doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.001

# 基于联合仿真的双臂瓣形铲移树机性能分析与试验

宁 晨[1] 张 建[2] 张文福[2] 吴纪元[1] 杜小强[1,3] 贾江鸣[1,3] 童卫忠[4]

（1. 浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2. 浙江省林业科学研究院，杭州 310023；3. 浙江省种植装备技术重点实验室，杭州 310018；4. 长兴泗安畅鹏机械加工厂，湖州 313000）

**摘要**：针对我国丘陵山区林木种植密集、地形复杂导致的移树机适应性差、液压系统能效低等问题，对移树机动臂结构进行了设计以及液压缸选型，建立了移树机机-液-离散元联合仿真模型，对整机结构及液压系统性能进行了分析。采用Recurdyn软件，对移树机行走底盘以及动臂进行了动力学仿真，确定了移树机最大抬升负载质量为2 t，动臂最大应力集中在抬升油缸孔前部，最大应力为72.5 MPa。基于移树机机-液-离散元联合仿真模型，对移树机抬升工况、铲刀切削土壤工况、土球摆动工况进行了模拟计算，分析了各执行元件油缸内压力变化曲线以及铲刀切削土壤阻力变化曲线，仿真结果表明：机臂在抬升过程中，抬升油缸压力稳定，压力为5.2 MPa；铲刀在切削土壤过程中，阻力逐渐增大，最大阻力为28 900 N；土球摆动工况下翻板油缸内压力随倾斜角度增大而增大，最大压力为8 MPa。开展了移树机林地液压系统测试试验，测试结果表明：机臂抬升过程中抬升油缸压力稳定在5.5 MPa；切削土壤工况下，铲刀油缸压力差为10 MPa，间接计算得出切削阻力为28 260 N；土球摆动工况下，翻板油缸压力随倾斜角度增大而增大，最大压力为7.7 MPa。通过移树机仿真试验与液压测试试验对比分析，得到抬升、切削土壤、土球摆动工况下仿真值与实测值相对误差分别为5.5%、2.3%、3.9%，验证了移树机联合仿真模型准确性以及移树机动臂结构与整机液压系统的稳定性。

**关键词**：移树机；液压系统；联合仿真；液压测试

**中图分类号**：S225.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1298(2024)S2-0001-09

# Performance Analysis and Test of Dual Arm Petal Shaped Shovel Tree Digging Machine Based on Co-simulation

NING Chen[1] ZHANG Jian[2] ZHANG Wenfu[2] WU Jiyuan[1] DU Xiaoqiang[1,3] JIA Jiangming[1,3] TONG Weizhong[4]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou* 310023, *China*
3. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
4. *Changxing Sian Changpeng Machinery Processing Factory, Huzhou* 313000, *China*)

**Abstract**: In response to the problems of poor adaptability of tree digging machines and low energy efficiency of hydraulic systems caused by dense forest planting and complex terrain in hilly and mountainous areas of China, the structure of the tree digging machine arm was designed and hydraulic cylinders model was selected, a co-simulation model of tree digging machine was established to analyze the structure and hydraulic system performance of the machine. Dynamic simulations were conducted on the chassis walking and arm of the tree digging machine using Recurdyn software. It was determined that the maximum lifting load of the tree digging machine was 2 t. The maximum stress on the lifting arm was concentrated in the front of the lifting cylinder hole, with a maximum stress of 72.5 MPa. A co-simulation model of the tree digging machine-liquid-discrete element method was established by using Recurdyn, AMESim, and EDEM software. The lifting condition of the tree digging machine, the soil cutting condition of the shovel, and the soil swinging condition were simulated and calculated. The pressure change curves inside the oil cylinder of each actuator and the soil cutting resistance change curve of the shovel were analyzed. The simulation results showed that during the lifting process of the arm, the pressure of the lifting oil

收稿日期：2024-08-20 修回日期：2024-09-10

**基金项目**：浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2023C02053、2022C01152)

**作者简介**：宁晨(1996—)，男，博士生，主要从事智能农机装备设计研究，E-mail: 1254504388@qq.com

**通信作者**：杜小强(1978—)，男，教授，博士生导师，主要从事机械设计与理论研究，E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

cylinder was stable, with a pressure of 5.2 MPa. During the process of cutting soil, the resistance of the shovel was gradually increased, with a maximum resistance of 28 900 N. Under the condition of soil swing, the pressure inside the flap oil cylinder was increased with the increase of tilt angle, and the maximum pressure was 8 MPa. Testing on the hydraulic system of the tree digging machine in woodland was conducted, and the test results showed that the pressure of the lifting cylinder remained stable at 5.5 MPa during the lifting process of the arm. Under the condition of cutting soil, the pressure difference of the shovel cylinder was 10 MPa, and the indirectly calculated cutting resistance was 28 260 N. Under the swing condition of the soil, the pressure of the flap oil cylinder was increased with the increase of the tilt angle, and the maximum pressure was 7.7 MPa. Through comparative analysis of tree digging machine simulation experiments and hydraulic testing, the relative errors between simulation values and measured values under lifting, cutting soil, and soil swing conditions were found to be 5.5%, 2.3%, and 3.9%, respectively. The accuracy of the co-simulation model of the tree digging machine and the stability of the tree digging machine arm structure and the hydraulic system was verified.

**Key words**: tree digging machine; hydraulic system; co-simulation; hydraulic testing

## 0 引言

我国大力推进生态文明建设以及果园种植标准化建设,对苗木移植装备需求不断增加。苗木起挖是移植最重要的工作环节,占用了大量的人工劳动力[1]。因此,研制工作性能稳定的移树机,不仅能降低人工成本,而且还能提高苗木起挖效率。

