

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.014

基于模糊PID的栽植直立度控制系统研究

金鑫¹ 李青¹ 李明勇¹ 陈爽¹ 李侦祥² 侯丙恒¹

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 苏州久富农业机械有限公司, 苏州 215200)

摘要: 针对钵苗机械化移栽过程由于机器与土壤相对运动稳定性差造成的株距不均匀、直立度控制难等问题,本文以多连杆栽植机构为对象,提出了适用于不同株距的零速移栽方法,设计了基于模糊PID的蔬菜移栽机直立度控制系统。建立栽植机构运动学模型、分析水平补偿机构与行驶速度的运动关系,构建直立度控制系统模型,实现对水平速度补偿电机自适应调节,从而控制整个栽植机构水平移动。对栽植器水平速度进行实时补偿,使栽植器末端点水平速度与移栽机前进速度合速度为零,达到了优化栽植轨迹的目的。在Matlab/Simulink中搭建控制系统仿真模型进行效果验证,仿真结果表明,使用模糊PID优化的控制系统响应更快,精度更高、鲁棒性较好,响应时间为0.012 s,超调量为4.737%。在Matlab中使用控制规则优化栽植轨迹,控制系统工作后,在不同株距条件下栽植器末端点入土轨迹得到优化,鸭嘴栽植器进入土壤后的轨迹较为垂直,土壤内水平位移减小到12 mm以下,有利于种苗被零速栽入土壤中。当栽植频率为48株/min、栽植株距为200~700 mm时进行种苗移栽试验。试验结果表明,对比常规组,控制组中种苗直立度受株距和行进速度的影响明显降低,随着土槽速度增加,大多数种苗直立度为75°~90°,控制组平均直立度合格率为95.50%,平均直立度优良率达91.25%,优良率相对于常规组提升23.85%,满足不同株距条件对种苗栽植直立度的控制要求。

关键词: 蔬菜移栽机; 栽植机构; 栽植轨迹; 种苗直立度; 模糊PID

中图分类号: S232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)14-0151-11 **OSID:** 

Planting Verticality Control System Based on Fuzzy PID

Jin Xin¹ Li Qing¹ Li Mingyong¹ Chen Shuang¹ Li Zhenxiang¹ Hou Bingheng¹

(1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. Suzhou Jiufu Agricultural Machinery Co., Ltd., Suzhou 215200, China)

Abstract: Aiming at the problems of uneven plant spacing and difficulty in controlling the uprightness due to poor relative motion stability between the machine and the soil during the mechanized transplanting of seedlings, taking the multi-link planting mechanism as the object, a zero-speed transplanting method suitable for different plant spacing was proposed, and a vegetable transplanter uprightness control system was designed based on fuzzy PID. Firstly, the kinematic model of the planting mechanism was established, the motion relationship between the horizontal compensation mechanism and the driving speed was analyzed, and the uprightness control system model was constructed to realize the adaptive adjustment of the horizontal speed compensation motor, thereby controlling the horizontal movement of the entire planting mechanism. The horizontal speed of the planter was compensated in real time so that the sum of the horizontal speed of the planter end point and the forward speed of the transplanter was zero, thus achieving the purpose of optimizing the planting trajectory. Secondly, a control system simulation model was built in Matlab/Simulink to verify the effect. The system simulation experiment showed that the control system optimized using fuzzy PID had faster response, higher accuracy and better robustness. The response time was 0.012 s and the overshoot was 4.737%. Then, control rules were used in Matlab software to optimize the planting trajectory. After the control system was working, the trajectory of the planter end point entering the soil under different plant spacing conditions was optimized. The trajectory

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-05-06
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001205)、河南省高校科技创新团队项目(23IRTSTHN015)和河南省科技攻关项目(242102110346)
作者简介: 金鑫(1986—),男,教授,博士,主要从事种苗高速栽插装备与农机状态检测技术研究,E-mail: jx.771@163.com
通信作者: 李明勇(1993—),男,副教授,博士,主要从事蔬菜智能化种植技术装备研究,E-mail: mingyonglee@163.com

of the duckbill planter after entering the soil was more vertical, and the horizontal displacement in the soil was reduced to less than 12 mm, which was conducive to the seedlings being planted into the soil at zero speed. Finally, the seedling transplanting comparison experiment was designed under the conditions of the planting frequency of 48 plants/minute and the planting spacing between 200 mm and 700 mm. Compared with the conventional group, the uprightness of the seedlings in the control group was significantly less affected by the plant spacing and travel speed. With the increase of the soil trough speed, the uprightness of most seedlings was in the range of 75° ~ 90°. The average uprightness qualified rate of the control group was 95.50%, and the average uprightness excellent rate was 91.25%, which was 23.85% higher than that of the conventional group, meeting the control requirements for the uprightness of seedlings under different plant spacing conditions.

Key words: vegetable transplanter; planting mechanism; planting trajectory; seedling uprightness; fuzzy PID

0 引言

目前,育苗移栽的种植方式已成为蔬菜生产的重要手段^[1]。机械化移栽不仅能够提升蔬菜移栽效率和质量,还能增加蔬菜产量、促进农户收益增加^[2-3]。现有栽植机构种类繁多,主要有多连杆式、行星轮式、吊杯式等^[4-5]。多连杆鸭嘴式栽植机构自由度高,能够通过连杆复合运动实现丰富的栽植轨迹,满足蔬菜栽培农业要求,适用于辣椒、番茄、茄子等种苗的移栽^[6-7]。

由于不同种类作物种植株距存在差异,栽植机构连杆参数固定,因此在移栽株距变化时,栽植机构原本设计的“零速移栽段”会失效,降低栽植机构作业效果^[8-9]。有研究者针对不同作物移栽需求,通过改进多连杆结构参数,设计专用栽植器^[10-12]。尹文庆等^[13]提出一种八连杆栽植机构,当株距为 300 ~ 430 mm 时,栽植合格率达 96%,栽植频率为 35 ~ 40 株/min。Iqbal 等^[14]设计了辣椒移栽机齿轮驱动摆动机构,当前进速度为 300 mm/s、株距为 150 mm 时,作业种苗直立度较高,接近 90°。Ankit 等^[15]设计了一种五连杆栽植机构,用于番茄和茄子种苗移栽,当株距为 450 mm 时,直立度平均值超过 89%。以上研究仅在设定的株距附近取得较好效果,而不同作物栽植株距不同,即使同种作物在不同种植地区栽植株距也不同,随着与设计株距的差距变大,栽植器对土壤、种苗扰动作用会增大,栽植器容易拖苗、带苗,使栽植效果变差^[16-18]。因此以上栽植机构仅能栽植特定株距的作物,造成栽植机构适应性较差,使用成本较高。

本文提出适用于不同株距下零速移栽方法,设计基于模糊 PID 的蔬菜移栽机直立度控制系统。通过对栽植器水平速度补偿,以实现不同株距下零速移栽,减小栽植器对土壤的扰动作用,以提高种苗移栽直立度。

