doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.031

# 基于最小作用力的球形果蔬采摘灵巧手接触力优化

鲍秀兰[1,2]　任梦涛[1]　马萧杰[1]　高胜童[1]　包有刚[1]　李善军[1,2]

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘要**: 针对末端执行器采摘作用力与果蔬匹配性差,导致损伤率较高、通用性偏低的问题,提出一种基于灵巧手的球形果蔬无损抓取接触力优化方法。分析球形果蔬采摘的分离方案,建立有摩擦无损点接触模型,以采摘期的水蜜桃为研究对象,试验测定指尖材料与水蜜桃的静摩擦因数和无损接触参数。基于旋量理论建立多指灵巧手的运动学模型以及雅可比矩阵,分析果蔬采摘的力平衡约束,构建关节-接触点-果蔬的力位映射模型,提出基于最小作用力的灵巧手抓取规划方法,以采摘水蜜桃为例进行求解分析,基于快速非支配排序遗传算法(Nondominated sorting genetic algorithm II,NSGA-II)实现接触力的多目标寻优。水蜜桃采摘试验结果表明,该方法能实现对半径为 2.6~8 cm 水蜜桃的稳定抓取与采摘,有效避免采摘过程中果蔬损伤,实际测量值与理论计算值平均绝对接触力误差为 0.39 N,采摘成功率为 92%,无损率为 97.8%,平均采摘时间为 10.3 s,满足灵巧手无损稳定采摘的需求。

**关键词**: 球形果蔬; 采摘机器人; 灵巧手; 无损抓取; 接触力优化; 力封闭

**中图分类号**: TP241　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0333-09　　**OSID**:

# Optimization of Contact Force for Spherical Fruit and Vegetable Picking Dexterous Hand Based on Minimum Force

BAO Xiulan[1,2]　REN Mengtao[1]　MA Xiaojie[1]　GAO Shengtong[1]　BAO Yougang[1]　LI Shanjun[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*

2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

**Abstract**: Aiming at the problem that the end-effector picking force is poorly matched with fruits and vegetables, resulting in a high damage rate and low versatility, a contact force optimization method for non-destructive grasping of spherical fruits and vegetables based on dexterous hands was proposed. The separation scheme of spherical fruit and vegetable picking was analyzed, and a frictional non-destructive point contact model was established. Peaches in the picking period were taken as the research object, and the static friction coefficient and non-destructive contact parameters between the fingertip material and peaches were experimentally determined. The kinematic model and Jacobian matrix of the multi-finger dexterous hand were established based on the screw theory, the force balance constraint of fruit and vegetable picking was analyzed, and the force-position mapping model of joint - contact point - fruit and vegetable was constructed. A grasping planning method for dexterous hands based on minimum force was proposed, and the solution analysis was carried out using the picking of peaches as an example, and the optimal solution of the planning model was obtained based on the NSGA - II algorithm. Field peach picking experiments showed that this method can achieve stable grasping and picking of peaches with a radius of 2.6 ~ 8 cm, effectively avoiding damage to fruits and vegetables during the picking process. The average absolute contact force error between the actual measured value and the theoretical calculated value was 0.39 N, the picking success rate was 92%, the non-destructive rate was 97.8%, and the average picking time was 10.3 s, which met the needs of dexterous hands for non-destructive and stable picking.

**Key words**: spherical fruit and vegetable; picking robot; dexterous hand; lossless grab; contact force optimization; force closure

收稿日期: 2024-07-30　修回日期: 2024-09-03

**基金项目**: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202219)和国家重点研发计划项目(2020YFD1000101)

**作者简介**: 鲍秀兰(1984—),女,副教授,博士,主要从事果园机器人结构设计与控制研究,E-mail: orchidbaoxl@mail.hzau.edu.cn

**通信作者**: 李善军(1977—),男,教授,博士,主要从事水果生产机械化技术与智能装备研究,E-mail: shanjunlee@mail.huaz.edu.cn

## 0 引言

为满足非结构环境下果蔬机器人多元精准作业需求[1],提高末端执行器的通用性和灵活性对果蔬作业全程智能化、数字化至关重要[2-3]。果蔬精准操作任务种类繁多、场景复杂,包括采摘、疏花疏果、修剪等农艺作业,其中采收环节是较为典型的劳动密集型作业,劳动力成本占总投入的 40% ~ 50%[4]。灵巧手相比气动型、欠驱动型的末端执行器更灵活,不需要根据作业场景更换,结构特征使其能保持适宜的接触力完成精细的操作任务[5]。果实表皮脆弱、果肉细软,易出现机械损伤现象[6-7],在果蔬实际采摘中,灵巧手存在以下问题:缺乏精准的接触力,过大的力导致果实损伤,过小的力导致果实滑落;缺乏抓握稳定的判定依据,采摘稳定性差。

诸多学者对果实采摘末端执行器进行了研究[8-13],抓取的稳定性与无损性存在矛盾[14],果蔬采摘执行器通常将提高抓取成功率作为首要目标,通过施加更大的压力增大摩擦力,实现更稳固的抓取,然而无损性是果蔬末端执行器批量应用的必要前提。因此,确定合适的作用力实现无损接触,保证果蔬采摘力封闭的稳定性是必要的。

为了匹配给定任务需求下的最优抓取规划,国内外学者在接触力优化方面提出了许多抓取模式[15-23]。果蔬组织易被破坏,因此需在保证抓取过程稳定的前提下对施加的接触力进行优化,以降低抓取过程中对被抓取物体造成的损伤。

针对末端执行器采摘作用力与果蔬匹配性差、损伤率高等问题,本文提出一种基于灵巧手的球形果蔬无损抓取接触力优化方法,分析果蔬分离与力学特性,建立有摩擦无损点接触模型,构建灵巧手-接触点-果蔬的力位映射模型,基于非支配多目标遗传算法证明灵巧手无损抓取优化模型的可靠性,生成最优接触力采摘方案。最后开展水蜜桃采摘试验,验证该方法的有效性。

