q_a、q_j 使从机紧急制动保证安全。当 $\Delta V>0$，ΔD 越大插入他车可能性越大，可缓慢增加 q_d；若 $\Delta V>0$，ΔV 越大应适当增加 q_v，适当减小 q_a、q_j 使从机加速防止间距过大；若 $\Delta V<0$，ΔV 越小应缓慢增加 q_v，缓慢减小 q_a、q_j 使从机缓减速制动平稳响应。

其中 q_a 调整趋势与 q_j 一致，因此以 ΔD、ΔV 为模糊控制输入，q_d、q_v、q_a 为输出，设定 ΔD 论域为 $[-10,10]$，ΔV 论域为 $[-3,3]$，设定其模糊集为{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}，对应{NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}，设定 q_d、q_a、q_j 论域为[0,1]，设定其模糊集为{极小、小、中、大、极大}，对应{VS、S、M、B、VB}，采用三角隶属函数对输入输出进行模糊化处理，所建立输入输出关系模糊曲面如图 8 所示。

2.4.2　横向模糊前视距离系数控制器设计

在基于 PP 算法的横向控制器设计中前视距离是决定算法控制精度的关键，若过大农机跟踪平滑、但可能响应缓慢导致转角转向不足，过小时追踪快速、但可能欠阻尼导致不稳定振荡，因在机库田间转场过程中路况多弯曲折，故结合参考路径弯曲程度 Q_C 和从机速度 v 动态调整确认前视距离，根据驾驶员经验调整前视距离 l_d：当 v 越大时，近处路况参考意义不大，选择远处路况，增长 l_d 保证跟踪稳定；当 Q_C 越大时，横向误差增大，注意近处路况，缩短 l_d 保证跟踪精确。

因此以 Q_C、v 为模糊控制输入，l_d 为输出，设定 v

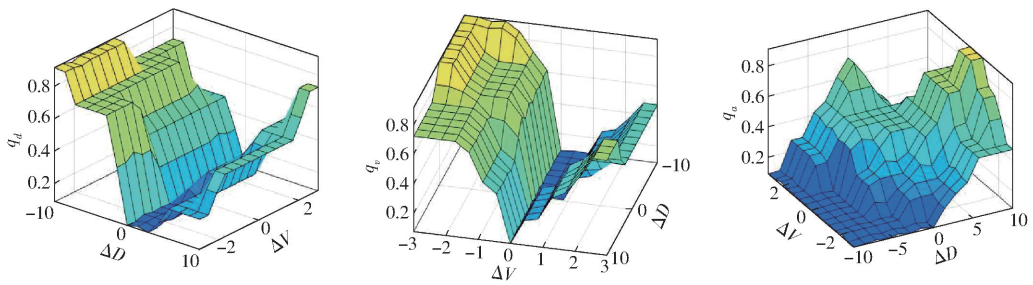


图 8　权重系数模糊曲面

Fig. 8　Fuzzy surface of weighting coefficients

论域为[0,40],Q_c 论域为[0,2],l_d 论域确定为[0.5,2.5],设定其模糊集为{极小、小、中、大、极大},对应{VS、S、M、B、VB},建立输入输出关系如图 9 所示。

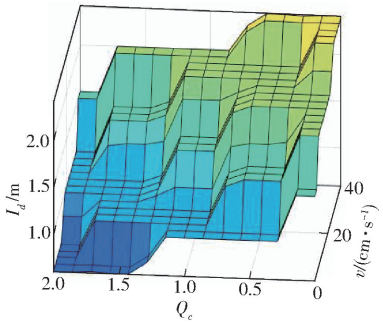


图 9 前视距离系数模糊曲面

Fig. 9 Fuzzy surface of forward viewing distance coefficient

3 仿真

3.1 仿真试验平台搭建

为验证多机协同控制器有效性,在 CarSim 仿真环境下建立由 1 台主机和 2 台从机构成的自动驾驶农机机组模型和转场道路模型,如图 10 所示;在 Matlab/Simulink 仿真环境下建立多机协同控制器模型,如图 11 所示,联合搭建农机编队场协同控制系统仿真平台进行仿真试验,参考实车试验对象:道依茨法尔 CD2204 型拖拉机厂家手册及试验测量数据,设置农机模型的仿真参数如表 1 所示。

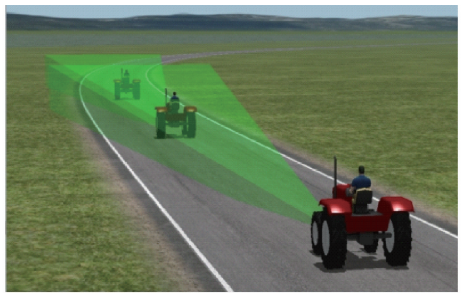


图 10 多机协同仿真场景

Fig. 10 Multi-machine cooperative simulation scenario

3.2 仿真试验验证

设计 3 种转场典型工况,分别对本文及传统控制器的纵向、横向、协同控制性能进行仿真验证。

3.2.1 横向控制性能仿真试验

在单移线路况下设置机组主从机以速度 4 m/s 及相对距离 7.8 m 匀速行驶转场,在总路程 40 ~ 180 m 范围内对比 PP、模糊 PP 控制器横向控制性能,仿真结果如图 12 所示。

