

基于产线链动需求的双绞龙组合式胡椒脱皮机设计与验证

张嘉伟^{1,2}, 张 园^{1,3}, 沈德战^{1,4}, 赵振华^{1,4}, 韦丽娇^{1,5}, 陈嘉烨¹

(1. 中国热带农业科学院农业机械研究所, 广东 湛江 524091; 2. 广东海洋大学机械工程学院, 广东 湛江 524091; 3. 广东省/湛江市农业类颗粒体精量排控工程技术研究中心, 广东 湛江 524000; 4. 湛江市类颗粒体动力学及精准精量排控重点实验室, 广东 湛江 524091; 5. 农业农村部热带作物农业装备重点试验室, 广东 湛江 524091)

摘 要: 胡椒脱皮传统单机作业模式在解决机械化脱皮的同时, 因工艺环节未能串联阻碍了胡椒初加工产线技术的发展。为进一步提升链动加工效益, 本文设计了基于产线链动需求的双绞龙组合式胡椒脱皮机, 通过对双绞龙核心部件的应力应变模拟, 表明其结构设计安全可靠, 双绞龙组合式胡椒脱皮机在实际应用中能够稳定、高效地完成脱皮工作, 符合现代工业对设备效能和可持续性的要求; 试验验证结果显示: 产线主输送速度在0.8~2.2 m/s, 绞龙组合转速为500~700 r/min时, 胡椒脱皮机的脱皮率能够稳定达到95%以上, 且果核破损率小于3%。基于产线链动需求的双绞龙组合式胡椒脱皮设计模式, 能够与胡椒初加工配套的其他生产设备联动, 符合产业化生产趋势方向。

关键词: 产线链动; 双绞龙组合式; 胡椒脱皮机; 应力仿真; 试验

中图分类号: S917.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-2154 (2024) 03-0038-07

0 引言

胡椒原产于印度西南海岸的热带雨林, 在热带和亚热带地区广泛分布, 中国主要产区包括海南的文昌、万宁、定安以及广东湛江、云南等地^[1]。胡椒在烹调、食品加工、香水制造和医药等多个行业中被广泛应用^[2-5]。根据2022年的统计数据, 我国胡椒产量为5.29万t, 同比增长2.4%, 相应的收获面积为24 753 hm², 同比增长1%。然而, 长期以来, 胡椒市场一直存在着供不应求的问题。在进口方面, 我国每年需要大量进口以满足国内需求, 并且进口量逐年上升。在出口方面, 我国的胡椒仅占生产总量的15%~20%, 随着全球需求的不断增加, 高品质胡椒在国际香料生产贸易中的地位越来越重要。因此, 当前我国胡椒产业面临的关

键挑战在于提升产品质量, 以增强其在国际市场上的竞争力。

目前, 胡椒脱皮方法主要包括传统水浸泡法、化学脱皮法、生物酶法和机械脱皮法。传统水浸泡法因加工周期冗长、浸泡池占用面积大、污染环境且伴随着成品具有馊臭味、加工质量不稳定而逐渐被淘汰^[6-7]。化学脱皮法需要消耗大量化学原料、成本高且废液污染环境, 也逐渐减少应用。生物酶法脱皮虽然周期短、污染少、在一定程度上节水, 但由于酶制剂成本高、难以自行生产和重复使用, 相关研究仍停留在实验室阶段, 推广困难且不受大众支持^[8-9]。机械脱皮法^[10]虽涉及设备多、工况复杂、成本高且存在脱皮不彻底、胡椒易受损、品质不可控等问题, 但相较于其他方法, 机械脱皮法仍具较高的性价比。

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 海南省科技专项资助——重点研发计划 (ZDYF2022XDNY136); 湛江市科技计划项目 (2022A01032&2020A05004); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1630132023005)

作者简介: 张嘉伟 (1998—), 男, 研究生, 研究方向为农业机械化与信息化。E-mail: 1654332175@qq.com

通讯作者: 张园 (1984—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为农业机械化与信息化。E-mail: 418727981@qq.com



