

# 履带式油菜苗移栽栽植孔成型机的设计与试验

向伟<sup>1,2,3</sup>, 吴明亮<sup>1,2,3\*</sup>, 官春云<sup>3,4</sup>, 徐玉娟<sup>1,2,3</sup>

(1. 湖南农业大学工学院, 长沙 410128; 2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128;  
3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128; 4. 湖南农业大学油料作物研究所, 长沙 410128)

**摘要:** 为设计新型油菜移栽机, 基于旱地移栽作业的工作特点, 融合油菜移栽农艺要求, 研制了一种履带式油菜移栽栽植孔成型装置。通过分析土壤物理机械力学特性, 求取打孔机构垂直出土所受摩擦阻力参数方程, 为关键部件打孔机构的机构设计提供力学参数与理论依据; 完成关键部件—打孔机构、靠模凸轮进行设计及优化后, 设计并试制试验样机, 进行田间试验。试验结果表明: 机器以慢一档工作状态下前进速度为 1.65~1.78 km/h, 作业效率达到 0.231~0.249 hm<sup>2</sup>/h, 其成孔的平均合格率也达到 93.8%。研制的机器能形成满足设计要求的栽植孔, 为新型移栽机的设计提供技术支持。

**关键词:** 移栽; 机械; 成型; 打孔机构; 靠模凸轮; 栽植孔; 油菜苗

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.002

中图分类号: S223.92

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0012-07

向伟, 吴明亮, 官春云, 徐玉娟. 履带式油菜苗移栽栽植孔成型机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 12-18. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.002 http://www.tcsae.org  
Xiang Wei, Wu Mingliang, Guan Chunyun, Xu Yujuan. Design and experiment of planting hole forming device of crawler transplanter for rape (*Brassica napus*) seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 12-18. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.002 http://www.tcsae.org

## 0 引言

油菜是一种重要的油料作物, 其菜籽油占中国居民食用植物油的 40%左右, 种植面积 700 万 hm<sup>2</sup> 和总产量 1200 万 t 均居世界第一<sup>[1-2]</sup>。长江流域是中国冬油菜的主产区, 种植面积占全国总面积 95%以上。目前, 油菜种植主要有直播和移栽 2 种模式, 但是, 长江流域油菜种植仍沿袭着油菜移栽种植模式, 而现有油菜移栽大多采用纯劳动力手工作业完成, 整体经济效益低, 因此, 必须发展油菜移栽机械<sup>[3-6]</sup>。

为了解决油菜移栽机械关键问题, 长期以来国内农机专家做了大量研究<sup>[7-9]</sup>, 于修钢, 袁文胜等研制开沟式移栽机, 该机采用栽植器将钵苗栽植入开沟器在翻耕地上开出的苗沟中, 覆土镇压后完成幼苗的移栽, 该类机型要求土壤疏松细碎, 且钵苗的破损率比较高<sup>[10-12]</sup>; 孙松林, 吴畏等研制鸭嘴栽插式移栽机, 鸭嘴式栽插器刺入土壤中后张开在土壤中形成栽植孔, 鸭嘴张开将幼苗栽入形成的栽植孔内, 提升鸭嘴式栽插器进行覆土完成幼苗的移栽, 该装置能同时完成打孔与幼苗栽植工作, 但要求土壤疏松细碎, 且幼苗苗龄和外观形状要求高, 喂苗速度不能过高<sup>[13-15]</sup>; 杭州市余杭区益民农业生产服

务专业合作社试制了由手扶拖拉机驱动的打孔机, 该机能在田间形成 V 型栽植孔, 通过人工将幼苗投入栽植孔内而完成幼苗移栽, 该类机型对土壤土质及含水率要求较高; 王晓东等设计了一种水轮式打穴移栽机, 从理论上分析孔穴形成过程, 得到打穴铲结构参数与孔穴形状之间的相互关系, 该机型能同时完成打穴、浇水和幼苗栽植工作, 但需在耕翻后平整良好的壤土上作业<sup>[16]</sup>。纵观已有研究成果, 油菜移栽机械取得一定的发展, 但作为油菜机械化栽植重要工序的栽植孔成型技术仍未取得突破性进展, 油菜是直根系忌水作物, 要求栽植油菜的土壤含水率低, 很大程度加大移栽油菜栽植孔的成型难度<sup>[17-21]</sup>。

为此, 本文基于旱地移栽作业的工作特点, 结合油菜移栽农艺要求, 设计一种直接在未耕地上作业的履带式油菜移栽栽植孔成型机。该机器通过打孔机构在土壤中完成栽植孔的成型, 随后通过取、送苗装置将幼苗投入到栽植孔内, 实施覆土镇压而完成幼苗移栽作业。

## 1 总体结构及主要技术指标

### 1.1 整机设计农艺与技术要求

根据旱地作业特点与油菜栽植农艺要求, 移栽油菜钵苗的栽植密度为 12~16 万株/hm<sup>2</sup>, 栽植深度一般为 30~60 mm<sup>[22-23]</sup>, 钵苗的基质大都为方锥台形, 上、下端面分别为边长 35 mm 和 25 mm 的正方形, 高为 40 mm。为此, 本研究提出栽植孔设计为圆柱形, 有利于幼苗的顺利入孔并保证其立苗率。根据幼苗物理机械特性, 设计栽植孔孔径 50 mm, 孔深 50 mm。

