

川麦冬往复切割式剪果装置设计与仿真试验

张博文 李爱潮 郑志安 孙东宇 吴敏
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 麦冬为我国大宗中药材品种,道地产区为四川和浙江,地下部分的块根为人药部位。本文针对麦冬块根采后人工脱果劳动强度大,缺乏成熟机械化脱果装置等问题,设计了一款川麦冬剪果装置。该装置采用两组阶梯式的往复切割器、输送夹持带、限果导须板和机架结构。结合麦冬剪果农艺要求和植株物理参数测量计算,确定了整体结构尺寸、限果导须板间隙、输送速度、切割间距、往复行程等参数。基于 ADAMS 软件对麦冬与脱果刀具之间进行了刚柔耦合仿真分析,以刀刃与麦冬植株接触力大于峰值切割力为条件,模拟切割效果;利用 ADAMS/view 中 Flex 模块对麦冬植株进行柔性化处理,分析在接触碰撞过程中两者接触力与麦冬植株形变的变化规律。选取切割速度、切割倾角、刀具构型三因素进行三水平正交试验,结果表明,影响切断的因素主次顺序为切割倾角、切割速度、刀具构型;切割速度与刀刃类型呈显著相关关系;当进行高速切割时,直齿型刀具所产生的峰值切割力大于其他两种刀具构型。综合考虑切割稳定可靠性、切割力和刀具构型最简化原则,得到优化工作参数为:切割速度 0.41 m/s、切割倾角 0.3°、刀具构型为三角光刃型。经仿真实验验证,该装置结构参数合理,满足麦冬脱果技术要求,可为麦冬脱果机械装置的优化设计提供理论和试验依据。

关键词: 麦冬; 脱果装置; 往复式; 仿真分析; ADAMS

中图分类号: S226.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0081-10

Design and Simulation Experiments of Reciprocating Cutting Tuber Removal Device for *Ophiopogon japonicus*

ZHANG Bowen LI Aichao ZHENG Zhian SUN Dongyu WU Min
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: *Ophiopogon japonicus* is a major variety of traditional Chinese medicinal herbs, which mainly cultivated in Sichuan Province and Zhejiang Province, and the medicinal part of it is the tuberous root normally barrier underground. Focusing on the labor intensive process of manually removing the tuberous root from *Ophiopogon japonicus*, as well as the lack of mature mechanical tuberous root removal devices, a tuberous root removal device was specifically designed for *Ophiopogon japonicus* from Sichuan Province. The device utilized two sets of step type reciprocating cutters, a set of conveying clamping belt, a caliper, and a rack structure. By considering the requirements of the tuberous root of the *Ophiopogon japonicus* harvesting and measuring the plants' physical parameters, parameters such as overall structure dimensions, caliper interstices, conveying speed, cutting intervals and reciprocating stroke can be determined. The rigid-fliexible coupling simulation analysis between the *Ophiopogon japonicus* and the tuberous root removal tool was conducted by using ADAMS software. The cutting effect was simulated under the condition of the contact force between the cutting edge and the *Ophiopogon japonicus* plants exceeded the peak cutting force. The Felx module in ADAMS/view was used to apply flexible treatment to the *Ophiopogon japonicus* plants, and the changing rules in contact force and plant deformation during the contact collision process was analyzed. Choosing cutting speed, cutting inclination angle and cutting tool configuration as three factors to design a three level orthogonal test. The order of importance for factors affecting cutting effects was as follows: cutting inclination angle, cutting speed, and cutting tool

configuration. Cutting speed was significantly correlated with the type of cutting tools. When proceeding high-speed cutting, the peak cutting force generated by the straight-tooth blade tool was greater than that of the other two configurations. Considering the principle of cutting stability reliability, cutting force and tool configuration minimization comprehensively, the optimized solution was carried out: the optimal working parameters was determined as cutting speed of 0.41 m/s, cutting inclination angle of 0.3° and a cutting tool configuration of a triangular smooth-edge blade. Verified by simulation, this device had rational structure parameter and met the technical requirements for the harvest of *Ophiopogon japonicus* tuber, providing a theoretical and experimental references for the further optimization design of mechanical devices.

Key words: *Ophiopogon japonicus*; tuber removal device; reciprocating; simulation analysis; ADAMS

0 引言

川麦冬,百合科多年生草本植物^[1],其植株的根茎横走,须根细长,前端或中部常膨大为纺锤型的肉质块根(药用部分)。麦冬含有多种皂苷成分^[2],其性微寒、味甘微苦^[3],具有养阴生津、润肺清心的作用,具有较高的保健和药用价值^[4]。摘果是麦冬采挖后重要的生产环节之一。现阶段农民使用剪刀或简易的齿状工具来进行麦冬摘果处理,劳动强度大,采摘效率低,人工成本较高,严重限制了大宗中药材麦冬产业的高质量发展。

麦冬主要种植在我国,日本、越南、印度等有少量产区,国内外关于麦冬机械化装备的研究主要围绕移栽和采收环节,但关于麦冬摘果机械装置方面的研究较少^[5]。按照脱果原理,可将目前所研究的麦冬脱果机械分为3类。第1类是击打式脱果装置,徐保华^[6]设计一种麦冬摘果机,使用胶柱对麦冬块根进行击打拉拽,进而完成脱果,陈岗福^[7]通过铁丝网罩与麦冬根茎间的相互摩擦将麦冬块根与根须脱离,此种方式对麦冬果的表皮损伤较大,在干燥后容易出现“乌花”,影响药品质量。第2类是梳刷脱果,王才全^[8]利用滚动式的刮轮对麦冬块根进行旋转梳脱;李彬林^[9]将麦冬根茎朝向同侧平铺,并将其固定运输,经过转动的篦子装置时,块茎被刮落。利用此方式在梳刷过程中麦冬易出现“抽芯”,导致药材质量不合格;第3类是切割脱果,朱平^[10]设计了一种麦冬摘果机,将麦冬苗放在存料盘上,然后手持麦冬一端将有麦冬果的一头靠近筒式剪刀,在人工递送植株操作下,筒式剪刀上的弧形刀片组将吊果和耙果切除;李彬林^[11]利用切果机械上部剪切机构中的定、动刀片将根部切下,结果发现仅部分有果实根须被动刀片切断,因此采用一次切割方式容易造成损伤和遗漏,并且定位比较困难。综上各类设计方案多见于专利文献中,由于设计方案仍存在工作原理不够合理、运动受力分析不够深入、脱果方式创新性不足等问题,不可避免的会对麦冬块根、

