

梳齿往复式杭白菊采摘装置设计与试验

王荣炎^{1,2} 郑志安^{1,2} 鹿秀凤³ 崔宝聪^{1,2} 高磊^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学中国农业机械化发展研究中心, 北京 100083;
3. 山东理工职业学院, 济宁 272000)

摘要: 针对杭白菊采摘耗费人力、采摘效率低等问题,设计了一种小型实用的梳齿往复式杭白菊采摘装置。根据杭白菊的生长特性和采摘要求,利用 SolidWorks 软件进行采摘装置的结构建模,该采摘装置利用梳齿梳脱和辊刷清扫作用以及曲柄摇杆机构的急回特性实现杭白菊的采收作业。为了获得该装置的最佳工作参数,进行了田间试验。首先,通过单因素采摘试验,确定了梳齿往复频率、梳齿间距、梳齿工作深度为影响采摘效果的3个主要因素;然后,以梳齿往复频率、梳齿间距、梳齿工作深度为试验因素,以杭白菊采摘率、含杂率、破损率和落地损失率为评价指标,进行了正交试验,试验结果表明:在梳齿往复频率 40 r/min、梳齿间距 6.5 mm、梳齿工作深度 200 mm 的参数组合下,采摘效果最佳,此时,杭白菊的采摘率为 92.47%,含杂率为 11.07%,破损率为 1.48%,落地损失率为 1.41%。所设计的梳齿往复式杭白菊采摘装置获得了较好的采摘效果。

关键词: 杭白菊; 采摘; 梳齿; 往复式

中图分类号: S225.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)12-0073-07

Design and Test of Comb-teeth Reciprocating *Chrysanthemum morifolium* Picking Device

WANG Rongyan^{1,2} ZHENG Zhian^{1,2} LU Xiufeng³ CUI Baocong^{1,2} GAO Lei^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. China Research Center for Agricultural Mechanization Development, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Shandong Polytechnic College, Jining 272000, China)

Abstract: Aiming at the problems of manpower consumption and low picking efficiency of Hangzhou white chrysanthemum, a small and practical comb-tooth reciprocating device for Hangzhou white chrysanthemum picking was designed. According to the growth characteristics and picking abstracts of Hangzhou white chrysanthemum, the structure of the picking device was modeled by SolidWorks software, and the picking device was built. The device utilized comb stripping and rolling brushing cleaning functions of comb and the quick return characteristics of crank-rocker mechanism to achieve the harvesting of *Chrysanthemum morifolium*. The physical and mechanical properties of *Chrysanthemum morifolium* were tested. In order to obtain the optimum working parameters of the device, field tests were carried out. Firstly, through single factor picking test, three main factors affecting picking effect were determined, namely, comb reciprocating frequency, comb spacing and comb working depth. Then, with comb reciprocating frequency, comb spacing and comb working depth as experimental factors, the orthogonal test was carried out to evaluate the picking rate, impurity content, breakage rate and landing rate of *Chrysanthemum morifolium*. Under the combination of reciprocating frequency of comb as 40 r/min, distance of comb as 6.5 mm and working depth of comb as 200 mm, the picking effect was the best. At this time, the picking rate of *Chrysanthemum morifolium* was 92.47%, the impurity rate was 11.07%, the damage rate was 1.48%, and the landing rate was 1.41%. The comb reciprocating picking device of Hangzhou white chrysanthemum achieved good picking effect.

Key words: *Chrysanthemum morifolium*; picking; comb-teeth; reciprocating

收稿日期: 2019-04-28 修回日期: 2019-07-15

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-21)

作者简介: 王荣炎(1992—),女,博士生,主要从事中药材采收机械化技术研究,E-mail: 1606764744@qq.com

通信作者: 郑志安(1965—),男,副教授,博士生导师,主要从事中药材生产机械化工程研究,E-mail: zhengza@cau.edu.cn

0 引言

杭白菊种植模式分为条栽和丛栽,采摘期为10月下旬至11月下旬。杭白菊顶层花与底层花的距离较大,花朵呈自上而下立体式排列,导致采摘条件复杂,杭白菊采摘时要求采后花朵上不带花柄,所以目前为人工分期采摘。杭白菊原产自浙江省桐乡市,2017年,桐乡市杭白菊种植面积达3 200 hm²,约占全国杭白菊总量的25%。随着杭白菊种植面积逐渐增大,劳动力供不应求,采摘成为制约杭白菊产业持续发展的瓶颈^[1-2]。

