

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.017

小麦秸秆往复切割试验台设计与应用*

侯加林 蒋 韬 吴彦强 刘 林 吕钊钦 杨启勇

(山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

摘要:为研究小麦秸秆的切割性能,设计了可在实验室模拟田间小麦收获时秸秆切割过程的往复切割试验台。试验台由机体架、割台、推动架、曲柄连杆、交流电机等组成,该试验台在前进速度 $0 \sim 1.8 \text{ m/s}$ 、切割速度 $0 \sim 1.6 \text{ m/s}$ 、切割倾角 $0 \sim 30^\circ$ 、刀片间隙 $0.8 \sim 3 \text{ mm}$ 范围内可调。对切割试验台的工作性能和小麦秸秆切割性能进行了试验研究,试验采用四因素四水平正交试验法和单因素试验法。试验结果表明:通过极差 R 判定影响切割性能的主次因子依次为切割位置、切割速度、刀片间隙和切割器倾角,在给定因素水平上的较优组合是:切割速度为 1.4 m/s ,切割器倾角为 20° ,刀片间隙为 1 mm ,切割位置为第3节。

关键词:小麦秸秆 切割 往复式 试验台

中图分类号: S225.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0101-06

引言

作物秸秆切割是联合收获机在田间作业的重要工序,切割性能直接影响收割效率和田间籽粒损失率,秸秆的切割试验参数也是衡量切割性能的重要依据^[1]。采用收割机械在田间直接进行作业获取切割参数时,存在收获季节性强、田间情况差别大、试验可重复性差和获取数据精度低等局限性问题^[2]。

为获得高精度的作物秸秆切割试验参数,一些学者研制了多种类型的作物秸秆切割试验装置^[3-7]。李耀明等设计了摆切式茎秆切割试验台,对玉米茎秆进行切割试验^[8-9];宋占华等设计了曲柄连杆式棉秆切割试验台,对棉秆进行切割试验,并分析切割速度和切割器倾角对切割力和切割功耗的影响^[10];刘庆庭等设计了单刀切割试验台,采用甘蔗茎秆作为试验材料,并对剪切时滑切角、刀盘倾角和切割速度等因素进行分析^[11-12]。以上秸秆切割试验装置,能够完成秸秆切割试验,并获取准确的切割试验参数,但不能模拟田间秸秆收获时切割的过程,并且试验材料通常选用粗大秸秆,对小麦秸秆的切割试验研究较少。针对上述问题,本文设计小麦秸秆往复切割试验台,以模拟秸秆在田间收获时的实际切割过程。

1 试验台总体结构

1.1 切割试验台结构

根据农业收获机械在田间运行时对秸秆的切割形式要求,设计制作了小麦秸秆往复切割试验台。切割试验台由机械系统和电气系统组成,原理如图1所示。控制系统以STM32单片机为核心,负责数据的采集并将处理后的数据存入SD卡中,执行机构由伺服电机和交流电机组成,人机交互界面进行试验台运行状态的实时显示和指令读取。

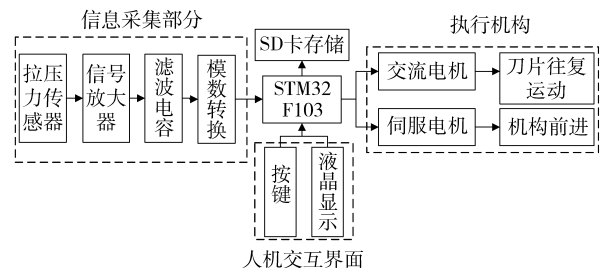


图1 切割试验台系统原理图

Fig.1 System diagram of cutting test bench

1.2 切割试验台工作原理

该试验台可模拟田间小麦秸秆收获时的切割过程和方式,并能采集切割力大小。该试验台可调节切割速度、动刀片与定刀片间隙、切割器倾角等。将试验用小麦秸秆固定在秸秆夹上,调节秸秆与割刀

收稿日期:2014-06-10 修回日期:2014-08-20

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA043601)、国家小麦生产产业技术体系资助项目和山东省小麦生产产业技术体系资助项目

作者简介:侯加林,教授,主要从事农业装备、农业信息技术研究,E-mail:jlhou@sdau.edu.cn

通讯作者:杨启勇,教授,主要从事小麦收获机械研究,E-mail:xqy@sdau.edu.cn

之间的夹角,然后调整刀片之间的间隙,打开控制系统设定交流电机转速,启动电机,调节伺服电机转速,设定完毕后打开电源,系统运行后,按数据采集按键进行数据采集。试验结束后电机停止工作,将采集的试验数据导出,以供数据查询和分析使用。

