

基于半实物仿真的丘陵山地拖拉机电液悬挂控制试验

翟志强¹ 陈一明^{1,2} 朱少华¹ 杜岳峰¹ 朱忠祥¹ 毛恩荣¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 小鹏汽车科技有限公司, 广州 510530)

摘要: 针对丘陵山地拖拉机电液悬挂控制系统田间试验困难、可重复性差等问题,基于半实物仿真技术开展电液悬挂控制系统试验研究。首先通过对试验拖拉机和悬挂作业装置进行受力分析,建立了丘陵山地拖拉机整机动力学模型、铧犁体的土壤阻力模型和拖拉机悬挂装置动力学模型。然后对丘陵山地拖拉机电液悬挂系统横向仿形控制、位控制、牵引力控制以及力位综合控制的系统原理进行了分析,设计了丘陵山地拖拉机电液悬挂模糊 PID 控制器。之后搭建拖拉机电液悬挂控制系统半实物仿真试验平台,开发电液悬挂控制系统,开展电液悬挂系统仿地形控制、力控制、位控制和力位综合控制等试验,对比分析模糊 PID 控制和经典 PID 控制方法性能。试验结果表明,模糊 PID 控制性能较好:在位置控制模式下,模糊 PID 控制无超调,控制系统响应时间为 0.6 s,较经典 PID 控制提高约 33.3%;耕深控制系统稳态误差约为 0.05 cm,较经典 PID 控制降低约 50%;在力控制模式下,模糊 PID 控制耕深的跟随误差最大值为 0.38 cm,标准差为 0.17 cm,较经典 PID 控制分别下降了 64.5%、39.3%,验证了所开发的电液悬挂控制系统的有效性。

关键词: 丘陵山地拖拉机; 电液悬挂; 控制性能试验; 半实物仿真

中图分类号: TP391; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0328-10

Experiment on Electro-hydraulic Hitch Control System for Hilly and Mountainous Tractor Based on Semi-physical Simulation

ZHAI Zhiqiang¹ CHEN Yiming^{1,2} ZHU Shaohua¹ DU Yuefeng¹ ZHU Zhongxiang¹ MAO Enrong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Xiaopeng Automobile Technology Co., Ltd., Guangzhou 510530, China)

Abstract: Aiming at the difficulties in the field test and poor repeatability of the electro-hydraulic hitch control system for hilly and mountainous tractors, the research on the electro-hydraulic hitch control system was carried out based on the semi-physical simulation technology. Firstly, through the force analysis of the test tractor and the suspension operation device, the dynamic model of the whole hilly and mountainous tractor, the soil resistance model of the plough body and the dynamic model of the tractor suspension device were established. The system principles of lateral profiling control, position control, force control and force-position integrated control of the electro-hydraulic suspension system for hilly and mountainous tractors were analyzed, and then a fuzzy PID controller for the electro-hydraulic suspension of hilly and mountainous tractors was designed. Afterwards the electro-hydraulic suspension control system was developed, experiments such as terrain imitation control, force control, position control and force-position integrated control of electro-hydraulic suspension system were carried out, and the performances of fuzzy PID control and classical PID control method were compared and analyzed. Finally, the test results showed that the fuzzy PID control performance was better; in the position control mode, the fuzzy PID control had no overshoot, and the control system response time was 0.6 s, which was about 33.3% higher than the classical PID control; the steady-state error of the tillage control system was about

收稿日期: 2022-06-15 修回日期: 2022-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52072407)和双一流科研项目(2022AC023)

作者简介: 翟志强(1989—),男,讲师,博士,主要从事农机装备设计与智能化控制研究,E-mail: zhaizhiqiang@cau.edu.cn

通信作者: 朱忠祥(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事农机装备设计与智能化控制研究,E-mail: zhuzhonxiang@cau.edu.cn

0.05 cm, which was about 50% lower than that of the classical PID control; in the force control mode, the maximum value of the tillage depth following error of the fuzzy PID control was 0.38 cm, and the standard deviation was 0.17 cm, which were respectively 64.5% and 39.3% lower than that of the classical PID control, which verified the effectiveness of the developed electro-hydraulic suspension control system.

Key words: hilly and mountainous tractor; electro-hydraulic hitch; control performance experiment; semi-physical simulation

0 引言

丘陵山地拖拉机作业环境复杂,对电液悬挂控制系统的性能提出了更高要求,通常需要自动调节悬挂系统姿态以适应坡地作业条件^[1]。在整机设计开发阶段,开展电液悬挂控制系统试验研究十分必要^[2]。国内外研究人员已在拖拉机电液悬挂系统试验研究方面开展了较多工作,如战凯等^[3]应用仿真分析法,首次在计算机上建立带有液压悬挂系统拖拉机的仿真程序,为复杂系统在计算机系统上的仿真研究奠定了基础。周云山等^[4]研制了一种数字式模拟加载装置,开展了阻力控制系统在土壤模拟系统中的动态性能,为控制性能测试及其评价阻力控制系统动态特性的研究提供了参考。谢斌^[5]采用电液比例控制的方式将拖拉机传统的机液式液压悬挂系统改造为电液悬挂系统,提出了一种滑转率与牵引阻力联合控制的方式,对实现拖拉机电液悬挂系统的智能化控制具有参考价值。庞昌乐^[6]设计了一套拖拉机作业机组仿真试验控制系统,探究了拖拉机机组的发动机负荷、滑转率以及耕作阻力 3 种参数的综合控制问题,为拖拉机机组的综合控制提供了借鉴。谭或^[7]在模糊控制策略的基础上,以滑转率、作业阻力与耕深为控制参数,对电液悬挂系统进行综合控制,并对室内试验控制系统的液压加载系统进行分析与试验研究。SANJEEV 等^[8]基于非线性控制理论利用参数估计技术设计了拖拉机电液悬挂系统的有效统一模型,在复杂液压悬挂系统动态仿真模型中表现出了较好的效果。WANG 等^[9]阐述了拖拉机电液悬挂系统控制策略方法,指出了 PID 控制策略抗干扰能力较弱,但未讨论模糊 PID 控制策略在非线性系统里实际试验测试效果。XU 等^[10]为提高拖拉机电液悬挂系统的响应速度和精度,提出了一种基于力位调节的变论域模糊控制算法,并进行了软硬件设计和试验验证。综上,目前针对拖拉机电液悬挂系统综合控制的研究已取得了较大进展,然而在丘陵山地拖拉机电液悬挂系统试验研究方面仍然缺乏。

