

油菜钵苗移栽机栽植机构参数匹配与轨迹分析

张照¹ 廖庆喜^{1,2} 许博¹ 胡先朋¹

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.南方粮油作物协同创新中心,长沙 410128

摘要 针对油菜钵苗移栽机的结构参数对栽植稳定性的影响及拖拉机田间作业时部分工作参数受载波动影响栽植性能等问题,采用 ADAMS 建立参数化模型,开展栽植机构结构参数(栽植臂、从动栽植臂、连杆)及作业参数匹配研究和轨迹分析,确定机组前进速度 v (m/s)与栽植频率 f (株/min)的匹配范围。结果表明:当栽植臂长度为 300 mm、从动栽植臂长度为 305 mm、连杆长度为 95 mm 时,栽植轨迹高度为 225 mm,其中连杆长度对栽植性能有较大影响;在理论可行范围内,当 f/v 比值为 200 时,栽植轨迹达到最优,且随机组的前进速度增加,对应的可行栽植频率范围呈线性关系随之增大,栽植机构可适应株距范围为 240~375 mm。同时,应用高速摄像在线观察得出,栽植机构实际运动轨迹与理论分析基本吻合。田间试验表明:穴深合格率为 90.7%,变异系数为 7.1%,穴口长度合格率为 84%,变异系数为 6.6%,满足栽植要求。

关键词 油菜钵苗移栽机;栽植机构;参数匹配;轨迹分析;ADAMS

中图分类号 S 223.92 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)02-0108-09

油菜裸苗数小时内即可脱水变蔫,易受损伤。油菜钵苗机械化移栽可避免移栽过程中油菜苗变蔫导致的机械分苗、取苗、植苗的难度增加,提高效率,获得健壮油菜苗,达到优质高产的目的,且能够解决长江流域稻-油三熟制地区的种植茬口矛盾^[1-10]。随着钵苗栽植技术的广泛应用,机械化移栽已成为农机领域的热点问题之一^[11-13]。栽植机构是指机械移栽过程中将作物秧苗移栽至大田的机构,作为移栽机重要的工作部件,其栽植质量决定了移栽机的性能^[14-17]。赵匀等^[18]研制出拟合齿轮五杆水稻钵苗移栽机构,通过开发人机对话的可视化软件进行了栽植机构轨迹优化。肖名涛等^[19]研制出双平行多杆栽植机构,通过建立运动学模型进行了栽植机构轨迹分析。金鑫等^[14]研制出膜上移栽钵苗栽植机构,利用 ADAMS 参数化建模分析了栽植机构中各杆件对栽植轨迹的影响。多杆栽植机构结构复杂、参数多,待实现的运动轨迹为高次曲线^[20],栽植机构各组参数组合只在特定机组前进速度和栽植频率下可获得最优栽植轨迹,相关学者针对特定作业参数进行了栽植机构栽植轨迹分析。本研究基于笔者所在课题组研制的油菜钵苗移栽机双五杆栽植机

构^[4],针对其栽植臂偏长难以保证鸭嘴栽植器有效同步入土获得适宜掘穴效果,易引起机具震动以及拖拉机田间作业时前进速度和动力输出轴转速受载波动影响栽植性能等问题,开展了栽植机构栽植臂、从动栽植臂和连杆的结构参数匹配研究,分析了机组前进速度和栽植频率对栽植性能的影响,确定了不同机组前进速度下可行栽植频率的匹配范围,为该栽植机构在田间作业的适应性提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 移栽机及栽植机构的结构和工作原理

油菜钵苗移栽机主要由机架、分苗装置以及栽植机构等组成,其结构如图 1 所示。分苗装置将有序排列的油菜钵苗输送至分苗位置并周期性逐个分离进入栽植机构,栽植机构在动力驱动下以特定栽植轨迹运动并完成钵苗移栽过程。

栽植机构由齿轮箱、曲柄 I、曲柄 II、连接臂、栽植臂、从动栽植臂、三角连接板、动力输入轴、动力传动轴 I、动力传动轴 II、凸轮、鸭嘴栽植器等组成(图 2)。齿轮箱内 3 个齿轮啮合传动,大小相同,栽植臂和从动栽植臂分别安装于齿轮箱两侧。动力经

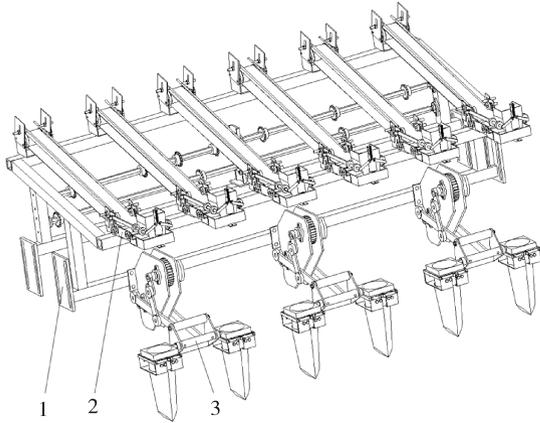
收稿日期:2016-05-21

基金项目:现代农业产业技术体系油菜科学家岗位(CASR-13);湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094);农业科研杰出人才及其创新团队

张照,硕士研究生,研究方向:油菜机械化移栽. E-mail: zhangz@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:廖庆喜,教授,研究方向:油菜机械化生产技术与装备. E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

