

梅花盘拔取-双层夹持输送协同作业履带自走式 甘蓝收获机设计与试验

官晓东^{1,2} 柴长虹^{1,2} 刘凯华^{1,2} 赵广阔³ 李沐桐^{1,2} 何林^{1,2}

(1. 广东省现代农业装备研究院, 广州 510630; 2. 农业农村部华南现代农业智能装备重点实验室, 广州 510630;
3. 黑龙江省农业机械工程科学研究院, 哈尔滨 150081)

摘要: 针对传统的甘蓝收获主要依赖人工, 劳动强度大、效率低、成本持续攀升及丘陵山区甘蓝机械化收获技术和装备缺乏等问题, 提出了集甘蓝拔取、姿态调整、双层夹持输送、切根、人工辅助装箱等环节的甘蓝机械化收获工艺方案; 同时为解决甘蓝收获需求及甘蓝种植位置偏差, 生长倾斜、大小不一致、输送时易翻滚等问题, 设计了梅花盘式拔取机构与双层夹持输送机构协同作业方式。阐述了整机结构与工作原理, 开展了甘蓝拔取及姿态调整过程、夹持输送过程、切根过程的动力学分析, 并确定了关键部件的结构参数和作业参数。为了满足整机在复杂作业环境下的通过性, 对整机行驶稳定性和越障能力进行了分析, 确定了整机的安全行驶阈值。田间试验表明, 当机器前进速度为 0.5 m/s, 割台与地面水平夹角为 28°, 输送带转速为 95 r/min, 辅助剥叶平台转速为 73 r/min, 扶持轮转速稳定在 47 r/min 时, 履带自走式甘蓝收获机的采净率为 98.97%, 破损率为 1.59%, 损伤率为 1.50%, 各项性能指标满足甘蓝机械化收获要求。

关键词: 甘蓝收获机; 梅花形盘式拔取机构; 双层夹持输送机构

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)19-0259-10

OSID:



Design and Experiment of Crawler-type Cabbage Harvester Based on Cooperative Operation of Plum-blossom Disc Uprooting and Double-layer Clamping Conveying

Guan Xiaodong^{1,2} Chai Changhong^{1,2} Liu Kaihua^{1,2} Zhao Guangkuo³ Li Mutong^{1,2} He Lin^{1,2}

(1. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Intelligent Equipment in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510630, China

3. Heilongjiang Academy of Agricultural Machinery Engineering Sciences, Harbin 150081, China)

Abstract: Traditional cabbage harvesting relies heavily on manual labor, resulting in high intensity, low efficiency, rising costs, and a lack of mechanized equipment for hilly and mountainous regions. To address these issues, a mechanized harvesting process was developed, integrating pulling, posture adjustment, double-layer clamping and conveying, root cutting, and manual-assisted boxing. A crawler self-propelled cabbage harvester was designed. The machine featured a plum-blossom-shaped disc pulling mechanism that operated in coordination with a double-layer clamping and conveying system. This configuration accommodated planting deviations, inclined growth, size variability, and the tendency of cabbages to roll during transport. The structure and operational principles of the harvester was described. Dynamic analyses of the pulling and posture adjustment process, clamping and conveying process, and root cutting process were conducted to determine the key structural and operational parameters. The moving stability and obstacle-crossing capability of the machine were evaluated to define safe operating thresholds under complex field conditions. Field tests were performed at a forward speed of 0.5 m/s, a

收稿日期: 2026-04-09 修回日期: 2026-05-06

基金项目: 2024 年广东省乡村振兴战略专项(粤财农[2024]28 号)

作者简介: 官晓东(1995—), 男, 工程师, 博士, 主要从事农作物收获装备研究, E-mail: 2358083029@qq.com

通信作者: 何林(1976—), 男, 正高级工程师, 主要从事收获机械研究, E-mail: 75318013@qq.com

header-ground angle of 28°, a conveyor belt speed of 95 r/min, an auxiliary leaf-stripping platform speed of 73 r/min, and a stabilizing wheel speed of 47 r/min. The harvester achieved a harvesting rate of 98.97%, a damage rate of 1.59%, and a bruising rate of 1.50%. The performance indicators met the requirements for mechanized cabbage harvesting.

Key words: cabbage harvester; plum-blossom disc uprooting mechanism; double-layer clamping and conveying mechanism

0 引言

甘蓝是我国重要的十字花科蔬菜作物,近年来种植面积稳定在 $9 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 左右^[1]。随着蔬菜产业向规模化、集约化方向快速发展,亟需解决传统甘蓝收获依赖人工,劳动强度大、效率低下、季节性用工紧张及生产成本持续攀升等突出问题。实现甘蓝收获的机械化已成为产业提质增效和可持续发展的迫切需求。

国外对甘蓝机械化收获的研究起步较早,且针对甘蓝大面积种植的地块设计了多种大型机械装备。其中意大利 HORTECH 公司研制的 RAPID T 型甘蓝收获机采用传感器自动调节切割高度,并通过双波浪形夹持输送机构压紧甘蓝,提高了切根合格率^[2-3]。瑞士 Baertschi - FOBRO 公司开发的 TK-2000 型甘蓝收获机为牵引式双行甘蓝联合收获机^[4-5],可适用于大面积露地甘蓝,但在地头转弯和较小地块的灵活性较差,针对地块小而散的作业环境难以表现出良好的收获效果。比利时 Vanhoucke 公司研发的 Vitus 系列甘蓝联合收获机为悬挂式甘蓝收获机,其机构更加紧凑,机动性更强,但在起伏地面对机手操作要求高^[6-7]。日本 Yanmar 和 Osada Nouki 公司^[8-10]对于结球类蔬菜收获提出了通过在夹持胶带上设置多组张紧轮的方式保证输送稳定性和切根一致性。日本^[11]、韩国^[12]、俄罗斯^[13-14]等通过智能化控制、姿态自动调整等方法实现了甘蓝在可控条件下的无损收获,并获得了较好的试验效果,但仍处于样机阶段。目前国内各高校和科研院所正在持续对甘蓝机械化收获技术和装备进行探究和研制,王志强团队^[15-16]设计了 4YB-I 型甘蓝收获机并进行了虚拟设计优化。周成^[17]采用双圆盘导入机构配合双螺旋式输送机构的方式,减少了输送环节的损伤。杜冬冬等^[18-19]设计了一种履带自走式甘蓝收获机并搭载了称量系统,能够适应江浙一带的甘蓝机械化收获并完成质量统计。翟长远等^[20]基于深度学习研发了甘蓝识别系统,为甘蓝智能化提供了技术支撑。张健飞等^[2]基于“立式夹持+柔性输送”设计了一种双行甘蓝收获机,具有良好的采收效果。

