

鲜食葡萄袋中袋包装装置设计与试验

刘平^{1,2} 高德政^{1,2} 王春颖^{1,2} 李双双^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要:为解决鲜食葡萄采摘、收集和运输过程中的损伤问题,设计了鲜食葡萄袋中袋包装装置,采摘作业时与机械臂协同工作,通过袋中袋包装避免损伤,包装完成后葡萄可直接落入收集筐,提高鲜食葡萄机械采收效率。首先,基于葡萄表面硬度、质量损失率、表面破裂指数和穿刺破裂力等损伤指标,确定袋中袋包装装置最佳充气气压为4 kPa,通过撑袋过程袋中袋受力分析与袋口形状分析,确定吸盘直径、撑袋距离和同侧吸盘距离为30、125、95 mm;然后,建立葡萄果实图像大小与充气时间关系模型,自动调节充气时间,保证不同大小的葡萄在充气包装完毕后都能达到最优的保护效果。最后,以巨峰葡萄为试验对象,试验结果表明无损收集成功率为95%,平均包装时长为28.4 s,最大气压偏差为0.2 kPa,平均气压偏差率为1.1%,平均损伤破裂率为1.5%,平均脱粒率为0.2%,包装效率为126串/h。袋中袋包装装置作业性能稳定,鲜食葡萄无损包装成功率高,避免了损伤,确保了新鲜度,提高了采摘收集效率。

关键词:鲜食葡萄;袋中袋;包装装置;力学特性;无损采收

中图分类号: S225.93; F760.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0376-09 OSID: 

Design and Experiment of Bag-in-bag Packaging Device for Fresh Grapes

LIU Ping^{1,2} GAO Dezheng^{1,2} WANG Chunying^{1,2} LI Shuangshuang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: In order to solve the problem of damage in the process of picking, collecting and transporting fresh grapes, a bag-in-bag packaging device was designed to work with the robotic arm during the picking operation to avoid damage through bag-in-bag packaging, and the grapes can fall directly into the collection basket after the packaging was completed to improve the efficiency of mechanical harvesting of fresh grapes. Firstly, based on the damage indexes such as grape surface hardness, quality loss rate, surface rupture index and puncture rupture force, the optimal inflation air pressure of the bag-in-bag packaging device was determined to be 4 kPa, and the suction cup diameter, bag-in-bag distance and ipsilateral suction cup distance were determined to be 30 mm, 125 mm and 95 mm through the bag-in-bag force analysis and bag opening shape analysis during the bag propping process; then the relationship between grape fruit image size and inflation time was established. The relationship between grape fruit image size and inflation time was modeled, and the inflation time was automatically adjusted to ensure that grapes of different sizes could achieve the optimal protection effect after inflation and packing. Finally, the test results showed that the success rate of nondestructive collection was 95%, the average packing time was 28.4 s, the maximum atmospheric pressure deviation was 0.2 kPa, the average air pressure deviation rate was 1.1%, the average damage rupture rate was 1.5%, the average threshing rate was 0.2%, and packaging efficiency was 126 strings/h. The bag-in-bag packaging device had stable operational performance, high success rate of non-destructive packaging of fresh grapes, which can avoid damage, ensure freshness, and improve picking and collecting efficiency.

Key words: fresh grapes; bag-in-bag; packaging device; mechanical properties; non-destructive harvesting

收稿日期: 2022-01-26 修回日期: 2022-05-15

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020KF002)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021LZGC013、2021TZXD001)和国家自然科学基金项目(31871543)

作者简介: 刘平(1983—),女,教授,博士生导师,主要从事农业智能装备和植物表型鉴定研究, E-mail: liupingsdau@126.com

0 引言

随着农业采摘机械化、智能化的发展,机械臂取代人工是鲜食葡萄采收的趋势^[1-4],由于鲜食葡萄含水量较高,在采收、包装和运输过程中会因缺少有效保护造成磨损、挤压、破裂和脱粒等损伤。亟需设计一款联合机械臂协同采摘的包装装置,采摘后即时收集,避免上述损伤。

徐勤超等^[5]设计球形水果塑料发泡网套包装机,采用柔性扩膜锥体扩膜,倒刺卡桶下膜包装;张克平等^[6]设计气动式水果包装机,编写 PLC 程序对系统中的设备进行控制,完成水果网套过程中的连续动作;而鲜食葡萄果实表皮较薄,汁水丰富,上述设计并不适用。张虎等^[7]研究了不同机械损伤对葡萄果实质地的影响,肖越等^[8]研究了不同包装下的葡萄在贮运过程中跌落与震动损伤,为合理选择葡萄包装提供理论基础,但均未做出包装装置,且针对鲜食葡萄机械采摘后自动包装机械相关研究较少。

目前,越来越多的鲜食葡萄种植户选择气体包装进行缓冲^[9-13],其中袋中袋的包装方式可有效避免葡萄运输过程中的损伤,且充气完毕无需封口,提高鲜食葡萄包装效率。但其充气过程是人工依据经验完成,没有统一的充气标准,导致充气气压不同而保护效果参差不齐。因此本文分析袋内气压与鲜食葡萄保护效果的关系,设计鲜食葡萄袋中袋包装装置,联合机械臂采摘鲜食葡萄,取代人工采收和充气包装,提高葡萄采摘效率,减少运输过程中的损伤。

