

# 卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构设计与试验

王金武<sup>1</sup> 周文琪<sup>1</sup> 李鑫<sup>1</sup> 冯金龙<sup>2</sup> 江东璇<sup>1</sup> 王金峰<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

**摘要:** 针对深施型液态施肥机扎穴机构始终无法满足喷肥针垂直姿态入出土问题, 分别根据卵形非圆齿轮与全正圆齿轮行星轮系的组合啮合特性, 设计了一种实现变速垂直扎穴的新型卵形-全正圆齿轮行星系扎穴机构。采用卵形齿轮相互啮合原理, 控制扎穴机构在工作周期内的瞬时角速度变化, 实现变速扎穴, 满足喷肥针在入土与出土过程中水平绝对速度趋近于零的特定要求, 达到穴口最小。以喷肥针垂直姿态扎穴并满足小穴口为设计目标, 建立机构数学模型, 以扎穴机构转速 120 r/min、前进速度 1.2 m/s 和扎穴深度 80 mm 为约束条件, 得到机构的结构参数为卵形齿轮长半轴距离 39.9 mm、偏心率 0.15、正圆齿轮节曲线直径 68 mm 和喷肥针长度 140 mm, 并运用 ADAMS 软件进行虚拟试验验证。通过高速摄像与扎穴试验, 得到喷肥针在前进速度 1.2 m/s、扎穴转速 120 r/min 与扎穴深度 80 mm 下的轨迹形状、水平绝对速度曲线以及穴口宽度。结果表明, 卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构在高转速与前进速度下, 喷肥针始终保证垂直姿态入出土, 实现了小穴口的目标。

**关键词:** 液态施肥机; 扎穴机构; 卵形齿轮; 变速扎穴; 性能试验

**中图分类号:** S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0136-07

## Design and Experiment of Variable Speed Picking Hole Mechanism for Oval and Circular Gear Planetary System

WANG Jinwu<sup>1</sup> ZHOU Wenqi<sup>1</sup> LI Xin<sup>1</sup> FENG Jinlong<sup>2</sup> JIANG Dongxuan<sup>1</sup> WANG Jinfeng<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Aiming to the problem that picking hole mechanism of deep-fertilization liquid fertilizer applicator can not meet fertilizer-spraying needle inserted and pulled out of soil vertically all the time, according to the meshing characteristic of combining gears for oval non-circular with round gears. A new kind of picking hole mechanism was designed to achieve variable speed and vertical posture at picking hole. The meshing principle of oval gears were used, which controlled every moment change of angular velocity to achieve variable speed picking hole in the working period, the characteristic met specific requirement, which had horizontal velocity of fertilizer-spraying needle trend to zero inserted and pulled out of soil, small hole mouth was achieved. To achieve small hole mouth and picking hole for vertical posture, the mathematics model of mechanism was established, with the rotational speed of picking hole mechanism of 120 r/min, forward speed of 1.2 m/s and depth of picking hole of 80 mm as constraint conditions, structure parameters of mechanism were obtained, including half shaft distance of oval gear shaft of 39.9 mm, eccentricity of 0.15, diameter of circular gear pitch curve of 68 mm and length of fertilizer-spraying needle of 140 mm, and virtual experiment was verified by using the ADAMS software. The experiments of high-speed camera and picking hole were carried out, the trajectory shape of fertilizer-spraying needle, curve of level absolute velocity and hole width were obtained when the forward speed was 1.2 m/s, rotational speed of picking hole mechanism was 120 r/min and depth of picking hole was 80 mm, the reasons for the formation of such results were analyzed. Experiments results showed that fertilizer-spraying needle still guaranteed the target that had small hole mouth and picking hole for vertical posture.

