doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.034

# 收获卸粮协同作业位速耦合控制方法

金诚谦[1]　陈钧龙[1]　刘　政[1]　杨腾祥[1]　刘岗微[1]　於海明[2]
(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.南京农业大学工学院,南京 210031)

**摘要**:为解决收获机与运粮车协同跟随卸粮过程中横纵向相对位置精确控制难题,提出了一种收获卸粮协同作业位速耦合控制方法。根据协同几何关系建立横纵向相对位置偏差的协同作业模型,提出了基于双 PID 纵向位速控制和模型预测横向路径跟踪控制的控制方法,进行了 Matlab/Simulink 与 CarSim 联合仿真和田间试验。仿真结果表明,不同收获机速度下稳态的双机平均纵向位置偏差为 0.004 2 m,标准差为 0.006 99 m,平均横向位置偏差为 0.018 7 m,标准差为 0.010 5 m。田间试验结果表明,不同收获机速度和不同双机横纵向相对初始位置偏差下,稳态的平均纵向位置偏差为 0.300 m,标准差为 0.345 m,平均横向位置偏差为 0.270 m,标准差为 0.288 m。结果表明,所提出的控制方法具有良好的收敛性能和鲁棒性,满足收获卸粮协同作业的横纵向位置偏差精度需求。

**关键词**:收获卸粮;协同作业;位速耦合;横纵向控制;模型预测控制
**中图分类号**:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0427-13　　**OSID**:

# Position-velocity Coupling Control Method and Experiments for Harvesting and Unloading Cooperative Operation

JIN Chengqian[1]　CHEN Junlong[1]　LIU Zheng[1]　YANG Tengxiang[1]　LIU Gangwei[1]　YU Haiming[2]
(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

**Abstract**: In the field harvesting operation, although the combine harvester operation effectively improved the mechanical utilization rate and operational efficiency, due to the limited capacity of the harvester silo, it is necessary to carry out cooperative harvesting and unloading operation with the transporter to unload and transport the grain. In order to accurately control the transverse and longitudinal relative position of the harvester and the transporter, so that the grain in the harvester is accurately unloaded into the silo of the transporter, a cooperative operation position-velocity coupling control method for harvesting and unloading grain was proposed. The principle of transverse and longitudinal relative bit speed cooperative was analyzed, a geometric model of cooperative operation was established, a longitudinal control method with dual PID control and a lateral control method with model predictive control were proposed, and a joint simulation of Matlab/Simulink and CarSim was established, and an unloading test in the field for the parameter optimization and validation experiments was carried out. The simulation results showed that, when the harvesting harvester speeds were 0.6 m/s, 0.8 m/s, and 1.0 m/s, the average longitudinal uptime was 14.04 s, the average lateral uptime was 9.581 s, the average longitudinal maximum overshoot was 0.003 1 m, the lateral maximum overshoot was zero, the average longitudinal error was 0.004 2 m with a standard deviation of 0.006 99 m, the average lateral error was 0.018 7 m with a standard deviation of 0.010 5 m. The results of field experiments showed that, when the harvesting harvester speeds were 0.4 m/s, 0.6 m/s, and 0.8 m/s, the average longitudinal error was 0.300 m with a standard deviation of 0.345 m, the average velocity deviation was 0.087 8 m/s with a standard deviation of 0.109 m/s, the average lateral error was 0.270 m with a standard deviation of 0.288 m, and the average heading deviation was 11.669° with a standard deviation of 12.642°. The results showed that the position-velocity coupling control method based on dual PID control and model predictive control proposed had good

收稿日期:2025-03-12　修回日期:2025-04-17
**基金项目**:国家重点研发计划项目(2021YFD2000503)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(23)1021)、国家自然科学基金项目(32171911)和中国农业科学院智慧农业与装备科学中心项目(CAAS-SAE-202301)
**作者简介**:金诚谦(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事大田作物收获机械化与智能化技术研究,E-mail:jinchengqian@caas.cn

convergence performance and control accuracy, which can meet the demand for transverse and longitudinal deviation accuracy in cooperative operation of harvesting and unloading.

**Key words**: harvesting and unloading; cooperative operation; position-velocity coupling; lateral and longitudinal control; model predictive control

## 0 引言

农业机械智能化、自主化作业已成为解决劳动力短缺的重要手段,但是随着农业装备作业智能化的发展,单机作业的局限性也逐渐体现出来[1]。因此,多机协同作业技术逐渐成为农业机械领域的重要研究热点,智慧农业和无人农场都倾向于采用这种技术,提高整体运营效率和农业机械资源利用效率[2]。在大田收获作业中,联合收获机作业虽然有效提高了机械利用率与作业效率,但由于收获机粮仓容量有限,需要与运粮车进行收获卸粮协同作业,卸载与运输粮食。研究收获卸粮协同作业位速耦合控制方法,消除收获机与运粮车的横纵向偏差,对于实现无人农场全程自主收获具有重要意义[3]。

目前,典型的运动控制方法包括比例-积分-微分(Proportion integration differentiation, PID)控制[4]、线性二次型调节器(Linear quadratic regulator, LQR)控制[5-6]、纯追踪控制[7-9]、滑模控制[10]、模型预测控制(Model predictive control, MPC)[11-13]和模糊控制[14]等。在农业机械运动控制领域,许多学者对单个农业机械运动控制方法进行了研究[14-20]。在收获卸粮协同作业研究领域,也有学者进行了收获机与运粮车相对位置控制方法研究[21-24]。

这些研究针对收获跟随卸粮协同作业纵向控制提出了多种控制方法,而在横纵两个方向上进行协同控制的研究局限于地头卸粮模式,还未应用于跟随卸粮模式。本文拟针对运粮车与收获机协同作业跟随卸粮横纵向位速耦合控制的需求,根据协同几何关系建立横纵向相对位置偏差的协同作业模型,提出基于双 PID 纵向位速耦合控制和 MPC 横向路径跟踪控制的协同作业位速耦合控制方法,建立 Matlab/Simulink 与 CarSim 联合仿真模型进行验证试验,通过田间试验验证控制方法的性能和适应性,以期实现双机跟随卸粮过程中横纵向位速耦合控制。

## 1 收获卸粮协同作业位速耦合控制系统设计

在实际的收获卸粮协同作业中,优先控制收获机与运粮车的相对位速而非直接调整卸粮臂角度,卸粮臂的旋转自由度虽然为调整卸粮方向提供了灵活性,但其调节范围通常受机械结构限制,且角度调整本质上是对目标点的局部修正,无法从根本上解决车辆间因运动偏差导致的卸载错位问题。

本文聚焦于收获卸粮协同作业位速耦合控制方法的研究。研究场景设定为:收获机执行匀速直线收获作业;运粮车初始停靠于地头待命区,当收获机粮仓高度达到预设阈值时,触发协同作业指令,运粮车随即启动并向收获机方向靠拢。在运粮车与收获机完成纵向对齐和横向上线后,双机需维持动态协同状态,即运粮车通过位速耦合控制同步调整速度与转向角度,从而控制运粮车位置,确保卸粮筒出口与目标接粮点在空间上精准对齐,避免粮食撒漏或碰撞风险。

为了直观地了解需要控制的双机相对位置偏差信息,本文用收获卸粮协同作业示意图表示双机协同作业的运行状态,如图 1 所示,其中,$P_h$为收获机定位点,$P_a$为卸粮口,$P_t$为运粮车的定位点,$P_u$为卸粮目标点,$d_1$为卸粮口与卸粮目标点的横向偏差,通过调节两车的相对横向距离来控制,$d_2$为纵向偏差,通过调节运粮车的车速来控制。

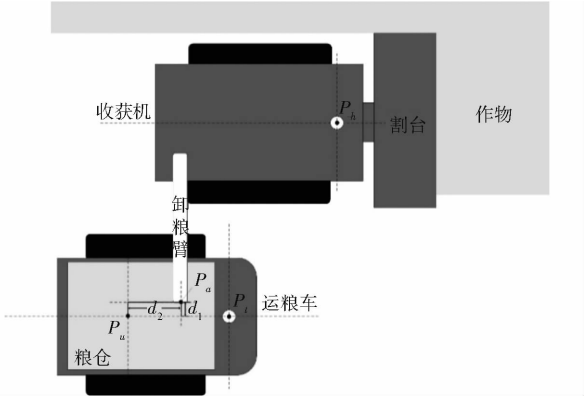



图 1 收获卸粮协同作业示意图

Fig. 1 Schematic of cooperative harvesting and unloading operation

车辆位速控制与卸粮臂角度控制之间存在主次关系。位速协同是动态匹配的核心,而卸粮臂调整更多是静态补偿。所以在卸粮臂完全展开后,要控制卸粮臂与卸粮目标点的相对位置,需要控制运粮车与收获机的相对位置。为了保证收获机准确地将粮食卸入运粮车,在收获机匀速行驶进行收获作业时,需要控制卸粮臂出口与卸粮点相对横纵向位置偏差 $d_1$、$d_2$,使卸粮臂的出口位置 $P_a$与卸粮目标点位置 $P_u$一致。然而,在收获卸粮协同作业中很难直接获取 $d_1$、$d_2$,所以在卸粮臂完全展开时,需要通过

