

引用格式:

张彪, 王邦追, 王国强, 荆天天, 唐忠, 吴美玲, 李亚健. 水稻秸秆在割台螺旋搅龙输送下的流动特性分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(2): 97-102.

ZHANG B, WANG B Z, WANG G Q, JING T T, TANG Z, WU M L, LI Y J. Analysis of the flow characteristics of rice straw transported by spiral churn on cutting tables[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(2): 97-102.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



水稻秸秆在割台螺旋搅龙输送下的流动特性分析

张彪¹, 王邦追¹, 王国强^{2*}, 荆天天¹, 唐忠¹, 吴美玲², 李亚健²

(1.江苏大学农业工程学院, 江苏 镇江 212013; 2.江苏省现代农牧装备工程技术研究开发中心, 江苏 泰州 225300)

摘要: 针对水稻秸秆在割台螺旋搅龙输送下的流动规律不明而难以揭示割台磨损现象的问题, 笔者分析收获过程中联合收割机割台螺旋搅龙对水稻秸秆接触单元体的输送状态, 建立流动速度数学模型, 绘制水稻秸秆质心的运动轨迹曲线; 采用离散元法模拟收获过程中螺旋搅龙对水稻秸秆的输送效果, 得到水稻秸秆质心处的运动轨迹曲线; 测绘割台磨损轮廓曲线, 并对水稻秸秆的理论运动轨迹曲线和仿真的运动轨迹曲线及割台的磨损轮廓曲线进行对比分析。结果表明: 当摩擦因数从0.3下降至0.1时, 螺旋叶片外缘带动水稻秸秆的轴向速度从1 058.83 mm/s提升至1 123.59 mm/s, 圆周向速度从670.59 mm/s下降至439.40 mm/s。仿真的水稻秸秆运动轨迹曲线和理论水稻秸秆运动轨迹的相似度较高, 均方误差为0.386 7~6.188 3; 磨损轮廓曲线与理论轨迹曲线仅在水稻秸秆与螺旋叶片接触后的轴向位移处于0~64 mm时的相似度较高, 整体曲线的均方误差为29.637 6。

关键词: 水稻秸秆; 螺旋搅龙; 流动特性; 运动轨迹; 离散元仿真

中图分类号: S225.31

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)02-0097-06

Analysis of the flow characteristics of rice straw transported by spiral churn on cutting tables

ZHANG Biao¹, WANG Bangzhui¹, WANG Guoqiang^{2*}, JING Tiantian¹, TANG Zhong¹, WU Meiling², LI Yajian²

(1.College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2.Jiangsu Modern Agricultural and Animal Husbandry Equipment Engineering Technology Research and Development Center, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: To address the difficulty in revealing the abrasion mechanisms due to the unknown flow pattern of the rice straw transported by the spiral churn of the cutting table, this study investigated the conveying process of rice straw by the combine harvester header auger during harvesting. The behavior of rice straw contact units was analyzed, and a mathematical model of flow velocity was established to plot the trajectory of the straw's centroid. Discrete element method simulations were employed to model the conveying process, obtaining the centroid trajectory. The wear profile of the header was measured and compared with the theoretical and simulated straw trajectories. The results showed that when the friction coefficient decreased from 0.3 to 0.1, the axial velocity of rice straw driven by the outer edge of the spiral blades increased from 1 058.83 mm/s to 1 123.59 mm/s, while the circumferential velocity decreased from 670.59 mm/s to 439.40 mm/s. The simulated straw trajectory closely matches the theoretical model, with a mean square error of 0.386 7-6.188 3. However, the wear profile aligned well with the theoretical trajectory only when the axial displacement of rice straw and spiral blade contact ranged from 0 to 64 mm, with an overall MSE of 29.637 6.

