

## 玉米穴施肥装置的设计与仿真

吴然然<sup>1</sup>, 张刘扬<sup>2</sup>, 钱梵梵<sup>2</sup>, 蔡海涛<sup>1</sup>

(1. 安徽省农业机械推广总站, 合肥 230031; 2. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

**摘要:** 针对玉米施肥利用率低的问题, 设计了一款穴施肥装置。首先阐述了装置的工作原理, 再利用 Matlab 软件建立数学模型, 之后将得到的各部件尺寸的数值在 Catia 软件中进行三维建模, 构建基于 Adams 软件平台下的运动学模型及基于 Abaqus 的多体动力学穴施肥-土壤有限元模型。结果表明, 入土机构能等穴施间距施肥, 并通过田间试验验证, 平均施肥深度为 86.3 mm, 施肥深度合格率 83%, 均符合技术要求。本研究提供一种减少机械与土壤阻力的穴施机构设计, 为同类机具的研究提供了参考。

**关键词:** 玉米穴施肥装置; 设计; 动力学仿真; 肥料利用率

中图分类号: S224.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0941-06

### Design and simulation of cave-fertilizer apparatus for maize

WU Ranran<sup>1</sup>, ZHANG Liuyang<sup>2</sup>, QIAN Fanfan<sup>2</sup>, CAI Haitao<sup>1</sup>

(1. Agricultural Machinery Extension Station of Anhui Province, Hefei 230031;

2. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** Aiming at the low fertilizer utilization rate of maize, a fertilizing device was designed. The working principle of the device was described first, and then the mathematical model was established using Matlab software. The numerical value of each component was modelled in Catia software, and then a simulation model was constructed based on Adams software platform and Abaqus multibody dynamic-hole applying machine - the finite element model of soil. The results showed that the fertilizer can be applied by the equidistant system. The average fertilization depth was 86.3 mm with a qualified rate of 83% through a field test, which met all the technical requirements.

**Key words:** corn cave fertilization device; design; dynamic simulation; fertilizer utilization

随着中国农业机械行业的发展, 玉米作物的施肥过程经常出现的漏施、多施而导致肥料利用率低的问题开始逐渐改善, 为了提高肥料有效利用率, 对于施肥深度的控制极为重要。目前, 国内很多学者针对穴施肥机构开展了一些研究<sup>[1-4]</sup>。王金武等提出了基于 Matlab 仿真的非规则齿轮行星系扎穴机构的优化设计<sup>[5]</sup>。杨自栋等设计了轮盘式液态肥穴播深施机并进行了试验分析<sup>[6]</sup>。杨术明等建立了变量穴施水穴播机的变量施水数学模型<sup>[7]</sup>。张睿等研制了一款基于处方图的链条输送式变量施肥抛撒机<sup>[8]</sup>。综上所述, 目前扎穴机构虽研究较多, 但是对于玉米中期穴施肥装置的研究鲜有报道。

针对上述问题, 本研究通过研制出一种玉米中

期穴施肥装置, 针对穴施机械行走方式采用曲柄摇杆机构, 简洁有效的实现穴施。为了克服传统曲柄摇杆机构运动平稳性差, 导致施肥深度处于一个较大区间无法满足农艺要求等问题, 此装置将入土施肥部件设计成两瓣圆锥式结构, 2 个部分形状相同, 在两者啮合时组成圆锥体, 减小了入土冲击。先利用 Matlab 与 Catia 软件进行装置尺寸结构设计, 然后构建 ADAMS 软件平台下的运动学仿真模型, 进行穴施肥深度测试; 建立 Abaqus 多体动力学模型, 模拟真实土壤破碎过程, 进行入土力变化趋势预测; 最后通过田间试验验证装置设计的准确性。

收稿日期: 2017-01-12

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划“稻麦丰产节水节肥农机农艺双适应关键技术”(2013BAD07B08-05)资助。

