

植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验

韩明兴 李 淼 段宏兵 徐 琨 余 锴

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 针对现有植物茎秆夹持装置存在夹伤茎秆、夹持行程及夹持力不可调等问题,设计一种植物茎秆柔性夹持装置,夹持手内置弹簧可实现植物茎秆柔性夹持,能进行夹持力与夹持行程双调节,更好适应植物茎秆在力学试验、嫁接、茎秆切割试验等领域夹持需求。基于所建立夹持装置刚柔耦合仿真模型,进行夹持力、夹持行程、弹簧刚度等多因素动力学对比仿真与试验分析,以弹簧刚度为设计变量进行灵敏度及稳定性分析,研究不同弹簧刚度对柔性夹持装置夹持性能的影响。仿真与试验结果表明:装置最大夹持直径为68.8 mm,基于所构建夹持装置精准夹持力模型,可平稳调控夹持行程、速度及夹持力;随着弹簧刚度的增加,夹持力逐渐变大,夹持稳定性增加,综合比较发现当弹簧刚度为10 N/mm时,可满足装置施加400 N切割力时植物茎秆稳定夹持需求,柔性夹持力波动较小,能有效避免损伤植物茎秆。

关键词: 植物茎秆; 柔性夹持装置; 稳定性分析; 可调夹持力; 刚柔耦合仿真; ADAMS

中图分类号: S220 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)02-0109-10

OSID:



Rigid-flexible Coupling Simulation and Experiment of Plant Stem Clamping Device Based on ADAMS

HAN Mingxing LI Miao DUAN Hongbing XU Kun YU Kai

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the problems of the existing plant stalk clamping device, such as clamping injury, clamping stroke and unadjustable clamping force, a plant stalk flexible clamping device was designed. The built-in spring of the clamping hand can realize the flexible clamping of plant stalk, and double adjust the clamping force and clamping stroke, so as to better meet the demands of plant stalk clamping in the fields of mechanics experiment, grafting and cutting test. Based on the rigid-flexible coupling simulation model of the clamping device, the multi-factor dynamic comparison simulation and test analysis were carried out, including clamping force, clamping stroke and spring stiffness. The sensitivity and stability analysis were carried out with the spring stiffness as the design variable to study the influence of different spring stiffnesses on the clamping performance of the flexible clamping device. The simulation and experiment results showed that the maximum clamping diameter of the device was 68.8 mm, and the clamping stroke, speed and clamping force can be controlled smoothly based on the accurate clamping force model of the clamping device. With the increase of spring stiffness, the clamping force was gradually increased, and the clamping stability would be increased. Comprehensive comparison showed that when the spring stiffness was 10 N/mm, it can meet the stable clamping demand of plant stems when the device applied 400 N cutting force, and the flexible clamping force had little fluctuation, which can effectively avoid damage to plant stems.

Key words: plant stem; flexible clamping device; stability analysis; adjustable clamping force; rigid-flexible coupling simulation; ADAMS

收稿日期: 2023-08-17 修回日期: 2023-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101627)

作者简介: 韩明兴(1986—),男,讲师,博士,主要从事农机装备机电液一体化设计研究, E-mail: hmx524@126.com

通信作者: 段宏兵(1969—),男,副研究员,主要从事马铃薯机械化技术与装备研究, E-mail: duanhb@mail.hzau.edu.cn

0 引言

夹持装置是一种具有抓取、固定等功能的特殊工具,广泛应用于工业、农业、医学等领域,其中柔性夹持装置由于适应性及顺应性强、通用性好等优点受到更多重视^[1]。目前,柔性夹持装置在农业相关领域应用存在研究时间短、结构种类少等问题,针对植物茎秆及果蔬娇嫩、易伤、易损的特点,设计一种适用于植物茎秆的柔性夹持装置具有重要意义^[2]。

植物茎秆进行拉伸试验时,由于缺失相应专用夹持装置,茎秆夹持松紧难以控制,导致出现茎秆滑动与夹断现象^[3];我国蔬菜种植面积大,茄果与瓜科占近 1/3,嫁接是实现集约化生产经常采用的方式^[4-5],传统方式包括使用胶带直接缠绕及采用夹子进行固定,存在枝条夹持不稳定、无法精准调控夹持力等问题,嫁接过程中会造成植株夹持损伤,严重影响成活率^[6];在相关农业自动化生产应用场景中,柔性夹持装置由于具有柔顺夹持特性,在抓取水果、蔬菜、蛋等易损对象时,可极大减少夹持抓取损伤^[7-9]。

传统夹持装置往往夹持行程固定,夹持力不可调,结构复杂且不稳定,无法很好适用于植物茎秆、果蔬等易损对象夹持固定。为此,本文提出一种电动缸驱动的植物茎秆柔性夹持装置,其夹持行程、夹持力均可调,可进行多株夹持,适用性广,在植物茎秆力学性能试验、嫁接、种植、茎秆切割试验等领域应用广泛。夹持装置采用电动缸驱动,能兼容各类自动化控制设备,实现植物茎秆夹持过程自动化与智能化。夹持装置内置弹簧可实现柔性夹持,通过斜滑槽将推杆直线运动转换为加持手的横向夹紧/松开运动,实现夹持力与夹持行程双向调节,能更好适应油菜、水稻、小麦等植物茎秆在相关力学试验、嫁接、茎秆切割试验等领域夹持需求。

目前植物茎秆夹持装置相关研究较少,缺乏类似设计参考。本文基于所建立夹持装置刚柔耦合仿真模型,进行夹持力、夹持行程、弹簧刚度等多因素动力学仿真与试验对比分析,对装置柔性夹持特性进行研究,以期类似柔性夹持装置设计提供参考。

1 整体结构与工作原理

植物茎秆柔性夹持装置主要由电动缸、斜滑槽、柔性夹持手及支架等组成,整体结构如图 1 所示。表 1 为柔性夹持装置主要技术参数,装置在 X 、 Y 、 Z 方向均可调节,其中沿茎秆径向(X 向)夹持可调范围为 $0 \sim 68.8$ mm,沿茎秆轴向(Y 向)可调范围为 $85 \sim 280$ mm,沿切割方向(Z 向)可调范围为 $60 \sim$

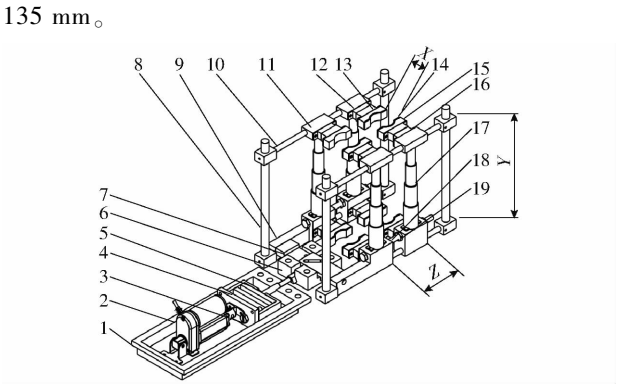


图 1 植物茎秆柔性夹持装置结构示意图
Fig.1 Structural diagram of plant stems flexible clamping device

