

文成糯米山药机械化去皮关键技术研究与装备设计

胡允森

文成县农业产业发展中心，浙江 温州

收稿日期：2026年1月10日；录用日期：2026年2月7日；发布日期：2026年2月14日

摘要

文成糯米山药作为国家地理标志产品，其深加工产业发展受制于传统人工去皮效率低、损伤大、易褐变等瓶颈。本文以推动特色农产品加工机械化、智能化为目标，针对糯米山药外形不规则、粘液多、质地脆等物理特性，系统分析了其机械化去皮的技术难点。通过对比多种去皮方案，创新性地提出“蒸汽预处理软化协同机器视觉引导自适应柔性切削”的机械化去皮技术路线。基于此，设计了一套集成视觉识别、PLC控制与自适应刀具的糯米山药去皮原理样机，本研究明确了关键工艺参数(如蒸汽温度90℃~98℃、时间25~40秒；超声波频率25~40 kHz)，为解决文成糯米山药产业化去皮难题提供了切实可行的机械化技术方案，对提升地方特色农产品附加值和产业竞争力具有重要现实意义。

关键词

文成糯米山药，农业机械化，去皮技术，机器视觉，装备设计

Key Technologies and Equipment Design for Mechanical Peeling of Wencheng Glutinous Yam

Yunsen Hu

Agricultural Industry Development Center of Wencheng County, Wenzhou Zhejiang

Received: January 10, 2026; accepted: February 7, 2026; published: February 14, 2026

Abstract

As a national geographical indication product, the deep processing industry of Wencheng glutinous

yam is constrained by bottlenecks such as low efficiency, high damage, and easy browning in traditional manual peeling. To promote the mechanization and intelligence of characteristic agricultural product processing, this paper systematically analyzes the technical difficulties in mechanical peeling of glutinous yam based on its physical characteristics, including irregular shape, high mucus content, and brittle texture. By comparing various peeling solutions, an innovative mechanized peeling technical route of “steam pretreatment softening combined with machine vision-guided adaptive flexible cutting” is proposed. Based on this, a prototype machine for glutinous yam peeling was designed, integrating visual recognition, PLC control, and adaptive cutting tools. This study clarifies key process parameters (such as steam temperature of 90°C~98°C, time of 25~40 seconds; ultrasonic frequency of 25~40 kHz), providing a practical mechanized technical solution to address the industrial peeling challenges of Wencheng glutinous yam. It holds significant practical importance for enhancing the added value and industrial competitiveness of local characteristic agricultural products.

Keywords

Wencheng Glutinous Yam, Agricultural Mechanization, Peeling Technology, Machine Vision, Equipment Design

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

文成糯米山药是浙江省文成县特有的名优农产品，具有近千年的栽培历史[1]，其口感糯而不腻、营养丰富，已获国家地理标志保护。随着大健康产业兴起，市场对糯米山药鲜切制品、预制菜等深加工产品的需求日益增长。然而，其深加工首道关键工序——去皮，长期依赖于手工作业。手工去皮存在效率低下、劳动强度大、产品标准化程度低、易受粘液刺激引发皮肤不适等诸多弊端[2]，严重制约了产业的规模化与标准化发展。

实现机械化去皮是突破产业瓶颈的必然选择[3]。然而，糯米山药独特的物理特性(如表皮凹凸不平、个体弯曲度大、果肉脆性高、表面粘液丰富)使得通用型根茎作物去皮设备(如滚筒摩擦式、毛刷式)难以直接适用[4]，存在去皮不净、果肉损伤率高、破损严重等问题。近年来，随着机器视觉、柔性执行器等智能农业装备技术的发展，针对不规则农产品的自适应加工成为研究热点[5][6]。然而，针对糯米山药这一兼具高粘液、高脆性特征的特殊物料，尚未见成熟的机械化去皮解决方案。