1 系统结构与原理

1.1 不同株距下直立度控制原理

蔬菜移栽机直立度控制系统主要功能是使多连杆栽植机构能够适应不同栽植株距的作业需求。栽植机构在完成设计后,静态轨迹固定不变,动态栽植作业轨迹由栽植频率与移栽机前进速度共同决定^[19-20]。根据移栽机栽植轨迹要求,引入特征参数 λ ^[21],计算式为

$$\lambda = \frac{r\omega}{v}$$

式 中

- r ——栽植器旋转半径,mm
- ω ——栽植器旋转角速度,rad/s
- v ——移栽机前进速度,mm/s

根据特征参数,栽植轨迹大致可分为 3 类,如图 1 所示^[22]。根据种苗移植要求,栽植器在入土过程水平位移尽可能小。栽植器对土壤扰动小,形成的穴口小,才能使种苗被“零速”栽入土壤,保证移栽质量^[23-24]。当 λ 为 1 时栽植效果最好。

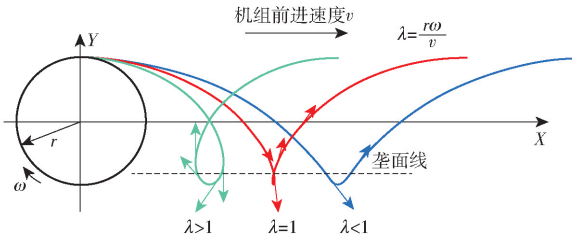


图 1 不同参数下栽植轨迹示意图
Fig. 1 Schematic of planting trajectory under different parameters

栽植株距受移栽机前进速度与栽植频率共同影响,前进速度与栽植频率比值不同,则移栽株距不同^[25]。将多连杆栽植机构栽植频率固定为 48 株/min,通过调整移栽机前进速度改变栽植株距,栽植器末端点作业轨迹如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着株距增大,栽植机构作业轨迹由余摆线向短摆线变化。当栽植株距为 300 ~ 400 mm 时,栽植轨迹形成

的环扣较小,形成的穴孔较小,有利于种苗被零速栽入土壤。当栽植株距小于 300 mm 时,栽植轨迹形成的环扣较大,穴孔过大,种苗移植后易倒伏、倾斜。当栽植株距大于 400 mm 时,栽植轨迹没有环扣,栽植末端点水平速度始终与前进方向一致,种苗容易向前倾斜。所以一种多连杆栽植机构无法适应多种株距的栽植需求。由于不同品种作物对株距要求不同,为了使栽植机构适应不同株距的移栽要求,提高多连杆栽植机构利用率,本文提出适用于不同株距的零速移栽方法,原理如图 3 所示。

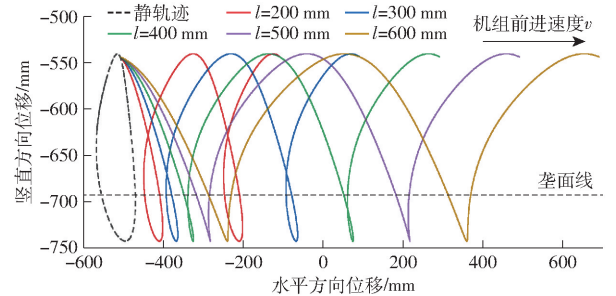


图 2 栽植轨迹随着株距变化示意图

Fig. 2 Schematic of planting trajectory changing with plant spacing

种苗移栽作业轨迹如图 3c、3d 所示,点 a 为栽植器接苗点,点 b 为栽植器鸭嘴入土点,点 c 为栽植器鸭嘴出土点。对栽植直立度控制主要发生在 $b \sim c$ 阶段,工作原理如图 3b 所示,在栽植器鸭嘴入土过程,通过给栽植机构整体 1 个水平速度,使栽植器

末端点水平速度与移栽机前进速度合速度为零,使栽植器在任意株距下都能实现零速移栽,以减小移栽损伤,提升移栽效果。

1.2 系统结构与工作原理

提出的直立度控制系统整体结构如图 4a 所示,主要包括多连杆栽植机构、土槽、机架、显示终端、控制箱、位置传感器、栽深调节模块、水平速度补偿模块等。其中,由水平速度补偿模块结合多连杆栽植机构实现不同株距条件下种苗零速移栽。

试验平台工作原理如图 4b 所示,通过移动土槽实现栽植机构与土壤相对运动,用于模拟移栽机前进。在移栽作业时,将移栽机目标频率与目标株距输入到控制系统,点击开始按钮系统开始工作。首先栽深检测模块测量栽植机构与垄面的距离,将栽植机构调整到指定高度。同时通过位置传感器对栽植机构进行重新定位,使栽植机构处于零位。然后土槽按照目标参数速度移动。栽植器在最高点完成接苗后继续运动,同时控制系统根据栽植器运动学模型解算出栽植器末端点水平速度,并与土槽移动速度进行合成,求出栽植末端点相对于土槽的实际水平分速度。在栽植器末端点到达土壤平面时,横移电机转动带动栽植机构水平移动对栽植机构的水平速度进行补偿,使栽植器末端点在前进方向上与土槽相对速度为零,实现不同速度下的零速移栽。在栽植器末端点离开土平面时,停止补偿。在栽植器末端点离开土壤后,栽植机构完成在水平方向上

