

青贮收获机动定刀间隙自动调节装置与控制系统研究

陈美舟¹ 徐广飞¹ 宋志才¹ 魏懋健¹ 刁培松¹ 辛世界²

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000)

摘要: 国产玉米青贮收获机切碎装置的动定刀间隙依赖人工手动调节,过程繁琐且调节精度较低,尚未实现自动化控制,为此,本文提出了先接触后退刀的动定刀间隙调节思路,设计了一种电驱摇臂偏心式动定刀间隙调节装置,在动刀为人字形排布的切碎装置两侧各安装一组,同步调节定刀先“接触”动刀使间隙“清零”,后退定刀,重新调节间隙至设定值;设计了基于振动加速度传感器的控制系统,通过定刀即将接触旋转动刀时的振动加速度信号判断接触状态;搭建了青贮收获机动定刀间隙自动调节试验台,以间隙设定值和滚筒转速为试验因素,以左、右两侧动刀与定刀间隙的均匀性变异系数为评价指标进行双因素重复试验。结果表明,间隙设定值、滚筒转速对间隙调节均匀性均具有显著影响,二者交互作用不显著;左、右两侧间隙同步调节误差仅为0.12% (<1%);滚筒转速为500 r/min时,各间隙设定值下左、右两侧间隙调节精度均最高,间隙设定值为0.2、0.6、1.0 mm时,间隙均匀性变异系数均值分别为6.03%、5.78%、5.36%,符合设计要求(≤10%);试验结果表明滚筒转速越低,间隙设定值越大,间隙调节越均匀。该研究实现了人字形排布的平板式动刀与定刀间隙的精准调节与控制。

关键词: 青贮收获机; 切碎滚筒; 间隙调节; 控制系统

中图分类号: S225.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0188-09 OSID: 

Design and Experiments of Clearance Automatic Adjusting Test Bench and Control System for Silage Harvester

CHEN Meizhou¹ XU Guangfei¹ SONG Zhicai¹ WEI Maojian¹ DIAO Peisong¹ XIN Shijie²

(1. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In silage harvesting process, the clearance between moving and fixed blades has an important influence on the shearing performance of silage harvester cutting device, which directly affects the quality of silage cutting. Although the development of domestic silage harvester markets increases mature, the key technology of clearance automatic adjusting is still lacking for silage harvester. At present, the manual regulation is still relied on, and the complicated regulating process seriously increases labor intensity, and even delays the farming time. In order to improve the mechanization and automation level of clearance adjusting for silage harvester, an electric drive rocker arm eccentric clearance automatic adjustment device was designed. One end of the rocker arm was driven by the motor to rotate with the thread shaft, and the other end was connected with the fixed blade seat. The fixed blade rotated around the rotating shaft under the drive of the rocker arm, so as to realize the adjustment of the appropriate gap. A clearance control system based on vibration acceleration sensor was developed, and the contact state was judged by vibration acceleration signal when the fixed blade and moving blade contacted. For checking the rationality of the clearance automatic adjustment device structure and the accuracy of the control system, indoor tests were carried out at three clearance measured values of 0.2 mm, 0.6 mm and 1.0 mm, and three chopping cylinder rotating speeds of 500 r/min, 800 r/min and 1 100 r/min. Test results showed that the clearance measured value and chopping cylinder rotating speed had a very significant effect on the clearance uniformity between the moving blade and fixed blade by the analysis of

收稿日期: 2021-12-30 修回日期: 2022-01-26

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020615)、国家重点研发计划项目(2016YFD0701302)、山东省现代农业产业体系玉米创新团队机械加工岗位专家项目和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ005)

作者简介: 陈美舟(1989—),女,讲师,博士,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: chenmf2830@163.com

通信作者: 刁培松(1962—),男,教授,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: dps2003@163.com

variance. With the increase of rotating speed of chopping cylinder, the variation coefficient of the clearance uniformity between the moving blade and fixed blade was increased. With the increase of clearance measured value, the variation coefficient of the clearance uniformity was decreased. The precision of left and right clearance synchronization adjusting was high, while the highest error was only 0.12% (<1%). When the rotating speed of chopping cylinder was 500 r/min, and the clearance measured value was 0.2 mm, 0.6 mm and 1.0 mm, respectively, the variation coefficient of the clearance uniformity between the moving blade and fixed blade was 6.03%, 5.78% and 5.36%, respectively. The device and its control system realized precise clearance regulation and control, which provided technical support for the intelligent control of domestic silage harvesting device.

Key words: silage harvester; chopping cylinder; clearance adjusting; control system

0 引言

动刀与定刀间隙直接影响玉米青贮收获机切碎装置对作物的切碎质量^[1-2]。间隙过大,作物易被滞留在间隙内,导致切割作物的摩擦力增加,动刀易出现打滑,使作物被拉断而非切断^[3],造成断面不齐,切段长度增加^[4];间隙过小,安装难度增加,易打刀,影响正常青贮作业,甚至出现安全问题^[5-8],因此,准确调节动定刀间隙至关重要。

欧美发达国家对青贮收获技术与关键装备的研究起步较早,以科乐收、凯斯和纽荷兰为代表,已经实现对动定刀间隙的自动调整与控制,纽荷兰的 FX 系列自走式青贮收获机,装配有 Adjust - O - Matic 自动控制系统,驾驶员通过显示屏设定间隙后,控制系统按照设定指令自动调节间隙,智能化水平高,但价格昂贵,受切碎装置结构与整机配置关系的影响,并不适合国内青贮收获机,因此未见相关推广应用^[9-10]。近年来,我国大力支持青贮产业,国产青贮收获机得以快速发展。国产青贮收获机在磨削动刀或更换动刀后,依赖人工手动调节间隙,调节精度非常低,同时复杂繁琐的操作过程增加了操作者的劳动强度,甚至延误农时^[11-12]。因此,迫切需要研制一种动定刀间隙调节装置并实现精准自动控制,提升国产青贮收获装备的自动化水平。

