doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.037

履带自走式单行茭白收获机设计与试验

费　焱　王　涛　李怡鹏　杨梦飞　楼婷婷　陈长卿
(浙江省农业机械研究院, 金华 321017)

摘要: 针对茭白产业人工收获劳动强度大、成本高且机械化收获技术与装备缺乏等问题,在分析茭白种植农艺、植株特性与机械化收获要求基础上,对茭白机械化收获关键技术进行了研究,并设计了一种履带自走式单行茭白收获机,可一次性完成茎秆切割、夹持输送、割叶、壳茭收集等工序,实现了茭白机械化收获。阐述了整机结构与工作原理,开展了履带动力底盘、双圆盘刀切割装置、夹持提升输送装置、纵向输送割叶装置等关键零部件结构设计与理论分析,确定了主要结构与工作参数。完成了样机试制并开展了田间试验,试验结果表明,收获机在茭田的行驶性能和通过性较好,当机器前进速度约为 0.4 m/s、夹持输送速度约为 0.7 m/s、双圆盘刀切割装置液压马达转速设置为 500 r/min 时,平均总损失率为 5.2%,平均壳茭损伤率为 7.3%,平均作业生产率为 0.14 hm^2/h,收获机各关键部件运行稳定,收获效果较好,满足茭白机械化收获要求。

关键词: 茭白收获机; 履带动力底盘; 双圆盘刀切割; 夹持输送; 田间试验
中图分类号: S225.92　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0403-08　　**OSID**:

Design and Experiment of Crawler Self-propelled Single-row Harvester for *Zizania latifolia*

FEI Yan　WANG Tao　LI Yipeng　YANG Mengfei　LOU Tingting　CHEN Changqing
(*Zhejiang Academy of Agricultural Machinery*, *Jinhua* 321017, *China*)

Abstract: In order to ameliorate the current situation of high labor intensity and cost of manual harvesting, lack of mechanized harvesting technology and equipment in *Zizania latifolia* industry, the key technologies of mechanized harvesting of *Zizania latifolia* were developed based on the planting agronomy, plant characters and requirements of mechanized harvesting. A crawler self-propelled single-row harvester for *Zizania latifolia* was developed which can complete the cutting, conveying, blade cutting, and collection processes in one go, achieving mechanized harvesting of *Zizania latifolia*. The structure and working principle of the harvester were elaborated, and the key components such as tracked crawler power chassis, double-disc cutting device, clamping and conveying device, vertical conveying and blade cutting device were designed based on the theoretical analysis. In addition, the main structural and working parameters of the harvester were determined. Finally, the *Zizania latifolia* harvester was developed, and field experiments were carried out. Field test results showed that the driving performance and passing ability of the *Zizania latifolia* harvester in the *Zizania latifolia* field were good. When the working speed was approximately 0.4 m/s, the clamping and conveying speed was approximately 0.7 m/s, and the motor driving speed of the double-disc cutting device was 500 r/min, respectively, the success rate of cutting was 100%, the average total loss rate was 5.2%, the average damage rate of shelled *Zizania latifolia* was 7.3%, and the average work efficiency was 0.14 hm^2/h. Moreover, the working parts of the harvester worked stably and showed a good effect, which indicated that the harvester prototype can basically meet he requirements for mechanized harvesting of *Zizania latifolia*. The research result can provide ways for the design and improvement of mechanized harvesting equipment for *Zizania latifolia*.

Key words: harvester for *Zizania latifolia*; tracked power chassis; double-disc cutter; clamping and conveying; field experiment

收稿日期: 2025-01-17　修回日期: 2025-03-06
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-A-13)和金华市科技计划主动设计项目(2023-2-001a)
作者简介: 费焱(1988—),男,工程师,主要从事水生蔬菜农机装备研究,E-mail: 869632783@qq.com
通信作者: 陈长卿(1980—),男,正高级工程师,主要从事水生蔬菜农机装备研究,E-mail: 496533235@qq.com

0 引言

茭白为禾本科菰属多年生宿根草本植物，具有独特风味和品质，富含糖、蛋白质、矿物质及氨基酸，兼具食用和药用价值，全国种植面积约 7.0 × 10^4 hm^2。近年来，随着茭白产业规模化、产业化、品牌化的良好发展，产量和产值明显提高，在农业增效、农民增收等方面发挥了重要作用[1-2]。然而由于茭白复杂的植株特性及恶劣的种植环境，适应性机械化配套装备缺乏，导致茭白生产劳动强度大、效率低、生产成本高。收获是茭白生产中劳动强度和用工量最大的环节，目前仍无机可用，完全依靠人工，严重制约了产业发展，因此实现茭白机械化收获十分必要。

茭白是我国特色蔬菜种类之一，国外种植茭白的国家和地区极少[3]，故目前尚未见国外茭白机械化收获装备研发报道。而国内对于茭白机械化收获装备研究也只停留在理论阶段，并未有样机试制和试验，成果也仅限于阐述概念的专利及论文[4-6]，对实际收获装备研制指导意义不大。与壳茭纺锤形外形类似的萝卜和同为禾本科的水稻机械化收获装备与技术[7-10]，国内外均有深入研究，可为茭白收获装备研制提供思路。然而，因茭白簇状水生、分蘖数多、高大的植株特性，现有收获装备的割台、输送装置等关键部件不适用，同时行走底盘也不适用于深泥脚茭田。

