doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.037

采后甘蓝单体排序定向输送装置设计与试验

崔功佩[1]　王京峥[2]　文双涛[1]　卫咏哲[1]　崔永杰[1,3]　牛子杰[1,4]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 中国重汽集团济南特种车有限公司, 济南 250117; 3. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
4. 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: 针对采后甘蓝人工上料及定向排序劳动强度大、生产效率低、人工成本高等问题,结合采后甘蓝商品化处理工艺及转动惯量特性,设计了采后甘蓝单体排序定向输送装置。该装置采用气缸传动对空间堆叠状态的采后甘蓝进行翻转卸料,随后在单层喂入辊和曲面缓冲轨道作用下采后甘蓝呈单层状态排出,再经限位辊和变螺距输送辊引导完成采后甘蓝的单体排序输送,最终基于转动惯量特性在 4 个锥形辊形成的稳定空间内实现定向输送。对翻转卸料机构、单层喂入缓冲机构、变螺距单体排序机构、锥形辊定向输送机构等关键部件进行了结构设计,并试制了采后甘蓝单体排序定向输送装置样机。以“中甘 15 号”甘蓝为试验材料,以卸料气缸运行速度、单层喂入辊转速、变螺距输送辊转速和输送链条线速度为试验因素,以单体排序成功率和定向成功率为试验指标进行了正交试验。结果表明,最优参数组合为卸料气缸运行速度 10 mm/s、单层喂入辊转速 50 r/min、变螺距输送辊转速 30 r/min、输送链条线速度 300 mm/s,在最优参数组合下,采后甘蓝单体排序成功率平均值为 96.50%,定向成功率平均值为 95.17%,标准差分别为 2.54%、3.28%,单通道作业效率约为 1 004 kg/h。本研究为深入研发采后甘蓝多通道高通量单体排序定向输送装置、实现采后甘蓝商品化处理机械化作业提供参考。

关键词: 采后甘蓝; 单体排序; 定向输送; 结构设计; 性能试验

中图分类号: S226.5; S635　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0351-10　　**OSID**:

Design and Test of Monomer Sorting and Orientational Conveying Device for Postharvest Cabbage

CUI Gongpei[1]　WANG Jingzheng[2]　WEN Shuangtao[1]　WEI Yongzhe[1]　CUI Yongjie[1,3]　NIU Zijie[1,4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *SINOTRUK Jinan Special Vehicle Co.*, *Ltd.*, *Ji'nan* 250117, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Internet of Things*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
4. *Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Artificial feeding and orientational sorting of postharvest cabbage are inefficient, labor-intensive and high-cost. Aiming at above problems, and combined with the commercial handling technology and moment of inertia of postharvest cabbage, a monomer sorting and orientational conveying device for postharvest cabbage was developed. Firstly, Turnover and unloading of postharvest cabbages in a spatially stacked state were realized by using a cylinder. Then, the postharvest cabbages were discharged in a single layer under the action of single-layer feeding roller and curved buffer track. And monomer sorting was realized under the guidance of the limit roller and the variable pitch conveyor roller. Finally, single postharvest cabbage in stable space formed by four tapered rollers was directionally conveyed based on moment of inertia. The structure design of the key mechanisms, such as turnover and unloading mechanism, monolayer feeding and buffer mechanism, monomer sorting mechanism with variable pitch, orientational conveying mechanism with tapered roller, was carried out. And the prototype of the monomer sorting and orientational conveying device for postharvest cabbage was trial produced. Taking “Zhonggan 15” cabbage as test material, the orthogonal test was carried out with running speed of

收稿日期: 2021-01-22　修回日期: 2021-03-11

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY02-04)和西北农林科技大学试验示范站(基地)科技成果推广项目(TGZX2018-28)

作者简介: 崔功佩(1992—),男,博士生,主要从事果蔬采后自动化生产装备研究,E-mail: cuigongpei689@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: agriculturalrobot@nwafu.edu.cn

unloading cylinder, revolving speed of single-layer feeding roller, revolving speed of variable pitch conveyor roller and line speed of conveying chain as the test factors, and the success rate of monomer sorting and the success rate of orientation as the test indexes. The results showed that the optimal parameters of running speed of unloading cylinder, revolving speed of single-layer feeding roller, revolving speed of variable pitch conveyor roller and line speed of conveying chain were 10 mm/s, 50 r/min, 30 r/min and 300 mm/s, respectively. Under the condition of the optimal parameter combination, the average success rate of monomer sorting was (96.50 ± 2.54)%, the average success rate of orientation was (95.17 ± 3.28)%, and the single-channel operation efficiency was about 1 004 kg/h, which met the operation requirements of subsequent links such as root trimming, detecting and grading. The research results provided a reference for further research and development of multi-channel high-throughput monomer sorting and orientational conveying device, and the mechanization operation of commercial handling for postharvest cabbage.

Key words: postharvest cabbage; monomer sorting; orientational conveying; structure design; performance test

0 引言

商品化处理能够有效提高采后甘蓝品质及经济附加值,已成为甘蓝产业的发展趋势[1-2]。然而,在商品化处理过程中,采后甘蓝上料及定向排序作业多以人工为主,其生产效率低、劳动强度大,且人工成本高[3-5]。因此,亟需设计一种采后甘蓝单体排序定向输送装置,从而为后续根部整修、检测、分级等环节提供有利条件。

目前,在用于农产品采后加工的上料排序输送装置方面国内外学者已进行了大量研究。文献[6]设计了一种转盘式对虾逐只分离装置,该装置可实现对虾的自动、有序、逐只喂入。文献[7]设计了定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机,该机可同时完成清土除杂、分选、排列、切块等多种作业。文献[8]设计了定量变距螺旋结构,并提出一种变距螺旋结构流量的计算方法。文献[9]设计了一种防堵塞、高能效的揉碎玉米秸秆螺旋-气力耦合输送装置,并进行了参数优化。文献[10]设计了链式气动冲切自动化干红枣去核机,该机可实现红枣个体自动定向排布上料和有效去核。文献[11-12]基于空间几何最小作用原理设计了鲜杏单体排序间隔输送装置和动态定向输送装置。文献[13]基于荔枝的物性特征和柔性去核刀具,设计了一种自动定向、去核、剥壳和分离一体联动的荔枝定向去核剥壳机。文献[14-16]基于禽蛋轴向运动及翻转运动机理研发了禽蛋大小头自动定向排列系统。在文献[17]研究的基础上,文献[18]设计了一种苹果专用输送机构。文献[19-21]对水果机器视觉分选机的卸料和翻转机构进行了优化设计。文献[22]根据苹果的形状和几何参数设计了定向试验平台。文献[23-24]结合自动视频采集系统开发了适用于商业的苹果定向系统。文献[25-26]利用苹果自身的惯性特性实现了苹果滚动输送过程的动态定向。文献[27]设计了一种适用于商业化的双锥滚子苹果定向机构。然而,国内外关于采后甘蓝自动上料排序输送装置的研究较少。文献[28]提出一种基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法,并对甘蓝翻转卸料[29]和自动调向[30]进行了仿真分析和结构设计,但作业性能仍需进一步优化和改进。