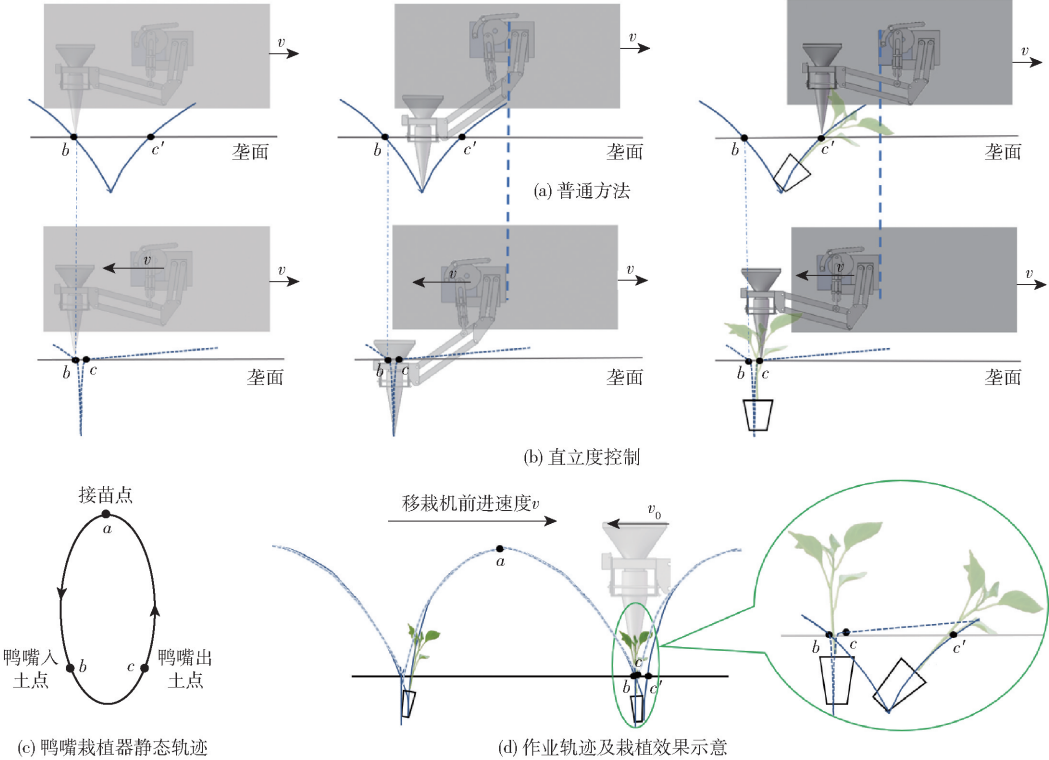


图 3 栽植直立度控制工作原理图

Fig. 3 Working schematics of planting verticality control

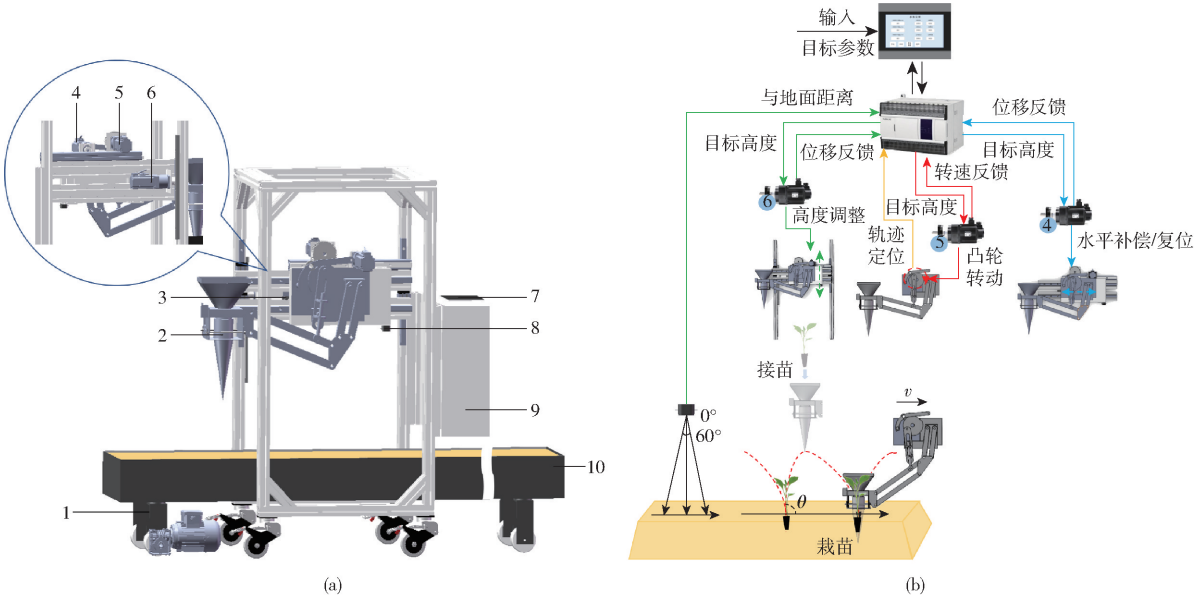


图4 栽植试验台整体结构及工作原理示意图

Fig. 4 Schematics of overall structure and working principle of planting experiment bench

1. 土槽 2. 多连杆栽植机构 3. 位置传感器 4. 横移电机 5. 栽植电机 6. 栽深电机 7. 显示终端 8. 栽深检测模块 9. 控制箱 10. 移动土槽

复位。随后栽植器运动到最高点进行接苗。重复以上步骤,以实现不同株距下种苗零速移栽。由于栽植器水平分速度连续变化,因此对控制系统的动态响应特性提出了较高要求,基于模糊 PID 开发栽植器自适应调整控制算法实现栽植机构精准控制。

2 栽植直立度控制系统设计

2.1 运动学分析

(1)栽植机构运动学

为了保证多连杆栽植机构在不同株距下栽植直立度效果,减小栽植器形成的穴口宽度,结合多连杆栽植机构结构参数,对栽植机构进行运动学分析,构建多连杆栽植机构运动学模型,得到栽植器末端点速度分解方程。栽植机构结构参数如表 1 所示,矢量图如图 5 所示。首先取凸轮中心点 A 为坐标原点,以水平方向为 x 轴,以竖直方向为 y 轴,建立笛卡尔坐标系,构建各点位置方程。其中,逆时针方向为转动正方向。

点 A 位移方程为

$$\begin{cases} x_A = 0 \\ y_A = 0 \end{cases} \tag{2}$$

点 B 位移方程为

$$\begin{cases} x_B = x_A + L_{AB}\cos\theta_1 \\ y_B = y_A + L_{AB}\sin\theta_1 \\ \theta_1 = \omega_0 t \\ \omega_0 = \frac{2\pi n/K}{60} \end{cases} \tag{3}$$

表 1 栽植机构结构参数

Tab. 1 Structural parameters of planting mechanism

参数	含义	参数	含义
L_{AB}	凸轮基圆半径	L_{BD}	导杆 BD 长度
	导杆 BD 与凸轮连接点		导杆 BD 与连杆 GN 连
L_{BC}	B 与定点 C 之间长度	L_{CD}	接点 D 与定点 C 之间长度
L_{EF}	摇杆 EF 长度		刚性连接件上的边 FG
	导杆 BD 与连杆 GN 的	L_{FG}	长度
L_{DG}	连接点 D 与刚性连接件上点 G 之间的长度		导杆 BD 与连杆 GN 的
L_{MN}	导苗筒中心点 M 与连杆 GN 端点 N 之间长度	L_{DN}	连接点 D 与连杆 GN 端点 N 之间长度
L_{ML}	导苗筒长度		导苗筒中心点 M 与鸭嘴末端点 Q 之间长度
L_{GJ}	刚性连接件上的边 GJ 长度	L_{MQ}	
L_{KJ}	连杆 KJ 长度	L_{LQ}	鸭嘴长度
	刚性连接件上的边 FI 的长度	L_{GN}	连杆 GN 长度
θ_2	导杆 BD 角位移	L_{HI}	摇杆 HI 长度
θ_4	边 FG 与边 FI 之间夹角	θ_1	AB 旋转角位移
θ_6	边 MN 与 x 轴正方向夹角	θ_3	连杆 GN 角位移
		θ_5	摇杆 EF 与 x 轴正方向夹角
α	AE 与 x 轴正方向夹角	θ_7	边 MQ 与 x 轴正方向夹角
		β	AC 与 x 轴正方向夹角