麦冬苗造成机械损伤,或出现漏切等现象,因此,亟需通过创新脱果方式、采用有效的受力分析手段和数值仿真方法开展设计基础研究,探究麦冬与刀具高效切割间的刚柔耦合关系、系统优化脱果装置稳定可靠性、明确优化设计参数等,为进一步研制满足麦冬脱果农艺要求和稳定高效脱果机具提供理论参考,同时为开发类似膨大块根类农产品脱果装置提供技术支撑。

基于前述研究和脱果关键技术分析,本文设计一种阶梯式往复切割麦冬摘果装置。采用多段式动静刀具剪切方式,设计限果导须板完成剪果定位,重点分析麦冬植株与切割刀具的刚柔耦合关系,运用ADAMS软件对麦冬摘果机械的往复式切割器进行动力学仿真^[12],通过响应面正交试验分析^[13],确定往复式切割器的优化工作参数组合,经数值模拟加以验证,为麦冬剪果装置设计提供理论依据。

1 整体结构和工作原理

1.1 麦冬物理力学特性与脱果农艺要求

四川省绵阳市三台县是我国最大的川麦冬种植基地,本文以当地种植的“川麦冬一号”作为脱果研究对象,每年的采收时间为4—5月,其采收后植株形态如图1所示,由于麦冬根系结构的特点,其入药部位具有特殊性,对于分离剪切有明确要求。麦冬果为植株地下部分的膨大块根,也就是入药部位,在实际生产中将分离膨大块根工艺称为脱果过程。

由图1可知,麦冬根系空间结构主要由主根、膨大块根和须根组成,膨大块根即麦冬果,其为主根上生长的膨大块根,经摘果分离干燥后作为药用部位;连接膨大块根的为主根,主根上分布若干须根,即为营养根,不做药用,采摘后干燥的主根和须根可自行脱落,不做剪切处理,也不做药用部位入药,因此剪切脱果需要通过剪切装置实现膨大块根的分离,允许剪切后膨大块根上连接一部分主根或须根。另外,麦冬膨大块根主要分布在根须的下端和中部,为准确开展麦冬脱果设计,须测定麦冬物理参数信息。



图 1 麦冬植株
Fig. 1 Ophiopogon

本研究在麦冬种植地采用随机取样方式,共选取 4 个取样点,每个取样点随机选取 3 株健康生长的麦冬植株进行物理参数测量,测量工具有游标卡尺、卷尺,测量内容包括块根直径、块根长度、单株块根数量、整株高度、根群分布直径(挖掘后)、茎白长度、茎叶总长度、根部长度;使用万能试验机(Instron 3367 型)对麦冬主根进行剪切试验,各物理参数如表 1 所示。脱果技术要求为:不伤果、不伤苗、不抽芯、不漏果、须根可与膨大块根连接,可不完全切除。

表 1 麦冬物理参数

Tab. 1 Physical parameters of Radix ophiopogonicus	
参数	数值
块根直径/mm	10. 61 ± 2. 16
块根长度/mm	24. 57 ± 7. 74
单株块根数量	15 ± 7
整株高度/mm	47. 40 ± 7. 99
根群分布直径(挖掘后)/mm	130. 00 ± 25. 82
茎白长度/mm	27. 30 ± 2. 16
茎叶总长度/mm	200. 00 ± 34. 20
根部长度/mm	127. 80 ± 20. 14
切断力/N	35. 13 ± 5. 69

根据上述测量数据,可为脱果装置结构参数提供参考。本文设计的麦冬剪果工作过程参考目前农户使用的简易工具,脱果梳齿设计了内侧刀刃,具体工作过程为手持麦冬茎叶部分,将麦冬果及根须部分喂入梳齿齿隙之中,由于梳齿间隙小于麦冬果直径,因此可将麦冬苗与麦冬果分于梳齿两侧,随着拉拽动作,麦冬果与根须连接部分由梳齿侧面具有的齿刃剪断,完成麦冬脱果全过程。研究发现切割方向的内侧刀刃设计是必要的,因此本文设计 3 种具有内侧刀刃的刀具构型。

1.2 整体结构

设计的麦冬剪果装置主要由输送夹持带、往

复式切割器、机架、曲柄连杆机构、直流驱动电机、限果导须板等结构组成,如图 2a 所示,曲柄连杆机构与往复式切割器、限果导须板共同组成切割机构。其中输送夹持带、往复式切割器由单独电机驱动。往复式切割器共 2 组,呈阶梯式分布,如图 2b 所示。

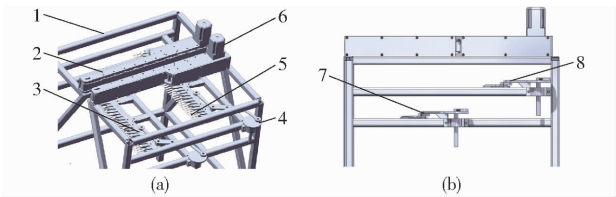


图 2 麦冬剪果试验台整机结构图
Fig. 2 Complete structure of Ophiopogon fruit cutting test bench

