

玉米干储一体仓气流场仿真分析与优化

朱广飞¹ 白岩松² 王松林² 蒋俊强³ 吴帅强^{4,5} 谢奇珍^{1,5}

(1. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 辽宁工业大学机械能与自动化学院, 锦州 121001;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 4. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471000;
5. 农业农村部农产品产地初加工重点实验室, 北京 100121)

摘要: 为提高玉米干储一体仓中气流场均匀性,采用计算流体力学和正交试验相结合的方法对玉米干储一体仓内部气流场分布进行数值仿真和参数优化。通过单因素试验,研究水平进风管位置、竖向通风笼直径、单位通风量3个因素对玉米干储一体仓通风均匀性的影响规律,并通过系列数值仿真及正交试验对干储一体仓通风结构及参数进行优化设计。结果表明:干储一体仓内气流的平均速度,受不同水平进风管位置的影响不明显,随着竖向通风笼直径的增加呈逐渐降低趋势,而随着单位通风量的增加持续增长。速度不均匀系数随水平进风管位置从上到下变动、竖向通风笼直径增加和单位通风量增加分别呈现先减小后增大、先急剧后缓慢降低和整体增加的趋势。其中,竖向通风笼直径对干储一体仓内部流场均匀性的影响最为显著,其次是水平进风管位置和单位通风量。优化后的干储一体仓通风结构及参数的组合为水平进风管位置-0.34 m、竖向通风笼直径400 mm、单位通风量 $20\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$,此方案下干储一体仓内部流场速度不均匀系数综合加权评分值与初始方案相比提高了77.4%,表明了优化方案的可行性。

关键词: 玉米; 干储一体; 气流场均匀性; 正交试验; 数值仿真

中图分类号: S229+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0381-10

Simulation Analysis and Optimization of Airflow Field in Integrated Silo for Corn Drying and Storage

ZHU Guangfei¹ BAI Yansong² WANG Songlin² JIANG Junqiang³ WU Shuaiqiang^{4,5} XIE Qizhen^{1,5}

(1. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
4. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China
5. Key Laboratory of Agro-Products Primary Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China)

Abstract: In order to improve the uniformity of airflow field in integrated silo for corn drying and storage, the computational fluid dynamics and orthogonal test method was used in numerical simulation and parameter optimization of airflow field distribution in integrated silo for corn drying and storage. By single factor experiment design, the influence of three factors, including the position of horizontal air inlet pipe, the diameter of vertical ventilation cage, and the unit ventilation volume on the ventilation uniformity of the integrated silo for corn drying and storage was studied. And through a series of numerical simulations and orthogonal experiments, the ventilation structure and parameters of the integrated silo for corn drying and storage were optimized and designed. Based on the analysis and comparison of the data and velocity cloud images obtained from the single factor experiment, it was found that the average velocity of air flow in the integrated silo for corn drying and storage was not obviously affected by the position of air inlet pipe at different levels, which was decreased gradually with the increase of diameter of ventilation cage and increased with the increase of unit ventilation volume. And the velocity non-uniformity coefficient was decreased first and then increased with the position of air inlet pipe from top to bottom, and first sharply and then slowly decreased with the increase of ventilation cage diameter, however, the overall trend of it

收稿日期: 2023-05-30 修回日期: 2023-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(32102054)和农业农村部规划设计研究院农规创新科研项目(SP202105、QD202108)

作者简介: 朱广飞(1988—),男,工程师,博士,主要从事农产品加工、贮藏技术与装备研究,E-mail: zhuguangfei@aaape.org.cn

通信作者: 谢奇珍(1965—),男,研究员,主要从事农产品加工、贮藏技术与装备研究,E-mail: xqizhen@sina.com

was increased with the increase of unit ventilation volume. According to the results of single factor experiment, it was preliminarily determined that the position range of air inlet pipe was $-0.34 \sim 0.34$ mm, the diameter range of ventilation cage was $200 \sim 400$ mm, and the range of unit ventilation volume was $20 \sim 40 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$. Then the orthogonal experiment of $L_9(3^4)$ was designed and carried out to analyze and optimize the parameters affecting the flow field uniformity of integrated silo for corn drying and storage. Based on the comparison of the comprehensive weighted score of airflow velocity non-uniformity coefficient and velocity cloud image as well as the range analysis under different combinations of the orthogonal experiment, it was concluded that the diameter of ventilation cage was the most significant influence factor on the airflow field uniformity of integrated silo for corn drying and storage, followed by the position of horizontal air inlet pipe and the unit ventilation volume. The optimized ventilation structure and parameters of the integrated silo for corn drying and storage were as follows: the position of horizontal air inlet pipe was -0.34 m, the diameter of vertical ventilation cage was 400 mm, and the unit ventilation volume was $20 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{t})$. Under this scheme, the comprehensive weighted score of velocity non-uniformity coefficient of the integrated silo for corn drying and storage was 77.4% higher than that of the initial plan, indicating the feasibility and practical application value of the optimized scheme. The research results can provide theoretical guidance and technical support for the ventilation structure and parameter optimization design of the integrated silo for corn drying and storage.

Key words: corn; integrated drying and storage; airflow field uniformity; orthogonal experiment; numerical simulation

0 引言

玉米是我国种植面积最大的粮食作物,2022年全国产量 $2.77 \times 10^{11} \text{ kg}^{[1]}$ 。然而,玉米作为晚秋作物,收获时玉米含水率普遍较高,一般为 $25\% \sim 30\%$,有时甚至高达 35% 以上,需要进行干燥处理,防止霉变,延长储存期^[2]。据有关报道,我国农村储粮约占当年粮食产量的 50% ,由于烘储装备总体不足等原因,粮食产后环节损失比例较高,每年损失粮食约 $2 \times 10^{10} \text{ kg}$,影响了粮食有效供给和农民增收^[3-4]。为解决粮食产地损失问题,近年来各级政府部门出台相关政策大力推广粮食烘储设施装备,同时国内科研机构与企业一直不断探索研发新技术与装备^[5]。针对粮食干燥机周年运行时间短、干燥作业成本高、粮食产后现代化储藏设施缺乏、干燥成套设施设备占地面积大、建设用地难以审批等现实问题,围绕粮食干燥和储藏关键环节进行技术创新,将干燥与储藏相结合,推出了粮食干燥储藏一体化设备^[6],在同步解决粮食干燥与储藏现有问题方面取得新进展。文献[7]研究表明,采用智能烘储一体化设备烘储小麦比传统晾晒储藏方式更有效地控制真菌和毒素的生长与累积。文献[8]对研制的农户用储藏加工一体机进行试验,结果表明,使用该一体机加工储藏的粮食符合食用要求。文献[9]关于高含水率玉米旋转通风仓降水试验的研究表明,玉米含水率可在 18 d 内由 27.12% 降至 14.60% ,且降水通风的单位能耗较低。

