

气流分配式排种器 CFD 模拟与改进^{*}

李中华¹ 王德成¹ 刘贵林² 杨明韶³ 王振华²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010;
3. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010010)

【摘要】 在建立气流分配式排种器三维模型的基础上, 利用 CFD 方法对排种器的内部流场进行了仿真模拟。选择标准 $k-\epsilon$ 模型和 DPM 模型分别对气相和固相进行模拟, 得到气流场分布图和颗粒场的运动轨迹图。结果表明, 模拟结果与试验结果基本一致。但分配器中存在涡流现象, 导致个别种子滞留在分配器中, 影响了排种的均匀性。通过改进结构及模拟, 消除了分配器中涡流滞种现象。

关键词: 牧草种子 排种器 气流 计算流体动力学

中图分类号: S223.2⁺5

文献标识码: A

CFD Simulation and Improvement of Air-stream Distributive Metering Device

Li Zhonghua¹ Wang Decheng¹ Liu Guilin² Yang Mingshao³ Wang Zhenhua²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Huhhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China

3. College of Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010010, China)

Abstract

To improve the uniformity of the forage seed metering, a 3-D model was built to simulate air-stream distributive metering device using computational fluid dynamics (CFD) method, in which the distribution of airflow field and path curve of the particle phase were simulated using standard $k-\epsilon$ model and discrete phase model (DPM), respectively. The results of simulation were in good agreement with experimental data. However, in the simulation, a few seeds were left in the distributor due to the air vortex, which impairs the uniformity of seed sowing. Therefore, CFD simulation was conducted to improve the structure of distributor, and vortex-caused seed detention was finally avoided after the improvement.

Key words Forage seed, Metering device, Air-stream, Computational fluid dynamics

引言

气流分配式排种器可用于播种牧草、大田作物等各类种子, 而且对种子尺寸和形状的适应性较好。种子特性和排种量对该排种器的空气动力学特性影响比较突出, 致使其内部流场特征复杂。国外一些学者对其气力输送装置进行了研究, 利用芝麻、谷物等做试验, 但对牧草种子及该类型装置的工作机理研究较少^[1~4]。该排种器的分配器设计比较复杂,

往往通过实际生产制造和试验来改进结构, 研发周期长、成本高。为此, 本文利用 CFD 的 Fluent 软件对已设计的气流分配式排种器样机内部气流流场进行仿真模拟, 分析气流场和颗粒(种子)的运动轨迹, 发现存在的问题, 提出排种器结构改进的建议。

1 气流分配式排种器的结构特点

气流分配式排种器由波纹管、圆盘式分配器、分配器盖及方形出口等部分组成, 如图 1 所示。波纹

收稿日期: 2008-05-29 修回日期: 2008-06-26

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD28B08)

作者简介: 李中华, 博士生, 主要从事草业机械、草场改良的研究, E-mail: joylzh@126.com

通讯作者: 王德成, 教授, 博士生导师, 主要从事草业机械、草场改良、环境保护及区域规划的研究, E-mail: wangdecheng_cau@126.com

管的尺寸影响气流携带种子的均匀性^[5-6]。圆盘式分配器由2个平行的圆盘组成,圆盘垂直于气流方向,气流撞击分配器盖后,流向各出口。方变圆出口是连接输种管和分配器的接口,因研究需要,只考虑分配器的方形出口。各部分结构参数如表1所示。

2 气流分配式排种器的 CFD 模拟过程

Fluent 是一种 CFD 软件包,它用于模拟各种流

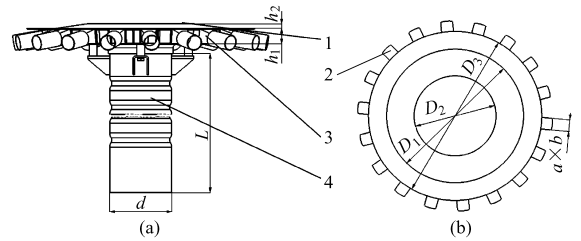


图1 气流分配式排种器结构示意图

Fig.1 Sketch of air-stream distributive metering device

(a) 主视图 (b) 俯视图

1. 分配器盖 2. 方形出口 3. 圆盘式分配器 4. 波纹管

表1 气流分配式排种器的结构参数

Tab.1 Configuration parameters of air-stream distributive metering device

波纹管		圆盘式分配器			分配器盖		方形出口		
L/mm	d/mm	D ₁ /mm	h ₁ /mm	D ₂ /mm	D ₃ /mm	h ₂ /mm	a/mm	b/mm	n/个
980	124	370	30	220	380	12	30	30	18

