doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.013

白芦笋选择采收机器人关键部件设计与试验

王子诺[1]　张　萍[2]　赵　威[1]　孟庆猛[1]　辛振波[1]　苑　进[1]
(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.山东农业大学信息科学与工程学院,泰安 271018)

摘要:针对白芦笋采收劳动强度大、作业效率低等问题,设计了一种白芦笋采收机器人。根据白芦笋的种植和采收特点,对白芦笋整机结构和控制系统进行了研究;分析了白芦笋采收的主要动作流程,确定白芦笋采收末端执行器的主要结构和核心设计参数,建立了白芦笋采收 MBD-DEM 复合的离散元运动联合仿真模型,校验设计参数合理性。仿真试验表明,末端执行器下插动作所需推力为 580.2 N,土中横刀动作所需推力为 44.2 N;以下刀位置倍数、切割距离倍数和末端执行器距垄面高度为指标进行三因素三水平的正交试验,最优采收参数组合为:下刀位置倍数 1.2、切割距离倍数 1.2、末端执行器距垄面高度 5 cm;大田采收试验表明,实际笋芽识别成功率为 90.2%,平均检测时间为 23 ms,成功识别笋芽的平均采收成功率为 92.7%,平均单次定位时间 1.7 s,平均单次采收动作时间 3.2 s;芦笋损伤率为 4.3%。

关键词:白芦笋;选择性采收;末端执行器;MBD-DEM 耦合仿真
中图分类号:TP242.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0166-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Key Components for Selective White Asparagus Harvesting Robot

Wang Zinuo[1]　Zhang Ping[2]　Zhao Wei[1]　Meng Qingmeng[1]　Xin Zhenbo[1]　Yuan Jin[1]
(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*
2. *College of Information Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*)

Abstract: A white asparagus harvesting robot was designed to address the high labor intensity and low operational efficiency associated with manual harvesting. Based on the planting and harvesting characteristics of white asparagus, the overall structure and control system of the robot were investigated. The primary motion sequence of the harvesting process was analyzed to determine the main structure and core design parameters of the end-effector. The robot was configured for continuous ridge-straddling operation, in which visual detection, lateral positioning, blade insertion, in-soil cutting, lifting, and discharge were coordinated without stopping. An MBD-DEM (Multi-body dynamics and discrete element method) coupled simulation model was established to verify the rationality of the design parameters. Simulation results indicated that the thrust required for the end-effector's insertion was 580.2 N, and the thrust required for the horizontal cutting action in the soil was 44.2 N. A three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted using the cutting position multiplier, cutting distance multiplier, and the height of the end-effector relative to the ridge surface as indices. The results showed that the optimal harvesting parameter combination was a cutting position multiplier of 1.2, a cutting distance multiplier of 1.2, and a height of 5 cm. Field experiments demonstrated an actual spear recognition success rate of 90.2% with an average detection time of 23 ms. For successfully recognized spears, the harvesting success rate was 92.7%, with an average single positioning time of 1.7 s and an average single harvesting cycle time of 3.2 s. The asparagus damage rate was found to be 4.3%. These results provide a basis for optimizing selective harvesting equipment for white asparagus grown on high ridges under field conditions.

Key words: white asparagus; selective harvesting; end-effector; MBD-DEM coupled simulation

收稿日期:2026-04-01　修回日期:2026-04-10
基金项目:国家自然科学基金项目(52275262)和山东省自然科学基金项目(ZR2025QC290)
作者简介:王子诺(2000—),男,博士生,主要从事智能农业装备研究,E-mail:wznsdau@qq.com
通信作者:苑进(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail:jyuan@sdau.edu.cn

0　引言

芦笋(石刁柏)，属多年生宿根草本植物，可食用部位为嫩茎，是一种药食兼用的高档蔬菜[1-5]。芦笋已成为我国具有国际竞争优势的新兴产业，种植面积约 1×10^5 hm^2，占世界芦笋种植面积的 40%，产量约占世界芦笋总产量的 50%。芦笋是我国加工出口贸易额最大的单一蔬菜品种，年产值超 100 亿元[6]。

国际上白芦笋种植的收获环节仍以人工为主，约占生产成本的 50%，是制约芦笋全程机械化生产的关键卡点，亟需自动采收设备，实现白芦笋采收环节的机械化作业[7]。目前全球范围内有关白芦笋的机械化采收尚处于探索阶段，刘雪美等[8]设计了一种白芦笋选择性收获机的末端执行器，通过入土、剪切、夹持、拔取等动作完成对白芦笋采收，其控制方式复杂，定位精度要求高，需要走停采模式作业，难以达到较高采收效率；由 AvL Motion 公司研发的 COMPACT S1560 自主采收机器人[9]，其体积较大，成本极高，无法适用于国内种植农艺特点及小田块分散的现状。

针对上述问题，本文设计白芦笋采收机器人整机结构，并对末端执行器设计参数进行优化，通过室内试验和正交试验优化采收作业的关键参数，最后通过大田试验验证机器人采收效果。

1　白芦笋种植模式与生物特性

1.1　白芦笋种植模式

针对白芦笋种植主流的露地培土栽培模式(图 1a)[10-11]，白芦笋采收季到来之前起垄，垄高(H_0)会随着白芦笋种植年限的增加而增高，最高约为 80 cm；白芦笋笋田垄面宽度(W_u)也会随着种植年限增加而加宽，最宽不会超过 80 cm；白芦笋种植土垄垄底宽度(W_d)约为 120 cm；笋田垄距(W_l)为 180 ~ 200 cm。

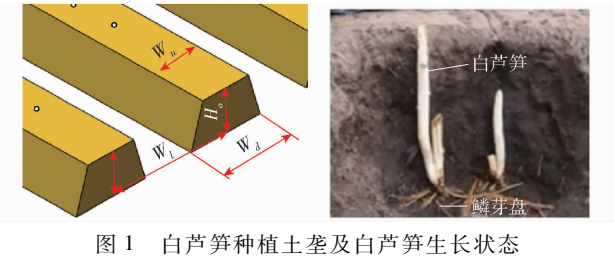


图 1　白芦笋种植土垄及白芦笋生长状态

Fig. 1　Soil ridges and growth status of white asparagus

1.2　白芦笋生物学特征

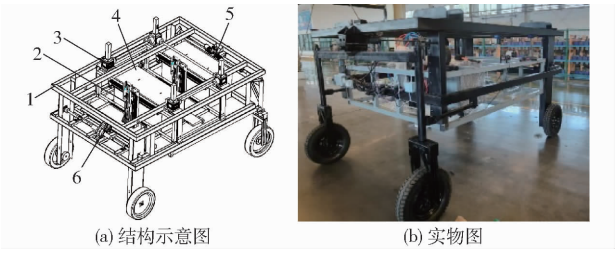
白芦笋笋芽出土后需及时采收，否则光照影响易变紫，导致商品性下降。白芦笋在采收季不断出笋，未出土笋芽埋藏于土中，其生长位置难以预知(图 1b)。因此，白芦笋机械化采收必须依赖目标识别与选择性采收相结合的方式。