本机设计的工作厢面为 1.4 m, 排水沟宽度 0.2 m,

收稿日期: 2015-01-21 修订日期: 2015-06-29

基金项目: 湖南省教育厅重点项目 (13A038); 湖南省政府重大专项 (湘府阅 [2014] 35 号); 湖南省科技厅平台建设项目 (湘财教指[2014]10 号)。

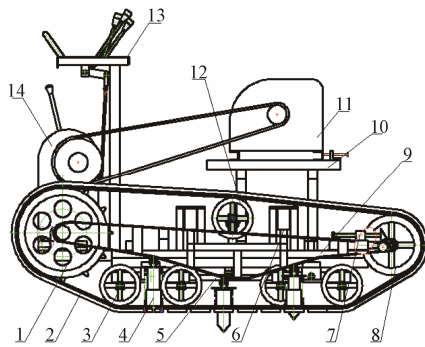
作者简介: 向伟, 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事作物生产工程及装备研究。长沙 湖南农业大学工学院, 410128。Email: 451846166@qq.com  
\*通信作者: 吴明亮, 男, 湖南常宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械创新设计与试验研究。长沙 湖南农业大学工学院, 410128。

Email: mlwu@hunau.edu.cn。中国农业工程学会会员: 吴明亮 (E041200186S)

故每厢栽植油菜的实际厢面 1.2 m, 按农艺要求, 行距为 250~300 mm, 栽植密度为 12~16 万株/hm<sup>2</sup>, 本设计取值行距为 300 mm, 栽植密度约为 12 万株/hm<sup>2</sup>, 由此可得株距为 250 mm。

## 1.2 整体结构及工作原理

履带式油菜移栽栽植孔成型机主要由成孔系统、履带行走系统、驱动系统、操作系统和附属装置等组成; 其中成孔系统主要有打孔机构、靠模凸轮和液压机构等; 履带行走系统主要包括: 行走履带、驱动轮、承重轮、履带张紧装置、张紧轮、行走底架和托轮等, 结构示意图如图 1 所示。



1.驱动轮 2.行走履带 3.承重轮 4.打孔机构 5.靠模凸轮 6.液压机构  
7.履带张紧装置 8.张紧轮 9.行走底架 10.柴油机机架 11.柴油机  
12.托轮 13.操作系统 14.变速箱

图 1 履带式油菜移栽栽植孔成型机结构简图

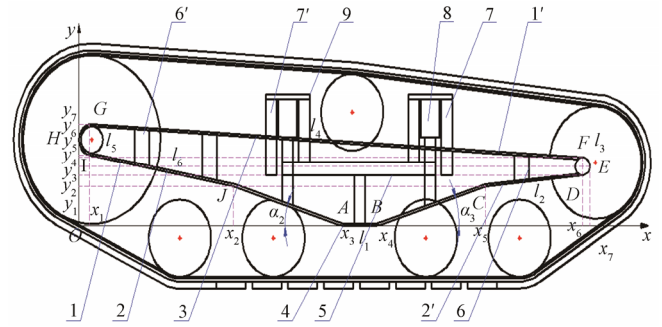
Fig.1 Structure diagram of planting hole forming mechanism of transplanter for rape

工作时, 柴油机经变速箱驱动履带做平铺式前进, 安装在履带上的打孔机构与履带同步运动。靠模凸轮与行走底架刚性联接随行走底架一起平动。在履带的平铺式前进过程中, 与地面接触的履带段相对地面始终处于静止状态, 该部分履带段上的打孔机构也处于相对静止状态, 而与行走底架和靠模凸轮相对该履带段做平动, 根据靠模凸轮的轮廓变化, 一直紧贴靠模凸轮的圆柱形孔刺上端的导向滚轮将随靠模凸轮的轮廓变化而周期性的给予圆柱形孔刺和复位弹簧施加来自机体重量经靠模凸轮提供的压力, 迫使弹簧压缩和复位, 圆柱形孔刺相应垂直压入土壤和拔出土壤, 完成了一个栽植孔的成型。该机构设有 2 条行走履带, 每条行走履带上分别设置有 2 排打孔机构, 因此机具前进的过程中, 每厢可以一次形成 4 排栽植孔。

## 2 关键部件设计

### 2.1 靠模凸轮

为保证圆柱形孔刺在行走履带与地面接触段精确实现垂直入土与垂直出土, 确保圆柱形孔刺不与整机结构产生运动干涉, 且在非工作状态下尽可能收缩于行走履带之中, 为整机装配预留空间, 设计如图 2 所示靠模凸轮。



1,1'.靠模凸轮 2,2'.下面板 3.上面板 4.底板结构 5.底板提升架 6,6'.面板支撑架 7,7'.液压提升机构 8.液压缸 9.缸体安装架

1,1'.Copying cam 2,2'.Underside face plate 3.Upper surface plate 4.Bottom board structure 5.Bottom board lift frame 6,6'.Panel support frame 7,7'.Hydraulic lift mechanism 8.Hydraulic cylinder 9.Cylinder block installation frame

