

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.017

水培生菜整株低损收获装置设计与试验

马义东¹ 徐 灿¹ 崔永杰^{1,2} 傅隆生^{1,3} 刘浩洲¹ 杨 晨¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:为解决水培生菜收获品质低、人工收获劳动力成本高等问题,设计了一种整株低损收获装置。通过夹持杆对菜叶的低损聚拢、割刀对生菜茎部的精准切割,实现单株水培生菜的整株低损收获。设计了各关键部件结构参数,分析了影响菜叶损伤的因素,利用图像处理方法测量了菜叶损伤面积;采用正交试验,研究了聚拢速度、聚拢角、聚拢高度、压菜速度对菜叶损伤面积的影响;通过力学分析和高速摄影,分析了聚拢角、聚拢高度对菜叶损伤面积的影响。正交试验结果显示:试验因素的显著性主次顺序为聚拢角、聚拢高度、压菜速度、聚拢速度;最优组合参数为聚拢速度 100 mm/s、聚拢角 15°、聚拢高度 70 mm、压菜速度 100 mm/s。验证试验表明:最优组合下生菜均为整株收获,菜叶损伤面积平均值为 432 mm²,损伤程度平均值为 0.13%,优化效果明显。

关键词: 水培生菜; 整株收获; 正交试验

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0162-08

Design and Test of Harvester for Whole Hydroponic Lettuce with Low Damage

MA Yidong¹ XU Can¹ CUI Yongjie^{1,2} FU Longsheng^{1,3} LIU Haozhou¹ YANG Chen¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to solve the issues of hydroponic lettuce manual harvesting with low quality but high cost, a harvester was designed and manufactured. The leaves lying on the hydroponics planting board were gathered by the holding rods before cutting the stem. The key components of the harvester were calculated; for instance, the device of gathering leaves up, the cutter bar and conveyer device. The damage area was measured by using image processing method. The factors those would influence the leaf damage were generalized. The influence of gathering angle and gathering height on damage area was analyzed though the mechanical analysis and high-speed photography. Orthogonal test was utilized to study the influence of gathering velocity, gathering angle, gathering height and velocity of putting lettuce down on damage area. The results showed that the order of significance was gathering angle, gathering height, velocity of putting lettuce down and gathering velocity. The optimized combination of factors that gave the minimum damage area was obtained, and the value of gathering velocity, gathering angle, gathering height and velocity of putting lettuce down were 100 mm/s, 15°, 70 mm and 100 mm/s, respectively. The average value of damage area was 432 mm², and the average value of damage degree was 0.13%, which meant that the optimization was obvious. This research offered a reference for designing the harvester which would harvest more than one hydroponic lettuce.

Key words: hydroponic lettuce; whole-plant harvesting; orthogonal test

0 引言

我国设施园艺中蔬菜的生产规模日益增大,水

培生菜是设施园艺中一种新型蔬菜^[1-4]。水培生菜的收获期短(5~7 d),且国内市场要求整株(菜叶不散)、低损收获;目前仍以人工收获为主,劳动力成

收稿日期: 2018-10-22 修回日期: 2018-11-30

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-04)

作者简介: 马义东(1991—),男,博士生,主要从事设施园艺自动化装备研究,E-mail: mayidong90@163.com

通信作者: 崔永杰(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事果蔬生产自动化研究,E-mail: cuiyongjie@nwafu.edu.cn

本高、收获品质不易保证。为适应水培生菜产业的快速发展,需研发整株低损收获装置。

目前,适用于土壤栽培的传统生菜收获机已商业化,其作业条件多为日光温室或大田,其研究主要集中于收获机割台^[5-10]、输送形式^[11-16]等方面。水培生菜与传统生菜的农艺特点、采收要求不同,其收获装置的割台形式、收获形式等与传统收获机也不同,目前仍处于研究阶段。高国华等^[17-18]设计了一款设施蔬菜收获装置,研究了切割速度等因素对切割力的影响。CHO 等^[19]设计了一款三自由度生菜采收机器人,其基于机器视觉测量生菜长势,进而利用模糊控制决定生菜夹持力度,最后对生菜进行切割、输送。UCHIDA 等^[20]设计的植物工厂生菜收获系统中,将生菜倾斜输送以利于收获,其割刀选用圆盘刀。上述研究侧重于省力切割、提高作业效率等方面,为水培生菜机械化收获提供了良好基础。然而,水培生菜机械化收获中的整株收获方法、菜叶损伤等方面问题还需进一步研究。

结合我国水培生菜农艺特点,本文提出一种整株低损收获方法,并设计相应机具,研究聚拢速度、聚拢角、聚拢高度、压菜速度对菜叶损伤面积的影响,并进行试验优化。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