1 鲜食葡萄袋中袋采收末端结构与工作原理

鲜食葡萄袋中袋采收末端主要包含鲜食葡萄袋中袋包装装置和机械臂,两者协同工作,完成葡萄的无损采摘、收集和包装过程。

1.1 鲜食葡萄袋中袋包装装置结构

针对篱壁种植模式的鲜食葡萄,设计了鲜食葡萄袋中袋包装装置,如图 1,主要由储袋箱、取袋机构、撑袋机构和充气机构组成。储袋箱前部开有取袋窗口,便于取袋,推袋板与储袋箱后部弹簧连接,通过弹簧挤压向前推袋。取袋转板和撑袋平板安装于储袋箱的两侧,取袋转板由电机驱动,撑袋平板由撑袋电缸驱动,取袋转板和撑袋平板均安装真空吸盘,通过空压机连接真空发生器提供负压。电动推杆固定于取袋转板内侧,推杆的往复运动带动高压充气喷头上、下移动,完成充气动作,具体参数如表 1。

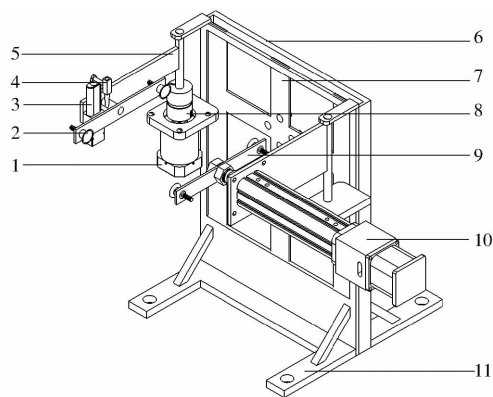


图 1 鲜食葡萄袋中袋包装装置结构图

Fig. 1 Fresh grapes bag-in-bag packaging device structure diagram

1. 旋转电机 2. 吸盘 3. 电动推杆 4. 高压充气喷头 5. 取袋转板 6. 储袋箱 7. 推袋板 8. 联轴器 9. 撑袋平板 10. 撑袋电缸 11. 底座

表 1 鲜食葡萄袋中袋包装装置参数

Tab. 1 Parameter of bag-in-bag packaging device for fresh grapes

参数	数值
装置长×宽×高/(mm×mm×mm)	680×375×275
袋中袋长×宽×高/(mm×mm×mm)	370×250×2
取袋窗口长×宽/(mm×mm)	320×240
旋转电机扭矩/(N·m)	1.2
撑袋电缸行程/mm	150
电动推杆行程/mm	30
真空压缩机压力/kPa	800
真空发生器最大负压/kPa	-800

由于袋中袋是软性材料,其充气孔与充气喷头之间易因受力不均产生形变,市面上的喷头均较粗,无法满足充气需求。因此设计充气机构,3D 打印符合袋中袋充气口尺寸的高压充气喷头和袋口支撑环。袋口支撑环放置袋中袋充气通道顶部,将软性袋口撑开,确保高压充气喷头下降时能够顺利插入。

1.2 机械臂结构

机械臂选择 Denso 6 轴 6 自由度机械臂,底座尺寸 160 mm×160 mm,手臂宽度为 110 mm,响应速度快,定位精度高。为满足采摘需求,设计了拍摄—剪切—夹持机构,主要包括深度相机、舵机、异型齿盘、单面刀片、连接杆和夹持片等零件^[14],如图 2。

1.3 鲜食葡萄袋中袋采收末端工作原理

鲜食葡萄袋中袋包装装置与机械臂协同工作,完成葡萄的无损采收,如图 3。在葡萄采摘过程中,首先,位于机械臂末端的深度相机识别到葡萄后,将深度相机与葡萄的距离信息反馈到 PC 端,不断调节拍摄—剪切—夹持机构位置与葡萄距离为 250 mm,正对葡萄进行拍摄,将图像传输至上位机,上位机图

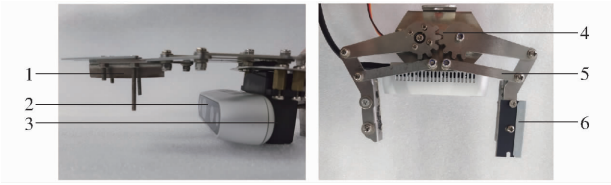


图2 拍摄—剪切—夹持机构实物图

Fig. 2 Photo-shear-holding mechanism physical picture

1. 夹持片 2. 深度相机 3. SAIBO 舵机 4. 异型齿盘 5. 连接杆 6. 单面刀片

像处理后获取葡萄位置和果实面积信息,通过控制舵机开合完成剪切和夹持动作,机械臂夹持葡萄移动至袋口上方。

机械臂采摘葡萄同时,鲜食葡萄袋中袋包装装置的旋转电机带动取袋转板转动 90° 至储袋箱窗口,吸盘将袋中袋吸牢,取袋转板复位至初始位置,将袋中袋取出(图4a);撑袋电缸驱动撑袋平板伸出,撑袋平板的吸盘接触到袋中袋后,真空发生器为吸盘提供负压,将袋中袋吸牢,撑袋电缸带动吸盘回缩,保持袋口撑开,等待鲜食葡萄落入(图4b)。

