doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.031

基于 ExpressLRS 的自主导航起垄覆膜机设计与试验

赵科学[1]　田素博[2,3]　宁晓峰[2,3]　陶　林[1]

(1. 沈阳工学院机械工程与自动化学院, 沈抚示范区 113112; 2. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110161;
3. 农业农村部园艺作物农业装备重点实验室, 沈阳 110161)

摘要: 针对目前起垄覆膜机作业中由于地面不平以及机身晃动会导致机具行走定位不准,垄体直线度偏差较大、稳定性差等问题,提出基于 ExpressLRS(Express long range system)的自主导航控制方法,设计了轻简化电动履带式自主导航起垄覆膜一体机,实现起垄、覆膜、覆土功能,并提升作业的直线度。对起垄机构关键参数进行设计和计算,并利用卡尔曼滤波算法搭建基于 ExpressLRS 的自主导航控制系统。利用 Wit-Motion 公司的单轴角度测量传感器 HWT101CT 进行样机测试,测试结果表明样机行走的偏航角度波动范围在 -2.5°~3.5°之间,横向位置偏差均值在 3 cm 以内,满足设计要求,速度在 0.1~0.2 m/s 区间导航效果最优,证明该系统具有可行性和有效性。样机田间试验表明垄高 170 mm 起垄效果最优,作业后垄高合格率 86.67%,垄顶宽合格率 93.33%,垄底宽合格率 86.67%。变异系数均小于 6%,表明垄体的均匀性较高。垄体直线度为 2.21 cm,垄顶平整度为 1.22 cm,表明自主导航直线行驶功能合格,各项评价指标满足起垄覆膜机的设计要求。

关键词: 温室; 自走式起垄机; 导航; 起垄机构; ExpressLRS 协议; 卡尔曼滤波

中图分类号: S223.4; S243　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0330-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Autonomous Navigation Ridge Filming Machine Based on ExpressLRS

ZHAO Kexue[1]　TIAN Subo[2,3]　NING Xiaofeng[2,3]　TAO Lin[1]

(1. *School of Mechanical Engineering and Automation*, *Shenyang Institute of Technology*, *Shenfu Demonstration Zone* 113122, *China*
2. *College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110161, *China*
3. *Key Laboratory of Horicultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shenyang* 110161, *China*)

Abstract: Aiming at the problems such as the uneven ground and the shaking of the fuselage in the current ridging and film-covering machinery operation, the positioning of the machine is inaccurate, the straightness deviation of the ridge body is large, and the stability is poor. An autonomous navigation control method based on Express long range system (ExpressLRS) was proposed. A light and simplified electric crawler-type autonomous navigation ridging and film-covering machine was designed to realize the functions of ridging, film-covering, soil-covering, and improve the straightness of the operation. The key parameters of the ridging mechanism were designed and calculated, and the Kalman filter algorithm was used to build an autonomous navigation control system based on ExpressLRS. Using WitMotion's uniaxial angle measuring sensor HWT101CT for prototype production, the test results showed that the yaw angle fluctuation range of the prototype was between -2.5° and 3.5°, the mean deviation of the lateral position was within 3 cm, which met the design requirements and proves that the system was feasible and effective. The best navigation effect was at speed of 0.1 m/s to 0.2 m/s. The field test of prototype showed that the ridge height of 170 mm had the best effect. Among them, the qualified rate of the ridge height was 86.67%, the qualified rate of the ridge top width was 93.33%, and the qualified rate of the ridge bottom width was 86.67%. All the coefficients of variation were less than 6%, indicating that the uniformity of the ridge body was high. Ridge straightness of 2.21 cm, ridge top flatness of 1.22 cm

收稿日期: 2024-11-13　修回日期: 2025-02-17

基金项目: 辽宁省联合计划应用基础研究项目(2023JH2/101700133)

作者简介: 赵科学(1979—),男,副教授,主要从事设施农业装备研究,E-mail: kexue_zhao@126.com

通信作者: 宁晓峰(1983—),男,副教授,主要从事叶菜收获技术与装备研究,E-mail: ningxiaofeng123@syau.edu.cn

indicated that the autonomous navigation straight line driving function qualified, the evaluation indicators met the design requirements of ridge laminating machine.

Key words: greenhouse; self-propelled ridge machine; navigation; ridge device; ExpressLRS protocol; Karlman filter

0　引言

起垄覆膜作业通过改善土壤的水热条件和理化性质,为作物提供了更好的生长环境,从而提高了作物产量和水分利用效率,对农业生产产生了积极的影响。随着农业技术的不断发展,对起垄覆膜作业的质量及精度要求也越来越高[1]。

文献[2－6]针对传统起垄机进行设计优化并通过试验验证,但传统拖拉机牵引的起垄机具在拖拉机牵引作业时,由于地面不平以及机身晃动,容易导致农机行走定位不准,从而出现垄体直线度偏差过大的问题。

针对温室大棚草莓种植环节中开沟起垄问题,余飞[7]设计一种大棚草莓种植开沟起垄装置并对作业参数进行优化。在大棚中,传统拖拉机牵引作业存在转弯半径大,作业容易遗漏,浪费土地资源等问题。张博远等[8]针对果园和丘陵山地等复杂地形的割草需求,设计一款基于 PixHawk 开源软硬件平台的全电驱动履带式割草机器人,然而,文献中提到采用蓝牙或传统飞控技术的农机控制系统,存在信号传输距离受限的问题,这限制了机器的运行范围。在距离较远或高低落差较大的农田中,信号不稳定和延迟现象显著,从而导致作业精度的偏差。

文献[9－12]中提到的采用惯性导航加 GPS 的组合导航方法,在日光温室中因为 GPS 信号不稳定和延迟的特性,可能导致作业精度的偏差。TAKAGAKI 等[13]设计一种视觉导航农机系统,讨论了一种区分可穿越区域的图像处理方法,但视觉定位技术存在成本高、信号延迟和技术复杂等问题,这些因素不利于广泛普及。