注:  $\alpha_2$  为靠模凸轮前倾角;  $\alpha_3$  为靠模凸轮后倾角; A, B, C, D, E, F, G, H, I, J 为靠模凸轮的极限点;  $(x_3, 0)$ ,  $(x_4, 0)$ ,  $(x_5, y_1)$ ,  $(x_6, y_2)$ ,  $(x_7, y_3)$ ,  $(x_6, y_4)$ ,  $(x_1, y_7)$ ,  $(0, y_6)$ ,  $(x_1, y_5)$ ,  $(x_2, y_1)$  分别为 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J 点坐标值; 线段 JAC 为靠模凸轮  $l_1$  段; 线段 CD 为靠模凸轮  $l_2$  段; 圆弧 DEF 为靠模凸轮  $l_3$  段; 线段 FG 为靠模凸轮  $l_4$  段; 圆弧 GHI 为靠模凸轮  $l_5$  段; 线段 IJ 为靠模凸轮  $l_6$  段。

Note:  $\alpha_2$  represent the anteversion angle of copying cam;  $\alpha_3$  represent the caster angle of copying cam; A, B, C, D, E, F, G, H, I, J represent the limit points of copying cam;  $(x_3, 0)$ ,  $(x_4, 0)$ ,  $(x_5, y_1)$ ,  $(x_6, y_2)$ ,  $(x_7, y_3)$ ,  $(x_6, y_4)$ ,  $(x_1, y_7)$ ,  $(0, y_6)$ ,  $(x_1, y_5)$ ,  $(x_2, y_1)$  represent the coordinate value of A, B, C, D, E, F, G, H, I, J point; Line segment JAC represents  $l_1$ -step of copying cam; Line segment CD represents  $l_2$ -step of copying cam; Arc DEF represents  $l_3$ -step of copying cam; Line segment FG represents  $l_4$ -step of copying cam; Arc GHI represents  $l_5$ -step of copying cam; Line segment IJ represents  $l_6$ -step of copying cam.

图 2 靠模凸轮结构示意图

Fig.2 Structure diagram of copying cam

靠模凸轮主要由上面板, 下面板, 底板结构, 面板支撑架, 液压提升机构等组成; 其中液压提升机构有底板提升架、液压缸和缸体安装架等。面板与底板结构形成靠模凸轮的外形轮廓, 靠模凸轮通过支持上、下面板的面板支撑架与行走底架刚性联接, 每条行走履带呈中心对称两边各设计 1 套靠模凸轮, 整机设计 4 套靠模凸轮, 底板提升架呈中心对称与两端的靠模凸轮上的底板结构刚性联接。

#### 2.1.1 靠模凸轮关键部件设计

为确保圆柱形孔刺在靠模凸轮两端的通过性, 并顺利依附靠模凸轮作回转运动, 设计靠模凸轮两端的回转半径 (图 2 中圆弧 DEF 与圆弧 GHI 的半径) 大于圆柱形孔刺上端的导向滚轮外径<sup>[24]</sup>。

为保证机具在水泥等硬化路面行进、田间作业转向等非打孔工作状态下正常运行时, 圆柱形孔刺不刺出行走履带, 于靠模凸轮底板结构 JC 段设计液压提升机构控制底板结构自动升降。非打孔工作状态下行进与田间作业转向运行时, 通过液压系统控制与底板提升架刚性联接的液压缸收缩, 提升底板结构, 此状态下, 圆柱形孔刺不伸出行走履带, 保证机具的正常行进与转向; 当需要正常打孔工作时, 液压系统控制液压缸伸出, 下压底板结构至工作位置, 打孔机构正常工作。

#### 2.1.2 靠模凸轮参数方程

采用 Matlab 软件描绘圆柱形孔刺运动轨迹, 绕着整个行走履带圆周按照运动情况布满圆柱型孔刺, 将每 2 个柱型孔刺上的顶点用曲线连接, 形成曲线  $l_i$  即为靠模凸

轮的极限轮廓曲线。

选取极限点  $J$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，构建  $l_1$  段，保证圆柱形孔刺的垂直入土与垂直出土过程；选取极限点  $C$ 、 $D$ ，构建  $l_2$  段；点  $D$ 、 $E$ 、 $F$  处构建  $l_3$  段，保证圆柱形孔刺拐角处的良好通过；极限点  $F$ 、 $G$  点之间构建  $l_4$  段；选取极限点  $G$ 、 $H$ 、 $I$  构建圆弧  $l_5$  段，保证圆柱形孔刺拐角通过性的同时，防止与传动轴之间的干涉；极限点  $I$  与  $J$  点之间构建  $l_6$  段；构建靠模凸轮最终的轮廓曲线。

建立如图 2 所示直角坐标系， $x$  轴与  $A$ 、 $B$  点连线重合， $y$  轴穿过靠模凸轮最左端，各极限点  $H$ 、 $(I$  和  $G)$ 、 $J$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $(D$  和  $F)$ 、 $E$  的横坐标值分别为  $0$ 、 $x_1 \sim x_7$ ； $0$ 、 $y_1 \sim y_7$  分别为各极限点  $(A$  和  $B)$ 、 $(C$  和  $J)$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $I$ 、 $H$ 、 $G$  的纵坐标值。