作者简介: 吴然然, 工程师。E-mail: 289957851@qq.com

### 1 玉米穴施肥装置三维设计

#### 1.1 玉米穴施肥装置工作原理

穴施肥装置中主要是由入土机构完成开穴和施肥任务。入土机构的设计是否合理直接影响着开穴和施肥效果。根据设计方案, 将入土机构设计为两瓣式结构, 分为固定式入土机构和移动式入土机构两部分。该机构完成 2 个工作过程, 在穴施肥机行走时, 该部件在空中旋转; 在穴施肥机施肥到达植株侧边开始施肥时, 该部件插入土中; 旋转回程时, 入土机构的可移动式入土机构上移, 形成错开口, 即排肥口, 肥料从该口处落入之前所开的穴中, 完成施肥。本装置由单缸汽油发动机驱动, 发动机输出的动力经各级传动链传递, 通过减速器带动驱动轴整周运动。曲柄摇杆机构变整周运动为往复运动, 实现扎穴动作。

#### 1.2 玉米穴施肥入土机构设计

根据预定设想的玉米穴施肥装置轨迹图, 符合曲柄摇杆机构中的摇杆轨迹图, 同时摇杆中又承担着入土机构中可移动式入土机构移动, 摇杆的内部工作原理图如图 1 所示。根据曲柄摇杆机构的工作原理, 设计图如下: 入土前, 凸轮转到缺口部分, 分离杠杆在压缩弹簧作用下, 推动移动式入土机构 1 与固定式入土机构 7 啮合, 共同完成开穴过程。随着凸轮继续旋转, 当凸轮转到非缺口处时, 移动式入土机构 1 回收, 与固定式入土机构 7 错开, 形成漏肥空间, 即施肥口, 肥料从施肥口漏出, 完成施肥过程。

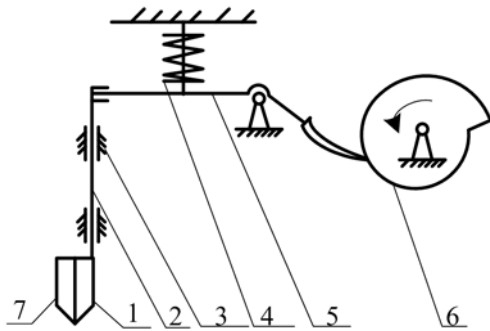


图 1 入土机构原理

Figure 1 The grave schematic diagram

#### 1.3 穴施肥装置尺寸设计

根据入土机构的运动轨迹, 建立入土机构入土点静轨迹, 利用 Matlab 软件建立轨迹数学模型<sup>[9-11]</sup>, 计算出穴施肥装置的初始值。

以 O 点作为坐标原点, 机构杆  $B_1$ 、曲柄  $B_2$ 、辅助矢量  $B_3$ 、连杆  $B_4$ 、摇杆  $B_5$ 、入土机构  $B_6$ 、入

土机构矢径  $B_7$ , 运算中所用符号:  $B_i$  为复数矢量,  $\theta_i$  为其幅角,  $\omega_i$  为同下标矢量的角速度,  $\xi_i$  为其角加速度。

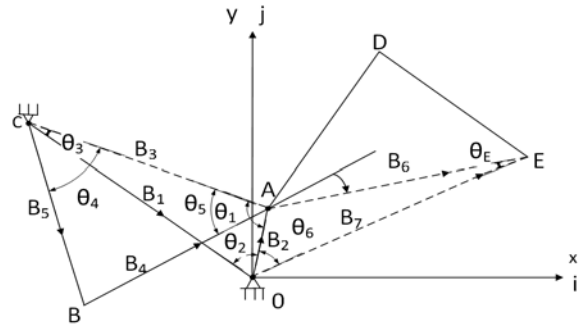


图 2 穴施肥机构矢量图

Figure 2 Hole fertilizing vector diagram

根据矢量图建立穴施肥机构入土机构的入土点的位移方程。

采用三角解法:

$$\text{在 } \triangle AOC \text{ 中, } \begin{cases} B_3 = B_2 + B_1 \\ B_2 = B_2 e^{j\theta_2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{在 } \triangle ACB \text{ 中, } B_3 = B_4 + B_5 \quad (2)$$

$$\text{在 } \triangle AOE \text{ 中, } B_7 = B_2 + B_6 \quad (3)$$

$$\text{由 } \triangle AOC \text{ 得: } B_3 = B_2 + B_1 \quad (4)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{|B_2| \sin \theta_2 + |B_1| \sin \theta_1}{|B_2| \cos \theta_2 + |B_1| \cos \theta_1} \quad (5)$$