1.3 机械系统设计

机械系统主要由机体架、割台、秸秆夹、齿轮齿条、电机等组成,结构如图2所示。割台通过滚动轴承在底座上前后运动,小麦秸秆通过秸秆夹安装在底座内并调整与割刀的相对角度,使小麦秸秆依次排列在底座上。切割试验台运行时伺服电机驱动齿条向前运行,推动割台运动;交流电机驱动曲柄连杆中的滑块做往复运动,从而带动刀片切割底座上的小麦秸秆。切割试验台的主要技术参数如表1所示。

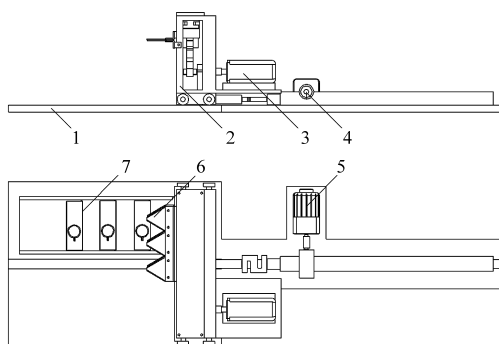


图2 切割试验台机械系统简图

Fig.2 Mechanical schematic of cutting test bench

- 1.底座 2.割台 3.交流电机 4.齿轮齿条 5.伺服电机
6.刀片 7.秸秆夹

表1 切割试验台主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of cutting test bench

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 500×500×290
切割速度/(m·s ⁻¹)	0~1.6
割台移动速度/(m·s ⁻¹)	0~1.8
交流电机功率/kW	1.5
伺服电机功率/W	850
传感器量程/kg	250
最大采样频率/kHz	100
最大采样数据通道数/个	8

1.3.1 切割器设计

切割器是切割试验台的重要工作部件之一,主要完成作物秸秆的切割,结构如图3所示,主要由机体架、定/动刀片、S型拉压力传感器、交流电机、滚动轴承等组成。割刀由3组刀片构成,刀片固定在刀片座上,刀片座采用螺栓与机体架连接,可调节动刀片与定刀片的间隙;曲柄连杆机构中的连杆装有拉压力传感器,在切割试验台运行时可将切割作物

茎秆的切割力实时传至控制系统;机体架下部安装4个滚动轴承,在伺服电机推动下使割台平稳前后运动。

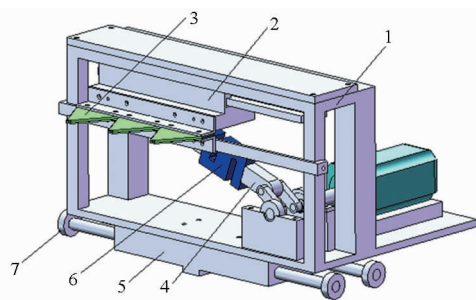


图3 切割器结构简图

Fig.3 Structure of cutting machine

- 1.机体架 2.滑块 3.刀片 4.曲柄连杆 5.导向块 6.拉压力传感器 7.滚动轴承

1.3.2 前进系统设计

前进系统用以推动割台向前运动,主要由伺服电机和齿轮齿条组成。驱动电机选用伺服电机,可通过调速器实现电机转速调节从而控制割台前进速度,当割台触碰到底座上的行程开关时,伺服电机停止转动,割台停止前进,调节电机正反转方向可使割台回到起始位置,前进系统结构如图4所示。

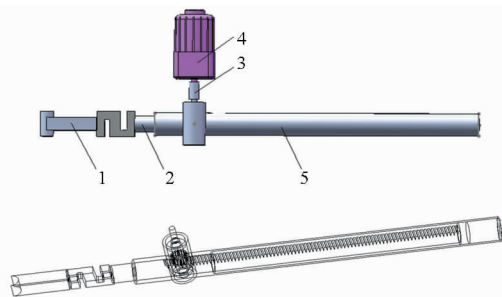


图4 前进系统结构简图

Fig.4 Structure of propulsion system

- 1.推动架 2.齿条 3.联轴器 4.伺服电机 5.齿条套

1.4 控制系统设计

控制系统用来控制切割试验台的运行和停止,并能对切割状态的参数进行测量,主要由微处理器控制系统、数据采集系统、信号放大系统和程序存储系统等组成^[13]。

1.4.1 微处理器控制系统

微处理器主要由基于ARM Cortex-M3内核的STM32F103增强型单片机完成^[14],其时钟频率达到72 MHz,片内资源丰富,搭配3.2寸TFT真彩屏模块实现切割状态的实时显示,系统硬件构成如图5所示。