如图 1 所示,水培生菜收获装置主要包括倍速链、聚拢气缸、夹持杆、割刀、切割气缸、输送气缸、压菜气缸等,可完成单株生菜的整株低损收获。倍速链间歇运动,当光电传感器 1 检测到定植板时,倍速链开始运动;光电传感器 2 检测到定植板时,倍速链停止,开始收获。夹持杆通过夹头安装于聚拢气缸末端,割刀切茎前,夹持杆提升一定高度以聚拢菜叶,聚拢高度由霍尔传感器确定。切茎后,生菜被运送至输送带。随后,压菜气缸(向下)与聚拢气缸(向上)同时运动,在二者共同作用下,生菜被摆放到输送带上,完成卸菜。

1.2 农艺特点

本文以水培生菜为研究对象,生菜通过海绵块种植于定植板上。如图 2a 所示,收获期的菜叶贴于定植板,茎部较短(8~16 mm),海绵块与生菜茎部、须根连为一体。生菜行距、株距均为 200 mm,定植孔直径范围为 20~30 mm。为便于整株低损收获,对定植板做如下改进:为避免夹持杆进入定植板时损伤菜叶,在定植孔两侧开槽,使夹持杆初始位置低于定植板上表面;为避免聚拢菜叶过程中生菜被拔

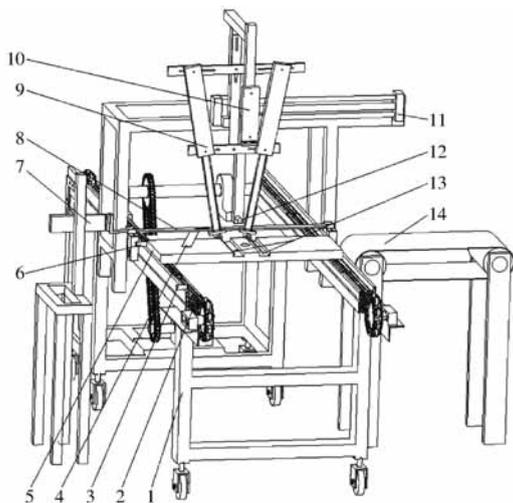


图 1 水培生菜收获装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of hydroponic lettuce harvester
1. 机架 2. 倍速链 3. 光电传感器 1 4. 割刀 5. 定植板 6. 光电传感器 2 7. 切割气缸 8. 刀架 9. 聚拢气缸 10. 压菜气缸 11. 输送气缸 12. 霍尔传感器 13. 夹持杆 14. 输送带

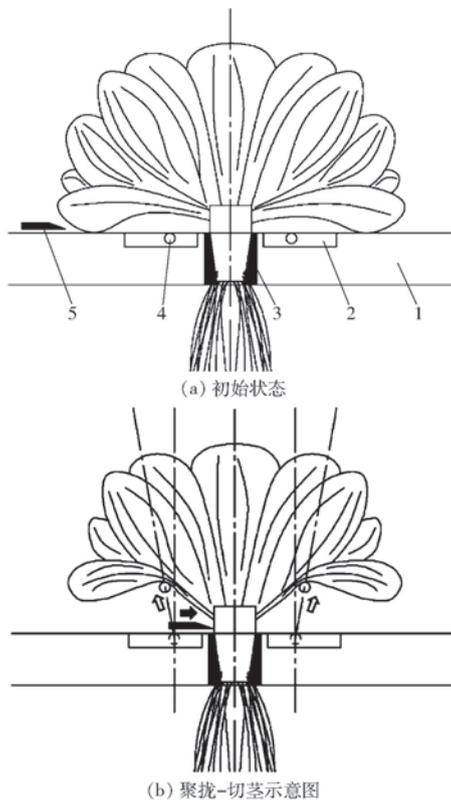


图 2 水培生菜整株低损收获原理图

Fig. 2 Principle diagrams for harvesting whole hydroponic lettuce with low damage

1. 定植板 2. 槽 3. 海绵块 4. 夹持杆 5. 割刀

出,造成切割部位不准,定植孔直径定为 20 mm,使海绵块与定植孔过盈配合。

1.3 工作原理

通过夹持杆对菜叶的低损聚拢、割刀对茎部的精准切割,实现水培生菜的整株低损收获。夹持杆

聚拢菜叶主要为避免割刀切伤菜叶(图2b)。割刀安装基准为定植板上表面,海绵块与定植孔过盈配合以保证对茎部的定位,进而实现对茎部精准切割。

2 关键部件设计

2.1 菜叶聚拢机构

菜叶聚拢机构由夹持杆、夹头和聚拢气缸等组成(图3a);其功能包括:防止割刀切伤菜叶、对切茎后的生菜进行夹持输送、卸菜等。由于夹持杆直接与菜叶接触,为减小菜叶所受摩擦力、降低菜叶损伤,夹头内加装滚动轴承,使夹持杆与菜叶间作用为滚动摩擦。夹持杆材料为食品用304钢,直径5mm,长度260mm,初始状态下两根夹持杆水平间距为60mm。