由图 12d 可知,算法在直线阶段时控制效果无明显区别,最大横向偏差发生在曲线阶段,PP、模糊 PP 控制下从机 1 最大横向误差分别为 0.024、0.009 m,从机 2 分别为 0.025、0.002 m,可知在主机产生横向转向动作给机组带来扰动时,PP 控制下从机间横向误差沿机组队列顺序依次叠加,导致机组协同稳定性降低、危及机组安全。由图 12c 所示模糊 PP 控制下机组各机前视距离随路径曲度的变化可知,农机

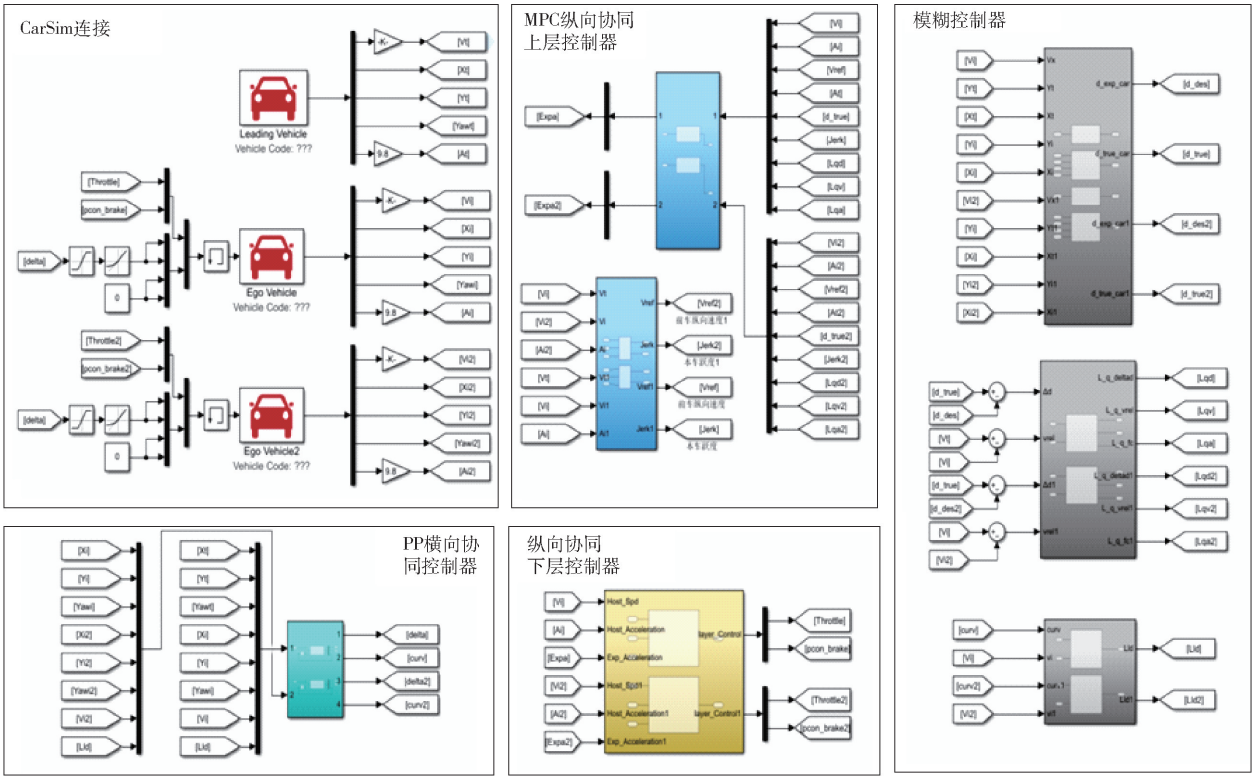


图 11 多机协同控制器仿真模型

Fig. 11 Multi-machine cooperative controller simulation model

表 1　协同控制器模型仿真参数

Tab. 1　Cooperative control model simulation parameters

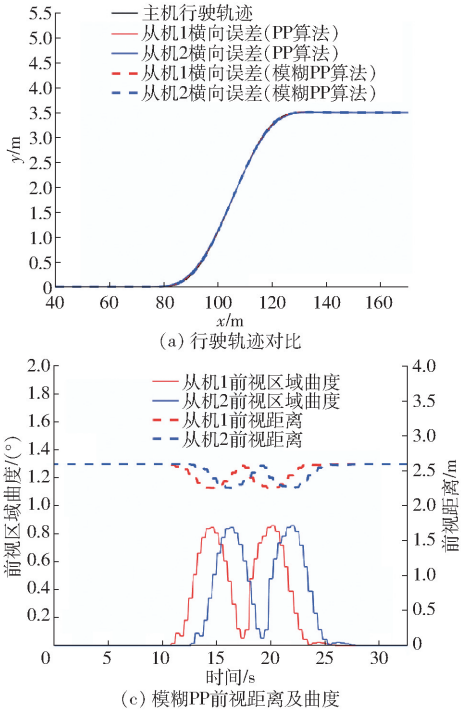
参数	数值	参数	数值
τ/s	0.5	T/s	0.2
M_g	5.75	t_h/s	1.2
N_o	0.346	d_0/m	3
η_t/%	73	$d_{\min}$/m	1
r_w/m	0.79	$v_{\min}$/(m·s^{-1})	0
K_p	0.83	$v_{\max}$/(m·s^{-1})	40
C_d	0.9	$a_{\min}$/(m·s^{-2})	−0.5
A_i/m^2	5.4	$a_{\max}$/(m·s^{-2})	0.5
m/kg	8 000	$j_{\min}$/(m·s^{-3})	−0.3
g/(m·s^{-2})	9.8	$j_{\max}$/(m·s^{-3})	0.3
f_z	0.05	a_{desmin}/(m·s^{-2})	−0.5
$f_d/f_v/f_a/f_j/f_{a_{des}}$	0.5	a_{desmax}/(m·s^{-2})	0.5
ε_{vmax}	1	ε_{vmin}	−1
ε_{amax}	0.1	ε_{amin}	−0.1
ε_{jmax}	0	ε_{jmin}	0
$\varepsilon_{a_{des}\max}$	0.1	$\varepsilon_{a_{des}\min}$	−0.1