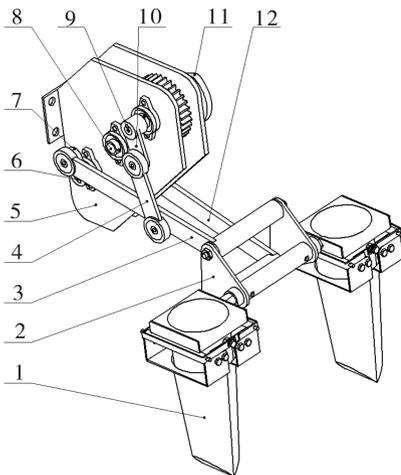
过动力输入轴驱动中间齿轮转动,并通过齿轮啮合驱动曲柄 I、曲柄 II 同向圆周运动。鸭嘴栽植器在栽植机构的带动下,末端形成栽植所必须的运动轨迹,并在运动中不断变换姿态,以满足接苗和栽植的要求。工作中,当鸭嘴栽植器运动至最高点时,钵苗从分苗装置投入鸭嘴栽植器中;当鸭嘴栽植器运动至最低点时,由栽植凸轮控制鸭嘴栽植器打开,完成栽植过程。



1.机架 Frame; 2.分苗装置 Detaching device; 3.栽植机构 Transplanting mechanism.

图 1 油菜钵苗移栽机结构示意图

Fig.1 Sketch of rape pot seeding transplanter



1.鸭嘴栽植器 Duckbill-type planting unit; 2.三角连接板 Triangular connection plate; 3.栽植臂 Transplanting arm; 4.连接臂 Connection rod; 5.齿轮箱 Gear box; 6.动力传动轴 I Power transmission shaft I; 7.曲柄 I Crank I; 8.动力输入轴 Power input shaft; 9.动力传动轴 II Power transmission shaft II; 10.曲柄 II Crank II; 11.凸轮 Cam; 12.从动栽植臂 Driven transplanting arm.

图 2 栽植机构结构示意图

Fig.2 Structure diagram of transplanting mechanism

1.2 结构参数匹配及栽植轨迹分析

1)栽植机构栽植过程评价指标。①栽植阶段。为保证栽植阶段栽植轨迹的直立度和重合度,根据肖名涛等^[19]所做栽植轨迹对移栽质量影响的试验,栽植轨迹入土出土点偏差 λ 以及竖直方向宽度 W 应均不大于 20 mm。栽植阶段鸭嘴栽植器所掘穴口较大时,影响钵苗出土率且给覆土镇压工序造成困难。根据陈建能等^[21]研究得出,穴口长度应大于 $1.1L$ (L 为钵上口边长),小于 $1.6L$ 。鸭嘴栽植器从开始进入苗床到完全离开苗床,入土部分运动包络线范围决定了穴口的大小,当栽植轨迹竖直方向宽度 W 为零且鸭嘴栽植器入土最深时刻其偏角达到最大时,所形成的穴口长度最大,此时鸭嘴栽植器入土示意图如图 3 所示。

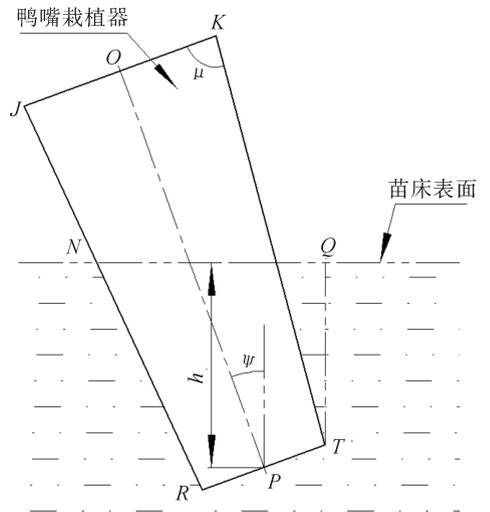


图 3 鸭嘴栽植器入土示意图

Fig.3 Working schematic diagram of duckbill-type planting unit

此状态下,穴口长度 l_{NQ} 有如下关系:

$$\begin{cases} l_{NQ} = \left(\frac{h_1 \cdot (l_{JK} - l_{RT})}{2l_{OP}} + \frac{l_{RT}}{2} \right) \cdot \left(\frac{\sin(180^\circ - u)}{\sin(u - \psi)} \right) + h_1 \cdot \tan\psi + \frac{l_{RT} \cdot \cos\psi}{2} \\ 1.1L \leq l_{NQ} \leq 1.6L \end{cases} \quad (1)$$

式中, l_{NQ} 为穴口长度, mm; l_{RT} 为鸭嘴栽植器下端长度, mm; l_{JK} 为鸭嘴栽植器上端面长度, mm; l_{OP} 为鸭嘴栽植器垂直高度, mm; h_1 为鸭嘴栽植器栽植深度, mm; μ 为鸭嘴栽植器壁面倾角, ($^\circ$); L 为钵上口边长, mm。其中 l_{RT} 为 64 mm, l_{JK} 为 100 mm, l_{OP} 为 200 mm。利用 MATLAB 分析得出鸭嘴栽植器在栽植阶段偏角需满足 $-17.6^\circ \leq \psi \leq 17.6^\circ$ 。

②接苗阶段。为保证接苗成功率,根据陈建能等^[21-22]及王英等^[23]的相关研究,结合本研究设计的鸭嘴栽植器,接苗阶段鸭嘴栽植器偏角范围应满足 $-6^\circ \leq \varphi_1 \leq 6^\circ$ 。为提高接苗可靠性,保证钵苗在接苗阶段顺利落入鸭嘴栽植器中且不翻倒,根据栽植机构特点及肖明涛等^[19]分析的接苗准确性影响因素及结论,接苗阶段鸭嘴栽植器上端面中心点与投苗点的水平方向最大偏移 S_x 和竖直方向最大偏移 S_y 均应不大于 25 mm。