结合茭白种植农艺、植株特性及茭田复杂作业环境，拟设计一种集茭田行走、茎秆切割、夹持输送、割叶、壳茭收集于一体的履带自走式单行茭白收获机，结合样机田间试验验证收获机工作性能，以期解决茭白机械化收获的关键技术问题。

1 整机结构与工作原理

1.1 设计目标

茭白为簇状水生植物，株高 180 ~ 250 cm，株丛直径 20 ~ 30 cm，种植行距 70 ~ 100 cm，株距 30 ~ 50 cm[11-13]。收获最终产物为壳茭，位于植株底部，长度 25 ~ 35 cm，内部含可食用的肉质茎，收获后的茭墩范围大且坚硬。茭白种植以小型农场或家庭为主，田块小而分散，且多为烂水田，泥脚深度可达 40 cm，收获作业环境恶劣。

根据茭白种植农艺、植株特征及生长环境，为解决茭白机械化收获系列问题，设计的茭白收获机应满足以下设计要求：①动力底盘能够适应小田块、深泥脚的作业环境及茭白种植行距，具有较好的通过性、灵活性和适应性。②收获部件能够适应茭白植株特性，一次性完成茎秆切割、夹持输送、割叶及壳茭收集等作业，得到最终商品化壳茭，降低人工劳动强度。③在满足机械化收获作业前提下，具有较好的作业性能，达到良好的作业效率，较低的损失率和损伤率。

1.2 整机结构

履带自走式单行茭白收获机整机结构如图 1 所示，主要由履带动力底盘、双圆盘刀切割装置、夹持提升输送装置、纵向输送割叶装置、输送传动系统等组成。整机采用 42.6 kW 柴油机驱动，最小离地间隙 400 mm，以适应茭田深泥脚作业环境，宽度 1 430 mm，适用于收获种植行距在 90 cm 以上的茭白植株。夹持提升输送装置以一定的角度与纵向输送割叶装置固接，以使双圆盘刀切割装置和夹持提升输送装置的喂入口位于整机中部，实现对中单行收获，较侧边布局具有整机宽度小的优势。双圆盘刀切割装置、夹持提升输送装置及纵向输送割叶装置整体在液压缸作用下，可绕带座轴承中心做俯仰动作，以调节作业高度和夹持输送倾角，提高收获适应性和通过性。输送传动系统由带传动、齿轮减速器、链传动及电磁离合器组成，实现在任意作业高度时动力均可连续传递，且使夹持输送速度始终与整机行走速度保持一定的比率，保证收获作业稳定性。茭白收获机主要技术参数如表 1 所示。

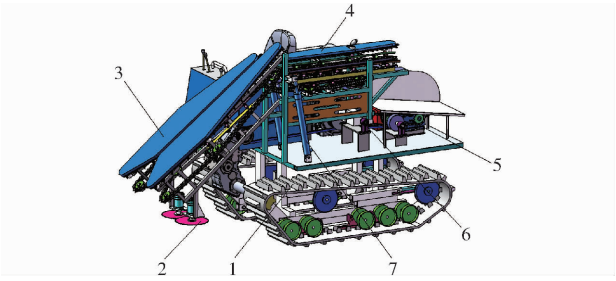


图 1 履带自走式单行茭白收获机结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of crawler self-propelled single-row harvester for *Zizania latifolia*

1. 履带动力底盘 2. 双圆盘刀切割装置 3. 夹持提升输送装置 4. 纵向输送割叶装置 5. 输送传动系统 6. 带座轴承 7. 液压缸

表 1 茭白收获机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of *Zizania latifolia* harvester

参数	数值
外形尺寸(长 × 宽 × 高)/(mm × mm × mm)	3 100 × 1 430 × 1 980
整机质量/kg	1 530
配套动力/kW	42.6
最小离地间隙/mm	400
适收行距/cm	≥90
作业生产率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	≥0.13
双圆盘刀切割装置高度调节范围/mm	500
行驶速度/($km \cdot h^{-1}$)	0 ~ 5

1.3　工作原理

茭白收获机可一次性完成茭白植株的茎秆切割、夹持输送、割叶、壳茭收集工序，具体工作过程如下：①茎秆切割过程：作业时，随着机组前进，夹持提升输送装置前端 V 形喂入口将茭白植株聚拢并引导至夹持点，形成有效夹持后，双圆盘刀切割装置对壳茭下部茎秆进行切割。②夹持输送过程：切断后的茭白植株先由夹持提升输送装置沿斜向上输送、再由纵向输送割叶装置中的纵向输送机构向后输送至割叶机构。③割叶过程：在纵向输送机构的夹持下，茭白植株被割叶机构割去叶片形成壳茭。④壳茭收集过程：壳茭受重力作用掉落至集料箱被收集，被割下的叶片则继续向后输送直至掉落田间，完成茭白机械化收获。

