DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.02.008

基于ADAMS的榨菜联合收获机拔取装置动力学仿真分析

周冉, 宋志禹, 金月*, 蒋清海

(农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京,210014)

摘要:针对榨菜采收期倒伏程度不一致和菜球不规则难以确定收获受力情况的问题,基于榨菜特殊的生长性状设计联合收获机,创新采用先拔后切根的收获方式,并对关键的拔取装置进行动力学仿真分析。在分析榨菜收获过程及其受力状况的基础上,深入研究拔取装置的V形圆锥辊与榨菜之间的相互作用力,得出榨菜被拔取时不同时刻受到的静摩擦力、弹性恢复力、动摩擦力,建立拔取榨菜的动力学模型。为深入分析拔取装置对榨菜的作用情况,进一步优化装置关键参数,在SolidWorks中建立该装置的三维模型,简化后导入ADAMS软件中进行仿真。在综合分析榨菜被拔取的受力点和受力大小等实际情况后,采用衬套力Bushing模拟非刚体菜球与根部之间的柔性连接,构建榨菜与联合收获机拔取装置的刚柔耦合模型。选择拔取辊开口间距、拔取辊转速、行驶速度为试验因素,以拔取力为试验指标,进行拔取过程性能仿真试验,揭示不同作业参数对拔取装置拔取力的影响规律。从仿真试验结果的曲线可知,拔取辊的开口间距、拔取辊转速与拔取力无明显的线性关系,拔取力的稳定性随着开口间距和机具行驶速度的增大而降低;拔取装置的工作效率随着开口间距的增大而降低,与拔取辊转速无关。试验结果极差分析表明,拔取装置的最优工作参数组合为拔取辊开口间距45 mm、拔取辊转速120 r/min、行驶速度1.0 km/h,此时拔取力最大,最值为487.2 N,研究结果为榨菜联合收获机的设计与优化提供了理论支撑。

关键词:榨菜联合收获机;拔取装置;刚柔耦合模型;动力学仿真分析

中图分类号:S23 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)02-0088-09

周冉, 宋志禹, 金月, 蒋清海. 基于ADAMS的榨菜联合收获机拔取装置动力学仿真分析[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(2): 88-96

ZHOU Ran, SONG Zhiyu, JIN Yue, JIANG Qinghai. Simulation analysis of mustard combine harvester extraction device based on ADAMS [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(2): 88-96

0 引言

榨菜又名青菜头,作为我国特有的一种蔬菜,主要种植在浙江、重庆、四川等地,据统计,2023年全国榨菜种植面积稳定在200 khm^{2}以上,全年产值达200亿元,是重要的经济作物之一[1-3]。目前,由于不同品种的榨菜形态差异大、根部离地高度不一等问题,尚无成熟的榨菜收获装备,所以榨菜收获作业还停留在人工采收阶段,作业效率低,严重限制榨菜产业的现代化发展[4]。

近年来,我国科研人员开展大量榨菜收获技术与装备的研发工作。冯伟等[5]设计了一种榨菜收获机割台,可进行切叶、切根、排叶、输送等作业,并通过正交试验得到该割台最佳的收获参数。黎奎良等[6]设计出一款榨菜收获机,具有自动对行、电动切割及倒铺功能。张涛等[7]设计出一款具有柔性夹持功能的榨菜收获机,满足了西南地区榨菜的农艺技术要求。金月等[8]设计出一款宽割幅可同时收获4行的榨菜收获机,并通过试验得出,所设计的独立仿形割台、除叶装置等,有助于提高榨菜的收获效率。薛向磊等[9]提出一种V形滑切割刀(单刃口),并通过优化试验确定该机的最佳工作参数,满足了榨菜收获需要同时打叶和切根的要求。向旺等[10]针对榨菜苗龄初期存在的缩短茎设计了一款榨菜收获机的滑切刀,并通过优化得出了有效的作业参数。

上述研究多款榨菜收获机多采用原地切割的方

收稿日期:2024-06-26 修回日期:2024-11-03

基金项目:江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(研究开发类项目)(NJ2023-08);余姚市科技计划项目(JHNS20210305);中国农业科学院创新工程果蔬茶收获技术装备创新团队

第一作者:周冉,男,1995年出生,江苏沭阳人,硕士,助理工程师;研究方向为果蔬茶收获技术与装备。E-mail:zr1796948428@163.com

*通信作者:金月,女,1988年出生,吉林吉林人,硕士,助理研究员;研究方向为蔬菜生产技术与装备。E-mail:sallymoonjin@sina.cn

式，存在收获有残留、菜球损伤大等问题。加之榨菜茎叶脆弱易断无法拔拽，因此，本研究采用拔取收获的方式，设计了一种针对菜球进行拔取的榨菜联合收获机，以拔取装置和榨菜为研究对象，分析榨菜被拔取时的受力情况，并建立榨菜联合收获机拔取装置与菜球的刚柔耦合模型，开展了关于拔取装置的作业参数对拔取力影响的动力学仿真试验。

1　整机结构及工作原理

榨菜联合收获机主要由底盘和割台组成，其中，底盘包括橡胶履带行走机构、动力传动系统、机架、操作及控制系统，割台包括V形圆锥辊拔取装置、带锯切割装置、柔性输送装置、拨禾装置等，如图1所示。整机由汽油发电机作为动力来源，割台所包含的各个装置均采用独立的电机进行驱动与控制，割台整体采用电动推杆实现与地面倾角的调节[11-12]。