白芦笋种植通常采用较高土垄，实际采收时主要收获垄面以下约 20 cm 范围内的嫩茎，再向下部位因木质素含量较高、食用品质较差，通常不作为商品采收对象。由于其采收切割部位位于土下，且不同芦笋个体在形态上存在差异，需预留合理的切割距离。上述因素共同决定了白芦笋的适宜采收方式应为“土中行刀切割拔出”[9]。

2　关键部件设计与选型

2.1　白芦笋采摘机器人主要结构

白芦笋采收机器人由高地隙行走底盘、升降机构、末端执行器、识别暗箱等关键部件组成(图 2a)；高地隙底盘上方安装有升降机构，升降机构吊装采摘单元框架，采摘单元框架安装的末端执行器和视觉识别暗箱可随升降机构移动且上下浮动，末端执行器可在采摘单元上左右横移。



(a) 结构示意图　　(b) 实物图

图 2　白芦笋采收机器人主要结构

Fig. 2　White asparagus harvesting robot

1. 机器主框架　2. 末端执行器　3. 升降装置　4. 识别暗箱　5. 转向机　6. 动力电机

其主要工作流程主要分为 4 个阶段：

(1)进垄阶段：机器人跨骑在白芦笋种植垄上，升降装置调节采摘单元框架，使其距垄面约 5 cm。

(2)识别阶段：沿垄连续行进，视觉系统实时识别和定位垄面成熟笋芽，并上传至控制系统。

(3)定位阶段：系统将笋芽位置坐标转换为末端执行器入土坐标，驱动末端执行器采收位置。

(4)采收阶段：依据行走速度计算下刀位置，驱动末端执行器挖取白芦笋，完成单次采收。

在上述作业过程中，车辆始终处于运动状态，无需停车即可同步完成识别、定位与采收等动作。白芦笋采收机器人的主要技术参数如表 1 所示。

2.2　控制系统设计

针对白芦笋采收机器人的作业场景与连续运动采收特点，本研究构建了由感知模块、控制模块、末端执行模块和底盘控制模块组成的白芦笋采收机器人控制系统，如图3所示。控制模块为整机运行核

表 1 白芦笋采摘机器人主要技术参数

Tab. 1 Specifications of white asparagus harvesting robot

参数	数值
整机配套功率/W	4 800
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 900×2 200×2 150
作业垄面高度范围/mm	600~800
作业垄面宽度范围/mm	0~800
输入气压/MPa	0.6~0.8
采摘行驶速度/(m·s^{-1})	0.1~0.5

心,由上位机、下位机构成,主要负责采集信息的接收与处理,以及对执行单元各部件运动过程的协调控制;感知模块主要包括深度相机、惯导传感器、光电传感器和光电编码器等,用于获取机器人运动状态信息及采收目标图像信息;末端执行模块主要包括电磁阀、直线模组电机、升降电机等部件,用于实现机器人关键运动机构的动作控制;底盘控制模块主要包括遥控器、信号接收机、VCU 和行走驱动电机等部件,用于反馈车辆运动控制状态。

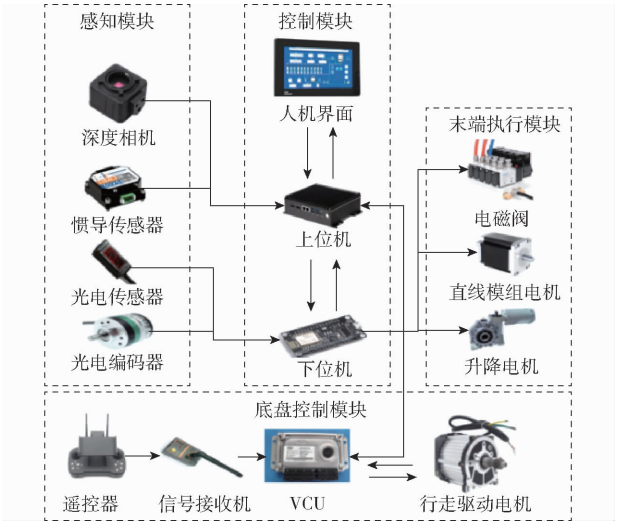


图 3 机器人主要功能部件交互关系示意图

Fig. 3 Interaction diagram of robot's main functional components

2.3 末端执行器设计

2.3.1 整体结构设计

设计的白芦笋采收末端执行器主要由安装底板、下刀气缸、横刀气缸、斜刀气缸、移动底座、立刀、拉切刀连杆和拉切刀组成(图 4a)。其中下刀气缸固定在安装底板一侧,移动底座安装下刀气缸的滑块上,背面通过直线导轨安装在安装底板上,可随着下刀气缸的动作上下移动;立刀安装在移动底座的下方,左右两个立刀之间夹持着拉切刀,拉切刀可以立刀刀头为圆心旋转;横刀气缸安装在移动底座的正面,斜刀气缸安装在横刀气缸的正面,可随横刀气缸移动,斜刀气缸动作部分安装延长固定板,可随着斜刀气缸和横刀气缸运动,拉切刀连杆连接延长固定板,两个气缸动作控制拉切刀旋转角度。

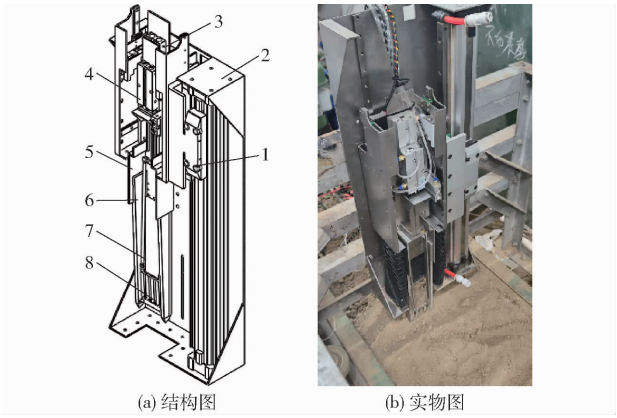
白芦笋末端执行器采收流程分为 4 个步骤:

