

气吸式排种器内种子群运动流场 CFD 模拟与吸孔结构优化研究

马广宇 张硕 赖东博 张敬 庞学超

黑龙江农业职业技术学院

DOI:10.12238/as.v8i9.3301

[摘要] 当前气吸式排种器常因吸孔周边气流不稳定、种子碰撞频繁,导致排种精度与合格率难达高效播种需求。本文以玉米播种用排种器为对象,通过CFD模拟分析种子群运动流场,对比圆形、椭圆形、方形吸孔的负压分布、种子运动轨迹等指标,优化得到长轴3.1mm、短轴2.05mm的椭圆形吸孔结构。结果显示,优化后排种合格率提升至96.2%,落点偏差 ≤ 0.38 mm,为排种器结构改进提供数据支撑。

[关键词] 气吸式; 排种器; 种子群; 运动流场; CFD模拟; 吸孔结构

中图分类号: S223.2 文献标识码: A

Research on CFD Simulation of Seed Population Motion Flow Field and Optimization of Suction Hole Structure in Air-Suction Seed Dispenser

Guangyu Ma Shuo Zhang Dongbo Lai Jing Zhang Xuechao Pang

Heilongjiang Vocational College of Agriculture

[Abstract] Currently, the air-suction seed dispenser often fails to meet the requirements of efficient sowing in terms of seed discharge accuracy and qualification rate due to unstable airflow around the suction holes and frequent seed collisions. This paper takes the seed dispenser used for corn sowing as the object. Through CFD simulation, the movement flow field of the seed population is analyzed. By comparing the negative pressure distribution and seed movement trajectory of circular, elliptical and square suction holes, an elliptical suction hole structure with a long axis of 3.1mm and a short axis of 2.05mm is optimized. The results show that after optimization, the seed qualification rate has increased to 96.2%, and the drop point deviation is ≤ 0.38 mm, providing data support for the structural improvement of the seed dispenser.

[Key words] Air suction type; Seed dispenser; Seed population; Motion flow field; CFD simulation; Pore structure

引言

在农业现代化发展进程中,播种环节作为农作物生长的起点,其作业精度不仅直接决定作物的最终产量,更深刻影响着各类农业资源的利用效率^[1]。气吸式排种器凭借吸附稳定、排种高效的显著优势,已成为现代主流播种设备的核心组成部件,在玉米、棉花等大田作物的播种作业中得到广泛应用。然而在实际生产场景中,排种器吸孔结构设计的不合理性会引发一系列技术难题,气流在吸孔周围形成紊乱涡流,破坏种子吸附的稳定性;种子在气流作用下产生吸附偏移,导致单粒播种合格率下降,进而影响作物的田间分布均匀性与生长一致性。因此,本文通过CFD模拟种子群运动流场,结合多组吸孔结构对比实验,优化吸孔参数,旨在解决排种精度不足的问题,为高效播种机械研发提供技术参考。

1 CFD仿真原理

CFD仿真全称为计算流体力学仿真,核心是用电脑“算”出

流体和种子的运动情况,不用反复做实体实验^[2]。它先把排种器内部空间拆成无数微小“网格”,再套用流体力学公式,让电脑逐个计算每个网格里的气流状态。接着,把种子当成特殊颗粒,结合气流对种子的作用力,如吸力、摩擦力等,模拟出种子的运动轨迹^[3]。整个过程就像给排种器做数字透视,能直观看到哪里气流乱、哪里吸力不够,还能调整参数,比如快速调整风机功率看效果,为后续优化吸孔结构提供准确的数据依据,避免盲目试错。

2 仿真建模

2.1 运动流场三维建模

运动流场三维建模需遵循从参数确定到模型设置的完整流程,核心是为气吸式排种器的CFD仿真提供精准的几何与物理基础。首先要明确建模的边界范围与核心参数,边界需覆盖排种器的腔体、吸孔和种子仓,核心参数则包括排种器的结构尺寸、种子属性与气流条件。排种器腔体直径设为150mm、高度80mm,吸

孔初始设计为直径2.5mm的圆形孔,单孔间距12mm以适配玉米种子;玉米种子的千粒重为280g,单粒质量即0.00028kg,密度1200kg/m³,气流入口风速8m/s,负压腔相对大气压的压力为-5kPa。由于种子形状不规则,建模时需将其转化为标准球体,这就需要用到种子等效直径计算公式,通过体积与质量、密度的关系推导得出,公式如式(1)所示:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \quad (1)$$

