

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.007

油菜无人播种作业两退三切鱼尾自动调头方法

张朝宇^{1,2} 卢 邦^{1,2} 李 强^{1,2} 王登辉^{1,2} 熊子庆^{1,2} 丁幼春^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为减小油菜无人播种作业系统调头产生的未作业区域面积,提高作业行切换对行精度,提出一种两退三切鱼尾调头自动控制方法。基于 CaseTM1404 型拖拉机、北斗 RTK 和 2BFQ-8 型油菜精量直播机构建了一套油菜无人播种作业系统。根据该系统参数,定量分析了 3 种鱼尾调头模型的路径几何关系,以田头未作业区域面积最少和对行精度最优为目标生成鱼尾调头路径,基于几何模型和运动学模型设计了改进的模糊自适应纯追踪控制器,依据该控制器结合油菜精量直播机播种规范构建了控制策略。开展了 3 种鱼尾调头模型田头未作业区域面积仿真,仿真结果表明,两退三切鱼尾调头模型相对于传统鱼尾调头模型田头未作业区域面积减少 14.62%~22.43%。运用该调头方法开展了田间无人播种作业试验,试验结果表明:两退三切鱼尾调头方法较传统鱼尾调头方法初始横向偏差减小 7.37~8.08 cm,上升时间减少 1.3~2.3 s,无人作业对行精度为 1.48 cm。该研究为油菜无人播种作业过程中的梭行路径调头换行方法提供了技术支撑。

关键词: 油菜; 无人播种作业; 调头模型; 控制策略

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0066-10

OSID:



Unmanned Seeding Automatic Control Method of Rapeseed Based on Two-back and Three-cut Fishtail U-turn Model

ZHANG Chaoyu^{1,2} LU Bang^{1,2} LI Qiang^{1,2} WANG Denghui^{1,2} XIONG Ziqing^{1,2} DING Youchun^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: As one of the important parts in the intelligent construction of the whole rapeseed industrial chain, the unmanned seeding operation of rapeseed can greatly improve the operation accuracy and labor production efficiency, and achieve the effect of reducing costs and improving efficiency. The middle and lower reaches of the Yangtze River are the main producing areas of winter rapeseed in China. In the process of unmanned seeding operation, linear navigation is the main method, and field U-turn and line-feed play a key linking role, and the U-turn path planning and controlling effect directly affect the line-to-line accuracy. Affected by the land and previous crops in Southern China, especially in the rice-oil rotation area in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the land scale is small and the soil is sticky. The unmanned planting operation process is complicated at the head of the field, and the U-turn is easy to slip when making the U-turn, and it is easy to produce deviation after changing the line. The tractor start the next row of seeding operations before it goes on the working line, resulting in poor row alignment accuracy and the phenomenon of replay and missed seeding, which directly affects the quality of rapeseed seeding operations. Aiming at the problems of complex line-feeding and poor accurate line-to-line ability of tractor navigation during unmanned seeding operation, a two-back and three-cut fishtail U-turn model was proposed to find the line. Analyzing the characteristics of unmanned seeding operation and equipment characteristics of the rapeseed direct seeding unit, and taking quantitative analysis in the line-hunting path at the U-turn at the field head, a set of rapeseeds unmanned seeding operation system was constructed, the main parts included CaseTM1404 tractor, Beidou high-precision positioning system,

收稿日期: 2022-04-25 修回日期: 2022-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000402、2021YFD2000402-3)和湖北省重点研发计划项目(2021BBA080)

作者简介: 张朝宇(1994—),男,博士生,主要从事油菜机械化生产智能化技术与装备研究,E-mail: 454800867@qq.com

通信作者: 丁幼春(1978—),男,教授,博士,主要从事油菜机械化生产智能化技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

angle sensor, vehicle controller, CAN analyzer, industrial computer, electronically controlled steering wheel and rapeseed precision seeder. The simulation test of three kinds of fishtail turning models was carried out. The results showed that the area of the non operating area of the two-back and three-cut fishtail U-turn model was reduced by 14.62% ~ 22.43% compared with the traditional fishtail U-turn model. The field unmanned seeding operation experiment of the model controller was carried out, and the results showed that the initial offset distance and rising time of the two-back and three-cut fishtail U-turn model was reduced by 7.37 ~ 8.08 cm and 1.3 ~ 2.3 s compared with that of the traditional fishtail U-turn model, and the operation alignment accuracy was 1.48 cm. This research result had guiding value for the comb-path U-turn operation during unmanned seeding operation of rapeseed.

Key words: rapeseed; unmanned seeding operation; U-turn model; control strategy

0 引言

长江中下游地区是我国冬油菜主要产区,油菜无人播种作业作为油菜全产业链智能化建设中重要环节之一,可以大幅度提高作业精度和劳动生产效率,实现节本增效^[1-2]。无人播种作业过程田头调头换行起到关键衔接作用,调头路径规划和控制效果直接影响对行精度与工作效率^[3-4]。受我国南方地区土地和前茬作物影响,尤其是长江中下游稻油轮作区,土地规模小且土壤黏重^[5],无人播种作业过程田头换行复杂。主要表现为调头转弯时轮胎容易滑移,换行后易产生较大初始横向偏差,拖拉机没有在作业路线上就进行下一行播种作业,导致对行精度不高,出现重播漏播现象,影响油菜播种作业质量。

