

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.03.002

曾功俊, 陈建能, 夏旭东, 等. 非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3): 06-10, 18

Zeng Gongjun, Chen Jianneng, Xia Xudong, et al. Design and experiment of a drag-type carrot harvesting device driven by non-circular gears [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(3): 06-10, 18

非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置设计与试验^{*}

曾功俊^{1, 2}, 陈建能^{2, 3}, 夏旭东^{2, 3}, 何也能¹

(1. 浙江工业职业技术学院, 浙江绍兴, 312000; 2. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州市, 310018;
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州市, 310018)

摘要: 针对传统匀速驱动的拉拽式胡萝卜收获装置存在胡萝卜根茎分离效果差等问题, 基于拉拽杆改进运动特性, 提出非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置。以拉拽杆改进运动特性为设计目标, 采用逆向分析法建立拉拽杆速度曲线与非圆齿轮节曲线的数学关系式, 设计非圆齿轮驱动的新型拉拽式胡萝卜根茎分离机构。运用 UG 三维设计软件进行三维建模与运动仿真, 结果显示拉拽杆仿真速度曲线与理论设计速度曲线吻合。研制非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜根茎分离装置试验台, 并进行胡萝卜根茎分离对照试验。结果表明, 胡萝卜根茎分离的成功率为 97.1%, 损伤率为 4.9%。相比于传统拉拽式胡萝卜根茎分离装置, 非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜根茎分离装置有助于改善胡萝卜根茎分离效果, 可为拉拽式胡萝卜收获机优化提供参考。

关键词: 胡萝卜; 拉拽式; 收获装置; 逆向设计; 根茎分离; 运动特性

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 03-0006-06

Design and experiment of a drag-type carrot harvesting device driven by non-circular gears

Zeng Gongjun^{1, 2}, Chen Jianneng^{2, 3}, Xia Xudong^{2, 3}, He Yeneng¹

(1. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing, 312000, China; 2. Faculty of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018, China; 3. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou, 310018, China)

Abstract: To solve the problem of poor carrot root-stem separation in traditional constant-speed drag-type carrot harvesting devices, this paper proposes a drag-type carrot harvesting device driven by non-circular gears based on the improved motion characteristics of the drag rod. Taking the motion characteristics of the drag rod as the design goal, the mathematical relationship between the drag rod speed curve and the non-circular gear pitch curve is established by using the reverse analysis method. Based on this, a new drag-type carrot root-stem separation mechanism driven by non-circular gears is designed. UG 3D design software is used for 3D modeling and motion simulation, and the results show that the simulated speed curve of drag rod is consistent with the theoretically designed speed curve. A test bench for the non-circular gear-driven drag-type carrot root-stem separation device is developed, and the tests of carrot root-stem separation are conducted. The results show that the success rate of carrot root-stem separation is 97.1%, and the damage rate is 4.9%. Compared with the traditional drag-type carrot root-stem separation device, the non-circular gear-driven device improves the effect of carrot root-stem separation, providing a reference for optimizing the drag-type carrot harvesters.

Keywords: carrots; drag-type; harvesting device; reverse design; root-stem separation; motion characteristic

0 引言

胡萝卜营养丰富, 广泛种植于世界各地, 我国胡萝卜

种植面积与总产量一直稳居世界前列^[1]。胡萝卜根茎分离是胡萝卜收获过程中最重要的工序, 胡萝卜根茎分离装置具有提高胡萝卜收获效率、增产增收等优

收稿日期: 2023 年 10 月 9 日 修回日期: 2024 年 2 月 29 日

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51805487); 浙江工业职业技术学院“专业学科一体化建设”科研项目(XKC202212009)

第一作者: 曾功俊, 男, 1989 年生, 武汉人, 博士研究生, 讲师; 研究方向为代农业装备与技术。E-mail: 15902775059@163.com

通讯作者: 陈建能, 男, 1972 年生, 福建泉州人, 博士, 教授; 研究方向为农业机械设计与机构数值分析。E-mail: jiannengchen@zstu.edu.cn