针对上述技术存在的问题,为了克服现有技术的不足,本文研究轻简化自主导航起垄覆膜机控制方法,实现精准稳定的起垄作业。首先设计一个可靠的机械结构,以确保作业的稳定性。其次通过 ExpressLRS 协议的无线传输实现远距离、高速率、低延迟的远程控制。最终,通过采用基于卡尔曼滤波优化算法的自主惯性导航系统,以转向角度为控制目标,利用脉冲宽度调制(PWM)信号进行控制,实现起垄机沿直线行驶的功能,提高机具定位与导航的精确度和稳定性,并通过田间性能试验加以验证。

1　起垄覆膜机总体设计

1.1　总体方案设计

自主导航起垄覆膜机(简称起垄机)包括机械部件和导航控制部件。总体技术方案如图 1 所示。机械部分包括履带底盘、仿形起垄机构、切抛式开沟机构以及覆膜覆土机构等。导航部件采用 ExpressLRS 协议的导航控制单元和电动底盘实现起垄机的直线运行。

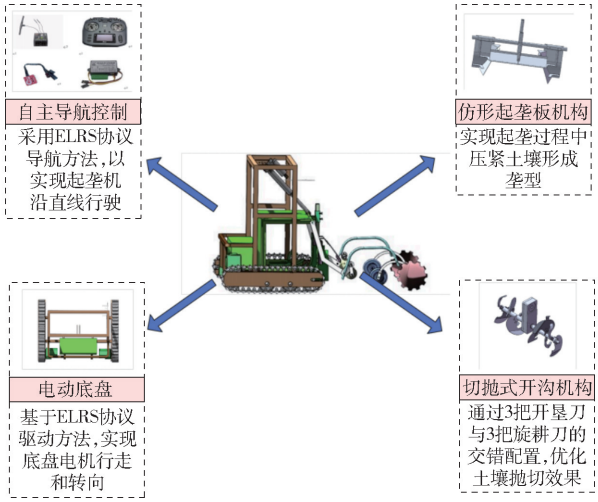

图 1　自主导航起垄覆膜机总体技术方案

Fig. 1　Overall plan diagram autonomous navigation ridging and laminating machine

1.2　起垄覆膜机工作原理

起垄机的主要工作流程如下:①由切抛式开沟机构的开垦刀将土壤切碎,两组同向旋转的旋耕刀将土壤输送到中间。由无刷电机通过减速器驱动旋耕刀的回转。②由起垄板和平垄板将土壤挤压成垄。③由覆膜机构将地膜平铺在土壤上。④由压膜覆土机构将地膜固定在土壤中。

在起垄覆膜作业过程中,由电动液压推杆精准控制后端起垄执行机构的升降,从而灵活调节垄的高度。操作人员可以手动调节底盘电机转速,进而优化起垄机的行进速度,确保达到最佳的起垄覆膜作业状态。起垄机结构如图 2 所示。主要参数如表 1 所示。

2　关键部件设计

机械结构构成起垄机的硬件主体,包括主机机架、电动底盘、开沟机构、仿形起垄机构以及挂膜覆

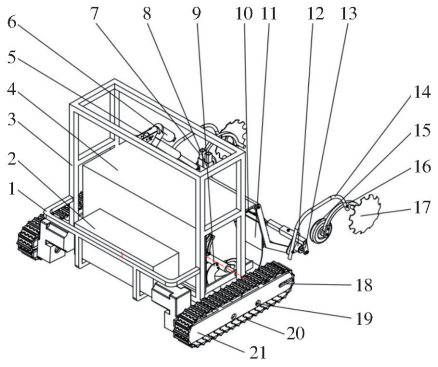

图 2 起垄机结构简图

Fig. 2 Structure diagram of ridge laminating machine

1. 前支架 2. 驱动电池 3. 主框架 4. 起垄机构外框 5. 连接杆 6. 电动液压杆 7. 立柱调节套 8. 立柱 9. 切抛式开沟器 10. 平垄板 11. 起垄板 12. 挂膜辊 13. 挂膜支架 14. 挂膜连杆 15. 压膜轮 16. 覆膜连杆 17. 覆土耙 18. 从动轮 19. 支撑轮 20. 履带链节 21. 传动轮

表 1 起垄机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

技术参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 860×1 160×1 470
整机质量/kg	300
作业速度/(km·h^{-1})	0~1.4(无级调速)
作业幅宽/mm	650~1 000
旋刀转速/(r·min^{-1})	0~120(无级调速)
膜边覆土宽度/mm	40~50
起垄高度/mm	150~200
垄顶宽度/mm	600
垄台倾角/(°)	60
配套功率/kW	≤4.5
电池容量/(A·h)	45

土机构等关键组件。其中切抛式开沟机构将土壤切碎聚拢成垄台。起垄机构用于压出符合要求的垄台;挂膜、覆土机构用于均匀地铺设地膜,并保证地膜能牢牢固定在地面。

2.1 起垄机框架设计

为了灵活调节起垄高度,设计一种高度可调整的起垄机主框架装置。起垄装置结构如图 3 所示,由一个导杆装置和一个摆杆装置组成,升降装置主要由主框架、液压推杆和升降平台 3 部分组成,各装置之间通过铰点相互连接形成导杆摇杆组合机构。导杆摇杆组合机构属于一种连杆结构,具有紧凑性和稳定性[14-15]。

当起垄装置电液推杆(导杆)伸缩时,会影响起垄机构(摆杆)的角度。当需要调整垄高时,起垄装置的框架会发生角度变化,同时起垄机构的高度也发生变化,为了确定升降机构的尺寸,根据图 4 的机构运动简图,进行以下计算:

