doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.009

水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置设计与试验

刘　迪[1,2]　王晓燕[1,2]　李洪文[1,2]　何　进[1,2]　王庆杰[1,2]　卢彩云[1,2]

（1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室，北京 100083）

摘要：针对东北黑土稻区水稻种植密度大、秸秆量多，导致还田过程中秸秆抛撒不均匀影响后续整地和插秧的问题，设计了一种水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置。通过建立导流板导秆落盘、抛撒盘离心抛秆、秸秆空中抛离3个过程运动学模型并进行理论分析，对导流单元、离心抛撒单元等关键部件进行设计。运用EDEM离散元软件进行单因素仿真试验，明确抛撒盘转速、扇叶偏角、导流板倾角和还田速率对抛撒横向均匀性变异系数的影响规律。以横向均匀性变异系数和抛撒幅宽为试验指标，利用主动离心式抛撒试验台进行Box-Behnken参数优化试验，并对优化结果进行田间验证与对比。验证试验结果表明，当抛撒盘转速为255 r/min、抛撒扇叶偏角为7°、导流板倾角为35°、还田速率为3.5 kg/s时，抛撒横向均匀性变异系数为17.34%，抛撒幅宽为4.58 m，与预测值误差小于5%，满足设计要求。通过与水稻联合收获机原装的导流式秸秆抛撒装置进行性能对比试验，得出设计的主动离心式秸秆抛撒装置抛撒效果更优。

关键词：水稻联合收获机；东北黑土稻区；离心抛撒；离散元

中图分类号：S244.29　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S1-0081-11

Design and Experiment of Active Centrifugal Rice Straw Spreading Device

LIU Di[1,2]　WANG Xiaoyan[1,2]　LI Hongwen[1,2]　HE Jin[1,2]　WANG Qingjie[1,2]　LU Caiyun[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage*, *Ministry of Agricultural and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of high density of rice planting and large amount of straw in the black soil rice area of Northeast China, the uneven straw spreading during the return process affects the subsequent soil preparation and rice transplanting. An active centrifugal rice straw spreading device installed on a combined harvester was designed. By establishing the kinematic model and theoretical analysis of the three processes of deflector guide straw dropping plate, the spreading plate centrifugal spreading straw, and straw spreading in the air, , the key components such as the deflector unit and the centrifugal spreading unit were designed. EDEM discrete element was used to conduct a single-factor simulation test to clarify the influence of speed of spreading disc, the declination angle of fan blade, inclination angle of deflector and returning rate on the variation coefficient of lateral uniformity of the spreading, and further narrow down the range of paraments. Taking the variation coefficient of lateral uniformity and the spreading width as the test indicators, the Box-Behnken parameter optimization and verification test was carried out by using the active centrifugal spreading test bench, and the optimization results were verified in the field. At the same time, the results were compared with a guide straw spreading device. The bench test results showed that the variation coefficient of the lateral uniformity of the spreading was 16.98%, the spreading width was 4.56 m when the speed of the spreading disc was 255 r/min, the deflection angle of the spreading fan blade was 7°, the inclination angle of the deflector was 35°, and the straw returning rate was 3.5 kg/s. The error with the predicted value was less than 5%, meeting the design requirements. Through the performance comparison experiment with the original diversion straw spreading device of a combined harvester, the variation coefficient of lateral uniformity was reduced by 16.74 %, and the spreading width was increased by 0.42 m, which concluds that the active centrifugal rice straw spreading device developed had better spreading effect.

Key words: rice combined harvester; the black soil rice area of Northeast China; centrifugal spreading; discrete element

收稿日期：2024-07-20　修回日期：2024-09-18

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD1500602-03)

作者简介：刘迪(1996—)，男，博士生，主要从事保护性耕作技术与装备研究，E-mail: liudi_0929@cau.edu.cn

通信作者：王晓燕(1973—)，女，教授，博士生导师，主要从事保护性耕作技术与装备研究，E-mail: xywang@cau.edu.cn

0 引言

东北黑土稻区是我国重要的水稻生产区，近年来为恢复提升黑土地耕地地力，水稻秸秆还田技术已在该区域大面积实施[1-3]。但在还田过程中存在秸秆抛撒不均现象[4]，严重影响秸秆腐解速度，导致后期整地时机具堵塞、插秧时秸秆漂浮[5-7]，解决秸秆抛撒不均匀问题对于秸秆还田技术具有重要意义。

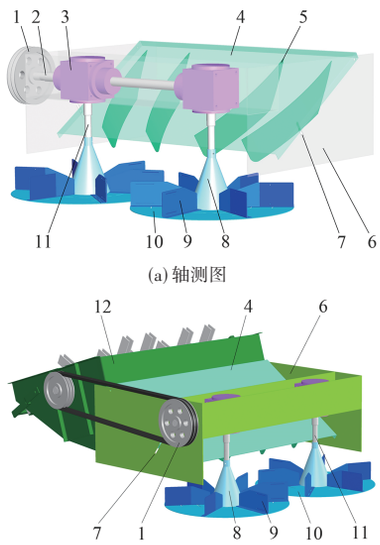
目前，国内外秸秆还田多采用联合收获机秸秆粉碎抛撒技术模式[8]，收获的同时将秸秆粉碎并直接抛撒覆盖于地表，抛撒装置性能决定了抛撒还田效果。根据抛撒形式不同，秸秆抛撒装置可分为动力式和导流式[9-10]。国外多采用动力式抛撒装置进行抛撒作业，具有代表性的有克拉斯公司LEXION系列收获机配套的栅条式秸秆抛撒装置[11]，凯斯公司生产的转盘式动力抛撒装置[12]，通过安装有栅条或叶片的旋转圆盘将秸秆抛至已收获区域。但针对动力式抛撒装置秸秆抛撒机理的相关理论研究较少，抛撒均匀性有待进一步提高。现阶段我国抛撒装置大多为导流式，国内相关学者以抛撒幅宽和均匀性为切入点开展了一系列研究。章志强等[13]设计了一种装有叶片调节装置的导流板，能够提高抛撒均匀性的同时提升抛撒幅宽；王将等[14]设计了一种适用于稻麦联合收获机的秸秆粉碎抛撒器，通过加装风力扇叶并优化导流叶片，增大秸秆抛出速度，使秸秆抛撒的“更散、更远”；王昕等[15]设计了一种秸秆撒布板双调节机构，可通过手动、电动两种方式调整撒布板叶片角度，实现秸秆扩散抛撒。虽导流式抛撒装置动力消耗少，但在东北黑土稻区种植密度大、秸秆量多的情况下，秸秆抛撒效果无法满足还田要求。

针对上述问题，以东北黑土稻区水稻收获作业常用c120/c100型联合收获机为基础，结合水稻秸秆特性及抛撒要求，设计一种水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置，通过建立秸秆在抛撒盘和空中的运动学模型并进行理论分析，确定抛撒装置关键部件参数；并设计单因素试验及Box-Behnken试验优化离心抛撒装置具体作业参数，以期为东北黑土稻区水稻秸秆抛撒装置研发提供技术支撑。

1 装置结构及工作原理

1.1 装置结构

主动离心式水稻秸秆抛撒装置主要由导流单元、离心抛撒单元、传动单元和机架等组成。导流单元主要包括导流板和分流叶片，离心抛撒单元由2个左右对称的抛撒单体组成，每个抛撒单体包括抛撒轴、抛撒管柱、抛撒盘和抛撒扇叶，具体结构如图1所示。该装置与联合收获机秸秆粉碎装置配合挂接，导流单元位于机架内侧，通过弧形滑槽调节导流板倾斜角度，分流叶片安装在导流板底部用于引流秸秆；离心抛撒单元的2个单体对称安装在导流单元后方，二者转向相反，可通过动力输入调节其转速。



