DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.009

基于IPSO-FUZZY-PP的履带式甘蓝收获机路径跟踪控制器的研究

高旭[1]，张健飞[1*]，赵闰[1]，杨旭辉[1,2]，刘建博[1,2]

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所，江苏南京，210014；2. 沈阳农业大学工程学院，辽宁沈阳，110866)

摘要：针对现有差速履带底盘路径跟踪控制器跟踪精度低、场景适配性差问题，本研究以小型轻简型履带式甘蓝收获机为试验平台，创新设计一种改进粒子群优化(IPSO)前视距离的自适应模糊纯跟踪控制器(IPSO-FUZZY-PP)。研究首先通过分析甘蓝收获机拔取辊作业特性，确定甘蓝对行导航精度需求随后构建履带式收获机差速运动学模型，明确两侧履带速度与行驶、转向状态的关联；以横向偏差、航向偏差为模糊控制器输入，双侧电机PWM占空比差为输出，结合IPSO算法动态优化前视距离。仿真结果显示，该控制器收敛速度较传统粒子群优化算法提升60%，可有效避免局部最优解；水泥路面试验(行驶速度0.5 m/s)中，该控制器最大跟踪偏差为0.035 m，平均绝对偏差为0.017 m，较传统纯跟踪控制器精度提升34.6%，上升时间从1.71 s缩短至0.76 s，响应速度提升55.6%；田间试验(行驶速度0.3 m/s、0.5 m/s、0.8 m/s)中，其最大跟踪偏差分别不超过0.031 m、0.037 m、0.041 m，平均绝对偏差分别控制在0.010 m、0.015 m、0.018 m以内，精度较传统纯跟踪控制器有所提升。本研究提出的控制器，可动态适配甘蓝收获的窄行距、多速度工况，满足甘蓝采收导航精度需求，为甘蓝无人化收获的精准对行提供技术支撑。

关键词：甘蓝；履带式收获机；纯跟踪；粒子群算法；精准作业；模糊控制

中图分类号：S225.99；TP273 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7217(2026)01-0086-10

高旭，张健飞，赵闰，杨旭辉，刘建博. 基于IPSO-FUZZY-PP的履带式甘蓝收获机路径跟踪控制器的研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(1)：86－95

GAO Xu, ZHANG Jianfei, ZHAO Run, YANG Xuhui, LIU Jianbo. Research on path tracking controller of crawler-type cabbage harvester based on IPSO-FUZZY-PP [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 86－95

0 引言

城镇化加速背景下，农村青壮年劳动力持续外流，农业领域“用工难、用工贵”问题日益凸显，而以深度学习、计算机视觉、强化学习为代表的前沿人工智能技术与物联网、自动驾驶技术的深度融合，正为农业产业升级注入革命性动力[1]。作为我国核心蔬菜品类，甘蓝产业地位举足轻重，据联合国粮食及农业组织(FAO)统计，我国甘蓝种植面积稳居世界第一[2]。但其收获环节机械化水平仍偏低，发展无人智能装备成为产业发展的迫切需求。其中，实现无人收获机的精准对行控制是突破关键技术瓶颈、提升作业效率的核心。

在农业机械精准对行控制领域，国外研究起步较早，广泛融合GNSS(global navigation satellite system)[3]、机器视觉[4-5]、深度学习及激光雷达[6]等技术，实现了较高程度的自动化导航，但仍受环境干扰大、成本高昂等限制。国内研究则较多聚焦于基于模糊控制[7-10]、PID及其改进算法[11-15]的路径跟踪方法，在特定作物与田间环境中取得了良好的控制效果，但普遍存在硬件依赖性强、场景适应性不足、动态调节精度有限等问题，难以完全适配如甘蓝窄行距等复杂作业场景。为此，本研究提出IPSO-FUZZY-PP控制器，旨在通过智能优化前视距离与模糊实时纠偏，提升电动履带底盘在窄行距条件下的跟踪精度与适应性。

1 甘蓝无人化收获对行导航精度范围要求

甘蓝采收需经过一系列连续操作，依次由拔取辊拔取甘蓝，辊筒式夹持输送装置完成夹持与输送，最后由圆盘切根装置执行切根。其中，拔取辊对甘蓝的拔取是实现有效采收的前提；而精确的导航精度能确保

收稿日期：2025-10-15 修回日期：2025-12-20

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2001203)；江苏省农机研发制造推广应用一体化试点专项项目(JSYTH10)

第一作者：高旭，男，1999年生，山东诸城人，硕士研究生；研究方向为农业机械无人驾驶技术及装备。E-mail：2452052464@qq.com

*通信作者：张健飞，男，1989年生，辽宁建平人，博士，副研究员；研究方向为结球类蔬菜收获、复杂地形无人驾驶技术及装备。E-mail：zhangjianfei@caas.cn

甘蓝进入收获机拔取范围，这对实现有效采收、保障对行准确性至关重要。课题组设计的甘蓝收获机能收获直径为120～180 mm的甘蓝。将太仓市璜泾镇现代农业园试验田内种植的绿球八号甘蓝作为试验分析对象，经过大量采样分析，150 mm处于80%以上，故在确定最小导航精度范围时，以直径为150 mm的甘蓝作为研究对象，设定坐标系，以拔取辊范围中心为原点，规定左边为负方向，右边为正方向。当甘蓝质心处于拔取辊范围中心位置（即坐标原点）时，此时甘蓝恰好能被收获，导航误差为0，对应图1(a)所示情况。当甘蓝处于拔取辊范围最左侧，导航精度下限为－50 mm，如图1(b)所示，当甘蓝处于拔取辊范围最右侧，导航精度上限为＋50 mm，如图1(c)所示。综合以上分析，为确保甘蓝能够被正常收获，导航精度需保证甘蓝质心位置在一定范围内波动时，甘蓝仍处于拔取辊可作用的范围。经过上述不同情况的探讨可知，甘蓝对行导航精度范围需控制在±50 mm内。

