

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.04.003

刘伟, 翟改霞, 王强, 等. 方草捆打捆机动态连续喂入机构设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(4): 15-21

Liu Wei, Zhai Gaixia, Wang Qiang, et al. Design and experiment of dynamic continuous feeding mechanism for square hay bundling machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(4): 15-21

方草捆打捆机动态连续喂入机构设计与试验*

刘伟^{1,2}, 翟改霞^{1,2}, 王强^{1,2}, 高晓宏^{1,2}, 李伟^{1,2}, 王淼^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司, 呼和浩特市, 010010;

2. 内蒙古自治区农牧业装备重点实验室, 呼和浩特市, 010010)

摘要: 针对目前市场对喂入机构研究不足以及喂入机构喂入能力不足的问题, 以饲草收获机中喂入机构为入手点, 设计方捆机动态喂入机构。基于方捆机工艺流程以及方捆机喂入量的分析, 确定主轴转速与喂入量呈正相关趋势, 喂入量与主轴转速的匹配决定喂入能力。运用矢量法设计动态喂入机构数学模型, 同时基于整体设计空间位置确立喂入机构的喂入角、抛送角、接触角、偏置角和喂入机构尺寸。基于离散元及动力学软件联合对喂入过程进行仿真分析, 得到最优参数组合: 主轴转速为 176 r/min 时, 喂入量为 12.5 kg/s。田间试验表明, 在收获苜蓿过程中, 该机构喂入量为 5~20 kg/s, 不会出现堵塞。

关键词: 方捆机; 饲草喂入; 喂入机构; 运动分析; 联合仿真

中图分类号: S817.1 文献标识码: A 文章编号: 2095-5553 (2026) 04-0015-07

Design and experiment of dynamic continuous feeding mechanism for square hay bundling machine

Liu Wei^{1,2}, Zhai Gaixia^{1,2}, Wang Qiang^{1,2}, Gao Xiaohong^{1,2}, Li Wei^{1,2}, Wang Miao^{1,2}

(1. Hohhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Hohhot, 010010, China; 2. Key Laboratory of Inner Mongolia Autonomous Region Agricultural and Animal Husbandry Equipment, Hohhot, 010010, China)

Abstract: In view of the lack of research on the feeding mechanism in the current market and the insufficient feeding capacity of the feeding mechanism, taking the feeding mechanism in forage harvesting machine as the starting point, the dynamic feeding mechanism of the square baler is designed. Firstly, based on the analysis of the process flow of the square baler and the feeding amount of the square baler, it is determined that the spindle speed is positively correlated with the feeding amount, at the same time, the matching of the feeding amount and the spindle speed determines the feeding ability. In this paper, the mathematical model of dynamic feeding mechanism is designed by vector method. At the same time, the feeding angle, throwing angle, contact angle, offset angle and the size of the feeding mechanism are established based on the overall design space position. Based on the joint simulation analysis of discrete element and dynamic software for the feeding process, the optimal parameter combination is as follows: when the spindle speed is 176 r/min, the feeding rate is 12.5 kg/s. The field experiment showed that the throwing amount of the mechanism was between 5-20 kg/s during the harvesting of alfalfa, and there would be no blockage.

Keywords: bundling machine; forage feeding; feeding mechanism; motion analysis; co-simulation

0 引言

我国农作物秸秆产生量正在逐年递增。2021 年全国秸秆产生量 8.65×10^8 t, 玉米、水稻和小麦三大

粮食作物秸秆产生量分别达到 3.21×10^8 t、 2.22×10^8 t 和 1.79×10^8 t, 合计占比 83.5%。秸秆打捆离田可防止环境污染、减少病虫害^[1]。其中秸秆离田利用率达 33.4%。在我国打捆机补贴销量中, 方捆机补

收稿日期: 2024 年 8 月 1 日 修回日期: 2025 年 6 月 15 日

* 基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFD2001904); 内蒙古自治区农牧业装备重点实验室(2023KYPT0022)

第一作者: 刘伟, 男, 1994 年生, 内蒙古乌兰察布人, 助理工程师; 研究方向为农牧业机械工程。E-mail: 986782804@qq.com

通讯作者: 翟改霞, 女, 1979 年生, 内蒙古丰镇人, 博士, 正高级工程师; 研究方向为农牧业机械化工程。E-mail: zhaigaixia79@163.com