$$B_3 = B_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) + B_1 \cos(\theta_1 - \theta_3) \quad (6)$$

$$\text{由 } \triangle ACB \text{ 得: } B_3 = B_4 + B_5 \quad (7)$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \arctan \frac{\sin(\theta_4 - \theta_3)}{\cos(\theta_4 - \theta_3)} \quad (8)$$

$$\theta_5 = \arctan \frac{|B_4| \sin \theta_4 - |B_3| \sin \theta_3}{|B_4| \cos \theta_4 - |B_3| \cos \theta_3} \quad (9)$$

$$\theta_6 = \theta_4 - \theta_E \quad (10)$$

秧爪尖 E 点坐标:

$$\begin{cases} X_E = |B_2| \cos \theta_2 + |B_6| \cos \theta_6 \\ Y_E = |B_2| \sin \theta_2 + |B_6| \sin \theta_6 \end{cases} \quad (11)$$

在 Matlab/simulink 模块下对穴施肥机构仿真建模, 搭建 simulink 模型。得到各部件尺寸/角度参数如表 1 所示。

#### 1.4 穴施肥装置结构设计

根据穴施肥机构的技术要求和得到的部件参数, 在 Catia 中对穴施肥装置进行结构设计, 得到三维数模如图 4 所示。

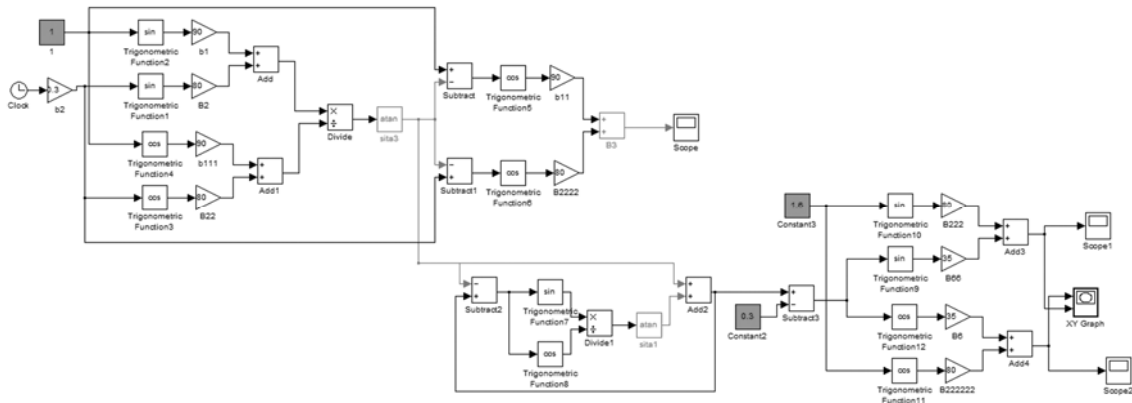


图 3 穴施肥机构仿真建模

Figure 3 Simulation modeling of hole fertilizing institutions

表 1 穴施肥装置尺寸

Table 1 Hole fertilization device dimensions

装置名称 Device	旋转中心到 原点位移/mm Displacement from rotation center to the origin	机构杆/mm Top-slat iron	曲柄_1/mm Crank_1	曲柄_2/mm Crank_2	连杆/mm Connecting rod	摇杆/mm Rocker	$\theta_1/^\circ$	$\theta_2/^\circ$	$\theta_3/^\circ$
长度/角度 Length/Angle	-28.758	210.00	87.700	70.000	310.00	40.000	145.88	70.880	164.37

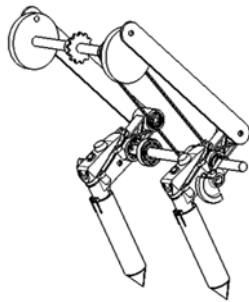


图 4 穴施肥装置三维模型

Figure 4 Three-dimensional model hole fertilizing device

## 2 穴施肥装置运动学仿真分析

穴施肥装置是玉米穴施肥机的关键部件，玉米中期施肥深度应大于 8 cm，但不超过 10 cm 为宜。其工作过程为固定入土部件和可移动入土部件啮合共同开穴，出土回程是可移动入土机构向下移动，形成施肥口，肥料落下。

