

基于混合扩张状态观测器的农田平地机液压系统反步滑模控制研究

魏新华^{1,2} 王庆壮¹ 吉鑫¹ 刘成良³ 汪岸哲¹

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 智能农机装备理论与技术重点实验室, 镇江 212013;

3. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 为解决农田平地机液压系统在复杂地貌平地作业时控制精度低、抗干扰能力差等问题,设计了一种基于混合扩张状态观测器(HESO)的反步滑模控制器。其中,HESO基于输出反馈信号估计系统未知状态和总扰动,并在前馈通道中进行扰动补偿;基于快速趋近律设计的反步滑模控制器输出连续光滑的控制量,增强了系统鲁棒性,克服了系统非线性与参数不确定性问题;通过 Lyapunov 稳定性理论对所提出的观测器和控制器稳定性进行验证,得到误差一致有界稳定结论;通过 AMESim 和 Matlab/Simulink 联合仿真与田间试验对本文控制算法的有效性和优越性进行了验证。在两条地貌情况较为复杂波浪地中单次平地 and 地貌情况较为相似的两田块进行 3 次遍历试验表明,使用本文控制方法,平地后高程相较于平地前标高的平均绝对误差、最大绝对误差、绝对误差标准差分别为 0.053、0.146、0.037 m 和 0.02、0.041、0.011 m,较 PID 算法分别降低 36.35%、28.32%、31.37% 和 62.6%、50%、51.83%。

关键词: 农田平地机; 混合扩张状态观测器; 反步滑模控制; 联合仿真

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0037-10

OSID:



Backstepping Sliding Mode Control for Hydraulic System in Farmland Leveller Based on Hybrid Extended State Observer

WEI Xinhua^{1,2} WANG Qingzhuang¹ JI Xin¹ LIU Chengliang³ WANG Anzhe¹

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory for Theory and Technology of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Zhenjiang 212013, China

3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to address the issues of low control accuracy and poor anti-interference capability of farmland leveller's hydraulic systems when operating on complex terrains, a backstepping sliding mode controller based on a hybrid extended state observer (HESO) was designed. The HESO estimated the system's unknown states and total disturbances based on output feedback signals and compensates for disturbances in the feedforward channel. The backstepping sliding mode controller, designed based on the fast reaching law, outputed continuous and smooth control quantities, enhancing the system's robustness and overcoming the issues of system nonlinearity and parameter uncertainty. The stability of the proposed observer and controller was proven by using Lyapunov stability theory, resulting in a conclusion of uniformly bounded stability of errors. The effectiveness and superiority of the control algorithm proposed were verified through joint simulations with AMESim and Matlab/Simulink, as well as field experiments. Single flattening experiments on two wavy terrains with relatively complex geomorphology and three traversal experiments on two similar terrains showed that using the proposed control method, the average absolute error, maximum absolute error, and standard deviation of the absolute error of the elevation after flattening compared with the pre-flattening elevation were 0.053 m, 0.146 m, 0.037 m, and 0.02 m, 0.041 m, 0.011 m, respectively. These values were reduced by

收稿日期: 2024-02-04 修回日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022ZD0115804)、江苏省农业自主创新项目(CX(22)2040)、江苏省重点研发计划项目(BE2021313)、江苏高校优势学科建设工程(四期)项目和常州市科技支撑计划(农业)项目(CE20212026)

作者简介: 魏新华(1972—),男,研究员,博士,主要从事农业装备智能控制和无人驾驶自主作业技术研究,E-mail: wei_xh@126.com

36.35% , 28.32% , 31.37% , and 62.6% , 50% , 51.83% respectively , compared with that of the PID algorithm.

Key words: farmland leveller; hybrid extended state observer; backstepping sliding mode control; joint simulation

0 引言

高标准农田建设是巩固和提高粮食生产能力、保障国家粮食安全的关键举措,提高农田平整度是保障水稻水浆管理效果、减少水田杂草危害的首要任务,也是提高旱田灌溉水利用率和灌溉水均匀度的重要措施,其中建设要求水田高差 3 cm 以内,旱田高差 5 cm 以内^[1]。现有平地机的工作流程主要分为“测”、“控”两部分,即采用激光靶标测高和 RTK (Real-time kinematic) 流动站测高,通过实际高度与标高进行对比来输出控制量对平地机液压系统进行控制,进而带动平地铲升降,完成平地作业;但现有平地机液压控制系统,在田块地貌复杂时易产生爬行、超调等问题,控制精度低、抗扰能力差。目前国内外学者对平地铲液压系统控制算法的研究较少,多为简单的开关控制及 PID 控制,控制精度不足,对抗动的抵抗力较差。文献[2-4]设计的平地机采用开关控制算法,来控制平地铲升降;文献[5]设计了一种基于模糊 PD 算法的水田平地铲高程控制系统,以抑制频率较低的干扰信号;文献[6]设计了一种 PI 算法对 GNSS 平地机叶片高程非平行提升进行控制,最后通过仿真和试验进行了验证。

平地机液压控制系统是存在时变扰动的复杂非线性电液伺服系统,近年来反步法^[7-10]和滑模控制^[11-14]在处理非线性系统抗扰问题上展现出独特的优越性,扩张状态观测器^[15-18](ESO)可以对系统未测量状态进行估计,使得其在电液伺服系统中的应用和研究中获得了广泛关注。文献[19]针对拖拉机耕深调节系统抗扰能力差等问题提出了一种反步滑模控制器,抑制了实际耕作中存在的冲击震荡;文献[20]针对矿用挖掘机摆动平台位置跟踪精度较差,设计了 ESO,提高了控制器鲁棒性和精准性。由于传统的 ESO 观测增益采用非线性函数^[21],因此也将其称为非线性扩张状态观测器(NESO),NESO 适用于扰动变动剧烈的非线性系统,但其参数整定比较困难,工程应用难度较高;针对这个问题,文献[22]提出了线性扩张状态观测器(LESO),大幅减少了控制参数个数,有利于工程应用,但 LESO 在处理高频或变化范围较大的外部扰动时效果较差。

因此,本文结合 NESO、LESO 的优缺点,针对平

地机液压控制系统智能化程度低、抗扰能力差问题,拟设计一种 HESO 反步滑模控制器,其中 HESO 根据平地机液压系统跟踪误差在线性和非线性模式之间切换,可以使观测器参数整定较为简单,易于工程实践,又能对高频以及变化范围较大的田间扰动进行准确估计;反步法和滑模控制器可以对平地机液压系统扰动进行抑制,克服系统非线性与参数不确定性问题,并对输出量进行平滑处理,避免产生抖振。通过理论推导证明调控算法稳定性,通过仿真和田间试验检验其控制效果。

