

基于鲫鱼流线的气送式排种系统分配器仿生设计与试验

李衍军¹ 赵金辉^{1,2} 赵佳乐³ 刘立晶^{1,2} 刘瑞⁴

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;
3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 4. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对气流输送式排种系统分配器工作过程中存在紊流等现象破坏种子流分配均匀性的问题,以鲫鱼流线型曲线为仿生原型,提出了一种分配器仿生设计方法。对鲫鱼进行三维扫描,获取点云数据,利用 Matlab 软件拟合得到 4 条鲫鱼流线型曲线,设计 4 种不同结构分配器,同时采用标准 $k-\varepsilon$ 模型非稳态的 Lagrangian 耦合算法对 4 种仿生结构分配器与原结构分配器进行气固两相流耦合仿真对比,得到最优结构。采用二次回归通用旋转组合设计试验,以播种量和风机频率作为影响因素,以各行排量一致性变异系数作为试验指标,对最优结构分配器开展验证试验。仿真分析结果表明:根据前上部曲线设计的分配器基本消除紊流现象且压力损失与各行排量一致性变异系数最小,确定其为最优结构。验证试验结果表明:优化后的分配器各行排量一致性变异系数不大于 3.72%,满足实际生产需求,说明流线型分配器能够有效提高排种系统种子分配均匀性。

关键词: 气流输送式排种系统; 分配器; 鲫鱼流线; 仿生设计

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0080-08 OSID: 

Biomimetic Design and Experiment of Distributor of Pneumatic Seeding System Based on Crucian Curve

LI Yanjun¹ ZHAO Jinhui^{1,2} ZHAO Jiale³ LIU Lijing^{1,2} LIU Rui⁴

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China
4. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: For solving the problem of turbulence and other phenomena destroying the uniformity of seed flow distribution during the working process of the pneumatic seeding system distributor, a bionic design method of the distributor based on the streamlined curve of crucian as a bionic prototype was proposed. The crucian was three-dimensionally scanned to obtain point cloud data, and four crucian streamline curves were fitted by Matlab, and four different structural distributors were designed by the curves. At the same time, the standard $k-\varepsilon$ model unsteady Lagrangian coupling algorithm was used to simulate the four types of bionics. The gas-solid coupling simulation comparison between the structure distributor and the original structure distributor was carried out to obtain the optimal structure. The quadratic regression universal rotating combination design test was adopted, the seeding rate and the fan frequency were used as influencing factors, and the coefficient of variation of the discharge consistency of each row was used as the test index to carry out the verification test for the optimal structure distributor. The simulation analysis results showed that the distributor designed by the upper curve of the front basically eliminated turbulence and had the smallest coefficient of variation between the pressure loss and the displacement of each row. It was determined that it was the optimal structure. The verification test results showed that the maximum value of the coefficient of variation of the consistency of each row of the optimized distributor was 3.72%,

收稿日期: 2021-03-09 修回日期: 2021-04-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700702)
作者简介: 李衍军(1989—),男,博士生,主要从事农业机械装备及关键技术研究,E-mail: 1047996083@qq.com
通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事种植机械装备研究,E-mail: xylilj@sina.com

which was less than the standard requirement and met the actual production demand, indicating that the streamlined distributor can effectively improve the uniformity of seed distribution in the seeding system. It can provide reference for the design and optimization of the distributor for the air conveying type metering system.

Key words: pneumatic seeding system; distributor; crucian curve; bionic design

0 引言

气流分配式排种方式具有工作效率高、节约成本、伤种率低、通用性强等特点,符合目前小麦播种机高速、精量、宽幅作业的发展趋势^[1-4]。随着现代农业的发展,播种机的作业效率、播种速度不断提高,对排种系统的设计制造提出更高要求^[5-7]。分配器是气流输送式排种系统中实现种子均匀分配的核心部件,其结构形式与参数对各行排量一致性有重要影响^[8]。

