

# 玉米免耕播种自动调偏系统设计与试验

张振国<sup>1,2</sup> 郭全峰<sup>1,2</sup> 蒋贵菊<sup>3</sup> 王蕴泽<sup>1,2</sup> 邢振宇<sup>1,2</sup> 许鹏<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;

3. 博乐市农业农村局, 博乐 833400)

**摘要:** 为适应新疆滴灌区宽窄行免耕种植模式,解决传统大型玉米免耕播种机播种过程中触碰根茬、无法精确约束路径、玉米粒距合格率低等问题,结合免耕播种农艺要求,在采用导航定位技术获取播种机当前位置与目标路径间偏差的基础上,设计一种玉米免耕播种自动调偏系统。该系统主要包括避茬装置、液压执行系统和控制系统,通过建立整机力学模型,对避茬装置和液压执行系统进行运动和受力分析,确定避茬装置和液压执行系统关键结构参数,获取避茬装置最佳挂接长度和液压执行系统最大驱动力。进一步优化控制系统,实现避茬装置自动调偏及接收反馈信息功能。对免耕播种避茬装置自动调偏系统进行性能试验,试验结果表明,神经网络PID的期望调偏角最大稳态误差为 $0.932^\circ$ ,超调量全部小于1%,平均响应稳态误差小于 $0.9^\circ$ ,满足预期。田间试验结果表明,当拖拉机作业速度不大于 $1.0\text{ m/s}$ 、行间秸秆覆盖量不大于 $1.0\text{ kg/m}^2$ 时,避茬率不小于85%,纵向调整距离不大于 $8.6\text{ m}$ ,玉米粒距变异系数不大于21.63%。此时播种机调偏避茬效果最佳,满足玉米免耕播种机农艺指标要求。

**关键词:** 免耕播种机; 玉米; 自动调偏; 避茬装置; 神经网络PID控制

中图分类号: S244.29

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0040-13

OSID:



## Design and Test of Automatic Deviation Adjustment System for No-tillage Sowing of Maize

ZHANG Zhenguo<sup>1,2</sup> GUO Quanfeng<sup>1,2</sup> JIANG Guiju<sup>3</sup> WANG Yunze<sup>1,2</sup> XING Zhenyu<sup>1,2</sup> XU Peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Key Laboratory of Xinjiang Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Agriculture and Rural Bureau of Bole, Bole 833400, China)

**Abstract:** To meet the no-till sowing pattern of wide and narrow rows in the drip irrigation area of Xinjiang, the sowing of traditional large maize no-till planter has problems of touching stubble, failing to constrain path accurately and having a low qualified rate of maize kernel spacing. Combining the agronomic requirements of no-tillage seeding, the navigation and positioning technology was utilized to obtain information about the deviation between the current position of the seeder and the target path. The deviation automatic adjustment system was designed based on the no-tillage seeding stubble avoidance device. The system included a stubble avoidance device, a hydraulic actuating system, and a hydraulic steering control system. Through establishing the mechanical model of machine, stubble avoidance device and hydraulic actuating system were analyzed in terms of movement and force. The key structural parameters of stubble avoidance and hydraulic steering were determined. Meanwhile, the optimal hook-up length of stubble avoidance device and the maximum driving force of hydraulic actuating system were obtained. Moreover, the hydraulic steering control system was optimized to realize function of automatic adjustment for stubble avoidance devices and acceptance of feedback information. The results showed that the maximum steady state error of desired adjustment angle was  $0.932^\circ$  for neural network PID, the overshooting amount was less than 1%, and the average response steady state error was less than  $0.9^\circ$ , which met expectations. When the tractor operating speed was no more than  $1.0\text{ m/s}$  and amount of straw covered between rows was no more than  $1.0\text{ kg/m}^2$ , the field test showed that the stubble avoidance rate was no less than 85%, vertical adjustment distance was no more than  $8.6\text{ m}$ , and coefficient of variation

收稿日期: 2023-12-12 修回日期: 2024-01-10

基金项目: 新疆智能农业装备重点实验室项目 (ND2N202304) 和新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目 (XJ2023G152)

作者简介: 张振国 (1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事特色农作物提质工程与装备技术研究, E-mail: zhangzhenguo@xjau.edu.cn

for qualifying grain spacing in maize was no more than 21.63%. Seeder had the best effect of offsetting and stubble avoidance and met the agronomic index requirements of maize no-tillage planter.

**Key words:** no-tillage sowing; maize; automatic deviation adjustment; stubble avoidance device; neural network PID control

## 0 引言

玉米免耕播种是新疆滴灌区实施保护性耕作的关键技术之一,主要将保护性耕作技术和宽窄行种植模式相结合,在秸秆覆盖地直接进行免耕避茬播种,可以实现节本增效。大型牵引式玉米免耕播种机作为新疆土地集中连片区域大规模作业的主要机具,得到了广泛的推广和应用<sup>[1-3]</sup>。新疆滴灌区玉米收获后,在传统拖拉机牵引大型播种机作业过程中,存在玉米根茬留存高,秸秆覆盖量大,地表起伏不平复杂田间情况,拖拉机无法精确约束大型牵引式播种机行走路径,致使播种机偏离行间播种路径,发生横向偏差,入土开沟播种部件触碰玉米根茬,进而导致播种质量下降<sup>[4-5]</sup>。

为有效实时补偿播种机横向偏差,使免耕播种机完成主动避茬免耕播种,目前主要采用安装导航的拖拉机带动播种机进行行间调偏作业。文献[6-8]采用RTK-GPS技术自动检测作物种植位置,对拖拉机前进路线进行规划。文献[9-11]采用RTK-GPS导航系统获取除草装置的实时位置,并通过液压系统驱动侧移框架实现除草装置的精准横向侧移。传统大型牵引式玉米免耕播种机的偏差补偿主要由自身质量较大的拖拉机带动播种机完成,不能精准调节播种路径、实时补偿播种机作业偏差。相对于拖拉机自动驾驶技术,文献[12-14]基于机具主动对行思路,采用机器视觉、多传感器信息融合、电机控制等技术,进行了机具导向装置设计,以期提高对行作业的精度。文献[15-16]基于机具主动对行思路,采用多传感器信息融合、液压控制等技术,设计了机具导向装置,提高了对行作业精度。文献[17-18]利用RTK-GNSS双天线导航定位传感器,路径跟踪控制器引导喷雾机自动完成直线行驶和地头转弯。结合上述研究,对于新疆滴灌区玉米免耕播种作业场景,相关研究学者对于机具对行技术研究较少,因此本文基于主动避茬免耕播种的研究思路,利用导航技术辅助定位,采用主动补偿播种机作业偏差的方法<sup>[19-20]</sup>,对玉米免耕播种自动调偏系统进行设计。

为提高新疆滴灌区玉米免耕播种质量,结合新疆滴灌区宽窄行玉米免耕播种农艺要求,设计一种适用于滴灌区的大型牵引式玉米免耕播种机自动调

偏系统。通过分析新疆滴灌区宽窄行播种条件,计算避茬装置所需最大调偏距离和最小驱动力矩,对避茬装置关键执行部件进行设计。同时,根据系统实时补偿播种机横向偏差的工作要求,通过卫星导航设置播种路径并实时获取播种机当前位置与目标路径间的偏差信息,采用神经网络PID(Proportion integral differential)同步控制算法进行系统参数整定,优化系统到达稳态所需时间,高效补偿播种机作业偏差,提高新疆滴灌区玉米免耕播种机作业效率与播种质量,以期为滴灌区玉米免耕播种自动调偏系统设计提供参考。

## 1 农艺要求与整机工作原理

### 1.1 滴灌区避茬播种条件

新疆滴灌区玉米播种采用宽窄行(600 mm + 400 mm)种植模式,滴灌带铺设在窄行中间,其中玉米免耕播种需在滴灌区宽行间等行距播种2行玉米<sup>[21]</sup>。常见玉米根茬留茬高度为(600 ± 50) mm,玉米根茬行间距 $L_1$ 为1 000 mm,玉米根茬窄行间距 $L_2$ 为400 mm,玉米根茬宽行间距 $L_3$ 为600 mm,玉米播种行与玉米根茬间距 $L_4$ 为150 mm,2行玉米播种行间距 $L_5$ 为300 mm。针对玉米免耕播种机存在触碰根茬、无法实时补偿作业偏差的问题,提出一种适用于玉米茬地玉米免耕播种主动补偿播种机作业偏差方法,即直接实时控制播种机改变行驶轨迹,使之与玉米根茬行距离保持在±50 mm,保证入土开沟播种部件在滴灌区宽行行间作业,实现免耕播种避茬作业。同时,考虑到玉米根茬辐射直径 $L_6$ 为100 mm,因此,玉米播种允许横向偏差 $L_7$ 不大于100 mm,如图1所示。

