

基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真*

杜岳峰 毛恩荣 宋正河 朱忠祥 高建民
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 在 Pro/E 中建立了摘穗辊及玉米植株收获模型,利用 Pro/E 与 ADAMS 的接口 MECHANISM/Pro 将所建模型导入了 ADAMS 中,通过分析植株受力,在 ADAMS 中建立了玉米植株与摘穗辊收获过程的虚拟样机模型,并添加约束和驱动。运用传感器技术,通过脚本仿真控制实现了玉米植株与摘穗辊收获过程的仿真,分析了玉米植株在倾角为 79°时的收获数据,最后依据收获时间、果穗啃伤分析了倾角对收获过程的影响,得出了玉米植株收获的理想倾角为 89°,为立辊式玉米收获机关键部件的设计提供了参数支持。

关键词: 玉米植株 立式摘穗辊 虚拟样机模型 收获过程 ADAMS

中图分类号: S225.5⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0106-06

Simulation on Corn Plants in Harvesting Process Based on ADAMS

Du Yuefeng Mao Enrong Song Zhenghe Zhu Zhongxiang Gao Jianmin
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

The models of stripper rollers of a certain type of corn harvester and corn plants were established in Pro/E. And then, these models were led to the ADAMS environment with the interface of MECHANISM/Pro to create the virtual prototyping models including constrains and motions. The harvesting process was simulated based on the ADAMS techniques of sensor and manuscript control. The simulation data analysis was mainly focused on the case that the corn plants at the angle of 79°. Finally, the best inclination angle of plant, 89°, was derived based on the analysis of harvest time and grain hurt rate.

Key words Corn plants, Vertical roller, Virtual prototyping models, Harvesting process, ADAMS

引言

摘穗部件是玉米收获机的核心部件^[1]。玉米收获机割台按照摘穗形式分为摘穗辊式和摘穗板式,摘穗辊式割台又分为卧辊式和立辊式。立辊式割台的适应性和工作可靠性不如卧辊式,但其在秸秆回收和籽粒损失方面有优势。目前国内外对立辊式割台研究相对较少,其结构型式、运动参数等工作性能、收获损失的影响及玉米植株在摘辊上的运动规律等均缺乏理论和试验等基础支撑。

本文运用 ADAMS 建立收获时玉米果穗与秸秆分离过程的虚拟样机模型,进行玉米收获过程中玉

米植株(包括玉米茎秆和玉米果穗,下同)与摘穗辊的运动学和动力学仿真。

1 虚拟样机模型建立

1.1 Pro/E 三维模型

立辊式玉米收获机是指摘穗辊与水平面的夹角大于 60°的玉米收获机^[2]。文中玉米植株物理参数为 2010 年在重庆永川区实测收获期数据,分析测量数据得到:玉米植株平均高度为 2 000 mm,平均直径为 25 mm,平均结穗高度为 950 mm。玉米植株材料力学参数为玉米植株平均密度 450 kg/m³、泊松比 0.33 和模量 1.1 × 10¹⁰ Pa^[3-4]。立式摘穗辊参数采

收稿日期: 2012-07-04 修回日期: 2012-08-01

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903050-5)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B01)

作者简介: 杜岳峰,博士生,主要从事车辆动力学和虚拟现实研究,E-mail: duyuefeng3705348@163.com

通讯作者: 毛恩荣,教授,博士生导师,主要从事液压传动和农业装备数字化设计研究,E-mail: gxy15@cau.edu.cn

用了国内现有的某小型立辊式玉米收获机设计参数。此外,夹持输送链夹持高度为 270 mm,如图 1 中的点 C 所示。

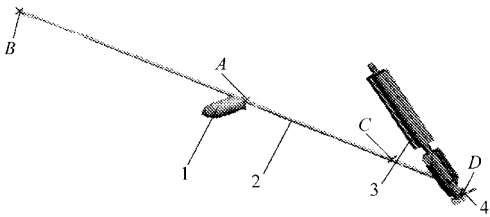


图 1 秸秆及果穗位置示意图
Fig.1 Position of straws and grains

1. 玉米果穗 2. 玉米秸秆 3. 摘穗辊 4. 摘穗辊底座

根据仿真需求,虚拟样机模型中玉米植株与摘穗辊的装配关系为:

