

梳齿带自走式杭白菊收获机设计与试验

刘子良¹ 王庆祝¹ 于慧爽¹ 吴敏¹ 沙广禄² 郑志安¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 涿州市瑞风机械有限责任公司, 涿州 072750)

摘要: 针对目前杭白菊机械采收漏采率高、破损率高、含杂率高,采收机械工作效率低、行走动力不足、通过性差、收集不便等问题,结合杭白菊的种植模式及采摘要求,设计了一款梳齿带自走式杭白菊收获机。该收获机主要由梳齿带采摘部件、毛刷组件、升降装置、行走装置、收集装置和液压系统组成,采用链传动带动梳齿排循环转动的方式,利用多排梳齿的梳刷作用实现对杭白菊的连续采收,可通过液压系统调节采摘部件的运转速度和工作高度。通过运动力学分析,确定了输送带、旋转梳齿排等关键部件的结构参数。基于此,搭建了试验样机,并以收获机行驶速度、采摘部件工作转速、梳齿与毛刷间的最小距离为试验因素,以杭白菊采摘率、损伤率和含杂率为试验指标,在田间进行了三因素三水平正交试验,获得了收获机最佳工作参数。当行驶速度为 0.1 m/s、采摘部件工作转速为 60 r/min、梳齿与毛刷间的最小距离为 60 mm 时,采摘效果最好,采摘率为 83.1%,破损率为 15.8%,含杂率为 17.9%。所设计的梳齿带自走式杭白菊收获机运行稳定,满足杭白菊采摘的农艺要求。

关键词: 杭白菊收获机; 梳齿式; 输送带

中图分类号: S225.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)S2-0043-09

Design and Experiment of Self-propelled Harvester with Comb and Conveyor Belt for Hangzhou White Chrysanthemum

LIU Ziliang¹ WANG Qingzhu¹ YU Huishuang¹ WU Min¹ SHA Guanglu² ZHENG Zhian¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Zhuozhou Ruifeng Machinery Co., Ltd., Zhuozhou 072750, China)

Abstract: In view of the problems such as high miss rate, high damage rate, high impurity content, low working efficiency, insufficient walking power, poor trafficability and inconvenient collection of the current Hangzhou white chrysanthemum harvesting machinery, a comb belt self-propelled harvester was developed based on the planting mode and picking requirements of Hangzhou white chrysanthemum. The harvester was mainly composed of harvesting components, brush components, lifting devices, walking devices, collection devices, and hydraulic systems. It utilized the comb action of multiple rows of comb teeth to achieve continuous harvesting of Hangzhou white chrysanthemum. The operating speed and working height of the harvesting components can be adjusted through the hydraulic system. Through theoretical calculations, the structural parameters of key components such as conveyor belts and comb teeth were determined. A prototype experiment was built with the driving speed of the harvester, the working speed of the picking components, and the minimum distance between the comb and brush as experimental factors. The picking rate, damage rate, and impurity content of Hangzhou white chrysanthemum were used as the experimental indicators. A three factors and three levels orthogonal experiment was conducted to obtain the optimal parameter combination of the harvester. The experimental results showed that when the driving speed was 0.1 m/s, the working speed of the picking components was 60 r/min, the minimum distance between the comb and brush was 60 mm, the picking effect was the best, with picking rate of 83.1%, damage rate of 15.8%, and impurity content rate of 17.9%. This comb belt self-propelled harvester had stable operation, which met the agronomic requirements of Hangzhou white chrysanthemum picking.

Key words: Hangzhou white chrysanthemum harvester; comb type; conveyor belt

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-31

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-21)、中医药创新团队及人才支持计划项目(ZYYXTDD-202205)和甘肃省重点研发计划项目(2020YF8GA008)

作者简介: 刘子良(1994—),男,博士后,主要从事中药材生产机械化工程研究,E-mail: lzlcacoe@163.com

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

0 引言

杭白菊又称甘菊,是我国传统的药用草本植物,同时也是菊花茶中最好的一个品种^[1],一直被看作药食兼用的佳品。杭白菊应用前景广阔,发展形势向好^[2-4],但杭白菊目前仍主要依靠人工采收,采收问题成为制约杭白菊产业发展的最大瓶颈^[5]。随着我国经济社会的发展及城镇化进程的加快,农村劳动力不足、人口老龄化问题凸显,杭白菊采收受花期限限制,“用工难”“用工贵”,不仅造成了直接的经济损失,也阻碍了杭白菊产业成体系、规模化发展。

国外对于菊花采收机械的研究起步较早,但其应用的菊花品种主要为洋甘菊^[6]。洋甘菊收获机按照采摘部件的结构形式可分为剪切式、梳齿式、梳齿切刀组合式。剪切式洋甘菊收获机在工作时从地面以一定高度收割枝、茎、花等草本,其结构简单,工作可靠,但采下的花朵花柄过长、含杂率较高。梳齿式洋甘菊收获机主要利用梳齿的梳刷作用将洋甘菊采下,按照梳齿的运动形式,分为线性梳齿式和旋转梳齿式;相较于线性梳齿式,旋转梳齿式收获机的采摘效率更高,形式也更加多样,但其采下的花朵仍存在花柄过长的问题,后期需要进行清选加工^[7]。由于杭白菊和洋甘菊在种植模式、田间管理、生物特性、采摘要求等方面均有差异,国外洋甘菊收获机并不能直接用于杭白菊采收^[8]。