保证自动对行作业质量的核心是实施良好的转弯调头方式和跟踪控制方法^[6-8]。学者们将两行间的转弯方式以最短路径规划分为无需调头的 Dubins 曲线^[9]和需要倒退的 Reeds - Shepp 曲线^[10],在农业应用中主要归纳为鱼尾式^[11]、 Ω 式^[12]和 C 式^[13-14]等。无人播种作业通常使用套行和梭行作业路径,套行作业路径更适用于大田块下无人播种作业,其转弯方式多为 C 式。吴才聪等^[15]针对 SF2104 型拖拉机研发了自动驾驶与作业控制系统,实现了套行路径下自动驾驶与作业。张闻宇等^[16]设计了一种适用于 2BFQ - 6 型油菜精量联合直播机组导航的双切圆寻线模型控制方法,该方法有效解决套行自动转弯中两条直线快速稳定换线问题。但套行作业路径对田块宽度具有要求,难以适应南方土地规模小且分散地区无人播种的环境。梭行作业路径对田块适应性较好,可根据幅宽要求采取不同调头方式,因此梭行作业路径对实现我国南方小型分散性农田无人化作业有较大的意义。刘兆朋等^[17]针对高地隙喷雾机基于纯追踪方法设计了田头转向控制器,实现在梭行路径下自动完成水泥路面、旱地和水田的喷雾作业。YIN 等^[18]基于 SPV -

6C 型插秧机的最小转弯半径规划作业路径与跟踪控制系统,实现了插秧机在小幅宽下田头 C 式自动转弯。李革等^[19]以改造的井关 PZ60 型插秧机为平台,基于改进的纯追踪算法实现两行间 Ω 式转弯路径的跟踪。CARIOU 等^[20-21]针对机器人小车在相邻路径调头问题,基于回旋曲线的调头模型优化了调头时间和调头区域面积。张朝宇等^[22]针对履带式油菜播种机特性设计的一套无人播种系统可完成小地块弓字路径下的油菜无人播种。适用于梭行作业调头方式中 C 式研究较成熟,但受机具幅宽小于拖拉机最小转弯半径影响,难以满足小规模土地中油菜精量直播机的自动调头操作;适用于小规模土地目前已有的调头方式中, Ω 式可实现小田块调头,但田头未作业区域面积较大;而田头未作业区域面积较小的鱼尾式受拖拉机动力换向和动力换挡技术不成熟的影响,目前相关研究较少。

针对油菜无人播种实际需求,为减小油菜无人播种作业系统的调头产生的未作业区域面积,提高作业对行精度,本文以 CaseTM1404 型拖拉机为平台拟构建一套油菜无人播种作业系统,依据几何学和运动学提出一种两退三切鱼尾调头模型,基于该模型改进模糊自适应纯追踪控制器,通过模拟驾驶员作业规范设计联合作业控制策略。开展两退三切鱼尾调头模型与传统鱼尾调头模型田头未作业区域面积仿真对比试验;并进行路面和田间试验,以验证两退三切鱼尾调头方法在油菜无人播种作业中的可行性和对行精度。

1 油菜无人播种作业系统

1.1 平台整体结构

油菜为旱地作物,南方油菜田内每行两侧设有一条排水沟,2BFQ - 8 型油菜精量直播机作业可一次性完成压茬、主动开沟、厢面覆土、精量播种及施肥^[1]。为满足无人播种作业需求,构建一套油菜无人播种作业系统,如图 1 所示,系统组成主要包括: CaseTM1404 型拖拉机、北斗高精度定位系统、角度

传感器、车载控制器、CAN 分析仪、工控计算机、电控方向盘和 2BFQ-8 型油菜精量直播机^[24]。

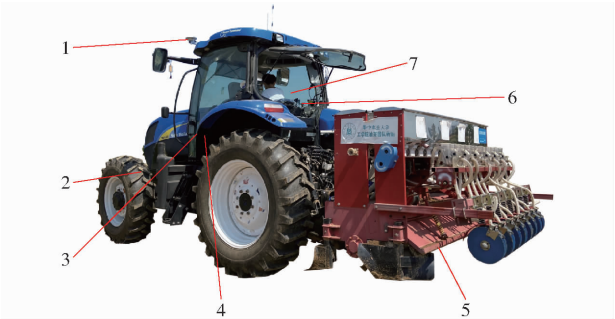


图 1 油菜无人播种作业系统组成

Fig. 1 Composition of rapeseed unmanned seeding operation system

1. 北斗定位接收天线 2. 角度传感器 3. CAN 分析仪 4. 车载控制器 5. 2BFQ-8 型油菜精量直播机 6. 工控计算机 7. 电控方向盘

油菜无人播种作业系统技术参数如表 1 所示,拖拉机牵引油菜精量直播机,直播机通过动力输出带动风机,直播机工作时,8 行排种器定量排出连续均匀的种子流,实现精量播种、施肥、覆土开沟一体作业。

表 1 油菜无人播种作业系统技术参数	
Tab. 1 Technical parameters of rapeseed unmanned seeding operation system	
参数	数值
拖拉机外形尺寸/(mm×mm×mm)	4 954×2 170×2 819
轴距/mm	2 739
标定转速/(r·min ⁻¹)	2 200
转弯半径/m	7
标定功率/kW	110~150
缸数(进气方式)	6(涡轮增压)
PTO 输出功率/kW	91
额定功率/kW	141
油菜精量直播机外形尺寸/(mm×mm×mm)	2 300×1 550×1 500
开沟深度/mm	60~240
行距/mm	280
工作幅宽/mm	2 300

1.2 控制系统结构

油菜无人播种作业控制系统结构框图如图 2 所示,主要由传感装置、控制模块和执行模块组成,传感装置由北斗高精度定位系统 M600 双天线北斗 RTK 移动站(上海司南卫星导航技术股份有限公司)和角度传感器(424A10A060 型角度传感器,分辨率 0.1°,测量范围 0°~90°)组成,高精度北斗 RTK 通过网络载波相位动态实时接收定位信息,角度传感器安装在前轮右侧转向销轴上可直接读取前轮转角。控制模块由 CAN 分析仪(CANOpenJ1939

型,珠海创芯科技有限公司)、车载控制器(NMC308 型)和工控计算机(LegionY7000P 型)组成,无人播种作业软件在工控计算机上编写,通过 CAN 分析仪与拖拉机车载控制器进行通讯。执行模块由电控方向盘(上海联适导航技术有限公司)和油菜精量直播机组组成,工控计算机通过串口通讯与移动站和电控方向盘进行数据交互和转向控制,通过 CAN 分析仪控制油菜精量直播机组速度、制动器、离合器、机具升降机构和 PTO。