鉴于此,本文基于半实物仿真技术建立丘陵

山地拖拉机电液悬挂控制系统试验方法,并针对犁耕工况,以某型丘陵山地拖拉机为对象开展试验研究。

1 拖拉机模型建立

1.1 电液悬挂系统组成

拖拉机电液悬挂控制系统主要组成如图 1 所示,包括液压泵、控制器、车身倾角传感器、电液比例控制阀组、双作用液压缸、农机具横向倾角传感器、角位移传感器以及销轴式牵引力传感器,可以实现拖拉机悬挂机构的横向仿形控制、力控制、位控制以及力位综合控制。

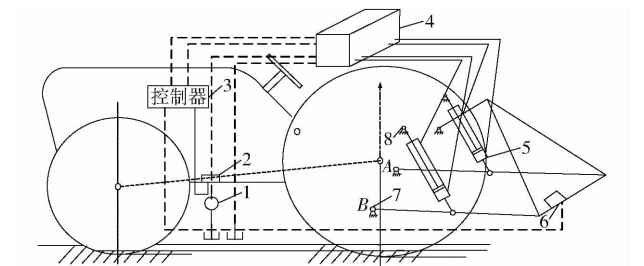


图 1 丘陵山地拖拉机电液悬挂系统组成
Fig.1 Composition of electro-hydraulic hitch system of hilly and mountainous tractor

- 1. 液压泵 2. 车身倾角传感器 3. 控制器 4. 电液比例控制阀组
- 5. 双作用液压缸 6. 农机具横向倾角传感器 7. 销轴式牵引力传感器 8. 角位移传感器

1.2 电液悬挂系统建模

1.2.1 拖拉机机体运动学模型

在机体运动学模型建立过程中,首先将拖拉机后轮的几何中心定为基准点,将拖拉机在耕作过程中的运动分为沿着犁耕行进方向上的平移运动和拖拉机车体在竖直平面内绕着基准点的转动。如图 2 所示,以拖拉机驱动轮的几何中心点 O 为坐标原点,分别以拖拉机行驶方向和竖直方向为 x_o 轴和 y_o 轴,建立参考坐标系 $Ox_o y_o$,拖拉机各主要结构的坐标位置通过其与驱动轮几何中心点 O 的相对坐标关系来表示^[11]。

设拖拉机前、后轮几何中心的距离为 l_{o01} ,假设拖拉机前、后轴在初始静止状态下的轴向载荷为 0,设静止状态下前、后轮几何中心的连线与水平面的

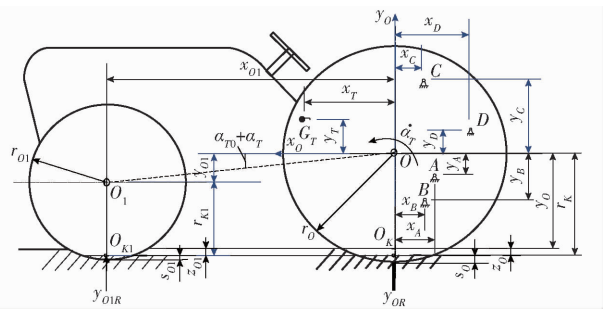


图2 丘陵山地拖拉机运动分析图

Fig.2 Schematic of hilly and mountainous tractor movement analysis

夹角为 α_{T0} ,拖拉机在作业过程中,前、后轮几何中心的连线与水平面的夹角为 $\alpha_{T0} + \alpha_T$;前轮几何中心与后轮几何中心的相对竖直距离为 y_{O1} ,后轮几何中心与车轮的地面接触点之间的相对竖直位移为 y_O ;前、后轮几何中心之间的距离可沿 x_O 轴和 y_O 轴分解为 x_{O1} 、 y_{O1} 。由图2中几何关系可知

$$\left\{\begin{aligned}r_{K1} &\approx r_{O1} - s_{O1} \\ r_K &\approx r_O - s_O \\ \dot{r}_{K1} &\approx -\dot{s}_{O1} \\ \dot{r}_K &\approx -\dot{s}_O \\ y_O &= r_K + y_{OR} - z_O = r_O + y_{OR} - s_O - z_O \\ y_{O1} &= r_O - r_{O1} + y_{OR} - y_{O1R} - s_O + s_{O1} - z_O + z_{O1} \\ x_{O1} &= \sqrt{l_{O01}^2 - y_{O1}^2} \\ \alpha_{T0} &= \arcsin \frac{r_O - r_{O1}}{l_{O01}} \\ \sin(\alpha_T + \alpha_{T0}) &= \frac{y_{O1}}{l_{O01}} = \\ &= \frac{r_O - r_{O1} + y_{OR} - y_{O1R} - s_O + s_{O1} - z_O + z_{O1}}{l_{O01}} \\ \alpha_T &= \arcsin \frac{r_O - r_{O1} + y_{OR} - y_{O1R} - s_O + s_{O1} - z_O + z_{O1}}{l_{O01}} - \alpha_{T0}\end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中 r_{K1} ——前轮几何中心 O_1 至前、后轮接地点之间的连线 $O_{K1}O_K$ 的距离,为其驱动半径,m
 r_K ——后轮几何中心 O 至前、后轮接地点之间的连线 $O_{K1}O_K$ 的距离,为其驱动半径,m
 r_{O1} ——前轮在未发生变形时的几何半径,m
 r_O ——后轮在未发生变形时的几何半径,m
 s_{O1} ——耕作过程中拖拉机在竖直方向所受的载荷变化而引起的前轮轮胎的变形量,m
 s_O ——耕作过程中拖拉机在竖直方向所受的