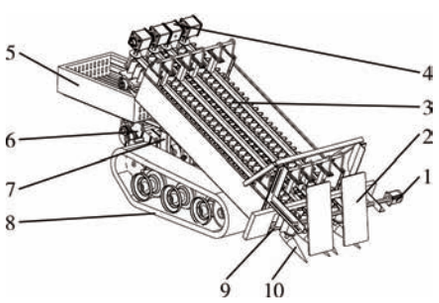


图1　榨菜联合收获机整机示意

Figure 1　Schematic diagram of the whole machine of the mustard combine harvester

1. 拨禾驱动电机　2. 拨禾装置　3. 柔性输送装置　4. 传动系统　5. 收集筐　6. 动力系统　7. 机架　8. 履带行走机构　9. 带锯切割装置　10. V形拔取装置

榨菜联合收获机作业过程与工作原理：根据当前地块的榨菜生长状态、种植农艺，调整拨禾装置位置、拔取装置开口间距、割台高度等，驶入榨菜垄后调整榨菜联合收获机位置，启动各个装置，随着榨菜联合收获机的匀速行进，联合收获机开始作业，榨菜依次进入高速反向旋转的V形锥辊，在拨禾装置的作用下，菜球经过切割装置被切去叶和根，紧接着被喂入输送装置，最后落入收集筐中，完成收获。其中，拔取装置的工作原理是：V形拔取辊与榨菜垄准确对行，且保持拔取辊前端锥部母线贴地，菜球可准确喂入两拔取辊之间，菜球进入V形锥辊后，同时整机匀速前进，菜球与拔取辊后端圆柱接触后，拔取辊与榨菜球及其根部产生碰撞与摩擦，高速旋转的辊面与榨菜表面接触形成一个摩擦副，此时锥辊会对菜球形成一个向上拔取的力，菜球逐渐被拔取。榨菜联合收获机的主要性能指标和技术参数如表1所示。

表1　主要性能指标和技术参数

Table 1　Main performance indicators and technical parameters

参数	数值
配套动力/kW	4
切割幅宽/mm	620
割台高度调节范围/mm	0～250
履带中心距/mm	450
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 350×1 200×1 100
整机重量/kg	180

2　榨菜联合收获机拔取装置设计与受力分析

2.1　拔取装置设计

根据工作原理可知，拔取装置是榨菜联合收获机的核心关键机构，其主要由拔取辊、万向传动装置和齿轮箱等组成。该装置两拔取辊的开口间距与转速可调，可应用于不同种植农艺与品种。与原地切割的采收方式不同，拔取辊对菜球为摩擦作用，损伤小。

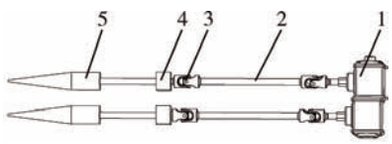


图2　拔取装置的构成

Figure 2　Composition of the extraction device

1. 齿轮箱　2. 传动轴　3. 万向联轴器　4. 拔取辊轴承座　5. 拔取辊

2.2　拔取过程受力

拔取过程受力分析是指拔取装置工作时榨菜的受力情况分析，包括榨菜所受的约束力、位移等。根据榨菜受到拔取装置的作用力，对榨菜受力状态进行分析，明确拔取装置的性能表现，以达到评估设计方案的目的，为实际研发提供改进依据与方向。拔取作业时，由于榨菜生长高度不一、形态差异大，菜球倒伏姿态多样、受力情况不明确，因此，为便于分析，将拔取辊与榨菜抽离出来作为研究对象，如图3所示。拔取辊与榨菜接触，将会产生接触力，接触力分为弹性力与摩擦力。在拔取辊的旋转作用下，此时榨菜所受到的约束力主要为摩擦力，具体分析如下。

拔取装置中拔取辊为旋转体，榨菜理想状态为竖直状态且为非旋转体，因此将榨菜视为悬臂梁，拔取辊为匀速转动，当拔取辊与榨菜球及根部接触时即产生碰撞，此时在辊对榨菜的摩擦力作用下菜球向上运动[13]。榨菜与拔取辊短暂的初次粘接时刻会产生静摩擦力 N_S，榨菜属于弹性体，因此榨菜在摩擦力作用下的弯曲变形会产生弹性恢复力 N_R，当初次粘接结束

时,可得出初始粘接时

$$N_S = N_R \tag{1}$$

式中:N_S——榨菜受到的静摩擦力,N;

N_R——榨菜产生的弹性恢复力,N。

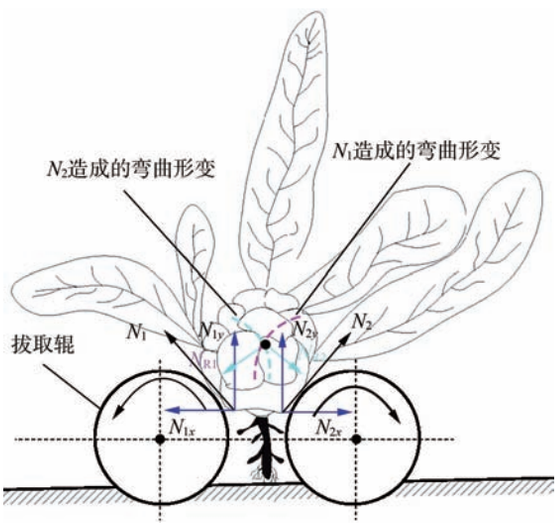


图3 拔取受力示意

Figure 3 Schematic diagram of extraction force

注:收获过程中,拔取辊对榨菜形成静摩擦力N_S、动摩擦力N_K两种摩擦力,图中仅以N_1表示左辊对菜球的摩擦力,N_2表示右辊对菜球的摩擦力,N_{1x}/N_{1y}为N_S/N_K左辊上水平方向和竖直方向的分力,N_{2x}/N_{2y}为N_S/N_K右辊上水平方向和竖直方向的分力,N_R为榨菜的弹性恢复力。