(a) 轴测图

(b) 装配图

图1 主动离心式水稻秸秆抛撒装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of active centrifugal rice straw spreading device

1. 主带轮 2. 转轴 3. 换向齿轮箱 4. 导流板 5. 分流叶片 6. 机架 7. 弧形滑槽 8. 抛撒管柱 9. 抛撒扇叶 10. 抛撒盘 11. 抛撒轴 12. 秸秆粉碎装置

1.2 工作原理

工作时，动力由带轮传递至转轴，经换向齿轮箱将水平动力纵向输出，带动2个抛撒单体同时反向高速旋转，左抛撒单体逆时针旋转，右抛撒单体顺时针旋转。秸秆经粉碎室抛出后，与导流板碰撞，在外力作用下改变原有运动方向使其沿导流板落至抛撒盘上，由于旋转圆盘产生的离心力以及秸秆和抛撒盘间摩擦力的共同作用，秸秆在抛撒盘上沿扇叶滑动一段距离，最终通过抛撒扇叶将秸秆抛向空中，直至落入田间完成抛撒作业。装置主要技术参数如表1所示。

表1 主动离心式水稻秸秆抛撒装置技术参数

Tab. 1 Parameters of active centrifugal rice straw spreading device

参数	数值
外形尺寸/(mm×mm×mm)	1 175×950×510
整机质量/kg	80
适配收获机机型	约翰迪尔c120/c100
抛撒幅宽/mm	4 500
抛撒高度/mm	900
抛撒转速/(r·min^{-1})	200~300
抛撒扇叶组数	12
导流倾角/(°)	30~35

2 秸秆抛撒全过程运动特性

粉碎后的水稻秸秆经导流板落入高速旋转的抛撒盘，被抛撒至田间完成还田作业。整个抛撒过程分为导

流板导秆落盘、抛撒盘离心抛秆、秸秆空中抛离3个阶段。

2.1　导流板导秆落盘的运动特性

根据牛顿第一定律，粉碎抛出的秸秆撞击导流板瞬间的受力状态如图2所示。将粉碎后的稻秆视为质点，由于撞击时间很短，忽略气流对秸秆的作用。

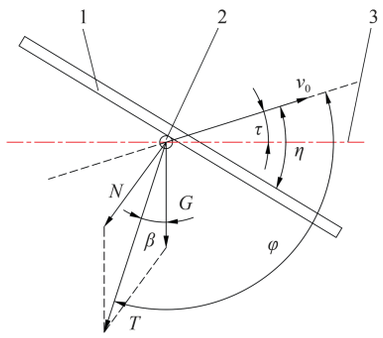


图2　导流板导秆原理分析

Fig. 2　Principle analysis of straw diversion by deflector

1. 导流板　2. 水稻秸秆　3. 水平面

由图2可得，碰撞瞬间稻秆运动方向与作用力夹角为

$$\varphi = 90 - \tau + \beta \tag{1}$$

其中

$$\beta = \arctan\frac{N\sin(\eta + \tau)}{G + N\cos(\eta + \tau)} \tag{2}$$

式中　φ——碰撞瞬间稻秆速度v_0与合力T的夹角，(°)

τ——碰撞瞬间稻秆运动方向与水平面的夹角，(°)

β——合力T与重力G的夹角，(°)

G——秸秆重力，N

N——碰撞瞬间导流板对秸秆的反作用力，N

T——秸秆重力G与反作用力N的合力，N

η——碰撞瞬间运动方向与导流板的夹角，(°)

将式(2)代入式(1)可得

$$\varphi = 90 - \tau + \arctan\frac{\sin(\eta + \tau)}{G + N\cos(\eta + \tau)} \tag{3}$$

根据式(3)可知，稻秆运动方向一定的情况下，采取不同导流板安装角度可以有效改变秸秆运动状态，使秸秆沿板面落至抛撒盘不同区域。

2.2　抛撒盘离心抛秆的运动特性

秸秆落盘后在抛撒盘上运动的受力模型如图3a所示，由于2个抛撒单体结构对称且同时相对转动，以左盘为例(下同)进行分析，不考虑秸秆之间的相互作用及其自旋性。

秸秆随抛撒盘做绕轴转动和沿扇叶滑移的合成运动，由图3a可知，秸秆所受各力为

$$\begin{cases} G = mg \\ F_{ce} = m\omega^2 r \\ F_{co} = 2m\omega\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \\ F_{fp} = \mu_p mg \\ F_{fs} = 2\mu_p m\omega\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{4}$$

式中　F_{ce}——秸秆所受离心力，N

F_{co}——秸秆所受科氏力，N

F_{fp}——秸秆相对抛撒盘运动产生的摩擦力，N

F_{fs}——秸秆相对抛撒扇叶运动产生的摩擦力，N

μ_p——秸秆与抛撒盘和抛撒扇叶间摩擦因数

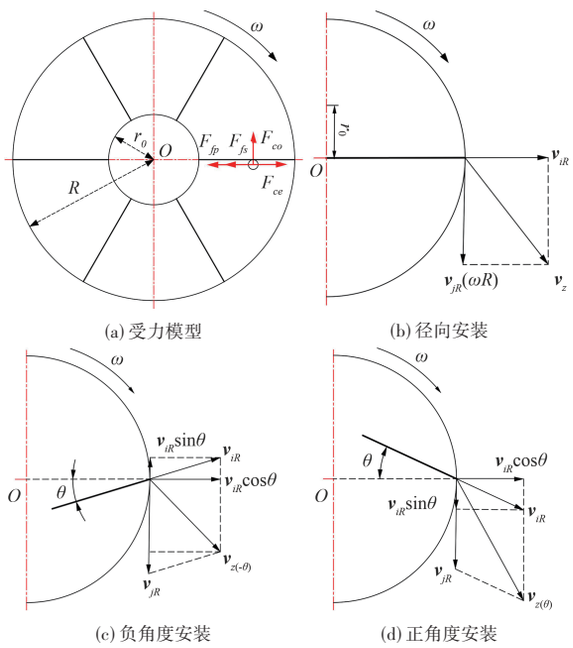
g——重力加速度，m/s^2

m——秸秆质量，kg

r——秸秆与抛撒盘中心垂直距离，mm

t——秸秆在抛撒盘上的运动时间，s

ω——抛撒盘旋转角速度，rad/s



(a) 受力模型　(b) 径向安装　(c) 负角度安装　(d) 正角度安装

图3　盘上秸秆受力示意图及不同扇叶角度布置形式

Fig. 3　Stress diagrams of straw on disc and arrangement of different fan blade angles

沿扇叶方向，由牛顿第二定律得

$$F = F_{ce} - F_{fp} - F_{fs} \tag{5}$$

秸秆在抛撒盘上运动方程为

$$\frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}t^2} = \omega^2 r - \mu_p g - 2\mu_p\omega\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

在$r(t=0)=r_0$，$\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}(t=0)=0$的初始条件下，解方程得

$$r = \frac{r_0 - C}{K_1 - K_2}\left(K_1 \mathrm{e}^{K_2 t} - K_2 \mathrm{e}^{K_1 t}\right) + C \tag{7}$$

其中

$$\begin{cases} K_1 = \omega\left(\sqrt{\mu_p^2 + 1} - \mu_p\right) \\ K_2 = -\omega\left(\sqrt{\mu_p^2 + 1} - \mu_p\right) \end{cases} \tag{8}$$

式中　r_0——秸秆落盘初始半径，mm

K_1、K_2——特征方程根

C——常数

对式(7)求导并进行变换得

$$v_i = \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} = \frac{\omega\left(r_0 - C\right)}{\sqrt{\mu_p^2 + 1}}\left(K_1 \mathrm{e}^{K_2 t} - K_2 \mathrm{e}^{K_1 t}\right) \tag{9}$$

