doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.002

基于模型预测控制的农机主从跟随作业控制方法

徐广飞[1,2]　陈美舟[1]　苗河泉[1]　姚文燕[1]　刁培松[1]　王文君[1]

(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255049;2.聊城市农业科学研究院,聊城 255000)

摘要:针对实际环境中由于农业机械(简称农机)作业过程的作业量以及土壤条件的变化等不确定性因素的影响,导致协同作业跟随农机的行驶工况不稳定、跟随协同作业响应慢、控制困难等问题,在综合考虑不确定性以及响应性能的基础上,提出了一种农机跟随分层控制架构,搭建农机田间作业下的纵向跟随动力学模型,并以间距保持、速度跟随、燃油经济性、加速度跟随性能为目标,进行基于模型预测控制(MPC)算法的上层控制器推导,基于前馈以及 PI 反馈的控制器作为下层控制,以上层控制器获得的控制加速度为目标,进行力矩(电流)跟踪,在保证抗不确定性以及干扰噪声的同时,提高跟随农机的响应能力。通过 Matlab/Simulink 仿真和田间试验验证,结果表明,该控制方法可以有效解决农机作业的跟随控制问题,与滑模变结构控制器相比,能够实现稳定跟随行驶,且速度误差和加速度误差更小,速度误差控制在 -0.291 32 ~ 0.180 01 m/s,加速度误差控制在 -0.056 78 ~ 0.056 28 m/s^2,稳定跟随距离误差为 ±0.45 m,具有良好的跟随效果。

关键词:农业机械;主从跟随作业;模型预测控制;不确定性;多目标优化

中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S2-0011-10

Following Operation Control Method of Farmer Machinery Based on Model Predictive Control

XU Guangfei[1,2]　CHEN Meizhou[1]　MIAO Hequan[1]　YAO Wenyan[1]　DIAO Peisong[1]　WANG Wenjun[1]

(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*
2. *Liaocheng Academy of Agricultural Sciences*, *Liaocheng* 255000, *China*)

Abstract: In the actual environment, due to the influence of uncertain factors such as the amount of agricultural machinery operation and the change of soil conditions, the driving condition of following agricultural machinery is unstable, and the response of following cooperative operation is slow, which lead to the difficulty of control. Therefore, in consideration of uncertainty and response performance, a kind of hierarchical control architecture for agriculture machinery was put forward, by building longitudinal dynamic model of agricultural machinery under the field to follow. Furthermore, taking the performance of following distance, following speed, fuel economy, following acceleration as the optimization target, the upper controller based on model predictive control (MPC) algorithm was derived to restrain uncertainty and interference noise. At the same time, to track torque (current) to improve the follow response ability of agricultural machinery, the lower layer controller based on the feedforward and feedback PI controller was designed which took the output of the upper controller-acceleration as the target. The simulation and experiment showed that this control method can effectively solve the following control problem of farm machinery operation. Compared with the sliding mode variable structure controller (SMC), this method can realize stable following driving with smaller speed error and smaller acceleration error. Speed error was controlled in the range of -0.291 32 ~ 0.180 01 m/s and acceleration error was controlled in the range of -0.056 78 ~ 0.056 28 m/s^2. Moreover, the error of stable follow distance was within ±0.45 m. The control effect was proved well according to the above data.

Key words: agricultural machinery; master and slave follow work; model predictive control; uncertainty; multi-objective optimization

收稿日期:2020-08-10　修回日期:2020-09-20

基金项目:山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ005)、山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF005-01)、山东省重大科技创新工程项目(2018JZZYY020615)、山东省现代农业产业体系玉米创新团队机械加工岗位专家项目和国家重点研发计划项目(2018YFD0300606-04)

作者简介:徐广飞(1991—),男,博士生,聊城市农业科学研究院助理农艺师,主要从事智能化农业机械装备研究,E-mail:gfxu@sdut.edu.cn

通信作者:刁培松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail:dps2003@163.com

0 引言

农业机械(简称农机)主从协同跟随作业是农机智能化的一个重要方面,随着智能农机以及自动驾驶技术的发展应用,农机跟随作业控制问题也得到了越来越多的关注。但由于田间作业条件的复杂性,农机跟随作业过程中的不确定性、干扰噪声以及跟随能力差需要得到更好的解决[1-4]。

主从跟随问题最先在车辆领域开始研究,车辆跟随过程中,需要综合考虑车辆安全性、跟踪性、经济性和舒适性等多性能目标,文献[5]提出了一种车辆自适应巡航控制(Adaptive cruise control, ACC)系统,来解决跟踪能力、燃油经济性和驾驶员期望响应等问题;文献[6]提出了基于显式模型预测控制(Explicit model predictive control, EMPC)理论的跟随车辆多目标控制方法,通过设计在线查表的搜索流程,定位当前状态所处分区进而应用该显式控制律实现自适应巡航控制;文献[7]提出了一种随机模型预测控制方法优化车辆跟踪环境下的油耗,利用对前车速度的短期预测求解约束运动水平最优控制问题。上述方法建立的模型无法较为准确地契合实际交通情况,因此,文献[8-12]基于对真实交通中计算机驾驶车辆的经验测量建立了跟车模型,并通过相关控制算法实现速度以及距离跟踪控制,但该方法需要先验数据的测量积累,实现起来较为困难;文献[13]提出了动态优化 IFT 的方法来提高数据稳定性,提高跟车性能;文献[14]基于卡尔曼滤波器和模型预测控制器提出一种具有自适应补偿能力的跟随控制器,采用卡尔曼滤波器估计状态变量,利用反馈校正机制改进跟车预测模型,实现自适应巡航控制。

主从跟随控制问题在车辆领域的研究较多并得到了一定程度的应用,但对于农机而言,由于复杂的田间作业环境,跟随作业控制一直是研究难点。文献[15]以福田雷沃 TG1254 型拖拉机为平台,研制了电-液自动机械式变速装置以及油门自动调节装置,并以增量式比例积分微分(Proportion-integration-differentiation, PID)控制算法实现定速巡航控制,速度控制精度达到 0.2 m/s。文献[16-17]搭建了自主跟随车辆试验平台,通过红外传感器、超声波传感器、双目视觉传感器等获取引导车的行驶状态,通过跟随农机进行控制,能够达到较小的跟随误差;文献[18]考虑纵向动力学模型非线性、道路坡度、机具整车质量变动及风阻等外部干扰因素的影响,提出一种基于滑模变结构算法(Sliding mode variable structure controller, SMC)的拖拉机定速巡航控制系统,有效解决非线性问题及外部干扰带来的鲁棒性问题;为了提高在水田等恶劣环境下作业的水稻直播机的跟踪性能,文献[19-20]分别提出了模糊逻辑推理自适应调整 PD 控制器参数 K_d 的最优控制方法以及在不平坦泥泞水田环境中的水稻直播机自动驾驶控制方法;文献[21]对巡航作业工况下的驱动转矩模型进行了研究。上述研究仍无法解决模型不确定性以及作业环境下的干扰问题。