**Key words:** liquid fertilizer applicator; pricking hole mechanism; oval gear; variable speed picking hole; performance experiment

收稿日期: 2017-09-12 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675093)

作者简介: 王金武(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事田间机械和机械可靠性研究, E-mail: jinwu@163.com

## 0 引言

液态肥以生产费用低、施肥方便、吸收快、用肥省、改善农业产品品质等诸多优点在国内外已得到较为广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。液肥深施技术是将液肥集中施于土壤耕作层的作物根系附近,利于加快作物对液肥的吸收,提高作物产量和质量<sup>[5]</sup>。

文献[6-7]采用曲柄滑块机构作为深施液肥装置的驱动部件。该装置采用“杆机构”运动形式,可实现单个注射针在入出土过程中保证垂直姿态深施肥。但由于“杆机构”的固有运动特性,机具工作效率、振动大,难以实现在高速下,喷肥针兼具垂直姿态扎穴与穴口小的目标。

现阶段,国内扎穴机构主要采用非圆齿轮行星系驱动喷肥针进行扎穴。如固装单臂喷肥针的椭圆-正圆齿轮行星系扎穴机构,虽然经过运动学和动力学优化,但驱动轮系仍不能满足喷肥针入出土垂直姿态要求且工作效率低,难以实现高速扎穴性能。固装双臂喷肥针的全椭圆齿轮行星系扎穴机构、采用二级传动的非圆齿轮行星轮系扎穴机构<sup>[8-11]</sup>以及最新设计的变形椭圆齿轮式与“斜置式”扎穴机构<sup>[12-14]</sup>,皆采用双喷肥针结构实现旋转交替扎穴方式,虽然满足高速扎穴,但该种机构利用参数正求与反求方法进行设计,并运用人机交互方式对机构进行反复优化,但也不能获得喷肥针垂直姿态入出土的目标。

针对上述问题,本文根据全正圆齿轮行星系的啮合原理,首先满足喷肥针时刻垂直运动姿态,其次结合卵形齿轮啮合运动规律,实现喷肥针变速扎穴的新型方式,实现喷肥针在入出土过程中达到小穴口的目标。基于此种思路,设计卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构,并探索该机构的工作机理,建立机构的数学模型,利用仿真软件进行虚拟试验,最终通过试验进行机构性能的验证。

## 1 卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构结构与原理

卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构主要由 5 个全等的正圆齿轮、2 个卵形齿轮、驱动壳体、法兰、摇臂、喷肥针等部分组成,如图 1a 所示。5 个正圆齿轮等序排列装配在驱动壳体内腔里面(此时驱动壳体初始安装位置垂直于地面),法兰穿透驱动壳体并与内腔里面的太阳轮固结,且静止不动,驱动壳体可围绕法兰旋转中心作旋转运动,如图 1b 所示。摇臂与喷肥针的固装体分别安装在上、下行星轮的轴心线上,摇臂初始安装角度需满足喷肥针垂

直地面。2 个卵形齿轮互相啮合,其中从动卵形齿轮与驱动壳体固结。

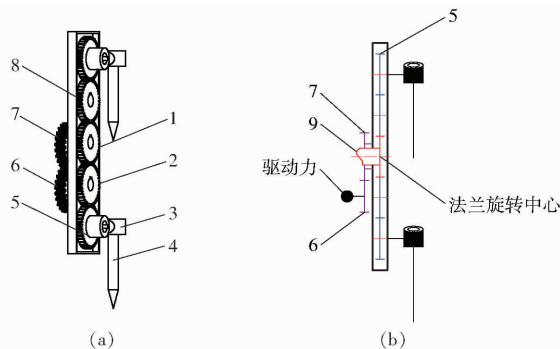


图 1 扎穴机构组成与原理图

Fig. 1 Diagrams of composition and principle of pricking hole mechanism

- 1. 太阳轮 2. 中间轮 3. 摇臂 4. 喷肥针 5. 行星轮 6. 主动卵形齿轮 7. 从动卵形齿轮 8. 驱动壳体 9. 法兰

工作时,主动卵形齿轮在驱动力下带动从动卵形齿轮,由此动力传递到驱动壳体上,由于卵形齿轮实现非匀速传动特性,使驱动壳体围绕法兰旋转中心作变速转动,驱动壳体带动全正圆齿轮行星系进行啮合运动。此时,中间轮围绕太阳轮公转且自转,行星轮与中间轮相互啮合,所以同理可知,行星轮围绕太阳轮公转且自转。由于行星轮与摇臂、喷肥针固结,最终动力传递给喷肥针,使其满足喷肥针始终保持垂直姿态且围绕法兰旋转中心作圆周运动。在驱动壳体的变速运动下,根据机构的前进速度,满足喷肥针在入出土过程中水平绝对速度趋近于零的特性要求,达到穴口小的目标,最终完成变速垂直扎穴。

