

# 基于倾角传感器的割台高度自适应调节系统

龙震寰 向阳\* 李亚军 胡正方 刘安稳 代秀峰

(湖南农业大学 机电工程学院,长沙 410128)

**摘要** 针对现有稻麦联合收获机割台高度自动调节系统存在传感器受环境干扰大、安装复杂和成本高等问题,提出一种基于车身倾角和割台倾角的割台高度间接测量方法,建立了相关的数学模型,并在此基础上研制一种基于倾角传感器的割台高度自适应调节系统。通过数学模型验证试验对比计算割台高度与实测割台高度以验证数学模型的准确性,并采用割台高度控制精度试验、系统响应速度试验和模拟田间过障试验验证基于倾角传感器的割台高度自适应调节系统的控制效果。结果表明:1)计算割台高度与实测割台高度变化曲线相关性系数为0.97,验证了数学模型的准确性;2)割台高度控制最大误差为18 mm;3)割台平均上升速度为0.22 m/s,下降速度0.17 m/s;4)在模拟田间过障试验中,相同过障条件下,开启该系统可将割台高度稳定性变异系数由未开启该系统条件下的10.77%降低为2.79%,鲁棒性好。本系统满足联合收获机的作业需求,适用于有小障碍物且较为平整的作业环境,可实现低成本、实时的自适应调节且安装方便。

**关键词** 联合收获机; 倾角传感器; 割台高度; 自适应调节

中图分类号 S225.31

文章编号 1007-4333(2021)11-0200-09

文献标志码 A

## Adaptive adjustment system of header height based on inclination sensor

LONG Zhenhuan, XIANG Yang\*, LI Yajun, HU Zhengfang, LIU Anwen, DAI Xiufeng

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract** Aiming at the problems such as large sensor interference from the environment, complicated installation and high cost existed in current automatic adjustment system for the header height of the rice-wheat combine harvester, an indirect measurement method of header height based on vehicle body inclination and header inclination is proposed. Related mathematical model is established and an adaptive adjustment system of header height based on inclination sensor is developed on this basis. The mathematical model verification test is performed to compare the calculated header height with the actual header height to verify the accuracy of the mathematical model. The header height control accuracy test, the system response speed test and the simulated field crossing test are used to verify the control effect of the adaptive adjustment system of header height based on inclination sensor. The results show that: 1) The correlation coefficient between the calculated header height and the measured header height change curve is 0.97, which verifies the accuracy of the mathematical model. 2) The maximum error of the header height control is 18 mm. 3) The average ascent speed of the header is 0.22 m/s and the average descent speed is 0.17 m/s. 4) In the simulated field crossing test, under the same obstacle conditions, turning on the system can reduce the coefficient of variation of the high stability of the header from 10.77% when the system is not turned on to 2.79%, and the robustness is good. This system meets the operational requirements of the combine harvester, and is suitable for a relatively flat working environment with small obstacles. The system can realize low-cost, real-time adaptive adjustment and is easy installation.

**Keywords** combine harvester; inclination sensor; header height; adaptive adjustment

收稿日期: 2021-02-18

基金项目: 湖南省重点研发计划(2019 NK2151;2018 NK2064)

第一作者: 龙震寰, 硕士研究生, E-mail: 1606936603@qq.com

通讯作者: 向阳, 副教授, 主要从事农业自动化技术及智能农业装备研究, E-mail: xy1608@126.com

收获机在收割过程中的作物损耗很大一部分原因是由于割台高度调整不当导致的<sup>[1-4]</sup>,合理的作物割茬高度有利于提高生产效率,减轻收获机工作部件的负荷<sup>[5-6]</sup>。目前稻麦联合收获机在收割作业中割台高度的调整基本依靠机手根据田间情况实时操作液压控制阀门实现<sup>[2,7]</sup>,由于作业环境和条件复杂多变,对于操作人员的经验和技术要求较高。割台高度的自动调节仍然是稻麦联合收获机研究和使用中亟待解决的一个问题。

收获机的割台离地高度决定割茬高度<sup>[8-10]</sup>,割台高度调整的关键在于如何测得当前实际离地高度。国外大多采用割台仿形机构实现收获机割台高度的自动调节,如约翰迪尔 JD-1075H 联合收获机的触点式割台高度仿形机构<sup>[11]</sup>,通过割台下方安装的仿形板随地面起伏上下摆动获得离地高度变化信息。杨银辉<sup>[12]</sup>设计了基于超声波传感器的割台高度控制系统,通过在割台底部安装多个超声波传感器进行高度检测,采用电液比例阀进行控制。廖勇等<sup>[13]</sup>采用红外传感器测量作物高度,在升降油缸上安装位移传感器间接测量割台高度,并采用电磁换向阀控制割台升降。而上述研究仍然存在一些问题,如割台下方安装仿形板的方法受地形变化影响较大;超声波传感器易受到作物的干扰,同时采用的电液比例阀成本较高;采用油缸位移测量割台高度的方法对地面起伏适应性不好,通过电磁换向阀控制割台升降一方面容易超调,且电磁阀的频繁开关容易造成阀芯损坏<sup>[14]</sup>。倾角传感器在割台高度的控制领域应用较少,而在耕深检测与控制<sup>[15-18]</sup>领域研究较为广泛,如谢斌等<sup>[15]</sup>通过倾角传感器检测提升臂的水平倾角变化,并换算得到实际耕深。吴帆等<sup>[16]</sup>通过倾角传感器测得旋耕机的水平倾角,并驱动调平油缸的伸缩对旋耕机具进行调平控制。