近年来,一些科研机构对菊花采摘机械进行了研究。德国莱布尼兹研究所研制的洋甘菊采摘机^[3],利用梳齿与刀具相结合的采摘部件,将花朵采摘后,通过气吸装置输送至收集箱,利用液压系统调节采摘部件工作高度并完成菊花的装卸,其采摘效率高,但采摘的花朵上带有过长花柄,需进一步加工处理;WILLOUGHBY等^[4]设计的菊花采摘机,利用曲柄连杆连接两个不同直径的偏心轮,其中设置在外轮上的梳刀组合进行菊花的采摘,辊刷将菊花扫落到传送带上,运送至盛花容器内,该采摘形式较为新颖,但花朵采摘率偏低,仅为75%,梳刀组合缺少控制系统,导致切断位置不统一,所带花柄过多;SEYED等^[5]研制了一种梳脱菊花的试验台,当沿花柄方向梳脱菊花,梳齿滚轴转速为500 r/min、对辊轴距为5 mm时,可梳落92%以上的花朵,该试验台验证了梳齿式梳脱菊花的可行性,为菊花采摘方式提供了参考,由于试验台是在理想状态下进行试验,与采摘机实际采收作业存在较大差异;姬长英等^[1]设计的手推式杭白菊梳齿采花机,利用安装在链条上的多排梳齿完成杭白菊的采摘和运输,达到了良好的采摘效果,但是机器的通过性较差;成岗等^[6]发明了一种菊花采摘装置,通过转动的采摘板将菊花摘下,利用输送带将菊花送至后方的收集箱,结构简单、成本低、采摘效率高;姬长英等^[7]设计的梳割气吸一体式贡菊采摘试验样机,采用梳割单元将菊花脱落,通过背负式气吸装置进行菊花收集,但采摘单元的工作范围较小,不能实现整株大部分菊花的采摘,机器通过性有待改善。

综上所述,国外菊花收获机械作业完成后,采后花朵上带有过长花柄,需将含茎、叶和花等收获后的物料进行清选分离^[8-10],不适用于我国杭白菊的采摘要求和加工方式。我国杭白菊机械化采摘的研究成果大多停留在专利技术和样机试制阶段。因此,需增大对杭白菊采收机械的研究力度。

本文设计一种梳齿往复式杭白菊采摘装置,通

过梳齿将菊花花朵梳落,利用曲柄摇杆机构的急回特性将梳落的花朵送至后方收集盒,辊刷将残留在梳齿间的花朵扫落,采摘单元连续运转完成杭白菊的采收作业,通过大量田间试验,获得采摘装置的最优工作参数,为杭白菊采摘机械化发展提供参考。

1 采摘装置结构与工作原理

1.1 设计要求

采摘装置主要是以合适的速度和采摘轨迹实现杭白菊的采摘,其设计要求如下:①所设计的采摘装置能够保证在合适作业速度下采摘时运行稳定;降低外界环境、机器振动等因素对采摘的影响。②采摘装置的采摘轨迹包络杭白菊花朵的高度差,能够适用于不同植株高度的采摘作业。③所设计的采摘装置具有较好的通过性,不会对杭白菊植株造成碾压伤害。

1.2 采摘装置结构

梳齿往复式杭白菊采摘装置由支架、机架侧板、直流减速电机、链传动机构、主动轴、从动轴、行走单元、收集盒和采摘单元组成(图1)。其中,采用了电压为24 V,功率为300 W, RV40系列的直流减速电机,减速比为30,输出转速范围为0~70 r/min,输出力矩为26.2 N·m。采用型号为JS-30AB 24V PWM的无级调速控制器调节电机转速。采摘单元主要由辊刷和一组偏置曲柄连杆机构组成,曲柄连杆机构是采摘单元的关键工作部件,主要由曲柄、连杆、滑块、滑轨、梳齿安装架和采摘梳齿组成。其中,滑轨为圆柱光轴直线轴承全套滑轨,采用SBR铝托,导轨直径16 mm,长500 mm。主动件曲柄作等速转动,从动件滑块作变速往复运动,连杆作平面复合运动,曲柄连杆机构带动采摘梳齿往复运动,利用曲柄连杆具有的急回特性^[11],实现杭白菊的采摘与收集。曲柄安装在主动轴上,连杆两端分别采用轴承与曲柄和滑块铰接,滑块与滑轨配合,沿滑轨做往复直线运动,采用螺栓将滑轨固定在机架两侧板上,滑轨安装高度可调,用于改变曲柄连杆的行程;梳齿安装架与左右两连杆采用螺栓固定,连杆上有多个通孔,可调整梳齿安装架的固定角度;采摘梳齿与梳齿安装板同样采用螺栓固定,方便更换不同齿距的采摘梳齿;机架右侧安装有功率为300 W的直流减速电机,通过无级调速控制器,调节梳齿采摘速度和辊刷转速,可根据实际采摘需要更换辊刷处的链轮,调节传动比;行走单元由4个万向轮组成;收集盒采用螺栓固定在机架内侧。