2)栽植机构栽植器入土受力分析。长江流域普遍为稻田田,土壤板结严重^[24],栽植机构栽植入土阶段掘穴越深,旋耕层土壤对其支持力越大。当鸭嘴栽植器掘穴深度未达到栽植要求而旋耕层土壤对鸭嘴栽植器的支持力已大于其所受的压力时,曲柄 I 和曲柄 II 越过鸭嘴栽植器处于最低点的临界位置,机具被撑起,越过临界位置之后,机具回落,导致移栽过程中掘穴深度未满足要求且机具周期性振动。当鸭嘴栽植器所受压力大于鸭嘴栽植器达到栽植深度所受的最大支持力时,鸭嘴栽植器可顺利入土,有效改善掘穴效果并减缓此种情况导致的机具周期性振动。取鸭嘴栽植器处于最低点时栽植机构的状态进行受力分析,其受力简化示意图如图 4 所示。

角, $(^\circ)$; ϵ 为栽植臂的 DG 边与水平方向夹角, $(^\circ)$; α 为支持力 F_2 与水平方向夹角, $(^\circ)$; γ 为拉力 F_1 与三角板 GH 边夹角, $(^\circ)$; β 为支持力 F_4 与栽植臂 DE 边夹角, $(^\circ)$ 。结合图 4 受力情况,以栽植机构处于受力临界状态展开分析。分别以三角板 GHQ , 曲柄 BF , 曲柄 AD 和栽植臂 DEG 为分析对象,建立平衡方程,得到曲柄转矩 M 与旋耕土壤层支持力 F_N 的关系如式(2)~(3)所示:

$$M = \frac{l_{BF} \cdot l_{GQ} \cdot l_{DG}}{l_{DE}} \cdot \frac{\sin\theta \cdot \sin\delta \cdot \sin(\epsilon + \alpha)}{\cos(\pi - \alpha) \cdot \sin\beta} \cdot F_N \quad (2)$$

$$\tan\alpha = \frac{l_{GH} \cdot \tan\gamma + l_{GQ} \cdot \sin\delta}{l_{GQ} \cdot \sin\delta \cdot \tan\gamma} \quad (3)$$

式中, l_{BF} 为曲柄 II 长度,mm; l_{DG} 为栽植臂 DG 边长,mm; l_{GQ} 、 l_{GH} 为 HQ 边长,mm; l_{DE} 为栽植臂 DE 边长,mm。由式(2)~(3)分析可知,若鸭嘴栽植器满足掘穴深度,曲柄实际转矩应满足 $M_{实} \geq M$; 在相同曲柄转矩 $M_{实}$ 下,栽植臂长度 l_{DG} 越小,鸭嘴栽植器在栽植入土阶段所受向下的压力越大,越容易入土,使掘穴效果满足栽植要求,并减缓鸭嘴栽植器不能顺利达到栽植深度而造成的机具周期性振动情况。在满足栽植要求下匹配栽植臂 DG 的长度,可改善鸭嘴栽植器掘穴效果,减小栽植过程中因掘穴造成的机具周期性振动,同时使机具结构紧凑。

3)栽植轨迹高度分析。分析栽植机构可知,栽植臂 DG 的长度主要影响栽植轨迹的高度。当曲柄 BF , 曲柄 AD , 连杆 EF 和连杆 DE 的长度不变时,取鸭嘴栽植器处于最高点和最低点两个位置分析栽植轨迹高度 h 与栽植臂长度 l_{DG} 的关系,如图 5 所示。

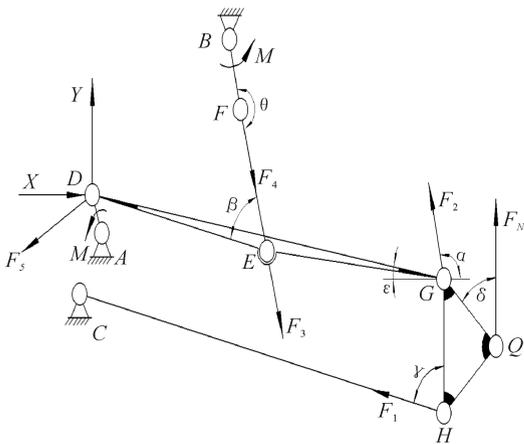


图 4 栽植机构受力简化示意图

Fig.4 Force sketch of transplanting mechanism

图 4 中, M 为曲柄转矩,N/m; F_N 为三角板 Q 点所受支撑力,N; F_1 为三角板 H 点所受拉力,N; F_2 为栽植臂 G 点所受支持力,N; F_3 为栽植臂 E 点所受支持力,N; F_4 为连杆 F 点所受支持力,N; F_5 为栽植臂 D 点所受拉力,N; θ 为曲柄 II 与连杆的夹角, $(^\circ)$; δ 为三角板 GHQ 的 GQ 边与竖直方向夹

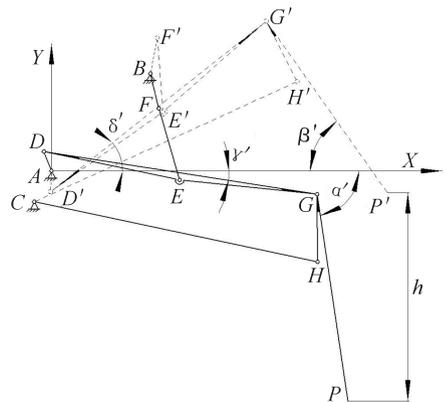


图 5 栽植机构处于最高和最低点时位置示意图

Fig.5 Highest and lowest sketch map of transplanting mechanism

图 5 中, h 为栽植轨迹垂直高度,mm; α' 为栽植机构最低点时 GP 边与水平方向夹角, $(^\circ)$; β' 为栽

栽植机构最高点时 $G'P'$ 边与水平方向夹角, ($^\circ$); γ' 为栽植机构最低点时 DG 边与水平方向夹角, ($^\circ$); δ' 为栽植机构最高点时 $D'G'$ 边与水平方向夹角, ($^\circ$)。当鸭嘴栽植器处于最低点时, 曲柄 AD 的转角 ϵ' (图中未标出) 为 117° ; 当鸭嘴栽植器处于最高点时, 曲柄 AD' 的转角 θ' (图中未标出) 为 267° ^[4]。根据栽植要求可知, 当鸭嘴栽植器到达最低点时, 其轴线需垂直于水平面, 即 α' 不变。当栽植臂 DG 长度变化时, 调整从动栽植臂 CH 和连杆 GH 的长度, 保证 α' 和 β' 保持不变, 栽植轨迹垂直高度 h 的表达式如式(4)所示。