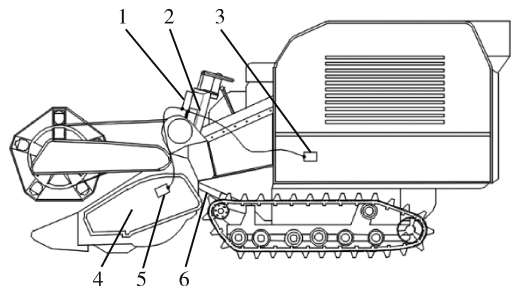
基于以上问题与现状,本研究拟采用俯仰倾角调节<sup>[19-20]</sup>割台高度的方法,基于车身倾角和割台倾角建立系统数学模型,在此基础上设计一种割台高度自适应调节系统,以为稻麦联合收获机割台高度自适应调节系统的设计提供参考。

## 1 系统结构与原理

### 1.1 系统基本结构

本研究基于碧浪 4LZY-1.2 履带自走式联合收获机设计基于倾角传感器的割台高度自适应调节系统,系统主要由单片机控制器、多功能滑阀控制系

统、车身倾角传感器和割台倾角传感器组成(图 1)。本系统通过在车身和割台上分别安装倾角传感器来获得车身和割台的倾角,并将倾角数据发送给单片机控制器,单片机控制器通过建立的数学模型计算得到相应设定割台高度条件下对应的目标割台倾角,并通过多功能滑阀控制系统控制割台举升油缸的进出油实现割台俯仰倾角的调节,从而实现收获机在工作过程中割台高度的自适应调整<sup>[21]</sup>。本系统选择的倾角传感器为 JY61P 六轴姿态传感器,其静态测量平均值误差为 $\pm 0.01^\circ$ 。同时,该传感器自带姿态动力学核心算法,集成动态卡尔曼滤波<sup>[22-24]</sup>融合算法,有利于解决收获机车身抖动导致的数据波动问题,从而提高控制系统的稳定性。倾角传感器属于敏感性元件,由于收获机在田间行驶中存在较小颠簸,因此,当车身倾角变化量 $< 0.75^\circ$ 时,不对割台进行调整;当车身倾角变化量 $\geq 0.75^\circ$ 时,对割台进行调整。



1. 单片机控制器; 2. 多功能滑阀控制系统; 3. 车身倾角传感器; 4. 割台; 5. 割台倾角传感器; 6. 割台举升油缸

1. Singlechip controller; 2. Multifunctional slide valve control system; 3. Body inclination sensor; 4. Header; 5. Header inclination sensor; 6. Header lifting cylinder

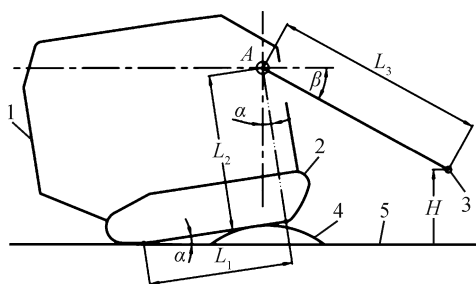
图 1 基于倾角传感器的割台高度自适应调节系统安装示意图

Fig. 1 Installation schematic diagram of the adaptive adjustment system of header height based on inclination sensor

### 1.2 系统数学模型

模拟联合收获机在起伏不平地面上行驶通过障碍物,通过安装在车身与割台的倾角传感器获得车身与割台的倾角,建立收获机车身倾角、割台倾角及割台高度间的几何关系(图 2)。

割台高度调节原理是当联合收获机经过障碍物时车身倾角 $\alpha$ 会发生变化,本研究采用调节割台俯仰倾角 $\beta$ 的方式使割台离地高度始终保持为 $H$ ,因此,根据车身倾角、割台倾角及割台高度间的几何关



1. 车身; 2. 履带轮; 3. 割台; 4. 障碍物; 5. 地面

1. Vehicle body; 2. Track wheel; 3. Header; 4. Obstacle; 5. Ground

A 为割台旋转中心;  $L_1$  为履带轮触地末端到割台旋转中心点 A 与履带轮底面垂线交点的距离;  $L_2$  为割台旋转中心点 A 到履带轮底面的垂直距离;  $L_3$  为割台旋转中心点 A 到割台的距离;  $\alpha$  为车身倾角;  $\beta$  为割台倾角;  $H$  为割台高度。

A is the rotation center of the header;  $L_1$  is the distance from the end of the track wheel to the intersection of the center point of rotation of the header A and the vertical line of the bottom surface of the track wheel;  $L_2$  is the vertical distance from the center of rotation A of the header to the bottom plane of the track wheel;  $L_3$  is the distance from the rotation center point A of the header to the header;  $\alpha$  is the inclination of the vehicle body;  $\beta$  is the inclination of the header;  $H$  is the height of the header.