1. 电动缸平台 2. 电动缸 3. 行程调节螺栓 4. 行程块 5. 推杆 6. 底座 7. 斜滑槽 8. 竖滑杆 9. 手柄 10. 横滑杆 11. 短手柄 12. 内弹簧套 13. 外弹簧套 14. 夹持手 15. 弹簧座 16. 弹簧 17. 阶梯圆柱 18. 螺纹调节杆 19. 间距调节螺母

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
电动缸速度/(mm·s ⁻¹)	1 ~ 5
电动缸最大负载/N	2 000
电动缸行程/mm	30
电动缸额定功率/W	20
电动缸额定电压/V	24
夹持装置尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	630×185×270
螺杆调节范围/mm	0 ~ 25
径向夹持范围/mm	0 ~ 68.8
切割方向可调范围/mm	60 ~ 135
茎秆轴向可调范围/mm	85 ~ 280

装置工作原理如图 2 所示,进行茎秆夹持时,电动缸推动推杆进行正、反向直线运动,通过斜滑槽将其直线推进运动转换为夹持手夹持动作。电动缸行程固定,通过调节行程螺栓伸出长度来控制推杆伸出距离。当推杆前推时,夹持装置夹紧;当推杆回拉时,夹持装置松开,恢复初始状态。夹持手、阶梯圆筒安装于横向滑杆上,横向滑杆上部通过紧固螺钉固定于竖直滑杆上,上下横向滑杆距离可根据实际

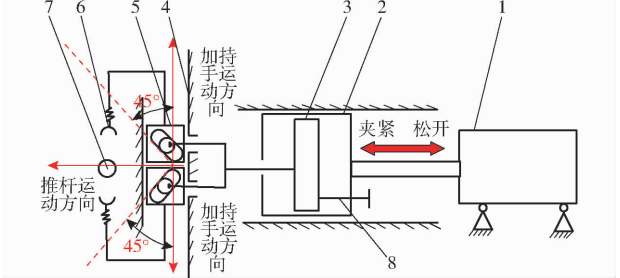


图 2 装置工作原理图

Fig.2 Working principle of clamping device

1. 电机 2. 行程块 3. 推杆 4. 底座 5. 槽板 6. 夹持手 7. 植物茎秆 8. 行程调节螺栓

需求调节。调节间距调节螺母可以改变夹持手间距,以满足多株夹持时的株距要求。每株茎秆夹持手均有上下两对,进行植物茎秆上下两点夹持。夹持手内置弹簧,能有效补偿茎秆夹持受压变形,实现植物茎秆柔性稳定夹持。装置整体结构具有良好扩展性,可根据需求设置多对夹持手,实现多植株夹持。

2 装置动力学模型

2.1 动力学仿真数学模型

基于 ADAMS 进行动力学仿真^[10-14],需通过运动副连接装置中各部件,其空间坐标约束方程为

$$\Phi^k(q) = [\Phi_1^k(q) \quad \Phi_2^k(q) \quad \cdots \quad \Phi_j^k(q)]^T = 0$$

(1)

式中 q ——广义坐标矢量
 j ——约束方程数

对于确定运动系统,其自由度为 0,驱动约束方程为

$$\Phi^D(q,t) = 0$$

(2)

式中 Φ^D ——系统驱动约束方程
 t ——时间,s

确定运动系统驱动方程为时变函数,需要有独立于运动学约束的驱动约束合集,约束方程为

$$\Phi(q,t) = \begin{bmatrix} \Phi^k(q,t) \\ \Phi^D(q,t) \end{bmatrix} = 0$$

(3)

基于系统运动副坐标矢量方程组,并令 $\mu = -((\Phi_q(q,t)\dot{q})_q\dot{q} + 2\dot{\Phi}_{qt}(q,t)\dot{q} + \Phi_{tt}(q,t)), v = -\Phi_t(q,t)$,通过求导得到速度方程及加速度方程

$$\begin{cases} \dot{\Phi}(q,\dot{q},t) = \Phi_q(q,t)\dot{q} - v = 0 \\ \ddot{\Phi}(q,\dot{q},\ddot{q},t) = \Phi_q(q,t)\ddot{q} - \mu = 0 \end{cases}$$

(4)

式中 Φ_q ——雅可比矩阵

2.2 装置刚柔耦合仿真模型

2.2.1 模型简化

夹持装置许多部件为固定连接,对模型动力学仿真计算影响不大,为提高仿真计算效率,进行一定简化,去除部分重复零件。对简化模型添加运动副及相对约束关系,得到改进后简化模型如图 3 所示。

2.2.2 约束设置

在 ADAMS 运动学仿真中,为避免相互运动接触构件之间出现穿透,需定义运动部件接触副。夹持装置机械系统模型约束为多接触约束类型,设定夹持装置内部构件间静摩擦因数为 0.2,动摩擦因数为 0.1;油菜茎秆与夹持手静摩擦因数为 0.23,动摩擦因数为 0.1^[15-16]。夹持装置材料为不锈钢,植物茎秆为油菜茎秆,表 2 为仿真时材料

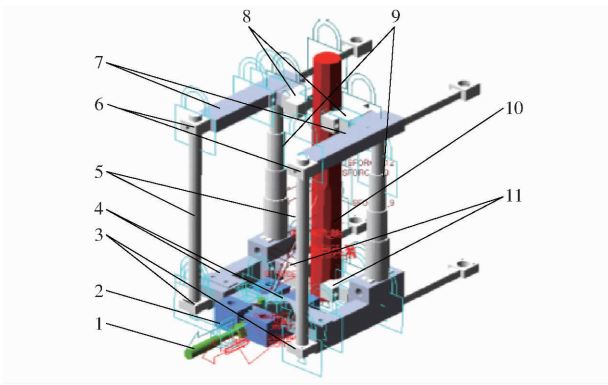


图 3 夹持装置简化模型

Fig. 3 Simplified model of clamping device

1. 推杆 2. 底盘 3. 横滑杆 4. 槽板 5. 竖滑杆 6. 上横滑杆
7. 夹持手柄 8. 上夹持手 9. 阶梯圆筒 10. 植物茎秆 11. 下夹持手

物理特性参数^[17]。

表 2 材料物理特性参数

Tab. 2 Material attribute parameters

材料	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
夹持装置	7.8	207 000	0.29
油菜茎秆	1.1	1 000	0.23

