doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.002

园艺电动旋耕机器人设计与试验

黄薛凯[1]　施印炎[1,2]　汪小旦[1,2]　王延鑫[1]　林乐彬[1]　郑恩来[1,2]
(1.南京农业大学工学院,南京 211800;2.江苏省现代农业设施农业技术与装备工程实验室,南京 211800)

摘要:针对设施园艺旋耕作业存在的机具缺失、传统拖拉机牵引污染大、功耗高、运动灵活性差等问题,本文设计了一种新能源园艺纯电自走式旋耕机器人。基于作业场景与农艺需求,确定了整机结构方案,开发了隔离型 DC-DC 电气系统架构、模块化旋耕机组及电液提升系统。通过虚拟样机技术构建了考虑底盘俯仰角与旋耕机组倾角的耕深 MAP 图,并采用 BP 神经网络 PID 控制器调控耕深电液提升系统。为提高控制性能,提出了一种改进果蝇算法,融合自适应步长、高斯随机游走及种群浓度判定值优化策略,用于 BP 神经网络 PID 初始权值整定。结果表明,改进果蝇算法较传统方法减少 9 次迭代,目标函数值降低 6.14%;在阶跃信号下基于该算法整定的 BP 神经网络 PID 控制器调节时间仅需 0.31 s,无稳态误差与超调,且对正弦信号与动态斜坡信号具有快速响应特性。田间验证显示,机器人旋耕速度均值为 2.81 km/h,平均偏移量为 0.211 2 m,偏移率为 0.524%,最小转弯半径为 458 mm,满足灵活行走转向要求;耕深 50、100、150 mm 工况下,稳定性系数分别为 89.51%、88.47%、92.85%,土壤破碎率达 70.51%、75.07%、89.14%,均优于碎土率大于 65%、耕深稳定性系数大于 85% 的作业标准。研究结果为设施旋耕机械设计与精准控制提供理论依据。

关键词:设施园艺;旋耕机器人;耕深自适应控制;BP 神经网络 PID;性能试验
中图分类号:S219.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0021-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Autonomous Electric Rototiller Robot for Horticulture

HUANG Xuekai[1]　SHI Yinyan[1,2]　WANG Xiaochan[1,2]　WANG Yanxin[1]　LIN Lebin[1]　ZHENG Enlai[1,2]
(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 211800, *China*
2. *Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facility Agriculture Technology and Equipment*, *Nanjing* 211800, *China*)

Abstract: In response to the issues of equipment shortages, high pollution, excessive power consumption, and poor maneuverability in traditional tractor-tillage operations in facility horticulture, an energy-driven, purely electric self-propelled tillage robot was designed. Based on operational scenarios and agronomic requirements, the overall structural scheme was determined, and an isolated DCDC electrical system architecture, modular tillage units, and an electro-hydraulic lifting system were developed. Using a virtual prototype simulation approach, a tillage depth MAP chart considering the chassis pitch angle and tiller inclination was constructed, and a BP neural network PID controller was employed to regulate the electro-hydraulic lifting system for tillage depth. To enhance control performance, an improved fruit fly optimization algorithm incorporating adaptive step size, Gaussian random walk, and population concentration judgment value optimization strategies was proposed for the initial weight tuning of the BP neural network PID. The results indicated that the improved fruit fly algorithm reduced the number of iterations by 9 and decreased the objective function value by 6.14% compared with that of traditional methods. The BP neural network PID controller, tuned based on this algorithm, achieved a regulation time of only 0.31 s under step signal conditions, with no steady-state error or overshoot, and exhibited rapid response characteristics to sinusoidal and dynamic ramp signals. Field validation demonstrated that the robot achieved an average tillage speed of 2.81 km/h, with an average deviation of 0.211 2 m, a deviation rate of 0.524%, and a minimum turning radius of 458 mm, meeting the requirements for flexible maneuvering. Under tillage depth conditions of 50 mm, 100 mm,

收稿日期:2025-02-25　修回日期:2025-03-10
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2000304、2023YFD2000305-04)和甘肃省农机研发制造推广应用一体化试点项目(6-1)
作者简介:黄薛凯(1997—),男,博士生,主要从事农业装备智能化控制研究,E-mail:2022212011@stu.njau.edu.cn
通信作者:汪小旦(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人与农业装备智能化控制研究,E-mail:wangxiaochan@njau.edu.cn

and 150 mm, the stability coefficients were 89.51%, 88.47%, and 92.85%, respectively, and the soil fragmentation rates reached 70.51%, 75.07%, and 89.14%, all exceeding the operational standards of a soil fragmentation rate greater than 65% and tillage depth stability above 85%. The research findings can provide a theoretical basis for the design and precise control of facility tillage machinery.

Key words: facility horticulture; tilling robot; tillage depth adaptive control; BP neural network PID controller; field performance testing

0 引言

土壤耕整作为设施园艺生产的核心作业环节，对改善土壤结构、增强透气性与保水性能具有重要作用，直接影响作物根系发育与养分吸收效率[1-2]。然而，设施园艺作业环境具有空间狭小、环境郁闭等特点，传统燃油动力机械因体积庞大、排放污染严重等问题，难以满足其作业需求[3]。同时，设施园艺对作业机械的灵活性、精准度及可持续性提出更高要求，传统机械在智能化和精细化管理方面存在明显不足。研发无污染、低噪音、高灵活性纯电旋耕机器人，成为实现设施园艺绿色低碳生产与推动农业智能化发展的关键技术路径[4-5]。

针对新能源耕整装备，国内外学者已开展大量研究，但在实际应用中仍存在显著局限。王宝超等[6]设计增程式电动履带旋耕起垄机，可根据作业负载进行纯电、增程器/电池协同供电模式切换，旋耕工作最大续航可达 1.9 h，但大负载工况下仍以增程器供电为主，未能避免传统机械废气排放。王海楠[7]设计了棚室电动履带旋耕起垄一体机，可以通过单次作业完成旋耕、起垄、覆膜 3 道工序，并利用离散元法进行工作参数与结构参数优化，但并未在实地进行作业性能试验。张超等[8-9]设计了以锂电池为主能源，光伏组件为辅助能源的太阳能轮边驱动微耕机，设计手动与负载自适应 2 种转矩控制策略，但温室内部光照变化大，光伏发电的转换效率较低，并且微耕机需要人工扶持作业，劳动强度大。法国 Naio Technologie 公司[10]推出多功能旋耕开沟播种机器人，采用四轮独立驱动，最大牵引质量可达 300 kg，配备 RTK GPS 导航定位系统，可实现最大 8 h 自主连续作业，但幅宽只有 47 cm；印度 XMACHINES 公司[11]开发 X100 系列多功能旋耕除草、播种、喷洒、种植机器人，重负载下采用四轮独立驱动可以最多续航 4 h，但作业幅宽为 43 cm，作业效率较低。宁波市农邦农业机械有限公司[12]自主研发新能源纯电动履带式旋耕机，单次充电续航可达 8 h 以上，但在智能化控制特别是耕深精准调节方面未实现突破。上述研究虽在一定程度上推进了新能源耕整装备发展，但在机器人电动化水平、控制精度、续航能力、作业效率及环境适应性等方面仍存在明显不足。

本文提出一种模块化双电机分布式驱动的新能源纯电旋耕机器人，采用纯电动化设计，解决传统机械排放污染问题；基于模块化开发理念设计隔离型电气系统、底盘驱动系统与旋耕机组，提升装备灵活性与适应性；提出融合改进果蝇算法的 BP 神经网络 PID 耕深控制器，以解决旋耕作业底盘俯仰与旋耕阻力扰动导致的耕深不稳定问题；最后通过田间试验，确保机器人在运动性能与旋耕作业性能方面均能满足设施园艺需求，以期为设施园艺领域高效耕整作业提供解决方案。

1 整机结构方案

新能源园艺电动旋耕机器人整机方案如图 1 所示，主要包括动力电池、电机驱动器、直流无刷电机、减速器、液压缸、电磁阀、旋耕机组、遥控信号接收装置、GNSS 信号接收装置、激光雷达以及 IMU。整机采用双电机前置方式进行驱动，电池组位于底盘后端，分别向底盘驱动系统以及旋耕作业系统供电。为平衡整机质量以及行走作业稳定，液压动力单元总成放置在平台前部，通过控制电液比例阀开度实现液压缸位移调节，进而实现耕深控制。旋耕机组采用三点悬挂方式与底盘连接，机组上配备单独旋耕电机，通过带轮与锥齿轮减速器驱动旋耕刀完成作业。主要设计参数如表 1 所示。