$$h = l_{AD} \cdot (\sin\theta' - \sin\epsilon') + l_{DG} \cdot (\sin\delta' + \sin\gamma') + l_{GP} \cdot (\sin\alpha' - \sin\beta') \quad (4)$$

式中, l_{AD} 为曲柄 I 长度, mm; l_{GP} 为三角板 G 点与栽植器底端面中点 P 的距离, mm。当仅有栽植臂 DG , 从动栽植臂 CH 和连杆 GH 的长度变化时, 其 $\theta', \epsilon', \delta', \gamma', \alpha', \beta'$ 均不变。由式(4)分析可知, 栽植轨迹高度 h 与栽植臂的长度 l_{DG} 呈正线性关系, 确定栽植轨迹高度 h 即可匹配栽植臂长度 l_{DG} 。

4) 栽植机构结构参数匹配及轨迹分析。栽植轨迹高度 h 取决于栽植机构作业对象适栽期的高度^[25]。因此, 以长江流域常用油菜品种华油杂 62、中双 6 号和中双 11 号为对象开展育苗试验并统计分析适栽期油菜钵苗高度。适栽期油菜钵苗高度近似正态分布, 以极大值为参照, 确定栽植机构栽植轨迹高度 h 为 230 mm 时可满足长江流域常用油菜品种钵苗移栽的要求, 对各油菜品种有较好的适应性, 结合式(4)确定栽植臂长度 l_{DG} 为 300 mm, 相比原

有尺寸缩短了 23.3%。

为保证工作过程中栽植轨迹及鸭嘴栽植器姿态满足栽植要求, 从动栽植臂 CH 和连杆 GH 的长度需根据栽植臂 DG 的长度进行分析确定。以栽植机构已确定的参数化关系为依据, 利用 ADAMS 软件建立栽植机构的参数化模型, 以机组前进速度 0.3 m/s, 栽植频率 60 株/min 为基础, 分析从动栽植臂 CH 与连杆 GH 对栽植轨迹和鸭嘴栽植器姿态的影响。为便于参数化建模, 通过 A 点建立直角坐标系, 以鸭嘴栽植器处于最低点为初始状态, 以 H 点坐标 x_H 和 y_H 为设计变量, 进行建模分析, 如图 6 所示。

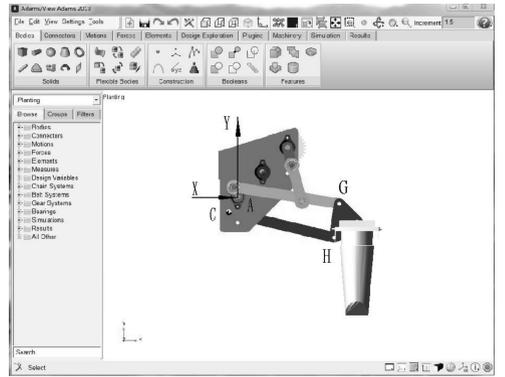


图 6 钵苗栽植机构参数化建模界面

Fig.6 Interface of parametric optimal modeling about pot seeding transplanting device

经分析, 栽植机构运行时, G 点到 C 点的最大距离为 375 mm, 结合栽植机构自身约束条件, 建立如下约束方程:

$$\begin{cases} 375 - \sqrt{(x_H - x_C)^2 + (y_H - y_C)^2} - \sqrt{(x_H - y_G)^2 + (y_H - y_G)^2} < 0 \\ \sqrt{(x_H - x_C)^2 + (y_H - y_C)^2} - \sqrt{(x_H - y_G)^2 + (y_H - y_G)^2} - 375 < 0 \\ y_H - y_G < 0 \\ x_H - x_G < 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据约束方程确定设计变量 x_H 和 y_H 的取值范围, 以本文“1.2 中 1)”的评价指标为衡量标准, 利用 ADAMS 试验设计“Design of Experiments”模块研究栽植机构运行时设计变量 x_H 和 y_H 对栽植轨迹和鸭嘴栽植器姿态的影响规律。本文“1.2 中 1)”水平方向最大偏移 S_x , 竖直方向最大偏移 S_y 和接苗阶段鸭嘴栽植器偏角范围均为接苗可靠性评价指标, 为了便于分析将该 3 个评价指标归一化, 以同时满足此 3 个评价指标的曲柄 AD 转角范围所占整个周期的百分比大小衡量接苗的可靠性, 百分比越大, 接苗可靠性越高。分析结果如图 7 和表 1 所示, 图 7

中 m, n 点分别表示栽植阶段和接苗阶段鸭嘴栽植器轴线偏角为 0° 对应的曲柄 AD 转角。以表 1 中不同 H 点坐标对应的从动栽植臂 CH 长度和连杆 GH 长度为因变量, 利用 MATLAB 拟合直观分析其对栽植性能的影响规律, 结果如图 8 所示。

图 7 和表 1 表明, 设计变量 x_H 和 y_H 对鸭嘴栽植器偏角变化有影响, 即从动栽植臂 CH 和连杆 GH 影响鸭嘴栽植器偏角。 mn 阶段, 从动栽植臂 CH 和连杆 GH 的长度对鸭嘴栽植器偏角变化趋势及最大值无明显影响。 nm 阶段, 随从动栽植臂 CH 长度增加, 鸭嘴栽植器偏角最大值逐渐减小, n 无明