国内外对分配器的研究主要以提高物料分配均匀性为目标。KUMAR 等^[9]对气流分配器进行了结构分析,研究了分配器几何形状对气流式播种机播种性能的影响,提出了分配器要设计成流线型才会使气流场分布达到最优,但并没有涉及播量因素的影响。德国的 Accord 气流集排条播机气流分配器虽然消除了涡流,但仍有滞留区和气流收缩现象^[10]。李中华等^[11]对气流分配式排种器进行了优化设计,并结合 CFD 模拟的方式对苜蓿种子进行仿真,研制了 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统,从节约能量的角度出发通过对比试验确定分配器优化结构,并研究排种定量器转速、播量和褶皱型增压管长度对各行排量一致性变异系数的影响规律。目前,对分配器的设计没有相应成熟经验公式可以参考,主要凭借经验,保证分配器能够使物料顺利排出,应该尽量减少紊流、滞流和气流急剧收缩现象,以免破坏种子在气相中的分布均匀度以及造成堵塞^[12-13]。因此设计一种能够有效减少紊流并提高种子分布均匀性的分配器,对提高气流输送式播种机作业效率与质量具有重要现实意义。

在农机部件的设计过程中仿生学为解决工作阻力问题提供了新思路^[14-15],赵淑红等^[16]根据旗鱼头部的流线型曲线,设计了仿旗鱼头部流线型开沟器,并进行了离散元仿真和土槽试验,验证仿旗鱼头部流线型开沟器能有效降低工作阻力,减小土壤扰动。孙文峰等^[17]根据鲟鱼头部的流线型曲线设计了植保分禾吊杆组合装置,并进行了 ADAMS 仿真和田间试验,验证了仿鲟鱼头部的植保分禾吊杆组合装置能够改善雾滴分布情况,降低工作阻力。本文依据鲫鱼的流线型曲线,建立拟合曲线的数学模型,设计仿鲫鱼曲线型分配器,确定分配器的结构参

数,运用离散元法与有限元法对分配器工作时压力损失、紊流情况及种子分布均匀性状况进行仿真分析,为气流输送式排种系统分配器的设计提供可行的研究方法,并进行台架对比试验,进一步确定分配器设计的合理性,为分配器的设计与优化提供参考。

1 鲫鱼功能曲线采集与分析

1.1 仿生原型分析

鲫鱼是一种常见的淡水鱼种,其体态丰腴且拥有符合流体动力学的曲线^[18],如图 1 所示,这使它在水中游动时能够获得较低的阻力。观察鲫鱼形态后,发现其身体头部与腹部的曲线形态更符合流线型曲线,而分配器在工作时其内部充满气流,流线形的分配器能够有效减少分配器内的紊流,提高种子分布均匀性。因此以鲫鱼身体前部和后部曲线为仿生原型,进行分配器的结构设计。

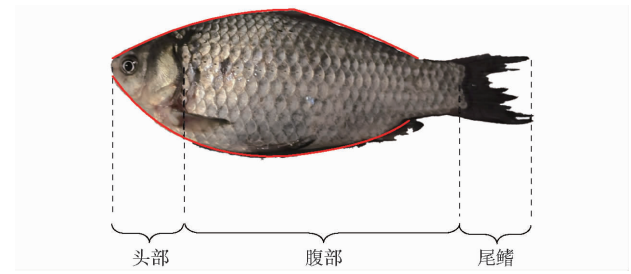


图 1 鲫鱼实物图

Fig. 1 Real picture of crucian

1.2 功能曲线提取及拟合方程建立

分配器内腔的曲线形状能够影响分配器内部气流状态,因此该部分应为本装置的核心,针对内腔曲线进行仿生优化设计。为确保仿生曲线建立的准确性,基于逆向工程原理,应保证鲫鱼物理特征不被破坏,所以将其正常麻醉后利用点云扫描仪进行信息提取,信息提取过程如图 2 所示。扫描创建模型网格后,得到鲫鱼的点云数据。将鲫鱼点云数据导入 Geomagic Studio 2016 对优化后的点云数据进行封装和填孔后得到鲫鱼模型^[19]。

为确定仿生结构参数,需要提取鲫鱼的轮廓曲线,并拟合曲线方程。由于需要的曲线可以在二维图像中表现,因此可使用 Matlab 软件对含有鲫鱼前部和后部曲线特征的图像进行图像处理,运用 Matlab 软件对该图像进行边缘检测、坐标获取、转换极坐标、转换笛卡尔坐标绘图等处理后,得到在笛卡