2　关键部件设计

2.1　履带动力底盘

2.1.1　总体结构

针对茭白种植模式和土壤条件，茭白收获机宜采用履带式行走方式，相较于轮式行走方式具有如下优势：①接地比压小、驱动力大，在潮湿松软、深泥脚的茭田土壤条件下具有更好的通过性。②机动性能好，田间转移方便，更适用于茭白种植的小田块分散化经营模式。③作业稳定性和安全性高，受地形影响小，更利于茭白收获时收获部件对行和切割高度调节[14]。

设计的履带动力底盘如图 2 所示，主要由车架、发动机、操作台、变速系统和行走系统组成。车架选用 Q235 钢管焊接而成，发动机采用 42.6 kW 柴油发动机。变速系统由齿轮变速器和静液压无级变速器(HST)组成，齿轮变速器有低速、标准、行驶 3 个挡位，每挡均可由 HST 调节速度或倒车。行走系统包括橡胶履带、轮系、导轨、导向张紧装置等。操作台包括启动开关、主变速杆、副变速杆、油门杆、转向及刹车操纵杆、收获部件升降操纵杆、输送开关、切割装置变速杆。

2.1.2　结构参数

从机动性、安全性、整机结构、茭白种植行距等多方面综合考虑，在比较了市面上常见履带后，确认选用宽度 b = 400 mm、节距 t = 90 mm 高花橡胶履带，确定 2 条履带间距，即轨距 B = 1 020 mm。收获机作业时需完成上下田、翻越田埂等工作，为保证越障性能，设计履带动力底盘接近角为 50°，离去角为 40°[15]。

由于茭田土壤常年泡水、坚实度低，对收获机的支撑性弱，设计履带动力底盘最小离地间隙为

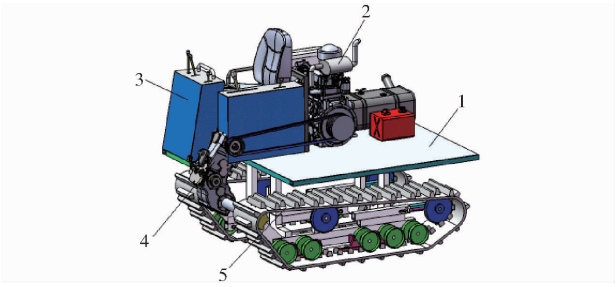


图 2　履带动力底盘结构示意图

Fig. 2　Structure schematic of tracked power chassis

1. 车架　2. 柴油发动机　3. 操作台　4. 变速系统　5. 行走系统

400 mm，且需对接地比压 p 做针对性设计，避免出现下陷深度过大导致行驶困难或陷车。接地比压 p 与整机重力 G 和履带接地面积有关，其关系式为

$$p = \frac{G}{2Lb} \tag{1}$$

式中　L——履带接地长度，m

履带式底盘在水田环境下的许用接地比压取 15 ~ 25 kPa[15]。已知收获机重力 G 为 15 000 N，根据式(1)计算可得履带接地长度取值范围为 0.75 ~ 1.25 m。综合考虑收获机整机结构设计和尺寸，取履带接地长度为 1.21 m。

为节省设计及制造成本，履带动力底盘轮系选用现有水稻联合收获机轮系。确定驱动轮齿数 n = 7，节线基准圆直径 $D_0 \approx 200$ mm，导向轮直径 D_z = 250 mm，支重轮直径 D_t = 175 mm，拖轮直径 D_r = 250 mm。

综合上述数据，计算得履带总长度为 4 315 mm，履带节数为 48 节。

2.2　双圆盘刀切割装置

2.2.1　结构及参数

切割装置与夹持提升输送装置协同作业，切除壳茭下方的茎秆，以实现茭白植株与根部分离，其切割效果对后续收获作业质量及效率有极大影响。考虑到茭白植株簇状水生、高大的特性，为减少切割阻力、刀具振动，降低切割损失，设计了双圆盘刀切割装置，其结构如图 3 所示，包括圆盘刀、传动刀轴、安装支架以及液压驱动系统。

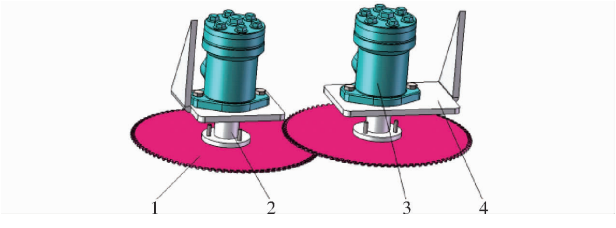


图 3　双圆盘刀切割装置结构示意图

Fig. 3　Structure schematic of double-disc cutting device

1. 圆盘刀　2. 传动刀轴　3. 液压马达(液压驱动系统)　4. 安装支架

圆盘刀结构及运动参数显著影响茭白茎秆切割效果,并决定液压驱动系统设计,因此有必要对刀盘直径、重叠量及转速进行设计[16]。

茭白茎秆切割过程可分为切割接触和切割两个阶段[17-18]。切割接触阶段茭白茎秆受力如图 4 所示,其中 O_1、O_2 为圆盘刀旋转中心,v_m 为收获机前进速度,ω 为圆盘刀角速度。为保证双圆盘刀对茭白茎秆的有效夹持切割,需满足双圆盘刀对茭白茎秆的夹持力大于推挤力。由于对称性,以单侧力进行分析,建立茭白茎秆切割接触力学模型

$$\begin{cases} f\cos\theta - N\sin\theta > 0 \\ f = \mu N \end{cases} \tag{2}$$

式中 f——单侧圆盘刀对茎秆的摩擦力,N

N——单侧圆盘刀对茎秆的压力,N

θ——剪切角,(°)