采用曲线定义的插值法求解出靠模凸轮各段的参数方程<sup>[25-26]</sup>：

$l_1$  段：

$$\begin{cases} y = -\frac{11}{37}x + \frac{7898}{37}, & 422 \leq x < 718 \\ y = 0, & 718 \leq x < 815 \\ y = \frac{11}{37}x + \frac{8965}{37}, & 815 \leq x < 1111 \end{cases} \quad (1)$$

$l_2$  段：

$$y = \frac{1}{11}x - 13, \quad 1111 \leq x < 1375 \quad (2)$$

$l_3$  段：

$$(y - 132)^2 + (x - 1375)^2 = 1225, \quad 1375 \leq x \leq 1395 \quad (3)$$

$l_4$  段：

$$y = -\frac{37}{673}x + \frac{153171}{673}, \quad 29 \leq x < 1375 \quad (4)$$

$l_5$  段：

$$(y - 192)^2 + (x - 35)^2 = 2025, \quad 0 \leq x < 29 \quad (5)$$

$l_6$  段：

$$y = -\frac{23}{131}x + \frac{21234}{131}, \quad 29 \leq x < 422 \quad (6)$$

完成靠模凸轮轮廓曲线参数方程的建立，如式 (1)~(6) 所示。

为确保方程的可靠性，完成靠模凸轮外轮廓曲线的参数化设计，设定直角坐标系，求取极值点的坐标值，编写图形成形程序，采用 Matlab 7.0 软件 `plog` 函数<sup>[27]</sup>，自动生成靠模凸轮的轮廓曲线，如图 3 所示。

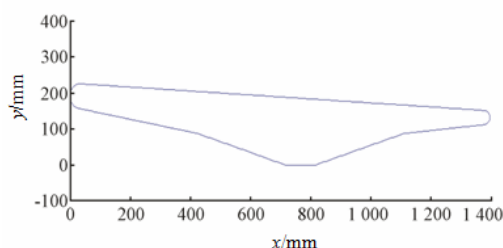
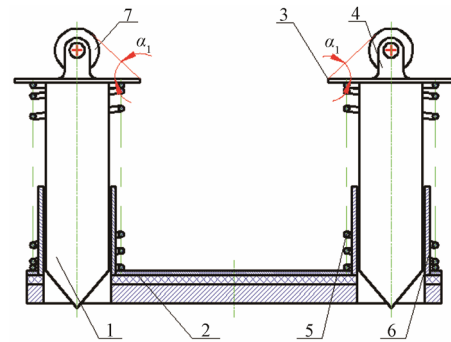


图 3 靠模凸轮参数化设计

Fig.3 Parametric design of copying cam

## 2.2 打孔机构的设计

为确保得到满足设计要求的栽植孔，所设计的打孔机构主要由圆柱形孔刺，导向套筒，复位弹簧，复位弹簧挡板，导向滚轮，滚轮支撑架等组成，如图 4 所示。圆柱形孔刺通过复位弹簧与行走履带固连，并通过安装在行走履带上的导向套筒，确保圆柱形孔刺只能做上下往复运动。为保证圆柱形孔刺与靠模凸轮滑动连接的可靠性，降低摩擦阻力，在圆柱形孔刺顶端设置了导向滚轮。



1.圆柱形孔刺 2.行走履带 3.复位弹簧挡板 4.滚轮支撑架 5.复位弹簧  
6.导向套筒 7.导向滚轮  
1.Cylindrical hole thorn 2.Crawler 3.Reset spring baffle 4.Roll support frame 5.Reset spring 6.Guiding sleeve 7.Rolling bearing

图 4 打孔机构

Fig.4 Pore forming device

工作过程中，打孔机构承受来自机体重量经靠模凸轮提供的压力，迫使复位弹簧压缩其长度，圆柱形孔刺往下运动而垂直刺入土壤，直至圆柱形孔刺刺入到设定的最大深度后，随着靠模凸轮与行走底架继续平动，打孔机构承受的压力逐渐减小，复位弹簧回复其长度，圆柱形孔刺逐步拔出土壤，直至圆柱形孔刺完全拔出土壤，完成栽植孔的成型。

### 2.2.1 圆柱形孔刺

为保证孔刺的顺利入土，圆柱形孔刺底端设计为锥形结构。按农艺要求移栽作物的栽植深度  $h_0=50$  mm，结合前端锥形尺寸，圆柱形孔刺的入土深度需达到 70 mm，圆柱形孔刺外围需套设复位弹簧，复位弹簧需一定的缓冲距离，圆柱形孔刺的长度取值 180 mm。根据钵苗基质尺寸参数，圆柱形孔刺外径取值 50 mm，圆柱形孔刺套入与行走履带固连的导向套筒，用于限制圆柱形孔刺在  $x$  轴方向的自由度，导向套筒外径设计为 60 mm。

### 2.2.2 导向滚轮

根据靠模凸轮的轮廓变化，圆柱形孔刺周期性的承受来自机体重量经靠模凸轮提供的压力，且圆柱形孔刺上端面与靠模凸轮一直接触，接触面将产生很大的摩擦力，故在圆柱形孔刺上端设计安装导向滚轮，采用滚动摩擦代替滑动摩擦，减小圆柱形孔刺与靠模凸轮之间的摩擦。

通过直径为 100 mm 的复位弹簧挡板刚性联接圆柱形孔刺与复位弹簧，在复位弹簧挡板上端设计滚轮支撑架安装导向滚轮，安装后导向滚轮与复位弹簧挡板之间需留 5~10 mm 安装间隙，利于导向滚轮的工作；连接复