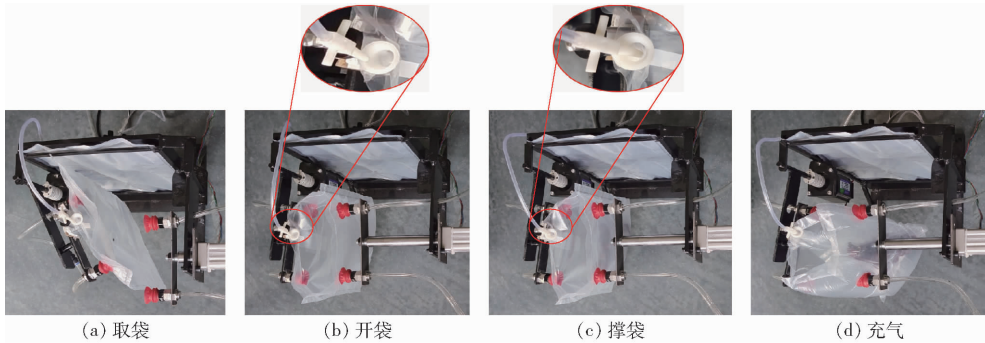


图4 包装过程示意图

Fig. 4 Packaging process diagrams

2 鲜食葡萄袋中袋包装装置关键参数确定

2.1 葡萄力学特性分析

选择多种果穗形态的巨峰葡萄12串,每串随机挑选带果梗葡萄10粒,共计120粒,测量其单粒平均赤道直径为28.88 mm,用质构仪测量所选葡萄纵向破裂力,试验过程中将葡萄放置于试验台,保持果梗与试验台平行,选取圆形平面压头,直径50 mm,以0.25 mm/s的加载速率缓慢加载,探头首先与葡萄赤道部分接触,随着探头的下降,葡萄头部先发生破裂,记录破裂时载荷,如图5和图6,所测葡萄的平均破裂力为18.63 N,最小破裂力为16.25 N,因此袋内充气气压对葡萄的压力应小于16.25 N。

2.2 最佳充气气压确定

袋中袋充气完毕后,内袋完全紧贴在葡萄上,如图7,袋内气压会对葡萄产生一定的压力,气压越大,压力越大,为了避免在充气时将葡萄挤裂,对单

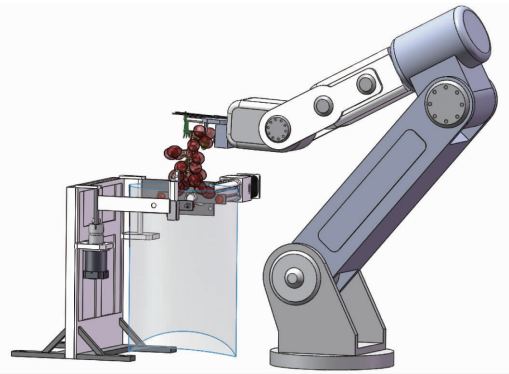


图3 鲜食葡萄袋中袋包装装置与机械臂协同工作示意图

Fig. 3 Schematic of bag-in-bag packaging device for fresh grapes worked in tandem with robotic arm

机械臂夹持装置释放葡萄落入袋中后,给袋中袋包装装置发送信号,电动推杆运动带动高压充气喷头下落(图4c)。开始充气,按照果实图像大小与充气时间关系确定充气时间,完成充气过程(图4d)。充气完毕后,吸盘停止提供负压,包装完毕的葡萄落入收集筐,完成鲜食葡萄收集过程。

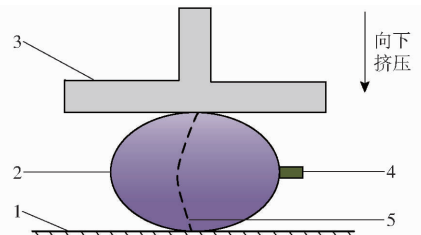


图5 单粒葡萄挤压示意图

Fig. 5 Single grape squeeze diagram

1. 试验台 2. 破裂位置 3. 质构仪平板探头 4. 果梗 5. 赤道直径

个葡萄的力学特性进行分析,确定最大充气气压。

充气完毕后的袋中袋将葡萄完全包裹,袋中袋内袋与葡萄接触处的葡萄受到的力最大,最容易破裂^[15],如图8。

接触点处的葡萄与袋中袋内袋接触,接触力为 F ,与相邻葡萄对接触点处葡萄作用的合力 $\sum F_i$ 相等。接触点处葡萄对相邻葡萄的作用力 F_{i3} 等于内

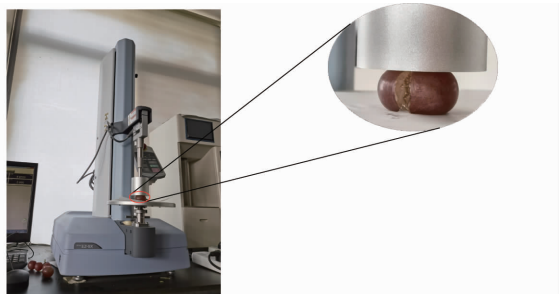


图 6 单粒葡萄挤压试验
Fig. 6 Single grape squeeze test

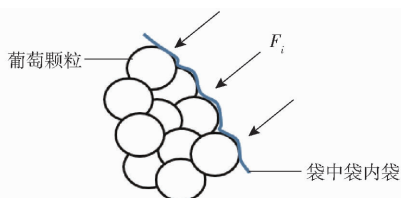


图 7 葡萄受袋中袋内袋挤压力示意图
Fig. 7 Grapes subjected to bag-in-bag inner bag squeeze pressure diagram

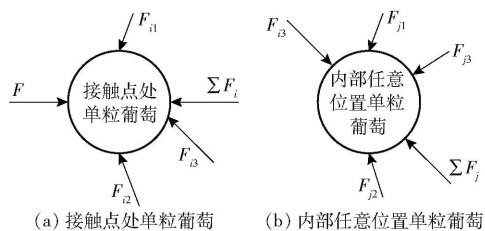


图 8 单粒葡萄受力分析图
Fig. 8 Single grape force analysis diagrams

部其他葡萄对该葡萄的合力 $\sum F_j$, 根据力的传递性和作用力与反作用力可得 $F > F_{i3} > F_{j3}$, 因此, 若与内袋接触的葡萄未发生破裂, 内部葡萄也不会发生破裂, 因此依据单粒葡萄挤压破裂试验, 确定单粒葡萄的挤压破裂力, 充气气压产生的压力应小于单粒葡萄的挤压破裂力。确保充气的气压所产生的压力应小于单粒葡萄的最小破裂力要求。