## 1 果蔬采摘农艺模型

### 1.1 果蔬分离方案

非结构环境下球形果蔬生长密集无序,枝叶果丛生交错,采摘姿态各异。采摘分离方式直接影响执行器的采摘能力,目前有垂直拉、水平拉、旋转和旋转-水平拉的分离方式,其中旋转-水平拉法所需分离力最小[24-25]。为提高采摘姿态在复杂场景下的通用性,模拟人工采摘施力动作,基于旋转与水平拉相结合的思想,提出一种掀拉-扭转的果蔬分离法,如图 1 所示,即沿果梗方向倾斜一定角度施加拉力,绕拉力施加力矩,用力螺旋表示分离力为 $\boldsymbol{F}_{p[6\times1]}$。

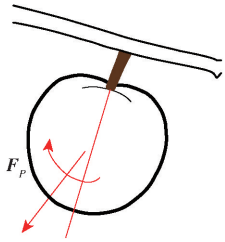



图 1 果蔬分离示意图

Fig. 1 Fruit and vegetable separation diagram

### 1.2 无损接触模型

灵巧手主要靠操作力采摘,故假设手指与果蔬表皮之间为有摩擦点接触,不考虑手指在果蔬表皮的滚动或滑动。如图 2 所示,抓取果蔬时接触力可表示为 $\boldsymbol{f}_{\text{tip}}=[f_x \quad f_y \quad f_z]^{\mathrm{T}}$,$f_x$、$f_y$、$f_z$ 分别为接触力 $\boldsymbol{f}_{\text{tip}}$ 在 $x$、$y$、$z$ 方向分量,接触力均位于摩擦锥内部,即操作力小于或等于抓取力与摩擦因数 $\mu$ 乘积。接触力分力中与接触面垂直的抓取力是导致果蔬损伤的主要原因,而与接触面相切的操作力会导致果皮擦伤。同时,接触力靠近摩擦锥边沿会增大滑移的可能性。故对果蔬的接触力应保持在一定阈值内,避免发生不确定损伤,提高接触稳定性,将无损状态下最大接触力分解为无损抓取力 $f_g$ 和无损操作力 $f_m$。因此,有摩擦无损点接触模型约束为

$$P=\{\sqrt{f_x^2+f_y^2}\leqslant\mu f_z \quad \sqrt{f_x^2+f_y^2}\leqslant f_m \quad 0\leqslant f_z\leqslant f_g\} \tag{1}$$

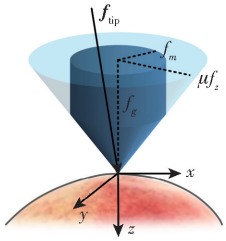



图 2 无损接触模型

Fig. 2 Frictional lossless point contact model

### 1.3 力学参数测定

#### 1.3.1 静摩擦因数

如图 3 所示,水蜜桃较其它果蔬更易受到损伤,故以水蜜桃“霞晖 5 号”为试验对象,测定其静摩擦因数。测量设备为 MXD-02 型摩擦因数仪(济南兰光机电技术有限公司),接触材料为聚氨酯橡胶,邵氏硬度为 40 A。试验过程中,将聚氨酯橡胶(150 mm × 80 mm × 2 mm)通过夹具固定在试验滑台上,用细绳连接拉力传感器和水蜜桃,水蜜桃稳定放置于接触材料上,设定摩擦因数仪砝码质量等于水蜜桃质量,试验滑台移动速度为 100 mm/min。为减小试验误差,对 3 个水蜜桃样品分别测试 3 次并

取平均值，试验结果如表 1 所示。

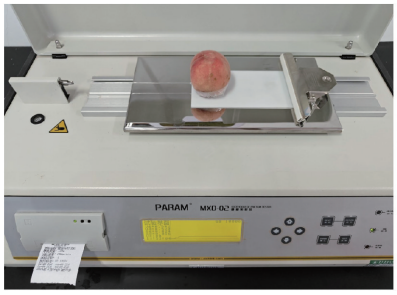


图 3　摩擦因数测定试验台

Fig. 3　Friction coefficient test bench

**表 1　静摩擦因数测定结果**

**Tab. 1　Static friction coefficient measurement results**

| 水蜜桃质量/g | 静摩擦因数 | 平均值 |
|---|---|---|
| 112 | 0. 512 | 0. 507 |
| | 0. 497 | |
| | 0. 513 | |
| 120 | 0. 528 | 0. 542 |
| | 0. 540 | |
| | 0. 557 | |
| 156 | 0. 481 | 0. 484 |
| | 0. 497 | |
| | 0. 475 | |

### 1. 3. 2　无损接触力

无损接触力可分解为无损抓取力和无损操作力。无损抓取力测定试验台主要包括灵巧手、FSR402 型薄膜压力传感器，如图 4 所示。薄膜压力传感器布置于指尖材料下，灵巧手指尖在水蜜桃正上方朝质心施加稳定压力 10 s，记录薄膜压力传感器的数值，即抓取力。从 2 ~ 8 N 每间隔 0. 5 N 做一组抓取力试验，共 13 组。在 25℃ 室温环境下放置 48 h，观察水蜜桃表皮及果肉褐变情况，记录无明显褐变组中最大抓取力为无损抓取力 $f_g$。

