doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.015

丘陵山地轨道农机具转运平台防失稳系统设计与试验

肖茂华[1]　丁甲辰[1]　朱烨均[1]　柯文韬[1]　解臣硕[1]　王家博[2]　史浩琪[3]

(1.南京农业大学工学院,南京 210031;2.江苏农林职业技术学院,镇江 212400;
3.上海大学中欧工程学院,上海 200444)

摘要:针对丘陵山地轨道运输平台转运农机具易失稳、运输安全性差等问题,设计了一种山地轨道运输平台防失稳液压自动调平系统。系统采用三轴加速度传感器实时监测平台姿态,开发了以平台 Z 轴倾角为输入的 PSO 模糊 PID(PSO Fuzzy-PID)调平控制器,并进行仿真试验与实机测试。仿真结果显示,在单位阶跃信号下,基于 PSO Fuzzy-PID 算法的系统响应时间为 0.181 s,超调量为 0。静态实机试验结果显示,在室内轨道倾角为 4°、7°和 10°下,PSO Fuzzy-PID 算法调平误差的标准差平均值为 0.068°,最大调平误差控制在 0.45°以内。动态实机试验结果显示,系统滞后时间小于 0.4 s,可保证平台在 -0.079°~0.497°范围内波动,满足 ±10°范围内平台精准调平的需求。研究结果验证了本系统的有效性,表明其在工程应用场景中有实际应用价值。

关键词:丘陵山地轨道运输;农机具转运平台;液压自动调平;粒子群算法;模糊 PID

中图分类号:S229$^+$.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0170-10　　**OSID**:

Design and Test of Anti-instability System of Hilly and Mountain Track Agricultural Machinery Transfer Platform

XIAO Maohua[1]　DING Jiachen[1]　ZHU Yejun[1]　KE Wentao[1]　XIE Chenshuo[1]　WANG Jiabo[2]　SHI Haoqi[3]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry*, *Zhenjiang* 212400, *China*
3. *China Europe Engineering College*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200444, *China*)

Abstract: Hilly and mountainous regions are characterized by complex terrain and agricultural machinery with high centers of gravity, which often leads to instability and rollover risks during rail transport operations. To address this challenge, a hydraulic automatic leveling anti-instability system for a mountain rail transport platform was proposed. The system integrated an ADXL345 triaxial accelerometer for real-time attitude monitoring and employed a particle swarm optimization fuzzy PID (PSO Fuzzy-PID) controller, using the platform's Z-axis tilt angle as the feedback variable. A simulation model was established in Simulink to compare the performance of conventional PID, fuzzy PID, and PSO Fuzzy-PID controllers. Simulation results demonstrated that the PSO Fuzzy-PID controller achieved a rapid response time of 0.181 s with zero overshoot, and outperformed conventional PID and fuzzy PID controllers in terms of adjustment time, stability, and overall dynamic response. Static experimental tests were conducted under track inclinations of 4°, 7°, and 10°, and the PSO Fuzzy-PID controller yielded an average leveling error standard deviation of only 0.068°, with maximum error constrained within 0.45°. The average leveling time was reduced by approximately 6.3% and 15.6% compared with that of fuzzy PID and conventional PID, respectively. Dynamic experiments further revealed that the system maintained a response delay below 0.4 s, with platform attitude fluctuations confined to -0.079° to 0.497°, thereby meeting the precise leveling requirement within ±10°. These results confirmed the effectiveness and reliability of the proposed PSO Fuzzy-PID based hydraulic leveling system. The system significantly enhanced the operational stability and safety of agricultural machinery transport on hilly rail platforms, providing valuable technical support for the intelligent development and practical application of agricultural transport equipment in mountainous regions.

Key words: hilly and mountainous rail transportation; agricultural machinery transfer platform; hydraulic automatic leveling; particle swarm optimization algorithm; fuzzy PID

收稿日期:2025-06-18　修回日期:2025-07-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2001805)

作者简介:肖茂华(1981—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:xiaomaohua@njau.edu.cn

0　引言

我国丘陵山地资源丰富，而复杂的地形条件与较低的农业机械化水平在一定程度上制约了该区域农业的可持续发展[1]。在丘陵山区，中小型农机具（如收获机、插秧机和播种机等）依然是主要的农业生产装备[2]。受限于地势起伏大、轨道坡度较陡等自然条件，目前已建成的山地轨道运输系统主要服务于农用物资（如化肥、农药等）的转运，尚不能满足动力农机具安全、可靠的转运需求[3]。动力农机具因普遍存在重心偏高的问题，在运输过程中易出现姿态不稳甚至倾覆的现象，严重影响作业的安全性与可靠性。鉴于此，研发一种可实现农机具运输过程中姿态快速感知与稳定调控的防失稳系统，对提升丘陵山区农机运输安全性具有重要意义[4]。

目前，防失稳系统研究主要集中在车辆、机器人以及丘陵山区农机作业部件等领域。在车辆领域，稳定性控制是核心研究内容，主要包括基于速度跟踪的横向稳定控制与底盘系统的协调稳定控制[5-6]。例如，文献[7-8]将速度跟踪问题转化为纵向控制，实现横纵向协同稳定控制；文献[9-10]则结合底盘结构特性构建了稳定性协同控制框架。在机器人领域，底盘行走机构的设计直接关系到机身姿态的平衡与稳定[11-12]。当前轮腿式机器人[13-14]在地形适应性和机动性能方面优势突出，刘毅等[15]和张庆等[16]围绕该类型机器人开展了位姿控制策略研究，实现了连杆与铰链结构的动态调整以维持稳定性。在丘陵山区农机作业部件方面，国内外学者也进行了大量研究。文献[17-18]采用PID 控制策略设计了喷药机喷杆自动调平系统，有效提升了施药作业效率；LATORRE-BIEL 等[19]提出了一种适用于拖拉机通用前端装载装置自动调平机构，并配套开发了相应控制算法。

车辆与机器人领域的防失稳技术普遍存在成本高、结构复杂等问题，难以在丘陵山地农机具轨道运输平台中实现工程化应用。而丘陵农机作业部件的调平系统多采用电推杆配合传统算法，难以满足轨道运输平台高负载、高可靠性的控制需求。

针对上述问题，本文设计一种适用于丘陵山地农机具轨道运输平台的防失稳系统。该系统集成姿态检测与液压自动调平技术，采用粒子群优化算法（PSO）对模糊逻辑 PID 控制器（Fuzzy-PID）进行参数优化，以实现对液压调平系统快速、精准控制，从而增强运输平台在复杂地形条件下的运输安全性。

