doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.006

小麦气送集排器等宽多边形槽齿轮式供种装置研究

王　磊[1,2]　舒彩霞[1,2]　席日晶[1]　廖庆喜[1,2]　刘嘉诚[1,2]　廖宜涛[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: 针对小麦气送式集排器供种装置充种环节种子流动性差,导致充种及供种不稳定的问题,设计了一种具有等宽多边形槽齿轮的小麦供种装置。阐述了供种装置的工作原理,确定了等宽多边形槽齿轮的主要结构参数。利用 EDEM 仿真对比分析了不同结构型式槽齿轮对种群扰动能力、充种及供种性能的影响,结果表明,当供种轴转速为 20 r/min 时,在仿真的 1 ~ 10 s 内随等宽多边形槽齿轮边数的增加,种群平均动能均值逐渐减小,对种群平均扰动能力依次减弱,但相邻平均动能峰值间隔时间缩短,扰动种群的频率增加;等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮扰动下种群平均动能均值比圆形槽齿轮分别高 371.32%、209.23%、91.02%、53.37%;以充种合格率((2 ± 1)粒/孔)和漏充率(0 粒/孔)为指标,等宽七边形槽齿轮充种合格率为 93.98%、漏充率为 2.78%,供种粒数与供种时间具有较高的线性度,充种和供种性能较优。台架试验验证了等宽七边形槽齿轮式供种装置的供种性能及对排种性能的影响,结果表明,当转速为 10 ~ 60 r/min 时,供种速率稳定性变异系数不高于 2.14%,供种时破损率不高于 0.20%,总排量稳定性变异系数不高于 2.15%,排种时破损率不高于 0.23%,满足小麦种子稳定供种要求。

关键词: 小麦; 气送式集排器; 供种装置; 等宽多边形槽齿轮
中图分类号: S223.2+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0053-11　　**OSID**:

Research on Seed Feeding Device with Constant Width Polygon Groove-tooth Wheel of Air-assisted Centralized Metering Device for Wheat

WANG Lei[1,2]　SHU Caixia[1,2]　XI Rijing[1]　LIAO Qingxi[1,2]　LIU Jiacheng[1,2]　LIAO Yitao[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: Considering the problem that the wheat seeds have poor fluidity in the seed filling link of the seed feeding device of air-assisted centralized metering device for wheat, which leads to unstable seed filling and feeding, a seed feeding device with constant width polygon groove-tooth wheel for wheat was developed. The working principle of the seed feeding device was described. The main structural parameters of the constant width polygon groove-tooth wheel were determined. The effects of different structure types of groove-tooth wheel on seed population disturbance ability, seed filling and seed feeding performance were compared and analyzed by EDEM. The simulation results showed that when the rotating speed of the seed feeding shaft was 20 r/min, with the increase of side quantity of the constant width polygon groove-tooth wheel, the average kinetic energy of the seed population was gradually decreased, and the average disturbance ability to the seed population was decreased in turn. Nevertheless, the interval between the adjacent average kinetic energy peaks was decreased and the frequency of disturbing the seed population was increased. The average kinetic energy of the seed population under the disturbance of the constant width triangular, the constant width pentagonal, the constant width heptagonal, and the constant width nonagon groove-tooth wheel was 371.32%, 209.23%, 91.02%, and 53.37% higher than that of circular groove-tooth wheel, respectively. Taking the quality rate of seed filling ((2 ± 1) grain/hole) and missing rate of seed filling (0 grain/hole) as indicators, the quality rate

收稿日期: 2022-04-13　修回日期: 2022-05-12
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)、国家自然科学基金项目(51975238)和中国博士后科学基金项目(2021M701340)
作者简介: 王磊(1988—),男,博士后,主要从事油菜和小麦播种技术与装备研究,E-mail: wangchong12356@126.com
通信作者: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

of seed filling and missing rate of the constant width heptagonal groove-tooth wheel were 93.98% and 2.78%, respectively. The seed feeding quantity and seed feeding time had high linearity, and the seed filling and seed feeding performance were better. The bench test verified the seed feeding performance of the seed feeding device with the constant width heptagonal groove-tooth wheel and the effect of seed feeding device on seeding performance. The results showed that when the rotating speed was 10 ~ 60 r/min, the variation coefficient of seed feeding rate stability was not higher than 2.14%, the damage rate was not higher than 0.20% during feeding process, the variation coefficient of total seeding mass stability was not higher than 2.15%, the damage rate was not higher than 0.23% during seeding process, which met the requirements of stable wheat seed feeding.

Key words: wheat; air-assisted centralized metering device; seed feeding device; constant width polygon groove-tooth wheel

0 引言

气送式排种技术采用“机械定量供种 + 高速气流输种 + 随机分配成行 + 气流辅助导种”方式排种[1-2],具有播种行数多、对种子外形尺寸要求低、作业速度高等特点,是精量排种技术的重要发展方向,在国内外已得到广泛的研究与应用[3-5]。供种装置作为气送式集排器实现稳定供种的关键部件,为排种过程提供连续稳定的种子流,其充种性能对供种速率稳定性和种子破损率具有显著影响[6-7]。气送式集排器排种小麦时,由于小麦种子表面有凹陷、球形度低、流动性差,充种环节种子难以稳定充入齿槽孔,且充入齿槽孔的种子受供种装置内种群作用影响,易从齿槽孔内掉落,导致齿槽孔漏充,降低了气送式集排器总排量稳定性。

为提高充种过程种子流动性,实现种子从种群内有效分离,雷小龙等[8]设计了安装于供种装置内的搅种机构,利用 EDEM 仿真确定了锥柱状齿槽孔与双螺旋排列方式的圆柱形搅种齿组合,可显著提高充种性能;邢赫等[9]在水稻气力式精量穴播排种器与种箱间设计了分层充种室,通过减少排种器中水稻种子之间的挤压力和摩擦力,改善种子的流动性;丛锦玲等[10]通过排种盘内表面嵌入导种条方式,提高油麦兼用型气力式精量排种器充种室内种子流动性,增加型孔内小麦种子充填率;史嵩等[11]设计了具有导种槽结构的气吸式精量排种器排种盘,利用 CFD - DEM 耦合仿真确定了导种槽曲线方程的基圆半径最优值,以提高玉米高速排种时充种性能;刘彩玲等[12]设计了安装于型孔轮式排种器内的振动定向供种机构,通过调整振动的方向、频率、振幅,提高非圆形种子的流动性和供种性能;HAN 等[13]利用 CFD - DEM 耦合仿真分析了气吸式精量排种器型孔结构对玉米种子充种性能的影响,确定了型孔的宽度和平均弧长的较优组合;YATSKUL 等[14]分析了法国 Kuhn 公司生产的气送式播种机供种装置的搅种机构对供种稳定性的影响。综上,国内外学者通过优化齿槽孔和型孔及充种室结构、添加扰种装置和搅种机构、增加激振装置等方式增加种群扰动和离散度。针对气送式集排器的供种装置,主要采用搅种机构与圆柱状槽齿轮配合方式提高种子流动性,存在增加排种环节和传动机构、易伤种等不足,而通过改变槽齿轮截面形状改善种子流动性的研究较少。