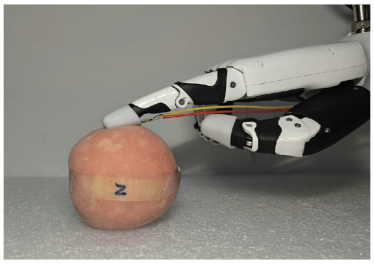


图 4　无损抓取力测定试验台

Fig. 4　Lossless grasping force test bench

无损操作力测定试验台主要包括铁架台、灵巧手、FSR402 型薄膜压力传感器、数字拉力计(0 ~ 50. 00 N，精度：0. 01 N)，如图 5 所示。托盘上的水蜜桃通过细绳在竖直方向上连接，同时将水蜜桃与数字拉力计在水平方向上连接。灵巧手指尖对水蜜桃正上方施加稳定的压力，将薄膜压力传感器保持在指定值 $f_g$。通过逐步增加拉力，改变数字拉力计的读数，并保持 10 s，定义为操作力。操作力从 2 ~ 8 N，每间隔 0. 5 N 做一次试验，共 13 组。在 25℃ 室温环境下放置 48 h，观察水蜜桃表皮及果肉褐变情况，记录无明显褐变组中最大操作力为无损操作力。

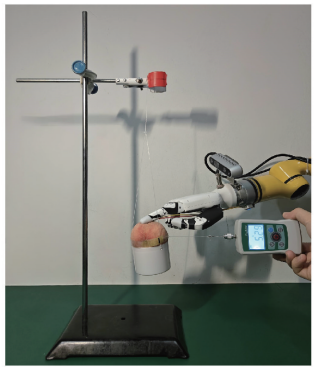


图 5　无损操作力测定试验台

Fig. 5　Nondestructive operating force test bench

试验测得水蜜桃的力学特性参数分别为：静摩擦因数平均值为 0. 51，无损抓取力平均值为 7. 5 N，无损操作力平均值为 3. 5 N。

## 2　灵巧手抓取模型

手指指端作用于垂直果梗的外径平面上，图 6 表示 $k$ 根手指的灵巧手抓取果蔬的模型，其中 $\{\boldsymbol{C}_k\}$ 为接触点坐标系，$\{\boldsymbol{O}\}$ 为果蔬质心坐标系。

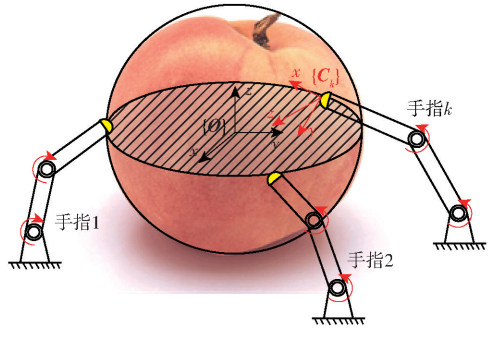



图 6　无损接触模型

Fig. 6　Fruit grasping model with dexterous hand

灵巧手抓取果蔬模型存在多级映射关系，如图 7 所示，这些关系可以分解为关节-接触点的位置与力映射、接触点-果蔬的位置与力映射。

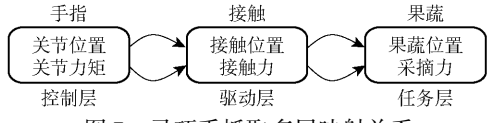



图 7　灵巧手抓取多层映射关系

Fig. 7　Dexterous hands grasp multi-layer mapping relationships

### 2. 1　关节-接触点的位置与力映射

在中指基关节处建立全局坐标系，拇指、食指、

中指、无名指、小指基坐标表示为$\{\boldsymbol{P}_i\}$,$i=1,2,3,4,5$。5 根手指基关节固连在手掌上,故各手指间相对位置固定,因此各手指基坐标相对中指基关节位姿为

$$\boldsymbol{P}_i=\boldsymbol{T}_i\boldsymbol{P}_3 \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{T}_i$——第 $i$ 根手指基坐标变换矩阵

$\boldsymbol{P}_3$——中指基关节处位姿矩阵

将灵巧手的每根手指等效为一个机械臂,因此可把灵巧手分解为多组机械臂得到整手运动学模型。建立单根手指的坐标系,求解每根手指的指尖位置和雅可比矩阵。

### 2.1.1 关节-接触点位置映射

不同于传统的运动学建模方法,指数积(Product of exponentials,POE)运动学建模法只需建立空间基坐标系与空间末端坐标系[26]。定义 $\boldsymbol{M}$ 为机械臂处于零位时从空间基坐标系到空间末端坐标系的坐标变换矩阵,$\boldsymbol{\omega}_i$ 为各关节轴方向矢量,$\boldsymbol{\nu}_i$ 为各关节轴位置矢量,$\boldsymbol{\xi}_i$ 为第 $i$ 个关节运动旋量,$\boldsymbol{\xi}_i=[\boldsymbol{\omega}_i\quad\boldsymbol{\nu}_i]^{\mathrm{T}}$。

则 $n$ 自由度空间机械臂 POE 运动学模型[27]可表示为

$$\boldsymbol{T}(\theta)=\prod_{i=1}^{n}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_i\theta_i}\boldsymbol{M} \tag{3}$$

其中

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}_i=\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{\omega}} & \boldsymbol{\nu}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}=\begin{bmatrix}0 & -\boldsymbol{\omega}_3 & \boldsymbol{\omega}_2\\ \boldsymbol{\omega}_3 & 0 & -\boldsymbol{\omega}_1\\ -\boldsymbol{\omega}_2 & \boldsymbol{\omega}_1 & 0\end{bmatrix}$$

式中 $\theta_i$——第 $i$ 个关节位置变量

$\hat{\boldsymbol{\omega}}$——$\boldsymbol{\omega}$ 对应的特殊正交群李代数

选取拇指进行分析,其余手指求解方法相同。如图 8 所示,建立拇指基坐标系$\{\boldsymbol{P}_1\}$与指尖坐标系$\{\boldsymbol{H}\}$。

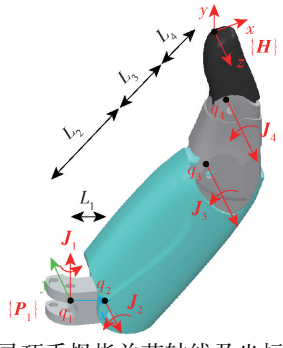



图 8 灵巧手拇指关节轴线及坐标示意图

Fig. 8 Axis and coordinate diagram of thumb joint of dexterous hand

拇指 POE 运动学模型参数如表 2 所示,零位状态下,拇指指尖坐标系$\{\boldsymbol{H}\}$相对拇指基坐标系$\{\boldsymbol{P}_1\}$的转移矩阵为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & L_1+L_2+L_3+L_4\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