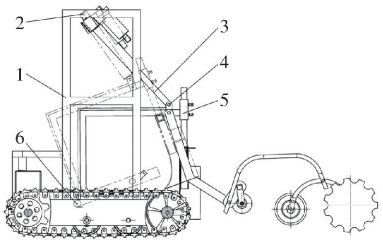

图 3 起垄装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of ridging device

1. 主框架 2. 电液推杆与主框架铰接点 3. 电液推杆 4. 电液推杆与起垄平台装置框架铰接点 5. 起垄装置框架 6. 起垄装置框架与主框架铰接点

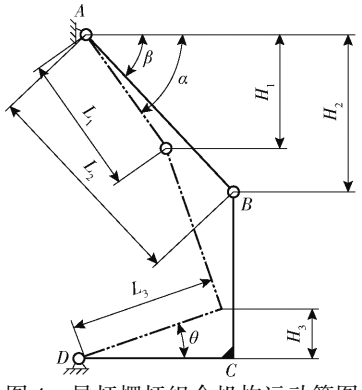

图 4 导杆摆杆组合机构运动简图

Fig. 4 Motion diagram of guide bar pendulum bar combination mechanism

$$S = L_2 - L_1 \tag{1}$$

$$L_1 = \frac{H_1}{\sin\alpha} \tag{2}$$

$$L_2 = \frac{H_2}{\sin\beta} \tag{3}$$

$$H_3 = L_3 \sin\theta \tag{4}$$

式中 S——导杆最大行程

L_1——导杆缩回到最高极限位置的长度

H_1——导杆缩回到最高极限位置距离整机上顶面高度

α——导杆伸出最低极限位置与主框架上顶面正方向夹角

L_2——导杆伸出最低极限位置的长度

H_2——导杆伸出到最低极限位置距离整机上顶面高度

β——导杆缩回最高极限位置与上顶水平面正方向夹角

L_3——摆杆的长度

H_3——摆杆抬升最大高度

θ——摆杆抬升最大位置与地面夹角

根据文献[16]及设施蔬菜机械化生产先进模式材料汇编(2022)的日光温室茄果类蔬菜机械化生产模式作业要点,采用东西向起垄方式。相邻两

垄之间的中心距一般为 1.8 m，垄底宽 80 cm，垄顶宽 60 cm，垄沟宽 100 cm，垄高 15 ~ 20 cm（冬季取高值，夏季取低值）。此外，垄底宽与垄高等参数要与所用移栽机械相匹配，具体如图 5 所示。

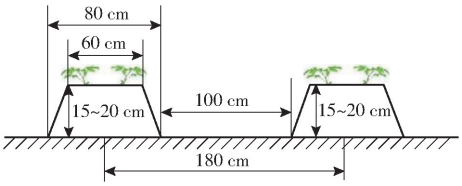

图 5　用于日光温室的茄果类机械化作业垄型尺寸示意图

Fig. 5　Ridge size of mechanized solanaceous crop operation for solar greenhouse

依据 GB/T 51182—2022《农业温室结构设计标准》温室大棚尺寸要求对起垄覆膜机尺寸进行规范，整机高度不超过 1 500 mm，履带车长度不超过 1 000 mm，起垄部件的可调整高度大于 50 mm。自主导航起垄覆膜机设计尺寸边界约束为

$$\begin{cases} L_1\sin\alpha + H_3 + R \leqslant 1\,500 \\ L_2\sin\beta + H_3 + R \leqslant 1\,500 \\ L_3\sin\theta + R > 50 \end{cases} \tag{5}$$

代入公式（1）~（4）计算得 $S = 225$ mm，$\alpha = 55.47°$，$\beta = 46.04°$，$L_3 = 500$ mm，$H_3 = 130$ mm。基于以上参数，整机外形尺寸得以确定，其长为 1 860 mm（其中底盘长度 1 000 mm），宽为 1 160 mm，高为 1 470 mm。保证垄高 150 ~ 200 mm 可调。

2.2　开沟起垄机构设计

起垄机主要由开沟机构和起垄机构组成。切抛组合式开沟机构是起垄覆膜机重要的部件之一，负责将电机的动能通过减速器转化到开垦刀和旋耕刀上，并将土壤切碎抛起并输送到起垄机构中。仇谕锋[17]提出传统起垄机开沟机构较为笨重，在工作过程中前进阻力较大，土壤粘附较为严重，不利于整机的顺畅前进作业。为解决上述问题设计切抛组合开沟机构，通过两侧的开垦刀将土壤切碎成小块并抛起，同时旋耕刀铲同向旋转，将土壤从两侧输送到中间，为后面起垄板持续输送土壤。同向旋转和土壤有效堆积是起垄前准备的关键过程[18]。切抛组合式开沟器旋刀铲铲尖的运动方程为

$$\begin{cases} X = V_m t + R\cos(\omega t) \\ Y = R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{6}$$

式中　(X, Y)——位置坐标

R——旋刀旋转半径

V_m——履带底盘作业前进速度

ω——旋刀刀铲旋转角速度

t——作业时间

切抛组合式开沟器作业时的旋转速度与深旋机作业前进速度的比值（即相对速度与牵引速度的比值）称为旋耕速比 λ，其表达式为

$$\lambda = \frac{V}{V_m} \tag{7}$$

当 $\lambda > 1$ 时切抛开沟刀铲圆周速度大于起垄机前进作业速度，此时，开沟刀铲会对与前行方向垂直的平面内土壤进行重复切削，形成余摆线，但过大的 λ 会导致开沟刀铲单位时间内对土壤的切削次数过多，而导致功耗的增加，故应合理选用 λ 值，本机 λ 设定为 5。把式（7）代入式（6）得

$$\begin{cases} X = R\left(\dfrac{\omega}{\lambda} + \cos(\omega t)\right) \\ Y = R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{8}$$

对上述公式做求导运算，得到旋刀的速度

$$\begin{cases} V_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -R\omega\sin(\omega t) \\ V_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{9}$$

则切抛组合开沟器旋刀铲尖的绝对运动速度为

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \tag{10}$$

把公式（9）代入公式（10）后得到

$$V = \sqrt{V_m^2 - 2V_m\omega R\sin(\omega t) + \omega^2 R^2} \tag{11}$$

其中

$$V_m = \frac{R\omega}{\lambda} = \frac{2\pi nR}{60\lambda} \tag{12}$$

即

$$R = \frac{30\lambda V_m}{\pi n} \tag{13}$$

根据设计要求配套底盘电机功率为 0.75 kW，与减速电机传动，经过计算理论前进速度为 0 ~ 0.39 m/s。开沟器刀辊电机功率 1.5 kW，与减速电机传动后经过计算转速 0 ~ 120 r/min，将以上参数代入公式（13）计算圆整后得旋刀回转半径 R = 170 mm。切抛组合开沟机构结构包括旋耕刀、传动轴、无刷减速电机和开垦刀，实物如图 6 所示。