本文针对甘蓝收获需求及甘蓝种植位置偏差,

生长倾斜、大小不一致、输送时易翻滚等问题,拟设计履带自走式甘蓝收获机。采用梅花盘式拔取机构与双层夹持输送机构协同作业的方式,以期解决甘蓝拔取准确度差,漏切根、错切根等问题,降低甘蓝收获的机械损伤,提高收获质量和效率。

1 整机结构组成与工作过程

1.1 整机结构组成

履带自走式甘蓝收获机主要由底盘、动力总成、操纵总成、割台、仿形机构、辅助剥叶平台、人工作业平台、遮阳棚等组成,如图 1 所示。

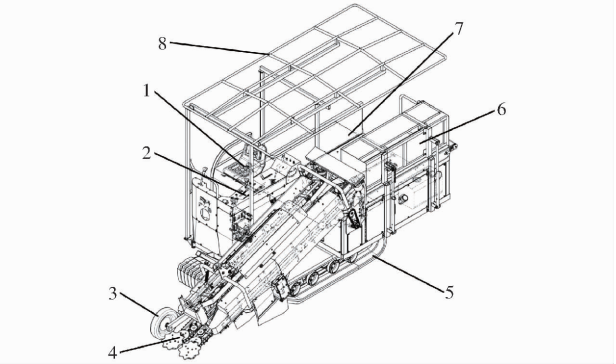


图 1 收获机结构示意图

Fig. 1 Schematic of harvester structure

1. 驾驶室 2. 操纵总成 3. 仿形机构 4. 割台 5. 底盘 6. 辅助剥叶平台 7. 人工作业平台 8. 遮阳棚

1.2 工作过程

整体布局采用割台偏置左侧的设计,收割过程中底盘履带始终位于已收割侧,不会压到甘蓝,可适应不同垄距的种植农艺。割台前端布置仿形机构,收割过程中地轮始终着地,油缸调整好割台离地的间隙,在地轮的支撑作用下,割台与地面的间隙始终恒定,以适应田间土地的高低起伏。作业时,根据甘蓝种植区域的地形条件,通过电液控制系统调节收获机上层机架的高度及角度,使割台与地面呈一定角度,同时保证梅花形盘式拔取装置贴近甘蓝底部。收获机前进作业,梅花形双盘对向旋转,将对行性差的甘蓝向中间拨拢,并将其拔起,通过扶持轮和双层夹持输送机构的作用,使其根部以垂直于圆盘切刀的姿态喂入圆盘刀切根机构,经双圆盘切刀将甘蓝根部切除,并连带部分老叶切断。甘蓝叶球随上层

输送带输送到后方人工辅助剥叶平台,在去除老叶、坏叶后装入框中。整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 800×2 630×2 000
整机质量/kg	2 240
行走发动机标定功率/kW	26
行走发动机标定转速/(r·min ⁻¹)	2 400
柴油箱容积/L	39
发动机作业转速/(r·min ⁻¹)	2 200
履带轨距/mm	940
履带接地长/mm	1 300
履带板宽度/mm	400

2 关键部件设计与参数确定

2.1 割台关键部件设计

割台主要由梅花形盘式拔取机构、姿态调整机构、双层夹持输送机构、圆盘刀切根机构组成,主要完成甘蓝拔取、输送、切根作业,割台装置组成如图 2 所示。

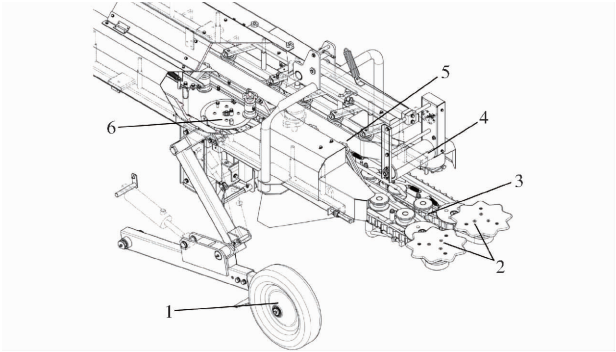


图 2 割台装置构成图

Fig.2 Composition of cutting platform device

1. 仿形机构 2. 梅花形盘式拔取机构 3. 下层输送带 4. 姿态调整机构 5. 上层输送带 6. 圆盘刀切根机构

2.1.1 拔取与姿态调整机构的设计和参数确定

根据实地调研,目前大部分甘蓝采用人工种植的方式,导致甘蓝种植位置偏差、生长倾斜等问题。因此收获机在甘蓝拔取过程中,设计了姿态调整机构配合梅花形盘式拔取机构的引拔方式,图 3 为拔取机构工作示意图。

为了使梅花形拨轮具有向后的分速度,推送甘蓝根部喂入割台时,梅花齿接触甘蓝根部的作用点应位于 K_1 与 K_2 之间,则梅花形拨轮安装中心距 L_a 应满足关系

$$\frac{D_0}{\lambda} + d_g < L_a < D_0 + d_g \tag{1}$$

式中 D_0 ——梅花形拨轮齿顶圆直径,mm

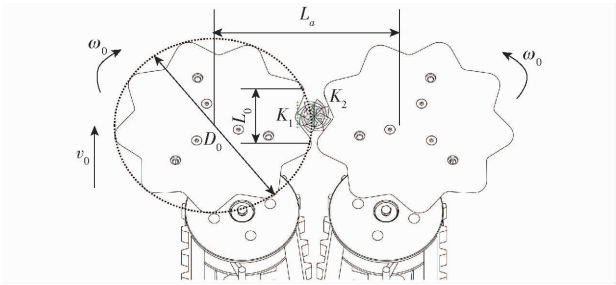


图 3 拔取机构工作示意图

Fig.3 Schematic of pulling mechanism's working principle

d_g ——甘蓝根部与叶球连接处直径,mm

λ ——梅花形拨轮线速度与前进速度比

当拨轮转动时,相邻两梅花齿之间的弧长应大于甘蓝根部直径,能够保证向后推动甘蓝,梅花形拨轮齿顶圆直径应满足公式

$$\frac{\pi D_0}{z} > d_g \tag{2}$$

式中 z ——梅花形拨轮齿数

梅花形盘式拔取机构以前进速度 v_0 做直线运动并以角速度 ω_0 进行对向旋转,将偏离甘蓝垄中心线的甘蓝通过梅花齿拨向垄中线位置并喂入割台,割台将甘蓝连根拔取。取梅花形拨轮线速度与前进速度比 λ 大于 1,则其运动轨迹均呈余摆线,为满足甘蓝收获时梅花齿可以作用于甘蓝根部,余摆线扣环之间的节距 l_1 应满足公式