本文针对人字形排布的平板式动刀与定刀的间隙调节要求,提出先接触后退刀的研究思路,设计一种电驱摇臂偏心式动定刀间隙调节装置,分别安装在切碎装置两侧,定刀在左、右两侧间隙调节摇臂的带动下先“接触”动刀使间隙“清零”,后退定刀重新调节间隙至设定值;设计基于振动加速度传感器的间隙调节控制系统,通过台架试验验证间隙自动调节装置及控制系统对左、右两侧间隙同步调节的精准性。

1 间隙调节原理

为将动定刀间隙准确调节至设定值,提出先接

触后退刀的间隙调节思路。首先使定刀靠近动刀,将动定刀间隙“清零”,再使定刀后退远离动刀,定刀后退距离即为重新调节后的动定刀间隙。需要注意的是,此处“清零”指的是动定刀间隙尽可能趋近于零而非接触,否则会出现打刀现象。

动刀以一定转速旋转时,定刀靠近动刀的过程会感受到逐渐增强的振动。由于定刀硬度较大,不易钻孔,因此,在定刀座左、右端各安装一个振动加速度传感器,用以采集定刀将要“接触”动刀时的振动加速度信号,以此判定间隙是否“清零”。

2 整体结构与工作原理

2.1 整体结构

电驱摇臂偏心式动定刀间隙调节装置,主要由偏心轴承、摇臂、螺纹销、螺纹轴、相贯线型底座、万向联轴器、间隙调节驱动器等组成,如图 1 所示。

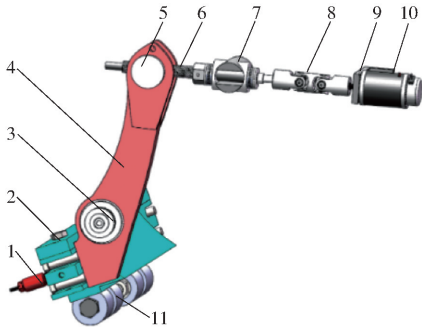


图 1 动定刀间隙自动调节装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of moving and fixed knife clearance automatic adjustment device

1. 振动传感器 2. 定刀及定刀座 3. 偏心轴 4. 摇臂 5. 螺纹销 6. 螺纹轴 7. 相贯线型底座 8. 万向联轴器 9. 支架 10. 间隙调节驱动器 11. 定刀座回转轴

自动调节装置的安装位置如图 2 所示。定刀座与摇臂下端斜面通过螺栓连接,摇臂下端通过偏心轴承与机架固定轴连接,摇臂上端与螺纹销焊接;螺纹轴一端与螺纹销通过螺纹连接,另一端穿过相贯线型底座通过平键与万向联轴器连接;万向联轴器另一端与固定在机架上的间隙调节驱动器连接。

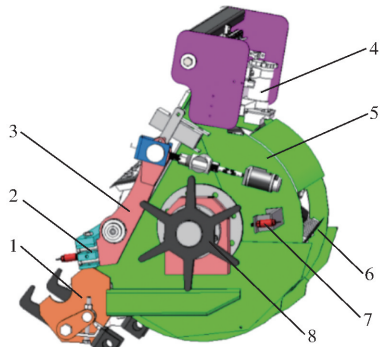


图2 动定刀间隙自动调节装置安装位置及原理图

Fig.2 Installation structure and principle diagram of moving and fixed knife clearance automatic adjustment device

1. 挂接机构 2. 定刀及定刀座 3. 间隙调节装置 4. 自动磨刀装置 5. 切碎装置机架 6. 切碎滚筒 7. 转速传感器 8. 测速齿轮

2.2 工作原理

工作时,间隙调节驱动器通过万向联轴器带动螺纹轴旋转,随着螺纹轴的旋转,摇臂上端随之前后摆动,摇臂下端则绕着偏心轴转动,带动定刀绕定刀回转轴旋转,完成靠近或远离动刀的动作。当螺纹轴随间隙调节驱动器逆时针旋转时,摇臂上端向前移动,摇臂下端带动定刀逆时针转动,完成退定刀动作,退刀原理如图3所示。定刀旋转方向与间隙调节驱动电机旋转方向一致。

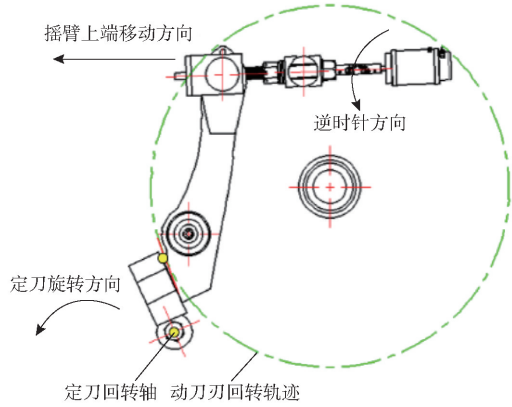


图3 退定刀原理图

Fig.3 Principle of backward fixed blade

3 关键部件设计

3.1 定刀回转轨迹

对磨损的动刀进行磨削后,需重新调节动定刀间隙,因此,定刀的回转轨迹为先“接触”磨削后的动刀,再后退至间隙设定值。定刀回转轨迹如图4所示, O_1 为定刀回转轴心, O_2 为动刀回转轴心,两轴心距离为 L 。 P_1 为定刀刃的初始位置,定刀刃回转半径为 R 。初始位置时,磨损后的动刀刃回转半径为 R_1 ,定刀刃与磨损后的动刀刃间隙为 δ_1 ,磨刀后,动刀

回转半径变为 R_2 。启动间隙自动调节,假设定刀靠近动刀,接触点为 P_2 ,之后定刀刃后退至 P_3 处,此时定刀刃与动刀刃的间隙为 δ_2 ,为动定刀间隙设定值,定刀刃的旋转角度为 θ 。