装置安装固定在工作台面上,仿真时模型增加绿色工作台面部分,对简化后夹持装置各部件添加约束,约束关系如表 3 所示,表中数字为图 3 中部件序号。

表 3 构件间约束关系设置

Tab. 3 Constraint relation among components

构件配对	约束类型
1-2	移动副
1-4	接触副、移动副
2-4	接触副、移动副
2-桌面	固定副
3-4、5	固定副
4-8	固定副
5-6	固定副
6-7	固定副
7-8	移动副、弹簧阻尼器
7-9	固定副
8-10	接触副
9-11	固定副
10-11	移动副、弹簧阻尼器
桌面-地面	固定副
桌面-10	接触副

2.2.3 刚柔耦合模型构建

采用刚体模型模拟油菜茎秆,会产生较大计算误差,而相较于刚体模型,柔性模型更符合油菜茎秆特性。油菜茎秆采用柔性体模型,夹持装置为刚性体模型,添加两者接触副,生成刚柔耦合模型。使用

油菜茎秆密度、弹性模量及泊松比的实际测量值来设置仿真模型,采用圆台形状来模拟油菜茎秆轴向秆径变化特征。

使用 ADAMS 自带的几何法对油菜茎秆进行网格划分,生成柔性体,以达到更好描述茎秆物理特性的目的^[18-20]。在 View Flex 模块中采用几何法,选择单元类型与网格类型,确定网格大小后,生成茎秆柔性体模型,完成夹持装置与油菜茎秆刚柔耦合仿真模型建立,如图 4 所示。

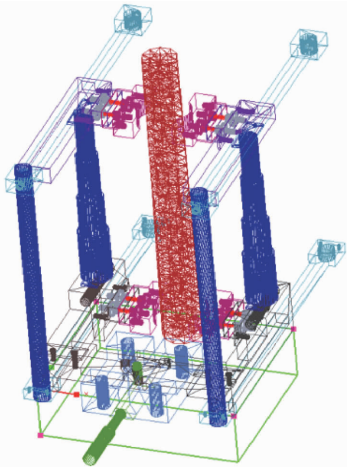


图 4 装置刚柔耦合模型

Fig. 4 Rigid-flexible coupling model of device

3 仿真

3.1 夹持性能

柔性夹持装置通过斜滑槽将推杆直线运动转换为装置夹持动作,夹持手初始状态开度为 36.8 mm,夹持手内凹槽半径为 7 mm,与内外弹簧座连接,弹簧最大压缩量为 9 mm,夹持装置最大夹持直径为 68.8 mm。

由图 5 可知,夹持过程中两夹持手距离曲线斜率约为推杆位移曲线斜率 2 倍,夹持速度与推杆移动速度成线性比例关系,调节电动缸速度就可准确控制夹持速度。调节行程螺栓可精确控制推杆伸缩位移,从而控制夹持行程。因而,通过控制电动缸速度及调节行程螺栓,可实现夹持行程与夹持速度双向精准调节。

图 6 为夹持手茎秆夹持原理,夹持力 F 由弹簧压缩量 Δx 决定,满足 $F = 2k\Delta x$, k 为弹簧刚度。弹簧压缩量 Δx 与茎秆直径 D 及推杆位移 x 有关,满足 $\Delta x = x - (50.8 - D)/2$ 。因而通过推杆位移就可精确控制装置末端夹持力,夹持力模型为

$$F = 2k[x - (50.8 - D)]/2 \quad (5)$$

在仿真试验中对比分析了有弹簧柔性夹持与无弹簧刚性夹持两种情况,在弹簧套施加固定副约束,

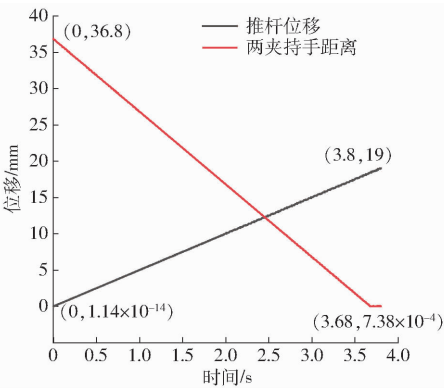


图 5 推杆位移与夹持距离变化曲线

Fig. 5 Push rod displacement and clamping distance curves

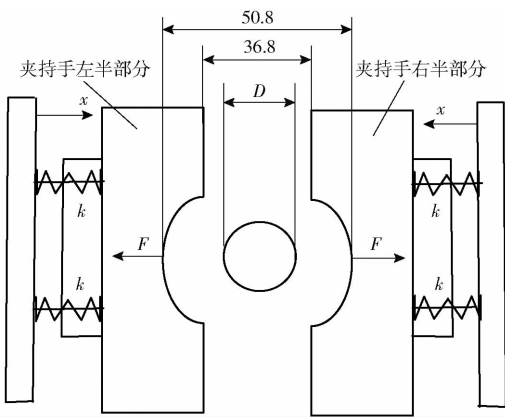


图 6 夹持手夹持原理图

Fig. 6 Schematic of clamping process

模拟无弹簧刚性夹持。对于有弹簧柔性夹持,初步设定弹簧刚度为 20 N/mm,推杆推力为 1 000 N。

图 7 为无弹簧刚性夹持与有弹簧柔性夹持特性曲线,结果表明在稳定夹持阶段,刚性夹持力波峰为 618 N,波谷为 424 N,夹持力波动区间为 194 N,夹持力波动较大;柔性夹持力波峰为 287 N,波谷为 264 N,夹持力波动区间 23 N,其振荡区间振幅仅为刚性加持的 12%,夹持力平稳性得到大幅提升。刚性夹持时瞬时夹持力较大且存在较大波动,瞬时夹持力最大达到 4 000 N,会损伤或破坏植物茎秆,而柔性夹持时,植物茎秆受力整体波动较小,可有效保护茎秆。

3.2 夹持过程动力学仿真

柔性夹持装置夹持对象为油菜茎秆,主要用于油菜茎秆射流切割试验,射流切割瞬时作用力最大可达 400 N,需要装置在切割力作用下仍能稳定夹持茎秆。

仿真时设定电动缸速度为 5 mm/s,基于油菜实际秆径(油菜茎秆半径为 16 ~ 18 mm),将其外形用圆凸台来模拟,上下两对夹持手垂直距离为 200 mm。选取油菜茎秆距底座 50 mm 处作为模拟切割部位,