表 2 拇指指数积运动学模型参数

Tab. 2 Thumb POE kinematic model parameters

| 关节 $i$ | $\boldsymbol{\omega}_i\in\mathbf{R}^3$ | $\boldsymbol{\nu}_i\in\mathbf{R}^3$ |
|---|---|---|
| 1 | $[0\quad 0\quad 1]^{\mathrm{T}}$ | $[0\quad 0\quad 1]^{\mathrm{T}}$ |
| 2 | $[0\quad -1\quad 0]^{\mathrm{T}}$ | $[0\quad 0\quad -L_1]^{\mathrm{T}}$ |
| 3 | $[0\quad -1\quad 0]^{\mathrm{T}}$ | $[0\quad 0\quad -(L_1+L_2)]^{\mathrm{T}}$ |
| 4 | $[0\quad -1\quad 0]^{\mathrm{T}}$ | $[0\quad 0\quad -(L_1+L_2+L_3)]^{\mathrm{T}}$ |

因此,将式(4)与表 2 的参数代入式(3),可得拇指关节到接触点映射关系为

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}c_1c_{234} & -c_1s_{234} & s_1 & P_x\\ s_1c_{234} & -s_1s_{234} & -c_1 & P_y\\ s_{234} & c_{234} & 0 & P_z\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{5}$$

其中

$$P_x=c_1(L_1+L_2c_2+L_3c_{23}+L_4c_{234})$$
$$P_y=s_1(L_1+L_2c_2+L_3c_{23}+L_4c_{234})$$
$$P_z=L_2s_2+L_3s_{23}+L_4s_{234}$$

$c_i$ 表示 $\cos\theta_i$,$s_i$ 表示 $\sin\theta_i$,$c_{ij}$表示 $\cos(\theta_i+\theta_j)$,$s_{ij}$表示 $\sin(\theta_i+\theta_j)$,$\theta_i$、$\theta_j$ 表示拇指第 $i$、$j$ 关节的位置变量,$i$、$j$ 取 1、2。

### 2.1.2 关节力矩-接触力的映射

给定 $\boldsymbol{T}=(\boldsymbol{R},\boldsymbol{p})$,定义其伴随变换矩阵为

$$\mathrm{Ad}(\boldsymbol{T})=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R} & 0\\ [\boldsymbol{p}]\boldsymbol{R} & \boldsymbol{R}\end{bmatrix} \tag{6}$$

对于串联机器人空间雅可比,通过旋量理论有

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})=[\boldsymbol{\xi}_1'\quad\boldsymbol{\xi}_2'\quad\cdots\quad\boldsymbol{\xi}_n'] \tag{7}$$

其中

$$\boldsymbol{\xi}_i'=\mathrm{Ad}\left(\prod_{k=1}^{i-1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{\xi}}_k\theta_k}\right)\boldsymbol{\xi}_i$$

将表 2 中模型参数代入式(6)得拇指空间雅可比为

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})=\begin{bmatrix}0 & s_1 & s_1 & s_1\\ 0 & -c_1 & -c_1 & -c_1\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & L_2c_1s_2 & c_1(L_2s_2+L_3s_{23})\\ 0 & 0 & L_2s_1s_2 & s_1(L_2s_2+L_3s_{23})\\ 0 & -L_1 & -L_1-L_2c_2 & -L_1-L_2c_2-L_3c_{23}\end{bmatrix} \tag{8}$$

关节力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 与接触力映射关系为

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}} \tag{9}$$

## 2.2 接触点运动学

根据抓取果蔬模型建立接触坐标系、果蔬质心

坐标系以及世界坐标系，选取果蔬质心坐标系为世界坐标系，如图 9 所示。

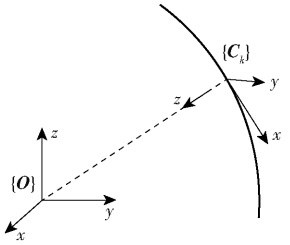



图 9　接触坐标系到果蔬坐标系的变换

Fig. 9　Transformation of contact coordinate system to fruit and vegetable coordinate system

为确定指尖接触力对果蔬的影响，将接触力转换到果蔬坐标系。第 $i$ 个接触坐标系 $\{\boldsymbol{C}_i\}$ 相对于果蔬坐标系 $\{\boldsymbol{O}\}$ 的位姿为 $\boldsymbol{T}_{OC_i}$，接触力在果蔬坐标系下表示为

$$\boldsymbol{F}_i = \boldsymbol{G}_i \boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}_i} = \mathrm{Ad}(\boldsymbol{T}_{OC_i})\boldsymbol{B}\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}_i} \tag{10}$$

其中　$\boldsymbol{B} = [\boldsymbol{I}_{3\times 3}\quad 0]^{\mathrm{T}}$

式中　$\boldsymbol{G}_i$——第 $i$ 个接触点的抓取矩阵

$\boldsymbol{B}$——有摩擦点接触的力螺旋基

$\boldsymbol{I}_{3\times 3}$——3 × 3 单位矩阵

当 $k$ 个手指接触力作用于果蔬时，接触力螺旋与外力螺旋的映射关系为

$$\boldsymbol{G}\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}} = \boldsymbol{F}_e \tag{11}$$

其中　$\boldsymbol{G} = [\boldsymbol{G}_1\quad \boldsymbol{G}_2\quad \cdots\quad \boldsymbol{G}_k]$

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}} = [\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}_1}^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}_2}^{\mathrm{T}}\quad \cdots\quad \boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}_k}^{\mathrm{T}}]$$

