

# 一种单工位红枣去核机去核结构的仿真分析研究

刘蒋龙, 张淑娟, 周靖博, 杨一

(山西农业大学工学院, 山西太谷 030801)

**摘要:** 针对现有三工位去核机对不同大小和品种的红枣去核时需要更换不同规格的夹具, 从而造成适应性差、工作效率低等问题, 结合各类红枣的外观形状及枣核的尺寸参数, 基于弹性夹具与旋转轴线定位原理设计了一种采用新型夹具的单工位去核机, 包括去核机主传动系统的设计以及新型夹具和去核系统关键机构的设计; 下夹具的旋转实现红枣的轴向定位, 弹性架设计使夹具对不同红枣具有适应性, 减去了去核机更换夹具的过程; 利用 UG 软件建立单工位红枣去核机的样机模型, 并结合去核系统的组成结构与工作原理, 对去核系统的模型进行适当简化, 再利用虚拟样机技术软件 ADAMS 对去核系统在工作状态下的运动规律与受力状况进行仿真分析; 最后对单工位红枣去核机的去核系统进行模拟试验, 验证其合理性。结果表明, 去核率达 95%, 成品率达 91.5%, 平均果肉损失率为 3.75%。该红枣去核机可以满足实际生产要求, 去核效率达 21600 枚/h, 高于现有红枣去核机的去核效率。

**关键字:** 红枣; 去核机; 单工位; 弹性夹具; 仿真

文章编号: 1673-9078(2016)9-154-160

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.023

## Simulation Analysis of a Single-station Jujube Pit-removing Machine

LIU Jiang-long, ZHANG Shu-juan, ZHOU Jing-bo, YANG Yi

(College of Engineering Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** Currently available triple-station jujube pit-removal machines require frequent changes of different sizes of fixtures when red jujubes of different size and variety are processed. This leads to poor adaptability, low work efficiency, and other issues. In order to solve these problems, a single-station pit-removal machine was designed based on an elastic fixture and the principle of rotational axis positioning, with a consideration of the dimensions of all kinds of jujubes and the parameters of their pits. The project included designing a novel fixture, the main transmission system, and the structure of key components. The axial positioning of red jujubes was achieved by the rotation of the lower fixture in the direction of the axis, while the design of the elasticity frame allowed the fixture to adapt to different sizes of red jujubes, thus avoiding the step of changing fixtures. A prototype model of single-station jujube pit-removal machine was built using UG software and appropriately simplified based on the structures of the components and the working principle of the pit-removal system. Subsequently, the pattern of movement and the stress conditions during operation was simulated by ADAMS virtual prototype software. Finally, a simulation with the single-station jujube pit-removal machine was carried out to validate its rationale. The results indicated that the pit-removal rate was 95%, the production yield was 91.5%, and the average rate of pulp loss was 3.75%. This jujube pit-removal machine satisfies the requirement of actual production and the pit removal rate was up to 21600 fruits per hour, which is higher than that of existing jujube pit-removal machines.

**Key words:** jujube; pit-removal machine; single-station; elastic fixture; simulation

红枣营养价值丰富, 被人们称为五果之王<sup>[1~3]</sup>。近年来红枣产业迅速发展, 为了适应红枣的产量增加以及市场化的需求, 红枣深加工技术的更新和进步就显得尤为重要。

去核, 作为红枣进一步加工过程中的必备环节,

收稿日期: 2015-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31271973); 山西省自然科学基金项目 (2012011030-3)

作者简介: 刘蒋龙 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业机械装备的研究

通讯作者: 张淑娟 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械装备的研究

其技术的不断更新直接决定枣后续加工的效率 and 品质。目前, 国内一些企业和科研单位已经针对红枣设计了去核设备, 马朝峰<sup>[4]</sup>等设计的链式结构去核机能够实现横径为 10~24 mm 的红枣去核率达到 98% 以上, 但其生产效率低, 大约 100 kg/h; 王兵臣<sup>[5]</sup>等设计了连续作业去核机构, 但结构的复杂性增加; 徐燕飞<sup>[6]</sup>等设计了同步循环机构, 结构得以简化, 但其导向板的使用使得整体的受力状况恶化, 影响了去核效果; 宁天德<sup>[7]</sup>设计的基于夹枣器和三工位去核原理的去核机整机效率较好, 但采用人工辅助上料的方式, 使总的效率降低; 由广达科技公司设计的 JQH-II 型去核机, 在去核管下面设计了橡胶挡圈, 减少了枣肉损

