

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.012

免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化

贾洪雷^{1,2} 郭明卓^{1,2} 郭春江^{1,2} 郑健^{1,2} 张成亮³ 赵佳乐^{1,2}

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025;
3. 哈尔滨市农业科学院, 哈尔滨 150028)

摘要: 针对中国东北地区玉米秸秆粗壮量大、不易腐烂,造成免耕播种机破茬防堵装置秸秆根茬切断率低和作业所需切割扭矩大的技术难题,以蝗虫口器多阶段梯锯齿状结构和双上颚异向等速咬合运动方式为仿生原型,设计一种可在东北地区实现高效破茬防堵作业的动态仿生破茬装置。通过仿生构建、机构设计、理论分析和参数优化等方法设计了行星齿轮变速机构和仿生破茬刀;运用 Arduino 系统和智能控制方法设计了智能驱动系统,实现了运动方式-结构耦合仿生;通过参数优化试验和回归分析等方法,研究了结构和作业参数对秸秆切断率和切割扭矩的影响规律,并得出最佳参数组合:作业速度为 10 km/h,回转半径为 250 mm,正转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量为 9,反转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量为 18;最终通过对比试验得出动态仿生破茬装置相较于被动缺口圆盘破茬刀可提高秸秆根茬切断率 22.6% ~ 27.4%;相较于驱动缺口圆盘破茬刀可提高秸秆根茬切断率 8.6% ~ 13.5%,降低扭矩输出 19.5% ~ 21.8%;作业后使用共聚焦激光扫描仪进行耐摩擦磨损对比试验,其平均表面粗糙度和最大磨痕深度相较于驱动缺口圆盘破茬刀分别下降 14.5% 和 15.9%。

关键词: 免耕播种机; 防堵装置; 破茬装置; 动态仿生; 正交试验

中图分类号: S223.2⁺5; TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0103-12

Design of Dynamic Bionic Stubble Cutting Device and Optimization Test of Parameters

JIA Honglei^{1,2} GUO Mingzhuo^{1,2} GUO Chunjiang^{1,2} ZHENG Jian^{1,2} ZHANG Chengliang³ ZHAO Jiale^{1,2}

(1. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

3. Harbin Academy of Agricultural Science, Harbin 150028, China)

Abstract: Corn stalks are stout and non-perishable in Northeast China, which results in the low cutting-out rate and high working resistance torque of the no-tillage planter. To improve the cutting efficiency of corn stalks and stubbles, a dynamic bionic stubble cutting device was designed, which was based on both the multistep serrated mouthpart structure and the moving mode of different-direction isokinetic occlusion. The planetary gear mechanism and bionic cutting disc were designed through bionic construction, mechanism design, theoretical analysis and parameter optimization; the intelligent driving system was designed by using Arduino system and intelligent control method, and thus the coupling bionic of motion mode and structure was realized. Moreover, the effect of structure and operating parameters, including the number of blades, radius of gyration and forward speed, on the cutting efficiency and working torque was studied via optimization test and regression analysis. The simulation tests results showed that the dynamic bionic stubble cutting device achieved the optimal working efficiency when the machine speed was 10 km/h, the radius of gyration was 250 mm, the number of bionic locust mouthpart blade in positive rotation cutting disc was 9, and the number of bionic locust mouthpart blade in reverse rotation cutting disc was 18. The comparative tests showed that for the dynamic bionic stubble cutting device, the cutting

收稿日期: 2018-04-23 修回日期: 2018-05-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700701)、国家自然科学基金项目(51705194)和吉林省科技发展计划项目(20160307011NY)

作者简介: 贾洪雷(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作及其智能装备研究,E-mail: jiah1@vip.163.com

通信作者: 赵佳乐(1985—),男,博士后,主要从事保护性耕作及其配套机具研究,E-mail: zhaojiale0103@163.com

rate of corn stalks and stubbles were decreased with the increase of machine speed. The cutting-out rate was the highest with a value of 97.1% when the machine speed was 6 km/h, while it was the lowest with a value of 92.9% when the machine speed was 10 km/h. Compared with the passive notch disc and the driving notch disc, the cutting-out rate of the dynamic bionic stubble cutting device was increased by 22.6% ~ 27.4% and 8.6% ~ 13.5%, respectively. Besides, the cutting torque of dynamic bionic stubble cutting device was decreased with the increase of the machine speed. When the machine speed was 6 km/h, the cutting torque was the largest with value of 60.5 N·m. Whereas the cutting torque reached the minimum at the machine speed of 10 km/h with value of 54.1 N·m. The cutting torque of dynamic bionic stubble cutting device was reduced by 19.5% ~ 21.8% compared with the driving notch disc. After the operation, the average surface roughness and the maximum wear scar depth were decreased by 14.5% and 15.9%, respectively, compared with that of the driving notch disc.

Key words: no-tillage planter; anti-blocking device; stubble device; dynamic bionic; orthogonal test

0 引言

优质的土壤性状是玉米稳产增收的基础,保护性耕作因具有恢复地力、增加土壤有机质含量和提高降水利用率等优点,已逐步成为主流耕作模式^[1-2]。东北地区为玉米一熟区,秸秆、根茬粗壮量大,且由于气候低温易旱致使秸秆、根茬难以腐烂,破茬防堵作业所需切割扭矩极大,致使免耕播种作业时秸秆根茬难以切断,残茬缠绕堵塞播种机具,严重影响了作业质量与效率,制约了保护性耕作在东北地区的发展^[3-4]。

为此,现有免耕播种机均设有破茬防堵装置,为有效提高其秸秆切断率和降低作业所需切割扭矩,国内外学者开展了大量研究^[5-8],上述研究均对破茬防堵装置研制与推广起到了有力的促进作用,而仿生学等技术的逐步成熟也为进一步提升农业机械作业性能提供了可能。

仿生学作为一门新兴工程学科,已在工程领域得到了大面积应用^[9]。生物经过亿万年的进化,总能利用现有材料和最小的能量消耗,“制造”出功能最优的生物体结构,仿生学正是通过研究生物的优秀结构特性为人类解决科学技术难题提供灵感。目前,通过仿生学原理解决农业机械领域难题,已经逐步受到人们的重视^[10-12],这些研究表明,通过仿生学设计可有效提升农业机械的作业性能。

因此,本文基于仿生学原理,融合免耕播种机破茬防堵机构作业原理与蝗虫口器高效切割机理,在结构形态仿生的基础上,加入运动形态仿生,设计一种可实现双刀盘异向等速旋转切割作业的动态仿生破茬装置,其可同时模拟出蝗虫口器切割植物纤维时的运动方式与口器结构形态特点,实现运动方式和形态结构的耦合仿生设计,并通过理论分析、试验优化和回归分析等方法,明确该机构结构和作业参数对残茬秸秆切割性能的影响规律,从而为高性能破茬防堵装置的设计提供理论与技术支撑。

1 免耕播种机动态仿生防堵装置设计

1.1 生物原型分析

蝗虫是一种常见的直翅目昆虫,主要以玉米、水稻等农作物为食,因此其口器进化出了具有对禾本性植物高效、低阻切割功效的结构和咬合方式。如图1所示,蝗虫口器结构具有一组对称的上颚结构,上颚前端左右切齿叶各包括4个顶端尖锐的大齿,长度约为上颚的三分之一,组成了多段阶梯锯齿状切割刃口结构,该结构可有效减少对植物纤维的拉伸,进而降低作业所需切割扭矩;同时上颚的基部具有强大的收肌腱和较小的展肌腱,两束肌肉通过快速的伸缩和舒展,能灵活的控制上颚的转动,进食过程中,使两上颚同时向内侧旋转,对植物纤维进行类似于剪刀的异向等速旋转切割作业,可有效降低切割扭矩^[13]。本文所设计的仿蝗虫动态仿生破茬机构可模拟出蝗虫口器进食时的异向等速咬合运动方式,以及多段阶梯锯齿状的口器结构,进而达到高效破茬防堵作业效果。