### 2.1 搭建运动学模型

由于穴施肥装置较为复杂，考虑到边界约束加载繁琐和仿真运行耗时长等问题，对穴施肥装置的相关部件进行简化处理：(1) 在驱动轴上直接加载经传动比计算后的驱动转速，简化驱动杆上的正圆齿轮和传动链条；(2) 摇臂上的紧固件对结果影响较小，也可忽略。将在简化后的穴施肥装置三维模型导入 Adams/View 模块，装配效果如图 5 所示。

### 2.2 边界约束和接触属性定义

对穴施肥装置施加驱动载荷和定义边界约束。穴施肥装置中曲柄动力分配轴通过链传动给 2 个曲柄动力轴提供动力，入土机构由入土机构动力分配轴通过链传动提供动力，在压缩弹簧和分离杠杆的作用下，可移动入土机构上下移动。动轨迹条件下，穴施肥装置约束、驱动副见表 2。添加过驱动副和约束的效果图见图 6。入土机构-土壤接触属性为碰撞，刚度值  $100\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ，力指数 1.4，阻尼取刚度值 0.5%，穿透深度值  $\geq 0$ 。



图 5 简化后三维模型

Figure 5 Simplified 3d model

### 2.3 结果与分析

对玉米穴施肥装置进行动轨迹分析，为分析穴施肥装置在工作时机械运动情况，整机以  $2\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  速度前进，根据发动机的功率，选用  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的速度模拟穴施肥装置的动轨迹。预设置仿真计算求解

时间 1 s，步长 200。结果中分析了 4 个运动周期，入土深度如图 7 所示。

图 7 表明机构在前进工况下，玉米穴施肥机的

施肥深度大于 8 cm，满足实际施肥深度要求。表明在与土壤的作用过程中，入土机构能保证等穴间距，即满足实际运动轨迹要求。

表 2 穴施肥装置约束、驱动副

Table 2 The constrained pair, drive of hole fertilizing device (dynamic trajectory)

约束和驱动 Constrained and drive	零部件 Part
固定副 constrained pair	曲柄动力分配轴&地面、
旋转副 Rotated pair	曲柄动力分配轴&地面、入土机构动力分配轴&地面、入土机构&地面、凸轮&地面、连杆&曲柄、入土机构&入土机构动力分配轴
移动副 Sliding pair	曲柄动力分配轴&地面、入土机构动力分配轴&地面、入土机构&地面、凸轮&地面、连杆&曲柄、入土机构&入土机构动力分配轴
凸轮副 Cam pair	凸轮&分离杠杆
弹簧 Spring	压缩弹簧&分离杠杆
驱动 Drive	曲柄动力分配轴转速、入土机构动力分配轴转速、行驶速度

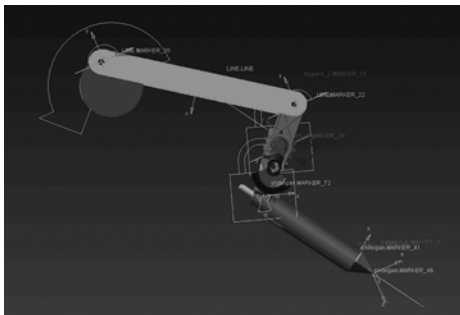


图 6 添加约束

Figure 6 Adding constraint graph

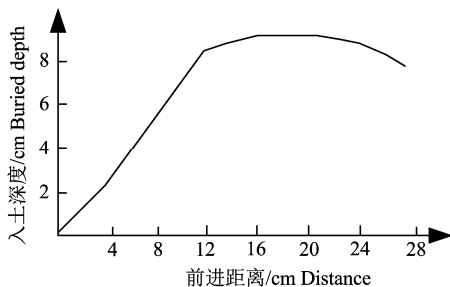


图 7 入土深度

Figure 7 Buried depth

### 3 穴施肥装置动力学仿真分析

以玉米中期穴施肥装置最大入土深度 10 cm 为极限工况，建立穴施肥装置-土壤有限元多体动力学模型，初始条件下入土施肥部件顶点 RP-1 与土壤表面接触，以 30°入土角插穴。根据研究目的，为了节约计算资源，对施肥部件尖端和旋转副刚体化，参考点设置为 RP-1，装配效果如图 8 所示。穴施肥装置材料为铸铁，使用 Drucker Prager 定义粘土模型。入土部件和土壤使用 8 结点线性六面体减缩积分单元 (C3D8R)，可以有效的克服沙漏能和防止

