doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.022

基于模糊PID的顶夹式取苗装置苗盘定位控制方法

孔德航[1,2]　张学东[1,2]　崔　巍[1,2]　吴海华[1,2]　孙　星[1,2]　王志伟[3]
王春雷[1,4]　宁义超[1,2]

（1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083；
3. 湖南省农业装备研究所，长沙 410005；4. 西南大学工程技术学院，重庆 400715）

摘要：针对顶夹式取苗装置苗盘精确输送定位的需求，提出了一种基于模糊PID与结合双传感器的苗盘精准定位控制方法。该方法通过激光传感器感知苗盘到位信息；通过角度传感器获取苗盘实时位置对应的角度信息；通过以两相混合式步进电机为对象建立的步进电机转角模糊PID控制模型对苗盘进行精确输送。以128穴标准育苗盘为输送对象，进行苗盘输送定位精度分析，结果表明，苗盘输送定位误差应小于2.13 mm，对应角度控制误差应小于2.03°。然后，根据顶夹式取苗装置工作原理，分析建立了苗盘输送定位控制系统。仿真试验表明，在获得的最优PID控制参数K_P=40、K_I=76、K_D=3.2下，模糊PID控制调节时间为0.18 s，受扰动后恢复时间0.31 s，响应最大变化量为0.94°，小于2.03°，动态性能与稳态性能均优于经典PID，满足控制精度需求。输送定位控制试验结果表明，模糊PID控制定位平均误差为0.32 mm，定位平均相对误差为0.92%，最大定位误差为0.53 mm，小于2.1 3mm，满足苗盘输送位置精确定位需求。该方法提升了系统抗干扰能力，为蔬菜自动移栽机关键技术升级提供了技术支撑。

关键词：移栽机；顶夹式取苗；苗盘定位；双传感器；模糊PID控制

中图分类号：S223.92　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0207-10

Control Method for Seedling Tray Positioning in Top-clamping Seedling-taking Device Based on Fuzzy PID

KONG Dehang[1,2]　ZHANG Xuedong[1,2]　CUI Wei[1,2]　WU Haihua[1,2]　SUN Xing[1,2]　WANG Zhiwei[3]
WANG Chunlei[1,4]　NING Yichao[1,2]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
3. *Institute of Hunan Agricultural Equipment Research, Changsha* 410005, *China*
4. *College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: In response to the demand for precise conveying and positioning for seedling trays in top-clamping seedling-taking devices, an accurate positioning control method based on fuzzy PID and dual sensors was proposed, which obtained the position information of seedling trays by a laser sensor and got corresponding angle information by an angle sensor. Moreover, a fuzzy PID control model based on a two-phase hybrid stepper motor was established to convey the seedling trays accurately. Taking the standard 128-cell seedling tray as the conveying object, the positioning accuracy of the seedling tray was analyzed, which showed that the positioning error of the seedling tray should be less than 2.13 mm, corresponding to the angle control error of less than 2.03°. Subsequently, the control system for seedling tray positioning was analyzed and established based on the working principle of the top-clamping seedling-taking device. The simulation results showed that under the optimal PID parameters, K_P=40, K_I=76, K_D=3.2, the adjustment time of fuzzy PID control was 0.18 s, the recovery time after disturbance was 0.31 s, and the maximum response variation was 0.94°, which was less than 2.03°. The fuzzy PID had a better dynamic and steady-state performance than the classical PID, meeting the control requirements. The positioning control results showed that the fuzzy PID achieved an average positioning error of 0.32 mm, an average relative positioning error of

收稿日期：2024－07－16　修回日期：2024－09－26
基金项目：湖南省智能农机装备创新研发项目
作者简介：孔德航(1997—)，男，硕士生，主要从事农业机械装备与技术研究，E-mail：k1955055125@163.com
通信作者：吴海华(1981—)，男，研究员，博士生导师，主要从事农村发展与农业机械化、农业装备技术创新战略研究，E-mail：caamswhh@163.com

0.92%, and a maximum positioning error of 0.53 mm, which was less than 2.13 mm. This method can meet the requirements for precise positioning of seedling tray conveying, enhancing the system′s anti-interference capability and providing a reference for the key technology upgrade of automatic vegetable transplanters.

Key words: transplanter; seedling taking by ejecting and clamping; seedling tray positioning; dual sensors; fuzzy PID

0 引言

近年来,蔬菜移栽机的相关研究聚焦于实现移栽过程的自动化、高效化及提升取苗、栽苗的作业质量[1-4]。顶夹式取苗方式具有取苗效率高、适应性强和便于实现自动化系统集成的优点,是目前蔬菜自动移栽机的主流取苗方式之一[5-7]。在取苗过程中,实现苗盘的精确输送和定位是确保取苗成功率,提升取苗装置稳定性与可靠性的关键。因此,研究高效、精确的苗盘定位控制方法具有理论意义和实际应用价值。

传统的纯机械式苗盘定位控制方式结构复杂且适应性差[8],同步控制难度大,研究相对较少。为解决纯机械式苗盘输送带来的问题,杨传华等[9]通过结合电感式接近开关和限位开关定位苗盘,基于PLC设计了苗盘定位控制装置。魏新华等[10]通过到位传感器定位苗盘,实现了苗盘的横向单列进给。文献[11-12]通过光电传感器定位苗盘,采取赋予步进电机固定脉冲的方式实现苗盘的定距进给。姚梦娇等[13]提出了基于双红外传感器的区间定位方法,有效减小了苗盘的定位偏差。以上研究在系统抗干扰能力上有待验证。为提高取苗装置的稳定性,文献[14-15]基于模糊PID控制算法实现了取苗机械手的定位控制,实现了精确取苗,但机械手的往复运动位移会随着取苗进程逐渐增加,影响取苗效率。

针对以上问题,本文在自主设计的顶夹式取苗装置上开展苗盘定位控制方法研究。通过对驱动步进电机建模分析,结合双传感器技术,建立苗盘输送定位模糊PID控制模型,以提高苗盘定位准确性和可靠性。

1 苗盘输送装置结构与工作原理

1.1 苗盘输送装置结构

苗盘定位控制方法研究在自主研发设计的顶夹式取苗装置上开展,装置整体结构如图1所示,由苗盘输送机构、顶苗机构和夹投苗机构组成。其中,苗盘输送机构由同步带(带推杆)、同步带轮、输送平台、步进电机、激光传感器和角度传感器组成;顶苗机构由顶杆与顶出气缸组成;夹投苗机构由取苗夹、伸展气缸、推进气缸和剪叉式伸缩机构组成。

激光传感器负责检测苗盘是否到位;角度传感器负责检测同步带轮旋转角度,为步进电机的启停控制提供参考。为使检测更加精准,将激光传感器安装于同步带

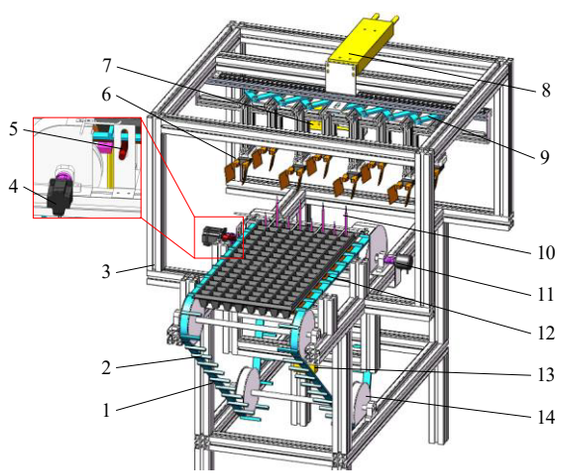


图1 顶夹式取苗装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of top-clamping seedling-taking device

