

联合收获机割台纵向高度-横向倾角协同仿形 系统设计与试验

黄毅¹ 周涛¹ 周志红^{2*} 任子誉¹ 付玲³

1. 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 长沙, 410114
2. 湖南工业职业技术学院机械工程学院, 长沙, 410208
3. 中联重科股份有限公司, 长沙, 410013

摘要:为提高联合收获机割台纵向高度与横向倾角的协同仿形能力,并提高仿形装置的检测灵敏度,设计了一种割台协同仿形系统。系统由曲臂式仿形检测装置、割台升降与调平液压系统、PLC控制单元、HMI显示屏及手动调控模块等组成。通过对比分析直臂式与曲臂式两种仿形装置的检测灵敏度及其影响因素,优选出检测灵敏度更高的曲臂式仿形装置。提出一种割台协同仿形控制策略并结合改进的灰色预测变速PID算法进行系统控制,基于割台与其底部地形呈现的相对平行或倾斜状态,实现独立或联合调节割台高度与倾角。仿真结果表明,与传统PID相比,仿形系统调节时间相对缩短58%,有效提高了系统的调节速度。田间试验结果表明,在4~10 km/h的作业速度下,仿形系统保持较高的作业精度,留茬高度合格率相比手动模式平均提高42.42%,各组留茬高度与目标高度绝对误差均控制在15 mm以内,留茬更加均匀,表明仿形系统具有良好的协同仿形性能。

关键词:纵向高度-横向倾角协同仿形;仿形检测装置;灰色预测;变速PID控制;联合收获机

中图分类号:S225.3

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.031

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Experiment of Longitudinal Height-lateral Inclination Synergistic Profiling System for Combine Harvester Headers

HUANG Yi¹ ZHOU Tao¹ ZHOU Zhihong^{2*} REN Ziyu¹ FU Lin³

1. College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, 410114
2. School of Mechanical Engineering, Hunan Industry Polytechnic, Changsha, 410208
3. Zoomlion Heavy Industry Science & Technology Co., Ltd., Changsha, 410013

Abstract: To improve the synergistic profiling capability of the combine harvester headers in terms of longitudinal height and lateral inclination, and enhance the detection sensitivity of the profiling devices, a synergistic profiling system for the headers was designed. The system consisted of a curved-arm profiling detection device, a hydraulic system for header lifting and leveling, a PLC control unit, an HMI display and a manual control module. Through comparative analysis of the detection sensitivity and influencing factors of straight-arm and curved-arm profiling devices, the curved-arm profiling device with higher detection sensitivity was selected. A synergistic profiling control strategy for the headers was proposed, combined with an improved gray prediction variable-speed PID algorithm for the system control. Based on the relative parallel or inclined states between the header and the underlying terrain, independent or joint adjustment of the header heights and inclinations were achieved. Simulation results show that compared with the traditional PID control, the adjustment time of the profiling system is reduced by 58%, effectively improving the system response speed. Field tests indicate that at operating speeds of 4~10 km/h, the profiling system maintains high operation accuracy. The qualified rate of stubble height is increased by an average of 42.42% compared with the manual mode, and the absolute errors between the stubble heights of each group and the target heights are controlled within 15 mm, resulting in more uniform stubble. These results demonstrate that the profiling system has excellent synergistic profiling performance.

Key words: longitudinal height-lateral inclination synergistic profiling; profiling detection device; grey prediction; variable speed PID control; combine harvester

收稿日期:2024-10-06

基金项目:国家自然科学基金(51875048,52105077);湖南省自然科学基金(2022JJ40550)

0 引言

联合收获机的使用大幅提高了谷物收获效率,同时也减轻了农民的劳动强度^[1]。联合收获机割台收获时需实时调整其作业高度,过高易引起较大的谷物漏割损失,过低则易造成割台铲土,降低收获品质,缩短割台使用寿命^[2]。

割台仿形功能通过自适应调整割台高度以适应地面起伏,使留茬更均匀。当前研究主要围绕割台仿形控制方式、割台高度检测方法及仿形系统控制策略三方面展开^[3-4]。电液控制方式因高精度和灵活性而成为当前主流的仿形控制方式^[5-6]。在割台高度检测方面,基于非接触式传感器的检测方法包括超声波或光电传感器测距及图像处理技术等,如GUO等^[7]提出了一种基于立体视觉的割台高度和作物高度实时检测方法,但此类检测方法易受到田间环境因素如杂草、泥土及光照的干扰,测量稳定性与可靠性不高。现有仿形系统多采用接触式仿形装置来检测割台高度,根据触地部件的结构特点可将仿形装置分为直臂式和曲臂式两类。直臂式装置常包括衔接圆弧形触地末端的长直型仿形板,如惠云婷等^[8]设计了一种带仿形轮的直臂式仿形探测机构,YANG等^[9]设计了一种直臂式的地面仿形监测机构,直臂式装置在较为平坦或缓坡地形下具有较好的检测性能,但对起伏较大的复杂地形适应性不足。曲臂式装置常包括具有连续曲率变化的仿形板,如NI等^[10]基于曲臂式仿形机构设计了大豆收获机割台仿形系统,宫元娟等^[11]设计了一种带有曲臂式仿形装置的甘蔗收获机割台随动控制系统,该类装置能够更好地贴合地面,对复杂地形适应能力更强。现有直臂、曲臂两类仿形装置多针对留茬较高时的检测,不适用于低留茬检测,低留茬检测时易引发由于检测装置灵敏度不足而导致的割台调整延迟和留茬不均问题。

在仿形系统控制策略方面,现有研究多围绕割台纵向高度控制进行算法设计,如WANG等^[12]提出了一种基于多传感器融合与模型预测控制相结合的割台高度智能控制算法,刘伟健等^[13]基于模糊PID控制设计了一种自适应仿形割台,但仅在台架试验中实现了割台高度与水平自适应调整,未经过田间测试。现有策略虽提高了割台纵向高度的控制精度,但对横向倾角的自适应调整考虑不足,限制了仿形系统性能。

为提高联合收获机割台仿形系统的协同仿形能力以及仿形装置的检测灵敏度,本文以4YZL-12F联合收获机为载体,开发了一种割台协同仿形系统。

1 仿形系统组成与工作原理

割台协同仿形系统主要由曲臂式仿形检测装置、割台升降液压缸及阀组、割台调平液压缸及阀组、PLC控制单元、HMI显示屏、手动调控模块及割台组成。仿形系统组成示意图见图1。