式中 ω_0 ——凸轮旋转角速度,rad/s
 t ——凸轮转动时间,s
 n ——栽植电机转速,r/min
 K ——栽植电机配备减速机减速比

点 C 位移方程为

$$\begin{cases} x_C = x_B + L_{BC}\cos\theta_2 \\ y_C = y_B + L_{BC}\sin\theta_2 \end{cases} \tag{4}$$

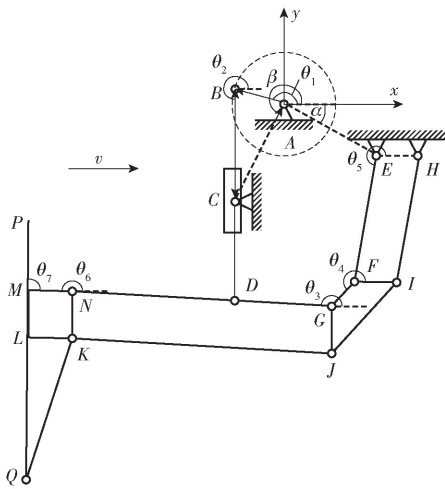


图 5 栽植机构结构矢量图

Fig. 5 Planting mechanism structure vector

根据图 5 可得

$$L_{AB} + L_{BC} = L_{AC} \quad (5)$$

根据式(2)~(5)解出变量 L_{BC} 、 L_{CD} 、 θ_2 为

$$\begin{cases} L_{BC} = \sqrt{L_{AC}^2 + L_{AB}^2 - 2L_{AC}L_{AB}\sin(\beta + \omega t)} \\ L_{CD} = L_{BD} - L_{BC} \\ \theta_2 = \arctan \frac{L_{AC}\sin\beta - L_{AB}\sin(\omega t)}{L_{AC}\cos\beta - L_{AB}\cos(\omega t)} \end{cases} \quad (6)$$

点 F 位移方程为

$$\begin{cases} x_F = x_E + L_{EF}\cos\theta_5 \\ y_F = y_E + L_{EF}\sin\theta_5 \end{cases} \quad (7)$$

点 G 位移方程为

$$\begin{cases} x_G = x_F + L_{FG}\cos\theta_4 \\ y_G = y_F + L_{FG}\sin\theta_4 \end{cases} \quad (8)$$

点 D 位移方程为

$$\begin{cases} x_D = x_G + L_{DG}\cos\theta_3 \\ y_D = y_G + L_{DG}\sin\theta_3 \end{cases} \quad (9)$$

根据图 5 可得

$$L_{AB} + L_{BD} = L_{AE} + L_{EF} + L_{FG} + L_{GD} \quad (10)$$

根据式(7)~(10)解出变量 θ_3 和 θ_5 为

$$\begin{cases} \theta_3 = \arccos \frac{AC \pm B \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2} \\ \theta_5 = \arccos \frac{A - L_{DG}\cos\theta_3}{L_{EF}} \\ A = L_{AB}\cos\theta_1 + L_{BD}\cos\theta_2 - L_{AE}\cos\alpha - L_{FG}\cos\theta_4 \\ B = L_{AB}\sin\theta_1 + L_{BD}\sin\theta_2 - L_{AE}\sin\alpha - L_{FG}\sin\theta_4 \\ C = \frac{A^2 + B^2 + L_{DG}^2 - L_{EF}^2}{2L_{DG}} \end{cases} \quad (11)$$

点 N 位移方程为

$$\begin{cases} x_N = x_D + L_{DN}\cos\theta_3 \\ y_N = y_D + L_{DN}\sin\theta_3 \end{cases} \quad (12)$$

点 M 位移方程为

$$\begin{cases} x_M = x_N + L_{MN}\cos\theta_6 \\ y_M = y_N + L_{MN}\sin\theta_6 \end{cases} \quad (13)$$

根据图 5 可得

$$L_{AQ} = L_{AD} + L_{DN} + L_{MN} + L_{MQ} \quad (14)$$

根据式(14)得到栽植鸭嘴末端点 Q 位移方程为

$$\begin{cases} x_Q = x_D + L_{DN}\cos\theta_3 + L_{MN}\cos\theta_6 + L_{MQ}\cos\theta_7 \\ y_Q = y_D + L_{DN}\sin\theta_3 + L_{MN}\sin\theta_6 + L_{MQ}\sin\theta_7 \end{cases} \quad (15)$$

取点 A 初始位置为坐标原点(记为点 O),以水平方向为 X 轴,以竖直方向为 Y 轴,建立世界坐标系。移栽机前进方向为 X 轴正方向(水平向右)。在世界坐标系中,鸭嘴末端点 Q 运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X_Q = x_Q + vt \\ Y_Q = y_Q \end{cases} \quad (16)$$

对式(16)进行求导,计算出鸭嘴末端点 Q 在水平方向上和竖直方向上的速度 v_X 、 v_Y 为

$$\begin{cases} v_X = d(L_{CD}\cos\theta_2 + L_{DN}\cos\theta_3)/dt + v \\ v_Y = d(L_{CD}\sin\theta_2 + L_{DN}\sin\theta_3)/dt \end{cases} \quad (17)$$

(2) 水平补偿机构与行驶速度运动关系

为了保证移栽种苗直立度要求,横移电机实现转速适应控制,需与栽植器末端点水平速度动态匹配。根据齿轮齿条传动关系和种苗零速移栽原理,建立补偿速度与电机转速、水平速度之间的关系

$$\begin{cases} v_0 = \frac{Kn_0\pi d}{60} \\ v_0 = -v_X \end{cases} \quad (18)$$

式中 v_0 ——水平补偿速度,mm/s

d ——齿轮直径,mm

n_0 ——横移电机转速,r/min

根据栽植机构运动学关系,可得横移补偿时电机转速与行驶速度关系为

$$n_{01} = -\frac{60}{K\pi d} [d(L_{CD}\cos\theta_2 + L_{DN}\cos\theta_3)/dt + v] \quad (19)$$

式中 n_{01} ——补偿时横移电机转速,r/min

根据栽植机构横移补偿速度和位移关系、补偿速度与电机转速,得出复位时电机转速与前进速度关系为

$$n_{02} = -\frac{60}{K\pi d} \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{d(L_{CD}\cos\theta_2 + L_{DN}\cos\theta_3)}{dt} + v \right] dt}{t_2 - t_1} \quad (20)$$

式中 n_{02} ——复位时横移电机转速,r/min

t_1 ——栽植器入土瞬间时间,s

t_2 ——栽植器出土瞬间时间,s

(3) 横移电机转速检测

为了使横移电机能够精确跟随理论转速运转,通过横移电机自带的编码器获取横移实际转速,并以此作为电机调速依据。假设编码器每转输出 N 个脉冲,统计 Δt 时间内检测到的脉冲个数 ΔP ,则实际转速为

$$n_{act} = \frac{\Delta P}{N \Delta t} \tag{21}$$

根据转速反馈值 n_{act} 和目标值 n_0 差值,通过模糊 PID 调整算法计算横移电机驱动器目标控制量,控制电机改变转速,直至横移电机转速反馈值近似目标值。