(1)下刀:末端执行器移动至坐标位置后进入等候状态,待到距离目标白芦笋 10 cm 左右时下刀气缸动作,带动移动部件下插进入土壤。

(2)拉切:下插进入土壤一定深度后,横刀气缸动作,拉切刀在土壤流动和气缸推动的共同作用下逐渐旋转至垂直于立刀的位置。

(3)采收:拉切刀处于横向位置后,随着车辆继续前进,拉切刀割断白芦笋,下刀气缸向上抬起,将白芦笋提出土垄。

(4)斜刀收刀:白芦笋提出土垄后,斜刀气缸伸出带动拉切刀向下倾斜,白芦笋和切刀表面土壤倾倒至垄面,随后横刀气缸和斜刀气缸一并收回,回到初始状态,完成一个采收流程。



(a) 结构图 (b) 实物图

图 4 末端执行器主要结构

Fig. 4 Main structure of end-effector

1. 下刀气缸 2. 安装底板 3. 横刀气缸 4. 斜刀气缸 5. 移动底座 6. 立刀 7. 拉切刀连杆 8. 拉切刀

2.3.2 芦笋切刀部件设计

末端执行器采收流程中,切割白芦笋的主要部件为拉切刀,切割之前拉切刀会在土中由直立向下的状态经由土壤流动和气缸推动的双重作用下旋转至平行于垄面的状态。

此过程中,初始状态下拉切刀连杆与拉切刀处于同一直线,气缸推动拉切刀连杆移动通过两个柔性关节转换为拉切刀的转动,拉切刀进入切割状态时与竖直方向保持垂直,其变形过程如图 5a 所示。根据其横刀时几何关系(图 5b)可得

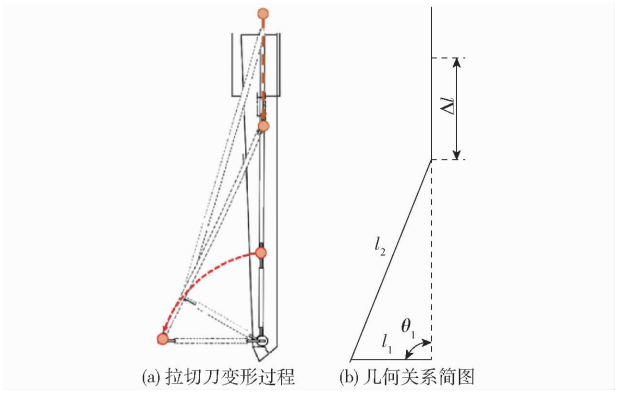
$$l_1 + l_2 - \Delta l = \sqrt{l_2^2 - l_1^2} \tag{1}$$

$$l_2 = \frac{-(\Delta l)^3 + l_1(\Delta l)^2 - 2l_1^3}{2(l_2^2 - (\Delta l)^2)} \tag{2}$$

式中 l_1、l_2——拉切刀和连杆长度,mm

Δl——气缸推动距离,mm

若满足 l_2 取值有效,推导其必要条件为



(a) 拉切刀变形过程　(b) 几何关系简图

图 5　拉切刀横刀过程

Fig. 5　Transverse cutting process of pull-cutting blade

$$0 < l_1 < \Delta l \tag{3}$$

所采摘的白芦笋长度应大于 200 mm，故当进入采收状态时有

$$\sqrt{l_2^2 - l_1^2} \geqslant 200 \tag{4}$$

气缸推动距离与所选气缸行程有关，因布置空间问题，设计安装气缸空间最大支持 100 mm 行程，在本设计中选取最大值 100 mm 作为基准进行计算。

经计算得，l_1 的取值范围为

$$83.3\ \text{mm} < l_1 < 100\ \text{mm} \tag{5}$$

为保证拉切刀在土中变形阻力尽可能小，同时保证不会因变形导致拉切刀无法动作，故最终所设计的拉切刀长度为 85 mm。代入公式(2)得拉切刀连杆长度为 248 mm。

拉切刀在土中行进时，拉切刀连杆和拉切刀同时受力，其主要受阻力情况如图 6 所示。

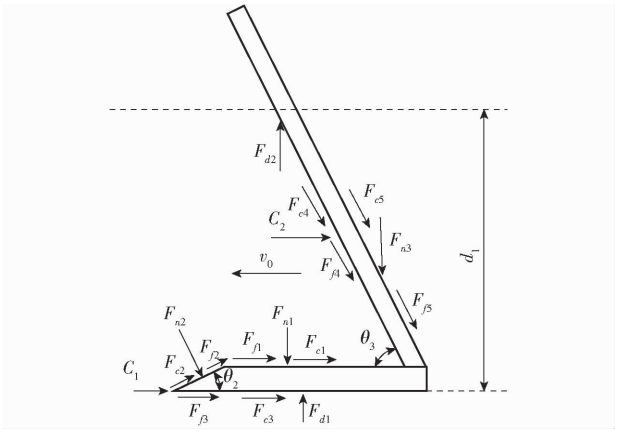


图 6　拉切过程阻力示意图

Fig. 6　Resistance during pull-cutting process

对于拉切刀，其主要阻力 F_{p1} 为

$$F_{p1} = F_{f1} + F_{c1} + (F_{f2} + F_{c2})\cos\theta_2 + F_{f3} + F_{c3} + F_{n2}\sin\theta_2 + C_1 \tag{6}$$

其中

$$F_{f1} = \mu F_{n1} \tag{7}$$

$$F_{f3} = \mu F_{d1} \tag{8}$$

式中　F_{n1}、F_{n2}——上表面和上刀面法向压力，N

F_{c1}、F_{c2}、F_{c3}——拉切刀上表面、上刀面、下刀面土壤粘附力，N

F_{f1}、F_{f2}、F_{f3}——拉切刀上表面、上刀面、下刀面与土壤摩擦力，N

F_{d1}——下刀面土壤支持力，N

C_1——拉切刀前侧土壤内聚力，N

θ_2——拉切刀刃口角度，(°)

μ——拉切刀与土壤间摩擦因数

对于单根拉切刀连杆，其主要阻力 F_{p2} 为

$$F_{p2} = (F_{f4} + F_{c4})\cos\theta_3 + (F_{f5} + F_{c5})\cos\theta_3 + \frac{F_{n3} - F_{d2}}{\tan\theta_3} + C_2 \tag{9}$$