控制双机导航定位点的相对位置偏差与期望偏差相同，从而消除卸粮臂出口与卸粮目标点的相对位置偏差，使卸粮臂与卸粮目标点实现精准对齐。在世界平面直角坐标系下，设置 $X$ 轴正方向为东方向，$Y$ 轴正方向为北方向，基准线为正北方向，将双机模型简化为能够指示航向的箭头，协同作业几何模型如图 2 所示。数学模型为

$$\begin{cases} L = \sqrt{(x_t - x_h)^2 + (y_t - y_h)^2} \\ \alpha = \arcsin\dfrac{x_t - x_h}{L} \\ d_h = L\sin(\alpha + \varphi_h) \\ d_l = L\cos(\alpha + \varphi_h) \end{cases} \tag{1}$$

式中　$L$——收获机与运粮车定位之间的距离，m

$(x_h, y_h)$——收获机定位坐标，m

$(x_t, y_t)$——运粮车定位坐标，m

$\alpha$——两车定位中心点连线与正北方向之间的夹角，rad

$\varphi_h$——收获机航向与正北方向夹角，rad

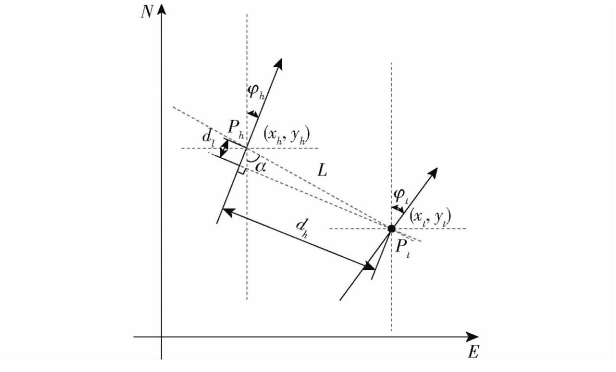



图 2　收获卸粮协同作业几何模型

Fig. 2　Geometric model of cooperative harvesting and unloading operation

要精准控制运粮车与收获机之间的横纵向相对偏差 $d_h$、$d_l$，需要获取双机精确经纬度、航向和行驶速度等信息，将其转化为便于计算的平面坐标系中，构建高精度、低延时的多源信息感知与坐标转换体系。本研究使用 RTK－GNSS 技术为运粮车和收获机提供导航定位信息，解析提取运粮车与收获机的经纬度信息，采用通用横墨卡托格网系统（Universal transverse Mercator grid system，UTM）将球面坐标转换为平面直角坐标，结合解析提取的航向角度计算得到双机实际相对横纵向位置偏差，连同转换为国际单位的速度以及期望横纵向相对位置偏差，进行双机协同作业位速耦合控制。通过改变运粮车液压转向机构的电动溢流阀比例控制转向，通过改变运粮车油门调节速度，实现运粮车与收获机位速耦合控制。控制框图如图 3 所示，通过运粮车上的控制器局域网（Controller area network，CAN）总线获得收获机和运粮车的位置、速度和航向信息，输入位速耦合控制器得到期望速度和转向角度，转换为油门和电动溢流阀比例输入 CAN 总线，从而改变运粮车前进速度和航向角，实现横纵向位速耦合控制。

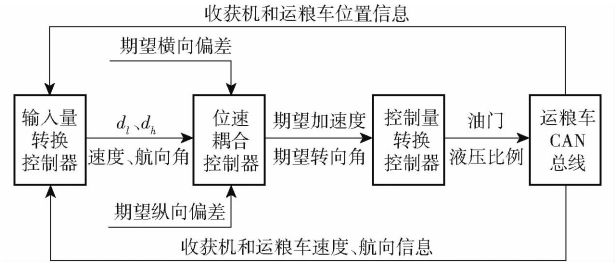



图 3　收获卸粮协同作业位速耦合控制框图

Fig. 3　Position-velocity coupling control framework for cooperative harvesting and unloading operation

设计的双机协同作业位速耦合控制系统包括定位模块、位速耦合控制模块、底盘运动控制模块、车间通信模块。定位模块采用 RTK－GNSS 芯片 UM982 采集经纬度、航向角度和速度信息，定位数据更新频率为 20 Hz，水平定位精度为 0.8 cm + 1 ppm，定向精度为 0.1(°)/m，速度精度为 0.03 m/s；位速耦合控制模块的控制终端为便携式计算机（Lenovo Y9000P），软件使用 Matlab/Simulink 进行开发控制；底盘运动控制模块采用 SPC－SFMC－X2424A 运动控制器，通过分级递阶结构实现了对双机行驶和协同作业的精确控制，转向执行机构为 HydraForce 生产的 TS38－20A 比例型电动溢流阀。车间通信模块采用 2 组 2.4 GHz 频率通信模块 E220－900T30S 进行无线通信，通信串口的传输频率为 1 Hz，使用 SPC－SDIO－0824 I/O 模块进行数据融合和处理。

运粮车和收获机分别通过接收机和天线采集 RTK－GNSS 定位信息，结合 LoRa 通信模块采集的车间通信信息，由 RS232 串口输出到通信终端，为控制器提供输入量；控制器通过 I/O 串口控制卸粮，通过脉冲宽度变调（Pulse width modulation，PWM）电路控制割台、转向、速度控制等系统，通过 CAN 总线控制发动机；运粮车的控制终端为便携式计算机，通过 CAN 总线与控制器建立连接，通过 Matlab/Simulink 软件进行控制；收获机的控制终端为触控显示屏，通过 CAN 总线与控制器进行连接控制。双机协同作业位速耦合控制系统总体结构如图 4 所示。

## 2　位速耦合控制器设计

位速耦合控制是一种在运动控制系统中同时考虑位置与速度的动态关系，并通过二者的协同调整

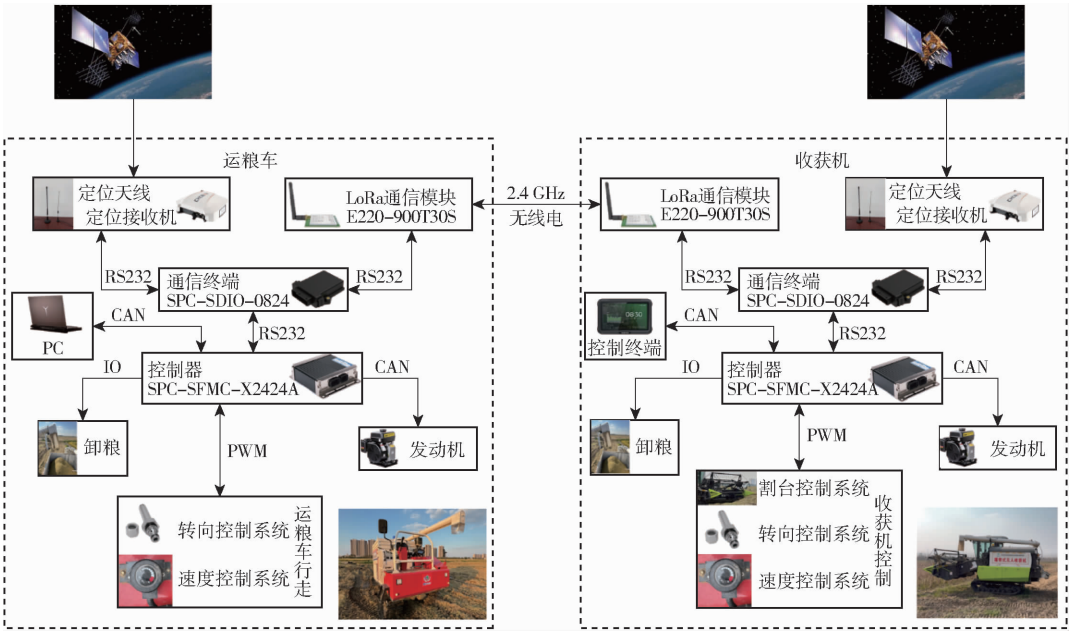



图 4 控制系统总体结构图

Fig. 4 Overall structure of control system

实现精准跟踪或协同运动的技术方法。其核心思想是通过位置误差与速度误差的联合反馈,设计控制器输出,使被控对象在满足位置精度的同时,兼顾速度的平滑性和响应速度,从而提升系统的动态性能与鲁棒性。位速耦合控制通过深度融合位置与速度的动态特性,解决了单一参数控制的局限性,特别适用于高精度路径跟踪、多机协同作业等复杂运动场景,是提升农业机械、自动驾驶等领域控制性能的关键技术之一。

收获卸粮协同作业位速耦合控制需要对运粮车与收获机横纵向相对位置和速度进行耦合控制,本研究提出了基于双 PID 纵向位速耦合控制和 MPC 横向路径跟踪控制的双机协同作业位速耦合控制方法。运粮车依据当前与收获机的纵向位置和速度偏差控制油门大小,依据双机横纵向位置、速度和航向角控制转向角度,控制器框图如图 5 所示。控制器主要包括位置-速度控制器、速度-加速度控制器和路径跟踪控制器。将实际纵向偏差和期望纵向偏差输入位置-速度控制器得到速度补偿,与双机实际速度共同输入速度-加速度控制器计算得到运粮车期望加速度输出控制器;将实际纵向偏差和期望纵向偏差之差、实际横向偏差和期望横向偏差之差、双机实际速度和航向角输入横向路径跟踪控制器,输出运粮车期望转向角。