载荷变化而引起的后轮轮胎的变形量,m

z_{O1} ——拖拉机在耕作土壤中前轮轮胎的沉陷量,m

z_O ——拖拉机在耕作土壤中后轮轮胎的沉陷量,m

y_{O1R} ——由耕作地表起伏引起的前轮几何中心相对于水平面在竖直方向上的位移,m

y_{OR} ——由耕作地表起伏引起的后轮几何中心相对于水平面在竖直方向上的位移,m

设拖拉机在作业过程中后轮几何中心点 O 沿水平方向的运动速度和加速度分别为 $\dot{x}_O$ 和 $\ddot{x}_O$,在数值上近似等效为拖拉机的行驶速度 v_O 和加速度 $\dot{v}_O$;沿竖直方向的运动速度和加速度分别为 $\dot{y}_O$ 和 $\ddot{y}_O$;拖拉机在耕作过程中,由地表起伏引起拖拉机车身绕基准点 O 的角速度和角加速度分别为 $\dot{\alpha}_T$ 和 $\ddot{\alpha}_T$,上述各变量可表示为

$$\left\{\begin{aligned}y_K &= s_O + z_O \\ y_{\Delta K} &= s_O + z_O - s_{O1} - z_{O1} \\ \dot{y}_{O1} &= \dot{y}_{OR} - \dot{y}_{O1R} - \dot{s}_O + \dot{s}_{O1} - \dot{z}_O + \dot{z}_{O1} \\ \ddot{y}_{O1} &= \ddot{y}_{OR} - \ddot{y}_{O1R} - \ddot{s}_O + \ddot{s}_{O1} - \ddot{z}_O + \ddot{z}_{O1} \\ \dot{x}_O &\approx v_O = (1 - \delta_K) \omega_K r_K \approx (1 - \delta_K) (r_O - s_O) \omega_K \\ \ddot{x}_O &\approx \dot{v}_O = (1 - \delta_K) (\dot{\omega}_K r_K + \omega_K \dot{r}_K) - \omega_K r_K \dot{\delta}_K = \\ &= (1 - \delta_K) [\dot{\omega}_K (r_O - s_O) - \omega_K \dot{s}_O] - \omega_K (r_O - s_O) \dot{\delta}_K \\ \dot{y}_O &= \dot{r}_K + \dot{y}_{OR} - \dot{z}_O = \dot{y}_{OR} - \dot{s}_O - \dot{z}_O = \dot{y}_{OR} - \dot{y}_K \\ \ddot{y}_O &= \ddot{r}_K + \ddot{y}_{OR} - \ddot{z}_O = \ddot{y}_{OR} - \ddot{s}_O - \ddot{z}_O = \ddot{y}_{OR} - \ddot{y}_K \\ \dot{\alpha}_T &= \frac{\dot{y}_{OR} - \dot{y}_{O1R} - \dot{s}_O + \dot{s}_{O1} - \dot{z}_O + \dot{z}_{O1}}{x_{O1}} = \\ &= \frac{\dot{y}_{OR} - \dot{y}_{O1R} - \dot{y}_{\Delta K}}{x_{O1}} \\ \ddot{\alpha}_T &= \frac{\ddot{y}_{OR} - \ddot{y}_{O1R} - \ddot{s}_O + \ddot{s}_{O1} - \ddot{z}_O + \ddot{z}_{O1}}{x_{O1}} + \\ &= \frac{y_{O1} (\dot{y}_{OR} - \dot{y}_{O1R} - \dot{s}_O + \dot{s}_{O1} - \dot{z}_O + \dot{z}_{O1})^2}{x_{O1}^3} = \\ &= \frac{\ddot{y}_{OR} - \ddot{y}_{O1R} - \ddot{y}_{\Delta K}}{x_{O1}} + \frac{y_{O1} (\dot{y}_{OR} - \dot{y}_{O1R} - \dot{y}_{\Delta K})^2}{x_{O1}^3}\end{aligned}\right. \quad (2)$$

式中 y_K ——驱动轮轮径下陷量与变形量之和,m
 $y_{\Delta K}$ ——前、后轮轮径下陷量与变形量差值,m
 ω_K ——驱动轮角速度,rad/s
 δ_K ——驱动轮形变量与轮径的比值

在图 2 中, D 为拖拉机后部与悬挂机构上拉杆的铰接点, A 、 B 分别为拖拉机与悬挂机构两下拉杆的左、右铰接点, C 为升降液压缸与拖拉机提升臂的铰接点, G_T 为拖拉机重心。根据平面坐标关系, 计算上述各点相对于坐标原点的相对坐标位置, 计算式为

$$\begin{cases} x_D = l_D \cos(\alpha_{OD} + \alpha_T) \\ y_D = l_D \sin(\alpha_{OD} + \alpha_T) \\ x_B = l_B \cos(\alpha_{OB} - \alpha_T) \\ y_B = l_B \sin(\alpha_{OB} - \alpha_T) \\ x_C = l_C \cos(\alpha_{OC} + \alpha_T) \\ y_C = l_C \sin(\alpha_{OC} + \alpha_T) \\ x_A = l_A \cos(\alpha_{OA} - \alpha_T) \\ y_A = l_A \sin(\alpha_{OA} - \alpha_T) \\ x_T = l_{G_T} \cos(\alpha_{G_T} - \alpha_T) \\ y_T = l_{G_T} \sin(\alpha_{G_T} - \alpha_T) \end{cases} \quad (3)$$

式中 l_{G_T} ——拖拉机质心与驱动轮几何中心之间的距离, m

α_{G_T} ——在初始静止状态下拖拉机质心与驱动轮几何中心连线与水平面之间的夹角, rad

l_A 、 l_B 、 l_D 、 l_C ——铰接点 A 、 B 、 D 、 C 与驱动轮几何中心之间的距离, m

α_{OA} 、 α_{OB} 、 α_{OD} 、 α_{OC} ——在初始静止状态下拖拉机的铰接点 A 、 B 、 D 、 C 与驱动轮几何中心连线与水平面之间的夹角, rad