1.3 工作原理

采摘梳齿是直接和杭白菊植株接触的部件,梳

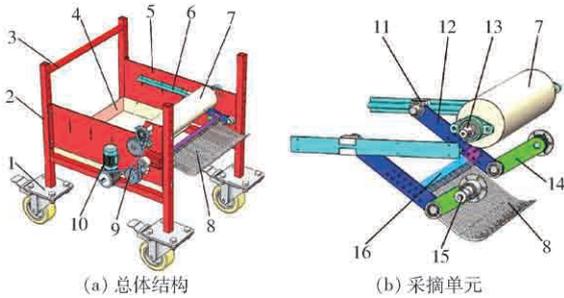


图 1 装置结构图

Fig. 1 Device structure diagram

1. 行走轮 2. 支架 3. 扶手 4. 收集盒 5. 机架侧板 6. 滑轨
7. 辊刷 8. 采摘梳齿 9. 链传动机构 10. 300 W 直流减速电机
11. 滑块 12. 连杆 13. 从动轴 14. 曲柄 15. 主动轴 16. 梳齿安装架

齿的长度和形状等参数对于实际采摘效果有着较大影响^[1,12],梳齿长度过长,梳齿易弯曲变形,长度过小,容易漏摘底部花朵,为提高杭白菊采摘率,在保证刚度的前提下,采摘梳齿长度取 260 mm,方条形梳齿容易拉断杭白菊枝条,采摘下的杭白菊花朵破损较多,且容易产生堵塞,圆形采花梳齿更容易插入植株枝条缝隙,采摘效果较好,并且端部为圆弧形的梳齿相较于直形梳齿,更易于将花朵向后方收集盒抛送^[12-13]。工作时,手推机器匀速前进,电机开启,通过链传动将动力传递给主动轴,曲柄做匀速旋转,滑块做变速往复直线运动,连杆带动采摘梳齿做平面复合运动。采摘梳齿运动到最低点插入杭白菊植株,并向斜上方运动采下菊花,当运动到行程的最高点时,采摘梳齿呈后倾姿态,利用曲柄连杆机构的急回特性,给采摘梳齿一个回程力,杭白菊掉落至机器后方的收集盒,同时,辊刷将梳齿上残留的杭白菊扫入收集盒,实现菊花的连续采摘^[14-16]。机架侧板防止采摘下的杭白菊飞溅,根据菊花植株的生长状况,控制手推机器的速度和采摘梳齿往复频率。

2 力学参数测试

杭白菊植株各部位名称如图 2 所示。

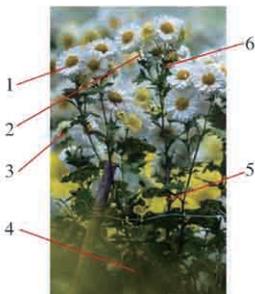


图 2 杭白菊各部位名称

Fig. 2 Names of parts of *Chrysanthemum morifolium*

1. 花朵 2. 花柄 3. 花托 4. 主枝 5. 一级分枝 6. 二级分枝

随机选取 20 株杭白菊盛开期植株,对其物理特性参数进行测量^[8,14,17-18],采用游标卡尺测量各部位直径,采用 TA. XTPlus 质构仪对各部位进行拉断测试(图 3),每组重复 5 次,试验结果如表 1 和表 2 所示。



图 3 杭白菊物理力学参数测试

Fig. 3 Measurement of physical and mechanical parameters of *Chrysanthemum morifolium*

表 1 杭白菊各部位直径

Tab. 1 Diameters of different parts of *Chrysanthemum morifolium* mm

部位	范围	平均值	标准差
花朵	24.5 ~ 39.5	35.4	2.75
花托	9 ~ 12	11.32	1.31
花柄	1.00 ~ 1.25	1.25	0.10
二级分枝	1.95 ~ 2.15	2.04	0.08
一级分枝	3.12 ~ 4.32	3.33	0.53
主枝	6.5 ~ 7.1	6.59	0.24

表 2 杭白菊植株拉断力

Tab. 2 Breaking force of *Chrysanthemum morifolium* N

部位	范围	平均值	标准差
花柄	2.61 ~ 5.59	4.09	1.04
二级分枝	16.88 ~ 26.61	25.30	3.99
一级分枝	150.40 ~ 190.75	170.74	15.66
主枝	240.00 ~ 307.68	283.90	28.30

采摘梳齿的间距应大于花柄以及各分枝直径,小于花托直径^[1,12],根据表 1 测试结果,确定采摘梳齿间距的范围为 4.32 ~ 9.00 mm,根据表 2 测试结果,得出了杭白菊植株各部位的拉断力范围,拉断力由大到小为主枝、一级分枝、二级分枝、花柄,且花柄处的拉断力为 2.61 ~ 5.59 N,明显小于其它部位拉断力,理论上采摘作业时,最先于花柄处拉断。