本研究设计了双 PID 位速控制器,位置-速度 PID 控制器的输入为收获机与运粮车的实际纵向偏差和期望纵向偏差。控制器计算实际和期望纵向偏差之间的误差,根据误差,通过比例、积分和微分计算出速度补偿。位置-速度 PID 控制器输出表示为

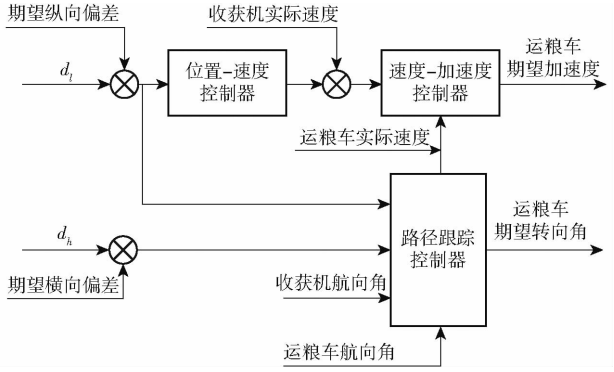



图 5 位速耦合控制器框图

Fig. 5 Framework of position-velocity coupling controller

$$u_1(t) = K_{p1}e_1(t) + K_{i1}\int_0^t e_1(\tau)\,\mathrm{d}\tau + K_{d1}\frac{\mathrm{d}e_1(t)}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中 $u_1(t)$——速度补偿值

$e_1(t)$——实际和期望纵向偏差之差

$K_{p1}$——位置-速度 PID 控制器比例增益

$K_{i1}$——位置-速度 PID 控制器积分增益

$K_{d1}$——位置-速度 PID 控制器微分增益

$\tau$——积分变数

设置输出饱和值,将计算出的速度补偿传递给速度-加速度 PID 控制器,速度-加速度 PID 控制器的输入为位置-速度 PID 控制器计算的速度补偿和收获机、运粮车的实际速度。控制器计算运粮车的实际纵向速度和速度补偿与收获机实际速度之间的误差,根据误差,通过比例、积分和微分计算出期望加速度。速度-加速度 PID 控制器的输出表示为

$$u_2(t)=K_{p2}e_2(t)+K_{i2}\int_0^t e_2(\tau)\mathrm{d}\tau+K_{d2}\frac{\mathrm{d}e_2(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中　$u_2(t)$——期望加速度

$e_2(t)$——运粮车的实际纵向速度和速度补偿与收获机实际速度之差

$K_{p2}$——速度-加速度 PID 控制器比例增益

$K_{i2}$——速度-加速度 PID 控制器积分增益

$K_{d2}$——速度-加速度 PID 控制器微分增益

设置输出饱和值，将计算出的期望加速度传递给控制量转换器，将期望加速度转换为油门大小，调节运粮车的位置和速度。

在农业机械自动驾驶领域，运动学模型的构建是路径跟踪控制算法设计的基础。运粮车转向由比例型电动溢流阀控制，作业时速度较慢，可以忽略在行进过程中轮胎侧滑、车身侧倾等影响稳定性的因素，不考虑运粮车行走时的侧偏和地面状况等因素的影响时，可将其简化为二轮车模型。本研究为 MPC 控制器设计了双机协同作业运动学模型，如图 6 所示，预测协同作业系统状态，根据双机状态偏差和期望状态偏差计算误差，构建目标函数，通过求解优化问题得到未来时刻的最优控制输入序列，第一个控制量输入作为运粮车转向角度，在下一个控制周期重复上述过程。

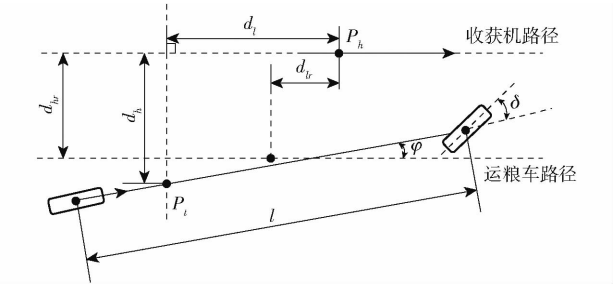



图 6　协同作业运动学模型

Fig. 6　Kinematic model of cooperative operation

本研究将 MPC 算法的输入量设置为收获机与运粮车实际横纵向偏差、期望横纵向偏差和双机的航向角、实际速度，输出量设置为运粮车期望转向角度，建立双机协同作业运动学方程

$$\begin{bmatrix}\dot d_l\\ \dot d_h\\ \dot\varphi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi\\ \sin\varphi\\ \dfrac{\tan\delta}{l}\end{bmatrix}v \tag{4}$$

式中　$\varphi$——运粮车航向与收获机航向夹角，rad

$l$——二轮车模型轴距，m

$\delta$——二轮车模型前轮转角，rad

$v$——二轮车模型前进速度，m/s

控制器的输入为实际纵向位置偏差 $d_l$、实际横向位置偏差 $d_h$ 和运粮车航向角度 $\varphi_t$，期望纵向位置偏差 $d_{lr}$、期望横向位置偏差 $d_{hr}$ 和收获机航向角度 $\varphi_h$、运粮车的实际速度，输出为运粮车的前轮转角。

系统可看作一个输入量为 $\boldsymbol{u}=(v,\delta)$ 和状态量为 $(d_l,d_h,\varphi)$ 的控制系统，用 $r$ 代表参考量，其一般形式为

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_r=f(\boldsymbol{\chi}_r,\boldsymbol{u}_r) \tag{5}$$

其中
$$\boldsymbol{\chi}_r=(d_{lr},d_{hr},\varphi)$$
$$\boldsymbol{u}_r=(v_r,\delta)$$

式中　$\boldsymbol{\chi}_r$——期望状态量

$\boldsymbol{u}_r$——期望控制量

对式(5)在参考轨迹 $(\boldsymbol{\chi}_r,\boldsymbol{u}_r)$ 处泰勒展开并忽略二阶以上的高阶项，得到

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_k=f(\boldsymbol{\chi}_r,\boldsymbol{u}_r)+\frac{\partial f(\boldsymbol{\chi}_{k-1},\boldsymbol{u}_k)}{\partial\boldsymbol{\chi}_{k-1}}(\boldsymbol{\chi}_{k-1}-\boldsymbol{\chi}_r)+\frac{\partial f(\boldsymbol{\chi}_{k-1},\boldsymbol{u}_k)}{\partial\boldsymbol{u}_k}(\boldsymbol{u}_k-\boldsymbol{u}_r) \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{\chi}_k$——状态量

$\dot{\boldsymbol{\chi}}_k$——状态变化率

$\boldsymbol{u}_k$——控制量

要得到这一时刻的状态量和状态变化量，需先有这一时刻的控制量 $\boldsymbol{u}_k$ 加上一时刻的状态量 $\boldsymbol{\chi}_{k-1}$。

将式(6)与式(5)相减，得到

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_k-\dot{\boldsymbol{\chi}}_r=\dot{\tilde{\boldsymbol{\chi}}}_k=\frac{\partial f(\boldsymbol{\chi}_{k-1},\boldsymbol{u}_k)}{\partial\boldsymbol{\chi}_{k-1}}(\boldsymbol{\chi}_{k-1}-\boldsymbol{\chi}_r)+\frac{\partial f(\boldsymbol{\chi}_{k-1},\boldsymbol{u}_k)}{\partial\boldsymbol{u}_k}(\boldsymbol{u}_k-\boldsymbol{u}_r)=\begin{bmatrix}\dot x-\dot x_r\\ \dot y-\dot y_r\\ \dot\varphi-\dot\varphi_r\end{bmatrix}=$$
$$\begin{bmatrix}0&0&-v_r\sin\varphi_r\\ 0&0&v_r\cos\varphi_r\\ 0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d_l-d_{lr}\\ d_h-d_{hr}\\ \varphi-\varphi_r\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\cos\varphi_r&0\\ \sin\varphi_r&0\\ \dfrac{\tan\delta_r}{l}&\dfrac{v_r}{l\cos^2\delta_r}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v-v_r\\ \delta-\delta_r\end{bmatrix} \tag{7}$$

式(7)即线性化的实际偏差状态量与期望偏差之间的误差模型，为了能将该模型用于模型预测控制器的设计，进行离散化处理

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}_k=\boldsymbol{A}_1\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k-1}+\boldsymbol{B}_1\tilde{\boldsymbol{u}}_k=\begin{bmatrix}1&0&-v_r\sin\varphi_rT\\ 0&1&v_r\cos\varphi_rT\\ 0&0&1\end{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{\chi}}_{k-1}+\begin{bmatrix}\cos\varphi_rT&0\\ \sin\varphi_rT&0\\ \dfrac{\tan\delta_rT}{l}&\dfrac{v_rT}{l\cos^2\delta_r}\end{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{u}}_k \tag{8}$$