(a) 螺旋式胡椒脱皮机 (b) 摩擦式胡椒脱皮机

图1 胡椒鲜果脱皮机

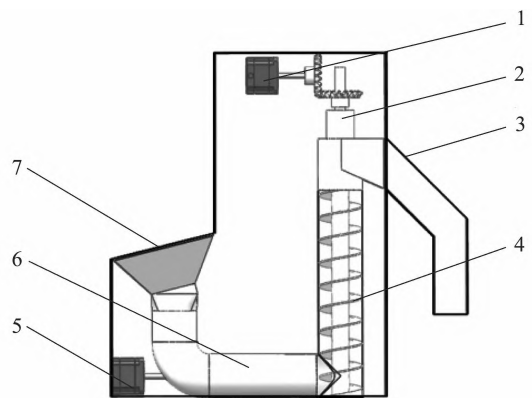
为了降低人工劳动成本、减轻劳动程度，简化工艺流程，许多专家学者在胡椒脱皮领域展开研究。在国外，印度泰米尔纳德邦农业大学 V. THIRUPATHI 团队发明了手动胡椒脱皮机^[11]，依靠外部多孔的圆筒、叶片和刷子组件相互作用实现脱皮。该机新颖、简单、效果良好，但随着胡椒鲜果物料增加，人工脱皮劳动强度大，作业质量波动较大，仅适用于中小型脱皮需求。越南 VINA NHA TRANG 公司的软黑胡椒脱皮机喷水系统能喷出 70 ~ 80 ℃ 热水，螺旋刀片定时回转使胡椒果脱皮，一次性完成熟化、脱皮，大大简化工艺流程。适温软化胡椒表皮和胶质层可提高脱皮效率，但螺旋刀片在水中回转增加了能耗。在国内，海南国营彬村山华侨农场的大型胡椒脱皮洗涤机组能将腐烂果皮与白胡椒脱开，胡椒果粒含杂率低，机组投入和后期维护成本高，果皮腐烂对环境不利，仍需改进。海南大学的张燕等^[12]设计的湿胡椒脱粒去皮机械设备通过电机提供动能，模拟试验表明工作效率达到 100 kg/h。广东省湛江国营奋勇华侨农场的齿片胡椒脱皮机加工能力 1.5 t/h，但需依赖手工洗涤。中国热带农业科学院农业机械研究所等^[13-15]单位制定了 NY/T 736—2003《胡椒初加工机械通用技术条件》指导胡椒的机械化生产，提出了白胡椒初加工工艺流程：脱粒（机械法）→去梗（机械法）→青熟果分选→浸泡（池泡）→洗涤（机械法）→晒干→除杂（机械法）→分级（机械法），发明的摩擦式胡椒鲜果脱皮装置和螺旋式胡椒鲜果脱皮机能大幅提升脱皮效率，摩擦式胡椒鲜果脱皮装置和螺旋式胡椒鲜果脱皮机的脱皮率达 95% 以上，果核破损率低于 4%，有效解决了机械化高效加工和低损脱皮的实际需求，其实物如图 1 所示。

但是考虑到生产线模式对于整体生产效能的巨大提升，目前的胡椒脱皮机虽然在解决胡椒脱皮问题上取得了显著进展，但由于其单机作业的特性，缺少生产线的有效联动。因此，急需一种能够与现代生产线完美衔接、实现高效协同作业的胡椒鲜果脱皮机组^[16-17]。这样的设备将有助于最大程度地发挥生产线模式的优势，提高整体生产效率，满足当今注重自动化和智能化的生产需求。

1 脱皮机整机结构设计与工作原理

1.1 结构特点

双蛟龙式胡椒脱皮机考虑了胡椒颗粒熟化物料至脱皮容腔的定量平移推送和垂直定速磨皮工艺需求，整体构造包括储料箱、脱皮脱胶管、主轴、供水装置、清堵装置、排渣孔等多个组件，具体构造示意如图 2 所示。该脱皮机主要涉及 2 个关键环节，即胡椒物料输送和脱皮。为实现这两大功能，脱皮机采用了水平式螺旋输送机和垂直式螺旋输送机。其结构主要由固定在输送轴上的螺旋叶片和相应的固定槽^[18-19]组成。胡椒脱皮机配备了两个电机，一个用于传送胡椒鲜果，另一个用于驱动主轴，这两者构成了脱皮的核心机构。主轴的设置包括主轴电机、螺旋叶片和柔性打齿，其中螺旋叶片位于主轴下部，而柔性打齿则设置在上部。供水装置包括洒水头和供水管，洒水头采用花洒结构，供水管一端连接洒水头，而另一端可连接水源。