3 田间试验

3.1 试验条件与方法

试验地点为河南省新乡市原阳县现代农业研究开发基地,试验时间为 2018 年 12 月,试验对象为杭白菊。试验设备包括:梳齿往复式杭白菊采摘装置、测速器、电子秤、花朵收集袋、便携式计算机、秒表、

卡尺、扳手等。收获装置外形尺寸(长×宽)为1.2 m×0.6 m,采摘单元升降范围为0.5~1 m,采摘梳齿长度为0.26 m,一排采摘梳齿宽度为0.5 m。该地杭白菊种植模式取决于采摘装置工作幅宽,即杭白菊一垄宽度为0.5 m,杭白菊株高在0.6~0.9 m,分枝高0.3~0.4 m,根据植株高度,调整采摘单元的高度。在装置制作过程中,将前面两个万向轮改为高地隙行走轮,使机器工作时具有较好的通过性,减小了手推机器行进的难度,同时降低了对杭白菊植株造成碾压伤害,样机试验如图4所示。



图4 收获装置田间试验

Fig. 4 Field test of harvester

试验时随机选取杭白菊植株,依据试验设计的因素水平组合进行试验。手动匀速推动机器前进,水平移动速度为0.2 m/s。每个因素水平组合下的采摘距离为2 m,以2 m内采摘的杭白菊质量为一组数据。每进行一组试验时,预先清理试验区内自然落在地面上的花朵和残叶,并调整各试验因素水平,稳定后进行杭白菊采摘,行走2 m后关闭直流减速电机。收集采摘下的花朵、枝叶以及采下掉落地面和未进入收集盒的花朵,用电子秤分别称量并记录。

将采摘行程每2 m作为一组采摘数据,测得100朵杭白菊的质量为165 g,将2 m内未采摘的杭白菊数量换算成质量,杭白菊花朵总质量为已采与未采花朵的质量之和。本次试验以采摘率、含杂率、破损率、落地率为评价指标,各指标定义^[4-5]为:采摘率为已采花朵与花朵总质量的百分比;含杂率为采摘的枝叶等杂质与包括花朵在内的所有采摘的质量百分比;破损率为破损的花朵质量与已采的花朵的百分比;落地率为采摘过程中未进入收集盒的花朵质量与已采花朵质量的百分比。

3.2 单因素试验与分析

根据梳齿往复杭白菊采摘装置的采摘原理和结构特点,确定有4个因素可能影响实际采摘效果,

分别是梳齿往复频率(往复频率)、梳齿间距、梳齿工作深度以及梳齿工作角度。每个因素取4水平(表3),以15 s内杭白菊脱落数量为评价指标,分别进行单因素试验,从而分析各因素对采摘效果的影响程度。试验结果如图5所示。

表3 单因素试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels of simulation tests

水平	因素			
	往复频率 A/ (r·min ⁻¹)	梳齿间距 B/mm	工作深度 C/mm	工作角度 D/(°)
1	30	4.0	100	40
2	40	6.5	150	50
3	50	8.0	200	60
4	60	9.5	250	70

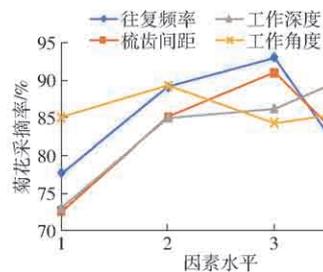


图5 单因素试验结果

Fig. 5 Single factor test results

由图5分析可得,在所选水平范围内,随着往复频率和梳齿间距的增大,杭白菊脱落数量均呈先上升后下降的趋势;其中,当往复频率为30 r/min时,花朵采摘率为77.7%,当往复频率为60 r/min时,采摘率为72.8%;采花梳齿间距为4 mm时,杭白菊花朵采摘率为72.64%,采花梳齿间距为9.5 mm时,杭白菊花朵采摘率为77.07%,过小会导致堵塞,梳齿间距过大会导致漏摘;梳齿工作深度小于100 mm时,杭白菊花朵采摘率较小,仅为73.08%,采摘率随着梳齿工作深度的增加而增加,但梳齿过长,强度不够;梳齿工作角度的改变对采摘效果无明显影响。最终确定往复频率、梳齿间距和工作深度为影响杭白菊采摘效果的主要因素。

3.3 试验因素和水平

往复频率、梳齿间距和梳齿工作深度分别取3个水平,因素水平如表4所示。

表4 田间试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels of field tests

水平	因素		
	往复频率	梳齿间距	工作深度
	A/(r·min ⁻¹)	B/mm	C/mm
1	20	6.5	150
2	40	8.0	200
3	60	9.5	250

3.4 正交试验

试验考虑了任意 2 个因素之间的交互作用^[19], 选用 $L_{27}(3^{13})$ 表进行正交试验, 试验组数 $N=27$, 每组试验重复 3 次, 取 3 次的平均值作为该组的试验结果, 得出每组的采摘率 η_c 、含杂率

