

基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法研究

崔功佩¹ 郑昕萌¹ 崔永杰^{1,2} 王京峥¹ 史颖刚^{1,2} 傅隆生^{1,3}

(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: 针对采后甘蓝人工连续定向效率低、劳动强度大等问题,以“中甘15号”甘蓝为研究对象,提出了一种基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法。首先,建立了采后甘蓝的简化几何模型,对3个惯量主轴的转动惯量及其定向运动稳定性进行了理论分析;其次,建立了定向仿真模型,基于ADAMS软件分析了26种初始姿态的采后甘蓝在定向过程中的位移差值和采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角随时间的变化规律;最后,搭建自动定向试验平台,以辊轮直径、轴向间隙、径向间隙和角速度为试验因素,以采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角和定向成功率为试验指标,进行了单因素和正交试验。理论分析和仿真结果表明,采后甘蓝在定向运动过程中,逐渐趋向绕转动惯量最小且唯一的中心轴转动,且该运动状态动态稳定,即实现了采后甘蓝的自动定向。试验结果表明,试验因素对采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角影响的显著性主次顺序为辊轮直径、角速度、轴向间隙、径向间隙,试验因素对定向成功率影响的显著性主次顺序为角速度、辊轮直径、轴向间隙、径向间隙;最优参数组合为辊轮直径80 mm、轴向间隙80 mm、径向间隙70 mm、角速度6 rad/s。在最优参数组合下进行了验证试验,结果表明,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角平均值为 $(6.72 \pm 1.23)^\circ$,定向所需时间为6.8 s,定向成功率为96%,满足采后甘蓝自动定向及后续高通量处理的需求。

关键词: 采后甘蓝; 转动惯量; 自动定向; 运动仿真; 试验分析

中图分类号: S226.5; S635 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0183-13

OSID:



Automatic Orientation Method for Postharvest Cabbage Based on Moment of Inertia

CUI Gongpei¹ ZHENG Xinmeng¹ CUI Yongjie^{1,2} WANG Jingzheng¹ SHI Yinggang^{1,2} FU Longsheng^{1,3}

(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: The orientation of postharvest cabbage is the key to the automatic operation of the postharvest processing system, which provides the position and posture conditions for the subsequent root trimming, detection and grading, etc. Aiming at the problems of low efficiency and high labor intensity of artificial continuous orientation of postharvest cabbage, an automatic orientation method based on the moment of inertia for postharvest cabbage was proposed, and the “Zhonggan 15” cabbage was taken as the research object. Firstly, the simplified geometric model of postharvest cabbage was established, and the moment of inertia in the three principal axes of inertia and the motion stability of postharvest cabbage during orientation were analyzed. Secondly, the orientation simulation model was established, and the variations both of displacement difference and included angle with time of 26 initial attitudes of postharvest cabbage during orientation were simulated and analyzed based on ADAMS software, to verify the feasibility of the method. Finally, automatic orientation test platform was built, and single factor test and orthogonal test

收稿日期: 2020-06-28 修回日期: 2020-08-31

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-04, 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@nwfufu.edu.cn

were carried out with the roller diameter, axial clearance, radial clearance and angular velocity as test factors, and the included angle between the central axis of postharvest cabbage and the roller axis and the orientation success rate as test indexes. It can be seen from the theoretical analysis and simulation results, postharvest cabbage gradually tended to rotate around the central axis with the smallest and only moment of inertia during the orientation, and the movement state was stable. That was to say, the automatic orientation of postharvest cabbage by this method can be realized. The experimental results showed that the primary and secondary influence order of test factors on the included angle between the central axis of postharvest cabbage and the roller axis was roller diameter, angular velocity, axial clearance and radial clearance. And the primary and secondary influence order of test factors on the orientation success rate was angular velocity, roller diameter, axial clearance and radial clearance. The optimal parameters of roller diameter, axial clearance, radial clearance and angular velocity were 80 mm, 80 mm, 70 mm and 6 rad/s, respectively. On the condition of the optimal parameter combination, the validation test was carried out. The average included angle between the central axis of postharvest cabbage and the roller axis was $(6.72 \pm 1.23)^\circ$, the time needed for orientation was 6.8 s, and the orientation success rate was 96%, which met the requirements of automatic orientation and subsequent high-throughput processing for postharvest cabbage, and also provided theoretical basis and technical support for orientation operation of postharvest processing that can be applied in other irregular spherical fruits and vegetables.

Key words: postharvest cabbage; moment of inertia; automatic orientation; motion simulation; experimental analysis

0 引言

甘蓝在我国种植广泛,2018年产量3380万t^[1]。甘蓝营养价值丰富,深受消费者喜爱。为了提升甘蓝产品的经济附加值,增加其贮存、运输、销售的便利性,商品化处理已成为甘蓝产业的发展趋势^[2]。然而,目前甘蓝商品化处理以人工为主,劳动强度大,且成本较高,亟需实现采后处理的全程自动化^[3]。其中,自动定向是采后处理的关键环节,也是后续根部修整、检测、分级环节等的必要保证。

目前,已有国内外学者对中、小型果蔬和禽蛋的自动定向方法进行了研究。康宁波等^[4]通过辊轮摩擦使自转的红枣处于最小动量稳定状态,进而实现红枣个体的定向排布。王春耀等^[5]提出了基于空间几何最小作用量的差速带式鲜杏动态定向输送方法,并分别从定向控制力矩、稳定性等方面进行了深入研究^[6-8]。李长友等^[9]利用荔枝的重心偏移和曲面特征,通过同向转动的对辊实现姿态自动调整和定向输送。姜松等^[10-12]分别基于交错轴摩擦轮传动和凸轮传动构建了禽蛋在输送支撑辊子上轴向运动和翻转运动的数学模型,实现禽蛋大小头的自动定向排列。WHITELOCK等^[13]分析了苹果随机状态下形状和几何参数对定向能力的影响,NARAYANAN等^[14-15]对基于惯性特征的苹果定向运动过程进行了可行性分析,李晶等^[16]在THROOP等^[17]研究的果盘结构上加以改进,并对其受力和运动状况进行了分析。MOTABAR等^[18]证明苹果的定向方法同样适用于番茄。甘蓝的体积较大,新鲜

的采后甘蓝叶球表面娇嫩、易损伤,因此上述研究的中、小型果蔬和禽蛋定向方法不适用于甘蓝。目前,甘蓝的相关研究主要集中在收获^[19-22]和品质检测^[23-24]等方面,采后甘蓝的自动定向方法尚未见文献报道。

针对上述问题,结合采后甘蓝的物理参数,本文提出一种基于转动惯量的自动定向方法,通过ADAMS运动仿真和试验研究对该方法进行验证分析,以提高采后处理的作业效率,降低劳动力成本,为采后甘蓝自动定向装置的设计提供理论依据。

1 采后甘蓝物理参数

物理参数为农产品模型的建立提供参考,是其定向研究的重要依据^[25]。本文以西北农林科技大学太白蔬菜试验示范站采收的30颗“中甘15号”新鲜甘蓝为试验材料,参考CUI等^[2]的方法对叶球横径、纵径、株高、球度以及中心柱的直径、长度等物理参数进行统计,并基于力矩平衡原理采用称重法^[26]对质心位置进行计算。采后甘蓝的结构及参数测量方法如图1所示,涉及的试验设备包括数显式游标卡尺(精度0.01 mm,量程0~300 mm),精密电子天平(精度0.01 g,量程0~2000 g)。各参数均由3位试验人员独立测量,每人重复测量2次,取平均值作为最终结果。

由图1可知,采后甘蓝主要由中心柱和着生在中心柱上的主叶脉和叶片构成。采后甘蓝的物理特性如表1所示,球度平均值为 $(88.58 \pm 3.79)\%$,质心至中心柱底部距离与株高比值(J/H)为 $(48.37 \pm$

