doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.05.026

可调式大白菜收获机根部切割装置设计与试验

佟文玉[1,2]　苑严伟[1,2]　白圣贺[1,2]　安　然[1,2]　牛　康[1,2]　周利明[1,2]　谭　俊[3]

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;
3. 泰州携创农业装备有限公司, 泰州 225300)

摘要: 针对河北地区大白菜切根作业中因地形复杂和切割参数不匹配导致的切根合格率较低的问题,本文设计了一种搭载履带龙门式底盘,通过改变切根机构电动推杆的伸缩量和割刀电机转速,实现切割高度、角度及转速可调的大白菜根部切割装置,以实现大白菜高效切割。该装置主要由仿形机构、切根机构、履带行走机构及控制系统组成。为优化作业性能,对切根机构进行静力学与动力学分析,确定切根机构上下高度调节量为 90 mm,角度调节范围为 0°~42°,转速调节范围为 0~600 r/min,并基于 ANSYS/LS-DYNA 软件构建大白菜根茎切割过程的有限元仿真模型,以根茎反作用力为评价指标,选取割刀倾角、割刀转速、前进速度为影响因素开展仿真优化试验,仿真试验结果表明:割刀倾角为 10.487°,割刀转速为 271.603 r/min,前进速度为 0.204 m/s 时,根茎反作用力最小,为 152.068 N,根据实际情况对仿真参数优化结果进行圆整后进行田间验证试验,田间试验结果表明:当割刀倾角为 10°,割刀转速为 275 r/min,机具前进速度调整为 0.2 m/s 时,切根合格率平均值为 93.23%,损伤率平均值为 4.05%,此时各关键部件工作性能稳定,切根一致性好,切根损伤率低,研究成果可为大白菜低损收获装备的设计及工作参数设置提供参考。

关键词: 大白菜收获机; 切割装置; 自动调节; ANSYS/LS-DYNA

中图分类号: S225.92　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)05-0282-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Adjustable Root Cutting Device for Chinese Cabbage

TONG Wenyu[1,2]　YUAN Yanwei[1,2]　BAI Shenghe[1,2]　AN Ran[1,2]　NIU Kang[1,2]　ZHOU Liming[1,2]　TAN Jun[3]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Taizhou Xiechuang Agricultural Equipment Co., Ltd., Taizhou* 225300, *China*)

Abstract: In response to the low qualified rate of root-cutting in Chinese cabbage operations in Hebei Province, which was caused by complex terrain and mismatched cutting parameters, a cabbage root-cutting device mounted on a crawler gantry chassis was designed. By adjusting the extension of the electric push rod in the cutting mechanism and the rotational speed of the cutting motor, the device realized adjustable cutting height, angle, and speed, thereby improving cutting efficiency. The system mainly consisted of a profiling mechanism, a cutting mechanism, a crawler walking mechanism, and a control system. To optimize operational performance, static and dynamic analyses of the cutting mechanism were conducted, and the adjustable range of cutting height was determined as 90 mm, the angle range as 0°~42°, and the rotational speed range as 0~600 r/min. Furthermore, a finite element simulation model of the cabbage stem cutting process was established by using ANSYS/LS-DYNA. Taking the stem reaction force as the evaluation index, cutter angle, cutter speed, and forward speed were selected as influencing factors for simulation-based optimization tests. The simulation results showed that when the cutter angle was 10.487°, the cutter speed was 271.603 r/min, and the forward speed was 0.204 m/s, the minimum stem reaction force was 152.068 N. After rounding the optimized simulation parameters to align with practical conditions, field validation tests were carried out. The results showed that when the cutter angle was 10°, the cutter speed was 275 r/min, and the forward speed was 0.2 m/s,

收稿日期: 2025-09-04　修回日期: 2025-09-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001803)

作者简介: 佟文玉(1998—),男,博士生,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: tongwenyu119@163.com

通信作者: 苑严伟(1980—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究,E-mail: yyw215@163.com

the average qualified root-cutting rate reached 93.23%, with an average damage rate of 4.05%. Under these conditions, the key components operated stably, root-cutting consistency was high, and the damage rate remained low. These findings provided a valuable reference for the design of low-damage harvesting equipment for Chinese cabbage and for the configuration of its operating parameters.

Key words: Chinese cabbage harvesting device; cutting device; automatic adjustment; ANSYS/LS - DYNA

0　引言

大白菜是中国大宗蔬菜之一，栽培地域广泛，因其耐寒、产量高、耐贮运、供应期长等优良特性，广泛种植于中国南北各地，四季均有生产。近年来，大白菜种植面积稳定在 1.8×10^6 hm^2 左右[1-2]，约占我国蔬菜总播种面积的 15%。在大白菜生产过程中，耕整地等环节的机械化水平较高，但收获环节的机械化水平较低，目前仍主要依靠人工先将大白菜推倒再利用刀具将大白菜从根茎处切断进行收获作业，该环节工作量占整个生产环节的 40%[3-5]，劳动强度大、效率低、作业成本高等问题日益凸显。现有收获装备因大白菜成熟期植株个体差异较大、地表不平及根茎高度不一导致的切根精度低、作业损伤大、收获损失严重等问题尤为严重。因此，研制出结构合理、性能稳定的切根装置是实现大白菜机械化收获的前提，对于大白菜低损收获装备的开发具有重要的研究意义。

国外学者较早开展了大白菜收获机械的相关研究，KANAMITSU 等[6]研制了一种手扶式大白菜收获机，但该收获机切根效果较差，漏切、斜切现象严重，后续为提高收获效率并减少切根损伤，在此基础上设计了一款拖拉机侧悬挂式大白菜收获机，但由于作业标准要求高，切根精度较低，限制了该机的实际应用效果。KIM 等[7]研发了一种履带自走式大白菜收获机，通过在输送带下布置的双圆盘锯完成切根作业，之后基于该成果对圆盘锯尺寸及倾斜角度进行优化，进一步提升了切根质量，但切割面不够平整，叶片易损伤[8]。

姚会玲[9]为确保将大白菜的根茎切净后能够顺利向后输送，设计了一种具有良好滑切性能的圆盘切割器模型，为大白菜根茎的低损切割提供参考。李向军等[10]研制了一种通过两个对向布置且呈一定角度的缺口圆盘对大白菜根部进行切割和起拔作业，通过圆盘弧面与地表接触实现限深功能，有效保证切根一致性。张静[11]采用对称布置的平底锯齿圆盘刀与凹面圆盘光刃刀结合的结构形式，实现切割装置整体随地面起伏运动，进一步提高了切根作业效果。

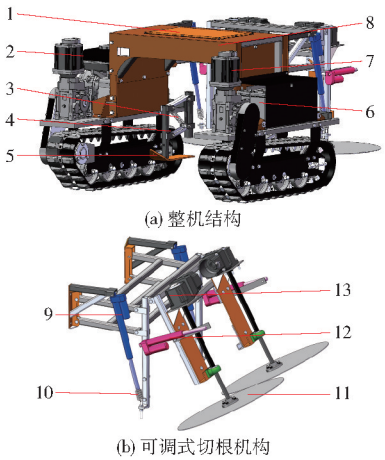
国外由于集约化规模种植模式，已对大白菜收获机的作业方式和性能进行了广泛研究，主要聚焦在日本、韩国等国家[12]，切根装置均以单个或一对锯齿圆盘为主，且多数是在后续倾斜输送过程中完成大白菜切根作业，因此切根一致性较差，损伤较高。国内各高校和科研机构在汲取国外先进方法的基础上自主创新，先后对大白菜切根结构和参数开展系列化探索与研究[13]，但大多停留在实验室或样机阶段，并未用于实际生产推广。随着计算机辅助工程技术的日益成熟，有限元仿真已成为研究农业物料切割过程、优化刀具结构与工作参数的有效工具。近年来，韩明兴等[14]构建了油菜茎秆切割过程有限元模型，获取切割作业动态特性；张军等[15]基于 Abaqus 有限元仿真对簇生番茄切割采收进行了研究，上述研究通过建立有限元物料本构模型与刀具–作物互作模型，为切割器结构与参数优化提供了重要理论依据，但针对大白菜根茎切割过程的有限元仿真研究较少。