失,但是工作速度不能太高,导致生产率降低;王侯贵<sup>[8]</sup>在三工位的基础上,设计了旋转扶正器,实现了红枣的轴线定位,但对级别不同的红枣需更换夹具,枣去核过程时间长。上述去核机大多基于三工位去核原理实现红枣去核,在去核过程中,红枣需要经过加紧定位、去核、顶核三个工位完成去核工作,降低了去核效率。而单工位去核机能够实现在一个工位上完成上述动作,节省了时间,降低了结构复杂性。

虚拟样机技术是在产品开发过程中,将产品部件设计和分析技术结合在一起,并针对使用过程中的各种情况进行仿真分析,测试产品的整体性能。陈莉<sup>[9]</sup>等采用仿真技术构建了咀嚼运动的简化模型,分析了咀嚼运动规律对食品物料破坏程度的影响。Meng Cai<sup>[10]</sup>等基于 ADAMS 软件建立车辆空气悬架动力学仿真分析,具有巨大的应用价值。

本文主要是基于弹性定位夹具与旋转轴线定位原理,开发了一种新型弹性夹具,设计一种采用新型去核系统的单工位双线工作红枣去核机;再利用 UG 软件建立去核系统的模型,采用虚拟样机技术软件 ADAMS 对工作状态下的去核系统进行运动规律和受力仿真分析,在此基础上再进行红枣去核模拟样机实验分析。

### 1 红枣去核机主传动系统的设计

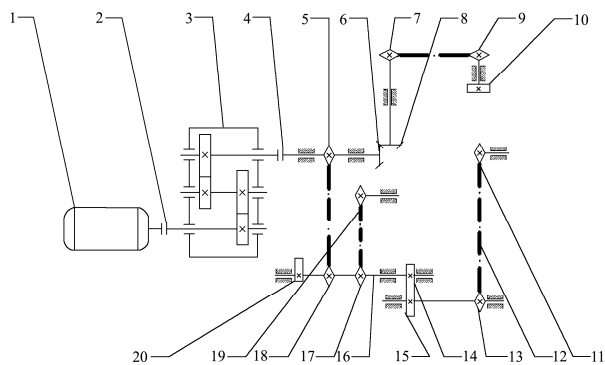


图1 去核机主传动机构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the main transmission in the pit-removal machine

注: 1.电动机; 2. 1#联轴器; 3.变速器; 4. 2#联轴器; 5. 1#主动链轮; 6.主动锥齿轮; 7. 2#主动链轮; 8.从动锥齿轮 9. 2#从动链轮; 10.齿轮; 11. 3#从动链轮; 12.链条; 13. 3#主动链轮; 14.主动拨盘; 15.槽轮; 16.主轴; 17.4#主动链轮; 18. 1#从动链轮; 19. 4#从动链轮; 20.曲轴机构。

如图1所示,电动机的源动力经过减速器减速后传递给齿轮轴,然后动力分为两路进行传递,一部分动力经锥齿轮及可伸缩万向节机构传递到安装于铁板之上的悬臂轴,再经过链传动与齿轮传动进而驱动上

夹具旋转;另一部分动力由链传动传递到主轴,再经主轴分三个方向进行传递:(1)经链传动驱动螺旋输送机;(2)经槽轮机构与链传动机构传动驱动上料传送链间歇运动;(3)经链传动到曲轴机构驱动去核系统上下往复运动。

如图2所示,整机采用双线布置,工作线对称分布,使整机受力均匀,工作可靠,可实现单次去核120枚,单位小时去核21600枚(计算公式如式(1))的效果。其主要由动力,传动,上料,去核,排出五个系统组成。

$$\theta = 2ab \frac{3600}{T} \quad (1)$$

去核系统的理论生产率 $\theta$ 取决于去核系统的夹具排数 $a$ ,单排夹具的数目 $b$ 以及完成一次所用的时间 $T$ ,本去核在考虑实际需求的基础之上,设计了6排夹具,每排装有10个夹具,单次去核时间为2s。