### 1.2 整机结构与原理

整机主要包含拖拉机、自动调偏系统、大型牵引式玉米免耕播种机和GNSS定位天线等,如图2所示。作业时,在拖拉机与大型牵引式玉米免耕播种机之间加装避茬装置,采用调偏避茬方法,由GNSS定位天线分别获取拖拉机行驶轨迹和机具当前实时位置,进而得到播种机横向偏差,避茬装置带动播种机侧向移动,使开沟器与玉米根茬保持足够的安全距离,完成玉米避茬免耕播种作业。

避茬装置是自动调偏系统的关键部件,主要包括悬挂-牵引承载连接机构、平行四杆夹持机构、牵

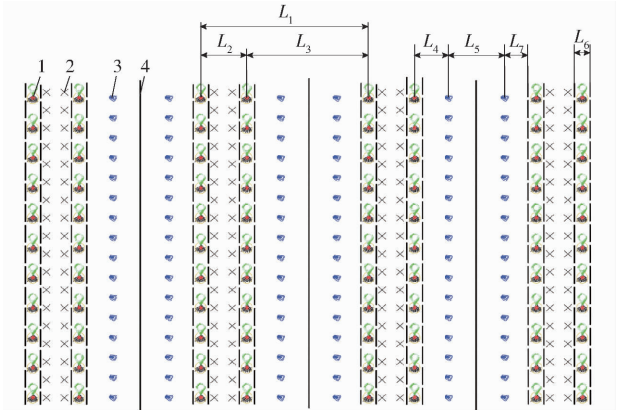


图 1 滴灌区玉米免耕播种作业条件示意图

Fig. 1 Schematic of no-till maize planting operating conditions in drip irrigation areas

1. 玉米根茬 2. 玉米秸秆 3. 玉米种子 4. 玉米种植中心线

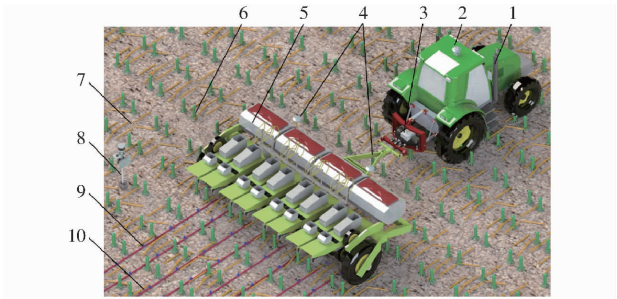


图 2 玉米免耕播种机作业示意图

Fig. 2 Maize no-till planter operation schematic

1. 拖拉机 2. 拖拉机定位天线 3. 自动调偏系统 4. 播种机定位天线 5. 大型牵引式玉米免耕播种机 6. 玉米秸秆 7. 玉米根茬 8. 基站 9. 玉米种子 10. 玉米播种行

引驱动机构及双点快速挂接平衡机构,如图 3 所示。悬挂-牵引承载连接机构前端通过三点悬挂于拖拉机,后端通过固接的双点快速挂接平衡机构牵引玉米免耕播种机。牵引驱动机构以后端中心为圆心缓慢左右摆动,进而调整双点快速挂接平衡机构左右移动。控制系统通过采集播种机实时 GNSS 定位数据进行计算处理,获得播种机作业实时调偏角,通过避茬装置进行作业偏差补偿,提高播种作业精度。

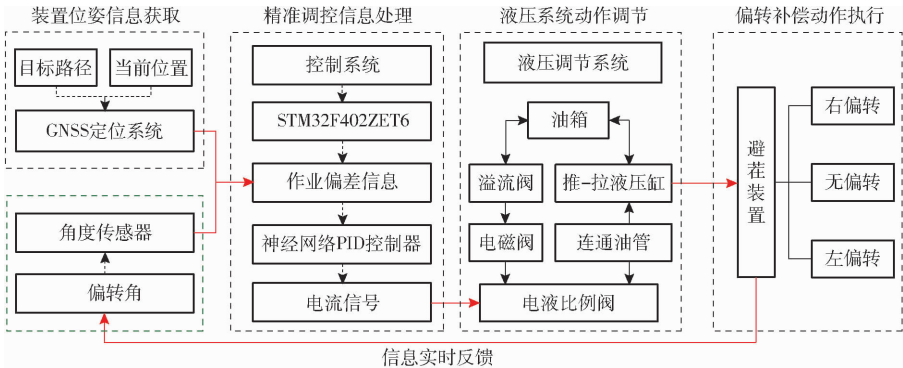


图 4 自动调偏系统结构框图

Fig. 4 Structure diagram of automatic deviation adjustment system

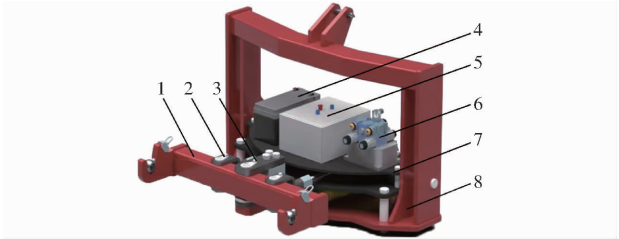


图 3 避茬装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of stubble avoidance device

1. 双点快速挂接平衡机构 2. 平行四杆夹持机构 3. 牵引驱动机构 4. 电源 5. 控制柜 6. 电液比例阀 7. 多层支撑板 8. 悬挂-牵引承载连接机构

1.3 自动调偏系统

滴灌区玉米免耕播种自动调偏系统主要包括避茬装置、液压执行系统、控制系统等,如图 4 所示。作业时,通过 GNSS 定位系统生成播种导航路径,获取装置位姿信息,储存在控制系统。当拖拉机沿目标路径稳定作业时,控制系统实时检测播种机当前位置与目标路径间的偏差信息。当车载计算机实测作业偏差与期望作业偏差有差异时,以 STM32 单片机为控制核心的控制系统进行偏差补偿。控制系统通过神经网络 PID 控制器发出指令信号,通过液压调节系统的电液比例阀控制推-拉液压缸,使避茬装置发生左右偏转,同时角度传感器实时检测并反馈避茬装置实际偏转角,形成闭环控制,进而调节播种机的侧移避茬播种作业路径,完成玉米免耕播种偏差补偿。

2 关键部件设计

避茬装置是完成玉米免耕播种机调偏避茬的关键部件。为得到避茬装置所需最小力矩,确定液压执行部件关键参数,本文首先通过对玉米免耕播种机、平行四杆夹持机构、牵引驱动机构进行力学分析,计算牵引驱动机构所需最小驱动力矩。其次依照调偏距离不超过滴灌区宽行长度的农艺要求,通过设计平行四杆机构连杆长度、牵引驱动机构转向

臂转动距离,确定避茬装置调偏距离与调偏角。最后完成液压执行部件设计,为自动调偏系统的搭建提供数据支撑。

### 2.1 机具受力分析

新疆滴灌区玉米免耕播种作业环境较为复杂,加装避茬装置于拖拉机与免耕播种机间,前后距离增大。为实现避茬装置的挂接、调偏及传递牵引力的功能,在拖拉机承载能力不变的情况下,为满足拖拉机能够正常提升装置和牵引免耕播种机,需要对避茬装置质心与机具下挂接点的间距  $d_{\min}$  进行设计,保持整机力矩平衡。参照悬挂架设计标准<sup>[22]</sup>,根据力矩平衡原理<sup>[23]</sup>,对拖拉机、避茬装置及玉米免耕播种机进行受力分析,如图 5、6 所示。