近年来,国内开始致力于杭白菊收获机械的研发。王春香^[9]设计了一种手推式梳齿摘花机,该装置采收效果良好,花朵损伤率和落地率较低,但需人手推动机器前进,劳动强度较大,且采摘部件升降范围有限、装置通过性较差。王荣炎等^[10-11]设计了凸轮盘型凹槽梳齿式和偏置曲柄滑块往复梳齿式两种杭白菊收获机,田间试验结果表明,两种收获机均存在采摘部件工作高度调节困难、机器前进速度不稳定等问题,但梳齿往复式杭白菊收获机的梳齿喂入情况更好,且漏采率较小、破损率更低,基本能够实现花朵的连续采收。此外,王荣炎等^[12]针对往复梳齿式杭白菊收获样机田间试验中存在的问题进行了优化设计,最终形成了气动翻转梳齿式杭白菊收获机;该收获机具有往复翻转和清齿功能,通过性较好,梳齿运动轨迹能够包络花层差,采摘效果较好,但仍存在行走动力不足、收集效果欠佳、可靠性不高等问题。

本文基于菊花-机具的力学特性,设计一种梳齿带自走式杭白菊收获机,并进行田间试验,获得收获机的最优工作参数,以期杭白菊采摘机械化发展

提供参考。

1 杭白菊采摘要求及设计目标

杭白菊采收期一般为每年 10 月—11 月下旬,胎菊采收比朵菊提前 7 d 左右^[13],采收朵菊时要求花形完整,且为便于采后加工,采收后的花朵不能带有花柄^[14]。由于杭白菊花序成熟期不一致,同一植株往往需要经过多次采收,采收时不能破坏杭白菊植株。所设计的杭白菊收获机首先应运行平稳,采摘部件运转速度和工作高度可调,以适应不同产区杭白菊采摘,同时具有良好的行走、转向性能,能够实现连续采摘;此外,针对杭白菊采后复生^[15]的特点,采摘装置应具有较好的通过性,以降低对植株的破坏。

2 整体结构与工作原理

2.1 整体结构

梳齿带自走式杭白菊收获机总体结构如图 1 所示,整机参数如表 1 所示。收获机主要由柴油机、采摘部件、收集装置、行走装置、前置机架、毛刷组件、升降装置和传动部件等组成。其中,采摘部件主要由传送带、驱动滚筒、动力轴、辐盘、多个梳齿排和支架部分组成,辐盘位于滚筒两侧,固定动力轴的同时对驱动滚筒起支撑作用;传送带紧压驱动滚筒;梳齿排通过多个螺栓固定在传送带上。传送带支架两侧通过螺栓固定在侧板上,螺栓位置可调,底部则通过方形垫片焊接在三角支架上。毛刷组件主要由毛刷、毛刷安装辊、转轴、半圆形侧板和矩形侧板组成,半圆形侧板通过螺栓固定在采摘部件侧板上,矩形安装板又通过螺栓固定在半圆形侧板上,螺栓位置均可以调节。收集装置安装于采摘部件下方,用于收集掉落的花朵。升降装置主要由液压缸、液压缸安装座、连接件、升降链条、链轮和滑块组成,升降链条一端通过连接件固定在液压缸上,一端通过螺栓固定在滑块上,滑块焊接在采摘部件三角支架两侧,升降装置工作时,滑块带动采摘部件沿前置机架滑槽上下滑动。

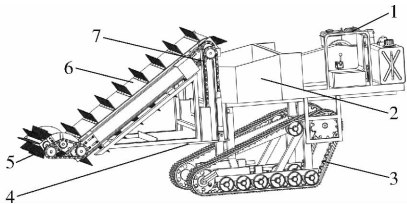


图 1 杭白菊收获机总体结构图
Fig. 1 Overall structure diagram of Hangzhou white chrysanthemum harvester

1. 柴油机 2. 收集装置 3. 三角履带底盘 4. 前置机架 5. 毛刷组件 6. 采摘部件 7. 升降装置

表 1 收获机工作参数

Tab.1 Harvester operating parameters

参数	数值/形式
外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	4×1.5×2
配套动力/kW	17.05
质量/kg	1 500
行走方式	自走式
收获机行驶速度/(m·s ⁻¹)	0~1
传送带倾角/(°)	45
采摘部件工作转速/(r·min ⁻¹)	0~100
工作幅宽/mm	750
采摘深度/mm	220
采摘梳齿离地最小高度/mm	180
采摘部件升降行程/mm	600