针对小麦气送式集排器供种装置充种环节种子流动性差,导致充种和供种不稳定的问题,设计一种具有等宽多边形槽齿轮的供种装置,确定等宽多边形槽齿轮的主要结构参数,利用 EDEM 仿真对比分析等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形、圆形槽齿轮对种群扰动能力、充种及供种性能的影响,通过台架试验验证较优等宽七边形槽齿轮式供种装置的供种性能,以期为小麦气送式集排器供种装置结构改进提供参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

气送式集排系统主要由风机、供料装置、供种装置、分配器、输送管道、导种管、开沟器、调速电机等组成,其结构如图 1 所示。

供种装置主要由种箱、种层调节板、卸种插板、

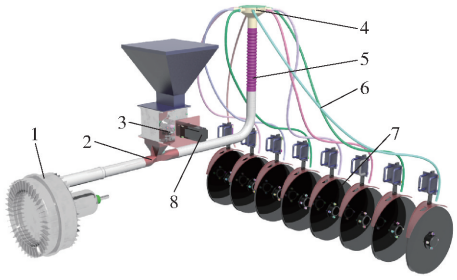
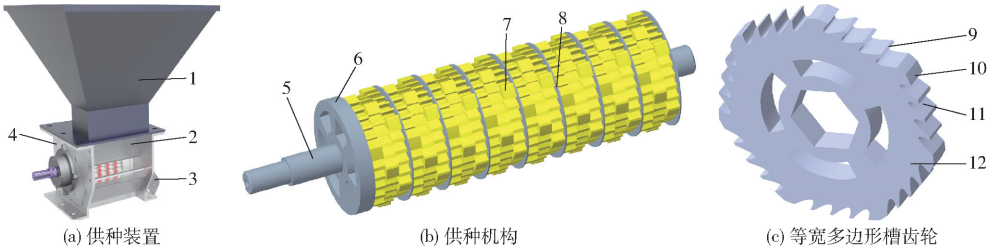


图 1 气送式集排系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of air-assisted centralized metering system

1. 风机 2. 供料装置 3. 供种装置 4. 分配器 5. 输送管道 6. 导种管 7. 开沟器 8. 调速电机

供种装置壳体、供种轴、空白轮、等宽多边形槽齿轮、中间隔板等组成。其中等宽多边形槽齿轮、中间隔板、空白轮、供种轴组成供种机构，供种机构上 24 个等宽多边形槽齿轮交错排布；等宽多边形槽齿轮作为供种装置实现稳定充种和供种的关键部件，可增加小麦种群扰动，提高种子流动性，其主要由间隔齿、扰种齿、齿槽孔、槽齿轮轮体组成，槽齿轮轮体外轮廓由数段等长圆弧组成，圆弧之间由扰种齿间隔。供种装置、供种机构及等宽多边形槽齿轮结构示意图如图 2 所示。



(a) 供种装置　(b) 供种机构　(c) 等宽多边形槽齿轮

图 2　供种装置结构示意图

Fig. 2　Structural diagrams of seed feeding device

1. 种箱　2. 种层调节板　3. 卸种插板　4. 供种装置壳体　5. 供种轴　6. 空白轮　7. 等宽多边形槽齿轮　8. 中间隔板　9. 间隔齿　10. 扰种齿　11. 齿槽孔　12. 槽齿轮轮体

1.2　工作原理

供种装置工作时，小麦种群依靠自身重力从种箱落入供种装置的充种室内，动力经供种轴带动等宽多边形槽齿轮转动，种子在自身重力、种群压力、等宽多边形槽齿轮扰动力等复合力作用下充入齿槽孔，等宽多边形槽齿轮对种群的周期性扰动增加了种子的流动性和离散度，实现囊入齿槽孔种子随等宽多边形槽齿轮转动过程中平稳从种群中分离，完成充种环节；充入齿槽孔内的种子随等宽多边形槽齿轮转动，完成携种环节；种子在自身重力和离心力作用下脱离齿槽孔，形成稳定种子流，完成供种环节。

2　关键部件设计

2.1　等宽多边形槽齿轮轮体

常规槽齿轮轮体外形轮廓为圆形，其外形规则、无外形突变，难以通过槽齿轮外形轮廓突变对充种室内种群产生持续扰动，在提高充种室内小麦种群流动性方面存在不足，需配合搅种机构改善充种性能。等宽多边形是一类具有等宽特性的封闭平面凸曲线，在任何方向上都有相同的宽度，等宽多边形可以在两平行线间自由转动且始终与直线保持直接接触[15-16]，由等宽多边形组成的槽齿轮轮体外形轮廓可改变充种室内空间，实现充种室内种群的周期性持续扰动。

等宽多边形定义[17]为，设 Γ 为凸封闭曲线，如图 3 所示，自原点 O 引射线 OE，OE 与 x 轴正方向夹角为 θ，作垂直于 OE 且与 Γ 相交任一直线 $L_1(S_1,\theta)$，记集 S_1 的上确界为 S，若 Γ 沿 θ 方向的宽满足

$$V(\theta)=p(\theta)+p(\theta+\pi)>0 \tag{1}$$

$$S=\sup\{S_1:L_1(S_1,\theta)\cap\Gamma\neq\varnothing\} \tag{2}$$

式中　$p(\theta)$ ——Γ 沿 θ 方向的支撑函数

$p(\theta+\pi)$ ——Γ 沿 $\theta+\pi$ 方向的支撑函数

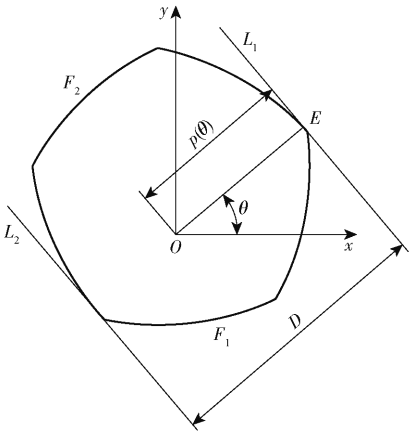


图 3　等宽多边形形成原理图

Fig. 3　Schematic of forming constant width polygon

由图 3 可知，等宽多边形 Γ 可视为由直线族 $\{L_1\}$、$\{L_2\}$ 的包络线 Γ_1、Γ_2 构成的封闭曲线，直线族 $\{L_1\}$、$\{L_2\}$ 的表达式为

$$x\cos\theta+y\sin\theta-p(\theta)=0 \tag{3}$$

$$x\cos\theta+y\sin\theta+D-p(\theta)=0 \tag{4}$$

构成 Γ 的包络线 Γ_1 曲线方程为

$$\begin{cases}x=p\cos\theta-p'\sin\theta\\ y=p\sin\theta+p'\cos\theta\end{cases} \tag{5}$$