$$l_1 = \frac{\pi D_0}{z\lambda} = \frac{S_1}{2} \tag{3}$$

式中 S_1 ——相邻两齿顶距离,mm

根据对甘蓝植株物理参数测定,甘蓝根部与叶球连接处直径在 20 ~ 40 mm 之间,为使甘蓝喂入时保持垂直于梅花形拨轮平面的姿态,甘蓝根部应与两梅花形拨轮的梅花齿尽可能啮合,通过三维设计结合制造工艺,择优选取两齿间夹角 125°,两梅花形拨轮齿底距离 56 mm,相邻两齿顶距离 105 mm。根据前期调研,甘蓝种植模式主要为垄作,3 行为 1 垄,甘蓝种植株距在 30 ~ 40 cm 之间,行距在 50 ~ 60 cm 之间,为了避免梅花形拨轮运动时相互干涉,需满足 $D_0 < L_a$,同时保证梅花形拨轮在旋转时不接触邻行甘蓝,最大程度减少因甘蓝种植位置偏差、生长倾斜等问题对甘蓝采净率的影响,综合整体结构并结合前期试验,梅花形拨轮齿顶圆直径设计为 290 mm,中心距设计为 292 mm,设计梅花形拨轮齿数为 9,计算得拨轮速比 λ 为 1.93。当 λ 小于 1.93 时,机器可能会向前推动甘蓝叶球使甘蓝根部拔出地表,导致出现漏切根、错切根的现象;当 $\lambda > 1.93$ 且不为 1.93 的整数倍时,导致拨轮无法稳定夹持甘蓝根部,甚至出现喂入堵塞的现象。因此,拨轮速比

$\lambda \geq 1.93$ 且为其整数倍。而为了机器作业流程顺畅,不发生夹持输送堵塞,拨轮喂入速度不应大于夹持输送速度。

当甘蓝收获作业时,通过机器不断前进,梅花形盘式拨取机构将甘蓝向上拨取,梅花形盘不断旋转,拨动甘蓝根部,使甘蓝脱离地面进入夹持输送机构。割台拨取甘蓝过程的动力学分析如图 4 所示。

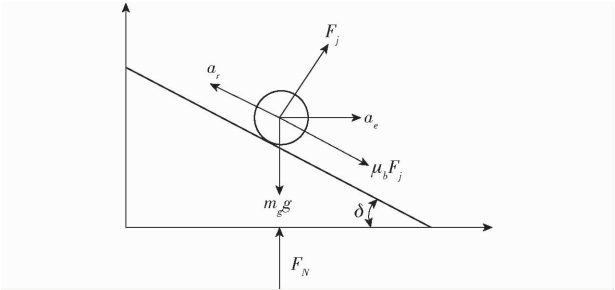


图 4 拔取甘蓝过程动力学分析
Fig. 4 Kinetic analysis of process of pulling cabbage

在甘蓝拔取过程中,将甘蓝和梅花形盘式拨取机构组成一个刚体系统进行受力分析,为简化模型,在分析过程中不考虑质心位置变化。刚体系统整体受力公式为

$$m_j a_j - m_g a_e + m_g a_r \cos \delta = \mu_b F_j \cos \delta \quad (4)$$

$$F_N - (m_j + m_g) g - F_j \sin \delta = m_g a_r \sin \delta \quad (5)$$

- 式中 m_j ——梅花盘式拨取机构质量,kg
 a_j ——梅花盘式拨取机构绝对加速度, m/s^2
 m_g ——甘蓝质量,kg
 a_e ——甘蓝收获机前进加速度, m/s^2
 a_r ——甘蓝运动相对加速度, m/s^2
 μ_b ——甘蓝与梅花盘之间的摩擦因数
 F_j ——梅花盘式拨取机构对甘蓝的拨取作用力, N
 F_N ——割台机架对梅花盘式拨取机构的约束反作用力, N
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2
 δ ——割台与地面水平夹角, $(^\circ)$

对甘蓝进行受力分析得

$$m_g (a_j \cos \delta - a_r) = m_g g \cos \delta \quad (6)$$

$$m_g g \cos \delta = F_j \quad (7)$$

通过推导可得

$$a_j = \frac{g(\mu_b \cos^2 \delta + \sin \delta \cos \delta)}{K_m - 1 + \cos^2 \delta} \quad (8)$$

式中 K_m ——梅花盘式拨取机构与甘蓝质量比
为使甘蓝拔取时能够向上运动而不跌落,需满足 $a_r > 0$ 。

通过推导可得

$$\mu_b > \frac{\tan \delta (K_m - 1 + \cos^2 \delta)}{\cos^2 \delta} - \tan \delta \quad (9)$$

因此在设计拨取机构时需考虑材料属性,根据文献[21],割台与地面夹角 δ 变化范围为 $20^\circ \sim 30^\circ$,本设计中采用梅花形盘外部包裹橡胶的制造工艺,保证在梅花形盘式拨取机构与地面夹角 δ 变化时,甘蓝与梅花形盘的摩擦因数均能满足式(4)~(9)。相比于双圆盘导入机构和双螺杆拨取机构,梅花形盘式拨取机构对甘蓝的拨取损伤程度更小。

拔取后的甘蓝植株整体姿态与双层夹持输送机构呈一定角度,如图 5 所示。倾斜姿态的甘蓝植株在切根作业时会发生切掉球形甘蓝尾部的现象,因此设计了姿态调整机构。为了保证在姿态调整过程中,扶持轮作用于甘蓝顶部且不造成损伤,根据前期测定甘蓝叶球直径在 $200 \sim 242 \text{ mm}$ 之间,扶持轮安装位置与梅花形拨轮之间的水平距离为 190 mm ,小于甘蓝叶球直径,同时采用高密度海绵包裹外层,随着甘蓝向上输送,姿态调整机构绕点 R 旋转,姿态调整机构中的扶持轮压送甘蓝进入双层夹持输送机构。在甘蓝重力作用下,甘蓝在压送过程中会向后倾斜,为了保证甘蓝植株在输送至圆盘刀切根机构前,始终保持甘蓝根部与圆盘刀刃相互垂直,使扶持轮以转速 n_f 转动,并通过甘蓝与扶持轮间的摩擦力调整甘蓝姿态。姿态调整过程的动力学分析如图 5 所示。