1. 机架 2. 输送夹持带 3. 往复式切割器 4. 曲柄连杆机构
5. 限果导须板 6. 直流驱动电机 7. 第 1 组切割器 8. 第 2 组切割器

1.3 工作原理

该装置分为 2 个运动单元进行剪果作业。输送单元工作原理为:人工抓取麦冬茎叶部分,使其根部朝下,置于喂入口,夹持输送装置两侧的皮带由一组电机进行同步驱动,将麦冬由喂入口向机器内输送,并对麦冬茎叶部分进行位置约束;剪果单元工作原理为:麦冬剪果过程要求完成剪切不同位置的膨大块根,允许膨大块根连接一定长度的主根和须根。当麦冬植株输送到切割器前方时,麦冬块根由于重力自然下坠,限果导须板间隙稍小于麦冬块根直径,麦冬果在其保护下不能进入切割器中,连接麦冬膨大块根的须根和主根进入限果导须板,对麦冬块根进行位置约束和引导,防止其摆动影响切割效果,往复式切割器通过动定刀配合对主根进行剪切。整个装置分为两段式,第 1 组切割器对下端麦冬膨大块根,即根部长度大于 150 mm 的麦冬块根,进行剪切完成第 1 次膨大块根分离,同时由于输送带持续输送,麦冬植株进入下一组阶梯式的切割器,再次对对上中部麦冬膨大块根,即根部长度小于 150 mm 的麦冬块根进行剪切,如此完成整个工作过程。限果导须板设计基于两段式剪切需要,并通过导板约束作用实现位置相对固定、模仿手持受力、减少须根保留过长等过程。

相较于一般切割式麦冬脱果机械,该装置利用限果导须板对麦冬块根进行定位,有效地解决了一般切割机械由于缺少定位导致麦冬根须无法喂入齿隙的问题;阶梯式多层次切割可减少漏切的现象,避免摘果损伤。麦冬脱果装置主要设计参数如表 2 所示。

表 2 结构设计参数

Tab.2 Structural design parameters

参数	数值
整体尺寸/(mm×mm×mm)	600×500×750
限果导须板间隙/mm	5
输送速度/(m·s ⁻¹)	0.3
往复行程/mm	37
切割间隙/mm	2

2 关键部件结构与运动分析

2.1 关键部件结构设计

切割装置是麦冬剪果装置的核心部件之一,其结构如图 3 所示,主要包括动刀片、定刀片、曲柄连杆机构、限果导须板等。曲柄连杆机构在工作过程中可以实现动刀片的往复运动,定刀片固定于动刀片下方,当动刀片进行往复运动时,两者由于相对运动产生速度差,实现对麦冬根须的剪切。由于麦冬根须错综复杂,且持续喂入的麦冬根须容易与高速运动的动刀片产生缠绕,影响稳定输送,导致根须摆动无法喂入齿隙,故在切割器下方安装限果导须板,一方面可以对麦冬块根进行定位约束,引导根须喂入切割器齿隙中,另一方面可以保护块根,避免刀片对块根造成机械损伤。工作原理即植株上部与下部分别由输送夹持带、限果导须板通过调整齿间的间隙的方式引导根须进入切割器和限制麦冬果进入切割器造成损伤,利用动刀片相对于定刀片做往复的剪切运动,将根须切断。

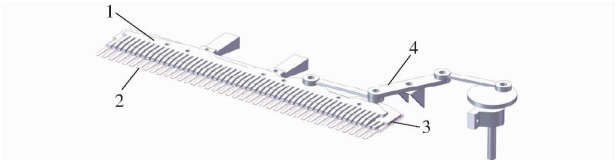


图 3 往复切割器

Fig.3 Reciprocating cutter

1. 动刀片 2. 限果导须板 3. 定刀片 4. 曲柄连杆机构

输送夹持带也是麦冬剪果装置的重要组成部分,其结构如图 4 所示,包括皮带、带轮、张紧轮、挡板、直流驱动电机。由于切割器下方的限果导须板会对麦冬块根进行固定约束,在输送带持续喂入的过程中会对麦冬植株产生轴向的拉力,故选用摩擦系数较大且耐磨性良好的橡胶作为皮带材质,对麦冬茎叶部分进行柔性夹持^[14]。依据脱果生产效率和系统稳定性要求,设计的输送夹持带以速度 0.3 m/s 喂入麦冬植株,进行连续剪果作业,喂入方向如图 5 所示。

2.2 切割装置运动分析

装置结构的运动规律可以反映出各个变量对切

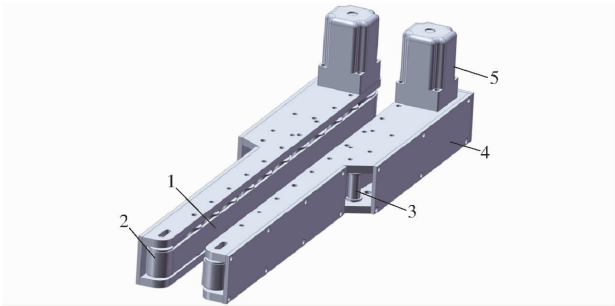


图 4 输送夹持带

Fig.4 Conveyor gripper belt

1. 皮带 2. 带轮 3. 张紧轮 4. 外侧挡板 5. 直流驱动电机

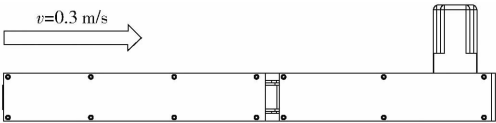


图 5 输送夹持带工作示意图

Fig.5 Working diagram of conveyor gripper belt

割效果的影响,为了更好地明确麦冬在此装置下的切割运动过程,参照往复式切割器运动原理^[16],对切割装置进行运动分析。以曲柄连杆(连杆长 $l > 10r$, r 为曲柄半径)驱动的往复式切割器动刀片的运动,为一近似的简谐运动。动刀片刃口上任一点的位移 X 、速度 v_x 和加速度 a_x ,如图 6 所示,都是变值,分别为

$$X = -r\cos(\omega t)$$
 (1)

$$v_x = r\omega\sin(\omega t) = \omega\sqrt{r^2 - X^2}$$
 (2)

$$a_x = r\omega^2\cos(\omega t) = -\omega^2 X$$
 (3)