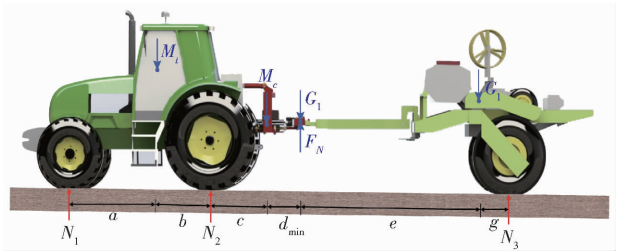


图 5 整机受力分析示意图

Fig. 5 Schematic of force analysis for machine

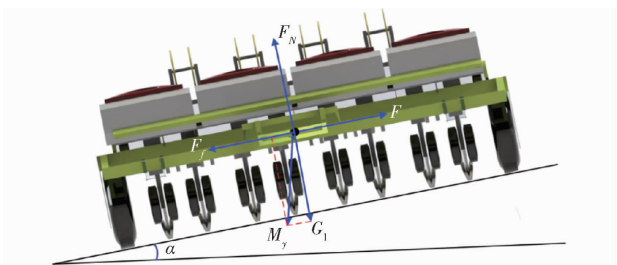


图 6 玉米播种机受力图

Fig. 6 Maize planter force diagram

以避茬装置为研究对象,分别以在拖拉机前轮中心  $N_1$ 、拖拉机后轮中心  $N_2$ 、播种机中心  $N_3$  处的力矩为 0,避茬装置质心与挂接点的间距  $d_{\min}$  力矩平衡方程为

$$d_{\min 1} = \frac{F_{N_2}(a+b) - M_i g a - M_c g(a+b+c)}{G_1} - (a+b+c+e+g) \quad (1)$$

$$d_{\min 2} = \frac{F_{N_1}(a+b) - M_i g a - M_c g c}{G_1} - (c+e+g) \quad (2)$$

$$d_{\min 3} = \frac{M_i g(b+c+e+g) - M_c g(e+g) - G_1 - F_{N_1}(a+b+c+e+g)}{F_{N_3} - M_i g - M_c g} \quad (3)$$

$$F_N = G_1 = M_y \cos \alpha \quad (4)$$

$$F = F_f = M_y \sin \alpha \quad (5)$$

式中  $G_1$ ——玉米免耕播种机重力,N

$M_i$ ——拖拉机重力,N

$M_c$ ——避茬装置重力,N

$F_{N_1}$ ——地面对前轮垂直合力,N

$F_{N_2}$ ——地面对后轮垂直合力,N

$F_{N_3}$ ——地面对播种机垂直合力,N

$F$ ——播种机拉力,N

$a$ ——拖拉机质心至前轮水平间距,mm

$b$ ——拖拉机质心至后轮水平间距,mm

$c$ ——装置质心至拖拉机后轮水平间距,mm

$e$ ——牵引点至播种机质心水平间距,mm

$g$ ——播种机质心至轮胎水平间距,mm

$f$ ——滚动阻力摩擦因数

$\alpha$ ——作业地形坡度角,(°)

$F_N$ ——地面对播种机的支持力,N

$F_f$ ——播种机摩擦力,N

$M_y$ ——斜坡下播种机重力,N

根据实际测量以及相关资料<sup>[24]</sup>,轮式拖拉机重力  $M_i$  取 40 000 N,播种机重力  $G_1$  取 30 000 N,避茬装置重力  $M_c$  取 3 500 N;地面对拖拉机前、后轮垂直合力  $F_{N_1}$ 、 $F_{N_2}$  分别取 36 650、25 000 N,地面对播种机垂直合力  $F_{N_3}$  取 30 000 N。拖拉机质心至前轮水平间距  $a$  和后轮水平间距  $b$  分别取 915、1 785 mm,拖拉机后轮中心至避茬装置后轮质心间距  $c$  取 560 mm;牵引点至播种机质心水平间距  $e$  取 3 000 mm;播种机质心至轮胎水平间距  $g$  取 500 mm。代入式(1)~(5)求解得出,避茬装置质心与挂接点的间距  $d_{\min}$  为 536 mm。考虑实际应用情况,取装置质心与机具下挂接点设计长度  $d_{\min}$  为 500 mm,满足装置作业要求。

### 2.2 平行四杆机构设计

避茬装置在横向补偿播种机偏差过程中,为保证避茬装置平稳进行,根据平行四杆可使各平行杆件受力相对均匀、提供平滑的运动轨迹和动力传递、减小各杆件振动和摆动幅度的工作原理<sup>[25]</sup>,对双点挂接机构进行设计。双点挂接机构工作过程中,主要受到来自大型牵引式玉米免耕播种机的扭转力。平行四杆机构作为双点挂接机构的主要工作部件,首先分析播种机对平行四杆机构的合力,其次杆件长度  $L$  需满足避茬装置质心与挂接点的最大间距  $e_{\max}$ ,最后得到平行四杆机构最终杆件长度  $L$ ,进而与播种机施加的扭转力达到力平衡。随着双点挂接机构左右调偏横移,播种机对平行四杆机构的合力作用点位置也在随时发生变化,如图 7 所示。

假设  $x$  轴正方向与双点挂接机构进行右偏移运动方向相同,以点  $O_1$  为基准点对平行四杆夹持

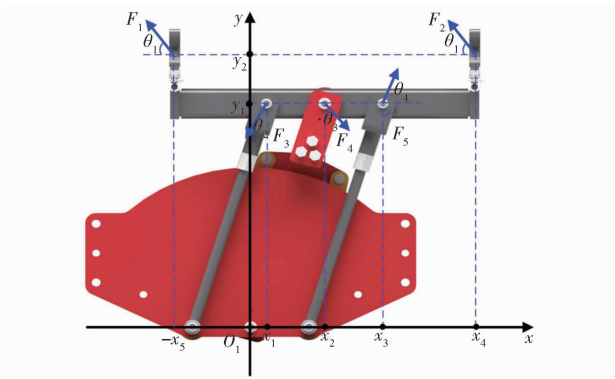


图 7 双点挂接机构受力图

Fig. 7 Force diagram of double-point hitching mechanism

机构进行受力分析,建立双点挂接机构力平衡方程为

$$\sum F_x = F_4 \sin \theta_3 + F_5 \cos \theta_4 - F_1 \cos \theta_1 - F_2 \cos \theta_1 - F_3 \sin \theta_2 \quad (6)$$

$$\sum F_y = F_1 \sin \theta_1 + F_2 \sin \theta_1 + F_5 \sin \theta_4 - F_3 \cos \theta_2 - F_4 \cos \theta_3 \quad (7)$$

$$\sum M_O = x_2 F_4 \sin \theta_3 + x_3 F_5 \cos \theta_4 - x_5 F_1 \cos \theta_1 - x_4 F_2 \cos \theta_1 - x_1 F_3 \sin \theta_2 - (y_2 F_1 \sin \theta_1 + y_2 F_2 \sin \theta_1 + y_1 F_5 \sin \theta_4 - y_1 F_3 \cos \theta_2 - y_1 F_4 \cos \theta_3) \quad (8)$$

式中  $F_1$ ——播种机作用在挂接机构左端扭转力,N  
 $F_2$ ——播种机作用在挂接机构右端扭转力,N  
 $F_3$ ——左连杆对机构对双点挂接机构拉力,N  
 $F_4$ ——牵引驱动机构对双点挂接机构扭转力,N  
 $F_5$ ——右连杆对双点挂接机构推力,N  
 $\theta_1$ ——免耕播种机航向角,(°)  
 $\theta_2$ ——左连杆对机构偏转角,(°)  
 $\theta_3$ ——牵引驱动机构偏转角,(°)  
 $\theta_4$ ——右连杆对机构偏转角,(°)  
 $x_1, x_3$ —— $F_3, F_5$ 到避茬装置回转轴心沿  $x$  方向的水平距离,mm  
 $x_2$ —— $F_4$ 到避茬装置回转轴心沿  $x$  方向的水平距离,mm  
 $x_5, x_4$ —— $F_1, F_2$ 到避茬装置回转轴心沿  $x$  方向的水平距离,mm  
 $y_1$ ——播种机牵引力到避茬装置回转轴心沿  $y$  方向的竖直距离,mm  
 $y_2$ ——牵引驱动机构偏转所受的摩擦力到装置回转轴心沿  $y$  方向的竖直距离,mm

以牵引驱动机构所受扭转力  $F_4$  最大为设计目标,由式(7)可知,当播种机航向角为  $30^\circ$  时,符合实际要求。平行四杆机构在作业过程中, $x_1 \sim x_3$  在  $0 \sim 800$  mm 范围内波动,为保证机构在各个时刻都能保持稳定工作,分别取  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  为 100、

360、520、680、940 mm。根据式(4)、(5)可知,播种机作用在挂接机构扭转力  $F_1, F_2$  合力为自身所受的拉力  $F$ ,拉力  $F$  取 15 600 N。代入式(6)~(8)可得,左连杆对机构对双点挂接机构拉力  $F_3$  为 10 240 N,牵引驱动机构对双点挂接机构扭转力  $F_4$  为 35 236 N,右连杆对机构对双点挂接机构推力  $F_5$  为 20 223 N。

