

小型玉米秸秆收割机的仿真与试验

张涛^{1a}, 张锋伟^{1b*}, 王丽娟², 石林榕^{1b}, 戴飞^{1b}, 赵武云^{1b}

(1.甘肃农业大学 a.农学院; b.工学院, 甘肃 兰州 730070; 2.兰州交通大学博文学院, 甘肃 兰州 730101)

摘要:针对甘肃地区玉米种植地块小且分散,人工收获劳动强度大,生产率低等问题,设计并研制了一种由传动系统、切割装置、扶禾器等组成的小型玉米秸秆收割机。利用 SolidWorks 和 ADMAS 对整机进行虚拟仿真,得到收割机的性能指标,并对样机进行田间收割试验。结果表明:收割机切割装置转轴的总动能为 1.547×10^5 J,转轴的总冲量为 3 858 N·s;在不清除地膜和杂草的条件下,平均割茬高度为 1.76 cm,玉米秸秆的平均铺放合格率达 95.59%,各装置协调、平稳、可靠,平均工作效率可达 $5.10 \text{ hm}^2/\text{h}$ 。通过整机虚拟仿真得到的转轴动能和冲量可作为收割机切割效果的性能指标。

关键词:玉米秸秆;收割机;试验;仿真

中图分类号: S225.5⁺¹ 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2015)05-0549-05

Simulation analysis and test of the small maize straw harvester

Zhang Tao^{1a}, Zhang Fengwei^{1b*}, Wang Lijuan², Shi Linrong^{1b}, Dai Fei^{1b}, Zhao Wuyun^{1b}

(1.a.College of Agronomy, b.College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2.Bowen College, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730101, China)

Abstract: Aimed at the problems in small and scattered corn field, i.e. mainly manual harvest, labor intensity, low productivity in gansu area, the small grain corn stalk harvester is designed and developed, which mainly composed of the transmission system, the cutting device and the grain lifer. Using SolidWorks and ADMAS virtual simulation the whole machine to get harvester performance indicators, and the corn straw harvest experiments are conducted on double ridge sowing fully-mulching dry land. The result show that the total kinetic energy of harvester cutting device axis is 1.547×10^5 J, and the total impulse is 3 858 N·s. Under the condition without to clear mulch and weeds, the average stubble height is 1.76 cm, and the corn straw qualified rate is reached 95.59%, as well as the device operating coordinatedly, stably and reliably. The average work efficiency can reach to $5.10 \text{ hm}^2/\text{h}$. The kinetic energy and impulse of the rotating shaft can be used as the performance indicators of harvester cutting property.

Keywords: corn straw; cutting machine; test; simulation

甘肃地区玉米种植地块比较分散,目前大部分地区玉米秸秆仍采用人工收割^[1]。

针对玉米秸秆人工收割劳动强度大,生产率低,使用联合收获机和大型收割机成本高等问题,笔者设计并研制了一种小型玉米秸秆收割机,收割装置轴中心距离可根据不同行距进行调节,结构紧凑,且易于安装维修;可实现覆膜且小地块玉米秸秆的收割和铺放。利用 SolidWorks 进行三维建模,

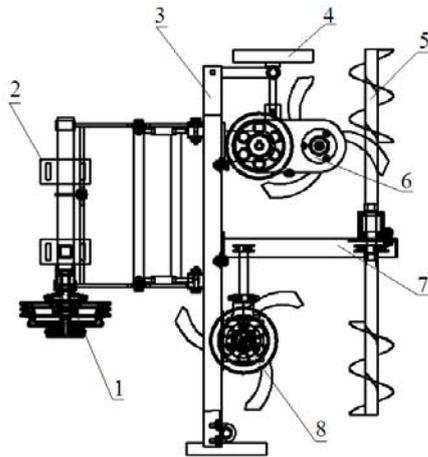
通过 ADMAS 对整机进行虚拟仿真,得到了各零件及整机性能指标,并进行了田间收割试验,现将结果报道如下。