1. 主轴电机；2. 淋水装置；3. 出料口；4. 脱皮主轴；5. 传输电机；6. 传输装置；7. 入料口

图2 胡椒脱皮机结构示意图

其主要技术参数如表 1 所示。

表1 胡椒脱皮机主要技术参数

序号	技术指标	胡椒脱皮机 6TH-200
1	加工能力 / $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	200
2	额定功率 / kW	2.6
3	耗水量 / $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	0.3 ~ 0.5
4	耗电量 / $\text{kW}\cdot\text{h}$	1.5 ~ 1.8

1.2 工作原理

胡椒脱皮机的整体工作原理如下：首先，熟化后的胡椒鲜果被输送至储料箱；随后通过自由落体沿着送料管道至水平式送料绞龙处，由传输电机带动送料绞龙向前推进，使得熟化后的胡椒鲜果顺利传送至脱皮脱胶管底端；紧接着主轴电机启动，通过与锥齿轮的啮合改变速度方向，将传输方向从水平转变为垂直，进而带动主轴转动。在主轴的作用下，脱皮脱胶管内的螺旋叶片开始运动，带动熟化后的胡椒鲜果从下向上运动。

在这个运动过程中，通过主轴上的柔性打齿和螺旋叶片的绞拌、挤压、摩擦作用，胡椒鲜果的果皮和果胶逐渐被褪去^[20]。与此同时，果皮和果胶在供水装置的洒水头冲刷下，顺着脱皮脱胶管内从上至下流动，最终通过排渣孔排出。去除了果皮和果胶的胡椒籽在螺旋叶片的推动下向上运动，通过脱皮脱胶管上部的出料管口排出，完成了整个胡椒鲜果的脱皮脱胶过程。

1.3 控制系统

该胡椒脱皮机主控制器采用变频器，主要基于变频器具有噪声小、可依据负载动态增减能耗且工作稳定等特点，其关键在于调整电机功率，以实现电机的变速运行。一旦电源接通，变频器启动并通过调整工作频率操控送料电机旋转，同时伺服电机同步协作，带动送料绞龙运动；绞龙主轴上的旋转叶片推动从储料箱掉落的胡椒鲜果流向脱皮脱胶管底端，通过变频器的频率调节，实现对伺服电机和绞龙转速的灵活掌控，达到对送料量的精确控制。同时，通过变频器调整脱皮电机的转速，进而控制脱皮主轴的旋转速度；在旋转叶片的引导下，胡椒物料从下往上逐步运输，完成脱皮过程。整个脱皮机的控制原理图如图3所示。通过智能变频器的调控，该系统实现了对脱皮机各部件的灵活控制，显著提

升了生产效率和操作精确度。

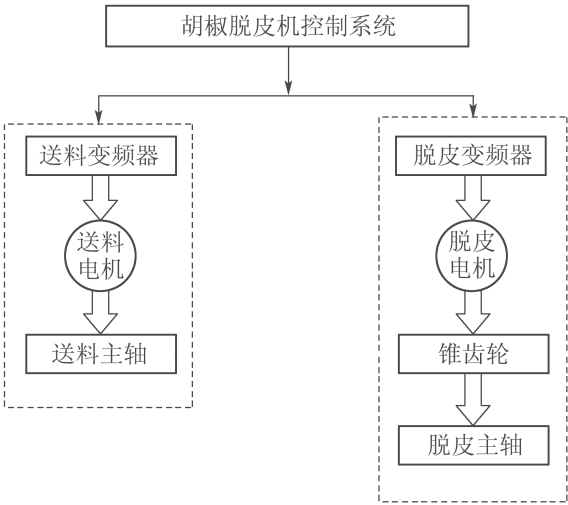


图3 胡椒脱皮机控制原理图

2 脱皮机关键结构与仿真

2.1 储料箱结构

储料箱采用上下开口的梯台型料箱结构，是胡椒物料输送的首要环节。经熟化后的胡椒鲜果通过掉落入料口，即刻进入储料箱，并通过脱皮绞龙直接输送至脱皮机构进行脱皮工序。然而，由于大量的胡椒物料一次性喂入储料箱可能导致堵塞情况的发生，因此，在实际的胡椒脱皮操作中，脱皮机械操作人员通常采取减少单次喂入量的策略，以防止此类问题的发生。