μ——圆盘刀与茎秆的摩擦因数

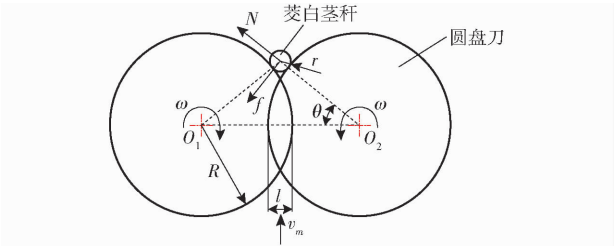


图 4 茭白茎秆切割接触阶段受力分析

Fig. 4 Force analysis of *Zizania latifolia* stalk in cutting contact stage

由图 4 几何关系可得

$$\theta = \arccos\frac{R - 0.5l}{R + r} \tag{3}$$

式中 R——圆盘刀半径,mm

r——茭白茎秆半径,mm

l——两圆盘刀重叠宽度,mm

茭白株丛直径为 20 ~ 30 cm,为避免漏切,实现单行茭白全面切割收获,双圆盘刀切割装置整体宽度应大于株丛直径,即

$$4R - l \geqslant 300 \text{ mm} \tag{4}$$

联合式(2) ~ (4)并结合茭白植株特性和整机结构,设计圆盘刀半径 $R = 150$ mm,两圆盘刀重叠宽度 $l = 40$ mm。

双圆盘刀切割属于低速有支撑切割,参考文献[17,19-20]设计双圆盘刀最低转速为 400 r/min,结合所选液压马达,设计最高转速为 750 r/min。

2.2.2 液压驱动系统

根据双圆盘刀切割装置结构及运动参数要求,对液压驱动系统进行设计,系统原理如图 5 所示。由柴油发动机驱动液压泵提供动力,2 个液压马达串联且转向相反,以保证不同负载下双圆盘刀转速始终保持一致。将调速阀接在与液压马达并联的旁油路上,通过调节调速阀控制定量泵留回油箱流量,来调节进入液压马达流量,实现双圆盘刀转速调节。二位四通电磁换向阀起开关作用,控制液压马达工作与停止。溢流阀作安全阀使用,正常工作时关闭,过载时才打开。

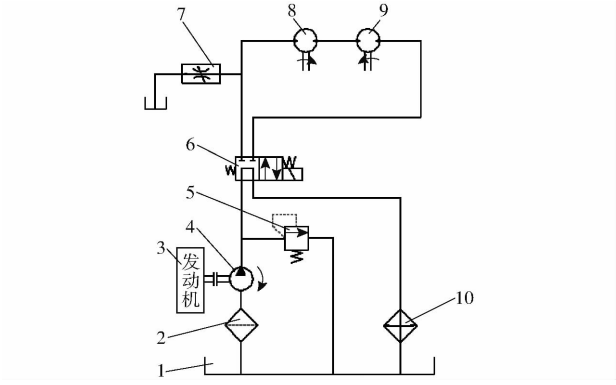


图 5 双圆盘刀切割装置液压驱动系统原理图

Fig. 5 Schematic of hydraulic drive system for double-disc cutting device

1. 油箱 2. 过滤器 3. 柴油发动机 4. 液压泵 5. 溢流阀 6. 二位四通电磁换向阀 7. 调速阀 8、9. 液压马达 10. 散热器

2.3 夹持提升输送装置

2.3.1 整体结构与工作原理

夹持提升输送装置作用是实现茭白植株的聚拢导入及向斜上方的夹持输送,其结构如图 6 所示,主要由夹持输送链、扶禾链、夹持输送链链轮、扶禾链链轮、张紧机构和机架组成。

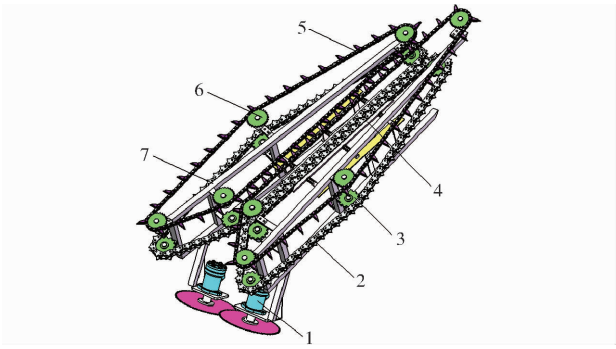


图 6 夹持提升输送装置结构示意图

Fig. 6 Structure schematic of clamp lifting and conveying device

1. 双圆盘刀切割装置 2. 夹持输送链 3. 夹持输送链链轮 4. 张紧机构 5. 扶禾链 6. 扶禾链链轮 7. 机架

夹持输送链和扶禾链均采用农机专用链条,分上下两层平行布置,作业时线速度保持一致。其中,夹持输送链起到夹持并输送茭白植株的作用,扶禾链起到扶持植株叶片的作用,避免高大叶片倒伏影响输送效果。夹持输送链和扶禾链前端均设计为 V 形张口,起到辅助拨禾、拢合叶片的作用,可以提高

