

冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验

蒋亚军¹ 廖宜涛¹ 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游地区饲用油菜生物量大、含水率高, 缺乏适用收获机械的问题, 开展了冬春鲜喂饲用油菜机械化收获切碎装置设计与试验。根据物料特性、切碎及抛送等作业要求, 确定了平板型滚刀式切碎装置主要结构参数和作业参数; 采用单因素与二次旋转正交组合试验研究了喂入压辊转速与切碎器主轴转速对茎秆切碎长度合格率和功耗的影响, 构建了长度合格率和功耗与喂入压辊转速和切碎器主轴转速的回归方程, 优化得出了最佳作业参数。试验结果表明: 喂入压辊转速为 400 ~ 550 r/min, 切碎器主轴转速为 600 ~ 800 r/min, 茎秆切碎长度合格率较优。优化得出喂入压辊转速 496.17 r/min、切碎器主轴转速为 709.14 r/min 时, 茎秆切碎长度合格率为 91.16%。采用平板型滚刀式切碎装置开展鲜喂饲用油菜收获田间试验和饲喂试验表明: 收获饲用油菜切碎茎秆长度满足饲用油菜冬春鲜喂要求。

关键词: 饲用油菜; 切碎装置; 滚刀式切碎器; 试验

中图分类号: S225.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0102-10

Design and Experiment on Cylinder-type Chopping Device of Harvester for Fodder Rapeseed in Winter and Spring

JIANG Yajun¹ LIAO Yitao¹ LIAO Qingxi^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Fodder rapeseed is a good quality feed crop, and it can effectively alleviate the problem of lack of green feed for livestock in winter and spring. Because of high water content and crispy texture of fodder rapeseed, there is a lack of applicable harvesting machinery in Mid-lower Yangtze River. To solve the problems, a kind of cylinder-type chopping device was designed. The structure and operation parameters of chopping device were analyzed through material properties and the requirements of cutting and throwing operations. Single factor experiment and rotation regression design were carried out to study the effects of feeding roller and cutterhead rotational speed on length qualified rate and power. The regression equation of the relationship between feeding roller and cutterhead rotational speed, and the length qualified rate and power was obtained. The results showed that the length qualified rate was better when the feeding roller rotational speed was 400 ~ 550 r/min and the cutterhead rotational speed was 600 ~ 800 r/min. The optimum operation condition was: the feeding roller rotational speed was 496.17 r/min, the cutterhead rotational speed was 709.14 r/min. Under this condition, the length qualified rate was 91.16% by calculation. What was more, the field experiment of fodder rapeseed harvester was conducted. It turned out that the cylinder-type chopping device worked well and the length qualified rate met the requirements of feeding. The results could provide support for optimization of the cylinder-type chopping device and the improvement of the overall structure for fodder rapeseed harvester.

Key words: fodder rapeseed; chopping device; cylinder-type cutterhead; experiment

收稿日期: 2018-11-23 修回日期: 2018-12-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662018JC005)、湖北省现代农业产业技术体系(高效冬春饲用作物)专项和农业农村部科研杰出人才及创新团队项目

作者简介: 蒋亚军(1990—), 男, 博士生, 主要从事油菜收获技术与装备研究, E-mail: hzauiyjun@163.com

通信作者: 廖庆喜(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

0 引言

油菜是我国长江中下游地区主要秋种夏收作物,既是优质油料作物,又是优质蜜源、大规模观花旅游、优质鲜饲和青贮饲料作物,极具发展潜力^[1]。饲用油菜是在冬春季节刈割油菜苗期到尾花期全株用于鲜喂或青贮饲喂牲畜的饲料,其生物量大、产量高、营养丰富、成本低,可有效缓解牲畜缺乏青饲料的问题^[2];特别是冬春季节辅助主料鲜喂,可促进牲畜生长,缩短育肥周期,降低饲喂成本。要促进饲用油菜作物生产的快速发展,推进农牧种养深度融合,轻简高效的机械化生产技术是关键。目前适应于油菜种植农艺要求的轻简高效精量联合播种装备已经在生产中得到推广应用^[3],但缺乏适应的饲用油菜轻简高效收获装备,由人工刈割油菜直接饲喂或切碎后饲喂,劳动量大、效率低。

国内外现有饲料作物收获机主要针对玉米、牧草等青贮收获,收获机主要包括割台总成、喂入装置、切碎装置、抛送装置等。为提高收获机适应性,车刚等^[4-5]研制了盘刀式揉搓切碎装置,其切碎饲料质量好、生产效率高。国外茎秆切碎装置多采用滚刀式切碎器^[6-8],可实现切碎长度无级可调。为满足青贮物料发酵条件,现有切碎装置^[9-14]主要采用具有揉搓功能的盘刀式切碎装置和带有籽粒破碎装置的滚刀式切碎装置。

前期研究发现盘刀式切碎装置用于饲用油菜收获,物料受过度揉搓挤压,导致物料汁水溢出无法饲喂,而且切碎后物料易堵在长而窄的输送通道内而无法继续作业。在此基础上本文针对饲用油菜含水率高、质地脆嫩,易于剪切、挤压破损的特点,设计一种适用于饲用油菜的滚刀式切碎装置,以满足切碎和饲喂要求。通过田间试验,测试其工作性能和效率以验证其工艺路线的可行性,为后续饲用油菜收获机研发和优化提供参考。

1 物料特性及收获难点

冬春鲜喂饲用油菜物料特性是设计饲用油菜收

获机及其关键部件的基础。选取饲用油菜主推品种华油杂 62,在湖北省潜江市饲用油菜试验基地开展试验。油菜生长状态如图 1a~1c 所示,生物量跟踪测试表明油菜盛花期生物量最大,可达 75 000 kg/hm²,而苜蓿、红豆草等饲草作物生物量^[15]在 9 000 kg/hm²左右,饲用油菜优势明显;盛花期生物量比苗期高约 40%,比果荚期高约 10%,原因是花期油菜茎秆粗蛋白、粗脂肪含量最高,结实后植株茎叶营养向果荚转移,干物质积累速率下降,因此饲用油菜花期是最佳收获期。