体流动及传热等问题,并可求得在指定区域内速度、压力和温度等变量及其变化,通过对结果的分析,提出结构优化的方案^[7-10]。

2.1 模型构建与网格划分

根据上述排种器的结构及其参数,利用 Solidworks 设计了气流分配式排种器的三维模型,如图2所示。利用 Gambit2.2 的 TGrid 程序对排种器进行了四面体单元的网格划分。根据精度要求及计算机的配置,步长取2,如图3所示。

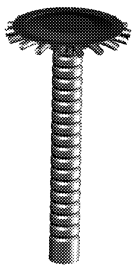


图2 气流分配式排种器的三维图

Fig.2 3-D model of air-stream distributive metering device

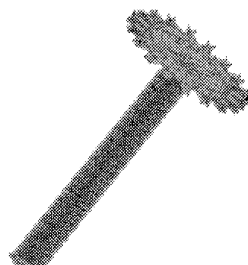


图3 气流分配式排种器的网格体示意图

Fig.3 Grids of air-stream distributive metering device

2.2 数值模拟

数值模拟选择非耦合隐式求解器进行求解,选用标准 $k - \epsilon$ 模型和离散相模型 (discrete phase model, 简称 DPM) 进行计算。工作压力参考点选在进口中心,绝对压力为 101 325 Pa。为了减少数值扩散,计算中选取了二阶迎风离散格式,并采用 SIMPLEC 算法进行速度压力耦合计算。

2.2.1 入口和出口条件

入口边界条件设为速度进口,进口流速设为

$u = 30 \text{ m/s}$ 。由于雷诺数 $Re = \frac{du\rho}{\eta} = 247\ 657.46 > 4\ 000$,故排种器内流场的流动形态为湍流,即

$$k = 0.15(0.16\bar{u}Re^{-0.125})^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{0.15}}{l} \quad (2)$$

其中

$$l = 0.07L$$

式中 k ——湍动能 ϵ ——湍动耗散率
 \bar{u} ——湍流平均速度 d ——管内径
 L ——波纹管长度 ρ ——流体密度
 η ——流体粘度 l ——湍流长度尺度
 C_μ ——经验常数,取 0.09

由式(1)、(2)计算得^[7-8] $k = 1.215, \epsilon = 25.32$ 。该排种器设有 18 个出口,出口边界条件设为流动出口。

2.2.2 颗粒(苜蓿种子)相

本文采用 DPM 模型模拟颗粒相的运动轨迹。在入口处,颗粒相占气固两相的体积分数小于 10%,故假设颗粒相为稀相,颗粒与颗粒间的相互作用及颗粒对气流的作用均忽略不计^[11]。模拟时,颗粒从排种器入口均匀投入,忽略颗粒尺寸的变化,取其平均粒径为 1.932 mm,密度为 770 kg/m³^[12]。