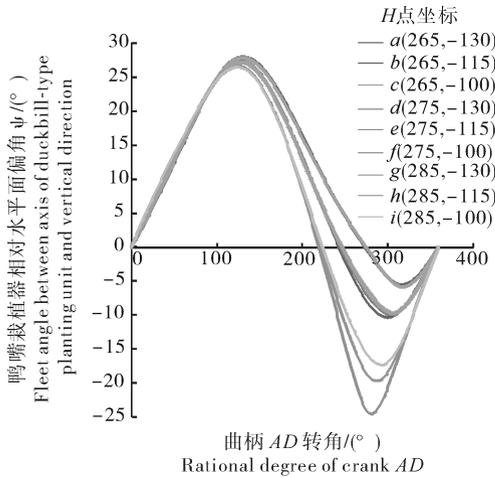


图 7 鸭嘴栽植器轴线相对竖直方向偏角
Fig.7 Fleet angle between axis of duckbill-type planting unit and vertical direction

显变化;随着连杆 GH 长度增加,鸭嘴栽植器偏角最大值逐渐减小, n 逐渐增大。 n 越大, 接苗阶段鸭嘴栽植器偏角变化趋势越平缓, 变化范围越小, 有利于接苗。

结合表 1 和图 8 分析可知, 在约束条件范围内, 连杆 GH 对栽植机构栽植过程评价指标有较大影响, 从动栽植臂 CH 长度对栽植过程评价指标无明显影响。图 8 表明, 随连杆 GH 长度增加, 栽植轨迹入土出土偏差 λ 和竖直方向宽度 W 先减小后增大; 栽植阶段鸭嘴栽植器偏角最小值逐渐减小, 最大值无明显变化; 接苗阶段曲柄 AD 转角所占周期百分比先增大后减小。根据本文“1.2 中 1)”所述的栽植机构栽植过程评价指标, 分析表 1 可知, 点(275, -115)附近为 H 点最优取值范围, 结合图 8 分析, 取连杆 GH 长度 95 mm, 栽植从动臂 CH 长度 305

表 1 不同 H 点对应的栽植机构部分结构及运行参数

Table 1 Part structural and working parameters of transplanting mechanism on different point H

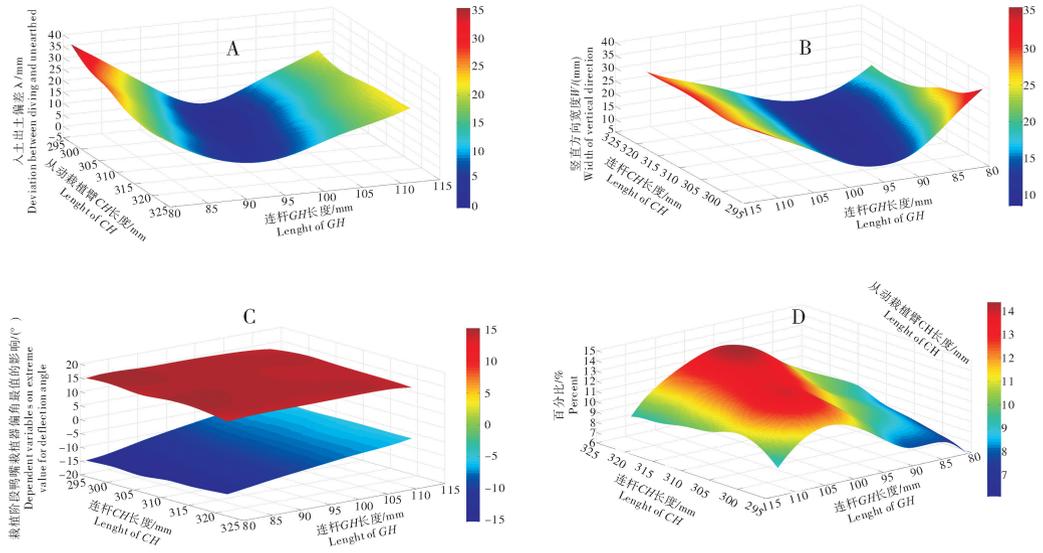
曲线 Curves	H 点坐标 Coordinate of point H	λ/mm	W/mm	栽植阶段鸭嘴栽植 器偏角变化范围 ψ/(°) Range of deflection angle for transplanting stage	曲柄 AD 转角 k ₁ 占周期比/% Percentage of rational degree for crank AD	从动栽植臂 CH 长度/mm Length of driven transplanting arm	GH 长度/mm Length of connection rod
a	(265, -130)	19.4	29.9	-5.5~14.2	10.8	302	113
b	(265, -115)	0.05	10.5	-9.1~14.6	11.4	298	98
c	(265, -100)	29.1	29.1	-14.5~15.0	7.5	295	84
d	(275, -130)	19.9	29.3	-5.7~14.0	10.8	312	111
e	(275, -115)	1.9	11.1	-9.1~14.5	12.8	308	97
f	(275, -100)	24.7	24.7	-14.9~14.1	8.1	305	82
g	(285, -130)	20.6	28.8	-5.8~13.8	10.3	321	111
h	(285, -115)	3.8	11.9	-9.2~14.3	14.2	317	96
i	(285, -100)	20.4	20.4	-14.0~15.0	9.2	314	81

注: λ 和 W 分别表示栽植轨迹入土出土点偏差和竖直方向宽度; k₁ 表示满足接苗阶段所有性能指标时曲柄 AD 的转角范围。 Note: λ refers to deviation of transplanting trajectory between diving and unearthed; W refers to width of vertical direction for transplanting trajectory; k₁ refers to rational degree range of crank AD when all performance indexes are met on grafted seedlings stage.