式中 v_i——秸秆沿扇叶运动相对速度，mm/s

当$r=R$时，秸秆离开抛撒盘，代入式(7)得

$$(R-C)\frac{2\omega\sqrt{\mu_p^2+1}}{r_0-C}=K_1e^{K_2t_R}-K_2e^{K_1t_R} \tag{10}$$

$$v_{iR}=\frac{\omega(r_0-C)}{2\sqrt{\mu_p^2+1}}\left(e^{K_2t_R}-e^{K_1t_R}\right) \tag{11}$$

式中 R——抛撒盘半径，mm

v_{iR}——秸秆离盘沿扇叶方向相对速度，m/s

t_R——秸秆在抛撒盘上运动总时间，s

秸秆离开抛撒盘时绝对速度v_z为

$$v_z=\sqrt{v_{iR}^2+(\omega R)^2} \tag{12}$$

由式(6)、(11)可知，秸秆在抛撒盘上的运动轨迹和离盘速度取决于秸秆落盘位置、抛撒盘转速以及秸秆在抛撒盘上的运动时间，进而影响秸秆下一阶段在空气中的运动。

2.3 秸秆空中抛离运动特性

秸秆以一定速度脱离抛撒盘后，在空中受自身重力和空气阻力作用，经类平抛运动最终落向地面。因空气密度远小于秸秆密度，忽略秸秆在空中所受的浮力。

在空中运动时，空气阻力F_a为

$$F_a=\frac{1}{2}C_d\rho Av_c^2 \tag{13}$$

式中 C_d——空气阻力系数

ρ——空气密度，kg/m^3

A——阻力面积，mm^2

v_c——秸秆相对空气速度，m/s

抛撒盘水平面为xy面，以垂直盘面与重力相反方向为z轴正方向，则秸秆在空中x、y、z轴3个方向运动方程为

$$\begin{cases}\dfrac{d^2x}{dt^2}=-\dfrac{k}{m}v_x\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}\\ \dfrac{d^2y}{dt^2}=-\dfrac{k}{m}v_y\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}\\ \dfrac{d^2z}{dt^2}=-\dfrac{k}{m}v_z\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}-g\end{cases} \tag{14}$$

其中 $$k=\frac{1}{2}C_d\rho A \tag{15}$$

式中 v_x——沿x轴方向速度分量，m/s

v_y——沿y轴方向速度分量，m/s

v_z——沿z轴方向速度分量，m/s

由式(13)~(15)可知，秸秆离盘后在空中的运动与空气参数等外界条件有关，离盘速度决定秸秆落地位置、抛撒距离及抛撒面积等基本作业参数。

3 关键部件设计与参数确定

3.1 导流单元设计

由导流单元导秆落盘过程运动分析可知，导流板与叶片尺寸及安装角度对导秆落盘轨迹有直接影响，关系着秸秆落盘位置和落盘后运动状态。其结构如图4a所示，参考抛撒装置整体尺寸，为配合抛撒盘抛秆作业，导流板尺寸设计为1 060 mm×580 mm×4 mm，与机架左右支撑板相连，并通过弧形滑槽调节导流板倾角。为更好引流粉碎抛出的秸秆，对分流叶片采用最速降线原理设计[16-17]，叶片弧线为最速降线L_S，考虑摩擦阻力作用进行伸缩平移变换后L_S的参数方程为

$$\begin{cases}x=r_e\left(\dfrac{\pi\theta}{180}-\sin\theta\right)+b\\ y=r_e\left(\dfrac{\pi\theta}{180}-\cos\theta\right)\end{cases} \tag{16}$$

其中 $$b=2(\mu_s-\pi\varepsilon/180)r_e \tag{17}$$

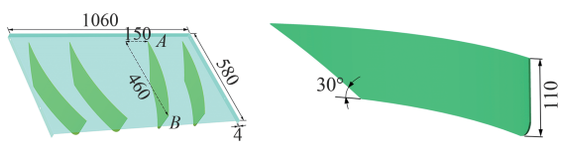
式中 r_e——变换后最速降线定义参数半径，mm

b——最速降线方程横向平移量，mm

μ_s——分流叶片与秸秆间的摩擦因数

ε——摩擦角，(°)

分流叶片安装在导流板底部，叶片起始点A到终点B的最速降线参数r_e、b取决于点A、B相对位置和叶片与秸秆间的摩擦因数。根据导流板尺寸及前期预试验，在导流板左、右两边各对称布置2个分流叶片，确定叶片两点横向距离为150 mm，纵向距离为460 mm，叶片高度为110 mm。参考东北水稻收获时联合收获机喂入量6~12 kg/s[18-19]，为使得粉碎后秸秆容易分流进入两叶片之间，将曲面叶片外形优化为类直角梯形，如图4b所示。叶片斜边靠近粉碎装置排草口一端，以确保秸秆更加顺畅流动。



(a) 导流单元轴测图 (b) 分流叶片

图4 导流单元结构示意图

Fig. 4 Structure diagrams of deflector unit

3.2 离心抛撒单元设计

3.2.1 抛撒单体设计

离心抛撒单元是主动离心式抛撒装置的核心工作部件，其结构参数决定秸秆抛撒质量。抛撒单体结构如图5a所示，抛撒管柱与抛撒轴相连并带动抛撒盘旋转，为避免秸秆落盘时产生堆积，防止过长秸秆缠绕，且尽可能减轻装置质量，减小转动惯量，将抛撒管柱设计为圆台空心体结构。秸秆落盘运动瞬间，首先需克服盘面间摩擦力，即

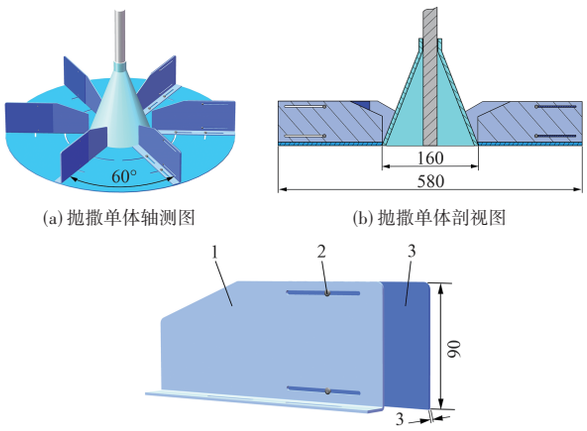
$$mr_0\omega^2\geqslant\mu_pmg \tag{18}$$

$$r_0\geqslant r_i\geqslant\frac{\mu_pg}{\omega^2} \tag{19}$$

式中 r_i——抛撒盘内圆半径，mm

落盘半径需满足式(19)，秸秆才能沿盘面径向向外运动。同时，秸秆离盘速度与抛撒盘直径有关，当圆盘直径增大时，秸秆离盘速度变大，抛撒幅宽增加，抛撒幅

宽与抛撒盘直径呈正相关。以保证装置可靠运行为前提并结合整体尺寸，将抛撒盘直径设计为580 mm，内圆直径为160 mm，如图5b所示。



(a) 抛撒单体轴测图　(b) 抛撒单体剖视图

(c) 抛撒扇叶

图5　抛撒单体结构示意图

Fig. 5　Structure diagrams of spreading monomer

1. 主叶片　2. 卡销　3. 延伸叶片

3.2.2　抛撒扇叶布置

通过抛撒盘离心抛秆过程运动分析可知，秸秆离盘绝对速度可分解为沿扇叶方向相对速度和与抛撒盘边缘相切的传送速度，根据撒施叶片布置经验[20-22]，采用角度可调（正角度、径向和负角度）的安装方式对秸秆抛撒扇叶进行布置，如图3b~3d所示，速度计算式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_{zj} = \boldsymbol{v}_{iR} + \boldsymbol{v}_{jR} \\ \boldsymbol{v}_{z(\theta)} = \boldsymbol{v}_{iR}\cos\theta + \boldsymbol{v}_{jR} + \boldsymbol{v}_{iR}\sin\theta \\ \boldsymbol{v}_{z(-\theta)} = \boldsymbol{v}_{iR}\cos\theta + \boldsymbol{v}_{jR} - \boldsymbol{v}_{iR}\sin\theta \end{cases} \tag{20}$$