由于葡萄排列紧凑, 其最外层单粒葡萄与袋中袋内袋接触的面积 S_g 范围为

$$\frac{1}{4}S \leq S_g \leq \frac{1}{2}S \quad (1)$$

式中 S ——单粒葡萄表面积, mm^2

取单粒葡萄为研究对象, 根据公式

$$p_{\max} = \frac{10^6 F_{\max}}{S_1} \quad (2)$$

$$S = 4\pi r^2 \quad (3)$$

$$S_1 = \pi r^2 \quad (4)$$

式中 F_{\max} ——内袋对最外层葡萄最大压力, N

p_{\max} ——袋内气体最大气压, Pa

S_1 ——葡萄赤道横截面积, mm^2

r ——葡萄赤道部分半径, mm

最大气压产生的压力 F_{\max} 与葡萄破裂最小力相同, 均为 16.25 N, 赤道部分半径为 14.44 mm, 袋中袋内袋与单粒葡萄接触面积取 $S/2$, 计算得 $p_{\max} = 24.8 \text{ kPa}$, 即充气气压不能超过 24.8 kPa。

考虑到充气完毕后葡萄在落入收集筐的瞬间, 袋内气压会由于撞击急剧增大, 通过试验来确定最佳充气气压。选择大小相近、成熟度一致的巨峰葡萄 60 串, 分为 12 组, 每组 5 串。1 组作为对照组, 不做处理, 其余 11 组作为试验组, 试验跌落高度设置 600 mm (鲜食葡萄袋中袋包装装置与收集筐高度为 300 ~ 600 mm 可调节, 600 mm 为最高跌落高度)。对照组不跌落, 试验组同时进行跌落试验, 其余 11 组向袋内充气至袋内气压分别为 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 kPa。跌落保护效果通过表面破裂指数^[16]、表面硬度^[17]、质量损失率^[18]和穿刺破裂力 4 个损伤指标来衡量:

(1) 表面破裂指数反映破裂损伤。把跌落后葡萄裂缝长度划为 4 个等级: 0 级, 未破裂; 1 级, 裂缝长度占葡萄纵向直径的 0 ~ 10%; 2 级, 裂缝长度占葡萄纵向直径的 10% ~ 30%; 3 级, 裂缝长度超过 30%。通过细线测量裂缝长度和葡萄周长, 计算表面破裂指数, 表面破裂指数的计算公式为

$$I_s = \frac{\sum_{i=1}^4 (l_i m_i)}{4m_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中 I_s ——表面损伤指数

l_i ——破裂级别 m_i ——总果实数

m_i ——该级破裂果实数

(2) 表面硬度反映挤压损伤。采用岛津 (日本) 质构仪测量跌落试验后未破裂的葡萄赤道部分表面硬度, 设定圆形平板探头 (直径 50 mm), 速度为 0.25 mm/s。每串取 10 粒未破裂的葡萄进行测量。

(3) 质量损失率反映脱粒损伤。用天平测量每串葡萄跌落前后的质量。计算公式为

$$r_m = \frac{m_f - m_a}{m_f} \times 100\% \quad (6)$$

式中 r_m ——质量损失率, %

m_f ——跌落前质量, kg

m_a ——跌落后质量, kg

(4) 穿刺破裂力反映果实口感^[19]。采用岛津 (日本) 质构仪测量跌落后未破裂的赤道部分穿刺破裂力, 选取柱形探头 (直径 2 mm), 速度为 0.25 mm/s。每串取 10 粒未破裂的葡萄进行测量。

对照组表面破裂指数为 0, 表面硬度为 18.63 N, 质量损失率为 0, 穿刺破裂力为 3.25 N。试验组的损伤指标平均值和方差如图 9。

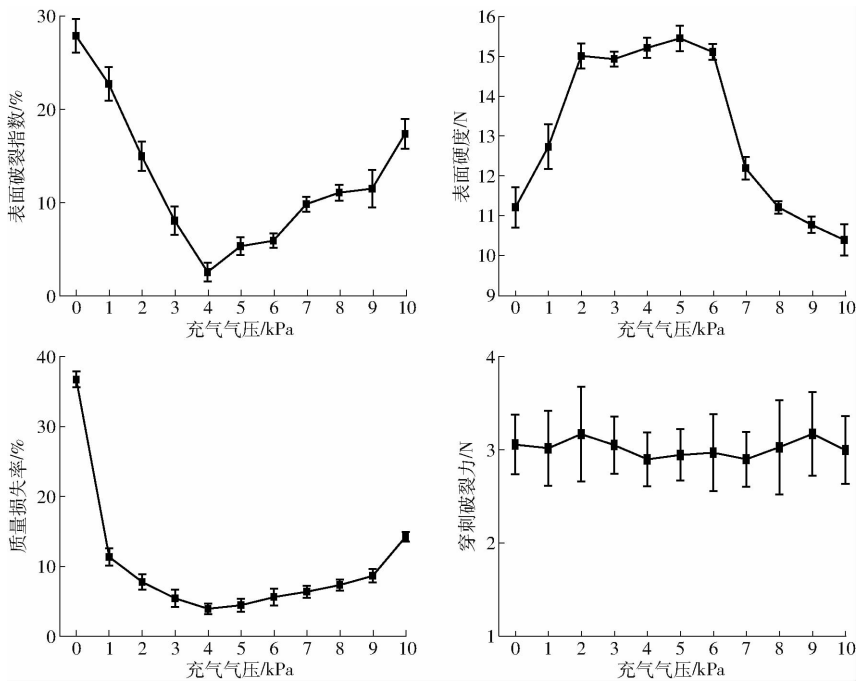


图9 不同充气气压下跌落保护效果试验结果

Fig. 9 Test results of fall protection effect under different inflation air pressures

