

全膜双垄沟播直插式玉米播种装置双面凸轮的设计

李星瑞, 石林榕, 赵武云*, 戴飞

(甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:针对全膜双垄沟播直插式玉米播种装置的核心部件单面凸轮控制的穴播杆水平位移不精确、振动较大等问题,设计采用双面凸轮代替。在沟播机虚拟样机基础上,生成双面凸轮内外接触轨迹曲线,由于生成的双面凸轮轨迹在奇点处过渡急剧,会造成凸轮与顶杆运动过程中冲击过大而无法实现设定的运动,甚至卡死,对轨迹过渡奇点段进行了圆弧过渡优化,对优化前后的凸轮在 x 、 y 方向位移曲线进行了对比,相应位移量较小。经沟播机虚拟样机仿真,双面凸轮驱动下的成穴器在入土前不会与地面发生干涉;对双面凸轮进行的冲击力和拉力作用下最大形变和应力进行分析的结果表明,双面凸轮在受到最大冲击力和拉力时最大变形量为 0.092 mm,且其最大 Von-Mises 应力均远低于 67 MPa,应能满足直插式玉米全膜覆盖双垄沟播机作业需求。

关键词:玉米;全膜双垄沟播技术;播种装置;双面凸轮

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2015)01-0094-05

Design of double-track cam of direct insert corn planting furrow seeder for whole plastic-film mulching on double ridges

Li Xingrui, Shi Linrong, Zhao Wuyun*, Dai Fei

(College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: In order to improve the precision of the horizontal displacement and reduce the vibration of punching rod controlled by single-track cam a double-track was designed for direct insert corn planting furrow seeder for whole plastic-film mulching on double ridges. Based on the virtual prototype of direct insert corn planting furrow seeder, the inside/outside contact curves of double-track cam were generated to design the cam. The sharp singularity transition in the contact curves of double-track cam could cause too vigorous impact between the cam and the rod to achieve the expected movement, even completely stop. So it is necessary to optimize the singularity transition by arc curve. The displacement in x , y direction was little changed for the curves before and after optimization. There was no interference between the hole former driving by the double-track cam with the ground by the simulation of virtual prototype of direct insert corn planting furrow seeder. By the analysis of the maximum deformation and stress of the double cam under the maximum impact and tension, it is found that the maximum deformation is 0.092 mm and the biggest Von-Mises stress was 19.8 MPa, far less than 67 MPa. The double-track cam can meet the demand for the operation of direct insert corn planting furrow seeder for whole plastic-film mulching on double ridges.

Keywords: corn; whole plastic-film mulching on double ridges; furrow seeder; double-track cam

旱地全膜覆盖双垄沟播栽培技术,是在传统地膜覆盖技术基础上发展起来的一项集雨、保墒、抗旱的新技术^[1]。甘肃近几年进行的试验表明,该技术可显著提高旱农田降水的保蓄率、利用率和作物

水分利用效率,其中玉米全膜覆盖双垄沟播增产效果十分显著^[2-3]。

目前,玉米全膜覆盖双垄沟播在甘肃省推广面积已突破 6.7×10^5 hm^2 。由于播种、收获、残膜捡

收稿日期: 2014-03-18

修回日期: 2014-09-19

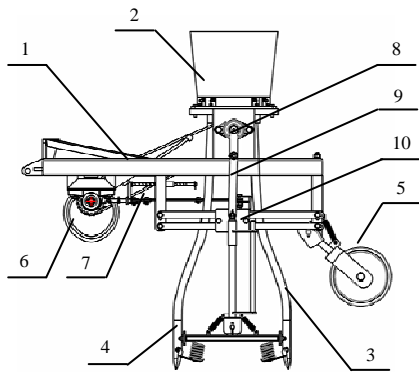
基金项目: 国家“十二·五”科技支撑计划项目(2012BAD14B10); 甘肃省干旱生境作物学重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(GSCS-2012-09)*