1. 同步带 2. 推杆 3. 机架 4. 步进电机 5. 激光传感器 6. 取苗夹 7. 伸展气缸 8. 推进气缸 9. 剪叉式伸缩机构 10. 顶杆 11. 角度传感器 12. 输送平台 13. 顶出气缸 14. 同步带轮

的下方,以此减少环境光照的影响;将角度传感器与同步带轮主动轮相联结,以此有效避免因步进电机行进误差或与联轴器间发生滑转等带来的影响。

针对苗盘输送机构定位控制展开分析,主要针对128穴(16行×8列)标准育苗盘,其尺寸参数如表1所示。

表1 苗盘尺寸参数

Tab. 1 Parameters of seedling tray

参数	苗盘规格/穴	长×宽/(mm×mm)	中心距/mm	上口长×宽/(mm×mm)	下口直径/mm
数值	128	540×280	35	30×30	10

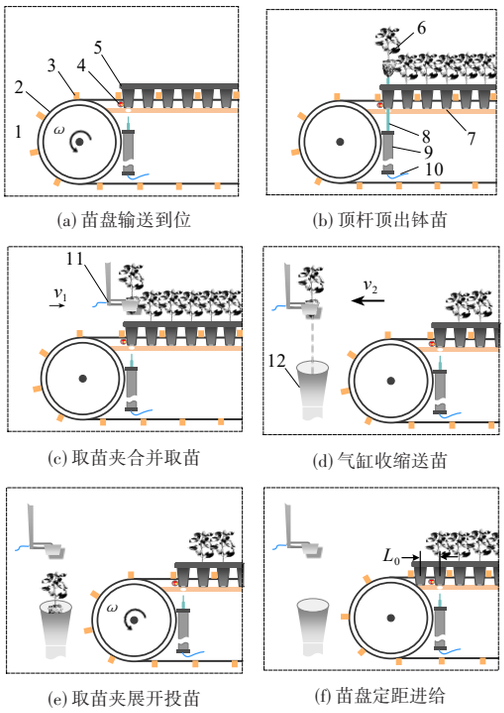
1.2 苗盘定位工作原理

苗盘定位控制过程结合送盘、顶苗、取苗、送苗和投苗作业过程,其工作原理如图2所示。

具体流程如下:

(1)人工将苗盘放置于输送平台上,并使苗盘准确卡在推杆之间。开始作业时,同步带轮在步进电机带动下以角速度ω运转,并携带苗盘向前进给。通过前方激光传感器检测到苗盘到位后,电机停止运转,此时苗盘第一排下口与顶出孔对齐,如图2a所示。控制器读取角度传感器反馈值,换算后记为α_c。

(2)顶出气缸伸出,顶杆向上将苗盘第1排钵苗顶出到位,如图2b所示。



(a) 苗盘输送到位　(b) 顶杆顶出钵苗　(c) 取苗夹合并取苗　(d) 气缸收缩送苗　(e) 取苗夹展开投苗　(f) 苗盘定距进给

图 2　苗盘定位工作流程图

Fig. 2　Workflow diagram of seedling tray positioning

1. 同步带轮　2. 同步带　3. 推杆　4. 激光传感器　5. 苗盘　6. 钵苗　7. 输送平台　8. 顶杆　9. 顶出气缸　10. 高压气管　11. 取苗夹　12. 导苗桶

(3)伸展气缸收缩带动苗爪对准钵苗,同时推进气缸推动夹持机构前进到位。到位后,取苗夹合并夹紧被顶出的第1排钵苗,顶出气缸收缩复位,如图2c所示。

(4)推进气缸收缩,同时伸展气缸伸出带动取苗夹对准下方导苗桶,如图2d所示。

(5)取苗夹松开,使钵苗自然下落到导苗桶中,排数计数器累加1,如图2e所示。

(6)下一目标位置对应角度为$\alpha_c+\varphi$。在建立的模糊PID模型控制下,步进电机带动同步带轮旋过角度φ,使苗盘前进一个中心距L_0,使第2排钵苗对齐顶出孔,如图2f所示。

重复步骤(1)~(6),直至该苗盘取苗完毕。

2　基于模糊PID的苗盘定位控制方法

在苗盘输送过程中,通过角度传感器实时获取在不同位置时刻同步带主动轮对应的角度值,与目标值比较产生偏差信号作为控制器的输入,经模糊PID算法处理后输出相应的脉冲信号给驱动器,控制步进电机的角度进给,进而缩小偏差,不断逼近目标值,具体流程如图3所示。

其中,前向通道脉冲信号输出由测得的角度偏差决定;反馈通道角度传感器的输出为模拟电压信号,与对应角度值的之间换算比例由传感器自身结构参数决定,对角度的增益为1。控制器与步进电机驱动器配合产生步进电机脉冲控制信号,对角度的增益亦为1。控制量之间的计算公式为

$$\begin{cases}\alpha_1-\alpha_0=\dfrac{P}{n}\theta_b\\ \alpha_1=Ku_1\\ K=\dfrac{\phi_m}{U_m}\end{cases}\tag{1}$$

式中　α_0——角度目标值,(°)

α_1——角度测量值,(°)

P——控制器脉冲信号输出

n——步进电机驱动器细分倍数

θ_b——步进电机步距角,(°)

K——角度传感器输出电压与对应角度的换算比例,(°)/V

u_1——角度传感器输出的电压信号,V

ϕ_m——角度传感器量程最大值,(°)

U_m——角度传感器最大输出电压,V

2.1　输送角度目标值确定

角度目标值α_0由初始角度α_c和转角步长φ构成。其中,初始角度α_c是苗盘的第1排到达顶出位置时角度测量值;转角步长φ是使苗盘继续前进一个中心距时的主动轮旋转角度。

以128穴(16行×8列)标准育苗盘为输送对象,苗盘及输送装置主要尺寸参数如图4所示,则使苗盘前进一个中心距L_0,主动轮需转过的角度计算公式为

$$\frac{\varphi}{360}=\frac{L_0}{2\pi R}\tag{2}$$

式中　R——主动轮半径,mm

其中,L_0=35 mm,R=60 mm,代入式(2)中求得φ=33.4°。将检测所用ZQK2209型角度传感器ϕ_m=360°,U_m=5 V等参数代入式(1),求得角度传感器输出电压与对应角度的换算比例K=72(°)/V。

当角度传感器旋转到360°时继续旋转,输出的电压信号会从5 V突变为0再重新开始测量。基于角度传感器的测量特点,结合式(1)、(2),推导出苗盘输送位置对应的角度目标值计算公式为

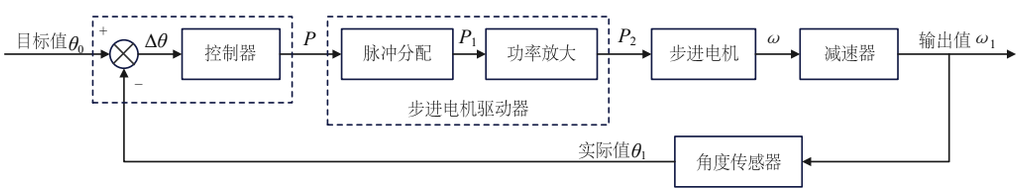


图 3　苗盘输送定位控制框图

Fig. 3　Block diagram of seedling tray positioning control

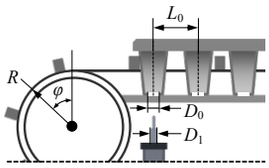


图4 苗盘及输送装置主要尺寸参数示意图

Fig. 4 Schematic of some size parameters of seedling tray and seedling-taking device

$$\alpha_0 = Ku_c + i\varphi - 360\left\lfloor \frac{Ku_c + i\varphi}{360} \right\rfloor \tag{3}$$