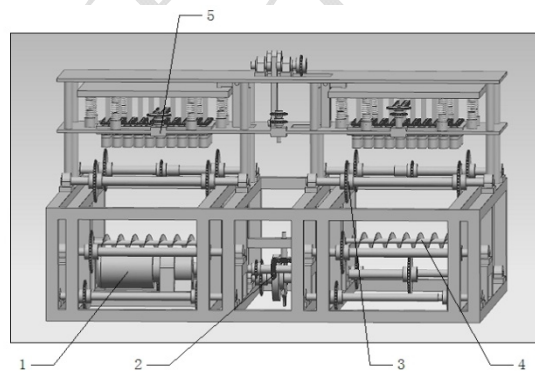


图2 去核机的整体结构图

Fig.2 Overall structure of the jujube pit-removal machine

注: 1.动力系统 2.传动系统 3.上料系统 4.排出系统 5.去核系统。

### 2 红枣去核机关键部件的设计

#### 2.1 红枣去核夹具

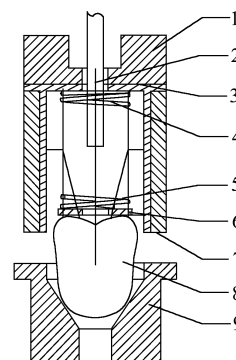


图3 夹具的结构图

Fig.3 Diagram of fixture structure

注: 1.连接盖; 2.去核杆; 3.弹性架; 4.压枣弹簧; 5.弹性

材料; 6.挡圈; 7.外管; 8.红枣; 9.下夹具。

红枣去核夹具分为上夹具和下夹具, 上夹具包括连接盖、外管、弹性架、压枣弹簧、挡圈等。图3中弹性架通过连接盖与外管固定, 通过使用倒圆锥形弹性材料, 夹具对直径不同的红枣具有适应性, 弹性材料还能给予红枣转矩, 实现红枣圆周运动。连接盖用于上夹具与驱动上夹具的空心轴连接, 压枣弹簧保证了上夹具与去核杆上升时, 去核红枣能顺利从去核杆滑下。弹簧下端的挡圈保证了红枣不会因为尺寸过小进入弹簧内部。

下夹具内部结构由圆柱和倒圆锥两部分组成, 下夹具均布在安装板上, 负责红枣的装载并辅助红枣旋转, 实现其轴向定位。尺寸较小的红枣, 其重心位于夹具表面之下, 尺寸较大的红枣, 在圆柱部分的周向分布夹持力保证其正确的轴向定位位置。

在夹具设计中, 红枣长度、直径, 枣核长度、直径等尺寸是夹具内部直径、上下容量、去核孔直径等参数设计的直接依据。我国主要品种红枣参数范围为: 纵径: 29~49 mm, 横径: 21~44 mm; 枣核尺寸为: 纵径: 15.6~34 mm, 横径: 4~12 mm。为了满足对各种不同大小红枣去核的要求, 去核杆的上下行程、上下夹具在上下方向的容量以最大红枣的参数为设计依据, 而关于夹具的内部直径, 则参考红枣的横径尺寸, 从各个尺寸区间红枣数量的分布以及去核质量方面寻求一个最佳点。夹具设计时, 尺寸以偏小为宜, 否则, 较小尺寸红枣在下模具中的姿态不利于上夹具定位。由于去核机在工作状态下夹具作用于红枣两端, 而红枣两端横径尺寸相对中间最大值处要小, 所以夹具设计时横径尺寸参考范围取为 15~34 mm。

## 2.2 红枣去核机构

如图4所示, 红枣去核机构主要由不锈钢板, 尼龙板, 轴承, 空心轴, 驱动齿轮, 压杆等组成, 在曲轴机构的驱动下实现去核的上下往复运动。上夹具在工作中一直保持旋转。当曲轴机构驱动系统向下运动时, 上夹具下行, 下夹具中的弹性材料与红枣上端接触, 红枣被夹持, 并在上夹具驱动作用下旋转, 夹具内壁的圆锥部分辅助红枣在旋转中使红枣实现竖直状态, 即通过旋转运动实现了红枣的轴向定位。同时, 去核杆的安装铁板向下运动, 去核杆从空心轴中进入上夹具, 将红枣枣核冲出, 枣核从下夹具下部的漏核孔落入螺旋输送机排出; 当曲轴及机构驱动系统向上运动, 在支撑弹簧回复力的作用下, 去核杆安装铁板相对不锈钢板向上运动, 同时带动去核杆向上运动, 在压枣弹簧的作用下, 去核红枣从去核杆滑下留在下

