

# 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

张闻宇, 张智刚\*, 罗锡文, 何杰, 胡炼, 岳斌斌

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 针对主从导航收获协同卸粮作业过程中作业车辆纵向相对位置控制需求以及拖车驱动系统非线性度较高的问题, 该研究设计了一种适用于主从导航收获协同卸粮作业的纵向相对位置协同控制方法。根据协同系统几何关系获得纵向相对位置偏差的平行协同模型, 基于动力学原理和位速耦合控制方法设计了纵向相对位置控制器; 通过面积辨识方法获取车速系统传递函数, 基于传递函数构建仿真模型进行控制器参数全因子仿真优化试验, 并与传统 PD 方法进行仿真对比试验, 结果表明该研究方法的最优参数适应性优于传统 PD。不同初始偏差的纵向协同田间空载试验结果表明, 在主机速度为 1 m/s 时, 3、7 和 10 m 初始纵向偏差下, 系统响应平均调节时间分别为 7.73、17.2 和 23.2 s, 9 组试验的平均稳态绝对偏差为 0.091 8 m, 平均相对速度稳态误差为 0.012 3 m/s, 表明该方法具有较好的初始偏差适应性; 田间协同收获作业表明, 在主机速度为 1 m/s 时, 平均稳态纵向相对位置偏差绝对值为 0.077 8 m, 标准差为 0.091 3 m, 协同精度能够满足收获协同卸粮的作业要求。研究结果可为自主收获作业系统研究提供支持。

**关键词:** 农业机械; 导航; 控制; 无人农场; 协同作业; 协同控制; 位速耦合

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.001

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0001-11

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.001 http://www.tcsae.org

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 1-11. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.001 http://www.tcsae.org

## 0 引言

为缓解农业劳动力短缺, 降低农业劳动强度, 全过程、全天候的无人化农场将成为未来农业的重要发展方向<sup>[1]</sup>。农业装备智能导航控制技术是无人农场的关键之一<sup>[2-6]</sup>, 近年来研究者针对旱田<sup>[7-10]</sup>、水田<sup>[11-12]</sup>、鱼塘<sup>[13]</sup>等农业装备的智能控制技术进行了大量研究, 同时研究了卫星<sup>[14-17]</sup>、激光雷达<sup>[18-19]</sup>或视觉<sup>[20-22]</sup>定位导航方法, 取得良好的控制效果, 但多数研究主要针对单机的自主控制。在无人农场收获环节中, 由于收获机粮仓有限, 需要收获机与运粮车的协同配合。其中将收获机的粮食转运到运粮车需要实现精准自主卸粮, 研究收获机和运粮车相对位置协同控制方法对于实现无人农场全程自主收获具有重要意义。

国内外研究者对相对位置协同控制方法进行了相关研究。日本的 Noguchi 等<sup>[23]</sup>设计了基于 Follow algorithm 和滑模变控制方法的主从农机协同作业控制方法, 速度设置在 0.5~1.5 m/s 之间, 仿真试验结果表明双机协同的相对位置均方根误差为 0.106 m。Zhang 等<sup>[24]</sup>出于安全考

虑设计了主从协同的控制算法, 该算法包含状态反馈和扰动前馈的 PD 控制逻辑, 构建了主从农机导航系统, 田间协同导航试验结果表明, 从机路径跟踪误差大多数时间在 0.1 m 以内。Zhang 等<sup>[25]</sup>针对田间协同作业导航性对位置误差控制, 设计了 PD 控制器, 速度为 0.83 m/s 时, 协同导航试验表明两机的相对位置平均偏差为 0.13 m, 方差为 0.15 m。Luo 等<sup>[26]</sup>在两辆电动机器人上验证了相对位置协同控制方法, 主机速度为 0.3 m/s, 初始偏差为 0.2 m 时, 相对位置平均误差为 0.01 m, 方差为 0.03 m。白晓平等<sup>[27]</sup>针对联合收获机群协同导航作业提出一种基于领航-跟随结构的收获机群协同导航控制方法, 用于控制路径跟踪横向偏差。许韶麟<sup>[28]</sup>采用预测模型方法实现了 4 架电动机器人的协同编队功能, 停止后采用卷尺测量, 误差不超过 5 cm。邹存名等<sup>[29]</sup>基于线性矩阵不等式的模型预测控制器设计了电动机器人车队协同方法, 基于 Arduino 控制单元搭建试验车队验证了算法的有效性和实用性。

上述研究针对多机器人相对位置协同问题提出了多种控制方法, 多数研究以小型机器人为对象, 控制对象的线性度较高, 但控制方法的速度适应范围不能满足收获协同卸粮作业需求。本文拟针对自主收获精准协同卸粮作业的需求, 分析纵向相对位置协同原理; 建立相对位置几何模型; 设计位速耦合纵向相对位置协同控制方法和辨识车速系统模型, 建立仿真模型进行参数优化和对比试验研究; 通过田间空载试验和实际收获协同卸粮试验, 验证控制方法的性能和适应性。

收稿日期: 2020-11-30 修订日期: 2021-04-17

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目(2017YFD0700404); 广东省重点领域研发计划项目(2019B020224001); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515111152)

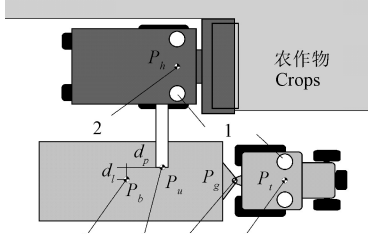
作者简介: 张闻宇, 博士, 博士后, 研究方向为精准农业、农业机械自主导航。Email: 617505084@qq.com

※通信作者: 张智刚, 博士, 副教授, 研究方向为农业机械导航、精细农业。

Email: zzg208@scau.edu.cn

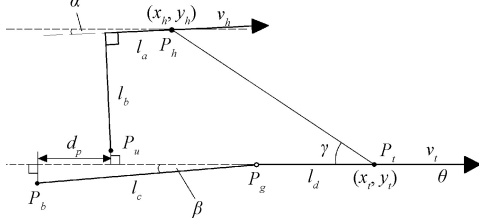
## 1 双机纵向相对位置协同原理

自主收获精准协同卸粮的作业状态如图 1 所示, 其中收获机和运粮车平行行驶。为了精准卸粮, 需要同时控制收获机  $P_h$  坐标( $x_h, y_h$ )和运粮车  $P_t$  坐标( $x_t, y_t$ ), 使卸粮筒出口  $P_u$  与卸粮目标点  $P_b$  重合。 $P_u$  与  $P_b$  的相对横向距离  $d_p$  通过调节两车的直线跟踪路径距离来控制。相对纵向距离  $d_p$  通过调节运粮车的车速来控制。

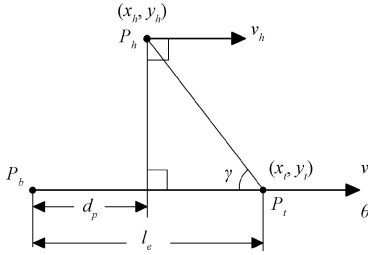


1.BDS 接受天线 2.收获机定位 3.卸粮目标点 4.卸粮口 5.铰点 6.拖拉机定位  
1.BDS receiving antenna 2.Harvester positioning point 3.Grain unloading target point 4.Grain unloading port 5.Hinge point 6.Tractor positioning point

a. 收获协同卸粮作业示意图  
a. Schematic diagram of harvest collaborative unloading operation



b. 收获协同卸粮作业几何关系  
b. Geometry relationship of harvest collaborative unloading operation



c. 收获卸粮平行协同模型  
c. The geometric model of harvesting collaborative unloading

注:  $P_h$  为收获机卫星定位点; ( $x_h, y_h$ ) 为  $P_h$  点坐标, m;  $P_t$  为运粮车卫星定位点; ( $x_t, y_t$ ) 为  $P_t$  点坐标, m;  $P_u$  为收获机卸粮口;  $P_b$  为卸粮目标点;  $P_g$  为运粮车铰点;  $v_h$  为收获机行驶速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $v_t$  为运粮车行驶速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $d_p$  为  $P_u$  与  $P_b$  在  $v_t$  方向投影的相对横向距离, m;  $l_a$  为卸粮口  $P_u$  在  $v_h$  方向的投影点到收获机定位中心点的距离, m;  $l_b$  为卸粮口  $P_u$  到  $v_h$  所在直线的距离, m;  $l_c$  为目标卸粮点  $P_b$  到铰点  $P_g$  的距离, m;  $l_d$  为定位点  $P_t$  到铰点  $P_g$  的距离, m;  $l_e$  为定位点  $P_t$  到目标卸粮点  $P_b$  的距离, m;  $\alpha$  为收获机速度方向与运粮车速度方向间的夹角, rad;  $\beta$  为运粮车的拖斗中心线相对运粮车中心线的夹角, rad;  $\gamma$  为两车定位中心点连线与运粮车  $v_t$  速度间的夹角, rad;  $\theta$  为运粮车行驶航向角, rad。