式中 $\boldsymbol{A}_1$、$\boldsymbol{B}_1$——线性时变矩阵

$T$——采样时间

为了建立运粮车的控制系统模型,需设一个新的状态量 $\boldsymbol{\xi}_k$,由 $k$ 时刻相对于当前时刻 $t$ 的状态量和 $k-1$ 时刻相对于当前时刻 $t$ 的控制量组成,有

$$\boldsymbol{\xi}_k = \begin{bmatrix} \tilde{\chi}_k \\ \tilde{u}_{k-1} \end{bmatrix} \tag{9}$$

从而可以得到状态空间表达式

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}_k + \boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}_k \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\eta}_k = \boldsymbol{C}\boldsymbol{\xi}_k \tag{11}$$

其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{O}_{N_u N_x} & \boldsymbol{I}_{N_u} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{I}_{N_u} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C} = [\boldsymbol{I}_{N_x} \quad \boldsymbol{O}_{N_x N_u}]$$

式中 $\Delta\boldsymbol{u}_k$——控制增量

$N_x$——状态量个数

$N_u$——控制量个数

$\boldsymbol{\eta}_k$——输出量矩阵

$\boldsymbol{C}$——线性时变矩阵

$\boldsymbol{I}$——单位矩阵 $\boldsymbol{O}$——零矩阵

系统 $t$ 时刻预测模型表达式为

$$\boldsymbol{Y}(t) = \boldsymbol{\psi}_t\boldsymbol{\xi}(k|t) + \boldsymbol{\theta}_t\Delta\boldsymbol{U}(t) \tag{12}$$

其中

$$\boldsymbol{Y}(t) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(k+1) \\ \boldsymbol{\eta}(k+2) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}(k+N_p) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}_t = \begin{bmatrix} \boldsymbol{CB} & \boldsymbol{O} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \boldsymbol{CAB} & \boldsymbol{CB} & \cdots & \boldsymbol{O} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \boldsymbol{CA}^{N_c-1}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{CA}^{N_c-2}\boldsymbol{B} & \cdots & \boldsymbol{CB} \\ \boldsymbol{CA}^{N_c}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{CA}^{N_c-1}\boldsymbol{B} & \cdots & \boldsymbol{CAB} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \boldsymbol{CA}^{N_p-1}\boldsymbol{B} & \boldsymbol{CA}^{N_p-2}\boldsymbol{B} & \cdots & \boldsymbol{CA}^{N_p-N_c-1}\boldsymbol{B} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\psi}_t = \begin{bmatrix} \boldsymbol{CA} \\ \boldsymbol{CA}^2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{CA}^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$\Delta\boldsymbol{U}(t) = \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{u}(k|t) \\ \Delta\boldsymbol{u}(k+1|t) \\ \vdots \\ \Delta\boldsymbol{u}(k+N_c|t) \end{bmatrix}$$

式中 $\boldsymbol{Y}(t)$——系统预测输出矩阵

$\boldsymbol{\theta}_t$——控制增量序列预测参数

$\boldsymbol{\psi}_t$——系统状态量预测参数

$\Delta\boldsymbol{U}(t)$——控制增量序列

$N_p$——预测时域

$N_c$——控制时域

滚动优化的目标在于促使当前状态迅速趋向参考值,并同时最小化控制量,以实现运粮车的快速而平稳的路径跟踪。本文采用加权平方和的方法,并引入松弛因子 $\varepsilon$ 以防止系统出现无解情况。目标函数为

$$\boldsymbol{J}(k) = (\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{Y}_{ref})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{Y}_{ref}) + [\Delta\boldsymbol{U}(t)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\Delta\boldsymbol{U}(t) + \rho\varepsilon^2 \tag{13}$$

式中 $\boldsymbol{Q}$——预测时域权重矩阵

$\boldsymbol{R}$——控制时域权重矩阵

$\boldsymbol{Y}_{ref}$——参考的状态矩阵

$\rho$——权值系数

目标函数 $\boldsymbol{J}(k)$ 第 1 项是状态误差加权和,表示运粮车跟踪路径迅速响应的能力;第 2 项是输入加权和,表示运粮车控制量稳定变化的能力。对 $\boldsymbol{J}(k)$ 求解时,将目标函数转化为一个二次规划问题,定义一个偏差 $e$,表达式为

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{\psi}_t\boldsymbol{\xi}_t - \boldsymbol{Y}_{ref} \tag{14}$$

联立式(12)~(14),得到优化后的目标函数

$$\boldsymbol{J}(k) = [\Delta\boldsymbol{U}(t)]^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{R})\Delta\boldsymbol{U}(t) + 2\boldsymbol{e}^2\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\theta}\Delta\boldsymbol{U}(t) + \rho\varepsilon^2 \tag{15}$$

进一步整理得到二次规划标准形式

$$\boldsymbol{J}(k) = \frac{1}{2}[\Delta\boldsymbol{U}(t)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\Delta\boldsymbol{U}(t) + \boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{U}(t) \tag{16}$$

式中 $\boldsymbol{H}$——正定 Hessian 矩阵

$\boldsymbol{f}$——控制增量系数矩阵

在每个控制周期内,求解式(16),得到每个控制时域内的输入增量 $\Delta\boldsymbol{U}$,将控制时域的第 1 个控制增量用于转向角度输入,根据当前运粮车状态以及与跟踪路径距离预测下一周期的控制增量序列,反复循环这一过程,实现最优控制。

在实际系统中,还要考虑系统控制量和控制增量的约束条件,可表示为 $\boldsymbol{u}_{\min} \leqslant \boldsymbol{u} \leqslant \boldsymbol{u}_{\max}$,$\Delta\boldsymbol{u}_{\min} \leqslant \Delta\boldsymbol{u} \leqslant \Delta\boldsymbol{u}_{\max}$。其中,$\boldsymbol{u}_{\min}$、$\boldsymbol{u}_{\max}$ 为控制量约束的最值,$\Delta\boldsymbol{u}_{\min}$、$\Delta\boldsymbol{u}_{\max}$ 为控制增量的最值。

## 3 收获卸粮协同作业位速耦合控制仿真

建立了收获卸粮协同作业控制仿真模型,利用 Matlab/Simulink 和 CarSim 进行联合仿真,用于控制器参数设计和收获卸粮协同作业位速耦合控制方法的性能验证。

### 3.1 仿真模型

为验证收获卸粮协同作业位速耦合控制方法,

使用 Matlab/Simulink 和 CarSim 软件建立联合仿真平台。CarSim 软件用于构建收获机和运粮车车辆模型并设计仿真工况，收获机的车辆模型用拖拉机代替，运粮车的车辆模型用卡车代替。利用 Simulink 的 S－Function 函数模块设计 MPC 控制器，利用 PID 模块设计双 PID 控制器，建立如图 7 所示的模型。收获机与运粮车的纵向位置和速度输入双 PID 控制器中，以输出运粮车的期望加速度输入 CarSim 运粮车模型；运粮车的位置、速度和航向角以及收获机的位置和航向角输入 MPC 控制器中，以控制运粮车的转向角度和期望加速度同时传递至 CarSim 运粮车模型实现横纵向位速耦合控制。

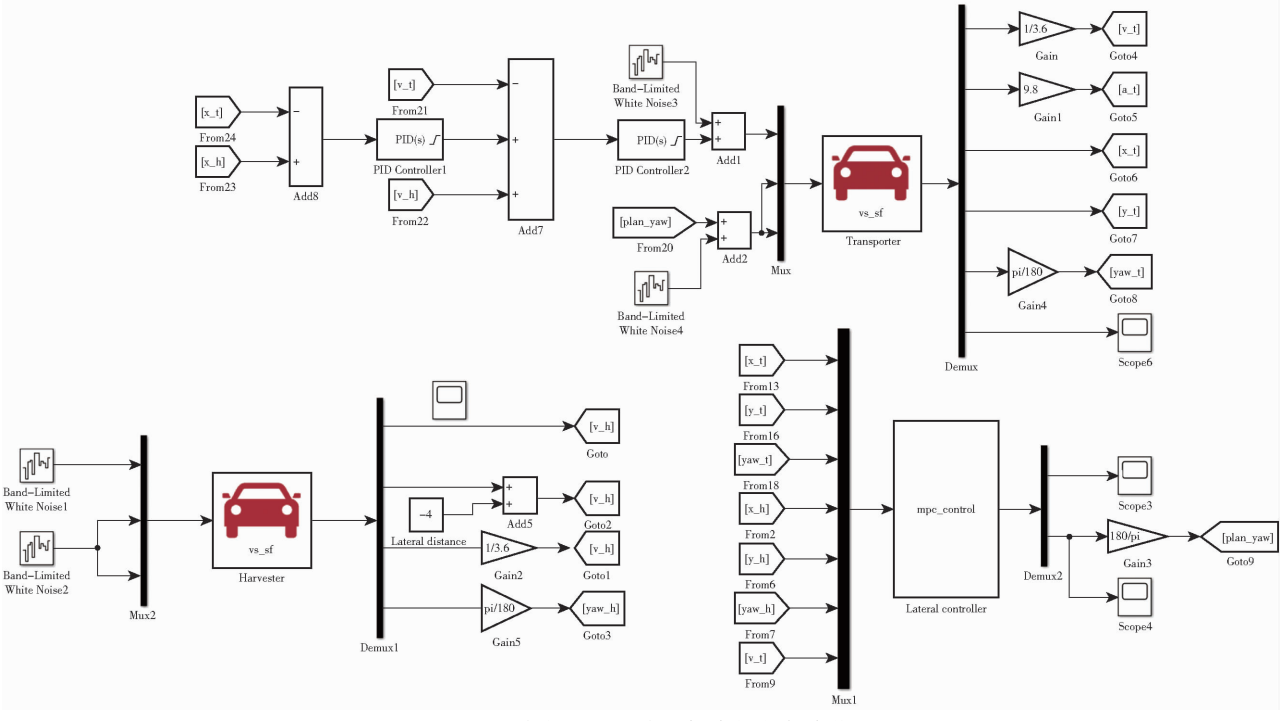



图 7　运粮车与收获机位速耦合控制仿真模型

Fig. 7　Simulation model of position-velocity coupling control between transporter and harvester