储料箱作为待处理脱皮胡椒工作区域，其箱体容积直接决定着整机作业量以及工作效率，根据公式（1）核算，箱体计算示意图如图4所示。

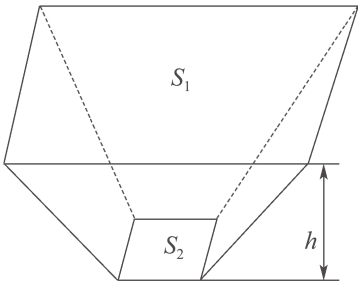


图4 储料箱箱体计算示意图

$$V = \frac{S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}}{3} h \tag{1}$$

式中：

V ——储料箱体容积， m^3 ；

S_1 ——上表面面积， m^2 ；

S_2 ——下表面面积， m^2 ；

h ——箱体垂直高度， m 。

设定理想单次工作喂入量为 25 kg 标准设计参数，核算得到储料箱箱体容积为 $V=3.189 \text{ m}^3$ 。

2.2 绞龙结构

胡椒脱皮机的传动系统是其工作效率至关重要的组成部分。其结构的合理性直接关系到胡椒脱皮机的工作可靠性、动力分配的合理性以及整体机械的使用寿命等。传动系统主要包括水平式螺旋输送机和垂直式螺旋输送机，分别对应送料绞龙和脱皮绞龙。其三维模型示意图如图 5 所示。

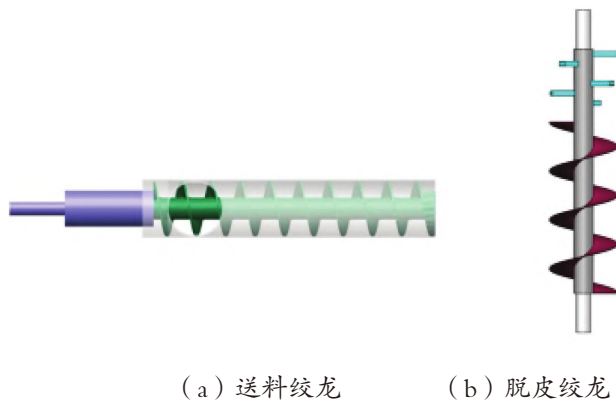


图 5 绞龙三维模型示意图

胡椒脱皮机采用了水平式螺旋输送机和垂直式螺旋输送机的组合，以实现有序且高效的工作过程，这一设计减轻了仅依赖于一条输送绞龙同时进行运

输和脱皮的压力，使得整个系统更加可控。通过同时使用水平和垂直输送机，系统实现了运输和脱皮的逐步有序进行^[21-24]，提高了整体工作效率和脱皮质量的可控性。这种双螺旋输送机的结构不仅使胡椒在运输和脱皮过程中更为稳定，而且有助于提高脱皮效率，可以满足生产线模式对于产能和效益的追求。

2.3 控制系统优化

鉴于双极绞龙速度对脱皮效果的影响，引入 STM32 微控制器作为主控单元^[25-27]，采用 PWM 方波动态调整输出电压值，STM32 输出电压值将与电机转速形成一一对应的关系，从而实现对输送蛟龙转速和喂入量的精准控制，以达到不堵塞、脱皮质量高的目标。此外，重量传感器实时采集称重储料箱中熟化后的胡椒粒重量，并通过变送器将其转换成标准电信号，再由模拟量输入模块传递给控制器。控制器负责对理想的单次加工重量与实际重量进行比较。通过对比实际重量与单次加工重量的结果，控制器能够实时判断是否符合设定标准，更加可控和高效地完成落料拥堵的问题，还可通过与上位机通信，将重量传感器与速度传感器^[28-29]数据上传至显示屏，也可在显示屏上更改其标准数值，以达到整机控制协调有序，如图 6 所示。

该胡椒脱皮机的设计不仅注重机械的高效脱皮，还通过对控制系统的优化，实现能源的有效利用。在生产线联动模式下，它可以根据需要自动启停，减少能源浪费，提高生产线的可持续性，保障设备协同运作。