位弹簧挡板最右端与导向滚轮的切线,与复位弹簧挡板端面间的夹角  $\alpha_1$  为  $42.8^\circ$ ,设计的夹角  $\alpha_1$  应小于靠模凸轮上的倾角  $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  (如图 2),避免工作过程中复位弹簧挡板端面与靠模凸轮接触产生干涉。导向滚轮的外径设计为 35 mm,内径为 10 mm。

### 2.2.3 复位弹簧

圆柱形孔刺依靠复位弹簧的弹力而垂直拔出土壤,工作过程中,为保证圆柱形孔刺顺利拔出土壤,复位弹簧需克服土壤的摩擦阻力  $Q_f$  与圆柱形孔刺的自身重力  $G$  及圆柱形孔刺与套筒、行走履带间的摩擦力  $f_1$ ,故复位弹簧的设计在考虑其所需压缩长度达到  $S_i$  的情况下其弹复力  $F_T$  需满足<sup>[28-30]</sup>:

$$F_T = k \cdot S_i \quad (7)$$

$$F_T \geq Q_f + G + f_1 \quad (8)$$

$$Q_f = u_p \cdot z \cdot e \cdot (c + k_o \cdot \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi) \quad (9)$$

式中:  $k$  为弹簧的刚度系数, N/m;  $S_i$  为弹簧的压缩长度, mm。  $u_p$  为圆柱形孔刺底部端面周长, mm;  $z$  为圆柱形孔刺的入土深度, mm;  $e$  为土力学基础中,土壤抗剪强度计算的比例系数<sup>[25]</sup>,取值为  $e=0.7$ ;  $c$  为土壤的黏聚力, kPa;  $\varphi$  为土壤的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $k_o$  为土壤的侧压力系数或静止压力系数,此为经验值,一般情况下砂土取值  $0.35 \sim 0.5$ ,黏性土取值  $0.5 \sim 0.7$ ;  $\gamma$  为土壤容重,  $\text{kg/m}^3$ 。

复位弹簧选择圆柱螺旋压缩弹簧,材料采用碳素弹簧钢,经计算复位弹簧的参数设计如表 1 所示。

表 1 复位弹簧参数

Table 1 Parameters of reset spring

参数 Parameter	数值 Values	参数 Parameter	数值 Values
弹丝直径 Spring diameter $d/\text{mm}$	5	节距 Pitch $t/\text{mm}$	12
弹簧中径 Mid-diameter of spring $D/\text{mm}$	75	有效圈数 The number of effective coil/ $n$	12
弹簧内径 Inner diameter of spring $D_i/\text{mm}$	70	支撑圈数 The number of support coil/ $n_2$	2
弹簧外径 Outer diameter of spring $D_o/\text{mm}$	80	总圈数 The number of all coil/ $n_1$	14
压缩间隙 Compression clearance $\delta/\text{mm}$	0.5	极限压缩长度 Limit compression length $l'/\text{mm}$	91
自由高度 Free height $H/\text{mm}$	154	安全压缩长度 Safety compression length $l''/\text{mm}$	84.5

为保证弹簧在压缩后能保持一定的弹性,设计时还需考虑在最大载荷作用下,每圈之间保持一定间隙  $\delta_0$ ,根据压缩弹簧的设计经验  $\delta_0$  的取值为<sup>[24]</sup>:  $\delta_0 = 0.1d \geq 0.5 \text{ mm}$ ,则弹簧的极限压缩长度:  $l' = (n_1 - 1)(t - d) = 91 \text{ mm}$ ,而  $l'' = (n_1 - 1)(t - d) - (n_1 - 1)\delta = 84.5 \text{ mm}$  为弹簧安全压缩长度。此次设计的打孔机构入土深度只需达到 70 mm,符合设计要求。

### 2.3 同一履带上打孔机构数量

根据油菜农艺要求,前文已确定栽植油菜株距  $b_1$  为 250 mm,行距  $b_2$  为 300 mm。综合考虑受力平衡及结构

设计的合理性,行走履带横向方向设置 2 个圆柱形孔刺,于行走履带两边中心对称,中心距 250 mm,即为株距  $b_1$ ;后续履带设计过程中,因打孔机构是均匀分布在行走履带上,形成一个封闭循环,且每 2 个打孔机构上的圆柱形孔刺的中心距需满足 300 mm,故行走履带的总长  $L_0$  需满足条件  $L_0 = 300b$ ,  $b$  取正整数 ( $b$  为单条履带单边打孔机构的数量),单条行走履带上圆柱形孔刺数量为  $N_0 = 2b$  个。

根据整机设计要求,完成行走底架的设计,单条行走履带上圆柱形孔刺数量为  $N_0 = 26$  个,  $b$  取值 13,故最终确定行走履带的总长为  $L_0 = 3900 \text{ mm}$ 。

## 3 样机试验

### 3.1 试验条件

完成整机结构设计及优化后,试制样机进行大田试验,试验场地为湖南农业大学试验农场,试验过程中机具以慢一档 ( $1.62 \sim 1.81 \text{ km/h}$ ) 行进;试验地表面土壤较平整,黏性土壤,含水率测定为 23.4%,土壤容重为  $1.223 \text{ g/cm}^3$ ,土壤 0~150 mm 处平均坚实度为 420 kPa,土壤中含有的杂草、秸秆等杂物较少。