其中　$p'=\mathrm{d}p/\mathrm{d}\theta$

Γ_2 曲线方程为

$$\begin{cases}x=(p-D)\cos\theta-p'\sin\theta\\ y=(p-D)\sin\theta+p'\cos\theta\end{cases} \tag{6}$$

式中　D——封闭曲线 Γ 在 θ 方向的宽度

实际在绘制等宽多边形时，绘制内接于直径为 R 圆的正 $2n+1$ 边形的边 A_1、A_2、…、A_{2n+1}，分别以边 A_1、A_2、…、A_{2n+1} 的 $2n+1$ 个交点 O_1、O_2、…、O_{2n+1} 为

圆心，A_1 到 A_{n+1} 的距离为半径绘制 $2n+1$ 个等宽多边形的拼接圆，$2n+1$ 个等宽多边形的拼接圆的公共部分，就是 $2n+1$ 条边的等宽多边形，等宽多边形的 $2n+1$ 条边为半径相同的圆弧连接而成，等宽多边形的相邻两条边连接处存在外形突变，作为等宽多边形槽齿轮轮体时，增加了充种室内种群的扰动。根据等宽多边形的定义和绘制原理可知，为实现等宽多边形在任何方向上都有相同的宽度，等宽多边形的边数应为奇数[18]，边数最少的等宽多边形为等宽三边形，同一宽度的等宽多边形，面积最小的为等宽三边形，面积最大的为圆形，则等宽三边形槽齿轮轮体对充种室内种群空间影响最大。以等宽五边形为例，其绘制过程如图 4 所示。

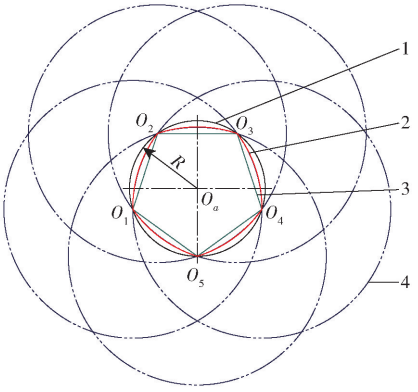
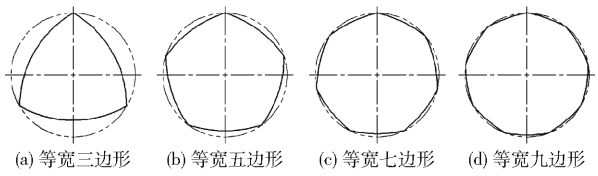


图 4 等宽五边形绘制示意图

Fig. 4 Schematic of drawing constant width pentagon

1. 正五边形外接圆 2. 等宽五边形 3. 正五边形 4. 等宽五边形的拼接圆

根据等宽多边形的结构特性，应用等宽多边形的槽齿轮轮体可有效增加种群扰动，改善种子流动性。随着等宽多边形边数的增加，等宽多边形相邻两条边连接处的外形突变对种群的扰动能力减弱，但边数的增加缩短了扰动周期。为满足供种装置对小麦种子充种性能的要求，并分析扰动能力和扰动周期对充种及供种性能的影响，设计等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮轮体。等宽多边形槽齿轮轮体的正多边形外接圆直径影响种子与齿槽孔接触时间，正多边形外接圆直径偏小时，为满足供种量要求，需增加等宽多边形槽齿轮转速，齿槽孔与种子接触时间缩短，不利于种子充填入齿槽孔；正多边形外接圆直径过大时，增加供种装置整体尺寸，影响气送式集排器整体布局，结合课题组前期研制的供种装置总体结构和小麦排种器槽轮直径范围，确定等宽多边形槽齿轮轮体的正多边形外接圆直径为 80 mm。根据等宽多边形的绘制方式，绘制等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮轮体截面，如图 5 所示。



(a) 等宽三边形 (b) 等宽五边形 (c) 等宽七边形 (d) 等宽九边形

图 5 等宽多边形槽齿轮轮体截面示意图

Fig. 5 Schematics of constant width polygon groove-tooth wheel body section

2.2 齿槽孔

小麦种子外形近椭球形，在种子长半轴方向存在凹陷，种子间摩擦力较大、种群流动性差不利于稳定充种。为提高充种及供种性能，基于抛物线形成齿槽孔截面曲线。

小麦种子充入齿槽孔的概率与小麦种子在充种室内的姿态相关，根据小麦种子的几何尺寸，型孔中小麦种子的姿态主要有“平躺”、“侧卧”、“竖立”3 种姿态。种子充入齿槽孔不同姿态的概率与该姿态的水平截面积呈正相关，根据文献[19]可知，小麦种子以“平躺”、“侧卧”、“竖立”3 种姿态充入型孔的概率分别为 42.98%、38.25%、18.77%，则小麦种子充入齿槽孔时种子姿态以“平躺”和“侧卧”为主。

型孔长度、宽度、高度是影响充种性能的关键参数，为保证小麦种子能以平躺姿态充入齿槽孔，型孔长度应大于种子最大长度，同时为保证充种精度，考虑一粒种子以平躺、一粒种子以侧卧姿态充种时的极限尺寸，齿槽孔长度应小于种子最大长度与最大宽度之和；齿槽孔宽度应大于种子最大宽度，同时为避免齿槽孔宽度方向上两粒种子同时以平躺姿态充种，齿槽孔最大宽度应小于两粒种子最小宽度之和；齿槽孔深度应大于种子最大宽度，且在第 2 粒种子以平躺姿态充种时，种子重心在齿槽孔外，故齿槽孔深度应小于 1.5 倍种子最大宽度。根据齿槽孔尺寸与种子充入姿态的关系可知

$$\begin{cases} b_{\max} < l < b_{\max} + c_{\max} \\ c_{\max} < w < 2c_{\min} \\ c_{\max} < h < 1.5c_{\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中 $b_{\max}$——小麦种子最大长度，mm

$c_{\max}$——小麦种子最大宽度，mm

$c_{\min}$——小麦种子最小宽度，mm

l——齿槽孔长度，mm

w——齿槽孔宽度，mm

h——齿槽孔高度，mm

以郑麦 9023 为研究对象，测得小麦种子最大长度、最大宽度、最小宽度分别为 6.5、3.5、3.0 mm，代入式(7)确定齿槽孔长度范围为 6.5 ~ 10.0 mm、齿

