

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

刘伟健, 罗锡文, 曾山^{*}, 曾力

(华南农业大学工程学院, 南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要:为促进水稻再生季穗头萌发, 头季稻机械收获时需保证 300~450 mm 的留茬高度, 但水田泥脚深浅不一, 收获时割台高度上下浮动, 留茬高度难以保证, 严重影响再生季产量。为此, 该研究设计了一种自适应仿形割台, 可实现割台高度及水平自适应调整。首先, 对自适应仿形割台结构进行设计。然后, 在 Matlab/Simulink 中搭建控制系统仿真模型, 设计模糊规则, 采用模糊 PID 控制方法对自适应仿形割台进行性能仿真, 以超调量、响应时间和稳定性为指标, 验证控制方法的可行性; 以阶跃信号作为激励, 对比分析了传统 PID 和模糊 PID 的控制效果, 结果表明, 模糊 PID 控制比传统 PID 的上升时间和到达稳态所需时间分别减少 78.9% 和 81.6%, 超调量由 46 mm 下降到 8.2 mm。最后, 搭建割台试验平台进行性能试验。结果表明, 采用模糊 PID 控制时割台提升过程的平均响应速度约为 0.216 m/s, 下降过程的平均响应速度约为 0.244 m/s, 割台高程调节的平均误差 6.75 mm, 水平调节的平均误差为 0.64°, 割台调整迅速, 定位准确度高, 可满足再生稻头季收获使用需求。

关键词: 农业机械; 试验; 再生稻; 自适应; 仿形割台; 模糊 PID 控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.001

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0001-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.001 http://www.tcsae.org

Liu Weijian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 1-9. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.001 http://www.tcsae.org

0 引言

再生稻具有一种两收、省工省种、能充分利用光温资源、实现增粮增收且稻米品质好等优点, 近年来在长江中下游地区得到迅速推广^[1-4]。再生稻头季机械化收获时需保证一定的留茬高度^[5-7], 依据水稻品种不同留茬高度为 300~450 mm^[8-10]。再生稻收获时, 田块泥脚深度不一, 收获机割台高度上下浮动, 驾驶员需实时调整割台高度以保证留茬高度, 如留茬高度不匀, 会影响作业效率和再生季的分蘖生长。为达到田块留茬高度一致的目的, 再生稻收获机割台需具备高度及水平自适应调整功能, 割台能够根据地面起伏状况自动进行高度及水平调整, 从而保证割茬高度一致, 提高再生季的产量。

系统控制特性决定了割台调整的精度与效率, 但由于死区、饱和区和间隙的普遍存在, 使系统产生响应滞后、速度降低、调节时间延长等问题^[11-14]。

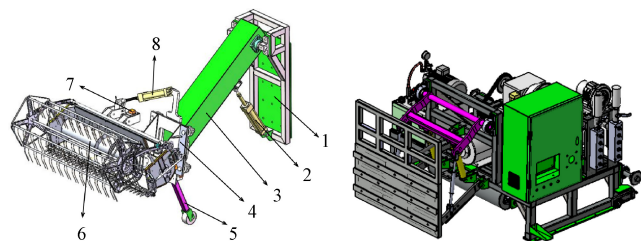
因此, 为了提高水稻再生季产量, 实现割台自适应仿形控制, 本文从自适应仿形割台结构和控制算法两方面进行研究, 对割台高度和水平执行系统受控运动特性

进行分析, 并通过仿真分析和台架试验, 对其有效性进行验证, 以期再生稻收获机割台控制提供依据和参考。

1 自适应仿形割台整体结构

1.1 整体结构

自适应仿形割台主要由割台支撑架、输送槽、转动圆盘、高程油缸、调平油缸、割台及仿形地轮构成, 如图 1 所示。



1. 割台支撑架 2. 高程油缸 3. 输送槽 4. 转动圆盘 5. 仿形地轮 6. 割台
7. 倾角传感器 8. 调平油缸
1. Header support frame 2. Elevation oil cylinder 3. Conveyor trough
4. Rotating disc 5. Profiling ground wheel 6. Header 7. Inclination sensor
8. Leveling oil cylinder

图 1 自适应仿形割台

Fig.1 Self-adaptive profiling header

本文割台主要参数如表 1 所示, 仿形地轮安装于收送槽下方, 采用单仿形地轮; 割台支撑架与土槽试验台车通过螺栓紧固连接, 输送槽与支撑架铰接, 高程油缸分别与割台支撑架、输送槽铰接; 割台与输送槽通过转动圆盘连接, 割台通过调平油缸的伸缩实现

收稿日期: 2022-04-08 修订日期: 2022-05-12

基金项目: 智慧农业工程技术与装备 (NT 2021009); 工信部 2021 重点项目 (TC210H02Y)

作者简介: 刘伟健, 博士生, 研究方向为农业机械装备制造。

Email: 531964726@qq.com

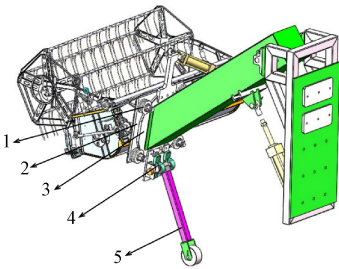
*通信作者: 曾山, 博士, 副研究员, 研究方向为水稻生产机械化技术及装备。Email: shanzeng@scau.edu.cn

一定角度的摆动；液压控制系统、高程控制系统、调平控制系统均安装于土槽试验台车上。割台角度调节装置主要由转动圆盘、旋转缸套、割台以及连接板等组成，如图 2 所示，连接板与割台固定连接，转动圆盘在四个旋转缸套的限位作用下与连接板紧密接触，并可绕喂入口转动一定角度。调平油缸通过支撑架与转动圆盘固定连接，随着调平油缸的伸缩，转动圆盘绕喂入口转动，完成割台角度调节。

表 1 割台主要参数

Table 1 Main parameters of header

参数 Parameters	数值 Values
割幅 Cutting width/mm	1 200
割台搅龙型式 Header auger type	伸缩式横向输送
拨禾轮型式 Reel type	偏心拨齿式
切碎器型式 Chopper type	往复循环式
喂入量 Feeding amount/(kg·s ⁻¹)	1 000
质量 Mass/kg	440
最大高度 Maximum height /mm	800
旋转角度 Leveling angle range/(°)	±10