式中 ω ——曲柄旋转角速度,rad/s
 t ——曲柄由极左点 A 起转过的时间,s

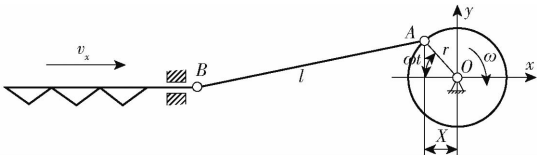


图 6 切割运动示意图

Fig.6 Cutting motion diagram

动刀片运动速度 v_x 与位移 X 为一椭圆方程式,即

$$v_x^2/(r^2\omega^2) + X^2/r^2 = 1$$
 (4)

这说明动刀片刃口上某点的速度是按照椭圆曲线规律而变化。当 $X=0$,即刃口某点正处于刀片在中点位置时, $v_{x,max} = r\omega = 10^{-3} \frac{\pi n}{30}$ 为最大值。当 $x = \pm r$ 时,即刃口某点处于刀片极左或极右位置时, $v_x=0$ 为最小值。

由于割刀横向直线运动速度是变化的,应用不便,因此引进割刀平均速度 v_p ,计算式为

$$v_p = \frac{S}{T} = \frac{nS}{30} = \frac{nr}{15}$$

(5)

式中 S ——割刀行程,mm

T ——割刀运动一个行程 $S=2r$ 内所用时间,s

n ——曲柄转速,r/min

为了实现设计仿真要求,本研究将割刀平均速度简化作为切割速度进行后续计算和分析,往复式切割器割刀运动为水平横向运动和直线前进运动的合成,本装置为植株向割刀处喂入,因此也可看作是相对直线前进运动,割刀横向运动平均速度 v_p 与植株喂入前进运动速度 v_m 的配合关系,决定割刀绝对运动轨迹^[17],割刀进距(切割进距) H 即割刀完成一个行程 S 的时间 T 内植株所前进的距离,计算式为

$$H = v_m T = 30v_m / n$$

(6)

切割行程与切割进距的比值为切割速比 K ,是反映装置切割性能的重要因素之一,切割速比 K 越小,漏割区域越大,切割质量不稳定;切割速比越大,重割区域越大,容易造成功耗浪费。因此,选取合适的切割速比有利于提高整机的切割性能。切割速比计算式为

$$K = \frac{S}{H} = \frac{v_p T}{v_m T} = \frac{v_p}{v_m}$$

(7)

植株喂入速度 v_m 根据实际工作效率确定,为 0.3 m/s,取 $K \geq 1.2$,可满足工况要求,为便于计算,确定切割速度 $v_p \geq 0.4$ m/s。

往复式切割器在工作时做高速往复直线运动,由于其速度是变化的,将在机器上产生较大的振动,速度越高则整机的振动就越大,机器的稳定性就越差^[18]。为了保证切割过程中操作人员的安全、整机的稳定性以及切割速比 K 不宜太大,综合考虑下,确定切割速度 $v_p \leq 0.8$ m/s。

基于上述分析,得到平均切割速度设计范围为 0.4~0.8 m/s 时,可满足工况要求。

3 基于 ADAMS 的麦冬-机械脱果刚柔耦合仿真分析

3.1 试验方法

为获得准确模拟环境,需对各模型赋予相应的材料特性,分别为泊松比、弹性模量和密度。切割器使用合金钢材料,相关参数可通过查阅资料获取;麦冬根须的属性参数通过 Instron 3367 型万能试验机、AR3130 型电子精密天平、数显游标卡尺测量获取。

泊松比计算公式为

$$\nu = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}$$

(8)

式中 ν ——泊松比

ε_1 ——垂直方向上的应变

ε ——载荷方向上的应变

通过电测法对麦冬进行泊松比的测定,试验前将电阻应变片贴在试样上,将试样固定在万能试验机上,对试样以速度 2 mm/min 持续加载,实时记录载荷方向及垂直方向的变形量变化,当试样发生显著损伤后,终止试验,依据式(8)进行计算泊松比。

弹性模量计算公式为

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

(9)

式中 E ——弹性模量 σ ——正应力

万能试验机可实时采集剪切力与位移,将试样固定于试验台底座上,刀具运动速率设为 2 mm/min,对试样持续加载,当试验发生剪切破坏后,终止试验,根据系统记录的数据及式(9),计算弹性模量。

采用比重杯法测定麦冬密度,计算公式为

$$\rho = \rho'(m_2 - m_3) / (m_1 - m_3)$$

(10)

式中 ρ ——麦冬密度,kg/m³

ρ' ——水的密度,kg/m³

m_1 ——烧杯装满水的质量,kg

m_2 ——放入麦冬后溢出水后烧杯质量,kg

m_3 ——取出麦冬,烧杯和剩下水的质量,kg

综上计算得到麦冬和切割器材料的属性参数平均值如表 3 所示。

表 3 模型材料参数

Tab.3 Model material parameters

项目	参数	数值
麦冬根须	泊松比	0.35
	弹性模量/MPa	20.43
	密度/(kg·m ⁻³)	395
切割器	泊松比	0.29
	弹性模量/MPa	2.07×10 ⁵
	密度/(kg·m ⁻³)	7 801

3.2 仿真设计

将麦冬根须与切割装置构建接触碰撞模型,接触碰撞模型将碰撞过程归结为“自由运动-接触变形”两种状态,ADAMS 软件通过计入碰撞体接触表面的弹性和阻尼,建立了描述碰撞过程中力和接触变形之间的本构关系。在 ADAMS 软件中常采用的模型为

$$F = k\delta^n + C(\delta)\dot{\delta}$$

(11)

式中 F ——法向接触力

k ——Hertz 接触刚度

n ——不小于 1 的指数

C ——阻尼系数
 δ ——接触点法向穿透距离

麦冬植株具有特殊的植物属性,无法直接进行刚体与刚体间的接触模拟仿真,在切割刀具的实际工作过程中,要经历麦冬根须与刀刃接触后产生形变的过程,即刚性构件与柔性茎秆接触的过程,在此过程中麦冬根须会产生弹性形变和塑性形变^[20],为获取真实的接触力及切割环境,须对麦冬根须与切割刀具进行刚柔耦合仿真试验,因此对麦冬植株进行柔性化处理是关键问题。

