

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.007

吊杯式移栽机栽植器运动学分析与试验*

崔巍^{1,2} 赵亮² 宋建农¹ 林金天²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

【摘要】以吊杯式移栽机栽植器的运动轨迹方程为基础,结合农艺要求,对移栽机进行了零速栽苗和最小破膜条件的理论分析,得出移栽机主要设计参数的计算公式,并进行了机具设计及田间试验。理论分析与田间试验表明,栽植器最佳投苗位置为过最低点后的上升段;株距调整时,应根据实际调整大小决定通过改变传动比还是栽植器个数来实现。

关键词: 吊杯式栽植器 运动学 设计 试验
中图分类号: S233.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0035-04

Kinematic Analysis and Experiment of Dibble-type Planting Devices

Cui Wei^{1,2} Zhao Liang² Song Jiannong¹ Lin Jintian²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Beijing 100083, China)

Abstract

Based on the movement trajectory formula of dibble-type planting device, the zero-velocity planting and the least damage of mulch-film was analyzed. The main parameters for transplanter were discussed. The proposed machine was designed and the experiment was carried out. The analysis and experiment showed that it's better to plant seedlings during rising stage of the planting devices. Spacing can be changed by changing the transmission ratio or the number of planting devices.

Key words Dibble-type planting device, Kinematics, Design, Experiment

引言

目前,国内外常见的半自动移栽机主要有吊杯式、钳夹式、链夹式、挠性圆盘式和导苗管式。除了导苗管式,前4类移栽机其栽植器栽苗时的运动都可看作是2种运动的合成,即围绕某一固定转轴的匀速圆周运动以及跟随整机向前行进的匀速直线运动。许多学者结合此运动特性对栽植器栽苗过程及参数间的关系进行了分析^[1~9],本文以吊杯式移栽机为例,建立栽植器运动轨迹方程,以此方程为基础,结合农艺上零速栽植和地膜最小损伤量的要求分析栽植器的栽苗过程和参数间的关系,设计机具并进行田间试验。

1 栽植器运动轨迹方程

建立如图1所示的直角坐标系,以移栽机前进方向为x正方向,与移栽地面垂直向上的方向为y正方向,栽植器圆周运动的回转中心为原点。取栽植器入土部分最低点为参考点,其运动方程为

{ x = -X_0 + v_0t + rcosωt
y = -Y_0 - rsinωt (1)

式中 x——栽植器水平方向位移
y——栽植器竖直方向位移
r——栽植器回转半径
ω——栽植器圆周运动角速度

收稿日期: 2012-07-25 修回日期: 2012-08-05
* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB735707)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A501)
作者简介: 崔巍, 博士生, 中国农业机械化科学研究院工程师, 主要从事农业机械工程装备研究, E-mail: cuiwei607@163.com
通讯作者: 宋建农, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械研究, E-mail: songjn@cau.edu.cn

v_0 ——移栽机前进速度 t ——时间
 $X_0、Y_0$ ——参考点相对于连接点的横、纵坐标

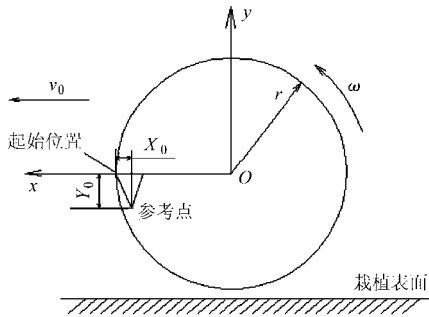


图 1 直角坐标系

Fig.1 Cartesian coordinate system

由于移栽机工作时栽植器运动为平动,所以其上各点运动规律是一致的。

2 栽苗过程运动分析

为了保证移栽质量,移栽机工作时栽植器运动应满足:①零速栽苗。即要求投苗时秧苗在水平方向的速度尽量小,以保证栽苗直立度。②对地膜的损害尽量小。膜上移栽时应尽量减小栽植器在地表以下的水平位移。③达到一定栽植深度。

根据以上农艺要求,结合运动轨迹方程,可得出移栽机参数选取的约束条件。

2.1 零速栽苗分析

移栽机作业要求零速栽苗,即栽植器在投苗时的水平速度 $v_x = 0$ 。

将式(1)对时间 t 求导可得栽植器在水平和垂直方向的速度分量 $v_x、v_y$ 为

$$\begin{cases} v_x = v_0 - r\omega \sin\omega t \\ v_y = -r\omega \cos\omega t \end{cases} \quad (2)$$