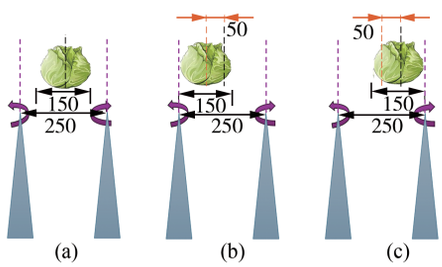


图1　甘蓝对行导航精度分析

Figure 1　Cabbage row navigation accuracy analysis

2　履带式甘蓝收获机自动导航作业系统的组成

2.1　履带式甘蓝收获机整体结构

履带式甘蓝收获机选用电动驱动平台，其核心构成包括动力底盘、甘蓝收获割台及电控系统，各系统相互配合，共同支撑收获机的行驶与甘蓝收获作业。收获机自动导航作业系统的具体布局如图2所示。动力底盘作为收获机的行驶核心部件，由橡胶履带总成、行星减速器、锂电池组及无刷直流电机共同构成。机箱内部集成了锂电池组、无刷直流电机及直角行星减速器3类关键部件，为避免作业环境中的粉尘、水渍对部件造成损坏，上述组件均进行了防水防尘密封处理。甘蓝收获机采用课题组研制的辊筒夹持式甘蓝割台。在甘蓝收获机作业过程中，割台电机驱动拔取辊、辊筒式夹持输送装置及圆盘切根装置协同工作，依次完成甘蓝的拔取、夹持、输送与切根等收获环节，保障甘蓝收获的效率与完整性。电控系统的核心功能为对行走电机和割台电机的作业状态调控，通过精准控制两电机的启停、转速等参数，保障收获机行驶与收获动作的协同运转。

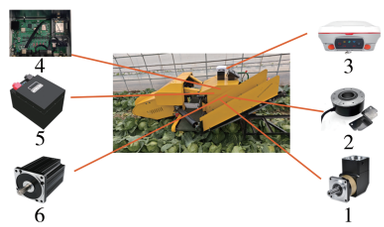


图2　履带式甘蓝收获机自动导航作业系统

Figure 2　Automatic navigation operation system of crawler cabbage harvester

1. 直角行星减速机　2. 旋转编码器　3. RTK-GNSS接收机
4. 主控机　5. 电机驱动器　6. 直流无刷电机

2.2　自动导航作业系统结构组成

履带式甘蓝收获机导航作业系统的核心构成包括传感模块、行走模块、控制模块和收获模块，各模块协同实现导航作业功能，系统总体架构如图3所示。传感模块包含两类核心装置：RTK-GNSS移动站设备内部融合了GNSS高精度板卡与IMU姿态传感器，为系统提供高精度定位与姿态数据；ZKT8030增量式光电旋转编码器主要用于检测收获机底盘两侧主动轴的转速，为行走控制提供关键转速反馈。控制模块以工控机为核心，其核心功能为：接收传感模块传输的定位、姿态及转速数据，对这些数据进行分析和处理后，生成控制指令，分别对行走模块的运动状态和收获模块的作业状态实施精准控制行走模块由双侧驱动电机与电机驱动装置组成，通过电机驱动装置精准调节两侧驱动电机的转速，利用两侧电机的转速差实现收获机灵活的转向动作，保障导航过程中的行驶稳定性。

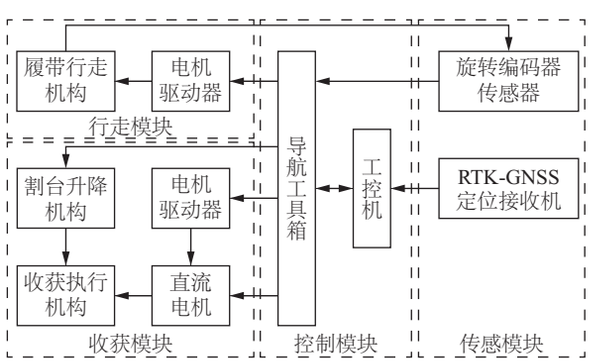


图3　自动导航作业系统总体结构图

Figure 3　The overall structure diagram of automatic navigation operation system

3　履带式甘蓝收获机导航控制器设计

3.1　履带式甘蓝收获机运动学模型

为确保履带式甘蓝收获机达成精准的对行作业，路径跟踪控制器的设计需满足收获作业的精度标准。

考虑到履带式行走机构独特的结构设计与车辆运动特征,其运动学模型选用经典的差速模型。在该模型里,车辆的运动状态由两侧履带的速度共同决定。在此基础上,提出了如下假定:履带行走机构的质量中心和几何中心是完全重叠的,整个机械结构绕中心对称布置;在行进过程中,履带只在路面上进行了纯滚动,没有打滑或打滑的情况,说明履带具有一定的转弯半径;各边履带的瞬间转向中心与接地几何中心完全一致。正如履带行走装置的运动图(图4)所示,在上位机发出步行命令之后,控制器会把这个命令转化成电信号,然后把它传送到下位机。

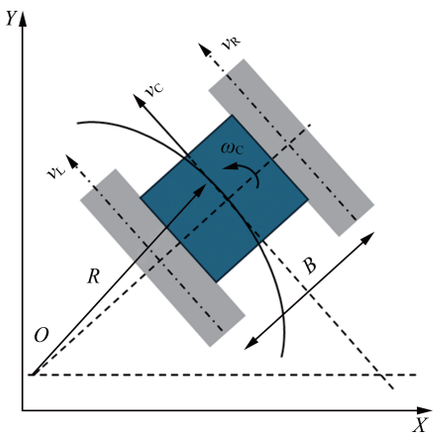


图4 履带式行走机构运动示意图

Figure 4 Motion diagram of crawler walking mechanism

$$\begin{cases} v_C = \dfrac{v_L + v_R}{2} \\ R = \dfrac{B(v_L + v_R)}{2(v_L - v_R)} \\ \omega_C = \dfrac{v_L - v_R}{B} \end{cases} \tag{1}$$