图2 车身倾角、割台倾角及割台高度间的几何关系

Fig. 2 The geometric relationship between the inclination of the body, the inclination of the header and the height of the header

系可以得到割台高度间接测量方法的数学模型表达式为:

$$H = L_1 \sin \alpha + L_2 \cos \alpha + L_3 \sin \beta \quad (1)$$

式中:  $H$  为割台高度, mm;  $\alpha$  为车身倾角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为割台倾角, ( $^\circ$ );  $L_1$  为履带轮触地末端到割台旋转中心点 A 与履带轮底面垂线交点的距离, mm;  $L_2$  为割台旋转中心点 A 到履带轮底面的垂直距离, mm;  $L_3$  为割台旋转中心点 A 到割台 B 的距离, mm。

本系统通过调整割台俯倾角  $\beta$  保证一定的割茬高度。对式(1)进行变换可得到割台高度自适应调节数学模型表达式为:

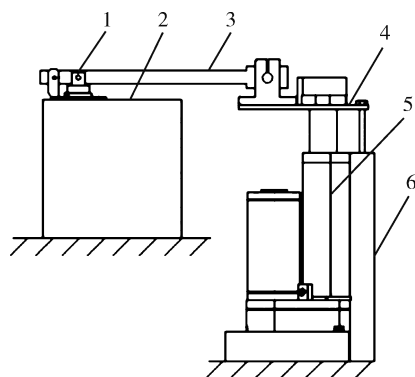
$$\beta = \frac{180}{\pi} \arcsin \left( \frac{H - L_1 \sin \alpha - L_2 \cos \alpha}{L_3} \right) \quad (2)$$

## 2 关键部件原理与性能分析

### 2.1 多功能滑阀控制系统原理

传统的联合收获机割台升降大多通过手动控制换向阀实现。考虑到割台高度控制的精度和经济性,本研究对碧浪 4LZY-1.2 履带自走式联合收获机原多功能滑阀操作部分进行改装,采用直流电动

推杆替代了手动操作杆,设计了多功能滑阀控制系统(图3)。其中,电动推杆底部固定,电动推杆的伸缩运动带动连接架,再通过操作杠杆带动阀芯往复运动,进而控制割台升降液压缸油的进出油方向与流量,实现割台的升降运动及升降速度控制。



1. 阀芯; 2. 多功能滑阀; 3. 操作杠杆; 4. 连接架; 5. 电动推杆; 6. 直线位移传感器

1. Spool; 2. Multifunctional spool valve; 3. Operating lever; 4. Connection frame; 5. Linear actuator; 6. Linear displacement transducer

图3 多功能滑阀控制系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of multifunctional slide valve control system

本系统选用 XTL 小型电动推杆,工作电压为 12 V,有效行程 100 mm,运动速度 48 mm/s。直线位移传感器选用 KTM-100 型号,量程为 100 mm,输出 0~5 V 电压信号,重复精度 0.01 mm。直线位移传感器平行安装于电动推杆侧面随电动推杆与连接架同步运动,同时实时测量电动推杆伸缩长度。为了提高电动推杆伸缩量控制的速度与精度,采用增量式 PID 控制算法对电动推杆的伸缩量进行精确控制,公式<sup>[25]</sup>为:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = \\ &K_P [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + \\ &K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $u(k)$  为系统的输出量;  $K_P$  为比例系数;  $e(k)$  为输入信号的偏差量;  $K_I$  为积分系数;  $K_D$  为微分系数。在已知系统中的电动推杆的参数、割台倾角变化范围、割台的速度相关要求的条件下,通过试验采用临界比例法<sup>[26]</sup>确定电动推杆伸缩量的 PID 控制参数为  $K_P=50$ 、 $K_I=2.2$ 、 $K_D=10.7$ 。

### 2.2 电动推杆控制精度

设位移传感器测量的电动推杆伸缩量为 0 时作为起点,取 9 个目标伸缩量,向单片机发送不同电动

推杆目标伸缩量控制指令,待电动推杆稳定后,记录位移传感器实测数据,每个目标伸缩量重复 5 组试验并取平均值。结果表明(图 4),电动推杆伸缩量控制的平均误差为  $\pm 0.025$  mm,最大误差为  $\pm 0.1$  mm,能够满足系统运行的精度要求。