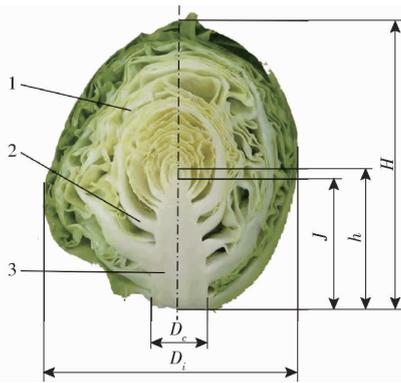


图 1 采后甘蓝结构及参数测量方法

Fig.1 Structure of postharvest cabbage and measurement method of parameters

1. 叶片 2. 主叶脉 3. 中心柱

0.21)% , 且 $H > D_x > D_y$, 整体可视为单轴对称椭球体, 且质心位于株高中点处附近, 为采后甘蓝几何模型及仿真模型的建立提供参考。

表 1 采后甘蓝物理特性参数

Tab.1 Physical parameters for postharvest cabbage

参数	最大值	最小值	平均值	标准差
横径 D_x /mm	143.48	106.37	129.27	9.45
纵径 D_y /mm	138.75	96.99	119.10	9.40
株高 H /mm	170.49	126.01	149.02	11.39
球度 S /%	96.16	81.89	88.58	3.79
中心柱直径 D_c /mm	34.05	28.26	31.43	1.72
中心柱长度 h /mm	94.35	41.32	65.97	10.95
质心至中心柱底部距离 J /mm	82.90	60.61	72.09	5.72

2 基于转动惯量的自动定向方法

2.1 自动定向试验平台工作原理

自动定向是将自然状态下不同姿态的采后甘蓝调整为根部朝向一致的位姿, 为后续根部修整等提供便利条件。采后甘蓝自动定向试验平台如图 2 所示, 由机架、电机、链传动机构、支撑轴和辊轮等组成。

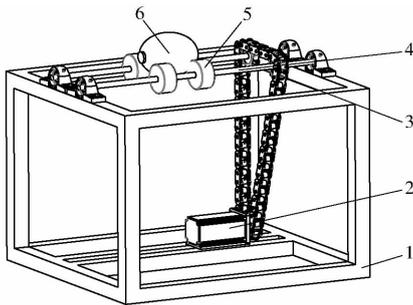


图 2 采后甘蓝自动定向试验平台结构图

Fig.2 Structure diagram of automatic orientation test platform for postharvest cabbage

1. 机架 2. 电机 3. 链传动机构 4. 支撑轴 5. 辊轮 6. 采后甘蓝

其工作原理是: 电机通过链传动机构为支撑轴的转动提供动力, 固连在支撑轴上的辊轮作同向等速转动。同时, 采后甘蓝以随机姿态落入 4 个辊轮形成的接触空间内, 并由辊轮的支持力和摩擦力带动其作滚动运动; 基于最小作用原理^[4-5], 采后甘蓝滚动过程中逐渐呈绕其转动惯量最小的中心轴转动的趋势并趋于稳定, 从而实现采后甘蓝的自动定向。

2.2 几何模型

结合采后甘蓝的物理特性, 将其简化为质量连续分布的椭球刚体模型, 主要分为中心柱和叶球两部分, 如图 3 所示。

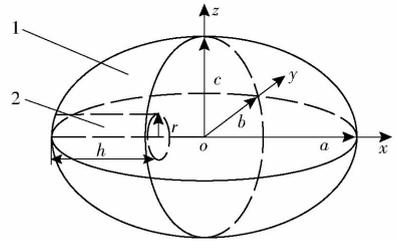


图 3 采后甘蓝几何模型

Fig.3 Geometric model of postharvest cabbage

1. 叶球 2. 中心柱

中心柱近似为圆柱体, 椭球体外部轮廓计算式为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

式中 a, b, c ——采后甘蓝在 x, y, z 轴方向的半径, m

2.3 转动惯量分析

每个刚体至少存在 3 个相互垂直的惯量主轴, 使这些方向上角动量平行于转动轴, 即刚体绕其惯量主轴运动^[27]。采后甘蓝转动惯量的计算公式为

$$I = \iiint_V r_i^2 dm = \iiint_V r_i^2 \rho dV \quad (2)$$

式中 I ——采后甘蓝的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

m ——采后甘蓝质量, kg

r_i ——某个质元到转轴的垂直距离, m

ρ ——该质元密度, kg/m^3

V ——采后甘蓝体积, m^3

结合采后甘蓝的几何模型, 对其 3 个惯量主轴的转动惯量进行计算, 计算式为

$$\begin{cases} I_x = \frac{1}{5} \rho_2 V (b^2 + c^2) + \frac{1}{2} V_1 (\rho_1 - \rho_2) r^2 \\ I_y = \frac{1}{5} \rho_2 V (a^2 + c^2) + \frac{1}{2} V_1 (\rho_1 - \rho_2) \cdot \left[\frac{1}{6} (3r^2 + h^2) + 2 \left(a - \frac{h}{2} \right)^2 \right] \\ I_z = \frac{1}{5} \rho_2 V (a^2 + b^2) + \frac{1}{2} V_1 (\rho_1 - \rho_2) \cdot \left[\frac{1}{6} (3r^2 + h^2) + 2 \left(a - \frac{h}{2} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (3)$$

其中 $V = \frac{4}{3}\pi abc$ (4)

$V_1 = \pi r^2 h$ (5)

式中 I_x, I_y, I_z ——采后甘蓝在 x, y, z 轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

V_1 ——中心柱体积, m^3

ρ_1 ——中心柱密度, kg/m^3

ρ_2 ——叶球密度, kg/m^3

r ——中心柱半径, m

由 $H > D_x > D_y$, 结合采后甘蓝的几何模型可得 $a > c > b$ (6)

联立式(3)和式(6), 可得3个惯量主轴的转动惯量满足

$I_y > I_z > I_x$ (7)

因此, 采后甘蓝3个惯量主轴的转动惯量存在明显的差异, 且 x 轴的转动惯量最小, 即采后甘蓝的中心轴是其空间转动时唯一的转动惯量最小的惯量主轴。

2.4 运动稳定性分析

如图4所示, 当采后甘蓝绕惯量主轴转动时, 其与辊轮形成相对稳定的4点接触; 利用动力学方程建立采后甘蓝三维坐标轴向的力矩方程

$$\begin{cases} I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z = M_x \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} + (I_x - I_z)\omega_z\omega_x = M_y \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y = M_z \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ——采后甘蓝绕 x, y, z 轴的自转角速度, rad/s

t ——采后甘蓝定向时间, s

M_x, M_y, M_z ——采后甘蓝以角速度 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 绕 x, y, z 轴自转的力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

此时, 采后甘蓝处于平衡状态, 即其转动线速度与辊轮的转动线速度相等, M_x, M_y 和 M_z 都近似为

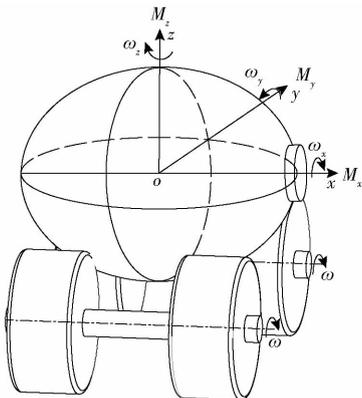


图4 采后甘蓝定向运动状态

Fig.4 Motion state of postharvest cabbage during orientation

零, 式(8)的欧拉动力学方程可简化为

$$\begin{cases} I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z = 0 \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} + (I_x - I_z)\omega_z\omega_x = 0 \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y = 0 \end{cases} \quad (9)$$

采后甘蓝在定向运动过程中, 其实际的运动轨迹符合最小作用原理^[4-5], 即逐渐趋向绕转动惯量最小的采后甘蓝中心轴运动。因此, 仅需对采后甘蓝绕其中心轴运动的状态进行稳定性判定。