Note:  $P_h$  is the satellite positioning point of harvester; ( $x_h, y_h$ ) is  $P_h$  point coordinate, m;  $P_t$  is the satellite positioning point of grain truck; ( $x_t, y_t$ ) is the coordinate of  $P_t$  point, m;  $P_u$  is the grain unloading port of harvester;  $P_b$  is the target point of grain unloading;  $P_g$  is the stranding point of grain truck;  $v_h$  is the traveling speed of harvester,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $v_t$  is the velocity of grain truck,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $d_p$  is the relative transverse distance of projection of  $P_u$  and  $P_b$  on  $v_t$  direction, m;  $l_a$  is the distance from the projection point of unloading port  $P_u$  on  $v_h$  to the positioning center point of harvester, m;  $l_b$  is the distance from the unloading port  $P_u$  to the velocity  $v_h$ , m;  $l_c$  is the distance from  $P_b$  to  $P_g$ , m;  $l_d$  is the distance from the positioning point  $P_t$  to the hinge point  $P_g$ , m;  $l_e$  is the distance from the positioning point  $P_t$  to  $P_b$ , m;  $\alpha$  is the angle between the speed direction of harvester and the speed direction of grain truck, rad;  $\beta$  is the angle between the center line of the tractor and the center line of the truck, rad;  $\gamma$  is the angle between the line connecting the locating center of the two vehicles and the  $v_t$  velocity of the grain transport vehicle, rad;  $\theta$  is the heading angle of grain truck, rad.

图 1 收获机运粮车纵向相对位置协同原理

Fig.1 Cooperative principle of longitudinal relative position of harvester and grain truck

分析协同作业时双机的几何关系(图 1b), 设置基准线为过运粮车定位点的运粮车行驶方向直线,  $d_p$  为目标卸粮点  $P_b$  与卸粮口  $P_u$  在基准线上的投影距离, 几何模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} d_p = l_a + l_c \cos \beta - P_h P_t \cos \gamma - l_a \cos \alpha + l_b \sin \alpha \\ P_h P_t = \sqrt{(y_t - y_h)^2 + (x_t - x_h)^2} \\ \gamma = \arctan \left( \frac{y_t - y_h}{x_t - x_h} \right) - \theta \end{cases} \quad (1)$$

使用上述模型时由于收获机、运粮车和拖斗的航向存在高频摆动, 全部引入模型, 容易引起控制振荡, 根据前期试验, 双机在直线导航跟踪过程, 车辆和拖斗航向摆动的标准差小于  $0.06^\circ$ , 且变化分布类似白噪声, 所以将  $\alpha$  和  $\beta$  设为 0。据此可以将上述模型简化为平行协同模型, 如图 1c 所示。假定双机在跟踪平行路径时, 航向稳定且与目标直线相同, 拖斗也与拖拉机位于同一直线上。这一假设能够降低模型复杂度, 同时提高控制目标的稳定性, 排除航向波动引起的高频干扰。由于简化模型中拖车、拖斗和收获机航向相同, 所以可以对  $P_b$  平移, 向前平移  $l_a$  的距离, 使得  $l_e = l_b + l_c - l_a$ ,  $l_e$  为  $P_b$  到  $P_t$  的距离, 通过  $P_h$  的投影计算  $d_p$ , 计算方程为

$$\begin{cases} d_p = l_e - P_h P_t \cos \gamma \\ \gamma = \arctan \left( \frac{y_t - y_h}{x_t - x_h} \right) - \theta \\ P_h P_t = \sqrt{(y_t - y_h)^2 + (x_t - x_h)^2} \end{cases} \quad (2)$$

## 2 纵向相对距离协同控制框架

收获机与运粮车分别规划行驶路径, 双机协同目标路径平行, 通过设定目标路径间距来调整两车横向相对距离, 由于所采用的直线跟踪方法精度为  $2.5 \text{ cm}^{[19]}$ , 所以双机协同横向相对距离控制精度能达到  $5 \text{ cm}$ 。本文主要研究纵向相对位置偏差控制方法, 通过改变运粮车油门大小进行调节。

纵向相对位置控制框架如图 2 所示, 收获机为主机, 运粮拖拉机为从机。对主机和从机的位置和速度进行差分, 获得主从机的相对位置和速度, 输入至位速耦合控制器得到期望发动机转速。将期望值通过 CAN 总线输入到发动机电子控制器 (Electronic Control Unit, ECU), 从而改变从机前进速度, 实现纵向相对位置控制。

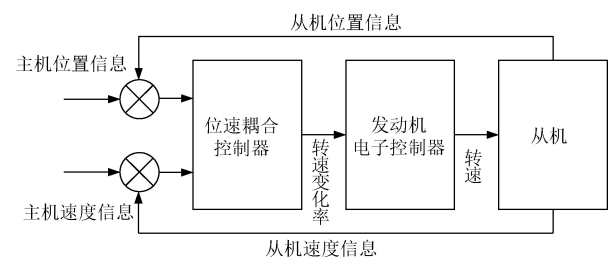


图 2 纵向相对位置协同控制框架

Fig.2 Longitudinal relative position collaborative control framework

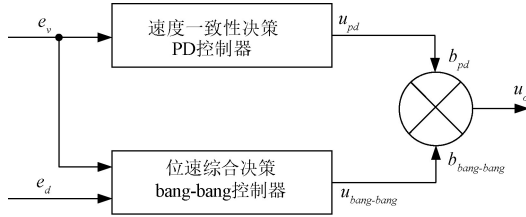
### 3 位速耦合控制器设计

控制两车的相对位置需要对位置和速度进行耦合控制，依据当前的位置和速度差改变油门控制的策略。

本文将位速控制分为 2 个分量，一个为速度一致性决策分量，另一个为位速综合决策分量，速度一致性决策分量  $u_{pd}$  与位速综合决策分量  $u_{bang-bang}$  加权求和得到位速耦合控制器输出  $u_o$ ， $u_o$  为发动机转速变化率，控制器结构简图如图 3 所示。

$$u_o = u_{pd} + b_{bang-bang} u_{bang-bang} \quad (3)$$

式中  $b_{bang-bang}$  为求和权重，通过仿真优化整定。



注： $e_d$  为收获机与运粮车的纵向相对位置偏差，矢量方向为从收获机投影点指向运粮车投影点，与行驶方向相反为正，数值与式(2)中  $d_p$  相同，m； $e_v$  为收获机与运粮车的速度差，矢量大小为运粮车速度减去收获机速度，与行驶方向相同为正， $m \cdot s^{-1}$ ； $u_{pd}$  为 PD 控制器输出， $r \cdot s^{-1}$ ； $u_{bang-bang}$  为 bang-bang 控制器的输出， $r \cdot s^{-1}$ ； $u_o$  为位速耦合控制器输出， $r \cdot s^{-1}$ ； $b_{pd}$  为 PD 控制器输出权重，本文设为 1； $b_{bang-bang}$  为 bang-bang 控制器输出权重，由仿真优化整定。  
Note:  $e_d$  is the longitudinal relative position deviation between harvester and grain truck, the vector direction is from the projection point of harvester to the projection point of grain truck, which is positive in the opposite direction of driving, the value is the same as  $d_p$  in formula (2), m;  $e_v$  is the speed difference between the harvester and the grain truck, vector size is the speed of grain carrier minus the speed of harvester, and it is positive as the driving direction,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $u_{pd}$  is the output of PD controller,  $r \cdot s^{-1}$ ;  $u_{bang-bang}$  is the output of bang-bang controller,  $r \cdot s^{-1}$ ;  $u_o$  is the output of the position-velocity coupling controller,  $r \cdot s^{-1}$ ;  $b_{pd}$  is the output weight of PD controller, which is set as 1 in this paper;  $b_{bang-bang}$  is the output weight of bang-bang controller, which is optimized by simulation.