(1) 秸秆与链条的夹持点 C 在脱离链条前始终沿链条(在摘穗辊中部空缺处,图示未标出)方向运行。

(2) 秸秆底端——点 D 的初始位置应在一对摘穗辊轴线组成的平面内。

(3) 秸秆的倾角通过调整平面 1(秸秆轴线与垂直于纸面的法线组成的平面)与平面 2(重力方向与垂直于纸面的法线组成的平面)的夹角实现。

通过变换(3)就可以实现不同倾角的玉米植株收获所需的 Pro/E 模型。

在 Pro/E 中简化后的植株与摘穗辊模型如图 1 所示。其中摘穗辊底部连接的传动箱被摘穗辊底座代替,并将摘穗辊后的一对拉茎辊省略。该设计的主要目的是为了简化模型、便于改变玉米植株的倾角及在 ADAMS 中添加收获机平移副、定义驱动方向等。

1.2 三维模型导入 ADAMS

利用 Pro/E 与 ADAMS 的接口 MECHANISM/Pro,将建立好的三维模型转换至 ADAMS 中,在 MECHANISM/Pro 中定义刚体。

1.3 玉米植株受链条及摘穗辊作用力和力矩分析

当下立辊拉引秸秆时,在辊作用力 F 的作用下,植株将受 X 、 Y 向两个方向力 F_x 和 F_y 的作用,同时也受到链条对它的作用力(夹持摩擦力) F_i 作用,如图 2 所示。假定植株作匀速和匀转速平面运动,则建立平衡方程式为

$$\begin{cases} F_x = F_i \sin \varphi \\ F_y = G - F_i \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$
$$\begin{cases} F_x = F \cos (\varphi - \theta) \\ F_y = F \sin (\varphi - \theta) \end{cases} \quad (2)$$
$$M_j = M_t + M_d + M_g + M_F \quad (3)$$
$$M_F = Fd \quad (4)$$

式中 d ——摘穗辊直径
($\varphi - \theta$)——摘穗辊与竖直方向(重力方向)倾角

G ——玉米植株和玉米果穗的重力
 M_j ——夹持链对植株的作用力矩
 M_t ——植株弹性恢复力矩
 M_d ——挡板对植株的阻挡力矩(图中未标挡板位置)
 M_g ——玉米秸秆和果穗的重力矩
 M_F ——辊对植株的作用力矩