由于采后甘蓝实际轮廓相对不光滑, 横径与纵径不等, 变径转动以及运动过程中质心的相对位置变化等均会造成转动波动, 可将其视为系统存在的轻微扰动进行分析。当采后甘蓝绕 x 轴以角速度 ω_0 稳定转动时, 其转动角速度为 $(\omega_0, 0, 0)$; 考虑轻微扰动对系统的影响, 其角速度为

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_0 + \varepsilon \\ \omega_2 = \lambda \\ \omega_3 = \mu \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ——采后甘蓝受到扰动后绕 x, y, z 轴的自转角速度, rad/s

$\varepsilon, \lambda, \mu$ ——由轻微扰动造成的采后甘蓝绕 x, y, z 轴的自转角速度, 且远小于角速度 $\omega_0, \text{rad}/\text{s}$

将式(10)代入式(9)并线性化后, 得到

$$\frac{d(\omega_0 + \varepsilon)}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} + \frac{I_x - I_z}{I_y} \omega_0 \mu = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d\mu}{dt} + \frac{I_y - I_x}{I_z} \omega_0 \lambda = 0 \quad (13)$$

联立式(12)、(13)再次求导, 可得

$$\frac{d^2\lambda}{dt^2} + \frac{(I_y - I_x)(I_z - I_x)}{I_y I_z} \omega_0^2 \lambda = 0 \quad (14)$$

$$\frac{d^2\mu}{dt^2} + \frac{(I_y - I_x)(I_z - I_x)}{I_y I_z} \omega_0^2 \mu = 0 \quad (15)$$

由式(7)可知

$$I_y - I_x > 0 \quad (16)$$

$$I_z - I_x > 0 \quad (17)$$

根据式(16)、(17)可知, 式(14)、(15)的一次项系数始终满足

$$\frac{(I_y - I_x)(I_z - I_x)}{I_y I_z} \omega_0^2 > 0 \quad (18)$$

由式(18)可知, 式(14)、(15)的解不随时间变化而线性增长, 即采后甘蓝绕 y 轴和 z 轴的角速度

基本不发生变化;此外,由式(11)可知,采后甘蓝绕 x 轴的角速度为常数,不发生变化。因此,采后甘蓝受到轻微扰动时,其绕中心轴的运动是动态稳定的。

综上所述,采后甘蓝在定向运动过程中,逐渐趋向绕转动惯量最小且唯一的中心轴转动,且该运动状态是动态稳定的。

3 基于 ADAMS 的运动仿真分析

3.1 模型建立

通过 SolidWorks 和 ADAMS 软件共同建立采后甘蓝定向仿真模型,如图 5 所示。参考前期研究基础^[3],将定向试验平台简化为绕支撑轴旋转的辊轮,辊轮直径为 80.00 mm,厚度为 35.00 mm,倒圆角半径为 2.00 mm,辊轮轴向间隙为 53.35 mm,径向间隙为 53.35 mm;采后甘蓝简化为叶球和中心柱组成的实体,横径、纵径、株高、中心柱直径和中心柱长度取表 1 中各物理参数的平均值,分别为 129.27、119.10、149.02、31.43、65.97 mm。

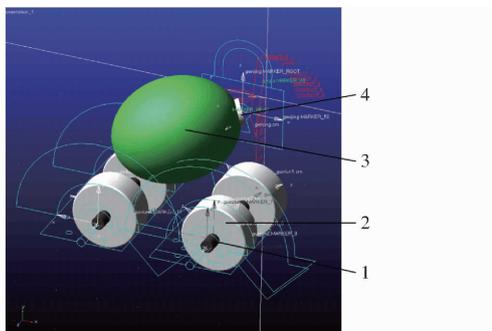


图 5 采后甘蓝定向仿真模型

Fig. 5 Simulation model of orientation for postharvest cabbage

1. 支撑轴 2. 辊轮 3. 叶球 4. 中心柱

3.2 材料定义与条件约束

(1) 材料定义

仿真模型各关键部件材料属性如表 2 所示。其中,叶球和中心柱的材料属性由前期基础试验^[3]测得,辊轮的材料为橡胶。

表 2 仿真部件材料属性

Tab. 2 Material properties of simulation parts

参数	叶球	中心柱	辊轮
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	860	970	670
弹性模量/MPa	5.21	1.77	7.84
泊松比	0.35	0.35	0.49

(2) 约束添加

根据采后甘蓝定向的实际运动情况,对模型进行条件约束。首先,叶球和中心柱之间建立固定副,以保证定向过程中采后甘蓝的完整性;其次,建立各辊轮绕支撑轴旋转的转动副,并依次添加数值固定

且方向相同的旋转驱动;最后,利用冲击函数法定义采后甘蓝叶球和中心柱与辊轮的接触力,刚度系数为 278 N/mm,碰撞指数为 1.5,最大阻尼系数为 0.3 N·s/mm,静摩擦因数为 0.5,动摩擦因数为 0.48^[3]。

(3) 标记点建立

在采后甘蓝的中心轴线上选取两个标记点 A 和 B ,分别位于中心柱底部和叶球中部,以研究采后甘蓝在定向过程中的位移差值及采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角变化。

(4) 仿真参数设置

根据采后甘蓝的根部朝向,将采后甘蓝落入自动定向装置的姿态分为 26 种情况进行仿真,如图 6 (图中 $A_1 \sim A_{26}$ 为采后甘蓝的初始姿态,箭头为根部的朝向)所示。其中,根部朝向平行于坐标轴的初始姿态共 6 种($A_1 \sim A_6$),位于坐标轴平面内的初始姿态共 12 种($A_7 \sim A_{18}$),位于三坐标象限内的初始姿态共 8 种($A_{19} \sim A_{26}$)。根据前期预试验,旋转驱动(辊轮角速度)设置为 3.50、6.75、10.00 rad/s,对应仿真时间分别设置为 15.0、10.0、10.0 s,仿真步数均为 500。

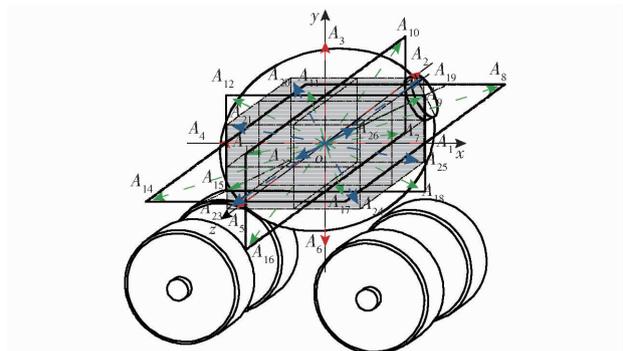


图 6 采后甘蓝姿态分布

Fig. 6 Attitude distribution of postharvest cabbage

(5) 指标计算方法

根据交错轴摩擦轮传动原理^[28-29]可知,类椭球体的采后甘蓝定向过程中在辊轮上作螺旋运动,即甘蓝绕自身轴线转动的同时沿辊轮轴线方向移动,产生轴向位移。因此,位移差值及采后甘蓝中心轴与辊轮轴线夹角的变化可直接反映其定向效果,并直接影响后续采后处理的质量。如图 7 所示,点 A 和点 B 为采后甘蓝中心轴上的两点,坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ;设定点 C ,其坐标为 $(x_1, y_1, z_1 + k)$,使线段 AC 的长度固定,且与辊轮轴线 z 轴平行。

在此基础上,采后甘蓝定向过程中 x 、 y 、 z 3 个方向的位移差值和采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角计算式分别为

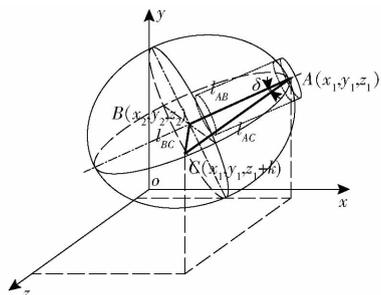


图7 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线夹角计算方法示意图

Fig. 7 Calculation method of included angle between central axis of postharvest cabbage and roller axis

$$\begin{cases} G_x = |x_1 - x_2| \\ G_y = |y_1 - y_2| \\ G_z = |z_1 - z_2| \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \delta = \arccos \left| \frac{l_{AB}^2 + l_{AC}^2 - l_{BC}^2}{2l_{AC}l_{AB}} \right| \\ l_{BC} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 + k - z_2)^2} \\ l_{AC} = \sqrt{(x_1 - x_1)^2 + (y_1 - y_1)^2 + (z_1 + k - z_1)^2} = k \\ l_{AB} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中 G_x 、 G_y 、 G_z ——采后甘蓝点 A 和 B 在 x 、 y 、 z 轴 3 个方向的位移差值, mm