图 3 位速耦合控制框图

Fig.3 Position-velocity coupling control block diagram

由于两车在协同行驶过程中，油门与速度系统具有较高的延时和非线性特点，所以在控制的过程中设置死区以提高稳定性，纵向偏差处于死区范围内时速度需要保持相对稳定。如果仅使用相对位置 PD 控制，易出现超调和振荡现象。速度偏差是位置偏差的微分，引入速度一致性决策分量，可提高控制系统阻尼，消减振荡。

速度一致性决策分量为 PD 控制。主要作用是协调两车速度，在位速综合决策分量死区范围内仅依靠该决策分量进行控制：

$$u_{pd} = k_p e_v + k_i \frac{de_v}{dt} \quad (4)$$

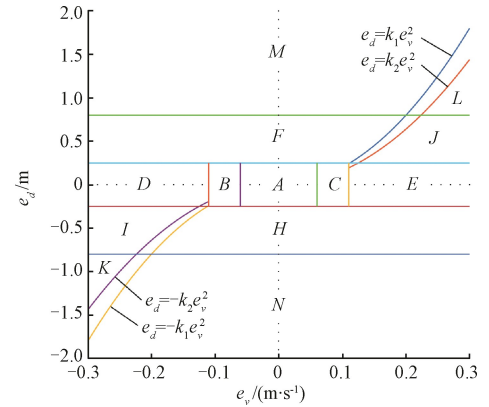
位速综合决策分量通过基于动力学原理的 Bang-Bang 控制模型计算，假设拖拉机在仅控制油门的情况下，最大合力为  $F_{max}$ ，最大加速度为  $a_{max}$ ，当前纵向速度偏差为  $e_v$  时，依据能量守恒方程  $F_{max}d = 1/2 m e_v^2$ ，以最大加速度  $a_{max}$  改变车速使得  $e_v$  减小为 0 时，运粮车与收获机的相对行驶距离  $d$  为

$$d = \frac{e_v^2}{2a_{max}} \quad (5)$$

式(4)~(5)中  $m$  为车体质量，kg； $k_p$  为比例增益系数， $t$  为时间，s。

依据上式知当纵向相对位置偏差  $e_d$  和速度偏差  $e_v$  的数学关系为式(5)时，执行加速度为  $a_{max}$  的减速，即可使纵向偏差  $e_d$  和速度偏差  $e_v$  同时收敛至 0。据此可以设计控制滑模开关函数  $f(e_v)$ ，通过该函数判断两车的当前状态，并改变控制策略，具体设计如下：

车辆通过油门大小实现加速或减速功能，不涉及换挡或者刹车，加减油门的最大变化率基本相同，所以最大加速度  $a_{max}$  和减速度  $-a_{max}$  的数值相近。依据述能量守恒原理，结合公式(5)设计滑模开关函数  $e_d = k_1 e_v^2$ 、 $e_d = k_2 e_v^2$ 、 $e_d = -k_1 e_v^2$  和  $e_d = -k_2 e_v^2$ ，其中  $k_1$  和  $k_2$  为接近的值，针对滑模面控制抖振问题，设置这 2 组滑模开关函数构建死区消除抖振。位置阈值  $e_d = (-0.25, 0.25)$  是距离精度死区， $e_d = (-0.8, -0.25)$  和  $e_d = [0.25, 0.8)$  是分段控制范围，大于该距离分为一段，速度阈值  $e_v = (-0.06, 0.06)$  是速度精度死区， $e_v = (-0.1, -0.06]$  和  $e_v = [0.06, 0.1)$  是分段控制范围，大于该速度范围分为一段，综合上述阈值设计位速综合决策方法，如图 4 所示。



注： $k_1$ 、 $k_2$  为二次函数系数，A~N 表示不同的车辆状态区域。

Note:  $k_1, k_2$  are quadratic function coefficients, A~N represents different vehicle state areas.

图 4 Bang-Bang 控制模型位速综合决策图

Fig.4 Bang-Bang control position and velocity comprehensive decision diagram

位速综合决策方法依据两车相对位置偏差  $e_d$  和相对速度偏差  $e_v$  值将状态分组如下：

A:  $\{-0.25 < e_d < 0.25, -0.06 < e_v < 0.06\}$  的矩形区域，输出分量为 0；

B:  $\{-0.25 < e_d < 0.25, -0.1 < e_v \leq -0.06\}$  的矩形区域，输出分量为  $a_1$ ；

C: B 关于  $y$  轴的对称区域，输出分量为  $-a_1$ ；

D:  $\{-0.25 < e_d < 0.25, e_v \leq -0.1\}$  的非闭合区域，输出分量为  $a_2$ ；

E: D 关于  $y$  轴的对称区域，输出分量为  $-a_2$ ；

F:  $\{0.25 \leq e_d < 0.8, e_d > k_1 e_v^2\}$  的非闭合区域，输出分量为  $a_3$ ；

H: F 关于原点的对称区域，输出分量为  $-a_3$ ；

I:  $\{-0.8 < e_d \leq -0.25, e_d > -k_2 e_v^2\}$  的非闭合区域，输出分量为  $a_4$ ；

J: I 关于原点的对称区域，输出分量为  $-a_4$ ；

$K: \{e_d \leq -0.8, e_d > -k_2 e_v^2\}$  的非闭合区域, 输出分量为  $a_5$ ;  
 $L: K$  关于原点的对称区域, 输出分量为  $-a_5$ ;  
 $M: \{e_d \geq 0.8, e_d > k_1 e_v^2\}$  的非闭合区域, 输出分量为  $a_6$ ;  
 $N: M$  关于原点的对称区域, 输出分量为  $-a_6$ 。

#### 4 纵向相对位置控制系统仿真模型

建立纵向相对位置控制系统仿真模型, 用于控制器设计、控制参数优化和控制性能研究。

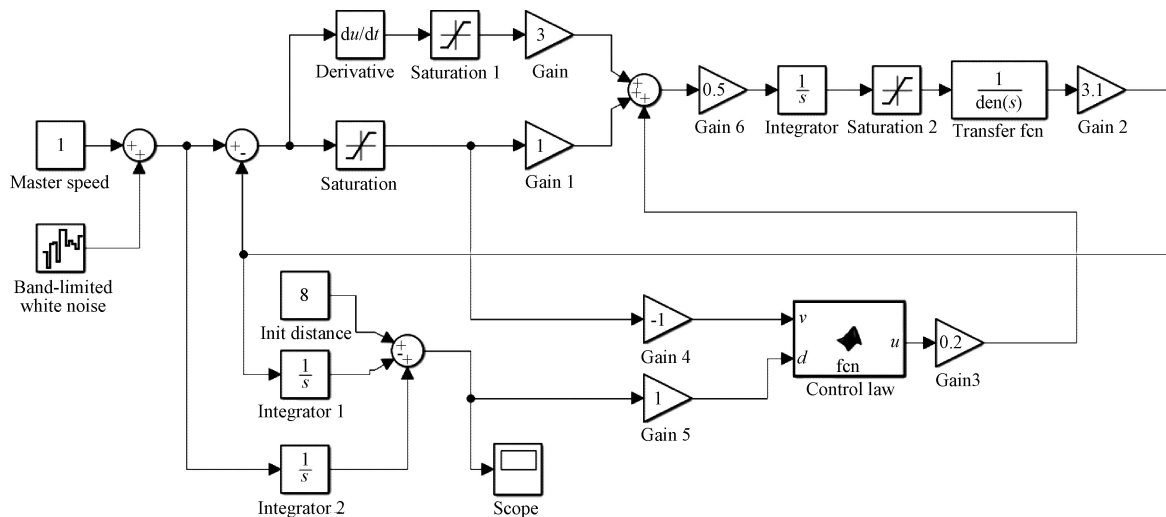
##### 4.1 行驶速度系统模型辨识

建立纵向相对位置控制系统仿真模型需要获得运粮车油门与行驶速度的传递函数模型。但通过发动机转动模型、变速箱传动模型和轮胎摩擦驱动模型正向推导运粮车油门与行驶速度的传递函数模型难度较大, 模型中部分参数未知, 无法拆分各部分进行参数整定。所以本文采用阶跃响应面积辨识法获取系统传递函数<sup>[16]</sup>。