行驶到曲度较大的路段时前视距离适当缩小，参数进行优化后的控制器在复现主机行驶轨迹效果上精度显著提升，且从机 2 相较从机 1 误差减小，沿机组队列顺序呈逐渐收敛衰减趋势。可验证本文方法具有更好的横向控制性能。

3.2.2　纵向控制性能仿真试验

在直线路况下设置机组主机速度第 1 阶段以 3.3 m/s 初始速度 80 s 加速至 4 m/s；第 2 阶段以正弦波形式进行 100 s 的两周期连续加减速，第 3 阶段 60 s 减速至 2 m/s。从机 1、从机 2 以初始速度 2.1 m/s 及初始相对距离 6.5 m 跟随转场，总仿真时间为 340 s，对比 PID、MPC、模糊 MPC 控制器纵向控制性能，仿真结果如图 13 所示。

该工况下机组初始速度、相对距离都不满足协同控制需求，图 13a、13b，图 13e、13f，图 13i、13j 分别为 3 种算法控制下车速与相对距离变化，对比其



(a) 行驶轨迹对比　(b) 行驶轨迹局部放大对比

(c) 模糊PP前视距离及曲度　(d) 横向误差对比

图 12　横向控制性能对比仿真试验结果

Fig. 12　Lateral control performance comparative simulation tests results

第 1 加速阶段可知，为满足控制需求形成稳定转场编队状态，从机加速过程中 PID 控制产生较大超调量导致稳定速度较慢，MPC 控制虽能较快响应但也产生了波动，而模糊 MPC 控制在车速、相对距离较大时优先调整两者控制权重以保证机组协同性能，所以具有更快的响应速度、更高的控制精度，对比图 13c、13d，图 13g、13h，图 13k、13l 3 种算法控制下的加速度与加速度变化率变化，可知在模糊 MPC 控制下能更快速准确形成稳定行驶的机组。

当从机与前机速度趋于稳定，各机间相对距离保持在 7.8 m，机组行驶进入稳态后，对比其第 2 变速阶段、第 3 减速阶段可知，MPC 控制下车速、相对距离、加速度变化，可知在前机频繁变速、紧急减速时 MPC 控制下数据波动剧烈、出现超调现象，且误差波动随着机组队列顺序放大，PID 控制平稳，而模糊 MPC 控制下变化曲线平滑，说明其在保证机组行驶稳定性的同时能对速度变化做出快速响应，在车速、相对距离趋于稳定但加速度急剧变化时优先调整加速度、加速度变化率权重保证机组稳定性能，对主机加速度的突变能准确快速调整控制，展现出更