1. 旋转缸套 2. 连接板 3. 转动圆盘 4. 角度传感器 5. 仿形地轮
1. Rotating cylinder liner 2. Connecting plate 3. Rotating disc 4. Angle sensor 5. Profiling ground wheel

图 2 割台角度调节装置

Fig.2 Header angle adjusting device

1.2 工作原理

该系统以 PLC 为控制核心，以角度传感器及倾角传感器输入数据为调控依据，以三位四通比例电磁阀为执行机构。作业时，输送槽下方的仿形地轮在自身重力作用下接触泥面，由于仿形地轮质量较轻，可准确将泥面的起伏通过角度传感器换算为割台实际高度，控制器通过角度传感器及倾角传感器实时采集割台高度与水平角度，与设定值进行对比，计算出偏差量，并将其作为系统输入量，通过模糊 PID 控制算法修正控制参数，根据计算输出后电压的变化实现比例阀开度的调节^[15]，采用三位四通比例阀控制液流方向和流量，驱动液压油缸伸长/缩短，进而实现割台自适应调节。该系统以 PLC 为控制核心，以角度传感器及倾角传感器输入数据为调控依据，以三位四通比例电磁阀为执行机构。

2 割台高度和水平调节

2.1 割台高度调节

高程油缸伸缩使输送槽绕铰接点旋转从而带动割台改变高度。为实现割台高度及水平自适应调整，建立割

台系统的几何简化模型并进行受力分析，如图 3 所示。根据图 3 几何关系，输送槽铰接点 A 处受力可分解为水平方向力 F_{Ax} 和竖直方向力 F_{Ay} ，有：

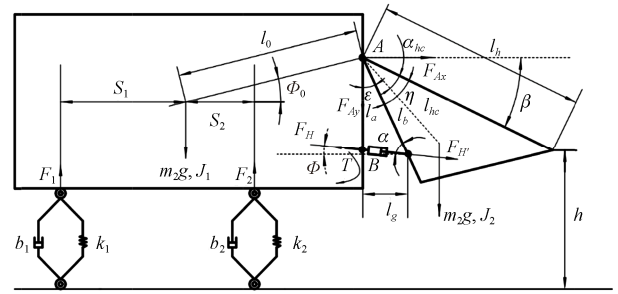
$$l_g^2 = l_a^2 + l_b^2 - 2l_a l_b \cos \varepsilon \quad (1)$$

$$x_A = l_0 \cos(\varphi_0 + \theta) \quad (2)$$

$$y_A = y - l_0 \sin(\varphi_0 + \theta) \quad (3)$$

$$h = h_0 + y_A - l_h \sin \beta \quad (4)$$

式中 y_A 为铰接点 A 与土槽试验台车重心在垂直方向的距离，mm； y 为土槽试验台车在垂直方向上的位移，mm； h_0 为铰接点 A 距地面高度，mm； θ 为车身倾斜角度，(°)。



注： S_2 、 S_1 、 l_0 分别为土槽试验台车前后轮、输送槽铰接点与车身重心在水平方向的距离，mm； T 为高程油缸连接处割台与车身的力矩，N·m； F_1 、 F_2 是后轮和前轮等效弹力和阻尼力，N； F_{Ax} 、 F_{Ay} 分别为输送槽铰接点处水平方向力和竖直方向力，N； J_1 、 J_2 分别为转动车身和割台的转动惯量，kg·m²； h 为割台高度，mm； k_1 、 k_2 、 b_1 、 b_2 分别为前后轮的弹性系数和阻尼系数； Z_1 、 Z_2 分别为后轮、前轮水平高度，m； θ 是车身倾斜角度，(°)； Φ_0 是输送槽铰接点与车身重心之间连线和平行于车身直线的夹角，(°)； Φ 是液压缸与水平面之间夹角，(°)； α_{hc} 是 A 点与割台重心连线和割台上平面的夹角，(°)； l_{hc} 是 A 点到割台重心的距离，mm； α 为高程油缸和输送槽间的角度，(°)； β 为割台上平面相对于水平面的夹角，(°)； l_a 、 l_b 分别为 A 点到高程油缸两铰接点的距离，mm； l_g 为高程油缸长度，m； F_H 、 $F_{H'}$ 分别为高程油缸作用在车身和割台上的力，N； l_h 为割台上平面与 A 点的距离，mm； ε 为高程油缸两铰接点间角度，(°)； η 为割台上平面与输送槽的夹角，(°)。

Note: S_2 、 S_1 、 l_0 are the horizontal distance between the hinge points of the front and rear wheels of the soil trough test trolley and the conveyor trough relative to the center of gravity of the vehicle body, mm; T is the moment between header and body at the connection of elevation cylinder, N·m; F_1 and F_2 are the equivalent elastic and damping forces of the rear wheel and the front wheel, N; F_{Ax} and F_{Ay} are the horizontal force and vertical force at the hinge joint of the conveyor, N; J_1 and J_2 are the rotational inertia of the rotating body and header, kg·m²; h is header height, mm; k_1 、 k_2 、 b_1 and b_2 are the elastic coefficient and damping coefficient of the front and rear wheels respectively; Z_1 and Z_2 are the horizontal height of rear wheel and front wheel respectively, m; θ is the inclination angle of the vehicle body, (°); Φ_0 is the included angle between the connecting line between the hinge joint of the conveying trough and the center of gravity of the vehicle body and the straight line parallel to the vehicle body, (°); Φ is the included angle between the hydraulic cylinder and the horizontal plane, (°); α_{hc} is the included angle between the connecting line between point a and the header center of gravity and the upper plane of the header, (°); l_{hc} is the distance from point A to the center of gravity of header, mm; α is the angle between the elevation cylinder and the conveyor, (°); β is the included angle between the upper plane of the header and the horizontal plane, (°); l_a and l_b are the distance from point a to the two hinge points of elevation cylinder respectively, mm; l_g is the length of elevation cylinder, mm; F_H and $F_{H'}$ are the forces exerted by the elevation cylinder on the vehicle body and header, N; l_h is the distance between the upper plane of the header and point A, mm; ε is the angle between two hinge points of elevation cylinder, (°); η is the included angle between the upper plane of the header and the conveying trough, (°).

