

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.006

气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析

李衍军<sup>1</sup> 刘友华<sup>1</sup> 刘立晶<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为探索气送式排种系统输种管长度对排种性能的影响机理,在分析不同长度输种管管内气流平均流速变化规律的基础上,进行流体动力学(CFD)仿真,得到不同长度输种管管内气流速度场分布图及排种量分布图。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为影响因素,以输种管管内气流平均流速、各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数为试验指标,进行了台架试验。试验结果表明:输种管长度增加,输种管管内气流平均流速降低,种子运动速度减慢,排种量减少,且当输种管长度小于2.50 m时,变化显著;当输种管长度在2.50~6.25 m时,气流平均流速降低速率减小,种子运动速度减慢变缓,排种量变化平缓,各行排量一致性变异系数为2.82%~3.88%,总排量稳定性变异系数为0.39%~1.28%,满足相关标准要求。因此设计时建议输种管长度选择在2.50~6.25 m之间。

**关键词:** 气送式播种机; 输种管长度; 气流平均流速; 排种性能

中图分类号: S223.2      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2020)06-0055-10      OSID: 

Distribution Mechanism of Airflow in Seed Tube of Different Lengths in Pneumatic Seeder

LI Yanjun<sup>1</sup> LIU Youhua<sup>1</sup> LIU Lijing<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China  
2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A test stand about the pneumatic conveying system was conducted to explore the mechanism of the effect of seed tube length on the seeding performance of the pneumatic conveying system. On basis of analysis of law of average flow velocity in tubes with different lengths, computational fluid dynamics (CFD) simulation was conducted to get the map of speed flow field in tubes with different lengths. The quadratic regression general rotation combination design was used for the experiment, and the seed application rate and frequency of fans were taken as influential factors. Moreover, indexes of the test included variation coefficient of each row displacement consistency, variation coefficient of total displacement stability and the average velocity of airflow in the seed tube. A total of 24 seed transport tubes were used, with a gradient of 0.25 m and a length ranges from 0.50 m to 6.25 m. The analysis and test results showed that when seed tube length was increased, the gas average flow velocity was decreased, the seed movement speed was decreased, and the corresponding seed quantity discharge was decreased. Therefore, seed tube length had a significant influence on the seeding quantity. When seed tube length was 2.50~6.25 m, both the decrease of average flow velocity and the decline of the seed velocity were slowed down, and the seeding amount was changed smoothly. In addition, the variation coefficient of each row displacement consistency was 2.82%~3.88%, and the variation coefficient of total displacement stability was 0.39%~1.28%. Therefore, the seeding evenness was good and could meet the requirements of relevant standards.

**Key words:** pneumatic seeder; seed tube length; gas average flow velocity; seeding performance

收稿日期: 2019-09-05    修回日期: 2019-11-17  
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

# 0 引言

气送式排种方式有利于播种机的配置,目前广泛应用于大型播种机<sup>[1-6]</sup>。气送式排种系统主要由风机、种箱、集中式排种器、过渡输种管、导流管、分配器及输种管等组成,各部分均会对排种性能产生影响,进而气送式排种系统直接影响气送式播种机的作业质量。雷小龙等<sup>[7-8]</sup>研究了集排器的倾角及转速对排种性能的影响;杨慧<sup>[9]</sup>、彭传杰等<sup>[4]</sup>研究了集排器排种轮有效长度对排种性能的影响,且通过试验得出了相应的函数关系;DANIEL<sup>[10]</sup>、WANG等<sup>[11]</sup>分别对导流管的管径和形状进行研究,发现改变进出口管径及采用椭圆形窝眼可提升种子分布均匀性;秦军伟等<sup>[12-13]</sup>设计制造了I型分配器;戴亿政等<sup>[14]</sup>在设计一种适用于气力集排式水稻直播机的分种器时,发现输种管长度影响分种效果,但仅试验了1.5 m和2.8 m两个水平。目前国内针对气送式播种机输种管的研究较少,而在食品工程<sup>[15-17]</sup>、化工<sup>[18-20]</sup>等领域,前人开展了不同管道长度对物料运输的影响研究。在气送式排种系统中输种管长度会对排种性能产生影响。对于大型气送式播种机而言,机具的宽幅特性导致输种管长度很难保持一致。本文针对气送式排种系统输种管管内气流在不同长度与风机频率下的变化开展试验研究,分析长度与气流流速的关系,探索输种管长度对排种性能影响的规律及机理,为解决不同长度输种管导致排种性能不佳等问题提供理论依据。

# 1 试验条件

## 1.1 试验台搭建

气送式排种系统试验台是在土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室2PST排种器性能测试系统基础上,增设了独立的气送式排种系统和相关检测仪器。气送式排种系统结构如图1所示,主要由风机、种箱、集中式排种器、空气-种子混合室、过渡输种管、导流管、分配器、输种管等组成。

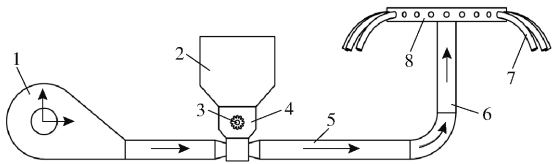


图1 气送式排种系统结构简图

Fig. 1 Sketch of pneumatic conveying system

1. 风机 2. 种箱 3. 集中式排种器 4. 空气-种子混合室 5. 过渡输种管 6. 导流管 7. 输种管 8. 分配器

本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 m<sup>3</sup>/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。

分配器为24行,依据生产用24行播种机结构参数,工作幅宽4 m,排种器距种沟底垂直高度1 m。输种管长度为1~4 m。

其工作过程为:集中式排种器定量播施排种箱内种子,以风机产生的气流为载体,输送空气-种子两相流,经过过渡输种管和导流管到达分配器,通过分配器径向分配排种,经过输种管落入接种杯中。

## 1.2 试验材料及仪器

试验选用在内蒙古自治区广泛种植且产量稳定的小麦品种农麦3号,长度平均值5.95 mm,宽度平均值3.13 mm,厚度平均值3.00 mm,千粒质量为39.98 g。