1 整机结构及主要技术参数

1.1 整机结构及工作原理

玉米秸秆收割机主要由机架、传动齿轮箱、带传动箱、绞龙、工作轴、回转式割刀、限位臂、限

位轮等组成。其结构如图 1 所示。



1 皮带轮;2 悬挂架;3 机架;4 地轮;5 扶禾器;6 割刀组合;7 带传动箱;8 传动齿轮箱。

图 1 小型玉米秸秆收割机结构

Fig.1 The structure diagram of small cornstalks harvester

为了使该玉米秸秆收割机结构更加紧凑,操作灵活,有较高的行距适应性,有利于提高秸秆收割质量,与拖拉机的挂接选择前悬挂方式。机组工作时,收割机随拖拉机速度行进,地轮在机具两侧限位导向,带传动箱带动扶禾器轴作顺时针旋转,扶禾器将玉米秸秆压弯并收拢到两垄之间,内旋的回转式切割器将玉米秸秆从根部割断;在扶禾器和切割器的共同作用下,玉米秸秆整体向前铺倒并成纵行排列。

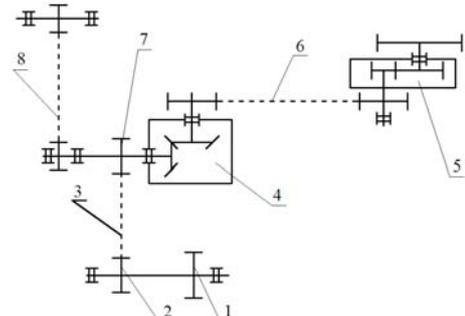
1.2 主要技术参数

该机配套动力为 8.83~13.24 kW 的四轮拖拉机,悬挂方式为前悬挂,通过皮带与拖拉机的动力结合。整机质量为 168.59 kg。工作行数为 2 行,适用的行距范围为 350~800 mm。空载条件下刀片的线速度为 23~28 m/s。

2 关键部件设计与分析

2.1 传动系统

图 2 为传动系统示意图。拖拉机动力经皮带带动收割机皮带轮转动,再由链传动传递至齿轮箱 I,通过带传动将动力传递至齿轮箱 II;其中链传动的一部分动力经过带传动传递至扶禾器,进而带动扶禾器工作。



1 皮带轮;2 大链轮;3 链条;4 齿轮箱 I;5 齿轮箱 II;6 皮带 I;7 小链轮;8 皮带 II。

图 2 玉米秸秆收割机传动系统

Fig.2 Schematic diagram of transmission system

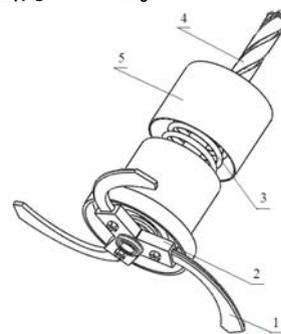
2.2 扶禾器

扶禾器主要由轴和螺旋叶片组成。轴采用直径 40 mm、长 110 cm 的圆空心钢制成,利用带传动箱两侧的轴承支座和链轮内部的键槽对轴进行固定。螺旋叶片是 2 段旋向相反的绞龙,绞龙的外直径为 85 mm,内直径为 40 mm,长为 45 cm,与轴的两边对齐并通过焊接安装。在收割过程中,两边的秸秆被绞龙向前压弯且往中间收拢,被割断后的秸秆呈条状、顺垄铺放,有利于后续打捆和掰棒工作的完成^[2]。

2.3 切割装置

2.3.1 切割装置及工作原理

参考圆盘式切割器的研究^[3-4],该机的切割装置主要由刀片、刀片固定座、刀片动力输出轴、轴预紧弹簧、轴套等组成,其结构如图 3 所示,采用组合式刀片,刀片数为 3,线速度 23.0~28.0 m/s,割刀回转直径 400 mm。切割装置的轴套之间安有预紧弹簧,使收割刀具有一定的仿形能力,其自动调整高度范围为 0~8 cm。



1 刀片;2 刀片固定座;3 轴预紧弹簧;4 刀片动力输出轴;5 轴套。

图 3 切割装置

Fig.3 Cutter structure

拖拉机的动力通过传动系统传递到刀轴，带动刀盘作平面回转运动，同时刀盘上的刀片实现整体回转式运动，将进入切割区的秸秆根部割断，整个玉米秸秆向前铺倒成纵行排列。

2.3.2 圆盘切割器的割刀运动和参数分析

圆盘式切割器的割刀运动是刀盘水平旋转与机器前进运动所合成的^[5]。刀片某一点对地面的轨迹为余摆线，如图 4 所示。刀片刃线对地面所扫过的面积为余摆带，其宽度与刃部长度相近似。