贴销量为 8 881 台, 占总销量的 62.8%^[2]。由此可见方捆机在秸秆收获中起着关键作用。

我国在 20 世纪 50 年代开始研究饲草料收获机械, 从单一品种到多种类产品, 此类机械为我国畜牧业的发展提供有力的保障。但还有许多难关急需突破^[3]。机械生产的第一要素为机械设计环节, 而方捆机首先需要对喂入机构进行设计; 喂入机构设计质量的优劣, 决定着方捆机质量的优劣, 因此喂入机构的机械设计环节尤为重要^[4]。同时, 喂入机构的优劣决定方捆机作业效率的高低, 当捡拾量不断加大时, 大多方捆机出现的首要问题是喂入口堵塞, 而不是捡拾能力不够, 形成物料在喂入口出现堆积现象, 同时一次性喂入型式对喂入机构的载荷较大。故研究高效的喂入机构是亟须解决的难题。

目前, 国内设备多使用拨叉一次喂入的方式, 该方式存在喂入机构受载大、磨损大、易堵塞等情况。对动态喂入机构的研究相对较少, 相关的研究主要集中在一次性输送喂入及喂入装置的改进。王岩^[5]对 9YFS-2.0 型一次喂入方捆机进行研究, 通过理论分析与运动学软件运用, 对喂入机构轨迹、位置进行合理化布局。罗金海等^[6]基于 TRIZ 理论的方捆机喂入装置创新设计, 分别提出 4 种不同方案, 经对比分析并结合实际生产情况, 选用增加机构的形式解决喂入不足的难题。韩雅峰^[7]基于 Adams 软件分析, 对喂入机构进行优化设计; 郑震霆^[4]基于有限元软件对喂入机构进行应力分析。上述主要采用运动学及有限元软件对机构进行设计及优化, 近年来, 离散元已经成为颗粒运动分析较为重要的方法, 在物料输送、喂入等方面应用广泛^[8-10]。为减小离散元仿真试验与实际试验的差异, 国内外学者专门对物料参数标定的研究也在逐渐增多^[11, 12]。

基于上述研究, 本文设计一种方捆机动态喂入装置, 采用动态喂入工作方式, 针对目前喂入机构受载大、磨损大、易堵塞的问题, 运用运动学及离散元软件耦合仿真方法, 对动态喂入装置工作原理与苜蓿植株在喂入装置中的喂入效果进行研究, 为动态喂入装置参数提供理论依据。同时通过数模建立, 设计动态喂入机构运动参数和结构参数, 确保设计的合理性与科学性。

1 结构组成及工作原理

1.1 结构组成

动态喂入模型结构包括喂入摆动连杆、架体、顶板、动态喂入曲轴、底板及喂入抛送连杆等, 喂入模型结构如图 1 所示。相同喂入量的情况下, 主轴每旋转 1 圈, 喂入机构通过 3 个不同相位的曲轴分别实现 3 次物料的抛送, 相对一次抛送机构, 该喂入机构的喂入优势: 主轴受载小、喂入机构受载小, 可靠性及稳定性高。

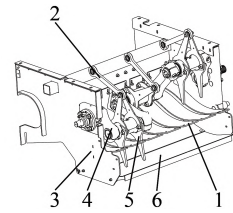


图 1 喂入模型结构

Fig. 1 Feeding model structure

1. 顶板 2. 喂入摆动连杆 3. 架体 4. 动态喂入曲轴
5. 喂入抛送连杆 6. 底板

1.2 工作原理

喂入机构主要包括搂、送、抛、回 4 个过程。机构在工作过程中, 物料被连续不断地送到喂入口, 喂入口的物料经动态喂入曲轴与 3 组喂入抛送连杆形成的动态喂入机构分别进行 4 个过程, 从而完成一次喂入。当第 1 组喂入抛送连杆抛送完成, 第 2 组喂入抛送连杆已完成搂的过程, 第 3 组喂入抛送连杆准备搂的过程, 从而达到物料不间断被抛送连杆抛送到指定腔室, 形成动态不间断喂入的过程。

2 设计原理及建模

喂入是方捆机作业中关键环节, 决定着方捆机的性能。合理匹配喂入机构是设计方捆机的关键, 而喂入量是喂入机构的关键参数, 通过对方捆机工艺流程介绍可推断出喂入量的决定因素。工艺简图可归结为: 捡拾、输送、喂入、打捆^[13]。