因此，为了解决大白菜机械化切根作业过程中因地表起伏和不同切割参数造成的切损问题，本文以河北地区“义和秋”大白菜为研究对象，设计一种搭载于履带龙门底盘的多参数可调式根部切割装置，基于 ANSYS/LS - DYNA 构建了大白菜根茎–割刀刚柔耦合有限元模型，揭示关键作业参数对根茎反作用力的影响机制，并通过田间试验验证优化结果的可靠性及装置作业性能。旨在为大白菜低损高效收获装备的研发及参数配置提供理论依据与技术支撑。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

如图 1a 所示，可调式大白菜根部切割装置主要由仿形机构、切根机构、履带行走机构及控制系统组成。仿形机构与底盘机架连接，由仿形板及位移传感器组成；切根机构主要由圆盘割刀、割刀轴、电动推杆、机架、拉伸弹簧等组成，如图 1b 所示。割刀动力元件选用直流无刷电机，割刀装置通过连接板安装在一个平行四边形连杆机构上，该四杆机构固定在龙门架上，以实现整体的稳固支撑和灵活调节。割台高度及切割角度通过调节电动推杆伸缩量来控制。割台高度调节电动推杆的末端通过销轴连接拉伸弹簧，旨在切根作业中实现一定的仿形效果且为



(a) 整机结构

(b) 可调式切根机构

图 1 可调式大白菜根部切割装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of adjustable Chinese cabbage root cutting device

1. 控制装置集成 2. 增程器 3. 仿形弹簧 4. 仿形机架 5. 仿形板 6. 电池组 7. 行走电机 8. 龙门式机架 9. 割台高度调节电动推杆 10. 拉伸弹簧 11. 圆盘割刀 12. 割台角度调节电动推杆 13. 割刀电机

割刀受到瞬时冲击或负载变化时提供缓冲,减少对切根机构的直接冲击,补偿切根作业过程中割刀高度调整的细微偏差;控制系统集成在龙门架内部,包含割台升降控制、割刀转速调节、无线遥控及数据储存功能。

无线遥控器功能如图 2 所示,电控系统如图 3 所示。电控系统采用直流电机正反转控制模块(LSD-100P50FID2 型,耐压 DC 100V,电流 50 A)搭配割台高度推杆(电动推杆,工作电压 DC 48V,行程 300 mm)及割刀角度推杆(电动推杆,工作电压 DC 48V,行程 150 mm)调节割台高度及切割角度,通过直流无刷电机驱动器(AQMD22A04BLS-E2 型,工作电压 DC 48 V,最大适配电机功率 1.35 kW,额定电流 35 A,额定转速 3 000 r/min,减速比 5)调节电机转速,进而调节割刀转速(额定最大转速为 600 r/min)。

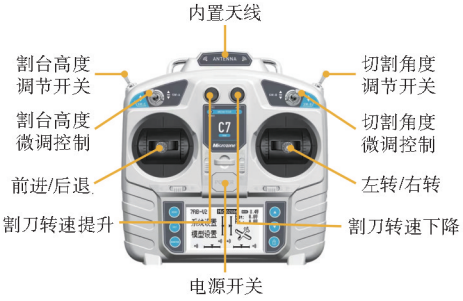


图 2 无线遥控器功能图

Fig. 2 Wireless remote control function diagram

1.2 工作原理

可调式大白菜根部切割装置工作过程如图 4 所示,工作时,首先通过遥控器调整切割装置位置完成垄间对行,随后调节切割机构高度,使仿形板接触土壤表面,并确保圆盘割刀位于大白菜最外层外包叶叶柄基部下方,最后调整切割机构角度,选择适宜的切割角度开始切根作业。在切根作业过程中,仿形板紧贴土壤表面,通过仿形机构上的位移传感器实时监测地面起伏变化,并将数据传递至正反转控制器,经处理后,控制器通过电动推杆的伸缩实现切割机构的高度自适应调节,从而确保切根位置一致,与此同时,割刀电机驱动圆盘割刀对向旋转,旋转的圆盘割刀切割大白菜根茎,将大白菜与土壤分离,完成切割作业。大白菜根部切割装置主要技术参数见表 1。

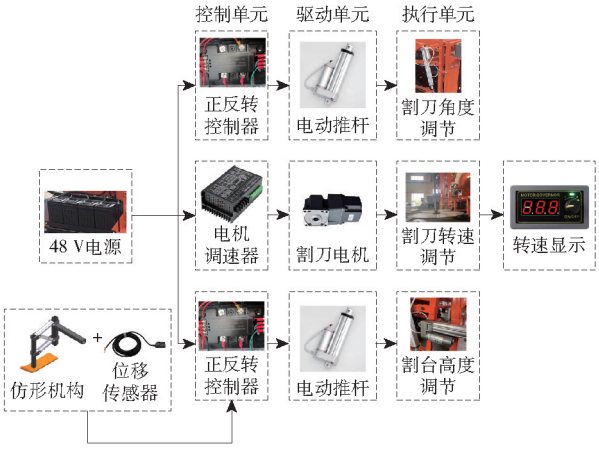


图 3 切割装置电控系统

Fig. 3 Electric control system of cutting device

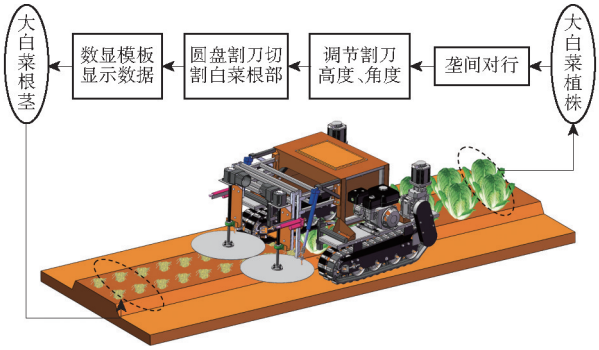


图 4 可调式大白菜根部切割装置工作原理图

Fig. 4 Working principle of adjustable Chinese cabbage root cutting device

表 1 可调式大白菜根部切割装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of adjustable Chinese cabbage root cutting device

技术参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 750×1 330×870
作业速度/(m·s^{-1})	0~0.8
工作幅宽/mm	1 200
割刀角度调节范围/(°)	0~42
割刀高度调节量/mm	180
割刀转速调节范围/(r·min^{-1})	0~600

2　根部切割装置设计

2.1　大白菜物理参数与切割位置确定

大白菜种类繁多，不同品种成熟期尺寸差异较大，本文选取河北主栽品种“义和秋”为试验对象，其叶球外形整体呈规整紧实的炮弹形，外包叶为 8～10 片。采用随机性、对角线和分类原则选取表面无破损、外包叶及根部完整的 100 棵成熟期大白菜进行展开度、结球直径、株高、根茎长度、根茎直径、总质量等参数测定，测量位置如图 5（W_b 为展开度，mm；D_b 为结球直径，mm；H_b 为株高，mm；H_g 为根茎长度，mm；D_g 为根茎直径，mm；H_c 为切根区域）所示，测定结果如表 2 所示。结合前期试验与观察，大白菜切割位置一般为最外层外包叶叶柄基部下方 20～30 mm 处，该位置可确保完全切除根系的同时保留完整叶球结构，考虑到机械化切根需求，本文切割机构设计与试验时均以尺寸接近平均值的大白菜为切根对象。

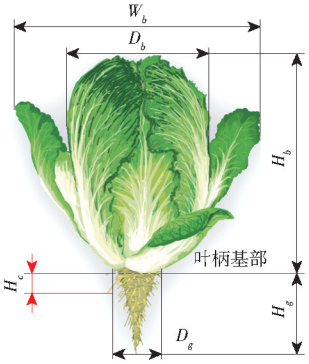


图 5　大白菜植株及切削区域示意图

Fig. 5　Schematic of Chinese cabbage plant and cutting area

表 2　大白菜几何特性测量结果

Tab. 2　Measurement results of geometric characteristics of Chinese cabbage

统计指标	展开度/mm	结球直径/mm	株高/mm	根茎长度/mm	根茎直径/mm	总质量/kg
平均值	481.15	169.52	277.32	103.76	28.78	2.31
最大值	523.70	176.50	283.60	112.54	32.67	2.48
最小值	457.50	158.40	264.30	91.77	23.42	2.12
标准差	16.73	5.08	5.45	6.05	2.59	0.14
变异系数/%	3.48	3.00	1.97	5.83	9.00	6.06