1.4.2 信号放大系统

拉压力传感器输出的模拟信号,经放大电路放大、模数转换后供单片机采集处理^[15-16]。信号放大

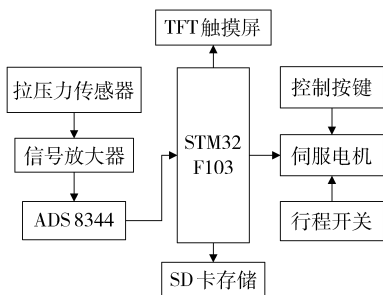


图5 微处理器系统

Fig.5 Diagram of micro processor

电路由 ICL7660S 组成的负电压产生电路和 AD620AN 信号放大器组成,AD620AN 芯片具有高精度、低杂讯等特点,增益范围为 1 ~ 1 000 倍。拉压力传感器满量程输出电压为 20 mV,信号放大器将此电压放大到 3.3 V 左右,放大倍数约为 165 倍。

1.4.3 系统抗干扰设计

为提高系统的精确性和抗干扰能力,确保切割试验台可靠连续的工作,在硬件方面,选用屏蔽线作为信号线,对拉压力传感器和信号放大器采用 36 V 蓄电池单独供电,减少交流电源产生的干扰,在信号放大器输出端并联滤波电容提高系统的精确性;在软件方面,采用低通滤波,消除干扰信号,程序中加入“独立看门狗”,提高系统的稳定性和精确性,系统抗干扰输出对比图如图 6 所示。

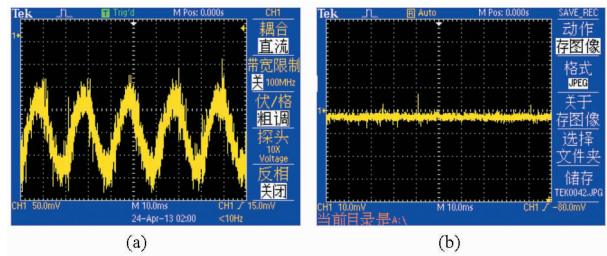


图6 系统抗干扰输出对比图

Fig.6 Comparison chart of interference output

(a) 未采取抗干扰措施信号输出 (b) 加入抗干扰措施信号输出

1.5 系统软件设计

系统软件由按键处理功能、A/D 转换、中断处

理和数据存储等模块组成^[17]。按键处理程序用于读取操作指令,进行对应试验参数设定;A/D 转换程序将传感器采集的电压信号进行数字量转换;中断处理程序主要用于接收行程限位开关输出的指令和系统的“开始”、“停止”和“复位”等指令;数据存储程序通过 SPI 总线使 STM32 单片机与 SD 卡进行通信,将切割力实时存入 SD 卡中;试验结束后系统可将保存的数据导出以便对其进行分析计算,整个系统结构简明、程序运行可靠,主程序流程如图 7 所示。

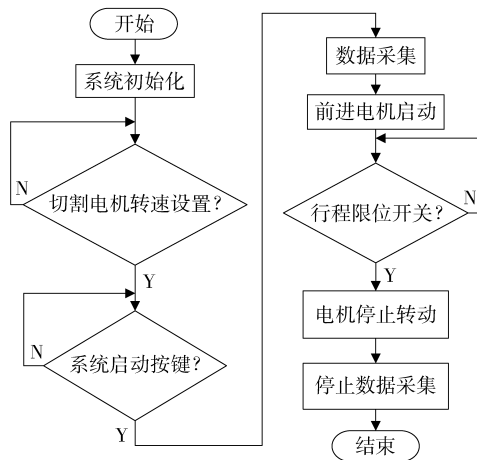


图7 主程序流程图

Fig.7 Flow chart of main program

2 应用

2.1 试验材料与参数测量

试验材料选自山东省泰安市山东农业大学农学试验田山农 22 号小麦,取样面积约 666 m²,采样时间为 2013 年 6 月 5 日至 2013 年 6 月 11 日,每采一次样记为一个批次,采样的试验材料要求秸秆通直、无明显缺陷、无损伤,每次试验在每批次中随机选取 50 ~ 100 株秸秆,试验开始前对小麦秸秆进行编号,试验结束后测定相应的含水率,小麦秸秆含水率如表 2 所示。