仿真模型的输入为白噪声，模拟田间土地凹凸不平对收获机和运粮车速度和转向角度的影响。设置仿真参数如表 1 所示，其中，设置位置-速度 PID 控制器饱和上限输出为 0.5，下限为 －0.5；速度-加速度控制器饱和上限输出为 2，下限为 －2。

**表 1　仿真参数**

**Tab. 1　Simulation parameters**

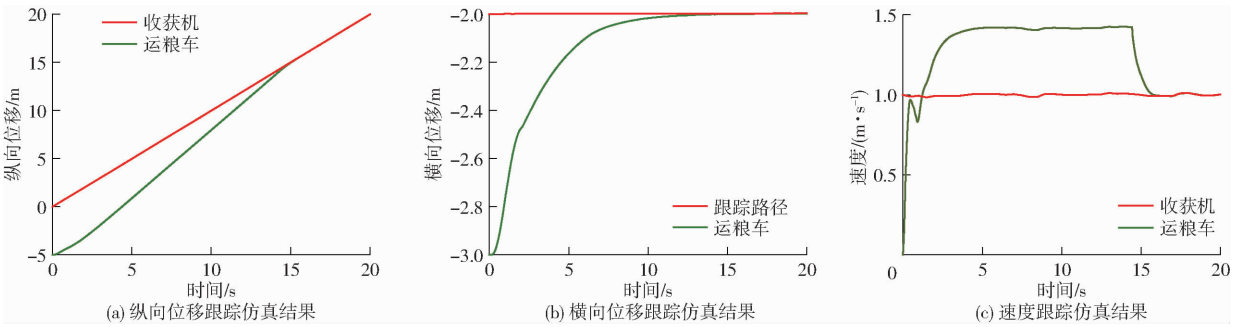
| 载体 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|
| 收获机 | 初始纵向位移/m | 0 |
| | 初始横向位移/m | 2 |
| | 最大功率/kW | 92 |
| 运粮车 | 初始纵向位移/m | －5 |
| | 初始横向位移/m | －3 |
| | 最大功率/kW | 73.5 |
| PID 控制器 | 比例系数 $K_p$ | 10 |
| | 积分系数 $K_i$ | 0.002 |
| | 微分系数 $K_d$ | 3 |
| MPC 控制器 | 状态量数 $N_x$ | 3 |
| | 控制量数 $N_u$ | 2 |
| | 预测时域 $N_p$ | 40 |
| | 控制时域 $N_c$ | 80 |
| | 采样时间 $T$/s | 0.01 |
| | 松弛因子 $\varepsilon$ | 10 |

## 3.2　仿真结果

仿真试验设置 3 个收获机速度进行控制性能测试，分别为 0.6、0.8、1.0 m/s，代表低速、中速和高速的运粮车跟踪过程。运粮车由地头等待点开始向做匀速直线收获作业的收获机靠近，期间做协同作业位速耦合控制，减小与收获机的相对横纵向偏差，追上后保持纵向位置速度与收获机一致，横向与收获机保持 4 m 卸粮距离。

以收获机速度为 1.0 m/s 的试验结果为例。双机纵向位移轨迹跟踪仿真结果如图 8a 所示，运粮车的纵向位移初始为 －5 m，经过位速耦合控制后精确跟踪收获机的纵向位移。运粮车横向路径跟踪仿真结果如图 8b 所示，运粮车的横向位移初始为 －3 m，跟踪的直线距初始位置 1 m，经过位速耦合控制后，运粮车实现对目标直线的快速跟踪上线，并保持一定精度跟踪直线。双机速度跟踪仿真结果如图 8c 所示，收获机以 1 m/s 的速度开始匀速行驶；运粮车的初始为静止状态，经过位速耦合控制后精确跟踪收获机的速度。

仿真分析借鉴王辉等[7]的试验条件，农业机械与规划路径的位置偏差小于 0.05 m 时，称农业机械




(a) 纵向位移跟踪仿真结果 (b) 横向位移跟踪仿真结果 (c) 速度跟踪仿真结果

图 8 收获卸粮协同作业位速耦合控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of position-velocity coupling control for cooperative harvesting and unloading operation

进入上线稳态位速耦合状态。以最大超调量和上线时间描述横纵向控制的收敛性能,用平均绝对误差和标准差描述横纵向位速耦合控制性能。

仿真结果表明,不同收获机速度下,平均纵向上线时间为 14.04 s,横向上线时间为 9.581 s,纵向最大超调量为 0.003 1 m,横向最大超调量为零;稳态下双机平均纵向位置偏差为 0.004 2 m,标准差为 0.006 99 m,平均横向位置偏差为 0.018 7 m,标准差为 0.010 5 m。控制方法具有良好的收敛性能和鲁棒性,控制精度满足收获卸粮协同作业的横纵向偏差精度需求。

## 4 收获卸粮协同作业田间试验

### 4.1 试验系统

为验证收获机与运粮车协同控制方法的效果,在昆山市陆家未来智慧田园进行了收获卸粮协同作业位速耦合控制田间试验,搭建了双机田间试验系统,如图 9 所示,由收获机和运粮车组成,徐工 XR730 型收获机与由 1GZL-230X 型自走式履带旋耕机改装的运粮车均具备电控底盘,能够实现电控转向与发动机转速控制。收获机与运粮车主要参数如表 2 所示。



图 9 收获卸粮协同作业田间试验

Fig. 9 Harvesting and unloading cooperative operation field experiment

收获卸粮协同作业位速耦合控制的软件部分采用 Matlab/Simulink 开发,如图 10 所示。CAN Configuration 为指定 CAN 设备属性模块,CAN Receive 为指定 CAN 设备接收 CAN 报文模块,根据

表 2 收获机与运粮车主要参数

Tab. 2 Main parameters of harvester and transporter

| 机械/类型 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|
| 收获机(徐工 XR730 型) | 整机质量/kg | 4 280 |
| | 整机外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) | 5 800×2 650×2 900 |
| | 配套功率/kW | 92 |
| | 粮仓容积/$m^3$ | 1.6 |
| 运粮车(1GZL-230X 型) | 整机质量/kg | 3 100 |
| | 整机外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) | 3 445×2 675×2 890 |
| | 前进速度/(m·$s^{-1}$) | 0.6~1.9 |
| | 配套功率/kW | 73.5 |

具体的通信协议,从 CAN 报文中读取并解析数据,对各种数据进行单位换算,将经纬度数据转换为 UTM 数据,计算横纵向位置偏差,与航向角、速度和期望横纵向偏差一同输入双 PID 控制器和 MPC 控制器,输出期望加速度和期望角速度,转换为油门大小和电动溢流阀比例连同控制标志输入 CAN Pack 模块进行数据打包,将打包的 CAN 报文通过 CAN Transmit 模块指定 CAN 设备传输 CAN 报文,将需要分析的数据通过 To Workspace 模块保持在 Matlab 工作区,以便后续进行数据分析。

### 4.2 试验结果与分析

经过测量,卸粮臂展开时收获机与运粮车定位模块的水平纵向偏差为 1 m,横向偏差为 4 m,运粮车粮仓尺寸为 1.64 m×1.56 m,横纵向偏差均小于 0.5 m 时满足卸粮条件,协同作业进入稳态。本研究进行了运粮车与收获机协同作业位速耦合控制田间试验,试验分为 3 组,以收获机的速度作为分组依据。因运粮车速度最快为 1.9 m/s 且田地大小不足以支持运粮车长距离追赶收获机,所以设置收获机最大速度为 0.8 m/s。分为 0.4 m/s(低速)、0.6 m/s(中速)和 0.8 m/s(高速)3 组,每组重复 3 次,对应不同的初始横纵向偏差,协同作业时双机的信息交互频率为 1 Hz,使用 RTK-GNNS 系统以 10 Hz 的采样率记录了双机位置、航向和速度等数据,收获机速