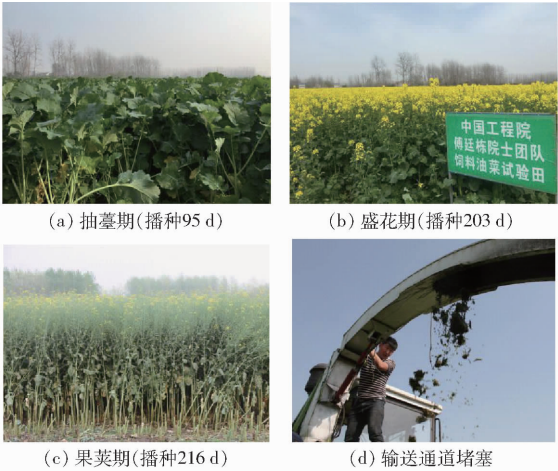


图 1 植株形态与输送通道堵塞

Fig. 1 Plant morphology and blocked congestion channel

分别测定饲用油菜抽薹期、盛花期和果荚期的植株物理机械特性,结果如表 1 所示。饲用油菜茎秆和叶片含水率均在 83% 以上,常用玉米等饲料作物收获时的含水率在 75% 以下^[16],油菜茎秆随着生长过程的变化,其含水率降低,木质化程度增加,茎秆弯曲强度、抗压强度和剪切强度增加,但显著低于玉米、牧草^[17]等作物。

综上所述,饲用油菜是含水率高、质地脆嫩、易于剪切、挤压破损的作物,因此现有收获机械采用盘刀式或具有挤压破碎功能的滚刀式切碎方式,收获效果均不理想。图 1d 为前期研究采用盘刀式切碎方式收获情况,切碎物料呈糊状,易粘附在通道管壁上造成输送通道堵塞,且饲喂效果不佳。

表 1 饲用油菜主要物理特性参数

Tab. 1 Main physical characteristics parameters of fodder rapeseed

品种	生长期	株高/ mm	鲜质量/ g	干质 量/g	茎叶比	茎秆含水 率/%	叶片含水 率/%	最大株径/ mm	平均产量/ (kg·m ⁻²)	弯曲强度/ MPa	轴向抗压 强度/MPa	剪切强度/ MPa
华油杂 62	抽薹期	861.14	163.57	14.31	1.33	93.64	90.17	14.21	3.98	1.96	0.44	0.36
	盛花期	1 258.31	285.83	41.27	15.35	85.16	86.54	22.07	7.57	2.47	1.76	0.95
	果荚期	1 413.23	257.14	42.25	52.88	83.25	84.58	28.26	6.91	4.72	2.15	1.64

注:茎叶比为茎秆鲜质量与叶片鲜质量比。

2 饲用油菜收获机设计与工作过程

2.1 模块化结构设计

为降低饲用油菜机械化收获成本投入,将模块化设计方法(MDM)应用到饲用油菜收获机研发中,对长江中下游保有量大的履带式谷物联合收获机进行功能定义及分解。对比分析谷物机械化收获与饲用油菜机械化收获工艺流程,其中行走功能、切割功能和输送功能与谷物联合收获功能需求一致。为实现饲用收获与谷物收获功能切换,通过对切碎功能和饲用油菜集卸功能模块组合重构,实现饲用油菜收获机的快速响应设计,其工艺流程与模块分类如图2所示。

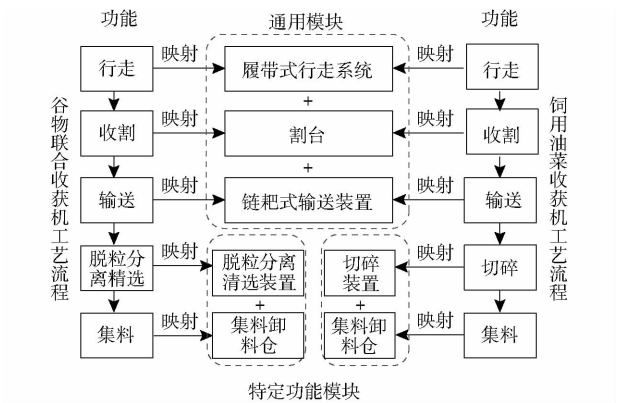


图2 工艺流程与模块分类

Fig.2 Technological process and module classified

将切碎装置和饲用油菜集料仓根据模块之间标准化和通用化设计原则,按照收获机功能需求变化对模块进行增减和替换的要求,实现收获机功能的快速重构。切碎装置与集料仓均采用螺栓连接安装于收获机底盘后方,总体结构如图3所示。主要技术参数如表2所示。

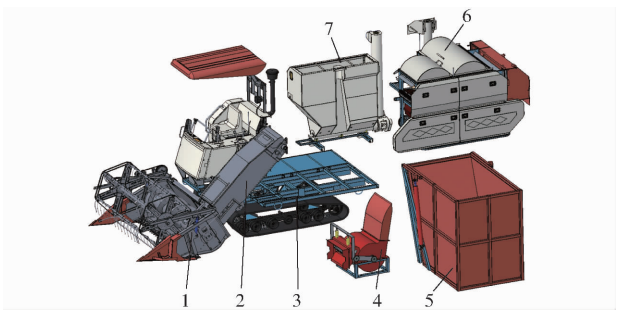


图3 饲用油菜收获机总体结构图

Fig.3 Structure of fodder rapeseed harvester

1. 割台 2. 链耙式输送装置 3. 履带行走系统 4. 饲用油菜滚刀式切碎装置 5. 饲用油菜集料卸料仓 6. 谷物脱粒分离精选装置 7. 谷物收获集料卸料仓

2.2 滚刀式切碎装置工作过程

根据物料不同状态,可将切碎装置工作过程分为4个阶段:抓取压实阶段、切削挤压阶段、切断推

表2 饲用油菜收获机主要技术参数
Tab.2 Major technical parameters of fodder rapeseed harvester

参数	形式/数值
结构形式	履带自走式
配套动力/kW	72
长×宽×高/(mm×mm×mm)	5 000×2 880×3 020
割幅/mm	2 000
最小离地间隙/mm	290
切碎装置形式	平板型滚刀式
集料卸料方式	液压自卸
最大装料量/kg	750
整机质量/kg	3 005
工作效率/($\text{hm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	0.33~0.53