其中

$$F_{f3} = \mu F_{n3}\cos\theta_3 \tag{10}$$

$$F_{f4} = \mu(F_{d2} - C_2\cos\theta_3)\cos\theta_3 \tag{11}$$

式中　F_{f4}、F_{f5}——拉切刀连杆内、外侧土壤摩擦力，N

F_{c4}、F_{c5}——拉切刀连杆内、外侧土壤粘附力，N

F_{n3}、F_{d2}——拉切刀连杆上、下层土壤压力，N

C_2——拉切刀连杆前侧土壤内聚力，N

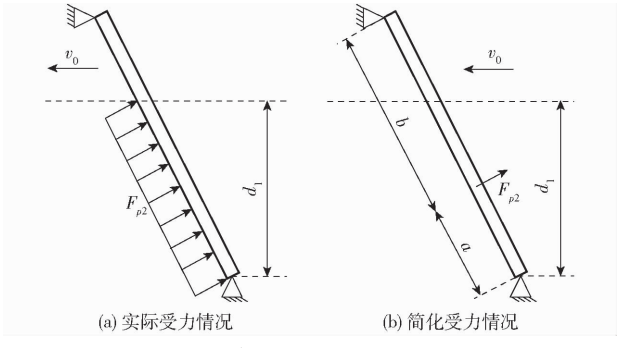
θ_3——拉切刀与拉切刀连杆夹角，(°)

拉切刀行进过程中总阻力 F_p 为

$$F_p = F_{p1} + 2F_{p2} \tag{12}$$

故机器人在行驶过程中的推力应大于此值才可以保证正常采收流程。

如图 7 所示，本文所设计的拉切刀连杆为 2 个圆柱体钢棒，对于其中任意一条连杆皆可以看作是超静定梁受一均布载荷变形的过程。



(a) 实际受力情况　(b) 简化受力情况

图 7　拉切刀连杆受力分析

Fig. 7　Stress analysis of pull-cutting blade linkage

基于以上分析，对于单一拉切刀连杆，在刀具下插至土壤深度 d_1 时，其所受弯矩为

$$M_u = \frac{F_{p2}ab^2}{l_2^2} \tag{13}$$

$$M_d = \frac{F_{p2}a^2b}{l_2^2} \tag{14}$$

$$M_c = \frac{F_{p2}a^2b^2}{l_2^3} \tag{15}$$

$$a=\frac{d_1}{2\cos\theta_3} \tag{16}$$

$$b=l_2-\frac{d_1}{2\cos\theta_3} \tag{17}$$

式中 M_u、M_d——连杆上、下固定端弯矩，N·m

M_c——等效受力点弯矩，N·m

a、b——连杆等效受力点上、下段长度，m

d_1——下刀深度，m

其所受最大应力 $\sigma_{\max}$ 为

$$\sigma_{\max}=\frac{32\max(|M_u|,|M_d|,|M_c|)}{\pi d_c^3} \tag{18}$$

式中 d_c——连杆直径，mm

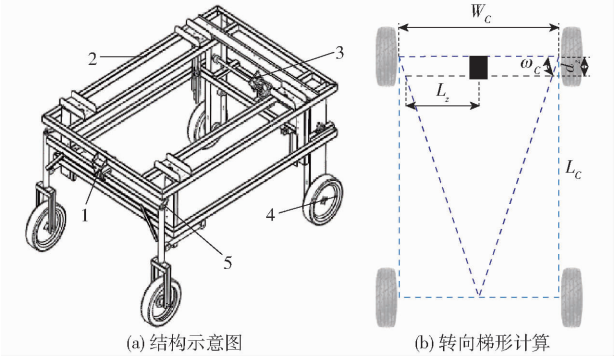
在采收过程中，应保证连杆所受应力小于其屈服强度才可正常完成采收流程，即

$$\sigma_{\max}<k \tag{19}$$

式中 k——连杆屈服强度，MPa

2.4 整机动力系统设计

针对白芦笋种植模式和试验场地的土壤条件，白芦笋采收机器人采用轮式高地隙底盘（图 8a），由机架、悬挂系统、动力变速系统、行走系统和转向系统组成。机架主要由 Q235 钢材焊接而成；悬挂系统采用平衡轴悬架，在车辆前轮连接处加装平衡轴，实现底盘的三点支撑四轮着地，悬架可活动范围为上、下各 20 cm；动力变速系统采用一台 1.8 kW 的低速高扭矩电机搭配变速比 1∶10∶28 的双挡变速箱，可实现较好的能效比；行走系统额外加装 1∶2 轮端减速，可实现轮端更高的扭矩，最高扭矩可达 168 N·m；转向系统采用思锐智能 S602271F 型方向机，额定转向扭矩可达 63.72 N·m。



(a) 结构示意图 (b) 转向梯形计算

图 8 高地隙底盘

Fig. 8 High ground clearance chassis

1. 悬挂系统 2. 机架 3. 动力变速系统 4. 行走系统 5. 转向系统

如图 8b 所示，车辆转向方式采用阿克曼转向，其转向机安装在前轴后方 d_z 处，方向机左右各长度为 L_z 的连杆通过球头连接至转向节臂，对于转向节臂，其安装角度和长度分别为

$$L_b=\frac{d_z}{\cos\omega_C} \tag{20}$$

其中

$$\cos\omega_C=\frac{L_C}{\sqrt{L_C^2+\left(\frac{W_C}{2}\right)^2}} \tag{21}$$

$$L_z=\frac{W_C-\frac{d_z W_C}{L_C}}{2} \tag{22}$$

式中 L_b——转向节臂长度，mm

d_z——方向机与前轴距离，mm

ω_C——转向节臂安装角度，(°)

L_C——前后轴距，mm

W_C——左右轴距，mm

L_z——方向机连杆长度，mm

所设计高地隙底盘前后轴距为 2 642 mm，左右轴距为 1 900 mm，根据以上公式求得所需转向节臂长度为 208 mm、安装角度为 16.87°、方向机连杆长度为 878 mm。

拉切刀变形发生在末端执行器下刀过程中，则从下刀位置到采收位置之间的距离应足够拉切刀完成变形，其下刀位置 d_x 应满足

$$l_1<d_x=v_0t_0 \tag{23}$$

式中 v_0——行进速度，m/s

t_0——下刀时间，s

此时末端执行器切割距离 d_q 为

$$d_q=v_0t_q \tag{24}$$

式中 t_q——切割时间，s

选取机器人行驶速度 0.1 m/s 作为采收作业速度，气缸完全插入土中所需时间为 1 s，此时末端下刀理论位置是位于笋前 10 cm 处。

2.5 升降机构设计

白芦笋采收机器人在作业前需调整采摘单元高度以适应作业垄面，四角吊装升降机构采用蜗杆升降机作为主体升降结构，机器工作时，因地面坑洼及采摘模式特点而存在冲击载荷，取冲击载荷系数为 1.25。吊装的采收单元质量为 600 kg。