研究表明,通风策略与流场均匀性是影响粮食通风储藏的两个重要因素^[10-11]。文献[12]关于储

粮仓内通风干燥过程的研究表明,通风处理能够使仓内温度梯度小于 3°C ,同时防止进风口的物料过度干燥或受潮。文献[13]基于多孔介质中的传热传质理论,对6种不同形式的通风笼进行了数值模拟,结果表明粮堆内部速度场随粮堆高度的增加而趋于均匀。文献[14]对高大平房仓横向与竖向通风方式进行了比较,结果表明横向通风方式下粮堆内部温度和水分布均匀性更好。课题组前期研究设计了一种自然通风与机械通风相结合的一体化智能储粮仓^[15],为优化一体仓的结构与运行参数,本文以玉米为研究对象,在初始一体仓方案的基础上,利用CFD技术研究装粮条件下仓内气流分布情况,探寻影响其分布的因素,并利用单因素分析与正交试验方法^[16],对通风结构、通风参数进行仿真优化设计,探究最佳参数组合方式,以期后续干储一体仓优化与高效应用提供支持。

1 模型建立

1.1 物理模型及网格划分

本文所研究的玉米干储一体仓结构以立筒仓为基础,主要由储粮系统、通风系统和控制系统组成。如图1所示,储粮系统包括锥顶、仓壁和锥底,其中仓壁和锥底开孔,开孔率约 35% 。仓内储粮区域可划分为3部分,包括上端锥顶段的空气区、中间仓壁段的圆柱装粮区以及下端锥底段的装粮区。通风系统由风机、水平进风管以及竖向通风笼组成,水平进风管为圆管(不开孔),一端穿过仓壁与风机连接,另一端与竖向通风笼连接。竖向通风笼由一段圆管与2个端盖组合而成,表

面开孔,开孔率约为 35%,竖向通风笼圆管下端与仓壁下端处于同一水平位置。具体结构参数如表 1 所示。

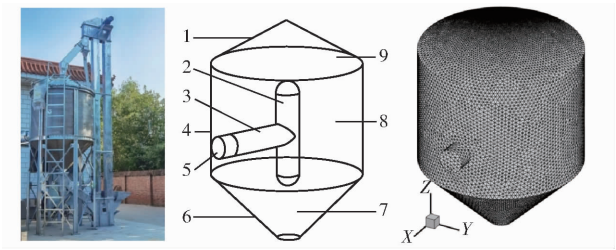


图 1 干储一体仓实物图及三维模型

Fig. 1 Image and three-dimensional model of integrated silo for drying and storage

1. 锥顶 2. 竖向通风笼 3. 水平进风管 4. 仓壁 5. 风机进风口 6. 锥底 7. 装粮锥底区 8. 装粮圆柱区 9. 空气锥顶区

表 1 干储一体仓主要参数

Tab.1 Parameters of integrated silo for drying and storage			
and storage		mm	
参数	数值	参数	数值
仓壁高	1 500	锥顶高	894
仓壁直径	2 000	进风口直径	300
锥底高	850		

为了有效进行模拟分析,对一体仓结构以及仓内通风系统进行了简化。建立一体仓三维模型,设置内部流场区域,采用 Mesh 对模型进行非结构化网格划分,如图 1 所示。

1.2 边界条件设置

一体仓进风路径是由风机将气流从风机进风口通过水平进风管送入竖向通风笼,进而通过通风笼在粮层中扩散,最后从一体仓仓壁及锥底的开孔处排出。进风口设置为速度入口边界条件,出风口由于其与外界直接接触,所以选择为压力出口边界条件,压强为标准大气压。水平进风管等均设置为壁面,壁面无滑移,且不考虑与外界传热影响。采用 Fluent 中的压力-速度耦合求解器进行稳态计算,求解算法为 Coupled 算法,湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 方程。

1.3 数学模型及参数

1.3.1 假设条件

根据一体仓的结构特点及通风特性,为了简化计算,对通风过程中的一些物理量作如下假设:一体仓粮堆为各向同性的连续介质,孔隙内气流均匀流动;本模拟不涉及能量交换和组分的转移;研究的流体介质为气体,视为理想气体、不可压缩、定常流动;任何流动情况都满足质量、能量和动量三大守恒定律。

1.3.2 数学模型

对于不可压缩流体流动,采用 N-S 方程描述其运动^[17],选用标准 $k-\varepsilon$ 方程计算流场。

连续性方程为

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\nabla \cdot (\rho v v) = \mu_{\text{eff}} \nabla^2 v - \nabla p - \rho g \tag{2}$$

标准 $k-\varepsilon$ 方程为

$$\nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \cdot \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \cdot \nabla \varepsilon \right) + (C_1 G_k \varepsilon - C_2 \rho \varepsilon^2) / k \tag{4}$$

式中 v ——气体流速, m/s
 ρ ——气体密度, kg/m³
 μ_{eff} ——气体有效黏度, Pa·s
 g ——重力加速度, m/s²
 k ——湍流动能, J
 p ——压力, Pa
 G_k ——平均速度梯度产生的湍动能, kg/(m²·s²)
 ε ——动能耗散率
 σ_k ——湍动能的湍流普朗克数, 取 1.0^[18]
 σ_ε ——耗散率的湍流普朗克数, 取 1.3^[19]
 C_1, C_2 ——经验常数, 分别取 1.44、1.92^[20]