送阶段、抛掷吹送阶段。抓取压实阶段,即物料由链耙式输送装置喂入喂入口时,自适应调节喂料结构将物料压实后均匀喂入。切削挤压阶段,即物料进入喂入口后,动刀以一定的线速度切割物料,在切割过程中,动刀对物料产生滑切的同时还存在一定的挤压。切断推送阶段,即随着切碎器主轴转动,动刀将切碎后的物料沿罩壳内壁圆弧推送至罩壳切向方向,在离心力作用下被抛掷。抛掷吹送阶段,即动刀对切碎后的物料提供足够速度,沿抛送罩壳内壁被抛出至集料卸料装置。待物料装满后由液压油缸将集料卸料装置翻卸至运输车。其工作过程如图4所示。

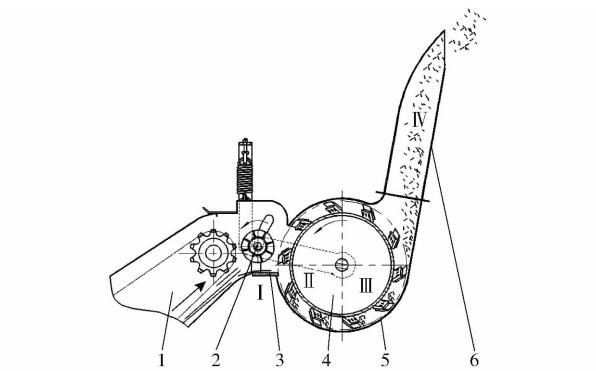


图4 切碎装置工作示意图

Fig.4 Schematic of chopping device

1. 链耙式输送装置 2. 自适应调节喂料机构 3. 定刀 4. 滚刀式切碎器 5. 切碎装置壳体 6. 抛送罩壳 I. 抓取压实阶段 II. 切削挤压阶段 III. 切断推送阶段 IV. 抛掷吹送阶段

3 切碎装置关键部件设计与分析

滚刀式切碎装置主要由自适应调节喂料机构、喂入口罩壳、下罩壳、支架、滚刀式切碎器、上罩壳等组成,其中自适应调节喂料机构和滚刀式切碎器是其关键部件,其结构如图5所示。

3.1 自适应调节喂料机构

饲用油菜在不同收获期生物量差异大,且不同

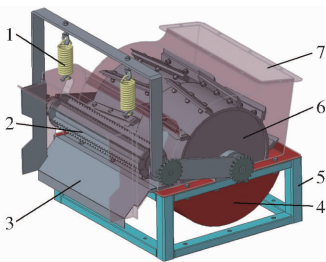


图 5 切碎装置结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of chopping device

1. 自适应调节喂料机构 2. 喂入压辊 3. 喂入口罩壳 4. 下罩壳 5. 支架 6. 滚刀式切碎器 7. 上罩壳

地块和播种量造成生物量分布不均,因此切碎装置喂料机构需满足大波动喂入量下物料的顺畅喂入。本文设计一种自适应调节喂料机构,由支撑架、吊环螺钉、圆柱螺旋拉伸弹簧、罩壳、轴承座、滚筒、牙板、喂入压辊轴和支撑侧板组成,如图 6 所示。根据饲用油菜收获过程中喂入量的变化,喂入压辊可绕着切碎器主轴上下浮动,从而实时自动调节喂入压辊与喂入底板之间的间隙,以适应喂入量波动,避免因喂入量过大造成切碎装置喂入口堵塞,提高切碎装置对喂入量的适应性。

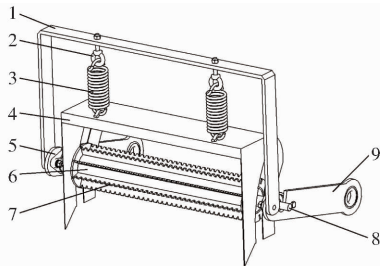


图 6 自适应调节喂料机构结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of adaptive adjustable mechanism of feedstock

1. 支撑架 2. 吊环螺钉 3. 圆柱螺旋拉伸弹簧 4. 罩壳 5. 轴承座 6. 滚筒 7. 牙板 8. 喂入压辊轴 9. 支撑侧板

切碎器主轴通过链传动将动力传递给喂入压辊轴,带动喂入压辊转动,并在弹簧等辅助部件的共同作用下将输送链耙送过来的物料压实,均匀地喂入至切碎器等待切割。为提高喂入压辊的抓取能力,滚筒上的牙板刃口设计成锯齿形,增大牙板与物料之间的摩擦力。

喂料机构的喂入作用依靠转动的喂入辊对物料挤压所产生的摩擦力,假设喂入前物料层厚度为 H_g ,经喂入辊压实后物料层厚度为 h_g ,其喂入过程受力分析如图 7 所示,为使物料顺利喂入,需满足

$$\begin{cases} f_g \cos \theta_g - F_N \sin \theta_g > 0 \\ f_g = F_N \tan \varphi_g \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_g ——压辊对物料的摩擦力,N
 F_N ——压辊对物料的正压力,N

θ_g ——压辊回转中心与正压力夹角, ($^\circ$)
 φ_g ——压辊对物料的摩擦角, ($^\circ$)

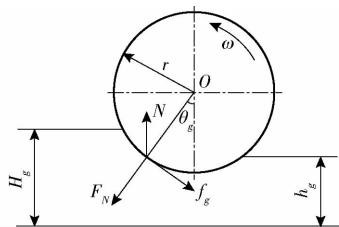


图 7 物料在喂入区受力分析

Fig. 7 Mechanics analysis of material in feeding zone

喂入压辊需要满足 $\varphi_g > \theta_g$ 的基本条件才能使物料层顺利喂入。喂入压辊半径 r 为

$$h_g + r = H_g + r \cos(2\theta_g) \quad (2)$$

当 $\varphi_g = \theta_g$ 时,最小喂入压辊半径 $r_{\min}$ 为

$$r_{\min} = \frac{H_g - h_g}{1 - \cos(2\varphi_g)} \quad (3)$$

取喂入前物料层最大厚度 H_g 为 0.06 m,经喂入辊压实后物料层厚度 h_g 为 0.045 m, φ_g 为 20° ,通过式(3)计算得 $r_{\min} = 0.064$ m,根据结构选取 $r = 0.07$ m。

