

一款园林全自动移栽装置的设计与优化

李 帅^{1,2}, 陈丽娜³

(1. 启明大学, 韩国 大邱 427-724; 2. 广东碧桂园职业学院, 广东 清远 511510; 3. 南方科技大学, 广东 深圳 518055)

摘 要: 传统移栽机的分苗装置多数为旋转托杯式, 动力消耗大、成本高, 且在使用时容易出现挂苗现象。为此, 在旋转托杯式分苗装置的基础上, 对高精度全自动移栽装置进行设计与优化, 旨在更好地实现瞬态分苗与接苗, 提升作业效率, 降低挂苗率。试验结果表明: 当分苗装置的移动脉冲频率为 25kHz 时, 直线运动的实际误差为 0.2~0.8mm, 符合作业要求; 当自动分苗装置的分苗频率为 45 株/(行·min), 分苗株数为 90 株/min, 移动速度为 199~397mm/s, 分苗成功率为 99.68%; 当自动分苗装置的分苗频率为 65 株/(行·min) 时, 分苗株数为 130 株/min, 机具的实际移动速度为 363~726mm/s, 未成功接收到的秧苗株数为 3 株, 未成功落入栽植器中的秧苗株数为 2 株, 分苗成功率为 96.16%; 当自动分苗装置的分苗频率为 70 株/(行·min), 分苗株数为 140 株/min, 移动速度为 410~819mm/s, 分苗成功率为 95.04%。

关键词: 移栽装置; 分苗装置; 高精度; 全自动

中图分类号: S223.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2021)03-0169-06

0 引言

蔬菜种植在我国整体种植领域中所占比重较大, 种植面积占我国种植总面积的 1/4, 尤其是新兴的移栽种植, 更是为国家今后农业自动化发展指明了方向。分苗装置作为全自动移栽机具的重要组成部分, 在自动移栽过程中起到承上启下的作用, 其自身栽植速度与取苗速度会直接影响到自动移栽机的作业效率与作业质量。

国外针对自动分苗装置的研究较早, 日本设计的半自动移栽机 PVHR2-E18, 充分利用苗杯输送链技术, 由传动链轮带动链条进行作业, 将钵苗移动至栽植位置上方, 随后将苗落下。意大利研究设计的 FU-TURA 型自动移栽机, 能够有效结合自动落苗装置与曲柄滑块装置, 使机具自动栽植质量得到提升。

国内针对蔬菜自动移栽机具的研究起步较晚, 目前多处于理论研究阶段, 且设计的自动移栽机具并没

有在蔬菜种植行业中得到普及应用。李梦西等人研究设计了一款藜蒿扦插机, 通过定滚筒装置能够实现秧苗在苗箱内自动有序排列, 为后续自动移栽环节提供了前提保障。专家学者曾提出油菜自动移栽分苗装置, 设计了一款双圆盘分苗装置, 通过左右对称的圆盘使整个装置在输送链条的带动下作业, 可以实现四行钵苗同时分离。我国当前的分苗装置种类繁多, 但相关育苗技术没能达到统一标准, 导致不同地区的钵苗体积存在差异。自动分苗装置主要分为两种作业形式, 即输送链条式与圆形转杯式: 后者只适合单行作业, 体积大且效率低; 前者采用槽轮装置进行间歇式作业, 虽能同时进行多行分苗作业, 但传动系统复杂、分苗效率低, 极易出现挂苗现象。为此, 笔者对传统分苗装置进行改良优化, 对其整体结构与动力系统进行重新设计, 从而使其能够带动苗杯实现多种送苗作业, 提升瞬态分苗与接苗的成功率, 为自动移栽机整体作业效率提供了参考。

1 总体设计

自动分苗装置在自动化移栽机作业过程中起到承上启下的作用, 位于栽植装置与取苗装置之间, 主要负责接苗、送苗与落苗工作, 如图 1 所示。

栽植作业时, 取苗机构将秧苗从穴盘中取出, 将其运送到分苗装置位置, 由分苗装置对秧苗进行接取, 最后将秧苗运送至栽植装置中进行自动化栽植。

收稿日期: 2019-09-05

基金项目: 广东省教育厅“十三五”科学研究规划项目(KHJJ20180941 HK); 2018 广东大学生科技创新培育专项资金立项项目(GZKJ139024); 广东碧桂园职业学院院级优秀青年教师培养计划资助项目(2017QN01); 广东碧桂园职业学院院级质量工程项目《园林规划设计》精品资源共享课程负责人项目(2018zlgckc01)