充气气压为4 kPa时,表面破裂指数低于其他几组,只有2.3%,保护效果最好。

充气气压低于2 kPa时,葡萄的表面硬度较低,说明充入气压较低,葡萄果粒与地面发生碰撞导致保护效果不佳,充气气压超过6 kPa,表面硬度下降,说明充入气压过高,葡萄在跌落过程中袋中袋受到撞击时气压过大,内袋挤压葡萄,表面硬度下降。

充气气压为3~5 kPa时,质量损失率较低,均保持在5%上下,4 kPa时质量损失率最低,为3.1%,低于2 kPa或超过6 kPa,质量损失率较高,说明充入气压过低或过高,在跌落的瞬间造成葡萄较为严重的脱粒损伤。

对于跌落未破裂的葡萄,充入气压对穿刺破裂力基本无影响,即口感基本不会改变。

综上所述,充气气压为4 kPa时,表面破裂指数为2.3%,表面硬度为15.1 N,质量损失率为3.1%,穿刺破裂力为2.95 N,保护效果最佳。

2.3 吸盘直径和撑袋距离确定

为保证机械臂夹持鲜食葡萄释放落入袋中时撑袋过程能够保持袋中袋不掉落,对撑袋过程中袋中袋受力分析,如图10所示。在撑袋过程中,4个吸盘与袋中袋形成4点接触,果实重力为 G ,袋中袋的质量可以忽略,吸盘与袋中袋的摩擦力为 F_f ,吸盘吸力为 F_s ,吸盘吸牢袋中袋且不掉落临界条件:果实重力小于等于袋中袋与吸盘之间产生的最大静摩擦力^[20-21]。

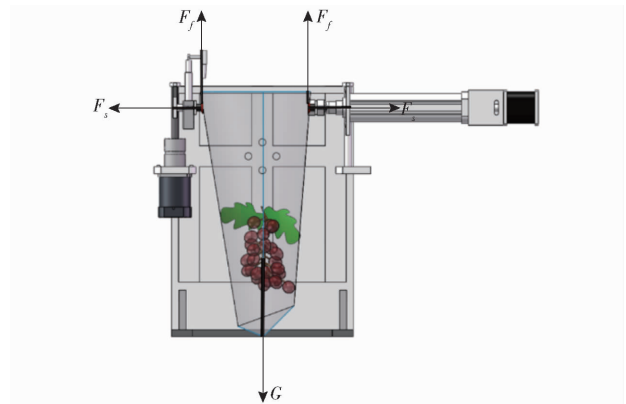


图10 撑袋过程中袋中袋受力分析

Fig. 10 Force analysis of bag-in-bag in process of bag propping

4个吸盘吸住袋中袋时产生的最小吸力 F_s 满足

$$F_s \geq \frac{G}{4\mu} \quad (7)$$

式中 μ ——真空吸盘与袋中袋的摩擦因数

葡萄质量在0.2~2 kg之间, μ 在0.8左右,取葡萄质量为2 kg,摩擦因数为0.8,可得 $F_s = 6.125$ N,即在选择气动装置时,为保证撑袋装置稳定性,要求每个吸盘均至少能提供6.125 N的吸力。空压机气压为800 kPa,真空发生器最大负压为-800 kPa,采用竖直起吊方式,如图11,所购买吸盘内负压为真空发生器负压的70%。

为保证撑袋过程中葡萄落入袋内时袋中袋不跌落,需确定吸盘直径。

根据机器人真空泵选型得吸盘直径的计算公

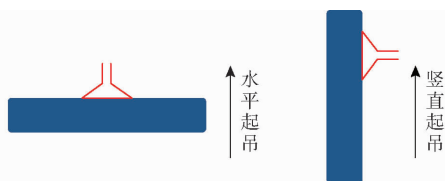


图 11 起吊方式示意图

Fig. 11 Diagram of lifting method

式

$$D \geq \sqrt{\frac{4Wt_1}{\pi n_i p_k}} \quad (8)$$

其中 $p_k = (0.63 \sim 0.95) p_v$ (9)

式中 D ——吸盘直径, mm

W ——吸盘吸取物体的重力, N

t_1 ——安全系数, 水平起吊时, $t_1 \geq 4$, 竖直射吊时, $t_1 \geq 8$

n_i ——吸盘个数

p_k ——吸盘内真空度, kPa

p_v ——真空发生器或真空泵最大负压, kPa

得出吸盘直径应大于 28.46 mm, 因此, 选择标准吸盘直径为 30 mm。

撑袋过程中为了保证袋口能够撑至最大, 需要对撑袋距离和同侧吸盘距离进行确定, 撑袋过程中吸盘移动俯视图如图 12, 同侧吸盘距离为 c , 两侧吸盘距离为 a , 撑袋距离为 b , 在撑袋过程中, 撑袋电缸控制撑袋吸盘回缩, 慢慢将袋中袋打开, 袋口周长保持 500 mm 不变, 为了使袋口内接圆直径最大, 在吸盘移动过程中, 内接圆直径 $r = \min(a, b)$ 不断变化, 当 $a = b$ 时, 内接圆直径最大, $r = 125$ mm, 同侧吸盘距离 c 为 95 mm。