式中　$\boldsymbol{G}$——抓取矩阵

$\boldsymbol{F}_e$——接触合力所平衡的外力螺旋

### 2.3　最小作用力抓取规划

采收环节的过度挤压与摩擦是造成果蔬机械损伤的主要原因，因此期望用最小的抓取力与操作力实现稳定的抓取，保证果蔬不受损伤。

(1)以各接触点最小抓取力为指标，建立指标函数 $\boldsymbol{\Psi}$，$\boldsymbol{\Psi}$ 值越小，果蔬无损率越高。

$$\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}}) = \boldsymbol{f}_z \boldsymbol{Q} \boldsymbol{f}_z^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

其中　$\boldsymbol{f}_z = [f_{z1}\quad f_{z2}\quad \cdots\quad f_{zk}]$

式中　$\boldsymbol{f}_z$——抓取力矩阵

$\boldsymbol{Q}$——抓取力权重矩阵

(2)接触点处的摩擦锥角 $\alpha = \arctan\mu$，第 $i$ 个接触点处接触力与法线的夹角 $\beta_i = \arctan(\sqrt{f_{xi}^2 + f_{yi}^2}/f_{zi})$，在保证各指尖抓取力最小的前提下，使指尖力最接近法线方向，实现最小操作力建立指标函数 $\boldsymbol{\Phi}$。

$$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}}) = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{\beta_i - \alpha}{\beta_i + \alpha} \tag{13}$$

$\boldsymbol{\Phi}$ 的取值范围为 $(-1, 0]$，当 $\beta_i = \alpha$ 时，接触力位于摩擦锥的锥面，处于相对滑动的临界点；当 $\beta_i = 0$ 时，接触力与圆锥体的法线重合，抓取最稳定。

以最小作用力为目标，构建优化目标函数 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}})$，同时考虑抓取模型下的约束条件，包括稳定采摘约束、无损接触约束等，多指无损采摘果蔬的多目标接触力优化模型可归纳为

$$\begin{cases} \min \boldsymbol{f}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}}) = \{\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}}), \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}})\} \\ \text{s. t.} \begin{cases} \boldsymbol{F}_p - \boldsymbol{F}_e \leqslant 0 \\ \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{tip}} - \boldsymbol{\tau}_{\max} \leqslant 0 \\ \boldsymbol{P} \end{cases} \end{cases} \tag{14}$$

式中　$\boldsymbol{\tau}_{\max}$——最大关节力矩

## 3　接触力优化与采摘试验

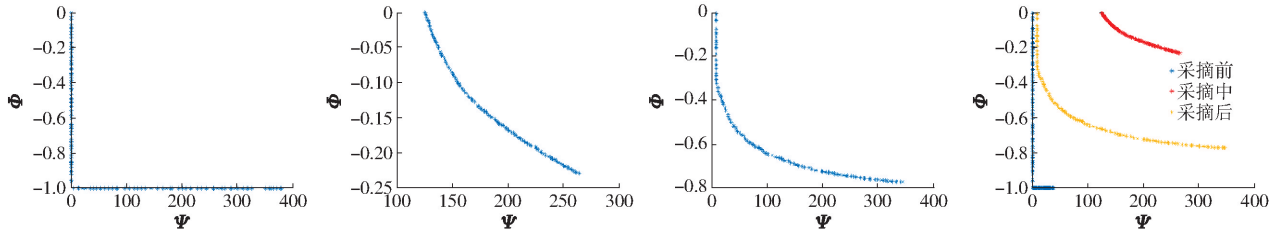
### 3.1　基于 NSGA－II 算法的采摘接触力优化

NSGA－II 算法是 DEB 等[28]提出的一种基于快速非支配排序的改进型多目标进化算法，通过模拟生物的种群进化迭代有效解决带约束的多目标问题。以三指抓取水蜜桃模型为例，水蜜桃半径为 0.062 m，质量为 112 g，摩擦因数为 0.51，在水蜜桃外径处选取接触点，抓取矩阵为

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1.000\,0 & -0.587\,8 & 0 & 0.809\,0 & 0.241\,9 & 0 & 0.970\,3 \\ 1.000\,0 & 0 & 0 & -0.809 & 0 & -0.587\,8 & -0.970\,3 & 0 & 0.241\,9 \\ 0 & -1.000\,0 & 0 & 0 & -1.000\,0 & 0 & 0 & -1.000\,0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.018\,2 & 0 & 0 & 0.075\,0 & 0 \\ 0 & 0.031\,0 & 0 & 0 & -0.025\,1 & 0 & 0 & -3.008\,0 & 0 \\ 0.031\,0 & 0 & 0 & 0.031\,0 & 0 & 0 & 0.310\,0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

作用力分别为采摘前的采摘力 $\boldsymbol{F}_{p1} = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$，采摘中采摘力 $\boldsymbol{F}_{p2} = [0\ -3\ -5.2\ 0\ -0.1\ -0.17]$，采摘后采摘力 $\boldsymbol{F}_{p3} = [0\ 0\ 1.12\ 0\ 0\ 0]$。其中，$\boldsymbol{F}_{p1}$ 为未与水蜜桃接触，$\boldsymbol{F}_{p2}$ 为分离瞬间的峰值力，$\boldsymbol{F}_{p3}$ 仅克服水蜜桃自重。算法环境为 Matlab R2022a，设置算法主要参数：原始种群为 120，交叉遗传概率为 0.8，变异概率为 0.5，最大迭代次数为 2 000。

图 10 为迭代后帕累托前沿曲线，横坐标为最小抓取力指标，数值越小表示无损率越高；纵坐标为最小操作力指标，数值越小表示稳定性越好，可以看出抓取力和操作力 2 个优化目标存在相互矛盾的关系。采摘前不产生作用力，由图 10a 可知，接触力等于或趋近于 0，理论结果与实际情况相符。在图 10b