### 3.2 试验方法

试验分 5 次进行并测定数据,每次试验需测定工作时间、孔距、有效深度、孔穴直径等参数。

工作时间:因机器的起步与停机过程中工作速度不稳定,故每次试验在机器运行的 30 m 中选择中间段 20 m 进行标定,用秒表记录标定的 20 m 内机器运行的时间记为工作时间。

孔距:规定同一行上相邻 2 个栽植孔的中心间距为孔距;试验测定时,连续测定单次 20 m 距离内所有相邻栽植孔的孔距取平均值作为 1 次试验的孔距。

有效深度:沿着栽植孔端面直至栽植孔内部直径不大于  $\sqrt{2} a_1$  ( $a_1$  为钵苗基质上部边长处),测量其垂直高度,记为有效深度;试验时测定单次 20 m 距离内所有栽植孔的有效深度取平均值作为 1 次试验的有效深度。

孔穴直径:沿栽植孔竖直方向自上往下至有效深度位置平分 4 处,用游标卡尺测量栽植孔的内径,取平均值为其孔穴直径;试验时测定单次 20 m 距离内所有栽植孔的孔穴直径取平均值作为 1 次试验的孔穴直径。

根据现场测定的指标分析得出机具工作的性能参数:合格栽植孔数量  $N_{hg}$ ,合格成孔率  $w$ ,成孔频率  $f_0$ ,作业效率  $\eta$ 。

合格成孔率  $w$ , %:

$$w = \frac{N_{hg}}{N_{ck}} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $N_{ck}$  为测定距离内的理论成孔数量,个;  $N_{hg}$  为测定距离内合格栽植孔数量,个;若栽植孔孔穴直径  $\phi_1$  大于  $\sqrt{2} a_1$ ,且孔穴的有效深度  $H_0$  大于钵苗基质的高度  $h_0$ ,则该栽植孔为合格栽植孔。

成孔频率  $f_0$  (机具每分钟形成栽植孔的个数),  $\text{min}^{-1}$ :

$$f_0 = \frac{N_{ck}}{T} \times 60 \quad (11)$$



式中:  $N_{ck}$  为测定距离范围内形成栽植孔数量, 个;  $T$  为成孔工作时间, s。

作业效率  $\eta$ ,  $\text{hm}^2/\text{h}$ :

$$\eta = \frac{s \cdot B_0}{T \times 666.7 \times 15} \times 3600 \quad (12)$$

式中:  $s$  为试验设计测定距离, 设定每次测定 20 m;  $B_0$  为垄的总宽, 取值 1.4 m (垄面宽 1.2 m 与排水沟宽度

0.2 m)。

### 3.3 结果与讨论

栽植孔成型机的试验结果如表 2 所示, 因试验数据采集工作长度为 20 m, 结合表中工作时间可计算得到机具实际前进速度为 1.65~1.78 km/h, 同时可得机具的作业效率达到 0.231~0.249  $\text{hm}^2/\text{h}$ , 满足配套移栽机工作效率设计要求。

表 2 成孔田间试验结果  
Table 2 Experimental results of field trial

试验号 Experimental number	测定距离 Distance/m	工作时间 Working time/s	孔距 Hole distance/mm	有效深度 Effective depth/mm	孔穴直径 Hole diameter/mm	合格孔数 The number of qualified planting holes	合格率 Qualified rate/%
1	20	41.7	299.8	48.8	50.4	249	93.6
2	20	43.7	300.1	43.8	50.0	254	95.5
3	20	42.6	299.7	49.7	48.7	248	93.2
4	20	40.5	300.0	48.6	49.8	251	94.4
5	20	41.8	299.9	45.6	50.7	245	92.1
均值 Average	20	42.1	299.9	47.3	49.9	249.4	93.8

试验中测定的孔距在 299.7~300.1 mm 之间, 均值为 299.9 mm, 其变化范围很小, 表明机具的滑移率等因素对成孔效果影响不大; 试验测定各次栽植孔有效深度在 43.8~49.7 mm 之间变化, 主要原因是, 当圆柱形孔刺拔出土壤过程中, 栽植孔周边仍然有部分土壤回填至栽植孔中, 致使所形成栽植孔没有达到 50 mm 的理论深度值, 但栽植孔平均有效深度仍达到 47.3 mm, 实际误差仅为 5.4%, 基本满足设计要求。

试验测定各次栽植孔孔穴直径在 48.7~50.7 mm 之间变化, 均值达到 49.9 mm, 表明圆柱形孔刺拔出土壤过程中没有出现挑土与黏土等问题。各次试验研究与测定, 得出栽植孔的合格率在 92.1%~95.5% 的范围内变化, 表明机具工作的稳定性较好, 多次试验成孔的总平均合格率达到 93.8%, 基本上实现设计要求。