式中　$\boldsymbol{v}_{zj}$——径向安装下秸秆离盘绝对速度，m/s

$\boldsymbol{v}_{z(\theta)}$——正角度安装下秸秆离盘绝对速度，m/s

$\boldsymbol{v}_{z(-\theta)}$——负角度安装下秸秆离盘绝对速度，m/s

$\boldsymbol{v}_{jR}$——秸秆离盘与盘相切传送速度，m/s

θ——抛撒扇叶安装偏角，(°)

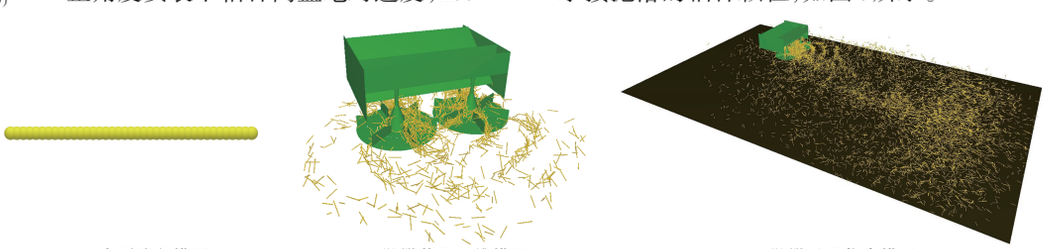
由式(20)可知，$v_{z(\theta)}>v_z>v_{z(-\theta)}$，即其他条件不变的情况下，扇叶径向安装下秸秆的离盘速度小于扇叶呈正角度安装的离盘速度，大于呈负角度安装速度。在抛撒盘上开设弧形长孔，使扇叶在-20°~20°之间调节。考虑到东北黑土稻区秸秆抛撒量较大，为使得秸秆均匀连续抛出，形成稳定秸秆流，提高秸秆抛撒质量。每个盘面均匀布置6组抛撒扇叶，扇叶高度为90 mm，每组抛撒扇叶由主叶片和延伸叶片构成，延伸叶片可随扇叶安装偏角的不同，沿主叶片滑槽伸缩调节至合适长度，其结构如图5c所示。

4　秸秆抛撒离散元仿真

确定影响秸秆抛撒质量的主要因素为抛撒盘转速、导流板倾角、扇叶偏角及秸秆还田速率。应用离散元仿真软件对装置的抛撒性能进行仿真，明确各作业参数对抛撒均匀性的影响规律，缩小各影响因素参数选择范围。

4.1　仿真模型构建与参数设置

粉碎后稻秆近似为长圆柱形，经测量东北地区稻秆直径集中分布在4.5~5.5 cm之间，结合《主要农作物秸秆机械化还田技术模式》中东北黑土稻区秸秆还田粉碎长度小于等于10 cm的要求[23]，采用39个直径为5 mm的球形颗粒组成长度为100 mm的水稻碎秆模型。为便于模拟和分析，去除与秸秆运动过程接触无关的部件并将其模型导入到EDEM中，参照粉碎装置出口的实际位置在模型中建立颗粒工厂生成秸秆。同时，设置土壤材料承接抛落的稻秆颗粒，如图6所示。



(a) 水稻碎秆模型　(b) 抛撒装置三维模型　(c) 抛撒过程仿真模型

图6　主动离心抛撒仿真模型

Fig. 6　Simulation models of active centrifugal dispersion

水稻碎秆模型、抛撒装置模型与土壤承接材料间均选用Hertz-Mindlin（no slip）接触力学模型。为确保能够完全收集整个抛撒区域的秸秆并考虑计算能力，确定仿真区域尺寸为5 400 mm×9 000 mm。仿真过程设置迭代时间步长为1×10^{-5} s，仿真时间为4 s，相关离散元仿真参数如表2所示[24-26]。

4.2　仿真试验设计

参照联合收获机用水稻秸秆还田机械抛撒性能评价标准，以秸秆横向均匀性变异系数作为仿真试验抛撒效果的评价指标，使用二维矩阵收集秸秆并计算其均匀性。设置主动离心式抛撒装置位于土壤承接面的一端进行初始作业，速度为

$$v_m = \frac{Q}{PLc} \tag{21}$$

式中　v_m——收获（抛撒）速度，m/s

Q——联合收获机喂入量，kg/s

P——东北地区水稻产量，kg/hm^2

L——工作幅宽，m

c——水稻草谷比，取1.03

表 2 仿真相关离散元参数

Tab. 2 Simulation related discrete element parameters

参数	数值
稻秆泊松比	0.40
钢铁泊松比	0.30
土壤泊松比	0.38
稻秆剪切模量/Pa	1×10^6
钢铁剪切模量/Pa	7×10^{10}
土壤剪切模量/Pa	1×10^6
稻秆密度/(kg·m^{-3})	225
钢铁密度/(kg·m^{-3})	7 800
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 850
稻秆-稻秆碰撞恢复系数	0.40
稻秆-钢铁碰撞恢复系数	0.30
稻秆-土壤碰撞恢复系数	0.40
稻秆-稻秆动摩擦因数	0.01
稻秆-钢铁动摩擦因数	0.01
稻秆-土壤动摩擦因数	0.20
稻秆-稻秆静摩擦因数	0.30
稻秆-钢铁静摩擦因数	0.38
稻秆-土壤静摩擦因数	0.80

东北地区水稻产量达 8 600 kg/hm^2[27]，由式(21)可得喂入量 6~12 kg/s 对应的机器前进速度为 0.77~1.55 m/s。沿机器前进方向，应用 EDEM 后处理 Selection 模块在秸秆稳定抛撒区域设置 Grid Bin Group，每个网格尺寸为 225 mm×225 mm，在 5 400 mm×2 700 mm 的收集矩形区域内共 12 行 24 列 288 个计算网格。将落入每列网格中的秸秆质量进行叠加，形成 1×24 的单行秸秆收集矩阵，对落入每列计算网格内秸秆总质量进行统计，横向分布均匀性变异系数计算式为

$$C_v = \frac{S}{\overline{m}} \times 100\% \tag{22}$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}\left(m_k - \overline{m}\right)^2} \tag{23}$$

$$\overline{m} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} m_k \tag{24}$$

式中 C_v——秸秆横向分布均匀性变异系数，%

S——标准差，kg

n——收集网格列数

m_k——第 k 列网格收集秸秆质量，kg

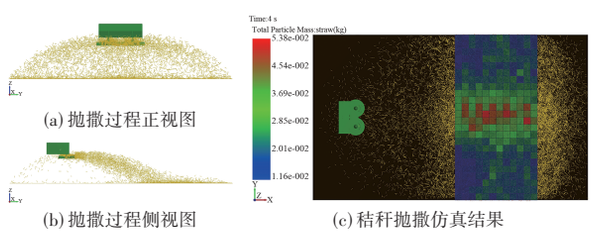
$\overline{m}$——收集区域内各列网格收集秸秆质量平均值，kg

4.3 仿真试验结果

由上文可知，抛撒扇叶偏角为-20°~20°，结合装置本身结构，设置导流板与水平方向安装倾角调节范围为 30°~40°，参照现有动力式秸秆抛撒装置作业圆盘的转速范围，设置抛撒盘转速为 150~300 r/min，参考东北地区水稻草谷比 1.03[28]，对应收获速度和喂入量设置秸秆生成速率(还田速率)为 3~6 kg/s。

