doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.005

油麦兼用高速播种机气送式排肥系统设计与试验

廖宜涛[1,2]　武安阳[1]　廖庆喜[1,2]　郑　娟[1]　王传奇[1]　张青松[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: 针对外槽轮排肥器在高速作业中存在肥料供应不足、脉动断条,造成肥料连续性、均匀性不足等问题,设计了一种叶轮供肥、离心分肥、辅以气流输送的气送式高速排肥系统。对叶轮供肥装置结构、离心分肥装置导流头和凹面圆盘进行设计;通过 EDEM 仿真试验,验证了所设计的叶轮供肥装置供肥变异系数小于 3.2%,明确了导流头曲线为带摩擦最速降线时肥料颗粒流速最快,确定了直线型、二次多项式曲线型、三次多项式曲线型 3 种凹面圆盘曲线的最优结构参数;开展 3 种曲线结构的凹面圆盘台架试验,确定直线型凹面圆盘作业效果最优。以仿真确定的供肥装置、带摩擦最速降线导流头和直线型凹面圆盘开展叶轮转速与离心圆盘转速工作参数匹配试验,结果表明,在各行排肥量一致性变异系数低于 7% 条件下,当叶轮转速为 14.00 ~ 21.23 r/min 即前进速度为 9.00 ~ 10.24 km/h 时,离心圆盘转速应大于 168.2 r/min;当叶轮转速为 21.23 ~ 25.00 r/min 即前进速度为 10.24 ~ 12.00 km/h 时,离心圆盘转速应小于 150 r/min。田间性能验证试验结果表明,在较优匹配工作参数下排肥系统总排肥量稳定性变异系数均不大于 4.11%,各行排肥量稳定性变异系数均不大于 6.94%。该研究为油麦兼用高速播种机高速施肥装置设计提供了参考。

关键词: 气送式排肥系统; 油麦兼用高速播种机; 导流头; 离心分肥装置; EDEM
中图分类号: S224.21　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0060-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Pneumatic Fertilizer Discharging System for High Speed Seeder for Rapeseed and Wheat

LIAO Yitao[1,2]　WU Anyang[1]　LIAO Qingxi[1,2]　ZHENG Juan[1]　WANG Chuanqi[1]　ZHANG Qingsong[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: In response to the issues of insufficient fertilizer supply and pulsating strip breakage during high-speed operation of the existing external trough-wheel fertilizer spreaders, which result in poor continuity and uniformity of fertilizer application, a high-speed air-assisted fertilizer distribution system was designed. This system featured an impeller for fertilizer supply, centrifugal fertilizer distribution, and air-flow assistance for transportation. The structural designs of the impeller feeding device, centrifugal distribution device flow deflector, and concave disk were completed. EDEM simulation experiments were conducted to verify the performance of the impeller feeding device, achieving a coefficient of variation of fertilizer supply stability below 3.2%. It was determined that the fertilizer particle velocity was the fastest when the flow deflector curve followed a friction-based brachistochrone line. The optimal structural parameters of three concave disk designs—linear, quadratic polynomial, and cubic polynomial—were determined. A bench test compared the performance of these three designs, and the linear concave disk had the most significant impact on operational effectiveness. Using the simulation-determined fertilizer feeding device, brachistochrone flow deflector, and linear concave disk, a matching experiment was conducted to determine the working parameters of the impeller speed and centrifugal disk speed. Results showed that under the condition that the variation coefficient of the consistency of fertilizer discharge volume was below 7%, when the impeller speed was 14.00 ~ 21.23 r/min (corresponding to a forward speed of 9.00 ~ 10.24 km/h), the centrifugal disk speed should exceed 168.2 r/min; when the impeller

收稿日期: 2025-03-18　修回日期: 2025-04-26
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)和国家现代油菜产业技术体系项目(CARS-12)
作者简介: 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

speed was 21.23 ~ 25.00 r/min (corresponding to a forward speed of 10.24 ~ 12.00 km/h), the centrifugal disk speed should be below 150 r/min. Field performance validation tests demonstrated that under optimal parameter matching, the variation coefficient of the stability of fertilizer discharge volume was not more than 4.11%, and the variation coefficient of the consistency of fertilizer discharge volume was not more than 6.94%. The research result can provide a reference for the design of high-speed fertilization devices for dual-purpose seeding machines used for crops such as rapeseed and wheat.

Key words: pneumatic fertilizer discharging system; high-speed seeder for rapeseed and wheat; flow guide head; centrifugal fertilizer device; EDEM

0　引言

油菜和小麦是我国重要粮油作物，在南方地区主要采用稻油、稻麦轮作模式，播种时节农时紧，常采用耕播集成作业方式提高效率[1-2]。随着机械化社会服务效率需求和大功率拖拉机发展，农机合作社等新型经营主体常采用翻耕埋茬、耕前施肥、旋耕整地、无人机播种等分段作业方式，通过提高作业速度提升作业的综合效率；但因施肥整地后肥料不集中、无人机撒播播种质量难以保证，急需高效稳定完成肥料条施和油菜播种的高速播种机[2-6]。国内目前针对 9 km/h 以上的油菜、小麦、玉米、大豆等作物的高速排种系统已进行一定研究[7-10]，但针对高速施肥系统研究相对较少，现多使用外槽轮式排肥器，在高速作业过程中存在肥料供应不足和脉动断条等问题。

播种机排肥系统主要分为供肥和分肥两个过程，具体可分为供分一体和供分分离两种排肥系统。供分一体排肥系统适用于一器一行至多行排肥作业，采用槽轮式、螺旋式、离心式等排肥器，将肥箱中的肥料群通过搅拌、振动、旋转等方式转化为均匀的肥料流[7-13]，分别输送至触土部件。由于排肥器多带有叶片结构，自身具有脉动现象，影响施肥均匀性。为提高施肥效果，王金峰等[11]设计了一种螺旋式外槽轮，通过设置若干螺旋线环型浅槽，从而保证肥料顺着凹槽的旋转方向连续排出，减小了外槽轮的脉动现象。肖文立等[12]设计了一种四头螺旋双行排肥器，通过调整排肥螺旋头数、螺距和工作转速并进行定量分析来减少相位脉冲，提高螺旋排肥均匀性。刘晓东等[13-15]通过增设弧形锥体引导肥料流动，调整锥盘倾角和离心推板角度促进肥料均匀流出，提高离心排肥均匀性。上述研究主要采用调整排肥器结构参数和工作参数来减小排肥器脉动现象，以提高排肥均匀性，多适用于中低速作业。

供分分离排肥系统采用排肥器集中供肥，肥料在气流裹挟作用下以欠约束方式在管道中混匀[16]，再分配输送至相应位置，能实现多行均匀施肥，显著提高工作效率。杨庆璐等[17-19]采用气力集排式排肥器，肥料在气流作用下自下而上输送至分配头进行肥料分配，通过优化波纹管与分配头结构、增设气肥分离装置，提高了施肥系统稳定性、均匀性。何亚凯等[20]采用集排风送式排肥器，肥料经气流作用自上而下直接进行分配输送，通过优化分流器结构和排肥器工作参数，提高排肥效果。上述研究通过气力输肥，避免了肥料的堵塞现象，经气流作用促进肥料混匀，降低了排肥过程的脉动现象，但在高速施肥条件下，需考虑风机功耗问题。