式中:v_C——履带式行走机构行走速度,m/s;

v_L——左侧履带线速度,m/s;

v_R——右侧履带线速度,m/s;

R——车辆以点O为转向中心的理论转向半径,m;

B——履带轨距,m;

ω_C——车辆瞬时转向角速度,rad/s。

由式(1)可知,当$v_L=v_R$时,即两侧履带速度相等,车体转向角速度为0°,转向半径R趋近于无穷大,此时履带车处于直线行驶状态;当$v_L>v_R$或$v_L<v_R$时,履带车以点O为转向中心,以R为半径做转向运动;当$v_L=-v_R$时,即两侧履带速度大小相等、方向相反,履带车的转向半径$0\leqslant R\leqslant B/2$,车辆进行原地转向。

3.2 自适应模糊控制器设计

双电机履带式底盘执行导航作业过程中,工控机借助RTK-GNSS移动站采集底盘的实时位置数据与航向角信息。在设定导航路径起始点并生成目标路径后,将实时位姿信息与目标路径进行对比计算,得出横向偏差值与航向偏差值。随后结合行驶速度、转向半径等参数传递至改进粒子群(IPSO)算法模块,求解出最优前视距离,再通过纯跟踪控制器解算得到航向偏差。最后,利用模糊控制获得PWM占空比,再传送给左右两台电机控制,实现甘蓝收获机底盘的轨迹跟踪任务。在图5中展示了一种路径跟踪控制器的整体设计图。

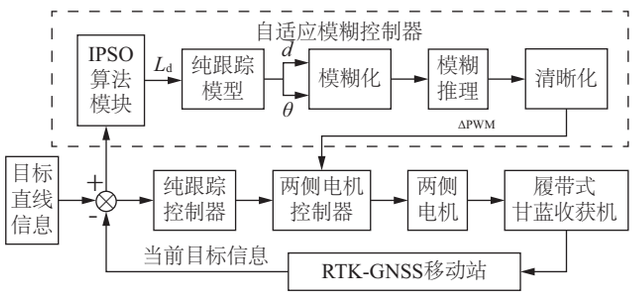


图5 路径跟踪控制器整体设计图

Figure 5 The overall design of the path tracking controller

3.2.1 纯跟踪几何模型分析

纯跟踪几何模型(pure pursuit model)是一种基于几何关系的路径跟踪方法,其核心思想是通过车辆当前位置与路径上预瞄点之间的几何关系,动态计算转向指令,使车辆以圆弧轨迹逼近目标路径。模型基本假设车辆在水平地面上运动,忽略滑移和地形起伏的影响,质心与几何中心重合[16]。车辆通过左右电机的差速实现转向,转向半径为R,纯跟踪几何模型如图6所示。

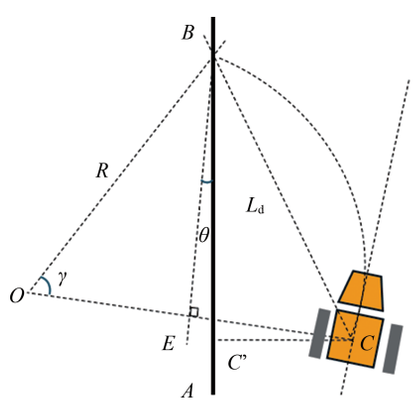


图6 履带式行走机构纯跟踪模型

Figure 6 Pure tracking model of tracked walking mechanism

根据纯跟踪模型的几何关系

$$\begin{cases} L_d = 2R\sin\dfrac{\gamma}{2} \\ \sin\dfrac{\gamma}{2} = \dfrac{L_{CE}}{L_d} \\ L_{CE} = d\cos\theta + \sqrt{L_d^2 - d^2}\,\sin\theta \end{cases} \tag{2}$$

式中：L_d——前视距离，m；

γ——圆弧CD对应的圆心角，(°)；

L_{CE}——点C到点E的距离，m；

d——横向偏差，m；

θ——航向偏差，(°)。

化简可得瞬时转向半径R与横向偏差d、航向偏差θ的关系式为：

$$R=\frac{L_d^2}{2\left(d\cos\theta+\sqrt{L_d^2-d^2\sin\theta}\right)} \tag{3}$$

$$\begin{cases} v_L=v_C\left[1+\dfrac{B\left(d\cos\theta+\sqrt{L_d^2-d^2}\,\sin\theta\right)}{L_d^2}\right] \\ v_R=v_C\left[1-\dfrac{B\left(d\cos\theta+\sqrt{L_d^2-d^2}\,\sin\theta\right)}{L_d^2}\right] \end{cases} \tag{4}$$

3.2.2　模糊控制器设计

为了实现甘蓝收获机的高效的路径修正，模糊控制器的输入变量选取横向偏差和航向偏差。输出变量为PWM占空比差，通过调整左右电机的速度差，提高车辆转向和跟踪控制精度，减少超调量[17]。

1)输入输出变量模糊化处理。基于差速履带车辆运行状态及操作经验，确定横向偏差范围为[−0.2 m，0.2 m]，航向偏差范围为[−45°，45°]，两侧电机控制量PWM之差论域范围为[−70，70]，具体模糊化处理过程如下：横向偏差为d，基本论域为[−0.2 m，0.2 m]，量化等级为{−6，−5，−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4，5，6}，模糊等级为{NB，NM，NS，0，PS，PM，PB}，量化因子取30。

航向偏差为θ，基本论域为[−45°，45°]，量化等级为{−6，−5，−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4，5，6}，模糊等级为{NB，NM，NS，0，PS，PM，PB}，量化因子取0.13。

因电动甘蓝收获机的工作速度一般在0.3 m/s左右，此时两侧电机转速控制量为30%左右，PWM控制量之差u模糊子集的论域为[−70，70]，量化等级为{−6，−5，−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4，5，6}，模糊等级为{NB，NM，NS，0，PS，PM，PB}，量化因子设为0.086。