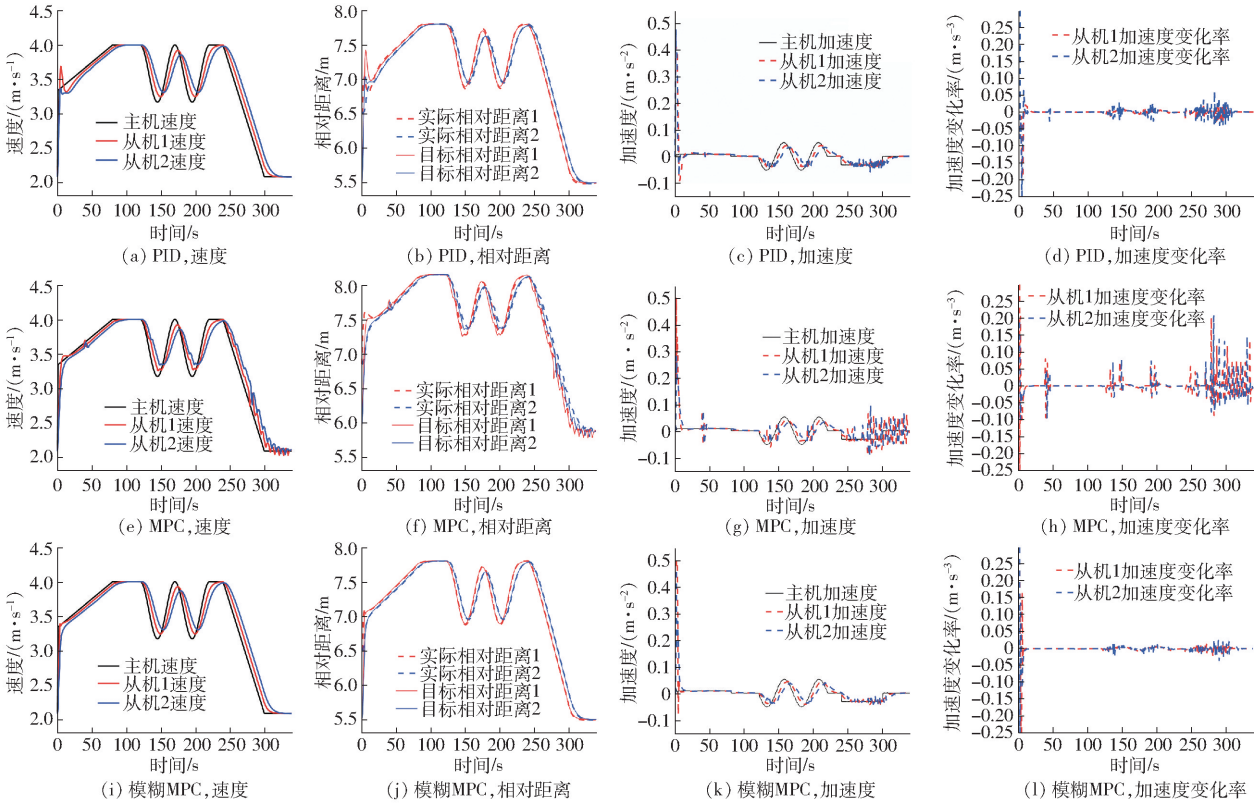


图 13 纵向控制性能对比仿真试验曲线

Fig. 13 Longitudinal control performance comparative simulation test curves

强的鲁棒性。可验证本文方法稳定机组编队状态速度快、响应主机状态变化超调抖振小,针对多种控制目标控制精度高,在各种工况中纵向控制性能优异。

将速度、相对距离、加速度、加速度变化率稳定时间分别定义为误差到达并维持在 ±0.05 m/s、±0.05 m、±0.005 m/s^2、±0.03 m/s^3 内所需要的最短时间,对比车速误差(表 2)、相对距离误差(表 3)、加速度误差(表 4)、加速度变化率(表 5)数据,可知模糊 MPC 控制下从机 1 稳定时间均小于前两种控制方法,稳定速度较MPC有所提升,较PID显著提升,同时从机 1、从机 2 速度误差控制在 0.215、0.186 m/s 内,相对距离误差控制在 0.031、0.027 m 内,加速度误差控制在 0.026、0.028 m/s^2 内,加速度变化率误差控制在 0.055、0.050 m/s^3 内,误差的各项性能指标较 PID 控制有所减小,较 MPC 控制大幅度减小,具有更好的控制精度,且相较于从机 2,从机 1 误差减小,满足机组的稳定需求。

表 2 速度误差仿真结果

Tab. 2 Result of speed error simulation

控制器类型	稳定时间/s		稳定后最大值/(m·s^{-1})		稳定后平均值/(m·s^{-1})	
	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2
PID	30.4	36.8	0.219	0.189	0.008	0.007
MPC	11.2	16.0	0.301	0.358	0.077	0.073
模糊 MPC	6.4	13.6	0.215	0.186	0.078	0.075

表 3 相对距离误差仿真结果

Tab. 3 Result of relative distance error simulation

控制器类型	稳定时间/s		稳定后最大值/m		稳定后平均值/m	
	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2
PID	15.2	11.2	0.049	0.048	0.016	0.014
MPC	10.4	5.6	0.322	0.313	0.047	0.044
模糊 MPC	5.0	4.8	0.031	0.027	0.011	0.010