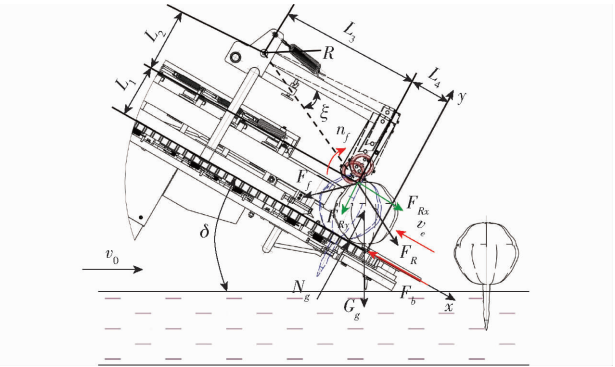


图 5 姿态调整过程动力学分析
Fig. 5 Dynamic analysis of posture adjustment process

根据姿态调整过程的动力学分析,得出扶持轮与甘蓝球体间相互作用的受力公式

$$F_f d_q = \frac{1}{2} G_g d_q \sin \delta \quad (10)$$

$$T_c = \frac{9\,550 P_d}{n_f} = F_f r_c \quad (11)$$

- 式中 G_g ——甘蓝植株重力, N
 F_f ——扶持轮与甘蓝顶部的摩擦力, N
 d_q ——甘蓝球部直径, mm
 T_c ——扶持轮转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

P_d ——电机功率, kW
 n_f ——扶持轮转速, r/min
 r_c ——扶持轮转动半径, mm

通过姿态调整过程的动力学分析可知,当甘蓝植株以垂直于圆盘刀刃的姿态被压送进入双层夹持输送机构时,根据电机选型和扶持轮的结构参数,可得扶持轮的转速为 44.0 ~ 64.5 r/min。

2.1.2 甘蓝夹持输送机构设计与参数确定

为了保证甘蓝在进入双层输送带时被稳定夹持,并能够连续完成甘蓝的输送作业,甘蓝夹持输送过程如图 6a 所示,由下层输送带夹持甘蓝根部,上层输送带夹持球部,在共同作用下,甘蓝植株首先在阶段 A 经过圆盘刀切根机构切除根部,切除根部后在阶段 B 经上层输送带夹持甘蓝球部稳定向上输送。为了适应甘蓝叶球的不同直径,采用弹性支撑杆对上层输送带进行张紧,结合整体结构,设计上层输送带最小间距为 90 mm,带宽为 90 mm。

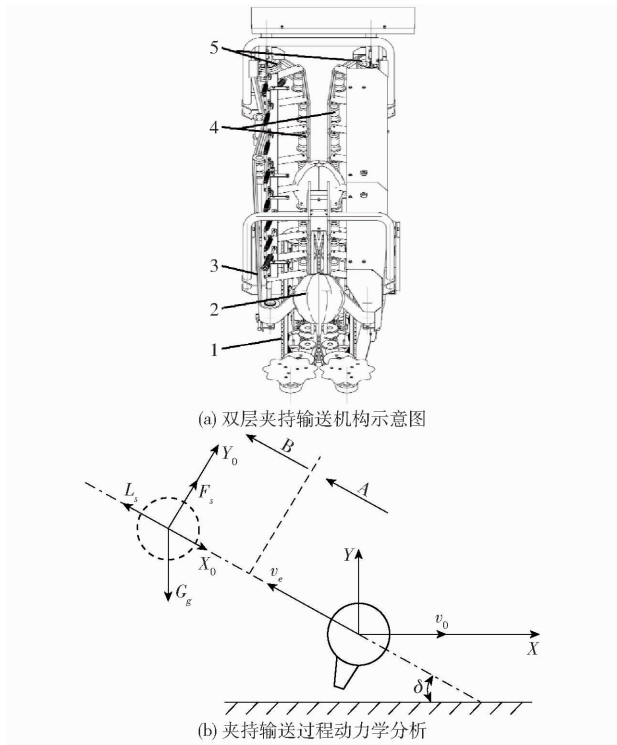


图 6 甘蓝夹持输送过程分析

Fig. 6 Analysis of cabbage clamping and conveying process
1. 下层输送带 2. 甘蓝植株 3. 上层输送带 4. 弹性支撑杆
5. 上层输送带轮

甘蓝在输送过程中的绝对运动速度由收获机前进速度和输送带的线速度合成,如图 6b 中 A 阶段所示,故可得到

$$v_e = \frac{\pi n_c D_c}{60} \quad (12)$$

$$\frac{\pi n_c D_c}{60} \geq \frac{v_0}{\cos \delta} \quad (13)$$

式中 v_e ——输送带线速度, m/s
 n_c ——输送带带轮转速, r/min
 D_c ——输送带带轮直径, mm

在甘蓝切根后被夹持输送至人工辅助平台的阶段,由于夹持输送带转速恒定,甘蓝在此阶段做匀速运动,甘蓝受力分析如图 6b 中 B 阶段所示,可得

$$L_s = \frac{9550 P_s}{n_c D_c} \geq G_g \sin \delta \quad (14)$$

$$F_s = \mu_s N_z = \frac{1}{2} G_g \cos \delta \quad (15)$$

式中 L_s ——上层输送带对甘蓝的提升力, N
 F_s ——上层输送带对甘蓝的夹持力, N
 N_z ——上层输送带对甘蓝的正压力, N
 μ_s ——上层输送带与甘蓝球部的摩擦因数
 P_s ——液压马达输出功率, kW

由式(12)~(15)可知,甘蓝自身重力 G_g 和夹持输送机构与地面夹角 δ 对输送带夹持力 F_s 、夹持输送机构提升力 L_s 有影响。而在收获时,甘蓝自身质量变化区间在 1.5 ~ 2.5 kg,夹持输送机构与地面夹角 δ 是影响甘蓝稳定输送的关键因素。 δ 越大,则 F_s 越小, L_s 越大; δ 越小,则 F_s 越大, L_s 越小。故两侧上层输送带设置多组张紧轮,保证输送过程中正压力稳定,避免甘蓝在阶段 B 夹持输送过程掉落。输送带转速的变化范围为 93.5 ~ 118 r/min。

2.1.3 甘蓝切根机构设计与参数确定

针对不同类型的蔬菜,切根机构的切割方式通常采用往复式切割、循环式切割、圆盘式切割等多种模式^[22-25],由于甘蓝根茎粗壮且部分品种纤维化明显,对其进行切根作业时,一般采用圆盘刀切根机构,如图 7a 所示。

甘蓝经双层输送带夹持输送至切刀位置时,切刀对甘蓝根部位置进行切根作业,动力学分析如图 7b 所示。切刀与甘蓝根部相互作用力学公式为

$$F_x = N_q \cos \gamma + T_q \sin \gamma \quad (16)$$

$$F_y = T_q \cos \gamma - N_q \sin \gamma \quad (17)$$

$$T_q = f N_q \quad (18)$$

式中 F_x ——切刀对甘蓝根部的切割力, N
 F_y ——切刀对甘蓝根部的钳持力, N
 N_q ——切刀对甘蓝根部的正压力, N
 T_q ——切刀对甘蓝根部的摩擦力, N
 f ——切刀对甘蓝根部的摩擦因数
 γ ——正压力与 X 轴夹角, (°)

