doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.002

# 青饲料收获技术与装备研究综述

尤　泳[1]　胡鹏展[1]　王德成[1]　惠云婷[1]　张晓航[1]　徐轶凡[1]　纪中良[2]　滕绍民[3]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东五征高北农牧机械有限公司, 日照 262306;
3. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083)

**摘要**: 青饲料作为畜牧业优质饲源,其机械化生产技术是保障饲草料产业高效发展的重要支撑,其中,青饲料收获装备是为畜牧业供应优质饲草料的关键装备。为系统掌握该领域技术动态,本文从青饲料收获机的组成结构与作业原理入手,重点梳理了饲草收割输送、喂入切碎、籽粒破碎、抛送装填及整机智能化感知调控等核心环节的研究进展,分析讨论当前国内外青饲料收获机相关研究领域的重点、难点及不足。目前我国已构建较为完备的青饲料收获机设计理论体系,具备独立研发生产能力,但仍存在基础理论研究滞后、核心技术自主化程度不高和整机智能化水平较低等问题。未来需从基础机理突破、关键技术创新和智能化系统构建 3 个维度开展研究,推动青饲料收获机从“中低端适配”向“高端自主可控”升级,为我国饲草料产业高质量发展提供装备支撑。

**关键词**: 青饲料收获机; 智能化; 作物适配性; 综述

**中图分类号**: S225.8　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0021-21　　**OSID**:

# Review of Research on Green Forage Harvesting Technologies and Equipment

YOU Yong[1]　HU Pengzhan[1]　WANG Decheng[1]　HUI Yunting[1]　ZHANG Xiaohang[1]
XU Yifan[1]　JI Zhongliang[2]　TENG Shaomin[3]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Shandong Wuzheng Takakita Stockbreeding Machinery Co.*, *Ltd.*, *Rizhao* 262306, *China*
3. *Menoble Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: As a high-quality feed source for animal husbandry, the mechanized harvesting and production technology of green forage is an important support for ensuring the efficient development of the forage industry. Among them, green forage harvesting equipment is a key device for supplying high-quality forage to the animal husbandry sector. To systematically grasp the technological trends in this field, this paper started with the composition structure and operating principle of green forage harvesters, focuses on sorting out the research progress in core links such as forage cutting and conveying, feeding and chopping, grain crushing, throwing and filling, and intelligent sensing and control of the whole machine, and analyzed and discusseed the key focuses, difficulties, and existing shortcomings in the relevant research fields of green forage harvesters at home and abroad. At present, China has established a relatively complete design theory system for green forage harvesters and possesses independent R&D and production capabilities. However, there are still problems such as the lag in basic theoretical research, the low degree of independence in core technologies, and the relatively low level of intelligentization of the whole machine. In the future, research should be carried out from three dimensions: breakthroughs in basic mechanisms, innovation in key technologies, and construction of intelligent systems. This is to promote the upgrading of green forage harvesters from “mid-to-low-end adaptation” to “high-end independent and controllable”, and provide equipment support for the high-quality development of China's forage industry.

**Key words**: green forage harvester; intelligence; crop adaptability; review

收稿日期: 2025-09-02　修回日期: 2025-09-20

**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-34)

**作者简介**: 尤泳(1980—),男,副教授,博士,主要从事智能草业装备与智慧草业研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

## 0 引言

青饲料又称“青绿饲料”,是指天然生长或人工种植的、处于新鲜青绿状态(未经过脱水、青贮等深度加工或仅经轻度处理)的植物性饲料[1]。青饲料是现代畜牧业发展的战略性物质基础,其供应能力直接关系到国家粮食安全(减少饲草料进口依赖)及畜牧业多元化可持续发展[2-4]。随着“粮改饲”政策深入推进,我国青饲料作物已形成规模化种植格局,饲草产业规模持续扩大[5-6]。

传统人工收获青饲料存在效率低、成本高、营养损失严重等问题,无法满足牲畜优质饲喂需求[7]。与之相比,青饲料机械化收获可使生产效率提升 5 ~ 8 倍,人力成本降低 60% 以上,同时通过精准控制留茬高度、切碎长度等,可有效保留营养成分并提高青贮发酵品质[8-9]。青饲料收获机的技术水平直接决定了青饲料机械化收获效率、品质,并对保障产业经济效益和生态效益具有重要意义[6]。

当前我国青饲料收获机市场呈现“高端外资主导、中低端国产崛起”的特征。欧美国家自 20 世纪 40 年代起发展青饲料收获技术,现已形成成熟的高端装备体系,其中克拉斯(CLAAS)JAGUAR 900 系列、约翰迪尔(John Deere)8600 型等机型,集成近红外光谱养分检测、自动跟车抛送和反向螺旋揉丝破碎等智能化功能,可适配玉米、苜蓿和高粱等多作物收获,作业效率达 800 ~ 1200 t/d[10-14]。我国青饲料收获机研发应用始于 20 世纪 50 年代的技术引进,历经仿制、自主研发到规模化生产的阶段,已呈现出快速崛起态势,中机美诺、山东五征和潍柴雷沃等企业产品市场份额超 70%,部分机型的籽粒破碎率(>90%)、标准草长率(>85%)已接近国际先进水平[15-17]。

然而,我国青饲料收获机技术仍存在显著短板,核心技术自主化程度不高,核心部件国产化率不足 40%[12,17];基础理论研究滞后,青饲料茎叶在机器系统中的运移特征、茎秆-机器互作机理等关键科学问题尚未突破,关键装置结构优化多依赖经验借鉴,缺乏系统的理论支撑[11];智能化水平较低,作业参数多停留在基础状态监测阶段,营养成分检测、作业质量检测、复杂环境下的作物品质感知和作业轨迹规划等技术尚未成熟[14]。

本文通过系统总结国内外青饲料收获机关键技术研究现状,指出现有研究难点和存在的不足,展望未来发展方向和研究重点,以期为我国青饲料收获机的技术创新与产业升级提供参考。

## 1 青饲料收获工艺与作业装备现状

### 1.1 青饲料机械化收获工艺

青饲料机械化收获作业模式主要分为联合式收获和分段式收获,如图 1 所示。联合式收获模式是利用青饲料收获机在田间一次性完成收割-切碎-碎料收集(或打捆、裹膜)等作业,适用于以全株青贮玉米为代表的青饲料作物。分段式收获是先对青饲料作物进行刈割,田间摊晒到一定含水率之后再进行捡拾切碎及碎料收集转运(或打捆、裹膜)等作业,适用于以苜蓿为代表的高含水率条件下不易于直接青贮的饲草。

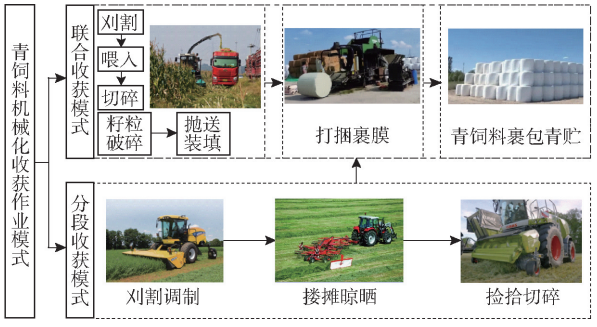



图 1 青饲料机械化收获工艺及配套作业装备

Fig. 1 Green forage ensiling harvesting technologies and supporting operating equipment

青饲料收获机根据动力来源主要分为自走式、牵引式和悬挂式。其中,自走式青饲料收获机由割台、喂入输送、切碎和籽粒破碎(揉搓)等关键装置,以及动力行走系统和控制系统组成,如图 2 所示。自走式青饲料收获机技术集成度高、适应性强,作业效率远高于牵引式与悬挂式,是具有代表性的青饲料收获机型。

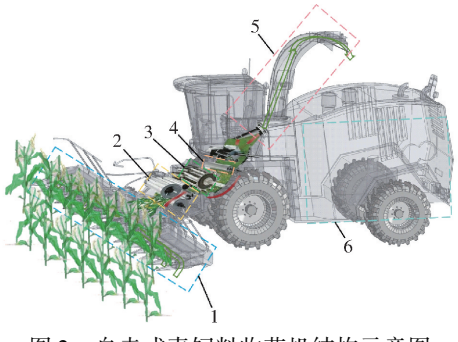



图 2 自走式青饲料收获机结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of self-propelled green forage harvester

1. 割台装置 2. 喂入装置 3. 切碎装置 4. 籽粒破碎装置
5. 碎料抛送装置 6. 动力行走系统

### 1.2 国外青饲料收获机发展现状

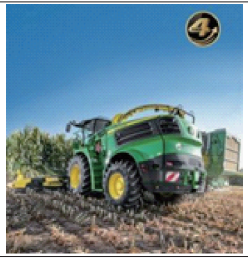
欧美国家青饲料收获机的发展始于 20 世纪 40 年代,20 世纪 50 年代中期,青饲料联合收获机逐步

取代分段式收获机具，不断提高工作效率、收获质量和自动化水平[10]。现阶段，在追求高效高质作业的基础上，进一步融合现代电子信息技术，呈现向高效节能、智能化自主作业、数据驱动优化和人机舒适性方向发展的趋势[11-13]。

国外典型青饲料收获机性能特点如表 1 所示，其中，约翰迪尔部分青饲料收获机型配备 HarvestLab™近红外光谱检测系统，实时监测收获后青饲料养分以调整机器作业参数；克拉斯 JAGUAR 900 系列以灵活切的碎滚筒与 CSPS 分析工具而领先业内，注重燃油经济性，通过优化动力系统和传动效率，降低运行成本；科罗尼 BiG X 系列青饲料收获机配备 850 kW 发动机与独特高效的链式割台，具有较强的收获喂入能力；纽荷兰 FR 9040 型通过 Variflow™系统实现多作物适配。以上企业产品展现出强大的技术创新能力与市场竞争力。

**表 1　国外典型青饲料收获机**

**Tab. 1　Typical foreign green forage harvesters**

| 名称 | 实物图 | 性能特点 |
|---|---|---|
| 约翰迪尔 8600 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 460 kW，可挂接 4 500/6 000/7 500 mm 割台，适配玉米、高粱等多种作物。切碎滚筒直径 670 mm，刀片数量 40/48/56/64 片，切段长度 3 ~ 26 mm 可调。集成 ProDrive™变速箱与 HarvestLab™检测系统，具备自动磨刀与金属异物检测功能，喂入装置配备 4 个喂入辊 |
| 克拉斯 960 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 480 kW，可挂接 9 000/3 599/5 960 mm 割台，最大喂入量 88 kg/s。切碎滚筒直径 850 mm，刀片数量 20/24/28/36 片，切段长度 6 ~ 48 mm，具备自动磨刀与异物检测功能，喂入装置配备 4 个喂入辊 |
| 科罗尼 BiG X 1180 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 850 kW，作业幅宽 10 500 mm，喂入量 120 ~ 160 kg/s。切碎滚筒有 28/36/40/48 片刀，切段长度 2 ~ 31 mm，喂入装置配备 6 个喂入辊，籽粒破碎率大于 90% |
| 纽荷兰 FR 9040 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 343 kW，作业幅宽 4 700 mm，喂入量 77 kg/s，喂入室宽度 860 mm，喂入装置配备 4 个喂入辊，双滚筒切碎设计，2 × 8/2 × 12 片刀，切段长度 4 ~ 33 mm(2 × 8 刀时 6 ~ 33 mm) |
| 罗斯托夫 RSM 1401 型自走式青饲料收获机 |  | 发动机功率 295 kW，作业幅宽 4 500 mm，切碎滚筒转速 1 200 r/min，切段长度 2 ~ 30 mm 可调，籽粒破碎率大于 85%；作业速度 0 ~ 20 km/h，抛筒可实现 226°旋转，具备自动磨刀器与异物检测功能，作业效率 500 ~ 800 t/d |

### 1.3　国内青饲料收获机发展现状

国内青饲料收获研究始于 20 世纪 50 年代，20 世纪70 年代推出首款自主研发的牵引式 9QS - 10 和悬挂式 9QS - 5 机型，20 世纪 90 年代后，以 9QS - 8 为代表的自走式机型实现多作物收割功能并批量投放市场，推动产业进入规模化发展阶段。

当前国内装备技术水平显著提升，在核心部件与智能化领域取得一定突破[14-16]，喂入量 35 kg/s 以下的机械较为成熟，部分国内典型青饲料收获机如表 2 所示。与国外机型相比，国产机械在留茬高度控制、标准草长和籽粒破碎程度等作业质量方面还存在差距。此外，同质化严重、功能单一、可靠性不足和自动化智能化水平不高等方面的问题需要解决。