表 4 加速度误差仿真试验结果

Tab. 4 Result of acceleration error simulation

控制器类型	稳定时间/s		稳定后最大值/(m·s^{-2})		稳定后平均值/(m·s^{-2})	
	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2
PID	11.2	10.4	0.026	0.029	0.007	0.006
MPC	7.2	10.2	0.123	0.099	0.013	0.018
模糊 MPC	5.6	7.0	0.026	0.028	0.006	0.005

表 5 加速度变化率仿真试验结果

Tab. 5 Result of jerk error simulation

控制器类型	稳定时间/s		稳定后最大值/(m·s^{-3})		稳定后平均值/(m·s^{-3})	
	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2	从机 1	从机 2
PID	10.4	8.0	0.061	0.060	0.002	0.004
MPC	7.2	7.6	0.201	0.237	0.009	0.008
模糊 MPC	6.4	6.6	0.055	0.050	0.002	0.002

3.2.3 控制性能仿真试验

在转弯路况下设置 60 m 路径,主机以初始速度

3 m/s 直行，进入弯道内降速至 1.5 m/s，出弯道后速度恢复至 3 m/s，从机 1、从机 2 以相同的初始速度，6.6 m 初始相对距离跟随转场，验证多机协同控制器总体性能，仿真结果如图 14 所示。

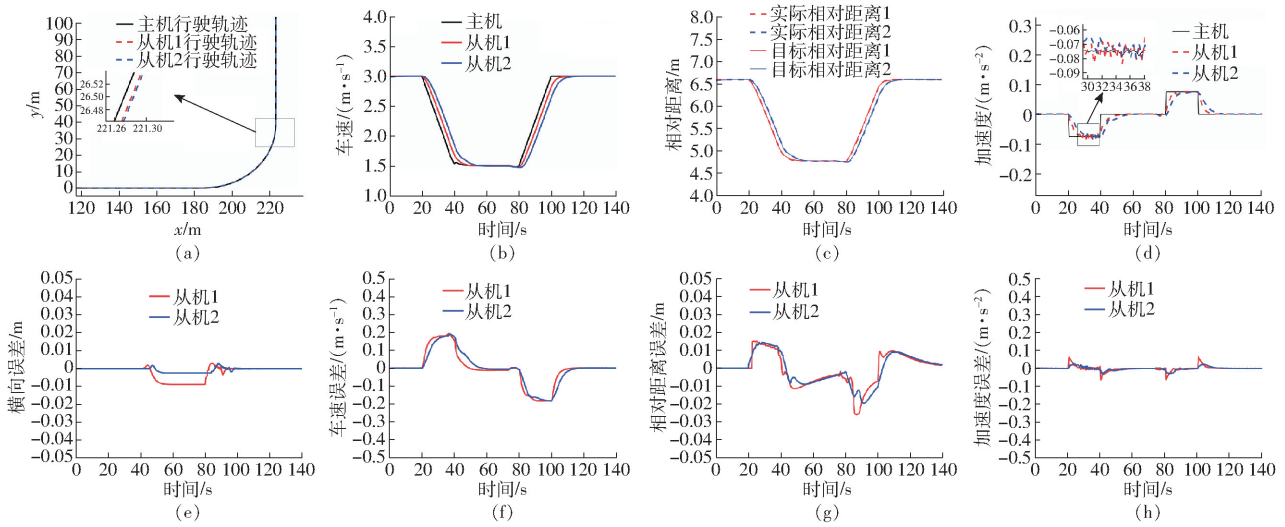


图 14　控制性能仿真试验曲线

Fig. 14　Control performance simulation test curves

该工况下机组初始条件满足协同控制要求、状态稳定，过程中以弯道、变速等因素对机组协同控制进行干扰。由图 14e 可知，虽在弯道路段机组轨迹间横向误差较大，但出弯后横向误差趋于稳定收敛至 0，证明控制器可实现从机沿主机轨迹行驶。由图 14c 中机组间相对距离变化可知，机组在转弯阶段时相对距离随车速下降缩短至 4.8 m 左右、过弯后恢复至 6.6 m，证明控制器可充分保证转场安全。由图 14d 可知，主机加速度波动对从机纵向跟随只造成极小抖振，证明控制器具备一定的抗干扰能力。观察图 14e ~ 14h 各控制目标误差可知，在 40 s 入弯、80 s 出弯阶段由于横纵向控制相互扰动存在一定抖振波动，但从机 1、从机 2 横向误差控制在 0.089、0.003 m 内，速度误差控制在 0.192、0.188 m/s 内，相对距离误差控制在 0.025、0.019 m 内，加速度误差控制在 0.063、0.032 m/s^2 内，均在合理范围内且能渐进稳定，同时随着队列顺序各项误差衰减，可证明多机协同控制器控制精度高、稳定性强。

