

玉米穗茎兼收割台切割夹持输送装置仿真与试验

张宗玲¹ 韩增德² 李树君³ 郝新明⁴ 王长伟⁴

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
3. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080; 4. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 以切割夹持装置为研究对象,采用 Recurdyn 软件构建玉米植株和切割夹持装置的刚柔混合系统,仿真分析了割刀与夹持点水平距离(-70、-35、0、35、70 mm)和果穗生长方向(机器前进方向、机器前进反向、垂直前进方向)对植株结穗点位移的影响。仿真结果表明:割刀与夹持点水平距离为 -70 mm 和 -35 mm 时,植株无夹持切割,会向果穗生长方向倾斜,容易造成损失;割刀与夹持点水平距离为 0、35、70 mm 时,植株夹持切割,结穗点位移变化规律相同,距离越大,对秸秆切碎均匀性越不利。试制穗茎兼收玉米割台,在机器作业速度为 1.2 m/s、夹持输送链线速度为 1.39 m/s 时,进行了割刀与夹持点水平距离分别为 -70 mm 和 35 mm 时的田间对比试验。田间试验结果为:割刀与夹持点水平距离为 -70 mm 时,植株收获总损失率为 36.2%,水平距离为 35 mm 时,植株收获总损失率仅为 3.3%,表明先夹持再切割可以大大减小植株收获损失率,验证了仿真分析的合理性及可靠性。

关键词: 玉米穗茎兼收; 切割夹持装置; 仿真; 田间试验

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0215-07

Simulation and Test on Straw Cutting and Clamping Device of Corn Combine Harvester for Stalk and Ears

Zhang Zongling¹ Han Zengde² Li Shujun³ Hao Xinming⁴ Wang Changwei⁴

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
3. China National Machinery Industry Corporation, Beijing 100080, China
4. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the influence of relative setting position between reciprocating cutter and nip point of gripping chains and the growth direction of corn ears on corn harvesting performance, a new gripping device of corn combine harvesting of corn stalk and ears in the cramping-cutting-transporting type was designed. A rice special agricultural chain was used to replace the gathering chain and gripping chain of gripping device in original corn combine harvester. The theory of dividing, dialing and gripping corn stalk was analyzed. Recurdyn software was employed to build a rigid-flexible system with corn stalk as flexible part and cutting-grapping device as rigid element. The effect of five horizontal distances between reciprocating cutter and nip point of gripping chains and three growth directions of corn ear on motion of ear growth point were simulated. The five distances were -70 mm, -35 mm, 0 mm, 35 mm and 70 mm, respectively, and the three directions were separately machine forwarding direction, opposite and vertical to forward directions. The simulation results showed that both the growth direction of corn ears and relative distance had effect on motion of corn plants. When the horizontal distance was -70 mm and -35 mm, corn plants were cut with no cramping, they would incline to the direction of corn ear growing;

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-19
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701904)
作者简介: 张宗玲(1989—),女,博士生,主要从事收获机械技术研究,E-mail: jdjzzl@163.com
通信作者: 李树君(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事农产品加工及贮藏工程研究,E-mail: lishujun@sinomach.com.cn

when the distance was 0 mm, 35 mm and 70 mm, corn plants were cut with cramping and they would move with gripping chains. A corn combine harvester for stalk and ears was designed and manufactured to test the performance of cutting and gripping device with horizontal distance of -70 mm and -35 mm in the field. Field tests were made at machine working speed of 1.2 m/s and gripping chain speed of 1.39 m/s. The results indicated that when the horizontal position of cutter relative to the nip point of grip chains was -70 mm, the total plant loss was 36.2% , while it was 3.3% with the position of 35 mm. This verified that cutting with gripping could greatly reduce the grain harvesting loss, and it proved that the simulation analysis was reasonable and reliable. This study illustrated corn combine harvester for stalk and ears in the cramping-cutting-transporting type needed to cut with gripping and provided a basis for design of corn combine in this type.