1 平地机液压伺服系统建模

平地机液压系统结构如图 1 所示,拖拉机 PTO 转动带动齿轮泵工作,将液压油输送到比例阀,控制器通过控制比例阀阀芯位移来控制液压缸伸缩,进而带动平地铲的升降。

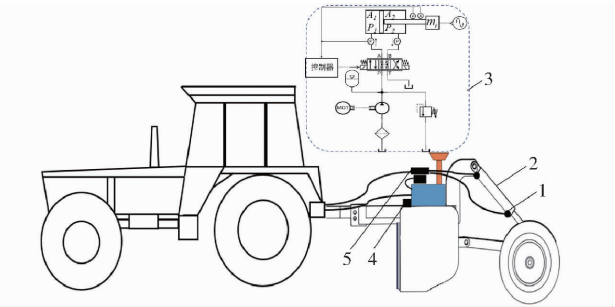


图 1 平地机液压系统结构图

Fig. 1 Diagram of farmland leveller's hydraulic system

1. 液压缸压力传感器 2. 行程反馈油缸 3. 平地机电液伺服系统示意图 4. 控制器 5. 比例阀

设液压缸左右两腔工作面积比 $n = A_2/A_1$, 负载流量和比例阀阀芯位移的关系为

$$Q_L = C_d \omega x_v \sqrt{\frac{2(p_s - \text{sgn}(x_v)P_L)}{\rho(1+n^3)}} \tag{1}$$

- 其中 $P_L = P_1 - P_2$
- 式中 Q_L ——液压缸输入流量
 C_d ——比例阀流量系数
 ω ——比例阀面积梯度
 x_v ——阀芯位移
 p_s ——供油压力
 ρ ——油液密度
 P_L ——负载压力
 $P_1、P_2$ ——液压缸左、右腔压力
 $\text{sgn}(x_v)$ ——符号函数

忽略外泄漏因素, 液压缸流量连续性方程为

$$Q_L = \frac{A_1 + A_2}{2} \dot{X}_p + C_{tp} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{1+n^2}{1+n^3} \dot{P}_L \quad (2)$$

式中 A_1 ——液压缸无杆腔工作面积

A_2 ——液压缸有杆腔工作面积

X_p ——液压缸活塞位移

C_{tp} ——液压缸总泄漏系数

V_t ——系统总压缩体积系数

β_e ——液压油弹性模量

根据牛顿第二定律, 液压缸力平衡方程为

$$\frac{A_1 + A_2}{1+n^3} P_L = m_t \dot{X}_p + B_p \dot{X}_p + F_L \quad (3)$$

式中 m_t ——负载质量

B_p ——负载阻尼系数

F_L ——作用在活塞上任意外负载力

其中 $Q_L, C_d, \omega, \rho, V_t, \beta_e, C_{tp}, A_1, A_2, m_t, B_p, n$ 为液压缸固有参数; X_p, P_L 由传感器测得, 不考虑弹性负载, 有

$$x_v = K_{sv} U \quad (4)$$

式中 K_{sv} ——比例阀增益

U ——控制电压信号

设状态变量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) = (X_p, \dot{X}_p, P_L)$, 则

平地机电液伺服系统状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha_1 x_3 - \alpha_2 x_2 + H(t) \\ \dot{x}_3 = -\alpha_3 x_3 - \alpha_4 x_3 + bU \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{A_1 + A_2}{m_t(1+n^2)} \\ \alpha_2 = \frac{B_p}{m_t} \\ \alpha_3 = \frac{2\beta_e(A_1 + A_2)}{V_t(1+n^2)} \\ \alpha_4 = \frac{4\beta_e C_{tp}(1+n^3)}{V_t(1+n^2)} \\ b = \frac{4(1+n^3)\beta_e C_d \omega K_{sv}}{V_t(1+n^2)} \sqrt{\frac{2(p_s - \text{sgn}(x_v)P_L)}{\rho(1+n^3)}} \\ H(t) = -\frac{F_L}{m_t} + \zeta \end{cases} \quad (6)$$

式中 ζ ——未建模动态

假设: $H(t)$ 为摩擦力与随机外负载力、未建模动态 ζ 的总和, 在实际平地过程中平地机遇到常见的扰动并非无限大, 而是一个有界数, 所以其一阶导数存在, 即 $|H(t)| \leq \Gamma_1, |\dot{H}(t)| \leq \Gamma_2$, 其中 Γ_1, Γ_2 为常数。

2 平地机电液伺服系统控制器设计

2.1 平地机液压系统 HESO 设计

平地机在实际平地过程中液压缸速度直接测量不准确, 同时由于平地机所平土地起伏较大或者土壤硬度较高时, 其所受扰动会发生较大变化; 当所平土地相对平缓时, 其所受扰动较小以及建模参数摄动等会导致式(5)中平地机液压系统负载扰动产生不确定性, 从而影响平地铲平地精度, 因此需要设计一个观测器来估计上述不可测量因素。本文引入结合了 LESO 和 NESO 优点的 HESO, 该观测器根据平地机液压系统跟踪误差在线性和非线性模式之间切换, 既能准确估计较小扰动, 又能在扰动剧烈变化时保持较高的响应速度和估计精度并降低了工程实践难度。

首先定义外部扰动 $x_4 = H(t)$, 令 $\dot{x}_4 = \kappa(t)$ 表示外部扰动变化率。则式(5)所示系统中 $\dot{x}_1, \dot{x}_2$ 经过扩张后数学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha_1 x_3 - \alpha_2 x_2 + x_4 \\ \dot{x}_4 = \kappa(t) \end{cases} \quad (7)$$

在平地机电液伺服控制系统中, 只能通过液压缸行程传感器测量位移 X_p , 令 x_1, x_2, x_4 的估计值为 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_4$, 位移观测误差 $e = \hat{x}_1 - x_1$, 为了实现对其他状态量和扰动的有效估计, HESO 设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \sigma_1 \eta_1(e) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \alpha_1 \hat{x}_3 - \alpha_2 \hat{x}_2 + \hat{x}_4 - \sigma_2 \eta_2(e) \\ \dot{\hat{x}}_4 = -\sigma_4 \eta_4(e) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_4$ ——观测值增益

$\eta_1(e), \eta_2(e), \eta_4(e)$ ——HESO 切换函数

由假设可知 HESO 中式(7)的估计误差是有界的。根据文献[23], $\sigma_i \eta_i(e) (i=1, 2, 4)$ 可以表达为 $l_i \omega_i^i e \phi^i(e) (i=1, 2, 4)$, 其中

$$\phi(e) = \begin{cases} v''^{\lambda_i-1} & (|e| \leq v'') \\ |e|^{\lambda_i-1} & (v'' < |e| \leq v') \\ 1 & (|e| > v') \end{cases} \quad (9)$$