夹具中。

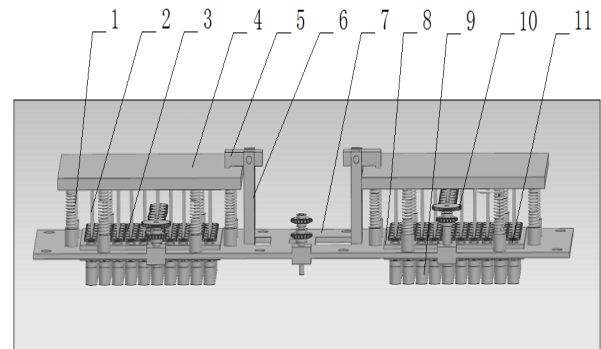


图4 去核系统结构图

Fig.4 Diagram of the structure of the pit removing system

注: 1.支撑弹簧; 2.去核杆; 3.驱动小齿轮; 4.去核杆安装板; 5.压杆; 6.压杆支架; 7.不锈钢板; 8.尼龙板; 9.上夹具; 10.驱动大齿轮; 11.空心轴。

表1 去核系统主要零件的设计参数

Table 1 Design parameters of the major parts for the pit-removal system

去核系统主要零件	项目	参数
支撑弹簧	数目	16
	材料	碳素弹簧钢丝 C 级
	旋绕比	8
	曲度系数	1.18
	弹簧中径	40 mm
	簧丝直径	4 mm
上夹具驱动齿轮	弹簧工作圈数	16
	精度	7 级
	模数	2
	齿数	25
动力输入齿轮	齿宽	8 mm
	模数	3
	齿数	21
	齿宽	8 mm
	夹具行间距	63.5 mm
	夹具行内间距	50 mm
	轴承型号	6203 深沟球轴承
	尼龙板厚度	12 mm
不锈钢板厚度	14 mm	
夹具行程	50 mm	
去核杆行程	60 mm	

### 2.2.1 去核件的选择

目前, 市场上红枣去核机产品的去核部件主要有去核杆与去核管两种形式。去核杆为实心, 工作过程中需克服枣核与枣肉间的粘连力将枣核冲出; 去核管为空心且多带有刃口, 工作过程中阻力更小, 但枣核

是先进入去核管内再由顶核杆将核排出，增加了顶核结构的设计。本设计使用去核杆对红枣进行去核，避免了不同规格去核管更换的麻烦。去核杆下端内凹，边缘带有刃口，以减小去核杆冲入红枣的阻力。

### 2.2.2 去核部件设计参数

去核系统主要由不锈钢板、尼龙板、轴承、空心轴、驱动齿轮、压杆等组成，主要零件的主要设计参数见表 1。

## 3 红枣去核机构的仿真分析

### 3.1 模型简化

为了实现对红枣去核机构的复杂结构进行分析，根据其去核功能，对去核系统模型简化如下<sup>[11-13]</sup>：1) 在滚子链传动时，接触副存在于链节和滚子之间，但其非本文研究重点，所以去掉滚子链传动部分，忽略非本文研究重点传动副的影响；2) 去核系统中，有 120 个驱动齿轮驱动各个去核单元工作，各个去核单元运动状态大致相同，选择单侧的 6 个去核单元及其传动机构进行仿真，减少模型仿真时间；3) 验证机器结构和参数设计是否满足预期要求，主要考虑去核系统的动力学分析，所以忽略去核阻力及压枣弹簧的作用反力，并建立水平间歇向前运动的上料传送带模型。

### 3.2 模型建立

采用 UG 软件进行格式转换并导入 ADAMS 软件，对模型实体进行布尔运算，并进行部件命名和自由度的约束。基于碰撞函数的接触算法<sup>[14]</sup> (Impact) 进行正压力的计算，完成正压力的施加。在对曲轴机构和上夹具齿轮进行运动施加之后，进行模型自检以及动力学分析。