试验仪器包括:电子天平(量程0~500 g,精度0.01 g)、秒表、游标卡尺(量程0~150 mm,精度0.02 mm)、接种杯(2 L)、风压检测仪(−2 000~2 000 Pa)等。

## 1.3 试验标准

根据GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》中的田间测试方法推导台架试验条件和计算总排量稳定性变异系数与各行排量一致性变异系数。

根据GB/T 19232—2003《风机盘管机组》A.3.2节测量静压。

# 2 试验设计与方法

## 2.1 试验设计

在试验过程中,分别进行了各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数测定。参考文献[9],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150~300 kg/hm<sup>2</sup>,风机频率40~50 Hz。试验方法选用二次回归通用旋转组合设计<sup>[21]</sup>,试验因素编码如表1所示。

表1 试验因素编码

Tab. 1 Coding of experimental factors

| 编码     | 因素             |                                   |
|--------|----------------|-----------------------------------|
|        | 风机频率 $x_1$ /Hz | 播种量 $x_2$ /(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
| −1.414 | 40.0           | 150                               |
| −1     | 41.5           | 172                               |
| 0      | 45.0           | 225                               |
| 1      | 48.5           | 278                               |
| 1.414  | 50.0           | 300                               |

以风机产生的高压气流为载体,带动种子在气送式系统中移动,气流速度对种子的输送至关重要,

管内气流速度与管内压力相关,且前人在开展管长对物料的运输影响分析时发现管道内压力会对物料运输产生影响<sup>[15,22]</sup>。试验采用的条件为在改变风机频率和播种量同时输种管长度在0.50~6.25 m时,以0.25 m为梯度,共计24根,输种管分别与分配器24个出口连接,用接种杯收集各输种管内的种子,每次测定收集种子的时间为30 s,重复5次,称量并记录数据。输种管按顺序依次标记为*i*(*i*=1, 2, …, 24)。

2.2 试验指标及参数测定

2.2.1 各行排量一致性变异系数与总排量稳定性变异系数测定

测定24行中各行的排量,重复5次,计算各行排量一致性变异系数。

总排量稳定性变异系数测试方法与各行排量一致性变异系数相同,重复5次,计算平均值。

2.2.2 输种管内气流压力测定

气送式排种系统工作时,采用静压环装置分别测量分配器内腔全压和24个出口处管壁静压。输种管内径30 mm,静压取压口直径1.3 mm,取压接口管内径4 mm。在取压口安装无毛刺且与壁面呈直角的测压嘴,测压嘴长度3 mm。静压环装置简图如图2所示。

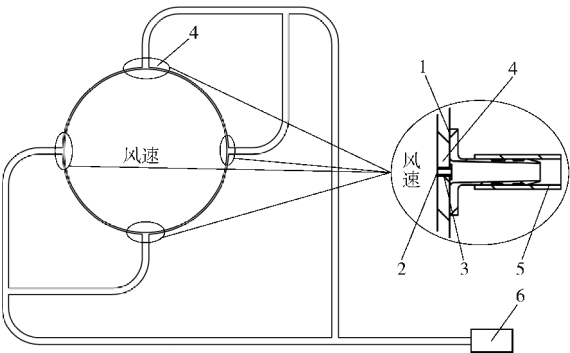


图2 静压环装置简图  
Fig.2 Sketch of ring of static pressure

1. 壁面 2. 取压口 3. 测压嘴 4. 取压接口 5. 取压接口管  
6. 风压检测仪

分配器内腔直径350 mm,内腔截面大于输种管的截面,在分配器内腔中,可视作流速为零。分配器内腔气流流动可视为定常流动。气流流向分配器上端面,速度在接近上端面中心点*A*时逐渐减低,流至*A*点滞止为零,气流在*A*点的动压为零,所以*A*点所测静压便是全压。如图3所示。

测定输种管入口处静压时,测量断面应尽量选择在气流平稳的直管段上,当测量断面设在弯头、三通管等异形部件后面时与这些部件距离应为4~5倍管道直径<sup>[23]</sup>。本试验选择在输种管上距离分配

器出口5*d*(*d*为输种管内径,取0.03 m)处的截面上互呈90°分布静压孔进行静压测定。如图4所示。

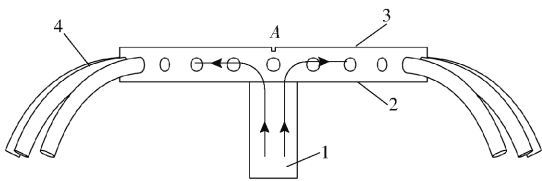


图3 分配器测压点

Fig.3 Distributor pressure measuring point layout

1. 导流管 2. 分配器下端面 3. 分配器上端面 4. 输种管

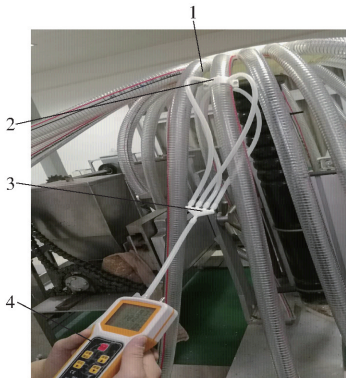


图4 输种管入口处静压的测定

Fig.4 Measurement of static pressure at inlet of seed drop tube

1. 输种管 2. 静压环 3. 混流装置 4. 压力表

2.2.3 输种管内气流平均流速计算

采用测得的全压与静压数据,计算输种管动压,定量得到管内气流流速,得出气流流速与对应输种管长度的趋势图,观测规律。

气流由分配器进入输种管的过程中,气压损失可忽略不计。动压计算公式为

$$p_{di} = p_A - p_{ji} \tag{1}$$

式中  $p_A$ ——*A*点处所测全压,Pa

$p_{di}$ ——第*i*行输种管的动压,Pa

$p_{ji}$ ——第*i*行输种管入口处的静压,Pa

第*i*行输种管内平均流速公式为

$$u_i = \sqrt{\frac{2p_{di}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(p_A - p_{ji})}{\rho}} \tag{2}$$