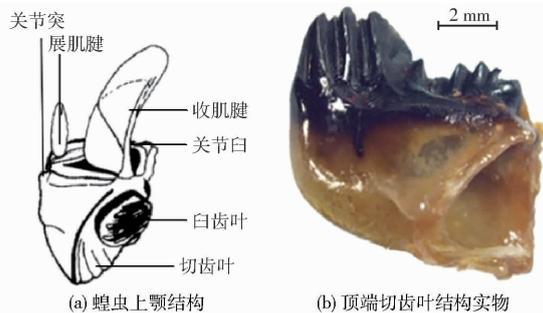


图1 蝗虫口器结构

Fig. 1 Structure diagrams of locust mouthpart

1.2 动态仿生破茬装置结构设计与作业原理

如图2a所示,动态仿生破茬装置主要由智能驱动系统、行星齿轮变速机构、仿生破茬刀(正转和反转)等组成,其中仿生破茬刀上设有仿蝗虫口器刀片,其刀刃曲线采用仿蝗虫口器切齿叶结构设计,其中正、反转仿生破茬刀各具有9个和18个仿蝗虫口

器刀片。如图 2b 所示,智能驱动系统由步进电机、转速智能控制系统和动力输出轴组成,其中转速智能控制系统由驱动器、编码器、显示模块等组成。如图 2c 所示,智能驱动系统的动力输出轴通过联轴器与驱动轴连接,正转仿生破茬刀通过固定轴套固连在驱动轴上,驱动轴与反转仿生破茬刀通过行星齿轮变速机构相连接,反转仿生破茬刀通过螺栓固连在行星齿轮变速机构的内齿圈上。如图 2d 所示,行星齿轮变速机构由 1 个太阳齿轮、3 个行星齿轮、1 个内齿圈等组成,其中太阳齿轮通过键连接与驱动轴固连^[14]。

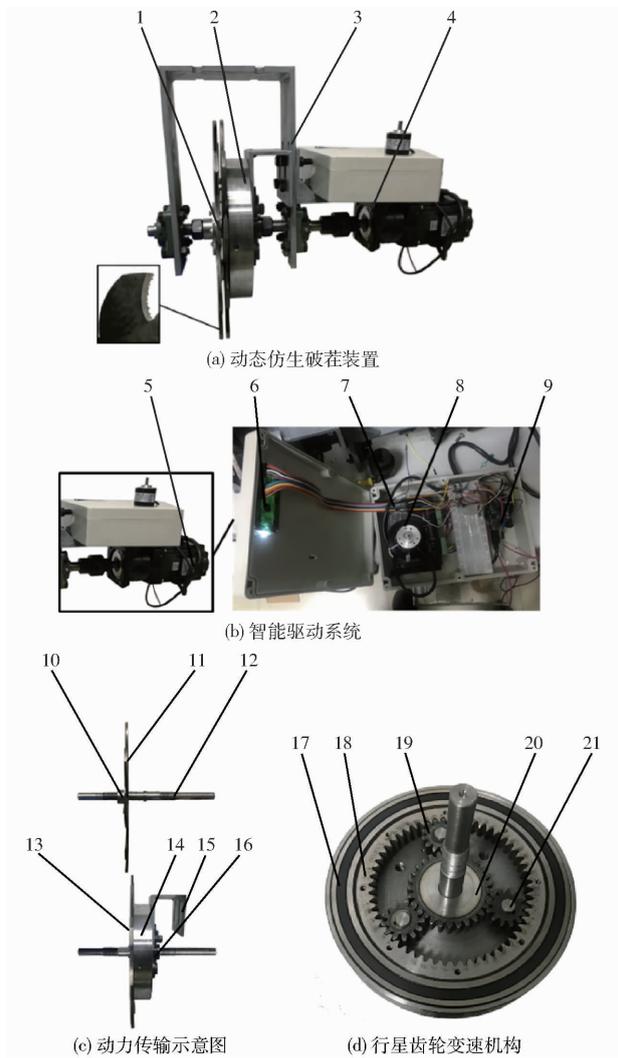


图 2 动态仿生破茬装置结构图

Fig. 2 Structure diagrams of dynamic bionic stubble cutting device

- 1. 仿生破茬刀 2. 行星齿轮变速机构 3. 连接机构 4. 智能驱动系统 5. 步进电机 6. 显示模块 7. 驱动器 8. 编码器
- 9. 主控芯片 10. 固定轴套 11. 正转仿生破茬刀 12. 动力输出轴 13. 反转仿生破茬刀 14. 外壳 15. 防转架 16. 轴承座
- 17. 内齿圈轴承 18. 内齿圈 19. 太阳齿轮 20. 行星齿轮 21. 行星齿轮轴

动态仿生破茬装置安装在免耕播种机播种单体

最前方,如图 3 所示,作业时,驱动轴将步进电机输出的扭矩传递给正转仿生破茬刀和行星齿轮变速机构,其中正转仿生破茬刀进行正转切割作业,行星齿轮变速机构实现反向变速传动,进而驱动反转仿生破茬刀进行反转切割作业,使两个仿生破茬刀实现同轴异向旋转。转速智能控制系统通过编码器实时采集机具前进作业速度 v ,并通过 Arduino 主控芯片实时计算出与速度 v 相对应的刀片旋转角速度 ω ,最终通过 3ND2283-600 驱动器驱动步进电机以角速度 ω 输出扭矩,从而使两把仿生破茬刀的平均切割线速度近似相等,进而模拟出蝗虫口器进食过程中的异向等速咬合运动方式,实现仿生切割运动方式与仿生刃口结构的耦合设计,达到高效切割秸秆与根茬的目的。

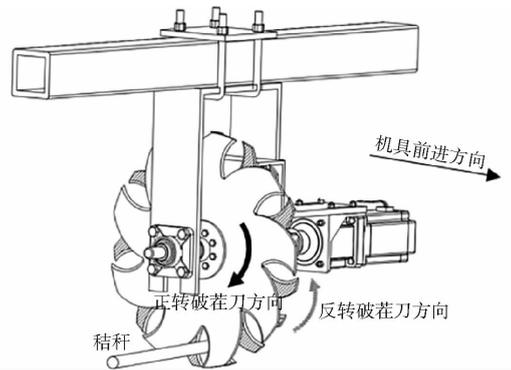


图 3 作业原理图

Fig. 3 Operating principle diagram

1.3 行星齿轮变速机构

作业时,驱动轴和行星齿轮变速机构分别驱动正、反转仿生破茬刀进行同轴异向等速旋转切割作业。此时,正、反转破茬刀上任一点的切割线速度为^[15]

$$v_i = \omega r_i - v \quad (1)$$

$$v_j = I\omega r_j + v \quad (2)$$

式中 v_i ——正转破茬刀任意一点切割线速度, m/s

v_j ——反转破茬刀任意一点切割线速度, m/s

r_i ——正转破茬刀任意一点回转半径, mm

r_j ——反转破茬刀任意一点回转半径, mm

I ——变速比

由式(1)、(2)可得出正、反转仿生破茬刀的平均切割线速度为

$$v_1 = -v + \frac{\omega}{n} \sum_{i=1}^q r_i \quad (3)$$

$$v_2 = v + \frac{I\omega}{n} \sum_{j=1}^p r_j \quad (4)$$

式中 v_1 ——正转破茬刀任意一点的平均切割线速度, m/s

v_2 ——反转破茬刀任意一点的平均切割线速

度, m/s

n ——正、反转仿生破茬刀转速, r/s

为使动态仿生破茬装置模拟出蝗虫口器切割植物的异向等速咬合运动方式,正、反转仿生破茬刀的平均切割线速度应近似相等,因此得出驱动轴旋转角速度、机具前进速度和行星齿轮变速机构变速比之间应满足

$$\omega = \frac{2v}{\frac{1}{n} \left(I \sum_{j=1}^p r_j - \sum_{i=1}^q r_i \right)} \quad (5)$$