在初次粘接结束后,榨菜相对于拔取辊滑动,相当于悬臂梁在旋转体的带动下滑动,即静摩擦力N_S将转化为动摩擦力N_K,梁在N_K作用下振动,此时梁弯矩的极值发生在动摩擦力点的截面上。

由机械动力学[14]可知,在不考虑梁轴向扭转的情况下,对于等直匀质梁其运动微分方程为

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}=-N_K \tag{2}$$

式中:E——榨菜的弹性模量,MPa;

I——榨菜的惯性矩,mm^4;

y——榨菜轴向的位移,mm;

x——榨菜横截面位置(坐标x);

ρ——榨菜体密度,g/mm^3;

A——榨菜截面面积,mm^2;

t——接触时间,s;

N_K——榨菜受到的动摩擦力,N。

由于N_K是作用在榨菜接触点(梁端点)的集中力,得到菜球在动摩擦力N_K作用下的运动方程为

$$Y(x,t)=\sum_{j=1}^{\infty}Y_j(x)\frac{Y_j(l)}{\omega_j^2}\left[(N_K-N_S)\cos\omega_j(t-t_a)-N_K\right] \tag{3}$$

式中:$Y(x,t)$——榨菜轴线的横向位移,mm;

$Y_j(x)$、$Y_j(l)$——榨菜x处与主轴对应第j阶固有频率ω_j的两个主振型。

因此,榨菜与拔取装置接触部位的受力状况为:榨菜先受到静摩擦力发生弯曲,到t_a时刻,静摩擦力N_S等于榨菜弯曲变形产生的弹性恢复力N_R,初始粘滑期结束;当榨菜处于初始位移下的固有振动状态,此时N_S转换为N_K;当振动位移达到最大值时,即到t_1时刻,动摩擦力又转变为静摩擦力,榨菜在拔取辊的作用下再次运动到初次碰撞时的位置,到达t_2时刻后,将会重复$t>t_a$的运动,直至拔取。

上述分析是拔取辊与榨菜接触微小的一段,对于榨菜其余部位,受力情况基本一致。各时刻受力情况见式(4)。

$$F(x,t)=\begin{cases}-N_S, 0\leqslant t\leqslant t_a\\ -N_K, t_a\leqslant t\leqslant t_1\\ -N_S, t_1\leqslant t\leqslant t_2\end{cases} \tag{4}$$

式中:$F(x,t)$——榨菜端点所受的作用力,N。

基于上述受力分析可知,拔取装置与榨菜之间产生的摩擦力即为拔取力。因此,下文优化设计与试验以其值为主要技术指标。

3 仿真模型的建立

由于拔取装置的结构参数影响榨菜球是否能够顺利拔取,影响菜球能否顺利进入切割装置和夹持输送装置,最终影响菜球切割质量的好坏和机收损失率的高低,故必须对拔取装置进行性能评估与验证。因为ADAMS软件不仅能进行拔取装置模拟试验,而且可以高效地实现高阶微分方程的数值计算,加之试验验证成本高、周期长,故采用ADAMS对榨菜联合收获机拔取装置进行动力学仿真。

3.1 榨菜及联合收获机仿真模型的建立

采用SolidWorks按1:1的比例建立榨菜(菜球、菜根)和榨菜联合收获机的仿真模型。由于不同品种的榨菜种植农艺、生长特性和尺寸等差异较大[15-16],根据对余姚等地榨菜的调研,在对榨菜的瘤径、根长、质量等与机械收获有关的参数统计后,外形尺寸取数据中的较大值并适当圆整,作为榨菜仿真模型(类似椭圆)的基本参数,具体参数见表2。

为降低后续仿真求解的难度、提高求解效率,对榨菜联合收获机整机进行适当简化:删除实体设计中螺栓、垫片和轴键等;由于SolidWorks与ADAMS的建模

都是基于Parasolid内核，为了二者进行数据交换时获得更加准确可靠的模型，在SolidWorks中将整机模型转存为*.X_T格式导入ADAMS。导入ADAMS后，对模型进行重命名、添加材料属性与装配约束等前处理设置[17]，模型如图4所示。

表2　榨菜属性表

Table 2　Attribute table of pickled vegetable

名称	参数	数值
榨菜	菜球茎高/直径/mm	160/120
	根长/mm	80
	模量/MPa	12.28
	泊松比	0.32
	密度/(g·cm^{-3})	0.976

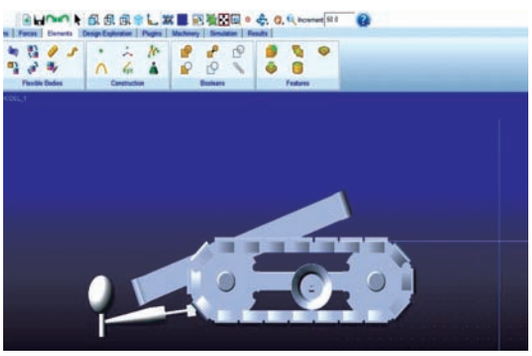


图4　榨菜联合收获机整机仿真模型

Figure 4　Simulation model of the whole machine of the mustard combine harvester

3.2　拔取装置—榨菜刚柔耦合模型建立

根据榨菜联合收获机的作业过程可知，菜球会受到向前推、向后拨、向上拔3个方向的分力，Bushing(衬套力)可以在两物体间施加于6个分量的相互作用力和力矩，更加接近实际。因此，对菜球与底部的柔性连接方式采用Bushing衬套力设置，将菜球与地面建立柔性化连接[18]，衬套力的大小根据菜球的物理特性设定，将榨菜联合收获机的拔取装置设在榨菜与底部柔性化连接的位置，如图5所示。将拔取辊与榨菜的之间的CONTACT设为Solid-Solid(实体与实体)，应用Coulomb力定义摩擦力，利用ADAMS中的冲击函数法(impact)计算榨菜球与左、右拔取辊的摩擦力。