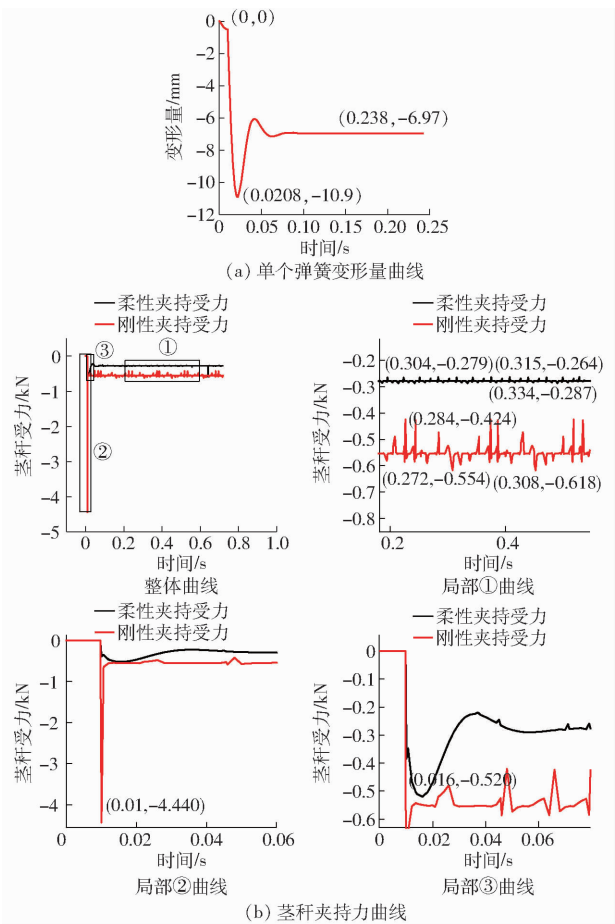


图 7 装置夹持特性仿真曲线

Fig. 7 Simulation curves of device clamping characteristics

约 3 s 完成茎秆夹持后,在茎秆切割部位施加 400 N 切割力负载,进行装置有切割力载荷时动态夹持仿真。

由图 8 可知,初始夹持装置并未接触茎秆,在 $t = 1.5\text{ s}$ 时装置开始接触茎秆,茎秆开始承受夹持力,最大等效应力约为 0.16 MPa。在 $t < 3\text{ s}$ 内未施加切割力 F_1 ,油菜茎秆最大应力约为 0.39 MPa,果荚期油菜茎秆最大剪切应力大于 1.33 MPa,装置不会夹伤油菜茎秆。在 $t = 3.2\text{ s}$ 时油菜茎秆受到切割力 F_1 作用,茎秆受到最大应力增加到 4.98 MPa,应力集中于油菜茎秆中部,油菜茎秆切割破坏最大剪切应力约为 2.03 MPa^[15],此时油菜茎秆将在中部被切割破坏,完成茎秆射流切割。

3.3 夹持稳定性

夹持稳定性是夹持装置重要性能,以油菜茎秆质心位移作为夹持稳定性指标。选取弹簧刚度为设计变量,研究装置夹持稳定性关键影响因素,并进行优化设计。初始弹簧刚度为 20 N/mm,驱动推杆速度为 5 mm/s,油菜茎秆质心位移如图 9 所示,在 1.5 ~ 2.0 s 时夹持装置开始接触茎秆,上下夹持手与茎秆接触时间存在一定差异,油菜茎秆在夹持手作用下

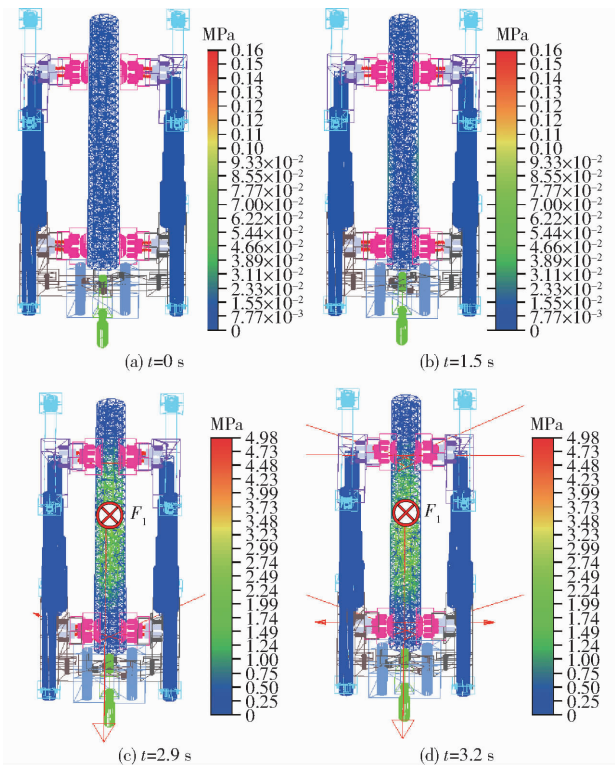


图 8 夹持过程应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of clamping process

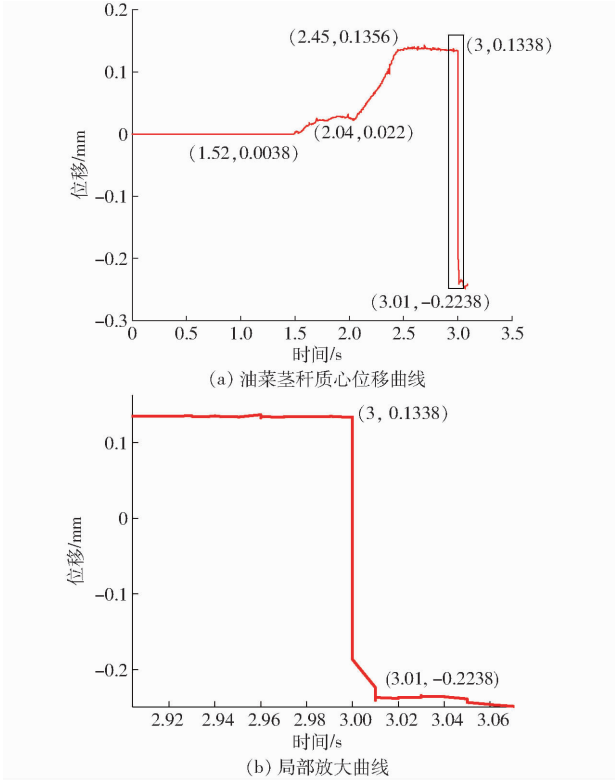


图 9 油菜茎秆质心位移曲线

Fig. 9 Displacement curves of center of mass of rapeseed stalks

发生位移,质心位置发生迁移;在 2.0 ~ 2.45 s 时上下夹持手共同夹持茎秆,质心位置变化均匀;在 2.45 ~ 3 s 时装置稳定夹持油菜,质心基本不发生移动。随后茎秆在切割力 F_1 作用下发生位移,质心产

生 0.35 mm 位移,3 s 之后茎秆质心位置基本保持稳定,仅发生微量移动。

灵敏度分析可以确定高灵敏度设计变量,研究其对系统目标影响程度,可为设计提供参考^[21-22]。选取弹簧刚度为设计变量,茎秆质心原始位置设为 204.57 mm,弹簧刚度变化区间为 0~20 N/mm,以茎秆质心极限位移最小值为设计目标,对比分析弹簧刚度对夹持稳定性的影响。