2.1 喂入量分析

由方捆机的工艺流程可推导出, 喂入量的决定因素为捡拾量, 假设单位时间内总捡拾量为 Q , 单位时间内总喂入量为 W ; 为使打捆机工作不出现堵机现象, 那么满足不堵机的条件为: 在相同时间内, $W > Q$; 而喂入量可在单位时间内分批次进行喂入。该喂入匹配的喂入口尺寸为 $190 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$, 假设喂入腔已填满, 喂入过程顶板与底板之间形成一个扇形空间, 形成的扇形面积为 S , 形成的物料体积为 V , 主轴转速为 n , 则

$$W = V \cdot n \cdot \rho \quad (1)$$

$$V = 1.2S \quad (2)$$

式中: W ——单位时间内总喂入量, kg/s ;

V ——物料在一周期内抛送行程形成的体积, m^3 ;

n ——主轴转速, r/min ;

ρ ——物料密度, kg/m^3 。

由此可以得出该机构喂入量与主轴转速成正比。

2.2 运动数学模型

通过运用四连杆机构原理建立单组喂入机构。简化后的平面喂入四连杆机构如图 2 所示, O 、 A 、 B 、 C 为旋转点, OA 为主动旋转臂, C 点与 D 点为固定旋转

点,形成 AD 抛送连杆。

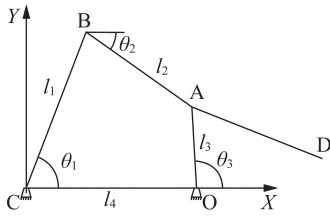


图 2 平面喂入四连杆机构

Fig. 2 Plane feeding four-bar linkage mechanism

假设平面四连杆机构的连杆 BC、AB、OA、CO 长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 , AD 为杆 AB 延长杆,连杆与 X 轴的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 和 θ_4 ,杆 4 分布在 X 轴上,可得杆 4 与 X 轴的夹角为 0° ,通过形成的封闭矢量四边形,运用矢量和为 0 的原理,建立矢量表达式

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4 \quad (3)$$

通过式(3),机构的位置方程分量形式可写成

$$\begin{aligned} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 &= l_3 \cos \theta_3 + l_4 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 &= l_3 \sin \theta_3 \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)的 X 轴和 Y 轴分解向量中,可以求得方位角度的代数式,由此描述各杆件的位置,位置方程可用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos \theta_2 \\ \sin \theta_1 & \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 1 \\ \sin \theta_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_3 \\ l_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)闭环矢量方程分量形式对时间求一阶导数,就可得到平面四连杆机构的速度方程

$$\begin{cases} -l_1 \omega_1 \sin \theta_1 - l_2 \omega_2 \sin \theta_2 = -l_3 \omega_3 \sin \theta_3 \\ l_1 \omega_1 \cos \theta_1 + l_2 \omega_2 \cos \theta_2 = l_3 \omega_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)中可求解出各从动杆的角速度,为了方便,利用计算机辅助计算,为更清楚地表达运动关系,可变换机构在矩阵中位置,得到矩阵形式

$$\begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_2 \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \omega_3 \begin{bmatrix} -l_3 \sin \theta_3 \\ l_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

速度矩阵可简写为

$$[A][\omega] = \omega_3 [B]$$

式中: $[A]$ ——从动件的位置参数矩阵;

$[\omega]$ ——从动件的角速度矩阵;

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ——杆 1、杆 2、杆 3 的角速度;

$[B]$ ——杆 3 的位置参数矩阵。

为得到平面四连杆加速度代数表达式,从而进一步了解机构运动,对式(5)求二阶导数,即可得加速度矩阵

$$\begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \omega_3^2 \begin{bmatrix} -l_3 \cos \theta_3 \\ -l_3 \sin \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos \theta_2 \\ -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: α_1 、 α_2 ——杆 1、杆 2 的角加速度。

加速度矩阵的表达式可简写为

$$[A][\alpha] = [\dot{A}][\omega] + \overline{\omega_3} [B]$$

式中: $[\omega]$ ——从动杆的角加速度矩阵。

运用平面四连杆运动分析方法对平面四连杆机构中的某个定点的运动情况进行分析,建立该点的位置方程、速度方程和加速度方程,得到该点速度和运动角度。

2.3 动态喂入机构建立

动态喂入机构由动态喂入曲轴与 3 组喂入单体四连杆机构两部分构成,图 3 为动态喂入机构原理图, O_1O_2 为旋转轴, OA_1 、 O_1A_1 、 O_2A_2 分别为旋转臂,形成以转速为变量的机构。每旋转 1 圈,动态喂入机构分别进行一次喂入,完成腔室一次完整的输送过程。