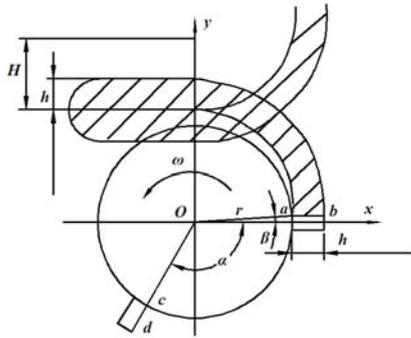


图 4 刀片运动轨迹
Fig.4 Motion track of blade

刀片任意一点的位移可用方程式^[6-7]表示。设刀盘中心为坐标原点 O，水平向右为 X 轴，垂直外端点的位移方程如下。

第 1 刀片内端 a 的位移方程：

$$X_a = r \cos(\omega t + \beta) \tag{1}$$

$$Y_a = v_m t + r \sin(\omega t + \beta) \tag{2}$$

式中：r 为刀片内端半径，mm；β 为刀片内外端点对盘的连线夹角；ω 为刀盘回转角速度，rad/s；t 为刀盘转过时间；v_m 为机器前进速度，m/s。

向上(机器前进方向)为 Y 轴。令刀盘逆时针转动，角速度为 ω，则相邻刀片各内、外端 b 的位移方程：

$$X_b = R \cos \omega t \tag{3}$$

$$Y_b = v_m t + R \sin \omega t \tag{4}$$

式中：R 为刀片外端半径，mm。

刀片的内、外端点的位移方程：

$$X_a = r \cos(\omega t + \beta - \alpha) \tag{5}$$

$$Y_c = v_m t + r \sin(\omega t - \alpha) \tag{6}$$

$$X_d = R \cos(\omega t - \alpha) \tag{7}$$

$$Y_d = v_m t + R \sin \omega t \tag{8}$$

式中：α 为相邻刀片夹角(°)。

回转式切割器因其切割能力强，回转惯性力容易平衡，振动较小，结构简单，适合粗茎秆类作物^[8]。

分析研究回转式刀片的运动参数，可以合理选择和设计切割器刀片的形状，以提高切割质量和效率。

3 玉米秸秆收割机的运动仿真

3.1 参数化建模与仿真

由于 ADAMS 软件参数化实体建模功能不强，所以利用 Solidworks 软件进行小型玉米秸秆收割机的三维建模，并以 Parasolid(*.X_T)的格式保存数据文件。

由于三维模型在数据转换的过程中可能出现特征的分离，因此需要对零部件的分离特征进行布尔操作^[9-10]，使得输入的各个构件是一个完整的零件。在 ADAMS/View 中输入小型玉米秸秆收割机的模型，并添加约束和载荷，如图 6 所示。通过施加约束及载荷，得到小型玉米秸秆收割机共 31 个可移动部件，添加的旋转副为 8 个，平移副 1 个，驱动 4 个，接触力 2 个，整机的自由度为 2。

将小型玉米秸秆收割机三维模型导入 ADAMS 虚拟样机中进行质量参数添加、布尔运算、载荷施加后，进行总装模型的仿真分析，设置仿真时间为 3.96 s，仿真步长为 200 步。

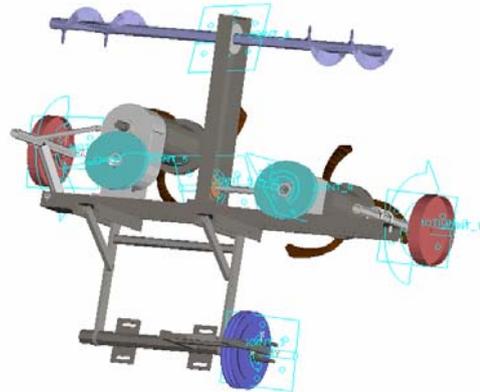


图 5 三维约束模型

Fig.5 The constraint of model

3.2 仿真结果与切割强度分析

小型玉米收割机刀片转动过程中，切割刀片所存储的能量即为刀轴动能，可作为检验刀片对秸秆的切断能力大小的标准，切割装置的动能分为刀轴转动动能和刀轴平动动能，如图 6 所示。由图 6 可知，刀轴的转动动能保持不变，为 1.545×10⁵J；刀轴平动动能满足正弦曲线，在机具正前方时是最大值，为 149.4 J，转到两侧时为 149.35 J，周期是 0.1 s，刀轴任何一点的动能在正前方时大于其他位置，转