作者简介: 李 帅(1984-), 男, 辽宁人, 博士, (E-mail) sunhou886@163.com。

当自动移栽机进行两行移栽作业时,两侧的栽植装置距离为 500mm,每个苗杯中心的距离为 250mm,同时要根据实际作业情况对苗杯之间的距离进行调整,具体采用定点落苗方法与定点接苗方法。分苗装置主要由落苗装置、移动装置及复数苗杯等组成,如图 2 所示。

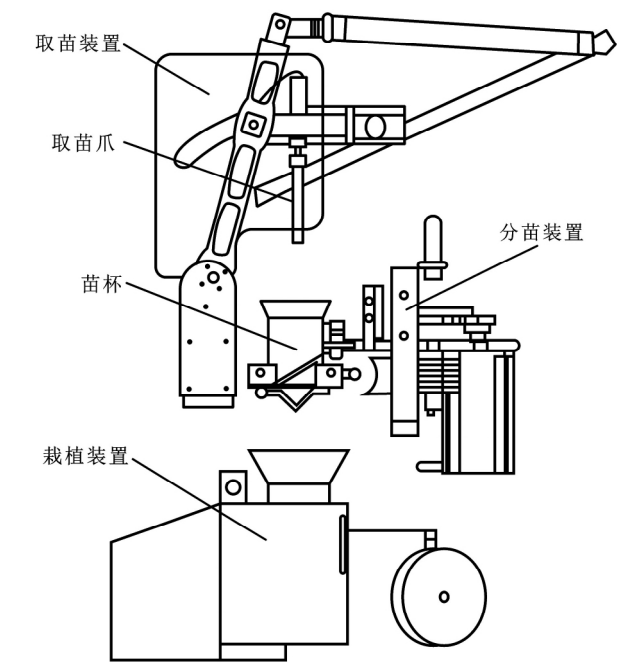


图 1 自动分苗装置位置图

Fig.1 Position diagram of automatic seedling dividing device

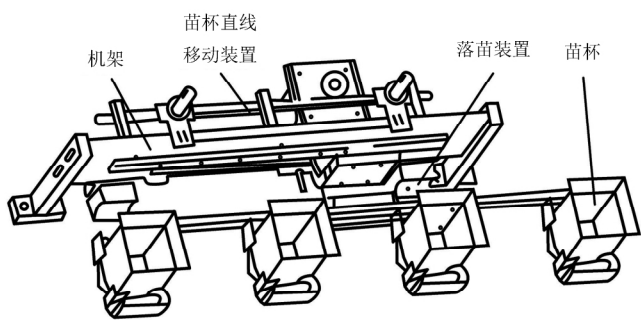


图 2 自动分苗装置整体结构

Fig.2 Overall structure of automatic seedling dividing device

自动分苗装置作业时,由苗杯对取苗装置所运送的秧苗进行接收,随后苗在传送滑道上做直线运动;当行至指定位置时,落苗装置触发开关将一号与三号秧苗落入栽植器中;然后,随着电机翻转,将二号与四号秧苗输送至指定位置,将秧苗落入栽植器中;最后,所有分苗装置返回初始位置,重新进行新一轮接苗分苗作业。

自动分苗装置在不同栽植频率中的作业时间也存在差异,设计的自动分苗装置为两行移栽,配 4 个苗杯进行作业。该装置在不同作业频率下所需时间如

表 1 所示。

表 1 自动分苗装置周期时间表

Table 1 Cycle schedule of automatic seedling dividing device

栽植频率 /株·(行·min) ⁻¹	栽植行数	作业苗杯	单周期 /s	循环周期 /次·min ⁻¹
45	2	4	2.67	22.5
50	2	4	2.41	25.0
55	2	4	2.19	27.5
60	2	4	2.01	30.0
65	2	4	1.85	35.5
70	2	4	1.71	35.0