式中 v', v'' ——设定的正数

其中 $\lambda_i \in (1, 2), v'' < v', 0 < v'' < 1$, 令 $\omega_i^i \phi^i(e) = \omega_0^i$ 。此时 HESO 可以写为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - l_1 \omega_0 e \\ \dot{\hat{x}}_2 = \alpha_1 \hat{x}_3 - \alpha_2 \hat{x}_2 + \hat{x}_4 - l_2 \omega_0^2 e \\ \dot{\hat{x}}_4 = -l_4 \omega_0^4 e \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)减去式(7)可得

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - l_1 \omega_0 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -\alpha_2 \tilde{x}_2 + \hat{x}_4 - l_2 \omega_0^2 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_4 = -\kappa(t) - l_4 \omega_0^4 \tilde{x}_1 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\tilde{x}_i = \hat{x}_i - x_i$ 是 HESO 的估计误差。定义 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_4) = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2/\omega_0, \tilde{x}_4/\omega_0^3)$ 。故 HESO 的估计误差可表示为

$$\dot{\gamma} = \omega_0 A_{ob} \gamma + B_{ob} \frac{-\kappa(t)}{\omega_0^3} \quad (12)$$

其中

$$B_{ob} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$A_{ob} = \begin{bmatrix} -4 & 1 & 0 \\ -6 & \frac{\alpha_2}{\omega_0} & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由于 A_{ob} 是 Hurwitz 矩阵, 因此存在一个对称正定矩阵 P 和正定矩阵 Q 使得 $A_{ob}^T P + P A_{ob} = -Q$ 。选择一个正定的 Lyapunov 函数

$$V_{ob} = \gamma^T P \gamma \quad (13)$$

因为 $\lambda_{\min}(P) \|\gamma\|^2 < V_{ob} < \lambda_{\max}(P) \|\gamma\|^2$, 定义 $B_{ob}^T P = Q$, 式(13)的导数可表达为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ob} &= -\omega_0 \gamma^T Q \gamma - 2B_{ob}^T P \gamma \frac{\kappa(t)}{\omega_0^3} \leq \\ &= -(\lambda_{\min}(Q) \|\gamma\| - \delta_2 \|\Omega\|) \frac{\dot{V}_{ob}}{\lambda_{\max}(P)} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\lambda_{\min}(P)$ 和 $\lambda_{\max}(P)$ 是矩阵 P 最大特征值和最小特征值, $\lambda_{\min}(Q)$ 是矩阵 Q 的最小特征值。通过选择合适的参数可使 $\lambda_{\min}(Q) \|\gamma\| > \delta_2 \|\Omega\|$, 通过文献[24]得出式(8)中的 HESO 是有限时间稳定的。

2.2 反步滑模控制器设计

在平地机实际工作中, 判断其作业效果的关键在于平地铲位移(即经几何换算后液压缸实际位移)对目标平地位移的跟踪速度和精度。本节基于 HESO 对速度和复合扰动的估计值进行反步滑模控制器设计, 使液压缸实际位移 x_1 跟踪目标轨迹 x_1^* 。其中反步法通过引入虚拟变量, 并进行逐步迭代最终得到控制量。令 x_i^* 为 x_i 的目标值, 控制策略图如图2所示。

定义 $e_1 = x_1 - x_1^*$, $e_2 = x_2 - x_2^*$, $e_3 = x_3 - x_3^*$ 。定义一个 Lyapunov 函数为 $V_1 = e_1^2/2$, 对 V_1 求导得 $\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1(x_2 - \dot{x}_1^*) = e_1(e_2 + x_2^* - \dot{x}_1^*)$, 要使 V_1 是负定, 令 $x_2^* = -k_1 e_1 + \dot{x}_1^*$, 所以 $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2$ 。定义一个新的 Lyapunov 函数为 $V_2 = V_1 + e_2^2/2$, 因为

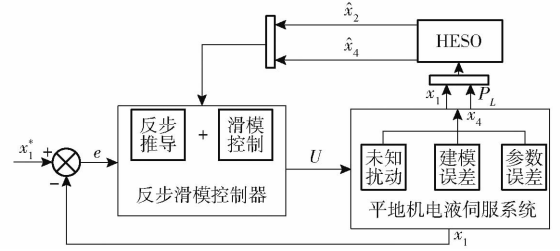


图2 基于 HESO 的反步滑模控制策略框图

Fig. 2 Blockdiagram of backstepping sliding mode control strategy based on HESO

$$\begin{cases} \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* \\ \dot{x}_2 = \alpha_1 x_3 - \alpha_2 x_2 + H(t) \end{cases} \quad (15)$$

又因为在实际中只能获得液压缸速度和总扰动估计值, 所以

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* = \alpha_1 x_3 - \alpha_2 \hat{x}_2 + \hat{x}_4 - \dot{x}_2^* \quad (16)$$

则 $\dot{V}_2$ 可表达为

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2(\alpha_1 x_3 - \alpha_2 \hat{x}_2 + \hat{x}_4 - \dot{x}_2^*) \quad (17)$$

为使 V_2 负定, 则要令

$$x_3 = \frac{1}{\alpha_1}(-k_2 e_2 + \alpha_2 \hat{x}_2 - \hat{x}_4 + \dot{x}_2^*)$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_1 e_2 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 - k_2 e_2^2 \leq \\ &= -\left(k_1 - \frac{1}{2}\right) e_1^2 - \left(k_2 - \frac{1}{2}\right) e_2^2 \end{aligned} \quad (18)$$

设计线性滑模面为

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 \quad (19)$$

式中 c_1, c_2 ——正实数

$$\hat{s} = c_1 e + c_2 \hat{e}_2 + e_3 \quad (20)$$

式中 $\hat{s}$ —— s 的观测值

采用的幂趋近律为

$$\dot{\hat{s}} = -R_3 \hat{s} - R_4 |\hat{s}|^\beta \text{sign}(\hat{s}) \quad (21)$$

式中 β ——常数

由式(19)、(21), 滑模控制器可以被设计为

$$\begin{aligned} U &= -\frac{1}{b}[(c_2 \alpha_1 - \alpha_4) x_3 - c_1 \dot{x}_1^* - c_2 \dot{x}_2^* - \dot{x}_3^* + c_2 \hat{x}_4 + \\ &+ (c_1 - \alpha_3 - c_2 \alpha_2) \hat{x}_2 + R_3 \hat{s} + R_4 |\hat{s}|^\beta \text{sign}(\hat{s})] \end{aligned} \quad (22)$$