δ ——采后甘蓝中心轴与辊轮轴线夹角, ($^\circ$)

l_{BC} 、 l_{AC} 、 l_{AB} ——线段 BC 、 AC 、 AB 的长度, mm

其中点 C 的坐标值参数 k 取 150 mm, 为固定值。

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 位移差值变化趋势

根据采后甘蓝姿态分布情况, 将中心轴线上的两个标记点 A 和 B 在 x 、 y 、 z 轴 3 个方向的位移差值变化分为平行于坐标轴、位于坐标轴平面内和位于三坐标象限内 3 种情况进行分析, 如图 8 ~ 10 所示。

如图 8a 所示, 当辊轮角速度为 3.50 rad/s 时, 采后甘蓝位移差值变化幅度相对较大, 但也逐渐趋于相对稳定运动, 其在 x 、 y 、 z 轴 3 个方向的位移差值分别稳定在 4.33、23.88、61.15 mm 附近。如图 8b 所示, 当辊轮角速度为 6.75 rad/s 时, 采后甘蓝 (除 A_1 外) 在 x 、 y 、 z 轴 3 个方向的位移差值分别稳定在 1.59、9.04、65.34 mm 附近。如图 8c 所示, 当辊轮角速度为 10.00 rad/s 时, 采后甘蓝在 x 、 y 、 z 轴 3 个方向的位移差值分别稳定在 1.27、6.68、65.63 mm 附近。与此同时, 当辊轮角速度分别为 3.50、6.75、10.00 rad/s 时, 位于坐标轴平面内和位于三坐标的象限内的采后甘蓝在 x 、 y 、 z 轴 3 个方向的位移差值变化均与平行于坐标轴的采后甘蓝位移

差值变化趋势基本一致 (图 9、10)。

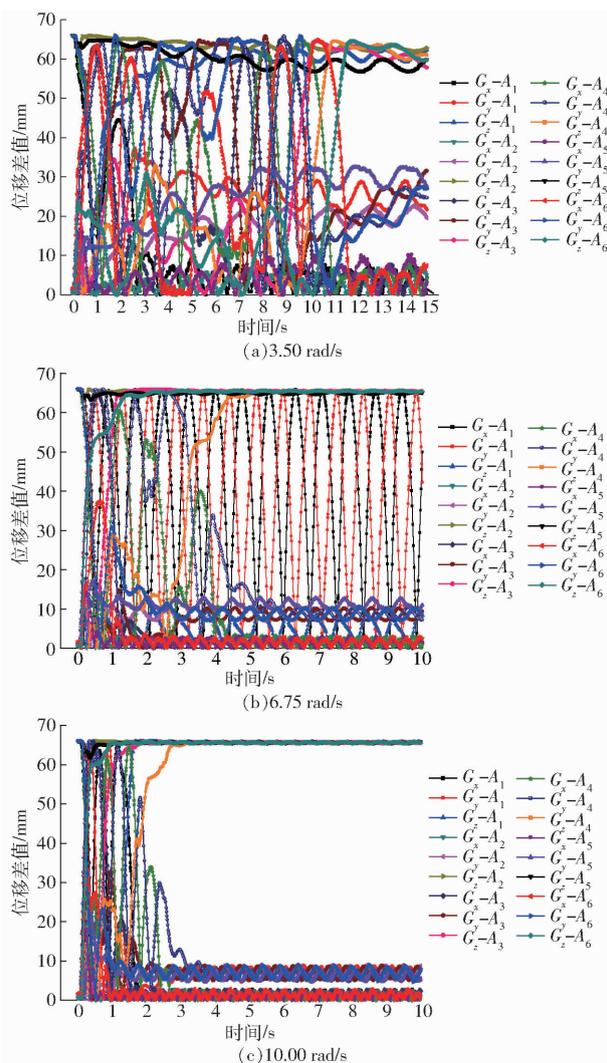


图8 平行于坐标轴的采后甘蓝定向位移差值变化曲线
Fig. 8 Displacement difference change of postharvest cabbage paralleled to coordinate axis

由上述仿真结果可知, 采后甘蓝在定向过程中, z 轴方向的位移差值最为稳定, x 轴和 y 轴方向的位移差值呈小范围简谐运动; 这是由于采后甘蓝与辊轮形成的两个周长相等的接触椭圆的横径和纵径存在差异性, 致使其在保证 z 轴方向位移差值稳定的同时, 在 x 轴和 y 轴方向的位移差值产生一定幅度的变化。同时, 随着辊轮角速度的增加, 采后甘蓝在 x 轴和 y 轴方向的位移差值逐渐减小, z 轴方向的位移差值逐渐增加, 且各方向位移差值的稳定性和一致性更高。此外, 通过平行于坐标轴、位于坐标轴平面内和位于三坐标象限内的采后甘蓝位移差值的横向对比可知, 当辊轮角速度一定时, 位于三坐标象限内的采后甘蓝各方向位移差值趋于稳定所需时间最短, 且均定向成功; 而平行于坐标轴和位于坐标轴平面内等特殊姿态的采后甘蓝定向所需时间相对较长, 且出现定向失败的情况 (A_1 和 A_{15})。总体来说, 大多数姿态的采后甘蓝经由自动定向装置, 可实现

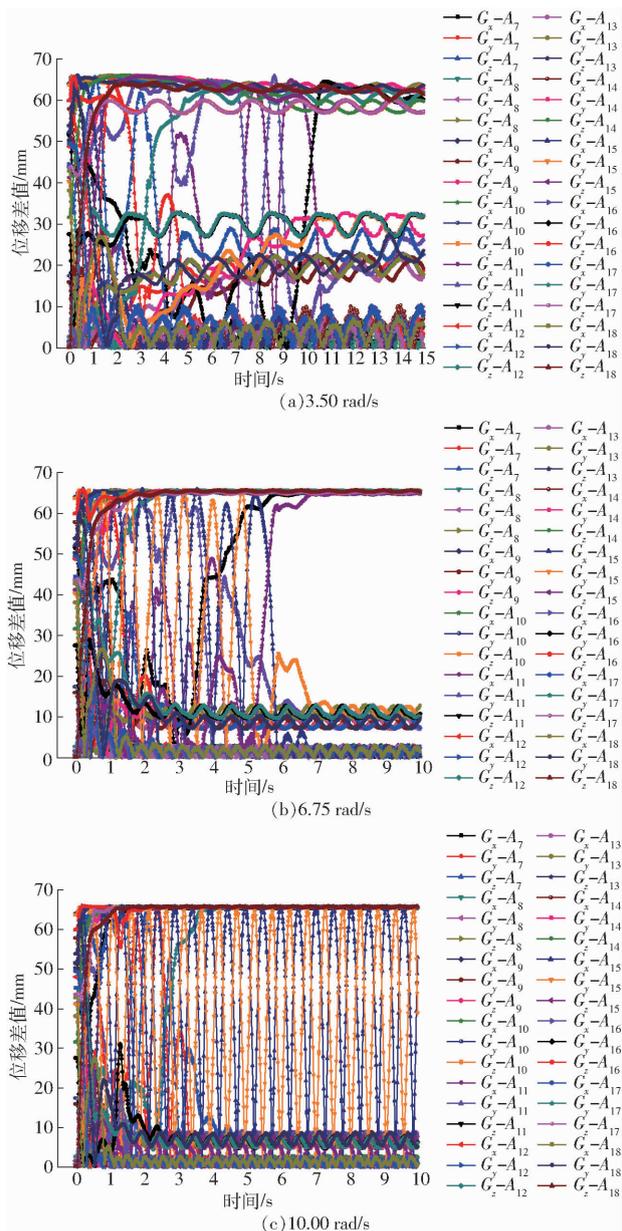


图 9 位于坐标轴平面内的采后甘蓝定向位移差值变化曲线

Fig. 9 Displacement difference change of postharvest cabbage located in coordinate plane