对平行四杆机构进行设计时,需确定各杆件长度以及左、右连杆与机架的夹角。根据结构设计结果,确定平行四杆机构主要参数有摆动角  $\theta$ 、连杆长度  $l_{AB} = l_{CD}$ 。由图 8 可得平行四杆机构左右横移长度为

$$\begin{cases} l_1 = l_{AB} \sin \theta_0 + l_{AB} \sin (\theta_5 - \theta_0) \\ l_2 = l_{AB} \sin (\theta_6 + \theta_0) - l_{AB} \sin \theta_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $l_1$ ——左摆动长度,mm  
 $l_2$ ——右摆动长度,mm  
 $\theta_0$ ——初始角,(°)  
 $\theta_5$ ——最大左摆动角,(°)  
 $\theta_6$ ——最大右摆动角,(°)

联立得摆动长度  $l$  为

$$l = l_1 + l_2 = l_{AB} \sin (\theta_5 - \theta_0) + l_{AB} \sin (\theta_0 + \theta_6) \quad (10)$$

则连杆长度  $l_{AB}$  为

$$l_{AB} = \frac{l}{\sin (\theta_5 - \theta_0) + \sin (\theta_0 + \theta_6)} \quad (11)$$

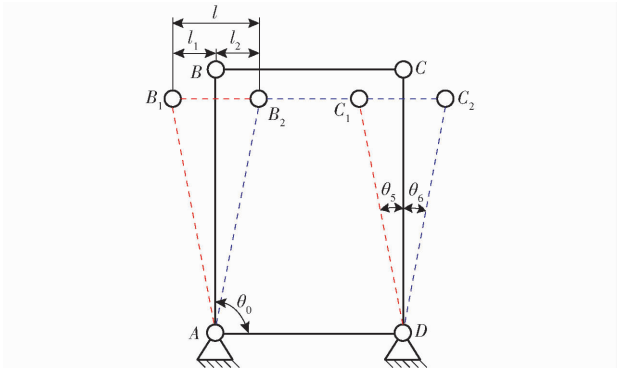


图 8 平行四杆夹持机构运动过程参数分析图

Fig. 8 Parameter analysis diagram of motion process for parallel four-bar clamping mechanism

根据式(11)可知,连杆长度  $l_{AB}$  与摆动长度  $l$ 、摆动角  $\theta$  有关。摆动长度与实际播种农艺要求有关,通常新疆滴灌区免耕播种作业机具左右偏差在 50 ~ 400 mm 之间<sup>[3,26]</sup>,故当平行四杆机构摆动长度  $l$  确定时,摆动长度  $l$  与摆动角  $\theta$  成反比。为满足新疆滴灌区偏差补偿要求,取初始角  $\theta_0$  为  $90^\circ$ ,最大左、右摆动角  $30^\circ$ ,将数据代入计算得摆动连杆长度  $l_{AB}$  为 500 mm,满足作业要求,为牵引驱动机构液压执行部件设计提供数据支撑。

2.3 牵引驱动机构设计

牵引驱动机构的液压执行部件是克服双点挂接机构、播种机扭转力的关键部件。在避茬装置调偏过程中,牵引驱动机构主要受到牵引式大型玉米免耕播种机牵引力以及摩擦力<sup>[27]</sup>。随着推-拉液压缸所处位置角度的变化,牵引驱动机构对播种机牵引的合力作用点位置也在随时发生变化,如图 9 所示。

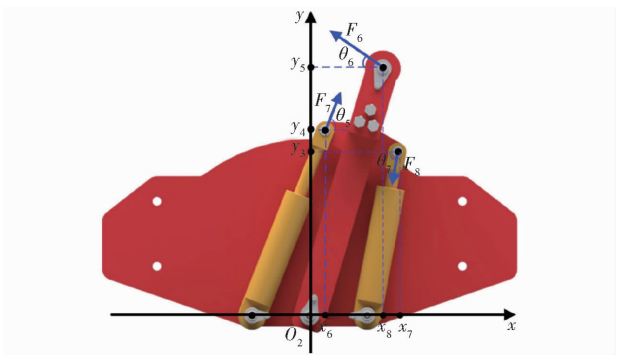


图 9 牵引驱动机构受力分析图

Fig. 9 Force analysis diagram of traction drive mechanism

假设  $x$  轴正方向与避茬装置偏转方向相同,鉴于牵引驱动机构摆动范围主要存在于第一象限,以回转轴心  $O_2$  为基准点对牵引驱动机构进行受力分析,建立牵引驱动机构力平衡方程为

$$\sum F_x = F_7 \cos \theta_5 + F_8 \cos \theta_7 - F_6 \cos \theta_6 \quad (12)$$

$$\sum F_y = F_7 \sin \theta_5 + F_8 \sin \theta_7 - F_6 \sin \theta_6 \quad (13)$$

$$\sum M_{O_2} = x_6 F_7 \cos \theta_5 + x_7 F_8 \cos \theta_7 - x_8 F_6 \cos \theta_6 + y_4 F_7 \sin \theta_5 + y_5 F_8 \sin \theta_6 - y_3 F_6 \sin \theta_7 \quad (14)$$

式中  $F_6$ ——播种机对双点挂接机构扭转力, N  
 $F_7$ ——避茬装置执行液压缸推力, N  
 $F_8$ ——避茬装置执行液压缸拉力, N  
 $x_6, x_7, x_8$ —— $F_7, F_8, F_6$  到避茬装置回转轴心  $O_2$  沿  $x$  方向的水平距离, mm  
 $y_3, y_4, y_5$ —— $F_8, F_7, F_6$  到避茬装置回转轴心沿  $y$  方向的竖直距离, mm

以牵引驱动机构执行液压缸所需最大推力  $F_7$  最大为设计目标。牵引驱动机构在作业过程中,  $x_6 \sim x_8$  在  $-300 \sim 300$  mm 范围内波动,为保证机构在各个时刻都能稳定,分别取  $x_6, x_7, x_8$  为 80、150、260 mm。根据 2.2 节平行四杆机构受力分析可知,牵引驱动机构对双点挂接机构扭转力  $F_4$  与播种机对双点挂接机构扭转力  $F_6$  是一对大小相同、方向相反的作用力,即  $F_6$  为  $-35\,236$  N。代入式 (11) ~ (13) 可得,避茬装置执行液压缸推力  $F_7$  为 15 000 N,避茬装置执行液压缸拉力  $F_8$  为 15 000 N。

为确定牵引驱动机构的液压部件行程,根据牵引驱动机构受力、平行四杆机构连杆长度,确定

支撑旋转臂摆动角以及横移长度,计算液压部件行程。

根据结构设计结果,确定牵引驱动机构主要参数有摆动角  $\varphi$ 、液压缸行程  $l_{EF} = l_{GF}$ 。由图 10 可得液压执行部件行程为

$$l_{EF1} = l_{EG} \cos(\varphi_0 + \varphi_2) \quad (15)$$

$$l_{EF2} = l_{EG} \cos(\varphi_0 - \varphi_1) \quad (16)$$

式中  $l_{EG}$ ——推-拉液压缸水平长度, mm  
 $l_{EF1}$ ——液压缸最大行程, mm  
 $l_{EF2}$ ——液压缸最小回程, mm  
 $\varphi_0$ ——初始角, ( $^\circ$ )  
 $\varphi_1$ ——最大左摆动角, ( $^\circ$ )  
 $\varphi_2$ ——最大右摆动角, ( $^\circ$ )

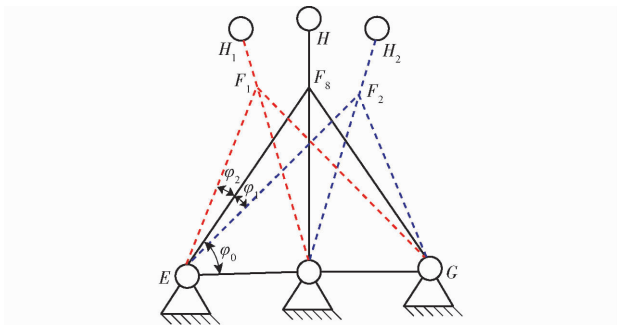


图 10 牵引驱动机构运动过程参数分析图

Fig. 10 Parameter diagram of motion process of traction drive mechanism

根据式 (15)、(16) 可知,连杆长度  $l_{AB}$  与摆动长度  $l$ 、摆动角  $\theta$  有关。摆动长度与实际播种农艺要求有关,通常新疆滴灌区免耕播种作业机具左右偏差在 50 ~ 400 mm 之间,通过正弦变换计算可得,当平行四杆机构摆动长度  $l$  确定时,摆动长度  $l$  与摆动角  $\theta$  成反比,即调偏转向角  $\varphi$  范围为  $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。为满足滴灌区偏差补偿要求,取初始角  $\varphi_0$  为  $90^\circ$ ,最大左、右摆动角为  $30^\circ$ ,将数据代入计算得,液压缸最大行程  $l_{EF1}$  为 750 mm,液压缸最小回程  $l_{EF2}$  为 450 mm,满足作业要求。