式中  $\rho$ ——工作状态下(20℃)空气的密度,取1.205 kg/m<sup>3</sup>

3 输种管内气流流速分析

输种管可分为气流流动起始段和完全发展段,当输种管长度较短时,气流在管中心线上的流速难以达到最大值,此时输种管只有气流流动起始段。

本文针对具有起始段和完全发展段的输种管,通过计算雷诺数及气流流动阻力,定性分析各行输

种管内气流流速的变化,阐述气流流速的变化规律和气流对种子的作用情况。

### 3.1 雷诺数

流体雷诺数计算式为

$$Re_1 = \frac{u_i d}{\nu} \quad (3)$$

式中  $\nu$ ——试验状态下空气的运动黏度,20℃下为  $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

对于圆截面管道,当  $Re_1 \leq 2300$  时,管内流体流动状态是层流; $Re_1 > 2300$  时,流动状态是紊流。将式(1)和式(2)计算值代入式(3),可得  $Re_1$  的取值范围为  $1.1523 \times 10^4 \sim 2.6403 \times 10^4$ ,均远远大于2300,所以本试验中,输种管内气流流动状态为紊流。

### 3.2 气流流动阻力

黏性流体在管道内流动过程中,根据产生阻力的原因不同,可将其流动阻力分为局部阻力和沿程阻力。局部阻力是流体流过管路中的折弯、阀门、变径管件等时,流体的流向和流速发生改变,导致边界层分离产生漩涡而造成的能量损失。在紊流状态下,沿程阻力大部分是由流体质点的迁移和横向脉动造成,小部分是由黏性摩擦造成,为克服这部分阻力,流体在流动过程中必然会产生能量损失<sup>[24]</sup>。本试验中气流由分配器进入输种管,管道变径,考虑局部阻力;气流在输种管内流动,无明显变径变向,考虑沿程阻力。

#### 3.2.1 分配器出口处压损计算

气流由分配器进入输种管,流道断面突然收缩,造成气流在分配器出口处压力损失。在紊流流动中, $Re_1$ 越大,惯性效应相比于粘性效应越占主导地位,此时压力损失系数  $K$  很大程度与装置几何结构相关,图5描绘流体变径进入管道的两种典型流动模式,给出相对应的压力损失系数  $K$ <sup>[25-26]</sup>。

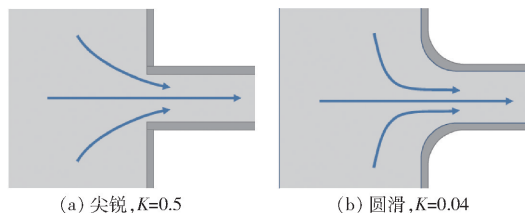


图5 管道变径情况简图

Fig. 5 Sketches of entrance flow conditions

本试验中,分配器出口处结构气流变径流出如图5b所示,取压力损失系数  $K=0.04$ 。

分配器出口处局部压力损失计算式为

$$p_A - p_j = \frac{1}{2} K \rho u_i^2 \quad (4)$$

其中

$$p_A - p_j = \gamma h_j \quad (5)$$

$$\gamma = \rho g \quad (6)$$

$$h_j = 0.02 \frac{u_i^2}{g} \quad (7)$$

式中  $p_j$ ——输种管入口处静压,Pa

$h_j$ ——分配器出口处局部阻力

$\gamma$ ——流体重度, $\text{N}/\text{m}^3$

$g$ ——重力加速度,取  $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$

#### 3.2.2 输种管内流动阻力计算

输种管内流体流动的沿程阻力可表示为达希-威斯巴赫公式

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u_i^2}{2g} \quad (8)$$

式中  $h_f$ ——输种管内沿程阻力,m

$l$ ——输种管长度,m

$\lambda$ ——沿程阻力系数,与流体黏度、流速、管径以及管壁的粗糙度等有关

在紊流状态下,根据绝对粗糙度  $\Delta$  和层流底层厚度  $\delta_l$  之间的关系,将流体沿固体壁面的流动分为水力光滑壁流动和水力粗糙壁流动。

圆管中层流底层厚度一般用半经验公式计算,即

$$\delta_l = \frac{34.2d}{Re_1^{0.875}} \quad (9)$$

24行输种管中,计算得  $\delta_l$  的最大值为  $0.28 \text{ mm}$ 。查表可得含有加强钢丝的橡胶软管内壁的绝对粗糙度  $\Delta$  的取值范围为  $0.3 \sim 4 \text{ mm}$ ,据实际观察,本试验中绝对粗糙度  $\Delta$  取值为  $0.3 \text{ mm}$ 。

当雷诺数  $Re_1$  较大,而层流底层的厚度  $\delta_l$  较小,且  $\delta_l < \Delta$  时,部分管壁粗糙高度不能被层流底层覆盖,突出在层流底层外的壁面粗糙高度成为紊流脉动与旋涡运动的新来源,壁面粗糙度对流经壁面的紊流产生影响。这种流动称为“水力粗糙壁”流动。当雷诺数  $Re_1$  继续增大,层流底层的厚度几乎为零,层流底层已无法覆盖壁面粗糙度,这种流动称为“完全粗糙壁”流动<sup>[27]</sup>。

本试验中  $\delta_l < \Delta$ ,且  $Re_1 > 4160[d/(\Delta)]^{0.85}$ ,所以输种管中气流的流动可称为“完全粗糙壁”流动。此时沿程阻力系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re_1$  无关,而只与相对粗糙度  $d/\Delta$  有关。可选用尼古拉兹归纳的公式计算沿程阻力系数

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{d}{2\Delta} + 1.74\right)^2} \quad (10)$$

将  $d=0.03 \text{ m}$  和  $\Delta=0.3 \text{ mm}$  代入式(10)中可得  $\lambda=0.03788$ 。

将  $\lambda=0.03788$ 、 $d=0.03 \text{ m}$  和  $l_{\min}=0.5 \text{ m}$  代入式(8)中,可得

$$h_{f\min} = 0.315 \frac{u_i^2}{g} \quad (11)$$

比较  $h_j$  与  $h_{j\min}$  的数值,相差一个数量级,所以在计算气流的流动阻力时,可不考虑局部阻力  $h_j$ ,即视气流由分配器进入输种管的过程中,无气压损失。