由扭矩公式 $P = T\omega$ 可知,当驱动机构输出功率 P 一定时,驱动轴旋转角速度 ω 越小,输出扭矩 T 就越大^[15],作业时破茬机构输出扭矩与作业所需切割扭矩之差越大,切割机构越容易切断秸秆。由式(5)可知,驱动轴转速随行星齿轮变速机构变速比的增大而减小,因此变速比应选择可选范围内的最大值。

太阳轮加工过程中齿轮模数按国家标准 GB1357—87 优先取整,综合考虑机构整体结构尺寸参数、加工难易程度,同时保证机构运行稳定性,太阳轮选择模数 $m = 3 \text{ mm}$,齿厚 20 mm ,太阳轮齿数 Z_1 取 $25 \sim 31$ 。根据机构整体内部空间配合,内齿圈齿数 Z_3 选择 $54 \sim 56$ 。行星齿轮变速机构变速比与内齿圈直径 d 之间的关系为

$$d = Z_1 m + 2h_a^* m \quad (6)$$

式(6)取齿顶高系数 h_a^* 为 1,可得出 $1.62 < I < 1.92$,选择最大理论传动比 1.92 进行设计,根据 KISSsoft 齿轮设计软件计算,太阳轮齿数 Z_1 应为 29,3 个行星轮齿数 Z_2 均为 13,内齿圈齿数 Z_3 应为 55,由此得出行星齿轮变速机构参数值如表 1 所示,其实际传动比为 1.897,代入仿真模块检验,传动接触强度、传动弯曲强度均符合设计要求。

表 1 行星齿轮变速机构参数

Tab.1 Planetary gear transmission mechanism parameters

参数	太阳齿轮	行星齿轮	内齿圈
齿数 Z	29	13	55
模数 m/mm	3	3	3
数量	1	3	1
齿顶高 h_a^*/mm	3	3	3
齿根高 h_f/mm	3.75	3.75	3.75
齿高 h/mm	6.75	6.75	6.75
分度圆直径 d/mm	87	39	165
齿顶圆直径 d_a/mm	93	45	159
齿根圆直径 d_f/mm	79.5	31.5	172.5
中心距 a/mm	63	63	63
端面压力角/(°)	20	20	20
变速比 I		1.897	

1.4 转速智能调节系统

转速智能调节系统以 Arduino 为主控芯片,结合雷赛步进电机 110BYG350D、步进电机驱动器 3ND2283-600、欧姆龙增量式光电编码器 E6B2-CWZ6C、LCD 显示模块 DM1602C、蓝牙模块 HC-06 等完成整个系统信号的采集与分析处理^[17-18]。系统的硬件框图如图 4 所示。

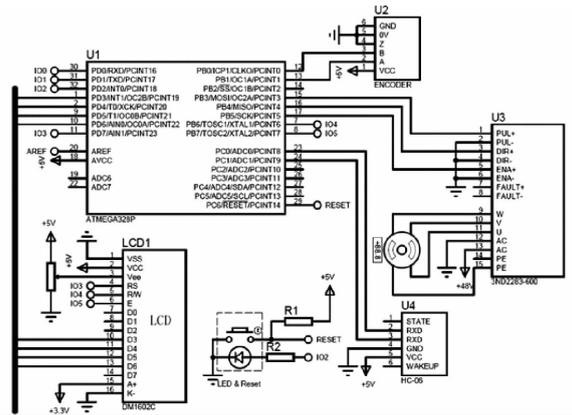


图 4 系统电路图

Fig.4 Schematic of system circuit

U1 为 Arduino 芯片,用于控制整个系统的正常工作;U2 为增量式光电编码器,用以实时采集整个机组的前进速度,该系统中使用了 A、B 两相的脉冲信号,用于判断旋转方向和转速。编码器的输出方式和输出信号如图 5、6 所示,通过捕获编码器 U2 中 A 相和 B 相的脉冲信号,转换为脉冲数,并计算出前进速度。Arduino 系统通过式(5),实时计算出步进电机的转速和驱动步进电机的脉冲信号的频率^[19-20]。

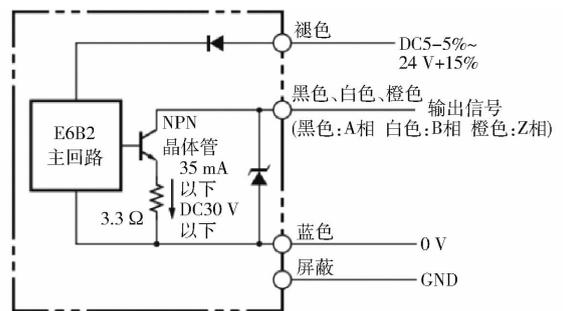


图 5 编码器 E6B2-CWZ6C 的输出回路

Fig.5 Output circuit of encoder E6B2-CWZ6C

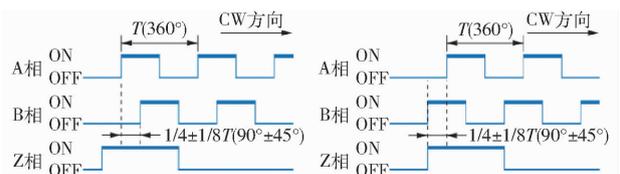


图 6 编码器 E6B2-CWZ6C 的输出脉冲信号

Fig.6 Output pulse signal of encoder E6B2-CWZ6C

U3 为步进电机驱动器 3ND2283-600,用于控制驱动系统中的 110 三相混合式步进电机,该驱动

器与控制器的接线为 PNP 输出接线方式^[21]; U4 为蓝牙模块 HC-06, 用以和 Android 系统连接通信, 通过相关软件进行数据传输、显示和命令控制, 工作中, LCD 屏也实时显示前进速度和刀盘转速等。

1.5 仿生破茬刀设计

如图 3 所示, 正、反转仿生破茬刀在工作过程中, 主要依靠其外侧延伸的多个仿蝗虫口器刀片进行剪切作业。仿生破茬刀片切割秸秆与蝗虫口器切割植物纤维具有相同的作业特点, 因此根据仿生学理论, 以蝗虫口器上颚为原型, 通过提取上颚切齿叶外轮廓曲线, 将切齿叶高效切割的特性应用于破茬刀片的切割刃中, 以期实现破茬刀高效破茬的功效。将蝗虫的上颚样品置于体式显微镜下观察, 由于切齿叶轮廓结构实际尺寸微小不便于采集, 因此对该部分进行图像截取后并放大, 所得轮廓结构如图 7 所示^[22-23]。

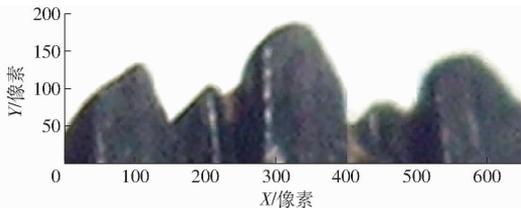


图 7 截取后的棉蝗切齿叶轮廓

Fig. 7 Contour map of intercepted cotton-powder cut tooth

分别使用 Matlab 软件中的 `rgb2gray`、`imerode`、`imdilate`、`im2bw`、`Imfill`、`edge` 函数命令对图 7 的轮廓图进行处理, 使其由原始图像转换为二值图像, 最终得出曲线轮廓坐标点^[24-25], 其工作流程如图 8 所示。

最后采用 LOG 算法将坐标点绘制成最终边界图, 所得曲线结构完整清晰, 与原图相比基本一致。

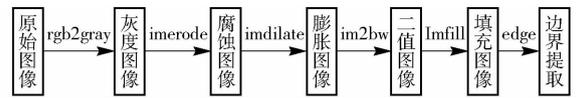


图 8 工作流程图

Fig. 8 Flow chart of work

并根据图像曲线连续性特点, 以每个波峰为一个单元, 将整个轮廓曲线分为 5 部分, 并分别命名为曲线 1、曲线 2、曲线 3、曲线 4 和曲线 5, 所得轮廓边界与曲线划分如图 9 所示。