为解决在高速作业过程中存在肥料供应不足、脉动断条，造成肥料连续性、均匀性不足等问题，本文设计一种叶轮供肥、离心分肥、辅以气流输送的气送式高速排肥系统。对叶轮供肥装置结构、离心分肥装置导流头和凹面圆盘进行设计；应用 EDEM 开展结构设计仿真试验，验证关键部件作业性能，结合台架试验开展圆盘结构选型，确定最优工作参数范围，以期为高速施肥装置研究提供参考。

1　总体结构与工作原理

1.1　总体结构

油麦兼用高速播种机由肥沟开沟器、开畦沟装置、油菜开沟环、小麦开沟器、镇压辊、离心式分肥装置、叶轮供肥装置及气送式排种器等组成，播种时采用小麦辊前播、油菜辊后播，整体结构及农艺过程如图 1 所示。整机由拖拉机牵引，前进过程中由开畦沟装置、肥沟开沟器和镇压辊共同作用，构建平整的凸垄厢面，肥料由肥箱经叶轮供肥装置、离心式分肥装置落入肥沟开沟器开出的肥沟中，播种小麦时导种管插入小麦开沟器中，播种油菜时导种管插入油菜种管架中，油菜开沟环固连于镇压辊上，随镇压辊旋压完成种沟开设，实现油菜直播播深仿形控制。

1.2　排肥器结构与工作原理

气送式高速排肥系统包括肥箱、叶轮供肥装置、导肥管、离心式分肥装置、输肥管和开沟器等；其中叶轮供肥装置主要包括叶轮、供肥下壳、落肥管、风机和文丘里管等；离心式分肥装置主要包括分肥外壳、导流头、离心圆盘和支架等，排肥系统及关键部件如图 2 所示。施肥作业时，肥料经肥箱出肥口落

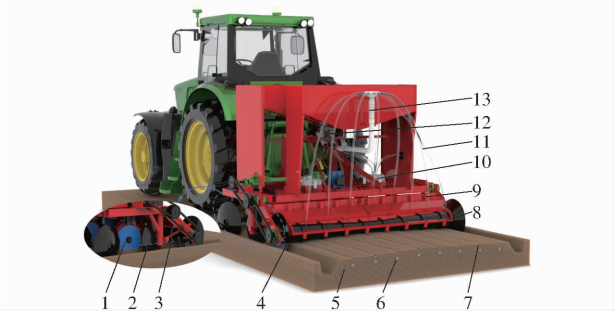


图 1 高速施肥播种机整体结构及农艺过程

Fig. 1 Overall structure and agronomic process of high-speed fertilization planter

1. 肥沟开沟器 2. 开畦沟装置 3. 油菜开沟环 4. 镇压辊 5. 土壤 6. 肥料 7. 种子 8. 油菜种管架 9. 小麦开沟器 10. 离心式分肥装置 11. 导种管 12. 叶轮供肥装置 13. 气送式排种器

入由叶轮叶片、肥箱、供肥外壳和排肥下壳构成的空腔中,经电机带动叶轮旋转将肥料输送至排肥下壳落肥口,后经落肥管落入文丘里管,在风机气流作用下输送至离心式分肥装置。其中肥箱出肥口和排肥下壳落肥口均为 2 个(对置分布),且出肥口与落肥口为垂直安装,叶轮转动 1 周可排肥 2 次,可实现低转速条件下大通量供肥。肥料流入离心式分肥装置后,经导流头均匀分布于离心圆盘上,在离心圆盘转动过程中,肥料颗粒逐步运动到圆盘边缘,通过分肥罩壳出口将肥料导出,在气流辅助作用下沿输肥管输送至触土部件。

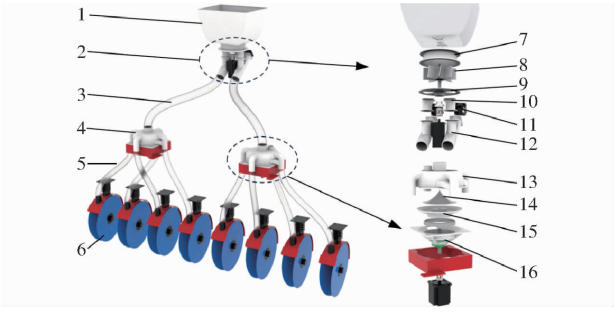


图 2 排肥系统及关键部件示意图

Fig. 2 Schematic of fertilizer discharge system

1. 肥箱 2. 叶轮供肥装置 3. 导肥管 4. 离心式分肥装置 5. 输肥管 6. 肥沟开沟器 7. 供肥外壳 8. 叶轮 9. 供肥下壳 10. 落肥管 11. 风机 12. 文丘里管 13. 分肥外壳 14. 导流头 15. 离心圆盘 16. 支架

2 关键部件设计

2.1 叶轮供肥装置参数设计

叶轮供肥装置由叶轮、供肥外壳、供肥下壳、落肥管等部件组成,主要参数包括叶轮叶片类型、高度 h_0,内径 D_i、外径 D_j,落肥口开度 θ_0 等。叶轮供肥过程分为轴向充肥、周向送肥、轴向落肥和周向过渡 4 个过程,为适应高速施肥作业的大供肥量需求,采用一分二的供肥模式,减少供肥装置体积及所需电机功率,并降低肥料输送过程的挤压破碎现象。

根据高速施肥作业要求,叶轮供肥装置设计参数关系为

$$\begin{cases} h_0 = \dfrac{1}{2}gt^2 \\ Q = \dfrac{[\pi(D_j + D_i) - 2kT_1](D_j - D_i)h_0\rho_0\varphi n_1}{1.2\times10^8} \\ \theta_0 > \dfrac{\pi n_1 t}{30} \end{cases} \tag{1}$$

式中 g——重力加速度,m/s^2

k——叶轮叶片数

n_1——叶轮转速,r/min

Q——叶轮供肥速率,g/s

T_1——叶轮叶片厚度,mm

t——肥料排出所需时间,s

ρ_0——颗粒肥料容重,kg/m^3

φ——颗粒肥料填充系数

叶轮动力选取 57 步进电机,经行星齿轮减速器进行减速增扭带动叶轮旋转,由于行星齿轮减速比选取较大,输出转速较低,设置供肥装置叶轮最高转速 n_1 为 25 r/min;为减少供肥装置体积,叶轮内径 D_i 取 60 mm,由导叶内外径关系,叶轮外径 D_j 为 160 mm;为避免肥料在运动过程中产生拥堵堆积,叶轮叶片间最小距离应大于肥料直径的 6 倍[21],鉴于叶轮内径与叶片结构强度,叶片厚度为 3 mm,叶片数设为 8 片,叶片间最小距离为 22.65 mm。结合高速施肥作业要求,单位时间内最大供肥量 Q 为 575 g/s,计算可得叶轮高度 h_0 为 48.57 mm,为便于加工制造 h_0 取 50 mm;则落肥口开度 $\theta_0 > 15.15°$,为避免肥料结块堵塞、提升肥料充肥落肥性能,结合叶轮叶片数,θ_0 取 45°。