麦冬植株根系结构分为须根、主根和膨大块根,其中膨大块根为药用部分,脱果过程即通过剪切作用将主根剪断,从而使膨大块根与植株分离。在切割过程中,有个别细小的须根可能会对刀具缠绕产生影响,但是由于主根直径远大于须根,且须根无药用价值,无需保证完整程度,因此可以在进行主根切割的同时对细小的须根一并切除,影响忽略不计,故可以简化以单根须接触形变和仿真分析作为装置实际作业载荷切割力。使用 SolidWorks 软件对麦冬单束根须进行建模,将模型导入 ADAMS 软件后运用其 Flex 板块对模型进行柔性化处理后,与切割装置模型一同添加约束,施加载荷构建刚柔耦合碰撞模型^[21],如图 7 所示。

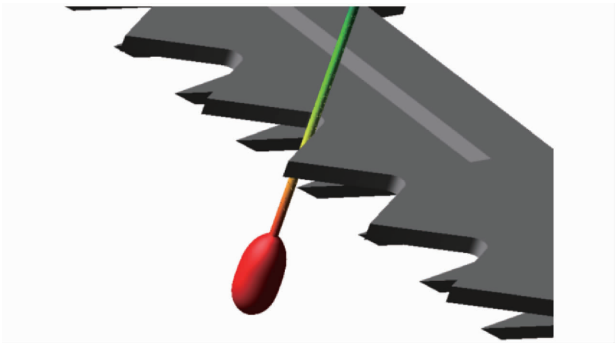


图 7 接触碰撞模型
Fig. 7 Contact collision model

由于 ADAMS 软件无法进行材料失效分析,即无法对麦冬根进行断裂分析,故将切割刀具与麦冬根接触瞬间产生的接触力看作切割力,当接触力满足麦冬断裂试验下的峰值切割力时,即可看作麦冬根能够被刀具切断^[19]。

对模型进行边界条件约束后,进行仿真分析,以切割速度 0.4 m/s、切割倾角 0°、刀具构型为三角光刃型下的接触碰撞模型为例,将仿真时间设为 0.1 s,仿真步数为 500,运行交互仿真分析。ADAMS/Solver 是 ADAMS 产品系列中处于核心地位的仿真器,可提供多种力学与运动学的解算结果^[22],利用 Solver 板块,对麦冬植株进行力学与位

移分析。麦冬根须受到的接触力如图 8 所示,当仿真进行到 0.001 2 s 时,接触力达到最大,即产生峰值切割力,为 31.1 N。

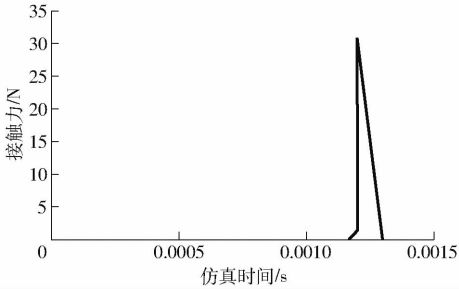


图 8 麦冬与刀具的接触力分析
Fig. 8 Analysis of contact force between ophiopogon and cutting tools

麦冬植株根须形变如图 9 所示,图 9a 为麦冬处于自由状态的根须形变云图,并未发生弹性形变,图 9b 为麦冬植株与刀具刚产生接触时的根须形变云图,可以看到在根须与齿刃接触点位置产生了微量的弹性形变,按照运动规律可知,自由运动的物体相互碰撞会产生大小相等方向相反的相互作用力^[23],但是由于上端输送夹持带的夹持约束,以及下方限果导须板对块根进行了固定约束,使得麦冬植株仅有 x 轴一个方向的自由度。图 9c 为麦冬植株持续喂入后与刀具齿刃继续发生接触碰撞的根须形变云图,根据图 9c 可知在麦冬根须与块根连接处会产生较大的形变,因此如果切割速度过小或齿刃过钝,会由于切割力的不足,从而由剪切破坏转变为拉伸破坏^[24],导致麦冬发生抽芯现象。

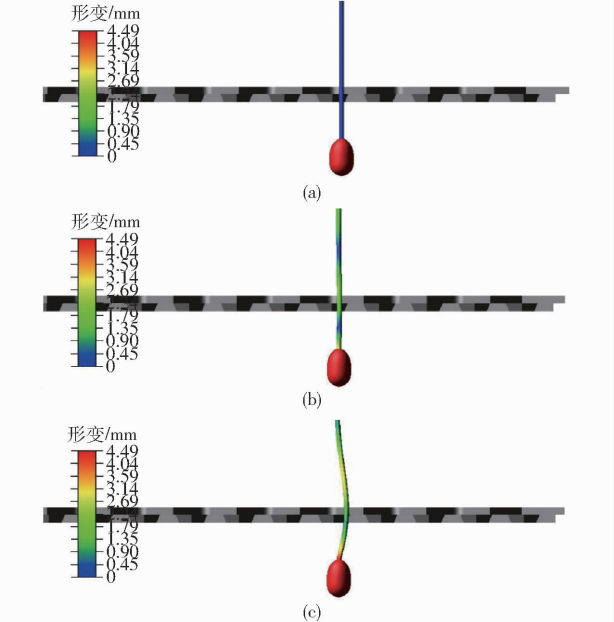


图 9 接触碰撞过程中的麦冬根须形变云图
Fig. 9 Deformation cloud images of ophiopogon root beard during contact collision

将麦冬根须发生剪切破坏时的峰值切割力作为根须断裂与否的评价指标,进行试验设计。通过前文的运动分析与仿真模拟结果可知,切割速度、切割倾角、刀具构型都会影响麦冬的切割效果^[25],以麦冬根须与刀具接触瞬间的相互作用力定义为切割器对麦冬根须的切割力,将切割速度、切割倾角、刀具构型作为影响因素,接触力作为响应指标,选择切割速度为 0.4 ~ 0.8 m/s、切割倾角 0° ~ 4°,刀具构型为直齿型、三角光刃型、三角齿刃型,如图 10 所示。为探究各影响因素和各因素间交互作用对评价指标的影响,得到最优的参数组合,开展三因素三水平的 Box – Behnken 试验,共进行 17 组试验,每组试验重复 5 次,取 5 次试验的平均值作为该组试验的测试结果,试验因素编码如表 4 所示。

