

全自动温室钵苗移栽机设计与试验

胡建平 张晨迪 王留柱 韩绿化

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为提高钵苗移栽机自动化程度和工作效率,设计了一种可实现8爪整体间隔取苗、分散间隔投苗、可用于穴盘到穴盘或花盆间的高效全自动钵苗移栽设备。阐述了移栽机的结构原理与工作过程,基于整体间隔取苗、分散间隔投苗原理,对移栽机整体结构及取苗爪分散部件进行设计,并合理规划移栽策略;综合考虑移栽动平台运动规律及同步带变形对动平台定位精度的影响,在ADAMS中建立移栽动平台刚柔耦合仿真模型,分别选取动平台水平运动等加速等减速、三次多项式和五次多项式运动规律进行仿真分析,结果表明3种运动规律定位精度均大于99.7%,其中五次多项式运动规律下定位精度最高。在不同移栽频率下对移栽动平台的定位精度及整机作业性能进行了试验,试验结果表明:移栽动平台在行程内的运动误差在0.15~1.22 mm,在120株/min移栽频率下移栽合格率可达90.23%,且随着移栽频率降低,移栽合格率逐渐提高,整个移栽作业运动协调可靠,定位精度高,可实现整体间隔取苗、分散间隔投苗的高效作业要求。

关键词: 全自动移栽机; 分散间隔投苗; 刚柔耦合; 设计; 仿真; 试验

中图分类号: S223 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)S0-0149-06

Design and Experiment on Automatic Greenhouse Seedling Transplanting Machine

Hu Jianping Zhang Chendi Wang Liuzhu Han Lihua

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To improve the automation and efficiency of plug seedling transplanter, a full-row-alternate-pick-up and disperse-alternate-dropping automatic seedling transplanting machine was designed, which was applicable for transplanting from plug trays to plug trays or to flowerpots with high location accuracy. The working process and principle of transplanting machine were introduced. The optimal transplanting strategy was selected and mechanism structure of the whole machine and disperse component for end-effectors was designed based on the full-row-alternate-pick-up and disperse-alternate-dropping requirement. To improve location accuracy affected by motion of transplanting platform and synchronous belt flexible deformation, the rigid-flexible coupling model of transplanting platform was established and simulated in ADAMS under the transplanting horizontal motion of constant acceleration and deceleration, cubic polynomial and quintic polynomial. The results indicated that the location accuracies under three motions were all higher than 99.7% and the one with quintic polynomial was the highest. The location accuracy experiment of transplanting platform and the whole transplanting performance experiment were conducted under different transplanting efficiencies. The results showed that the designed mechanism was reliable with a success transplanting rate of 90.23% at speed of 120 seedlings/min and the location accuracy was 0.15~1.22 mm.

Key words: automatic transplanting machine; disperse-alternate-dropping seedling; rigid-flexible coupling; design; simulation; experiment

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-24

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目(BE2014373)、江苏省协同创新计划项目(NZXT02201402)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1033-5)和江苏高校优势学科建设工程项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介: 胡建平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究, E-mail: hujp@ujs.edu.cn

引言

设施农业育苗生产中,为满足钵苗对生长空间和养分不断增多的需求,需将其从高密度穴盘移植到低密度穴盘。而该项劳动密集型工作,现仍以手工作业为主,效率低且成本高,难以满足集约化育苗生产的需求^[1-4]。目前国外温室自动移栽机技术已较为成熟,但其结构复杂、价格昂贵、体积庞大,与我国现阶段设施农业生产模式的适应性较差^[5-8]。而国内对穴盘苗移栽机的研究大多处于研究和试验阶段,研制出的多为半自动式钵苗移栽机,自动化程度低,实用性不高,难以满足工厂化大规模生产的要求^[9-12]。

基于课题组前期研究和设施穴盘苗高速全自动移栽作业要求,本文设计一种集自动填土、打穴、定位输送、快速平稳栽植的高性能全自动移栽设备,以实现整体间隔取苗、分散间隔投苗、精确定位;对移栽策略进行规划;建立移栽动平台刚柔耦合仿真模型,在ADAMS中对其水平运动规律进行仿真分析,选取最佳运动规律;建立虚拟样机并制造实际样机进行试验,在不同运动加速度下检验移栽动平台定位精度,在不同作业频率下检验移栽机整机移栽合格率。