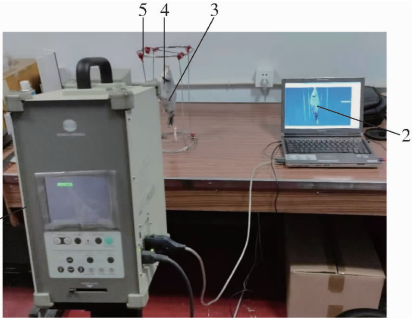


图 2 轮廓取样扫描

Fig. 2 Contour of sampling scan

1. 点云扫描仪 2. 扫描鲫鱼轮廓 3. 贴片 4. 鲫鱼实物 5. 支架

尔坐标系表现的鲫鱼轮廓曲线,如图 3 所示。

仿生装置腔体流线需与鲫鱼前部和后部的曲线相匹配,由于尾部曲线趋于水平压力损失较大,所以

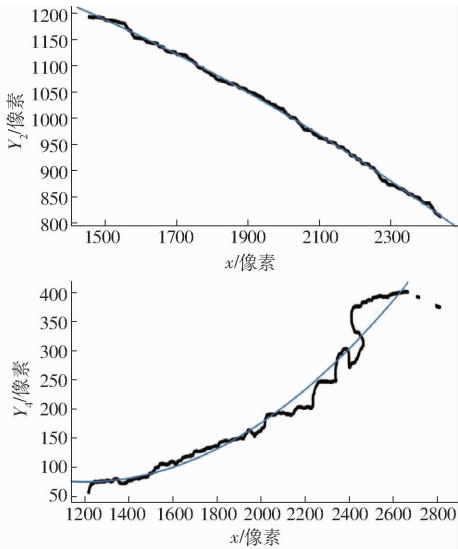
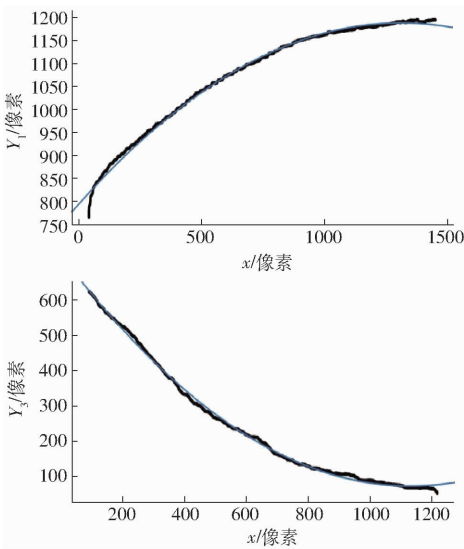


图 4 轮廓分段曲线

Fig. 4 Contour of segment curve

$$Y_1 = -2.293 \times 10^{-4} x^2 + 0.626x + 792.5$$
$$(R^2 = 0.9952)$$
$$Y_2 = -9.40 \times 10^{-5} x^2 - 0.028x + 1442$$
$$(R^2 = 0.9988)$$
$$Y_3 = 5.087 \times 10^{-4} x^2 - 1.15x + 726.4$$
$$(R^2 = 0.9982)$$
$$Y_4 = 1.602 \times 10^{-4} x^2 - 0.3862x + 306.7$$
$$(R^2 = 0.9532)$$

2 仿生结构设计

分配器安装在导流管上方,能够将导流管输送来的空气-种子两相流均匀分配到各个输种管中,保证排种效果。分配器的结构直接影响到各行排种量,是判断排种性能的关键,具体结构如图 5 所示。

2.1 分配器压力损失机理分析

种子经分配器腔体与排种管进入输种管运动过

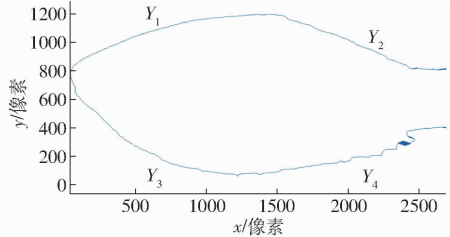


图 3 笛卡尔坐标系下鲫鱼轮廓曲线

Fig. 3 Crucian carp contour curve in Cartesian coordinate system

将尾部曲线去除,然后对得到的轮廓曲线分段提取。根据最小二乘法原则对得到的鲫鱼轮廓点云数据使用 cftool 工具箱进行曲线拟合和量化分析。分段提取曲线如图 4 所示,得到拟合后各段曲线方程分别为