Key words: corn stalk and ears combine harvesting; cutting and gripping device; simulation; field test

引言

玉米茎秆可以作为优质的饲料来源和重要的工业原料。近年来,玉米茎秆的收获得了越来越多的重视,研究者们设计了多种穗茎兼收玉米割台^[1-3]。其中,拨禾链拨禾-往复式切割器切割-夹持链夹持输送-摘穗装置摘穗是目前广泛应用的玉米穗茎兼收收获割台的工作流程,能够完成玉米果穗和茎秆的收获^[4-6]。前期研究结果表明:此种割台中割刀和夹持输送链的安装位置会直接影响到玉米的收获质量^[7]。因此,在设计切割夹持装置时,需优化割刀与夹持输送链的安装位置。传统的优化方法是通过更换部件进行试验确定安装范围,费时费力,且受玉米收获季节性的制约。随着计算机技术的提高,计算机辅助设计及仿真分析得到了广泛应用,研究者们利用 ANSYS、ADAMS 及 Matlab 等软件对玉米收获机的分禾、摘穗装置进行了多种仿真分析^[8-12]。

本文以自制的切割夹持装置为研究对象,基于多体动力学理论,利用 Recurdyn 软件刚柔混合系统分析往复式割刀与夹持点的相对位置与果穗生长方向对玉米植株收获性能的影响,最后进行田间试验。

1 结构设计

因传统果穗拨禾链拨齿间距较大,在收获过程中,主要用于拨禾与果穗输送,不具备夹持输送茎秆的功能。本设计采用水稻专用农机夹持输送链(3358T-48180 型),实现拨禾与夹持输送一体化。设置了可调间隙的链条导板,实现不同直径茎秆的夹持输送。切割夹持装置结构如图 1 所示。

装置的工作流程:随着收获机的前进,玉米植株被分禾器引向夹持输送链,并由夹持输送链向后输送到夹持位置,茎秆被夹持后由往复式切割器完成切割,茎秆被切断后,玉米植株在夹持输送链的作用

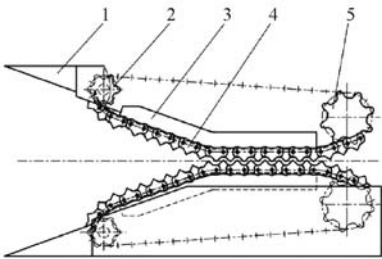


图 1 夹持输送装置简图

Fig.1 Diagram of dialing and clamping mechanism of corn straw

1. 分禾器 2. 从动链轮 3. 链条导板 4. 链条 5. 主动链轮

下输送到摘穗装置,果穗被摘下。工作要求:保证先夹持后切割,避免玉米植株由于果穗生长位置不同产生倾斜,造成损失。

1.1 玉米植株受力及运动分析

玉米植株在分禾、拨禾、夹持阶段的受力及运动分析如图 2 所示。

由图 2a 玉米植株在分禾过程中的受力分析可得

$$\begin{cases} F_n = F_j \sin \alpha \\ F_m = f F_n \end{cases} \tag{1}$$

式中 F_n ——分禾器对茎秆的支持力,N
 F_j ——茎秆反弹力,N
 F_m ——分禾器对茎秆的摩擦力,N
 2α ——分禾器锥角,(°)
 f ——玉米茎秆与分禾器间的摩擦因数,为 0.2~0.6^[9]

分禾器能实现分禾且不推倒茎秆的条件为

$$F_j \cos \alpha \geq F_m \tag{2}$$

即 $f \tan \alpha \leq 1, \alpha \leq 59^\circ$ 。

由图 2b 夹持输送链拨禾时茎秆的速度分析,可得

$$\begin{cases} v_L \cos(\alpha' + \theta) = (v_m / \cos \beta) \cos \theta \\ v_{Z1} = v_L \sin(\alpha' + \theta) - (v_m / \cos \beta) \sin \theta \end{cases} \tag{3}$$

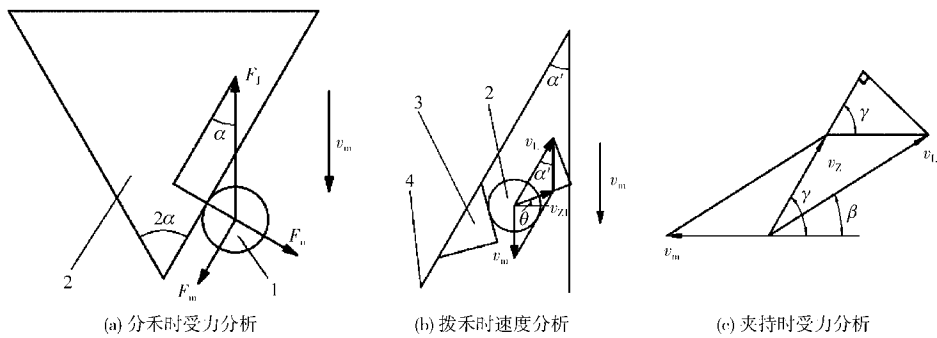


图2 玉米植株受力及运动分析

Fig. 2 Force and motion analyses diagram of corn plant

1. 茎秆 2. 分禾器 3. 链片 4. 链条

式中 v_L ——夹持输送链线速度, m/s
 v_m ——前进速度, m/s
 β ——割台倾角, ($^\circ$)
 v_{zi} ——茎秆与链片接触点的合速度, m/s
 α' ——夹持输送链拨禾段与收获机前进方向间的夹角, ($^\circ$)
 θ —— v_{zi} 与机器前进方向垂线间的夹角, ($^\circ$)
夹持输送链能拨禾的条件为: $\theta \geq 0$, 即