割台的行距适应性。张紧机构能够根据茭白茎叶粗细自适应调整夹紧力和间隙，保证夹持可靠的同时避免堵塞卡链。

2.3.2　夹持输送速度

夹持输送是与茎秆切割相协调作业的工作流程，茭白茎秆在夹持状态下被切割是保证有序输送的必要条件[21-22]。若夹持输送速度过慢，会导致茭白植株被夹持提升输送装置前端推倒而不能被顺利夹持输送。若夹持输送速度过快，由于在夹持未切割阶段夹持点不断上移，会导致最终的夹持点过高，一方面影响输送和茎秆切割的稳定性，另一方面导致后续割叶高度过高而使收获的壳茭保留过多叶片。因此，夹持输送速度是夹持提升输送装置设计的关键参数，有必要对其进行重点分析和设计。

由于夹持提升输送装置随收获机一同向前运动，茭白植株夹持点绝对速度 v_p 由夹持输送速度 v_j 和收获机前进速度 v_m 合成[23]。如图 7 所示，夹持提升输送装置与地面夹角为 β，β 随切割高度的变化而变化；同时受整机空间布局限制，为实现对中收获，夹持提升输送装置与竖直面夹角为 α。由于是空间速度合成，为便于分析，先将夹持输送速度 v_j 沿收获机前进方向、横向及竖直方向分解为

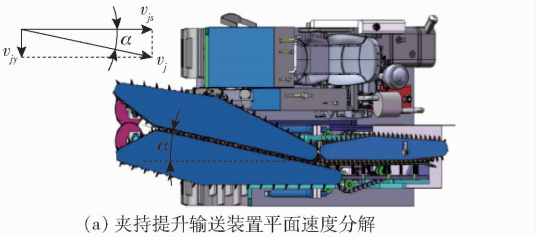
$$\begin{cases} v_{jx} = v_{js}\cos\beta = v_j\cos\alpha\cos\beta \\ v_{jy} = v_j\sin\alpha \\ v_{jz} = v_{js}\sin\beta = v_j\cos\alpha\sin\beta \end{cases} \tag{5}$$

式中　v_{js}——夹持输送速度 v_j 在竖直面内分量，m/s

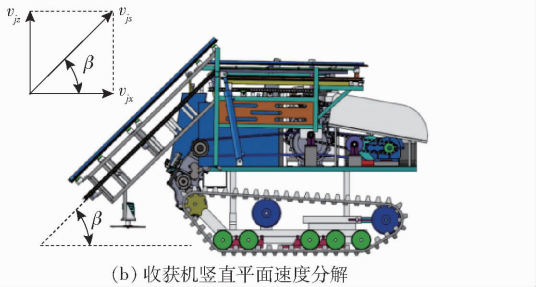
v_{jx}——夹持输送速度 v_j 在收获机前进方向分量，m/s

v_{jy}——夹持输送速度 v_j 在收获机横向分量，m/s

v_{jz}——夹持输送速度 v_j 在收获机竖直方向分量，m/s



(a) 夹持提升输送装置平面速度分解



(b) 收获机竖直平面速度分解

图 7　夹持输送速度分解

Fig. 7　Decomposition of clamp conveying speed

在 3 个方向上，将夹持输送速度 v_j 和收获机前进速度 v_m 进行合成，可得到茭白植株夹持点绝对速度 v_p，即

$$\begin{cases} v_{px} = v_j\cos\alpha\cos\beta - v_m \\ v_{py} = v_j\sin\alpha \\ v_{pz} = v_j\cos\alpha\sin\beta \end{cases} \tag{6}$$

式中　v_{px}——夹持点绝对速度 v_p 在收获机前进方向分量，m/s

v_{py}——夹持点绝对速度 v_p 在收获机横向分量，m/s

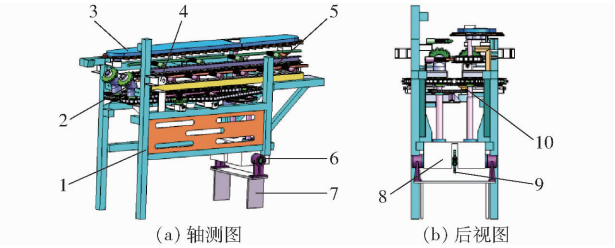
v_{pz}——夹持点绝对速度 v_p 在收获机竖直方向分量，m/s

当 $v_{px}<0$，即 $\dfrac{v_j}{v_m}<\dfrac{1}{\cos\alpha\cos\beta}$ 时，夹持点绝对速度方向向收获机前进方向倾斜一定角度，这将迫使茭白植株受到向前的分力而相互挤压，甚至被推倒，导致不能被顺利夹持输送。当 $v_{px}>0$，即 $\dfrac{v_j}{v_m}>\dfrac{1}{\cos\alpha\cos\beta}$ 时，夹持点绝对速度方向向收获机前进的相反方向倾斜一定角度，这将迫使茭白植株受到向后的分力而被依次喂入夹持提升输送装置，能够被正常夹持输送。因此，设计时需将 $\dfrac{v_j}{v_m}$ 设置为大于 $\dfrac{1}{\cos\alpha\cos\beta}$。然而，由于夹持点绝对速度横向分量 v_{py} 和竖直分量 v_{pz} 会导致茭白植株在夹持未切割阶段夹持点横移和上移，因此过大的夹持输送速度 v_j 会使最终夹持点过高而影响夹持输送效果和壳茭留叶长度。由结构设计可得，夹持提升输送装置与竖直面夹角 α 为 12°，与地面夹角 β 根据作业需求在 30°～42°之间可调。根据分析结合试验结果，v_j/v_m 取 1.4～2.0。

