doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.007

立式夹持式甘蓝联合收获机设计与试验

张健飞[1]　李衍军[2]　唐金成[1,3]　佟文玉[1,4]　宋志禹[1]　曹光乔[1]

(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.农业农村部现代农业装备重点实验室,南京 210014;
3.沈阳农业大学工程学院,沈阳 110866;4.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083)

摘要:针对我国甘蓝机械化收获水平低、适应性差、缺少专用收获装备等问题,在测定江浙一带主栽甘蓝品种"青玉"物理参数并结合当地种植模式与机械化收获要求设计配套种植模式的基础上,本文设计了一款基于"立式夹持+柔性输送"形式的双行甘蓝收获机。该机主要由拔取装置、夹持输送装置、切根装置、横向输送装置、收集装置等关键部件组成,采用挠性喂入与柔性夹持协同作业的减损方法,通过张紧机构和柔性夹持机构显著降低机采损伤,有效适应不同球径甘蓝收获,可一次性完成双行甘蓝切根、起拔、夹持输送、装箱收集等作业。为提升作业性能,对各关键装置进行了理论分析与计算并开展田间试验,同时,采用多因素响应面分析法(RSM)进行甘蓝收获机作业参数优化试验,研究了机具行走速度、拔取辊转速、柔性夹持输送带转速和双圆盘割刀转速对采收合格率的影响,结果表明,当行走速度 1.0 km/h、拔取辊转速 110 r/min、输送带转速 180 r/min 和割刀转速 300 r/min 时工作效果最优,此时收获机各关键部件工作稳定,收获效果好,采收合格率达 93.83%。研究结果为甘蓝生产机械化栽培模式设计提供了数据支撑和理论支持。

关键词:甘蓝;收获机;立式夹持;柔性输送

中图分类号:S225.92　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)02-0070-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Vertical Clamping Combine Harvester for Cabbage

ZHANG Jianfei[1]　LI Yanjun[2]　TANG Jincheng[1,3]　TONG Wenyu[1,4]　SONG Zhiyu[1]　CAO Guangqiao[1]

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*
3. *College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
4. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of low mechanization level, poor adaptability, and lack of dedicated harvesting equipment for cabbage harvesting in China, a two rows cabbage harvester based on the "vertical clamping and flexible conveying" principle was developed. This was achieved by first measuring the physical parameters of the main local cabbage variety "Qingyu" in the Jiangsu-Zhejiang region and designing a compatible planting pattern based on local cultivation practices and mechanized harvesting requirements. The machine primarily consisted of key components, including a pulling device, a clamping and conveying device, a root-cutting device, a transverse conveying device, and a collecting device. It employed a damage-reduction method featuring the coordinated operation of flexible feeding and flexible clamping. Through the tensioning mechanism and the flexible clamping mechanism, mechanical damage during harvesting was significantly reduced, effectively adapting to the harvesting of cabbage heads with different diameters. It can complete the operations of root cutting, lifting, clamping and conveying, and box collection for two rows of cabbage in a single pass. To enhance operational performance, theoretical analysis and calculations were conducted for each key device, followed by field trials. Furthermore, a multi-factor response surface methodology (RSM) optimization experiment was employed to study the effects of machine travel speed, pulling roller speed, flexible clamping conveyor

收稿日期:2025-07-03　修回日期:2025-08-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52205273)和农业农村部现代农业装备重点实验室开放课题(2023007)

作者简介:张健飞(1989—),男,副研究员,主要从事蔬菜收获技术装备研究,E-mail:zhangjianfei88@126.com

通信作者:曹光乔(1978—),男,研究员,主要从事农业机械化工程研究,E-mail:caoguangqiao@126.com

belt speed, and dual-disc cutter speed on the qualified harvesting rate. The optimization results indicated that the best working performance was achieved at a travel speed of 1.0 km/h, a pulling roller speed of 110 r/min, a conveyor belt speed of 180 r/min, and a cutter speed of 300 r/min. Under these conditions, the key components operated stably, harvesting effectiveness was high, and the qualified harvesting rate reached 93.83%. The research result can provide both empirical data and theoretical foundations for the design of mechanized cultivation systems in cabbage production, while also offering valuable experience that can be referenced for the mechanized production of other vegetable crops.

Key words: cabbage; harvester; vertical clamping; gentle conveying

0　引言

甘蓝(*Brassica oleracea* var. *capitata*)又称包菜、莲花白、结球甘蓝等,在我国不同地域四季均可种植,近年种植面积稳定在 9×10^5 hm^2 左右[1]。我国甘蓝机械化收获水平较低,缺乏适宜甘蓝主栽品种和种植模式的专用收获装备,高度依赖人工收获且采收后需要大量人工进行装筐、装袋及转运,意大利 Hortech、比利时 Vanhoucke 等成熟的甘蓝收获装备,价格昂贵,不适应我国种植农艺及小球径甘蓝采收,难以在我国推广应用,因此,亟需研发一种能够紧密贴合甘蓝种植规范、并能实现低损联合收获的甘蓝专用收获设备,以降低生产成本,减轻劳动负担并提高甘蓝产业经济效益。

欧美国家早在上世纪初就已对甘蓝收获机进行了广泛研究,设计了诸多大型机械作业装备[2-4]。苏联研制的 CKM-1[5] 和 NKH-1[6] 单行甘蓝收获机,采用链式夹持输送,收获效率低、损伤率大。美国 Hansen[7] 研制的甘蓝收获机采用反向旋转的双螺旋输送方式。文献[8-9]采用一对反向转动的橡胶输送带对甘蓝进行夹持输送;HEINRICH[10] 基于输送带式设计一种压顶输送结构,可使甘蓝植株在输送过程中保持直立、压紧状态,提高了切根准确性;日本 Yanmar 和 Osada Nouki 公司研制了一种白菜履带自走式收获机[11],通过在夹持胶带中设置多组张紧轮来保证输送稳定性和切根一致性。

现阶段,国内各高校和科研院所相继对甘蓝收获技术和装备进行了系列化摸索和探究,文献[12-13]设计了 4YB-1 型甘蓝收获机,并对整机进行了虚拟优化设计;周成[14] 设计一种采用双螺旋式输送的甘蓝收获机,通过优化关键作业部件,进一步减少输送环节对甘蓝的损伤;杜冬冬[15] 设计了适应江浙一带的履带自走式甘蓝收获机;房欣等[16] 设计了一种压顶式甘蓝收获机,采用压顶式与双螺旋输送相结合的输送形式;李天华等[17] 设计了一种基于球夹式输送结构的甘蓝收获机,该结构有效降低了甘蓝在收获过程中的损伤程度;翟长远等[18] 采用北斗导航与视觉识别技术,研制了大田甘蓝自主收获机器人;农业农村部南京农业机械化研究所研发的甘蓝收获机可实现平、垄作甘蓝连续收获作业,一次性作业可实现拔取、输送、切根、剥叶到集箱的联合收获功能[19]。