若甘蓝根部被双圆盘切刀稳定钳持,则 $F_y > 0$, 即 $f > \tan \gamma$, 由式(16)~(18)可得

$$f > \tan \left(\arccos \frac{a_q}{D_q + d_g} \right) \quad (19)$$

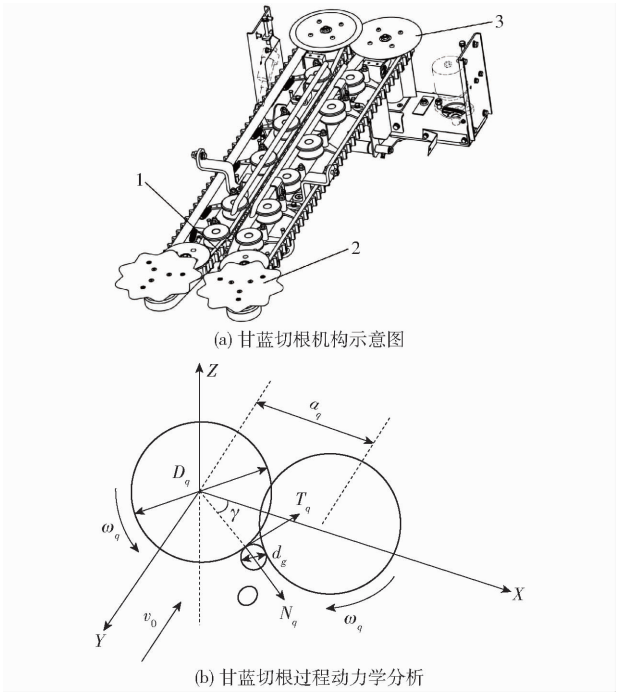


图 7 甘蓝切根过程分析

Fig.7 Analysis of cabbage root cutting process

1. 下层输送带 2. 梅花形盘 3. 圆盘刀

式中 a_q ——两圆盘刀中心距,mm
 D_q ——圆盘刀直径,mm

通过切根过程动力学分析,在设计本机器时,为避免结构间相互干涉,考虑切根结构的空间位置,圆盘刀直径 D_q 取 240 mm,中心距为 210 mm。为防止出现切根不完整现象,在双圆盘切刀之间设计了一部分重合区域,重叠部分为 30 mm。

2.2 整机行驶通过性分析

根据前期调研,甘蓝种植主要集中在丘陵缓坡地,土壤条件为砂壤土,收获时土壤含水率小于 20%,坡度一般为 10% ~ 15%,田埂高度一般为 15 ~ 18 cm,沟渠宽度一般为 25 ~ 28 cm,该机型主要在丘陵山区作业,则需满足坡度小于等于 25% 的情况下安全行驶。若要使整机能正常作业及安全行驶,整机行驶通过性是重要指标。其中整机稳定性主要考虑收获机横向稳定性、纵向稳定性^[26],采用极限倾翻角和极限滑移角对整机横向、纵向稳定性进行评价。根据丘陵山区农机设计安全规范,安全裕度不应小于 1.5,整机越障性主要考虑整机在田间沟埂交错的作业环境中的通过性,主要对垂直越障和跨越沟渠能力进行评价。根据田间机器作业工况,垂直越障高度不小于 18 cm,跨越沟渠宽度不小于 28 cm。收获机履带与地面附着力和整机质心位置是影响整机稳定性的主要因素。考虑装载、油量、配重等因素的不断变化,在不超载的情况下,基于三维软件质量属性模块对整机质心位

置最不利状态进行测定^[27],整机稳定性分析时结构参数如表 2 所示。

表 2 整机稳定性分析时结构参数	
Tab.2 Structural parameters related to stability	
analysis of whole machine	
参数	mm
前后支重轮轴线间距 L_0	990
前支重轮轴线与质心间距 L_1	289
质心与纵向中心平面偏移距离 e_x	84
下坡时质心与后支重轮轴线间的距离 e_y	700.6
左履带到整机中心面 x 方向距离 S_1	670
质心与地面垂直间距 h_0	698.45
上坡时质心与后支重轮轴线间的距离 e_y	450

2.2.1 横向稳定性

履带自走式甘蓝收获机在坡道静止或匀速行驶时的受力分布如图 8 所示。

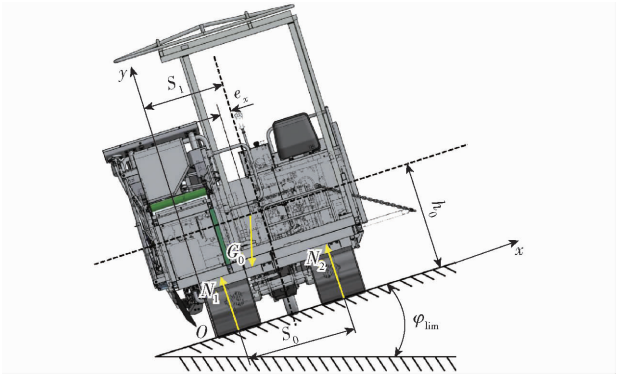


图 8 横向稳定性分析

Fig.8 Schematic of lateral stability analysis

以履带接地边缘点 O 为原点建立平面直角坐标系,构建收获机在 xy 平面力系平衡方程

$$N_1 + N_2 = G_0 \cos \varphi_{lim} \tag{20}$$

$$N_2 \left(S_1 + \frac{S_0}{2} \right) + G_0 \sin \varphi_{lim} h_0 = G_0 \cos \varphi_{lim} \left(S_1 + \frac{S_0}{2} - e_x \right) \tag{21}$$

式中 N_1 ——地面对左侧履带的支持力,N
 N_2 ——地面对右侧履带的支持力,N
 G_0 ——整机重力,N
 S_0 ——左右履带中心距,mm
 φ_{lim} ——极限倾翻角,(°)

若履带自走式甘蓝收获机能稳定通过横向坡道不发生侧翻,则需地面对右侧履带支持力 $N_2 \geq 0$,由式(20)、(21)可得

$$N_2 = 2G_0 \frac{(S_1 + e_x) \cos \varphi_{lim} - h_0 \sin \varphi_{lim}}{2S_1 + S_0} \tag{22}$$