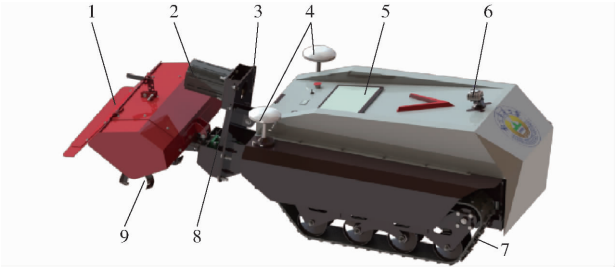

图 1 旋耕机器人整体结构

Fig. 1 Overall structure of tilling robot

1. 旋耕机组 2. 旋耕电机 3. 倾角传感器 4. GNSS 接收器 5. 显示屏 6. 激光雷达 7. 履带 8. 带轮 9. 旋耕刀

2 关键系统设计

2.1 电气系统设计

电气系统采用高压电池组(48 V 铅酸电池)为

表 1　机器人主要设计参数

Tab. 1　Main design parameters of robot

参数	数值
底盘(长×宽×高)/(m×m×m)	1.2×0.8×2.0
整机质量/kg	400
驱动电机功率/W	2×2 000
前进速度/(km·h^{-1})	0~3
电池容量/(A·h)	100
旋耕电机功率/W	5 500
旋耕深度/mm	0~250
旋耕宽度/mm	900

主能源，通过隔离型 DC－DC 变换器构建多电压等级供电系统，系统架构如图 2 所示。其中，高压侧直接驱动底盘行走电机与旋耕电机，低压侧通过变压器提供 24 V 与 12 V 电源，分别为主控制器、传感器、电磁阀及通信模块供电。为确保安全，系统采用整机负极搭铁设计，并通过高效拓扑隔离型 DC－DC 转换器实现高、低压地与车身的电气隔离。此外，系统集成电池管理系统(BMS)，实时监控电池状态，并具有过充、过放和热失控保护功能。

控制系统采用 CAN 总线通信架构，实现多传感器信息快速采集与控制指令实时传输。硬件部分以 Arduino Mega2560 为核心控制器，配备 ZM－BL48Z50S 型电机驱动器，通过 PWM 信号实现电机转速与方向的精确控制。远程操作功能由 MC7－MINI 遥控模块实现，8 通道信号输出经过转把模块转化为 PWM 指令，接收器接受到控制指令后驱动电机执行相应动作[13－14]。

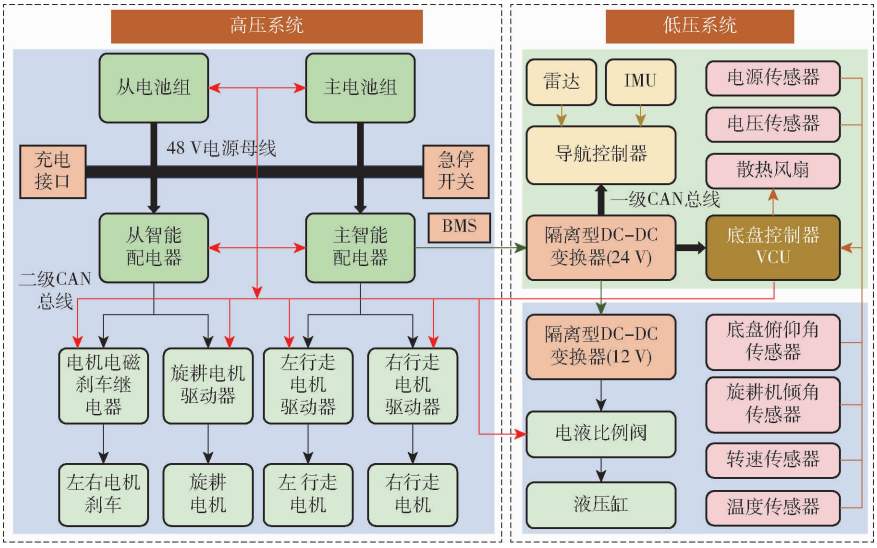

图 2　整机隔离型 DC－DC 电气架构

Fig. 2　Isolated DC－DC electrical architecture

2.2　旋耕机组设计

2.2.1　旋耕机组结构设计

旋耕机组由悬挂架、带轮、传动中轴，减速箱、防护罩以及旋耕组件组成。采用模块化设计，具备单独的旋耕电机，通过带轮传递转矩，经锥齿轮减速箱后输出至刀辊轴带动旋耕刀作业。下悬挂与底盘铰接，上悬挂与液压缸直接连接，通过液压缸伸缩控制旋耕机升降以调节耕深。机组结构如图 3 所示。

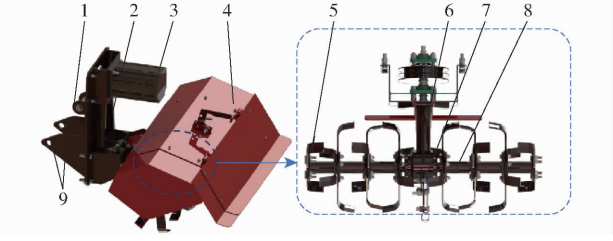

图 3　旋耕机组整体结构

Fig. 3　Overall structure of tilling unit

1. 上悬挂　2. 带轮　3. 旋耕电机　4. 防护罩　5. 旋耕刀　6. 传动轴　7. 减速箱　8. 刀辊轴　9. 下悬挂

2.2.2　旋耕电机选型

旋耕作业时，旋耕电机输出功率需大于旋耕作业功耗需求，即

$$P_N \geqslant K\frac{P_f}{\eta} \tag{1}$$

式中　P_N——旋耕电机输出功率，kW

K——旋耕电机功率储备系数，取 1.2

P_f——旋耕作业所需功率，kW

η——机械传递效率，取 0.97

旋耕作业时功率[15]计算式为

$$P_f = 0.1K_\lambda dV_m B \tag{2}$$

其中　$K_\lambda = K_g K_1 K_2 K_3 K_4$

式中　K_λ——旋耕比阻，N/cm^2

d——旋耕深度，cm

V_m——机器人前进速度，m/s

B——耕幅，m

K_g——切土节距系数

K_1——耕深修正系数

K_2——土壤含水率修正系数

K_3——残茬植被修正系数

K_4——作业方式修正系数

根据《农业机械手册》以及 GB/T 5668—2017《旋耕机》,取 K_g 为 8 N/cm^2,K_1 为 0.8,K_2 为 0.92,K_3 为 0.8,K_4 为 0.66,可得旋耕作业功率为

$$P_f = 1.2 \times 0.1 K_g K_1 K_2 K_3 K_4 d V_m B/\eta \approx 4.81 \text{ kW} \quad (3)$$

因此选择额定功率 5.5 kW 直流无刷电机,额定转速为 2 500 r/min。

2.2.3 减速箱与旋耕刀选型

由于旋耕机器人在温室中作业需要满足模块化与小型化需求,因此旋耕电机与旋耕刀辊垂向布置,利用带轮进行一级减速增矩,再利用直角行星减速机进行二级减速增转矩的同时改变电机动力传动方向。设计带轮传动比为 1∶2.25,行星减速机减速比为 1∶3。

弯形旋耕可增加刀具与土壤接触面积,改善土壤切割效果,在旋转过程不断切削和翻动土壤,能够更加均匀地耕作,达到更高的耕作深度和更好的土壤破碎效果。在高速回转下,弯形旋耕刀能够平稳切土,作业震动与冲击较小,适用于设施精准耕整作业,因此两侧各选取 1 组双刀,中间选取 6 组 4 刀。双刀和四刀搭配可优化刀具切割面积和作用力分布,均匀分布耕作负载,延长刀具寿命,确保稳定作业。

2.3 行走系统设计

2.3.1 履带行走机构设计

机器人采用履带式底盘行走装置,可增大接地面积,在增大机器人运动稳定性的同时也可减小比压,保障土壤疏松性。结构如图 4 所示,包括橡胶履带、驱动轮、支重轮、托带轮以及导向轮等。