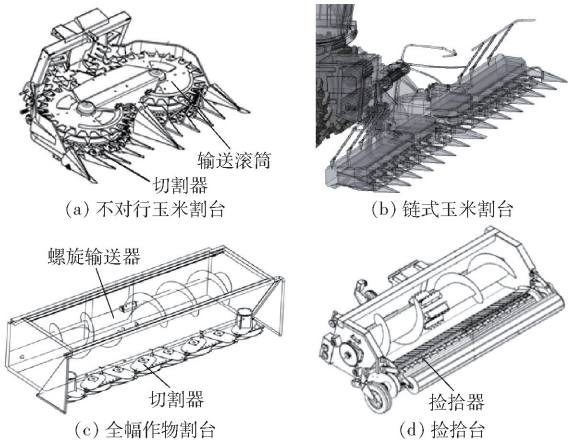
## 2　割台装置及技术

青饲料收获机常见的可挂载割台包括玉米割台、全幅作物割台和捡拾台等，如图 3 所示。割台一般由切割系统[17-22]、输送系统[23]、高度调节系统[24-28]、传动系统、机架和辅助系统中的全部或几项组成。玉米割台以不对行割台为主流，按切割方

表 2 国内典型青饲料收获机

Tab. 2 Typical domestic green forage harvesters

| 名称 | 实物图 | 性能特点 |
|---|---|---|
| 铁建重工 Q700 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 566 kW,作业幅宽 6 000 mm,支持不对行收割。切碎滚筒有 24 片刀片,籽粒破碎率大于 90%,田间作业速度达 17 km/h,标准草长率超 85% |
| 中联谷王 FL3000A 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 221 kW,作业幅宽 3 000 mm,喂入量 16 kg/s,切碎滚筒有 28 片刀片,切段长度 10~45 mm 无级可调,籽粒破碎率大于 90% |
| 五征 4QZ-3 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 177 kW,作业幅宽 2 080 mm,集成收割、切碎和打捆功能,喂入量 15 kg/s,喂入装置配备 5 个喂入辊,切碎滚筒有 24 片刀片,切段长度 11/15/19/29 mm 可调节;具备金属异物检测功能,作业效率较传统分段式提升 30% |
| 中机美诺 9265A 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 267 kW,作业幅宽 2 900 mm,喂入量 13 kg/s,喂入装置配备 4 个喂入辊,喂入室宽 730 mm,切碎滚筒有 24 片刀片,切段长度 10/13/18/22 mm 可调,籽粒破碎率大于 85%,静液压驱动,具备金属探测与过载保护功能,作业效率 13.3 $hm^2$/d |
| 美迪 9QZ-2900A 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 228 kW,往复式割台,作业幅宽 2 930 mm,喂入量不小于 10 kg/s,喂入装置配备 8 个喂入辊,切碎滚筒有 12 片刀片,切段长度 8~45 mm 可调,静液压驱动 |
| 潍柴雷沃谷神 4QZ-30A1 型青饲料收获机 |  | 发动机功率 338 kW,喂入室宽度 730 mm,切碎滚筒有 20 片刀片,切断长度 5/6.5/8.5/11/17/21 mm 可调,具备金属探测功能 |




(a) 不对行玉米割台 (b) 链式玉米割台 (c) 全幅作物割台 (d) 捡拾台

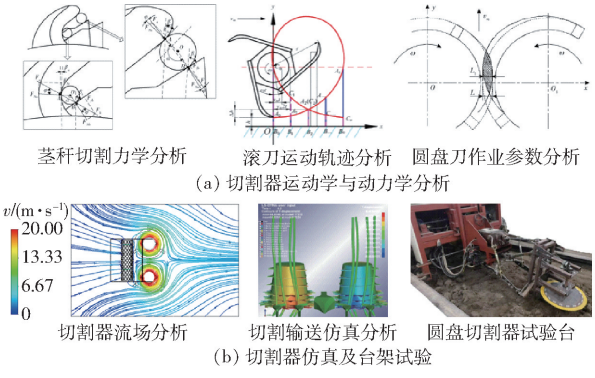
图 3 不同类型的青饲料收获机割台结构示意图

Fig. 3 Structural schematic diagram of the header for different types of green forage harvesters

式可分为塔式圆盘割台、往复式割台和链式割台,其中塔式圆盘割台目前的应用最为广泛[12]。全幅作物割台又称矮秆作物割台,适用于分蘖能力强、细茎秆和平播的青饲料作物。捡拾台在分段收获中的后段使用,一般用于需进行割铺晾晒的青饲料作物捡拾作业,如苜蓿、黑麦草和燕麦草等。保证切割留茬高度、茬口质量和有序汇集输送是青饲料收获割台设计首要考虑的问题。

## 2.1 割台切割器技术

切割器是青饲料收获机割台完成切割作业的核心部件,由于不同的青饲料生长形态及力学特性具有明显差异[29-32],切割器机构及参数设计需适配不同青饲料收获要求[33]。如图 4 所示,国内外学者围绕切割器设计展开系统研究,通过 MBD、DEM、FEA




(a) 切割器运动学与动力学分析

(b) 切割器仿真及台架试验

图 4 青饲料收获机割台切割器理论与仿真分析

Fig. 4 Theory and simulation analysis of the cutter on the header of green forage harvesters

等仿真分析方法对切割过程进行运动学与动力学分析，并结合试验台架验证理论可行性，已建立了较为完善的切割器设计理论体系[34-37]。主要针对不同青饲料作物收获农艺需求，研究不同型式切割器结构，优化切割器参数及刀具运动轨迹，降低收获损失、切割阻力及刀具功耗[38-39]。

饲草料作物易对高速旋转下的刀具表面造成包括显微切削、粘着磨损和应变疲劳脱落等形式的损伤，刀具表面材料硬度、塑性、韧性及显微结构组织对金属材料耐磨性有较大影响[40-41]。国外如克拉斯、约翰迪尔及纽荷兰等企业生产的青饲料收获机切割器刀具通过采用高强度材料，或表面熔覆硬化层的方式增强刀具耐磨性能[36, 42-43]。目前国内高端耐磨割刀在制造技术及理论创新上缺乏系统研究，在实现材料硬度的梯度均匀变化等方面依然有较大的研究空间[42]。此外，研究表明切刀设计与多年生作物再生的产量具有相关性，优质割刀可缩短作物再生周期，提高产量[44]。

如图 5 所示，在刀具结构优化方面，国内学者引入仿生学概念，进行了仿生切割刀具结构设计研究。大量研究结果表明，相较于普通切割刀具，仿生切割刀具在切割青饲料作物茎秆时表现出较低的切割力与切割功耗，且部分仿生刀具有自磨锐特性，长时间作业仍能保证相对光滑平整的茎秆切割面[45-50]。

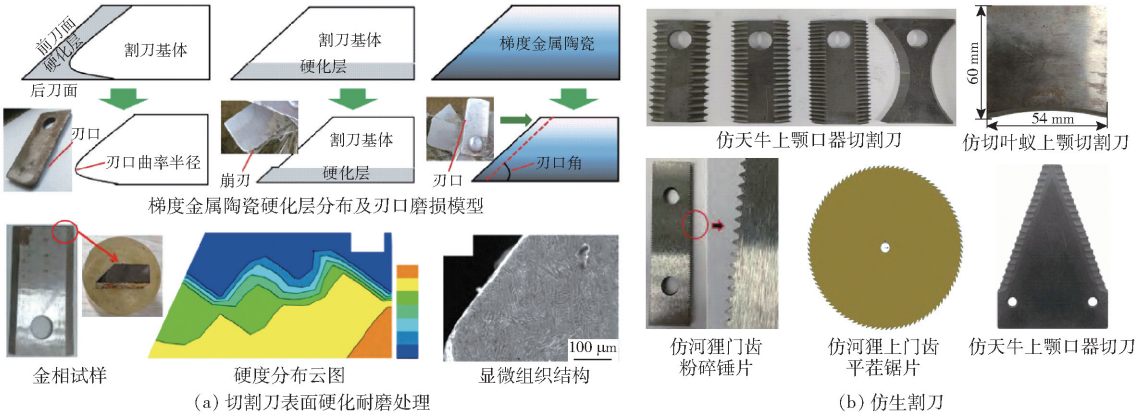



图 5　切割刀具优化设计结果

Fig. 5　Results of cutting tool optimization design

## 2.2　割台仿形技术

多数青饲料作物对切割留茬高度具有敏感性，其影响作物再生速率与产量[51-54]。割台仿形是收获机适应地形起伏、保持留茬高度稳定的核心技术[55-56]，相关学者在仿形机构优化、算法响应速度提升和作物高度监测等方面对收获割台仿形开展研究[57-59]，如图 6 所示。华南农业大学研究的二自由度自适应仿形机构，通过装置上的角度传感器获取地面波动信息，实时调整割台高度和倾斜角度[28]。刘伟健等[58]设计了一种自适应仿形割台，采用模糊 PID 控制方法提升了割台仿形时的响应速度。郭新年等[59]设计了一种基于激光视觉的农作物株高测量系统，通过将激光射线投射识别农作物顶点，株高测量相对误差最大为 2.17%，对收获机械割台高度自动控制提供了新的方法。

随着传感器技术的发展，未来青饲料收获机割台仿形技术将以主动仿形为核心，重点解决传感信号多源干扰、信号滞后和传感器作业校准难等问题，研发多模态传感器融合算法并引入自校准机制，提升割台主动仿形精度。

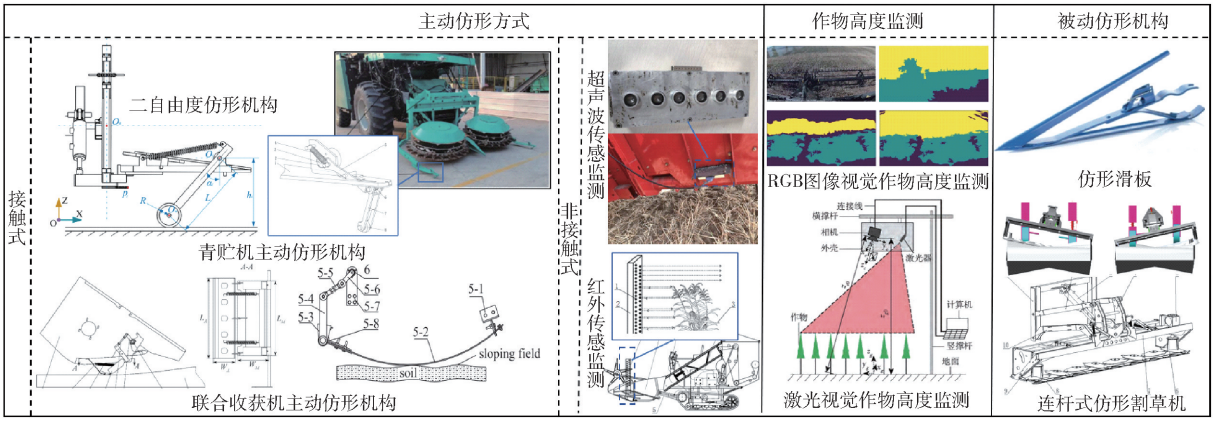



图 6　割台仿形相关技术

Fig. 6　Technologies related to header profiling

### 2.3 喂入量检测技术

喂入量检测技术在谷物联合收获机上的应用研究起步较早[60-63]。青饲料作物类型多样,营养体形态复杂,喂入量检测难度大。当前主流检测技术手段主要有:通过测量机器关键轴的转速、扭矩和功率等工况,间接建模实现喂入量的在线检测[64];通过测量作物推挤的反作用力反映喂入量[65-66];利用图像处理技术,通过作物密度及株高预测喂入量[67-68],如图 7 所示。目前青饲料收获机主要通过第 1 种方式实现喂入量检测。




(a) 传动轴扭矩测量 (b) 多传感器融合测量

(c) 茎秆弯曲力测量 (d) 激光雷达测量

图 7 不同喂入量检测方法

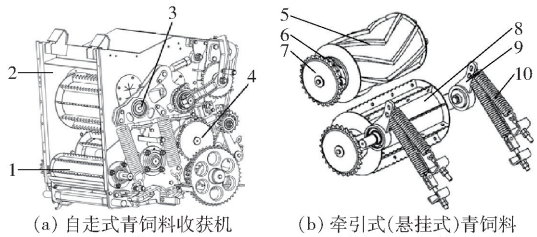
Fig. 7 Different feeding amount detection methods

相关学者聚焦喂入量检测技术优化,WANG 等[64]提出了基于关键条件数据与多变量回归的喂入量检测方法,实时采集切割、喂入和切碎等关键轴的转速、转矩、功耗及液压参数,通过构建喂入量与作业参数的多元回归模型提升检测精度。张振乾等[60-61]在搭建喂入量检测系统基础上,对比不同插值与滤波方法对扭矩、转速等传感器信号的预测和降噪效果,通过分段式线性插值与自适应滤波组合实现较低的相对测量误差。当前喂入量检测技术需与控制系统结合,在获取喂入量估测值后,由车机控制系统自动调整作业参数,确保收获机始终处于最佳喂入量范围作业。