目前,国内一些企业引进了国外移树机技术,为了使移树机性能得到进一步提升,多数学者主要对整机机械结构和液压系统进行了优化。在抬升机臂和切削土壤刀具优化方面,多数研究采用仿真技术对铲刀切削土壤阻力特性进行了分析[2-7]。文献[8]对移树机大臂机构进行了运动学和动力学分析,建立了大臂机构参数优化模型,确定了大臂最佳结构参数。文献[9]采用ANSYS软件对原型铲刀和仿生铲刀切削土壤过程进行了优化,确定了铲刀最佳参数,有效减小了铲刀切削阻力。文献[10]采用ANSYS软件,对弧形刀片切削土壤过程进行了有限元仿真,分析了振动及非振动条件下刀片的应力、切削阻力变化情况;文献[11]在土壤切削问题中提出,土壤是以颗粒群的形式运动,存在土层的分离和混合,采用有限元法进行铲刀切削阻力特性研究具有局限性,采用DEM离散元法能更好地分析挖掘装置与土壤之间的作用情况[12-15]。文献[16]采用EDEM软件,对移树机弯刀挖掘过程进行了离散元仿真,对比了优化前后铲刀切削阻力。为了减小负载波动引起的液压冲击以及提升液压系统的能效,需要进行整机液压系统优化[17]。文献[18]对链式旋切移树机液压系统进行了设计,采用AMESim软件,建立了负载敏感系统模型,确定系统具有负载自适应能力。文献[19]对移树机液压系统进行了设计,采用AMESim软件,对功率匹配控制系统进行了仿真,验证了控制方案的有效性。

综上分析,目前研究均是对移树机机械结构或液压系统单独地进行仿真分析。然而,在移树机实际工作中,铲刀的动力来自于液压系统,液压系统的负载取决于切削阻力,因此,单一地对整机某个系统进行仿真,无法真实地反映移树机实际工况下的工作性能。

本文以双臂瓣式移树机为研究对象,采用机-液-离散元联合仿真方法,模拟挖树作业过程,对移树机整机结构及液压系统性能进行分析,结合移树机林地液压测试试验,验证移树机联合仿真模型的准确性。

## 1 移树机整机结构与工作原理

移树机整机结构如图1所示。移树机采用瓣式铲刀挖树装置,瓣式铲刀相比链式、圆弧式、斜铲式铲刀,土球起挖效果更好,因其挖树装置对土球的起挖方式是包裹式,所以对土壤黏性要求低,起挖过程中,培土保存完好,起挖转移效率高。为了提高移树机底盘林间通过性,要求整机结构紧凑,在保证机臂抬升性能的同时,减小动臂的尺寸,因此采用同步双臂结构,底盘采用一字橡胶履带轮驱动,具有更好的越障性和抓地性。此外,

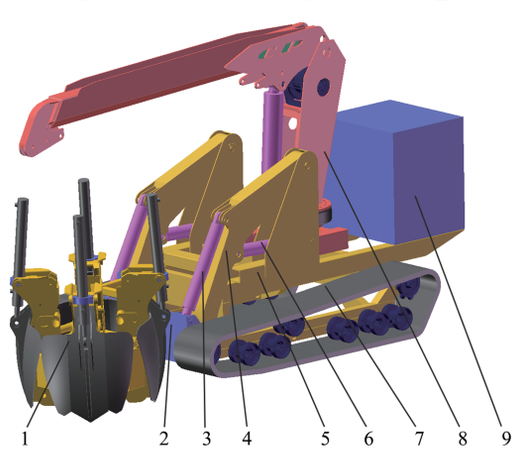



图1 双臂瓣式移树机整机结构

Fig. 1 Double arm petal tree digging machine overall structure

1. 瓣式挖树装置 2. 翻板 3. 角度调节液压缸 4. 动臂 5. 底盘机架 6. 抬升液压缸 7. 履带轮 8. 吊臂 9. 动力系统

考虑到苗木移植工作环节还包括苗木装车，为了提高移植工作效率，将吊臂集成于移树机底盘，实现移树机起挖和吊运一体化功能，考虑整机重力平衡问题，吊臂安装在动臂后侧居中位置处。

整机动力源为柴油发动机，底盘行走由机械传动系统提供动力，挖树装置、翻板、动臂、吊臂由液压传动系统提供动力。挖树装置配备4套瓣式铲刀，铲刀通过液压缸提供动力，并在装置轨道上移动。随着液压缸伸长，铲刀不断深入土壤。当铲刀运动到最大限位时，相邻铲刀之间闭合，完成苗木断根以及土球塑形。然后，通过翻板和动臂联合动作，实现苗木离地。最后，通过吊臂将苗木摆放至运输车甲板上。整机液压系统共用一个油泵，采用电磁换向阀对挖树装置各部件运动进行控制，采用手动换向阀对翻板、动臂、吊臂运动进行控制。整机液压系统原理图如图2所示。

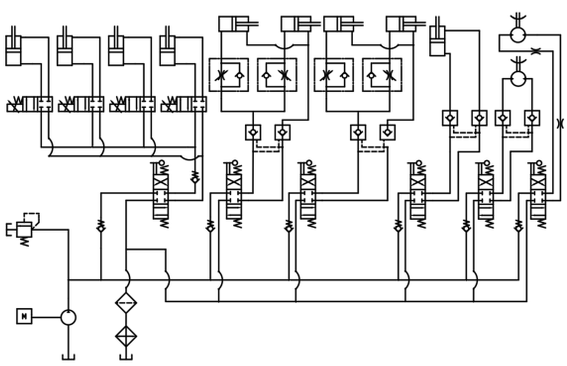


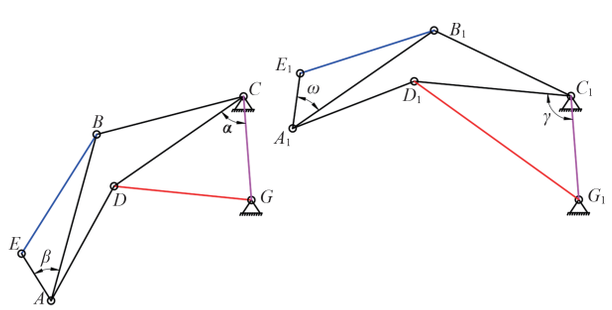
图2　移树机整机液压系统原理图

Fig. 2　Schematic of tree digging machine hydraulic system

## 2　移树机关键部件设计及液压元件选型

### 2.1　动臂结构设计

由于底盘体型较小，挖树装置质量较大，动臂结构需与底盘紧凑贴合，安装位置需尽量位于底盘后侧，保持整机平衡。根据底盘平台离地高度、平台结构布局、挖树装置作业条件等要求，确定动臂安装位置、结构及尺寸。翻板是用于调整挖树装置俯仰角度的部件，其结构及尺寸根据动臂安装距、挖树装置固定结构、摆动角度范围要求等参数确定。移树机动臂机构简图如图3所示。