由表 4 可知,当弹簧刚度从 0 增大到 20 N/mm 时,灵敏度呈现先增大后减小的变化规律,在 10 N/mm 时灵敏度取得最大值 0.233 18,之后随着弹簧刚度的进一步增大,灵敏度迅速减小到 0.056 11,并基本保持不变。当弹簧刚度由 0 增大到 10 N/mm 时,质心位移快速从 4.67 mm 减小到 0.43 mm;之后进一步增大到 15 N/mm 时,质心位移进一步减小到 0.28 mm;当弹簧刚度大于 15 N/mm 后,质心位移变化不大。总体上,弹簧刚度增大会使最大质心位移不断减小,灵敏度呈现先增大后减小的变化规律,质心位移减少速率先增大后减小。弹簧刚度对夹持灵敏度影响较大,最大灵敏度为最小灵敏度的近 2 倍。灵敏度对设计目标影响较大,灵敏度大时弹簧刚度提高能迅速地减小茎秆质心位移,灵敏度过小时弹簧刚度的进一步提高对减小茎秆质心位移并无显著效果。当弹簧刚度超过 15 N/mm 后,弹簧刚度对装置夹持稳定性影响减弱,无法通过进一步增加弹簧刚度来提高装置夹持性能。

表 4 弹簧刚度灵敏度			
Tab.4 Spring stiffness sensitivity			
序号	最大质心位移/mm	刚度/(N·mm ⁻¹)	灵敏度
1	4.67	0	0.117 05
2	2.64	5	0.205 22
3	0.43	10	0.233 18
4	0.28	15	0.056 11
5	0.22	20	0.059 26

图 10 为不同弹簧刚度时油菜茎秆质心位移变化曲线,其中设计目标为质心最大位移的极小值,灵敏度反映弹簧刚度对油菜茎秆质心位移影响程度。当刚度为 0(刚性夹持)时,具有最大夹持力,加持力施加速率也最大,几乎瞬间完成茎秆夹持。随着弹簧刚度增加夹持力也增大,茎秆会获得更大的夹持摩擦力,茎秆夹持刚度变大,装置抗负载夹持稳定性变好,装置夹持性能得到提升,但夹持力的过度增加也会加大茎秆夹伤风险。综合考虑弹簧刚度对灵敏度、质心位移及夹持力的影响,发现当弹簧刚度为 10 N/mm 时夹持稳定性较高,夹持力适中,装置选

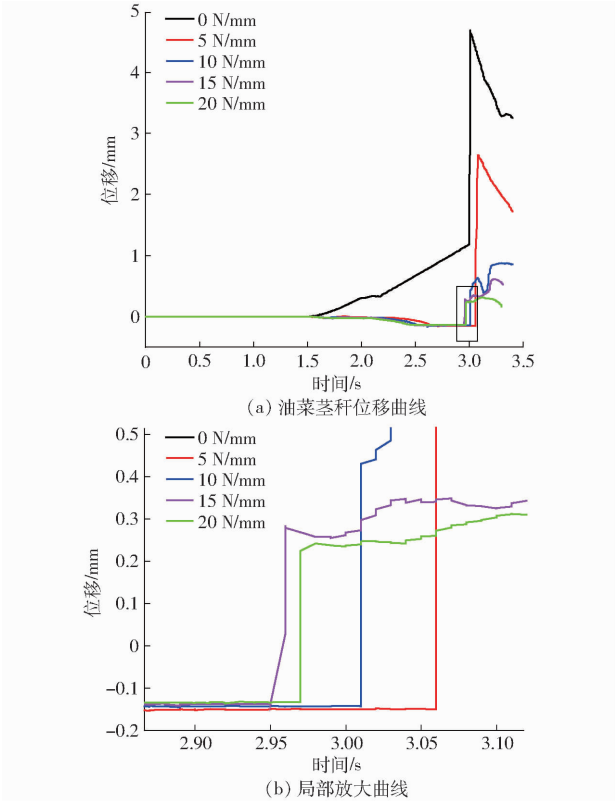


图 10 不同弹簧刚度时茎秆质心位移曲线
Fig. 10 Influence of spring stiffness on displacement of stem centroid

取最佳弹簧刚度为 10 N/mm。

相比于现有刚性夹持装置存在的夹持损伤及植株适应性差等问题^[23],本装置具有可调节性好、夹持力精准稳定及抗负载能力强等优势;气动夹爪存在控制滞后、夹持力难以精确调控等问题^[24],本装置基于精确夹持力模型,可以精准调控夹持力;软体夹持装置夹持力大多只有 1~8.9 N^[25],夹持力过小,无法适用大负载场合,本装置实用性更好,夹持力可以承受 400 N 以上载荷,夹持带载能力提高近 40 倍。

4 试验

4.1 试验条件

在夹持机械中监测夹持力对于装备工作质量至关重要^[26-28],为研究装置夹持力动态特性,验证仿真结果准确性,加工制造了植物茎秆柔性夹持装置样机,如图 11 所示,对装置夹持力动态特性进行试验测试。

采用 LC700D 型微型称重传感器对夹持装置油菜茎秆夹持力进行测试,同时为研究装置运动特性,采用 BL-100NZ-485 型激光位移传感器对装置动态位移进行测试,采集频率为 10 Hz。力传感器及激光位移传感器主要参数如表 5 所示。

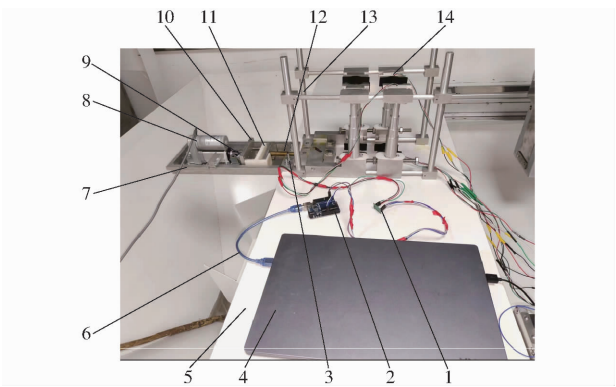


图 11 试验样机

Fig. 11 Test prototype

1. HX711 模块 2. Arduino 板 3. 连接螺栓 4. 计算机 5. 试验台 6. 数据线 7. 电动缸平台 8. 电动缸 9. 调节螺栓 10. 行程块 11. 滑块 12. 推杆 13. 夹持架 14. 力传感器装置

表 5 力传感器及激光位移传感器参数

Tab. 5 Parameters of sensors

型号	参数	数值
LC700D	额定载荷/N	100
	零点输出/($\text{mV} \cdot \text{V}^{-1}$)	± 0.3
	输出灵敏度/($\text{mV} \cdot \text{V}^{-1}$)	± 0.2
	激励电压/V	5 ~ 10
	极限过载/% ($\text{F} \cdot \text{S}$)	150
BL-100NZ-485	响应时间/ms	1.5 ~ 15
	光点直径/mm	0.2
	重复精度/mm	0.07
	检测范围/mm	65 ~ 135
	测量中心距离/mm	100