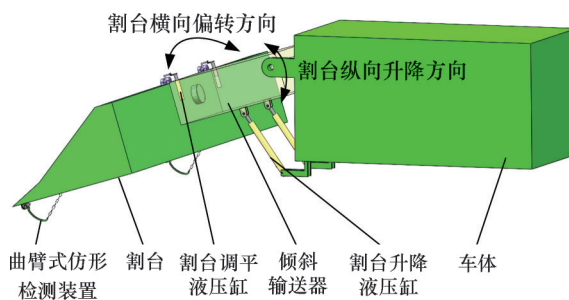


图1 协同仿形系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the profiling system

在割台左右两侧对称布置一套曲臂式仿形装置,该装置在收获过程中紧贴地面并将地面起伏信号转化成传感器输出的0.5~4.5 V电压信号,通过PLC控制单元处理得到割台两侧实时离地高度,并根据两侧高度对割台底部的地形状态进行评估。基于割台与其底部地形的相对平行或倾斜状态,独立或联合调节割台高度与倾角。割台升降液压缸的动态响应使得割台与倾斜输送器作为一个整体,能够灵活地绕车身旋转,进而控制割台纵向高度来适应地形起伏,纵向高度变化范围为50~1250 mm。通过调平液压缸动作可使割台绕倾斜输送器实现一定角度的横向偏转来适应地形坡度。大型联合收获机因具有大喂入量、宽割幅的特点,常应用于大田平原地区,大田平原地区地形起伏均匀、起伏量较小,并且坡度常小于5°^[8]。该系统横向偏转角范围为左右各7.5°(当收获机停放在水平路面并且割台水平时,偏转角为0°),限制仿形系统能适应的最大地形坡度为7.5°,满足大田平原地区的作业要求。系统的工作原理如图2所示,包括简化液压执行系统原理以及割台高度的闭环反馈控制原理。由于仿形系统需要精确控制割台位置,故控制割台升降与调平液压缸的液压阀均采用电磁比例阀,液压系统压力为16 MPa,各液压阀的型号与规格参数如表1所示。

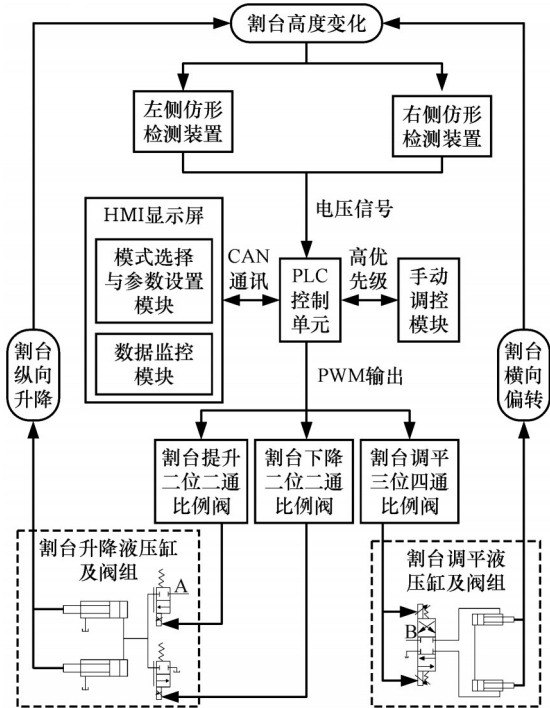


图2 仿形系统工作原理

Fig.2 Control principle of profiling system

表1 液压阀的型号与规格参数

Tab.1 Hydraulic valve models and specifications

| 元件名称 | 型号 | 额定压力/ MPa | 额定流量/ (L·min ⁻¹) |
|------|------------------|--------------|---------------------------------|
| 提升阀 | SP12-20-0-N-24ER | 25 | 114.0 |
| 下降阀 | SP10-20-0-N-24ER | 25 | 68.1 |
| 调平阀 | SP10-58C | 25 | 22.7 |

2 仿形系统硬件设计

2.1 仿形检测装置设计

小麦的适宜留茬高度一般介于50~200 mm,其中,50~100 mm留茬高度偏低,常见于收获倒伏作物,常规收获留茬高度在100~200 mm之间。研究设计了图3所示的直臂式和曲臂式两种仿形检测装置,检测范围均为40~300 mm,确保其覆盖留茬高度范围并留有适当的余量。当检测高度超出仿形装置检测高度范围时,检测失效,为保证检测有效,地形最大起伏量不应超过260 mm。

在最大检测高度时,仿形臂轴线与竖直方向具有最小的夹角 θ_{\min} ,设定为 30° ,此时两类仿形臂旋点与触地点之间具有相同的最大传感距离350 mm,曲臂的外廓曲率半径设为350 mm,两种臂型壁厚均为15 mm,臂宽为20 mm。仿形臂在自身重力与扭簧的扭力下与地面保持接触,将地面起伏信号通过旋转支架传递至角度传感器,选用ContelecVert-X系列 $\pm 45^\circ$ 型角度传感器,通过测定传感器的输出信号可以间接获得割台离地