肥料在叶轮转动及重力作用下进行轴向和周向运动,其运动方式类似于水流在轴流泵中的运动过程,叶轮叶片选取轴流泵导叶形式。肥料从肥箱中在自身重力作用下由静止状态向叶轮中进行填充,为便于肥料颗粒进入,叶片进口角设为 90°;肥料颗粒流出时,为减少肥料颗粒与叶片摩擦,提高叶片耐用度,叶片出口应与肥料流出速度垂直,叶片出口倾角计算公式为

$$\alpha_{out} = \arctan\frac{\pi D n_1}{60\sqrt{2gh_0}} \tag{2}$$

式中 α_{out}——叶片出口倾角,(°)

D——叶片直径,mm

为简化叶片设计过程,按照轴流泵导叶设计流程[22],仅计算沿周向方向的 5 个叶片轮廓,再通过

放样生成所需叶轮叶片结构。叶轮转速与叶轮供肥装置供肥效果密切相关，需对其工作范围进行定量分析，叶轮工作转速需满足

$$2.7\times10^{-3}Q_{\min}v_{\min}\leqslant n_y\leqslant 2.7\times10^{-3}Q_{\max}v_{\max} \quad (3)$$

式中　n_y——叶轮工作转速，r/min

$Q_{\max}$、$Q_{\min}$——排肥系统最大、最小施肥量，kg/hm^2

$v_{\max}$、$v_{\min}$——整机最大、最小前进速度，km/h

根据设计要求，排肥系统施肥量为 600 ~ 750 kg/hm^2，整机前进速度为 9 ~ 12 km/h，则叶轮转速应为 14.58 ~ 24.3 r/min。

2.2　离心圆盘设计

由于供肥装置采用叶轮式供肥装置，肥料不可避免会出现脉动现象；且肥料通过管道输送至离心式分肥装置，存在周向分布不均等问题。为保证肥料从分肥外壳出口处均匀稳定排出，离心圆盘应具有促进肥料周向分布及存储携带肥料的能力，因而离心圆盘选取导流头与凹面圆盘组合形式，通过导流头均布肥料颗粒流向离心圆盘底部，而后在离心圆盘转动过程中进行肥料混匀及均匀分配，离心圆盘结构如图 3 所示。

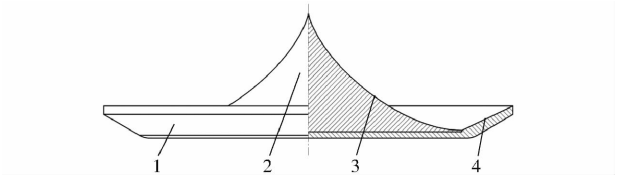


图 3　离心圆盘结构示意图

Fig. 3　Centrifugal disc structure diagram

1. 凹面圆盘　2. 导流头　3. 导流头曲线　4. 凹面圆盘曲线

2.2.1　导流头曲线设计

为保证肥料颗粒顺利排出，颗粒到达分肥罩壳落肥口处时运动速度应达到排出要求，离心圆盘需为颗粒排出提供充足的时间余量，即离心圆盘需承接一定时间内的肥料流，离心圆盘顶端到最低点的垂直距离 H 为

$$H=\frac{\omega\varphi_1 Q}{2\pi\mu g\rho_0\varphi R_1}\times10^3 \quad (4)$$

式中　R_1——离心圆盘回转半径，取 100 mm

φ_1——离心圆盘填充余量系数

μ——离心圆盘与肥料间摩擦因数

ω——离心圆盘角速度，rad/s

为缓解供肥装置脉动，离心圆盘采用导流头与末端曲线结合的凹面圆盘结构，以促进肥料颗粒在离心圆盘中均匀分布。离心式排种排肥装置导流头曲线通常为无摩擦最速降线[14]与直线[7,21]两种结构，但由于肥料易吸水粘连，与离心圆盘的摩擦不容忽视，设计过程采用带摩擦的最速降线理论，导流头曲线为带摩擦最速降线。后续通过对比肥料颗粒在 3 种导流头上的运动情况，明确最优导流头结构。由离心圆盘轮廓曲线起点和终点位置，得到肥料颗粒运动轨迹即导流头轮廓，颗粒运动轨迹示意图如图 4 所示。

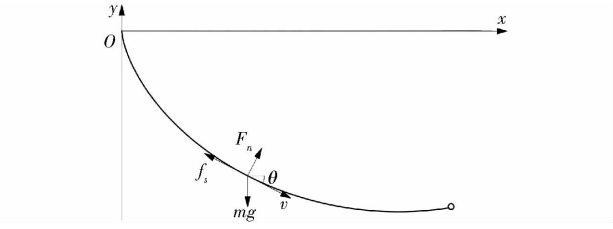


图 4　颗粒运动轨迹示意图

Fig. 4　Motion trajectory diagram of particles

由图 4 可知，颗粒在运动过程中的受力及约束条件为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=mg\sin\theta-f_s \\ mv\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=-mg\cos\theta+F_n \\ \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}-v\cos\theta=0 \\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}-v\sin\theta=0 \end{cases} \quad (5)$$

式中　f_s——颗粒运动过程中受到的摩擦力，N

F_n——颗粒受到的支持力，N

m——颗粒质量，g

v——颗粒速度，m/s

θ——颗粒速度与水平面夹角，(°)

由式(4)可得，垂直距离 H 取 56 mm，导流头半径定为 75 mm，则离心圆盘边缘坐标为(75 mm，-56 mm)。为保证颗粒在导流头运动时间 T 最短，定义关于时间的泛函数、构造拉格朗日方程[23-24]，在限定条件下求得所需时间极小值，函数方程为

$$\begin{cases} T=\displaystyle\int_0^t[1+\lambda_1(\dot{x}-v\cos\theta)+\lambda_2(\dot{y}-v\sin\theta)+ \\ \qquad \lambda_3(\dot{v}+\mu v\dot{\theta}-g\sin\theta+\mu g\cos\theta)]\,\mathrm{d}t \\ L=1+\lambda_1(\dot{x}-v\cos\theta)+\lambda_2(\dot{y}-v\sin\theta)+ \\ \qquad \lambda_3[\dot{v}+\mu v\dot{\theta}+g(\sin\theta+\mu\cos\theta)] \end{cases} \quad (6)$$

式中　λ_1、λ_2、λ_3——拉格朗日乘子

L——拉格朗日方程

借助 Euler - Lagrange 方程生成所需求解函数方程，结合肥料颗粒初始及终点处边界条件，进行函数求解[24]。采用 Newton - Raphson 迭代法对拉格朗日乘子和时间 T 进行函数逼近，生成颗粒在各个时间步内的坐标值，对所获的颗粒坐标值进行五阶

曲线拟合,得到带摩擦最速降线导流头曲线方程;同理,通过调整摩擦因数 μ,可得到无摩擦最速降线导流头曲线方程。带摩擦最速降线型、无摩擦最速降线型、直线型导流头曲线方程 y_1、y_2、y_3 为

$$\begin{cases} y_1 = -1.1485\times10^{-7}x^5 + 2.4640\times10^{-5}x^4 - \\ \quad 1.9766\times10^{-3}x^3 + 8.0832\times10^{-2}x^2 - \\ \quad 2.4471x - 0.9560 \\ y_2 = -1.5899\times10^{-7}x^5 + 3.3193\times10^{-5}x^4 - \\ \quad 2.6222\times10^{-3}x^3 + 0.1044x^2 - \\ \quad 2.7857x - 1.9646 \\ y_3 = -\dfrac{56}{75}x \end{cases} \tag{7}$$