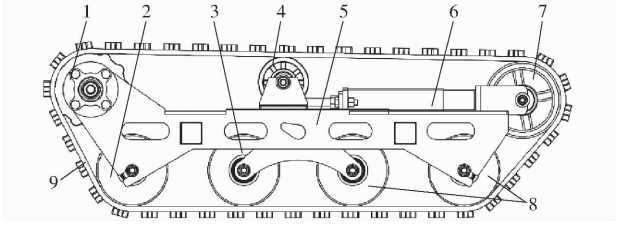

图 4 履带行走机构原理图

Fig. 4 Schematic of crawler walking mechanism

1. 驱动轮 2、3、8. 支重轮 4. 拖带轮 5. 外连接板 6. 导向轮连接支架 7. 导向轮 9. 履带

(1)履带节距。履带节距 T 与机器人质量呈线性关系,节距较大会增加与履带啮合过程冲击,但较小会降低履带强度与刚度,计算式为

$$T = \lambda \sqrt[4]{m} \quad (4)$$

式中 m——机器人整机质量,kg

λ——节距系数,取 15.0 ~ 17.5

计算得履带节距为 70 mm。

(2)履带接地长度与宽度。农用履带底盘接地长度 L_0 与宽度 b 影响机器人直线行驶能力与转向性能。为提高机器人在松软路面通过性与稳定性,接地长度与宽度通常满足

$$\begin{cases} L_0 = 1.07 \sqrt[3]{m/1\,000} \\ b = (0.18 \sim 0.22) L_0 \end{cases} \quad (5)$$

结合温室旋耕作业特点以及设计需求,最终设计履带接地长度 L_0 为 0.77 m,宽度 b 为 0.17 m。

(3)履带接地比压。履带接地比压 P_0 反映机器人履带承载能力,越大越有利于机器人在松软路面作业,但也会增加履带质量与制造成本,对于小型农业机械,接地比压一般为 10 ~ 30 kPa,因此需对履带的承载能力进行校核,即

$$P_0 = \frac{mg}{2BL_0} \quad (6)$$

计算得接地比压为 14.97 kPa,满足设计需求。

2.3.2 驱动电机与减速器匹配设计

无刷电机响应速度快、功率密度高,可实现机器人行走与作业精准控制,因此采用无刷直流电机加减速器形式驱动机器人。旋耕机器人作业过程需克服地面阻力,同时也能克服坡度阻力的影响以翻越作业转场过程的斜坡,同时机器人运动速度较低,因此忽略加速阻力与空气阻力的影响,可得机器人运动总阻力为

$$F = fmg + mg\sin\theta + F_t \quad (7)$$

式中 F——前进阻力,N

f——地面摩擦因数

θ——机器人最大爬坡度,(°)

F_t——机器人最大牵引力,N

参照文献[16]取摩擦因数为 0.3,旋耕机器人转场过程最大爬坡度取 5°,最大牵引力取 3 000 N,因此计算得机器人驱动力最大为 4 517.65 N,机器人底盘驱动轮半径为 0.11 m,可得单侧电机最大输出转矩为 248.47 N·m。

机器人运动速度计算式为

$$v = \frac{n_{\text{out}}}{i_g} \frac{2\pi}{60} r \quad (8)$$

式中 n_{out}——减速器输出转速,r/min

i_g——减速器减速比

r——驱动轮半径,取 0.11 m

机器人最大前进速度取 3 km/h,计算得电机经减速器减速增矩后最大输出转速为 72.34 r/min。根据理论计算参数并且预留余量后,选取

SNH130DMW65－21093 型直流无刷电机，额定转速为 3 000 r/min，额定转矩为 6.5 N·m，减速器选取 TKM48B 型斜齿轮减速器，减速比为 1∶40，最大可承受 350 N·m 负载转矩。

2.3.3　动力电池匹配设计

动力电池容量主要由机器人作业续航里程与整机电机功率决定[17]，计算式为

$$C_b = \frac{P_e}{\eta_e}\frac{S_e}{V_m}\frac{1}{\Delta SOC} \tag{9}$$

式中　C_b——电池总容量，A·h

P_e——电机总功率，取 9.5 kW

η_e——驱动系统效率，取 0.9

S_e——目标续航里程，取 25 km

ΔSOC——电池 SOC 变化值，取 0.9

计算得所需电池总容量为 93.74 A·h，选取 4 块 12 V、单体容量为 100 A·h 的铅酸电池组串联供电。

2.4　电液提升系统设计

选用 48 V/1 200 W 双向动力单元总成，液压缸最大行程为 250 mm。利用液压缸提升与下降旋耕机组，避免由于土壤硬度变化导致液压缸被顶起从而降低耕深稳定性的问题，如图 5 所示。

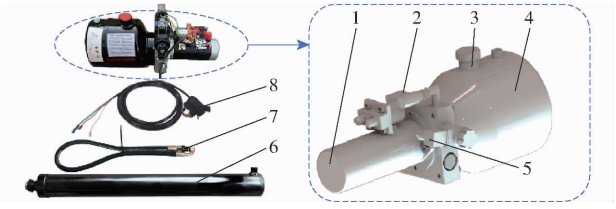

图 5　电液提升系统结构

Fig. 5　Electro-hydraulic lifting system structure

1. 电机　2. 继电器　3. 油孔　4. 油箱　5. 电液比例阀　6. 液压缸　7. 油管　8. 升降开关

3　基于 IFOA－BP 神经网络的耕深控制策略

旋耕深度稳定性是评价旋耕质量关键指标，传统按照经验推动拉杆控制耕深方法精度低，无法在不同路况下稳定作业，因此设计耕深 BP 神经网络 PID 控制器，降低负载扰动影响，确保耕深达到目标值。

3.1　电液提升系统模型建立

3.1.1　耕深曲面标定

采用运动学分析建立耕深模型存在较大的误差，而采用田间试验进行耕深标定方法存在底盘俯仰角无法控制的问题，因此利用虚拟样机模型获取旋耕机组倾角 α、底盘俯仰角 β 与实际耕深 h 的函数关系。以车身水平且旋耕机垂直于地面作为零点，同时控制底盘俯仰角在[－5°，5°]（前倾为正，后仰为负）、旋耕机组倾角在[－7°，20°]（顺时针旋转为正）组合变化，结果如图 6 所示，R^2 = 0.998，拟合精度较高[18]。

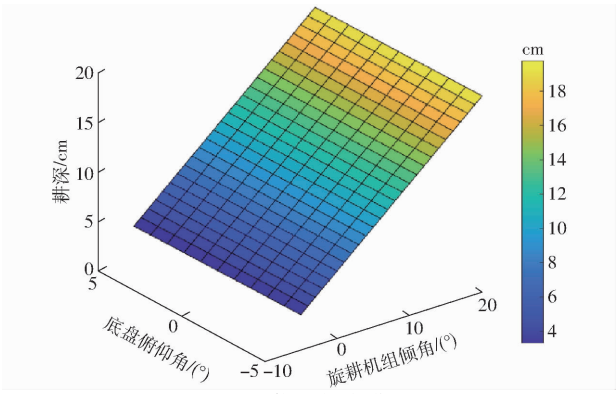

图 6　耕深标定曲面

Fig. 6　Tilling depth calibration surface

3.1.2　耕深调控模型

耕深调节系统由电液比例阀、液压缸、悬挂机构以及角度传感器等组成，需建立自电液比例阀输入电压至提升臂旋转角度输出传递函数，为耕深控制提供依据[19－20]。

（1）电液比例阀。驱动电流经比例阀线圈后产生电磁力推动阀芯位移，同时也受到自身阻尼力、弹簧作用力与油液稳态力的影响，得到电流 i 与阀芯位移 x_y 传递函数为

$$G_1(s) = \frac{X_y(s)}{I(s)} = \frac{K_q}{\frac{s^2}{\omega_g^2} + 2\frac{\xi_g}{\omega_g}s + 1} \tag{10}$$

式中　K_q——阀芯增益系数，m/A

ω_g——比例阀固有频率，rad/s

ξ_g——比例阀固有阻尼

（2）阀控液压缸。当电液比例阀阀芯位移 X_y 时，由于液压缸为单出杆形式导致进入液压缸两腔液压油流量不一致，在压差作用下推动液压缸活塞产生位移，根据液压缸流量连续性方程与活塞受力平衡方程可得阀芯位移 x_y 与活塞位移 x_u 传递函数为

$$G_2(s) = \frac{X_u(s)}{X_y(s)} = \frac{\frac{K_h}{A_p}}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\frac{\xi_h}{\omega_h}s + 1\right)} \tag{11}$$