## 2 卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构模型

### 2.1 全正圆齿轮行星系传动机理

全正圆齿轮行星系可实现喷肥针垂直姿态入出土运动特性要求,其结构简图如图 2 所示。

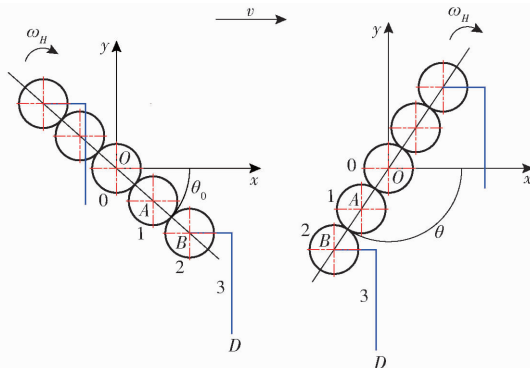


图 2 全正圆齿轮行星系机构简图

Fig. 2 Mechanism diagram of all circular gear planetary system

建立机构模型直角坐标系,其转动中心位于坐标原点  $O$ , 则

$$i_{20}^H = \frac{\omega_2 - \omega_H}{\omega_0 - \omega_H} = (-1)^2 \frac{Z_1 Z_2}{Z_0 Z_1} = 1 \quad (1)$$

式中  $i_{20}^H$ ——转化轮系行星轮与太阳轮传动比  
 $\omega_0$ ——太阳轮角速度, rad/s  
 $\omega_2$ ——行星轮角速度, rad/s  
 $\omega_H$ ——驱动壳体瞬时角速度, rad/s  
 $Z_0$ ——太阳轮齿数  
 $Z_1$ ——中间轮齿数  
 $Z_2$ ——行星轮齿数

由于太阳轮静止不动,即可推出

$$\omega_0 = \omega_2 = 0 \quad (2)$$

所以,根据式(2)得到喷肥针的角速度为零,其相对运动轨迹为绕  $O$  点的圆,如将喷肥针初始安装位置为垂直地面,即在驱动壳体转动的过程中,喷肥针始终围绕  $O$  点一直保持垂直姿态  $90^\circ$  扎穴。

行星轮中心点  $B$  的相对位移方程为

$$\begin{cases} x_B = L_{OB} \cos\theta \\ y_B = L_{OB} \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中  $x_B, y_B$ —— $B$  点水平相对位移与垂直相对位移, m

$L_{OB}$ ——太阳轮与行星轮之间的中心距, m  
 $\theta$ ——驱动壳体中心线与  $x$  轴之间的夹角, rad

则  $B$  点的相对速度方程为

$$\begin{cases} v_{Bx} = -\dot{\theta}_2 L_{OB} \sin\theta \\ v_{By} = \dot{\theta}_2 L_{OB} \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\theta = \theta_2 + \theta_0$

式中  $v_{Bx}, v_{By}$ —— $B$  点水平相对速度与垂直相对速度, m/s

$\dot{\theta}_2$ ——驱动壳体瞬时角速度 ( $\dot{\theta}_2 = \omega_H$ ), rad/s  
 $\theta_0$ ——驱动壳体中心线与  $x$  轴之间的初始夹角, rad

$\theta_2$ ——驱动壳体在  $t$  时间内转过的角度(从动卵形齿轮转角), rad

由于喷肥针  $D$  点相对行星轮  $B$  点并无角度转动,所以  $D$  点与  $B$  点的相对速度相同,则  $D$  点的绝对速度方程为

$$\begin{cases} v_{Dx} = -\dot{\theta}_2 L_{OB} \sin\theta + v \\ v_{Dy} = \dot{\theta}_2 L_{OB} \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中  $v_{Dx}, v_{Dy}$ —— $D$  点水平绝对速度与垂直绝对速度, m/s

$v$ ——机构的前进速度, m/s

根据式(5)可知,当  $L_{OB}$  与  $v$  为定值时,  $v_{Dx}$  始终随  $\theta$  变化而变化。喷肥针在入土到最低点的过程中,  $\sin\theta$  随着  $t$  逐渐增大;喷肥针在最低点到出土过程中,  $\sin\theta$  随着  $t$  逐渐减小。所以,  $\dot{\theta}_2$  的变化必然先随着  $t$  逐渐减小,而后随着  $t$  逐渐增大,以此满足  $v_{Dx}$  任意时刻始终保证  $\dot{\theta}_2 L_{OB} \sin\theta$  趋近于定值且等于  $v$ , 则垄面上的穴口变小。