2.3 稳定性分析

通过式(22)中给出的控制方程和式(8)中给出的观测器, 可以将式(5)所示系统驱动至滑模面上, 并收敛到滑模面附近, 最后状态变量收敛成参考轨迹的残差集。定义一个 Lyapunov 函数为

$$V = V_2 + \frac{1}{2} \hat{s}^2 + \gamma^T P \gamma \quad (23)$$

通过杨氏不等式, $\dot{V}$ 可以表达为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{V}_2 + \hat{s} \dot{\hat{s}} - \omega_0 \boldsymbol{\gamma}^T \boldsymbol{Q} \boldsymbol{\gamma} - 2 \boldsymbol{B}_{oh}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{\gamma} \frac{\kappa(t)}{\omega_0^3} \leq \\ & - \left(k_1 - \frac{1}{2\mu}\right) e_1^2 - \left(k_2 - \frac{1}{2\mu}\right) e_2^2 - R_3 \hat{s}^2 - \\ & \omega_0 \|\boldsymbol{Q}\| \|\boldsymbol{\gamma}\|^2 - 2\delta_2 \|\boldsymbol{\Omega}\| \varepsilon = -\tau V + \Lambda \quad (24) \end{aligned}$$

其中

$$\tau = \min \left\{ k_1 - \frac{1}{2\mu}, k_2 - \frac{1}{2\mu}, R_3, \frac{\omega_0}{\lambda_{\max}(\boldsymbol{P})}, 2 \right\} \Lambda = -2\delta_2 \|\boldsymbol{\Omega}\| \varepsilon$$

根据式(24), $V(t) \leq V(0) e^{-\tau t} + \Lambda/\gamma$, 可知 $\hat{s}, e_i$ 和 $\tilde{x}_i$ 是最终有界的, 收敛域为 $|\hat{s}| \leq \sqrt{2\Lambda/\gamma}$, $|e_i| \leq \sqrt{2\Lambda/\gamma}$, $|x_i| \leq \sqrt{\|\boldsymbol{P}\| \Lambda/\gamma}$ 。此外通过式(19)、(20)可得

$$s = \hat{s} + c_2 \tilde{x}_2 \leq \sqrt{2\Lambda/\tau} + c_2 \sqrt{\Lambda \|\boldsymbol{P}\|/\tau} \quad (25)$$

因此式(5)所示系统可以收敛到滑动面 s 附近。

3 仿真验证

为了验证本文所提出的基于 HESO 反步滑模控制算法的有效性和优越性, 使用 AMESim 和 Matlab/Simulink 对平地机液压控制系统进行联合仿真^[25]。其中 AMESim 是一款多领域液压系统仿真平台, 能更好地模拟液压系统的动态特性, 有多种接口, 可以和 Simulink 联合仿真进行数据交换。AMESim 中的传感器采样频率设 1 kHz, 联合仿真固定步长设置 0.001 s。联合仿真系统界面如图 3 所示, 液压系统仿真参数如表 1 所示。

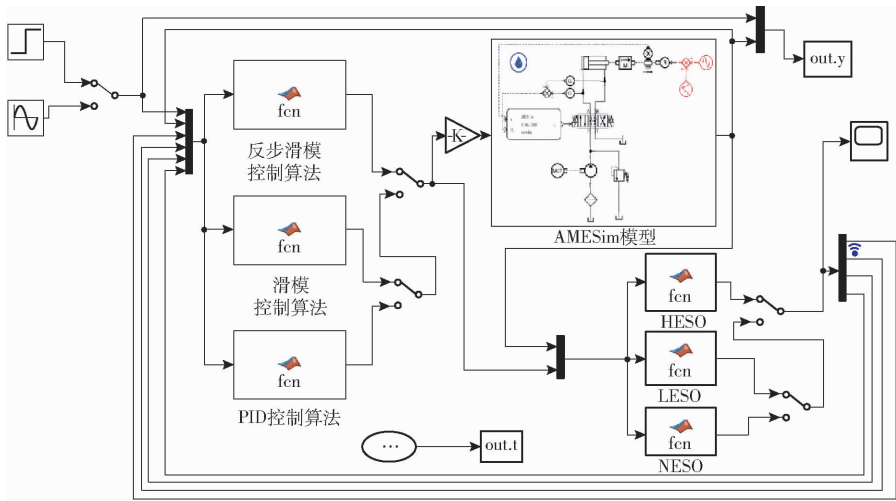


图 3 联合仿真系统界面
Fig. 3 Co-simulation system interface

表 1 液压系统仿真参数

Tab. 1 Hydraulic system simulation parameters	
参数	数值
负载质量 m_i/kg	300
总压缩体积系数 V_i/m^3	4×10^{-5}
液压缸有效工作面积 A_p/cm^2	30.615
液压缸行程 X_p/m	0.3
液压油弹性模量 B_p/Pa	4 000
供油压力 p_s/MPa	40
比例阀面积梯度 ω	6.09×10^{-3}
比例阀流量系数 C_d	0.61

3.1 观测器性能验证

通过联合仿真对比 HESO 和 LESO、NESO 对扰动的观测效果。设置 HESO 参数 $l_1 = 1, l_2 = 6, l_3 = 4, \omega_1 = 250, v' = 0.15, v = 0.003, \lambda_1 = 1.01, \lambda_2 = 1.15, \lambda_3 = 1.35$ 。当所平土地较为平坦时, 系统受到较小的扰动, 同时液压系统建模参数不确定性会使系统受到高频扰动, 结合液压缸平地受力在 AMESim 中施加时变正弦干扰力 $F_1 = 8\,000 \sin(\pi t)$,

当所平土地为起伏较大的波浪地或者土壤硬度较高时, 系统受到一个较大的扰动, 所以在 4.5 s 时施加阶跃干扰 $F_2 = 7\,000\text{ N}$, 当平地机从地势较高的位置快速行驶到地势较低的位置使平地铲快速卸土, 导致负载扰动快速减小, 所以在 8.5 s 时施加阶跃干扰 $F_3 = -7\,000\text{ N}$ 。总干扰力 $F_L = F_1 + F_2 + F_3$, 3 种观测器对虚拟扰动的估计和估计误差如图 4、5 所示。

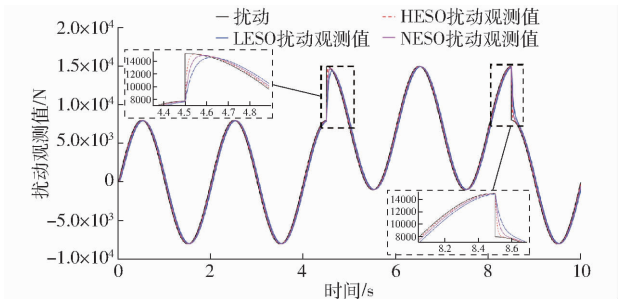


图 4 HESO、LESO、NESO 观测器性能
Fig. 4 HESO, LESO and NESO observer performances

通过对比 3 种观测器估计值可以看出, 在 4.5 s

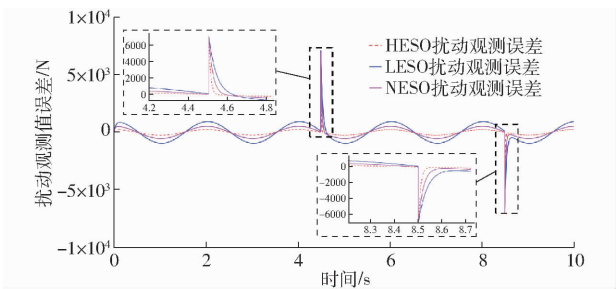


图5 HESO、LESO、NESO 观测器误差

Fig. 5 HESO, LESO and NESO observation errors

时刻、8.5 s 时刻,给系统增加和撤销 7 000 N 的阶跃扰动时,HESO 比 LESO、NESO 有更好的观测性能,同时在受到高频时变扰动时,HESO 的观测性能优于 LESO 和 NESO。综上所述,本文所用的 HESO 能够适应平地机平地控制中复杂多变的扰动值,快速准确地对扰动估计,性能优于 LESO 和 NESO。其中 HESO 对平地机液压系统在实际工作过程中液压缸速度观测结果如图 6 所示。