可知,在 $0 < v_0 < r\omega, v_0 = r\omega, v_0 > r\omega$ 这 3 种情况下,将得到 3 种性质不同的特殊曲线,如图 2 所示曲线 1、2、3,分别为余摆线、摆线和短摆线,其中余摆线水平方向零速点有 2 个,摆线有 1 个,短摆线没有。图中, $O_1、O_2、O_3$ 点均为栽植器运动最低点;轨迹 2 中 O_2 点也是水平方向零速点, $E、F$ 点为栽植器上升段和下降段的点;轨迹 1 中 $A、B$ 点为水平方向零速点, D 点为扣环交叉点。

显然,图 2 所示轨迹 1 和轨迹 2 有零速点,即运动参数满足 $0 < v_0 \leq r\omega$ 时,可实现零速栽苗。通过秧苗脱离栽植器的运动分析可进一步缩小参数选取范围。

栽苗过程中,秧苗从栽植器开始打开到完全脱离需要一段时间,而栽植器水平速度为零的情况只存在于 1、2 个时间点,因此理想的投苗时间应该是零速点两侧的时间段,即图 2 中所示 O_3AD 段、 O_3BD

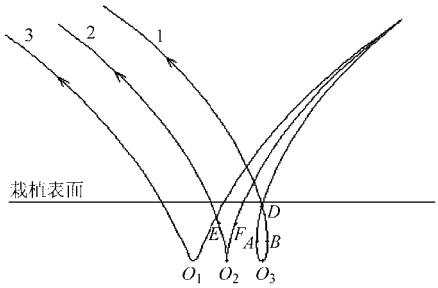


图 2 不同参数关系下的运动轨迹

Fig.2 Trajectories with different parameters

段以及 EO_3F 段。

栽苗过程也是栽植器和秧苗的分离过程。为了减小栽植器运动对秧苗姿态的干扰以及对地膜的破坏,应尽量缩短分离时间。秧苗脱离栽植器时的运动除了受栽植器影响外,还存在垂直向下的自由落体运动。与栽植器下降阶段投苗相比,上升阶段投苗,秧苗和栽植器在竖直方向的相对速度更大,分离时间更短,更有利于投苗;如果栽植器下降阶段投苗,打开时土流会顺势进入其内部,将苗支起,不利于脱苗。所以,栽植器最佳投苗时间应该是图 2 中所示轨迹 1 的 O_3BD 段,即运动参数应满足 $0 < v_0 < r\omega$ 。

实际应用中,通常最关心的参数是株距、栽植器的回转半径和栽植器的个数,根据各参数间的内在关系,即可得出零速栽苗条件为

$$\frac{Sn}{r} < 2\pi \quad (3)$$

式中 S ——株距 n ——栽植器个数

2.2 最小破膜约束公式分析

移栽机进行膜上移栽时,会对地膜有一定的损坏。如果栽植器运动轨迹设计不合理,入土时水平方向位移过大会导致地膜大范围的撕裂,不符合农艺要求;而且栽苗时形成土窝过大不利于土壤回流,影响秧苗直立度。因此栽植器在水平方向的位移也是参数的设计依据。

栽植器从最低点开始入土到完全离开土壤,入土部分运动包络线范围,决定了对地膜的损坏程度,而在栽植器尺寸确定的情况下,运动轨迹则是决定地膜损坏程度的关键因素。在地表以下,栽植器水平方向位移越大,对地膜损坏越严重,因此应在满足栽植深度的前提下寻求水平位移最小的轨迹线。

图 3 为在同一栽植深度下不同运动轨迹水平位移示意图,点 $A、B$ 的水平分速度为零,点 $G、H$ 分别为运动轨迹与栽植表面的交点,点 D 为扣环交叉点。由于移栽机工作时栽植器作平面运动,其上各点运动轨迹相同,栽植器入土部分最低点的最大水平位移大于或等于其余所有点的最大水平位移,因此仍然取此点为参考点。