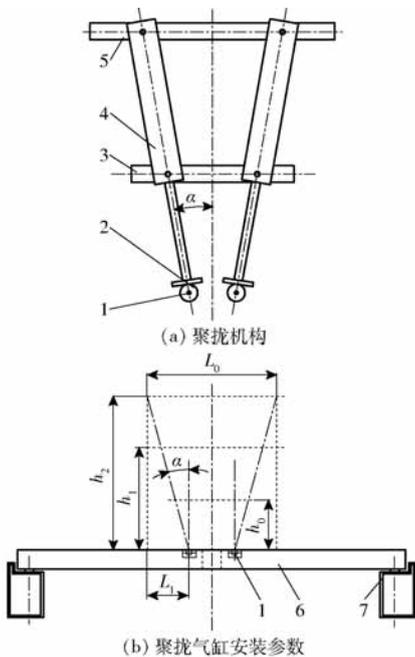


图3 菜叶聚拢机构示意图

Fig. 3 Device sketches for gathering leaves up

1. 夹持杆 2. 夹头 3. 下固定板 4. 聚拢气缸 5. 上固定板
6. 定植板 7. 倍速链

夹持杆聚拢角及聚拢高度需考虑生菜的物理尺寸、农艺参数,如图3所示。统计测量得到:生菜最小高度 h_1 为125mm,最大高度 h_2 为225mm。夹持杆最大展开间距 L_0 设置为生菜株距。

本文设计的试验装置为单株收获,为保证后续研究收获多株生菜时,夹持杆相互不干涉,根据生菜株距等参数,确定聚拢角最大值,其计算方程为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{L_1}{h_2} \\ L_1 = \frac{L_0 - 60}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_1 ——聚拢气缸水平偏移距离
 α ——聚拢角

由式(1)可得,聚拢角最大为 15° 。聚拢角将影响菜叶的聚拢效果及损伤,菜叶聚拢过度(聚拢角过小)会损伤菜叶。根据上述计算及预试验结果,聚拢角范围选为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。

夹持杆聚拢高度需考虑生菜的高度范围及聚拢菜叶的作业要求。聚拢高度过低,菜叶无法完全脱离定植板;聚拢高度过高会造成海绵块从定植孔中拔出;均不符合精准切茎的条件。根据生菜的高度范围 $[h_1, h_2]$ 及预试验,聚拢高度 h_0 的范围选为50~90mm。根据预试验效果,夹持杆聚拢速度范围选为100~500mm/s。

2.2 割台

割台主要包括割刀、刀架、切割气缸等,如图4所示。对茎部的精准切割是保证整株低损收获的关键,切割高度过大会切散、切伤菜叶;根据生菜茎部的高度范围(8~16mm),割刀与定植板上表面间隙设置为5mm。割刀材料为碳钢,长240mm,宽30mm,厚0.5mm。为减小切割力,割刀滑切角设置为 20° ^[21]。为保证切割成功,切割气缸的缸径选为20mm、行程 L_2 选为200mm,切割速度设置为300mm/s。为保证夹持杆及夹头作业空间,刀架与定植板间隙 L_3 设置为80mm。

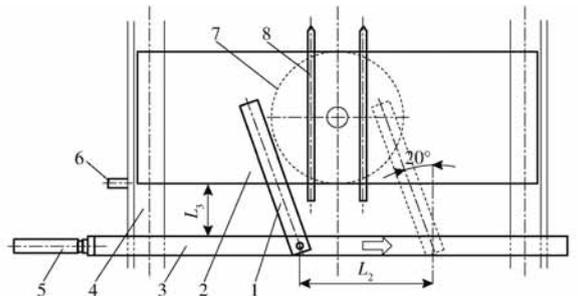


图4 割台结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of cutter bar

1. 割刀 2. 定植板 3. 刀架 4. 倍速链 5. 切割气缸 6. 光电传感器 7. 生菜轮廓 8. 夹持杆

2.3 输送及卸菜机构

切茎后生菜的输送及卸菜主要由聚拢机构、输送气缸和压菜气缸等完成。切茎后的生菜处于夹持状态,经输送气缸(速度300mm/s)运送至输送带。卸菜时,聚拢气缸与压菜气缸同时运动(图5)。压菜气缸行程选为125mm;为减小卸菜损伤,压菜气缸行程底端与夹持杆垂直方向的间隙 L_4 设置为40mm。根据预试验结果,压菜气缸速度范围选为100~500mm/s。