针对上述问题,结合采后甘蓝的物理参数和转动惯量特性,本文设计一种采后甘蓝单体排序定向输送装置,以实现空间堆叠的采后甘蓝单体的有序输送及自动定向作业,从而提高采后甘蓝整修处理的作业效率和质量,并为采后甘蓝商品化处理系统的研发提供理论依据。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

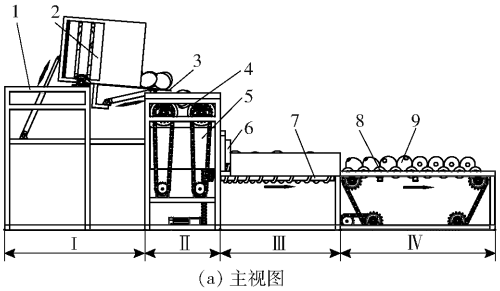
单体排序定向输送是采后甘蓝商品化处理系统[31]的第一道工序,该装置的总体结构如图 1 所示,主要由机架、甘蓝箱、卸料板、单层喂入辊、曲面缓冲轨道、限位辊、变螺距输送辊、锥形辊等组成。按照各机构功能的不同,该装置可分为翻转卸料机构、单层喂入缓冲机构、变螺距单体排序机构和锥形辊定向输送机构。

1.2 工作原理

采后甘蓝单体排序定向输送装置的工作流程可依次划分为翻转卸料、单层喂入缓冲、变螺距单体排序和锥形辊定向输送。具体步骤如下:

(1)翻转卸料。采后甘蓝随甘蓝箱转动一定角度到达卸料初始位置,然后以固定角速度打开卸料板;采后甘蓝在自身重力及摩擦力的作用下,由高到低依次经由卸料板滚落至单层喂入缓冲区域。

(2)单层喂入缓冲。空间堆叠的采后甘蓝经由相向转动的单层喂入辊,在自身重力和单层喂入辊

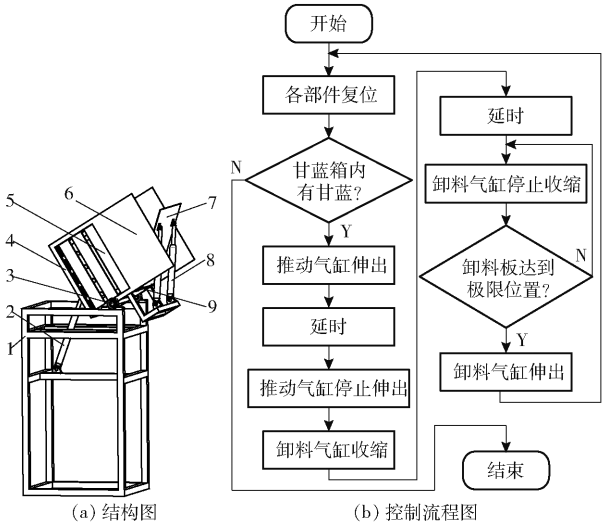


(a) 主视图　　(b) 俯视图

图 1　采后甘蓝单体排序定向输送装置结构示意图

Fig. 1　Structure diagrams of monomer sorting and orientational conveying device for postharvest cabbage

1. 机架　2. 甘蓝箱　3. 卸料板　4. 单层喂入辊　5. 曲面缓冲轨道　6. 限位辊　7. 变螺距输送辊　8. 锥形辊　9. 采后甘蓝　Ⅰ. 翻转卸料机构　Ⅱ. 单层喂入缓冲机构　Ⅲ. 变螺距单体排序机构　Ⅳ. 锥形辊定向输送机构



(a) 结构图　　(b) 控制流程图

图 2　翻转卸料机构

Fig. 2　Turnover and unloading mechanism

1. 机架　2. 推动气缸　3. 翻转主轴　4. 翻转架　5. 甘蓝箱　6. 侧挡板　7. 卸料板　8. 卸料气缸　9. 合页

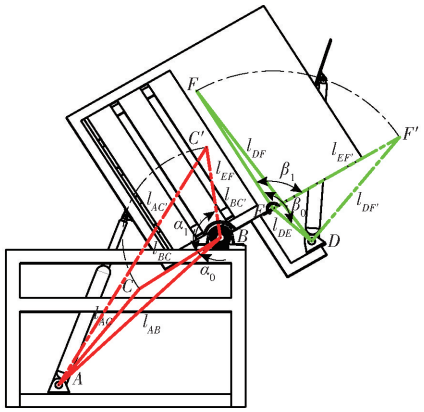


图 3　翻转卸料过程气缸运动分析

Fig. 3　Motion analysis of cylinder during turnover and unloading

的摩擦力作用下呈单层状态排出；继而经由曲面缓冲轨道的引导实现垂直运动向水平运动的转化。

(3)变螺距单体排序。运动至曲面缓冲轨道末端的采后甘蓝在限位辊的作用下，单体依次进入变螺距输送辊形成的通道内；并经变螺距输送辊的螺旋推动作用实现采后甘蓝的单体排序输送。

(4)锥形辊定向输送。采后甘蓝单体依次进入由 4 个锥形辊形成的稳定空间内，受摩擦力作用做转动运动；基于采后甘蓝的转动惯量特性，根部姿态随机的采后甘蓝逐渐绕其中心轴动态稳定运动，实现根部姿态一致性的定向输送作业。

2　关键部件结构及参数设计

2.1　翻转卸料机构

翻转卸料机构主要由机架、推动气缸、翻转主轴、翻转架、甘蓝箱、侧挡板、卸料板、卸料气缸、合页等组成，如图 2a 所示。翻转架通过翻转主轴与机架固定，并在推动气缸伸出作用下实现其翻转作业；随后，通过合页铰接与翻转架固定的卸料板在卸料气缸收缩作用下逐渐打开，进而实现采后甘蓝的卸料作业。同时，甘蓝箱上方设有侧挡板，以防止翻转卸料过程中采后甘蓝发生掉落。具体控制流程如图 2b 所示。