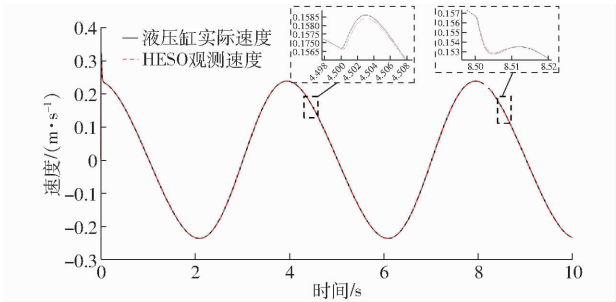


图6 HESO 对速度观测结果

Fig. 6 Speed observation results by HESO

3.2 控制器对比与分析

由于本文平地机使用的液压缸最大伸长量为 0.3 m,液压系统完成一次伸缩的最快频率为 0.25 Hz,为了测试和验证第 2 节所提出控制算法的控制效果,控制器设置为跟踪幅值 0.15 m、周期为 0.5π 的期望正弦轨迹 $x_1^* = 0.15\sin(0.5\pi t)$ 。

(1)本文所提出的基于 HESO 的反步滑模控制器,观测器参数如 3.1 节所述,综合考虑控制器响应速度和稳态精度,将参数设为 $c_1 = 5\,000, c_2 = 2\,500, R_3 = 500, R_4 = 200, \beta = 0.5$ 。

(2)基于 HESO 的滑模控制器,观测器参数与 3.1 节中所用观测器相同。滑模面设置为 $s = c_1 e_1 + e_2$,其中 $e_1 = x_1 - x_1^*, e_2 = \hat{x}_2 - x_2^*$,使用与本文控制器相同的快速趋近律。参数设置为 $c_1 = 30\,000, R_3 = 300, R_4 = 1\,000, \beta = 0.5$ 。

(3)无状态观测的 PID 控制器,以跟踪误差信号为反馈,综合考虑控制器的响应时间和超调量,参数设置为 $K_p = 10, K_i = 0.001, K_d = 0.001$ 。

控制器根据 AMESim 中的位移传感器反馈进行

轨迹跟踪。3 种控制器对参考轨迹跟踪性能、跟踪误差如图 7、8 所示。

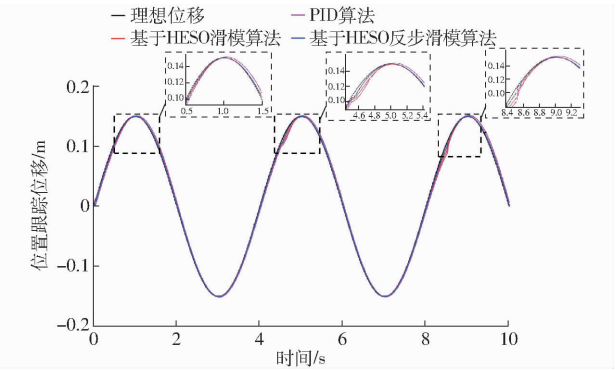


图7 轨迹跟踪效果

Fig. 7 Trajectory tracking performance

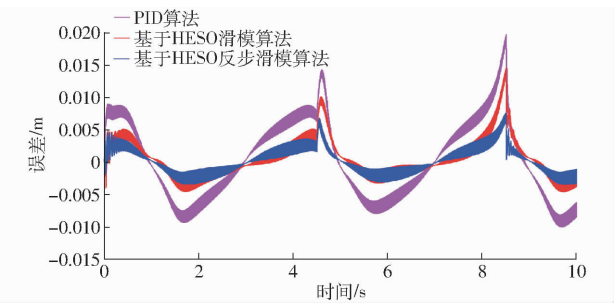


图8 轨迹跟踪误差曲线

Fig. 8 Trajectory tracking error curves

可以看出,在初始时刻给负载施加正弦扰动力后,本文算法能够迅速跟踪上理想位移,并使跟踪误差保持在 0.003 m 范围内;作为对照组的基于 HESO 滑模控制算法和 PID 算法跟踪性能则要差很多,其中基于 HESO 滑模控制算法超调误差最大达到 0.005 m, PID 算法超调误差最大达到 0.01 m;当系统在 4.5 s 时受到一个 7 000 N 的阶跃干扰力后本文算法迅速对扰动进行估计和补偿,跟踪误差波动最小,最大跟踪误差瞬时达到 0.007 6 m,且迅速跟踪上。基于 HESO 滑模控制算法和 PID 算法在突然施加阶跃干扰力后,跟踪误差都有不同程度增大和振荡,最大跟踪误差分别为 0.014 6、0.019 7 m,在 8.5 s 时阶跃干扰力突然消失时情况也类似。综合来看,在正弦干扰力和阶跃干扰力的共同施加下,本文算法均保持了最大调节速度和最小跟踪误差。如图 9 所示,本文算法的控制量连续,且对突发扰动能做出迅速反应,冲击振荡较小,从而对扰动进行前馈抵消,保证轨迹跟踪的稳定。在表 2 中定量评估了 3 种控制算法的跟踪性能,由表 2 可知本文提出的基于 HESO 的反步滑模控制器平均值绝对误差 (MAE) 相较于基于 HESO 的滑模控制器和 PID 控制分别降低 27.27% 和 69.23%;在最大绝对误差 (MAD) 评估中,本文算法相较两对比算法分别降低 47.86% 和

61.42% ;另外在绝对误差的标准差 (SDAE) 评估中,本文算法相较于两个对比算法分别降低 42.86% 和 62.5% ;以上分析证明本文算法在跟踪指定平地轨迹时,跟踪误差的平均水平和离散程度均明显优于其他对比算法,在正弦扰动力和阶跃扰动力的干扰下,本文算法仍可保持良好的跟踪性能,充分体现了本文算法的高鲁棒性。