1　总体结构与工作原理

1.1　转运平台总体结构

丘陵山地农机具轨道运输平台主要由前挡板、钩锁电机、平台台面、液压尾板、轨道轮、固定装置以及调平装置等组成（图 1）。其中，固定装置包括移动与固定限位块及驱动电机，调平装置包括液压泵、电磁阀、液压杆及输油管（图中未表示）。转运平台的总体结构图如图 2 所示。

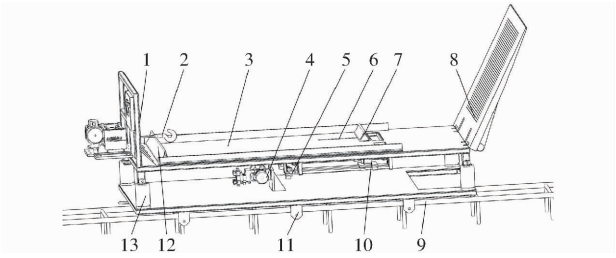

图 1　运输平台模型图

Fig. 1　Diagram of transport platform model

1. 前挡板　2. 钩锁电机（钩子）　3. 转运平台台面　4. 液压泵（电磁阀安装位置）　5. 蜗杆电机（驱动限位块前后移动）　6. 滑槽　7. 移动式限位块　8. 液压尾板　9. 双轨轨道　10. 伺服电机（驱动限位块伸出或隐藏）　11. 轨道轮　12. 固定式限位块　13. 调平液压杆

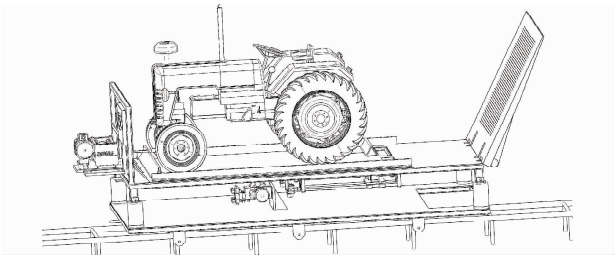

图 2　转运平台总体结构图

Fig. 2　Overall structural diagram of transit platform

在农机具转运作业过程中，转运平台首先放下液压尾板，并通过钩锁电机钩住农机具将其沿尾板牵引至平台上，直至其前轮接触到平台前段的固定限位块。此时，后方的隐藏式限位块伸出，并沿滑槽移动，最终抵靠于农机具底盘（车轮或履带）位置，实现前后限位的双重固定。该限位装置的尺寸设计充分考虑了当前市场上常见的丘陵山区中小型农机具特性，能够兼容不同轮距、轴距、履带宽度及履带间距，具备良好的通用性与适应性。在运输过程中，防失稳调平系统持续调节平台姿态，使农机具始终保持在较小的倾斜角度范围内，保证转运平台的运输稳定性与安全性。

1.2　转运平台防失稳系统硬件选型

通过市场调研丘陵山区常用中小型农机具的规格参数，设计转运平台尺寸为 3 000 mm × 1 500 mm × 1 500 mm，最大承载 800 kg，调平范围为 ±10°。

防失稳液压调平系统通过布置在平台前后各两根液压推杆实现对平台姿态的动态调节。根据转运平台设计参数并结合图 3 进行防失稳系统液压推杆选型,液压推杆的极限负载与行程为

$$\Delta h = h_1 - h_0 = l_0 \tan\alpha \tag{1}$$

$$\Delta l = \frac{\Delta h}{\cos\beta} \tag{2}$$

$$F_1 = \frac{G_1 \cos\alpha}{\cos\beta} \tag{3}$$

式中 l_0——两液压推杆顶部间距

h_0——两层平行时距离

h_1——液压杆伸长后平台两层固定点间距

α——调平的范围角度

β——液压推杆与台面的夹角

Δh——液压推杆伸长后平台左侧升高高度

Δl——推杆最大行程

G_1——机具在调平转轴左侧的重量

F_1——假设平台工作时其所有质量均处于左侧,且重心位置与液压推杆接触位置在一条垂直的直线上时推杆的极限负载

代入实际数据得:$\Delta h = 0.317\ 4$ m;$\Delta l = 0.366\ 5$ m;$F_1 = 8\ 915.32$ N。

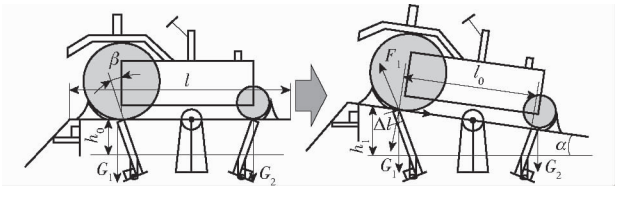

图 3 调平示意图

Fig. 3 Schematic of leveling

为确保系统在实际运行中的安全性与可靠性,设计中预留一定的安全裕度,选用单缸双向液压推杆作为调平执行元件。其主要参数如下:额定推力为 20 000 N、行程为 370 mm、缸径为 40 mm、杆径为 25 mm、最大工作压力 16 MPa。该液压推杆配置可满足系统在丘陵山地复杂工况下对调平响应力和行程范围的要求,为平台姿态调整提供可靠的执行能力。

特种运输车辆在执行运输任务过程中发生货物侧翻的风险可通过多种指标进行评估[20]。鉴于丘陵山地轨道地形起伏显著的特点,轨道坡度(即所运输货物的倾斜角度)成为评估丘陵山地轨道农机具转运平台运输稳定性的核心指标。基于此,本文防失稳系统以转运平台实时监测的倾角值作为主要输入与反馈信号,构建控制程序。综合考虑稳定性与成本,系统集成 ADXL345 三轴加速度传感器来实时监测平台角度变化。表 1 列出了该传感器的主要参数。

表 1 ADXL345 三轴加速度传感器相关参数

Tab. 1 ADXL345 parameters of three-axis accelerometer

参数	规格/数值
工作电压/V	2.0 ~ 3.6(典型值 3.3)
工作/待机电流/μA	40(低功耗模式)/0.1
量程范围/g	±2, ±4, ±8, ±16
数字接口	I^2C(支持标准/快速模式) SPI(3/4 线模式)
工作温度/℃	-40 ~ 85