表2 小麦秸秆含水率

Tab.2 Moisture content of wheat straw

采样时间	2013-6-5	2013-6-6	2013-6-7	2013-6-8	2013-6-9	2013-6-10	2013-6-11
含水率/%	31.15	28.51	23.89	24.48	22.79	21.93	21.33

2.2 正交试验与分析

选取 L₁₆(4⁴) 正交表进行试验,即研究切割速度、切割器倾角、刀片间隙和切割位置对切割力的影响,切割试验台采用标准 V 型割刀,切割性能好,对细茎秆有较强的适应性,试验开始前将试样须根、麦穗、麦叶和叶鞘剥去,将小麦秸秆从各节处剪开,自

上至下选取 4 节,分别标号,如果存在第 5 节不对其进行测量。

正交试验结果和极差分析如表 3 所示,表中括号内数字为因素水平值,对正交试验结果进行 F 分布检验,F 检验显著性水平 P 值为 0.10,分析结果如表 4 所示。

表3 试验结果

Tab.3 Results of orthogonal test

试验 序号	因素				平均切割 力峰值/N
	切割速度	切割器倾角	刀片间隙	切割位置	
	$A/(m \cdot s^{-1})$	$B/(^{\circ})$	C/mm	D	
1	0.6(1)	0(1)	0.8(1)	1(1)	49.2
2	0.6(1)	15(2)	1.0(2)	2(2)	52.1
3	0.6(1)	20(3)	1.2(3)	3(3)	55.2
4	0.6(1)	25(4)	1.4(4)	4(4)	64.7
5	0.8(2)	0(1)	1.0(2)	3(3)	56.5
6	0.8(2)	15(2)	0.8(1)	4(4)	60.3
7	0.8(2)	20(3)	1.4(4)	1(1)	47.7
8	0.8(2)	25(4)	1.2(3)	2(2)	50.8
9	1.2(3)	0(1)	1.2(3)	4(4)	61.7
10	1.2(3)	15(2)	1.4(4)	3(3)	53.8
11	1.2(3)	20(3)	0.8(1)	2(2)	44.6
12	1.2(3)	25(4)	1.0(2)	1(1)	40.7
13	1.4(4)	0(1)	1.4(4)	2(2)	46.9
14	1.4(4)	15(2)	1.2(3)	1(1)	40.1
15	1.4(4)	20(3)	1.0(2)	4(4)	52.8
16	1.4(4)	25(4)	0.8(1)	3(3)	44.9
R	7.075	1.650	2.525	11.925	$\sum = 882.0$

表4 正交试验结果 F 分布检验Tab.4 Results of orthogonal F -distribution test

因素	S	自由度	F 比	F 临界值
A	199.315	3	1.024	2.610
B	31.120		0.160	
C	29.215		0.150	
D	519.015		2.666	

由表4可得,切割位置在 $\alpha=0.10$ 水平上显著。由极差 R 判定影响切割性能的主次因子,比较 R_j 可得 $R_D > R_A > R_C > R_B$ 。根据因素判定优水平,由试验数据可得优水平为 A_4 、 B_4 、 C_2 、 D_1 。

2.3 单因素试验

2.3.1 刀片间隙

由正交试验结果可以看出切割位置对切割性能有显著影响,保持切割位置和切割速度处于优水平前提下,分析刀片间隙对切割性能的影响。

在含水率相同的情况下,对第4批次下的第3节小麦秸秆进行刀片间隙对切割性能影响分析,保持切割速度为1.4 m/s,切割器倾角为 22° ,试验数据Origin拟合图如图8所示。试验结果表明:随着刀片间隙的增大,切割力峰值增大,刀片间隙在1 mm左右时切割力峰值最小且切割效果较好,切口处未产生撕裂,割茬较整齐,切割质量较好。

2.3.2 切割速度

在含水率相同的情况下,对第5批次第3节小麦秸秆进行切割速度性能影响分析,保持刀片间隙1 mm,切割器倾角为 22° ,试验数据如图9所示。

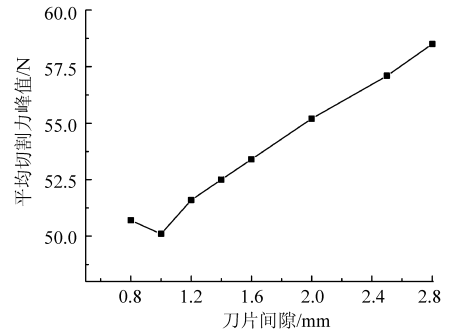


图8 刀片间隙对切割性能的影响

Fig.8 Effect of blade pitch on cutting performance

试验结果表明:随着切割速度的降低,小麦秸秆切割力增大,在切割过程中引起的小麦秸秆呈现局部变形增大,秸秆往往被拉断而不是被切断,且刀片间的摩擦力增大,导致切割力和切割功耗增加,切割质量下降;当切割速度增加时,在切割点小麦秸秆的传递变形时间减小,所需切割力峰值减小,切割质量较好。