主从跟随作业控制问题为多目标优化控制问题,需要综合考虑主从农机间距保持、速度跟随、燃油经济性、加速度跟随等性能,同时,还需要应对复杂田间作业环境所带来的各类不确定性以及干扰等问题,因此,本文研究一种考虑不确定性以及干扰的多目标优化兼顾系统响应性能的控制方法。

1 总体控制方案

通过建立包含不确定性以及干扰的跟随动力学模型并进行农机跟随 MPC 控制器推导,设计反映各类行驶工况的跟随目标速度(加速度以及行驶距离进而确定),根据跟随农机加装的 RTK-GPS 惯导组合导航获取的实际速度、加速度、实际行驶距离,由跟随农机 MPC 控制器产生上层控制加速度,作为下层控制器的目标值。下层控制包含驱动/制动开关控制器及前馈加 PI 电流控制器,驱动/制动开关控制器根据目标加速度正负值做出驱动或制动的判断,并计算目标电流。前馈加 PI 电流控制器计算得到实际电流传递给执行机构(电子油门节气门驱动电机/线控液压制动驱动电机),从而改变跟随农机的行驶状态,跟从主机行驶,逻辑控制框图如图 1 所示。

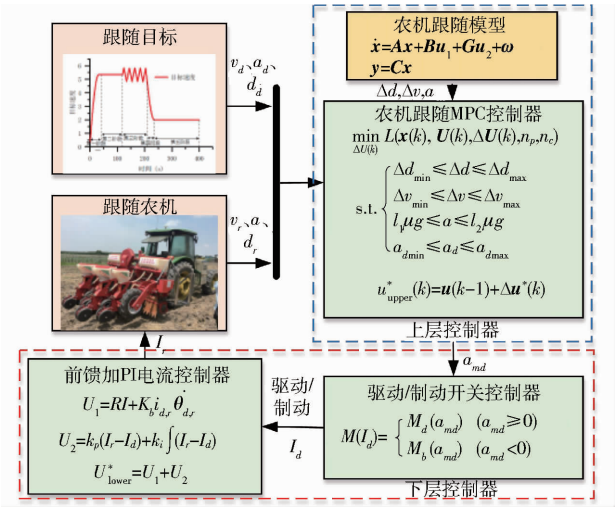

图 1 主从农机跟随控制框图

Fig. 1 Control block diagram of master-slave agricultural machinery following

2　农机跟随模型

在跟随过程中，根据跟随农机的纵向运动状态建立农机纵向动力学模型为

$$\frac{N_g N_0 \eta_t}{r_w} M_e - K_P P_b = m\dot{v}_f + C_A v_f^2 + mgf + F_r \quad (1)$$

式中　N_g——发动机动力传动比

N_0——发动机到驱动轮传动比

η_t——传动系统的机械效率，%

M_e——发动机输出力矩，N·m

K_P——比例系数

P_b——制动压力，N

r_w——车轮半径，m

v_f——跟随农机行驶速度，m/s

m——跟随农机质量，kg

C_A——空气阻力系数

g——重力加速度，m/s^2

f——滚动阻力系数

F_r——机具平均牵引力，N

在跟随过程中，采用固定时距模型，可得在采样时刻 k 的期望间距为

$$d_d(k) = tv_f(k) + d_0 \quad (2)$$

式中　d_d——期望跟随距离，m

t——跟车时距，s

d_0——最小跟车距离，m

由式(1)、(2)推导出农机跟随模型为

$$\Delta\dot{d} = \Delta v - ta \quad (3)$$

$$\Delta\dot{v} = \frac{1}{m}(C_A v_f^2 + mgf + F_r) - \frac{N_g N_0 \eta_t}{m r_w} M_e + a \quad (4)$$

其中　$\Delta d = d_r - d_d \quad \Delta v = v_m - v_f$

式中　Δd——跟随间距误差，m

d_r——实际的跟随距离，m

Δv——速度跟随误差，m/s

v_m——主机速度，m/s

a——主机加速度，m/s^2

假设未建模的动力系统动力学、农机参数误差和外部干扰等所造成的不确定性较小，则跟随农机的输入/输出动力学可由一阶系统描述为

$$a_r = \frac{K_a}{T_a s + 1} a_d \quad (5)$$

式中　a_r——实际跟随加速度，m/s^2

a_d——期望跟随加速度，m/s^2

K_a——系统增益，频率响应的方法确定农机响应参数值，取 1.0

T_a——时间常数，取 0.5 s

由式(3)～(5)建立跟随系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_1 + \boldsymbol{G}\boldsymbol{u}_2 + \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -t \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dfrac{-1}{T_a} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B} = [0 \quad 0 \quad K_a/T_a]^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{G} = [0 \quad 1 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{x} = [\Delta d \quad \Delta v \quad a]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{\omega} = [0 \quad \zeta \quad \Theta]^{\mathrm{T}}$$

$$\zeta = \frac{1}{m}(C_A v_f^2 + mgf + F_r) - \frac{N_g N_0 \eta_t}{m r_w} M_e + K_P P_b$$

$$\boldsymbol{u}_1 = a_d \quad \boldsymbol{u}_2 = a$$

式中　$\boldsymbol{x}$——状态变量

$\boldsymbol{u}_1$——跟随农机的期望加速度，m/s^2

$\boldsymbol{u}_2$——主机的加速度，m/s^2

$\boldsymbol{\omega}$——附加项　　Θ——干扰项

$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{G}$——系数矩阵

3　模型预测控制器设计

由于田间作业较大的不确定性及外部干扰，尤其是跟随作业过程中，需要跟随农机具有较好的响应性能，同时，还需要具有抗模型不确定性以及干扰的能力，一般的控制器很难较好地解决该问题，模型预测控制算法(MPC)基于当前时刻当前控制模型预测未来一段时间内的控制结果，通过不断修正模型参数和系统评价得到最优控制结果。在满足响应性能的同时，能够解决模型失配、干扰等问题，因此设计 MPC 控制器进行主从跟随作业控制。