由表 1 可知:当自动分苗装置的作业频率为 70 株/(行·min)时,也就是每分钟栽植 140 株秧苗,其相对循环单周期为 1.71s。

2 主要结构及参数设计

2.1 直线移动装置设计

直线移动装置由直线运行导轨、机架、齿轮、滑块、齿条,以及各类连接板等组成,如图 3 所示。

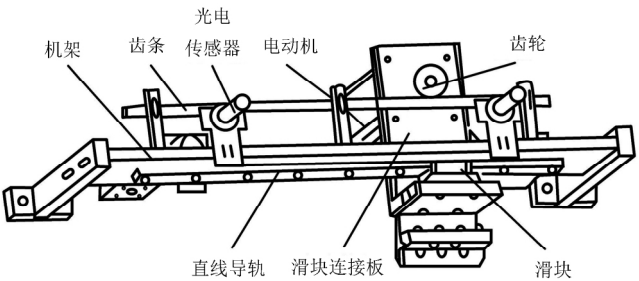


图 3 直线移动装置整体结构

Fig.3 Overall structure of linear moving device

装置的电动机与滑块及各类连接板相连,将滑块固定在滑块连接板上,从而使滑块能沿轨道进行直线移动。工作时,由电机带动驱动齿轮为齿条提供转动动力,驱动齿轮在齿条上移动,使滑块连接板能够进行直线往复移动,为苗杯直线作业提供动力。

齿轮参数具体为:齿数 40,直径 40mm,齿牙之间的转动角为 9°。其综合变形公式为

$$\varepsilon_n = r\alpha - l - Z_n$$

其中 r 为齿轮半径; Z_n 为齿轮廓误差值; α 为齿轮转动角度; l 为实际位移距离; n 为齿轮与齿条的对比值。

因此,齿轮齿条的横向啮合力为

$$F = \sum_{n=1}^i F_n = \sum_{n=1}^i (k_n \varepsilon_n + h_n \dot{\varepsilon}_n) =$$
$$\sum_{n=1}^i [k_n(r\alpha - l - Z_n) + h_n(r\dot{\alpha} - \dot{l} - \dot{Z}_n)]$$

齿轮齿条的力矩平衡形式为

$$\begin{cases} J\ddot{\alpha} = M - rF \\ m\ddot{l} = -N + F\cos\theta \end{cases}$$

其中 θ 为啮合角 ($^{\circ}$) ,取 $\theta=20^{\circ}$; m 为齿条质量 (kg) ,取 $m=0.386\text{kg}$; J 为齿轮转动惯量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) 。
将上述公式进行合并得

$$\begin{cases} J\ddot{\alpha} + r\sum_n [k_n(r\alpha - l - Z_n) + h_n(r\dot{\alpha} - \dot{l} - \dot{Z}_n)] = M \\ m\ddot{l} - \cos\theta\sum_n [k_n(r\alpha - l - Z_n) + h_n(r\dot{\alpha} - \dot{l} - \dot{Z}_n)] = -N \end{cases}$$

根据上述公式可知: 当外部驱动系统较为稳定时,装置的综合刚度 k 的周期随着时间而变化,从而使齿轮齿条产生周期性变化。将实际作业模型导入 ADAMS 程序中进行力学分析,当分苗作业频率为 70 株/(行 $\cdot$ min) 时,相对循环单周期为 1.71s,去除苗杯与接苗装置的交接时间 0.6s,即齿轮完成运行周期的所需时间为 1.21s,可计算出齿轮齿条的受力峰值为 17N,均值约为 10N,满足齿轮齿条作业要求。

2.2 落苗装置设计

针对落苗装置进行设计时,要注意区分传统的旋转苗杯式作业方式,即需要在相关位置设置缺口,以使苗杯输送至指定位置时,完成落苗作业。针对此环节研究设计了全新落苗方式,即定点可控落苗,通过对苗杯的输送轨迹进行实时控制,当苗杯达到栽植上方时,通过控制将苗杯转移到栽植器中,实现苗杯瞬态转移,这样无需提前计算输送距离,还能提升栽植精准度。落苗装置的作业简图如图 4 所示。