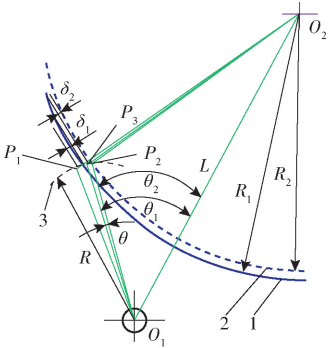


图4 定刀回转轨迹示意图

Fig.4 Schematic of fixed tool rotation track

1. 磨损后动刀回转轨迹 2. 磨削后动刀回转轨迹 3. 定刀旋转轨迹

间隙调节后,定刀刃与动刀刃回转轴间的关系为

$$l_{O_2P_3} = \delta_2 + R_2 \tag{1}$$

由 $\triangle O_1O_2P_2$ 和 $\triangle O_1O_2P_3$ 的几何关系可得定刀刃回转角 θ 与动定刀间隙设定值 δ_2 间的关系为

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \tag{2}$$

其中

$$\cos\theta_2 = \frac{R^2 + L^2 - (R_2 + \delta_2)^2}{2RL} \tag{3}$$

$$\cos\theta_1 = \frac{R^2 + L^2 - R_2^2}{2RL} \tag{4}$$

将式(3)、(4)代入式(2),得动定刀间隙设定值 δ_2 与定刀刃回转角 θ 之间的数学模型为

$$\theta = \arccos \frac{R^2 + L^2 - R_2^2}{2RL} - \arccos \frac{R^2 + L^2 - (R_2 + \delta_2)^2}{2RL} \tag{5}$$

基于课题组设计的自动磨刀装置,每次磨刀的磨削量为0.5 mm,磨削后,设定动定刀间隙为0.3 mm^[13],则动刀刃回转半径 R_2 由300 mm变为299.5 mm。将 $L = 354.5$ mm、 $R = 134$ mm、 $\delta_2 = 0.3$ mm代入式(5)得 $\theta = 0.13^\circ$ 。

3.2 摇臂

摇臂需带动定刀座绕回转轴旋转。青贮作业时,定刀座需要保持固定,避免动定刀间隙发生变化。摇臂的旋转中心即定刀座回转轴,因此摇臂下端与机架的连接需要偏心,摇臂下端通过偏心轴承与机架固定轴连接,如图5a所示。

假设动刀与定刀正好接触时为定刀的初始位置,此时间隙为零,忽略动定刀近似接触而存在的微小间隙。如图5b所示,摇臂带动定刀座绕回转轴心 O_1 旋转,定刀刃自初始位置 P_d 运动到终点位置 P'_d 后,动刀磨损严重,不再需要磨削,而需要及时更换

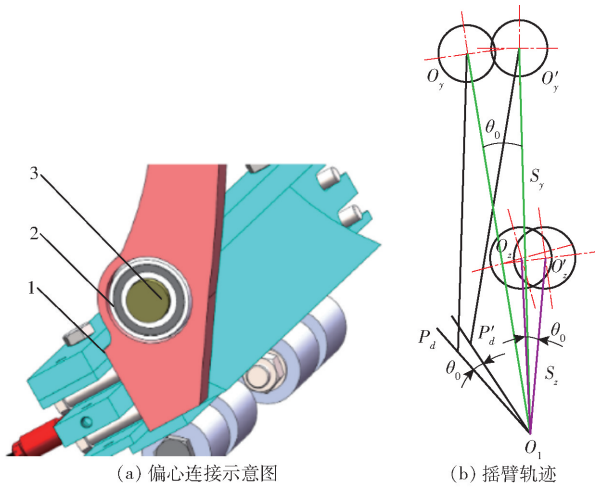


图 5 摇臂

Fig. 5 Rocker arm

1. 摇臂下端倾斜面 2. 偏心轴承 3. 固定轴

动刀,此时,定刀座的最大旋转角度为 θ_0 ,摇臂下端孔中心由 O_z 运动到 O'_z ,摇臂上端螺纹销中心由 O_y 运动到 O'_y ,摇臂下端孔与上端螺纹销的旋转角度均为 θ_0 。定刀座回转轴距摇臂下端孔的距离为 S_z ,距摇臂上端螺纹销中心的距离为 S_y ,则摇臂下端孔的偏心量 $\widehat{O_z O'_z}$ 与旋转角度 θ_0 的关系为

$$l_{\widehat{O_z O'_z}} = \frac{\theta_0 \pi S_z}{180} \quad (6)$$

摇臂上端螺纹销的偏心量 $\widehat{O_y O'_y}$ 与旋转角度 θ_0 的关系为

$$l_{\widehat{O_y O'_y}} = \frac{\theta_0 \pi S_y}{180} \quad (7)$$

根据经验,刀片磨损超过 1 cm 后需要更换,确定间隙 δ_2 的最大值为 10 mm,代入式(5)得定刀座最大旋转角度 θ_0 为 4.4° 。

设计定刀座回转轴与摇臂下端孔的距离 S_z 为 163.5 mm,与摇臂上端螺纹销中心的距离 S_y 为 433.4 mm,分别代入式(6)、(7),确定摇臂下端孔的偏心量为 12.56 mm,摇臂上端螺纹销的偏心量为 33.26 mm。联立式(5)、(7)得,摇臂偏心量 l 与间隙 δ_2 之间的关系为

$$l = 2.4\pi \left(\arccos \frac{R^2 + L^2 - R_2^2}{RL} - \arccos \frac{R^2 + L^2 - (R_2 + \delta_2)^2}{2RL} \right) \quad (8)$$