力传感器安装于夹持手与内弹簧壳之间(图 12),夹持茎秆时装置压缩弹簧,在弹簧力与夹持力共同作用下,弹簧外壳沿螺栓杆移动,夹持力作用于传感器受力端,使其产生微小形变,其内部应变片产生阻值变化,产生的电信号传到信号采集模块,经标定后即可获取夹持力实时数据。夹持装置共安装 4 个力传感器,分为上下两对力传感器,测量夹持过程中夹持力动态变化,力传感器数据实时采集频率为 2.5 Hz。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 运动特性及茎秆拉伸试验

试验中分别对电动缸位移、推杆位移及夹持手位移进行实时测量(图 13),夹持茎秆时电动缸、推杆及夹持手速度分别为 4.02、4.43、3.99 mm/s,松开茎秆时速度分别为 4.38、4.03、4.32 mm/s。

考虑到装置各部件加工安装及传感器测量误差,各部件运动速度有一定差异。由图 13 可知,夹持手与电动缸始终保持良好线性比例关系,电动缸推动行程块做固定行程运动,通过调节行程螺栓,可调节推杆行程块实际输出位移,进而调节夹持行程。

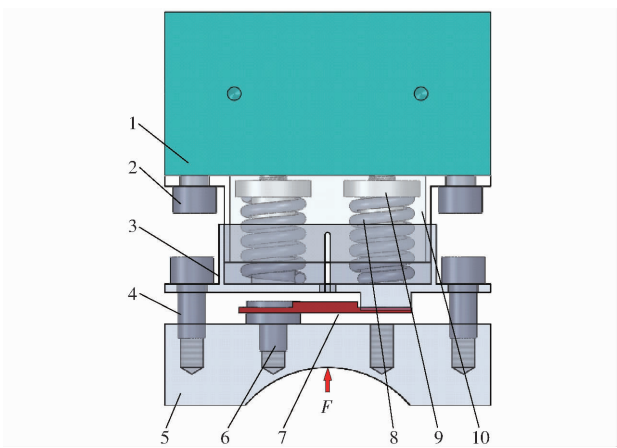


图 12 力传感器布置

Fig. 12 Force sensor arrangement

1. 夹持手柄 2. 螺栓 3、10. 外弹簧壳 4. 半光螺栓 5. 夹持手 6. 短螺栓 7. 力传感器 8. 内弹簧壳 9. 弹簧座

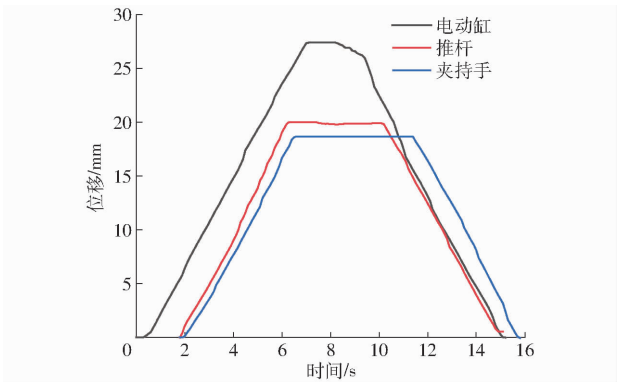


图 13 装置运动特性曲线

Fig. 13 Motion characteristic curves of device

装置推杆与夹持手运动方向呈 45°,推杆与夹持手位移基本保持同步,装置能精准实现夹持行程控制。

图 14 为油菜茎秆夹持性能拉伸试验,验证装置茎秆夹持有效性与合理性。具体测试时,逐渐增加油菜茎秆径向拉伸剪切力,直至茎秆拉断破坏,记录下拉力计拉力。当茎秆径向拉伸剪切力小于 140 N 时,油菜茎秆可稳定夹持;当拉力增加到 145 N 时,茎秆发生严重变形并断裂破坏,装置仍能稳定夹持油菜茎秆。装置设计最大切割力为 400 N,完全满足油菜茎秆射流切割试验时茎秆稳定夹持需求。

4.2.2 夹持力动态特性试验

图 15 为装置夹持力动态特性曲线,油菜茎秆具有下粗上细特点,致使下夹持手夹持力稍大于上夹持手,左右夹持手夹持力变化接近。由于油菜茎秆非光滑外形以及左右力传感器安装误差,夹持手左右两部分接触茎秆时间不同步,测试结果表现为夹持力存在一定差异(图 15a)。图 15b 为无弹簧刚性夹持与有弹簧柔性夹持对比,刚性夹持力平均比柔性夹持力大 3 ~ 4 N,刚性夹持时夹持力波动远大于柔性夹持,柔性夹持装置夹持力变化较小,具有较好夹