### 3.3 气流平均流速

#### 3.3.1 气流平均流速变化规律

分配器中心顶点处  $A$  至输种管出口截面间的伯努利方程为

$$\frac{p_A}{\gamma} + z_A + \frac{u_A^2}{2g} = \frac{p_0}{\gamma} + z_0 + \frac{u_i^2}{2g} + h_f \quad (12)$$

式中  $z_A$ —— $A$  点截面高度, m

$z_0$ ——输种管出口截面高度, m

$u_A$ ——分配器中心顶点处的气流流动速度,  
 $u_A = 0$

$p_0$ ——工作状态下的大气压, Pa

将式(6)、(8)代入式(12)中,可得气流流体由分配器内腔至输种管出口处的压降

$$\Delta p_1 = p_A - p_0 = \frac{\rho u_i^2}{2} \left(1 + \frac{l\lambda}{d}\right) - (z_A - z_0)\rho g \quad (13)$$

其中  $(z_A - z_0)\rho g$  与  $\frac{\rho u_i^2}{2} \left(1 + \frac{l\lambda}{d}\right)$  相差一个数量级,所以在定性考量时可忽略  $(z_A - z_0)\rho g$ 。故

$$u_i^2 = \frac{2\Delta p_1}{\left(1 + \frac{\lambda}{d}l\right)\rho} \quad (14)$$

式(13)中 24 行输种管的  $p_0$  均为大气压,  $p_A$  均为分配器中心顶点  $A$  处的全压,  $\Delta p_1$  在本试验中为定值,  $\rho$ 、 $\lambda$ 、 $d$  也均为定值,且对不同行次的输种管,  $\Delta p_1$ 、 $\rho$ 、 $\lambda$  和  $d$  均相等,故管内气流平均流速的平方与管长大致成反比。

#### 3.3.2 气流平均流速变化速率的规律

气流由分配器内腔流入输种管进口端,最终流出输种管出口端的流动简图如图 6 所示,总长度为  $L$  的输种管分为长度为  $L_1$  的起始段和长度为  $L_2$  的完全发展段。

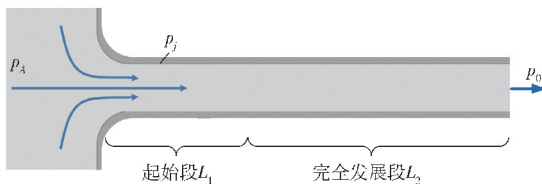


图 6 气流流动简图

Fig. 6 Diagram of airflow

气流由分配器内腔流入输种管中,由式(1)、(2)可知输种管内气流平均流速为

$$u = \sqrt{\frac{2(p_A - p_j)}{\rho}} \quad (15)$$

气流在长度为  $L$  的输种管内的压降为

$$\Delta p_2 = p_j - p_0 \quad (16)$$

输种管内压降等于压力梯度沿管长的积分,即

$$\Delta p_2 = \int_0^L -\frac{\partial p}{\partial l} dl \quad (17)$$

可假设平均压力梯度为  $\bar{B}$ , 则

$$\Delta p_2 = \bar{B}L \quad (18)$$

将式(16)、(18)代入式(15)中,可得

$$u = \sqrt{\frac{2(p_A - p_0 - \bar{B}L)}{\rho}} \quad (19)$$

式(19)中,只有  $\bar{B}$  和  $L$  是变量,则  $\bar{B}L$  的值越大,气流平均流速越小。

因为输种管内气流在单位长度起始段的压力损失大于完全发展段,则起始段  $L_1$  的平均压力梯度  $B_1$  大于完全发展段  $L_2$  的平均压力梯度  $B_2$ ,总长度  $L$  内的平均压力梯度为

$$\bar{B} = \frac{L_1 B_1 + L_2 B_2}{L_1 + L_2} \quad (20)$$

当输种管长度只包含起始段  $L_1$  时,  $\bar{B} = B_1$ , 其值较大。由于  $\bar{B}L$  决定气流平均流速的大小,所以在此种情况下输种长度对气流平均流速的影响大;当输种管长度包含起始段  $L_1$  和完全发展段  $L_2$ ,且完全发展段  $L_2$  占比较小时,  $\bar{B} = (L_1 B_1 + L_2 B_2)/(L_1 + L_2)$ , 其值介于  $B_1$  和  $B_2$  之间,所以在此种情况下输种管长度对气流平均流速影响一般;当输种管长度逐渐接近  $L$ ,且完全发展段  $L_2$  占比较大时,  $\bar{B} \approx B_2$ , 其值较小,所以在此种情况下输种管长度对气流平均流速的影响较小。

综合分析可知,输种管长度只包含起始段  $L_1$  时,气流平均流速减少明显;输种管长度包含起始段  $L_1$  和完全发展段  $L_2$  且接近  $L$  时,气流平均流速减少平缓。

### 3.4 种子运动速度变化规律

小麦种子外形似椭球体,种子在输种管内无序运动时,可近似等效为球体。等效球体的直径是

$$D = \sqrt[3]{L_M W T} \quad (21)$$

式中  $D$ ——小麦种子等效球体直径, m

$L_M$ ——小麦种子长度,取  $5.95 \times 10^{-3}$  m

$W$ ——小麦种子宽度,取  $3.13 \times 10^{-3}$  m

$T$ ——小麦种子厚度,取  $3.00 \times 10^{-3}$  m

计算得小麦种子等效球体直径  $D = 3.82 \times 10^{-3}$  m。

种子特征雷诺数

$$Re_2 = \frac{(u_i - u_0)D}{\nu} \quad (22)$$

式中  $u_0$ ——输种管内种子运动速度, m/s

种子在输种管内的运动速度远小于气流平均流速,故  $u_0$  在式(22)中可忽略,即

$$Re_2 \approx \frac{u_i D}{\nu} \quad (23)$$

将由式(1)和式(2)计算出的  $u_i$  和  $D = 3.82 \times 10^{-3} \text{ m}$  代入式(23)中,可得到  $Re_2$  的取值范围为  $1.4673 \times 10^3 \sim 3.3619 \times 10^3$ 。