当机构在田间作业时,  $v$  为定值,  $L_{OB}$  不易改变,所以仅当  $\dot{\theta}_2$  为变量时,使其满足  $\dot{\theta}_2 \sin\theta$  为定值,则在喷肥针扎穴过程中  $v_{Dx}$  可始终趋近于零,实现扎穴机构变速作业。

### 2.2 卵形齿轮啮合原理

卵形齿轮传动是一对完全相同的节曲线围绕各自的旋转中心作纯滚动,如图3所示。

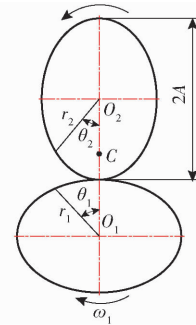


图3 卵形齿轮传动示意图

Fig.3 Transmission of oval-shaped gears

卵形齿轮节曲线方程为<sup>[15-18]</sup>

$$r_1 = \frac{A(1 - e^2)}{1 - e \cos(2\theta_1)} \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{A(1 - e^2)}{1 + e \cos(2\theta_2)} \quad (7)$$

$$\theta_2 = \int_0^{\theta_1} \frac{A(1 - e^2)}{a(1 - e \cos(2\theta_1)) - A(1 - e^2)} d\theta_1 \quad (8)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{\dot{\theta}_1 (1 + e \cos(2\theta_2))}{1 - e \cos(2\theta_1)} \quad (9)$$

式中  $r_1$ ——主动卵形齿轮的节曲线, mm  
 $r_2$ ——从动卵形齿轮的节曲线, mm  
 $\theta_1$ ——主动卵形齿轮转角, rad  
 $\dot{\theta}_1$ ——主动卵形齿轮角速度, rad/s  
 $A$ ——卵形齿轮长半轴距离, mm  
 $a$ ——两个卵形齿轮的中心距, mm  
 $e$ ——偏心率

根据式(4)可知,喷肥针在入土到最低点的过程中,随着驱动壳体的转动,  $\theta$  逐渐增大,即  $v_{Bx}$  逐渐增大,如将瞬时角速度逐渐变小,则可保证  $v_{Dx}$  为一定值且趋近于零。同理,喷肥针在最低点到出土过程中,需将瞬时角速度逐渐增大。通过研究卵形齿

轮的啮合传动特性,可保证喷肥针实现小穴口的特定要求。

### 3 卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构参数设计

#### 3.1 工作参数的设定

根据文中建立的机构数学模型,设定主动卵形齿轮转速 120 r/min,则从动卵形齿轮为同一转速,说明扎穴机构每秒扎穴 4 次,将穴距设定为 300 mm,则  $v = 1.2 \text{ m/s}^{[19-20]}$ 。

#### 3.2 结构参数的设计

$L_{OB}$ 为决定驱动壳体纵向尺寸的主要影响因素。纵向尺寸过大,机构动力学性能变差,驱动力变大;纵向尺寸过小,易导致相邻之间的喷肥针干涉,穴距变小。如图 4 所示。

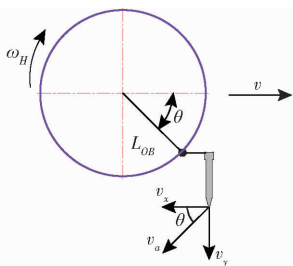


图 4 喷肥针工作示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spray fertilizer needle

根据前期研究,为保证穴距 300 mm 及良好的动力学性能, $L_{OB}$ 应在 120 ~ 150 mm 之间。本文选择  $L_{OB}$ 为 136 mm,则求得正圆齿轮节曲线直径为 68 mm。为避免驱动壳体刮土和达到农艺要求深施肥深度,喷肥针的设计尺寸需略大于正圆齿轮节曲线半径(34 mm)、扎穴深度(80 mm)和驱动壳体壁厚相加的尺寸,所以设定的喷肥针长度为 140 mm。