## 3 喂入装置

### 3.1 喂入辊组结构

喂入装置负责将割台收割后的松散青饲料逐级压实并均匀稳定输送至切碎装置,主要包括箱体、喂入辊组、浮动压紧机构及传动机构等,如图 8 所示。青饲料进入装置后,由喂入对辊完成输送与逐级压实,需确保青饲料压紧效果的同时保障输送过程顺畅稳定。




(a) 自走式青饲料收获机喂入装置 (b) 牵引式(悬挂式)青饲料收获机喂入装置

图 8 青饲料收获机喂入装置结构示意图

Fig. 8 Structural schematic diagram of the feeding device for green forage harvesters

1. 喂入辊组 2. 喂入装置箱体 3. 浮动压紧机构 4. 传动机构 5. 固定辊 6. 轴承座 7. 链轮 8. 浮动辊 9. 压紧连杆 10. 压紧弹簧

国外青饲料收获机喂入装置广泛集成传感器与自动控制系统,具有较高的作物适应性。国内青饲料收获机喂入装置多采用紧凑机械形式,由于相关技术原理研究不充分,作物适应性有限,在喂入质量与效率方面与国外仍存在较大的技术差距。不同青饲料收获机喂入装置如表 3 所示。

影响喂入质量的因素包括喂入辊尺寸、数量、布置方式及辊齿形状等[69]。常见辊齿形状一般分为锯齿形、星形、人字形及光面形,对青饲料物料的抓取能力依次减弱。喂入装置前对辊以提升抓取能力为核心,多采用大直径锯齿辊;后对辊侧重均匀压实,常采用小直径的光面辊。锯齿形辊齿应用较广,适配青贮玉米、甜高粱等高秆作物,但处理韧性强的细长茎秆时易发生物料缠绕现象,通常设置一定辊齿倾角降低青饲料喂入缠绕几率。此外,喂入装置与切碎装置的作业参数组合直接影响青饲料的切段质量,CHEN 等[70]验证了实现较优标准草长率与切碎能耗的辊组及切碎装置转速组合,王征等[71]利用 Simulink 软件分析切碎装置稳态特性及扰动响应,建立优化切碎喂入矢角数学模型,使切碎能耗降低了 11.36%。

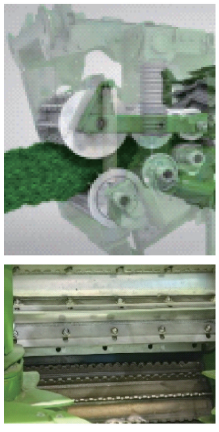
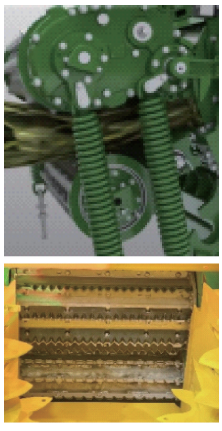
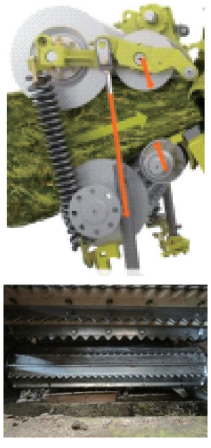
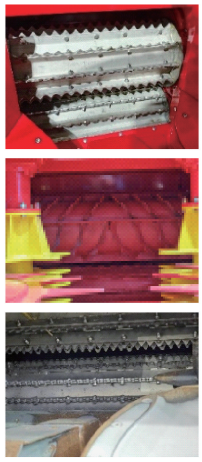
喂入装置中的浮动预紧机构通过对青饲料施加一定的压紧力,保障后续的切段质量。基于不同青饲料的多株压缩特性,需探究最优功耗及特定切段长度条件下的料层厚度,构建喂入装置压缩输送不同青饲料作物时的压缩力与功耗关系模型,进而在喂入方向上对不同喂入对辊的紧压及连接机构进行针对性设计。同时,需研究喂入装置对物料的有序输送机制,明晰喂入装置与切碎装置相对位置关系对切碎质量的影响,提升标准草长率。

### 3.2 异物探测技术

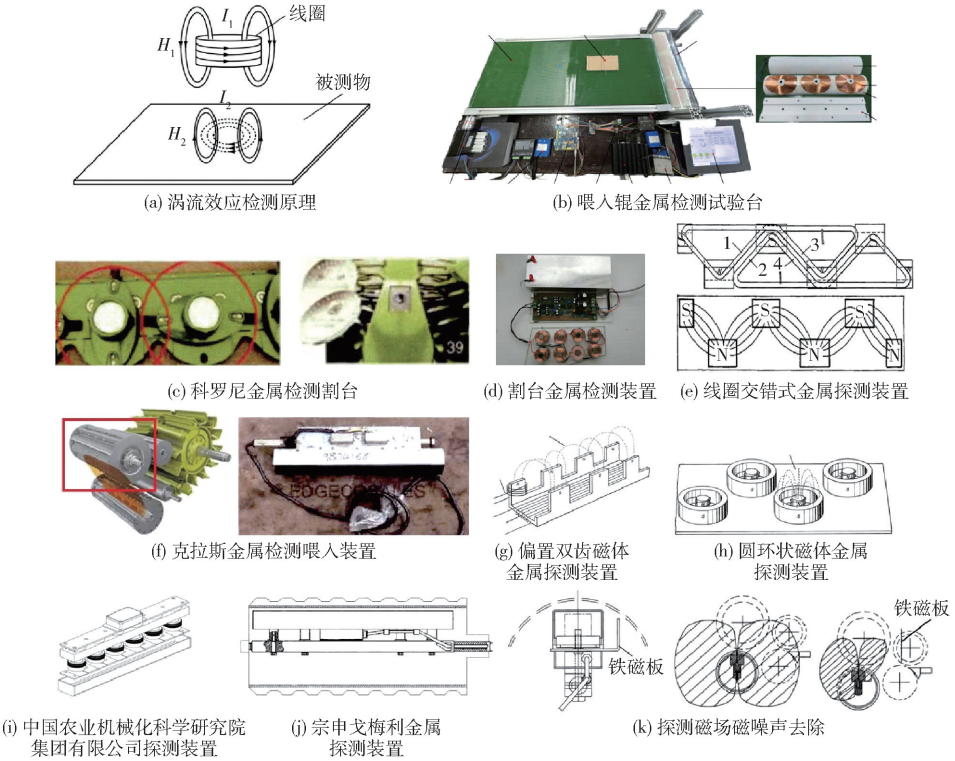
青饲料收获机吸入金属、石块等硬质异物会破坏切碎刀具,导致切碎质量急剧恶化。国外先进的青饲料收获机已配备异物探测系统(图 9c、图 9f),

**表 3　不同青饲料收获机喂入装置**

**Tab. 3　Feeding devices in different green forage harvesters**

| 名称 | 科罗尼青饲料收获机 | 约翰迪尔青饲料收获机 | 克拉斯青饲料收获机 | 国内青饲料收获机 |
|---|---|---|---|---|
| 结构 |  |  |  |  |
| 技术参数 | 6 个喂入辊，辊齿可更换，直径 280 ~ 320 mm，表面碳化钨涂层，弹簧浮动压紧，独立液压马达驱动，转速 0 ~ 80 r/min 无级调节，具备反向旋转功能 | 4 个喂入辊，辊齿可更换，两侧双弹簧浮动压紧，喂入室宽度 660 mm，闭式液压系统驱动，转速范围 30 ~ 120 r/min，具备反向旋转功能 | 4 个喂入辊，辊齿可更换，弹簧液压阻尼复合浮动预紧机构，喂入室宽度 730 mm，喂入辊与切碎滚筒齿轮同步传动 | 主流机型 4 或 5 个喂入辊，弹簧或弹簧-液压复合预紧，液压驱动为主导，具备反向旋转功能，根据不同切碎长度转速可调，部分机型具有金属探测功能 |

检测到硬质异物后最快可在 0. 05 s 内停机。异物探测主要包括对金属和石块的探测，在金属探测技术方面，青饲料收获机多采用电磁感应探测方法，通过感应线圈或霍尔传感器检测磁场的变化判断是否存在金属异物（图 9a）；石块探测主要通过振动或加速度传感器检测喂入辊的异常振动或速度变化实现。




(a) 涡流效应检测原理　(b) 喂入辊金属检测试验台

(c) 科罗尼金属检测割台　(d) 割台金属检测装置　(e) 线圈交错式金属探测装置

(f) 克拉斯金属检测喂入装置　(g) 偏置双齿磁体金属探测装置　(h) 圆环状磁体金属探测装置

(i) 中国农业机械化科学研究院集团有限公司探测装置　(j) 宗申戈梅利金属探测装置　(k) 探测磁场磁噪声去除



图 9　不同类型金属探测装置

Fig. 9　Different types of metal detection devices

青饲料收获机金属探测装置常见安装位置包括喂入辊内部（图 9f）、切割刀盘（图 9c）及割台侧板处（图 9d），为提升金属探测装置的可靠性和灵敏度，减少漏测现象，国外研究人员围绕线圈及磁体设计进行改进，包括合理布置线圈或磁体位置、磁噪声干扰消除等[72-77]。如图 9e 所示，纽荷兰公司采用两

组反极性磁体交错布置,在磁体上方形成三角并列结构,通过相邻检测区域磁场方向差异,大幅降低金属异物漏检概率[73]。同时开发了自适应检测阈值方法,由计算机自动间隔采样有无金属异物状态下的磁噪声,以过滤干扰、保持较高灵敏度[74]。STROSSER 等[76]提出偏置双齿与环状交错两种磁体布置方式(图 9g、图 9h),通过扩大磁场空间范围,减小物料流方向对探测灵敏度影响,降低漏测率。BYTTEBIER 等[77]在前后喂入辊间放置铁磁板有效地限制金属探测装置后方金属部件的磁噪声(图 9k),提高金属异物探测灵敏度。

国内在金属探测技术方面已经开展了相关研究。姚则[78]设计了一种安装在青饲料收获机割台侧板处的共平面式金属探测装置,在竖直与水平方向达到 200 mm 检测范围。李洋[79]基于 COMSOL 多物理场仿真软件对探测感应线圈进行了关键参数分析,集成了模块化的金属探测系统,试验结果显示系统报警准确率 100%,响应时间 0.11 s(图 9b)。中国农业机械化科学研究院集团有限公司研发了基于涡流效应与电磁振荡原理的青饲料收获机金属探测装置(图 9i)。总体看,配备金属探测功能的国内青饲料收获机对国外产品的依赖程度较高,国内相关研究成果尚未大规模产业化。

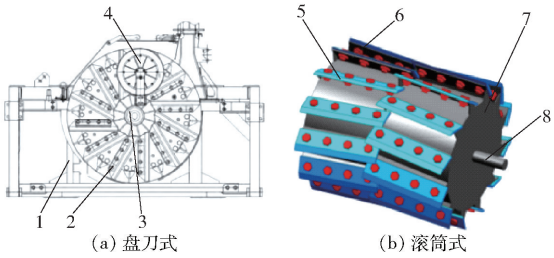
## 4 切碎装置

切碎装置是青饲料收获机的核心部件之一,相关研究表明青饲料的切段长度及均匀性对青饲料青贮发酵品质具有显著影响,基于青贮发酵质量建立了不同种类的青饲料作物切碎长度理论模型[80-83]。

如图 10 所示,目前青饲料收获机切碎装置按照切碎刀型式可分为盘刀式与滚筒式。盘刀式切碎装置在国内小型牵引式或悬挂式青饲料收获机上有应用[84-87],但由于径向切碎速度不均,切碎质量较差。滚筒式切碎装置结构紧凑,可实现较大的切段长度调整范围,动刀均处于同一个圆周上,工作速度一致,切段质量高[88-89],在自走式青饲料收获机上应用最为广泛。

国外滚筒式切碎装置技术研发始于 19 世纪末,设计制造体系已经十分成熟。目前对切碎装置的研究聚焦于切碎刀具的形状改良、刀具表面涂层、切碎滚筒结构及工作参数优化等方面[90]。国外典型青饲料收获机切碎装置如表 4 所示。

我国已初步形成青饲料收获机滚筒式切碎装置切碎理论技术体系。切碎装置消耗功率大,我国青饲料收获机受发动机功率限制,滚筒式切碎装置配备刀具数量普遍较少。如表 5 所示,根据动刀与切



(a) 盘刀式 (b) 滚筒式

图 10 青饲料收获机切碎装置

Fig. 10 Chopping device of green forage harvester

1. 机架 2. 盘刀式动刀 3. 盘刀式切碎装置 4. 磨刀石 5. 滚刀式动刀 6. 动刀安装座 7. 切碎滚筒 8. 滚筒主轴

碎滚筒相对安装位置,可分为单排动刀切碎滚筒和多排动刀切碎滚筒;根据刀具形状及安装形式可分为平板斜置滚筒式、螺旋曲面滚筒式及弧形曲面滚筒式。多排动刀切碎滚筒相较单排动刀切碎滚筒载荷更加均匀[91-93],动刀对茎秆产生的剪切力使青饲料切碎物向中间流动,降低物料与侧壁的摩擦耗能,目前应用较为广泛。弧形曲面滚筒式动刀片整体呈内凹的曲面,典型代表为克拉斯青饲料收获机特异结构弯刀,具有良好的切割质量及抛送能力,但加工难度高,国内青饲料收获机应用较少。