在黏性流体绕圆球的运动中,阻力系数的定义式

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho (u_i - u_0)^2 S} \quad (24)$$

则气流作用在种子上的推力为

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S C_D (u_i - u_0)^2 \quad (25)$$

$$\text{其中} \quad S = \pi d^2 / 4 \quad (26)$$

式中  $C_D$ ——阻力系数

$F_D$ ——气流作用在种子上的推力, N

$S$ ——种子的最大迎流面积,  $\text{m}^2$

根据圆球的阻力系数与雷诺数关系曲线可知,当雷诺数  $Re_2$  取值范围为  $1.4673 \times 10^3 \sim 3.3619 \times 10^3$  时,阻力系数  $C_D = 0.44$ , 是定值<sup>[25]</sup>,故本试验中气流作用在小麦种子上的推力  $F_D$  和气流平均流速与种子运动速度差值的平方  $(u_i - u_0)^2$  成正比,即  $F_D \propto (u_i - u_0)^2$ 。

可以假定种子在输种管内匀速运动,所受壁面摩擦力  $f$  为定值。 $f = F_D$ , 则在不同行次输种管,当输种管内气流平均流速  $u_i$  减小,所对应的管内种子运动速度  $u_0$  也必然降低。

### 3.5 定性分析

具有起始段与完全发展段的输种管,管内气流平均流速的平方与管长大致成反比。输种管长度增加,管内气流平均流速减小,所对应的管内种子运动速度降低,导致输种管排种量减少。

输种管越短,气流平均流速减少越明显,种子运动速度降低越明显,排种量减少越显著;输种管大于一定长度时,气流平均流速减少趋缓慢,种子运动速度降低趋缓慢,排种量减少趋平缓。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真模型建模与简化

在 SolidWorks 三维空间中建立分配器和输种管组合的三维简化模型,如图 7 所示,输种管长度由 0.50 m 至 6.25 m 顺时针均匀分布,以 0.25 m 为梯度,并将其导入 Flow Simulation 模块中,进行流体动力学计算。SolidWorks Flow Simulation 将流体分析划分为两个独立类型<sup>[28]</sup>: 内部分析和外部分析。本文采用内部分析,即考虑的是流体在外围固体壁面内部的流动。在运行内部分析之前须通过模型检查

工具检查模型是否完全封闭及装配体的零件之间是否存在无效接触等几何问题,使用封盖功能将导流管下端进风口和输种管末端出风口封闭,计算出总的流体体积为  $0.055 \text{ m}^3$ 。

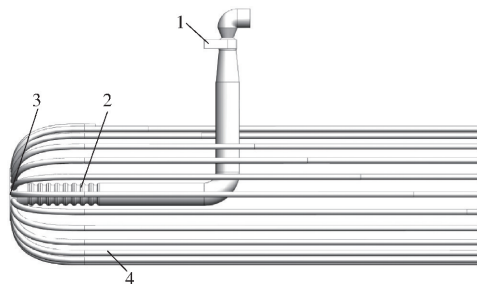


图 7 气流输送系统简化模型

Fig. 7 Model simplification of pneumatic conveying system

1. 空气-种子混合室 2. 导流管 3. 分配器 4. 输种管

### 4.2 边界条件设置与网格划分

边界条件和工程目标是控制使计算有解和收敛的前提。整个气流输送系统都是置于自然环境中,温度设定为  $20^\circ\text{C}$ ,进口边界条件为速度进口,输送气流速度公式

$$v_a = K_L \sqrt{\frac{\rho_s}{1000}} + K_d L_z \quad (27)$$

式中  $v_a$ ——输送气流速度,  $\text{m/s}$

$K_L$ ——物料粒度系数,小麦为 16

$K_d$ ——物料特性系数,小麦为  $(2 \sim 5) \times 10^{-5}$

$\rho_s$ ——物料密度,取  $1.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

$L_z$ ——输种管道的折算长度, m

由于  $K_d$  很小,所以  $K_d L_z$  很小,可以忽略不计,同时考虑到输送管道的密封性以及压损等影响因素,实际输送气流速度应较理论值大  $10\% \sim 30\%$ ,因此输送气流速度  $v_a = (1 + 10\%) \times 18.7 = 20.6 \text{ m/s}$ ,可取  $21 \text{ m/s}$  作为进口速度进行仿真;输种管末端出口静压均为大气压力,设置出口边界条件为压力出口,压强为  $101.325 \text{ kPa}$ 。对于内部流场而言,雷诺数  $Re_1 > 2300$  时,则流动一定为紊流<sup>[29]</sup>。所以,本文采用标准  $k-\epsilon$  模型及默认定义量。壁面条件设置为理想壁面,完全反射。分别选择进、出口封盖内侧面作为表面参数选择面,勾选静压、动压力和速度等参数作为分析运行完成后获取显示的工程目标参数。

SolidWorks Flow Simulation 自动将计算域划分为很多切片,并进一步细分为长方体网格来产生计算网格。之后为了正确求解模型的集合体,网格单元会根据需要再次细分,生成与时间相关的 Navier-Stokes 方程组,并基于计算网格来求解该方程组。本模型各部分的间隙很小,设定最小缝隙尺寸为  $0.1 \text{ mm}$ ,最小壁面厚度为  $1 \text{ mm}$ ,全局在采用自动设置下,“初始网格的级别”设置为 6 级,因输种管的

厚度为 3 mm,则最小壁厚可以设置为 1 mm。对输种管部分进行网格细化,选择“高级狭长通道”,分配器部分设定了局部网格细化,以获得关键部位的更细小的网格。经网格划分后得到约 173 万个流体网格和 36 万个部分网格(即流体和固体边界的网格)。

4.3 仿真结果分析

4.3.1 残差图

图 8 为残差图。由图 8 可知,经过 1 651 次迭代计算,模型的连续性指数、x 轴速度、y 轴速度、z 轴速度、湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  的残差均小于 0.001,表明模型已经收敛。