为保证采后甘蓝顺利完成翻转卸料作业，需对推动气缸和卸料气缸的运动行程进行计算，如图 3 所示，图中点 A 和 B 分别为推动气缸固定铰链中心点和翻转主轴中心点，点 D 和 E 分别为卸料气缸固定铰链中心点和合页销轴中心点。

推动气缸和卸料气缸推杆由初始位置(点 C 和点 F)运动至最终位置(点 C'和点 F')后，翻转架和卸料板形成的卸料平面倾角应大于采后甘蓝的休止角。测得采后甘蓝的休止角约为 10°，故翻转架的翻转角 α_1应不小于 100°，卸料板的翻转角 β_1应不小于 90°。由三角形边长关系和气缸结构可知，推动气缸和卸料气缸应满足

$$\begin{cases} l_{AC}^2 = l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{BC}\cos\alpha_0 \\ l_{AC'}^2 = l_{AB}^2 + l_{BC'}^2 - 2l_{AB}l_{BC'}\cos(\alpha_0+\alpha_1) = \\ \qquad l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AB}l_{BC}\cos(\alpha_0+\alpha_1) \\ l_{DF}^2 = l_{DE}^2 + l_{EF}^2 - 2l_{DE}l_{EF}\cos\beta_0 \\ l_{DF'}^2 = l_{DE}^2 + l_{EF'}^2 - 2l_{DE}l_{EF'}\cos(\beta_0-\beta_1) = \\ \qquad l_{DE}^2 + l_{EF}^2 - 2l_{DE}l_{EF}\cos(\beta_0-\beta_1) \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} l_{AC} \geqslant l_{AC'} - l_{AC} \\ l_{DF'} \geqslant l_{DF} - l_{DF'} \end{cases} \tag{2}$$

式中 l_{AC}、l_{AB}、l_{BC}——初始位置时推动气缸线段 AC、AB、BC 的长度,mm

α_0——翻转架初始角,(°)

$l_{AC'}$——推动气缸伸出后的长度,mm

$l_{BC'}$——线段 BC'的长度,与线段 BC 的长度相等,mm

l_{DF}、l_{DE}、l_{EF}——初始位置时卸料气缸线段 DF、DE、EF 的长度,mm

β_0——卸料板初始角,(°)

$l_{DF'}$——卸料气缸收缩后的长度,mm

$l_{EF'}$——线段 EF'的长度,与线段 EF 的长度相等,mm

根据前期预试验和仿真结果[29],翻转架的翻转角 α_1 确定为 120°,卸料板的翻转角 β_1 确定为 90°;翻转架的理想初始角 α_0 为 0°,卸料板的理想初始角 β_0 为 180°。联立式(1)和式(2),可得

$$\begin{cases}(l_{AB}-l_{BC})^2 \geqslant l_{AB}l_{BC} \\ (l_{DE}+l_{EF})^2 \geqslant \dfrac{8}{3}l_{DE}l_{EF}\end{cases} \tag{3}$$

根据翻转架和甘蓝箱的结构尺寸,l_{BC} 选取为 300 mm,l_{EF} 选取为 400 mm;根据式(3)的计算结果,l_{AB} 选取为 800 mm,l_{DE} 选取为 150 mm。将其代入式(1)可知,推动气缸和卸料气缸的行程应满足

$$\begin{cases}\Delta_{AC} \supseteq [l_{AC}, l_{AC'}] = [500\ \text{mm}, 100\sqrt{97}\ \text{mm}] \\ \Delta_{DF} \supseteq [l_{DF'}, l_{DF}] = [50\sqrt{73}\ \text{mm}, 550\ \text{mm}]\end{cases} \tag{4}$$

2.2 单层喂入缓冲机构

单层喂入缓冲机构主要由机架、电机、链传动机构、单层喂入辊、缓冲层、保护罩、侧挡板、曲面缓冲轨道等组成,如图 4 所示。电机通过链传动机构带动 1 对覆有缓冲层的单层喂入辊等速相向运动,使空间堆叠的采后甘蓝以单层状态释放至曲面缓冲轨道,引导其从垂直方向运动转化为水平方向运动。同时,在单层喂入辊上方和曲面缓冲轨道两侧分别设置有保护罩和侧挡板,以防止采后甘蓝被链传动机构夹伤或掉落。

采后甘蓝单层喂入及曲面缓冲过程如图 5(图中 O_1、O_2 分别为单层喂入辊的旋转中心,O、O'、O''分别为不同状态下采后甘蓝的质心,P 为曲面缓冲轨道起点,S 为最速降线的起点,E 为曲面缓冲轨道终点)所示,并将采后甘蓝简化为球体进行受力及运动分析。

2.2.1 单层喂入阶段

采后甘蓝在单层喂入阶段的受力如图 5a 所示。根据达朗贝尔原理[32],采后甘蓝受力平衡方程为

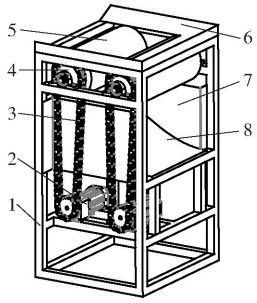


图 4 单层喂入缓冲机构

Fig. 4 Monolayer feeding and buffer mechanism

1. 机架 2. 电机 3. 链传动机构 4. 单层喂入辊 5. 缓冲层 6. 保护罩 7. 侧挡板 8. 曲面缓冲轨道

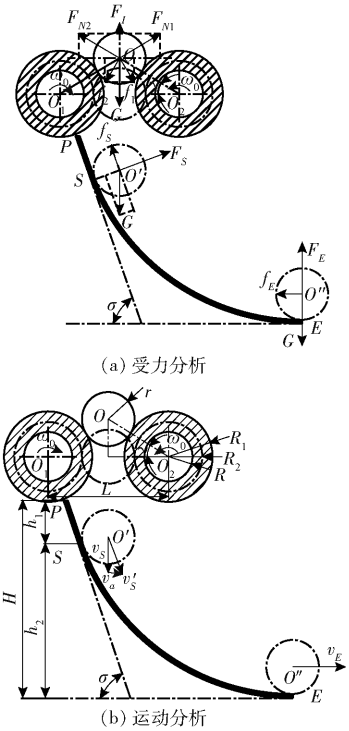


图 5 采后甘蓝单层喂入及曲面缓冲过程

Fig. 5 Process of monolayer feeding and surface buffering for postharvest cabbage

$$\begin{cases}F_{N1}\cos\gamma + f_1\sin\gamma - F_{N2}\cos\gamma - f_2\sin\gamma = 0 \\ f_1\cos\gamma + f_2\cos\gamma + G - F_{N1}\sin\gamma - F_{N2}\sin\gamma + F_I = 0 \\ f_1 = \mu_1 F_{N1} \\ f_2 = \mu_1 F_{N2} \\ F_I = -ma\end{cases} \tag{5}$$