4.3.1 抛撒盘转速

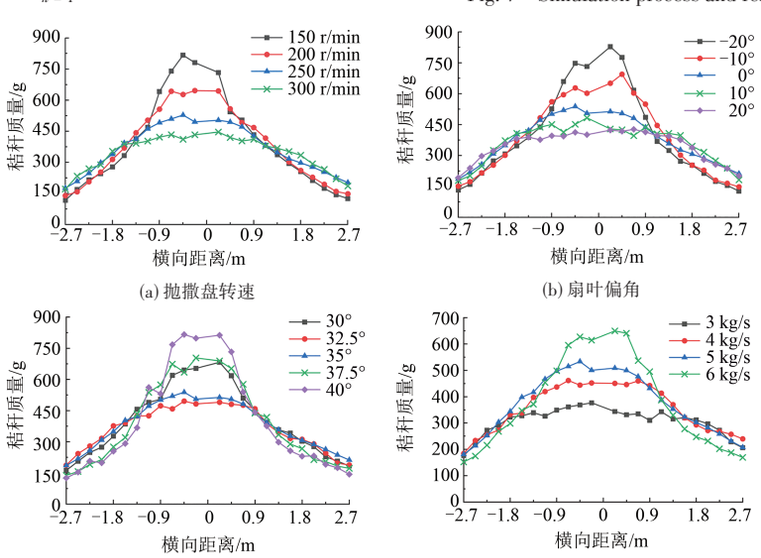
保持扇叶偏角、导流板倾角、还田速率分别为 0°、35°、5 kg/s，抛撒盘转速分别选取 150、200、250、300 r/min，共进行 4 组仿真试验，当转速为 250 r/min 时，秸秆抛撒仿真过程及结果如图 7 所示。测得 4 组试验秸秆在横向幅宽方向上分布如图 8a 所示，秸秆主要落在 -2.5~2.5 m 区域，低转速下秸秆分布较集中，峰值较大；随抛撒盘转速增加，峰值降低，秸秆分布范围增大，横向抛撒均匀性逐渐变好，秸秆分布一致性逐渐提高。



(a) 抛撒过程正视图 (b) 抛撒过程侧视图 (c) 秸秆抛撒仿真结果

图 7 秸秆抛撒仿真过程及结果

Fig. 7 Simulation process and results of straw spreading



(a) 抛撒盘转速 (b) 扇叶偏角 (c) 导流板倾角 (d) 还田速率

图 8 单因素对秸秆抛撒分布的影响

Fig. 8 Effects of single factor on straw spreading distribution

4.3.2　扇叶偏角

保持抛撒盘转速、导流板倾角、还田速率分别为250 r/min、35°、5 kg/s，扇叶偏角为-20°、-10°、0°、10°、20°，共进行5组仿真试验。横向幅宽方向秸秆分布规律如图8b所示，峰值与扇叶偏角呈反比，随扇叶偏角增大，秸秆分布峰值逐渐降低、且变化趋势渐缓，秸秆横向分布变异系数减小，分布均匀性提高。

4.3.3　导流板倾角

保持抛撒盘转速、扇叶偏角、还田速率分别为250 r/min、0°、5kg/s，导流板与水平方向安装倾角为30°、32.5°、35°、37.5°、40°，共进行5组仿真试验。横向幅宽方向秸秆分布规律如图8c所示，在上述范围内，随导流板倾角增大，秸秆分布峰值先减小后增大，倾角为30°时，秸秆分布曲线在中间位置出现较大波动，其两端与32.5°、35°倾角的秸秆分布曲线大致重合；观察仿真过程发现，倾角过小时，少部分秸秆未落至抛撒盘上，而从盘前间隙直接落地。

4.3.4　还田速率

保持抛撒盘转速、扇叶偏角、导流板倾角分别为250 r/min、0°、35°，还田速率为3、4、5、6 kg/s，共进行4组仿真试验。横向幅宽方向秸秆分布规律如图8d所示，随秸秆还田速率变化，秸秆分布质量曲线出现明显波动，影响秸秆横向分布均匀性，还田速率增大，秸秆均匀性变异系数增加，分布图形逐渐向梯形转变，6 kg/s时变异系数最大，达到44.73%，抛撒效果较差。

5　台架试验

5.1　试验条件

在黑龙江省哈尔滨市松北农牧机械厂（北纬45°79′，东经126°62′）进行主动离心式水稻秸秆抛撒装置的试验台试验（图9）。试验选用收获后未经粉碎直接铺放田间的水稻秸秆，秸秆平均长度为715 mm、平均含水率为32.8%。试验台主要包括直流减速电机、直流调速电机、粉碎装置、离心抛撒装置和传送带等。



图9　台架试验

Fig. 9　Bench experiment

1. 喂入罩　2. 粉碎直流减速电机　3. 抛撒直流调速电机　4. 固定台架　5. 粉碎装置　6. 主动离心式抛撒装置

试验时将秸秆放至传送带实现均匀喂入，由电机分别为粉碎轴和抛撒盘提供动力，利用变频器调节抛撒转速，并通过卷轴滚子的相对运动代替机器前进承接秸秆。

5.2　试验评价指标

实际抛撒过程中，秸秆横向抛撒距离应与收获机作业幅宽保持一致，距离过大会导致秸秆抛至未收获区域影响收获，过小则无法均匀覆盖整块地表，因此选取抛撒幅宽、横向均匀性变异系数作为评价指标，参照GB/T 24675.6-2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》测定方法[29]，进行Box-Behnken试验，确定主动离心式秸秆抛撒装置最优作业参数。

5.3　试验方案与结果分析

通过抛撒单因素仿真试验与国内外抛撒装置的相关研究，结合秸秆还田的实际需求，确定抛撒盘转速为200~300 r/min、扇叶倾角为-10°~20°、导流板偏角为30°~35°、还田速率为3~5 kg/s，利用Design-Expert 8.0.6软件进行Box-Behnken试验设计，对指标显著性进行分析，确定各因素及其交互作用对试验指标的影响，得到主动离心式抛撒装置最优参数组合。试验因素编码如表3所示，试验方案与结果如表4所示，X_1、X_2、X_3、X_4为编码值。

表3　试验因素编码

Tab. 3　Experimental factors and codes

编码	因素			
	抛撒盘转速/(r·min^{-1})	扇叶偏角/(°)	导流板倾角/(°)	还田速率/(kg·s^{-1})
1	300	20	35.0	5
0	250	5	32.5	4
-1	200	-10	30.0	3

表4　试验方案与结果

Tab .4　Experimental design and results

试验编号	因素				横向均匀性变异系数Y_1/%	抛撒幅宽Y_2/ m
	X_1	X_2	X_3	X_4		
1	-1	-1	0	0	49.84	3.87
2	1	-1	0	0	25.13	4.97
3	-1	1	0	0	29.73	4.75
4	1	1	0	0	15.37	5.21
5	0	0	-1	-1	19.76	4.38
6	0	0	1	-1	17.02	4.36
7	0	0	-1	1	33.86	4.67
8	0	0	1	1	29.73	4.42
9	-1	0	0	-1	24.83	4.16
10	1	0	0	-1	16.84	4.76
11	-1	0	0	1	44.72	4.01
12	1	0	0	1	24.34	5.08
13	0	-1	-1	0	34.78	4.31
14	0	1	-1	0	20.31	4.83
15	0	-1	1	0	30.29	4.06
16	0	1	1	0	18.06	4.78
17	-1	0	-1	0	35.23	4.21
18	1	0	-1	0	20.32	4.93
19	-1	0	1	0	33.25	4.24
20	1	0	1	0	18.07	4.86
21	0	-1	0	-1	29.10	4.10
22	0	1	0	-1	16.28	4.85
23	0	-1	0	1	46.17	4.31
24	0	1	0	1	26.06	4.97
25	0	0	0	0	25.17	4.57
26	0	0	0	0	22.31	4.57
27	0	0	0	0	24.88	4.61
28	0	0	0	0	27.01	4.47
29	0	0	0	0	23.47	4.39