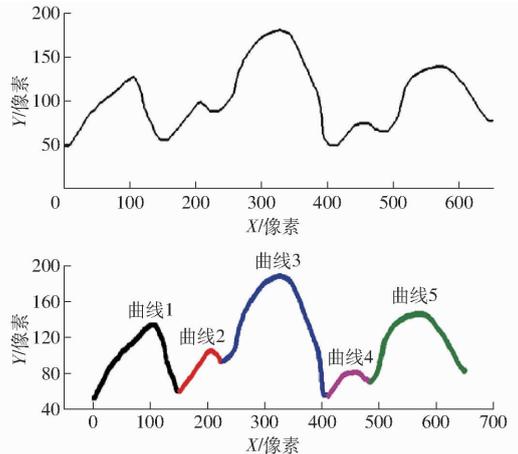


图 9 轮廓边界与曲线划分

Fig. 9 Division diagram of outline boundary and curve

使用 Origin 软件对上述 5 部分曲线分别拟合, 拟合方式为最小二乘法六次多项式, 拟合方程为^[26]

$$\varphi(x) = B_0 + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + B_4x^4 + B_5x^5 + B_6x^6 \quad (7)$$

式中参数 B_0 及 $B_1 \sim B_6$ 拟合结果如表 2 所示。由表 2 可知, 5 个曲线的拟合方差 R^2 均大于 0.988, 拟合程度较高, 将拟合函数绘制在直角坐标系中, 得出绝大多数残差小于 10, 拟合精度符合加工要求。

表 2 参数拟合结果

Tab. 2 Parameter fitting results

	曲线 1	曲线 2	曲线 3	曲线 4	曲线 5
B_0	53.597 5	59.792 1	91.610 4	54.880 3	64.792 7
B_0 标准误差	0.915 1	0.321 3	2.016 3	0.406 9	0.181 5
B_1	0.155 02	0.392 57	0.166 24	0.226 25	0.127 89
B_1 标准误差	0.173 50	0.124 12	0.286 91	0.157 58	0.183 24
B_2	0.102 94	0.069 10	0.086 40	0.084 74	0.063 75
B_2 标准误差	0.010 30	0.014 96	0.013 75	0.019 03	0.009 80
B_3	-0.003 65	-0.004 31	-0.001 66	-0.004 10	-0.002 17
B_3 标准误差	2.61×10^{-4}	7.67×10^{-4}	2.83×10^{-4}	9.78×10^{-4}	2.258×10^{-4}
B_4	5.43×10^{-5}	1.30×10^{-4}	1.38×10^{-5}	8.93×10^{-5}	2.64×10^{-5}
B_4 标准误差	3.19×10^{-6}	1.89×10^{-5}	2.80×10^{-6}	2.42×10^{-5}	2.56×10^{-6}
B_5	3.63×10^{-7}	1.79×10^{-6}	5.51×10^{-8}	9.99×10^{-7}	1.46×10^{-7}
B_5 标准误差	1.86×10^{-8}	2.23×10^{-7}	1.32×10^{-8}	2.84×10^{-7}	1.36×10^{-8}
B_6	8.83×10^{-10}	8.84×10^{-9}	8.31×10^{-11}	4.49×10^{-9}	3.02×10^{-10}
B_6 标准误差	4.13×10^{-11}	9.98×10^{-10}	2.38×10^{-11}	1.28×10^{-9}	2.76×10^{-11}
R^2	0.994 08	0.998 97	0.988 10	0.994 70	0.989 48

如图10a所示,选取公式(7)为仿蝗虫口器刀片的刀刃曲线结构,综合考虑整机结构,并借鉴参考传统破茬刀盘尺寸,仿生破茬刀的回转直径设定为400~500 mm,单个仿蝗虫口器刀片所对应弧长 l_{Ω} 和高度 h 为

$$l_{\Omega} = \frac{2\pi \left(\frac{D}{2} - h \right)}{n} \quad (8)$$

$$h = \frac{D - d}{2} \quad (9)$$

式中 D ——仿生破茬刀回转直径,mm

d ——刀盘基圆回转直径,mm

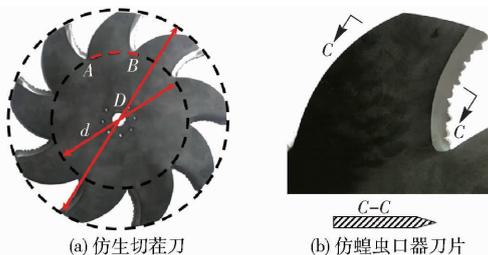


图10 仿生破茬刀结构示意图

Fig. 10 Structure diagrams of bionic cutting disc

如图10a所示,刀盘基圆回转直径 d 近似等于内齿圈轴承外圈直径,计算得出单个仿蝗虫口器刀片高度 $50 \text{ mm} < h < 80 \text{ mm}$,为方便加工,确定 $h = 70 \text{ mm}$,将拟合后的切齿叶外轮廓曲线等比放大,使单个刀片均布有3段仿生刃口曲线,最终加工效果如图10b所示。

2 试验

2.1 试验条件与仪器设备

试验于2018年3月1—20日在吉林大学生物与农业工程学院土槽实验室(土槽长30 m、宽4 m)进行,为使土槽土壤状况与田间情况一致,采用的整土工艺为:人工整土整平—人工洒水—埋入根茬—压实—土壤表面铺上秸秆^[27]。所采用玉米秸秆平均直径为25 mm,玉米根茬地上平均高度为300~500 mm,根茬主根地下平均深度为65~75 mm,其余土壤物理化学属性如表3所示。

试验主要仪器设备如下:土槽台车测试系统、卷尺、耕深尺、环刀组件(容积 100 cm^3)、电子天平、MS-350型水分测定仪、SC-900型土壤紧实度仪、11000型土壤温度计、AKC-205B型扭矩传感器、TS-5HM型智能测试仪、OLS3000型共聚焦激光扫描显微镜等。

2.2 试验方法

试验分为两部分。第一部分为研究动态仿生破茬装置的结构参数对秸秆切断率、切割扭矩的影响,

表3 土槽试验田0~100 mm深度土壤物理化学属性

Tab. 3 Soil physical and chemical properties at 0~100 mm depth in soil test field

理化参数	数值
土壤紧实度/MPa	40.2
土壤容积密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.237
土壤含水率/%	21.2
土壤温度/°C	13.2
pH值	7.08
有机质质量分数/%	3.78
全氮质量分数/%	0.13
速效钾质量比/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	173.2
速效磷质量比/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	16.5

由前文分析可知,两仿生破茬刀的仿蝗虫口器刀片为主要工作部件,作业效果与前进速度、入土深度、切割次数有关,受三者共同影响。因此对整个工作部件选取3个主要因素:播种机前进速度 v 、仿生破茬刀回转半径 R 、每个仿生破茬刀上的仿蝗虫口器刀片数量 M ,每个因素选择3个水平。6~10 km/h为东北地区播种机常用前进速度,因此选择6、8、10 km/h 3种作业速度为参数水平;市面上现有圆盘破茬刀的回转半径多介于200~300 mm之间,同时基于破茬装置结构限制,取回转半径300 mm为上限值,因此选择200、250、300 mm 3种回转半径为参数水平;动态仿生破茬装置在切割秸秆和根茬时,单位时间内刀片刃口接触秸秆根茬的次数越多,切断率就越高,由于刀盘尺寸限制,在被动刀盘仿蝗虫口器刀片数量为18时达到最大值,若继续添加仿蝗虫口器刀片数量,会导致主动刀盘与被动刀盘形成的夹角不足以夹住秸秆,前文研究可知:正转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量与反转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量之比为1:2,因此设定正转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量范围为7~9个。