以衬套力失效模拟榨菜被拔取的效果[19]。ADAMS中的传感器可收集仿真过程中的各种数据，菜球受到的摩擦力是由于拔取辊与榨菜接触产生的CONTACT，具体地说，菜球受到的拔取力(摩擦力)即菜球受到Y方向的CONTACT力，因此，对CONTACT力添加1个测力传感器的检测函数，采用测力传感器监测拔取辊接触菜球时Y方向的CONTACT值，决定衬套力是否失效，来模拟菜球是否被拔起的过程。当传感器检测到菜球所受到的CONTACT力达到设置的标准，衬套力失效，完成菜球的收获。衬套力失效后，在ADAMS后处理模块Post Processor中观察菜球在拔取辊接触作用下的运动效果。

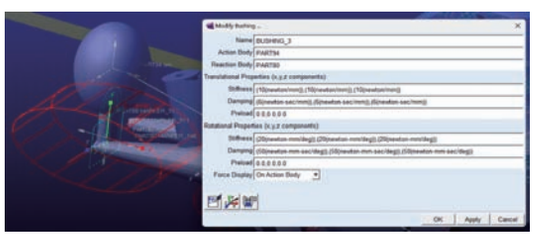


图5　拔取辊与菜球接触示意

Figure 5　Schematic diagram of contact between the extraction roller and the vegetable ball

4　仿真试验

4.1　仿真试验方法

由于影响榨菜联合收获机收获作业的因素较多，对拔取装置影响较大的有拔取辊后端开口间距、拨禾辊转速、行驶速度等因素，为获得最佳的动力学参数组合，以拔取辊后端的开口间距和拔取辊转速、行驶速度为试验变量因素，以最大拔取力为试验指标，设计仿真试验。基于生产率大于0.03 hm^2/h的要求，行驶速度的因素水平则不低于0.8 km/h；根据佟文玉[12]针对甘蓝联合收获机拔取辊转速开展的单因素试验，参照其转速范围选择拔取榨菜联合收获机拔取辊转速的因素水平；为了提高效率且尽可能覆盖参数取值区间，根据正交设计表设计仿真试验方案[20]，仿真时间设为2 s，仿真步数为200。试验因素水平见表3。

表3　仿真试验因素水平表

Table 3　Simulation test factor level table

因素 水平	行驶速度 /(km·h^{-1})	拔取辊转速 /(r·min^{-1})	开口间距 /mm
1	0.8	120	35
2	1.0	150	45
3	1.2	180	55

4.2　仿真试验结果与分析

4.2.1　试验结果统计

基于4.1试验方法，根据典型正交实验表$L_9(3^4)$进行三因素三水平仿真试验。完成试验后，为了便于后续分析，在Post Processor中统计拔取力。正交的组合方式和试验结果如表4所示。

4.2.2　当机具行驶速度为0.8 km/h时，拔取辊不同

转速、开口间距对榨菜收获的影响

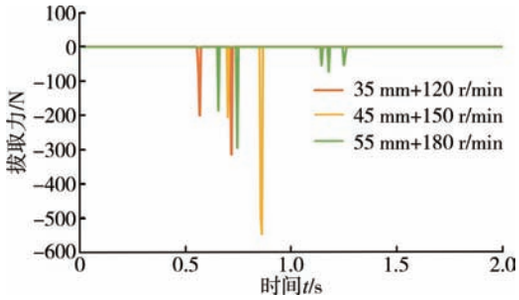


图 6 0.8 km/h 时拔取辊不同参数下的拔取力

Figure 6 Extraction force of the pull-out roller under different parameters at 0.8 km/h

图 6 所示为机具行驶速度 0.8 km/h 时,拔取辊取不同参数组合的拔取力曲线。由仿真试验中的动态变化可知,在拔取辊 35 mm、45 mm、55 mm 3 种开口间距的配置下,菜球分别在 0.77 s、0.79 s、0.87 s 时衬套力失效,即实现菜球被拔取辊拔起。从拔取时间看,间距越小,拔取时间越早。产生的拔取力可见表 4 的试验指标值。从拔取力值看,拔取辊转速为 150 r/min 时,拔取力比 120 r/min 时增长 26 N,但 180 r/min 时又下降 20 N,此时辊的转速与拔取力为非线性关系。从试验曲线看,拔取力出现更高的波峰值,这是菜球脱离衬套力约束后产生的碰撞,即菜球被拔取后的运动过程中,菜球被拔取辊冲击产生的瞬时力,因此波峰值大。从瞬时冲击来看,拔取辊开口间距为 55 mm、转速 180 r/min,波峰值最小,此时对榨菜球的破坏最小,有利于降低机械收获的破损率。