针对现有甘蓝收获装备普遍存在农机农艺配套差、收获损伤高、效率低等问题,本文以“农机+农艺”高度融合为目标,设计一种基于“立式夹持+柔性输送”式的双行甘蓝收获机,采用挠性喂入与柔性夹持协同作业的减损方法,通过配备张紧机构与柔性夹持机构,以期解决不同球径甘蓝适应性收获问题,降低机械损伤。提出与该机相配套的垄作 2 行、垄作 4 行的甘蓝种植模式,以期提高甘蓝收获效率,降低劳动强度。

1　甘蓝物理几何特性与种植模式

选取江苏省早熟春甘蓝品种“春喜”为试验对象,从定植到收获约 60 d。为满足机械化收获要求,确定适宜的行、株距,于 2025 年 1 月 14—18 日在江苏省常熟市横塘蔬菜专业合作社采用随机、对角线和分类原则,选取表面无损伤、莲座叶及根部完整的样本,主要测定叶球纵径 G_d、横径 H_d 和展开度 W_d(甘蓝已成熟),相关参数见图 1 和表 1。

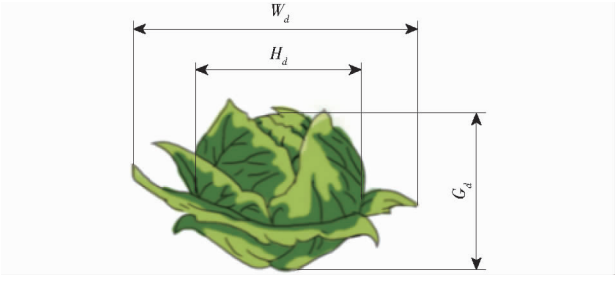


图 1　甘蓝关键几何参数

Fig. 1　Key geometric parameters of cabbage

表 1　甘蓝物理几何特性

Tab. 1　Physical geometry of cabbage

项目	球纵径/mm	球横径/mm	总质量/kg	球质量/kg	展开度/mm
平均值	162.30	163.80	1.910	1.360	325.60
最大值	190.00	185.00	2.265	1.806	360.00
最小值	135.00	140.00	1.241	0.725	290.00
标准差	19.05	12.92	0.340	0.420	20.45

为了在垄作种植模式下保持适当的植株密度,

确保相邻叶片覆盖土壤,降低杂草生长并简化田间管理,结合当地种植品种,甘蓝种植行距一般为400~450 mm,种植株距为280~330 mm,设置排水沟深为150~200 mm(雨后垄面会塌陷),沟宽为200~300 mm。垄作2行和垄作4行种植模式如图2所示。

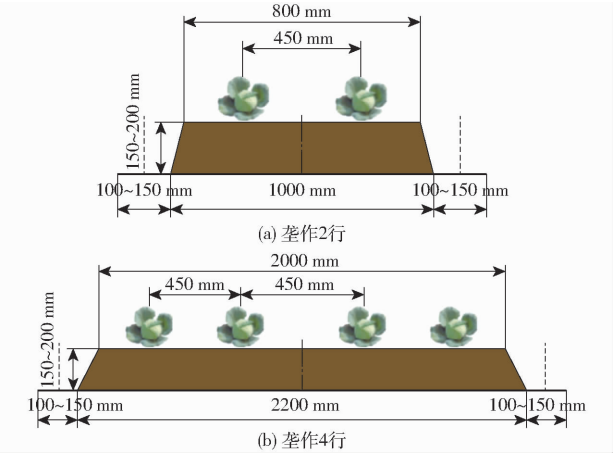


图2 种植模式示意图

Fig. 2 Schematics of planting pattern

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

4GS-2型乘驾式双行甘蓝收获机主要由履带式行走底盘、收获割台、剥叶机构和集料箱等组成。其中甘蓝收获割台主要由拔取装置、夹持输送装置、双圆盘切根装置和链-齿轮传动系统等组成,收获割台通过三点悬挂式结构与履带式行走底盘进行铰接,以对称中心面为基准呈纵向布置,甘蓝收获机结构示意图如图3所示。整机技术参数见表2。

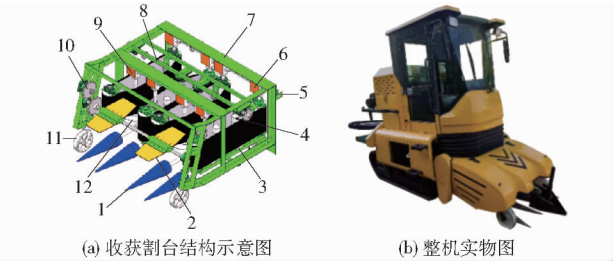


图3 甘蓝收获机结构示意图

Fig. 3 Cabbage harvest machine

1. 拔取装置 2. 拨禾轮 3. 柔性夹持输送装置 4. 涨紧轮 5. 三点悬挂铰接固定板 6. 输送装置传动齿轮箱 7. 机架 8. 主传动轴 9. 切根机构传动齿轮箱 10. 拨禾机构传动齿轮 11. 地轮 12. 双圆盘切根装置

2.2 甘蓝收获机工作原理

收获割台工作区域分为拔取区、拨禾区、夹持输送区和切割区(图4)。

工作时,行走底盘发动机驱动直连液压泵,液压泵通过电控阀组控制各执行元件液压马达,实现协调动作。拔取机构位于整机前方,通过调整割台高度,使拔取辊紧贴地面,确保能够伸入甘蓝叶片下方;机器向前运动,甘蓝进入2个拔取辊间,通过拔取辊外旋给甘蓝一个向上的拔取力拔出甘蓝;由于拔取辊有一定倾角,拔取过程甘蓝处于倾斜状态,此时通过拨禾轮拨正甘蓝并送入夹持输送机构;立式夹持输送装置将甘蓝夹持向后输送的同时,双圆盘切根机构将甘蓝根部切除,切除根部的甘蓝将进入横向输送装置,最后进入集料箱,从而完成甘蓝拔取、夹持输送、切根、除叶和收集。

表2 整机技术参数

Tab. 2 Technical parameters of whole machine

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 500×1 750×2 600
作业速度/(km·h^{-1})	0~5
工作幅宽/mm	1 200
工作行数	2
割刀型式	双圆盘割刀
割台高度调节方式	手动液压
割台高度调节范围/mm	0~340
履带宽度/mm	200
履带节距/mm	72
履带节数	56
适用收获甘蓝行距/mm	400~500
适用收获甘蓝球径/mm	150~200