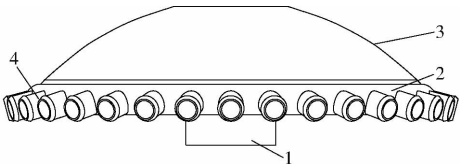


图 5 分配器结构图

Fig. 5 Structure of distributor

1. 与导流管连接部分 2. 分配器下端面 3. 分配器上端面 4. 分配器排种管

程中不可避免的要产生压力损失,如果压力损失太大容易造成气流速度发生突变,从而产生紊流等现象,因此在进行结构设计时需分析压力损失。由于分配器内部形状不规则(如图 6 所示),压力损失不能用公式直接进行理论计算,所以将分配器等效分为 32 根独立倾斜管道进行压力损失估算。

管内的压力损失主要包括加速压力损失 Δp_a 、纯空气压力损失 Δp_q 、重力压力损失 Δp_g 、种子之间碰撞摩擦引起的压力损失 Δp_z 、种子与管壁之间碰

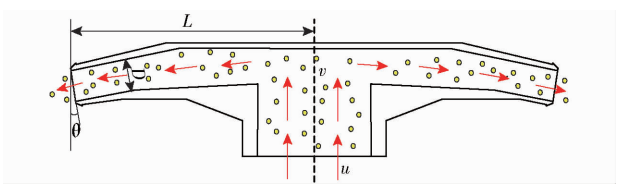


图 6 分配器内种子运动示意图

Fig. 6 Distribution principle diagram of distributor

撞摩擦引起的压力损失 Δp_f ，具体计算公式为

$$\Delta p_a = \frac{1}{2} \lambda_a \mu \rho v^2 \quad (1)$$

$$\Delta p_q = \frac{1}{2} \lambda \rho v^2 \frac{L}{D \cos \theta} \quad (2)$$

$$\Delta p_g = \frac{1}{2} \lambda_g \mu \rho v^2 \phi \frac{L}{D \cos \theta} \quad (3)$$

$$\Delta p_z = \frac{1}{2} \lambda_s \mu \rho v^2 \phi \frac{L}{D \cos \theta} \quad (4)$$

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} \lambda_f \mu \rho v^2 \phi \frac{L}{D \cos \theta} \quad (5)$$

其中 $\phi = \frac{u}{v} \quad (6)$

式中 u ——种子临界速度, m/s

v ——气流速度, m/s

μ ——料气输送比

ρ ——工作状态(20℃)空气密度, 1.205 kg/m³

λ ——壁面压损系数, 小麦取 0.003 2

λ_a ——加速压损系数, 取 0.2

L ——分配器等效长度, m

D ——排种管内径, m

θ ——分配器排种管与竖直方向夹角, (°)

λ_g ——重力压损系数

λ_s ——种子间碰撞摩擦压损系数

λ_f ——种子与管壁碰撞摩擦压损系数

ϕ ——理论速度系数

分配器总压损失为

$$\Delta p_A = 32 (\Delta p_a + \Delta p_q + \Delta p_g + \Delta p_z + \Delta p_f) \quad (7)$$

由上述公式分析得到, 种子在分配器内部运动过程中压力损失主要受气流速度、种子速度、料气比、排种管直径与长度的影响, 随着气流速度、种子速度、料气比、分配器等效长度的增加各压力损失逐渐增大, 成正比关系。随排种管直径的增加, 除加速压力损失无变化外, 其他压力损失均减小, 由于排种管与输种管连接, 所以排种管外径需同输种管内径一致。在保证排种顺畅的基础上, 减小分配器等效长度能有效减小压力损失。通过理论分析为分配器的结构设计提供基础, 对排种系统进口风速的选择提供参考。

2.2 仿生分配器结构设计

为了减小分配器内部压力损失, 本次分别提取

鲫鱼的前上部(Y_1)、后上部(Y_2)、前下部(Y_3)、后下部(Y_4) 4 条仿生流线型曲线, 在原有分配器基础上将 4 条曲线用于分配器腔体建模, 设计时尽量保证分配器 32 根排种管布局紧凑, 可以减小分配器腔体体积, 防止因气流速度突变产生压力损失。设计了不同结构的 4 种分配器, 如图 7 所示。

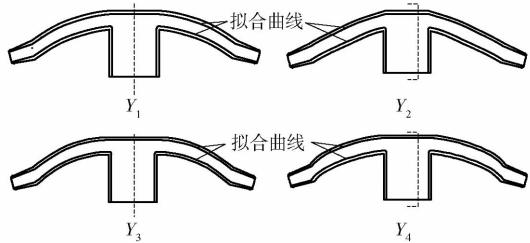


图 7 仿鲫鱼曲线分配器结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of distributor based on bionic crucian curve