从随机姿态逐渐调整至 x 、 y 、 z 轴方向均相对稳定的运动状态,即绕其转动惯量最小的中心轴运动,从而验证了基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法的可行性。

3.3.2 夹角变化趋势

26 种不同初始姿态的采后甘蓝在定向过程采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角变化如图 11 所示,以进一步探讨基于转动惯量的采后甘蓝自动定向效果。

如图 11a 所示,当辊轮角速度为 3.50 rad/s 时,各初始姿态采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角均逐渐稳定在 22.60° 附近。其中,初始姿态为 A_6 、 A_4 、

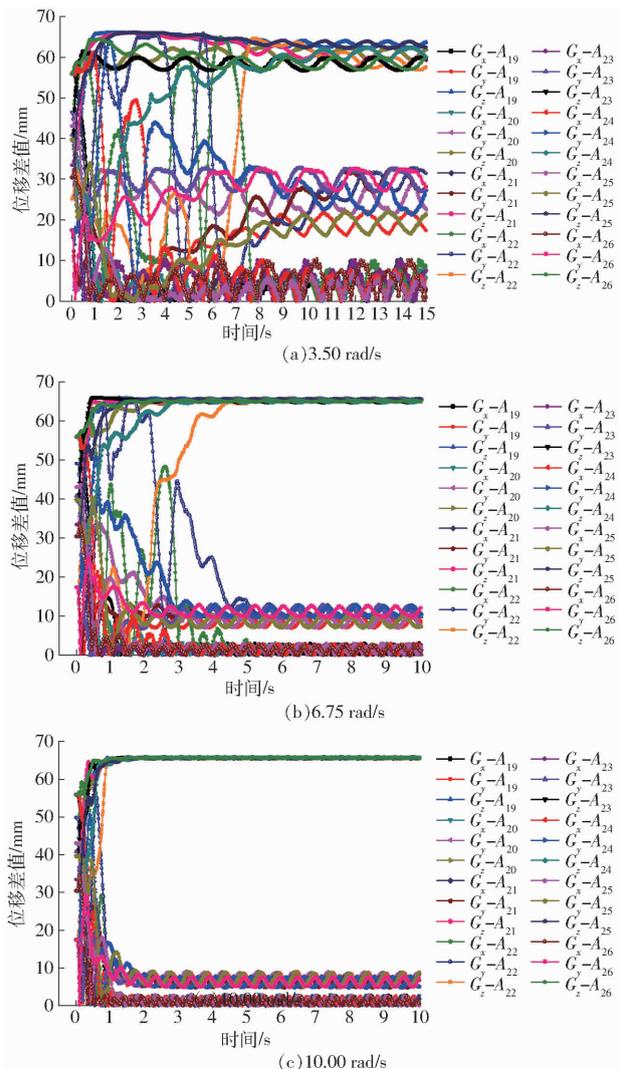


图 10 位于三坐标象限内的采后甘蓝定向位移差值变化曲线

Fig. 10 Displacement difference change of postharvest cabbage located in three-coordinate quadrant

A_{11} 、 A_3 和 A_{22} 的采后甘蓝定向所需时间相对较长,最长定向所需时间达 11.76 s;其余姿态的甘蓝在 7.68 s 均趋于稳定。如图 11b 所示,当辊轮角速度为 6.75 rad/s 时,除初始姿态 A_1 外,其余情况的采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角均稳定在 8.60° 附近。其中,初始姿态为 A_{15} 、 A_{11} 、 A_4 和 A_{22} 的采后甘蓝定向所需时间相对较长,最长定向所需时间达 7.24 s;其余姿态的甘蓝在 2.92 s 均趋于稳定。如图 11c 所示,当辊轮角速度为 10.00 rad/s 时,除初始姿态 A_{15} 外,其他姿态的采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角均稳定在 5.87° 附近。其中,初始姿态为 A_{12} 和 A_4 的采后甘蓝定向所需时间相对较长,最长定向所需时间达 4.74 s;其余姿态的甘蓝在 2.66 s 均趋于稳定。

通过仿真结果得出,绝大多数随机姿态的采后甘蓝在自动定向装置的作用下,其中心轴与辊轮轴线的夹角逐渐减小且趋于稳定;同时,随着辊轮角速

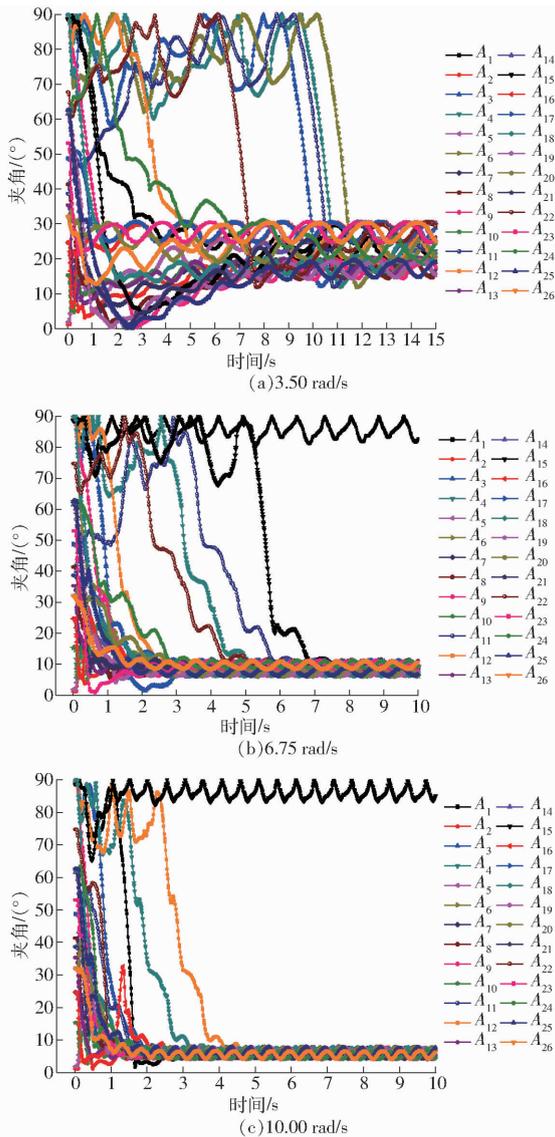


图 11 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线夹角的变化曲线
Fig. 11 Included angle change between central axis of postharvest cabbage and roller axis during orientation

度的增加,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角和定向所需时间均呈逐渐减小的趋势。其中,部分姿态的采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角逐渐增加至 90° 后再急剧降至稳定区域,且急剧减小阶段的曲线变化基本一致,如图 11a 的 A_6 和 A_4 , 图 11b 的 A_{11} 和 A_{22} 以及图 11c 的 A_{12} 和 A_4 。此外,如图 11b 和图 11c 所示,初始姿态为 A_1 和 A_{15} 的采后甘蓝分别在辊轮角速度为 6.75 rad/s 和 10.00 rad/s 时出现定向失败的情况,即采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角稳定在 90° 附近。结合图 6 姿态分布可知,上述定向失败的甘蓝初始姿态位于 xoy 平面内,符合 2.3 节转动惯量分析中甘蓝绕转动惯量相对偏大的惯量主轴(非中心轴)转动的情况。此时,各辊轮对采后甘蓝产生的接触力成对分布且基本相等,使其处于受力平衡状态。且在定向过程中无外力打破该平衡状态,因此在该状态下采后甘蓝可以实现绕此惯量主