对基于跟随系统的状态空间模型进行离散化处理，转换为离散时间系统模型

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}_k \boldsymbol{u}_1(k) + \boldsymbol{G}_k \boldsymbol{u}_2(k) + \boldsymbol{\omega}_k \\ \boldsymbol{y}_k(k) = \boldsymbol{C}_k \boldsymbol{x}(k) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\boldsymbol{A}_k = \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}T_s} \quad \boldsymbol{B}_k = \boldsymbol{B}\int_0^{T_s} \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}\tau}\mathrm{d}\tau$$

$$\boldsymbol{G}_k = \boldsymbol{G}\int_0^{T_s} \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}\tau}\mathrm{d}\tau \quad \boldsymbol{\omega}_k = \boldsymbol{\omega}\int_0^{T_s} \mathrm{e}^{\boldsymbol{A}\tau}\mathrm{d}\tau$$

$$\boldsymbol{C}_k = \boldsymbol{C}$$

式中　T_s——系统的采样时间，s

τ——时间变量，s

为减少或消除静态误差对于系统的影响，引入积分项，将离散状态空间式(7)改写为增量式。预测函数描述为

$$\begin{cases} \Delta\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}_k \Delta\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}_k \Delta\boldsymbol{u}_1(k) + \boldsymbol{G}_k \Delta\boldsymbol{u}_2(k) + \Delta\boldsymbol{\omega}_k \\ \boldsymbol{y}_k(k) = \boldsymbol{C}_k \Delta\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{y}(k-1) \end{cases} \quad (8)$$

其中
$$\begin{cases}\Delta \boldsymbol{x}(k)=\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}(k-1)\\ \Delta \boldsymbol{u}_1(k)=\boldsymbol{u}_1(k)-\boldsymbol{u}_1(k-1)\\ \Delta \boldsymbol{u}_2(k)=\boldsymbol{u}_2(k)-\boldsymbol{u}_2(k-1)\\ \Delta \boldsymbol{\omega}_k(k)=\boldsymbol{\omega}(k)-\boldsymbol{\omega}(k-1)\end{cases}$$

为了推导出系统预测方程,需要做以下假设:控制时域外的系统控制量保持不变,即

$$\Delta \boldsymbol{u}_1(k+i)=0 \quad (i=n_c,\ n_c+1,\cdots,n_p-1) \tag{9}$$

假设干扰在控制时刻以后保持不变,则

$$\Delta \boldsymbol{\omega}(k+i)=0 \quad (i=1,2,\cdots,n_p-1) \tag{10}$$

其中,n_p和n_c分别是预测水平和控制水平,输出方程可进一步表述为

$$\boldsymbol{y}_k(k+1|k)=\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}\Delta \boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k)+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{G}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k)+\boldsymbol{C}_k\Delta \boldsymbol{\omega}(k)+\boldsymbol{y}(k) \tag{11}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}_k(k+2|k)=&(\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^2+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A})\Delta \boldsymbol{x}(k)+(\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}\boldsymbol{B}_k+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k)\Delta \boldsymbol{u}_1(k)+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k+1)+\\&(\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}\boldsymbol{G}_k+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{G}_k)\Delta \boldsymbol{u}_2(k)+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{G}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k+1)+(\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}+\boldsymbol{C}_k)\Delta \boldsymbol{\omega}(k)+\boldsymbol{y}(k)\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}_k(k+n_c|k)=&\sum_{i=1}^{n_c}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^i\Delta \boldsymbol{x}(k)+\sum_{i=1}^{n_c}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k)+\sum_{i=1}^{n_c-1}\boldsymbol{C}_c\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k+1)+\\&\cdots+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k+n_c-1)+\sum_{i=1}^{n_c}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k)+\\&\sum_{i=1}^{n_c-1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k+1)+\cdots+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k+n_c-1)+\\&\sum_{i=1}^{n_c}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{\omega}(k)+\boldsymbol{y}(k)\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}_k(k+n_p|k)=&\sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^i\Delta \boldsymbol{x}(k)+\sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k)+\\&\sum_{i=1}^{n_p-1}\boldsymbol{C}_c\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k+1)+\cdots+\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_1(k+n_p-1)+\\&\sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k)+\sum_{i=1}^{n_p-1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k+1)+\cdots+\\&\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{u}_2(k+n_p-1)+\sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\Delta \boldsymbol{\omega}(k)+y(k)\end{aligned} \tag{14}$$

n_p步内的预测输出向量和n_c步内的输入向量定义为

$$\boldsymbol{Y}_p(k+1|k)\overset{\text{def}}{=}\begin{bmatrix}y_k(k+1|k)\\ y_k(k+2|k)\\ \vdots\\ y_k(k+n_p|k)\end{bmatrix}_{n_p\times 1} \tag{15}$$

$$\Delta \boldsymbol{U}(k)\overset{\text{def}}{=}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{u}_1(k)\\ \Delta \boldsymbol{u}_1(k+1)\\ \vdots\\ \Delta \boldsymbol{u}_1(k+n_c-1)\end{bmatrix}_{n_c\times 1} \tag{16}$$

根据式(11),系统下n_p步的预测输出可表示为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Y}_p(k+1|k)=&\boldsymbol{S}_x\Delta \boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{I}\boldsymbol{y}(k)+\\&\boldsymbol{S}_\omega\Delta \boldsymbol{\omega}(k)+\boldsymbol{S}_u\Delta \boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{S}_v\Delta \boldsymbol{u}_2(k)\end{aligned} \tag{17}$$

其中
$$\boldsymbol{S}_x=\begin{pmatrix}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}\\ \sum_{i=1}^{2}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^i\\ \vdots\\ \sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^i\end{pmatrix}_{n_p\times 1}\quad \boldsymbol{I}=\begin{pmatrix}I_{m\times m}\\ I_{m\times m}\\ \vdots\\ I_{m\times m}\end{pmatrix}_{n_p\times 1}\quad \boldsymbol{S}_\omega=\begin{pmatrix}\boldsymbol{C}_k\\ \sum_{i=1}^{2}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\\ \vdots\\ \sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\end{pmatrix}_{n_p\times 1}$$

$$\boldsymbol{S}_u=\begin{pmatrix}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k & 0 & \cdots & 0\\ \sum_{i=1}^{2}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k & \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \sum_{i=1}^{n_c}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k & \sum_{i=1}^{n_c-1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k & \cdots & \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{B}_k\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k & \sum_{i=1}^{n_p-1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k & \cdots & \sum_{i=1}^{n_p-n_c+1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}_k\end{pmatrix}_{n_p\times n_c}$$

$$\boldsymbol{S}_v=\begin{pmatrix}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{G}_k & 0 & \cdots & 0\\ \sum_{i=1}^{2}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k & \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{G}_k & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \sum_{i=1}^{n_c}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k & \sum_{i=1}^{n_c-1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k & \cdots & \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{G}_k\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \sum_{i=1}^{n_p}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k & \sum_{i=1}^{n_p-1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k & \cdots & \sum_{i=1}^{n_p-n_c+1}\boldsymbol{C}_k\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{G}_k\end{pmatrix}_{n_p\times n_c}$$