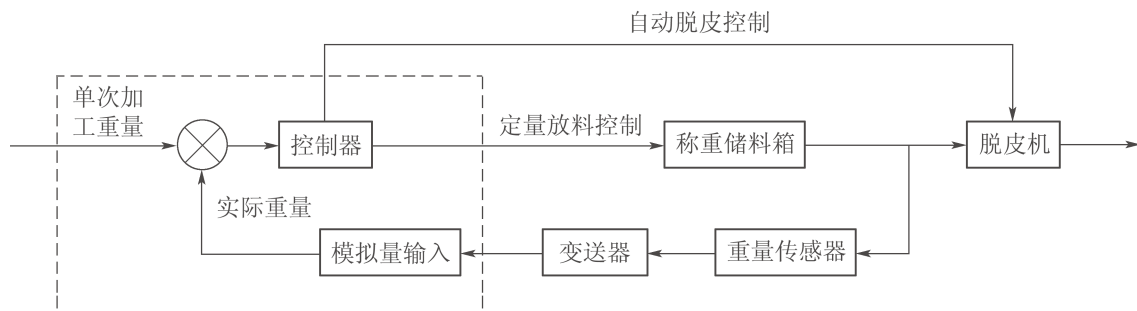


图 6 定量自适应脱皮流程

2.4 绞龙运动仿真与结果分析

脱皮绞龙作为胡椒脱皮机的核心工作部件，其关键力学参数的分析和校核至关重要。采用

Simulation 插件对脱皮绞龙进行模态分析，模拟机构在机械设备运行中的受力和应变状态，包括在疲劳、弯曲和响应等情况下的形变以验证设计环节存在的

问题或缺陷^[30]。这种分析方法有效提高了关键执行机构设计的准确性和可靠性,同时显著缩短了设备的研发周期和成本。

鉴于不锈钢具有耐高温、耐腐蚀、耐酸性介质和抗高温氧化等优点^[31],在食品级胡椒加工工艺中,本研究选择采用 304 不锈钢材料来制作绞龙叶片及主轴,所选叶片材料的主要性能参数列于表 2。

表2 不锈钢性能参数

项目	密度/ (g·cm ⁻³)	泊松 比	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ (N·mm ⁻²)	弹性模量/ (kN·mm ⁻²)
数值	7.93	0.29	≥ 520	≥ 205	193

采用最大法向应力和应变,模拟描述胡椒物料

进入脱皮机构时绞龙叶片对抗弯曲和形变的性能。为真实地反映受力情况,设定载荷为 650 N,均匀分布,遵循图 7 所示的分布方式仿真获得应力应变云图和最大数值作为绞龙叶片的极限性能参数。

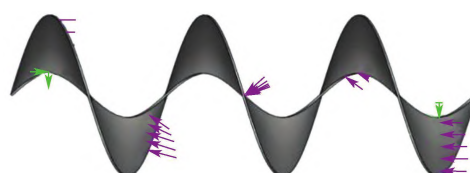


图7 绞龙叶片模型添加模拟外部载荷

基于实体网格化进行离散化处理,将求解域分解成适量的单元,通过运算得到 Von Mises 应力(范式等效应力)云图,如图 8 所示。

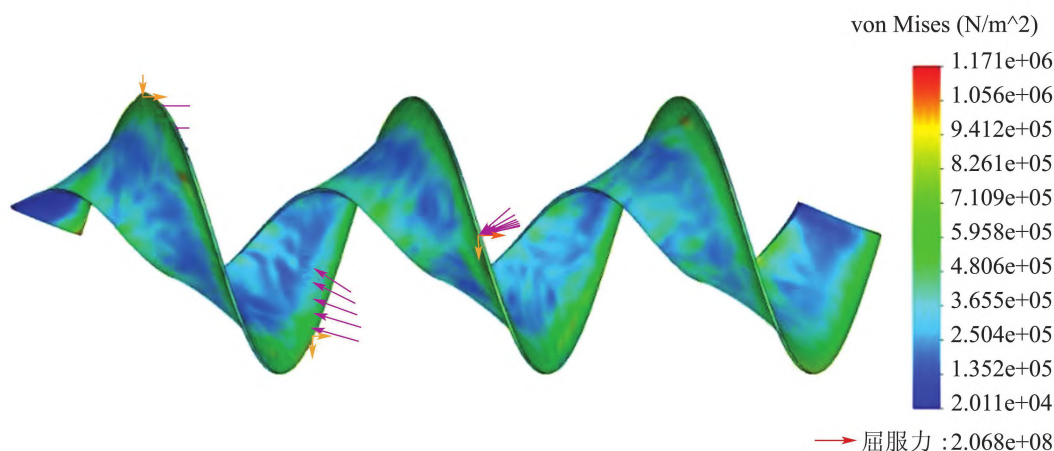


图8 范式等效应力分布云图

由图 8 所示可知,绞龙叶片所受最小法向应力值为 $1.838 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,最大法向应力值为 $5.387 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

$$\Gamma_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \phi_{xy}^2} \quad (3)$$

$$\tau_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \phi_{xy}^2} \quad (4)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为第一、二、三主应力, $\tau_{\max}$ 和 $\tau_{\min}$ 分别为平面上最大和最小主应力。