将机构工作及结构参数代入式(5)中,并满足喷肥针在入土与出土过程中  $v_{Dx}$ 趋近于零的变化规律。根据卵形齿轮的啮合特性,本文设计其结构尺寸  $A = 39.9 \text{ mm}$ ,  $e = 0.15$ ,最终求得  $\theta_2$ ,实现垄面上出现的穴口变小。

### 4 虚拟试验验证

为验证机构设计的合理性,通过 Pro/E 软件建立扎穴机构三维模型,并导入到 ADAMS 软件进行扎穴轨迹验证。图 5 为扎穴机构相对运动轨迹,轨迹形状为圆形,符合全正圆齿轮行星系传动特性,喷肥针始终保证垂直姿态扎穴。图 6 为扎穴机构在前进速度 1.2 m/s 与转速 120 r/min 下的绝对运动轨迹。

从图 6 中获知,在喷肥针入出土轨迹段,存在轨

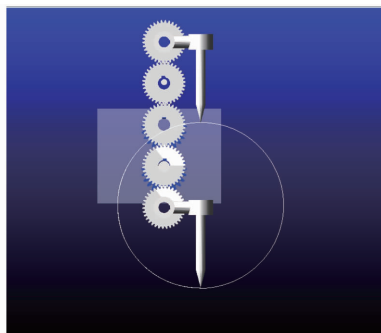


图 5 扎穴机构相对运动轨迹

Fig. 5 Relative motion trajectory of pricking hole mechanism

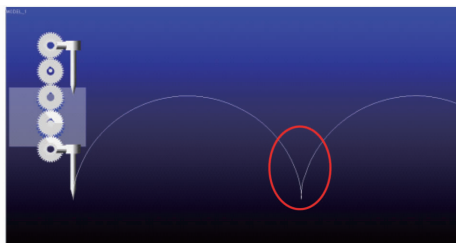


图 6 扎穴机构绝对运动轨迹

Fig. 6 Absolute motion trajectory of pricking hole mechanism

迹段重合部分,图中红色圆圈区域所示轨迹为“Y”形轨迹。说明在此过程中,经过扎穴机构的变速运动,满足喷肥针的水平绝对速度为零的特性要求,此时仅有垂直绝对速度,穴口尺寸与喷肥针直径尺寸相同。综上所述,设计的机构可满足喷肥针垂直姿态扎穴,当机构前进速度为 1.2 m/s 时,扎穴机构既能保证高速扎穴也能保证穴口小的特定要求,此时穴口大小为 26 mm,满足扎穴施肥农艺要求。

## 5 试验

### 5.1 试验测试与方法

为验证设计的卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构正确性,本文利用高速摄像技术,对卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构喷肥针的绝对运动进行拍摄<sup>[21-22]</sup>,并在土槽上对机构进行扎穴试验,如图 7 所示。试验地点为东北农业大学工程学院农具实验室,依据中耕时期的土壤状况要求,调整土壤坚实度范围为 0.6 ~ 1.0 MPa,含水率为 15% ~ 25%。

根据理论分析得到的机构结构与工作参数,调节驱动壳体转速至 120 r/min 平稳转动,机构前进速度为 1.2 m/s,通过高速摄像机对扎穴机构进行拍摄。运用 Phantom V5.1 软件建立坐标系,并记录喷肥针尖点的坐标,通过 Excel 软件对数据点进行曲线拟合,获得实际的喷肥针绝对运动轨迹与速度曲线。将扎穴深度调整为 80 mm 并测量穴口尺寸。