收稿日期: 2024-01-12

修回日期: 2025-01-22

基金项目: 泰州市科技支撑计划(农业)项目(TN202219); 2022年度国家农业可持续发展试验示范区建设市级财政专项资金项目(ZK20230001)

作者简介: 张彪(1999—), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 主要从事智能农机装备理论与技术研究, 1027540269@qq.com; *通信作者, 王国强, 硕士, 副教授, 主要从事智能农业装备结构设计及关键技术研发, 2008020159@jsahvc.edu.cn

Keywords: rice straw; spiral churn; flow characteristics; trajectory; discrete element simulation

水稻联合收割机的工作环境恶劣^[1],割台装置表面被水稻秸秆磨损后,容易发生锈蚀进而出现漏洞,影响整机性能^[2]。SCHEWE等^[3]用磨损试验证实了Archard磨损模型在磨损评估中的有效性,但这个模型的应用需要获取法向载荷、滑移距离等动态参数,这需要对物料与部件的接触运动规律进行分析。许林云等^[4]提出了计算果实特征点与质心坐标系变化计算方法,构建了果实在运动瞬时姿态的平移、摆动及旋转的运动模型。辛亚鹏等^[5]根据撒肥盘对肥料颗粒的作用情况,从力学、能量碰撞角度分析颗粒的运动情况。杨善东等^[6]为优化所设计的甜菜分离输送装置,对各输送器与土壤、甜菜进行运动分析,构建了运动学方程。王万章等^[7]根据拉格朗日-达朗伯方程分析了割台螺旋搅龙在小麦输送过程中的动态受力情况。连国党等^[8]与罗海峰等^[9]分别以食葵、土壤为物料,选取螺旋叶片上物料单元为质点进行了力学和运动学分析。QI等^[10]采用三因素三水平响应面法分析了仿真中沙土、果实的运动参数,并以此对装置结构进行参数优化。彭才望等^[11]通过分析虫沙在双向螺旋结构中的运动特性,确定了主要结构的参数以及螺旋叶片与虫沙力学性能之间的函数关系。乌兰图雅等^[12]基于揉碎的玉米秸秆的可压缩性及螺旋搅龙工作参数建立了输送过程的数学模型,进而分析了螺旋叶片的受力、生产率和输送效率等输送指标情况。

李佳俊等^[13]使用高速摄影系统观察了不同导种管中种子的运移轨迹。为更准确地得到物料颗粒的实时运动参数,学者们开始使用仿真软件进行分析。CHEN等^[14]对玉米种子进行参数标定,采用离散元法(DEM)预测种子在损伤测试仪中的运动和损伤的具体参数,得到了较好的效果。WANG等^[15]使用虚拟键构建了水稻柔性秸秆,用于模拟籽粒与不同面积秸秆的分离效果。KANG等^[16]通过计算流体力学(CFD)和DEM耦合的方法模拟固液混合物在泵中的流动情况,结合颗粒对泵的相互作用对泵的磨损程度进行量化。上述研究主要聚焦于农业机械对不同物料的处理过程,通过力学、运动学及数值模拟等方法,深入分析物料与部件的相互作用规律,并用试验进行验证。目前,针对割台中水稻秸

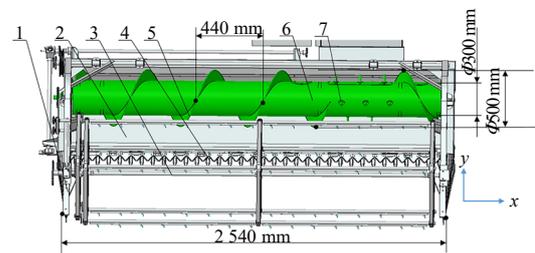
秆流动的数学模型和离散元仿真研究较少。

为此,本研究中,通过分析水稻收获过程中螺旋搅龙的受力情况,研究螺旋叶片工作参数对水稻秸秆输送运动规律的影响,建立水稻秸秆运动轨迹模型;通过割台磨损的轮廓轨迹对比分析所建立的模型轨迹与实际运动磨损轨迹的差异,以期为进行割台磨损研究和改善割台装置设计提供依据。