2.2 工作原理

在收获机开始工作之前,根据杭白菊植株高度对采摘部件的工作高度进行调节,手动调节液压换向阀,液压杆在液压系统的控制下伸长或缩短,升降链条带动滑块在前置机架滑槽内上下移动,从而实现采摘部件工作高度的调节。当采摘部件调整到合适的工作高度后,松开液压换向阀,升降机构自锁,采摘部件工作高度调节完成。启动柴油机,收获机开始工作,柴油机的一部分动力通过 V 形带传动传递至齿轮变速箱,最终驱动履带底盘运转;一部分动力通过液压泵驱动液压马达,液压马达再将动力通过链传动传递至采摘部件上部动力轴,采摘部件上部动力轴带动驱动滚筒旋转,驱动滚筒旋转后与传送带产生滑动摩擦力,传送带在滑动摩擦力的作用下开始运动,安装在传送带上的梳齿排随传送带运动,最终将花朵采下;采摘部件下部动力轴则通过链传动将动力传递给中间轴,中间轴再通过齿轮传动将动力传递给毛刷组件转轴并完成换向,毛刷旋转方向与传送带下部动力轴旋转方向相反,毛刷将花层聚拢,配合梳齿排采摘花朵,如图 2 所示;通过调节液压马达转速可实现采摘部件工作转速的调节。

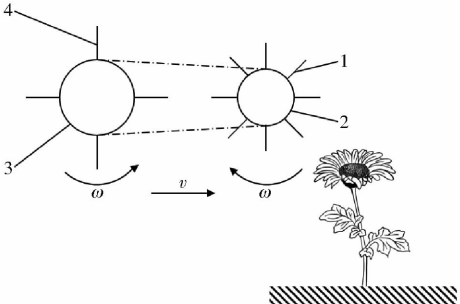


图 2 采摘部件工作原理示意图

Fig.2 Schematic of working principle of picking components

1. 毛刷 2. 毛刷安装辊 3. 滚筒 4. 梳齿排

3 关键部件设计与参数确定

3.1 杭白菊形态特性与力学参数

为确定梳齿带自走式杭白菊收获机关键部件的结构与参数,首先需对杭白菊的形态特性以及植株的力学特性进行测定,图 3 为杭白菊各部位名称。根据王荣炎^[11]对保定市高阳县杭白菊的测定,得到杭白菊形态特性参数与力学特性参数如表 2、3 所示。

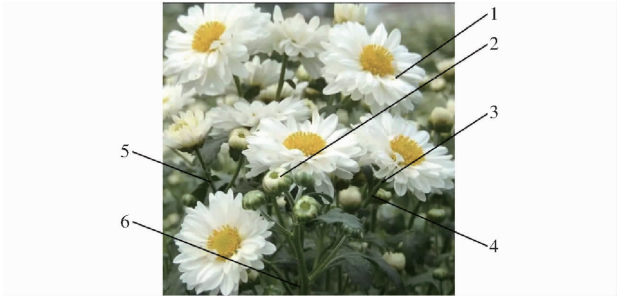


图 3 杭白菊各部位名称

Fig.3 Names of various parts of Hangzhou white chrysanthemum

1. 朵菊 2. 胎菊 3. 花托 4. 花柄 5. 分枝 6. 主枝

表 2 杭白菊各部分直径

Tab.2 Diameters of different parts of Hangzhou

white chrysanthemum		mm
部位	平均值	标准差
朵菊花朵	44.18	3.27
朵菊花托	10.74	0.79
胎菊花托	8.93	0.73
花柄	1.22	0.15
分枝	2.02	0.11
主枝	3.51	0.47
花层差	0.21	0.03

由表 2 可知,杭白菊胎菊和朵菊花托直径大于枝条直径,且花朵柔软,花托较硬,因此可以将施力作用点落于花托处使花柄断裂,从而实现杭白菊采摘。由表 3 可知,杭白菊采摘过程中存在的破坏形式主要为拉断和剪断,拉伸试验和剪切试验中杭白菊均于花柄处先发生断裂,且花柄处的拉伸破坏载荷小于剪切破坏载荷。

3.2 采摘部件结构与参数

杭白菊采摘部件主要由传送带、滚筒和多排梳齿组成(图 4)。传送带压紧滚筒,多排梳齿通过螺栓固定在传送带上,传送带采用斜置的方式以实现花朵的采收;当给滚筒施加旋转驱动时,在摩擦力的作用下带动传送带转动,从而带动梳齿排转动,梳齿排喂入待采花丛并将花朵采下,采下的花朵随梳齿排转动,最终落入采摘部件下方的收集装置内。

表 3 杭白菊不同部位的拉伸和剪切力学性能参数

Tab.3 Tensile and shear mechanical parameters of different parts of Hangzhou white chrysanthemum				
部位	拉伸破坏载荷/N	拉伸模量/MPa	剪切破坏载荷/N	切变模量/MPa
花柄	6.62 ± 1.52	20.31 ± 4.46	11.19 ± 2.79	28.29 ± 4.29
分枝	59.51 ± 11.91	468.34 ± 56.26	90.02 ± 24.02	635.06 ± 84.91
主枝	261.59 ± 32.42	883.29 ± 108.03	187.85 ± 46.93	745.75 ± 79.63