图 3 割台系统受力分析简图

Fig.3 Force analysis diagram of header system

进行动力学分析有：

$$J_1 \ddot{\theta} = -F_1 S_1 + F_2 S_2 - T - F_{Ax} l_0 \sin \varphi_0 - F_{Ay} l_0 \cos \varphi_0 \quad (5)$$

$$J_2 \ddot{\beta} = m_2 g l_{hc} \cos(\beta + \alpha_{hc}) - T \quad (6)$$

受力平衡时有:

$$m_1 \ddot{y} = -F_{Ay} + F_H \sin \varphi - m_1 g + F_1 + F_2 \quad (7)$$

$$F_{Ax} = -m_2 g + F_H \cos \varphi \quad (8)$$

$$F_{Ay} = m_2 \ddot{y}_{hc} + F_H \sin \varphi + m_2 g \quad (9)$$

$$F_1 = -k_1 (-S_1 \theta - Z_1 + y) - b_1 (-\dot{S}_1 \dot{\theta} - \dot{Z}_1 + \dot{y}) \quad (10)$$

$$F_2 = -k_2 (S_2 \theta - Z_2 + y) - b_2 (S_2 \dot{\theta} - \dot{Z}_2 + \dot{y}) \quad (11)$$

由此可得割台高度关于 ε 的函数关系为

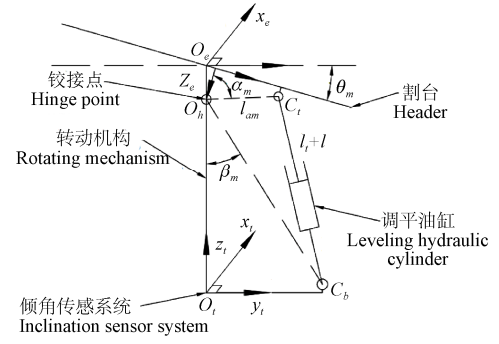
$$h(\varepsilon) = l_{od} - l_g \cdot \cos(\varepsilon + d) \quad (12)$$

式中 l_{od} 为割台于最低点时 l_g 在垂直方向上的投影长度, m。

2.2 割台水平调节

割台通过调平油缸和转动圆盘与输送槽相连, 调平油缸伸缩使割台绕转动圆盘旋转从而带动割台改变角度。割台的运动可分解为土槽试验台车对其的牵引运动以及割台相对于土槽试验台车的转动运动。不考虑牵引运动, 则割台相对于土槽试验台车的运动为平面转动, 几何模型如图 4 所示, x_t 正方向为割台前进方向, 倾角传感平面平行于水平面, 割台向右侧倾斜时倾角为正, x_e 正方向为割台前进速度方向, 调平机构简化为割台和转动铰接点与油缸连接点^[16], 割台相对于土槽试验台车的顺时针方向转动角度为正, 则调平油缸杆伸长量 l 与割台相对于土槽试验台车倾斜角度 θ_m 的关系为

$$\theta_m = 180^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \left(\alpha_m + \beta_m + \arccos \frac{l_a^2 + l_b^2 - (l_t + l)^2}{2l_{ma}l_{mb}} \right) \quad (13)$$



注: $O_e x_e y_e z_e$ 为割台中心坐标系; $O_t x_t y_t z_t$ 为土槽试验台车中心坐标系; 转动机构与割台的铰接点为 O_t ; C_b 为调平油缸底端与转动机构的铰接点; θ_m 为割台相对于土槽试验台车的倾斜角度, ($^\circ$); C_t 为调平油缸顶端与割台的铰接点; α_m 为夹角 $O_e O_t C_t$, ($^\circ$); β_m 为夹角 $O_t O_b C_b$, ($^\circ$); l_a 为 $O_b C_t$ 的长度, mm; l_b 为 $O_t C_b$ 的长度, mm; l_t 为调平油缸杆最短长度, mm; l 为调平油缸杆伸长量, mm。

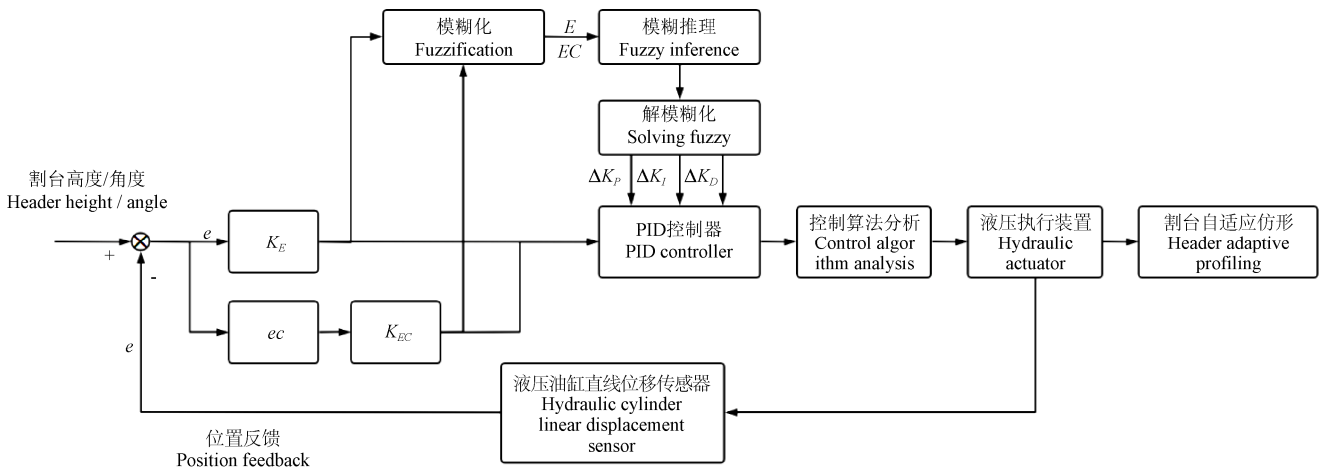
Note: $O_e x_e y_e z_e$ is coordinate system of the center of header; $O_t x_t y_t z_t$ is the coordinate system of the center of soil trough test trolley; O_t is the hinge point between the rotating mechanism and the header; C_b is the hinge point between the bottom end of the leveling cylinder and the rotating mechanism; θ_m is the inclination angle of the header relative to the soil trough test trolley, ($^\circ$); C_t is the hinge point between the top of the leveling cylinder and the header; α_m is the included angle $O_e O_t C_t$, ($^\circ$); β_m is the included angle $O_t O_b C_b$, ($^\circ$); l_a is the length of $O_b C_t$, mm; l_b is the length of $O_t C_b$, mm; l_t is the shortest length of leveling cylinder rod, mm; l is the extension of leveling cylinder rod, mm.