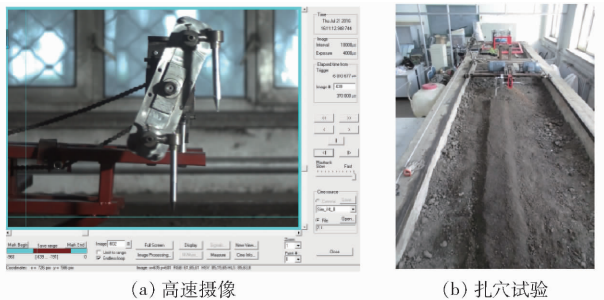


图7 扎穴机构性能试验

Fig. 7 Performance experiment of pricking hole mechanism

## 5.2 试验结果与分析

喷肥针的绝对运动轨迹曲线如图8所示;喷肥针水平绝对速度曲线如图9所示。穴口宽度平均为28.6 mm,如表1所示。

从图8中可以看出,在一个扎穴周期内,测得喷

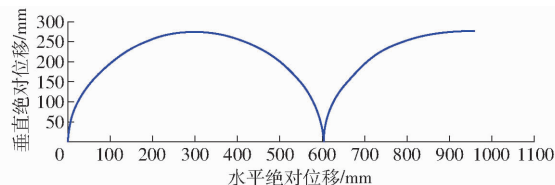


图8 喷肥针绝对运动轨迹

Fig. 8 Absolute motion trajectory of spray fertilizer needle

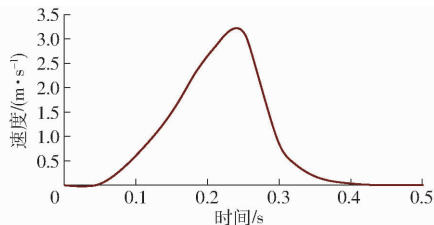


图9 喷肥针水平绝对速度曲线

Fig. 9 Absolute horizontal velocity curve of spray fertilizer needle

表1 穴口宽度测量结果  
Tab. 1 Test results of hole width

试验序号	穴口序号										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	31	26	28	30	27	30	26	25	30	28	28.1
2	30	27	33	30	30	29	26	30	27	30	29.2
3	31	28	27	23	28	27	35	28	27	28	28.2
4	30	31	28	27	28	24	30	28	26	29	28.1
5	30	27	29	30	31	28	30	30	31	27	29.3

肥针轨迹高度为275.3 mm,轨迹长度为602.5 mm。测得的轨迹曲线与仿真得到的轨迹曲线相比,形状相同(“Y”形轨迹)。喷肥针在入土与出土过程中,轨迹底端存在曲线重合部分(水平绝对位移602.5 mm位置处)。从图9中可以看出,喷肥针完成一个扎穴周期内,水平绝对速度曲线为余弦函数曲线,最小值为0 m/s,最大值为3.13 m/s。开始时,喷肥针从第1个穴口最底端出土;0.5 s结束时,喷肥针达到第2个穴口最底端。在0~0.04 s与0.46~0.50 s内,喷肥针水平绝对速度为零。由表1数据得知,测得的穴口宽度与理论值26 mm相差2.6 mm,由于扎穴速度较大,所以机构的振动是造成误差的主要原因。

扎穴机构在一个工作周期内,通过卵形齿轮相互啮合传动,驱动壳体时刻存在角速度变化。根据式(5)可知,满足喷肥针在入土与出土轨迹段中,其部分时刻水平绝对速度为零的特性要求。所以存在图8轨迹重合部分与图9水平绝对速度为零的变化趋势,验证了理论设计的正确性。

## 6 结论

(1)根据卵形齿轮与全正圆齿轮行星系的啮合特性,设计了一种满足喷肥针变速垂直作业的卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构,并建立该机构的数学模型,根据设计目标与要求,最终得到机构的结构与工作参数。

(2)根据理论分析得到的机构参数,对卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构进行虚拟试验,得到喷肥针的相对与绝对运动轨迹曲线,验证了喷肥针保证入出土的垂直姿态的同时,也可保证穴口小的要求。

(3)对机构进行高速摄像与扎穴试验。试验结果表明,喷肥针在前进速度1.2 m/s、扎穴转速120 r/min与扎穴深度80 mm下,喷肥针在入土与出土过程中,轨迹底端存在曲线重合部分,此时水平绝对速度为零。所以,卵形-全正圆齿轮行星系变速扎穴机构的结构特性可兼得喷肥针垂直扎穴与穴口小的目标,并测得穴口宽度为28.6 mm,达到农艺施肥要求。