式中 F_{N1}、F_{N2}——采后甘蓝所受支撑力,N

f_1、f_2——采后甘蓝所受摩擦力,N

γ——采后甘蓝初始喂入角,(°)

G——采后甘蓝重力,N

F_I——采后甘蓝惯性力,N

μ_1——缓冲层对采后甘蓝的摩擦因数

m——采后甘蓝质量,kg

a——采后甘蓝加速度,m/s^2

经计算可得

$$a = g + \frac{2F_{N1}(\mu_1\cos\gamma - \sin\gamma)}{m} \tag{6}$$

式中　g——重力加速度，m/s^2

由于采后甘蓝从卸料板到单层喂入辊的滚落距离较小，其在喂入瞬间的速度可忽略不计。为保证采后甘蓝顺利实现低损单层喂入，该瞬间采后甘蓝加速度应不小于其重力加速度，即式(6)应满足

$$\tan\gamma \leqslant \mu_1 \tag{7}$$

其中，缓冲层材料为海绵，其对采后甘蓝的摩擦因数 μ_1 测定为 0.56，代入式(7)可知 γ 范围为 0° ~ 29.25°；由上文可知，采后甘蓝的休止角为 10°，故 γ 范围为 10° ~ 29.25°。此外，如图 5b 所示，采后甘蓝与覆有缓冲层的单层喂入辊的结构关系应满足

$$\begin{cases} 2(r + R_1)\cos\gamma = L \\ 2r\cos\gamma \geqslant L - 2R_1 \\ 2r \leqslant L - 2R_2 \end{cases} \tag{8}$$

式中　r——采后甘蓝半径，mm

L——单层喂入辊轴间距，mm

R_1——缓冲层外半径，mm

R_2——缓冲层最小压缩半径，mm

联立式(7)和式(8)可得

$$\frac{L}{2} - r\cos\gamma \leqslant R_1 \leqslant \frac{\sqrt{1+\mu_1^2}L}{2} - r \tag{9}$$

通过上述分析与初步试验，采后甘蓝初始喂入角 γ 取值为 18°。以“中甘 15 号”甘蓝为试验对象，其半径 r 范围为 59.55 ~ 74.51 mm[28]；单层喂入辊轴间距 L 取值为 300 mm，缓冲层外半径 R_1 取值为 95 mm，缓冲层最小压缩半径 R_2 取值为 70 mm。单层喂入辊转速 n_0 确定为 40 ~ 60 r/min[33]，单层喂入辊半径 R 取值为 45 mm，故海绵厚度为 50 mm，压缩率为 50%。

2.2.2　曲面缓冲阶段

如图 5 所示，曲面缓冲轨道的轨迹线主要由在点 S 处相切的线段 PS 和最速降线 SE 两部分组成。其中，最速降线 SE 的曲线方程为

$$\begin{cases} x = r_c(\tau - \sin\tau) \\ y = r_c(\cos\tau - 1) \end{cases} \tag{10}$$

式中　x——采后甘蓝 x 轴方向运动距离，mm

y——采后甘蓝 y 轴方向运动距离，mm

r_c——最速降线旋转圆半径，mm

τ——最速降线旋转圆滚动角，rad

采后甘蓝在曲面缓冲阶段的运动符合能量守恒定律，由此可知

$$\begin{cases} \dfrac{1}{2}mv_0^2 + mgh_1 = \dfrac{1}{2}mv_S^2 \\ \dfrac{1}{2}mv_S^2 + mgh_2 = W_f + \dfrac{1}{2}mv_E^2 \\ W_f = \displaystyle\int f_i \mathrm{d}s = \int_0^{\pi} \frac{\mu_2 G}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right)^2}} \sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)^2}\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{11}$$

式中　v_0——采后甘蓝脱离单层喂入辊的瞬时速度，m/s

h_1——线段 PS 的垂直高度，m

v_S——采后甘蓝在点 S 的瞬时速度，m/s

h_2——最速降线 SE 的垂直高度，m

W_f——摩擦力在最速降线上所做的功，N·m

v_E——采后甘蓝在点 E 的瞬时速度，m/s

f_i——采后甘蓝在最速降线上所受摩擦力，N

$\mathrm{d}s$——最速降线轨迹微元，m

μ_2——曲面缓冲轨道对采后甘蓝的摩擦因数

联立式(10)和式(11)，可得

$$v_E = \sqrt{v_0^2 + 2g[h_1 + 2r_c(1 - \mu_2)]} \tag{12}$$

通过上述分析与摆动冲击试验，线段 PS 的垂直高度 h_1 取值为 100 mm，倾角 σ 取值为 75°；最速降线旋转圆半径 r_c 取值为 125 mm。故最速降线 SE 的垂直高度 h_2 为 250 mm，曲面缓冲轨道的总高度 H 为 350 mm。

2.3　变螺距单体排序机构

变螺距单体排序机构主要由机架、电机、链传动机构、限位辊、防护板、变螺距输送辊、螺旋肋等组成，如图 6 所示。单层喂入的采后甘蓝经 1 对限位

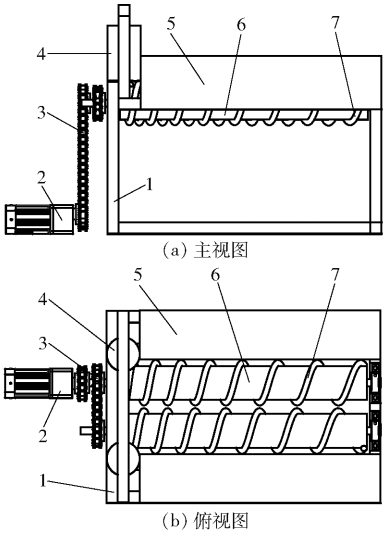


图 6　变螺距单体排序机构

Fig. 6　Monomer sorting mechanism with variable pitch

1. 机架　2. 电机　3. 链传动机构　4. 限位辊　5. 防护板　6. 变螺距输送辊　7. 螺旋肋

辊引导,单体依次进入等速同向转动的 1 对变螺距输送辊形成的通道内;并在螺旋肋推动作用下逐渐实现单体排序输送。此外,在变螺距输送辊两侧设置有防护板,以避免采后甘蓝在变螺距单体排序过程中发生掉落。