式中　K_h——滑阀流量位移系数，m^2/s

A_p——活塞有效作用面积，m^2

ω_h——液压缸固有频率，rad/s

ξ_h——液压缸固有阻尼

（3）液压缸与旋耕机组倾角。旋耕机组倾角通过安装在电机固定板上的倾角传感器获取，根据图 7 可得在 $\triangle ACE$、$\triangle CBD$ 中存在关系

$$l_{CE} = l_{CF} - l_{EF} = \frac{l_2}{\cos\alpha} - l_3 - (l_2\tan\alpha + l_5)\sin\alpha \tag{12}$$

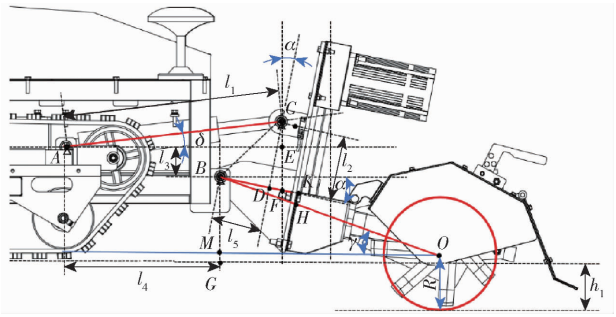

图 7 液压缸与旋耕机组运动示意图

Fig. 7 Schematic of tilling depth control motion

$$l_{AE} = l_4 + (l_2\tan\alpha + l_5)\cos\alpha \tag{13}$$

$$\gamma = \alpha + \arcsin\frac{l_{KH}}{l_{BH}} \tag{14}$$

求解可得液压缸活塞长度 l_1 与旋耕机组倾角 α 关系为

$$l_1 = \sqrt{\left[\frac{l_2}{\cos\alpha} - l_3 - (l_2\tan\alpha + l_5)\sin\alpha\right]^2 + [l_4 + (l_2\tan\alpha + l_5)\cos\alpha]^2} \tag{15}$$

联立式(10)~(15),通过查询图 6 即可获得耕深系统模型。

3.2 果蝇优化算法改进

3.2.1 果蝇优化算法

果蝇优化算法(Fruit fly optimization algorithm, FOA)是一种模拟果蝇觅食行为提出的启发式智能搜索算法[21],果蝇与食物距离会影响气味浓度,迭代过程中果蝇向气味最浓的果蝇位置附近进行随机游走,算法结构简单,搜索速度快,受搜索问题参数扰动小,具有较高的鲁棒性。核心搜索步骤为:

(1)初始化果蝇二维方向搜索种群位置 X_b、Y_b。

(2)以个体为单位进行随机搜索

$$\begin{cases} X_i = X_b + rand_1 \\ Y_i = Y_b + rand_2 \end{cases} \tag{16}$$

式中 $rand_1$、$rand_2$——果蝇随机搜索步长

(3)计算果蝇个体与坐标原点距离 $Dist$ 以及气味 S,更新当前气味浓度最高个体 $bestIndex$,保留最优初始位置和味道浓度,控制整个种群向该位置运动,计算式为

$$\begin{cases} Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \\ S_i = \dfrac{1}{Dist_i} \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases} Smell_i = f(S_i) \\ [bestSemll, bestIndex] = \min(Smell_i) \\ X_b = X(bestIndex) \\ Y_b = Y(bestIndex) \end{cases} \tag{18}$$

(4)循环步骤(2)、(3)直至达到最大迭代次数。

3.2.2 果蝇算法改进

果蝇算法每次迭代后都会控制种群飞行至最优位置后继续进行搜索,当前全局最优解处于局部最优时,算法无法跳出局部最优点,也会导致后期种群多样性不足,并且果蝇算法的搜索参数通过随机产生,搜索效低。针对以上问题,对果蝇算法进行改进:

(1)自适应缩小步长策略[22]。果蝇算法采用随机步长,难以平衡全局与局部搜索。为优化搜索策略,引入自适应步长缩小机制,以参数 β、ε 控制步长收缩速率与幅度。初期较大步长有助于快速接近全局最优区域,随着迭代进行,步长逐渐减小,实现局部精细搜索,从而提高收敛精度。采用自适应步长果蝇搜索更新公式为

$$\begin{cases} X_i = X_b + h\boldsymbol{R}_v \\ h = h_{\max} - (h_{\max} - h_{\min})\left[1 + \beta\left(\dfrac{t}{\max_{iter}}\right)^{0.5}\right]^{-\varepsilon} \end{cases} \tag{19}$$

式中 h、$h_{\max}$、$h_{\min}$——收缩因子及其最大最小值

$\boldsymbol{R}_v$——[-1,1]内的随机向量

β、ε——调整参数

t——当前迭代次数

$\max_{iter}$——最大迭代次数

(2)高斯随机游走策略[23]。针对果蝇算法在搜索后期易出现种群同质化的问题,引入基于概率的高斯随机游走变异策略。该策略通过对个体施加高斯扰动生成新解,增强跳出局部最优能力,并拓展搜索空间,提高全局最优解发现概率。在迭代过程中,高斯变异以一定概率产生较大扰动,提升探索能力,同时维持种群多样性,避免过早收敛,从而加快全局最优解的收敛速度。更新公式为

$$X_{axis} = \begin{cases} X_{best} & (rand > 1 - \sqrt{t/\max_{iter}}) \\ X_{best} + stepsize\ rand & (rand \leqslant 1 - \sqrt{t/\max_{iter}}) \end{cases} \tag{20}$$

其中

$$stepsize = a_0(X_{axis} - X_{best}) \tag{21}$$

$$a_0 = Gussian(X_{axis}, X_{best}, \gamma) \tag{22}$$

式中 $stepsize$——高斯随机游走范围

X_{axis}——当前果蝇位置

X_{best}——种群最优位置

γ——高斯变异参数

(3)果蝇种群浓度判定值优化[24-25]。标准果蝇算法仅在 x 和 y 方向搜索,优化高维非线性问题能力有限。为拓展搜索空间,在距离更新公式中引入果蝇在 z 方向的搜索,同时在浓度判定公式中引入非线性变化参数 L,使得果蝇气味判定值可为负,从而将搜索范围由二维扩展至整个空间。在增强算

法全局搜索能力同时，有助于果蝇算法跳出局部最优，并且显著提升了其在高维非线性问题上的优化性能。新浓度判定值式为

$$\begin{cases} Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} \\ S_i = \dfrac{1}{Dist_i} + L \\ L = Dist_i(0.5 - rand) \end{cases} \tag{23}$$

3.3　IFOA－BP 神经网络 PID 控制器设计

PID 控制易实现，对于线性系统控制效果优越，但旋耕电液提升系统是非线性时变系统，受负载变化与参数扰动频繁，定参数 PID 控制无法实现实时跟踪响应，因此结合 BP 神经网络对 PID 参数在线整定，同时利用改进的果蝇算法优化 BP 神经网络初始权值，控制系统框图如图 8 所示[26－28]。

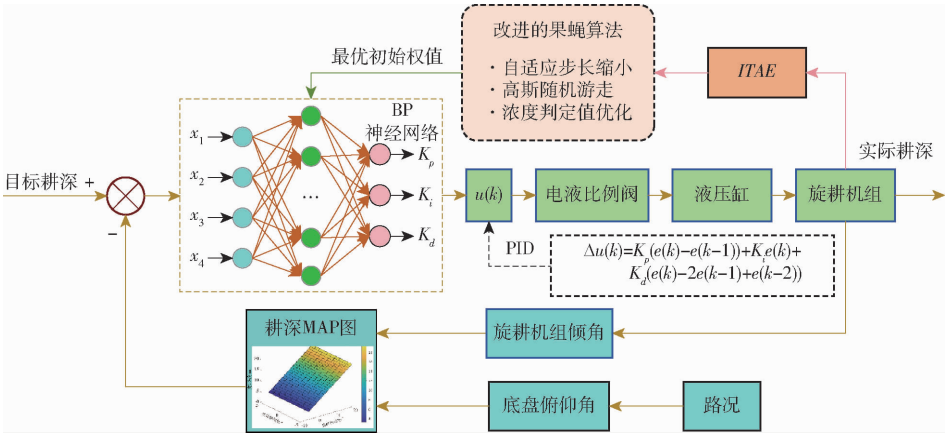

图 8　基于 IFOA－BP 神经网络 PID 的耕深控制框图

Fig. 8　Tilling depth control strategy based on IFOA－BP neural network PID

3.3.1　BP 神经网络 PID 设计

BP 神经网络 PID 控制器分为 2 个部分：增量式 PID 控制器与 BP 神经网络，增量式 PID 控制器数学公式为

$$\begin{cases} u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \\ \Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + \\ \qquad K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{cases} \tag{24}$$