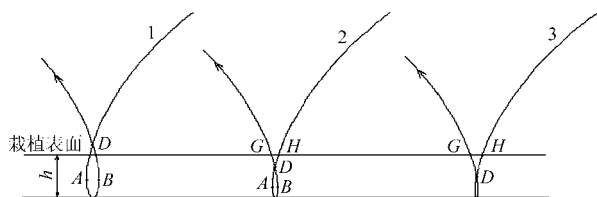


图3 相同栽植深度、不同轨迹下水水平位移示意图

Fig. 3 Horizontal displacement of different trajectory

图3所示轨迹1中,参考点水平最大位移为 l_{AB} ,在此基础上变化参数令 D 点相对于栽植平面向下移动, l_{AB} 会逐渐减小,当 D 点移动至栽植平面以下时,如轨迹2所示, l_{AB} 继续减小, l_{GH} 逐渐增大,当 $l_{GH} = l_{AB} = a$ 时,达到一个平衡点,此时参考点在地表下的水平最大位移达到最小。若 D 点相对于栽植表面继续向下移动,达到轨迹3所示状态,此时 $l_{GH} > a > l_{AB}$,水平最大位移变为 l_{GH} 。此状态下虽然最低点水平最大位移 $l_{GH} > a$,但是对栽植器入土部分其他点而言,位置较高的点水平最大位移反而小,而且栽植器入土部分通常呈倒锥形,因此虽然栽植器下端水平位移较大,但是本身横向尺寸小,最终形成的包络线的范围也不大。所以, $l_{GH} > a > l_{AB}$ 的情况下也能获得理想的运动轨迹。

综上所述,设计参数时,栽植器运动轨迹若能满足栽植表面在扣环交叉点 D 以上且 $l_{GH} \geq l_{AB}$,则对地膜的损坏较小。令 G_0 、 H_0 点为 D 点以上、水平坐标与 A 、 B 点分别相等的两点,则 $l_{G_0H_0} = l_{AB}$,理想轨迹的参数关系式表示为

$$\begin{cases} X_A = X_{G_0} \\ r - |Y_{G_0}| \leq h \end{cases} \quad (4)$$

式中 X_A ——点 A 横坐标

X_{G_0} 、 Y_{G_0} ——点 G_0 横、纵坐标

h ——栽植深度

Y_{G_0} 计算复杂,难以用精确的表达式表示。而在实际应用中,对于一般的农作物,栽植深度 h 通常不大于10 cm,在栽植器回转半径不小于15 cm的情况下, Y_{G_0} 与 Y_A 近似满足

$$r - |Y_{G_0}| \approx 4(r - |Y_A|) \quad (5)$$

式中 Y_A ——点 A 纵坐标

而 Y_A 可以表示为

$$Y_A = -Y_0 - \frac{v_0}{\omega}$$

于是可得参数关系式

$$4\left(r - \frac{v_0}{\omega}\right) = 4\left(r - \frac{Sn}{2\pi}\right) \leq h$$

$$\text{即} \quad \frac{Sn}{r} \geq 2\pi\left(1 - \frac{h}{4r}\right) \quad (6)$$

3 参数间的关系分析

栽植器的回转半径和栽植器个数是设计参数,而株距是计算参数。当前半自动移栽机多为地轮驱动,株距可表示为

$$S = \frac{\pi D}{(1 - \mu)in} \quad (7)$$

式中 D ——地轮直径

i ——地轮到栽植器的传动比

μ ——移栽机地轮打滑率

则式(3)、(6)转换为

$$2\left(1 - \frac{h}{4r}\right) \leq \frac{D}{(1 - \mu)ir} < 2 \quad (8)$$

式中 $h \leq 10$ cm, $r \geq 15$ cm,所以设计移栽机时,为保证秧苗直立度并尽量减小膜上移栽对地膜的损害,参数选择应参考式(8)。

移栽机使用过程中调整参数时,在满足式(8)的前提下可以通过改变传动比小范围调整株距,但是如果株距调整使 $\frac{D}{(1 - \mu)ir}$ 值超出了式(8)表示的范围,会出现大范围撕膜现象,此时应考虑改变栽植器个数 n 来调整株距。