图 7 为机具行驶速度 0.8 km/h 时,拔取辊取不同参数组合的质心运动曲线。从图中曲线可知,当拔取辊开口间距为 35 mm、转速为 120 r/min 时,榨菜质心变化的斜率最大,表明此时榨菜被拔取的运动速度最快,榨菜受到的合力最大;结合曲线和动画可知,0.8~1.2 s 之间为菜球被拔起后,菜球尚未进入切割装置,菜球与拔取辊仍有接触,不断碰撞产生的质心波动表明完整拔取每颗菜球的时间约 0.6 s;而当拔取辊开口间距为 55 mm、转速为 180 r/min 时菜球与拔取辊接触的时间到 1.5 s,持续最久,这是因为此时开口更大,菜球与拔取辊接触面增大,且拔取夹持的力度没有前二者大。

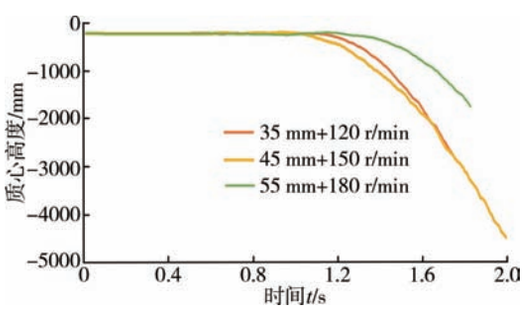


图 7 0.8 km/h 时拔取辊不同参数下的质心变化曲线

Figure 7 Centroid curves of the extraction roller under different parameters at 0.8 km/h

表 4 试验结果

Table 4 Test results

试验序号	A 行驶速度/(km·h⁻¹)	B 拔取辊转速/(r·min⁻¹)	C 开口间距/mm	D 误差项	试验指标/N
1	0.8	120	35	1	200.3
2	0.8	150	45	2	206.2
3	0.8	180	55	3	185.8
4	1.0	120	45	3	487.2
5	1.0	150	55	1	175.9
6	1.0	180	35	2	193.1
7	1.2	120	55	2	204.09
8	1.2	150	35	3	177.8
9	1.2	180	45	1	343.3

4.2.3 当机具行驶速度为 1.0 km/h 时,拔取辊不同转速、开口间距对榨菜收获的影响

图 8 所示为机具行驶速度 1.0 km/h 时,拔取辊取不同参数组合的拔取力曲线。由仿真试验中的动态变化可知,第 2 组的拔取辊开口间距配置分别为 45 mm、55 mm、35 mm,菜球分别在 0.67 s、0.82 s、0.64 s 被拔起并产生拔取力尖峰。值得注意的是,当拔取辊开口间距为 45 mm、转速为 120 r/min 时,拔取辊对菜球产生了 487.2 N 拔取力,是同机具行驶速度条件下另外两种情况的 2.5 倍以上,且为各组参数的最大值,表明开口间距 45 mm、转速为 120 r/min 为试验中的最优组合。当前机具行驶速度下,当开口间距为 55 mm 时,拔

取力曲线尖峰明显增多，尖峰密集且数值相差较大，这是开口间距为55 mm时菜球与拔取辊发生多次碰撞冲击导致的。

图9为机具行驶速度1.0 km/h时，拔取辊取不同参数组合的质心运动曲线。由曲线可知，开口间距为35 mm和45 mm时，二者拔取力基本相等，菜球被拔取后的运动速度相近，因此两种情况的斜率一致性较高。结合动画可知，当机具行驶速度提高1.0 km/h时，菜球进入切割装置的时间提前到1.1 s，拔取夹持接触的时间缩短到0.5 s；而开口间距为55 mm时，菜球进入切割装置的时间1.7 s，接触时间从0.82～1.7 s拔取过程持续了0.9 s，夹持力度略显不足，试验表明：同等机具行驶速度下，拔取辊开口间距为55 mm时的拔取效率会低于开口间距为35 mm、45 mm。

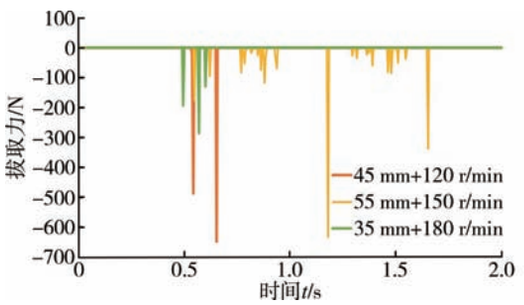


图8　1.0 km/h时拔取辊不同参数下的拔取力

Figure 8　Extraction force of the pull-out roller under different parameters at 1.0 km/h

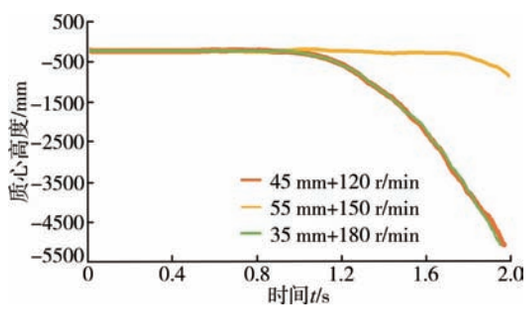


图9　1.0 km/h时拔取辊不同参数下的质心变化曲线

Figure 9　Centroid curves of the extraction roller under different parameters at 1.0 km/h