2.2 栽植直立度控制系统模型

水平速度补偿系统动态特性直接影响种苗直立度效果,通过优化横移电机变速运行的控制过程,降低控制系统响应时间和稳态误差。系统输入为横移电机目标转速,控制器经过计算后将控制信号输送给横移电机,电机运转完成栽植机构水平速度补偿。系统输出为横移电机实际转速,最后反馈到控制器,进行闭环负反馈控制。

为了实现上述过程,同时考虑传统 PID 控制对非线性系统适应性差、控制精度低的问题,采用模糊 PID 控制算法进行优化。控制系统方案框图如图 6 所示。

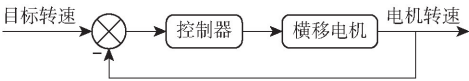


图 6 控制系统方案框图

Fig. 6 Block diagram of control system scheme

根据总体控制方案,建立控制系统数学模型,为控制器设计和仿真提供依据。根据负载及电机特性,伺服电机电压平衡方程、电磁转矩方程和转矩平衡方程为

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} + IR + K_d \omega = U \\ T_e = K_e I \\ J \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + T_L = T_e \end{cases} \tag{22}$$

式中 U ——伺服电机输入电压,V
 I ——伺服电机输入电流,A
 R ——伺服电机电枢电阻, Ω
 K_e ——电流转矩常数
 T_e ——电机输出转矩, $N \cdot m$
 K_d ——伺服电机反电动势系数
 J ——伺服电机转子转动惯量, $kg \cdot m^2$
 B_m ——电机阻尼参数, $N \cdot m \cdot s / rad$
 T_L ——总负载转矩, $N \cdot m$

L ——电枢电感,H

整理式(22)可得

$$s \frac{LJ}{K_d K_e} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{RJ}{K_d K_e} \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega = \frac{1}{K_d} U - \frac{L}{K_d K_e} \frac{dT_L}{dt} - \frac{R}{K_d K_e} T_L \tag{23}$$

式中 K_m ——电压转速常数

经过拉普拉斯变换,可得伺服电机控制系统框图如图 7 所示。代入参数计算,最终得系统传递函数为

$$G(s) = K_v \frac{\omega(s)}{U(s)} \frac{1}{K_r} = \frac{10}{0.04s^2 + 8s + 1} \tag{24}$$

式中 K_v ——放大系数 K_r ——减速比

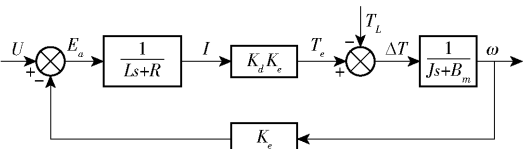


图 7 控制系统框图

Fig. 7 Control system block diagram

通过以上水平补偿控制系统模型求解出系统传递函数,可为后续模糊 PID 控制系统设计提供依据。

2.3 栽植直立度控制器设计

为了使控制系统有更好的鲁棒性,采用双输入三输出的模糊 PID 控制,结构框图如图 8 所示。首先,手动输入目标频率和目标株距,根据栽植机构运动学模型以及横移电机运动关系得到横移电机目标转速,作为初始设定值,通过横移电机自带的编码器得到直立度控制电机实时转速,作为反馈值。模糊控制系统对比目标转速与反馈转速,得到转速偏差 e 和偏差变化量 e_c ,并作为模糊控制器输入量。输入量经过模糊化处理得到输入语言变量 E 和 E_c 。

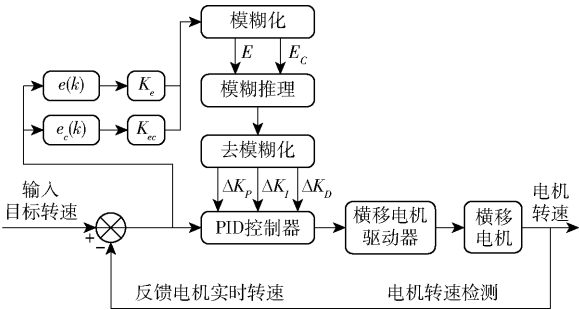


图 8 Fuzzy PID 的结构框图

Fig. 8 Structure block diagram of fuzzy PID

通过模糊控制规则对语言变量 E 和 E_c 进行模糊推理和去模糊化,通过查询模糊控制规则表和获取 3 个输出语言变量 K_p 、 K_i 、 K_d 所对应的隶属度,最终 PID 控制器输出控制参数修正值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,实现 PID 参数的在线自整定,从而使横移装置有良好的动态性能。

控制系统参数自整定公式为

$$\begin{cases} e(t) = n_0(t) - n_{act}(t) \\ e_c(t) = de(t)/dt \\ U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D de(t) dt \\ K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_I = K'_I + \Delta K_I \\ K_D = K'_D + \Delta K_D \end{cases} \quad (25)$$

式中 $U(t)$ ——PID 控制输出
 $\int_0^t e(t) dt$ ——累计偏差
 K_p ——比例系数
 K_I ——积分系数
 K_D ——微分系数
 K'_p, K'_I, K'_D ——PID 控制器初始参数

综上所述,在模糊 PID 控制器执行过程,实时

地监测横移电机的实际转速 $n_{act}(t)$,经模糊推理实时调整 PID 参数后,输出适当控制量调整横移电机转速,实现系统自适应调节,使转速到达控制目标。

3 试验与结果分析

3.1 栽植直立度控制系统仿真试验

为了验证控制算法有效性,利用 Matlab/Simulink 对 PID 和模糊 PID 控制算法进行仿真,仿真模型如图 9 所示。系统仿真过程,选用阶跃信号作为输入,仿真时间为 1 s,仿真结果如图 10 所示。由图 10 可见,传统 PID 控制器超调量较大,使用模糊 PID 优化的控制系统响应时间为 0.012 s,超调量为 4.737%。模糊 PID 通过将控制规则条件和操作模糊化,并整理成集,与专家信息整合后存入计算机,通过智能推理实现控制参数自整定,对非线性输入响应更快,动态调速精度更高、鲁棒性更好。