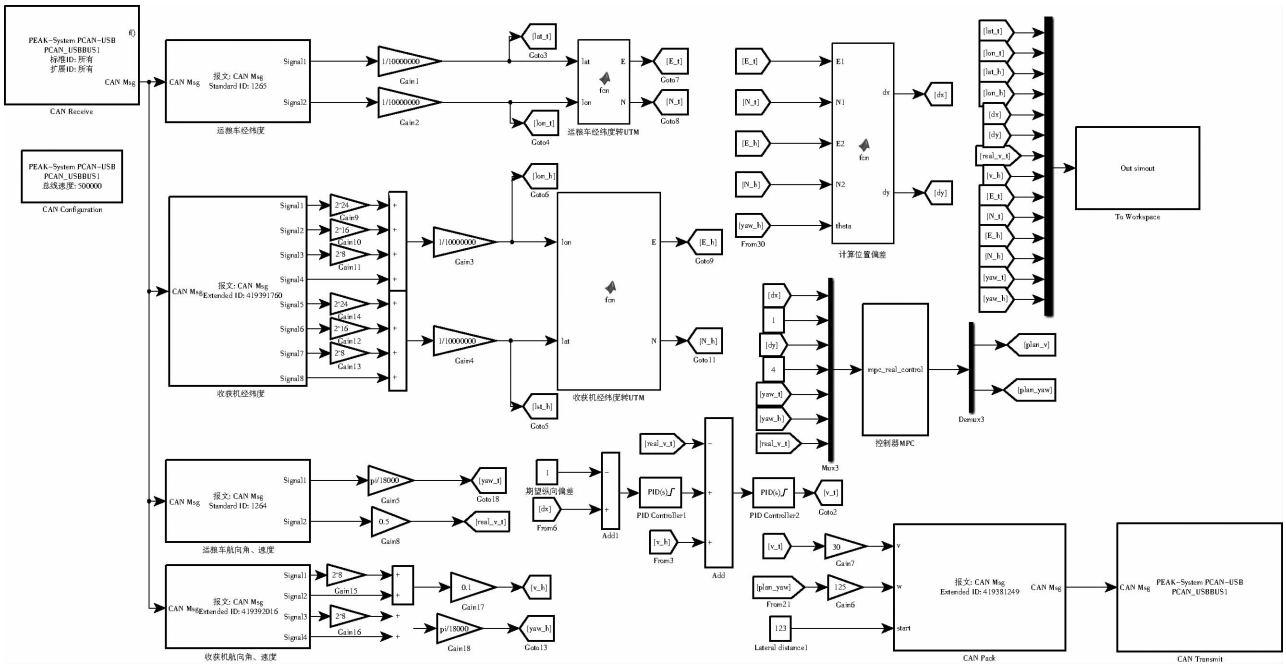



图 10　收获卸粮协同作业田间试验软件模型

Fig. 10　Harvesting and unloading cooperative operation field experiment software

度为 0.4 m/s 的第 1 次试验曲线如图 11 所示。

以收获机首次试验中的行进速度 0.4 m/s 为例进行深入分析。将采集到的 WGS84 经纬度数据转换为统一的 UTM 坐标系，以便进行精确的轨迹描述。在 UTM 坐标系下，绘制了收获机与运粮车的实际运动轨迹，以及基于收获机位置推导出的运粮车期望轨迹，图 11a 所示为运粮车从起始位置精确地追踪由收获机动态生成的期望轨迹的过程。运粮车在地头位置开始，逐步调整其行驶路径以并入期望的协同作业路径。此过程中，双机之间的横向位移偏差从初始的 5.847 m 逐渐减小至期望的 4 m 范围内，如图 11b 所示，体现了运粮车良好的路径跟踪能力。在追赶收获机的过程中，运粮车的速度经历了先增加后减小的变化，最终稳定在与收获机相同的 0.4 m/s 左右，如图 11c 所示。这一速度调节过程确保了运粮车能够高效且安全地接近并匹配收获机的行进速度。同时，双机之间的纵向位移偏差也经历了显著的减小过程，从初始的 10.825 m 逐渐缩小至期望的 1 m 偏差范围内，并在稳定状态下保持一定的精度，如图 11d 所示。