1.3 转运平台防失稳控制系统原理

图 4 为液压自动调平系统工作流程图。

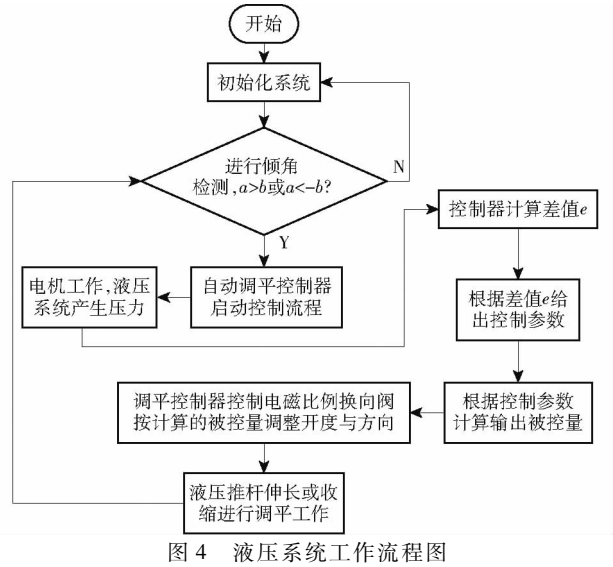

图 4 液压系统工作流程图

Fig. 4 Hydraulic system workflow diagram

其中,变量 a 表示由 ADXL345 三轴加速度传感器实时检测的平台当前倾斜角,变量 b 为系统预设的最大允许倾斜角阈值。在正常运行过程中,控制板在通电后首先对系统进行初始化,随后 ADXL345 传感器开始持续监测平台姿态角,并将检测值与预设的倾斜角阈值进行比较。

当平台倾斜角超过设定的安全限值时,防失稳调平控制器将启动自动调平程序。一方面,控制器驱动液压系统中的电机工作,使液压管路内产生压力;另一方面,系统根据实时检测值与设定目标值之间的偏差 e 进行控制参数整定,并计算出相应的控制输出量。执行机构电磁比例阀根据控制器的输出量调整阀口的开度及通油方向,从而驱动液压缸实现伸缩,完成对平台姿态实时调节。通过该闭环控制过程,可确保农机具在运输过程中的倾斜角始终维持在安全范围内,显著提升运行稳定性与作业安全性。

2 基于 PSO Fuzzy - PID 的转运平台防失稳调平控制器设计

2.1 调平控制系统的传递函数计算

设计该调平控制器前需计算该调平控制系统的

传递函数。在忽略弹性负载的情况下，将液压系统的数学模型简化为液压缸与电磁比例阀的传递函数组合，其中液压缸传递函数为

$$G(1)=\frac{1}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2}+\frac{2\xi_h}{\omega_h}s+1\right)A_h} \tag{4}$$

式中　s——拉普拉斯变换中的复频率变量

A_h——等效液压缸横截面积

ξ_h——液压缸阻尼比

ω_h——液压缸固有频率

电磁比例阀的传递函数为

$$G(2)=\frac{K_aK_vK_h}{\frac{s^2}{\omega_v^2}+\frac{2\xi_v}{\omega_v}s+1} \tag{5}$$

式中　K_a——比例放大器增益系数

K_v——比例阀电磁铁增益系数

K_h——比例阀流量增益系数

ξ_v——比例电磁阀阻尼比

ω_v——电磁铁固有频率

总系统的传递函数为

$$G(s)=G(1)G(2)=\frac{K_aK_vK_h}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2}+\frac{2\xi_h}{\omega_h}s+1\right)\left(\frac{s^2}{\omega_v^2}+\frac{2\xi_v}{\omega_v}s+1\right)A_h} \tag{6}$$

对液压缸进行阶跃响应测试，得出 ξ_h 取 0.8，ω_h 为 700 Hz，根据 1.2 节液压缸实际参数计算横截面积 A_h 为 12.56 cm^2。对电磁阀进行频率响应分析以及实验测定，得出 ξ_v 取 0.5，ω_v 为 150 Hz，K_a 取 188.6，K_h 为 2.82 L/(min·mA)，K_v 取 7.1 N/A。

2.2　传统 PID 调平控制器设计

传统常规 PID 控制是目前自动控制中使用最为广泛的控制策略之一[21]，其主要分为位置式和增量式 2 种。增量式 PID 控制常用于被控对象为电机的控制系统，本文防失稳系统中被控对象为液压自动调平系统中的电磁比例阀，适合采用位置式 PID 控制。位置式 PID 控制器主要由比例项、积分项与微分项 3 个单元互相配合而成，主要结构如图 5 所示。

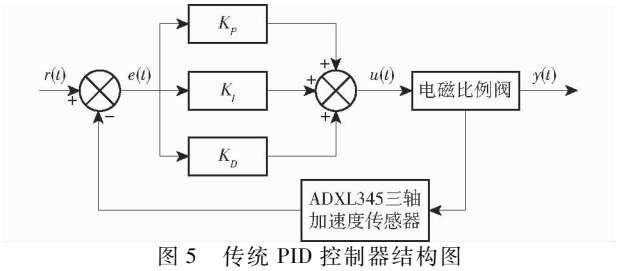

图 5　传统 PID 控制器结构图

Fig. 5　Structure diagram of traditional PID controller

在控制器中，需要设置比例系数 K_P、积分系数 K_I 与微分系数 K_D 3 个控制参数对被控项进行控制，其关系式为

$$u(t)=K_Pe(t)+K_I\int_0^t e(t)\,dt+K_D\frac{de(t)}{dt} \tag{7}$$

控制器根据 t 时刻下设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 差值 $e(t)$ 的情况，给出控制量 $u(t)$ 并作用于受控对象，但式(7)为连续算法表达式，在嵌入式部署实际调平过程需要进行离散化采样步骤，假设一共进行 m 次采样，取采样周期 T 取 1 ms。最终推得离散化 PID 控制算法为

$$u(k)=K_Pe_m+K_I\sum_{b=0}^{m}e_b+K_D(e_m-e_{m-1}) \tag{8}$$

式中　e_m、e_{m-1}、e_b——第 m、$m-1$、b 次采样的误差值

将实际数据代入传递函数，采用试凑法结合系统开环试验进行初步整定，经多次调整设置传统 PID 控制器 K_{P0} 为 0.07、K_{I0} 为 0.5、K_{D0} 为 0.005。

传统 PID 控制器因其结构简单、参数整定方便，在各类线性系统中得到了广泛应用。然而，当应用于具有强非线性特征的复杂控制对象时，其控制性能往往受到显著限制。一方面，复杂系统难以建立精确的数学模型；另一方面，被控对象本身及其所处环境具有较强的不确定性，导致传统 PID 难以实现理想的控制目标，系统稳定性与响应性能难以保障。