进行了阶跃响应试验, 将期望转速从 1 000 阶跃为 1 400, 通过 BDS(BeiDou system)系统测量获得拖拉机速度上升了 0.3 m/s, 记录速度变化曲线, 采样率为 10 Hz, 对数据进行归一化处理, 再通过面积辨识方法, 计算获得二阶传递函数如式 (6) 所示。试验数据与辨识模型阶跃响应  $G(s)$  如图 5 所示, 该辨识模型的  $R^2$  为 0.988 1, 满足建立仿真模型的要求。

$$G(s) = \frac{1}{0.2555s^2 + 1.737s + 1} \quad (6)$$

式中  $s$  为复参数。



注: Master speed 为设定的主机速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; Band-limited white noise 为白噪声 (能量密度  $10^{-4}$ , 步长 0.4); Init distance 为初始距离, m; Control law 为位速耦合控制率, fcn 为函数,  $v, d, u$  为输入量, Derivative 为微分环节;  $t$  为时间, s; Integrator 为积分环节, Transfer fcn 为系统传递函数, den(s) 为复参数多项式, Saturation 为限幅环节, Gain 为比例环节, Scope 为示波器,  $s$  为复参数。

Note: Master speed is the set host speed,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; Band-limited white noise is the white noise (energy density is  $10^{-4}$ , step size is 0.4); Init distance is the initial distance, m; Control law is the position-velocity coupling control rate, fcn is a function,  $v, d, u$  are the inputs, Derivative is the differential link;  $t$  is the time, s; Integrator is the integral link, Transfer fcn is the system transfer function, den(s) is a complex parameter polynomial, Saturation is the limiting link, Gain is the proportion link, Scope is oscilloscope,  $s$  is complex parameter.

图 6 平行行驶两车纵向相对位置控制仿真模型

Fig.6 Simulation model of longitudinal relative position control of two parallel running vehicles

##### 4.3 仿真模型验证

为验证仿真模型是否符合实际情况, 在雷沃阿波斯智慧农业示范基地的试验田进行仿真模型验证试验:

1) 设计收获机与运粮车协同试验, 根据收获机常规

##### 4.2 纵向相对位置协同系统仿真模型

仿真模型输入包括主机的前进速度、初始纵向相对位置和初始从机行驶速度。将纵向相对位置偏差和相对速度输入位速耦合控制器, 计算出发动机转速变化率, 由转速变化率积分获得当前发动机转速。通过基于面积辨识所获得的传递函数计算出从机车速, 该车速与主机车速差为相对速度。相对速度的积分与初始纵向相对位置的和为当前相对位置。依据拖拉机发动机转速可调节的最大和最小速度, 对仿真速度进行限幅, 速度限幅范围为 0.3~2.0 m/s; 针对发动机转速变化率进行限幅, 变化率限幅范围为 -300~600 r/s。纵向相对位置控制 Simulink 仿真模型如图 6 所示。

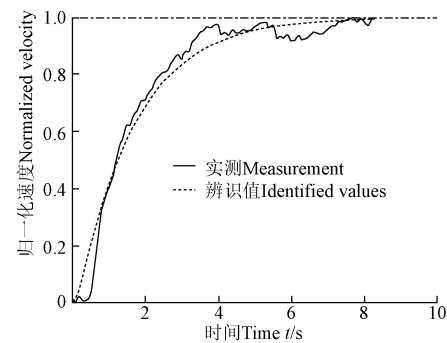


图 5 发动机与车速系统面积辨识传递函数

Fig.5 Engine and vehicle velocity system area identification transfer function

收获速度, 设置主机速度为 1 m/s。根据所设计位速耦合控制算法, 可知纵向相对位置偏差大于 8 m 时, 控制器计算输出已经大于最大油门变化值, 而被限幅, 运粮车将开最大油门前进, 再设置更大初始偏差, 收敛过程相

似。所以设置初始相对偏差为 8 m 具有一定的代表性;

2) 通过 BDS-GNSS 双天线系统采集车辆速度, RTK-GNSS 定位模块(司南公司的 K728), 定位信息获取频率为 10 Hz, 水平定位精度 $\pm(10+D\times 10^{-6})\text{mm}$ ,  $D$  为基站到移动站的距离, km;

3) 设置相同的初始条件, 将所得结果与仿真模型的结果进行对比, 结果如图 7 所示(图中的实际数据的毛刺来源于其他数据对通讯信道占用导致的处理延时)。仿真系统与实际系统的调节时间相差 2.1 s, 上升时间相差 1.3 s, 稳态偏差相差 0.19 m, 所构建仿真系统满足仿真分析要求。

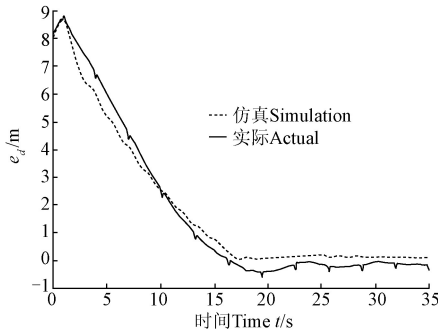


图 7 仿真模型验证试验结果

Fig.7 Simulation model verification test result

#### 4.4 位速耦合控制器参数仿真优化

位速耦合控制器中的关键参数包括 2 个分控制器的系数  $k_p$ 、 $k_d$ 、 $b_{\text{bang-bang}}$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  等。根据前期试验<sup>[30]</sup>可知将拖拉机发动机转速变化率控制在 300 r/s 以内控制过程中没有明显的顿挫现象。以上述变化率改变油门大小, 最大转速变化率为 5.0 r/s, 预设  $a_1$  至  $a_6$  参数分别为 1.5、2.5、3.0、0.5、2.5 和 5.0 r/s。基于初步测试结果, 参数的优化组  $k_p$  设置为 0.025~0.75 之间的 30 等分组,  $k_d$  设置为 1.5~4.0 的 6 等分组,  $b_{\text{bang-bang}}$  设置为 0.1~1.0 的 10 个等分组。主机速度设置为 1 m/s, 相距距离为 8 m, 用这  $30\times 10\times 6$  组参数进行全因子试验获得纵向控制响应数据。性能指标综合时间绝对误差(Integral Time Absolute Error, ITAE)<sup>[31]</sup>重点关注动态性能, 加入随机噪声后的稳态性能对该指标的影响较低。本文希望能兼顾纵向相对位置协同控制的动态性能和稳态性能, 根据文献<sup>[32]</sup>, 系统时域响应的性能指标包括上升时间  $t_r$ 、调节时间  $t_s$ 、稳态偏差  $e$ 、标准差  $\sigma$  和超调量  $M_p$ 。设计本文的参数优化性能指标  $J$  如式(7), 综合考虑阶跃响应性能指标的物理实际意义, 各项指标的优化方向都是降低数值, 加权求和能够代表动态和稳态性能。