螺纹轴和螺纹销选用 2.5 mm 的细牙螺纹^[14-15],螺纹轴旋转一圈,螺纹销移动距离为 2.5 mm,据此,螺纹轴旋转角度 θ_y 与摇臂偏心量 l 之间的关系为

$$l = \frac{\theta_y}{360^\circ} \times 2.5 = \frac{1}{144} \theta_y \quad (9)$$

根据式(8)、(9)可以确定有刷直流电机的旋转角度与动定刀间隙之间的关系。

3.3 相贯线型底座

设计的相贯线型底座如图 6 所示,由两对半月型金属块组成,左、右金属块为光孔,确保螺纹轴能旋转并在贯穿相贯线型底座处上下浮动。

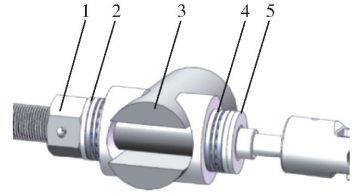


图 6 相贯线型底座结构示意图

Fig. 6 Schematic of intersecting linear base structure

1. 螺母 + 开口销 2, 5. 金属垫片 3. 相贯线型底座 4. 单向推力球轴承

4 控制系统

4.1 控制系统方案

间隙调节时,动刀按设定转速由切碎电机驱动旋转,安装在动刀轴一侧的测速齿轮与转速传感器配合,实时监测动刀转速并反馈给控制器;控制器通过间隙调节驱动器使定刀顺时针旋转“接触”动刀,安装在定刀两端的振动加速度传感器检测到定刀将要接触动刀的振动加速度信号,并将信号传递给控制器,控制器再通过间隙调节驱动器使定刀顺时针旋转,实现后“退刀”,间隙调节驱动有刷直流电机依据动定刀间隙设定值旋转相应角度。控制系统原理如图 7 所示。

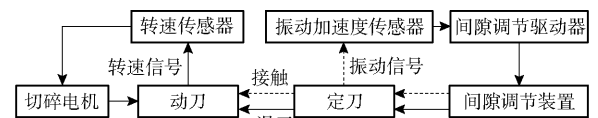


图 7 控制系统原理图

Fig. 7 Control system schematic

4.2 控制系统硬件组成

建立基于振动加速度传感器的间隙调节控制系统,主要由控制器、信号检测模块、切碎电机及变频器和间隙调节驱动器等组成,如图 8 所示。

4.2.1 控制器

控制器选用 STM32F 系列 105 单片机(72 MHz 主频,64 引脚,供电电源 DC 5V, I/O 引脚输入电压 2 ~ 3.6 V),具有 2 个 12 位数模转换器以及通用、高级和基本共 10 个定时器,满足定时、计数脉冲和输出 PWM 信号的要求,14 个通信接口中含 2 个 CAN 接口。

4.2.2 信号检测模块

(1) 振动加速度传感器

选用 OMRON 公司 D7F-S01-10 型压电式振

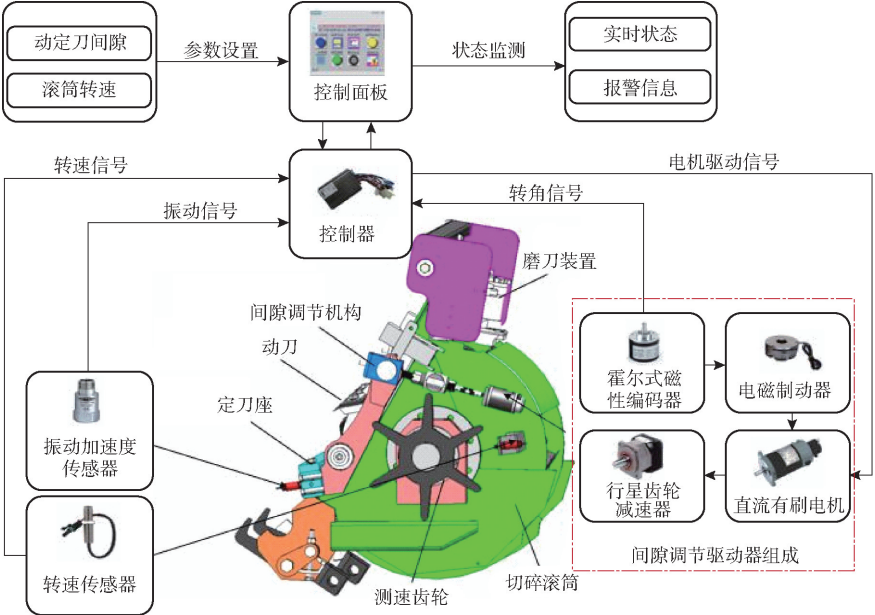


图 8 间隙调节控制系统硬件构成图

Fig. 8 Hardware components of clearance adjustment system

动传感器,适用于机械接触与碰撞的振动环境,灵敏度为 5.1 mV,检测频率为 0.02 ~ 2 kHz (± 3 dB),最大加速度为 784 m/s²,单振幅 2 mm 或 392 m/s²。振动加速度传感器通过螺纹固定在定刀座上,安装位置如图 9 所示。该传感器检测的仅是沿传感器轴向方向的振动,其他由发动机等造成的振动对振动加速度传感器的信号采集影响非常小,完全可忽略。

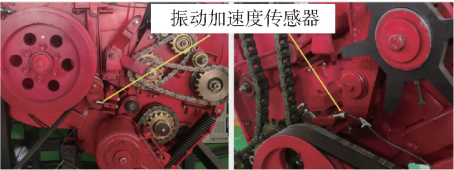


图 9 振动加速度传感器安装位置图

Fig. 9 Vibration acceleration sensor installation

为保证振动加速度信号的可信度,利用专门的传感器标定校准系统,对振动加速度传感器进行标定。

(2)转速传感器

安装在动刀主轴上的测速齿轮与转速传感器配合,测速齿轮随动刀轴旋转时,转速传感器感应到一定幅度的脉冲信号。选用以诺电气自动化公司的 YN18-2N20H 型转速传感器,霍尔式,NPN 输出,安装螺纹 M18,检测距离 2 mm。安装位置如图 10 所示。