1.3.3 多孔介质模型

因玉米颗粒之间存在孔隙,气体在孔隙间流动,故可将其简化为均匀且各向同性的多孔介质^[21]。多孔介质的模拟是在标准流体流动方程中加入了动量方程阻力源项,阻力源项由黏性损失项和惯性损失项两部分组成,需要黏性阻力系数与惯性阻力系数等参数来确定,即

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \tag{5}$$

式中 S_i —— i 向动量方程阻力源项

D ——黏性阻力系数

C ——惯性阻力系数

μ ——流体黏度, N·s/m²

v_j —— j 向流速, m/s

对于简单均值多孔介质情况^[22],可将式(5)简化为

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_j + C \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \tag{6}$$

式中 α ——多孔介质的渗透率

D 与 C 计算公式分别为

$$D = \frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\varphi)^2}{D_p^2 \varphi^3} \tag{7}$$

$$C=\frac{3.5(1-\varphi)}{D_p\varphi^3}\tag{8}$$

式中 D_p ——多孔介质的等效直径,取 8.32 mm
 φ ——玉米孔隙率,取 0.398

由此计算得出黏性阻力系数 D 为 $1.241\times 10^7\text{ m}^{-2}$,惯性阻力系数 C 为 $4\,005\text{ m}^{-1}$ 。

1.4 评价指标

1.4.1 气流分布云图

在 CFD 仿真模拟中,速度、温度、压力等的分布云图是其最直观的数据展现方式^[23-24]。本文主要以速度云图的形式来描述仿真结果^[25-26]。

1.4.2 速度不均匀系数

进口速度以及粮堆不同区域会引起气流轨迹的变化,导致粮仓内部压力、速度分布各不相同,为定量分析一体仓内部流场均匀性,需建立评价指标。根据一体仓结构特点,按图 2 所示,在仓内沿轴向取 4 个不同高度截面、沿径向取 3 个半径不同的圆柱面进行评定,设置 40 个监测点来进行数据分析。参考 GB/T 40150—2021^[27],在数据分析中引入速度不均匀系数。不均匀系数越大,说明内部流场越不均匀,反之,则代表内部流场均匀性越好,公式为

$$C_v=\frac{S_v}{\bar{V}}\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(V_i-\bar{V})^2}\tag{9}$$

式中 C_v ——速度不均匀系数
 S_v ——监测点风速的标准差,m/s
 $\bar{V}$ ——监测点风速的平均值,m/s
 V_i ——各监测点风速,m/s
 n ——监测点数量

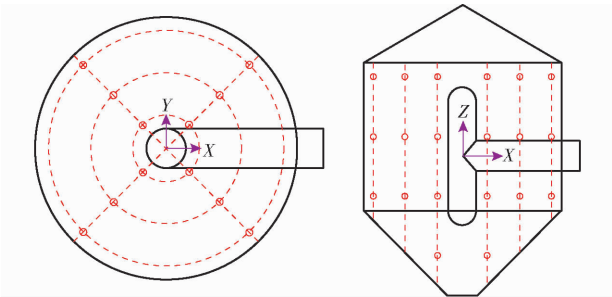


图 2 监测点位置
Fig. 2 Location of measuring points

1.4.3 综合评价指标

由于通风过程中不同径向圆柱面之间存在速度梯度,导致对流场均匀性的研究难以有效分析,因此本文采用综合加权评分法,将多层圆柱面上的试验数据转化为单指标的试验结果,进行优化分析^[28-29]。

(1) 确定各项指标的权值。在进行流场分析

时,速度不均匀系数是考核流场分布均匀性的重要指标。一体仓内部不同径向圆柱面粮层区域受通风影响的程度不同,导致其所占权重也不同。结合主观赋权法和客观赋权法^[30],确定半径 r 为 0.30、0.575、0.90 m 圆柱面粮层的速度不均匀系数权重 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 0.3、0.4、0.3。

(2) 统一指标数量级和量纲,即

$$Y_{I,J}^*=\frac{100(Y_{I,\max}-Y_{I,J})}{Y_{I,\max}-Y_{I,\min}}\tag{10}$$

式中 $Y_{I,J}^*$ ——第 I 个指标 J 号仿真试验值的正向归一化值

$Y_{I,J}$ ——第 I 个指标 J 号仿真试验指标值

$Y_{I,\max}$ ——第 I 个指标的最大值

$Y_{I,\min}$ ——第 I 个指标的最小值

(3) 计算综合加权评分。把各项指标的加权评分相加即为综合加权评分值,公式为

$$Y_J^{**}=\sum_{I=1}^3W_IY_{I,J}^*\tag{11}$$

式中 Y_J^{**} ——第 J 号仿真试验的综合加权评分值
 W_I ——第 I 个指标的权重

2 一体仓流场模拟结果与分析

2.1 网格无关性及可靠性验证

2.1.1 网格无关性

网格数量影响计算精度以及收敛情况,网格数量过少,通常会导致获得的结果不够精确,或者使结果难以收敛。但网格数量越大,计算量就越大,对计算机硬件要求就越高。因此,需要合理确定网格数量。将一体仓模型网格分别划分为 7 万、15 万、30 万、67 万、90 万 5 组,通过不同网格数量与出口压力、速度的关系来表征网格数量对气流场模拟结果的影响。由图 3 可知,当网格数量增加到 67 万个后,出口压力与速度趋于平缓,可以满足仿真要求。因此,本文采用数量为 67 万的网格密度。

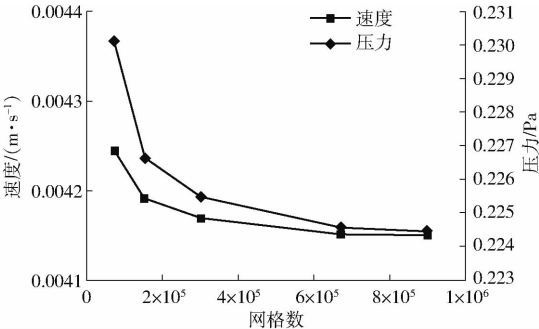


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

2.1.2 模拟可靠性

为验证一体仓 CFD 流场模型以及仿真结果的

正确性和可靠性,本文采用近似模型方法^[31-32],按照 1:6 的比例制作了一体仓小型试验台,如图 4 所示。由于干储一体仓采用缓速通风,粮堆内部风速较小,大仓难以准确测量。因此,根据实际测试需要,将小型试验台入口单位通风量适当提高,设为 $180\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$,并按照图 2 所示的干储一体仓监测点示意图,建立与干储一体仓内部半径 r 为 0.30、0.575、0.90 m 3 个同轴圆柱面上位置相对应的小型试验台监测点(40 个),利用风速仪(VT-110 型便携式热线风速仪,KIMO 公司)测量各点风速,并与模拟结果进行对比分析,如图 5 所示。