作者简介: 李星瑞(1990—),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事农业工程技术与装备研究,1057017148@qq.com; *通信作者,赵武云,博士,教授,主要从事农业工程技术与装备研究, zhaowuy@gsau.edu.cn

拾等环节的机械化作业仍处于空白,加之现有玉米点播器和手推式玉米穴播机劳动强度大、生产效率低;旱地全膜双垄沟播技术相关的播种机具主要依靠传统的滚轮式穴播器,普遍存在撕膜、挑膜和膜孔错位现象,严重制约了全膜双垄沟播技术的快速发展^[4-7],不能满足甘肃实际玉米播种的需求。笔者在研究甘肃农业大学工学院研制的全膜双垄沟播直插式玉米播种机工作过程与原理的基础上,通过播种机虚拟样机生成了双面凸轮内外轨迹,借助三维造型软件建立了双面凸轮模型,并对其应力强度进行了校核,以为全膜双垄沟播直插式玉米播种装置提供运行精确、平稳可靠部件^[8]。

1 整机结构及主要技术参数

玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机主要由机架、种箱、导种管、成穴器、支撑轮、双面凸轮、放大机构、曲柄、连杆和滑块等组成,如图 1 所示。



1 机架;2 种箱;3 导种管;4 成穴器;5 支撑轮;6 双面凸轮;7 放大机构;8 曲柄;9 连杆;10 滑块。

图 1 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机结构

Fig.1 Structure diagram of direct insert precision hillseeder of corn whole elastic

直插式玉米全膜覆盖双垄沟播机主要参数如表 1 所示。

表 1 播种机主要技术参数

Table 1 Main technology parameter of seeder

指标	参数	指标	参数
配套动力/kW	2.94	整机质量/kg	85
外形尺寸(长×宽×高)/m	1.5×0.8×1.0	作业行数	2
行距/m	0.5~0.7	支撑地轮数	1
株距/m	0.3	播种深度/m	0.02
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.5		

作业时,动力经变速箱传递至凸轮轴,带动凸轮转动的同时,凸轮轴将动力传递至曲柄轴,进而实现成穴器垂直和水平联动,实现水平方向“零速”投种。

与此同时,曲柄轴驱动排种器转动排种,种子经导种管输送至成穴器中,成穴器入土时动鸭嘴强制开启,实现排种。该机有效地解决了成穴器膜上播种时所出现的撕膜、挑膜和穴孔与幼苗错位等问题。

2 双面凸轮设计

2.1 设计要求

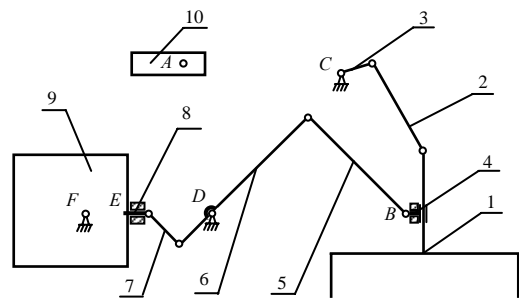
依据直插式玉米全膜覆盖双垄沟直插式播种机主要技术指标及甘肃全膜覆盖双垄沟播种植模式及相关农艺指标^[9],确定播种株距为 30 cm,播种深度 20 cm,牵引机前进速度为 0.5 m/s,提出双面凸轮设计应满足:1)因牵引拖拉机输出转速恒定,凸轮须绕轴匀速转动,顶杆在其上的位移、速度、加速度的变化应平滑,避免刚性冲击;2)双面凸轮轨迹曲线的设计主要是为了补偿播种机在作业过程中成穴器水平速度,即解决成穴器播种时与土壤接触时间水平段绝对速度为 0;3)凸轮应耐磨,刚性好,受顶杆冲击时有足够的强度。为满足以上要求,编写顶杆 II 一端在水平方向的位移变化的分段函数。凸轮转 1 周,顶杆 II 端在各个时间段的位移 s 函数。

$$s = \begin{cases} 0 & (0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{33}) \\ -500 & (\frac{\pi}{33} < \varphi \leq \frac{32\pi}{33}) \\ 500 & (\frac{32\pi}{33} < \varphi \leq \frac{65\pi}{33}) \\ 0 & (\frac{65\pi}{33} < \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为顶杆 II 一端水平的位移(mm); φ 为旋转角度(°)。