2)确定隶属度函数。三角形隶属函数有较优的灵活性和较高计算效率，两侧电机控制量PWM之差的三角形隶属度函数如图7所示。

3)制定模糊控制规则。为履带车辆与规划路径的各种方位关系设计相应的控制规则，如表1所示。

模糊规则设计根据履带式甘蓝收获机驾驶员手动操作经验，当横向偏差为正值时，车辆位于路径右侧，为使车辆回归期望路径，需实施左转操作。具体控制方式为增大左电机占空比，从而增强左侧履带驱动力，使车辆向左转向。当横向偏差为负值时，车辆处于路径左侧，此时应控制车辆右转。实现方式是增大右电机占空比，提高右侧履带驱动力，促使车辆向右转向。

若航向偏差为正值，表明车辆航向向右偏离期望方向，为修正航向，需控制车辆左转，以调整行驶方向，使其回到正确路径。当航向偏差为负值时，意味着车辆航向向左偏离期望方向，此时应控制车辆右转，使车辆航向回归到期望方向[18]。

基于以上的驾驶经验，经过专家经验设计的模糊控制器有49条控制规则，对应的模糊规则曲面如图8所示。

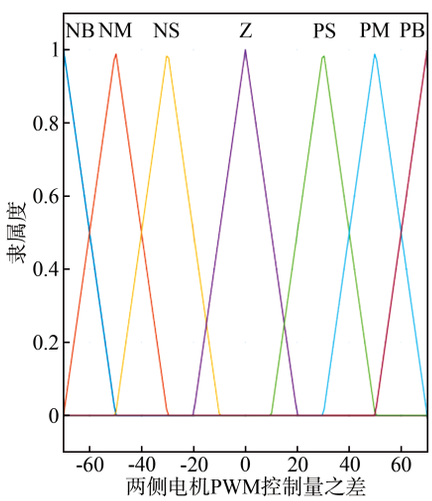


图7　两侧电机PWM控制量之差隶属度函数

Figure 7　Membership function of the difference between PWM control quantities of motors on both sides

表1　模糊控制规则

Table 1　Fuzzy control rules

双电机PWM控制量之差	横向偏差d/m						
航向偏差θ/(°)	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	0
NM	NB	NM	NM	NS	NS	0	PS
NS	NM	NM	NS	NS	0	PS	PM
0	NM	NS	NS	0	PS	PS	PM
PS	NS	NS	0	PS	PS	PM	PB
PM	NS	0	PS	PS	PM	PM	PB
PB	0	PS	PS	PM	PM	PB	PB

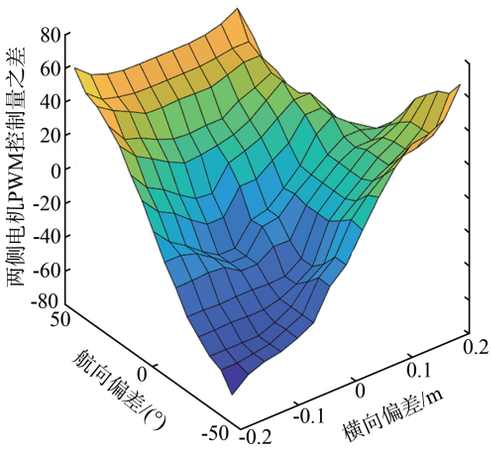


图 8 模糊控制规则曲面图

Figure 8 Fuzzy control rule surface diagram

3.2.3 自适应前视距离

前视距离 L_d 是纯追踪算法中的唯一可调参数[19]，它与车辆的横向偏差 d、航向偏差 θ、车速 v_C 存在直接关联，直线跟踪的性能很大程度上由前视距离 L_d 决定。而传统的固定前视距离策略难以适配甘蓝田间作业的复杂动态环境。甘蓝收获过程中，作业时的车速变化、地形起伏都会影响最佳前视距离。

粒子群算法(PSO)为解决这一难题提供了创新路径。该算法通过模拟鸟群协作觅食的智能行为，在多维参数空间内构建并行搜索机制。每个粒子作为独立的搜索实体，基于自身历史最优位置(个体极值)和种群全局最优位置，通过速度—位置迭代公式动态调整搜索策略，逐步逼近最优解[20]。与传统优化算法相比，PSO 具有显著优势：首先，无须目标函数具备连续性和可导性，特别适用于前视距离这类难以建立精确数学模型的优化问题；其次，算法结构简单，仅需调节惯性权重、学习因子等少量参数，避免了复杂的梯度计算，计算效率更高；最后，通过并行搜索和信息共享机制，PSO 在解空间探索中展现出快速收敛特性，能够在短时间内找到满足当前作业条件的最优前视距离。相比于遗传算法(GA)需通过选择、交叉、变异等复杂操作实现进化，计算复杂度高且参数调整困难和模拟退火算法(SA)对初始温度、降温速率等参数敏感，参数设置不当易陷入局部最优解，PSO 算法凭借其快速收敛性、低复杂度和强鲁棒性，能够在甘蓝收获机实时作业过程中，根据动态信息，高效输出最优前视距离，故引入粒子群算法来显著提升自适应模糊纯跟踪控制器的对行性能。

1)初始化粒子群：随机生成 N 个粒子，每个粒子在 D 维搜索空间中都有对应的位置 $X_i=[x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{iD}]$ 和速度 $V_i=[v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{iD}]$，$i=1,2,\cdots,N$。同时，设定算法的最大迭代次数 T、惯性权重 w 的初始值 w_{max} 和终值 w_{min}，学习因子 c_1 和 c_2。