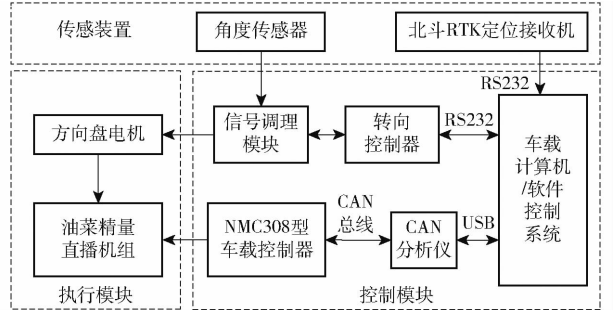


图 2 控制系统总体结构框图

Fig. 2 Overall structure of control system

2 拖拉机导航两退三切鱼尾调头模型

2.1 调头模型

油菜无人播种作业路径通常由平行线段组成,直播机需要在不同的作业轨迹之间进行对行切换。在田块面积较小的情况下,鱼尾调头方式是一种接近人驾驶习惯的调头方式,鱼尾调头路径可分为 2 类:①由 1 段直线轨迹和 2 段圆弧相切轨迹组成调头路径(图 3a)。②由 3 段圆弧相切的轨迹组成调头路径(图 3b、3c)。

调头初始横向偏差为完成一次调头后车辆与换行后目标直线的横向偏差,为避免调头过程中拖拉机滑移造成初始横向偏差过大,导致未上线就开始进入下一条直线跟踪,基于以上原则设计一种两退三切鱼尾调头路径。如图 3c 所示,在第 1 行完成播种作业后规划一条倒退路径 AB,AB 长度为机具长度,在不碾压已作业区域的情况下有效利用土地资源;由几何关系得出换行到第 2 行线上的最短鱼尾路径;再通过第 2 行起始处规划出 1 条倒退路径 EF,EF 长度为一个车身长度,倒退过程模拟人驾驶时的对行调整,实现在未作业区域面积较小的情况下精准换行。

基于调头路径几何关系建立 3 种鱼尾调头模型,如图 3 所示,以点 B 为原点,第 1 行作业线为 Y 轴,方向为 Y 轴正向,其中 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别是以点 O_1 、 O_2 、 O_3 为圆心的夹角。定义 L_s 为调头长度, L_t 为田头预留长度, R 为拖拉机转弯半径,设点 E 为 (x, y) ,

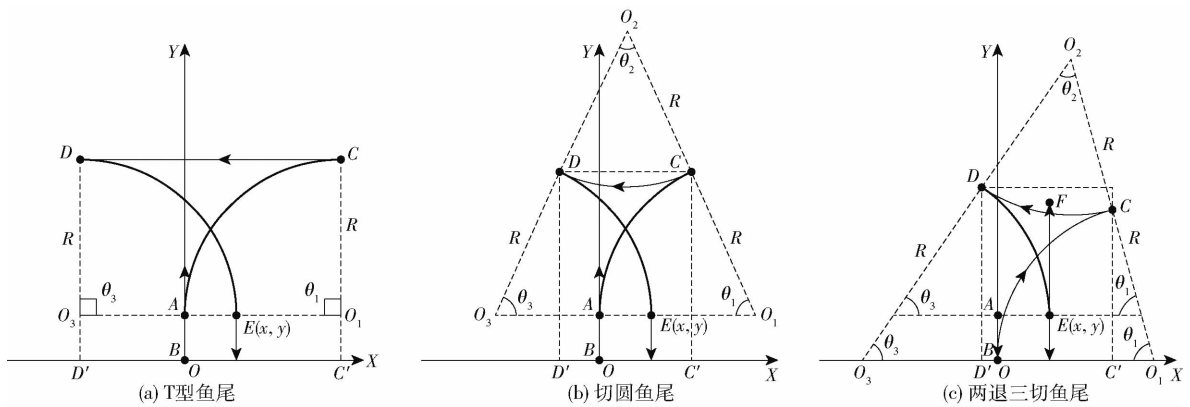


图 3 鱼尾调头几何模型

Fig. 3 Geometry relations of fishtail U-turn

其中 x 为机具幅宽, y 为机具长度, 且 $x < R_{\min}$ 。为避免航向突变, 各段导航路径两两相切。

T 型鱼尾几何关系如图 3a 所示, 其中调头路径长度 $L_{sa} = L_{AC} + L_{CD} + L_{DE}$, 调头路径长度 L_{sa} 由两段弧线段和一段直线组成, 即

$$L_{sa} = R\theta_1 + L_{CD} + R\theta_3 = R(\theta_1 + \theta_3) + 2R - L_{AE} \quad (1)$$

式中 L_{sa} ——T 型鱼尾调头路径长度, m

根据几何关系可得到点 D 坐标为 $(-R + x + R\cos\theta_3, y + R\sin\theta_3)$, 点 C 坐标为 $(R - R\cos\theta_1, y + R\sin\theta_1)$ 。

切圆鱼尾几何关系如图 3b 所示, 其中调头路径长度 $L_{sb} = L_{AC} + L_{CD} + L_{DE}$, 调头路径长度 L_{sb} 由 3 段弧线段组成, 即

$$L_{sb} = R\theta_1 + R\theta_2 + R\theta_3 = R(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2)$$

式中 L_{sb} ——切圆鱼尾调头路径长度, m

根据几何关系可得点 D 坐标为 $(-R + x + R\cos\theta_3, y + R\sin\theta_3)$, 点 C 坐标为 $(R - R\cos\theta_1, y + R\sin\theta_1)$ 。得到 θ_1 和 θ_3 的几何关系为

$$\theta_1 = \theta_3 = \arccos \frac{2R - x}{4R} \quad (3)$$

两退三切鱼尾几何关系如图 3c 所示, 其中调头路径长度 $L_{sc} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}$, 调头路径长度 L_{sc} 由 3 段弧线段和 2 条直线段组成, 即

$$L_{sc} = L_{AE} + R\theta_1 + R\theta_2 + R\theta_3 + L_{EF} = L_{AE} + R(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_{EF} \quad (4)$$