由于各项阶跃响应性能指标的数值范围存在差距, 直接求和会使数值较大的指标削减数值较小指标的影响, 所以本文将正常收敛过程中的几个指标数值调整到基本相同的范围内, 使所设计的指标能够兼顾动态性能和稳态性能, 仿真试验中稳态偏差、标准差控制目标在 0.2 m 左右, 所以稳态指标权重  $b_2$  设为 15, 超调量单位为%, 控制目标在 4%即 0.3 m 以内, 所以超调量指标权重  $b_3$  设为 100%, 仿真时间设为 35 s, 分析得出的上升时

间与调整时间在 0~35 s, 所以时间权重  $b_{j1}$  设为 1/35。采用该性能指标筛选出适合纵向相对位置协同控制的参数, 分析参数适应性, 剔除极端参数。

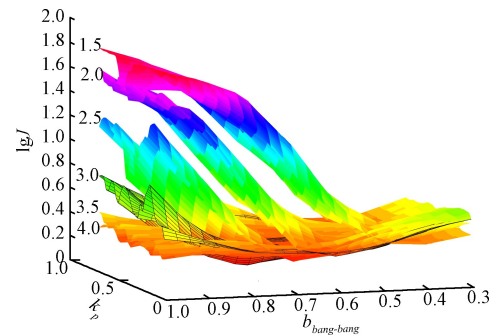
$$J = b_{j1}t_r + b_{j1}t_s + b_{j2}|e| + b_{j2}\sigma + b_{j3}M_p \quad (7)$$

通过全因子试验获得参数响应曲面, 对响应数据进行对数处理, 将指标调整到适当的大小, 同时保留指标的相对关系:

$$J' = \lg J \quad (8)$$

为了提高优化结果的泛化能力和鲁棒性, 使用二维卷积核式(9)对响应曲面进行特征提取, 获得处理后的参数性能响应曲面如图 8 所示。

$$w = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (9)$$



注:  $J$  为参数优化性能指标; 1.5~4.0 为微分系数  $k_d$ 。  
Note:  $J$  is parameters optimization performance indicator; 1.5-4.0 is differential coefficient.

图 8 参数优化全因子试验响应曲面

Fig.8 Parameter optimization full factor test response surface

由图 8 可知, 最优性能指标出现在  $k_d=3.0$  时, 此时  $k_p$ 、 $k_d$  和  $b_{\text{bang-bang}}$  分别为 0.2、3 和 0.8。

依据上述优化方法对速度 0.5、1.0 和 1.5 m/s 进行参数寻优, 结果如表 1 所示。由于该方法基于动力学原理设计, 参数响应曲面平缓, 最优参数速度适应性较好。

表 1 位速耦合控制参数优化结果

Table 1 Position-velocity coupling control parameter optimization results

速度 Velocity $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$k_p$	$k_d$	$b_{\text{bang-bang}}$
0.5	0.175	3	0.8
1.0	0.2	3	0.8
1.5	0.2	3	0.7

由于实际协同过程中可能存在干扰导致控制超调, 运粮车超车至收获机前方, 相对位置偏差为负。为验证最优参数在初始偏差为负值时的控制效果设计验证试验, 仿真模型同上文, 初始偏差为 -8 m, 3 组试验主机速度分别设为 0.5、1.0 和 1.5 m/s。响应曲线如图 9 所示。平均稳态偏差绝对值分别为 0.027 5、-0.068 9 和 0.056 0 m; 稳态标准差分别为 0.034 9、0.026 9 和 0.026 3 m; 上升时间分别为 14.7、12.7 和 12.7 s; 调节时间分别为 16.7、14.9 和 14.9 s。试验结果表明所设计方法负向初始偏差响应收敛。



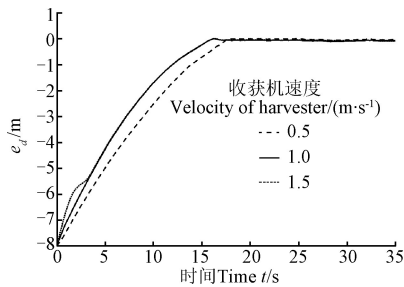


图 9 初始偏差为负值仿真控制性能试验结果

Fig.9 Simulation control performance test results with negative initial deviation

为验证性能指标权重的变化对优化后最优参数控制率的影响,设计了一组对比试验,改变性能指标的权重比例,寻优后采用结果参数,并分析寻优参数的响应数据,步骤如下:

- 1) 设置速度为 1.5 m/s,初始偏差为 8 m,试验组 1 中权重  $b_{j2}$  设为 15,试验组 2 中权重  $b_{j2}$  设为 25,提高其中一个权重,其他权重则相对降低;
- 2) 采用上述优化方法获得 2 组最优参数  $k_p$ 、 $k_d$ 、 $b_{bang-bang}$  分别为 0.2、3、0.8 和 0.1、3、0.7;
- 3) 采用上述 2 组参数进行仿真试验,初始偏差为 8 m,主机速度设为 1.5 m/s。

试验结果如图 10 所示,第 1 组相较第 2 组上升时间减少 0.07 s,调节时间减少 0.02 s,稳态偏差增加 0.007 9 m。理论上改变指标的权重能够改变最优参数控制率的响应指标,可以根据需求整定最优参数。但是试验结果表明,由于最优参数附近的响应曲面平缓,这些参数的响应数据各项性能指标都很相近,实际作用不显著。

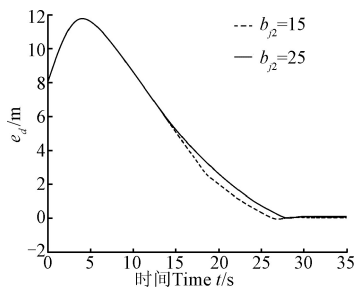


图 10 不同性能指标权重  $b_{j2}$  条件下仿真试验结果

Fig.10 Simulation test results under different performance index weights  $b_{j2}$

4.5 控制性能对比仿真试验

为了研究位速耦合纵向相对位置控制方法与传统 PD 方法<sup>[25]</sup>的差异,设计了双 PD 纵向相对位置控制器,将速度误差 PD 反馈和位置偏差 PD 反馈相加获得控制输出。

针对位置偏差 PD 控制器的参数运用上文相同的优化方法进行参数优化,结果如表 2。参数优化结果表明,位置偏差 PD 控制方法与主机速度的相关性比位速耦合控制方法高。

表 2 位置偏差 PD 控制参数  $k_{p\_d}$  和  $k_{d\_d}$  的优化结果  
Table 2 Position deviation PD control parameters  $k_{p\_d}$  and  $k_{d\_d}$  optimization results

速度 Velocity $v/(m\cdot s^{-1})$	$k_{p\_d}$	$k_{d\_d}$
0.5	0.75	4.25
1.0	0.5	3.75
1.5	0.35	4.5

仿真对比试验设计:3 组对比试验,主机速度设置为 0.5、1.0 和 1.5 m/s,位速耦合控制器参数  $k_p$ 、 $k_d$  和  $b_{bang-bang}$  分别设置为 0.2、3 和 0.8,双 PD 控制器参数  $k_p$ 、 $k_d$ 、 $k_{p\_d}$  和  $k_{d\_d}$  分别设置为 0.2、3、0.5 和 3.75,测试控制方法的速度适应性,性能指标包括上升时间、调节时间和超调量。试验结果如表 3 所示。试验结果表明:

- 1) 主机速度为 0.5 m/s 时,最优参数下本文方法相较双 PD 方法,上升时间减小 3.8 s,调节时间减小 10.2 s;
- 2) 主机速度为 1.0 m/s 时,最优参数下本文方法相较双 PD 方法,上升时间增加 4.7 s,调节时间增加 5.7 s;
- 3) 主机速度为 1.5 m/s 时,本文方法依然稳定,而双 PD 方法出现 135%的超调,且收敛较慢。最优参数下本文方法相较双 PD 方法,上升时间增加 1.0 s,调节时间减小 42.7 s,超调量减小 135 个百分点。