图 4 割台水平调节几何模型简图

Fig.4 Geometric model diagram of header horizontal adjustment

3 模糊 PID 控制

利用模糊规则对 PID 控制器参数进行动态调整, 可实现 PID 参数的自适应整定, 增强系统的动态响应能力^[17-19]。割台自适应仿形系统的模糊 PID 控制器主要包含增量型 PID 控制器和模糊控制器两部分, 其中基于模糊规则的模糊控制器是整个控制器的关键, 模糊控制器经模糊化、模糊推理、去模糊化等过程完成参数的自适应整定, 割台自适应仿形系统模糊 PID 框图如图 5 所示, 液压油缸直线位移传感器将测得的实际液压杆位移 c 作为控制器的实际值, 外部输入割台高度和角度给定值 r , 得到误差 e ($e=r-c$) 以及误差变化率 ec ($ec=de/dt$)。



注: e 为误差, mm; ec 为误差变化率, $ec=de/dt$; K_E 和 K_{EC} 为 e 和 ec 的量化因子; ΔK_P , ΔK_I , ΔK_D 为比例系数 K_P 、积分系数 K_I 、微分系数 K_D 的在线修正值; E 、 EC 为 e 和 ec 的语言变量。

Note: e is the position error, mm; de is the change rate of the position error; K_E and K_{EC} are quantization factors of e and ec ; ΔK_P , ΔK_I , ΔK_D are online modification values of scale coefficient K_P , integral coefficient K_I and differential coefficient K_D ; E and EC are the language variables of e and ec .

图 5 模糊 PID 控制系统框图

Fig.5 Block diagram of fuzzy PID Controller

3.1 模糊控制原理

模糊控制器主要由模糊化模块、模糊推理模块和去模糊化模块组成。模糊化是将实际测量值转变为模糊语言变量值的过程，通常将输出值与设定值的误差及误差变化率作为输入，使实际测量值转变为一个模糊集合，常见的模糊化方法有输入点隶属度取 1 法、分档模糊集法和隶属度值法等。模糊条件语句常采用以下模糊词集表示：NB（Negative Big）、NM（Negative Medium）、NS（Negative Small）、ZO（Zero）、PS（Positive Small）、PM（Positive Medium）、PB（Positive Big）。选择较多的描述词汇可有效提高控制的精细程度，选择较少的词汇会使描述变得粗糙，降低控制的精细程度。

3.2 模糊控制器设计

根据头季稻收获特点，设置割台高度误差 e 、 ec 的可行区间分别为 $[-50\text{ cm}, 50\text{ cm}]$ 和 $[-10\text{ cm/s}, 10\text{ cm/s}]$ ， ΔK_P 的可行区间为 $[-0.5, 0.5]$ ， ΔK_I 的可行区间为 $[-0.15, 0.15]$ ， ΔK_D 的可行区间为 $[-0.2, 0.2]$ ；输入、输出变量的模糊子集量化为 7 级，表示为 $[\text{NB NM NS ZO PS PM PB}]$ ；基本论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；根据 PID 参数调整原则及再生稻收获机割台高实际调节过程和经验^[20-22]，建立模糊控制规则，如表 2 所示。

PID 参数自整定原则^[23-26]如下：

- 1) 当偏差较大时，为尽快消除偏差，提高响应速度，同时为了避免系统响应出现超调，需要增大 K_P ，减小 K_D ， K_I 通常取零。
- 2) 当偏差较小时，为继续减小偏差，并防止超调过大、产生震荡、稳定性变坏，应当增大 K_P 和 K_I ，保证系统的稳态性能。
- 3) 当偏差与偏差变化率同号时，被控量就是朝偏离既定值方向变化。因此当被控量接近定值时，反号的比例作用阻碍积分作用，避免积分超调及随之而来的震荡，有利于控制。
- 4) 偏差变化率的大小表明偏差变化的速率，当偏差变化率较大时，应当减小 K_P ，增大 K_I 。

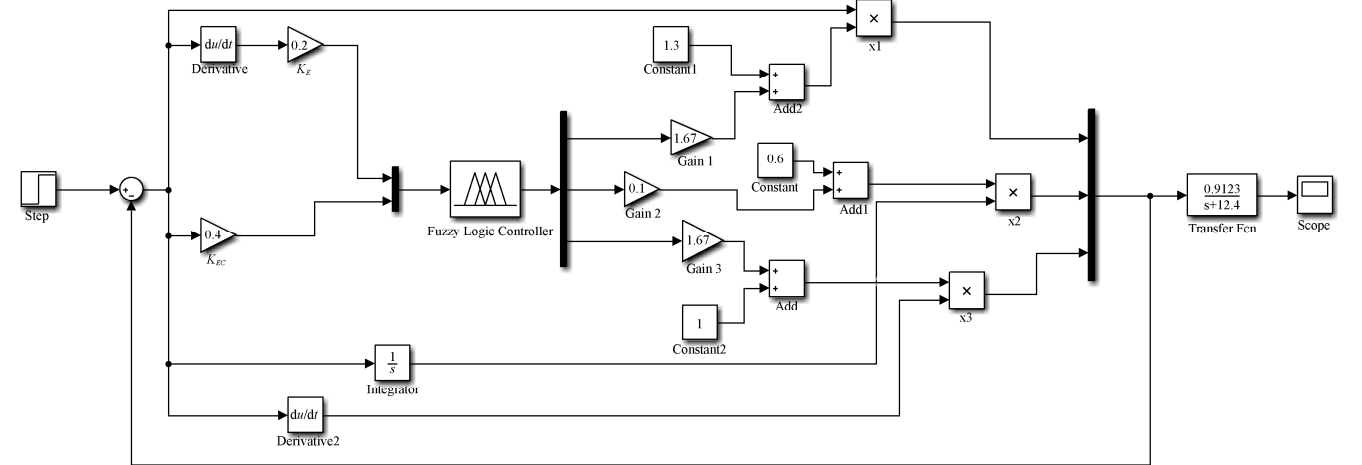
表 2 模糊规则表
Table 2 Fuzzy rule table

参数 Parameters	ec	e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
K_P	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB	NB
K_I	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
K_D	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NM	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3.3 模糊 PID 控制仿真