式中 L_{sc} ——两退三切鱼尾调头路径长度, m

根据几何关系可得到点 D 坐标为 $(-R + x + R\cos\theta_3, y + R\sin\theta_3)$, 点 C 坐标为 $(R - R\cos\theta_1, R\sin\theta_1)$ 。得到 θ_1 和 θ_3 的几何关系为

$$\cos\theta_1 = \frac{\left(2R - \frac{y}{\sin\theta_1}\right)^2 + \left(2R - x - \frac{y}{\tan\theta_1}\right)^2 - 4R^2}{2\left(2R - \frac{y}{\sin\theta_1}\right)\left(2R - x - \frac{y}{\tan\theta_1}\right)} \quad (5)$$

$$\cos\theta_3 = \frac{\left(2R + \frac{y}{\sin\theta_3}\right)^2 + \left(2R - x + \frac{y}{\tan\theta_3}\right)^2 - 4R^2}{2\left(2R + \frac{y}{\sin\theta_3}\right)\left(2R - x + \frac{y}{\tan\theta_3}\right)} \quad (6)$$

根据切圆几何关系可得

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \pi \quad (7)$$

$$L_t = R\sin\theta_3 \quad (8)$$

针对以上 3 种鱼尾调头模型, 可得当拖拉机转弯半径 R 接近拖拉机最小转弯半径 $R_{\min}$ 时, 构成的调头长度 L_s 最优, 田头预留长度 L_t 最小, 且田头预留长度 L_t 与机具幅宽 x 、机具长度 y 、转弯半径 R 有关。

2.2 无人作业路径生成算法

无人作业路径算法以 C++ 作为编程语言, 基于 Google 地图 API 在 Qt 平台上编写路径规划软件, 农田边界信息通过人工在地图上鼠标获取四边形田块的地理信息, 以矩形边界信息、拖拉机和悬挂机具的基本参数为输入, 路径生成图如图 4 所示, O 、 P 、 Q 、 R 为田块边界, 经过墨卡托投影 (Universal transverse Mercator, UTM) 算法进行坐标转换, 将 WGS84 坐标转换为平面坐标^[23], 为简化计算过程, 建立相对坐标系, 以点 O 为原点, 作业边方向为 Y 轴方向, 得到田块顶点坐标 $O(0, 0)$ 、 $P(0, y_2)$ 、 $Q(x_3, y_3)$ 、 $R(x_4, 0)$ 。规定机具从点 O 方向进入田块, 参照 OP 边为作业边, 且与 Y 轴平行, 根据平面两点间距离公式可得到各边的长度。

路径生成算法流程如下: 通过等距偏置处理生成平行的作业路径^[24-25], 调头边偏置距离为 $L_t + L_a$, 偏置次数为 2 次; 作业边偏置距离为 $x/2$, 偏置次数为

$$m = \left\lfloor \frac{l_{OR} - 2L_a}{x} \right\rfloor \quad (9)$$

式中 m ——偏置次数

L_a ——安全距离, m

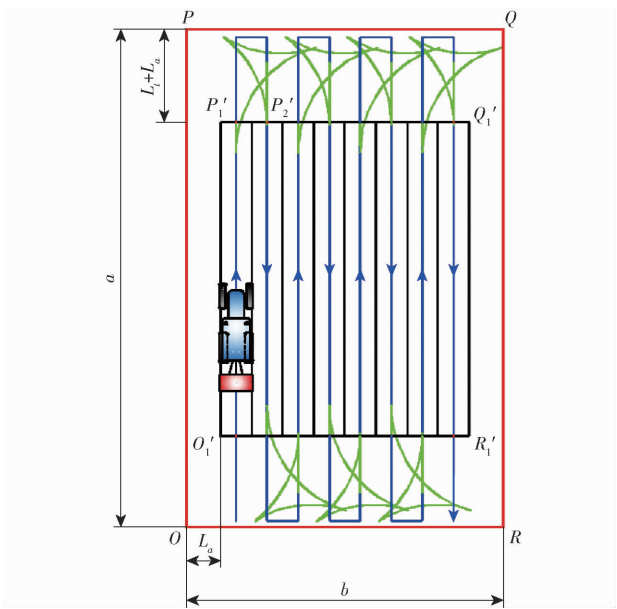


图 4 基于两退三切鱼尾模型的作业路径生成图
Fig.4 Path planning algorithm of two-back and three-cut fishtail U-turn model

作业边偏置线与调头边偏置线的交点可得到所有地头节点,此时以节点 P_1' 和 P_2' 为例,节点坐标分别为 $P_1' \left(\frac{x}{2} + L_a, y_2 - L_t - L_a \right)$ 、 $P_2' \left(\frac{3x}{2} + L_a, y_2 - L_t - L_a \right)$ 。

节点 P_1' 和 P_2' 分别对应图 3c 中的点 A 和点 E,依据 2.1 节鱼尾调头几何关系生成 5 条单次调头路径,同理按播种顺序将所有节点处添加调头路径,生成基于两退三切鱼尾调头模型的梭行作业路径。

矩形田块土地调头产生的未作业区域面积为田头预留长度和田块宽度乘积。根据以上路径生成算法,在忽略偏移安全距离所产生的非作业区域下,定义 S_{ab} 为矩形田块的面积,田块长度为 a ,田块宽度为 b ,在不考虑车身尺寸情况下的调头产生的未作业区域面积为

$$S_s = bL_t = bR\sin\theta_3 \tag{10}$$

2.3 路径仿真试验

为验证两退三切鱼尾调头模型相较于传统鱼尾调头方法田头未作业区域面积更小,通过仿真试验,以 C++ 作为编程语言,在 Qt 平台上编程,基于 Google 地图 API 编写路径规划软件,在 Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60 GHz、16 GB、Windows 10 操作系统下,运行程序并测试效果。