$$v_L \cos \alpha \cos \beta \geq v_m \quad (4)$$

由图 2c 切割后玉米植株在夹持输送链中的运动分析可得

$$v_L \sin(\gamma - \beta) = v_m \sin \gamma \quad (5)$$

得

$$\frac{v_L}{v_m} = \frac{\sin \gamma}{\sin(\gamma - \beta)} \quad (6)$$

式中 γ ——合速度与机器前进反方向间夹角, ($^\circ$)

1.2 参数确定

分禾器设计需要满足扶禾拢禾, 且不推倒折断玉米茎秆。我国玉米收获时茎秆含水率普遍在 70%~80%, 玉米植株折断临界角(在即将折断的瞬间, 植株与地面法线的夹角)一般在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 玉米结穗高度一般不小于 600 mm, 研究表明在结穗高度为 600 mm 时, 理论上分禾器宽度不大于 220 mm 就能避免植株被分禾器折断^[13-14], 本文将分禾器宽度设计为 180 mm, 两分禾器间距为 480 mm。

因夹持链与水平面夹角一般为 $20^\circ \sim 25^\circ$ ^[9], 故设计割台在低割位置时的倾角 β 为 23° , 设计分禾器锥角 2α 为 40° , 对应拨禾段夹持输送链夹角与前进方向夹角 α' 为 20° , 故机器作用速度 v_0 为 1.0 m/s 时, 夹持输送链线速度 v_L 应大于等于 1.16 m/s。

夹持输送链选用 3358T-48180 型农机专用链, 链条间距为 35 mm, 链条内节内宽为 58 mm, 设计主动链轮齿数为 8, 从动链轮齿数为 6。由前期研究可知^[15], 根部茎秆折断变形范围可超过 15 mm, 稍部变形量低于 5 mm。本设计中链片间隙取为 10 mm。

2 模型建立

利用 Recurdyn 软件中 R-Flex 方法对玉米茎秆柔性体与夹持机构刚性体混合进行仿真分析, 分析切割点对玉米植株夹持时结穗点位移的影响。

2.1 玉米茎秆仿真模型的建立

根据文献[16-18], 确定仿真时玉米茎秆的物理参数: 玉米茎秆高度为 2 400 mm, 结穗高度为 1 085 mm, 茎秆直径 21 mm, 分 15 节, 泊松比为 0.33, 弹性模量为 1.1×10^4 MPa, 密度为 450 kg/m^3 。

为了减少网格数量, 加快仿真速度, 将玉米茎秆柔性体设置为梁单元, 步骤为 Flexible→Beam, 在窗口中输入每节玉米茎秆的中心点, 然后右键完成操作, 在 Beam Group 的 Library 中选择梁的截面形状(本文选择中空圆柱体), 在 Property 中设置泊松比为 0.33, 半径 R 为 10.5 mm, 茎秆壁厚 t 为 1.5 mm, 设置 Node Thickness 为 160 mm, Mesh Segmen 设置为 1, 设置完成, 茎秆模型建立。

2.2 机构模型建立

利用 Chain 工具包建立夹持输送装置, 依次建立从动链轮、主动链轮、链连接和链条导板, 其中从动链轮和主动链轮需要建立链轮轴, 链轮轴与母体用固定副连接, 链轮与链轮轴间有转动副, 主动链轮的 RevJoint 需要定义 Motion, 为了使链在启动时相对平稳, 用 step 函数定义 Motion 中 Velocity(time)。然后选择 Chain→Assembly, 依次选择主动链轮, 链导板, 从动链轮, 再回到主动链轮, 构建闭环链装配, Bushings Type 选择 Single, 勾选 Auto Link No. Calculation 和 Auto Guide Type Search, 点击 Estimation, 链装配完成。因所用夹持输送链为农业机械专用链, 在 Recurdyn 软件中没有该链型, 本文在 SolidWorks 软件中建立了链片模型, 导入到 Recurdyn 软件中, 用 Bushing Force 联接链片和链内外节, 完成链条系统的建立。