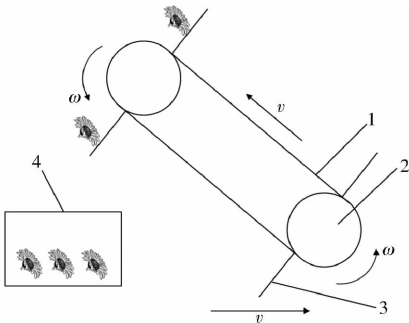


图 4 采摘部件结构示意图
Fig.4 Schematic of structure of picking parts
1. 传送带 2. 滚筒 3. 梳齿排 4. 收集装置

3.2.1 传送带参数

传送带的主要参数包括圆弧段半径 r 、倾斜角 α 及直线段长度 l_1 (图 5)。传送带圆弧段直径关系到采摘部件整体尺寸及梳齿排数目^[16]。当驱动滚筒线速度和转动频率一定时,圆弧段半径越大,需要安装的梳齿排数越多,采摘部件消耗的功率也越大,此外,圆弧段半径过大会限制梳齿排工作空间,当驱动滚筒中心轴高度和梳齿长度一定时,驱动滚筒直径越大,梳齿排可采摘菊花的深度越大,且驱动滚筒直径过小会导致梳齿排与传送带圆弧段接触面积有限,不利于梳齿排的安装。综合考虑,取圆弧段半径 r 为 100 mm。

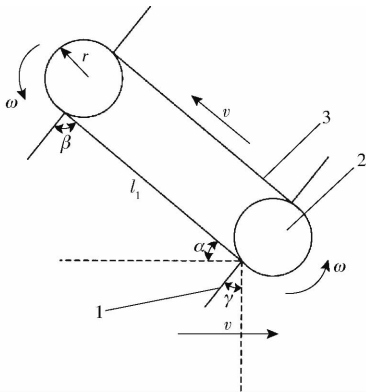


图 5 传送带倾角设计示意图
Fig.5 Schematic of conveyor belt inclination design
1. 梳齿排(直线段) 2. 驱动滚筒(圆弧段) 3. 传送带

由于传送带斜置,需确定传送带倾角,如图 5 所示,传送带倾角 α 及梳齿排安装角 β 均会影响梳齿排的喂入角,为控制变量数目同时也为保证梳齿排强度,取梳齿排安装角 β 为 90° ,由此,传送带倾角

α 等于梳齿排与竖直平面的夹角 γ ,理论上 γ 越小,梳齿排喂入角越好,而 γ 范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$;考虑到采摘部件整体高度一定时, γ 越小传送带直线段长度越大,因此,为保证采收性能,传送带倾角 α 取 45° 。

从图 6 可知,传送带直线段长度主要根据收集装置的高度确定,取杭白菊株高 h_1 为 0.3 m,采摘部件下部滚筒中心轴离地高度 h_2 为 0.4 m,收集装置顶部离地高度 h_3 为 1.2 m。为使杭白菊花朵有足够的时间从梳齿上掉落,传送带顶部与收集装置顶部间应留有一定间隙,即传送带直线段长度应满足

$$l_1 > \frac{h_3 - h_2}{\sqrt{2}/2}$$
 (1)

由式(1)计算后,取传送带直线段长度为 1.8 m。

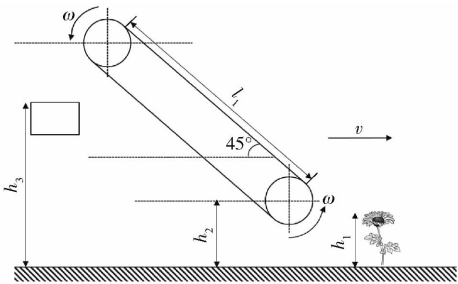


图 6 传送带直线段长度设计示意图
Fig.6 Design diagram of straight section length of conveyor belt

3.2.2 梳齿排参数

梳齿是采摘部件中最重要的结构,其结构形式决定了杭白菊采摘效果及花朵的破损情况,目前常见的梳齿形状有三角形、长条形、圆柱形、六角形、圆弧形、圆角形等,由于圆弧形梳齿具有更好的花层聚拢作用,且更易将花丛喂入,因此,在花类采摘机械中,梳齿形状多为圆弧形。然而,圆弧形梳齿加工及安装难度较大,且采收过程中,花朵易堆积在梳齿末端,破碎率与损失率较高,因此,考虑以上因素,本文选用长条形梳齿,并将梳齿前部磨尖以便于喂入(图 7)。

为使采摘不发生遗漏,梳齿排排数需满足

$$\frac{l_z}{v} \geq t_j$$
 (2)

其中

$$t_j = \frac{60}{k_1 n_m}$$
 (3)