主从协同控制在考虑抗作业负荷扰动等不确定性及干扰的同时,主要考察跟随机具的间距保持能力、速度跟随能力、加速度跟随能力,同时还需要跟随机具有较好的燃油经济性。因此,该控制问题为多目标优化问题,根据控制需求,建立相关的指标如下:

(1)间距保持性能指标

进行主从协同控制过程中,跟随车辆需要与前车保持一定的距离,尤其是主从作业具有较高的相关性时。因此,通过设置期望跟随距离d_d、实际跟随距离d_r、跟随间距误差Δd,根据间距误差设计跟

随性能指标函数 J_1 为

$$J_1 = \lambda_1 |\Delta d|^2 \tag{18}$$

式中　λ_1——Δd 权重

(2)速度跟随性能指标

进行跟随控制过程中，跟随速度误差 Δv 来保证主从农机的同步程度，据此设计性能指标函数 J_2 为

$$J_2 = \lambda_2 |\Delta v|^2 \tag{19}$$

式中　λ_2——Δv 权重

(3)燃油经济性

农机的能源消耗较大，在进行跟随作业过程中需要考虑燃油经济性，而燃油经济性与控制量直接相关，设计燃油经济性指标 J_3 为

$$J_3 = \lambda_3 |a_d|^2 \tag{20}$$

式中　λ_3——a_d 权重

(4)加速度跟随性能指标

跟随农机在对主机进行跟随过程中，为保证跟随农机的作业品质以及保护农机具，跟随过程不宜有较大的加速度冲击，因此，根据 2 个采样周期内的加速度差值设计加速度冲击指标 J_4 为

$$J_4 = \lambda_4 |\Delta a_d|^2 \tag{21}$$

其中　$$\Delta a_d = a_{k+1} - a_k$$

式中　λ_4——相邻时刻加速度权重

a_k——k 时刻加速度，m/s^2

a_{k+1}——$k+1$ 时刻加速度，m/s^2

Δa_d——相邻时刻加速度差，m/s^2

综合考虑跟随农机的间距保持能力、速度跟随能力、加速度跟随能力以及燃油经济性，从而确定最终的指标函数为

$$L = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 = \lambda_1 |\Delta d|^2 + \lambda_2 |\Delta v|^2 + \lambda_3 |a_d|^2 + \lambda_4 |a_{k+1} - a_k|^2 \tag{22}$$

将其转换为预测形式为

$$L = \sum_{i=1}^{n_p} \| y(k+i|k) \|^2_{\boldsymbol{\lambda}_y} + \sum_{i=0}^{n_c-1} \| u(k+i|k) \|^2_{\boldsymbol{\lambda}_u} + \sum_{i=0}^{n_c-1} \| \Delta u(k) \|^2_{\boldsymbol{\lambda}_{\Delta u}} \tag{23}$$

其中

$$\boldsymbol{\lambda}_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_a \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_u = \lambda_3$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{\Delta u} = \lambda_4$$

式中　$\boldsymbol{\lambda}_u$——控制输入加权矩阵

$\boldsymbol{\lambda}_{\Delta u}$——控制增量加权矩阵

$\boldsymbol{\lambda}_y$——输出 y 的权重矩阵

λ_a 为 a 的权重，对于跟随农机的控制指标主要考虑期望加速度 a_d 的影响，而不考虑主机加速度，因此，设置 $\lambda_a = 0$。为权衡各性能指标从而得到较优的控制性能，设计为

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1 \tag{24}$$

本文重点考虑拖拉机跟随性能，因此适当增大跟随指标权重，得到：$\lambda_1 = 0.3$，$\lambda_2 = 0.3$，$\lambda_3 = 0.1$，$\lambda_4 = 0.3$。由于农机作业过程中的土壤附着秸秆及墒情等的变化，导致土壤附着系数为动态变化过程，因此跟随农机的加速度需要满足变化的土壤附着系数的滑移率约束条件，则加速度应满足

$$l_1 \mu g \leqslant a \leqslant l_2 \mu g \tag{25}$$

式中　μ——附着系数

l_1、l_2——根据土壤条件以及作业条件动态调整因子

在满足约束的情况下，确保目标函数为最小值来获得控制率，即

$$\begin{cases} \min\limits_{\Delta U(k)} L(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{U}(k), \Delta \boldsymbol{U}(k), n_p, n_c) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \Delta d_{\min} \leqslant \Delta d \leqslant \Delta d_{\max} \\ \Delta v_{\min} \leqslant \Delta v \leqslant \Delta v_{\max} \\ l_1 \mu g \leqslant a \leqslant l_2 \mu g \\ a_{d\min} \leqslant a_d \leqslant a_{d\max} \end{cases} \end{cases} \tag{26}$$

定义辅助变量

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_y \boldsymbol{Y}(k+1|k) \\ \boldsymbol{\lambda}_u \boldsymbol{U}(k+1|k) \\ \boldsymbol{\lambda}_{\Delta u} \Delta \boldsymbol{U}(k+1|k) \end{bmatrix} \tag{27}$$

将预测方程(17)代入可得

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_y (\boldsymbol{S}_x \Delta \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{I}\boldsymbol{y}(k) + \boldsymbol{S}_\omega \Delta \boldsymbol{\omega}(k) + \boldsymbol{S}_u \Delta \boldsymbol{U}(k) + \boldsymbol{S}_v \Delta \boldsymbol{u}_2(k)) \\ \boldsymbol{\lambda}_u \boldsymbol{U}(k) \\ \boldsymbol{\lambda}_{\Delta u} \Delta \boldsymbol{U}(k) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_y \boldsymbol{S}_u \\ 0 \\ \boldsymbol{\lambda}_{\Delta u} \end{bmatrix} \Delta \boldsymbol{U} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_y (\boldsymbol{S}_x \Delta \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{I}\boldsymbol{y}(k) + \boldsymbol{S}_\omega \Delta \boldsymbol{\omega}(k) + \boldsymbol{S}_v \Delta \boldsymbol{u}_2(k)) \\ \boldsymbol{\lambda}_u \boldsymbol{U}(k) \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\widetilde{\boldsymbol{A}} \boldsymbol{z} + \boldsymbol{b} \tag{28}$$

其中

$$\boldsymbol{z} = \Delta \boldsymbol{U}(k) \quad \widetilde{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_y \boldsymbol{S}_u \\ 0 \\ \boldsymbol{\lambda}_{\Delta u} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_y \boldsymbol{E}_p(k+1|k) \\ \boldsymbol{\lambda}_u \boldsymbol{U}(k) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_p(k+1|k) = \boldsymbol{S}_x \Delta \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{I}\boldsymbol{y}(k) + \boldsymbol{S}_\omega \Delta \boldsymbol{\omega}(k) + \boldsymbol{S}_v \Delta \boldsymbol{u}_2(k)$$