式中　$\Delta u(k)$——控制电压增量，V

K_p——比例系数

K_i——积分系数

K_d——微分系数

$e(k)$——当前时刻耕深偏差，cm

$u(k)$——当前时刻控制电压，V

BP 神经网络采用 4－5－3 前馈网络结构，如图 9 所示。$\omega_{ij}^{(2)}$、$\omega_{ij}^{(3)}$ 分别为隐藏层和输出层加权系数，输入层神经元为期望输出值、系统偏差、实际输出值以及控制量，输出层神经元为 PID 控制器 3 个系数。

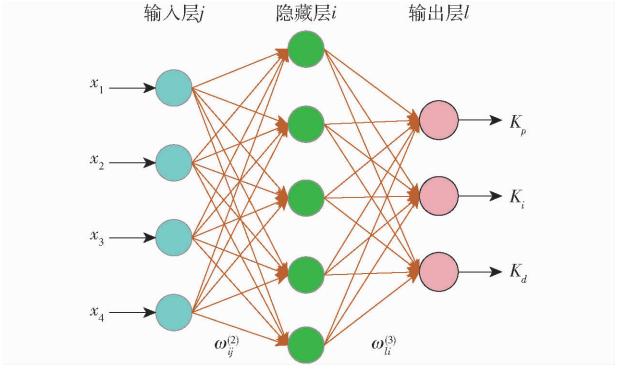

图 9　BP 神经网络结构

Fig. 9　BP neural network structure

输入层输入为

$$\begin{cases} O_j^{(1)} = x_{k-j} = e(k-j) \quad (j = 0,1,\cdots,M-1) \\ O_M^{(1)} = 1 \end{cases} \tag{25}$$

隐藏层输入为

$$\begin{cases} net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^{M} \omega_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}(k) \\ O_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)) \quad (i = 0,1,\cdots,Q-1) \\ O_Q^{(2)}(k) \equiv 1 \end{cases} \tag{26}$$

隐藏层采用 Sigmoid 作为激励函数

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \tag{27}$$

输出层输入为隐藏层输出，即

$$net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^{Q} \omega_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \tag{28}$$

输出层输出分别为 K_p、K_i、K_d，即

$$\begin{cases} O_i^{(3)}(k) = g(net_j(3)) \quad (i = 0,1,2) \\ O_0^{(3)}(k) = K_p \\ O_1^{(3)}(k) = K_i \\ O_2^{(3)}(k) = K_d \end{cases} \tag{29}$$

由于 PID 参数均为正值，因此采用非负的

Sigmod 函数作为输出层神经元激励函数

$$g(x)=\frac{1}{2}(1+\tanh(x))=\frac{e^{x}}{e^{x}+e^{-x}} \tag{30}$$

为使得耕深误差最小，取控制对象性能指标函数

$$E(k)=\frac{1}{2}(r(k)-y(k))^{2} \tag{31}$$

式中 $E(k)$——性能指标值

$r(k)$——目标耕深，cm

$y(k)$——实际耕深，cm

神经网络训练目标是使得性能指标值最小，采用梯度下降法修正网络的权重系数，并引入惯性项提升全局搜索速度，得输出层与隐藏层权重计算式为

$$\begin{cases}\Delta w_{li}^{(3)}(k+1)=\eta\delta_{l}^{(3)}O_{i}^{(2)}(k)+\alpha\Delta w_{li}^{(3)}(k)\\ \delta_{l}^{(3)}=e(k+1)\operatorname{sgn}\left(\dfrac{\partial y(k+1)}{\partial u(k)}\right)\dfrac{\partial u(k)}{\partial O_{l}^{(3)}(k)}g'net_{l}(k)\end{cases}$$

$$(l=0,1,2) \tag{32}$$

$$\begin{cases}\Delta w_{li}^{(2)}(k+1)=\eta\delta_{i}^{(2)}O_{j}^{(1)}(k)+\alpha\Delta w_{ij}^{(2)}(k)\\ \delta_{i}^{(2)}=f'(net_{i}^{(2)}(k))\sum_{i=0}^{2}\delta_{l}^{(3)}w_{li}^{(3)}(k)\end{cases}$$

$$(i=0,1,\cdots,Q-1) \tag{33}$$

式中 η——神经网络学习率

∂——惯性因子

3.3.2 IFOA 优化 BP 神经网络流程

BP 神经网络采用梯度下降法进行参数迭代与自适应学习，初始权值影响 BP 神经网络学习速度与训练精度，因此结合 IFOA 对 BP 神经网络 PID 控制器训练以获取最优初始权值，搜索流程如图 10 所示。步骤为：①初始化 4－5－3 层 BP 神经网络结构及参数，初始化果蝇位置、果蝇数量与最大迭代次数。②更新果蝇最优位置，输入至 BP 神经网络模块进行训练，输出目标函数值。③根据 IFOA 算法进行果蝇位置更新，返回步骤②直至达到最大迭代次数，输出最优初始权值矩阵。

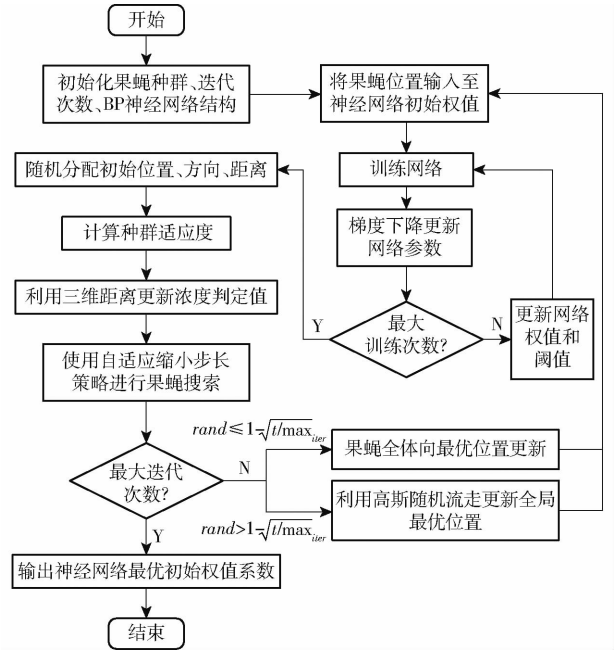

图 10 IFOA 优化 BP 神经网络 PID 流程

Fig. 10 IFOA-optimized BP neural network PID process

IFOA 优化采用 *ITAE* 作为目标函数，即

$$ITAE=\int t|r(k)-y(k)|\,dt \tag{34}$$

3.4 旋耕控制仿真结果与分析

以单位阶跃响应为目标对初始权重系数矩阵进行整定，整定时间设置为 5 s，果蝇种群设置为 50，迭代次数为 30，改进结果如图 11 所示。IFOA 只需要 13 次即可完成迭代，相较于改进前减少 9 次，目标函数值为 0.010 7，相较改进前降低 6.14%，改进效果明显。

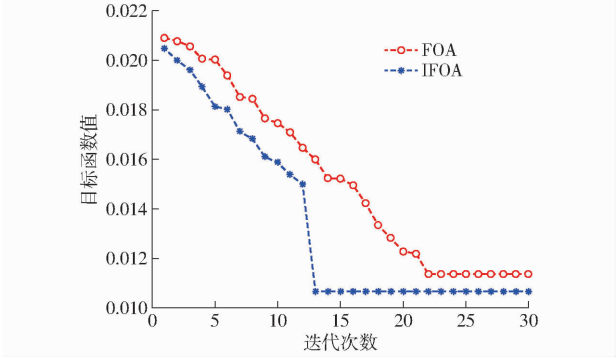

图 11 IFOA 算法改进结果

Fig. 11 Result of IFOA improvement

(1)阶跃信号

旋耕作业过程耕深需要保持恒定值，因此利用阶跃信号进行模拟，仿真过程对电液提升系统施加均值为 100、方差为 0.1 随机负载扰动信号，响应及误差曲线如图 12、13 所示。耕深响应结果如表 2 所示。