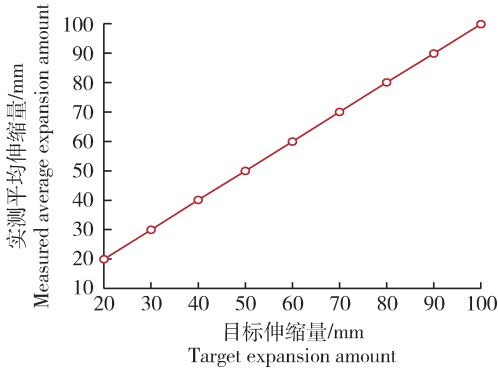
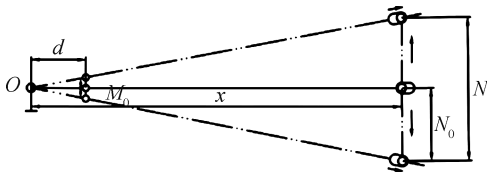


图 4 电动推杆实测伸缩量与目标伸缩量的关系  
Fig. 4 The relationship between the measured expansion amount of the linear actuator and the target expansion amount

### 2.3 阀芯控制原理

电动推杆带动连接架推动操作杠杆使阀芯实现伸缩运动,在电动推杆伸缩量实现精确控制后,通过操作杠杆可进而实现阀芯位置的精确控制,原理见图 5。其中,阀芯和电动推杆带动的连接架安装在操作杠杆上;当电动推杆伸缩量为  $N_0$  时,阀芯处于初始



$O$  为操作杠杆末端固定点;  $M_0$  为阀芯初始位置。

$N$  为阀芯的运动行程对应的电动推杆行程;  $N_0$  为阀芯初始位置对应的电动推杆伸缩量;  $d$  为阀芯初始位置  $M_0$  到操作杠杆末端固定点  $O$  的距离;  $x$  为电动推杆行程  $N$  的中点到操作杠杆末端固定点  $O$  的距离。

$O$  is the fixed point at the end of the operating lever;  
 $M_0$  is the initial position of the spool.

$N$  is the stroke of the linear actuator corresponding to the movement stroke of the spool;  $N_0$  is the expansion amount of the linear actuator corresponding to the initial position of the spool;  $d$  is the distance from the initial position  $M_0$  of the spool to the fixed point  $O$  at the end of the operating lever;  $x$  is the distance from the midpoint of the stroke  $N$  of the linear actuator to the fixed point  $O$  at the end of the operating lever.

图 5 简化阀芯位置控制原理图

Fig. 5 Simplified spool position control principle diagram

位置  $M_0$ ,割台举升油缸油量不变,割台停止调整。

根据阀芯位置控制的原理得到阀芯位置  $M$  与电动推杆的伸缩量  $N$  的关系为:

$$M = \frac{d(N_0 \pm N)}{x} \quad (4)$$

式中:  $d$  为阀芯初始位置  $M_0$  到操作杠杆末端固定点  $O$  的距离;  $x$  为电动推杆行程  $N$  的中点到操作杠杆末端固定点  $O$  的距离。

### 2.4 电动推杆伸缩量与割台升降速度的关系

阀芯位置与割台升降液压缸流量相关,进而直接影响割台升降速度。为明确电动推杆伸缩长度与割台升降速度之间的关系,进行了相关的标定试验:首先将割台位置调整至最高(低)点,然后控制电动推杆运动到指定电动推杆伸缩量位置,记录割台运动到最低(高)点的时间,再结合运动高度范围计算相应的平均下降(上升)速度。

由试验结果(图 6)可见:当电动推杆伸缩量大于 45 mm 时,割台向上运动,当电动推杆伸缩量小于 45 mm 时,割台向下运动,电动推杆伸缩量为 45 mm 时,阀芯处于中心位置,割台停止运动。因此,当割台高度达到目标高度时,阀芯回归中心位置。随着电动推杆向两侧移动,割台升降运动速度增大且与电动推杆的伸缩量之间呈非线性变化。通过人工标定和记录多个电动推杆伸缩量下的割台升降运动速度,再通过数据插值构建相对应关系表,采用软件查表方式实现割台升降运动速度的控制。因此,采用多功能滑阀控制系统可在一定程度上取代电液比例阀,从而较大程度降低硬件成本和设备改装难度。

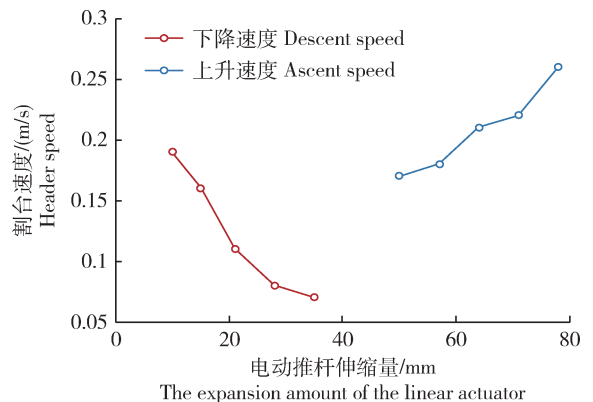


图 6 电动推杆伸缩量与割台升降速度的关系

Fig. 6 The relationship between the expansion amount of the linear actuator and the lifting speed of the header