图 6　切抛组合式开沟机构实物图

Fig. 6　Physical picture of cutting and throwing ditching mechanism

1. 旋耕刀　2. 传动轴　3. 减速电机　4. 开垦刀

切抛式开沟机构后面是仿形起垄机构。根据农艺要求，设计起垄仿形机构保证垄顶宽度 600 mm、垄台倾角 60°。并设计垄宽调节部件保证作业幅宽在

650 ~ 1 000 mm 之间可调。仿形起垄机构的主要功能是通过起垄板塑造垄型,并通过平垄板进行平整,该机构还包括立柱调节套和横梁调节套,调节套安装在立柱和横梁上,用于调节垄高和垄宽。实物如图 7 所示。

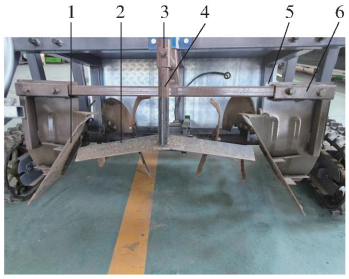

图 7 仿形起垄机构实物图

Fig. 7 Physical picture of copying ridging mechanism

1. 起垄板 2. 平垄板 3. 立柱调节套 4. 立柱 5. 横梁 6. 横梁调节套

3 导航控制系统设计

研究的导航控制系统为基于 ExpressLRS 的惯性导航系统。该导航系统能够纠正因环境因素产生的偏差,确保在 GPS 受限的温室大棚内使起垄机直线行走。借助内置的惯性敏感器件,通过调整基准方向以及最初的位置信息,能够精确确定载体在惯性空间的位置、方向和速度,从而实现低速农机的自主导航控制。

3.1 导航控制系统搭建

自主导航采用基于 ExpressLRS 协议的惯性导航控制方法,并将基于该协议的主控系统、高频头扩展模块在农业机械中进行创新集成应用。惯性测量装置(IMU)是确保无外界辅助下的自动导航、姿态监控的核心组件,依托于内置的陀螺仪和加速度计来监测物体的方向变动及加速度状态。该装置独立作业时,能高效完成物体姿态角度的辨识与加速度解析。该自主导航系统可减小偏差,提高农机行走的直线度和稳定性。当农机底盘移动出现偏差时,惯性导航元件陀螺仪会检测农机自身姿态的偏移。惯性导航系统安装在前端控制箱内,当保持左右端驱动电机转速相同时,其便不会发生偏转运动;当载具位置的航偏角产生偏差,即当载具向左端偏转时,因为前者沿顺时针方向旋转,控制系统反作用力作用在机身中心轴上沿逆时针方向,引起逆时针偏航运行。相反,则会引起载具的顺时针偏航运动。电动底盘控制装置结构如图 8 所示。

导航控制系统主要由以下几部分组成:控制系统(通信天线、STM32F407 主控、按键显示终端)、转向机构(接收机、混控转换器、驱动器等)和可提升

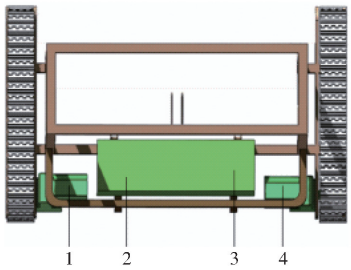

图 8 电动底盘控制装置结构图

Fig. 8 Electric schematic chassis

1. 左侧驱动电机 2. 驱动器及导航电路 3. 蓄电池 4. 右侧驱动电机

控制距离和信号强度的扩展模块(即高频头)。结构框图、原理图如图 9、10 所示。

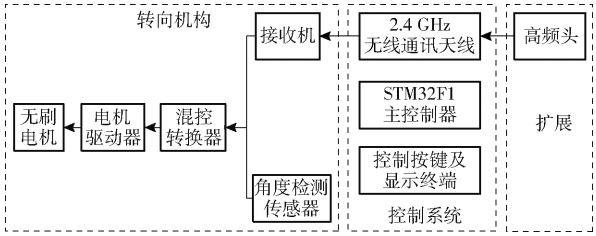

图 9 导航控制系统结构框图

Fig. 9 Structure block diagram of navigation control system

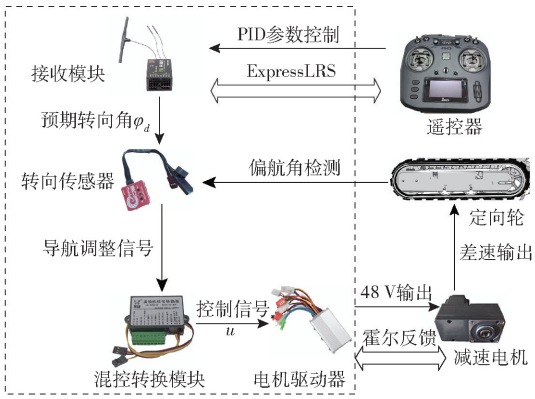

图 10 导航控制原理图

Fig. 10 Principle diagram of autonomous navigation

3.2 基于卡尔曼滤波器补偿的导航算法

传感器元件的误差会对导航系统产生误差和延迟。导航系统的误差累计会产生滞后性以及零漂积累问题。在滤波环节利用卡尔曼滤波算法进行预测已被证明可以有效优化惯性导航[19]。惯性自主导航流程如图 11 所示。