### 4.1 切碎刀具

切碎刀具是青饲料收获机切碎装置的核心部件,动定刀结构及参数配合、刀具材料直接影响切碎质量、功耗和使用寿命[94-98]。切碎刀具的优化设计是国内外青饲料收获装备生产企业的研发重点。

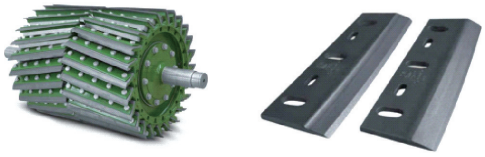
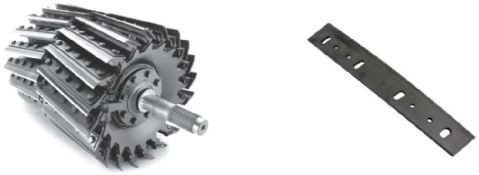
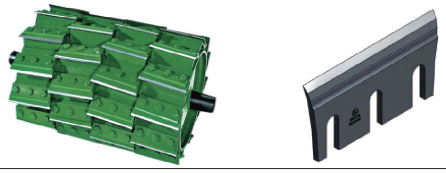
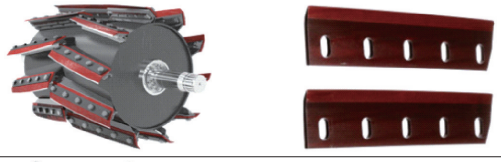
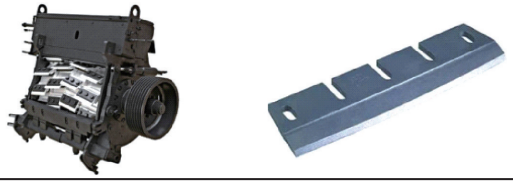
如图 11 所示,在刀具结构设计与优化方面,相关研究集中在刃型、刃倾角和滑切角等对切碎质量的影响,并通过切碎过程的运动学、动力学分析,仿真或试验验证优化刀具结构参数;在切碎功耗方面,建立功耗分析数学模型,分析滚筒转速、直径、喂入料层厚度等因素对功耗的影响,提出滚刀切碎装置安装参数与切割参数的最佳取值范围等[99-104]。在刀形创新设计方面,结合仿生学与计算机辅助的曲面逆向工程研究方法,通过对仿生原型部位轮廓特征扫描提取曲面点云,建立相关拟合函数优化刀具曲面[105-108]。王海翼[90]提出了一种仿生河狸下门齿外形结构特征及啮合啃咬功能的青饲料收获机滚刀设计方法,采用微分补偿和曲面诱导设计优化了刀具结构特征,对比普通刀具切割阻力降低了 17.43%。总体看,我国自主设计制造的切碎刀具存在刀具使用寿命短、切割阻力大和刀刃易磨损等问题,与国外切碎刀具相比仍存在较大差距。

### 4.2 自动磨刀对刀技术

青饲料收获机的自动磨刀装置机械结构主要包括自动磨刀系统箱体、磨刀门开关机构、磨刀石水平往复运动机构、磨刀石上下进给机构[109-110],工作时

**表 4　国外典型青饲料收获机切碎装置及性能特点**

**Tab. 4　Chopping devices of typical foreign green forage harvesters**

| 机型 | 切碎装置与刀具实物图 | 性能特点 |
|---|---|---|
| 克拉斯 JAGUAR 900 系列 V－MAX 切碎装置 |  | 人字形斜置折线型弯刀及特异结构弯刀，满足多种物料切碎需求，刀具安装倾角及动、定刀间距可调，20/24/28/36 刀配置，刀具内部熔覆耐磨合金涂层，自动磨刀对刀 |
| 科罗尼 BIG X 系列 Biogas 切碎装置 |  | 人字形排布折弯曲线刃刀，刀具安装倾角及动、定刀间距可调，40/48 刀配置，抗冲击能力强，每对刀具夹角 11°，刀具内部熔覆耐磨合金涂层，自动磨刀对刀 |
| 纽荷兰 FR 920 切碎装置 |  | 人字形曲线刃弯刀，抛送均匀性高，参数空气动力学几何优化，刀具倾角及动、定刀间距可调，自动磨刀对刀 |
| 约翰迪尔 9000 系列 切碎装置 |  | 4 排阶梯人字形排布直板型弯刀，40/48/56 刀配置，刀具倾角及动、定刀间距可调。Dura Line™耐磨技术，具备自清洁功能，减少碎料堆积 |
| 芬特 Katana 850 切碎装置 |  | 曲线刃弯刀，动、定刀大倾角安装，反向自动磨刀，激光复合涂层硬化 |
| Rostselmash F2650 切碎装置 |  | 曲线刃弯刀，4 排人字形动刀布局，自动磨刀对刀，内刃面耐磨涂层硬化 |

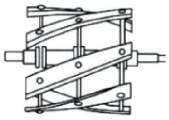
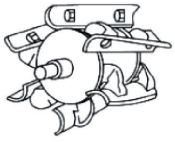
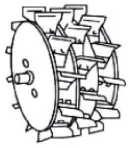
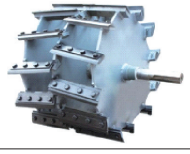
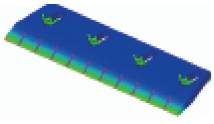
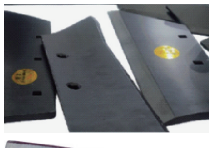
磨刀石在水平往复移动机构带动下对刀具进行刃磨。国外先进青饲料收获机型大多采用全液压驱动或电机带动磨刀石沿圆柱形滑轨往复移动的磨刀结构，具备智能控制功能，可以输入或调节包括人工磨刀次数、切碎长度在内的多种磨刀作业参数。国内的自动磨刀技术发展较快并已得到快速应用[111,113]。

切碎装置中的动、定刀间隙的手动调整操作流程复杂，危险系数高，对操作人员技术要求较高。如图 12 所示，国外企业已经实现对动、定刀间隙的自动调整与控制，并在自动对刀技术上不断进行创新。克拉斯 JAGUAR 系列青饲料收获机通过爆震传感器采集定刀与动刀轻微接触瞬间的高频震动信号，使定刀后退特定距离实现间隙调整，但无法主动检测定刀与动刀相对位置，且存在爆震传感器失效导致刀具损坏的隐患[114]。纽荷兰 Adjust－0－Matic 自动控制系统可按照设定指令自动调节间隙，智能化水平高，但受特定切碎装置结构与整机配置关系的限制，不适合国内青饲料收获机。国产青饲料收获机普遍依赖人工手动调节间隙，调节精度低。陈美舟等[115]设计出一种基于振动加速度传感器的电驱摇臂偏心式动定刀间隙调节装置，间隙先“清零”后调节达到设定值，两侧间隙均匀性变异系数低于 10%。

青饲料收获机切碎动刀的锋利程度影响秸秆切碎质量与切割能耗[116]。目前切碎刀具锋利度多通过收获机燃油消耗、工作噪声和切碎质量等间接参数变化，或人工目视和手指触感检查刀刃进行判断，易受主观影响且无法确定刀刃磨损的具体位置。WALTHER 等[117]通过对刀刃圆角半径的测量证实相同的刀具收获不同作物造成的磨损程度存在显著差异，频繁磨刀会缩短刀片使用寿命，需要根据具体的刀具磨损状态对磨刀程序进行调整。目前国内外在刀具锋利度检测方面的研究较少。约翰迪尔 Procut 系统可以测量并显示对刀以及磨刀的最佳时间节点，通过两个特殊感应器利用归纳法自动控制动刀和定刀在对刀过程中的间隙[118－119]。SIEBALD 等[120]

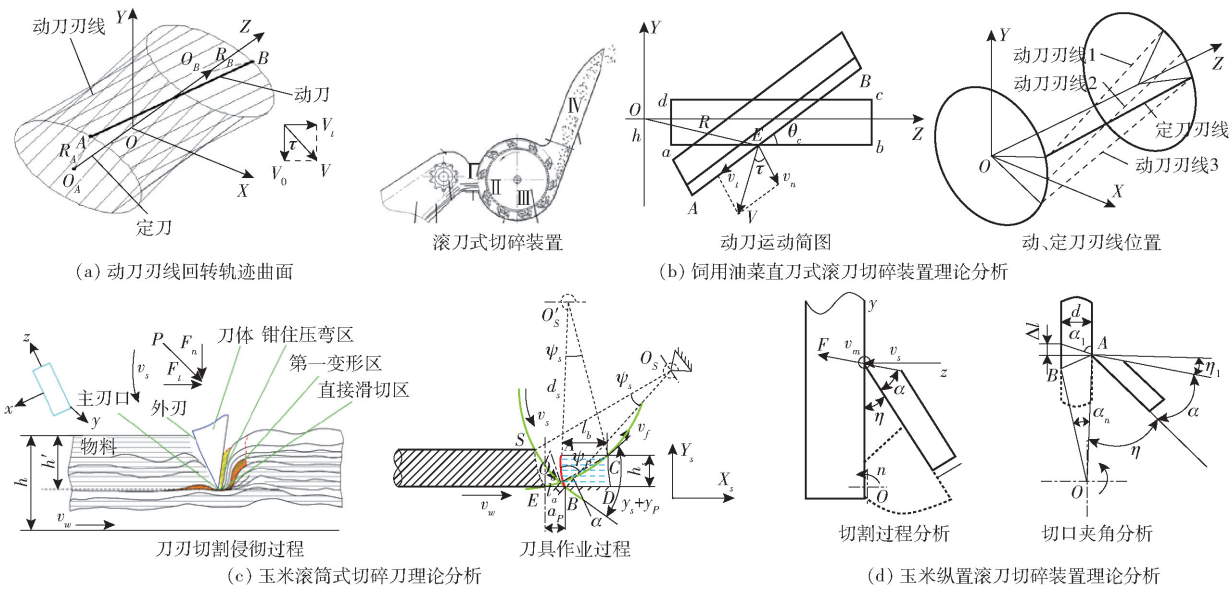
表 5 国内青饲料收获机切碎装置与刀具

Tab. 5 Chopping devices and cutting tools of domestic green forage harvesters

| 分类 | 切碎装置类型/刀具生产企业 | 切碎装置刀具结构 | 切碎装置/刀具类型 | 性能特点 |
|---|---|---|---|---|
| 滚筒切碎装置 | 平板滚筒式 |  | 单排动刀切碎滚筒 | 直板型动刀,制造简单,磨刃方便,切碎功耗和系统振动较大,抛送效果差 |
| | 螺旋曲面滚筒式 |  | 单排动刀切碎滚筒 | 滑切效果好,工作负荷小,机器振动小,运转平稳,刀片制造精度高,动、定刀间隙调节复杂,抛送效果差 |
| | 弧形曲面滚筒式 |  | 单排动刀切碎滚筒 | 切割质量与抛送性能好,刀具加工难度大 |
| | 两排人字形直刀 |  | 多排动刀切碎滚筒 | |
| | 三排一字形弯刀 |  | 多排动刀切碎滚筒 | 刀具多排布局,降低切割冲击,减小机器振动,切割阻力均匀,工作平稳,抛送性能好,具有一定加工难度,目前青饲料收获机多使用多排动刀切碎滚筒 |
| | 四排人字形直刀[105] |  | 多排动刀切碎滚筒 | |
| | 五征青饲料收获机切碎装置 |  | 平板直刀 | 刀具数量 24 把,切碎质量均匀,切碎抛送效果好,刀具前后刃面碳化钨涂层硬化 |
| | 美迪青饲料收获机切碎装置 |  | 平板直刀 | 刀具数量 24 把,刀具刃面碳化钨涂层硬化,自动磨刀 |
| 青饲料切碎刀具 | 中机美诺科技股份有限公司 |  | 弧形弯刀 | 刀具刃面为多段圆弧面,刀尖楔角小,内刃合金涂层 |
| | 顺利机械刀具有限公司 |  | 折线型弯刀 | 刀具外刃多段折线,内刃合金涂层 |
| | 特冶装备集团有限公司 |  | 折线型弯刀 | 刀具外刃多段折线,整体弯折幅度大,内刃合金涂层 |
| | 正宝机械刀具有限公司 |  | 折线型弯刀 | 刀具外刃多段折线,刃面与刀身一次折弯成型,内刃合金涂层 |

采用爆震传感器和 NI USB－4431 测量系统进行声学测量信号与刀鼓触发信号的采集,并在克拉斯 JAGUAR 950 型自走式青饲料收获机上进行了基于振动声学信号的刀具状态检测试验,具有一定的应用前景[120]。