采用表 1 中油菜无人播种作业系统参数作为输入,根据式(8)对不同幅宽下 3 种鱼尾调头模型田头预留长度 L_t 进行仿真,结果如图 5 所示,仿真结果表明,两退三切鱼尾调头模型相对于传统鱼尾调头

模型田头预留长度减少 0.93 ~ 1.57 m。根据式(10)对 3 种鱼尾调头模型产生的未作业区域面积进行对比分析,结果表明,两退三切鱼尾调头模型相对于传统鱼尾调头模型田头未作业区域面积减少 14.62% ~ 22.43%。

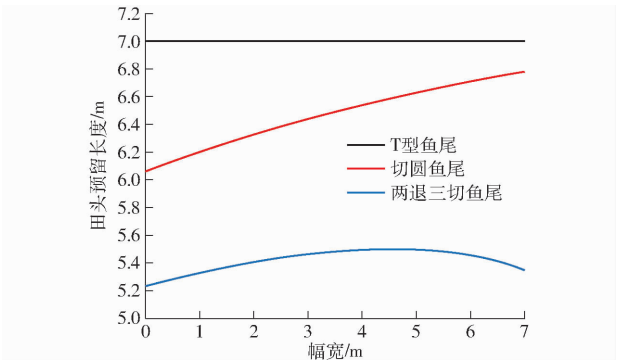


图 5 不同调头模型田头预留长度
Fig.5 Different U-turn models reserve lengths for field heads

3 两退三切鱼尾调头模型控制方法

3.1 拖拉机运动学和几何模型

对于阿克曼转向的车辆,在忽略轮胎滑移、车轴刚度和倾角等因素的情况下,其运动学模型如图 6 所示,在惯性坐标系 XOY 下,可得车辆运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{X} = v\cos\theta \\ \dot{Y} = v\sin\theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L}\tan\alpha \end{cases} \tag{11}$$

式中 $\dot{X}$ ——X 方向速度, m/s
 $\dot{Y}$ ——Y 方向速度, m/s
 v ——行驶速度, m/s
 L ——拖拉机前后轮轴距, m
 $\dot{\theta}$ ——航向角速度, (°)/s
 α ——拖拉机当前偏角, (°)

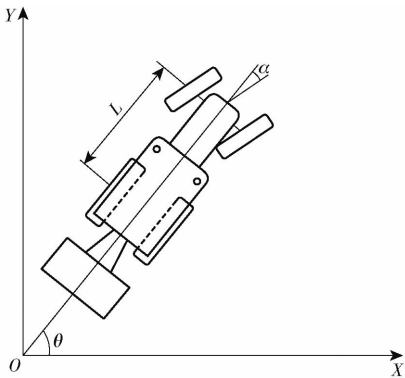


图 6 拖拉机运动示意图

Fig.6 Schematic of tractor movement

转向半径与前轮偏角的关系为

$$R = \frac{L}{\tan\alpha} \tag{12}$$

当前轮偏角为最大值 $\delta_{\max}$ 时,有最小转向半径 $R_{\min}$ 。

3.2 控制器设计

基于拖拉机运动学和几何模型,设计了导航路径跟踪控制器。自动转向控制系统结构图如图 7 所示,转向控制器接收目标转角和实时角度信息,形成反馈回路,通过角度偏差计算控制量,发送至电控方向盘,对直播机组转向进行控制。

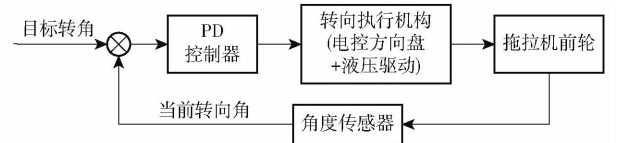


图 7 自动转向控制系统结构图
Fig. 7 Automatic steering control system

为适应拖拉机变速状态下稳定控制,路径跟踪采用改进的模糊自适应纯追踪控制器^[22],根据几何关系得到目标前轮偏角与前视距离^[26]关系为

$$\alpha = \arctan \frac{2L(d\cos\theta - \sqrt{L_d^2 - d^2}\sin\theta)}{L_d^2} \tag{13}$$

式中 L_d ——前视距离,m
 d ——拖拉机到作业路径的横向偏差,m
不同于履带式车辆运动学,改进后导航控制器系统结构图如图 8 所示,对该控制器模糊规则进行重新定义,以横向偏差 d 、航向偏差 θ 和拖拉机行驶速度 v 作为模糊自适应纯追踪控制器的输入,前视距离 L_d 作为模糊控制器的输出,计算目标转角,通过转向控制器控制拖拉机转向。

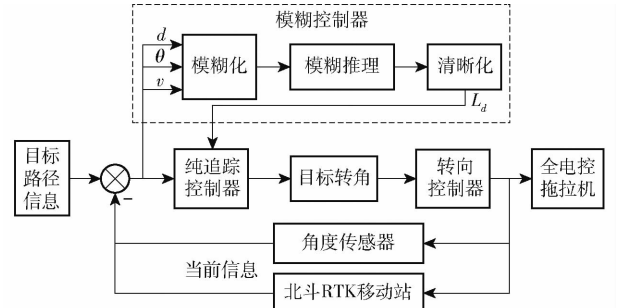


图 8 导航控制器系统结构图
Fig. 8 Structure diagram of navigation controller system

3.3 控制策略

油菜无人播种作业有一定的播种规范,油菜精量直播机作业时由于旋耕机和被动式开沟犁的交互作用,会在种床厢面与畦沟连接部位形成倾斜边坡^[27]。有序控制拖拉机速度、制动器、离合器、转向机构、机具升降机构和 PTO 是实现无人播种的重要环节。控制策略结合农艺操作要求,无人播种作业

控制规则如表 2 所示。

表 2 作业控制规则
Tab. 2 Autonomous operation control strategy

系统工况	速度控制	转向控制	机具控制	离合控制	制动控制
倒退导航	R	Y	N	N	N
切圆导航	L	Y	N	N	N
直线段作业	H	Y	Y	N	N
前后切换处	N	N	N	Y	Y
工作异常	N	N	N	Y	Y
完成作业	N	N	N	Y	Y