为验证割台自适应仿形系统控制的有效性，在 Matlab/Simulink 中对割台高度控制进行仿真分析并和传统 PID 进行控制效果对比。步骤如下：首先在 Matlab 中建立两输入三输出的模糊控制器，确定输入、输出量的论域及隶属函数，将制定的模糊控制规则输入到规则编辑器中。

针对建立的系统模型，通过 Matlab 的 Simulink 仿真模块建立模糊 PID 控制仿真模型，以阶跃信号作为系统输入^[27]，将自适应仿形控制系统的各个环节传递函数代入 Simulink 仿真平台，构建如图 6 所示的系统仿真模型，通过仿真分析，对被控对象的 PID 参数进行整定，观测系统响应速度与超调量。



注：Step 为阶跃信号模块；Integrator 为积分模块；Derivative 为微分模块；Fuzzy logic controller 为模糊控制器；Constant 为输入常数模块；Transfer Fcn 为传递函数；Gain 为增益模块；Add 为加法函数；Scope 为示波器。
Note: Step is a step signal module; Integrator is the integration module; Derivative is the differential module; Fuzzy logic controller is the fuzzy controller; Constant is the input constant module; Transfer Fcn is the transfer function; Gain is the gain module; Add is the addition function; Scope is the oscilloscope.

图 6 模糊 PID 仿真模型
Fig.6 Fuzzy PID Simulation Model

系统仿真时间为 10 s, 当割台位置由 0 调节至 350 mm 时, 割台响应特性仿真曲线如图 7 所示。由图可知, 传统 PID 控制在 4.9 s 时达到稳态, 最大超调量为 46 mm; 模糊 PID 控制在 0.9 s 时达到稳态, 与传统 PID 控制相比, 系统上升时间减少 78.9%, 系统达到稳态所需时间减少 81.6%, 系统超调量为 8.2 mm, 系统稳定性更强^[28]。

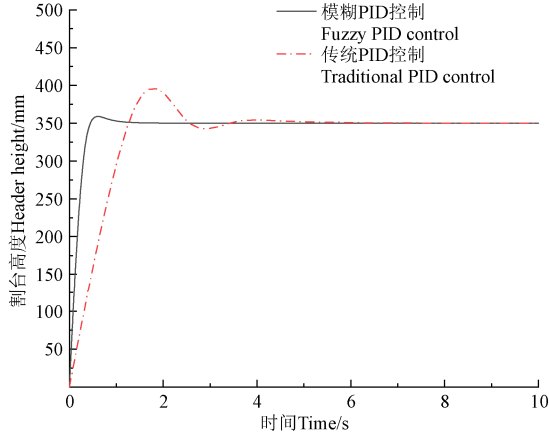


图 7 传统 PID 与模糊 PID 的割台高度控制仿真结果
Fig.7 Simulation results of header height control based on traditional PID and fuzzy PID

设置任意初始角度, 仿真时间为 10 s, 割台调平响应特性仿真曲线如图 8 所示, 由图 8 可知: 采用模糊 PID 控制, 系统超调量小于 1°, 2.8 s 内可达到稳态, 割台向左调平平均响应速度约为 2.38°/s, 割台向右调平平均响应速度约为 3.22°/s, 调节速度可满足使用需求。

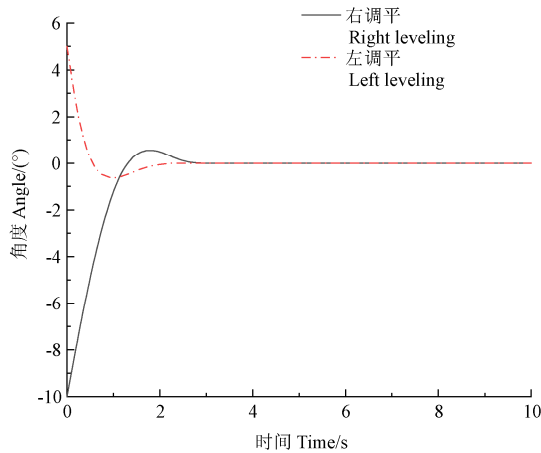


图 8 模糊 PID 割台调平响应图
Fig.8 Fuzzy PID header leveling response diagram

4 台架试验

为验证割台自适应仿形控制系统的实际控制效果, 在华南农业大学增城教学科研基地进行了台架试验, 割台采用四川刚毅科技集团有限公司生产的 4L-1.0 II 型稻麦联合收获机割台, 割台通过螺栓固定于土槽试验台车上, 为模拟田间起伏田条件, 在进行割台仿形模拟试验前对土槽内土壤表面形态进行调整, 设定土槽试验台车行进速度为 1.0 m/s, 如图 9 所示。



1.割台 2.土槽试验台车 3.控制面板
1.Header 2.Soil tank test trolley 3.Control panel

图 9 自适应仿形割台台架试验

Fig.9 Bench test of adaptive profiling header

4.1 试验方案

根据 GB16151.12-1996《农业机械运行安全技术条件 谷物联合收获机》试验方法, 以割台提升和下降速度和调平速度为指标分析自适应仿形割台实际控制效果。分别对传统 PID 控制和模糊 PID 控制的定位精度和响应速度进行测试。通过在 PLC 中加载不同算法来验证传统 PID 和模糊 PID 的控制效果。根据土槽试验台车的运动状态试验分为静态试验与动态试验, 静态试验中不移动土槽试验台车, 只进行割台高度和水平调节精度和响应速度试验; 动态试验中设定土槽试验台车行进速度为 1.0 m/s, 在割台控制面板上设置割台目标高度与角度, 并开启割台自动调整模式, 控制器输出控制信号驱动三位四通比例电磁阀的阀口开度大小使高程油缸、调平油缸动作。

4.2 静态试验

调节精度是评估割台自适应仿形控制系统的重要指标, 调节精度越高, 头季稻留茬高度越准确, 水稻再生季产量与品质也就越好。分别对传统 PID 控制和模糊 PID 控制下的割台调节精度进行测试, 记录每次割台实际高度角度和输入高度角度的差值, 差值越小说明精度越高, 如图 10 所示。