剪切自锁现象，共划分 341 834 个网格单元，103 902 个节点，其中 25 376 个六面体单元，316 458 个四面体单元。

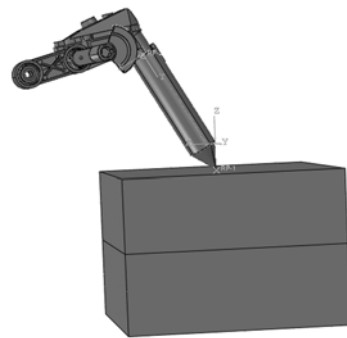


图 8 装配效果

Figure 8 Assembly rendering

#### 3.1 边界接触属性

对土壤模型施加 Z 方向 - 9.8 m·s<sup>-2</sup> 加速度模拟重力作用，限制土壤底面自由度，两对侧面均定义对称边界条件，保证侧面侧向不会有位移的同时模拟土壤真实环境。由于入土力只能在有边界条件的区域进行检测，因此入土部件的运动采用边界形式施加，运动方向由向量定义。其起始点和入土力监测点如表 3 所示。

穴施肥机以 30° 入土角接触土壤表面时，包含法向行为和切向滑移，法向行为采用“硬”接触，并允许穴施肥机-土壤接触后分离；切向滑移采用显式分析步各向同性摩擦模型，引入“罚”摩擦公式，摩擦系数 0.3。接触类型为 Explicit 通用接触，穴施肥机运动相当于进入土壤模型内部，因此接触对选择网格建模，解析刚体默认表面接触不穿透。

表 3 运动方向和监测点坐标

Table 3 Moving direction and monitoring point coordinates

名称 Item	X 坐标/mm X-coordinate	Y 坐标/mm Y-coordinate	Z 坐标/mm Z-coordinate
运动向量起点 Starting point of motion vector	96.197693	0	129.223906
运动向量终点 End of motion vector	0	0	-37.395386
入土力监测点 Earth force monitoring point	96.197693	0	129.223906