2.4　纵向输送割叶装置

纵向输送割叶装置作用是接收由夹持提升输送装置输送的茭白植株，依次完成纵向输送、割叶和叶片还田的步骤。其结构如图 8 所示，主要由机架、防护罩、油缸支座、角度传动箱、直角传动箱、割叶机构及纵向输送机构等组成。

纵向输送机构如图 9 所示，为保证输送及割叶的可靠性，实现叶片还田，设计为上、中、下 3 层结构。下层由 2 条对称布置的夹持输送链组成，中层由夹持输送链和夹持杆组成，上层由扶禾链和扶禾杆组成。3 层结构都配置相应的张紧杆和张紧弹簧，能够实现夹持力和间隙的自适应调节。割叶机构布置在纵向输送机构下层夹持结构的后下方，采用单圆盘刀切割方式[24]，其结构如图 10 所示。作业时，下层夹持结构夹住壳茭上部，中层夹持结构夹住叶片中部，上层扶禾结构扶着叶片上部，依次有序



(a) 轴测图 (b) 后视图

图 8 纵向输送割叶装置结构示意图

Fig. 8 Structure schematics of vertical conveying and blade cutting device

1. 机架 2. 角度传动箱 3. 防护罩 4. 油缸支座 5. 纵向输送机构 6. 带座轴承 7. 轴承支座 8. 直角传动箱 9. 链轮 10. 割叶机构

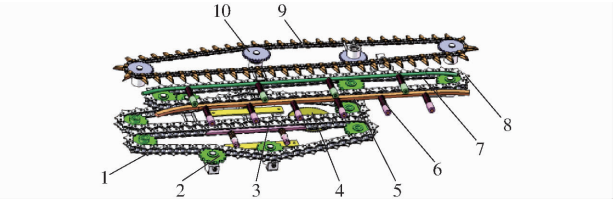


图 9 纵向输送机构结构示意图

Fig. 9 Structure schematic of vertical conveying mechanism

1、8. 夹持输送链 2. 夹持输送链链轮 3. 张紧杆 4. 割叶圆盘刀 5. 夹持杆 6. 张紧弹簧 7. 扶禾杆 9. 扶禾链 10. 扶禾链链轮

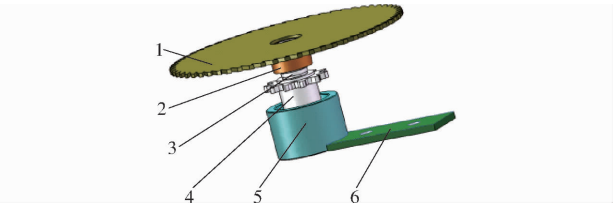


图 10 割叶机构结构示意图

Fig. 10 Structure schematic of blade cutting mechanism

1. 割叶圆盘刀 2. 连接套 3. 传动轴 4. 链轮 5. 轴承座 6. 安装板

地将单根茭白植株向后输送。到达割叶机构后,壳茭和叶片被切割分离,壳茭因重力掉落至下方集料箱被收集,而叶片在中层夹持结构和上层扶禾结构共同作用下继续向后输送直至掉落茭田。

3 田间试验

3.1 试验条件

设计的履带自走式单行茭白收获机样机于 2024 年 9 月在浙江省农业机械研究院试验田开展田间试验。试验田平均泥脚深度 250 mm,最大泥脚深度不超过 400 mm,茭白品种为金茭 4 号,种植行距 1 m,株距 30 cm。在试验地块随机选取 5 行长势基本一致的茭白,各选取 20 m 作为试验区,共进行 5 次重复试验。试验前,预先清除试验区内死亡、壳茭生长位置异常等不适宜收获的茭白植株。

试验前,预先将样机停放至茭田,待整机下陷深度稳定后,调整双圆盘刀切割装置至合适高度。为兼顾作业生产率、驾驶员对行校准及切割高度调整,调整整机前进速度至 0.4 m/s 左右,同时根据上文设计的工作参数要求调整夹持输送速度至 0.7 m/s 左右,双圆盘刀切割装置液压马达转速至 500 r/min 左右,待双圆盘刀切割装置、夹持提升输送装置、纵向输送割叶装置运行稳定后,机器前进收获。

3.2 试验方法

参照 GB/T 5667—2008《农业机械生产试验方法》、GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》以及文献[25-26],以总损失率、壳茭损伤率及作业生产率等试验指标作为茭白收获机的性能评价指标。