### 3.3 运动学仿真分析

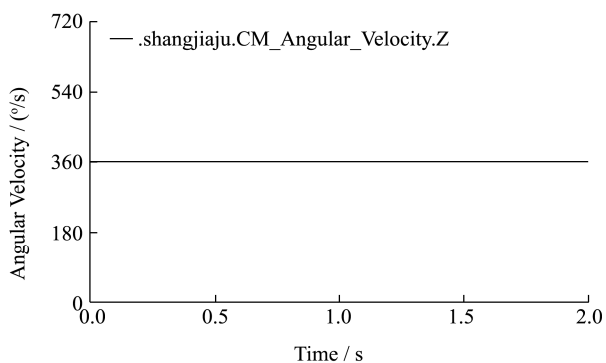


图 5 上夹具时间-角速度曲线

Fig.5 Curve of time versus angular velocity for the rotating fixture

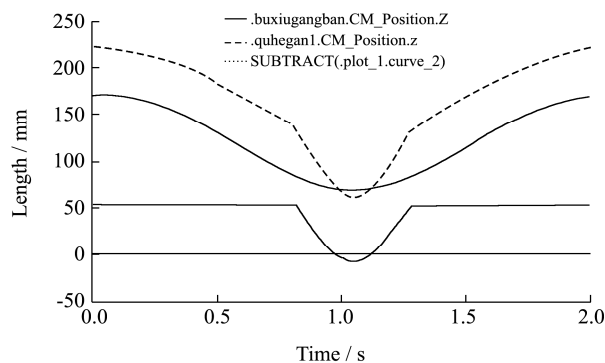


图 6 去核杆、不锈钢板时间-位移曲线及去核杆行程曲线

Fig.6 Curve of time versus displacement for the pit-removing pole and corrosion resistant plate and path curve of pit-removing pole

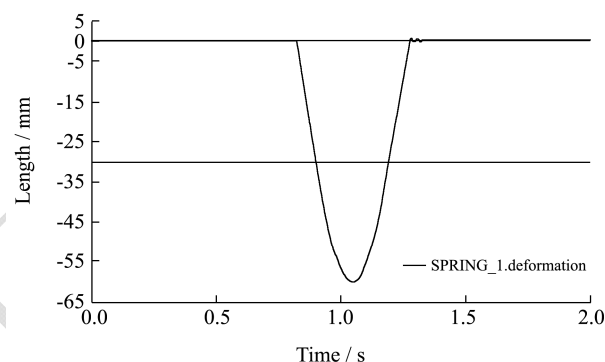


图 7 支撑弹簧时间-变形曲线

Fig.7 Curve of deformation versus time for the support spring

对仿真参数设置：仿真时间 (end time) 设置为 2 s，步长 (steps) 设置为 5000，精度 (step size) 为 0.001，对建立的模型进行仿真分析，各部件运动参数分析结果见图 5~图 11。

红枣去核系统的工作过程可以分为下行、扶正定位、去核、回位、上行五个阶段。如图 5 所示，上夹具以角速度 360 °/s 转动。如图 6 所示，图中的实线为去核机构仿真过程中去核杆的位移-时间曲线，粗虚线为去核仿真机构中去核不锈钢板的位移-时间曲线。在 0.82~1.27 s 之间，去核杆相对于不锈钢板下行。细虚线为两条曲线的差值，即为去核杆相对不锈钢板的行程-时间曲线。在 0.82~1.05 s，去核杆相对于不锈钢板的行程的最大差值为 60.6 mm。支撑弹簧的时间-压缩变形量曲线如图 7 所示。在 0.82~1.05s 之间，弹簧的形变量从 0 mm 变化到 60.11 mm。相比去核杆相对于不锈钢板的行程-时间曲线，两者的变化趋势一致，数值上有 0.51 mm 的差别，这是由于弹簧在伸展过程中产生波动导致的。设计的去核杆行程为 60 mm，仿真结果与设计误差为 1%。导杆、压杆等设计也满足要求。