式中 l_z ——株距,m

比,即拉力随梳齿间隙的增大而增大,花朵所受的拉力越大其越容易被采下,但梳齿间隙过大时会出现漏采现象,理论上,梳齿间隙应介于杭白菊枝茎直径与花托直径之间,枝茎可以通过梳齿间隙,而花朵则无法通过,因此,取梳齿间隙为 6 mm。

3.3 毛刷组件结构与参数

为减小梳齿排的喂入阻力,在采摘部件前端安装毛刷(图 10),采摘部件下部滚筒将动力传递至毛刷组件并换向,毛刷旋转将待采花枝分散成行,随后将花丛喂入梳齿排。

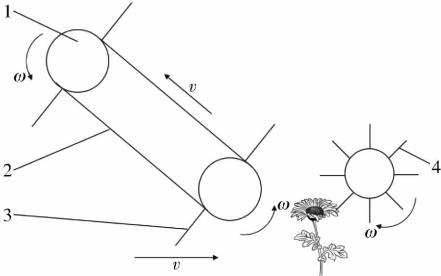


图 10 毛刷工作原理示意图
Fig. 10 Schematic of working principle of brush
1. 滚筒 2. 传送带 3. 梳齿排 4. 毛刷

毛刷组件主要由毛刷、毛刷安装辊、转轴、半圆形侧板、矩形侧板等零件构成。毛刷安装位置对于杭白菊采摘率、破损率有着重要影响,若毛刷与梳齿排间的最小距离过大,则毛刷的聚拢作用有限,反之则会挤压花朵,造成花朵损伤,因此毛刷安装位置应可调。本文设计了一种半圆形侧板,半圆形侧板通过螺栓分别与矩形侧板和采摘部件侧板连接,可通过调节螺栓位置实现毛刷安装位置调节,如图 11 所示。

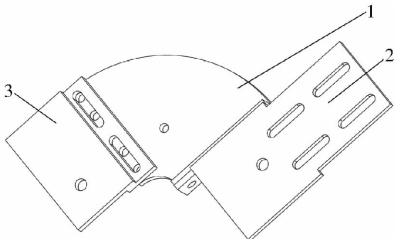


图 11 毛刷组件结构示意图
Fig. 11 Schematic of brush structure
1. 半圆形侧板 2. 采摘部件侧板 3. 矩形侧板

在设计毛刷组件时,首先需考虑毛刷的材料和类型^[19]。不同材料的毛刷对花丛的聚拢能力不同,聚拢花丛时对花朵的损伤程度也不同,毛刷材料不能过硬也不能过软,选用尼龙毛刷。毛刷的类型也会对采摘结果造成影响,毛刷辊与花层接触面积较大,聚拢作用更好,但其存在卷带杭白菊枝茎,造成含杂率较高的问题,选用条刷。毛刷组件参数设计结果如表 4 所示。

表 4 毛刷组件参数

Tab. 4 Parameters of brush component

参数	数值/形式
毛刷材质	尼龙
毛刷类型	条刷
毛刷与梳齿排间的最小距离/mm	0 ~ 100
毛刷排数	8
毛刷长度/mm	100
毛刷安装辊直径/mm	80
毛刷工作幅宽/mm	800

3.4 升降装置

升降装置主要由液压缸、液压缸安装座、升降链条、链轮、连接件、滑块组成,连接件用于连接两侧液压缸与升降链条。将采摘部件和毛刷组件简化为规则实体,不计摩擦阻力,对其在升降装置工作时的受力情况进行分析。如图 12 所示,当采摘部件工作高度上升时,实体受自身重力 $m_k g$ 、两侧链条对其施加的竖直向上拉力 $2T_1$,拉力 T_1 与液压缸对链条施加的竖直向下拉力 F_3 相等,实体合加速度竖直向上;当采摘部件工作高度下降时,实体受自身重力 $m_k g$ 、两侧链条对其施加的竖直向上拉力 $2T_2$,拉力 T_2 与液压缸对链条施加的竖直向上推力 F_2 相等,实体合加速度竖直向下。由此,实体在两种运动状态下运动学方程为

$$\begin{cases} 2F_3 - m_k g = m_k \frac{2X_1}{t_s^2} \\ m_k g - 2F_2 = m_k \frac{2X_1}{t_s^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 F_3 ——液压缸对链条的拉力,N
 F_2 ——液压缸对链条的推力,N
 m_k ——采摘部件与毛刷组件质量,kg
 X_1 ——液压缸工作行程,mm
 t_s ——液压缸完成工作行程需要的时间,s