结合工作状况和经验公式[34],变螺距输送辊直径应满足

$$D \leqslant \frac{2r\cos\varphi - l}{1 - \cos\varphi} \tag{13}$$

式中 D——变螺距输送辊直径,mm

φ——采后甘蓝与变螺距输送辊的摩擦角,(°)

l——变螺距输送辊间隙,mm

结合采后甘蓝物理参数[28]和设计经验,变螺距输送辊间隙 l 确定为 40 mm,变螺距输送辊直径 D 确定为 120 mm。两个变螺距输送辊上的螺旋肋以 180°的初始角交错安装,使相同螺距的螺旋肋形成相对稳定的平行空间。螺旋肋采用左旋 20 mm 的圆钢,以保证不同尺寸采后甘蓝均可实现单体排序。

螺旋肋与变螺距输送辊交线的展开方程为

$$Y = \frac{S_0}{2N(\pi D)^2}X^2 \tag{14}$$

式中 Y——螺旋轴向进程,mm

X——螺旋轴回转长度,mm

S_0——最终螺距,mm

N——变螺距圈数

由此可得,螺旋肋与变螺距输送辊交线的第 n 圈螺距 S_n 为

$$S_n = Y_n - Y_{n-1} = \frac{(2n-1)S_0}{2N} \quad (2 \leqslant n \leqslant N) \tag{15}$$

其中

$$N = \frac{2(L_0 - S_0)}{S_0} \tag{16}$$

式中 Y_n——第 n 圈螺旋轴向进程,mm

L_0——变螺距输送辊长度,mm

结合采后甘蓝物理参数[28],螺旋肋最终螺距 S_0 确定为 220 mm,变螺距输送辊长度 L_0 确定为 1 200 mm,故变螺距圈数 N 选取为 9。将其代入式(14)和式(15),并考虑过小螺距不便加工等因素,螺旋肋与变螺距输送辊交线的各圈螺距分别确定为:S_2 为 36.7 mm,S_3 为 61.1 mm,S_4 为 85.6 mm,S_5 为110.0 mm,S_6 为 134.4 mm,S_7 为 158.9 mm,S_8 为 183.3 mm,S_9 为 207.8 mm。根据变螺距单体排序机构性能需求,变螺距输送辊转速确定为 20 ~ 40 r/min;限位辊直径确定为 80 mm,限位辊高度确定为 200 mm,限位辊间距确定为 240 mm。

2.4 锥形辊定向输送机构

由前期 ADAMS 仿真结果发现,锥形辊条件下采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角、定向所需时间、定向成功率等定向指标值均优于圆柱辊[28,30]条件下的定向指标值,故本文采用锥形辊作为采后甘蓝定向的核心部件。锥形辊定向输送机构主要由机架、电机、链传动机构、联轴器、被动齿轮、支撑轴、锥形辊、齿条等组成,如图 7 所示。采后甘蓝单体以随机姿态落入 4 个锥形辊形成的稳定空间内,并在锥形辊的支持力和摩擦力作用下保持稳定;随后,采后甘蓝在齿轮齿条副作用下随锥形辊作等速旋转运动,并因其转动惯量特性逐渐绕其中心轴线稳定转动[28],进而实现采后甘蓝的定向输送。

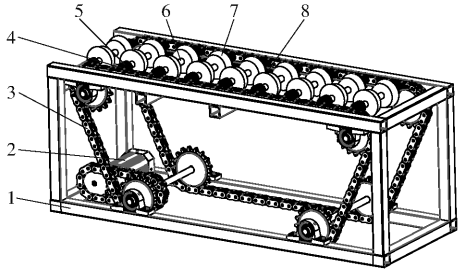


图 7 锥形辊定向输送机构

Fig. 7 Orientational conveying mechanism with tapered roller

1. 机架 2. 电机 3. 链传动机构 4. 联轴器 5. 被动齿轮 6. 支撑轴 7. 锥形辊 8. 齿条

链传动机构的链条上均匀分布若干加长销,并通过内置轴承的联轴器与支撑轴连接固定,使其随链条匀速运动;当成对安装在支撑轴上的被动齿轮与齿条啮合运动时,成对安装在支撑轴上的锥形辊随支撑轴和被动齿轮做同向转动,如图 8(图中 v_1 为输送链条线速度,ω_1 为主动链轮角速度,ω_2 为锥形辊角速度)所示。

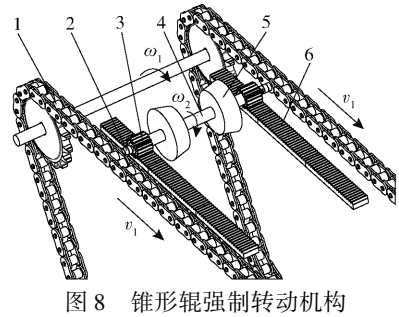


图 8 锥形辊强制转动机构

Fig. 8 Forced rotation structure of tapered roller

1. 链传动机构 2. 联轴器 3. 被动齿轮 4. 支撑轴 5. 锥形辊 6. 齿条

基于前期研制的自动调向装置[30]和预试验结果,锥形辊最小直径确定为 70 mm,锥形辊锥角确定为 20°,锥形辊厚度确定为 30 mm。根据主动链轮分度圆直径为 154.87 mm,设计配套的链传动机构;采后甘蓝定向成功所需时间为 6.8 s[28],齿条长度确定为 1 m。为避免采后甘蓝因锥形辊间隙过大而掉

落，或因其角速度过大而飞出，在预试验基础上，锥形辊径向间隙确定为 50 mm，轴向间隙确定为 60 mm，锥形辊角速度确定为 9 ~ 15 rad/s。

3　样机性能试验

3.1　材料与设备

2020 年 11 月于西北农林科技大学附近的常乐综合市场购买新鲜的“中甘 15 号”甘蓝 120 颗，并在农业农村部农业物联网重点实验室进行性能试验。样品横径范围为 114 ~ 128 mm，纵径范围为 108 ~ 124 mm，株高范围为 132 ~ 155 mm，质量范围为 527 ~ 795 g，球度范围为 87% ~ 94%。

根据关键结构及参数设计，对采后甘蓝单体排序定向输送装置进行了样机试制，如图 9 所示。试验设备还包括东莞万创电子制品有限公司生产的 AR926 型激光测速仪（量程为 2.5 ~ 99 999 rad/min，精度为 ± 0.05%），美国微软公司生产的 LifeCam Studio 型摄像头（最高分辨率为 2 304 像素 × 1 728 像素，最大帧率为 30 f/s），日本 OLYMPUS 公司生产的 i - SPEED 型高速摄影机（最大帧率为 10 000 f/s）。