势,因此,加大胡萝卜收获装置的研发投入是提高胡萝卜生产规模和效益的重要途径^[2]。

拉拽式胡萝卜收获装置通过胡萝卜与拉杆之间的拉拽作用实现胡萝卜与胡萝卜缨子分离,进而完成胡萝卜收获任务。该收获装置具有结构简单、可靠性高、能适应恶劣工作环境等优势。然而,在胡萝卜收获过程中,拉拽杆与胡萝卜的拉拽作用容易擦伤胡萝卜,且存在胡萝卜根茎分离不彻底的现象,导致胡萝卜损伤率高和收获成功率低等问题。为改善拉拽式胡萝卜收获装置的工作性能,研究人员针对拉拽式胡萝卜收获装置工作机理开展研究,如 Xia 等^[3]基于有限元显式动力学模拟胡萝卜与拉杆之间的冲击条件,结合拉伸试验和压缩试验提出了胡萝卜芯、肉、茎的数学模型,并采用自研的钟摆装置进行冲击试验验证理论模型,为降低胡萝卜损伤率提供理论参考。曾功俊等^[4-6]运用力学试验机对胡萝卜缨子力学特性进行研究,结果表明,拉拽杆的运动特性对胡萝卜根茎分离效果影响显著,据此提出改进型拉拽杆速度曲线。上述研究结果对改善胡萝卜根茎分离效果有指导意义,但有关拉拽杆运动特性的研究均停留于理论分析,实践应用研究鲜有报道。

为进一步降低胡萝卜损伤率,提高胡萝卜根茎分离成功率,根据拉拽式胡萝卜收获装置工作机理,基于拉拽杆改进运动特性,提出非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置。通过建立三维模型和运动仿真验证机构设计的合理性与正确性,基于此研制试验平台,并以传统拉拽式胡萝卜根茎分离装置为参照进行胡萝卜根茎分离试验,为改善拉拽式胡萝卜收获机性能提供新思路。

1 拉拽式胡萝卜收获装置工作原理

1.1 整机工作原理

为便于机械化操作,胡萝卜收获过程主要分为胡萝卜拔取、输送和根茎分离等阶段^[7]。拉拽式胡萝卜收获装置主要由输送装置和拉拽式胡萝卜根茎分离装置组成(图1)。

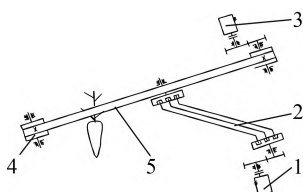


图1 拉拽式胡萝卜收获装置简图

Fig. 1 Sketch of a pull-type carrot harvester
1. 拉拽杆液压马达 2. 拉拽装置 3. 输送带液压马达
4. 从动带轮 5. 输送带

如图1所示,拉拽式胡萝卜收获装置作业时,首先,由挖掘部件对深埋于土中的胡萝卜进行松土,然后,输送带夹持胡萝卜缨子沿输送带方向往上运动,运

动到特定位置时,拉拽装置中两组拉拽杆拉拽胡萝卜往下运动,这样在拉拽杆和输送带的共同作用下实现胡萝卜根茎分离。

1.2 根茎分离装置工作原理

根茎分离装置(图2)是拉拽式胡萝卜收获装置的关键部件,主要由驱动齿轮箱、主动圆盘、拉拽杆、从动圆盘以及支撑板组成。拉拽杆一端插入主动圆盘的铰接孔内,另一端插入从动圆盘的铰接孔内。工作时,动力装置通过驱动齿轮箱驱动主动圆盘转动,带动插入主动圆盘铰接孔内的拉拽杆在主动圆盘所在平面内做圆周平动,拉拽杆另一端在结构的约束下推动从动圆盘转动,驱动拉拽杆在主动圆盘所在平面内做圆周平动^[8]。左右两边的拉拽杆在运动过程中会有重叠区域,该区域为胡萝卜拉拽杆工作区。以拉拽杆所在平面建立 x 轴和 y 轴,垂直拉拽杆所在平面方向建立 z 轴。当输送带夹持胡萝卜缨子进入拉拽杆工作区时,拉拽杆与胡萝卜根部接触并沿 z 轴方向产生作用力,在输送带的配合下完成拉拽胡萝卜动作,实现胡萝卜根茎分离。