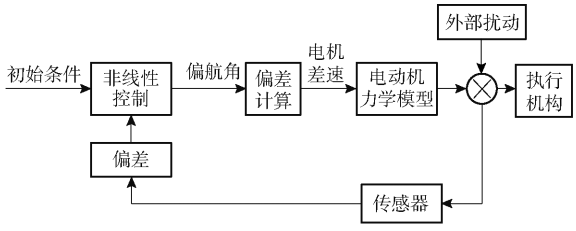

图 11 惯性自主导航流程图

Fig. 11 Flowchart of inertial navigation

(1)单轴陀螺仪算法。本研究只要求满足起垄

机沿垄直线行走，所以只需要对航向角度进行读取和调整[20]，陀螺仪的 z 轴输出角速度为

$$\omega_{\text{output}} = K\omega_{\text{input}} + b + n \tag{14}$$

式中　K——陀螺仪灵敏度

ω_{input}——实际输入角速度

b——偏置(零偏)

n——测量噪声

对角速度进行积分可得到绕 z 轴的偏航角

$$\theta(t) = \int_0^t K\omega_{output}(t)\,\mathrm{d}t + \theta(t-1) \tag{15}$$

(2)卡尔曼滤波器优化。该优化算法利用概率模型，能够持续优化和融合新数据，从而有效削弱误差对导航结果的负面影响[21]。因此该方法可以对基于 ExpressLRS 的陀螺仪随机误差进行补偿。系统通过调整参数噪声矩阵，进一步提升惯性导航的精度[22]。线性离散系统的状态方程和预测方程为

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_{k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_k + \boldsymbol{W}_k \tag{16}$$

$$\boldsymbol{Z}_k = \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{V}_k \tag{17}$$

式中　$\boldsymbol{X}_k$——k 时刻系统状态向量

$\boldsymbol{A}$——状态转移矩阵

$\boldsymbol{X}_{k-1}$——$k-1$ 时刻系统状态向量

$\boldsymbol{U}_k$——k 时刻输入向量

$\boldsymbol{B}$——k 状态控制输入矩阵

$\boldsymbol{W}_k$——系统过程噪声向量

$\boldsymbol{Z}_k$——k 时刻观测向量

$\boldsymbol{H}$——观测矩阵

$\boldsymbol{V}_k$——观测噪声向量

通过 IMU 的误差来建立状态方程

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1} = \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1,k-1} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{k-1} \\ \boldsymbol{P}_{k,k-1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_{k-1,k-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q} \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k = \dfrac{\boldsymbol{P}_{k,k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{k,k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}} \\ \boldsymbol{P}_{k,k-1} = \hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1} + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{Z}_k - \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1}) \\ \boldsymbol{P}_{k,k} = [\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}]\boldsymbol{P}_{k,k-1} \end{cases} \tag{19}$$

式中　$\hat{\boldsymbol{X}}_{k,k-1}$——状态预测估计值

$\hat{\boldsymbol{X}}_{k,k}$——最优估计值

$\boldsymbol{I}$——与状态空间同维度的状态矩阵

$\boldsymbol{K}_k$——k 时刻增益矩阵

$\boldsymbol{P}_{k,k-1}$——根据 $k-1$ 时刻对 k 时刻的协方差矩阵估计值

$\boldsymbol{P}_{k,k}$——k 时刻的协方差矩阵最优估计值

$\boldsymbol{R}$——系统过程噪声协方差矩阵

$\boldsymbol{Q}$——系统观测噪声协方差矩阵

在姿态更新中通过卡尔曼滤波优化对角度估计进行预测与优化，从而有效减少噪声和零漂所带来的影响。

(3)航向 PID 控制。基于当前的角度偏差(目标值减去实际值)、积分误差(累加过去的误差)和变化率(误差的变化)进行计算[23]。

期望角度 θ_{desired} 与实际角度 $\theta(t)$ 的误差为

$$e(t) = \theta_{\text{desired}}(t) - \theta(t) \tag{20}$$

航向 PID 控制的偏航角为

$$u(t) = K_p\left[e(t) + K_i\left(e(t)\,\mathrm{d}t + K_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right)\right] \tag{21}$$

式中　$u(t)$——偏航角的控制变量

$e(t)$——当前姿态角的实际值与设定值之差，即误差信号

K_p——比例增益

K_i——积分增益

K_d——微分增益

将输出控制量 $u(t)$ 发送给执行机构(两个驱动轮的无刷电机)，调整系统姿态。保存当前角度 $\theta(t)$ 和误差 $e(t)$ 用于更新状态，并用于下次计算。

(4)混控控制。混控控制通过混控器将 PID 控制器输出的偏航角控制量 $u(t)$ 分配到混控执行器通道 1，将速度与位置信号分开，如图 12 所示。

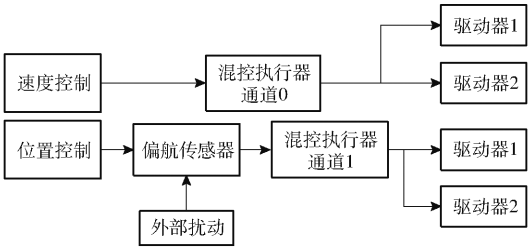

图 12　混控原理图

Fig. 12　Principle diagram of mixer

混控器的输出为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\text{roll}} \\ u_{\text{pitch}} \\ u_{\text{yaw}} \\ u_{\text{thrust}} \end{bmatrix} \tag{22}$$

式中　u_1、u_2、u_3、u_4——电机的控制量

u_{roll}、u_{pitch}、u_{yaw}——滚转、俯仰和偏航控制量

u_{thrust}——总推力控制量

对于单轴控制，混控器的输出可以简化为

$$\begin{cases} u_{\text{left}} = u_{\text{left}} + u(t) \\ u_{\text{right}} = u_{\text{right}} - u(t) \end{cases} \tag{23}$$

式中　u_{left}、u_{right}——左、右动力轮驱动器的控制量

3.3　基于 ExpressLRS 的导航流程设计

ExpressLRS 是一种轻量级数据链路层协议，主要用于无人机的低延迟、高可靠性的数据传输。它采用简单的帧结构设计，旨在降低带宽需求并简化

通信流程。

控制系统组成部件如图 13 所示。


(a) ELRS接收机


(b) JUMPER遥控器


(c) 导航元件:UR陀螺仪


(d) 双路混控转换器

图 13 控制系统组成部件

Fig. 13 Control system components

ExpressLRS 导航控制工作流程如下:

(1)发送端发射:发射端硬件载体为遥控器,STM32F407 作为主控芯片,其功能在于对电机速度精准控制,以及实现姿态的精确计算。

(2)接收端接收:接收机包含解码模块,解析接收到的字节序列还原原始数据;确保接收方正确地捕获到帧的起始和结束。信号经过陀螺仪对信号处理和控制电机驱动器实现导航纠偏。