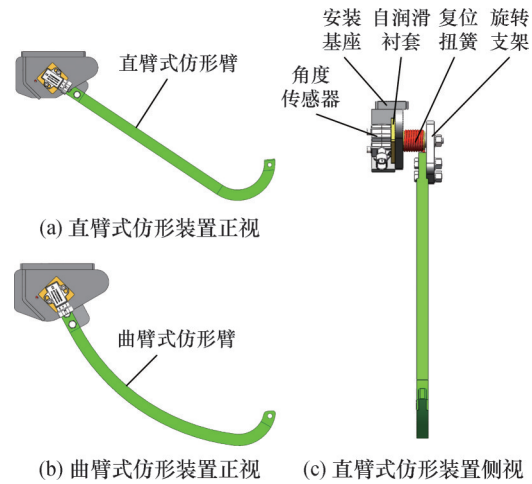


图3 仿形检测装置

Fig.3 Profiling detection device

高度。

2.2 仿形装置检测灵敏度分析

2.2.1 检测灵敏度的影响因素

仿形装置的检测灵敏度可用单位割台高度变化引起的仿形装置传感器角度输出变化来评估。通过分析直臂、曲臂两类仿形装置的工作过程,探究影响检测灵敏度的主要因素。

仿形装置工作过程如图4所示,假设收获机以速度 v 进行作业,并在同一位置分别安装了直臂与曲臂两种仿形装置。田间地面凸起导致割台高度从 H_1 降至 H_2 ,直臂式装置触地点由 A 点运动至 A' 点,曲臂式装置触地点则由 B 点运动至 B' 点。 L_0 、 L'_0 为直臂式装置触地点与仿形装置安装面之间的水平距离, L_1 、 L'_1 表示曲臂式装置的相应水平距离。仿形装置传感距离为从触地点至仿形装置回转中心 O 之间的直线距离, L_2 与 L_3 分别为曲臂式与直臂式两类装置的传感距离。 L_3 即为直臂的长度,在工作过程中不发生变化,即 $L_3=L'_3$,存在如下几何关系:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{L_0^2 + H_1^2} &= L_3 \\ \sqrt{L_0^2 + H_2^2} &= L'_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

割台高度由 H_1 降至 H_2 必然导致 $L'_0 > L_0$,直臂式装置的触地点产生后移,导致检测滞后时间

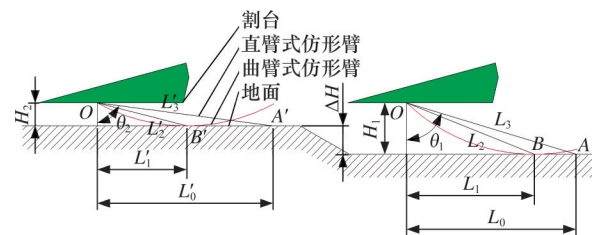


图4 仿形装置工作过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of the working process of the profiling detection device

增长。曲臂式装置触地点定义为曲臂与地面的切点,随着高度降低而前移, $L'_1 < L_1$, 因此曲臂式装置能更快检测到地形变化, 从而缩短响应时间。

θ_1, θ_2 分别为 OA, OA' 与沿安装点竖直方向之间的夹角, 有

$$\begin{cases} H_1 = L_3 \cos \theta_1 & 30^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \\ H_2 = L'_3 \cos \theta_2 & 30^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta h = H_2 - H_1 = L'_3 \cos \theta_2 - L_3 \cos \theta_1 \quad (3)$$

其中, Δh 为凸起高度值, 因 $L_3 = L'_3$, 则有

$$|\Delta h|/L_3 = |\cos \theta_2 - \cos \theta_1| \quad (4)$$

在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 仿形装置的角位移 $\Delta\theta$ 的大小与 $|\cos \theta_2 - \cos \theta_1|$ 成正相关关系:

$$|\Delta\theta| = |\theta_2 - \theta_1| \propto |\cos \theta_2 - \cos \theta_1| \quad (5)$$

$$|\Delta\theta| \propto |\Delta h|/L_3 \quad (6)$$

根据式(6), 由割台高度变化引起的仿形装置角位移输出变化主要与仿形装置传感距离有关, 在相同的割台高度变化量下, 由于 L_3 保持不变, 而曲臂式装置传感距离 L_2 随着割台高度降低逐渐减小, 因此曲臂式装置产生的角位移偏差变化信号较直臂更大, 这能激发更大的系统响应幅度, 提高仿形系统的动态响应能力。

2.2.2 标定试验

为测得仿形装置的检测灵敏度, 在割台两侧对称安装了直臂式和曲臂式仿形检测装置, 如图5所示, 通过手动调控制台并记录仿形装置角度传感器的角度输出值 α ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) 与割台高度 H , 采用最小二乘法对数据进行拟合标定, 得出 $\alpha-H$ 关系模型:



(a) 直臂侧割台高度测量 (b) 曲臂侧割台高度测量

图5 仿形装置标定试验

Fig.5 Calibration test of profiling device

$$\alpha_z = -0.112H_z + 55.47 \quad (7)$$

$$\alpha_q = -0.193H_q + 58.96 \quad (8)$$

式中: 下标 z, q 分别表示直臂式、曲臂式仿形检测装置。

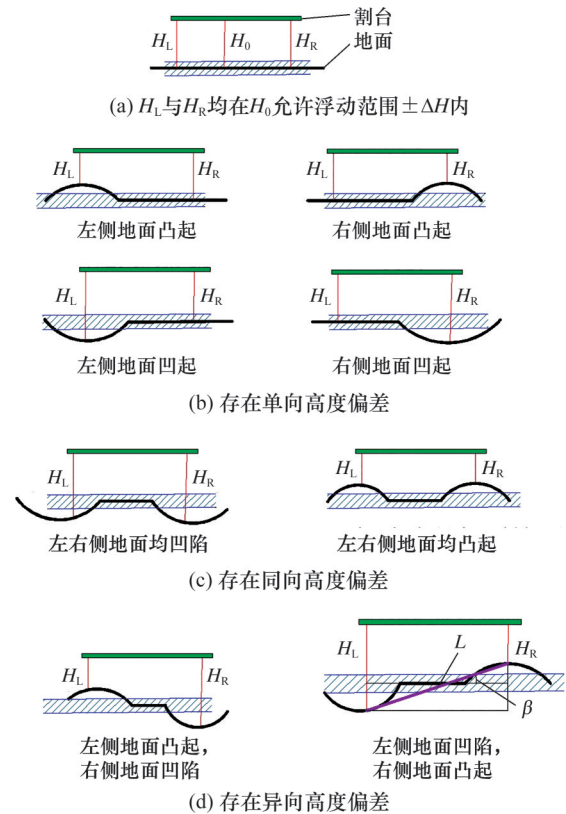
通过计算输出角度的一阶导数绝对值^[14], 得到检测装置的灵敏度 $S, S = |\Delta\alpha/\Delta h|$ 。直臂式装置灵敏度为 0.112, 曲臂式装置的灵敏度为 0.193, 曲臂式装置对单位割台高度变化的响应比直臂式装置高 72.3%, 具有更高的检测灵敏度, 能更有效地捕捉地面轮廓的变化, 使割台及时作出调整动作。