式中 u_c——苗盘的某一排到达顶出位置时角度传感器的输出电压,V

i——已完成的取苗排数

$\lfloor\ \rfloor$——向下取整符号

其中K=72(°)/V,φ=33.4°,代入式(3)有

$$\alpha_0 = 72u_c + 33.4i - 360\lfloor 0.2u_c + 0.09i \rfloor \tag{4}$$

2.2 定位控制精度分析

鉴于苗盘在输送过程中,每盘的定位位置均是采用角度传感器测量,即可忽略步进电机误差的影响。控制误差主要来源于角度传感器分辨率精度所导致的测量误差。若苗盘排数为k,完成整盘输送需要k次角度记录(1次初始值,k-1次目标值),即每个苗盘最大累计误差计算式为

$$e_m = k\frac{\pi R f}{180} \tag{5}$$

式中 f——角度传感器分辨率精度,(°)

e_m——单个苗盘最大累计误差,mm

128穴育苗盘排数k为16,角度传感器分辨率精度f为0.022°,代入式(5),求得单盘最大累计误差e_m为0.37 mm。

如图4所示,苗盘的种穴下口直径D_0=10 mm,顶杆直径D_1=5 mm,记顶杆居于苗盘下口中心时为测量起始点,考虑到测量误差e_m,苗盘输送位置距离测量起始点容许误差为-2.13~2.13 mm,对应角度偏差为-2.03°~2.03°。为评价控制效果,规定每个苗盘单排定位精度计算公式为

$$\sigma_0 = \frac{|\Delta L|}{L_0} \times 100\% \tag{6}$$

$$\sigma_1 = \frac{|\Delta\theta|}{\varphi} \times 100\% \tag{7}$$

式中 $|\Delta L|$——单排容许最大定位误差,mm

$|\Delta\theta|$——单排容许最大角度误差,(°)

σ_0——单排容许最大定位误差率,%

σ_1——单排容许最大角度误差率,%

经式(6)、(7)计算得σ_0=6.09%,σ_1=6.08%,即系统输送定位误差应保持在2.13 mm之内,定位误差率不高于6.09%,步进电机旋转角度误差应小于2.03°,输送定位控制角度误差率应小于6.08%。

2.3 输送位置控制系统传递函数建立

采用57HB6401型两相混合式步进电机,其运动平衡方程为[16-18]

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = T_e - B\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} - T_L \tag{8}$$

式中 J——电机转子转动惯量,kg·m^2

T_e——电磁转矩,N·m

B——粘滞阻尼系数

T_L——负载转矩,N·m

由A、B两组绕组产生的电磁转矩T_e为

$$\begin{cases} T_e = -\dfrac{1}{2}L_1 i_A^2 Z_r \sin(Z_r\theta) + \dfrac{1}{2}L_1 i_B^2 Z_r \cos(Z_r\theta) \\ Z_r = 2\pi/\theta_Z \end{cases} \tag{9}$$

式中 Z_r——步进电机转子齿数

θ_Z——步进电机齿距角,(°)

联立式(8)、(9)得到步进电机运动参数方程

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{2}L_1 i_A^2 Z_r \sin\left(Z_r\theta\right) - \frac{1}{2}L_1 i_B^2 Z_r \cos\left(Z_r\theta\right) + T_L = 0 \tag{10}$$

初始时刻,t=0,位置角θ及其变化率dθ/dt(即角速度ω)均为0。忽略负载转矩T_L,步进电机采取细分通电方式,在单相励磁作用下对式(10)推导得出

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{2}L_1 i_A^2 Z_r \sin\left(Z_r\theta\right) = 0 \tag{11}$$

当步进电机转子在Δt时刻产生微小转动角度$\Delta\theta$=θ_1-θ_0时(θ_0为目标值,θ_1为控制量),式(11)变为

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta_1}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}\theta_1}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{2}L_1 i_A^2 Z_r^2 \theta_1 = \frac{1}{2}L_1 i_A^2 Z_r^2 \theta_0 \tag{12}$$

对式(12)进行拉普拉斯变换,求得步进电机传递函数

$$G_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\theta_0(s)} = \frac{Z_r^2 L_1 i_A^2}{2Js^2 + 2Bs + Z_r^2 L_1 i_A^2} \tag{13}$$

式中 $G_1(s)$——步进电机传递函数

$\theta_1(s)$——角度控制量拉氏变换形式

$\theta_0(s)$——角度目标值拉氏变换形式

为了增大步进电机输出扭矩,在其输出轴联结一个减速比为6∶1的减速器,该过程为比例控制,传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\theta_{\mathrm{out}}}{\theta_{\mathrm{in}}} = \frac{1}{6} \tag{14}$$

式中 $G_2(s)$——减速器传递函数

θ_{in}——减速器输入角

θ_{out}——减速器输出角

两相混合式步进电机参数如表2所示,联立式(13)、(14),苗盘输送位置控制系统的开环传递函数$G_K(s)$为

$$G_K(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{180}{9.72s^2 + 0.84s + 1\,080} \tag{15}$$

2.4 模糊PID控制器设计

模糊PID控制器是对经典PID控制器的一种改进和扩展,利用建立的模糊规则来处理非线性、时变或不确定的系统,具有更好的适应性和鲁棒性[19-21]。

苗盘定位控制器结构如图5所示,以角度偏差信号

表 2　步进电机参数

Tab. 2　Parameters of stepper motor

参数	型号	步距角/(°)	供电电压/V	相电感/mH	相电流/A	转动惯量/(kg·cm²)	粘滞阻尼系数/(N·m·r⁻¹·min)	转子齿数
取值	57HB6401	1.8	24~36	4.5	4	0.81	0.07	50

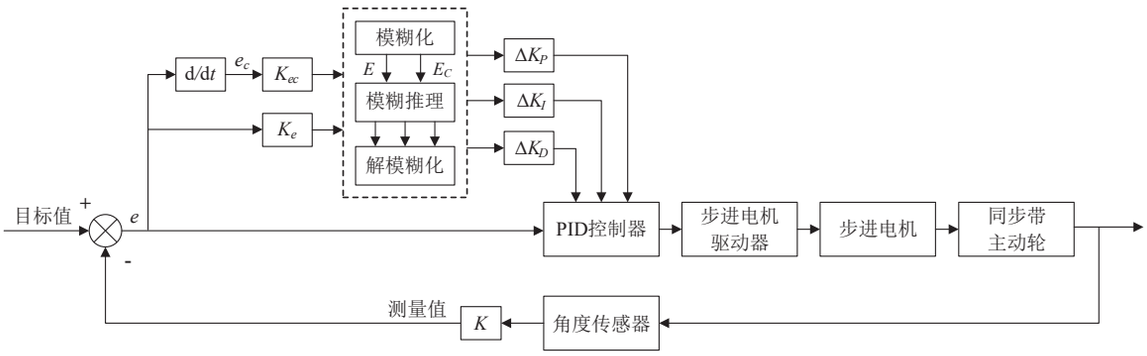


图 5　苗盘定位模糊PID控制器结构图

Fig. 5　Structure diagram of fuzzy PID controller for seedling tray positioning

e和角度偏差信号导数e_c作为模糊计算部分的输入量，在经过模糊化、模糊推理和解模糊化过程后，得到PID控制器参数调整量ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D。将以上调整量输入至PID控制器中，进行PID参数的实时自适应调节，实现角度目标值在线精确调整。