2.2 外轨迹生成机构

通过 ADAMS/View 建立全膜双垄沟播直插式玉米播种装置仿真运动模型(图 2)。该机构由机架、



1 成穴器;2 连杆;3 曲柄;4 顶杆 I;5 放大杆 I;6 放大杆 II;7 放大杆 III;8 顶杆 II;9 凸轮生成平面;10 机架。

图 2 直插式播种装置机构仿真运动模型

Fig.2 Structure diagram of the direct insert planting device

成穴器、连杆、曲柄、顶杆 I、放大杆 I、放大杆 II、放大杆 III、顶杆 II 和凸轮生成平面等部件组成。坐标系上建立 6 个局部坐标点，其坐标点位置列于表 2。

表 2 设计点的坐标值

Table 2 Coordinate of design points

坐标点	变量名	x/mm	y/mm
A	MARKER_50	100.0	280.0
B	MARKER_51	517.5	2.8
C	MARKER_52	385.0	248.5
D	MARKER_53	160.0	0
E	MARKER_54	23.8	0
F	MARKER_55	-25.0	0

在 A 点建立机架，添加水平约束和平动电机 Motion_1，前进速度为 0.5 m/s；C 点建立长为 60 mm 曲柄，与机架铰接，添加转速为 0.76 rad/s 电机 Motion_2，曲柄另一端与连杆铰接；长 180 mm 的连杆下端与成穴器铰接；在 B 点建立平行于地面的长 34.5 mm 的顶杆 I，其上有 STEP 函数驱动的水平平动电机 Motion_3，顶杆 I 左端与放大杆 I 铰接，右端与成穴器有垂直方向的平动；在 E 点建立长 47.5 mm 的顶杆 II，与机架有水平平动，右端与放大杆 III 铰接；在 D 点建立的放大杆 II，两端分别与放大杆 I 和放大杆 III 铰接；在 F 点建立凸轮生成平面，与机架铰接，添加与 Motion_2 转速相同、方向相反的 Motion_4。该机构主要利用机构运动时凸轮生成平面与顶杆 II 的相对运动生成双面凸轮外轨迹曲面，其中 Motion_3 由 STEP 函数驱动电机，据分段函数 1 的推杆位移 s 运动规律，编写 STEP 函数： $STEP(time,0,0,0.02,-500)+STEP(time,0.64,0,0.68,1\ 000)+STEP(time,1.30,0,1.32,-500)$ 。STEP 函数曲线如图 3 所示。

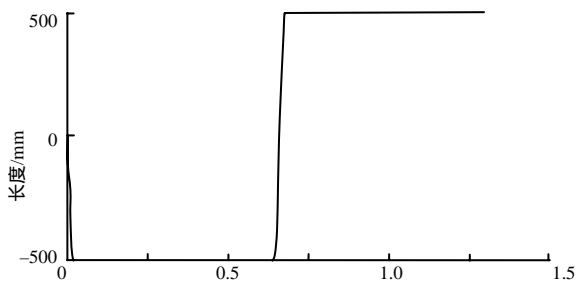


图 3 STEP 函数曲线

Fig.3 STEP function curve

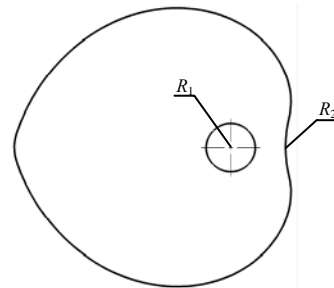
建立直插式播种装置机构仿真运动模型后，开启仿真面板，设置仿真时间与时间步。使用 Trace a point's relative position from last simulation 功能，分