2.3　Fuzzy－PID 调平控制器设计

利用模糊逻辑控制器优化传统 PID 控制是针对上述问题而提出的一种控制策略。其控制流程图如图 6 所示。

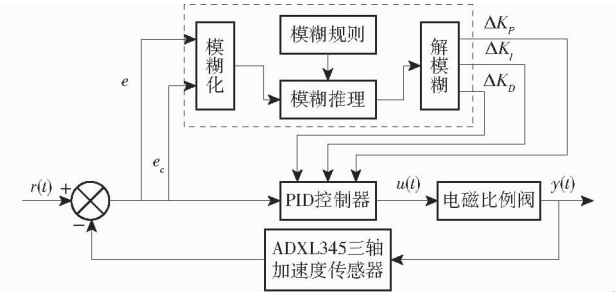

图 6　Fuzzy－PID 调平控制器结构图

Fig. 6　Structure diagram of Fuzzy－PID leveling controller

由于模糊控制可有效解决复杂非线性系统控制问题，因此将传统 PID 与模糊控制相结合，使丘陵山地农机具轨道运输平台液压调平系统具有自适应性，可自动调节控制参数，适应被控过程的变化，提高控制性能和可靠性，改善传统 PID 不足之处。

设计的 Mamdani 型模糊控制器以角度偏差 e 与偏差变化率 e_c 为输入量，$e_c=de/dt$，根据模糊规则进行模糊推理，利用 Centroid 解模糊并输出 PID 的调整参数 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D，得出模糊 PID 控制器实际输出 K_P、K_I、K_D 为

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \tag{9}$$

在模糊 PID 控制器中对输入量 e 与 e_c 以及输出量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 进行模糊规则设计，每个变量的模糊集个数均为 7 个，分别为 NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB，输入变量 e 与 e_c 隶属函数 NB 与 PB 取 gaussmf 型，输入变量的其他隶属函数以及输出变量的全部隶属函数均取 trimf 型函数。且每个输入变量与输出变量的模糊集个数均为 7 个，输出变量 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的模糊规则均为 49 条，对应的空间曲面如图 7 所示。

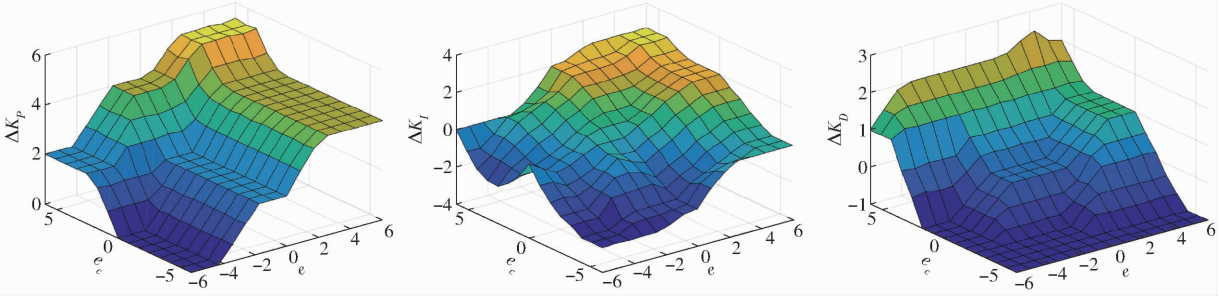

图 7 模糊 PID 控制器输出 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 曲面

Fig. 7 Fuzzy – PID controller outputed ΔK_P, ΔK_I and ΔK_D surface diagram

2.4 PSO Fuzzy – PID 控制器设计

传统模糊 PID 控制器在参数整定过程中主要依赖人工经验，核心参数如量化因子与比例因子的选择具有一定的主观性，容易陷入局部最优，难以实现系统性能的全局最优化。PSO 是一种基于群体智能机制的全局优化方法，其基本思想是通过粒子间的信息交互与协同搜索，在解空间中寻找全局最优解[22-23]。将 PSO 算法引入模糊 PID 控制器的参数优化过程中，可通过粒子间的协作与竞争机制实现对控制器参数的自动寻优，从而有效提高系统的鲁棒性与控制精度。该算法尤其适用于求解高维、复杂、非线性的优化问题。基于粒子群算法优化模糊 PID 控制器的结构如图 8 所示。

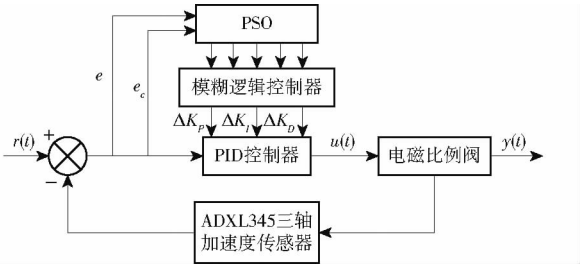

图 8 粒子群算法优化模糊 PID 控制器结构图

Fig. 8 Particle swarm optimization fuzzy PID controller structure diagram

在优化算法迭代过程中，需借助适应度函数对群体中各个体性能进行量化评价。其中，ITAE (Integral of time-weighted absolute error) 指标因其兼具响应速度快、系统平稳性好及超调量小等优势，已被广泛应用于控制系统性能评估。鉴于其优越的动态特性评价能力，将 ITAE 作为防失稳系统中控制器性能优化的重要依据之一。以系统 ITAE 指标为优化目标，优化模糊 PID 控制器的量化因子（K_e、K_{e_c}）与比例因子（$K_{\Delta K_P}$、$K_{\Delta K_I}$ 与 $K_{\Delta K_D}$）。

首先根据需优化的参数生成 5 维向量

$$\boldsymbol{X} = (K_e, K_{e_c}, K_{\Delta K_P}, K_{\Delta K_I}, K_{\Delta K_D}) \tag{10}$$

初始化粒子的位置与速度，以 ITAE 指标计算每个粒子的适应度，在实际过程中需进行离散化处理，以 F 为采样周期，J 为采样序号，ITAE 函数离散化公式为

$$E = \sum_{g=0}^{n} |e(JF)| JFF \tag{11}$$

在评估完每个粒子的适应度之后，更新个体最优和全局最优并记录，然后进行速度与位置迭代优化，即

$$v_k^{(t)} = \omega v_k^{(t-1)} + c_1 r_1 (p_k^{(t)} - x_k^{(t)}) + c_2 r_2 (g_k^{(t)} - x_k^{(t)}) \tag{12}$$

$$x_k^{(t)} = x_k^{(t-1)} + v_k^{(t-1)} \tag{13}$$

式中 $v_k^{(t)}$、$x_k^{(t)}$、$v_k^{(t-1)}$、$x_k^{(t-1)}$——粒子 k 在第 t、$t-1$ 次迭代的速度和位置