2.2.3 壁面条件

对于气流相和颗粒相,均假设壁面为无滑移条件。

2.3 模拟结果及分析

图4为残差图。由图4可知,经过107次迭代,模型的 k 和 ϵ 等各项指标(图中 X 轴、Y 轴速度基本重合)的残差均小于 0.001,表明模型收敛。

图5为速度矢量分布图。由图5可知,在波纹

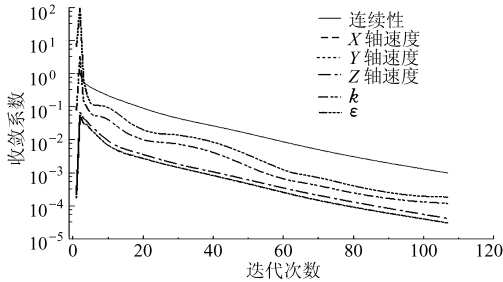


图4 残差图

Fig.4 Distribution of residuals

管中,气流除近壁面速度接近零外,流速一直较高且稳定。在分配器中,随着流动截面面积的增加,气流速度随之降低,即分配器产生了速度沉降。这既有利于减轻种子与分配器盖部的碰撞,又有利于空气和种子流的充分混合和均匀分流。由于涡流作用使得气流速度在 $Z=995\text{ mm}$ 平面上降低到约 7 m/s 。在顶部,由于气流与盖部的碰撞,导致顶部气流的速度几乎降为零。各出口气流速度几乎相等,约 22 m/s ,这在一定程度上保证了排种均匀性。

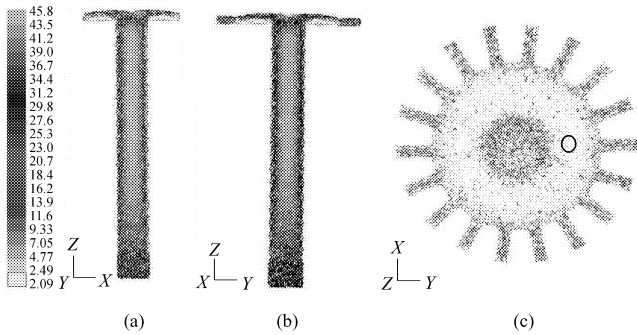


图5 速度矢量分布图

Fig.5 Distribution of velocity vector

(a) OXZ平面 (b) OYZ平面 (c) $Z=995\text{ mm}$ 平面 (d) Z轴速度

图6为湍流分布图。由图6可知,在波纹管中,湍流不明显,流动较平稳。在分配器中,湍流程度明显上升,并产生了不均匀涡流,湍动能在 $60\sim 70\text{ m}^2/\text{s}^2$ 之间。该涡流可能导致极少部分种子排不出去,滞留在分配器中。在顶部,由于碰撞,中心轴

Z轴的湍动能骤增,接近 $15\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。在出口处,仍有部分涡流。分配器及出口存在涡流,不利于排种的均匀性和稳定性。故可尝试改进分配器的结构形状或将出口管沿着分配器底部的圆周部位放置。

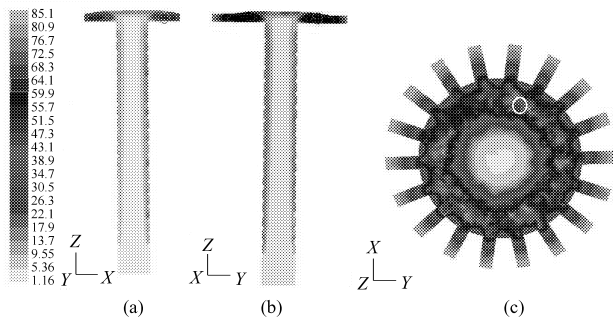


图6 湍流分布图

Fig.6 Distribution of turbulence

(a) OXZ平面 (b) OYZ平面 (c) $Z=995\text{ mm}$ 平面 (d) Z轴湍动能

图7为压力分布图。由图7可知,在波纹管中,气流压力平缓降低(图中压力均为相对于大气压的相对压力值)。在分配器中,由于速度沉降作用,压力随之降低,约为 $-1\ 300\text{ Pa}$ 。在产生涡流的部位,压力降到最低点,约为 $-1\ 700\text{ Pa}$,这将导致极少部分种子滞留在分配器中。可通过改变分配器底部的结构,如适当增加弧度,减少分配器中涡流的产生,从而减少分配器中种子的滞留。在顶部,由于种子与分配器盖的碰撞,形成冲击力,该部分冲击力过大

会损害种子,影响种子的发芽率。可尝试改变分配器盖部的形状,如设计较圆滑的盖部,缓解种子与盖部的碰撞。

图8是利用DPM模型模拟颗粒相(苜蓿种子)的运动轨迹图。在波纹管中,空气-种子流流动较平稳。进入分配器后,空气-种子流由于惯性仍继续向上运动,直到与分配器盖碰撞后改变运动方向流向出口。在分配器中,因气流场存在涡流,致使少数颗粒轨迹也存在涡流运动,难以顺畅排出,从而影响排