3 收获参数正交试验

3.1 菜叶损伤因素分析

经预试验发现,菜叶损伤有划伤、折伤、切伤

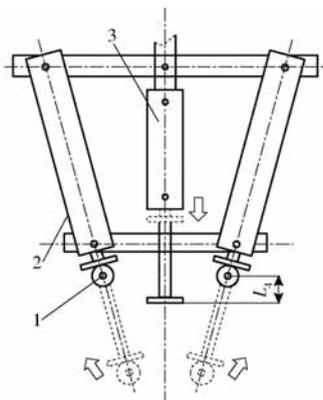


图 5 卸菜过程示意图

Fig. 5 Diagram of putting lettuce down

1. 夹持杆 2. 聚拢气缸 3. 压菜气缸

3 种形式。

由收获作业流程可知, 菜叶划伤、折伤主要由夹持杆聚拢菜叶造成。聚拢菜叶过程生菜受力如图 6 所示。其中, 菜叶受到的夹持杆压力 (F_{N1} 、 F_{N2}) 将影响折伤, 菜叶受到的夹持杆摩擦力 (f_1 、 f_2) 将影响划伤。由于海绵块与定植孔过盈配合, 聚拢过程中, 可将生菜视为固定于定植板, 且整体受力平衡。

水平方向, 力的平衡方程为

$$(f_1 - f_2) \cos\beta = (F_{N1} - F_{N2}) \sin\beta \quad (2)$$

竖直方向, 力的平衡方程为

$$(F_{N1} + F_{N2}) \cos\beta + (f_1 + f_2) \sin\beta = G + f_0 \quad (3)$$

式中 β ——夹持杆压力与竖直方向夹角

G ——重力

f_0 ——定植孔对海绵块摩擦力

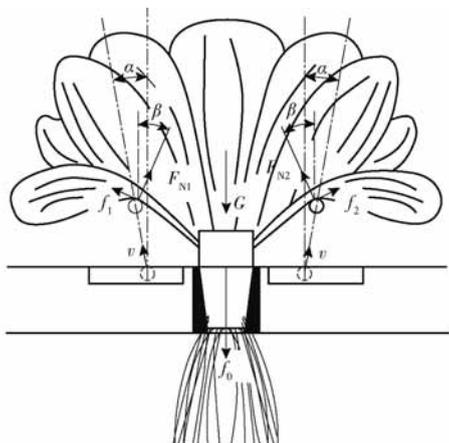


图 6 聚拢过程生菜受力示意图

Fig. 6 Lettuce force diagram during gathering process

由式(2)、(3)可知, 聚拢角影响夹持杆对菜叶作用力。聚拢速度、压菜速度会直接影响菜叶所受冲量, 进而影响菜叶受力。

由收获作业流程可知, 菜叶切伤由割刀造成, 主要受夹持杆聚拢高度、聚拢角的影响。

综合聚拢过程菜叶受力、收获作业流程可知: 菜叶损伤来源主要有聚拢速度不当、聚拢角度不当、聚拢高度不当、压菜速度不当, 如图 7 所示。前面仅得到了聚拢速度、压菜速度、聚拢角、聚拢高度的取值范围, 各因素的最优参数组合还需由正交试验确定。

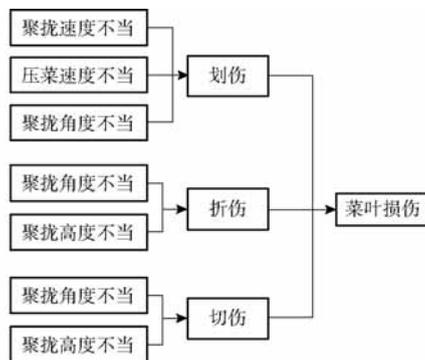


图 7 菜叶损伤因素分析

Fig. 7 Analysis of leaves damage factors

3.2 试验设计

3.2.1 试验装置与材料

为验证水培生菜整株低损收获方法、优化装置参数, 搭建了单株水培生菜收获试验装置, 如图 8 所示。试验材料为水培奶油生菜, 采购自陕西省旭田光电农业科技有限公司, 共 55 株(45 株用于正交试验, 10 株用于验证试验)。该生菜采用深液流水培技术栽培 45 d, 生菜高度范围为 125 ~ 225 mm, 菜叶展开尺寸范围为 200 ~ 280 mm, 茎高范围为 8 ~ 16 mm。

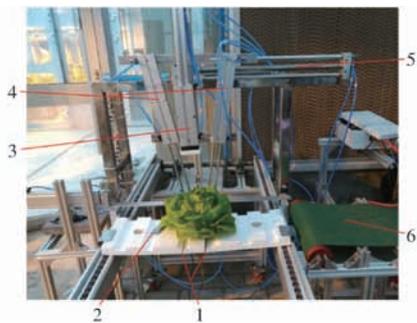


图 8 单株收获试验装置

Fig. 8 Test device for harvesting

1. 夹持杆 2. 割刀 3. 压菜气缸 4. 聚拢气缸 5. 输送气缸
6. 输送带

3.2.2 试验因素与水平

试验因素包括夹持杆聚拢速度、聚拢角、聚拢高度、压菜气缸压菜速度。根据计算所得聚拢角、聚拢高度的取值范围, 聚拢角试验水平选取 5° 、 10° 、 15° , 聚拢高度选取 50、70、90 mm。聚拢气缸及压菜气缸的速度选取高速 (500 mm/s)、中速 (300 mm/s)、低速 (100 mm/s)。试验因素水平如表 1 所示。选用