图 10 割台高度测量

Fig.10 Header height measurement

在控制面板中设定割台目标高度, 以直线位移传感器检测的油缸位移伸长量作为系统的反馈信号, 控制算法通过对误差信号及时修正, 实现割台高度的精准定位。采用卷尺测量每次割台的实际高度, 相对误差按下式计算:

$$E_b = \frac{Z_a}{T} \times 100\% \quad (14)$$

$$Z_a = X - T \quad (15)$$

式中 E_b 为高度相对误差, %; T 为设定高度, mm; Z_a 为

误差量, mm; X 为割台实际高度, mm。

采用数显水平角度测量仪对割台水平调节精度进行测定, 两种控制算法分别进行 10 次试验, 计算传统 PID 控制和模糊 PID 控制的最大高度误差, 并计算平均相对误差, 结果如表 3 所示。

表 3 割台调节精度试验结果
Table 3 Test results of header adjustment accuracy

试验号 Test No.	设定高度 Set height/mm	设定角度 Set angle/(°)	传统 PID 控制 Traditional PID control			模糊 PID 控制 Fuzzy PID control		
			实际高度 Actual height/mm	高度误差 Height error/mm	实际角度 Actual angle/(°)	实际高度 Actual height/mm	高度误差 Height error/mm	实际角度 Actual angle/(°)
1	250	0	221	29	-3.21	233	17	2.13
2	300	0	262	38	2.15	286	14	1.43
3	350	0	381	31	3.45	367	17	-2.04
4	400	0	361	39	-3.21	421	21	1.01
5	450	0	408	42	3.57	461	11	2.11
6	250	0	221	29	2.53	239	11	-1.26
7	300	0	336	36	-3.47	316	16	2.33
8	350	0	317	33	4.34	337	13	2.01
9	400	0	452	52	3.53	417	17	-1.45
10	450	0	412	38	2.37	425	25	1.83

由表 3 可知, 传统 PID 控制的最大高度误差为 52 mm, 平均相对误差为 10.67%, 最大角度误差 4.34°, 精度无法满足割台调节要求。模糊 PID 控制的最大高度误差为 25 mm, 平均相对误差为 4.71%, 最大角度误差 2.33°。以上试验表明, 模糊 PID 控制的相对误差均小于传统 PID 控制, 模糊 PID 控制精度均高于传统 PID 控制。

4.3 割台响应速度试验

再生稻收获作业时, 收获机行走速度约为 0.8~1.5 m/s, 若割台响应速度过慢, 则无法满足再生稻留茬需求。根据《农业机械设计手册》可知, 割台升降应灵活、平稳、可靠, 不应有卡阻现象。分别对传统 PID 控制和模糊 PID 控制的割台响应速度进行测试, 两种控制算法各进行 10 组试验, 包括割台提升与割台下降试验, 通过每次割台达到稳定所需时间, 计算割台响应速度, 结果如表 4 所示。

表 4 割台响应速度试验结果

Table 4 Test results of response speed of header controlled

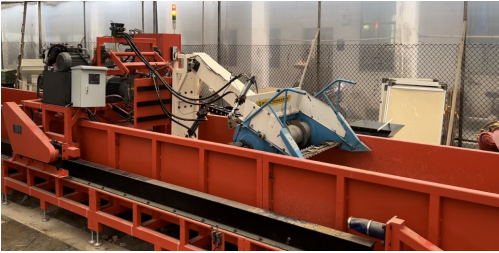
项目 Items	设定高度 Set height/mm	起始高度 Starting height/mm	传统 PID 控制 Traditional PID control		模糊 PID 控制 Fuzzy PID control	
			响应时间 Response time/s	响应速度 Response speed/(m·s ⁻¹)	响应时间 Response time/s	响应速度 Response speed/(m·s ⁻¹)
割台提升 Header lifting	400	0	5.7	0.07	2.01	0.20
	380	0	6.3	0.06	1.73	0.22
	360	0	5.1	0.07	1.64	0.22
	340	0	6.8	0.05	1.48	0.23
	320	0	4.6	0.07	1.53	0.21
割台下降 Header lowering	0	450	5.6	0.08	1.8	0.25
	0	430	6.1	0.07	1.59	0.27
	0	410	5.1	0.08	1.95	0.21
	0	380	4.2	0.09	1.52	0.25
	0	360	4.5	0.08	1.5	0.24

由表 4 可知, 传统 PID 控制割台提升、下降平均响

应速度分别为 0.064 和 0.08 m/s, 根据 GB16151.12-1996《农业机械运行安全技术条件谷物联合收获机》中对割台升降速度的规定: 割台提升速度应不低于 0.2 m/s, 下降速度不低于 0.15 m/s, 传统 PID 控制无法满足使用需求; 采用模糊 PID 控制割台提升时平均响应速度为 0.216 m/s, 割台下降时平均响应速度为 0.244 m/s, 以广东省美香占 2 号为例, 种植株距×行距为 250 mm×300 mm, 若割台运动速度为 1 m/s, 则割台通过株距所需时间约为 0.25 s, 通过株距所用时间乘以割台响应速度即行距内割台最大调节高度为 54 mm, 为保证水稻的正常生长, 稻田需灌水和排水, 以保持土壤湿润, 泥面高度差一般较小, 通常在 0~50 mm 内, 割台提升/下降响应速度可满足实时调节要求。

4.4 系统整体模拟试验

试验于 2022 年 3 月 10 日在华南农业大学增城试验基地进行, 试验土槽长 10 m, 宽 1.2 m, 设定割台目标高度为 450 mm, 目标角度为 0°, 土槽试验台车行走速度为 1 m/s, 数据记录频率为 40 Hz, 如图 11 所示。



a. 侧视图
a. Side view



b. 正视图
b. Front view

图 11 割台动态试验

Fig.11 Header dynamic test

试验采用电脑给 PLC 发送高度和角度调节指令的方式进行, 其中电脑作为主设备进行指令的发送和高度/角度数据的显示, PLC 作为从设备, 在执行电脑命令的同时返回数据。PLC 通过 USB 转 TTL 模块与电脑进行串口通信。PLC 首先判断是否接收到指令, 然后对接收到的指令进行解析, 提取割台目标高度/角度信息, 同时结合液压缸直线位移传感器采集到的数据, 两者综合进行算法分析。当 PLC 接收到电脑指令, 并执行相应动作后, 将割台位置高度数据返回给电脑, 利用串口调试助手显示出来, 试验过程中记录串口助手上显示的割台高度/角度及实际测量的割台高度和角度数据。