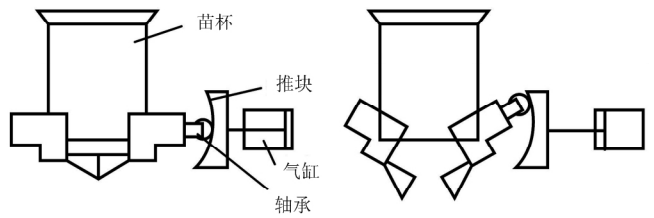


图 4 落苗装置作业简图
Fig.4 Operation diagram of seedling drop device

为提升苗杯装置的控制精度及作业效率,需要精准掌握落苗前的作业轨迹,从而使装置能够准确停止在栽植器上方。虽然苗杯开合作业的负载不大,但对推杆的运行速度却要求较高,所以选定气缸作为该装

置的运行原件,通过气缸有效推动苗杯落苗。落苗装置如图 5 所示。

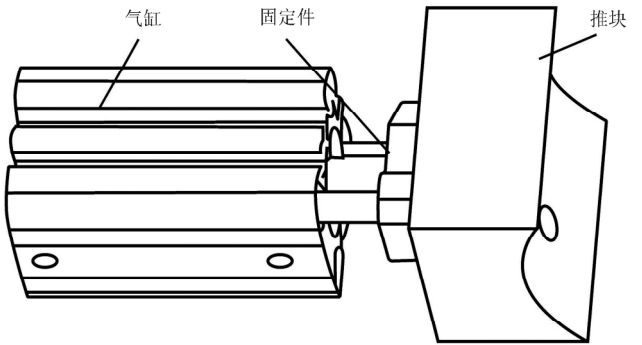


图 5 落苗装置结构图
Fig.5 Structure diagram of seedling drop device

2.3 苗杯设计

苗杯作为分苗作业过程中的秧苗载体,通常为圆筒形式,随着各类秧苗的生长需求与种植要求不断增加,近些年逐渐出现了方形苗杯,使整体布局能够更加紧凑,提升作业效率。方形苗杯的缺点是杯口较小,容易在作业过程中出现挂苗现象,为了解决这个问题,对分苗装置的苗杯进行优化设计,其整体结构如图 6 所示。

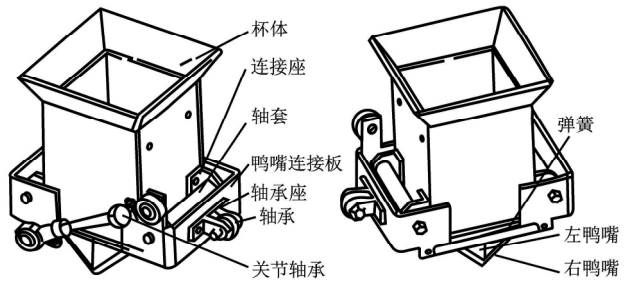


图 6 新型苗杯结构
Fig.6 New seedling cup structure

新型苗杯的长度和宽度均为 80mm,符合多数作物的钵苗尺寸。苗杯上部加设导苗口,能够有效提升作业效率;杯部底端的鸭嘴围绕螺杆转动,并在之间安装了关节轴承与弹簧,使二者保持一定距离。当没有外力加载时处于闭合状态,轴承会沿着曲面进行运动,苗杯下端鸭嘴张开时,将秧苗落入栽植器中。