4 机具设计及田间试验

4.1 机具设计

设计的2ZB-2型移栽机,如图4所示,主要部件有机架、地轮、投苗筒、行星齿轮箱和吊杯栽植器。整机由地轮驱动,地轮动力经链传动传给行星齿轮箱,行星齿轮箱中心轴再将一部分动力传给投苗筒,吊杯栽植器通过键连接固定在行星齿轮箱输出轴上。移栽机工作时机具在拖拉机牵引下作直线运动,栽植器随行星齿轮箱相对于机架作匀速转动,形成余摆线的绝对运动轨迹。

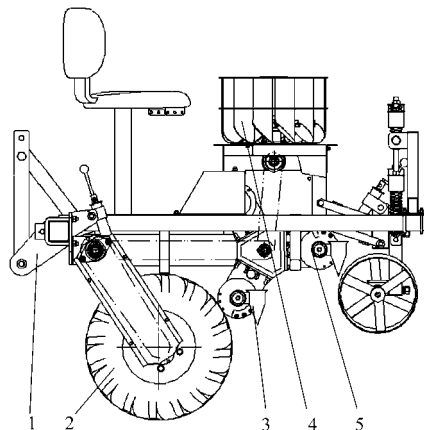


图4 2ZB-2型移栽机

Fig. 4 Type 2ZB-2 transplanter

1. 机架 2. 地轮 3. 吊杯栽植器 4. 投苗筒 5. 行星齿轮箱

2ZB-2 型移栽机主要参数如表 1 所示。

表 1 2ZB-2 型移栽机主要参数

Tab.1 Main parameters of type 2ZB-2 transplanter						
参 数	配套拖 拉机/kW	株距(可调) /cm	行距 /cm	栽植深 度/cm	地轮直 径/cm	栽植器回 转半径/cm
数值	22~30	20~50	34	4~10	56	22

4.2 田间试验

以穴盘育苗的红干椒为移栽作物进行田间试验,红干椒平均苗高为 15 cm,要求膜上移栽,株距 20~28 cm,移栽深度 5~7 cm。

4.2.1 试验设计

设计了 4 种方案,如表 2 所示。

表 2 试验设计
Tab.2 Experiment design

方案	传动 比	栽植器 个数	计算株 距/cm	吊杯打开 位置
1	17/12	5	27	上升段
2	20/12	5	23	上升段
3	18/13	6	23	上升段
4	18/13	6	23	下降段

方案 1:根据式(8)并结合红干椒种植农艺得出参数配置;吊杯打开位置为上升段。

方案 2:通过改变传动比调节株距为 23 cm 的参数配置;吊杯打开位置为上升段。

方案 3:在遵守式(8)的前提下,同时调整栽植器个数和传动比,调节株距为 23 cm 的参数配置;吊杯打开位置为上升段。

方案 4:参数配置同方案 3;吊杯打开位置为下降段。

每组方案重复进行 3 次试验,每次试验连续移栽 200 株苗。

试验地选在河北唐县白塔村,为沙壤土,翻耕平整。2ZB-2 型移栽机地轮打滑率为 8%。

4.2.2 试验结果分析

试验结果取 3 次试验的平均值,结果如表 3 所示。

表 3 试验结果
Tab.3 Experiment results

方案	前进方向地轮破损长度/mm	栽苗有效度/%
1	64	92
2	80	83
3	62	91
4	未测	68

试验结果表明,方案 1、3 地膜破损要远小于方案 2,栽苗有效度也高得多,均在 90% 以上。方案 2 的 $\frac{D}{(1-\mu)ir}$ 值小于式(8)表示的范围,地膜破损程度比方案 1、方案 3 高 30% 左右。而方案 4 由于在栽植器下降过程投苗,很多苗出现栽植深度不够,倒伏甚至苗根部外漏的情况,栽苗有效度较低。

5 结论

(1) 吊杯式栽植器工作时最佳投苗位置为过最低点后的上升段。

(2) 吊杯式移栽机设计时,参数设计可参照 $2\left(1-\frac{h}{4r}\right)\leqslant\frac{D}{(1-\mu)ir}<2$ 。

(3) 吊杯式移栽机使用过程中,小范围株距调整可以通过改变传动比实现,但是如果传动比改变令 $\frac{D}{(1-\mu)ir}$ 值超出式(8)表示的范围,应考虑改变栽植器个数 n 来调整株距。

(4) 通过田间对比试验,验证了文中理论分析的正确性。

参 考 文 献

1 封俊,秦贵,宋卫堂,等. 移栽机的吊杯运动分析与设计准则[J]. 农业机械学报,2002,33(5):48~50.
Feng Jun, Qin Gui, Song Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of the dibble-type tranplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(5):48~50. (in Chinese)