1 温室钵苗移栽机结构设计及工作原理

温室钵苗移栽机主要由上土机、填土装置、打穴装置、输送装置和移栽装置等几部分组成。其中,上土机采用2TS-260型全自动上土机,填土装置配有单独的输送系统,可与移栽机输送装置实现对接,填土装置下面装有轮子,可与主机实现分离;打穴装置安装在输送装置前端,其上装有红外对射传感器感知植苗盘是否到位;输送装置分两侧输送,一侧输送供苗盘,一侧输送植苗盘;移栽装置在整个流水线最末端,用以完成供苗盘至植苗盘的移栽作业。各部件间通过运动协调以实现自动填土、打穴、定位输送、整体间隔取苗、分散间隔投苗、苗盘连续进给等一系列工序,其总体结构如图1所示。

以黄瓜苗从育苗盘移栽到育苗盆为例,移栽作业时,将托盘花盆放置在填土装置输送架上,传感器检测到花盆后,填土装置输送系统带动花盆向前运动,填土装置传感器检测到位,其气缸推动落土板打开进行落土,动作结束后气缸带动落土板关闭,输送平台带动托盘至移栽机输送装置继续运动,打穴装置传感器检测到位,其气缸带动压头固定板快速下落打穴,而后输送装置继续动作,同时另一侧供苗盘开始输送,传感器检测供苗盘和花盆均到指定位置

后,移栽装置动作,电动机驱动取苗爪部件下移整体间隔取苗,而后电动机驱动动平台整体平移至花盆上方,同时分散部件对取苗爪分散间距至与花盆相匹配,平台下移对一侧两花盆移栽,而后平台上移后水平返回让位,同时花盆输送至后侧对应取苗爪位置,平台平移后下移植苗,如此往复实现分散间隔投苗。

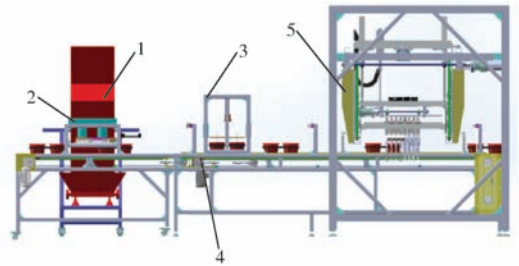


图1 温室钵苗移栽机整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of greenhouse pot seedling transplanting machine

1. 上土机 2. 填土装置 3. 打穴装置 4. 输送装置 5. 移栽装置

2 移栽装置设计及取苗、植苗策略规划

2.1 结构组成

移栽装置由移栽动平台和取苗爪分散机构两部分组成。其中,移栽动平台由水平方向同步带、水平直线导轨、水平伺服电动机、水平同步带传动轴、竖直伺服电动机、安装侧板、取苗爪分散部件和竖直方向直线导轨组成。竖直伺服电动机驱动取苗爪分散部件在竖直方向直线导轨上下移夹苗植苗,水平伺服电动机通过水平同步带传动轴带动水平方向同步带驱动取苗爪分散部件水平移动作业。机构间通过电动机时序控制实现彼此的运动协调,进而控制取苗爪及时准确的夹取和投放,其结构组成如图2所示。

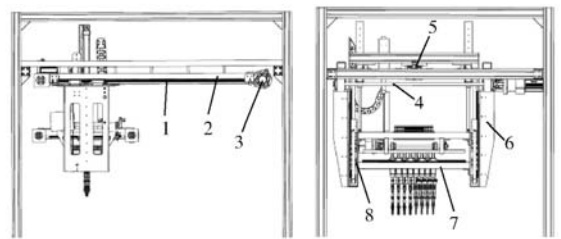


图2 移栽动平台结构图

Fig. 2 Structure diagram of transplanting platform

1. 水平方向同步带 2. 水平直线导轨 3. 水平伺服电动机
4. 水平同步带传动轴 5. 竖直伺服电动机 6. 安装侧板 7. 取苗爪分散部件 8. 竖直方向直线导轨

取苗爪分散部件主要由8个两指四针式取苗爪、分散板、同步带传动机构等组成,如图3所示。水平伺服电动机驱动同步带传动机构带动分散板沿X方向横移,取苗爪在分散板滑槽内沿Y方向分散,