根据相关研究可知<sup>[15]</sup>,液压缸内径为 100 mm,活塞杆直径为 50 mm,出油口背压为 0.4 MPa,活塞杆移动速度为 1.2 m/min,液压缸容积效率为 0.85;避茬装置执行液压缸拉力  $F_8$  为 15 000 N;以液压伸缩装置为研究对象,液压缸受力平衡方程为

$$p_0 \frac{\pi}{4} D^2 = F_8 + p_1 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (17)$$

$$Q = \frac{10^{-3} \pi}{4 \eta_v} v (D - d) \quad (18)$$

式中  $p_0$ ——液压缸工作压力, MPa  
 $D$ ——液压缸内径, mm  
 $d$ ——活塞杆直径, mm

$p_1$ ——液压缸出油口背压,MPa  
 $Q$ ——单位时间内油液通过缸筒有效截面的  
体积,即流量,L/min  
 $v$ ——活塞杆移动速度,m/min  
 $\eta_v$ ——液压缸容积效率

将数据代入式(17)、(18),得液压缸工作压力  $p_0$  为 14.16 MPa,流量  $Q$  为 1.5 L/min。参照液压系统压力低于液压缸额定压力 2/3 的原则,设计额定压力 16 MPa,最高压力 19 MPa,行程 150 mm 的推-拉液压缸,以夹角为 60° 对称放置于支撑旋转臂左右两侧,满足避茬装置关键部件设计需求。同时,为满足避茬装置调偏避茬控制系统需求,结合液压缸设计参数,对电液比例阀进行配套设计,从而为自动调偏系统的搭建提供数据支撑。

3 自动调偏系统设计

3.1 系统硬件设计

自动调偏系统硬件主要由控制盒、导航定位模块、电液比例阀、角度传感器、液压缸等组成,如图 11 所示。其中导航定位模块采用上海联适导航技术股份有限公司生产的 R60 型北斗/GNSS 定位接收天线,定位精度为  $\pm 2.5$  cm。角度传感器采用东莞普地电子科技有限公司生产的 PD-3806 型单圈绝对值传感器,线性精度为 0.1°,测量范围为 0°~360°。其他器件有北京华德液压工业集团有限责任公司生产的 BFWN-02-3C2-7-20-G24K31F1 型电磁比例换向阀、4WE6HB61B/CG12N9Z5L 型电磁换向阀、ZDB6VP-2-40B/315 型

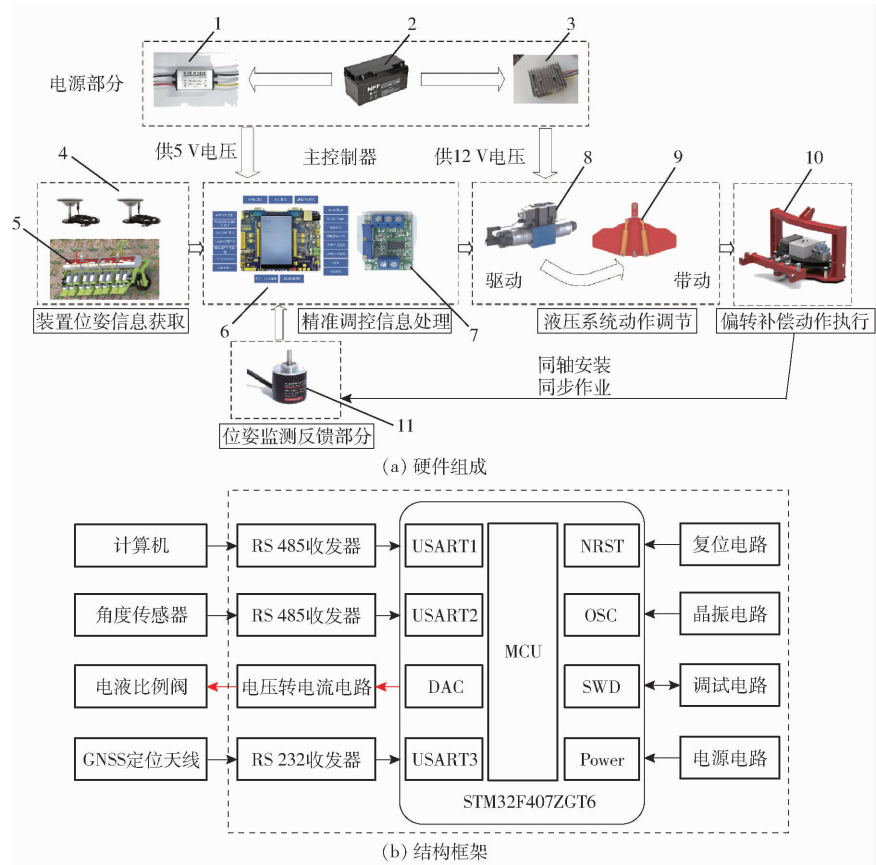


图 11 自动调偏系统硬件组成和结构框架

Fig. 11 Hardware composition and structural framework of automatic deflection system  
1. 12V 转 5V 降压模块 2. 12V 直流电源 3. 12V 转 24V 升压模块 4. 导航定位模块 5. 牵引式玉米免耕播种机 6. 控制盒 7. 电  
压转电流模块 8. 电液比例换向阀 9. 液压缸 10. 避茬装置 11. 角度传感器

叠加式溢流阀。卫星天线安装至播种机中间正上方处,实时检测播种机偏差距离。角度传感器安装至避茬装置后端正下方以反馈调整角度。  
主控制器采用广州星翼电子科技有限公司的 STM32F407ZGT6 微处理器,除通过 RS232 收发器与 GNSS 定位接收天线通讯外,还通过 RS485 收发器直接与计算机通讯和接收来自绝对值型角度传感器

发送的 ASCII 角度信息。主控制器接收 GNSS 定位接收天线脉冲信号以计算播种机当前位置,计算出避茬装置移动目标值,决策液压阀开闭,带动避茬装置移动,实现自动调偏。