则 φ_{lim} 需满足

$$\varphi_{lim} \leq \arctan \frac{S_1 + e_x}{h_0} \tag{23}$$

整机横向极限滑移角 φ'_{lim} 为

$$\varphi'_{lim} \leq \arctan \mu' \quad (24)$$

式中 μ' ——地面附着系数,取 0.7

相关参数代入可得履带自走式甘蓝收获机横向极限倾翻角 φ_{lim} 为 47.24° ,安全裕度为 4.3,横向极限滑移角 φ'_{lim} 为 35° 。

2.2.2 纵向稳定性

当整机匀速上坡或下坡时,其处于静力平衡状态,整机的受力分布如图 9 所示。

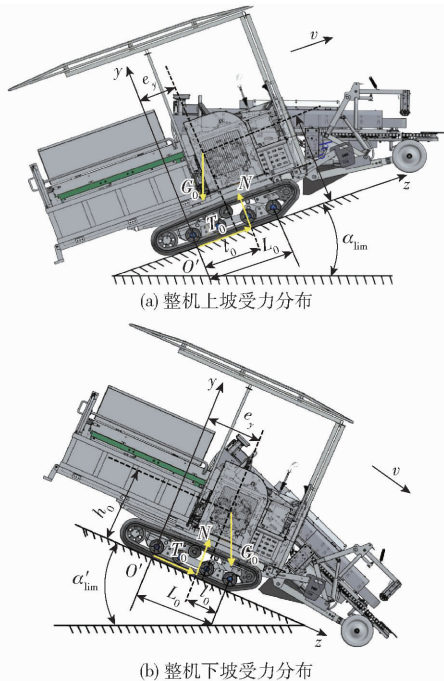


图 9 纵向稳定性分析

Fig. 9 Schematics of longitudinal stability analysis

以履带接地边缘点 O' 为原点建立平面直角坐标系,构建收获机在 yz 平面力系平衡方程

$$N = G_0 \cos \alpha_{lim} \quad (25)$$

$$Nl_0 + G_0 h_0 \sin \alpha_{lim} = G_0 e_y \cos \alpha_{lim} \quad (26)$$

式中 N ——地面对整机的垂直支持力, N

l_0 ——支重轮轴线与支持力之间的距离, mm

α_{lim} ——上坡极限倾翻角, $(^\circ)$

若收获机上坡时不发生倾翻,则需支重轮轴线与支持力之间的距离 $l_0 \geq 0$,通过式(25)、(26)可得

$$l_0 = \frac{e_y \cos \alpha_{lim} - h_0 \sin \alpha_{lim}}{\cos \alpha_{lim}} \geq 0 \quad (27)$$

则上坡极限倾翻角 α_{lim} 为

$$\alpha_{lim} = \arctan \frac{e_y}{h_0} \quad (28)$$

同理可知,收获机下坡极限倾翻角 α'_{lim} 为

$$\alpha'_{lim} = \arctan \frac{L_0 - e_y}{h_0} \quad (29)$$

相关参数代入可得履带自走式甘蓝收获机上坡极限倾翻角 α_{lim} 为 32.62° ,安全裕度为 2.56,下

坡极限倾翻角 α'_{lim} 为 22.51° ,安全裕度为 1.66。根据分析,本机的极限倾翻角能够满足作业工况的要求。

2.2.3 整机越障性

履带自走式甘蓝收获机翻越田埂时,当质心能够在极限倾角范围内落在田埂边缘,则整机在重力作用下恢复整机的水平状态,从而完成田埂翻越。越障分析示意图如图 10 所示。

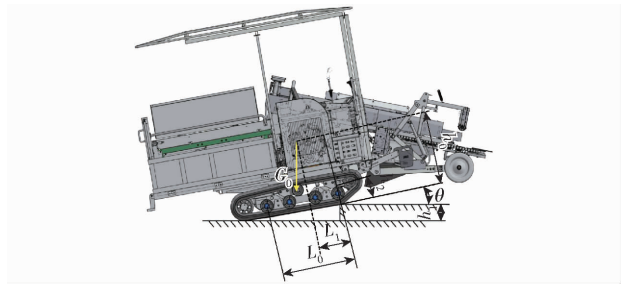


图 10 越障分析示意图

Fig. 10 Schematic of obstacle crossing analysis

收获机能够顺利翻越田埂需满足

$$\begin{cases} h_1 \leq h_2 \\ h_1 \leq (L_0 - L_1 - h_0 \tan \theta) \sin \theta \\ \theta \leq \alpha_{lim} \end{cases} \quad (30)$$

式中 h_1 ——田埂高度, mm

h_2 ——前驱动轮中心与地面垂直距离, mm

θ ——垂直越障时俯仰角, $(^\circ)$

当整机前端支重轮与沟渠边缘接触时,质心未越过沟渠边界线,整机继续匀速前进;当末端支重轮脱离沟渠边缘线时,质心处于沟渠内,整机会后倾进入沟渠;反之整机可平稳跨越沟渠。整机可平稳跨越沟渠最大宽度 B 为

$$B \leq \min(L_1, L_0 - L_1) \quad (31)$$

通过对整机的越障分析可得,收获机可翻越垂直高度 h_1 为 189 mm,可跨越沟渠的最大宽度 B 为 289 mm。根据分析,本机的越障能力满足作业工况的要求。

3 田间试验

3.1 试验条件和试验设备

为了验证履带自走式甘蓝收获机样机的收获性能和可靠性,于 2026 年 1 月 5 日在广东省广州市白云区广良白云基地甘蓝种植地开展田间试验。甘蓝品种为“觉绿甘蓝”,种植农艺为一垄 3 行,平均株距为 0.3 m,平均行距为 0.6 m,平均垄距为 2.05 m,平均垄宽为 1.75 m,平均垄高为 0.15 m。甘蓝生长情况如图 11 所示。

试验设备包括履带自走式甘蓝收获机、钢卷尺、数显温湿度表、手持激光测距仪、纸、笔、电子秤等。



图 11 甘蓝生长情况

Fig. 11 Cabbage growth

3.2 试验方法及评价指标

试验前,对试验田进行检查,保证机具作业环境平坦、无障碍物。预先调整机器前进速度为 0.5 m/s,割台与地面水平夹角为 28°,输送带转速为 95 r/min,辅助剥叶平台转速为 73 r/min,扶持轮转速稳定在 47 r/min。待各部件运行稳定后进行收获,共计进行 10 组试验,每组试验总行程 50 m,其中前 5 m 为稳定区,中间 40 m 为测定区,后 5 m 为停车区。在测定区内每隔 5 m 设置一个测试点,共 8 个测试点。在各个测试点统计甘蓝种植达标叶球总数。参考技术规范 NY/T 4073—2022《结球甘蓝机械化生产技术规程》和 DG/T 249—2024《叶类蔬菜收割机》,以采净率、破损率、损伤率作为性能评价指标。