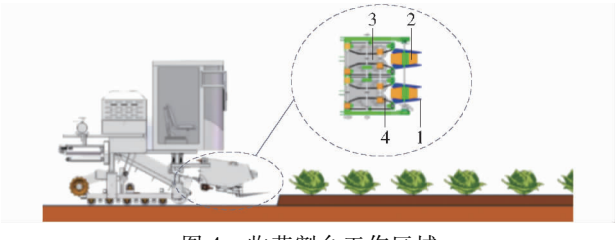


图4 收获割台工作区域

Fig. 4 Harvest header working area

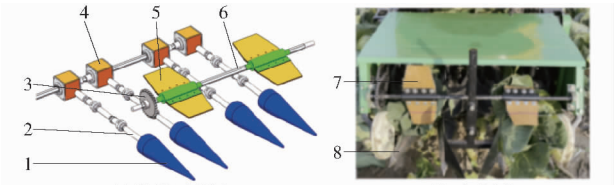
1. 拔取区 2. 拨禾区 3. 夹持输送区 4. 切割区

3 关键零部件设计

3.1 拔取装置设计

甘蓝机械化收获过程中,拔取装置设计至关重要。拔取装置如图5所示,拔取辊为带有一定倾角的圆锥筒,该角度取决于输送装置与地面水平夹角,确保甘蓝进入输送装置根部位置垂直于切割面。

当甘蓝收获机作业时,拔取辊紧贴地面,随着机具不断前进,拔取辊旋进甘蓝外包叶下方,通过外旋使甘蓝受到向上的牵引力,待甘蓝完全脱离地面后,拨禾轮将甘蓝拨正进入到夹持输送机构。通过前期试验与观察,甘蓝直接作用在拔取辊上,不断转动的拔取辊是造成甘蓝摩擦损伤的主要原因,将甘蓝和



(a) 结构示意图　(b) 实物图

图 5　拔取装置

Fig. 5　Pulling device

1. 拔取辊　2. 万向传动轴　3. 拨禾传动齿轮　4. 直齿齿轮箱　5、8. 拨禾　6. 拨禾传动轴　7. 拔取辊

拔取辊组成一个刚体系统进行受力分析，为简化模型，在分析过程中质点质心位置不予考虑，如图 6a 所示，由质心运动定理可得

$$\sum mv_x = \sum F_x^{(e)} \tag{1}$$

即
$$m_j a_j - m(a_e - a_r\cos\delta) = F_N\cos\delta = \mu F_j\cos\delta \sum mv_z = \sum F_z^{(e)} \tag{2}$$

式中　μ——甘蓝摩擦因数

a_r——甘蓝运动相对加速度，m/s^2

a_e——整体收获机前行加速度，m/s^2

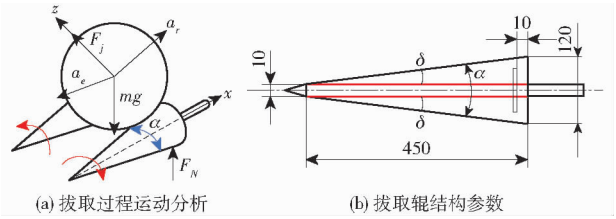
δ——拔取辊水平角，(°)

F_j——拔取辊构成系统对甘蓝的拔取力，N

m_j——拔取辊结构单螺旋质量，kg

F_N——收获割台对拔取辊的反作用力，N

即
$$F_N - (m_j + m)g - F_j\sin\delta = ma_r\sin\delta$$



(a) 拔取过程运动分析　(b) 拔取辊结构参数

图 6　拔取装置

Fig. 6　Extraction device

根据刚体运动质心运动规律，由式(1)、(2)可得 x 方向与 z 方向的受力平衡方程为

$$m(a_j\cos\delta - a_r) = mg\sin\delta \tag{3}$$

$$mg\cos\delta = F_j \tag{4}$$

式中　α_j——甘蓝收获机绝对加速度，m/s^2

联立式(3)、(4)可得

$$a_j = \frac{mg(\mu\cos^2\delta + \sin\delta\cos\delta)}{m_j - m + m\cos^2\delta} \tag{5}$$

$$a_j = \frac{g(\mu\cos^2\delta + \sin\delta\cos\delta)}{K_m - 1 + \cos^2\delta} \tag{6}$$

式中　K_m——拔取辊与收获甘蓝质量比

为使甘蓝在拔取辊上顺利输送而不跌落须满足 $a_r > 0$。联立式(5)、(6)可得

$$\frac{mg(\mu\cos^2\delta + \sin\delta\cos\delta)}{m_j - m + m\cos^2\delta} > g\frac{\sin\delta}{\sin\delta} \tag{7}$$

即
$$\mu > \frac{\tan\delta(K_m - 1 + \cos^2\delta)}{\cos^2\delta} - \tan\delta \tag{8}$$

收获时保证甘蓝始终向上运动不跌落，需满足式(8)，因此设计拔取机构时需考虑其材料属性，拔取辊间距根据双拔取辊对甘蓝的压力确定，同时这种作用力与拔取辊和甘蓝之间的摩擦力正相关，由式(6)可得，拔取辊与甘蓝之间的相对运动对甘蓝的拔取影响很大，所以拔取辊转速对甘蓝采收至关重要。

根据文献[20]确定甘蓝拔取辊锥度角 α 为 14° ~ 20°时，甘蓝拔取输送成功率最高；拔取辊末端圆筒半径与辊筒轴线长度之间比值通过夹角 δ 正切值确定，拔取辊内侧间距 50 ~ 80 mm，有利于甘蓝根茎通过，确定拔取辊末端直径为 120 mm，圆锥状拔取辊轴线总长 450 mm，由于拔取辊工作时紧贴地面，拔取辊(锥度)与水平夹角为 14°，符合设计要求。

3.2　夹持输送装置设计

如图 7 所示，设计的双行甘蓝收获机配备 2 种不同的输送装置，一种是位于收获割台中的立式输送装置，将拔取后的甘蓝输送至切根及后续运输环节；另一种是位于收获机尾部完成横向输送输送装置，将完成根部切割的甘蓝输送至收集箱中。


(a) 立式输送装置　(b) 横向输送装置

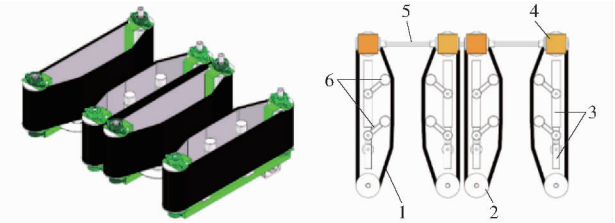
图 7　夹持输送装置

Fig. 7　Clamping conveyor

3.2.1　立式夹持输送装置

设计的双行甘蓝收获机采用“立式夹持 + 柔性输送”的形式，采用挠性喂入与柔性夹持协同作业的减损方法，提高对不同球径甘蓝适应性，实现甘蓝低损输送。立式夹持输送装置结构示意图如图 8 所示。

通过试验发现，甘蓝在输送过程主要受到摩擦、挤压和碰撞等破损形式的影响，刚性部件导致其形变量过大。为减少损伤，立式夹持输送装置选择高密度 CR 柔性海绵带包裹甘蓝进行夹持输送，以减小相对摩擦。同时，设计的张紧机构将部分形变转移至柔性夹持输送带上，从而降低甘蓝形变程度。这种设计不仅有效防止了甘蓝变形，还确保了夹持过程无滑动，从而避免因切根导致植株受力滑移和无效切根，实现甘蓝从拔取辊喂入到横向输送装置的低损运送。随后通过横向输送装置将根部切割的