2.2　切割刀片设计

2.2.1　切根模型分析

在农业切割机械研究中，按照支撑条件不同，切割可分为高速无支撑切割和低速有支撑切割，由于大白菜根茎结构较为粗壮，且切根作业过程中，田间作业环境复杂，无法给大白菜根部提供支撑条件，因此选用高速无支撑切割方式，具体切割过程及受力简图如图 6 所示，在圆盘割刀切割大白菜根茎瞬间

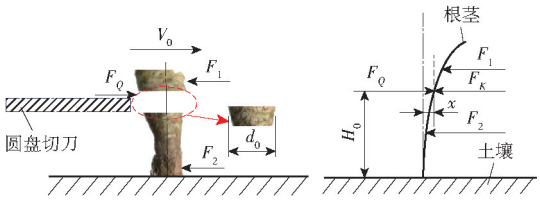


图 6　切根过程受力分析

Fig. 6　Force analysis of root cutting process

有切割力 F_Q，根茎的惯性力 F_1、F_2，以及根茎切割处反作用力 F_K，进行理想的高速无支撑切根作业时，大白菜根茎处于静止状态，此时应满足 $F_Q = F_1 + F_2 + F_K$。由于大白菜根茎较粗且有一定韧性，因此在切割过程中扰度较小，发生的弯曲变形不明显，因此可以将该切根过程视为悬臂梁结构[16]，构建该过程切割力数学模型，此时圆盘割刀受到来自根茎部的反切力与反作用力，则切割力 F_Q 应满足

$$F_Q = \Delta m \frac{\mathrm{d}(V + V_0)}{\mathrm{d}t} + F_x + F_K \tag{1}$$

其中

$$F_x = 3\frac{E_0 I_0}{H_0^3}x \tag{2}$$

$$\Delta m \frac{\mathrm{d}(V + V_0)}{\mathrm{d}t} = \Delta m \frac{V_0 | V + V_0 |}{d_0} \tag{3}$$

即

$$F_Q = \Delta m \frac{V_0 | V + V_0 |}{d_0} + 3\frac{E_0 I_0}{H_0^3}x + F_K \tag{4}$$

式中　Δm——切除的根茎质量，kg

V_0——割台前进速度，mm/s

V——切割根茎时线速度，mm/s

t——切根作业时间，s

x——大白菜根茎水平位移，mm

F_x——根茎切割处水平分力，N

E_0——根茎弹性模量，MPa

H_0——根茎切割处离地高度，mm

I_0——截面惯性矩，mm^4

d_0——根茎切割处直径，mm

由式(4)可知，切割力主要受切割处直径、圆盘割刀线速度以及机具前进速度的影响。为保证切根质量，避免出现大白菜前倾或斜切等现象，应尽可能降低圆盘割刀所受来自根茎部的反作用力。反作用力过大易导致切割阻力增大、切口质量下降，甚至引发机构振动和能耗上升。因此，在切根作业中，减小根茎对割刀的反作用力，对于提高切割效率、保证切面平整性和降低作业能耗具有重要意义。后续将基于仿真优化正交试验，以最小根茎反作用力为关键指标，系统分析各因素影响，寻求最优作业参数组合。

2.2.2　圆盘割刀设计

针对不同生理性状的蔬菜根茎，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[17]。对于大白菜等粗根茎作物,一般使用圆盘式切割装置。由于大白菜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,但会导致较大的功耗[18]。因此,本文采用双圆盘切割形式,选用光刃式圆盘刀(高速钢材质),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,以平衡切根过程中大白菜根茎所受的水平力,确保切割的平稳性和完整性[19]。

如图 7 所示,切根过程中,圆盘割刀主要受到切向力 F_T、法向力 F_N及切根轴向力 F_A的共同作用[13],其中 F_T主要来源于切根过程中割刀表面与大白菜根茎切削面之间产生的摩擦力,法向力 F_N主要来源于切根过程中大白菜根茎对割刀的冲击和大白菜根茎的抗弯能力对割刀产生的反作用力,切根轴向力 F_A主要来源于切根过程中割刀与地面存在一定角度导致大白菜根茎对割刀的挤压力。

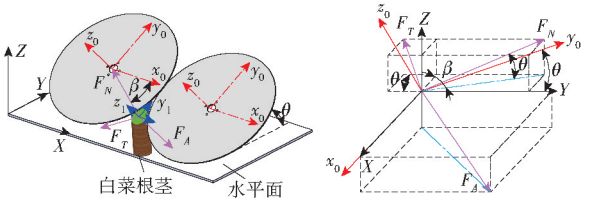


图 7 圆盘割刀三维受力分析图

Fig. 7 Three-dimensional force analysis diagram of disc cutter

分别以大白菜根茎切割断面中心、圆盘刀中心为原点建立 $x_1y_1z_1$及 $x_0y_0z_0$坐标系。

由于左右两片圆盘割刀对称布置,受力情况大致相同,选取其中一片圆盘割刀进行受力分析,以大白菜根茎中心为原点,圆盘割刀三维受力分析如图 8 所示。

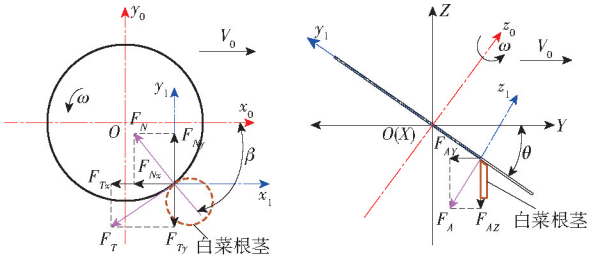


图 8 圆盘割刀受力分析图

Fig. 8 Disc cutter force analysis diagram

由图 8 可知,在刀盘平面(x_0y_0)内,x_0轴上的总横向分力 F_{x0}为方向相同的两个分力 F_{Tx}与 F_{Nx}之和,即

$$F_{x_0} = F_{Tx} + F_{Nx} = F_T\sin\beta + F_N\cos\beta \tag{5}$$

式中 β——圆盘割刀中心与大白菜根茎中心连线和 x_0轴之间的夹角,(°)

y_0轴方向上受到的总纵向分力为方向相反的 F_{Ty}与 F_{Ny}之和,即

$$F_{y_0} = F_{Ty} - F_{Ny} = F_T\cos\beta - F_N\sin\beta \tag{6}$$

由于 x_0轴、x_1轴与 X 轴重合,y_0轴与 y_1轴重合且与 Y 轴的夹角为 θ,所以 x_0轴与 X 轴上的力等同,y_0轴上的力在 Y 轴和 Z 轴上存在分量,因此,圆盘割刀在 X、Y、Z 轴上所受的力分别为

$$\begin{cases} F_X = F_{x_0} = F_{Tx} + F_{Nx} = F_T\sin\beta + F_N\cos\beta \\ F_Y = F_{y_0}\cos\theta + F_{AY} = (F_{Ty} - F_{Ny})\cos\theta + F_{AY} = \\ \qquad (F_T\cos\beta - F_N\sin\beta)\cos\theta + F_A\sin\theta \\ F_Z = F_{y_0}\sin\theta - F_{AZ} = (F_T\cos\beta - F_N\sin\beta)\sin\theta - F_A\cos\theta \end{cases} \tag{7}$$

式中 F_{AZ}——切根轴向力 F_A在 Z 轴方向分力,N

F_{AY}——切根轴向力 F_A在 Y 轴方向分力,N

θ——割刀倾角,(°)