根据Design-Expert软件中的Box-Behnken Design组合设计原理,以作业所需切割扭矩和秸秆切断率作为试验指标,设计了三因素三水平正交组合试验^[28]。因素编码如表4所示。运用Design-Expert软件中Box-Behnken Design响应曲面设计法,共进行17组试验,其中12组为析因点,5组为零点以估计误差,并对试验结果进行分析,检验各因

表4 因素编码

Tab. 4 Codes of factors

编码	因素		
	作业速度 v / ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	回转半径 R / mm	仿蝗虫口器 刀片数量 M /个
1	10	300	9
0	8	250	8
-1	6	200	7

素对试验指标的显著性影响,并得出响应曲面和回归方程,优化出各因素的最佳参数组合^[29]。

第二部分为研究动态仿生破茬装置最优结构参数相较于传统破茬机构作业性能的对比试验,对比试验指标为:秸秆切断率、作业所需切割扭矩、刃口表面磨痕形貌和磨痕深度。根据第一部分试验所得出的最优组合参数组合加工出最佳动态仿生破茬装置,与被动缺口圆盘破茬刀(西班牙 BELLOTA 农机具有限公司)和驱动圆盘破茬刀(吉林农信机械制造有限公司)进行对比试验,并对第一部分试验的参数优化结果进行验证,3 种刀具材质均为 65Mn。

作业分 3 组进行,分别安装被动缺口圆盘破茬刀、驱动缺口圆盘破茬刀、动态仿生破茬装置。台车前进速度固定为 6、8、10 km/h,驱动缺口圆盘破茬刀作业状态下转轴无动力输出,驱动缺口圆盘刀与动态仿生破茬装置作业条件下,布置好根茬与秸秆后,每次试验后重新布置相同数量的秸秆和根茬,每组试验重复 5 次,土槽试验结束后,分别卸下 3 组刀片,对刃口处进行激光切割,切割片大小不超过 30 mm × 30 mm,进行激光共聚焦观测试验。

2.3 试验指标测试方法

动态仿生破茬装置工作过程中,两刀盘共同切割玉米秸秆,两刀盘通过同一根旋转轴连接,本文通过在旋转轴轴端处安装扭矩传感器测量整个旋转轴的扭矩^[30],因此本试验以玉米秸秆切断率和切割扭矩为参数优化试验指标,以秸秆切断率、切割扭矩和刃口表面磨痕形貌和磨痕深度为对比试验指标。

2.3.1 玉米秸秆根茬切断率

土槽试验时,将一定数量的根茬埋入垄上种植带中,再将一定数量的秸秆随机散乱的铺在种植区域^[31],台车每运行一次,对土槽内玉米秸秆、根茬的总数量和被切断数进行测量,玉米秸秆根茬切断率为

$$y = \frac{n_1 + n_2}{n_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中 n_1 ——切断的根茬数量

n_2 ——切断的秸秆数量

n_0 ——种植带上玉米秸秆和根茬总数

2.3.2 切割扭矩

计算切割扭矩时,刀盘切割茎秆所产生扭矩为扭矩传感器实测总扭矩减去步进电机空载时所产生扭矩,即

$$T = T_1 - T_0 \quad (11)$$

式中 T_1 ——扭矩传感器实测总扭矩

T_0 ——步进电机空载时所产生扭矩

2.3.3 刃口表面磨痕形貌和磨痕深度

对动态仿生破茬装置、被动缺口圆盘破茬刀、驱动圆盘破茬刀刃口分别进行抛光处理,使用表面粗糙度测量仪检测抛光面表面粗糙度 $R_a < 0.2 \mu\text{m}$,划痕深度 $R_v < 0.5 \mu\text{m}$,在土槽试验车固定后以相同速度试验完成后使用激光共聚焦测量仪分别检测 3 种破茬机构刃口表面粗糙度与划痕深度,测量方式如图 11 所示。

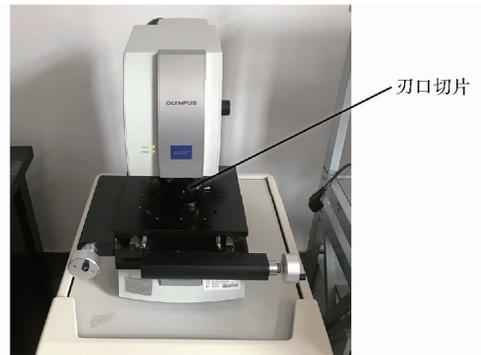


图 11 共聚焦激光扫描试验

Fig. 11 Experiment of confocal laser scanning

3 试验结果与讨论

3.1 参数优化试验结果

试验样品与参数优化试验现场如图 12、13 所示,被动圆盘破茬刀与驱动圆盘破茬刀回转半径均为 250 mm,作业过程中,被动圆盘破茬刀无电机驱动,驱动圆盘破茬刀与动态仿生破茬装置刀片转速由转速智能调节系统实时调节,以各影响因素编码值为自变量,以玉米秸秆根茬切断率、切割扭矩为相应指标的试验结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为作业速度、回转半径、仿蝗虫口器刀片数量编码值。



图 12 试验样品

Fig. 12 Test samples

表 5 中的试验结果经过 Design-Expert 软件处理后得出整理后的方差分析结果见表 6。

对表 6 数据进行二次多元回归拟合,得到平均玉米秸秆根茬切断率、平均切割扭矩对编码自变量的二次多元回归方程分别为

$$Y_1 = 97.20 - 1.61X_1 - 1.44X_2 - 2.00X_3 + 1.25X_1X_2 + 1.37X_1X_3 - 1.18X_2^2 - 1.65X_3^2 \quad (12)$$



(a) 试验现场 (b) 作业过程

图 13 参数优化试验现场

Fig. 13 Parameter optimization test site

表 5 响应曲面试验设计与结果

Tab. 5 Response surface experimental design and results

试验序号	X_1	X_2	X_3	玉米秸秆根茬切断率/%	切割扭矩/(N·m)
1	-1	-1	0	96.9	53.12
2	1	-1	0	92.0	31.23
3	-1	1	0	98.1	60.12
4	1	1	0	98.2	57.35
5	-1	0	-1	96.8	49.24
6	1	0	-1	90.0	32.02
7	-1	0	1	98.9	60.13
8	1	0	1	97.6	55.75
9	0	-1	-1	90.8	32.34
10	0	1	-1	94.8	42.84
11	0	-1	1	95.9	45.69
12	0	1	1	96.0	58.38
13	0	0	0	96.1	53.07
14	0	0	0	95.1	52.38
15	0	0	0	96.9	53.69
16	0	0	0	95.8	54.38
17	0	0	0	97.1	57.12

$$Y_2 = 54.10 - 5.78X_1 + 7.04X_2 + 7.94X_3 + 4.78X_1X_2 + 3.21X_1X_3 - 4.06X_2^2 - 5.23X_3^2 \quad (13)$$

对于平均玉米秸秆根茬切断率对编码自变量的二次多元回归方程,回归诊断显示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 对平均玉米秸秆根茬切断率影响均为显著项($P < 0.05$)。失拟项 P 值为 0.246 4,显然 $P > 0.05$,回归方程不失拟。决定系数与校正决定系数均接近于 1,表明回归方程拟合度很高,精密密度为 10.727,大于 4,表明该回归方程在设计域内预测性能良好。各因素对秸秆根茬切断率显著性的影响由大到小依次为:仿蝗虫口器刀片数量、作业速度、回转半径。

对于平均切割扭矩对编码自变量的二次多元回归方程,回归诊断显示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 对平均切割扭矩影响均为显著项($P < 0.05$)。