3 协同仿形系统软件设计

3.1 协同仿形调整策略设计

在自动仿形模式下进行收获作业时, 首先需根据作物类型与特点通过显示屏设定割台目标高度, 即割台(割刀)相对于地面应保持的理想高度, 以使得作物被均匀收割, 留茬高度保持一致。如图6所示, 根据两侧高度与割台目标高度 H_0 的偏差, 可将地形起伏分为4种典型情况, 当测量高度低于目标高度时表示地面凸起, 而高于目标高度时则表明地面凹陷。4种典型情况为: 两侧高度均在目标高度允许浮动范围内, 表明地面整体平整(图6a); 单向高度偏差表示一侧地面凸起或凹陷, 而另一侧较为平整(图6b); 同向高度偏差意味着两侧地面同时凸起或凹陷(图6c); 存在异向高度偏差则反映两侧地面凹凸情况相反(图6d)。此分类为割台协同仿形调整提供了决策依据。当存在异向高度偏差时, 可根据两侧割台高度计算确定地面斜坡坡度 β , 割台需调整横向偏转角使其与斜坡保持相对平行状态, 使两者相对倾斜角 $\varphi = 0^\circ$ 。相对倾斜角计算式为

$$\varphi = \beta = \arcsin(|H_L - H_R|/L) \quad (9)$$



注: ΔH 为割台目标高度允许的浮动值, 即浮动范围为 $[H_0 - \Delta H, H_0 + \Delta H]$, 两条蓝色实线之间的阴影区域即表示 $\pm \Delta H$

图6 地形起伏示意图

Fig.6 Schematic diagram of terrain undulation

式中： H_L 为割台左侧高度； H_R 为割台右侧高度； L 为左右两侧仿形检测装置安装点之间的横向距离，在试验机4YZL-12F上设定为6000 mm。

割台纵向高度与横向倾角协同仿形程序流程如图7所示。其中， δ 为斜坡坡度阈值； t 为高度偏差状态更新持续时间； T_1 为割台与地面相对平行时的偏差更新延时条件； T_2 为割台与地面相对倾斜时的偏差更新延时条件。当两侧割台高度均在目标高度允许浮动范围内时，割台保持当前状态不进行调整，否则系统进一步根据斜坡坡度判断割台与地面的相对状态。当斜坡坡度超过预设阈值时，判定割台与地面相对倾斜；坡度在阈值以下则视为割台与地面相对平行。相对平行状态下，割台仅需在纵向进行高度调整，以适应不同偏差情况下的地形。割台提升或下降动作旨在确保基准高度维持在允许高度浮动范围内。相对倾斜时，割台需根据偏差状态调整纵向高度或横向倾角。当两侧高度变化引起偏差情况更新，需要进入新的偏差下的程序逻辑时，偏差更新持续时间

需满足一定的延时条件 T ，满足延时条件表明地面的凹凸状态真实发生变化，否则视为地面干扰信号。如在收获过程中割台与地面相对平行的情况下，出现单侧地面凸起而另一侧地面平整的单向高度偏差情况时，需要持续一定的时间才能判定地形发生了真实变化。设定 T_1 、 T_2 参数值越大，仿形系统对地面干扰信号的过滤能力越强。

3.2 仿形系统控制方法设计与仿真

联合收获机的工作过程具有大延时的特点^[15]，仿形系统在检测到地形变化后需要 Δt 时间才能作出响应动作，在车速 v 下将产生 $v\Delta t$ 的调节滞后距离。为减小仿形系统的滞后影响，本文结合灰色预测模型，将割台高度或倾角的单步预测值与反馈量应用到PID控制算法中，实现系统快速稳态响应。同时为了避免因预测误差过大而产生系统超调等现象，引入系数 $f(\tilde{e}(k))$ 动态调整PID积分项的累积速度，使得割台高度或倾角偏差越大，积分越慢，反之则越快^[16]。

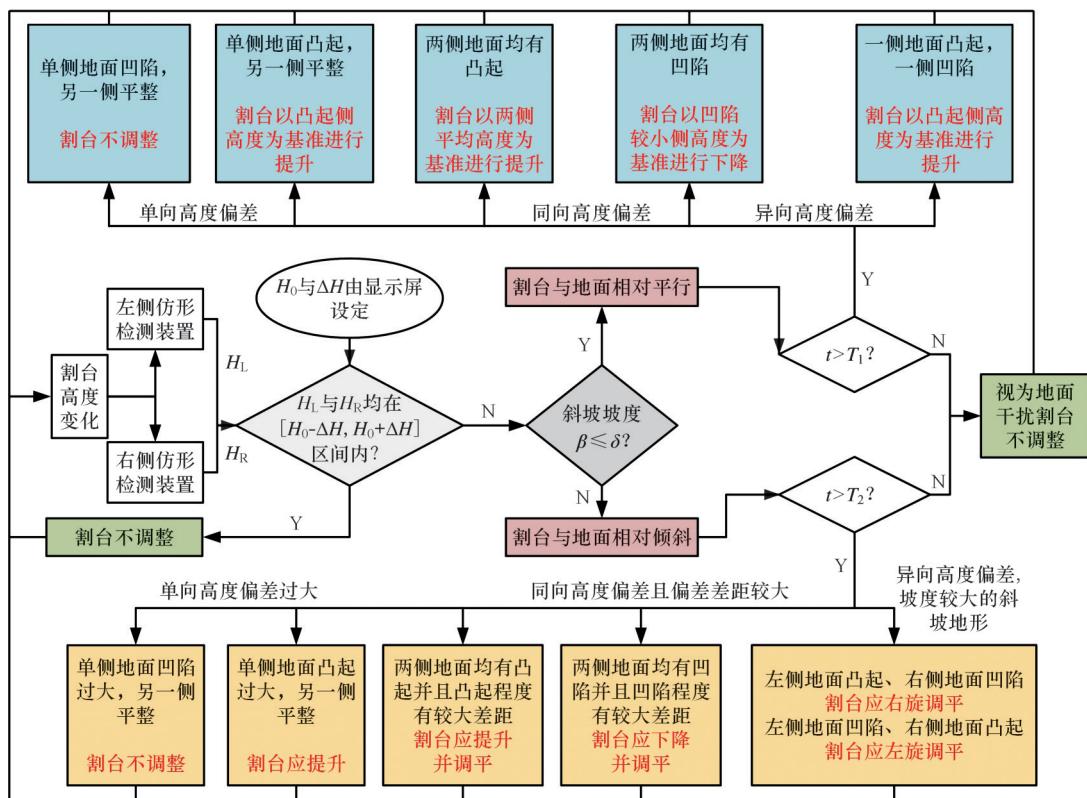


图7 仿形动作判断程序流程图

Fig.7 Flowchart of the profiling action judgment program

3.2.1 改进灰色预测模型建立

在割台仿形系统中，作业环境的复杂性和地形的不断变化导致割台高度与倾角数据快速波动，并常伴有噪声和突变，这些因素显著降低了传统灰色预测方法的准确性和可靠性。针对该问题