5.3.1 回归模型与显著性方差分析

对试验结果进行二次回归分析，并进行多元参数拟合，得到横向均匀性变异系数Y_1和抛撒幅宽Y_2两个评价指标的回归方程，对其显著性进行检验。

横向均匀性变异系数Y_1方差分析结果如表5所示，试验模型极显著（P<0.01）。影响秸秆抛撒横向均匀性变异系数Y_1主次因素依次为抛撒盘转速X_1、扇叶偏角X_2、还田速率X_4、导流板倾角X_3。抛撒盘转速X_1、扇叶偏角X_2、导流板倾角X_3、还田速率X_4、抛撒盘转速X_1与扇叶偏角X_2交互项、抛撒盘转速X_1与还田速率X_4交互项、抛撒盘转速二次项X_1^2、扇叶偏角二次项X_2^2和还田速率二次项X_4^2对横向均匀性变异系数Y_1存在极显著的影响（P<0.01）；扇叶偏角X_2与还田速率X_4交互项对横向均匀性变异系数Y_1存在显著影响（0.01≤P<0.05）；其他因素对横向均匀性变异系数Y_1不显著（P>0.1）。将不显著交互项和二次主效应项平方和、自由度并入残差项，剔除不显著因素，进行回归分析，得到各因素对横向均匀性变异系数Y_1影响的回归方程为

$$Y_1 = 21.95 - 8.13X_1 - 7.46X_2 - 1.49X_3 + 6.75X_4 + 2.59X_1X_2 - 3.10X_1X_4 - 1.82X_2X_4 + 3.85X_1^2 + 4.28X_2^2 + 2.73X_4^2 \tag{25}$$

表5 横向均匀性变异系数方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis of variation coefficient of transverse uniformity

变异来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	2 327.67	14	166.26	62.62	<0.000 1***
X_1	792.68	1	792.68	298.53	<0.000 1***
X_2	667.52	1	667.52	251.40	<0.000 1***
X_3	26.52	1	26.52	9.99	0.006 9***
X_4	547.43	1	547.43	206.17	<0.000 1***
X_1X_2	26.78	1	26.78	10.09	0.006 7***
X_1X_3	0.018	1	0.018	6.86×10^{-3}	0.935 1
X_1X_4	38.38	1	38.38	14.45	0.001 9***
X_2X_3	1.25	1	1.25	0.47	0.503 1
X_2X_4	13.29	1	13.29	5.00	0.042 1**
X_3X_4	0.48	1	0.48	0.18	0.676 2
X_1^2	101.86	1	101.86	38.36	<0.000 1***
X_2^2	125.23	1	125.23	47.16	<0.000 1***
X_3^2	2.25	1	2.25	0.85	0.372 9
X_4^2	52.42	1	52.42	19.74	0.000 6***
残差	37.17	14	2.66		
失拟项	29.27	10	2.93	1.48	0.375 9
误差	7.91	4	1.98		
总和	2 364.84	28			

注：***表示极显著（P<0.01），**表示显著（0.01≤P<0.05），下同。

对上述回归性方程进行失拟性检验，P>0.1，不显著，证明不存在其他影响指标的主要因素，试验指标与试验因素存在显著的二次关系。

抛撒幅宽Y_2方差分析结果如表6所示，试验模型极显著（P<0.01）。影响秸秆抛撒幅宽Y_2主次因素依次为抛撒盘转速X_1、扇叶偏角X_2、还田速率X_4、导流板倾角X_3。抛撒盘转速X_1、扇叶偏角X_2和抛撒盘转速X_1与扇叶偏角X_2交互项对抛撒幅宽Y_2存在极显著影响（P<0.01）；还田速率X_4、抛撒盘转速X_1与还田速率X_4的交互项和抛撒盘转速二次项X_1^2对抛撒幅宽Y_2存在显著影响（0.01≤P<0.05）；导流板倾角X_3和扇叶偏角二次项X_2^2对抛撒幅宽Y_2存在较显著影响（0.05≤P<0.1）；其他因素对抛撒幅宽Y_2不显著（P>0.1）。将不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差项，剔除不显著因素，进行回归分析，得到各因素对抛撒幅宽Y_2影响的回归方程为

$$Y_2 = 4.47 + 0.38X_1 + 0.31X_2 - 0.051X_3 + 0.071X_4 - 0.16X_1X_2 + 0.12X_1X_4 + 0.09X_1^2 + 0.081X_2^2 \tag{26}$$

表6 抛撒幅宽方差分析结果

Tab. 6 Variance analysis of spreading width

变异来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	3.32	14	0.24	33.24	<0.000 1***
X_1	1.74	1	1.74	243.83	<0.000 1***
X_2	1.18	1	1.18	165.93	<0.000 1***
X_3	0.031	1	0.031	4.34	0.055 9*
X_4	0.06	1	0.06	8.44	0.011 5**
X_1X_2	0.10	1	0.10	14.35	0.002 0***
X_1X_3	2.5×10^{-3}	1	2.5×10^{-3}	0.35	0.563 4
X_1X_4	0.055	1	0.055	7.74	0.014 7**
X_2X_3	0.01	1	0.01	1.40	0.256 3
X_2X_4	2.03×10^{-3}	1	2.03×10^{-3}	0.28	0.602 6
X_3X_4	0.013	1	0.013	1.85	0.195 0
X_1^2	0.036	1	0.036	5.09	0.040 6**
X_2^2	0.032	1	0.032	4.43	0.053 8*
X_3^2	0.016	1	0.016	2.29	0.152 7
X_4^2	0.015	1	0.015	2.06	0.172 7
残差	0.1	14	7.14×10^{-3}		
失拟项	0.067	10	6.75×10^{-3}	0.83	0.632 2
误差	0.032	4	8.12×10^{-3}		
总和	3.42	28			