轴动态稳定转动。

综上所述,基于 ADAMS 的采后甘蓝位移差值及采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角变化的仿真结果与基于转动惯量的自动定向理论分析基本一致,验证了基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法的可行性。

4 定向试验

4.1 材料与设备

2019 年 10 月,从西北农林科技大学太白蔬菜试验示范站随机采收成熟期“中甘 15 号”甘蓝 90 颗,保留甘蓝根茎和外包叶以降低运输过程造成的机械损伤。试验样品运送至实验室后,人工对采后甘蓝进行外包叶剥除和根茎剪切,样品横径范围为 $124 \sim 141 \text{ mm}$,纵径范围为 $117 \sim 133 \text{ mm}$,株高范围为 $148 \sim 165 \text{ mm}$,球度范围为 $86\% \sim 95\%$ 。

自制的采后甘蓝自动定向试验平台如图 12 所示。试验设备还包括德国艾瑞泽公司生产的数显式游标卡尺(量程为 $0 \sim 300 \text{ mm}$,精度为 0.01 mm),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 $2.5 \sim 99\,999 \text{ rad/min}$,精度为 $\pm 0.05\%$)。

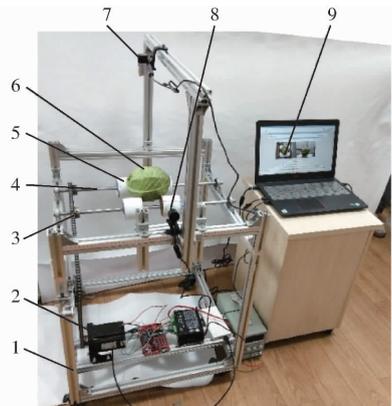


图 12 采后甘蓝自动定向试验平台

Fig. 12 Automatic orientation test platform for postharvest cabbage

1. 机架 2. 电机 3. 链传动机构 4. 支撑轴 5. 辊轮 6. 采后甘蓝 7. 俯视摄像头 8. 侧视摄像头 9. 计算机

4.2 试验方法

为了探究各关键因素对采后甘蓝定向的影响规律,根据采后甘蓝定向过程的受力分析^[3]及预试验结果,以辊轮直径、轴向间隙、径向间隙和角速度为试验因素,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角和定向成功率为试验指标进行单因素试验和正交试验。其中,通过更换不同尺寸的辊轮实现辊轮直径的调整,通过数显式游标卡尺测定轴向间隙和径向间隙,通过 AR926 型激光测速仪获取辊轮的角速度参数。

单因素试验时, 辊轮直径为 60、70、80、90 mm, 轴向间隙为 40、50、60、70、80 mm, 径向间隙为 40、50、60、70 mm, 角速度为 2、4、6、8、10 rad/s。每组试验以 20 颗采后甘蓝为试验样本且重复 3 次, 以降低个体差异以及初始位姿对定向结果的影响。

基于采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角越小越好及定向成功率越高越好的原则, 在单因素试验结果的基础上确定四因素三水平正交试验各因素的取值范围, 如表 3 所示。每组试验以 20 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。

表 3 正交试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	辊轮直径/ mm	轴向间隙/ mm	径向间隙/ mm	角速度/ (rad·s ⁻¹)
1	70	60	50	4
2	80	70	60	6
3	90	80	70	8

采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角、定向成功率等试验指标通过图像处理技术获取^[3], 具体步骤如下:

(1) 试验前, 分别在甘蓝根部中心点及距根部中心点最远的甘蓝顶部中心点插入长度为 15 mm 的棉签棒; 两处棉签棒裸露在外的长度均为 5 mm, 且通过品红溶液进行染色处理, 以便于后续图像处理过程中对标记点的识别。

(2) 基于 Live View 视频录制软件获取俯视摄像头和侧视摄像头采集的采后甘蓝定向实时视频, 视频编码格式为 mp4, 帧率为 30 f/s, 时间为 20 s。

(3) 利用 Matlab 2018a 以 3 帧的间隔对视频进行分帧处理, 从而得到 JPG 图像。

(4) 以沾染品红溶液的棉签棒作为标记点, 采用 Photoshop 软件标尺工具对俯视图像和侧视图像中两个标记点的连线与辊轮轴线的夹角进行测定, 如图 13 所示, 分别记为 δ_1 和 δ_2 。

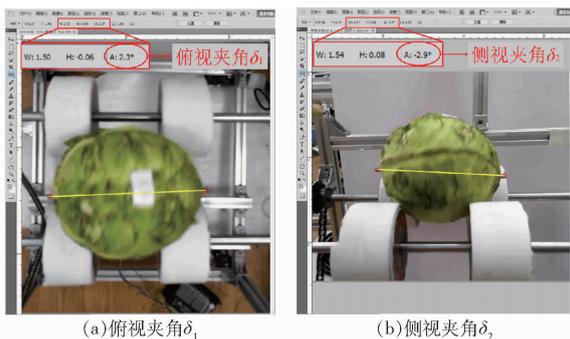


图 13 标记点与辊轮轴线的夹角测量方法

Fig. 13 Measurement method of included angle between mark points and roller axis

根据三角函数关系方程

$$\begin{cases} l \sin \delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ \tan \delta_1 = \frac{|x_1 - x_2|}{|y_1 - y_2|} \\ \tan \delta_2 = \frac{|z_1 - z_2|}{|y_1 - y_2|} \end{cases} \quad (21)$$

式中 l ——两标记点的距离, mm

可得采后甘蓝中心轴与辊轮轴线夹角 δ 的计算公式为

$$\delta = \arcsin \sqrt{\frac{\tan^2 \delta_1 + \tan^2 \delta_2}{1 + \tan^2 \delta_1 + \tan^2 \delta_2}} \quad (22)$$

此外, 基于采后甘蓝自动定向的仿真结果, 将采后甘蓝绕中心轴以固定角度稳定运动作为定向成功的判断依据。定向成功率计算式为

$$\eta = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (23)$$

式中 η ——采后甘蓝的定向成功率, %

n ——定向成功的采后甘蓝样本数, 颗

N ——采后甘蓝样本总数, 颗

4.3 结果与分析

4.3.1 单因素对定向指标的影响

分别对影响采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角、定向成功率等试验指标的辊轮直径、轴向间隙、径向间隙和角速度等因素进行试验研究, 试验结果如图 14 所示。

如图 14a 所示, 辊轮直径为 80 mm 时, 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角最小, 且定向成功率最高。辊轮直径由 60 mm 增加到 80 mm 的过程中, 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角随辊轮直径的增加呈逐渐减小的趋势, 而定向成功率稳步上升。但是, 当辊轮直径过大, 即辊轮直径为 90 mm 时, 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角再次增加, 同时定向成功率也大幅度下降。

如图 14b 所示, 随着轴向间隙的增加, 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角整体呈下降趋势, 且定向成功率整体呈上升趋势。其中, 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角在轴向间隙由 40 mm 增加到 50 mm 范围内呈明显减小的趋势, 在 50 ~ 80 mm 范围内变化不大。当轴向间隙由 40 mm 增加到 60 mm 时, 定向成功率呈快速上升趋势; 而在 60 ~ 80 mm 范围内, 定向成功率增长相对缓慢。

如图 14c 所示, 径向间隙由 40 mm 增加到 50 mm 的过程中, 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角和定向成功率均呈小幅度增加。而当径向间隙由