3.2 系统软件设计

为解决新疆滴灌区玉米免耕播种自动调偏过程中常规 PID 控制控制算法存在超调大、干扰后调整

时间长、稳态误差较大等问题,系统软件采用神经网络 PID 控制算法用于调偏转向调节。神经网络 PID 控制可减少调节次数、增加抗干扰能力,从而避免液

压缸频繁动作,减少机器振动,提高系统稳定性<sup>[28-29]</sup>。神经网络 PID 控制系统及主程序流程如图 12 所示。

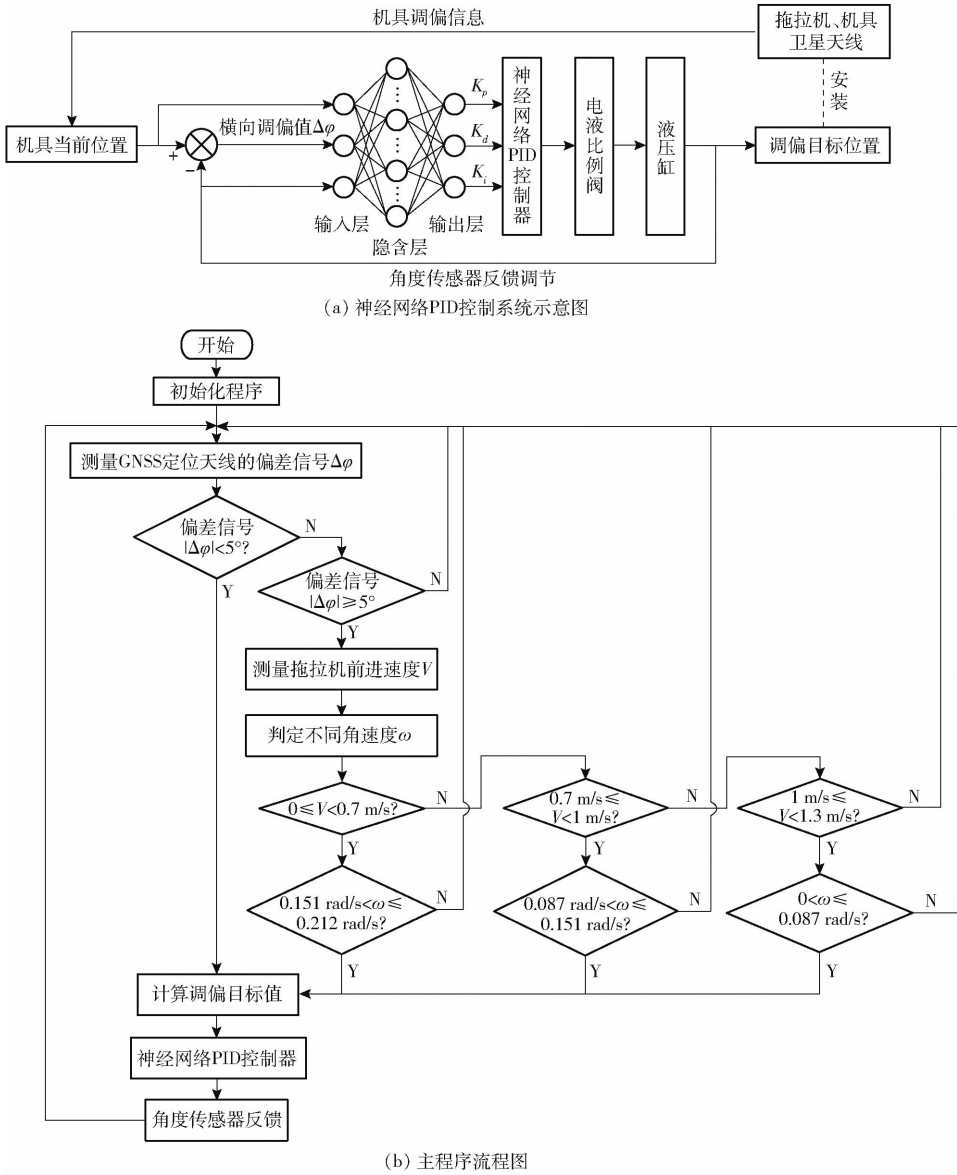


图 12 神经网络 PID 自动调偏控制系统及主程序流程图

Fig. 12 Neural network PID automatic deviation control system and main program flowchart

为避免播种机前进作业中避茬装置调偏角速度过快导致入土开沟部件损坏,主程序首先采集 GNSS 定位接收天线偏差信号检测播种机偏转角,并据此判断免耕播种机偏差引起的角度变化量  $\Delta\varphi$ 。若  $|\Delta\varphi| < 5^\circ$ ,不进行调节;若  $|\Delta\varphi| \geq 5^\circ$ 时,控制器不会立即发出控制信号,而是读取拖拉机作业速度  $V$ ,并根据拖拉机不同作业速度区间和角度变化量  $\Delta\varphi$  对角速度  $\omega$  进行微调:当前进速度在  $[0, 0.7 \text{ m/s})$  时,  $0.151 \text{ rad/s} < \omega \leq 0.212 \text{ rad/s}$ ;当拖拉机作业速度在  $[0.7 \text{ m/s}, 1.0 \text{ m/s})$  时,  $0.087 \text{ rad/s} < \omega \leq 0.151 \text{ rad/s}$ ;当拖拉机作业速度在区间  $[1.0 \text{ m/s}, 1.3 \text{ m/s})$  时,  $0 < \omega \leq 0.087 \text{ rad/s}$ 。这样有利于避免开沟部件入土偏转过快而损坏,并减少了执行机构

频繁振荡。

3.3 性能试验

为验证自动调偏系统控制有效性,以液压工作站为动力输出进行神经网络 PID 控制系统信号跟踪性能试验。该试验拖拉机速度为 0.7、1.0、1.3 m/s, GNSS 天线接收  $\pm 30^\circ$  的偏差信号,神经网络 PID 控制器通过 RS 232 通信发送到液压执行系统,试验结果如图 13 所示。试验结果表明,在目标转角从  $-30^\circ \sim 30^\circ$  变化过程中,经计算可知,神经网络 PID 算法控制下,最大稳态误差为  $0.932^\circ$ ,超调量全部小于 1%,平均响应稳态误差小于  $0.9^\circ$ 。在路况变化不大的情况下,神经网络 PID 控制系统能保证偏差转向角迅速且稳定地转到目标转向角,且误差范

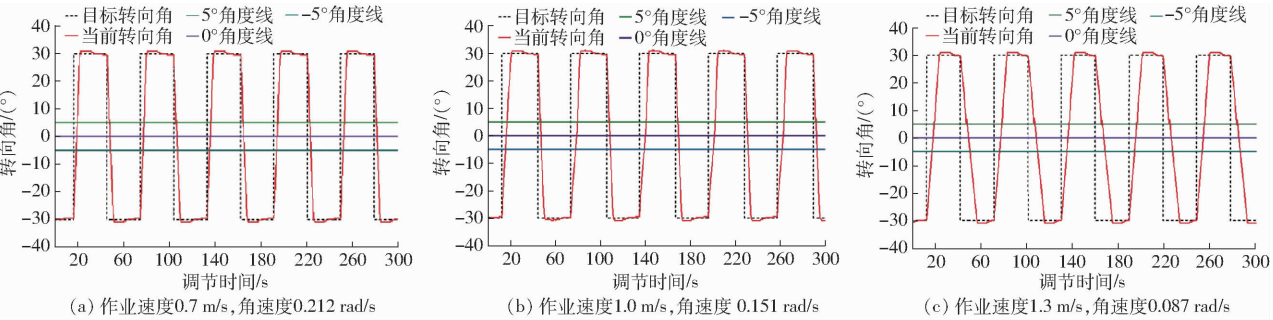


图 13 神经网络 PID 控制系统测试响应图

Fig. 13 Test response diagrams of neural network PID control system

围较小,满足新疆滴灌区玉米茬地播种调偏需求。

4 田间试验

4.1 试验方案

大型牵引式玉米免耕播种作业中,秸秆覆盖量、拖拉机前进速度是影响玉米免耕播种质量的主要因素。根据 GB/T 2865—2017《免(少)耕施肥播种机》制定试验方案,检测玉米免耕播种机播种质量,试验指标为不同作业速度与玉米秸秆覆盖量下的避茬率、纵向调整距离和玉米粒距变异系数。试验于 2023 年 10 月在新疆博尔塔拉蒙古自治州玉米免耕种植基地进行试验,采用未实行土壤整体旋耕作业的种植田作为待试验区域。其中,玉米根茬宽行行距为 600 mm,窄行行距为 400 mm,平均高度为 (500±50) mm,土壤含水率为 13%、平均紧实度为 148 kPa。试验地机收后按照试验地不同秸秆覆盖量的要求,采用秸秆粉碎还田机进行秸秆粉碎均匀抛撒作业<sup>[30]</sup>。利用卷尺在试验地随机选取 16 处 30 m×10 m 的区域作为待试验区域,序号为 1,2,⋯,16,如图 14 所示。

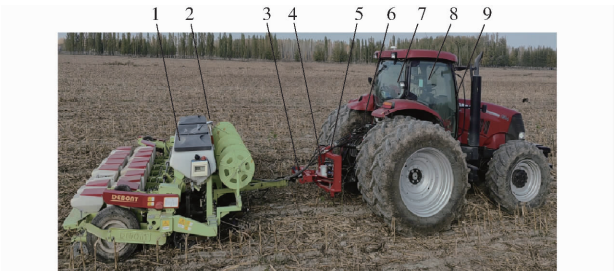


图 14 田间试验

Fig. 14 Field test

1. 播种机 2. 卫星导航天线 3. 双点挂接装置 4. 控制箱 5. 避茬装置 6. 液压系统 7. 计算机 8. 控制系统 9. 拖拉机

4.2 试验指标及测试方法

目前尚无专门的玉米免耕播种避茬装置相关标准,测试参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》和 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》,测试内容主要包括避茬率、纵向调

整距离、玉米粒距变异系数。

播种机作业完成后,在每个试验区域内随机选取 3 个 10 m×8 m 小区,收集直立根茬完好留存在地表上的数量与该试验区域内所有直立根茬数量,避茬率计算公式为

$$K = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{K_{1i}}{K_i} \times 100\%$$
 (19)

式中  $K$ ——避茬率,%  
 $K_{1i}$ ——第  $i$  次试验后地表直立根茬数量  
 $K_i$ ——第  $i$  次试验前地表直立根茬数量

播种机作业完成后,为使数据准确,以免耕播种机中间开沟器行驶轨迹为基准,在每个试验区域测量并记录播种机到玉米根茬偏差逐渐减少为 0 时所需纵向调整距离,重复 3 次求出平均值,公式为

$$S = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 S_j$$
 (20)

式中  $S$ ——试验后开沟器到根茬行间无横向偏差时所需前进距离平均值,mm  
 $S_j$ ——第  $j$  次试验后开沟器到根茬行间无横向偏差时所需前进距离,mm

播种机作业完成后,在每个试验区域的播种带内随机选取 8 个长度为 5 m 的区域进行选择,记录长度内的玉米种子数量,粒距变异系数计算公式为

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{\sum n_i X_i}{n_2} \\ C = n_2 \sqrt{\frac{\sum n_i X_i^2}{n_2'} - \bar{X}^2} / \sum n_i X_i \times 100\% \end{cases}$$
 (21)