注:“R”表示拖拉机倒车,“L”表示拖拉机低速控制。“H”表示拖拉机高速控制,“N”表示不执行控制,“Y”表示执行控制。

无人播种作业控制流程图如图 9 所示,图中 v_0 为停止速度, v_1 为慢速, v_2 为作业速度, v_R 为倒退速度,根据 RTK 北斗定位获取当前车辆的位置信息,按照表 2 中控制作业逻辑对拖拉机进行控制,拖拉机播种作业行驶到点 A 时,处于前进和后退切换处,机具抬升,PTO 停止工作,进行倒退导航;行驶到点 B 时,处于后退和前进切换处;从 B ~ E 进行鱼尾调头切圆导航,按照控制作业逻辑对拖拉机进行控制;拖拉机第 1 次行驶到点 E 时,处于前进和后退切换处,进行倒退导航,行驶到点 F 时,处于后退和前进切换处;当拖拉机第 2 次行驶到点 E 时,机具下降,PTO 开始工作,进行播种作业。

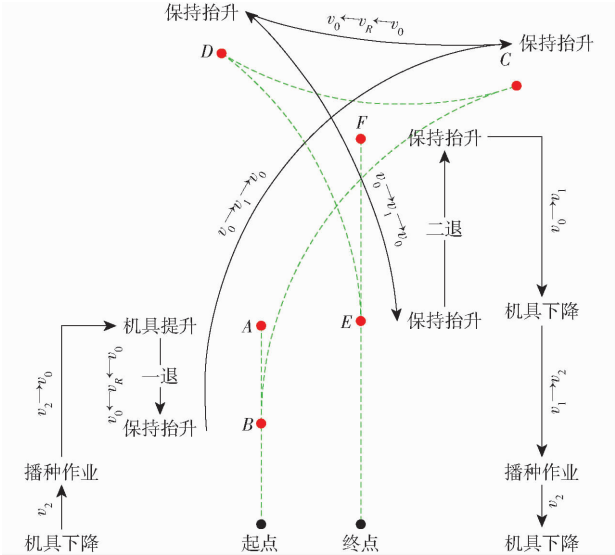


图 9 无人播种作业控制流程图

Fig. 9 Control flow chart of unmanned seeding operation

4 两退三切鱼尾调头方法试验

4.1 路面试验

为测试两退三切鱼尾调头模型路面导航控制性能,在湖北省武汉市华中农业大学“油菜全程机械化”基地进行转向试验和不同速度下直线跟踪试验。

拖拉机鱼尾调头切圆导航时拖拉机转弯半径为最小转弯半径,设定目标转角为最大前轮偏角,拖拉机转向行驶速度为 1.0 m/s,给定阶跃控制信号 21°,转向控制响应结果如图 10 所示,拖拉机前轮转向角从 0°转至 21°,耗时 4 s,超调量为 0.15°,当角度达到目标转角后,稳态误差为 0.09°。

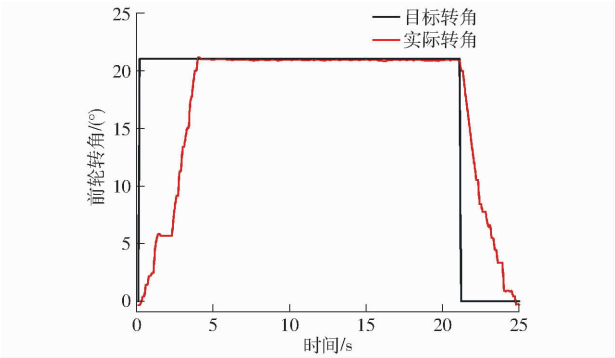


图 10 转向控制响应
Fig. 10 Steering control response

拖拉机分别在慢速 v_1 、作业速度 v_2 和倒退速度 v_R 下进行路面直线跟踪试验。各速度进行 3 次直线跟踪试验,试验结果如表 3 所示,试验结果表明:当拖拉机速度为 -0.8、0.9、1.5 m/s 时,改进的模糊自适应纯追踪控制器最大横向偏差分别不大于 3.64、3.21、3.55 cm,平均绝对偏差分别不大于 1.22、1.04、1.30 cm。

表 3 路面不同速度下直线跟踪结果

Tab.3 Straight line tracking results at different speeds on road surface

		cm		
平均速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验序号	最大横向 偏差	平均绝对 偏差	标准差
-0.8	1	3.31	1.22	0.85
	2	3.64	1.18	1.21
	3	3.42	1.04	0.71
	平均值	3.45	1.15	0.92
0.9	1	2.49	0.92	0.62
	2	3.21	0.98	0.78
	3	3.12	1.04	1.29
	平均值	2.94	0.98	0.90
1.5	1	3.45	1.30	0.76
	2	3.55	1.28	1.30
	3	3.13	1.14	1.05
	平均值	3.38	1.24	1.04

4.2 田间试验

为测试不同鱼尾调头方法田间导航性能,于湖北省荆门市掇刀区试验田进行田间试验,田内无障碍物,试验材料:皮尺、北斗 RTK 移动站、工控计算机。具体操作步骤:①试验前进行传感器、工控计算机等各控制系统部件的检查,将北斗 RTK 移动站电

源打开,等待移动站冷启动完成并在工控计算机成功显示定位数据后,在软件系统上设定两行梭行路径和作业幅宽。②将拖拉机悬挂的直播机抬升并保持悬空,再将拖拉机行驶至作业起点附近,初始姿态调节到横向偏差 50 cm、初始航向偏角 5° 以内。③打开上位机软件中的导航数据保存功能,开始试验并记录试验数据,分别对单次调头下两退三切鱼尾模型和传统鱼尾模型进行跟踪,记录试验过程中的横向偏差。在不考虑作业时间的情况下,3 种调头方法跟踪完成后进入下一条作业路径的横向偏差如图 11 所示。