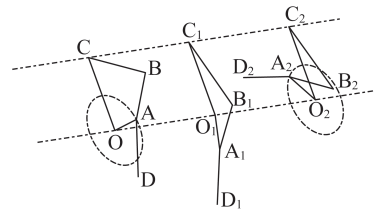


图 3 动态喂入机构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic feeding mechanism

图 4 为动态喂入曲轴侧视图, A、 A_1 、 A_2 分别为动态喂入曲轴上三侧点, O 为动态喂入曲轴上旋转中心, OA 、 O_1A_1 、 O_2A_2 三边空间夹角为 120° ,同时 A、 A_1 、 A_2 为单体四连杆主动旋转点,动态喂入曲柄旋转时,由于三主动旋转点分三等分,即搂为一等分、送抛为一等分、回为一等分,形成机械结构三等分动态喂入过程,可形成不间断喂入过程,从而达到连续喂入的效果。

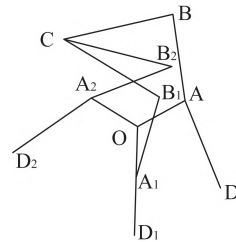


图 4 动态喂入机构侧视图

Fig. 4 Side view of dynamic feeding mechanism

2.4 喂入过程分析

喂入过程中形成的接触角与偏置角为固定值,接触角与偏置角的形成是为减小机构在下搂过程中喂入抛送连杆与物料的初始喂入角,使喂入抛送连杆与物料产生滑移概率降低,从而搂的效果更佳。在搂的过程中,喂入角不断减小,逐渐到送料过程,从而抛送物料;在抛送过程中,抛送角在不断加大,当达到最大角度时,进入回程阶段,从而三联机构不断进行循环喂入过程。

通过数学模型,匹配的空间结构及运动轨迹三因素,运用运动分析软件调整得到 $l_4=368.5 \text{ mm}$, $l_3=$

175.2 mm, $l_2=280$ mm, $l_1=360$ mm, $l_{AD}=305$ mm。

喂入参数:喂入角 α 最大为 64° , 抛送角 β 最小为 76.1° , 接触角 γ 为 10.6° , 偏置角 θ 为 13.6° , 如图 5 所示。输送行程为 725 mm, 匹配的参数满足设计要求。

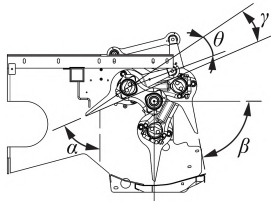


图 5 喂入过程

Fig. 5 Feeding process

2.5 数模建立

通过方案对比,运用 SolidWorks 软件对三联喂入机构进行数字建模^[14],图 6 为动态喂入曲轴模型。

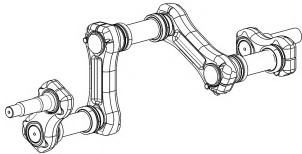


图 6 动态喂入曲轴模型

Fig. 6 Dynamic feeding crankshaft model

三联喂入机构在垂直于轴向平面的投影,相当于三联平面四连杆机构,图 7 为动态喂入机构模型。

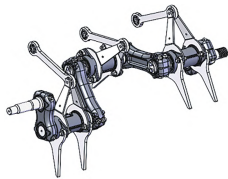


图 7 动态喂入机构模型

Fig. 7 Dynamic feeding mechanism model

3 仿真试验

3.1 仿真模型建立

动态喂入机构在喂入苜蓿时与苜蓿发生相互作用,为明确动态喂入机构是否达到设计喂入效果,同时明确最佳作业参数,进行离散元仿真试验。在离散元模型中采用 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型,该接触模型能够很好地代替纤维连接^[15]。苜蓿的泊松比为 0.4,密度为 256 kg/m^3 ,剪切模量为 5 MPa,颗粒平均直径为 2 mm。喂入的过程中,物料越细小,越不容易喂入,故在仿真时用 2 mm 的物料在离散元软件中建立杆形离散元模型,该模型形状如图 8 所示。机构采用 45 号钢,其密度与泊松比分别为 7800 kg/m^3 、0.3;其中苜蓿与苜蓿碰撞恢复系数为 0.11;苜蓿与苜蓿静摩擦系数为 0.45;苜蓿与苜蓿滚动摩擦系数为 0.08;苜蓿与 45 号钢碰撞恢复系数为 0.16;苜蓿与 45 号钢静摩擦系数为 0.54;苜蓿与 45 号钢滚动摩擦系数为 0.24;联合仿真参数如