(a) 采摘前 (b) 采摘中 (c) 采摘后 (d) 对比

图 10 接触力优化结果

Fig. 10 Contact force optimization results

和图 10c 中，$\Psi$ 分别为[150,165]和[45,55]时，对应的优化策略位于帕累托前沿的拐点处，该区间内采摘的成功率和无损率都比较好。由图 10d 可以看出，采摘后与采摘中的帕累托前沿呈支配关系，表明采摘瞬间所需要的作用力大于采摘后的作用力。帕累托前沿整体分布较均匀、连续性强，验证了模型的有效性与准确性，表现出不同采摘状态下无损率与稳定性之间的负相关关系。通过对结果分析，在不同设计方案中，提高无损率的同时优化稳定性，指导实际应用中接触力选择与调整。

### 3.2 田间试验

#### 3.2.1 系统搭建

为验证该方法的正确性与可行性，搭建了灵巧手采摘试验样机如图 11 所示，由灵巧手、机械臂、视觉系统、工控机和移动底盘组成，操作系统为 Ubuntu 20.04、ROS noetic。

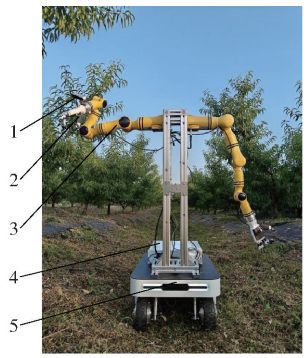



图 11 灵巧手试验样机

Fig. 11 Dexterous hand test prototype

1. RH56DFX 型灵巧手 2. RM65－BI SE 型机械臂 3. D435 型深度相机 4. 工控机 5. 松灵 Ranger mini 型移动底盘

选取华中农业大学桃园基地(114°37′25″N，30°47′60″E)成熟期(6 月下旬)的水蜜桃，开展灵巧手采摘试验。试验包括 3 个阶段：采摘前期，灵巧手处于初始手势(图 12a)，机械臂到达预定采摘位姿(图 12b)；采摘中期，灵巧手形成抓取手势并逐渐接触水蜜桃(图 12c)，机械臂执行采摘轨迹实现果梗分离(图 12d)；采摘后期，机械臂将灵巧手移动至果筐位置。

#### 3.2.2 接触力测试

对半径为 0.062 m、质量为 112 g 的水蜜桃进行



(a) 初始手势 (b) 摘取位姿 (c) 抓取果蔬 (c) 分离果蔬

图 12 灵巧手采摘流程

Fig. 12 Dexterous hand picking process

三指采摘试验，采用 FSR402 型电阻式薄膜压力传感器，贴置手指指尖测量抓取力，采样间隔为 0.2 s，以获取每根手指的实际抓取力数据，共设计 5 组重复试验，抓取力误差带如图 13 所示。理论值来源于帕累托前沿接触力优化结果，分采摘前、中、后 3 个阶段。采摘过程中，机械臂在 0～2.8 s 移动到摘取位姿。随后抓取水蜜桃，同时抓取力在 2.8～3.2 s 内逐渐增大，抓取稳定后机械臂通过掀拉-扭转使果梗发生分离，抓取力在 4.4 s 处达到峰值。4.6 s 后果梗完全分离，灵巧手稳定抓取水蜜桃至果筐，此时抓取力趋于稳定。理论计算值与实际测量值在总体趋势上呈现良好的一致性，平均绝对接触力误差为 0.39 N。

采摘瞬间的抓取力与理论值存在一定误差，主要由于果梗分离所需要的力具有不确定性，且分离瞬间水蜜桃加速度骤增，导致接触力突变。采摘后的抓取力有小幅低频的波动，原因在于采摘后机械臂避障轨迹引起末端灵巧手姿态变化，从而导致水蜜桃的质心坐标系发生改变，最终影响了接触力的

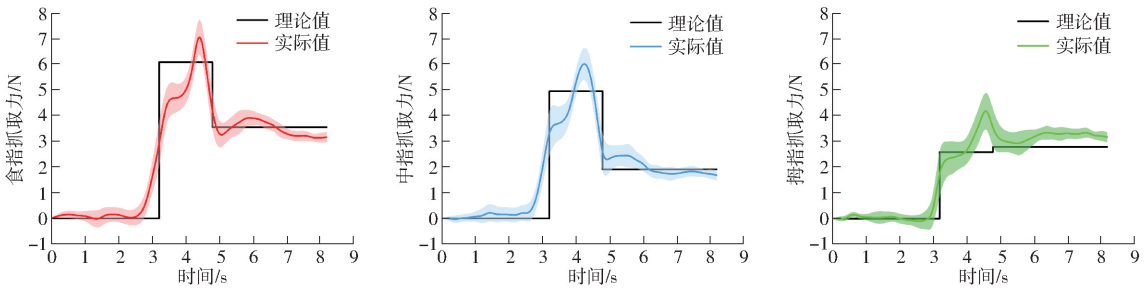



图 13　抓取力误差曲线

Fig. 13　Grasp force error diagrams

准确性。

### 3.2.3　采摘试验

为进一步评估接触力优化方法的有效性，将其与常用抓取方法的采摘性能进行比较。设置力控模式和位控模式 2 个对照组，其中，力控模式抓取力设定为恒力 6 N；位控模式抓取位置为接触到水蜜桃后，手指由接触点向果蔬质心压入 1 mm[29]。共设计 110 组实地果园水蜜桃采摘试验，并按抓取方法分为 3 组，将采摘后水蜜桃置于 25℃ 室温环境下 48 h，观察水蜜桃表皮及果肉褐变情况。采摘试验结果见表 3。

**表 3　水蜜桃采摘试验结果**

**Tab. 3　Experimental data of peach picking**

| 组别 | 采摘数量 | 平均峰值抓取力/N | 平均采摘时间/s | 无损率/% | 成功率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 接触力优化 | 50 | 6.10 | 10.3 | 97.8 | 92.0 |
| 力控模式 | 30 | 7.72 | 9.8 | 70.4 | 90.0 |
| 位控模式 | 30 | 6.37 | 10.7 | 96.0 | 83.3 |