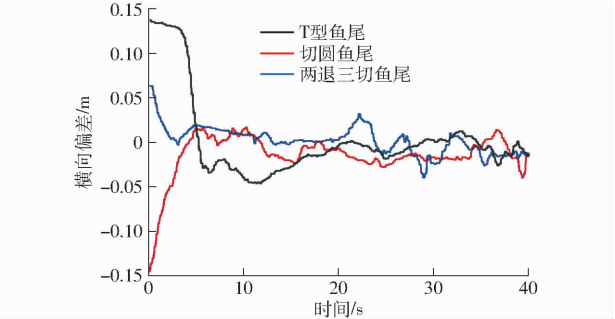


图 11 不同调头方法横向偏差
Fig. 11 Initial distance deviation of different U-turn models

由图 11 可知,两退三切鱼尾模型较切圆鱼尾模型作业路径初始横向偏差减小 8.08 cm,上升时间减小 1.3 s;较 T 型鱼尾模型作业路径初始横向偏差减小 7.37 cm,上升时间减小 2.3 s,说明有规划出倒退路径的模型可有效补偿转弯时土壤滑移引起拖拉机没有上线就进行下一行作业产生的横向偏差,减少了初始横向偏差和上升时间。

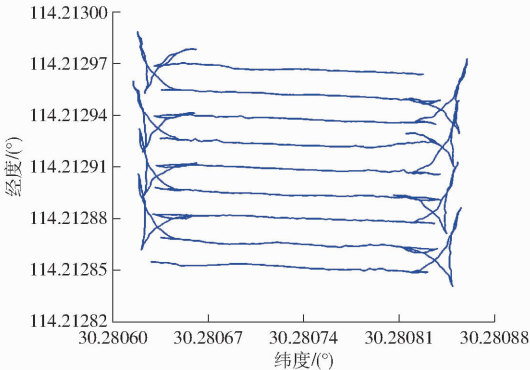
4.3 无人播种作业试验

为了对油菜无人播种作业系统对行精度和性能进行评估,于 2021 年 10 月 5 日在湖北省鄂州市华中农业大学油菜试验基地进行试验。采用五点采样法进行田间土壤条件测试,测得田间土壤含水率为 24.3%,土壤坚实度为 651.6 kPa。油菜播种无人作业系统在地图上选定田块,根据油菜播种农艺要求自动规划作业路径,规划播种路径为 9 行,作业幅宽为 2.3 m,北斗移动站接收位置信息频率为 10 Hz,油菜无人播种系统可实现一键启动完成无人播种作业,无人作业现场和导航路径轨迹如图 12 所示,各行直线跟踪结果如表 4 所示。

对行精度为作业轨迹间平均偏差^[28],油菜无人播种作业系统按照控制策略完成两段相邻作业轨迹跟踪,在这两段作业轨迹的稳态跟踪阶段,等间距地提取 10 对左侧边界点,边界点之间的距离应等于幅宽设定距离,用卷尺测量对应边界点之间的距离,减去设定的作业幅宽,得到 10 个作业点与作业行距之



(a) 无人作业现场



(b) 无人作业轨迹

图 12 自动驾驶作业试验

Fig. 12 Experiment of unmanned operation

表 4 田间各行直线跟踪结果
Tab. 4 Line tracking results

行号	试验平均速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向 偏差/cm	平均绝对 偏差/cm	标准差/ cm
1	1.35	5.54	1.31	1.71
2	1.26	6.31	1.73	2.12
3	1.42	7.69	1.54	2.73
4	1.12	4.63	1.11	3.12
5	1.30	5.93	1.44	2.43
6	1.27	5.42	1.35	3.27
7	1.33	4.34	1.55	2.96
8	1.37	6.82	1.56	2.64
9	1.29	7.94	1.84	3.21

间的偏差,求取 10 个偏差的平均值作为作业轨迹间平均偏差,测量计算求得直播机无人作业对行精度为 1.48 cm,标准差为 2.41 cm。

5 结论

(1) 为实现油菜无人播种作业,针对 CaseTM1404 型拖拉机和 2BFQ-8 型油菜精量直播机构建了一套油菜无人播种作业系统,试验表明搭建的油菜无人播种系统在选取田块边界后,生成作业路径,能按照规划路径完成直线行驶、田头调头,实现一键启动直播机无人播种作业。

(2) 根据油菜直播机组无人播种作业特点与机具特性,定量分析了 3 种鱼尾调头方式的路径几何关系,提出一种两退三切鱼尾调头方法,以田头未作业区域面积最少和对行精度最优为目标,得到路径生成算法。根据无人播种作业系统的几何模型和运动学模型设计了改进的模糊自适应纯追踪控制器,依据该控制器结合油菜播种农艺特点构建了无人作业控制策略。

(3) 针对该系统进行了 3 种鱼尾调头模型产生的未作业区域面积仿真试验,仿真结果表明:两退三切鱼尾调头模型相对于传统鱼尾调头模型田头未作业区域面积减少 14.62%~22.43%。田间试验结果表明:两退三切鱼尾调头方法较传统鱼尾调头方法初始横向偏差减小 7.37~8.08 cm,上升时间减少 1.3~2.3 s,该调头方法有效补偿转弯时土壤滑移引起拖拉机没有上线就进行下一行作业产生的横向偏差,且无人播种作业对行精度为 1.48 cm。

参 考 文 献

[1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)

[2] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021,40(2):24-44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24-44. (in Chinese)

[3] LOWENNERG-DEBOER J, HUANG I Y, GRIGORIADIS V, et al. Economics of robots and automation in field crop production [J]. Precision Agriculture, 2020, 21(2): 278-299.