表 3 控制性能仿真对比试验  
Table 3 Simulation and contrast test of control performance

速度 Velocity $v/(m\cdot s^{-1})$	方法 Methods	上升时间 Rise-time/s	调节时间 Steady-time/s	超调量 Overshoot/%
0.5	本文方法	15.2	17.1	0
	双 PD	19	27.3	0
1.0	本文方法	17.6	19.6	0
	双 PD	12.9	13.9	0
1.5	本文方法	23.1	25.1	0
	双 PD	22.1	67.8	135

上述分析表明,采用传统 PD 方法能够获得良好性能,但是参数速度适应性较差。由于实际作业时针对不同农机、地况和不同主机速度,难以进行人工全局整定。

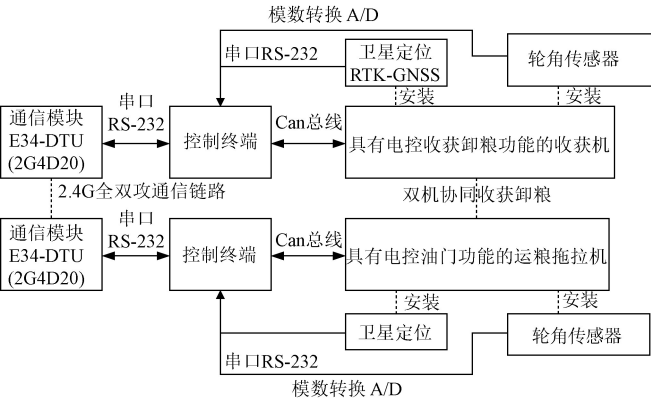
5 双机协同纵向相对位置控制方法性能试验

5.1 试验系统

为了研究位速耦合纵向相对位置控制方法的适应性和精度,搭建了双机导航协同收获试验系统,系统由收获机和运粮车组成,收获机(雷沃重工 GE80S-H)与运粮车(雷沃重工 M1104)均具备电控底盘,能够实现电控转向与发动机转速控制,主要参数如表 4。采用 RTK-GNSS 定位模块(司南公司 K728),定位信息获取频率为 10 Hz,水平定位精度 $\pm(10+D\times 10^{-6})$  mm;车轮转角传感器采用 BEI-9902120CW,非线性度为 $\pm 2\%$ ,A/D 采样精度为 12 位;转向执行机构为力士乐公司的 HT801053;双机通讯采用 2 组 2.4 GHz 频率通信模块(EBYTE 公司的 E34-DTU(2G4D20)),模块与控制终端通过 RS-232 通讯;控制终端为 AGCS-I 控制器和触控显示屏,控制终端通过 CAN 总线与双机的底盘电控单元(Electronic Control Unit)通讯;位速耦合纵向相对位置控制方法移植于 AGCS-I 控制器内。软件部分采用 Metrowerks Code Warrior for ARM Developer Suite v1.2 开发。系统结构和试验平台如图 11 与图 12 所示。

表 4 收获机与运粮车主要结构参数  
Table 4 Main structural parameters of harvester and grain truck

项目 Items	参数 Parameters	数值 Values
收获机 雷沃重工 GE80S-H	外形尺寸/(mm×mm×mm)	6 800×2 960×3 400
	割幅/mm	2 560
	整机质量/kg	5 400
	配套动力/kW	175
	粮仓容积/m <sup>3</sup>	2.2
	作业小时生产效率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.6~1.3
运粮车 雷沃重工 M1104	外形尺寸/(mm×mm×mm)	4 590×2 050×2 990
	整机质量/kg	5 100
	配套动力/kW	110
	前进速度范围/(km·h <sup>-1</sup> )	2.38~33.16



注：RS-232 为串口通讯；RTK-GNSS 为实时动态全球定位系统；DTU 为串口数据转换无线传输。  
Note: RS-232 is serial communication; RTK-GNSS is a real-time dynamic global positioning system; DTU is used for serial data conversion and wireless transmission.

图 11 收获机与运粮车协同作业控制系统结构  
Fig.11 Cooperative working control system of harvester and grain truck



图 12 收获机与运粮车协同作业试验场景  
Fig.12 Cooperative operation test scenario of harvester and grain truck

5.2 试验方案

协同系统试验在雷沃阿波斯智慧农业示范基地进行，对主从系统分别规划目标直线路径，采用预瞄点导航控制方法<sup>[17]</sup>控制横向偏差，采用本文所设计的位速耦合纵向相对位置控制方法进行纵向偏差控制，控制器参数  $k_p$ 、 $k_d$  和  $b_{bang-bang}$  分别设置为 0.2、3 和 0.8。收获机（主机）行驶速度按照实际作业需求设置为 1 m/s，运粮车（从机）进行跟随，运粮车手动档位设置于中一档，通过调节发动机转速进行位速协同，可调范围在 0.7~1.6 m/s 之间。设置 3 个水平的初始纵向相对位置偏差进行控制性能试验，分别为 3、7 和 10 m，代表短距、中距和长距的跟踪过程，每组初始距离进行 3 次重复试验。以 10 Hz 频率对纵向相对位置偏差和纵向相对速度偏差进行记录。

以平均稳态纵向相对位置偏差  $\bar{e}_d$  和稳态纵向相对位置偏差的标准差  $\sigma_d$  为双机进入稳定协同状态时的相对纵向距离控制精度指标，以平均稳态纵向相对速度偏差和稳态纵向相对速度误差的标准差  $\sigma_v$  为双机进入稳定协同状态时的纵向相对速度控制精度指标；以双机协同纵向相对位置控制稳态时间  $t_s$ 、上升时间  $t_r$  和超调量  $M_p$  反映控制方法在跟踪过程中的收敛性能。通过以上指标分析控制质量。

5.3 结果与分析

设置 3、7 和 10 m 初始纵向相对位置偏差的 3 组重复试验结果如表 5 所示。通过不同的试验结果可知本文提出的控制方法和优化参数的适应性较好，试验结果可重复性良好。全部试验的平均稳态纵向相对位置偏差绝对值为 0.091 8 m，稳态纵向相对位置偏差的标准差为 0.117 3 m，控制精度满足协同卸粮作业需求，对其他作业如加种加油同样可行。平均超调量为 1.7%，平均稳态速度偏差为 0.012 3 m/s，协同过程平稳，在可调速度范围内实现了纵向协同控制。

文献[25]中田间协同试验中主机速度为 0.83 m/s 时，试验结果表明两机的相对位置平均偏差为 0.13 m，方差为 0.15 m。文献[23]在仿真系统中运用滑模变控制方法控制 2 台农机的纵向相对位置，仿真试验结果表明平均偏差为 0.106 m。与上述研究比较，本文针对运粮车行驶系统建立简化平行协同模型和运动学模型，进行了系统模型辨识和控制参数优化，并通过田间验证了所设计方法的相对位置平均偏差分别降低 29.2%和 13.2%。

表 5 不同初始偏差下纵向相对位置控制试验结果  
Table 5 Longitudinal relative position control test results with different initial deviations

初始偏差 InDe/m	试验号 Test No.	调节时间 Steady-time/s	上升时间 Rise-time/s	超调量 Overshoot/%	相对纵向位置偏差 LRPD/m	STD of LRPD /m	速度偏差 VD/(m·s <sup>-1</sup> )	STD of VD/(m·s <sup>-1</sup> )
3	1	7.9	6.5	0	0.087 8	0.118 1	0.019 7	0.082 6
	2	7.3	6.4	0	0.074 6	0.137 2	0.023 4	0.101 7
	3	8.0	7.1	0	0.113 1	0.106 9	0.025 2	0.088 5
	平均	7.73	6.67	0	0.091 8	0.120 7	0.022 8	0.090 9
		13.0	12.1	0	0.024 5	0.105 8	0.016 6	0.078 7
7	1	13.0	12.1	0	0.024 5	0.105 8	0.016 6	0.078 7
	2	16.8	15.3	0	0.144 5	0.103 3	0.028 5	0.082 0
	3	21.8	16.9	4.8	0.142 4	0.069 4	-0.016 5	0.061 8
	平均	17.2	14.8	1.6	0.103 8	0.092 8	0.009 5	0.074 2
		23.3	25.3	3.8	0.178 9	0.156 9	0.031 7	0.098 3
10	1	23.3	25.3	3.8	0.178 9	0.156 9	0.031 7	0.098 3
	2	17.8	16.4	0	0.087 3	0.128 5	0.021 4	0.086 6
	3	28.7	21.6	7.0	0.027 2	0.130 2	-0.039 3	0.092 0
	平均	23.2	21.1	3.6	0.079 7	0.138 5	0.004 6	0.092 3
	总平均 Overall average			1.7	0.091 8	0.117 3	0.012 3	0.085 8

Note: InDe is initial deviation; LRPD is longitudinal relative position deviation; SD is standard deviation; VD is velocity deviation.