$L_9(3^4)$ 正交表进行试验设计,共 9 组试验,每组试验重复 5 次,取平均值。

表 1 收获试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of harvesting experiment

水平	因素			
	聚拢速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	聚拢角/ ($^\circ$)	聚拢高度/ mm	压菜速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	100	5	50	100
2	300	10	70	300
3	500	15	90	500

3.2.3 试验指标

试验指标选取菜叶损伤面积,利用图像处理的方法进行测量。由于部分损伤不易直接观察,利用品红染色处理以突显损伤^[22],菜叶损伤面积测量方法如下:

- (1)将收获后生菜分离成单片菜叶。
- (2)将菜叶在 5% 酸性品红中染色 15 min^[22]。
- (3)冲洗菜叶表面品红,擦干菜叶。
- (4)利用微软相机 (Microsoft LifeCam) 采集菜叶图像,相机距载物板上表面高度为 235 mm,载物板背景选用蓝色,如图 9 所示。

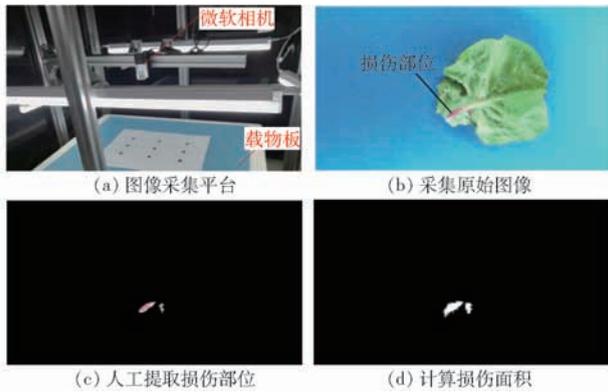


图 9 菜叶图像采集及处理

Fig.9 Image capturing and process of lettuce leaf

(5)进行面积标定,如图 10a 所示,每个面积标定单元尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,共 9 个。菜叶弯曲造成其与载物板上表面不完全在同一水平面上,因此选取相机距载物板高度 235、230、225 mm 3 个水平进行标定,结果如图 10b 所示。标定结果显示: 100 mm^2 内像素数平均值为 1 581 个,像素数的均方根误差为 120 个,变异系数为 7.6%。

(6)在 Photoshop 中人工提取^[23-25]菜叶损伤部位作为图像前景,图像背景为黑色区域部分(即 R 、 G 、 B 值均为 0 的像素),保存图像,如图 9c 所示。

(7)根据面积标定结果,在 Matlab 中计算图像前景像素的面积(即 R 、 G 、 B 均大于 0 的像素数),如图 9d 所示,记为菜叶损伤面积。

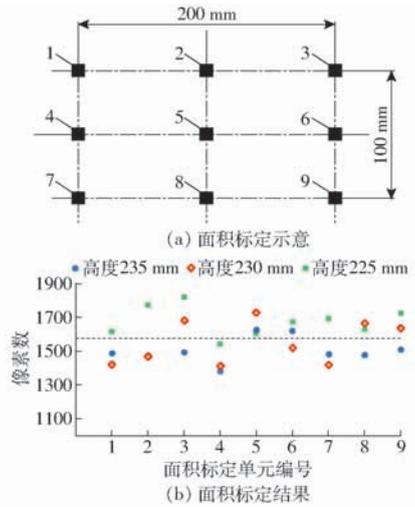


图 10 图像采集面积标定

Fig.10 Calibration of image capturing area

3.3 结果与分析

3.3.1 方差与极差分析

收获正交试验设计与结果如表 2 所示 (A 、 B 、 C 、 D 分别为聚拢速度、聚拢角、聚拢高度、压菜速度水平值);方差分析结果如表 3 所示,由 F 值可知,试验因素对菜叶损伤面积影响的显著性主次次序为:聚拢角、聚拢高度、压菜速度、聚拢速度。

表 2 收获正交试验结果

Tab.2 Results of orthogonal tests for harvesting

试验号	因素				菜叶损伤面积/ mm^2
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	4 512
2	1	2	2	2	2 335
3	1	3	3	3	1 469
4	2	1	2	3	5 451
5	2	2	3	1	2 922
6	2	3	1	2	827
7	3	1	3	2	6 431
8	3	2	1	3	3 544
9	3	3	2	1	476

表 3 正交试验方差分析结果

Tab.3 Analysis of variance for orthogonal tests

因素	偏差平方和	自由度	F
A	767 187	2	0.090
B	31 062 375	2	3.639 *
C	1 188 774	2	0.139
D	1 123 783	2	0.132
误差	34 142 118	8	

注: * 表示在 0.1 水平上显著。

为优化因素组合,获得菜叶损伤面积最小的组合,对表 2 试验结果进行极差分析,如图 11 所示。由图 11 可知:因素的最优组合(菜叶损伤面积最小)为 $A_1B_3C_2D_1$,即聚拢速度为 100 mm/s 、聚拢角为