表 1 所示,联合仿真模型^[16]如图 9 所示。



图 8 苜蓿离散元模型

Fig. 8 Alfalfa discrete element model

表 1 联合仿真主要参数

Tab. 1 Main parameters of co-simulation

参数	数值
苜蓿泊松比	0.40
苜蓿密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	256
苜蓿剪切模量/MPa	5
45 钢密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7800
45 钢泊松比	0.30
苜蓿与苜蓿碰撞恢复系数	0.11
苜蓿与苜蓿静摩擦系数	0.45
苜蓿与苜蓿滚动摩擦系数	0.08
苜蓿与 45 钢碰撞恢复系数	0.16
苜蓿与 45 钢静摩擦系数	0.54
苜蓿与 45 钢滚动摩擦系数	0.24

联合仿真模型由颗粒工厂,仿真区域与仿真模型三部分构成,仿真模型由 SolidWorks 软件建立,通过导出 x_t 格式分别导入离散元与运动学软件中,通过离散元与运动学软件建立连接,从而完成联合仿真。

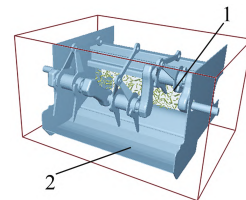


图 9 联合仿真模型

Fig. 9 Co-simulation model

1. 颗粒工厂 2. 仿真区域

3.2 仿真结果与分析

通过已确定的方捆机动态喂入机构参数,分析喂入量和主轴转速对苜蓿抛送的效果,抛送效果主要分析机构给予苜蓿的运动情况。喂入量的多少与草条密度、打捆前进速度密切相关,具体体现为捡拾器的捡拾量,根据 JB/T 5160—2010《牧草捡拾器》标准,捡拾器的作业速度应能满足配套主机作业的要求,额定作业速度一般应为 5~12 km/h,在额定转速下,按每米工作幅宽计算,捡拾器应能捡拾每米草条重量不小于 3 kg 的干草(含水率为 20%)或每米草条重量不小于 4 kg 的半风干饲草(含水率为 55%)^[17]。根据匹配,设定仿真喂入量区间为 5~20 kg/s。根据设备设计动力匹配情况,设定主轴转速为 130~200 r/min。

3.2.1 回归方程仿真试验

以喂入机构喂入量 W 与主轴转速 n 为试验因素,

以物料抛送效果为评价指标,进行回归方程的仿真试验。喂入量取值范围为 5~20 kg/s,主轴转速取值范围为 130~200 r/min,设计的试验方案及试验结果见表 2。

表 2 试验设计与结果
Tab. 2 Experimental design and results

序号	W /(kg·s ⁻¹)	n /(r·min ⁻¹)	物料速度 v /(m·s ⁻¹)	物料加速度 A /(m·s ⁻²)
1	9.5	152.75	1.01	17.86
2	20	157.65	0.72	40.05
3	15.5	200	1.04	49.96
4	16.7	182.85	0.92	44.99
5	13.775	145.356	0.8	23.45
6	5	194.75	1.78	15.28
7	5	147.5	1.35	8.76
8	18.5	130	0.62	25.19
9	8.225	173.4	1.24	19.92
10	12.875	168.5	0.96	29.4
11	20	200	0.91	64.46
12	11.45	200	1.21	36.9
13	8.375	130	0.92	11.4
14	16.7	182.85	0.92	44.99
15	13.775	145.356	0.8	23.45
16	13.775	145.356	0.8	23.45
17	20	174.952	0.8	32.2
18	8.225	173.4	0.93	30