3.2 滚刀式切碎器

滚刀式切碎器采用平板式,主要由滚筒基座、滚筒主轴、动刀座、动刀、动刀护板等组成,其结构如图 8 所示。



图 8 滚刀式切碎器

Fig. 8 Cylinder-type cutterhead

1. 动刀座 2. 滚筒基座 3. 切碎器主轴 4. 动刀 5. 动刀护板

3.2.1 动刀结构参数设计

动刀刃口为直线形,其刃口曲线可近似认为椭圆曲线的一部分,椭圆曲线由平板刀刃底面与滚筒中心线成一定角度倾斜相截时形成,刃口曲线取椭圆曲线接近平直的一段以保证平板刀刃 AB 的运动轨迹近似为圆柱面,其结构参数如图 9 所示。

从图 9 中可得到椭圆曲线的方程为

$$\frac{X^2}{R^2} + \frac{Z^2}{\left(\frac{R}{\sin \alpha}\right)^2} = 1 \quad (4)$$

动刀刃结构参数间的关系为

$$\begin{cases} X = R \cos \varphi \\ Z \tan \alpha = R \sin \varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中 X 、 Z ——刀刃上某点的坐标值,m

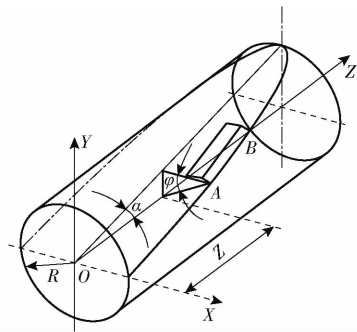


图 9 动刀在滚筒上结构参数

Fig. 9 Structure parameters of locomotory knife on cylinder

- α ——动刀底面所在平面与主轴中心线的夹角, (°)
- R ——刀刃轨迹半径, m
- φ ——刀刃上某点的安装前倾角, (°)

谷物联合收获机输送链耙内槽宽度为 0.55 m, 取切碎滚筒宽度为 0.60 m, 计算得动刀片长度为 0.29 m。取刀刃轨迹半径 $R = 0.25$ m, 试验表明, 动刀安装前倾角 φ 越大, 其切碎性能越好, 但抛送性能越差。适收期饲用油菜茎秆含水率高、切碎难度小, 为兼顾切碎器抛送性能, 取 A 点安装前倾角 $\varphi_A = 30^\circ$ 。由动刀刃参数方程式(4)、(5)可计算取整得 B 点的安装前倾角 $\varphi_B = 37^\circ$ 。倾斜角 α 受切碎器结构限制, 设计中取 $\alpha = 5^\circ$, 动刀刃角取 20° 。

3.2.2 切割过程运动学分析

切碎器工作时, 动刀围绕切碎器主轴做顺时针圆周运动。为保证切碎过程为滑切, 以减少功耗, 动刀需倾斜安装, 并与定刀有一夹角, 使得动刀与定刀始终处于滑切状态。分析动刀和定刀运动方式, 如图 10 所示。

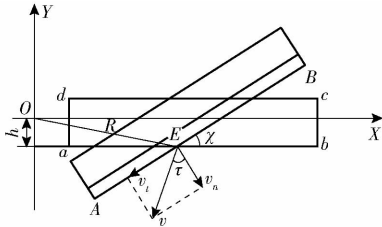


图 10 动刀运动简图

Fig. 10 Kinematic diagram of locomotory knife

当动刀刃 AB 旋转到喂入口 abcd 的开始点 d 处时, 开始切割物料; 运动到 a 点时, 在定刀刃 ab 的作用下做有支撑切割; 运动到 b 点完成一次切割。取动刀与定刀刃线相交点 E, 将动刀刃线上 E 点的速度 v 分为沿刃口方向的滑切速度 v_t 和垂直刃口方向的正切速度 v_n , v_t 与 v 之间的夹角为滑切角 τ , 动刀刃 AB 与定刀刃 ab 夹角为推挤角 χ , 则推挤角与滑切角的关系为

$$\frac{h}{\sqrt{R^2 - h^2}} = \tan(\tau - \chi) \tag{6}$$

整理得

$$\tan \tau = \frac{h - \sqrt{R^2 - h^2} \tan \chi}{\sqrt{R^2 - h^2} + h \tan \chi} \tag{7}$$

$$h = \frac{R \tan(\tau - \chi)}{\sqrt{\tan^2(\tau - \chi) + 1}} \tag{8}$$

式中 h ——定刀配置高度, m

由式(6)、(7)可知, 推挤角与滑切角成正比关系, 滑切角过大引起推挤角过大。切碎过程中, 选择合理的滑切角可使切割单位面积所需的功率最小。根据试验采用直线刃口的动刀, 取滑切角范围为 $10^\circ \sim 18^\circ$, 推挤角范围为 $4^\circ \sim 8^\circ$ [18]。设计中取滑切角 $\tau = 10^\circ$, 推挤角 $\chi = 5^\circ$, 由式(8)计算得出定刀配置高度 $h = 43.41$ mm, 取 43 mm。

3.2.3 抛送过程运动学分析

切碎物料离开抛料口的运动可视为斜上抛运动。在初速度 v_p 所在的竖直平面内, 选定切碎器主轴中心位置为坐标原点 O, 取水平方向为 X 轴, 竖直方向为 Y 轴, 如图 11 所示。

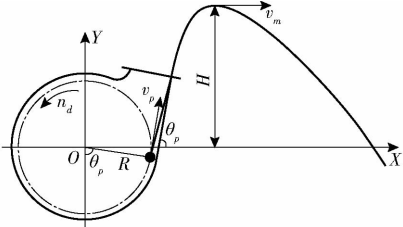


图 11 物料抛送轨迹

Fig. 11 Trajectory of material throwing

不能忽视空气阻力对离开抛料口物料斜上抛运动的影响。空气阻力非常复杂, 与空气的密度和物料的运动速度、形状和体积等因素有关。在低速情况下 (200 m/s), 可认为空气阻力与物料速度一次方成正比 [19]。由运动学公式和牛顿第二定律得出物料运动轨迹方程

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -b_1 \frac{\partial x}{\partial t} \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -b_1 \frac{\partial y}{\partial t} - mg \\ x|_{t=0} = 0 \\ v_x|_{t=0} = v_p \cos \theta_p \\ y|_{t=0} = -R \cos \theta_p \\ v_y|_{t=0} = v_p \sin \theta_p \end{cases} \tag{9}$$

- 式中 m ——物料质量, kg
- x, y ——物料在 t 时刻的轨迹坐标值, m
- t ——物料运动时间, s
- b_1 ——空气阻力系数, kg/s