以实现取苗爪间距调整。

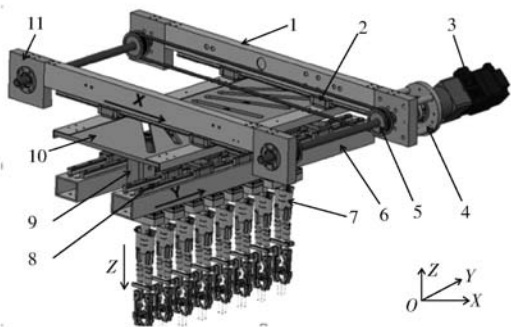


图3 取苗爪分散装置

Fig. 3 Dispersing device of seedling claw

- 1. 导轨支架 I 2. 导轨 I 3. 伺服电动机 4. 电机动架 5. 同步带传动机构 6. 导轨支架 II 7. 取苗爪 8. 导轨 II 9. 双轴气缸 10. 分散板 11. 轴架

分散板结构如图4所示,分散板上的滑槽以一定规律的倾斜角度对称分布,每个滑槽的中心线A'A、B'B、C'C、D'D延长后汇聚一点O,滑槽相对轴线OO'对称分布,等间隔展开或合拢取苗爪时,对称轴线OO'与各滑槽中心线的夹角满足: $\tan\alpha_1 : \tan\alpha_2 : \tan\alpha_3 : \tan\alpha_4 = 1 : 3 : 5 : 7$ 。

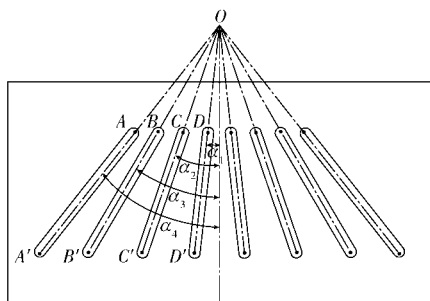


图4 分散板结构图

Fig. 4 Structure diagram of dispersing plate

2.2 整体间隔取苗、分散间隔植苗策略规划

从移栽方式看,8个取苗爪安装方向与穴盘进给方向相同,8个取苗爪同时取苗,选择按列移栽。以从128孔穴盘到4孔的托盘花盆移栽为例,规划移栽策略,以减小移栽动平台来回移动的距离。由于穴盘孔的中心距较小,而花盆的孔中心距较大,为了减少取苗爪间距的频繁调整,制定了整体间隔取苗、分散间隔植苗的策略,即取苗时相邻取苗爪间隔一颗钵苗夹取,植苗时取苗爪隔一个进行植苗。以供苗盘和植苗盘相邻的一侧作为各自内侧,相互远离的一侧作为各自外侧,从128孔穴盘到4孔托盘的移栽方案可分为^[13]:

方案1:取苗爪自供苗盘中按从内侧到外侧的顺序依次取苗,再到植苗盘中按第1个盘从内侧到外侧,第2个盘从外侧到内侧的顺序依次植苗,见图5a。

方案2:取苗爪自供苗盘中按从内侧到外侧的顺序依次取苗,再到植苗盘中按第1个盘从外侧到内

侧,第2个盘从内侧到外侧的顺序依次植苗,见图5b。

方案3:取苗爪自供苗盘中按从外侧到内侧的顺序依次取苗,再到植苗盘中按第1个盘从外侧到内侧,第2个盘从内侧到外侧的顺序依次植苗,见图5c。

方案4:取苗爪自供苗盘中按从外侧到内侧的顺序依次取苗,再到植苗盘中按第1个盘从内侧到外侧,第2个盘从外侧到内侧的顺序依次植苗,见图5d。

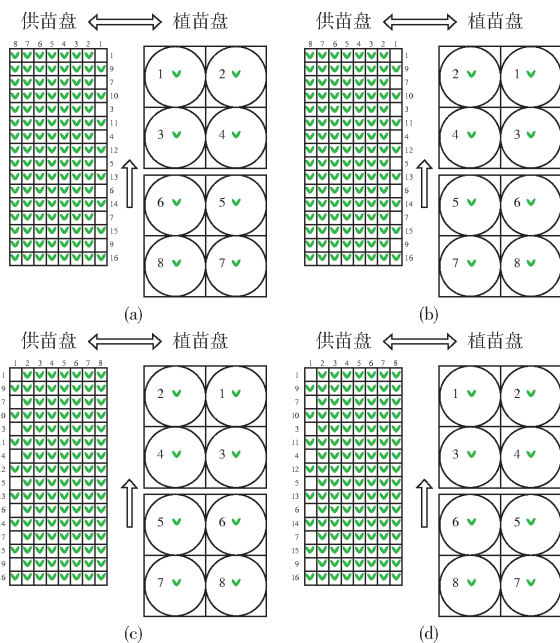


图5 不同移栽方案

Fig. 5 Different transplanting schemes

比较4种移栽方案水平方向总位移,对4种方案分别进行8个移栽循环作业,统计单次移栽结束后取苗爪在水平方向的总行程S,其结果如图6所示。可以得出,方案1和4水平总行程相同,方案2和3水平总行程相同。为了减小移栽动平台的水平行程,提高移栽效率,优先选用水平总行程较少的方案1和4,同时为避免取苗爪因停留时气压下降而下移磕碰,在移栽作业完成后动平台应回到供苗盘

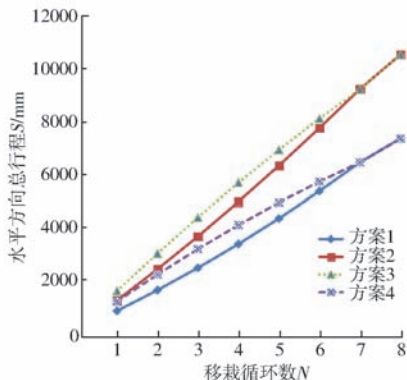


图6 不同移栽方案水平方向总行程

Fig. 6 Total horizontal displacement of different transplanting schemes

外侧的零点,因此以供苗盘外侧第1列作为移栽起始点,故综合考虑方案4为最佳策略。

3 移栽动平台刚柔耦合仿真分析

由于取苗爪夹苗时定位精度要求较高,同步带柔性体变形对其影响较大,基于 ADAMS 软件对移栽动平台进行动力学刚柔耦合仿真,分析不同运动规律下取苗爪定位精度。将在 SolidWorks 中简化的移栽平台三维模型导入到 ADAMS 中,添加相应约束,得到移栽平台刚性体模型;同步带传动轴水平运动中会受到较大的力,考虑建模准确性,使用 Flex 柔性体模块对同步带传动轴柔性化建模,使用 ADAMS/Machinery 模块创建同步带柔性体模型。刚柔耦合仿真模型如图 7 所示。

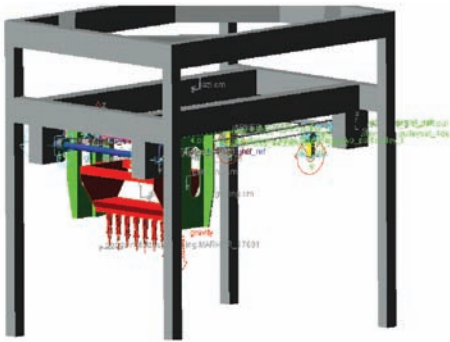


图7 移栽动平台刚柔耦合仿真模型

Fig.7 Rigid-flexible coupling simulation model of transplanting moving platform

对移栽动平台水平运动分别加以等加速等减速、三次多项式和五次多项式运动规律,在 ADAMS 中分别使用 IF 条件函数、三次多项式逼近阶跃 STEP 函数、五次多项式逼近阶跃 STEP5^[14] 函数作为水平运动的驱动函数,对取苗爪运动轨迹进行仿真分析。同时考虑取苗爪竖直取苗和植苗动作,以形成整个门形运动轨迹。同步带带轮节圆直径 $d_0 = 84.89 \text{ mm}$,理论上移动平台移动位移为 1 m ,同步带传动轴转过角度为 1349.88° ,以 900 个作业循环/h 计,每个作业循环为 4 s ,设置单向水平运动时间为 0.8 s ,竖直运动时间 0.4 s ,取苗和植苗时间停顿 0.1 s 。取苗爪运动轨迹如图 8 所示。