综合分析国内外青饲料收获机自动磨刀对刀研究




(a) 动刀刃线回转轨迹曲面　(b) 饲用油菜直刀式滚刀切碎装置理论分析

(c) 玉米滚筒式切碎刀理论分析　(d) 玉米纵置滚刀切碎装置理论分析

图 11　不同型式切碎刀具切碎理论分析

Fig. 11　Theoretical analysis of the chopping device

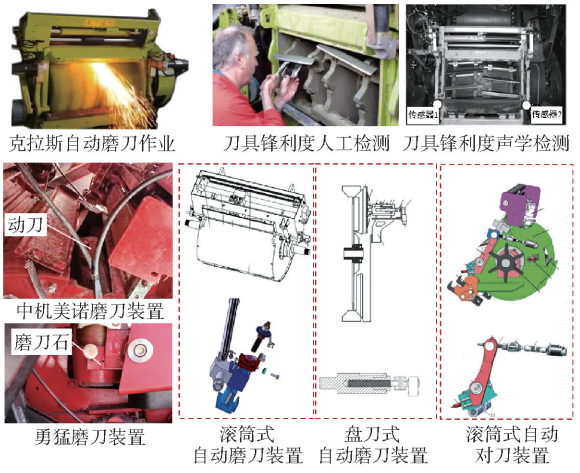



图 12　自动磨刀对刀装置

Fig. 12　Automatic knife sharpening and alignment device

现状,国外先进青饲料收获机具备全程自动化、可视化、智能化磨刀对刀功能。国内青饲料收获机虽已有部分厂家研制出电液驱动的自动磨刀系统,但大多机型仅实现磨刀石和磨刀门驱动形式的自动化,同时缺少刀具锋利度检测功能,智能化程度低,在自动对刀技术方面的研究更为薄弱,基本不具备自动对刀功能。

## 5　籽粒破碎装置

全株青贮玉米等青饲料作物在切碎后需要对籽粒进行破碎,提高青贮品质和营养利用效率。饲喂经过揉搓及籽粒破碎后的青饲料,牛奶产量提升 0.2 ~ 2.0 kg/d[121-123]。如表 6 所示,籽粒破碎装置根据揉搓部件结构可分为板式和对辊式[124]。受结构及尺寸的限制,板式籽粒破碎装置一般应用在小型牵引式或悬挂式青饲料收获机上[125]。国内外自走式青饲料收获机普遍采用对辊式破碎装置,表面通常经硬化处理并加工有不同形状辊齿,通过对辊之间的速差进行作物的揉搓与破碎[126-128]。

国内外研究人员主要围绕破碎机理、仿真技术、能耗与可靠性优化等方面对茎秆揉搓籽粒破碎装置开展了大量的研究,通过建立运动学与动力学模型等方式对破碎装置的破碎机理进行分析,离散元仿真技术结合台架试验验证青饲料作物碎料的揉搓破碎效果,模块化快速拆装机构降低作业能耗[129-132]。

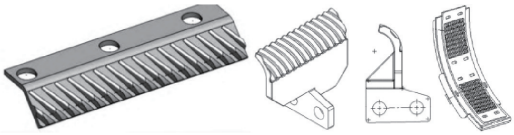
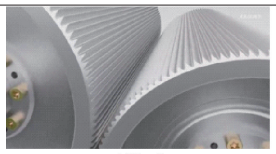
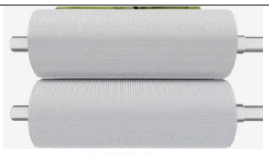
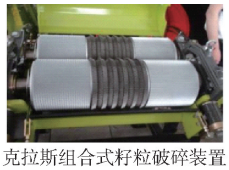
耿端阳等[127-128]基于差速破碎原理分别设计了碟盘式与螺旋缺口锯齿型对辊籽粒破碎装置,理论分析玉米籽粒在破碎装置中的运动受力,得到了较优的对辊组合形式;建立玉米秸秆与籽粒离散元模型,结合仿真与台架试验探究了破碎装置参数对青贮玉米秸秆的揉搓破碎效果,试验结果表明主动辊转速 5 000 r/min、差速比 30% 下的秸秆丝化率为 91.12%。LISOWSKI 等[35]采用数值模拟的方式建立了玉米秸秆揉搓过程功耗的变化的数学模型。籽粒破碎装置磨损大且功率消耗高,破碎间隙通常为可调节设计以减小磨损、降低功耗,同时有效避免堵塞(图 13c)。克拉斯青饲料收获机搭载的 SHREDLAGE 系统可通过液压张紧机构自动调节籽粒破碎间隙,确保稳定的破碎效果。科罗尼青饲料收获机籽粒破碎装置为模块化设计,可通过快速拆卸避免非必要运行的功耗(图 13d)。

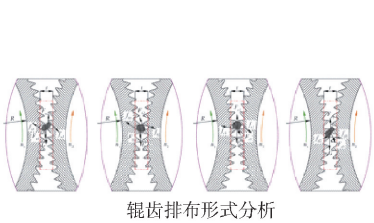
## 6　青碎料抛送装置技术

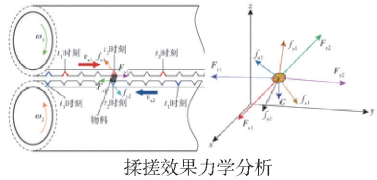
碎料抛送是由抛送装置实现物料从切碎端到接料车斗的输送。抛送装置主要由抛送筒、导向机构及驱动系统构成,通过高速叶轮产生离心力抛送物料,实现大流量长距离抛送。抛送筒在驱动系统液

表 6 籽粒破碎装置分类及特点

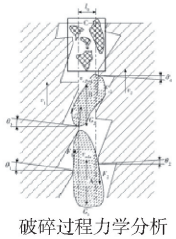
Tab. 6 Classification and characteristics of grain crushing devices

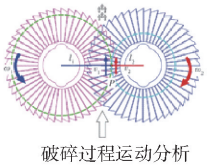
| 分类 | | 总体结构 | 特点 | 局限性 |
|---|---|---|---|---|
| 板式籽粒破碎装置 | |  | 搓板长度灵活可调，适用不同揉搓要求，结构简单，加工成本低 | 籽粒破碎效果差，依靠摩擦实现揉搓，不适用高含水率高纤维物料 |
| 对辊式籽粒破碎装置 | 直辊式 |  直齿式  直齿螺旋齿槽式 | 通过对辊速差产生的挤压、剪切进行切碎茎秆揉搓和籽粒破碎；碟盘式增大表面处理面积，增加揉搓破碎效率与力度[124]；组合式籽粒破碎效果较优，满足不同作业情况需求 | 碟盘式、组合式籽粒破碎辊加工难度大，成本高 |
| | 碟盘式 |  克拉斯盘式籽粒破碎装置  科罗尼碟式籽粒破碎装置 | | |
| | 组合式 |  约翰迪尔组合式籽粒破碎装置  克拉斯组合式籽粒破碎装置 | | |


辊齿排布形式分析

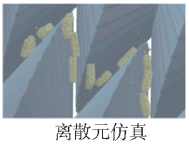

揉搓效果力学分析

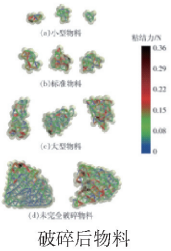
(a)

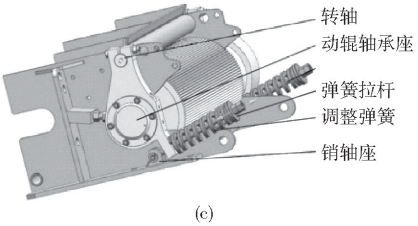

破碎过程力学分析


破碎过程运动分析

(b)


离散元仿真


破碎后物料




(c)


科罗尼籽粒破碎装置快速拆装过程

(d)

图 13 籽粒破碎装置技术

Fig. 13 Technology of grain crushing device

压马达和伸缩油缸的作用实现俯仰与偏航调节，导向机构安装在抛送筒的出口端，通过调整导向板的角度使物料能够准确落入运输车辆的指定区域。

国外高端青饲料收获机通常搭载有自动跟车碎料抛送系统，如图 14 所示。基本原理为获取接料车厢空间坐标及车厢内碎料分布位置信息，规划碎料落点，抛送过程中实时识别接料车厢内部多个点位的碎料填充状态，根据检测结果调整抛送臂的空间位姿，实现自动跟车装填。国内青饲料收获机多数为机手或操作员观察接料车厢状态手动控制碎料抛送，工作强度大、车厢空间利用效率低，并极易造成收获损失。

目前，自走式青饲料收获机与接料车之间的自动填充方法主要基于计算机视觉技术控制抛送筒运动实现自适应寻车抛送装填[133-134]。青饲料收获田间作业环境较复杂，影响收获机与接料车相对位置变化因素较多。因此，国内外学者对检测方法优化进行了相关的研究，根据车辆位置关系制定不同装填规则，并根据装填规则开发接料车厢检测算法。如图 15 所示，尤泳等[134]通过改进的 R-YOLOv5 算法实现了对旋转车厢和物料流的高精度识别，识别精度超过 90%。苗中华等[135]通过图像与点云数据处理技术，利用 RANSAC 算法实现了车斗边沿的识别和空间定位。ZHANG 等[136]通过建立抛送臂与接料车厢空间三坐标系模型，利用 SVD 算法和 RANSAC 算法实现了对不同形状容器的高精度识别与定位，识别准确率达 90%，定位误差小于 100 mm。刘磊等[137-139]通过基于改进 U-Net 的自动检测方




图 14　国外青饲料收获机自动装填系统

Fig. 14　Automatic loading systems for foreign green forage harvesters

显著提升复杂环境下料斗的检测精度和实时性。利用饲料堆积模型开发了落料点预测方法，提出并验证了一种 IPSO－PID 轨迹跟踪控制方法优化抛送臂轨迹和控制参数，使卸料时间缩短 37%，饲料抛撒损失率降低约 1 个百分点。国内相关研究仍处于田间测试阶段，自适应抛送装填系统尚未实现国产化替代。

## 7　青饲料收获机智能感知与数据融合技术

青饲料收获机的智能化发展围绕精准感知、智能决策与自主调控展开，目前国外相关研究较多，已覆盖关键参数感知、数据融合分析、智能控制及远程运维等核心领域，通过多维度技术融合实现作业效率提升、品质优化与运维智能化。

设备状态参数的感知聚焦于关键部件的工况健康度监测，测量整合多源信息提升感知精度与系统

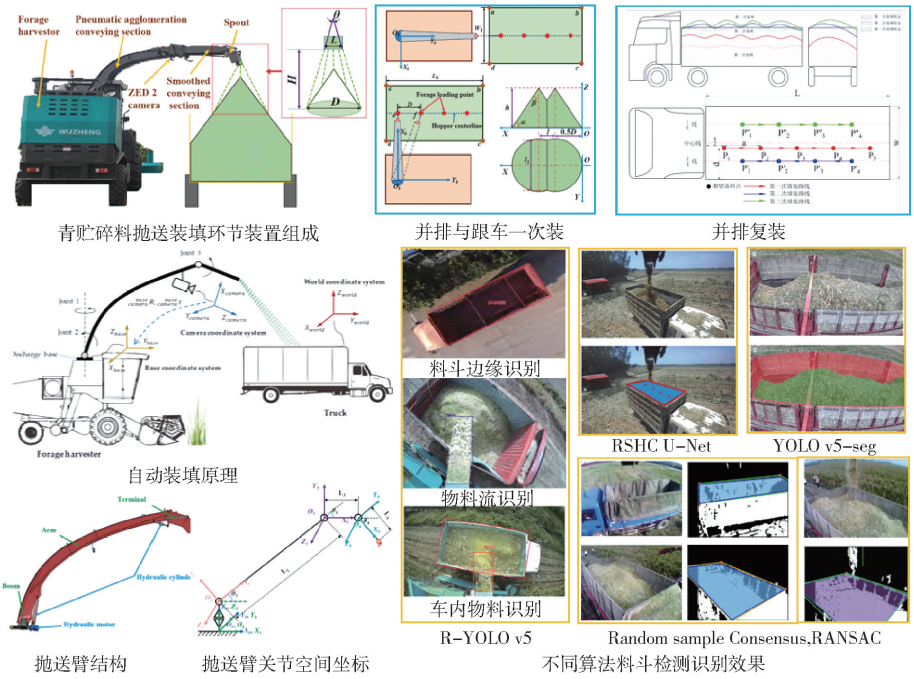



图 15　碎料自动抛送系统

Fig. 15　Automatic conveying system for crushed materials

鲁棒性。针对不同关键机械参数的测量需求，研究者开发了多种传感器与感知方法，以质量流量作为衡量收获效率的核心参数代表的测量技术较为成熟，主要通过扭矩、转速等传感器采集数据，结合液压系统特性实现机械负载感知[140－143]。如利用压电加速度传感器采集切割装置的结构声信号反映刀片磨损状态[120]；开发 CAN 总线远程监测系统稳定传输与分析工况数据[144－145]；分析青饲料收获机负载假设，建立综合模型预测燃油消耗并优化能耗[146]。ZHOU 等[147]提出的改进随机森林（RFNB）算法，通过朴素贝叶斯树提升青饲料收获机故障监测精度；毛文华等[144]设计的远程监测系统则融合车载终端的实时采集数据、云端的存储与分析能力，通过 Redis 数据库缓解高并发访问压力，实现了数据采集、传输与应用的解耦。