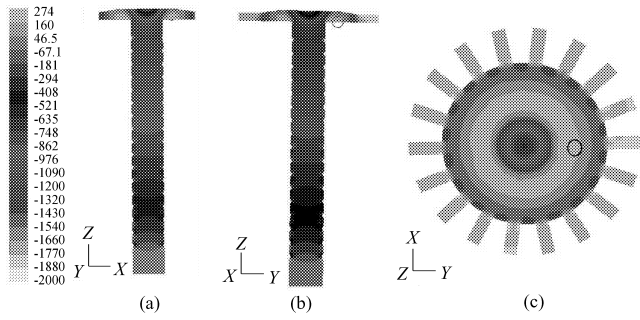


图 7 压力分布图

Fig.7 Distribution of pressure

(a) OXZ 平面 (b) OYZ 平面 (c) Z = 995 mm 平面 (d) Z 轴压力

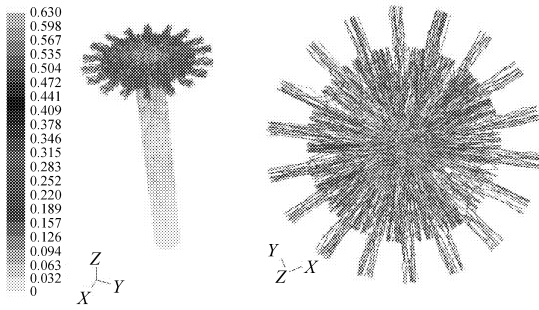


图 8 种子运动轨迹图

Fig.8 Path lines of seeds

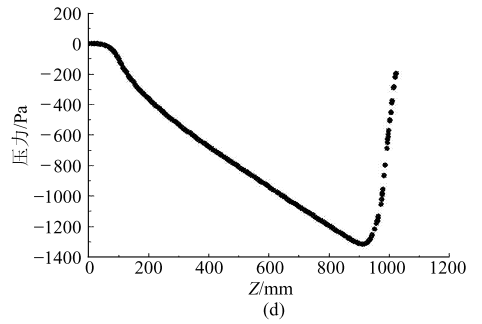


图 9 苜蓿种子模拟结果与试验结果的比较图

Fig.9 Comparison results of Lucerne seed between simulation and experiment

种的均匀性。

2.4 模拟结果与试验结果的比较

如图 9 所示,CFD 模拟的结果与试验结果基本吻合。表明 CFD 模拟对该类排种器流场的模拟是有效的。其试验条件为:利用 9BQM-3.0 型正压式气送免耕播种机,在风速为 30 m/s 时,对苜蓿种子进行了 10 次排种试验。模拟结果表明,各出口排量稳定性变异系数优于实际试验值。主要原因是:模拟时颗粒相被认为是稀相,在一定程度上减少了种子与分配器盖的碰撞。另外,数值计算时忽略了颗粒与颗粒间的作用及颗粒对气流相的作用,从而简化了颗粒在流场中的受力。最后,在建立三维模型时,为了方便建模对排种器作了少许简化。

3 改进方案设计与模拟分析

针对原有气流分配式排种器结构存在的涡流滞种问题,现提出凹 T 形、半圆形和 Y 形等 3 种排种器改进设计方案,并分别对其进行三维 CFD 仿真模拟。其 OXZ 平面上的速度矢量分布如图 10 所示。凹 T 形分配器流场稳定且不存在涡流,分配器顶部的凹弧缓解了种子与顶部的碰撞。半圆形分配器的底部有涡流,该涡流将导致种子的滞留,影响分配器的排种均匀性。该方案的气流流场不理想。Y 形分配器的流场稳定且不存在涡流,分配器盖顶部的圆弧对气流有一定的导向作用,减轻了气力输送时种子与盖部的碰撞,提高了排种的均匀性。Y 形分配器出口的速度比凹 T 形分配器大。综合以上分析,Y 形分配器为最优改进方案。