mm。当机组前进速度 0.3 m/s, 栽植频率 60 株/min 时, 栽植机构栽植轨迹如图 9 所示, 机组前进方向向左。

参数匹配研究表明, 栽植臂 DG 长 300 mm, 从动栽植臂 CH 长 305 mm, 较原来分别缩短了 23.3% 和 25.6%, 连杆 DG 长 95 mm, 栽植轨迹高度为 225 mm。当栽植机构前进速度为 0.3 m/s,

栽植频率为 60 株/min, 取栽植深度为 60~100 mm 时, 鸭嘴栽植器栽植轨迹入土出土偏差 λ 为 1.3~8.0 mm, 竖直方向宽度 W 为 10~15 mm, 入土出土轨迹具有较好垂直度和重合度, 栽植阶段鸭嘴栽植器偏角范围为 -9.8°~16.5°, 接苗阶段所占周期百分比为 11.7%, 满足油菜钵苗机械化移栽的要求。



A:因变量对栽植轨迹入土出土偏差的影响 Effects of dependent variables on deviation between diving and unearthed;B:因变量对栽植轨迹竖直方向宽度的影响 Effects of dependent variables on width of vertical direction;C:因变量对栽植阶段鸭嘴栽植器偏角最值的影响 Effects of dependent variables on extreme value for deflection angle;D:因变量对接苗阶段曲柄 AD 转角所占周期百分比的影响 Effects of dependent variables on percentage of crank AD rational degree.

图 8 从动栽植臂 CH 长度与连杆 GH 长度对栽植性能的影响

Fig.8 Effects on transplanting performance by length of driven transplanting arm CH and linkage GH

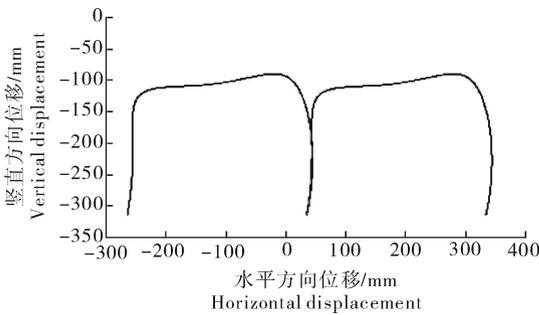


图 9 鸭嘴栽植器底端面中心点 P 栽植轨迹曲线
Fig.9 Transplanting locus of point P on duckbill-type planting unit

2 结果与分析

2.1 栽植机构作业参数匹配分析

栽植机构作业参数主要包括机组前进速度 v 和栽植频率 f 。油菜钵苗移栽机大田作业时工况复杂,机组前进速度及拖拉机动力输出轴转速的波动导致栽植频率不稳定,影响栽植性能。以改进后的栽植机构为对象,开展不同机组前进速度下可行栽植频率范围的匹配分析,确定可适应的栽植株距范围,为栽植机构栽植可靠性和适应性提供理论基础。结合本文“1.2 中 1)”所述的栽植机构栽植过程评价

指标,采用 ADAMS 仿真分析机组前进速度 v 和栽植频率 f 对栽植过程评价指标的影响,通过匹配分析确定不同机组前进速度下可行栽植频率的范围。将栽植机构三维模型导入 ADAMS 软件中,以机组前进速度 v 和栽植频率 f 为试验因素,进行计算机模拟分析。结合实际经验,机组前进速度分别选取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m/s,栽植深度选取 80 mm,改变栽植频率 f 的大小,分析其对栽植过程评价指标的影响以及可适应的株距范围,结果如表 2 所示。

表 2 可知,不同机组前进速度 v 和栽植频率 f 下,栽植机构栽植阶段偏角 ψ 范围以及接苗阶段曲柄 AD 转角 k_1 均不变,即机组前进速度 v 和栽植频率 f 对栽植机构工作过程中鸭嘴栽植器的姿态变化无影响。栽植阶段鸭嘴栽植器偏角范围为 $-9.8^\circ \sim 14.5^\circ$,接苗阶段所占周期百分比为 11.7%,满足栽植和接苗的要求。分析可知,在理论可行范围内,当 f/v 为 200 的匹配组合时,栽植轨迹达到最优, λ 为 1.3 mm, W 为 10 mm。当栽植频率小于最优频率时,栽植轨迹为短摆线;当栽植频率大于最优频率时,栽植轨迹为余摆线。根据最优匹配频率下栽植机构栽植轨迹入土出土偏差 λ 和竖直方向宽度 W 分析,当 f/v 一定时,不同栽植频率不同机组

表 2 机组前进速度和栽植频率对栽植性能的影响

Table 2 Effects of velocity and planting frequency for transplanting performance

$v/(m/s)$	栽植频率可行范围/(株/min) Feasible range of transplanting frequency	$f/(株/min)$	λ/mm	W/mm	$\phi/(^\circ)$	曲柄 AD 转角 k_1 占周期比/% Percentage of rational degree for crank AD	株距/mm Range of transplanting spacing
0.1	15~25	20	1.3	10	-9.8~14.5	11.7	240~400
0.2	32~49	40	1.3	10	-9.8~14.5	11.7	245~375
0.3	48~75	60	1.3	10	-9.8~14.5	11.7	240~375
0.4	64~100	80	1.3	10	-9.8~14.5	11.7	240~375
0.5	80~124	100	1.3	10	-9.8~14.5	11.7	242~375

注:栽植频率可行范围表示特定机组前进速度下栽植轨迹满足栽植要求的栽植频率范围;最优栽植频率表示栽植轨迹达到最优时的频率; λ 和 W 分别表示在最优栽植频率 f 下栽植轨迹入土出土点偏差和竖直方向宽度。Note:Feasible range of transplanting frequency refers to the range that met the demand of transplanting with specific speed;Optimal transplanting frequency refers to the frequency that gained optimal transplanting trajectory; λ refers to deviation of optimal transplanting trajectory between diving and unearthed; W refers to width of vertical direction with optimal transplanting frequency.