2)适应度函数确立：适应度函数对粒子群算法有重要影响。根据路径跟踪问题的实际需求，评价指标主要包括路径精度和转向次数两个因素。适应度函数需要基于评价指标构建，因此本研究的目标函数由横向偏差和转向路径角度组成。履带底盘在设施大棚内复杂环境下的高精度跟踪与低转向次数的平衡。路径段的转向角度 δ，$\delta\in[90^\circ,180^\circ]$，要达到适应度最大，确保前视距离在 $L_{os}=K_H$ 附近时达到最优平衡。

$$f(L_{os})=\frac{1}{\exp[K_A\cdot(L_{os}-K_H)^2+K_C]} \tag{5}$$

$$K_H=L_{os_{min}}+\left(\frac{\lambda\cdot|\delta-\delta_{min}|}{\delta_{max}-\delta_{min}}+\frac{\xi\cdot d}{d_{max}}-\xi\right)\cdot(L_{os_{max}}-L_{os_{min}}) \tag{6}$$

式中：K_H——权重函数，表示当前状态下的最优前视距离；

K_A——控制函数的陡峭程度，决定前视距离对 K_H 偏离时适应度下降的速率；

K_C——调整函数的偏移量；

λ、ξ——权重系数，分别调节转向角度和横向偏差对 K_H 的影响权重，$\lambda\in(0,1)$，$\xi\in(-1,0)$；

$L_{os_{min}}$——前视距离的最小值；

$L_{os_{max}}$——前视距离的最大值；

δ_{min}——转向路径角度的最小值；

δ_{max}——转向路径角度的最大值；

d_{max}——横向偏差的最大值。

3)更新个体最优位置和全局最优位置：对于每个粒子，将其当前适应度值 $F(X_i)$ 与个体历史最优适应度值 $F(pbest_i)$ 进行比较。若 $F(X_i)<F(pbest_i)$，则更新个体最优位置 $pbest_i=X_i$。在所有粒子的个体最优位置中，找出适应度值最小的位置作为全局最优位置 $pbest_i$。

4)动态调整惯性权重：提出动态调节惯性权值的方法，以实现对全局寻优和局部寻优的均衡。随着迭代次数 t 的增加，惯性权重 w 从 w_{max} 线性递减至 w_{min}，公式为：

$$w=w_{max}-\frac{w_{max}-w_{min}}{T}\times t \tag{7}$$

5)自适应调整学习因子：通过调整学习因子改变粒子向个体最优和全局最优的强度。个体学习因子调整公式和全局学习因子调整公式分别为：

$$c_1=c_{1min}+\frac{F(pbest_i)-\bar{F}}{F_{max}-F_{min}}\times(c_{1max}-c_{1min}) \tag{8}$$

$$c_2 = c_{2\max} - \frac{F(pbest_i) - \bar{F}}{F_{\max} - F_{\min}} \times (c_{2\max} - c_{2\min}) \quad (9)$$

式中：$F(pbest_i)$——种群平均适应度值；

$F_{\max}$——种群中的最大适应度值；

$F_{\min}$——种群中的最小适应度值；

$c_{1\max}$、$c_{1\min}$、$c_{2\max}$、$c_{2\min}$——学习因子的设定最值。

6）更新粒子速度和位置：依据动态调整后的惯性权重w以及自适应调整的学习因子c_1、c_2，更新粒子的速度和位置。速度更新公式和位置更新公式分别为：

$$v_{id}(t+1) = w \times v_{id}(t) + c_1 \times r_{1d}(t) \times \left[p_{id}(t) - x_{id}(t)\right] + c_2 \times r_{2d}(t) \times \left[p_{gd}(t) - x_{id}(t)\right] \quad (10)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (11)$$

式中：r_{1d}、r_{2d}——[0,1]区间内的随机数；

p_{id}——粒子i的历史最优位置的第d维分量；

p_{gd}——全局最优位置的第d维分量。

7）局部搜索机制：在粒子当前位置附近随机生成一个小的扰动向量$\Delta X_i = [\Delta x_{i1}, \Delta x_{i2}, \cdots, \Delta x_{iD}]$，其中$\Delta x_{id} \sim N(0, \sigma^2)$（$N$表示正态分布，$\sigma$为标准差，然后更新粒子位置$X_i = X_i + \Delta X_i$，使粒子在局部区域内进行更细致的搜索，有助于发现更好的解。

8）粒子群规模设定为50，最大迭代次数设为100次。惯性权重w的最小值设为0.4，最大值设为0.9，保证算法前期粒子有较强的全局搜索能力，使算法后期粒子专注于局部搜索。学习因子c_1的最大值为2.5，最小值为1；学习因子c_2的最大值为2.5，最小值为0.5。局部搜索判断次数设为10次，当粒子连续10次位置未更新时触发局部搜索。局部搜索范围设为[−0.1,0.1]，在当前位置附近较小范围内进行精细搜索，有助于发现更优解。权重系数w_1、w_2、w_3分别设为0.3、0.2、0.1。

3.2.4　自适应模糊控制器设计仿真

基于上述理论，进行了改进粒子群搜索算法仿真分析，算法运行时间为0.05～0.07 s，并将其与经典粒子群搜索算法在相同算例进行对比分析，仿真结果如图9所示，改进粒子群搜索算法在前15次迭代内快速逼近最优值（适应度值从0.628降至0.624），相比传统粒子群搜索算法收敛速度提升60%，改进粒子群搜索算法在迭代前期的收敛速度明显提升，并多次跳出局部最优值，且迭代62次后寻找到整个搜索过程中最佳适度值，相对于经典的粒子群搜索算法迭代次数减少了27次，验证了改进粒子群算法的有效性。

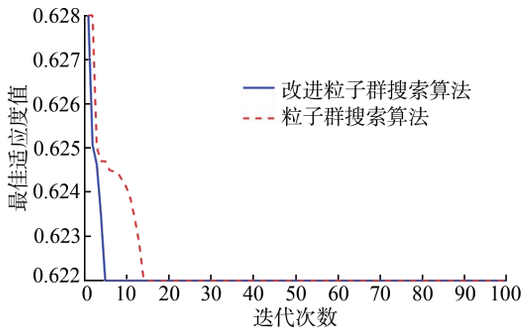


图9　改进粒子群算法与粒子群算法仿真对比

Figure 9　Simulation comparison between improved particle swarm optimization algorithm and particle swarm optimization algorithm