1 割台的结构与原理

1.1 割台及其螺旋搅龙输送装置介绍

水稻联合收割机的割台装置主要用于田间作物收割与输送。本研究中,以现有割台装置为基础,着重分析水稻秸秆的流动轨迹。割台整体结构主要包括分禾器、拨禾轮、往复切割装置、螺距搅龙、割台框架等部件,其中螺旋搅龙是水稻秸秆输送的核心部件,主要结构包括螺旋滚筒、螺旋叶片、伸缩拨指等部分,如图1所示。



1 分禾器; 2 割台框架; 3 拨禾轮; 4 往复切割装置; 5 螺旋叶片; 6 螺旋滚筒; 7 伸缩拨指; 螺旋搅龙的轴线方向为x方向; 收割机前进的方向为y方向。

图1 割台装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the cutting table device

工作时,水稻秸秆在拨禾轮和往复式割刀作用下被拨送至螺旋搅龙处,依靠螺旋叶片和水稻秸秆的接触推动水稻秸秆沿轴向移动,将其输送至伸缩拨指处,经伸缩拨指拨向输送槽以完成水稻秸秆输送作业。

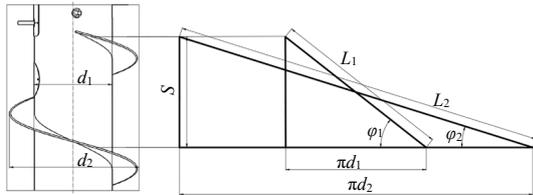
1.2 螺旋搅龙结构分析

水稻秸秆的散落性较好,为长秆状物料,故本研究中,选用正螺旋面的满面式螺旋叶片(图2)进行分析,螺旋叶片上任一点与螺旋轴线夹角为该点螺旋升角(φ):

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{S}{2\pi R} \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \cos \varphi = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{S}{2\pi R} \right)^2} \\ \sin \varphi = \frac{S}{2\pi R} \sqrt{1 + \left(\frac{S}{2\pi R} \right)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中： R 为水稻秸秆与螺旋叶片的接触到轴线的距离； S 为螺距。



d_1 螺旋轴轴颈； πd_1 螺旋轴轴颈周长； d_2 螺旋叶片直径； πd_2 螺旋叶片外缘的周长； L_1 内螺旋线； L_2 外螺旋线； φ_1 内螺旋升角； φ_2 外螺旋升角。

图2 螺旋搅龙尺寸参数

Fig.2 Spiral churn size parameters

2 水稻秸秆的运移特性

2.1 水稻秸秆力学分析

水稻秸秆和螺旋叶片之间的接触为面接触，为方便分析受力情况，将接触面积简化为单元体，分析螺旋叶片对水稻秸秆接触单元体的作用力。从图3可知，总合力(F)由螺旋叶片对水稻秸秆的支持力(F_1)和摩擦力(f_1)组成，它可以分解为沿轴向分力(F_x)和绕圆周向力(F_t)。

$$\begin{cases} F_x = F \cos(\varphi + \psi) \\ F_t = F \sin(\varphi + \psi) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\psi = \tan^{-1} \mu$ ，为摩擦导致的偏移角； μ 为金属对水稻秸秆的摩擦因数。

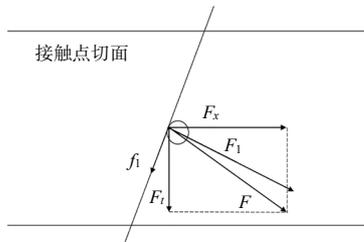


图3 螺旋叶片与水稻秸秆接触单元体的受力情况

Fig.3 The force situation of the unit cell in contact with rice straw by spiral blades