注：*表示较显著（0.05≤P<0.1）。

对上述回归性方程进行失拟性检验，P>0.1，不显著，证明不存在其他影响指标的主要因素，试验指标与试验因素存在显著的二次关系。

5.3.2 响应曲面

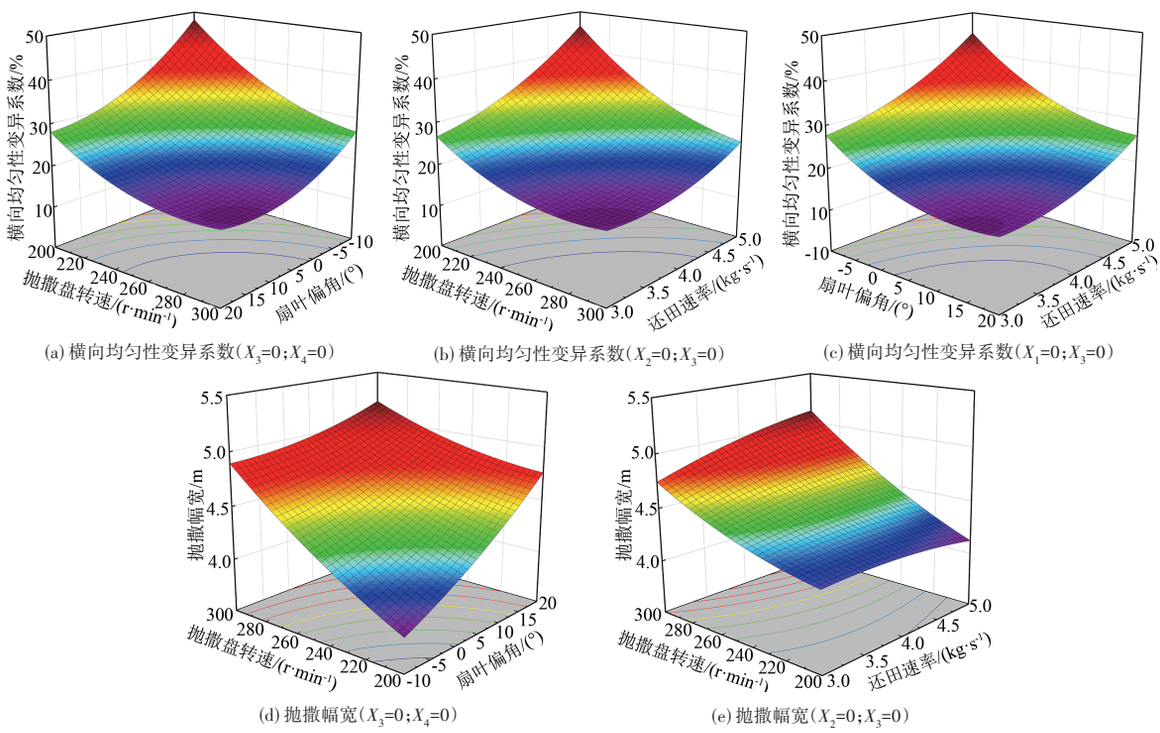
利用Design-Expert 8.0.6软件对交互作用显著项进行响应曲面分析，如图10所示。

当导流板倾角为32.5°、还田速率为4 kg/s时，抛撒盘转速与扇叶偏角对横向均匀性变异系数和抛撒幅宽的影响如图10a、10d所示。当抛撒盘转速一定时，扇叶偏角与横向均匀性变异系数呈负相关，与抛撒幅宽呈正相关，这是因为随着扇叶偏角增大，秸秆沿扇叶末端离盘的绝对速度变大，从而有利于提高抛撒均匀性与抛撒幅宽，其较优扇叶偏角为2°~20°。当扇叶偏角一定时，抛

撒盘转速与横向均匀性变异系数呈负相关，与抛撒幅宽呈正相关，这是因为随着抛撒盘转速增加，抛撒盘外径线速度提升，秸秆抛离圆盘速度增大，从而提高了抛撒均匀性与抛撒幅宽，其较优抛撒盘转速为235~290 r/min。相对于扇叶偏角，抛撒盘转速为主要影响因素。

当扇叶偏角为5°、导流板倾角为32.5°时，抛撒盘转速与还田速率对横向均匀性变异系数和抛撒幅宽的影响如图10b、10e所示。当抛撒盘转速一定时，还田速率与横向均匀性变异系数和抛撒幅宽均呈正相关，当还田速率减小，秸秆均匀流动性提高，秸秆横向抛撒不均匀性降低，但质量减小动能也降低，从而抛撒幅宽偏小，其较优还田速率为3.2~4.8 kg/s。当还田速率一定时，抛撒盘转速与横向均匀性变异系数呈负相关，与抛撒幅宽呈正相关，随着抛撒盘转速逐渐增大，施加在碎秆上的能量变大，秸秆离盘速度增加，从而有利于提高秸秆横向抛撒均匀性与抛撒幅宽，其较优抛撒盘转速为232 ~298 r/min。相对于还田速率，抛撒盘转速为主要影响因素。

当抛撒盘转速为250 r/min、导流板倾角为32.5°时，扇叶偏角与还田速率对横向均匀性变异系数和抛撒幅宽的影响如图10c所示。当扇叶偏角一定时，还田速率与横向均匀性变异系数呈正相关，这是因为随还田速率增加，秸秆易缠绕堆积，抛撒流动性变差，横向均匀性变异系数较高，其较优还田速率为3~4.8 kg/s。当还田速率一定时，扇叶偏角与横向均匀性变异系数呈负相关，这是因为随扇叶偏角增加，秸秆沿扇叶滑移流动性提高，抛离圆盘的绝对速度增大，从而提高了抛撒均匀性，其较优扇叶偏角为-6°~20°。相对于还田速率，扇叶偏角为主要影响因素。



(a) 横向均匀性变异系数(X_3=0;X_4=0)　(b) 横向均匀性变异系数(X_2=0;X_3=0)　(c) 横向均匀性变异系数(X_1=0;X_3=0)

(d) 抛撒幅宽(X_3=0;X_4=0)　(e) 抛撒幅宽(X_2=0;X_3=0)

图 10　双因素响应曲面

Fig. 10　Response surfaces of double parameters

5.3.3　参数优化

根据响应曲面分析结果，应用Design-Expert 8.0.6软件中的优化模块，对2个试验指标的回归模型进行优化。结合秸秆抛撒装置的实际工作条件及作业要求，选取约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1,X_2,X_3,X_4) \\ \max Y_2(X_1,X_2,X_3,X_4) \\ \text{s.t.}\begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_4 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{27}$$

对各个参数进行优化，最终得出较优的参数组合为抛撒盘转速为254.96 r/min、抛撒扇叶偏角为7.19°、导流板倾角为34.7°、还田速率为3.5 kg/s，此时横向均匀性变异系数为16.83%，抛撒幅宽为4.5 m。

6　田间验证试验

为验证优化结果的可靠性及抛撒性能指标，进行了c120/c100型水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置田间验证试验，并与原装配套导流式秸秆抛撒装置进行（采用联合收获机秸秆粉碎装置挂接导流式抛撒装置）对比试验。

在优化参数基础上，综合考虑装置稳定性、安全性以及调节简便性，确定抛撒盘转速为255 r/min，抛撒扇叶偏角为7°、导流板倾角为35°、还田速率为3.5 kg/s。作业后分别测量计算2组秸秆抛撒的横向均匀性变异系

数及抛撒幅宽，每组试验进行5次取平均值，得到试验结果如表7所示。由表7可知，水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置的抛撒横向均匀性变异系数为17.34%，抛撒幅宽为4.58 m，误差均小于5%，与优化结果基本一致，且符合GB/T 24675.6-2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》中规定的抛撒不均匀性不大于30%和抛撒幅宽与收割幅宽尽可能一致的要求，相关优化组合合理。

表7 对比试验结果

Tab. 7 Comparison bench test results

抛撒装置类型	横向均匀性变异系数/%	抛撒幅宽/m
主动离心式秸秆抛撒装置	17.34	4.58
导流式秸秆抛撒装置	34.08	4.16

水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置相较于原装导流式秸秆抛撒装置的抛撒横向均匀性变异系数较小、抛撒均匀性好，抛撒幅宽更接近收割幅宽。水稻联合收获机主动离心式秸秆抛撒装置抛撒性能明显优于原装导流式秸秆抛撒装置。

6 结论

（1）针对联合收获机水稻收获作业秸秆抛撒不均问题，设计了一种主动离心式水稻秸秆抛撒装置，通过对导流板导秆落盘、抛撒盘离心抛秆、秸秆空中抛离3个运动过程理论分析，确定了导流单元、离心抛撒单元等关键部件结构参数。

（2）建立稻秆抛撒离散元模型，进行单因素仿真试验，明确抛撒盘转速、扇叶偏角、导流板倾角和还田速率对抛撒横向均匀性变异系数的影响规律，并缩小参数范围。采用Box-Behnken试验，分析各因素对横向均匀性变异系数及抛撒幅宽的影响，得出各因素与试验指标间的回归模型及较优的参数组合。