别以顶杆 II 左端 Marker 点为轨迹点，参照物为凸轮生成平面^[10]。删除凸轮生成平面，使用所生成的轨迹曲线拉伸成凸轮实体，对其添加与 Motion_4 相同电机，顶杆 II 与凸轮实体外表面之间添加高副—点面约束。同时删除顶杆 I 的 Motion_3 电机。

2.3 外轨迹曲线的优化

因 Adams/view 中生成的凸轮外轨迹曲线在始、未交接点过渡急剧，会对整机造成刚性冲击，对插播机精密插播造成误差；加之凸轮始、未交接位置点的小范围修改不会对成穴器垂直间隙插播造成整机性能方面的影响，因此，可对凸轮始、未交接点进行圆弧过渡优化。

将生成的凸轮轨迹曲线导入 Caxa 电子图版，对凸轮轨迹曲线始、未交接点进行圆角过渡优化。优化后的凸轮轨迹曲线如图 4 所示。



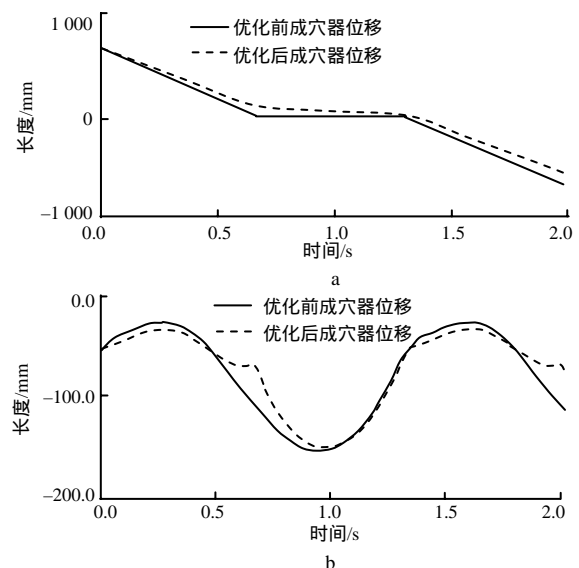
R_1 凸轮旋转中心半径； R_2 优化后的半径。

图 4 优化后的凸轮轨迹曲线

Fig.4 Optimized cam path curve

2.4 外轨迹曲线的验证

将优化后的凸轮与原凸轮分别驱动下的成穴器位移曲线进行对比，如图 5 所示。



a x 方向位移变化曲线；b y 方向位移变化曲线。

图 5 成穴器质心位移变化轨迹曲线

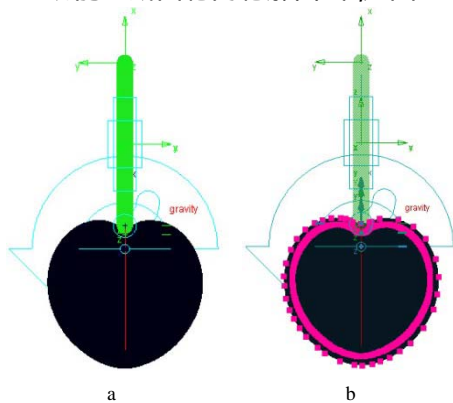
Fig.5 Cavitation device centroid displacement change path curve

由图 5 可知，2 个凸轮驱动下的成穴器 x 方向位移曲线大致相同；在 y 方向位移中，优化后的凸轮驱动下的成穴器在入土之前有小范围的下移，下移量为 9 mm，经直插式播种机虚拟样机仿真可知，优化后的双面凸轮驱动下的成穴器在入土前不会与地面发生干涉，因此，优化后的凸轮外轨迹曲线能满足设计要求。

2.5 内轨迹

设计中提出了 2 种凸轮方案，第 1 种是单面凸轮，第 2 种是双面凸轮。单面凸轮与顶杆之间需弹簧力使两者充分接触，会造成柔性冲击，而双面凸轮机构无需预紧弹簧支撑顶杆，对顶杆有顶和拉两种力，且运行平稳精确，顶杆上设计了 2 个滚轮，内外滚轮配合顶杆紧压在凸轮的内、外 2 个轮廓面上，使顶杆的运动较平稳^[11]。鉴于此，对双面凸轮进行研究，在已完成的双面凸轮外轨迹曲线的基础上生成内轨迹曲线。