(a) 立式夹持输送装置结构图 (b) 柔性夹持输送装置结构示意图

图 8 立式夹持输送装置

Fig. 8 Vertical clamping conveyor

1. 柔性夹持输送带 2. 从动轮 3. 夹持输送机构安装架 4. T2 齿轮箱 5. 输送带主传动轴 6. 张紧机构

甘蓝经由剥叶装置完成剥叶操作后输送至收集箱中,如图 9 所示。



(a) 横向输送收集过程 (b) 收集效果

图 9 横向输送收集装置

Fig. 9 Transverse conveying collection device

江浙一带主栽甘蓝品种成熟期球径为 150 ~ 200 mm 之间(单球质量为 1.5 ~ 3 kg),为提高收获机适应性,设计立式夹持输送装置喂入间隙为 120 ~ 220 mm 可调,确保不同品种甘蓝因球径不同仍可顺利喂入输送。

3.2.2 甘蓝立式夹持输送过程分析

为了保证柔性夹持输送装置有序、可靠工作,该装置输送速度须依据整机前进速度进行设定。甘蓝与输送带接触点速度和方向直接影响其输送状态[21],对甘蓝立式夹持输送运动过程进行理论分析,如图 10a 所示,甘蓝运动由整机前进速度和夹持带运动共同合成,其运动关系为

$$\boldsymbol{V}_e = \boldsymbol{V}_m + \boldsymbol{V}_a \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{V}_a$——立式夹持输送带线速度,km/h

$\boldsymbol{V}_m$——整机行走速度,km/h

$\boldsymbol{V}_e$——甘蓝绝对运动速度,km/h

根据三角关系及正弦定理可得

$$\begin{cases} \dfrac{V_a}{\sin(180-(\alpha+\beta))} = \dfrac{V_e}{\sin\alpha} \\ \dfrac{V_m}{\sin\beta} = \dfrac{V_a}{\sin\alpha} \end{cases} \tag{10}$$

由式(10)可得

$$\frac{V_a}{V_m} = \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\beta} = K \tag{11}$$

式中 β——甘蓝绝对运动方向与立式夹持输送带夹角,(°)

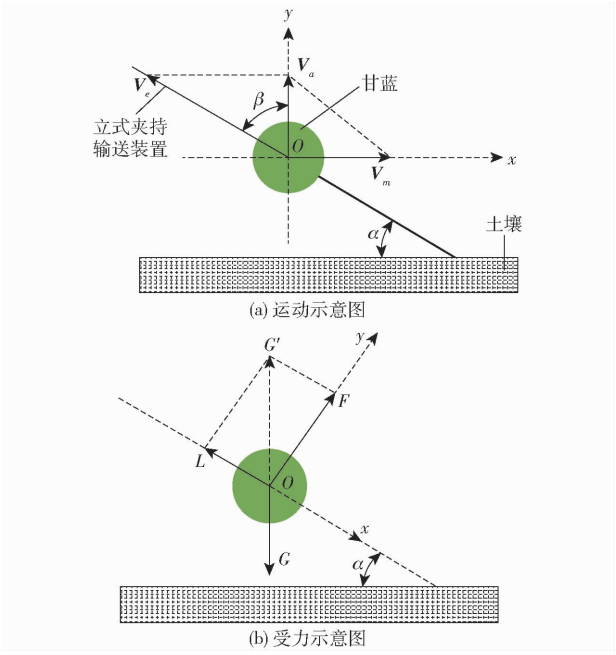


图 10 甘蓝运动及受力分析

Fig. 10 Movement and force analysis of cabbage

K——立式夹持输送带速度与整机前进速度比值

α——割台与水平面夹角,(°)

当 $K<1$,即 $V_a<V_m$ 时,甘蓝绝对速度会向机具前进方向前倾,不易夹取或易产生机械损伤;理想状态下,甘蓝绝对运动速度应竖直向上,则 K 需大于 1,$V_a = V_m/\sin\beta$。为了高效且低损夹持收获,一般割台与水平面夹角为 10° ~ 20°[22],本文取 14°,则 β 为 76°,机具行走速度选 1.44 km/h,计算得夹持输送带速度为 1.48 km/h。此时立式夹持输送带可达到最佳夹持输送状态,且速度大于机具前进速度,能够避免甘蓝在夹持输送过程中出现拥堵。

夹持运输过程,以单个甘蓝为研究对象,建立甘蓝力学模型,如图 10b 所示。由于机具前进速度和夹持输送带转速恒定,因此甘蓝在此过程做匀速运动。甘蓝受到自身重力、输送机构提升力和夹持输送带夹持力共同作用。力平衡方程为

$$\begin{cases} L = G\sin\alpha \\ F = G\cos\alpha \end{cases} \tag{12}$$

式中 F——夹持输送带夹持力,N

G——甘蓝自身重力,N

L——立式夹持输送装置提升力,N

由式(12)可知,提升力 L 和夹持力 F 受甘蓝自身重力、立式夹持输送机构与水平地面夹角 α 影响,当 α 越大,则 L 越大,F 越小,传送速度过快且容易掉落;反之,则 L 越小,F 越大,传送速度过快易出现拥堵和机械损伤,因此 α 是影响甘蓝低损收获的关键因素。

江浙一带主栽品种甘蓝平均质量为 1.5 ~ 3 kg，所需最大夹持输送带夹持力为 23.29 N，远远小于甘蓝径向压缩力极值 1 198.3 N[23]，对其不会造成机械损伤。

3.3　切根装置设计

针对不同生理性状蔬菜根茎，切根装置通常采用往复式切割、循环式切割和圆盘式切割等多种模式，以实现精准切割和处理[24]。对于甘蓝等粗根茎作物，一般使用圆盘式切割装置。由于甘蓝根茎粗壮且部分品种纤维化严重，单圆盘切割需要较高转速以降低切割力的不平衡性，会导致较大功耗。因此，采用双圆盘切割形式（图 11），使两刀在中心线方向保持一定距离，并在轴线方向上部分重叠，以平衡切根过程中甘蓝根茎所受的水平力，确保切割平稳性和完整性[25]。

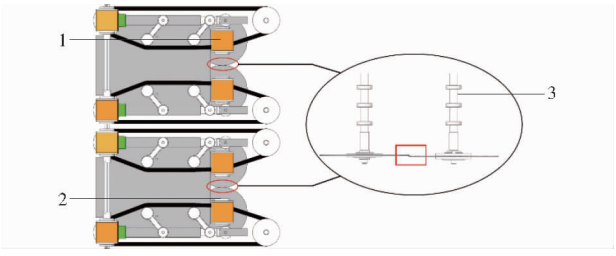
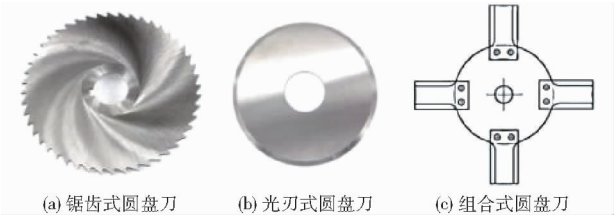