从 ADAMS 后处理模块中分别调用仿真结果,以取苗爪针顶点为标记点,生成移栽动平台的水平位移、速度和加速度曲线,如图 9~11 所示。且由曲线探测器可得,理论水平位移为 1 m 时,等加速等减速运动规律水平位移仿真结果为 997.63 mm ,三次多项式运动规律仿真结果为 997.21 mm ,五次多项式运动规律仿真结果为 997.98 mm 。由结果可以看出,3 种运动规律定位精度均大于 99.7% ,且三者相差不大。

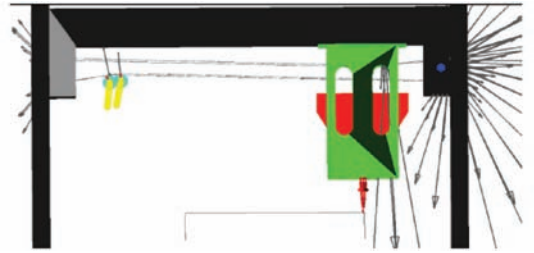


图8 取苗爪运动轨迹

Fig.8 Movement track of seedling claw

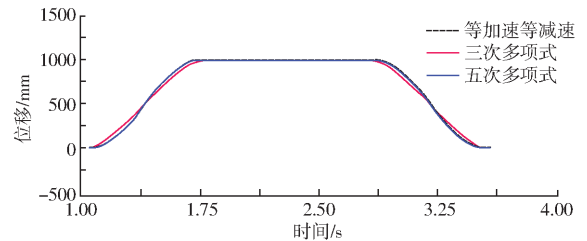


图9 移栽动平台水平位移曲线

Fig.9 Horizontal displacement curves of transplanting moving platform

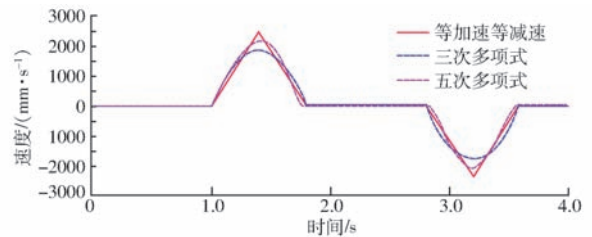


图10 移栽动平台水平速度曲线

Fig.10 Horizontal velocity curves of transplanting moving platform

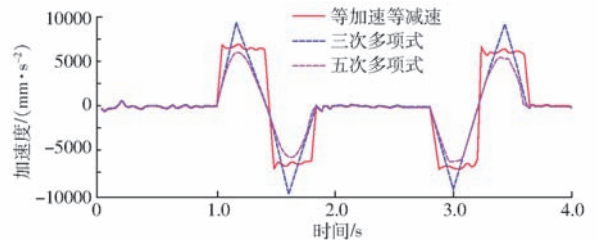


图11 移栽动平台水平加速度曲线

Fig.11 Horizontal acceleration curves of transplanting moving platform

4 试验与分析

4.1 移栽平台定位精度试验

4.1.1 定位精度试验方案

为评估移栽动平台的定位精度是否满足移栽机作业要求,对移栽动平台进行定位精度试验。采用 35A16 型三向加速度传感器和 DH5902 型动态数据采集仪采集移栽平台在不同脉冲频率下的水平加速度,采用由 KTC-1200 型拉杆式直线位移传感器、BZ2204A 型插头式变送模块和 BZ7201 型数据采集仪组成的直线位移测量系统,对移栽动平台在不同

脉冲频率下的水平定位精度进行测量。搭建的加速度测试系统和位移测试系统如图 12、图 13 所示。



图 12 加速度测试系统

Fig. 12 Acceleration test system

1. 三向加速度传感器 2. 动态数据采集仪



图 13 移栽动平台定位精度测量

Fig. 13 Positioning accuracy measurement of transplanting moving platform

1. 拉杆式位移传感器 2. 数据采集分析系统

由仿真结果得知,3 种运动规律下定位精度相差不大,基于控制简便性考虑,本试验采用伺服电动机自身的等加速等减速运动规律,通过改变伺服驱动器的加减速时间和脉冲频率,考察在不同加速度下移栽动平台的定位精度是否满足要求。设定加减速时间为 200 ms,脉冲频率分别为 10 000、15 000、20 000、25 000、30 000、35 000、40 000、45 000、50 000、55 000、60 000、65 000、70 000 Hz,每个脉冲频率下移栽动平台水平运动 3 个循环,分别测定 3 个循环中的水平运动加速度和定位误差,然后取平均值。