本文提出一种改进的灰色预测方法，采用滑动窗口更新的方式对GM(1,1)模型进行优化，保持模型原有维度不变，将最新的高度或倾角数据连续集成到模型中，同时逐步淘汰模型中最旧的数据点。这种更新机制使得预测模型能够利用更接近

预测时刻的历史数据,从而更准确地捕捉系统当前的特征,不仅提高了预测精度,还节约了控制器的存储空间并减小了计算量。设 n 时刻获取仿形系统输出的观测时序为

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\} \quad (10)$$

进入 $n+1$ 时刻后,引入新观测值 $X^{(0)}(n+1)$ 的同时移除最早的观测值 $X^{(0)}(1)$,从而形成一个等维的新信息时序:

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n+1)\} \quad (11)$$

n 时刻的累加生成时序为

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\} \quad (12)$$

式中: n 为建模维数; $X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n-1)$ 为历史割台高度数据; $X^{(0)}(n)$ 为现时高度数据。

k 时刻的累加生成值为

$$X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

接着生成紧邻均值序列

$$z^{(1)}(i) = \frac{1}{2} (X^{(1)}(i) + X^{(1)}(i-1)) \quad (14)$$

$$i=2, 3, \dots, n$$

建立 GM(1,1) 模型灰微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}(t)}{dt} + aX^{(1)}(t) = b \quad (15)$$

其中, a 为发展系数; b 为灰色作用量。 a, b 可用最小二乘法来估计:

$$A = [a \quad b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

得到 a, b 在根均方差意义下的估计值后,可得上述模型的解为

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = [(X^{(0)}(1) - b/a)]e^{-ak} + b/a \quad (17)$$

其中, $k=1, 2, \dots, n$ 。对式(17)的序列进行累减生成操作后得到原始高度序列在 $k+M$ 时刻的高度预估值:

$$\hat{X}^{(0)}(k+M) = (1 - e^{-a})(X^{(0)}(1) - b/a)e^{-a(k+M-1)} \quad (18)$$

其中, M 为预测步数,系统的滞后或惯性越大,预测步数 M 也越大,但超过一定值后会造成预测精度下降^[17],割台仿形系统滞后性与惯性均较大,取预测步数 $M=5$,原始观测时序建模维数为 4。

3.2.2 改进灰色预测变速 PID 控制方法

改进灰色预测变速 PID 控制原理如图 8 所示,对应第 k 次采样时刻, $r(k)$ 为系统给定的割台高度或倾角, $u(k)$ 为控制器输出值, $y^{(0)}(k)$ 为当前检测到的割台高度或倾角, $\hat{y}^{(0)}(k+M)$ 为超前 M 步的割台高度或倾角的灰色预测值, $e(k)$ 为当前误差值, $\hat{e}(k)$ 为预测误差值。其中:

$$\left. \begin{aligned} e(k) &= r(k) - y^{(0)}(k) \\ \hat{e}(k) &= r(k) - \hat{y}^{(0)}(k+M) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\tilde{e}(k) = \begin{cases} \hat{e}(k) & e(k)\hat{e}(k) \geq 0 \\ \frac{1}{2}(e(k) + \hat{e}(k)) & e(k)\hat{e}(k) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

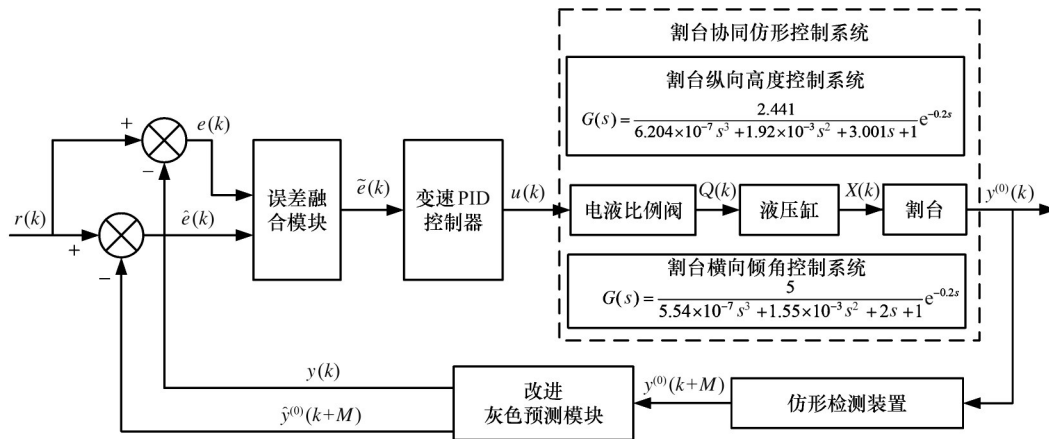


图 8 改进灰色预测变速 PID 控制原理

Fig.8 Improved grey prediction variable speed PID control principle

误差融合模块根据式(20)对 $e(k)$ 与 $\hat{e}(k)$ 进行融合处理得到参与变速 PID 调节算法的误差项 $\tilde{e}(k)$ 。当 $e(k)\hat{e}(k) \geq 0$ 时,说明系统趋势一致,即预测误差与实际误差同向,以预测误差为输入误差进行调节,能够更快地响应系统变化从而有效抑制系统可能出现的超调。当 $e(k)\hat{e}(k) < 0$ 时,

说明系统输出已经在给定目标量附近波动,取实际误差与预测误差的均值作为输入误差,可以避免过度调整,保持系统的稳定性。改进灰色预测变速积分 PID 算法表达式为

$$u(k) = k_p \tilde{e}(k) + k_i \left(\sum_{i=0}^{k-1} e(i) + f(\tilde{e}(k))\tilde{e}(k) \right) t_s + k_d (\tilde{e}(k) - \tilde{e}(k-1)) \quad (21)$$

$$f(\tilde{e}(k)) = \begin{cases} 1 & |\tilde{e}(k)| \leq B \\ \frac{A - |\tilde{e}(k)| + B}{A} & B < |\tilde{e}(k)| \leq A + B \\ 0 & |\tilde{e}(k)| > A + B \end{cases} \quad (22)$$