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2
 $v_x、v_y$ ——物料在 t 时刻的速度分别在 $X、Y$ 轴上的投影, m/s
 v_p ——物料的初速度, m/s
 θ_p ——物料抛出轨迹与水平方向夹角,即出射角, $(^\circ)$

将式(9)采用分离变量法得到位移关系方程

$$\begin{cases} x = \frac{m}{b_1} v_p \cos \theta_p (1 - e^{-\frac{b_1 t}{m}}) \\ y = \left(\frac{m^2 g}{b_1^2} + \frac{m v_p \sin \theta_p}{b_1} \right) (1 - e^{-\frac{b_1 t}{m}}) R \cos \theta_p - \frac{m g t}{b_1} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,物料质量和空气阻力系数影响水平射程和竖直射程,切碎后的茎秆因质量大且空气阻力系数小,水平射程和竖直射程都比叶片的射程大。给定物料初速度,如果出射角太大,则切碎物料运动将接近直上直下,水平射程不会很远。如果出射角太小,则由于重力加速度的影响,切碎物料不会在空中经历很长时间,水平距离也不会很远。

切碎器主轴转速越高,刀刃顶部线速度越高,输送能力也越高,要实现物料顺利抛送至集料仓需满足

$$v_p = \frac{(1 + \mu_2) \sqrt{v_m^2 + 2gH(1 + \mu_1)}}{\sin \theta_p} \quad (11)$$

式中 μ_1 ——壳体内壁摩擦及空气阻力损失系数,取 0.22

μ_2 ——物料与动刀发生碰撞损失系数,取 0.65

v_m ——物料到达最高点处速度, m/s

H ——物料抛送高度,取 0.5 m

要满足物料能顺利抛送至集料仓内,并保证至少能填满 $2/3$ 的容积,则物料到达最高点速度 v_m 范围为 $8 \sim 12\text{ m/s}$ ^[20],取抛料口倾斜角为 $\theta_p = 80^\circ$,由式(11)计算得出切碎器刀刃线速度 v_p 为 $14.64 \sim 20.98\text{ m/s}$,则切碎器主轴转速为 $559 \sim 802\text{ r/min}$ 。

3.2.4 理论切碎长度

切碎器工作时,动刀随滚筒做回转运动将喂入的物料切碎。物料切碎长度为相邻动刀两次切割动作之间物料喂入的进给量,故物料切碎长度为

$$l = \frac{120 v_w}{n_d z} \quad (12)$$

式中 l ——物料理论切碎长度, m
 v_w ——物料喂入速度, m/s
 n_d ——切碎器主轴转速, r/min
 z ——动刀数量,取 20

文献[21]表明,青饲作物切碎长度依据家畜种类、饲料类别及老嫩状况而定,饲喂牛为 $30 \sim$

80 mm ,饲喂羊为 $30 \sim 60\text{ mm}$,切碎长度越均匀饲喂效果越好。按照谷物联合收获机输送链耙线速度,取物料喂入速度 $v_w = 3\text{ m/s}$,代入式(12)计算得物料理论切碎长度区间为 $[22\text{ mm}, 32\text{ mm}]$,表明切碎器主轴转速符合设计要求。切碎装置主要结构参数如表 3 所示。

表 3 切碎装置主要参数	
Tab.3 Main structure parameters of chopping device	
参数	数值/形式
喂入压辊半径 r/mm	70
切碎器刀片数量	20
切碎器刀片排列	人字形、均布
切碎器刀刃轨迹半径 R/mm	250
切碎器主轴转速 $n_d/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	559 ~ 802
定刀配置高度 h/mm	43
动定刀切割间隙 mm	0.4 ~ 1.0

4 切碎装置台架试验

4.1 试验材料与装置

本试验以盛花期华油杂 62 油菜全株为试验材料,含水率为 85.11% ,田间测产统计茎秆产量为 $3.98 \sim 7.57\text{ kg/m}^2$ 。采用自制的饲用油菜切碎装置试验台,模拟田间收获的喂入切碎过程进行试验研究,如图 12 所示。

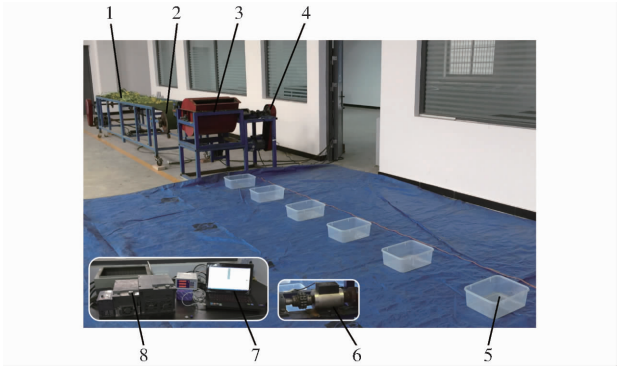


图 12 切碎装置试验台
Fig. 12 Test-bed of chopping device
1. 物料 2. 输送台 3. 切碎装置 4. 机架 5. 接料盒 6. 扭矩功率传感器 7. M400 数据采集软件 8. 三菱变频器

切碎器主轴转速、喂入辊转速及输送台驱动辊转速均通过变频器调节,安装的扭矩功率传感器(北京新宇航测控科技股份有限公司,转速测量范围: $0 \sim 5\,000\text{ r/min}$,灵敏度: $\pm 0.5\%$,扭矩测量范围: $\pm 20\text{ N} \cdot \text{m}$,准确度等级: $\pm 0.05\%$)测定切碎器主轴扭矩和转速。

4.2 试验设计与方法

按收获样机田间作业最大行走速度 0.5 m/s 、割幅 2 m 计算,理论喂入量为 $3.98 \sim 6.91\text{ kg/s}$,台架试验中设计喂入量为 7 kg/s 。试验设定输送带喂入

速度为 3 m/s; 试验时将刈割的油菜全株按设定喂入量称取后, 均匀铺放在输送带上; 试验前先启动切碎器主轴与喂入压辊电动机, 并待二者转速稳定后启动输送台电动机; 物料抛出后, 对各接料盒 (360 mm × 250 mm × 130 mm) 物料进行分选并称量。