表 6 正交试验方差分析

Tab. 6 Variance analysis of orthogonal test result

试验指标	方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F	P
玉米秸秆根茬切断率	模型	105.19	9	11.69	11.95	0.001 8
	X_1	20.80	1	20.80	21.27	0.002 5
	X_2	16.53	1	16.53	16.90	0.004 5
	X_3	32.00	1	32.00	32.71	0.000 7
	X_1X_2	6.25	1	6.25	6.39	0.039 4
	X_1X_3	7.56	1	7.56	7.74	0.027 3
	X_2X_3	3.80	1	3.80	3.89	0.089 3
	X_1^2	0.32	1	0.32	0.33	0.586 2
	X_2^2	5.81	1	5.81	5.94	0.044 9
	X_3^2	11.46	1	11.46	11.72	0.011 1
	纯误差	2.68	4	0.025		
	失拟项	4.17	3	0.065	2.07	0.246 4
	总和	112.04	16			
切割扭矩	模型	1496.48	9	166.28	38.44	<0.000 1
	X_1	267.50	1	267.50	61.85	0.000 1
	X_2	396.35	1	396.35	91.64	<0.000 1
	X_3	504.19	1	504.19	116.57	<0.000 1
	X_1X_2	91.40	1	91.40	21.13	0.002 5
	X_1X_3	41.22	1	41.23	9.53	0.017 6
	X_2X_3	1.20	1	1.20	0.28	0.614 8
	X_1^2	0.71	1	0.71	0.17	0.696 7
	X_2^2	69.43	1	69.43	16.06	0.005 1
	X_3^2	115.20	1	115.20	26.64	0.001 3
	纯误差	12.68	4	3.17		
	失拟项	17.60	3	5.87	1.85	0.278 4
	总和	1526.76	16			

失拟项 P 值为 0.278 4,显然 $P > 0.05$,回归方程不失拟。决定系数与校正决定系数均接近于 1,表明回归方程拟合度很高,精密密度为 18.78,大于 4,表明该回归方程在设计域内预测性能良好。各因素对秸秆根茬切断率显著性的影响由大到小依次为:仿蝗虫口器刀片数量、回转半径、作业速度。

3.2 参数优化试验结果分析与讨论

固定 3 因素中的 1 个因素为零水平,应用响应曲面法分析其他 2 个因素对试验指标的影响和交互作用。运用 Matlab 软件对 Design-Expert 软件求出的回归方程进行寻优,得出最佳参数组合。

3.2.1 试验各因素对平均玉米秸秆根茬切断率的影响规律

固定作业速度为 8 km/h 时,回转半径和仿蝗虫口器刀片数量与玉米秸秆根茬切断率的关系为

$$Y_1 = 97.20 - 1.44X_2 - 2.00X_3 - 1.18X_2^2 - 1.65X_3^2 \quad (14)$$

固定回转半径 R 为 250 mm 时,作业速度和仿蝗虫口器刀片数量与玉米秸秆根茬切断率的关系为

$$Y_1 = 97.20 - 1.61X_1 - 2.00X_3 + 1.37X_1X_3 - 1.65X_3^2 \quad (15)$$

固定仿蝗虫口器刀片数量 M 为 8, 作业速度和回转半径与玉米秸秆根茬切断率的关系为

$$Y_1 = 97.20 - 1.61X_1 - 1.44X_2 + 1.25X_1X_2 - 1.18X_2^2 \quad (16)$$

由图 14 和式 (14) ~ (16) 可知, 三因素对平均

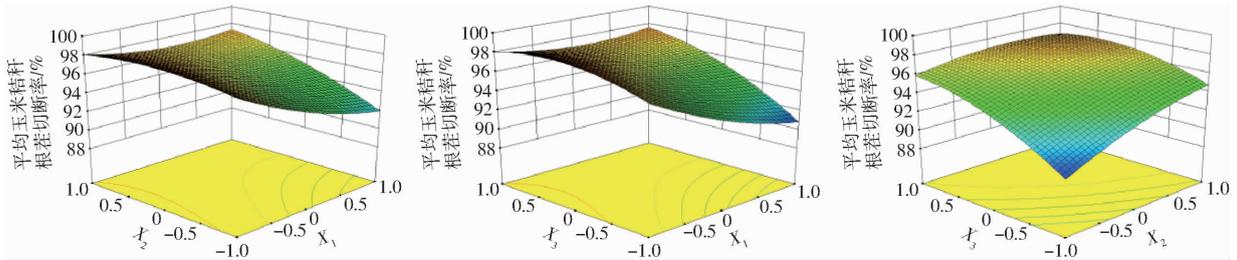


图 14 各因素对平均玉米秸秆根茬切断率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surface for influence of various factors on cutting rate of corn stalks and stubbles

3.2.2 试验各因素对平均切割扭矩的影响规律

固定作业速度为 8 km/h 时, 回转半径和仿蝗虫口器刀片数量与切割扭矩的关系为

$$Y_2 = 54.10 + 7.04X_2 + 7.94X_3 - 4.06X_2^2 - 5.23X_3^2 \quad (17)$$

固定回转半径 R 为 250 mm 时, 作业速度和仿蝗虫口器刀片数量与切割扭矩的关系为

$$Y_2 = 54.10 - 5.78X_1 + 7.94X_3 + 3.21X_1X_3 - 5.23X_3^2 \quad (18)$$

固定仿蝗虫口器刀片数量 M 为 8 时, 作业速度和回转半径与切割扭矩的关系为

$$Y_2 = 54.10 - 5.78X_1 + 7.04X_2 + 4.78X_1X_2 - 4.06X_2^2 \quad (19)$$

由图 15 和式 (17) ~ (19) 可知, 三因素对平均切割扭矩具有显著性影响 ($P < 0.01$), 作业速度分别与回转半径和仿蝗虫口器刀片数量具有交互作用, 回转半径和仿蝗虫口器刀片数量之间无交互作用。平均切割扭矩随着作业速度的加快而下降, 下降趋势逐步减缓, 随着回转半径的增大而上升, 且上升趋势逐渐减缓, 随着仿蝗虫口器刀片数量的增加而上升, 且上升趋势逐步减缓。

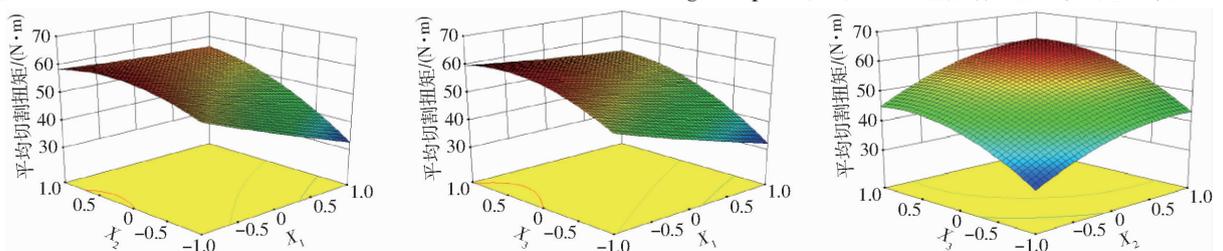


图 15 各因素对平均切割扭矩影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface of influence of each factor on average cutting torque

玉米秸秆根茬切断率具有显著性影响 ($P < 0.01$), 作业速度分别与回转半径和仿蝗虫口器刀片数量具有交互作用, 回转半径和仿蝗虫口器刀片数量之间无交互作用。平均玉米秸秆根茬切断率随着作业速度的加快而下降, 下降趋势逐步减缓; 随着回转半径的上升而增高, 且上升趋势逐渐减缓; 随着仿蝗虫口器刀片数量的增加而上升, 且上升趋势逐步减缓。