收获机与运粮车之间的横向偏差变化如图 12 所示，展示了在不同收获机速度下，运粮车横向对齐

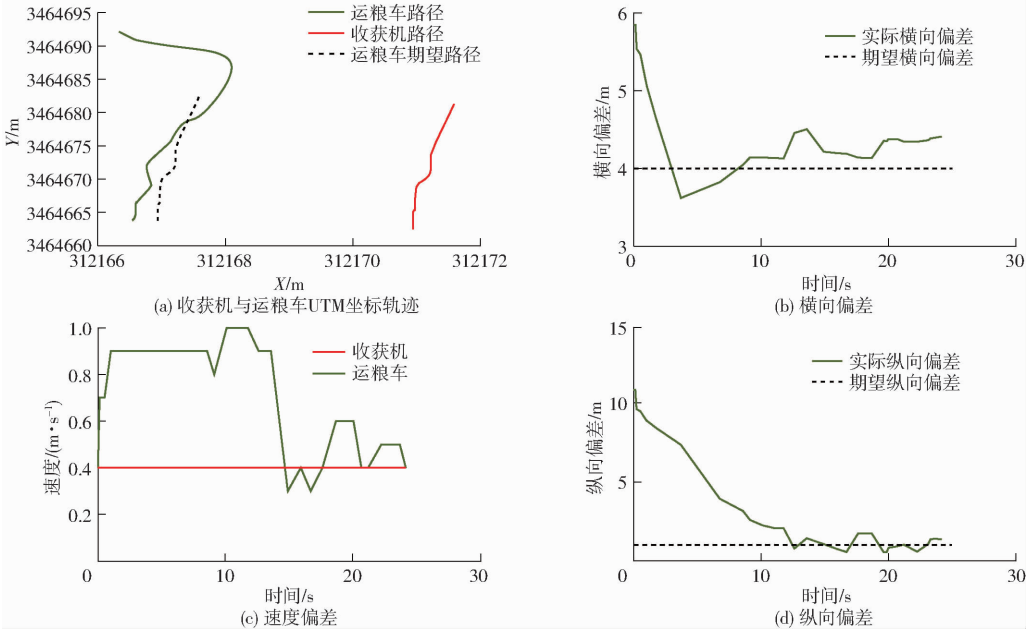



图 11　收获机速度为 0.4 m/s 的第 1 次试验结果

Fig. 11　Result of the first experiment with harvester velocity of 0.4 m/s

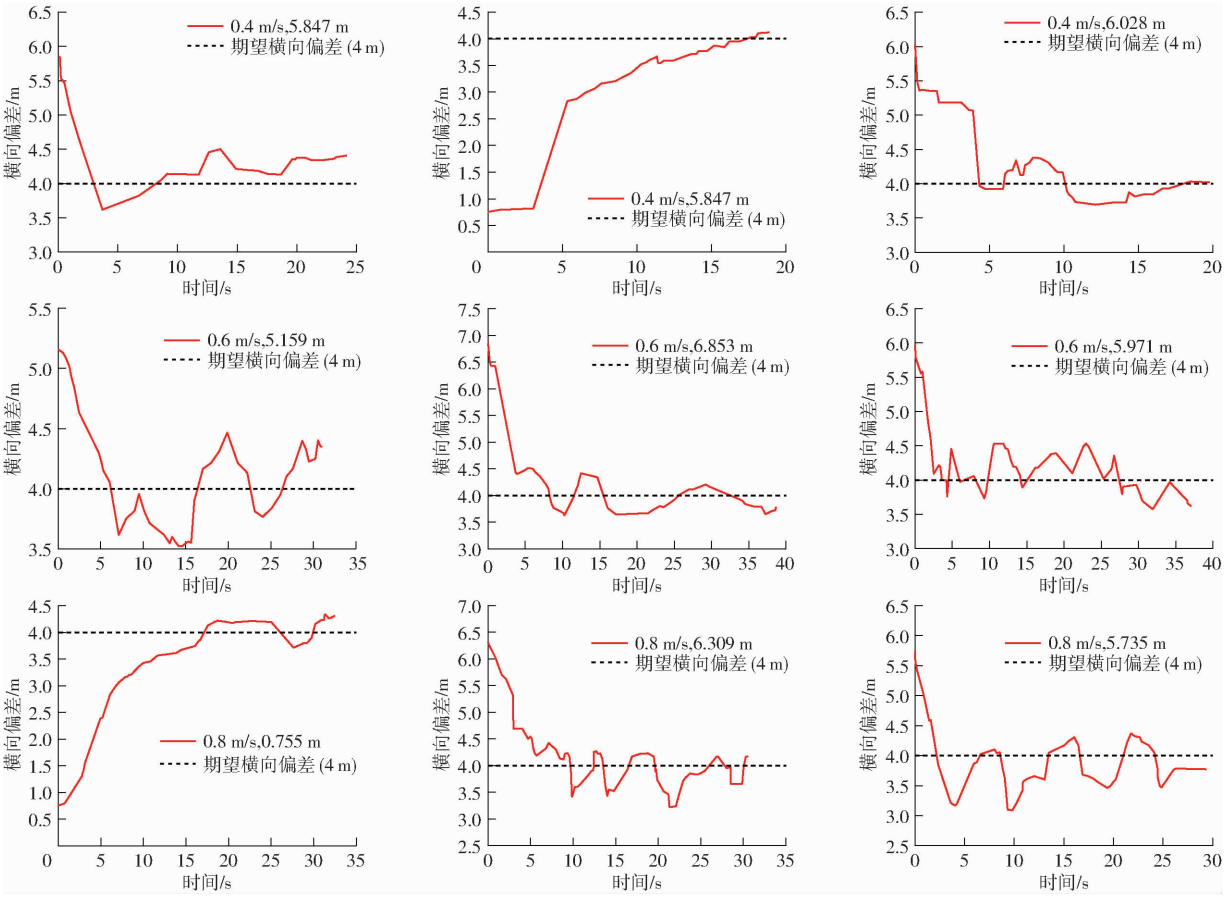



图 12 田间试验横向偏差控制结果

Fig. 12 Effectiveness of lateral deviation control in field experiment

期望路径的动态过程及其稳态性能。具体而言,当收获机以 0.4 m/s 的速度行进时,运粮车在完成与收获机的横向对齐过程中,其平均最大超调量为 0.269 m。进入稳态对齐状态后,横向平均误差为 0.222 m,标准差为 0.217 m,表明运粮车能够较为稳定地保持在期望的横向偏差范围内。当收获机速度提升至 0.6 m/s 时,运粮车完成横向对齐的平均最大超调量为 0.432 m,反映出速度提升对运粮车跟踪精度带来的挑战。进入稳态后,横向平均误差仍为 0.293 m,标准差为 0.325 m,虽然波动性略有增加,但仍能保持在可接受的偏差范围内。当收获机速度达到 0.8 m/s 时,运粮车完成横向对齐的平均最大超调量增大至 0.721 m,表明在更高速度下,运粮车的跟踪难度进一步加大。进入稳态后,横向平均误差为 0.296 m,标准差为 0.321 m,表明尽管初始对齐过程中的超调量较大,但运粮车在稳态下仍能保持一定的横向偏差精度。综合不同收获机速度下的数据,平均横向位置偏差为 0.270 m,标准差为 0.288 m,表明运粮车在不同速度和初始横向偏差条件下,均能实现与收获机横向偏差为 4 m 的卸粮位置对齐,并在对齐后保持一定的横向偏差精度,与收获机进行协同作业。

收获机与运粮车之间的纵向偏差变化如图 13 所示,揭示了在不同收获机速度下,运粮车纵向对齐收获机的动态过程及其稳态性能。具体而言,当收获机以 0.4 m/s 的速度行进时,运粮车在完成与收获机的纵向对齐过程中,其平均最大超调量达到 0.356 m。进入稳态对齐状态后,纵向平均误差为 0.250 m,标准差为 0.308 m,表明运粮车在纵向方向上能够较为稳定地保持在期望的偏差范围内。当收获机速度提升至 0.6 m/s 时,运粮车完成纵向对齐的平均最大超调量为 0.516 m,进入稳态后,纵向平均误差为 0.296 m,标准差为 0.344 m。当收获机速度达到 0.8 m/s 时,运粮车完成纵向对齐的平均最大超调量为 0.819 m,进入稳态后,纵向平均误差为 0.355 m,标准差为 0.382 m。综合不同收获机速度下的数据,平均纵向位置偏差为 0.300 m,标准差为 0.345 m。试验结果表明在收获机速度较快的情况下,运粮车的纵向跟踪难度进一步加大,尽管初始对齐过程中的超调量较大,运粮车在稳态下仍能保持一定的纵向偏差精度。运粮车在不同速度和初始纵向偏差条件下,均能实现与收获机纵向偏差为 1 m 的卸粮位置对齐,并在对齐后保持一定的纵向偏差精度,与收获机进行协同作业,进一步验证了协同作

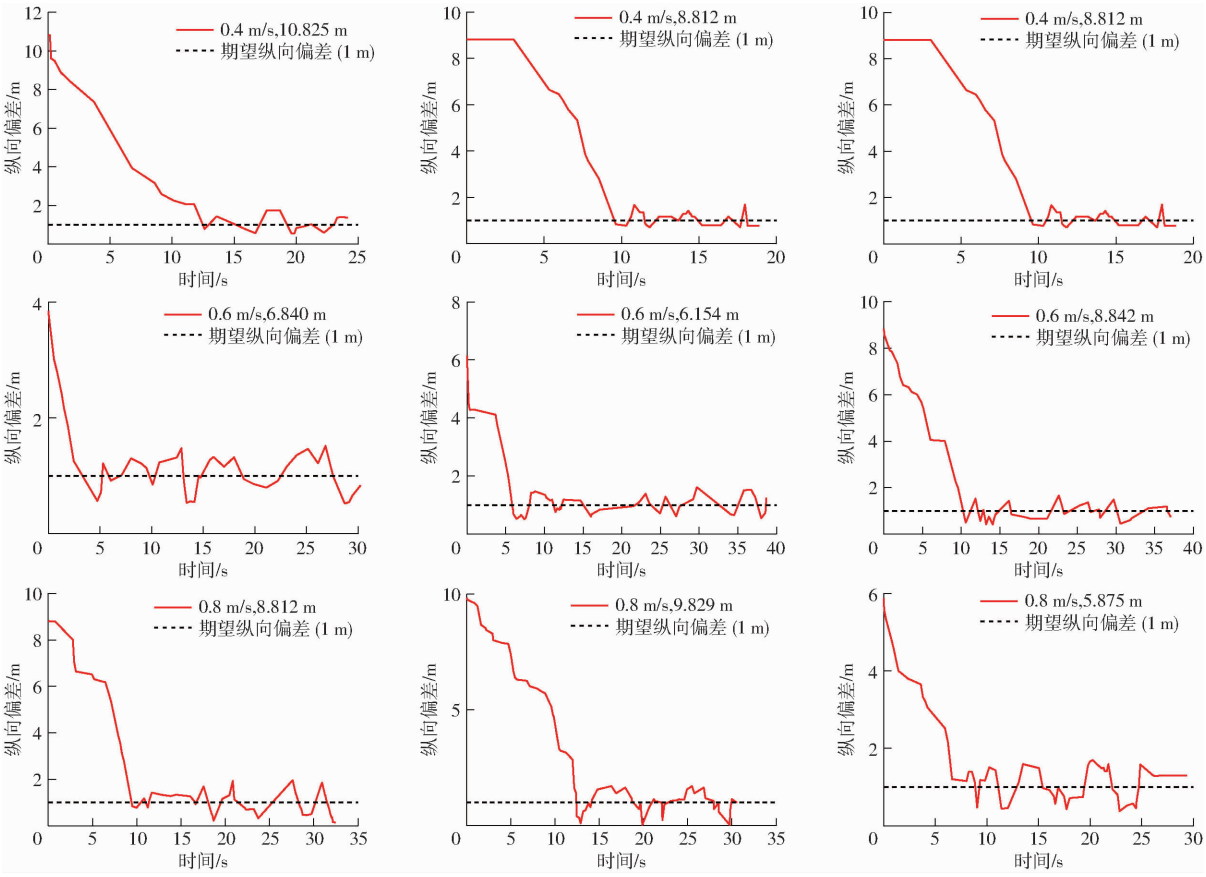



图 13　田间试验纵向偏差控制结果

Fig. 13　Effectiveness of longitudinal deviation control in field experiment

业控制方法的有效性和鲁棒性。

收获机与运粮车的速度变化如图 14 所示，展示了在不同收获机速度条件下，运粮车对收获机速度跟踪的动态过程及其稳态性能。设置了位置-速度 PID 控制器饱和上限输出为 1，下限为 -1，速度-加速度控制器饱和上限输出为 2，下限为 -2，控制运粮车最大速度在最大前进速度以内。具体而言，当收获机以 0.4 m/s 的速度行进时，运粮车在完成速度对齐并进入稳态后，平均速度偏差为 0.087 5 m/s，标准差为 0.108 m/s。结果表明，尽管存在一定的速度波动，但运粮车能够较为准确地跟踪收获机的速度。当收获机速度提升至 0.6 m/s 时，运粮车在完成速度对齐并进入稳态后，平均速度偏差减小至 0.082 7 m/s，标准差为 0.115 m/s。尽管标准差略有增加，但平均速度偏差的减小表明运粮车在更高速度下仍能保持良好的速度跟踪性能。当收获机速度达到 0.8 m/s 时，运粮车在完成速度对齐并进入稳态后，平均速度偏差为 0.093 1 m/s，标准差为 0.105 m/s。尽管在最高速度下，运粮车的速度波动有所增加，但平均速度偏差仍保持在可接受范围内，表明运粮车在不同速度条件下均能实现有效的速度跟踪。综合不同收获机速度下的数据，可以看出运粮车在不同速度条件下均能实现对收获机速度的准确跟踪，并在对齐后保持一定的速度精度，与收获机进行协同作业。

收获卸粮协同作业仿真试验效果优于田间试验，这是因为田间试验相对于仿真试验存在导航设备误差、计算误差及运粮车与收获机的通信速率等因素。而田间试验使用的导航系统存在 0.8 cm 误差，在软件计算转换为 UTM 坐标时也存在误差，系统通信更新频率为 1 Hz，每过 1 s 向运粮车传递一次收获机状态，通信速率较慢，这些因素为导致跟踪结果偏差较大的主要原因。在后续的研究中，可以根据收获机匀速行驶这个特性，实时预测收获机状态，建立融合多通信技术的基于实时预测和时延补偿滤波的信息处理方法[25]，提高收获机与运粮车的信息更新频率。