轴的总能为 $1.547 \times 10^5 \text{ J}$ ，说明刀片转到正前方时的切割能量最大，切割效果最好。

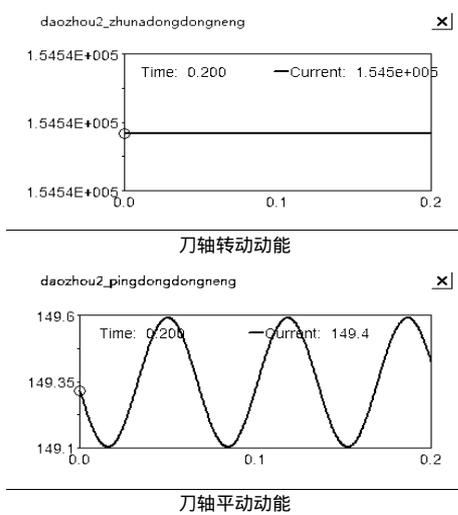


图 6 刀轴动能

Fig.6 Kinetic energy of cutter shaft

在切割过程中，刀片和秸秆相互作用的时间极短且受力大，变化剧烈，很难对该力的加速度作准确测量；通过虚拟样机仿真可得到刀轴的实时冲量，刀轴的冲量如图 7 所示，同样也分为转动冲量和平动冲量，其中刀轴的转动冲量保持不变，为

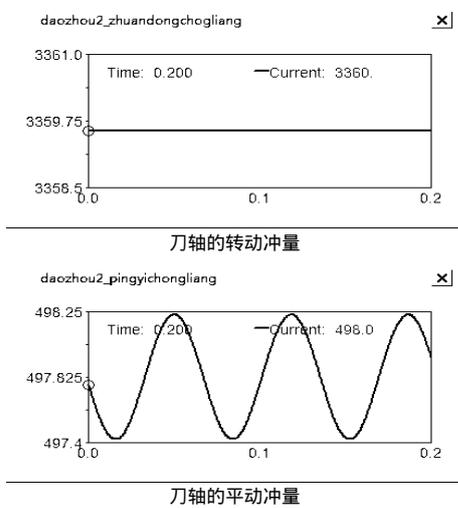


图 7 刀轴冲量

Fig.7 Impulse of cutter shaft

表 1 小型玉米秸秆收割机在不同试验条件下的主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of the small scale cornstalks harvester under different test conditions

试验区	生产率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	割茬高度/cm	铺放角/($^\circ$)	铺放厚度/cm	铺放合格率/%	收割后地表状况
1	4.76	1.78	5.2	4.14	92.32	
2	4.32	1.01	10.6	3.45	97.37	
3	5.78	2.56	4.9	6.28	97.89	割茬高度一致，无漏
4	5.14	1.62	8.7	4.36	95.43	割，地头地边处理合
5	5.54	1.81	12.6	5.39	94.17	理，无漏油现象
平均值	5.10	1.76	8.4	4.72	95.59	

3 360 N·s；刀轴的平动冲量满足正曲线规律，刀轴上的任何一点转到机具正前方时为 498.0 N·s，转到两侧时为 497.825 N·s，周期为 0.1 s。

4 田间试验

4.1 试验条件

样机试验在兰州大学农业实验区进行。试验地为全覆膜垄播旱地，地势平坦，土壤含水率约为 18%。每个试验区长约 100 m，宽约 30 m，总共分为 5 个试验区。试验地垄高 20~28 mm，行距 400 mm，株距 300 mm，地膜厚度 0.008~0.01 mm；玉米秸秆株高 204~281 cm，茎粗 19.52~38.62 mm，含水率约为 25%，植株茎和叶片已经枯萎，试验在未清除地膜、杂草的条件下进行。配套动力为东方红-200 型拖拉机，功率为 9.7 kW，作业速度为低二档，4.5 km/h。