式中： k_p, k_i, k_d 分别为比例、积分、微分系数； t_s 为采样时间； $f(\tilde{e}(k))$ 为变速PID积分项变速因子，其值在 $[0, 1]$ 区间内变化，使积分项积分速度在 $k_i \sum_{i=0}^{k-1} e(i)T$ 和 $k_i \sum_{i=0}^k e(i)T$ 之间； A, B 为设置的误差限。

式(22)中参数 B 常设置为影响系统响应速度和稳定性之间的折中值， A 值通常小于 B 值。需通过观察系统的响应和性能来调整 A, B 值，若系统响应过慢，应适当减小 A 值，若系统超调严重，则应适当增大 B 值，通过多次试验和调整，找到最佳的参数组合。

3.2.3 仿真对比试验

编写MATLAB的M文件，进行离散仿形系统的改进灰色预测变速PID控制与普通PID控制的仿真对比分析。设置仿真步数200，采样时间0.1 s，基于临界比例度法经验公式整定PID的控制器参数。

在割台高度控制系统中，目标高度设为60 mm，误差限 A 为50 mm， B 为80 mm。进行至100步时，对目标高度施加30 mm的干扰，模拟目标高度变化为90 mm。仿真结果如图9所示，普通PID控制在约5.5 s时达到稳态，伴随8.65%的超调量；相比之下，改进灰色预测变速PID控制在2.3 s内达到稳态，调节时间缩短58.18%，且控制过程无明显超调，稳态误差小于0.3 mm。改进灰色预测变速PID控制方法因其超前预测系统行为的能力和积分变速区间的设计，有效抑制了系统的超调现象，系统受到干扰后，在2 s内能够恢复稳态，其控制性能优于普通PID控制。

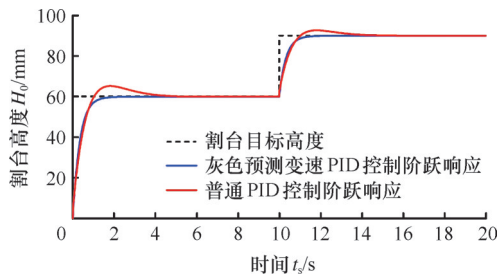


图9 割台高度控制阶跃响应仿真结果

Fig.9 Simulation results of header height control step response

在割台倾角控制系统仿真中，设定目标倾角为 1° ，误差限 A 为 0.3° ， B 为 0.6° ，仿真至100步时对系统输出施加 0.5° 的干扰，如图10所示，在改进

灰色预测变速积分PID控制方法下，系统调节时间由普通PID控制下的6.2 s缩短至2.6 s，降低58.06%，且几乎没有超调和稳态误差，在普通PID控制方式下，超调量达16.7%。在系统输出受到干扰后，改进灰色预测变速PID方法有效减小了系统对干扰的过度反应，减少了超调和振荡现象，显著提高控制效果。

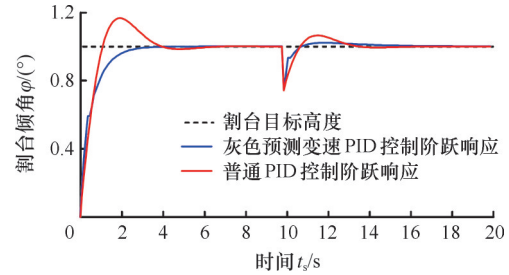


图10 割台倾角控制阶跃响应仿真结果

Fig.10 Simulation results of header leveling control step response

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证仿形系统的协同仿形能力以及不同作业条件下的控制精度，2024年6月在安徽阜阳市开展了田间试验。试验区域呈现自然起伏及不同坡度的斜坡，最大起伏量约170 mm，最大坡度约 6.3° 。仿形检测装置选择灵敏度更高的曲臂式装置，试验机型为4YZL-12F大型联合收获机，配备7.6 m宽的割台。田间试验场景如图11所示。



(a) 田间试验现场

(b) 留茬高度采样

图11 田间试验

Fig.11 Field experiment

4.2 试验指标与方法

试验基于采集的割台平均高度与相对斜坡倾斜角的实时数据并结合收获后的留茬控制精度，对割台协同仿形性能进行综合评估。

设定每组试验区域长50 m、宽10 m，沿收获方向每5 m设留茬高度采样处，每个采样处横向设置5个采样点，测量此5点留茬高度并取平均值作为采样处的留茬高度。试验分为手动调控和自动仿形两种模式，自动模式下首先进行6组试验，为检验协同仿形系统对不同留茬高度区间的适应性，前3组设定7 km/h的相同车速，留茬高度分

别设为低留茬60 mm、中等留茬100 mm、较高留茬160 mm;为检验仿形系统在不同车速下的仿形性能,后3组车速分别为4、8、10 km/h,留茬高度统一为100 mm。手动模式下,在相同条件下进行6组对照试验。试验采用20 mm的平均绝对偏差作为判定留茬高度是否合格的标准,将合格率 p 和平均绝对偏差 e_{MAD} 作为系统性能的主要评价指标:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad h_i = \begin{cases} 1 & |h_i - H_0| \leq 20 \\ 0 & |h_i - H_0| > 20 \end{cases}$$

$$e_{MAD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i - H_0|$$

式中: h_i 为每个采样处的留茬高度均值; H_0 为目标留茬高度; N 为标记的采样处的总个数。

4.3 试验结果与分析

图12所示为在自动仿形模式、车速7 km/h、割台目标高度150 mm条件下采集的割台平均高度与相对斜坡倾角瞬时值,目标相对倾角为 0° ,采样周期为20 ms。割台高度允许浮动范围为130~170 mm,左右割台高度允许极限差值为40 mm,割台相对倾角允许浮动范围通过式(9)计算得到,为 $\pm 0.38^\circ$ 。手自动两种模式下的测试结果如表2和表3所示。