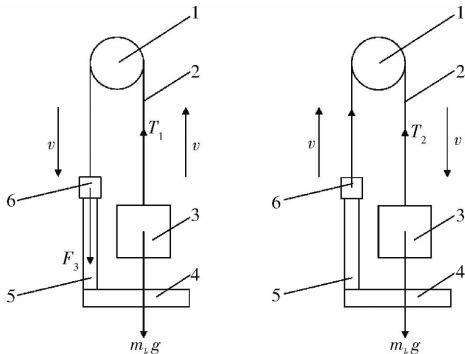


图 12 采摘部件及毛刷组件升降过程受力分析

Fig. 12 Force analysis of picking components and

brush components during lifting and lowering process

1. 链轮 2. 升降链条 3. 简化实体 4. 底部支撑架 5. 液压缸
6. 连接件

取采摘部件和毛刷组件质量 m_k 为 300 kg, 液压缸工作行程 X_1 为 300 mm, 液压缸完成工作行程需要的时间 t_s 为 5 s, 计算可得: $F_3 = T_1 = 1\,473.6\text{ N}$, $F_2 = T_2 = 1\,466.4\text{ N}$ 。查询《机械设计》手册^[20], 选用 12A-1-80L/60 型升降链条, 链节数为 38, 升降链条参数如表 5 所示。

表 5 升降链条参数
Tab.5 Parameters of lift chain

参数	数值
节距/mm	19.05
滚子直径/mm	11.91
抗拉强度/kN	31.80
平均抗拉强度/kN	41.5
质量/(kg·m ⁻¹)	1.5

3.5 液压系统设计

液压控制系统具有结构简单、工作稳定、元件质量小、工作寿命长且便于维护等特点^[21]。液压系统主要由采摘部件工作高度调节部分、动力传递及采摘部件工作转速调节部分组成。整个系统的动力由液压泵提供, 将外部机械能转换为压力能进行动力传递, 而液压缸与液压马达作为执行元件, 主要用于调节采摘部件工作高度与采摘部件工作转速。整机液压系统原理图如图 13 所示。

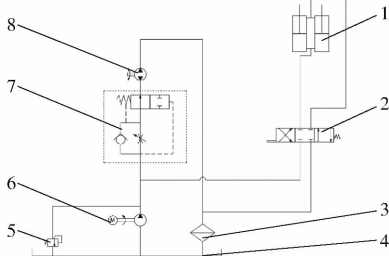


图 13 液压系统原理图

Fig. 13 Hydraulic system schematic

1. 液压缸 2. 换向阀 3. 过滤器 4. 油箱 5. 溢流阀 6. 液压泵 7. 调速组合阀 8. 液压马达

通过理论计算分析, 并对液压元件进行选型, 确定整体液压元件如表 6 所示。

表 6 液压元件

Tab.6 List of hydraulic components

名称	型号
液压泵	HGP-3A-F23R
液压马达	BMR200
液压缸	HSG50/60-28
溢流阀	ZDB6VP-2-40B/2Q
三位四通换向阀	ZS-L118-3
调速阀组	FR12-23A-0-N
油箱	80 L

4 田间试验

4.1 试验条件

试验地点为保定市高阳县杭白菊种植基地, 试验时间为 2021 年 10 月 15 日, 试验时环境温度为 11~21℃, 环境相对湿度为 47%~73%。杭白菊种植模式为畦垄种植, 一垄种植两行, 行距约 0.3 m、株距 0.25~0.30 m、垄宽 0.8~0.9 m。由于种苗移栽定植后出现高温高湿天气, 杭白菊生长受到抑制, 植株高度远低于往年, 普遍在 60 mm 之下, 大部分植株高度在 20~30 mm。试验设备则包括: 梳齿带自走式杭白菊收获机、电子秤(测量精度 0.1 g 以上)、密封袋、秒表、转速仪(LotronDT-2236B 型)、卷尺(量程: 500 cm, 最小刻度: 1 cm)、螺丝刀、扳手等。样机试验如图 14 所示。



图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiment

4.2 试验指标及方法

根据杭白菊采摘要求, 以采摘率、破损率和含杂率为试验评价指标, 综合评价收获机采摘效果。以每 2 m 作为一个试验小区, 统计各试验小区落入收集装置内花朵的总质量、破损花朵质量以及包括枝茎、叶子等杂质在内的所有采摘物总质量; 随机选取 100 朵花朵, 称其质量为 130 g, 并将各试验小区内未采摘下的花朵换算为质量。采摘率通过采摘花朵的总质量与采摘区所有花朵总质量的比值计算得到, 破损率通过采摘后破损花朵的质量与采摘区所有花朵总质量的比值计算得到, 含杂率通过落入收集装置内的枝茎、叶子等杂质质量与所有采摘物总质量的比值计算得到。

4.3 试验方案设计与结果分析

通过分析梳齿带自走式杭白菊收获机的采摘原理和结构特点, 影响其采摘效果的因素主要有收获机行驶速度、采摘部件工作转速和毛刷组件安装位置。为深入研究各因素对杭白菊收获机采摘效果的影响, 进行了收获机行驶速度、采摘部件工作转速、毛刷与梳齿间的最小距离的三因素三水平正交试验。在开展正交试验前先进行单因素试验, 以确定

各因素最佳水平。

4.3.1 单因素试验

为探究收获机行驶速度对采摘效果的影响,保持其他因素不变,以收获机行驶速度为变量,固定采摘部件工作转速为 30 r/min、梳齿与毛刷间的最小距离为 50 mm,每个水平重复 3 次试验,试验结果如表 7 所示。