4.2 试验方法

根据有关国家标准和农业机械试验方法^[11-13]，分别在全覆膜垄播旱地的 5 个试验区进行收割试验，测定试验区长度、机器通过时间、割茬高度、铺放角、铺层厚度、铺放合格率、收割后地表状况 7 个指标，考查收割机传动、割刀装置、扶禾器、液压操纵等各部分及整机的性能。割茬高度的测定是在每个测区行程方向上测定 3 个点，每个点 1 m^2 范围内测量留茬高度并取平均值，再对 3 个测定点求总平均值；铺放角、铺层厚度的测定是每个试验区随机选取 5 个点，测其秸秆与机具前进方向的夹角、铺层厚度，并求其平均值。

4.3 试验结果与分析

小型玉米秸秆收割机在全覆膜垄播旱地条件下的主要性能指标见表 1。

结果表明：在作业过程中，5 个试验区的平均工作效率为 $5.10 \text{ hm}^2/\text{h}$ ；割茬高度一致、无漏耕、地头地边处理合理，平均割茬高度为 1.76 cm ，铺放角 8.4° ，铺放厚度 4.72 cm ，铺放合格率达 95.59% ，符合收割机械的割茬高度和铺放标准^[14]，且明显优于玉米联合收获机械的铺放效果^[15]。

5 结论与讨论

通过 ADMAS 对虚拟样机进行模拟仿真，得到了衡量收割机切割能力的性能指标，即切割装置的动能和冲量，其值越大，说明刀盘的转速越高，刀片和秸秆相互作用的时间越短、受力极大，可以瞬间完成柔性秸秆和杂草的切割。

切割装置的绕轴转动设计，使其通过调节两切割器轴距适应不同行距秸秆的收割，其范围是 $350\sim 800 \text{ mm}$ ；切割器轴套之间安装的预紧弹簧具有仿形能力，刀片紧贴地面，根据地形不同，作 $0\sim 8 \text{ cm}$ 范围内的自动高度调节。

小型玉米秸秆收割机的平均割茬高度为 1.76 cm ，铺放合格率 95.59% ；机具动力强，工作效率高，可在不清除地膜和杂草的旱地条件下顺利作业，不发生缠绕、皮带打滑现象，平均工作效率是 $5.10 \text{ hm}^2/\text{h}$ 。

该机的离合装置还有待进一步改善，以免失效或零件磨损，影响工作效率；在机身尾部设计打捆或粉碎装袋装置，更能提高玉米秸秆回收利用和整机实用性。

参考文献：

- [1] 张亚萍. 甘肃定西玉米收割机的推广现状及策略[J]. 农业技术与装备, 2013(12): 5-6.
- [2] 石增武. 玉米收获机茎秆切割铺放装置的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
- [3] 刘兆朋. 圆盘式苕麻切割器的设计及试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- [4] 范国昌, 马大敏. 锯齿式双圆盘切割器的研究[J]. 河北农业技术师范学院学报, 1998, 12(2): 40-43.
- [5] 陈诚. 往复切割器式灌木平茬机切割力的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [6] 卿上乐, 颖刚华, 刘庆庭. 甘蔗收割机单圆盘切割器运动学分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 51-54.
- [7] 贾瑞昌, 赵华海. 收获机械切割器的技术进展[J]. 广东农机, 1999(3): 17-19.
- [8] 史增录, 赵武云, 吴建民, 等. 4UX-550型马铃薯收获机悬挂机组液耦合仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 98-102.
- [9] 黄汉东, 王玉兴, 唐艳芹, 等. 甘蔗切割过程的有限元仿真[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 161-166.
- [10] 何月娥. 农机试验设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [11] 南京农业大学. 田间试验和统计方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [12] 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.
- [13] 全国农业机械标准化技术委员会, 中国标准出版社第三编辑室. 农业机械标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 吴修远. 穗茎兼收型玉米收获机摘穗切碎装置设计与仿真试验分析[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.
- [15] 孟繁儒. 国外谷物和玉米收获机械[J]. 农机化研究, 1985(5): 21-25.
- [16] 江苏工学院. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1987.
- [17] 西北工业大学机械原理及机械零件教研室. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立