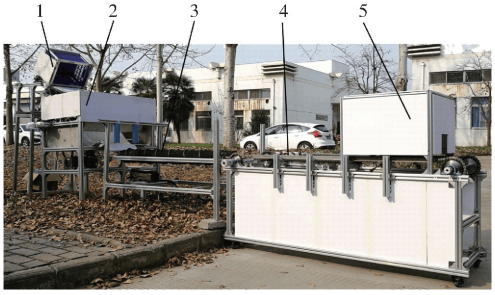


图 9　采后甘蓝单体排序定向输送装置

Fig. 9　Monomer sorting and orientational conveying device for postharvest cabbage

1. 翻转卸料机构　2. 单层喂入缓冲机构　3. 变螺距单体排序机构　4. 锥形辊定向输送机构　5. 图像处理机构

3.2　试验方法

为了探究各关键因素对采后甘蓝单体排序定向输送的影响规律，根据采后甘蓝单体排序定向输送过程的受力及运动仿真分析[28-30]和预试验结果，本文以卸料气缸运行速度、单层喂入辊转速、变螺距输送辊转速和输送链条线速度为试验因素，单体排序成功率和定向成功率为试验指标进行正交试验，各因素的取值范围如表 1 所示。其中，输送链条线速度与单体排序成功率不相关，故在以单体排序成功率为试验指标的正交试验中将其设置为空列处理。每组试验以 30 颗采后甘蓝为试验样本且重复 3 次，取平均值作为试验结果。

单体排序成功率通过高速摄影技术进行量化分析[29]，具体步骤如下：

表 1　正交试验因素水平

Tab. 1　Factors and levels of orthogonal test

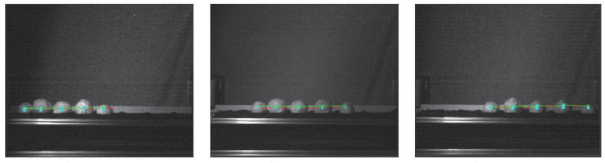
水平	因素			
	卸料气缸运行速度/（mm·s^{-1}）	单层喂入辊转速/（r·min^{-1}）	变螺距输送辊转速/（r·min^{-1}）	输送链条线速度/（mm·s^{-1}）
1	10	40	20	225
2	40	50	30	300
3	70	60	40	375

（1）基于高速摄影机获取采后甘蓝的单体排序实时视频，视频编码格式为 hsv，拍摄帧率为 500 f/s。

（2）利用 i - SPEED Suit 软件以 60 帧的间隔时间进行分帧处理，从而得到对应图像。

（3）分别从坐标纸 5 个不同位置选取标准尺寸为 150 mm 的区域，在高速摄影中计算可知其对应的像素数平均值为 137，故设定比例系数为 0.913。

（4）选取采后甘蓝的质心为人工提取特征点，以此得到该瞬间各采后甘蓝的坐标位置，进而得到相邻采后甘蓝的间距，如图 10 所示。



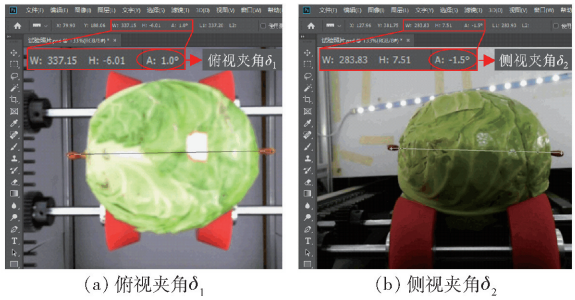
（a）4.08 s　（b）7.44 s　（c）8.88 s

图 10　基于高速摄影的采后甘蓝单体排序分析

Fig. 10　Analysis of monomer sorting for postharvest cabbage based on high-speed photography

目前尚无采后甘蓝单体排序效果的标准，借鉴鲜杏单体排序性能指标[12]，将一个螺距内有且仅有一个采后甘蓝，即目标采后甘蓝与下一采后甘蓝的间距不小于 207.8 mm 时，定义为单体排序成功。

定向成功率通过图像处理技术进行量化分析[28,30]，通过 Photoshop 软件标尺工具分别得到俯视图像和侧视图像中采后甘蓝中心轴与锥形辊轴线的夹角 δ_1 和 δ_2，如图 11 所示。



（a）俯视夹角δ_1　（b）侧视夹角δ_2

图 11　采后甘蓝中心轴与锥形辊轴线的夹角

Fig. 11　Included angle between central axis of postharvest cabbage and tapered roller axis

采后甘蓝中心轴与锥形辊轴线的夹角 δ 计算式为

$$\delta = \arcsin\sqrt{\frac{\tan^2\delta_1 + \tan^2\delta_2}{1 + \tan^2\delta_1 + \tan^2\delta_2}} \tag{17}$$

结合采后甘蓝根部整修需求[3],将采后甘蓝绕中心轴以固定角度稳定运动,且采后甘蓝中心轴与锥形辊轴线的夹角不大于 10°,视为定向成功。

3.3 结果与分析

3.3.1 单体排序成功率

采后甘蓝单体排序正交试验结果如表 2 所示,A、B、C 分别表示卸料气缸运行速度、单层喂入辊转速、变螺距输送辊转速的水平值。由极差分析可知,试验因素对单体排序成功率的影响主次顺序为卸料气缸运行速度、变螺距输送辊转速、单层喂入辊转速,最优参数组合(单体排序成功率最高)为 $A_1B_2C_2$。

表 2 单体排序正交试验结果

Tab. 2 Results of orthogonal test for monomer sorting

试验序号	A	B	C	空列	单体排序成功率 η_1/%
1	1	1	1	1	84.44
2	1	2	2	2	97.78
3	1	3	3	3	86.67
4	2	1	2	3	91.11
5	2	2	3	1	85.56
6	2	3	1	2	77.78
7	3	1	3	2	78.89
8	3	2	1	3	72.22
9	3	3	2	1	77.78
k_1	89.63	84.81	78.15		
k_2	84.82	85.19	88.89		
k_3	76.30	80.74	83.71		
R	13.33	4.45	10.74		