(3)转换装置信号转换:接收机的信号经陀螺仪对位置信号进行纠偏。再经过双路混控转换器进行混控调节,将不同通道的数据转换为“转向”信号和“油门”信号,分别对驱动器进行位置和速度控制。

4 田间性能试验

4.1 样机试制与导航性能测试

起垄机样机在辽宁双麟农业机械有限公司车间装配并调试,旨在验证其结构的合理性、性能是否达标,以及主要作业功能是否满足实际需求。样机如图 14 所示。



图 14 起垄机样机

Fig. 14 Ridge machine prototype

为检测惯性导航装置对起垄机运行的影响,采用偏航角传感器对偏航角进行检测。由 WitMotion 公司提供的单轴角度测量传感器 HWT101CT 用于测量偏转角度的变化。将 HWT101CT 传感器连接到计算机,在上位机进行初始化配置。

在车间对起垄机的偏航角度进行测试以验证导航性能,模拟作业工况测试,分别以速度 1(0.1 ~ 0.2 m/s)和速度 2(0.3 ~ 0.4 m/s)两种行驶速度测试,测试场景如图 15 所示。


(a) t=20 s


(b) t=45 s

图 15 偏航角测试场景

Fig. 15 Yaw angle test scenario

偏航角测试:起垄机在硬质地面行走,将初试角度设为 0°。由于开始和结束阶段机器行走时速度不平稳,不能反映正常的偏航角度,以 20 ~ 100 s 作为数据采集区间,1 s 采集 3 次,通过上位机软件测得的偏航角试验曲线如图 16 所示,偏航角波动范围在 -2.5° ~ 3.5°之间。

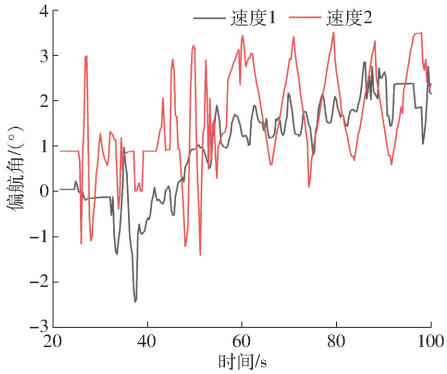

图 16 偏航角试验曲线

Fig. 16 Yaw angle test

位置偏差测试:起垄机直线行走距离 70 m,测试 5 次,横向位置偏差在 3 cm 以内,满足起垄作业要求 5 cm 标准。导航系统可以保证作业直线度需求。

偏航角试验结果表明速度 0.1 ~ 0.2 m/s 区间导航效果最优,如表 2 所示。通过偏航角测试和位置偏差测试,验证了基于 ExpressLRS 导航方法满足起垄机直线运行的设计指标。

表 2 偏航角试验结果

Tab. 2 Yaw angle test results (°)

项目	偏航角均值	标准差
速度 1	0.98	1.06
速度 2	1.18	1.20

4.2　田间性能试验内容与方法

试验主要测量垄顶宽、垄底宽、垄高、垄体直线度和垄顶平整度 5 个指标。其中垄型参数(垄顶宽、垄底宽和垄高)对于评估起垄机机械技术水平至关重要。垄体直线度反映起垄机直线行驶的性能,而垄顶平整度是影响作物移栽质量的关键因素。

试验于 2024 年 9 月下旬在辽宁省沈阳市苏家屯区的番茄种植试验大棚内进行,如图 17 所示。试验场地土壤平均含水率为 16.2%,硬度为289.9 kPa,旋刀转速 100 r/min,作业速度为 0.12 m/s。试验所用工具主要包括:含水率测定仪、土壤硬度计、盘尺、卷尺和直尺等。试验在旋耕后的软土地面上进行,旋耕深度 200 mm。



图 17　起垄机试验过程

Fig. 17　Ridger test process diagram

《蔬菜机械化起垄作业技术规范》[24] 中的起垄作业质量测量方法如下:

(1)垄高:直尺测量沟底至垄顶的垂直高度。

(2)垄顶宽和垄底宽:直尺测量垄顶、垄底边缘宽度。

(3)垄体直线度:以盘尺拉出的直线为基准,测量垄顶中心点与该基准线的偏差。

(4)垄顶平整度:直尺测量垄顶不同测点与相对基准面的垂直高度差。

试验作业涉及 3 条垄,每条垄取中间 20 m 垄体进行 5 点随机测量,每个测量点测量 3 次并记录。

应用变异系数作为评价参数,判断起垄作业是否能够形成均匀的垄体,变异系数越小表明垄体的均匀性越好。

4.3　起垄合格率测定

应用垄体合格率、变异系数作为评价参数判断起垄作业是否能够形成均匀的垄体且符合农艺要求。

根据茄果机械化种植农艺要求,将垄面高度 150 ~ 200 mm、垄顶宽度 600 mm 作为测定标准。垄体参数在 ±2 cm 以内,合格率大于等于 80% 为合格。垄体直线度小于等于 5 cm,垄顶平整度小于等于 2.5 cm 为合格。

根据装置的设计原理,理想的起垄高度应在 150 ~ 200 mm 之间。试验结果表明,起垄高度 H 越大则起垄机尾部承受力更大,进而使起垄机机头易于上翘,不利于起垄覆膜作业的稳定性。相反,如果起垄高度过低,则会导致土方量不足,影响垄台的成型。为确定最佳的起垄高度 H,本研究根据实际测试土壤条件及温室机械化作业要求:垄高冬季取高值,夏季取低值。在 150 ~ 190 mm 范围内进行垄高、垄顶宽、垄底宽的合格率单因素试验,试验结果如图 18 所示,确定起垄高度最优为 170 mm,对应垄底宽 780 mm。

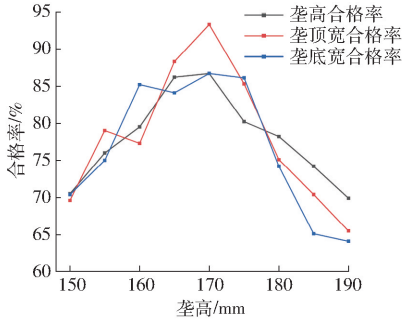

图 18　不同垄高时合格率变化曲线

Fig. 18　Influence of different ridge heights on pass rate of ridge formation

在 170 mm 垄高条件下,实测垄高合格率为 86.67%,垄顶宽合格率为 93.33%,垄底宽合格率为 86.67%,垄体质量试验结果如表 3 所示,均符合日光温室茄果类机械化种植农艺要求。