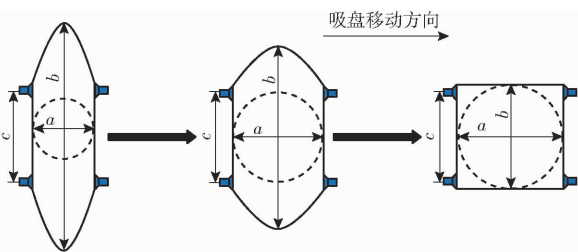


图 12 撑袋过程中吸盘移动俯视图

Fig. 12 Top view of suction cup movement in process of bag support

2.4 最佳充气时间确定

不同体积的葡萄装到相同大小的袋中, 为保证充气完毕后能够达到最优的保护效果, 向袋内充气时间是不同的, 由于袋中袋单向进气的特点, 不将其戳破很难得到其内部的气压, 通过试验来分析葡萄体积与充气时间的关系, 根据葡萄体积自调节最优充气时间, 保证每一串葡萄在包装完毕后都能达到最佳的保护效果。

准备 25 串体积不同、新鲜的巨峰葡萄, 通过深度相机正对葡萄 250 mm 拍照, 图像处理获取果实图像大小信息(白色像素点个数表示图像中葡萄面积), 如图 13, 通过排水法测量葡萄体积, 再将已知体积的葡萄装入袋中袋内, 进行充气, 通过气压表连接气针, 将袋戳破, 实时测量袋内气压, 当气压为 4 kPa 时, 停止充气, 记录充气时间。

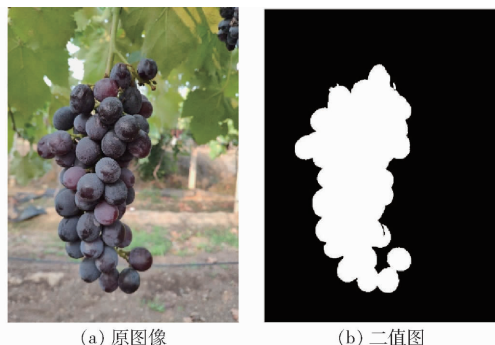


图 13 图像处理获得葡萄像素点数

Fig. 13 Image processing to obtain number of grape pixel points

根据试验数据建立果实图像大小与充气时间的关系模型

$$t = 6.89 \times 10^{-10} P_i - 2.37 \times 10^{-4} P_i + 25.99 \quad (10)$$

式中 t ——充气时间, s

P_i ——葡萄图像像素点数

拟合曲线如图 14 所示。

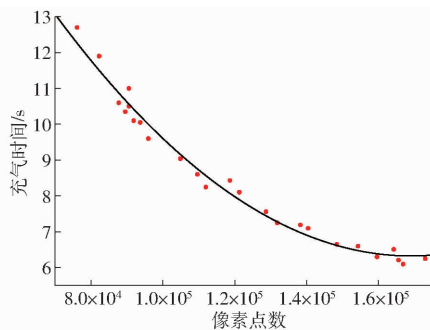


图 14 葡萄像素点数与充气时间关系曲线

Fig. 14 Curve of grape pixel count versus inflation time

鲜食葡萄袋中袋包装装置的自调节充气原理如下: 单片机接收到 PC 端返回的果实图像大小信息, 根据式(10)计算该串葡萄所需充气时间, 通过控制电磁阀的关断时间来控制充气时间, 完成自动充气过程。

3 控制系统设计

鲜食葡萄袋中袋包装装置与机械臂协同工作, 可实现鲜食葡萄的无损采收包装, 整体控制流程如图 15。

机械臂通过 PC 端控制, 袋中袋包装装置控制

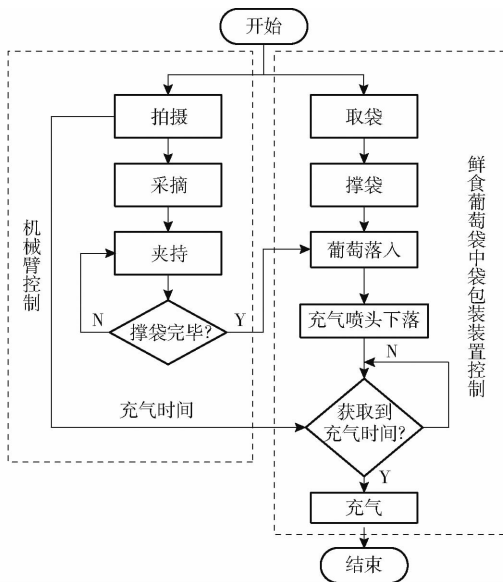


图 15 控制系统流程图

Fig. 15 Control system flow chart

系统程序采用 C 语言在 Keil u Vision 5 开发环境中编写,以正点原子 STM32F103ZET6 开发板为核心,主程序调动相应的若干模块实现整个袋中袋收集、充气 and 包装过程。

控制过程:在葡萄采摘过程中,首先,位于机械臂末端的深度相机识别到葡萄后移动至距离葡萄 25 cm 处,正对葡萄拍摄图像,将图像传输至上位机,上位机图像处理后获取葡萄位置和果实图像大小信息,同时,袋中袋包装装置完成取袋和撑袋动作,当撑袋准备完毕后,装置向单片机发送完成指令,单片机判断机械臂是否移动到袋中袋上方,若未完成,继续等待,若已就位,机械臂释放葡萄,落入袋中。高压充气喷头下落,等待单片机发送充气时间信息,接收到信息后,按照此时间控制充气喷头的开关,完成充气过程,实现鲜食葡萄无损采收。

4 试验

4.1 试验结果

选购 40 串成熟度一致、表面无损伤的巨峰葡萄进行包装跌落保护试验,样品质量为 0.30 ~ 0.65 kg,机械与人工各包装 20 串后进行跌落保护试验,跌落高度设置为 300 mm。袋中袋包装装置样机如图 16。

通过包装试验考核样机的平均包装时长、平均气压偏差率、平均表面破裂率、平均脱粒率、工作效率和包装合格率。机械包装结果如图 17,包装试验结束后将葡萄取出,机械包装与人工包装的鲜食葡萄损伤情况对比如图 18,试验结果如表 2。