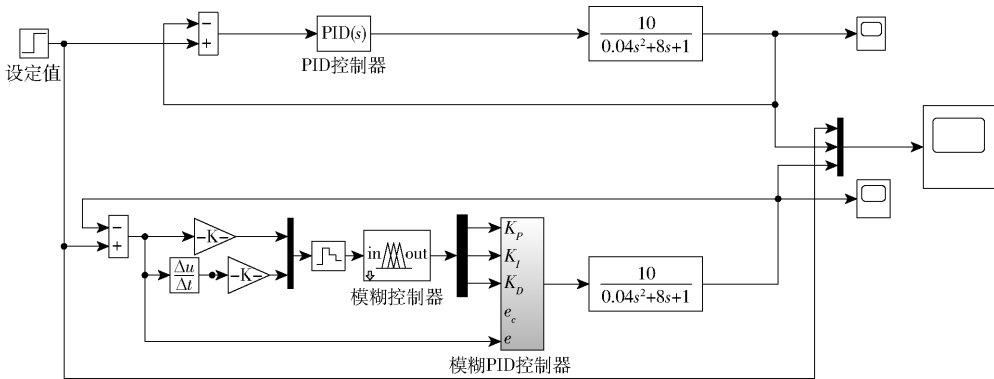


图9 仿真模型

Fig.9 Simulation model

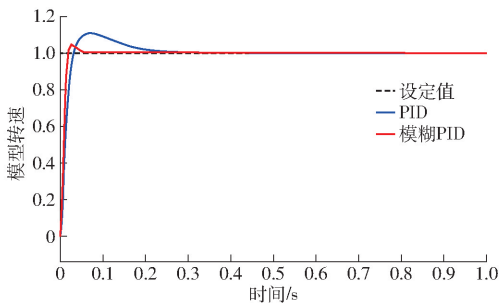


图 10 响应曲线

Fig.10 Response curves

3.2 栽植机构轨迹仿真试验

为了检验本文提出的栽植直立度控制方法的可行性,当栽植频率为 48 株/min、栽植深度为 50 mm、栽植株距分别为 200、300、400、500、600、700 mm 时,利用 Matlab,分别对栽植机构处于控制和未控制状态下栽植器末端点 Q 位移进行仿真,得到点 Q 位移轨迹仿真如图 11 所示。从图 11 可以看出,未控制时,鸭嘴栽植器栽植轨迹随株距变化较大,土壤平面

下轨迹形成的水平位移较大,易造成种苗倾斜或倒伏;控制系统工作后,栽植末端点入土轨迹得到优化,土壤平面下轨迹较为垂直,水平位移较小,有利于种苗被零速栽入土壤中。当株距为 200 mm 时,栽植轨迹如图 11a 所示;未控制轨迹形成的环扣较大,栽植末端点进入土壤后形成的最大水平位移超过 40 mm,这种轨迹栽植过程形成的穴口较大,不利于鸭嘴打穴,对栽植种苗直立度的影响较大;控制后轨迹更加垂直,栽植末端点进入土壤后形成的最大水平位移均减小到 12 mm 以下,有利于鸭嘴将种苗零速载入土壤。当株距为 300、400 mm 时,栽植轨迹如图 11b、11c 所示。未控制栽植轨迹形成的环扣较小,但栽植末端点进入土壤后形成的最大水平位移仍然很大,处于 24 ~ 30 mm 范围,控制后栽植器末端点进入土壤后形成的最大水平位移减小到 10 ~ 12 mm,种苗能够零速落入土壤。

当株距为 500、600、700 mm 时,栽植轨迹如图 11d ~ 11f 所示;未控制轨迹为余摆线,没有环扣,

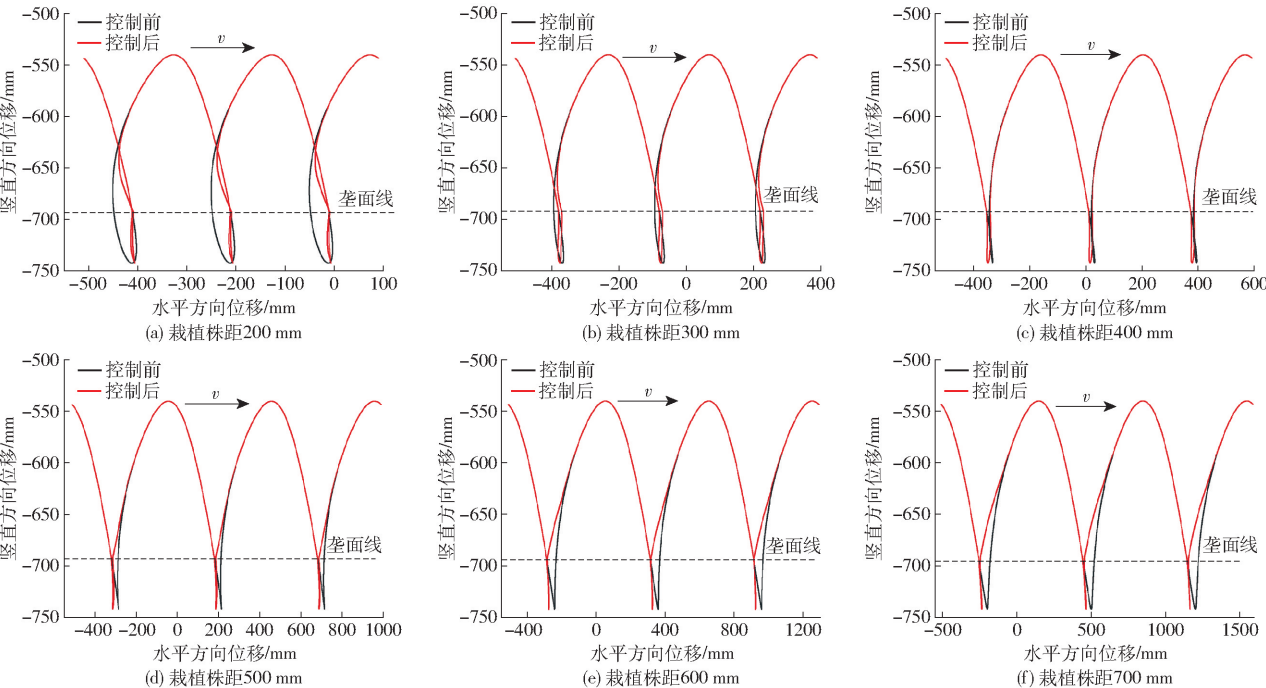


图 11 不同株距栽植轨迹仿真曲线

Fig. 11 Simulation curves of planting trajectory with different plant spacings

栽植末端点进入壤后形成的最大水平位移均超过 35 mm,这种轨迹栽植过程形成的穴口不利于种苗直立,种苗会随移栽机前进以及栽植器运作而向前倾倒;控制后轨迹较为理想,栽植末端点进入土壤后形成的最大水平位移减小到 9 mm 以下,栽植器进入土壤后垂直运动,不会对种苗直立度造成较大影响。

3.3 种苗移栽试验

3.3.1 试验条件与评价指标

为了验证本文提出的直立度控制系统控制效果,在河南科技大学西苑校区北区 10 号楼(34°66'N, 112°37'E)进行种苗移栽试验,如图 12 所示。移栽试验选用便携式移动土槽进行重复移植试验,土槽内填充黄土,试验时土槽移动。根据 GB/Z 26583—2011《辣椒生产技术规范》,对土壤进行翻土,以维持土壤结构,保证土面平整、无大土块。试验对象为萧新一号薄皮辣椒苗,72 穴/盘,苗龄 35 d,平均苗高 170 mm。