(a)初始位置　　(b)最高位置

图3　移树机动臂机构简图

Fig. 3　Schematic of tree digging machine arm

点$A$、$B$、$C$、$D$为动臂与翻板、液压缸、机架固定安装的铰接孔，连线$AB$长度984 mm、连线$BC$长度868 mm、连线$CD$长度900 mm、连线$AD$长度746 mm，连线$DG$为抬升液压缸，连线$AE$为翻板，连线$BE$为角度调节液压缸，$\alpha$为动臂初始位置时连线$CD$与固定架铰接孔连线$CG$的夹角，为60°，$\beta$为翻板初始位置时连线$AE$与动臂铰接孔连线$AB$的夹角，为48°。

### 2.2　液压缸选型计算

通过动臂、翻板运动学分析，结合移树机动臂抬升高度及挖树装置俯仰角要求，确定液压缸的行程、安装距、缸径。根据移树机最大抬升高度以及挖树装置摆动角度要求，确定动臂顺时针最大转动角40°，翻板逆时针最大转动角15°，四边形$ABCD$为动臂初始位置，四边形$A_1B_2C_3D_4$为动臂抬升至最大高度时位置。根据公式

$$l_{DG}=\sqrt{l_{CD}^2+l_{CG}^2-2l_{CD}l_{CG}\cos\alpha} \tag{1}$$

$$l_{BE}=\sqrt{l_{AE}^2+l_{AB}^2-2l_{AE}l_{AB}\cos\beta} \tag{2}$$

$$\gamma=\alpha+40^\circ \tag{3}$$

$$\omega=\beta+15^\circ \tag{4}$$

式中　$\gamma$ ——$\angle D_1C_1G_1$角度，(°)

$\omega$ ——$\angle B_1A_1E_1$角度，(°)

计算得到：$DG$长度792 mm、$BE$长度807 mm、$D_1G_1$长度1 091 mm、$B_1E_1$长度886 mm。

通过动臂动力学分析，确定抬升液压缸所需的最大推力。阻力取决于挖树装置、树、动臂的重力负载，为了简化动臂的动力分析，将阻力作用点设定为点$A_1$，阻力$F_2$为$1\times10^4$ N，抬升过程中，阻力$F_2$方向始终为重力方向，阻力臂长度$L_2$逐渐增加，推力$F_1$方向与$C_1D_1$夹角逐渐减小，动力臂长度$L_1$逐渐变短，因此在动臂抬升到最高位置时，抬升液压缸所需推力最大，动臂受力分析如图4所示。

$$F_1L_1=F_2L_2 \tag{5}$$

$$d=2\sqrt{\frac{F_1}{P\pi}} \tag{6}$$

式中　$d$ ——油缸内径

$P$ ——油缸工作压力

根据公式计算得到最大推力$F_1$为$3.5\times10^4$ N，缸径$d$为53 mm。

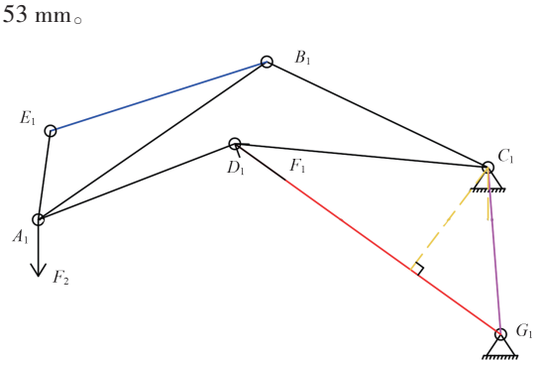



图4　最大推力工况下动臂受力分析

Fig. 4　Force analysis of arm under maximum thrust condition

综上分析，动臂油缸选用安装距为750 mm、最大行程为450 mm、缸径为80 mm型号的油缸，由于翻板所需推力小于动臂，因此，该型号油缸也满足翻板工作动力要求。

## 3 基于联合仿真的移树机性能分析

建立机-液-离散元联合仿真模型，需要分别在Recurdyn软件中建立移树机动力学模型，在AMESim软件中建立液压系统模型，在EDEM软件中建立土壤模型，并创建数据输入和输出接口，实现各模块之间数据传递，从而对模型进行仿真计算。

### 3.1 移树机动力学模型建立

首先通过Solidworks软件建立移树机三维模型，然后转x_t格式，将文件导入Recurdyn软件中，在Track.LM模块中建立履带轮模型，并将其设置为底盘模型的从属系统，在Ground模块中建立路面模型，最后建立各部件之间的运动副及接触。移树机动力学模型如图5所示。

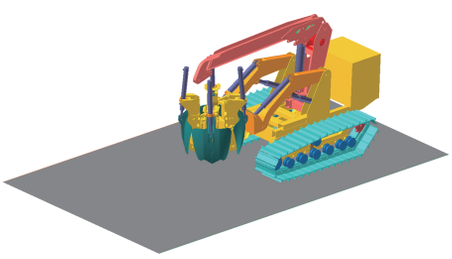


图5 移树机动力学模型

Fig. 5 Dynamic model of tree digging machine

#### 3.1.1 底盘稳定性分析

为了满足挖树作业要求，在林间具有较好的通过性，整机在结构设计上较为紧凑。相比于国外针对大胸径树苗移树机，本文所研究的移树机底盘较小，且针对大胸径树苗起挖的工作装置重量较大，又位于底盘前端，因此需对移树机底盘进行稳定性分析。通过对整机行走进行动力学仿真分析，来验证整机结构设计布局的合理性。为了简化模型，利用增大挖树装置重量的方式来等效负载工况。

因重心偏置导致底盘失稳的状况下，底盘在行走时车身会发生晃动，因此，通过底盘位姿角度变化来反映底盘稳定性。仿真结果表明，当挖树装置最大负载质量为2 t时，底盘行走仍能保持稳定性。行走工况下，底盘摆动角度变化如图6所示。0~1 s内，底盘位姿角度存在较大波动，这是因为路面模型和底盘之间留有一定距离，仿真计算开始，底盘落至路面，与路面接触这个过程，底盘与路面具有冲击力。1~5 s为底盘行走过程，底盘位姿在0°~0.5°范围内轻微摆动，该结果验证了底盘稳定性。