2.2 水稻秸秆流动状态分析

从图4可知，割台装置中将割台框架设定为定坐标系，而螺旋搅龙整体作为动参考系，物料与螺旋搅龙叶片接触的单元体简化为动点。

$$\begin{cases} v_c = \frac{2\pi n R}{60} = \frac{\pi n R}{30} \\ v_a = v_c \sin \varphi = \frac{\pi n R}{30} \sin \varphi \\ v_r = v_c \cos \varphi = \frac{\pi n R}{30} \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中： v_c 为牵连速度； v_a 为绝对速度； v_r 为相对速度； n 为转速。在实际工作中，由于水稻秸秆受到螺旋叶片摩擦力的作用，其实际运动方向会偏离叶片法线方向，故合速度可用式(5)表示。

$$\begin{cases} v = \frac{v_a}{\cos \psi} = \frac{\pi n R \sin \varphi}{30 \cos \psi} \\ v_x = v \cos(\varphi + \psi) \\ v_t = v \sin(\varphi + \psi) \end{cases} \quad (5)$$

式中： v 为合速度； v_x 为轴向速度； v_t 为圆周速度。

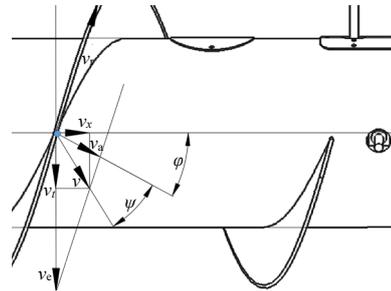


图4 水稻秸秆在螺旋叶片上的运动情况

Fig.4 Situation of the movement of rice straw on spiral blades

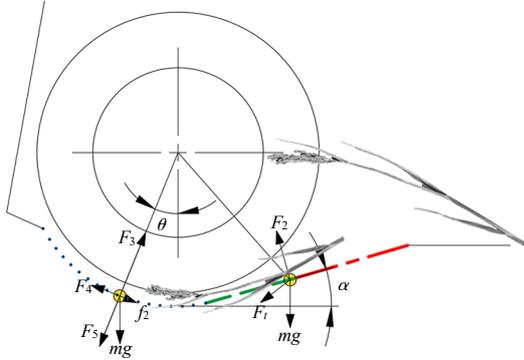
水稻秸秆在拨禾轮作用下与割台倾斜处接触，下移后与螺旋叶片接触、碰撞，水稻秸秆姿态发生偏转，水稻秸秆单元体的轴向速度在螺旋叶片和水稻秸秆群共同作用下不断上升，直至达到稳定输送状态，如图5中蓝色的点线所示，此时螺旋叶片所提供的水稻秸秆的轴向力可近似认为是水稻秸秆受到的轴向摩擦力。由式(5)可知，水稻秸秆单元体存在轴向速度和圆周向速度，将水稻秸秆单元体的摩擦力按圆周向和轴向进行分解，两者的比值即为圆周速度和轴向速度之比。在螺旋搅龙中填满物料，根据物料轴向向稳定输送状态下的力平衡条件可得：

$$F_x = \cos(\arctan \frac{v_t}{v_x}) \mu F_3 \quad (6)$$

结合式(3)可以求出圆周向力(F_t)为

$$F_t = \tan(\varphi + \psi) \cos(\arctan \frac{v_t}{v_x}) \mu F_3 \quad (7)$$

式中, F_3 为割台底板对水稻秸秆的支撑力。



F_2 法向支撑力; F_4 切向合力; F_5 离心力; f_2 割台底板对水稻的阻力; mg 水稻重力; α 割台底板与地平面的夹角; θ 水稻沿圆周方向的倾斜角。