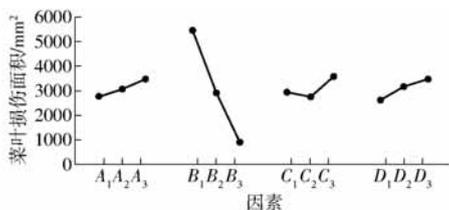


图 11 菜叶损伤面积随因素变化曲线

Fig. 11 Variation curves of leaf damage area with factors

15°、聚拢高度为 70 mm、压菜速度为 100 mm/s。

3.3.2 试验因素对菜叶损伤面积影响的分析

由图 11 可知,菜叶损伤面积随聚拢角的增大而减小;随聚拢高度的增大,先减小后增大,聚拢高度 70 mm 时达到最小;随压菜速度、聚拢速度的增大而增大。压菜速度、聚拢速度越大,菜叶所受冲量越大,因此菜叶损伤越大。利用力学分析、高速摄影,分析聚拢角、聚拢高度对菜叶损伤面积的影响。

(1) 聚拢角

结合生菜受力(图 6)及式(2)、(3)分析聚拢角对菜叶损伤面积的影响。由于菜叶间存在间隙,聚拢角 α 越大,夹持杆对生菜的聚拢程度越小,生菜受到的压力(F_{N1} 、 F_{N2})、摩擦力(f_1 、 f_2)越小,因此菜叶损伤面积随聚拢角的增大而减小(图 11)。

(2) 聚拢高度

由式(3)可知:增大聚拢高度会造成定植孔对海绵块的摩擦力(f_0)增大,进而造成生菜受到的压力(F_{N1} 、 F_{N2})、摩擦力(f_1 、 f_2)增大;因此,增大聚拢高度会增加菜叶受力。正交试验结果显示,菜叶损伤面积随聚拢高度的增大,先减小后增大(图 11)。

利用高速摄影机(OLYMPUS, i-SPEED, 拍摄频率 500 帧/s)对收获过程进行观察,分析上述现象。经高速摄影发现,聚拢高度 50 mm 即可避免割刀切伤菜叶,如图 12 所示,其中聚拢速度为 500 mm/s,聚拢角为 10°,压菜速度为 500 mm/s。图 12a 为初始状态,菜叶贴于定植板;图 12b 显示聚拢过程中,菜叶与定植板分离;图 12c 显示切割茎部时,菜叶已被拢起,割刀不会切伤、切散菜叶;图 12d 显示整株收获效果,切割部位为生菜茎部,菜叶无散开。然而,由于生菜并非对称的几何体,割刀的冲击等外力可能造成切茎后生菜偏斜,如图 13a 所示;此情况下,聚拢高度仅 50 mm 会造成输送过程中菜叶与定植板相互作用(图 13),进而增加菜叶的损伤;图 13 中聚拢速度为 300 mm/s,聚拢角为 15°,压菜速度为 300 mm/s。聚拢高度 70 mm 时,输送过程不会出现菜叶与定植板接触,避免其相互作用;因此,聚拢高度 70 mm 时的菜叶损伤小于聚拢高度 50 mm 时的损伤(图 11)。