表 3　垄体质量试验结果

Tab. 3　Ridge mass test results

编号	垄高/mm	垄顶宽/mm	垄底宽/mm
1	190	600	780
2	165	595	765
3	160	590	740
4	160	580	765
5	165	605	775
6	165	600	772
7	160	585	778
8	165	575	775
9	162	595	770
10	155	585	755
11	170	580	760
12	162	580	750
13	180	600	775
14	177	610	785
15	160	580	780
合格率/%	86.67	93.33	86.67

得到垄体参数的标准差以及变异系数,如表 4 所示。

在该试验环境下,垄体合格率均超过 80% 并且变异系数均小于 6%,表明起垄质量达到标准要求。

4.4　作业后垄体直线度和垄顶平整度测定

为检测自主导航起垄机直线导航效果以及垄体

表 4 垄体质量参数标准差和变异系数

Tab. 4 Standard deviation coefficient of variation of ridge parameters

参数	平均值/mm	标准差/mm	变异系数/%
垄高	166.4	9.29	5.89
垄顶宽	590.7	10.83	1.83
垄底宽	769.2	12.53	1.63

平整度。利用标准差公式统计并计算每一个行程上测量点和水平基准线中心距离的标准差的平均有效数值,即为该机的作业后垄体直线度。所用仪器为钢尺(精度 1 mm)、盘尺。计算公式为

$$K_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (b_{ji} - b_j)^2}{n_j - 1}} \tag{24}$$

$$K_1 = \frac{\sum_{j=1}^{N} K_j}{N} \tag{25}$$

式中 K_j——第 j 行程横向偏移量的数学标准差,cm

n_j——j 点水平基准线上测定的交叉点数

N——同一工况下所有测定点数

b_j——第 j 行程横向偏移量的平均值,cm

b_{ji}——第 j 行程的第 i 个点横向偏移量,cm

K_1——垄体直线度,cm

在作业后的土壤层表面,选定一条中心基准线,并在 3 个作业行程内分别设置 5 个垄体中心测量点,以测量这些点与中心基准线的距离。各测量点相对于设定的水平中心基准线的距离测量结果及其统计计算结果如表 5 所示。

表 5 垄体直线度试验结果

Tab. 5 Ridge straightness test results cm

垄序号	与中心线的水平距离					平均值	标准差
	1	2	3	4	5		
1	-0.4	-0.5	4.0	4.4	2.0	1.90	2.33
2	4.0	4.5	-0.5	3.0	3.5	2.90	1.98
3	-1.5	-0.5	2.0	1.2	4.5	1.14	2.32

为了评估作业后的地表平整度,在作业完成的土壤层上选定一条水平基准线,并在 3 个作业行程中分别设置 5 个测量点,用以测量这些点与水平基准线的垂直距离。计算过程遵循公式(24)、(25)。最终所得出的平均值和标准差被用作衡量该机作业后地表平整度。相关试验结果如表 6 所示。

4.5 试验结果

由表 5 和表 6 结果计算可得,该机在作业后垄体直线度为标准差平均值 2.21 cm,小于垄体直线度的标准值 5 cm;垄顶平整度为标准差平均值 1.22 cm,小于垄顶平整度的标准值 2 cm。因此垄体直线度和垄顶平整度均达到标准。

表 6 垄顶平整度试验结果

Tab. 6 Roof flatness test results cm

垄序号	与基准线的垂直距离					平均值	标准差
	1	2	3	4	5		
1	3	1.5	3.4	2.4	4.5	2.96	1.12
2	3	2.4	3.5	1.3	4.5	2.94	1.20
3	3.6	0.5	2	0.3	1.5	1.58	1.33

作业后,垄高合格率 86.67%,垄顶宽合格率 93.33%,垄底宽合格率 86.67%。其中垄高样本标准差 9.29 mm,变异系数为 5.89%;垄顶宽样本标准差 10.83 mm,变异系数为 1.83%;垄底宽标准差 12.53 mm,变异系数为 1.63%。所有垄体参数合格率都在 80% 以上,达到农业标准。变异系数均小于 6%,表明垄体的均匀性较高。评价指标均满足日光温室机械化起垄作业要求。

5 结论

(1)完成了起垄覆膜机的机械结构设计,对起垄覆膜机关键部件进行了设计,主要车体框架采用焊接固定,提高装配便捷性。具备开沟、起垄、覆膜功能。设计了导杆摆杆机构,该机构能够灵活调节起垄深度,范围在 150 ~ 200 mm 之间。

(2)搭建了基于 ExpressLRS 协议的自主导航控制系统,以实现在温室大棚 GPS 受限环境中的高精度直线行驶。测试表明速度在 0.1 ~ 0.2 m/s 时偏航角均值 0.98°,标准差 1.06°,车辆行走偏航角度波动范围在 -2.5° ~ 3.5°之间,横向位置偏差均值在 3 cm 以内,满足起垄作业直线度小于 5 cm 的作业标准。

(3)完成了样机的田间性能试验。结果表明:在该机作业速度为 0.12 m/s,垄高在 170 mm 时合格率最优。垄高设为 170 mm 时测得垄高均值为 166.4 mm,合格率 86.67%,垄顶宽均值为 590.7 mm,合格率 93.33%,垄底宽均值 769.2 mm,合格率 86.67%,垄体参数的变异系数均小于 6%,垄体直线度为 2.21 cm,平整度为 1.22 cm,均满足行业要求。

(4)本研究设计的履带式自主导航起垄覆膜机整机最大功率 4.5 kW,具有尺寸小、整机功耗低、轻简化的优点。

参 考 文 献

[1] 李天来. 设施蔬菜产业发展(一)我国设施蔬菜产业发展现状及展望[J]. 中国蔬菜,2023(9):1 - 6.
LI Tianlai. Development status of China's facility vegetable industry and outlook[J]. Chinese Vegetables, 2023(9):1 - 6. (in Chinese)

[2] 王维,贺功民,王亚妮,等. 辣椒起垄覆膜机的设计与试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(6):57 - 62.
WANG Wei, HE Gongmin, WANG Yani, et al. Design and experimental research of pepper ridging and laminating machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(6):57 - 62. (in Chinese)

[3] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):16 - 25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):16 - 25. (in Chinese)

[4] 张仕林,赵武云,戴飞,等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报,2020, 36(1): 20 - 30.
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 20 - 30. (in Chinese)

[5] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏, 等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023, 54(1): 116 - 126,295.
DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116 - 126,295. (in Chinese)

[6] DAI F, GUO W, SONG X, et al. Optimization of mechanized soil covering path based on the agronomic mode of full-film double-ditch with double-width filming[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 139 - 146.