根据刚体平面运动学原理, 可求得上述各关键位置点的运动速度与运动加速度。其中拖拉机重心 G_T 在水平方向运动速度和竖直方向运动速度为 v_{Tx} 和 v_{Ty} , 在水平方向加速度和竖直方向加速度为 a_{Tx} 和 a_{Ty} , 可分别表达为

$$\begin{cases} x_T = l_{G_T} \cos(\alpha_{G_T} - \alpha_T) \\ y_T = l_{G_T} \sin(\alpha_{G_T} - \alpha_T) \\ v_{Tx} = \dot{x}_O + y_T \dot{\alpha}_T \\ v_{Ty} = \dot{y}_O - x_T \dot{\alpha}_T \\ a_{Tx} = \ddot{x}_O + y_T \ddot{\alpha}_T - x_T \dot{\alpha}_T^2 \\ a_{Ty} = \ddot{y}_O - x_T \ddot{\alpha}_T - y_T \dot{\alpha}_T^2 \end{cases} \quad (4)$$

在水平与竖直方向上, 拖拉机与悬挂机构的上拉杆铰接点 D 、拖拉机与悬挂机构的下拉杆左、右两铰接点 A 和 B 、升降液压缸与拖拉机提升臂铰接点 C 的运动速度 v_{Dx} 、 v_{Dy} 、 v_{Ax} 、 v_{Ay} 、 v_{Bx} 、 v_{By} 、 v_{Cx} 、 v_{Cy} 以及 A 、 B 两点的加速度 a_{Ax} 、 a_{Ay} 、 a_{Bx} 、 a_{By} 可分别表达为

$$\begin{cases} v_{Dx} = \dot{x}_O + y_D \dot{\alpha}_T \\ v_{Dy} = \dot{y}_O + x_D \dot{\alpha}_T \\ v_{Bx} = \dot{x}_O - y_B \dot{\alpha}_T \\ v_{By} = \dot{y}_O + x_B \dot{\alpha}_T \\ v_{Cx} = \dot{x}_O + y_C \dot{\alpha}_T \\ v_{Cy} = \dot{y}_O + x_C \dot{\alpha}_T \\ v_{Ax} = \dot{x}_O - y_A \dot{\alpha}_T \\ v_{Ay} = \dot{y}_O + x_A \dot{\alpha}_T \\ a_{Bx} = \ddot{x}_O - y_B \ddot{\alpha}_T + x_B \dot{\alpha}_T^2 \\ a_{By} = \ddot{y}_O + x_B \ddot{\alpha}_T + y_B \dot{\alpha}_T^2 \\ a_{Ax} = \ddot{x}_O - y_A \ddot{\alpha}_T + x_A \dot{\alpha}_T^2 \\ a_{Ay} = \ddot{y}_O + x_A \ddot{\alpha}_T + y_A \dot{\alpha}_T^2 \end{cases} \quad (5)$$

同理, 拖拉机前轮几何中心 O_1 的水平 and 竖直方向速度 v_{O1x} 、 v_{O1y} 以及水平方向和竖直方向的加速度 a_{O1x} 、 a_{O1y} 可表示为

$$\begin{cases} v_{O1x} = \dot{x}_O - y_{O1} \dot{\alpha}_T \\ v_{O1y} = \dot{y}_O - x_{O1} \dot{\alpha}_T \\ a_{O1x} = \ddot{x}_O - y_{O1} \ddot{\alpha}_T - x_{O1} \dot{\alpha}_T^2 \\ a_{O1y} = \ddot{y}_O - x_{O1} \ddot{\alpha}_T + y_{O1} \dot{\alpha}_T^2 \end{cases} \quad (6)$$

1.2.2 耕作受力模型

拖拉机在耕作过程中车体与农机具受到的外力有: ①拖拉机的重力 G , 作用于拖拉机重心, 重心的横坐标表示为 X_g , 纵坐标表示为 Y_g 。②后悬挂的重力 G_n , 地面支持力 F_n 。③土壤的反作用力, 拖拉机在稳定工作时土壤对犁体工作曲面的反作用力表示为 R_{xy} , 此作用力可以分解为水平的阻力 R_x 和竖直阻力 R_y ^[12], 耕深对于土壤阻力的竖直阻力 R_y 的影响最大; 铧犁侧板与沟壁的水平摩擦力可表示为 L_x , 土壤的垂直瞬态作用力为 F_d 。

拖拉机车体与犁体耕作时受力分析如图 3、4 所示。

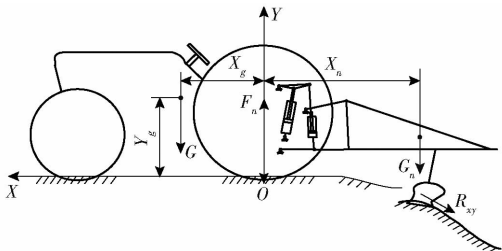


图 3 丘陵山地拖拉机受力分析图

Fig.3 Schematic of force analysis of hilly and mountainous tractor

犁体所受到的水平阻力 R_x 和竖直阻力 R_y 的表达式为

均解模糊化后得到 K_p 、 K_i 、 K_d 的变化值,与原值相加得到新的 K_p 、 K_i 、 K_d 值。进而实现模糊 PID 控制,制定该规则表时应该遵循以下原则:①误差 e 较大时,为使系统具有较快的响应速度,避免出现较大的超调量,比例系数应该取较大值,积分系数和微分系数应该取一个较小值。②误差 e 较小时,为使系统避免较大的稳态误差以及避免在平衡点出现较大振荡,比例系数取一个较小值,积分系数应该取一个较大值,微分环节根据情况做适当调整^[14-15]。

基于上述规则,制定模糊控制规则表,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules

变量	论域	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Δk_p	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	NS	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NM	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
Δk_i	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
Δk_d	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NS	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3 半实物仿真试验平台开发

3.1 总体设计方案

半实物仿真(HIL)是在系统测试过程中,控制器的外部环境可通过实时的数字环境来模拟实现,对于一些难以建立数学仿真模型的部件则可以保留在闭环中,这样组成的闭环测试系统的优点在于可在实验室环境下完成对控制单元的测试以及初期适配工作,可大大降低系统开发成本,缩短开发周期^[16-18]。通过半实物仿真系统中的实时处理器对仿真模型的运行状态的实时监测,可实现系统模型参数的在线调整^[19-20]。