因此，$\min \boldsymbol{\rho}_z^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\rho} = (\widetilde{\boldsymbol{A}} \boldsymbol{z} - \boldsymbol{b})^{\mathrm{T}} (\widetilde{\boldsymbol{A}} \boldsymbol{z} - \boldsymbol{b})$ 的最优极值解为

$$\boldsymbol{z}^* = (\widetilde{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{T}}\widetilde{\boldsymbol{A}})^{-1}\widetilde{\boldsymbol{A}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b} \tag{29}$$

最优控制序列可表示为

$$\Delta\boldsymbol{U}^*(k) = (\boldsymbol{S}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y\boldsymbol{S}_u + \boldsymbol{\lambda}_{\Delta u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{\Delta u})^{-1}\cdot \boldsymbol{S}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y\boldsymbol{E}_p(k+1\mid k) \tag{30}$$

解第 1 个元素可得

$$\Delta\boldsymbol{u}^*(k) = [\boldsymbol{I}_{n_p\times n_p} \quad 0 \quad \cdots \quad 0]_{1\times n_c}\Delta\boldsymbol{U}^*(k) = \boldsymbol{K}_m\boldsymbol{E}_p(k+1\mid k) \tag{31}$$

其中

$$\boldsymbol{K}_m = [\boldsymbol{I}_{n_p\times n_p} \quad 0 \quad \cdots \quad 0]_{1\times n_c}(\boldsymbol{S}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y\boldsymbol{S}_u + \boldsymbol{\lambda}_{\Delta u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{\Delta u})^{-1}\boldsymbol{S}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_y \tag{32}$$

最终的 MPC 控制率可表示为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{upper}}^*(k) = \boldsymbol{u}(k-1) + \Delta\boldsymbol{u}^*(k) \tag{33}$$

4 下层控制器设计

上层控制器根据目标需求计算目标加速度作为下层控制器的输入,下层控制器控制执行机构来跟踪期望值,实现控制。农机在跟随过程中,根据期望值的变化进行相应的加减速控制,涉及驱动系统以及制动系统,为了避免执行机构冲突,设计驱动/制动选择控制器,即加速时选择驱动系统来执行,减速时选择制动系统来执行。

$$M(I_d) = \begin{cases} M_d(a_{md}) & (a_{md}\geqslant 0) \\ M_b(a_{md}) & (a_{md}<0) \end{cases} \tag{34}$$

式中 M_d——驱动力矩,N·m

M_b——制动力矩,N·m

$M(I_d)$——驱动/制动选择力矩,N·m

a_{md}——上层控制器计算得到的目标加速度,$\mathrm{m/s^2}$

通过加装电子油门以及线控制动器对农机进行驱动/制动控制,电子油门通过用线束代替拉索或者拉杆,在节气门加装电动机,用电动机驱动节气门开度,控制驱动力矩。线控制动器通过接收制动信号控制助力电机进而推动制动泵工作。本文设计的下层控制器主要是为了满足对期望信号的快速跟踪,驱动以及制动的控制实现都是通过电机。采用前馈加 PI 控制器对电机的电流进行控制来跟踪期望驱动/制动力矩。

根据基尔霍夫电压定律可得电机电压的微分方程为

$$U = L\dot{I} + RI + K_b\theta_m \tag{35}$$

式中 θ_m——电机转动角,rad

I——电机电流,A

R——电机等效电阻,Ω

L——电机等效电感,H

K_b——电机反电动势,V

前馈控制令 $\dot{I}=0$,得前馈电压为

$$U_1 = RI + K_b i_{d,r}\dot{\theta}_{d,r} \tag{36}$$

式中 $i_{d,r}$——减速比

$\theta_{d,r}$——减速器输出轴转角,rad

电机的目标电流通过上层控制器计算得到的目标加速度换算得到,对电流跟踪的误差采用 PI 控制模型为

$$U_2 = k_p(I_r - I_d) + k_i\int(I_r - I_d) \tag{37}$$

式中 k_p——PID 比例系数

k_i——PID 积分系数

I_d——理想电流,A

I_r——实际电流,A

可得下层控制器的总控制率为

$$U_{\mathrm{lower}}^* = U_1 + U_2 \tag{38}$$

5 仿真验证

通过 Matlab/Simulink 编写控制程序并搭建控制模型,对所提出的农机跟随控制算法进行验证,上层控制器中的相关参数选取如下:参照文献[22]中土壤条件及相应附着系数,设置附着系数 $\mu=0.28$;根据土壤条件及作业条件设置动态调整因子 l_1、l_2,仿真过程设置路面附着系数较小,应减小加速度并缩小其范围,分别设计为 $l_1=0.6$,$l_2=0.9$;为保证控制性能,距离误差约束条件设计为 $\Delta d_{\min}=-0.5$ m,$\Delta d_{\max}=0.5$ m,设计速度误差约束条件为 $\Delta v_{\min}=-0.5$ m/s,$\Delta v_{\max}=0.5$ m/s;为使拖拉机运行平稳,设计加速度约束条件为 $a_{d\min}=-0.3\ \mathrm{m/s^2}$,$a_{d\max}=0.3\ \mathrm{m/s^2}$。下层控制器进行 PID 参数调节,进行多次调试,得到调节参数为 $k_p=5.3$,$k_i=2.2$;电机电阻为 $R=1.2\ \Omega$,电感为 $L=0.04$ H,减速比 $i_{d,r}=20$。

结合拖拉机的真实运动情况,搭建纵向动力学模型、拖拉机模型以及发动机模型等,在仿真过程中,加入了外部噪声对所提出的跟随算法进行验证,为使仿真过程较好地贴近实际运行情况以进行控制器验证,参考约翰迪尔拖拉机的真实静态以及动态参数进行仿真参数设置,如表 1 所示。发动机 MAP 图及仿真结果如图 2~4 所示。

设置目标速度变化如图 3 黑色曲线所示,包含加速、匀速、连续变速、减速等阶段,最大速度为 14 m/s,通过 SMC 与本文提出方法的速度以及加速度仿真结果对比可知,基于 SMC 的控制方法跟随响应存在一定的滞后,并且对噪声的处理能力较差,存

表 1　仿真模型参数

Tab. 1　Simulation model parameters

参数	数值
拖拉机质量 m/kg	3 910
发动机动力传动比 N_g	5.89
传动系统机械效率 η	0.89
比例系数 K_P	0.85
空气阻力系数 C_A	0.28
滚动阻力系数 f	0.05
机具平均牵引力 F_r/N	5 000
期望跟随距离 d_d/m	30
时间常数 T_a/s	0.5
车轮半径 r_w/m	0.85