#### 3.1.2 动臂安全性分析

动臂是移树机的核心部件，其结构强度决定了移树机承载能力，是保证安全作业的前提。因此，对动臂在

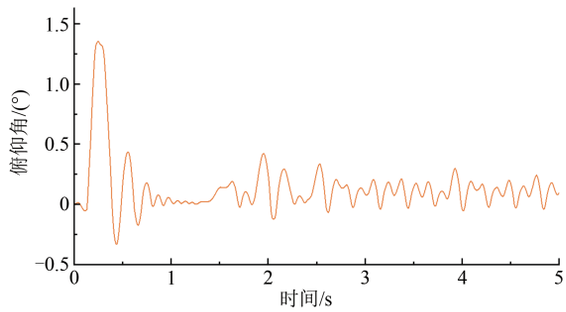



图6 底盘行走俯仰角变化曲线

Fig. 6 Chassis walking pitch angle variation curve

动态工作过程中所产生的最大应力和应力集中位置进行分析，可以检验结构的稳定性以及作为结构优化的基础。为了简化仿真模型，除去了移树机动力学模型底盘部分，仅保留土球起挖过程中的工作装置，将机架与大地固定，其余部件之间运动副保持不变，等效模拟移树机的土球起挖工作。采用刚柔耦合技术，对动臂进行网格划分，建立柔性体，并采用FDR技术，建立柔性体与刚体之间的约束，动臂刚柔耦合动力学模型如图7所示。

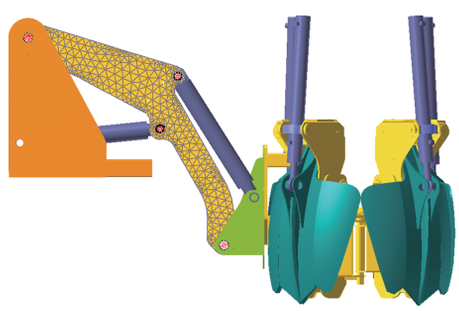


图7 动臂刚柔耦合动力学模型

Fig. 7 Rigid flexible coupling dynamic model of lifting arm

动臂刚柔耦合动力学仿真结果如图8(图中颜色越红，应力越大)所示。动臂在运动过程中，动载荷应力实时发生变化，应力主要集中在前半臂的上下边缘，最大应力集中在靠近抬升油缸孔附近位置，最大应力为72.5 MPa，移树机的动臂材料选用Q355钢，最大应力小

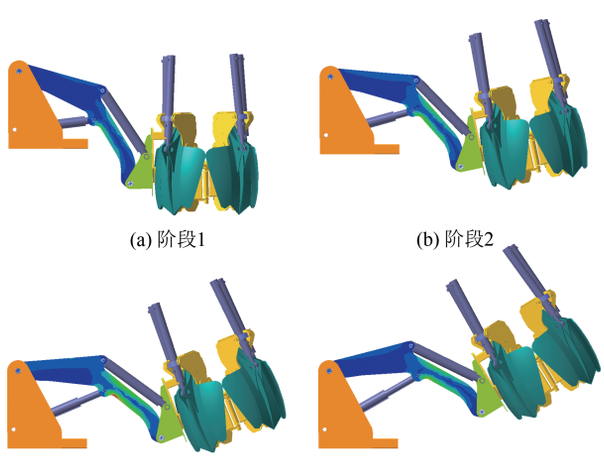



图8 运动过程中动臂应力云图

Fig. 8 Stress cloud map of lifting arm during movement

于许用应力(237 MPa)，验证了动臂结构的安全性。

### 3.2　移树机液压系统模型建立

采用AMESim软件，根据整机液压系统原理图，选用标准库中的液压元件，连接各元件之间的端口，并根据实际液压元件型号，设置模型参数。实现液压系统与机械系统模型之间耦合[20-22]。首先，通过创建FMI功能模拟接口，在液压缸输出端建立力、速度、位移检测模型，力检测模型与接口的输入端连接，速度、位移检测模型与接口输出端连接。然后，在模型计算模块中生成液压系统模型的fmu数据文件。最后，建立动力学模型协同仿真环境，将fmu数据文件作为机械系统和液压系统数据传递的纽带。为了简化模型，对动臂和挖树装置两个液压系统分别进行建模，液压系统模型如图9、10所示。

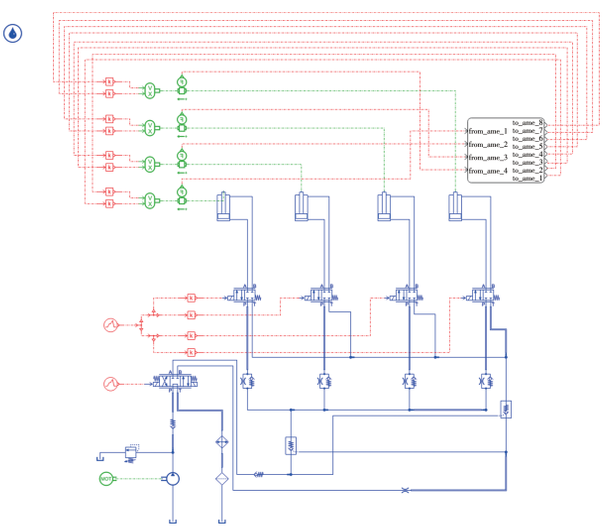


图9　挖树装置液压系统模型

Fig. 9　Hydraulic system model of tree digging device

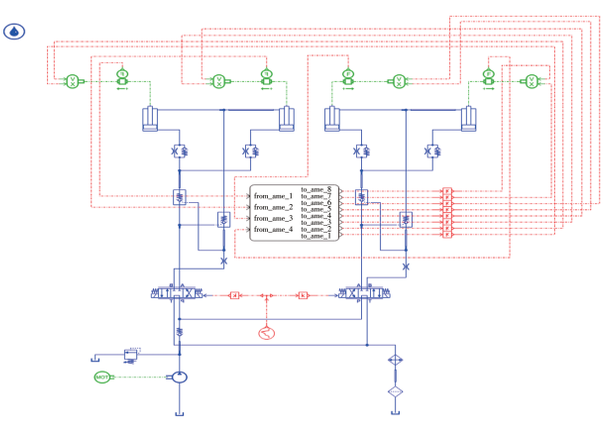


图10　动臂液压系统模型

Fig. 10　Hydraulic system model of lift arm

通过改变换向阀控制信号值，来控制液压缸运动。假定仿真时间在0~0.5 s内，动臂液压缸静止，换向阀控制信号值为“0”，换向阀处于中位，油路阻断；在0.5~4 s内，动臂液压缸匀速伸长，换向阀控制信号值为“-40”，换向阀处于左位，油路接通。0~4 s内，动臂液压系统压力变化如图11所示。仿真结果表明，在0.5~1 s内，系统瞬态响应阶段，液压系统存在超调，油压存在波动；在1~4 s内，液压系统压力趋于稳定，压力为5.2 MPa。