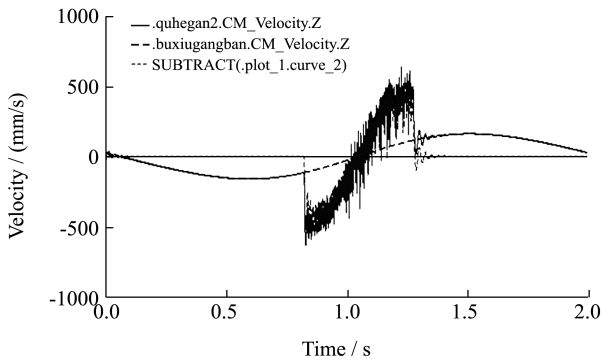


图8 去核杆和不锈钢板时间-速度曲线及去核杆相对不锈钢板时间-速度曲线

Fig.8 Curve of time versus velocity for the pit-removing pole and stainless steel plate

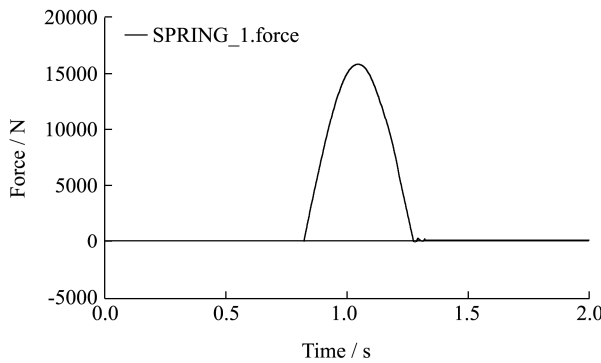


图9 支撑弹簧时间-力曲线

Fig.9 Curve of time versus force for the support spring

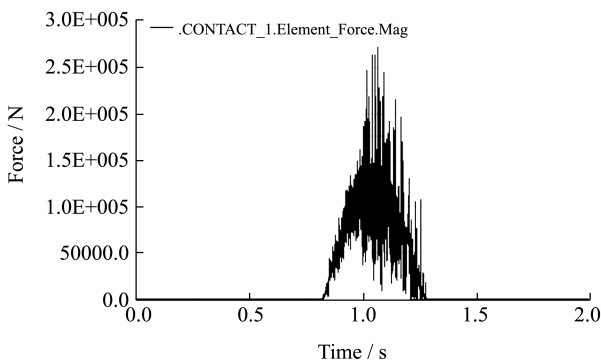


图10 压杆与去核杆安装铁板时间-接触力曲线

Fig.10 Curve of time versus contact force for the pressing pole and plate for pit-removing pole

不锈钢板上下往复运动受到曲轴机构的驱动,其速度为曲轴连接处速度的竖直分量,速度曲线为三角曲线,如图8所示,去核杆相对于不锈钢板的时间-速度曲线由去核杆与不锈钢板的时间-速度曲线做差得到。图9为支撑弹簧的时间-力曲线,图10和图11分别为压杆与去核安装铁板,压杆与顶杆的时间-接触力曲线。综合分析图8~图11,在0~0.82 s,去核杆与不锈钢板的速度曲线重合,两者一起向下运动。0.82~1.05 s,在顶杆作用下,压杆给去核杆安装铁板

向下的压力,支撑弹簧因此被压缩。在去核杆不断下行的过程中,受支撑弹簧反力的作用,速度逐渐减少,弹簧弹力在压缩过程中逐渐增大,压杆与去核杆安装铁板、顶杆间的接触力也逐渐增大。当去核杆速度减小为0 m/s,去核杆下端到达下夹具底部,压杆与去核安装铁板、顶杆间的接触力也达到最大,不锈钢板向下运动到最低位置。在1.05~1.33 s,去核不锈钢板向上运动,顶杆对压杆的作用逐渐减少,去核杆受支撑弹簧作用向上运动,速度逐渐增大。支撑弹簧弹力,压杆与去核杆安装铁板、顶杆间的接触力逐渐减少,顶杆与压杆分离时,压杆与去核杆安装铁板,顶杆之间的接触力减小到0 N,弹簧的变形量也减小到0 mm。1.33~2 s,去核杆安装铁板与去核不锈钢板保持相对静止,去核系统向上运动,回到起始位置。