[7] 余飞. 温室大棚草莓种植开沟起垄机的设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
YU Fei. The design and test of trenching and ridging machine for strawberry planting in greenhouse[D]. HeFei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[8] 张博远,孔凡霞,兰玉彬,等. 智能割草机器人结构设计与分析[J]. 机械设计,2022,39(2):66 - 77.
ZHANG Boyuan, KONG Fanxia, LAN Yubin, et al. Structure design and analysis of intelligent mowing robot[J]. Journal of Machine Design, 2022,39(2):66 - 77. (in Chinese)

[9] 陈倩倩,魏建雄. 惯性导航计量技术发展现状与展望[J]. 计量与测试技术,2024,51(2):45 - 47,51.
CHEN Qianqian, WEI Jianxiong. Development status and prospect of inertial navigation measurement technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024,51(2):45 - 47,51. (in Chinese)

[10] WEI C Y, LI H L, SHI J Y, et al. Row anchor selection classification method for early-stage crop row-following[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192:106567.

[11] DING F, ZHANG W Y, LUO X W, et al. Gain self-adjusting single neuron PID control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and transport vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 107050.

[12] 袁洪良,杨浚宇,唐睿,等. 基于低成本惯导和运动约束的农机高精度定位系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(7): 17 - 25.
YUAN Hongliang, YANG Junyu, TANG Rui, et al. High-precision localization of autonomous agricultural machinery using low-cost IMU and motion constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(7):17 - 25. (in Chinese)

[13] TAKAGAKI A, MASUDA R, LIDA M, et al. Image processing for ridge/furrow discrimination for autonomous agricultural vehicles navigation[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 47 - 51.

[14] 刘德军,晁浚淇,苏俊锋,等. 履带自走式园林剩余物粉碎装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(6):722 - 731.
LIU Dejun, CHAO Junqi, SU Junfeng, et al. Design and test of treck self-propelled garden waste crushing device[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023,54(6):722 - 731. (in Chinese)

[15] 周忠仁,俞成涛,周翔宇,等. 新型护理床椅的背板机构设计及分析[J]. 机械传动,2022,46(3):74 - 80.
ZHOU Zhongren, YU Chengtao, ZHOU Xiangyu, et al. Design and analysis of backplane mechanism for new nursing bed chair [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012,46(3):74 - 80. (in Chinese)

[16] 喻景权,王秀峰. 蔬菜栽培学总论[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2014.

[17] 仇谕锋. 适用于粘土环境下的起垄覆膜机设计与优化[D]. 长沙:中南大学,2022.
QIU Yufeng. Design and optimization of ridging and film mulching machine applicable to clay environment[D]. Changsha: Central South University, 2022. (in Chinese)

[18] 陈平录,苏江红,许静,等. 丘陵果园立式螺旋开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(10):223 - 233,274.
CHEN Pinglu, SU Jianghong, XU Jing, et al. Design and experiment of vertical spiral trenching-fertilizing machine for hilly orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2024. 55(10), 223 - 233,274. (in Chinese)
[19] HAN X Z, KIM H J, JEON C W, et al. Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation[J]. Biosystems Engineering, 2019, 178: 70 - 85.
[20] VALENTE D S M, MOMIN A, GRIFT T, et al. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105128.
[21] AN G, ZHONG Z, YANG S, et al. EASS: an automatic steering system for agricultural wheeled vehicles using fuzzy control [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108123.
[22] JONES M H, BELL J, DREDGE D, et al. Design and testing of a heavy-duty platform for autonomous navigation in kiwifruit orchards[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 129 - 146.
[23] 林熙淼,叶云翔,王梦想,等. 基于侧偏力矩检测的旋耕起垄拖拉机自主导航控制方法[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):373 - 382,391.
LIN Ximiao, YE Yunxiang, WANG Mengxiang, et al. Autonomous navigation control method of rotary tillage ridging tractor based on lateral torque detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 373 - 382,391. (in Chinese)
[24] T/CAMA 37—2020 蔬菜机械化起垄作业技术规范[S]. 2020.

(上接第 329 页)

[23] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57 - 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 - 68. (in Chinese)
[24] 薛宝宝, 李浩, 牛东红, 等. 不同月龄缢蛏新品种数量性状的相关与通径分析[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 941 - 949.
XUE Baobao, LI Hao, NIU Donghong, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of new variety of *Sinonovacula constricta* at different months of age[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 941 - 949. (in Chinese)
[25] 黄小毛, 张顺, 朱耀宗, 等. 气送式油菜飞播装置投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 31 - 41.
HUANG Xiaomao, ZHANG Shun, ZHU Yaozong, et al. Seeding process analysis and test of the air conveying rapeseed aerial seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 31 - 41. (in Chinese)
[26] 周锋. 煤炭大颗粒气力输送关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHOU Feng. Study on key technology of pneumatic conveying for large coal particles[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)
[27] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43 - 51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43 - 51. (in Chinese)
[28] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM - CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48 - 57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 - 57. (in Chinese)
[29] 陈鸿宇. 滩涂泥螺采收关键技术及装备研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
CHEN Hongyu. Research on key technology and device for the harvesting of mud snails (*Bullacta exarata*) in mudflats[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023. (in Chinese)
[30] 心男. 基于 EDEM - FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
XIN Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM - FLUENT[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)