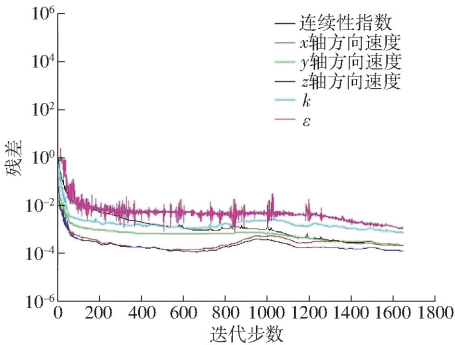


图 8 残差图  
Fig. 8 Distribution of residuals

4.3.2 速度分布云图

气流到达分配器后与分配器上端盖发生碰撞,压差使气流从各个输种管中流出。俯视以分配器中部切面为基准面生成速度流场分布图,如图 9 所示。输种管长度由 0.50 m 增大至 6.25 m,所对应的气流平均流速由 39.37 m/s 逐步减小至 25.54 m/s。输种管长度增加,气流平均流速减小,且当输种管长度越小时,气流平均流速减小越显著,输种管长度越大时,气流平均流速减小越平缓,与理论分析结果相吻合。

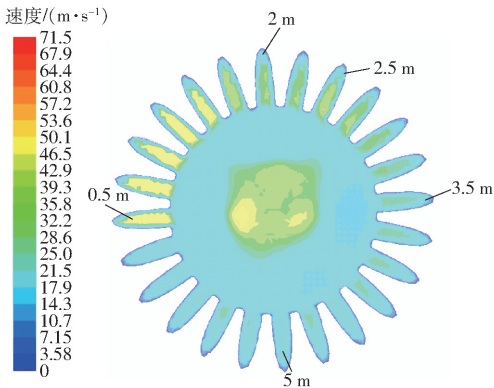


图 9 分配器和输种管气流速度流场分布  
Fig. 9 Velocity flow field distribution of distributor and seed tube

4.3.3 粒子示踪

为了更好地模拟小麦种子在气流输送系统中的分配效果,可用“粒子研究”进行预测。根据实际情

况,设置小麦种子的材料属性,小麦种子经集中式排种器进入气流输送系统,选择集中式排种器的入口表面作为起始面,设置显示 500 个点,在“粒子属性”中设置粒子直径为 3.82 mm,球度为 0.64,根据播种量计算得到“质量流量”为 0.245 kg/s,且种子在集中式排种器中随槽轮转动时,在种子排出位置的切向速度为 0.256 m/s。考虑到小麦种子的重力,设置重力方向为  $x$  轴正向,重力加速度为  $9.81\text{ m/s}^2$ 。

运行结果如图 10 所示。可直观地看到,输种管长度由 0.50 m 增大至 6.25 m,分配器分配到每行中所对应的种子数量逐步减少。输种管长度增加,输种管中所对应的种子数量减少,且当输种管长度越小时,种子数量减少趋势越显著,输种管长度越大时,种子数量减少趋势越平缓,当输种管长度超过 2.5 m 以后,排种量趋于稳定。根据粒子迹线研究统计各行粒子数,不同长度输种管中粒子数统计结果如表 2 所示。

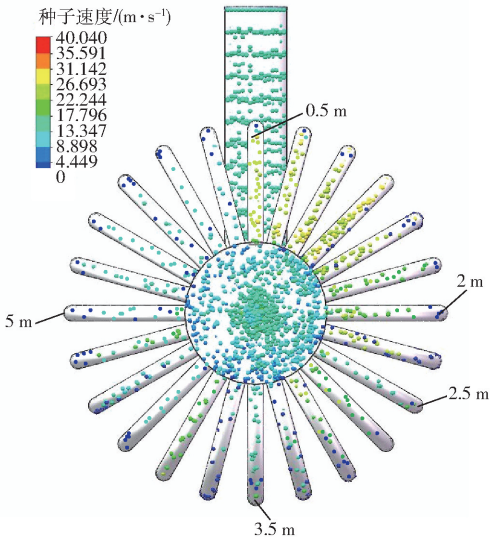


图 10 不同输种管长度所得排种量仿真值  
Fig. 10 Simulation value of application rate per row under different seed tubes lengths

表 2 不同输种管长度所对应的粒子数

Tab. 2 Simulation value of particles rate per row under different seed tubes lengths

| 输种管长度/m | 粒子数/个 | 输种管长度/m | 粒子数/个 |
|---------|-------|---------|-------|
| 0.50    | 41    | 3.50    | 18    |
| 0.75    | 34    | 3.75    | 18    |
| 1.00    | 30    | 4.00    | 17    |
| 1.25    | 27    | 4.25    | 17    |
| 1.50    | 26    | 4.50    | 17    |
| 1.75    | 24    | 4.75    | 17    |
| 2.00    | 23    | 5.00    | 16    |
| 2.25    | 22    | 5.25    | 16    |
| 2.50    | 19    | 5.50    | 16    |
| 2.75    | 19    | 5.75    | 15    |
| 3.00    | 19    | 6.00    | 15    |
| 3.25    | 19    | 6.25    | 15    |

5 试验结果与分析

5.1 试验结果

根据二次回归通用旋转组合设计进行 13 组试验,结果见表 3。

从表 3 可以看出,当输种管长度在 0.50 ~ 2.25 m 范围时,总排量稳定性变异系数为 1.57% ~

4.53%;输种管长度在 2.50 ~ 6.25 m 范围时,总排量稳定性变异系数为 0.39% ~ 1.28%。

输种管长度在 0.50 ~ 2.25 m 范围时,各行排量一致性变异系数范围为 13.12% ~ 27.54%,输种管长度在 2.50 ~ 6.25 m 范围时,各行排量一致性变异系数为 2.82% ~ 3.88%。