η_z 、破损率 η_p 、落地损失率 η_l 等指标。试验方案与结果如表 5 所示, 试验结果的直观分析如表 6 所示, 各指标的因素交互作用如表 7 所示, 利用软件 Design-Expert 8.0.6 对试验结果进行方差分析, 结果如表 8 所示。

表 5 试验方案与结果
Tab.5 Plan and result of test

试验号	因素													指标/%			
	A	B	(A×B) ₁	(A×B) ₂	C	(A×C) ₁	(A×C) ₂	(B×C) ₁	空列	空列	(B×C) ₂	空列	空列	η_c	η_z	η_p	η_l
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	71.36	8.59	4.25	8.70
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	86.82	13.96	4.23	3.12
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	88.75	16.15	6.06	1.50
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	78.68	14.00	2.33	7.87
5	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	84.39	11.73	4.16	6.54
6	1	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	2	2	89.29	12.85	4.17	2.10
7	1	3	3	3	1	1	1	1	3	3	3	2	2	78.82	7.69	4.98	14.49
8	1	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	3	3	84.21	7.29	4.17	6.54
9	1	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	82.67	13.66	6.05	5.67
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	85.83	11.14	0	2.89
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	92.47	11.07	1.48	1.41
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	88.57	15.06	6.45	6.14
13	2	2	3	1	1	1	3	2	3	1	3	1	2	90.35	13.00	1.29	1.79
14	2	2	3	1	2	2	1	3	1	2	1	2	3	95.89	12.00	3.10	3.41
15	2	2	3	1	3	3	2	1	2	3	2	3	1	88.37	13.89	5.00	5.28
16	2	3	1	2	1	1	3	3	1	2	2	3	1	84.13	1.22	1.89	1.46
17	2	3	1	2	2	2	1	1	2	3	3	1	2	87.72	15.58	2.00	3.04
18	2	3	1	2	3	3	2	2	3	1	1	2	3	85.11	16.67	5.00	8.15
19	3	1	3	2	1	1	2	1	3	2	1	3	2	81.01	13.44	6.45	5.46
20	3	1	3	2	2	3	3	2	1	3	2	1	3	88.14	15.58	4.41	2.95
21	3	1	3	2	3	1	1	3	2	1	3	2	1	84.42	19.05	6.06	1.50
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	81.57	12.70	4.65	6.65
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	75.58	14.58	2.63	4.56
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	80.70	15.10	8.70	1.28
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	81.25	12.90	2.56	7.75
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	84.85	15.53	3.57	1.12
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	74.53	16.77	6.98	7.78

3.5 试验结果分析与讨论

3.5.1 结果分析

对试验方案中 4 个评价指标进行逐一分析, 对于杭白菊采摘率这一指标, 由表 8 可知, 往复频率 A 、梳齿工作深度 C 为显著性因素, 往复频率与梳齿工作深度的交互作用 AC 、梳齿间距与梳齿工作深度的交互作用 BC 为显著性交互作用。显著性大小为 A 、 C 、 AC 、 BC 。显著性因素的最优水平可通过比较 3 个水平下的数据均值获得, 对于显著的交互作用的最优组合, 先计算两因素所有水平组合的均值, 再通过比较获得最优的水平组合, 根据显著性大小来依次确定各因素的水平。由表 6 的直观分析可知, 因素 A 的最优水平为 2, 因素 C 的最优水平为 2。根据

表 7 可知, 当 C 取 2, B 取 1 时, 均值最大。综上所述可知, 最佳因素水平组合为 $A_2B_1C_2$, 此时采摘率为 92.47%, 但含杂率较高, 为 11.07%。

对于含杂率这一指标, 由表 8 可知, 梳齿工作深度 C 为唯一的显著性因素。由表 6 的直观分析可知, 因素 C 的最优水平为 1, 在因素 C 为 1 的前提下, 根据表 7、8 得最佳因素组合为 $A_1B_3C_1$, 此时含杂率为 7.69%, 但采摘率仅为 78.82%, 落地损失率达到最高值 14.49%。

对于破损率这一指标, 由表 8 可知, 梳齿工作深度 C 、往复频率 A 为显著性因素。显著性大小为 C 、 A 。由表 6 的直观分析可知, 因素 C 和因素 A 的最优水平均为 2, 在此前提下, 根据表 7、8 得最佳因素