另一链条系统利用复制粘贴再用 Basic Object

Control 调整到需要的位置,夹持输送链系统建立完成。为了仿真机器前进运动,设置链条系统的母体,给母体定义水平移动副,机构与玉米的仿真模型如图 3 所示。

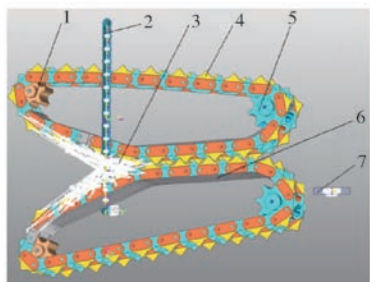


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

- 1. 从动链轮 2. 玉米茎秆 3. 链片与茎秆间的连接处 4. 链片
- 5. 主动链轮 6. 链条导板 7. 母体

3 模型仿真分析

3.1 主从链轮的速度

定义主动链轮的转速表达式为 $-\text{step}(\text{time}, 0, 0.5, w)$, 即启动 0.5 s 后, 链轮转速为 w , 定义 w 分别为: 10、60 rad/s, 对应的链条线速度分别为: 1 344、8 400 mm/s。为了仿真割台随机器运动, 定义链子系统母体水平移动副位移与时间的运动方程式为 $\text{DIM}(\text{time}, 0.5) * 1\,000$, 表示仿真时间为 0.5 s 时, 母体开始以速度为 1 000 mm/s 匀速运动, 这是为了保证夹持输送链的转速达到稳定值后再对茎秆作用。

仿真中链系统的主动链轮和从动链轮的移动速度和转动速度如图 4 所示。图 4a 表示主动链轮转速为 10 rad/s 时, 主动链轮与从动链轮转动与平动速度图, 因主动链轮与从动链轮的齿数比为 8:6, 故从动链轮的转速应为 13.33 rad/s。因链传动的不平稳性, 为了进一步分析主从动链轮转速关系和夹持茎秆对链轮转速的影响, 分析了主动链轮转速为 60 rad/s 时主从链轮转速的变化, 如图 4b 所示。从图中可知, 主动链轮的转速平稳地增至 60 rad/s, 在

链传动作用下, 从动轮转速振动增至 80 rad/s。在仿真时间为 0.5 s 时, 链轮才有移动速度。在该仿真图中茎秆与夹持点在机器前进方向上的相对位置为 50 mm, 因此茎秆会在仿真时间为 0.55 s 时被夹持, 此时从动链轮的转速因链受力而出现跳动。仿真中主、从动链轮的转速和移动速度与实际情况相符。

图 4a 与图 4b 对比可知, 链条速度增加, 夹持茎秆时链条所受的冲击力越大, 在低速下, 夹持茎秆时的冲击相对于链条本身的传动冲击小。两图中起始位置有大小相同的瞬时角速度, 这是由于链条间的套筒力在启动瞬间对从动链轮作用, 阻碍其运动。

3.2 植株结穗位置对玉米收获的影响

为了提高仿真效率, 设置主动链轮转速表达式为 $-\text{step}(\text{time}, 0, 0.05, 10)$, 定义链子系统母体水平移动副位移与时间的运动方程式为 $\text{DIM}(\text{time}, 0.1) * 1\,000$ 。茎秆相对于夹持点的 x 轴坐标为 -100 mm 。利用 Analysis 中的 Scenario 设置 Beam Force 2 的失效时间点来仿真割刀的不同位置, 仿真失效时间分别设置为 0.13 (图 5)、0.165、0.2、0.235、0.27 s 分别对应切割位置距离夹持点的水平距离为 -70 、 -35 、 0 、 35 、 70 mm 。仿真步长为 0.002 5 s。

设机器前进方向为 x 轴负方向, 机器前进相反方向为 x 轴正方向, 沿机器前进方向右侧垂直方向为 y 轴正方向, 垂直向上为 z 轴正方向。在玉米茎秆结穗高度 1 050 mm 处^[8] 建立 3 个不同方向的力矩来仿真果穗不同的生长位置, 分别为 x 轴正向, x 轴负向, y 轴负向。研究果穗生长方向不同时, 对切割夹持的影响。

研究了切割位置与夹持点的水平距离分别为 -70 mm 和 0 mm 时, 果穗生长位置对结穗点位移的影响, 如图 6 所示。图 6a 表示距离为 -70 mm 时切割后结穗点 x 、 y 、 z 方向上的位移, 此时茎秆切割后未被夹持输送链夹持, 在果穗的转矩作用下, 茎秆向果穗生长方向倾斜。当果穗位置在 x 轴正向时, 植