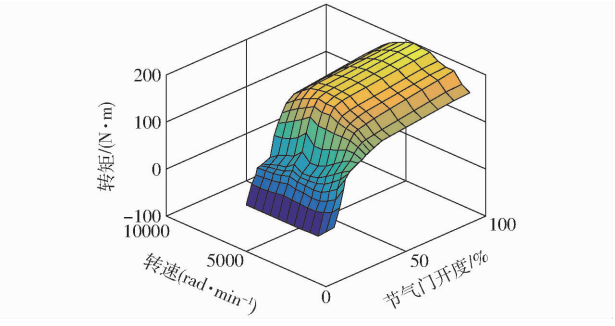

图 2　发动机 MAP 图

Fig. 2　Engine MAP

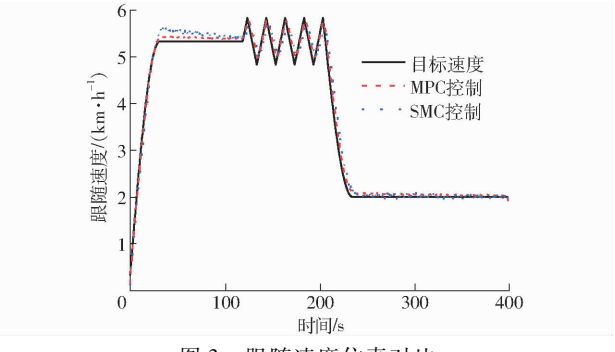

图 3　跟随速度仿真对比

Fig. 3　Comparison of following speed under simulation

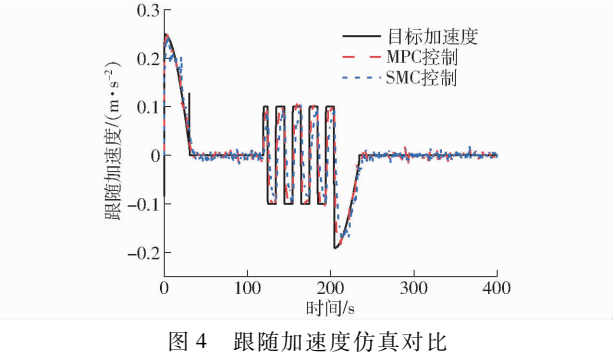

图 4　跟随加速度仿真对比

Fig. 4　Comparison of following acceleration under simulation

在较大的噪声波动，本文提出的基于 MPC 的跟随控制方法能够较好地实现速度以及加速度的跟随，下层反馈加 PI 电流控制器有效提高响应能力，MPC 在设计过程中考虑模型不确定性以及干扰噪声，具有较好的抗不确定性以及噪声抑制能力。

6　试验验证

对本文所提控制方法的实际效果进行了拖拉机跟随试验，试验地点为山东省淄博市朱台镇禾丰种业有限公司无人农场，试验土壤为黄壤土，试验地块为均匀铺撒小麦秸秆的麦茬地，土壤含水率：0 ~ 10 cm为 15%，10 ~ 20 cm 为 16%；土壤坚实度：10 cm 处为 2.3 MPa，20 cm 处为 3.2 MPa，平整度较为均匀。试验平台如图 5 所示，选用约翰迪尔 6603 型拖拉机，挂载带清茬旋耕的 6 行玉米精量播种机，加装 RTK − GPS 导航用于测量实时速度，速度辅助传感器用于速度验证校正，惯导用于测量实时加速度，电子油门及线控液压制动器用于驱动执行机构进行加减速。文献[23 − 25]提供了一种硬件在环快速控制方案，基于此，本文进行了基于 dSPACE 的快速控制硬件设计，dSPACE 用于将 Matlab/Simulink 编写的控制程序快速生成控制信号。为了较好地验证提出算法的控制效果，需要对各类行驶工况进行验证，并与 SMC 的控制效果进行对比。本文设置主机目标行驶速度如图 6a 所示，将其行驶过程主要分为 5 个阶段，第 1 阶段为加速阶段，第 2 阶段为中高速匀速行驶阶段，第 3 阶段为速度波动阶段，第 4 阶段为减速阶段，第 5 阶段为低速匀速行驶阶段。

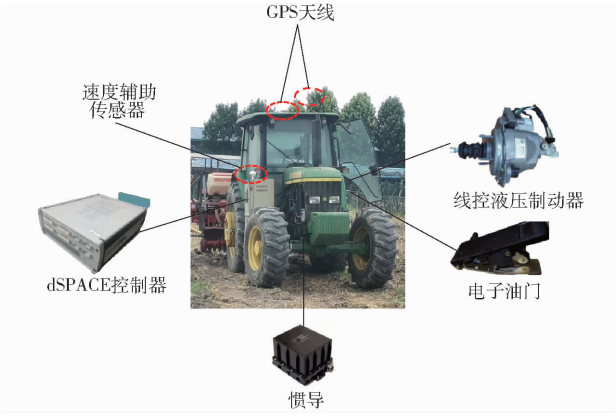

图 5　跟随农机作业试验控制平台

Fig. 5　Experiment control platform of following operation agricultural machinery

图 6b 为跟随速度对比图，可以看出，基于 SMC 算法的跟随速度在加速初始阶段出现了较大幅度的超调，而由于 MPC 算法执行过程中参考未来时刻的预测值来进行当前时刻的控制，使跟随速度可以在各个阶段较好地跟随目标速度，实行稳定跟随行驶。图 6c、6d 为加速度阶段以及高频速度加减阶段的速度跟随局部放大图。从图 6c 可以看出，MPC 控制器结合下层控制器具有更快速的响应能力，比 MPC 控制响应快 3 s 左右；图 6d 可以看出，面对频繁的加