图 4 小型试验台

Fig.4 Test platform of small silo

由图 5 可知,在半径 r 为 0.30、0.575、0.90 m

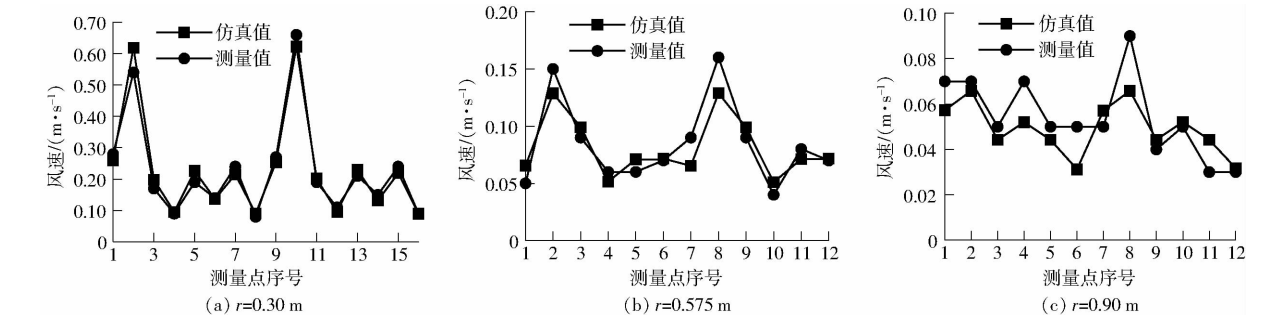


图 5 各圆柱面监测点风速测量值与仿真值对比

Fig.5 Comparisons of airflow velocity simulation value and measured value for measuring points in cylindrical surfaces

同心圆柱面上的各监测点测量值与仿真值存在一定的误差,但是总体变化趋势基本一致。经计算得到不同半径同心圆柱面上测量值与仿真值的平均相对误差分别约为 9.5%、15.6%、18.3%,总体相对误差约为 14%,表明 Fluent 仿真所选取的求解器模型及其边界条件等符合实际情况^[11]。由此认为,在实际大仓模型上所进行的 CFD 模拟同样具有可靠性,可用于后续大仓仿真方案的优化分析。

2.2 初始一体仓方案流场分析

对初始方案(水平进风管位置 0 m、竖向通风笼直径 300 mm、单位通风量 $20\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$)进行仿真,截取 ZX 处平面的速度云图和气流迹线图^[33],观察气体进入一体仓后在竖向通风笼以及粮层多孔介质内的分布情况,如图 6 所示,空气从水平进风管进入竖向通风笼后,在竖向通风笼处向上、下两个方向散开,并在上、下两侧通风区域内逆水平风向形成两处较大的涡旋。主要原因是由于水平进风口位于竖向通风笼对称中心位置,且竖向通风笼直径有限,进入竖向通风笼的气流由于粮层阻力的作用,无法直接穿透粮层,而是向上、下两端分流,并形成对称的两个回流涡旋,需采取措施进行优化。

按照上述监测点方案导出数据,计算各个同心圆柱面的平均速度、标准差、速度不均匀系数以及将 3 个同心圆柱面不均匀系数进行综合评分,具体数值见表 2。气流进入通风系统后由于粮层阻力影

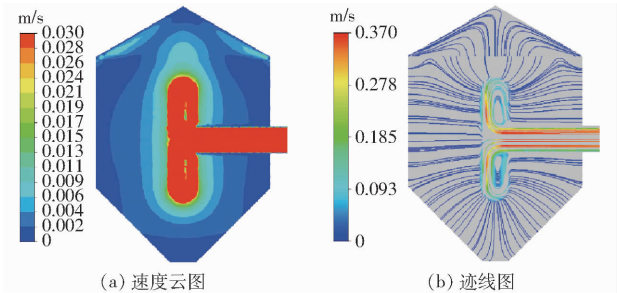


图 6 气流速度云图与迹线图

Fig.6 Velocity cloud image and trace diagram of airflow

表 2 各圆柱面监测点数据

Tab.2 Data for measuring points in cylindrical surfaces

半径/ m	平均速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	标准偏差/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度不均 匀系数	速度不均匀 系数综合加权 评分值
0.30	0.007 1	0.002 8	0.405 0	51.712
0.575	0.002 8	0.000 6	0.227 1	
0.90	0.001 5	0.000 2	0.160 1	

响,气流速度呈下降趋势,越靠近出口风速越低;速度不均匀系数由内向外呈降低趋势,流场整体均匀性较差。

2.3 不同因素对速度场的影响

2.3.1 水平进风管位置

水平进风管位置是影响一体仓内部流场均匀性的重要因素之一。在竖向通风笼直径 300 mm、单位通风量 $30\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$ 条件下,设置水平进风管中心位

置分别为 0.55、0.34、0、-0.34、-0.55 m(Z 轴坐标值,以坐标原点为 0 m,见图 2)进行单因素试验,并选取 ZX 面进行分析。

表 3 为不同水平进风管位置对一体仓内部流场速度不均匀系数的影响,可以看出,不同位置进风管对一体仓内部气流平均速度的影响不大,但对速度不均匀系数的影响较明显。各梯度速度不均匀系数随水平进风管位置从上到下呈先减小后增大趋势,当进风管位置为 -0.34 m 时,速度不均匀系数最小,为 0.261 0。由图 7 可以看出,气流经水平进风管进入竖向通风笼,再由通风笼分配进入粮层,导致紧贴进风管壁面的粮层容易出现低速区,但厚度不大。水平进风管位于 0.55 m 时,气流由竖向通风笼分配后,向上运动的气流与锥顶碰撞后,向两侧进行扩散,在进风管上方,不同速度区域相互作用,出现涡旋,产生低速区,影响粮