对不同的抓取模式在平均峰值抓取力、采摘时间、无损率和采摘成功率等关键指标进行比较。平均峰值抓取力是影响果蔬无损率的重要指标，接触力优化组平均峰值抓取力为 6.10 N，低于其他两组模式。力控模式所需的采摘时间最短，但在果梗分离瞬间机械臂摆动时产生的峰值力过大，导致水蜜桃发生形变甚至裂纹，无损率为 70.4%，显著低于其它两组模式。位控模式采摘成功率为 83.3%，低于接触力优化的 92%，这一差距的原因主要在于其对于抓取条件变化的适应性较差，从而影响了采摘的成功率。从平均峰值抓取力、采摘效率、采摘质量和采摘稳定性 4 方面综合分析，本文提出的果蔬采摘接触力优化方法具有良好的效果，进一步验证了该方法的有效性。

通过对不同半径水蜜桃的采摘结果进行分析发现，接触力优化方法的采摘失败组中水蜜桃的半径均小于 2.6 cm。这是因为在较大半径的水蜜桃中，接触点定位误差占果蔬总体尺寸的比例较小，接触点误差对较大尺寸果蔬的影响相对有限。该方法能实现对半径为 2.6 ~ 8 cm 水蜜桃的稳定抓取与采摘，有效避免采摘过程中果蔬的损伤，灵巧手能够实现对水蜜桃的无损稳定采摘。

## 4　结论

（1）构建了关节-接触点-果蔬的力位映射模型，提出了一种灵巧手采摘接触力优化方法，基于 NSGA - II 算法对规划模型进行了求解，实现对球形果蔬无损稳定采摘的接触力分配。

（2）建立了果蔬的有摩擦无损点接触模型，分析了基于人工的果蔬采摘分离方案，通过试验测得指尖材料与水蜜桃的静摩擦因数和无损接触参数。

（3）针对水蜜桃开展了理论计算与采摘试验，结果表明该方法能实现对半径为 2.6 ~ 8 cm 水蜜桃的稳定抓取与采摘，有效避免采摘过程中果蔬的损伤，实际测量值与理论计算值的平均绝对接触力误差为 0.39 N，采摘成功率为 92%，无损率为 97.8%，平均采摘时间为 10.3 s。

## 参　考　文　献

[1]　赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报，2021，42(6)：1 - 7.
ZHAO Chunjiang. Current situations and prospects of smart agriculture[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 1 - 7. (in Chinese)

[2]　陈青，殷程凯，郭自良，等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报，2023，39(4)：1 - 15.
CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(4): 1 - 15. (in Chinese)

[3]　苟园旻，闫建伟，张富贵，等. 水果采摘机器人视觉系统与机械手研究进展[J]. 计算机工程与应用，2023，59(9)：13 - 26.
GOU Yuanmin, YAN Jianwei, ZHANG Fugui, et al. Research progress on vision system and manipulator of fruit picking robot

[J]. Computer Engineering and Applications,2023,59(9):13 - 26. (in Chinese)
[4] 赵春江,范贝贝,李瑾,等. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J]. 智慧农业(中英文),2023,5(4):1 - 15.
ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin, et al. Agricultural robots: technology progress, challenges and trends[J]. Smart Agriculture,2023,5(4):1 - 15. (in Chinese)
[5] 蔡世波,陶志成,万伟伟,等. 机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战[J]. 机械工程学报,2021,57(15):1 - 14.
CAI Shibo,TAO Zhicheng,WAN Weiwei,et al. Multi-fingered dexterous hands: from simplicity to complexity and simplifying complex applications[J]. Journal of Mechanical Engineering,2021,57(15):1 - 14. (in Chinese)
[6] ZHANG B,ZHOU J,MENG Y,et al. Comparative study of mechanical damage caused by a two-finger tomato gripper with different robotic grasping patterns for harvesting robots[J]. Biosystems Engineering,2018,171:245 - 257.
[7] JI W,TANG C,XU B,et al. Contact force modeling and variable damping impedance control of apple harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,198:107026.
[8] 鲍秀兰,马志涛,马萧杰,等. 丘陵果园自然环境下柑橘采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(4):124 - 135.
BAO Xiulan,MA Zhitao,MA Xiaojie,et al. Design and experiment of citrus picking robot in hilly orchard natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):124 - 135. (in Chinese)
[9] TINOCO V,SILVA M F,SANTOS F N,et al. A review of pruning and harvesting manipulators[C]//2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions,2021:155 - 160.
[10] 魏博,何金银,石阳,等. 欠驱动式柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):120 - 128.
WEI Bo,HE Jinyin,SHI Yang,et al. Design and experiment of underactuated end-effector for citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):120 - 128. (in Chinese)
[11] CHEN X,LI Z,WANG Y,et al. Effect of fruit and hand characteristics on thumb-index finger power-grasp stability during manual fruit sorting[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,157 :479 - 487.
[12] 赵云伟,黄浩然,刘晓敏,等. 无系留气动自适应球果采摘软体手爪设计与实验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):74 - 84.
ZHAO Yunwei, HUANG Haoran, LIU Xiaomin, et al. Design and grasping experiments on untethered adaptive pneumatic soft gripper for globose fruit picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):74 - 84. (in Chinese)
[13] 夏红梅,夏娟,甄文斌,等. 番木瓜摘取的接触力学模型构建与试验[J]. 华南农业大学学报,2017,38(3):99 - 105.
XIA Hongmei,XIA Juan,ZHEN Wenbin,et al. Design and test of a contact mechanics model for papaya picking[J]. Journal of South China Agricultural University,2017,38(3):99 - 105. (in Chinese)
[14] 秦欢欢,赖虹妃,刘坤,等. 面向球果抓取的主动式三指手爪设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):67 - 74.
QIN Huanhuan,LAI Hongfei,LIU Kun,et al. Design and experiment of active gripper for spherical fruit grasping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):67 - 74. (in Chinese)
[15] 刘庆运,岑豫皖,谢能刚,等. 基于抓取稳定性的手指接触力规划算法[J]. 机械工程学报,2010,46(7):57 - 62.
LIU Qingyun,CEN Yuwan,XIE Nenggang,et al. Optimization algorithm for contact forces based on grasping stability[J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(7):57 - 62. (in Chinese)
[16] 莫海军,黄平. 基于最大力螺旋多指手抓取规划[J]. 机械工程学报,2009,45(3):258 - 262.
MO Haijun,HUANG Ping. Planning of grasping with multifingered hands based on the maximal external wrench[J]. Journal of Mechanical Engineering,2009,45(3):258 - 262. (in Chinese)
[17] 文双全,吴铁军. 多边形物体带摩擦抓取的最优规划算法[J]. 机械工程学报,2010,46(23):45 - 52.
WEN Shuangquan,WU Tiejun. Optimal planning algorithm for polygonal object grasping with frictional contacts[J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(23):45 - 52. (in Chinese)
[18] 郭语,孙志峻. 机器人多指手的多目标优化抓取规划[J]. 东南大学学报(自然科学版),2012,42(4):643 - 648.
GUO Yu,SUN Zhijun. Multi-objective optimization grasping planning for multifingered robot hand[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2012,42(4):643 - 648. (in Chinese)
[19] YU D,YU Z,ZHOU Q,et al. Grasp optimization with constraint of contact points number for a humanoid hand[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics,2017: 2205 - 2211.
[20] RAKESH V,SHARMA U,MURUGAN S,et al. Optimizing force closure grasps on 3D objects using a modified genetic algorithm[J]. Soft Computing, 2018,22:759 - 772.
[21] 韩伟,陈恩茂,徐志刚,等. 灵巧手最小抓取作用力规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(6):80 - 83,87.
HAN Wei,CHEN Enmao,XU Zhigang,et al. The minimum grip force planning of the dexterous hands[J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology,2020(6):80 - 83,87. (in Chinese)
[22] 李泳耀,江磊,杜宇,等. 面向精细抓取的刚软耦合仿人手作用力优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(5):144 - 149.
LI Yongyao,JIANG Lei,DU Yu,et al. Contact force optimization for precision grasping of rigid-soft coupled anthropomorphic hand[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2024,52(5):144 - 149. (in Chinese)
[23] CLOUTIER A,YANG J. Grasp force optimization approaches for anthropomorphic hand[J]. Journal of Mechanisms and