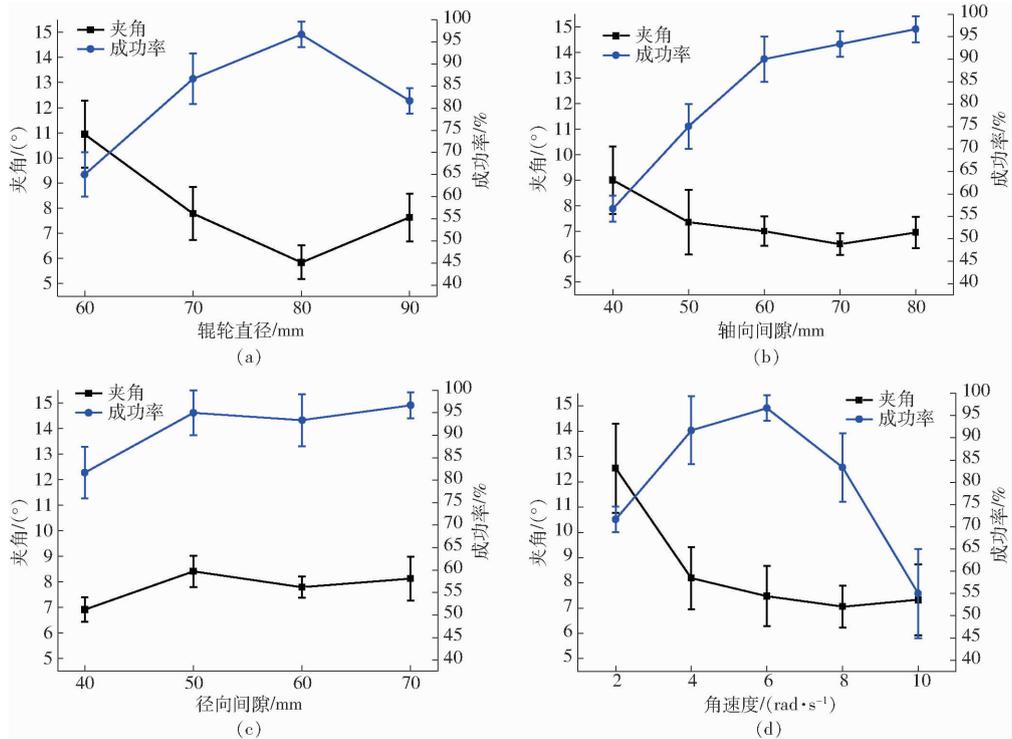


图 14 单因素对定向试验指标的影响

Fig. 14 Effect of single factor on directional test index

50 mm 增加到 70 mm 时,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角存在小幅度的变化,但整体相对平稳;同时,定向成功率也基本保持稳定状态。

如图 14d 所示,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角随角速度的增加整体呈下降趋势。其中,角速度由 2 rad/s 增加到 4 rad/s 的过程中,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角明显减小;而角速度由 4 rad/s 增加到 10 rad/s 的过程中,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角变化不明显。同时,定向成功率随角速度的增加呈先增加后减小的趋势;当角速度为 6 rad/s 时,采后甘蓝的定向成功率最高。

4.3.2 方差与极差分析

采后甘蓝定向正交试验结果如表 4 所示, A、B、C、D 表示辊轮直径、轴向间隙、径向间隙、角速度的水平值。方差分析结果如表 5 和表 6 所示,由 F 值可知,试验因素对采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角影响的显著性主次顺序为:辊轮直径、角速度、轴向间隙、径向间隙;试验因素对定向成功率影响的显著性主次顺序为:角速度、辊轮直径、轴向间隙、径向间隙。

为获得采后甘蓝定向效果最佳的参数组合,对表 4 试验结果进行极差分析,结果如图 15 所示。其中,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角的最优组合(采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角最小)为 $A_2B_2C_3D_3$;定向成功率的最优组合(定向成功率最高)为 $A_2B_3C_3D_2$ 。结合采后甘蓝中心轴与辊轮轴线

表 4 定向正交试验结果

Tab. 4 Results of orthogonal tests for orientation

试验号	A	B	C	D	采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角 $\delta/(\circ)$	定向成功率 $\eta/\%$
1	1	1	1	1	8.37	76.67
2	1	2	2	2	7.65	86.68
3	1	3	3	3	7.84	75.00
4	2	1	2	3	6.94	73.33
5	2	2	3	1	7.58	85.00
6	2	3	1	2	7.42	96.67
7	3	1	3	2	8.96	91.67
8	3	2	1	3	8.89	71.67
9	3	3	2	1	9.81	81.67

表 5 采后甘蓝中心轴与辊轮轴线夹角方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for included angle between central axis of postharvest cabbage and roller axis

因素	偏差平方和	自由度	F
A	5.649	2	3.386*
B	0.174	2	0.104
C	0.019	2	0.011
D	0.832	2	0.499
误差	6.674	8	

注: * 表示在 0.1 水平上显著,下同。

的夹角、定向成功率的极差分析结果,对最优组合中差异性较大的轴向间隙(B_2 和 B_3)和角速度(D_2 和 D_3)进一步分析。轴向间隙为 B_3 时的定向成功率高于轴向间隙为 B_2 的定向成功率,且采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角的增幅较小,在可以接受的

表 6 定向成功率方差分析

Tab. 6 Analysis of variance for success rate

因素	偏差平方和	自由度	F
A	46.820	2	0.313
B	26.535	2	0.177
C	17.249	2	0.115
D	508.398	2	3.395*
误差	599.002	8	

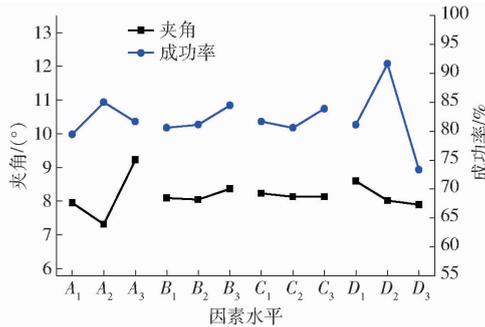


图 15 定向指标随因素变化曲线

Fig. 15 Variation of orientation index with factors

范围内;角速度为 D_2 时的定向成功率远高于角速度为 D_3 时的定向成功率,且两者采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角变化不大。因此,采后甘蓝定向的最优组合确定为 $A_2B_3C_3D_2$,即辊轮直径为 80 mm、轴向间隙为 80 mm、径向间隙为 70 mm、角速度为 6 rad/s。

4.3.3 优化结果验证

为了验证正交试验的参数优化结果,选取“中甘 15 号”甘蓝 50 颗以随机姿态置于采后甘蓝自动定向试验平台,对最优组合(辊轮直径为 80 mm、轴向间隙为 80 mm、径向间隙为 70 mm、角速度为 6 rad/s)进行试验验证。

试验结果表明,各初始姿态的采后甘蓝在 2.6 ~ 6.8 s 范围内陆续定向成功,即定向所需时间为 6.8 s;同时,采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角平均值为 $(6.72 \pm 1.23)^\circ$,如图 16 所示,图中 NO.03、NO.07、NO.11 等为验证试验的样本序号。

实际定向作业采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角随时间变化趋势与 ADAMS 仿真结果基本一致,验证了仿真模型的正确性。其中,实际定向所需时间相对较长,是由采后甘蓝球体轮廓的轻微扰动造成的;且定向所需时间随采后甘蓝中心轴与辊轮轴

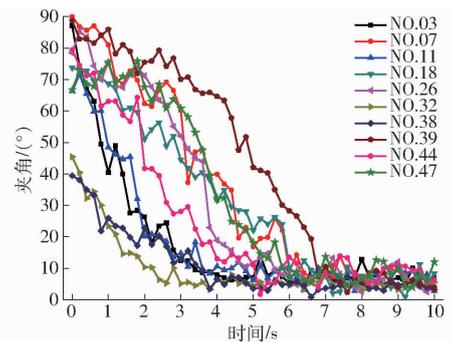


图 16 实际定向作业采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角的变化曲线

Fig. 16 Included angle change between central axis of postharvest cabbage and roller axis during orientation in field

线的初始夹角的减小呈逐渐减少的趋势。在验证试验中,2 颗采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的初始夹角为 90° 的采后甘蓝出现定向失败,此时各辊轮对采后甘蓝产生的接触力处于平衡状态,使其绕转动惯量相对偏大的惯量主轴动态稳定转动。共计 48 颗采后甘蓝定向成功,定向成功率为 96%,满足采后甘蓝自动定向及后续高通量处理的需求。