模糊PID控制器在设计时，需要确定PID控制器参数预设值、确定语言变量、确定隶属度函数、建立模糊规则库和完成解模糊[22-23]。

PID控制器时域模型为

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} + K_I \int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau \qquad (16)$$

式中　$u(t)$——控制输出变量

$e(t)$——系统偏差

K_P——比例增益系数

K_D——微分增益系数

K_I——积分增益系数

其参数整定是一个迭代过程，方法有很多种。由式(15)可知，本控制对象为典型的二阶振荡系统，因此选用Z-N(Ziegler-Nichols)法来进行PID参数整定[24]，根据阶跃响应试验结果选择参数。

苗盘定位主要依靠角度偏差e来进行控制，因此选取角度偏差e和角度偏差变化率e_c作为输入语言变量，ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D作为输出语言变量。输入语言变量E和E_C模糊子集采取7档划分方式：{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}，分别表示{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，输出语言变量也相应划分为7档。各语言变量论域和换算比例如表3所示。

表 3　模糊变量参数设置

Tab. 3　Fuzzy variable parameter settings

语言变量	基本论域	量化论域	换算比例
E	[−33.4, 33.4]	[−6, 6]	0.18
E_C	[−60, 60]	[−6, 6]	0.1
ΔK_P	[−9, 9]	[−3, 3]	3
ΔK_I	[−18, 18]	[−3, 3]	6
ΔK_D	[−1.5, 1.5]	[−3, 3]	0.5

控制器的输入变量经过比例放缩至量化论域后，即可按照模糊子集建立的模糊规则进行模糊推理。

考虑实际情况，在调整的前期，因偏差较大，应该选择较大的比例增益、较小的积分增益和较大的微分增益；在调整的中期，为使系统具有较小的超调量，应选择较小的比例增益、适中的积分增益和较小的微分增益；在调整的后期，为减少稳态误差，应选择较大的积分增益和较小的微分增益，以此来避免响应出现振荡和过冲。最终确定ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D模糊规则如表4所示。

考虑对驱动步进电机的控制效果，选用分辨率和灵敏度高且运算量少的三角形隶属度函数。此外，解模糊

表 4　ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D模糊规则

Tab. 4　Fuzzy rule of ΔK_P, ΔK_I and ΔK_D

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/ NB/ PS	PB/ NB/ NS	PM/ NM/NB	PM/ NM/NB	PS/ NS/NB	ZO/ ZO/NM	ZO/ ZO/PS
NM	PB/ NB/ PS	PB/ NB/ NS	PM/ NM/NB	PS/ NS/NM	PS/ NS/NM	ZO/ ZO/NS	NS/ ZO/ZO
NS	PM/ NB/ ZO	PM/ NM/ NS	PM/ NS/NM	PS/ NS/NM	ZO/ ZO/NS	NS/ PS/NS	NS/ PS/ZO
ZO	PM/ NM/ ZO	PM/ NM/ NS	PS/ NS/NS	ZO/ ZO/NS	NS/ PS/NS	NM/ PM/NS	NM/ PM/ZO
PS	PS/ NM/ ZO	PS/ NS/ZO	ZO/ ZO/ZO	NS/ PS/ZO	NS/ PS/ZO	NM/ PM/ZO	NM/ PB/ZO
PM	PS/ ZO/ PB	ZO/ ZO/ NS	NS/ PS/PS	NM/ PS/PS	NM/ PM/PS	NM/ PB/PS	NB/ PB/PB
PB	ZO/ ZO/ PB	ZO/ ZO/PM	NM/ PS/PM	NM/ PM/PM	NM/ PM/PS	NB/ PB/PS	NB/ PB/PB

环节是将控制器推理的模糊值清晰化为具体控制量的过程，一般有重心法、加权平均法和最大隶属度法等方法。鉴于重心法具有响应速度快的特点，适用于实时性要求高的场合[25]，即采用重心法进行解模糊操作。

经过上述的计算处理后，模糊控制器对PID参数的调整公式为

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \tag{17}$$

式中 K_{P0}、K_{I0}、K_{D0}——PID参数预设值

3 苗盘定位控制系统设计

苗盘输送定位控制过程结合了“顶苗-夹苗-投苗”动作。笔者对气缸动作、顶苗速度和深度、取苗末端执行器等关键部件完成了设计与分析，详见文献[26]，结果为：顶杆直径5 mm、顶针直径1.9 mm、顶针长度18 mm、顶苗速度0.3 m/s、夹苗加载距离4 mm。

对取苗关键部件进行设置后，建立的苗盘定位控制系统原理框图如图6所示。

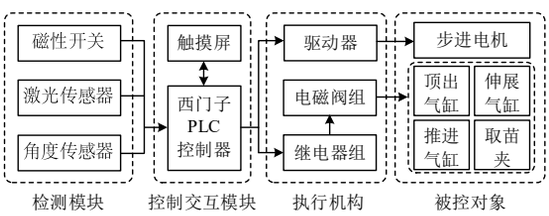


图6 苗盘定位控制系统原理框图

Fig. 6 Schematic of seedling tray positioning control system

控制系统主要由检测模块、控制交互模块、执行机构与被控对象组成。其中，磁性开关负责反馈各个气缸的伸缩状态，为苗盘定位控制节点提供判断依据；可编程控制器选用西门子S7-1200 1214C，通过驱动器控制步进电机进行苗盘输送，通过控制继电器组与电磁阀组的通断实现对3个气缸与取苗夹的伸缩控制。

以128穴苗盘定位控制为例，其控制流程如图7所示。系统启动后，初始化程序会对各个气缸状态进行复位，然后启动电机开始送苗。当激光传感器检测苗盘到达顶出位置后，系统将根据当前排数以及角度传感器的反馈值更新输送初始角度。在完成“顶苗-夹苗-投苗”操作后，根据磁性开关判断各气缸复位状态，并更新下一位置对应的角度目标值，通过模糊PID算法控制步进电机带动苗盘到达下一目标位置。苗盘排数累加器在每一次完成投苗后计数，对整盘排数16取余得到当前的作业排号，直到完成单盘输送。

4 试验

4.1 仿真试验

4.1.1 PID控制参数整定

根据前文分析，由式(15)、(16)系统开环传递函数和经典PID控制器时域模型，通过Matlab软件的Simulink环境搭建控制系统模型进行仿真验证试验[27]，如图8所示。