式中  $C$ ——粒距变异系数,%  
 $\bar{X}$ ——合格率平均差,cm  
 $X_i$ ——每个区段变量  
 $n_i$ ——不同区段中值出现的频率

4.3 性能试验

4.3.1 试验设计与方法

为获取最佳玉米免耕播种机作业质量,在整机试验前设计性能试验,以获取相关参数的最佳组合。

以秸秆覆盖量、作业速度为影响因素,设计二因素三水平正交试验,各因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码  
Tab.1 Test factors codes

| 编码 | 因素                                      |                                       |
|----|-----------------------------------------|---------------------------------------|
|    | 秸秆覆盖量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 作业速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
| -1 | 0.5                                     | 0.7                                   |
| 0  | 1.0                                     | 1.0                                   |
| 1  | 1.5                                     | 1.3                                   |

4.3.2 试验结果分析

田间试验结果如表 2 所示。

表 2 试验设计方案及结果  
Tab.2 Test design and response values

| 序号 | 因素                                          |                                           | 避茬率/% | 纵向调整距离/m | 变异系数/% |
|----|---------------------------------------------|-------------------------------------------|-------|----------|--------|
|    | 秸秆覆盖量/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) | 作业速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |       |          |        |
| 1  | 0.5                                         | 0.7                                       | 95    | 7.1      | 18.54  |
| 2  | 0.5                                         | 1.0                                       | 92    | 8.3      | 23.62  |
| 3  | 0.5                                         | 1.3                                       | 88    | 9.6      | 26.32  |
| 4  | 1.0                                         | 0.7                                       | 88    | 8.6      | 21.63  |
| 5  | 1.0                                         | 1.0                                       | 85    | 9.8      | 24.63  |
| 6  | 1.0                                         | 1.3                                       | 82    | 10.6     | 27.82  |
| 7  | 1.5                                         | 0.7                                       | 85    | 10.2     | 32.24  |
| 8  | 1.5                                         | 1.0                                       | 83    | 11.3     | 24.61  |
| 9  | 1.5                                         | 1.3                                       | 81    | 12.6     | 38.65  |

由表 2 可知,当行间秸秆覆盖量  $0.5\text{ kg/m}^2$ ,作业速度  $0.7\text{ m/s}$  时,避茬率  $95\%$ ,比作业速度  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的避茬率分别高 3、7 个百分点;当行间秸秆覆盖量为  $1.0\text{ kg/m}^2$ 、作业速度为  $0.7\text{ m/s}$  时,避茬率为  $88\%$ ,比作业速度为  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的避茬率分别高 3、6 个百分点;行间秸秆覆盖量为  $1.5\text{ kg/m}^2$ 、作业速度为  $0.7\text{ m/s}$  时,避茬率为  $85\%$ ,比作业速度为  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的避茬率分别高 2、4 个百分点。

当秸秆覆盖量相同时,避茬率随着作业速度增大逐渐减小,且作业速度最大时,避茬率最小;当作

业速度相同时,避茬率随着行间秸秆覆盖量增大逐渐减小,且行间秸秆覆盖量最大时,避茬率最小。究其原因,一方面是秸秆覆盖量增大,自动调偏系统生成的播种导航路径及神经网络 PID 控制器决策的准确性会有所下降,且液压系统动作存在一定滞后性,导致未能及时有效避开根茬。另一方面原因是作业速度增大时,GNSS 定位播种机的实时位置与自动调偏系统的决策角速度不能较好匹配,从而导致避茬率下降。

通过记录播种机行驶的卫星导航检测、执行偏转误差距离,选取典型位移段中的 9 组样本点绘制卫星导航检测执行偏移拟合点线图,如图 15 所示。

整体上,避茬装置执行偏转有明显地向导航检测偏移贴近趋势。在秸秆覆盖量为  $0.5\text{ kg/m}^2$ 、作业速度为  $0.7\text{ m/s}$  时,纵向调整距离为  $7.1\text{ m}$ ,比作业速度为  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的纵向调整距离分别低  $1.2\text{ m}$  和  $2.5\text{ m}$ ;在秸秆覆盖量为  $1.0\text{ kg/m}^2$ 、作业速度为  $0.7\text{ m/s}$  时,纵向调整距离  $8.6\text{ m}$ ,比作业速度  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的纵向调整距离分别低  $1.2\text{ m}$  和  $2\text{ m}$ ;在秸秆覆盖量为  $1.5\text{ kg/m}^2$ 、作业速度为  $0.7\text{ m/s}$  时,纵向调整距离  $10.2\text{ m}$ ,比作业速度  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的纵向调整距离分别低  $1.1\text{ m}$  和  $2.4\text{ m}$ ;如图 15 所示,当作业速度相同时,避茬装置到达目标角所需纵向调整距离随着秸秆覆盖量增大而增大,且作业速度最大时,纵向调整距离最大。

为测试不同秸秆覆盖量试验地的玉米播种作业效果,进行车速  $0.7\sim1.3\text{ m/s}$  下玉米播种合格粒距均匀性田间试验,得到不同秸秆覆盖量、不同作业速度下玉米播种粒距田间实际测量结果热力图,如图 16 所示。

由图 16 可知,在秸秆覆盖量  $0.5\text{ kg/m}^2$ 、作业速度  $0.7\text{ m/s}$  时,玉米粒距变异系数  $17.47\%$ ,比作业速度为  $1.0\text{ m/s}$  和  $1.3\text{ m/s}$  的玉米粒距变异系数分别低  $7.8.75$  个百分点;秸秆覆盖量  $1.0\text{ kg/m}^2$ 、作业

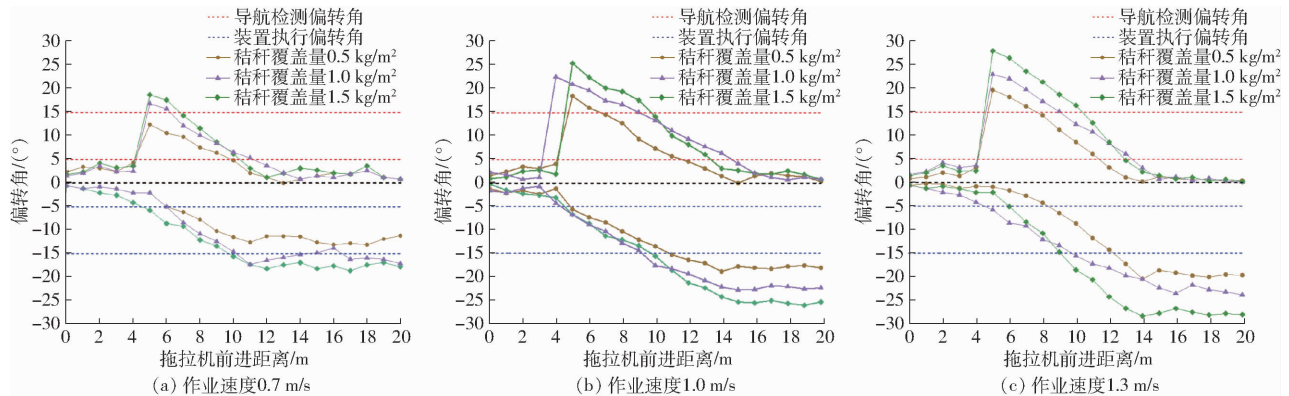


图 15 纵向调整距离

Fig.15 Vertical adjustment distance

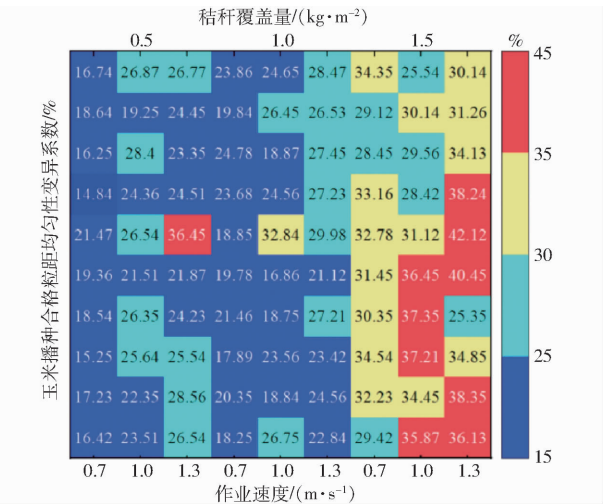


图 16 玉米播种合格粒距均匀性变异系数热力图  
Fig. 16 Thermal diagram of variation coefficient of uniformity of qualified grain spacing in maize sowing