3.2.2 回归方程方差分析

使用软件分析表 2 试验数据,建立多元回归模型,物料速度与喂入量、主轴转速的回归方程为

$$v=0.91-0.33W+0.21n-0.07Wn+0.18W^2+0.05n^2 \quad (9)$$

物料加速度与喂入量、主轴转速的回归方程为

$$A=28.15+14.15W+11.89n+6.07Wn-3.48W^2+2.70n^2 \quad (10)$$

由表 3 可知,回归模型的 P 值 < 0.05,表明回归模型显著;回归模型失拟项的 P 值 > 0.10,表明模型不显著。模型决定系数 R² 与校正决定系数均接近于 1,变异系数与精密度分别为 0.77%、0.78% 和 18.76、17.72,说明该物料速度与物料加速度拟合回归模型具有较高的可靠性。由物料速度与物料加速度的 P 值可判断试验因素对喂入量及主轴转速都有显著影响,试验因素对物料有效深度的影响为喂入量 < 主轴转速。

从图 10(a)可以看出,当主轴转速由 200 r/min 递减为 130 r/min 时,物料加速度递减,抛送能力降低;当喂入量增加时,物料加速度先增加后减少,说明喂入量在一定范围内,喂入机构对物料的加速度效果更好。从图 10(b)可以看出,当主轴转速由 200 r/min 递减为 130 r/min 时,物料速度递减,抛送能力降低;当喂入量增加时,物料速度递减,抛送能力降低。

表 3 回归方程方差分析

Tab. 3 Variance analysis of regression equation

来源	物料速度				物料加速度			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	1.14	5	25.28	<0.000 1	3 303.04	5	26.38	<0.000 1
W	0.767 1	1	85.14	<0.000 1	1 416.18	1	56.55	<0.000 1
n	0.302 3	1	33.55	<0.000 1	1 013.60	1	40.48	<0.000 1
Wn	0.017 1	1	1.89	0.193 8	118.05	1	4.71	0.050 7
W ²	0.087 4	1	9.70	0.008 9	31.73	1	1.27	0.282 4
n ²	0.007 0	1	0.771 9	0.396 9	18.67	1	0.745 5	0.404 8
残差	0.108 1	12			300.51	12		
失拟项	0.060 1	8			249.70	8		
误差	0.048 0	4	0.625 0	0.735 4	50.80	4	2.46	0.200 9
总和	1.25	17			3 603.55	17		

注: P < 0.05 表示该模型差异性显著。

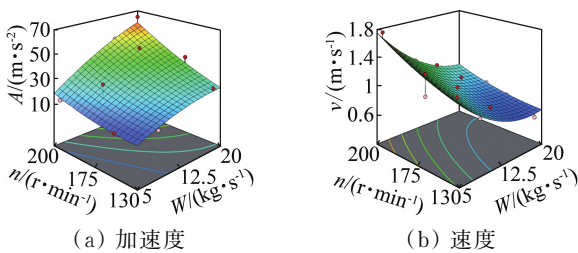


图 10 交互响应曲面图

Fig. 10 Interaction corresponding surface diagram

运用多因素软件对各指标试验结果进行优化,优化的目标为主轴转速与喂入量。优化后结果:主轴转速为 176 r/min 时,喂入量为 12.5 kg/s。

3.2.3 喂入叉受力与物料速度分析

最大喂入量情况下可验证该机构的性能是否可行,基于匹配出的主轴转速,通过 20 kg/s 的喂入量对喂入叉受力及物料速度进行分析。

由图 11 可知,在搂、送、抛这 3 个过程中,喂入叉的

受力在逐渐增大,表明在抛的过程中物料同时受力变大,但在该机构材料受力范围内。根据作用力与反作用力,机构受力增大,有利于物料输送,验证机构的合理性。由于坐标系建立,物料抛送速度为负,分析物料输

送速度为 $-7.3\sim 0$ m/s,由于物料输送过多,图 12 中红色物料主要为喂入又在拨送回程的过程中后面粘带的物料,但带回的物料占比较少,不影响物料输送,前端红色物料为在搂的过程中,喂入又前端回弹回来的物料。