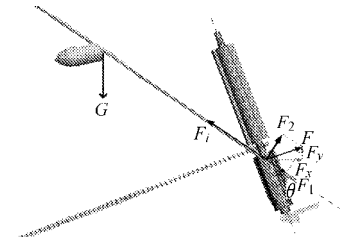


图 2 玉米秸秆受力示意图
Fig.2 Force analysis of straws

因链条对植株有作用力 F_i ,根据作用力与反作用力的关系,植株对链条就产生了反向作用力 F_h ,它的力矩是 M_h ,如图 3 所示,并且

$$F_h = F_i \quad (5)$$
$$M_h = M_j = M_t + M_d + M_g + M_F \quad (6)$$

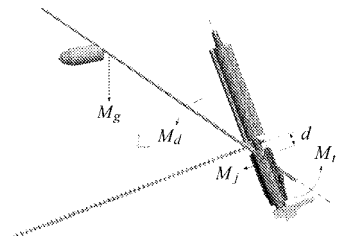


图 3 玉米秸秆作用力矩示意图
Fig.3 Moment exerting on straws

1.4 在 ADAMS 中定义约束、驱动

(1) 定义玉米果穗与秸秆的连接方式为柔性连接 Bushing。选用 Bushing 连接,使果穗与秸秆之间产生一对与相对位移和相对速度呈正比的三分量作用力。

(2) 定义秸秆在夹持输送链条上的运动副及驱动。在点 C 处沿链条实际方向定义秸秆的平移副,并在平移副上创建驱动。设定速度为 2 400 mm/s。

(3) 利用冲击函数法定义玉米秸秆与左、右摘穗辊的接触力,接触类型为 Solid - Solid(实体与实体)。应用 Coulomb(库仑法)定义摩擦力。

(4) 定义其他驱动。设摘穗辊转速为 900 r/min,收获机前进速度为 1 000 mm/s。

建立完整的虚拟样机如图 4 所示,其中 X 负方向指向收获机前进方向, Y 正方向代表路面垂直方

向, Z 向与车轮轴向重合(驾驶员左侧方向为 Z 正方向)。

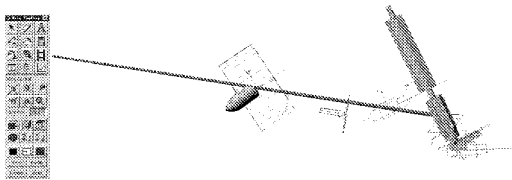


图 4 玉米收获虚拟样机

Fig. 4 Corn harvester virtual prototyping model

2 关键技术

2.1 传感器运用

传感器可以感知系统运行到某一状态时的时间^[5]。本文需定义 2 个传感器:

(1) 玉米秸秆与链条相对位置关系传感器。该传感器主要用于检测玉米秸秆是否脱离链条,一旦通过检测位置关系确定事件发生时,通过脚本仿真控制使该传感器失效,同时使玉米秸秆沿链条方向的平移副、驱动速度失效,但仿真仍能继续进行。

(2) 玉米果穗与摘穗辊碰撞力检测传感器。如图 5 所示,玉米果穗被摘落的 3 个主要过程如下:①摘穗辊基圆对秸秆的挤压完成摘穗。②凸棱对果穗大端的冲击完成摘穗。③凸棱对果穗大端苞叶及秸秆的挤压完成摘穗。试验研究表明,凸棱对果穗大端的挤压和冲击以及基圆对果穗的挤压是完成摘穗的主要过程^[6]。

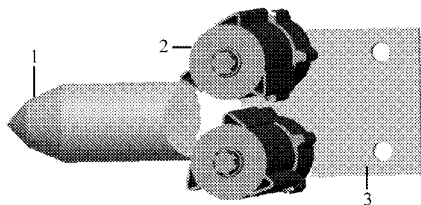


图 5 摘穗辊摘穗示意图

Fig. 5 Stripper roller

1. 玉米果穗 2. 摘穗辊 3. 摘穗辊底座

对于穗柄与秸秆的结合力,由前苏联的相关资料得知,剥去苞叶的玉米穗断开阻力在穗柄根部干物质含量为 66% 时约在 190 ~ 520 N,当穗柄根部的干物质含量较小时,断开阻力将更高,摘下的带苞叶玉米穗的断开阻力更高。例如,干物质含量为 32%,其断开阻力在 510 ~ 830 N^[7]。西南丘陵山地地区玉米收获时植株含水率比平原地区偏高,随机测量 100 株收获期玉米植株穗柄与秸秆的结合力,分析得出约为 500 N,故本文将其定义为 500 N。

将凸棱与基圆合为一个整体(摘穗辊),综合上述分析可将收获过程简化为:当玉米果穗与某一摘

穗辊间的作用力大于结合力 500 N 时,果穗便被摘离秸秆实现收获。碰撞力检测函数为:

$$\max(\text{abs}(\text{CONTACT}(\text{MPRO_model}.\text{CONTACT_CONTACT_maizerollerleft79d}, 0, 1, 0)), \text{abs}(\text{CONTACT}(\text{MPRO_model}.\text{CONTACT_CONTACT_maizerollerright79d}, 0, 1, 0)))$$

其中,2 个 $\text{abs}()$ 函数分别代表玉米果穗与左、右摘穗辊的碰撞总力。

当 2 个传感器检测到相应事件发生后,采取 continue 的方式继续当前仿真,并执行下一个仿真命令。

2.2 仿真过程控制

ADAMS 有交互式和脚本式^[8]2 种仿真控制方式。本文应用脚本控制的 ADAMS/Solver 命令进行仿真控制,其定义如图 6 所示。

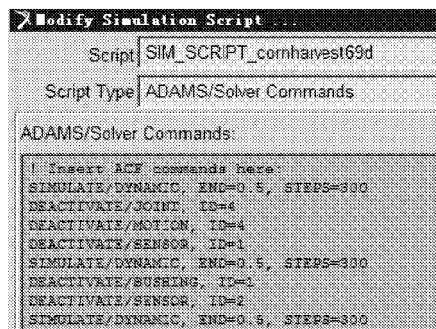


图 6 脚本控制定义

Fig. 6 Definition of manuscript control

(1) 当玉米秸秆与链条相对位置关系传感器触发时,使玉米秸秆沿链条方向的平移副、驱动速度失效,同时令该传感器失效。

(2) 当玉米果穗与摘穗辊碰撞力的传感器触发,即玉米果穗与摘穗辊的碰撞力超过 500 N 时,使玉米果穗与玉米秸秆的 Bushing 柔性连接失效,达到果穗被摘落的效果,同时使该传感器失效。