速度 0.7 m/s 时,玉米粒距变异系数 21.63%,比作业速度 1.0 m/s 和 1.3 m/s 的玉米粒距变异系数分别低 1.58 个百分点和 4.25 个百分点;在秸秆覆盖量为 1.5 kg/m<sup>2</sup>、作业速度 0.7 m/s 时,玉米粒距变异系数 31.59%,比作业速度 1.0 m/s 和 1.3 m/s 的变异系数分别低 1.03 个百分点和 3.52 个百分点。

田间试验结果表明,不同行间秸秆覆盖量和不同作业速度下的玉米粒距变异系数都符合国家标准,玉米免耕播种机能够较好地适应不同行间秸秆覆盖量和不同作业速度,田间试验效果如图 17 所示。当拖拉机作业速度不大于 1.0 m/s、行间秸秆覆盖量不大于 1.0 kg/m<sup>2</sup> 时,避茬率不小于 85%,玉米粒距变异系数不大于 21.63%,此时玉米免耕播种机调偏避茬效果最佳。

5 结论

(1)设计了一种基于自动调偏的玉米免耕播种



图 17 田间试验调偏效果图  
Fig. 17 Field test bias adjustment effect  
1. 玉米根茬行 2. 机具轨迹线

避茬装置,基于主动避茬免耕播种的研究思路,采用北斗导航技术辅助定位,能够实现主动补偿播种机作业偏差,满足高效补偿播种机作业偏差需求,提高新疆滴灌区玉米免耕播种机作业效率与播种质量。

(2)对拖拉机-避茬装置-播种机进行动力学分析,得到装置最佳挂接长度为 500 mm;根据建立的避茬装置力学模型,得到双点挂机机构所需最大驱动力为 35 236 N,设计牵引驱动机构并确定结构参数。设计了以神经网络 PID 为控制算法的机电液一体化自动调偏系统,性能试验结果表明:整机转角在 -30°~30°范围内调节,神经网络 PID 算法控制下,最大稳态误差为 0.932°,超调量全部小于 1%,平均响应稳态误差小于 0.9°,运动状态与自动调偏系统所设定的运动情况基本吻合,控制精度较高。

(3)为获取最佳玉米免耕播种机作业质量,以试制的自动调偏系统为试验对象进行不同因素下的田间试验。由田间试验结果可知,当作业速度不大于 1.0 m/s、行间秸秆覆盖量不大于 1.0 kg/m<sup>2</sup> 时,避茬率不小于 85%,纵向调整距离不大于 8.6 m,玉米粒距变异系数不大于 21.63%,此时免耕播种机调偏避茬效果最佳,符合设计要求。

参 考 文 献

[1] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1-19.  
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1-19. (in Chinese)

[2] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 1-15.  
WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 1-15. (in Chinese)

[3] 袁盼盼,李洪文,蒋贵菊,等. 滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 43-52.  
YUAN Panpan, LI Hongwen, JIANG Guiju, et al. Design and experiment of straw cleaning device for wide-narrow maize no-tillage sowing strip in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 43-52. (in Chinese)

[4] 张祥彩,李洪文,何进,等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 77-82, 71.

- ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (Supp.1): 77–82, 71. (in Chinese)
- [5] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52–59.
- NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52–59. (in Chinese)
- [6] BAIO F H R. Evaluation of an auto-guidance system operating on a sugar cane harvester[J]. Precision Agriculture, 2012, 13: 141–147.
- [7] PEREZ-RUIZ M, SIAUGHTER D C, GLIEVER C, et al. Tractor-based real-time kinematic-global positioning system (RTK–GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(1): 64–71.
- [8] NORREMARK M, GRIEPEINTROG H W, NIELSEN J, et al. Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area[J]. Precision Agriculture, 2012, 13: 149–162.
- [9] ENGOCHEA-GUEVARA J M, CONESA-MUÑOZ J, ANDÚJAR D, et al. Merge fuzzy visual servoing and GPS-based planning to obtain a proper navigation behavior for a small crop-inspection robot[J]. Sensors, 2016, 16(3): 276.
- [10] KANAGASINGHAM S, EKPANYAPONG M, CHAIHAN R. Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(4): 831–855.
- [11] PEREZ-RUIZ M, CARBALLIDO J, AGÜERA J, et al. Development and evaluation of a combined cultivator and band sprayer with a row-centering RTK–GPS guidance system[J]. Sensors, 2013, 13(3): 3313–3330.
- [12] 李洪文, 李娇, 苏艳波, 等. 玉米茬地免耕播种机具导向系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 41–46.
- LI Hongwen, LI Jiao, SU Yanbo, et al. Design and experiment on oriented system for no-tillage planters in maize stubble field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 41–46. (in Chinese)
- [13] 何卿, 高焕文, 李洪文. 接触式拖拉机导航控制系统[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 97–101.
- HE Qing, GAO Huanwen, LI Hongwen. Contact tractor navigation control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 97–101. (in Chinese)
- [14] 陈婉芝. 基于机器视觉的免耕播种机对行避茬技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- CHEN Wanzhi. Study on maize stubble avoidance technology based on machine vision for row-follow no-till seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [15] 张振国, 郭全峰, 何进, 等. 小麦免耕播种机双导轨滑移式调偏系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 59–69.
- ZHANG Zhenguo, GUO Quanfeng, HE Jin, et al. Design and experiment of double-guide sliding deflection system for no-till wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 59–69. (in Chinese)
- [16] ZHANG Zhenguo, GUO Quanfeng, HE Jin, et al. Design and experiment of side-shift stubble avoidance system for no-till wheat seeder based on deviation-perception fusion technology[J]. Agriculture, 2023, 13(1): 180.
- [17] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计[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 CSAE, 2018, 34(1): 15–21. (in Chinese)
- [18] 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 CAN 总线的拖拉机导航控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 35–42.
- LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 35–42. (in Chinese)
- [19] 冯慧敏, 高娜娜, 孟志军, 等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 60–67.
- FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 60–67. (in Chinese)
- [20] 魏爽, 季宇寒, 曹如月, 等. 农机自动驾驶控制决策方法与软件系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 30–34, 171.
- WEI Shuang, JI Yuhan, CAO Ruyue, et al. Decision control method and software of automatic navigation system for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 30–34, 171. (in Chinese)
- [21] 王春雷, 卢彩云, 李洪文, 等. 基于支持向量机的玉米根茬行图像分割[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 117–126.
- WANG Chunlei, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Image segmentation of maize stubble row based on SVM[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 117–126. (in Chinese)
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 轮式拖拉机质心位置测定质量周期法: NY/T 1877—2010[S]. 北京: 中国农业出版社,

2011.

- [23] 乔晓东, 王晓燕, 颜华, 等. 后悬挂农具田间试验平台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 63–68.  
QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Field experiment platform for rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 63–68. (in Chinese)
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 农业轮式拖拉机后置式三点悬挂装置 0、1N、1.2N、2、3N、3.4N 和 4 类:GB/T 1593—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [25] 王金峰, 翁武雄, 鞠金艳, 等. 基于遥控转向的稻田行间除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 97–105.  
WANG Jinfeng, WENG Wuxiong, JU Jinyan, et al. Design and test of weeder between rows in rice field based on remote control steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 97–105. (in Chinese)
- [26] 楚杰, 路海东, 薛吉全, 等. 玉米宽窄行深旋免耕精量播种机田间试验及效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 34–41.  
CHU Jie, LU Haidong, XUE Jiquan, et al. Field experiment and effect of precise mechanical sowing of maize based on wide-narrow row deep rotation and no-tillage technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 34–41. (in Chinese)
- [27] 刁培松, 赵殿报, 姚文燕, 等. 玉米播种机滴灌带浅埋铺设装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 88–97.  
DIAO Peisong, ZHAO Dianbao, YAO Wenyan, et al. Design and experiment of shallow buried laying device for drip irrigation belt of corn seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 88–97. (in Chinese)
- [28] 孙文峰, 刘海洋, 王润涛, 等. 基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 55–64, 94.  
SUN Wenfeng, LIU Haiyang, WANG Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55–64, 94. (in Chinese)
- [29] 张锦辉, 李彦明, 齐文超, 等. 基于神经网络 PID 的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 356–366.  
ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 356–366. (in Chinese)
- [30] 陈海涛, 邹震, 王星, 等. 免耕播种机侧向清秸覆秸秸秆比例回收装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 120–129.  
CHEN Haitao, ZOU Zhen, WANG Xing, et al. Design and experiment of straw proportional recovery device for clearing and covering straw of no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 120–129. (in Chinese)