（3）田间验证结果表明，当抛撒盘转速为255 r/min、抛撒扇叶偏角为7°、导流板倾角为35°、还田速率为3.5 kg/s时，主动离心式水稻秸秆抛撒装置抛撒横向均匀性变异系数为17.34%，抛撒幅宽为4.58 m，与预测值误差小于5%，指标满足设计要求。抛撒性能相较于原装导流式秸秆抛撒装置更优。

参 考 文 献

[1] 王金武，唐汉，王金峰.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J].农业机械学报，2017，48(5)：1-21.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. (in Chinese)

[2] 孟祥宇，冉成，刘宝龙，等.秸秆还田配施氮肥对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J].作物杂志，2021(3)：167-172.
MENG Xiangyu, RAN Cheng, LIU Baolong, et al. Effects of straw returning to field and nitrogen application on soil nutrients and rice yield in black soil areas of Northeast China[J]. Crops, 2021(3): 167-172. (in Chinese)

[3] 何艳，严田蓉，郭长春，等.秸秆还田与栽插方式对水稻根系生长及产量的影响[J].农业工程学报，2019，35(7)：105-114.
HE Yan, YAN Tianrong, GUO Changchun, et al. Effect of methods of straw returning and planting on root growth and rice yield[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 105-114. (in Chinese)

[4] 孙妮娜，王晓燕，李洪文，等.东北稻区不同秸秆还田模式机具作业效果研究[J].农业机械学报，2018，49(增刊)：68-74，154.
SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Performance of straw returning equipment under different mechanized straw returning pattern in northeast rice area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 68-74, 154. (in Chinese)

[5] 王金武，王奇，唐汉，等.水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J].农业机械学报，2015，46(9)：112-117.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112-117. (in Chinese)

[6] SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of rice straw spreading and plowing combined machine[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2020, 29(2): 136-144.

[7] 王金峰，张鑫，唐汉，等.水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J].农业机械学报，2021，52(11)：28-39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28-39. (in Chinese)

[8] 孙妮娜，王晓燕，李洪文，等.水稻秸秆直接还田技术配套机具研究进展[J].农机化研究，2019，41(7)：1-7.
SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Study on the technology and equipment of rice straw direct returning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 1-7. (in Chinese)

[9] WANG Jiang, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Research progress on straw chopping and spreading technology and machinery[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2020, 29(3): 226-234.

[10] 王昕，金诚谦，徐金山，等.联合收割机后秸秆切碎抛撒研究现状与趋势[J].中国农机化学报，2018，39(1)：1-6.
WANG Xin, JIN Chengqian, XU Jinshan, et al. Research status and trend of the crop straws of combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(1): 1-6. (in Chinese)

[11] CLASS LEXION系列收获机[EB/OL]. https://www.claas.co.uk/products/combines/lexion-8900-7400.html.

[12] CASE IH Axial-flow系列收获机[EB/OL]. https://www.caseih.com/emea/es-es/productos/harvesting/axial-flow-150-series.html.

[13] 章志强，何进，李洪文，等.可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J].农业机械学报，2017，48(9)：76－87.
ZHANG Zhiqiang，HE Jin，LI Hongwen，et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(9)：76－87.（in Chinese）

[14] 王将，王晓燕，李洪文，等.水稻秸秆激荡滑切与撕裂两级切割粉碎装置设计与试验[J].农业机械学报，2021，52(10)：28－40.
WANG Jiang，WANG Xiaoyan，LI Hongwen，et al. Design of rice straw chopping device for agitation sliding cutting and tearing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(10)：28－40.（in Chinese）

[15] 王昕，金诚谦，徐金山，等.稻麦联合收获机秸秆撒布板调节方式试验与优化[J].农机化研究，2019，41(8)：127－135.
WANG Xin，JIN Chengqian，XU Jinshan，et al. Study and design optimization on the angle adjustments of the straw spreader panel in a combined wheat harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(8)：127－135.（in Chinese）

[16] 史乃煜，陈海涛，魏志鹏，等.基于最速降线原理的免耕播种机强制回土装置研究[J].农业机械学报，2020，51(2)：37－44.
SHI Naiyu，CHEN Haitao，WEI Zhipeng，et al. Design and test of forced-return device based on principle of brachistochrone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(2)：37－44.（in Chinese）

[17] 李胜强，谭铭，张展博.含黏性力最速降线问题的最优化解法及其在ADS设计中的应用[J].清华大学学报(自然科学版)，2018，58(6)：563－569.
LI Shengqiang，TAN Ming，ZHANG Zhanbo. An optimization method of brachistochrone problem with viscous friction and its application in ADS design[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2018，58(6)：563－569.（in Chinese）

[18] 滕悦江，金诚谦，陈艳普，等.稻麦联合收获机分段式脱粒装置设计与优化[J].农业工程学报，2020，36(12)：1－12.
TENG Yuejiang，JIN Chengqian，CHEN Yanpu，et al. Design and optimization of segmented threshing device of combine harvester for rice and wheat[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(12)：1－12.（in Chinese）

[19] 李宝垒.农业机械学[M].北京：中国农业出版社，2003

[20] 张国忠，王洋，刘浩蓬，等.离心侧抛式藕田撒肥器设计与试验[J].农业工程学报，2021，37(19)：37－47.
ZHANG Guozhong，WANG Yang，LIU Haopeng，et al. Design and experiments of the centrifugal side throwing fertilizer spreader for lotus root fields[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(19)：37－47.（in Chinese）

[21] 施印炎，陈满，汪小旦，等.离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J].农业机械学报，2018，49(3)：86－93，113.
SHI Yinyan，CHEN Man，WANG Xiaochan，et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(3)：86－93，113.（in Chinese）

[22] 芦新春，陈书法，杨进，等.宽幅高效离心式双圆盘撒肥机设计与试验[J].农机化研究，2015，37(8)：100－103.
LU Xinchun，CHEN Shufa，YANG Jin，et al. Design and experiment on double-disc spreader with wide breadth and highly efficiency[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2015，37(8)：100－103.（in Chinese）

[23] 农业机械化管理司.主要农作物秸秆机械化还田技术模式[EB/OL].（2017-12-22）[2018-09-12]. http://www.njhs.moa.gov.cn/keji/ 201712/ t20171227_6129152. html.

[24] 施丽莉，顾峰玮，胡志超，等.稻茬麦覆秸还田播种机均匀抛撒机理分析与机构优化[J].农业机械学报，2022，53(7)：74－83.
SHI Lili，GU Fengwei，HU Zhichao，et al. Analysis and optimization of uniform throwing device by no-tillage planter of wheat after rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(7)：74－83.（in Chinese）

[25] 方会敏，姬长英，Ahmed Ali Tagar，等.秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J].农业机械学报，2016，47(1)：60－67.
FANG Huimin，JI Changying，AHMED Ali Tagar，et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(1)：60－67.（in Chinese）

[26] JIA Honglei，DENG Jiayu，DENG Yanling，et al.Contact parameter analysis and calibration in discrete element simulation of rice straw [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2021，14(4)：72－81.

[27] 孙妮娜，董文军，王晓燕，等.东北稻区水稻收获秸秆处理方式综合效果研究[J].农业机械学报，2020，51(4)：69－77.
SUN Nina，DONG Wenjun，WANG Xiaoyan，et al. Comprehensive effect of rice harvesting straw treatment methods in northeast rice region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：69－77.（in Chinese）

[28] 祝延立，那伟，郗登宝，等.吉林省主要农作物秸秆系数测定及资源评价[J].农业科技通讯，2020(7)：188－190.

[29] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 24675.6-2009 保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机[S].北京：中国标准出版社，2009