按照上述操作后,便可执行脚本仿真命令进行仿真。

3 玉米植株 79° 倾角收获仿真分析

3.1 果穗摘落时间及碰撞力分析

由图 7 可以看出,在 0.209 9 s 时果穗碰撞力为 543.328 N,此时果穗已与秸秆分离,实现了收获过程,所以其收获时间为 0.209 9 s。

3.2 果穗质心运动分析

如图 8 所示,支座上的 Marker37 位于支座上表面与左侧摘穗辊轴线相交处,其 X 方向为夹持输送链链条方向。

如图 9 所示,在 0.209 9 s 时,玉米果穗被摘落,在随后的下落过程中,其与摘穗辊发生了第 2 次乃

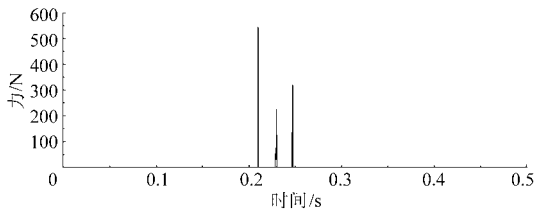


图 7 玉米秸秆在 79°倾角收获时果穗碰撞力-时间曲线

Fig. 7 Curves of striking force and time when corn plants at the angle of 79°

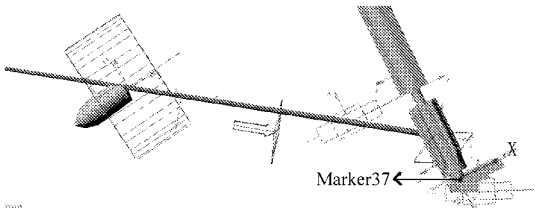


图 8 Marker37 方位示意图

Fig. 8 Position of Marker37

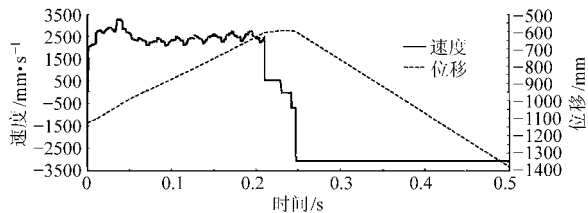


图 9 果穗质心 X 向位移和速度随时间的变化曲线

Fig. 9 Relationship of displacement and velocity with time under X direction

至第 3 次碰撞导致果穗旋转落下,故其速度呈阶梯式下降。

由图 10 可知,在 Marker37 坐标下 0 ~ 0.001 7 s 时,玉米果穗质心的速度由 0 达到 2 400 mm/s,即与链条同速,直到 0.209 9 s 玉米果穗被摘落期间,其速度在 2 500 mm/s 附近,由此可以看出玉米果穗与秸秆的 Bushing 连接合理。由全局坐标系下的速度-时间曲线可以看出,0.247 6 s 以后,果穗与摘穗辊脱离,经过一系列振荡后最终在 X 方向匀速运动。

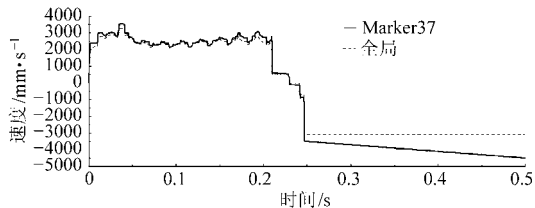


图 10 果穗质心在全局和 Marker37 坐标下 X 向速度随时间的变化曲线

Fig. 10 Curves of grain centroid velocity - time relationships in X direction in global coordinate system and local coordinate system of Marker37