表6 各指标直观分析
Tab.6 Intuitive analysis of each index

		%													
		A	B	$(A \times B)_1$ $(A \times B)_2$		C	$(A \times C)_1$ $(A \times C)_2$		$(B \times C)_1$		空列	空列	$(B \times C)_2$	空列	空列
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
η_c	k_1	82.78	85.26	82.44	84.69	81.44	82.19	82.73	83.70	84.19	83.80	81.84	83.91	83.80	
	k_2	88.72	85.00	84.43	84.77	86.70	83.93	84.59	84.48	83.50	84.81	85.55	85.84	83.65	
	k_3	81.36	82.59	85.99	83.40	84.71	86.74	85.53	84.67	85.16	84.24	85.46	83.10	85.40	
	极差	7.36	2.68	3.55	1.36	5.25	4.55	2.80	0.96	1.66	1.01	3.71	2.74	1.74	
η_z	k_1	11.77	13.78	12.73	13.64	10.52	13.51	13.32	12.60	11.34	12.89	13.18	13.47	11.94	
	k_2	12.18	13.32	13.45	13.35	13.04	12.14	13.07	14.16	14.31	12.66	11.58	13.51	13.66	
	k_3	15.07	11.92	12.84	12.03	15.47	13.37	12.63	12.26	13.38	13.47	14.26	12.05	13.43	
	极差	3.30	1.86	0.72	1.61	4.95	1.37	0.68	1.89	2.97	0.81	2.68	1.46	1.72	
η_p	k_1	4.49	4.38	4.38	4.12	3.16	4.29	4.43	4.26	4.45	3.51	4.29	4.43	4.12	
	k_2	2.91	4.00	3.52	4.05	3.31	4.16	4.74	4.05	3.43	4.75	4.16	3.97	4.35	
	k_3	5.11	4.13	4.61	4.35	6.05	4.06	3.34	4.21	4.63	4.25	4.06	4.11	4.04	
	极差	2.20	0.37	1.09	0.29	2.90	0.23	1.40	0.21	1.20	1.24	0.23	0.46	0.32	
η_l	k_1	6.28	3.74	4.27	4.49	6.34	6.58	5.50	4.05	5.08	4.72	5.91	4.87	4.26	
	k_2	3.73	4.39	4.84	4.34	3.63	3.66	6.18	5.04	4.63	3.95	4.43	4.83	5.39	
	k_3	4.34	6.22	5.23	5.51	4.38	4.11	2.67	5.26	4.64	5.68	4.02	4.65	4.70	
	极差	2.55	2.48	0.96	1.17	2.71	2.93	3.51	1.22	0.45	1.73	1.89	0.22	1.13	

组合为 $A_2B_1C_2$, 此时杭白菊破损率为 0, 达到该指标的理想状态, 但杭白菊采摘率较低, 为 85.83%, 含杂率较高, 为 11.14%。

对于落地损失率这一指标, 由表 8 可知, 往复频率与梳齿工作深度的交互作用 AC 为显著性交互作用, 往复频率 A 、梳齿间距 B 和梳齿工作深度 C 均为显著性因素。显著性大小为 AC 、 C 、 A 、 B 。由表 6 的直观分析可知, 因素 A 和因素 C 的最优水平均为 3, 因素 B 的最优水平为 1。综上可知, 最佳因素水平组合为 $A_3B_1C_3$, 此时落地损失率为 1.50%, 但采摘率较低, 为 84.42%, 含杂率达到最高值, 为 19.05%, 破损率为 6.06%。

结合杭白菊的实际采摘要求, 需要综合考虑杭白菊采摘各项指标: 优先保证高采摘率的前提下, 使杭白菊含杂率、破损率以及落地损失率尽可能低, 由此确定 3 个因素的最优水平组合为 $A_2B_1C_2$ 。在此因素水平组合下, 杭白菊的采摘率为 92.47%, 含杂率为 11.07%, 破损率为 1.48%, 落地损失率为 1.41%。

3.5.2 讨论

通过实地试验, 验证了梳齿往复杭白菊采摘装置能够达到良好的采摘效果, 获得了该装置的最佳工作参数, 但是采摘装置需要人工手推前进, 不仅费力而且前进速度易受人为因素的影响, 统计试验数据时, 只记录了位于采摘单元运动范围内的花朵采摘情况, 试验误差不可避免, 所以需要添加自动控制机器人行进的模块, 对杭白菊合理密植, 使花朵分布位置尽量一致, 便于机械采摘, 并且保证采摘装置的工作幅宽与杭白菊种植畦宽一致, 做到