综上仿真结果表明，多机协同控制器在各方面均展现出显著优于传统控制器的性能，且能满足农机转场环境下各种工况控制需求，进一步为实车试验提供参数选取指导。

4　实车试验

4.1　实车试验平台搭建

对 2 台道依茨法尔 CD2204 型拖拉机、1 台爱科麦赛福格森 MF2204 型拖拉机进行电控化改造后将其分别作为主机、从机 1、从机 2 构成智能拖拉机机组，以该机组为实车试验平台进一步验证控制器性能。机组的信息采集系统选用 RTK - GNSS 定位系统组合惯性测量单元，测量各农机位置、航向、速度、加速度等实时信息，其中选用维特智能 HWT605 型姿态传感器，精度达加速度 0.01 g，角速度 0.01 g，角度 0.05°；选用 NovAtel OEM719 基站接收机、北斗星通 NC502 - D 流动站接收机，双天线模式定位精度达 1 cm ± 1 ppm。实时通信系统将所采集数据打包上传至主机决策控制系统，再将解算所得控制量下达至各从机行车控制系统，其中选用触想科技 J1900 车载计算机搭载本文所设计的控制器实现控制量解算，选用有人物联网 4G DTU 数传终端模块基于 TCP 协议 Socket 技术实现各机间无线通信。从机行车控制系统中控制器将控制量转化为可执行量控制具体执行部件，通过转角传感器、电动方向盘实现转向控制，电子油门实现驱动控制，制动电动推杆实现制动控制，动力换挡实现速度挡位匹配控制，选用北京中嵌凌云 EMB8628I 工业控制板，频率高、可靠性强；上海联适 EMS2 型转向驱动单元，扭矩大、精度高；天海科 DWQCA 转角传感器，线性度达 0.02% FS、角分辨率达 0.022°，都具有防尘防水、经久耐用等特点，适用于农机恶劣使用环境，实车试验平台系统具体构成如图 15 所示。

4.2　实车结果验证分析

实车试验在农场机库至田间转场路段中选取与仿真试验相近的转弯路径 130 m，主机启动后从 0 m/s 加速至 3 m/s 稳定行驶，进入弯道内降速至 1.5 m/s，出弯后速度恢复至 3 m/s 稳定行驶，从机 1、从机 2 以 3 m 初始相对距离跟随主机进行转场试



图 15 实车试验平台系统构成图

Fig. 15 System structure of vehicle test platform

验,以验证多机协同控制器在实车平台总体性能,仿真结果如图 16 所示。

实车试验中机组初始条件符合控制需求、状态稳定,过程中通过转弯路径验证系统横向协同性能,主机变速验证系统纵向协同性能。由图 16a、16e 可知从机 1、从机 2 轨迹间横向误差控制在 0.090、0.072 m 内,直行阶段主机行驶轨迹波动使得横向误差产生一定振荡、弯道阶段道路曲度变化产生较大误差,但通过横向前视距离实时优化调整都能实现渐进稳定,整体控制平缓,满足横向控制指标稳定性需求,各从机沿主机轨迹精确循迹行驶;由图 16b、16f 可知从机 1、从机 2 速度误差控制在 0.570、0.558 m/s 内,由图 16c、16g 可知相对距离误差控制在 0.169、0.127 m 内,在加速阶段主机速度变化剧烈,通过调整纵向权重系数以偏重协同性能,使速度控制响应快速且没有产生过大的抖振波动,机间相对距离跟随速度变化趋势平滑,变化无超调,保持机组合理安全的机间间距及稳定转场编队状态,具备一定的抗不确定性及抗干扰能力;由图 16d、16h 可知从机 1、从机 2 加速度误差控制在 0.252、0.211 m/s^2 内,通过调整纵向权重系数以偏重稳定性能,使主机加速度波动对从机纵向跟随只造成极小抖振,具有较好的稳定性,满足纵向控制指标稳定性需求。将图 16 与图 14 对比可知控制器实际效果与理论仿真基本一致,虽由于信息采集及下层控制等因素影响存在偏差、时延导致