作物品质参数的感知方面是机器作业参数调整的重要依据，近红外光谱（NIRS）与图像处理技术的应用较为广泛，DIGMAN 等[148]将移动 NIR 光谱仪集成到自走式收获机的出料口，满足全株玉米和苜蓿的实时水分监测需求。BIJAY 等[149]结合微波介电常数与人工神经网络，通过测量苜蓿在 1 ~ 18 GHz 的介电特性，构建密度无关的含水率

(11.5% ~ 73%)预测模型,检测时间仅 12 s;RASMUSSEN 等[150]优化的 Faster R-CNN 模型可测量青贮玉米物理特性。

综上,青饲料收获机的参数感知已覆盖质量流量、品质、设备状态等多维度,多数据融合通过模型优化、信号解析与系统集成显著提升了感知性能,但在复杂工况适应性(如作物多样性、环境干扰)和实时性优化(如高频数据处理效率)方面仍需进一步研究。

## 8 问题分析与展望

### 8.1 现有研究难点与问题

基于青饲料收获机核心环节(割台、喂入、切碎、籽粒破碎、抛送、智能化)的技术现状及文献分析,当前国内围绕青饲料收获机关键技术装备研究仍存在以下薄弱环节和瓶颈。

(1)青饲料作物收获适配性不足,基础理论研究滞后

青饲料收获机的作物适配性是保障“多作物、广场景”作业的核心,但当前国内在基础机理与装备设计的协同性上存在显著短板。从理论层面看,青饲料切割与破碎机理研究不系统,对苜蓿、王草、构树等长纤维、高韧性或木质化青饲料的力学特性研究不足,导致切割装置设计缺乏针对性,反映出不同作物对收获装置的差异化需求尚未形成普适性理论体系。从装备应用看,喂入堵塞与缠绕问题突出,未明确“青饲料物理特性-喂入参数-堵塞风险”的定量关系,装备对复杂作物条件的作业适应性差。此外,专用收获装置稀缺,全幅作物割台、灌木捡拾割台等专用装备依赖进口。

(2)可靠性设计与能耗优化滞后,核心部件性能差距显著

青饲料收获机的可靠性与能耗直接影响作业经济性,但国内在关键部件耐磨设计制造、整机动态能耗调控上存在明显不足。从部件层面看,核心部件磨损与疲劳破坏问题突出,切碎刀具作为易损件,国外高性能装备多采用高强梯度材料或表面熔覆硬化层,而国内多数平板直刀采用普通合金钢且未经过系统的表面强化处理,寿命与国外差距达 50% 以上,且切碎装置对青饲料切断长度的均匀性低,是长久以来限制国内青饲料收获机收获质量提升的重要原因;从仿生设计应用看,实验室成果与实际工况适配性较差,国内学者虽开发了仿天牛上颚、河狸门齿的仿生刀具,但多基于单一作物的理想工况,未考虑田间土壤粘附、多作物混杂等实际问题,需进一步结合复杂工况优化。从整机能耗看,缺乏实时功率动态调节机制,现有装备的动力系统多基于静态负载设计,而田间喂入量波动(±30%)导致实际燃油消耗与设计值偏差可达 10% ~20%。

(3)复杂环境感知精度与鲁棒性不足,智能化技术研究滞后

青饲料收获机的智能化依赖“精准感知-数据融合-自主调控”的全链条技术,但国内在感知系统可靠性与多模态数据处理上存在短板。首先,国产传感器性能与环境适应性差,受光照变化、机器振动、作物粉尘等干扰因素影响较大,实际作业中的精度误差远高于理想环境,抗干扰能力与国外差距显著(如约翰迪尔 HarvestLab™ 近红外系统在复杂环境下养分检测误差小于 3%[15])。其次,多模态数据融合技术存在瓶颈,青饲料收获需整合作物状态、装备工况、环境参数等多源数据,但现有研究多采用单一传感数据,缺乏数据互补与冗余容错设计。最后,智能调控闭环尚未形成,国外高端机型已实现“感知-决策-执行”智能化,而国内机型多停留在“数据采集-状态显示-辅助执行”阶段,缺乏自适应优化。

### 8.2 展望

目前,我国在青饲料收获机设计研发等相关领域已经具备一定的研究基础,结合国内外技术发展趋势,未来需从基础机理突破、关键技术创新、智能化系统构建 3 个维度开展研究,推动青饲料收获机从“中低端适配”向“高端自主可控”升级,力争在高端机型、核心部件、基础理论上实现突破,为我国饲草料产业高质量发展提供装备支撑。

(1)聚焦“作物-部件”互作机理,突破适配性与可靠性瓶颈

开展多作物适配的切割机理研究,结合动力学、有限元法、离散元法等仿真技术,建立“青饲料物理特性-切割参数-切割质量”定量分析模型,指导切割切碎装置设计。开展作业能耗适配性研究,建立基于物料流形态转变方式的能耗响应模型,分析各作业环节影响能耗的主要因素,合理配置和动态调整动力消耗,提升青饲料收获机作业能效。开展青饲料物料流在收获机械系统中的运动姿态与轨迹变化研究,建立“喂入量-工作状态感知-堵塞风险”评估模型,利用载荷信号感知、图像视觉识别等技术实现堵塞提前预警,提高作业流畅性、稳定性。

(2)聚焦作业场景驱动下的整机设计与关键装置创制,满足不同作业需求

针对丘陵山区等特殊场景,基于模块化与轻量化设计开发小型化、轻量化青饲料收获机,采用折叠式割台提升转场灵活性;针对规模化种植,采用大功

率与宽幅割台设计，优化动力传动系统，提升喂入量与作业效率，进行结构拓扑优化，降低整机重量，减少土壤压实。围绕喂入、切碎、破碎等核心环节，开展高质量喂入-切碎（破碎、揉搓）-抛送协同设计，结合逆向工程与仿生学技术，优化设计切碎刀具、籽粒破碎、茎秆揉丝等关键部件，推广材料耐磨制备工艺新技术在刀具生产制造中的应用，实现刀具硬度梯度均匀性和使用寿命提升，降低磨损导致的性能衰减。

（3）构建“感知-决策-调控”智能化系统，提高智能化作业水平

以“精准感知、自主作业”为方向，融合多传感技术与智能算法，研发全流程智能化系统。突破复杂环境感知瓶颈，集成多模态感知系统，同时整合 CAN 总线数据，构建“作物品质-装备工况-环境参数”的多源数据库，为机智能化作业决策提供支撑。开发“单机智能-多机协同”的控制体系，在单机层面，重点突破智能仿形割台、高通量有序输送、切段长度调节、自动磨刀对刀、自适应抛送装填、在线检测和智能化人机交互等智能化关键技术；多机层面结合北斗导航与 5G 技术，实现收获机、接料车、打捆机的作业轨迹规划与协同调度，提升青饲料收获机单机智能化水平和多机协同作业能力。同时细分场景智能化适配，优化小型机型的智能化模块，提升实用性。

## 参 考 文 献


[1] 饲料工业术语 GB/T 10647—2008[S]. 2008.

[2] 国务院办公厅. 关于促进畜牧业高质量发展的意见（国办发〔2020〕31 号）[EB/OL]. [2025-09-02]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-09/27/content_5547612.htm.

[3] 农业农村部. 关于印发《“十四五”全国饲草产业发展规划》的通知（农牧发〔2022〕7 号）[EB/OL]. [2025-09-02]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content_5676205.htm.

[4] 赵云，谢开云，万江春，等. 粮草兼顾型畜牧业饲草料发展现状及展望[J]. 草业科学，2017，34(3)：653-660.
ZHAO Yun, XIE Kaiyun, WAN Jiangchun, et al. Development and prospects of ‘grain-forage supply’ in modern animal husbandry[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3): 653-660. (in Chinese)

[5] 杨彤，赵雯莉，董金玮，等. 2000—2020 年中国青饲料播种面积及其供需驱动因素的时空格局[J]. 地理学报，2024，79(7)：1804-1823.
YANG Tong, ZHAO Wenli, DONG Jinwei, et al. Spatio-temporal patterns of succulence sown area and its driving factors considering forage demand and supply in China during 2000—2020[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(7): 1804-1823. (in Chinese)

[6] 汪开英，李鑫，陆建定，等. 碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J]. 农业工程学报，2022，38(1)：230-238.
WANG Kaiying, LI Xin, LU Jianding, et al. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China[J]. Transactions of the CSAE, 2022. 38(1): 230-238. (in Chinese)

[7] 王德成，贺长彬，武红剑，等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：1-25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1-25. (in Chinese)

[8] JOHNSON L, HARRISON J H, HUNT C, et al. Nutritive value of corn silage as affected by maturity and mechanical processing: a contemporary review[J]. Journal of Dairy Science, 1999, 82(12): 2813-2825.

[9] SHINNERS K J, JIROVEC A G, SHAVER R D, et al. Processing whole-plant corn silage with crop processing rolls on a pull-type forage harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(4): 323-331.

[10] 姚河江，王教滨，李谦绪，等. 青饲料收获机研究现状与展望[J]. 农业科技与装备，2023(5)：46-48.
YAO Hejiang, WANG Jiaobin, LI Qianxu, et al. Research status and prospect of greenfeed harvester[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2023(5): 46-48. (in Chinese)

[11] 李向阳，宋学锋，张锋伟，等. 玉米青饲料收获机喂入切碎装置研究概况[J]. 林业机械与木工设备，2022，50(10)：22-29.
LI Xiangyang, SONG Xuefeng, ZHANG fengwei, et al. Research overview of feeding and chopping device for corn silage harvester[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2022, 50(10): 22-29. (in Chinese)

[12] 王泽群，华荣江，赫志飞，等. 自走式青饲料收获机主要机械部件技术现状[J]. 农业工程，2022，12(3)：20-25.
WANG Zequn, HUA Rongjiang, HE Zhifei, et al. Technical status of main mechanical parts of self-propelled forage harvester [J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(3): 20-25. (in Chinese)

[13] 魏常友，刘文亮，彭飞，等. 青贮收获机割台发展现状及趋势[J]. 农业与技术，2024，44(4)：44-48.

[14] 刘杰. 可折叠式青贮机割台系统设计[D]. 芜湖：安徽工程大学，2023.
LIU Jie. Design of table cutting system for foldable silage machine[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023. (in Chinese)

[15] 黄鸿辉. 7.5 m 青贮收获机割台优化设计[D]. 秦皇岛：河北科技师范学院，2023.
HUANG Honghui. Optimization design of cutting platform of 7.5 m silage harvester[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2023. (in Chinese)

[16] 孙明伟，窦英杰，李学永，等. 6.0 m 折叠式青贮机割台优化设计及试验[J]. 中国农机化学报，2025，46(4)：10-16.
SUN Mingwei, DOU Yingjie, LI Xueyong, et al. Optimal design and test of cutting table of 6.0 m folding silage machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 10-16. (in Chinese)