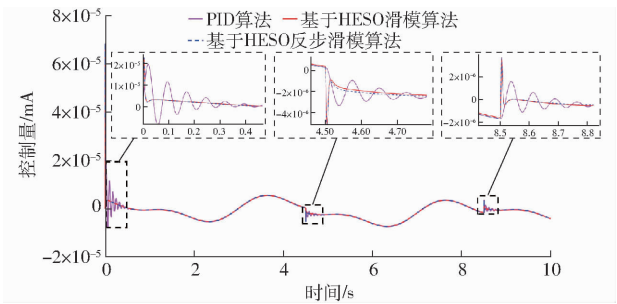


图 9 3 种控制算法控制量

Fig.9 Control signals of three control algorithms

表 2 控制算法评价指标

Tab.2 Control algorithm evaluation metrics m

参数	PID 算法	基于 HESO 滑模算法	基于 HESO 反步滑模算法
MAE	0.005 21	0.002 22	0.001 59
MAD	0.019 73	0.014 61	0.007 62
SDAE	0.003 16	0.002 13	0.001 17

4 田间试验

4.1 试验平台

为了检验改造后的平地机液压调控系统的可行性,并进一步验证所设计液压控制算法的优越性,在田间进行实际平地作业试验。以东方红 LF1104 - C 型轮式拖拉机牵引惠达科技有限公司生产的幅宽 3 m 型平地机为试验对象,对本文控制方法的可行性和优越性进行验证,如图 10 所示。为了获取上文仿真中所需参数,首先对平地机进行智能化改

造,安装力士乐三位四通比例换向阀、电控卸荷阀、行程反馈油缸、油压传感器、土满报警传感器。为满足控制需求,选择意法半导体公司生产的 STM32F1 芯片作为主控制器,此芯片具有多路 AD/DA 通道,多路 DI/DO 通道,232/CAN 通信通道,满足平地机液压系统智能化控制。平地机工作之前使用手持式打点设备打点获得待平整土地标高 H ,将此高程设为标高通过串口输入到嵌入式控制系统中。平地机在平地过程中通过 GNSS 高程天线获取实时高程 h ,和标高 H 作差求出高程差 E ,通过几何换算求出液压缸目标伸长量 X_1 ,通过基于 HESO 的反步滑模控制器针对目标伸长量输出控制量 U 并结合实际高程 h 和标高 H 关系对三位四通比例换向阀进行控制,进而控制液压缸的伸缩,带动平地铲升降,此时行程反馈油缸进行输出位移反馈、液压缸压力传感器输出压力反馈进行闭环控制,当土满报警传感器检测到平地机铲内土满时不再执行挖土指令,并且根据平地铲实际高程 h 和标高 H 关系来决定平地铲卸土速度,控制流程如图 11 所示。

4.2 田间平地试验

试验在江苏省镇江市润果农场犁耕晾晒后的田块进行。本次试验分为 2 部分,首先为了更好地模拟仿真效果,人为造出两条长 30 m、宽 3 m、高差在 0.45 m 范围内的路径,每条路径上面间隔 5 m 左右设置最大高差 0.45 m 的波浪地进行单次平地试验,其次选取两块地貌相似的田块进行 3 次遍历试验。

平地之前使用手持式打点设备测量待平土地地貌信息后,由机手驾驶拖拉机以固定挡位、固定油门行驶。分别使用本文算法和 PID 算法对平地机液压系统进行控制,对试验田块进行平整,平地之后以同样的方法对平地之后地貌数据进行获取分析,其中

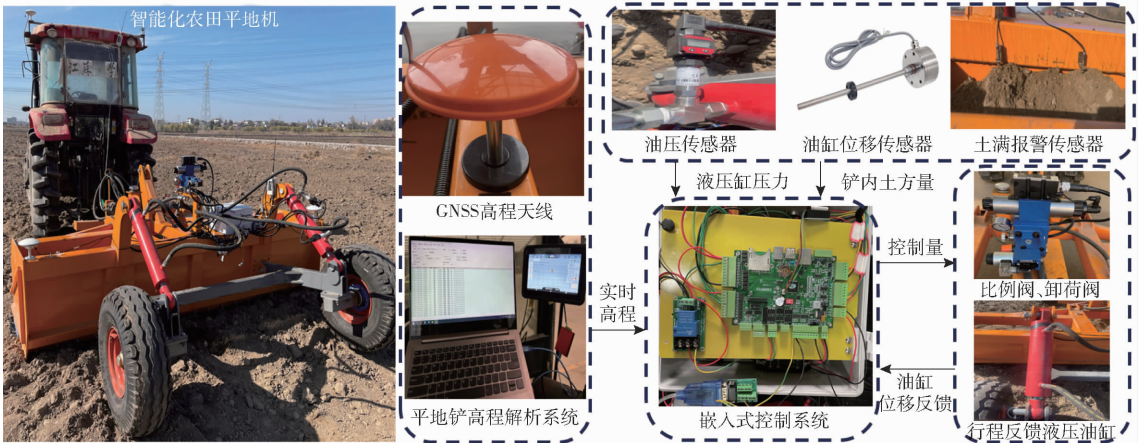


图 10 智能化农田平地机系统组成

Fig.10 Composition of intelligent dryland agricultural satellite-guided leveling machine system