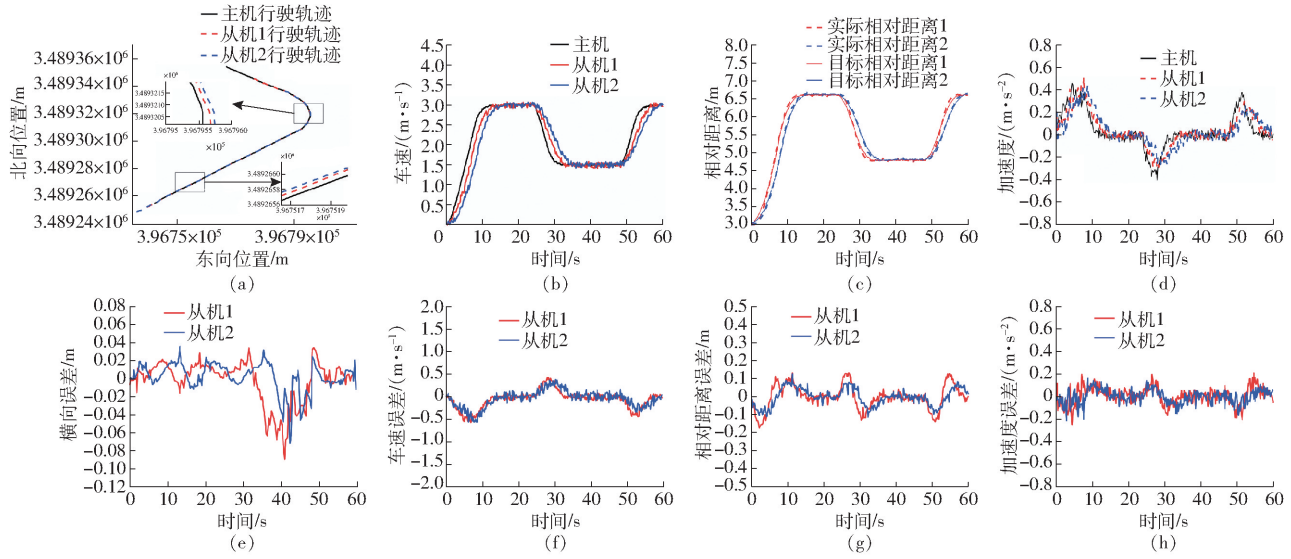


图 16 控制性能实车试验曲线

Fig. 16 Control performance vehicle test curves

性能数据存在一定的超调抖振，但各项性能指标均在合理范围，且各项误差均随队列顺序逐渐衰减稳定，实车试验表明本文所提方法稳定机组状态速度快、响应主机变化超调小，针对多种控制目标控制精度高，满足横向行驶轨迹、纵向相对距离、速度、加速度的协同控制要求，充分适应实际农机转场场景多机协同控制。

5　结论

（1）为提升协同控制在农机转场过程中的响应速度、控制精度、稳定性、鲁棒性，本文搭建农机编队转场模型并设计多机协同控制方法，通过 Frenet 坐标转换实现横纵向控制解耦；横向控制采用曲线系数拟合主机轨迹提供参考路径，基于 PP 算法求解前轮转角；纵向控制基于 MPC 算法上层控制器求解期望加速度，下层控制器将期望加速度转化为电子油门电压、制动踏板行程。

（2）引入模糊算法实时调整控制参数，提高多机协同控制方法对转场复杂环境多变工况的适应性。

（3）基于 CarSim/Simulink 仿真平台进行仿真，验证本文设计控制器相对传统控制器的优越性，并利用实车试验平台验证了其实际可行性，为智慧农场中机库田间转场、多机协同作业提供了技术支撑。

参　考　文　献

[1] 孟志军，王昊，付卫强，等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：1－24.
MENG Zhijun，WANG Hao，FU Weiqiang，et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(10)：1－24.（in Chinese）

[2] 曹如月，李世超，魏爽，等. 基于 Web－GIS 的多机协同作业远程监控平台设计[J]. 农业机械学报，2017，48(增刊)：52－57，14.
CAO Ruyue，LI Shichao，WEI Shuang，et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web－GIS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(Supp.)：52－57，14.（in Chinese）

[3] 张迎雪，陈萌，陈金宝，等. 多机器人智能化协同技术研究进展[J]. 载人航天，2021，27(6)：767－778.
ZHANG Yingxue，CHEN Meng，CHEN Jinbao，et al. Research progress of intelligent cooperative technology for multiple robots [J]. Manned Spaceflight，2021，27(6)：767－778.（in Chinese）

[4] 谭威，胡永江，李文广，等. 多无人机协同任务规划研究综述[J]. 微型电脑应用，2021，37(9)：189－192.
TAN Wei，HU Yongjiang，LI Wenguang，et al. A survey of multi-UAV cooperative mission planning[J]. Microcomputer Applications，2021，37(9)：189－192.（in Chinese）

[5] 刘成良，林洪振，李彦明，等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报，2020，51(1)：1－18.
LIU Chengliang，LIN Hongzhen，LI Yanming，et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(1)：1－18.（in Chinese）

[6] 白晓平，胡静涛，王卓. 基于视觉伺服的联合收割机群协同导航从机定位方法[J]. 农业工程学报，2016，32(24)：59－68.
BAI Xiaoping，HU Jingtao，WANG Zhuo. Slave positioning method for cooperative navigation of combine harvester group based on visual servo[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(24)：59－68.（in Chinese）