表 7 收获机行驶速度对采摘效果的影响

Tab.7 Effect of harvester traveling speed on harvesting performance %

参数	收获机行驶速度/(m·s ⁻¹)					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
采摘率	82.3	81.7	78.5	72.1	64.6	53.9
破损率	3.3	3.6	3.8	4.3	4.9	5.7
含杂率	6.1	8.0	8.5	9.3	9.8	11.0

试验结果表明,采摘部件工作转速和毛刷组件安装位置一定时,收获机行驶速度越小,单位面积内杭白菊植株的采摘次数越多,杭白菊采摘率越高,而当收获机行驶速度减小到一定数值时,植株上所剩花朵的数量有限,采摘率的增加趋于平缓^[22];随着收获机行驶速度的增加,梳齿对杭白菊植株的冲击变强,破损率和含杂率均增大,且采摘率逐渐减小。因此,取收获机行驶速度分别为 0.1、0.2、0.3 m/s。

为探究采摘部件工作转速对采摘效果的影响,保持其他因素不变,以采摘部件工作转速为变量,固定收获机行驶速度为 0.2 m/s、梳齿与毛刷间的最小距离为 50 mm,每个水平重复 3 次试验,试验结果如表 8 所示。

表 8 采摘部件工作转速对采摘效果的影响

Tab.8 Effect of working speed of picking components on harvesting performance %

参数	采摘部件工作转速/(r·min ⁻¹)				
	30	45	60	75	90
采摘率	81.7	82.9	83.5	84.0	84.1
破损率	3.7	8.9	15.1	22.6	33.8
含杂率	7.8	8.8	12.5	18.6	24.0

试验结果表明,随着采摘部件工作转速的增加,采摘率逐渐增大,直到采摘部件工作转速达 60 r/min,而破损率与含杂率均随采摘部件工作转速的增大而增大,因此,取采摘部件工作转速为 30、45、60 r/min。

由上文可知,毛刷与梳齿间最小距离的调节范围为 0~100 mm,应在保证花朵完整通过的基础上尽可能小,由于花朵直径约为 33 mm,因此取毛刷与梳齿间最小距离为 40、50、60 mm。

4.3.2 正交试验设计

基于单因素试验结果,选用 L₉(3³)表进行正交

试验,每组重复 3 次,取平均值作为试验结果,正交试验因素与水平如表 9 所示^[23]。

表 9 正交试验因素与水平

Tab.9 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	行驶速度/(m·s ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)	最小距离/mm
1	0.1	30	40
2	0.2	45	50
3	0.3	60	60

正交试验结果如表 10 所示,表中 A、B、C 为因素水平,不同作业参数组合下,收获机收获杭白菊的采摘率、破损率与含杂率有着明显的差异,说明收获机行驶速度、采摘部件工作转速以及毛刷与梳齿间最小距离对收获机的采收性能影响较大。通过对正交试验结果进行极差分析,结果如表 11 所示。

表 10 正交试验结果

Tab.10 Experimental results

编号	因素			指标		
	A	B	C	采摘率/%	破损率/%	含杂率/%
1	1	1	1	75.1	4.9	7.1
2	1	2	2	77.9	11.0	12.8
3	1	3	3	83.1	15.8	17.9
4	2	1	2	66.3	4.1	9.0
5	2	2	3	69.0	7.8	11.1
6	2	3	1	84.6	21.0	25.0
7	3	1	3	63.2	3.1	9.8
8	3	2	1	72.1	14.3	16.7
9	3	3	2	80.9	18.8	22.0

表 11 正交试验极差分析

Tab.11 Variance analysis of regression model

试验指标	水平	A	B	C
采摘率	1	0.787	0.683	0.773
	2	0.733	0.730	0.750
	3	0.720	0.830	0.717
	R	0.067	0.147	0.057
破损率	1	0.107	0.040	0.133
	2	0.110	0.110	0.113
	3	0.120	0.187	0.090
	R	0.013	0.147	0.043
含杂率	1	0.127	0.087	0.163
	2	0.150	0.137	0.147
	3	0.163	0.217	0.130
	R	0.037	0.130	0.033

由表 11 可知,各因素对收获机采摘率的影响由大到小为 B(采摘部件工作转速)、A(收获机行驶速度)、C(梳齿与毛刷间的最小距离),最佳因素组合为 A₁B₃C₁,即行驶速度为 0.1 m/s、采摘部件工作转

速为 60 m/s、梳齿与毛刷间的最小距离为 40 mm 时,采摘率最高;各因素对杭白菊破损率的影响由大到小为 B (采摘部件工作转速)、 C (梳齿与毛刷间的最小距离)、 A (行驶速度),最佳因素组合水平为 $A_1B_1C_3$,即行驶速度为 0.1 m/s、采摘部件工作转速为 30 m/s、梳齿与毛刷间的最小距离为 60 cm 时,破损率最低;各因素对杭白菊含杂率的影响由大到小为 B (采摘部件工作转速)、 A (行驶速度)、 C (梳齿与毛刷间的最小距离),最佳因素组合水平为 $A_1B_1C_3$,即行驶速度为 0.1 m/s、滚筒转速为 30 m/s、梳齿与毛刷间的最小距离为 60 cm 时,含杂率最低。