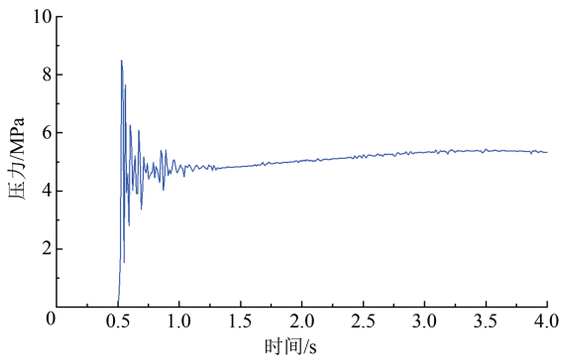



图11　动臂液压系统压力变化曲线

Fig. 11　Variation curve of lifting arm hydraulic system oil pressure

### 3.3　挖树装置仿真模型建立及性能分析

在机液联合仿真模型的基础上，对与土壤接触的动力学模型铲刀部件进行wall处理，并将wall文件导入到EDEM模型中，实现机液离散元联合仿真。在EDEM模型中，铲刀的运动由动力学软件控制，Recurdyn中铲刀的阻力来自机械结构表面与土壤颗粒接触过程中产生的摩擦力。

#### 3.3.1　EDEM仿真模型建立

首先，建立土壤模型，土壤颗粒模型采用单个球形颗粒，为了节省离散元模型仿真计算时间，将实际土壤颗粒按扩大10倍的尺寸进行建模[16]，设置颗粒半径为12 mm。建立高为1 m、长宽均为3 m的六面体颗粒床以及边长为3 m的正方形平面颗粒工厂，在几何模型设置中导入wall文件，生成铲刀机械部件。土壤颗粒与铲刀参数设置，如表1所示[23]。

**表1　土壤颗粒及铲刀部件参数设置**

**Tab. 1　Parameter settings for soil particles and shovel components**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 土壤颗粒泊松比 | 0.4 |
| 土壤颗粒剪切模量/Pa | $1\times10^{6}$ |
| 土壤颗粒密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 350 |
| 土壤颗粒间静摩擦因数 | 0.5 |
| 土壤颗粒间动摩擦因数 | 0.4 |
| 铲刀泊松比 | 0.3 |
| 铲刀弹性模量/Pa | $2\times10^{11}$ |
| 铲刀密度/(kg·m$^{-3}$) | 7 800 |
| 土壤颗粒与铲刀部件间碰撞恢复系数 | 0.3 |
| 土壤颗粒与铲刀部件间静摩擦因数 | 0.5 |
| 土壤颗粒与铲刀部件间动摩擦因数 | 0.4 |

由于实际作业环境中，土壤具有黏性，因此接触模型的选取对模拟结果的准确性有很大的影响。经典的Hertz接触模型的主要缺点是仅考虑弹性变形，不涉及由于范德华力作用导致的黏结力，因此不适合模拟黏性土壤。JKR接触模型是一种黏结性颗粒接触模型，颗粒之间的相互吸引力用表面能表征，因此，本文通过建立

JKR 接触模型，以及设置表面能系数[24]，来表征土壤颗粒之间黏结力，表面能参数设置为 7.91 J/m$^2$。

设置仿真求解器模块参数时，综合考虑计算时间及仿真稳定性，将固定时间步长设置为 Rayleigh 时间步长的 20%[25]。根据土壤颗粒填充时间，设置颗粒生成总时间为 5 s，设置目标保存间隔为 0.01 s，最终生成的土壤模型如图 12 所示。

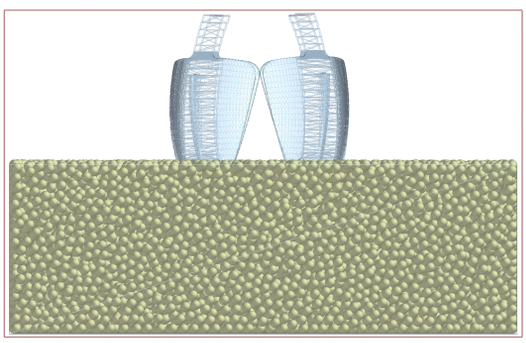


图 12 土壤 EDEM 模型

Fig. 12 EDEM model of soil

### 3.3.2 铲刀切削土壤动力学特性分析

在挖树过程中，油缸动力主要取决于铲刀与土壤之间的阻力，树根会对铲刀产生一定阻力，但其阻力与土壤切削阻力相比较小，因此，本文主要通过建立联合仿真模型，研究铲刀与土壤之间的切削阻力变化情况，并通过土球起挖工况下的油缸液压测试，将仿真值与真实测试值进行比较，从而验证模型的准确性。设置铲刀液压缸运动副驱动函数，函数表达式为 STEP(TIME,0.5,0,3,-600)，函数意义为仿真在 0.5~3 s 内，活塞缸匀速运动，行程为 600 mm，最后将仿真步长设置为 0.01 s，仿真计算总时间设置为 4 s。仿真模型如图 13 所示。