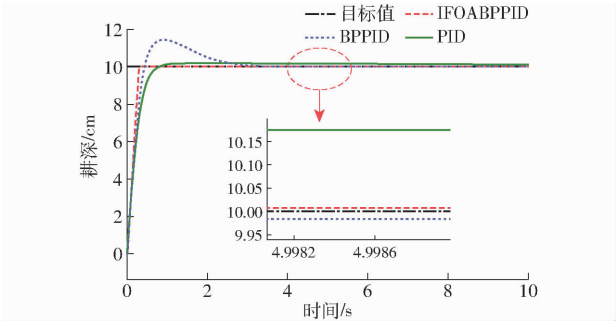

图 12 阶跃响应

Fig. 12 Step response

IFOABPPID、BPPID 以及 PID 控制下最大超调量分别为 0、14.25%、2.14%，最大稳态误差分别为 0、0.07、0.186 cm，采用IFOABPPID控制下的耕深

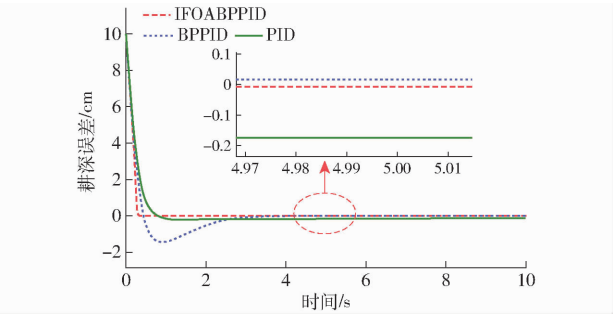

图 13　阶跃响应误差

Fig. 13　Step response error

表 2　不同控制器响应结果

Tab. 2　Response results of different controllers

控制方法	最大超调量/%	上升时间/s	调节时间/s	最大稳态误差/cm
IFOABPPID	0	0.31	0.31	0
BPPID	14.25	0.92	2.96	0.07
PID	2.14	0.79	3.64	0.186

稳态误差最小，响应最快，表明设计的 IFOABPPID 具有最优的鲁棒性、抗干扰能力以及响应速度，满足控制需求。

（2）正弦扰动信号

为测试控制器跟踪性能，输入正弦扰动信号，测试初始阶段误差为 10 cm，仿真结果见图 14、15。跟踪过程 3 种控制方法最大误差分别为 0.36、3.40、3.76 cm，动态目标信号下，IFOABPPID 可迅速上线跟踪，响应速度最快，动态误差最小，而 BPPID 与 PID 控制响应迟滞，动态跟踪误差较大。

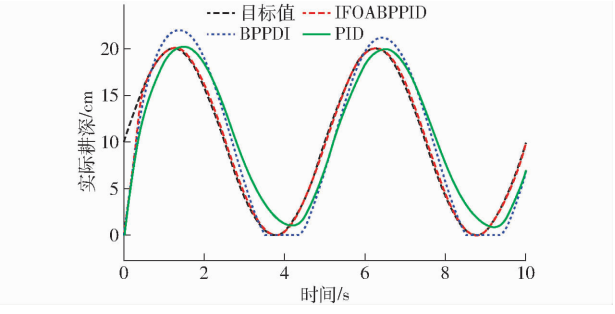

图 14　正弦响应

Fig. 14　Sine response

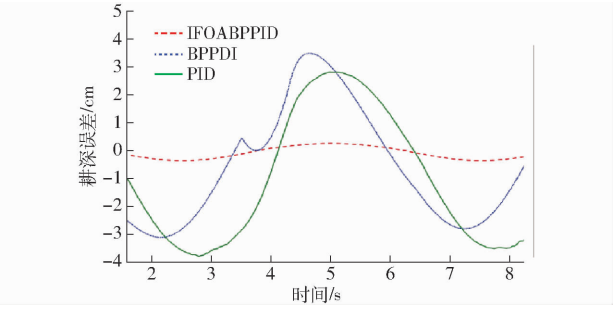

图 15　正弦响应误差

Fig. 15　Sine response error

（3）斜坡信号响应

在旋耕过程中机器人需根据不同作物种植需求调节耕深，因此采用斜坡信号模拟负载扰动下对于增加耕深的需求，仿真结果见图 16、17。在初始阶段控制器均存在一定跟踪误差，最大分别为 0.004、0.16、0.22 cm，分别通过 0.15、0.16、0.62 s 后逐渐减小，IFOABPPID 与 BPPID 在 0.3、3.58 s 后进入稳态，误差为 0，而 PID 一直存在逐渐缩小的误差，收敛缓慢。相较于其他控制器 IFOABPPID 在收敛速度与精度上表现最优。

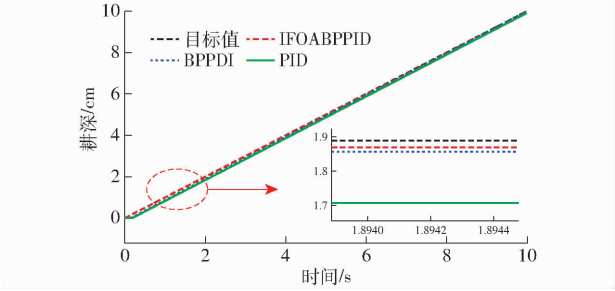

图 16　斜坡响应

Fig. 16　Ramp response

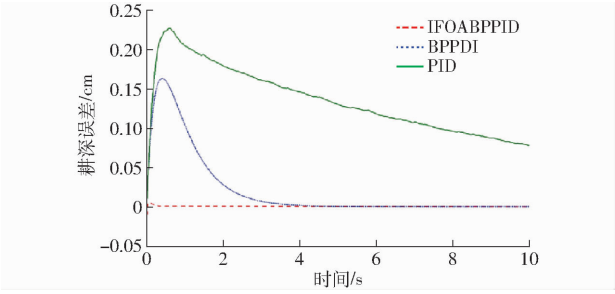

图 17　斜坡响应误差

Fig. 17　Ramp response error

仿真结果表明所设计的 IFOABPPID 在动态信号以及负载扰动下可实现阶跃、正弦、斜坡信号的跟踪，在响应速度、稳态误差与调节时间上均优于 BPPID 与 PID，满足旋耕机器人精准耕整作业需求。

4　试验结果与分析

4.1　试验条件

旋耕机器人田间性能测试于 2024 年 7 月在南京市江宁区谷里街道某蔬菜生产基地进行，试验场景如图 18 所示。试验场地为单体塑料大棚，尺寸为 8 m × 95 m，测得 0 ~ 200 mm 内土壤质量含水率为 15.22%、坚实度为 253 kPa。试验仪器主要有计算机、卷尺、铲子、电子秤、土壤含水率测试仪以及土壤坚实度测试仪等。

4.2　运动性能试验

4.2.1　直线运动速度试验

在试验温室中划分出 5 m 前预备区以及 40 m



(a) 试验场景 (b) 试验温室

图 18 试验场地

Fig. 18 Experimental site

速度测区,测区中间取直线作为标准中心线,试验区间如图 19 所示。试验开始前在前预备区内启动旋耕机器人,稳定加速至最大行驶速度,从进入测区内开始记录时间直至驶出测区。待机器人驶出测区后,测量机器人底盘与标准中心线偏移量[29-30]。

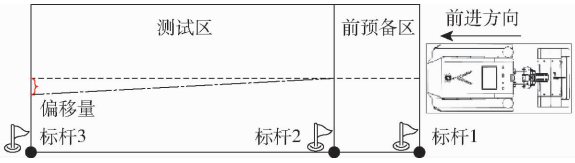

图 19 直线行驶试验示意图

Fig. 19 Schematic of linear driving test

偏移率计算式为

$$\psi = \frac{l}{S_L} \times 100\% \tag{35}$$

式中 l——机器人行驶偏移量,m

S_L——测试区间总长度,m

设定旋耕机器人行走速度为 3 km/h,耕深设置为 10 cm,试验重复 5 次,结果如表 3 所示。机器人平均行驶时间为 51.20 s,速度均值为 2.81 km/h,平均偏移量为 0.211 2 cm,平均偏移率为 0.524%,综合行驶偏差较小,满足机器人运动需求。

表 3 直线运动速度试验结果

Tab. 3 Linear motion speed test

序号	行驶时间/s	实际速度/(km·h^{-1})	误差/cm	偏移量/cm	偏移率/%
1	49.32	2.92	-0.08	0.189	0.46
2	50.70	2.84	-0.16	0.214	0.53
3	51.79	2.78	-0.22	0.172	0.43
4	51.06	2.82	-0.18	0.213	0.53
5	53.14	2.71	-0.29	0.268	0.67
均值	51.20	2.81	-0.186	0.211 2	0.524