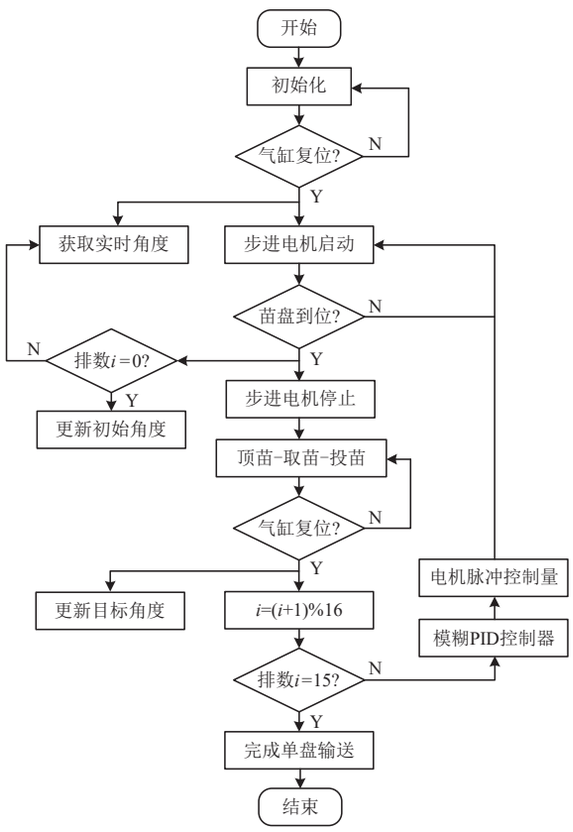


图7 苗盘定位控制流程图

Fig. 7 Flowchart of seedling tray positioning control

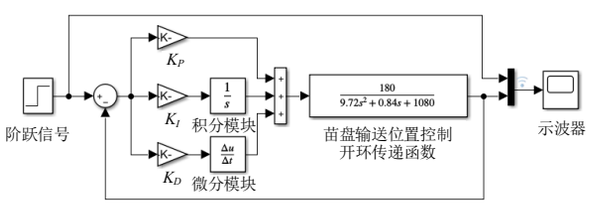


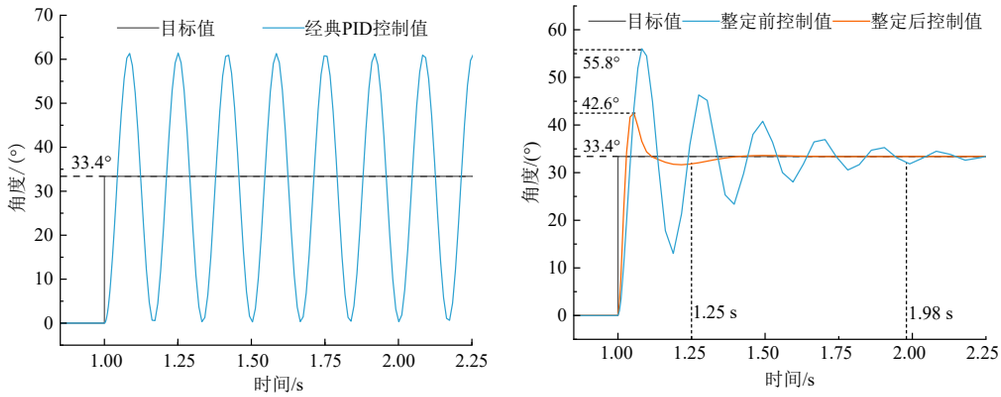
图8 经典PID控制器模型

Fig. 8 Typical PID controller model

采用Z-N法(Ziegler-Nichols method)进行PID控制器参数整定步骤为：

(1)获取临界比例增益。将K_I、K_D置零，此时PID控制器只有纯比例作用。在输入为33.4°的阶跃信号作用下，调节K_P至68时，系统输出变为等幅振荡，将此时的比例增益记为K_{pcr}，由输出图像可知，等幅振荡周期T_{pcr}为0.17 s，如图9a所示。

(2)计算PID控制器参数并微调。根据Z-N法PID参数整定表5计算出各参数：K_P=42、K_I=504、K_D=0.875。将参数值输入仿真程序中，系统输出响应曲线如图9b所示，可见系统存在明显的超调和振荡，其中超调M_P=22.4°，调节时间t_s=1.98 s。对PID参数进行微调，并适当增加微分增益，经多次试验后，当K_P=40、K_I=504、K_D=3.2时，对比可见系统超调明显减少，振荡现象基本消除，其中超调M_P=9.2°，调节时间t_s=0.25 s，将此时的参数值记为预设值。



（a）等幅振荡响应曲线　　（b）参数整定前后响应曲线

图 9　PID 参数整定过程响应曲线

Fig. 9　Response curves of PID parameter tuning process

表 5　PID 参数整定表

Tab. 5　PID parameter tuning table

模型	K_P	T_I	T_D	K_I	K_D
PID	$0.6K_{per}$	$0.5T_{cr}$	$0.125T_{cr}$	K_P/T_I	K_PT_D

4.1.2　模糊 PID 控制算法仿真

经典 PID 控制器在参数整定后仍存在超调，影响苗盘输送过程中的稳定性，因此需要进一步结合模糊控制器进行优化设计。根据前文分析，在 Matlab 软件的 Simulink 环境搭建模糊 PID 算法仿真模型，如图 10 所示。为进一步减少超调量，对预设值中的积分增益 K_I 进行减小，当 K_I 减小至 76 时，此时系统超调已基本消除。

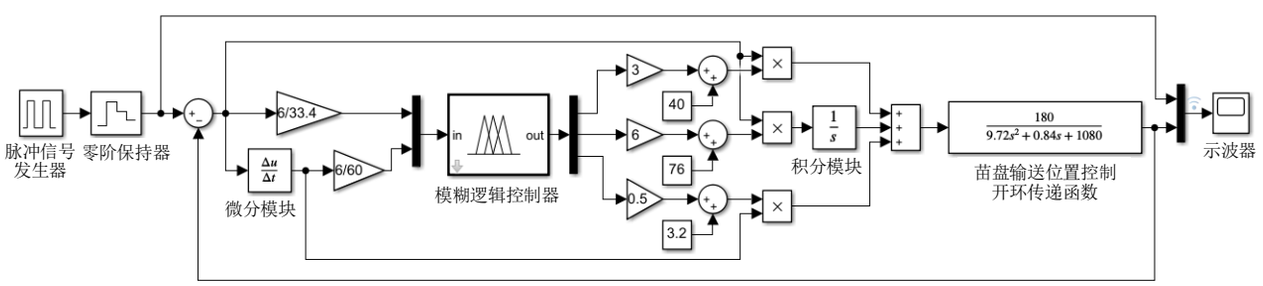


图 10　苗盘定位模糊 PID 控制器模型

Fig. 10　Fuzzy PID controller model of seedling tray positioning

当苗盘到位后，步进电机会变为间断供给状态，每次转动固定角度使苗盘的下一排到达顶出位置。因此，选择幅值为 33.4°的脉冲信号作为输入，对经典 PID 和模糊 PID 的控制效果进行对比。

设定经典 PID 参数 K_P=40、K_I=504、K_D=3.2；模糊 PID 参数预设值 K_P=40、K_I=76、K_D=3.2；采样时间为 1 ms，仿真结果如图 11 所示，两者控制效果对比如表 6 所示。

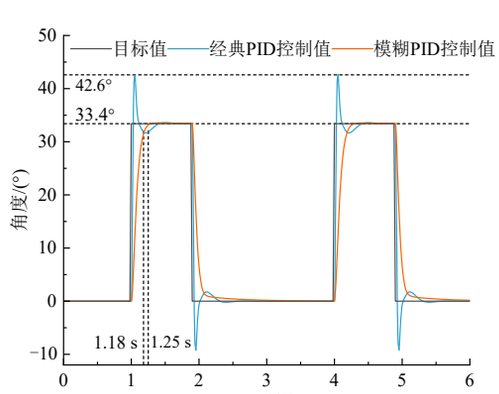


图 11　两种控制算法对脉冲信号的响应曲线

Fig. 11　Response curves of pulse signal for two control algorithms

表 6　控制性能仿真试验结果对比

Tab. 6　Comparison of control performance simulation test results

模型	超调量/(°)	上升时间/s	调节时间/s
经典 PID	9.2	0.03	0.25
模糊 PID	0	0.14	0.18

根据结果可知，经典 PID 控制超调量为 27.5%，在 1.03 s 开始上升，在 1.25 s 达到稳态；模糊 PID 控制无超调产生，在 1.14 s 开始上升，在 1.18 s 达到稳态（5% 误差带）。相比之下，模糊 PID 控制器在参数整定良好的情况下能够有效降低乃至消除系统超调，缩短调节时间，提升系统的稳态性能和动态性能，有利于苗盘精准定位控制。