槽孔宽度范围为 3.5 ~ 6.0 mm、齿槽孔高度范围为 3.50 ~ 5.25 mm。

基于等宽多边形槽齿轮轮体结构特性，结合齿槽孔宽度和高度的取值范围，确定齿槽孔截面抛物线曲线未偏转时齿槽孔高度 h 为 3.8 mm，以等宽五边形槽齿轮轮体为例，采用抛物线曲线 $y=x^2$ 的齿槽孔结构如图 6 所示。

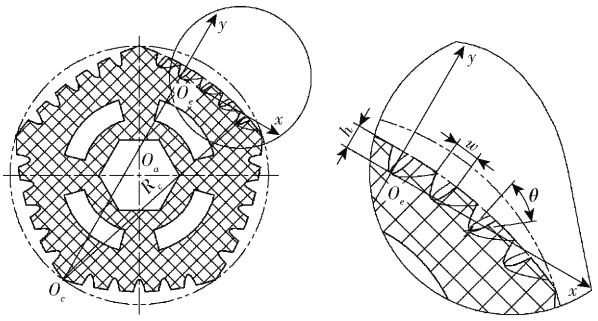


图 6　未偏转抛物线齿槽孔结构示意图

Fig. 6　Structural diagram of non deflected parabolic foramina alveolaria

由图 6 可知，等宽多边形槽齿轮齿槽孔高度一定时，联立抛物线齿槽孔方程和以 O_c 为圆心的等宽多边形的拼接圆方程可得

$$\begin{cases} y=x^2 \\ x^2+(y+R_c-3.8)^2=R_c^2 \end{cases} \tag{8}$$

式中　R_c——等宽多边形的拼接圆半径，mm

根据等宽多边形的正多边形外接圆、等宽多边形的拼接圆与等宽多边形的几何关系，可得等宽多边形的拼接圆半径为

$$R_c=\frac{R\sin\dfrac{180°}{2n+1}}{\sin\dfrac{90°}{2n+1}} \tag{9}$$

根据式(8)、(9)可确定等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮齿槽孔宽度 w 为 3.89 mm。

为提高充种室内种群离散度，在利用等宽多边形槽齿轮轮体增加种群扰动基础上，通过齿槽孔截面抛物线偏转进一步提高充种室内种群离散度，并保证种子在供种环节顺利从齿槽孔中排出。齿槽孔截面抛物线偏转过程中，以点 O_c 为圆心对齿槽孔截面抛物线整体偏转，偏转方向与等宽多边形槽齿轮转动方向相同。受小麦种子自然休止角、齿槽孔结构、齿槽孔数量及所在等宽多边形边长限制，齿槽孔截面抛物线偏转角过大时，齿槽孔无法成型，齿槽孔截面抛物线偏转角偏小时，供种环节种子难以排出，一般齿槽孔截面抛物线偏转角取值范围为 30° ~ 50°[20]，综合齿槽孔截面抛物线未偏转时齿槽孔的宽度和高度参考尺寸，为保证小麦种子有效充种和供种，确定齿槽孔截面抛物线偏转角 θ 为 40°。

当齿槽孔截面抛物线偏转角为 40°时，等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮的齿槽孔高度均为 4.88 mm，齿槽孔宽度分别为 5.57、5.60、5.61、5.61 mm；圆形槽齿轮的齿槽孔高度为 4.80 mm，齿槽孔宽度为 5.36 mm。根据齿槽孔长度取值范围及等宽多边形槽齿轮在供种装置内的排布，确定齿槽孔长度为 9 mm。

2.3　齿槽孔数量

单位时间内供种装置供种量应与播种机工作时播量要求一致，建立供种装置供种量与播量关系方程

$$\begin{cases} Q_s=\dfrac{Bv_m}{ab} \\ Q_m=\dfrac{qZNn_a}{60} \end{cases} \tag{10}$$

式中　Q_s——播种机播量，粒/s

B——播种机作业幅宽，m

v_m——播种机作业速度，m/s

a——平均粒距，m

b——行距，m

Q_m——供种装置供种量，粒/s

q——单个齿槽孔充入种子数量，粒

Z——单个槽齿轮径向齿槽孔数量

N——槽齿轮数量

n_a——槽齿轮转速，r/min

播种机播量和供种装置供种量相同时，由式(10)可得单个槽齿轮径向齿槽孔数量为

$$Z=\frac{60Bv_m}{abqNn_a} \tag{11}$$

由式(11)可知，单个槽齿轮径向齿槽孔数与播种机作业幅宽、作业速度成正比，与平均粒距、行距、单个齿槽孔充入种子数量、槽齿轮数量、槽齿轮转速成反比。综合考虑长江中下游地区小麦播种作业速度为 4 ~ 8 km/h，播量为 120 ~ 225 kg/hm^2，播种机作业幅宽为 2 m，一次播种 8 行，行距为 200 mm，平均粒距为 10 mm，单个齿槽孔充种粒数为 2，单行对应槽齿轮数量为 3，槽齿轮总量为 24，槽齿轮转速为 10 ~ 60 r/min，代入式(11)可得单个槽齿轮径向齿槽孔数量为 19 ~ 57。

等宽多边形的拼接圆半径与等宽多边形边长的几何关系为

$$l_c=\frac{\pi R_c}{2n+1} \tag{12}$$

式中　l_c——等宽多边形的边长，mm

结合式(9)、(12)可得等宽多边形的边长为

$$l_c = \frac{\pi R \sin\dfrac{180°}{2n+1}}{(2n+1)\sin\dfrac{90°}{2n+1}} \tag{13}$$

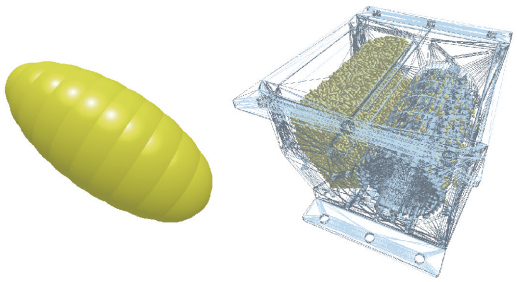
由式(13)可知,正多边形外接圆半径一定时,等宽多边形的边长随等宽多边形边数的增加而减小。正多边形外接圆半径为 40 mm 时,等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮轮体的边长分别为 72.55、47.81、35、27.5 mm,结合齿槽孔宽度取值范围,等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮轮体单边可形成的齿槽孔数量分别应不大于 13、8、6、4。相邻齿槽孔间有间隔齿时,为满足齿槽孔强度,同时保持不同等宽多边形槽齿轮轮体齿槽孔数量接近,确定等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮轮体单边齿槽孔数量分别为 9、5、4、3,等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮的径向齿槽孔数量分别为 27、25、28、27,槽齿轮交错排布。槽齿轮轮体为圆形时,确定齿槽孔数为 30。