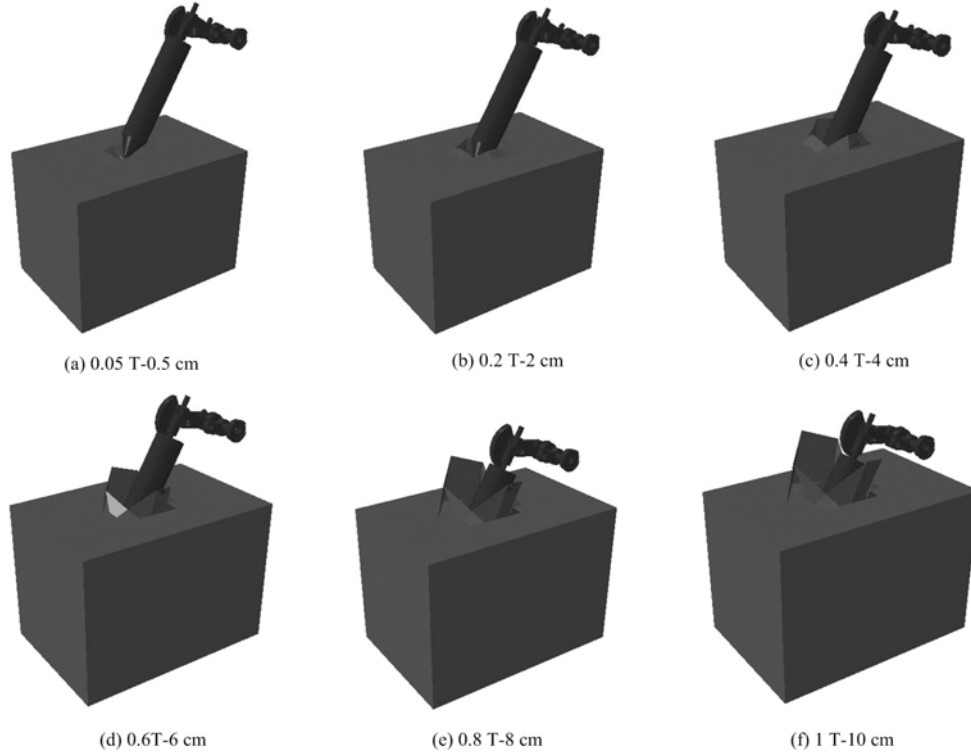


图 9 不同时刻仿真效果

Figure 9 Different time simulations

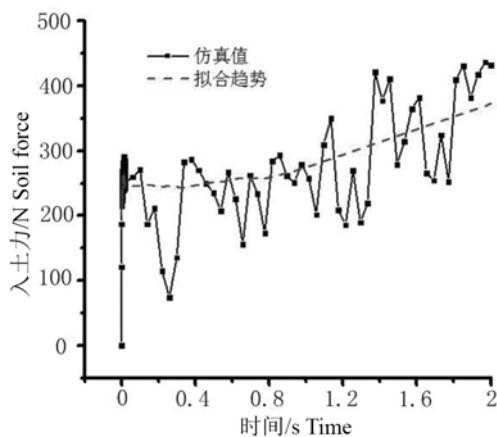


图 10 入土力变化

Figure 10 Conversion of soil force

### 3.2 动力学仿真

在 Abaqus/Explicit 模块中对时间进行动力学显式积分, 设置 2 个分析步: (1) 运动时间 0.1 s, 打开几何非线性; (2) 运动时间 1.9 s, 打开几何非线性, 对穴施机部件质量放大, 放大因子为 6。为了

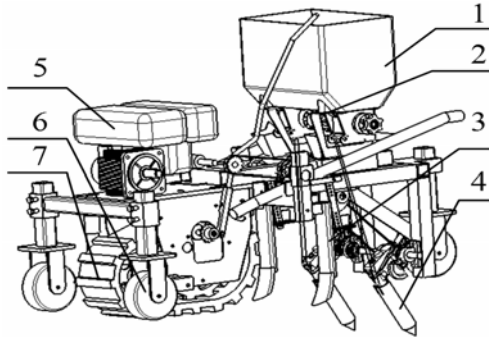
提高运算速度, 设置 Single 运算, 应用高性能工作站求解 inp 文件, 工作站配置: 双 CPU48 核 2.5GHz, 可用内存 (RAM) 256 GB, 一种工况平均耗时约 10 h。设定穴施机完成一次入土施肥时间为 1 T, 不同时刻的仿真效果如图 9 所示。0.05T 时穴施机入土深度 0.5 cm, 完成分析步一的准备阶段; 0.4 T 时入土深度 2 cm, 穴施机尖端进入土壤; 1T 时刻入土深度 10 cm, 穴施机完成入土过程, 破土效果明显。入土力变化如图 10 所示, 穴施机初始破土时出现受力突增, 破土之后整体受力呈上升趋势, 并伴随较激烈的受力波动, 这是由于土壤的板结特性, 入土过程造成土壤断裂, 该时刻入土力产生突降。

## 4 田间试验

为了验证机构设计合理性, 将试制的玉米穴施肥装置挂载在配套试制的小型玉米施肥机上<sup>[11-12]</sup>, 在安徽农业大学农翠园开展了玉米中期穴施试验<sup>[16]</sup>。样机轴测图如图 11 所示。

表 4 施肥深度合格率试验  
Table 4 Pass rate test fertilization depth

参数 Parameter	试验结果 Experimental result	技术要求 Technical requirements
平均施肥深度/mm Average depth of fertilization	86.3	≥80
施肥深度合格率/% Depth of fertilization rate	83	≥80



1.肥料箱; 2.排肥器; 3.开沟器; 4.穴施肥装置; 5.单缸汽油机; 6.转向轮; 7.履带行走轮  
1. Fertilizer box; 2. Fattening device; 3. Grooves; 4. Point fertilization device; 5. Single cylinder gasoline engine; 6. Steering wheel; 7. Caterpillar walking wheel