升降机提升扭矩为

$$T_t=T_l+T_f \tag{25}$$

其中

$$T_l=\frac{F_0P}{2\pi\eta} \tag{26}$$

$$T_f=\frac{\mu_sF_0d_s}{2} \tag{27}$$

式中 T_t、T_l、T_f——升降机总驱动扭矩、负载扭矩、摩擦扭矩，N·m

F_0——升降机总负载，N

P——升降机丝杆导程，m/r

η——传动效率

μ_s——摩擦因数

d_s——丝杆直径，m

驱动升降机升降的电机功率应满足

$$P_M = \frac{n_m T_t}{9\,550} \tag{28}$$

式中　P_M——电机功率，kW

n_m——电机转速，r/min

取丝杆导程为 6 mm，升降速度为 0.6 m/min。对应的升降机扭矩及电机功率分别为 28.1 N·m 和 1.7 kW。经冲击载荷较核后，选取 35.2 N·m 和 2.2 kW。对应选择升降机型号为 SWL2.5T。

为防止涡轮蜗杆系统失效，在吊装的采摘单元的四角额外加装直线导轨消除冲击载荷影响。假设存在极端情况，机器在转场期间遭受撞击，则机器所受冲击力 F_i 为

$$F_i = \frac{m_0 v_{\max}}{t_i} \tag{29}$$

式中　m_0——机器人自身质量，kg

$v_{\max}$——最大行驶速度，m/s

t_i——冲击时间，s

为防止冲击载荷传导至螺杆，则所选用的直线导轨额定动载荷应大于 F_i，所设计机器质量小于 2 000 kg，当机器遭受撞击，机器由 10 km/h 的行进速度在 0.1 s 之内停止，此时机器所受冲击载荷为 55 600 N，本研究选用 HGR25 系列导轨滑块套装，可满足抗冲击要求。

3　基于 MBD－DEM 的末端执行器仿真

3.1　仿真预处理

基于 MBD－DEM（Multi-body dynamics and discrete element method[8,12-15]）耦合仿真方法，建立末端执行器采收动作动力学模型，模拟白芦笋-土壤-末端执行器之间相互作用过程以验证设计可行性与校验设计参数。

MBD 仿真配置包括末端执行器模型和末端动作规划。为提高仿真速度，对末端执行器模型做简化处理，仅保留关键零部件。取车辆速度为 0.1 m/s，末端执行器于笋前 10 cm 处下刀开始采收，于笋后 10 cm 处完成对芦笋的完全切割并提出垄面，中间各部件动作与前文末端执行器工作流程一致。

本研究取部分工作场景作为仿真场景[16]，建立 300 mm 白芦笋模型用作填充颗粒，选用 Hertz Mindlin with JKR[17] 作为颗粒间的接触模型；仿照白芦笋土垄形状，截取土垄上部高 35 cm、长 80 cm 的梯形土垄填充土壤颗粒，使用 Hertz Mindlin with JKR 作为土壤颗粒间的接触模型。参考前期研究[8,16]，DEM 仿真参数如表 2 所示。使白芦笋与土壤颗粒充分接触，固定白芦笋最下端 5 cm 处模拟坚韧根茎。笋土复合离散元模型如图 9 所示。

表 2　EDEM 仿真参数

Tab.2　EDEM simulation parameters

参数	数值
土壤颗粒泊松比	0.4
土壤颗粒剪切模量/MPa	1.08
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	1 866
末端执行器材料密度/(kg·m^{-3})	7 800
白芦笋颗粒泊松比	0.3
白芦笋颗粒密度/(kg·m^{-3})	980
白芦笋颗粒剪切模量/MPa	0.163
土壤和土壤间恢复系数	0.25
土壤与土壤间静摩擦因数	0.4
土壤与土壤间滚动摩擦因数	0.3
土壤与末端执行器间恢复系数	0.3
土壤与末端执行器间静摩擦因数	0.5
土壤与末端执行器间滚动摩擦因数	0.35
白芦笋颗粒间恢复系数	0.55
白芦笋颗粒间静摩擦因数	1.7
白芦笋颗粒间滚动摩擦因数	0.6
白芦笋颗粒与末端执行器间恢复系数	0.4
白芦笋颗粒与末端执行器间静摩擦因数	0.5
白芦笋颗粒与末端执行器间滚动摩擦因数	0.45

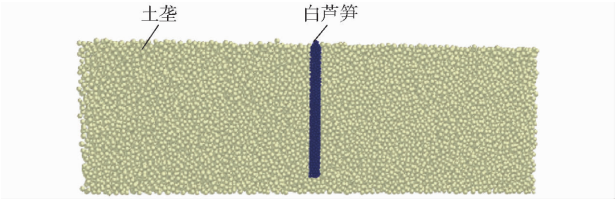


图 9　DEM 仿真分析模型

Fig.9　DEM simulation model

在动力学仿真软件中导出与白芦笋及土壤颗粒有接触的几何体并将其耦合，最终可得白芦笋-土壤-末端执行器的 MBD－DEM 仿真分析模型，如图 10 所示；仿真过程中设置时间步长为自动时间步长的 29%，仿真完成总时间为 2.5 s，保存时间间隔为 0.01 s[18]，网格尺寸为最小颗粒的 3 倍（9 mm），仿真过程使用 GPU 加速，处理器：Intel ® Core i7 12700k CPU @3.6 GHz，GPU：RTX 2080Ti。