前进速度下栽植轨迹不变。同时,随机组前进速度增加,满足栽植机构栽植要求的栽植频率匹配范围逐渐增大,栽植频率匹配范围上限、下限随机组前进速度增加均呈正线性关系,平均相关系数均为 0.999 6。根据线性拟合参数得出,在理论可行范围内,当机组前进速度 v 和栽植频率 f 满足如下匹配范围时,栽植机构的栽植过程均可满足栽植要求,如式(6)所示。

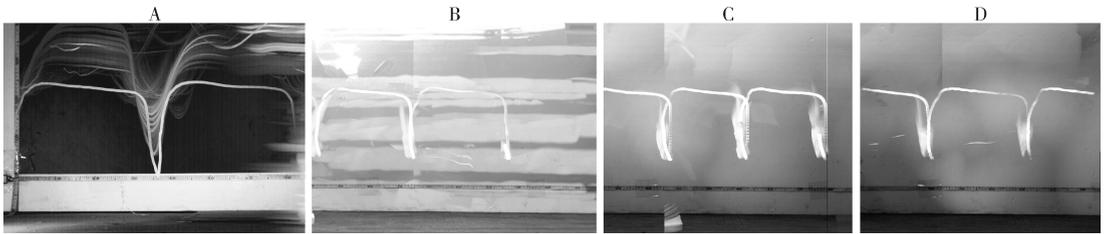
$$\begin{cases} 162v - f - 0.8 < 0 \\ 249v - f - 0.1 < 0 \\ f > 0; v > 0 \end{cases} \quad (6)$$

针对田间作业情况复杂,当机组前进速度和栽植频率产生一定波动时,该栽植机构仍能满足栽植

要求,适应性较强。在满足栽植要求情况下,改变机组前进速度和栽植频率,可使栽植株距在 240~375 mm 范围内可调。

2.2 栽植机构试验

1)栽植轨迹高速摄像运动试验。为验证栽植机构栽植轨迹以及匹配分析的正确性,根据结构参数匹配研究的结果加工试制栽植机构并进行栽植轨迹高速摄像运动试验。试验采用东方红-LX854 型拖拉机为动力,将栽植机构安装于 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机平台上,以机组前进速度 v 和栽植频率 f 为变量进行栽植机构空运行高速摄像运动试验(机组前进方向向右)。结果如图 10 所示。



A: $v=0.15 m/s$; $f=24$ 株/min; B: $v=0.15 m/s$; $f=30$ 株/min; C: $v=0.15 m/s$; $f=37$ 株/min; D: $v=0.2 m/s$; $f=40$ 株/min.

图 10 栽植机构高速摄影运动轨迹

Fig.10 Transplanting trajectory given by high-speed photography

结果表明,高速摄像呈现的栽植轨迹变化趋势与理论分析基本吻合,验证了优化后栽植机构的可行性以及匹配分析的正确性。但轨迹平滑度和直线度存在一定偏差,主要原因如下:(1)机具通过三点悬挂挂接,拖拉机行走时机具振动误差;(2)链传动松紧边产生的相位误差和齿轮间隙产生的相位误差;(3)利用 Startrails 图像分析软件所产生的拾取误差;

(4)摄像机、栽植机构和投影板之间的投影误差。

2)栽植机构掘穴效果试验。为验证栽植机构掘穴效果,以机组前进速度方向穴口长度 L_1 、株距 L_2 以及穴深 H 为评价指标进行田间掘穴试验。试验前将试验地旋耕,使土壤呈疏松状态,土壤平均含水率约为 34.8%。试验时,拖拉机前进速度为 0.21 m/s,栽植频率为 42 株/min,连续取 75

组数据,图11为田间试验现场,试验结果如表3所示。



图11 栽植机构田间试验

Fig.11 Field test of transplanting mechanism

表3 栽植机构掘穴效果

Table 3 Burrowing effect of transplanting mechanism

评价指标 Evaluation index	平均值/mm Average	变异系数/% Coefficient of variation	合格率/% Qualified rate
穴深 H Depth of well	92.1	7.1	90.7
穴口长度 L_1 Length of well	90.8	6.6	84
株距 L_2 Transplanting spacing	309.8	15.7	100

注:评价标准参照油菜移栽机质量评价技术规范 NY/T 1924—2010 以及参考文献[18]。Note: Evaluation standard refers to NY/T 1924—2010 and reference [18].

从表3可知,穴深、穴口长度和株距均满足栽植要求。穴深合格率为90.7%,穴深变异系数为7.1%,表明改进后的栽植机构掘穴效果有一定改善。因掘穴过程中土壤回流,导致穴口长度均值偏大,合格率偏低。

3 讨论

本研究建立了栽植机构基于 ADAMS 的参数化模型,开展了栽植机构结构参数匹配分析,得到栽植臂长度为300 mm,从动栽植臂长度为305 mm,分别缩短了23.3%和25.6%,连杆长度为95 mm。当机组前进速度为0.3 m/s,栽植频率为60株/min,栽植深度为80 mm时,栽植轨迹入土出土偏差 λ 为1.3 mm,竖直方向宽度 W 为10 mm,栽植阶段鸭嘴栽植器偏角范围为 $-9.8^\circ \sim 14.5^\circ$,接苗阶段所占周期百分比为11.7%,栽植轨迹高度为225 mm,满足油菜钵苗机械化移栽的要求。栽植机构