图 11 样机轴侧

Figure 11 Axis side view of prototype

按照 NY/T 1003-2006 《施肥机械质量评价技术规范》<sup>[17]</sup>标准对玉米穴施肥机械进行田间试验, 试验现场图如图 12 所示。选用的肥料为尿素, 颗粒尺寸为 1.0~3.0 mm, 堆密度 750 kg·m<sup>-3</sup>, 试验时随机选择植株行间进行施肥, 测试 10 行。试验时机械以 2 km·h<sup>-1</sup> 的速度匀速前进, 每行试验结束以后, 随机选取 10 个穴测试其深度。在已开穴的方位扒开覆盖的土层, 直至漏出白色固体的肥料, 以施肥覆土后的地面为测量基准面, 测定肥料至基准面的距离。通过精度为 0.1 mm 的计量齿测试肥料与地面之间的距离。按照实验数据计算平均施肥深度和施肥深度合格率。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^h H_i}{K} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{K_h}{K} \times 100 \quad (13)$$

式中:  $H$  为平均施肥深度, cm;  $H_i$  为第  $i$  点的施肥深度 ( $i=1,2,3,\dots,k$ ), cm;  $K$  为测定点数;  $\gamma$  为施肥深度合格率, %;  $K_h$  为施肥深度合格点数。

通过式 (12)、式 (13) 计算平均施肥深度及施肥深度合格率如表 4 所示。按照 NY/T 1003-2006 《施肥机械质量评价技术规范》<sup>[17]</sup>标准, 均符合技

术要求。

## 5 结论

利用 Matlab 建立轨迹数学模型, 确定部件尺寸参数, 再通过 Catia 进行三维建模完成玉米穴施肥装置的结构设计, 缩短了玉米穴施肥机械的设计研发周期。

通过建立运动学和动力学仿真模型, 机构运动仿真满足运动轨迹和受力要求, 并经过田间试验验证, 平均施肥深度为 86.3 mm, 施肥深度合格率 83%, 均符合技术要求。

本装置运用曲柄摇杆机构, 减少机械与土壤直接作用的阻力, 可安装在小型施肥机械上, 借助机具行走动力平稳有效的实现颗粒肥深施。

## 参考文献:

- [1] 李复辉, 刁培松, 杜瑞成, 等. 内嵌勺盘式舵轮免耕施肥播种机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 16-23.
- [2] 王金峰, 王金武, 葛宜元, 等. 深施型液态施肥机扎穴机构优化设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 52-55.
- [3] 郗晓焕, 王金武, 郎春玲, 等. 液态施肥机椭圆齿轮扎穴机构优化设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 80-83.
- [4] 刘亚华, 王金武, 王金峰, 等. 深施液态施非圆齿轮扎穴施肥装置试验分析[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(2): 54-58.
- [5] 王金武, 张春风, 周文琪, 等. 基于 MATLAB 仿真的非规则齿轮行星系扎穴机构的优化设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 22-28.
- [6] 杨自栋, 王廷恩, 兰翼, 等. 轮盘式液态肥穴播深施机设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 139-143.
- [7] 杨术明, 杨青, 杨成海. 变量穴施水穴播机的变量施水数学模型[J]. 农业机械学报, 2009 (增刊 1): 41-44.
- [8] 张睿, 王秀, 赵春江, 等. 链条输送式变量施肥抛撒机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 20-25.
- [9] 陈然, 孙华东. 基于 MATLAB 的曲柄滑块和摇块机构的运动仿真分析[J]. 煤炭机械, 2015, 36(1): 243-244.
- [10] 熊文伟. 基于 MATLAB/Simulink 曲线连杆机构运动学分析及仿真[J]. 煤炭技术, 2012, 31(4): 18-19.
- [11] 郭飞, 韩冰. 基于 Matlab 的曲柄摇杆机构运动学仿真[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 45-46.
- [12] 郑媛媛. 电动玉米中期追肥机的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [13] 高利娟. 烟草定量穴施追肥机的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [14] 陈黎卿, 李艳, 曹成茂, 等. 基于遗传算法的山区微型播种施肥机减振优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 17-22.
- [15] 张勋. 玉米穴播穴施肥装置的设计研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [16] 李沐桐, 温翔宇, 周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37-43.
- [17] 中华人民共和国农业部. 施肥机械质量评价技术规范: NY/T 1003-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.