3 仿生分配器装置仿真

为进一步探究仿生结构分配器对气流场改善情况, 以仿生结构分配器与原水平结构分配器(图 6)为例, 分别对 5 种分配器内物料进行运动学分析。为探明不同流线型曲线对种子分配均匀性的影响, 对不同结构的分配器进行了仿真模拟试验。由于分配器工作时难以测量其内部风速、压力分布, 因此可运用仿真模拟技术表现分配器工作时其内部气流场的分布情况。

传统的 CFD 模拟无法准确模拟排种系统中种子的运动情况, 从而不能准确模拟其工作过程。而 EDEM-Fluent 耦合仿真中, 基于离散元的数值模拟可以准确分析种子的力学行为, 提供种子的实际位置和运动情况, 从而得到更加丰富的模拟结果^[20-21]。

3.1 仿真参数选择

本研究基于 EDEM 2018 软件分析种子运动情况, 基于 Fluent 18.0 软件分析气流场分布。在 EDEM 软件中进行仿真设置, 由于小麦种子表面几乎没有粘附力, 所以种子与种子间、种子与壁面间均采用 Hert-Mindlin 无滑动接触模型, 并设置重力加速度方向为 X 轴正向。参考文献[21]中小麦种子的参数, 仿真中所有材料的参数如表 1 所示。由于小麦种子在分配器内所占体积分数不足 10%, 因此 Fluent 中仿真模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型非稳态的 Lagrangian 耦合算法。Lagrangian 耦合不仅能够实现气固两相流之间的动量、能量交换, 还能计算离散相颗粒对连续相的影响^[22-24]。查阅资料确定种子与所选材料的泊松比、弹性模量, 计算得到剪切模量, 测定小麦种子的密度、三轴尺寸等。材料基本参

数如表 1 所示。

表 1 仿真参数
Tab.1 Parameters used in simulation

材料	参数	数值
小麦	泊松比	0.42
	剪切模量/Pa	5.1×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 350
	等效直径/mm	3.83
树脂	泊松比	0.36 ~ 0.41
	剪切模量/Pa	1.0×10^9
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 117
种子-种子	碰撞恢复系数	0.42
	静摩擦因数	0.35
	动摩擦因数	0.05
种子-分配器	碰撞恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.40
	动摩擦因数	0.05

3.2 建模与边界条件设置

利用 SolidWorks 软件对气流输送式排种系统进行建模并对模型进行简化;然后利用 ICEM 18.0 进行混合网格的划分,即对分配器进行非结构化网格划分,其余部分采用结构网格进行划分。边界条件和工程目标是控制计算有解和收敛目标的前提。本研究中对于气流相,气流入口设置为气流速度入口,方向垂直于入口平面,速度为 35 m/s;壁面采用静止边界条件;种子入口和分配器排种管出口设置为气

流压强出口,且进种量设置为 160 g/s。种子入口为种子连续进入排种系统的通道,分配器排种管为种子与气流混合体经过分配器后进入排种管的出种口。

按 EDEM 软件与 Fluent 软件耦合计算的数据传递需要,Fluent 软件中的时间步长必须是 EDEM 软件中时间步长的整数倍。为保证计算的稳定,EDEM 的时间步长一般是瑞利时间步的 10% ~ 30%,因此 EDEM 软件中时间步长设置为 1.5×10^{-6} s,保存时间步长设置为 40 步,保存时间设置为 0.001 s;Fluent 的时间步长设置为 EDEM 时间步长的 100 倍,即 1.5×10^{-4} s,迭代计算 20 000 步,总仿真时间为 3 s。

3.3 仿真结果与分析

通过 CFD-Post 软件进行后处理,得到 4 种仿生结构分配器(图 8a ~ 8d)与原水平结构分配器(图 8e)的流线分布图及压力损失值。仿真过程中气固两相流经导流管进入分配器随后被分配到各输种管,由图 8 分析得到前上部、前下部结构中流线无紊流现象且流线均匀分布于分配器中,而后上部、后下部、原结构中紊流现象明显且后下部结构的紊流现象最严重,紊流现象的存在会导致种子在各行的分布均匀性变差,压力损失增大,由此可得前上部、前下部两种结构优于后上部、后下部及原结构。