层气流速度分布均匀性。水平进风管位于 -0.55 m 时,气流由竖向通风笼分配后,由于粮层阻力的影响,运动至锥顶处的气流速度较低,产生次低速区,同样影响速度均匀性。而水平进风管位置为 0.34、0、-0.34 m 时,气流低速区较另外两种模型的气流低速区小,速度更加均匀。通过对一体仓内部流场均匀性计算以及云图的分析,初步确定水平进风管位置范围为 -0.34 ~ 0.34 m。

表 3 水平进风管位置对速度场的影响
Tab.3 Effects of position of horizontal air inlet pipe on airflow velocity field

参数	水平进风管位置/m				
	0.55	0.34	0	-0.34	-0.55
平均速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.006 2	0.006 2	0.006 2	0.006 1	0.006 1
速度不均匀系数	0.266 0	0.265 4	0.261 3	0.261 0	0.266 1

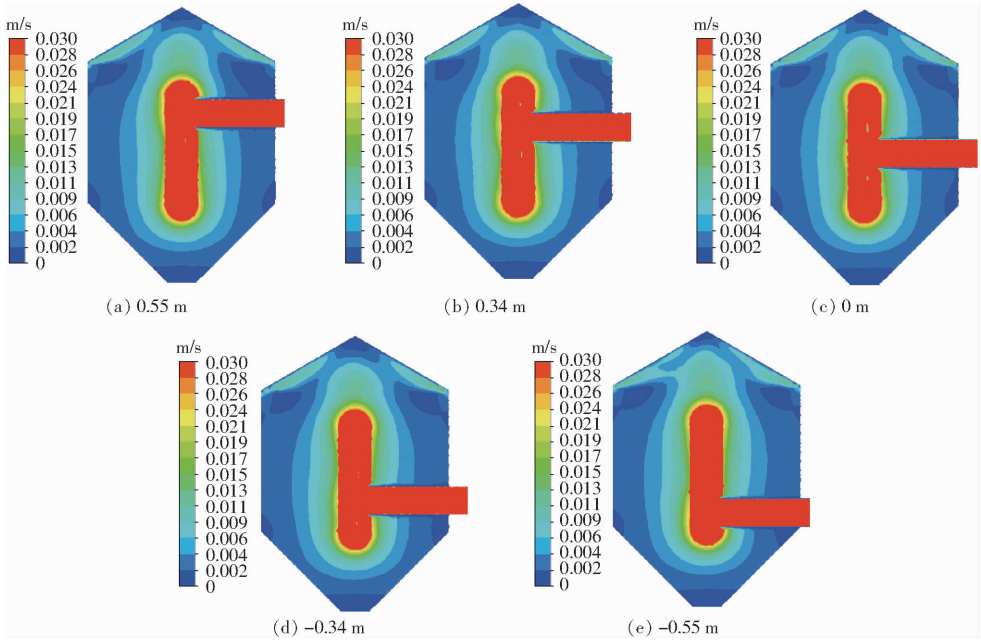


图 7 不同位置水平进风管下 ZX 平面速度云图

Fig.7 Velocity cloud images at ZX plan of horizontal air inlet pipe with different positions

2.3.2 竖向通风笼直径

竖向通风笼直径会影响粮堆相同通风量的风速,进而可能影响一体仓内部气流均匀分布。根据设计实际,本文将一体仓内部竖向通风笼直径分别设为 100、200、300、400、500 mm,单位通风量定为 $30\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{t})$,水平进风管位置为 0 m,进行仿真计算,获得一体仓内部平均速度、速度不均匀系数变化曲线如图 8 所示。可知,随着竖向通风笼直径的增加,气流在竖向通风笼内部运动后进入粮层的运动轨迹变长,平均速度呈逐渐降低趋势,速度不均匀系数呈先急剧后缓慢降低的趋势。这是因为随着通风笼直径的增加,其表面积随之增加,参与分配的气流

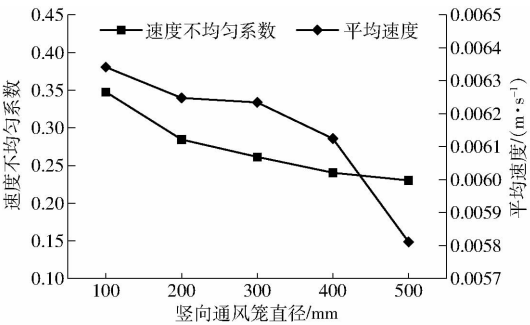


图 8 竖向通风笼直径对速度不均匀系数与平均速度的影响

Fig.8 Influence of diameter of vertical ventilation cage on velocity non-uniformity coefficient and average velocity

逐渐增多,对气流的分配能力也逐渐增强。竖向通风笼直径为 100 mm 时,其仓内速度不均匀系数较大,整仓流场均匀性较差,随直径增加,效果好转;竖向通风笼直径达到 400 mm 以后,平均速度下降趋势变得更加明显,而速度不均匀系数下降的趋势开始变缓,表明竖向通风笼直径增加导致流场均匀性改善的边际效应在减弱。这是因为随着通风笼直径持续增加,气流在竖向通风笼内部产生涡旋,会造成竖向通风笼分配气流速度落差变大。因此,确定竖向通风笼直径范围为 200 ~ 400 mm。

2.3.3 单位通风量

为分析一体仓不同通风量对仓内流场均匀性的影响,根据 LS/T 1202—2002^[34]对粮仓通风量的规定,将单位通风量分别设为 10、20、30、40、50 m³/(h·t)进行仿真,设定竖向通风笼直径为 300 mm,水平进风管位置为 0 m。获得一体仓内部平均速度、速度不均匀系数变化曲线如图 9 所示。

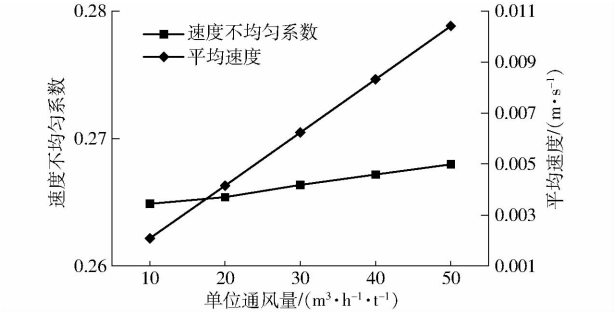


图 9 单位通风量对速度不均匀系数与平均速度的影响
Fig.9 Influence of unit ventilation volume on velocity non-uniformity coefficient and average velocity