4.2.3 切碎电机及变频器

选用六安益升电机有限公司 YE2-20CL1-2 型三相异步电动机作为切碎电机,额定功率 30 kW,额定转速 2 950 r/min,电压 380 V AC。选用上海正控电气有限公司 ZK880-30KWG-3 型变频器控制

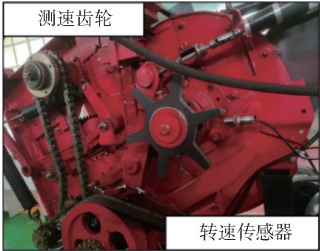


图 10 转速传感器安装图

Fig. 10 Installation of rotating speed sensor

切碎电机,输入电流 62 A,输入电压 380 V $\pm 15\%$,输出电压 0 ~ 380 V,输出频率 0 ~ 600 Hz,PWM 信号驱动电动机调速。

4.2.4 间隙调节驱动器

间隙调节驱动器由霍尔式磁性编码器、电磁制动器、有刷直流电机以及行星齿轮减速器组成。通过对摇臂运动轨迹的理论分析知,螺纹轴的旋转量较小,需要采用减速器降低电机转速;为避免断电时,电机被负载带动反向旋转,采用电磁制动器锁住电机;霍尔式磁性编码器采集电机的转角信号输送至控制器,控制器根据转角信号输出电机驱动信号,控制间隙调节电机动作。

采用温州恒捷电机有限公司 HJX50RNA970i-X1201-BM 型直流有刷行星减速电机,供电电压交流 24 V,额定转速 3 600 r/min,减速后额定输出转速 3.7 r/min;内置减速器为三级行星减速器,减速比为 1/970,输出轴通过万向联轴器(WSP 型可伸缩小型十字轴、型号 WSP1-PB- $\Phi 16-\Phi 16-190/220$)与螺纹轴连接;电磁制动器采用 TJ-D-10 型断电刹车器,断电时磁通迅速消失,电机断电停止旋转;霍尔式磁性编码器为上海角盟自动化设备有限公司

DRT 系列孔型编码器,供电电压交流 24 V,编码器输出 A 相和 B 相两路信号,相位差 90°,据此辨别电机的旋转方向,每转输出 16 个方波脉冲。

4.3 控制系统软件设计

使用 C 语言,基于 Microsoft Visual Studio(VS) 2015 开发平台结合 Structured Query Language(SQL) 2012 数据库,开发上位机控制软件^[16]。软件系统在 VS2015 软件平台开发主体程序,利用 SQL2012 数据库实现振动加速度信号和转速信号的上传和存储,包括系统通讯模块、参数设置模块和作业控制模块。

系统通讯模块使用 RS485 总线通讯,两线制接线方式,实现多点模拟信号或开关信号的传输。参数设置模块实现对设备信息、所需转速和间隙值的设置和存储。作业控制模式分为点动和自动控制模式,点动控制模式下,通过观察左、右两侧的振动加速度参数,点动调节定刀左、右两侧与动刀的间隙,确保定刀两端间隙一致;自动控制模式下,左右两侧的动定刀间隙调节装置同步动作,点动与自动模式界面如图 11 所示。控制系统流程如图 12 所示。

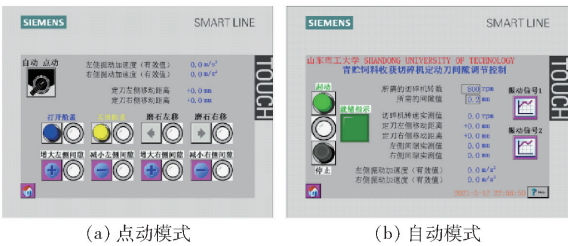


图 11 软件控制界面

Fig. 11 Software control interface

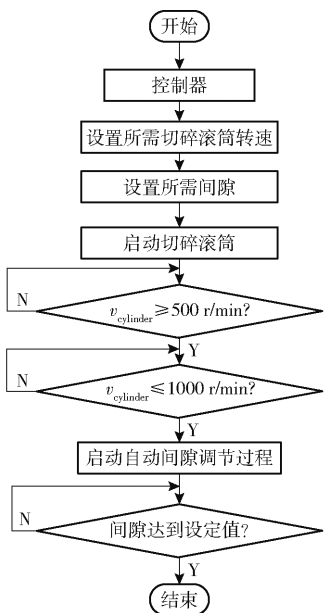


图 12 系统控制流程图

Fig. 12 Control flowchart of system

5 台架试验

5.1 试验设备与仪器

搭建动定刀间隙自动调节试验台,确保在环境因素可控的条件下验证间隙调节装置结构的可靠性及控制系统的准确性,考察各变量对间隙调节过程的影响,为后期间试验提供参考。试验台主要由液压系统、传动系统、切碎滚筒、间隙调节装置、自动磨刀装置、喂入装置、机架以及控制系统等组成,如图 13 所示。

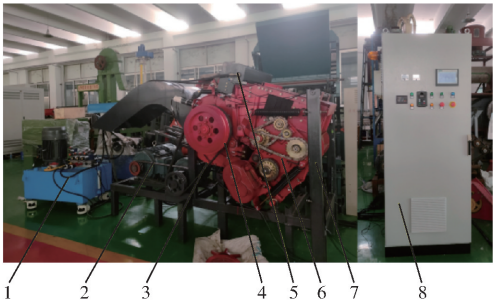


图 13 动定刀间隙自动调节试验台

Fig. 13 Automatic adjustment test bench for moving and fixedblade clearance

1. 液压系统 2. 传动系统 3. 切碎滚筒 4. 间隙调节装置 5. 自动磨刀装置 6. 喂入装置 7. 机架 8. 控制系统

采用世达工具有限公司生产的公英制式塞尺测量动定刀间隙,测量精度 0.02 ~ 1 mm。

5.2 试验方法与指标

5.2.1 试验因素

不同作物对青贮切段长度的要求不同,对动定刀间隙的需求也不一致,通常为 0.2 ~ 1 mm^[17]。本文期望尽可能达到设定的间隙,但受机械结构、传感器精度及灵敏度等影响,间隙设定值与实际间隙存在偏差。为了考察不同动定刀间隙设定值下间隙调节的准确性,分别选取间隙设定值 0.2、0.6、1.0 mm 进行试验。