(1)总损失率

茭白收获机总损失包括漏割损失和掉落损失,统计每组试验测试区内的壳茭总数量、未被切割及未被夹持而掉落的壳茭数量,计算总损失率,计算式为

$$S_Z = \frac{W_L + W_g}{W_Z} \times 100\% \tag{7}$$

式中 S_Z——总损失率,%

W_Z——测试区内壳茭总数量,个

W_L——测试区内未被切割壳茭数量,个

W_g——测试区内被切割但未被夹持而掉落的壳茭数量,个

(2)壳茭损伤率

统计每组试验后收集箱内壳茭数量,和因切根、夹持、割叶而导致损伤的壳茭数量,计算壳茭损伤率,计算式为

$$S_S = \frac{W_S}{W_X} \times 100\% \tag{8}$$

式中 S_S——壳茭损伤率,%

W_X——每组试验后收集箱内壳茭数量,个

W_S——收集箱内损伤的壳茭数量,个

(3)作业生产率

作业生产率是反映茭白收获机单位时间内收获一定区域面积的能力,由于是单行收获,可通过种植行距和行走速度确定,计算式为

$$E_C = \frac{3\,600 H_j v_m}{10\,000} \tag{9}$$

式中 E_C——作业生产率,hm^2/h

H_j——茭白种植行距,m

3.3 试验结果与分析

田间试验现场与收获效果如图 11 所示。样机在测试过程中,整机在茭田的行驶性能和通过性较

好，各关键部件运行良好、性能稳定，能够一次性完成切割、输送、割叶、收集工序，满足茭白机械化收获要求。根据上述样机田间试验及指标评价方法，分别计算总损失率、壳茭损伤率及作业生产率，取 5 次试验结果平均值，总损失率为 5.2%、壳茭损伤率为 7.3%、作业生产率为 0.14 hm^2/h。


(a) 试验现场


(b) 夹伤及切割破损壳茭


(c) 合格壳茭

图 11　试验现场与收获效果

Fig. 11　Test site and results

田间试验过程中，测试区内茭白植株均被有效切割，无漏割，总损失率为 5.2%，都由掉落损失造成，其主要原因为个别矮小植株无法被有效夹持而掉落在双圆盘刀切割装置安装支架处。壳茭损伤率为 7.3%，造成壳茭损伤的原因是测试区内茭田地形存在一定起伏，作业时需驾驶员视情况进行切割高度调整，同时壳茭生长高度存在一定差异。切割高度调整过高会导致茎秆切割时双圆盘刀位置高于壳茭底部而使壳茭底部破损，而切割高度调整过低则会导致双圆盘刀与泥水接触，加快刀具磨损。对于个别生长位置过低的壳茭，为保护双圆盘刀，导致切割高度不能再下调，作业时只能选择切割壳茭底部而造成损伤；对于个别生长位置过高的壳茭，会导致输送时夹持位置低于壳茭顶部被夹伤，割叶时顶部被割破。由于壳茭生长位置普遍离地不高，壳茭底部切割破损是造成损伤的主要原因。

4　结论

（1）根据茭白种植农艺、植株特性与机械化收获要求，研制了一种履带自走式单行茭白收获机，主要包括履带动力底盘、双圆盘刀切割装置、夹持提升输送装置、纵向输送割叶装置、输送传动系统等，可一次性完成茎秆切割、夹持输送、割叶、壳茭收集工序，实现茭白机械化收获。

（2）采用履带式行走方式，确定了履带式动力底盘主要结构参数：功率 42.6 kW、最小离地间隙 400 mm、轨距 1 020 mm、履带宽度 400 mm、履带接地长度 1 210 mm、接近角 50°、离去角 40°；采用双圆盘刀切割方式，对切割过程进行了分析，确定了圆盘刀半径为 150 mm，两圆盘刀重叠宽度为 40 mm，转速为 400 ~ 750 r/min，同时设计了液压驱动系统；夹持提升输送装置采用下夹持、上扶禾的双层输送结构，通过结构设计与速度分析，确定了装置与竖直面夹角为 12°，夹持输送速度与收获机前进速度比值为 1.4 ~ 2.0；纵向输送割叶装置采用下夹持、中夹持、上扶禾的 3 层输送结构，配合单圆盘刀割叶机构，实现了纵向输送、割叶和叶片还田功能。

（3）田间试验结果表明，茭白收获机总损失率为 5.2%、壳茭损伤率为 7.3%、作业生产率为 0.14 hm^2/h；整机在茭田的行驶性能和通过性较好，各关键部件运行良好、性能稳定，满足茭白机械化收获要求。

参　考　文　献

[1] 陈建明，张珏锋，王强，等. 茭白产业绿色可持续发展技术集成创新与应用[J]. 浙江农业科学，2022，63(7)：1386 - 1390.

[2] 周超，李臣. 我国茭白的营养与开发利用研究综述[J]. 长江蔬菜，2017(20)：32 - 35.