由图 11 可知,在 0.001 7 s 时果穗 Y 向速度在

Bushing 连接作用下由 0 迅速达 1 189.776 1 mm/s,随后在 Bushing 作用下跟随秸秆以 700 mm/s 左右的速度在 Y 向运行,直至 0.209 9 s 时被摘落后,经与摘辊的再次碰撞后以重力加速度为加速度沿 Y 向下落。

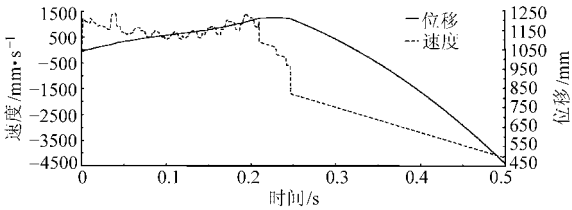


图 11 果穗质心在 Y 方向的位移和速度随时间的变化曲线

Fig. 11 Relationship of displacement and velocity with time under Y direction

由图 12 可知,在刚开始运行时果穗质心在 Z 轴位移为零,0.01 ~ 0.094 5 s 时在 Z 轴负向方向,直至 0.257 5 s 时在 Z 轴正向方向,随后又转向 Z 轴负向方向。对于速度,0 ~ 0.01 s 时 Z 向速度为零,至 0.209 9 s 时,其在左、右摘穗辊凸棱的作用下正、反方向速度反复运行,经过与摘辊的再次碰撞后以 -1 580.409 8 mm/s 的速度运行。

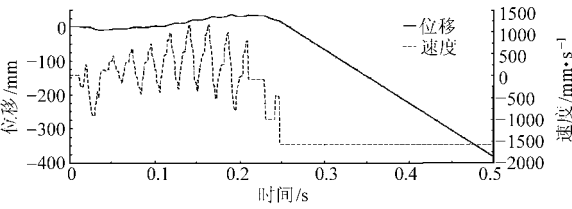


图 12 果穗质心在 Z 方向的位移和速度随时间的变化曲线

Fig. 12 Relationship of displacement and velocity with time under Z direction

3.3 果穗与秸秆的 Bushing 连接分析

如图 13 所示,玉米秸秆离开下立辊时,因玉米果穗与秸秆相对位移和速度发生突变,总转矩突然增大,随后在摘穗辊的作用下呈现周期性的变化规律。

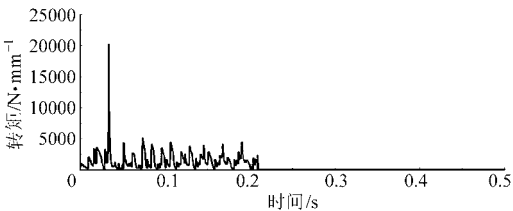


图 13 Bushing 总转矩

Fig. 13 Total torque of Bushing

如图 14 所示,截取玉米秸秆离开拉茎辊至玉米果穗被摘落前的 0.05 ~ 0.2 s 进行分析,可看出在 X、Y、Z 方向的转矩均呈周期性变化,按仿真 900 r/min、每个摘穗辊有 3 条凸棱计算,在 0.15 s 内正好有 $15 \times 3 \times 0.15 = 6.75$ 周期,与仿真结果一致。

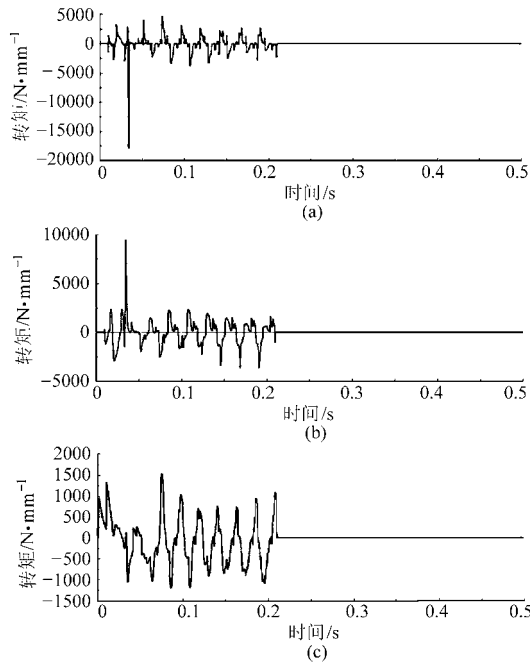


图 14 Bushing 在不同方向上转矩随时间的变化曲线
Fig. 14 Relationship of moments with time under different directions of Bushing
(a) X 方向 (b) Y 方向 (c) Z 方向