### 3 割台高度自适应调节原理

割台高度自适应调节原理见图7。由式(2)可知,系统的被控制量是根据设定的割台高度 $H$ 和车身的倾角 $\alpha$ 通过数学模型计算得到的目

标割台倾角 $\beta$ 。单片机控制器根据目标割台倾角与实测割台倾角的偏差,采用增量式PID算法<sup>[25]</sup>计算并控制输出相应的电动推杆伸缩量,进而控制油阀阀芯的位置、实现割台高度的自适应调整。

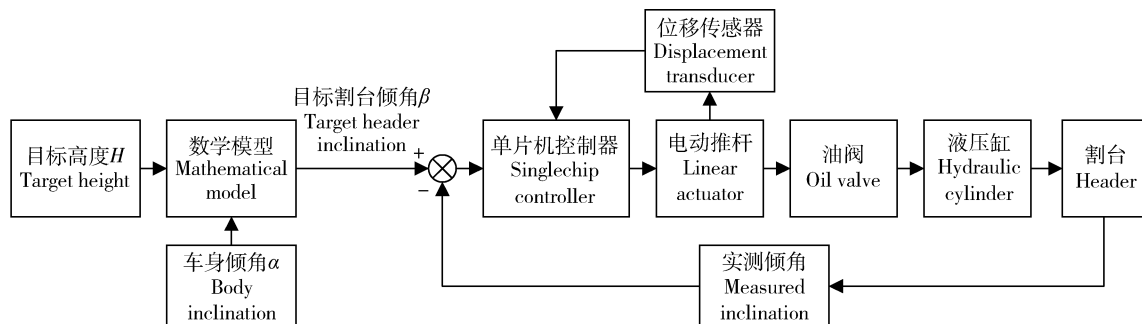


图7 割台高度自适应调节原理

Fig. 7 The principle of self-adjusting height of header

### 4 试验方法

试验于2020年8月在湖南农业大学农机实训中心进行,试验区域地面水平角度为 $0^\circ$ 。以碧浪4LZY-1.2履带自走式联合收获机作为试验对象,通过在割刀底部安装超声波测距传感器测量割台的离地高度,选用的超声波传感器型号是LGCB3000-30GM-D6-V1,工作电压为 $0\sim 5$  V,检测精度为2 mm。

#### 4.1 数学模型验证试验

将联合收获机开至水平水泥地面上,割台高度设定为350 mm,并关闭割台高度自适应调整系统,将长、宽、高为3 000、160、60 mm的木条放置收获机正前方2.5 m处,驾驶收获机以0.45 m/s的速度

驶过木条,开机后实时记录车身倾角数据、割台倾角数据与割台离地高度数据,并采用式(1)计算出对应的割台高度。将计算的割台高度与割台底部的超声波传感器测量的实际割台高度数据进行对比(图8),结果表明,计算割台高度与实测割台高度的最大误差为44.1 mm,相关性系数为0.97,两曲线呈高度相关性,验证了式(1)和式(2)的准确性。

#### 4.2 割台高度控制精度试验

由单片机控制器发送不同目标割台倾角指令,待割台调整并稳定后,记录割台底部超声波传感器测得的实际割台高度数据,并与由相应目标割台倾角计算得到的计算割台高度进行对比,结果见表1。试验结果表明,最大绝对误差为18 mm,最大

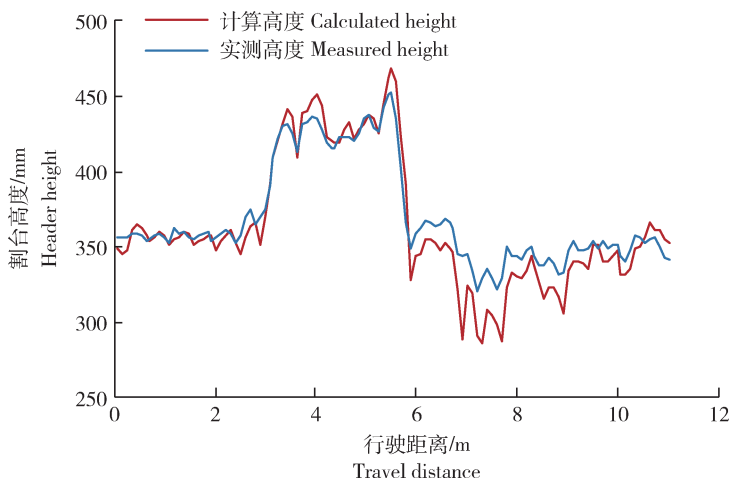


图8 过障中割台计算高度与实测高度

Fig. 8 The calculated height and measured height of the header in the obstacle course

表 1 割台高度控制精度试验结果

Table 1 Control accuracy test result of the header height

试验号 Test number	设定倾角/(°) Set inclination	计算高度/mm Calculated height	实测高度/mm Measured height	绝对误差/mm Absolute error	相对误差/% Relative error
1	-22	763	751	12	1.6
2	-25	663	645	-18	2.7
3	-28	564	570	6	1.0
4	-30	500	500	0	0
5	-33	406	394	-12	3.0
6	-38	257	265	8	3.1
7	-40	200	200	0	0
8	-43	118	125	7	5.9