切根过程中,大白菜根茎受到左右两割刀的共同作用,两切根力大部分相互抵消,但仍然有分力在各个轴向上影响切割的稳定性和质量,在 X 轴方向 F_X为两个方向相同的分合力 F_{Tx}与 F_{Nx}之和,该值过高将导致圆盘刀刃口磨损加剧;在 Y 轴方向 F_Y为 F_{y0}在 Y 轴上的投影与 F_{AY}之和,当该值过高时,将导致切根位置不理想,切口毛糙不平整,且长期作用下易引发刀片变形、卷刃甚至断裂;在 Z 轴方向上 F_Z为 F_{y0}在 Z 轴的投影与方向相反的切根轴向力 F_{AZ}之和,F_Z值过大将引起割刀偏离预定轨迹,甚至刀具卡在大白菜根茎中影响切割质量。因此,根茎的切割质量与切根力密切相关,实际切根作业过程中,割刀的倾角、转速和前进速度直接影响切割力的平衡与根茎对刀具的反作用力,合适的割刀倾角 θ 能够优化切割路径,减少根茎对割刀的冲击力,从而降低法向力 F_N和切根轴向力 F_A。此外,倾角的调整还能够有效减少割刀与根茎切削面之间的摩擦力从而减小切向力 F_T,降低摩擦造成的功耗和刀具磨损;较高的角速度 ω 有助于减小单位时间内的切割阻力,但过高的角速度会导致过大的摩擦力和振动,影响切割质量;前进速度直接影响根茎与割刀的接触压力,较快的前进速度可能导致割刀受力过大,产生过多的切根轴向力 F_A,进而引发振动或割刀偏移,影响切割位置。因此,在进行切根作业时,需要综合考虑倾角、角速度和前进速度的相互作用,通过优化这些参数,减少根茎对割刀的反作用力,提升切割效率,确保切割质量和刀具的长期使用寿命。

进一步地,根茎对圆盘割刀切根作业时的反作用力,不仅是上述受力关系的直接反馈,更是影响根

茎切割位置、切口质量的关键因素。为防止大白菜在切根过程中被“推走”或“带偏”，获得平整高质量的切口，双圆盘割刀在切根过程中应具有一定的钳持性能[20]，假设根茎断面处为一理想圆且在切根过程中根茎不发生变形，则此时大白菜根茎受力分析如图 9 所示。

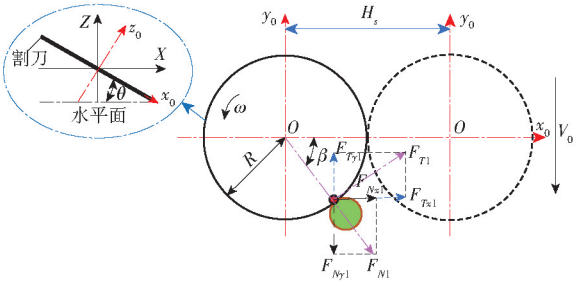


图 9　根茎受力分析图

Fig. 9　Stress analysis diagram of rhizome

此时切根力 C_x 和夹持力 G_y 分别为

$$C_x = F_{Tx1} + F_{Nx1} \tag{8}$$

$$G_y = F_{Ty1} - F_{Ny1} \tag{9}$$

式中　F_{Tx1}——切向力 F_T 在 x_0 轴方向分力，N

F_{Nx1}——法向力 F_N 在 x_0 轴方向分力，N

F_{Ny1}——法向力 F_N 在 y_0 轴方向分力，N

若想大白菜根茎在切根过程中被双圆盘割刀夹持住来确保切割位置一致性，防止大白菜根茎在切根过程中被推离，则需要

$$G_y > 0 \tag{10}$$

即 $F_{Ty1} > F_{Ny1}$，其中 $F_{Ty} = F_N f$，由此可得

$$F_N f\cos\beta > F_N \sin\beta \tag{11}$$

当 $f > \tan\beta$ 时，圆盘割刀具有良好的夹持性能[20]，此时

$$\beta = \arccos\frac{H_s}{2(R+r)} \tag{12}$$

式中　f——圆盘割刀与大白菜根茎的摩擦因数，一般取 0.6[11]

H_s——两圆盘割刀中心距，mm

R——圆盘割刀半径，mm

r——大白菜根茎半径，mm

为避免机械结构的相互干涉，选取圆盘割刀的半径 R 为 150 mm，中心距 H_s 为 300 mm，由式(12)可知此时 $\beta = 32.57°$，$\tan\beta = 0.63 > f = 0.6$，说明该切根装置具有良好的夹持性能，能够有效夹持根茎，避免滑移和无效切割。

2.3　切割机构设计

2.3.1　切根高度调节机构

为确保切根机构的稳定性，并在高度调节过程中保持切割角度不变，同时满足“主动高度调节 + 被动仿形”的技术要求，该切割装置切根高度调节机构采用平行四连杆机构[21-22]，因此需要对平行四连杆机构进行合理设计，正确选定牵引角、仿形角、杆件长度等参数。

如图 10 所示，电动推杆与机架杆连接，通过调节电动推杆伸缩实现连杆位置与切根高度主动调节，平行四连杆仿形机构的总高度调节量 H 为

$$H = H_1 + H_2 \tag{13}$$

其中

$$\begin{cases} H_1 = L\sin(\alpha_1 + \alpha) - L\sin\alpha \\ H_2 = L\sin\alpha + L\sin(\alpha_2 - \alpha) \end{cases} \tag{14}$$

式中　H_1——上高度调节量，mm

H_2——下高度调节量，mm

α——牵引角，(°)

α_1——提升变化角，(°)

α_2——下降变化角，(°)

L——连架杆长度，mm

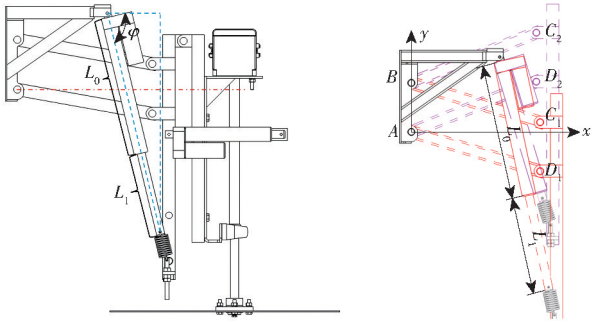


图 10　电动推杆高度调节示意图

Fig. 10　Electric push rod height adjustment diagram

高度调节机构末端高度变化量与电动推杆长度关系为

$$\begin{cases} H_1 = L_2\sin\varphi_0 - L\sin\alpha - (L_0 + L_1)\sin\varphi \\ H_2 = (L_0 + L_1)\sin\varphi - L_2\sin\varphi_0 + L\sin\alpha \end{cases} \tag{15}$$

式中　L_0——电动推杆体长度，mm

L_1——推杆长度，mm

L_2——连架杆水平状态时电动推杆总长度，mm

φ——电动推杆与水平方向夹角，(°)

φ_0——连架杆水平时电动推杆的水平夹角，(°)

由图 11 可知，当切根机构总高度调节量 H 固定时，四杆机构的连架杆长度 L 越短，则牵引角 α 变化范围越大，反之，则牵引角 α 变化范围越小。为使切根机构工作稳定，牵引角 α 变化范围越小越好[20]，因此，上、下连杆的尺寸越长越有利于切根作业的稳定性，但连杆长度过长，会使切根机构不紧凑，整机重心后移，影响作业稳定性。一般平行机构总变化角 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 小于等于 45°[23]，为确保切根机构作业稳定性并便于高度调节，现有四杆机构中，α 大小一般为 0° ~ 10°之间，α_2 一般为 6° ~ 22°之间，