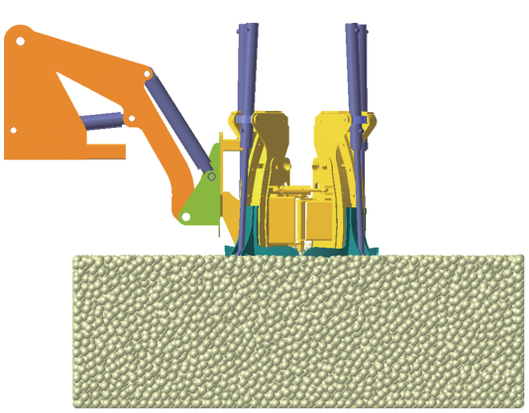


图 13 铲刀切削土壤动力学仿真模型

Fig. 13 Dynamic simulation model of soil cutting with shovel blade

铲刀切削土壤阻力变化曲线如图 14 所示。在 0.5~3 s 内，阻力持续增大，且阻力增长趋势变大，最大阻力为 28 900 N，仿真时间在 3 s 后，液压缸停止运动，铲刀与土壤之间处于静止状态，铲刀切削土壤阻力瞬间减小。

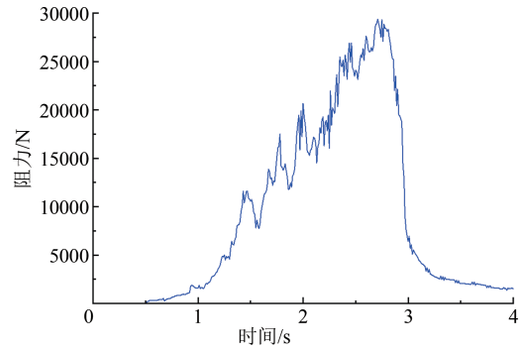



图 14 铲刀切削土壤阻力变化曲线

Fig. 14 Variation curve of cutting resistance between shovel and soil

### 3.3.3 土球原地摆动工况下液压系统特性分析

为了减小挖树装置抬升过程中铲刀与土壤之间的阻力以及保持土球底部完整性，会通过控制翻板液压缸，使挖树装置发生小倾斜角摆动，使铲刀外表面与土壤之间具有一定间隙，降低土壤对铲刀表面的侧向压力，从而减小铲刀与土壤之间的接触阻力。挖树装置摆动工况示意图如图 15 所示。

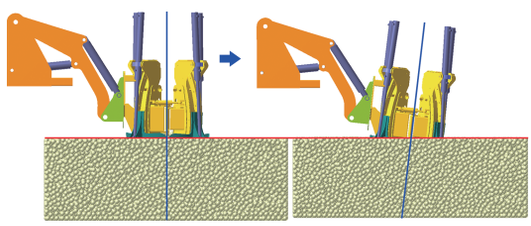


图 15 挖树装置前后摆动工况示意图

Fig. 15 Schematic of swing working condition of tree digging device

根据实际工况下挖树装置倾斜角度，计算液压缸伸长量，从而确定液压系统所需供油时间，对液压系统换向阀控制信号参数进行设置。控制信号参数设置为(0,0,3)+(-40,-40,2)，换向阀在 0~3 s 内，进出油口阻断，在 3~5 s 内，进出油口连通。翻板液压缸油压变化如图 16 所示，在 0~0.5 s 内，液压系统瞬态响应，从 0 MPa 跳跃至 5 MPa，随后油压快速下降且稳定在 2.5 MPa，在 1~3 s 内，虽然换向阀处于进出油口阻断状态，但是由于挖树装置反力的作用，液压缸内存在压力，压力变化呈先

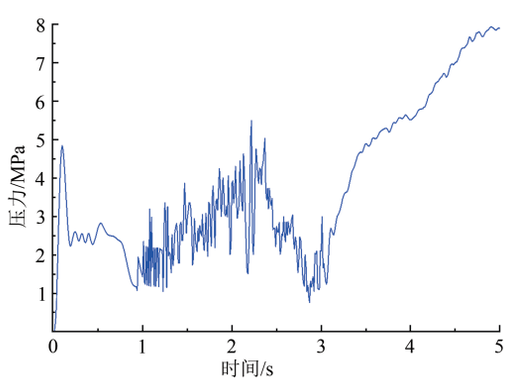



图 16 土球摆动工况下翻板油缸压力变化曲线

Fig. 16 Pressure of flipping plate oil cylinder under condition of soil swing

上升后下降趋势，压力峰值为 5 MPa，在 3~5 s 内，油压从 1.5 MPa 上升至 8 MPa，油压呈上升趋势，且前半阶段比后半阶段上升趋势更快。

## 4　移树机林地试验测试与分析

### 4.1　试验条件与测试方法

试验地点选在浙江省湖州市长兴林园，移树机液压系统测试现场如图 17 所示。液压测试设备选用 STONEBOOK-0080-SN 型便携式测试仪、SR-CT60-B-B-6 型涡轮流量传感器、SR-PPT400-05-0C 型压力传感器。通过对各工况下的液压系统进行测试，可计算出液压缸的推力，以及明晰液压系统压力特性。将测试结果与仿真结果进行比较，验证移树机联合仿真模型的准确性，并对各工况下液压系统特性进行分析，验证液压系统的稳定性，为优化整机结构及液压系统提供理论基础。



图 17　移树机液压系统测试现场

Fig. 17　Testing site for hydraulic system of tree digging machine

### 4.2　测试结果与分析

由于移树机在实际操作过程中受环境、人为等不确定因素影响，测试结果与仿真试验结果无法实时对应，因此，主要分析比较两者的压力变化趋势以及压力大小。

#### 4.2.1　动臂液压系统测试与分析

动臂液压缸油压测试结果如图 18 所示。在 0~1 s 内，系统瞬态响应阶段，液压系统存在超调，压力峰值为 7 MPa，在 1~8.5 s 内，压力稳定为 5.5 MPa，动臂处于抬升状态；在 8.5~10 s 内，压力稳定为 14 MPa，动臂液压缸活塞杆运动到最大行程，油管内压力达到系统设定最大工作压力，液压油从溢流阀卸荷。计算得到抬升油缸压力仿真值与测试值相对误差[26]为 5.5%。

#### 4.2.2　挖树装置液压系统测试与分析

为了验证土壤模型的准确性，通过对铲刀空载工况以及切削土壤工况下油缸压力进行测试，得到油缸压力差，计算出油缸推力，间接确定铲刀切削土壤阻力。将测试结果与仿真结果进行比较，通过判断土壤切削阻力变化趋势及大小，来验证土壤模型的准确性。空载运动工况下铲刀油缸压力测试结果如图 19 所示，结果表明：