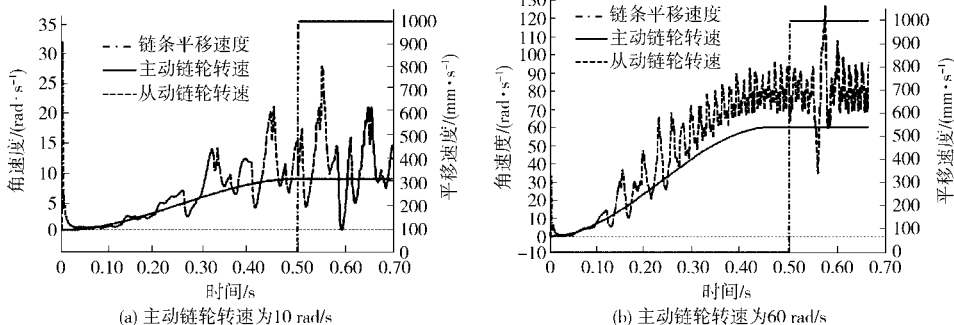


图 4 主动链轮和从动链轮的转动速度和链条平移速度

Fig. 4 Rotational speed of master and slave sprockets and translational speed of chain

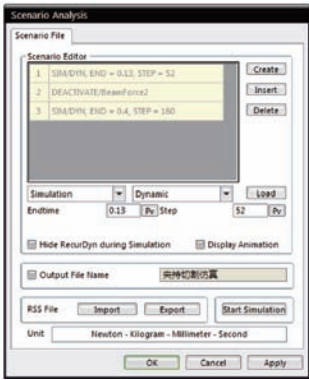


图5 距离为-70 mm 时仿真时间设置窗口

Fig.5 Simulation time setting window with distance between cutter and nip point of -70 mm

株倾斜方向与机器前进方向相反,在植株向后倾斜过程中与夹持输送链相遇,同割台一起运动, x 轴位移先增大后均速减小, y 轴位移基本保持不变, z 轴位移先减小后保持不变,曲线的波动是由茎秆同割台运动时链片对茎秆作用产生;当果穗生长位置在 y 轴负向时,植株倾斜方向与机器前进方向垂直, x 轴位移不变,起始阶段在果穗的作用下倾斜,产生倾斜后重力与果穗同时作用,倾斜加速度增大,故 y 轴和 z 轴位移呈抛物线状;当果穗生长在 x 轴负向时,植株倾斜方向与机器前进方向相同,植株与机器的相遇会加快植株向 x 轴负向倾斜, x 轴和 z 轴位移呈抛物线, y 轴坐标不变。

图 6b 表示切割位置与夹持点距离为 0 mm、结穗位置不同时,切割后结穗点在 x 、 y 、 z 方向上的位移变化,此时茎秆在有夹持的状态下完成切割。从图 6b 中可知,果穗在 3 个生长方向,茎秆均能被夹

持,果穗生长位置对结穗点位移仍有影响,结穗点 x 轴位移由大到小为: x 轴负向生长、 y 轴负向生长、 x 轴正向生长; y 轴位移中 y 轴负向生长的果穗位移最大, x 轴负向与正向生长的果穗位移相同;3 个生长方向的果穗 z 轴位移相同,由于夹持输送链对茎秆的摩擦力小于茎秆的重力,故在夹持输送过程中茎秆在重力作用下会向 z 轴负向运动,故 z 轴位移呈抛物线状。

3.3 切割点对玉米收获的影响

由 3.2 节的分析可知果穗生长方向在 x 轴负向时最不利于夹持,因此在本节仅分析果穗生长方向在 x 轴负向时切割点位置对结穗点位移的影响。

定义链条导板水平方向左侧起点为夹持点,当割刀与夹持点间的水平距离分别为 -70、-35、0、35、70 mm 时(为了方便调整链装配,依据链条的节距确定割刀与夹持点的水平距离间隔),结穗点在 x 、 y 、 z 方向上的位移随时间的变化如图 7 所示。由图 7 仿真曲线可知,在仿真时间为 0.15 s 链片开始对茎秆作用,结穗点位置振动。仿真中割刀与夹持点位置为 -70 mm 和 -35 mm 时,茎秆为无夹持切割,并在果穗和重力作用下倾斜,容易造成损失。割刀与夹持点的水平距离为 0 mm、35 mm 和 70 mm 时,茎秆为夹持切割,切割完成后,茎秆随夹持输送链一起运动,3 种位置下果穗结穗点位移变化规律相同, z 轴位移加速度小于距离为 -35 mm 和 -70 mm 时的加速度,这是由于夹持输送链对茎秆的摩擦作用。割刀与夹持点的水平距离越大, z 轴位移量越大,对后续切碎质量越不利。