相对误差为 5.9%，相关性系数为 0.98。

#### 4.3 系统响应速度试验

系统响应速度也是影响割台高度自适应调节系统性能的重要因素，本试验设割台高度 350 mm 为起点，给单片机控制器发送不同的割台倾角变化量指令，并使用单片机控制器记录割台倾角从开始调整到稳定的时间，待割台调整并稳定后，记录超声

波传感器实测的割台离地高度数据，进而计算割台升降运动速度，试验结果表明(表 2)，割台平均上升速度为 0.22 m/s，下降速度为 0.17 m/s，满足 GB 16151.12—1996《农业机械运行安全技术条件》<sup>[27]</sup>对割台提升速度不低于 0.2 m/s，下降速度不低于 0.15 m/s 的标准要求，能够满足联合收获机在工作过程中的割台调节速度要求。

表 2 割台高度自适应调节系统响应速度

Table 2 The response speed of header height adaptive adjustment system

试验号 Test number	割台上升 Header up				割台下降 Header down			
	$\Delta\beta/(^\circ)$	$\Delta H/\text{mm}$	时间/s Time	速度/(m/s) Speed	$\Delta\beta/(^\circ)$	$\Delta H/\text{mm}$	时间/s Time	速度/(m/s) Speed
1	3	87	0.35	0.24	-3	88	0.54	0.16
2	5	136	0.57	0.24	-5	139	0.85	0.16
3	8	279	1.40	0.20	-8	279	1.50	0.19
4	9	313	1.52	0.21	-9	304	1.81	0.17
5	11	335	1.60	0.21	-11	332	2.10	0.16

注： $\Delta\beta$ 为割台目标倾角与初始倾角的差值； $\Delta H$ 为割台目标倾角与初始倾角的差值  $\Delta\beta$  对应的实测高度变化量。

Note:  $\Delta\beta$  is the difference between the target inclination angle of the header and the initial inclination angle;  $\Delta H$  is the measured height change corresponding to the difference  $\Delta\beta$  between the target inclination angle of the header and the initial inclination angle.

#### 4.4 模拟田间过障试验

将联合收获机开至水平地面，设定割台初始离地高度为 350 mm，并将长、宽、高为 3 000、160、60 mm 的木条放置于收获机正前方 2.5 m 处，分别在开启和不开启割台高度自适应控制系统的条件下，从同一起点出发驾驶收获机以 0.45 m/s 的速度

驶过木条，开机后实时记录割台底部超声波传感器测得的割台高度数据，结果见图 9。

在开启割台高度自适应控制系统后，可以较大程度减小障碍起伏引起的割台高度变化。收获机割台高度自适应控制效果可通过稳定性变异系数  $V$  表示<sup>[28]</sup>，该系数反应收获机在收获过程中割台高度

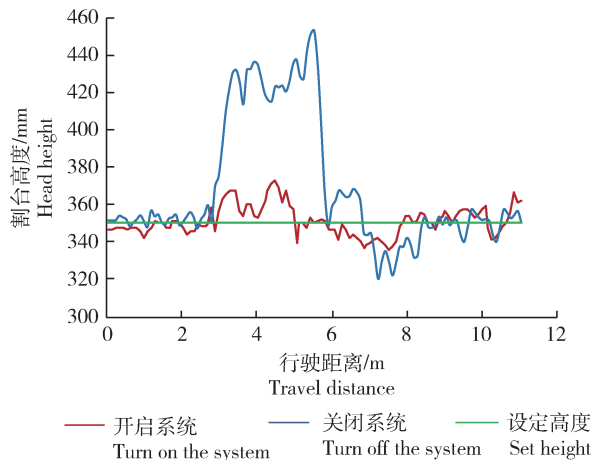


图9 自适应控制系统开启和关闭条件下割台高度变化

Fig. 9 The height of the header changes when the adaptive control system is turned on and off

表3 自适应控制系统开启和关闭条件下割台高度调节效果性能评估

Table 3 Performance evaluation of the adjustment effect of the header under the conditions of turning on and off the adaptive control system

性能参数 Performance parameter	关闭系统 Turn off the system	开启系统 Turn on the system
割台平均高度/mm Average height of header	386.4	351.9
误差峰值/mm Peak error	102.6	22.9
均方根误差/mm Root mean square error	49.9	10.1
稳定性变异系数/% Stability coefficient of variation	10.77	2.79

## 5 结论

本研究提出了一种基于车身倾角和割台倾角的割台高度间接测量方法,并以碧浪 4LZY-1.2 履带自走式联合收获机作为试验对象设计了一套割台高度自适应调节系统,通过试验验证了基于车身倾角和割台倾角的割台高度间接测量方法数学模型的准确性,并对割台高度自适应调节系统的响应速度、控制精度、割台高度调整效果进行了试验分析。主要结论如下:

1) 数学模型验证试验表明,基于该方法的计算割台高度与实测割台高度变化曲线相关性系数为 0.97,验证了基于车身和割台倾角间接测量高度方法的可行性与准确性。

2) 采用电动推杆设计的多功能滑阀控制系统实现了对阀芯位置的精确控制,为后续割台高度调整方式的研究提供了基础,并且较大程度降低了硬件

的变化程度,计算公式为:

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\bar{X}$  为各割台高度测量点的平均值; $S$  为各割台高度测量点的标准差, $S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ ,其中  $x_i$  为测量点的割台高度, $n$  为测量点数。

根据式(5)对联合收获机经过障碍物阶段(行驶距离为 2.5~8.4 m)自适应控制系统开启和关闭条件下的实测割台高度数据进行计算,得到割台的性能参数,并进行对比分析(表 3)。

可见,割台高度自适应控制系统在有小障碍物的作业环境中能够自适应调整割台高度,且有效提高了割台高度的稳定性。

成本和设备改装难度。割台高度控制精度试验表明,割台高度控制最大误差为 18 mm,相对误差最大为 5.9%,相关性系数为 0.98,实现了对割台高度的精确控制;系统响应速度试验表明,割台平均上升速度为 0.22 m/s,下降速度为 0.17 m/s,满足相关国家标准要求。

3) 模拟田间过障试验结果表明,相比未启用本割台高度自适应调节系统,开启本系统条件下最大割台高度差降低了 77.9 mm,平均割台高度稳定性变异系数由 10.77% 降低为 2.79%,提高了割台高度变化的稳定性。

本研究提出的数学模型是以水平地面行驶条件为基准的,适用于有小障碍物且较为平整的作业环境,当作业地面起伏较大或者在斜坡作业时,自适应调节系统会在一定程度上的失准,后续可针对相关作业条件开展进一步研究。另外,本研究提出的多功能滑阀控制系统响应速度相比电液比例阀仍然



较慢,在不考虑经济性的条件下,本系统可换用电液比例阀<sup>[29-31]</sup>进一步提高调节性能。

## 参考文献 References

- [1] Glancey J L. Analysis of header loss from pod stripper combines in green peas[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 68(1): 1-10
- [2] 陈宜松. 稻麦联合收获机割台参数电控及切割器频率分段调控装置[D]. 镇江: 江苏大学, 2020
- Chen Y S. Device for electronically controlling cutting table parameters of rice-wheat combine harvester and frequency segmentation control device of cutter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020 (in Chinese)
- [3] 程念, 胡焉为, 苗玉彬. 收割机割台高度的模糊控制策略研究[J]. 机电一体化, 2018, 24(4): 17-22
- Chen N, Hu Y W, Miao Y B. Research on fuzzy control of harvester header height[J]. *Mechatronics*, 2018, 24(4): 17-22 (in Chinese)
- [4] Hachiya M, Amano T, Yamagata M, Kojima M. Development and utilization of a new mechanized cabbage harvesting system for large fields[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2004, 38(2): 97-103
- [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 X C, Wang J S, Deng Y D. Research status of the height measurement and control system of harvester header[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2019(1): 77-78 (in Chinese)
- [6] 李成浩, 潘跃. 留茬高度对收割机作业效率和成本影响分析[J]. 农业装备技术, 2010, 36(1): 37-38
- Li C H, Pan Y. An analysis of effects of the heights of grain stems on the efficiency and cost of harvesters[J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2010, 36(1): 37-38 (in Chinese)
- [7] 伟利国, 车宇, 汪风珠, 李伟. 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 L G, Che Y, Wang F Z, Li W. Design and experiment of the ground profiling control system of combine header[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(5): 150-154 (in Chinese)
- [8] 胡焉为, 苗玉彬. 叶菜收割机割台高度控制策略[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2018, 44(4): 646-651, 657
- Hu Y W, Miao Y B. Control strategy for leaf vegetable harvester header height[J]. *Journal of Donghua University: Natural Science*, 2018, 44(4): 646-651, 657 (in Chinese)
- [9] 郭备, 王德成, 王光辉, 付作立, 郭震. 小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 123-129, 108
- Wu B, Wang D C, Wang G H, Fu Z L, Guo Z. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 123-129, 108 (in Chinese)
- [10] Ma S, Karkee M, Scharf P A, Zhang Q, Tong J, Yu L. A study on the effects of harvester off-track errors on sugarcane stubble losses[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2017, 33(6): 771-779
- [11] 刘小艳. 图像处理在割台高度控制系统中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009
- Liu X Y. Application of image processing on the altitudinal control system of the platform[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009 (in Chinese)
- [12] 杨银辉. 基于超声波传感器的割台高度自动控制系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007
- Yang Y H. Research of header height automatic controlling system based on ultrasonic sensor[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007 (in Chinese)
- [13] 廖勇, 向阳, 吴明亮, 刘大为, 陈益千, 李亚军. 联合收割机割台高度自适应调节系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2018, 44(3): 326-329
- Liao Y, Xiang Y, Wu M L, Liu D W, Chen Y Q, Li Y J. Design and test of the adaptive height adjustment system for header of the combine-harvester [J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2018, 44(3): 326-329 (in Chinese)
- [14] 章铁成. 基于模糊 PID 的旋耕机组水平控制系统设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017
- Zhang T C. Design of horizontal control system of rotary tiller based on fuzzy PID [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017 (in Chinese)
- [15] 谢斌, 李皓, 朱忠祥, 毛恩荣. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 15-21
- Xie B, Li H, Zhu Z X, Mao E R. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4): 15-21 (in Chinese)
- [16] 吴帆, 蒋蕪, 胡文武, 金生, 陈庚. 基于 AMESim 的旋耕机自动调平系统仿真分析与试验研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(8): 64-74
- Wu F, Jiang P, Hu W W, Jin S, Chen G. Experimental study and simulation analysis of rotary tiller automatic leveling system based on AMESim [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(8): 64-74 (in Chinese)
- [17] 李超军. 基于 PID 控制的电液耕深调节系统研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017
- Li C J. Research on the electro-hydraulic depth adjustment system based on PID control algorithm [D]. Chongqing: Southwest University, 2017 (in Chinese)
- [18] 尹彦鑫, 王成, 孟志军, 陈竞平, 郭树霞, 秦五昌. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49