本文依靠振动加速度传感器采集动定刀即将接触时定刀座的振动信号,而振动加速度受切碎滚筒转速的影响非常大,滚筒转速越高,定刀靠近动刀时定刀座的振动越强烈。为了考察切碎滚筒转速对间隙调节准确性的影响,参考磨刀时滚筒转速范围 500 ~ 1 100 r/min^[18],本文选取 500、800、1 100 r/min 进行试验。

5.2.2 试验内容与指标

选取间隙均匀性变异系数作为试验指标,进行双因素重复试验,测试间隙设定值和滚筒转速对间隙调节性能的影响规律^[19-20]。分别在左、右两侧切碎辊上,随机选取 3 把动刀,标记为左 1、左 2、左 3、右 1、右 2、右 3,每把动刀上选取 3 个点,测量其与定

刀的间隙,3 点分别标记为 A、B、C,如图 14 所示。共进行 9 组试验,每组试验重复 3 次。每组试验结束后,利用塞尺测量各点间隙,求每把动刀与定刀间隙的均值、标准差,最终计算出间隙均匀性变异系数。

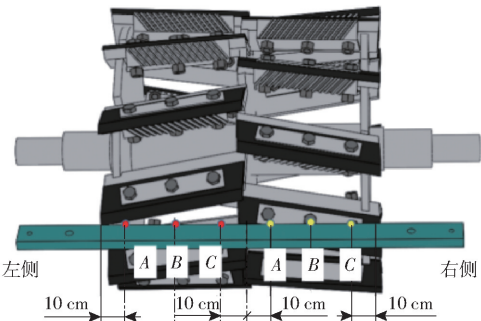


图 14 标记位置
Fig. 14 Tag location

间隙测量方法:测量间隙时停机断电,确保人员安全。测量时用单条或多条尺片组合插入测量点动定刀之间,手动旋转切碎辊,正好合适时,尺片组合为该点的实际间隙。间隙测量方法如图 15 所示。



图 15 右 A 点间隙测量过程

Fig. 15 Clearance measurement process at right point A

5.3 试验结果与分析

试验过程中,间隙自动调节装置运行可靠,未出现打刀、系统停顿或报警等现象,控制系统稳定精确,满足间隙调节的要求。滚筒转速为 500 r/min,间隙设定值为 0.6 mm 时,截取示波器上定刀与动刀“接触”时振动加速度的采样波形图,如图 16 所示。

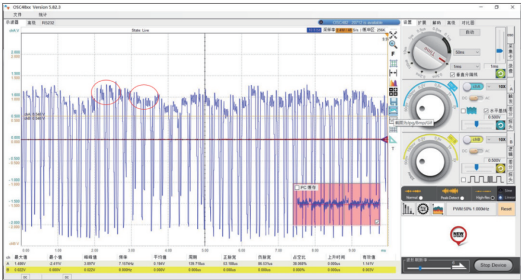


图 16 示波器采样波形图
Fig. 16 Oscilloscope samples waveform

观察发现,振动加速度曲线出现间歇但均匀连续的峰值,应为每把动刀与定刀将要“接触”时分别

采集到的信号。由于定、动刀“接触”时要求间隙驱动电机立即反转退刀,因此采样周期较短。动定刀间隙非常小,且定刀的旋转变化并不明显,但是通过联轴器的转角可以看出间隙调节电机的输出变化,联轴器旋转带动螺杆旋转,摇臂随之带动定刀转动。图 17 为间隙自动调节过程中 13 ~ 16 s 时,间隙调节电机输出转角变化示意图。

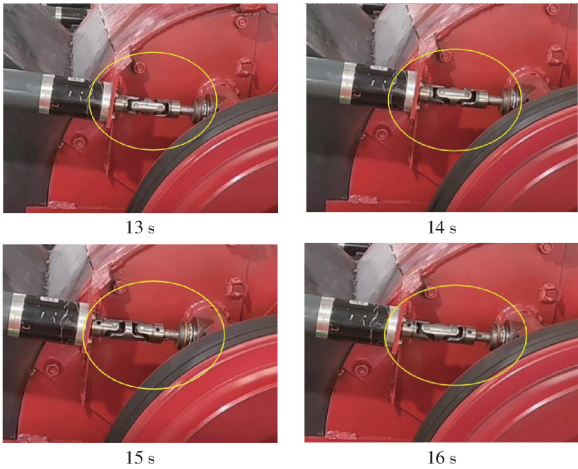


图 17 间隙调节电机输出转角

Fig. 17 Output angle change for clearance adjustment motor

间隙均匀性变异系数试验结果如表 1 所示,不同间隙设定值和滚筒转速下的间隙均匀性变异系数变化曲线如图 18 所示,方差分析如表 2 所示^[21-22]。

表 1 间隙均匀性变异系数试验结果
Tab. 1 Test results of coefficient of variation at different clearances