图 11　双圆盘切根装置结构示意图

Fig. 11　Double disc root cutting mechanism

1. 驱动电机　2. 圆盘割刀　3. 传动轴

如图 12 所示，圆盘式切割装置刀型一般分为锯齿式圆盘刀、光刃式圆盘刀以及组合式圆盘刀等形式[26-27]，为保证切根平整度和完整性，设计的甘蓝收获机选用光刃式圆盘刀，即高速钢刀盘。



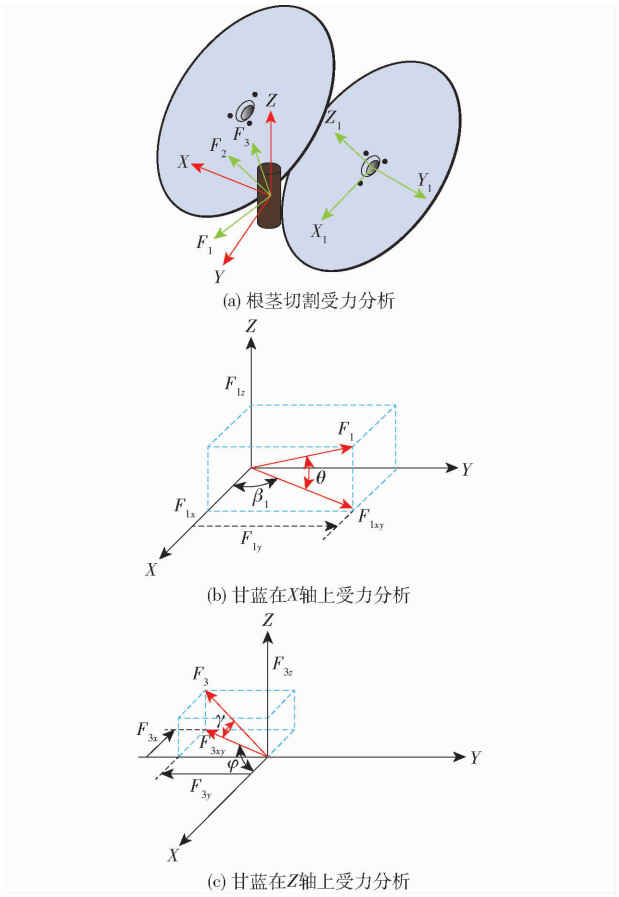
(a) 锯齿式圆盘刀　(b) 光刃式圆盘刀　(c) 组合式圆盘刀

图 12　切割圆盘刀刀型

Fig. 12　Cutting disc knife type drawing

在切割甘蓝根部过程中，有 3 个不同方向的切削力（图 13），分别为 F_1、F_2 和 F_3。这些力在水平面上投影分别为 F_{1xy} 和 F_{3xy}，可分解为在 X 轴和 Y 轴上分力（F_{1x}、F_{1y}、F_{3x} 和 F_{3y}）。β_1 和 φ 为分力与 X 轴夹角。

由于双圆盘割刀不对称性以及在轴线方向上的部分重叠，X 轴和 Z 轴方向上仍然存在一些切削力（F_2）。此外，甘蓝在 Z 轴方向上受到分合力 F_{1z} 和 F_{3z} 的作用，还有前进方向上的切削摩擦力，使其在上方受到较大的纵向分力，有助于夹持根茎，避免漏



(a) 根茎切割受力分析

(b) 甘蓝在X轴上受力分析

(c) 甘蓝在Z轴上受力分析

图 13　根茎切割受力分析

Fig. 13　Rootstock cutting force analysis diagrams

切及滑切现象。

通常情况下，可将 X 轴上的力 F_{1x} 近似为主要的切削力，因为实际情况中，F_{3xy} 与 X 轴之间夹角很小。另外，考虑到实际安装和使用情况，可将铅垂面角度 γ 设为零，只考虑俯仰角 θ 对切割参数的影响，以确定最佳切割参数。

切根装置 2 把圆盘刀假设均为理想圆盘，甘蓝根在切根处为一理想圆，且在切根过程中根茎不发生变形，则此时甘蓝根茎切根示意图如图 14 所示。

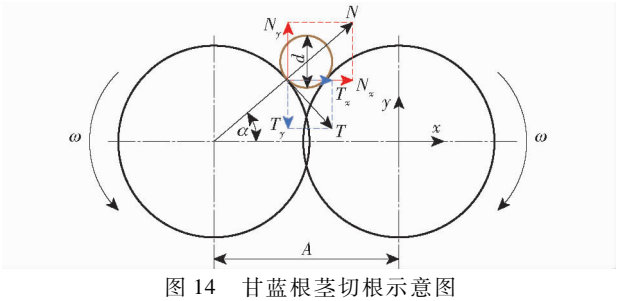


图 14　甘蓝根茎切根示意图

Fig. 14　Schematic of cutting roots of cabbage rhizomes

由图 14 可得，切根力 Q_x 和夹持力 P_y 为

$$Q_x = N_x + T_x \tag{13}$$

$$P_y = T_y - N_y \tag{14}$$

为使甘蓝根茎被刀盘夹持住，需满足

$$P_y > 0 \tag{15}$$

即，$T_y > N_y$；其中，$T = Nf$，即

$$Nf\cos\alpha > N\sin\alpha \tag{16}$$

其中

$$\theta = \arccos\frac{A/2}{(D+d)/2} = \arccos\frac{A}{D+d} \tag{17}$$

式中 N——刀盘对甘蓝根茎的法向反力

N_x、N_y——N 在 x、y 方向上的分力

T——刀盘对甘蓝根茎的摩擦力

T_x、T_y——T 在 x、y 方向上的分力

f——圆盘刀与甘蓝根间摩擦因数，取 0.7[30]

A——两圆盘中心距，mm

D——圆盘刀直径，mm

d——根切根处直径，取 25 ~ 35 mm

所以，当 $f > \tan\alpha$ 或 $\varphi > \alpha$ 时，圆盘刀具有良好的夹持性能[28-29]。

江浙一带甘蓝根茎平均直径 d 为 30 mm，行距为 450 mm，因设计的甘蓝收获机为双行收获，为避免机械结构相互干涉，圆盘刀直径 D 取 250 mm，重叠部分为 2 mm，中心距 A 为 248 mm 为适宜，根据式(17)，求得 α 为 30.6°，$\tan\alpha$ 为 0.6，此时 $f > \tan\alpha$，说明该切根装置具有良好的夹持性能，在切根作业时能有效夹持根茎，避免滑移和无效切割。同时双圆盘割刀转速对切根质量有着较大的影响，双圆盘割刀转速过低，切割能量越低，造成甘蓝切根不完全，甚至切不断根茎，进一步降低甘蓝收获合格率，双圆盘割刀转速过高又将增大切根功耗。