3.2.3 试验参数对作业性能影响规律的讨论

由式 (3) ~ (5) 可知, 作业速度和回转半径的增大, 均会增大仿生破茬刀的切割线速度, 切割线速度越大, 切割阻力越小, 但回转半径的增大, 会增加相同作业深度条件下的仿生破茬刀入土面积, 因此切割扭矩随着作业速度的加快而下降, 随着回转半径的增大而上升; 仿蝗虫口器刀片的数量越多, 机具前进单位长度内, 仿生破茬刀切割次数越高, 因此切割扭矩随之上升。综上说明机具前进单位长度内的切割次数比切割线速度对切割扭矩的影响更显著。

作业速度加快会造成单位长度内仿生破茬刀切割次数的减少, 因此平均玉米秸秆根茬切断率随着作业速度的加快而下降; 在作业深度相同条件下, 回转半径越大, 同一时间内与秸秆根茬相接触的仿蝗虫口器刀片数量越多, 造成单位长度内仿生破茬刀切割次数的增加, 因此平均玉米秸秆根茬切断率随着回转半径和仿蝗虫口器刀片数量的增加而上升。综上说明机具前进单位长度内的切割次数比切割线速度对平均玉米秸秆根茬切断率的影响更显著。

3.2.4 结构和作业参数优化

在试验结果分析和模型拟合的基础上利用 Design-Expert 软件对试验参数进一步优化, 同时使

用 Matlab 软件对式(14)~(19)进行寻优求解,以秸秆切断率为主要寻优指标,寻优结果的期望度越接近1,说明秸秆切断率越好,将期望度按从高到低排序,获得最优参数取值方案如表7所示。从表7中可看出,第8号方案组合为最优组合,由于作业速度

易受田间复杂地况的影响而较难保证其精准性,且规定仿蝗虫口器刀片数量只能为自然数,并综合考虑加工精度等问题,最终选取的最优参数组合为:作业速度为10 km/h,回转半径为250 mm,正转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量为8.94(加工时取9),仿蝗虫

表7 软件虚拟计算最佳参数组合方案及对应效果

Tab.7 Software virtual computing optimal parameter combination scheme and corresponding effect

序号	作业速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	回转半径/ mm	主动破茬刀仿蝗虫口 器刀片数量/个	玉米秸秆根茬 切断率/%	切割扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	期望度
1	6	222.55	8.36	98.9	52.13	0.976
2	6	223.70	8.23	98.8	51.72	0.976
3	6	224.81	8.28	98.7	51.03	0.976
4	6	223.19	8.32	98.7	51.22	0.976
5	6	219.29	8.26	98.9	51.36	0.975
6	10	250.00	9.00	98.8	49.62	0.975
7	10	250.00	8.94	98.8	48.32	0.975
8	10	250.00	8.91	98.7	48.11	0.974
9	10	250.00	9.00	98.8	49.80	0.972
10	8	237.62	8.81	98.7	50.84	0.969

口器刀片数量为18。

3.3 对比试验结果分析与讨论

如图16所示,动态仿生破茬装置在任意作业速度条件下的秸秆切断率显著优于驱动缺口圆盘破茬刀(提高8.6%~13.5%)和被动缺口圆盘破茬刀(提高22.6%~27.4%)($P < 0.05$),其中作业速度为10 km/h时优势最大,秸秆切断率为92.9%,相较于其他两种破茬机构分别提高切断率13.5%和27.4%。

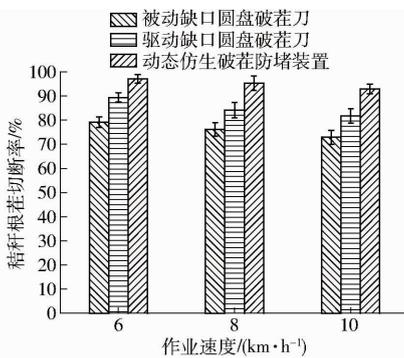


图16 秸秆根茬切断率试验结果

Fig.16 Test results of cutting rate of corn stalks and stubbles

如图17所示,动态仿生破茬装置在任意作业速度条件下的切割扭矩显著低于驱动缺口圆盘破茬刀($P < 0.05$),显著高于被动缺口圆盘破茬刀($P < 0.05$)。随着作业速度的增大,动态仿生破茬装置与驱动缺口圆盘破茬刀之间的切割扭矩之差逐步增大,与被动缺口圆盘破茬刀之间的切割扭矩之差逐步减小,作业速度为6 km/h时,作业所需切割扭矩

为60.5 $\text{N}\cdot\text{m}$,比驱动缺口圆盘破茬刀降低19.5%,当作业速度为10 km/h时,作业所需切割扭矩为54.1 $\text{N}\cdot\text{m}$,比驱动缺口圆盘破茬刀降低切割扭矩21.8%,仅比被动缺口圆盘破茬刀提高切割扭矩5.9 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

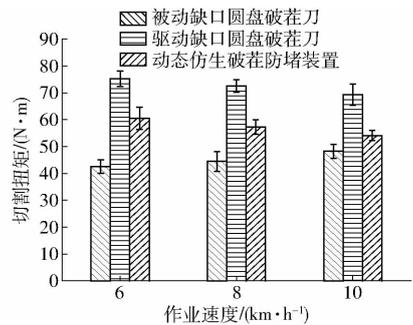


图17 切割扭矩试验结果

Fig.17 Test results of cutting torque

如图18所示,动态仿生破茬装置平均表面粗糙度 $R_a = 0.344 \mu\text{m}$,最大磨痕深度 $R_v = 0.671 \mu\text{m}$;被动缺口圆盘破茬刀平均表面粗糙度 $R_a = 0.312 \mu\text{m}$,最大磨痕深度 $R_v = 0.571 \mu\text{m}$;驱动缺口圆盘平均表面粗糙度 $R_a = 0.34 \mu\text{m}$,最大磨痕深度 $R_v = 0.67 \mu\text{m}$ 。动态仿生破茬装置的痕迹密度与磨痕深度均高于被动缺口圆盘破茬刀,主要是因为其切割速度远高于被动缺口圆盘破茬刀所致。动态仿生破茬装置的耐摩擦磨损性能显著高于驱动缺口圆盘破茬刀($P < 0.05$),刃口表面磨损形貌无明显划痕,痕迹密度与磨痕深度均低于驱动缺口圆盘破茬刀,平均表面粗糙度和最大磨痕深度相较于驱动缺口圆盘破茬刀分别下降14.5%和15.9%。

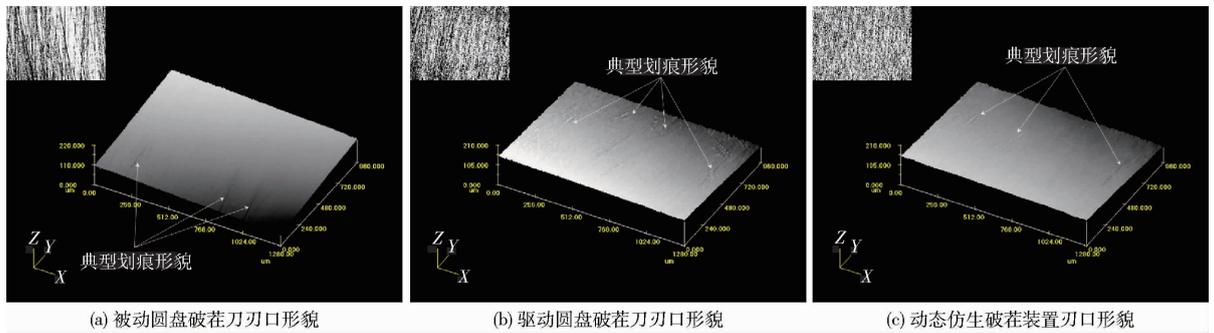


图 18 耐摩擦磨损性能试验结果

Fig. 18 Test results of tribological wear

综上,动态仿生破茬装置的整体作业性能优于驱动缺口圆盘破茬刀和被动缺口圆盘破茬刀。

4 结论

(1)以多段阶梯锯齿状的口器结构和双口器异向等速咬合运动方式为仿生原型,通过仿生构建和理论设计等方法设计出行星齿轮变速机构、智能驱动系统和仿蝗虫口器刀片,实现了结构-运动耦合仿生设计;该机构相较于被动缺口圆盘破茬刀可提高秸秆切断率 22.6% ~ 27.4%;相较于驱动缺口圆盘破茬刀可提高秸秆切断率 8.6% ~ 13.5%,降低作业所需切割扭矩 19.5% ~ 21.8%;作业后其平均表