3.2　仿真运行结果

运行此仿真模型，运用 EDEM 后处理模块对仿真过程进行分析，采收过程仿真结果如图 11 所示。

仿真过程表明，采收末端执行器可以通过预定动作完成白芦笋的采收任务。拉切刀在土壤流动和

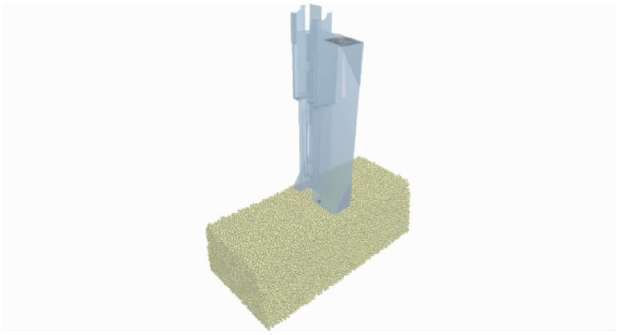


图 10 MBD－DEM 仿真分析模型

Fig. 10 MBD－DEM simulation model

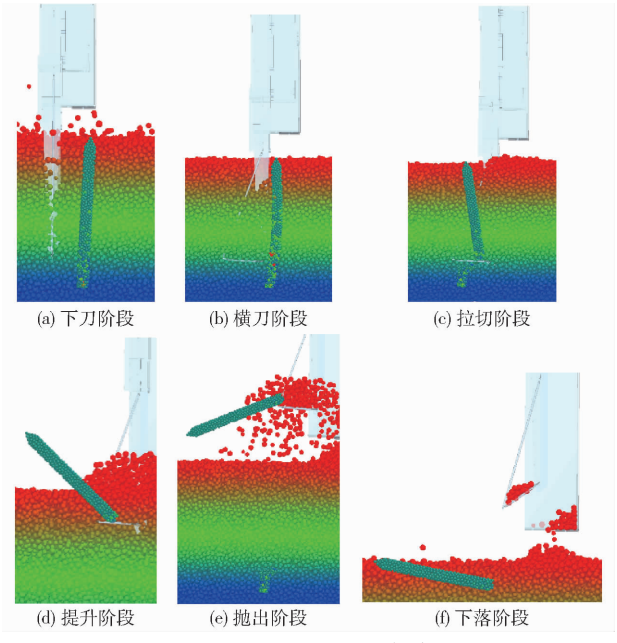


图 11 MBD－DEM 采收仿真过程

Fig. 11 MBD－DEM harvest simulation

气缸推力的作用下由垂直于垄面变形至平行于垄面,运动轨迹与设计相符。根据仿真数据(图 12),在采收流程中,末端执行器单侧立刀最大受力为 176.603 N;拉切刀最大受力为 227.041 N;综合最大受力为 580.2 N,故所选下刀气缸在标准工作气压条件下下插力应大于 580.2 N;在拉切刀变形过程中,横刀气缸所受最大力为 44.169 4 N;故所选横刀气缸在标准工作气压下所提供的推力应大于此值才可正常完成预定工作流程。

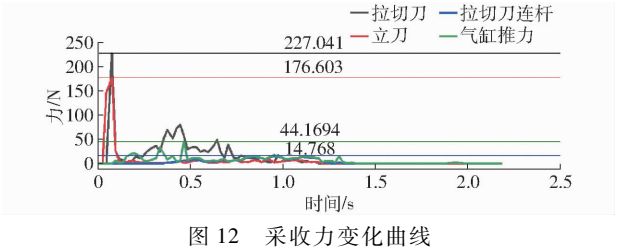


图 12 采收力变化曲线

Fig. 12 Harvesting force variation curves

选取下刀气缸为 OSP－40 无杆气缸,其在标准工作压力(0.6 MPa)下可实现 754 N 的下插力,横刀气缸和斜刀气缸分别选用 TN10－100 和 TN10－50 双杆气缸,两者其在标准工作压力下可实现 74.3 N 推力。

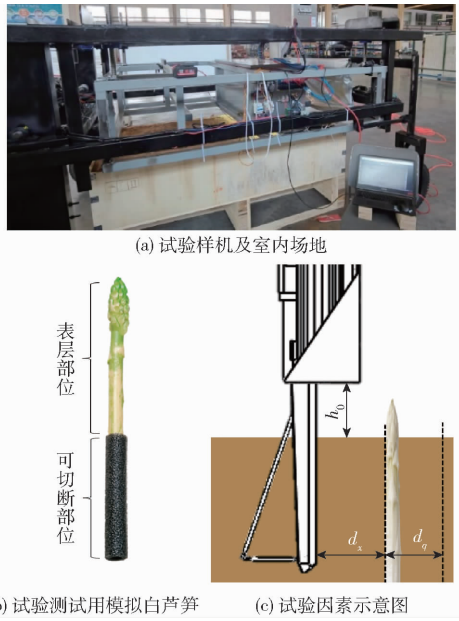
在采收过程中,拉切刀下插至土中 200 mm 位置,拉切刀连杆所受阻力最大值为 14.768 N;代入公式(18)可得,拉切刀连杆直径应大于 2.94 mm,在本研究中取值 5 mm,此时拉切刀连杆所受最大应力为 41.82 MPa,小于屈服强度,在运动过程中拉切刀连杆不会因产生塑性变形而失效。

4 作业参数试验优化

为验证仿真试验准确性和最佳的采收参数组合,设计了白芦笋采收室内模拟试验。

4.1 试验方法与方案

试验样机和场地如图 13a 所示,在室内布置 2 m×1 m×0.8 m 土槽,白芦笋采收机样机跨在土槽两侧,土槽内人工安置模拟白芦笋(图 13b),模拟白芦笋上段采用仿真芦笋,下段采用泡沫棒模拟被拉切刀切断部分。



(a) 试验样机及室内场地

(b) 试验测试用模拟白芦笋 (c) 试验因素示意图

图 13 室内采收试验

Fig. 13 Indoor harvesting experiment

如图 13c 所示,白芦笋采收机器人下刀位置、切割距离由机器人行驶速度决定,其理论值为 d_x 和 d_q,由于土壤扰动和芦笋切口摩擦力的影响,芦笋在土中最佳下刀位置和提升位置都可能会产生变化。正交试验[17,19－24]中下刀位置选择 d_x 倍数 1.0、1.2 和 1.5 共 3 个水平;切割距离选 d_q 倍数 1.0、1.2 和 1.5 共 3 个水平;末端执行器距垄面高度选择 5、7、9 cm 3 个水平,见表 3。