4 甘蓝机械化收获试验与结果分析

4.1 甘蓝机械化收获试验

4.1.1 试验地点和试验设备

为验证本文设计的双行甘蓝收获机收获性能和可靠性，于 2025 年 1 月 14 日在江苏省常熟市横塘专业蔬菜合作社进行收获试验，试验田总面积约 0.67 hm^2，甘蓝种植模式为垄作，行距为 450 mm，株距为 330 mm，土壤类型为黏壤土，此时甘蓝已经成熟至收获标准，生长情况如图 15 所示。



图 15 甘蓝生长状况

Fig. 15 Cabbage growth picture

试验设备有自行研制的双行甘蓝收获机、米尺、电子秒表、计数器、纸、笔等，试验对象为“春喜”甘蓝。

4.1.2 试验方法及评价指标

收获前，对试验田进行检查，保证机具作业环境平坦、无障碍物，并按要求调试甘蓝收获机各部分装置保证其正常工作，尽可能选择一致性好的试验田进行试验。在甘蓝田间收获试验时，每次试验选取整个垄面连续成熟的甘蓝进行收获(单垄长度约 50 m，290 ~ 330 颗甘蓝)，田间收获试验及作业前后对比如图 16 所示。



(a) 田间试验 (b) 收获前 (c) 收获后

图 16 田间验证试验

Fig. 16 Field validation trials

甘蓝机械收获并未有相关标准和规定，因此参照文献[31-32]进行采收试验。

当甘蓝叶球达到紧实时进行采收，在收割时保留 2 片外叶(莲座叶)以保护叶球，做到表皮干净无破损、无裂球。

根据结球甘蓝生产技术规范及茎叶类蔬菜收获质量要求定义甘蓝采收合格率，须满足条件：①机械切根截面须平整，不能发生折断或切出 2 个截面的情况。②切割位置须在甘蓝外包叶上 10 ~ 15 mm 处，同时把外包叶切断。③采收之后保留 2 ~ 3 片莲座叶来保护叶球。④没有因机械收获作业而造成的明显裂球、挤压破损、切割破损等情况发生。采收合格率计算式为

$$K = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \tag{18}$$

式中 K——采收合格率，%

N_1——单次测定试验收获甘蓝合格数，颗

N_0——单次测定试验甘蓝总数，颗

为验证本文所设计甘蓝收获机在不同种植模式收获作业时的适配性，参照文献[33]选定拔取辊转速为 120 r/min，柔性夹持输送带转速为 200 r/min，双圆盘割刀转速为 250 r/min，基于田间复杂工况(土壤条件、甘蓝个体差异)等对作业稳定性及拔取-夹持输送-切根-收集等环节协同作用的考虑，选定机具行走速度为 1.2 km/h 进行田间试验，统计垄作 2 行、垄作 4 行和平作 3 种种植模式的产量及采收合格数，田间试验收获总面积约为 0.2 hm^2，起垄数量总数为 16 垄，其中有 10 垄采用垄作 2 行的种植方式，6 垄采用垄作 4 行种植模式，其余种植方式为平作，各占地约 1/15 hm^2。分别对 3 种种植模式产量及采收合格数进行统计，结果如表 3 所示。

表 3　甘蓝采收试验统计

Tab. 3　Cabbage harvest test statistics

参数	栽培模式		
	垄作 2 行	垄作 4 行	平作
产量/(颗·hm^{-2})	50 520	51 930	58 590
采收合格数/颗	45 150	46 230	50 850
采收合格率/%	89.37	89.02	86.79

由表 3 可知，甘蓝采收合格率最高可达 89.37%，无漏收现象，设计的栽培模式产量较传统模式产量减少约 12%，基本达到甘蓝栽植颗数不减的目标。

4.2　甘蓝采收合格率响应面试验

4.2.1　试验设计与结果

对于甘蓝收获机，机具行走速度、拔取辊转速、柔性夹持输送带转速和双圆盘割刀转速是影响收获合格率的关键因素，为获得最高收获合格率时甘蓝收获机最佳工作参数组合，采用多因素响应面分析法(RSM)，以机具行走速度 x_1、拔取辊转速 x_2、柔性夹持输送带转速 x_3、双圆盘割刀转速 x_4 为试验因素，利用 Design-Expert 13 软件进行二次多项式回归分析，进行甘蓝收获机作业参数优化试验，并利用响应面分析法对各因素相关性和交互效应的影响规律进行分析，试验过程中测得甘蓝采收合格率 y，试验因素编码见表 4，根据 Box－Benhnken Design(BBD)试验设计原理[34]，试验方案与结果如表 5 所示，X_1、X_2、X_3、X_4 为因素编码。

表 4　因素编码

Tab. 4　Factors and coding

编码	因素			
	机具行走速度 x_1/(km·h^{-1})	拔取辊转速 x_2/(r·min^{-1})	柔性夹持输送带转速 x_3/(r·min^{-1})	双圆盘割刀转速 x_4/(r·min^{-1})
1	1.4	160	250	300
0	1.2	120	200	250
－1	1.0	80	150	200

4.2.2　甘蓝采收合格率方差及显著性分析

利用 Design-Expert 13 软件进行回归方程显著性方差分析，结果如表 6 所示。由 Design-Expert 13 软件得到回归模型的 P 小于 0.001，说明该模型可用且结果极显著，该模型失拟项 P 为 0.563 4 > 0.05，说明该回归模型的拟合度较高且误差较小。

由表 6 可知，试验各因素对甘蓝采收合格率影响由大到小为：机具行走速度、柔性夹持输送带转速、双圆盘割刀转速、拔取辊转速。

由表 6 可知 X_1、X_3、X_4、X_3X_4、X_1^2、X_2^2、X_3^2、X_4^2 等因素极显著。其余因素不显著。

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Design scheme and results

序号	因素				采收合格率
	X_1	X_2	X_3	X_4	y/%
1	0	－1	0	1	95.9
2	0	1	0	1	94.6
3	0	1	－1	0	94.9
4	－1	0	1	0	92.1
5	0	0	－1	1	94.2
6	0	－1	1	0	92.6
7	0	0	1	1	96.1
8	0	0	0	0	96.5
9	－1	0	0	1	95.2
10	0	－1	－1	0	95.5
11	1	0	－1	0	91.3
12	－1	－1	0	0	95.9
13	0	0	0	0	97.1
14	－1	0	－1	0	94.2
15	1	1	0	0	92.9
16	0	0	1	－1	90.1
17	1	0	1	0	91.1
18	－1	1	0	0	94.3
19	0	0	0	0	96.8
20	0	1	1	0	92.4
21	0	0	0	0	95.2
22	0	1	0	－1	93.3
23	1	0	0	1	93.3
24	1	0	0	－1	92.7
25	－1	0	0	－1	93.8
26	0	0	0	0	96.7
27	0	0	－1	－1	95.7
28	1	－1	0	0	92.8
29	0	－1	0	－1	93.1