由图 9 可知,随着单位通风量的增加,一体仓内气流平均速度呈持续增加趋势,速度不均匀系数整

体呈增加趋势,在单位通风量达到 20 m³/(h·t)以后增加趋势更加显著,流场均匀性变差。单位通风量过低时,气流受粮层阻力影响,穿透粮层能力变弱,对仓内气流分配均匀的效果未必理想;随着单位通风量的增加,竖向通风笼对气流相对分配能力也随之减弱,导致仓内气流速度过快,涡旋增多,造成通风笼分配气流速度落差过大,故仓内速度不均匀系数增加,流场均匀性变差。综合考虑,确定单位通风量范围为 20 ~ 40 m³/(h·t)。

2.4 一体仓通风结构及参数优化设计

2.4.1 试验方案设计

由上述单因素仿真结果可知,影响一体仓流场分布均匀性的主要因素为水平进风管位置、竖向通风笼直径和单位通风量。采用正交试验分析这些因素的参数组合对一体仓流场分布均匀性的影响^[35]。根据单因素仿真结果确定试验因素变化范围为水平进风管位置 -0.34 ~ 0.34 m、竖向通风笼直径 200 ~ 400 mm、单位通风量 20 ~ 40 m³/(h·t)。根据选定的试验因素,确定如表 4 所示的因素和水平表,选用 L₉(3⁴)正交表进行仿真计算。仿真方案及结果见表 5(表中 A、B、C 表示水平进风管位置、竖向通风笼直径、单位通风量水平值)。

表 4 正交试验因素水平			
Tab.4 Factors and levels of orthogonal experiment			
水平	因素		
	水平进风管 位置/m	竖向通风笼 直径/mm	单位通风量/ (m ³ ·(h·t) ⁻¹)
1	0.34	200	20
2	0	300	30
3	-0.34	400	40

表 5 试验设计及结果							
Tab.5 Experimental design and results							
试验序号	A	B	C	速度不均匀系数			综合加权 评分值
				r = 0.30 m	r = 0.575 m	r = 0.90 m	
1	1	1	1	0.456 0	0.244 3	0.174 5	2.615
2	1	2	2	0.424 0	0.230 0	0.154 2	41.361
3	1	3	3	0.405 7	0.215 9	0.141 6	79.963
4	2	1	3	0.447 4	0.246 9	0.171 8	5.508
5	2	2	1	0.405 0	0.227 1	0.160 1	51.712
6	2	3	2	0.371 8	0.213 1	0.145 3	84.663
7	3	1	2	0.433 3	0.237 0	0.170 1	15.312
8	3	2	3	0.404 5	0.226 6	0.162 4	50.430
9	3	3	1	0.372 4	0.208 3	0.150 5	91.701
K ₁	129.940	29.436	146.029				
K ₂	148.883	149.504	141.336				
K ₃	163.444	263.328	135.902				
k ₁	43.313 6	9.812	48.676				
k ₂	49.627 9	49.834	47.112				
k ₃	54.481 4	87.776	45.300				
R	11.167 8	77.964	3.375 0				
排序	2	1	3				

2.4.2 优化方案流场分析

通过上述数学模型与边界条件以及正交试验参数的确定,实现了一体仓通风过程的数值仿真,得到一体仓内部的速度分布与各监测点速度数据。为了比较方案优化前后的变化,取 ZX 截面云图进行分析。各仿真方案仓内部气流速度分布如图 10 所示,

与原始一体仓方案(第 5 组)相比,各方案在 ZX 平面上的速度云图均有不同程度变化。其中,第 3、6、9 组速度云图表明,与初始方案相比,其速度云图中的各个颜色面积相差不大,且颜色过渡平缓,说明其内部流场分布较为均匀,初步分析是在于 3 组试验均有因素 B_3 (竖向通风笼直径)的作用,且其影响较大。