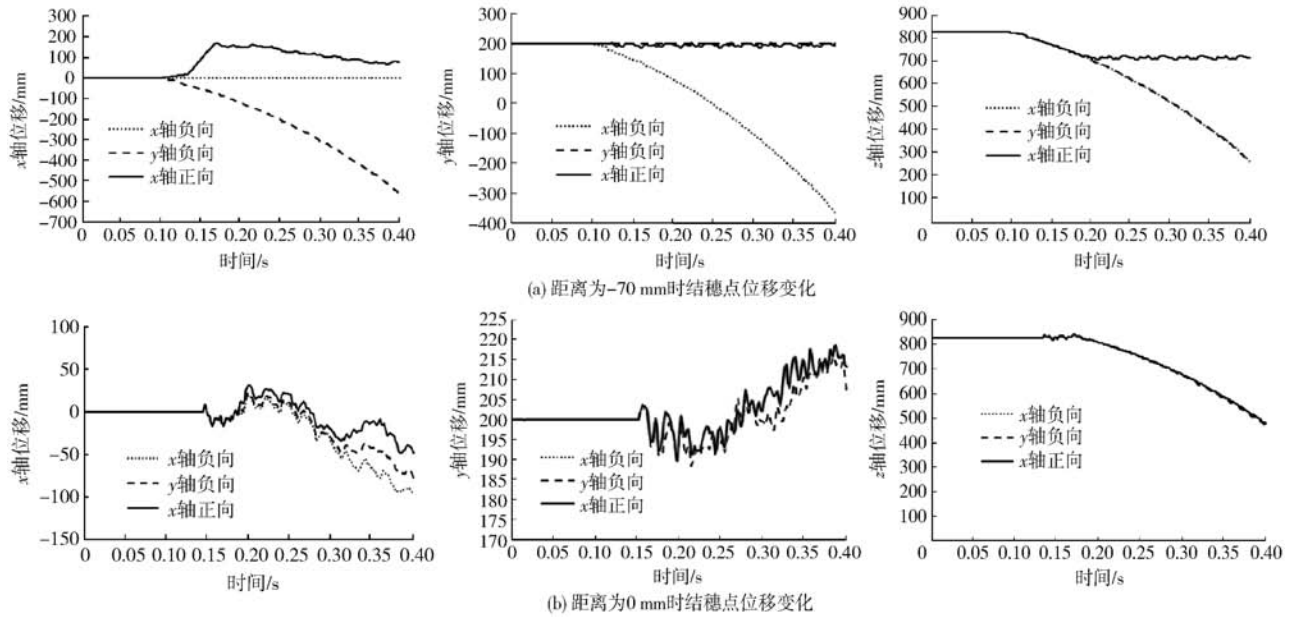


图6 果穗生长位置对结穗点位移的影响

Fig.6 Influence of corn ear growing direction on displacement of corn ear growing point

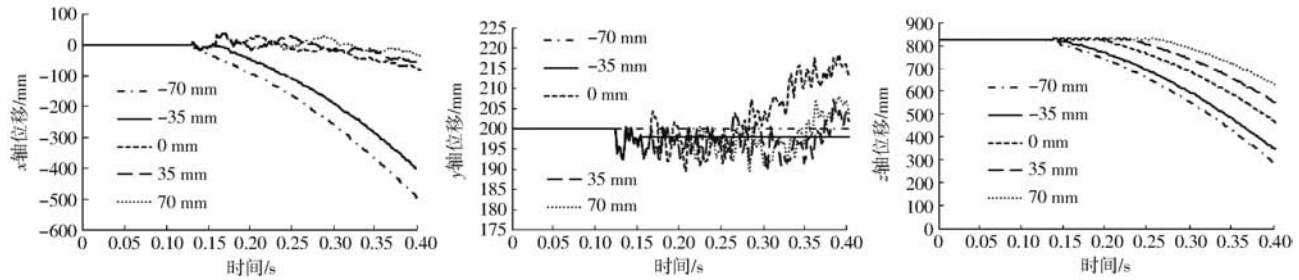


图7 切割点对结穗点位移的影响

Fig.7 Influence of cutter position on displacement of corn ear growing point

4 田间试验

4.1 试验方法

根据仿真模型结果,对样机进行优化,并于2015年10月进行玉米收割试验,试验地点为河北省保定市涿水县涿水镇庄町村,试验品种为兴农998。株距为295 mm,行距为638 mm。田间试验方法:按照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械 试验方法》规定的方法,试验区由20 m 稳定区、20 m 测定区、15 m 停车区组成,稳定区和停车区的玉米在试验前清理干净。