根据第四强度理论,屈服应力即为去除由形变所产生的最小应力值。通过式(2)~(4)的计算,得知绞龙叶片的屈服应力值为 3.204×10^8 。与最大应力值 5.387×10^5 相比,最大应力远小于屈服应力,表

明该结构设计是安全可靠的。然而,根据图 8 中的应力云图,可以观察到最大受力点位于主轴和叶片焊接点处。因此,在设计中需要加强该区域的厚度,采用“边缘延伸”效应,将叶片设计为边缘薄中心厚的结构,这样的设计更为合理。

3 试验验证

3.1 试验条件

为验证本双绞龙组合式胡椒脱皮机的实用性和可持续性,将其与脱皮机、熟化机联动形成一条完整的白胡椒初加工生产线,如图 9 所示。于 2023 年 8 月在海南省文昌市胡椒加工试验基地进行测试试验。本次试验的核心目标在于详细评估加工白胡椒成品的破损率、脱皮率以及整机的工作效率。

3.2 方法步骤

胡椒鲜果的脱皮试验按照筛选→脱粒→熟化→脱皮→烘干的一体化链动工艺展开。待整条生产线预热完毕后，将筛选好的整穗有红果或 80% 以上的黄果且表皮没有腐烂迹象的 50 kg 胡椒鲜果以固定时速喂入量放置于脱粒机上，胡椒果穗将经过脱粒机脱去梗叶或其他杂质，熟化机将对胡椒果粒进行加热处理，最后脱皮机完成胡椒果粒的脱皮脱胶工作。待试验结束之后，出料口的初加工物料随机承装，并使用记号笔一一记录并对应，待清洗后自然控水。白胡椒初加工生产线如图 9 所示。



图 9 白胡椒初加工生产线

控水结束后，采用勺子进行定量承装，每个编号随机抽取 10 份样本，每份样本包含 100 粒胡椒果。在清洗过程中，对每个样本的实际脱皮情况进行肉眼观察，并进行详细的数据记录。

3.3 试验结果与分析

试验在硬质地基，无加固装置下进行，控制主输送速度在 0.8~2.2 m/s，整线无明显震动，试验过程中机械运转平稳，工作安全可靠，喂入及出料基本顺畅，脱皮机可较好的完成脱皮工作。

经过反复调试试验验证，最终确认双绞龙组合转速为 500~700 r/min 时，胡椒脱皮机的脱皮率能够稳定达到 95% 以上，且果核破损率小于 3%。从表 3 可知在水润条件下胡椒脱皮机整机运转较顺畅，主轴转速在 600 r/min 时，脱皮效率可达到 100%，但果核破损现象会加重，存在一定的加工浪费现象。该试验方案及工艺流程下，测试数据表明，脱皮质量效果达到了胡椒产线加工模式的需求。

表3 胡椒鲜果脱皮率结果测定

序号	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
1	1 (1)	0 (3)	1 (0)	2 (2)
2	0 (2)	0 (1)	1 (0)	1 (2)
3	0 (1)	0 (0)	1 (0)	1 (3)
4	2 (1)	0 (1)	2 (0)	1 (0)
5	2 (3)	0 (1)	1 (1)	0 (0)
6	1 (1)	0 (2)	2 (0)	2 (1)
7	0 (0)	0 (2)	2 (0)	2 (3)
8	1 (2)	0 (3)	1 (0)	2 (3)
9	1 (1)	1 (0)	1 (1)	3 (2)
10	2 (3)	0 (1)	2 (0)	0 (1)

备注：脱皮试验用胡椒果均经过熟化机彻底熟化后喂入脱皮机，且脱皮过程均按照胡椒量与水量 20:1 进行湿化。方案 1 至 4 分别对应脱皮绞龙转速为 500、600、700、800 r/min。序号及方案下对应的数字为每 100 粒未达到脱皮效果的个数，带括弧的表示有果核破损的数据。