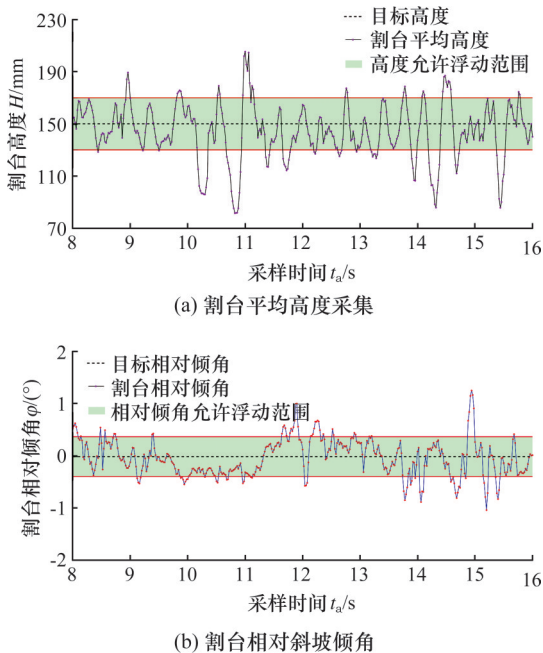


图12 割台高度与倾角瞬时值

Fig.12 Instantaneous value of header height and inclination

试验结果显示:

1)采集的割台高度与倾角始终围绕目标值上下波动,并且在允许浮动范围内的采样点数分别占总采样数的71.07%与75.06%,初步表明仿形

表2 自动仿形模式下的测试结果

Tab.2 Test results under automatic profiling mode

| 采样组别 | 固定收获车速7 km/h | | | 固定留茬高度100 mm | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------------|--------|---------|
| | 60 mm | 100 mm | 160 mm | 4 km/h | 8 km/h | 10 km/h |
| 1 | 66 | 104 | 169 | 87 | 109 | 115 |
| 2 | 66 | 110 | 161 | 86 | 114 | 90 |
| 3 | 63 | 115 | 169 | 100 | 107 | 108 |
| 4 | 72 | 112 | 154 | 93 | 91 | 110 |
| 5 | 74 | 103 | 172 | 96 | 89 | 90 |
| 6 | 54 | 105 | 173 | 99 | 110 | 86 |
| 7 | 75 | 97 | 181 | 93 | 92 | 112 |
| 8 | 56 | 108 | 169 | 96 | 91 | 109 |
| 9 | 74 | 105 | 167 | 101 | 121 | 77 |
| 10 | 46 | 96 | 163 | 101 | 109 | 93 |
| 11 | 70 | 93 | 158 | 96 | 113 | 108 |
| e_{MAD} | 9 | 6.87 | 8.35 | 5.24 | 10.75 | 11.85 |
| p | 85.45% | 87.27% | 85.45% | 94.5% | 83.63% | 80% |

表3 手动调控下的测试结果

Tab.3 Test results under manual control

| 采样组别 | 固定收获车速7 km/h | | | 固定目标高度100 mm | | |
|-----------|--------------|--------|--------|--------------|--------|---------|
| | 60 mm | 100 mm | 160 mm | 4 km/h | 8 km/h | 10 km/h |
| 1 | 80 | 120 | 185 | 118 | 128 | 131 |
| 2 | 84 | 78 | 182 | 115 | 133 | 134 |
| 3 | 83 | 124 | 177 | 123 | 128 | 139 |
| 4 | 79 | 79 | 136 | 86 | 127 | 136 |
| 5 | 87 | 125 | 179 | 121 | 130 | 134 |
| 6 | 82 | 128 | 183 | 120 | 134 | 139 |
| 7 | 86 | 129 | 181 | 123 | 137 | 141 |
| 8 | 83 | 123 | 183 | 116 | 130 | 132 |
| 9 | 86 | 76 | 188 | 115 | 134 | 132 |
| 10 | 96 | 127 | 149 | 123 | 126 | 129 |
| 11 | 84 | 126 | 184 | 116 | 135 | 130 |
| e_{MAD} | 25 | 24 | 21.54 | 18.6 | 31.02 | 34.29 |
| p | 43.64% | 50.9% | 52.72% | 56.36% | 30.91% | 27.27% |

系统具有协同控制割台纵向高度与横向倾角的能力。

2)在自动仿形模式设定车速7 km/h的试验条件下,各试验组的留茬合格率均超过85%,平均绝对偏差均小于10 mm,无显著组间差异,表明仿形系统在统一车速下对不同留茬高度具有良好的适应性。在变车速的条件下,不同车速下的留茬高度平均绝对偏差分别为5.24 mm、10.75 mm、11.85 mm,合格率分别为94.5%、83.63%、80%。车速提高引起的振动与颠簸对仿形系统性能产生不利影响,但在10 km/h以下的常规作业速度下,系统保持良好的仿形效果。

3)自动仿形模式下的留茬平均绝对偏差均值为8.68 mm,平均留茬合格率为86.05%,手动模

式下的留茬平均绝对偏差均值为 25.74 mm, 平均留茬合格率为 43.63%。自动模式下留茬偏差相比于手动模式下降了 66.3%, 合格率提高了 42.42%, 留茬更加均匀, 显示仿形系统良好的协同仿形能力及在提高收获精度方面的优势。

5 结论

1) 为提高联合收获机割台仿形系统对割台纵向高度与横向倾角协同仿形能力, 以及仿形装置的检测灵敏度, 设计了一种割台纵向高度-横向倾角协同仿形系统, 该系统能快速检测并响应地形变化, 实现独立或联合调整割台纵向高度与横向倾角, 使收获后的留茬更加均匀。

2) 曲臂式装置凭借较短的传感臂长度和更靠前的触地点, 其检测灵敏度相对直臂式装置提高了 72.3%, 这使其能更有效捕捉地面轮廓变化, 产生更大的角位移偏差变化信号, 从而增强仿形系统的响应幅度。

3) 研究提出一种改进的灰色预测变速 PID 控制方法, 相较于传统 PID 控制, 系统调节时间缩短了 58%, 并增强了系统抗干扰能力。田间试验表明, 自动仿形模式下留茬高度合格率达到 86.05%, 相对于手动模式提高了 42.42%, 各组留茬高度与设定目标高度绝对误差均控制在 15 mm 以内, 留茬更加均匀, 协同仿形系统整体性能能够满足设计及使用需求。

参考文献:

- [1] 罗锡文, 廖娟, 臧英, 等. 我国农业生产的发展方向: 从机械化到智慧化[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1):46-54.
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZANG Ying, et al. Developing from Mechanized to Smart Agricultural Production in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1):46-54.
- [2] CHEN W, HU L, WANG G, et al. Design of 4UM-120D Electric Leafy Vegetable Harvester Cutter Height off the Ground Automatic Control System Based on Incremental PID[J]. Agriculture, 2023, 13(4):905.
- [3] 刘华伟, 张萍, 杨晓慧, 等. 国内谷物联合收获机割台智能化现状与发展研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4):189-197.
LIU Huawei, ZHANG Ping, YANG Xiaohui, et al. Research on Current Situation and Development of Intelligent Header of Domestic Grain Combine Harvester[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2022, 43(4):189-197.
- [4] 伟利国, 车宇, 汪凤珠, 等. 联合收割机割台地面仿形控制系统设计及试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(5):150-154.
WEI Liguu, CHE Yu, WANG Fengzhu, et al. Design and Experiment of Ground Profiling Control System for Combine Harvester Cutting Platform [J]. Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5):150-154.
- [5] 李新成, 王家胜, 邓玉栋. 收获机割台高度测控系统研究现状[J]. 农业开发与装备, 2019(1):77-78.
LI Xincheng, WANG Jiasheng, DENG Yudong. Research Status of Header Height Measurement and Control System of Harvester[J]. Agricultural Development and Equipment, 2019(1):77-78.
- [6] 陈进, 汪树青, 练毅. 稻麦联合收获机割台参数按键电控调节装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16):19-26.
CHEN Jin, WANG Shuqing, LIAN Yi. Design and Experiment of Electronic Control Device for Parameters of Harvester Header of Rice and Wheat Combine Harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16):19-26.
- [7] GUO Y, LI Y, LIU Z, et al. Advanced Stereo Vision-based Solutions for Header and Crop Height Detection in Combine Harvesters [C]//2023 IEEE 9th International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS). DaLi, 2023:366-373.
- [8] 惠云婷, 张国锐, 马海明, 等. 自走式青饲料收获机仿形系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2):1-9.
HUI Yunting, ZHANG Guorui, MA Haiming, et al. Header Profiling System of Self-propelled Green Fodder Harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S2):1-9.
- [9] YANG R, WANG Z, SHANG S, et al. The Design and Experimentation of EVPIVS-PID Harvesters' Header Height Control System Based on Sensor Ground Profiling Monitoring[J]. Agriculture, 2022, 12(2):282.
- [10] NI Y, JIN C, CHEN M, et al. Computational Model and Adjustment System of Header Height of Soybean Harvesters Based on Soil-machine System [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183:105907.
- [11] 官元娟, 金忠博, 白晓平, 等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2):119-128.
GONG Yuanjuan, JIN Zhongbo, BAI Xiaoping,

- et al. Design and Experiment of Servo Control System for Sugarcane Header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2):119-128.
- [12] WANG Q, MENG Z, WEN C, et al. Grain Combine Harvester Header Profiling Control System Development and Testing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223:109082.
- [13] 刘伟健, 罗锡文, 曾山, 等. 基于模糊PID控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10):1-9.
- LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance Test and Analysis of Adaptive Contour Harvesting Platform for Regenerated Rice Based on Fuzzy PID Control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10):1-9.
- [14] SCHLIPF R. Header Height Control System Accounting for Change in Header Pitch; US11696530B2 [P]. 2020-01-02.
- [15] 陈进, 郑世宇, 李耀明, 等. 联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10):110-115.
- CHEN Jin, ZHENG Shiyu, LI Yaoming, et al. Grey Prediction Fuzzy Control System for Forward Speed of Combine Harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(10):110-115.
- [16] 周洲, 陈宇轩, 程鑫. BP+RNN变速积分PID算法
(上接第2412页)
- [17] WANG Dongyang, SHAO Bo, QI Jilin, et al. Study on Strain Localization of Frozen Sand Based on Uniaxial Compression Test and Discrete Element Simulation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 223:104221.
- [18] LU Wenjun, RAED L, SVEINUNG L, et al. Fracture of an Ice Floe: Local Out-of-plane Flexural Failures Versus Global In-plane Splitting Failure [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123:1-13.
- [19] 周陈超. 不同破坏准则下极地海冰有限元材料和粘聚单元法的应用[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- ZHOU Chenchao. Polar Sea Ice Finite Element Materials under Different Failure Criteria and Application of Cohesive Element [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.
- [20] 蒋昱妍. 基于粘聚单元法的海洋结构物-层冰碰撞的汽车底盘测功机控制系统[J]. 机械设计与制造, 2021(2):148-152.
- ZHOU Zhou, CHEN Yuxuan, CHENG Xin. Automobile Chassis Dynamometer Control System Based on BP+RNN Variable Speed Integral PID Algorithm [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021(2):148-152.
- [17] 汪凤凤, 黄海宏, 王海欣. EAST快控电源灰色预测PID控制预研[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4):604-610.
- WANG Fengfeng, HUANG Haihong, WANG Haixin. Pre-Research on Gray Prediction PID Control of EAST Fast Control Power Supply[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(4):604-610.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介:** 黄毅, 男, 1978年生, 教授。研究方向为工程机械动力学及控制。E-mail: tjhuangyi110@163.com。周志红*(通信作者), 男, 1978年生, 高级工程师。研究方向为机械结构设计、液压传动控制等。E-mail: 632430930@qq.com。
- 本文引用格式:**
黄毅, 周涛, 周志红, 等. 联合收获机割台纵向高度-横向倾角协同仿形系统设计及试验[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2413-2422.
- HUANG Yi, ZHOU Tao, ZHOU Zhihong, et al. Design and Experiment of Longitudinal Height-lateral Inclination Synergistic Profiling System for Combine Harvester Headers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2413-2422.
-
- 数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- JIANG Yuyan. Numerical Simulation of Marine Structure-level Ice Collision Based on Cohesive Element Method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介:** 董国军*(通信作者), 男, 1974年生, 副教授。研究方向为硬脆难加工材料的高效精密加工技术、超精密加工及纳米级切削加工技术等。E-mail: dongguojun@hit.edu.cn。
- 本文引用格式:**
董国军, 赖睿达, 代勇, 等. 基于河冰微观结构的超声辅助切削仿真分析及验证实验[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2405-2412.
- DONG Guojun, LAI Ruida, DAI Yong, et al. Ultrasonic Assisted Cutting Simulation and Validation Experimental Research Based on River Ice Mesostructure [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2405-2412.