通过虚拟样机技术进行动力学仿真分析,该设计整体性能完好,各部件结构尺寸和运动规律符合预期设计要求,为进一步的样机实体制作提供了理论依据。

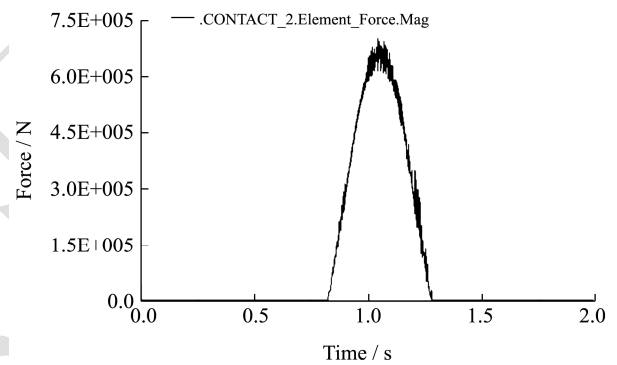


图11 压杆与顶杆时间-接触力曲线

Fig.11 Curve of time versus contact force for the pressing pole and mandrel

## 4 红枣去核模拟实验

### 4.1 实验方案

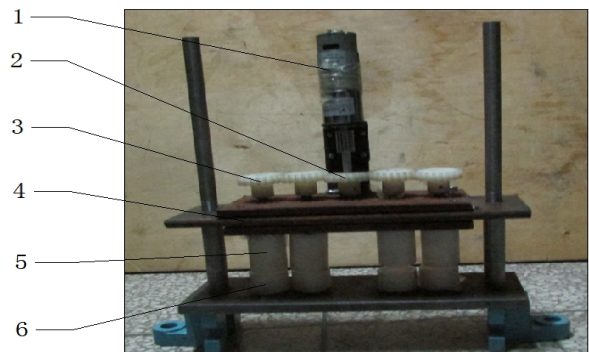


图12 红枣去核模拟试验装置

Fig.12 Device for the simulation test of the removal of red jujube pits

注: 1.电动机; 2.主动齿轮; 3.驱动齿轮; 4.去核杆安装板;

5.上夹具; 6.下夹具。



图 13 红枣去核模拟试验结果

Fig.13 Simulation test results of the removal of jujube pits

注: 图为去核之后的红枣, 下图为不同大小红枣去核效果。

表 2 红枣去核模拟试验统计数据

Table 2 Statistical data of the simulation experiment using the pit-removal system

组号	样本数	去核率		成品率		果肉损失率			
		去核红枣数	比例 %	成品红枣数	比例 %	样品红枣总质量/g	样品枣核质量/g	样品净枣核质量/g	比例 %
1	50	46	92	45	90	329.97	29.36	17.15	3.9
2	50	48	96	47	94	344.23	31.11	19.02	3.7
3	50	47	94	44	88	333.89	29.54	17.66	3.8
4	50	49	98	47	94	340.27	30.46	18.87	3.6
平均值	50	47.5	95	45.75	91.5	337.09	30.12	18.18	3.75

为了验证机器的合理性和可靠性, 进行红枣去核模拟实验。根据理论分析结果及参数设计制作图 12 的模拟实验装置。电机输出的动力经主动齿轮传递给驱动齿轮, 进而在驱动齿轮的作用下上夹具做圆周运动; 下夹具负责红枣的承载, 人为驱动去核杆安装板上下往复运动。以太谷壶瓶枣为实验材料, 50 个一组, 共计 4 组, 对去核率、合格率、以及果肉损失率三方面的数据进行分析, 实验去核结果见图 13。实验数据及分析结果见表 2。

## 4.2 实验结果分析

表 1 中的实验数据表明, 4 组实验平均去核 47.5 枚, 平均去核率为 95%, 去核效率达到了较高水平, 也表明基于旋转原理对红枣进行轴线定位去核具有更高的精度; 平均成品率为 91.5%, 略低于现有红枣去核机 92% 的水平, 这是由于使用模拟装置进行去核时, 去核速度低, 切口边缘不整齐导致; 平均果肉损失率为 3.75%, 略高于现有去核机 2.5% 的水平, 这是由于模拟试验中去核杆冲核速度较小, 且试验红枣较干, 枣核粘连枣肉较多导致。在实际生产中, 去核速度提高之后可以减少损失率和提高成品率。