拟合曲线决定系数 R^2 均大于 0.9993,拟合效果较好,可作为导流头结构解析解,不同导流头曲线如图 5 所示。后续通过仿真试验跟踪肥料颗粒在不同导流头中的运动情况,以肥料颗粒在导流头运动时间最短为目标,确定最优导流头曲线。

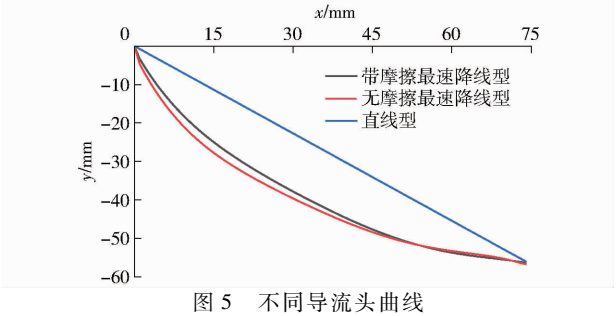


图 5 不同导流头曲线

Fig. 5 Different flow guide head profile curves

2.2.2 凹面圆盘曲线设计

肥料颗粒在分肥器运动过程中,由于颗粒之间、颗粒与分肥器之间发生碰撞、摩擦、滚动、滑动等现象,运动过程较为复杂;但当肥料颗粒运动到离心圆盘边缘时,由于分肥罩壳的外在约束,在颗粒未进入到出肥口时仅存在绕轴旋转运动,颗粒在离心圆盘边缘受力如图 6 所示。

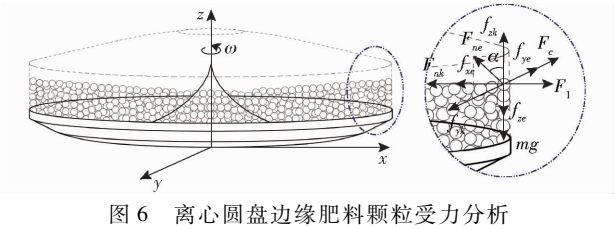


图 6 离心圆盘边缘肥料颗粒受力分析

Fig. 6 Force diagram of fertilizer particles at edge of centrifugal disc

通过分析肥料在圆盘边缘的运动状态,可确定分肥器结构参数与工作参数。颗粒在圆盘边缘受力为

$$\begin{cases} F_1 - F_{nk} - f_{xe} - F_{ne}\sin\alpha = 0 \\ F_c + f_{ye} - f_{yk} = 0 \\ f_{zk} + F_{ne}\cos\alpha - f_{ze} - mg = 0 \\ F_1 = m\omega^2 R_1 \\ F_c = 2mv_e\omega \end{cases} \tag{8}$$

式中 F_1——肥料颗粒离心力,N

F_c——肥料颗粒科氏力,N

F_{nk}——分肥罩壳对肥料颗粒的支持力,N

F_{ne}——肥料群对肥料颗粒的支持力,N

f_{yk}、f_{zk}——分肥罩壳对肥料颗粒在 y、z 方向的摩擦力,N

f_{xe}、f_{ye}、f_{ze}——肥料群对肥料颗粒在 x、y、z 方向的摩擦力,N

v_e——肥料颗粒绕轴旋转速度,m/s

α——肥料群在运动中形成的堆积角,(°)

当肥料颗粒运动到分肥外壳落肥口处时,分肥外壳对颗粒的支持力和摩擦力消失,此时肥料群仅在离心力作用下克服肥料群的摩擦力便可排出,为简化计算仅考虑肥料颗粒在 xoz 平面上的受力[13],则在 x 方向受力可简化为

$$F_1 - f_{xe} - F_{ne}\sin\alpha > 0 \tag{9}$$

即

$$\omega > \sqrt{\frac{g}{R_1}\tan(\alpha+\beta)}$$

式中 β——肥料颗粒休止角,(°)

肥料颗粒沿导流头落于离心圆盘底端,而后在离心力作用下沿末端曲线逐渐运动到离心圆盘边缘,在此过程中凹面圆盘末端曲线结构对肥料颗粒运动过程影响较大,为简化计算将肥料群在运动过程中形成的倾角 α 近似等于休止角 β,则 $\omega > 13.03$ rad/s,即离心圆盘工作转速应大于 124.48 r/min。为探究不同末端曲线结构对排肥性能的影响,以得到最优曲线结构,选取直线、二次多项式曲线和三次多项式曲线 y_4、y_5、y_6 进行对比,3 种末端曲线表达式为

$$\begin{cases} y_4 = \tan(k_1(x-75)) \\ y_5 = k_2(x-75)^2 \\ y_6 = k_3(x-75)^3 \end{cases} \tag{10}$$

式中 k_1——直线倾斜角度,(°)

k_2——二次多项式调整系数

k_3——三次多项式调整系数

所对应离心圆盘结构如图 7 所示。

由于肥料颗粒在离心圆盘上运动过程较为复杂,难以精确得到最优圆盘结构,故通过仿真试验和台架试验方法进行确定。采用仿真试验得到各类曲线结构圆盘中较优的 k_1、k_2、k_3 值,而后将较优的各类圆盘进行台架试验,通过试验分析以确定最优圆

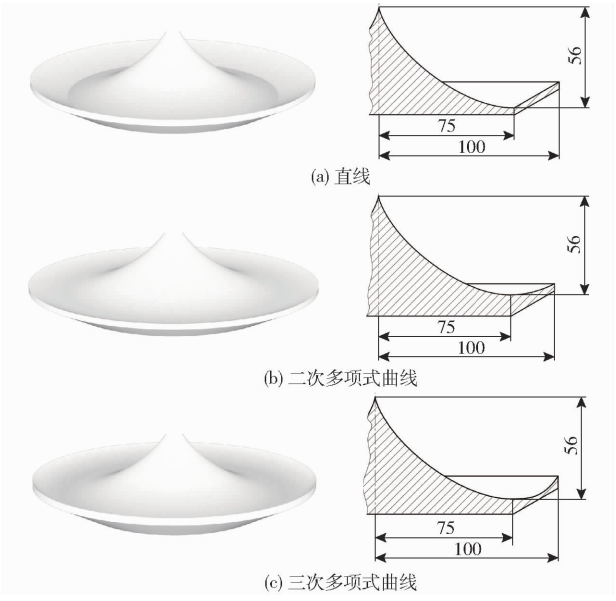


图 7　不同末端曲线圆盘

Fig. 7　Centrifugal discs with different end curves

盘结构及其对应的工作参数[25-27]。

2.3　仿真试验

2.3.1　仿真模型

为验证排肥系统各部件的工作性能，选取较优的离心圆盘导流头和凹面圆盘曲线结构，采用 EDEM 进行离散元仿真模型分析，在模型构建过程中，为降低运算量，未在模型中增设气流作用，肥料颗粒仅在重力作用下落入离心圆盘；在进行导流头仿真时为避免多余因素干扰，仅保留导流头，并于其上设置圆锥状颗粒工厂，仿真模型如图 8 所示，仿真时间步长设为 0.01 s。由于肥料颗粒为类球形散粒体，根据肥料颗粒几何特性将其简化为直径 3.56 mm 的球形模型，肥料颗粒与排肥装置之间接触模型为 Hertz Mindlin 无滑动接触模型，肥料颗粒和排肥装置材料特性如表 1 所示[14,28-29]。