## 4 结 论

本文基于旱地移栽作业的工作特点, 结合油菜移栽农艺要求, 设计一种履带式油菜移栽栽植孔成型装置。分析土壤物理机械力学特性, 求取打孔机构垂直出土所受摩擦阻力参数方程, 为关键部件打孔机构的结构设计提供力学参数与理论依据。对关键部件靠模凸轮、打孔机构进行设计及优化后, 完成整机的设计与试制, 进行田间试验。试验结果表明, 机具以 1.65~1.78 km/h 速度作业, 其作业效率达到 0.231~0.249  $\text{hm}^2/\text{h}$ , 成孔的平均合格率为 93.8%, 成孔机构的各项性能指标满足设计要求, 该研究与设计为新型移栽机的设计提供研究基础与技术支持。

### 【参 考 文 献】

- [1] 官春云. 中国油菜产业发展方向[J]. 粮食科技与经济, 2011, 36(2): 5-6.  
Guan Chunyun. The development trend of China's rape industry[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2011, 36(2): 5-6.(in Chinese with English abstract)

- [2] 周康韵, 仲云龙, 裘正军, 等. 华东地区油菜机械化生产现状及发展对策[J]. 农机化研究, 2009, 31(8): 228-231.  
Zhou Kangyun, Zhong Yunlong, Qiu Zhengjun, et al. Present situation and countermeasures for rape mechanized production in East China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(8): 228-231. (in Chinese with English abstract)
- [3] Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of a seed-ling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13-19.
- [4] 万霖, 汪春, 车刚. 小型蔬菜移栽机的改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 117-122.  
Wan Lin, Wang Chun, Che Gang. Improved design and experiment of small-size vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 117-122. (in Chinese with English abstract)
- [5] 童俊华, 蒋焕煜, 蒋卓华, 等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 8-16.  
Tong Junhua, Jiang Huanyu, Jiang Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 8-16. (in Chinese with English abstract)
- [6] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53.  
Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- [7] 金诚谦, 吴崇友, 石磊. 油菜生产全程机械化技术体系关键技术研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 221-223.  
Jing Chenqian, Wu Chongyou, Shi Lei. Key technologies for the systems of rape mechanization in whole productive course[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 221-223. (in Chinese with English abstract)

- [8] De Baet s S, Poesen J. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. Geomorphology, 2006, 76(1/2): 54—67.
- [9] 陈达, 周丽萍, 杨学军. 移栽机自动分钵式栽植器机构分析与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 54—57, 69.  
Chen Da, Zhou Lipin, Yang Xuejun. Mechanism analysis and motion simulation of planting apparatus with automatic distributing bowl mechanism for transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 54—57, 69. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周福君, 芦杰, 杜佳兴. 玉米钵苗移栽机圆盘式栽植机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 18—24.  
Zhou Fujun, Lu Jie, Du Jiaxing. Parameters optimization and experiment of corn-paper transplanting machine with seedling disk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 18—24. (in Chinese with English abstract)
- [11] 于修刚, 袁文胜, 吴崇友. 我国油菜移栽机研发现状与链夹式移栽机的改进[J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 232—235.  
Yu Xiugang, Yuan Wenshen, Wu Chongyou. Research and development status of the oilseed rape transplanter in China and improvement of clip-chain transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1): 232—235. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王文明, 窦卫国, 王春光, 等. 2ZT-2 型甜菜移栽机栽植系统的参数分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 69—73.  
Wang Wenming, Dou Weiguo, Wang Chunguang, et al. Parameter analysis of the planting process of 2ZT-2 beet transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 69—73. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴畏, 孙松林, 肖名涛, 等. 2ZY-1 型烟草移栽机栽植器的优化设计[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 166—170.  
Wu Wei, Sun Songlin, Xiao Mingtao, et al. Optimization design for planter of 2ZY-1 tobacco transplanting machine[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(2): 166—170. (in Chinese with English abstract)
- [14] 罗江河, 孙松林, 肖名涛, 等. 基于 Matlab 的油菜移栽机栽植机构运动学建模与分析[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(6): 693—698.  
Luo Jianghe, Sun Songlin, Xiao Mingtao, et al. Planting mechanism kinematics modeling and analysis of rapeseed transplanting machine based on Matlab[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2013, 39(6): 693—698. (in Chinese with English abstract)
- [15] 何耀杰, 邱白晶, 杨亚飞, 等. 基于有限元模型的喷雾机喷杆弹性变形分析与控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 28—36.  
He Yaojie, Qiu Baijing, Yang Yafei, et al. Deformation analysis and control of elastic deformation for spray boom based on finite element model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(6): 28—36. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王晓东. 水轮式打穴移栽机成穴机理及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.  
Wang Xiaodong. The Experimental Study on the Water-wheel Transplanter's Punching Mechanism[D]. Beijing: China Agriculture University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张祖立, 王君玲, 张为政, 等. 悬杯式蔬菜移栽机的运动分析与性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 21—25.  
Zhang Zuli, Wang Junling, Zhang Weizheng, et al. Kinematic analysis and performance experiment of cantilever cup vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姜晨龙, 俞国胜. 高效深栽造林钻孔机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 75—83.  
Jiang Chenlong, Yu Guosheng. Development and experiment of efficient deep planting earth auger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 75—83. (in Chinese with English abstract)
- [19] 崔崑, 刘双喜, 高丽娟, 等. 2ZFS-1A 型多功能烟草移栽机的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 2): 36—41.  
Cui Wei, Liu Shuangxi, Gao Lijuan, et al. Development of 2ZFS-1A multifunctional tobacco transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(supp.2): 36—41. (in English with Chinese abstract)
- [20] 杨洲, 陈朝海, 段洁利, 等. 果园施肥用便携式电动挖穴机性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 25—31.  
Yang Zhou, Chen Chaohai, Duan Jieli, et al. Performance test of hand-held electric hole-digger for fertilization in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 25—31. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵匀, 樊福雷, 宋志超, 等. 反转式共轭凸轮蔬菜钵苗移栽机构的设计与仿真[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 8—16.  
Zhao Yun, Fan Fulei, Song Zhichao, et al. Design and simulation of inverted vegetable pot seedling transplanting mechanism with conjugate cam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 8—16. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李世武, 陈志, 杨敏丽. 农机农艺结合问题研究[J]. 中国农机化, 2011(4): 10—13, 17.  
Li Shiwu, Chen Zhi, Yang Minli. Research on combination of agricultural machinery and agronomy[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(4): 10—13, 17. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘洋, 李亚雄, 吕新民, 等. 吊篮式裸根棉苗膜上移栽机的设计[J]. 西北农业学报, 2010, 19(12): 202—206.  
Liu Yang, Li Yaxiong, Lü Xinmin, et al. Design on the transplanting machine of suspended basket naked root cotton on membrane[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(12): 202—206. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 64—320.  
Zhao Yun. Analysis and Synthesis of Agricultural Machinery[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 64—320. (in Chinese with English abstract)
- [25] 叶秉良, 李丽, 俞高红, 等. 蔬菜钵苗移栽机取苗臂凸轮机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 21—29.  
Ye Bingliang, Li Li, Yu Gao hong, et al. Design and test on cam mechanism of seedling pick-up arm for vegetable transplanter for pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 21—29. (in Chinese with English abstract)
- [26] 佟金, 张智泓, 陈东辉, 等. 凸齿镇压器与土壤相互作用的三维动态有限元分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 48—58.