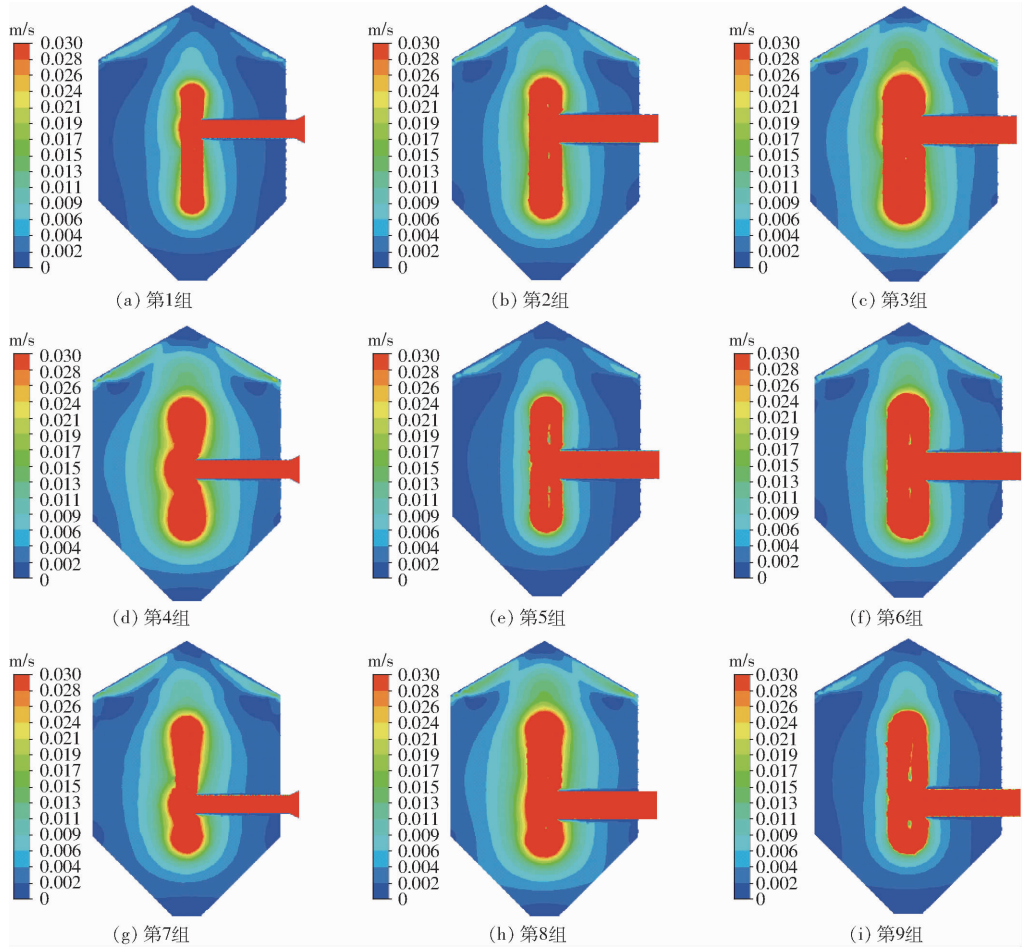


图 10 正交试验 9 组方案速度云图

Fig. 10 Velocity cloud images of nine schemes in orthogonal experiment

对一体仓内部流场速度不均匀系数综合加权评分结果进行分析,得出极差分析结果,如表 5 所示。竖向通风笼直径对于一体仓内部流场均匀性影响最大,水平进风管位置次之,单位通风量影响效果最小。根据分析结果,得出速度不均匀系数综合加权评分值主效应图如图 11 所示。可以看出,前述 3 因

素水平速度不均匀系数综合加权评分值最优的试验方案为 $A_3B_3C_1$,即正交试验中第 9 组,此方案下一体仓内部流场速度不均匀系数综合加权评分值为 91.701,与初始方案相比提高了 77.4%。

3 结论

(1)对初始一体仓方案内部气流场的仿真分析结果表明,气体进入仓内以后,在竖向通风笼的作用下,向上、下两个方向散开,从而在上、下两侧通风区域内逆水平风向形成两处较大涡旋,影响一体仓内部流场均匀性,速度不均匀系数综合加权评分值为 51.712。

(2)研究了不同水平进风管位置、竖向通风笼直径以及单位通风量条件下,一体仓内部气流场的分布规律。一体仓内气流速度受不同水平进风管位

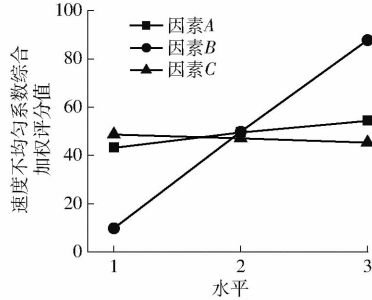


图 11 均值主效应图

Fig. 11 Main effects plot for mean value

置的影响不明显,随着竖向通风笼直径的增加呈逐渐降低趋势,而随着单位通风量的增加持续增长。速度不均匀系数随水平进风管位置从上到下变动呈现先减小后增大的趋势,随着竖向通风笼直径的增加呈先急剧后缓慢降低的趋势,随单位通风量的增加整体呈增加趋势。确定水平进风管位置范围为 $-0.34 \sim 0.34$ m、竖向通风笼直径范围为 $200 \sim 400$ mm、单位通风量范围为 $20 \sim 40$ m³/(h·t)。

(3)对影响一体仓内部气流场分布的因素及选

取的水平进行正交优化试验,以综合加权评分值为指标,影响气流场均匀性的主次因素从大到小依次为竖向通风笼直径、水平进风管位置、单位通风量。得到一体仓结构及参数的最优组合:水平进风管位置 -0.34 m、竖向通风笼直径 400 mm、单位通风量 20 m³/(h·t),此方案下一体仓内部流场速度不均匀系数综合加权评分值与初始方案相比提高了 77.4% ,即优化后的一体仓内部气流场均匀性得到有效改善,表明了优化方案的可行性和实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 年度数据[R/OL]. (2023-07-01). <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] KARYADI J N W, SUGANDA E E, HIKAM F, et al. Characteristic of corn drying (*Zea Mays* L) using recirculated column dryer[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 355(1): 012047.
- [3] 肖乐,李家馨,葛亮,等. 面向粮情决策支持的知识图谱构建研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(10): 29-37.
XIAO Le, LI Jiaxin, GE Liang, et al. Knowledge graph construction for decision support of grain situation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(10): 29-37. (in Chinese)
- [4] QIAO F B. The impact of mechanization on crop production in China[J]. Applied Economics, 2023, 55(15): 1728-1741.
- [5] 农业农村部,国家发展改革委,财政部,等. 关于加快粮食产地烘干能力建设的意见:农机发[2023]3号[A/OL]. (2023-05-11)[2023-05-11]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/NYJXHGLS/202305/t20230511_6427377.htm.
- [6] 王松林,白岩松,朱广飞,等. 粮食产地干燥储藏一体化技术研究进展[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(7): 14-17.
WANG Songlin, BAI Yansong, ZHU Guangfei, et al. Research progress on integrated technology of drying and storage in grain producing areas[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(7): 14-17. (in Chinese)
- [7] 张娜娜,张守梅,张银平,等. 智能烘储一体化装备对储藏小麦质量安全与品质影响[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 142-150.
ZHANG Na'na, ZHANG Shoumei, ZHANG Yinping, et al. Effects of intelligent drying and storage equipment on the quality safety of wheat during storage[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 142-150. (in Chinese)
- [8] 刘长生,杨晓鑫,高树成,等. 农户用稻谷储藏加工一体机测试试验报告[J]. 粮食加工, 2021, 46(2): 82-83.
LIU Changsheng, YANG Xiaoxin, GAO Shucheng. Test report on integrated rice storage and processing machine for famers[J]. Grain Processing, 2021, 46(2): 82-83. (in Chinese)
- [9] 田琳,曹阳,杨思成,等. 旋转通风干燥仓高水分玉米降水实验研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(2): 120-124.
TIAN Lin, CAO Yang, YANG Sicheng, et al. Experimental study of high moisture corn dewatering in rotating air drying barn[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(2): 120-124. (in Chinese)
- [10] LI C J, FANG Z D, ZHONG J H, et al. Evaluating the dynamic characteristics and energetic performance of a paddy multistage counter-flow dryer[J]. Biosystems Engineering, 2022, 221: 208-223.
- [11] 王振文,吴敏,徐新民,等. 热泵烘房结构及参数优化仿真设计[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 464-475.
WANG Zhenwen, WU Min, XU Xinmin, et al. Optimal simulation design of structure and parameter in heat pump drying room[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 464-475. (in Chinese)
- [12] LOPES D C, MARTINS J H, MELO E C, et al. Aeration simulation of stored grain under variable air ambient conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 42: 115-120.
- [13] ZHANG H, LI X, WANG Y X, et al. Evaluation and analysis of internal flow field uniformity in grain stack based on multi zone model of porous media[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 2164-2170.
- [14] 俞晓静,王远成,戚禹康. 高大平房仓横向与竖向通风的数值模拟及分析[J]. 山东建筑大学学报, 2020, 35(1): 64-70.
YU Xiaojing, WANG Yuancheng, QI Yukang. Numerical simulation and comparative analysis of lateral and vertical ventilation of large warehouses[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2020, 35(1): 64-70. (in Chinese)
- [15] 谢奇珍,朱广飞,赵玉强,等. 一种自然通风与机械通风相结合的智能储粮仓:202110474519.3[P]. 2022-06-10.
- [16] 丁涛,邱绵靖,刘志伟,等. 前置导叶对畜禽舍轴流风机性能的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 80-88.
DING Tao, QIU Mianjing, LIU Zhiwei, et al. Influence of inlet guide vane on the performance of axial fan for livestock and poultry farming[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 80-88. (in Chinese)
- [17] 吴沿友,郭晓君,付为国,等. 红树林多孔介质阻力模型与消波效果仿真分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 92-97, 295.
WU Yanyou, GUO Xiaojun, FU Weiguo, et al. Porous medium resistance model and simulation on effect of wave dissipation of mangrove forest[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 92-97, 295. (in Chinese)
- [18] HUANG L, MUJUMDAR S A. Numerical study of two-stage horizontal spray dryers using computational fluid dynamics[J]. Drying Technology, 2006, 24(6): 727-733.