表 3 试验方案与结果  
Tab.3 Schemes and results of experiment

| 试验<br>序号 | 因素                   |                                          | 总排量稳定性变异系数 $y_1/\%$ |               | 各行排量一致性变异系数 $y_2/\%$ |               |
|----------|----------------------|------------------------------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------|
|          | 风机频率 $x_1/\text{Hz}$ | 播种量 $x_2/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ | 0.50 ~ 2.25 m       | 2.50 ~ 6.25 m | 0.50 ~ 2.25 m        | 2.50 ~ 6.25 m |
| 1        | 45.0                 | 150                                      | 1.89                | 0.71          | 17.63                | 3.58          |
| 2        | 41.5                 | 172                                      | 3.27                | 1.24          | 27.54                | 2.82          |
| 3        | 48.5                 | 172                                      | 3.72                | 1.28          | 13.12                | 3.81          |
| 4        | 40.0                 | 225                                      | 1.81                | 0.52          | 25.19                | 3.42          |
| 5        | 50.0                 | 225                                      | 3.43                | 1.27          | 15.89                | 3.74          |
| 6        | 41.5                 | 278                                      | 3.76                | 1.28          | 22.94                | 3.31          |
| 7        | 48.5                 | 278                                      | 1.57                | 0.39          | 14.08                | 3.20          |
| 8        | 45.0                 | 300                                      | 4.53                | 1.21          | 19.69                | 3.88          |
| 9        | 45.0                 | 225                                      | 1.79                | 0.56          | 15.82                | 3.22          |
| 10       | 45.0                 | 225                                      | 1.77                | 0.58          | 14.83                | 3.01          |
| 11       | 45.0                 | 225                                      | 1.81                | 0.55          | 14.60                | 2.89          |
| 12       | 45.0                 | 225                                      | 1.76                | 0.54          | 15.07                | 2.97          |
| 13       | 45.0                 | 225                                      | 1.74                | 0.62          | 15.14                | 3.11          |

5.2 输种管内气流流速计算结果

处理试验中在不同播量与风机频率下测量的气压数据,将采集到的数据代入式(1)、(2)中,得到不同长度输种管对应的管内平均流速,如图 11 所示。

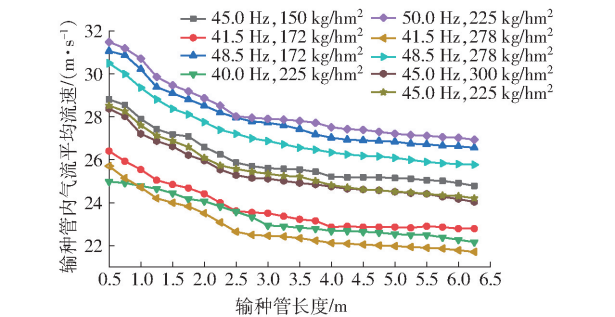


图 11 不同风机频率和播种量下管内气流平均流速试验曲线

Fig. 11 Variation curves of average flow velocity in pipe with different fan frequency and seeding amount

从图 11 可得出,在不同播种量与风机频率下,输种管内气流平均流速随着输种管长度增加,其平均流速逐渐减小。输种管长度小于 2.5 m 时,平均流速的变化速率明显大于输种管长度大于 2.5 m 时的变化速率,计算结果与分析结果相吻合。

5.3 各行排种量测试结果

在不同播种量与风机频率下,不同长度输种管

小麦平均排种量如图 12 所示。

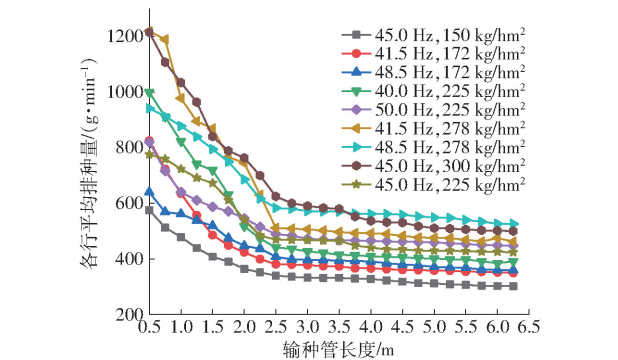


图 12 不同风机频率和播种量下各行平均排种量变化曲线  
Fig. 12 Variation curves of average application rate per row under different fan frequency and seeding amount

从图 12 可得出,小麦平均排种量随着输种管长度增加逐渐减少。输种管长度小于 2.5 m 时,排种量减少急剧,输种管长度大于 2.5 m 时排种量逐渐趋于平稳,由此可得输种管长度越短,对排种质量的影响越显著。

结合图 11 与图 12 可知,当输种管长度介于 2.50 ~ 6.25 m 之间时,管长对排种量的影响基本可以忽略,试验结果与分析结果相吻合;在本试验工况下,输种管起始段与完全发展段的分界点在 2.5 m 附近。结合图 11 趋势与第 3 节分析结果(输种管管

内气流平均流速的平方与输种管长度大致成反比)可知,当输种管达到一定长度,管内气流流速不足以带动种子运动进行送种,此时排种量无法满足排种要求。

## 6 结论

(1) 由输种管内气流流动分析得出,输种管长度的变化导致管内气流平均流速的改变,影响种子在管内的运动速度,从而影响种子排种量。

(2) 通过理论分析与台架试验得出,在不同播种量与风机频率下,当输种管长度小于2.5 m时,输种管内气流平均流速降低明显;当输种管长度

在2.50~6.25 m时,输种管内气流平均流速降低较为平缓,且在具有起始段和完全发展段的输种管内,气流平均流速的平方与输种管长度大致成反比。

(3) CFD仿真与排种性能台架试验结果表明:随着输种管长度的增加,小麦排种量减少;输种管越短,排种量减少越明显,排种性能不佳;当输种管长度在2.50~6.25 m时,各行排量一致性变异系数为2.82%~3.88%,总排量稳定性变异系数为0.39%~1.28%,满足相关标准要求,且对排种量的影响基本可以忽略,与分析结果相一致。设计时,建议输种管长度选择在2.50~6.25 m之间。