ω——惯性因子

$p_k^{(t)}$——粒子 k 的个体最优值

$g_k^{(t)}$——粒子群的全局最优解

c_1、c_2——加速度常数

r_1、r_2——随机函数

基于粒子群优化的模糊 PID 控制器由 3 部分组成，分别是粒子群优化算法、模糊逻辑控制器以及传统 PID 控制器。其主要控制流程图如图 9 所示。

在自动调平控制过程中，引入粒子群优化算法对模糊控制器中的隶属函数进行优化搜索，通过在目标解空间中寻找满足性能要求的最优隶属函数参数组合，并结合系统运行状态对其进行实时更新，从

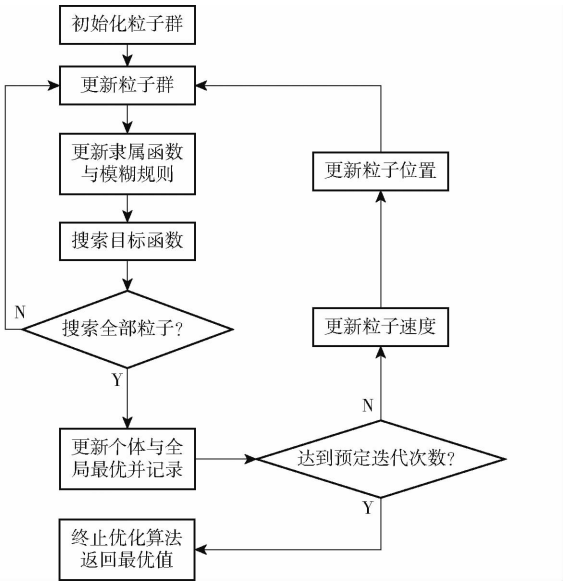

图 9　粒子群算法优化模糊逻辑控制器流程图

Fig. 9　Flowchart of particle swarm optimization fuzzy logic controller

而有效提升模糊 PID 控制器的响应速度与控制精度。

3　基于 Simulink 的调平控制器仿真

3.1　仿真模型建立

在仿真试验中采用传统 PID、模糊 PID 和基于粒子群算法优化的模糊 PID 3 种不同的控制方法在 Matlab/Simulink 软件中进行仿真，并设置采样周期为 1 ms，仿真模型图如图 10 所示。

传统位置式 PID 控制器：根据 2.2 节所选参数，取 K_P为 0.07、K_I为 0.5、K_D为 0.005。输入单位阶跃信号进行仿真。

模糊 PID 控制器：根据 2.3 节的设计流程，设置输入参数偏差 e 与偏差变化率 e_c论域均为[-6,6]，输出参数 ΔK_P的论域范围为[-6,6]，ΔK_I和 ΔK_D的论域均为[-3,3]。

基于 PSO 优化的模糊 PID 控制器：PSO Fuzzy - PID 控制器首先设定算法参数，初始粒子群数量 s 设置为 25。惯性因子 ω 设置为 0.8，控制粒子的惯性。加速度常数 c_1、c_2均为 0.2，用来调节个体和群体经验的权重。最大迭代次数设为 200，不设置最小适应度，以达到最优目标。

3.2　仿真结果分析

图 11 为 PSO 算法在迭代过程中个体最优适应度曲线，同时也反映稳态性能指标 ITAE 的优化过程。由图 11 可见，随着迭代次数增加，最优适应度持续下降，并在后期逐渐趋于平稳，表明算法具有良好的全局搜索能力，能有效规避局部最优的风险。约在第 50 次迭代后，适应度趋于稳定，说明粒子群已基本收敛至全局最优解，对应的个体适应度达到最优水平。

为了更加直观进行对比，将单位阶跃信号作为输入信号，对比上升时间（系统初次从稳态值的 10% 上升到 90% 的时间）、调节时间以及超调量3 种性能指标，仿真时间为 1 s，3 种控制器的单位阶跃响应对比分析图如图 12 所示，3 种性能指标如表 2 所示。

由图 12 可知，PSO Fuzzy - PID 控制系统在最短时间内达到稳态目标值，且整体响应过程稳定迅速。尽管其上升时间略慢于传统 PID 控制器，但后者存在显著的超调现象，且调节时间明显长于前者，表明 PSO Fuzzy - PID 控制器在系统动态性能方面具有明显优势。

进一步地，与常规 Fuzzy - PID 算法相比，PSO Fuzzy - PID 控制器在超调量上表现相近，二者均保

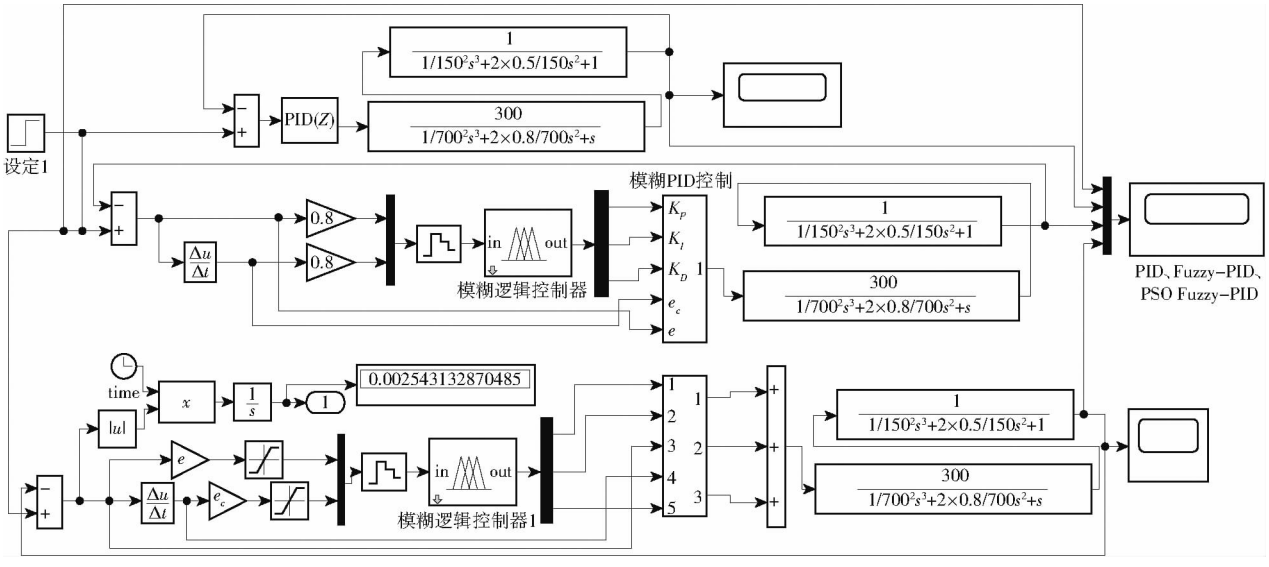

图 10　PID、Fuzzy - PID 与 PSO Fuzzy - PID 控制系统仿真模型

Fig. 10　Simulation model diagram of PID, Fuzzy - PID and PSO Fuzzy - PID control system