4.2.4　当机具行驶速度为1.2 km/h时，拔取辊不同转速、开口间距对榨菜收获的影响

图10为机具行驶速度1.2 km/h时，拔取辊取不同参数组合的拔取力曲线。在机具行驶速度为1.2 km/h的情况下，由仿真动画可知，开口间距35 mm、45 mm、55 mm时，菜球被拔起的时间分别提前到了0.6 s、0.62 s、0.64 s。从拔取力值看，当开口间距为45 mm，拔取力为343.3 N，是其他二者的1.5倍以上，且由表4可知，开口间距取45 mm皆为各因素水平中拔取力的最大值，因此，拔取辊后端开口间距45 mm为试验中3个水平中的最优值。拔取力曲线出现更多波峰，表明机具行驶速度较快时，菜球与拔取辊产生更多次碰撞，菜球受到多次瞬时冲击，优点是可以提高收获效率，缺点是将导致菜球受到的拔取力不稳定与增大菜球受损率。

图11为机具行驶速度1.2 km/h时，拔取辊取不同参数组合的质心运动曲线。与前两种机具行驶速度不同的是，当机具行驶速度为1.2 km/h的时候，当拔取辊开口间距为45 mm、转速为180 r/min时，菜球最先被拔取进入切割装置，此时榨菜受到的拔取力最大。当开口角为35 mm、45 mm，拔取辊接触每颗菜球的时间仍在0.6 s左右，但开口间距55 mm时，持续拔取时间接近1 s，与机具行驶速度0.8 km/h、1.0 km/h时类似，开口间距55 mm时拔取效率低于其他两种，同时表明菜球与拔取辊的夹持接触时间长短与开口间距有关，与拔取辊转速无关。

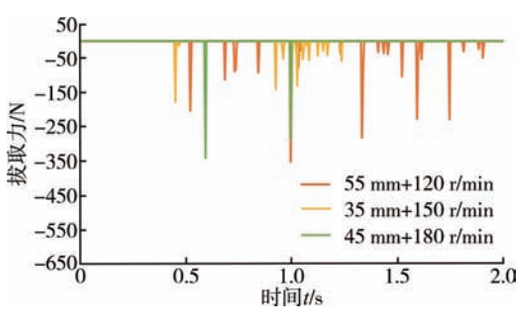


图10　1.2 km/h时拔取辊不同参数下的拔取力

Figure 10　Extraction force of the pull-out roller under different parameters at 1.2 km/h

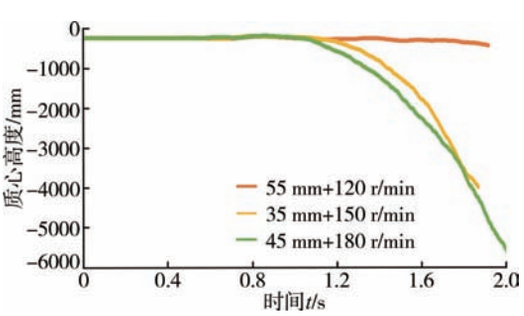


图11　1.2 km/h时拔取辊不同参数下的质心变化曲线

Figure 11　Centroid curves of the extraction roller under different parameters at 1.2 km/h

4.3　影响因素的极差分析

为准确分析试验结果，采用极差分析分别评估3个因素对拔取力的影响（D为空列误差项），通过极差值R确定3个因素对拔取力指标影响的主次关系。试验结果的极差分析如表5所示。

从表5可得，各因素的极差值分别为：87.97、110.56、156.97、82.47，以拔取力为指标，极差越大，表示该因素对拔取力影响越大，因此，3个因素中拔

取辊的开口间距C对拔取力的影响最大,其次是拔取辊的转速B,再次是整机行驶速度A。k值表示各因素不同水平的均值,均值越大,代表在收获过程中该因素的平均水平越高,即拔取辊给榨菜向上的推力越大,由图12也可知,拔取力的最佳组合为$A_2B_1C_2$。

表5 极差分析表

Table 5 Range analysis table

试验序号	A	B	C	D
K_1	592.3	891.6	571.2	719.5
K_2	856.2	559.9	1036.7	603.4
K_3	725.2	722.2	565.8	850.8
k_1	197.43	297.20	190.40	239.83
k_2	285.40	186.63	345.57	201.13
k_3	241.73	240.73	188.60	283.60
极差R	87.97	110.56	156.97	82.47
主次因素	CBA			
最优组合	$A_2B_1C_2$			

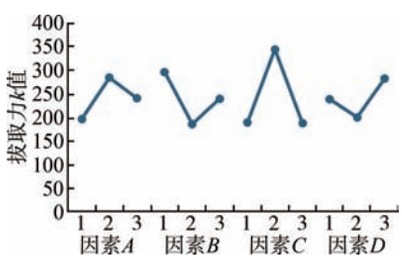


图12 各因素水平对拔取力影响程度示意图

Figure 12 Schematic diagram of the influence of the level of each factor on the extraction force

5 讨论

5.1 本研究的重要发现及创新点

由于现有的榨菜收获机很少使用拔取收获的方式,有对榨菜拔取物理力学特性的试验研究,得出榨菜实际的拔取力、抗拉力、根茎剪切力,但尚未建立榨菜被拔取时的理论模型。本研究根据榨菜被机械拔取时的受力状态,对榨菜球茎与摩擦系数等理想化处理,将榨菜简化成为一个长在地上的悬臂梁模型,构建了榨菜被拔取时的动力学模型。基于榨菜动力学模型的建立,本研究进行仿真试验,根据试验结果可知,榨菜拔取力约为200 N,这与文献[16]中试验获取的榨菜拔取力一致性较高,表明所建立的仿真模型是有效的,仿真结果具有重要的参考意义。