4.2.3　甘蓝采收合格率回归方程

利用 Design-Expert 13 软件采用 4 因素 3 水平回归试验设计方法得到甘蓝采收合格率的回归方程为

$$y = 96.426 - 0.95X_1 - 0.283\,3X_2 - 0.941\,7X_3 + 0.875X_4 + 0.425X_1X_2 + 0.475X_1X_3 + 0.21X_1X_4 + 0.1X_2X_3 - 0.375X_2X_4 + 1.85X_3X_4 - 1.95X_1^2 - 0.875\,8X_2^2 - 1.86X_3^2 - 0.888\,3X_4^2 \quad (19)$$

通过对甘蓝采收合格率响应面回归模型中的 P 值进行排除检验，在不失拟的基础上剔除不显著项进行方差拟合，得到回归方程为

$$y = 96.426 - 0.95X_1 - 0.941\,7X_3 + 0.875X_4 + 1.85X_3X_4 - 1.95X_1^2 - 0.875\,8X_2^2 - 1.86X_3^2 - 0.888\,3X_4^2 \quad (20)$$

4.2.4　甘蓝采收合格率交互项响应面分析

由表 6 可知，柔性夹持输送带转速与双圆盘割刀转速之间的交互作用对甘蓝采收合格率影响极显著，为了更加直观地分析柔性夹持输送带转速与双

表 6 回归方程显著性分析

Tab. 6 Regression equation significance analysis

差异来源	平方和	自由度	均方和	F	P
回归模型	88.33	14	6.31	11.89	<0.000 1 **
X_1	10.83	1	10.83	20.42	0.000 5 **
X_2	0.963 3	1	0.963 3	1.82	0.199 2
X_3	10.64	1	10.64	20.06	0.000 5 **
X_4	9.19	1	9.19	17.32	0.001 **
X_1X_2	0.722 5	1	0.722 5	1.36	0.262 7
X_1X_3	0.902 5	1	0.902 5	1.70	0.213 1
X_1X_4	0.16	1	0.16	0.301 6	0.591 5
X_2X_3	0.04	1	0.04	0.075 4	0.787 6
X_2X_4	0.562 5	1	0.562 5	1.06	0.320 6
X_3X_4	13.69	1	13.69	25.81	0.000 2 **
X_1^2	24.69	1	24.69	46.54	<0.000 1 **
X_2^2	4.98	1	4.98	9.38	0.008 4 **
X_3^2	22.52	1	22.52	42.46	<0.000 1 **
X_4^2	5.12	1	5.12	9.65	0.007 7 **
剩余	7.43	14	0.530 4		
失拟	5.25	10	0.525 4	0.967 6	0.563 4
误差	2.17	4	0.543		
总和	95.75	28			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$）。

圆盘割刀转速交互作用对甘蓝采收合格率的影响，利用 Design-Expert13 软件得到相应的响应曲面如图 17 所示。

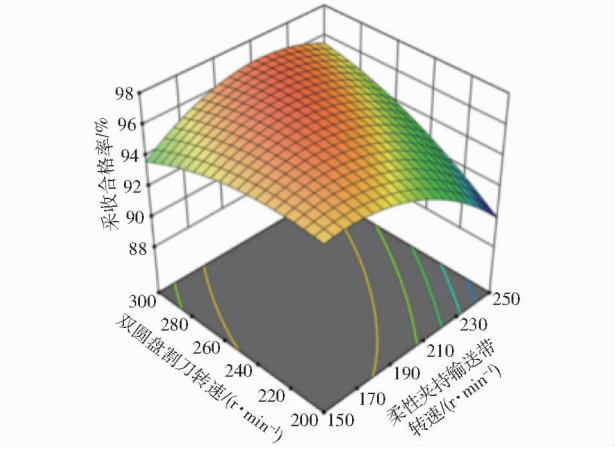


图 17 交互因素对甘蓝采收合格率的影响（$X_1=0, X_2=0$）

Fig. 17 Influence of interactive factors on qualified rate of cabbage harvesting ($X_1=0, X_2=0$)

由图 17 可知，当行走速度和拔取辊转速固定（1.2 km/h 和 120 r/min）时，当刀盘转速提至 200 ~ 250 r/min 时，随着输送带转速增加，合格率先增后略减。当刀盘转速为 250 ~ 300 r/min 时，合格率持续降低。原因为低刀盘转速时，较高的输送带转速减少了切割时间，导致无效切割，降低了合格率；而高刀盘转速则能有效切断甘蓝根茎，提高合格率。当输送带转速为 150 ~ 210 r/min 时，刀盘转速变化对合格率影响小，但为 210 ~ 250 r/min 时，合格率呈线性增长，因为在低输送带转速时，甘蓝能有效切根。相反，过高的输送带转速会导致切根不完整，从而降低合格率。当输送带转速为 175 ~ 225 r/min、刀盘转速为 275 ~ 300 r/min 时，可获得较高的甘蓝采收合格率。

4.3 甘蓝收获机收获性能工作参数优化

以甘蓝采收合格率为试验指标。对甘蓝采收合格率进行最大化优化，设定甘蓝采收合格率约束条件为 92% ~ 100%，设定前进速为 1.0 ~ 1.4 km/h，拔取辊转速为 80 ~ 160 r/min，柔性夹持输送带转速为 150 ~ 250 r/min，双圆盘割刀转速为 200 ~ 300 r/min，优化目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} 92\% < f(X_1, X_2, X_3, X_4) < 100\% \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_4 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{21}$$

由 Design-Expert 13 软件对目标进行优化求解得到：当甘蓝收获机机具行走速度为 1.25 km/h、拔取辊转速为 109.75 r/min、柔性夹持输送带转速为 174.18 r/min、双圆盘割刀转速为 298.60 r/min 时，甘蓝采收合格率最大理论值为 95.18 %，满足收获要求。

4.4 甘蓝收获机田间收获性能试验验证

设计的双行甘蓝收获机动力由履带式底盘提供，其他工作部件动力由机械传动完成，考虑到机械传动的限制性与参数优化的约束性，需要对优化后参数组合进行圆整以期得到与机具工作实际情况相匹配的最优解，最终选定拔取辊转速为 110 r/min、柔性夹持输送带转速为 180 r/min、双圆盘割刀转速为 300 r/min、行走速度为 1.0 km/h，在相同试验条件下，进行 3 组田间收获性能验证试验，每次试验选取甘蓝生长状况优异的垄面进行（长度约 60 m），每垄种植 280 ~ 330 颗甘蓝，每组试验重复 5 次，统计甘蓝采收合格数及损伤数。

试验结果表明，当栽培模式为垄作 2 行与垄作 4 行时，甘蓝采收合格率均大于 90%，最大值为 95.14%，最小值为 90.19%，采收合格率平均值分别为 92.05% 和 93.83%。当栽培模式为传统平作时，甘蓝采收合格率开始下降，最大值为 91.36%，最小值为 86.32%。综上所述，本文设计的甘蓝标准化栽培模式能够更好地适应此甘蓝收获装备作业，田间验证试验效果良好。

5 结论

（1）设计了双行甘蓝收获机，并根据该装备作

业性能与江苏省主栽甘蓝品种生物特性，按照严格的种植标准及管理程序设计了一套甘蓝垄作 2 行和垄作 4 行标准化栽培模式，形成甘蓝全程机械化收获作业系统。

（2）提出了一种“立式夹持 + 柔性输送”的采收策略，采用挠性喂入与柔性夹持协同作业的减损方法，提高对不同球径甘蓝的适应性，实现甘蓝低损输送。设计的输送装置喂入口间隙为 120 ~ 220 mm 可调，确保不同品种甘蓝因球径不同仍可顺利进行喂入输送。

（3）田间性能试验结果表明，设计的甘蓝收获机最高采收合格率时最佳工作参数组合为拔取辊转速 110 r/min、柔性夹持输送带转速 180 r/min、双圆盘割刀转速 300 r/min、行走速度 1.0 km/h，此时运行平稳、性能可靠，切根一致性好，甘蓝采收合格率达 93.83%，机采效果良好。

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] 肖宏儒，金月，曹光乔. 蔬菜生产机械化装备技术研究[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2019：18 - 37.