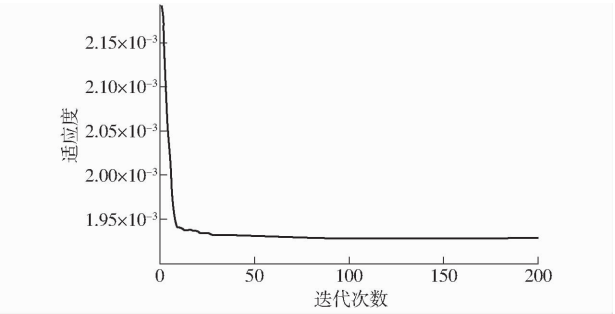

图 11 最佳适应度曲线

Fig. 11 Optimal fitness curve

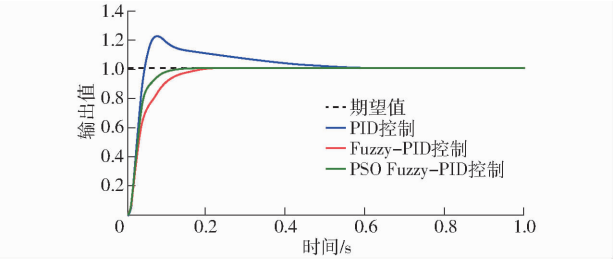

图 12 3 种控制器系统输出的对比结果

Fig. 12 Comparison of outputs of three controller systems

表 2 3 种控制器数据对比

Tab. 2 Comparison of data of three controllers

控制方式	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%
PID	0.028	0.587	22.5
Fuzzy－PID	0.069	0.269	0
PSO Fuzzy－PID	0.051	0.181	0

持在较低水平;但在上升时间与调节时间方面,PSO 优化方案均优于未优化的 Fuzzy－PID 控制器,从而体现出其更优的综合性能。

表 2 可进一步验证上述结论:传统 PID 控制器仅在上升时间方面具有一定优势,而在超调量和调节时间上均明显劣于另外 2 种方法。具体而言,传统 PID 控制器的超调量高达 22.5%,而 Fuzzy－PID 与 PSO Fuzzy－PID 控制器的超调几乎为零;传统 PID 控制器调节时间分别较 PSO Fuzzy－PID 与 Fuzzy－PID 控制器多 0.406 s 和 0.318 s,PSO Fuzzy－PID 控制器调节时间相较传统 PID 与 Fuzzy－PID 降低 69% 与 33%。

综上,通过 Matlab 仿真分析可知,PSO Fuzzy－PID 控制器在响应速度与系统稳定性之间实现了良好平衡,具备显著的控制性能优势。

4 转运平台样机防失稳系统试验

4.1 试验平台搭建与调平试验设计

为评估所提出的防失稳调平控制系统在丘陵山地农机具轨道运输平台上的实际性能,并验证其工程适用性,搭建了试验台架并开展了实机测试,如图 13 所示。

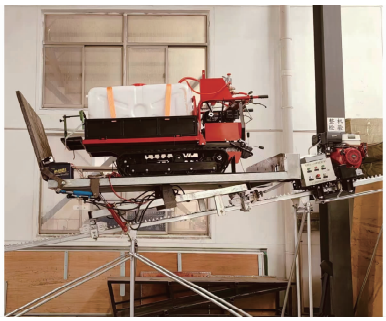

图 13 模拟实际工况的室内试验平台

Fig. 13 Indoor test platform simulated test under actual operating conditions

试验条件:试验平台搭建于桑普农机(常州)有限公司厂区内,选用辅助柴油动力机对运输平台进行牵引。为模拟典型农机具转运工况,在平台上安置桑普 3WZ－SP500 型履带式喷雾机作为负载。机头与平台在轨道上实际运行距离为 18 m,其中前段 4 m 为水平直轨(轨道倾角为 0°),后段 4 m 为固定坡道(轨道倾角为 10°),中间 10 m 为过渡弯轨,轨道每米倾角递增 1°,以构建连续变化的坡度环境,模拟实际运行中的复杂地形。

系统设计:控制系统以 STM32F103ZET6 单片机为核心处理器,集成 ADXL345 三轴加速度传感器实现对平台倾斜角的实时监测,并采用 Keil μVision5 软件编写与加载控制算法。液压系统配置小型定速液压泵,其排量为 2.5 mL/r、额定转速为 3 000 r/min 时最大流量为 7.5 L/min、最大工作压力为 20 MPa,采用 24 V 直流供电,功率为 300 W。控制执行元件选用通径为 6 mm 的直动式电磁比例方向阀,其最大工作压力为 25 MPa,额定流量 5 L/min,额定电压 24 V,适用温度范围为 －20 ~ 80℃。各液压单元通过定制液压软管连接,构成完整的丘陵山地轨道运输平台防失稳液压自动调平系统。

试验方法:①为验证 3 种控制算法的实际调平性能,开展静态自动调平试验。综合考虑试验安全性及厂区空间限制,设定平台调平控制范围为轨道倾角 0° ~ 10°(－10° ~ 0°部分为对称工况)。试验选取轨道倾角为 4°、7°和 10° 3 种典型工况,调平目标均设定为 0°。在每种工况下,分别对传统 PID、Fuzzy－PID 和 PSO Fuzzy－PID 3 种控制策略各进行 8 次独立试验,记录系统实际调平时间及调平误差,以评估不同算法在静态调平过程中的性能差异。②为进一步验证 PSO Fuzzy－PID 算法动态性能,开展动态调平试验。设定辅助动力机头以 1 m/s 的恒定速度从室内轨道起点运行至终点,在试验过程中每 0.4 s 记录 1 次平台角度,共采集 45 个数据点,动态试验共进行 3 组。