(1) 采净率

参考 NY/T 4073—2022《结球甘蓝机械化生产技术规程》,对于甘蓝采净率的评价为:通过机械收获作业后,采收获得的达标叶球株数占测区内总达标叶球株数的百分比,公式为

$$Z_c = \frac{a_i}{a} \times 100\%$$

式中 a_i ——采收获得的达标叶球株数,株
 a ——测区内总达标叶球株数,株
 Z_c ——机器收获作业后采净率, %

(2) 破损率

参考 NY/T 4073—2022《结球甘蓝机械化生产技术规程》,在收获过程中,采收的叶球被切割、切碎部分超过整体体积的 1/5,失去原有商品价值的被定义为破损叶球。对于甘蓝破损率的评价为:在收获作业后,机械采收的破损叶球株数占总达标叶球株数的百分比,公式为

$$P_c = \frac{N_p}{a} \times 100\%$$

式中 P_c ——破损率, %
 N_p ——机械采收的破损叶球株数,株

(3) 损伤率

参考 NY/T 4073—2022《结球甘蓝机械化生产技术规程》,在收获过程中,采收的叶球完整,但由

于机械挤压、碰撞等原因造成叶球受损,失去原有商品价值的叶球为损伤叶球。参考 DG/T 249—2024《叶类蔬菜收割机》,对于甘蓝损伤率的评价为:行程结束后,随机抽取 100 株甘蓝,收集范围内不足 100 株的抽取所有甘蓝,挑拣出损伤甘蓝,计算株数,公式为

$$S_s = \frac{N_s}{N_c} \times 100\%$$

式中 S_s ——损伤率, %
 N_s ——损伤甘蓝株数,株
 N_c ——抽取的甘蓝株数,株

3.3 结果与分析

田间试验过程与收获效果如图 12 所示,4SG-1 型履带自走式甘蓝收获机在测试过程中各关键部件稳定运转,满足甘蓝机械化收获要求。根据上述试验及指标评价方法,分别测定试验区域内甘蓝的采净率、破损率、损伤率等试验指标,试验结果如表 3 所示。



图 12 田间验证试验场景与效果

Fig. 12 Scenarios and effects of field validation trials

表 3 田间验证试验结果

Tab. 3 Field verification test results				%
编号	采净率	破损率	损伤率	
1	98.93	1.50	1.00	
2	99.31	1.61	2.00	
3	98.90	1.62	2.00	
4	98.87	1.48	1.00	
5	99.11	1.53	2.00	
6	98.84	1.86	1.00	
7	99.23	1.50	1.00	
8	98.97	1.53	2.00	
9	98.61	1.75	1.00	
10	98.93	1.50	2.00	
平均值	98.97	1.59	1.50	

通过计算验证试验结果的平均值,收获机的采净率为 98.97%,破损率为 1.59%,损伤率为 1.50%。验证试验中采净率标准差为 0.2%,基于 t 分布,其平均值有 95% 的置信区间为 (98.83%, 99.11%);破损率标准差为 0.12%,基于 t 分布,其平均值有 95% 的置信区间为 (1.50%, 1.68%),损伤率标准差为 0.53%。基于二项分布,其平均值有 95% 的置信区间为 (0.91%, 2.46%),数据波动处于可接受范围。验证试验结果表明,履带自走式甘

蓝收获机能够满足甘蓝机械化收获的相关要求。

3.4 与国内外主流甘蓝收获机对比

国内外主流的甘蓝收获机有 4SG-2 型乘驾式甘蓝收获机^[28]、4GCSD-1200 型自走式甘蓝收获机^[29]、比利时 KOROVM DB 型甘蓝收获机^[30]、意大利 RAPID T 甘蓝收获机^[31]，各机型参数如表 4 所示。

表 4 国内外主流甘蓝收获机性能参数
Tab.4 Performance parameters of mainstream cabbage harvesters at home and abroad

项目	4SG-2	4GCSD-1200	KOROVM DB	RAPID T
所属国家	中国	中国	比利时	意大利
机型	自走式	自走式	悬挂式	悬挂式
作业行数/行	2	2	多行	1
作业效率/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.07 ~ 0.13	0.246	0.1 ~ 0.13	
损失率/%	≤1	≤2.2	≤5 *	≤5 *
损伤率/%	≤4.2	≤5 *	≤5 *	≤5 *
适用场景	中等规模	百公顷级	平原连片	规模化

注：* 未公开数据，依据行业标准给出。

根据试验测试，4SG-1 型履带自走式甘蓝收获机为单行收获，实际作业效率为 0.04 hm^2/h 。由于在连续作业时，需要驾驶员在对行时进行校准和需要人工辅助去除老叶等原因，导致实际作业效率较低。后续需要在自动对行和无损剥叶（老叶）等研究方向进行优化。通过与国内外主流机型对比分析，本机与 4SG-2 型乘驾式甘蓝收获机收获效率、损失率几乎一致，但损伤率更低；与 4GCSD-1200 型自走式甘蓝收获机对比，本机的损失率更低，且更

适应丘陵山区地块小而散的甘蓝种植区域。国外机器多以悬挂式甘蓝收获机为主，更适应平原、规模化种植基地，对地块平整度要求较高，其作业效率高的优势难以发挥。

4 结论

(1) 根据甘蓝机械化收获要求，研制了履带自走式甘蓝收获机，可一次性完成甘蓝拔取、夹持输送、切根、装箱等收获作业环节。

(2) 采用“梅花盘式拔取+双层夹持输送”的采收方法，对拔取过程、输送过程、切根过程进行了动力学分析，明确了影响甘蓝收获质量的主要作业参数及范围：割台与地面水平夹角范围为 20°~30°，输送带转速为 93.5~118 r/min ，扶持轮转速为 44~64.5 r/min 。

(3) 对履带自走式甘蓝收获机行驶通过性进行了分析，横向极限倾翻角的理论值为 47.24°，横向极限滑移角理论值为 35°，上坡极限倾翻角理论值为 32.62°，下坡极限倾翻角理论值为 22.51°，可翻越垂直高度理论值为 189 mm，可跨越沟渠的最大宽度理论值为 289 mm。

(4) 田间试验表明，当机器前进速度为 0.5 m/s ，割台与地面水平夹角为 28°，输送带转速为 95 r/min ，辅助剥叶平台转速为 73 r/min ，扶持轮转速稳定在 47 r/min 时，履带自走式甘蓝收获机的采净率为 98.97%，破损率为 1.59%，损伤率为 1.50%，有效解决了甘蓝拔取准确度差造成的采净率低、漏切根、错切根造成的机械损伤等问题。

参 考 文 献

[1] 佟文玉,张健飞,宋志禹,等. 甘蓝收获技术与装备研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报,2024,45(1): 322-329.
Tong Wenyu,Zhang Jianfei,Song Zhiyu,et al. Research status and development trends of cabbage harvesting technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(1): 322-329. (in Chinese)