4.3 试验指标

试验以物料切碎长度合格率和功耗为评价指标。切碎长度合格率计算方法: 将接料盒中采集的茎秆收集并称取其质量 m_z , 用直尺分选出大于 60 mm 的茎秆并称取其质量 m_b , 即不合格茎秆质量, 切碎长度合格率计算公式为

$$Y_h = \frac{m_z - m_b}{m_z} \times 100\%$$
 (13)

式中 Y_h ——切碎长度合格率, %

功耗通过安装在切碎器主轴上的扭矩功率传感器测定, 每组试验结束后将传感器测定的瞬时扭矩、功率和所需时间导出, 利用有效工作时段瞬时功率计算获得切碎功耗, 计算公式为

$$Y_w = \int P(t) dt_z$$
 (14)

式中 Y_w ——切碎功耗, kJ

$P(t)$ ——瞬时功率, kW

t_z ——切碎所需时间, s

4.4 试验结果与分析

4.4.1 单因素试验结果与分析

试验设定物料喂入速度 $v_w = 3$ m/s, 为保证物料流畅喂入, 喂入压辊转速需满足

$$n_y \geq \frac{30v_w}{\pi r}$$
 (15)

式中 n_y ——喂入压辊转速, r/min

由式 (15) 计算可得最小喂入压辊转速为 409 r/min。设置切碎器主轴转速为 550 r/min, 喂入压辊转速选取 6 个水平, 每个水平下重复 3 次试验 (下同)。喂入压辊转速与茎秆合格率、功耗的关系曲线如图 13 所示。

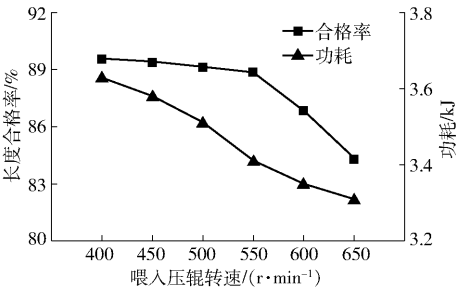


图 13 喂入压辊转速对长度合格率和功耗的影响
Fig. 13 Effects of rotational speed of feeding roller on length qualified rate and power

由图 13 可知, 物料长度合格率和功耗均随喂入压辊转速的增大而减小, 原因在于随着喂入压辊的转速增加, 物料喂入速度提高, 单位时间内切碎器作用在物料层的切割次数减少, 不合格茎秆长度数量增加, 导致茎秆长度合格率降低, 同时切碎器切割次数的减少降低了切碎器剪切功耗; 喂入压辊转速在 400 ~ 550 r/min 范围内, 长度合格率较为稳定, 当喂入压辊转速达到 600 r/min 后, 合格率急剧下降, 因此喂入压辊转速不宜超过 600 r/min。综合考虑长度合格率和功耗, 喂入压辊在 400 ~ 550 r/min 范围内结果较优。

设置喂入压辊转速为 550 r/min, 切碎器主轴转速在 550 ~ 850 r/min 内选取 7 个水平, 图 14 为切碎器主轴转速与茎秆合格率、功耗的关系曲线。

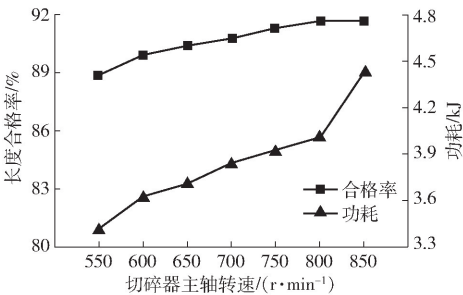


图 14 切碎器主轴转速对长度合格率和功耗的影响
Fig. 14 Effects of rotational speed of cutterhead on length qualified rate and power

由图 14 可知, 长度合格率和功耗均随切碎器主轴转速增大而提高, 原因在于切碎器主轴转速提高, 单位时间内切碎器作用在物料层的切割次数增多, 合格茎秆长度数量增加, 促使茎秆长度合格率提高, 同时切碎器切割次数的增多增加了切碎器剪切功耗; 切碎器主轴转速在 600 ~ 800 r/min 范围内, 功耗增长缓慢, 当转速达到 850 r/min 后, 长度合格率提高比例较小, 而功耗增加明显, 原因在于过高转速需克服空气阻力造成的损耗, 综合考虑长度合格率和功耗, 切碎器主轴转速在 600 ~ 800 r/min 范围内结果较优。

4.4.2 二次旋转正交组合试验

在喂入压辊转速在 400 ~ 550 r/min 范围内和切碎器主轴转速在 600 ~ 800 r/min 范围内安排二次旋转正交组合试验, 利用 Design-Expert 数据处理软件, 建立喂入压辊转速、切碎器主轴转速与长度合格率、功耗之间的回归方程和优化模型。试验因素编码如表 4 所示, 二次旋转正交组合试验结果如表 5 所示。

对表 5 中数据进行 F 检验和方差分析, 经软件处理后, 得出切碎长度合格率和功耗的方差分析结果如表 6、7 所示。对表中数据进行二次多元回归拟合, 选用二次项模型建立切碎长度合格率、功耗与各因素间回归模型, 得到回归方程为

表 4 因素编码
Tab.4 Factors coding

编码	因素	
	喂入压辊转速	切碎器主轴转速
	$x_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
-1.414	400.00	600.00
-1	421.97	629.29
0	475.00	700.00
1	528.03	770.71
1.414	550.00	800.00

表 5 试验方案与结果
Tab.5 Protocols and results

试验号	喂入压辊转速	切碎器主轴 转速	切碎长度合 格率 $Y_h/\%$	功耗 Y_w/kJ
	$x_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$		
1	421.97	629.29	90.23	3.85
2	528.03	629.29	90.03	3.63
3	421.97	770.71	92.01	4.67
4	528.03	770.71	91.82	4.56
5	400.00	700.00	91.21	4.09
6	550.00	700.00	90.81	3.84
7	475.00	600.00	89.52	3.76
8	475.00	800.00	92.22	4.83
9	475.00	700.00	91.11	3.93
10	475.00	700.00	91.03	3.92
11	475.00	700.00	90.92	3.95
12	475.00	700.00	91.13	3.98
13	475.00	700.00	91.26	4.01

表 6 Y_h 的二次项模型方差分析
Tab.6 Variance analysis of response surface quadratic
model for Y_h