4.4 试验验证

结合杭白菊的实际采摘要求,综合考虑三因素对各评价指标的影响关系,在保证高采摘率的前提下,尽量减少杭白菊破碎率和含杂率,因此,最终确定为最优参数组合为 $A_1B_3C_3$,即行驶速度为 0.1 m/s、采摘部件工作转速为 60 r/min、梳齿与毛

刷间的最小距离为 60 mm 时,采摘效果最好,采摘率为 83.1%,破损率为 15.8%,含杂率为 17.9%。

5 结论

(1)设计了梳齿带自走式杭白菊收获机,该收获机采用多排梳齿沿传送带运动的方式实现杭白菊的连续采摘,通过液压系统实现采摘部件转速以及采摘高度的调节;搭建了梳齿带自走式杭白菊收获机样机,机器运行稳定,通过性良好,对不同植株高度的采摘适应性较强,基本满足设计要求。

(2)探究了收获机行驶速度、采摘部件工作转速、梳齿与毛刷间的最小距离对采摘率、损伤率、含杂率的影响。进行了三因素三水平正交试验,试验结果表明,采摘部件工作转速对杭白菊采摘率、损伤率、含杂率有显著影响,当行驶速度为 0.1 m/s、采摘部件工作转速为 60 r/min、梳齿与毛刷间的最小距离为 60 mm 时,采摘效果最好,菊花采摘率为 83.1%、破损率为 15.8%、含杂率为 17.9%。

参 考 文 献

[1] 常相伟,魏丹丹,陈栋杰,等. 药用与茶用菊花资源形成源流与发展变化[J]. 中国现代中药,2019,21(1):116-123,145. CHANG Xiangwei, WEI Dandan, CHEN Dongjie, et al. Historical origin and development of medicinal and tea *Chrysanthemum morifolium* resources[J]. Modern Chinese Medicine, 2019,21(1):116-123,145. (in Chinese)

[2] YANG D, LIU S, TENG F, et al. Morphology and metabolite profiles of southern and northern *Chrysanthemum* in China[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 194:116250.

[3] 程存归,李丹婷,刘幸海,等. 杭白菊与野菊花的微量元素比较研究[J]. 光谱学与光谱分析,2006,26(1):156-158. CHENG Cungui, LI Danting, LIU Xinghai, et al. Comparative study on trace elements in *Flos Chrysanthemi* and *Flos Chrysanthemi Indici*[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006,26(1):156-158. (in Chinese)

[4] 杨勇,赵悦,张柯鑫,等. 特色菊花茶新产品的加工试验[J]. 中国茶叶加工,2020(1):38-43. YANG Yong, ZHAO Yue, ZHANG Kexin, et al. New product development of characteristic *Chrysanthemum* tea[J]. China Tea Processing, 2020(1):38-43. (in Chinese)

[5] 徐东海,江宝庆. 杭白菊产业机械装备与技术预测分析[J]. 南方农机,2008(6):39-40.

[6] SINGH O, KHANAM Z, MISRA N, et al. Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.): an overview[J]. Pharmacognosy Reviews, 2011,5(9):82.

[7] BRABANDT H, EHLERT D. Chamomile harvesters: a review[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1):818-824.

[8] 祁正栋,连国党,李亮亮,等. 万寿菊机械式采摘技术现状与建议[J]. 农业工程,2020,10(9):26-30. QI Zhengdong, LIAN Guodang, LI Liangliang, et al. Present situation and suggestions on mechanical picking technology of marigold[J]. Agricultural Engineering, 2020,10(9):26-30. (in Chinese)

[9] 王春香. 手推式杭白菊梳齿摘花机结构设计及试验[D]. 南京:南京农业大学,2016.

[10] 王荣炎,郑志安,姜大龙,等. 单排梳齿往复式菊花采摘机的设计与仿真[J]. 农机化研究,2022,44(8):181-186,192. WANG Rongyan, ZHENG Zhian, JIANG Dalong, et al. Design and simulation of single row comb reciprocating *Chrysanthemum* picking machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(8):181-186,192. (in Chinese)

[11] 王荣炎. 气动翻转往复梳齿式杭白菊采收装置设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2022.

[12] 王荣炎,于慧爽,陈安迪,等. 气动翻转梳齿式菊花采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):184-193. WANG Rongyan, YU Huishuang, CHEN Andi. et al. Design and test of pneumatic flipping comb-type *Chrysanthemum* picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):184-193. (in Chinese)

[13] 孙淑芳,沈学根,张新风,等. 采收期对杭白菊4个主栽品种功效成分的影响[J]. 中国中药杂志,2011,36(21):2945-2949. SUN Shufang, SHEN Xuegen, ZHANG Xinfeng, et al. Effects of harvesting stage on functional constituents of four kinds of Hangbaiju[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2011,36(21):2945-2949. (in Chinese)