农机农艺相互融合, 以实现杭白菊机械化采摘, 提高整体经济效益。

表7 各指标的因素交互作用

Tab.7 Interaction of indicators of factors		%			
因素交互	η_c	η_z	η_p	η_l	
$A_1 \times B_1$	82.31	12.90	4.85	4.44	
$A_1 \times B_2$	84.12	12.86	3.55	5.50	
$A_1 \times B_3$	81.90	9.55	5.07	8.90	
$A_2 \times B_1$	88.96	12.42	2.64	3.48	
$A_2 \times B_2$	91.54	12.96	3.13	3.49	
$A_2 \times B_3$	85.65	11.16	2.96	4.22	
$A_3 \times B_1$	84.52	16.02	5.64	3.30	
$A_3 \times B_2$	79.35	14.13	5.33	4.16	
$A_3 \times B_3$	80.21	15.07	4.37	5.55	
$A_1 \times C_1$	76.29	10.09	3.85	10.35	
$A_1 \times C_2$	85.14	10.99	4.19	5.40	
$A_1 \times C_3$	86.90	14.22	5.43	3.09	
$A_2 \times C_1$	86.77	8.45	1.06	2.05	
$A_2 \times C_2$	92.03	12.88	2.19	2.62	
$A_2 \times C_3$	87.35	15.21	5.48	6.52	
$A_3 \times C_1$	81.28	13.01	4.55	6.62	
$A_3 \times C_2$	82.92	15.23	3.54	2.88	
$A_3 \times C_3$	79.88	16.97	7.25	3.52	
$B_1 \times C_1$	79.40	11.06	3.57	5.68	
$B_1 \times C_2$	89.14	13.08	3.37	2.49	
$B_1 \times C_3$	87.25	16.75	6.19	3.05	
$B_2 \times C_1$	83.53	13.23	2.76	5.44	
$B_2 \times C_2$	85.35	12.77	3.30	4.84	
$B_2 \times C_3$	86.12	13.95	5.96	2.89	
$B_3 \times C_1$	81.40	7.27	3.14	7.90	
$B_3 \times C_2$	85.59	12.80	3.25	3.57	
$B_3 \times C_3$	80.77	15.70	6.01	7.20	

表 8 各指标方差分析
Tab. 8 Variance analysis for each index

因素	平方和				自由度				F				F 临界值				显著性			
	η_c	η_z	η_p	η_l																
A	274.09	58.32	23.14	31.95	2	2	2	2	15.75	3.21	5.77	6.14	4.46	4.46	4.46	4.46	*	*	*	*
B	39.17	16.84	0.65	29.83	2	2	2	2	2.25	0.93	0.16	5.74	4.46	4.46	4.46	4.46				*
(A × B) ₁	56.96	2.71	5.93	4.19	2	2	2	2	3.27	0.15	1.48	0.81	4.46	4.46	4.46	4.46				
(A × B) ₂	10.54	13.23	0.43	7.32	2	2	2	2	0.61	0.73	0.11	1.41	4.46	4.46	4.46	4.46				
C	126.61	110.12	47.87	35.22	2	2	2	2	7.28	6.06	11.93	6.77	4.46	4.46	4.46	4.46	*	*	*	*
(A × C) ₁	94.80	10.24	0.25	44.72	2	2	2	2	5.45	0.56	0.06	8.60	4.46	4.46	4.46	4.46	*	*	*	*
(A × C) ₂	36.53	2.15	9.73	62.33	2	2	2	2	2.10	0.12	2.43	11.99	4.46	4.46	4.46	4.46			*	*
(B × C) ₁	4.69	18.34	0.22	7.56	2	2	2	2	0.27	1.01	0.06	1.45	4.46	4.46	4.46	4.46				
(B × C) ₂	80.64	32.65	0.23	17.79	2	2	2	2	4.63	1.80	0.06	3.42	4.46	4.46	4.46	4.46	*	*	*	*
误差	69.61	72.74	16.05	20.80	8	8	8	8												

注:显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

4 结论

(1)设计了一种梳齿往复式杭白菊采摘装置,采摘单元由辊刷和一组偏置曲柄连杆机构组成,利用梳齿的梳脱、辊刷的清扫和曲柄摇杆机构的急回特性,实现杭白菊的采收作业,搭建了采摘装置样机,机器运行稳定,适用于不同植株高度的采摘作

业,机器通过性良好,基本满足设计要求。

(2)为得到该装置的最佳工作参数,在田间分别进行了单因素和正交试验,试验结果表明:在往复频率 40 r/min、梳齿间距 6.5 mm 和梳齿工作深度 200 mm 的参数组合下,杭白菊的采摘率为 92.47%,含杂率为 11.07%,破损率为 1.48%,落地损失率为 1.41%,采摘效果最佳。