3 供种装置充种性能仿真试验

为探究供种装置的槽齿轮轮体结构型式对充种及供种性能的影响,运用 EDEM 软件仿真分析等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形、圆形槽齿轮对充种环节小麦种群扰动能力和充种性能的影响,并对比分析等宽五边形、等宽七边形槽齿轮对供种性能的影响。

3.1 模型建立

为提高仿真效率,将仿真模型简化,仅保留供种装置壳体、种层调节板、等宽多边形槽齿轮、供种轴等关键部件,将简化后的模型文件另存为. stp 格式,导入 EDEM 2018 前处理模块中,于充种室上方建立颗粒工厂,使种子自由下落至充种室内。仿真模型如图 7 所示。



(a) 小麦种子模型 (b) 供种装置仿真模型

图 7 仿真模型

Fig. 7 Simulation models

根据测定的小麦种子三轴尺寸分布,确定小麦种子仿真模型的三轴尺寸为 6.40 mm × 3.00 mm × 3.00 mm,种子模型尺寸正态分布,标准差设置为 0.05 mm。种子与种子、种子与供种装置壳体间采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,等宽多边形槽齿轮材料为 ABS 工程塑料,供种装置壳体、种层调节板材料为铝合金,仿真参数[21-22]如表 1 所示。

表 1 仿真与接触参数

Tab. 1 Parameters of simulation and contact

项目	参数	数值
小麦种子	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	5.1×10^{7}
	密度/(kg·m^{-3})	1 350
铝合金	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	2.7×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	2 700
ABS 工程塑料	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^{8}
	密度/(kg·m^{-3})	1 060
种子-种子	恢复系数	0.42
	静摩擦因数	0.35
	动摩擦因数	0.05
种子-铝合金	恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.4
	动摩擦因数	0.05
种子- ABS 工程塑料	恢复系数	0.6
	静摩擦因数	0.4
	动摩擦因数	0.05

3.2 仿真试验方法

设定总仿真时间为 10 s,0 ~ 1 s 为种子生成阶段,在充种室上方生成小麦种子 1.5×10^{4} 粒,使种子自由下落至充种室中。第 1 秒供种轴开始转动,设置供种轴转速为 20 r/min,仿真完成后应用 EDEM 后处理模块提取 1 ~ 10 s 仿真数据进行分析,试验重复 3 次。

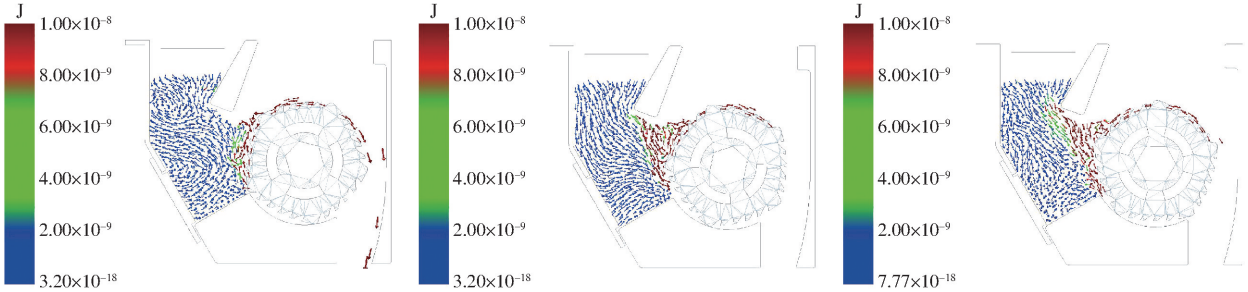
为探究等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形、圆形的 5 种结构型式槽齿轮对种群扰动和充种性能的影响,在充种室内接近槽齿轮表面处建立圆弧形选区,应用 EDEM 后处理模块提取 1 ~ 10 s 选区内 2 000 粒小麦种子的种群平均动能均值及每间隔 0.1 s 的种群平均动能,用于衡量充种室内种群运动状态;统计携种环节齿槽孔内种子数量,计算充种合格率((2 ± 1)粒/孔)、漏充率(0 粒/孔)及多充率(>3 粒/孔);后处理阶段在等宽五边形、等宽七边形槽齿轮式供种装置的投种区建立长方体检测框,统计检测框内 1 ~ 8 s 累计种子数量。

3.3 仿真试验结果与分析

3.3.1 槽齿轮结构型式对种群扰动能力的影响

较优结构槽齿轮对充种室内种群扰动能力强,可增加充种区内种群离散度,使种子易于在重力、种群压力、等宽多边形槽齿轮扰动力等复合作用力下

充入齿槽孔，离散度较高的种群，其平均动能较大，故选择充种室内种群平均动能作为衡量不同结构型式槽齿轮对种群扰动能力的评价指标。以等宽五边形槽齿轮为例，分别截取仿真过程中槽齿轮的扰种齿进入充种室、位于充种室中部和离开充种室 3 个阶段的种群运动矢量图，如图 8 所示。



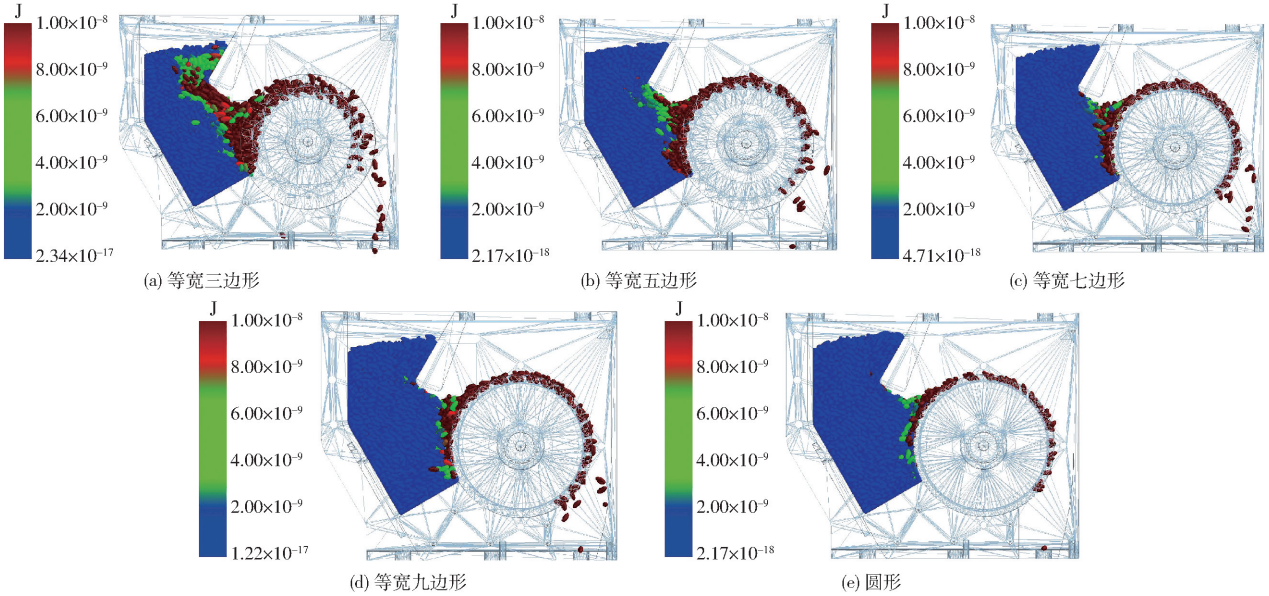
(a) 进入充种室　　(b) 充种室中部　　(c) 离开充种室

图 8　扰种齿进入充种室不同阶段种群运动矢量图

Fig. 8　Motion vector graphs of seed population motion at different stages of disturbing seed teeth entering seed filling chamber