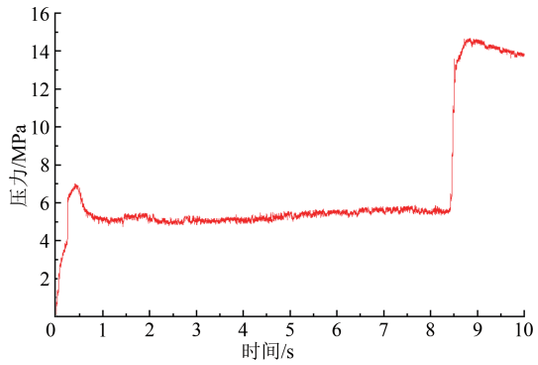



图 18　动臂油缸压力变化曲线

Fig. 18　Pressure variation curve of lifting arm cylinder

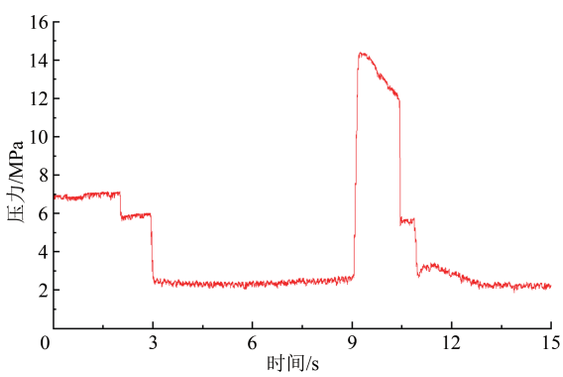



图 19　空载运动工况下铲刀油缸压力变化曲线

Fig. 19　Pressure variation curve of shovel cylinder under no-load motion condition

在 3~9 s 内，铲刀沿着滑轨伸出，油缸压力稳定在 2 MPa，在 9~10 s 内，油缸活塞杆运动到最大行程，压力立即上升至系统最大工作压力 15 MPa，在 10~15 s 内，铲刀油压卸荷，下降至系统背压 2.4 MPa。

切削土壤工况下铲刀油缸压力测试结果如图 20 所示。由于测试仪是提前采集信号，在 0~16 s 内为铲刀调整阶段，还未切削土壤，因此，无需对其分析，在 16~20 s 内，铲刀不断深入土壤，油缸压力逐渐上升，最大压力为 12.4 MPa，20 s 后，铲刀油压卸荷。

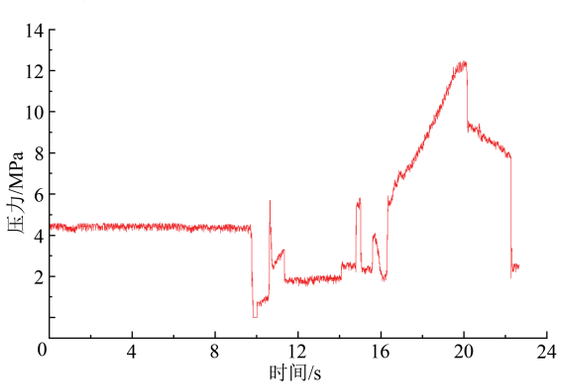



图 20　切削土壤工况下铲刀油缸压力变化曲线

Fig. 20　Pressure variation curve of shovel cylinder under soil cutting conditions

通过对铲刀空载运动与切削土壤工况下油缸压力的分析，得知油缸最大压力差为 10 MPa，根据公式

$$F_r = P\frac{\pi d^2}{4} \tag{7}$$

计算得到最大切削土壤阻力 $F_r$ 为28260 N，计算得到切削土壤阻力仿真值与测试值对误差为2.3%。

**4.2.3** 翻板液压系统测试与分析

挖树装置小角度摆动工况下，实测翻板油缸压力变化如图21所示。在0~2.5 s内，油压的变化是受到铲刀切削土壤阻力反作用的影响，翻板内具有一定压力，2.5~7 s内，翻板油缸伸长，驱动挖树装置向前摆动6°，该角度根据操作工人经验所确定，油缸压力从2.8 MPa上升至7.7 MPa，在5 s时，油压出现一次波动，这种现象与人工操作、复杂的环境等因素相关。计算得到翻板油缸压力仿真值与测试值相对误差为3.9%。由此，验证了移树机联合仿真模型的准确性。

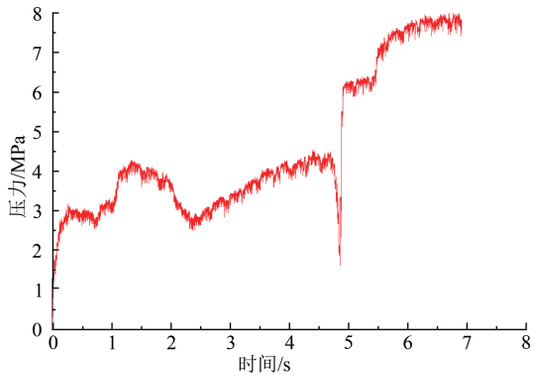



图21 土球摆动工况下翻板油缸压力变化曲线

Fig. 21 Pressure variation curve of flap oil cylinder under soil ball swing condition

## 5 结论

（1）根据底盘平台离地高度、平台结构布局、挖树装置作业条件等要求，对移树机动臂结构进行了设计以及液压缸选型。

（2）采用Recurdyn软件，对移树机行走底盘及动臂进行了动力学仿真，验证了底盘及动臂结构的稳定性。

（3）基于机-液-离散元联合仿真技术，对移树机典型工况下的液压系统特性进行了分析，明确了执行元件油缸压力变化趋势及大小，验证了液压系统的稳定性。

（4）采用液压测试仪，对典型工况下的动臂油缸、铲刀油缸以及翻板油缸液压系统进行了压力测试，比较了测试值与仿真值，验证了模型的准确性。

## 参 考 文 献

[1] 胡桂琼. 生态园林建设中林业技术应用论述[J]. 现代园艺，2019（2）：164－165.
HU Guiqiong. Discussion on the application of forestry technology in ecological landscape construction[J]. Modern Horticulture，2019（2）：164－165.（in Chinese）

[2] RAZZAGHI E，SOHRABI Y. Vibratory soil cutting a new approach for the mathematical analysis[J]. Soil and Tillage Research，2016，159：33－40.