4.1.3　扰动信号下仿真

在实际作业时，取苗装置经常会受到外部噪声和负载扰动等干扰的影响，易出现较大的控制偏差或振荡。仿真分析可以评估模糊 PID 控制算法在扰动信号下的鲁棒性，以观测算法对系统参数变化或干扰的抵抗能力，这有助于验证算法的可靠性和实用性。搭建扰动条件下控制系统仿真模型，如图 12 所示。

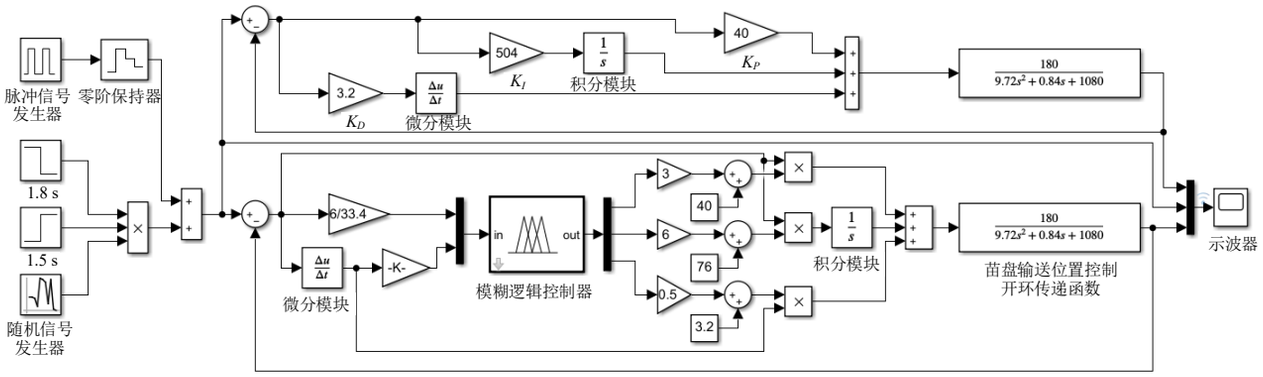


图 12 加入扰动的控制系统仿真模型

Fig. 12 Simulation model of control system incorporating disturbances

试验采用 Random Signal 模块产生均值为 0.8°、采样时间为 0.1 s 的随机扰动信号，并在 t=1.5 s 时作用于系统，在 t=1.8 s 时停止扰动。经典 PID 控制器和模糊 PID 控制器均采用前文得出的最优试验控制参数。

仿真结果如图 13 所示，在扰动信号开始作用后，两条响应曲线均发生了一定程度的超调。经典 PID 控制响应曲线在点 A 达到峰值，超调量为 2.2%，随后在点 D（t=1.83 s）时恢复稳定，过程耗时 0.33 s，最大响应变化量为 1.65°，接近 2.03°，易发生顶盘情况。模糊 PID 控制响应曲线在点 B 达到峰值，超调量为 2.0%，随后在点 C（t=1.81 s）时恢复稳定，过程耗时 0.31 s，最大响应变化量仅为 0.94°。整个扰动过程，相比于经典 PID 控制，模糊 PID 控制表现更加平稳，系统响应更加快速，鲁棒性更强，更适合投入到实际生产应用中。

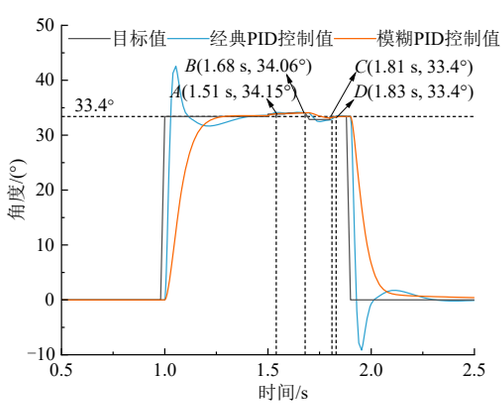


图 13 加入扰动的脉冲信号响应曲线

Fig. 13 Response curves of pulse signal incorporating disturbances

4.2 苗盘输送定位控制试验

4.2.1 试验设备与材料

为验证基于模糊 PID 算法的苗盘输送定位控制效果，于 2024 年 2 月 15 日在中国农业机械化科学研究院集团有限公司农业技术装备全国重点实验室进行台架试验。试验装置主要由稳压电源、气泵、计算机、取苗装置和控制柜等组成，如图 14 所示。控制器、步进电机驱动器、继电器等均封装于控制柜中。

试验前，调整激光传感器的初始安装位置，使顶杆能够于苗盘第 1 排种穴下孔中心位置穿出，并用标记贴

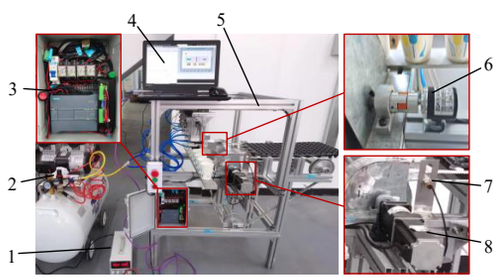


图 14 试验平台

Fig. 14 Test platform

1. 稳压电源 2. 气泵 3. 计算机 4. 取苗装置 5. 控制柜 6. 角度传感器 7. 激光传感器 8. 步进电机

在顶杆处标记好检测参考位置，如图 15 所示。

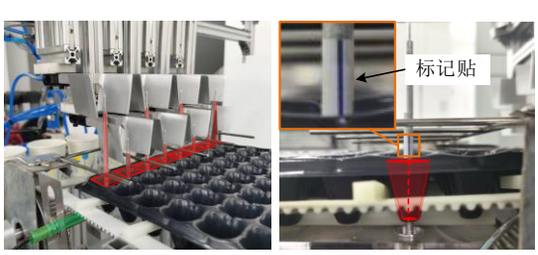


图 15 传感器调整与测量标记操作

Fig. 15 Operation of sensor adjustment and measurement marking

4.2.2 试验指标

根据前文分析，目标值更新角度步长为 33.4°，对应位移步长为 35 mm，后者实际值更方便获取。因此，以苗盘每排到达顶出孔位置定位误差 ΔX 作为苗盘定位评价指标，偏差越小，定位越准确，系统控制越精准。测量操作如图 16 所示，选择操作较方便的苗盘上口测量顶杆与上口两端的相对位置，以此间接计算出定位误差，相对误差计算式为

$$\delta = \frac{\Delta X}{L_0} \times 100\% \tag{18}$$

其中 $$\Delta X = X_1 - X_2 = l_1 - l_2$$

式中 X_1——实际位移，mm

X_2——理论位移，mm

l_1、l_2——顶杆与苗盘上口两端相对距离，mm

δ——相对误差，%

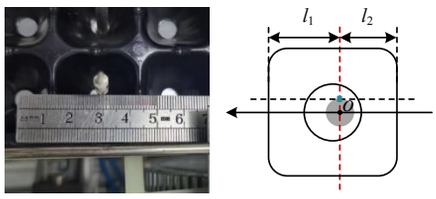


图16　定位误差测量示意图

Fig. 16　Schematic of positioning error measurement

4.2.3　试验结果与分析

试验中装置取投苗频率为100株/min[26]。在试验台架上分别进行经典PID与模糊PID苗盘定位控制试验，通过开关按钮暂时中断程序，通过直尺测量苗盘每次到达顶出位置后，顶出排上口两端与顶杆标记点间的距离，计算出定位误差和相对误差。苗盘定位试验结果如表7所示。