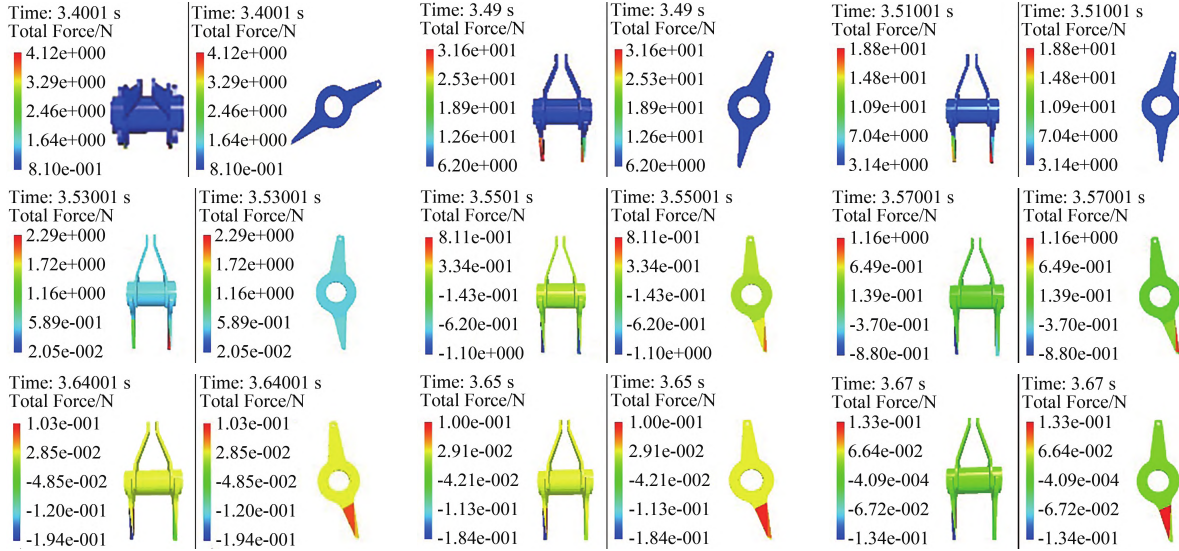


图 11 喂入叉受力分析

Fig. 11 Force analysis of feeding fork

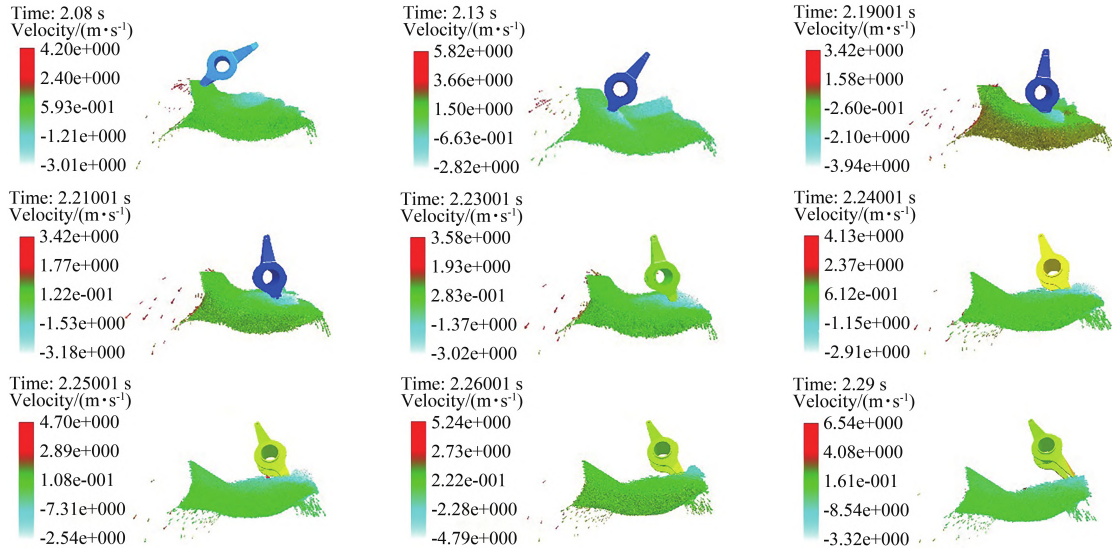


图 12 喂入叉受力及物料速度变化

Fig. 12 Feeding fork force and material speed change

3.3 加速度

运用运动学软件,以图 3 中 D 点作为 maker 点,图 13 为主动旋转轴转速为 176 r/min 情况下,D 点的加速度运动图。

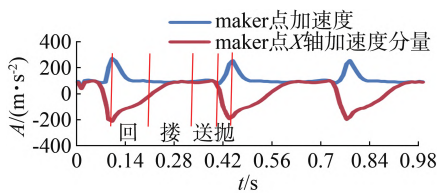


图 13 D 点加速度

Fig. 13 D-point acceleration

图 13 中蓝线为 D 点加速度变化趋势,红线为 D 点加速度在 X 轴上的分量,根据坐标系建立,向出口输送物料为负方向。由加速度图对比可推断出,在抛送物料过程中,物料受力一直增大,速度不断变快,可有效实现抛送物料过程,验证喂入机构设计的合理性。