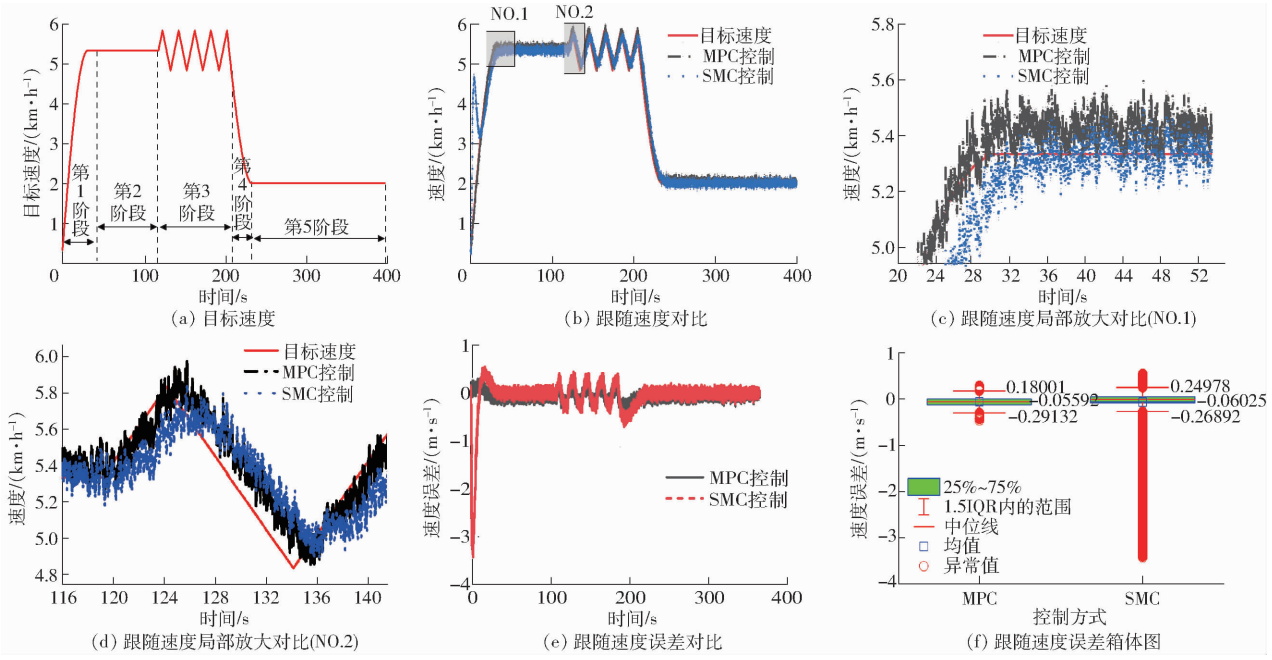

图 6 跟随速度

Fig. 6 Following speed

减速工况,本文提出的控制方法可以更好地跟随目标速度。图 6e 为跟随速度误差对比图,SMC 在加速初期产生较大的超调,在频繁加减速阶段也产生了较大的误差波动,对比本文提出的方法而言,SMC 不具备 MPC 的鲁棒性,对于目标的急剧变化调整能力不足,同时,由于下层电流跟踪控制器设计,进一步提高了本文设计方法的响应速度。图 6f 为误差箱体图,基于 MPC 控制器的跟随速度误差均值为 0.056 m/s,且数据集中平稳,集中在 -0.291 32 ~ 0.180 01 m/s范围内,具有很好的抗不确定性以及抗干扰能力,基于 SMC 的跟随误差均值为 0.06 m/s,数据分散度大,最大误差达到 -3.5 m/s,较难应对田间作业的不确定性以及干扰等问题。

由图 7a 跟随加速度对比图可以看出,加速初期,基于 SMC 控制的跟随加速度出现了较大幅度的振荡波动,而本文提出的方法在加速初期便展现了很好的加速度跟踪性能,尤其在 235 s 左右,由于田间环境或作业载荷的影响基于 SMC 控制的加速度出现较大凸起,而本文提出的方法在设计过程中考虑不确定性以及干扰因素,从而能够有效应对该因

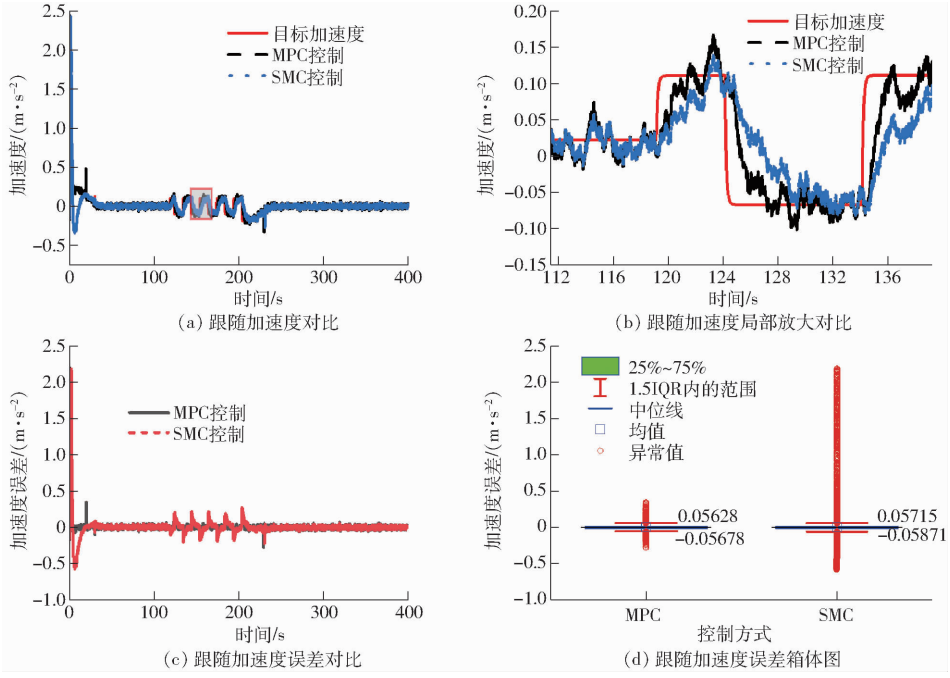

图 7 跟随加速度

Fig. 7 Following acceleration

素的影响。图 7b 为加速度对比局部放大图，本文提出的控制方法对加速度的突变阶跃展现出了更好的跟踪能力。图 7c 为加速度误差对比图，可以看出在频繁加减速工况下，SMC 控制下的加速度跟踪误差波动较大。由图 7d 可以看出，本文提出的控制方法误差数据异常点极少，具有较好的抗不确定性以及抗干扰能力，具有较好的跟踪误差稳定性，加速度跟踪误差集中在 −0.056 78 ~ 0.056 28 m/s^2，最大误差约为 0.3 m/s^2，加速度跟踪效果良好。

图 8a 为跟随距离对比图，与 SMC 相比，本文提出的控制方法展现了更好的距离跟踪效果，从图 8b 可以看出，SMC 控制方法距离误差较大，较难控制跟随距离误差在 0 附近，在主机速度变化剧烈时，会产生很大的误差波动，本文提出的控制方法，在跟随初期便可以使跟随距离误差迅速控制到 ±0.45 m，具有较好的距离跟踪能力。