连杆 GH 对栽植性能有较大影响。栽植机构运行过程中,鸭嘴栽植器姿态与机组前进速度和栽植频率无关。作业参数匹配分析表明,当 f/v 为200的匹配组合时,栽植轨迹最优,且随机组前进速度增加,满足栽植性能的栽植频率范围呈正线性关系随之增大。改变机组前进速度和栽植频率,栽植机构可适应240~375 mm的栽植株距。

高速摄像试验结果验证了理论分析的合理性;田间试验中穴深合格率为90.7%,变异系数为7.1%,穴口长度合格率为84%,变异系数为6.6%,株距合格率为100%,变异系数为15.7%,满足油菜钵苗机械化移栽要求。

移栽机田间作业情况复杂,影响栽植机构栽植性能的因素较多,后续有待进一步开展田间试验,探究机组前进速度、栽植频率、土壤含水率等因素对钵苗直立度的影响,以期提高栽植机构的栽植可靠性。同时,该栽植机构与鸭嘴栽植器配套使用,栽植时鸭嘴栽植器自身重力促使栽植装置产生冲击载荷,不利于接苗,后续可进行传动系统、鸭嘴栽植器结构和材料的改进,使栽植机构作业时匀速运动,避免栽植轨迹失真,提高栽植成功率。

参 考 文 献

- [1] 任珂珂,陈海涛,赖庆辉,等.移栽机的链式纸钵研究[J].东北农业大学学报,2010,41(12):113-118.
- [2] 叶秉良,刘安,俞高红,等.蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J].农业机械学报,2013,44(2):57-62.
- [3] 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.
- [4] 廖庆喜,刘明峰,张照,等.油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J].农业机械学报,2015,46(11):49-56.
- [5] 帅海洪,丁秋凡,陈卫江,等.双季稻区油菜移栽与直播性状比较研究[J].湖南农业科学,2010(1):28-30.
- [6] 袁金展,马霓,张春雷,等.移栽与直播对油菜根系建成及籽粒产量的影响[J].中国油料作物学报,2014(2):189-197.
- [7] 张青松,肖文立,廖庆喜,等.油菜直播机深浅旋组合式种床整备装置的设计与试验[J].华中农业大学学报,2016,35(4):121-128.
- [8] PARISH RL.Current developments of seeders and transplanter in vegetables[J].Hort technology,2005,15(2):346-351.
- [9] KUMAR G V, RAHEMANH. Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings[J].Biosystems engineering,2011,110(2):189-197.
- [10] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the American society of agricultural and biological engineering, 2001,45(1):13-19.

- [11] 陈科,杨学军,颜华,等.基于 Matlab 的全自动移栽机取苗机构设计与参数优化[J].农业机械学报,2013,44(S1):24-26.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 金鑫,李树君,杨学军,等.膜上移栽钵苗栽植机构运动分析与参数优化[J].农业机械学报,2012,43(S1):29-34.
- [15] 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(6):693-698.
- [16] 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.
- [17] TSUGA K. Development of fully automatic vegetable transplanter[J].JARQ-Japan agricultural research quarterly,2000,34:21-28.
- [18] 赵匀,朱慧轩,辛亮,等.拟合齿轮五杆水稻钵苗移栽机构的机理分析与试验[J].农业工程学报,2016,32(1):12-21.
- [19] 肖名涛,孙松林,罗海峰,等.双平行多杆栽植机构运动学分析与试验[J].农业工程学报,2014,30(17):25-33.
- [20] 陈建能,王伯鸿,张翔,等.多杆式零速度钵苗移栽机栽植机构运动学模型与参数分析[J].农业工程学报,2011,27(9):7-12.
- [21] 陈建能,章鹏华,王英,等.旋转式钵苗栽植机构多目标参数优化与试验[J].农业机械学报,2015,46(5):46-53.
- [22] 陈建能,夏旭东,王英,等.钵苗在鸭嘴式栽植机构中的运动微分方程及应用试验[J].农业工程学报,2015,31(3):31-39.
- [23] 王英,陈建能,吴加伟,等.用于机械化栽植的西兰花钵苗力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(24):1-10.
- [24] 张青松,汲文峰,廖宜涛,等.油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J].农业机械学报,2014,45(2):130-135.
- [25] 孙国祥,汪小岳,何国敏,等.穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J].农业机械学报,2010,41(10):48-53.

Parameters matching and trajectory analysis of transplanting mechanism for rapeseed pot seedling

ZHANG Zhao¹ LIAO Qingxi^{1,2} XU Bo¹ HU Xianpeng¹

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China

Abstract Transplanting is a sensitive and precise operation affected by structural parameters of the mechanism and tractor rotating speed fluctuation during operation. A model was established to detect transplanting mechanism by using ADAMS. Parameters matching and trajectory analyses of structural parameters and working parameters were investigated and corresponding tractor velocity v and planting frequency f range were determined. The results showed that the exact length of transplanting arm and driven transplanting arm were 300 mm and 305 mm, respectively. The length of connection rod having greater affect on transplanting performance was 95 mm with the locus height of 225 mm. The optimal matching combination was obtained when f/v was 200. The corresponding feasible planting frequency range increased proportionally with tractor velocity. There was good adaptability in the range between 240 mm and 375 mm transplanting spacing for transplanting mechanism. Results of high-speed camera test indicated that the actual moving track was consistent with the theoretical one. The results of field trials showed that qualified percentage of the depth and length of the hole were 90.7% and 84% with the coefficient of variation being 7.1% and 6.6%, respectively. It can meet the demand of transplanting process of the seedling. It will provide a reference for the adaptability of field operation.

Keywords rapeseed pot seedling transplanters; transplanting mechanism; parameters matching; trajectory analysis; ADAMS