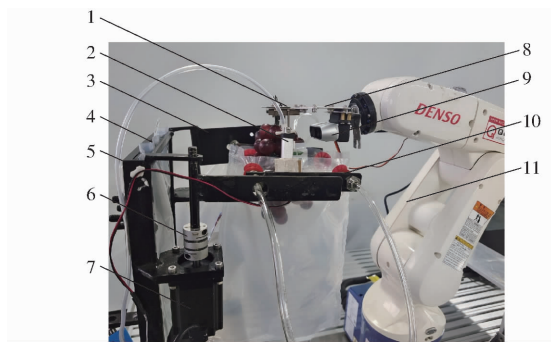


图 16 鲜食葡萄袋中袋包装装置

Fig. 16 Fresh grapes bag-in-bag packaging device

1. 单面刀片
2. 充气机构
3. 电缸支架
4. 袋中袋
5. 储袋箱
6. 联轴器
7. 旋转电机
8. 连接杆
9. 深度相机
10. 真空吸盘
11. 机械臂



图 17 包装结果

Fig. 17 Packaging result

1. 袋中袋
2. 气针
3. 巨峰葡萄
4. 软 PU 管
5. 数字气压表



(a) 机械包装

(b) 人工包装

图 18 机械与人工包装对比

Fig. 18 Mechanical and manual packaging comparison charts

表 2 机械与人工包装试验结果

Tab. 2 Mechanical and manual packaging test results

参数	数值	
	机械包装	人工包装
平均包装时长/s	28.4	24.6
最大气压偏差/kPa	0.2	1.8
平均气压偏差率/%	1.1	11.4
平均表面破裂率/%	1.5	6.1
平均脱粒率/%	0.2	0.8
工作效率/(串·h ⁻¹)	126	145
包装合格率/%	95	70

平均包装时长 t_s 为

$$t_s = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (11)$$

式中 t_i ——第 i 串葡萄包装时长, s

n ——试验葡萄串数,取20

最大气压偏差 p_m 为

$$p_m = \max(|p_i - p_s|) \quad (12)$$

式中 p_i ——第 i 串葡萄袋内气压,Pa

p_s ——标准气压,取4 kPa

平均气压偏差率 d_p 为

$$d_p = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - p_s|}{np_s} \times 100\% \quad (13)$$

平均表面破裂率 r_d 为

$$r_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{a_i} \times 100\% \quad (14)$$

式中 c_i ——第 i 串葡萄破裂粒数

a_i ——第 i 串葡萄总粒数

平均脱粒率 r_f 为

$$r_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{a_i} \times 100\% \quad (15)$$

式中 f_i ——第 i 串葡萄脱粒数

工作效率 e 为

$$e = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} \times 3\ 600 \quad (16)$$

包装合格率 d_q 为

$$d_q = \frac{n_q}{n} \times 100\% \quad (17)$$

式中 n_q ——未脱粒、未破裂的葡萄总串数

4.2 结果分析

由表2可知,鲜食葡萄袋中袋包装装置平均包装时长为28.4 s,试验过程中机械连续工作,运行平稳,最大气压偏差为0.2 kPa,平均气压偏差率为1.1%,平均表面破裂指数为1.5%,平均脱粒率为

0.2%,每小时可包装126串,包装合格率为95%。人工平均单果包装时间为24.6 s,最大气压偏差为1.8 kPa,平均气压偏差率为11.4%,平均表面破裂率为6.1%,平均脱粒率为0.8%,每小时可包装145串,包装合格率为70%。袋中袋包装装置包装的最大气压偏差、平均气压偏差率、平均表面破裂指数和平均脱粒率指标都远低于人工,充入气压稳定,保护效果好。但机械包装的工作效率略低于人工,可通过改进包装过程,或者多组机械同时作业提高效率。

5 结论

(1)设计了鲜食葡萄袋中袋包装装置,以葡萄表面硬度、质量损失率、表面破裂指数和穿刺破裂力为损伤指标,确定袋中袋包装装置最佳充气气压为4 kPa,通过撑袋过程中袋中袋受力分析与袋口形状分析,确定吸盘直径、撑袋距离和同侧吸盘距离为30、125、95 mm。

(2)建立葡萄果实图像大小与充气时间的关系模型,保证不同体积的葡萄在充气包装完毕后都能达到最优的保护效果。

(3)样机试验表明,样机稳定运转,平均单果包装时长为28.4 s,最大气压偏差为0.2 kPa,平均气压偏差率为1.1%,平均表面破裂指数为1.5%,平均脱粒率为0.2%,每小时可包装126串,包装合格率为95%。