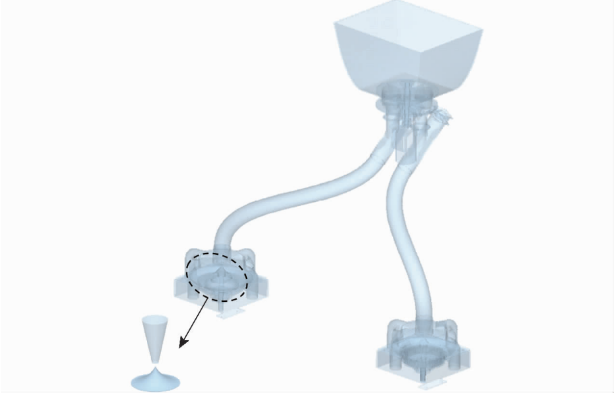


图 8　仿真模型

Fig. 8　Simulation model

2.3.2　供肥装置仿真试验

在进行叶轮供肥装置性能验证时，于叶轮供肥装置 2 个落肥管处设置 Grid Bin Group 网格箱，叶轮

表 1　仿真参数设置

Tab. 1　Parameters of simulation model

类型	参数	数值
肥料	密度/(kg·m^{-3})	932
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	8.86×10^{7}
肥料-肥料	恢复系数	0.28
	静摩擦因数	0.34
	动摩擦因数	0.21
ABS	密度/(kg·m^{-3})	1 060
	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.9×10^{8}
肥料- ABS	恢复系数	0.39
	静摩擦因数	0.37
	动摩擦因数	0.20

转速参照设计要求，结合实际作业时存在的中低速作业情景取 5、10、15、20、25 r/min，分别测定各时间步长内流经肥料质量，计算总排肥量稳定性变异系数和两侧排肥量一致性变异系数[13]，每组试验重复 3 次，叶轮供肥装置供肥性能如图 9 所示。随着叶轮转速增大，总排肥量稳定性变异系数逐渐降低而后趋于平稳，均小于 3.2%。主要原因是叶轮为多叶片结构且叶片为导叶形式，在转速较低、时间较短条件下存在叶片位置不同导致落肥量出现较大差异；随着转速增大，叶轮单位时间内供肥差异逐渐减小，总排肥量稳定性变异系数稳定于较低水平，在使用过程中应在实际前进速度和所需施肥量对应的叶轮转速范围内采取相对较高的叶轮转速。叶轮供肥装置两侧排肥量一致性变异系数总体处于较低水平，均小于 0.5%，叶轮转速对其影响较小。在高速作业条件下即叶轮转速大于等于 15 r/min 时，叶轮供肥装置供肥性能较优，可以稳定均匀地为离心式分肥装置提供肥料流。

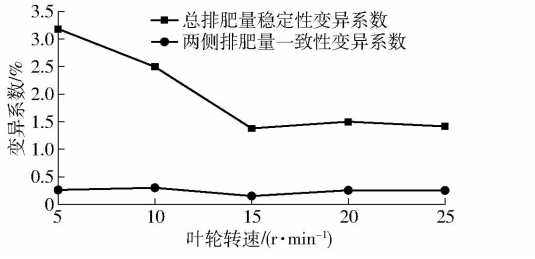


图 9　叶轮供肥装置工作性能变化曲线

Fig. 9　Performance of impeller fertilizer supply device

2.3.3　导流头仿真试验

为明确带摩擦最速降线导流头作业效果，对比各类型导流头作业性能，于导流头边缘设置 Geometry Bin Group 网格区，选取 50 粒肥料颗粒，读取肥料颗粒在不同结构导流头上的运动时间，肥料颗粒在导流头上停留时间越短，表明肥料流动效果

越好,导流头结构更为合理。肥料颗粒在带摩擦最速降线型、无摩擦最速降线型与直线型导流头上停留时间如图 10 所示。颗粒在直线型导流头上运动时间最长,平均时间为 0.216 s;在无摩擦最速降线型导流头上运动时间次之,平均时间为 0.154 s;在带摩擦最速降线型导流头上运动时间最短,平均时间为 0.145 s。根据最速降线理论设计的导流头性能显著优于直线型导流头,由于肥料易吸水粘连的物理特性,带摩擦最速降线型导流头效果优于无摩擦最速降型线导流头。在进行后续仿真分析及台架试验时,导流头应选为带摩擦最速降线型。

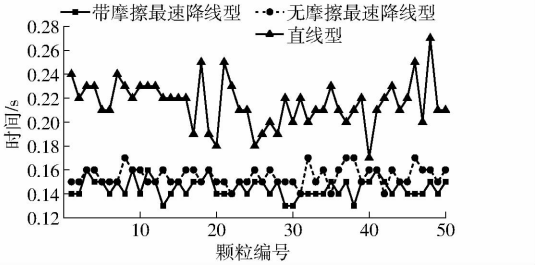


图 10 肥料颗粒在导流头中停留时间变化曲线

Fig. 10 Residence time of fertilizer particles in guide head

2.3.4 凹面圆盘曲线仿真试验

为选取较优的离心圆盘结构,于离心式分肥装置出肥口处构建实体 Box 来收集排出的肥料颗粒,采用 Grid Bin Group 网格箱统计各 Box 承接的肥料质量,统计排肥系统的各行排肥量一致性变异系数和各时间肥料波动变异系数,每组仿真试验重复 3 次,而后将试验结果进行曲线拟合以选取最优结构参数。其中各时间肥料波动变异系数 C_i 计算公式为

$$C_i = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P}_i)^2}{n-1}}}{\overline{P}_i} \tag{11}$$

式中 P_i——各时间步长排肥质量,g

$\overline{P}_i$——各时间步长平均排肥质量,g

n——时间步数量

叶轮转速和离心圆盘转速与排肥系统工作效果密切相关,为保证排肥系统极限条件下的工作性能,在进行仿真试验时将叶轮转速设为 25 r/min,离心圆盘结构设为常用的直线型圆盘[7],离心圆盘转速通过单因素试验选定,试验结果如图 11 所示。由图 11 可知,当叶轮转速一定时,排肥系统的各时间肥料波动变异系数随着离心圆盘转速增加而逐渐增大,在小于 130 r/min 和 150 ~ 160 r/min 之间增加较快;各行排肥量一致性变异系数随着离心圆盘转速增加先急剧下降,而后趋于平稳,在大于 150 r/min 后逐渐上升;为取得较优试验效果,在排肥系统稳定工作范围内选取工作参数,综合选取离心圆盘工作转速为 150 r/min。

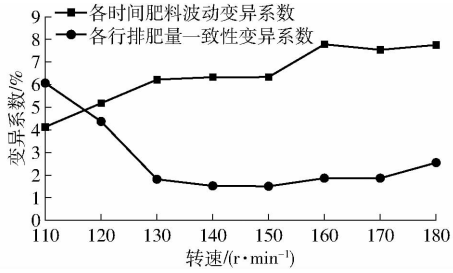


图 11 离心圆盘转速对排肥系统工作性能的影响

Fig. 11 Influence of centrifugal disc speed on working performance of fertilizer discharging system