试制穗茎兼收玉米收获机割台,切割位置与夹持点间的水平间距分别调整为-70 mm 和35 mm,在机器作业速度为1.2 m/s,夹持输送链线速度为1.39 m/s 时,进行田间试验,试验实物图如图8所示。每组试验重复3次。

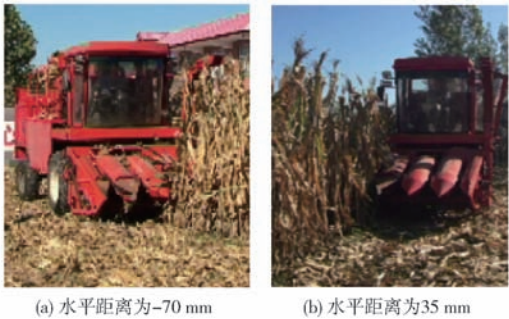


图8 田间试验

Fig.8 Field test

4.2 试验参数

试验中以单行收获时植株推倒率、植株夹持损失率、植株收获总损失率为试验指标。试验指标计算方法如下:

(1)植株推倒率 W_1

$$W_1 = \frac{N_t}{N_z} \times 100\%$$
 (7)

式中 N_t ——每次试验中被推倒的植株数量,株
 N_z ——每次试验收获的总植株数,株

(2)植株夹持损失率 W_2

$$W_2 = \frac{N_j}{N_z} \times 100\%$$
 (8)

式中 N_j ——每次试验中因夹持不稳定损失的植株数量,株

(3)植株收获总损失率 W_3

$$W_3 = W_1 + W_2$$
 (9)

4.3 试验结果

试验中获得的推倒植株和夹持损失植株数量可计算植株损失率,结果如表1所示,切割位置在 x 轴正向与夹持点水平距离为-70 mm 时,植株收获总损失率为36.2%,距离为35 mm 时植株总损失率仅为3.3%,说明先夹持再切割可以大大减小植株损失率,降低植株的推倒率和夹持损失率,该结果与仿真结果相一致。

表1 切割夹持装置植株损失率

Tab.1 Plant loss rate of cutting and gripping device

间距/ mm	试验 序号	植株推倒 率/%	夹持损失 率/%	植株总损 失率/%
-70	1	24.2	11.5	35.7
	2	24.1	12.4	36.5
	3	25.7	10.7	36.4
	平均值			36.2
35	1	2.2	1.6	3.8
	2	1.1	2.3	3.4
	3	1.9	0.9	2.8
	平均值			3.3

5 结论

(1)利用 Recurdyn 软件创建了玉米茎秆与切割夹持装置刚柔混合系统,分析了夹持输送切割过程,解释了穗茎兼收玉米割台的切割夹持输送工作原理,明确了该原理的玉米收获割台需先夹持后切割,为穗茎兼收玉米收获割台的设计提供了方法。

(2)仿真结果表明:无夹持切割时植株会向果穗生长方向倾斜,产生损失趋势,夹持切割时,植株结穗点位移变化规律相同,但割刀与夹持点间的水平距离越大,对后续切碎质量越不利。故割刀与夹

持点位置设置应能满足先夹持后切割,但两者距离不易过大。

(3)田间试验结果表明:在机器作业速度为 1.2 m/s,夹持输送链线速度为 1.39 m/s 时,割刀与夹持点水平距离为 -70 mm 时,植株收获总损失率

为 36.2%,距离为 35 mm 时植株收获总损失率为 3.3%,说明先夹持再切割可以大大减小植株收获损失率,该结果与仿真结论相一致,证实了利用 Recurdyn 软件仿真分析切割夹持装置性能的可靠性。