4.2　试验结果分析

统计 72 次静态试验的数据绘制成点线图，探究 3 种算法下防失稳系统的实际性能。静态调平试验结果如图 14 所示。

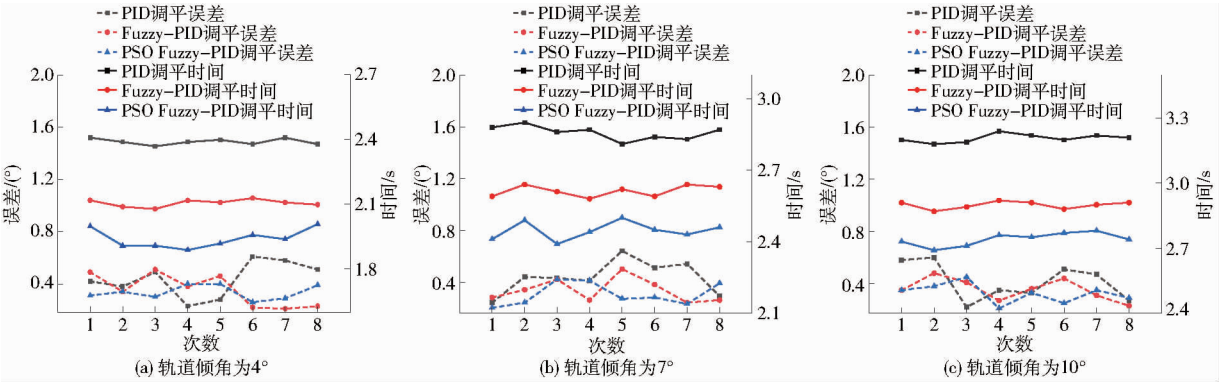

图 14　3 种算法在不同轨道倾角下的静态调平结果

Fig. 14　Static leveling results of three algorithms under different orbital inclinations

由图 14 可知，基于 PSO 优化的模糊 PID 控制算法在响应速度、控制精度及系统稳定性方面均优于传统 PID 与常规模糊 PID 控制器。在轨道倾角为 4°、7°和 10° 3 种工况下，PSO Fuzzy－PID 控制器调平误差的标准差平均值为 0.068°，优于 Fuzzy－PID 控制器（0.094°）及传统 PID 控制器（0.128°），该误差可能来源于机器装配、传感器安装、传感器本身测量精度所产生的误差，整体调平误差在可接受范围内。为进一步提高测量数据的准确性与系统的运行可靠性，可通过提升装配工艺水平、优化传感器安装结构，或选用更高精度的传感器加以改进。此外 PSO Fuzzy－PID 算法在不同倾角条件下的调平误差和倾角幅度并未表现出明显相关性，表明算法的稳定性较强。在最大调平误差方面，PSO Fuzzy－PID 控制器误差为 0.45°，同样低于 Fuzzy－PID 控制器的 0.51°和传统 PID 控制器的 0.64°。

在调平时间方面，3 种不同倾角的多次试验中 PSO Fuzzy－PID 的整体调平时间均低于另外 2 种算法。PSO Fuzzy－PID 控制器在 3 种倾角下的平均调平时间分别为 1.94、2.45、2.74 s，而 Fuzzy－PID 控制器分别为 2.10、2.61、2.90 s，传统 PID 控制器则分别为 2.39、2.86、3.20 s。与 Fuzzy－PID 和传统 PID 控制器相比，PSO Fuzzy－PID 控制器的平均调平时间分别缩短约 6.3% 与 15.6%。

动态调平试验，每次独立试验后均对传感器重新进行校准，收集 3 次试验采样点的数据并绘制成折线图（图 15），以便直观反映基于 PSO Fuzzy－PID 算法控制的系统动态性能。

如图 15 所示，3 次独立试验所得结果整体趋势基本一致。在试验初始阶段（0～4 m），由于设备运行过程中存在轻微振动，传感器检测到的平台倾角在 0°附近呈极小幅度波动，此阶段自动调平系统尚未启动。距离轨道约 4 m 处，由于轨道坡度发生变

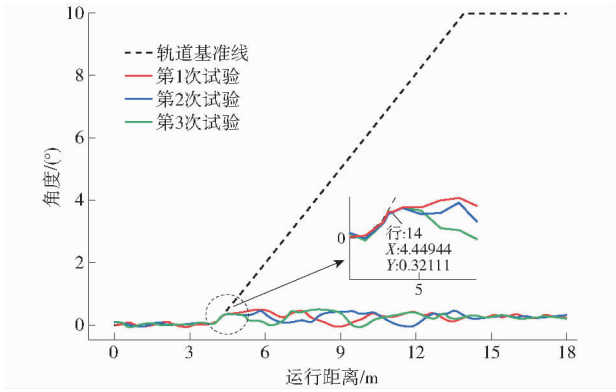

图 15　动态试验结果图

Fig. 15　Dynamic test result chart

化，平台随之出现明显倾斜，在 4.3～4.4 m 处自动调平系统开始介入，表明系统响应滞后时间为 0.3～0.4 s。该滞后主要由传感器采样延迟、电磁阀响应时间、液压油压缩效应及静摩擦力克服过程所致，但整体滞后量处于系统允许范围内。为减小系统响应滞后，可采用高采样频率的传感器、选用响应速度更快的电磁阀，同时加强机械结构润滑以减小初始静摩擦力，从而有效提升系统响应速度与控制精度。

在试验中期（4～14 m），防失稳自动调平系统持续工作，使平台姿态波动控制在 －0.079°～0.497°之间，系统表现出良好的调平能力与稳定性。进入试验后期（14～18 m），当轨道坡度稳定维持在 10°时，平台姿态趋于稳定，最终保持在 0.2°～0.3° 的狭小范围内，进一步验证了调平系统在持续运行过程中的有效性与鲁棒性。

综上所述，基于 PSO 优化的模糊 PID 控制策略在动态响应性能和调平精度方面均表现出更优的控制效果，充分验证了本文所设计防失稳系统在丘陵山地轨道运输平台实际工况下的适用性与可靠性，能够有效保障农机具运输作业的安全运行。

5 结论

(1)设计了一种基于 PSO Fuzzy - PID 控制策略的液压自动调平系统。系统利用 ADXL345 三轴加速度传感器实现对平台姿态的实时检测,以平台倾角作为反馈量调节液压阀阀口开度,从而实现对液压缸动作的精确控制。该方案有效保障了调平系统响应灵活性与运行稳定性。