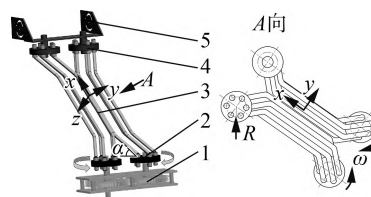


图2 胡萝卜根茎分离机构运动分析

Fig. 2 Movement analysis of carrot root-stem separation mechanism

1. 齿轮箱 2. 主动圆盘 3. 拉拽杆 4. 从动圆盘 5. 支撑板

传统拉拽式胡萝卜收获机通常由圆柱齿轮匀速驱动根茎分离装置。工作时,在转速为 ω 的主动圆盘驱动下,拉拽杆在主动圆盘所在平面做圆周平动,其纵向平移速度 v 如式(1)所示。

$$v = \omega R \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: R ——拉拽杆的圆周平移运动半径;

t ——主动圆盘转动时间。

根据拉拽杆与主动圆盘的角度关系,可计算出拉拽杆沿 z 轴方向的速度 v_z ,如式(2)所示。

$$v_z = v \cos(0.5\pi - \alpha) \quad (2)$$

式中: α ——主动圆盘和拉拽杆的夹角。

工作时,胡萝卜与拉拽杆一起运动,因此,在拉拽杆作用下,胡萝卜沿 z 轴方向的运动速度与拉拽杆相同。由式(1)和式(2)可得式(3)。

$$v_z = \omega R \sin \alpha \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

2 拉拽杆运动特性分析

2.1 传统拉拽杆速度曲线分析

拉拽式胡萝卜根茎分离装置通过拉拽杆与胡萝卜

共同作用来完成胡萝卜根茎分离,拉拽杆作用方向(图 3(a)中 z 轴方向)速度的变化情况决定拉拽杆与胡萝卜之间作用力的变化情况。传统拉拽式胡萝卜根茎分离装置中的拉拽杆由主动圆盘匀速驱动,当 $R = 50 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 时,由式(3)可知,拉拽杆作用方向速度曲线为正弦曲线,如图 3(b)所示。实际工作中,当主动圆盘转角为 $50^\circ \sim 95^\circ$ 时,两相对拉拽杆的位置重叠甚至相互交错,这个阶段是拉拽杆与胡萝卜相互作用的时段(即拉拽杆的工作时段)。由图 3(b)可知,正弦型拉拽杆作用方向速度曲线的特点为:在整个工作时段,拉拽杆速度从 0.35 m/s 一直增加到最高速度 0.5 m/s ,整个过程一直处于变加速状态,速度增幅为 0.15 m/s ,加速度逐渐减小。

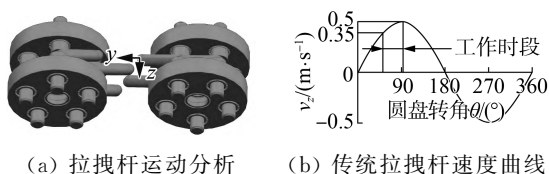


图 3 传统拉拽杆运动特性

Fig. 3 Motion characteristics of traditional drag-rod

2.2 改进型拉拽杆速度曲线分析

由式(3)可知,主动圆盘和拉拽杆的夹角、拉拽杆的圆周平移运动半径以及圆盘转速均对拉拽杆作用在胡萝卜上的运动特性有影响。近年来,学者们聚焦于胡萝卜收获机结构参数对胡萝卜根茎分离效果的影响,忽略拉拽杆运动特性对胡萝卜根茎分离效果的影响。为此,文献[4]对胡萝卜缨子进行力学特性试验,结果表明:拉拽杆以较高速度瞬间作用在胡萝卜上时,胡萝卜根茎分离效果良好。结合前期的研究成果,并根据传统正弦型拉拽杆速度曲线的特点,提出改进型拉拽杆速度曲线^[4],如图 4 所示,其特点为:整体形状类似正弦曲线,第一阶段拉拽杆速度快速均匀加速到最高点;第二阶段进入工作状态,保持稳定高速状态,速度增幅为 0 m/s 。工作阶段,拉拽杆能以较高速度瞬间作用在胡萝卜上,并持续输出作用力,满足拉拽杆以较高速度瞬间作用在胡萝卜的条件,有利于改善胡萝卜根茎分离效果。然而该结论仅停留在力学测试仪的分析上,并没有在胡萝卜根茎分离装置上进行深入研究和验证。