[17] 郇晓龙,尤泳,王德成,等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):112 - 124.
HUAN Xiaolong, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):112 - 124. (in Chinese)
[18] 董瑞. 青贮玉米收获割台切割过程仿真及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
DONG Rui. Simulation and experimental study on cutting process of silage corn harvesting header[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
[19] 周辉,赵建柱,王德成,等. 基于逆向工程的苜蓿切割压扁机刀盘建模[J]. 林业和草原机械,2021,2(4):18 - 23.
ZHOU Hui, ZHAO Jianzhu, WANG Decheng, et al. Research on modeling of cutterhead of alfalfa cutting and flattening machine based on reverse engineering[J]. Forestry and Grassland Machinery,2021,2(4):18 - 23. (in Chinese)
[20] 宋月鹏,王征,吴昆,等. 金属陶瓷自磨刃割刀对苜蓿低损伤切割机理分析[J]. 农业机械学报,2020,51(10):421 - 426,309.
SONG Yuepeng, WANG Zheng, WU Kun, et al. Fabrication of self-sharpening blades with metalloceramics materials and low-damaged cutting mechanism of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 421 - 426,309. (in Chinese)
[21] 付作立. 双圆盘式刈割压扁机切割系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
FU Zuoli. Study on cutting system for two discs mower conditioner[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
[22] MA J, WU K, GAO A, et al. Study on the bionic design and cutting performance of alfalfa cutters based on the maxillary mouthparts of longicorn beetles[J]. Agriculture, 2024, 14(8): 1302.
[23] 李青江, 钟波, 闵令强, 等. 4QZ45 青贮机收获割台切割输送机构设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 41 - 46.
LI Qingjiang, ZHONG Bo, MIN Lingqiang, et al. Design of cutting conveying mechanism of the harvesting header of 4QZ45 silage machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 41 - 46. (in Chinese)
[24] 李超然. 自走式苜蓿收割机割台连杆式仿形系统设计与试验[D]. 北京:中国农业大学,2025.
LI Chaoran. Design and experiment of linkage-based profiling system for cutting table of self-propelled alfalfa harvester[D]. Beijing: China Agricultural University,2025. (in Chinese)
[25] 祝露,尤泳,王德成,等. 悬挂式割草机折叠机构优化与液压仿形系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(9):122 - 130.
ZHU Lu, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of folding mechanism and hydraulic profiling system of hanging mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 122 - 130. (in Chinese)
[26] 李雷霞,顾玲玲,华荣江,等. 青贮饲料收获机割台高度固定控制装置的设计及应用[J]. 农业工程,2019,9(8):88 - 91.
LI Leixia, GU Lingling, HUA Rongjiang, et al. Design and application of control device for fixing the header in height of a silage harvester[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(8): 88 - 91. (in Chinese)
[27] SAINZCOSTA N, RIBEIRO A, BURGOS ARTIZZU X P, et al. Mapping wide row crops with video sequences acquired from a tractor moving at treatment speed[J]. Sensors, 2011, 11(7): 7095 - 7109.
[28] LUO Y, LIAO Z, SHI S, et al. Design and testing of a 2-DOF adaptive profiling header for forage harvesters[J]. Agronomy, 2024, 14(9): 1909.
[29] 马彦华,宋春东,宣传忠,等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(11):22 - 30.
MA Yanhua, SONG Chundong, XUAN Chuanzhong, et al. Parameters calibration of discrete element model for alfalfa straw compression simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 22 - 30. (in Chinese)
[30] SHI Y, JIANG Y, WANG X, et al. A mechanical model of single wheat straw with failure characteristics based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 1 - 15.
[31] STB A, LEBLICQ T, SAEYS W. Aerodynamic properties of harvested perennial ryegrass: effects of particle mass, size and moisture content[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 67 - 79.
[32] SOLEIMANIN, KAMANDAR M R, KHOSHNAM F, et al. Defining and modelling sesame stalk shear behaviour in harvesting by reciprocating cutting blade[J]. Biosystems Engineering, 2023, 229: 44 - 56.
[33] 邬备. 苜蓿刈割压扁收获机械系统的优化和试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
WU Bei. Optimization and experimental study on mechanical system of alfalfa mower conditioner[D]. Beijing: China Agricultural University,2017. (in Chinese)
[34] 郇晓龙. 簇生高茎秆王草机械化青贮收获工艺及关键装置研究[D]. 北京:中国农业大学, 2022.
HUAN Xiaolong. Study on mechanized silage harvesting technology and key equipment of clustered high stem king grass[D]. Beijing: China Agricultural University,2022. (in Chinese)
[35] LISOWSKI A, KLONOWSKI J, SYPULA M, et al. Energy of feeding and chopping of biomass processing in the working units of forage harvester and energy balance of methane production from selected energy plants species[J]. Biomass and Bioenergy, 2019, 128: 105301.
[36] EL-BAILY M M. A study of rotary drum mower blade wear and its effects on forage productivity[J]. Agricultural Engineering, 2022, 47(3): 87 - 100.
[37] 耿端阳,纪晓琦,牟孝栋,等. 构树收获割台设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(7): 2152 - 2164.
GENG Duanyang, JI Xiaoqi, MOU Xiaodong, et al. Design and experiment of harvesting and cutting table of Broussonetia papyrifera[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 2152 - 2164. (in Chinese)
[38] 邬备,王德成,王光辉,等. 割草机切割压扁装置运行参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(10):76 - 83.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization and experiments of cut-condition device working parameter on mower conditioner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 76 - 83. (in

Chinese)
[39] 付作立,王德成,李卫,等. 双圆盘式苜蓿旋转切割器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊 1):214 – 220.
FU Zuoli, WANG Decheng, LI Wei, et al. Design and experiment of two-disc rotary mower of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp. 1):214 – 220. (in Chinese)
[40] 李晓康,丁立利,吴劲锋. 苜蓿草粉对不同金属材料的磨损试验[J]. 机械研究与应用,2020,33(2):112 – 114,117.
LI Xiaokang, DING Lili, WU Jinfeng. Wear tests of alfalfa meal on different metal materials[J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(2): 112 – 114,117. (in Chinese)
[41] 张炜,吴劲锋,马国军,等. 苜蓿草粉对金属材料的磨料磨损试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 64 – 67.
ZHANG Wei, WU Jinfeng, MA Guojun, et al. Experiment of metal materials abrasive wear for alfalfa powder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 64 – 67. (in Chinese)
[42] 宋月鹏,王伟,李法德,等. 稀土催渗碳氮硼共渗自磨刃割刀组织与性能研究[J]. 表面技术,2021,50(1):340 – 346.
SONG Yuepeng, WANG Wei, LI Fade, et al. Microstructure and properties of self-sharpening blades via carbon-nitron-boronized with rare elements catalysis[J]. Surface Technology,2021,50(1):340 – 346. (in Chinese)
[43] 宋月鹏,高雪,李法德,等. 超重力熔铸梯度材料制备饲草料收获机械自磨锐切刀[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(1):94 – 100.
SONG Yuepeng, GAO Xue, LI Fade, et al. Study on self-sharpening cutters for forage harvesting machine with functionally gradient material prepared by combustion synthesis melt-casting under ultra-gravity field[J]. Sci Sin Tech, 2018, 48(1): 94 – 100. (in Chinese)
[44] MOMIN M A, WEMPE P A, GRIFT T E, et al. Effects of four base cutter blade designs on sugarcane stem cut quality[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(5): 1551 – 1560.
[45] 张黎骅,罗惠中,周杨,等. 青贮玉米切叶蚁上颚仿生粉碎刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(12):48 – 56.
ZHANG Lihua, LUO Huizhong, ZHOU Yang, et al. Design and test of bionic crushing blade based on the mandible of the leaf-cutter ant for harvesting silage maize[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(12): 48 – 56. (in Chinese)
[46] 薛振鹏. 基于仿生功能模块的青贮装备割台设计[D]. 济南:济南大学,2022.
XUE Zhenpeng. Design of cutting platform for silage equipment based on bionic function module[D]. Jinan: University of Jinan, 2022. (in Chinese)
[47] 赵竹. 玉米收获机纵置切碎装置切刀-秸秆互作机理及刀刃仿生研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
ZHAO Zhu. Cutter-straw interaction mechanism of the longitudinal chopping device for the corn harvester and a study of the bionic blade[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[48] 韩志武,刘志刚,裴承慧,等. 基于外部形态仿生技术的沙柳平茬锯片设计与仿真[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版),2025,44(1):44 – 50.
HAN Zhiwu, LIU Zhigang, PEI Chenghui, et al. Design and simulation of salix cheilophila serrated blade based on external morphological biomimetics technology[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2025,44(1):44 – 50. (in Chinese)
[49] 王金栋,谢宇鸿,陈燚,等. 基于河狸门齿的锤片式粉碎机锤片仿生设计[J]. 工程设计学报,2023,30(4):476 – 484.
WANG Jindong, XIE Yuhong, CHEN Yi, et al. Biomimetic design of hammer pieces for hammer mill based on beaver incisors[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023,30(4): 476 – 484. (in Chinese)
[50] 田昆鹏,李显旺,沈成,等. 天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):56 – 61.
TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(5):56 – 61. (in Chinese)
[51] 李国聪,劳蔼鸿,白雨鑫,等. 留茬高度与收获期对渝青玉 3 号青贮玉米营养成分、霉菌毒素含量及肉牛瘤胃体外发酵参数的影响[J/OL]. 草业学报. https://link.cnki.net/urlid/62.1105.S.20250626.1344.002.
LI Guocong, LAO Aihong, BAI Yuxin, et al. Effects of stubble height and harvest period on the nutritional components, mycotoxin content and in vitro fermentation parameters of rumen in beef cattle of Yu Qingyu No. 3 silage corn[J/OL]. Acta Prataculturae Sinica. (in Chinese)
[52] 陈彦伶,田雄,周晓敏,等. 留茬高度对饲用杂交构树产量与营养品质的影响[J]. 贵州畜牧兽医,2024,48(6):25 – 28.
[53] 张腾薇,吕二锁,刘志萍,等. 留茬高度对全株大麦青贮品质的影响[J]. 中国草地学报,2022,44(7):87 – 92.
ZHANG Tengwei, LÜ Ersuo, LIU Zhiping, et al. Effects of stubble height on silage quality of whole barley[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(7): 87 – 92. (in Chinese)
[54] 耿爱军,张猛,张姬,等. 玉米收获机割台高度自动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊 2): 118 – 125.
GENG Aijun, ZHANG Meng, ZHANG Ji, et al. Design and experiment of automatic control system for corn header height[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 2):118 – 125. (in Chinese)
[55] 李亚军,向阳,林洁雯,等. 基于机器视觉的叶菜类蔬菜菜垄识别算法[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 88 – 98.
LI Yajun, XIANG Yang, LIN Jiewen, et al. Ridge recognition algorithm for leaf vegetables based on machine vision[J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(3):88 – 98. (in Chinese)
[56] SUN Y, XÜ L, BO J, et al. Development of a four-point adjustable lifting crawler chassis and experiments in a combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105416.
[57] 张聪. 收割机割台仿形与作物测高方法研究[D]. 南京:东南大学,2019.
ZHANG Cong. Research on header profiling and crop height measurement method[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)

[58] 刘伟健,罗锡文,曾山,等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报,2022,38(10):1 -9.
LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(10):1 -9. (in Chinese)
[59] 郭新年,周恒瑞,张国良,等. 基于激光视觉的农作物株高测量系统[J]. 农业机械学报,2018,49(2):22 -27.
GUO Xinnian, ZHOU Hengrui, ZHANG Guoliang, et al. Crop height measurement system based on laser vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2):22 -27. (in Chinese)
[60] 张振乾,彭程,孙意凡,等. 联合收获机喂入量监测系统信号分析与处理[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊1):73 -78.
ZHANG Zhenqian, PENG Cheng, SUN Yifan, et al. Signal analysis and processing of combine harvester feed rate monitoring system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(Supp.1):73 -78. (in Chinese)
[61] 张振乾,孙意凡,刘仁杰,等. 联合收获机喂入量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):85 -92.
ZHANG Zhenqian, SUN Yifan, LIU Renjie, et al. Design and test of feed rate monitoring system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):85 -92. (in Chinese)
[62] 汤玲玉. 联合收割机喂入量检测系统设计及检测方法研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
TANG Lingyu. Design of combine harvester feeding rate detection system and research on the detection method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2021. (in Chinese)
[63] 陈旭,何勋,朱晨辉,等. 谷物联合收获机喂入量检测技术研究现状与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报,2025,6(1):71 -80.
CHEN Xu, HE Xun, ZHU Chenhui, et al. Research status and development trend of feed quantity detection technology for grain combine harvester[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025,6(1):71 -80. (in Chinese)
[64] WANG F, WANG J, JI Y, et al. Research on the measurement method of feeding rate in silage harvester based on components power data[J]. Agriculture, 2023,13(2):391.
[65] MATHANKER S K, BUSS J C, GAN H, et al. Stem bending force and hydraulic system pressure sensing for predicting napiergrass yield during harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 111: 174 -178.
[66] 赵胜华,张国忠,张仕杰,等. 基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒实时喂入量测量系统设计[J]. 华中农业大学学报,2020,39(2):160 -169.
ZHAO Shenghua, ZHANG Guozhong, ZHANG Shijie, et al. Designing a real-time feed measurement system for horizontal axial flow threshing drum based on thin film sensor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020,39(2):160 -169. (in Chinese)
[67] 张姝琦. 基于机器视觉的油菜收获喂入量及品质监测[D]. 南京:南京大学,2021.
ZHANG Shuqi. Monitoring the feeding quantity and quality of rape harvest based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese)
[68] WHITMIRE C D, VANCE J M, RASHEED H K, et al. Using machine learning and feature selection for alfalfa yield prediction[J]. AI,2021,2(1):71 -88.
[69] WANG D, BUCKMASTER D R, JIANG Y, et al. Experimental study on baling rice straw silage[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2011, 4(1): 20 -25.
[70] CHEN M, XU G, WEI M, et al. Optimization design and experiment on feeding and chopping device of silage maize harvester [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(3): 64 -77.
[71] 王征,宋占华,刘平,等. 铡草机切碎辊作物喂入矢角参数模型建立与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):200 -211.
WANG Zheng, SONG Zhanhua, LIU Ping, et al. Development and experiment of crop feeding angle parameter model in chopping roll of hay cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(7):200 -211. (in Chinese)
[72] WILLI B, MARKUS B. Metal detection device: U S Patent 7,489,130[P]. 2009 -02 -10.
[73] BOHMAN C E. Metal detector apparatus: U S Patent 4,433,528[P]. 1984 -02 -28.
[74] New Holland. Adaptive thresholding for metal detection: EP0735384A2[P]. 1996 -02 -10.
[75] BENNETT J C L, DE L J D, DURLING J H P. Static magnetic field metal detector: U S Patent 3,889,249[P]. 1975 -06 -10.
[76] STROSSER R P, CHOW M K, BOHMAN C E. Magnetic field producing apparatus: U S Patent 4,344,074[P]. 1982 -08 -10.
[77] BYTTEBIER WARD M R, PAQUET BERT J F. Foreign object detection system for agricultural harvesting machines: US20070277491A1[P]. 2007 -12 -06.
[78] 姚则. 青贮机金属异物探测系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2019.
YAO Ze. Research on metal detection system of silage machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[79] 李洋. 青贮机铁磁性金属探测系统开发与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2023.
LI Yang. Development and experiment of ferromagnetic metal detection system for silage machine[D]. Beijing: China Agricultural University,2023. (in Chinese)
[80] SUAREZ M F X, ZANTON G I, HEINRICHS A J. Effect of forage particle length on rumen fermentation, sorting and chewing activity of late-lactation and non-lactating dairy cows[J]. Animal, 2013, 7(2): 272 -278.
[81] NEDELCU A, CIUPERCA R, ZAICA A, et al. Influence of forage harvester chopping equipment on characteristics of chips [C]// Proceedings of 19th International Scientific Conference,2020: 1319 -1324.
[82] BELOV M I. Precision cut forage harvester chopper units and particle length distribution[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2019, 21(4): 83 -89.