6 田间作业试验

为验证位速耦合纵向相对位置控制方法在实际收获作业时的控制质量，2019 年 7 月在甘肃金昌进行了双机协同小麦收获试验。试验场景如图 13 所示。



图 13 双机协同收获作业

依据待收获小麦田块规划 U 型收获路径。收获路径沿待收区域设定，收获机路径向前进方向左侧平移 4.5 m

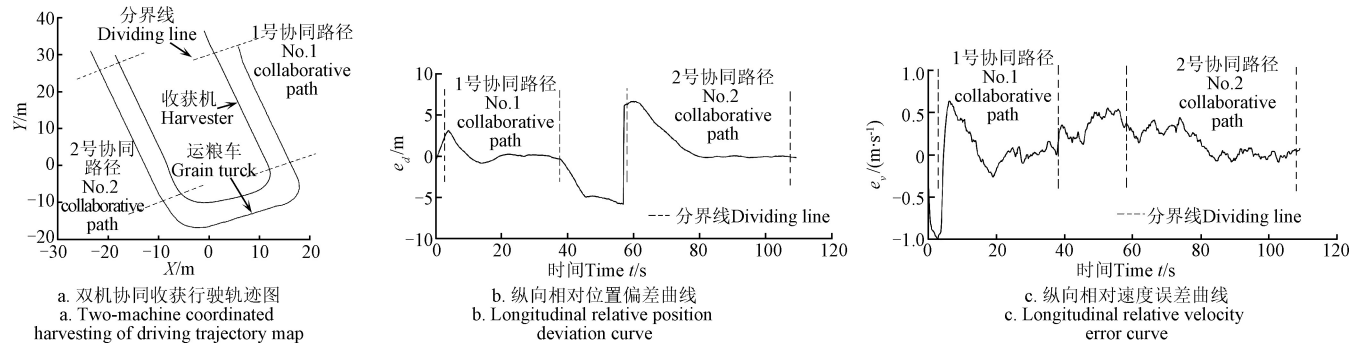


图 14 双机协同小麦收获试验试验结果

Fig.14 Results of the two-machine cooperative wheat harvest experiment

表 6 双机协同收获纵向相对位置控制试验结果

Table 6 Two-machine coordinated harvesting longitudinal relative position control test result								
InDe/m	试验号 Test No.	调节时间 Steady-time/s	上升时间 Rise-time/s	超调量 Overshoot/%	LRPD/m	STD of LRPD /m	VD/(m·s <sup>-1</sup> )	STD of VD/(m·s <sup>-1</sup> )
2	1	15.2	7.0	26	0.073 8	0.091 3	-0.030 7	0.089 4
6	2	17.6	16.1	0	0.081 7	0.091 2	0.019 4	0.075 8
平均				13	0.077 8	0.091 3	0.005 7	0.082 6

7 结 论

针对自主导航收获协同卸粮过程中纵向相对位置控制需求以及拖车驱动系统非线性度较高的问题，本文构建了简化平行协同模型，设计了位速耦合纵向相对位置控制方法，结合直线跟踪控制方法，实现了双机收获协同卸粮作业，主要结论如下：

1) 为研究所设计方法的实际性能，进行了不同初始纵向偏差的田间双机协同试验。主机速度为 1 m/s，初始纵向偏差分别为 3、7 和 10 m 时，平均调节时间分别为 7.73、17.2 和 23.2 s。田间试验平均稳态偏差绝对值为 0.091 8 m，速度平均稳态误差为 0.012 3 m/s。由于运粮车系统目前还无法自动切换高低档位，通过发动机调节前进速度范围有限，所以未进行不同速度主机的适应性研究，研发自动切换高低

设置为运粮车行驶路径，形成一个大 U 型路径嵌套于收获的 U 型路径外侧。保证粮筒展开后卸粮点位于运粮车中轴线附近。依据小麦收获常规作业速度，速度设定为 1 m/s，运粮车跟随接粮。只在直线收获路径上卸粮，接近转弯时停止卸粮并收回卸粮筒。协同模式中运粮车与收获机从田头并排起始。收获机为主机，运粮车为从机。收获机先作业，运粮车等待收获机的启动信号再启动。运粮车行驶在外圈，行程大于收获机，为了安全作业转弯时需要前后错开，所以田间试验运粮车初始纵向位置偏差为正。初始偏差非人为设置，由协同作业自然形成。试验指标与前文一致。

小麦收获试验的双机协同轨迹如图 14a 所示，协同过程分为来去 2 段，分别编号为 1 和 2。纵向相对位置偏差和纵向速度偏差如图 14b、图 14c 所示，各项性能指标如表 6 所示。平均稳态纵向相对位置偏差绝对值为 0.077 8 m，稳态纵向相对位置偏差的标准差为 0.091 3 m。协同精度能够满足收获协同卸粮的需要。

档位的运粮车系统，能够进一步深入研究控制方法的速度适应性。

2) 为优化控制器参数建立仿真模型。采用面积辨识法获取了油门车速开环二阶传递函数，并基于该传递函数设计拖拉机速度控制仿真模型。运用该模型获取了控制器优化参数，进行本文方法与传统 PD 方法的对比试验，试验结果表明，主机速度为 1.5 m/s 时，本文方法相较传统 PD 方法，上升时间减小 1.0 s，调节时间减小 42.7 s，超调量减小 135%。本文方法克服了传统 PD 方法参数速度适应性差的问题。

3) 实际协同收获作业表明，主机速度在 1 m/s 时，纵向相对位置控制收敛，平均稳态纵向相对位置偏差为 0.077 8 m，稳态纵向相对位置偏差的标准差为 0.091 3。能够适应实际作业工况，协同精度能够满足收获协同卸粮的需要。



## [参 考 文 献]

- [1] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 1-12.  
Li Daoliang, Li Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [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]. 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 with English abstract)
- [3] 董胜, 袁朝辉, 谷超, 等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 1-11.  
Dong Sheng, Yuan Zhaohui, Gu Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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 Yuhuan, 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 with English abstract)
- [5] Han Shafeng, He Yong, Fang Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: A review[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2018, 44(4): 381-391, 515.  
韩树丰, 何勇, 方慧. 农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 381-391, 515. (in English with Chinese abstract)
- [6] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.  
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [7] Mahmud M S A, Abidin M S Z, Mohamed Z, et al. Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 488-499.
- [8] Seyyedhasani H, Dvorak J S, Roemmele E. Routing algorithm selection for field coverage planning based on field shape and fleet size[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 523-529.
- [9] 张闻宇, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 29-36.  
Zhang Wenyu, Ding Youchun, Liao Qingxi, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 29-36. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [11] 何杰, 朱金光, 罗锡文, 等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 10-17.  
He Jie, Zhu Jinguang, Luo Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15-21.  
Liu Zhaopeng, Zhang Zhigang, Luo Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [13] 洪剑青, 赵德安, 孙月平, 等. 基于卡尔曼滤波离散滑模控制的明轮船直线跟踪[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 33-39.  
Hong Jianqing, Zhao Dean, Sun Yueping, et al. Linear trajectory tracking of paddle boat using discrete sliding mode control based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 33-39. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张智刚, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(S): 6-12.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhao Zouxi, et al. Trajectory tracking control method based on kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 40(S): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张闻宇, 王进, 张智刚, 等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 18-27.  
Zhang Wenyu, Wang Jin, Zhang Zhigang, et al.