因此，开展针对文成糯米山药物料特性的专用机械化去皮技术与装备研究，具有紧迫的产业需求和明确的学术价值。本文旨在通过系统分析物料特性，创新设计原理，开发一套适应性强、损耗率低、自动化程度高的机械化去皮解决方案，为推动文成糯米山药产业迈向机械化、智能化加工提供核心技术支持。

2. 物料特性分析与机械化去皮难点

2.1. 物料基本物理与生化特性

本研究首先对文成糯米山药进行了系统的物料特性测定(表 1、表 2)[7]。数据显示，其硬度(1138.83 ± 390.67 g)、胶着性(27690.12 ± 13809.01 N)和咀嚼性(22117.56 ± 13463.53 N)等质构参数离散度大，表明

个体间及同一根茎不同部位的力学性质差异显著。对比 10℃与 25℃下的硬度数据发现, 低温下表皮硬度显著增加(>15%), 为低温预处理以降低去皮损伤提供了依据[8]。物料富含多酚氧化酶(PPO), 是去皮后易发生酶促褐变的主要原因, 要求在机械化去皮流程中集成有效的护色工艺。

Table 1. Main physical characteristic parameters of Wencheng glutinous yam (Sample Size: 15)
表 1. 文成糯米山药主要物理特性参数(样本数 15 个)

品质参数	硬度 Hardness	粘着性 Adhesiveness	回复性 Resilience	黏聚性 Cohesion	弹性 Springiness	胶着性 Gumminess	咀嚼性 Chewiness
单位	g	g.sec	%	%	%	N	N
数值	1138.83	-3.98	13.33	26.80	77.88	27690.12	22117.56
标准差	390.67	3.93	7.26	17.03	9.034	13809.01	13463.53

Table 2. Hardness data of Wencheng glutinous yam at different depths and temperatures
表 2. 文成糯米山药不同温度下不同深度的硬度数据

		部位	硬度(kgf/cm ²)			
25℃	外表皮	12.29	14.05	11.66	15.26	
		16.11	16.57	13.74	11.3	
	内表皮	9.41	9.33	8.93	7	
		11.46	7.37	7.93	9.38	
	山药肉	9.79	9.7	6.67	7.4	
		7.41	8.03	7.81	8.17	
10℃	外表皮	17.48	14.05	14.45	17.31	
		12.91	19.31	15.01	12.56	
	内表皮	12.07	10.79	11.84	13.64	
		11.12	11.8	11.52	11.9	
	山药肉	7.3	6.79	6.27	7.14	
		7.08	6.58	6.76	7.18	

2.2. 机械化去皮的核心难点

基于特性分析, 其机械化去皮面临三大核心挑战。一是几何适应性难题。非柱状、不规则的弯曲外形, 使得固定轨迹的刀具难以实现全表面均匀接触, 易产生“漏去皮”或“过切削”。二是损伤控制难题。高脆性果肉在机械外力下易断裂(破损)或产生深划痕(损伤), 影响商品率和后续加工品质; 三是粘液处理难题。丰富的粘液在去皮过程中会包裹刀具, 导致打滑、效率下降, 并加剧设备清洁负担。

3. 机械化去皮技术方案对比与优选

针对上述难点,本研究对主流去皮技术进行了适配性评估(表3)。综合分析,单一技术路径难以兼顾。因此,本研究提出“仿生+智能”的复合技术路线:采用“蒸汽微软化预处理”降低表皮附着力和整体脆性,再结合“机器视觉引导的自适应柔性切削”作为核心去皮执行单元,以实现精准、低损的去皮目标。

Table 3. Comparison of applicability of different peeling techniques for glutinous yam processing
表3. 不同去皮技术在糯米山药加工中的适用性对比