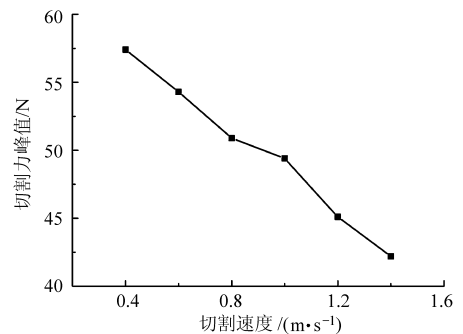


图9 切割速度对切割性能的影响

Fig.9 Effect of cutting speed on cutting performance

2.3.3 切割位置

在含水率相同批次下,保持切割速度为1 m/s,刀片间隙为1 mm,切割器倾角 20° ,分析小麦秸秆不同位置的切割性能,试验数据如表5所示。由表5可得,切割力的峰值随着切割位置的降低而增加,小麦秸秆底部的切割力峰值大于顶部的切割力峰值。

表5 不同切割位置的平均切割力峰值

Tab.5 Peak value of average cutting force on different cutting position

批次	切割位置			
	1	2	3	4
1	47.2	50.8	56.4	62.3
2	45.6	49.9	56.2	61.5
3	44.8	46.7	52.4	59.2
4	43.2	46.9	51.3	58.1

2.4 试验结果综合分析

在实际小麦秸秆切割过程中,切割速度是一项重要参数,对切割质量和切割性能产生重要的影响,随着切割速度的增加,小麦秸秆切割力峰值会降低,

切割质量提高,综合考虑正交试验结果与实际切割过程,选取切割速度为 $1.2 \sim 1.4 \text{ m/s}$,试验指标为 A_4 ;小麦秸秆从下至上由粗到细变化,并不是均匀体,存在各向异性的差异,通过正交试验表明,当切割器倾角在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 时,切割效果好,割茬整齐,端口齐平,小麦秸秆无撕裂现象,综合切割性能因素,切割器倾角在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 之间,试验指标为 B_3 ;当间隙增大时,会造成切口处不齐,产生撕裂,易堵刀,综合切割质量和切割性能考虑,刀片间隙应小于 1 mm ,试验指标为 C_2 ;在实际小麦秸秆切割过程中,常以第3节为主要切割点,根据正交试验结果,选取 D_3 为试验指标。

3 结论

(1)采用曲柄连杆驱动机构,设计了小麦秸秆

往复式切割试验台。该试验台满足小麦秸秆切割的试验要求,前进速度为 $0 \sim 1.8 \text{ m/s}$,切割速度为 $0 \sim 1.6 \text{ m/s}$,小麦秸秆与刀片相对角度在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内可调,动刀片与定刀片间隙在 $0.8 \sim 3 \text{ mm}$ 范围内可调。

(2)切割试验台采用 32 位的 STM32 处理器作为核心系统,可实现系统的自动控制,使用 SD 卡存储数据,提高切割试验台的数据存储效率,整个试验台具有良好的操作性和人机交互性。

(3)对切割试验台进行正交试验,分析影响切割性能的主次因子,依次为切割速度、切割位置、刀片间隙和切割器倾角,综合正交试验结果和实际切割过程可以得出,切割位置和切割速度是对小麦秸秆切割性能影响的主要因素,选取 $A_4 B_3 C_2 D_3$ 为较优组合。