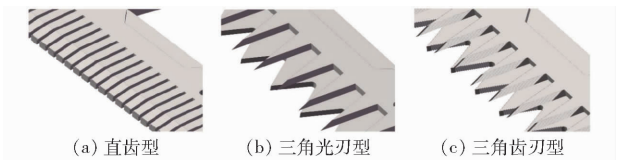


图 10 刀具构型

Fig. 10 Tool configuration

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Horizontal coding of experiment factors			
编码	因素		
	切割速度	切割倾角	刀具构型 C
	A/(m·s ⁻¹)	B/(°)	
-1	0.4	0	直齿型
0	0.6	2	三角光刃型
1	0.8	4	三角齿刃型

3.3 试验结果与分析

根据上述试验设计方案以及试验因素编码表,对麦冬-机械摘果刚柔耦合模型进行仿真模拟,获得不同工况下的最大接触力,即峰值切割力,试验结果如表 5 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

通过 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件对仿真数据进行响应面回归分析,并经计算得出了各影响因素与评价指标间的拟合方程,为

$$y = 71.26 + 37.95x_1 + 47.41x_2 + 7.34x_3 - 8.75x_1x_2 - 40.65x_1x_3 - 4.93x_2x_3 + 49.51x_1^2 - 4.27x_2^2 + 37.53x_3^2 \quad (12)$$

回归方程方差分析如表 6 所示,对软件计算结果进行分析,麦冬-脱果机械刚柔耦合模型 P 值小于 0.01,表明回归方程极显著,失拟项 P 值大于 0.05,表明失拟项不显著,说明该回归模型拟合程度较好,可用于进行各试验因素对评价指标的影响分析。

通过表6可知,方程的一次项A、B及二次项A²、

表 5 试验设计方案及试验结果

Tab. 5 Experimental design scheme and results				
试验 编号	因素			峰值切割 力/N
	x_1	x_2	x_3	
1	-1	-1	0	31.1
2	1	-1	0	110.0
3	-1	1	0	140.5
4	1	1	0	184.4
5	-1	0	-1	52.3
6	1	0	-1	224.0
7	-1	0	1	173.9
8	1	0	1	183.0
9	0	-1	-1	56.2
10	0	1	-1	163.8
11	0	-1	1	55.1
12	0	1	1	143.0
13	0	0	0	75.4
14	0	0	0	60.5
15	0	0	0	80.3
16	0	0	0	54.9
17	0	0	0	85.2

表 6 方差分析

Tab. 6 Analysis of variance					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	54 072.49	9	6 008.05	17.32	0.000 5
A	11 521.62	1	11 521.62	33.22	0.000 7
B	17 983.56	1	17 983.56	51.86	0.000 2
C	10 430.71	1	10 430.71	11.24	0.031 9
AB	306.25	1	306.25	0.88	0.378 6
AC	6 609.69	1	6 609.69	19.06	0.003 3
BC	97.02	1	97.02	0.28	0.613 2
A ²	10 319.97	1	10 319.97	29.76	0.001 0
B ²	76.68	1	76.68	0.22	0.652 5
C ²	5 931.32	1	5 931.32	17.10	0.004 4
失拟项	1 750.89	3	583.63	3.45	0.131 3

注:当 $P \leq 0.01$ 时,表示影响极显著,当 $0.01 < P < 0.05$ 时,表示影响显著。

C^2 的 P 值均小于 0.01,差异极显著,一次项 C 小于 0.05,差异显著,交互项 AC 的 P 值小于 0.01,差异极显著,其余项 AB 、 BC 、 B^2 则不显著,回归方程中,单因素系数代表了影响因素对评价指标的影响,通过回归方程可知影响由大到小依次为切割倾角、切割速度、刀具构型。

单因素对切割力的影响如图 11 所示,切割速度线性项和平方项、切割倾角的线性项和刀具构型的平方项对于峰值切割力的影响是显著的,随着切割速度的增加,峰值切割力先减小再增大;切割倾角与切割力则呈现正相关。从图 11c 可知,当刀具构型作为影响因素时,对离散点进行分析,当切割速度与

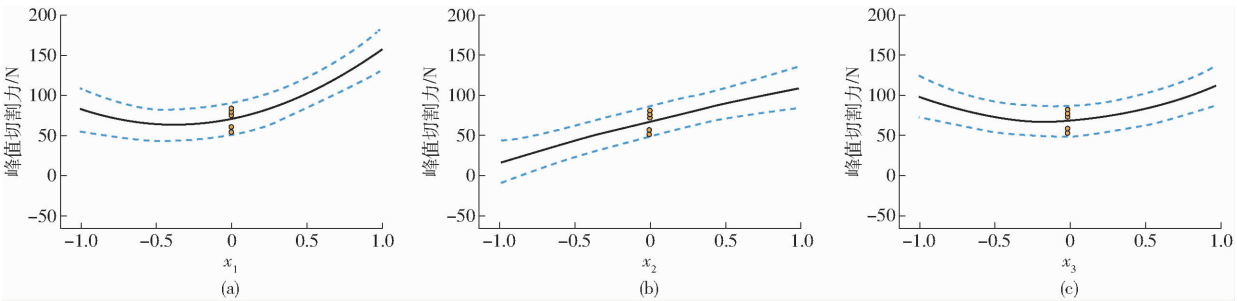


图 11 单因素对切割力的影响曲线

Fig. 11 Single factor effect curves on cutting force

切割倾角都处于中心水平时,选用三角齿刃型的刀具产生的峰值切割力最大,直齿型的刀具次之,三角光刃型的刀具产生的峰值切割力最小。不同刀具类型对于切割的影响取决于接触瞬间所处离散点的力学特性和受力情况。