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P	显著性
模型	6.99	5	1.4	110.53	<0.000 1	**
x_1	0.11	1	0.11	9.02	0.019 8	
x_2	6.82	1	6.82	539.21	<0.000 1	**
x_1x_2	2.5×10^{-5}	1	2.5×10^{-5}	0.002	0.965 8	
x_1^2	0.003	1	0.003	0.21	0.663 4	
x_2^2	0.056	1	0.056	4.39	0.074 4	
残差	0.089	7	0.013			
失拟项	0.025	3	0.008	0.53	0.685 7	
纯误差	0.063	4	0.016			
总和	7.08	12				

注：**表示极显著,下同。

$$Y_h = 72.92 + 3.83 \times 10^{-3}x_1 + 0.04x_2 + 6.67 \times 10^{-7}x_1x_2 - 6.89 \times 10^{-6}x_1^2 - 1.78 \times 10^{-5}x_2^2$$
$$Y_w = 22.03 - 0.01x_1 - 0.05x_2 + 7.33 \times 10^{-6}x_1x_2 + 5.47 \times 10^{-6}x_1^2 + 3.61 \times 10^{-5}x_2^2$$

模型失拟项表示所用模型与试验的拟合程度,一般要求失拟项 $P>0.05$ 。目标函数 Y_h 、 Y_w 失拟项

分别为 0.685 7、0.171 1,均大于 0.05,说明失拟因素不存在,可用该回归方程替代试验真实点对试验结果开展相关分析。

表 7 Y_w 的二次项模型方差分析
Tab.7 Variance analysis of response surface quadratic
model for Y_w

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P	显著性
模型	1.62	5	0.32	132.80	<0.000 1	**
x_1	0.058	1	0.058	23.95	0.001 8	
x_2	1.33	1	1.33	545.82	<0.000 1	**
x_1x_2	0.003	1	0.003	1.24	0.302 2	
x_1^2	0.002	1	0.002	0.67	0.438 6	
x_2^2	0.23	1	0.23	92.81	<0.000 1	**
残差	0.017	7	0.002			
失拟项	0.012	3	0.004	2.82	0.171 1	
纯误差	0.005	4	0.001			
总和	1.64	12				

由表 6 和表 7 方差分析可知,两者模型 $P<0.001$,说明该模型具有统计学意义。 F 值表示各因素对试验结果的影响程度,值越大表明影响程度越高,由表 6、7 可知切碎器主轴转速对茎秆切碎长度合格率和功耗的影响远大于喂入压辊转速。

4.5 响应曲面分析与验证

采用软件 Optimization 模块对模型开展优化分析,得到切碎装置的最优参数组合。当喂入压辊转速为 496.17 r/min、切碎器主轴转速为 709.14 r/min 时,茎秆切碎长度合格率为 91.16%、功耗为 3.98 kJ,此时,由软件给出的综合评价指数最大值为 0.654,为最优参数组合,综合评价响应曲面如图 15 所示。

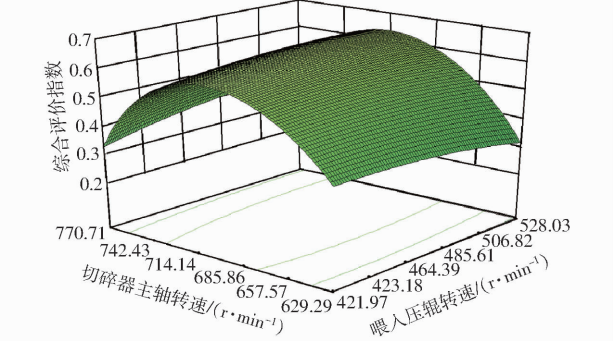


图 15 响应曲面

Fig.15 Response surface showing effects of roate speed

根据响应曲面分析得到的最优参数组合开展验证试验,试验仍在室内切碎装置试验台架上进行。为消除误差,试验重复 5 次取平均值,得到试验结果为:茎秆切碎长度合格率为 91.05%、功率损耗为 3.96 kJ,实际试验值与软件分析值的差值分别为 0.11 个百分点、0.02 kJ。试验结果与软件分析值基

本接近,验证软件分析值是可信的。

5 田间试验

2018 年 3 月初,在湖北省潜江市鹏乐农业发展有限公司饲用油菜种植基地,将该装置应用于冬春鲜喂饲用油菜收获样机上,进行了田间试验,收获的物料直接作为该养牛场每天的青料饲喂。收获的作物品种为华油杂 62,种植方式为机直播,平均种植密度 38 株/m^2 ,整株含水率 86.30%,平均株高 1 237.24 mm,平均单株质量 0.288 kg。收获机前进

速度为 0.5 m/s。田间试验效果如图 16a 所示,切碎后的物料状态如图 16b 所示,切碎后的物料饲喂效果如图 16c 所示。

田间试验结果表明,饲用油菜收获机的各个部件均运转正常,性能稳定,能够完成收获作业。切碎装置抛料通道无堵塞,物料输送流畅,茎秆切碎长度合格率满足饲用油菜饲喂要求。以切碎物料开展饲喂试验,在相同的饲喂量下,机收饲用油菜基本采食干净,比人工刈割的整株油菜的采食时间平均缩短 56.21%,采食量平均增加 26.37%。

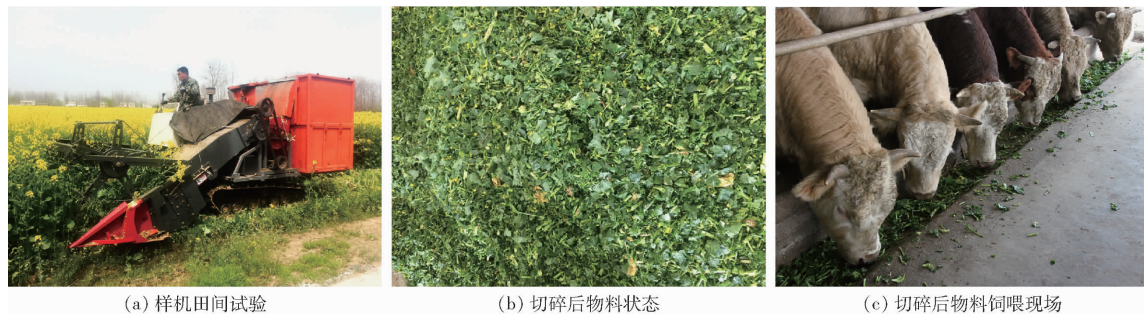


图 16 田间及饲喂试验

Fig. 16 Field experiment and feeding effect

6 结论

(1) 针对目前人工收割效率低、成本高,机械化收获缺少适用于饲用油菜的切碎装置的问题,设计了滚刀式切碎装置,通过物料特性、切碎及抛送等作业要求分析,确定了滚刀式主要结构参数和运行参数。