3.3.2 定向成功率

采后甘蓝定向正交试验结果如表 3 所示,D 表示输送链条线速度的水平值。由极差分析可知,试验因素对定向成功率的影响主次顺序为输送链条线速度、卸料气缸运行速度、变螺距输送辊转速、单层喂入辊转速,最优参数组合(定向成功率最高)为 $A_1B_2C_2D_2$。

表 3 定向正交试验结果

Tab. 3 Results of orthogonal test for orientation

试验号	A	B	C	D	定向成功率 η_2/%
1	1	1	1	1	76.67
2	1	2	2	2	96.67
3	1	3	3	3	73.33
4	2	1	2	3	78.89
5	2	2	3	1	80.00
6	2	3	1	2	76.67
7	3	1	3	2	77.78
8	3	2	1	3	61.11
9	3	3	2	1	71.11
k_1	82.22	77.78	71.48	75.93	
k_2	78.52	79.26	82.22	83.71	
k_3	70.00	73.70	77.04	71.11	
R	12.22	5.56	10.74	12.60	

对比表 2 和表 3 可知,在相同参数组合下,定向成功率均小于单体排序成功率,即单体排序是采后甘蓝实现自动定向的前提。综合考虑采后甘蓝单体排序和定向输送效果,最优参数组合确定为 $A_1B_2C_2D_2$,即卸料气缸运行速度为 10 mm/s、单层喂入辊转速为 50 r/min、变螺距输送辊转速为 30 r/min、输送链条线速度为 300 mm/s。

3.4 试验验证

为了验证参数优化结果,随机选取“中甘 15 号”甘蓝 60 颗,以最优参数组合(卸料气缸运行速度为 10 mm/s、单层喂入辊转速为 50 r/min、变螺距输送辊转速为 30 r/min、输送链条线速度为 300 mm/s),在采后甘蓝单体排序定向输送装置上进行试验验证,试验结果如表 4 所示。

表 4 验证试验结果

Tab. 4 Results of verification test

试验序号	单体排序成功数量 n_1/颗	定向成功数量 n_2/颗	单体排序成功率 η_1/%	定向成功率 η_2/%
1	59	58	98.33	96.67
2	57	56	95.00	93.33
3	59	59	98.33	98.33
4	56	55	93.33	91.67
5	57	56	95.00	93.33
6	60	60	100	100
7	58	58	96.67	96.67
8	60	59	100	98.33
9	56	54	93.33	90.00
10	57	56	95.00	93.33
平均值	57.9	57.1	96.50	95.17
标准差	1.5	2.0	2.54	3.28

试验结果表明,采后甘蓝单体排序定向输送装置在最优参数组合下单体排序成功率平均值为(96.50 ± 2.54)%,定向成功率平均值为(95.17 ± 3.28)%,基本满足采后甘蓝商品化处理的需求。此外,由于该装置为试验样机,尺寸较小,单通道作业效率约为 1 004 kg/h,后续将通过多通道组合作业进一步提高作业效率。

4 结论

(1)提出一种采后甘蓝单体排序定向输送方法,对翻转卸料机构、单层喂入缓冲机构、变螺距单体排序机构、锥形辊定向输送机构等关键部件进行

了结构设计，试制了采后甘蓝单体排序定向输送装置样机，并进行了性能试验。

（2）正交试验表明：影响单体排序成功率的主次顺序为卸料气缸运行速度、变螺距输送辊转速、单层喂入辊转速；影响定向成功率的主次顺序为输送链条线速度、卸料气缸运行速度、变螺距输送辊转速、单层喂入辊转速。最优参数组合为卸料气缸运行速度 10 mm/s、单层喂入辊转速50 r/min、变螺距输送辊转速 30 r/min、输送链条线速度 300 mm/s。

（3）验证试验表明，在最优参数组合下，采后甘蓝单体排序定向输送装置单体排序成功率平均值为 96.50%，定向成功率平均值为 95.17%，标准差分别为 2.54%、3.28%，单通道作业效率约为 1 004 kg/h。本研究可为采后甘蓝商品化处理系统的研发提供条件支撑与理论依据。

参 考 文 献

[1] LAMIKANRA O. Fresh-cut fruits and vegetables science, technology and market[M]. Boca Raton:CRC Press, 2008.

[2] 曾爱松，宋立晓，许园园，等. 鲜食加工兼用甘蓝新品种‘春秋秀美’的选育[J]. 中国瓜菜，2020, 33(10):89－91.
ZENG Aisong, SONG Lixiao, XU Yuanyuan, et al. Breeding of new cabbage cultivar ‘Chunqiu Xiumei’ for edible and processing [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020,33(10):89－91. (in Chinese)

[3] CUI Gongpei, ZHENG Xinmeng, WANG Jingzheng, et al. Physical and mechanical experiments for designing cabbage precision trimming device [C]// The 2019 ASABE Annual International Meeting, Boston, 2019.

[4] 张艳龙，李祥辉，聂馨晨，等. 农产品上料定向排序技术研究现状[J]. 新疆农机化，2019(1):12－16.
ZHANG Yanlong, LI Xianghui, NIE Xinchen, et al. Research status of directional ording technique for agricultural products [J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2019(1): 12－16. (in Chinese)

[5] KONDO N, MONTA M, NOGUCHI N. Agri-robot (Ⅱ)-mechanisms and practice [M]. Tokyo:Corona Publishing Co., Ltd., 2006.

[6] 熊师，赵博，胡小鹿，等. 对虾逐只分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2020,51(11):357－365.
XIONG Shi, ZHAO Bo, HU Xiaolu, et al. Design and experiment on prawn single separation device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):357－365. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20201139&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.039. (in Chinese)

[7] 王相友，祝珊，李学强，等. 定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2020,51(6):334－345.
WANG Xiangyou, ZHU Shan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of directional arrangement vertical and horizontal cutting of seed potato cutter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):334－345. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20200636&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.036. (in Chinese)

[8] 徐雪萌，李飞翔，李永祥，等. 定量变距螺旋结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2019,50(12):89－97.
XU Xuemeng, LI Feixiang, LI Yongxiang, et al. Design and experiment of quantitative variable pitch screw [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 89－97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20191210&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.010. (in Chinese)

[9] 乌兰图雅，青林，王春光. 揉碎玉米秸秆螺旋-气力耦合输送装置设计[J]. 农业工程学报，2019,35(6):29－38.
WULANTUYA, QING Lin, WANG Chunguang. Design of screw－pneumatic coupling conveying device for crushed corn straw [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 29－38. (in Chinese)