2.4 控制系统设计

分苗装置控制系统主要采用 PLC 作为控制组件,主要功能为检测元件、控制系统,以及驱动各元件运动。PLC 运行结构如图 7 所示。

将 PLC 控制器作为自动分苗装置的核心元件,针对作业环境实际情况进行整合分析,发布精准作业命令,有效完成落苗作业,其操作流程如图 8 所示。

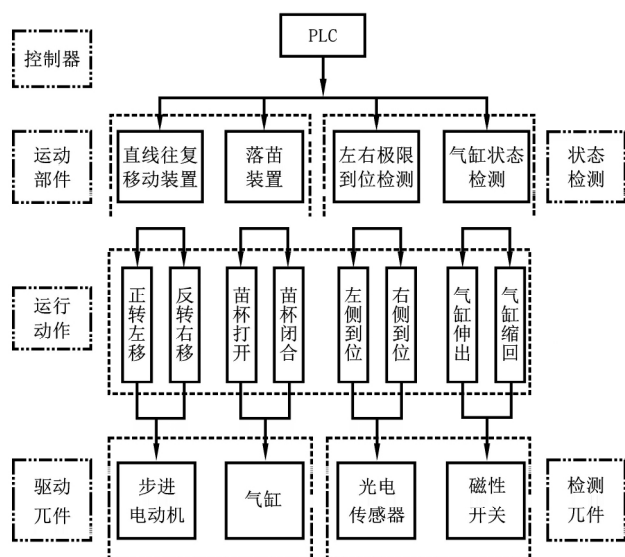


图 7 PLC 运行结构图

Fig.7 PLC running structure diagram

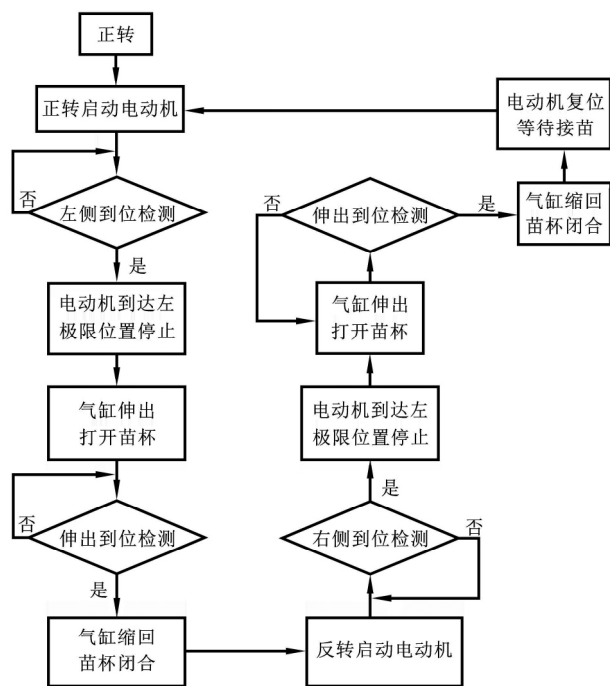


图 8 自动分苗装置作业流程图

Fig.8 Flow chart of automatic seedling dividing device

3 试验

3.1 自动落苗装置移动误差测试

为确保机具的移动定位精准性符合作业要求,试验环节将对机具的直线移动装置的定位精度进行测定。装置中,电动机内部步距角为 1.8° ,将电动机的细分倍数设为40,即每个脉冲电机的转动角度为 0.045° 。对装置的定位精度进行测定时要参照实际行进距离,可计算出运动230mm距离的所需理论脉冲值为14332;对电动机的加速时间与减速时间进行调整,

从而得出实际脉冲频率,实现对不同速度下的苗杯运动的精准测量,并对其定位精度的准确性作出判定。

试验结果具体如表 2 所示。由表 2 可知: 当电动机的转动速度不断增加时, 相对脉冲频率也会受到大幅度影响, 当电动机的转动速度越来越慢时, 在 0.3s 的加速时间中, 会增加电动机转动速度及脉冲频率; 当苗杯进行直线运动作业时, 苗杯定位误差也会随着电动机的速度增加而逐渐增多。为对苗杯直线运动时的定位误差进行修正, 拟采取定位误差转变为提升电动机转动脉冲数值的方式。

表2 自动分苗装置移动定位精度测试结果

Table 2 Test results of moving positioning accuracy of automatic seedling dividing device

电机脉冲频率	加速度	实际运动时间	实际位移	定位误差
/Hz	/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	/s	/mm	/mm
2500	0.05	6.79	224.89	0.13
5000	0.09	3.46	224.60	0.32
10 000	0.15	2.32	224.13	0.56
12 500	0.23	1.70	223.79	0.80
15 000	0.32	1.35	223.54	1.04
17 500	0.44	1.08	223.13	1.32
20 000	0.58	0.88	222.77	1.99
22 500	1.12	0.77	222.46	2.42
25 000	1.52	0.70	222.22	2.90