图5 水稻秸秆在割台y-z面的受力情况

Fig.5 Force analysis of rice straw on the y-z plane of the header

水稻秸秆所处的割台底板位置为圆弧, 存在圆周速度, 故此时水稻秸秆单元体受到 F_5 、 mg 、 F_t 、 f_2 的作用(图5), 由此可以得出此时的 F_3 。

$$F_3 = m \frac{v_t^2}{R_3} + mg \cos \theta \quad (8)$$

式中: R_3 为割台底板圆弧段的半径。由式(8)可以得出水稻秸秆单元体所受到的 F_4 。

$$F_4 = F_t - \sin(\arctan \frac{v_t}{v_x}) \mu F_3 - mg \sin \theta \quad (9)$$

由牛顿第二定律, 结合式(1)、(2)、(7)、(8)、(9), 可得出水稻秸秆单元体的圆周速度(v_t)。

$$v_t = v_{t0} + \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \mu + \frac{S}{2\pi R} \cos(\arctan \frac{v_t}{v_x}) \\ 1 - \mu \frac{S}{2\pi R} \\ - \sin(\arctan \frac{v_t}{v_x}) \end{array} \right] dT \\ \left\{ \mu \left[\frac{v_t^2}{R_3} + g \cos(\theta) \right] \right\} - g \sin \theta \end{array} \right\} \quad (10)$$

式中: v_{t0} 为处于割台底板圆弧段时水稻秸秆单元体的圆周速度; T 为时间。

3 数值模拟及流动轨迹分析

3.1 水稻秸秆摩擦因数测定

使用斜坡试验装置对水稻茎秆和籽粒进行摩

擦因数的测定。将待测的秸秆与籽粒放置于可调节角度的钢板上, 钢板一侧铰接, 另一侧用绳子调节钢板的倾斜角度。当物料与钢板发生位移时记录水平仪所显示的角度, 据此计算秸秆的滑动摩擦因数和滚动摩擦因数。测得籽粒滑动摩擦因数为0.23~0.46, 平均值为0.32; 籽粒滚动摩擦因数为0.26~0.38, 平均值为0.29; 秸秆滑动摩擦因数为0.25~0.40, 平均值为0.32; 秸秆滚动摩擦因数为0.19~0.22, 平均值为0.21。

3.2 流速数值法模拟计算

为进一步分析水稻秸秆的流动规律, 将联合收割机割台装置的工作参数代入MATLAB进行计算($S=440$ mm, $n=170$ r/min, $R=150\sim 250$ mm)。由摩擦因数测定试验结果可知, 水稻茎秆与籽粒的摩擦因数范围包括0.3, 因此, 将 $\mu=0.3$ 作为水稻秸秆整体的摩擦因数代入式(2)、(5)进行计算, 可得水稻秸秆在螺旋叶片作用下的流动速度。

图6显示, 随着水稻秸秆与螺旋叶片的接触点到轴线的距离增大, 水稻秸秆的圆周向速度呈下降趋势, 而轴向速度呈上升趋势; 轴向速度随摩擦因数的上升而下降, 圆周向速度随摩擦因数的上升而上升。当摩擦因数从0.3下降到0.1时, 螺旋叶片外缘带动水稻秸秆的轴向速度从1 058.83 mm/s提升至1 123.59 mm/s, 圆周向速度从670.59 mm/s下降至439.40 mm/s。这说明摩擦因数的降低能够有效提升螺旋搅龙对水稻秸秆的输送效率。

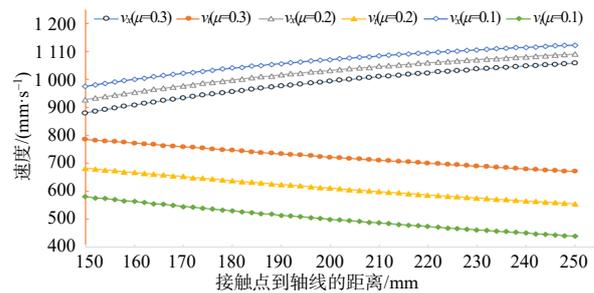


图6 不同摩擦因数下水稻秸秆的流动速度

Fig.6 Flow velocity of rice straw under varying coefficients of friction

水稻秸秆间的摩擦因数大于水稻秸秆与割台装置材料的摩擦因数, 并且由于形状和摩擦力使得割台底板的水稻秸秆会被螺旋叶片外缘处的水稻秸秆带着移动, 即处于割台底板的水稻秸秆的速度小于等于螺旋叶片外缘处水稻秸秆的速度, 即 $v_x \leq 1 058.83$ mm/s, $v_t \leq 737.65$ mm/s。