[3] NIKOLAY U，ARTEM M，ALEXANDR M. Experimental study of the parameters of the active tool of a cultivator with a frame in form a flexible tubular element[J]. Engineering，Agricultural and Food Sciences，2017，106：1－5.

[4] IBRAHMI A，BENTAHER H，MAALEJ A. Soil-blade orientation effect on tillage forces determined by 3D finite element models[J]. Spanish Journal of Agricultural Research，2014，12(4)：941－951.

[5] MUDARISOV S G，GABITOV I I，LOBACHEVSKY Y P，et al. Modeling the technological process of tillage[J]. Soil and Tillage Research，2019，190：70－77.

[6] MAKANGE N R，JI Changying，TOROTWA I. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2020，179：105848.

[7] ZHAO Z，WANG D，SHANG S，et al. Analysis of *Cyperus esculentus*-soil dynamic behavior during rotary tillage based on discrete element method[J]. Agriculture，2023，13(2)：358.

[8] 陈建能，高巧玲，陶红连，等. 移树机大臂机构多目标参数优化及试验[J]. 浙江理工大学学报（自然科学版），2018，39(1)：62－68.
CHEN Jianneng，GAO Qiaoling，TAO Honglian，et al. Multi-objective parameter optimization and experiment of tree transplanting machine's arm[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University(Natural Sciences)，2018，39(1)：62－68.（in Chinese）

[9] 赵雄，马行潇，高巧玲，等. 仿生减阻树木移植机铲片设计与试验[J]. 农业工程学报，2018，34（16）：37－42.
ZHAO Xiong，MA Xingxiao，GAO Qiaoling，et al. Design and experiment of bionic resistance reduction for tree transplanter shovel[J]. Transactions of the CSAE，2018，34（16）：37－42.（in Chinese）

[10] 杨育鑫. 移树机弧形刀具振动切削减阻分析及优化[D]. 大连：大连理工大学，2019.
YANG Yuxin. Analysis and optimization of vibration cutting resistance of curved shovel of tree spades[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2019.（in Chinese）

[11] 徐中华，王建华. 有限元法分析土壤切削问题的研究进展[J]. 农业机械学报，2005，36(1)：134－137.
XU Zhonghua，WANG Jianhua. Advances in finite element analysis of soil cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2005，36(1)：134－137.（in Chinese）

[12] 程一启，张兆国，张丹，等. 三七收获机组合式挖掘铲减阻效果研究[J]. 农机化研究，2019，41(2)：55－60.
CHENG Yiqi，ZHANG Zhaoguo，ZHANG Dan，et al. Research of resistance reduction effect of *Panax notoginseng* harvest combined digging shovel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(2)：55－60.（in Chinese）

[13] 樊昱. 基于离散元法的马铃薯挖掘机理研究及仿生铲设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2020.
FAN Yu. Research on potato digging mechanism based on discrete element method and design of bionic shovel[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[14] 乔屹涛. 铲式挖掘部件仿生设计及减阻脱附性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2022.
QIAO Yitao. Research on bionic design of shovel excavation components and its performance of drag reduction and desorption[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese)

[15] 张兆国, 薛浩田, 王一驰,等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):100 - 111.
ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100 - 111. (in Chinese)

[16] 仇树成. 挖树弯刀振动分析与结构优化[D]. 镇江:江苏大学, 2020.
QIU Shucheng. Vibration analysis and structure optimization on tree-digging machete[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

[17] 马红玲.农机液压技术应用方式与常见故障问题研究[J]. 农机与农艺, 2024, 55(1): 76 - 78.
MA Hongling. Research on the application mode and common fault problems of agricultural machinery hydraulic technology [J]. Agricultural Machine and Agronomy, 2024, 55(1): 76 - 78. (in Chinese)

[18] 杨艳峰. 挖树机机械结构及负载自适应系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
YANG Yanfeng. Research on the mechanical structure and load adaptive system of tree digging machine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)

[19] 陶红连. 植树机工作装置液压系统功率匹配方法及试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2018.
TAO Honglian. Power matching method and experimental study on working device hydraulic system of trees transplanting machine[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018. (in Chinese)

[20] 郝驰宇, 冯广斌, 孙华刚,等. 基于RecurDyn和AMESim的换挡离合器联合仿真及工作特性分析[J]. 机械传动, 2018, 42(9): 140 - 144.
HAO Chiyu, FENG Guangbin, SUN Huagang, et al. Co-simulation and operating characteristic analysis of shift clutch based on RecurDyn and AMESim[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(9): 140 - 144. (in Chinese)

[21] 林云龙, 杨发展, 扈伟昊,等. 大姜播种机液压系统设计及联合仿真分析[J]. 机床与液压, 2023, 51(19): 182 - 188.
LIN Yunlong, YANG Fazhan, HU Weihao, et al. Hyraulic system design and co-simulation analysis of ginger seeding machine[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(19): 182 - 188. (in Chinese)

[22] 杜小强, 宁晨, 杨振华,等. 跨式油茶果收获机履带底盘行走液压系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 139 - 147.
DU Xiaoqiang, NING Chen, YANG Zhenghua, et al. Design and experiment of hydraulic system for crawler chassis of straddle type *Camellia oleifera* fruit harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 139 - 147. (in Chinese)

[23] 王法安, 倪畅, 张兆国,等. 三七收获机挖掘铲减阻特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 179 - 190,199.
WANG Faan, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Analysis and experiment on drag reduction characteristics of digging shovel of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 179 - 190,199. (in Chinese)

[24] 王法安, 曾悦, 张兆国,等. 三七种植土壤离散元仿真模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(4): 588 - 597.
WANG Faan, ZENG Yue, ZHANG Zhaoguo, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for *Panax notoginseng* planting soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(4): 588 - 597. (in Chinese)

[25] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农,等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294 - 300.
LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transations of the CSAE, 2016, 32(15): 294 - 300. (in Chinese)

[26] 郭琦. 混凝土泵车关键液压系统建模与仿真分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.
GUO Qi. Modeling and simulation analysis of key hydraulic system of concrete pump truck[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2023. (in Chinese)