参 考 文 献

- [1] 姬长英,王春香,顾宝兴,等.手推式杭白菊梳齿摘花机结构设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):143-150. JI Changying, WANG Chunxiang, GU Baoxing, et al. Design and experiment of hand-push *Chrysanthemum morifolium* comb-teeth picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):143-150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160720&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.020. (in Chinese)
- [2] 王晓莉.菊花生产主要环节机具研制[J].农业工程,2017,7(5):121-123. WANG Xiaoli. Development of machines for main parts of chrysanthemum production [J]. Agricultural Engineering, 2017,7(5):121-123. (in Chinese)
- [3] BEIER K, EHLERT D. Methods for evaluation of picking performance of chamomile (*Matricaria recutita* L.) harvesters. Part I: comparison of established methods[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2014,1(1):e1-e7.
- [4] WILLOUGHBY R A, SOLIE J B, WHITNEY R W. A mechanical harvester for marigold flowers[C]//Milwaukee, Wisconsin: ASAE Annual International Meeting, 2000.
- [5] SEYED H D, PARVIN J H, GOLAM R C. Design, construction and evaluation of chrysanthemum flower stem cleaner machine [J]. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2014,8(6):369-375.
- [6] 成岗,周兆锋,刘虎.一种菊花采摘装置:CN105900608A[P].2016-08-31.
- [7] 姬长英,张纯,顾宝兴,等.梳割气吸一体式贡菊采摘机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):142-150. JI Changying, ZHANG Chun, GU Baoxing, et al. Design and experiment of shear-sucting mountain chrysanthemum picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):142-150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.017. (in Chinese)
- [8] EHLERT D, BRIER K. Development of picking devices for chamomile harvesters [J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2014,1(3):73-80.
- [9] VESELINOV B, ADAMOVIC D, MARTINOV M, et al. Mechanized harvesting and primary processing of *Calendula officinalis* L. inflorescences[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014,12(2):329-337.
- [10] BRABANDT H, EHLERT D. Chamomile harvesters: a review[J]. Industrial Crops and Products, 2011,34(1):818-824.
- [11] 申永胜.机械原理教程[M].3版.北京:清华大学出版社,2015.
- [12] EHLERT D, ADAMEK R, GIEBEL A, et al. Influence of comb parameters on picking properties for chamomile flowers (*Matricaria recutita*) [J]. Industrial Crops and Products, 2011,33(1):242-247.

6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 04. 016. (in Chinese)

- [28] 罗帅,袁巧霞,GOUDA Shaban,等. 基于JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):343-350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameter calibration of scum manure matrix based on JKR bond model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343-350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180440&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 04. 040. (in Chinese)
- [29] HASSELDINE B P J, GAO C, COLLINS J M, et al. Mechanical response of common millet (*Panicum miliaceum*) seeds under quasi-static compression: experiments and modeling[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 73: 102-113.
- [30] HORVATH D, POOS T, TAMAS K. Modeling the movement of hulled millet in agitated drum dryer with discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 254-268.
- [31] OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM)[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 274-288.
- [32] RAMASHIA S E, GWATA E T, MEDDOWS-TAYLOR S, et al. Some physical and functional properties of finger millet (*Eleusine coracana*) obtained in sub-Saharan Africa[J]. Food Research International, 2018, 104: 110-118.
- [33] PEZO M, PEZO L, JOVANOVIC A P, et al. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336: 255-264.
- [34] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 95-107.
- [35] WANG S, LI H, TIAN R, et al. Numerical simulation of particle flow behavior in a screw conveyor using the discrete element method[J]. Particuology, 2019, 43: 137-148.
- [36] FERNANDEZ J W, CLEARY P W, MCBRIDE W. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5585-5601.

(上接第79页)

- [13] 亓丹丹,史建新,王学农. 4MZ-5 梳齿式采棉机采摘头工作参数的确定[J]. 农机化研究, 2012, 34(3):64-67.
QI Dandan, SHI Jianxin, WANG Xuenong. On the operational parameter confirmation of 4MZ-5 serrate-type cotton picking-up head[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3):64-67. (in Chinese)
- [14] 孙胃岭,曹卫彬,古乐乐,等. 基于红花力学特性的梳夹式采摘机构的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018,40(5):46-51.
SUN Weiling, CAO Weibin, GU Lele, et al. Design and validation of gripping picking mechanism based on safflower mechanical properties[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(5):46-51. (in Chinese)
- [15] 李长河,刘承诚,庄文华,等. 梳齿式蓖麻采摘系统的设计与运动轨迹模拟[J]. 机械设计与制造, 2016,5(5):95-98.
LI Changhe, LIU Chengcheng, ZHUANG Wenhua, et al. The structural design and motion simulation of the comb-type castor picking system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016,5(5):95-98. (in Chinese)
- [16] 王文明,王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2012,43(10):82-89.
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):82-89. (in Chinese)
- [17] 左志严,格日乐,常玉山,等. 内蒙古中西部6种乡土植物枝条抗拉力学特性[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015,36(4):55-60.
ZUO Zhiyan, GE Rile, CHANG Yushan, et al. 6 kinds of native plants in central and western Inner Mongolia branch tensile mechanical properties [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2015,36(4):55-60. (in Chinese)
- [18] MILOS P, DRAGISA R, MIODRAGOVIC R. The comparative analysis of basic working parameters for different chamomile harvesters[J]. Acta Horticulturae, 2007,1(7):245-251.
- [19] 何为. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.