种苗移栽试验时,栽植频率设为 48 株/min,栽植深度设为 50 mm,栽植株距为 200、300、400、500、600、700 mm,土槽按照每种株距对应的速度行驶。分别设计常规组和对照组移栽试验各 6 组,1 组 80 株种苗,每组连续进行多次试验。试验使用数显角度尺测量辣椒幼苗主茎和土面之间角度,如图 13 所示。最后统计每组试验直立度合格和优良的株数,直立度合格率 Q_x 和优良率 Q_y 计算式为



图 12 试验装置

Fig. 12 Experimental device

$$\begin{cases} Q_x = \frac{N_x}{N_s} \times 100\% \\ Q_y = \frac{N_y}{N_s} \times 100\% \end{cases} \quad (26)$$

式中 N_x ——人工测量得到的直立度合格株数
 N_y ——人工测量得到的直立度优良株数
 N_s ——每组种苗总株数

根据 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》及辣椒幼苗移栽的农艺要求,提出一种评价标准,在前进方向上,种苗茎秆与地面之间夹角为 75°~90°(若夹角大于 90°,则取其补角),判定种苗直立度为优良;种苗茎秆与地面之间夹角为 30°~75°,判定种苗直立度为合格。

3.3.2 试验结果与分析

种苗移栽试验结果如表 2 所示,在 6 组常规组试验中,当株距为 300、400 mm 时,种苗移栽直立度效果较好,但随着株距增加,土槽移动速度也随之增



图 13 种苗直立度测量

Fig. 13 Seedling uprightness measurement

加, 种苗直立度效果会随土槽速度增加而降低。当株距大于 500 mm 后, 土槽速度过快, 种苗受栽植器运动的影响较大, 导致优良株数减少。

在 6 组控制组试验中, 土槽行进速度对栽植优良率的影响明显降低, 随着土槽速度增加, 栽植器进入土壤后带动种苗运动幅度变小, 大多数种苗直立度为 75°~90°。6 组控制组试验平均直立度合格率为 95.50%, 平均直立度优良率达 91.25%, 优良率相对于常规组提升 23.85%, 满足对种苗直立度控制要求。

4 结论

(1) 设计了移栽作业平台, 提出了适用于不同株距下的零速移栽方法, 设计了基于模糊 PID 的蔬

表 2 试验结果

Tab. 2 Experimental result

试验组	试验	栽植株	种苗数	合格株	优良株	合格	优良
	组号	距/mm	量/株	数/株	数/株	率/%	率/%
常规组	1	200	80	71	67	88.75	83.75
	2	300	80	74	70	92.50	87.50
	3	400	80	75	72	93.75	90.00
	4	500	80	69	60	86.25	75.00
	5	600	80	65	54	81.25	67.50
	6	700	80	59	47	73.75	58.75
平均值						86.04	77.08
控制组	7	200	80	78	76	97.50	95.00
	8	300	80	77	74	96.25	92.50
	9	400	80	77	73	96.25	91.25
	10	500	80	75	71	93.75	88.75
	11	600	80	75	71	93.75	88.75
	12	700	80	74	69	92.50	86.25
平均值						95.50	91.25

菜移栽机直立度控制系统。通过对栽植器水平速度补偿, 实现了任意株距下的零速移栽, 减小了栽植的穴口尺寸, 提升了栽植效果。首先建立栽植机构的运动学模型、分析水平补偿机构与行驶速度的运动关系, 构建直立度控制系统模型, 实现横移电机转速自适应调节, 从而控制整个栽植机构水平移动, 对栽植器水平速度进行实时补偿, 使栽植器末端点水平速度与移栽机前进速度的合速度为零, 实现不同株距下栽植轨迹控制, 保证了种苗移栽直立度。

(2) 在 Matlab/Simulink 中搭建控制系统仿真模型进行效果验证, 系统仿真试验结果表明, 使用模糊 PID 优化的控制系统响应更快, 精度更高、鲁棒性较好, 响应时间为 0.012 s, 超调量为 4.737%。在 Matlab 软件中使用控制规则优化栽植轨迹, 控制系统工作后, 栽植末端点在不同株距条件下入土轨迹得到优化, 鸭嘴进入土壤的轨迹较为垂直, 水平位移减至 12 mm 以下, 有利于种苗被零速栽入土壤中。

(3) 当栽植频率为 48 株/min、栽植株距为 200~700 mm 时, 种苗移栽对比试验结果表明: 对比常规试验组, 控制试验组中的种苗直立度受株距和行进速度的影响明显降低, 随着土槽速度增加, 大多数种苗直立度为 75°~90°, 控制试验组平均直立度合格率为 95.50%, 平均直立度优良率达 91.25%, 优良率相对于常规组提升 23.85%, 满足不同株距条件对种苗栽植直立度控制要求。

参 考 文 献

[1] Jin Xin, Zhao Kaixuan, Ji Jiangtao, et al. Design and experiment of automatic transplanting device for potted tomato seedlings [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(3): 1045–1054.