4 田间试验

根据最优参数组合,匹配计算喂入量情况,喂入量为 5~20 kg/s,主轴转速为 176 r/min 时,以抛送是否堵塞判断抛送效果。

试验后喂入机构内部情况见图14,该机构未出现明显受力缺陷,同时喂入仓未出现堵塞、喂入不足的情况。



图14 喂入机构试验

Fig. 14 Feeding mechanism test

喂入试验结果如表4所示,表明主轴转速为176 r/min时,喂入效果好的喂入量为10~15 kg/s。

表4 试验结果

Tab. 4 Test results

试验组	$W/(kg \cdot s^{-1})$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	喂入效果
1	5~10	176	良好
2	10~15	176	好
3	15~20	176	良好
平均值	10~15	176	良好

5 结论

1) 设计一种方捆机动态喂入机构,主轴每旋转1圈,喂入连杆机构分别喂入1次,喂入连杆机构的交互喂入可有效提升喂入效果,同时提高机构作用载荷,可有效提高机构使用寿命与可靠性。

2) 采用离散元与运动学联合仿真建立苜蓿与喂入机构作用模型,在喂入机构喂入过程中得到苜蓿与喂入连杆机构中喂入叉之间的作用规律,同时确定该喂入机构最佳主轴转速为176 r/min,最佳抛送角度为 76.1° ,喂入量可达20 kg/s。

3) 田间试验验证该机构喂入效果较好,不存在喂入堵塞、抛送不足的现象。

参 考 文 献

- [1] 廖亮,白雪. “秸”尽所能 做好秸秆“还田+离田”高效利用[N]. 中国经济导报, 2022-11-22.
- [2] 2023—2023年中国打捆机行业市场调查研究及发展战略规划报告[N]. 华经产业研究院, 2022-11-21.
- [3] 中国农业机械化协会. 饲草(料)收获机械行业发展报告[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [4] 郑震霆. 机械结构的可拓创新设计方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [5] 王岩. 9YFS-2.0型方捆捡拾压捆机喂入及压缩机构的分析与研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [6] 罗金海, 李志杰, 张平. 基于TRIZ理论的方捆机喂入装置创新设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 38-41.
- Luo Jinhai, Li Zhijie, Zhang Ping. Innovative design on

the feeding device of square bundle baler based on evolution theory of TRIZ [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 38-41.

- [7] 韩雅峰. 牧草打捆机喂入机构结构优化设计与研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [8] 张兆国, 徐红伟, 薛浩田, 等. 三七茎秆离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 61-70.
- Zhang Zhaoguo, Xu Hongwei, Xue Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of Panax Notoginseng stem [J]. Transactions of the Chinese society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61-70.
- [9] 刘珂, 魏伟锋, 朱纪跃, 等. 田间机收元胡离散元模型参数标定与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 32-38.
- Liu Ke, Wei Weifeng, Zhu Jiyue, et al. Parameter calibration and test of rhizome corydalis discrete element model of field machine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 32-38.
- [10] 童世合, 邵明玺, 曹猛, 等. 基于DEM的玉米秸秆离散元模型参数标定[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 69-75.
- Tong Shihe, Shao Mingxi, Cao Meng, et al. Parameter calibration of corn straw discrete element model based on DEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(2): 69-75.
- [11] Mousaviraad M, Tekeste M Z, Rosentrater K A. Calibration and validation of a discrete element model of corn using grain flow simulation in a commercial screw grain auger [J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(4): 1403-1415.
- [12] Jalal K, Joanna W, Heman R, et al. Modelling and simulation of fruit drop tests by discrete element method [J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 228-240.
- [13] Kochev I S. General method for full force balancing of spatial and planar linkages by internal mass redistribution [J]. Mechanism and Machine Theory, 1987, 22(4): 333-341.
- [14] 楼鸿棣, 邹慧君. 高等机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [15] 赵吉坤, 宋武斌, 李晶晶, 等. 基于EDEM的水稻秸秆建模及力学性能分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1086-1093.
- [16] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11): 22-30.
- [17] JB/T 5160-2010, 牧草捡拾器[S].