- (4): 68-74  
 Yin Y X, Wang C, Meng Z J, Chen J P, Guo S X, Qin W C. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49 (4): 68-74 (in Chinese)
- [19] 耿爱军, 张猛, 张姬, 张智龙, 高昂, 郑金龙. 玉米收获机割台高度自动调控系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51 (S2): 118-125  
 Geng A J, Zhang M, Zhang J, Zhang Z L, Gao A, Zheng J L. Design and experiment of automatic control system for corn header height [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51 (S2): 118-125 (in Chinese)
- [20] 庄肖波, 李耀明. 基于鲁棒反馈线性化的联合收获机割台高度控制策略[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 123-130  
 Zhuang X B, Li Y M. Header height control strategy of harvester based on robust feedback linearization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 123-130 (in Chinese)
- [21] 秦云. 联合收割机负荷控制系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012  
 Qin Y. Study on load control system of combined harvester [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012 (in Chinese)
- [22] Aharizad N, Setan H, Lim M. Optimized Kalman filter versus rigorous method in deformation analysis [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2012, 6(3-4): 135-142
- [23] 倪涛, 赵泳嘉, 张红彦, 刘香福, 黄玲涛. 基于 Kinect 动态手势识别的机械臂实时位姿控制系统[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 417-423, 407  
 Ni T, Zhao Y J, Zhang H Y, Liu X F, Huang L T. Real-time mechanical arm position and pose control system by dynamic hand gesture recognition based on kinect device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 417-423, 407 (in Chinese)
- [24] 李亚军, 向阳, 刘研, 林洁雯, 胡正方, 代秀峰. 基于卡尔曼滤波的播种机 GPS 测速数据优化算法研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(1): 148-154  
 Li Y J, Xiang Y, Liu Y, Lin J W, Hu Z F, Dai X F. Research on optimized algorithm of GPS velocity data of seeder based on Kalman filter[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 148-154 (in Chinese)
- [25] 田昊, 云长江, 彭毅. 增量 PID 算法在某风洞压力控制中的应用改进[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(3): 64-66  
 Tian H, Yun C J, Peng Y. Improving application of increment PID adjust method for pressure control in wind tunnel[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(3): 64-66 (in Chinese)
- [26] 李宏超. 发动机电子节气门的控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017  
 Li H C. Study on electronic throttle valve control of engine [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017 (in Chinese)
- [27] GB 16151. 12—1996 农业机械运行安全技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996  
 GB 16151. 12—1996 Technical requirements of operating safety for agricultural machinery[S]. Beijing: China Standard Press, 1996 (in Chinese)
- [28] 何家慧, 康杰, 聂友红, 何培祥, 李云伍, 赵华慧. 微耕机耕深辅助控制系统的设计和试验研究[J]. *农机化研究*, 2016, 38(3): 119-123  
 He J H, Kang J, Nie Y H, He P X, Li Y W, Zhao H H. Design and research on a system of auxiliary depth-control system for micro-tiller[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(3): 119-123 (in Chinese)
- [29] 邵明玺, 辛喆, 江秋博, 张延安, 杜岳峰, 杨后富. 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 M X, Xin Z, Jiang Q B, Zhang Y A, Du Y F, Yang H F. Fuzzy PID control for lateral pose adjustment of tractor rear suspension [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 34-42 (in Chinese)
- [30] Fallahi M, Zareinejad M, Baghestan K, Tivay A, Rezaei S M, Abdullah A. Precise position control of an electro-hydraulic servo system via robust linear approximation [J]. *ISA Transactions*, 2018, 80: 503-512
- [31] Ferrari A, Pizzo P, Rundo M. Modelling and experimental studies on a proportional valve using an innovative dynamic flow-rate measurement in fluid power systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(13): 2404-2418

责任编辑: 刘迎春