(4)机械包装效果明显优于人工,降低了劳动强度,但作业效率略低,可通过改进包装过程或者多组机械共同工作提高作业效率,可为鲜食葡萄自动化无损采收提供参考。

参 考 文 献

- [1] 宁政通, 罗陆锋, 廖嘉欣, 等. 基于深度学习的葡萄果梗识别与最优采摘定位[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 222-229. NING Zhengtong, LUO Lufeng, LIAO Jiaxin, et al. Recognition and the optimal picking point location of grape stems based on deep learning[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 222-229. (in Chinese)
- [2] 刘平, 朱衍俊, 张同勋, 等. 自然环境下贴叠葡萄串的识别与图像分割算法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 161-169. LIU Ping, ZHU Yanjun, ZHANG Tongxun, et al. Algorithm for recognition and image segmentation of overlapping grape cluster in natural environment[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 161-169. (in Chinese)
- [3] 罗陆锋, 邹湘军, 卢清华, 等. 采摘机器人作业行为虚拟仿真与样机试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 34-42. LUO Lufeng, ZOU Xiangjun, LU Qinghua, et al. Virtual simulation and prototype test for behavior of robot in picking process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 34-42. (in Chinese)
- [4] 熊俊涛, 何志良, 汤林越, 等. 非结构环境中扰动葡萄采摘点的视觉定位技术[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 29-33, 81. XIONG Juntao, HE Zhiliang, TANG Linyue, et al. Visual localization of disturbed grape picking point in non-structural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 29-33, 81. (in Chinese)
- [5] 徐勤超, 陈红, 潘海兵, 等. 球形水果塑料发泡网套包装机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 56-61. XU Qinchao, CHEN Hong, PAN Haibing, et al. Design and test of foam net packing machine for spherical fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 56-61. (in Chinese)
- [6] 张克平, 田佳壮, 李妙祺, 等. 基于PLC气动式水果套网包装机自动控制系统设计[J]. 中国农业大学学报, 2019,

- 24(3):117-125.
ZHANG Keping, TIAN Jiazhuang, LI Miaoqi, et al. Design of automatic control system of pneumatic fruit packaging machine based on PLC[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(3):117-125. (in Chinese)
- [7] 张虎, 张平, 张小栓, 等. 不同机械损伤对葡萄果实质地的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(6):25-30.
ZHANG Hu, ZHANG Ping, ZHANG Xiaoshuan, et al. Effect of different mechanical damage on texture of grape fruit[J]. Storage and Process, 2018, 18(6):25-30. (in Chinese)
- [8] 肖越, 武佩, 王顺喜, 等. 葡萄贮运过程中跌落与振动损伤的试验分析[J]. 包装工程, 2019, 40(5):9-18.
XIAO Yue, WU Pei, WANG Shunxi, et al. Experimental analysis of dropping and vibration damage in grapes storage and transportation[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5):9-18. (in Chinese)
- [9] 张辉, 温昕晔, 郑素慧, 等. 常温下不同气体包装处理对薄皮核桃贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2014, 14(4):5-9.
ZHANG Hui, WEN Xinye, ZHENG Suhui, et al. Effects of different atmospheres packaging treatments on storage quality of thin-skinned walnut at normal temperature[J]. Storage and Process, 2014, 14(4):5-9. (in Chinese)
- [10] 王雪芬, 陆佳平. 充气袋承载与缓冲特性的试验研究[J]. 包装工程, 2013, 34(19):55-58.
WANG Xuefen, LU Jiaping. Loading and cushioning performance of air filled bag[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19):55-58. (in Chinese)
- [11] 赵德坚. 充气量对充气缓冲包装垫缓冲性能的影响研究[J]. 包装工程, 2011, 32(13):32-34.
ZHAO Dejian. Influence of gas volume on cushioning property of air cushion[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13):32-34. (in Chinese)
- [12] 伍志祥, 许晓春, 陆佳平. 单向排气和充气技术在包装中的应用[J]. 包装学报, 2011, 3(4):15-18.
WU Zhixiang, XU Xiaochun, LU Jiaping. Application of one-way exhaust and inflation technology in special packaging[J]. Packaging Journal, 2011, 3(4):15-18. (in Chinese)
- [13] 王剑功, 褚伟雄, 吴剑. 葡萄电商运输工艺关键技术研究[J]. 食品科技, 2020, 45(1):62-68.
WANG Jiangong, CHU Weixiong, WU Jian. Research on key technologies of grape e-commerce transportation process[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1):62-68. (in Chinese)
- [14] 张同勋. 棚架式葡萄采摘机械臂定位与运动控制系统研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.
ZHANG Tongxun. Research on positioning and motion control of scaffolding grape picking manipulator[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [15] 尹建军, 陈永河, 贺坤, 等. 抓持-旋切式欠驱动双手指葡萄采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11):12-20.
YIN Jianjun, CHEN Yonghe, HE Kun, et al. Design and experiment of grape-packing device with grasping and rotary-cut type of underactuated double fingered hand[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):12-20. (in Chinese)
- [16] 郑永华, 苏新国, 毛杭云. 纯氧处理草莓的保鲜效果初探[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(3):85-88.
ZHENG Yonghua, SU Xinguo, MAO Hangyun. A preliminary study on the effects of pure oxygen on strawberry fruit storage[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(3):85-88. (in Chinese)
- [17] 彭永彬, 李玉, 徐鹏程, 等. 葡萄果实硬度及影响硬度的主要因素[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(5):1227-1234.
PENG Yongbin, LI Yu, XU Pengcheng, et al. Grape fruit firmness and the main influencing factors[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2014, 26(5):1227-1234. (in Chinese)
- [18] 孙新枝. 壳聚糖保鲜剂涂膜对保鲜葡萄的效果研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19):329-330.
SUN Xinzhi. Study on fresh-keeping treatment of grape by chitosan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(19):329-330. (in Chinese)
- [19] 马庆华, 王贵禧, 梁丽松. 质构仪穿刺试验检测冬枣质地品质方法的建立[J]. 中国农业科学, 2011, 44(6):1210-1217.
MA Qinghua, WANG Guixi, LIANG Lisong. Establishment of the detecting method on the fruit texture of dongzao by puncture test[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(6):1210-1217. (in Chinese)
- [20] GERT A K, FRANS C T V D, JUST L H. A planar geometric design approach for a large grasp range in underactuated hands[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(8):1121-1136.
- [21] 姬伟, 罗大伟, 李俊乐, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器的柔顺抓取力控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9):19-26.
JI Wei, LUO Dawei, LI Junle, et al. Compliance grasp force control for end-effector of fruit-vegetable picking robot[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9):19-26. (in Chinese)