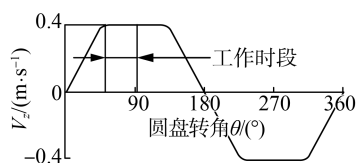


图 4 改进型拉拽杆速度曲线

Fig. 4 Improved drag-rod speed curve

注: V_z 表示改进型拉拽杆速度。

3 新型根茎分离装置设计与仿真

为提高拉拽式胡萝卜收获装置的收获成功率、降低胡萝卜损伤率,以期改善拉拽式胡萝卜收获装置的工作效果,基于改进型拉拽杆速度曲线,采用逆向设计的方法提出非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜根茎分离装置,该装置主要由机架、输送机构和非圆齿轮箱驱动的非圆齿轮箱驱动,如图 5 所示。



图 5 基于改进运动特性的拉拽式胡萝卜收获装置

Fig. 5 Drag-type carrot harvesting device based on improved motion characteristics

1. 输送机构 2. 机架 3. 根茎分离机构

3.1 非圆齿轮箱结构

非圆齿轮对具有灵活可变的传动比,能满足拉拽式胡萝卜根茎分离装置多样化的运动特性需求,以非圆齿轮对为核心的非圆齿轮箱是实现拉拽杆改进运动特性的关键部件。如图 6 所示,非圆齿轮箱包括非圆齿轮对、减速齿轮对以及等速齿轮对。其中,主动非圆齿轮过动力轴与驱动电机相连,从动非圆齿轮通过传动轴与主减速齿轮固连;从动减速齿轮通过输出轴 I 与主等速齿轮固连^[8]。动力传递路线:动力由主动轴经非圆齿轮对通过传动轴传递给减速齿轮对,再经等速齿轮对由输出轴 I 和输出轴 II 传递给拉拽杆驱动圆盘。

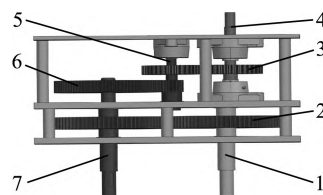


图 6 非圆齿轮箱

Fig. 6 Non-circular gear box

1. 输出轴 II 2. 等速齿轮对 3. 非圆齿轮对 4. 动力轴
5. 传动轴 6. 减速齿轮对 7. 输出轴 I

3.2 非圆齿轮对设计

3.2.1 非圆齿轮传动比计算

采用基于拉拽杆运动特的逆向设计法求解非圆齿轮节曲线:建立改进型拉拽杆速度曲线与主动非圆齿轮转角之间的数学关系式,结合拽杆速度曲线与从动非圆齿轮转角之间的数学关系求出非圆齿轮传动比,根据非圆齿轮节曲线理论模型求出非圆齿轮的节曲线。

根据提出的改进型拉拽杆速度曲线运动规律,建立拉拽杆输出速度与主动非圆齿轮转角之间的数学关系如式(4)所示。

$$V_z = f(\varphi_1) \quad (4)$$

式中: φ_1 ——主动非圆齿轮转角;

V_z ——改进型拉拽杆速度。

拉拽杆输出速度与从动非圆齿轮转角之间的数学关系为式(5)。

$$V_z = \varphi_2' R \sin \varphi_2 \quad (5)$$

式中: φ_2 ——从动非圆齿轮转角。

由式(4)和式(5)以及非圆齿轮对传动特性,确定非圆齿轮传动比 i 与主动非圆齿轮转角之间的关系,如式(6)所示。

$$i = g(\varphi_1) \quad (6)$$

3.2.2 求解非圆齿轮对

通过给定的齿轮对中心距与前面求出的非圆齿轮传动比,可计算得到非圆齿轮节曲线^[9]。如图7所示, a 为非圆齿轮对的中心距, φ_1 为主动非圆齿轮转角, ω_1 为主动非圆齿轮瞬时角速度, φ_2 为从动非圆齿轮转角, ω_2 为从动非圆齿轮瞬时角速度, P 点为非圆齿轮对的瞬心。根据瞬心的性质,则有 $\omega_1 \times O_1P = \omega_2 \times O_2P$, 用 r_1 、 r_2 分别表示 O_1P 、 O_2P , 则非圆齿轮对的瞬时传动比计算如式(7)所示。