通过 Adams/view 读取凸轮外轨迹曲线，调整方位使其始末点向上，与顶杆垂直接触，利用顶杆自重使其与凸轮充分接触，不需使用弹簧，简化了双面凸轮内轨迹曲线生成机构，对凸轮添加旋转电机，对顶杆与凸轮外轮廓曲线之间施加点面高副约束^[11-12]。凸轮内轨迹生成机构如图 6-a 所示。再次使用 Trace a point's relative position from last simulation 功能生成凸轮内轮廓曲线，如图 6-b 所示。



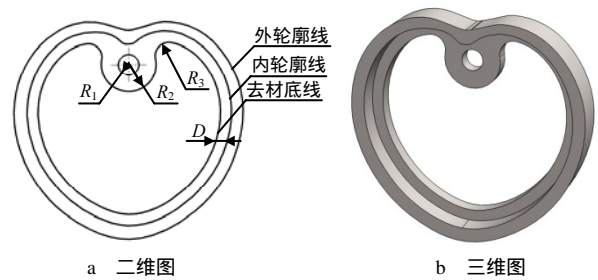
a 凸轮内轨迹生成机构；b 生成的内轨迹曲线。

图 6 凸轮内轨迹生成机构

Fig.6 Generation double-track cam mechanism

将生成的双面凸轮内外轮廓曲线导出，应用 CAXA 电子图版对双面凸轮内部构造进行设计，设计完成的双面凸轮二维图如图 7-a 所示。通过

Solidworks 进行三维实体构造，如图 7-b 所示。



a 二维图

b 三维图

R_1 回转中心半径； R_2 回转中心外缘半径； R_3 凸轮去材底线与 R_2 过渡半径。

图 7 双面凸轮构造

Fig.7 Double-track cam mechanism

3 双面凸轮强度校核

通过 ANSYS 软件对双面凸轮进行静力学载荷应力研究。双面凸轮材料选用聚甲醛，其具有坚韧的硬度、良好的热稳定性，密度小，摩擦系数小，耐磨性能好，屈服抗拉强度为 67 MPa^[13]。由于直接测量双面凸轮受到的冲击力有困难，可通过直插式精量穴播整机的虚拟样机模型测量与双面凸轮接触的顶杆 II 受到的加速度。在双面凸轮回转 1 周顶杆 II 受到的加速度变化曲线如图 8 所示。顶杆 II 的质量为 0.5 kg，由公式 $F=ma$ 可知，双面凸轮外表面在 0.01 s 时受到的冲击力为 9.28 N，内表面在 0.66 s 时受到的拉力为 2.96 N。将值放大 10 倍，冲击力为 92.8 N，拉力为 29.6 N。

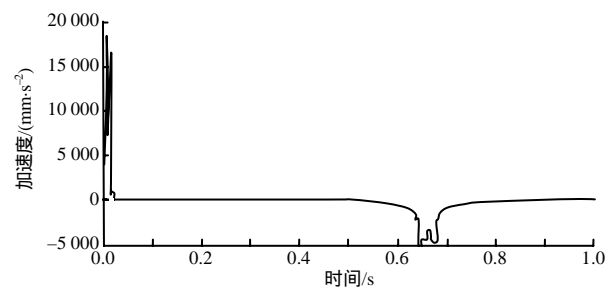
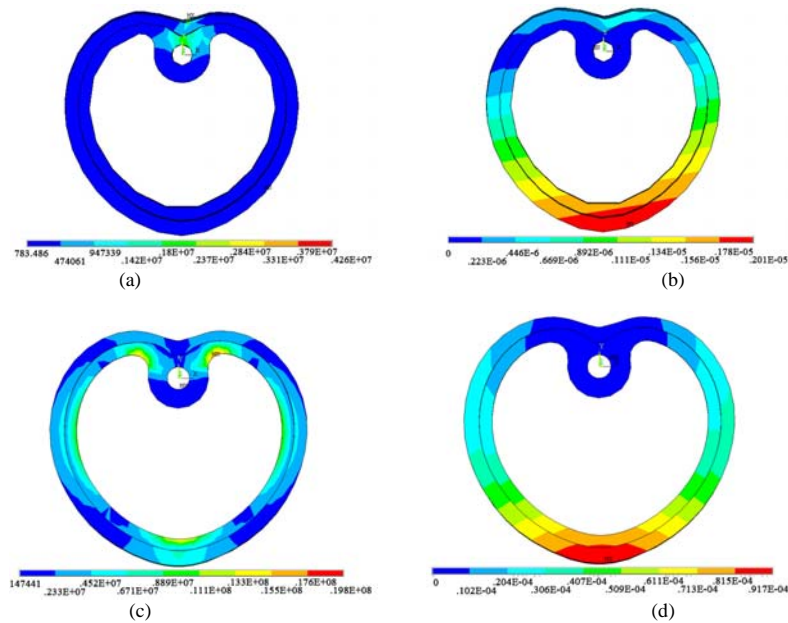