## 5　结论

（1）针对收获机与运粮车协同跟随卸粮过程中横纵向相对位置精确控制的难题，本研究根据协同几何关系建立了横纵向相对位置偏差的协同作业模型，提出了一种基于双 PID 控制的纵向位速控制和模型预测控制的横向路径跟踪控制的控制方法，实现了双机收获卸粮协同作业位速耦合控制。

（2）为研究所设计方法的实际性能，建立了

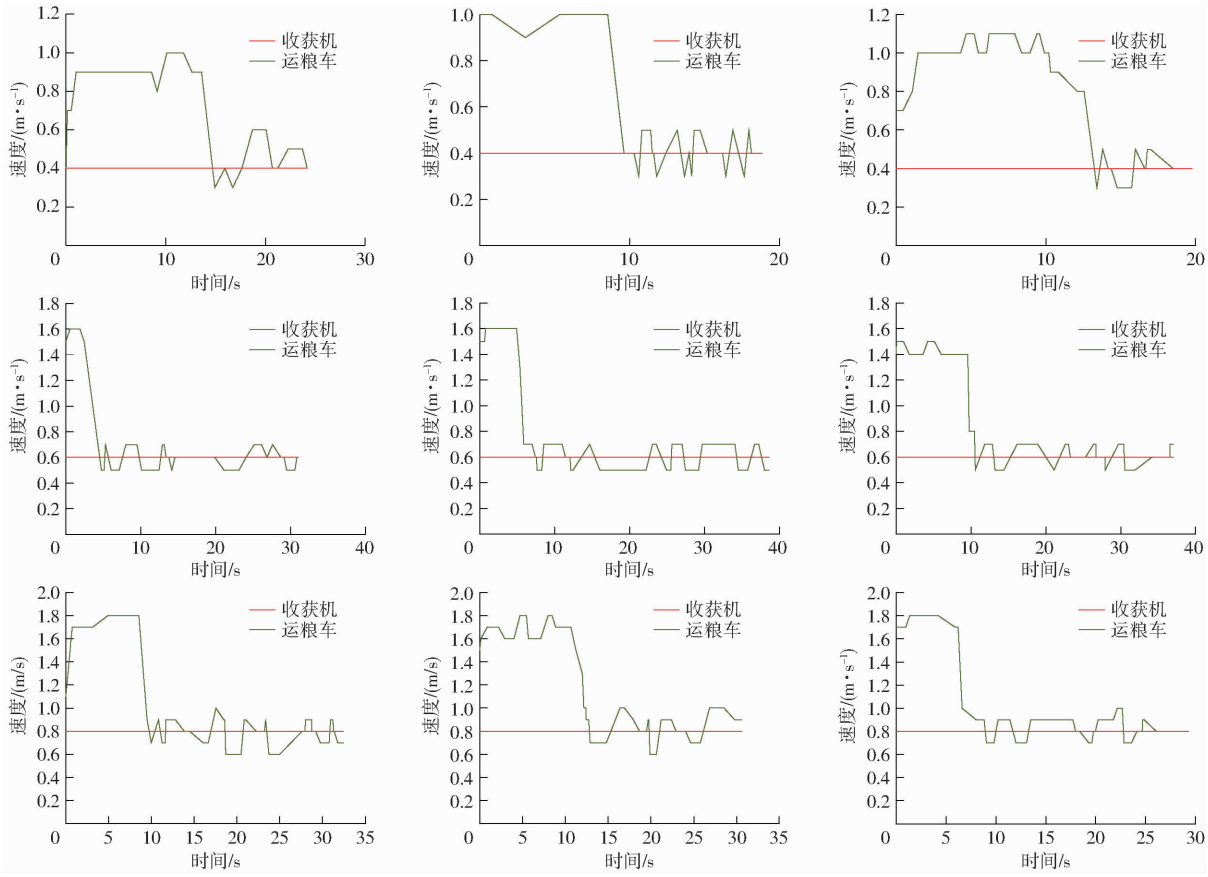



图 14 田间试验速度控制结果

Fig. 14 Effectiveness of velocity control in field experiment

Matlab/Simulink 和 CarSim 联合仿真模型,进行了不同收获机速度的仿真试验。仿真结果表明,收获机速度分别为 0.6、0.8、1.0 m/s 时,稳态下双机平均纵向位置偏差为 0.004 2 m,标准差为 0.006 99 m,平均横向位置偏差为 0.018 7 m,标准差为 0.010 5 m。控制方法具有良好的收敛性能和鲁棒性,控制精度满足收获卸粮协同作业的横纵向偏差精度需求。

(3)为研究所设计方法的实际性能,进行了不同收获机速度和不同双机相对初始位置偏差的田间试验。试验结果表明,收获机速度分别为 0.4、0.6、0.8 m/s 时,平均纵向位置偏差为 0.300 m,标准差为 0.345 m,平均速度偏差为 0.087 8 m/s,标准差为 0.109 m/s,平均横向位置偏差为 0.270 m,标准差为 0.288 m,平均航向偏差为 11.669°,标准差为 12.642°。提出的位速耦合控制方法可应用于收获卸粮协同作业,能够满足协同作业卸粮要求。

## 参 考 文 献

[1] WEI W, XIAO M, WANG H, et al. Research progress of multiple agricultural machines for cooperative operations: a review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109628.

[2] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1 - 20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1 - 20. (in Chinese)

[3] 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)

[4] CHOI S, D'ANDREA-NOVEL B, FLIESS M, et al. Model-free control of automotive engine and brake for Stop-and-Go scenarios[C]//2009 European Control Conference (ECC). Budapest: IEEE, 2009: 3622 - 3627.

[5] SHAKOURI P, ORDYS A, LAILA D S, et al. Adaptive cruise control system: comparing gain-Scheduling PI and LQ controllers [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 12964 - 12969.

[6] XU S, PENG H, SONG Z, et al. Accurate and smooth speed control for an autonomous vehicle[C]//2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2018: 1976 - 1982.

[7] 王辉,王桂民,罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 – 19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 – 19. (in Chinese)

[8] 杨洋,查家翼,李延凯,等. 拖拉机机组无人作业协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 421 – 429.
YANG Yang, ZHA Jiayi, LI Yankai, et al. Design and experiment of unmanned operation cooperative control system for tractor operating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 421 – 429. (in Chinese)

[9] 何杰,曾鸿禧,李明锦,等. 基于驱动轮横向侧偏补偿的自动导航拖拉机改进纯追踪路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 28 – 37.
HE Jie, ZENG Hongxi, LI Mingjin, et al. Improved pure pursuit path tracking control method for automatic navigation tractor based on drive wheel lateral deviation compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 28 – 37. (in Chinese)

[10] FERRARA A, VECCHIO C. Second order sliding mode control of vehicles with distributed collision avoidance capabilities [J]. Mechatronics, 2009, 19(4): 471 – 477.

[11] ZHU M, CHEN H, XIONG G. A model predictive speed tracking control approach for autonomous ground vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 138 – 152.

[12] ZHU D, HU Y, GONG X, et al. Idle speed control system design based on engine torque management[C]//2015 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2015: 1809 – 1814.

[13] 张通. 基于模糊 MPC 的智能车队纵向跟随控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
ZHANG Tong. Research on longitudinal following control of intelligent vehicle platoons based on fuzzy model predictive control [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[14] 魏新华,邓屹,崔鑫宇,等. 基于模糊算法的农机编队转场多机协同控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 48 – 60.
WEI Xinhua, DENG Yi, CUI Xinyu, et al. Multi-machine collaborative control method of agricultural machinery formation transfer based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 48 – 60. (in Chinese)

[15] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 105 – 114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of Crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105 – 114. (in Chinese)

[16] LIU Z, WANG Z, BAI X, et al. Linearized longitudinal dynamic model for tractor cruise control system[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation. ACM, 2018: 221 – 227.

[17] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等. 基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 22 – 30, 99.
CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 22 – 30, 99. (in Chinese)

[18] HE J, HU L, WANG P, et al. Path tracking control method and performance test based on agricultural machinery pose correction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107185.

[19] LI Y, CAO Q, LIU F. Research on fuzzy PID control of electronically controlled hydraulic power steering system for unmanned agricultural vehicle[C]//2019 International Conference on High Performance Big Data and Intelligent Systems (HPBD&IS). IEEE, 2019: 215 – 218.

[20] 刘环宇,唐嘉城,邹顺,等. 基于多目标优化的策略型自适应农机路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 198 – 207.
LIU Huanyu, TANG Jiacheng, ZOU Shun, et al. Adaptive path tracking predictive control method for agricultural machinery based on strategy-based multi-objective optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 198 – 207. (in Chinese)

[21] 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): 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.): 11 – 20. (in Chinese)

[22] DING F, ZHANG W, LUO X, et al. Gain self-adjusting single neuron PID control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and transport vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108215.

[23] ZHANG W, HU L, DING F, et al. Parking precise alignment control and cotransporter system for rice harvester and transporter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108443.

[24] MA Z, ZHANG C, WANG W, et al. Supervised reinforcement learning-based collaborative master-slave harvest control study in wheat[J]. Agronomy, 2024, 14(11): 2577.

[25] DING F, ZHANG W, LUO X, et al. Design and experiment for inter-vehicle communication based on dead-reckoning and delay compensation in a cooperative harvester and transport system[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2052.