5 结论

(1) 提出了一种基于转动惯量的采后甘蓝自动定向方法,并研制自动定向试验平台进行了试验验证,该方法可实现随机姿态采后甘蓝的自动定向作业。

(2) 建立了采后甘蓝几何模型,分析了 3 个惯量主轴的转动惯量及运动稳定性,并基于 ADAMS 软件对 26 种初始姿态采后甘蓝的位移差值及采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角变化进行了仿真分析,验证了该自动定向方法的可行性。

(3) 正交试验表明,影响采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角的显著性主次顺序为辊轮直径、角速度、轴向间隙、径向间隙;影响定向成功率的显著性主次顺序为角速度、辊轮直径、轴向间隙、径向间隙。最优参数组合为辊轮直径 80 mm、轴向间隙 80 mm、径向间隙 70 mm、角速度 6 rad/s。

(4) 验证试验表明,最优参数组合下,随机姿态采后甘蓝中心轴与辊轮轴线的夹角平均值为 $(6.72 \pm 1.23)^\circ$,定向所需时间为 6.8 s,定向成功率为 96%。

参 考 文 献

- [1] FAOSTAT. Production of cabbages and other brassicas in 2018 [EB/OL]. [2020-05-19]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- [2] 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, MA, United States, 2019.
- [3] 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 post-harvest

- cabbage trimming system [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(2): 64–70. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 王春耀, 梁勤安, 闵磊, 等. 水果输送过程中定向机理的分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 95–98. WANG Chunyao, LIANG Qin'an, MIN Lei, et al. Analysis and test for orientation mechanism in fruit transportation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(20): 95–98. (in Chinese)
- [6] 丁湘燕, 王春耀, 黄春阳, 等. 基于四元数的单轴对称水果定向控制力矩分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(2): 246–251, 398. DING Xiangyan, WANG Chunyao, HUANG Chunyang, et al. Analysis in control torques of uniaxial symmetry fruit during orientation based on quaternion [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(2): 246–251, 398. (in Chinese)
- [7] 罗建清, 王春耀. 杏果输送过程中稳定性的数值模拟与试验研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(13): 115–120, 145. LUO Jianqing, WANG Chunyao. Dynamic stability of apricots motion in their directional conveying [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(13): 115–120, 145. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] WHITELOCK D P, BRUSEWITZ G H, STONE M L. Apple shape and rolling orientation [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2006, 22(1): 87–94.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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)
- [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] MOTABAR P, LEFCOURT A M, TASCH U, et al. Use of inertial properties to orient tomatoes [J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(2): 517–525.
- [19] 杜冬冬, 费国强, 王俊, 等. 自走式甘蓝收获机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 16–23. DU Dongdong, FEI Guoqiang, WANG Jun, et al. Development and experiment of self-propelled cabbage harvester [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(14): 16–23. (in Chinese)
- [20] 李天华, 孟志伟, 丁贺贺, 等. 甘蓝切根作业力学分析与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 63–72. LI Tianhua, MENG Zhiwei, DING Hehe, et al. Mechanical analysis and parameter optimization of cabbage root cutting operation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(7): 63–72. (in Chinese)
- [21] DU D, WANG J, XIE L, et al. Design and field test of a new compact self-propelled cabbage harvester [J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(5): 1243–1250.
- [22] ZHOU C, LUAN F, FANG X, et al. Design of cabbage pulling-out test bed and parameter optimization test [J]. *Chemical*

Engineering Transactions, 2017, 62: 1267 - 1272.

- [23] 李鸿强, 孙红, 李民赞. 基于机器视觉的结球甘蓝形状鉴别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 141 - 146.
LI Hongqiang, SUN Hong, LI Minzan. Identification of cabbage ball shape based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 141 - 146. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015S024&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.024. (in Chinese)
- [24] 李鸿强, 孙红, 李民赞. 基于可见/短波近红外光谱检测结球甘蓝维生素 C 含量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 269 - 275.
LI Hongqiang, SUN Hong, LI Minzan. Detection of vitamin C content in head cabbage based on visible/near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 269 - 275. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 姜松, 漆虹, 王国江, 等. 禽蛋基本特性参数分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 137 - 142.
JIANG Song, QI Hong, WANG Guojiang, et al. Analysis and experiment on basic properties of poultry eggs [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 137 - 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120426&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.026. (in Chinese)
- [27] 蒋再富, 张定梅. 惯量主轴法在三维刚体转动惯量计算中的应用[J]. 荆楚理工学院学报, 2016, 31(2): 68 - 70, 77.
JIANG Zaifu, ZHANG Dingmei. Application of the principal axis method of inertia in the calculation of the moment of inertia of three-dimensional rigid body [J]. Journal of Jingchu University of Technology, 2016, 31(2): 68 - 70, 77. (in Chinese)
- [28] 姜松, 陈琦莹, 冯侃, 等. 交错轴摩擦轮传动原理及其在移动小车运动分析中的应用[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 394 - 402.
JIANG Song, CHEN Qiyong, FENG Kan, et al. Mechanism of wheel-ground crossed friction wheel drive and application in motion analysis of omni-directional mobile car [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 394 - 402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200446&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.046. (in Chinese)
- [29] 姜松, 陈琦莹, 王婧, 等. 交错轴摩擦轮传动机理及应用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 65 - 72.
JIANG Song, CHEN Qiyong, WANG Jing, et al. Mechanism and application of the crossed friction wheel drive [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 65 - 72. (in Chinese)

(上接第 182 页)

- [12] 王凤芹, 谢慧, 楚乐然, 等. 产丁醇芽孢杆菌的分离、筛选与鉴定[J]. 微生物学通报, 2010, 37(1): 7 - 11.
WANG Fengqin, XIE Hui, CHU Leran, et al. Screening and identification of a bacillus strain producing butanol [J]. Microbiology China, 2010, 37(1): 7 - 11. (in Chinese)
- [13] 蒋淑儒. 不同贮藏条件对油茶籽品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
JIANG Shuru. Influences of different storage conditions on quality of oil-camellia seeds [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [14] 石晓丽. 油茶籽及油茶籽油贮藏过程中的品质变化研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
SHI Xiaoli. Studies of nutrition and quality changes during storage in camellia seed and oil [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [15] 田洪芸, 陆垣宏, 李恒. 我国食用植物油质量安全状况及监管现状分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16): 5271 - 5275.
TIAN Hongyun, LU Yuanhong, LI Heng. Analysis on quality and safety status and supervision status of edible vegetable oil in China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(16): 5271 - 5275. (in Chinese)
- [16] 余会康, 郭建平. 气候变化对福建省普通油茶含油率影响分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 87 - 94.
YU Huikang, GUO Jianping. Analysis of climate change effect on camellia oil content in Fujian Province of China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(1): 87 - 94. (in Chinese)
- [17] 杨锦平, 翁银菊, 刘秋琼. 现代农业发展中农机与农艺相结合的措施[J]. 农家参谋, 2019(22): 40.
- [18] 饶洪辉, 黄登昇, 王玉龙, 等. 液压驱动式油茶果采摘机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 133 - 139, 147.
RAO Honghui, HUANG Dengsheng, WANG Yulong, et al. Design and experiment of hydraulic-driven camellia fruit picking machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 133 - 139, 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=&file_no=20190515&journal_id=csam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.015. (in Chinese)
- [19] BROWN G K, FRAHM J R, SEGERLIND L J, et al. Bark strengths and shaker pads vs cherry bark damage during harvesting [J]. Transactions of the ASABE, 1987, 30(5): 1266 - 1271.
- [20] 饶洪辉, 罗时挺, 余佳佳, 等. 基于 ANSYS Workbench 的齿梳拨刀式油茶果采摘机拨果及花苞损伤仿真研究[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(12): 2134 - 2141.
RAO Honghui, LUO Shiting, YU Jiajia, et al. Study on simulation analysis of camellia fruit picking and its bud damage with tooth comb dial knife machine based on ANSYS Workbench [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(12): 2134 - 2141. (in Chinese)