- [19] 王洋,刘洁琼. 超低比转数离心泵叶轮切割的三维流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(5):79–83.
WANG Yang, LIU Jieqiong. Impeller trim of super-low specific speed centrifugal pump based on numerical simulation of 3D flow field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(5):79–83. (in Chinese)
- [20] 任海伟,李金平,刘增光,等. 太阳能干燥室内部气流场分布 CFD 数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):235–238.
REN Haiwei, LI Jinping, LIU Zengguang, et al. Numerical simulation of airflow fields in solar drying chamber by CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.1):235–238. (in Chinese)
- [21] 吴孟秋,雷登文,朱广飞,等. 基于动网格的白萝卜热风干燥热质传递研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊2):293–302.
WU Mengqiu, LEI Dengwen, ZHU Guangfei, et al. Hot-air drying heat and mass transfer of white radish based on moving mesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp.2):293–302. (in Chinese)
- [22] KHATCHATOURIAN O A, TONIAZZO N A, GORTYSHOV Y F. Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions[J]. Biosystems Engineering,2009,104(2):205–215.
- [23] MENASRIA F, ZEDAIRIA M, MOUMMI A. Numerical study of thermohydraulic performance of solar air heater duct equipped with novel continuous rectangular baffles with high aspect ratio[J]. Energy,2017,133(15):593–608.
- [24] ROMERO V M, CEREZO E, GARCIA M I, et al. Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program[J]. Energy Procedia, 2014,57:1651–1658.
- [25] 吕豪,吕黄珍,王雷,等. 微波-热风振动流化床干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):344–351,248.
LÜ Hao, LÜ Huangzhen, WANG Lei, et al. Design and experiment of microwave-hot-airflow vibrating dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):344–351,248. (in Chinese)
- [26] DARABI H, ZOMORODIAN A, AKBARI M H, et al. Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD[J]. Journal of Food Science & Technology,2015,52(1):359–366.
- [27] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 40150—2021 粮油储藏 储粮机械通风均匀性评价方法[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [28] WANG S Y, GAO X M, YOU Z Y, et al. Experiment and parameter optimization of an automatic row following system for the traction beet combine harvester[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2023,16(1):145–152.
- [29] 喻黎明,曹东亮,李久霖,等. Y 型网式过滤器多目标优化正交试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):322–333.
YU Liming, CAO Dongliang, LI Jiulin, et al. Multi-objection optimization orthogonal test of Y-type screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):322–333. (in Chinese)
- [30] SHEN H C, LIANG J F, LAN S L. Comprehensive evaluation on design scheme of cartesian robot[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(3b): 254–257.
- [31] 罗松. 基于 CFD 对垂直通风猪舍气流场与温度场的数值模拟及优化研究[D]. 南昌:江西农业大学,2020.
LUO Song. Numerical simulation and optimization research of airflow field and temperature field in a vertical ventilated piggery based on CFD[D]. Nanchang:Jiangxi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [32] 王远成,余海,杨开敏,等. 仓储稻谷热湿耦合传递及黄变的数值模拟[J]. 农业工程学报,2022,38(4):297–307.
WANG Yuancheng, YU Hai, YANG Kaimin, et al. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer and yellowing of stored rice during storage in silo[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 297–307. (in Chinese)
- [33] 蒋蘋,杨希文,罗亚辉,等. 蔬菜气雾栽培箱不同气流循环方式的流场和温度场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报,2019, 35(16):233–241.
JIANG Pin, YANG Xiwen, LUO Yahui, et al. CFD simulation of flow field and temperature field of different air flow circulation modes in vegetable aeroponics cultivation box[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(16):233–241. (in Chinese)
- [34] 国家粮食局. LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [35] 谢颀,张文光,尹雪乐,等. 基于正交试验方法的柔性神经电极优化设计[J]. 上海交通大学学报,2020,54(8):785–791.
XIE Jie, ZHANG Wenguang, YIN Xuele, et al. Optimization design of flexible neural electrodes based on orthogonal experimental method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2020,54(8):785–791. (in Chinese)