使用数值法,由式(10)迭代计算割台底板处水稻秸秆的圆周速度和移动的角度,将时间步长设为 0.000 1,总步数设为 5 000,代入 $v_i=737.65\text{ mm/s}$ 、 $R_3=275\text{ mm}$ 、 $R=250\text{ mm}$ 、 $\mu=0.3$ 计算,结果如图7所示。水稻秸秆因处在圆弧段之中,所受到的切向加速度为负值,圆周速度随运动时间的延长而下降,因为圆周速度 $>0\text{ mm/s}$,水稻秸秆所处的角度随运动时间的延长而上升,直至时间为 0.304 3 s 时,圆周速度近似为 0 mm/s,此时的水稻秸秆达到理论上的圆弧最高端点,然后下滑,但实际中,后续喂入的水稻秸秆会阻止处于极限位置的水稻秸秆向下滑移,使之仍然保持上升的趋势。

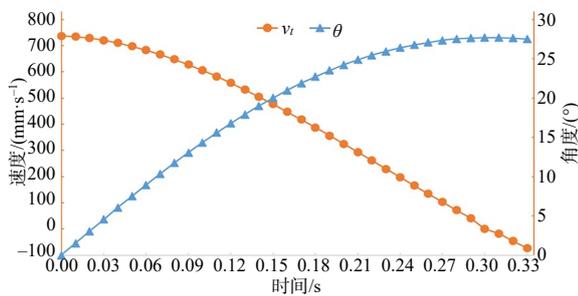


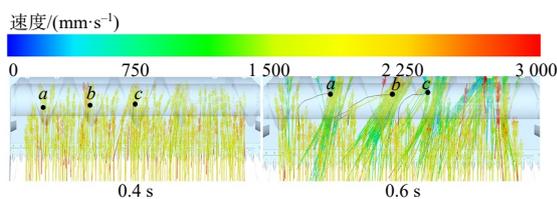
图7 水稻秸秆的圆周速度和移动角度

Fig.7 Rice straw circumferential velocity and angle of movement

3.3 基于离散元法水稻秸秆在割台中的流动情况

在EDEM中进行水稻秸秆建模,参照文献[15]设置水稻茎秆的空心圆柱体模型和颗粒间的接触参数,并采用本研究中测得的水稻茎秆和籽粒对Q235的平均摩擦因数进行割台输送仿真。颗粒工厂处于割刀正上方100 mm、长2 200 mm、宽4 mm;水稻秸秆长度为700 mm,以800株/s的速度在颗粒工厂范围内随机生成,方向为沿水平线倾斜15°。输送速度在y方向为1 600 mm/s,z方向(竖直向上)为-100 mm/s,重力加速度 $g=9\ 810\text{ mm/s}^2$ 。

利用EDEM后处理功能进行分析,取0.4、0.6 s时的运动进行相互比较(图8),图中各颜色表示水稻秸秆颗粒的速度;水稻的质心距离秸秆末端510 mm。



a、b、c为水稻秸秆质心;黑线为质心的运动轨迹。

图8 水稻秸秆的运动情况

Fig.8 Dynamic behavior of rice straw

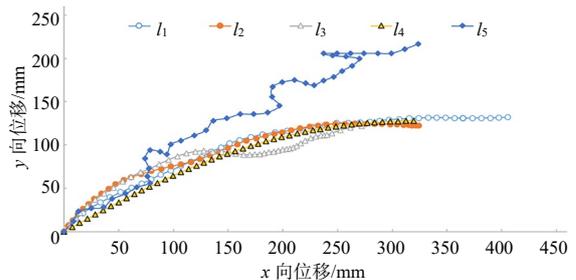
由图8可知,0.4 s时水稻秸秆从颗粒工厂输送至割台底板与螺旋搅龙之间,在重力加速度的作用下速度为600~2 970 mm/s,此时螺旋叶片推动少量水稻秸秆,因此,水稻秸秆质心的运动轨迹近似直线。