4　导航系统试验

4.1　路面直线跟踪试验

验证履带式甘蓝收获机搭载的自适应前视模糊控制器在直线跟踪场景下的导航精度与响应效率，在盐城盐海拖拉机厂内空旷无障碍物的水泥路面开展验证试验。试验启动前需完成两项关键准备：一是对控制系统各部件（包含传感器、控制箱、工控机等）开展安装调试与功能核查，确保各组件连接可靠、可正常运行；二是启动RTK-GNSS接收机，等待移动站完成冷启动；监测工控机反馈的定位数据，待数据更新频率达标且连续5 s无中断后，确认定位系统状态稳定，进入路径设定环节。通过工控机上位机界面，在空旷区域内依次选定A、B两个点位，系统自动以A、B两点连线生成试验基准路径，保存路径参数。首先启动履带式甘蓝收获机，先将其收获模块抬升并保持悬空状态，防止模块接触地面影响试验精度；将样机行驶至AB路径起点附近，通过工控机调节初始姿态：利用位姿传感器反馈数据，将航向偏差控制在20°以内，横向偏差维持在0.5 m左右，确保两次测试初始条件一致。接着开启上位机软件的导航数据保存功能，启动试验并同步记录数据，对试验过程中关键数据进行实时采集与存储，并对两次测试的原始数据进行筛选，剔除信号干扰、设备短暂异常导致的无效数据，保留真实有效的数据用于分析，确保数据可靠性。

遵循上述试验步骤，在确保初始偏差与航向状态基本一致、车体速度设定为0.5 m/s的条件下，分别为样机搭载自适应前视模糊控制器和纯追踪控制器，开展两次路面导航控制效果测试，通过两组测试数据的对比，进一步验证自适应模糊导航控制器的直线跟踪性能[21]。

为量化评估两种控制器的导航精度差异，选用最大跟踪偏差与平均绝对偏差作为用于评估导航精度的

核心指标。其中,指标计算结果的符号含义明确:符号为正时,代表导航精度提升;符号为负时,则代表导航精度下降,该标准为后续性能提升量化分析提供统一依据。

$$M=\frac{S_{avg}-M_{avg}}{S_{avg}}\times 100\% \tag{12}$$

式中:M——导航精度提高百分比,%;

S_{avg}——纯追踪控制器偏差平均值,m;

M_{avg}——模糊自适应控制器偏差平均值,m。

根据式(12)的计算结果,从精度对比:在0.5 m/s行驶速度下,自适应前视模糊控制器的最大跟踪偏差(0.035 m),较纯追踪控制器(0.066 m)降低47.0%,平均绝对偏差(0.017 m),较纯追踪控制器(0.026 m)降低34.6%,说明其在直线跟踪过程中对偏差的控制能力更强,导航精度显著更优。

从响应效率对比:自适应前视模糊控制器的上升时间(0.76 s),较纯追踪控制器(1.71 s)缩短55.6%,反映其对初始偏差、航向波动的修正速度更快,响应更灵敏,能更快使样机回归基准路径,减少偏差累积[22]。

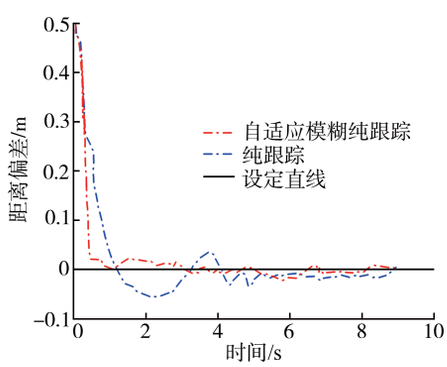


图10 自适应模糊纯跟踪算法与纯跟踪算法试验对比

Figure 10 Comparison of adaptive fuzzy pure tracking algorithm and pure tracking algorithm

4.2 田间直线跟踪试验

为验证自适应模糊控制算法是否满足精度要求并保障高喂入成功率,同时对比传统纯跟踪导航方案性能。于2025年4月17日在太仓市璜泾镇现代农业园旱田环境下开展系统性试验。试验准备阶段,确保导航中心和拔取辊中心对齐:调整拔取辊位置,使两者中心重合,误差≤1 mm,避免机械偏移导致质心误判。试验设自适应模糊控制算法组、传统纯跟踪导航组的3种速度对比,每组重复3次,核心步骤如下:从路径起点出发,待RTK信号稳定后启动作业,同步开启数据采集设备[23]。以设定速度行驶,每10 m记录1次底盘中心坐标,通过摄像头观察前后3株甘蓝喂入情况,标注有效喂入情况。完成单条路径后地头转向,每20 m统计样区有效喂入株数;每次试验后随机选取3个1 m×1 m样方,按"喂入成功率=成功株数/总株数×100%"计算成功率。每组重复3次,试验前重新校准设备,更换样方位置避免重复统计,确保数据代表性。

表2 纯跟踪与自适应前视模糊纯跟踪效果对比

Table 2 Pure tracking and adaptive forward-looking fuzzy pure tracking effect comparison

控制方法	速度/(m·s^{-1})	试验轮次	最大横向偏差/m	平均绝对偏差/m	样方总株数/株	喂入成功株数/株	喂入成功率/%
纯跟踪控制器	0.3	1	0.063	0.03	11	9	81.8
		2	0.065	0.031	10	9	90.0
		3	0.064	0.03	12	10	83.3
		均值	0.064	0.030	—	—	84.8
	0.5	1	0.067	0.031	10	6	60.0
		2	0.068	0.032	11	7	63.6
		3	0.066	0.031	12	8	66.7
		均值	0.067	0.031	—	—	63.6
	0.8	1	0.070	0.033	11	7	63.6
		2	0.072	0.034	10	6	60.0
		3	0.071	0.032	12	7	58.3
		均值	0.071	0.033	—	—	60.6
自适应模糊纯跟踪控制器	0.3	1	0.031	0.010	10	10	100
		2	0.032	0.011	11	10	90.9
		3	0.030	0.009	12	11	91.7
		均值	0.031	0.010	—	—	93.9
	0.5	1	0.037	0.015	10	9	90.0
		2	0.038	0.016	11	10	90.9
		3	0.036	0.014	12	11	91.7
		均值	0.037	0.015	—	—	90.9
	0.8	1	0.041	0.018	9	7	77.8
		2	0.042	0.019	10	8	80.0
		3	0.040	0.017	11	9	81.8
		均值	0.041	0.018	—	—	80.0