双因素交互作用对切割力影响的响应面如

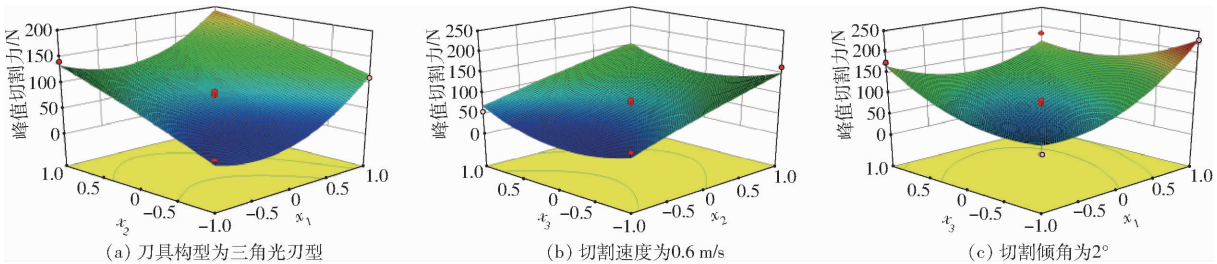


图 12 交互作用对切割力影响的响应面

Fig. 12 Response surface diagrams of interaction effect on cutting force

为获得该脱果装置的最优工作参数组合,运用 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件对回归模型进行约束目标求解^[27]。由表 1 可知,测得根须切断力平均值为 35.13 N,标准差为 5.69 N,为了便于计算以及满足一些粗壮根须的切割条件,将目标切割力设置为 50 N,进行仿真结果优化预测。得到的优化结果为:切割速度 0.574 m/s、切割倾角 0.18°、刀具构型为三角齿刃型。

相对于切割倾角与刀具构型,切割速度除对切割力有影响外,还与影响切割效果的其他因素有关,因此应在选取的速度范围内使其尽量更小,在避免浪费功率的同时,还能够保证整机的稳定性。由于刀具构型与切割速度具有交互作用,在改变切割速度的同时,刀具构型也会随之改变。在 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件的优化结果集中选取切割速度较小的因素组合水平,同时考虑实际加工制造情况,相较于三角齿刃型刀具,三角光刃型更加易于实际加工制造,综合考虑,选取以下因素组合水平,即切割速度 0.41 m/s、切割倾角 0.3°、刀具构型为三角光刃型,与优化结果进行验证对比。

分别对预测模型得到的优化结果及验证结果进行仿真模拟试验,并且对比试验值与预测值之

图 12 所示,其中切割速度与刀具构型交互作用对切割力的影响显著,如图 12c 所示,当切割倾角为中心水平(2°)时,在高速切割的情况下,直齿型刀具所产生的峰值切割力大于其他两种刀具构型,在低速切割的情况下,三角齿刃型刀具产生的峰值切割力大于其他两种刀具构型。

间的差异,表 7 为优化结果与验证结果的比较,切割速度为 0.574 m/s 时,优化结果仿真试验得到切割力为 48.89 N,误差为 1.11 N,切割速度为 0.410 m/s 时,验证结果仿真试验得到切割力为 51.23 N,误差为 1.23 N,均接近于预测值 50 N,综合考虑切割速度的影响,故确定最优因素组合水平为:切割速度 0.41 m/s、切割倾角 0.3°、刀具构型为三角光刃型,满足切割要求。

表 7 优化结果与验证结果

Tab.7 Comparison of optimized results and validated results

试验 序号	因素		切割力/N			
	切割速度/ (m·s ⁻¹)	切割倾 角/(°)	刀具构型	预测值	试验值	误差
1	0.574	0.18	三角齿刃型	50	48.89	1.11
2	0.410	0.30	三角光刃型	50	51.23	1.23

4 结论

(1)结合麦冬摘果的农艺要求、植株力学参数以及人工摘果的原理分析,设计了一种川麦冬往复切割式脱果装置,主要由输送夹持带、往复式切割器、限果导须板组成,确定了整机尺寸为

600 mm × 500 mm × 750 mm、切割行程为 37.55 mm、切割间隙为 2 mm、限果导须板间隙为 5 mm 以及喂入速度为 0.3 m/s,结构紧凑,能够实现麦冬脱果要求。

(2)对往复式切割器以及输送夹持带进行了关键结构参数的设计,利用限果导须板与夹持带对麦冬植株进行了定位约束及引导喂入齿隙完成切割,由两组切割器分两段切割,能够满足麦冬不伤果、不伤苗、不抽芯、不漏果的脱果技术要求。对切割器进行了运动学分析,确定在切割速度为 0.4~0.8 m/s 时,能够在保证切割效果的同时,还保证整机的稳定

性及安全性。

(3)构建了麦冬植株和采摘关键部件的刚柔耦合仿真模型,开展多因素优化仿真分析。将刀具与根须间的接触力作为评价指标,确定了切割速度、切割倾角、刀具构型对切割力的影响主次顺序是切割倾角、切割速度、刀具构型,分析了切割速度与刀具构型间的交互作用,运用 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件求解,得出优化试验因素组合为:切割速度 0.41 m/s、切割倾角 0.3°、刀具构型为三角光刃型时,切割力为 50 N,并进行了仿真试验验证,结果表明满足麦冬脱果技术要求。

参 考 文 献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:155.

[2] 李红彦,蔡晓洋,杨瑞山,等. 川麦冬药材商品等级标准及质量评价[J]. 中成药,2023,45(2):641-646.

[3] 刘考铎,唐诗怡,赵露颖,等. 基于性状特征的浙产麦冬和川产麦冬的主成分和聚类比较分析[J]. 中草药,2021,52(6):1765-1771.

LIU Kaohua, TANG Shiyi, ZHAO Luying, et al. Principal component and cluster comparative analysis of *Ophiopogonis radix* from Zhejiang and Sichuan Provinces based on their morphological character[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(6):1765-1771. (in Chinese)

[4] 蒙倩,张航,CHAYANIS S,等. 麦冬类药材及其混淆品的性状及显微鉴别研究[J]. 中草药,2022,53(24):7905-7914.