在进行凹面圆盘曲线选型时,设定叶轮转速为 25 r/min、离心圆盘转速为 150 r/min,通过调整 3 类凹面圆盘末端曲线的 k_1、k_2、k_3 值,统计各类圆盘工作性能,以此选取最优结构,3 种末端曲线试验结果如图 12 所示。其中拟合曲线均为二次多项式且 R^2 均大于 0.92,拟合程度较优,可用于选择离心圆盘结构。3 种末端曲线变化趋势相近,随着调整系数 k_1、k_2、k_3 增大,末端曲线高度逐渐升高,各行排肥量一致性变异系数先减小再增大,各时间肥料波动变异系数逐渐增大。其主要原因是当 k_1、k_2、k_3 较小时,凹面圆盘边缘高度较低,对肥料颗粒的存储携带作用较小,肥料在离心圆盘停留时间较短,难以及时混匀,造成各行排肥量一致性变异系数偏高,但仍有效缓解了肥料波动情况;随着 k_1、k_2、k_3 增大,肥料在离心圆盘停留时间渐渐升高,肥料混匀效果逐渐变优;但当 k_1、k_2、k_3 较高时,凹面圆盘边缘高度较高,肥料在离心圆盘停留时间较长,肥料颗粒在盘中出现堆积情况,造成各行排肥量一致性变异系数和各时间肥料波动变异系数升高。

直线型末端曲线关于倾斜角度 k_1 的试验结果如图 12a 所示,各行排肥量一致性变异系数随 k_1 增大先减小再增大,于 30°左右达到最小值;各时间肥料波动变异系数随 k_1 增大逐渐增大,在 30°之前增加较为平缓,而后急剧增大;由仿真数据与拟合曲线可知,在 20° ~ 30°区间内波动较为平稳,为取得较优综合性能,k_1 取 25°。二次多项式型末端曲线关于调整系数 k_2 的试验结果如图 12b 所示,各行排肥量一致性变异系数随 k_2 增大先减小再增大,k_2 为 0.01 左右达到最小值;各时间肥料波动变异系数随 k_2 增大逐渐增大,且增加趋势也逐渐变快,肥料波动现象也愈发剧烈,在进行调整系数选择时应选取相对较低值;由仿真数据与拟合曲线可知,k_2 为 0.01 时,各行排肥量一致性变异系数和各时间肥料波动变异系数均处于较低水平,可作为该种曲线的较优结构。

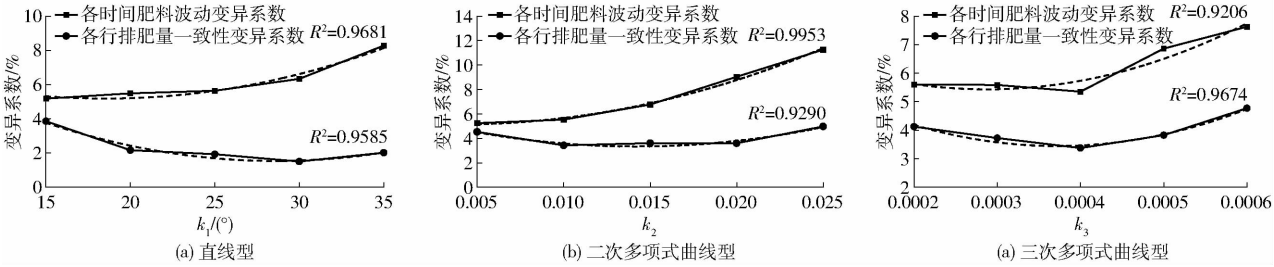


图 12　3 种凹面圆盘末端曲线仿真试验结果

Fig. 12　Simulation test results of three kinds of concave disc end curves

三次多项式型末端曲线关于调整系数 k_3 的试验结果如图 12c 所示，各行排肥量一致性变异系数和各时间肥料波动变异系数均随 k_3 增大先减小再增大，且在 k_3 为 0.000 4 左右均处于相对低值，选取该系数作为三次多项式曲线的相对最优参数。

3　排肥性能台架试验

3.1　试验材料

按照仿真试验结果加工试制了直线型圆盘、二次多项式曲线型圆盘、三次多项式曲线型圆盘共 3 种凹面圆盘，将其分别安装于台架上，试验台架如图 13 所示，由肥箱、台架、叶轮供肥装置、导肥管、离心式分肥装置、输肥管和集肥盒等部分组成。



图 13　试验台架

Fig. 13　Test stand

1. 肥箱　2. 台架　3. 叶轮供肥装置　4. 导肥管　5. 离心式分肥装置　6. 输肥管　7. 集肥盒

3.2　试验方法

试验选取与仿真分析相同的 3 类较优凹面圆盘结构，以叶轮转速、离心圆盘转速、凹面圆盘结构为试验因素，进行三因素三水平正交试验。结合预试验结果，为满足前进速度 9 ~ 12 km/h 及施肥量 600 ~ 750 kg/hm^2 的高速作业条件，叶轮转速选为 14 ~ 25 r/min；随着离心圆盘转速逐渐提高，肥料颗粒在离心圆盘中停留时间逐渐减小，当转速超过 180 r/min 后，肥料颗粒停留时间趋于平稳，结合设计条件，离心圆盘转速选为 120 ~ 180 r/min。正交试验因素水平如表 2 所示。

表 2　试验因素水平

Tab. 2　Factors and levels

水平	因素		
	叶轮转速/(r·min^{-1})	离心圆盘转速/(r·min^{-1})	凹面圆盘结构
1	14.0	120	直线型圆盘
2	19.5	150	二次多项式曲线型圆盘
3	25.0	180	三次多项式曲线型圆盘

根据 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》，以总排肥量稳定性变异系数和各行排肥量一致性变异系数为评价指标[13]，分别接取各排肥管肥料并进行称量，每组重复 3 次。利用 Design-Expert 软件对试验效果较好的圆盘结构进行回归分析，得出回归方程，寻求叶轮转速与离心圆盘转速较优工作区间，并进行试验验证。

3.3　试验结果分析

正交试验结果与极差分析如表 3 所示，表中 X、

表 3　正交试验结果与极差分析

Tab. 3　Orthogonal test results and range analysis

试验序号		因素			总排肥量稳定性变异系数 C_1/%	各行排肥量一致性变异系数 C_2/%
		X	Y	Z		
1		1	1	1	5.23	6.82
2		1	2	2	2.52	8.30
3		1	3	3	4.39	9.29
4		2	1	2	2.08	5.39
5		2	2	3	1.16	5.87
6		2	3	1	2.23	5.64
7		3	1	3	4.35	4.82
8		3	2	1	3.57	4.02
9		3	3	2	2.21	5.88
总排肥量稳定性变异系数	K_1	12.14	11.66	11.03		
	K_2	5.47	7.25	6.81		
	K_3	10.13	8.83	9.90		
	R_1	6.67	4.41	4.22		
各行排肥量一致性变异系数	K_1	24.41	17.03	16.48		
	K_2	16.90	18.19	19.57		
	K_3	14.72	20.81	19.98		
	R_2	9.69	3.78	3.50		

Y、Z 为因素水平值,其中总排肥量稳定性变异系数和各行排肥量一致性变异系数越小,排肥效果越好。极差分析结果表明:影响总排肥量稳定性变异系数的主次顺序为 X、Y、Z,其较优参数组合为 $X_2Y_2Z_2$;影响各行排肥量一致性变异系数的主次顺序为 X、Y、Z,其较优参数组合为 $X_3Y_1Z_1$。