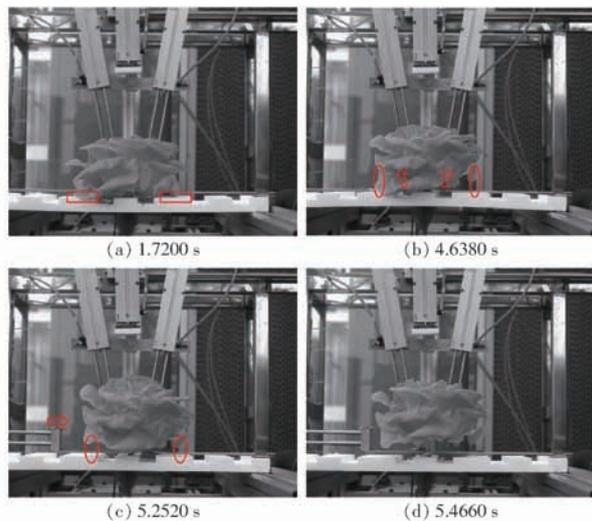


图 12 水培生菜聚拢-切茎过程

Fig. 12 Process of gathering up leaves and cutting stem

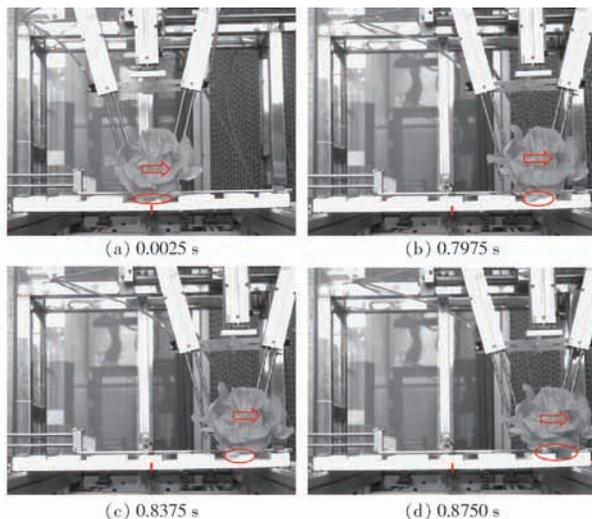


图 13 切茎后生菜输送过程

Fig. 13 Process of transporting lettuce to conveyor

4 验证试验

为验证正交试验优化结果,对最优参数组合(聚拢速度 100 mm/s、聚拢角 15°、聚拢高度 70 mm、压菜速度 100 mm/s)进行试验验证,试验重复 10 次。由于尚无评价水培生菜收获效果的标准,利用菜叶损伤面积 S_1 、损伤程度 η 评价收获作业的效果。定义损伤程度为菜叶损伤面积 S_1 与菜叶总面积 S_0 的比值,即

$$\eta = S_1/S_0 \times 100\% \quad (4)$$

验证试验结果显示:最优组合参数下切割部位均为生菜茎部,切割后生菜上的茎剩余 3 ~ 11 mm,可实现对茎部精准切割;菜叶无散开,可完成生菜整株收获(图 14)。菜叶损伤面积平均值为 432 mm²,标准差为 131 mm²,变异系数为 30.45%;损伤程度平均值为 0.13%,标准差为 0.03%,变异系数为

23.08% (表4);优化效果明显,收获作业生菜损伤较低。

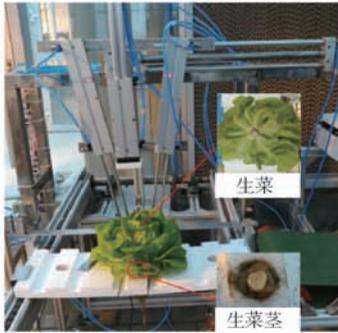


图14 整株低损收获效果

Fig. 14 Harvesting effect of whole and low damage

5 结论

(1)提出了一种水培生菜整株低损收获方法并研制了样机,利用夹持杆对菜叶低损聚拢、割刀对生菜茎部精准切割,可实现整株低损收获。

(2)正交试验表明,影响菜叶损伤面积的显著性主次顺序为聚拢角、聚拢高度、压菜速度、聚拢速度。最优组合参数为聚拢速度 100 mm/s、聚拢角 15°、聚拢高度 70 mm、压菜速度 100 mm/s。通过力

表4 验证试验结果
Tab. 4 Results of verification test

试验号	菜叶损伤	有损伤菜叶	菜叶总	损伤程度 $\eta/\%$
	面积 $S_1/$ mm^2	总面积 $S_2/$ mm^2	面积 $S_0/$ mm^2	
1	483	9 850	323 079	0.15
2	499	9 436	356 647	0.14
3	289	12 678	280 735	0.10
4	691	8 422	393 599	0.18
5	432	13 635	369 133	0.12
6	537	10 442	34 467	0.16
7	463	20 052	345 433	0.13
8	311	11 343	343 444	0.09
9	338	11 953	358 170	0.09
10	273	11 606	284 497	0.10
平均值	432	11 942	339 941	0.13
标准差	131	3 248	35 389	0.03
变异系数/%	30.45	27.23	10.40	23.08

学分析、高速摄影发现:增大聚拢角可减小菜叶受力;聚拢高度 70 mm 时,可避免切茎后生菜在输送过程中菜叶与定植板接触。

(3)验证试验表明,最优组合参数下,生菜均为整株收获,菜叶损伤面积平均值为 432 mm^2 ,损伤程度平均值为 0.13%。

参 考 文 献

- [1] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171201&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.001.
LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 1-18. (in Chinese)
- [2] 齐飞,魏晓明,张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1-9.
QI Fei, WEI Xiaoming, ZHANG Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 1-9. (in Chinese)
- [3] 王俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 81-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140214&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.014.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and it's development [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81-87. (in Chinese)
- [4] 肖体琼,何春霞,陈巧敏,等. 基于机械化生产视角的中国蔬菜成本收益分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 75-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150512&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.012.
XIAO Tiqiong, HE Chunxia, CHEN Qiaomin, et al. Cost-benefit analysis of vegetable production based on agricultural mechanized production [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 75-82. (in Chinese)
- [5] 秦广明,赵映,肖宏儒,等. 高速双动小型手扶式叶菜收获机设计与运动分析[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 9-12.
QIN Guangming, ZHAO Ying, XIAO Hongru, et al. Design and movement analysis of double-acting cutting device of small walking leafy vegetables harvesters [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 9-12. (in Chinese)
- [6] 邹福星,李建平,何相逸,等. 电动自走式温室水体修复植物收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 61-66, 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160609&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.009.
ZOU Fuxing, LI Jianping, HE Xiangyi, et al. Design and experiment of self-propelled water body restoration plants harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 61-66, 82. (in Chinese)
- [7] 施印炎,陈满,汪小昂,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 110-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170215&journal_id=jcsam. DOI: 10.