图 8a 中，扰种齿进入充种室后，位于槽齿轮表面区域的种子在扰种齿带动下随供种轴转动方向运动；图 8b 中，扰种齿位于充种室中部时，由于扰种齿的强制带动和摩擦带动作用在充种室内形成具有较高运动速度的扰动区域；图 8c 中，扰种齿离开充种室时，由于扰种齿下方出现局部空缺，位于斜上方的种群产生向空缺区域流动的趋势，种群运动趋势与齿槽孔开口方向一致，有利于种子充入齿槽孔。

图 9 为不同结构型式槽齿轮式供种装置的充种室内种群平均动能分布，充种室内红色种子为强制带动层种子，绿色种子为摩擦带动层种子，蓝色种子为静止层种子。由图 9 可知，充种室内种群平均动能从靠近槽齿轮表面向槽齿轮径向方向递减，与槽齿轮接触的强制带动层在槽齿轮带动下产生沿槽齿轮线速度方向运动，强制带动层带动与其相邻的外层种群运动，其种群运动速度低于强制带动层，且沿槽齿轮径向方向逐层递减至静止层；接近槽齿轮表面的强制带动层和摩擦带动层的厚度和种群平均动能较大时，种群流动性较好。图 9 中，采用等宽多边形槽齿轮的供种装置充种室内强制带动层和摩擦带动层的面积明显大于圆形槽齿轮，充种室内产生的强制带动层和摩擦带动层面积从大到小依次为等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形、圆形，是由于等宽多边形槽齿轮表面轮廓的相邻两条边连接处形成的扰种齿存在突起，当槽齿轮表面扰种齿进入充种室时，位于充种室上方的种群在扰种齿强制带动下沿线速度切线方向向上运动，引起充种室容积产生周期性变化，且等宽多边形槽齿轮边数越少，相邻两条边连接处的外形突变越大，对种群的扰动能力越强；圆形槽齿轮表面轮廓无突起，摩擦带动能力较弱，仅能带动贴近槽齿轮表面种群运动。



(a) 等宽三边形　　(b) 等宽五边形　　(c) 等宽七边形

(d) 等宽九边形　　(e) 圆形

图 9　不同结构型式槽齿轮的种群动能分布图

Fig. 9　Diagrams of seed population kinetic energy distribution of groove-tooth wheel under different structural types

图 10 为不同结构型式等宽多边形槽齿轮扰动时种群平均动能随时间的变化曲线。由图 10 可知,种群平均动能随时间变化呈周期性波动,且不同槽齿轮种群平均动能之间存在较大差异;等宽三边形槽齿轮与等宽五边形槽齿轮扰动时种群平均动能随时间波动幅度较大;等宽七边形、等宽九边形及圆形槽齿轮扰动时种群平均动能随时间波动较小,但波动次数较多,是由于随等宽三边形、等宽五边形槽齿轮转动时,供种装置充种室容积周期性变化较大、种子流动性较强,种群平均动能较高;等宽七边形、等宽九边形及圆形槽齿轮转动时,供种装置充种室容积周期性变化较小、种子流动性较弱,种群平均动能较低,但等宽七边形和等宽九边形的外形突变扰种齿数量较多,波动次数增加。

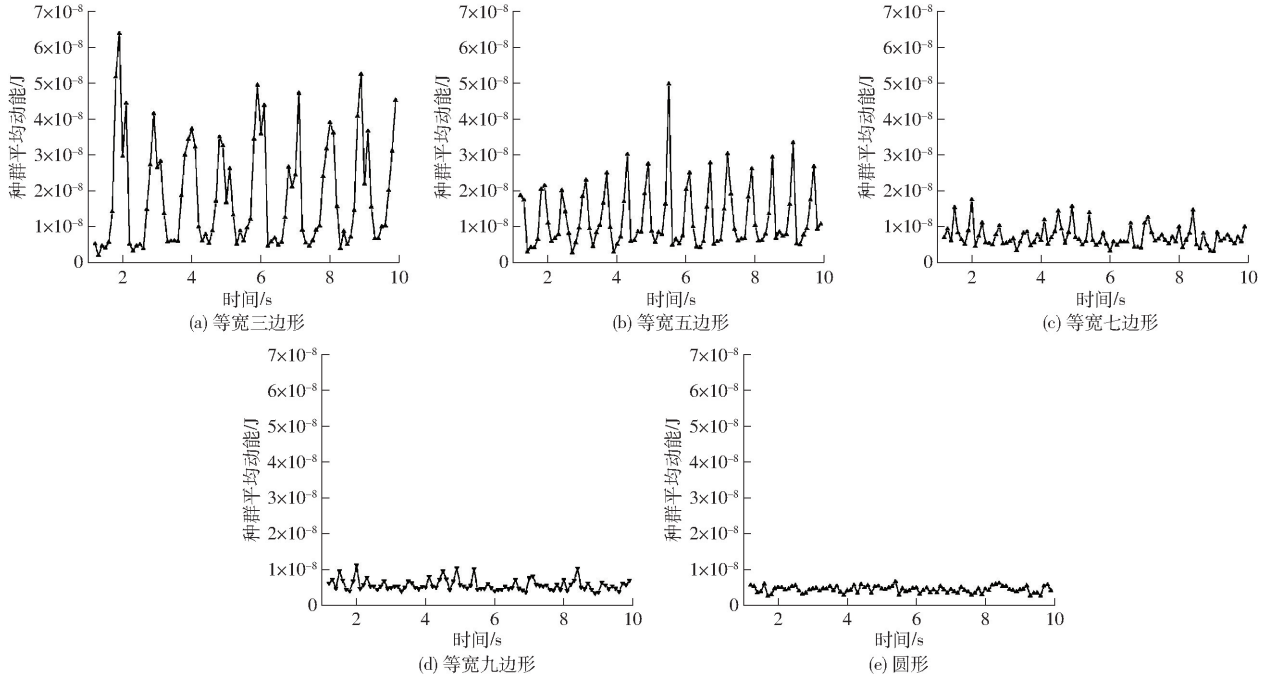


图 10 不同结构型式等宽多边形槽齿轮种群平均动能随时间的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of seed population average kinetic energy of groove-tooth wheel under different structural types with time