5.2 本研究的局限性及进一步的工作

该理论模型的局限性主要在于考虑的运动过程和受力状况较为理想化,实际田里的榨菜种植农艺、生长高度、生长姿态等情况十分复杂,影响模型的非线性因素很多,后续需要进一步考虑该模型中未考虑的球茎不规则、生长高度不一等因素,以此来完善理论模型,更加准确地反映出实际状况。

本研究的动力学仿真模型是通过BUSHING来模拟菜球与底部的连接,再通过脚本来控制仿真是否继续。这种方法的局限性是菜球与拔取辊的摩擦系数、菜球受到地面的柔性约束都是理想化的,未考虑拔取辊与菜球接触时是否会稳定受力。虽然仿真情况下收获成功,这是因为传感器检测到所设的拔取力,柔性连接即刻失效。但实际收获中连续拔取作业,极短的接触时间可能会出现会漏拔等现象。此外,由于受力暂未考虑拨禾装置的协同工作,模型未建立拨禾部分。因此,在后续的研究中,在仿真模型中有必要考虑拔取辊的表面特征,并对实际收获时的土质状况、根系分布和根长度、瘤茎离地高度、拨禾轮转速与片数、环形带锯切割速度、夹持输送速度等因素展开深入研究。

本研究采取SolidWorks建立三维模型,再导入ADAMS处理后进行仿真,然而每次拔取装置的结构参数修改时,都需要在SolidWorks中修改再重新导入ADAMS处理,工作量很大,因此,后续的研究可在ADAMS/View中参数化建模,在仿真分析中根据需要便捷地改变设计变量,从而提高仿真效率,也减少由不同软件之间的转换给仿真带来的误差。

6 结论

本研究以榨菜联合收获机的拔取装置作为研究对象,阐述了榨菜联合收获机整机结构与联合收获的工作原理,针对拔取装置对菜球作用分析受力状况,对影响拔取力的拔取辊不同转速、开口间距与机具行驶速度等因素开展了研究,主要获得以下结论:

1)基于榨菜被拔取的受力分析,建立了榨菜受力的数学模型,可以更加明确和解释菜球与拔取辊之间的相对运动,有助于预测菜球受力的响应行为;采用SolidWorks和ADAMS软件建立了拔取装置与榨菜的刚柔耦合模型,进行了正交仿真试验,对于拔取装置的设计具有重要参考意义。

2)从拔取辊各组试验的拔取力曲线可知,拔取辊的开口间距、转速与拔取力无明显的线性关系。然而拔取装置的工作效率受开口间距大小的影响较大,开口间距越大,拔取工作效率越低,与拔取辊转速无关。拔取力的稳定性受开口间距和机具行驶速度影响较大,开口间距越大、行驶速度越快,榨菜受力越不稳定。

3)拔取力受到各个因素的影响程度不同,由极差

分析可知，3个因素对拔取力影响程度依次是：开口间距＞转速＞机具行驶速度，从而得到了最佳组合：拔取辊后端开口间距取 45 mm，拔取辊转速 120 r/min，行驶速度取 1.0 km/h，最佳组合的拔取力为 487.2 N。研究得到的拔取装置最佳结构参数的调节范围，有利于提高榨菜联合收获效率和整机性能。

参 考 文 献

[1] 俞国红，郑航，薛向磊，等．榨菜收获装备研究现状与展望[J]．中国农机化学报，2021，42(6)：17－20.

[2] 涪陵榨菜产业2020年产值达120亿元[J]．南方农业，2021，15(1)：15.

[3] 王涛，费焱，楼婷婷，等．浙江省榨菜生产全程机械化技术与装备研究进展[J]．农业开发与装备，2023(10)：33－36.

[4] 王涛，楼婷婷，费焱，等．丘陵山区榨菜收获机械化收获关键技术探讨[J]．中国农机化学报，2023，44(12)：11－16.
WANG Tao，LOU Tingting，FEI Yan，et al. Discussion on key technologies of mechanized harvesting of mustard in hilly and mountainous areas [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(12)：11－16.

[5] 冯伟，李平，张先锋，等．榨菜收获机割台结构设计与试验[J]．南方农业，2018，12(34)：127－129，133.

[6] 黎奎良，叶进，岳高峰，等．青菜头收获机切割装置设计与试验研究[J]．农机化研究，2019，41(12)：140－144.
LI Kuiliang，YE Jin，YUE Gaofeng，et al. Design and experimental study on cutting device of tumorous stem mustard harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(12)：140－144.

[7] 张涛，李英，宋树民，等．基于柔性夹持的青菜头收获机设计与试验[J]．农业机械学报，2020，51(S2)：162－169，190.
ZHANG Tao，LI Ying，SONG Shumin，et al. Design and experiment of tumorous stem mustard harvester based on flexible gripping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(S2)：162－169，190.

[8] 金月，肖宏儒，宋志禹，等．手扶自走式青菜头联合收获机设计与试验[J]．中国农机化学报，2020，41(11)：45－50.
JIN Yue，XIAO Hongru，SONG Zhiyu，et al. Design and experiment of self-propelled tumorous stem mustard combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(11)：45－50.

[9] 薛向磊，郑航，叶云翔，等．定刀滑切式榨菜收获机设计与试验[J]．中国农机化学报，2023，44(6)：48－55.
XUE Xianglei，ZHENG Hang，YE Yunxiang，et al. Design and test of a fixed knife sliding cutting mustard harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，44(6)：48－55.