- 6041/j.issn.1000-1298.2017.02.015.
- SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiment on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 110 - 116. (in Chinese)
- [8] GUARNIERI A, MAGLIONI C, MOLARI G. Dynamic analysis of reciprocating single-blade cutter bars [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 755 - 764.
- [9] NANG V N, YAMANE S. Development of prototype harvester for head lettuce [J]. Engineering in Agriculture, 2015, 8(1): 18 - 25.
- [10] VAN N N, YAMANE S. Cutting component development for a lettuce harvester[C] // American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, Kansas City, 2013.
- [11] SHEPARDSON E, POLLOCK J, REHKUGLER G. Research and development of a lettuce harvester [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1974, 17(2): 212 - 216.
- [12] 权龙哲,申静朝,奚德君,等. 狭闭空间内苗盘物流化搬运机器人运动规划与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1): 51 - 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.008.
- QUAN Longzhe, SHEN Jingchao, XI Dejun, et al. Motion planning and test of robot for seedling tray handling in narrow space [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 51 - 59. (in Chinese)
- [13] 张瑞华,施俊侠,张日红,等. 小型绿叶类蔬菜收获机的收获方案及切割装置设计[J]. 农业科技与装备,2015(10): 11 - 13,16.
- ZHANG Ruihua, SHI Junxia, ZHANG Rihong, et al. Harvest scheme and cutter design of small green leafy vegetables harvester [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(10):11 - 13,16. (in Chinese)
- [14] SCHIED M, HARRIOTT B L. Cutting lettuce stems with a water jet [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1973, 16(3): 440 - 442.
- [15] LENKER D H, ADRIAN P A, FRENCH G W, et al. Selective mechanical lettuce harvesting system [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1973, 16(5): 858 - 861, 866.
- [16] SUZUKI H, SAITO K, SHIOKAWA H, et al. Lettuce harvester development (part 4)-development of trial machine for practical use and field examinations [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2003, 65(6): 141 - 148.
- [17] 高国华,王天宝,周增产,等. 设施蔬菜收获切割影响因素优化试验[J]. 农业工程学报,2015,31(19):15 - 21.
- GAO Guohua, WANG Tianbao, ZHOU Zengchan, et al. Optimization experiment of influence factors on greenhouse vegetable harvest cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19):15 - 21. (in Chinese)
- [18] 高国华,王凯,苑严伟,等. 基于能量平衡的设施蔬菜收获机拉拔切割过程力学特性分析[J]. 农业工程学报,2017, 33(24):58 - 64.
- GAO Guohua, WANG Kai, YUAN Yanwei, et al. Mechanical characteristic analysis of drawing and cutting process for greenhouse vegetable harvester based on energy balance theory[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 58 - 64. (in Chinese)
- [19] CHO S I, CHANG S J, KIM Y Y, et al. AE-automation and emerging technologies: development of a three-degrees-of-freedom robot for harvesting lettuce using machine vision and fuzzy logic control [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 143 - 149.
- [20] UCHIDA T, YAMANO T, MIYAZAKI H. Development on automatic harvesting system for leaf vegetables [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1994, 6(3): 197 - 202.
- [21] 陈诚,俞国胜. 往复式灌木切割器滑切角对灌木切割的影响[J]. 北京林业大学学报,2011,33(2):115 - 119.
- CHEN Cheng, YU Guosheng. Effect of silding cutting angle of bush reciprocating cutter on bush cutting[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(2):115 - 119. (in Chinese)
- [22] 王向阳,于胜爽,潘炎,等. 青菜机械损伤的检测方法研究[J]. 北方园艺,2014(5):26 - 30.
- [23] 崔永杰,苏帅,王霞霞,等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5): 247 - 252. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130543&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.043.
- CUI Yongjie, SU Shuai, WANG Xiaxia, et al. Recognition and feature extraction of kiwifruit in natural environment based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 247 - 252. (in Chinese)
- [24] 李凯,冯全,张建华. 棉花苗叶片复杂背景图像的联合分割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2017,29(10):1871 - 1880.
- LI Kai, FENG Quan, ZHANG Jianhua. Co-segmentation algorithm for complex background image of cotton seedling leaves [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017,29(10):1871 - 1880. (in Chinese)
- [25] 崔永杰,王霞霞,徐立青,等. 基于机器视觉的嫁接用苗外观特征自动检测[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):89 - 95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140414&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.014.
- CUI Yongjie, WANG Xiaxia, XU Liqing, et al. Automatic detection for external features of grafting seedlings based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 89 - 95. (in Chinese)