表2呈现了纯追踪控制器与自适应模糊纯追踪控制器的控制性能对比结果。路径跟踪精度对比:自适应模糊控制器在0.3、0.5、0.8 m/s速度下的最大横向偏差平均值分别为0.031 m、0.037 m、0.041 m,较传统纯跟踪控制器分别降低51.56%、44.78%、42.65%;平均绝对偏差降低66.7%、51.61%、45.45%,验证了的路径跟踪精度优势。自适应模糊控制器在各速度下

的喂入成功率显著高于传统纯跟踪控制器。综合结论：自适应模糊纯跟踪控制器在甘蓝田间采收场景中，既能保证不同作业速度下的路径跟踪精度，又能显著提升喂入成功率，整体性能优于传统纯跟踪控制器，完全满足甘蓝精准采收的实际需求[24]。



图 11　田间试验现场

Figure 11　Field test site

5　结论

1）针对现有差速履带底盘路径跟踪控制器跟踪精度低、场景适配性差问题，本研究以小型轻简型履带式甘蓝收获机为试验平台，创新设计一种改进粒子群优化（IPSO）前视距离的自适应模糊纯跟踪控制器。

2）根据对甘蓝收获机拔取辊拔取范围的分析，确定甘蓝对行导航精度范围要求，以拔取辊范围中心位置为坐标原点，甘蓝对行导航精度范围要求为±50 mm。

3）本研究以自主研发的履带式甘蓝收获机为对象，构建智能化导航控制体系。首先基于收获机运动学模型与几何学模型，建立纯跟踪的数学模型。在路径跟踪核心参数优化方面，采用改进粒子群优化算法（IPSO）构建自适应前视距离策略，相较于传统粒子群算法收敛速度提升60%。在控制策略设计环节，创新性地将模糊逻辑理论融入纯跟踪控制架构，最终构建的自适应模糊纯跟踪控制器。

4）水泥路面试验表明：在0.5 m/s行驶速度下，自适应前视模糊控制器的最大跟踪偏差较纯追踪控制器降低47.0%，平均绝对偏差较纯追踪控制器降低34.6%，说明其在直线跟踪过程中对偏差的控制能力更强，导航精度显著更优。

从响应效率对比：自适应前视模糊控制器的上升时间较纯追踪控制器缩短55.6%，反映其对初始偏差、航向波动的修正速度更快，响应更灵敏，能更快使样机回归基准路径，减少偏差累积。

5）田间路径跟踪及成功喂入率试验表明：自适应模糊控制器在0.3、0.5、0.8 m/s速度下的最大横向偏差分别为0.031 m、0.037 m、0.041 m，较传统纯跟踪控制器分别降低51.56%、44.78%、42.65%；平均绝对偏差降低66.7%、51.61%、45.45%，验证了的路径跟踪精度优势且自适应模糊控制器在各速度下的喂入成功率显著高于传统纯跟踪控制器。

参　考　文　献

[1] 罗锡文. 人工智能与植保机械化[J]. 智能化农业装备学报（中英文），2020，1(1)：1－6.
LUO Xiwen. Artificial intelligence and plant protection mechanization [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2020，1(1)：1－6.

[2] 张健飞，杨旭辉，佟文玉，等. 甘蓝类蔬菜全程机械化现状、问题与发展路径研究[J]. 蔬菜，2025(9/10)：87－97.
ZHANG Jianfei，YANG Xuhui，TONG Wenyu，et al. Research on the status，problems and development paths of full mechanization in *Brassica* vegetables [J]. Vegetables，2025(9/10)：87－97.

[3] KANAGASINGHAM S，EKPANYAPONG M，CHAIHAN R. Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot [J]. Precision Agriculture，2020，21(4)：831－855.

[4] AGHI D，MAZZIA V，CHIABERGE M. Local motion planner for autonomous navigation in vineyards with a RGB-D camera-based algorithm and deep learning synergy [J]. Machines，2020，8(2)：27.

[5] NEHME H，AUBRY C，SOLATGES，T，et al. LiDAR-based structure tracking for agricultural robots：Application to autonomous navigation in vineyards [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems，2021，103(4)：61.

[6] KURITA H，OKU M，NAKAMURA T，et al. Localization method using camera and LiDAR and its application to autonomous mowing in orchards [J]. Journal of Robotics and Mechatronics，2022，34(4)：877－886.

[7] 王伟康，罗承铭，张国忠，等. 双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报（自然科学版），2022，41(2)：199－207.
WANG Weikang，LUO Chengming，ZHANG Guozhong，et al. Design and experiment of automatic navigation system for double-motor crawler rice harvester chassis [J]. Journal of Huazhong Agricultural University （Natural Science Edition），2022，41(2)：199－207.

[8] 王法安，王博洋，张兆国，等. 履带车辆自适应预瞄跟踪模糊控制算法[J]. 农业工程学报，2024，40(10)：32－43.
WANG Fa′an，WANG Boyang，ZHANG Zhaoguo，et al. Adaptive preview tracking fuzzy control algorithm for tracked vehicles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(10)：32－43.

[9] 赵状状，张国忠，罗承铭，等. 考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J]. 农业工程学报，2024，40(12)：

46－54.
ZHAO Zhuangzhuang, ZHANG Guozhong, LUO Chengming, et al. Path tracking algorithm of the dual motor tracked chassis considering skid and slip [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(12): 46－54.