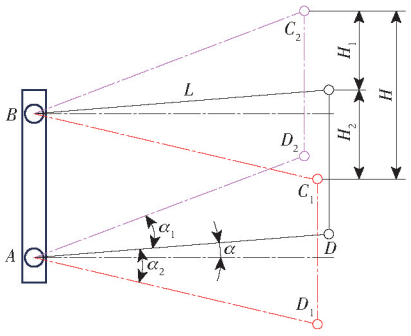


图 11 平行四连杆机构高度调节示意图

Fig. 11 Parallel four-bar linkage mechanism height adjustment diagram

该范围对应切割高度降低的调节过程,($\alpha+\alpha_1$)一般为 20°~40°之间,对应切割高度提升的调节过程[20]。根据实际考察及切根条件设计 $\alpha_1=15°$、$\alpha=0°$、$\alpha_2=15°$,平行四连杆长杆长度为 350 mm,代入式(15)中可得 $H_1=H_2=90$ mm。一般作业情况下,上、下高度调节量均需保持在 8~12 cm 范围内[20],综上所述,该平行四连杆仿形结构满足设计要求。

2.3.2 切根角度调整机构

如图 12 所示,为探究不同切割角度对切根质量的影响,设计了一种角度可调式切根机构。该机构利用电动推杆的伸缩运动带动割刀连接杆绕销轴旋转,从而实现切割角度的调节。通过控制电动推杆的伸长量,可实现多种切割角度的变化。

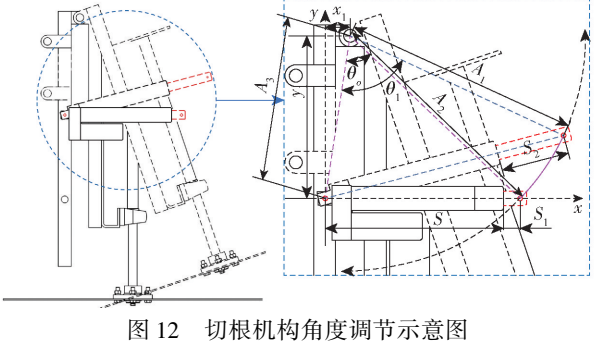


图 12 切根机构角度调节示意图

Fig. 12 Angle adjustment diagram of root cutting mechanism

电动推杆的伸缩长度与切割角度变化量关系式为

$$K=\arccos\frac{A_1^2+A_3^2-(S+S_2)^2}{2A_1A_3}-\arccos\frac{A_2^2+A_3^2-(S+S_1)^2}{2A_1A_3} \tag{16}$$

其中

$$A_3=\sqrt{x_1^2+y_1^2} \tag{17}$$

式中 K——切根机构角度变化量,(°)

S——电动推杆外管总长度,mm

S_1——电动推杆完全压缩时长度,mm

S_2——电动推杆伸缩变化长度,mm

A_1——电动推杆伸缩量变化时伸缩杆销孔与切割机构销孔距离,mm

A_2——电动推杆伸缩杆完全压缩时伸缩杆销孔与切割机构销孔距离,mm

A_3——切割机构销孔与电动推杆前端固定孔距离,mm

x_1——电动推杆与切割机构销孔 x 方向投影距离,mm

y_1——电动推杆与切割机构销孔 y 方向投影距离,mm

电动推杆外管总长度 S 为 256 mm,伸缩杆完全压缩时长度 S_1 为 32 mm,当角度变化最大时,S_2 取伸缩杆最大行程 150 mm,又因为在切根机构高度不变的情况下,伸缩杆末端销孔到切根机构的销孔距离保持不变,即 $A_1=A_2=325$ mm,x_1 取 35 mm,y_1 取 225 mm,代入式(16)可得最大角度变化量取整为 42°。

因此,该切割装置可实现切割平面与水平面夹角在 0°~42°范围内调节,为切割作业参数优化提供了可靠的机构保障。

3 有限元仿真优化试验

为研究切割过程中圆盘割刀与根茎的相互作用,在前期物理特性对比与文献结论基础上[11,24-25],将成熟植株叶球对力学响应的影响视为次要因素,仅针对根茎-圆盘刀系统开展有限元仿真分析,旨在构建大白菜根茎切割过程有限元模型,通过正交旋转组合试验设计,确定切割机构的最优工作参数组合,以期实现工作部件的优化设计。

3.1 刚柔耦合模型建立及参数设置

为了提高有限元仿真结果的准确性与可靠性,采用 ANSYS/LS-DYNA 构建根茎与切割圆盘刀的刚柔耦合模型,结合表 1 确定大白菜根茎物理尺寸,利用 Solidworks 三维软件绘制大白菜根茎及割刀,如图 13 所示。

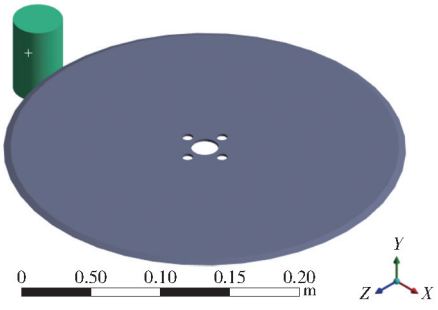


图 13 大白菜根茎及圆盘割刀几何模型

Fig. 13 Geometric model of Chinese cabbage rhizome and disc cutter

在有限元分析过程中,对网格划分和节点设置

进行了优化。作为变形体的大白菜根部是仿真中的重点，通过对大白菜根部逐步细化网格进行收敛性分析，在单元尺寸细化到 0.8 mm 时，切割力变化小于 2%，最大应力变化小于 3%，认为其达到网格收敛，并兼顾了仿真计算速度。最后通过 ANSYS 的网格质量分析功能，确保所有单元的长宽比控制在1～3 范围内，雅可比值大于 0.7，扭曲度小于 0.5，保证其单元质量；由于在仿真中将圆盘割刀设定为刚体，无需进行应力收敛性分析，其网格划分主要考虑能保证刀刃边缘几何形状的准确表达，确保切割时与根茎的接触面积与实际保持一致。因此，综合考虑计算精度与效率，对大白菜根部与切割圆盘刀采用分区域网格划分策略进行网格划分，如图 14 所示，划分后大白菜根部为六面体单元，其节点数为 94 946 个，单元数为 90 516 个；切割圆盘刀为四面体单元，其节点数为 9 636 个，单元数为 4 714 个。大白菜根部是典型的各向同性材料，设置为柔性体，选择 Orthotropic 正交各向同性材料作为根部材料模型，通过添加失效参数，可以达到模拟切根的效果[24]。根据大白菜根部力学特性试验以及文献[25－26]，确定大白菜根部及割刀仿真参数如表 3 所示。

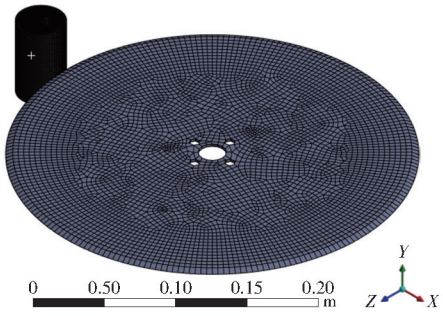


图 14　网格划分后切割模型效果

Fig. 14　Effect of cutting model after meshing

表 3　根茎有限元仿真参数

Tab. 3　Rhizome finite element simulation parameters

参数	数值
根茎密度/(kg·m^{-3})	880
切割刀密度/(kg·m^{-3})	7 800
根茎切向泊松比 ν_{XY}	0.06
根茎径向泊松比 ν_{XZ}	0.30
根茎轴向泊松比 ν_{YZ}	0.30
切割刀泊松比	0.30
根茎切向弹性模量 E_{XY}/MPa	398
根茎径向弹性模量 E_{XZ}/MPa	398
根茎轴向弹性模量 E_{YZ}/MPa	140
切割刀弹性模量/MPa	210
根茎切向剪切模量 G_{XY}/MPa	29.70
根茎径向剪切模量 G_{XZ}/MPa	29.70
根茎轴向剪切模量 G_{YZ}/MPa	15.30
切割刀剪切模量/MPa	7×10^4

大白菜根部与圆盘割刀之间设置为相互作用，接触类型为摩擦。由于在切割过程中大白菜根部材料的破坏，其接触特性设定为“侵蚀”，即面侵蚀接触算法 ESTS。定义接触面的动静摩擦因数分别为 0.15 和 0.23。如图 15 所示，在仿真中的根部底端添加固定约束，对切割圆盘刀调整到绕 Y 轴转动沿 X 轴方向移动，并调整圆盘刀与水平前进方向的角度以期接近真实效果。