位置	间隙设定 值 X_1/mm	滚筒转速 $X_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	间隙均匀性变异系数/%			
			第 1 次	第 2 次	第 3 次	均值
左侧	0.2	500	5.79	6.10	6.32	6.07
		800	6.44	6.28	6.57	6.43
		1 100	7.11	7.34	7.45	7.30
	0.6	500	5.77	5.64	5.96	5.79
		800	6.23	6.76	6.49	6.49
		1 100	7.11	7.23	7.18	7.17
	1.0	500	5.42	5.37	5.25	5.35
		800	6.12	6.42	6.38	6.31
		1 100	6.44	6.98	7.01	6.81
右侧	0.2	500	5.81	6.09	6.14	5.98
		800	6.23	6.36	6.52	6.37
		1 100	6.98	7.23	7.39	7.20
	0.6	500	5.64	5.72	5.88	5.75
		800	6.18	6.68	6.41	6.42
		1 100	7.08	6.97	7.22	7.09
	1.0	500	5.38	5.52	5.18	5.36
		800	6.09	6.23	6.34	6.22
		1 100	6.39	6.85	6.94	6.73

左、右侧间隙调节结果显示,随着间隙设定值的增加,间隙均匀性变异系数呈减小趋势。间隙设定

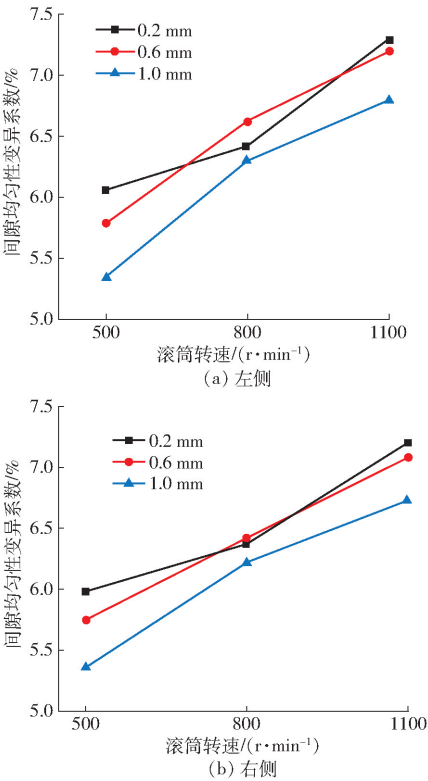


图 18 不同间隙设定值和滚筒转速时间隙均匀性变异系数变化曲线

Fig. 18 Variation curves of variation coefficient between clearance measured value and rotating speed of chopping cylinder

表 2 方差分析

Tab. 2 Analysis of variance

	因素来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
左侧	X_1	0.964	2	0.482	12.083	<0.01
	X_2	8.310	2	4.155	104.181	<0.01
	X_1X_2	0.277	4	0.069	1.734	0.186
	误差	0.718	18	0.04		
	总和	1 120.801	27			
右侧	X_1	0.881	2	0.441	12.366	<0.01
	X_2	7.594	2	3.797	105.58	<0.01
	X_1X_2	0.201	4	0.05	1.412	0.27
	误差	0.641	18	0.036		
	总和	1 098.025	27			

值为 0.2、0.6、1.0 mm 时,左侧平均间隙均匀性变异系数分别为 6.65%、6.52%、6.21%;右侧平均间隙均匀性变异系数分别为 6.58%、6.46%、6.15%。随着间隙设定值的增加,间隙调节愈加精确。间隙设定值较小时,受偏心摇臂及螺纹轴的机械加工精度影响,调节相对不准确;随着滚筒转速的增加,间隙均匀性变异系数呈增加趋势,滚筒转速为 500 r/min 时,左侧平均间隙均匀性变异系数分别为 5.74%、6.46%、7.11%,右侧平均间隙均匀性变异系数分别为 5.7%、6.34%、7.01%。滚筒转速较高时,定刀

座所受振动频率增加,影响传感器采集信号的灵敏度,定刀距离动刀较远时即被误认为已经“接触”,造成间隙调节准确性降低。

由图 18 可知,左、右两侧间隙调节受间隙设定值和滚筒转速的影响趋势相同,平均间隙均匀性变异系数随间隙设定值的增加而减小,随滚筒转速的增加而增加。随着间隙设定值增加,左、右两侧平均间隙均匀性变异系数差别逐渐减小,0.2 mm 时相差 0.07%,0.6、1.0 mm 时均相差 0.06%;随滚筒转速增加,左、右两侧平均间隙均匀性变异系数差别也随之增加,500 r/min 时相差 0.04%,800、1 100 r/min 时,差异分别为 0.12% 和 0.11%。

综上,左、右两侧间隙调节装置同步调节的误差非常小,最高误差仅为 0.12% (<1%),可见控制系统调节准确性高,能够满足高精度间隙调节的设计要求。

通过方差分析可知(表 2),左、右两侧间隙调节时,间隙设定值和滚筒转速对间隙均匀性变异系数均有非常显著的影响($P < 0.01$),而间隙设定值与滚筒转速之间的交互作用影响不显著。不同作物的硬度及青贮切碎长度要求不同,所需动定刀间隙值也不同,但滚筒转速为 500 r/min 时,各间隙设定值下调节最为准确。当滚筒转速为 500 r/min,间隙设定值为 0.2、0.6、1.0 mm 时,左、右两侧间隙均匀性变异系数均值分别为 6.03%、5.78%、5.36%,定刀与各动刀间隙均匀一致性较好。

5.4 讨论

受传感器质量、偏心摇臂式间隙调节机构机械加工精度以及控制系统信号采集、传输与响应速度的影响,左、右两侧间隙调节存在一定的误差,但是较传统人工间隙调节的准确度上明显提高,极大缩减了人工调节间隙的繁琐步骤,提高了间隙调节的精度和效率。经验证,通过人工补偿误差的办法一定程度上可以减小系统误差。

试验台以青贮收获机原装切碎装置为基础,台架试验操作与田间作业过程要求一致,因此,台架试验能够模拟大田试验,验证在环境变量可控条件下间隙自动调节技术的可行性。但实际青贮作业后,动定刀状态发生了改变,间隙自动调节的精度及控制系统的准确性需进一步试验。