通过极差分析得到 3 个因素对总排肥量稳定性变异系数和各行排肥量一致性变异系数的主次关系,选取了较优参数组合,为进一步分析 3 个因素的显著性,进行了方差分析,如表 4 所示。叶轮转速对总排肥量稳定性变异系数影响显著,对各行排肥量一致性变异系数影响极显著;离心圆盘转速和凹面圆盘结构均对总排肥量稳定性变异系数影响不显著,对各行排肥量一致性变异系数影响极显著。为提高排肥性能,从因素显著性角度,应选取直线型圆盘,并需通过调整叶轮转速和离心圆盘转速来确定最优工作参数范围。

表 4 方差分析

Tab. 4 Variance analysis

方差来源	总排肥量稳定性变异系数					各行排肥量一致性变异系数				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
X	7.80	2	3.90	21.90	0.043 7 *	17.23	2	8.61	2 739.37	0.000 4 **
Y	3.33	2	1.66	9.34	0.096 7	2.50	2	1.25	397.50	0.002 5 **
Z	3.18	2	1.59	8.93	0.100 7	2.44	2	1.22	388.10	0.002 6 **
残差	0.36	2	0.18			0.006	2	0.003		
总和	14.67	8				22.176	8			

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

3.4 最优工作参数分析

为寻求最优工作范围,结合方差分析结果,离心圆盘结构选择直线型凹面圆盘,以叶轮转速与离心圆盘转速为影响因子,因离心圆盘转速对总排肥量稳定性变异系数影响不显著,故仅以各行排肥量一致性变异系数为评价指标开展 CCD 正交组合试验[30-32],因素编码如表 5 所示。

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Experimental factors codes

编码	因素	
	叶轮转速/(r·min^{-1})	离心圆盘转速/(r·min^{-1})
-1.414	14.00	120.00
-1	15.61	128.79
0	19.50	150.00
1	23.39	171.21
1.414	25.00	180.00

每组试验重复 3 次,试验结果如表 6 所示,A、B 为因素编码值。

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析,结果如表 7 所示。由表 7 可知,回归模型 $P < 0.01$,失拟项 P 值大于 0.05,表明回归模型准确,拟合度较好。其中叶轮转速 A 对各行排肥量一致性变异系数影响极显著,叶轮转速平方项 A^2、离心圆盘转速平方项 B^2、交互项 AB 影响显著,构建回归方程模型为

$$C = 7.49 - 0.971\,1A + 0.141\,5B + 0.822\,5AB - 0.626\,5A^2 - 0.864B^2 \quad (12)$$

表 6 台架试验结果

Tab. 6 Bench test results

试验序号	因素		各行排肥量一致性变异系数 C/%
	A	B	
1	-1	-1	7.97
2	1	-1	4.88
3	-1	1	6.41
4	1	1	6.61
5	-1.414	0	7.49
6	1.414	0	4.04
7	0	-1.414	4.95
8	0	1.414	5.63
9	0	0	6.87
10	0	0	7.82
11	0	0	8.02
12	0	0	7.23
13	0	0	7.50

表 7 回归模型方差分析

Tab. 7 Analysis of variance of regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	17.47	5	3.49	7.69	0.009 2 **
A	7.54	1	7.54	16.60	0.004 7 **
B	0.160 1	1	0.160 1	0.352 2	0.571 6
AB	2.71	1	2.71	5.95	0.044 8 *
A^2	2.73	1	2.73	6.01	0.044 1 *
B^2	5.19	1	5.19	11.42	0.011 8 *
残余项	3.18	7	0.454 6		
失拟项	2.34	3	0.78	3.71	0.119 0
误差	0.841 9	4	0.210 5		
总和	20.65	12			

通过回归方程，绘制响应曲面等高线图，如图 14 所示，在叶轮与离心圆盘转速较低的工作条件下，各行排肥量一致性变异系数相对较高，在进行田间作业时应避免该工作条件；各行排肥量一致性变异系数沿高叶轮转速、低离心圆盘转速方向下降最快，在进行较高速度施肥作业时，应选取较低离心圆盘转速。以各行排肥量一致性变异系数低于 7% 为例，为取得较优作业效果，在叶轮转速为 14.00 ~ 21.23 r/min 即前进速度为 9.00 ~ 10.24 km/h 时，离心圆盘转速应大于 168.2 r/min；在叶轮转速为 21.23 ~ 25.00 r/min 即前进速度为 10.24 ~ 12.00 km/h 时，离心圆盘转速应控制在 150 r/min 以下；随着供肥量的提高，为避免肥料颗粒在离心圆盘中产生堆积，离心圆盘转速可适当提高。

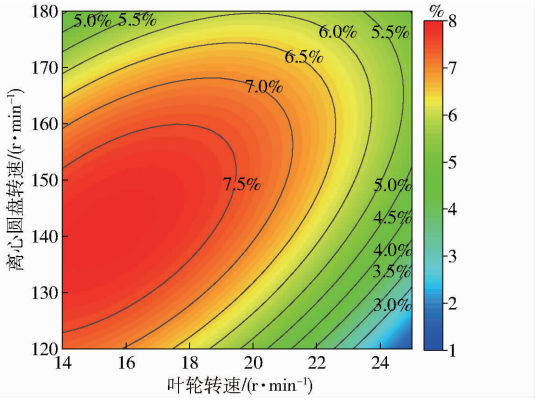
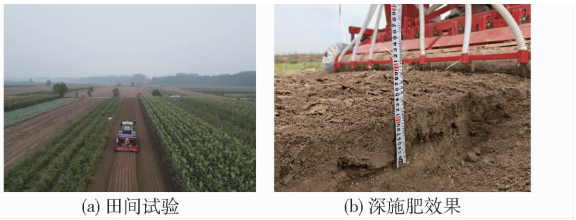


图 14　响应曲面等高线图

Fig. 14　Response surface contour map

4　田间试验

为进一步验证高速排肥系统在田间复杂工况下的适应性，于 2024 年 10 月 21 日在湖北省天门市开展高速施肥作业田间试验。排肥系统安装于高速播种平台上，配套动力为沃得奥龙 WD1304 型拖拉机，采用拖拉机蓄电池为排肥电机和风机供电，在高 1 挡和高 2 挡下进行田间试验，如图 15 所示。拖拉机高 1 和高 2 挡前进速度分别为 9.2、11.7 km/h，选择叶轮转速为 16、23 r/min，离心圆盘转速根据台架试验结果进行选取，拖拉机每次行驶 30 m，在肥管末端安装接肥袋，每组试验重复 3 次，试验结果如表 8 所示。



(a) 田间试验　　(b) 深施肥效果

图 15　田间作业效果

Fig. 15　Field trial effect

表 8　田间排肥效果

Tab. 8　Effect of fertilizer discharge in field

拖拉机挡位	叶轮转速/(r·min⁻¹)	离心圆盘转速/(r·min⁻¹)	总排肥量稳定性变异系数/%	各行排肥量一致性变异系数/%
高 1 挡	16	170	1.07	6.94
		180	1.75	6.40
高 2 挡	23	120	4.01	4.53
		130	4.11	4.75
		140	3.88	5.59