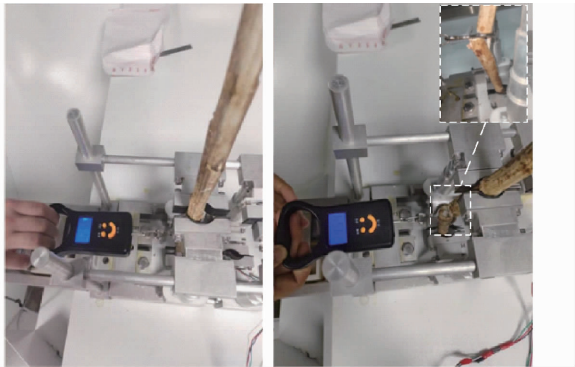


图 14 油菜茎秆夹持性能拉伸试验

Fig. 14 Tensile test of rapeseed stem clamping performance

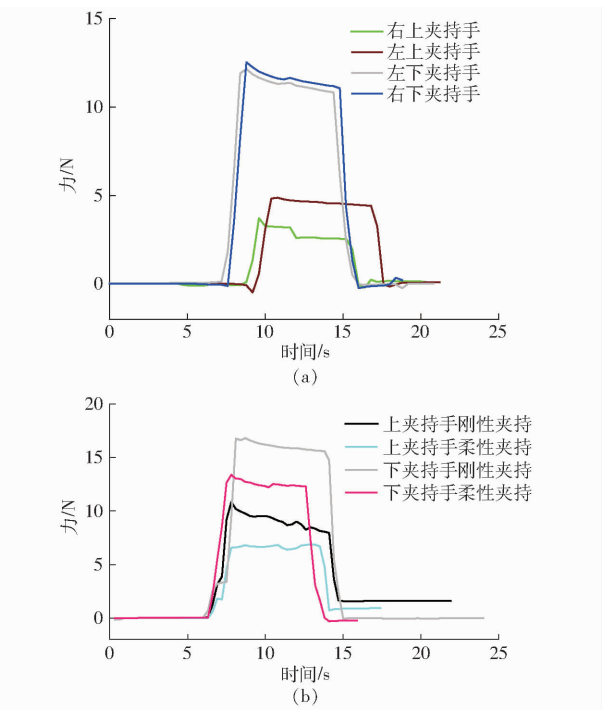


图 15 夹持力动态特性曲线

Fig. 15 Dynamic characteristic curves of clamping force

持一致性与稳定性,与仿真结果基本一致。

植物表皮及茎秆较为脆弱,易受到损伤,较小夹持力可以减少植物机械损伤^[29],夹持力精确控制是影响装置作业效果的关键因素^[30]。图 15b 测试结

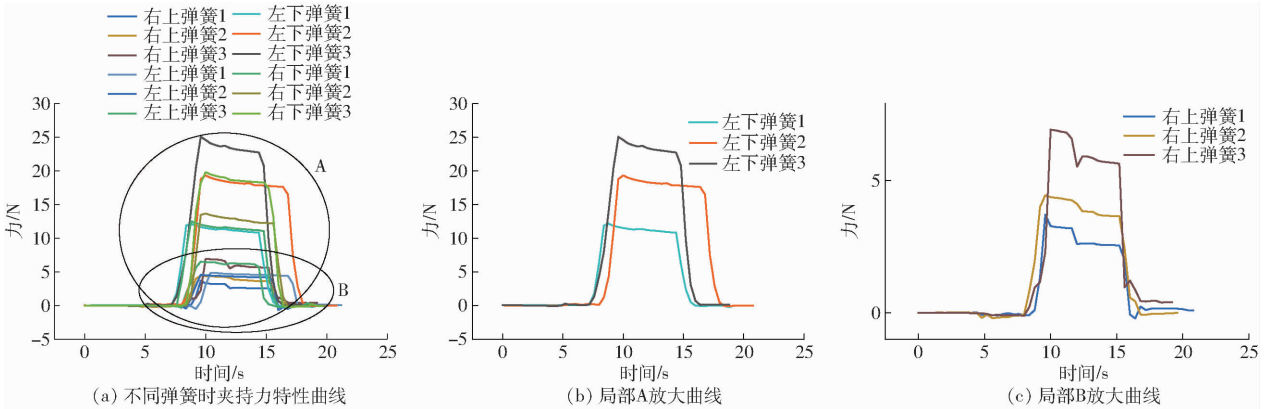


图 16 不同弹簧时夹持力特性曲线

Fig. 16 Characteristic curves of clamping force at different spring

果表明装置在夹持过程中其夹持力会出现不同程度的衰减,主要由茎秆受夹后发生形变所导致。测试中刚性夹持力最大下降约 26%,柔性夹持力最大下降约 8%,远小于刚性夹持力变化幅度。柔性夹持装置通过其内置弹簧形变可动态补偿茎秆受压收缩变形量,使夹持装置与茎秆保持良好夹持接触,夹持力更加稳定。在装置内部弹簧缓冲及变形补偿作用下,柔性夹持装置可实现更稳定可靠的持续夹持,夹持力与压缩弹簧形变相关,通过改变弹簧刚度可实现对夹持力方便灵活的调控。

对比分析夹持手内弹簧刚度对夹持力的影响,选取弹簧 1 刚度为 2.7 N/mm,弹簧 2 刚度为 5.4 N/mm,弹簧 3 刚度为 8.8 N/mm,保持 3 种弹簧圈数一致以及长度均为 15 mm。3 种弹簧每次试验测试条件相同,测试茎秆上下两夹持部位直径分别约为 15 mm 和 18 mm,3 次测试中茎秆上夹持部位直径分别为 14.8、14.82、15.4 mm,3 次测试时所夹持茎秆下夹持部位直径分别为 16.8、17.52、18.4 mm,油菜茎秆夹持部位直径的变化,会对夹持力产生一定影响,结合夹持力模型(式(5)),3 次试验测试中,因夹持直径变化引起的最大误差不超过 13%。

由图 16 可知,夹持力随弹簧刚度变大而增大,上下夹持手夹持力差异较大,茎秆夹持部位对夹持力有较大影响。装置可根据植物秆径变化特点来调节合适夹持部位,同时在上、下夹持手设置不同刚度弹簧,即可调控茎秆上下不同部位夹持力。结合柔性夹持装置夹持力理论计算模型,可实现对不同植物茎秆的差异化、精确化夹持。

由于测量误差、传感器精度等因素影响,柔性夹持装置夹持力理论计算与试验测试结果存在一定差异,其最大误差约为 13%。试验验证了柔性夹持装置夹持力理论数学模型的准确性,夹持装置能很好地进行夹持行程控制,夹持稳定夹持力波动小。为后续相关夹持装置设计提供理论参考。

5 结论

(1)在 ADAMS 中对植物茎秆柔性夹持装置进行动力学仿真,分析夹持装置工作性能及夹持过程,柔性夹持装置最大茎秆夹持直径可达 68.8 mm,夹持行程、夹持速度、夹持力均可控可调。

(2)对柔性夹持装置加载切割力负载,装置带载夹持力平稳无较大振动。建立了装置夹持力精确数学模型,夹持装置能可靠安全地进行油菜茎秆夹

持作业。柔性茎秆受夹压会收缩变形,刚性夹持力最大下降约 26%,而柔性夹持力最大仅下降约 8%,远小于刚性夹持力变化幅度,柔性夹持装置可实现更稳定可靠的茎秆夹持。

(3)对装置夹持稳定性进行比较分析,以油菜茎秆最大质心位移作为稳定性判定依据,研究弹簧刚度对夹持稳定性的影响。随着弹簧刚度变大油菜茎秆质心位移减小速率变慢,而当弹簧刚度为 10 N/mm 时,其夹持稳定性较高,夹持力适中。

参 考 文 献

[1] 魏树军,王天宇,谷国迎. 基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计[J]. 机械工程学报,2017,53(13): 29–38.
WEI Shujun, WANG Tianyu, GU Guoying. Design of a soft pneumatic robotic gripper based on fiber-reinforced actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 29–38. (in Chinese)

[2] 周科宏. 番茄抓取机器人末端执行器研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学,2022.
ZHOU Kehong. Research and design of the robotic end-effectors for tomato holding[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[3] 山西农业大学. 一种用于测试植物茎秆力学性能的拉伸试验机夹头: ZL 201711055418.2[P]. 2019–05–14.