本文采用的设备是 dSPACE 公司研发的面向实

时仿真和高速 I/O 口处理的硬件系统^[21],为进行控制器的控制性能测试试验与控制策略的开发^[22],通过 I/O 串口将控制器与 dSPACE 实时仿真系统连接^[23],丘陵山地拖拉机车身和电液悬挂控制系统模型导入 dSPACE 实时仿真系统,实现丘陵山地拖拉机电液悬挂系统仿真模型与控制器之间的实时通讯。借助半实物仿真系统的操纵面板,实现对整个试验过程管理和直观地呈现试验数据曲线。丘陵山地拖拉机电液悬挂控制系统半实物仿真系统方案如图 6 所示。

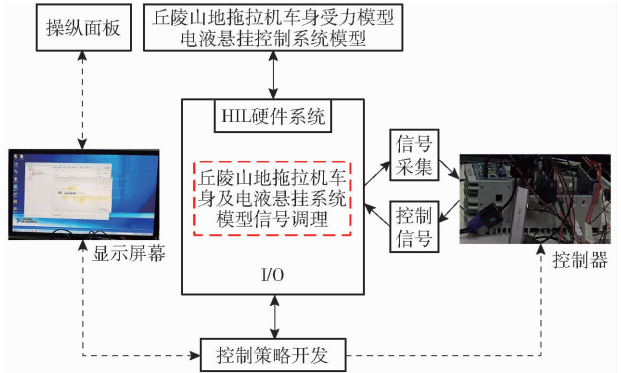


图 6 电液悬挂控制系统半实物仿真平台方案
Fig.6 Scheme of semi-physical simulation platform for electro-hydraulic hitch control system

3.2 控制界面设计及平台搭建

丘陵山地拖拉机电液悬挂系统半实物仿真试验的控制过程采用电控式面板,控制界面的设计原则为:①能够实现不同控制模式的切换,各控制模式之间不会产生影响。②能够输入控制目标设定值,如力位综合控制比例系数等。③该操纵界面应该具有较好的人机交互性。④操控者可以观察到系统实时状态变化。设计的操纵界面如图 7 所示。

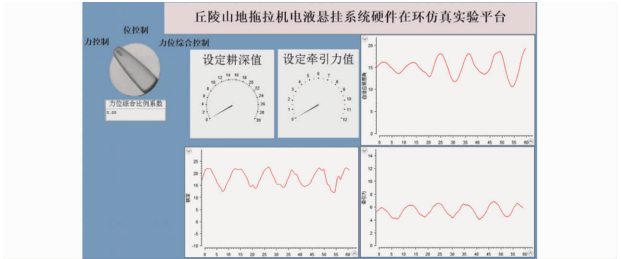


图 7 电液悬挂控制系统控制界面
Fig.7 Control interface for electric-hydraulic hitch control system

根据半实物仿真试验的结构组成与丘陵山地拖拉机电液悬挂系统的控制方案,搭建的丘陵山地拖拉机电液悬挂控制系统半实物仿真试验平台系统的组成如图 8 所示。将电液悬挂系统模型导入 dSPACE 中,利用 Simulink 进行模型的代码编译,通过控制面板调节力位综合比例系数,可仿真测试电

液悬挂控制系统在不同力位综合比例系数下的控制效果,对控制器的性能进行验证。

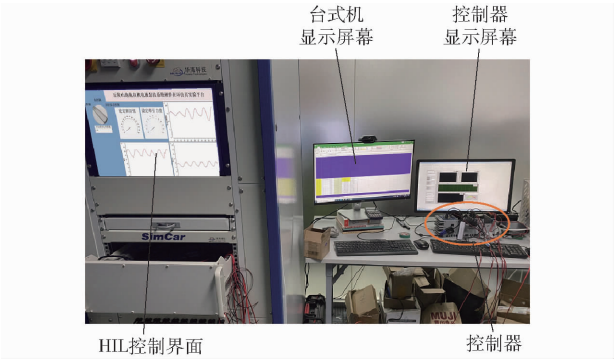


图 8 电液悬挂控制系统半实物仿真试验平台
Fig.8 Semi-physical simulation test platform for tractor hydraulic hitch control system

4 试验结果与分析

运用所建电液悬挂系统模型和半实物仿真试验平台,模拟丘陵山地拖拉机沿坡地等高线犁耕作业的工况,开展电液悬挂系统的横向仿形控制、位置控制、牵引力控制以及力位综合控制的性能试验。为使模拟作业环境更符合实际犁耕作业工况,采用比阻随机变化的模拟加载形式,选用的土质为砂壤土^[24],其比阻变化范围为 2.5 ~ 4.5 N/mm²,如图 9 所示。

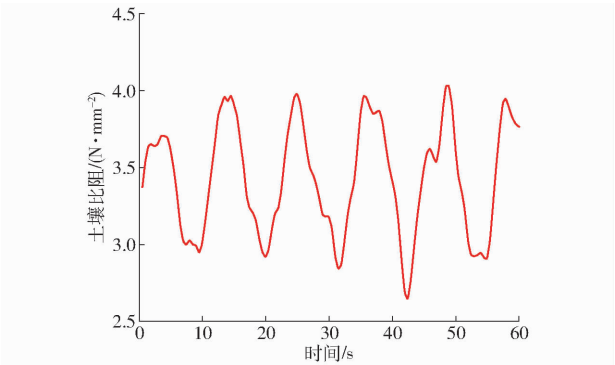


图 9 土壤比阻波动变化曲线
Fig.9 Soil specific resistance fluctuation curve

4.1 横向仿形控制

设置拖拉机行驶速度为 1 m/s,沿等高线作业的坡度在 10° ~ 20°范围内平缓波动变化,仿真时间设置为 60 s,仿真试验结果如图 10 所示。
由图 10 可知,两种控制算法均无超调,其中模糊 PID 自适应控制相较于 PID 控制的响应速度提高了大约 15%,模糊 PID 自适应控制的最大跟随误差约为 1.7°,PID 控制的最大跟随误差约为 2.8°。上述试验结果验证了电液悬挂模糊 PID 控制系统具有更好的响应速度和控制精度。