试验数据如下: 以角度传感器测量的割台高度数据为参考, 角度传感输出的数据可以实时准确地表示割台

与地面间的高度，运动过程中割台高度始终维持在 450 mm 左右，平均误差 6.75 mm，最大误差 11.63 mm，割台高度控制效果较好；倾角传感器测量输出角度为起伏路面倾斜角度，割台在运动过程中始终保持水平，平均误差为 0.64° ，最大误差 2.35° ，自适应仿形割台控制系统能实现割台高度和水平自动控制，控制效果理想，具有较高控制精度，可实现割台对不平路面的快速响应，数据实时采集结果如图 12 和图 13 所示。

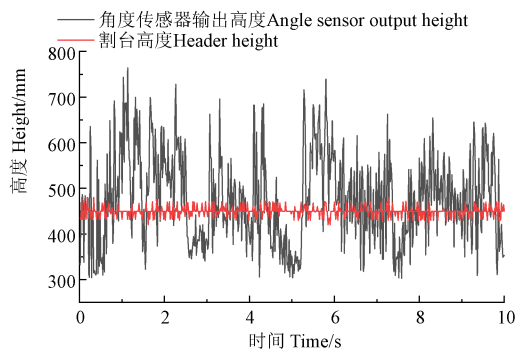


图 12 割台高度调整试验结果

Fig.12 Header height adjustment test results

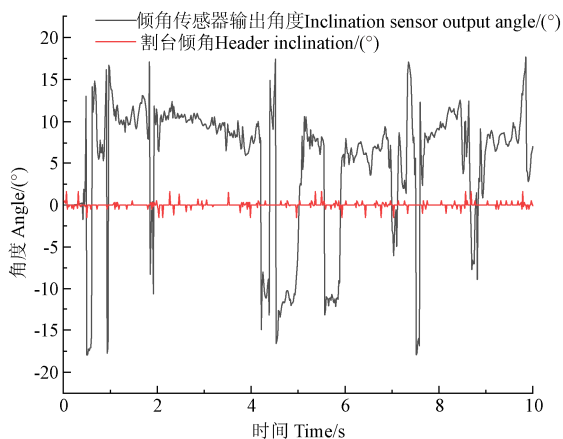


图 13 割台调平试验结果

Fig.13 Header leveling test results

5 结 论

1) 设计了一种自适应仿形割台，包括对割台结构及控制系统的设计，系统根据割台实时高度及倾角，控制电磁换向阀驱动油缸伸缩调节割台的高度与角度，直线位移传感器测量油缸的伸长量，利用割台与再生稻收获机的几何关系，实现了割台的自适应调平控制，使割台始终保持水平。

2) 以土槽试验平台对自适应仿形割台控制系统的性能进行验证，结果表明：传统 PID 控制的割台提升、下降平均响应速度分别为 0.064 和 0.08 m/s；模糊 PID 控制的割台提升/下降平均响应速度分别为 0.216 和 0.244 m/s，模糊 PID 控制相比传统 PID 控制反应速度更快，采用模糊 PID 控制的割台高度调节平均误差 6.75 mm，最大误差 11.63 mm；割台水平调节平均误差为 0.64° ，最大误差 2.35° ，控制效果满足再生稻收获需求，可为南方地区再生稻机械化收获技术与装备研究提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 王飞, 彭少兵. 水稻绿色高产栽培技术研究进展[J]. 生命科学, 2018, 30(10): 1129-1136.
Wang Fei, Peng Shaobing. Research progress in rice green and high-yield management practices[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2018, 30(10): 1129-1136. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717.
Xu Fuxian, Xiong Hong, Zhang Lin, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(9): 1702-1717. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84-92.
Wang Hanhao, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈莉. 不同水稻品种的再生特性及留桩高度对产量和质量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
Chen Li. Regeneration Characteristics and Effects of Stubble Height on Yield and Quality for Different Rice Varieties[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘伟健, 罗锡文, 曾山, 等. 履带式再生稻收获机田间转弯机理研究与性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版): 2022, 56(3): 1-12.
Liu Weijian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Study on field turning mechanism and performance test of crawler ratooning rice harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition): 2022, 56(3): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [6] 曾山, 黄登攀, 杨文武, 等. 三角履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版): 2021, 52(5): 1-9.
Zeng Shan, Huang Dengpan, Yang Wenwu, et al. Design and test of the chassis of triangular crawler reclaiming rice harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition): 2021, 52(5): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [7] 付建伟, 张国忠, 谢干, 等. 双通道喂入式再生稻收获机研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 11-20.
Fu Jianwei, Zhang Guozhong, Xie Gan, et al. Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(3): 11-20. (in Chinese with English abstract)
- [8] Liu W J, Luo X W, Zeng S, et al. The design and test of the chassis of a triangular crawler-type ratooning rice harvester[J]. Agriculture, 2022, 12(6): 890.