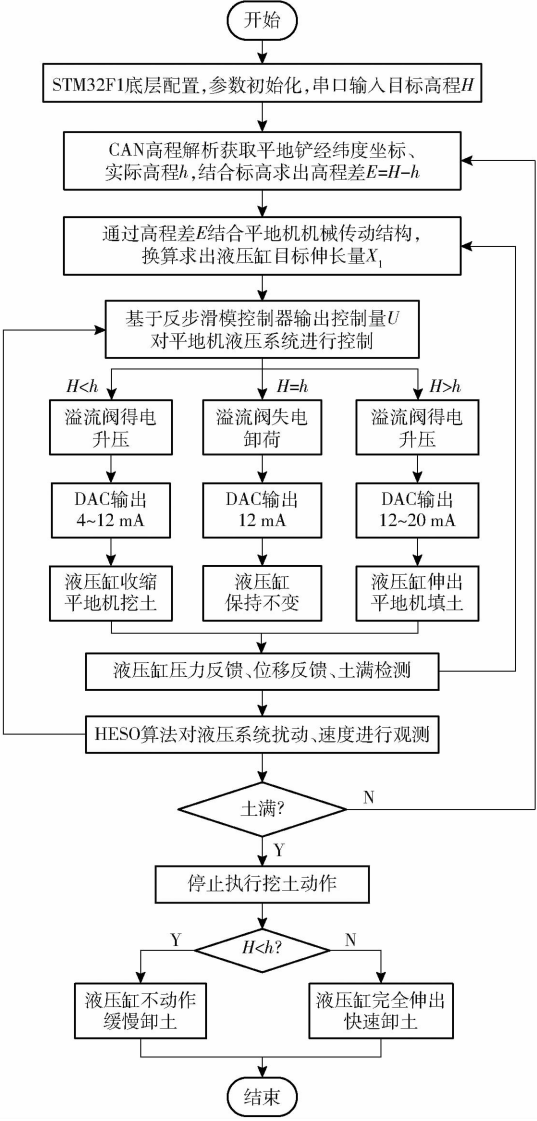


图 11 控制流程图

Fig. 11 Flow chart of control algorithm

手持式打点设备所测数据中包含卫星测量误差和平地机机械传动间隙误差等。由图 12 ~ 16 可知,在对地貌情况较为复杂的两条波浪地进行单次平地后以及对地貌情况较为相似的两田块进行 3 次遍历后,本文所提出的基于 HESO 反步滑模算法的响应速度最快、稳态精度最高、平地后地貌变化曲线整体波动最平稳。由表 3 可知,单次平地后高程相较于人为造势地面标高本文算法较 PID 算法的 MAE、MAD、SDAE 分别降低 36.35%、28.32% 和 31.37%; 3 次遍历平地后高程相较于平地之前标高本文算法较 PID 算法的 MAE、MAD、SDAE 分别降低 62.6%、50% 和 51.83%。由此可得,本文算法明显比 PID 控制器更为优越,使得平地质量进一步提升。

5 结论

(1)为解决平地机平地过程中受到外部时变扰

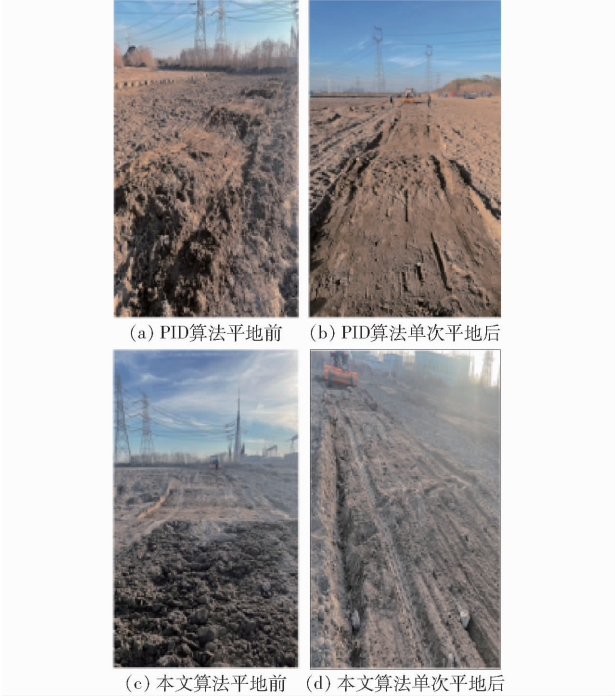


图 12 两条路径平地前后场景

Fig. 12 Scenes before and after flattening for two paths

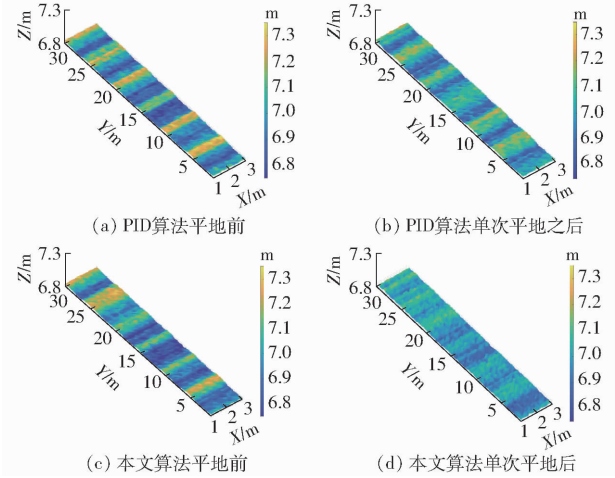


图 13 两条路径平地前后三维地势图

Fig. 13 3D terrain maps before and after leveling along two paths



图 14 不同田块平地前后场景

Fig. 14 Scenes before and after flattening for different fields

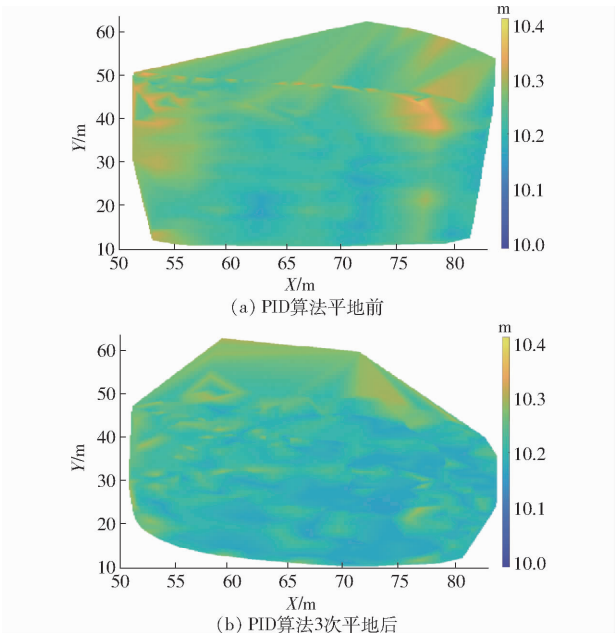


图 15 PID 算法平地前后三维地势图

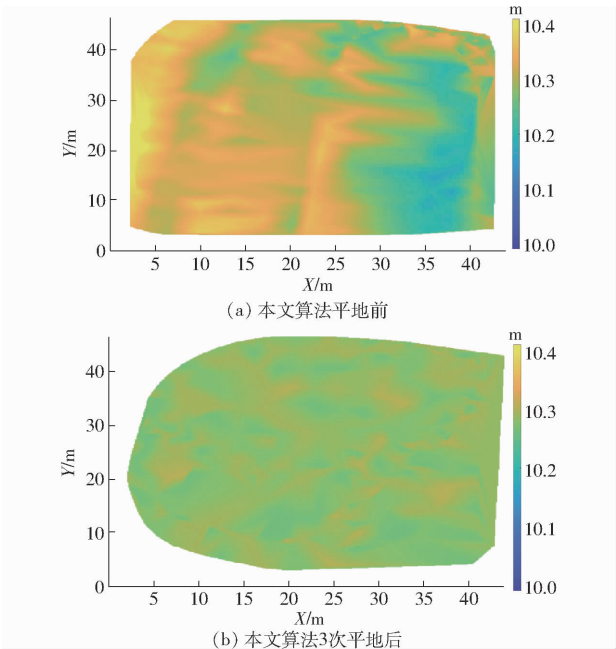


图 16 本文算法平地前后三维地势图

Fig. 15 3D terrain maps before and after levelling with PID algorithm

Fig. 16 3D terrain maps before and after levelling with proposed algorithm

动观测不准确和未知状态难以测量问题,引入 HESO 对平地机液压系统所受扰动进行观测,并在前馈通道对扰动进行抵消,增强了平地机液压系统抗扰能力。

(2) 针对平地机对称阀非对称缸电液伺服系统,将反步控制器与滑模算法相结合,提高了平地机液压系统鲁棒性与控制精度,克服了系统非线性与参数不确定性问题,易于工程实践。