4 结语

模拟试验和试验验证结果表明，双绞龙组合式胡椒脱皮机在实际应用中能够稳定、高效地完成脱皮工作，符合现代工业对设备效能和可持续性的要求。采用双绞龙组合式胡椒摩擦脱皮方式，控制产线主输送速度在 0.8~2.2 m/s，绞龙组合转速为 500~700 r/min 时，胡椒脱皮机的脱皮率能够稳定达到 95% 以上，且果核破损率小于 3%，各项指标符合设计要求。基于产线链动需求的双绞龙组合式胡椒脱皮设计模式，能够与胡椒初加工配套的其他生产设备联动，显著提高整体生产效率，符合产业化生产趋势要求。

参考文献

- [1] FAN Z, MOJEL R, LI G. Physicochemical properties of black pepper (*Piper nigrum*) starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181: 986-993.
- [2] 邢谷杨. 中国胡椒生产概况 [J]. 世界农业, 2002 (8): 19-20, 23.
- [3] 李鑫, 王福清, 吴桂革, 等. 3 种脱皮方式对白胡椒品质的影响 [J]. 食品科学, 2022, 43 (15): 79-86.
- [4] 邹华松, 杨建峰, 林丽云. 中国胡椒研究综述 [J].

- 中国农业科学, 2009, 42 (7): 2469-2480.
- [5] JAYANT S R, SANKUNNY M K. A status review on the medicinal properties of essential oils [J]. Industrial Crops & Products, 2014(62): 250-264.
- [6] 张园, 邓怡国, 李明福, 等. 胡椒酶法与机械法联合脱皮试验及结果分析 [J]. 现代农业装备, 2018 (5): 32-37.
- [7] VINOD V, KUMAR A, ZACHARIAH T J. Isolation, characterization and identification of pericarp-degrading bacteria for the production of off-odour-free white pepper from fresh berries of *Piper nigrum* L. [J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 116(4): 890-902.
- [8] MF LI, Y ZHANG, WY LUO, et al. Study on pepper decorticating technology and equipment [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015(741): 577-581.
- [9] 林玉钦, 陶锐, 邓浩, 等. 三种胡椒脱皮方式污水水质指标比较分析 [J]. 现代食品科技, 2019, 35 (3): 140-147.
- [10] 段宙位, 王世萍, 何艾, 等. 胡椒的酶辅助机械脱皮工艺优化及品质分析 [J]. 食品科技, 2020, 45 (9): 73-78.
- [11] YUAN ZHANG, LIJIAO WEI, YIGUO DENG, et al. Testing of basic characteristics of pepper fresh fruits and optimization of mechanical parameters [C]. In 3rd International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2018), pages 627-631.
- [12] 疏奇, 张燕. 湿胡椒脱粒去皮机的设计 [J]. 食品与机械, 2016, 32 (2): 91-93, 127.
- [13] 张园, 韦丽娇, 李玉林, 等. 一种胡椒鲜果脱皮洗涤一体机: CN105052413B [P]. 2017-03-08.
- [14] 张园, 李明福, 李玉林, 等. 摩擦式胡椒鲜果脱皮装置的设计与试验分析 [J]. 中国农机化学报, 2016, 37 (4): 96-99.
- [15] 张园, 李玉林, 葛畅, 等. 胡椒鲜果预处理破损机的研制与结果分析 [J]. 中国农机化学报, 2016, 37 (10): 120-124.
- [16] LIU C, WU W, SONG J. Characteristics and process optimization of hot-air drying pepper [C]//International Conference on Mechatronics and Intelligent Materials, 2012.
- [17] 张园, 邓怡国, 李明福, 等. 胡椒酶法与机械法联合脱皮试验及结果分析 [J]. 现代农业装备, 2018, 42 (5): 33-38.
- [18] MINGLANI DHEERAJ, SHARMA ABHISHEK, PANDEY HARSH, et al. Analysis of flow behavior of size distributed spherical particles in screw feeder [J]. Powder Technology, 2020 (prepublish).
- [19] 刘威, 唐倩, 刘宗敏, 等. 水平式螺旋输送机运动模型搭建和参数化设计 [J]. 食品与机械, 2019, 35 (6): 96-99.
- [20] 庞子乾, 王明湖, 李明江, 等. 新型胡椒脱皮脱胶一体机: CN215302898U [P]. 2021-12-28.
- [21] 陈国胜, 周国鹏, 张阳, 等. 双梁桥式起重机主梁有限元模态及屈曲分析 [J]. 设备管理与维修, 2022 (6): 27-29.
- [22] 吴池源, 晋心斌. 叶轮给料机的结构改进 [J]. 水泥工程, 2023, 212 (1): 63.
- [23] 刘彩霞. 圆捆机搅龙结构改进设计 [J]. 农业技术与装备, 2021, 383 (11): 14-15.
- [24] 陈岁繁, 张小猛, 李其朋, 等. 垂直螺旋输送机输送特性及其参数优化研究 [J/OL]. 机电工程: 1-12 [2023-03-30].
- [25] 胡科幻. 基于 32 位 MCU 的三层共挤出交联电缆生产线的智能控制系统的研究与实现 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [26] 李国勇, 杨丽娟. 神经·模糊·预测控制及其 MATLAB 实现. 第 3 版 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [27] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [28] 邢高勇, 毛罕平, 王佳慧, 等. 小区谷物联合收获机作业速度智能调控算法设计与仿真 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (11): 45-50.
- [29] 王伟, 宫元娟, 白雪卫, 等. 移动式秸秆制粒机作业速度调控系统研究 [J]. 农业机械学报, 2021, 52 (10): 186-95.
- [30] 余书豪, 湛永祥. 螺旋轴直径对螺旋输送机性能的影响 [J]. 中国粉体技术, 2018, 24 (2): 32-37.
- [31] LI YING, LI JIANJIAN, FU CHONGLONG. Hardening behavior of selective laser melted 304L stainless steel under Xe irradiation [J]. Vacuum, 2021, 192.