Robotics,2018,10(1):011004.
[24] FAN P,YAN B,WANG M,et al. Three-finger grasp planning and experimental analysis of picking patterns for robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,188:106353.
[25] JI W,HE G,XU B,et al. A new picking pattern of a flexible three-fingered end-effector for apple harvesting robot[J]. Agriculture, 2024,14(1):102.
[26] 魏武,李艳杰,廖志鹏,等. 基于旋量理论的蛇形机器人运动学建模[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(2):1-8.
WEI Wu,LI Yanjie,LIAO Zhipeng,et al. Kinematics modeling of snakelike robot based on screw theory[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2019,47(2):1-8. (in Chinese)
[27] 乔贵方,杜宝安,张颖,等. 基于 POE 模型的工业机器人运动学参数二次辨识方法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):419-425.
QIAO Guifang,DU Baoan,ZHANG Ying,et al. Quadratic identification method of kinematic parameters of industrial robots based on POE model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):419-425. (in Chinese)
[28] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S,et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
[29] 周德志,卢立新. 水蜜桃动态松弛特性与模型表征[J]. 包装工程,2005(6):12-13,21.
ZHOU Dezhi,LU Lixin. Dynamic relaxation property and modelling for peach[J]. Packaging Engineering,2005(6):12-13,21. (in Chinese)

(上接第 289 页)

[27] 王宝山. 小粒径种子兼用精量穴播集排系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
WANG Baoshan. Design and experiment of precision hill-seeding centralized metering system for small particle size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[28] CEEN Zeren, XUE Duomei, WANG Guoqiang, et al. Simulation and optimization of the tracked chassis performance ofelectric shovel based on DEM-MBD[J]. Powder Technology, 2021, 390: 428-441.
[29] 卢琦,刘芳建,刘立晶,等. 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证[J]. 农业机械学报,2023,54(10):46-57.
LU Qi, LIU Fangjian, LIU Lijing, et al. Establishment and verification of discrete element model for seed furrow soil-seed-covering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):46-57. (in Chinese)
[30] KAI Suna, YUAN Jianqun, ZHAO Jinwen, et al. A DEM-based general modeling method and experimental verification for wheat plants in the mature period[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,214:108283.
[31] 姚文燕,赵殿报,苗河泉,等. 免耕播种机浅旋清茬斜置式防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):42-52.
YAO Wenyan, ZHAO Dianbao, MIAO Hequan, et al. Design and experiment of oblique anti-blocking device for no-tillage planter with shallow plowing stubble clearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):42-52. (in Chinese)
[32] 姚文燕. 麦-玉轮作区玉米免耕播种主动防堵技术研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
YAO Wenyan. Reserch on active anti-blocking technology of no-tillage seeding of corn in wheat-corn rotation area[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2023. (in Chinese)
[33] 张智泓,赵亮亮,赖庆辉,等. 基于 DEM-MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(15):10-20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 10-20. (in Chinese)
[34] 夏俊芳,张朋,苑宏文,等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报,2024,55(9):174-184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen,et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):174-184. (in Chinese)
[35] XIE Dongbo, HE Jiaxun, LIU Tao, et al. Establishment and validation the DEM-MBD coupling model of flexible straw-Shajiang black soil-walking mechanism interactions[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,224:109203.
[36] WANG Yueming, XUE Weiliang, MA Yunhai, et al. DEM and soil bin study on a biomimetic disc furrow opener[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,156:209-216.