由于底盘两侧电机响应速度以及触地工况不同,导致两侧转速存在一定偏差,旋耕过程机器人也会存在侧倾现象,使得两侧电机受持续的时变扰动,导致电机转速存在波动,在一定程度上增加了底盘速度与运动偏移发生,但均能满足使用要求在可接受范围内,后续拟研究底盘电子差速控制以提高底盘运动同步性。

4.2.2 转向性能试验

将机器人遥控至空旷田间,旋耕机不入土,转弯时将遥控器转向遥感至最大行程后保持不变,分别操作机器人向左、右各转 1 圈,得到不同运动轨迹并对运动轨迹上关键点进行测量,根据直径计算机器人最小转弯半径,测量方法如图 20 所示。

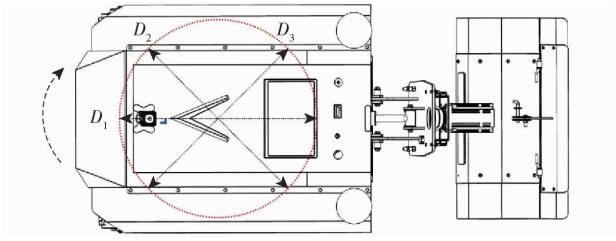

图 20 机器人转向圆测量方法

Fig. 20 Robot steering performance test results

试验结果如表 4 所示,机器人在前进和后退下左右转弯圆半径基本一致,与设计转弯圆半径偏差率分别为 4.96%、2.67%、6.36%、6.13%,与设计值的偏差率均小于 10%,满足旋耕机器人灵活转向需求。

表 4 机器人转向性能试验结果

Tab. 4 Robot steering performance test results

运动方向	设计值/mm		实测值/mm				偏差率/%
			D_1	D_2	D_3	均值	
前进	左	450	472	468	477	472.3	4.96
	右	450	462	466	458	462.0	2.67
后退	左	450	481	476	479	478.6	6.36
	右	450	469	483	481	477.6	6.13

4.3 耕深稳定性试验

根据文献[31]开展耕深稳定性试验,试验时设置刀辊转速 300 r/min、前进速度 0.3 m/s,分别在 3 种目标耕深 50、100、150 mm 下,测试 IFOABPPID、PID 及开环控制耕深稳定性。试验时,沿 40 m 作业行程每 2 m 采集左、右侧耕深数据,取左右两点的均值为该测区的实际耕深,共设置 20 个测区,每个测点重复测量 3 次取均值,以消除人为测量误差,确保数据可靠性,测量方法如图 21 所示。



图 21 耕深测量方法

Fig. 21 Tilling depth measurement method

耕深稳定性系数计算式为

$$U_j = 1 - V_j \tag{36}$$

其中

$$V_j = \frac{S_j}{a_j} \times 100\% \tag{37}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (a_{ji} - a_j)^2}{n_j - 1}} \tag{38}$$

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} a_{ji}}{n_j} \tag{39}$$

式中　a_j——第 j 个行程耕深平均值，mm

a_{ji}——第 j 个行程第 i 个点耕深，mm

n_j——第 j 个行程测定点数

S_j——第 j 个行程耕深标准差，mm

V_j——第 j 个行程耕深变异系数，%

U_j——第 j 个行程耕深稳定性系数，%

不同控制方法下实际耕深如图 22 所示，耕深平均值标准差以及耕深稳定性系数如表 5 所示。采用 IFOABPPID 控制的耕深优于 PID 控制以及开环控制，3 种目标耕深 50、100、150 mm 下，IFOABPPID 控制耕深稳定性系数分别为 89.51%、88.47%、92.85%，相较于 PID 控制提升 6.67、3.99、5.48 个百分点，相较于开环控制提升 11.63、6.89、7.13 个百分点，满足 GB/T 5668—2017《旋耕机》中耕深稳定性系数大于 85% 的标准，定参数的 PID 控制与开环控制不能适应不平整的农田路面，在机器人发生俯仰时无法及时调整耕深，旋耕阻力波动时抗干扰能力差，IFOABPPID 控制器可以实现耕深精准调控，满足旋耕需求。

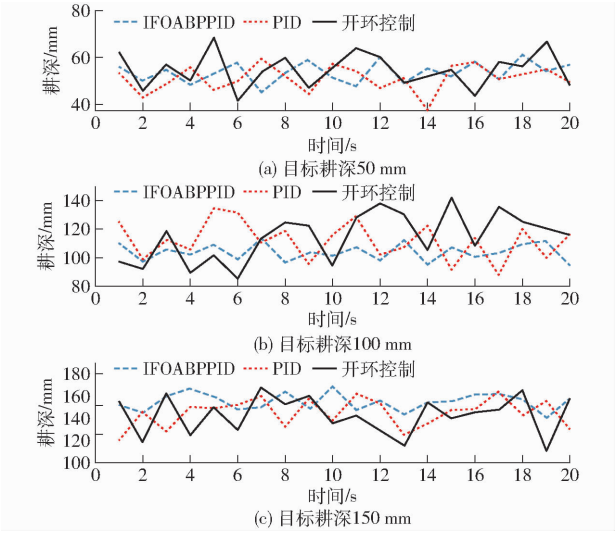

图 22　田间耕深测量结果

Fig. 22　Tilling depth measurement results

表 5　不同控制方法下耕深控制结果

Tab. 5　Tilling depth control results by different control methods

控制器	目标耕深 50 mm			目标耕深 100 mm			目标耕深 150 mm		
	平均耕深/mm	耕深标准差/mm	耕深稳定性系数/%	平均耕深/mm	耕深标准差/mm	耕深稳定性系数/%	平均耕深/mm	耕深标准差/mm	耕深稳定性系数/%
IFOABPPID	52.4	5.49	89.51	104.1	12.01	88.47	153.9	11.01	92.85
PID	48.7	8.36	82.84	109.5	17.03	84.45	142.4	17.99	87.36
开环控制	53.6	11.86	77.88	111.2	20.48	81.58	139.6	19.93	85.72

4.4　土壤破碎率试验

采用自制 0.5 m × 0.5 m 木框对 IFOABPPID 控制下耕后土壤进行碎土率测定。沿作业区域每隔 2 m 设置采样点，将采样范围内全耕层土块按最大边长分级：一级（<4 cm）、二级（4 ~ 8 cm）、三级（>8 cm）。挖出采样区内所有土块，使用电子秤分级称量，以一级土块质量百分比作为碎土率评价指标，测量方法见图 23。



图 23　土壤破碎率采集

Fig. 23　Soil fragmentation rate collection

土壤破碎率计算式为

$$P_i = \frac{M_i - m_i}{M_i} \times 100\% \tag{40}$$

式中　P_i——第 i 个测区土壤破碎率，%

M_i——第 i 个测区区域全耕层土块总质量，g

m_i——第 i 个测区区域大于 4 cm 土块质量，g

在 IFOABPPID 控制下，3 种工况土壤破碎率如图 24 所示，平均土壤破碎率分别为 70.51%、75.07%、89.14%，满足 GB/T 5668—2017《旋耕机》中土壤破碎率大于 65% 的标准，各测点土壤破碎率标准差均小于 10%，表明土壤破碎率较为稳定，满足碎土需求。

5　结论

（1）设计了一种双电机分布式驱动的纯电旋耕

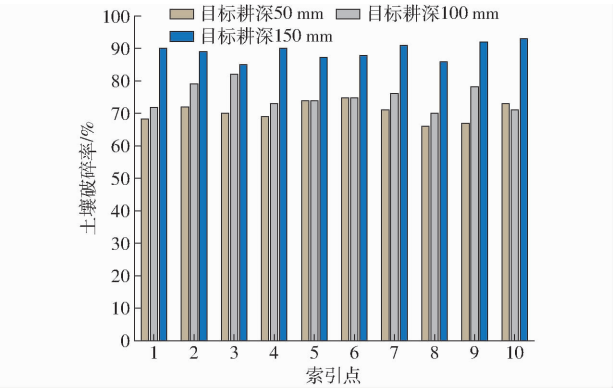

图 24 田间试验土壤破碎率测量结果

Fig. 24 Soil fragmentation rate measurement results

机器人,基于模块化设计的方法,开发了隔离型电气系统、旋耕机组、底盘驱动系统以及电液提升系统,并对关键机构进行动力学分析、设计计算与零部件选型。

(2)设计了旋耕 BPPID 控制器,提出改进的果蝇算法对神经网络初始权值矩阵进行优化。在果蝇算法中引入自适应补偿缩小策略、高斯随机游走策略以及种群浓度判定值优化策略,可以降低 9 次迭代,目标函数值降低 6.14%。阶跃信号下上升时间为 0.31 s,超调量与稳态误差均为 0,正弦信号下最大误差为 0.36 cm,斜坡信号下 0.38 s 进入稳态,最大误差为 0.004 cm,提出的控制器具有较强的鲁棒性与抗干扰能力。