MENG Qian, ZHANG Hang, CHAYANIS S, et al. Characterization and microscopic identification of *Ophiopogonis radix* and its adulterants[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(24):7905-7914. (in Chinese)

[5] 蒋辉霞,罗俊,刘宇,等. 麦冬全程机械化生产建议[J]. 四川农业与农机,2022(4):46-47.

[6] 徐保华. 一种麦冬摘果机:211153742U[P]. 2020-08-04.

[7] 陈岗福. 简易麦冬摘果机:204377463U[P]. 2015-06-10.

[8] 王才全. 一种麦冬自动摘果机:213343397U[P]. 2021-06-04.

[9] 李彬林. 一种一体式麦冬摘果机:114667848A[P]. 2022-06-28.

[10] 朱平. 麦冬摘果机:203327564U[P]. 2013-12-11.

[11] 李彬林. 一种麦冬摘果机:214592953U[P]. 2021-11-05.

[12] ZHANG Y, FU Z, LIU H. Flexible body grasping simulation in ADAMS[C]//Trans. Tech. Publications, 2014:509-512.

[13] 杜哲,胡永光,王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):221-226.

DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):221-226. (in Chinese)

[14] 侯加林,李超,娄伟,等. 大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):137-145.

HOU Jialin, LI Chao, LOU Wei, et al. Design and test of floating clamping device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1):137-145. (in Chinese)

[15] 施印炎,陈满,汪小岳,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):110-116.

SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):110-116. (in Chinese)

[16] 史增录,唐学鹏,鄢金山,等. 往复式切割装置摆环机构的刚柔耦合仿真及分析[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(3):292-296.

SHI Zenglu, TANG Xuepeng, YAN Jinshan, et al. Rigid-flexible coupling simulation and analysis of sway ring mechanism in reciprocating cutting device[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3):292-296. (in Chinese)

[17] 郑永东,岑海堂,张天放,等. 向日葵收割装置的设计与仿真研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(12):1-3,29.

ZHENG Yongdong, CEN Haitang, ZHANG Tianfang, et al. Research progress of domestic and foreign TMR feeding technologies and mixers[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(12):1-3, 29. (in Chinese)

[18] 于英杰,王剑,赖庆辉,等. 手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):124-133.

YU Yingjie, WANG Jian, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of hand-held vibrating comb-type *Coffea arabica* L. harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9):124-133. (in Chinese)

[19] 金诚谦,齐彦栋,刘岗微,等. 大豆联合收获机拨禾轮作用机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2023,54(6):104-113.

JIN Chengqian, QI Yandong, LIU Gangwei, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of soybean combine harvester reel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6):104-113. (in Chinese)

[20] 王佳,李绍波,陈春皓,等. 葡萄茎秆切割装置作业参数优化与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(2):37-45.
WANG Jia,LI Shaobo,CHEN Chunhao,et al. Optimization and test of operating parameters of grape stem cutting device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(2):37-45. (in Chinese)

[21] 束钰,耿晓阳,宋月鹏,等. 带夹持机构的锯切式苹果剪枝机设计[J]. 中国农机化学报,2018,39(8):9-16.
SHU Yu,GENG Xiaoyang,SONG Yuepeng,et al. Design of saw-cutting apple pruning machine with clamping mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(8):9-16. (in Chinese)

[22] 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)

[23] 王荣炎,于慧爽,陈安迪,等. 气动翻转梳齿式菊花采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):184-193.
WANG Rongyan, YU Huishuang, CHEN Andi,et al. Design and test of pneumatic flipping comb-type chrysanthemum picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(10):184-193. (in Chinese)

[24] 陆亮,涂宇. 整杆式巨菌草双圆盘切割装置动力学研究与参数优化[J]. 中国农机化学报,2023,44(3):41-48.
LU Liang, TU Yu. Kinetics research and parameter optimization of the whole-rod giant Juncao double-disc cutting device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(3):41-48. (in Chinese)

[25] 吴昆,宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6):1-20.
WU Kun,SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(6):1-20. (in Chinese)

[26] 郇晓龙,尤泳,王德成,等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):112-124.
HUAN Xiaolong,YOU Yong,WANG Decheng,et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):112-124. (in Chinese)

[27] 刘巍,黄小毛,马丽娜,等. 油葵联合收获机专用割台设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):83-88,135.
LIU Wei,HUANG Xiaomao,MA Li'na,et al. Design and experiment of special header of oil sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):83-88,135. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 80 页)

[21] 周建阳,李尚平,潘宇晨,等. 入土切割对砍蔗质量影响的研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(1):22-25.  
ZHOU Jianyang,LI Shangping,PAN Yuchen,et al. Study on the effect of soil cutting on quality of cutting sugarcane[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2016,37(1):22-25. (in Chinese)

[22] 丁宁,李海涛,闫安,等. 秸秆多级连续冷辊压成型参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):196-202,290.  
DING Ning,LI Haitao,YAN An,et al. Optimization and experiment on straw multi-stage continuous cold roll forming for molding parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):196-202, 290. (in Chinese)

[23] 廖庆喜,王乾祥,万星宇,等. 自走式油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):126-138.  
LIAO Qingxi,WANG Qianxiang,WAN Xingyu,et al. Design and experiment of self-propelled rapeseed stalks harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3):126-138. (in Chinese)

[24] 王伯凯,张鹏,曹明珠,等. 花生捡拾收获机秧蔓输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):126-137.  
WANG Bokai,ZHANG Peng,CAO Mingzhu,et al. Design and experiment of pneumatic conveying device for seedlings of peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):126-137. (in Chinese)

[25] 刘芳建,杨学军,方宪法,等. 甘蔗收获机切段装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(9):90-95.  
LIU Fangjian,YANG Xuejun,FANG Xianfa,et al. Design and experiment of chopper device in sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):90-95. (in Chinese)