2 何扬清,尹文庆,章士秀. 3 种旱地移栽机栽植器的性能分析[J]. 安徽农业科学,2006,34(24):6 722~6 723,6 725.
He Yangqing, Yin Wenqing, Zhang Shixiu. Performance analysis of three types of transplanters used in dry land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2006,34(24):6 722~6 723,6 725. (in Chinese)

3 刘磊,陈永成,毕新胜,等. 吊篮式移栽机栽植器运动参数的研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2008,26(4):504~506.
Liu Lei, Chen Yongcheng, Bi Xinsheng, et al. Research on the 2ZM-2 transplanting machine with the nacelle[J]. Journal of Shihezi University:Natural Science, 2008,26(4):504~506. (in Chinese)

4 武科,毕新胜,陈永成. 吊篮式移栽机栽植器的研究[J]. 农机化研究,2010,32(6):73~76.
Wu Ke, Bi Xinsheng, Chen Yongcheng. The research of the dibble-type transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(6):73~76. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 张为政,王君玲,张祖立. 悬杯式蔬菜移栽机的设计[J]. 农机化研究, 2011(8): 104 ~ 106.
Zhang Weizheng, Wang Junling, Zhang Zuli. Design of cantilever cup vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(8): 104 ~ 106. (in Chinese)
- 2 封俊,秦贵,宋卫堂,等. 移栽机的吊杯运动分析与设计准则[J]. 农业机械学报, 2002, 33(5): 48 ~ 50.
Feng Jun, Qin Gui, Song Weitang, et al. The kinematic analysis and design criteria of the dibble-type transplanters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 48 ~ 50. (in Chinese)
- 3 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)
- 4 张茜,刘磊,陈永成. 吊篮式移栽机栽植器运动轨迹研究[J]. 农业机械, 2009(14): 107 ~ 109.
- 5 王君玲. 蔬菜栽植机栽植机理分析及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.
Wang Junling. Theoretical analysis and experimental study on vegetable transplanter[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 6 李其响, 阚建文, 丁梅霞. 滑道分钵轮式栽植器的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 98 ~ 103.
Li Qiyun, Zha Jianwen, Ding Meixia. Experimental study on slideway parting-bowl-wheel transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(5): 98 ~ 103. (in Chinese)
- 7 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, 2011, 27(11): 21 ~ 25. (in Chinese)
- 8 周德义,孙裕晶,马成林. 移栽机凸轮摆杆式扶苗机构设计与分析[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 26 ~ 30.
Zhou Deyi, Sun Yujing, Ma Chenglin. Design and analysis of a supporting-seeding mechanism with cam and combined rocker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 9 陈建能,王伯鸿,任根勇,等. 蔬菜移栽机放苗机构运动学模型建立与参数分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 48 ~ 53.
Chen Jianneng, Wang Bohong, Ren Genyong, et al. Kinematics modeling and parameters analysis of seven-linkage vegetable seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 48 ~ 53. (in Chinese)
- 10 陈建能,王伯鸿,张翔,等. 多杆式零速度钵苗移栽机植苗机构运动学模型与参数分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 7 ~ 12.
Chen Jianneng, Wang Bohong, Zhang Xiang, et al. Kinematics modeling and characteristic analysis of multi-linkage transplanting mechanism of pot seeding transplanter with zero speed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 7 ~ 12. (in Chinese)

(上接第 38 页)

- 5 韩长杰. 吊篮式移栽机的研究与分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007.
Han Changjie. The research and analysis of the dibble-type transplanter[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 6 Munilla R D. A high-speed dibbling transplanter[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 30(2): 904 ~ 908.
- 7 韩长杰,杨宛章,司明理. 转盘式投苗机构的设计与调整[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(2): 74 ~ 76.
Han Changjie, Yang Wanzhang, Si Mingli. Design and adjustment of turnplate-type dropping seedling mechanism[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007, 30(2): 74 ~ 76. (in Chinese)
- 8 Walter L Moden. An autocratically-fed bandoleer transplanter[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(4): 864 ~ 867.
- 9 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)
- 10 赵匀. 农业机械计算机辅助分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- 11 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.