(3)田间试验结果表明,当机器人速度 3 km/h、耕深为 100 mm 时,横向平均偏移量为 0.211 2 m,平均偏移率为 0.524%;平均转弯圆半径为 472.63 mm,与设计值的平均偏差为 5.03%;3 种目标耕深 50、100、150 mm 下,IFOABPPID 控制的耕深稳定性系数分别为 89.51%、88.47%、92.85%,土壤破碎率均值分别为 70.51%、75.07%、89.14%,满足 GB/T 5668—2017《旋耕机》,设计的旋耕机器人能够满足园艺土壤精整需求。

参 考 文 献

[1] ZHAO P, GAO X, JU X, et al. Optimization of the front-mounted fertilizer pipe strip rotary tillage device by modeling the wide-seedbed characteristics and power consumption[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109624.

[2] YAO R, GAO Q, LIU Y, et al. Deep vertical rotary tillage mitigates salinization hazards and shifts microbial community structure in salt-affected anthropogenic-alluvial soil[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: 105627.

[3] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1):348 - 364.
LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 348 - 364. (in Chinese)

[4] LIU W, YANG R, LI L, et al. Energy and environmental evaluation and comparison of a diesel-electric hybrid tractor, a conventional tractor, and a hillside mini-tiller using the life cycle assessment method[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 469: 143232.

[5] 徐立友,张俊江,闫祥海,等. 农业装备电动化技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 1 - 12.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, YAN Xianghai, et al. Review of research for agricultural equipment electrification technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 1 - 12. (in Chinese)

[6] 王宝超,乔明睿,初香港,等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 431 - 439.
WANG Baochao, QIAO Mingrui, CHU Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431 - 439. (in Chinese)

[7] 王海楠. 棚室电动履带式旋耕起垄一体作业机的设计研究[D]. 保定:河北农业大学, 2020.
WANG Hainan. Design and research of a shed electric tracked rotary cultivation and integral working machine[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[8] 张超,朱思洪,王军洋,等. 太阳能园艺拖拉机驱动系统匹配设计与性能分析[J]. 农业工程学报,2015,31(11): 24 - 30.
ZHANG Chao, ZHU Sihong, WANG Junyang, et al. Matching design and performance analysis for driving system of solar garden tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 24 - 30. (in Chinese)

[9] ZHANG C, GAO H, DENG X, et al. Design method and theoretical analysis for wheel-hub driving solar tractor[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2016, 28(12): 903 - 912.

[10] BOTTA A, CAVALLONE P, BAGLIERI L, et al. A review of robots, perception, and tasks in precision agriculture[J]. Applied Mechanics, 2022, 3(3): 830 - 854.

[11] WANG T, CHEN B, ZHANG Z, et al. Applications of machine vision in agricultural robot navigation: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107085.

[12] SIDDIQUE M A A, YANG C W, CHUNG N, et al. Usable time estimation and suitable battery selection for electric tractor considering agricultural operational load[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 36606.

[13] 张雷,徐同良,李嗣阳,等. 全线控分布式驱动电动汽车底盘协同控制研究综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 261 - 280.
ZHANG Lei, XU Tongliang, LI Siyang, et al. Overview on chassis coordinated control for full x-by-wire distributed drive

electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 261 - 280. (in Chinese)
[14] 汪小旦,李泽晟,陈彦宇,等. 高地隙农田信息采集机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 65 - 77.
WANG Xiaochan, LI Zesheng, CHEN Yanyu, et al. Design and experiment of farmland information collection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 65 - 77. (in Chinese)
[15] 廖贵明,杜有洪,陈紫娟,等. 基于离散元法的纯电动旋耕机作业参数分析与优化[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 848 - 858.
LIAO Guiming, DU Youhong, CHEN Zijuan, et al. Analysis and optimization of operating parameters of pure electric rotary tillers based on discrete element method[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 55(6): 848 - 858. (in Chinese)
[16] 郝建军,艾庆贺,袁大超,等. 电动自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 216 - 225,274.
HAO Jianjun, AI Qinghe, YUAN Dachao, et al. Design and experiment of electric self-propelled maize - peanut strip compound planting pesticide applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 216 - 225,274. (in Chinese)
[17] DENG X, SUN H, LU Z, et al. Research on dynamic analysis and experimental study of the distributed drive electric tractor [J]. Agriculture, 2022, 13(1): 40.
[18] HUANG X, WANG X, WANG Y, et al. Multi-objective optimization and experimental analysis of rotary tillage parameters for horticultural electric tractors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 109962.
[19] 黄薛凯,鲁植雄,陈雷,等. HMCVT 泵控马达系统模糊 PID 控制研究[J]. 江西农业大学学报, 2023,45(1): 189 - 201.
HUANG Xuekai, LU Zhixiong, CHEN Lei, et al. Research on fuzzy PID control of HMCVT pump-controlled-motor system[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(1): 189 - 201. (in Chinese)
[20] 陈仲举,谢斌,罗振豪,等. 无人驾驶电动拖拉机犁耕机组路径跟踪与耕深模糊控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 491 - 504.
CHEN Zhongju, XIE Bin, LUO Zhenhao, et al. Fuzzy control strategy for path tracking-tillage depth of unmanned electric tractor ploughing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 491 - 504. (in Chinese)
[21] RANJAN R K, KUMAT V. A systematic review on fruit fly optimization algorithm and its applications[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(11): 13015 - 13069.
[22] HUANG H, TAO D, WEI X, et al. Adaptive image enhancement algorithm based on variable step fruit fly optimization algorithm and nonlinear beta transform[J]. Biomimetics, 2023, 8(2): 212.
[23] ONAY F K. A novel improved chef-based optimization algorithm with Gaussian random walk-based diffusion process for global optimization and engineering problems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2023, 212: 195 - 223.
[24] HU G, XU Z, WANG G, et al. Forecasting energy consumption of long-distance oil products pipeline based on improved fruit fly optimization algorithm and support vector regression[J]. Energy, 2021, 224: 120153.
[25] 刘平,刘伟汉,梁栋. 基于改进果蝇优化算法的 BP 神经网络在组合梁钢构件定位中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 1 - 8.
LIU Ping, LIU Weihan, LIANG Dong. Application of BP neural to composite beam steel member positioning network based on improved fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2023, 42(6): 1 - 8. (in Chinese)
[26] JIANG X, CHENG T. Design of a BP neural network PID controller for an air suspension system by considering the stiffness of rubber bellows[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 74: 65 - 78.
[27] 张振国,郭全峰,蒋贵菊,等. 玉米免耕播种自动调偏系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 40 - 52.
ZHANG Zhenguo, GUO Quanfeng, JIANG Guiju, et al. Design and test of automatic deviation adjustment system for no-tillage sowing of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 40 - 52. (in Chinese)
[28] 徐圣林,朱立成,韩振浩,等. 作物表型信息获取机器人底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 388 - 399.
XU Shenglin, ZHU Licheng, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of robot chassis for obtaining crop-phenotypic information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 388 - 399. (in Chinese)
[29] 王金武,唐汉,沈红光,等. 高地隙折腰式水田多功能动力底盘设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 32 - 40.
WANG Jinwu, TANG Han, SHEN Hongguang, et al. Design and experiment of high clearance roll-waist multifunctional power chassis for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 32 - 40. (in Chinese)
[30] 刘环宇,邹顺,唐嘉城,等. 基于参数预调型超螺旋滑模控制的履带农用底盘路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 136 - 144.
LIU Huanyu, ZOU Shun, TANG Jiacheng, et al. Path tracking control algorithm for tracked agricultural chassis based on parameter-pre-tuned super-twisting sliding mode control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 136 - 144. (in Chinese)
[31] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5668—2017 旋耕机[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.