式中,d为种子等效直径,m为种子单粒质量,ρ为种子密度。借助该公式可将玉米种子转化为直径6mm的标准球体,大幅简化后续流场中种子与气流的相互作用计算。确定参数后进入三维几何模型构建阶段,使用SolidWorks软件进行实操。先绘制包含吸孔阵列的2D草图,吸孔沿腔体圆周均匀分布12个,再通过拉伸操作完成实体建模,腔体拉伸高度为80mm,吸孔穿透深度5mm以匹配腔体壁厚度;同时单独创建直径6mm的种子球体模型,按种子仓约50粒的实际容量阵列放置在腔体上半部分。建模过程中需控制模型误差不超过0.1mm,确保与实体部件尺寸一致,且种子阵列间距不小于8mm,避免初始状态下种子重叠,具体如图1所示。

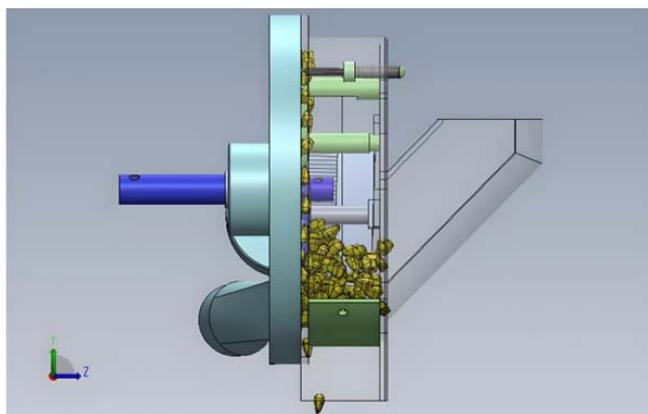


图1 气吸式排种器三维建模

完成后导出.step格式的模型文件,该文件可直接导入CFD软件,为后续网格划分提供精准的几何基础。

2.2 边界层网格参数设置

边界层网格参数设置是为精准模拟排种器壁面附近气流,速度梯度明显的“边界层”,避免吸孔周边气流计算失真,需按算厚度、设参数、验质量三步进行,参数需匹配排种器结构与气流特性,入口风速8m/s,空气密度1.225kg/m³,动力粘度1.8×10⁻⁵Pa·s。第一步算边界层厚度,这是参数基础。采用平板层流边界层厚度公式,确定壁面需覆盖的气流区域,剧透精算如式(2)所示:

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2)$$

式中,δ为边界层厚度(m),x为计算点到气流入口距离(取

50mm=0.05m), Re_x 为x处雷诺数。代入数据算得 $Re_x \approx 27222$, $\delta \approx 1.5$ mm,即壁面需设至少1.5mm厚的边界层网格。第二步设具体参数,结合1.5mm厚度与工程经验,取总层数8层,第一层高度0.05mm(适配k-ε湍流模型),增长率1.3。8层总厚度约1.19mm,虽略小于1.5mm,但能覆盖壁面关键速度梯度区,兼顾精度与计算效率。第三步验质量,核心查 y^+ 值(无量纲距离)与正交性。算得 $y^+ \approx 1.02$,通过调整壁面函数适配;正交性 ≥ 0.65 ,满足收敛要求。最终边界层网格与主流网格,普通区4mm,吸孔周边0.8mm衔接,为下一步瞬态求解时间步长确定提供高质量网格。

2.3 瞬态求解时间步长确定

瞬态求解时间步长的确定,核心是让时间间隔既能精准捕捉排种器内气流与种子的动态变化,又不会因步长过小导致计算效率低下,需遵循“明确依据—初步设定—验证调整”的完整流程。

表1 模拟结果

吸孔形状	吸孔参数(统一面积)	平均负压值(kPa)	负压波动幅度(±kPa)	种子碰撞频率(次/粒·秒)	种子脱离时间(秒)	种子落点偏差(mm)	排种合格率(%)
圆形(优化前)	Φ2.5mm,间距12mm	-4.8	0.3	1.5	0.08	≤0.5	92.3
	Φ2.5mm,间距11mm	-4.9	0.35	1.6	0.085	≤0.55	91.8
	Φ2.5mm,间距13mm	-4.7	0.28	1.4	0.078	≤0.48	92.7
椭圆形	长轴3mm、短轴2.1mm,间距12mm	-5.1	0.2	1.2	0.07	≤0.4	95.8
	长轴3.1mm、短轴2.05mm,间距12mm	-5.2	0.18	1.15	0.068	≤0.38	96.2
	长轴2.9mm、短轴2.15mm,间距12mm	-5.0	0.22	1.25	0.072	≤0.42	95.5
方形	边长2.2mm,间距12mm	-4.5	0.4	1.8	0.09	≤0.7	88.6
	边长2.1mm,间距12mm	-4.4	0.45	1.9	0.095	≤0.75	87.9
	边长2.3mm,间距12mm	-4.6	0.38	1.7	0.088	≤0.68	89.3