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{a - r_1}{r_1} \quad (7)$$

由于非圆齿轮对的传动比 i 会随主动齿轮转角变化而变化,其瞬心 P 的位置及 r_1 、 r_2 也会随之变化,由式(7)可得极坐标系下非圆齿轮节曲线方程,如式(8)所示。

$$\begin{cases} r_1(\varphi_1) = \frac{a}{1+i} \\ r_2(\varphi_2) = a - r_1(\varphi_1) = \frac{ai}{1+i} \\ \varphi_2 = \int_0^{\varphi_1} \frac{1}{i} d\varphi_1 \end{cases} \quad (8)$$

非圆齿轮节曲线不仅决定齿轮的传动规律,还影响齿廓生成以及其加工制造难度。因此,在设计非圆齿轮时,需要依据节曲线曲率半径对节曲线的凹凸性进行校验,节曲线曲率半径如式(9)所示。

$$\rho = \frac{\left[r^2 + \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{r^2 + 2 \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 - r \frac{d^2 r}{d\varphi^2}} \quad (9)$$

式中: r ——齿轮节曲线半径;

φ ——节曲线半径相对于初始线的夹角。

通过式(9)分别对求出的主、从动非圆齿轮节曲线进行齿轮凹凸性验证。如果 ρ 为正值,则齿轮节曲线为凸,可顺利生成齿廓,无需对节曲线进行优化;否则,需要对其进行优化处理^[10]。

运用 MATLAB 软件,基于非圆齿轮节曲线方程

和节曲线曲率半径计算公式编写非圆齿轮节曲线设计程序,求出非圆齿轮节曲线。再通过非圆齿轮齿廓与齿轮节曲线之间的数学关系计算非圆齿轮齿廓,非圆齿轮对求解结果如图8所示。

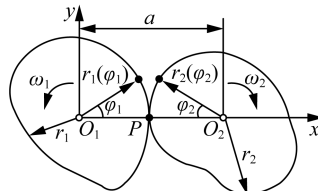


图7 非圆齿轮节曲线示意图

Fig. 7 Non-circular gear pitch curve diagram

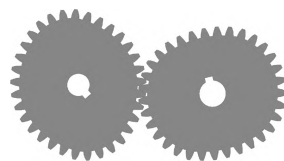


图8 非圆齿轮对

Fig. 8 Non-circular gear pair

3.3 根茎分离机构运动仿真

根据非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜根茎分离装置的结构参数及工作空间要求,采用 UG 三维设计软件建立胡萝卜根茎分离机构三维模型^[11]。如图9所示,首先,将零件的三维实体模型导入 UG 装配模块进行装配,然后,在 UG 运动仿真模块中给装配体添加相应的约束和驱动进行虚拟仿真,最后,将仿真结果与理论结果进行比较。对比结果如图10所示,拉拽杆仿真速度曲线与前述理论设计的速度曲线吻合。

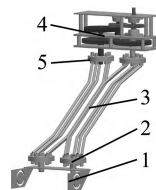


图9 胡萝卜根茎分离机构三维模型

Fig. 9 3D model of carrot root-stem separation mechanism

1. 支撑板 2. 从动圆盘 3. 拉拽杆 4. 非圆齿轮箱 5. 主动圆盘

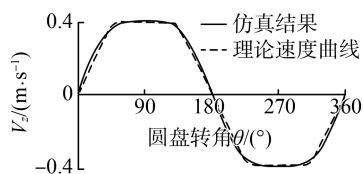


图10 仿真与理论速度曲线

Fig. 10 Simulation and theoretical speed curves

4 试验与结果

4.1 试验方法

研制非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置试验台,在浙江绍兴袍江地区农田试验地里培育浙江地区

普遍种植的“新红胡萝卜”品种,选取成熟期的胡萝卜作为试验样品。以文献[5]的机构参数为试验参照对象,以胡萝卜根茎分离的成功率(试验过程中胡萝卜根茎顺利分离的概率)和损伤率(试验过程中胡萝卜受到损伤的概率)为胡萝卜根茎分离效果评价指标,开展胡萝卜根茎分离对照试验^[12]。为排除其他参数对试验结果的干扰,除拉拽杆速度曲线以外,其余参数均与参照文献中的参数保持一致:拉拽杆作用方向运动速度最高为 0.4 m/s、拉拽杆与输送带夹角为 40°。试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械联合收割机试验方法》,以胡萝卜根茎分离成功率和胡萝卜损伤率为性能评价指标,计算如式(10)和式(11)所示,试验过程如图 11 所示^[13]。

$$\eta_1 = \frac{n_1}{n} \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta_2 = \frac{n_2}{n} \times 100\% \quad (11)$$