[83] FERRARETTO L F, SHAVER R D. Effect of corn shredlage on lactation performance and total tract starch digestibility by dairy cows[J]. The Professional Animal Scientist, 2012, 28(6): 639 - 647.
[84] 谢新亚,姚河江,王灿博,等. 轮盘式切碎器自动磨刀装置的设计[J]. 农业科技与装备,2020(6):11 - 13.
XIE Xinya, YAO Hejiang, WANG Canbo, et al. Design of automatic knife grinder for wheel disc cutter[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2020(6): 11 - 13. (in Chinese)
[85] 方梅,别镇江,郁志宏,等. 盘刀式铡草机切割性能试验研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(2):67 - 72.
FANG Mei, BIE Zhenjiang, YU Zhihong, et al. Experimental study on cutting performance of disc cutter chaff cutter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(2):67 - 72. (in Chinese)
[86] 别镇江. 铡草机切碎器切割过程有限元仿真分析及切碎器性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
BIE Zhenjiang. Finite element simulation analysis of the cutting process of chaff cutter and experimental study on the performance of the cutter[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2019. (in Chinese)
[87] 郁志宏,闫彪彪,王光明,等. 9Z - 6A 型盘刀式铡草机切碎器改进设计与性能试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 151 - 155.
YU Zhihong, YAN Biaobiao, WANG Guangming, et al. Experimental study on the performance of 9Z - 6A disc-knife chaff cutter after improved[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(12):151 - 155. (in Chinese)
[88] 王教滨,阿力木·买买提吐尔逊,姚河江,等. 青饲料收获机切碎器自动磨刀装置设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(11):45 - 52,58.
WANG Jiaobin, ALIMU Maimait Tursun, YAO Hejiang, et al. Design and test of automatic sharpening device for chopper of green fodder harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(11):45 - 52,58. (in Chinese)
[89] 王教滨,阿力木·买买提吐尔逊,李谦绪,等. 青饲料收获机切碎装置设计与试验[J]. 农机化研究,2024,46(5):31 - 36,44.
WANG Jiaobin, ALIMU Maimait Tursun, LI Qianxu, et al. Design and test of shredding device of green feed harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(5):31 - 36,44. (in Chinese)
[90] 王海翼. 仿生河狸门齿青饲料切碎刀具设计方法及滑切特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2025.
WANG Haiyi. Study on bionic design method and sliding cutting characteristics of silage chopping blade for beaver incisors [D]. Beijing: China Agricultural University, 2025. (in Chinese)
[91] 尤泳,王红达,郇晓龙,等. 王草收获机滚筒破碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):134 - 142.
YOU Yong, WANG Hongda, HUAN Xiaolong, et al. Design and experiment of roller crushing device of king grass harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):134 - 142. (in Chinese)
[92] 王宏立,王文春,杨天维,等. 青饲机平板刀式滚筒切碎器的设计研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2004,16(3):45 - 52.
WANG Hongli, WANG Wenchun, YANG Tianwei, et al. Design on plane table-knife drum cutter of the verdant forage harvester[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2004,16(3):45 - 52. (in Chinese)
[93] 薛钊,付君,陈志,等. 青饲玉米收获机械切碎装置参数优化试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(2):739 - 748.
XUE Zhao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization experiment on parameters of chopping device of forage maize harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2020,50(2):739 - 748. (in Chinese)
[94] 贺智涛,丁慧玲,李健,等. 秸秆切割问题研究综述[J]. 机械设计与制造,2023(8):277 - 284.
HE Zhitao, DING Huiling, LI Jian, et al. Review of researches on stalk cutting[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023 (8):277 - 284. (in Chinese)
[95] OKYERE F G, KIM H T, BASAK J K, et al. Influence of operational properties and material's physical characteristics on mechanical cutting properties of corn stalks[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2022, 47(2): 197 - 208.
[96] JOHNSON P C, CLEMENTSON C L, MATHANKER S K, et al. Cutting energy characteristics of miscanthus x giganteus stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 42 - 48.
[97] 曹江. 高能效铡草机切碎器机理及能效表征[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
CAO Jiang. Energy efficiency and mechanism characterization of high efficiency chaff cutter[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2021. (in Chinese)
[98] VU V D, NGO Q H, NGUYEN T T, et al. Multi-objective optimization of cutting force and cutting power in chopping agricultural residues[J]. Biosystems Engineering, 2020, 191: 107 - 115.
[99] BOCHAT A, ZASTEMPOWSKI M. Kinematics of drum movement of the cutting unit of a straw cutter[J]. Journal of Polish CIMAC, 2012, 7(3): 11 - 16.
[100] LISOWSKI A, ŚWIATEK K, KLONOWSKI J, et al. Movement of chopped material in the discharge spout of forage harvester with a flywheel chopping unit: measurements using maize and numerical simulation[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111 (4): 381 - 391.
[101] 蒙哲靖. 履带式青贮玉米油菜两用收获机物料切抛装置设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
MENG Zhejing. Design and experiment of chopping and throwing device for crawler-type silage corn and rape dual-purpose harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023. (in Chinese)
[102] 李宁. 滚刀式果园枝条粉碎装置的设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2022.
LI Ning. The design and research of the cutter-type orchard branch crushing device[D]. Shihezi: Shehezi University,2022. (in Chinese)
[103] 蒋亚军. 饲用油菜收获机关键装置设计及试验[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
JIANG Yajun. Design and test of key equipments for fodder rapeseed harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2019. (in Chinese)
[104] ZHAO Z, WANG Z N, ZHAO B, et al. Design and research of a cutting blade for corn stalks based on a bionic principle

[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2022,68(3):711 - 721.
[105] HU J, XU L, YU Y, et al. Design and experiment of bionic straw-cutting blades based on locusta migratoria manilensis[J]. Agriculture, 2023, 13: 2231.
[106] HUANG H, CHEN W K, KURIYAGAWA T. Profile error compensation approaches for parallel nanogrinding of aspherical mold inserts[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(15):2237 - 2245.
[107] MAHMOODI E M, EBRAHIMI R, GHANBARIAN D, et al. Geometric characterization of moldboard plough using coupled close photography and surface fitting model[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170:122 - 129.
[108] AGUILAR M A, AGUILAR F J, AGUERA F, et al. The evaluation of close-range photogrammetry for the modelling of moldboards plough surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 397 - 407.
[109] 赵波. 青贮机切碎器自动磨刀系统研发[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
ZHAO Bo. Research and development of automatic knife sharpening system for silage cutter[D]. Wrumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[110] 滕绍民,华荣江,兰宁,等. 青饲料收获机自动磨刀装置及弧形弯刀设计[J]. 农业工程,2022,12(6):100 - 103.
TENG Shaomin, HUA Rongjiang, LAN Ning, et al. Design on automatic knife sharpening device and curved cutlass for silage harvester[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(6): 100 - 103. (in Chinese)
[111] 中机美诺 9265A 型自走式青饲料收获机[J]. 农业机械,2022(8):32.
[112] 李社潮. 2019 中国国际农机展 10 大青贮收获机[J]. 农业机械,2020(1):27 - 28.
[113] 郑宇光,贺静. 4QZ - 20 型青饲料收获机自动磨刀电气智能化控制系统硬件和软件设计[J]. 农业机械, 2021(12): 73 - 77.
[114] 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司. 收获机中动定刀调距装置以及收获机中动定刀调距方法: 202410559654.1[P]. 2024 - 07 - 12.
[115] 陈美舟,徐广飞,宋志才,等. 青贮收获机动定刀间隙自动调节装置与控制系统研究[J]. 农业机械学报,2022,53(11): 188 - 196.
CHEN Meizhou, XU Guangfei, SONG Zhicai, et al. Design and experiments of clearance automatic adjusting test bench and control system for silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 188 - 196. (in Chinese)
[116] 李雷霞,赫志飞,顾玲玲,等. 青贮饲料收获机电控磨刀装置设计[J]. 农业工程, 2018, 8(7): 95 - 97.
LI Leixia, HE Zhifei, GU Lingling, et al. Design of electric control sharpener device for silage harvester[J]. Agricultural Engineering,2018, 8(7): 95 - 97. (in Chinese)
[117] WALTHER V, STEIN D, WILD, K. Change in knife sharpness on forage chopper and its consequences for knife sharpening [J]. Agricultural Engineering, 2011, 66(3):173 - 175.
[118] 约翰迪尔 8000 系列青饲料收获机最新技术 Procut 系统斩获金奖[J]. 现代化农业,2016 (12):63.
[119] 卢妍妍,石博. 约翰迪尔 8400 型自走式青饲料收获机(二)[J]. 现代化农业,2016(7):42.
[120] SIEBALD H, PFORTE F, KULIG B, et al. Referencing acoustic monitoring of cutting knives sharpness in agricultural harvesting processes using image analysis[J]. Biosystems Engineering,2023,226:86 - 98.
[121] JOHNSON L M, HARRISON J H, DAVIDSON D, et al. Corn silage management: effects of hybrid, maturity, inoculation, and mechanical processing on fermentation characteristics[J]. Journal of Dairy Science, 2003,86(1):287 - 308.
[122] VANDERWERFF L, FERRARETTO L F, SALVATI G, et al. Update on corn shredlage for dairy cows[J]. Focus on Forage,2014,16:4.
[123] JANČÍK F, KUBELKOVÁ P, LOUČKA R, et al. Shredlage processing affects the digestibility of maize silage[J]. Agronomy,2022, 12: 1164.
[124] DEERE & COMPANY. Conditioning device for a forage harvester:US201313898925[P]. 2015 - 03 - 31.
[125] 张琦峰,谢焕雄,胡志超,等. 悬挂式青贮机调质装置的设计及试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(10):164 - 168.
ZHANG Qifeng, XIE Huanxiong, HU Zhichao, et al. Design and experimental study of conditioning device for suspension silage machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020, 42(10):164 - 168. (in Chinese)
[126] 杨硕林,陈锦源,张华,等. 青贮玉米收获机械喂入粉碎装置设计[J]. 山东农业工程学院学报,2022,39(7):31 - 35.
YANG Shuolin, CHEN Jinyuan, ZHANG Hua, et al. Design of feeding and crushing device for silage corn harvesting machinery[J]. The Journal of Shandong Agriculture and Engineering University, 2022,39(7):31 - 35. (in Chinese)
[127] 耿端阳,孙延成,牟孝栋,等. 基于差速辊的青贮玉米籽粒破碎仿真试验及优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2022, 52(3):693 - 702.
GENG Duanyang, SUN Yancheng, MU Xiaodong, et al. Simulation test and optimization of grain breakage of silage maize based on differential roller[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(3): 693 - 702. (in Chinese)
[128] 耿端阳,牟孝栋,孙延成,等. 青贮玉米螺旋缺口锯齿型揉丝破碎辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12): 134 - 141.
GENG Duanyang, MU Xiaodong, SUN Yancheng, et al. Simulation and test of silage corn screw notched sawtooth type crushing roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 134 - 141. (in Chinese)
[129] 牟孝栋,姜慧新,孙延成,等. 青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 218 - 226.
MOU Xiaodong, JIANG Huixin, SUN Yancheng, et al. Simulation optimization and experiment of disc-type grain crushing device of silage corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp1): 218