技术方案	原理	效率	对糯米山药的适应性	主要弊端
传统机械摩擦/毛刷	物理摩擦去除表皮	高	差	损伤率高,凹面去皮不净,粘液缠绕
热力(蒸汽)软化	热能弱化皮肉连接	中	较好	单独使用可能导致表层糊化,能耗较高
化学/碱液去皮	化学腐蚀表皮	中	一般	存在试剂残留风险,影响产品“天然”属性
高压水射流	高速水流切削	高	中	设备成本高,水资源消耗大,对脆性物料控制难
机器视觉引导切削	视觉定位,精准切削	中高	优	系统复杂,前期投入大,但能实现自适应

4. 关键技术与装备设计

4.1. 总体技术路线

设计遵循“感知-决策-执行”的智能化逻辑(图1)。流程为:山药经蒸汽预处理模块(参数:90℃~98℃,25~40秒)进行表皮软化与粘液清洁→进入视觉检测工位,由CCD相机获取三维点云数据,识别外形轮廓与表皮残留区域→中央控制器(PLC)根据模型规划最优刀具路径→自适应柔性切削执行机构(集成粗、精加工刀具)进行仿形切削。

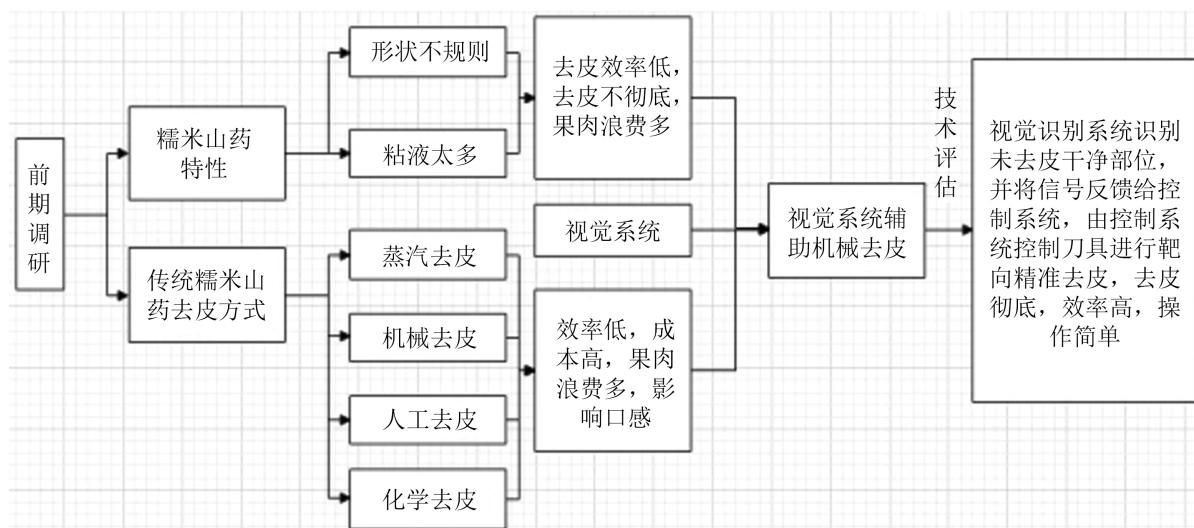
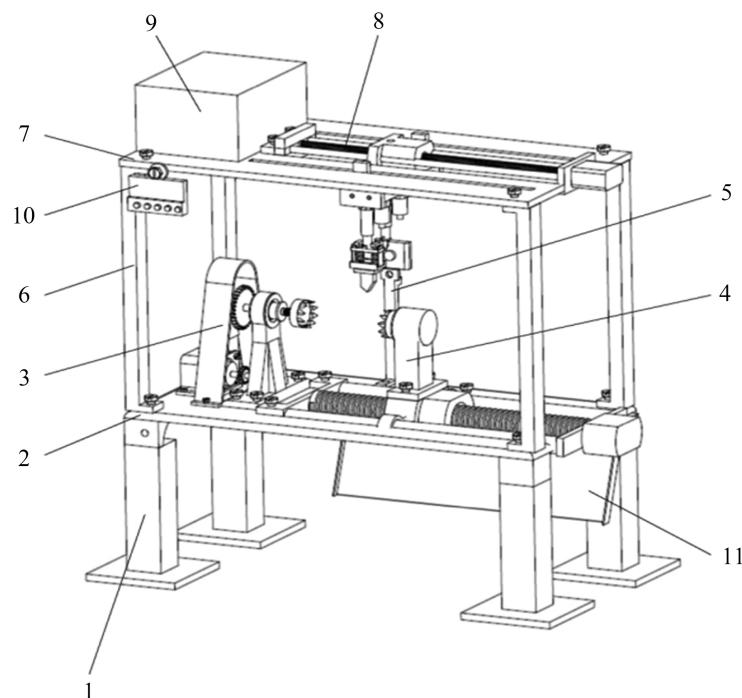