式中: n_1 ——损伤的胡萝卜数量,根;

n_2 ——根茎顺利分离的胡萝卜数量,根;

n ——胡萝卜总数,根;

η_1 ——胡萝卜损伤率;

η_2 ——胡萝卜根茎分离成功率。



(a) 试验过程 (b) 胡萝卜根茎成功分离

图 11 胡萝卜根茎分离试验

Fig. 11 Carrot root-stem separation test

4.2 结果与分析

每组试验重复 10 次,每次 10 根胡萝卜,并对其数据进行均值化处理,被选取的胡萝卜外形规则且无损伤,尺寸大小接近。如表 1 所示,胡萝卜根茎分离成功率为 97.1%,损伤率为 4.9%。

表 1 胡萝卜根茎分离效果对比结果

Tab. 1 Results of comparison of carrot root-stem separation effect

试验对象	成功率	损伤率
传统拉拽式	94	7.7
新型拉拽式	97.1	4.9

试验结果表明:相比于传统拉拽式胡萝卜根茎分离装置,非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置的根茎分离成功率提高 3.1%,胡萝卜损伤率降低 2.8%。分析试验过程发现,拉拽杆与胡萝卜相互作用时间缩短,减小拉拽杆与胡萝卜撞击和摩擦带来的损伤;瞬时高速的

拉拽作用加快胡萝卜根茎迅速分离,改进型拉拽杆运动特性有效改善胡萝卜收获装置的工作性能。

5 结论

以改进型拉拽杆速度曲线为目标,采用基于改进运动特性的逆向分析法,设计非圆齿轮驱动的新型拉拽式胡萝卜根茎分离装置。对该装置进行三维建模和运动仿真分析,结果表明:拉拽杆仿真速度曲线与理论设计的速度曲线吻合,满足理论设计要求。

1) 根据机构分析所得参数研制试验样机并进行胡萝卜根茎分离试验,结果表明:非圆齿轮驱动的拉拽式胡萝卜收获装置的胡萝卜根茎分离成功率为 97.1%,损伤率为 4.9%,满足胡萝卜收获装置农艺要求。

2) 对比传统拉拽式胡萝卜收获装置,胡萝卜根茎分离效果指标均有改善,验证改进型拉拽杆速度曲线的合理性,可为改进拉拽式胡萝卜收获机提供参考。

参 考 文 献

- [1] 彭钰航,王广红,孙飞雪,等. 胡萝卜热泵干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 211—216.
Peng Yuhang, Wang Guanghong, Sun Feixue, et al. Optimization of carrot heat pump drying process by response surface methodology [J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 211—216.
- [2] Jozef K, Norbert L. The influence of working parameters of a carrot harvester on carrot root damage [J]. Maintenance and Reliability, 2011, 39(1): 35—41.
- [3] Xia X, Xu Z, Yu C, et al. Finite element analysis and experiment of the bruise behavior of carrot under impact loading [J]. Agriculture, 2021, 11(6): 471.
- [4] 曾功俊. 胡萝卜缨子的力学特性及拉拽式收获部件研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
Zeng Gongjun. Study on mechanical characteristics and pulling parts harvest of carrots tassel [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017.
- [5] 曾功俊,陈建能,夏旭东,等. 胡萝卜缨果拉拽式分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 73—79.
Zeng Gongjun, Chen Jianneng, Xia Xudong, et al. Design and experiment on pull type of tassel fruit separation for carrot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 73—79.
- [6] 曾功俊,陈建能,夏旭东,等. 基于响应面法的拉拽式胡萝卜根茎分离试验研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 1—8.
Zeng Gongjun, Chen Jianneng, Xia Xudong, et al. Experimental study on pull type carrot root-stem separation based on Response surface method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 1—8.