(3) 通过 Lyapunov 稳定性理论对所提出的观测器和控制器稳定性进行证明;通过联合仿真以及在高差 0.45 m 内的波浪地中单次平地和地貌情况较为相似的两田块进行 3 次遍历试验表明,使用本文

表 3 田间试验评价指标

Tab.3 Field experiment evaluation indicators m				
参数	PID 算法	PID 算法	本文算法	本文算法
	单次平地	3 次遍历	单次平地	3 次遍历
MAE	0.084	0.054	0.053	0.020
MAD	0.204	0.082	0.146	0.041
SDAE	0.054	0.023	0.037	0.011

控制方法,平地后的高程相较于人为造势地面的标高 MAE、MAD、SDAE 分别为 0.053、0.146、0.037 m 和 0.02、0.041、0.011 m,较 PID 算法分别降低 36.35%、28.32%、31.37% 和 62.6%、50%、51.83%。

参 考 文 献

[1] GB/T 30600—2022 高标准农田建设通则[S]. 2022.

[2] 胡炼,罗锡文,林潮兴,等. 1PJ-4.0 型水田激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4):146-151. HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxing, et al. Design and experimentation of 1PJ-4.0 type paddy field laser leveling machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):146-151. (in Chinese)

[3] 胡炼,杜攀,罗锡文,等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8):15-21. HU Lian, DU Pan, LUO Xiwen, et al. Suspended multi-wheel supported dryland laser leveling machine: design and experiment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):15-21. (in Chinese)

[4] ONO Y. Method of controlling motor grader and motor grader: 10, 961, 685[P]. 2021-03-30.

[5] 赵润茂. 激光平地机高程运动估计与自适应控制方法研究[D]. 广州:华南农业大学, 2020. ZHAO Runmao. Research on elevation motion estimation and adaptive control methods of laser graders[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[6] ÖZKAN E C, ERGEZER H. Kinematic analysis and position control of motor grader blade mechanism for automatic levelling [C]//International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE, 2022:237-242.

[7] SHI S, FANG Y, LI J, et al. Backstepping position tracking control for electro-hydraulic servo system with input saturation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 6(10):2699-2704.

[8] VAIDYANATHAN S, AZAR A T. Backstepping control of nonlinear dynamical systems[M]. Academic Press, 2020.

[9] WEN G, CHEN C P, GE S S. Simplified optimized backstepping control for a class of nonlinear strict-feedback systems with

- unknown dynamic functions[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 51(9): 4567–4580.
- [10] 王龙龙,蓝鸿,周胥,等.拖拉机极限态侧翻回稳陀螺主动控制系统设计与试验[J].农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 320–327.
WANG Longlong, LAN Hong, ZHOU Xu, et al. Design and experiment of gyroscopic active control system for tractor rollover stability in extreme conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 320–327. (in Chinese)
- [11] 吉鑫浩,汪成文,陈帅,等.阀控电液位置伺服系统滑模反步控制方法[J].中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 1518–1525.
JI Xinhao, WANG Chengwen, CHEN Shuai, et al. Sliding mode backstepping control method for valve-controlled electro-hydraulic position servo systems[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2020, 51(6): 1518–1525. (in Chinese)
- [12] 施国标,周倩,王帅,等.无人驾驶模式下电液复合转向系统高鲁棒性控制策略[J].农业机械学报, 2019, 50(12): 395–402.
SHI Guobiao, ZHOU Qian, WANG Shuai, et al. Robust control strategy for electro-hydraulic composite steering system under unmanned driving mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 395–402. (in Chinese)
- [13] YANG X, YAO J, DENG W. Output feedback adaptive super-twisting sliding mode control of hydraulic systems with disturbance compensation[J]. ISA Transactions, 2021, 109: 175–185.
- [14] 沈跃,张亚飞,刘慧,等.农业装备自动控制技术研究综述[J].农业机械学报, 2023, 54(8): 1–18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1–18. (in Chinese)
- [15] 张震阳,汪成文,郭新平,等.基于ESO的电液位置伺服系统反步滑模控制[J].北京航空航天大学学报, 2022, 48(6): 1082–1090.
ZHANG Zhenyang, WANG Chengwen, GUO Xinping, et al. Backstepping sliding mode control of electro-hydraulic position servo system based on ESO[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(6): 1082–1090. (in Chinese)
- [16] 沈跃,何思伟,刘慧,等.高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J].农业机械学报, 2020, 51(11): 385–392, 402.
SHEN Yue, HE Siwei, LIU Hui, et al. Design and experiment of self-steering electric chassis control system for high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 385–392, 402. (in Chinese)
- [17] JI X, WEI X, WANG A. A novel control method for unmanned agricultural tractors: composite back-stepping sliding mode path tracking[J]. Information Technology and Control, 2023, 52: 515–528.
- [18] 黄建中,岑豫皖,叶小华,等.基于线性扩张状态观测器的机械臂变负载滑模控制[J].机床与液压, 2021, 49(13): 45–50.
HUANG Jianzhong, CEN Yuwan, YE Xiaohua, et al. Sliding mode control for variable payload of robotic arm based on linear extended state observer[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2021, 49(13): 45–50. (in Chinese)
- [19] WANG A, JI X, ZHU Y, et al. Tillage depth regulation system via depth measurement feedback and composite sliding mode control: a field comparison validation study[J]. Measurement and Control, 2024, 57(6): 685–702.
- [20] QIN T, MA Y X, LI Y H, et al. Torque equilibrium position closed-loop control of dual electric motors swing system for large mining excavator[J]. Mechatronics, 2023, 95: 103035.
- [21] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900–906.
- [22] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: from an enduring idea to an emerging technology[C]//Proceedings of 2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control(RoMoCo). IEEE, 2015: 269–282.
- [23] HAN J Q. Active disturbance rejection control technique: the technique for estimating and compensating the uncertainties[M]. National Defense Industry Press, 2008: 197–270.
- [24] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of homogeneous systems[C]//Proceedings of the 1997 American Control Conference, 1997: 2513–2514.
- [25] 任新宇,郭迎清,姚华廷.基于AMESim的航空发动机防喘调节器性能仿真研究[J].航空动力学报, 2004, 19(4): 572–576.
REN Xinyu, GUO Yingqing, YAO Huating. Performance simulation study of anti-stall regulator for aircraft engines based on AMESim[J]. Journal of Aerodynamics, 2004, 19(4): 572–576. (in Chinese)