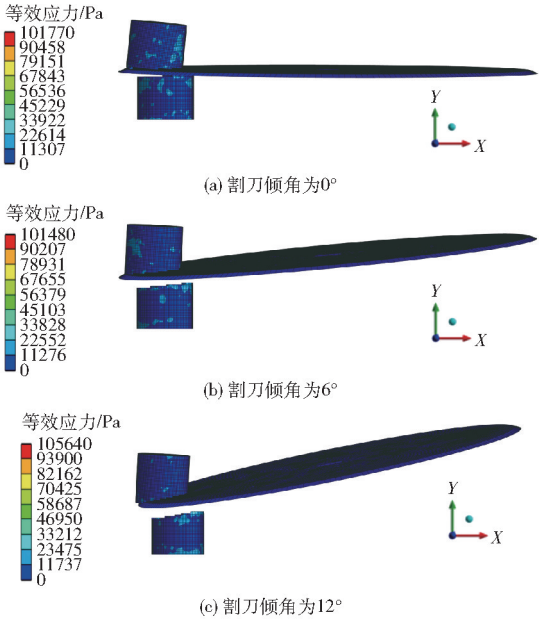


图 15　不同切割参数下大白菜根部变形图

Fig. 15　Root deformation diagram of Chinese cabbage under different cutting parameters

3.2　大白菜根部切割仿真优化试验

基于 ANSYS/LS－DYNA 软件对大白菜根茎切割过程进行仿真试验，以期揭示其受力规律[26]。大白菜根茎切割过程中，根部主要受到土壤和切割装置的影响，结合 2.2.1 节切根数学模型分析可知，切割过程中根茎部反作用力直接影响大白菜切根效果，是衡量大白菜切根效果的重要指标。基于前期理论分析，根据 Box－Behnken 原理设计试验，选择割刀倾角(x_1)、割刀转速(x_2)和机具前进速度(x_3)为试验因素，以切根过程中根茎反作用力 Y_1 为评价指标，根据预试验结果，割刀倾角选择 0°、6°、12°，割刀转速选择 100、200、300 r/min，前进速度选择 0.2、0.3、0.4 m/s，中心水平设置 3 次重复，各因素编码如表 4 所示，试验方案及结果如表 5 所示。

3.3　仿真试验结果分析

通过 Design-Expert 13 软件对试验结果进行多元回归分析和拟合，得到最大切根反作用力 Y_1 的回归方程为

$$Y_1 = 175.60 - 0.53X_1 - 0.64X_2 + 762.79X_3 - 0.02X_1X_2 + 20.26X_1X_3 + 1.77X_2X_3 - 0.29X_1^2 - 2\,017.78X_3^2 \tag{18}$$

表 4 仿真试验因素编码

Tab. 4 Simulation test factors and coding

编码	因素		
	割刀倾角 x_1/(°)	割刀转速 x_2/(r·min^{-1})	前进速度 x_3/(m·s^{-1})
-1	0	100	0.2
0	6	200	0.3
1	12	300	0.4

表 5 仿真试验方案与结果

Tab. 5 Simulation test scheme and results

序号	因素			Y_1/N
	x_1/(°)	x_2/(r·min^{-1})	x_3/(m·s^{-1})	
1	0	100	0.3	214.55
2	12	100	0.3	219.82
3	0	300	0.3	204.34
4	12	300	0.3	170.36
5	0	200	0.2	198.26
6	12	200	0.2	159.21
7	0	200	0.4	176.76
8	12	200	0.4	186.34
9	6	100	0.2	218.28
10	6	300	0.2	158.53
11	6	100	0.4	191.16
12	6	300	0.4	202.22
13	6	200	0.3	208.46
14	6	200	0.3	206.68
15	6	200	0.3	212.45
16	6	200	0.3	207.72
17	6	200	0.3	218.58

式中 X_1、X_2、X_3——因素编码值

回归方程的决定系数 R^2 为 0.981 0，拟合程度较高；方差分析(ANOVA)如表 6 所示。最大根茎反作用力 Y_1 模型 $P<0.000\ 1$，说明回归方程极显著，能够描述各因素与响应值之间的关系；模型失拟项 $P>0.05$，说明失拟项不显著，不存在其他主要因素影响结果；割刀倾角 X_1 和割刀转速 X_2 对结果影响极显著；根据回归方程得到各因素交互作用对结果影响的响应曲面如图 16 所示。

表 6 回归模型方差分析

Tab. 6 Regression model analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	66 457.17	9	717.46	40.09	<0.000 1
X_1	423.11	1	423.11	23.64	0.001 8
X_2	1 467.74	1	1 467.74	82.00	<0.000 1
X_3	61.61	1	61.61	3.44	0.105 9
X_1X_2	385.14	1	385.14	21.52	0.002 4
X_1X_3	591.22	1	591.22	33.03	0.000 7
X_2X_3	1 253.51	1	1 253.51	70.04	<0.000 1
X_1^2	460.48	1	460.48	25.73	0.001 4
X_2^2	15.97	1	15.97	0.892 0	0.376 4
X_3^2	1 714.28	1	1 714.28	95.78	<0.000 1
残差	125.29	7	17.90		
失拟项	30.10	3	10.03	0.421 7	0.748 0
纯误差	95.18	4	23.80		
总计	6 582.46	16			

注：$P<0.01$ 表示影响极显著，$0.01\leq P<0.05$ 表示影响显著。

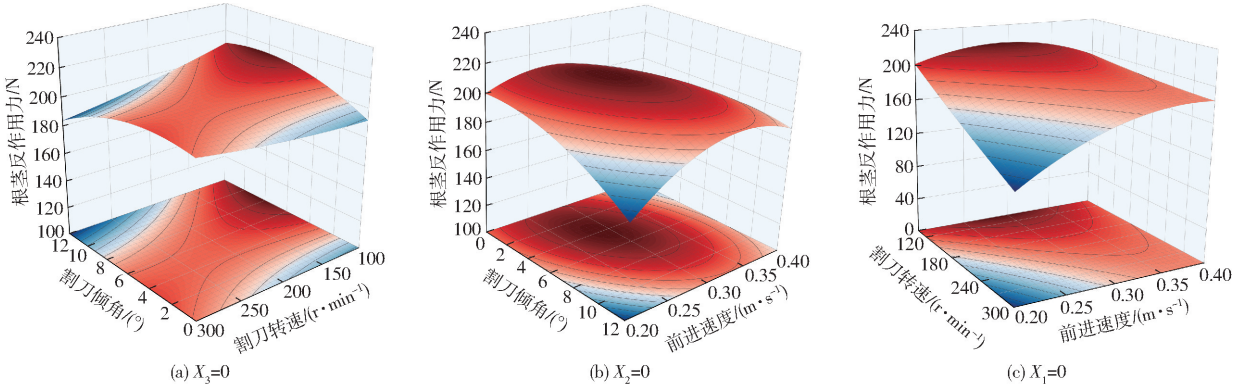


图 16 因素相互作用对根茎反作用力的响应曲面

Fig. 16 Response surface diagrams of factors interaction on rhizome reaction force

当机具前进速度为定值时，割刀倾角和割刀转速交互作用对根茎反作用力的影响如图 16a 所示。可知，当割刀倾角固定时，根茎反作用力随割刀转速升高无显著变化；固定割刀转速时，根茎反作用力随割刀倾角增大先逐渐增大后逐渐减少。

当割刀转速为定值时，割刀倾角与前进速度交互作用对根茎反作用力的影响如图 16b 所示。可知，当割刀倾角固定时，随着前进速度不断增加，根茎反作用力逐渐增大至峰值后逐渐减少，固定前进速度时，根茎反作用力随割刀倾角增加，呈逐渐减小的趋势。

当割刀倾角为定值时，割刀转速与前进速度交互作用对根茎反作用力的影响如图 16c 所示。可知，当前进速度固定时，根茎反作用力随割刀转速增加表现出明显的减少趋势；当割刀转速固定时，根茎反作用力虽同样随前进速度增加呈先增加后减小的