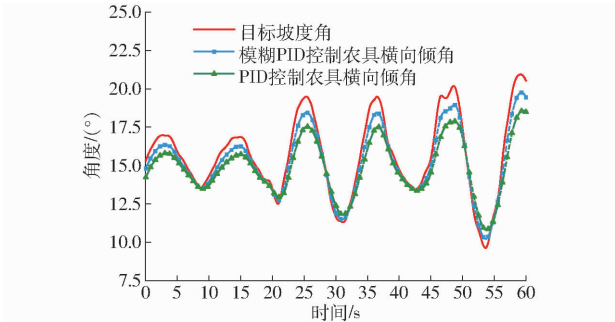


图 10 横向仿形控制半实物仿真试验结果
Fig.10 Semi-physical simulation result of lateral profiling control

4.2 位置控制

选择控制模式为位置控制,设定耕深阶跃信号由 15 cm 阶跃至 20 cm,阶跃时间分别设定为 10 s 和 20 s,电液悬挂系统的响应曲线如图 11 所示。

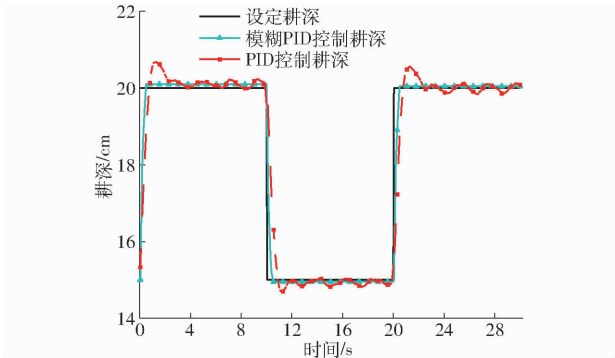


图 11 位置控制算法半实物仿真试验结果
Fig.11 Semi-physical simulation test result of position control algorithm

由图 11 可知,在耕深阶跃变化信号发出后,PID 控制有些许超调,模糊 PID 自适应控制无超调产生。PID 控制的过渡时间约为 0.9 s,待稳定后系统误差约为 0.1 cm、波动范围为 ±0.3 cm;模糊 PID 自适应控制的过渡时间约为 0.6 s,系统稳定后的误差约 0.05 cm,且其抗干扰能力较 PID 控制更好。

4.3 牵引力控制

将电液悬挂控制系统设置为牵引力控制模式,设定牵引力为 5 kN,截取 60 s 的仿真曲线如图 12a 所示。
由图 12a 可知,模糊 PID 自适应控制的响应速度相较于 PID 控制较快,且波动变化范围较小,两种控制算法的实际牵引力在目标值附近波动变化。由图 12b、12c 可知,模糊 PID 自适应控制与 PID 控制均具有一定的迟滞现象,但模糊 PID 控制相对于 PID 控制的系统滞后较小,且模糊 PID 自适应控制的耕深跟随误差最大值为 0.38 cm,标准差为 0.17 cm,而 PID 控制的耕深跟随误差的最大值为 1.07 cm,标准差为 0.28 cm。通过上述对比分析可

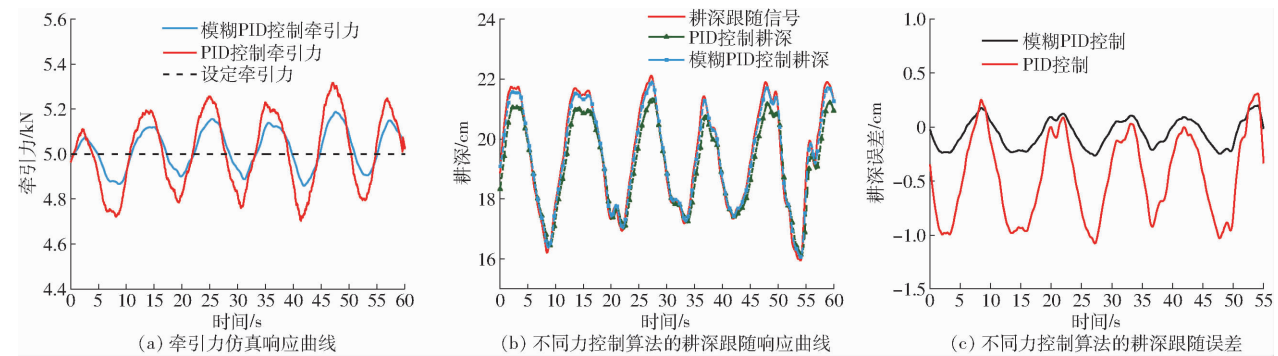


图 12 力控制算法半实物仿真试验结果

Fig. 12 Semi-physical simulation result of force control algorithm

知,当电液悬挂控制系统采用模糊 PID 控制时,丘陵山地拖拉机电液悬挂控制系统的耕深跟随误差的最大值下降了 64.5%,标准差下降了 39.3%,由此可知,电液悬挂模糊 PID 控制系统具有更好的控制效果。

4.4 力位综合控制

设定力位综合比例系数分别为 0.25、0.5、0.75,对比分析电液悬挂控制系统在不同力位综合比例系数下的控制响应性能。设定试验目标牵引力为 5 kN,耕深为 20 cm,控制方法采用模糊 PID 控制,截取仿真过程的时间为 60 s,所得力位综合控制的响应曲线如图 13 所示。

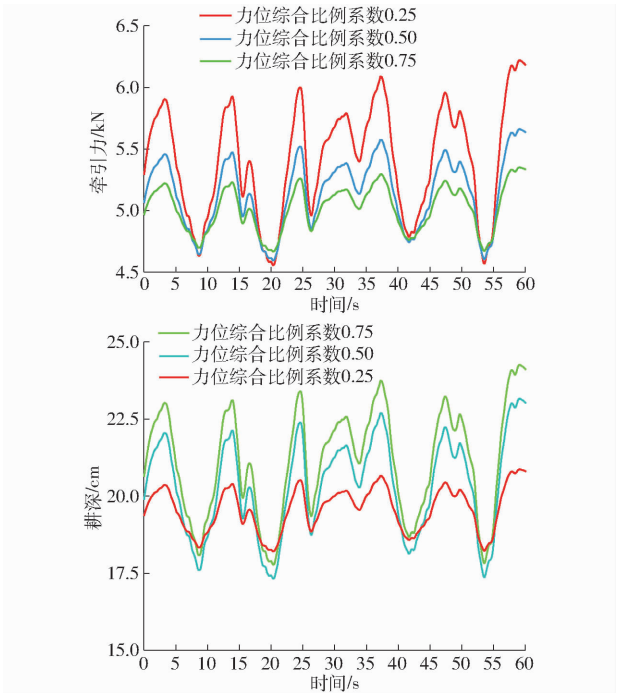


图 13 力位综合控制半实物仿真试验结果

Fig. 13 Semi-physical simulation result of force and position comprehensive control