4.1.2 定位精度试验结果与分析

从图 14 中看出,随着驱动脉冲频率增加,运动加速度不断增加,移栽动平台定位误差呈现上升趋势,在脉冲频率超过 50 000 Hz 后,移栽动平台定位误差上升迅速。将误差转换为脉冲数进行补偿,对移栽动平台定位误差行修正。再按照脉冲频率 50 000 Hz,移动位移分别为 100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000 mm 进行定位误差测量,结果如图 15 所示。

从图 15 可以看出,移栽动平台在其行程内,定位误差在 0.15 ~ 1.22 mm 之间,而本移栽机的设计定位误差要求控制在 ± 2 mm 范围内,因此满足移栽定位精度要求。

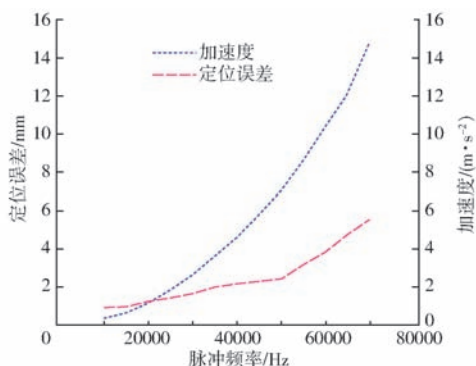


图 14 加速度和定位误差随脉冲频率变化曲线

Fig. 14 Variations of acceleration and position error with pulse frequency

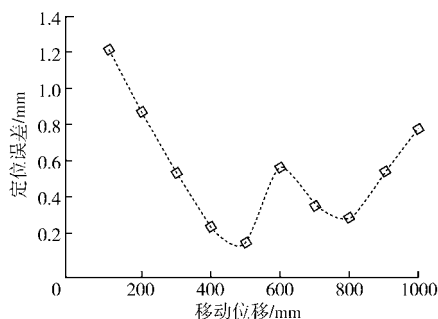


图 15 定位误差随位移变化曲线

Fig. 15 Changing curve of position accuracy with displacement

4.2 温室钵苗移栽机移栽性能试验

4.2.1 移栽性能评价指标

试验中以整机移栽合格率 η 为评价指标,则

$$\eta = \frac{N - a - b - c}{N} \times 100\%$$

式中 a ——移栽完成后未取出的钵苗个数

b ——带苗和钵体破碎个数

c ——钵苗茎秆与地面夹角 $\alpha \leq 45^\circ$ 的倒伏钵苗数量

N ——移栽总株数^[15]

4.2.2 移栽性能试验方案

以育苗周期为 15 d 的 128 穴孔津优 1 号黄瓜苗为试验对象,并用游标卡尺测量苗钵高度,用红外水分测定仪测定苗钵含水率;将移栽机设定为 240、480、600、900 个工作循环/h,对应的移栽频率为 32、64、80、120 株/min,按照移栽方案 4 完成从 128 孔穴盘到 4 孔托盘花盆的移栽,统计不同移栽频率下的移栽合格率。

4.2.3 移栽性能试验结果与分析

从试验结果可知,对于育苗周期 15 d、含水率 50% ~ 60%、平均钵苗高度 116 mm、两子叶一心叶、盘根状况良好的黄瓜苗,随着移栽频率增加,移栽合格率逐渐下降,最高 120 株/min 下移栽合格率维持在 90.23%,可见温室钵苗移栽机整机结构设计合

理,移栽动平台定位精度满足要求,达到自动化钵苗移栽作业要求。

表1 移栽试验数据

Tab.1 Experimental data of transplanting

移栽 频率/ (株·min ⁻¹)	试验 株数 N	平均 高度/ mm	含水 率/ %	未取 出株 数 a	带苗和 钵体破 碎株 数 b	植苗 倒伏 株数 c	移栽 合格 率/ %
32	128 × 2	116.3	50 ~ 60	2	1	1	98.05
64	128 × 2	115.1	50 ~ 60	4	3	1	96.88
80	128 × 2	116.6	50 ~ 60	7	5	3	94.14
120	128 × 2	116.1	50 ~ 60	11	9	5	90.23