螺旋叶片和水稻秸秆开始接触时,水稻秸秆整体朝向沿顺时针偏转后被螺旋叶片推动输送,此时水稻秸秆的轴向速度呈波动式上下浮动,在推力和摩擦力带动下,秸秆沿圆周向转动和轴向滑动,整体轴向速度为400~1 400 mm/s,在0.6 s时可以发现,原本随机分布的水稻秸秆在螺旋叶片的推动下沿轴线方向汇集。观察质心运动轨迹可看出,位移的主要方向为轴线方向。

4 试验验证与轨迹分析

4.1 割台轮廓曲线测绘

物料接触滑移会产生磨损现象,可通过割台磨损轮廓表示水稻秸秆流动情况。针对割台的磨损边缘轮廓进行测绘,测绘的割台长度为2 540 mm,x-y投影的宽度为680 mm,螺旋搅龙轴线所处投影位置距离割台背板255 mm,螺旋滚筒直径为300 mm,螺旋叶片直径为500 mm。这些数值与代入MATLAB进行理论计算的数值以及使用离散元仿真的模型的数据相同。将磨损轮廓按垂直投影方向进行测绘,取水稻秸秆与螺旋叶片接触位置为起始点,合并理论计算的运动轨迹和EDEM中水稻秸秆颗粒的运动轨迹在垂直方向上的投影,结果如图9所示。



l_1 、 l_2 、 l_3 分别为图8中a、b、c点的运动轨迹线; l_4 为公式计算的运动轨迹线; l_5 为割台磨损轮廓曲线。

图9 割台磨损轮廓曲线与水稻秸秆运动轨迹

Fig.9 Wear profile curve of cutting table and motion trajectory of rice straw

4.2 曲线轨迹对比结果

由图9可知,所有轨迹曲线均呈凸形上升趋势,其中离散元仿真中水稻质心位置a、b、c的运动轨迹 l_1 、 l_2 、 l_3 在最初时整体的y向位移增长较快, $x=[0, 150]$ 内整体轨迹均处于理论运动轨迹曲线 l_4 上方,

l_1 、 l_2 、 l_3 的运动轨迹在y方向最大位移的值接近，y方向最大位移范围在[121.59, 131.96]之中。 l_4 上升至坐标点(322.20, 127.88)后，开始下降。 l_4 与 l_1 、 l_2 、 l_3 在y方向最大位移值的最大差值为6.29 mm。

在田间收获过程中，水稻秸秆不断被喂入至螺旋搅龙，即水稻秸秆达到y最大值时，后续物料不断涌入使得水稻秸秆整体膨胀，整体规模变大，因此，当x为0~64 mm时，轮廓曲线 l_5 与理论曲线 l_4 重