(2) 采用单因素试验研究了喂入压辊转速与切碎器转速对茎秆切碎长度合格率和功耗的影响。试验结果表明:喂入压辊转速为 400 ~ 550 m/s,切碎器主轴转速为 600 ~ 800 m/s,茎秆切碎长度合格率较优。

(3) 通过二次旋转正交组合试验,得出了喂入压辊转速、切碎器主轴转速与茎秆切碎长度合格率、

功耗之间的回归方程,方差分析表明,切碎器主轴转速对茎秆切碎长度合格率和功耗的影响远大于喂入压辊转速。

(4) 通过 Design-Expert 软件得出切碎装置最佳运动参数组合为喂入压辊转速 496.17 r/min、切碎器主轴转速为 709.14 r/min 时,茎秆切碎长度合格率为 91.16%、功耗为 3.98 kJ。

(5) 田间试验表明,滚刀式切碎装置收获饲用油菜时,物料切碎均匀、抛送顺畅,未出现堵塞现象,茎秆切碎长度合格率满足饲用油菜饲喂要求。饲喂试验表明:在相同的饲喂量下,机收饲用油菜比人工刈割的整株油菜的采食时间平均缩短 56.21%,采食量平均增加 26.37%。

参 考 文 献

- [1] 张哲,殷艳,刘芳,等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5):618-623. ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5):618-623. (in Chinese)
- [2] 汪波,宋丽君,王宗凯,等. 我国饲料油菜种植及应用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5):695-701. WANG Bo, SONG Lijun, WANG Zongkai, et al. Production and feeding technology of fodder-rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5):695-701. (in Chinese)
- [3] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):1-16. (in Chinese)
- [4] 车刚,万霖,张伟,等. 青贮饲料收获机实体设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2):82-86. CHE Gang, WAN Lin, ZHANG Wei, et al. Solid design and experiment of forage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):82-86. (in Chinese)

- [5] 万霖,车刚,汪春,等. 4QZR-30型青贮饲料收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3):187-190.
WAN Lin, CHE Gang, WANG Chun, et al. Solid design and experiment of 4QZR-30 forage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):187-190. (in Chinese)
- [6] LIN J. Mathematical model for improved mass flow estimation in the feeder housing of a forage harvester[D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [7] VOICU E, PIRNA I, CIUREL G, et al. Researches on harvesting of Miscanthus crop with the forage harvester[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2010, 32(3):37-42.
- [8] BROWNELL D K, LIU J, HILTON J W, et al. Evaluation of two forage harvesting systems for herbaceous biomass harvesting[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(5):1651-1658.
- [9] 张银平,刁培松,杜瑞成,等. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆切碎与输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):208-214.
ZHANG Yinping, DIAO Peisong, DU Ruicheng, et al. Design and test of stalk chopping and conveying device for corn combine reaping both stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):208-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s032&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.032. (in Chinese)
- [10] 丛宏斌,李明利,李汝莘,等. 4YQK-2型茎秆青贮打捆玉米收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10):96-100.
CONG Hongbin, LI Mingli, LI Ruxin, et al. Design of 4YQK-2 combine harvester for corn and straw ensilage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10):96-100. (in Chinese)
- [11] 翟之平,高搏,杨忠义,等. 叶片式秸秆抛送装置功耗分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10):26-33.
ZHAI Zhiping, GAO Bo, YANG Zhongyi, et al. Power consumption and parameter optimization of stalk impeller blowers[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10):26-33. (in Chinese)
- [12] 万其号,王德成,王光辉,等. 自走式牧草青贮联合装袋机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19):30-37.
WAN Qihao, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of self-propelled grass silage combined bagging machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19):30-37. (in Chinese)
- [13] 张道林,孙永进,赵洪光,等. 立辊式玉米摘穗与茎秆切碎装置的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7):50-52.
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang, et al. Design of a vertical roll type of corn picker and stalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7):50-52. (in Chinese)
- [14] 张道林,孙永进,赵洪光. 自走式穗茎兼收型玉米联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1):79-82.
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang. Design and experiment of the self-propelled combine harvester for corn and stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1):79-82. (in Chinese)
- [15] 宋书红,杨云贵,张晓娜,等. 不同刈割时期对紫花苜蓿和红豆草产量及营养价值的影响[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(2):44-51.
SONG Shuhong, YANG Yungui, ZHANG Xiaona, et al. Effect of mowing period on the yield and nutrition level of alfalfa and sainfoin[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2017, 38(2):44-51. (in Chinese)
- [16] 徐玉鹏. 青贮玉米品种产量与农艺性状相关性研究[J]. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(4):60-61,14.
XU Yupeng. Study on the correlations between the yields and agronomic characters of silage maize varieties[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2009, 30(4):60-61,14. (in Chinese)
- [17] 赵春花,张锋伟,曹致中. 豆禾牧草茎秆的力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9):122-126.
ZHAO Chunhua, ZHANG Fengwei, CAO Zhizhong. Experiment on stalk mechanical properties of legume forage and grasses[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9):122-126. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [19] 闵永林,陈池. 两种空气阻力模型的抛射体飞行轨迹研究[J]. 装备制造技术, 2009(12):15-17.
MIN Yonglin, CHEN Chi. Projectile track under two kinds of air resistance models[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(12):15-17. (in Chinese)
- [20] 邱进,吴明亮,官春云,等. 定动刀同轴水稻秸秆切碎还田装置结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10):11-19.
QIU Jin, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design and experiment of chopping device with dynamic fixed knife coaxial for rice straw[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):11-19. (in Chinese)
- [21] 王洪超,刘大森,刘春龙,等. 饲料油菜及其饲用价值研究进展[J]. 土壤与作物, 2016, 5(1):60-64.
WANG Hongchao, LIU Dasen, LIU Chunlong, et al. Research progress of forage rape and its feed value in China[J]. Soil and Crop, 2016, 5(1):60-64. (in Chinese)