参 考 文 献

- 1 宋占华,肖静,张世福,等.曲柄连杆式棉秆切割试验台设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(增刊1):162-167.
Song Zhanhua, Xiao Jing, Zhang Shifu, et al. Design and experiment on crank-connecting rod cotton stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp. 1): 162-167. (in Chinese)
- 2 唐忠,李耀明,徐立章,等.单茎秆切割试验台的设计与实验[J].农机化研究,2009,31(12):141-143.
Tang Zhong, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. The design and test of single stem cutting test-bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 141-143. (in Chinese)
- 3 吴明亮,官春云,汤楚宙,等.油菜茎秆切割力影响因素试验[J].农业工程学报,2009,25(6):141-144.
Wu Mingliang, Guan Chunyun, Tang Chuzhou, et al. Experiments on influencing factors of cutting force of rape stem[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 141-144. (in Chinese)
- 4 罗海峰,汤楚宙,邹冬生,等.龙须草茎秆往复式切割试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):13-17.
Luo Haifeng, Tang Chuzhou, Zou Dongsheng, et al. Experiment on reciprocating cutting of *Eulaliopsis binata* stem[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 13-17. (in Chinese)
- 5 Mello R C. Effect of blade shape and speed on cutting forces for sugar cane[J]. Acta Scientiarum-Agronomy, 2005, 27(4): 661-665.
- 6 夏萍,印崧,陈黎卿,等.收获机械往复式切割器切割图的数值模拟与仿真[J].农业机械学报,2007,38(3):65-68.
Xia Ping, Yin Song, Chen Liqing, et al. Numerical simulation of cutting pattern of a reciprocating cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 65-68. (in Chinese)
- 7 陈诚,俞国胜.往复式灌木切割器滑切角对灌木切割的影响[J].北京林业大学学报,2011,33(2):115-119.
Chen Cheng, Yu Guosheng. Effect of sliding cutting angle of bush reciprocating cutter on bush[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(2): 115-119. (in Chinese)
- 8 李耀明,秦同娣,陈进,等.玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J].农业工程学报,2011,27(1):160-164.
Li Yaoming, Qin Tongdi, Chen Jin, et al. Experiments and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 160-164. (in Chinese)
- 9 赵湛,李耀明,徐立章.超级稻单茎秆切割力学性能试验[J].农业机械学报,2010,41(10):72-75.
Zhao Zhan, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Experiment on cutting mechanical property of single super rice stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 72-75. (in Chinese)
- 10 宋占华,田富洋,张世福,等.空载状态下往复式棉秆切割器动力学仿真与试验[J].农业工程学报,2012,28(16):17-22.
Song Zhanhua, Tian Fuyang, Zhang Shifu, et al. Simulation and experiment of reciprocating cutter dynamics of cotton stalk under no-load[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 17-22. (in Chinese)
- 11 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.甘蔗茎秆切割力试验[J].农业工程学报,2007,23(7):90-94.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Cutting force test of sugar cane stalk [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 90-94. (in Chinese)
- 12 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.农作物茎秆的力学特性研究进展[J].农业机械学报,2007,38(7):172-176.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 172-176. (in Chinese)
- 13 蒋韬,侯加林,李天华,等.田间玉米茎秆往复切割试验台[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):32-36.

- Jiang Tao, Hou Jialin, Li Tianhua, et al. Field reciprocating cutting test bench for corn stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):32-36. (in Chinese)
- 14 李宁. 基于 MDK 的 STM32 处理器开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- 15 张华,吴欣,王大星. 基于 ARM7 的 SD 卡读写控制在数据采集系统中的应用[J]. 电子技术应用,2009(7):38-41.
- 16 张毅刚. 单片机原理及接口技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- 17 张慧,侯加林,郎需强,等. 便携式农作物茎秆剪切力测试仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 131-135.
- Zhang Hui, Hou Jialin, Lang Xuqiang, et al. Design and experiment of portable shear tester for crop stalks [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):131-135. (in Chinese)

Design and Experiment of Wheat Straw Cutting Reciprocating Test Bench

Hou Jialin Jiang Tao Wu Yanqiang Liu Lin Lü Zhaoqin Yang Qiyong

(Mechanical and Electronic Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to analyze the cutting performance of wheat straw, reciprocating cutting test bench for simulating the cutting process of wheat straw in laboratory was designed. The designed test bench was composed of body frame, chopped header, crank connecting link, AC motor and etc. The forward speed was 0 ~ 1.8 m/s, cutting speed was 0 ~ 1.6 m/s, cutting angle was 0 ~ 30°, and adjustable blade gap was in the range of 0.8 ~ 3 mm. The paper mainly focused on the working performance of test bench and cutting performance for wheat straw. Orthogonal test with four factors and four levels and single factor test was carried out. The results showed that: with the range R , the order of factors affected the cutting performance could be determined as: cutting position, cutting speed, blade gap and cutting angle. With a given experimental factors and levels, the optimum combination of parameters were: cutting speed of 1.4 m/s, cutting angle of 20°, blade gap of 1mm and cutting position of the third section of wheat straw.

Key words: Wheat straw Cutting Reciprocating Test bench