由表 8 可知，排肥系统总排肥量稳定性变异系数均不大于 4.11%，各行排肥量稳定性变异系数均不大于 6.94%，满足国家标准要求。在较低叶轮转速条件下总排肥量稳定性变异系数相对较低，各行排肥量一致性变异系数处于较高水平，在相同挡位条件下，各行排肥量一致性变异系数随离心圆盘转速增加而逐渐减小；在较高叶轮转速条件下总排肥量稳定性变异系数相对较高，各行排肥量一致性变异系数处于较低水平，在相同挡位条件下，各行排肥量一致性变异系数随离心圆盘转速增大而逐渐增大。由于拖拉机在前进过程中，存在机具倾斜、震动等问题，排肥系统各行排肥量稳定性变异系数相对台架试验有所差异，但仍符合台架试验所得规律，表明排肥系统可较好适应田间复杂作业工况。

5　结论

(1)针对外槽轮排肥器在高速作业过程中存在肥料供应不足和脉动断条等现象，造成肥料连续性、均匀性不足等问题，采用供分分离的排肥形式，设计了一种叶轮供肥、离心分肥、辅以气流输送的气送式高速排肥系统。

(2)根据作业要求，对叶轮供肥装置结构、离心分肥装置导流头和凹面圆盘进行了设计；应用 EDEM 开展了结构设计仿真试验，验证了叶轮供肥装置供肥效果，其变异系数均小于 3.2%；明确了导流头曲线为带摩擦最速降线时肥料颗粒流速最快；确定了直线型、二次多项式曲线型、三次多项式曲线型 3 种设计的凹面圆盘曲线最优结构参数，3 种圆盘的调整系数 k_1、k_2、k_3 分别为 25°、0.01、0.000 4。

(3)为确定较优离心圆盘结构，以叶轮转速、离心圆盘转速、凹面圆盘结构为试验因素，进行正交试验，对试验结果进行极差分析和方差分析，选取直线型凹面圆盘为较优离心圆盘结构。为获得最优工作参数范围，以叶轮转速与离心圆盘转速为影响因子，以各行排肥量一致性变异系数为评价指标开展 CCD 正交组合试验，绘制了响应曲面等高线图，确

定了较优工作参数范围:在各行排肥量一致性变异系数低于 7% 条件下,当叶轮转速为 14.00 ~ 21.23 r/min 时,离心圆盘转速应大于 168.2 r/min;当叶轮转速为 21.23 ~ 25.00 r/min 时,离心圆盘转速应小于 150 r/min。

(4)田间试验结果表明,排肥系统总排肥量稳定性变异系数均不大于 4.11%,各行排肥量稳定性变异系数均不大于 6.94%,满足国家标准要求,试验结果符合台架试验所得规律,表明排肥系统可较好适应田间复杂作业工况。

参 考 文 献

[1] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):24 - 44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24 - 44. (in Chinese)

[2] 郑娟,黄凰,廖宜涛,等. 长江中游地区油菜生产全程机械化技术进展与建议[J]. 中国油料作物学报,2024,46(2):245 - 259.
ZHENG Juan, HUANG Huang, LIAO Yitao, et al. Progress and suggestions on full mechanization of rapeseed production in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(2): 245 - 259. (in Chinese)

[3] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报,2016,32(1):1 - 11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1 - 11. (in Chinese)

[4] 张兆同,陈瑶,魏瑜,等. 区域农机化高质量发展评价指标体系构建与应用[J]. 农业工程学报,2021,37(3):64 - 72.
ZHANG Zhaotong, CHEN Yao, WEI Yu, et al. Construction and application of the evaluation index system for high quality development of regional agricultural mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 64 - 72. (in Chinese)

[5] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等. 播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报,2022,38(24):1 - 13.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1 - 13. (in Chinese)

[6] 高丽萍,陈慧,刘嘉诚,等. 油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响[J]. 农业工程学报,2023,39(11):87 - 97.
GAO Liping, CHEN Hui, LIU Jiacheng, et al. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(11): 87 - 97. (in Chinese)

[7] 廖庆喜,沈文惠,王磊,等. 油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):154 - 167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 154 - 167. (in Chinese)

[8] 李晓冉,廖庆喜,廖宜涛,等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. 农业工程学报,2024,40(4):51 - 61.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 51 - 61. (in Chinese)

[9] 施彬彬,王传奇,陈雪儿,等. 油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):102 - 115.
SHI Binbin, WANG Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 102 - 115. (in Chinese)

[10] 廖宜涛,王传奇,施彬彬,等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):134 - 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and text of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 134 - 146. (in Chinese)

[11] 王金峰,高观保,翁武雄,等. 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):92 - 104.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 92 - 104. (in Chinese)

[12] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):68 - 77.
XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68 - 77. (in Chinese)

[13] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等. 螺旋扰动锥体离心式排肥器设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(2):40 - 49.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Design and experiment of spiral disturbance cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 40 - 49. (in Chinese)

[14] 刘晓东,胡瑞,王登辉,等. 基于颗粒肥料运动模型的排肥器优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):85 - 95.

LIU Xiaodong, HU Rui, WANG Denghui, et al. Optimization and test of fertilizer apparatus based on granular fertilizer movement model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 85 - 95. (in Chinese)
[15] LIU Xiaodong, LÜ Qingqing, LI Guangxi, et al. Design optimization and experimental verification of spiral cone centrifugal fertilizer apparatus based on the discrete element method[J]. Processes, 2023, 11(1): 199.
[16] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1 - 14. (in Chinese)
[17] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD - DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J]. 农业机械学报,2019,50(8):81 - 89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 - 89. (in Chinese)
[18] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. 农业工程学报,2020,36(1):1 - 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 1 - 10. (in Chinese)
[19] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(13):1 - 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and experiment of pneumatic centralized fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 1 - 10. (in Chinese)
[20] 何亚凯,杨学军,翟长远,等. 集排风送式玉米分层追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):54 - 63.
HE Yakai, YANG Xuejun, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of air-assisted layered fertilization machine of centralized distributing for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 54 - 63. (in Chinese)
[21] 王金峰,付佐栋,翁武雄,等. 圆锥盘推板式水田侧深施肥双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):53 - 62.
WANG Jinfeng, FU Zuodong, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of conical-disc push plate double-row fertilizer apparatus for side-deep fertilization in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 53 - 62. (in Chinese)
[22] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
[23] LIPP S C. Brachistochrone with Coulomb friction[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 1997, 35(2): 562 - 584.
[24] HAYEN J C. Brachistochrone with Coulomb friction[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2005, 40(8): 1057 - 1075.
[25] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(22):1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)
[26] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)
[27] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报,2019,35(1):12 - 22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12 - 22. (in Chinese)
[28] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):65 - 75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65 - 75. (in Chinese)
[29] 廖庆喜,陈勇,张青松,等. 油菜侧深穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):41 - 52.
LIAO Qingxi, CHEN Yong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of side deep hole fertilization device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 41 - 52. (in Chinese)
[30] 姚露,廖庆喜,王磊,等. 油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(6): 78 - 88.
YAO Lu, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiment of spiral seed feeding device in spinning disc high-speed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 78 - 88. (in Chinese)
[31] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):87 - 96.
DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 87 - 96. (in Chinese)
[32] 廖宜涛,刘嘉诚,廖庆喜,等. 正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):63 - 76.
LIAO Yitao, LIU Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and test of positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 63 - 76. (in Chinese)