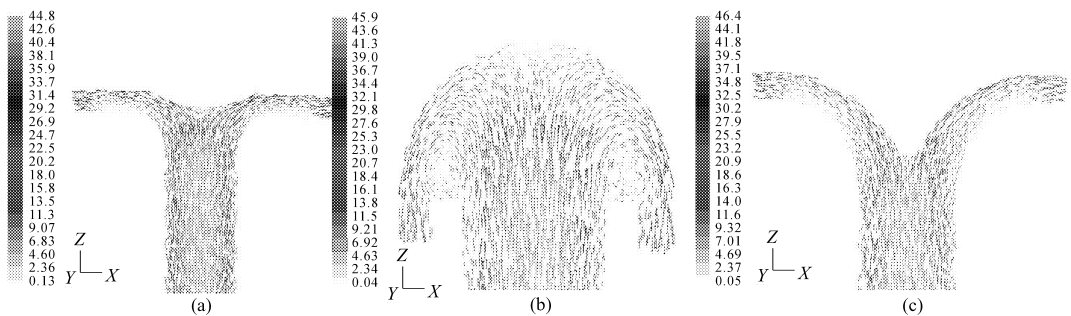


图 10 改进结构的 OXZ 平面速度矢量分布

Fig.10 Velocity vector of the improved structure in plane OXZ

(a) 凹 T 形排种器 (b) 半圆形排种器 (c) Y 形排种器

4 结论

(1) 利用 CFD 方法对原圆盘型气流分配式排种器进行的模拟,其结果与实际样机试验结果基本一致,各出口排量稳定性变异系数为 3.5~4.2,说明 Fluent 软件对该类排种器进行仿真模拟是有效的。

(2) 经过模拟发现,原圆盘型气流分配式排种器存在涡流滞种现象,影响了输种的顺畅性和排种的均匀性。

(3) 通过对改进结构进行 CFD 模拟表明,Y 形分配器具有内部流场均匀和出口速度较高有利于排种等优点,为原圆盘型气流分配式排种器的理想改进方案。

参 考 文 献

- 1 Kumar V J F, Durairaj C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 75(1): 81~95.
- 2 Frye A L, Peukert W. Identification of material specific attrition mechanisms for polymers in dilute phase pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(2): 175~185.
- 3 Bilirgen H, Levy E, Yilmaz A. Prediction of pneumatic conveying flow phenomena using commercial CFD software[J]. Powder Technology, 1998, 95(1): 37~41.
- 4 Li A J, Webba C, Pandiella S S, et al. Solids deposition in low-velocity slug flow pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(2): 167~173.
- 5 罗惕乾,程兆雪,谢永曜. 流体力学[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- 6 张洪流. 流体流动与传热[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- 7 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 8 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- 9 蔡忆昔,蔡继业. 基于 Fluent 软件的直喷柴油机螺旋进气道设计[J]. 农业机械学报,2006,37(6):1~4.
Cai Yixi, Cai Jiye. Design of helical intake port of DI engine based on Fluent[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6):1~4. (in Chinese)
- 10 陈次昌,宋文武,杨昌明,等. 离心泵三维设计的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(3):34~36.
Chen Cichang, Song Wenwu, Yang Changming, et al. 3-D design of a centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3):34~36. (in Chinese)
- 11 Liu C K K, Liu H S. Numerical simulation of dilute turbulent gas-solid flows in horizontal channels[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1996, 23(3):575~605.
- 12 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

(上接第 71 页)

- 2 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- 3 周祖镠. 农业物科学[M]. 北京:农业出版社,1994.
- 4 李耀明,刘彩玲,陈进. 水稻育苗播种装置气力吸种部件的研究[J]. 农业机械学报,1999,30(6):46~49.
Li Yaoming, Liu Cailing, Chen Jin. Study on vacuum seed-metering device of rice seeding precision mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(6):46~49. (in Chinese)
- 5 张守勤,马成林,王成和,等. 气力轮式排种器型孔的流场及作用[J]. 农业机械学报,1991,22(4):26~30.
Zhang Shouqin, Ma Chenglin, Wang Chenghe, et al. The flow field of cell born in the pneumatic wheel-type seed-metering device and it's effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(4): 26~30. (in Chinese)
- 6 Karayel D, Barut Z B, Ozmerzi A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437~444.
- 7 刘文卿. 试验设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.