3.4 秸秆测量曲线

如图 15 所示,自 0.01 ~ 0.04 s 玉米秸秆在下立辊(拉茎作用)作用下其 X 向速度急速上升,当其运行至与摘穗辊阶段后,除秸秆在果穗被摘落后的一段时间内速度在 X 向有所下降外,其他时间一直在稳步加速,原因是在摘穗辊凸棱的作用下使秸秆加速向收获机前进方向的相反方向运动。

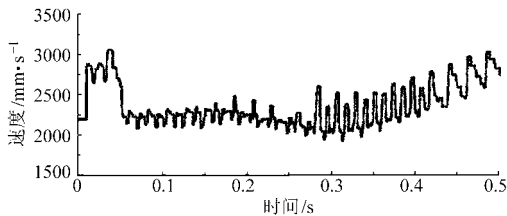


图 15 玉米秸秆质心在 X 向速度随时间的变化曲线
Fig. 15 Relationship of velocity with time under X direction of corn plant centroid

如图 16 所示,在秸秆运行至与摘穗辊作用阶段,秸秆 Y 向速度一直上升,随后在重力作用下下降。此亦是摘穗辊凸棱作用所致。

如图 17 所示,由于两辊凸棱的作用,玉米秸秆质心左右摆动,速度跳动较大。

通过上述对玉米秸秆质心的 X、Y、Z 方向的速度变化,分析得知凸棱对秸秆的加速作用效果显著,由此可知摘穗辊凸棱对秸秆的收获起着至关重要的作用。

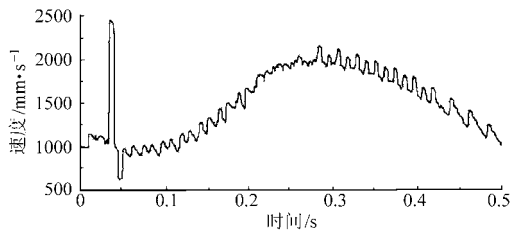


图 16 玉米秸秆质心在 Y 向速度随时间的变化曲线
Fig. 16 Relationship of velocity with time under Y direction of corn plant centroid

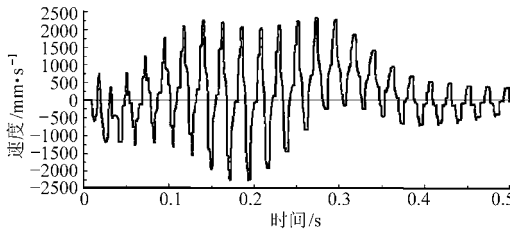


图 17 玉米秸秆质心在 Z 向速度随时间的变化曲线
Fig. 17 Relationship of velocity with time under Z direction of corn plant centroid

4 不同倾角收获仿真对比

由图 18 可知,秸秆在 69°倾角收获时,果穗收获时间为 0.185 1 s,果穗碰撞力为 1 326.708 N;79°收获时,果穗收获时间为 0.209 9 s,果穗碰撞力为 543.328 N;89°收获时,果穗收获时间为 0.195 9 s,果穗碰撞力为 500.004 N。

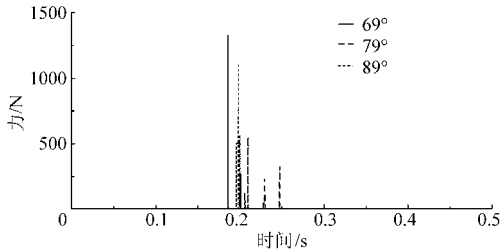


图 18 不同倾角收获时玉米果穗的碰撞力随时间的变化曲线

Fig. 18 Relationship of striking forces of grains with time at different angles

综合分析知,在 69°收获时,虽然收获时间最短,但果穗的碰撞力最大,对果穗损伤最严重,而 79°与 89°收获时,果穗的碰撞力差别不大,但 89°收获比 79°收获时间少 0.014 s。其位移变化如图 19 所示:69°收获时,其初始水平距离为 671.751 4 mm,相应地,79°与 89°收获时分别为:778.194 mm、860.992 mm。从图中可以看出,69°收获与 79°收获时,在果穗被摘落前,除其初始位置不同外,收获行进的轨迹方向几乎一样,而 89°收获速度却明显快于 79°收获,以至于果穗初始距离远于 79°收获近 90 mm 的情况下却能先于 0.014 s 进行收获。