[4] 赵尊练,杨广君,巩振辉,等. 克服蔬菜作物连作障碍问题之研究进展[J]. 中国农学通报,2007,23(12): 278–282.
ZHAO Zunlian, YANG Guangjun, GONG Zhenhui, et al. Review on continuous cropping obstacle in vegetable crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(12): 278–282. (in Chinese)

[5] 于贤昌,王立江. 蔬菜嫁接的研究与应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),1998,29(2): 249–256.
YU Xianchang, WANG Lijiang. Study and application in vegetable graft[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 1998, 29(2): 249–256. (in Chinese)

[6] 新乐市天灌农业科技有限公司. 一种西瓜种植用嫁接夹持装置: ZL 202220462079.X[P]. 2022–09–02.

[7] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 123(8): 1930–1935.

[8] 彭艳,刘勇敢,杨扬,等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(9): 11–20.
PENG Yan, LIU Yonggan, YANG Yang, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 11–20. (in Chinese)

[9] 湖南农业大学. 一种作物茎秆切割试验用茎秆快速夹持装置: ZL 201910090796.7[P]. 2021–03–23.

[10] 杨海,周海波,冯小川,等. 锯齿形双圆盘切割器切割原理分析与仿真[J]. 农机化研究,2011,33(9): 23–26.
YANG Hai, ZHOU Haibo, FENG Xiaochuan, et al. Cutting principle analysis and simulation of hackle dual-disc cutter bar[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(9): 23–26. (in Chinese)

[11] 陈国晶,赵冰,孙鹏. 甘蔗收割机单圆盘切割器切割运动分析与仿真[J]. 农机化研究,2009,31(11): 107–110.
CHEN Guojing, ZHAO Bing, SUN Peng. Kinematics and simulation of single disc base cutter of sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 107–110. (in Chinese)

[12] 刘先杰. 小型甘蔗联合收割机流程虚拟仿真分析及集蔗机构的改进[D]. 南宁: 广西大学,2006.
LIU Xianjie. Flow virtual simulation analysis and collecting device amelioration of the mini type sugarcane harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)

[13] 崔涛,刘佳,张东兴,等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 的玉米茎秆柔性体仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊): 112–115.
CUI Tao, LIU Jia, ZHANG Dongxing, et al. Flexible body simulation for corn stem based on ANSYS and ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 112–115. (in Chinese)

[14] 赵玉侠,高德文,何广平. 轮式移动机器人在圆形管道中的运动学建模与仿真分析[J]. 北方工业大学学报,2010,22(3): 35–40.
ZHAO Yuxia, GAO Dewen, HE Guangping. Simulation analysis and kinematics modeling of wheeled mobile robot in round pipe[J]. Journal of North China University of Technology, 2010, 22(3): 35–40. (in Chinese)

[15] 廖宜涛,王在腾,廖庆喜,等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1): 236–243.
LIAO Yitao, WANG Zaiteng, LIAO Qingxi, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 236–243. (in Chinese)

[16] 石明全,张鹏,范树迁,等. 基于多接触约束的动力学仿真计算效率[J]. 机械工程学报,2011,46(7): 108–113.
SHI Mingquan, ZHANG Peng, FAN Shuqian, et al. Computational efficiency for dynamics simulation based on multi-contact

- mechanical system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 46(7): 108–113. (in Chinese)
- [17] 蒋亚军,廖宜涛,廖庆喜. 基于P-K失效模型的饲用油菜茎秆仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报,2022,53(3): 309–318.
- JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Simulation parameters calibration for P-K failure model of fodder rapeseed stalk [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(3): 309–318. (in Chinese)
- [18] 邱述金,郭玉明,郑德聪. 柠条收获机圆盘锯式切割系统动力学仿真与参数优化[J]. 农业机械学报,2014,45(8): 72–79.
- QIU Shujin, GUO Yuming, ZHENG Decong. Dynamic simulation of disc saw cutter system of *Caragana korshinskii* harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 72–79. (in Chinese)
- [19] 谭理,纪爱敏,黄继承,等. 基于ADAMS的工业大麻输送机构参数优化[J]. 中国农机化学报,2023,44(5): 42–47.
- TAN Li, JI Aimin, HUANG Jicheng, et al. Parameter optimization of industrial hemp conveying mechanism based on ADAMS [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5): 42–47. (in Chinese)
- [20] 李明昊,牛昊,范佳艺,等. 刚柔耦合仿生机器鱼传动轴动态疲劳可靠性分析[J]. 中国工程机械学报,2023,21(4): 358–362.
- LI Minghao, NIU Hao, FAN Jiayi, et al. Rigid-flexible coupling dynamic fatigue reliability study on bionic fish driving shaft [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(4): 358–362. (in Chinese)
- [21] ENRIQUE C, ROBERT M, CARMEN C. Sensitivity analysis in optimization and reliability problems [J]. Responsible Engineering and System Safety, 2008, 93(12): 1788–1800.
- [22] COURTEILLE E, LEOTOING L, MORTIER F, et al. New analytical method to evaluate the power plant and improvement vehicle NVH[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2005, 24(6): 929–943.
- [23] 甄文斌,冯俊杰,董朝,等. 一种管道水培叶菜变方位包络定心抓取方式[J]. 农业工程学报,2023,39(20): 46–54.
- ZHEN Wenbin, FENG Junjie, DONG Zhao, et al. Centering grabbing with variable orientation envelope for hydroponic leafy vegetables cultivated in pipeline [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 46–54. (in Chinese)
- [24] LIU S, WANG F, LIU Z, et al. A two-finger soft-robotic gripper with enveloping and pinching grasping modes [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(1): 146–155.
- [25] 郭钟华,吉成浩,窦梦宇,等. 轻韧型软体夹持器的仿生设计与研究[J]. 中国机械工程,2023,34(5): 595–602, 609.
- GUO Zhonghua, JI Chenghao, DOU Mengyu, et al. Bio-inspired design and research on light ductile soft grippers [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(5): 595–602, 609. (in Chinese)
- [26] 徐高伟,刘宏新,荐世春,等. 基于五杆机构的丹参膜上移栽机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(9): 55–65.
- XU Gaowei, LIU Hongxin, JIAN Shichun, et al. Design and test of transplanting mechanism on mulch-film of *Salvia miltiorrhiza* based on five-bar mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 55–65. (in Chinese)
- [27] JIN X, LI D Y, MA H, et al. Development of single row automatic transplanting device for potted vegetable seedlings [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 67–75.
- [28] 吴永宏,李群明. 机械手夹持接触力及力封闭分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(6): 1580–1586.
- WU Yonghong, LI Qunming. Analysis of gripping contact force and force-closure of manipulator [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1580–1586. (in Chinese)
- [29] 张静,王俊,杜冬冬,等. 履带自走式单行大白菜收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12): 134–146.
- ZHANG Jing, WANG Jun, DU Dongdong, et al. Design and experiment of self-propelled single-row harvester for Chinese cabbage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 134–146. (in Chinese)
- [30] 崔永杰,卫咏哲,丁辛亭,等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022, 53(1): 104–114, 122.
- CUI Yongjie, WEI Yongzhe, DING Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104–114, 122. (in Chinese)