当电动机脉冲频率为最高值 25kHz 时,自动分苗装置的定位误差为 2.90mm; 将实际脉冲数值增加 126Hz、实际运动位移为 225mm 时,装置所需的脉冲数值为 14 458Hz。针对脉冲数值 14 458Hz 进行试验,得出苗杯直线运动时的定位误差为 0.36mm,满足自动分苗装置的作业精度要求;再次将脉冲数值 14 458Hz 的相关数据与苗杯的直线运动定位进行综合,能够得出苗杯移动位移数值为 50、70、125、150、175、200mm。定位误差变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知: 当苗杯的移动脉冲频率为 25kHz 时, 在直线运动时的实际误差为 0.2~0.8mm; 当苗杯的移动脉冲频率分别为 2500、5000、7500、10 000、12 500、15 000、17 500、20 000、22 500Hz 时, 如对机具的脉冲数值进行适当调整, 则可有效降低苗杯直线运动时的误差值, 从而提升自动分苗装置的作业精度。

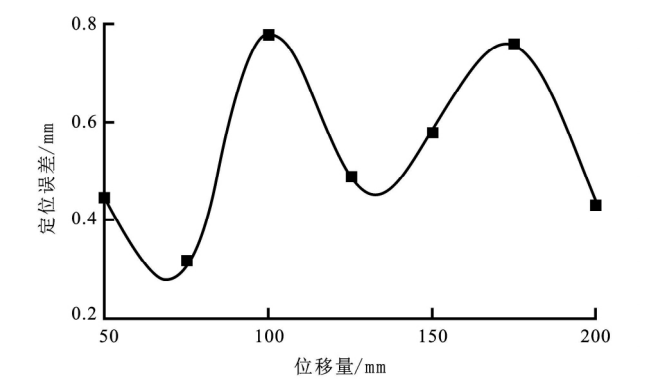


图 9 自动分苗装置移动误差变化曲线图

Fig.9 Curve of movement error of automatic seedling dividing device

3.2 自动分苗装置成功率测试

自动分苗装置样机制作完毕后 ,进行性能测试 ,评价指标为其分苗成功率。

自动分苗装置的分苗成功率计算公式为

$$\eta = \frac{L - a - b}{L}$$

其中 , η 为分苗成功率; L 为试验总秧苗株数; a 为没能成功接住的秧苗株数; b 为没有成功落在栽植器中的秧苗株数。

针对不同循环形式进行分别测试 ,对分苗成功率进行整合分析 ,结果如表 3 所示。

表 3 自动分苗装置分苗成功率测试结果

Table 3 Test results of seedling success rate of automatic seedling dividing device

分苗频率 /(株·行) ⁻¹ min ⁻¹	分苗株数 /株·min ⁻¹	实际移动速度 /mm·s ⁻¹	未接到的秧苗株数 /株	未落下的秧苗株数 /株	分苗成功率 /%
45	90	199~397	0	1	99.68
50	100	237~473	0	1	99.68
55	110	281~561	1	1	98.36
60	120	322~643	2	1	97.51
65	130	363~726	3	2	96.16
70	140	410~819	3	3	95.04

由表 3 可知: 当自动分苗装置的分苗频率为 45 株/(行·min) 时 ,分苗株数为 90 株/min ,机具移动速度为 199~397mm/s ,未成功接收到秧苗株数为 0 ,未成功落入栽植器中秧苗株数为 1 株 ,分苗成功率为 99.68%; 当自动分苗装置的分苗频率为 50 株/(行·min) 时 ,分苗株数为 100 株/min ,机具移动速度为 237~473mm/s ,未成功接收到的秧苗株数为 0 ,未成功落入栽植器中秧苗株数为 1 株 ,分苗成功率为 99.68%; 当自动分苗装置分苗频率为 60 株/(行·min) 时 ,分苗株数为 120 株/min ,机具移动速度为 322~643mm/s ,未成功接收到的秧苗株数为 2 株 ,未成功落入栽植器中的秧苗株数为 1 株 ,分苗成功率为 97.51%; 当自动分苗装置的分苗频率为 65 株/(行·min) 时 ,分苗株数为 130 株/min ,机具移动速度为 363~726mm/s ,未成功接收到的秧苗株数为 3 株 ,未成功落入栽植器中的秧苗株数为 2 株 ,分苗成功率为 96.16%; 当自动分苗装置的分苗频率为 70 株/(行·min) 时 ,分苗株数为 140 株/min ,机具移动速度为 410~819mm/s ,未成功接收到的秧苗株数为 3 株 ,未成功落入栽植器中的秧苗株数为 3 株 ,分苗成功率为

95.04%。

4 结 论

针对全自动移栽装置 ,对其自动分苗装置进行重新设计 ,从而有效控制分苗成功率 ,减少挂苗现象 ,直接提升全自动移栽机的实际应用价值。试验结果表明: 自动分苗装置设计合理 ,能够满足自动化移栽机的作业要求 ,可有效实现高质量、高效率分苗作业。

参考文献:

[1] 燕亚民,冯朝印,张贵明. 2YZS 自走式烟草移栽机行走装置的设计[J].中国农机化学报,2013(6): 239~243.