表 2 为供种轴转速为 20 r/min 时,槽齿轮扰动的充种室中 1 ~ 10 s 内种群平均动能均值。由表 2 可知,等宽三边形槽齿轮扰动时种群平均动能均值及平均动能均值的标准差最大,圆形槽齿轮扰动时种群平均动能及平均动能标准差最小。等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮扰动时种群平均动能均值比圆形槽齿轮分别高 371.32%、209.23%、91.02%、53.37%。种群平均动能均值越大,槽齿轮对种群扰动能力越强,种群的流动性越好,易于种子克服种群内摩擦力充入齿槽孔。综合图 8 ~ 10 及表 2 可知,采用等宽多边形槽齿轮可以有效打破种群稳定状态,提高槽齿轮附近区域种子流动性。

结合图 10 和表 2 可知,随等宽多边形槽齿轮边数的增加,种群平均动能均值逐渐增小,相邻平均动能峰值间隔时间缩短,扰动种群的频率增加,是由于等宽多边形槽齿轮边数越少,扰种齿两侧曲率突变越大,充种室内种群拖带和回流越剧烈,但扰种齿数量增加有助于缩短相邻扰种齿扰动种群平均动能峰值的间隔时间,有利于对种群的持续扰动。

表 2 不同结构型式槽齿轮扰动时种群平均动能均值

Tab. 2 Average kinetic energy mean value of seed population of different structural types groove-tooth wheel under disturbance J

槽齿轮结构型式	平均动能均值	标准差
等宽三边形	1.89×10^{-8}	1.51×10^{-8}
等宽五边形	1.24×10^{-8}	8.68×10^{-9}
等宽七边形	7.66×10^{-9}	2.96×10^{-9}
等宽九边形	6.15×10^{-9}	1.03×10^{-9}
圆形	4.01×10^{-9}	9.11×10^{-10}

3.3.2 槽齿轮结构型式对充种性能的影响

表 3 为不同结构型式槽齿轮式供种装置的充种性能。根据表 3 可知,齿槽孔结构和供种轴转速相同时,等宽七边形、等宽五边形、等宽九边形、等宽三边形、圆形槽齿轮的充种性能依次降低,等宽五边形和等宽七边形槽齿轮的充种合格率分别为 92.70% 和 93.98%、漏充率分别为 6.70% 和 2.78%,充种性能较优。结合槽齿轮结构型式对种群扰动性能影响的分析可知,等宽三边形槽齿轮具有较强的种群扰动能力,但因外缘曲率较大,且对种群持续扰动的间隔周期较长,不利于种子稳定填充进入

齿槽孔而造成漏充，且存在铲种现象，槽齿轮表面存在多余种子，供种量存在脉动性，不利于稳定连续充种；等宽九边形和圆形槽齿轮对种群扰动较小，充种室内种群处于稳定堆积状态，不利于种子从种群中脱离充入齿槽孔，漏充率较高；等宽五边形与等宽七边形槽齿轮，其种群扰动能力优于等宽九边形和圆形槽齿轮，可对种群产生连续扰动，且槽齿轮外轮廓曲率突变较小，对种群持续扰动的间隔周期较短，利于种子充入齿槽孔，充种性能较优。

表 3　不同结构型式槽齿轮充种性能

Tab. 3　Seed filling performance of groove-tooth wheel under different structural types　%

槽齿轮结构型式	合格率	合格率变异系数	漏充率	漏充率变异系数
等宽三边形	68. 30	4. 10	25. 00	16. 30
等宽五边形	92. 70	1. 30	6. 70	7. 10
等宽七边形	93. 98	3. 40	2. 78	6. 20
等宽九边形	79. 14	4. 05	18. 84	7. 97
圆形	64. 30	5. 10	35. 70	9. 30

3. 3. 3　槽齿轮结构型式对供种性能的影响

为比较充种性能较优的等宽五边形和等宽七边形槽齿轮的供种连续性，统计等宽五边形、等宽七边形槽齿轮式供种装置检测框内累计种子数量随时间的变化曲线，如图 11 所示。由图 11 可知，等宽五边形槽齿轮供种粒数随时间呈阶梯状上升，表明等宽五边形槽齿轮供种存在间隔，是由于充种环节等宽五边形槽齿轮对种群持续扰动的间隔周期较长，且等宽五边形槽齿轮相邻两边连接处的扰种齿突起较大，导致供种不连续；等宽七边形槽齿轮供种粒数与供种时间具有较高的线性度，供种时间与供种粒数曲线关系式为 $y = 10.392x - 27.838$，决定系数为 0. 998 2，可实现连续稳定供种。

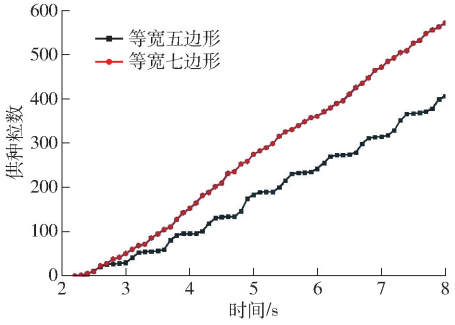


图 11　供种量随时间的变化曲线

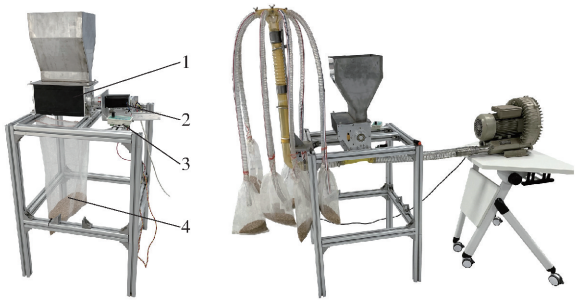
Fig. 11　Variation curves of seed feeding quantity with time

综合等宽多边形槽齿轮对种群扰动能力、充种性能及供种性能影响的分析可知，等宽七边形槽齿轮式供种装置的供种和充种性能较优。

4　试验

4. 1　试验设备

为验证较优等宽七边形槽齿轮式供种装置的供种性能及供种装置对气送式集排器排种性能的影响，将安装有 3D 打印等宽七边形槽齿轮的供种装置固定于自制的供种性能检测试验台上，采用调速器调节步进电机转速，步进电机提供供种轴驱动力；将安装有等宽七边形槽齿轮式供种装置的气送式集排器安装于排种性能检测试验台上。试验装置如图 12 所示。