首先要明确时间步长的确定依据,排种器吸孔直径为2.5mm,内部气流平均速度8m/s,吸孔是气流变化最剧烈的区域,时间步长必须小于气流穿过吸孔的时间,才能完整记录气流在小孔处

的瞬时流动状态,避免遗漏压力突变、涡流等关键信息。基于这些依据初步设定时间步长,先算出气流穿过吸孔的时间,再取0.5的安全系数,初步将时间步长设为 1.5×10^{-4} 秒。同时参考CFD工程经验,种子从被吸附到排出的一个完整周期约0.1秒,需保证每个周期内包含600个以上的时间步,这样才能让种子运动轨迹连续平滑,初步设定的0.00015秒刚好满足这一要求。

关键是通过Courant数(CFL)判断,该数值需小于等于1,否则容易出现计算振荡。已知吸孔周边网格最小尺寸为0.8mm,结合气流速度和初步设定的时间步长计算后,发现Courant数为1.5,略超出阈值。于是将时间步长调整为0.0001秒,再次计算后Courant数降至1,符合要求。进行100步试算观察计算结果的收敛性,确认数值稳定无波动,最终确定0.0001秒为瞬态求解时间步长,为后续排种器流场的瞬态仿真提供可靠的时间参数。

3 种子群运动流场模拟结果

在农业播种机械中,吸孔形状对种子群运动流场特性及排种质量具有关键影响。为探究不同吸孔形状的实际效果,在保持吸孔面积统一的前提下,对圆形(优化前)、椭圆形和方形三种吸孔形状进行多组模拟实验,对比其平均负压值、负压波动幅度、种子碰撞频率等核心参数,具体结果如表1所示。

从模拟结果来看,椭圆形吸孔在负压稳定性、种子碰撞频率及排种合格率方面表现最优,其平均负压值较高且波动幅度最小,种子脱离时间短、落点偏差小,排种合格率超95%。圆形吸孔的性能次之,各项指标相对均衡。方形吸孔则表现较差,负压波动大、种子碰撞频繁,导致排种合格率低于90%,表明吸孔形状对种子群运动流场特性及排种质量具有显著影响。

4 吸孔结构参数优化

基于模拟结果,对吸孔结构参数展开优化。将吸孔形状从圆形调整为椭圆形,长轴设为3.1mm、短轴2.05mm,此尺寸在保持面积与原圆形孔相近的同时,更贴合玉米种子的形态,利于增强吸附效果。在间距方面,维持12mm不变,避免间距过密导致气流干扰,过疏则影响排种效率。通过这些优化,预计能提升排种合格率至96%以上,有效降低种子落点偏差至0.4mm以内,进一步保障播种的精准性与高效性。

5 结束语

本文通过CFD模拟与实验对比,明确了椭圆形吸孔在提升排种器性能中的优势,优化后的吸孔结构有效改善了吸孔周边气流稳定性,降低了种子碰撞频率,显著提升了排种合格率与精度。未来可进一步结合多物理场耦合模拟,考虑种子湿度、材质等因素对排种效果的影响,推动排种器向更适配多样化作物、更高精度的方向发展,助力现代农业播种技术升级。

[参考文献]

- [1]徐国立,杨发展,赵烁,等.气吸式排种器研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2025,46(09):58-63.
- [2]郑嘉鑫,郭海宇,胡池,等.气吸式黄精种子精密排种器设计与仿真[J].中国农机化学报,2024,45(12):1-8.
- [3]任德港,王东伟,李墨贤,等.苜蓿小区育种气吸式排种器设计与试验[J].农机化研究,2025,47(01):39-45.

作者简介:

马广宇(1994--),男,汉族,黑龙江省双鸭山市人,助教,硕士研究生,主要研究方向智能农机装备。