趋势，但其变化幅度相对较小，显著低于转速变化的影响。

由上述试验结果可知，割刀转速及机具前进速度对根茎反作用力影响较大，当割刀转速较高、机具前进速度较快时，刃口与根茎接触时间较短、对根茎切割面摩擦作用时间短，根茎在切割过程中扰动较小，反作用力较小；割刀转速与前进速度的单独变化对根茎反作用力的影响相对较小，尤其是当两者保持在一定匹配范围内时，切割力变化不明显。因此，实际作业中的转速与前进速度组合可根据后续优化试验进行设置。

3.4　仿真试验结果验证

为了实现最小根茎反作用力，保证切根效果，借助 Design-Expert 13 软件对上述回归模型进行优化分析，设置求解目标位最小响应值，得到切根作业最佳参数组合：割刀倾角为 10.487°，割刀转速为 271.603 r/min，前进速度为 0.204 m/s，此时预测结果为 143.589 N。使用上述参数进行切根过程仿真，得到的根茎反作用力为 152.068 N，二者相对误差为 5.58%，误差较小，该回归模型准确可靠，该最优参数组合为后续田间验证试验提供了理论基础。

4　田间验证试验

4.1　试验条件

如图 17 所示，为了检测可调式大白菜根部切割装置的切根性能、可靠性及控制精度，2024 年 6 月 18 日于河北省张家口市万全区大白菜试验基地进行田间实地切根试验。试验田土壤类型为厚黑碴土，试验当日天气晴朗，最高气温 36.0℃，最低气温 16.0℃，相对湿度约为 44%。该基地采用单垄双行种植模式（垄面宽幅 1.1 m）、行距 40～45 cm、株距 45～50 cm、沟深 15～30 cm、沟宽 20～30 cm。试验所用大白菜品种为“义和秋”，展开度为 450～520 mm，结球直径为 158～176 mm，株高为 264～277 mm，根茎长度为 91～112 mm，根茎直径为 23～32 mm。



图 17　田间验证试验

Fig. 17　Field verification test

4.2　试验方法

大白菜收获机械并未有相关标准和规定，因此本试验参照 DG/T 249—2024《叶类蔬菜收割机》农业机械推广鉴定大纲，结合 GB/Z 26582—2011《结球甘蓝生产技术规范》与 NY/T 3664—2020《手扶式茎叶类蔬菜收获机质量评价技术规范》等国家相关标准测试方法相关指标选取切根合格率为性能评价指标进行切根试验。切根合格率定义如下：①机械切根截面需平整，不能发生折断或出现两个截面的情况。②切根位置需在大白菜外包叶底部上方25～30 mm 较佳切根处，同时将外包叶切断。③大白菜球体没有因切根作业造成的明显机械破损的情况发生。切根试验时需统计单次试验大白菜总数与切根合格的大白菜数量，即

$$C = \frac{C_Q}{N} \times 100\% \tag{19}$$

式中　C——切根合格率，%

C_Q——大白菜切根合格数量，棵

N——单次试验大白菜总数，棵

损伤率定义如下：因切根装置切根作业产生机械损伤的大白菜棵数（包括但不限于擦伤、切损、因机械碰撞导致的裂球等纯机械作用引发的损伤形式），切根试验时需统计单次试验大白菜总数与切损的大白菜数量，即

$$D = \frac{D_Q}{N} \times 100\% \tag{20}$$

式中　D——损伤率，%

D_Q——大白菜切损数量，棵

试验前，对试验田进行检查，确保切根作业环境平坦、无障碍物，同时保证可调式大白菜根部切割装置各工作部件均能正常运行，基于 3.4 节工作参数优化结果，结合实际工作状况对切根装置工作部件优化参数结果进行圆整，调整割刀倾角为 10°左右，割刀转速为 275 r/min，机具前进速度调整为 0.2 m/s 开展试验，试验过程中尽可能选择大白菜成熟度一致性好的试验地进行试验，每次试验选取 20 m 垄面上连续成熟的大白菜进行切根作业（约 80 棵大白菜），对切根作业完成后的切根合格数与损伤数进行统计，试验重复 5 次，统计结果均为多次试验的平均值。

4.3　试验结果与分析

可调式大白菜根部切割装置田间验证试验结果如表 7 所示。田间试验结果表明：当割刀倾角为 10°，割刀转速为 275 r/min，机具前进速度调整为 0.2 m/s 时，该切割装置运行稳定可靠，未出现漏切现象，且每次试验切根高度基本一致，切根合格率平均值为 93.23%，损伤率平均值为 4.05%。

表 7 切根试验结果

Tab. 7 Field test results of root cutting

序号	试验大白菜总数/棵	切损数量/棵	切根合格数量/棵	切根合格率/%	损伤率/%
1	102	4	94	92.16	3.92
2	84	3	80	95.24	3.57
3	74	6	66	89.19	8.11
4	82	2	78	95.12	2.44
5	90	2	85	94.44	2.22
平均值				93.23	4.05

4.4 对比试验结果与分析

为客观评估本文所研制可调式大白菜根部切割装置的实际应用性能,将本文设计的装置与文献[13]和文献[17]的切根合格率与损伤率进行对比分析。本文采用的“损伤率”与文献所述“损失率”在指标名称上有所区别,但两者所依据的评判标准较为接近,均用于反映切割过程中对大白菜植株的机械损伤程度。对比结果如表 8 所示。

表 8 对比试验结果

Tab. 8 Comparative test results %

机具类型	平均切根合格率	平均损伤率
本文机具	93.23	4.05
文献[13]	93.40	7.84
文献[17]	87.20	7.20

如表 8 所示,本文所研制的可调式大白菜根部切割装置与文献[13]中大白菜收获的切根合格率(93.40%)几乎处于同一水平,并高于文献[17]的 87.20%。在损伤控制方面,本文装置的损伤率为 4.05%,显著低于两类对比文献的 7.84% 与 7.20%。说明本装置在切根作业环节可以有效降低对大白菜植株的机械损伤,在实际应用中表现出良好的可靠性与适用性,能够满足大白菜机械化切根作业需求。

如图 18 所示,切根作业中大白菜损伤类型以斜切及切散为主,通过田间试验结果分析切损原因:由于大白菜个体物理特性差异较大导致切割位置不固定从而切损大白菜;由于随着切根装置不断前进,操作人员受限于遥控视角,难以实时准确观测前进状态,使得切割装置行进轨迹发生变化导致切削位置发生偏移;切根作业过程中大白菜相互挤压、撞击切根机构产生损伤从而降低试验评价指标。该田间试验验证了该切割装置各机构设计的合理性以及试验方案对提升切根质量的可行性,但切根机构实际工作参数及结构参数优化有待进一步优化。后续研究可进一步验证前进速度、割刀倾角、割刀转速等对切根质量的影响,以期为大白菜切根装备优化提供理论支撑。



(a) 切散 (b) 斜切 (c) 切根合格 (d) 切根作业后

图 18 大白菜切根试验效果

Fig. 18 Effects of Chinese cabbage root cutting test

5 结论

(1)针对大白菜机械化切根作业过程中因地表起伏和不同切割参数造成的切损问题,本文设计了一种搭配电动履带式底盘,具备无线遥控功能,可实现切割角度、切割高度及切割速度独立调节的大白菜切根切割装置。

(2)测定试验对象“义和秋”大白菜基本物理特性参数:展开度平均值为 543 mm,结球直径平均值为 155 mm,株高平均值为 164 mm,根茎长度平均值为 60.55 mm,总质量平均值为 2.77 kg。

(3)设计了一种可调节切根角度、转速及高度的切根机构,采用对称布置的光刃型双圆盘刀,切根角度调节范围为 0°~42°,高度调节范围为 0~90 mm,割刀转速调节范围为 0~600 r/min,通过调节上述工作参数验证并提升大白菜切根作业的质量与效率。

(4)基于 ANSYS/LS-DYNA 软件对大白菜根茎切割过程进行有限元分析,以根茎切削反作用力为评价指标,以割刀倾角、割刀转速、前进速度为影响因素开展仿真优化试验,得到切根作业最佳参数组合为:割刀倾角 10.487°,割刀转速 271.603 r/min,前进速度 0.204 m/s,此时根茎反作用力为 143.589 N。