由表7分析可知，经典PID控制的定位平均误差为0.81 mm，定位平均相对误差为2.32%，最大定位误差为1.61 mm；模糊PID控制定位平均误差为0.32 mm，定位平均相对误差为0.92%，最大定位误差为0.53 mm。根据前文分析，苗盘每排到达顶出孔位置时，种穴下孔边缘与顶杆外径边缘间的距离应保持在2.13 mm以内。经典PID最大定位控制误差很接近2.13 mm，容错范围较小，相比之下，模糊PID控制下苗盘输送定位误差更小，控制过程更加平稳。综合来看，模糊PID控制能更好地满足苗盘输送精确定位的需求。

5　结论

（1）通过对驱动步进电机的建模分析，结合双传感器，建立了一种针对顶夹式取苗装置的苗盘输送模糊PID定位控制模型。此方法有效避免了因步进电机滑转或自身旋转误差带来的影响，且无需考虑角度传感器安装过程的偏差。

表7　不同控制方法下苗盘输送位置定位精度试验结果

Tab. 7　Test results of seedling tray positioning accuracy by different control methods

试验序号	理论位移/mm	经典PID控制			模糊PID控制		
		实际位移/mm	定位误差/mm	相对误差/%	实际位移/mm	定位误差/mm	相对误差/%
1	0	0.52	0.52	1.43	0.26	0.26	0.74
2	35	35.77	0.77	2.20	35.32	0.32	0.91
3	70	70.74	0.74	2.11	70.47	0.47	1.34
4	105	105.36	0.36	1.03	104.86	−0.14	−0.40
5	140	139.53	−0.47	−1.34	139.72	−0.28	−0.81
6	175	174.22	−0.78	−2.23	175.21	0.21	0.60
7	210	208.86	−1.14	−3.26	210.53	0.53	1.51
8	245	243.39	−1.61	−4.60	245.44	0.44	1.26
9	280	279.28	−0.72	−2.06	279.71	−0.29	−0.83
10	315	315.83	0.83	2.37	314.76	−0.24	−0.69
11	350	350.29	0.29	0.83	350.33	0.33	0.94
12	385	386.17	1.17	3.34	385.39	0.39	1.11
13	420	420.76	0.76	2.17	420.17	0.17	0.49
14	455	456.22	1.22	3.49	454.65	−0.35	−1.00
15	490	491.09	1.09	3.11	489.58	−0.42	−1.20
16	525	525.53	0.53	1.51	524.67	−0.33	−0.94

（2）仿真试验结果表明，相比经典PID控制，模糊PID控制调节时间为0.18 s，响应迅速，动态性能更好。比例增益为40、积分增益为76、微分增益为3.2时，模糊PID控制效果最优。在抗干扰能力表现上，模糊PID控制输出响应更加平稳，受到干扰后的恢复稳定耗时为0.31 s，最大响应变化量仅为0.94°，小于2.03°，满足控制精度需求。

（3）苗盘输送定位控制试验结果表明，基于模糊PID设计的顶夹式取苗装置苗盘输送定位控制系统对苗盘的定位平均误差为0.32 mm，定位平均相对误差为0.92%，最大定位误差为0.53 mm。经典PID控制的平均相对误差为2.27%，最大定位误差为1.61 mm。相比之下，模糊PID控制效果更优，其满足苗盘输送精确定位的需求，且提升了取苗装置实际作业过程的稳定性与可靠性。

参　考　文　献

[1]　田志伟，马伟，杨其长，等. 温室穴盘苗移栽机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报，2022，27(5)：22－38.
TIAN Zhiwei，MA Wei，YANG Qichang，et al. Research status and problem analysis of plug seedling transplanter in greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University，2022，27(5)：22－38.（in Chinese）

[2]　SYED T N，LAKHIAR I A，CHANDIO F A. Machine vision technology in agriculture：a review on the automatic seedling transplanters[J]. International Journal of Multidisciplinary Research and Development，2019，6(12)：79－88.

[3] 文永双，张俊雄，袁挺，等.蔬菜穴盘苗移栽自动取苗技术现状与分析[J].中国农业大学学报，2021，26(4)：128－142.
WEN Yongshuang，ZHANG Junxiong，YUAN Ting，et al. Current situation and analysis of automatic pick-up technology for vegetable plug seedlings[J]. Journal of China Agricultural University，2021，26(4)：128－142.(in Chinese)

[4] 孙晓晓，刘洋，李斌，等.穴盘苗自动移栽机取苗装置研究现状及展望[J].中国农机化学报，2021，42(3)：22－28.
SUN Xiaoxiao，LIU Yang，LI Bin，et al. Research status and prospect of the seeding collecting device of the automatic transplanter[J]. Journal of Chinese Agriculture Mechanization，2021，42(3)：22－28.(in Chinese)

[5] 王宁，任玲，李江全，等.穴盘苗移栽机自动取苗技术研究现状与展望[J].中国农机化学报，2021，42(1)：59－66.
WANG Ning，REN Ling，LI Jiangquan，et al. Research status and prospect of automatic seedling picking technology of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42(1)：59－66.(in Chinese)

[6] 张学东，崔巍，刘云强，等.穴盘苗移栽自动取投苗技术研究现状与展望[J].中国农机化学报，2023，44(12)：17－24.
ZHANG Xuedong，CUI Wei，LIU Yunqiang，et al. Research status and prospect of automatic seedling picking and transplanting technology of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(12)：17－24.(in Chinese)

[7] 王品隆，颜华，李鹏斌.顶夹式气动取苗装置设计与试验[J].农业工程，2020，10(2)：76－81.
WANG Pinlong，YAN Hua，LI Pengbin. Design and experiment of ejecting-clip pneumatic picking-up seedlings device[J]. Agricultural Engineering，2020，10(2)：76－81.(in Chinese)

[8] 金鑫，杜新武，杨传华，等.蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置设计与试验[J].农业机械学报，2016，47(7)：103－111.
JIN Xin，DU Xinwu，YANG Chuanhua，et al. Design and experiment on automatie transporting mechanism for vegetable potted seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(7)：103－111.(in Chinese)

[9] 杨传华，方宪法，杨学军，等.基于PLC的蔬菜钵苗移栽机自动输送装置[J].农业机械学报，2013，44(增刊1)：19－23.
YANG Chuanhua，FANG Xianfa，YANG Xuejun，et al. Automatic delivery mechanism of potted-seedling for vegetable transplanter based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(Supp.1)：19－23.(in Chinese)

[10] 魏新华，包盛，刘晓凯，等.穴盘苗全自动移栽机运动协调控制系统设计与移栽试验[J].农业机械学报，2016，47(12)：1－7.
WEI Xinhua，BAO Sheng，LIU Xiaokai，et al. Design and experiment on potted-seedling automatic transplanter control system for motion coordinating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(12)：1－7.(in Chinese)

[11] 胡建平，常航，杨丽红，等.自动移栽机整排取苗间隔投苗控制系统设计与试验[J].农业机械学报，2018，49(6)：78－84.
HU Jianping，CHANG Hang，YANG Lihong，et al. Design and experiment of control system for automatic transplanter picking up and spacing casting whole row of seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(6)：78－84.(in Chinese)

[12] 伍龙，刘念聪，王艳华，等.基于PLC的全自动移栽机取苗喂苗控制系统设计[J].中国农机化学报，2021，42(10)：87－91.
WU Long，LIU Niancong，WANG Yanhua，et al. Design of the control system for picking up and feeding seedlings of automatic transplanter based on PLC[J]. Journal of China Agricultural Mechaization，2021，42(10)：87－91.(in Chinese)