[2] 张健飞,李衍军,唐金成,等. 立式夹持式甘蓝联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2026,57(2):70-80.
Zhang Jianfei,Li Yanjun,Tang Jincheng,et al. Design and experiment of vertical clamping combine harvester for cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2026,57(2): 70-80. (in Chinese)

[3] 张健飞,杨旭辉,佟文玉,等. 甘蓝类蔬菜全程机械化现状、问题与发展路径研究[J]. 蔬菜,2025(增刊2): 87-97.
Zhang Jianfei,Yang Xuhui,Tong Wenyu,et al. Research on the status, problems and development paths of full mechanization in brassica vegetables[J]. Vegetables,2025(S2): 87-97. (in Chinese)

[4] Baertschi-FOBRO Inc. Cabbage harvester for fresh market and industry cabbage[EB/OL]. [2026-04-10]. <http://www.fobro.com/export/EN/Gem-usebau/FOBRO-Pamtec-Kohlernter.html>.

[5] 王尚彦. 自走式甘蓝收获试验台设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2023.
Wang Shangyan. Design and experimental research of self-propelled cabbage harvesting test platform[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2023. (in Chinese)

[6] Vanhocke. Cabbage harvester[EB/OL]. [2026-04-10]. <https://vanhoucke.engineering/en/cabbage-treatment/cabbageharve-ster>.

[7] Zhang J F,Cao G Q,Jin Y,et al. Parameter optimization and testing of a self-propelled combine cabbage harvester[J]. Agriculture,2022,12(10): 1610.

[8] 张静,王俊,杜冬冬,等. 履带自走式单行大白菜收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(12): 134-146.
Zhang Jing,Wang Jun,Du Dongdong,et al. Design and experiment of crawler self-propelled single-row harvester for Chinese

- cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 134–146. (in Chinese)
- [9] Kanamitsu M, Yamamoto K, Shibano Y, et al. Development of a Chinese cabbage harvester (Part1): fundamental research and development of harvesting mechanism[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1993, 55(5): 133–140.
- [10] Kanamitsu M, Yamamoto K, Shibano Y, et al. Development of a Chinese cabbage harvester (Part 3): development of height controller and field test of harvester[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1994, 56(2): 127–133.
- [11] Fukao T. Field robotics: applications and fundamentals[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2021, 33(6): 1216–1222.
- [12] Park Y, Kim H J, Son H I. Novel attitude control of korean cabbage harvester using backstepping control[J]. Precision Agriculture, 2023, 24(2): 744–763.
- [13] Park Y, Son H I. A sensor fusion-based cutting device attitude control to improve the accuracy of korean cabbage harvesting[J]. Journal of the ASABE, 2022, 65(6): 1387–1396.
- [14] 杨家豪, 杜雅刚, 房欣, 等. 甘蓝拔取输送装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(6): 32–36.
Yang Jiahao, Du Yagang, Fang Xin, et al. Design and experimental study of cabbage picking and conveying device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 32–36. (in Chinese)
- [15] 王志强, 郭维俊, 王芬娥, 等. 4YB-I 型甘蓝收获机的总体设计[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(3): 126–130.
Wang Zhiqiang, Guo Weijun, Wang Fen'e, et al. The overall design of the 4YB-I type cabbage harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(3): 126–130. (in Chinese)
- [16] 李小明. 4YB-I 型甘蓝收获机的改进设计[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
Li Xiaoqiang. Improved design of 4YB-I cabbage harvester[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [17] 周成. 甘蓝收获关键技术及装备研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
Zhou Cheng. Research on key technology and equipment of cabbage harvesting[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [18] 杜冬冬, 王俊, 裴姗姗. 甘蓝根茎部切割部位及方式优化试验研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 34–40.
Du Dongdong, Wang Jun, Qiu Shanshan. Optimization of cutting position and method for cabbage root and stem[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 34–40. (in Chinese)
- [19] 杜冬冬. 履带自走式甘蓝收获机研究及称重系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Du Dongdong. Research on crawler self-propelled cabbage harvester and development of weighing system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [20] 翟长远, 付豪, 郑康, 等. 基于深度学习的大田甘蓝在线识别模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 293–303.
Zhai Changyuan, Fu Hao, Zheng Kang, et al. Establishment and experimental verification of deep learning model for online recognition of field cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 293–303. (in Chinese)
- [21] 杜冬冬, 费国强, 王俊, 等. 自走式甘蓝收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 16–23.
Du Dongdong, Fei Guoqiang, Wang Jun, et al. Design and experiment of self-propelled cabbage harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 16–23. (in Chinese)
- [22] 吴昆, 宋月鹏. 农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 1–20.
Wu Kun, Song Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 1–20. (in Chinese)
- [23] 费焱, 王涛, 李怡鹏, 等. 履带自走式单行茭白收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 403–410.
Fei Yan, Wang Tao, Li Yipeng, et al. Design and experiment of crawler self-propelled single-row harvester for *Zizania latifolia* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 403–410. (in Chinese)
- [24] Du Zhe, Zhao Xiaonan, Jin Xin, et al. Application of grey relational analysis and Taguchi method in cutter working parameters for tea-leaf mechanical harvester[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 318: 112099.
- [25] 王德成, 赵彦瑞, 尤泳, 等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 178–187.
Wang Decheng, Zhao Yanrui, You Yong, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 178–187. (in Chinese)
- [26] 张兆国, 邓寓轩, 王法安, 等. 自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 164–177.
Zhang Zhaoguo, Deng Yuxuan, Wang Fa'an, et al. Trafficability analysis and scaling model experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 164–177. (in Chinese)
- [27] 单伊尹, 廖庆喜, 万星宇, 等. 油菜薹对行自走式收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 93–104.
Shan Yiyin, Liao Qingxi, Wan Xingyu, et al. Design and experiment of self-propelled six-row harvester for oilseed rape shoot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 93–104. (in Chinese)
- [28] 农业农村部南京农业机械化研究所 [EB/OL]. [2026-04-10]. <http://www.niam.com.cn/zycg/91feea3d43454bdd970666637e05f5c4.htm>.
- [29] 农业农村部南京农业机械化研究所 [EB/OL]. [2026-04-10]. <http://www.niam.com.cn/xwdt/yw/286374.htm>.
- [30] 吉福瑞农业机械成都有限公司 [EB/OL]. [2026-04-10]. https://www.nongjitong.com/product/jifuruiny_87416449.html.
- [31] 云南吉峰农机有限公司 [EB/OL]. [2026-04-10]. <http://www.nongji888.com/show.asp?id=696>.