6 结论

(1)提出了先接触后退刀的间隙调节思路,基于青贮收获机人字形排布的平板式动刀切碎装置,设计了电驱摇臂偏心式动定刀间隙调节装置,间隙调节摇臂在电机驱动下进行偏心摇摆,控制器根据振动加速度信号驱动间隙调节电机,带动定刀靠近

或远离动刀,实现间隙的重新调节。

(2)搭建了动定刀间隙自动调节试验台,以间隙设定值、滚筒转速为试验因素进行台架试验。试验表明,间隙自动调节装置运行可靠、无干涉;左、右两侧间隙同步调节精度高,最高误差仅为0.12% ($<1\%$),控制系统运行稳定,能够满足动定刀间隙高精度自动调节的要求。间隙设定值、滚筒转速对间隙均匀性具有非常显著的影响,二者之间交互作

用不显著。

(3)滚筒转速为500 r/min时,各间隙设定值下间隙调节精度均最高;在此转速下,间隙设定值为0.2、0.6、1.0 mm时,间隙均匀性变异系数均值分别为6.03%、5.78%、5.36%,符合设计要求($\leq 10\%$)。试验表明,间隙设定值越大,滚筒转速越低,间隙调节越准确均匀。该研究实现了人字形排布的平板式动刀与定刀间隙的自动精准调节与控制。

参 考 文 献

- [1] 陈志,郝付平,王锋德,等.中国玉米收获技术与装备发展研究[J].农业机械学报,2012,43(12):44-50.
CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 44-50. (in Chinese)
- [2] 牟孝栋,姜慧新,孙延成,等.青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):218-226.
MOU Xiaodong, JIANG Huixin, SUN Yancheng, et al. Simulation optimization and experiment of disc-type grain crushing device of silage corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 218-226. (in Chinese)
- [3] 薛钊,付君,陈志,等.青饲玉米收获机械切碎装置参数优化试验[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(2):356-365.
XUE Zhao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization experiment on parameters of chopping device of forage maize harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(2): 356-365. (in Chinese)
- [4] 薛飞.自走式青饲料收获机关键部件设计及仿真[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2017.
XUE Fei. Design and simulation of key components of self-walking green fodder harvester[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [5] 吴昆,宋月鹏.农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J].农业机械学报,2022,53(6):1-20.
WU Kun, SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1-20. (in Chinese)
- [6] 周春燕.青贮螺旋切碎滚筒关键零件的有限元分析及优化[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
ZHOU Chunyan. Finite element analysis and optimal design of important parts of cylinder-type cornstalk shredder[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [7] 陈菊芬.青饲切碎机刀片磨损规律及使用寿命研究[D].北京:中国农业大学,2004.
CHEN Jufen. A study on wear law and service life of moving blade of succulence cutter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [8] 尤泳,王红达,郇晓龙,等.王草收获机滚筒破碎装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(4):134-142.
YOU Yong, WANG Hongda, HUAN Xiaolong, et al. Design and experiment of roller crushing device of King grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 134-142. (in Chinese)
- [9] 林贵忠,匡恩远.FX系列自走式青贮收获机的主要技术特点[J].现代化农业,1998(8):31-34.
- [10] 魏天路,杜爽,葛宜元,等.青饲料收获机切碎辊刀具的优化设计及试验[J].中国农业科技导报,2020,22(12):82-92.
WEI Tianlu, DU Shuang, GE Yiyuan, et al. Optimum design and experiment of cutter of chopping roller of green forage harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(12): 82-92. (in Chinese)
- [11] 吴良军,杨洲,段洁利,等.龙眼树枝修剪机具刀片切割力的影响因素试验[J].农业工程学报,2012,28(24):8-14.
WU Liangjun, YANG Zhou, DUAN Jiel, et al. Experiment on influencing factors of cutting force of blades of trim tool for longan branch[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 8-14. (in Chinese)
- [12] 杨颖,尚琴琴,王英博,等.4QX-12型玉米青贮收获机的切碎性能分析与试验[J].农机化研究,2017,39(3):42-46.
YANG Ying, SHANG Qinqin, WANG Yingbo, et al. Chopped performance analysis and test on 4QX-12 silage maize harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 42-46. (in Chinese)
- [13] SHINNER K J. Engineering principles of silage harvesting equipment[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [14] 吴宗泽.机械设计师手册[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [15] 杨运强.传感器与测试技术[M].北京:冶金工业出版社,2016.
- [16] 张真,迟瑞娟,杜岳峰,等.基于CAN总线的玉米收获智能控制系统研究[J].农业机械学报,2018,49(增刊):275-281.
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 275-281. (in Chinese)
- [17] 宋月鹏,王征,吴昆,等.金属陶瓷自动磨刀割刀对苜蓿低损伤切割机理分析[J].农业机械学报,2020,51(10):421-426,309.
SONG Yuepeng, WANG Zheng, WU Kun, et al. Fabrication of self-sharpening blades with metaloceramics materials and low-damaged cutting mechanism of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 421-426, 309. (in Chinese)
- [18] 顾沈明.C语言程序设计[M].3版.北京:清华大学出版社,2016.
- [19] GAN H, MATHANKER S, MOMIN M A, et al. Effects of three cutting blade designs on energy consumption during mowing-conditioning of Miscanthus Giganteus[J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 109(2): 166-177.
- [20] 李海同,万星宇,徐阳,等.油菜收获机割台螺旋输送机间隙自适应调节机构研究[J].农业机械学报,2017,48(11):115-122.
LI Haitong, WAN Xingyu, XU Yang, et al. Clearance adaptive adjusting mechanism for header screw conveyor of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 115-122. (in Chinese)
- [21] 肖信.Origin 8.0 实用教程:科技作图与数据分析[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [22] 郑宁,胡雄,薛晓光.SPSS 21 统计分析与应用从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2015.