- [2] Jin Xin, Yuan Yanwei, Ji Jiangtao, et al. Design and implementation of anti-leakage planting system for transplanting machine based on fuzzy information[J]. *Computers Electronics in Agriculture*, 2020, 169: 105204.
- [3] 毛灿, 罗海峰, 朱毅, 等. 钵苗移栽机械研究现状与发展趋势[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(1): 215–222.
Mao Can, Luo Haifeng, Zhu Yi, et al. Research status and development trend of seedling transplanting machinery[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 215–222. (in Chinese)
- [4] 肖名涛, 肖仕雄, 陈斌, 等. 油菜钵苗开沟槽水平推苗栽植机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 56–63, 71.
Xiao Mingtao, Xiao Shixiong, Chen Bin, et al. Design and experiment of horizontal push seedling transplanting mechanism for rapeseed seedling opening groove[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 56–63, 71. (in Chinese)
- [5] 王磊, 吴启帅, 俞高红, 等. 小株距非圆齿轮行星轮系植苗机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(11): 294–305.
Wang Lei, Wu Qishuai, Yu Gaohong, et al. Design and experiment of small plant-spacing non-circular planetary gear train planting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(11): 294–305. (in Chinese)
- [6] Jin S J, Frank G O, Jae M J, et al. A study on improving the performance of the planting device of a vegetable transplanter[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2018, 43(3): 202–210.
- [7] 颜华, 刘冲, 李鹏斌, 等. 蔬菜移栽机栽植静轨迹可调式鸭嘴栽植装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 71–81.
Yan Hua, Liu Chong, Li Pengbin, et al. Design and experiment of duckbill planting device with adjustable static trajectory for planting vegetable transplanters[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 71–81. (in Chinese)
- [8] 吴国环, 俞高红, 周海丽, 等. 三臂回转式水稻钵苗移栽机构反求设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 84–91.
Wu Guohuan, Yu Gaohong, Zhou Haili, et al. Reverse design and tests of three-arms rotary rice seedling transplanting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 84–91. (in Chinese)
- [9] Wen Yongshuang, Zhang Junxiong, Tian Jinyuan, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. *Computers Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106017.
- [10] Nandede B M, Ranjeet K, Padhee D. Evaluation of multistage automatic vegetable transplanter (MAVT) for pot seedlings of tomato[J]. *BIOINFOLET-A Quarterly Journal of Life Sciences*, 2013, 10(1b): 193–195.
- [11] Ye Bingliang, Zeng Gongjun, Deng Bin, et al. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter[J]. *International Journal of Agricultural Biological Engineering*, 2020, 13(3): 70–78.
- [12] 俞高红, 李成虎, 汪应萍, 等. 小株距高密度蔬菜植苗机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 96–105, 38.
Yu Gaohong, Li Chenghu, Wang Yingping, et al. Design and experiment of transplanting mechanism for high density vegetables with small plant spacing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 96–105, 38. (in Chinese)
- [13] 尹文庆, 刘海马, 胡飞, 等. 旱地栽植机八连杆栽植机构优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 51–60.
Yin Wenqing, Liu Haima, Hu Fei, et al. Optmization design and experiment on eight-linkage planting mechanism of dryland transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 51–60. (in Chinese)
- [14] Iqbal M I, Md N I, Milon C, et al. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kW walking-type automatic pepper transplanter[J]. *Machines*, 2021, 9(1): 6.
- [15] Ankit S, Sanjay K. Design and development of a vegetable plug seedling transplanting mechanism for a semi-automatic transplanter[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 326: 112773.
- [16] Markumningsih S, Seok-Joon Hwang, Ju-Seok N. Experimental safety analysis for transplanting device of the 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter[J]. *Agronomy*, 2022, 12(8): 1890.
- [17] 金永旺, 胡建平, 吕俊鹏, 等. 蔬菜自动移栽机多叶片式鸭嘴栽植机构设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(增刊1): 217–229.
Jin Yongwang, Hu Jianping, Lü Junpeng, et al. Design and experiment of multi-blade duck bill planting mechanism for automatic vegetable transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(S1): 217–229. (in Chinese)
- [18] 周海丽, 杨伟, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机开沟式多杆植苗机构优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3): 79–86.
Zhou Haili, Yang Wei, Yu Gaohong, et al. Optimization design and experiments of ditching multi-barseedling planting mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 79–86. (in Chinese)
- [19] 李慧霜, 马月虹, 曹新伟. 手扶式移栽机栽植机构优化设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(11): 24–31.
Li Huishuang, Ma Yuehong, Cao Xinwei. Optimization design and test of the planting mechanism of the hand-held transplanting machine[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(11): 24–31. (in Chinese)
- [20] 俞高红, 王磊, 孙良, 等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 1–20.

- Yu Gaohong, Wang Lei, Sun Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1–20. (in Chinese)
- [21] 秦贵, 封俊, 宋卫堂, 等. 移栽机的吊杯运动分析与设计准则[J]. 农业机械学报, 2002, 33(5): 48–50.
- Qin Gui, Feng Jun, Song Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of the dibble-type transplanters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 48–50. (in Chinese)
- [22] Kendall S L, Holmes H, White C A, et al. Quantifying lodging-induced yield losses in oilseed rape [J]. Field Crops Research, 2017, 211: 106–113.
- [23] 李鹏斌, 颜华, 王品隆, 等. 移栽机小株距栽植机构杆件优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 72–78.
- Li Pengbin, Yan Hua, Wang Pinlong, et al. Optimization and test of small plant spacing planting mechanism rod for transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 72–78. (in Chinese)
- [24] 尹大庆, 张诺一, 周脉乐, 等. 高速变姿态接苗鸭嘴式栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 65–72.
- Yin Daqing, Zhang Nuoyi, Zhou Maile, et al. Optimal design and experiment of high speed duckbill planting mechanism with variable catch-seedling attitude [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 65–72. (in Chinese)
- [25] 王永维, 何焯亮, 王俊, 等. 旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 19–25.
- Wang Yongwei, He Chaoliang, Wang Jun, et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable potseedling transplanter for dry land [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 19–25. (in Chinese)

(上接第48页)

- [12] Liu W, Lu H, Fu H, et al. Learning to upsample by learning to sample [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023: 6027–6037.
- [13] Tong Z, Chen Y, Xu Z, et al. Wise-IoU: bounding box regression loss with dynamic focusing mechanism [PP/OL]. V3. arXiv(2023-04-08) [2025-05-01]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10051>.
- [14] Lee J, Park S, Mo S, et al. Layer-adaptive sparsity for the magnitude-based pruning [PP/OL]. V2. arXiv (2021-05-09) [2025-05-01]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.07611>.
- [15] Han Q, Fan Z, Dai Q, et al. On the connection between local attention and dynamic depth-wise convolution [PP/OL]. V5. arXiv (2022-08-04) [2025-05-01]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.04263>.
- [16] Lee Y, Hwang J, Lee S, et al. An energy and GPU-computation efficient backbone network for real-time object detection [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019.
- [17] Hu J, Shen L, Sun G. Squeeze-and-excitation networks [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Bision and Pattern Recognition, 2018: 7132–7141.
- [18] Wang J, Chen K, Xu R, et al. Carafe++: unified content-aware reassembly of features [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 44(9): 4674–4687.
- [19] Shi W, Caballero J, Huszar F, et al. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1874–1883.
- [20] Zheng Z, Wang P, Liu W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression [C] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(7): 12993–13000.
- [21] Ma X, Dai X, Bai Y, et al. Rewrite the stars [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024: 5694–5703.
- [22] Qin D, Lechner C, Delakis M, et al. MobileNetV4: universal models for the mobile ecosystem [C] // European Conference on Computer Vision, 2025: 78–96.
- [23] Liu Z, Lin Y, Cao Y, et al. Swin transformer: hierarchical vision transformer using shifted windows [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021: 10012–10022.
- [24] Wang A, Chen H, Lin Z, et al. Repvit: revisiting mobile cnn from vit perspective [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024: 15909–15920.
- [25] Liu X, Peng H, Zheng N, et al. Efficientvit: memory efficient vision transformer with cascaded group attention [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 14420–14430.
- [26] Chen Z, Chen K, Lin W, et al. Piou loss: towards accurate oriented object detection in complex environments [C] // European Conference on Computer Vision, 2020: 195–211.
- [27] Zhang H, Zhang S. Shape-iou: more accurate metric considering bounding box shape and scale [PP/OL]. V2. arXiv (2024-01-12) [2025-05-01]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.17663>.