(5)进行田间试验,基于有限元仿真参数优化结果进行田间验证试验,验证了该切割装置各机构设计的合理性以及切根合格率检测方法的可行性,田间试验结果表明:割刀倾角为 10°,圆盘刀转速为 275 r/min,机具前进速度调整为 0.2 m/s 时,切根合格率平均值为 93.23%,损伤率平均值为 4.05%,为我国大白菜低损收获装备开发及工作参数设置提供了理论依据和技术支撑。

参 考 文 献

[1] ZHANG Jing, WANG Jun, GU Shuang, et al. Relaxation characteristics for quality evaluation of Chinese cabbage[J]. Journal

of Food Engineering, 2021, 306: 110635.
[2] 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 of Chinese cabbage harvester and counter-measures for its development[J]. China Vegetables, 2024(5): 14 - 22. (in Chinese)
[3] 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)
[4] 孟祥峰. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 中国农业信息, 2016(8): 103 - 104.
MENG Xiangfeng. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J]. China Agricultural Informatics,2016 (8): 103 - 104. (in Chinese)
[5] 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. Development status of mechanized harvesting technology and equipment for leafy vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2025, 46(1): 346 - 352. (in Chinese)
[6] KANAMITSU M, YAMAMOTO K. Development of Chinese cabbage harvester[J]. Technical Report of the Institute of Agricultural Machinery (Japan), 1994, 30(1):35 - 41.
[7] KIM H, YEONGSOO C. Pulling performance of a self-propelled Chinese cabbage harvester and design of a preprocessing unit [J]. J. Agric. Life Sci, 2020, 54(1): 99 - 108.
[8] PARK S, LEE S, PARK W, et al. Preliminary tests for Chinese cabbage harvesting with harvesting simulator[J]. J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc, 2021, 22: 470 - 479.
[9] 姚会玲. 大白菜收获机关键部件的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
YAO Huiling. Study on key parts of Chinese cabbage harvester[J]. Beijing: China Agricultural University,2007. (in Chinese)
[10] 李向军,赵大勇,张宝库,等. 背负式大白菜收获机的研制[D]. 农业科技与装备, 2017(10): 25 - 27.
LI Xiangjun, ZHAO Dayong, ZHANG Baoku, et al. Development and experiment of self-propelled cabbage harvester[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2017(10): 25 - 27. (in Chinese)
[11] 张静. 结球大白菜物理力学特性与履带自走式收获机械的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
ZHANG Jing. Research on physical and mechanical properties of headed Chinese cabbage and its crawler self-propelled harvesting equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
[12] 王名声,龚中良,解福祥,等. 大白菜机械化收获技术研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2024, 46(3): 252 - 258.
WANG Mingsheng, GONG Zhongliang, JIE Fuxiang, et al. Research status and development trend of Chinese cabbage mechanized harvesting technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(3): 252 - 258. (in Chinese)
[13] 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)
[14] 韩明兴,余锴,段宏兵,等. 基于 SPH - FEM 的油菜茎秆磨粒气体射流切割仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 82 - 92.
HAN Mingxing, YU Kai, DUAN Hongbing, et al. Simulation and experiments of abrasive gas jet cutting for rapeseed stem using SPH - FEM[J]. Transactions of the CSAE,2024, 40(17): 82 - 92. (in Chinese)
[15] 张军,辛迪,蓝伟科,等. 簇生番茄果梗超声切割过程仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 153 - 161.
ZHANG Jun, XIN Di, LAN Weike, et al. Simulation and experiment on ultrasonic cutting process of clustered tomato stems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(3): 153 - 161. (in Chinese)
[16] 施印炎,陈满,汪小旦,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 110 - 116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 110 - 116. (in Chinese)
[17] 王名声. 大白菜收获机切根装置设计与试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2023.
WANG Mingsheng. Design and experimental research on root cutting device of Chinese cabbage harvester[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023. (in Chinese)
[18] 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 gantry type electric drive rapeseed stalks harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 147 - 159. (in Chinese)
[19] 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)
[20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

(下转第 302 页)

[15] BALLESTA-GARCIA M, ROYO S. Modelling polarized pulsed LiDAR signals in scattering media: an approach for optimizing systems in real-world scenarios[J]. Optics Express, 2024, 32(13): 22837.
[16] STUCHLY M A, STUCHLY S S. Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-a review[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1980, 29(3): 176 - 183.
[17] 王转卫,赵春江,商亮,等. 基于介电频谱技术的甜瓜品种无损检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 290 - 295.
WANG Zhuanwei, ZHAO Chunjiang, SHANG Liang, et al. Nondestructive testing of muskmelons varieties based on dielectric spectrum technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 290 - 295. (in Chinese)
[18] 许景辉,赵钟声,王一琛,等. 基于双线性理论的土壤介电测量研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 322 - 331.
XU Jinghui, ZHAO Zhongsheng, WANG Yichen, et al. Soil dielectric measurement based on bilinear theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 322 - 331. (in Chinese)
[19] 席翔,储洪强,冉千平,等. 通用硅酸盐水泥基材料低频介电性能的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 2074 - 2089.
XI Xiang, CHU Hongqiang, RAN Qianping, et al. Low-frequency dielectric behavior of common portland cement-based materials: a review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 2074 - 2089. (in Chinese)
[20] 李雪萍,闫静,周永一,等. 电阻加载半椭圆偶极子天线的设计与研究[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 51 - 55.
LI Xueping, YAN Jing, ZHOU Yongyi, et al. Design and study of resistor-loaded half-ellipse antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(2): 51 - 55. (in Chinese)
[21] SHANG X, YUAN B, GU Y, et al. A new method for improving isolation of GPR antenna[C]// 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS): IEEE, 2022: 1165 - 1170.
[22] 王尚,马竟轩,杨东升,等. 射频器件超细引线键合射频性能仿真[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 1 - 7, 97.
WANG Shang, MA Jingxuan, YANG Dongsheng, et al. Research on the RF performance simulation of ultra-fine wire bonding of RF devices[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 1 - 7, 97. (in Chinese)
[23] 刘沛江,何骁,陈泽坚,等. 介质材料的介电性能测试方法综述[J]. 广东电力, 2022, 35(8): 1 - 12.
LIU Peijiang, HE Xiao, CHEN Zejian, et al. Review of dielectric property test methods for dielectric materials[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(8): 1 - 12. (in Chinese)
[24] ULLOA R Z, SANTIAGO M G H. The interaction of microwaves with materials of different[J]. Electromagnetic Fields and Waves, 2019: 93.

(上接第 293 页)

[21] 王锦江,陈志,杨学军,等. 3QXZ-6 型制种玉米去雄机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 112 - 118.
WANG Jinjiang, CHEN Zhi, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of 3QXZ - 6 seed corn detasseling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(7): 112 - 118. (in Chinese)
[22] 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 26 - 32.
ZHAO Shuhong, JIANG Enchen, YAN Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE,2013, 29(14): 26 - 32. (in Chinese)
[23] 耿端阳,何珂,印祥,等. 玉米花生间作播种施肥一体机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 34 - 41.
GENG Duanyang, HE Ke, YIN Xiang, et al. Design and test of corn-peanut intercropping seeding-fertilizing machine [J]. Transactions of the CSAE,2017, 33(17): 34 - 41. (in Chinese)
[24] 蒋连琼. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的圆锯片锯切过程仿真研究[D]. 南宁:广西大学, 2013.
JIANG Lianqiong. Simulation study of circular saw cutting process based on ANSYS/LS - DYNA[D]. Nanning: Guangxi University, 2013. (in Chinese)
[25] ZHANG Jing, WANG Jun, DU Dongdong, et al. Optimization and validation of root-cutting device for Chinese cabbage harvester based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108314.
[26] 赵统森. 白菜收获机设计与关键技术研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2020.
ZHAO Tongsen. Design and key technology research of Chinese cabbage harvester[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2020. (in Chinese)