## 5 结论

5.1 本红枣去核机在采用双线传动设计的基础上, 对

主要的去核机构及夹具进行了设计和仿真分析, 并进行红枣去核实验, 模拟该去核机的去核结果。设计的弹性夹具解决了现有红枣去核机普遍存在的对不同大小红枣去核需更换不同规格夹具的问题, 增强了机器的适应性。基于轴线定位原理使红枣在旋转运动中实现去核, 保证了去核杆作用的精度, 避免了夹紧定位对定位精度的影响。设计的红枣去核机构由现有去核机的三工位简化为单工位, 去核系统整体结构简化, 大大提高了机器的去核生产率。基于虚拟样机技术对设计的红枣去核机进行仿真分析, 验证了设计参数合理性。

5.2 受红枣去核模拟实验装置加工精度的限制, 在去核过程中, 粘连枣肉较多, 造成果肉损失率提高, 需进一步改进。

## 参考文献

- [1] Li J W, Ding S D, Ding X L. Optimization of the ultrasonically assisted extraction of polysaccharides from *zizyphus jujuba* cv. Jinsixiaozao [J] Journal of Food Engineering, 2007, 80: 176-183
- [2] Agate M P, Fbiano C, Ammar B, et al. Flavonoids of *zizyphus jujuba* L. and *zizyphus spina-christi* (L.) wild (rhamnaceae) fruits [J] Food Chemistry, 2008, 112 (4): 858-862

- [3] 周靖博.一种新型红枣去核机的设计与仿真[D].晋中:山西农业大学,2014  
ZHOU Jing-bo. Design and simulation of a new type of jujube pit removing machine [D]. Jinzhong: Shanxi Agriculture University, 2014
- [4] 马朝峰,刘凯,周春国,等.链式红枣去核机的设计与试验[J].农业工程学报, 2011, 27(5): 127-130  
MA Chao-feng, LIU Kai, ZHOU Chun-guo, et al. Design and experiment of the chain type jujube kernel removing machine [J].Transaction of the CSAE, 2011, 27(5): 127-130
- [5] 王兵臣.大枣去核机:中国专利,00620024690.5[P]2007-7-4  
WANG Bing-chen. Jujube pit removing machine: Chinese Patent, 00620024690.5 [P] 2007-7-4
- [6] 徐燕飞.枣去核机:中国专利,200820073768.1[P]2008-11-12  
XU Fei-yan. Jujube pit removing machine: Chinese patent, 200820073768.1 [P] 2008-11-12
- [7] 宁天德.半自动硬枣去核划皮机:中国专利,01229251.6 [P] 2001-6-28  
NING Tian-de. Semi-automatic hard jujube denuclearization of peel machine: Chinese patent, 01229251.6 [P] 2001-6-28
- [8] 王侯贵,王永红.全自动红枣去核机:中国专利, 201220234062.5 [P] 2012-12-19  
WANG Hou-gui, WANG Yong-hong. Automatic jujube pit removing machine: Chinese patent, 201220234062.5 [P] 2012-12-19
- [9] 陈莉,孙永海,刘晶晶,等.咀嚼运动对食品物料破坏效果的仿真分析[J].现代食品科技,2014,30(1):147-152  
CHEN Li, SUN Yong-hai, LIU Jing-jing, et al. Simulation analysis of food materials damage effect based on chewing movement [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 147-152
- [10] Meng Cai, Liang Gu. The dynamics simulation analysis of automotive air suspension and control system based on adams and matlab [J]. Sensors & Transducers, 2013, 161(12): 609-617
- [11] Lv-bo M. Design method of equipment optimization development based on standardization theory [J]. Defence Technology, 2013, 9(3): 140-145
- [12] Chang C, Wang C, Chen B, et al. A study of a numerical analysis method for the wheel-rail wear of a heavy-haul train [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2010, 224(F5): 473-482
- [13] ZHANG Yun-long, NIE Yi-hua, XU Wang-guo, et al. The reliability analysis of mechanical response of pavement structure by ansys [J]. Hunan Communication Science and Technology (S1008-844X), 2013, 39(3): 4-6
- [14] Dong Q H, Chen L. Dynamic and control of free floating rigid flexible coupling space manipulator during caprute uncertain debris [C]// Proceedings of the 63rd International Astronatical Congress, Naples, 2012: 2702-2710