## 参考文献

- WANG Yunxia. Present application situation of liquid fertilizer and its development tendency[J]. Chemical Fertilizer Design, 2003,41(4):10-13. (in Chinese)
- 2 徐秀成. 提高肥料利用率化工部门能做什么[J]. 磷肥与复肥, 1999, 14(3): 6-11.  
XU Xiucheng. What can departments of chemical industry do for raising fertilizer use efficiency [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 1999, 14(3): 6-11. (in Chinese)
- 3 窦桂梅, 刘巧英. 机械深施化肥应用技术研究[J]. 山西农业科学, 2000, 28(2): 3-6.  
DOU Guimei, LIU Qiaoying. Research on application technology of mechanized deep fertilization [J]. Agricultural Science of Shanxi, 2000, 28(2): 3-6. (in Chinese)
- 4 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 700-709.  
LI Wei, LI Xuhua, LI Haiyan, et al. Effect of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 700-709. (in Chinese)
- 5 张义峰, 杨景波, 衣淑娟. 牧草免耕播种与液体施肥机的设计[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011, 23(4): 20-22.  
ZHANG Yifeng, YANG Jingbo, YI Shujuan. Design on machine of fodder grass zero tillage seeding and liquid apply fertilizer [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011, 23(4): 20-22. (in Chinese)
- 6 MARCELO J S, HENRIQUE C J F, PAULO S G M, et al. Liquid fertilizer application to ratoon cane using a soil punching method [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 165: 279-285.
- 7 WOMAC A R, TOMPKINS F D. Probe-type injector for fluid fertilizers [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1990, 6(2): 149-154.
- 8 王金武, 周文琪, 张春风, 等. 非规则齿轮行星系扎穴机构反求设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 71-75. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151111&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151111&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.011.  
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, ZHANG Chunfeng, et al. Reverse design and experiment of non-circular gear planetary system picking hole mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 71-75. (in Chinese)
- 9 刘春香, 王金武, 周文琪, 等. 液肥深施双斜孔式喷肥针动力学分析与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 54-58. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160308&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160308&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.008.  
LIU Chunxiang, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Dynamics analysis and experiment of double oblique hole spray fertilizer needle of liquid fertilizer deep-fertilization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 54-58. (in Chinese)
- 10 刘春香, 王金武, 唐汉, 等. 基于贝塞尔曲线的液肥扎穴机构动力学分析与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 116-122. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160516&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160516&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.016.  
LIU Chunxiang, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Dynamics analysis and test on picking hole mechanism of liquid fertilizer based on bezier curve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 116-122. (in Chinese)
- 11 王金武, 刘亚华, 王金峰, 等. 全椭圆齿轮行星系液态肥深施机构优化设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 59-65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20121011&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121011&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.011.  
WANG Jinwu, LIU Yahua, WANG Jinfeng, et al. Optimized design and experimental of the liquid fertilizer deep mechanism with planetary elliptic gears [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 59-65. (in Chinese)
- 12 冯金龙, 王金武, 周文琪, 等. 变形椭圆齿轮式扎穴机构设计与工作参数试验优化 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 90-96. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170411&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170411&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.011.  
FENG Jinlong, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Design of pricking hole mechanism with deformation elliptical gears and optimization of experiment with work parameters [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 90-96. (in Chinese)
- 13 王金武, 周文琪, 王秀, 等. 基于三次拉格朗日曲线拟合轨迹的斜置式扎穴机构研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 79-85. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170509&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170509&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.009.  
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Xiu, et al. Oblique type pricking hole mechanism based on lagrange curve for cubic fitting trajectory [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 79-85. (in Chinese)
- 14 王金武, 周文琪, 王金峰, 等. 斜置式非规则齿轮行星系扎穴机构工作参数试验优化 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 66-70. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170608&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170608&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.008.  
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Jinfeng, et al. Experiment and optimization of working parameters for pricking hole mechanism of oblique type non-circular gears planetary system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 66-70. (in Chinese)
- 15 陈继照. 椭圆齿轮行星系分插机构动力学特性研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- 16 王英, 夏旭东, 何小晶, 等. 偏心-椭圆齿轮行星系栽植装置动力学优化与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 38-46. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170106&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170106&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.006.  
WANG Ying, XIA Xudong, HE Xiaojing, et al. Dynamics optimization and experiment of planting device driven by planetary eccentric gears and elliptic gears [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 38-46. (in Chinese)
- 17 徐洪广, 赵匀, 张允慧, 等. 水稻钵苗移栽机变性卵形齿轮分秧机构的运动机理分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 10-15.  
XU Hongguang, ZHAO Yun, ZHANG Yunhui, et al. Analysis on kinematic principle for seedling-picking machinery of rice transplanter with deformed oval gears [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 10-15. (in Chinese)
- 18 陈建能, 王英, 黄前泽, 等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 52-56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131009&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131009&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.009.  
CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,