图 8 顶杆 II 加速度变化曲线

Fig.8 Acceleration curve of mandrel II

将双面凸轮模型导入 ANSYS 中进行前处理。选择单元类型为 Solid92，弹性模量为 2 280 MPa，泊松比为 0.417，密度为 1.29 g/cm³，进行自由网格划分，对凸轮旋转中心内表面进行固定约束^[14-15]，对双面凸轮转过 0.01、0.66 s 时外表面、内表面施加 92.8、29.6 N，求解的位移和应力云图如图 9 所示。



A 冲击力下的应力; b 冲击力下的形变; c 拉力下的应力; d 拉力下的形变。

图 9 双面凸轮应力与形变云图

Fig. 9 Analysis results diagram of double-track cam

由图 9 分析可知, 双面凸轮在最大冲击力下, 最大变形量为 0.002 mm, 最大 Von-Mises 应力为 4.260 MPa; 双面凸轮在最大拉力作用下, 最大变形量为 0.092 mm, 最大 Von-Mises 应力为 19.8 MPa, 因此, 所设计的双面凸轮在受到最大冲击力和拉力时最大变形量为 0.092 mm, 且其最大 Von-Mises 应力均远低于 67 MPa, 满足直插式玉米全膜覆盖双垄沟播机的凸轮设计要求。

参考文献:

- [1] 赵凡. 旱地玉米全膜覆盖双垄面集雨沟播栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2004(11): 22-23.
- [2] 黄高宝, 方彦杰, 李玲玲, 等. 旱地全膜双垄沟播玉米高用水机制研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010(6): 116-121.
- [3] 李来祥, 刘广才, 杨祁峰, 等. 甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应用进展[J]. 干旱地区农业研究, 2009(1): 114-115.
- [4] 赵建托, 赵武云, 任颜华, 等. 牛海华玉米全膜覆盖双垄沟播机直插式播种装置设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2010(10): 40-41.
- [5] 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48.
- [6] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91-97.
- [7] 孙伟, 吴建民, 黄晓鹏, 等. 勺匙式玉米精量取种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 17-21.
- [8] 赵韩, 丁爵曾, 梁锦华. 凸轮机构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [9] 张利军. 玉米全膜覆盖双垄面集雨沟播种植技术[J]. 陕西农业科学, 2010(5): 209-210.
- [10] 顾卫东. 虚拟样机技术与 ADAMS 应用实例教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [11] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [12] 赵武云, 刘艳妍, 吴建民, 等. ADAMS 基础与应用实例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [13] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册: 第二册[K]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [14] 郑正, 雷君相, 罗宇舟. 基于 ANSYS 对塑料齿轮的结构静力学分析[J]. 制造业自动化, 2010, 32(5): 163-166.
- [15] 石林榕, 赵武云, 吴建民, 等. 切片造型技术在农产品有限元分析中的应用[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3): 95-98.

责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 吴志立