- Self-calibrating variable structure Kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 18-27. (in Chinese with English abstract)
- [16] 靳标, 李建行, 朱德宽, 等. 基于自适应有限冲激响应-卡尔曼滤波算法的GPS/INS导航[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 75-81.
- Jin Biao, Li Jianxing, Zhu Dekuan, et al. GPS/INS navigation based on adaptive finite impulse response-Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 75-81. (in Chinese with English abstract)
- [17] 丁幼春, 詹鹏, 周雅文, 等. 北斗定位田间信息采集平台运动控制器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 178-185.
- Ding Youchun, Zhan Peng, Zhou Yawen, et al. Design and experiment of motion controller for information collection platform in field with Beidou positioning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 178-185. (in Chinese with English abstract)
- [18] 侯加林, 蒲文洋, 李天华, 等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 80-88.
- Hou Jialin, Pu Wenyang, Li Tianhua, et al. Development of dual-lidar navigation system for greenhouse transportation robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 80-88. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘路, 潘艳娟, 陈志健, 等. 高遮挡环境下玉米植保机器人作物行间导航研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 11-17.
- Liu Lu, Pan Yanjuan, Chen Zhijian, et al. Inter-rows navigation method for corn crop protection vehicles under high occlusion environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 11-17. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丁幼春, 夏中州, 彭靖叶, 等. 联合收获机单神经元PID导航控制器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 34-42.
- Ding Youchun, Xia Zhongzhou, Peng Jingye, et al. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈子文, 李伟, 张文强, 等. 基于自动Hough变换累加阈值的蔬菜作物行提取方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 314-322.
- Chen Ziwen, Li Wei, Zhang Wenqiang, et al. Vegetable crop row extraction method based on accumulation threshold of Hough Transformation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(22): 314-322. (in Chinese with English abstract)
- [22] 关卓怀, 陈科尹, 丁幼春, 等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 19-28.
- Guan Zhuohuai, Chen Keyin, Ding Youchun, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 19-28. (in Chinese with English abstract)
- [23] Noguchi N, Will J, Reid J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.
- [24] Zhang X, Geimer M, Noack P O, et al. A semi-autonomous tractor in an intelligent master-slave vehicle system[J]. Intelligent Service Robotics, 2010, 3(4): 263-269, 16.
- [25] Zhang C, Noguchi N, Yang L. Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 121: 269-281.
- [26] Luo C, Mohsenimanesh A, Laguë C. Synchronous tracking control for agricultural wide-span implement varrier (WSIC)[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(3): 873-883.
- [27] 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 cooperative navigation method based on leader-follower structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14-21. (in Chinese with English abstract)
- [28] 许韶麟. 多移动机器人的协同定位与导航规划[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Xu Shaolin. Cooperative Localization and Navigation Planning of Multi-Mobile Robot[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [29] 邹存名, 单慧, 李洪兴. 基于模型预测的车辆协同编队控制[J/OL]. 控制工程. 2020-11-19. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20200251>.
- Zou Cunming, Shan Hui, Li Hongxing. Model prediction vehicle cooperative formation control[J]. Control Engineering of China. 2020-11-19. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20200251>. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhang W Y, Gai J Y, Zhang Z G, et al. Double-DQN based path smoothing and tracking control method for robotic vehicle navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 104985.
- [31] Richard C D, Robert H B. Modern Control Systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 250-256.
- [32] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 66-68.

## Position-velocity coupling control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and grain truck

Zhang Wenyu, Zhang Zhigang<sup>\*</sup>, Luo Xiwen, He Jie, Hu Lian, Yue Binbin

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Intelligent robot system has become an essential development direction for managing a farm in the whole-process, all-day, and unmanned environment in smart agriculture. Therefore, it is necessary to cooperate with the harvester and grain truck to realize the autonomous operation in the harvest link. In this study, a longitudinal relative position cooperative control system was designed in the process of master-slave navigation harvesting and co-unloading grain, suitable for the trailer drive system with high nonlinearity. A parallel cooperative model of two machines was established to calculate the deviation of longitudinal relative position, where the relative position of harvester and grain truck was geometrically represented. A linear tracking was also utilized to control the transverse distance deviation, due to the fact that the harvester and grain truck separately planned the operation path. In longitudinal distance error, the throttle of the grain truck was used to adjust the longitudinal relative distance and further control the forward speed. A position-velocity coupling controller was designed to calculate the desired throttle, including a speed feedback Proportional Derivative(PD) controller and a position-velocity integrated decision bang-bang controller. The switch function of the bang-bang controller was derived from the dynamic features with good robustness. An open-loop second-order transfer function of throttle speed was generated from area identification to optimize the parameters of the controller. A simulated model of longitudinal relative position control was constructed to optimize the parameters of position-velocity coupling controller, according to the transfer function. A field experiment was conducted to verify the reliability of the model. Additionally, a comparison was also performed on the designed control system and traditional PD control. The simulation results showed that the designed control was fully adapted to the change of host speeds in practical operation, indicating better adaptability than the traditional PD. A two-machine cooperative navigation test was set to determine the adaptability and accuracy of longitudinal relative position control of position-velocity coupling in field operation. Both the harvester (Lovol Heavy Industry GE80S-H) and grain truck (Lovol Heavy Industry M1104) were installed on an electrically controlled chassis, to realize electronic steering and speed control of engines. Real-time kinematic and global navigation satellite systems (RTK-GNSS, K728 of Si Nan Company) were used to locate modules, with the location acquisition frequency of 10 Hz, and the accuracy of horizontal positioning  $\pm (10+D\times 10^{-6})$  mm, where  $D$  is the distance between the base station and the mobile station, km. A wheel corner sensor (BEI-9902120CW) was used with the nonlinearity of  $\pm 2\%$ , and A/D sampling accuracy of 12 bits. The switch actuator was Rexroth HT801053. Two sets of communication modules with 2.4 GHz frequency were used for the dual-machine communication (EBYTE company E34-DTU (2G4D20)), where module and control terminal were communicated via RS-232, and the control terminals were AGCS-I controllers with touch screens. The CAN bus was adopted to connect the control terminal with the chassis electronic control unit of the dual machine. This position-velocity coupling longitudinal relative position control was transplanted into the AGCS-I controller. Metrowerks CodeWarrior was adopted for ARM Developer Suite v1.2 development. Collaborative system experiments were conducted in a pilot field at the Lovol Arbos Intelligent Agriculture Demonstration Base. The experiment result showed that the longitudinal relative position deviation converged rapidly under the initial longitudinal deviation of 3, 7, and 10 m when the speed of the main engine was 1 m/s. The average adjustment time of system response was 7.73, 17.2, and 23.2 s, respectively. The average steady-state longitudinal relative position deviation was 0.091 8 m, and the standard deviation of steady-state longitudinal relative position deviation was 0 m, while the control accuracy of 1 173 suitable for the requirement of co-unloading grain, indicating excellent initial deviation adaptability. In addition, a wheat harvest test of the dual-machine cooperative system was carried out in Jinchang, Gansu Province of China. The performance of longitudinal relative position control with position-velocity coupling was obtained in the actual harvest operation. The field experimental results showed that the average steady-state longitudinal relative position deviation was 0.077 8 m, and the standard deviation of steady-state longitudinal relative position deviation was 0.091 3 m, indicating high cooperative accuracy in the need of harvest cooperative grain unloading. The finding can provide sound support for the high-precision independent system of harvest operation in smart farming.

**Keywords:** agricultural machinery; automatic navigation; control; unmanned farm; cooperative operation; cooperative control; position-velocity coupling