[3] 翁丽青，杨鸯鸯，胡伋，等. 余姚单季茭白品种(系)比较试验[J]. 浙江农业科学，2024，65(10)：2289 - 2292.
WENG Liqing, YANG Yangyang, HU Ji, et al. Comparative experiment of single-season varieties(lines) *Zizania latifolia* in Yuyao[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(10): 2289 - 2292. (in Chinese)

[4] 费焱，王涛，崔志超，等. 茭白生产机械化发展现状与对策[J]. 中国农机化学报，2024，45(11)：278 - 282，298.
FEI Yan, WANG Tao, CUI Zhichao, et al. Current status and countermeasures of mechanized development of *Zizania latifolia* production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(11): 278 - 282, 298. (in Chinese)

[5] 浙江省农业机械研究院. 一种茭白联合收割机：202210615508.7[P]. 2024 - 05 - 07.

[6] 王靖凯，张亚豪. 关于水生蔬菜茭白收获机械的研究[J]. 农家参谋，2019(11)：88.

[7] 刘子坚，田立权，丁肇，等. 4LZ - 2.1Z 型双速双动水稻联合收割机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2021，42(2)：25 - 30.
LIU Zijian, TIAN Liquan, DING Zhao, et al. Development and experiment on 4LZ - 2.1Z type double speed and double action rice combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 25 - 30. (in Chinese)

[8] ODUORI M F, MBUYA T O, SAKAI J, et al. Kinematics of the tined combine harvester reel[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2012, 14(3): 53 - 60.

[9] LESZCZYNSKI N. The influence of working parameters of a carrot harvester on carrot root damage[J]. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2011, 49(1): 35 - 41.

[10] 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. (in Chinese)

[11] 俞飞飞,张其安,严从生,等. 单季茭白新品种‘皖茭 3 号’[J]. 园艺学报,2022,49(增刊 2):139 - 140.
YU Feifei, ZHANG Qi'an, YAN Congsheng, et al. A new single-harvest *Zizania latifolia* cultivar ‘Wanjiao 3’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(Supp. 2): 139 - 140. (in Chinese)

[12] 李怡鹏,杨梦飞,郑寨生,等. 双季茭白新品种‘浙茭 10 号’[J]. 园艺学报,2022,49(12):2763 - 2764.
LI Yipeng, YANG Mengfei, ZHENG Zhaisheng, et al. A new double-harvest water bamboo cultivar ‘Zhejiao 10’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(12): 2763 - 2764. (in Chinese)

[13] 张尚法,陈可可,郑寨生,等. 双季茭白新品种‘浙茭 8 号’[J]. 园艺学报,2021,48(6):1271 - 1272.
ZHANG Shangfa, CHEN Keke, ZHENG Zhaisheng, et al. A new double-harvest water bamboo cultivar ‘Zhejiao 8’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(6): 1271 - 1272. (in Chinese)

[14] 孙景彬,曾令坤,应婧,等. 农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2024,55(11):202 - 220.
SUN Jingbin, ZENG Lingkun, YING Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 202 - 220. (in Chinese)

[15] 董昭. 履带式水田荸荠收获机设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
DONG Zhao. Design and experimental research of crawler-type water chestnut harvester in paddy field[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 孔凡婷,王德福,石磊,等. 圆盘切割式蓖麻采摘装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(23):1 - 9.
KONG Fanting, WANG Defu, SHI Lei, et al. Design and experiment of disc-cutting picking device of castor[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 1 - 9. (in Chinese)

[18] 许斌星,陈永生,管春松,等. 韭菜收获机圆盘切割装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(2):79 - 83,100.
XU Binxing, CHEN Yongsheng, GUAN Chunsong, et al. Design and experiment of disc cutting device for leek harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 79 - 83,100. (in Chinese)

[19] 陆亮,涂宇. 整杆式巨菌草双圆盘切割装置动力学研究与参数优化[J]. 中国农机化学报,2023,44(3):41 - 48.
LU Liang, TU Yu. Kinetics research and parameter optimization of the whole-rod giant Juncao double-disc cutting device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 41 - 48. (in Chinese)

[20] 任甲辉,支腾,李法堂,等. 圆盘切割式剑麻采摘装置设计与仿真[J]. 中国农机化学报,2023,44(1):77 - 84.
REN Jiahui, ZHI Teng, LI Fatang, et al. Design and simulation of the disc-cutting picking device of sisal hemp[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 77 - 84. (in Chinese)

[21] 辛尚龙,赵武云,石林榕,等. 立辊式玉米收获割台夹持输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(9):34 - 43.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiments of the clamping and conveying device for the vertical roller type corn harvesting header[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 34 - 43. (in Chinese)

[22] 张宗玲. 新型玉米穗茎联合收获机割台的研制[D]. 北京:中国农业大学,2018.
ZHANG Zongling. Study on a new corn combine harvester header for reaping both corn stalk and spike[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[23] 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 harvesting equipment and development of its weighing system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)

[24] 王金武,关睿,高鹏翔,等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):73 - 81.
WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73 - 81. (in Chinese)

[25] 刘子良,王庆祝,于慧爽,等. 梳齿带自走式杭白菊收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 2):43 - 51,100.
LIU Ziliang, WANG Qingzhu, YU Huishuang, et al. Design and experiment of self-propelled harvester with comb and conveyer belt for Hangzhou white chrysanthemum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 43 - 51,100. (in Chinese)

[26] 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 oil seed rape shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 93 - 104. (in Chinese)