[3] HSU Y S，CHANG S F. Field tests of a prototype cabbage harvester [J]. Memoirs of the College of Agriculture，National Taiwan University，1998，28(2)：10 - 18.

[4] 张哲，刘俟墨，唐金成，等. 大白菜收获机研究现状及发展对策[J]. 中国蔬菜，2024(5)：14 - 22.
ZHANG Zhe，LIU Simo，TANG Jincheng，et al. Research status and development strategies of Chinese cabbage harvesters[J]. China Vegetables，2024(5)：14 - 22.（in Chinese）

[5] MORRIS C E，WEN A M，XU X H，et al. Ice nucleation-active bacteria on Chinese cabbage in Northern China：population dynamics and characteristics and their possible role in storage decay[J]. Phytopathology，1992，82(7)：739 - 746.

[6] 王俊，杜冬冬，胡金冰，等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报，2014，45(2)：81 - 87.
WANG Jun，DU Dongdong，HU Jinbing，et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(2)：81 - 87.（in Chinese）

[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] LENKER D H，ADRIAN P A，FRENCH G W，et al. Selective mechanical lettuce harvesting system[J]. Transactions of the ASAE，1973，16(5)：858 - 861.

[9] 杜冬冬，王俊，裘姗姗. 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）

[10] HEINRICH B. Tractor-mounted silage-extraction implement-has horizontally reciprocating knives with shoes working against frame member undersides：DE3023986A[P]. 2024 - 10 - 31.

[11] 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）

[12] 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）

[13] 李小强. 4YB - Ⅰ型甘蓝收获机的改进设计[D]. 兰州：甘肃农业大学，2013：15 - 30.
LI Xiaoqiang. Improved design of 4YB - Ⅰ cabbage harvester[D]. Lanzhou：Gansu Agricultural University，2013：15 - 30.（in Chinese）

[14] 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，2013：8 - 24.
ZHOU Cheng. Research on key technology and equipment of cabbage harvesting[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2013：8 - 24.（in Chinese）

[15] 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）

[16] 房欣，周成. 压顶式甘蓝收获机设计与试验[J]. 现代化农业，2019(8)：70 - 71.

[17] 李天华，孟志伟，丁贺贺，等. 甘蓝切根作业力学分析与参数优化[J]. 农业工程学报，2020，36(7)：63 - 72.
LI Tianhua，MENG Zhiwei，DING Hehe，et al. Mechanical analysis and parameter optimization of cabbage root cutting operation[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(7)：63 - 72.（in Chinese）

[18] 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)

[19] 梁树建,刘立晶,刘芳建,等.叶类蔬菜机械化收获技术装备发展现状[J].中国农机化学报,2025,46(1):346 - 352.
LIANG Shujian, LIU Lijing, LIU Fangjian, et al. The state of development of leafy vegetable mechanized harvesting technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(1): 346 - 352. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 杨鑫,张银平,贡亮,等.土下切根聚拢式菠菜有序收获机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(7):384 - 393.
YANG Xin, ZHANG Yinping, GONG Liang, et al. Design and experiment of spinach harvester with root cutting and gathering under soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):384 - 393. (in Chinese)

[22] 佟文玉. 手扶式甘蓝收获机关键部件设计与试验优化[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023:26 - 41.
TONG Wenyu. Design and experimental optimization of key components for walking-type cabbage harvester[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 26 - 41. (in Chinese)

[23] 张健飞, 肖宏儒, 曹光乔, 等. 甘蓝收获机割台设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11):39 - 44.
ZHANG Jianfei, XIAO Hongru, CAO Guangqiao, et al. Design and experiment of cabbage harvester platform[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 39 - 44. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 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)

[26] 廖宜涛, 李运通, 万星宇, 等. 龙门式电驱动油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12):147 - 159.
LIAO Yitao, LI Yuntong, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of portal-type electrically driven rapeseed stalk harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(12): 147 - 159. (in Chinese)

[27] 王涛, 闫小丽, 米国鹏, 等. 硬质茎秆切割装置研究现状[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(8):34 - 39,74.
WANG Tao, YAN Xiaoli, MI Guopeng, et al. Research status of cutting devices for hard stems[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 34 - 39,74. (in Chinese)

[28] 郑嘉鑫, 王世顺, 马龙, 等. 三七茎叶采收机仿生切割刀片设计与试验[J].农业机械学报, 2024, 55(8):117 - 126.
ZHENG Jiaxin, WANG Shishun, MA Long, et al. Design and experiment of bionic cutting blades for *Panax notoginseng* stem and leaf harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):117 - 126. (in Chinese)

[29] 郝朝会, 吴宗剑, 李元宝, 等.工业大麻收获机割台设计与试验[J].农业机械学报, 2024, 55(增刊2):112 - 121.
HAO Zhaohui, WU Zongjian, LI Yuanbao, et al. Design and test of industrial hemp cutting table[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp.2):112 - 121. (in Chinese)

[30] 杨光, 肖宏儒, 张健飞, 等. 甘蓝双圆盘切根装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(10) : 83 - 88.
YANG Guang, XIAO Hongru, ZHANG Jianfei, et al. Design and experiment of a double-disk root cutting device for cabbage [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(10): 83 - 88. (in Chinese)

[31] 中国标准化研究院. 结球甘蓝生产技术规范:GB/Z 26582—2011[S]. 中国标准出版社, 2011.

[32] 叶类蔬菜收割机. 农业机械推广鉴定大纲:DG/T 249—2024[S]. 中华人民共和国农业农村部, 2024.

[33] 佟文玉, 张健飞, 曹光乔, 等. 手扶式甘蓝收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10):30 - 36.
TONG Wenyu, ZHANG Jianfei, CAO Guangqiao, et al. Design and experiment of a walk-behind cabbage harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 30 - 36. (in Chinese)

[34] 赵雄, 徐港吉, 陈建能, 等. 基于 Laws 与 Gabor 滤波的田间西兰花花球识别技术[J].农业机械学报, 2023, 54(4): 313 - 322.
ZHAO Xiong, XU Gangji, CHEN Jianneng, et al. Field broccoli head recognition technology based on Laws and Gabor filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):313 - 322. (in Chinese)