[10] 赵立军，贾云帆，殷文科，等. 基于模型预测控制的履带式除草机器人设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(4)：84－94.
ZHAO Lijun, JIA Yunfan, YIN Wenke, et al. Design and experiment of a tracked weeding robot based on model predictive control [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 84－94.

[11] 章少岑，魏新华，邓屹，等. 履带式收割机全田块路径跟踪算法设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(20)：36－45.
ZHANG Shaocen, WEI Xinhua, DENG Yi, et al. Design and experiments of the whole field path tracking algorithm for a track based harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (20): 36－45.

[12] ZHANG S, WEI X, LIU C, et al. Adaptive path tracking and control system for unmanned crawler harvesters in paddy fields [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109878.

[13] 何杰，满忠贤，胡炼，等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(1)：9－17.
HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 9－17.

[14] 崔鑫宇，崔冰波，马振，等. 几何路径跟踪组合算法及其农业机械自动导航应用[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：24－31.
CUI Xinyu, CUI Bingbo, MA Zhen, et al. Integration of geometric-based path tracking controller and its application in agricultural machinery automatic navigation [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4 (3): 24－31.

[15] 贺庆，冀杰，冯伟，等. 割草机器人自适应时域MPC路径跟踪控制方法[J]. 智慧农业(中英文)，2024，6(3)：82－93.
HE Qing, JI Jie, FENG Wei, et al. Adaptive time horizon MPC path tracking control methodfor mowing robot [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 82－93.

[16] HU C, RU Y, LI X, et al. Path tracking control for brake-steering tracked vehicles based on an improved pure pursuit algorithm [J]. Biosystems Engineering, 2024, 242: 1－15.

[17] 胡杰，钟鑫凯，陈瑞楠，等. 基于模糊LQR的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程，2022，44(1)：17－25，43.
HU Jie, ZHONG Xinkai, CHEN Ruinan, et al. Path tracking control for intelligent vehicles based on fuzzy LQR [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 17－25, 43.

[18] SHUAI W, WANG H, ZHANG H, et al. Research on satellite navigation control of six-crawler machinery based on Fuzzy PID algorithm [J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(4): 984－999.

[19] WANG X, ZHANG B, DU X, et al. An adaptive path tracking controller with dynamic look-ahead distance optimization for crawler orchard sprayers [C]// Actuators. MDPI, 2025, 14(3): 154.

[20] ZHENG J, WANG X, HUANG X, et al. Adaptive control system of header for cabbage combine harvester based on IPSO-fuzzy PID controller [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110044.

[21] 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 Zhaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit controller for crawler rapeseed planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (12): 105－114.

[22] 景亮，冯瑞，沈跃，等. 基于扰动观测的4WSS电驱动无人农机路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报，2024，40(23)：73－81.
JING Liang, FENG Rui, SHEN Yue, et al. Path tracking control method for 4WSS unmanned agricultural machinery based on disturbance observation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (23): 73－81.

[23] 刘文龙，郭锐，赵静一. 基于预瞄模型的农机路径跟踪预测控制方法[J]. 农业工程学报，2023，39(17)：39－50.
LIU Wenlong, GUO Rui, ZHAO Jingyi. Predictive control method for the path tracking of agricultural machinery based on preview model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39 (17): 39－50.

[24] 付小波，韩增德，韩科立，等. 基于粒子群算法改进的轮式收获机纯追踪模型路径跟踪研究[J]. 农业工程，2023，13(7)：105－112.
FU Xiaobo, HAN Zengde, HAN Keli, et al. Path tracking of improved pure pursuit model of wheeled harvester based on PSO algorithm [J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(7): 105－112.

Research on path tracking controller of crawler-type cabbage harvester based on IPSO-FUZZY-PP

GAO Xu[1], ZHANG Jianfei[1*], ZHAO Run[1], YANG Xuhui[1, 2], LIU Jianbo[1, 2]

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*; 2. *College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low tracking accuracy and poor scene adaptability of the existing differential tracked chassis path tracking controller, this study uses a small light and simple tracked cabbage harvester as a test platform to innovatively design an improved particle swarm optimization (IPSO) with fore-look distance adaptive fuzzy pure tracking controller (IPSO-FUZZY-PP). First, the study analyzes the operating characteristics of the cabbage harvester's pulling roller, and the cabbage's demand for navigation accuracy is determined. Then, the differential kinematics model of the crawler harvester is constructed to clarify the relationship between the track speed on both sides and the driving and steering states. The lateral deviation and heading deviation are used as the input of the fuzzy controller, and the PWM duty cycle difference of the two-sided motor is used as the output. The IPSO algorithm is used to dynamically optimize the fore-look distance. The simulation results show that the convergence speed of the controller is 60% higher than that of the traditional particle swarm optimization algorithm, which can effectively avoid the local optimal solution. In the cement pavement test (driving speed of 0.5 m/s), the maximum tracking deviation of the controller is 0.035 m, and the average absolute deviation is 0.017 m. Compared with the traditional pure tracking controller, the accuracy is improved by 34.6%, the rise time is shortened from 1.71 s to 0.76 s, and the response speed is improved by 55.6%. In the field test (driving speed 0.3, 0.5, 0.8 m/s), the maximum tracking deviation is not more than 0.031 m, 0.037 m, 0.041 m, respectively, and the average absolute deviation is controlled within 0.010 m, 0.015 m, 0.018 m, respectively. Compared with the traditional pure tracking controller, the accuracy is improved. The controller proposed in this study can dynamically adapt to the narrow row spacing and multi-speed conditions of cabbage harvest, meet the accuracy requirements of cabbage harvest navigation, and provide technical support for the precise alignment of unmanned cabbage harvest.

Keywords: cabbage; crawler harvester; pure tracking; particle swarm optimization algorithm; precise operation; fuzzy control

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2023YFD2001203); Jiangsu Agricultural Machinery Research and Development Manufacturing Application Integration Pilot Special Project (JSYTH10)

First Author: GAO Xu, E-mail: 2452052464@qq.com

* **Correspondence Author:** ZHANG Jianfei, E-mail: zhangjianfei@caas.cn