[2] 薛党勤,侯书林,张佳喜.我国旱地移栽机械的研究进展与发展趋势[J].中国农机化学报,2013(5): 8~11.

[3] 何亚凯,贺智涛,姬江涛,等.膜上移栽机设计与运动参数分析[J].中国农机化学报,2015,36(3): 15~17.

[4] 赵匀,刘星,薛向磊,等.茄子钵苗全自动移栽机构优化设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(5): 159~167.

[5] 于磊,石铁,徐涛,等. 2ZYZ-2 型两行全自动玉米秧苗移栽机的研究[J].农业科技与装备,2015(8): 13~15.

[6] 陈大军,侯加林,施国英,等.国内旱地移栽机技术现状分析[J].中国农机化学报,2018,39(7): 98~102.

- [7] 吕志军,单伊尹,王杰.等.蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J].中国农机化学报,2017(11):34-38.
- [8] 魏新华,包盛,刘晓凯.等.穴盘苗全自动移栽机运动协调控制系统设计与移栽试验[J].农业机械学报,2016(12):1-7,52.
- [9] 宋玉洁,胡军,李文涛.等.基于纸质钵育移栽技术的玉米移栽机分苗机构的创新设计[J].农业装备与车辆工程,2016,54(7):77-80.
- [10] 石铁.全自动玉米秧苗移栽机的研制与试验[J].农业工程学报,2015,31(3):23-30.
- [11] 王蒙蒙,宋建农,刘彩玲.等.蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(14):49-57.
- [12] 陈大军,侯加林,施国英.等.国内旱地移栽机技术现状分析[J].中国农机化学报,2018,39(7):98-102.
- [13] 王保帅,杨永发,高延杰.等.摆杆式烟苗移栽挖穴机的设计与优化分析[J].中国农机化学报,2016(8):23-27.
- [14] 谭胡心,郑扬.自动化玉米移栽机送苗装置的研究[J].农机化研究,2017,39(7):252-255.
- [15] 杜晟,王卫兵,王吉奎.最小破膜条件下吊篮式移栽机结构参数研究[J].中国农机化学报,2016,37(1):5-8.

Design and Optimization of an Automatic Transplanting Device for Gardens

Li Shuai^{1,2}, Chen Lina³

(1. Qiming University, Taegu 427-724, Korea; 2. Guangdong Biguiyuan Vocational College, Qingyuan 511510, China; 3. South University of Science and Technology of China, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Most of the seedling-dividing devices of traditional transplanters are rotary cup-type, which have large power system, high cost and easy to hang seedlings in use. Therefore, this paper will study on the basis of rotating cup seedling-separating device, through the design and optimization of high-precision automatic transplanting device, can better achieve transient seedling-separating and seedling-grafting, improve operational efficiency and reduce seedling-hanging rate. The specific test results are as follows: when the moving pulse frequency of the seedling-seeding device is 25 000 Hz, the actual error of the device is 0.2-0.8mm in linear motion, which can meet the requirements of operation; when the seedling-seeding frequency of the automatic seedling-seeding device is 45 plants/min/row, the number of seedlings is 90 plants/min, and the actual moving speed of the machine is 199-397mm/s, and the success rate of seedling division is 99.68%. When the frequency of seedling division of the automatic seedling division device is 65 plants/min/row, the number of seedlings division is 130 plants/min, the actual moving speed of the machine is 363-726mm/s, and the unsuccessful received seedlings. The success rate of seedling division was 96.16%. When the frequency of seedling division of the automatic seedling division device was 70 plants/min/row, the number of seedlings was 140 plants/min, the actual moving speed of the device was 410-819mm/s, and the success rate of seedling division was 95.04%.

Key words: transplanting; device; seedling separation device; high precision; full automation