- Tong Jin, Zhang Zhihong, Chen Donghui, et al. Three-dimensional dynamic finite element analysis of interaction between toothed wheel and soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(10): 48—58. (in Chinese with English abstract)
- [27] 俞高红, 刘炳华, 赵匀, 等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 53—57.
- Yu Gaohong, Liu Binghua, Zhao Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [28] 向伟. 油菜移栽机栽植孔成型机构试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- Xiang Wei. Experiment Study on Planting Hole Forming Device of Transplanting Machine for Rape[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李小昱, 雷廷武, 王为. 土壤抗压强度的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 19—21.
- Li Xiaoyi, Lei Tingwu, Wang Wei. Experimental research on unconfined compression strength of soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(5): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 21—25.
- Chen Hongxing, Li Fahu, Hao Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 21—25. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of planting hole forming device of crawler transplanter for rape (*Brassica napus*) seedlings

Xiang Wei<sup>1,2,3</sup>, Wu Mingliang<sup>1,2,3\*</sup>, Guan Chunyun<sup>3,4</sup>, Xu Yujuan<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment, Changsha 410128, China;

3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China;

4. Oilseeds Crops Institute, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** In order to resolve some key issues about the machinery of transplanter for rape seedlings, a new type of transplanter with crawler planting hole forming tools for rape was designed based on the working characteristic in the dry land and agronomic requirement. Research on soil physical and mechanical characteristics were conducted to provide the technical parameters for the design of the hole forming device. First, we completed the whole structure design and analyzed the working principle of the device. The crawler was drove by power system to go forward, on which the hole forming device was installed and synchronously moving. The surface cam was mounted on the chassis. As the caterpillar moved forward, the pore forming device installed on the track vertically stabbed into the soil under the pressure of surface cam supplied by body weight. As the tracks moved forward, the hole forming device was out of the surface cam profiling. As such, a plant hole was formed. We analyzed the curve of surface cam limit, confirmed the limited point so that a coordinate system was established. We then chose the definition curve interpolation method to solve the parameter equation of surface cam profiling combining with Matlab7.0 software plot function in the program and generated surface cam outline curve. For the optimization of punch mechanism of structural design, the surface cam profiling and reset spring control capacity into hole device unearthed vertically. The cylindrical hole was pressured by shearing and extrusion soil. We analyzed the same track number, it had two tracks. Each of them had two linear holes. When the machine moved forward, each side could dig holes in four rows at one time. We installed rolling bearing in the hole forming device for rolling friction instead of sliding friction to reduce friction in the cylindrical hole and the friction between the surface cams. By use of the prototype machine in field, we recorded variables, such as the time, moving distance, distance between holes, the depth of effective planting hole, and the diameter of planting hole. We analyzed indexes such as the rate of qualified hole, hole forming frequency, efficiency, etc.. The result showed that if the machine at lower speed at 1.65-1.78 km/h, the efficiency was up to 0.231-0.249 hm<sup>2</sup>/h, and the rate of qualified hole up to 93.8% on average. The various performance indicator met the design requirement. The planting and hole forming machine can get holes at 1 400 mm in length each, 50 mm in diameter, 50 mm in depth, and 120000 holes/hm<sup>2</sup> in hole density per area. This could get the planting hole to satisfy agronomic requirement. The research provided theoretical and technical references for design of the new type of transplanter.

**Key words:** transplants; machinery; forming; transplanter; hole forming device; copying cam; planting hole; rape seedlings