面粗糙度和最大磨痕深度相较于驱动缺口圆盘破茬刀分别下降 14.5% 和 15.9%。

(2)通过参数优化试验和理论分析得出作业前进速度、仿生刀盘回转半径和仿蝗虫口器刀片数量等参数因可改变作业过程中的秸秆切割线速度,以及机具前进单位长度内的切割次数,从而对秸秆切断率和切割扭矩产生显著性影响($P < 0.05$),并得出动态仿生破茬装置最优结构和作业参数组合为:作业速度为 10 km/h,回转半径为 250 mm,正转破茬刀仿蝗虫口器刀片数量为 9,仿蝗虫口器刀片数量为 18,该条件下其秸秆切断率为 92.9%,作业所需切割扭矩为 54.1 N·m。

参 考 文 献

- 刘志娟, 杨晓光, 吕硕, 等. 气候变化背景下东北三省春玉米产量潜力的时空特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 103 - 112. LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang, LÜ Shuo, et al. Spatial-temporal variations of spring maize potential yields in a changing climate in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 103 - 112. (in Chinese)
- ZHANG Z Q, QIANG H J, MCHUGH A D, et al. Effect of conservation farming practices on soil organic matter and stratification in a mono-cropping system of Northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 173 - 181.
- 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1 - 19. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. (in Chinese)
- JIA H L, WANG G, GUO L, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 112 - 119.
- HE J, ZHANG Z Q, LI H W, et al. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: a review[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(4): 1 - 12.
- 何进, 李洪文, 王庆杰, 等. 动力甩刀式小麦固定垄免耕播种机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 51 - 55, 67. HE Jin, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Powered hammering blade no-till wheat seeder for permanent raised beds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 51 - 55, 67. (in Chinese)
- 张喜瑞, 何进, 李洪文, 等. 免耕播种机驱动圆盘防堵单元体的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 117 - 121. ZHANG Xirui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on the driving disc of anti-blocking unit for no-tillage planter [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 117 - 121. (in Chinese)
- 蒋金琳, 龚丽农, 王东伟, 等. 免耕播种机双刀盘有支撑切茬破茬装置的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 17 - 22. JIANG Jinlin, GONG Linong, WANG Dongwei, et al. Design and experiment for driving double coulters anti-blockage device of no-till planter [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 17 - 22. (in Chinese)
- 任露泉, 梁云虹. 生物耦合及其分类学与特征规律研究[J]. 中国科学: E 辑, 2010, 40(1): 5 - 13. REN Luquan, LIANG Yunhong. Biological couplings: classification and characteristic rules [J]. Science China Technologies Sciences, 2010, 40(1): 5 - 13. (in Chinese)
- 马云海, 马圣胜, 贾洪雷, 等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36 - 41. MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36 - 41. (in Chinese)

- 11 张加清, 陈长卿, 徐锦大, 等. 仿生开沟机刀盘的设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 138-142.
ZHANG Jiaqing, CHEN Changqing, XU Jinda, et al. Design of the bionic ditching cutter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 138-142. (in Chinese)
- 12 白景峰, 李博, 吕秀婷, 等. 基于狗獾爪趾的仿生深松铲振动减阻研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 224-227.
BAI Jingfeng, LI Bo, LÜ Xiuting, et al. study on vibration anti-drag of the badger claws bionic subsoiler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 224-227. (in Chinese)
- 13 李常营. 留高茬玉米收获机切割部件的仿生设计及其切割机理[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LI Changying. Bionic blade of corn harvester for leaving high stubble and its cutting mechanism [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- 14 李旭, 贾楠, 王文强, 等. 莱佩莱捷行星齿轮动力学仿真分析[J]. 机械传动, 2012, 36(5): 61-63.
LI Xu, JIA Nan, WANG Wenqiang, et al. Dynamics simulation of lepelletier planet gear [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(5): 61-63. (in Chinese)
- 15 李沐桐, 李天宇, 官晓东, 等. 旱地回转穴式播种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 48-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180207&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.007.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design and experiment of rotary hole seeder for dryland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48-57. (in Chinese)
- 16 徐宝富, 羊衍贵, 谌志新, 等. 电液驱动无级调速装置[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 201-205.
XU Baofu, YANG Yangui, CHEN Zhixin, et al. Hydro-electrically-driven stepless speed governors [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(2): 201-205. (in Chinese)
- 17 蒋佳晨, 黎英, 闫亚超, 等. 基于变结构理论的步进电机无传感器控制[J]. 控制工程, 2016, 23(1): 18-23.
JIANG Jiachen, LI Ying, YAN Yachao, et al. Sensorless control of stepper motor based on variable structure theory[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(1): 18-23. (in Chinese)
- 18 ZHAO J L, ZHU L T, JIA H L, et al. Automatic depth control system for a no-till seeder [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2018, 11(1): 115-121.
- 19 王凯正, 林葵, 张华达, 等. 基于Arduino的轮式移动机器人速度控制模式比较[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(6): 70-77.
WANG Kaizheng, LIN Fen, ZHANG Huada, et al. Comparison of speed control modes of wheeled mobile robot based on Arduino [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2017, 31(6): 70-77. (in Chinese)
- 20 JIAH L, GUO M Z, YU H B, et al. An adaptable tillage depth monitoring system for tillage machine [J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 187-199.
- 21 苏钊, 黄卫清, 王寅, 等. 三相驱动交替步进压电直线电机[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2538-2544.
SU Zhao, HUANG Weiqing, WANG Yin, et al. A three-phase driving alternate stepping piezoelectric linear motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2538-2544. (in Chinese)
- 22 ZHAO J L, HUANG D Y, JIA H L, et al. Analysis and experiment on cutting performances of high-stubble maize stalks[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(1): 40-52.
- 23 IGATHINATHANE C, WOMAC A R, SOKHANSANJ S. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting [J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(2): 97-106.
- 24 JIA H L, LI C Y, ZHANG Z Z, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting [J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 497-505.
- 25 LIU C B, SHENG C, YANG H L, et al. Design and optimization of bionic Janus blade in hydraulic torque converter for drag reduction[J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15(1): 160-172.
- 26 高伦, 李雨成, 李雪冰. 风机特性曲线绘制中数据选取[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(10): 1406-1409.
GAO Lun, LI Yucheng, LI Xuebing. Ventilator characteristic curve drawing data selection [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2013, 32(10): 1406-1409. (in Chinese)
- 27 马洪亮, 高焕文, 李洪文, 等. 驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 47-50.
MA Hongliang, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on corn stalk and rootstalk cutting by driven disc[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 47-50. (in Chinese)
- 28 贾洪雷, 赵佳乐, 姜鑫铭, 等. 行间免耕播种机防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 16-25.
JIA Honglei, ZHAO Jiale, JIANG Xinming, et al. Design and experiment of anti-blocking mechanism for inter-row no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 16-25. (in Chinese)
- 29 王宏立. 国产和西班牙产破茬刀摩擦磨损性能对比研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2016, 28(4): 93-97.
WANG Hongli. Comparative study on friction and wear behaviors of Chinese and Spanish disc coulter[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016, 28(4): 93-97. (in Chinese)
- 30 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 定动刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 108-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108-116. (in Chinese)
- 31 赵佳乐, 贾洪雷, 郭明卓, 等. 免耕播种机有支撑滚切式防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 18-28.
ZHAO Jiale, JIA Honglei, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of supported roll-cutting anti-blocking mechanism with for no-till planter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 18-28. (in Chinese)