[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 Yuhan, 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)

[5] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报,2019,35(7):12-20.
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12-20. (in Chinese)

[6] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6):8-17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm

- in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8–17. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 张闻宇,丁幼春,王雪玲,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, WANG Xueling, 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)
- [9] SABELHAUS D, FRANK R, LARS P M Z H, et al. Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(4): 399–409.
- [10] BACKMAN J, PIIRAINEN P, OKSANEN T. Smooth turning path generation for agricultural vehicles in headlands[J]. Biosystems Engineering, 2015, 139: 76–86.
- [11] HIROKI K, MICHIIHISA L, WONJAE C, et al. Rice autonomous harvesting: operation framework[J]. Journal of Field Robotics, 2017,34(6): 1084–1099.
- [12] YIN Xiang, DU Juan, GENG Duanyang, et al. Development of an automatically guided rice transplanter using RTK–GNSS and IMU[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018,51(17):374–378.
- [13] 何杰,朱金光,张智刚,等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):17–24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):17–24. (in Chinese)
- [14] 翟志强,王秀倩,王亮,等. 面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):542–547.
ZHAI Zhiqiang, WANG Xiuqian, WANG Liang, et al. Path planning for autonomous agricultural machinery of master-slave cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):542–547. (in Chinese)
- [15] 吴才聪,王东旭,陈智博,等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. 农业工程学报,2020,36(18):42–48.
WU Caicong, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18):42–48. (in Chinese)
- [16] 张闻宇,丁幼春,李兆东,等. 基于双切圆寻线模型的农机导航控制方法[J]. 农业机械学报,2016,47(10):1–10.
ZHANG Wenyu. DING Youchun, LI Zhaodong, et al. Dual circle tangential line-tracking model based tractor navigation control method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10):1–10. (in Chinese)
- [17] 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 CSAE,2018,34(1):15–21. (in Chinese)
- [18] YIN Xian, DU Juan, NOGUCHI N, et al. Development of autonomous navigation system for rice transplanter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 89–94.
- [19] 李革,王宇,郭刘粉,等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J]. 农业机械学报,2018,49(5):21–26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):21–26. (in Chinese)
- [20] CARIOU C, LENAIN R, THUÏLOT B, et al. Motion planner and lateral-longitudinal controllers for autonomous maneuvers of a farm vehicle in headland[C]// 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009: 5782–5787.
- [21] CARIOU C, LENAIN R, BERDUCAT M, et al. Autonomous maneuver of a farm vehicle with a trailed implement: motion planner and lateral-longitudinal controllers[C]// 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010: 3819–3824.
- [22] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):105–114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):105–114. (in Chinese)
- [23] 廖宜涛,舒彩霞,廖庆喜,等. 油菜精量直播机气力式排种系统稳压控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(15): 49–56.
LIAO Yitao, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Air pressure stabilizing method and experiment of pneumatic seed-metering system of precision rapeseed planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(15):49–56. (in Chinese)
- [24] 吴迪军. UTM 投影地区工程独立坐标系的建立方法[J]. 测绘工程,2020,29(4):7–10,14.
WU Dijun. Establishment of engineering independent coordinate system in countries and regions using UTM projection[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2020, 29(4): 7–10, 14. (in Chinese)
- [25] 张小燕,朱朦,董本志. 三次 NURBS 空间曲线的投影等距偏置算法[J]. 林业和草原机械,2016,27(2):29–32.
ZHANG Xiaoyan, ZHU Meng, DONG Benzhi. Offset algorithm of a third-order NURBS curve based on projection[J]. Forestry

and Grassland Machinery, 2016, 27(2): 29 – 32. (in Chinese)

[26] 张华强,王国栋,吕云飞,等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(9):18 – 25.
ZHANG Huaqiang, WANG Guodong, LÜ Yunfei, et al. Agricultural machinery automatic navigation control system based on improved pure tracking model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):18 – 25. (in Chinese)

[27] 刘立超,张青松,肖文立,等. 油菜机械直播作业厢面地表粗糙度测量与分析[J]. 农业工程学报,2019,35(12):38 – 47.
LIU Lichao, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Measurement and analysis of surface roughness of rapeseed mechanized direct seeding operation[J]. Transactions of the CSAE ,2019,35(12):38 – 47. (in Chinese)

[28] 赵祚喜,罗阳帆,马昆鹏,等. 基于全站仪的插秧机卫星导航作业精度检验方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 50 – 56.
ZHAO Zuoxi,LUO Yangfan,MA Kunpeng, et al. Navigation operating accuracy testing method of rice transplanter based on total station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):50 – 56. (in Chinese)

(上接第 53 页)

[17] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(13):23 – 34.
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(13): 23 – 34. (in Chinese)

[18] 李俊伟,胡斌,罗昕,等. 型孔式棉花精量穴播器滚落清种过程的理论分析与仿真[J]. 中国机械工程,2011, 22(19): 2344 – 2348.
LI Junwei, HU Bin, LUO Xin, et al. Theoretical analysis and simulation in rolling seed clearing process of hole-type cotton accurate device[J]. China Mechanical Engineering,2011,22(19): 2344 – 2348. (in Chinese)

[19] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7):29 – 39.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7): 29 – 39. (in Chinese)

[20] XING H, WANG Z, LUO X, et al. Design of an active seed throwing and cleaning unit for pneumatic rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11(2): 62 – 69.

[21] 王金武,唐汉,关睿,等. 动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):48 – 57.
WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12): 48 – 57. (in Chinese)

[22] XUE P, HAO Y, JIAO W, et al. Design and test of a double-curved guiding groove for a high-speed precision seed-metering device[J]. Transactions of the ASABE, 2020,63(5): 1349 – 1360.

[23] 侯守印,邹震,魏志鹏,等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(10):77 – 86,108.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10): 77 – 86,108. (in Chinese)

[24] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验研究[J]. 农业工程学报,2019,35(23):9 – 20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9 – 20. (in Chinese)

[25] 高筱钧,徐杨,杨丽,等. 基于 DEM – CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(增刊):92 – 100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of Venturi feeding tube based on DEM – CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.): 92 – 100. (in Chinese)

[26] XU T, YU J, YU Y, et al. A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method [J]. Advanced Powder Technology,2018,29(12): 3274 – 3290.