4.2 评价指标

各个试验参数分别进行 50 次芦笋的模拟采收,

表 3　试验因素水平

Tab. 3　Experimental factors and levels

水平	因素		
	下刀位置倍数	切割距离倍数	末端执行器距垄面高度/cm
1	1.0	1.0	5
2	1.2	1.2	7
3	1.5	1.5	9

芦笋成功由土下提至土槽表面记作采收成功，采收成功率指采收成功芦笋数量与总采收数量的百分比，其计算公式为

$$C = \frac{N_s}{N_T} \times 100\% \tag{30}$$

式中　C——采收成功率，%

N_s——成功采收芦笋数量

N_T——总采收芦笋数量

4.3　试验结果及分析

正交试验方案、结果及极差分析结果如表 4 所示（X、Y、Z 为因素水平值）。切割距离对采收效果影响最明显（$F = 33.0$，$P = 0.02 < 0.05$），拉切刀切割白芦笋后再向前多行动一部分距离使白芦笋位于拉切刀中段时采收成功率增加，切割距离过大可能会导致白芦笋超出拉切刀范围导致切割后无法提出芦笋；其次，末端执行器距离垄面高度影响次之（$F = 27.4$，$P = 0.03 < 0.05$），随着末端执行器与垄面距离的降低，采收效果变好，这可能是因为切割位置变高后，表层土壤较少流动性较强，对芦笋切割部分的土壤扰动变强从而导致切割位置越高采收效果越差；下刀位置影响最小（$F = 4.5$，$P = 0.18 > 0.05$），随下刀距离增加，采收效果变好，这可能是因为下刀距离增加后拉切刀变形所引起的芦笋附近土壤扰动变小导致。采收效果最佳组合为 $X_2Y_2Z_1$，下刀位置倍数选取 1.2、切割距离倍数选取 1.2、末端执行器距垄面高度选 5 cm。

表 4　正交试验设计与结果

Tab. 4　Orthogonal experimental design and result

试验编号	因素			采收成功率/%
	X	Y	Z	
1	1	1	1	92
2	1	2	2	92
3	1	3	3	72
4	2	1	2	92
5	2	2	3	84
6	2	3	1	88
7	3	1	3	82
8	3	2	1	98
9	3	3	2	76
k_1	0.853	0.887	0.927	
k_2	0.880	0.913	0.867	
k_3	0.853	0.787	0.793	
F	4.5	33.0	27.4	
P	0.18	0.02	0.03	

5　田间试验

2025 年 6 月搭建的白芦笋采收机样机在山东省曹县开展芦笋采收大田试验，试验样机搭载两套采收末端执行器同时进行工作。采收试验开始时间为 05:30，采收试验结束时间为 09:30，分时段共作业田地约 0.2 hm^2，作业期间使用室内试验所验证的最佳参数组合进行试验。

采摘过程如图 14a ~ 14e 所示，感知相机捕捉芦笋位置后，末端执行器定位至芦笋位置执行采收步骤将芦笋挖出。平均单次定位时间 1.7 s，定位后采收动作执行时间 3.2 s，采收成功率为 92.7%。本次试验总计作业 8 垄，每垄长度为 80 m，研究选取其中一条典型土垄[25]中间段 50 m 作为测试样本，进行详细计数和分析，记录相关数据如表 5 所示。



(a) 采摘试验现场　(b) 下刀阶段　(c) 横刀阶段　(d) 切割阶段　(e) 斜刀阶段　(f) 白芦笋切割损伤　(g) 白芦笋撞击损伤

图 14　作业场景和效果

Fig. 14　Scenario and operational effectiveness

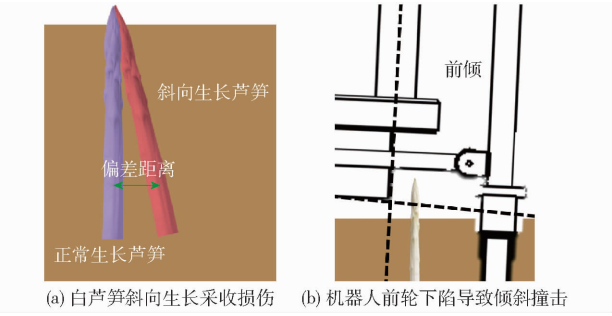
如图 14f 所示，采收过程中主要损伤形式为切割距离过短导致芦笋未完全切开从而在提出来时连带芦笋表皮一同扯下，进而导致损伤，试验期间对采摘参数做过调整，但依旧无法完全解决此问题，仍有损伤的芦笋存在，其可能原因为部分芦笋在生长时受外部环境干扰导致其斜向生长，采收时拉切刀提

表 5 田间试验结果

Tab. 5 Experimental results of harvesting

参数	数值
垄面可采收白芦笋数量/根	245
总计识别白芦笋数量/根	221
采收成功数量/根	205
采收成功率/%	92.7
损伤白芦笋数量/根	9
损伤率/%	4.3
单次采收动作时间/s	3.2
横向定位时间/s	1.7
总采收时间/s	500

升位置保持不变,故拉切刀在土中未完全切割芦笋,如图 15a 所示;此外垄间土地有存在坑洼路段,机器人作业时,由于前轮陷入坑洼之中,导致车辆前倾(图 15b),部分芦笋因机器人过于贴近垄面被撞断,如图 14g 所示,无法进行识别和采收。



(a) 白芦笋斜向生长采收损伤 (b) 机器人前轮下陷导致倾斜撞击

图 15 白芦笋采收损伤示意图

Fig. 15 Schematics of white asparagus harvesting damage

剔除两种方式损伤芦笋后,典型土垄下实际采收成功率可达 94.4%,略高于室内试验结果,原因是大田土质含水量和流动性差异,导致土壤扰动更小,且白芦笋切口处相较于模拟试验芦笋有更大的摩擦力,白芦笋更容易从土中采出。综上,白芦笋采收机器人满足白芦笋采收需求。

6 结论

(1)为了实现白芦笋的选择性采收,设计并优化了白芦笋采收末端执行器,末端执行器拉切刀长度为 85 mm 时,拉切刀连杆长度为 248 mm,底盘方向机安装连杆长度为 878 mm,转向节臂安装角度为 16.87°,长度为 208 mm。

(2)构建白芦笋采收 MBD - DEM 仿真模型,模拟使用白芦笋采收末端执行器采收的全过程,并对前期设计进行校核,得出下刀气缸和横刀气缸的推力应分别大于 580.2 N 和 44.2 N,拉切刀连杆直径应大于 3 mm。

(3)试验样机室内试验的正交分析表明,采收效果影响从大到小为:切割距离倍数、末端执行器距离垄面高度、下刀位置倍数,最佳参数组合为:下刀位置倍数 1.2、切割距离倍数 1.2、末端执行器距垄面高度 5 cm。

(4)大田试验表明,实际笋芽识别成功率为 90.2%,平均检测时间为 23 ms;成功识别笋芽的平均采收成功率为 92.7%,平均单次定位时间为 1.7 s,单次采收动作时间为 3.2 s;芦笋损伤率为 4.3%,垄面破坏性较小,采收过程中各机构运行平稳,满足白芦笋采收需求。

参 考 文 献

[1] Zare M, Rashidian G, Tran H Q, et al. The evaluation of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) root powder as a feed supplement on enhancing growth, immunity, and alleviating acute crowding stress in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Aquaculture Reports, 2025, 44: 103060.