Figure 1. Technology development roadmap
图1. 开发技术路线

4.2. 核心装备设计：视觉引导自适应去皮装置(图 2)



1-支撑座；2-承载台基座；3-固定夹持组件，4-活动夹持组件；5-图像识别组件；6-支撑柱；7-上盖板；8-去皮组件；9-PLC 控制箱；10-PLC 控制面板；11-去皮收集板

Figure 2. Structural schematic diagram of the glutinous yam peeling device
图 2. 糯米山药去皮装置的结构示意图

4.2.1. 机器视觉识别与路径规划系统

视觉系统采用集成高分辨率工业 CCD 相机与光源[9]。算法流程如下：一是图像采集与预处理。通过视觉传感器采集山药图像[10]，并利用深度信息补偿粘液反光区域的缺失。二是表皮特征提取。采集完山药的轮廓数据，结合纹理特征[11]，由 PLC 控制装置根据分析处理后的山药轮廓数据来控制刀具的切削深度，可以更好地去除山药表皮，同时可以提高去除山药表皮的精度。三是坐标变换与路径规划[12]。将识别出的表皮像素坐标通过相机标定参数转换至机器人基坐标系。采用等残留高度螺旋轨迹规划算法，以确保刀具覆盖所有待去皮表面，同时优化切削连续性，减少空行程。

4.2.2. 自适应柔性切削单元设计

该单元是执行低损伤去皮的核心，其创新性在于一是多自由度夹持与旋转系统。采用“固定顶齿 + 伺服驱动活动顶齿”的 V 型对心夹持机构，一端固定，另一端由伺服电机驱动实现自适应对心与夹紧，配合主轴旋转，可实现山药原位的 360 度无死角曝光；二是自适应刀具系统。这是机械设计的核心，装置配备并联的粗加工固定刀具与精加工柔性刀具。刀具采用特制弧形刃口刀片，材料为食品级不锈钢，刃口设计兼顾锋利度与耐用性，以减少对脆性果肉的撕裂。柔性刀具安装在由直线导轨导向的滑块上，滑块与支架之间通过预压弹簧组连接。弹簧刚度经过计算选择($\sim 50 \text{ N/mm}$)，旨在提供恒定且适中的切削压力(目标值 5~10 N)，能实时贴合山药表面的起伏，刀具在弹簧力作用下可沿导轨上下浮动，实现被动式自适应贴合[13]。机构内置线性编码器实时反馈刀具位置，形成位置闭环，辅助控制切削深度。

4.3. 辅助技术：蒸汽 - 超声波协同软化工艺研究

蒸汽软化通过湿热作用使表皮与果肉之间的细胞结构松弛，果胶等物质分解，降低附着力[14]。超声波的空化效应和机械振动则进一步分离表皮，同时减少粘液残留。为降低主切削单元的负载，前置研究探索了蒸汽与超声波协同的预处理工艺[15]。结果表明(表 4、表 5)，90℃~98℃的饱和蒸汽处理 25~40 秒，能有效渗透表皮薄壁细胞层，降解果胶，使表皮剥离能降低约 60%。后续辅以 25~40 kHz、功率密度 0.5~1.5 W/cm² 的超声波处理 10~20 秒，其空化效应能进一步松动表皮并破碎粘液网络结构。此协同工艺为未来设计一体化去皮生产线提供了重要参数依据。