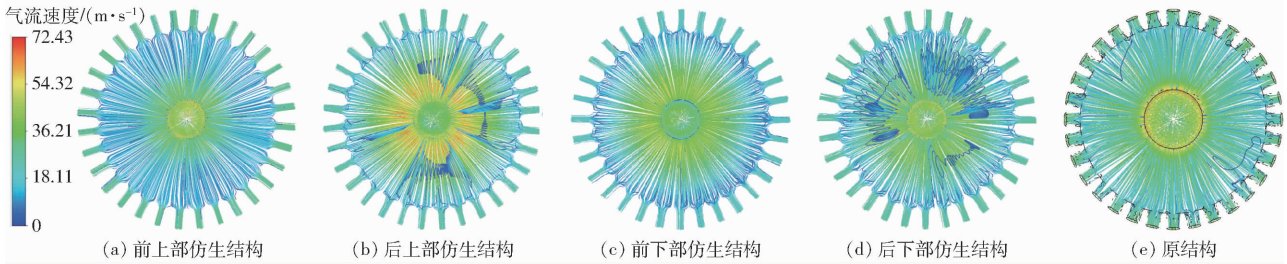


图 8 分配器内部流线图

Fig.8 Flow line of distributor

在 EDEM 中利用块功能统计分析分配器各排种管排出的种子数量,根据各行排量一致性变异系数计算公式得到不同结构分配器的各行排量一致性变异系数,种子分布均匀性仿真图如图 9 所示。

通过耦合仿真得到 5 种分配器的压力损失与各行排量一致性变异系数,具体数值见表 2,结构 b、d、e 中压力损失及各行排量一致性变异系数都大于其他结构,是由分配器内部紊流导致的,且各行排量一

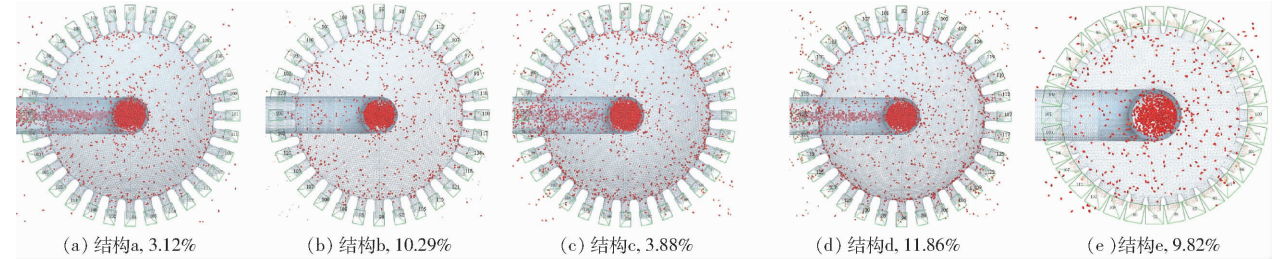


图 9 种子分布均匀性仿真图

Fig.9 Simulation diagram of seed distribution uniformity

致性变异系数显著高于标准要求,不满足实际生产需要,所以排除结构 b、d、e。综合分析分配器内流线分布图与种子分布均匀性图,结构 a 的流线速度变化较小且优于结构 c,结构 a 中各行排量一致性变异系数及压力损失最小,说明结构 a 的分配均匀性优于结构 c,最终确定结构 a 分配器(即鲫鱼前上部曲线 Y_1 得到的分配器)为最优结构。

表 2 仿真模拟结果
Tab.2 Simulation value

分配器结构类型	压力损失/Pa	各行排量一致性
		变异系数/%
a	7 467. 1	3. 12
b	9 830. 0	10. 29
c	9 251. 8	3. 88
d	17 877. 4	11. 86
e	9 884. 8	9. 82

4 台架试验

4.1 试验台搭建

气流输送式排种系统试验台是在中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室 2PST 型排种器性能测试系统基础上,增设了独立的气流输送式排种系统,如图 10 所示。试验装置选用北方规模化种植常用播种机型 32 行播种机配套的气流输送式排种系统;试验台采用旋涡式气泵风机,最大转速 2 850 r/min,最大风压 32 kPa,最大风量 $9\text{ m}^3/\text{min}$,功率 5. 5 kW。风机参数可通过变频器调节,最高频率为 50 Hz。排种轴由电机驱动,电机最高转速为 100 r/min。