[2] 孔天宇, 赵岩, 苗风收, 等. 芦笋活性成分、生物功能及应用研究进展[J]. 北方园艺, 2025(17): 132 - 140.
Kong Tianyu, Zhao Yan, Miao Fengshou, et al. Research progress on nutritional composition, biological activity and application of asparagus[J]. Northern Horticulture, 2025(17): 132 - 140. (in Chinese)

[3] Zhang L, Li Y, Liang Y, et al. Determination of phenolic acid profiles by HPLC - MS in vegetables commonly consumed in China[J]. Food Chemistry, 2018, 276: 538 - 546.

[4] Zhang R, Xiong Y, Ma Y, et al. *Asparagus officinalis* polysaccharide-loaded liposomal gels alleviate skin inflammation via inhibiting the NF - KB/MAPK pathways[J]. Journal of Functional Foods, 2025, 125: 106679.

[5] 刘彩玲, 王丽, 黄锦卿, 等. 不同品种芦笋的营养品质与风味特征分析[J/OL]. 食品工业科技. (2026 - 02 - 22)[2026 -04 - 01]https://doi.org/10.13386/j.issn1002 - 0306.2025110200.

[6] 吴芝岭, 王孟琪, 李梅芳. 中国芦笋出口国际竞争力及驱动因素分析[J]. 中国瓜菜, 2026, 39(2): 247 - 257.
Wu Zhiling, Wang Mengqi, Li Meifang. Analysis of international competitiveness and driving factors of Chinese asparagus exports[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2026, 39(2): 247 - 257. (in Chinese)

[7] 陈度, 张勤, 王书茂, 等. 芦笋机械化收获技术现状与发展分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(4): 113 - 120.
Chen Du, Zhang Qin, Wang Shumao, et al. Analysis on the status and development of asparagus mechanized harvesting technology[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(4): 113 - 120. (in Chinese)

[8] 刘雪美, 杜帅, 苑进, 等. 白芦笋选择性收获机末端执行器作业分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 110 - 120.
Liu Xuemei, Du Shuai, Yuan Jin, et al. Analysis and experiment on selective harvesting mechanical end-effector of white asparagus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 110 - 120. (in Chinese)

[9] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 1 - 17.
Yuan Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 1 - 17. (in Chinese)

[10] 汪李平. 长江流域塑料大棚芦笋栽培技术(上)[J]. 长江蔬菜, 2020(24): 19 - 23.
Wang Liping. Cultivation techniques for asparagus in plastic greenhouses in the Yangtze River Basin (part Ⅰ)[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2020(24): 19 - 23. (in Chinese)

[11] 张琦. 白芦笋采收机抛笋集箱与垄面修复装置优化设计及试验研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2024.
Zhang Qi. Optimization design and experimental study of white asparagus shoot throwing gathering and ridge surface repairing device of white asparagus harvester[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[12] Ma X, Yu Z, Su Q, et al. Mechanistic investigation of soil detachment in the corn root-soil complex using coupled MBD - DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 242: 111368.

[13] Maraveas C, Tsigkas N, Bartzanas T. Agricultural processes simulation using discrete element method: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237(C): 110733.

[14] Ma X, Yu C, Wang L, et al. Optimization design of a double planet carrier planetary gear train transplanting mechanism based on an MBD - DEM simulation of potted plant movement[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 233: 110141.

[15] Li H, He J, Wang Q, et al. Analysis of slope-adaptive in covering-compacting device for no-till sowing based on DEM - MBD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 233: 110175.

[16] 王德玉. 白芦笋采收执行机构优化设计及试验研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2023.
Wang Deyu. Optimization design and experimental study of the executive mechanism for harvesting white asparagus[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[17] 岳健民, 董创, 王海峰, 等. 牛舍智能推料作业机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(2): 101 - 108.
Yue Jianmin, Dong Chuang, Wang Haifeng, et al. Design and experiment of intelligent feed-pushing robot for cowshed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(2): 101 - 108. (in Chinese)

[18] Zeng Y, Li J, Li H, et al. Research on the ditching resistance reduction of self-excited vibrations ditching device based on MBD - DEM coupling simulation[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1372585.

[19] 刘晓敏, 卫恒, 刘政, 等. 农业灌溉管道探查机器人设计与实验[J/OL]. 农业机械学报. (2026 - 01 - 22)[2026 - 04 - 01]. https://link.cnki.net/urlid/11.1964.s.20260122.1321.002.

[20] 段洁利, 莫杏康, 黄朝炜, 等. 基于张合式刀具的香蕉落梳末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 376 - 385.
Duan Jieli, Mo Xingkang, Huang Chaowei, et al. Design and experiment of banana de-handing end effector based on opening-closing cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 376 - 385. (in Chinese)

[21] 班超, 迟瑞娟, 黄修炼, 等. 基于激光雷达导航的玉米喷药机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊2): 200 - 209.
Ban Chao, Chi Ruijuan, Huang Xiulian, et al. Design and experiment of corn-spraying robot with LiDAR navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 200 - 209. (in Chinese)

[22] 张日红, 陈德照, 王振豪, 等. 宽行距果蔬种植环境土壤检测机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 217 - 228.
Zhang Rihong, Chen Dezhao, Wang Zhenhao, et al. Design and experiment of soil detection robot for wide-rowing fruit and vegetable planting environments[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 217 - 228. (in Chinese)

[23] 王亚薇, 何津立, 林熙淼, 等. 温室番茄采摘机器人伸缩式机械臂设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊1): 18 - 28.
Wang Yawei, He Jinli, Lin Ximiao, et al. Design and experiment of tomato picking robot based on telescopic robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 18 - 28. (in Chinese)

[24] 李帅,游朝鑫,定冬旭,等. 自由端加捻立式青草制辫成型装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报. (2026 - 03 - 03)[2026 - 04 - 01] https://link.cnki.net/urlid/11.1964.S.20260303.0958.002.

[25] 荣佳诚, 熊梓茗, 元嘉策, 等. 复合机械臂构型番茄采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(5): 61 - 70,94.
Rong Jiacheng, Xiong Ziming, Yuan Jiace, et al. Design and experiment of composite-manipulator-type tomato harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(5): 61 - 70,94. (in Chinese)