由图 13 可知,在力位综合控制中,随着力位综合比例系数的增加,即牵引力控制所占的比重增大,牵引力与耕深的波动变化范围会发生相应

的变化。当力位综合控制比例系数为 0.25 时,牵引力均值为 5.41 kN,标准差为 0.45 kN;耕深均值为 19.58 cm,标准差为 0.73 cm。当力位综合比例系数为 0.5 时,牵引力均值为 5.14 kN,标准差为 0.28 kN;耕深平均值为 20.46 cm,标准差为 1.57 cm。当力位综合比例系数为 0.75 时,牵引力均值为 5.09 kN,标准差为 0.21 kN;耕深均值为 21.11 cm,标准差为 1.74 cm。由上述分析可知,力位综合比例系数越大,牵引力波动范围越小,耕深波动变化范围越大。

4.5 控制模式转换

通过手动选择的方式设置面板旋钮,分别设置位置控制、牵引力控制与力位综合控制(取力位综合比例系数为 0.5),进行控制模式转换试验,控制器在环仿真试验结果如图 14 所示。

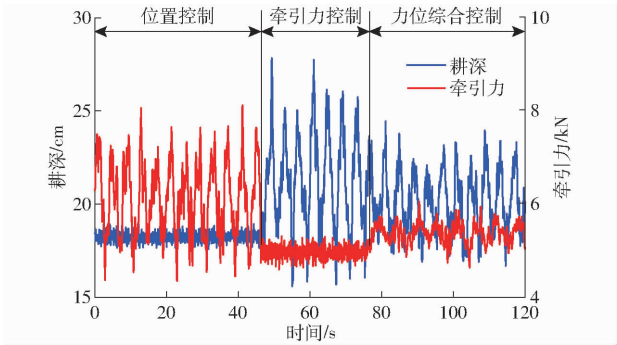


图 14 控制模式转换半实物仿真试验结果

Fig. 14 Semi-physical simulation result of control mode conversion

由图 14 可知,在转换为牵引力控制模式与位置控制模式时,耕深与牵引力的变化趋势与前文试验结果一致,进一步验证了丘陵山地拖拉机电液悬挂控制系统在不同控制模式下的控制效果。

5 结论

(1) 针对丘陵山地拖拉机犁耕作业工况建立的犁体受力模型、悬挂机构动力学模型和整机动力学模型有效,可用于开展电液悬挂系统仿真分析。

(2)开发的基于模糊 PID 的电液悬挂控制系统

控制、位控制和力位综合控制功能,满足丘陵山地拖

响应速度较高、精度较高,能够实现仿地形控制、力

拉机犁耕作业需求。

参 考 文 献

[1] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)

[2] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. (in Chinese)

[3] 战凯,张兰义,秦维谦. 拖拉机悬挂农具耕作机组在微机上的仿真研究[J]. 吉林工业大学学报, 1990(4): 81-88.
ZHAN Kai, ZHANG Lanyi, QIN Weiqian. Simulation by micro-computer on tractor with mounted implement[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1990(4): 81-88. (in Chinese)

[4] 周云山,张兰义,秦维谦,等. 拖拉机液压悬挂抖动特性数字模拟加载试验台的研究[J]. 农业机械学报, 1990,31(1):35-40.
ZHOU Yunshan, ZHANG Lanyi, QIN Weiqian, et al. Digital loading simulator for dynamics of tractor hydraulic lifting system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990,31(1):35-40. (in Chinese)

[5] 谢斌. 拖拉机农具仿真作业机组悬挂系统电液控制技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
XIE Bin. Study on electrohydraulic control technology of hitch system for the tractor-implement combination[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)

[6] 庞昌乐. 拖拉机作业机组仿真系统控制策略和模糊综合控制的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
PANG Changle. Study on control strategy and fuzzy integrated control for the tractor-implement combination simulated system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese)

[7] 谭彧. 拖拉机液压悬挂和加载系统性能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
TAN Yu. The study of characteristics for hydraulic hitch & loading system in tractor [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

[8] SANJEEV K, VIRENDRA K T, CHANDAN K B, et al. Modeling, simulation and experimental validation of flow rate of electro-hydraulic hitch control valve of agricultural tractor[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 82:102070.

[9] WANG Ling, WANG Yu, DAI Dong, et al. Review of electro-hydraulic hitch system control method of automated tractors[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2021,14(3):1-11.

[10] XU Jikang, LI Ruichuan, LI Yanchao, et al. Research on variable-universe fuzzy control technology of an electro-hydraulic hitch system[J]. Processes, 2021, 9:1920.

[11] BAUER F, PORTEŠ P, SLIMARIK D, et al. Observation of load transfer from fully mounted plough to tractor wheels by analysis of three point hitch forces during ploughing[J]. Soil and Tillage Research, 2017,172: 69-78.

[12] DWYER M J. The effect of draught control response on the performance of agricultural tractors[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1969, 14(4): 295-312.