- [9] 刘竣. 高地隙轮式再生稻收获机的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
Liu Jun. Design and Test of High Clearance Wheel Type Ratoon Rice Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [10] 肖森. 再生稻头季机收对再生季产量和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
Xiao Sen. Effect of Mechanical Harvesting of Main Crop on the Grain Yield and Quality of Ratoon Crop in Ratooned Rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [11] 丁友强, 刘彦伟, 杨丽, 等. 基于 Android 和 CAN 总线的玉米播种机监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 33-41.
Ding Youqiang, Liu Yanwei, Yang Li, et al. Monitoring system of maize precision planter based on android and CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [12] Cay A, Kocabiyyik H, May S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters part II: Field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 11-17.
- [13] 王华, 杨可可, 刘析辉. 采用自适应死区补偿耦合自适应级联控制的液压执行机构优化[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 15-18.
Wang Hua, Yang Keke, Liu Xihui. Optimization of hydraulic actuator based on adaptive dead time compensation coupled adaptive cascade control[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(1): 15-18. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ding Q, Li Y, Zhang X, et al. Novel low-cost control system for large high-speed corn precision planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(2): 151-158.
- [15] 孙文峰, 刘海洋, 王润涛, 等. 基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 55-64.
Sun Wenfeng, Liu Haiyang, Wang Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55-64. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡炼, 林潮兴, 罗锡文, 等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 15-20.
Hu Lian, Lin Chaoxing, Luo Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 15-20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 冀常鹏, 孙巍. 变论域自适应模糊 PID 控制系统仿真与应用[J]. 测控技术, 2018, 37(10): 119-123.
Ji Changpeng, Sun Wei. Simulation and application of variable universe adaptive fuzzy-PID control system[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(10): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [18] 邵明玺, 辛喆, 江秋博. 拖拉机后悬挂横向位姿调整的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 34-42.
Shao Mingxi, Xin Zhe, Jiang Qiubo. Fuzzy PID control for lateral pose adjustment of tractor rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(21): 34-42.
- [19] 宋淑然, 阮耀灿, 洪添胜, 等. 果园管道喷雾系统药液压力的自整定模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 157-161.
Song Shuran, Ruan Yaocan, Hong Tiansheng, et al. Self-adjustable fuzzy PID control for solution pressure of pipeline spray system in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 157-161. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王卫兵, 李小军, 李飞. 基于模糊 PID 取投苗装置控制系统的设计及试验[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(4): 80-89.
Wang Weibing, Li Xiaojun, Li Fei. Design and experiment of control system for seedling picking-up and transferring device based on fuzzy PID[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(4): 80-89. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱德兰, 阮汉铨, 吴普特, 等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 186-191.
Zhu Delan, Ruan Hancheng, Wu Pute, et al. Strategy on remote fuzzy PID control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 186-191. (in Chinese with English abstract)
- [22] Liu L X, Li Q, Jiang H L. A novel variable structure PID fuzzy controller for torsional vibration in mechanical transmission system[J]. International Journal of Applied Systemic Studies, 2020, 9(1): 85-96.
- [23] Liu M H, Zhou G, Jin C X. An anti-collision four-axis UAV design based on PID fuzzy controller[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392(6): 15-23.
- [24] 董哲, 陆静平. 基于模糊 PID 控制的甘蔗收割机刀盘仿形系统设计及仿真[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(11): 12-16.
Dong Zhe, Lu Jingping. Design and simulation of sugarcane harvester based on fuzzy PID control[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11): 12-16. (in Chinese with English abstract)
- [25] 任玲, 王宁, 曹卫彬, 等. 番茄钵苗整排取苗手定位的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 21-30.
Ren Ling, Wang Ning, Cao Weibin, et al. Fuzzy PID control of manipulator positioning for taking the whole row seedlings of tomato plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(8): 21-30. (in Chinese with English abstract)
- [26] 陈黎卿, 解彬彬, 李兆东, 等. 基于双闭环 PID 模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 33-41.
Chen Liqing, Xie Binbin, Li Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop

- PID fuzzy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张缠保. 循环流化床主蒸汽压力的模糊控制[J]. 太原理工大学学报, 2006(5): 576-578.
- Zhang Chanbao. Research on the fuzzy control algorithm for main steam pressure control of circulated fluidized bed boiler[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006(5): 576-578. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王镇道, 张乐, 彭子舜. 基于 PSO 优化算法的模糊 PID 励磁控制器设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(8): 106-111, 136.
- Wang Zhendao, Zhang Le, Peng Zishun. Design of fuzzy PID excitation control based on PSO optimization algorithm[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(8): 106-111, 136. (in Chinese with English abstract)

Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control

Liu Weijian, Luo Xiwen, Zeng Shan^{*}, Zeng Li

(College of Engineering, South China Agricultural University, Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Ratooning rice has been one of the rice planting modes for a long history in China, dating back to 1700 years ago. The rice bud can grow again, after the rice harvest in the first season. As such, the ratooning rice can be harvested twice at a time. Planting areas of the ratooning rice can be required for the amiable temperature, light and water conditions for the stable and high yield. The rice panicles are collected in the harvesting process, where 1/3 of the plant and root system are left for the tiller growth again. A high stubble height remains during mechanical harvest in the first season of ratooning rice, in order to promote the panicle germination in the regeneration season. There are different depths of soil feet in the field during the operation of ratooning rice harvester, where the header height of the harvester fluctuates up and down. The driver needs to adjust the header height in real time to ensure the stubble height. The uneven stubble height has posed a great threat to the operation efficiency and tiller growth in the regeneration season. The height and level adaptive adjustment function can be a high demand for the header of the ratooning rice harvester for the consistent stubble height of the field. It is necessary to automatically adjust the height and level in the header, according to the ground fluctuation. In this study, an adaptive profiling header was developed to realize the adaptive adjustment of height and level. Firstly, the specific structure was designed to include the header support frame, conveying groove, rotating disc, elevation oil cylinder, leveling oil cylinder, header, and profiling ground wheel. Among them, the header was rotated around the conveying groove at the given angle. Secondly, a simulation model of the control system was established to optimize the fuzzy PID controller using the Matlab/Simulink platform. The performance of the adaptive profiling header was then evaluated to verify the feasibility of the fuzzy PID control, in terms of the overshoot, response time, and stability index. Taking the step signal as the excitation, the better control of fuzzy PID was achieved, where the rise time and the time required to reach the steady state were reduced by 78.9%, and 81.6% than before, indicating almost no overshoot in the system. The simulation results show that the fuzzy PID control system presented a better performance in the response speed and overshoot. Finally, the test platform of the header was built to conduct the header adjustment accuracy test, header response speed test, and overall system simulation. The bench test results show that the average response speed of header lifting, falling, leveling to the left, and leveling to the right were about 0.216 m/s, 0.244 m/s, 2.38°/s and 3.22°/s, respectively, using the fuzzy PID control system. The header height was measured to obtain the data output using the angle sensor system, and then to accurately represent the height between the header and the ground in real time, when the traveling speed of the soil tank trolley was 1 m/s. Consequently, the header height always maintained the set value during the movement, with the average and maximum errors of 6.75 and 11.63 mm, respectively, indicating the better control effect of header height. The output angle of the inclination sensor was measured for the inclination angle of the undulating road in the field. The header remained horizontal during the movement, with the average and maximum errors of 0.64° and 2.35°, respectively. Anyway, the control parameters of PID control were better than that of the traditional. The header was also adjusted quickly under the stable state. There was a relatively small error between the experimental and the simulation, indicating the better fitting degree. Therefore, the fuzzy PID control system can fully meet the adjustment requirements of the header.

Keywords: agricultural machinery; test; ratooning rice; adaptive; profiling header; fuzzy PID control