合度较高，在后半段中，曲线 l_5 和曲线 l_4 在y轴方向的数值差距逐渐变大，在x=322.2 mm处达到最大差值，为88.12 mm。

使用多项式方程对图9中曲线进行拟合，从拟合结果(表1)可知，理论轨迹和离散元仿真轨迹重合度较高，但理论曲线和实际磨损轮廓曲线仅一部分曲线重合，整体存在差异。

表1 曲线的拟合方程及拟合情况

Table 1 Fitting equation and fit of the curve

运动轨迹	方程	决定系数	均方误差
l_1	$y=10^{-6}x^3-2\times 10^{-3}x^2+0.9068x+3.4214$	0.9980	0.3867
l_2	$y=-7\times 10^{-13}x^6+10^{-9}x^5-7\times 10^{-7}x^4+2\times 10^{-4}x^3-2.57\times 10^{-2}x^2+2.0204x-1.2419$	0.9995	4.2096
l_3	$y=-10^{-11}x^6+8\times 10^{-9}x^5-2\times 10^{-6}x^4+2\times 10^{-4}x^3-1.79\times 10^{-2}x^2+1.6077x+0.2422$	0.9978	6.1883
l_4	$y=-9\times 10^{-7}x^3-8\times 10^{-4}x^2+0.7446x-0.8459$	1.0000	1.0000
l_5	$y=4\times 10^{-12}x^6-4\times 10^{-9}x^5+2\times 10^{-6}x^4-4\times 10^{-4}x^3+3.18\times 10^{-2}x^2-0.1793x+9.3876$	0.9795	29.6376

5 结论

1) 当摩擦因数从0.3下降到0.1时，螺旋叶片外缘带动水稻秸秆的轴向速度从1 058.83 mm/s提升至1 123.59 mm/s，圆周向速度从670.59 mm/s下降至439.40 mm/s。即摩擦因数降低有利于提高水稻秸秆轴向输送速度。

2) 对比理论轨迹曲线、仿真轨迹曲线和割台磨损轮廓曲线可以得出，仿真时水稻秸秆运动轨迹曲线和理论轨迹相差不大，其均方误差为0.3867~6.1883。实际轮廓与理论假设位置有所偏差，仅部分曲线重合，整体曲线的均方误差为29.6376。

参考文献:

- [1] TANG Z, REN H, LI X Y, et al. Structure design and bearing capacity analysis for crawler chassis of rice combine harvester[J]. Complexity, 2020, 2020(1): 7610767.
- [2] LIU Y, LUO C M, ZONG W Y, et al. Optimization of clamping and conveying device for sunflower oil combine harvester header[J]. Agriculture, 2021, 11(9): 859.
- [3] SCHEWE M, WILBUER H, MENZEL A. Simulation of wear and effective friction properties of microstructured surfaces[J]. Wear, 2021, 464: 203491.
- [4] 许林云, 刘冠华, 宣言, 等. 果实振动响应时的空中运动数学模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 206-213.
- [5] 辛亚鹏, 王琳, 施印炎, 等. 离心式变量撒肥机关键结构数值模拟与优化[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(6): 1452-1461.
- [6] 杨善东, 邱田元, 马闯, 等. 甜菜联合收获机分离输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 191-200.
- [7] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵

轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 170-180.

- [8] 连国党, 宗望远, 封伟, 等. 食葵联合收获割脱一体式割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 122-131, 154.
- [9] 罗海峰, 张晟, 吴明亮, 等. 中间集抛后送式双侧斜输烟草培土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 97-108, 165.
- [10] QI J T, PEI M H, KAN Z, et al. Parameter optimization and testing of a conveying and soil-removing device for tiger nut(*Cyperus esculentus*) mechanical harvesting[J]. Processes, 2023, 11(1): 67.
- [11] 彭才望, 孙松林, 贺喜, 等. 双向螺旋黑水虻虫沙收集装置设计与试验[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(5): 637-646.
- [12] 乌兰图雅, 王春光, 祁少华, 等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送性能试验分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 51-59.
- [13] 李佳俊, 陶桂香, 衣淑娟, 等. 指夹式亚高速玉米播种不同导种管种子运移轨迹对比[J]. 农机化研究, 2024, 46(3): 167-171, 181.
- [14] CHEN Z P, WASSGREN C, KINGSLY AMBROSE R P. Development and validation of a DEM model for predicting impact damage of maize kernels[J]. Biosystems Engineering, 2022, 224: 16-33.
- [15] WANG Q R, MAO H P, LI Q L. Modelling and simulation of the grain threshing process based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105790.
- [16] KANG C, CAO Q, TENG S, et al. Wear characteristics of a centrifugal pump transporting solid-liquid mixture: an experimental and numerical study[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(1): 102277.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正