图 10 排种系统试验台

Fig. 10 Device of pneumatic conveying system

1. 文丘里管 2. 集中式排种器 3. 分配器 4. 输种管 5. 导流管

4.2 试验方案与评价指标

在试验过程中,对各行排量一致性变异系数进行测定。试验方案设计参考文献[5],选定风机频率 x_1 和播种量 x_2 为试验因素,根据我国不同地区农艺要求,播种量满足 $150\sim300\text{ kg}/\text{hm}^2$,进口风量由控制风机的电机进行调整,为便于试验过程参数设置和计算简便,风机频率作为试验因素,风量经试验

取 $7.2\sim9\text{ m}^3/\text{min}$,转换成风机频率 $40\sim50\text{ Hz}$,输种管长度 3.5 m ,内径 32 mm ^[2]。试验方法选用二次回归通用旋转组合设计^[25],试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码
Tab.3 Coding of experimental factors

编码	因素	
	风机频率 x_1/Hz	播种量 $x_2/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$
- 1. 414	40. 0	150
- 1	41. 5	172
0	45. 0	225
1	48. 5	278
1. 414	50. 0	300

试验中采用各行排量一致性变异系数为评价指标,测定方法为:分别测定 32 行中各行的排种量,重复 5 次,计算平均值,从而得到各行排种量一致性变异系数。

4.3 试验结果分析

根据二次回归通用旋转组合设计进行 9 组试验,得到试验结果如表 4 所示。

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Schemes and results of experiment

试验 序号	因素		各行排量一致	压力
	x_1/Hz	$x_2/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	性变异系数/%	损失/Pa
1	40. 0	225	3. 72	7 396. 4
2	41. 5	172	2. 76	7 501. 6
3	41. 5	278	3. 04	7 649. 8
4	45. 0	150	3. 14	8 493. 7
5	45. 0	225	2. 45	8 574. 8
6	45. 0	300	3. 37	8 654. 1
7	48. 5	172	3. 59	8 897. 4
8	48. 5	278	2. 91	9 023. 8
9	50. 0	225	3. 41	9 243. 2

通过对不同播种量与风机频率下仿生优化分配器的各行排量一致性变异系数进行计算,得到优化后的分配器各行排量一致性变异系数不大于 3. 72%,说明在不同播种量与风机频率下各行排量一致性变异系数均小于国外同类型产品 (3. 90%)^[9],满足实际生产需求。仿生优化后的分配器在不同播种量与风机频率下的压力损失均小于耦合仿真中其他结构分配器的压力损失,说明仿生优化后的分配器能够有效降低压力损失,提高气流输送式排种系统种子分布均匀性,从而减小各行排量一致性变异系数。

5 结论

(1) 针对气流输送式排种系统分配器工作过程

中存在紊流等现象破坏种子流分配均匀性的问题,提出根据鲫鱼流线型曲线仿生设计分配器结构;采用最小二乘法分段曲线拟合原理,建立鲫鱼流线型曲线数学模型,并利用逆向工程技术设计4种流线型分配器。

(2)通过耦合仿真对仿生结构分配器与原水平结构分配器的流线分布和种子分布均匀性进行分析,得到结构a分配器基本消除了紊流现象,速度变

化最小且压力损失与各行排量一致性变异系数最小,确定结构a分配器为最优结构。

(3)通过台架试验验证得到,最优结构分配器在不同播种量与风量下的各行排量一致性变异系数均小于国外同类型产品并满足实际生产需求,说明流线型分配器能够有效减少紊流,提高排种系统种子分配均匀性,可为后续气流输送式排种系统部件的设计提供参考依据。