[10] 向旺，孙玉华，刘凡一，等．青菜头缩短茎滑切刀研制[J]．农业工程学报，2023，39(16)：266－275.
XIANG Wang，SUN Yuhua，LIU Fanyi，et al. Development of the sliding cutter for the shortened stem of tumorous stem mustard [J]. Transactions of the Chinese society of Agricultural Engineering，2023，39 (16)：266－275.

[11] 张健飞，肖宏儒，曹光乔，等．甘蓝收获机割台设计与试验[J]．中国农机化学报，2020，41(11)：39－44.
ZHANG Jianfei，XIAO Hongru，CAO Guangqiao，et al. Design and experiment of cabbage harvester cutting table [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(11)：39－44.

[12] 佟文玉．手扶式甘蓝收获机关键部件设计与试验优化[D]．沈阳：沈阳农业大学，2023.
TONG Wenyu. Design and test optimization of key components of hand-held cabbage harvester [D]. Shenyang：Shenyang Agricultural University，2023.

[13] 马建敏，黄协清，陈天宁．旋转与非旋转体间接触摩擦诱发振动的理论分析[J]．西安交通大学学报，1999(1)：105－109.
MA Jianmin，HUANG Xieqing，CHEN Tianning. Contact friction induced vibration between revolute and non-revolute bodies [J]. Journal of Xi′an Jiaotong University，1999(1)：105－109.

[14] 石端伟．机械动力学[M]．北京：中国电力出版社，2012.

[15] 龚境一．青菜头切割装置的设计与优化研究[D]．重庆：西南大学，2019.
GONG Jingyi. Design and optimization of tumorous stem mustard cutting device [D]. Chongqing：Southwest University，2019.

[16] 薛元鹏，陈俊杰，叶进，等．青菜头物理力学特性研究[J]．西南大学学报(自然科学版)，2017，39(2)：147－152.
XUE Yuanpeng，CHEN Junjie，YE Jin，et al. Study on physical and mechanical properties of tumorous stem mustard [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2017，39(2)：147－152.

[17] 李增刚，李保国．ADAMS入门详解与实例(第3版)[M]．北京：清华大学出版社，2021.

[18] 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.

[19] 杜岳峰，毛恩荣，宋正河，等．基于ADAMS的玉米植株收获过程仿真[J]．农业机械学报，2012，43(S1)：106－111.
DU Yuefeng，MAO Enrong，SONG Zhenghe，et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on

ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 106－111.
[20] 杨家豪, 杜雅刚, 房欣, 等. 甘蓝拔取输送装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(6): 32－36.
YANG Jiahao, DU Yagang, FANG Xin, et al. Design and experimental study of cabbage picking and conveying device [J]. Journal of Chinese Agricultural mechanization, 2024, 45(6): 32－36.

Simulation analysis of mustard combine harvester extraction device based on ADAMS

ZHOU Ran, SONG Zhiyu, JIN Yue*, JIANG Qinghai

(*Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: To address challenges associated with inconsistent lodging degree and the irregular corm size during the harvest of tumorous stem mustard, which is difficult to determine the optimal harvesting forces, a specialized combine harvester was designed based on the special growth traits of this crop. An innovative harvesting methodology, involving initial pulling followed by root cutting, was adopted, and the dynamic simulation analysis of the key pulling device was carried out. Based on the analysis of the harvest process of mustard tuber and its stress state, the interaction force between the V-shaped cone roller of the extraction device and the mustard tuber was studied in detail. Static friction, elastic restoring force, and dynamic friction force at different stages of the plucking process were mathematically derived, so as to establish the dynamic model for corm extraction. To comprehensively analyze the interaction between the extraction device and the mustard tuber, and further optimize the key parameters of the device, a three-dimensional model of the mechanism was established using SolidWorks, subsequently simplified and imported into ADAMS software for dynamic simulation. Considering the application points and magnitudes of forces experienced by the mustard corm during extraction, a bushing force element was employed in simulate to represent the flexible connection between the tuber (modeled as a non-rigid body) and its root. This approach enabled the construction of a rigid-flexible coupling model representing the interaction between the mustard and the combine harvester′s pulling device. Taking the pull-out force as the primary performance metric, the performance simulation tests of the pull-out process were carried out by selecting the opening spacing of the pull-out roll, the rotation speed of the pull-out roll and the driving speed as the test factors. The influence of different operating parameters on the pull-out force exerted by the pull-out device was elucidated. Analysis of the simulation results indicated no obvious linear relationship between the opening spacing of the pulling roller, the rotation speed and the extraction force. Furthermore, the stability of the extraction force was observed to decreases with the increases in both the opening spacing and the driving speed of the machine. The working efficiency of the extraction device decreases with an increase in opening spacing, and was found to be largely independent of the pulling rollers′ rotational speed. The range analysis of the test results identified the optimal working parameter combination of the extraction device as: the opening spacing of the extraction roller 45 mm, the rotation speed of the extraction roller 120 r/min, and the driving speed 1.0 km/h. Under these conditions, the extraction force was the largest, the maximum value 487.2 N. The research results provide theoretical support for the design and optimization of the mustard combine harvester.

Keywords: mustard combine harvester; extraction device; rigid-flexible coupling model; dynamic simulation analysis

Foundation items: Demonstration and Extension Project of Modern Agricultural Machinery Equipment and Technology in Jiangsu Province (Research and development projects) (NJ2023-08); Science and Technology Plan Project of Yuyao City (JHNS20210305); the Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (Fruit, vegetable and tea harvesting technology and equipment innovation team)

First Author: ZHOU Ran, E-mail: zr1796948428@163.com

*__Correspondence Author:__ JIN Yue, E-mail: sallymoonjin@sina.cn