[10] 康宁波，尚梦玉，何建国，等. 链式气动冲切自动化干红枣去核机设计[J]. 农业工程学报，2018, 34(22): 19－26.
KANG Ningbo, SHANG Mengyu, HE Jianguo, et al. Design of chained pneumatic punching automatic dried jujube pit removing machine [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 19－26. (in Chinese)

[11] 刘向东，王学农，王春耀，等. 差速式三通道鲜杏动态定向输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016,47(10):35－43.
LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test of apricot dynamic orientation and conveying device with 3-path differential belts [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 35－43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20161005&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.005. (in Chinese)

[12] 刘向东，王学农，王春耀，等. 鲜杏单体排序间隔输送装置的设计与试验[J]. 农业工程学报，2016,32(12):31－38.
LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test on transmitting device for fresh apricot with single fruit rank in certain interval [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 31－38. (in Chinese)

[13] 李长友，马兴灶，程红胜，等. 荔枝定向去核剥壳机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2014,45(8): 93－100.
LI Changyou, MA Xingzao, CHENG Hongsheng, et al. Design and experiment of litchi denucleating and decorticating machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 93－100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140815&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.015. (in Chinese)

[14] 姜松，姜奕奕，孙柯，等. 禽蛋大小头自动定向排列中轴向运动机理研究[J/OL]. 农业机械学报，2013,44(10): 209－215.
JIANG Song, JIANG Yiyi, SUN Ke, et al. Axial motion mechanism of automatic orientation of egg's pointed end and blunt end [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 209－215. http://www.j-

csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20131034&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 10. 034. (in Chinese)

[15] 姜松,孙柯,杨德勇,等. 禽蛋大小头自动定向排列中翻转运动机理研究[J/OL]. 农业机械学报,2014, 45(3): 215 - 222.
JIANG Song, SUN Ke, YANG Deyong, et al. Turnover motion mechanism of automatic orientation of eggs according to pointed end and blunt end [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 215 - 222. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20140335&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 03. 035. (in Chinese)

[16] 姜松,王国江,漆虹,等. 禽蛋大小头自动定向排列系统设计[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(6): 113 - 117.
JIANG Song, WANG Guojiang, QI Hong, et al. Design of automatic orientation system of blunt and tip sides of eggs [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 113 - 117. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20120621&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 06. 021. (in Chinese)

[17] THROOP J A, ANESHANSLEY D J, UPCHURCH B L, et al. Apple orientation on two conveyors: performance and predictability based on fruit shape characteristics[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 99 - 109.

[18] 李晶,张东兴,刘宝. 苹果分级机输送与翻转机构设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5): 158 - 161,157.
LI Jing, ZHANG Dongxing, LIU Bao. Design of conveyer and turnover mechanism of apple grader [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 158 - 161,157. (in Chinese)

[19] 魏新华,周杏鹏,李法德,等. 杠杆式水果高速分级卸料装置的优化设计[J]. 农业机械学报,2007,38(10):94 - 98,112.
WEI Xinhua, ZHOU Xingpeng, LI Fade, et al. Optimal design of the lever-styled high-speed fruits discharging assembly [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(10):94 - 98,112. (in Chinese)

[20] 魏新华,周杏鹏,李法德,等. 水果机器视觉分选机滚子式输送翻转机构优化设计[J]. 农业机械学报,2007,38(9):98 - 102.
WEI Xinhua, ZHOU Xingpeng, LI Fade, et al. Optimum design of fruits roller conveyor of machine vision grader [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(9):98 - 102. (in Chinese)

[21] 徐惠荣,应义斌,盖玲. 双锥式滚子水果输送翻转机构的研究[J]. 农业机械学报,2003,34(6):100 - 103.
XU Huirong, YING Yibin, GAI Ling. Research on fruit feeding and rolling installation with bicone rollers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(6):100 - 103. (in Chinese)

[22] WHITELOCK D P, BRUSEWITZ G H, STONE M L. Apple shape and rolling orientation [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 87 - 94.

[23] NARAYANAN P, LEFCOURT A M, TASCH U, et al. Theoretical analysis of stability of axially symmetric rotating objects with regard to orienting apples [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(4): 1353 - 1364.

[24] NARAYANAN P, LEFCOURT A A, TASCH U, et al. Orientation of apples using their inertial properties[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 2073 - 2081.

[25] LEFCOURT A M, NARAYANAN P, TASCH U, et al. Algorithms for parameterization of dynamics of inertia-based apple orientation [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1): 123 - 129.

[26] LEFCOURT A M, NARAYANAN P, TASCH U, et al. Orienting apples for imaging using their inertial properties and random apple loading [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 64 - 71.

[27] BENNEDSEN B S, PETERSON D L, TABB A. Identifying defects in images of rotating apples [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 48(2): 92 - 102.

[28] 崔功佩,郑昕萌,崔永杰,等. 基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11):183 - 195.
CUI Gongpei, ZHENG Xinmeng, CUI Yongjie, et al. Automatic orientation method for postharvest cabbage based on moment of inertia [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):183 - 195. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20201120&flag = 1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. 11. 020. (in Chinese)

[29] 王京峥,崔功佩,郑昕萌,等. 基于 EDEM 的甘蓝翻转卸料过程运动与损伤分析[J]. 农机化研究, 2021,43(2): 16 - 22,77.
WANG Jingzheng, CUI Gongpei, ZHENG Xinmeng, et al. Experiment and analysis on discharging of cabbage reversed discharge device based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(2): 16 - 22,77. (in Chinese)

[30] 郑昕萌,崔功佩,王京峥,等. 甘蓝采后整修系统自动调向装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2021,43(2): 64 - 70.
ZHENG Xinmeng, CUI Gongpei, WANG Jingzheng, et al. Design and experiment of automatic orientation device for postharvest cabbage trimming system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(2): 64 - 70. (in Chinese)

[31] 崔永杰,崔功佩,卫咏哲,等. 一种用于甘蓝采后商品化处理的自动整修系统: ZL202020054634.6 [P]. 2020 - 09 - 18.

[32] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学(Ⅱ) [M]. 北京:高等教育出版社, 2016.

[33] 潘海兵,王振亚,陈红,等. 宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015, 31(12):239 - 245.
PAN Haibing, WANG Zhenya, CHEN Hong, et al. Design and experiment on dual rollers peeling machine for satsuma mandarin [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12):239 - 245. (in Chinese)

[34] 王方艳,张东兴. 圆盘挖掘式甜菜联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(13):8 - 14.
WANG Fangyan, ZHANG Dongxing. Design and experiment of disc-dig sugar beet combine [J]. Transaction of the CSAE, 2013, 29(13):8 - 14. (in Chinese)