44(10): 52-56. (in Chinese)

- 19 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 20 吴序堂,王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 21 余佳佳,丁幼春,廖宜涛,等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. 华中农业大学学报,2014,33(3): 103-108.
- YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2014,33(3):103-108. (in Chinese)
- 22 陶桂香,衣淑娟,汪春,等. 基于高速摄像技术的水稻钵盘精量播种装置投种过程分析[J]. 农业工程学报,2012,28(2): 197-201.
- TAO Guixiang, YI Shujuan, WANG Chun, et al. Analysis on dropping processing of precision sowing device in rice seeding bowl by high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):197-201. (in Chinese)

(上接第 135 页)

- 15 CAMPOS A V P, OLIVEIRA O S, FERREIRA L V, et al. Dem simulations of dynamic angle of repose of acerola residue: a parametric study using a response surface technique[J]. Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2015, 1(2): 11326-11333.
- 16 WANG X, YU J, LV F, et al. A multi-sphere based modelling method for maize grain assemblies[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(2):584-595.
- 17 WANG L, LI R, WU B, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particology, 2018,38:185-195.
- 18 COETZEE C J, DNJ E. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198-212.
- 19 邱白晶,姜国徽,杨宁,等. 水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析[J]. 农业工程学报,2012,28(3): 44-49.
- 20 CUNHA R N, SANTOS K G, LIMA R N, et al. Repose angle of monoparticles and binary mixture: an experimental and simulation study[J]. Powder Technology, 2016, 303: 203-211.
- 21 杜欣,曾亚武,高睿,等. 基于 CT 扫描的不规则外形颗粒三维离散元建模[J]. 上海交通大学学报,2011,45(5): 711-715.
- 22 石林榕,吴建民,孙伟,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.
- SHI Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40-48. (in Chinese)
- 23 ASAE S368.4-2000. Compression test of food materials of convex shape[S]. 2000.
- 24 YAN Z, WILKINSON S K, STITT E H, et al. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis[J]. Computational Particle Mechanics, 2015, 2(3): 283-299.
- 25 牛康,苑严伟,罗敏,等. 双层种箱式马铃薯排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(20): 32-39.
- NIU Kang, YUAN Yanwei, LUO Min, et al. Design and experiment of potato metering device with double-deck seed tank[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 32-39. (in Chinese)
- 26 GONZÁLEZ-MONTELLANO C, FUENTES J M, AYUGA-TÉLLEZ E, et al. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 553-562.
- 27 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 28 文愿运,刘马林,刘荣正,等. 颗粒离散单元法数值模拟与典型实验对比研究[J]. 中国粉体技术,2015(3): 1-5.
- 29 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报,2014,63(17): 165-171.
- HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 165-171. (in Chinese)
- 30 王俊,许乃章,胥芳. 桃子冲击力学特性及其与桃子硬度的数学模型[J]. 农业机械学报,1994,25(4): 58-62.
- 31 ZHOU Y C, XU B H, YU A B, et al. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres [J]. Powder Technology, 2002, 125(1): 45-54.
- 32 YANG J, XUAN K, BIN L I, et al. Study on release mechanism of inhibitory components from cinnamon and clove powders [J]. Journal of Food Safety, 2012, 32(2): 189-197.
- 33 GHODKI B M, GOSWAMI T K. DEM simulation of flow of black pepper seeds in cryogenic grinding system [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 196: 36-51.
- 34 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3): 49-56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170306&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006.
- ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-56. (in Chinese)
- 35 ZHOU Y C, WRIGHT B D, YANG R Y, et al. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation [J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 1999, 269(2-4): 536-553.
- 36 赖庆辉,马文鹏,刘素,等. 气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5): 44-53. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170505&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170505&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.005.
- LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44-53. (in Chinese)
- 37 MARIGO M, STITT E H. Discrete element method (DEM) for industrial applications: comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets [J]. Kona, 2015, 32:236-252.
- 38 袁志发,周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000: 292-303.
- 39 徐中儒. 农业试验最优回归设计[M]. 哈尔滨:黑龙江科技出版社,1998: 181-187.