参 考 文 献

- 1 齐自成,马继春,姜伟,等. 穗茎兼收玉米联合收获机的研究现状及前景展望[J]. 农业装备与车辆工程,2011(10): 1-4.
QI Zicheng, MA Jichun, JIANG Wei, et al. The research situation and foreground of domestic corn combine reaping both corn stalk and spike[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2011(10): 1-4. (in Chinese)
- 2 赵学林. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆切碎回收装置设计与研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2014.
ZHAO Xuelin. Design and research for the stalk chopping and recovery device of corn combine reaping both stalk and spike[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
- 3 高林,任建伟,郭永杰,等. 我国自走式穗茎兼收联合收获机的发展历程与现状[J]. 农业机械,2015(17): 129-132.
- 4 张道林,孙永进,赵洪光,等. 立辊式玉米摘穗与茎秆切碎装置的设计[J]. 农业机械学报,2005,36(7): 50-52, 76.
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang, et al. Design of a vertical-roll type of corn picker and stalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 50-52, 76. (in Chinese)
- 5 闫洪余,吴文福,尹慧敏,等. 立辊型玉米收获机运动参数对损失率的影响[J]. 吉林大学学报:工学版,2010,40(1): 113-118.
YAN Hongyu, WU Wenfu, YIN Huimin, et al. Influence of working parameters on loss rate of vertical roll corn harvester[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(1): 113-118. (in Chinese)
- 6 闫洪余,吴文福,韩峰,等. 立辊型玉米收获机摘穗辊型对工作性能的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(5): 76-80.
YAN Hongyu, WU Wenfu, HAN Feng, et al. Effects of the type of the snapping rolls of vertical corn harvester on harvesting performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 76-80. (in Chinese)
- 7 赵洪光,张道林. 秸秆切割装置夹持与切割关系的分析[J]. 山东理工大学学报:自然科学版,2005,19(4): 81-84.
ZHAO Hongguang, ZHANG Daolin. The relationships between clamping and cutting on straw cutting system[J]. Journal of Shangdong University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 19(4): 81-84. (in Chinese)
- 8 杜岳峰,朱忠祥,宋正河,等. 小型玉米收获机分禾与摘穗装置性能仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊): 100-105.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Simulation of divider and snapping roll for small-scale corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 100-105. (in Chinese)
- 9 杜岳峰,毛恩荣,朱忠祥,等. 两行玉米收获机割台设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊2): 22-26.
DU Yuefeng, MAO Enrong, ZHU Zhongxiang, et al. Design and experiment of two-row corn harvester header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 22-26. (in Chinese)
- 10 崔涛,刘佳,张东兴,等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 的玉米茎秆柔性体仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊): 112-115.
CUI Tao, LIU Jia, ZHANG Dongxing, et al. Flexible body simulation for corn stem based on ANSYS and ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 112-115. (in Chinese)
- 11 郭君娣,伍德林,陈黎卿. 基于 ADAMS 的玉米茎秆与收获割台仿真[J]. 农机化研究,2016(3): 80-85.
GUO Jundi, WU Delin, CHEN Liqing. Simulation of maize culm with harvester header based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(3): 80-85. (in Chinese)
- 12 贺俊林,胡伟,郭玉富,等. 扶禾杆在不对行导入玉米茎秆中的运动仿真[J]. 农业工程学报,2007,23(6): 125-129.
HE Junlin, HU Wei, GUO Yufu, et al. Kinematic simulation of no-row feed-in mechanism with guide-rod for corn harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 125-129. (in Chinese)
- 13 杜翠红. 穗茎兼收型玉米联合收获机立式割台的理论与试验研究[D]. 淄博:山东理工大学,2006.
DU Cuihong. Theory and experimental study on the vertical header of corn combine harvester for both ears and stalks[D]. Zibo: Shangdong University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 14 贺俊林. 低损伤玉米摘穗部件表面仿生技术和不分行喂入机构仿真[D]. 长春:吉林大学,2007.
HE Junlin. Biomimetic surfaces of snapping rolls with lower damage action and simulation of no-row feed-in mechanism of maize harvesters[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 15 张彦河. 玉米秸破碎力学特性的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2003,15(4): 43-45.
ZHANG Yanhe. A study of mechanics characteristics on breaking up corn straw[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2003, 15(4): 43-45. (in Chinese)
- 16 郝付平,陈志,张子瑞,等. 拨禾星轮式玉米收获台设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(6): 112-117.
HAO Fuping, CHEN Zhi, ZHANG Zirui, et al. Design and experiment of corn harvester head with reel star wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 112-117. (in Chinese)
- 17 高梦祥,郭康权,杨中平,等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报,2003,34(4): 46-50.
GAO Mengxiang, GUO Kangquan, YANG Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 46-50. (in Chinese)
- 18 张智龙. 梳脱式玉米摘穗机构设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
ZHANG Zhilong. Design and experiment of a corn stripping mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)