(2)在对系统传递函数建模的基础上建立了完整的 Simulink 仿真平台。仿真结果表明,经粒子群算法优化后,控制器在迭代约 50 次内完成收敛,系统调节时间减少至 0.181 s,相较于传统 PID 控制器(0.587 s)和模糊 PID 控制器(0.269 s)分别减少了约 69% 和 33%;同时,系统在调节过程中无超调现象,验证了 PSO Fuzzy - PID 控制算法在响应速度与稳定性方面的优越性能。

(3)静态试验结果表明,在 3 种典型轨道倾角条件下,基于 PSO Fuzzy - PID 控制的防失稳液压调平系统的调平误差的标准差平均值为 0.068°,表明系统在多个测试中调平误差分布稳定,具有良好的一致性,最大误差不超过 0.45°,优于传统 PID 与常规模糊 PID 控制器,且平均调平时间分别缩短 6.3% 与 15.6%。动态试验结果显示,在转运过程中系统延迟小于 0.4 s,平台姿态角稳定在 -0.079° ~ 0.497°范围内波动,进一步验证了所设计系统在实际工况下的稳定性与可靠性。

参 考 文 献

[1] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1 - 20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1 - 20. (in Chinese)

[2] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1 - 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1 - 18. (in Chinese)

[3] 宋月鹏, 张红梅, 高东升, 等. 国内丘陵山地果园运输机械发展现状与趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 50 - 55,67.
SONG Yuepeng, ZHANG Hongmei, GAO Dongsheng, et al. Development status and trend of domestic orchard transportation machinery in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(1): 50 - 55,67. (in Chinese)

[4] 牟孝栋, 杨福增, 段罗佳, 等. 丘陵山地拖拉机调平与防翻关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 1 - 16.
MOU Xiaodong, YANG Fuzeng, DUAN Luojia, et al. Research advances and development trend of mountainous tractor leveling and anti-rollover system[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 1 - 16. (in Chinese)

[5] 王珊珊, 梁军, 陈龙, 等. 基于动态稳定域的 LPV/H_∞ 车辆横纵向稳定协同控制[J]. 机械工程学报, 2025,61(6): 228 - 237.
WANG Shanshan, LIANG Jun, CHEN Long, et al. LPV/H_∞ based on dynamic stability region cooperative control of vehicle lateral and longitudinal stability[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025,61(6): 228 - 237. (in Chinese)

[6] KONG J, PFEIFFER M, SCHILDBACH G, et al. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design [C]//2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2015: 1094 - 1099.

[7] HAJILOO R, ABROSHAN M, KHAJEPOUR A, et al. Integrated steering and differential braking for emergency collision avoidance in autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(5): 3167 - 3178.

[8] LIN F, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. Trajectory tracking of autonomous vehicle with the fusion of DYC and longitudinal-lateral control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32: 16.

[9] ZHANG L, DING H, GUO K, et al. Cooperative chassis control system of electric vehicles for agility and stability improvements [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(1): 134 - 140.

[10] ZHU J, WANG Z, ZHANG L, et al. Braking/steering coordination control for in-wheel motor drive electric vehicles based on nonlinear model predictive control[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 142: 1 - 20.

[11] 兰玉彬, 闫瑜, 王宝聚, 等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20):30 - 40.
LAN Yubin, YAN Yu, WANG Baoju, et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20):30 - 40. (in Chinese)

[12] 倪利伟, 张红松, 马宗正, 等. 基于模型降维的轮腿机器人姿态控制试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241171.
NI Liwei, ZHANG Hongsong, MA Zongzheng, et al. Experimental study on posture control of wheel legged robot based on model dimensionality reduction[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241171. (in Chinese)

[13] NI L, MA F, WU L, et al. Posture control of a four-wheel-legged robot with a suspension system[J]. IEEE Access, 2020, 8:

152790 – 152804.

[14] LIU D, WANG J, LEI T, et al. Active suspension control with consensus strategy for dynamic posture tracking of wheel-legged robotic systems on uneven surfaces[J]. ISA Transactions, 2022, 131: 628 – 638.

[15] 刘毅, 丰宗强, 刘洋, 等. 轮式并联调姿机器人冗余控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 423 – 435.
LIU Yi, FENG Zongqiang, LIU Yang, et al. Investigation on wheeled parallel pose-tuning robot redundant control strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 423 – 435. (in Chinese)

[16] 张庆, 潘烤鑫, 王振宇, 等. 复杂地形下仿生轮腿式机器人位姿控制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 380 – 391,403.
ZHANG Qing, PAN Kaoxin, WANG Zhenyu, et al. Pose control of biomimetic wheel-legged robots in complex terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 380 – 391,403. (in Chinese)

[17] 印祥, 安家豪, 王显, 等. 高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 98 – 105,115.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Xian, et al. Design and test of automatic beam leveling system for high-clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 98 – 105,115. (in Chinese)

[18] 周志艳, 周铭杰, 陈羽立, 等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 70 – 79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Automatic leveling control system of rotors hovering spray boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 70 – 79. (in Chinese)

[19] LATORRE-BIEL J I, ARANA I, BALLESTEROS T, et al. Front end loader with automatic levelling for farm tractors[J]. Biosystems Engineering, 2016, 148: 111 – 126.

[20] JIN Z, LI J, HUANG Y, et al. Study on rollover index and stability for a triaxle bus[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32: 64.

[21] 朱凤磊, 张立新, 胡雪, 等. 基于蝙蝠优化 BP – PID 算法的精准施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 135 – 143, 171.
ZHU Fenglei, ZHANG Lixin, HU Xue, et al. Precision fertilizer application control system based on BA optimization BP – PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 135 – 143, 171. (in Chinese)

[22] 刘涛,杨奉源,刘望,等. 基于特征筛选和粒子群优化的花生生物量估算[J]. 农业工程学报,2025,41(1):238 – 247.
LIU Tao, YANG Fengyuan, LIU Wang, et al. Estimation of peanut biomass based on feature selection and particle swarm optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 238 – 247. (in Chinese)

[23] 王斌,杨宏贤,冯杰,等. 基于 PSO 的 DSSAT 水稻品种参数优化[J]. 农业机械学报,2023,54(11):369 – 375.
WANG Bin, YANG Hongxian, FENG Jie, et al. Rice cultivar coefficient optimization of DSSAT based on PSO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):369 – 375. (in Chinese)