(下转第68页)

Study on 3D Positioning Method of Porcine Sperm based on Focusing Degree Evaluation of Diffraction Reconstruction

LI Guoxiao¹, JIANG Yuetong¹, LI Chenxi², WU Junwei¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Zhenjiang 212400, China; 2. Lianyungang Lihua Animal Husbandry Co., LTD, Lianyungang 222000, China)

Abstract: Sperm motility performance is an important basis for evaluating sperm motility. At present, the relatively advanced computer-assisted sperm analysis (CASA) method uses graphics processing technology to process and analyze sperm images taken by phase contrast microscope. The equipment is large and expensive, and the imaging field is small. More importantly, the motion trajectory obtained by this method is on the plane. In fact, sperm movement occurs in three dimensions. The key step to obtain 3D motion trajectory is 3D positioning. Therefore, a method to obtain 3D positioning of porcine sperm by lensless diffraction imaging is proposed in this study. In this method, based on the diffraction image reconstruction, image processing algorithm is used to obtain its plane coordinates, and focusing degree evaluation index and self-focusing algorithm are designed to obtain its height coordinates by using the principle that the reconstruction distance affects the contrast of virtual and real images. Furthermore, the 3D location of porcine sperm individual is realized. The results show that this method can achieve the accuracy of $\pm 1.4 \mu\text{m}$ and $\pm 10 \mu\text{m}$ in the horizontal and vertical directions respectively. This method is expected to provide more scientific data support for sperm quality detection and reproductive medicine research.

Key words: porcine sperm; three-dimensional positioning; diffraction reconstruction; focusing degree evaluation; self-focusing algorithm

(上接第44页)

Design and Verification of Tandem Dragon Combined Pepper Peeling Machine based on Production Line Dynamic Requirements

ZHANG Jiawei^{1,2}, ZHANG Yuan^{1,3}, SHEN Dezhan^{1,4}, ZHAO Zhenhua^{1,4}, WEI Lijiao^{1,5}, CHEN Xiaoyao¹

(1. Agricultural Machinery Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China; 2. School of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524091, China; 3. Guangdong/Zhanjiang Engineering Technology Research Center of Precision Emission Control for Agricultural Particulates, Zhanjiang 524000, China; 4. Zhanjiang Key Laboratory of Dynamics and Precision Emission Control for Particulates, Zhanjiang 524091, China; 5. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang 524091, China)

Abstract: The existing single-machine operation mode, while addressing the mechanized peeling process, hinders the development of technology in the initial processing line of pepper. To further enhance the processing efficiency of the chain, this paper proposes a double-screw dragon combination pepper peeling machine based on the dynamic requirements of the production line. Stress-strain simulations of core components indicate that its structural design is safe, reliable, and stable, with a significant reduction in costs. Physical verification reveals that this double-screw dragon combination pepper peeling machine, due to its adoption of a production line mode, achieves much higher efficiency than single-machine peeling machines. The peeling rate exceeds 95%, and the core damage rate is less than 3%, meeting the design requirements.

Key words: production line dynamics; double-screw dragon combination; pepper peeling machine; stress simulation; test