## 参 考 文 献

- [1] 常金丽,张晓辉. 2BQ-10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):136-141. CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic conveying system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- [2] 常金丽. 机械定量气流式集中排种系统的研究及其排种特性试验分析[D]. 泰安:山东农业大学,2007. CHANG Jinli. Research and experimental analysis of centralized pneumatic conveying system[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [3] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8-15. QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- [4] 彭传杰,张晓辉,侯存良,等. 气送式集排式排种器试验台的设计[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):32-36. PENG Chuanjie, ZHANG Xiaohui, HOU Cunliang, et al. Design on test-bed of centralized pneumatic seed metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization Research, 2017, 38(1): 32-36. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59-67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180307&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180307&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)
- [7] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学,2017. LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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 Science, 2014. (in Chinese)
- [10] DANIEL W K. Distribution tube for pneumatic applicator: US4575284[P]. 1989-03-11.
- [11] WANG Yu, HE Yaling, LEI Yonggang, et al. Heat transfer and hydrodynamics analysis of a novel dimpled tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1273-1281.
- [12] 秦军伟,张晓辉,陈彬,等. 集中式排种系统中分配器的设计及试验研究[J]. 农机化研究,2007,29(6):131-133. QIN Junwei, ZHANG Xiaohui, CHEN Bin, et al. Design and test research of allotter in centralized pneumatic conveying system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(6): 131-133. (in Chinese)
- [13] 秦军伟,张晓辉,姜忠爱. 集中式排种系统中分配器的设计计算[J]. 农业装备技术,2004,30(6):37-38. QIN Junwei, ZHANG Xiaohui, JIANG Zhongai. Design and calculation of the allotter in the central-type drill system[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2004, 30(6): 37-38. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 宋维春. 食品生产过程中气力输送的压力损失计算[J]. 琼州大学学报,2004,31(5):37-39. SONG Weichun. Calculation of pressure loss in pneumatic transmission for the process of food manufacture[J]. Journal of Qiongzhou University, 2004, 31(5): 37-39. (in Chinese)
- [16] 刘宝华,李振亮,李亚,等. 小麦粉多点供料气力输送系统的研究[J]. 粮油食品科技,2014,22(4):19-21.

- LIU Baohua, LI Zhenliang, LI Ya, et al. Research on the flour pneumatic conveying system with multipoint feeding[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014, 22(4): 19–21. (in Chinese)
- [17] 关佳斌, 裴旭明, 张琳荔. 粮食颗粒群密相变径气力输送的流动特性[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(2): 38–43.
- GUAN Jiabin, PEI Xuming, ZHANG Linli. Research on flow characteristics of pneumatic conveying in dense phase stepped pipeline of grain particles[J]. China Powder Science and Technology, 2018, 24(2): 38–43. (in Chinese)
- [18] 杨腾. 石灰石粉密相气送式中试研究[J]. 化工进展, 2003, 22(11): 1213–1216.
- YANG Teng. Pneumatic conveying research of limestone-powder in dense phase[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(11): 1213–1216. (in Chinese)
- [19] 郭晓镭, 龚欣, 代正华, 等. 竖直上升管中直密相气力输送压降特性[J]. 化工学报, 2007, 34(3): 602–607.
- GUO Xiaolei, GONG Xin, DAI Zhenghua, et al. Pressure drop characteristics of pneumatic dense phase transport in riser[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 34(3): 602–607. (in Chinese)
- [20] 杨俊. 浅析聚烯烃装置气流输送系统的设计思路[J]. 石油化工设计, 2007, 23(2): 38–39, 16.
- YANG Jun. Design ideas for pneumatic conveying plant in polyolefin plant[J]. Petrochemical Design, 2007, 23(2): 38–39, 16. (in Chinese)
- [21] 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [22] 吴珊, 刘彦辉, 张申海, 等. 供水管道压力调控对漏水量影响的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 26(3): 27–29.
- WU Shan, LIU Yanhui, ZHANG Shenhui, et al. Experimental study on influences of pressure regulation and control in water supply pipes on volume of water leakage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 26(3): 27–29. (in Chinese)
- [23] 孙一坚. 简明通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [24] 周乃君. 工程流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [25] 史皓男. 灌溉管网中变径管水力特性研究[J]. 水利规划与设计, 2016, 28(5): 66–68.
- SHI Haonan. Experimental study on influences of pressure regulation and control in water supply pipes on volume of water leakage[J]. Water Resources Planning and Design, 2016, 28(5): 66–68. (in Chinese)
- [26] DIMOTAKIS P E, LY E R C, PAPANTONIOU D Z. Viscous flow in pipes[M] // BRUCE R M. Fundamentals of fluid mechanics. Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, USA, 2009: 383–460.
- [27] 李文科. 工程流体力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007.
- [28] 陈超祥, 胡其登. Solidworks Flow Simulation 教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [29] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

#### (上接第 54 页)

- [21] 李复辉, 刁培松, 杜瑞成, 等. 内嵌勺盘式舵轮免耕施肥播种机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 16–23.
- LI Fuhui, DIAO Peisong, DU Ruicheng, et al. Development and test of no-tillage fertilization planter with embedded spoon disc helm wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 16–23. (in Chinese)
- [22] 谢永春, 张平良, 郭天文, 等. 覆膜穴播方式对旱地小麦田土壤硝态氮和铵态氮积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 836–843.
- XIE Yongchun, ZHANG Pingliang, GUO Tianwen, et al. Effect of film-mulching on nitrate and ammonium nitrogen in dryland wheat fields[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 836–843. (in Chinese)
- [23] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 1–9.
- ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 1–9. (in Chinese)
- [24] 陈学庚, 卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35–38.
- CHEN Xuegang, LU Yongtao. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35–38. (in Chinese)
- [25] 王希英, 唐汉, 王金武, 等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82–90.
- WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161111&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161111&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.011. (in Chinese)
- [26] 耿端阳, 张明源, 何珂, 等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 68–76.
- GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 68–76. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180108&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180108&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.008. (in Chinese)
- [27] 潘典进, 周江霞, 罗传贵, 等. 油菜精量直播栽培几个技术问题[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 784–787.
- [28] 莫嵩山. 油菜机械覆膜穴播技术要点[J]. 农业开发与装备, 2019(4): 209–214.
- [29] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [30] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.