(a) 供种性能试验装置　　(b) 排种性能试验装置

图 12　试验装置

Fig. 12　Experiment device

1. 供种装置　2. 步进电机　3. 调速器　4. 收集网袋

4. 2　试验方案

试验选取小麦品种为郑麦 9023，千粒质量为 48. 77 g，平均三轴尺寸为 6. 40 mm × 3. 00 mm × 3. 00 mm。试验过程中种箱内装入小麦种子 8 kg，以减少种量变化对供种性能及排种性能的影响。为满足小麦气送式集排器排种时对供种装置供种量的需求，设置供种轴转速为 10 ~ 60 r/min，供种轴安装 24 个等宽七边形槽齿轮，以供种装置 60 s 内供种质量为供种速率，采用收集网袋收集供种装置及气送式集排器排出的小麦种子，试验重复 5 次，统计供种速率、供种速率稳定性变异系数、供种时种子破损率、总排量稳定性变异系数、排种时种子破损率，试验结果如表 4 所示。

表 4　供种及排种性能试验结果

Tab. 4　Test results of seed feeding and seeding performance

转速/(r·min^{-1})	供种速率/(g·min^{-1})	供种速率稳定性变异系数/%	供种时破损率/%	总排量稳定性变异系数/%	排种时破损率/%
10	612. 34	2. 14	0. 13	2. 15	0. 15
20	1 384. 52	0. 72	0. 14	0. 68	0. 16
30	1 801. 64	0. 69	0. 15	0. 72	0. 16
40	2 532. 31	1. 01	0. 13	0. 97	0. 17
50	3 105. 33	0. 98	0. 18	1. 03	0. 20
60	3 725. 85	1. 15	0. 20	1. 14	0. 23

4.3 试验结果分析

由表 4 可知,供种速率随供种轴转速在 10 ~ 60 r/min 内增加而在 612.34 ~ 3 725.85 g/min 内逐渐增大,供种轴转速与供种速率的拟合方程为 $y = 61.316x + 47.6$,$R^2 = 0.9965$,线性拟合度较好;供种轴转速为 10 r/min 时,供种速率稳定性变异系数及总排量稳定性变异系数较高,是由于较低转速下等宽七边形槽齿轮对种群扰动能力不足;供种轴转速为 20 ~ 60 r/min 时,供种速率稳定性变异系数不高于 1.15%,供种时破损率不高于 0.20%,总排量稳定性变异系数不高于 1.14%,排种时破损率不高于 0.23%,表明等宽七边形槽齿轮式供种装置可满足小麦气送式集排器供种量的要求。

5 结论

(1)设计了一种具有等宽多边形槽齿轮的供种装置,确定了等宽多边形槽齿轮的主要结构参数,分析确定了等宽多边形槽齿轮轮体的正多边形外接圆直径为 80 mm,等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮的径向齿槽孔数量分别为 27、25、28、27。

(2)运用 EDEM 软件仿真分析了等宽多边形槽齿轮对小麦种群扰动能力和充种性能的影响,并对比分析了等宽五边形、等宽七边形槽齿轮对供种性能的影响,结果表明:等宽三边形、等宽五边形、等宽七边形、等宽九边形槽齿轮扰动时种群平均动能均值比圆形槽齿轮分别高 371.32%、209.23%、91.02%、53.37%;等宽七边形槽齿轮充种合格率为 93.98%、漏充率为 2.78%,供种粒数与供种时间具有较高的线性度,充种和供种性能较优。

(3)较优等宽七边形槽齿轮式供种装置供种性能及对排种性能影响的台架试验结果表明:供种速率随供种轴转速在 10 ~ 60 r/min 内增加而在 612.34 ~ 3 725.85 g/min 内逐渐增大;供种轴转速为 10 ~ 60 r/min 时,供种速率稳定性变异系数不高于 2.14%,供种时破损率不高于 0.20%,总排量稳定性变异系数不高于 2.15%,排种时破损率不高于 0.23%,表明等宽七边形槽齿轮式供种装置可满足小麦气送式集排器供种量的要求。

参 考 文 献

[1] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166(2): 1 - 12.

[2] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):70 - 78.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of pneumatic and pneumatic collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 70 - 78. (in Chinese)

[3] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z, et al. Numerical simulation of two-phase "Air - Seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 1 - 7.

[4] 戴亿政,罗锡文,张明华,等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(10):1 - 8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 1 - 8. (in Chinese)

[5] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 油麦兼用型气送式排种器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):62 - 72,97.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62 - 72, 97. (in Chinese)

[6] 袁昊,刘彩玲,宋建农,等. 超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动供种装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):31 - 40.
YUAN Hao, LIU Cailing, SONG Jiannong, et al. Piezoelectric vibration seed supply device of precision metering device for plug seedling of super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 31 - 40. (in Chinese)

[7] 王磊,廖宜涛,廖庆喜,等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):75 - 85.
WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75 - 85. (in Chinese)

[8] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):26 - 34.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26 - 34. (in Chinese)

[9] 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式排种器分层充种室设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(4):42 - 48.

XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of stratified seed-filling room on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 42 - 48. (in Chinese)

[10] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报,2014,30(8):30 - 39.
CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30 - 39. (in Chinese)

[11] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):61 - 70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61 - 70. (in Chinese)

[12] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):108 - 115.
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108 - 115. (in Chinese)

[13] HAN D, ZHANG Dongxing, JING Huirong, et al. DEM - CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150(6): 426 - 438.

[14] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161(9): 120 - 134.

[15] ROCHERA D. Algebraic equations for constant width curves and Zindler curves[J]. Journal of Symbolic Computation, 2022, 113: 139 - 147.

[16] 徐晓俊,何俊声,高业田. 等竞曲线的数学原理与等宽凸轮机构设计[J]. 东北重型机械学院学报,1989,13(3):45 - 50.
XU Xiaojun, HE Junsheng, GAO Yetian. Mathematical principle of constant-breadth curve and design of constant-breadth cam [J]. Journal of Northeast Institute of Heavy Machinery, 1989, 13(3): 45 - 50. (in Chinese)

[17] MARTINI H, MUSTAFAEV Z. A new construction of curves of constant width[J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25(9): 751 - 755.

[18] PANRAKSA C, WASHINGTON L C. Real algebraic curves of constant width[J]. Periodica Mathematica Hungarica, 2017, 74(2): 235 - 244.

[19] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10 - 18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10 - 18. (in Chinese)

[20] 李兆东,王晴晴,张亚兰,等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):116 - 124.
LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 116 - 124. (in Chinese)

[21] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6): 11 - 19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11 - 19. (in Chinese)

[22] 王磊,廖宜涛,万星宇,等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):68 - 79,97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68 - 79, 97. (in Chinese)