[13] 董秀林,史维祥,周福章,等. 拖拉机阻力控制系统实验分析与动态性能评价指标体系探讨[J]. 农业工程学报, 1997,13(1): 74-77.
DONG Xiulin, SHI Weixiang, ZHOU Fuzhang, et al. Experiment research on the tractor draught control system and discussion on the judging-target-system[J]. Transactions of the CSAE, 1997,13(1): 74-77. (in Chinese)

[14] 李珍珍,朱浩铭. 模糊 PID 控制器的设计[J]. 通信电源技术, 2019, 36(11): 48-50.
LI Zhenzhen, ZHU Haoming. Design of fuzzy PID controller[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(11): 48-50. (in Chinese)

[15] 王昕,江航,郑益慧,等. 飞机空调车的多模型模糊 PID 控制器设计[J]. 控制工程, 2016, 23(4): 453-457.
WANG Xin, JIANG Hang, ZHENG Yihui, et al. Multiple models fuzzy PID controller design in air-condition temperature control system[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(4): 453-457. (in Chinese)

[16] 闫松. 混合动力汽车动态能量管理策略及硬件在环仿真研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
YAN Song. Study on the dynamic energy management strategy and in-loop simulation of hybrid electric vehicles[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020. (in Chinese)

[17] 赵广伟. 船舶液压舵机系统硬件在环仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
ZHAO Guangwei. Hardware-in-the-loop simulation of marine hydraulic rudder system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)

[18] 黄淼. 基于 dSPACE 的 ESC 硬件在环仿真测试系统开发研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
HUANG Miao. Development of ESC hardware-in-the-loop simulation test system based on dSPACE [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017. (in Chinese)

[19] 杨刘倩,徐兴无,张敏,等. 电动汽车用电池管理系统硬件在环仿真测试研究[J]. 中国测试, 2018, 44(增刊1): 160-165.
YANG Liuqian, XU Xingwu, ZHANG Min, et al. Battery management system for electric vehicle hardware in loop test research[J]. China Measurement & Test, 2018,44(Supp.1): 160-165. (in Chinese)

[20] 赵龙同. 用于硬件在环仿真测试的无人驾驶碾压机建模研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
ZHAO Longtong. Research on modeling of driverless roller for hardware in the loop simulation test [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)

[21] 位正. 新一代硬件在环仿真平台的研究和开发[D]. 北京: 清华大学, 2009.
WEI Zheng. Development of new generation hardware-in-the-loop simulation platform[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)

[22] 潘峰, 薛定宇, 徐心和. 基于 dSPACE 半实物仿真技术的伺服控制研究与应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 936 – 939.
PAN Feng, XUE Dingyu, XU Xinhe. The research and application of dSPACE-based hardware-in-the-loop simulation technique in servo control[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 936 – 939. (in Chinese)

[23] 蔡毅. 基于 MATLAB/RTW 实时仿真系统的设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
CAI Yi. Research and design of real-time simulation system based on MATLAB/RTW[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)

[24] 王素玉, 刘站, 李瑞川, 等. 基于土壤比阻的大功率拖拉机变权重力位综合控制研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 351 – 357.
WANG Suyu, LIU Zhan, LI Ruichuan, et al. Variable weight force-position mixed control of high-power tractor based on soil specific resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 351 – 357. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 292 页)

[16] 石海春, 柯永培, 刘应洪, 等. 电导率法测定玉米种子活力的优化条件[J]. 种子, 2008(5): 7 – 10.  
SHI Haichun, KE Yongpei, LIU Yinghong, et al. Optized conditions of the electrical conductivity method for detem ination of seed vigor in maize[J]. Seed, 2008(5): 7 – 10. (in Chinese)

[17] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

[18] PURLIS E, SALVADORI V O. A moving boundary problem in a food material undergoing volume change-simulation of bread baking[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 949 – 958.

[19] 王庆惠, 闫圣坤, 李忠新, 等. 核桃深层热风干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 60 – 63.  
WANG Qinghui, YAN Shengkun, LI Zhongxin, wet al. Study on characteristics on depth of walnut byhot-air drying[J]. Food & Machinery. 2015, 31(6): 60 – 63. (in Chinese)

[20] JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Food & Bioproducts Processing, 2011, 89(3): 194 – 201.

[21] 王凤贺, 丁治春, 陈鹏泉, 等. 油茶籽热风干燥动力学研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 426 – 432.  
WANG Fenghe, DING Zhichun, CHEN Pengxiao, et al. Investigation on hot-air drying of Camellia oleifera seeds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 426 – 432. (in Chinese)

[22] WANG H, LIU J S, MIN W H, et al. Changes of moisture distribution and migration in fresh ear corn during storage[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(11): 2644 – 2651.

[23] 姚连谋, 张怡, 乔勇进, 等. 热风与冷冻干燥对五种鲜食甜玉米粒品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 61 – 68.  
YAO Lianmou, ZHANG Yi, QIAO Yongjin, et al. Effects of hot air and freeze drying on the quality of five fresh sweet corns kernels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 61 – 68. (in Chinese)

[24] 张玉荣, 周显青, 张勇. 储存玉米膜脂过氧化与生理指标的研究[J]. 中国农业科学, 2008(10): 3410 – 3414.  
ZHANG Yurong, ZHOU Xianqing, ZHANG Yong. Research on membrane lipid peroxidation and physiological parameters of storage maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008(10): 3410 – 3414. (in Chinese)

[25] 成军虎, 周显青, 张玉荣, 等. 干燥玉米品质特性与淀粉得率相关性分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 37 – 42.  
CHENG Junhu, ZHOU Xianqing, ZHANG Yurong, et al. Analysis of correlation between quality characteristics and starch yield of dried maize[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2010, 31(4): 37 – 42. (in Chinese)

[26] 罗宁, 魏湜, 李晶, 等. 低温胁迫对玉米苗期根系特征及电导率的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2694 – 2699.  
LUO Ning, WEI Shi, LI Jing, et al. Effects of low-temperature stress on root system characteristics and electric conductivity ofmaize seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2694 – 2699. (in Chinese)

[27] 高灿红, 胡晋, 郑昀晔, 等. 玉米幼苗抗氧化酶活性、脯氨酸含量变化及与其耐寒性的关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1045 – 1050.  
GAO Canhong, HU Jin, ZHENG Yunye, et al. Antioxidant enzyme activities and proline content in maize seedling and their relationships to cold endurance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6): 1045 – 1050. (in Chinese)

[28] 朱德泉, 王继先, 朱德文. 玉米微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 72 – 75.  
ZHU Dequan, WANG Jixian, ZHU Dewen, et al. Experimental study on characteristics of microwave drying of maize grain and its effects on grain quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 72 – 75. (in Chinese)

[29] REN G Y, ZHANG L D, ZENG F L, et al. Effects of hot air drying temperature and tempering time on the properties of maize starch[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(6): 236 – 241.