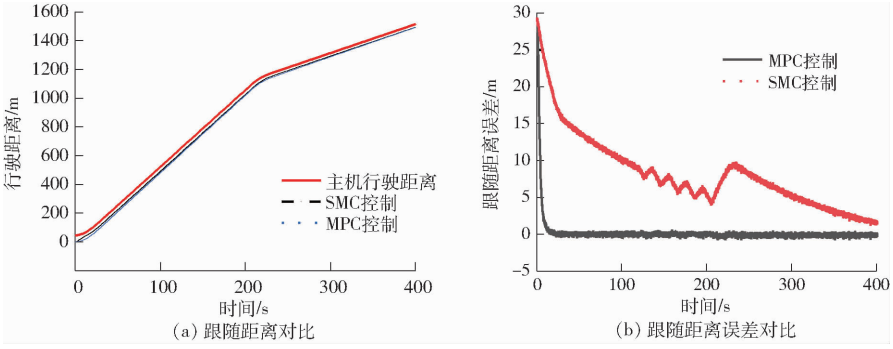

图 8　跟随距离

Fig. 8　Following distance

7　结论

（1）考虑农机的作业条件，进行跟随动力学模型建立并考虑模型不确定性以及干扰噪声进行了基于 MPC 算法的控制器推导，推导过程中主要以间距保持、速度跟随、燃油经济性、加速度跟随性能为目标来提高综合跟随控制性能，同时，设计下层反馈及 PI 电流控制器来提高系统的响应能力。

（2）通过基于 dSPACE 的快速原型控制方法，将控制方法进行了快速验证，搭建农机跟随试验平台，通过与 SMC 算法的控制效果对比，验证了本文所提出的控制方法在间距保持、速度跟随、加速度跟随方面都具有较好的控制能力，同时能够有效应对不确定性以及干扰问题。试验结果表明，本文设计的控制器跟随速度误差在 −0.291 32 ~ 0.180 01 m/s，加速度误差保持在 −0.056 78 ~ 0.056 28 m/s^2，跟随距离误差为 ±0.45 m，能够较好地满足控制要求。

参　考　文　献

[1] 胡静涛，高雷，白晓平，等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报，2015，31(10)：1 − 10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1 − 10. (in Chinese)

[2] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1 − 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200101&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)

[3] 谢斌，武仲斌，毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(8)：1 − 17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1 − 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180801&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)

[4] HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2018, 44(4): 381 − 391.

[5] LI S, LI K, RAJAMANI R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 556 − 566.

[6] 赵树恩，冷姚，邵毅明. 车辆多目标自适应巡航显式模型预测控制[J]. 交通运输工程学报，2020，20(3)：206 − 216.
ZHAO Shu'en, LENG Yao, SHAO Yiming. Vehicle multi-objective adaptive cruise explicit model predictive control[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20(3): 206 − 216. (in Chinese)

[7] MOSER D, SCHMIED R, WASCHL H, et al. Flexible spacing adaptive cruise control using stochastic model predictive control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(1): 114 − 127.

[8] WANG J,ZHANG L,ZHANG D, et al. An adaptive longitudinal driving assistance system based on driver characteristics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2013, 14(1):1 - 12.
[9] MILANES V, SHLADOVER S E. Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2014, 48: 285 - 300.
[10] NOAH J G, CHIEN-LUN L. Car-following characteristics of adaptive cruise control from empirical data[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(9): 1 - 10.
[11] CHRISTOPHER L,MICHAEL W,BRITTON E,et al. Dynamic traffic assignment of cooperative adaptive cruise control[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies, 2018, 90: 114 - 133.
[12] SHLADOVER S E,NOWAKOWSKI C,LU X,et al. Cooperative adaptive cruise control[J]. Transportation Research Record, 2015,2489:145 - 152.
[13] WANG Chaojie,GONG Siyuan,ZHOU Anye,et al. Cooperative adaptive cruise control for connected autonomous vehicles by factoring communication-related constraints[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 113:124 - 145.
[14] 黄菊花,邹汉鹏,刘明春. 考虑测量噪声的车辆自适应巡航控制系统纵向跟车研究[J]. 北京理工大学学报,2020, 40(3):254 - 261.
HUANG Juhua,ZOU Hanpeng, LIU Mingchun. Research on the longitudinal tracking of adaptive cruise control system for vehicles considering of measurement noise[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(3): 254 - 261. (in Chinese)
[15] 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于自动机械式变速的拖拉机定速巡航系统[J]. 农业工程学报,2012,28(4):21 - 26.
HAN Keli,ZHU Zhongxiang,MAO Enrong,et al. Cruise control system of tractor based on automated mechanical transmission [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 21 - 26. (in Chinese)
[16] 王致情. 农业车辆自主跟随控制系统的设计与实现[D]. 南京:南京农业大学,2014.
WANG Zhiqing. Design and implementation of autonomous following control system for agricultural vehicles[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
[17] 毕伟平. 基于双目视觉的主-从车辆自主跟随方法的设计与试验[D]. 南京:南京农业大学,2016.
BI Weiping. Design and test of autonomous following method of master and slave vehicles based on binocular vision[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[18] 王卓,刘知祥,白晓平,等. 拖拉机定速巡航系统纵向加速度跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):21 - 28.
WANG Zhuo,LIU Zhixiang,BAI Xiaoping,et al. Longitudinal acceleration tracking control of tractor cruise system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 21 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.002. (in Chinese)
[19] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):30 - 37.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):30 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004. (in Chinese)
[20] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等. 水田环境下水稻直播机自动驾驶控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):15 - 22.
ZHANG Yan,LI Yanming,LIU Xiangpeng,et al. An automatic drive control technique for rice drill seeder in uneven paddy fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):15 - 22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.002. (in Chinese)
[21] 武仲斌,谢斌,迟瑞娟,等. 电动拖拉机田间巡航作业驱动转矩管理模型[J]. 农业工程学报,2019,35(4):88 - 98.
WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Driving torque management model for electric tractor in field cruise condition [J]. Transactions of the CSAE,2019,35(4):88 - 98. (in Chinese)
[22] 吴树岸. 基于附着系数实时估算的拖拉机软土地面自动识别方法研究[D]. 南京:南京农业大学,2017.
WU Shu'an. Research on automatic recognition method of tractor soft soil surface based on real-time estimation of adhesion coefficient [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[23] WU H, XU G, WU J, et al. EPS current tracking method research based on hybrid sensitivity H_∞ control algorithm[J]. Journal of Electrical & Computer Engineering, 2018(9):1 - 10.
[24] XU G, DIAO P, HE X, et al. Research on vehicle active steering control based on linear matrix inequality and hardware in the loop test scheme design and implement for active steering[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(11): 1 - 12.
[25] XUE M, XU G, FENG J, et al. Control strategy of automotive electric power steering system based on generalized internal model control[J]. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2020, 14: 1 - 9.