5 结论

(1)设计了一种可实现8爪整体间隔取苗、分散间隔投苗的高效全自动钵苗移栽设备,设计了取苗爪分散部件,基于穴盘相邻穴间距及花盆间距,合理设计滑槽式分散板结构尺寸。

(2)对移栽策略进行优选,提出整体间隔取苗、分散间隔植苗策略,减少动平台移动行程,提高整机作业性能。

(3)综合考虑移栽动平台运动规律及同步带变形对动平台定位精度的影响,建立移栽动平台刚柔耦合模型,对移栽动平台水平运动分别以等加速等减速、三次多项式和五次多项式运动规律驱动,得出其水平位移、速度和加速度曲线,对比得出3种运动规律下定位精度相差不大,均高于99.7%,其中五次多项式运动规律下定位精度最高。

(4)对钵苗移栽机进行定位精度和移栽性能试验,以不同水平加速度及位移测定其定位误差,结果表明移栽动平台定位误差在0.15 ~ 1.22 mm之间,满足移栽定位精度要求;以移栽合格率为评价指标,分别在32、64、80、120株/min移栽频率下测定其移栽合格率,最高可达98.05%。经试验验证,整机作业性能良好,满足全自动钵苗移栽机设计要求。

参 考 文 献

- 张振国,曹卫彬,王侨,等.穴盘苗自动移栽机的发展现状[J].农机化研究,2013(5):237-241.
ZHANG Z G, CAO W B, WANG Q, et al. Development status and prospect of plug seedlings automatic transplanting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(5):237-241. (in Chinese)
- 于红松,张铁中,杨丽.穴盘苗自动移栽机研究现状与发展前景[J].农业机械,2008(20):44-45.
- PARISH R L. Current developments in seeders and transplanters for vegetable crops [J]. Horttechnology, 2005, 15(2):346-351.
- KUMAR G V, PRASANNA, RAHEMAN H. Vegetable transplanters for use in developing countries—a review [J]. International Journal of Vegetable Science, 2008, 14(3):232-255.
- TIAN S B, QIU L C. Design on plug seedling automatic transplanter in greenhouse [J]. Advanced Materials Research, 2011, 317-319:586-589.
- 齐飞,周新群,张跃峰,等.世界现代化温室装备技术发展及对中国的启示[J].农业工程学报,2008,24(10):279-285.
QI F, ZHOU X Q, ZHANG Y F, et al. Development of world greenhouse equipment and technology and some implications to China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10):279-285. (in Chinese)
- 辜松,杨艳丽,张跃峰,等.荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J].农业工程学报,2013,29(14):185-194.
GU S, YANG Y L, ZHANG Y F, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):185-194. (in Chinese)
- CHOI W C, KIM D C, RYU H L, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):13-19.
- 范云翔,杨子万, ADEKOLA K A, 等.温室全自动移栽机的研究开发[J].农业工程学报,1996,12(2):111-115.
FAN Y X, YANG Z W, ADEKOLA K A, et al. Development of automatic transplanter in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2):111-115. (in Chinese)
- 慕春晖.平动二自由度钵苗移栽机器人机构设计及运动学仿真[D].镇江:江苏大学,2012.
QI C H. Mechanism design and dynamic simulation of a translational 2-DOF bowl seeding transplanting robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- QI C H, HU J P, MA J, et al. Solving motion law by numerical simulation on bowl seeding transplanting robot [C] // LI D, CHEN Y. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Proceedings of 5th International Conference on Computer and Computing Technology in Agriculture, 2012:103-111.
- 冯青春,王秀,姜凯,等.花卉幼苗自动移栽机关键部件设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(6):21-27.
FENG Q C, WANG X, JIANG K, et al. Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6):21-27. (in Chinese)
- 严宵月.并联移栽机器人运动控制系统设计与研究[D].镇江:江苏大学,2014.
YAN X Y. Design and research on the motion control system of a parallel transplanting robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- 钟小勇,李凤英. ADAMS 函数的使用技巧[J].装备制造技术,2008(11):100-102.
ZHONG X Y, LI F Y. Usage skills of several ADAMS functions [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(11):100-102. (in Chinese)
- 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 J L. Theoretical analysis and experimental study on vegetable transplanter [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2006. (in Chinese)