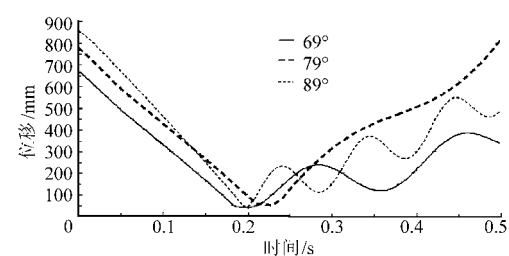


图 19 在不同角度收获时果穗联结点相对于 Marker37 X 向位移随时间的变化曲线

Fig. 19 Curves of position-time of joint of grain relative to Marker37 at different angles

通过对收获时间和果穗的啃伤力分析可知,收获作业时玉米秸秆的理想倾角为 89°。

5 结束语

通过分析实际收获过程,依照玉米果穗与摘穗辊的作用机理,灵活运用传感器,以脚本控制方法实现了玉米收获过程的仿真,并分析了玉米秸秆倾角为 79°时收获情况,最后分析了玉米秸秆倾角对玉米收获时间和玉米果穗啃伤的影响,得出了收获作业时玉米秸秆的理想倾角为 89°。

参 考 文 献

1 刘枫. 穗、茎兼收型立式摘穗辊玉米收获机的关键部件研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
Liu Feng. Primary structure on the vertical snapping roller of corn combine harvester for both ears and stalks[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

2 宋林平. 玉米收获机的分类与摘穗机构[J]. 农机推广与安全, 2006(5): 26 ~ 28.

3 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): 114 ~ 118.
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): 114 ~ 118. (in Chinese)

4 张彦河. 玉米秸秆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)

5 李军, 邢俊文, 覃文浩. ADAMS 实例教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002.

6 闫洪余. 立辊式玉米收获机关键部件工作机理及试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
Yan Hongyu. Working mechanism and experimental research on key components of vertical roll-type corn harvester[D]. Changchun: Jinlin University, 2009. (in Chinese)

7 张明涛. 玉米摘穗装置的理论分析与仿真研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
Zhang Mingtao. Theoretic analysis and imitation resrarch of corn snapping bars[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

8 杜平安, 于德江, 岳萍. 虚拟样机技术的技术与方法体系研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3 447 ~ 3 451.
Du Ping'an, Yu Dejiang, Yue Ping. Research on technology and methodology architecture of virtual prototyping technology[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(15): 3 447 ~ 3 451. (in Chinese)

(上接第 140 页)

6 张晓辉, 李其才, 李法德, 等. 往复式切割器割刀惯性力平衡实用计算公式[J]. 农机化研究, 1997(2): 30 ~ 36.
Zhang Xiaohui, Li Qicai, Li Fade, et al. Reciprocating cutter cutter inertial force balance practical formula[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1997(2): 30 ~ 36. (in Chinese)

7 彭霞. 番茄收获机割台部分的设计及仿真研究[D]. 石河子:石河子大学, 2009.
Peng Xia. Study and simulation of the tomato harvester' cutting units[D]. Shihezi: Shihezi University, 2009. (in Chinese)

8 牛海华. 强适应性小型振动式马铃薯挖掘机的设计[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2011.
Niu Haihua. The design of strong adaptability small vibration type potato digger[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011. (in Chinese)

9 尚书旗, 王方艳, 刘曙光, 等. 花生收获机械的研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 20 ~ 25.
Shang Shuqi, Wang Fangyan, Liu Shuguang, et al. Research situation and development trend on peanut harvesting machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 20 ~ 25. (in Chinese)

10 余泳昌, 刘文艺, 赵迎芳, 等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 109 ~ 113.
Yu Yongchang, Liu Wenyi, Zhao Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 109 ~ 113. (in Chinese)