Table 4. Steam treatment parameters

表 4. 蒸汽处理参数

参数	优化范围	实验依据
温度	90℃~98℃	低于山药的淀粉糊化温度(100℃)，避免果肉软化
时间	25~40 秒	时间过短则软化不足，过长导致能耗增加
蒸汽压力	0.15~0.3 MPa	确保蒸汽穿透表皮褶皱

Table 5. Ultrasonic treatment parameters

表 5. 超声波处理参数

参数	优化范围	作用
频率	25~40 kHz	低频(<25 kHz)易损伤果肉，高频(>40 kHz)空化效应减弱
功率密度	0.5~1.5 W/cm ²	功率过低则剥离不彻底，过高导致局部过热
作用时间	10~20 秒	与蒸汽时间匹配，总周期控制在 1 分钟内

5. 预期性能分析与讨论

本设计方案旨在解决传统机械化去皮的三大痛点。

针对几何适应性：通过“视觉识别 + 路径规划 + 柔性执行”的闭环，理论上可实现任意形状山药的全表面覆盖去皮，预计去皮面积百分比可达 98%以上。

针对损伤控制：柔性刀具的恒压跟随特性，能将切削力控制在稳定阈值，结合蒸汽预处理降低物料整体硬度，目标是将果肉损伤率从传统机械的 8%~15% 降低至 2%以下。

针对效率与自动化：集成化的自动夹持、视觉识别与 PLC 控制，将单根处理时间大幅缩短，目标产能可达 800~1200 kg/h，显著优于人工效率，并为进一步对接自动化生产线奠定基础。

6. 结论与展望

本文聚焦文成糯米山药产业化去皮的瓶颈问题，开展了系统的机械化去皮技术研究。通过物料特性分析，明确了其机械化加工的特殊性。创新性地提出了“蒸汽预处理软化协同机器视觉引导自适应柔性切削”的技术路线，研究成果表明，该技术方案在理论上能有效应对糯米山药形状不规则、质地脆、粘液多的挑战，实现高效、低损、高自动化的去皮作业，为文成糯米山药产业的升级提供了关键的装备技

术储备。

参考文献

- [1] 金再欣. 文成糯米莳特征特性及栽培技术要点[J]. 中国农技推广, 2018, 34(4): 34-35.
- [2] 张琦. 山药清洗去皮机传动装置设计[J]. 时代农机, 2016, 43(6): 72-73.
- [3] 李政. 佛手山药去皮机械研究可行性报告[J]. 湖北农机化, 2020(3): 136-137.
- [4] 焦瑞泽. 文成山药多糖和黏液质的理化性质及生物活性[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [5] 李政. 用于无损草莓收获的柔性机器人系统: 设计、控制与评估[J]. 野外机器人学报, 2021, 38(6): 935-953.
- [6] 王福军. 根茎类蔬菜机械化去皮技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 1-10.
- [7] 唐楠锐. 荸荠去皮技术研究进展与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 101-110.
- [8] 李培刚. 新鲜果蔬加工关键技术[J]. 农业机械, 2022(5): 80-83.
- [9] 吴清政. 机器视觉在农业机械路径规划中的应用[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(5): 92-94.
- [10] 刘同金. 计算机视觉在果蔬分类中的应用[J]. 现代农业科技, 2020(5): 258, 262.
- [11] 宁祎. 喷涂机器人路径规划方法分析与展望[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 19-27.
- [12] 杨俊. 基于机器视觉的鲢鱼头加工装置设计及试验[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 178-187.
- [13] 俞国红. 自适应仿形甘薯削皮机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 135-142.
- [14] 曹光矗. 薯类作物去皮技术及设备研究进展与展望[J]. 农业工程, 2020, 10(5): 8-14.
- [15] 魏丽娜. 表面不规则的难清洗果蔬清洗技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 175-183.