[13] 姚梦娇，胡建平，刘伟，等.基于区间分析的自动移栽机苗盘定位控制方法[J].农业工程学报，2023，39(4)：27－36.
YAO Mengjiao，HU Jianping，LIU Wei，et al. Positioning control method for the seedling tray of automatic transplanters based on interval analysis[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(4)：27－36.(in Chinese)

[14] 任玲，王宁，曹卫彬，等.番茄钵苗整排取苗手定位的模糊PID控制[J].农业工程学报，2020，36(8)：21－30.
REN Ling，WANG Ning，CAO Weibin，et al. Fuzzy PID control of manipulator positioning for taking the whole row seedlings of tomato plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(8)：21－30.(in Chinese)

[15] 王卫兵，李小军，李飞.基于模糊PID取投苗装置控制系统的设计及试验[J].东北农业大学学报，2022，53(4)：80－89.
WANG Weibing，LI Xiaojun，LI Fei. Design and experiment of control system for seedling picking- up and transferring device based on fuzzy PID[J]. Journal of Northeast Agricultural University，2022，53(4)：80－89.(in Chinese)

[16] 余驰，李健仁，张刚峰.两相混合式步进电机建模与仿真[J].兵工自动化，2016，35(2)：48－51，55.
YU Chi，LI Jianren，ZHANG Gangfeng. Modeling and simulation of two-phase hybrid stepping motor[J]. Ordnance Industry Automation，2016，35(2)：48－51，55.(in Chinese)

[17] 郑雪钦，郭东辉.基于混合模式PWM二相步进电机驱动控制的研究[J].系统仿真学报，2012，24(2)：456－461.
ZHENG Xueqin，GUO Donghui. Study on driving control of two-phase stepping motor based on mixing mode PWM[J]. Journal of System Simulation，2012，24(2)：456－461.(in Chinese)

[18] RUBAAI A，CASTRO-SITIRICHE M J，OFOLI A R. Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives：an integrated environment for rapid control prototyping[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2008，44(4)：1090－1098.

[19] TANG K S，MAN K F，CHEN G，et al. An optimal fuzzy PID controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2001，48(4)：757－765.

[20] KRISTIYONO R，WIYONO W. Autotuning fuzzy PID controller for speed control of BLDC motor[J]. Journal of Robotics and Control(JRC)，2021，2(5)：400－407.

(下转第229页)

[24] 王海滨，李志鹏，姜雪松，等.基于槽型凸轮传动的蓝莓采摘机设计与试验[J].农业机械学报，2018，49(10)：80－91.
WANG Haibin，LI Zhipeng，JIANG Xuesong，et al. Design and experiment of blueberry picker based on trough CAM drive [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(10)：80－91.（in Chinese）
[25] 白云鹏. 基于动力学的盘状凸轮机构凸轮轮廓的设计方法[D]. 沈阳：沈阳建筑大学，2015.
BAI Yunpeng. Design method of CAM profile of disc CAM mechanism based on dynamics [D]. Shenyang：Shenyang Jianzhu University，2015.（in Chinese）
[26] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京：化学工业出版社，2008.
[27] 孙宁，史先磊，陈艳，等.基于EDEM的马铃薯挖掘装置设计与试验[J].农机化研究，2024，46(11)：29－34，44.
SUN Ning，SHI Xianlei，CHEN Yan，et al. Design and experiment of potato digging device based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，46(11)：29－34，44.（in Chinese）
[28] 陈超鹏，全伟，吴明亮，等.基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J].湖南农业大学学报(自然科学版)，2019，45(4)：433－439.
CHEN Chaopeng，QUAN Wei，WU Mingliang，et al. Parameter optimization of vertical penetrating parts in rape transplanting based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)，2019，45(4)：433－439.（in Chinese）
[29] 曾繁地. 基于离散元穴盘苗-栽植器-土壤相互作用的仿真分析与试验研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2023.
ZENG Fandi. Simulation analysis and experimental study on the interaction between seedling and planter and soil based on discrete elements [D]. Hohhot：Inner Mongolia Agricultural University，2023.（in Chinese）
[30] 张荣芳，周纪磊，刘虎，等.玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J].农业机械学报，2022，53(增刊1)：69－77.
ZHANG Rongfang，ZHOU Jilei，LIU Hu，et al. Research on parameter calibration method for discrete element simulation of corn particle bonding model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp.1)：69－77.（in Chinese）
[31] ABHIJIT K，MATHUR S M. Design and development of an automatic vegetable transplanter using a novel rotating finger device with push-type mechanism for plug seedlings[J].International Journal of Vegetable Science，2022，28(2)：121－131.
[32] 史玉鹏，薛博，臧传江，等.山地作物移栽机井窖式单线螺旋成穴装置设计与试验[J].农业机械学报，2023，54(增刊1)：103－114.
SHI Yupeng，XUE Bo，ZANG Chuanjiang，et al. Design and experiment of shaft cell-type single line spiral caving device for mountain crop transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp.1)：103－114.（in Chinese）
[33] 韩长杰，徐阳，尤佳，等.半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机成穴器参数优化[J].农业工程学报，2019，35(11)：48－56.
HAN Changjie，XU Yang，YOU Jia，et al. Optimization of pit parameters of semi-automatic compressed matrix watermelon pot transplanter[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(11)：48－56.（in Chinese）
[34] 苑进，李金光，邹亮亮，等.基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J].农业机械学报，2020，51(增刊2)：85－98.
YUAN Jin，LI Jinguang，ZOU Liangliang，et al. Optimal design and experiment of root cutter for spinach harvester based on discrete elements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.2)：85－98.（in Chinese）
[35] 田立权，李红阳，胡华东，等.同轴双滚筒联合收获机设计与试验[J].农业机械学报，2020，51(增刊2)：139－146.
TIAN Liquan，LI Hongyang ，HU Huadong，et al. Design and experiment on coaxial double speed threshing for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.2)：139－146.（in Chinese）

（上接第216页）

[21] XIAO M，MA Y，WANG C，et al. Design and experiment of fuzzy-PID based tillage depth control system for a self-propelled electric tiller [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2023，16(4)：116－125.
[22] CHEN C L，CHEN P C. Analysis and design of fuzzy control system[J]. Fuzzy Sets and Systems，1993，57(2)：125－140.
[23] 董馨雨. 两相混合式步进电机高精度闭环驱动控制系统及实验研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2021.
DONG Xinyu. Research on high accuracy closed-loop drive control system and experiment of two-phase hybrid stepping motor [D]. Shenyang：Shenyang University of Technology，2021.（in Chinese）
[24] SUDHA G，ANITA R. Performance based comparison between various ZN tuninng PID and fuzzy logic PID controller in position control system of DC motor[J]. International Journal on Soft Computing，2012，3(3)：55.
[25] SAIN D，MOHAN B M. Modeling，simulation and experimental realization of a new nonlinear fuzzy PID controller using center of gravity defuzzification[J]. ISA Transactions，2021，110：319－327.
[26] 张学东，刘立晶，宁义超，等.蔬菜移栽机顶夹式取苗装置末端执行器设计与试验[J].农业机械学报，2023，54(增刊1)：115－124，134.
ZHANG Xuedong，LIU Lijing，NING Yichao，et al. Design and experiment of end effector of seedling taking by jacking and clampling of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp.1)：115－124，134.（in Chinese）
[27] 车刚，刘威，万霖，等.水稻秧棚苗床精平机自动调平系统设计与试验[J].农业工程学报，2023，39(22)：9－17.
CHE Gang，LIU Wei，WAN Lin，et al. Design and experiment of the automatic leveling system for seedbed precision leveler in rice seedling nursery[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(22)：9－17.（in Chinese）