参 考 文 献

- [1] 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究,2013,35(12):216-220.
YANG Hui, LIU Lijing, ZHOU Junping, et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 216-220. (in Chinese)
- [2] 李衍军,刘友华,刘立晶. 气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析[J]. 农业机械学报,2020,51(6):55-64.
LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tube of different lengths in pneumatic seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 55-64. (in Chinese)
- [3] 刘友华. 气流输送式排种系统气压平衡装置的设计与试验[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2019.
LIU Youhua. Design and experiment of pressure balance device for pneumatic conveying system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2019. (in Chinese)
- [4] 王超,李洪文,何进,等. 稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):43-53.
WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of pneumatic wheat precision seed casting device in rice-wheat rotation areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 43-53. (in Chinese)
- [5] 杨慧. 气送式排种系统性能试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2014.
YANG Hui. Experimental study on performance of pneumatic conveying system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
- [6] BOURGES G, MEDINA M. Air-seeds flow analysis in a distributor head of an "air drill" seeder[J]. Acta Horticulturae, 2013, 1008: 259-264.
- [7] 刘正道,王庆杰,李洪文,等. 耦合 CFD-DEM 的气力式种肥穴施装置投肥路径分析与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(21):18-25.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Fertilizer injecting route analysis and test for air-blowing seed-fertilizer hole-applicator via CFD-DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 18-25. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] KUMAR V J F, DIVAKER D C. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 75(1): 81-95.
- [10] FURUHATA M, CHOSA T, SHIOYA Y, et al. Developing direct seeding cultivation using an air-assisted strip seeder[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2015, 49(3): 227-233.
- [11] 李中华,王德成,刘贵林,等. 正压式气流排种器排种效果试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 89-93.
LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Experimental study on sowing seeds by air-stream metering mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 89-93. (in Chinese)
- [12] 张晓辉,王永振,张利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(3):59-67.
ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. (in Chinese)
- [13] 戴亿政,罗锡文,王在满,等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):36-42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36-42. (in Chinese)
- [14] 贾洪雷,孟凡豪,刘立晶,等. 芯铧式开沟器仿生设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(4):44-49,77.
JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 44-49, 77. (in Chinese)
- [15] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):16-24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions

of the CSAE,2017,33(4):16–24. (in Chinese)

[16] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):32–39.
ZHAO Shuhong,LIU Hongjun,TAN Hewen,et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(5):32–39. (in Chinese)

[17] 孙文峰,刘海洋,付天鹏,等. 基于鲟鱼头部曲线的植保分禾吊杆组合装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(1):49–61.
SUN Wenfeng,LIU Haiyang,FU Tianpeng,et al. Design and experiment of plant protection opener suspender combination device based on sturgeon head curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1):49–61. (in Chinese)

[18] SHEN Q,WANG T,LIANG J,et al. Hydrodynamic performance of a biomimetic robotic swimmer actuated by ionic polymer-metal composite[J]. Smart Materials and Structures,2013,22(7):1–13.

[19] 贾洪雷,郑健,赵佳乐,等. 2BDB–6(110)型大豆仿生智能耕播机设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):93–107.
JIA Honglei,ZHENG Jian,ZHAO Jiale,et al. Design and experiment of 2BDB–6(110) soybean bionic intelligent till-sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):93–107. (in Chinese)

[20] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):171–180.
LI Liwei,MENG Zhijun,WANG Xiaou,et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):171–180. (in Chinese)

[21] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM–Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):69–77.
WEN Xiangyu,JIA Honglei,ZHANG Shengwei,et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM–Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):69–77. (in Chinese)

[22] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(3):57–68.
LEI Xiaolong,LIAO Yitao,ZHANG Wenyu,et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):57–68. (in Chinese)

[23] MANZONE M, PAOLO M, MARIO T, et al. Performance evaluation of a cyclone to clean the air exiting from pneumatic seed drills during maize sowing[J]. Crop Protection, 2015, 76: 33–38.

[24] 胡明国. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.

[25] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 苔麸播种机气流输送式排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):101–107.
ZHAO Jinhui,LIU Lijing,YANG Xuejun,et al. Design and experiment of pneumatic seeding system of teff seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):101–107. (in Chinese)

(上接第 24 页)

[29] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣袋装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):38–46.
WEI Guoliang,ZHANG Qingsong,LIU Lichao,et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):38–46. (in Chinese)

[30] 贾洪雷,陈忠亮,郭红,等. 旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计[J]. 农业机械学报,2000,31(4):29–32.
JIA Honglei,CHEN Zhongliang,GUO Hong,et al. Study on working principle of rotary tillage and stubble cutting and design of universal knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4):29–32. (in Chinese)

[31] 龚曙光,邱爱红,谢桂兰. 基于有限元分析的零部件优化设计研究与应用[J]. 机械,2002,29(5):23–25.
GONG Shuguang,QIU Aihong,XIE Guilan. The research and application of parts optimal design based on finite element analysis[J]. Mechanic, 2002, 29(5):23–25. (in Chinese)

[32] DWORECKI Z, FISZER A, LOBODA M. Calculation of tractor and agricultural machines moments of inertia[J]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2005,50(3):20–30.

[33] 徐刚,朱思洪,聂信天,等. 国产拖拉机振动系统固有频率研究[J]. 振动与冲击,2014,33(15):157–161.
XU Gang,ZHU Sihong,NIE Xintian,et al. Natural frequencies calculation for vibrating systems of tractors made in China[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15):157–161. (in Chinese)