(下转第 18 页)

- Mechanization, 2022, 43(6): 51—57.
- [3] 纪要, 张文毅, 刘宏俊, 等. 气吸双层滚筒式精量排种器设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 22—28.
Ji Yao, Zhang Wenyi, Liu Hongjun, et al. Design and experiment of double-layer roller precision seed sowing device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 22—28.
- [4] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 47—56.
Ding Li, Yang Li, Zhang Dongxing, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 47—56.
- [5] 伍皖闽, 陈学庚, 王士国, 等. 组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 60—70.
Wu Wanmin, Chen Xuegeng, Wang Shiguo, et al. Design and experiment of combined-hole maize precision dibbler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 60—70.
- [6] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 指夹式玉米精量排种器种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 29—37, 46.
- [7] 王金武, 唐汉, 周文琪, 等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 68—76.
- [8] 那晓雁. 指夹式玉米精密排种器试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [9] 李洪刚. 仿生指夹式排种器[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [10] 耿端阳, 李玉环, 孟鹏祥, 等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 38—45.
- [11] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [12] 李杞超. 取种块式小粒径蔬菜种子精量排种器机理分析与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [13] 成大先. 机械设计手册(第5版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [14] 李洪成, 曾荣, 杨天圆, 等. 玉米种子冲击破碎特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 29—37.
Li Hongcheng, Zeng Rong, Yang Tianyuan, et al. Experimental study on the impact breakage characteristics of maize kernels [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(7): 29—37.
- [15] 顿国强, 毛宁, 刘文辉, 等. 四杆平移式大豆小区育种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 70—78.
Dun Guoqiang, Mao Ning, Liu Wenhui, et al. Design and experiment of four-bar translational seed metering device for soybean plot breeding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 70—78.
- [16] 张学军, 陈勇, 史增录, 等. 双仓转盘式棉花竖直圆盘排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 27—36.
Zhang Xuejun, Chen Yong, Shi Zenglu, et al. Design and experiment of double-storage turntable cotton vertical disc hole seeding and metering device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 27—36.
- [17] GB/T 6973—2005, 单粒(精密)播种机试验方法[S].
- [18] NY/T 987—2006, 铺膜穴播机作业质量[S].

(上接第 10 页)

- [7] 王家胜, 尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38—43.
Wang Jiasheng, Shang Shuqi. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 38—43.
- [8] 宋慧鹏, 孙丽颖, 曾功俊, 等. 一种多级非圆齿轮箱驱动的拉拽式胡萝卜缨果分离机构[P]. 中国专利: CN202020920470.0, 2021—02—02.
- [9] 刘永平, 贝员贝, 魏永峭, 等. 基于包络特征的非圆齿轮数字化设计与齿形优化研究[J]. 机械传动, 2022, 46(8): 55—60.
Liu Yongping, Yuan Beibei, Wei Yongqiao, et al. Research on digital design and tooth shape optimization of non-circular gears based on envelope features [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(8): 55—60.
- [10] 卞景扬, 莫帅, 韩涵, 等. 非对称齿轮设计方法与动态啮合特性研究[J]. 机械设计, 2019(S1): 59—64.
Bian Jingyang, Mo Shuai, Han Han, et al. Design method of asymmetrical gears and research on dynamic meshing characteristics [J]. Journal of Mechanical Design, 2019(S1): 59—64.
- [11] 彭绪友, 廖宇兰, 李东贺, 等. 基于 ADAMS 的五杆式单行木薯种植机的设计与试验[J]. 机械设计, 2022, 39(4): 52—57.
Peng Xuyou, Liao Yulan, Li Donghe, et al. Design and experiment of five-bar single-row cassava planter based on ADAMS [J]. Journal of Mechanical Design, 2022, 39(4): 52—57.
- [12] 郑昱, 孟凡伟, 杨占立, 等. 基于试验设计方法和响应面方法的九索并联机构优化设计[J]. 机械工程学报, 2017(17): 106—116.
Zheng Yu, Meng Fanwei, Yang Zhanli, et al. Optimization design of a parallel mechanism driven by nine cables based on experimental design methods and response surface methods [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(17): 106—116.
- [13] 姚帅, 薛臻, 缪磊, 等. 拔取式白萝卜联合收获机研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(8): 27—33.
Yao Shuai, Xue Zhen, Miao Lei, et al. Design and experiment of pulling white radish combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 27—33.