[7] 翟志强，王秀倩，王亮，等. 面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法[J]. 农业机械学报，2021，52(增刊)：542－547.
ZHAI Zhiqiang，WANG Xiuqian，WANG Liang，et al. Collaborative path planning for autonomous agricultural machinery of master-slave cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(Supp.)：542－547.（in Chinese）

[8] 李亚硕，赵博，徐名汉，等. 基于半监督 BP_Adaboost 的农机作业效益评估[J]. 农业工程学报，2023，39(23)：67－74.
LI Yashuo，ZHAO Bo，XU Minghan，et al. Evaluating operation benefit of agricultural machinery using semi-supervised BP_Adaboost[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(23)：67－74.（in Chinese）

[9] 窦汉杰，陈震宇，翟长远，等. 果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：1－22.
DOU Hanjie，CHEN Zhenyu，ZHAI Changyuan，et al. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(4)：1－22.（in Chinese）

[10] NOGUCHI N，WILL J，REID J，et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2004，44(1)：1－19.

[11] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：1－18.
ZHANG Man，JI Yuhan，LI Shichao，et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18.（in Chinese）

[12] MA Z，CHONG K，MA S，et al. Control strategy of grain truck following operation considering variable loads and control delay [J]. Agriculture，2022，12(10)：1545.

[13] 徐广飞，陈美舟，苗河泉，等. 基于模型预测控制的农机主从跟随作业控制方法[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊

2): 11 - 20.
XU Guangfei, CHEN Meizhou, MIAO Hequan, et al. Following operation control method of farmer machinery based on model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 11 - 20. (in Chinese)
[14] 张闻宇, 张智刚, 罗锡文, 等. 收获机与运粮车纵向相对位置位速耦合协同控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 1 - 11.
ZHANG Wenyu, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Position-velocity coupling control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and grain truck[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 1 - 11. (in Chinese)
[15] 朱忠祥, 宋正河, 谢斌, 等. 拖拉机队列自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 149 - 154.
ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, XIE Bin, et al. Automatic control system of tractors platooning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 149 - 154. (in Chinese)
[16] 白晓平, 王卓, 胡静涛, 等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14 - 21.
BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader - follower structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14 - 21. (in Chinese)
[17] OKUDA R, KAJIWARA Y, TERASHIMA K. A survey of technical trend of ADAS and autonomous driving[C]// Technical Papers of 2014 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. IEEE, 2014: 1 - 4.
[18] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车自适应巡航系统的多模式切换控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 96 - 102.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, et al. Multi-mode switching, controller for vehicle adaptive cruise control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 96 - 102. (in Chinese)
[19] NIDAMANURI J, NIBHANUPUDI C, ASSFALG R, et al. A progressive review: emerging technologies for ADAS driven solutions[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 7(2): 326 - 341.
[20] SHLADOVER S E, SU D, LU X Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow[J]. Transportation Research Record, 2012, 2324(1): 63 - 70.
[21] GANJI B, KOUZANI A Z, KHOO S Y, et al. Adaptive cruise control of a HEV using sliding mode control[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(2): 607 - 615.
[22] 李旭, 谢宁, 王建春, 等. 面向切入场景的变权重自适应巡航控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(4): 10 - 18.
LI Xu, XIE Ning, WANG Jianchun, et al. A variable weight adaptive cruise control strategy for cutover scenarios[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2023, 37(4): 10 - 18. (in Chinese)
[23] CHU Y H, KUILIN Z. Impact of cooperative adaptive cruise control on traffic stability[J]. Transportation Research Record, 2022, 2676(12): 226 - 241.
[24] KIANFAR R, FALCONE P, FREDRIKSSON J. A control matching model predictive control approach to string stable vehicle platooning[J]. Control Engineering Practice, 2015, 45: 163 - 173.
[25] WU D, QIAO B, DU C, et al. Multi-objective dynamic coordinated adaptive cruise control for intelligent electric vehicle with sensors fusion[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 209: 111125.
[26] 覃频频, 吴锋民, 张顺锋, 等. 考虑道路几何设计的智能网联车队横纵向协同控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 1059 - 1065.
QIN Pinpin, WU Fengmin, ZHANG Shunfeng, et al. Intelligent and connected platoon lateral and longitudinal coordinated control considering road conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3): 1059 - 1065. (in Chinese)
[27] 孙亮亮. 城市道路场景下车辆编队运动规划与控制算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
SUN Liangliang. Research on vehicle formation motion planning and control algorithm in urban road scenarios [D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
[28] 刘景森, 吉宏远, 李煜. 基于改进蝙蝠算法和三次样条插值的机器人路径规划[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1710 - 1719.
LIU Jingsen, JI Hongyuan, LI Yu. Robot path planning based on improved bat algorithm and cubic spline interpolation[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1710 - 1719. (in Chinese)